

SWAT2000 理论手册

(中文版本)

张雪松

Xuesong Zhang

史瑞尼

Raghavan Srinivasan

Translated From

S.L. NEITSCH, J.G. ARNOLD, J.R. KINIRY, J.R. WILLIAMS, K.W. KING. 2002. *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2000*. Temple, Texas: Blackland Research

Center, Texas Agricultural Experiment Station. GSWRL Report 02-01, BRC Report 02-05, TWRI Report TR-191.

目录

第 1 章 绪论	1
1.1 SWAT 的发展.....	3
1.2 SWAT 总结.....	6
第 2 章 方程:能量	27
2.1 日地关系.....	28
2.2 太阳辐射.....	31
2.3 温度.....	39
2.4 风速.....	46
2.5 NOMENCLATURE.....	47
2.6 REFERENCES.....	49
第 3 章 方程:大气水	51
3.1 降水.....	52
3.2 最大半小时降水.....	53
3.3 水蒸汽.....	53
3.4 积雪覆盖.....	56
3.5 融雪.....	59
3.6 NOMENCLATURE.....	61
3.7 REFERENCES.....	62
第 4 章 方程:天气模拟器	65
4.1 降水.....	66
4.2 太阳辐射 & 温度.....	68
4.3 相对湿度.....	73
4.4 最大半小时降雨量.....	77
第 5 章 方程:气候自定义	83
5.1 高程带.....	84
5.2 气候变化.....	86
5.3 NOMENCLATURE.....	87
第 6 章 方程:地表径流	89
6.1 径流量:SCS 径流曲线数法.....	90
6.2 径流量:GREEN & AMPT 下渗法.....	98
6.3 径流峰值.....	101
6.4 地表径流延迟.....	107
6.5 输移损失.....	108
6.6 NOMENCLATURE.....	111
6.7 REFERENCES.....	112
第 7 章 方程:蒸散发	115

目录

7.1 冠层存储	116
7.2 潜在蒸散发	117
7.3 实际蒸散发	126
7.4 NOMENCLATURE	133
7.5 REFERENCES	135
第 8 章 方程:土壤水	138
8.1 土壤结构	139
8.2 渗漏	142
8.3 旁通流	144
8.4 侧向流	151
8.5 NOMENCLATURE	156
8.6 REFERENCES	157
第 9 章 方程:地下水	160
9.1 地下水系统	161
9.2 浅层含水层	163
9.3 深层含水层	171
9.4 NOMENCLATURE	171
9.5 REFERENCES	173
第 10 章 方程:氮	174
10.1 氮循环	175
10.2 矿化、反消化/固化	180
10.3 硝化、氨挥发	184
10.4 反硝化	187
10.5 降水中的氮	188
10.6 固化	189
10.7 水中硝酸盐的向上运动	190
10.8 渗滤	190
10.9 NOMENCLATURE	190
10.10 REFERENCES	192
第 11 章 方程:磷	194
11.1 磷循环	195
11.2 矿化、降解和固化	198
11.3 无机磷的吸附	202
11.4 渗滤	205
11.5 NOMENCLATURE	206
11.6 REFERENCES	207
第 12 章 方程:杀虫剂	209
12.1 冲刷	211
12.2 降解	211
12.3 渗滤	213

12.4	NOMENCLATURE.....	213
12.5	REFERENCES	213
第 13 章	方程:泥沙.....	216
13.1	MUSLE	217
13.2	USLE.....	226
13.3	积雪覆盖效应.....	228
13.4	地表径流中的泥沙延迟.....	229
13.5	侧向流和地下径流中的泥沙.....	230
13.6	NOMENCLATURE.....	231
13.7	REFERENCES	232
第 14 章	方程:营养物输移.....	234
14.1	硝酸盐运动.....	235
14.2	地表径流中的有机氮.....	237
14.3	溶解态磷的运动.....	239
14.4	地表径流中吸附在泥沙上的有机和无机磷.....	240
14.5	地表径流和侧向流中的营养物延迟.....	242
14.6	NOMENCLATURE.....	243
14.7	REFERENCES	245
第 15 章	方程:杀虫剂输移.....	247
15.1	杀虫剂的相分布.....	248
15.2	溶解态杀虫剂的运动.....	250
15.3	吸附态杀虫剂的输移.....	254
15.4	地表径流和侧向流中的杀虫剂延迟.....	257
15.5	NOMENCLATURE.....	258
15.6	REFERENCES	259
第 16 章	方程:水质参数.....	260
16.1	藻类.....	261
16.2	碳生化需氧量.....	261
16.3	溶解氧.....	263
16.4	NOMENCLATURE.....	264
16.5	REFERENCES	265
第 17 章	方程:生长循环.....	266
17.1	热量单位.....	267
17.2	休眠.....	273
17.3	植物类型.....	273
17.4	NOMENCLATURE.....	274
17.5	REFERENCES	275
第 18 章	方程:最优生长.....	277
18.1	潜在生长.....	278
18.2	植物的水分吸收.....	287
18.3	营养物吸收.....	292

目录

18.4	作物产量	302
18.5	NOMENCLATURE	304
18.6	REFERENCES	307
第 19 章	方程:实际生长	310
19.1	生长限制	311
19.2	实际生长	315
19.3	实际作物产量	316
19.4	NOMENCLATURE	318
第 20 章	方程:常规管理	320
20.1	种植/生长季节开始	321
20.2	收获操作	322
20.3	放牧操作	323
20.4	收获&销毁操作	325
20.5	销毁/生长季节结束	326
20.6	翻耕	326
20.7	施肥	329
20.8	自动肥料施用	331
20.9	杀虫剂施用	335
20.10	缓冲带	337
20.11	NOMENCLATURE	337
20.12	REFERENCES	339
第 21 章	方程:水管理	340
21.1	灌溉	341
21.2	瓦沟排水	343
21.3	蓄水/洼地	344
21.4	调水	344
21.5	消耗性用水	345
21.6	点源负荷	346
21.7	NOMENCLATURE	346
第 22 章	方程:城市用地	347
22.1	城市用地的特点	348
22.2	城市用地的地表径流	349
22.3	USGS 回归方程	350
22.4	累积/冲刷	352
22.5	NOMENCLATURE	356
22.6	REFERENCES	357
第 23 章	方程:水流演算	359
23.1	河道特征	360
23.2	流量和速率	362

23.3	变量存储演算方法.....	365
23.4	MUSKINGUM 演算方法.....	368
23.5	传播损失.....	372
23.6	蒸发损失.....	373
23.7	BANK STORAGE.....	374
23.8	河道水量平衡.....	376
23.9	NOMENCLATURE.....	377
23.10	REFERENCES.....	378
第 24 章	方程:泥沙演算.....	381
24.1	泥沙河道输移.....	382
24.2	河道深切和加宽.....	386
24.3	NOMENCLATURE.....	387
24.4	REFERENCES.....	388
第 25 章	方程:河道内营养物循环过程.....	390
25.1	藻类.....	391
25.2	氮循环.....	398
25.3	磷循环.....	403
25.4	碳生化需氧量.....	405
25.5	氧.....	406
25.6	NOMENCLATURE.....	411
25.7	REFERENCES.....	414
第 26 章	方程:河道内杀虫剂转化.....	416
26.1	水体中的杀虫剂.....	417
26.2	泥沙中的杀虫剂.....	422
26.3	质量守恒.....	426
26.4	NOMENCLATURE.....	427
26.5	REFERENCES.....	428
第 27 章	方程:蓄水演算.....	430
27.1	水库.....	431
27.2	池塘/湿地.....	437
27.3	洼地/壶穴.....	442
27.4	NOMENCLATURE.....	446
第 28 章	方程:水体中的泥沙.....	448
28.1	质量守恒.....	449
28.2	沉淀.....	449
28.3	泥沙出流.....	452
28.4	NOMENCLATURE.....	452
第 29 章	方程:水体中的营养物质.....	453
29.1	营养物转化.....	454
29.2	总平衡.....	458

目录

29.3 富营养化	458
29.4 NOMENCLATURE	461
29.5 REFERENCES	461
第 30 章 方程:水体中的杀虫剂	463
30.1 水体中的杀虫剂	464
30.2 泥沙中的杀虫剂	469
30.3 质量守恒	473
30.4 NOMENCLATURE	474
30.5 REFERENCES	475
附录 A 变量列表	477
附录 B 参考文献	501

第 1 章 绪论

SWAT 为 Soil and Water Assessment Tool ,Dr. Jeff Arnold 为 USDA 农业科学研究所 (ARS)开发的一个流域尺度模型 ,的首字母缩写。SWAT 开发的目的是在具有多种土壤、土地利用和管理条件的复杂流域 ,预测长期土地管理措施 ,对水、泥沙和农业污染物的影响。为了满足这一目标 ,模型有以下特点 :

- ◆ 基于物理过程。SWAT 需要流域内天气、土壤性质、地形、植被和管理措施的详细信息 ,而不是通过回归方程描述输入输出的关系。与水运动、泥沙运动、植物伸张、营养物循环等相关的物理过程在 SWAT 中直接模拟。

这种方法的有点包括

- ◆ 在没有监测资料 (如 , 河流测站数据) 的流域可

以进行模拟

- ◆ 不同输入数据 (如 , 管理措施的变化、气候、植被等) 对水质或其它变量的相对影响可以定量化。

- ◆ 采用易于获取的输入数据。虽然 SWAT 可以模拟十分专业化的过程 , 如细菌输移等 , 但是运行模型所需的最少数据可以较为容易地从政府部门得到。
- ◆ 有计算效率。模拟较大流域和不同管理措施效果 , 不需要很大的时间和金钱的投入。
- ◆ 使用户可以研究长期影响。目前关注的许多问题包括污染物的累积及其对下游的影响等。研究这类问题 , 模型需要运行数十年。

SWAT 为时间连续模型 , 即长期模型。 模型不是为详细的短期暴雨模拟而设计的。

1.1 SWAT 的发展

SWAT 吸收了几个 ARS 模型的特点，从 SWRRB¹模型(Simulator for Water Resources in Rural Basins) (Williams et al., 1985; Arnold et al., 1990)直接演化而来的。对 SWAT 的发展产生直接贡献的模型包括 CREAMS² (Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems) (Knisel, 1980), GLEAMS³ (Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems) (Leonard et al., 1987), 和 EPIC⁴ (Erosion-Productivity Impact Calculator) (Williams et al., 1984)。

SWRRB 的发展从修改 CREAMS 模型的日降雨径流模型开始。对 CREAMS 水文模型的主要改变包括：a) 扩展模型，以同时在几个子流域计算，并预测流域产水量；b) 添加了地下水和回归流模块；c) 添加了水库存储模块，以计算农田池塘和水库对流域水和泥沙产量的影响；d) 添加了考虑降雨、太阳辐射和气温的天气模拟模型，以帮助长期模拟并提供时间和空间上典型的天气；e) 改进了预测峰值径流的方法；f) 添加了 EPIC 模型的植物生长模型，以考虑植物生长的年变化；g) 添加了简单的洪水演算模型；h) 添加

¹ SWRRB 是一个事件连续模型，用以模拟流域非点源负荷。

² 在 20 世纪 70 年代早期，为响应清洁水法，农业研究所召集了跨学科来自美国的科学家来开发一个基于过程的，非点源模拟模型。CREAMS 是在这些研究活动的基础上开发的。CREAMS 是一个田间尺度模型，用以模拟土地管理对小尺度田地的水，泥沙，营养物质和农药的输出影响。其他一些农业研究所的模型，如 GLEAMS, EPIC, SWRRB 和 AGNPS，都起源于 CREAMS 模型。

³ GLEAMS 是一个以模拟地下水的农药和营养物质负荷的非点源模型。

⁴ EPIC 最初被开发用来模拟土壤侵蚀对农作物生产的影响，目前已经演化成为一个综合的田间尺度的农业管理非点源污染负荷模型。

第 1 章 绪论

了泥沙输移模块，以模拟泥沙在池塘、水库、河道和峡谷中的运动；i) 添加了传播损失计算。

在 1980s 末，模型应用的主要焦点在于水质评价，SWRRB 的开发反应的这一点。在这一时期 SWRRB 的主要修改包括：a) 添加了 GLEAMS 模型的杀虫剂迁移转化模块；b) 可选择 SCS 技术估算峰值径流；c) 新开发的泥沙产量模型。这些修改扩展的模型的能力，以处理不同的流域管理问题。

在 1980s 末, Bureau of Indian Affairs 需要一个模型估算在 Arizona 和 New Mexico 印第安保留地地区水管理对下游的影响。虽然 SWRRB 可以容易地应用在几百平方公里的流域，但是 Bureau 想模拟几千平方公里的流域。对于这一尺度的流域，需要将其分为几百个子流域。但是 SWRRB 模型只允许划分 10 个子流域，并且模型直接将子流域的产水和沙演算到流域出口。这些限制导致了 ROTO (Routing Outputs to Outlet) (Arnold et al., 1995) 模型的开发，其可以接收多个 SWRRB 模型的输出，并演算水流在河道和水库中的运动。ROTO 提供了河道演算方法和克服了 SWRRB 模型的子流域限制。虽然这一方法是有效的，但是多个 SWRRB 文件的输入输出是笨拙的，而且需要大量的计算机存储。此外，所有的 SWRRB 只能独立运行，然后输入到 ROTO 中，进行河道和水库演算。为了克服这些不便，SWRRB 和 ROTO 被结合在一切，称为 SWAT。在允许模拟大尺度流域的同时，SWAT 保留了 SWRRB 的所有优点。

自 SWAT 在 90s 初开发以来, 已经经历了不断的回顾和扩展。模型主要的改进版本为 :

- ◆ SWAT94.2: 添加了多水文响应单元 (HRUs)。
- ◆ SWAT96.2: 添加了自动施肥和自动灌溉; 添加了冠层存储; 添加了 CO₂ 模块以模拟气候变化对作物生长的影响; Penman-Monteith 潜在蒸散发方程; 基于动力存储模型的层间流; 河道内营养物水质方程 QUAL2E; 河道内杀虫剂演算。
- ◆ SWAT98.1: 改进融雪演算; 河道水质模型改进; 营养物循环演算扩展; 放牧, 粪肥使用, 和瓦沟排水; 修改模型以适用于南半球。
- ◆ SWAT99.2: 改进营养物循环, 稻田/湿地演算改建, 水库/池塘/湿地营养物沉淀去除; 河岸存储; 河道重金属演算; 将年的参考从 2 位变为 4 位; SWMM 模型的城市累积/冲刷, 和 USGS 回归方程。
- ◆ SWAT2000: 细菌输移演算 ;Green & Ampt 下渗; 改进天气生成器; 允许输入太阳辐射、相对湿度和风速的读入或生成; 允许输入 ET 值的读取或计算; 所有潜在 ET 方法的回顾 ;高层带过程改进; 允许模拟无数个水库; Muskingum 演算; 修正的休眠计算以适用于热带地区。

除了上述的变化, 模型界面已开发了 Windows (Visual Basic), GRASS, 和 ArcView 版本。 SWAT 也已经经历了大量的验证。

1.2 SWAT 总结

SWAT 可以模拟不同的流域物理过程。这些过程将在本节中简要介绍。详细介绍，可以参考不同章节。

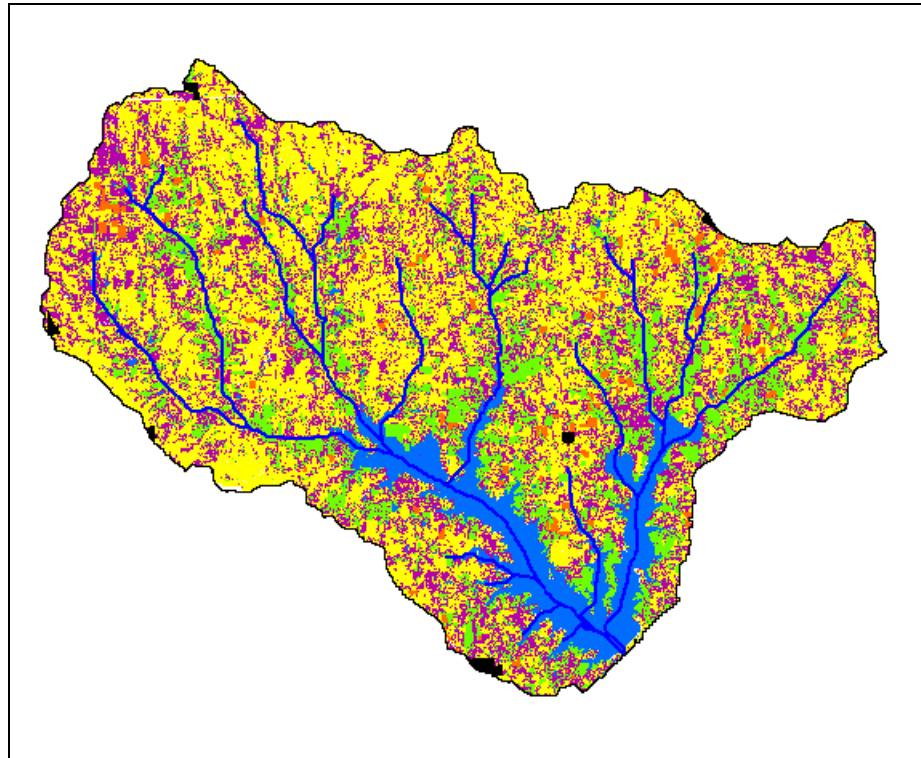


Figure 1.1: Map of the Lake Fork Watershed in Northeast Texas showing the land use distribution and stream network

为便于模拟，流域可以分为不同的子流域。模拟中子流域的应用是十分有用的，因为流域不同地区具有不同的土壤和土地利用，这些对水文过程有显著影响。通过将流域划分为子流域，用户可以在空间上引用不同的区域。

图 1.2 为图 1.1 中流域的子流域划分。

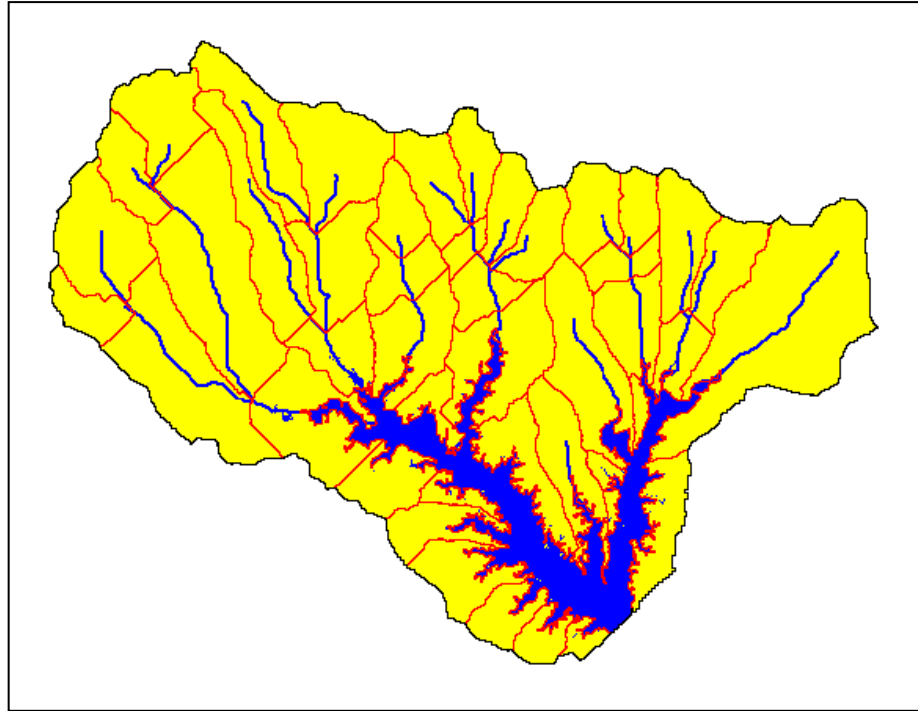


Figure 1.2: Subbasin delineation of the Lake Fork Watershed.

每一个子流域的输入信息可以划分为：气候；水文响应单元或 HRUs；池塘/湿地；地下水；以及主河道、支流和子流域排水区。水文响应单元为子流域中具有唯一土地覆被、土壤和管理措施的集总单元。

无论采用 SWAT 研究任何问题，水量平衡是任何过程的驱动力。为了准确预测杀虫剂、泥沙或营养物的运动，模型模拟的水文循环必需符合流域实际。流域的水文模拟，可以分为两个主要部分。第一个为水文循环的陆地阶段，如图 1.3 所示。水文循环的陆地阶段控制进入河道的水、泥沙和营养物、杀虫剂的量。第二部分为水文循环的河道演算阶段，可以定义为水、泥沙等在河道中运动至出口的过程。

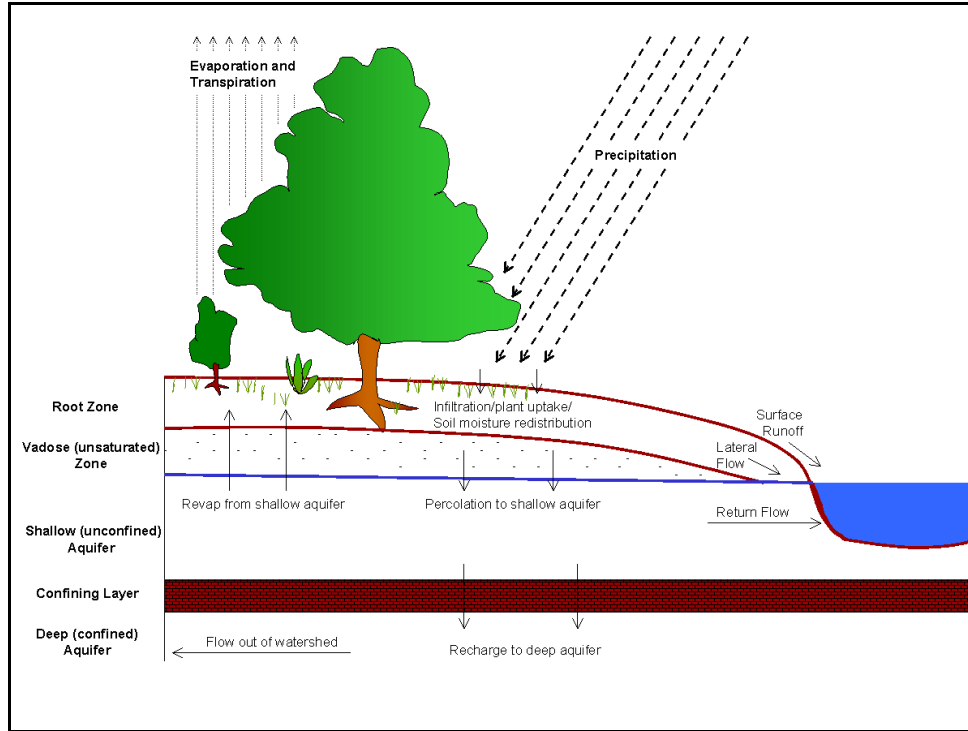


Figure 1.3: Schematic representation of the hydrologic cycle.

1.2.1 水文循环的陆地阶段

SWAT 模拟的水文循环基于水量平衡方程：

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw})$$

式中： SW_t 为最终土壤含水量(mm H₂O), SW_0 为第 i 天的初始土壤含水量 (mm H₂O), t is the time (days), R_{day} 为第 i 天的降水量 (mm H₂O), Q_{surf} 为为第 i 天的地表径流量 (mm H₂O), E_a 为第 i 天的蒸散发(mm H₂O), w_{seep} 为第 i 天通过土壤剖面进入包气带的水量 (mm H₂O), Q_{gw} 为第 i 天的的回归流量 (mm H₂O).

对流域的划分使模型可以反应不同植被和土壤的蒸散发。径流分别从 HRU 计算，并演算以得到流域总径流。这可以增加精度，更好地模拟水平衡物理过程。

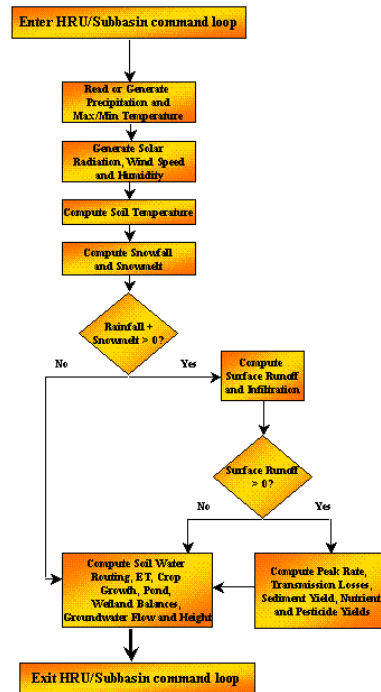


Figure 1.4: HRU/Subbasin command loop

图 1.4 图示了 SWAT 模拟水文循环陆地阶段的过程顺序。这一阶段设计的数据输入和过程将在下面的部分介绍。

1.2.1.1 气候

流域气候提供了湿度和能量输入，这些因素控制着水量平衡，决定了水文循环不同过程的相对重要性。

SWAT 需要的气候变量有：日降水、最高/最低温度、太阳辐射、风速和相对湿度。模型可以读入实测日降水、最高/最低温度、太阳辐射、风速和相对湿度值，也可以在模拟过程中生成。

天气生成器. 日天气数据可以根据月平均值生成。模型可以对每一个子流域生成一系列的天气数据。每一个子流域的天气数据是相对独立的，没有空间相关性。

生成降水. SWAT 采用 Nicks (1974)开发的模型生成日降水。这一降水模型也可以用来填补确实的数据记录。降水生成器采用一阶 Markov 链模型，根据模型产生的随机数值(0.0-1.0)和月湿 - 干日可能性来定义某日为湿日或干日。如果定义为湿日，则根据偏态分布或修正的指数分布产生一定的降水。

生成气温和太阳辐射. 最高/最低温度和太阳辐射采用正态分布产生。生成器引入一个连续性方程以考虑干日 vs.湿日条件对温度和辐射的影响。最高温度和太阳辐射在模拟湿日时，被下调，这种调整可以是生长的长期最高温度和太阳辐射与月输入平均一致。

生成风速. 修正指数方程用来生成日平均风速，根据月平均风速。

生成相对湿度. 相对湿度模型采用三角分布，根据月平均值来模拟日平均相对湿度。与气温和辐射相似，日平均相对湿度也会根据干日或湿日进行调整。

降雪. SWAT 根据日平均气温将降水分为雨或冻雨/雪。

积雪覆盖. SWAT 的积雪覆盖模块从一个简单、均一的积雪覆盖模型改进为更加复杂的，可以考虑由遮蔽、漂移、地形和土地覆被作用引起的不均匀分布。用户定义一个积雪深度阈值，超过这一值，积雪将覆盖 100%的面积。如果子流域中积雪低于这一深度，积雪覆盖可以非线性降低，计算公式为面损耗曲线。

积雪融化. 积雪融化通过大气、雪堆温度，融化速率，和积雪覆盖面积控制。如果有雪存在，当日最高气温超过 0°C 时，根据雪堆温度和最

高温度的温差、融雪发生的阈值，采用线性方程来计算融雪量。融化的积雪将作为降水来估算径流和渗漏。对于融雪，其降雨能量为 0，峰值径流的估算，假设 24 小时融雪均匀分布。

高程带。模型允许子流域域被分为最多 10 个高程带。积雪覆盖和融化对于每一个高程带分别计算。通过将子流域划分为高程带，模型可以评价降水和温度的地形变化对积雪和融雪的影响。

土壤温度. 土壤温度影响水分运动和残余物的降解速率。日平均土壤温度在土壤表面和每一层的中心计算。土壤表面温度是积雪覆盖、植被和残余物覆盖、裸土表层温度，和前一天土壤地表温度的函数。土层温度为表层温度、年平均气温和土壤阈值深度(超过这一深度气象条件变化不会影响土壤温度)的函数。这一温度被称为阻尼温度，并且独立于容重和土壤含水量

1.2.1.2 水文

在降水降落过程中，可能被截留在植被冠层或者直接降落到土壤表面。土壤表面的水分将下渗到土壤剖面或者产生坡面径流。坡面流的运动相对较快，很快进入河道，产生短期河流响应。。下渗的水分可以滞留在土壤中，然后被蒸散发，或者通过地下路径缓慢地运动到地表水系统。SWAT 在 HRU 中模拟的水分运动潜在迁移路径如图 1.5 所示。

冠层存储。 冠层存储指水分被植被冠层截留，并可以供蒸发使用。当采用曲线数法计算地表径流时，冠层截留考虑在内。但是，如果采用 Green & Ampt 法计算下渗和径流，冠层存储必需分别模拟。SWAT 允许用户输入土地覆被在最大叶面积指数时的最大冠层存储水量。这一数值和叶面积指数被模型用来计算最大植被生长过程中最大存储量。当计算蒸发时，首先去除冠层存储的水量。

下渗。 下渗指水分从土壤表面进入土壤剖面。随着下渗继续，土壤湿度增加，使得下渗速率降低，直到达到一定稳态值。初始下渗速率，依赖于土壤表层含水量。最终下渗速率为土壤饱和传导率。因为曲线数方法以日为时间步长计算径流，不能直接模拟下渗。进入土壤剖面的水量为净雨和地表径流之差。Green & Ampt 下渗方法可以直接模拟下渗，但是需要短时间步长的降水数据。

再分配。 再分配指水分进入土壤剖面（降水或灌溉）后的持续运动。再分配是由土壤剖面中的水分含量差异引起的。一旦含水量在整个剖面是均一的，再分配将停止。SWAT 的再分配模块采用存储演算计算来预测根系区土壤层的水流。向下水流或渗漏，当超过土壤层田间持水量，且下层土壤未饱和时发生。水流速率由土壤饱和传导率决定。如果土壤层温度为 0°C 或以下，该层将不发生再分配。

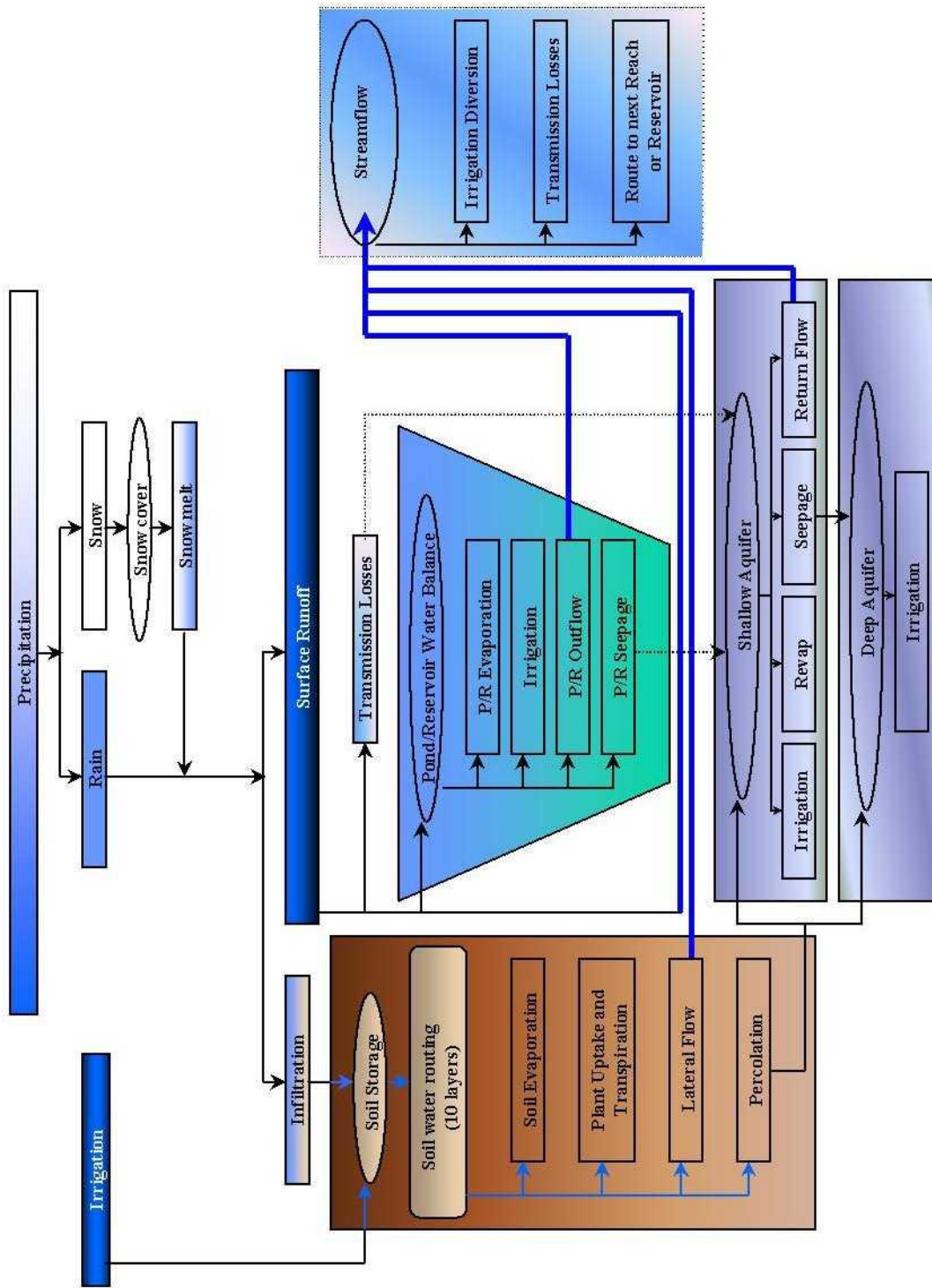


Figure 1.5: Schematic of pathways available for water movement in SWAT

蒸散发. 蒸散发为所有促使地表或近地表的液相或固相中的水分变为大气水分的过程的总称。蒸散发包括从河流、湖泊，裸土，和植被表层的蒸发，和从植物叶片内部的蒸发（散发）；以及冰和雪的生华。模型分别计算土壤和植被的蒸发(Ritchie，1972)。潜在土壤水蒸发的估算为潜在蒸散发和叶面积指数（叶片面积和 HRU 面积比值）的函数。实际土壤水蒸发估算，采用土壤深度和含水量的指数函数计算。植物散发采用潜在蒸散发和叶面积指数的线性函数计算。

潜在蒸散发. 潜在蒸散发为大面积植被（可以有无限水分供给）完全且均匀覆盖的区域的蒸散发。这一速率被假设为部首微气候过程，如对立或热量存储效应等，的影响。模型提供了三种选择计算潜在蒸散发：Hargreaves (Hargreaves et al., 1985), Priestley-Taylor (Priestley and Taylor, 1972), 和 Penman-Monteith (Monteith, 1965)。

侧向地下径流. 侧向地下径流，或层间流，为土壤表层以下至饱和带之间区域的河道径流水分供给。土壤剖面(0-2m)的层间流计算与再分配同时进行。动力存储模型用来预测每一个土壤层中的层间流。模型考虑传导率、坡度和土壤含水量的变化。

地表径流. 地表径流，或坡面流，为发生在坡面的水流。采用日或次日步长的降水输入，SWAT 模拟对每一个 HRU 模拟地表径流和峰值径流。

地表径流量采用修正的 SCS 曲线数法 (USDA Soil Conservation Service, 1972) 或 Green & Ampt 下渗法 (Green and Ampt, 1911) 计算。在曲线数方法中，曲线数随着土壤含水量非线性变化。曲线数在土壤含水量接近凋萎点时下降，在接近饱和时增加。Green & Ampt 法需要次日步长的降水数据，根据湿峰母质潜势和有效水力传导率计算下渗。没有下渗的水分变为地表径流。SWAT 包含了一个计算冻土径流的模块，当第一层土壤温度低于 0°C 时土壤被定义为冻土。模型会增加冻土的径流，但在冻土较干时仍允许显著的下渗。

峰值径流预测采用修正的合理性方程。简单地，合理性方程基于这样一个思想，即如果降水强度 i 即时开始并无限持续，那么径流速率

将会增加直到汇流时间, t_c , 此时所有的子流域水分汇集到流域出口。在修正的合理性方程, 峰值径流为子流域汇流时间, t_c , 内的降水量, 日地表径流量, 和子流域汇流时间的函数。在子流域汇流时间内发生的降水, 根据日降水量采用随机技术估算。子流域汇流时间采用 Manning 公式计算, 考虑坡面和河道汇流。

池塘. 池塘为子流域中的水体存储结构, 可以截留地表径流。池塘的汇流面积定义为子流域面积的分数。池塘被假设为位于主河道之外的地区, 并且不接收上游子流域来水。池塘水存储为池塘容量、日入流和出流、渗漏和蒸发的函数。需要的数据输入为存储容量和池塘表面积 (饱和容量时)。低于饱和容量时的表面积采用非线性存储函数计算。

支流河道. 在子流域中定义了两种类型的河道: 主河道和支流河道。支流河道为次要的低阶的河道。子流域中每一个支流河道只在子流域的一部分排水, 并不接收地下水供给。支流河道内的所有水流演算进入子流域主河道。SWAT 采用支流河道性质来决定子流域汇流时间。

传播损失. 传播损失为地表水流通过河床渗滤去除的水量。这种损失发生在只有一定时段发生地下水供给或没有地下水供给的季节性河流或间歇性河流。SWAT 采用 Lane 方法 (见 SCS 水文手册(USDA Soil Conservation Service, 1983)第 19 章) 估算传播损失。河道的水分损失为河道宽度、长度和水流时间的函数。当支流河道发生传播损失时, 需要调整总径流量和峰值径流。

回归流. 回归流, 或基流, 为地下水供给的河道径流。SWAT 将地下水分为两个含水层系统: 浅层非承压含水层 (供给回归流), 和深层承压含水层向流域外河流供给水源(Arnold et al., 1993)。流出根系区底部的水分渗漏, 分为两个部分: 即不同含水层的水源。除了回归流, 流域存储在浅层含水层的水分在十分干旱的条件下可以补充土壤剖面水分, 或被植物吸收。浅层非承压含水层和深层承压含水层中的水分也可以通过水泵提取。

1.2.1.3 植被覆盖和生长

第 1 章 绪论

SWAT 采用单一植物生长模型来模拟所有植被覆盖类型。这一模型可以区分一年生和多年生植物。一年生植物从种植日期生长到收获日期，或累积热量单元等于潜在植物热量单元。多年生植物，保持它们的根系系统，在冬天休眠。它们在日平均温度超过基温时从新开始生长。植物生长模型用来评价根系区去除水分和营养物、散发，和生物量/产量。

潜在生长。 模拟日植物生物量的潜在增加定义为理想条件下生物量的增加。模拟日植物生物量的潜在增加为截留能量和植物转化能量为生物量的效率系数的函数。截留的能量根据太阳辐射和植物叶面积指数计算。

潜在和实际散发。 计算潜在植物散发的过程蒸散发章节介绍。实际散发为潜在蒸散发和土壤可利用水量的函数。

营养物吸收。 植物利用氮和磷量采用供给/需求方法估算，日植物氮磷需求为元素在植物中的实际浓度和最优浓度之差。最优浓度在不同的生长阶段不同(Jones, 1983)。

生长限制。 潜在植物生长和产量通常由于环境限制因子而不能达到。模型估算水、营养物和温度和限制作用。

1.2.1.4 侵蚀

侵蚀和泥沙产量采用修正通用土壤流失方程(MUSLE) (Williams, 1975) 在每一个 HRU。USLE 采用降雨作用侵蚀能量因子，MUSLE 采用径流来模拟侵蚀和泥沙产量。这种替代的可以有以下的好处：提高模型预测精度，不需要估计输移比，次暴雨泥沙产量可以估计。水模型可以估计径流总量和峰值径流，与子流域面积结合，可以用来计算计算径流侵蚀能量变量。作物管

理因子以日为单位计算，其为地上生物量、地表残余物和最小植被作物因子和函数。其它侵蚀方程的因子的介绍见 Wischmeier and Smith (1978).

1.2.1.5 营养物

SWAT 模拟流域中几种形式的氮和磷的运动和转化。在土壤中，氮从一种形态到另一种形态的转化，由图 1.6 所示的氮循环控制。土壤中磷的转化由图 1.7 所示的磷循环控制。营养物可以通过地表径流和层间流进入河道，并在河道中向下游输移。

氮. SWAT 在 HRU 中模拟的不同过程和不同土壤中的氮库，如图 1.6 所示。植物对氮的利用采用供给/需求方法估算(见植物生长章节)。除了植物利用，硝酸盐和有机氮可以通过水流从土壤去除。地表径流、层间流和渗漏中的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 量根据水量和土壤层平均浓度估算。有机氮随泥沙的输移采用 McElroy et al. (1976) 开发的，并经 Williams and Hann (1978) 修改的，针对单一暴雨事件的负荷方程计算。负荷方程根据表层土壤中有机氮浓度，泥沙产量，和富集系数来估算日有机氮损失。富集系数为泥沙中有机氮浓度与土壤有机氮浓度之比。

NITROGEN

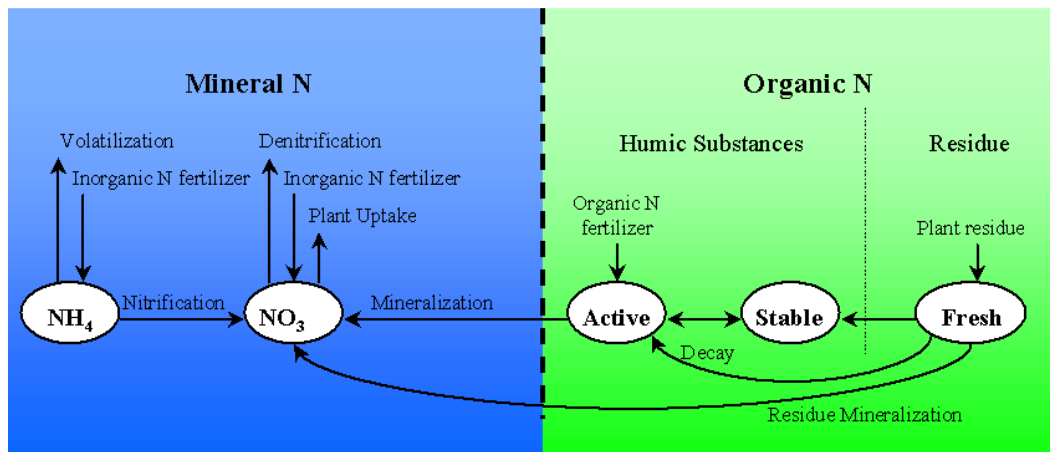


Figure 1.6: Partitioning of Nitrogen in SWAT

磷. SWAT 在 HRU 中模拟的不同过程和不同土壤中的磷库，如图 1.7 所示。植物对氮的利用采用供给/需求方法估算（见植物生长章节）。除了植物利用，土壤中的溶解态磷和有机磷可以通过水流去除。磷不是易于移动的营养物，地表径流与表层 10mm 土层中的溶解态磷的相互作用是不完全的。径流去除的溶解态磷采用地表 10mm 中溶解态磷浓度和，径流量和分离系数来计算。磷的泥沙输移采用与有机氮相似的负荷方程模拟。

PHOSPHORUS

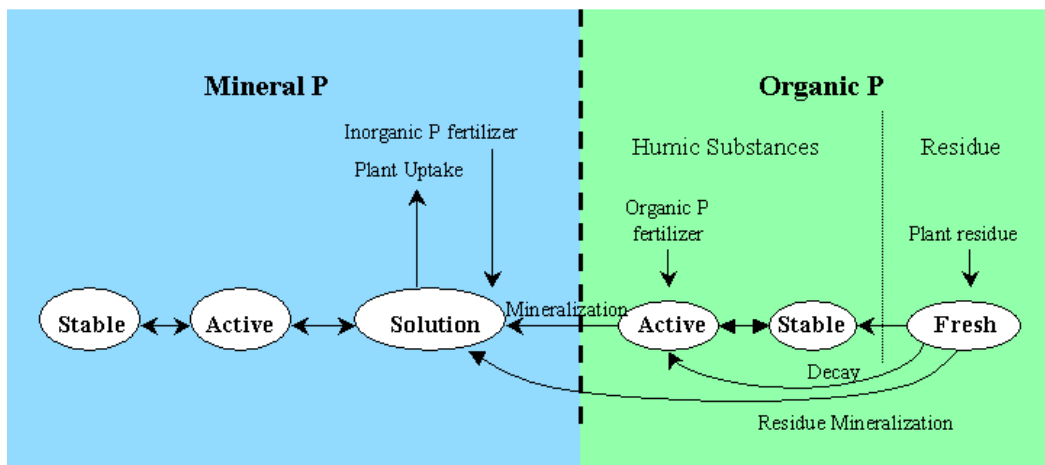


Figure 1.7: Partitioning of Phosphorus in SWAT

1.2.1.6 杀虫剂

虽然 SWAT 没有模拟杂草、害虫和其它有害物对植物生长的压力,但是可以在 HRU 中使用杀虫剂以研究化学物质在流域中的运动。SWAT 模拟地表径流携带杀虫剂进入河道 (以溶液或吸附在泥沙的形式), 通过渗漏进入土壤剖面 and 含水层(在溶液中)。水循环陆地阶段的杀虫剂运动模型改进自 GLEAMS (Leonard et al., 1987)。杀虫剂的运动由其可溶性、降解半衰期, 和土壤有机氮碳吸附系数决定。植物叶片上和土壤中的杀虫剂, 根据半衰期以指数形式降解。杀虫剂通过水和泥沙的输移, 针对每一次暴雨事件计算, 当渗漏发生时计算每一土层的渗滤。

PESTICIDES

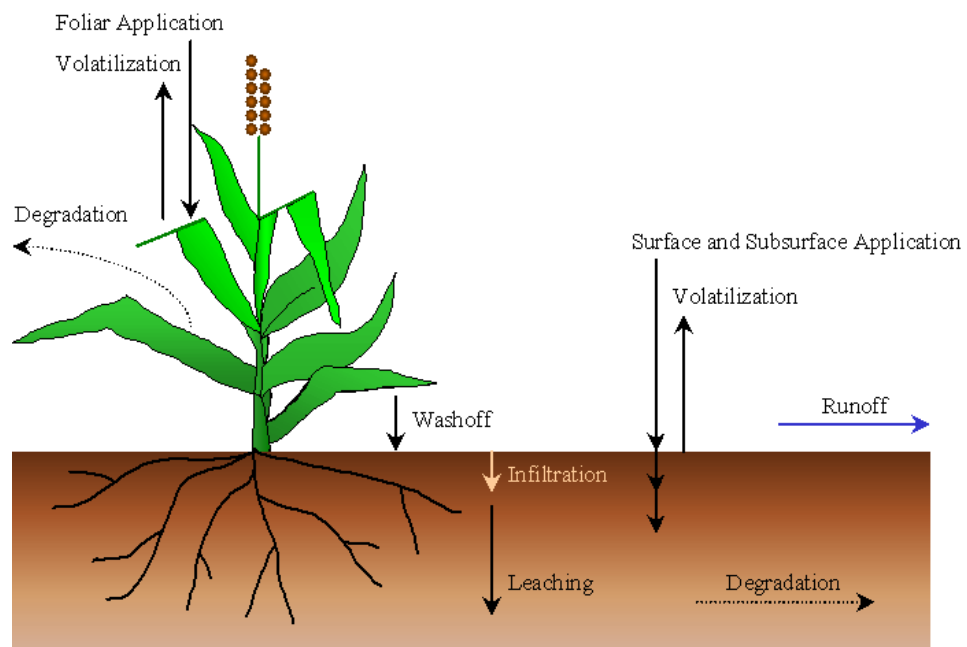


Figure 1.8 Pesticide fate and transport in SWAT

1.2.1.7 管理

SWAT 允许用户定义每一个 HRU 的管理措施。用户可以定义生长季节的开始和结束，指定施肥、杀虫剂的量和时间，以及灌溉和耕地操作。在生长季节借宿时，可以以产量的方式从 HRU 去除生物量，或者作为地表残余物。

除了这些基本的措施，其它象放牧，自动施肥和灌溉，以及常规水利用等操作可以较为容易地实现。最新的管理措施改进为，增加了城市地区的泥沙和营养物负荷计算。

轮作. 字典将轮作定义为在同一田地连续种植不同的农作物，通常有一定的顺序。SWAT 中的轮作指年复一年的管理措施变化。在轮作中没有管理措施和年数的限制。SWAT 也不限制 HRU 中土地覆被和植物生长的种类。但是在同一时间只允许种植一种植被。

水利用. 两种典型的水利用为农用土地的灌溉和城市的水供给。SWAT 允许 HRU 用水来自所有的流域内和流域外水源。水可以在水库、河段、和子流域之间交换，以及从流域外调水。

1.2.2 水文循环的河道演算阶段

一旦 SWAT 确定了进入主河道的水、泥沙、营养物和杀虫剂的负荷后，这些负荷将在河网中采用与HYMO相似的命令结构来演算 (Williams and Hann, 1972)。除了模拟河道中的质量平衡，SWAT 也模拟化学物质在河道和河床的转化。图 1.9 图示了 SWAT 模拟的不同河道内过程。

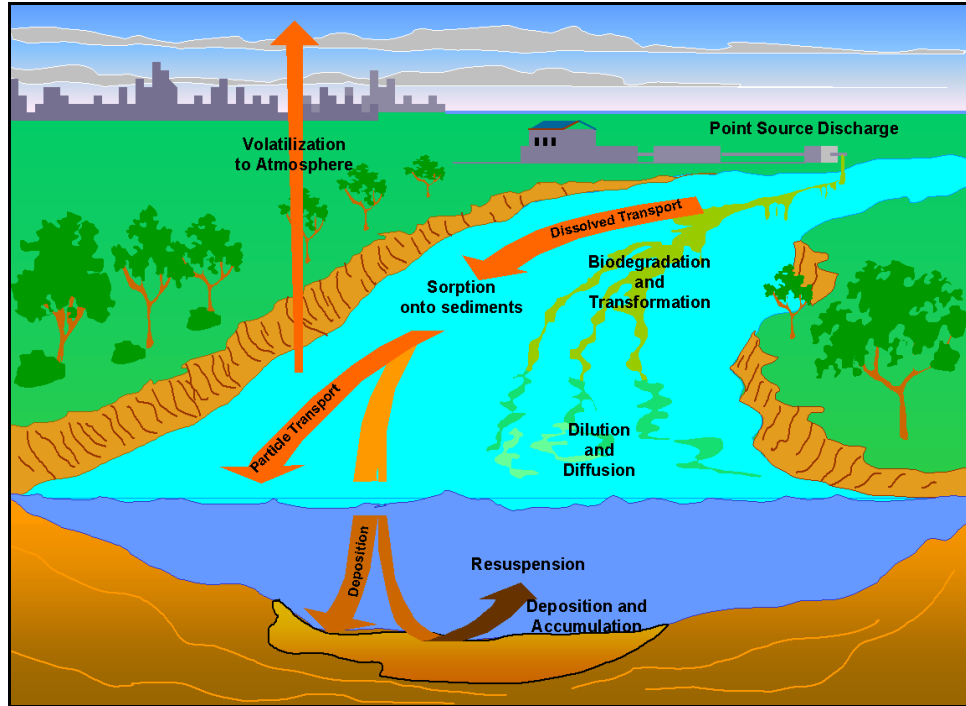


Figure 1.9: In-stream processes modeled by SWAT

1.2.2.1 主河道或支流的演算

主河道中的演算可以分为四个部分：水、泥沙、营养物和有机化学物质。

洪水演算. 随着水流向下游流动，一部分可能通过蒸发和传播损失而去除。另一个潜在损失为农业或人类用水。水流可以通过直接降水或点源排放而补充。水力可以采用变量存储系数法(Williams, 1969) 或 Muskingum 法演算。

泥沙演算. 河道中的泥沙输移有两个过程同时控制：沉积和冲刷。T 此前的 SWAT 版本采用河流能量来估算河道沉积和冲刷(Arnold et al, 1995)。Bagnold (1977) 定义了河流能量为水密度、流速和水面坡度的乘积。Williams (1980) 采用 Bagnold 定义开发了确定冲刷为河道坡度和速率的函数。在本版本中，该方程被简化，最大河道输移泥沙量为河道峰值速率的函数。可利用

第 1 章 绪论

的河流能量可以用来再悬浮结合不紧密的沉积物质,直到所有的物质被去除。过剩的河流能量可以造成河床的冲刷。河床冲刷根据河床可蚀性和覆被调整。

营养物演算. 河流中的营养物转化由河道内水质模块控制。SWAT 应用的河道内动力学,修改自 QUAL2E(Brown and Barnwell, 1987)。模型模拟溶解态营养物和吸附态营养物。溶解态营养物与水一起输移,而吸附态营养物允许随泥沙沉积在河床。

河道杀虫剂演算. 虽然无数种杀虫剂可以施用于 HRU,但是只有一种杀虫剂可以在河网中演算,因为其过程十分复杂而难于模拟。与营养物相似,总河道杀虫剂负荷被分为溶解态和吸附态部分。溶解态杀虫剂与水一起输移,而吸附态营养物随泥沙输移,并受沉积等过程的影响。在溶解和吸附两相中的杀虫剂转化由一阶降解关系控制。模型模拟的主要河道内过程包括:沉淀、埋藏、再悬浮、挥发、扩散和转化。

1.2.2.2 水库演算

水库的水量平衡包括入流、出流、降水、蒸发、渗漏和调水。

水库出流. 模型提供了 3 中方法估算水库出流。第一种为用户输入实测出流,第二种为小的无控制水库设计,需要用户指定水排泄速率,当水库容量超过常规库容,多余的水分以一定的的速率排泄。超过防洪库容的部分在一天内排泄。第三种为大的有管理水库设计,需要用户指定月水量管理目标。

泥沙演算. 泥沙入流可以来自上游河道或子流域地表径流。水库中的泥沙浓度采用简单的连续性方程,根据入流、出流和水库蓄水体积和浓度估算。水库中泥沙沉积由平衡泥沙浓度和泥沙颗粒中值计算。出流的泥沙量为水流量和排泄时水库泥沙浓度的乘积。

水库营养物质. 采用简单的氮磷物质平衡模型(Chapra, 1997)。模型假设: 1) 湖泊是完全混合的; 2) 磷为限制因子; 3) 总磷为湖泊营养状态的测量。第一个假设忽略了湖泊分层,和跃温层浮游生物的变化。第二个假设通常在非点源为主时成立,第三个假设暗示总磷和生物量之间存在关系。磷物质平衡方程包括湖泊、入流、出流浓度和总损失速率。

湖泊杀虫剂. 湖泊杀虫剂平衡模型修改自 Chapra (1997), 并假设完全混合状态。系统被分为完全混合的水层, 其下为完全混合的泥沙层。在水和泥沙层中杀虫剂被分为溶解态和颗粒态。模型模拟的主要过程包括负荷、出流、转化、挥发、沉淀、扩散、再悬浮和埋藏。

1.3 REFERENCES

- Arnold, J.G., P.M. Allen, and G. Bernhardt. 1993. A comprehensive surface-groundwater flow model. *J. Hydrol.* 142:47-69.
- Arnold, J.G., J.R. Williams, A.D. Nicks, and N.B. Sammons. 1990. SWRRB: A basin scale simulation model for soil and water resources management. Texas A&M Univ. Press, College Station, TX.
- Arnold, J.G., J.R. Williams and D.R. Maidment. 1995. Continuous-time water and sediment-routing model for large basins. *Journal of Hydraulic Engineering* 121(2):171-183.
- Bagnold, R.A. 1977. Bedload transport in natural rivers. *Water Resources Res.* 13(2):303-312.
- Brown, L.C. and T.O. Barnwell, Jr. 1987. The enhanced water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS documentation and user manual. EPA document EPA/600/3-87/007. USEPA, Athens, GA.
- Chapra, S.C. 1997. *Surface water-quality modeling*. McGraw-Hill, Boston.
- Green, W.H. and G.A. Ampt. 1911. Studies on soil physics, 1. The flow of air and water through soils. *Journal of Agricultural Sciences* 4:11-24.
- Hargreaves, G.L., G.H. Hargreaves, and J.P. Riley. 1985. Agricultural benefits for Senegal River Basin. *J. Irrig. and Drain. Engr.* 111(2):113-124.
- Jones, C.A. 1983. A survey of the variability in tissue nitrogen and phosphorus concentrations in maize and grain sorghum. *Field Crops Res.* 6:133-147.
- Knisel, W.G. 1980. CREAMS, a field scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems. USDA Conservation Research Rept. No. 26.
- Leonard, R.A. and R.D. Wauchope. 1980. Chapter 5: The pesticide submodel. p. 88-112. *In* Knisel, W.G. (ed). CREAMS: A field-scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems. U.S. Department of Agriculture, Conservation research report no. 26.

- Leonard, R.A., W.G. Knisel, and D.A. Still. 1987. GLEAMS: Groundwater loading effects on agricultural management systems. *Trans. ASAE* 30(5):1403-1428.
- McElroy, A.D., S.Y. Chiu, J.W. Nebgen, and others. 1976. Loading functions for assessment of water pollution from nonpoint sources. EPA document EPA 600/2-76-151. USEPA, Athens, GA.
- Monteith, J.L. 1965. Evaporation and the environment. p. 205-234. *In* The state and movement of water in living organisms. 19th Symposia of the Society for Experimental Biology. Cambridge Univ. Press, London, U.K.
- Nicks, A.D. 1974. Stochastic generation of the occurrence, pattern and location of maximum amount of daily rainfall. p. 154-171. *In* Proc. Symp. Statistical Hydrology, Tucson, AZ. Aug.-Sept. 1971. USDA Misc. Publ. 1275. U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC.
- Priestley, C.H.B. and R.J. Taylor. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Mon. Weather Rev.* 100:81-92.
- Ritchie, J.T. 1972. A model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resour. Res.* 8:1204-1213.
- USDA Soil Conservation Service. 1983. National Engineering Handbook Section 4 Hydrology, Chapter 19.
- USDA Soil Conservation Service. 1972. National Engineering Handbook Section 4 Hydrology, Chapters 4-10.
- Williams, J.R. 1980. SPNM, a model for predicting sediment, phosphorus, and nitrogen yields from agricultural basins. *Water Resour. Bull.* 16(5):843-848.
- Williams, J.R. 1975. Sediment routing for agricultural watersheds. *Water Resour. Bull.* 11(5):965-974.
- Williams, J.R. 1969. Flood routing with variable travel time or variable storage coefficients. *Trans. ASAE* 12(1):100-103.
- Williams, J.R., A.D. Nicks, and J.G. Arnold. 1985. Simulator for water resources in rural basins. *Journal of Hydraulic Engineering* 111(6): 970-986.

第 1 章 绪论

- Williams, J.R. and R.W. Hann. 1978. Optimal operation of large agricultural watersheds with water quality constraints. Texas Water Resources Institute, Texas A&M Univ., Tech. Rept. No. 96.
- Williams, J.R. and R.W. Hann. 1972. HYMO, a problem-oriented computer language for building hydrologic models. *Water Resour. Res.* 8(1):79-85.
- Williams, J.R., C.A. Jones and P.T. Dyke. 1984. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. *Trans. ASAE* 27(1):129-144.
- Wischmeier, W.H., and D.D. Smith. 1978. Predicting rainfall losses: A guide to conservation planning. USDA Agricultural Handbook No. 537. U.S. Gov. Print. Office, Washington, D. C.

第 2 章 方程:能量

当水分通过降水的形式引进水循环系统时；系统中可利用的能量，尤其是太阳辐射，会对在陆地阶段的水循环过程起着主要的控制作用。一些过程诸如降雪、雪融以及蒸腾在很大程度上受到温度和太阳辐射的影响；故而，能量的输入在重建和模拟水量平衡时是极其关键的，这是因为蒸腾是一个流域中主要的水分散失机制。

2.1 日地关系

为了利用模型去计算日辐射，有必要首先去了解许多关于地球绕日轨道的基本概念。如要详细的理解这方面，请参考 Iqbal 在 1983 年关于日辐射的相关讨论。

2.1.1 日地距离

日地的平均距离为 1.496×10^8 公里，通常我们称这个距离为一个天文单位(AU)。众所周知，地球绕日运转的轨道是近似为一个椭圆，因而在特定一天，日地距离是变化的，最大可为 1.017 AU，最小为 0.983 AU。

由于到达地球表面的太阳辐射能量是与日地距离的平方成反比的，所以日地距离的精确与否对此有重要影响。通常，日地距离的计算公式表述为一个保留特定有限项的 Fourier 级数展开。对于一般的工程应用，Duffie 和 Beckman (1980) 提出的一个简略公式足以满足需求，他们的公式是用来计算地球半径矢量平方的倒数，亦称为地球轨道的偏心率纠正因子 E_0 ：

$$E_0 = \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 = 1 + 0.033 \cos \left[\frac{2\pi d_n}{365} \right] \quad 2.1.1$$

式中， r_0 为日地平均距离(1 AU)， r 为代求某一天的日地距离； d_n 为该天的在一年中的天数，它是从 1 月 1 号作为第一天一直到 12 月 31 号作为第 365 议天；其中，二月份总是取为 28 天，考虑到闰年的存在，这使得该方程的精度有所变化。

2.1.2 太阳倾斜角

地球上处在太阳入射光线垂直入射对应的地点的纬度，可以看作太阳倾斜角；春分和秋分对应的太阳倾斜角为0度，而夏至和冬至的太阳倾斜角约分别为23.5度和-23.5度。

下面这个 Perrin de Brichambaut 于 1975 年提出的简单的公式可以用于计算太阳倾斜角：

$$\delta = \sin^{-1} \left\{ 0.4 \sin \left[\frac{2\pi}{365} (d_n - 82) \right] \right\} \quad 2.1.2$$

式中 δ 为太阳倾斜角，单位为弧度(Radian); d_n 所求日期的在一年中的天相对数。

2.1.3 太阳正午，日升，日落，昼长

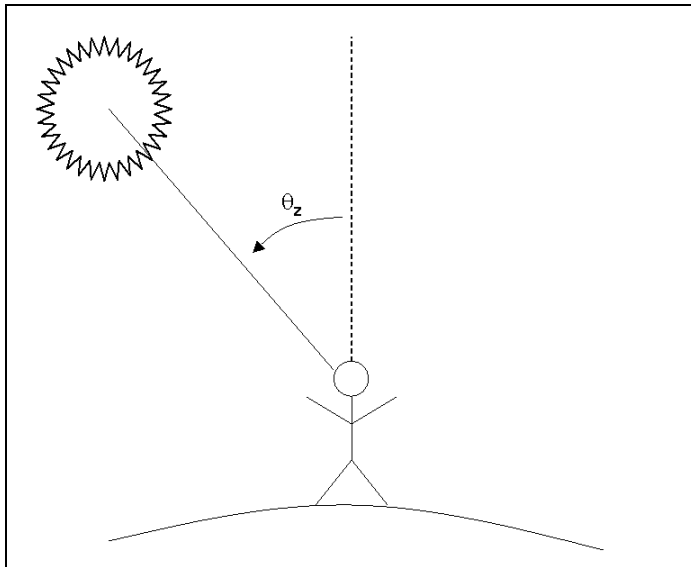


Figure 2-1: Diagram illustrating zenith angle

第 2 章 方程：能量

太阳天顶角指的是太阳入射光线和垂直于观测者向上的地面法线的夹角，如图 2-1 中所示的 θ_z 。当天顶角取当天的最小值时对应的时刻称为太阳正午。

$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega t \quad 2.1.3$$

对于某一给定的地理位置，太阳和该处地球表面的水平切面的关系可以由下式表述：

$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega t \quad 2.1.3$$

式中， δ 为以弧度为单位的太阳倾斜角； ϕ 为当地的单位为弧度的地理纬度坐标； ω 为地球自转的角速度（ $0.2618 \text{ rad h}^{-1}$ or 15° h^{-1} ）； t 为太阳时。在太阳正午， t 取为 0 时刻，在上午取正值，在下午和晚上取负值。乘积项 ωt 常称为时角。

$$T_{SR} = + \frac{\cos^{-1} \left[\tan \delta \tan \phi \right]}{\omega} \quad 2.1.4$$

和

$$T_{SS} = - \frac{\cos^{-1} \left[\tan \delta \tan \phi \right]}{\omega} \quad 2.1.5$$

总日长, T_{DL} , 计算如下：

$$T_{DL} = \frac{2 \cos^{-1} \left[\tan \delta \tan \phi \right]}{\omega} \quad 2.1.6$$

日升 T_{SR} 和日落 T_{SS} 发生再距离太阳正午相等时间的时刻；通过求解上面的方程，它们很容易得出：

总昼长 T_{DL} 就可以日落时刻减去日出时刻，即为：

$$T_{DL} = \frac{2 \cos^{-1} \left[-\tan \delta \tan \phi \right]}{\omega} \quad 2.1.6$$

当纬度超过 66.5° 或者低于 -66.5° 时， $[-\tan \delta \tan \phi]$ 的取值会超过 1，从而上式就失效；此时，要么没有日出发生（冬季）或者没有日落发生； T_{DL} 因此相应的要分别赋值为 0 或者 24 小时。

如果要得到一年中的最短的昼长，对于北半球，可以将太阳倾斜角取为 -23.5° (-0.4102 radians) 代入方程 2.1.6 求得，而南半球，代入 23.5° (0.4102 radians) 来获的。

表 2-1 给出了 SWAT 模型中用于本节计算中唯一用到的输入变量

Table 2-1: SWAT input variables that used in earth-sun relationship calculations.

Variable name	Definition	File Name
LATITUDE	Latitude of the subbasin (degrees).	.sub

2.2 太阳辐射

2.2.1 地球外辐射

太阳辐射是地球气候演边过程中的唯一的能量来源；通常我们称的太阳常数 I_{sc} 是指在距离太阳 1AU 之外的垂直太阳入射方向的单位面积上所截获的全波段的太阳辐射能。长期以来，人们就试图去精确量化这个值。1981 年 10 月，国际标准采用的官方的值为：

第2章 方程：能量

$$I_{SC} = 1367 \text{ W m}^{-2} = 4.921 \text{ MJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$$

特定某一天的地球外辐照度可以通过下式求出：

$$I_{0n} = I_{SC} E_0 \quad 2.2.1$$

式中， E_0 是地球绕日轨道的偏心率纠正因子， I_{0n} 的量纲和 I_{SC} 相同。

为了计算某一水平面的辐照度 I_0 ，可以利用下式：

$$I_0 = I_{0n} \cos \theta_z = I_{SC} E_0 \cos \theta_z \quad 2.2.2$$

式中， $\cos \theta_z$ 是太阳天顶角的余弦。

一天内照射在一水平切面上的能量总量可以通过一下积分公式给出：

$$H_0 = \int_{sr}^{ss} I_0 dt = 2 \int_0^{ss} I_0 dt \quad 2.2.3$$

式中 H_0 为地球外日辐照度 ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)， sr 为日出时刻， ss 为日落时刻。

假设某一天内 E_0 近似保持常值，并且把对时间积分转换为对时角积分，上面方程可改写为：

$$H_0 = \frac{24}{\pi} I_{SC} E_0 \int_0^{T_{SR}} (\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega t) d\omega t \quad 2.2.4$$

或者

$$H_0 = \frac{24}{\pi} I_{SC} E_0 \left[T_{SR} (\sin \delta \sin \phi) + \cos \delta \cos \phi \sin \left(\omega T_{SR} \right) \right] \quad 2.2.5$$

式中 I_{SC} 为太阳常数 ($4.921 \text{ MJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$)， E_0 为地球绕日轨道的偏心率纠正因子， ω 是地球自转角速度 ($0.2618 \text{ rad h}^{-1}$)， T_{SR} 为按照方程 2.1.4 定义的日出时

间, δ 是以弧度为单位的太阳倾斜角, ϕ 为地理纬度坐标. 把所有的常数项归为一个常数因子, 可以得到下式:

$$H_0 = 37.59E_0 \left[T_{SR} \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \sin \left(\frac{\pi}{2} - \delta \right) \right] \quad 2.2.6$$

2.2.2 无云状态下的日辐射

射入地球大气层的太阳辐射, 会有一部分被散射掉或者吸收掉. 损失掉的能量由大气透过率、空气的组分和成分含量、能量在大气传播经过的路径长度以及辐射的波长等因素决定。

由于太阳辐射在大气中传播过程及其复杂, 并且详细的讨论整个物理过程需要相当繁琐的运算, 所以 SWAT 粗略的假设在晴空无云的天气下, 20% 的地球外辐射将会被大气吸收掉. 基于此假设, 可以求出地球表面某特定位置的最大可能太阳辐射:

$$H_{MX} = 30.0E_0 \left[T_{SR} \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \sin \left(\frac{\pi}{2} - \delta \right) \right] \quad 2.2.7$$

式中最大可能太阳辐射 H_{MX} , 表示晴空下到达地球的辐射总量, 其单位为 ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$).

2.2.3 日太阳辐射

实际上, 由于云层的存在, 到达地表的日太阳辐射总量 H_{day} 辐射要小于理论上计算的最大可能辐射总量 H_{mx} ; 这里 SWAT 模型需要的日间辐射总量或者可以通过输入文件给出或者是通过模型模拟生产。

第 2 章 方程：能量

在输入控制代码中的 SLRSIM 变量，就是用来定义到底利用哪种方法。将该变量设置为 1，则会从外部输入文件读入，并且存放太阳辐射数据的文件名以及包含的记录条数会在控制输入输出文件(file.cio)中由设置。当 SLRSIM 设置为 2 时，则通过方程来产生日太阳辐射数据；这些方程将会在第四章中讨论到。SWAT 中所涉及到关于太阳辐射的输入变量总结于表 2-2。

Table 2-2: SWAT input variables used in solar radiation calculations.

Variable name	Definition	File Name
LATITUDE	Latitude of the subbasin (degrees).	.sub
SLRSIM	Solar radiation input code: 1-measured, 2-generated	.cod
NSTOT	Number of solar radiation records within the .slr file (required if SLRSIM = 1)	file.cio
SLRFILE	Name of measured solar radiation input file (.slr) (required if SLRSIM = 1)	file.cio
ISGAGE	Number of solar radiation record used within the subbasin (required if SLRSIM = 1)	file.cio

see description of .slr file in the User's Manual for input and format requirements if measured daily solar radiation data is being used

2.2.4 时均太阳辐射

在一小时内，照射到一水平切面的地球外辐射由下式给出

$$I_0 = I_{SC} E_0 \left(\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega t \right) \quad 2.2.8$$

式中， I_0 为在以 ωt 为中心的一小时间隔内积累的地球外辐射。

为了更为精确的计算每小时内的日照总辐射，需要对当地的标准时间和太阳时的差别有所了解。为了简化，SWAT 假设太阳正午即为当地的 12:00PM。

为日出和日落之间的每个小时都计算出 I_0 , 并且求和, 那么所得的结果应当等于 H_0 。因此, H_0 乘以每小时内辐射能量占当天总量的比例来求得每一时内的辐射。这种方法的好处在于我们在估计最大和实际到达地面辐射的差值时用到的假设可以自动的被包含到计算每小时的辐射中来。

SWAT 用下面的公式来计算到达地面的时均太阳辐射：

$$I_{hr} = I_{frac} \cdot H_{day} \quad 2.2.9$$

式中, I_{hr} 为在该天某一特定小时内的时均太阳辐射($\text{MJ m}^{-2} \text{hr}^{-1}$), I_{frac} 是该小时所占的能量的比例, H_{day} 是该天照射到地面上的太阳辐射总量。

下式给出了如何计算 I_{frac} ：

$$I_{frac} = \frac{\left(\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega t_i \right)}{\sum_{t=SR}^{SS} \left(\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega t \right)} \quad 2.2.10$$

式中 t_i 为第 i 小时中点对应的太阳时。

2.2.5 日净辐射

净辐射的计算需要得知入射和反射的短波辐射和净长波(热)辐射。下式给出如何通过净短波和净长波辐射来求得总的净辐射。

$$H_{net} = H_{day} \downarrow - \alpha \cdot H_{day} \uparrow + H_L \downarrow - H_L \uparrow \quad 2.2.11$$

或者

$$H_{net} = (1 - \alpha) H_{day} + H_b \quad 2.2.12$$

第2章 方程：能量

式中 H_{net} 为辐射 ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), H_{day} 到达地面的太阳短波辐射($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), α 为短波段的地表反照率, H_L 为长波辐射 ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), H_b 为净入射长波辐射 ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$). 每个量所带的箭头表示能量流动的方向。

2.2.5.1 净短波辐射

净短波辐射定义为 $(1 - \alpha)H_{day}$. 关于 α , SWAT 将起每天的值视为土壤类型, 植被覆盖, 积雪等的函数。当雪水当量大于 0.5 mm 时,

$$\alpha = 0.8 \quad 2.2.13$$

当雪水当量小于 0.5 mm 并且没有植被在 HRU 生长时,

$$\alpha = \alpha_{soil} \quad 2.2.14$$

式中 α_{soil} 为土壤的反照率. 当植被在生长并且雪水当量小于 0.5 mm 时,

$$\alpha = \alpha_{plant} \cdot (1 - cov_{sol}) + \alpha_{soil} \cdot cov_{sol} \quad 2.2.15$$

式中 α_{plant} 为植被的反照率(设为 0.23), cov_{sol} 是土壤覆盖因子, 可由下式获得

$$cov_{sol} = \exp\left(-5.0 \times 10^{-5} \cdot CV\right) \quad 2.2.16$$

上式中 CV 是地上生物量和残留物。 (kg ha^{-1}).

2.2.5.2 净长波辐射

长波辐射可以根据下面辐射公式直接计算出来:

$$H_R = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_K^4 \quad 2.2.17$$

式中 H_R 是辐射的能量($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), ε 为发射率, σ Stefan-Boltzmann 常数 ($4.903 \times 10^{-9} \text{ MJ m}^{-2} \text{K}^{-4} \text{d}^{-1}$), T_K 为大气的平均卡氏摄氏度。(273.15 + °C).

净长波辐射是通过一个对方程 2.217 修正后的公式来计算的 (Jensen et al., 1990):

$$H_b = f_{cld} \cdot (\varepsilon_a - \varepsilon_{vs}) \cdot \sigma \cdot T_K^4 \quad 2.2.18$$

式中 H_b 净长波辐射 ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), f_{cld} 是为了调节云层的影响引入的一个调节因子, ε_a 是大气的发射率, ε_{vs} 植被活则土壤的发射率

Wright and Jensen (1972) 提出了下面形式的云层调节因子, f_{cld} :

$$f_{cld} = a \cdot \frac{H_{day}}{H_{MX}} - b \quad 2.2.19$$

式中 a 和 b 是常数, H_{day} 是给定某一天到达地面的太阳辐射($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), H_{MX} 该天可以获得的最大可能太阳辐射 ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$).

方程 2.2.18 中的 2 个发射率可以合为一项 :净发射率 ε' . 净发射率可以下面的公式来求出 (Brunt , 1932):

$$\varepsilon' = \varepsilon_a - \varepsilon_{vs} = -a_1 + b_1 \cdot \sqrt{e} \quad 2.2.20$$

式中 a_1 和 b_1 是常数, e 在给定那天的蒸气压(kPa). e 的计算将在第三章涉及到。

由 2.2.18, 2.2.19, and 2.2.20 可以得到如下计算净长波辐射的公式

第 2 章 方程：能量

$$H_b = - \left[a \cdot \frac{H_{day}}{H_{MX}} - b \right] \cdot \left[a_1 + b_1 \sqrt{e} \cdot \sigma \cdot T_K^4 \right] \quad 2.2.21$$

上式中涉及到的几个待定常量(a , b , a_1 and b_1)的实验值列于表 2.3.

SWAT 中所采用的系数是利用 Doorenbos and Pruitt 提出的 (1977):

$$H_b = - \left[0.9 \cdot \frac{H_{day}}{H_{MX}} + 0.1 \right] \cdot \left[0.34 - 0.139 \sqrt{e} \cdot \sigma \cdot T_K^4 \right] \quad 2.2.22$$

Table 2-3: Experimental coefficients for net long-wave radiation equations (from Jensen et al., 1990)

Region	(a,	b)	(a ₁ ,	b ₁)
Davis, California	(1.35,	-0.35)	(0.35,	-0.145)
Southern Idaho	(1.22,	-0.18)	(0.325,	-0.139)
England	not available		(0.47,	-0.206)
England	not available		(0.44,	-0.253)
Australia	not available		(0.35,	-0.133)
General	(1.2,	-0.2)	(0.39,	-0.158)
General-humid areas	(1.0,	0.0)		
General-semihumid areas	(1.1,	-0.1)		

Table 2-4: SWAT input variables used in net radiation calculations.

Variable name	Definition	File Name
SOL_ALB	α_{soil} : moist soil albedo	.sol
MAX TEMP	T_{mx} : Daily maximum temperature (°C)	.tmp
MIN TEMP	T_{mn} : Daily minimum temperature (°C)	.tmp
SOL_RAD	H_{day} : Daily solar radiation reaching the earth's surface (MJ m ⁻² d ⁻¹)	.slr

2.3 温度

温度影响着一系列物理，化学和生物过程。植被的成长与温度依赖型很大，例如有机物的分解和矿物化。日均气温可以输入给模型或者能月均气温中生成。土壤和水分的温度可以从气温中估算出来。

2.3.1 日气温

SWAT 需要日最大和最小气温。这些数据可以通过输入文件读入或者是模型来产生。用户强烈被建议去获得尽可能靠近流域或者在流域内的日气温测量值。如何用户使用了这些测量的气温，模型的输出精度将大大提高。

在输入控制代码中的 TMPSIM 变量，就是用来定义到底利用哪种方法获得气温数据。将该变量设置为 1，则会从外部输入文件读入，并且存放数据的文件名称以及包含的记录条数会在控制输入输出文件(file.cio)中由设置。当 TMPSIM 设置为 2 时，则通过方程来产生日气温数据；这些方程将会在第 4 章中讨论到。SWAT 中所涉及到关于太阳辐射的输入变量总结于表 2-5。

Table 2-5: SWAT input variables that pertain to daily air temperature.

Variable name	Definition	File Name
TMPSIM	Air temperature input code: 1-measured, 2-generated	.cod
NTGAGE	Number of temperature gage (.tmp) files used in simulation file (required if TMPSIM = 1)	file.cio
NTTOT	Number of temperature records used in simulation (required if TMPSIM = 1)	file.cio
NTFIL	Number of temperature records within each .tmp file (required if TMPSIM = 1)	file.cio
TFILE	Name of measured temperature input file (.tmp) Up to 18 files may be used. (required if TMPSIM = 1)	file.cio
ITGAGE	Number of temperature record used within the subbasin (required if TMPSIM = 1)	file.cio

= 1)

see description of .tmp file in the User's Manual for input and format requirements if measured temperature data is being used

2.3.2 时气温

气温数据一般是通过日最高气温和最低气温提供的；通常，一个合理得到时气温的做法是将日最高气温和日最低气温进行正弦差值。最高日气温假设出现在 15:00 小时，而最低日气温假设出现在 3:00 小时(Campbell, 1985)，那么每个小时的气温就可以通过下式计算得到：

$$T_{hr} = \bar{T}_{av} + \frac{(T_{mx} - T_{mn})}{2} \cdot \cos(0.2618 \cdot (hr - 15)) \quad 2.3.1$$

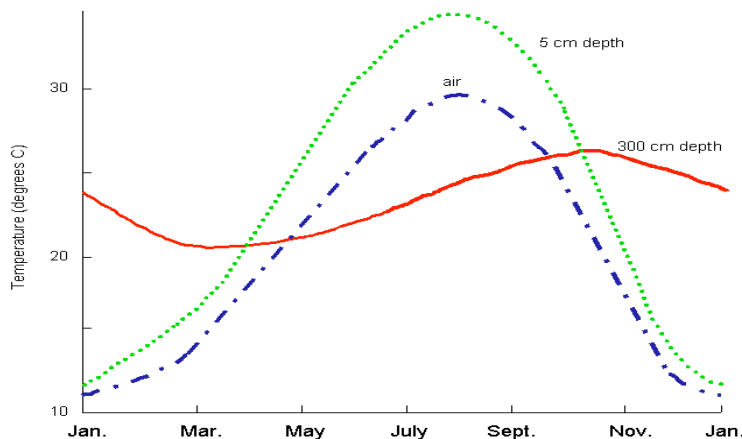
式中 T_{hr} 是某天第 hr 小时的气温 (°C)， \bar{T}_{av} 该天的日平均气温(°C)， T_{mx} 为日最高气温 (°C)， T_{mn} 为日最低气温 (°C)。

Table 2-6: SWAT input variables that pertain to hourly air temperature.

Variable name	Definition	File Name
MAX TEMP	T_{mx} : Daily maximum temperature (°C)	.tmp
MIN TEMP	T_{mn} : Daily minimum temperature (°C)	.tmp

2.3.3 土壤温度

土壤温度的大小是随着地表气温的季节和日变化而波动的。图 2 -



2 所示的为 College Station, Texas 地区的气温和地表下 5cm 和 10cm 深处的土壤温度。

Figure 2-2: Four-year average air and soil temperature at College Station, Texas.

这副图说明了土壤温度变化的好几个重要特点。首先，土壤温度的年波动是一个正弦函数，其次，地温的年波动幅度随着土壤深度的增加而减小，直到达到某一深度时地温保持恒定不变；最后，最高和最低气温出现的时间是随着深度的不同而不同的。如上图中所示，在地表取最低气温时（一月）和地下 300cm 处取最低温度时（三月）有 3 个月的间隔。

Carslaw 和 Jaeger (1959) 提出了一个方程来定量计算地温的季节性变化：

$$T_{soil}(z, d_n) = \bar{T}_{AA} + A_{surf} \exp\left(-z/dd\right) \sin\left(\omega_{imp} d_n - z/dd\right) \quad 2.3.2$$

式中 $T_{soil}(z, d_n)$ 是在深度为 z (mm) 的地温($^{\circ}\text{C}$)， d_n 为在一年中的当天的天数， \bar{T}_{AA} 是年平均地温 ($^{\circ}\text{C}$)， A_{surf} 是比表层温度变化的幅度 ($^{\circ}\text{C}$)， dd 是温度衰减深度 (mm)， ω_{imp} 是温度波动的角频率。可见，当 $z = 0$ (地表) 时，方程 2.3.2 可以简化为 $T_{soil}(0, d_n) = \bar{T}_{AA} + A_{surf} \sin(\omega_{imp} d_n)$ 。当 $z \rightarrow \infty$ 时，方程 2.3.2 变为 $T_{soil}(\infty, d_n) = \bar{T}_{AA}$ 。

为了计算上面方程中某些变量的值，必须首先知道土壤的热容和热传导率特性，但是这些特性一般很少被测量，并且从其他的土壤物理特性推导出来也不是很有效。因此，SWAT 采用的做法是把当天的土壤温度作为前一天的温度，年平均气温，当地表温度的和剖面深度等的函数来计算的。

以下这个方程是用来计算每层土壤中心的日平均温度：

第 2 章 方程：能量

$$T_{soil}(z, d_n) = \ell \cdot T_{soil}(z, d_{n-1}) + (1 - \ell) \cdot [df \cdot (\bar{T}_{AAair} - T_{ssurf}) + T_{ssurf}] \quad 2.3.3$$

式中 $T_{soil}(z, d_n)$ 是在第 d_n 天深度 z (mm) 处的温度 ($^{\circ}\text{C}$)。 ℓ 为延迟系数； t (取值从 0.0 到 1.0) 为一个控制前一天温度对今天温度影响的一个因子， $T_{soil}(z, d_{n-1})$ 是该土层中前一天的温度， df 作为一个深度因子去量化该土层所处的深度对温度的影响， \bar{T}_{AAair} 年平均气温 ($^{\circ}\text{C}$)， T_{ssurf} 当天的土壤表层温度。SWAT 把延迟系数 ℓ 设为 0.80。前一天的土壤温度为已知，并且年平均气温可以从天气生成文件(.wgn)中的报告的长期月最高和最低气温来计算出来。深度因子 df 和土壤标称温度 T_{ssurf} 的计算将在下面讨论。

深度因子 df 可以由下面方程计算得出：

$$df = \frac{zd}{zd + \exp(0.867 - 2.078 \cdot zd)} \quad 2.3.4$$

式中 zd 是当前土壤层的中心深度 z 与衰减深度 dd 的比值：

$$zd = \frac{z}{dd} \quad 2.3.5$$

从前 3 个方程中 (2.3.3, 2.3.4 and 2.3.5) 可以看出，在接近土壤表层的深度，土壤温度是土壤表层温度的函数。随真深度的增加，土壤温度受年平均气温的影响逐渐增大，一直到衰减深度 dd ，土壤的温度在 \bar{T}_{AAair} 的 5% 范围中。

衰减深度 dd 是每天都要计算的，它是最大衰减深度、土壤容积密度、和土壤水分的函数。最大衰减深度 dd_{max} 可以通过下式计算得出：

$$dd_{max} = 1000 + \frac{2500\rho_b}{\rho_b + 686 \exp(5.63\rho_b)} \quad 2.3.6$$

式中 ρ_b 为土壤的容积密度 (Mg/m^3)。

土壤水分含量对衰减深度的影响可以通过转换因子 ϕ 来体现出来， ϕ 可以通过下式给出

$$\phi = \frac{SW}{(0.356 - 0.144\rho_b)z_{tot}} \quad 2.3.7$$

式中 SW 为在土壤剖面中的水分含量，它是通过在土壤剖面中的水的深度来表达的 (mm H₂O)， ρ_b 为土壤容积密度 (Mg/m³)， z_{tot} 为从土壤表面到土壤剖面底部的距离 (mm)。

那么衰减深度每天的值 dd 就可以得出：

$$dd = dd_{max} \cdot \exp\left[\ln\left(\frac{500}{dd_{max}}\right) \cdot \left(\frac{1-\phi}{1+\phi}\right)^2\right] \quad 2.3.8$$

式中 dd_{max} 为最大的衰减深度 (mm)， ϕ 为土壤水分的一个转换因子。

壤表层温度是前一天地表温度，地表覆盖的总量，以及当表面没有覆盖时表面的温度等的函数。裸露土壤地表的温度可以用下式给出：

$$T_{bare} = \bar{T}_{av} + \varepsilon_{sr} \frac{(T_{mx} - T_{mn})}{2} \quad 2.3.9$$

式中 T_{bare} 裸露土壤表面的温度(°C)， \bar{T}_{av} 当天的平均温度 (°C)， T_{mx} 为日最高气温(°C)， T_{mn} 日最低气温 (°C)， ε_{sr} 为一辐射项。辐射项采用下式计算：

$$\varepsilon_{sr} = \frac{H_{day} \cdot (1 - \alpha)}{20} \quad 2.3.10$$

式中 H_{day} 当天到达地表的太阳辐射(MJ m⁻² d⁻¹)， α 为该天对应的反照率。

第 2 章 方程：能量

土壤表面上的任何覆盖将会大大的影响土壤表面的温度；植被和雪层覆盖对土壤温度的影响可以用如下这个权重因子来计算得出：

$$bcv = \max \left\{ \frac{CV}{CV + \exp(-0.563 - 1.297 \times 10^{-4} \cdot CV)}, \frac{SNO}{SNO + \exp(-0.055 - 0.3002 \cdot SNO)} \right\} \quad 2.3.11$$

式中 CV 表示当天总的地表上的生物量和残留物(kg ha^{-1})； SNO 为当天雪层的水分含量($\text{mm H}_2\text{O}$)。依次计算出来的权重因子 bcv 对于裸露地表来言取值为 0，当覆盖物增加时逐渐趋近 1.0。

下面的方程可以用来计算土壤表面温度 T_{ssurf} ：

$$T_{ssurf} = bcv \cdot T_{soil}(d_n - 1) + (-bcv) \cdot T_{bare} \quad 2.3.12$$

式中， bcv 为表征地表覆盖物的影响的权重因子， $T_{soil}(1, d_n - 1)$ 为前一天的第一层土壤层的温度 ($^{\circ}\text{C}$)， T_{bare} 为裸露地表的土壤温度($^{\circ}\text{C}$)。可以看出，地表覆盖的作用是增加了前一天温度近地表温度对当地地面温度的影响。

SWAT 中直接影响到土壤温度计算的输入变量已经在下表 2-7 中列出。此外，还有其他几个变量用于初始化子盆地残迹物和雪层覆盖或者 HRUs (.sub 中的 SNO_SUB 和 SNOEB; .hru 中的 RSDIN)。这些输入变量的这是影响模拟初期的最初几个月的值；最终，在管理操作文件中.mgt 中的时间参数将会影响到地表的覆盖，相应地影响到土壤温度。

Table 2-7: SWAT input variables that pertain to soil temperature.

Variable name	Definition	File Name
TMPMX	Average maximum air temperature for month (°C)	.wgn
TMPMN	Average minimum air temperature for month (°C)	.wgn
SOL_Z	z: Depth from soil surface to bottom of layer (mm)	.sol
SOL_BD	ρ_b : Moist bulk density (Mg m ⁻³ or g cm ⁻³)	.sol
SOL_ALB	Moist soil albedo.	.sol
MAX TEMP	T_{mx} : Daily maximum temperature (°C)	.tmp
MIN TEMP	T_{mn} : Daily minimum temperature (°C)	.tmp

2.3.4 水温

水温需要用来模拟溪流内得生物和水质变化过程。SWAT 利用了 Stefan and Preud'homme (1993)发展得一个方法来计算充分混合得溪流得日平均水温：

$$T_{water} = 5.0 + 0.75\bar{T}_{av} \quad 2.3.13$$

式中 T_{water} 为当天得水温 (°C), \bar{T}_{av} 该天得平均气温 (°C).

由于水得热学惰性，水温对气温得变化得响应常常被滞留和延迟；当我们把水温和气温画在一起比较得时候，发现水温得高峰一般要滞后于气温高峰约 3 - 7 个小时。随着河水得深度得增加，滞后时间要超过这个典型范围。对于非常大的河流来说，滞留时间可能达到 1 周左右。方程 2.3.13 假设气温和水温的延迟时间小于一天。

除了气温，水温还受到太阳辐射，相对湿度，风速，水深，和地下水径流，人为热源，泥沙热传导率，以及是否河网受到节流和堵塞等诸多因素的影响。SWAT 假设这些因素的影响可以忽略。

Table 2-8: SWAT input variables that pertain to water temperature.

Variable name	Definition	File Name
MAX TEMP	T_{mx} : Daily maximum temperature (°C)	.tmp
MIN TEMP	T_{mi} : Daily minimum temperature (°C)	.tmp

2.4 风速

当使用 Penman-Monteith 方程来估算潜在蒸腾的影响时，SWAT 需要已知风速。SWAT 假设风速信息来自于距地表 1.7 处的仪表测量。

当利用 Penman-Monteith 方程来估算蒸散时，方程中的风速必须是位于冠层上的测量；在 SWAT 中，对于植被高度和风速测量的高度差，指定了一个最小的距离 1 米；当超过 1 米时，原始的风速信息按照下式被调整：

$$z_w = h_c + 100 \quad 2.4.1$$

式中 z_w 为测量的风速位于的高度 (cm)， h_c 为植被高度 (cm)。

在近地表风速随高度的变化可以由下式给出 (Haltiner and Martin, 1957):

$$u_{z_2} = u_{z_1} \cdot \left[\frac{z_2}{z_1} \right]^{aa} \quad 2.4.2$$

式中 u_{z_1} 为 z_1 处的风速 (m s^{-1}) (cm)， u_{z_2} 为高度 z_2 处的风速， aa 是一个位于 0 和 1 之间的一个指数，它的值决定于大气的稳定性和地表的粗糙度。

Jensen (1974) 建议 aa 取 0.2; 这也是 SWAT 所采用的。

每天的风速数据必须从输入文件读入或者通过模型生成。在输入控制代码文件中 WNSIM 变量用以标志如何生成。将该变量设置为 1，则会从外部输入文件读入，并且存放数据的文件名称以及包含的记录条数会在控制输

入输出文件(file.cio)中由设置。当 TMPSIM 设置为 2 时，则通过方程来产生日风速数据；这些方程将会在第四章中讨论到。

Table 2-9: SWAT input variables used in wind speed calculations.

Variable name	Definition	File Name
WNDSIM	Wind speed input code: 1-measured, 2-generated	.cod
NWTOT	Number of wind speed records within the .wnd file (required if WNDSIM = 1)	file.cio
WNDFILE	Name of measured wind speed input file (.wnd) (required if WNDSIM = 1)	file.cio
IWGAGE	Number of wind speed record used within the subbasin (required if WNDSIM = 1)	file.cio

see description of .wnd file in the User's Manual for input and format requirements if measured daily wind speed data is being used

2.5 NOMENCLATURE

- A_{surf} Amplitude of the surface fluctuations in soil temperature ($^{\circ}\text{C}$)
- AU Astronomical unit (1 AU = 1.496×10^8 km)
- CV Total aboveground biomass and residue present on current day (kg ha^{-1})
- E_0 Eccentricity correction factor of earth ($(r_0/r)^2$)
- H_0 Extraterrestrial daily irradiation ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)
- H_b Net outgoing long-wave radiation ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)
- H_{day} Solar radiation reaching ground on current day of simulation ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)
- H_L Long-wave radiation ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)
- H_{MX} Maximum possible solar radiation ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)
- H_{net} Net radiation on day ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)
- H_R Radiant energy ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)
- I_{frac} Fraction of daily solar radiation falling during specific hour on current day of simulation
- I_{hr} Solar radiation reaching ground during specific hour on current day of simulation ($\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$)
- I_{SC} Solar constant ($4.921 \text{ MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$)
- I_0 Extraterrestrial daily irradiance incident on a horizontal surface ($\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$)
- I_{0n} Extraterrestrial daily irradiance incident on a normal surface ($\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$)
- SNO Water content of snow cover on current day (mm H_2O)
- SW Amount of water in soil profile (mm H_2O)
- T_{bare} Temperature of soil surface with no cover ($^{\circ}\text{C}$)
- T_{DL} Daylength (h)
- T_{hr} Air temperature during hour ($^{\circ}\text{C}$)

第 2 章 方程 : 能量

T_K Mean air temperature in Kelvin ($273.15 + ^\circ\text{C}$)

T_{mn} Minimum air temperature for day ($^\circ\text{C}$)

T_{mx} Maximum air temperature for day ($^\circ\text{C}$)

T_{soil} Soil temperature ($^\circ\text{C}$)

T_{ssurf} Soil surface temperature ($^\circ\text{C}$)

T_{SR} Time of sunrise in solar day (h)

T_{SS} Time of sunset in solar day (h)

T_{water} Average daily water temperature ($^\circ\text{C}$)

\bar{T}_{AA} Average annual soil temperature ($^\circ\text{C}$)

\bar{T}_{AAair} Average annual air temperature ($^\circ\text{C}$)

\bar{T}_{av} Average air temperature for day ($^\circ\text{C}$)

a Constant in equation used to calculate the cloud cover adjustment factor

a_1 Constant in equation used to calculate net emissivity

aa Exponent between 0 and 1 that varies with atmospheric stability and surface roughness that is used in calculating wind speed at different heights

b Constant in equation used to calculate the cloud cover adjustment factor

b_1 Constant in equation used to calculate net emissivity

bcv weighting factor for impact of ground cover on soil surface temperature

cov_{sol} Soil cover index for albedo determination

d_n Day number of year, 1 on January 1 and 365 on December 31

dd Damping depth (mm)

dd_{max} Maximum damping depth (mm)

df Depth factor used in soil temperature calculations

e Vapor pressure (actual) on a given day (kPa)

f_{cld} Factor to adjust for cloud cover in net long-wave radiation calculation

h_c Canopy height (cm)

hr Hour of day (1-24)

r Actual earth-sun distance (AU)

r_0 Mean earth-sun distance, 1 AU

t Number of hours before (+) or after (-) solar noon

t_i Solar time at the midpoint of the hour i

u_{z1} Wind speed (m s^{-1}) at height z_1 (cm)

u_{z2} Wind speed (m s^{-1}) at height z_2 (cm)

z Depth below soil surface (mm)

z_1 Height of wind speed measurement (cm)

z_2 Height of wind speed measurement (cm)

z_{tot} Depth to bottom of soil profile (mm)

z_w Height of the wind speed measurement (cm)

zd Ratio of depth in soil to damping depth

α Short-wave reflectance or albedo

α_{plant} Plant albedo (set at 0.23)

α_{soil} Soil albedo

δ Solar declination (radians)

ε	Emissivity
ε'	Net emittance
ε_a	Atmospheric emittance
ε_{sr}	Radiation term for bare soil surface temperature calculation
ε_{vs}	Vegetative or soil emittance
ℓ	Lag coefficient that controls influence of previous day's temperature on current days temperature
σ	Stefan-Boltzmann constant ($4.903 \times 10^{-9} \text{ MJ m}^{-2} \text{ K}^{-4} \text{ d}^{-1}$)
θ_z	Zenith angle (radians)
ϕ	Latitude in radians
ρ_b	Soil bulk density (Mg m^{-3})
φ	Scaling factor for impact of soil water on damping depth
ω	Angular velocity of the earth's rotation ($0.2618 \text{ radians h}^{-1}$)
ω_{imp}	Angular frequency in soil temperature variation

2.6 REFERENCES

- Brunt, D. 1932. Notes on radiation in the atmosphere. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 58: 389-418.
- Campbell, G.S. 1985. Soil physics with BASIC: transport models for soil-plant systems. Elsevier, Amsterdam.
- Carslaw, H.S. and J.C. Jaeger. 1959. Conduction of heat in solids. Oxford University Press, London.
- Doorenbos, J. and W.O. Pruitt. 1977. Guidelines for predicting crop water requirements. FAO Irrig. and Drain. Paper No. 24, 2nd ed. FAO, Rome.
- Duffie, J.A. and W.A. Beckman. 1980. Solar engineering of thermal processes. Wiley, N.Y.
- Haltiner, G.J. and F.L. Martin. 1957. Dynamical and physical meteorology. McGraw-Hill, New York.
- Iqbal, M. 1983. An introduction to solar radiation. Academic Press, N.Y.
- Jensen, M.E. (ed.) 1974. Consumptive use of water and irrigation water requirements. Rep. Tech. Com. on Irrig. Water Requirements, Irrig. and Drain. Div., ASCE.

第 2 章 方程：能量

- Jensen, M.E., R.D. Burman, and R.G. Allen (ed). 1990. Evapotranspiration and irrigation water requirements. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 70, ASCE, N.Y.
- Perrin de Brichambaut, Chr. 1975. Cahiers A.F.E.D.E.S., supplément au no 1. Editions Européennes Thermique et Industrie, Paris.
- Stefan, H.G. and E.B. Preud'homme. 1993. Stream temperature estimation from air temperature. Water Resources Bulletin 29(1): 27-45.
- Wright, J.L. and M.E. Jensen. 1972. Peak water requirements of crops in Southern Idaho. J. Irrig. and Drain. Div., ASCE, 96(IR1):193-201.

第 3 章 方程:大气水

降水为水进入水文循环陆地阶段的机制。因为降水控制水量平衡，降水量和空间、时间分布对于水文模拟至关重要。

3.1 降水

模拟日达到地球表面的降水, Rday, 可以有输入文件读入或由模型生成。强烈建议用户尽量施用实测数据, 这可以提高 SWAT 的预测精度。

不幸的是, 即使施用实测降水数据, 仍然会有降水的测量误差。在单一站点测量降水会有多种来源的误差, 并且根据点数据推广到面数据的过程也会带来新的误差。典型地, 对于年或更长时间段的总的和平均面降水估计会 10% 的相对不确定性(Winter, 1981)。

降水的点测量通常只能捕捉到实际降水的一部分特征。站点监测数据不能获取实际数据特征, 主要是由于测量工具产生的风斡旋造成的。这些风斡旋减少了较小雨滴和雪花的捕获。 Larson and Peck (1974) 发现地面以上的测量工具如果没有防风设备的话, 会低估 10% 雨和 30% 雪。即使测量工具有防风设备, 这一误差源也不能去除。对于这一误差源和其它误差源的渗入探讨, 以及处理这些误差的方法, 请参阅 Dingman (1994)。

在输入控制文件(.cod)中的变量用来识别获取降水数据的方法。如果读入日降水数据, 该变量设为 1, 降水数据文件的名称和文件中存储的降水记录在控制输入输出(file.cio) 中定义。如果生成日降水数据, PCPSIM 设为 2。 SWAT 中用来产生降水数据的方程将在第 4 章介绍。SWAT 中雨降水相关的输入变量总结在表 3-1 中。

Table 3-1: SWAT input variables used in precipitation calculations.

Variable name	Definition	File Name
PCPSIM	Precipitation input code: 1-measured, 2-generated	.cod
NRGAGE	Number of precipitation gage files (.pcp) used (required if PCPSIM = 1)	file.cio
NRTOT	Total number of precipitation records used in simulation (required if PCPSIM = 1)	file.cio
NRGFIL	Number of precipitation records in each .pcp file (required if PCPSIM = 1)	file.cio
RFILE	Name of measured precipitation input file(s) (.pcp) (required if PCPSIM = 1)	file.cio
IRGAGE	Number of precipitation record used within the subbasin (required if PCPSIM = 1)	file.cio

see description of .pcp file in the User's Manual for input and format requirements if measured daily precipitation data is being used

3.2 最大半小时降水

SWAT 需要最大半小时降水来计算峰值径流。最大半小时降水为日降水总量的一个分数, $\alpha_{0.5}$ 。如果采用次日时间步长的降水数据, SWAT 将直接根据降水数据就算最大半小时降水。如果采用日降水数据, SWAT 采用第 4 章中介绍的方法产生一个 $\alpha_{0.5}$ 值。

3.3 水蒸汽

如果采用 Penman-Monteith 或者 Priestley-Taylor 方程来估算潜在蒸散发, SWAT 需要相对湿度数据。Penman-Monteith 方程中有考虑近蒸发表面空气中水蒸汽量对蒸发的作用的项。Penman-Monteith 和 Priestley-Taylor 均需要实际蒸汽压 (可以根据相对湿度计算)。

相对湿度为空气实际的蒸汽压与饱和蒸汽压的比率：

$$R_h = \frac{e}{e^o} \quad 3.3.1$$

第3章 方程：大气水

式中： R_h 为模拟日相对湿度 is the relative humidity on a given day, e 为实际蒸汽压 (kPa), e^o 饱和蒸汽压 (kPa).

饱和蒸汽压为最大的热力学稳定蒸汽压，为空气温度的函数。SWAT 采用计算 Tetens (1930) 和 Murray (1967)的方法计算饱和蒸汽压。

$$e^o = \exp\left[\frac{16.78 \cdot \bar{T}_{av} - 116.9}{\bar{T}_{av} + 237.3}\right] \quad 3.3.2$$

式中： e^o 模拟日饱和蒸汽压(kPa) and \bar{T}_{av} 为日平均气温 (°C)。当相对湿度已知，实际蒸汽压可以通过方程 3.3.1 计算：

$$e = R_h \cdot e^o \quad 3.3.3$$

饱和蒸汽压曲线可以由方程 3.3.2 得到。饱和蒸汽压曲线的斜率可以通过对方程 3.3.2 微分得到：

$$\Delta = \frac{4098 \cdot e^o}{(\bar{T}_{av} + 237.3)^2} \quad 3.3.4$$

式中： Δ 为饱和蒸汽压曲线的斜率 (kPa °C⁻¹), e^o 模拟日饱和蒸汽压(kPa) , \bar{T}_{av} 为日平均气温(°C).

蒸发的速率与表层蒸汽压和其上层空气蒸汽压之差成正比。这一差别称为蒸汽压赤字：

$$vpd = e^o - e \quad 3.3.5$$

式中： vpd 为蒸汽压赤字 (kPa), e^o 模拟日饱和蒸汽压 (kPa), e 模拟日实际蒸汽压(kPa)。 vpd 的值越大，蒸发速率越快。

蒸发潜热, λ , 为破坏液体状态下水分子氢键, 使其转化为气体, 而吸收的热量。蒸发潜热为温度的函数, 可以用如下方程计算(Harrison, 1963):

$$\lambda = 2.501 - 2.361 \times 10^{-3} \cdot \bar{T}_{av} \quad 3.3.6$$

式中: λ 为蒸发潜热 (MJ kg^{-1}), \bar{T}_{av} 为日平均气温($^{\circ}\text{C}$).

蒸发涉及潜热和显热在蒸发体和空气之间的交换。psychrometric 常数, γ , 表示从流经热量计空气获得的显热和转化为潜热的显热达到平衡, 可采用下式计算:

$$\gamma = \frac{c_p \cdot P}{0.622 \cdot \lambda} \quad 3.3.7$$

式中: γ 为 psychrometric 常数($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$), c_p 为在固定大气压下湿润空气的比热 ($1.013 \times 10^{-3} \text{ MJ kg}^{-1} ^{\circ}\text{C}^{-1}$), P 为大气压 (kPa), λ 为蒸发潜热 (MJ kg^{-1}).

psychrometric 常数的计算需要大气压。SWAT 采用 Doorenbos 和 Pruitt (1977)开发的方程估算大气压:

$$P = 101.3 - 0.01152 \cdot EL + 0.544 \times 10^{-6} \cdot EL^2 \quad 3.3.8$$

式中: P 为大气压(kPa), EL 为高程 (m).

日相对湿度可以从输入文件读入或由模型生成。输入控制文件的变量 (.cod) 识别获取相对湿度数据的方法。如果读入相对湿度数据, 该变量设为 1, 相对湿度数据文件的名称和文件中存储的降水记录在控制输入输出 (file.cio) 中定义。如果生成相对湿度数据, RHSIM 设为 2。SWAT 中用来产生相对湿度数据的方程将在第 4 章介绍。

Table 3-2: SWAT input variables used in relative humidity calculations.

Variable name	Definition	File Name
RHD	R_h : daily average relative humidity	.hmd
TMP_MX	T_{mx} : maximum temperature for day (°C)	.tmp
TMP_MN	T_{mn} : minimum temperature for day (°C)	.tmp
ELEV	EL : elevation (m)	.sub
RHSIM	Relative humidity input code: 1-measured, 2-generated	.cod
NHTOT	Number of relative humidity records within the .hmd file (required if RHSIM = 1)	file.cio
RHFILE	Name of measured relative humidity input file (.hmd) (required if RHSIM = 1)	file.cio
IHGAGE	Number of relative humidity record used within the subbasin (required if RHSIM = 1)	file.cio

see description of .hmd file in the User's Manual for input and format requirements if measured relative humidity data is being used

3.4 积雪覆盖

SWAT 根据日平均气温将降水分为雨或者冰雨/雪。临界温度， T_{s-r} ，用来划分降水为雨或雪。如果日平均气温低于临界温度，那么降水被认为是雪，雪降水的水当量被添加到雪堆中。

降雪以雪堆的形式存储在地表。雪堆中存储的水量以融雪水当量的形式表示。雪堆将由于降雪而增加，融雪、升华而减少。雪堆的质量平衡方程为：

$$SNO = SNO + R_{day} - E_{sub} - SNO_{melt} \quad 3.4.1$$

式中： SNO 为模拟日雪堆中的水含量 (mm H₂O)， R_{day} 模拟日降水 (如果 $\bar{T}_{av} \leq T_{s-r}$) (mm H₂O)， E_{sub} 模拟日的升华量 (mm H₂O)， SNO_{melt} 为模拟日的融雪量 (mm H₂O)。积雪量表示为覆盖在 HRU 面积上的深度。

由于漂移、遮蔽和地形因子的影响，子流域中的雪堆很少均匀分布。这导致子流域的部分区域是没有积雪覆盖的，精确计算子流域的融雪，必需定量这部分面积。

初始积雪覆盖变化的因素通常是不变的，这使得可以将积雪覆盖面积与子流域中给定时间存在的积雪量相联系。这一关系表达为面积损耗曲线，可以用来以子流域中积雪量的函数的形式描述雪堆的季节性增加或减少。(Anderson, 1976).

面积损耗曲线需要一个积雪深度阈值， SNO_{100} ，以定义当超过此阈值时将100%覆盖子流域。阈值深度将依赖于植被分布、雪的风载荷、风对雪的冲刷、截留和坡向，并且对流域是唯一的。

面积损耗曲线基于自然对数，其方程为：

$$sno_{cov} = \frac{SNO}{SNO_{100}} \cdot \left(\frac{SNO}{SNO_{100}} + \exp\left(cov_1 - cov_2 \cdot \frac{SNO}{SNO_{100}} \right) \right)^{-1} \quad 3.4.2$$

式中： sno_{cov} 为被积雪覆盖的 HRU 面积， SNO 为模拟日雪堆的水含量 (mm H₂O)， SNO_{100} 为 100% 覆盖的积雪深度阈值 (mm H₂O)， cov_1 和 cov_2 为定义曲线形状的系数。 cov_1 和 cov_2 值通过两个已知点求解方程 3.4.2 得到：95% 覆盖面积时为 95% SNO_{100} ；50% 覆盖面积时，用户定义的 SNO_{100} 分数时。

在下面的图形中，为 50% 覆盖面积时对应不同 SNO_{100} 分数的面积损耗曲线的例子。

第3章 方程：大气水

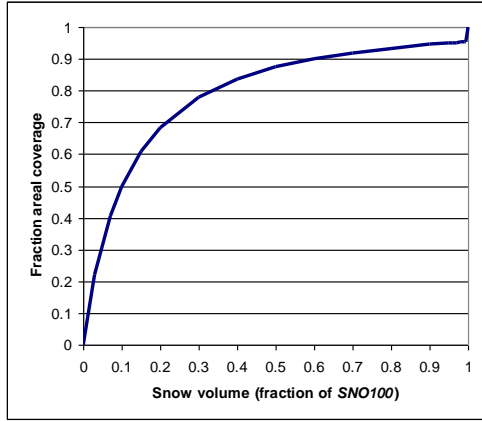


Figure 3-1: 10% $SNO_{100} = 50\%$ coverage

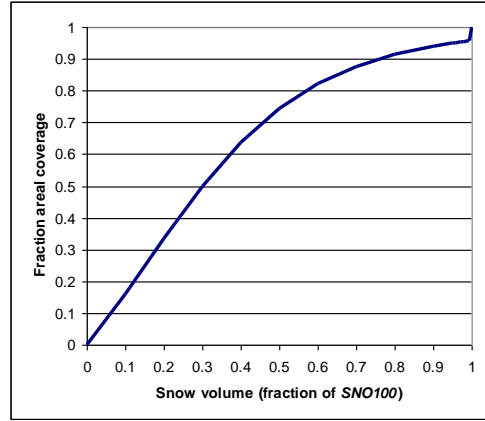


Figure 3-2: 30% $SNO_{100} = 50\%$ coverage

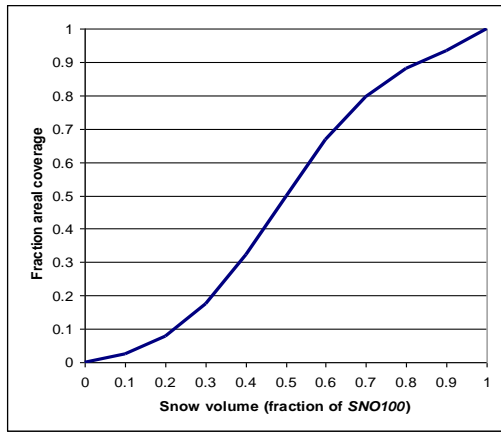


Figure 3-3: 50% $SNO_{100} = 50\%$ coverage

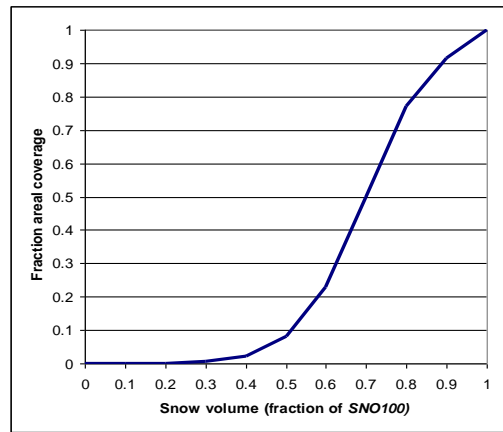


Figure 3-4: 70% $SNO_{100} = 50\%$ coverage

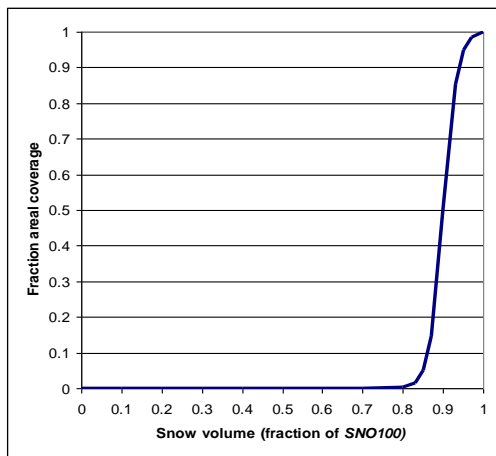


Figure 3-5: 90% $SNO_{100} = 50\%$ coverage

需要注意，一旦雪堆持水量超过 SNO_{100} ，HRU 中的积雪深度假设是均一的，即 $sno_{cov} = 1.0$ 。面积损耗曲线只在雪堆水含量在 0.0 和 SNO_{100} 之间时，对

融雪有影响。因此，如果 SNO_{100} 较小，面积损耗曲线对融雪的影响将很小。

随着 SNO_{100} 增加，面积损耗曲线将对融雪过程施加更大的影响。

Table 3-3: SWAT input variables used in snow cover calculations.

Variable name	Definition	File Name
SFTMP	T_{s-r} : Mean air temperature at which precipitation is equally likely to be rain as snow/freezing rain (°C)	.bsn
SNOCOVMX	SNO_{100} : Threshold depth of snow, above which there is 100% cover	.bsn
SNO50COV	Fraction of SNOCOVMX that provides 50% cover	.bsn
SNO_SUB	Initial snow water content in subbasin (mm H ₂ O)	.sub
SNOEB	Initial snow water content in subbasin elevation band (mm H ₂ O)	.sub

3.5 融雪

融雪由空气和雪堆温度、融雪速率，以及积雪覆盖面积控制。

在计算径流和渗漏时，融雪将被看作降雨处理。当 SWAT 计算侵蚀时，融雪降雨能量设为 0。融雪产生的水量，假设为在 24 小时内均匀分布。

3.5.1 雪堆温度

雪堆温度为前一日的日平均温度的函数，随温度以阻尼函数的形式变化 (Anderson, 1976)。前一日雪堆温度对当前日雪堆温度的影响，通过延迟因子， l_{sno} ，控制。延迟因子本质上考虑了雪堆密度、雪堆深度、暴露度和其它影响雪堆温度因素的影响。计算雪堆温度的方程为：

$$T_{snow}(t) = T_{snow}(t-1) \cdot \left(-l_{sno} \right) \bar{T}_{av} \cdot l_{sno} \quad 3.5.1$$

第3章 方程：大气水

式中： $T_{snow \ d_n}$ 为模拟日雪堆温度(°C)， $T_{snow \ d_{n-1}}$ 为前一日雪堆温度 (°C)， ℓ_{sno} 雪堆温度延迟因子， \bar{T}_{av} 当前日平均气温 (°C)。随着 ℓ_{sno} 接近 1.0，当前日平均气温对雪堆温度的作用增加，前一日雪堆温度的作用减少。

雪堆只有在其温度超过一定阈值， T_{mIt} ，时才开始融化，这一阈值是用户定义的。

3.5.2 融雪方程

SWAT 中的融雪采用 (雪堆温度与最高气温的平均值，与融雪温度阈值之差) 的线性函数计算：

$$SNO_{mIt} = b_{mIt} \cdot sno_{cov} \cdot \left[\frac{T_{snow} + T_{mx}}{2} - T_{mIt} \right] \quad 3.5.2$$

式中： SNO_{mIt} 为模拟日的融雪量(mm H₂O)， b_{mIt} 为模拟日的融雪因子 (mm H₂O/day-°C)， sno_{cov} 为积雪覆盖 HRU 的分数， T_{snow} 为模拟日的雪堆温度 (°C)， T_{mx} 为模拟日最高气温(°C)， T_{mIt} 融雪温度阈值 (°C)。

融雪因子可以最大 (夏至) 和最小值 (冬至) 之间季节性变化：

$$b_{mIt} = \frac{(b_{mIt6} + b_{mIt12})}{2} + \frac{(b_{mIt6} - b_{mIt12})}{2} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{365} \cdot (d_n - 81)\right) \quad 3.5.3$$

式中： b_{mIt} 为模拟日融雪因子 (mm H₂O/day-°C)， b_{mIt6} 为 6 月 21 日融雪因子 (mm H₂O/day-°C)， b_{mIt12} 为 12 月 21 日融雪因子(mm H₂O/day-°C)， d_n 模拟日在一年中的天数。

在农村地区，融雪因子在 1.4 to 6.9 mm H₂O/day-°C 之间变化 (Huber and Dickinson, 1988)。在城市地区，变化上限有所提高，因为机器、行人会将积雪压实

(Bengston, 1981; Westerstrom, 1981)。已报告的融雪因子在 3.0 to 8.0 mm H₂O/day-°C 之间。沥青上的融雪的融雪因子 (Westerstrom, 1984) 在 1.7 to 6.5 mm H₂O/day-°C。

Table 3-4: SWAT input variables used in snow melt calculations.

Variable name	Definition	File Name
TIMP	ℓ_{sno} : Snow temperature lag factor	.bsn
SMTMP	T_{mlt} : Threshold temperature for snow melt (°C)	.bsn
SMFMX	b_{m6} : Melt factor on June 21 (mm H ₂ O/day-°C)	.bsn
SMFMN	b_{m12} : Melt factor on December 21 (mm H ₂ O/day-°C)	.bsn

3.6 NOMENCLATURE

E_{sub} Amount of sublimation on a given day (mm H₂O)

EL Elevation (m)

P Atmospheric pressure (kPa)

R_{day} Amount of rainfall on a given day (mm H₂O)

R_h Average relative humidity for the day

SNO Water content of snow cover on current day (mm H₂O)

SNO_{100} Amount of snow above which there is 100% cover (mm H₂O)

SNO_{melt} Amount of snow melt on a given day (mm H₂O)

T_{melt} Threshold temperature for snow melt (°C)

T_{mx} Maximum air temperature for day (°C)

T_{s-r} Rain/snow boundary temperature (°C)

T_{snow} Snow pack temperature on a given day (°C)

\bar{T}_{av} Average air temperature for day (°C)

b_{melt} Melt factor for the day (mm H₂O/day-°C)

b_{m6} Melt factor for June 21 (mm H₂O/day-°C)

b_{m12} Melt factor for December 21 (mm H₂O/day-°C)

c_p Specific heat of moist air at constant pressure (1.013×10^{-3} MJ kg⁻¹ °C⁻¹)

cov_1 Snow cover areal depletion curve shape coefficient

cov_2 Snow cover areal depletion curve shape coefficient

d_n Day number of year, 1 on January 1 and 365 on December 31

e Actual vapor pressure on a given day (kPa)

e^o Saturation vapor pressure on a given day (kPa)

sno_{cov} Fraction of the HRU area covered by snow

vpd Vapor pressure deficit (kPa)

第3章 方程：大气水

- $\alpha_{0.5}$ Maximum half-hour rainfall expressed as a fraction of daily rainfall
 Δ Slope of the saturation vapor pressure curve (kPa °C⁻¹)
 γ Psychrometric constant (kPa °C⁻¹)
 λ Latent heat of vaporization (MJ kg⁻¹)
 ℓ_{sno} Snow temperature lag factor

3.7 REFERENCES

- Anderson, E.A. 1976. A point energy and mass balance model of snow cover. NOAA Technical Report NWS 19, U.S. Dept. of Commerce, National Weather Service.
- Bengston, L. 1981. Snowmelt-generated runoff in urban areas. p. 444-451. *In* B.C. Yen (ed.) Urban stormwater hydraulics and hydrology: proceedings of the Second International Conference on Urban Storm Drainage, held at Urbana, Illinois, USA, 15-19 June 1981. Water Resources Publications, Littleton, CO.
- Brunt, D. 1952. Physical and dynamical meteorology, 2nd ed. University Press, Cambridge.
- Dingman, S.L. 1994. Physical hydrology. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ.
- Doorenos, J. and W.O. Pruitt. 1977. Guidelines for predicting crop water requirements. FAO Irrig. and Drain. Paper No. 24, 2nd ed. FAO, Rome.
- Harrison, L.P. 1963. Fundamental concepts and definitions relating to humidity. *In* A. Wexler (ed.) Humidity and moisture, Vol. 3. Reinhold Publishing Company, N.Y.
- Huber, W.C. and R.E. Dickinson. 1988. Storm water management model, version 4: user's manual. U.S. Environmental Protection Agency, Athens, GA.
- Larson, L.L., and E.L. Peck. 1974. Accuracy of precipitation measurements for hydrologic modeling. Water Resources Research 10:857-863.
- Murray, F.W. 1967. On the computation of saturation vapor pressure. J. Appl. Meteor. 6:203-204.

Tetens, O. 1930. Uber einige meteorologische Begriffe. *Z. Geophys.* 6:297-309.

Westerstrom, G. 1981. Snowmelt runoff from urban plot. p. 452-459. *In* B.C. Yen (ed.) Urban stormwater hydraulics and hydrology: proceedings of the Second International Conference on Urban Storm Drainage, held at Urbana, Illinois, USA, 15-19 June 1981. Water Resources Publications, Littleton, CO.

Westerstrom, G. 1984. Snowmelt runoff from Porson residential area, Lulea, Sweden. p. 315-323. *In* Proceedings of the Third International Conference on Urban Storm Drainage held at Chalmers University, Goteborg, Sweden, June 1984.

Winter, T.C. 1981. Uncertainties in estimating the water balance of lakes. *Water Resources Bulletin* 17:82-115.

第 4 章 方程:天气模拟器

SWAT 模型需要日降水、最高和最低温度、太阳辐射、相对湿度和风速。用户可以选择读入实际观测数据，也可以根据多年月平均数据来生成日数据。

SWAT 中集成了 WXGEN 天气生成器模型 (Sharple and Williams , 1990) 来模拟气象资料，以弥补观测资料中的缺失记录。这一天气模拟器是专门针对美国开发的。如果用户更喜欢其他的模型，不同的日输入数据也可以由替代模型生成。

降雨的发生对相对湿度、太阳辐射、和温度均有重要影响。因此，天气模拟器首先独立地模拟某一天的降水，然后模拟最高和最低温度、太阳辐射和相对湿度。最后风速也会独立地模拟。

4.1 降水

降雨模拟采用偏态马科夫链 (Nicks , 1974) 或者指数马科夫链模型 (Williams , 1995) 生成。一个一级马科夫链用来定义某一天是干日还是湿日。当确定为湿日 , 则偏态马科夫链或指数马科夫链模型会用来模拟降水量。表 4.1 列出了 SWAT 用来模拟降水的输入变量。

4.1.1 湿日和干日的发生

在某一天降水的可能性根据前一天是干日或湿日 , 采用一级马科夫链来确定。湿日定义为一天降水超过 0.1mm。

对于每一个月 , 用户需要输入在前一天 $i-1$, 为湿日的情况下 , 某一天 i 为湿日的可能性 , $P_i(W/W)$, 以及在前一天 $i-1$, 为湿日的情况下 , 某一天 i 为湿日的可能性 , $P_i(W/D)$ 。根据这两个可能性 , 可以推断 :

$$P_i(D/W) = 1 - P_i(W/W) \quad 4.1.1$$

$$P_i(D/D) = 1 - P_i(W/D) \quad 4.1.2$$

式中 : $P_i(D/W)$ 为在前一天 $i-1$, 为湿日的情况下 , 某一天 i 为干日的可能性 ; $P_i(D/D)$ 为在前一天 $i-1$, 为干日的情况下 , 某一天 i 为干日的可能性。

为了定义某一天为干日或湿日 , SWAT 首先产生一个 0.0-1.0 之间的随机数。这一随机数与干-湿日可能性 $P_i(W/W)$ 或 $P_i(W/D)$ 比较。如果随机数等于或者小于干-湿日可能性 , 这一天被定义为湿日如果随机数大于干-湿日可能性 , 这一天被定义为干日。

4.1.2 降水量

有很多概率分布函数用来描述降水量的分布。SWAT提供了两个函数：偏态或者指数分布。

偏态分布是 Nicks (1974) 基于 Fiering (1967) 年用来模拟典型径流偏态分布来定义的。公式为：

$$R_{day} = \mu_{mon} + 2 \cdot \sigma_{mon} \cdot \left(\frac{\left[\left(\frac{SND_{day} - g_{mon}}{6} \right) \cdot \left(\frac{g_{mon}}{6} \right) + 1 \right]^3 - 1}{g_{mon}} \right) \quad 4.1.3$$

式中： R_{day} 为某一天的降水量 (mm H₂O) ， μ_{mon} 为该月份的日均降水量 (mm H₂O) ， σ_{mon} 为该月日降水量的标准方差， SND_{day} 为某一天的标准正态偏离， g_{mon} 为该月日降水的偏态系数。

某一天的标准正态偏离采用下式计算：

$$SND_{day} = \cos(2.283 \cdot rnd_2) \cdot \sqrt{-2 \ln(rnd_1)} \quad 4.1.4$$

式中： rnd_1 和 rnd_2 为0.0-1.0之间的随机数。

指数分布可以作为偏态分布的一种替代形式。指数分布需要的输入较少，并且在降水较少的区域应用较广。指数分布模拟日降水的公式为：

$$R_{day} = \mu_{mon} \cdot \left(\ln(rnd_1) \right)^{exp} \quad 4.1.5$$

式中： R_{day} 为某一天的降水量 (mm H₂O) ， μ_{mon} 为该月份的日均降水量 (mm H₂O) ， rnd_1 为0.0-1.0之间的随机数， exp 为1.0-2.0的指数。随着 exp 的增大，一年中异常降水事件发生数目会增加。在美国的不同地区的检验结果表明该值在1.3时模拟结果令人满意。

第 4 章 方程：天气模拟器

Table 4-1: SWAT input variables that pertain to generation of precipitation.

Variable name	Definition	File Name
PCPSIM	Precipitation input code: 1-measured, 2-generated	.cod
PR_W(1,mon)	$P_i(W/D)$: probability of a wet day following a dry day in month	.wgn
PR_W(2,mon)	$P_i(W/W)$: probability of a wet day following a wet day in month	.wgn
IDIST	Rainfall distribution code: 0-skewed, 1-exponential	.cod
REXP	<i>rexp</i> : value of exponent (required if IDIST = 1)	.cod
PCPMM(mon)	average amount of precipitation falling in month (mm H ₂ O)	.wgn
PCPD(mon)	average number of days of precipitation in month ($\mu_{mon} = PCPMM / PCPD$)	.wgn
PCPSTD(mon)	σ_{mon} : standard deviation for daily precipitation in month (mm H ₂ O)	.wgn
PCPSKW(mon)	g_{mon} : skew coefficient for daily precipitation in month	.wgn

4.2 太阳辐射 & 温度

用来产生日最高温度、最低温度和太阳辐射(Richardson, 1981; Richardson and Wright, 1984) 的方法是基于 Matalas(1967)发表的弱平稳过程来计算的。

4.2.1 日残差

最高温度、最低温度和太阳辐射的残差需要作为模拟日值的输入。残差需要是系列相关和协相关，并相关性在各个位置是常量。计算残差的公式为：

$$\chi_i(j) = A\chi_{i-1}(j) + B\varepsilon_i(j) \quad 4.2.1$$

式中： $\chi_i(j)$ 为第*i*天 3×1 的矩阵，其中的元素为：最高温度的残差 ($j=1$)，最低温度的残差 ($j=2$)，和太阳辐射的残差 ($j=3$)； $\chi_{i-1}(j)$ 为第*i-1*天 3×1 的残差矩阵； ε_i 为 3×1 的矩阵，由独立的随机部分组成；A和B为 3×3 的矩阵，

其中的元素定义可以使新序列具有系列相关和协相关系数。A和B矩阵由下式

计算：

$$A = M_1 \cdot M_0^{-1} \quad 4.2.2$$

$$B \cdot B^T = M_0 - M_1 \cdot M_0^{-1} \cdot M_1^T \quad 4.2.3$$

式中：上标-1表示矩阵的逆，上标T表示矩阵的转置。M₀和M₁定义为：

$$M_0 = \begin{bmatrix} 1 & \rho_0(2) & \rho_0(3) \\ \rho_0(2) & 1 & \rho_0(3) \\ \rho_0(3) & \rho_0(3) & 1 \end{bmatrix} \quad 4.2.4$$

$$M_1 = \begin{bmatrix} \rho_1(1) & \rho_1(2) & \rho_1(3) \\ \rho_1(1) & \rho_1(2) & \rho_1(3) \\ \rho_1(1) & \rho_1(2) & \rho_1(3) \end{bmatrix} \quad 4.2.5$$

$\rho_0(j,k)$ 为在同一天变量j和k 之间的相关系数，其中j和k的设置为：1 (最高温度)，2 (最低温度) 或3 (太阳辐射)； $\rho_1(j,k)$ 为在变量j和滞后一天的变量k 之间的相关系数。

Richardson (1982) 采用20年的气温和太阳辐射数据，确定了美国31个地区的相关系数。根据这些系数的平均值，M₀和M₁为：

$$M_0 = \begin{bmatrix} 1.000 & 0.633 & 0.186 \\ 0.633 & 1.000 & -0.193 \\ 0.186 & -0.193 & 1.000 \end{bmatrix} \quad 4.2.6$$

$$M_1 = \begin{bmatrix} 0.621 & 0.445 & 0.087 \\ 0.563 & 0.674 & -0.100 \\ 0.015 & -0.091 & 0.251 \end{bmatrix} \quad 4.2.7$$

根据方程4.2.2和4.2.3，A和B矩阵为：

$$A = \begin{bmatrix} 0.567 & 0.086 & -0.002 \\ 0.253 & 0.504 & -0.050 \\ -0.006 & -0.039 & 0.244 \end{bmatrix} \quad 4.2.8$$

$$B = \begin{bmatrix} 0.781 & 0 & 0 \\ 0.328 & 0.637 & 0 \\ 0.238 & -0.341 & 0.873 \end{bmatrix} \quad 4.2.9$$

方程4.2.8和4.2.9种定义的A和B矩阵，与方程4.2.1联合运用可以生成最高温、最低温度和太阳辐射残差的日序列。

4.2.2 模拟值

最高温度、最低温度和太阳辐射的日数值根据方程4.2.1中的残差元素与月标准方差相乘，并与月平均温度相加而得。

$$T_{mx} = \mu mx_{mon} + \chi_i \sigma mx_{mon} \quad 4.2.10$$

$$T_{mn} = \mu mn_{mon} + \chi_i \sigma mn_{mon} \quad 4.2.11$$

$$H_{day} = \mu rad_{mon} + \chi_i \sigma rad_{mon} \quad 4.2.12$$

式中： T_{mx} 为最高温度（ $^{\circ}\text{C}$ ）， μmx_{mon} 为月最高温度平均值（ $^{\circ}\text{C}$ ）， $\chi_i(1)$ 为在某一天最高温度残差， σmx_{mon} 为该月的日最高温度标准方差（ $^{\circ}\text{C}$ ）， T_{mn} 为最低温度（ $^{\circ}\text{C}$ ）， μmn_{mon} 为月最低温度平均值（ $^{\circ}\text{C}$ ）， $\chi_i(2)$ 为在某一天最低温度残差， σmn_{mon} 为该月的日最低温度标准方差（ $^{\circ}\text{C}$ ）， H_{day} 为日太阳辐射（ MJ m^{-2} ）， $\chi_i(3)$ 为在某一天太阳辐射残差， σrad_{mon} 为该月的日太阳辐射标准方差（ MJ m^{-2} ）。

用户需要输入最高和最低温度和标准偏差。对于太阳辐射标准方差，可以采用极端值和平均值之差的1/4来估算该月的标准方差：

$$\sigma rad_{mon} = \frac{H_{mx} - \mu rad_{mon}}{4} \quad 4.2.13$$

式中： $\delta radmon$ 为该月日太阳辐射标准偏差($MJ\ m^{-2}$)， Hmx 为可以到达地面的最大日太阳辐射($MJ\ m^{-2}$)， $\overline{\delta radmon}$ 为该月的日平均太阳辐射。

4.2.3 对于晴天和阴天情况的调整

最高温度和太阳辐射在多云情况下会较晴天为低。为了考虑干/湿日对最高温度和太阳辐射的影响，在方程4.2.10和4.2.12中的平均日最高温度 $\mu mxmon$ ，和平均日太阳辐射， $\mu radmon$ ，将根据干/湿日进行调整。

4.2.3.1 最高温度

连续性方程将考虑干日或湿日调整的日最高气温与该月的平均日最高气温联系起来：

$$\mu mx_{mon} \cdot days_{tot} = \mu Wmx_{mon} \cdot days_{wet} + \mu Dmx_{mon} \cdot days_{dry} \quad 4.2.14$$

式中： $\delta mxmon$ 为该月平均日最高气温 ($^{\circ}C$)， $days_{tot}$ 为该月的天数， μWmx_{mon} 为该月中湿日的平均日最高温度 ($^{\circ}C$)， $days_{wet}$ 为该月湿日的天数， μDmx_{mon} 为该月中干日的平均日最高温度 ($^{\circ}C$)， $days_{dry}$ 为该月干日的天数。

这里假设，湿日平均最高温度根据一定的分数($\mu mx_{mon} - \mu mn_{mon}$)低于干日平均最高温度：

$$\mu Wmx_{mon} = \mu Dmx_{mon} - b_T \cdot (\mu mx_{mon} - \mu mn_{mon}) \quad 4.2.15$$

式中 μWmx_{mon} 为该月中湿日的平均日最高温度($^{\circ}C$)， μDmx_{mon} 为该月中干日的平均日最高温度 ($^{\circ}C$)， b_T 为一个尺度因素，控制着由降水或者无降水所引起的温度离散程度。 μmx_{mon} 为该月平均日

第4章 方程：天气模拟器

最高温度 (°C) , μmn_{mon} 为该月平均日最低温度 (°C) 。在SWAT中, 尺度因素 b_T 设为0.5。

为了计算干日平均最高温度, 方程4.2.14和4.2.15联立求解得 μDmx_{mon} :

Dmx_{mon} :

$$\mu Dmx_{mon} = \mu mx_{mon} + b_T \cdot \frac{days_{wet}}{days_{tot}} \cdot (\mu mx_{mon} - \mu mn_{mon}) \quad 4.2.16$$

将修正的数值代入方程4.2.10, SWAT可以用下式计算湿日和干日

最高温度:

$$T_{mx} = \mu Wmx_{mon} + \chi_i \cdot \mu mx_{mon} \quad 4.2.17$$

$$T_{mx} = \mu Dmx_{mon} + \chi_i \cdot \mu mx_{mon} \quad 4.2.18$$

4.2.3.2 太阳辐射

连续性方程将考虑干日或湿日调整的太阳辐射与该月的平均日

太阳辐射联系起来:

$$\mu r_{m} \cdot \mu W_{rad} = \mu W_{rad} \cdot \mu W_{rad} + \mu D_{rad} \cdot \mu W_{rad} \quad 4.2.19$$

式中: μrad_{mon} 为该月平均日太阳辐射(MJ m⁻²), $daystot$ 为该月的天数, $\mu Wrad_{mon}$ 为该月中湿日的平均日太阳辐射(MJ m⁻²), $dayswet$ 为该月湿日的天数, $daysdry$ 为该月干日的天数。

这里假设, 湿日平均太阳辐射根据一定的分数低于干日平均最

$$\mu Wrad_{mon} = b_R \cdot \mu Drad_{mon} \quad 4.2.20$$

式中: $\mu Wrad_{mon}$ 为该月中湿日的平均日太阳辐射 (MJ m⁻²), $\mu Drad_{mon}$ 为该月中干日的平均日太阳辐射(MJ m⁻²), b_R 为一个尺度

因素，控制着由降水或者无降水所引起的温度离散程度。在SWAT中，尺度因素 bR 设为0.5。

为了计算干日平均最高温度，方程4.2.19和4.2.20联立求解得 μ

$Drad_{mon}$:

$$\mu Drad_{mon} = \frac{\mu rad_{mon} \cdot days_{tot}}{b_R \cdot days_{wet} + days_{dry}} \quad 4.2.21$$

将修正的数值代入方程4.2.12，SWAT可以用下式计算湿日和干

日太阳辐射：

$$H_{day} = \mu Wrad_{mon} + \chi_i \odot rad_{mon} \quad 4.2.22$$

$$H_{day} = \mu Drad_{mon} + \chi_i \odot rad_{mon} \quad 4.2.23$$

Table 4-2: SWAT input variables that pertain to generation of temperature and solar radiation.

Variable name	Definition	File Name
TMPSIM	Temperature input code: 1-measured, 2-generated	.cod
SLRSIM	Solar radiation input code: 1-measured, 2-generated	.cod
TMPMX(mon)	μmx_{mon} : average maximum air temperature for month (°C)	.wgn
TMPSTDMX(mon)	σmx_{mon} : standard deviation for maximum air temperature in month (°C)	.wgn
TMPMN(mon)	μmn_{mon} : average minimum air temperature for month (°C)	.wgn
TMPSTD MN(mon)	σmn_{mon} : standard deviation for minimum air temperature in month (°C)	.wgn
SOLARAV(mon)	μrad_{mon} : average daily solar radiation for month (MJ m ⁻²)	.wgn
PCPD(mon)	$days_{wei}$: average number of days of precipitation in month	.wgn

4.3 相对湿度

当采用 Penman-Monteith 方程时 SWAT 方程需要相对湿度数据来计算潜在蒸发。日平均相对湿度的计算根据月平均温度和三角形分布来计算。

4.3.1 月平均相对湿度

相对湿度定义为在某一给定温度下实际水气压与饱和水气压之比：

$$R_{hmon} = \frac{e_{mon}}{e_{mon}^o} \quad 4.3.1$$

式中： R_{hmon} 为该月平均相对湿度， e_{mon} 为该月平均温度下实际水气压 (KPa)， e_{mon}^o 为该月平均温度下饱和水气压 (KPa)。饱和水气压， e_{mon}^o ，与月平均气温相关：

$$e_{mon}^o = \exp \left[\frac{16.78 \cdot \mu t m p_{mon} - 116.9}{\mu t m p_{mon} + 237.3} \right] \quad 4.3.2$$

式中： e_{mon}^o 为该月平均温度下饱和水气压 (KPa)， $\mu t m p_{mon}$ 为该月平均温度 (°C)。该月平均温度的计算基于月最高气温和月最低气温的平均值获得。

露点温度为使实际水气压与饱和水气压相等的温度。因此，将露点温度带入方程4.3.2替换月平均温度，实际水气压可以计算为：

$$e_{mon} = \exp \left[\frac{16.78 \cdot \mu d e w_{mon} - 116.9}{\mu d e w_{mon} + 237.3} \right] \quad 4.3.3$$

式中： e_{mon} 为月平均温度下的实际水气压 (KPa)， $\mu d e w_{mon}$ 为月平均露点温度 (°C)。

4.3.2 日数据的生成

采用三角型分布来生成日相对湿度需要4个输入：月平均相对湿度，在月内所允许的最高相对湿度，在月内所允许的最小相对湿度，一个在0.0–1.0之间的随机数。

最高相对湿度值，或三角形分布的上限，根据月平均相对湿度计算：

$$R_{hUmon} = R_{hmon} + \left(-R_{hmon} \right) \cdot \exp \left(R_{hmon} - 1 \right) \quad 4.3.4$$

式中： R_{hUmon} 为在月内所能生成的最高日相对湿度， R_{hmon} 为月平均相对湿度。

最低相对湿度值，或三角形分布的下限，根据月平均相对湿度计算：

$$R_{hLmon} = R_{hmon} \cdot \left(-\exp \left(R_{hmon} \right) \right) \quad 4.3.5$$

式中： R_{hLmon} 为在月内所能生成的最低日相对湿度， R_{hmon} 为月平均相对湿度。

三角形分布采用下面两个方程中一个来生成日相对湿度值。

$$R_h = R_{hLmon} + \left[rnd_1 \cdot \left(R_{hUmon} - R_{hLmon} \right) \right] \cdot \left(R_{hmon} - R_{hLmon} \right)^{-5} \quad 4.3.6$$

$$\text{If } rnd_1 \leq \left(\frac{R_{hmon} - R_{hLmon}}{R_{hUmon} - R_{hLmon}} \right) \text{ then}$$

$$R_h = R_{hLmon} + \left[rnd_1 \cdot \left(R_{hUmon} - R_{hLmon} \right) \right] \cdot \left(R_{hmon} - R_{hLmon} \right)^{-5} \quad 4.3.6$$

$$\text{If } rnd_1 > \left(\frac{R_{hmon} - R_{hLmon}}{R_{hUmon} - R_{hLmon}} \right) \text{ then}$$

$$R_h = R_{hUmon} - \left(R_{hUmon} - R_{hmon} \right) \cdot \left[\frac{R_{hUmon} \cdot \left(-rnd_1 \right) \cdot R_{hLmon} \cdot \left(-rnd_1 \right)^{0.5}}{R_{hUmon} - R_{hmon}} \right] \quad 4.3.7$$

式中： Rh 为计算的日平均相对湿度， $rnd1$ 为模型为每一个计算日生成的随机数， $Rhmon$ 为该月平均相对湿度， $RhLmon$ 为在月内所能生成的最低日相对湿度， $RhUmon$ 为在月内所能生成的最高日相对湿度。

4.3.3 对于晴天和阴天情况的调整

为了考虑干/湿日对模拟相对湿度的影响，月平均相对湿度可根据干/湿日进行调整。

连续性方程将考虑干日或湿日调整的月平均相对湿度与该月的平均日相对湿度联系起来：

$$R_{hmon} \cdot days_{tot} = R_{hWmon} \cdot days_{wet} + R_{hDmon} \cdot days_{dry} \quad 4.3.8$$

式中： $Rhmon$ 为该月平均相对湿度， $daystot$ 为该月的天数， $dayswet$ 为该月湿日的天数， $daysdry$ 为该月干日的天数， $RhWmon$ 为该月湿日平均相对湿度， $RhDmon$ 为该月干日平均相对湿度，

这里假设，湿日平均相对湿度根据一定的分数低于干日平均相对湿度：

$$R_{hWmon} = R_{hDmon} + b_H \cdot (R_{hDmon} - R_{hLmon}) \quad 4.3.9$$

式中： $RhWmon$ 为该月湿日平均相对湿度， $RhDmon$ 为该月干日平均相对湿度， b_H 为一个尺度因素，控制着由降水或者无降水所引起的相对湿度离散程度。在SWAT中，尺度因素 b_R 设为0.9。

为了计算干日平均相对湿度，方程4.3.8和4.3.9联立求解得

$RhDmon$ ：

$$R_{hDmon} = \left(R_{hmon} - b_H \cdot \frac{days_{wet}}{days_{tot}} \right) \cdot \left(1.0 - b_H \cdot \frac{days_{wet}}{days_{tot}} \right)^{-1} \quad 4.3.10$$

为反映湿日或干日条件的影响，在方程4.3.4 和4.3.7 中，SWAT 在湿日条件下采用 R_{hmon} 替换 R_{hWmon} 在干日条件下采用 R_{hDmon} 替换 R_{hWmon} 。

Table 4-3: SWAT input variables that pertain to generation of relative humidity.

Variable name	Definition	File Name
RHSIM	Relative humidity input code: 1-measured, 2-generated	.cod
TMPMN(mon)	μmn_{mon} : average minimum air temperature for month (°C)	.wgn
TMPMX(mon)	μmx_{mon} : average maximum air temperature for month (°C)	.wgn
DEWPT(mon)	μdew_{mon} : average dew point temperature for month (°C)	.wgn
PCPD(mon)	$days_{wet}$: average number of days of precipitation in month	.wgn

4.4 最大半小时降雨量

SWAT 需要最大半小时降雨量来计算径流峰值。当模型输入为日降水量时，最大办小时降雨量根据月平均最大半小时降水数据和三角形分布来计算。当有地表径流产生时，该日的最大半小时降水也相应生成。

4.4.1 月最大半小时降雨量

对于每一个月，用户提供在整个数据周期内的最大半小时降雨量，这些极值用来计算代表性月最大半小时降水分数。

在计算每一个月最大半小时降水分数之前，通过计算三个月的均值来平滑最大半小时降水量：

$$R_{0.5sm(mon)} = \frac{R_{0.5x(mon-1)} + R_{0.5x(mon)} + R_{0.5x(mon+1)}}{3} \quad 4.4.1$$

第4章 方程：天气模拟器

式中： $R_{0.5sm(mon)}$ 为给定月份平滑后的最大半小时降水 (mm H₂O)， $R_{0.5x}$ 为给定月份最大半小时降水极值(mm H₂O)。确定平滑最大半小时降水后，代表性月最大半小时降水分数采用下式计算：

$$\alpha_{0.5mon} = adj_{0.5\alpha} \cdot \left[1 - \exp \left(\frac{R_{0.5sm(mon)}}{\mu_{mon} \cdot \ln \left(\frac{0.5}{yrs \cdot days_{wet}} \right)} \right) \right] \quad 4.4.2$$

式中： $\alpha_{0.5mon}$ 为给定月份平均半小时降水分数， $adj_{0.5\alpha}$ 为调整因子， $R_{0.5sm}$ 为给定月份平滑后的最大半小时降水， μ_{mon} 为给定月份平均日降水量(mm H₂O)， yrs 为用来获取月半小时降水极值数据的年数， $days_{wet}$ 为给定月份的湿日天数。调整因子允许用户调整对半小时降水分数和径流峰值的模拟。

4.4.2 日数据的生成

采用三角型分布来生成日最大半小时降水分数需要4个输入：月平均半小时降水分数，在月内所允许的最高半小时降水分数，在月内所允许的最小半小时降水分数，一个在0.0–1.0之间的随机数。

最大半小时降水分数，或三角形分布的上限，根据日降雨量计算：

$$\alpha_{0.5U} = 1 - \exp \left(\frac{-125}{R_{day} + 5} \right) \quad 4.4.3$$

式中： $\alpha_{0.5U}$ 为在特定日所能生成的最大半小时分数， R_{day} 为在特定日的降水量。

最小半小时降水分数，或三角形分布的下限， $\alpha_{0.5L}$ ，设为0.02083。

三角形分布采用下面两个方程中一个来生成日最大半小时降水分数。

$$\text{If } rnd_1 \leq \left(\frac{\alpha_{0.5mon} - \alpha_{0.5L}}{\alpha_{0.5U} - \alpha_{0.5L}} \right) \text{ then}$$

$$\alpha_{0.5} = \alpha_{0.5L} + rnd_1 \cdot (\alpha_{0.5U} - \alpha_{0.5L}) \quad 4.4.4$$

$$\text{If } rnd_1 > \left(\frac{\alpha_{0.5mon} - \alpha_{0.5L}}{\alpha_{0.5U} - \alpha_{0.5L}} \right) \text{ then}$$

$$\alpha_{0.5} = \alpha_{0.5U} - (\alpha_{0.5U} - \alpha_{0.5mon}) \left[\frac{\alpha_{0.5U} (-rnd_1) - \alpha_{0.5L} (-rnd_1)}{\alpha_{0.5U} - \alpha_{0.5mon}} \right]^{0.5} \quad 4.4.5$$

式中： $\alpha_{0.5}$ 为日最大半小时降水分数， $\alpha_{0.5mon}$ 为给定月份平均最大半小时降水分数， rnd_1 为模型为每一个计算日生成的随机数， $\alpha_{0.5L}$ 为在特定日所能生成的最小半小时分数， $\alpha_{0.5U}$ 为在特定日所能生成的最大半小时分数，

Table 4-4: SWAT input variables that pertain to generation of maximum half-hour rainfall.

Variable name	Definition	File Name
RAINHHMX(mon)	$R_{0.5x}$: extreme half-hour rainfall for month (mm H ₂ O)	.wgn
APM	$adj_{0.5\alpha}$: peak rate adjustment factor	.bsn
PCPMM(mon)	average amount of precipitation falling in month (mm H ₂ O)	.wgn
PCPD(mon)	$days_{wei}$: average number of days of precipitation in month ($\mu_{mon} = PCPMM / PCPD$)	.wgn
RAIN_YRS	yrs : number of years of data used to obtain values for RAINHHMX	.wgn
PRECIPITATION	R_{day} : amount of rain falling on a given day (mm H ₂ O)	.pcp

4.5 风速

当采用Penman-Monteith方程时SWAT方程需要风速数据来计算潜在蒸散发。

日平均风速的计算根据修正指数分布方程来计算：

$$\mu_{10m} = \mu_{wnd_{mon}} \cdot \left(\ln(rnd_1) \right) \quad 4.5.1$$

第 4 章 方程：天气模拟器

式中： μ_{10m} 为日平均风速 (m s^{-1}), $\mu_{wnd_{mon}}$ 为月平均风速(m s^{-1}), $rnd1$ 为模型为每一个计算日生成的随机数。

Table 4-5: SWAT input variables that pertain to generation of wind speed.

Variable name	Definition	File Name
WNDSIM	Wind speed input code: 1-measured, 2-generated	.cod
WNDV(mon)	$\mu_{wnd_{mon}}$: Average wind speed in month (m/s)	.wgn

4.6 NOMENCLATURE

- A 3×3 matrix of elements defined to ensure serial and cross correlation of generated temperature and radiation values $A = M_1 \cdot M_0^{-1}$
- B 3×3 matrix of elements defined to ensure serial and cross correlation of generated temperature and radiation values $B \cdot B^T = M_0 - M_1 \cdot M_0^{-1} \cdot M_1^T$
- H_{day} Solar radiation reaching ground on current day of simulation ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)
- H_{MX} Maximum possible solar radiation ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)
- M_0 3×3 matrix of correlation coefficients between maximum temperature, minimum temperature and solar radiation on same day
- M_1 3×3 matrix of correlation coefficients between maximum temperature, minimum temperature and solar radiation on consecutive days
- $P_i(D/D)$ Probability of a dry day on day i given a dry day on day $i - 1$
- $P_i(D/W)$ Probability of a dry day on day i given a wet day on day $i - 1$
- $P_i(W/D)$ Probability of a wet day on day i given a dry day on day $i - 1$
- $P_i(W/W)$ Probability of a wet day on day i given a wet day on day $i - 1$
- $R_{0.5sm}$ Smoothed maximum half-hour rainfall for a given month ($\text{mm H}_2\text{O}$)
- $R_{0.5x}$ Extreme maximum half-hour rainfall for the specified month ($\text{mm H}_2\text{O}$)
- R_{day} Amount of rainfall on a given day ($\text{mm H}_2\text{O}$)
- R_h Average relative humidity for the day
- R_{hDmon} Average relative humidity of the month on dry days
- R_{hLmon} Smallest relative humidity value that can be generated on a given day in the month
- R_{hUmon} Largest relative humidity value that can be generated on a given day in the month
- R_{hWmon} Average relative humidity for the month on wet days
- R_{hmon} Average relative humidity for the month
- SND_{day} Standard normal deviate for the day
- T_{mn} Minimum air temperature for day ($^{\circ}\text{C}$)

T_{mx}	Maximum air temperature for day ($^{\circ}\text{C}$)
$adj_{0.5\alpha}$	Peak rate adjustment factor
b_H	Scaling factor that controls the degree of deviation in relative humidity caused by the presence or absence of precipitation
b_R	Scaling factor that controls the degree of deviation in solar radiation caused by the presence or absence of precipitation
b_T	Scaling factor that controls the degree of deviation in temperature caused by the presence or absence of precipitation
$days_{dry}$	Number of dry days in the month
$days_{tot}$	Total number of days in the month
$days_{wet}$	Number of wet days in the month
e_{mon}	Actual vapor pressure at the mean monthly temperature (kPa)
e_{mon}°	Saturation vapor pressure at the mean monthly temperature (kPa)
g_{mon}	Skew coefficient for daily precipitation in the month
$rexp$	Exponent for exponential precipitation distribution
rnd_1	Random number between 0.0 and 1.0
rnd_2	Random number between 0.0 and 1.0
yrs	Number of years of rainfall data used to obtain values for monthly extreme half-hour rainfalls
$\alpha_{0.5}$	Maximum half-hour rainfall expressed as a fraction of daily rainfall
$\alpha_{0.5L}$	Smallest half-hour rainfall fraction that can be generated on a given day
$\alpha_{0.5mon}$	Average maximum half-hour rainfall fraction for the month
$\alpha_{0.5U}$	Largest half-hour rainfall fraction that can be generated on a given day
ε_i	3×1 matrix of independent random components
σ_{mon}	Standard deviation of daily rainfall (mm H_2O) for the month
σmn_{mon}	Standard deviation for daily minimum temperature during the month ($^{\circ}\text{C}$)
σmx_{mon}	Standard deviation for daily maximum temperature during the month ($^{\circ}\text{C}$)
σrad_{mon}	Standard deviation for daily solar radiation during the month (MJ m^{-2})
$\rho_0(j,k)$	Correlation coefficient between variables j and k on the same day where j and k may be set to 1 (maximum temperature), 2 (minimum temperature) or 3 (solar radiation)
$\rho_1(j,k)$	Correlation coefficient between variable j and k with variable k lagged one day with respect to variable j
μ_{mon}	Mean daily rainfall (mm H_2O) for the month
μDmx_{mon}	Average daily maximum temperature of the month on dry days ($^{\circ}\text{C}$)
$\mu D rad_{mon}$	Average daily solar radiation of the month on dry days (MJ m^{-2})
μWmx_{mon}	Average daily maximum temperature of the month on wet days ($^{\circ}\text{C}$)
$\mu W rad_{mon}$	Average daily solar radiation of the month on wet days (MJ m^{-2})
μdew_{mon}	Average dew point temperature for the month ($^{\circ}\text{C}$)
μmn_{mon}	Average daily minimum temperature for the month ($^{\circ}\text{C}$)
μmx_{mon}	Average daily maximum temperature for the month ($^{\circ}\text{C}$)
μrad_{mon}	Average daily solar radiation for the month (MJ m^{-2})
μtmp_{mon}	Mean air temperature for the month ($^{\circ}\text{C}$)

第 4 章 方程 : 天气模拟器

$\mu_{wnd_{mon}}$ Average wind speed for the month (m s^{-1})

μ_{10m} Mean wind speed for the day at height of 10 meters (m s^{-1})

$\chi_i(j)$ 3×1 matrix for day i whose elements are residuals of maximum temperature ($j = 1$), minimum temperature ($j = 2$) and solar radiation ($j = 3$),

4.7 REFERENCES

- Fiering, M.B. 1967. Streamflow synthesis. Harvard University Press, Cambridge.
- Matalas, N.C. 1967. Mathematical assessment of synthetic hydrology. *Water Resources Res.* 3(4):937-945.
- Nicks, A.D. 1974. Stochastic generation of the occurrence, pattern, and location of maximum amount of daily rainfall. p. 154-171. *In Proc. Symp. Statistical Hydrology*, Aug.-Sept. 1971, Tuscon, AZ. U.S. Department of Agriculture, Misc. Publ. No. 1275.
- Richardson, C.W. 1982. Dependence structure of daily temperature and solar radiation. *Trans. ASAE* 25(3):735-739.
- Richardson, C.W. 1981. Stochastic simulation of daily precipitation, temperature, and solar radiation. *Water Resources Res.* 17(1):182-190.
- Richardson, C.W. and D.A. Wright. 1984. WGEN: a model for generating daily weather variables. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS-8.
- Sharpley, A.N. and J.R. Williams, eds. 1990. EPIC-Erosion Productivity Impact Calculator, 1. model documentation. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Tech. Bull. 1768.
- Williams, J.R. 1995. Chapter 25. The EPIC Model. p. 909-1000. *In Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications. Highlands Ranch, CO.

第 5 章 方程:气候自定义

SWAT 可以模拟山区地形对气温和降水的影响。模型也可以修改气候输入，来模拟气候变化的影响。

5.1 高程带

地形雨在世界的某些地方是显著的现象。为考虑地形对降水和温度的影响，SWAT 允许在每个子流域中定义最多十个高程带。并采用考虑不同递减率 和测站高程与高程带高程之差函数来计算不同高程带的降水和最高和最低温度。对于降水：

$$R_{band} = R_{day} + \left(EL_{band} - EL_{gage} \right) \frac{plaps}{1000} \text{ when } R_{day} > 0.01 \quad 5.1.1$$

式中： R_{band} 为高程带的降水量(mm H₂O)， R_{day} 为测站实测值获模拟值(mm H₂O)， EL_{band} 为高程带的平均高程(m)， EL_{gage} 为测站高程(m)， $plaps$ 为降水递减率 (mm H₂O/km)，1000为转换m为km的因子。对于温度：

$$T_{mx,band} = T_{mx} + \left(EL_{band} - EL_{gage} \right) \frac{tlaps}{1000} \quad 5.1.2$$

$$T_{mn,band} = T_{mn} + \left(EL_{band} - EL_{gage} \right) \frac{tlaps}{1000} \quad 5.1.3$$

$$\bar{T}_{av,band} = \bar{T}_{av} + \left(EL_{band} - EL_{gage} \right) \frac{tlaps}{1000} \quad 5.1.4$$

式中： $T_{mx,band}$ 为高程带的最大降水量(mm H₂O)， $T_{mn,band}$ 为高程带的最小降水量(mm H₂O)， $\bar{T}_{av,band}$ 为高程带的日平均温度(°C)， T_{mx} 为测站实测值获模拟最高日气温(°C)， T_{mn} 为测站实测值获模拟最低日气温(°C)， \bar{T}_{av} 为测站实测值获模拟平均日气温(°C)， EL_{band} 为高程带的平均高程(m)， EL_{gage} 为测站高程(m)， $tlaps$ 为气温递减率(°C/km)，1000为转换m为km的因子。

计算子流域中每个高程带的降水和气温之后，新的子流域平均降水和气温用下式计算：

$$R_{day} = \sum_{bnd=1}^b R_{band} \cdot fr_{bnd} \quad 5.1.5$$

$$T_{mx} = \sum_{bnd=1}^b T_{mx,band} \cdot fr_{bnd} \quad 5.1.6$$

$$T_{mn} = \sum_{bnd=1}^b T_{mn,band} \cdot fr_{bnd} \quad 5.1.7$$

$$\bar{T}_{av} = \sum_{bnd=1}^b \bar{T}_{av,band} \cdot fr_{bnd} \quad 5.1.8$$

式中： R_{day} 为考虑地形因素调整后的日平均降水(mm H₂O)， T_{mx} 为考虑地形因素调整后的日最高温度(°C)， T_{mn} 为考虑地形因素调整后的日最低温度(°C)， \bar{T}_{av} 为考虑地形因素调整后的平均日气温(°C)， R_{band} 为高程带***bnd*** 内的降水量(mm H₂O)， $T_{mx,band}$ 为高程带***bnd*** 内的最高日气温(°C)， $T_{mn,band}$ 为高程带***bnd*** 内的最低日气温(°C)， $\bar{T}_{av,band}$ 为为高程带***bnd*** 内的平均日气温(°C)， fr_{bnd} 为在**高程带内**的面积占子流域面积的分数， b 为子流域内**高程带数量**。

在每一个高程带内模拟的过程包括雪的累积、升华和融化。与降水和气温数据一样，在升华和溶雪在每一个高程带内确定以后，可以计算子流域平均值。

Table 5-1: SWAT input variables that pertain to orographic effects.

Variable Name	Definition	Input File
ELEVB	EL_{band} : Elevation at center of the elevation band (m)	.sub
ELEVB_FR	fr_{band} : Fraction of subbasin area within the elevation band.	.sub
WELEV	EL_{gage} : Elevation of recording gage whose data is used to calculate values in .wgn file (m)	.wgn
ELEVATION	EL_{gage} : Elevation of precipitation recording gage (m)	.pcp
ELEVATION	EL_{gage} : Elevation of temperature recording gage (m)	.tmp
PLAPS	$plaps$: Precipitation 递减率 (mm H ₂ O/km)	.sub
TLAPS	$tlaps$: Temperature 递减率 (°C/km)	.sub
PRECIPITATION	R_{day} : Daily precipitation (mm H ₂ O)	.pcp
MAX TEMP	T_{mx} : Daily maximum temperature (°C)	.tmp
MIN TEMP	T_{mn} : Daily minimum temperature (°C)	.tmp

5.2 气候变化

气候变化对水供给的影响是一个主要研究领域。SWAT 可以修改模型的输入数据（降水、相对湿度、风速、潜在蒸散发和天气模拟参数）来模拟气候变化。一个简易的方法是对不同的气候输入数据加一个调整因子。

SWAT 允许用户再每一个子流域中调整降水、气温、太阳辐射、相对湿度以及二氧化碳。对于降水、气温、太阳辐射、相对湿度的调整是直接的：

$$R_{day} = R_{day} \cdot \left(1 + \frac{adj_{pcp}}{100} \right) \quad 5.2.1$$

式中： R_{day} 为一天中的降水量(mm H₂O)， adj_{pcp} 为降水变化百分比。

$$T_{mx} = T_{mx} + adj_{tmp} \quad 5.2.2$$

式中： T_{mx} 为日最高气温 (°C)， adj_{tmp} 为气温变化 (°C)。

$$T_{mn} = T_{mn} + adj_{tmp} \quad 5.2.3$$

式中： T_{mn} 为日最低气温（°C）， adj_{tmp} 为气温变化（°C）。

$$\bar{T}_{av} = \bar{T}_{av} + adj_{tmp} \quad 5.2.4$$

式中： \bar{T}_{av} 为日平均气温（°C）， adj_{tmp} 为气温变化（°C）。

$$H_{day} = H_{day} + adj_{rad} \quad 5.2.5$$

式中： H_{day} 为日太阳辐射（°C）， adj_{rad} 为太阳辐射变化（MJ m⁻² d⁻¹）。

$$R_h = R_h + adj_{hmd} \quad 5.2.6$$

式中： R_h 为日相对湿度（°C）， adj_{hmd} 为相对湿度变化分数。

SWAT允许调整相的月变化。随着二氧化碳的增加，植物生产力增加、植物需水下降。考虑二氧化碳水平对植物需水影响的方程将在第7章和第18章介绍。当模拟二氧化碳变化影响时，必须采用Penman-Monteith 方程来计算潜在蒸散发。这一方法已经被修正用来考虑二氧化碳对潜在蒸散发的影响。

Table 5-2: SWAT input variables that pertain to climate change.

Variable Name	Definition	Input File
RFINC(mon)	adj_{pcp} : % change in rainfall for month	.sub
TMPINC(mon)	adj_{tmp} : increase or decrease in temperature for month (°C)	.sub
RADINC(mon)	adj_{rad} : increase or decrease in solar radiation reaching earth's surface for month (MJ m ⁻²)	.sub
HUMINC(mon)	adj_{hmd} : increase or decrease in relative humidity for month	.sub
CO2	CO ₂ : carbon dioxide level in subbasin (ppmv)	.sub
IPET	Potential evapotranspiration method	.cod

5.3 NOMENCLATURE

CO₂Concentration of carbon dioxide in the atmosphere (ppmv)

第5章 方程：气候自定义

- EL_{band} Mean elevation in the elevation band (m)
 EL_{gage} Elevation at the precipitation, temperature, or weather generator data recording gage (m)
 H_{day} Solar radiation reaching ground on current day of simulation ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)
 R_{band} Precipitation falling in the elevation band ($\text{mm H}_2\text{O}$)
 R_{day} Amount of rainfall on a given day ($\text{mm H}_2\text{O}$)
 R_h Average relative humidity for the day
 T_{mn} Minimum air temperature for day ($^{\circ}\text{C}$)
 $T_{mn,band}$ Minimum daily temperature in the elevation band ($^{\circ}\text{C}$)
 T_{mx} Maximum air temperature for day ($^{\circ}\text{C}$)
 $T_{mx,band}$ Maximum daily temperature in the elevation band ($^{\circ}\text{C}$)
 \bar{T}_{av} Mean air temperature for day ($^{\circ}\text{C}$)
 $\bar{T}_{av,band}$ Mean daily temperature in the elevation band ($^{\circ}\text{C}$)
- adj_{hmd} Change in relative humidity expressed as a fraction
 adj_{pcp} % change in rainfall
 adj_{rad} Change in radiation ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)
 adj_{tmp} Change in temperature ($^{\circ}\text{C}$)
 fr_{band} Fraction of subbasin area within the elevation band
 $plaps$ Precipitation 递减率 ($\text{mm H}_2\text{O}/\text{km}$)
 $tlaps$ Temperature 递减率 ($^{\circ}\text{C}/\text{km}$)

第 6 章 方程:地表径流

当地表供水大于下渗时，地表径流发生。当向干燥土壤供水时，供水率和下渗率可能是相同的。但是下渗率随着土壤湿度增加而下降。当供水速率大于下渗速率，地表洼地开始蓄水。如果供水速率继续大于下渗速率，一旦所有的第洼地填满，地表径流就发生了。

SWAT 中采用两种方法来计算地表径流 SCS 径流曲线数法(SCS ,1972)和 the Green & Ampt 下渗法 (1911)。

6.1 径流量:SCS 径流曲线数法

SCS方程为经验模型，在1950s开始广泛应用。它是20多年美国农业流域降雨 - 径流关系研究的成果。这种方法的研究为在不通土地利用和土壤类型估计径流量提供了统一的基础 (Rallison and Miller, 1981).

SCS径流曲线数方程为 (SCS , 1972) :

$$Q_{surf} = \frac{R_{day} - I_a}{R_{day} - I_a + S} \quad 6.1.1$$

式中： Q_{surf} 为累积径流量或净雨(mm H₂O) R_{day} 为第*i*天的降水量(mm H₂O) I_a 为初损，包括：地表蓄水、截留和产流前的下渗(mm H₂O)， S 为持蓄参数(mm H₂O)。持蓄参数由于土地利用、土壤类型、管理措施和坡度的不同空间变化，由于土壤含水量的不通时间变化。持蓄系数定义为：

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad 6.1.2$$

式中： CN 为模拟日的曲线数。初损， I_a ，通常估计为 $0.2S$ ，那么方程6.1.1变为：

$$Q_{surf} = \frac{R_{day} - 0.2S}{R_{day} + 0.8S} \quad 6.1.3$$

当 $R_{day} > I_a$ 时径流发生。方程6.1.3的对于不通曲线数的图形解见图6-1。

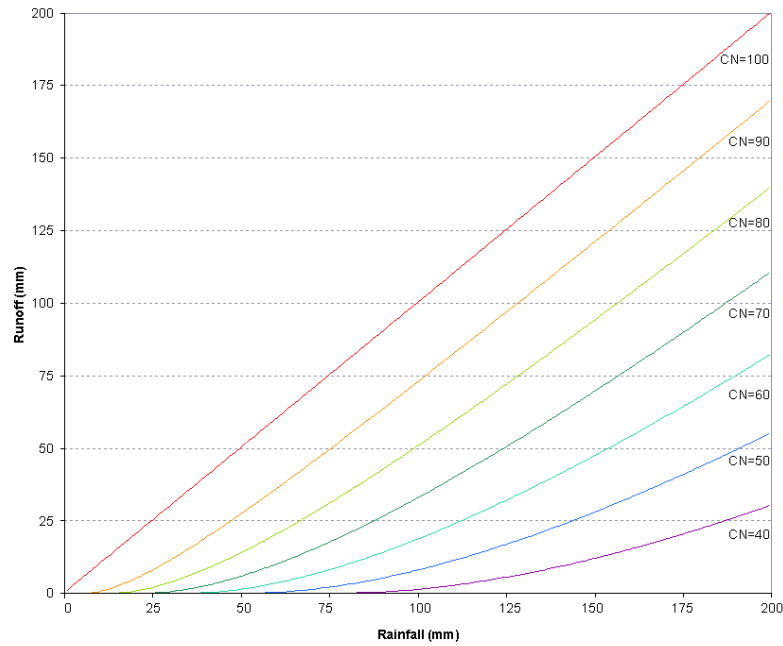


Figure 6-1: Relationship of runoff to rainfall in SCS curve number method.

6.1.1 SCS CURVE NUMBER

SCS 曲线数为土壤下渗能力、土地利用和前期土壤水分条件的函数。对于湿度条件 II 下的典型的曲线数列在表 6-1、6-2 和 6-3，根据不同的土地覆盖和土壤类型 (SCS Engineering Division, 1986)。这些值适用于坡度为 5% 的条件。

Table 6-1: Runoff curve numbers for cultivated agricultural lands

Cover		Hydrologic condition	Hydrologic Soil Group			
Land Use	Treatment or practice		A	B	C	D
Fallow	Bare soil	---	77	86	91	94
		Poor	76	85	90	93
		Good	74	83	88	90
Row crops	Straight row	Poor	72	81	88	91
		Good	67	78	85	89

* Crop residue cover applies only if residue is on at least 5% of the surface throughout the year.

第 6 章 方程：地表径流

	Straight row w/ residue	Poor	71	80	87	90
		Good	64	75	82	85
	Contoured	Poor	70	79	84	88
		Good	65	75	82	86
	Contoured w/ residue	Poor	69	78	83	87
		Good	64	74	81	85
	Contoured & terraced	Poor	66	74	80	82
		Good	62	71	78	81
	Contoured & terraced w/ residue	Poor	65	73	79	81
		Good	61	70	77	80
Small grains	Straight row	Poor	65	76	84	88
		Good	63	75	83	87
	Straight row w/ residue	Poor	64	75	83	86

Table 6-1, cont.: Runoff curve numbers for cultivated agricultural lands

Cover

Land Use	Treatment or practice	Hydrologic condition	Hydrologic Soil Group				
			A	B	C	D	
	Contoured	Good	60	72	80	84	
		Poor	63	74	82	85	
	Contoured w/ residue	Good	61	73	81	84	
		Poor	62	73	81	84	
	Contoured & terraced	Good	60	72	80	83	
		Poor	61	72	79	82	
	Contoured & terraced w/ residue	Good	59	70	78	81	
		Poor	60	71	78	81	
	Close-seeded or broadcast legumes or rotation	Straight row	Good	58	69	77	80
			Poor	66	77	85	89
Contoured		Good	58	72	81	85	
		Poor	64	75	83	85	
Contoured & terraced		Good	55	69	78	83	
		Poor	63	73	80	83	
		Good	51	67	76	80	

Table 6-2: Runoff curve numbers for other agricultural lands

Cover Type	Hydrologic condition	Hydrologic Soil Group			
		A	B	C	D
Pasture, grassland, or range—continuous forage for grazing ⁵	Poor	68	79	86	89
	Fair	49	69	79	84
	Good	39	61	74	80
Meadow—continuous grass, protected from grazing and generally mowed for hay	- - - -	30	58	71	78
Brush—brush-weed-grass mixture with brush the major element ⁶	Poor	48	67	77	83
	Fair	35	56	70	77
	Good	30	48	65	73
Woods—grass combination (orchard or tree farm)	Poor	57	73	82	86
	Fair	43	65	76	82
	Good	32	58	72	79
Woods ⁷	Poor	45	66	77	83
	Fair	36	60	73	79
	Good	30	55	70	77
Farmsteads—buildings, lanes, driveways, and surrounding lots.	- - - -	59	74	82	86

⁵ *Poor*: < 50% ground cover or heavily grazed with no mulch; *Fair*: 50 to 75% ground cover and not heavily grazed; *Good*: > 75% ground cover and lightly or only occasionally grazed

⁶ *Poor*: < 50% ground cover; *Fair*: 50 to 75% ground cover; *Good*: > 75% ground cover

⁷ *Poor*: Forest litter, small trees, and brush are destroyed by heavy grazing or regular burning; *Fair*: Woods are grazed but not burned, and some forest litter covers the soil; *Good*: Woods are protected from grazing, and litter and brush adequately cover the soil.

Table 6-3: Runoff curve numbers for urban areas[§]

Cover		Hydrologic Soil Group				
Cover Type	Hydrologic condition	Average % impervious area	A	B	C	D
Fully developed urban areas						
Open spaces (lawns, parks, golf courses, cemeteries, etc.) [†]	Poor		68	79	86	89
	Fair		49	69	79	84
	Good		39	61	74	80
Impervious areas:						
Paved parking lots, roofs, driveways, etc. (excl. right-of-way)	----		98	98	98	98
Paved streets and roads; open ditches (incl. right-of-way)	----		83	89	92	93
Gravel streets and roads (including right-of-way)	----		76	85	89	91
Dirt streets and roads (including right-of way)	----		72	82	87	89
Table 6-3, continued: Runoff curve number for urban areas						
Cover		Hydrologic Soil Group				
Cover Type	Hydrologic condition	Average % impervious area	A	B	C	D
Urban districts:						
Commercial and business		85%	89	92	94	95
Industrial		72%	81	88	91	93
Residential Districts by average lot size:						
1/8 acre (0.05 ha) or less (town houses)		65%	77	85	90	92
1/4 acre (0.10 ha)		38%	61	75	83	87
1/3 acre (0.13 ha)		30%	57	72	81	86
1/2 acre (0.20 ha)		25%	54	70	80	85
1 acre (0.40 ha)		20%	51	68	79	84
2 acres (0.81 ha)		12%	46	65	77	82
Developing urban areas:						
Newly graded areas (pervious areas only, no vegetation)			77	86	91	94

6.1.1.1 土壤水文组

美国自然资源保护局 (NRCS) 根据下渗特征将土壤分为四个组。

NRSCS 土壤调查组 (1996) 定义水文组为：在相似暴雨和覆被条件下具有相似产流能力的一组土壤。影响产流能力的土壤特性为影响在裸土 (非冻土) 长时间湿润后的最小下渗速率的因素。这些土壤特性包括：随季节变化的水位、饱和水力传导度以及弱透水层的深度。土壤

[§] SWAT will automatically adjust curve numbers for impervious areas when IURBAN and URBLU are defined in the .hru file. Curve numbers from Table 6-3 should **not** be used in this instance.

[†] *Poor*: grass cover < 50%; *Fair*: grass cover 50 to 75%; *Good*: grass cover > 75%

可以划分为四个组：A、B、C 和 D，或三个具有双重性质的组：A/D、B/D 和 C/D。不通类型的定义分别为：

A: (低产流能力)。土壤具有高下渗速率，即使在完全湿润的情况下。主要由较深的、排水条件好的沙粒或砾石组成。水传输速率高。

B: 在完全湿润的情况下，土壤具有中等下渗速率。主要为中等深度或较深，排水条件中等或较好土壤，中等精细和中等粗糙质地的土壤。水传输速率中等。

C: 在完全湿润的情况下，土壤具有较小的下渗速率。通常含有阻止水分向下运动的土壤层，或者由较精细或精细质地土粒组成。水传输能力较慢。

D: (高产流能力)。土壤在完全湿润条件下的下渗速率很小。主要为具有高膨胀性的黏土组成，具有永久水位的土壤，在地表或近地表具有黏土层的土壤。水传输速率很低。

对于可以充分排水的某些湿润土壤可以用双重属性的水文组来表示。第一个字母表示有排水，第二个字母表示无排水。只有自然条件被划分为类型 D 的土壤被赋予双重类型。附录 D 中给出了美国土壤及其水文组。

6.1.1.2 前期土壤湿润条件

SCS 定义了三中前期湿度条件：I - 干旱（凋萎点），II - （平均湿度），和 III - 湿润（田间持水量）。湿润条件 I 的曲线数最低。湿润条件 I 和 II 的曲线数可以用下式计算：

$$CN_1 = CN_2 - \frac{20 \cdot (100 - CN_2)}{(100 - CN_2 + \exp[1.533 - 0.0636 \cdot (100 - CN_2)])} \quad 6.1.4$$

$$CN_3 = CN_2 \cdot \exp[0.00673 \cdot (100 - CN_2)] \quad 6.1.5$$

式中： CN_1 为湿润条件 I 的曲线数， CN_2 为湿润条件 II 的曲线数， CN_3 为湿润条件 III 的曲线数。

持蓄参数随土壤剖面含水量的变化根据下式计算：

$$S = S_{\max} \cdot \left(1 - \frac{SW}{W + \exp[w_1 - w_2 \cdot SW]} \right) \quad 6.1.6$$

式中： S 为给定含水量的持蓄参数（mm）， S_{\max} 为持蓄参数可能的最大值（mm）， SW 为土壤剖面含水量减去凋萎点含水量（mm H₂O）， w_1 和 w_2 为形状系数。最大持蓄参数值， S_{\max} ，根据方程 6.1.2 和 CN_1 来求解。

形状系数通过求解方程 6.1.6，假设：

- 1) 湿润条件 I 曲线数的持蓄参数与凋萎点土壤含水量相对应，
- 2) 湿润条件 III 曲线数的持蓄参数与田间持水量土壤含水量相对应，
- 3) 土壤曲线数为 99 ($S = 2.54$)，当完全饱和时。

第 6 章 方程：地表径流

$$w_1 = \ln \left[\frac{FC}{1 - S_3 \cdot S_{\max}^{-1}} - FC \right] + w_2 \cdot FC \quad 6.1.7$$

$$w_2 = \frac{\left(\ln \left[\frac{FC}{1 - S_3 \cdot S_{\max}^{-1}} - FC \right] - \ln \left[\frac{SAT}{1 - 2.54 \cdot S_{\max}^{-1}} - SAT \right] \right)}{\ln(SAT - FC)} \quad 6.1.8$$

式中： w_1 为第一形状系数， w_2 为第二形状系数， FC 为在田间持水量时的土壤剖面含水量($\text{mm H}_2\text{O}$)， S_3 为湿润条件III曲线数的持蓄参数， S_{\max} 为湿润条件I曲线数的持蓄参数， SAT

为在完全饱和时的土壤剖面含水量($\text{mm H}_2\text{O}$)，2.54为土壤曲线数为99的持蓄参数

当表土为冻土时，持蓄参数采用下式修正：

$$S_{frz} = S_{\max} \cdot \left[1 - \exp(-0.000862 \cdot S) \right] \quad 6.1.9$$

式中： S_{frz} 为对冻土条件调整后的持蓄参数 (mm)， S 为采用6.1.6计算的给定含水量的持蓄参数 (mm)， S_{\max} 为持蓄参数可能的最大值 (mm)。

根据土壤含水量调整的日曲线数值通过重置式 6.1.2 并代入相应湿润条件的持蓄参数求得：

$$CN = \frac{25400}{\ln(S + 254)} \quad 6.1.10$$

式中： CN 为模拟日期的曲线数， S 为相应湿润条件的持蓄参数

6.1.1.3 坡度调整

表中所提供的湿润条件 II 曲线数是针对 5% 坡度条件的。Williams (1995) 开发了下面的方程来针对不通的坡度调整曲线数：

$$CN_{2s} = \frac{CN_3 - CN_2}{3} \left[1 - 2 \cdot \exp(-13.86 \cdot slp) \right] + CN_2 \quad 6.1.11$$

式中： CN_{2s} 为坡度调整后的湿润条件II曲线数， CN_3 为默认5%坡度的湿润条件III曲线数， CN_2 为默认5%坡度的湿润条件II曲线数， slp 为子流域百分数坡度。如果用户希望调整曲线数的坡度效应，调整需要在输入曲线数到管理文件之前进行。

Table 6-1: SWAT input variables that pertain to surface runoff calculated with the SCS curve number method.

Variable Name	Definition	Input File
IEVENT	Rainfall, runoff, routing option.	.cod
PRECIPITATION	R_{day} : Daily precipitation (mm H ₂ O)	.pcp
CN2	CN_2 : Moisture condition II curve number	.mgt
CNOP	CN_2 : Moisture condition II curve number	.mgt

6.2 径流量：GREEN & AMPT 下渗法

GREEN & AMPT 方程假设地表永远存在多余水分来预测下渗(Green & Ampt, 1911)。方程假设土壤剖面为均匀的且前土壤含水量均匀地分布在剖面中。随着水下渗进入土壤，模型假设在湿峰以上的土壤完全饱和，在湿峰处含水量急剧变化。图6-2 为Green & Ampt方程模拟的土壤水分随深度的变化与实际情况的对比。

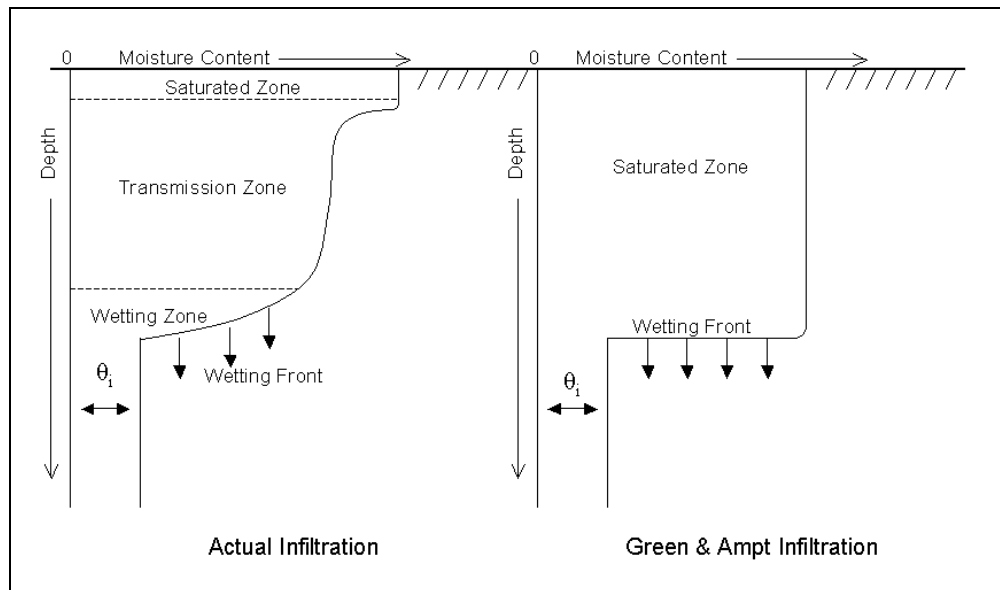


Figure 6-2: Comparison of moisture content distribution modeled by Green & Ampt and a typical observed distribution.

Mein and Larson (1973) 开发了一种方法来确定采用 Green & Ampt 方程下渗蓄水时间。Green-Ampt Mein-Larson 超渗雨量方法引入的 SWAT 中，作为模拟地表径流的替代方法。这一方法需要用户输入时间尺度小于日的降水数据。

Green-Ampt Mein-Larson 下渗速率定义为：

$$f_{inf,t} = K_e \cdot \left(1 + \frac{\Psi_{wf} \cdot \Delta\theta_v}{F_{inf,t}} \right) \quad 6.2.1$$

式中： f_{inf} 为时刻 t 的下渗速率(mm/hr)， K_e 为有效水力传导率(mm/hr)， Ψ_{wf} 为湿峰基模势(mm)， $\Delta\theta_v$ 为湿峰两边的土壤容积含水量的变化(mm/mm)， F_{inf} 为时刻 t 累积下渗(mm H₂O)。

当降水强度小于下渗速率时，在此时段内所有的降水下渗，累积下渗量为：

$$F_{inf,t} = F_{inf,t-1} + R_{\Delta t} \quad 6.2.2$$

式中： $F_{inf,t}$ 为给定时段累积下渗(mm H₂O)， $F_{inf,t-1}$ 为给定时段的前一个时段的累积下渗(mm H₂O)， $R_{\Delta t}$ 为给定时段内的降水量(mm H₂O)。

由方程6.2.1定义的下渗速率为下渗量的函数，而下渗量又反过来是前一个时段下渗速率的函数。为了避免长时段的数值错误， f_{inf} 采用 dF_{inf}/dt 来替换，可得其积分为：

$$F_{inf,t} = F_{inf,t-1} + K_e \cdot \Delta t + \Psi_{wf} \cdot \Delta\theta_v \cdot \ln \left[\frac{F_{inf,t} + \Psi_{wf} \cdot \Delta\theta_v}{F_{inf,t-1} + \Psi_{wf} \cdot \Delta\theta_v} \right] \quad 6.2.3$$

方程 6.2.3 必需在每一个时段结束时重复求解累积下渗量 $F_{inf,t}$ ，。这里采用了连续叠代技术。

Green-Ampt有效水力传导率参数， K_e ，估计为饱和水力传导率 K_{sat} 的一半(Bouwer, 1969)。Nearing et al. (1996) 开发了一个方程，将有效水力传导率看作饱和水力传导率和曲线数的函数来计算。这一方程考虑了土地覆被的影响，其公式为：

第 6 章 方程：地表径流

$$K_e = \frac{56.82 \cdot K_{sat}^{0.286}}{1 + 0.051 \cdot \exp(0.062 \cdot CN)} \quad 6.2.4$$

式中： K_e 为有效水力传导率(mm/hr)， K_{sat} 为饱和水力传导率(mm/hr)， CN 为曲线数。

湿峰基模势， Ψ_{wf} ，为空隙率、沙土百分比和黏土百分比的函数(Rawls and Brakensiek, 1985)：

$$\begin{aligned} \Psi_{wf} = 10 \cdot \exp \left[\right. & 5.5309 - 7.32561 \cdot \phi_{soil} + 0.001583 \cdot m_c^2 + 3.809479 \cdot \phi_{soil}^2 + \\ & 0.000344 \cdot m_s \cdot m_c - 0.049837 \cdot m_s \cdot \phi_{soil} + 0.001608 \cdot m_s^2 \cdot \phi_{soil}^2 + \\ & 0.001602 \cdot m_c^2 \cdot \phi_{soil}^2 - 0.0000136 \cdot m_s^2 \cdot m_c - 0.003479 \cdot m_c^2 \cdot \phi_{soil} - \\ & \left. 0.000799 \cdot m_s^2 \cdot \phi_{soil} \right] \quad 6.2.5 \end{aligned}$$

式中： ϕ_{soil} 为土壤空隙率 (mm/mm)， m_c 为黏土百分比， m_s 为沙土百分比。

对于每一个时段，SWAT计算进入土壤的水。没有下渗进入土壤的水变为地表径流。

Table 6-2: SWAT input variables that pertain to Green & Ampt infiltration calculations.

Variable Name	Definition	Input File
IEVENT	Rainfall, runoff, routing option.	.cod
IDT	Length of time step (min): $\Delta t = IDT/60$.cod
PRECIPITATION	$R_{\Delta t}$: Precipitation during time step (mm H ₂ O)	.pcp
SOL_K	K_{sat} : Saturated hydraulic conductivity of first layer (mm/hr)	.sol
CN2	CN : Moisture condition II curve number	.mgt
CNOP	CN : Moisture condition II curve number	.mgt
SOL_BD	ρ_b : Moist bulk density (Mg/m ³): $\phi_{soil} = 1 - \rho_b / 2.65$.sol
CLAY	m_c : % clay content	.sol

6.3 径流峰值

径流峰值为某次降雨事件中的最大径流速率。径流峰值速率为暴雨侵蚀能力的指标，用来预测水土流失。SWAT采用修正的合理性方程来计算径流峰值。

合理性方程在沟渠、河道和洪水控制系统的设计中应用广泛。合理性方程基于这样一个假设：如果雨强*i*在*t* = 0开始，并无限继续，径流会一直增加直到当整个子流域面积内的汇流到达出口时的*t* = *t_{conc}*。合理性方程为

$$q_{peak} = \frac{C \cdot i \cdot Area}{3.6} \quad 6.3.1$$

式中：*q_{peak}* 为径流峰值 ($m^3 s^{-1}$)，*C* 为径流系数，*i* 为雨强 (mm/hr)，*Area* 为子流域面积 (km^2)，3.6为单位转换因子。

6.3.1 汇流时间

汇流时间为降雨事件开始到整个子流域面积内汇流均到达出口。也就是说，汇流时间为一滴水从子流域中最远的一点汇流到出口的时间。汇流时间包括坡面汇流时间（从子流域中最远的一点汇流到河道所需时间）和河道汇流时间（从上游河道到出口所需时间）：

$$t_{conc} = t_{ov} + t_{ch} \quad 6.3.2$$

式中：*t_{conc}* 为子流域汇流时间 (hr)，*t_{ov}* 为坡面汇流时间 (hr)，*t_{ch}* 为河道汇流时间 (hr)。

第 6 章 方程：地表径流

6.3.1.1 坡面汇流时间

坡面汇流时间， t_{ov} ，可以采用下式计算：

$$t_{ov} = \frac{L_{slp}}{3600 \cdot v_{ov}} \quad 6.3.3$$

式中： L_{slp} 为子流域坡长 (m)， v_{ov} 为坡面流速($m \ s^{-1}$)，3600为单
位转换因子。

坡面流速可以假设坡面底部有1m宽条带，根据曼宁公式计算：

$$v_{ov} = \frac{q_{ov}^{0.4} \cdot slp^{0.3}}{n^{0.6}} \quad 6.3.4$$

式中： q_{ov} 为平均坡面流速($m^3 \ s^{-1}$)， slp 为子流域平均坡度($m \ m^{-1}$)， n
为子流域曼宁粗糙度系数。假设平均流速为6.35 mm/hr，并转换单位：

$$v_{ov} = \frac{0.005 \cdot L_{slp}^{0.4} \cdot slp^{0.3}}{n^{0.6}} \quad 6.3.5$$

将方程6.3.5代入6.3.3，得：

$$t_{ov} = \frac{L_{slp}^{0.6} \cdot n^{0.6}}{18 \cdot slp^{0.3}} \quad 6.3.6$$

Table 6-3: Values of Manning's roughness coefficient, n , for overland flow (Engman, 1983).

Characteristics of Land Surface	Median	Range
Fallow, no residue	0.010	0.008-0.012
Conventional tillage, no residue	0.090	0.060-0.120
Conventional tillage, residue	0.190	0.160-0.220
Chisel plow, no residue	0.090	0.060-0.120
Chisel plow, residue	0.130	0.100-0.160
Fall disking, residue	0.400	0.300-0.500
No till, no residue	0.070	0.040-0.100
No till, 0.5-1 t/ha residue	0.120	0.070-0.170
No till, 2-9 t/ha residue	0.300	0.170-0.470
Rangeland, 20% cover	0.600	

Short grass prairie	0.150	0.100-0.200
Dense grass	0.240	0.170-0.300
Bermudagrass	0.410	0.300-0.480

6.3.1.2 河道汇流

河道汇流时间, t_{ch} , 可以采用下式计算:

$$t_{ch} = \frac{L_c}{3.6 \cdot v_c} \quad 6.3.7$$

式中: L_c 为子流域内平均河道水流长度(km), v_c 为平均河道流速($m s^{-1}$), 3.6为单位转化因子。

平均河道水流长度采用下式计算:

$$L_c = \sqrt{L \cdot L_{cen}} \quad 6.3.8$$

式中: L 为最远点到子流域出口的河道长度(km), L_{cen} 为子流域质心到河道的距离(km)。假设 $L_{cen} = 5.0$, 则平均河道水流长度为:

$$L_c = 0.71 \cdot L \quad 6.3.9$$

假设河道为2:1侧边坡, 10:1的底宽 - 深比, 采用曼宁公式可以估算平均流速:

$$v_c = \frac{0.489 \cdot q_{ch}^{0.25} \cdot slp_{ch}^{0.375}}{n^{0.75}} \quad 6.3.10$$

式中: v_c 为平均河道速率($m s^{-1}$), q_{ch} 为平均河道流量($m^3 s^{-1}$), slp_{ch} 为河道坡度($m m^{-1}$), n 为河道曼宁粗糙度系数。转换平均河道流量的单位为mm/hr, 采用下面的公式:

$$q_{ch} = \frac{q_{ch}^* \cdot Area}{3.6} \quad 6.3.11$$

第 6 章 方程：地表径流

式中： q_{ch}^* 为平均河道流量 (mm/hr) ， $Area$ 为子流域面积 (km^2) ，
3.6为 单位转换因子。平均河道流量与单位源面积流量 (单位源面积 =
1ha)

$$q_{ch}^* = q_0^* \cdot (100 \cdot Area)^{0.5} \quad 6.3.12$$

式中： q_0^* 为 单位源面积流量 (mm/hr) ， $Area$ 为子流域面积 (km^2) ，
100为 单位转换因子。假设单位源流量为 6.35 mm/hr ， 并将方程 6.3.11
和 6.3.12 代入 6.3.10 ， 得：

$$v_c = \frac{0.317 \cdot Area^{0.125} \cdot slp_{ch}^{0.375}}{n^{0.75}} \quad 6.3.13$$

将方程 6.3.9 和 6.3.13 代入 6.3.7 ， 得：

$$t_{ch} = \frac{0.62 \cdot L \cdot n^{0.75}}{Area^{0.125} \cdot slp_{ch}^{0.375}} \quad 6.3.14$$

式中： t_{ch} 为河道汇流时间 (hr) ， L 为河道末端最远点到流域出口
的河道距离 (km) ， n 为河道曼宁粗糙度系数 ， $Area$ 为子流域面积
(km^2) ， slp_{ch} 为河道坡度 ($m \cdot m^{-1}$)。

Table 6-4: Values of Manning's roughness coefficient, n , for channel flow (Chow, 1959).¹

Characteristics of Channel	Median	Range
Excavated or dredged		
Earth, straight and uniform	0.025	0.016-0.033
Earth, winding and sluggish	0.035	0.023-0.050
Not maintained, weeds and brush	0.075	0.040-0.140
Natural streams		
Few trees, stones or brush	0.050	0.025-0.065
Heavy timber and brush	0.100	0.050-0.150

¹ Chow (1959) has a very extensive list of Manning's roughness coefficients. These values represent only a small portion of those he lists in his book.

虽然方程6.3.6和6.3.14中的一些假设显得有些太宽泛,但是估算的汇流时间总得来说,在均匀子流域可以给出较为满意的结果。由于方程6.3.6和6.3.14基于水力学考虑,比纯经验方程要可靠。

6.3.2 径流系数

径流系数为入流量, i Area, 与峰值流量, q_{peak} , 的比值。这一系数对于不同的降雨事件有所不通, 可以采用下式计算:

$$C = \frac{Q_{surf}}{R_{day}} \quad 6.3.15$$

式中: Q_{surf} 为地表径流(mm H₂O), R_{day} 为该日的降雨量(mm H₂O)。

6.3.3 雨强

雨强为在汇流时间内的平均降雨量。基于这一定义, 可以采用下式计算雨强:

$$i = \frac{R_{tc}}{t_{conc}} \quad 6.3.16$$

式中: i 为雨强(mm/hr), R_{tc} 为在汇流时间内的降雨量(mm H₂O), t_{conc} 为子流域汇流时间(hr)。

对Hershfield (1961)收集的不同历时和频率的降雨资料的分析表明, 在汇流时间内的降雨量与24 - hr内的降雨量成比例:

$$R_{tc} = \alpha_{tc} \cdot R_{day} \quad 6.3.17$$

式中: R_{tc} 为在汇流时间内的降雨量(mm H₂O), α_{tc} 为日降雨量中发生在汇流时间内的比例, R_{day} 为日降雨量(mm H₂O)。

对于短历时暴雨，全部或大部分降雨发生在汇流时间内，使得 α_{tc} 接近 1.0。当暴雨强度均匀时($i_{24} = i$)，可以得到 α_{tc} 的最小值。这一最小值可以通过将汇流时间与雨强的乘积代入方程6.3.17中来求得：

$$\alpha_{tc,\min} = \frac{R_{tc}}{R_{day}} = \frac{i \cdot t_{conc}}{i_{24} \cdot 24} = \frac{t_{conc}}{24} \quad 6.3.18$$

因此， α_{tc} 在 $t_{conc}/24$ 和1.0之间。

SWAT将汇流时间内的降雨量作为最大半小时降雨强度内的降雨量占日降雨量的分数的函数来估计：

$$\alpha_{tc} = 1 - \exp \left[-t_{conc} \cdot \ln \left(\frac{1}{\alpha_{0.5}} \right) \right] \quad 6.3.19$$

式中： $\alpha_{0.5}$ 为最大半小时降雨强度内的降雨量占日降雨量的分数， t_{conc} 为子流域汇流时间 (hr)。确定 $\alpha_{0.5}$ 的方法在第3和4章有所介绍。

6.3.4 修正的合理性方程

用来估算径流峰值的修正的合理性方程，通过将方程 6.3.15、6.3.16 和 6.3.17 代入 6.3.1 中求得：

$$q_{peak} = \frac{\alpha_{tc} \cdot Q_{surf} \cdot Area}{3.6 \cdot t_{conc}} \quad 6.3.20$$

式中： q_{peak} 为径流峰值($m^3 \ s^{-1}$)， α_{tc} 为日降雨量中发生在汇流时间内的比例， Q_{surf} 为地表径流($mm \ H_2O$)， t_{conc} 为子流域汇流时间 (hr)， $Area$ 为子流域面积 (km^2)，3.6为单位转换因子。

Table 6-5: SWAT input variables that pertain to peak rate calculations.

	Input File
--	---------------

Variable Name	Definition	
DA_KM	Area of the watershed (km ²)	.bsn
HRU_FR	Fraction of total watershed area contained in HRU	.hru
SLSUBBSN	L_{slp} : Average slope length (m)	.hru
SLOPE	slp : Average slope steepness (m/m)	.hru
OV_N	n : Manning's "n" value for overland flow	.hru
CH_L(1)	L : Longest tributary channel length in subbasin (km)	.sub
CH_S(1)	slp_{ch} : Average slope of tributary channels (m/m)	.sub
CH_N(1)	n : Manning's "n" value for tributary channels	.sub

6.4 地表径流延迟

在大的子流域中，当汇流时间超过 1 天时，只有一部分地表径流到达主河道。

SWAT 考虑了这种地表径流的特性，延迟一部分地表径流进入主河道。一旦

计算得到地表径流，进入主河道的地表径流量需要给出：

$$Q_{surf} = Q'_{surf} + Q_{stor,i-1} \left(1 - \exp \left[\frac{-surlag}{t_{conc}} \right] \right) \quad 6.4.1$$

式中： Q_{surf} 为在模拟日进入主河道的地表径流(mm H₂O)， Q'_{surf} 为模拟日产生的地表径流量(mm H₂O)， $Q_{stor,i-1}$ 为前一天存储或延迟的地表径流(mm H₂O)， $surlag$ 地表径流延迟系数， t_{conc} 为子流域汇流时间 (hr)。

方程 6.4.1 中的表达式 $\left(1 - \exp \left[\frac{-surlag}{t_{conc}} \right] \right)$ 代表某一天中总的可得水量中允许进入主河道的部分。图 6-3 汇出了不同的 $surlag$ 和 t_{conc} 值所对应的该表达式值。

第 6 章 方程：地表径流

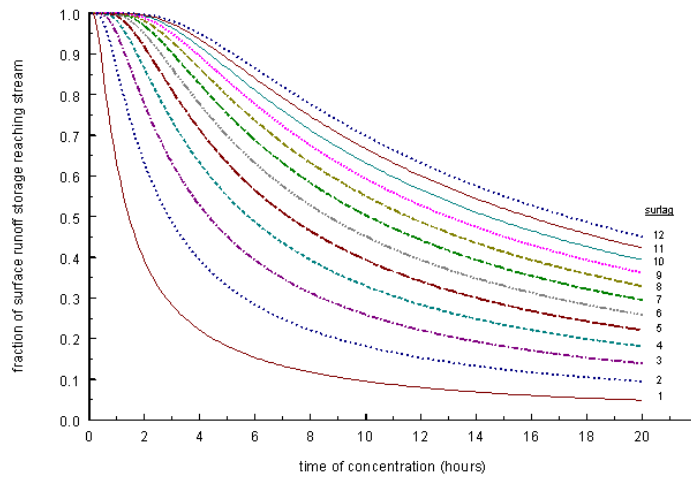


Figure 6-3: Influence of *surlag* and t_{conc} on fraction of surface runoff released.

注意到，对于给定的汇流时间，*surlag* 值的下降导致存储在流域中的水量增加。地表径流的延迟可以是河道径流过程线平滑。

Table 6-6: SWAT input variables that pertain to surface runoff lag calculations.

Variable Name	Definition	Input File
SURLAG	<i>surlag</i> : surface runoff lag coefficient	.bsn

6.5 输移损失

在许多干旱、半干旱流域存在间歇性河流，吸收了大量的河道径流(Lane, 1982)。这种吸收，或称输移损失，使得向下游河道运动的洪水波减少。SCS 水文手册的第19章(Lane, 1983)一种估算间歇性河流输移损失的方法。这一方法是应用在没有实测入流 - 出流数据的情况，并假设没有层间流或岸边流的补给。

考虑输移损失的预测径流量为：

$$vol_{Qsurf,f} = \begin{cases} 0 & vol_{Qsurf,i} \leq vol_{thr} \\ a_x + b_x \cdot vol_{Qsurf,i} & vol_{Qsurf,i} > vol_{thr} \end{cases} \quad 6.5.1$$

式中： $vol_{Qsurf,f}$ 为考虑输移损失后的预测径流量(m^3)， a_x 为对于长为L和宽为W的河道的回归截距(m^3)， b_x 为对于长为L和宽为W的河道的回归斜率， $vol_{Qsurf,I}$ 为考虑输移损失前的预测径流量(m^3)， vol_{thr} 为对于长为L和宽为W的河道的阈值流量(m^3)。阈值流量为：

$$vol_{thr} = -\frac{a_x}{b_x} \quad 6.5.2$$

相应的径流峰值方程为：

$$q_{peak,f} = \frac{1}{3600 \cdot dur_{flw}} \left[a_x - (-b_x) \cdot vol_{Qsurf,i} + b_x \cdot q_{peak,i} \right] \quad 6.5.3$$

式中： $q_{peak,f}$ 为考虑输移损失后的径流峰值(m^3/s)， dur_{flw} 为水流历时(hr)， a_x 为对于长为L和宽为W的河道的回归截距(m^3)， b_x 为对于长为L和宽为W的河道的回归斜率， $vol_{Qsurf,I}$ 为考虑输移损失前的预测径流量(m^3)， $q_{peak,I}$ 为考虑输移损失前的径流峰值(m^3/s)。水流历时采用下式计算：

$$dur_{flw} = \frac{Q_{surf} \cdot Area}{3.6 \cdot q_{peak}} \quad 6.5.4$$

式中： dur_{flw} 为水流历时(hr)， Q_{surf} 为地表径流($mm H_2O$)， q_{peak} 为径流峰值($m^3 s^{-1}$)， $Area$ 为子流域面积(km^2)，3.6为单位转换因子。

为了计算不同长度和宽度河道的回归参数，需要定义单位河道的参数。

单位河道为长L = 1km，宽W = 1m的河道。单位河道的参数采用下式计算：

第 6 章 方程：地表径流

$$k_r = -2.22 \cdot \ln \left[1 - 2.6466 \cdot \frac{K_{ch} \cdot dur_{flw}}{vol_{Qsurf,i}} \right] \quad 6.5.5$$

$$a_r = -0.2258 \cdot K_{ch} \cdot dur_{flw} \quad 6.5.6$$

$$b_r = \exp \left[0.4905 \cdot k_r \right] \quad 6.5.7$$

式中： k_r 为衰减因子($m^{-1} km^{-1}$)， a_r 为单位河道的回归截距(m^3)， b_r 为单位河道的回归斜率， K_{ch} 为河道淤积层的有效传导率 (mm/hr)， dur_{flw} 为水流历时 (hr)， $vol_{Qsurf,i}$

为初始径流量(m^3)，回归参数为：

$$b_x = \exp \left[k_r \cdot L \cdot W \right] \quad 6.5.8$$

$$a_x = \frac{a_r}{(-b_r)} \cdot (-b_x) \quad 6.5.9$$

式中： a_x 为对于长为L和宽为W的河道的回归截距(m^3)， b_x 为对于长为L和宽为W的河道的回归斜率， k_r 为衰减因子($m^{-1} km^{-1}$)，L为子流域河道末端最远点到达出口的距离 (km)，W为平均河道宽度 (m)， a_r 为单位河道的回归截距(m^3)， b_r 为单位河道的回归斜率。

地表径流的输移损失假设渗漏进入潜水层。

Table 6-7: SWAT input variables that pertain to transmission loss calculations.

Variable Name	Definition	Input File
DA_KM	Area of the watershed (km^2)	.bsn
HRU_FR	Fraction of total watershed area contained in HRU	.hru
CH_K(1)	K_{ch} : effective hydraulic conductivity (mm/hr)	.sub
CH_W(1)	W : average width of tributary channel (m)	.sub
CH_L(1)	L : Longest tributary channel length in subbasin (km)	.sub

6.6 NOMENCLATURE

- Area* Subbasin area (km^2)
C Runoff coefficient in peak runoff rate calculation
CN Curve number
CN₁ Moisture condition I curve number
CN₂ Moisture condition II curve number
CN_{2s} Moisture condition II curve number adjusted for slope
CN₃ Moisture condition III curve number
F_{inf} Cumulative infiltration at time t ($\text{mm H}_2\text{O}$)
FC Water content of soil profile at field capacity ($\text{mm H}_2\text{O}$)
I_a Initial abstractions which includes surface storage, interception and infiltration prior to runoff ($\text{mm H}_2\text{O}$)
K_{ch} Effective hydraulic conductivity of the channel alluvium (mm/hr)
K_e Effective hydraulic conductivity (mm/hr)
K_{sat} Saturated hydraulic conductivity (mm/hr)
L Channel length from the most distant point to the subbasin outlet (km)
L_c Average flow channel length for the subbasin (km)
L_{cen} Distance along the channel to the subbasin centroid (km)
L_{slp} Subbasin slope length (m)
Q_{stor} Surface runoff stored or lagged ($\text{mm H}_2\text{O}$)
Q_{surf} Accumulated runoff or rainfall excess ($\text{mm H}_2\text{O}$)
R _{Δt} Amount of rain falling during the time step ($\text{mm H}_2\text{O}$)
R_{day} Amount of rainfall on a given day ($\text{mm H}_2\text{O}$)
R_{tc} Amount of rain falling during the time of concentration ($\text{mm H}_2\text{O}$)
S Retention parameter in SCS curve number equation (mm)
S₃ Retention parameter for the moisture condition III curve number
S_{frz} Retention parameter adjusted for frozen conditions (mm)
S_{max} Maximum value the retention parameter can achieve on any given day (mm)
SAT Amount of water in the soil profile when completely saturated ($\text{mm H}_2\text{O}$)
SW Amount of water in soil profile ($\text{mm H}_2\text{O}$)
W Average width of flow, i.e. channel width (m)
- a_r* Unit channel regression intercept (m^3)
a_x Regression intercept for a channel of length L and width W (m^3)
b_r Unit channel regression slope
b_x Regression slope for a channel of length L and width W
dur_{flw} Duration of flow (hr)
f_{inf} Infiltration rate (mm/hr)
i Rainfall intensity (mm/hr)
k_r Decay factor ($\text{m}^{-1} \text{km}^{-1}$)
m_c Percent clay content
m_s Percent sand content
n Manning's roughness coefficient for the subbasin or channel

第 6 章 方程：地表径流

- q_0^* Unit source area flow rate (mm hr^{-1})
 q_{ch} Average channel flow rate ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)
 q_{ch}^* Average channel flow rate (mm hr^{-1})
 q_{ov} Average overland flow rate ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)
 q_{peak} Peak runoff rate (m^3/s)
 $q_{peak,f}$ Peak rate after transmission losses (m^3/s)
 $q_{peak,i}$ Peak rate before accounting for transmission losses (m^3/s)
 slp Average slope of the subbasin (% or m/m)
 slp_{ch} Average channel slope (m m^{-1})
 $surlag$ Surface runoff lag coefficient
 t_{ch} Time of concentration for channel flow (hr)
 t_{conc} Time of concentration for a subbasin (hr)
 t_{ov} Time of concentration for overland flow (hr)
 v_c Average channel velocity (m s^{-1})
 v_{ov} Overland flow velocity (m s^{-1})
 $vol_{Q_{surf,f}}$ Volume of runoff after transmission losses (m^3)
 $vol_{Q_{surf,i}}$ Volume of runoff prior to transmission losses (m^3)
 vol_{thr} Threshold volume for a channel of length L and width W (m^3)
 w_1 Shape coefficient in retention parameter adjustments for soil moisture content
 w_2 Shape coefficient in retention parameter adjustments for soil moisture content
- $\alpha_{0.5}$ Fraction of daily rain falling in the half-hour highest intensity rainfall,
 α_{tc} Fraction of daily rainfall that occurs during the time of concentration
 ϕ_{soil} Porosity of the soil (mm/mm)
 Ψ_{wf} Wetting front matric potential (mm)
 θ_v Volumetric moisture content (mm/mm)

6.7 REFERENCES

- Bouwer, H. 1969. Infiltration of water into nonuniform soil. Journal Irrigation and Drainage Div., ASCE 95(IR4):451-462.
- Chow, V.T. 1959. Open-channel hydraulics. McGraw-Hill, New York.
- Engman, E.T. 1983. Roughness coefficients for routing surface runoff. Proc. Spec. Conf. Frontiers of Hydraulic Engineering.
- Green, W.H. and G.A. Ampt. 1911. Studies on soil physics, 1. The flow of air and water through soils. Journal of Agricultural Sciences 4:11-24.
- Hershfield, D.M. 1961. Rainfall frequency atlas of the United States for durations from 30 minutes to 24 hours and return periods from 1 to 100 years. U.S. Dept. Commerce Tech. Paper No. 40.

- Lane, L.J. 1983. Chapter 19: Transmission Losses. p.19-1–19-21. *In Soil Conservation Service. National engineering handbook, section 4: hydrology. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.*
- Lane, L.J. 1982. Distributed model for small semi-arid watersheds. *J. Hydraulic Eng., ASCE*, 108(HY10):1114-1131.
- Mein, R.G. and C.L. Larson. 1973. Modeling infiltration during a steady rain. *Water Resources Research* 9(2):384-394.
- Natural Resources Conservation Service Soil Survey Staff. 1996. National soil survey handbook, title 430-VI. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
- Nearing, M.A., B.Y. Liu, L.M. Risse, and X. Zhang. 1996. Curve number and Green-Ampt effective hydraulic conductivities. *Water Resources Bulletin* 32:125-136.
- Rallison, R.E. and N. Miller. 1981. Past, present and future SCS runoff procedure. p. 353-364. *In V.P. Singh (ed.). Rainfall runoff relationship. Water Resources Publication, Littleton, CO.*
- Rawls, W.J. and D.L. Brakensiek. 1985. Prediction of soil water properties for hydrologic modeling. p. 293-299. *In E.B. Jones and T.J. Ward (eds). Watershed management in the 80's. ASCE, New York, N.Y.*
- Soil Conservation Service. 1972. Section 4: Hydrology *In National Engineering Handbook. SCS.*
- Soil Conservation Service Engineering Division. 1986. Urban hydrology for small watersheds. U.S. Department of Agriculture, Technical Release 55.
- Williams, J.R. 1995. Chapter 25: The EPIC model. p. 909-1000. *In V.P. Singh (ed). Computer models of watershed hydrology. Water Resources Publications, Highlands Ranch, CO.*

第 7 章 方程:蒸散发

蒸散发是一个包容性的俗语，包括了使得地球表面水分转化为水蒸气的所有过程。包括植物冠层蒸发、散发、升华和土壤蒸发。

蒸散发是水分离开流域系统的主要机制。陆地上，大概62%的降水被蒸散。在大部分流域和除南极洲之外的所有大陆，蒸散超过径流 (Dingman, 1994)。

降水与蒸散的差值为可供人类利用和管理的水量。对于蒸散的准确估计对于水资源的评价、气候和土地利用变化的影响是十分重要的。

7.1 冠层存储

植被冠层可以对下渗、地表径流和蒸散发施加重要的影响。随着雨水的降落，冠层截留可以减少雨滴的侵蚀能力，并滞留一部分降雨在冠层中。冠层对这些过程的影响，取决于植被覆盖密度和植被类型的形态。

当计算地表径流时，SCS 曲线数法将冠层截留综合到初损这一概念中。初损同时也包括地表蓄水和产流前的下渗。初损估计占持蓄参数的 20%（见第 6 章）。

当采用 Green and Ampt 下渗方法时，冠层的降雨截留必需单独计算。

SWAT 可以根据叶面积指数来估算每天最大冠层存储量：

$$can_{day} = can_{mx} \cdot \frac{LAI}{LAI_{mx}} \quad 7.1.1$$

式中： can_{day} 为模拟日最大冠层存储量(mm H₂O)， can_{mx} 为当冠层充分发育时的最大冠层存储量(mm H₂O)， LAI 为模拟日叶面积指数， LAI_{mx} 为植被最大叶面积指数。

在任何一天的降雨事件过程中，在水分到达地面之前，首先要满足冠层存储。

$$R_{INT(f)} = R_{INT(i)} + R'_{day} \quad \text{和} \quad R_{day} = 0$$

$$\text{当 } R'_{day} \leq can_{day} - R_{INT(i)} \quad 7.1.2$$

$$R_{INT(f)} = can_{day} \quad \text{和} \quad R_{day} = R'_{day} - (can_{day} - R_{INT(i)})$$

$$\text{当 } R'_{day} > can_{day} - R_{INT(i)} \quad 7.1.3$$

式中： $RINT(i)$ 为模拟日冠层存储的初始自由水量(mm H₂O)， $RINT(f)$ 为模拟日冠层存储的最终自由水量(mm H₂O)， R'_{day} 为考虑冠层存储之前的降水量(mm H₂O)， R_{day} 为模拟日到达地面的降水量(mm H₂O)， can_{day} 为日最大冠层存储量(mm H₂O)。

Table 7-1: SWAT input variables used in canopy storage calculations.

Variable name	Definition	File Name
CANMX	can_{mx} : maximum canopy storage	.hru

7.2 潜在蒸散发

潜在蒸散发 (PET) 最初是由 Thornthwaite (1948) 作为气候分类框架中的部分而引入的概念。他定义 PET 为：在一个均匀覆盖了生长植被的区域，在有充分土壤水分供给并且无对流或热存储效应的条件下，蒸散发的速率。因为蒸散发速率受不同植被特征的影响显著，Penman (1956) 简化 PET 概念为：完全遮蔽地表、具有均匀高度，并且供水充分的矮绿作物的散发水量。Penman 采用草作为他的参照作物，但是后来的研究者(Jensen, et al., 1990) 建议高度 30-50cm 的紫花苜蓿可能更为合适。

目前有很多方法估算蒸散发。其中三中引入到了 SWAT 中：Penman-Monteith 法 (Monteith, 1965; Allen, 1986; Allen et al., 1989)，Priestley-Taylor 法 (Priestley and Taylor, 1972) and the Hargreaves 法

(Hargreaves et al., 1985)。SWAT 也可以读入用户采用其他方法计算的蒸散发值。

SWAT 中考虑的这三种方法需要不同的输入。Penman-Monteith 法需要太阳辐射、气温、相对湿度和风速。Priestley-Taylor 法需要太阳辐射、气温和相对湿度。Hargreaves 法只需要气温。

7.2.1 PENMAN-MONTEITH 法

Penman-Monteith 方程考虑了支持蒸发所需的能量，移除水蒸气的机制的能力，空气动力学和表面阻抗。Penman-Monteith 方程的公式为：

$$\lambda E = \frac{\Delta \cdot (H_{net} - G) \rho_{air} \cdot c_p \cdot [e_z^o - e_z] r_a}{\Delta + \gamma \cdot (r_c / r_a)} \quad 7.2.1$$

式中： λE 为潜热通量密度(MJ m⁻² d⁻¹)， E 为蒸发深度速率(mm d⁻¹)， Δ 为饱和水汽压 - 温度曲线斜率，de/dT (kPa °C⁻¹)， H_{net} 为净辐射(MJ m⁻² d⁻¹)， G 地表热通量密度(MJ m⁻² d⁻¹)， ρ_{air} 为空气密度(kg m⁻³)， c_p 为固定压强下的比热(MJ kg⁻¹ °C⁻¹)， e_z^o 在高度 z 处饱和水汽压(kPa)， γ 为湿度常数(kPa °C⁻¹)， r_c 为植被冠层阻抗(s m⁻¹)， r_a 为空气层弥散阻抗 (空气动力学阻抗) (s m⁻¹)。

对于供水良好的植被，在中等大气稳定度下，假设风速剖面为对数型，Penman-Monteith 方程可以写为(Jensen et al., 1990)：

$$\lambda E_t = \frac{\Delta \cdot (H_{net} - G) + \gamma \cdot K_1 \cdot (0.622 \cdot \lambda \cdot \rho_{air} / P) \cdot (e_z^o - e_z)}{\Delta + \gamma \cdot (+ r_c / r_a)} r_a \quad 7.2.2$$

式中： λ 为蒸发潜热(MJ kg⁻¹)， E_t 为蒸发深度速率(mm d⁻¹)， K_1 为用来保证表达式中的两个计算项具有相同单位的尺度系数(对于 u_z in m s⁻¹, $K_1 = 8.64 \times 10^4$)， P 为大气压(kPa)。

净辐射， H_{net} ，的计算，在第二章中进行了介绍。蒸发潜热， λ ，饱和水汽压 - 温度曲线斜率， Δ ，湿度常数， γ ，以及饱和、实际水汽压， e_z^o 和 e_z ，的计算在第三章中进行了介绍。没有定义的项为土壤热通量， G ，复合项， $K_1 \cdot 0.622 \lambda \rho / P$ ，空气动力学阻抗， r_a ，和冠层阻抗， r_c 。

7.2.1.1 土壤热通量

在数小时时间的土壤热存储或释放可以很大，但是通常日与日之间的变化较小，因为在上午存储的土壤热量可以在晚上土壤冷却时释放。既然当作物覆盖的土壤在10 - 30天周期的土壤热通量变化很小，这一变化可以在能量平衡中忽略。SWAT假设日土壤土量， G ，为0。

7.2.1.2 空气动力阻抗

对于显热和蒸汽传输的空气动力阻抗， r_a ，可以由下式计算：

$$r_a = \frac{\ln \left[\frac{z_p - d}{z_w - d} \right] + \ln \left[\frac{z_p - d}{z_{om} - d} \right]}{k^2 u_z} z_{ov} \quad 7.2.3$$

式中： z_w 为风速测量的高度 (cm)， z_p 相对湿度和气温测量的高度 (cm)， d 为风速剖面的水平位移 (cm)， z_{om} 为动量传递的粗糙

长度 (cm) , z_{ov} 水蒸气输移的粗糙长度 (cm) , k 为 von Kármán 常数 , u_z 为在高度 z_w 处的风速 ($m s^{-1}$)。

von Kármán 常数在紊流中认为是普遍的常数 , 它的值在 0.36-0.43 范围内 (Jensen et al., 1990)。SWAT 中假设其为 0.41。

Brutsaert (1975) 确定了表面粗糙参数 , z_o , 与植被冠层平均高度 (h_c) 有关 , 且 $h_c/z_o = 3e$ 或者 8.15 , 式中 e 为自然对数。基于这一关系 , 动量传递的粗糙长度可以估计为 :

$$z_{om} = h_c / 8.15 = 0.123 \cdot h_c \quad h_c \leq 200cm \quad 7.2.4$$

$$z_{om} = 0.058 \cdot (h_c)^{0.9} \quad h_c > 200cm \quad 7.2.5$$

式中 : 平均植被冠层高度 (h_c) 的单位为 cm。

动量传递的粗糙长度包括非流线体作用力效应。这些作用力对于热量和水蒸气的传输没有影响 , 因此热量和水蒸气传输的粗糙长度仅为动量传递的一个分数。Stricker and Brutsaert (1978) 建议采用下式估算蒸汽传输的粗糙长度 :

$$z_{ov} = 0.1 \cdot z_{om} \quad 7.2.6$$

植被的位移高度可以采用下面的关系估算 (Monteith, 1981; Plate, 1971) :

$$d = 2/3 \cdot h_c \quad 7.2.7$$

风速测量高度 , z_w , 湿度和温度测量高度 , z_p , 假设为 170cm。

7.2.1.3 冠层阻抗

研究表明供水充分的参照作物的冠层阻抗可以通过将单一叶片最小表面阻抗除以1/2冠层叶面指数得到(Jensen et. al, 1990)：

$$r_c = r_\ell / (0.5 \cdot LAI) \quad 7.2.8$$

式中： r_c 为冠层阻抗($s\ m^{-1}$)， r_ℓ 为单一叶片最小有效气孔阻抗($s\ m^{-1}$)，LAI为冠层叶面积指数。

不同植被类型叶片的气孔分布不同。典型地，气孔不均匀分布在植被叶片的上表面和下表面。只在叶片单一面有气孔的植被归类为hypostomatous，在叶片两面有气孔的植被归类为amphistomatous。有效叶片气孔阻抗的确定需要考虑上表面（近轴）和下表面（远轴）气孔阻抗(Rosenburg, et al., 1983)。当上表面和下表面气孔数目不等时，有效气孔阻抗可以估算为：

$$r_\ell = \frac{r_{\ell-ad} \cdot r_{\ell-ab}}{r_{\ell-ab} + r_{\ell-ad}} \quad 7.2.9$$

式中： r_ℓ 为单一叶片最小有效气孔阻抗($s\ m^{-1}$)， $r_{\ell-ad}$ 为近轴最小叶面气孔阻抗($s\ m^{-1}$)， $r_{\ell-ab}$ 为远轴最小叶面气孔阻抗($s\ m^{-1}$)。对于amphistomatous叶片，有效气孔阻抗为：

$$r_\ell = \frac{r_{\ell-ad}}{2} = \frac{r_{\ell-ab}}{2} \quad 7.2.10$$

对于hypostomatous叶片，有效气孔阻抗为：

$$r_\ell = r_{\ell-ad} = r_{\ell-ab} \quad 7.2.11$$

叶片传导率定义为叶片阻抗的倒数：

$$g_l = \frac{1}{r_l} \quad 7.2.12$$

式中： g_l 为最大有效叶片传导率(m s^{-1})。当冠层阻抗表示为叶片传导率的函数时，方程7.2.8变为：

$$r_c = (0.5 \cdot g_l \cdot LAI)^{-1} \quad 7.2.13$$

式中： r_c 为冠层阻抗(s m^{-1})， g_l 为最大有效叶片传导率(m s^{-1})，LAI 为冠层叶面积指数。

对于气候变化模拟，可以修正冠层阻抗来反映二氧化碳浓度变化的影响。Morison (1987)介绍了二氧化碳浓度增加对叶片传导率的影响。Morison发现二氧化碳浓度在330和660 ppmv时，二氧化碳浓度翻倍可以使叶片传导率降低40%。在这一特定值域，传导率的降低是线性的 (Morison and Gifford, 1983)。Easterling et al. (1992)建议采用下式来修正叶片传导率项，以模拟二氧化碳浓度变化对蒸散发的影响：

$$g_{l,CO_2} = g_l \cdot \left[1.4 - 0.4 \cdot \left(\frac{CO_2}{330} \right) \right] \quad 7.2.14$$

式中： g_{l,CO_2} 为反映二氧化碳变化效应的叶片传导率(m s^{-1})， CO_2 为二氧化碳浓度 (ppmv)。

将这一修正引入到方程7.2.8：

$$r_c = r_l \cdot \left[(0.5 \cdot LAI)^{-1} \cdot \left(1.4 - 0.4 \cdot \frac{CO_2}{330} \right) \right]^{-1} \quad 7.2.15$$

SWAT 默认二氧化碳浓度为 330 ppmv，如果用户没有输入其浓度的话。在这一默认条件下， $\left(1.4 - 0.4 \cdot \frac{CO_2}{330} \right)$ 项简化为 1.0，冠层阻抗变为 7.2.8。

当计算实际蒸散发时，冠层阻抗项需要修正以反映高蒸汽压亏空对叶片传导率的影响(Stockle et al, 1992)。对于一个植被类型，蒸汽压亏空阈值定义为，植被叶片传导率响应蒸汽压亏空开始下降时的值。调整的叶片传导率为：

$$g_{\ell} = g_{\ell, mx} \cdot \left[1 - \Delta g_{\ell, decl} \left(\frac{vpd - vpd_{thr}}{vpd_{thr}} \right) \right] \quad \text{if } vpd > vpd_{thr} \quad 7.2.16$$

$$g_{\ell} = g_{\ell, mx} \quad \text{if } vpd \leq vpd_{thr} \quad 7.2.17$$

式中： g_{ℓ} 为单一叶片传导率(m s^{-1})， $g_{\ell, mx}$ 为单一叶片最大传导率(m s^{-1})， $\Delta g_{\ell, decl}$ 为蒸汽压亏空增加一单位，叶片传导率的下降速率($\text{m s}^{-1} \text{ kPa}^{-1}$)， vpd 为蒸汽压亏空(kPa)， vpd_{thr} 为蒸汽压亏空阈值(kPa)。应用在两个不同蒸汽压亏空值实测的气孔传导率，蒸汽压亏空增加一单位，叶片传导率的下降速率可以求解方程7.2.16得到：

$$\Delta g_{\ell, decl} = \frac{\left(- \frac{fr_{g, mx}}{vpd_{fr} - vpd_{thr}} \right)}{\left(\frac{vpd_{fr} - vpd_{thr}}{vpd_{thr}} \right)} \quad 7.2.18$$

式中： $\Delta g_{\ell, decl}$ 为蒸汽压亏空增加一单位，叶片传导率的下降速率($\text{m s}^{-1} \text{ kPa}^{-1}$)， $fr_{g, mx}$ 为在蒸汽压亏空 vpd_{fr} 下得到的叶片传导率占最大气孔传导率的分数， vpd_{thr} 为蒸汽压亏空阈值(kPa)。对于所有的植物种类，蒸汽压亏空阈值假设为1.0。

7.2.1.4 复合项

对于以 m s^{-1} 为单位的风速，Jensen et al. (1990)提供如下关系来计算 $K_1 0.622 \lambda \rho / P$ ：

$$K_1 \cdot 0.622 \cdot \lambda \cdot \rho / P = 1710 - 6.85 \cdot \bar{T}_{av} \quad 7.2.19$$

式中： \bar{T}_{av} 为平均气温。

为了计算潜在蒸散发，Penman-Monteith 方程必需针对某一参照作物求解。SWAT 采用 40cm 高的紫花苜蓿，并且假设参照作物最小叶片阻抗为 $100 \text{ (s m}^{-1}\text{)}$ 。根据这一冠层高度，方程 7.2.3 简化为：

$$r_a = \frac{114.}{u_z} \quad 7.2.20$$

计算冠层阻抗的方程需要叶面积指数。参照作物的叶面积指数采用 Allen et al. (1989)开发的方程来计算，并假设 LAI 为冠层高度的函数。对于没有收割的，高度超过 3cm 的紫花苜蓿和草：

$$LAI = 1.5 \cdot \ln(h_c) + 1.4 \quad 7.2.21$$

式中：LAI 为叶面积指数， h_c 为冠层高度 (cm)。对于冠层高度为 40cm 的紫花苜蓿，叶面积指数为 4.1。采用这一数值，冠层阻抗方程简化为：

$$r_c = 49 / \left(1.4 - 0.4 \cdot \frac{CO_2}{330} \right) \quad 7.2.22$$

当以小时为时间步长，计算蒸散发并将其叠加时，Penman-Monteith 方程计算的最为精确。采用日平均参数来估算日蒸散发显示了其可靠性，SWAT 中也是采用这一方法来计算蒸散发的。但是，用户采用日

平均参数来估算日蒸散发可能导致显著的错误。这些错误是因为风速、湿度和净辐射的日分布不均使得日均参数值不能符合实际情况。

7.2.2 PRIESTLEY-TAYLOR 法

PRIESTLEY-TAYLOR (1972) 开发了一个简化的复合项来针对湿润地表情况。当环境为湿润情况时，删除了空气动力学项，而能量项乘以一个系数， $\alpha_{pet} = 1.28$ 。

$$\lambda E_o = \alpha_{pet} \cdot \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot (H_{net} - G) \quad 7.2.23$$

式中： λ 为潜热通量密度($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)， E_o 为蒸发深度速率(mm d^{-1})， α_{pet} 为系数， Δ 为饱和水汽压 - 温度曲线斜率， de/dT ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$)， γ 为湿度常数($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$)， H_{net} 为净辐射($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)， G 为地表热通量密度($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)。

PRIESTLEY-TAYLOR 方程提供了在弱对流条件下估算潜在蒸散发的方法。在半干旱或干旱地区，能量平衡的对流过程显著，该方法会低估潜在蒸散发。

7.2.3 HARGREAVES 法

HARGREAVES 法最初是根据8年加利福尼亚Davis地区喜冷阿尔塔酥油草的测渗计数据推得的(Hargreaves, 1975)。并进行了一些改进(Hargreaves and Samani, 1982 and 1985)。SWAT模型中应用的方法发表在1985年(Hargreaves et al., 1985)：

$$\lambda E_o = 0.0023 \cdot H_o \cdot (T_{mx} - T_{mn})^{0.5} \cdot (T_{av} + 17.8) \quad 7.2.24$$

第 7 章 方程：蒸散发

式中： λ 为潜热通量密度($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)， E_0 为蒸发深度速率(mm d^{-1})， H_0 为地外辐射($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)， T_{mx} 为模拟日最高温度 ($^{\circ}\text{C}$)， T_{mn} 为模拟日最低温度 ($^{\circ}\text{C}$)， \bar{T}_{av} 为模拟日平均温度 ($^{\circ}\text{C}$)。

Table 7-2: SWAT input variables used in potential evapotranspiration calculations summarized in this section.

Variable name	Definition	File Name
IPET	Potential evapotranspiration method	.cod
WND_SP	u_z : Daily wind speed (m/s)	.wnd
CO2	CO_2 : Carbon dioxide concentration (ppmv)	.sub
MAX TEMP	T_{mx} : Daily maximum temperature ($^{\circ}\text{C}$)	.tmp
MIN TEMP	T_{mn} : Daily minimum temperature ($^{\circ}\text{C}$)	.tmp
GSI	$g_{l,mx}$: maximum leaf conductance (m s^{-1})	crop.dat
FRGMAX	$fr_{g,mx}$: Fraction of maximum leaf conductance achieved at the vapor pressure deficit specified by vpd_{fr}	crop.dat
VPDFR	vpd_{fr} : Vapor pressure deficit corresponding to value given for $fr_{g,mx}$ (kPa)	crop.dat

7.3 实际蒸散发

确定潜在蒸散发后，需要计算实际蒸散发。SWAT 首先蒸发植被冠层截留的降水，然后，SWAT 采用与 Richtie (1972) 提出的方法计算最大散发量和最大升华/土壤蒸发。接着计算土壤的实际升华和蒸发。如果，HRU 中存在雪，将发生升华。只有当没有雪时，土壤蒸发才会发生。

7.3.1 截留降水的蒸发

任何冠层中的自由水都是可以蒸发的。冠层截留降水对实际蒸散发的贡献在林地是十分显著的，甚至有时可以超过散发。

SWAT 在计算实际蒸发时，尽可能多地蒸发冠层存储自由水。如果潜在蒸散发， E_o ，小于冠层存储的自由水， R_{INT} ，那么：

$$E_a = E_{can} = E_o \quad 7.3.1$$

$$R_{INT(f)} = R_{INT(i)} - E_{can} \quad 7.3.2$$

式中： E_a 为模拟日流域实际蒸散发量(mm H₂O)， E_{can} 为模拟日由冠层自由水的蒸发量(mm H₂O)， E_o 为模拟日的正在蒸散发(mm H₂O)， $R_{INT(i)}$ 为模拟日冠层存储的初始自由水量(mm H₂O)， $R_{INT(f)}$ 为模拟日冠层存储的最终自由水量(mm H₂O)。如果潜在蒸散量， E_o ，大于冠层存储自由水量， R_{INT} ，那么：

$$E_{can} = R_{INT(i)} \quad 7.3.3$$

$$R_{INT(f)} = 0 \quad 7.3.4$$

当冠层存储水量蒸发完后，剩余蒸发需水 $E'_o = E_o - E_{can}$ 由植被和雪/土壤提供。

7.3.2 散发

如果采用 Penman-Monteith 方程计算潜在蒸散发，散发采用 7.2.1 部分介绍的方程计算。对于其它计算方法，散发采用下式计算：

$$E_t = \frac{E'_o \cdot LAI}{3.0} \quad 0 \leq LAI \leq 3.0 \quad 7.3.5$$

$$E_t = E'_o \quad LAI > 3.0 \quad 7.3.6$$

式中： E_t 为模拟日最大散发量(mm H₂O)， E'_o 为考虑冠层自由水分蒸发调整后的潜在蒸散发(mm H₂O)，LAI为叶面积指数。采用7.3.5和7.3.6计算的散发表为植被在理想条件下生长的散发量。因为土壤剖面中的可利用水量缺乏，实际散发量可能低于此值。实际植被吸收水量和散发的计算将在18和19章介绍。

7.3.3 升华和土壤蒸发

升华和土壤蒸发量收遮蔽度的影响。最大升华和土壤蒸发量由下式计算：

$$E_s = E'_o \cdot cov_{sol} \quad 7.3.7$$

式中： E_s 为最大升华和土壤蒸发量(mm H₂O)， E'_o 为为考虑冠层自由水分蒸发调整后的潜在蒸散发(mm H₂O)， cov_{sol} 为土被指数。土被指数由下式计算：

$$cov_{sol} = \exp\left(5.0 \times 10^{-5} \cdot CV\right) \quad 7.3.8$$

式中： CV 为地表生物量和残余物(kg ha⁻¹)。如果雪水当量大于0.5mm H₂O，土被指数设为0.5。

最大升华和土壤蒸发量在植物利用水量较高的时期根据下式的关系下降：

$$E'_s = \min\left[E_s, \frac{E_s \cdot E'_o}{E_s + E_t}\right] \quad 7.3.9$$

式中： E'_s 为考虑植物利用水后的最大升华和土壤蒸发量(mm H₂O)， E_s 为最大升华和土壤蒸发量(mm H₂O)， E'_o 为考虑冠层自由水分蒸发调整后的潜在

蒸散发(mm H₂O), E_t 为模拟日最大散发量(mm H₂O)。当 E_t 值低时 $E'_s \rightarrow E_s$ 。

但是，随着 E_t 接近 E'_o ， $E'_s \rightarrow \frac{E_s}{1 + COV_{sol}}$ 。

7.3.3.1 升华

确定最大升华和土壤蒸发量后，SWAT 首先从雪堆中满足蒸发需求。

如果雪堆的含水量大于最大升华和土壤蒸发需求，那么：

$$E_{sub} = E'_s \quad 7.3.10$$

$$SNO_{(f)} = SNO_{(i)} - E'_s \quad 7.3.11$$

$$E''_s = 0. \quad 7.3.12$$

式中： E_{sub} 为模拟日升华量(mm H₂O)， E'_s 为考虑植物利用水后的最大升华和土壤蒸发量(mm H₂O)， $SNO(i)$ 为模拟日升华前雪堆含水量(mm H₂O)， $SNO(f)$ 为模拟日升华后雪堆含水量(mm H₂O)， E''_s 为模拟日最大土壤水蒸发(mm H₂O)。如果雪堆的含水量小于最大升华和土壤蒸发需求，那么：

$$E_{sub} = SNO_{(i)} \quad 7.3.13$$

$$SNO_{(f)} = 0. \quad 7.3.14$$

$$E''_s = E'_s - E_{sub} \quad 7.3.15$$

7.3.3.2 土壤水蒸发

当对土壤水的蒸发需求存在时，SWAT 首先区分不同土壤层的蒸发需求。确定不同深度最大蒸发水量分布的方程为：

第 7 章 方程：蒸散发

$$E_{soil,z} = E_s'' \cdot \frac{z}{z + \exp(2.374 - 0.00713 \cdot z)} \quad 7.3.16$$

式中： $E_{soil,z}$ 为深度 z 处的蒸发需求(mm H₂O)， E_s'' 为模拟日最大土壤水蒸发(mm H₂O)， z 为距离地表的深度。在这一方程中系数的选择标准是使50%的蒸发需求在10cm土壤表层，95%蒸发需求在100mm土壤表层。

每一个土壤层的蒸发需求量由计算的土壤上部和下部蒸发需求量之差来确定：

$$E_{soil,ly} = E_{soil,zl} - E_{soil,zu} \quad 7.3.16$$

式中： $E_{soil,ly}$ 为第 ly 层的蒸发需求(mm H₂O)， $E_{soil,zl}$ 为土层下部的蒸发需求(mm H₂O)， $E_{soil,zu}$ 为土层上部的蒸发需求(mm H₂O)。

图 7-1 为某以典型土壤剖面的蒸发需求分布，这一土壤被分为1mm的土层，并假设100mm的总蒸发需求。

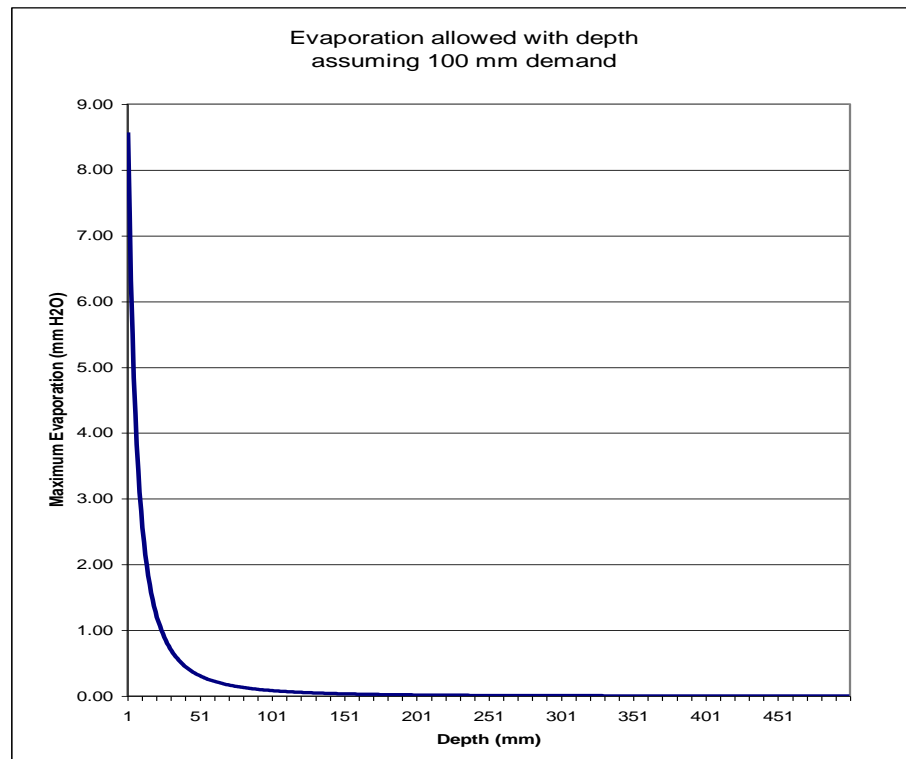


Figure 7-1: Soil evaporative demand distribution with depth.

如前所述，深度分布假设 50% 的蒸发需求由 10mm 土壤表层满足。在本例中，总的蒸发需求为 100mm，50mm 水为 50%。这是顶层土壤不能满足的。

SWAT 不允许不同土层来弥补其它土层所不能满足的蒸发需求。土层不能满足的蒸发需求导致了实际蒸散发的下降。

方程 7.3.16 引入了一个系数来允许用户修改用来满足土壤蒸发的深度分布。修正方程为：

$$E_{soil,ly} = E_{soil,z} - E_{soil,zu} \cdot esco \quad 7.3.17$$

第 7 章 方程：蒸散发

式中： $E_{soil,ly}$ 为第 ly 土层的蒸发需求(mm H₂O)， $E_{soil,zl}$ 为土层下部的蒸发需求(mm H₂O)， $E_{soil,zu}$ 为土层上部的蒸发需求(mm H₂O)， $esco$ 为土壤蒸发补偿系数。图7-2图示了这一方程的对于不同 $esco$ 的解。 $esco = 1.0$ 的图与图7-1一致。

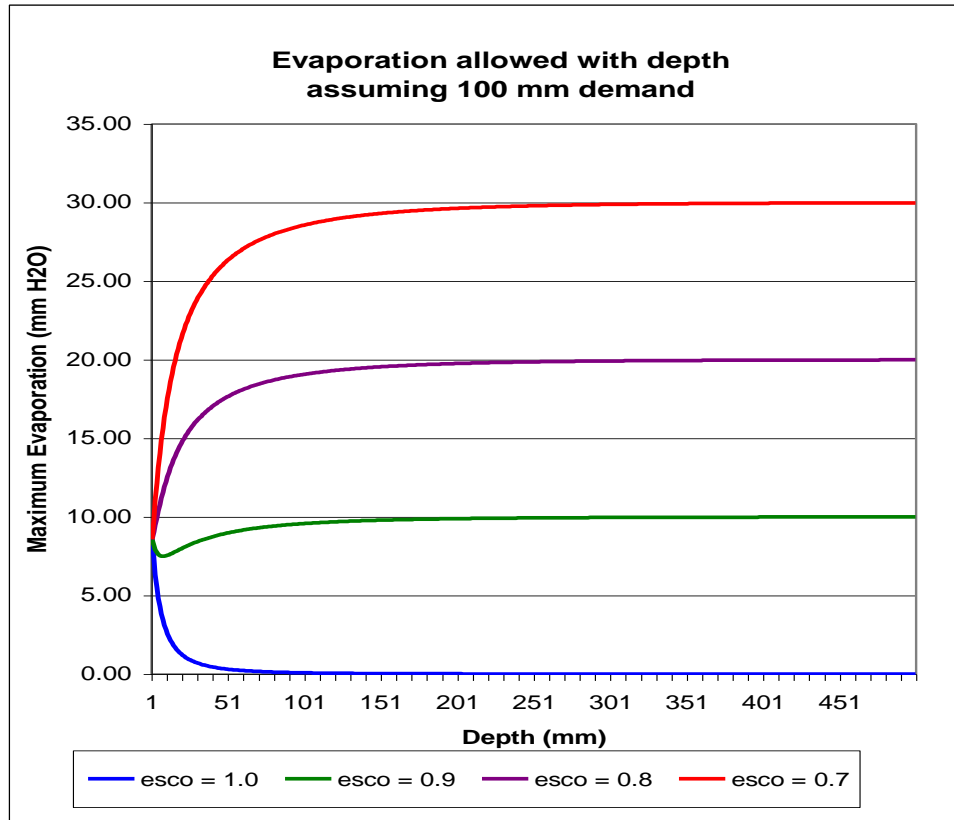


Figure 7-2: Soil evaporative demand distribution with depth

随着 $esco$ 的减小，模型可以分配更多的蒸发需求给较深的土层。

当土层的含水量小于田间持水量时，土层的蒸发需求根据下式的关系下降：

$$E'_{soil,ly} = E_{soil,ly} \cdot \exp\left(\frac{2.5 \cdot (SW_{ly} - FC_{ly})}{FC_{ly} - WP_{ly}}\right) \quad \text{when } SW_{ly} < FC_{ly} \quad 7.3.18$$

$$E'_{soil,ly} = E_{soil,ly} \quad \text{when } SW_{ly} \geq FC_{ly} \quad 7.3.19$$

式中： $E'_{soil,ly}$ 为第 ly 土层根据土壤含水量调整后的蒸发需求(mm H₂O)， $E_{soil,ly}$ 为第 ly 土层的蒸发需求(mm H₂O)， SW_{ly} 为第 ly 土层的含水量(mm H₂O)， FC_{ly} 为第 ly 土层的田间持水量(mm H₂O)， WP_{ly} 为第 ly 土层的凋萎点含水量(mm H₂O)。

除了限制在干旱条件下的蒸发水量，SWAT 定义了在任何条件下的最大去除水量。这一最大值为植物利用水量的 80%，其中植物利用水量定义为土壤含水量与土层凋萎点含水量 (-1.5 MPa) 之差。

$$E''_{soil,ly} = \min \left(E'_{soil,ly}, 0.8 \cdot (SW_{ly} - WP_{ly}) \right) \quad 7.3.20$$

式中： $E''_{soil,ly}$ 为第 ly 土层土壤的蒸发水量(mm H₂O)， $E'_{soil,ly}$ 为第 ly 土层根据土壤含水量调整后的蒸发需求(mm H₂O)， SW_{ly} 为第 ly 土层的含水量(mm H₂O)， WP_{ly} 为第 ly 土层的凋萎点含水量(mm H₂O)。

Table 7-3: SWAT input variables used in soil evaporation calculations.

Variable name	Definition	File Name
ESCO	<i>esco</i> : soil evaporation compensation coefficient	.bsn, .hru

7.4 NOMENCLATURE

- CO_2 Concentration of carbon dioxide in the atmosphere (ppmv)
 CV Total aboveground biomass and residue present on current day (kg ha⁻¹)
 E Depth rate evaporation (mm d⁻¹)
 E_a Actual amount of evapotranspiration on a given day (mm H₂O)
 E_{can} Amount of evaporation from free water in the canopy on a given day (mm H₂O)
 E_o Potential evapotranspiration (mm d⁻¹)
 E'_o Potential evapotranspiration adjusted for evaporation of free water in the canopy (mm H₂O)
 E_s Maximum sublimation/soil evaporation on a given day (mm H₂O)

第 7 章 方程：蒸散发

- E'_s Maximum sublimation/soil evaporation adjusted for plant water use on a given day (mm H₂O)
 E''_s Maximum soil water evaporation on a given day (mm H₂O)
 $E_{soil,ly}$ Evaporative demand for layer ly (mm H₂O)
 $E'_{soil,ly}$ Evaporative demand for layer ly adjusted for water content (mm H₂O)
 $E''_{soil,ly}$ Amount of water removed from layer ly by evaporation (mm H₂O)
 $E_{soil,z}$ Evaporative demand at depth z (mm H₂O)
 E_{sub} Amount of sublimation on a given day (mm H₂O)
 E_t Transpiration rate (mm d⁻¹)
 FC_{ly} Water content of layer ly at field capacity (mm H₂O)
 G Heat flux density to the ground (MJ m⁻² d⁻¹)
 H_0 Extraterrestrial daily irradiation (MJ m⁻² d⁻¹)
 H_{net} Net radiation on day (MJ m⁻² d⁻¹)
 K_1 Dimension coefficient in Penman-Monteith equation
 LAI Leaf area index of the canopy
 LAI_{mx} Maximum leaf area index for the plant
 P Atmospheric pressure (kPa)
 R_{day} Amount of rainfall on a given day (mm H₂O)
 R'_{day} Amount of precipitation on a given day before canopy interception is removed (mm H₂O)
 R_{INT} Amount of free water held in the canopy on a given day (mm H₂O)
 SNO Water content of snow cover on current day (mm H₂O)
 SW_{ly} Soil water content of layer ly (mm H₂O)
 T_{mm} Minimum air temperature for day (°C)
 T_{mx} Maximum air temperature for day (°C)
 \bar{T}_{av} Mean air temperature for day (°C)
 WP_{ly} Water content of layer ly at wilting point (mm H₂O).

 c_p Specific heat of moist air at constant pressure (1.013×10^{-3} MJ kg⁻¹ °C⁻¹)
 can_{day} Maximum amount of water that can be trapped in the canopy on a given day (mm H₂O)
 can_{mx} Maximum amount of water that can be trapped in the canopy when the canopy is fully developed (mm H₂O)
 cov_{sol} Soil cover index
 d Zero plane displacement of the wind profile (cm)
 e Actual vapor pressure on a given day (kPa)
 e^o Saturation vapor pressure on a given day (kPa)
 $esco$ Soil evaporation compensation coefficient
 $fr_{g,mx}$ Fraction of the maximum stomatal conductance, $g_{\ell,mx}$, achieved at the vapor pressure deficit, vpd_{fr}
 g_{ℓ} Leaf conductance (m s⁻¹)
 $g_{\ell,mx}$ Maximum conductance of a single leaf (m s⁻¹)

h_c	Canopy height (cm)
k	Von Kármán constant
r_a	Diffusion resistance of the air layer (aerodynamic resistance) ($s\ m^{-1}$)
r_c	Plant canopy resistance ($s\ m^{-1}$)
r_ℓ	Minimum effective resistance of a single leaf ($s\ m^{-1}$)
$r_{\ell-ab}$	Minimum abaxial stomatal leaf resistance ($s\ m^{-1}$)
$r_{\ell-ad}$	Minimum adaxial stomatal leaf resistance ($s\ m^{-1}$)
u_z	Wind speed at height z_w ($m\ s^{-1}$)
vpd	Vapor pressure deficit (kPa)
vpd_{fr}	Vapor pressure deficit corresponding to $fr_{g, mx}$ (kPa)
vpd_{thr}	Threshold vapor pressure deficit above which a plant will exhibit reduced leaf conductance (kPa)
z	Depth below soil surface (mm)
z_{om}	Roughness length for momentum transfer (cm)
z_{ov}	Roughness length for vapor transfer (cm)
z_p	Height of the humidity (psychrometer) and temperature measurements (cm)
z_w	Height of the wind speed measurement (cm)
α_{pet}	Coefficient in Priestley-Taylor equation
Δ	Slope of the saturation vapor pressure curve ($kPa\ ^\circ C^{-1}$)
$\Delta g_{\ell, decl}$	Rate of decline in leaf conductance per unit increase in vapor pressure deficit ($m\ s^{-1}\ kPa^{-1}$)
ρ_{air}	Air density ($kg\ m^{-3}$)
γ	Psychrometric constant ($kPa\ ^\circ C^{-1}$)
λ	Latent heat of vaporization ($MJ\ kg^{-1}$)

7.5 REFERENCES

- Allen, R.G. 1986. A Penman for all seasons. *J. Irrig. and Drain Engng.*, ASCE, 112(4): 348-368.
- Allen, R.G., M.E. Jensen, J.L. Wright, and R.D. Burman. 1989. Operational estimates of evapotranspiration. *Agron. J.* 81:650-662.
- Brutsaert, W. 1975. Comments on surface roughness parameters and the height of dense vegetation. *J. Meterol. Soc. Japan* 53:96-97.
- Dingman, S.L. 1994. *Physical hydrology*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ.

第 7 章 方程：蒸散发

- Easterling, W.E., N.J. Rosenburg, M.S. McKenney, C.A. Jones, P.T. Dyke, and J.R. Williams. 1992. Preparing the erosion productivity impact calculator (EPIC) model to simulate crop response to climate change and the direct effects of CO₂. *Agricultural and Forest Meteorology* 59:17-34.
- Hargreaves, G.H. 1975. Moisture availability and crop production. *Trans. ASAE* 18: 980-984.
- Hargreaves, G.H. and Z.A. Samani. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture* 1:96-99.
- Hargreaves, G.H. and Z.A. Samani. 1982. Estimating potential evapotranspiration. *Tech. Note, J. Irrig. and Drain. Engr.* 108(3):225-230.
- Hargreaves, G.L., G.H. Hargreaves, and J.P. Riley. 1985. Agricultural benefits for Senegal River Basin. *J. Irrig. and Drain. Engr.* 111(2):113-124.
- Jensen, M.E., R.D. Burman, and R.G. Allen (ed). 1990. *Evapotranspiration and irrigation water requirements*. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 70, ASCE, N.Y. 332 pp.
- Monteith, J.L. 1965. Evaporation and the environment. p. 205-234. In *The state and movement of water in living organisms*, XIXth Symposium. Soc. for Exp. Biol., Swansea, Cambridge University Press.
- Monteith, J.L. 1981. Evaporation and surface temperature. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 107:1-27.
- Morison, J.I.L. 1987. Intercellular CO₂ concentration and stomatal response to CO₂. p. 229-251. In E. Zeiger, G.D. Farquhar and I.R. Cowan (ed.) *Stomatal function*. Stanford University Press, Palo Alto, CA.
- Morison, J.I.L. and R.M. Gifford. 1983. Stomatal sensitivity to carbon dioxide and humidity. *Plant Physiol.* 71:789-796.
- Penman, H.L. 1956. Evaporation: An introductory survey. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 4:7-29.
- Plate, E.J. 1971. *Aerodynamic characteristics of atmospheric boundary layers*. U.S. Atomic Energy Comm., Critical Review Series, TID-25465. 190 pp.

- Priestley, C.H.B. and R.J. Taylor. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Mon. Weather. Rev.* 100:81-92.
- Ritchie, J.T. 1972. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resour. Res.* 8:1204-1213.
- Rosenburg, N.J., B.L. Blad, and S.B. Verma. 1983. *Microclimate: the biological environment*, 2nd ed. John Wiley & Sons, New York.
- Stockle, C.O., J.R. Williams, N.J. Rosenberg, and C.A. Jones. 1992. A method for estimating the direct and climatic effects of rising atmospheric carbon dioxide on growth and yield of crops: Part 1—Modification of the EPIC model for climate change analysis. *Agricultural Systems* 38:225-238.
- Stricker, H. and W. Brutsaert. 1978. Actual evapotranspiration over summer period in the 'Hupsel Catchment.' *J. Hydrol.* 39:139-157.
- Thornthwaite, C.W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review* 38:55-94.

第 8 章 方程:土壤水

进入土壤的水可以有不同的运动路径。土壤水分可以被植被吸收或蒸发，也可以从土壤剖面底部渗漏并最终变为含水层出流，还可以在土壤剖面中作水平运动补给河道径流。在这些不同的运动路径中，植被吸收去除了进入土壤剖面的大部分水分。

8.1 土壤结构

土壤包括三相：固、液和气。固相包括形成土壤基质或骨干的无机物和有机物。在固体颗粒之间，土壤孔隙中存在液相和气相。土壤溶液可以完全（饱和）或部分（非饱和）地充满土壤孔隙。当土壤为非饱和时，土壤溶液可以为附着在颗粒表面的薄膜、在颗粒接触点周围的环型楔以及在狭窄的孔隙中的分隔体。

土壤容积密度定义为孔隙空间和基质的相对量。容积密度为：

$$\rho_b = \frac{M_s}{V_T} \quad 8.1.1$$

式中： ρ_b 为容积密度(Mg m^{-3})， M_s 为固体质量(Mg)， V_T 为土壤总体积(m^3)。

总体积定义为：

$$V_T = V_A + V_w + V_s \quad 8.1.2$$

式中： V_A 为空气体积(m^3)， V_w 为水的体积(m^3)， V_s 为固体的体积(m^3)。

土壤孔隙率和土壤容积密度的关系为：

$$\phi_{soil} = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_s} \quad 8.1.3$$

式中： ϕ_{soil} 土壤孔隙率，表示为总体积的分数， ρ_b 为容积密度(Mg m^{-3})， ρ_s 为颗粒密度(Mg m^{-3})。颗粒密度，或土壤固体密度，为土壤基质中无机组成部分的函数。根据研究，其默认值为 2.65 Mg m^{-3}

土壤溶液、气体的存储、传输和可得性更加以来于土壤孔隙空间的安排而非孔隙率。根据在最狭窄点处的毛孔直径，毛孔可以分为大孔隙（最小

第 8 章 方程:土壤水

直径 $>100\text{ }\mu\text{m}$),中等孔隙(最小直径在 $30\text{-}100\text{ }\mu\text{m}$)和微孔隙(最小直径 $<30\text{ }\mu\text{m}$)。大孔隙只有在暴雨或蓄水期才传输水分,并且在这些孔隙的排水在停止水供给后很快结束。大孔隙控制土壤的通风和排水过程。中等孔隙在大孔隙排空后依然排水,例如,在没有积蓄雨水和水分再分配时。微孔隙持蓄土壤溶液或传输速率十分的慢。

当比较不同质地的土壤时,黏土包含更多的微孔隙和中等孔隙,而沙土包含更多的大孔隙。通过比较黏土和沙土的水力传导率可以明显地得到上述结论。沙土的传导率可以是黏土的好几个数量级。

土壤含水量在 0 (土壤烘干后)到最大值, Φ_{soil} (土壤饱和)之间变化。对于植被 - 土壤交互,可以发现两种中间状态:田间持水量和永久凋萎点。田间持水量为当饱和土壤排水两天后的含水量。永久凋萎点为,土壤中生长植被开始凋萎并且其叶片不能在潮湿空气经过一晚后恢复时的土壤含水量。为了使这两种状态易于定量化,采用不同压强下的土壤含水量来定义。田间持水量为土壤在压强为 0.033 MPa 下的含水量,凋萎点含水量为土壤在压强为 1.5 MPa 下的含水量。田间持水量和凋萎点含水量之差为植物可利用水量。

Table 8-1: Water contents for various soils at different moisture conditions.

Texture	Clay Content (% Solids)	Water content (fraction total soil volume)		
		Saturation	Field capacity	Permanent wilting point
sand	3 %	0.40	0.06	0.02
loam	22 %	0.50	0.29	0.05
clay	47 %	0.60	0.41	0.20

表 8-1 列出了三种土壤在不同湿润条件下的含水量。注意总孔隙率 (在含水量饱和时给出), 对于沙土最低, 而对于黏土最高。

黏土排水比壤土和黏土要快。在沙土中, 田间持水量只有 15% 的饱和含水量, 而该值对于壤土为 58%, 对于黏土为 68%。随着黏土含量增加水分损失减少的原因有两个: 如前所述, 黏土比沙土含有更多的微孔隙和中等孔隙; 同时, 与沙土和粉土土粒不同, 黏土土粒具有负压。因为水分的极化特征, 黏土土粒可以吸引和持留水分子。黏土土粒的高持水能力也可以由永久凋萎点时的高含水量说明。在表 8-1 中列出的土壤, 在凋萎点, 黏土的容积含水量为 0.20 而沙土和壤土分别为 0.02 和 0.05。

植物可利用水量, 也可以成为可利用水容量, 通过田间持水量和永久凋萎点含水量之差计算:

$$AWC = FC - WP \quad 8.1.4$$

式中: AWC 为植物可利用水量, FC 为田间持水量, WP 凋萎点含水量。对于表 8-1 列出的三种不同质地的土壤, 沙土的可利用水容量为 0.04, 壤土为 0.24, 黏土为 0.21。即使黏土比壤土含水量高, 壤土提供的植物可利用水量教黏土为高。这一性质在实际中也是普遍的。

SWAT 采用下式估算每一层土壤的永久凋萎点含水量:

$$WP_{ly} = 0.40 \cdot \frac{m_c \cdot \rho_b}{100} \quad 8.1.5$$

式中: WP_{ly} 第 ly 层永久凋萎点含水量, 表示为总体积的分数, m_c 为土层的黏土含量 (%), ρ_b 为容积密度 ($Mg \cdot m^{-3}$)。田间持水量采用下式估算:

第 8 章 方程:土壤水

$$FC_{ly} = WP_{ly} + AWC_{ly} \quad 8.1.6$$

式中： FC_{ly} 第 ly 层田间持水量，表示为总体积的分数， WP_{ly} 第 ly 层永久凋萎点含水量，表示为总体积的分数， AWC_{ly} 为第 ly 层植物可利用水量。 AWC_{ly} 为用户输入参数。

水分可以在饱和或非饱和状态下流动。在饱和土壤中，水流驱动力为重力，通常向下流动。非饱和土壤中水流驱动力为由临近区域高低含水量梯度。非饱和水量可以向任意方向流动。

SWAT 只模拟饱和水流。模型记录每一个土层的含水量，但假设水分在每一个土层中均匀分布。这一假设使得模型不需模拟水平方向的非饱和流。不同土层间的非饱和流通过植物水吸收深度分布（方程 18.2.1）和土壤水蒸发深度分布（方程 7.3.16）来间接模拟。

饱和水流在土层含水量超过田间持水量时发生。超过田间持水量的水分可以产生渗漏、侧向流或者瓦沟排水，条件是土层温度大于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。当土层冻结时，没有水分运动。

Table 8-1: SWAT input variables used in percolation calculations.

Variable name	Definition	File Name
CLAY	m_c : Percent clay content	.sol
SOL_BD	ρ_b : Bulk density (Mg m^{-3})	.sol
SOL_AWC	AWC_{ly} : available water capacity	.sol

8.2 渗漏

渗漏发生在土壤剖面的每一个土层。当土层含水量超过田间持水量时发生渗漏。当土层冻结时，没有水流运动。

土层中可以下渗的水量为：

$$SW_{ly,excess} = SW_{ly} - FC_{ly} \quad \text{if} \quad SW_{ly} > FC_{ly} \quad 8.2.1$$

$$SW_{ly,excess} = 0 \quad \text{if} \quad SW_{ly} \leq FC_{ly} \quad 8.2.2$$

式中： $SW_{ly,excess}$ 为模拟日土层中可以排出的水量(mm H₂O)， SW_{ly} 为模拟日土层中的含水量(mm H₂O)， FC_{ly} 为土层田间持水量(mm H₂O)。

从一个土层向下一层运动的水分采用库容演算方法：

$$w_{perc,ly} = SW_{ly,excess} \cdot \left(1 - \exp \left[\frac{-\Delta t}{TT_{perc}} \right] \right) \quad 8.2.3$$

式中： $w_{perc,ly}$ 为一个土层向下一层运动的水量(mm H₂O)， $SW_{ly,excess}$ 为模拟日土层中可以排出的水量(mm H₂O)， Δt 为时间步长 (hrs)， TT_{perc} 为渗漏传播时间 (hrs)。

渗漏传播对于每一层是不同的：

$$TT_{perc} = \frac{SAT_{ly} - FC_{ly}}{K_{sat}} \quad 8.2.4$$

式中： TT_{perc} 为渗漏传播时间(hrs)， SAT_{ly} 为土层完全饱和时的含水量(mm H₂O)， FC_{ly} 为土层田间持水量(mm H₂O)， K_{sat} 为土层饱和水力传导率 (mm·h⁻¹)。

从最底层土层渗漏的水分进入包气带。包气带为土壤剖面底部与含水层顶部之间的部分。水分在包气带运动进入含水层的方程在第9章介绍。

第 8 章 方程:土壤水

Table 8-2: SWAT input variables used in percolation calculations.

Variable name	Definition	File Name
SOL_K	K_{sat} : Saturated hydraulic conductivity (mm/hr)	.sol

8.3 旁通流

土纲中十分特殊的一类为变性土。这类土壤在干燥时收缩而在湿润时膨胀。当土壤干燥时，有大的裂隙在土壤表面出现。这种行为是气候和土壤特性共同决定的。变性土包含至少 30%的黏土，并且黏土主要 smectitic 矿物组成。并且处在干湿循环的气候条件下。

变性土分布很广（图 8-1），并且具有很多地方性名称，这些名称中的部分列在表 8-3。

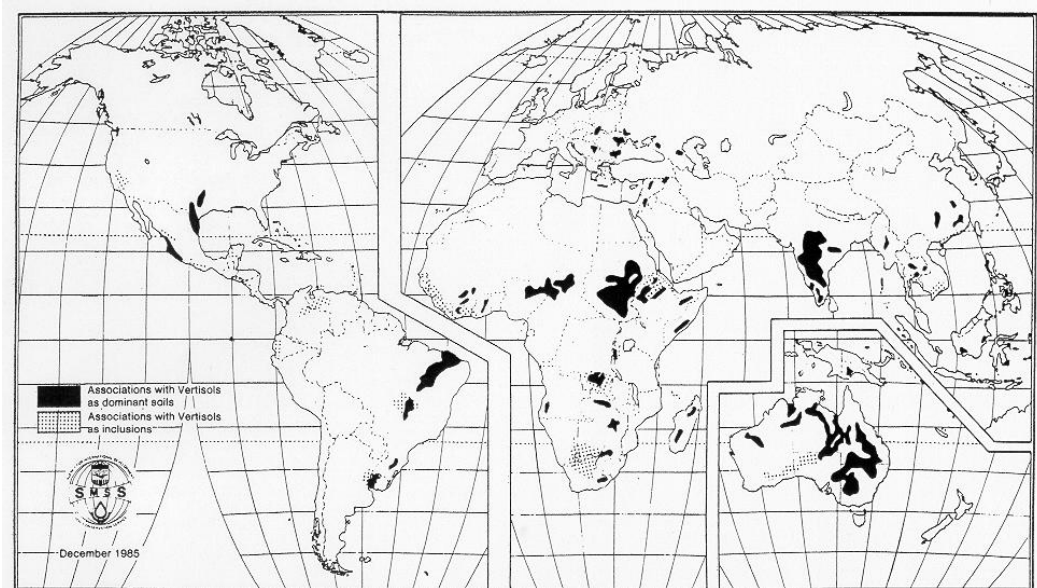


Figure 8-1: Soil associations of Vertisols (From Dudal and Eswaran, 1988)

Table 8-3: Alternative names for Vertisols or soils with Vertic properties (Dudal and Eswaran, 1988).

Names	Countries
<i>Names that include the word "black"</i>	
Barros pretos	Portugal
Black clays	South Africa, Australia
Black cotton soils	Africa, India
Black cracking clays	Uganda
Black earths	Australia, Africa
Black turf soils	South Africa
Dark clay soils	United States
Subtropical black clays	Africa
Sols noirs tropicaux	Africa
Terra nera	Italy
Terres noires tropicales	Africa
Terras negras tropicais	Mozambique
Tierras negras de Andalucia	Spain
Tropical black earths	Angola, Ghana
Tropical black clays	Africa
<i>Names that reflect the black color</i>	
Karail	India
Melanites	Ghana
Teen Suda	Sudan
Tropical Chernozems	Africa, India
Impact Chernozems	Russia
<i>Vernacular names</i>	
Adobe soils	United States, Philippines
Badobes	Sudan
Dian Pere	French West Africa
Gilgai soils	Australia
Firki	Nigeria
Mbuga	Tanzania
Kahamba	Congo
Makande	Malawi
Morogan	Romania
Regur	India
Rendzina	United States
Shachiang soils	China
Smolnitza	Bulgaria, Romania

第 8 章 方程:土壤水

Smonitza	Austria, Yugoslavia
Sols de paluds	France
<hr/>	
Tirs	Morocco, North Africa
Vlei grond	South Africa
Sonsocuite	Nicaragua
<hr/>	
<i>Coined names</i>	
<hr/>	
Densinagra soils	Angola
Gravinigra soils	Angola
Grumusols	United States
Margalite soils	Indonesia
Vertisols	United States

用来定义土壤为变性土的一个标准是在干季形成收缩裂隙，并且裂隙要超过 50cm 深，在 50cm 深处至少 1cm 宽。裂隙在表面的宽度可能达到 30cm，典型的宽度为 6-15cm。

为准确预测变性土区域的地表径流和下渗，土壤体积随时间的变化需要定量化。Bouma and Loveday (1988) 定义了三种下渗需要重新定义的土壤湿润条件 (图 8-2)。

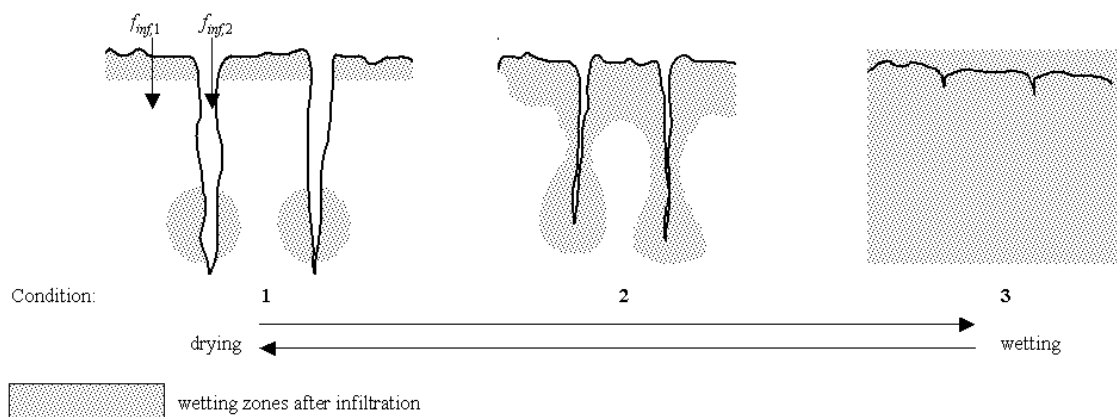


Figure 8-2: Diagram showing the effect of wetting and drying on cracking in Vertisols (from Bouma and Loveday, 1988)

传统下渗模型适用于裂隙膨胀合并,土壤表现为均匀孔隙介质的情况(图 8-2 中的第 3 种情况)。第一种情况代表裂隙具有最大宽度,这种情况发生在干季结束雨季开始时。情况 2 为旺盛生长的作物需要多次灌溉或降水来支持其生长的裂隙发展。旁通流,自由水在非饱和土壤层的垂直运动,在情况 1 和 2 会发生。旁通流(图 8-2 中的 $finf,2$) 在降雨或灌溉速率超过垂直下渗速率(图 8-2 中的 $finf,1$) 时发生。

当模拟旁通流时,SWAT 计算每一层土壤的裂隙体积。在降水发生的日期,下渗(图 8-2 中的 $finf,1$) 和地表径流首先采用曲线数法或 Green & Ampt 法计算。如果产生地表径流,则进入裂隙。相当于土壤剖面总裂隙体积的水量允许作为旁通流进入土壤剖面。超过裂隙体积的地表径流作为坡面流。

进入裂隙的水首先充满裂隙底层土壤,并依次充满上层裂隙。

初始估计的土层裂隙体积为:

$$crk_{ly,i} = crk_{max,ly} \cdot \frac{coef_{crk} \cdot FC_{ly} - SW_{ly}}{coef_{crk} \cdot FC_{ly}} \quad 8.3.1$$

式中: $crk_{ly,i}$ 为模拟日土层初始裂隙体积,表示为深度(mm), $crk_{max,ly}$ 土层最大允许裂隙体积(mm), $coef_{crk}$ 为旁通流调整系数, SW_{ly} 为模拟日土层中的含水量($mm H_2O$), FC_{ly} 为土层田间持水量($mm H_2O$)。旁通流调整系数设为 0.10。

在干化阶段,当整个土壤剖面的含水量低于田间持水量 90% 时,模拟日裂隙体积根据方程 8.3.1 估算的体积和前一天裂隙体积估算。当土壤在湿润阶

第 8 章 方程:土壤水

段或土壤剖面含水量超过田间持水量90%时，模拟日裂隙体积根据为方程

8.3.1估算的体积：

$$crk_{ly} = \ell_{crk} \cdot crk_{ly,d-1} + (1.0 - \ell_{crk}) \cdot crk_{ly,i}$$

when $SW < 0.90 \cdot FC$ and $crk_{ly,i} > crk_{ly,d-1}$ 8.3.2

$$crk_{ly} = crk_{ly,i}$$

when $SW \geq 0.90 \cdot FC$ or $crk_{ly,i} \leq crk_{ly,d-1}$ 8.3.3

式中： crk_{ly} 为模拟日土层裂隙体积，表示为深度（mm）， ℓ_{crk} 为干化阶段裂隙发育延迟系数。 $crk_{ly,d-1}$ 为前一天土层裂隙体积（mm）， $crk_{ly,i}$ 为根据方程8.3.1估算的模拟日初始裂隙体积（mm）， SW 为模拟日土壤剖面的含水量（mm H₂O）， FC_{ly} 为土壤剖面田间持水量（mm H₂O）。

当决定土壤剖面持水量的压强增加，水分传播变慢。因为水分传播与经典固结原理中固结系数相似(Mitchell, 1992)，传播的减少会影响裂隙的形成。在干化阶段，延迟系数的引入考虑了土壤水分再分配。延迟系数， ℓ_{crk} ，默认值为0.99。

土层的最大裂隙体积， $crk_{max,ly}$ ，采用下式计算：

$$crk_{max,ly} = 0.916 \cdot crk_{max} \cdot \exp \left[-0.0012 \cdot z_{l,ly} \cdot depth_{ly} \right]$$
 8.3.4

式中： $crk_{max,ly}$ ，土层的最大裂隙体积（mm）， crk_{max} 为整个土壤剖面的潜在裂隙体积，表示为总体积的分数， $z_{l,ly}$ 为从土壤表面到土层底部的深度（mm）， $depth_{ly}$ 为土层深度（mm）。潜在裂隙体积， crk_{max} ，需要用户输入。测量这一参数所需信息请参与Bronswijk (1989; 1990)的著作。

每一层的裂隙体积计算后，可得土壤剖面总裂隙体积

$$crk = \sum_{ly=1}^n crk_{ly} \quad 8.3.5$$

式中： crk 为土壤剖面总裂隙体积 (mm)， crk_{ly} 为每一层的裂隙体积 (mm)， ly 为土层， n 为土壤剖面的层数。

采用曲线数或Green & Ampt 法计算地表径流后，该值需要减去该日的裂隙体积：

$$Q_{surf} = Q_{surf,i} - crk \quad \text{if } Q_{surf,i} > crk \quad 8.3.6$$

$$Q_{surf} = 0 \quad \text{if } Q_{surf,i} \leq crk \quad 8.3.7$$

式中： Q_{surf} 模拟日径流(mm H₂O)， $Q_{surf,i}$ 模拟日采用曲线数或Green & Ampt 法计算地表径流(mm H₂O)， crk 为土壤剖面总裂隙体积 (mm)。总的进入土壤的水分为：

$$w_{inf} = R_{day} - Q_{surf} \quad 8.3.8$$

式中： w_{inf} 模拟日进入土壤的水分(mm H₂O)， R_{day} 为考虑冠层截留后的降水深度(mm H₂O)， Q_{surf} 模拟日径流(mm H₂O)。

穿过土壤剖面底部的旁通流为：

$$w_{crk,btm} = 0.5 \cdot crk \cdot \left(\frac{crk_{ly=nn}}{depth_{ly=nn}} \right) \quad 8.3.9$$

式中： $w_{crk,btm}$ 为穿过土壤剖面底部的旁通流(mm H₂O)， crk 为土壤剖面总裂隙体积 (mm)， $crk_{ly=nn}$ 为模拟日最深土层的裂隙体积 (mm)， $depth_{ly=nn}$ 为最深土层的深度 (mm)。

计算完成 $w_{crk,btm}$ 后，从最深土层开始充满，直至耗尽所有进入土壤的水分。

第 8 章 方程:土壤水

Table 8-4: SWAT input variables used in bypass flow calculations.

Variable name	Definition	File Name
ICRK	Bypass flow code: 0-do not model bypass flow; 1-model bypass flow	.cod
SOL_CRK	crk_{max} : Potential crack volume for soil profile	.sol

8.4 侧向流

侧向流在土壤传导率较高且较浅处具有不透水或半透水层的地区显著。在这样一个系统中，降水会在垂直方向上渗漏，直到不透水层。水分会在不透水层上方累积，形成饱和带，即上层滞水面。这一饱和带为侧向流地下流的来源。

SWAT采用动力存储模型 (Sloan et al., 1983) 模拟地下径流。这一模型模拟陡坡山坡上的两维横截面流路。这一方程的推倒采用了动力学近似。

这一模型基于质量守恒方程，或水量平衡方程，并将整个山坡段作为控制体。山坡段具有深度为 D_{perm} ，长度为 L_{hill} 的透水性土壤，并且在在其底部有不透水土层或边界 (图8-3)。山坡段于水平方向的夹角为 α_{hill} 。

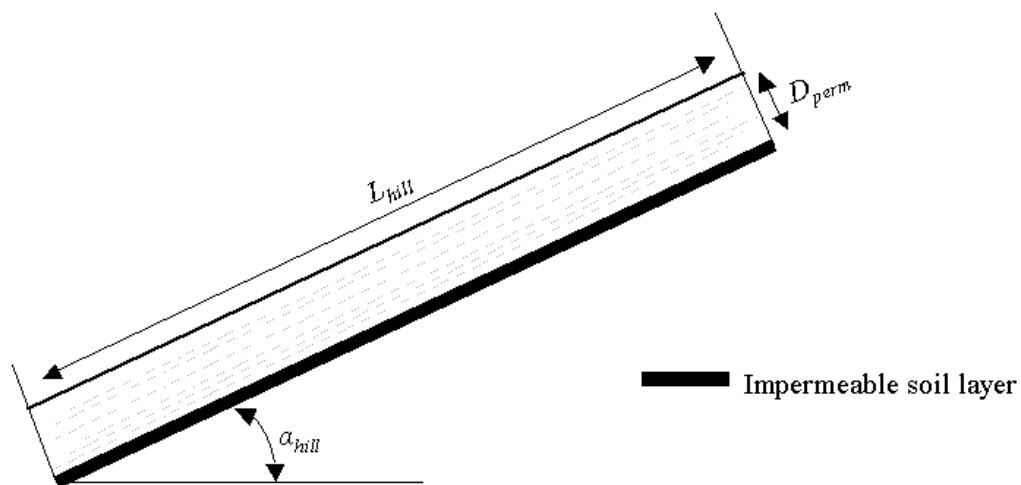


Figure 8-3: Conceptual representation of the hillslope segment.

第 8 章 方程:土壤水

饱和地下水或侧向流的动力波逼近假设饱和带中的流线与不透水边界平行，且水力坡度与坡度相等。

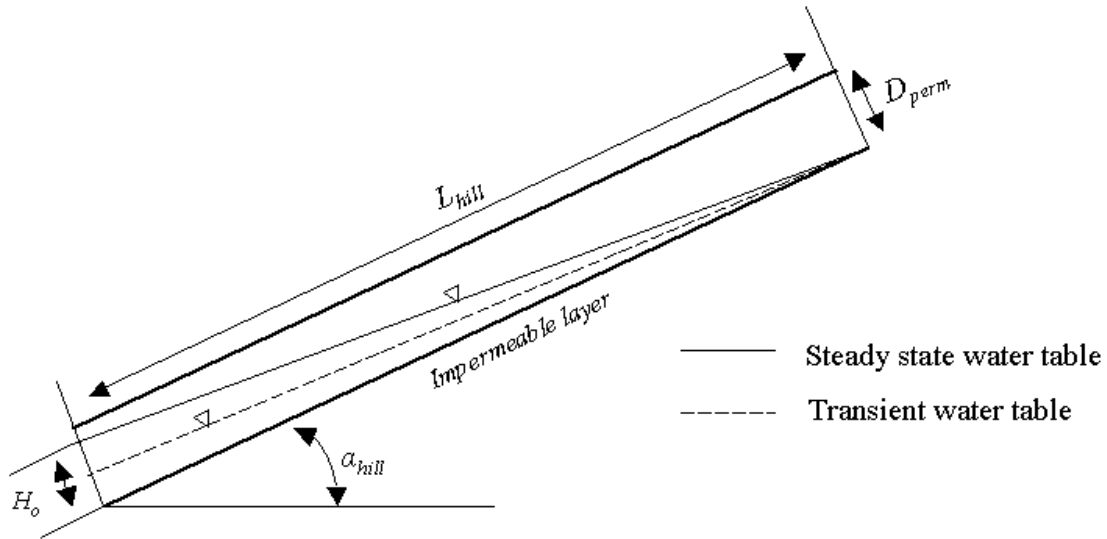


Figure 8-4: Behavior of the water table as assumed in the kinematic storage model.

从图8-4，山坡段饱和带内单位面积可以排出的水量， $SW_{ly,excess}$ ，为：

$$SW_{ly,excess} = \frac{1000 \cdot H_o \cdot \phi_d \cdot L_{hill}}{2} \quad 8.4.1$$

式中： $SW_{ly,excess}$ 为山坡段饱和带内单位面积可以排出的水量(mm H₂O)， H_o 为出口处垂直于山坡的饱和带厚度，表示为总厚度的分数 (mm/mm)， ϕ_d 为土壤可排泄孔隙率 (mm/mm)， L_{hill} 为坡长 (m)，1000为变换m为mm的转换因子。这一方程可以求解 H_o

$$H_o = \frac{2 \cdot SW_{ly,excess}}{1000 \cdot \phi_d \cdot L_{hill}} \quad 8.4.2$$

土壤孔隙率为：

$$\phi_d = \phi_{soil} - \phi_{fc} \quad 8.4.3$$

式中： Φ_d 为土壤可排泄孔隙率 (mm/mm)， Φ_{soil} 为土壤孔隙率 (mm/mm)， Φ_{fc} 田间持水量所充满孔隙 (mm/mm)。

当土层含水量超过土层田间持水量时，被认为是饱和的。在饱和层中可排泄的水量为

$$SW_{ly,excess} = SW_{ly} - FC_{ly} \quad \text{if} \quad SW_{ly} > FC_{ly} \quad 8.4.4$$

$$SW_{ly,excess} = 0 \quad \text{if} \quad SW_{ly} \leq FC_{ly} \quad 8.4.5$$

式中： SW_{ly} 为模拟日土层含水量 (mm H₂O)， FC_{ly} 为土层田间持水量 (mm H₂O)。

山坡段出口净排水量， Q_{lat} ，为：

$$Q_{lat} = 24 \cdot H_o \cdot v_{lat} \quad 8.4.6$$

式中： Q_{lat} 为山坡出口排水量 (mm H₂O/day)， H_o 为山坡出口处垂直于山坡的含水层饱和厚度，表示为山坡含水层总厚度的分数 (mm/mm)， v_{lat} 为出口处的水流速率 (mm·h⁻¹)，24 为将小时转化为天的因子。

出口处的水流速率定义为：

$$v_{lat} = K_{sat} \cdot \sin(\alpha_{hill}) \quad 8.4.7$$

where K_{sat} 为饱和水力传导率 (mm·h⁻¹)， α_{hill} 山坡段坡度。SWAT 中的坡度输入为单位距离 (slp) 高程的增加，与 $\tan(\alpha_{hill})$ 相等。由于 $\tan(\alpha_{hill}) \cong \sin(\alpha_{hill})$ ，方程 8.4.3 采用坡度作为模型输入：

$$v_{lat} = K_{sat} \cdot \tan(\alpha_{hill}) \cong K_{sat} \cdot slp \quad 8.4.8$$

结合方程 8.4.2、8.4.8 和 8.4.6，得到：

第 8 章 方程:土壤水

$$Q_{lat} = 0.024 \cdot \left(\frac{2 \cdot SW_{ly,excess} \cdot K_{sat} \cdot slp}{\phi_d \cdot L_{hill}} \right) \quad 8.4.9$$

式中所有的术语同前。

8.4.1 测向流延迟

在大的子流域，汇流时间超过 1 天，只有一部分侧向流进入主河道。SWAT 考虑了这一特性，延迟了一部分侧向流进入主河道。

计算侧向流后，进入主河道的部分需要给出：

$$Q_{lat} = Q'_{lat} + Q_{latstor,i-1} \cdot \left(1 - \exp \left[\frac{-1}{TT_{lat}} \right] \right) \quad 8.4.10$$

式中： Q_{lat} 为模拟日进入主河道的侧向流(mm H₂O)， Q'_{lat} 为模拟日产生的侧向流(mm H₂O)， $Q_{latstor,i-1}$ 为模拟日前一天剩余的侧向流(mm H₂O)， TT_{lag} 为侧向流传播时间 (days)。

模型可以计算侧向流传播时间或采用用户定义时间。在大多数情况下，用户应该采用模型计算值。如果 HRU 中存在瓦沟排水，侧向流传播时间为：

$$TT_{lag} = \frac{tile_{lag}}{24} \quad 8.4.11$$

式中： TT_{lag} 为侧向流传播时间 (days)， $tile_{lag}$ 为瓦沟排水延迟时间 (hrs)。

如果HRU中不存在瓦沟排水，侧向流传播时间为：

$$TT_{lag} = 10.4 \cdot \frac{L_{hill}}{K_{sat,mx}} \quad 8.4.12$$

式中： TT_{lag} 为侧向流传播时间 (days)， L_{hill} 为山坡坡长 (m)， $K_{sat,mx}$ 土壤剖面中的最大饱和传导率 (mm/hr)。

方程 8.4.10 中的表达式 $\left(1 - \exp\left[\frac{-1}{TT_{lag}}\right]\right)$ 代表模拟日允许进入主河道的水量占

总可得水量的分数。图 8-5 图示了不同 TT_{lag} 值时的该表达式值。

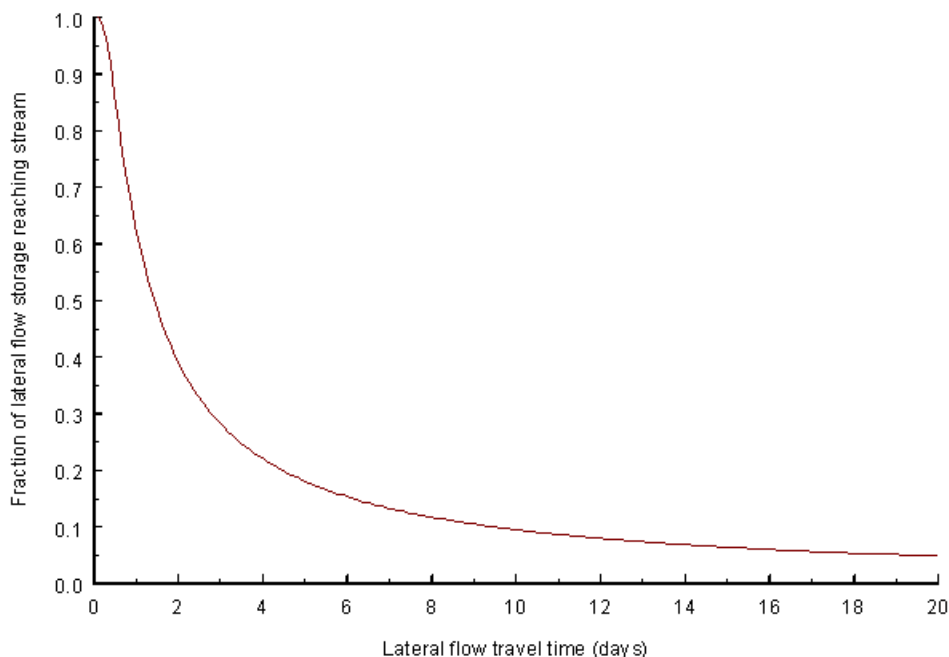


Figure 8-5: Influence of TT_{lag} on fraction of lateral flow released.

侧向流延迟可以平滑河道径流过程线。

Table 8-5: SWAT input variables used in lateral flow calculations.

Variable name	Definition	File Name
SLSOIL	L_{hill} : Hillslope length (m)	.hru
SOL_K	K_{sat} : Saturated hydraulic conductivity (mm/hr)	.sol
SLOPE	slp : Average slope of the subbasin (m/m)	.hru
LAT_TTIME	TT_{lag} : Lateral flow travel time (days)	.hru
GDRAIN	$tile_{lag}$: Drain tile lag time (hrs)	.hru

8.5 NOMENCLATURE

- AWC* Available water capacity (fraction or mm H₂O)
AWC_{ly} Available water capacity of soil layer (fraction or mm H₂O)
FC Water content of soil profile at field capacity (fraction or mm H₂O)
FC_{ly} Water content of layer *ly* at field capacity (fraction or mm H₂O)
H_o Saturated thickness normal to the hillslope at the outlet expressed as a fraction of the total thickness (mm/mm)
K_{sat} Saturated hydraulic conductivity (mm/hr)
L_{hill} Hillslope length (m)
M_S Mass of the solids (Mg)
Q_{lat} Lateral flow; water discharged from the hillslope outlet (mm H₂O/day)
Q_{latstor,i-1} Lateral flow stored or lagged from the previous day (mm H₂O)
Q_{surf} Accumulated runoff or rainfall excess (mm H₂O)
R_{day} Amount of rainfall on a given day (mm H₂O)
SAT_{ly} Amount of water in the soil layer when completely saturated (mm H₂O)
SW Amount of water in soil profile (mm H₂O)
SW_{ly} Soil water content of layer *ly* (mm H₂O)
SW_{ly,excess} Drainable volume of water stored layer (mm H₂O)
TT_{lag} Lateral flow travel time (days)
TT_{perc} Travel time for percolation (hrs)
V_A Volume of air (m³)
V_S Volume of solids (m³)
V_T Total soil volume (m³)
V_W Volume of water (m³)
WP Water content at wilting point (fraction or mm H₂O)
WP_{ly} Water content of the soil layer at wilting point (fraction or mm H₂O)
- coef_{crk}* Adjustment coefficient for crack flow
crk Total crack volume for the soil profile on a given day (mm)
crk_{ly} Crack volume for the soil layer on a given day expressed as a depth (mm)
crk_{ly,d-1} Crack volume for the soil layer on the previous day (mm)
crk_{ly,i} Initial crack volume calculated for the soil layer on a given day expressed as a depth (mm)
crk_{max} Potential crack volume for the soil profile expressed as a fraction of the total volume
crk_{max,ly} Maximum crack volume possible for the soil layer (mm)
depth_{ly} Depth of the soil layer (mm)
m_c Percent clay content
slp Average slope of the subbasin (% or m/m)
tile_{lag} Drain tile lag time (hrs).
v_{lat} Velocity of flow at the hillslope outlet (mm·h⁻¹)
w_{crk,btm} Amount of water flow past the lower boundary of the soil profile due to bypass flow (mm H₂O)
w_{inf} Amount of water entering the soil profile on a given day (mm H₂O)

$w_{perc,ly}$ Amount of water percolating to the underlying soil layer on a given day (mm H₂O)

$z_{l,ly}$ Depth from the surface to the bottom of the soil layer (mm)

α_{hill} Slope of the hillslope segment (degrees)

Δt Length of the time step (hrs)

ℓ_{crk} Lag factor for crack development during drying

ρ_b Bulk density (Mg m⁻³)

ρ_s Particle density (Mg m⁻³)

ϕ_d Drainable porosity of the soil (mm/mm)

ϕ_{fc} Porosity of the soil layer filled with water when the layer is at field capacity water content (mm/mm)

ϕ_{soil} Porosity of the soil (mm/mm)

8.6 REFERENCES

- Bouma, J. and J. Loveday. 1988. Chapter 5: Characterizing soil water regimes in swelling clay soils. p. 83-96. *In* L.P. Wilding and R. Puentes (ed). Vertisols: their distribution, properties, classification and management. Texas A&M University Printing Center, College Station, TX.
- Bronswijk, J.J.B. 1989. Prediction of actual cracking and subsidence in clay soils. *Soil Science* 148:87-93.
- Bronswijk, J.J.B. 1990. Shrinkage geometry of a heavy clay soil at various stresses. *Soil Science Soc. Am. J.* 54:1500-1502.
- Dudal, R. and H. Eswaran. 1988. Chapter 1: Distribution, properties and classification of vertisols. p. 1-22. *In* L.P. Wilding and R. Puentes (ed). Vertisols: their distribution, properties, classification and management. Texas A&M University Printing Center, College Station, TX.
- Koorevaar, P., G. Menelik, and C. Dirksen. 1983. *Elements of Soil Physics*. Elsevier, Amsterdam.
- Mitchell, A.R. 1992. Shrinkage terminology: escape from 'normalcy'. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 56:993-994.

第 8 章 方程:土壤水

Sloan, P.G. and I.D. Moore. 1984. Modeling subsurface stormflow on steeply sloping forested watersheds. *Water Resources Research*. 20(12): 1815-1822.

Sloan, P.G., I.D. Morre, G.B. Coltharp, and J.D. Eigel. 1983. Modeling surface and subsurface stormflow on steeply-sloping forested watersheds. *Water Resources Inst. Report 142*. Univ. Kentucky, Lexington.

第 9 章 方程:地下水

地下水是地壳饱和带中压力高于大气压（正压）的水。水分进入地下水存储的主要方式为下渗和渗漏，虽然地表水体对地下水的再补给也会发生。

9.1 地下水系统

在地下水饱和带中，存在高导水率和低导水率区域。高导水率区域由粗粒状颗粒组成，具有较多的大孔隙，可以较容易地允许水分运动。低导水率区域由细粒状颗粒组成，具有较多的微孔隙和中等孔隙，限制了水分运动速率。

含水层为“一个地质单元，可以存储足够的水分并且以可以产生显著水文效应速率传输水分” (Dingman, 1994)。非承压含水层的上边界为地下水面。地下水面定义为水压强为标准大气压的深度。承压含水层的上边界和下边界均被水力传导率较含水层传导率显著降低的地质物质所限制。图 9-1 图示了这两种类型的含水层。

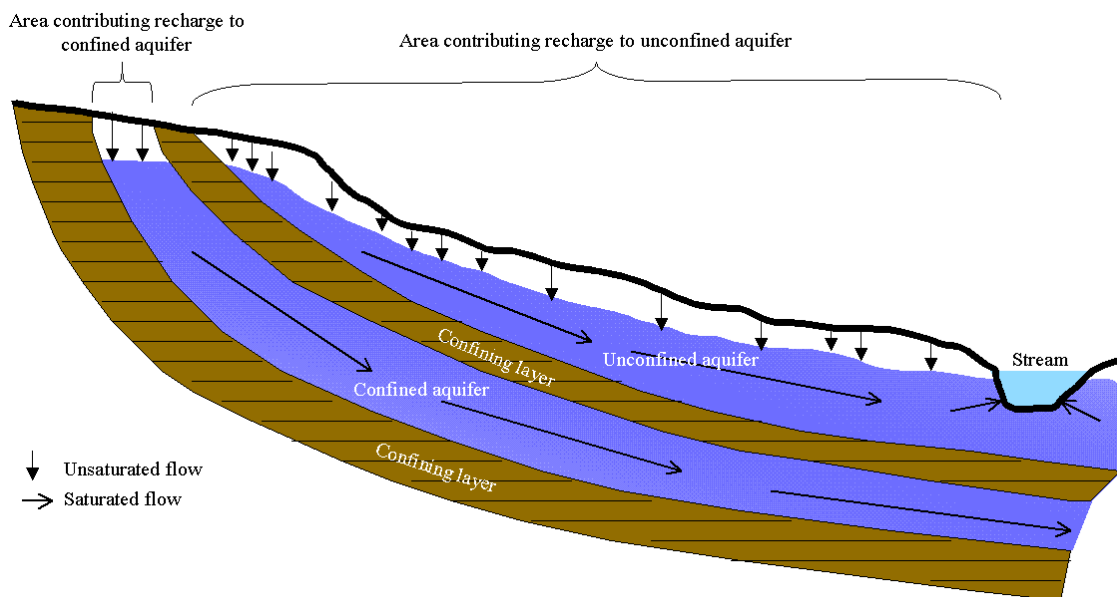


Figure 9-1: Unconfined and confined aquifers (from Dingman, 1994).

对非承压含水层的补给是通过地表大部分面积的渗漏。相对地，承压含水层通过地表渗漏的补给只发生在承压含水层的上游端，在上游端，含水层的地质组分暴露于地球表面，水流是非承压的，且具有自由水面。

地形对地下水流具有重要的影响。在理想化的多坡高低的地下水流如图 9-2 所示。地形景观可以划分为补给区和排泄区。补给区的定义为：地下水流背向地下水面的流域部分。排泄区的定义为：地下水流指向地下水面的流域部分。在排泄区，地下水面为地表或接近地表，并且通常存在地表水体。

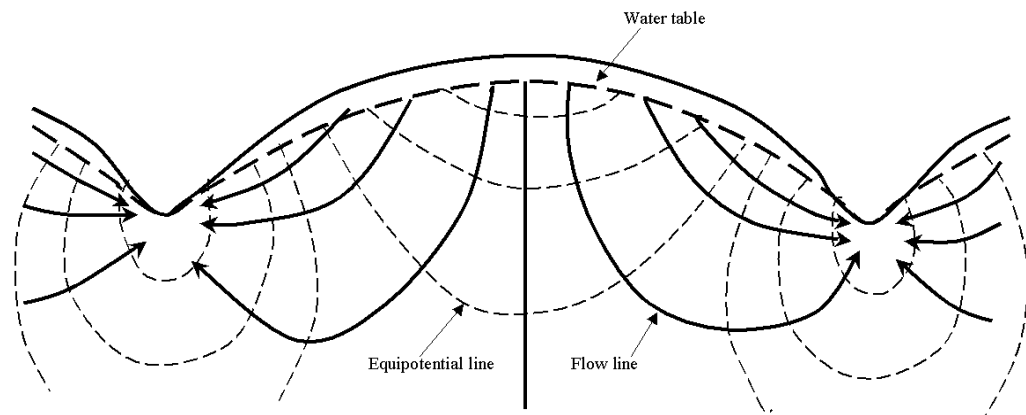


Figure 9-2: Groundwater flow net in an idealized hilly region with homogenous permeable material resting on an impermeable base (from Hubbert, 1940)

河流可以根据其与地下水系统的关系来分类。在排泄区的河流接收地下水，成为增益河流或出流河（图 9-3a）。这种河流在下游的排泄量增加。位于补给区的河流成为亏水河或入渗河流，这种河流在下游的排泄量减少。亏水河流可以与地下水联系（图 9-3b）或滞留在地下水区域之上（图 9-3c）。同时接收和损失地下水的河流成为流通河流（图 9-3d）。

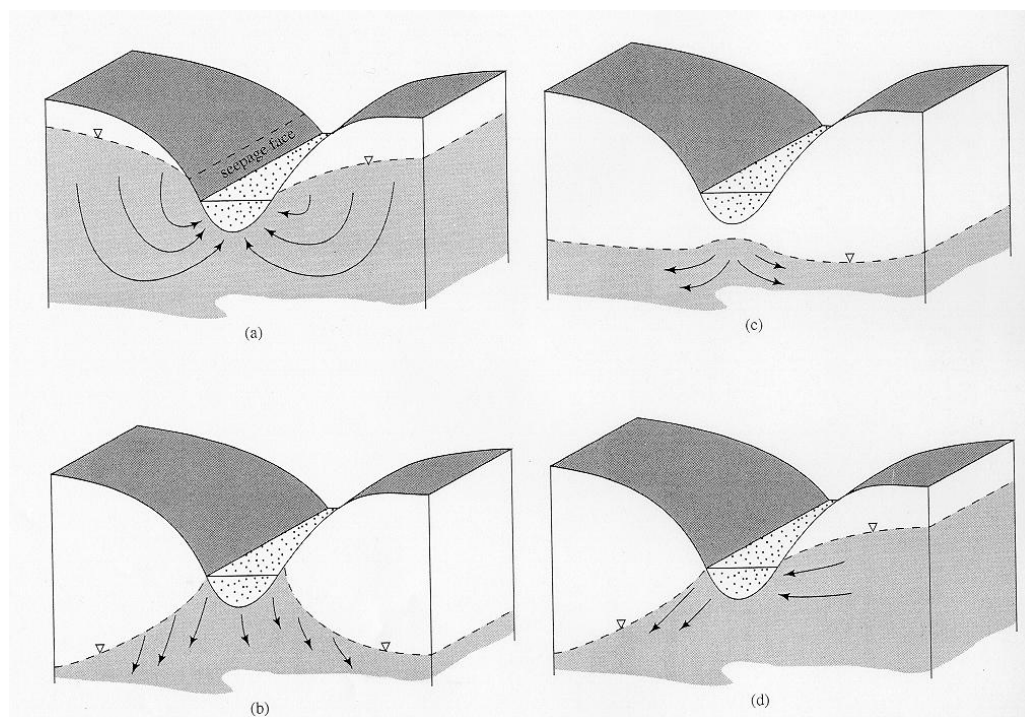


Figure 9-3: Stream-groundwater relationships: a) gaining stream receiving water from groundwater flow; b) losing stream connected to groundwater system; c) losing stream perched above groundwater system; and d) flow-through stream (from Dingman, 1994).

SWAT 可以在每一个子流域中模拟两个含水层。浅层含水层为非承压含水层，可以向主河道或子流域河道供给水流。深层含水层为承压含水层，进入深层含水层的水分被假设为流出流域(Arnold et al., 1993)。

9.2 浅层含水层

浅层含水层的水量平衡方程为：

$$aq_{sh,i} = aq_{sh,i-1} + w_{rchrg} - Q_{gw} - w_{revap} - w_{deep} - w_{pump,sh} \quad 9.2.1$$

式中： $aq_{sh,i}$ 为在第*i*天浅层含水层的蓄水量(mm H₂O)， $aq_{sh,i-1}$ 为在第*i*-1天浅层含水层的蓄水量(mm H₂O)， w_{rchrg} 为在第*i*天进入浅层含水层的水量

(mm H₂O), Q_{gw} 为在第*i*天进入主河道的地下水流或基流量(mm H₂O), w_{revap} 为第*i*天由于水分亏缺而进入土壤层的水量(mm H₂O), w_{deep} 为第*i*天由浅层含水层渗漏进入进入深层含水层的水量(mm H₂O), $w_{pump,sh}$ 为第*i*天从浅层含水层抽取的水量(mm H₂O)。

9.2.1 补给

通过渗漏或旁通流穿过土壤剖面底部进入并流经包气带，之后成为浅层地下水补给。在水分离开土壤剖面到进入浅层含水层之间的时间延迟，取决于地下水面的深度以及包气带和地下水饱和带地质组分的水力性质。

在SWAT中采用了指数衰减权重函数来计算水分离开土壤剖面到进入浅层含水层之间的时间延迟，指数衰减权重函数是 Venetis (1969)提出的，Sangrey et al. (1984)将其用在了一个降水/地下水响应模型中。衰减函数适应土壤剖面对浅层含水层补给为非瞬时(1天或更少)的情况。

在某一天的含水层补给为：

$$w_{rchrg,i} = \left(-\exp\left[-1/\delta_{gw}\right] \right) w_{seep} + \exp\left[-1/\delta_{gw}\right] \cdot w_{rchrg,i-1} \quad 9.2.2$$

式中： $w_{rchrg,i}$ 为某一天的含水层补给量(mm H₂O), δ_{gw} 为地质组分的延迟时间(days), w_{seep} 为第*i*天由浅层含水层渗漏进入进入深层含水层的水量(mm H₂O), $w_{rchrg,i-1}$ 为在第*i*-1天由浅层含水层渗漏进入进入深层含水层的水量(mm H₂O)。第*i*天由浅层含水层渗漏进入进入深层含水层的水量采用下式计算：

$$W_{seep} = W_{perc,ly=n} + W_{crk,btm} \quad 9.2.3$$

式中： w_{seep} 为第*i*天由浅层含水层渗漏进入进入深层含水层的水量(mm H₂O)， $w_{perc,ly=n}$ 为土壤剖面最底层渗漏的水量(mm H₂O)， n 土壤层数， $w_{crk,btm}$ 为以旁通流方式流出土壤剖面最底层的水量(mm H₂O)。

延迟时间， δ_{gw} ，不能直接测量，但是可以通过比较实测水位与由不同 δ_{gw} ，模拟得到的水位来确定。Johnson (1977)开发了一个简单的程序来循环地测试和评价不同的流域延迟时间。Sangrey et al. (1984)注意到在统一地区的监测井具有相似的 δ_{gw} ，因此确定某种地貌形态区域的延迟时间后，可以将该值应用到相同地貌形态地区。

9.2.2 地下水/基流

浅层含水层可以向主河道和子流域河道供给基流。只有在浅层含水层中的蓄水量超过用户定义的阈值时 $aqshthr,q$ ，基流才会产生。

地下水流补给的稳定态响应为(Hooghoudt, 1940)：

$$Q_{gw} = \frac{8000 \cdot K_{sat}}{L_{gw}^2} \cdot h_{wtbl} \quad 9.2.4$$

式中： Q_{gw} 为在第*i*天进入主河道的地下水流或基流量(mm H₂O)， K_{sat} 为含水层水力传导率 (mm/day)， L_{gw} 为地下水系统的流域边界到主河道的距离 (m)， h_{wtbl} 为水位高度 (m)。

由于地下水流对周期性补给的非稳态响应引起的水位波动(Smedema and Rycroft, 1983)：

第 9 章 方程：地下水

$$\frac{dh_{wtbl}}{dt} = \frac{w_{rchrg} - Q_{gw}}{800 \cdot \mu} \quad 9.2.5$$

式中： $\frac{dh_{wtbl}}{dt}$ 为水位高度随时间的变化 (mm/day)， w_{rchrg} 为第*i*天进入含水层的补给量(mm H₂O)， Q_{gw} 为在第*i*天进入主河道的地下水流或基流量 (mm H₂O)， μ 为含水层的单位产水量 (m/m)。

假设地下水流的变化与水位变化的关系为线性的，方程 9.2.5 和 9.2.4 联合可得：

$$\frac{dQ_{gw}}{dt} = 10 \cdot \frac{K_{sat}}{\mu \cdot L_{gw}^2} \cdot (w_{rchrg} - Q_{gw}) \equiv \alpha_{gw} \cdot (w_{rchrg} - Q_{gw}) \quad 9.2.6$$

式中： Q_{gw} 为在第*i*天进入主河道的地下水流或基流量(mm H₂O)， K_{sat} 为含水层水力传导率 (mm/day)， μ 为含水层的单位产水量 (m/m)， L_{gw} 为地下水系统的流域边界到主河道的距离 (m)， w_{rchrg} 为第*i*天进入含水层的补给量(mm H₂O)， α_{gw} 为基流回归常数或比例常数。将方程9.2.6积分、重置可得 Q_{gw} ：

$$Q_{gw,i} = Q_{gw,i-1} \cdot \exp[-\alpha_{gw} \cdot \Delta t] + w_{rchrg} \cdot (1 - \exp[-\alpha_{gw} \cdot \Delta t]) \quad 9.2.7$$

式中： $Q_{gw,i}$ 为在第*i*天进入主河道的地下水流或基流量(mm H₂O)， $Q_{gw,i-1}$ 为在第*i-1*天进入主河道的地下水流或基流量(mm H₂O)， α_{gw} 为基流回归常数或比例常数， Δt 为时间步长 (1 day)， w_{rchrg} 为第*i*天进入含水层的补给量(mm H₂O)。

基流回归常数， α_{gw} ，为地下水流对补给变化的直接指数(Smedema and Rycroft, 1983)，其值在缓慢响应地区为0.1-0.3，在快速响应地区为0.9-1.0。

虽然可以计算基流回归常数，但是最佳估计应分析无补给时段河道径流获取。

当浅层含水层不接收补给时，方程9.2.7简化为：

$$Q_{gw} = Q_{gw,0} \cdot \exp[-\alpha_{gw} \cdot t] \quad 9.2.8$$

式中： Q_{gw} 为在时间t进入主河道的地下水流或基流量(mm H₂O)， $Q_{gw,0}$ 为在退水开始时(t=0)进入主河道的地下水流或基流量(mm H₂O)， α_{gw} 为基流回归常数，t为退水开始后的时间(days)。基流回归常数可以通过重置9.2.8得到：

$$\alpha_{gw} = \frac{1}{N} \cdot \ln \left[\frac{Q_{gw,N}}{Q_{gw,0}} \right] \quad 9.2.9$$

式中： α_{gw} 为基流回归常数， $Q_{gw,0}$ 为在退水开始时(t=0)进入主河道的地下水流或基流量(mm H₂O)， $Q_{gw,N}$ 为第N天地下水流或基流(mm H₂O)，N为退水天数。

得到流域测站的基流天数较为容易，基流天数为以 log 循环下降的基流退水。当采用基流天数时，方程 9.2.9 可以进一步简化为：

$$\alpha_{gw} = \frac{1}{N} \cdot \ln \left[\frac{Q_{gw,N}}{Q_{gw,0}} \right] = \frac{1}{BFD} \cdot \ln \left[0.23^{-\frac{2.3}{BFD}} \right] \quad 9.2.10$$

式中： α_{gw} 为基流回归常数，BFD 为流域的径流天数。

9.2.3 再蒸发

水分可以从浅层含水层运动到上层非饱和带。在含水层上层物质干燥的时期，分割饱和非饱和带的毛细管作用带中的水可以蒸发和向上传播。随着毛细管作用带中的水蒸发，下层水分替代。水分也可以通过深根性作物的吸收直接从含水层中损失。

SWAT将进入上层的水分作为蒸散发需求的函数进行模拟。为避免与土壤蒸发和散发的混淆，这一过程定义为“再蒸发”。这一过程在饱和带距离地表深度较浅或有深根性植物生长的流域较为显著。因为植被类型可以影响在蒸发过程，决定再蒸发的参数通常随土地利用类型变化。再蒸发只有在浅层含水层蓄水量超过用户定义的某一阈值， $aq_{shthr,rvp}$ ，时发生。

通过再蒸发过程，可以从含水层损失的最大水量为：

$$w_{revap,mx} = \beta_{rev} \cdot E_o \quad 9.2.11$$

式中： $w_{revap,mx}$ 为作为水分亏缺响应，而可以进入土壤层的最大水量(mm H₂O)， β_{rev} 为再蒸发系数， E_o 为模拟日潜在蒸散发(mm H₂O)。模拟日实际再蒸发量为：

$$w_{revap} = 0 \quad \text{if } aq_{sh} \leq aq_{shthr,rvp} \quad 9.2.12$$

$$w_{revap} = w_{revap,mx} - aq_{shthr,rvp} \quad \text{if } aq_{shthr,rvp} < aq_{sh} < aq_{shthr,rvp} + w_{revap,mx} \quad 9.2.13$$

$$w_{revap} = w_{revap,mx} \quad \text{if } aq_{sh} \geq aq_{shthr,rvp} + w_{revap,mx} \quad 9.2.14$$

式中： w_{revap} 为作为水分亏缺响应，而实际进入土壤层的水量(mm H₂O)， $w_{revap,mx}$ 为作为水分亏缺响应，而可以进入土壤层的最大水量(mm H₂O)，

aq_{sh} 为模拟日初始含水层蓄水量(mm H₂O), $aq_{shthr,rvp}$ 为浅层含水层中再蒸发或渗漏进入深层含水层发生的阈值地下水面(mm H₂O)。

9.2.4 进入深层含水层的渗漏

总的日补给中一部分可以进入深层含水层。进入深层含水层的渗漏只有在浅层含水层蓄水量超过用户定义的某一阈值, $aq_{shthr,rvp}$, 时发生。

通过渗漏, 可以从含水层损失的最大水量为:

$$w_{deep,mx} = \beta_{deep} \cdot w_{rchrg} \quad 9.2.15$$

式中: $w_{deep,mx}$ 为第*i*天可以进入深层含水层损失的最大水量(mm H₂O), β_{deep} 为含水层渗漏系数, w_{rchrg} 为第*i*天进入含水层的补给量(mm H₂O)。

模拟日实际渗漏量为:

$$w_{deep} = 0 \quad \text{if } aq_{sh} \leq aq_{shthr,rvp} \quad 9.2.12$$

$$w_{deep} = w_{deep,mx} - aq_{shthr,rvp} \quad \text{if } aq_{shthr,rvp} < aq_{sh} < \left[aq_{shthr,rvp} + w_{revap,mx} \right] \quad 9.2.13$$

$$w_{deep} = w_{deep,mx} \quad \text{if } aq_{sh} \geq \left[aq_{shthr,rvp} + w_{revap,mx} \right] \quad 9.2.14$$

式中: w_{deep} 为实际进入深层含水层的水量(mm H₂O), $w_{deep,mx}$ 为可以进入深层含水层的最大水量(mm H₂O), aq_{sh} 为模拟日初始含水层蓄水量(mm H₂O), $aq_{shthr,rvp}$ 为浅层含水层中再蒸发或渗漏进入深层含水层发生的阈值地下水面(mm H₂O)。

9.2.5 提取

如果浅层含水层被指定为灌溉水源或其它流域外用水，模型允许不超过浅层含水层总水量的水分损失。详细的关于水管理的介绍见第 21 章。

9.2.6 地下水位

虽然 SWAT 目前没有输出地下水位，实际上模型中计算了该值。地下水位通过方程 9.2.4 与地下水流联系：

$$Q_{gw} = \frac{8000 \cdot K_{sat}}{L_{gw}^2} \cdot h_{wtbl} = \frac{8000 \cdot \mu}{10} \cdot \frac{10 \cdot K_{sat}}{\mu \cdot L_{gw}^2} \cdot h_{wtbl} = 800 \cdot \mu \cdot \alpha_{gw} \cdot h_{wtbl} \quad 9.2.15$$

式中： Q_{gw} 为在第 i 天进入主河道的地下水流或基流量 ($\text{mm H}_2\text{O}$)， K_{sat} 为含水层水力传导率 (mm/day)， μ 为含水层的单位产水量 (m/m)， L_{gw} 为地下水系统的流域边界到主河道的距离 (m)， h_{wtbl} 为水位高度 (m)， α_{gw} 为基流回归常数。将 Q_{gw} 的这种定义代入方程 9.2.7 得：

$$h_{wtbl,i} = h_{wtbl,i-1} \cdot \exp \left[\alpha_{gw} \cdot \Delta t + \frac{w_{rchrg} \cdot \left(-\exp \left[\alpha_{gw} \cdot \Delta t \right] \right)}{800 \cdot \mu \cdot \alpha_{gw}} \right] \quad 9.2.16$$

式中： $h_{wtbl,i}$ 为第 i 天水位高度 (m)， $h_{wtbl,i-1}$ 为第 $i-1$ 天水位高度 (m)， α_{gw} 为基流回归常数， Δt 为时间步长 (1day)， w_{rchrg} 为第 i 天进入含水层的补给量 ($\text{mm H}_2\text{O}$)， μ 为含水层的单位产水量 (m/m)。

Table 9-1: SWAT input variables used in shallow aquifer calculations.

Variable name	Definition	File Name
GW_DELAY	δ_{gw} : Delay time for aquifer recharge (days)	.gw
GWQMN	$aq_{shthr,q}$: Threshold water level in shallow aquifer for base flow ($\text{mm H}_2\text{O}$)	.gw

ALPHA_BF	α_{gw} : Baseflow recession constant	.gw
REVAPMN	$aq_{shthr,rvp}$: Threshold water level in shallow aquifer for revap or percolation to deep aquifer (mm H ₂ O)	.gw
GW_REVAP	β_{rev} : Revap coefficient	.gw
RCHRG_DP	β_{deep} : Aquifer percolation coefficient	.gw
GW_SPYLD	μ : Specific yield of the shallow aquifer (m/m)	.gw

9.3 深层含水层

深层含水层的水量平衡方程为：

$$aq_{dp,i} = aq_{dp,i-1} + w_{deep} - w_{pump,dp} \quad 9.3.1$$

式中： $aq_{dp,i}$ 为第*i*天深层含水层的蓄水量(mm H₂O)， $aq_{dp,i-1}$ 为第*i-1*天深层含水层的蓄水量(mm H₂O)， w_{deep} 为第*i*天从浅层含水层渗漏进入深层含水层的水量(mm H₂O)， $w_{pump,dp}$

为第*i*天从深层含水层抽取的水量(mm H₂O)。进入深层含水层的水量在 9.2.4部分介绍完毕。如果深层含水层为灌溉或其它流域外用水的水源，模型允许不超过深层含水层总水量的水分损失。

进入深层含水层的水分没有考虑到未来水分预算的计算中，可以认为其在流域系统中消失。

9.4 NOMENCLATURE

BFD	Number of baseflow days for the watershed
E_o	Potential evapotranspiration (mm d ⁻¹)
K_{sat}	Hydraulic conductivity of the aquifer (mm/day)
L_{gw}	Distance from the ridge or subbasin divide for the groundwater system to the main channel (m)
N	Time lapsed since the start of the recession (days)
Q_{gw}	Groundwater flow, or base flow, into the main channel (mm H ₂ O)

第 9 章 方程：地下水

$Q_{gw,0}$ Groundwater flow at the start of the recession (mm H₂O)

$Q_{gw,N}$ Groundwater flow on day N (mm H₂O)

aq_{dp} Amount of water stored in the deep aquifer (mm H₂O)

aq_{sh} Amount of water stored in the shallow aquifer (mm H₂O)

$aq_{shthr,q}$ Threshold water level in shallow aquifer for base flow (mm H₂O)

$aq_{shthr,rvp}$ Threshold water level in shallow aquifer for revap or percolation to deep aquifer (mm H₂O)

h_{wtbl} Water table height (m)

$w_{crk,btm}$ Amount of water flow past the lower boundary of the soil profile due to bypass flow (mm H₂O)

w_{deep} Amount of water percolating from the shallow aquifer into the deep aquifer (mm H₂O)

$w_{deep,mx}$ Maximum amount of water moving into the deep aquifer (mm H₂O)

$w_{pump,dp}$ Amount of water removed from the deep aquifer by pumping (mm H₂O)

$w_{pump,sh}$ Amount of water removed from the shallow aquifer by pumping (mm H₂O)

w_{rchrg} Amount of water entering the aquifer via recharge (mm H₂O)

w_{revap} Amount of water moving into the soil zone in response to water deficiencies (mm H₂O)

$w_{revap,mx}$ Maximum amount of water moving into the soil zone in response to water deficiencies on day i (mm H₂O)

w_{seep} Total amount of water exiting the bottom of the soil profile (mm H₂O)

α_{gw} Baseflow recession constant

β_{deep} Aquifer percolation coefficient

β_{rev} Revap coefficient

δ_{gw} Delay time or drainage time for aquifer recharge (days)

μ Specific yield of the shallow aquifer (m/m)

9.5 REFERENCES

- Arnold, J.G., P.M. Allen, and G. Bernhardt. 1993. A comprehensive surface-groundwater flow model. *Journal of Hydrology* 142: 47-69.
- Dingman, S.L. 1994. *Physical hydrology*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ.
- Hooghoudt, S.B. 1940. Bijdrage tot de kennis van enige natuurkundige grootheden van de grond. *Versl. Landbouwkd. Onderz.* 46: 515-707.
- Hubbert, M.K. 1940. The theory of groundwater motion. *Journal of Geology* 48: 785-944.
- Johnson, K.H. 1977. A predictive method for ground water levels. Master's Thesis, Cornell University, Ithica, N.Y.
- Sangrey, D.A., K.O. Harrop-Williams, and J.A. Klaiber. 1984. Predicting ground-water response to precipitation. *ASCE J. Geotech. Eng.* 110(7): 957-975.
- Smedema, L.K. and D.W. Rycroft. 1983. *Land drainage—planning and design of agricultural drainage systems*, Cornell University Press, Ithica, N.Y.
- Venetis, C. 1969. A study of the recession of unconfined aquifers. *Bull. Int. Assoc. Sci. Hydrol.* 14(4): 119-125.

第 10 章 方程：氮

氮循环的复杂性和氮对植物生长的重要性使得其为许多研究的主体。氮循环为一个动态系统，涉及了水、大气和土壤。植物生长最需要元素为氮素，除了碳、氧和氢。

10.1 氮循环

氮在无机土壤中的三种主要形态为：与腐植质有关的有机氮、土壤胶体中的无机氮形态，以及土壤溶液中的无机氮形态。氮可以通过施肥、粪肥或残余物的施用，共生或非共生细菌的固化，和降水等方式进入土壤。氮可以通过植物吸收、渗滤、挥发、反消化或侵蚀等方式从土壤中去。图 10-1 图示了主要的氮循环过程。

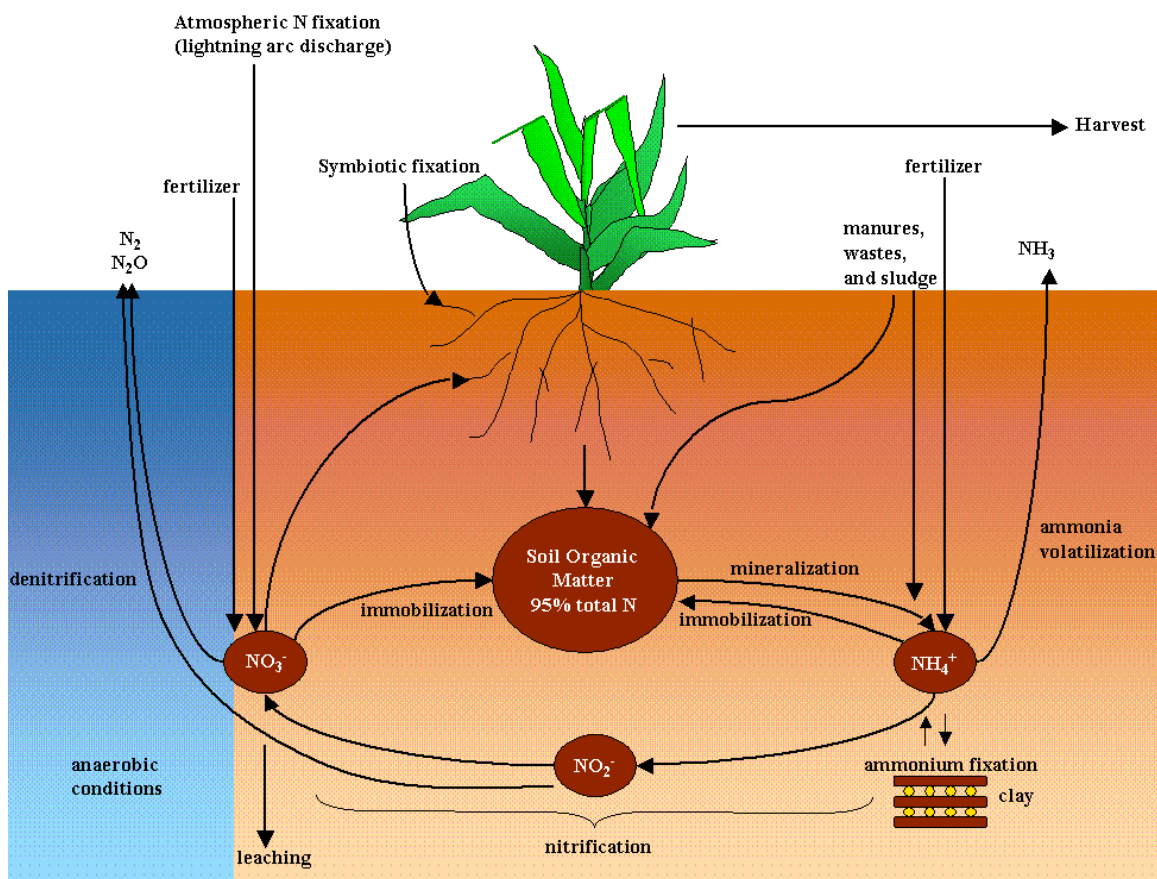


Figure 10-1: The nitrogen cycle

第 10 章 方程：氮

氮被认为是具有很强活性的元素。氮的这种高活性特性是由于其可以存在一些化合态。化合态或氧化态描述了相对于中性原子，在氮原子周围轨道上的电子数。如果原子失去电子，化合态为正，如果得到电子，则为正。不同化合态的氮，有如下示例：

最高氧化态	+5	NO_3^-	硝酸盐
	+4	NO_2	二氧化氮
	+3	NO_2^-	亚硝酸盐
	+2	NO	一氧化氮(气)
	+1	N_2O	硝石(笑气)
	0	N_2	氮气或氮元素
	-1	NH_4OH	羟胺
	-2	N_2H_4	
最高还原态	-3	NH_3 or NH_4^+	氨气或铵

氮可以改变其化合态的能力，使其成为高活性元素。预测氮在不同库中的运动对于管理这一元素的环境管理至关重要。

SWAT模拟了氮在土壤中5中不同的库(图10-2)。两个库为无机氮： NH_4^+ 和 NO_3^- ，其它三个库为有机氮。Fresh organic N 与作物残渣和微生物生物量

有关，活性和稳态有机氮库与土壤腐植质有关。与腐植质有关的有机氮被分成两个库，以考虑可以矿化的腐植物的变化。

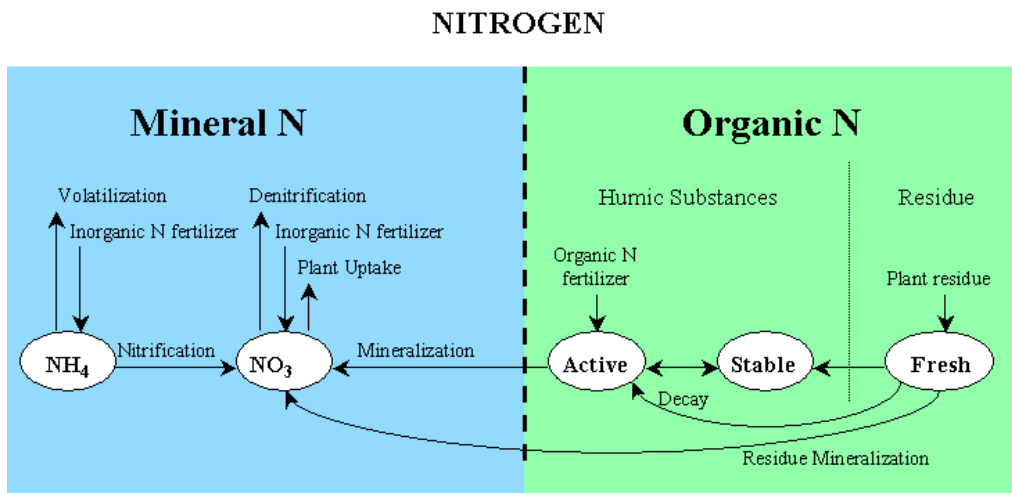


Figure 10-2: SWAT soil nitrogen pools and processes that move nitrogen in and out of pools.

10.1.1 土壤氮水平的初始化

用户可以定义所有土壤层在模拟初始时间的硝酸盐和腐植质中的有机氮的含量。如果用户没有定义初始氮浓度，SWAT 会初始不同库中的氮水平。

土壤中的初始硝酸盐氮水平随深度变化：

$$NO3_{conc,z} = 7 \cdot \exp\left(\frac{-z}{1000}\right) \quad 10.1.1$$

式中： $NO3_{conc,z}$ 为在土壤深度 z 处的硝酸盐浓度(mg/kg or ppm)， z 为距离土壤表面的深度 (mm)。采用方程10.1.1计算的硝酸盐浓度随深度的变化如图10-3所示。在此，计算的硝酸盐浓度为土层下边界处。

第 10 章 方程：氮

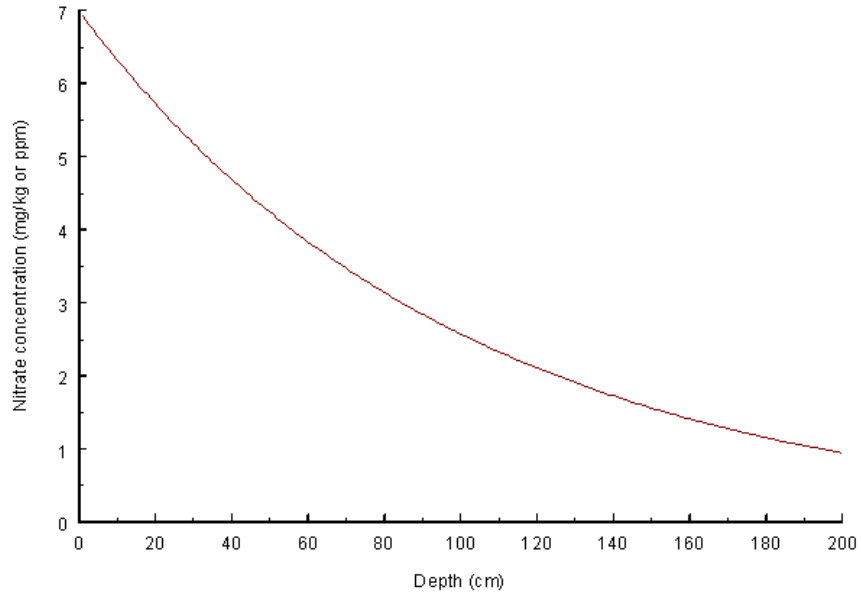


Figure 10-3: Nitrate concentration with depth.

有机氮水平根据 C:N 比为 14:1 来计算。在每一个土层中的腐植质有机氮为：

$$orgN_{hum,ly} = 10^4 \cdot \left(\frac{orgC_{ly}}{14} \right) \quad 10.1.2$$

式中： $orgN_{hum,ly}$ 为腐植质有机氮在土层中的含量(mg/kg or ppm)， $orgC_{ly}$ 为土层中的有机碳含量(%)。腐植质有机氮被分为活性和稳态库，计算公式为：

$$orgN_{act,ly} = orgN_{hum,ly} \cdot fr_{actN} \quad 10.1.3$$

$$orgN_{sta,ly} = orgN_{hum,ly} \cdot (1 - fr_{actN}) \quad 10.1.4$$

式中： $orgN_{act,ly}$ 为活性库中的氮浓度(mg/kg)， $orgN_{hum,ly}$ 为腐植质有机氮在土层中的含量(mg/kg or ppm)， fr_{actN} 为腐植质有机氮在活性库中的含量分数， $orgN_{sta,ly}$ 为稳态库中的氮浓度(mg/kg)。在活性库中的腐植质有机氮的分数， fr_{actN} ，设为0.02。

在 fresh organic 库中的氮含量在所有土壤层中设为 0，除了表层 10mm 土壤。在表层 10mm 土壤中，fresh organic nitrogen 设为 0 土壤表面初始残余物的 0.15%：

$$orgN_{frsh,surf} = 0.0015 \cdot rsd_{surf} \quad 10.1.5$$

式中： $orgN_{frsh,surf}$ 为表层 10mm 土壤中，fresh organic nitrogen 含量 (kg N/ha)， rsd_{surf} 为表层 10mm 土壤中，残余物库的物质质量 (kg N/ha)。

土壤氮中的铵库， NH_4ly ，初始值为 0 ppm。

SWAT 允许营养水平作为浓度输入，但它基于质量来进行所有的计算。为了将浓度转换为质量，浓度需要乘以土壤容积密度和土层深，并除以 100：

$$\frac{conc_N \cdot \rho_b \cdot depth_{ly}}{100} = \frac{kg\ N}{ha} \quad 10.1.6$$

式中： $conc_N$ 为土层中的氮浓度 (mg/kg or ppm)， ρ_b 为土层土壤容积密度 (Mg/m^3)， $depth_{ly}$ 为土层深度 (mm)。

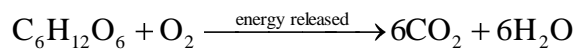
Table 10-1: SWAT input variables that pertain to nitrogen pools.

Variable Name	Definition	Input File
SOL_NO3	$NO3_{conc,ly}$: Initial NO_3 concentration in soil layer (mg/kg or ppm)	.chm
SOL_ORGN	$orgN_{hum,ly}$: Initial humic organic nitrogen in soil layer (mg/kg or ppm)	.chm
RSDIN	rsd_{surf} : Material in the residue pool for the top 10mm of soil ($kg\ ha^{-1}$)	.hru
SOL_BD	ρ_b : Bulk density of the layer (Mg/m^3)	.sol
SOL_CBN	$orgC_{ly}$: Amount of organic carbon in the layer (%)	.sol

10.2 矿化、反消化/固化

降解是 fresh organic 残余物离解为简单有机物。矿化是将有机的、植物不可利用的氮通过微生物转化为无机的、植物可利用的氮。固化是将植物可利用的无机氮通过微生物转化为植物不可利用的有机氮。

细菌降解有机物以获取生长所需能量。植物残余物离解成葡萄糖，并转化为能量：



将葡萄糖转化为二氧化碳和水的过程中释放出的能量可以用在不同的细胞过程，包括蛋白质合成。蛋白质合成需要氮。如果产生葡萄糖的残余物中有足够的氮，细菌将利用有机物质中的氮来满足蛋白质合成的需要。如果产生葡萄糖的残余物中氮含量太低细菌将利用土壤溶液中的 NH_4^+ 和 NO_3^- 来满足其需要。如果残余物中的氮含量超过细菌需要，细菌将过剩的氮以 NH_4^+ 的形式释放到土壤溶液中。C:N 比和矿化/固化的普遍关系为：

C:N 比 > 30:1 固化发生，土壤中 NH_4^+ 和 NO_3^- 减少

20:1 < C:N 比 < 30:1 无变化，固化和矿化过程平衡

C:N 比 < 20:1 矿化发生，土壤中 NH_4^+ 和 NO_3^- 增加

SWAT中的氮矿化算法为net矿化算法，将固化过程也考虑在方程中。

该算法修改自PAPRAN矿化模型(Seligman and van Keulen, 1981)。矿化有两个

来源：作物残余物和微生物生物量中的fresh 有机氮库，以及土壤腐植质中的活性有机氮库。矿化和降解只有在土壤层温度高于0°C时发生。

矿化和降解依赖于水分可得性和温度。在矿化和降解方程中考虑了温度和水对这些过程的影响的两个因素。

营养物循环温度因素：

$$\gamma_{tmp,ly} = 0.9 \cdot \frac{T_{soil,ly}}{T_{soil,ly} + \exp\{.93 - 0.312 \cdot T_{soil,ly}\}} + 0.1 \quad 10.2.1$$

式中： $\gamma_{tmp,l}$ 为ly土层的营养物循环温度因素， $T_{soil,ly}$ 为ly土层温度(°C)。营养物循环温度因素不低于0.1。

营养物循环水分因素：

$$\gamma_{sw,ly} = \frac{SW_{ly}}{FC_{ly}} \quad 10.2.2$$

式中： $\gamma_{sw,ly}$ 为ly土层的营养物循环水分因素， SW_{ly} 为ly土层模拟日的含水量(mm H₂O)， FC_{ly}

为ly土层模拟日的田间持水量(mm H₂O)。营养物循环水分因素不低于0.05。

10.2.1 腐植质矿化

腐植质中氮可以在活性和稳态有机库之间运动。从一个库向另一个库转换的氮量为：

$$N_{tmp,ly} = \beta_{tmp} \cdot orgN_{act,ly} \cdot \left(\frac{1}{fr_{actN}} - 1 \right) - orgN_{sta,ly} \quad 10.2.3$$

式中： $N_{trns,ly}$ 为在活性和稳态有机库之间运动的氮量(kg N/ha)， β_{trns} 为速率常数 (1×10^{-5})， $orgN_{act,ly}$ 为在活性有机库中的氮量(kg N/ha)， $fractN$ 为腐植质氮存在与活性库中的分数 (0.02)， $orgN_{sta,ly}$ 为在稳态有机库中的氮量(kg N/ha)。当 $N_{trns,ly}$ 为正时，氮从活性有机库向稳态有机库运动。当 $N_{trns,ly}$ 为负时，氮从稳态有机库向活性有机库运动。

腐植质有机氮库的矿化，采用下式计算：

$$N_{mina,ly} = \beta_{min} \cdot \gamma_{tmp,ly} \cdot \gamma_{sw,ly}^{1/2} \cdot orgN_{act,ly} \quad 10.2.4$$

式中： $N_{mina,ly}$ 为腐植质有机氮库中的氮矿化(kg N/ha)， β_{min} 为腐植质有机氮矿化系数， $\gamma_{tmp,ly}$ 为ly土层的营养物循环温度因素， $\gamma_{sw,ly}$ 为ly土层的营养物循环水分因素， $orgN_{act,ly}$ 为在活性有机库中的氮量(kg N/ha)。

氮从腐植质有机氮库矿化的氮被添加到该层硝酸盐氮库。

10.2.2 残余物降解和矿化

Fresh 有机氮库的降解和矿化只在第一土壤层存在。降解和矿化通过每日更新的衰减系数来控制。衰减系数根据残余物中的 C:N 比和 C:P 比，以及温度和土壤含水量计算。

残余物中的 C:N 比为：

$$\varepsilon_{C:N} = \frac{0.58 \cdot rsd_{ly}}{orgN_{fsh,ly} + NO3_{ly}} \quad 10.2.5$$

式中： $\varepsilon_{C:N}$ 为土层中残余物的C:N比， rsd_{ly} 为土层ly中的残余物量 (kg/ha)，0.58为残余物中的碳含量分数， $orgN_{frsh,ly}$ 为土层ly中fresh有机氮库的氮量 (kg/ha)， $NO3_{ly}$ 为土层ly中的硝酸盐含量 (kg/ha)。

残余物的 C:P 比为：

$$\varepsilon_{C:P} = \frac{0.58 \cdot rsd_{ly}}{orgP_{frsh,ly} + P_{solution,ly}} \quad 10.2.6$$

式中： $\varepsilon_{C:P}$ 为土层中残余物的C:P比， rsd_{ly} 为土层ly中的残余物量 (kg/ha)，0.58为残余物中的碳含量分数， $orgP_{frsh,ly}$ 为土层ly中fresh有机库的磷量 (kg/ha)， $P_{solution,ly}$ 为土层ly溶液中的磷含量 (kg/ha)。

衰减系数定义残余物降解的分数。衰减系数采用下式计算：

$$\delta_{ntr,ly} = \beta_{rsd} \cdot \gamma_{ntr,ly} \cdot \gamma_{tmp,ly} \cdot \gamma_{sw,ly} \quad 10.2.7$$

式中： $\delta_{ntr,ly}$ 为残余物衰减系数， β_{rsd} 为残余物fresh有机营养物质矿化的速率系数， $\gamma_{ntr,ly}$ 为ly层营养物质循环残余物降解因子， $\gamma_{tmp,ly}$ 为ly层营养物质循环温度因子， $\gamma_{sw,ly}$ 为ly层营养物质循环水分因子。

营养物质循环残余物降解因子为：

$$\gamma_{ntr,ly} = \min \left\{ \begin{array}{l} \exp \left[-0.693 \cdot \frac{\varepsilon_{C:N} - 25}{25} \right] \\ \exp \left[-0.693 \cdot \frac{\varepsilon_{C:P} - 200}{200} \right] \\ 1.0 \end{array} \right. \quad 10.2.8$$

式中： $\gamma_{ntr,ly}$ 为ly层营养物质循环残余物降解因子， $\varepsilon_{C:P}$ 为土层中残余物的C:P比， $\varepsilon_{C:N}$ 为土层中残余物的C:N比。

残余物fresh有机氮库中氮矿化计算公式为：

$$N_{minf,ly} = 0.8 \cdot \delta_{ntr,ly} \cdot orgN_{frsh,ly} \quad 10.2.9$$

式中： $N_{minf,ly}$ 为残余物fresh有机氮库中氮矿化(kg N/ha)， $\delta_{ntr,ly}$ 为残余物降解系数， $orgN_{frsh,ly}$ 为土层ly中fresh有机氮库的氮量 (kg/ha)。Fresh 有机氮库矿化的氮，添加到该层硝酸盐氮库。

残余物fresh有机氮库中氮降解计算公式为：

$$N_{dec,ly} = 0.2 \cdot \delta_{ntr,ly} \cdot orgN_{frsh,ly} \quad 10.2.9$$

式中： $N_{dec,ly}$ 为残余物fresh有机氮库中氮降解(kg N/ha)， $\delta_{ntr,ly}$ 为残余物降解系数， $orgN_{frsh,ly}$ 为土层ly中fresh有机氮库的氮量 (kg/ha)。Fresh 有机氮库降解的氮，添加到该层硝酸盐氮库。

Table 10-2: SWAT input variables that pertain to mineralization.

Variable Name	Definition	Input File
CMN	β_{min} : Rate coefficient for mineralization of the humus active organic nutrients	.bsn
RSDCO	β_{rsd} : Rate coefficient for mineralization of the residue fresh organic nutrients	.bsn
RSDCO_PL	β_{rsd} : Rate coefficient for mineralization of the residue fresh organic nutrients	crop.dat

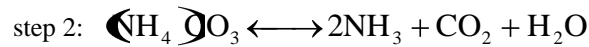
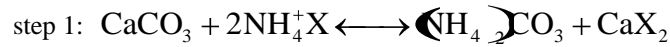
10.3 硝化、氨挥发

硝化是将 NO_3^- 经过两步细菌氧化变为 NH_4^+ ：

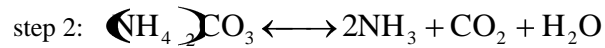
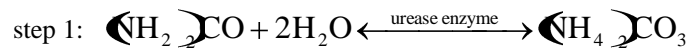


氨挥发为NH₃以气态形式的损失，当铵，NH₄⁺，表施到含钙土壤或将尿素，(NH₂)₂CO，表施到任何土壤时发生。

当铵，NH₄⁺，表施到含钙土壤：



当尿素，(NH₂)₂CO，表施到任何土壤：



SWAT结合Reddy et al. (1979)和Godwin et al.(1984)的方法来模拟硝化和氨挥发。首先计算硝化和氨挥发总量，然后区分两个过程。硝化取决于土壤温度和土壤含水量，而氨挥发取决于土壤温度和深度。将采用三个系数来考虑这些参数对硝化和氨挥发算法的影响。硝化和氨挥发只在温度高于5°C时发生。

硝化和氨挥发温度因子为：

$$\eta_{tmp,ly} = 0.41 \cdot \frac{T_{soil,ly} - 5}{10} \quad \text{if } T_{soil,ly} > 5 \quad 10.3.1$$

式中： $\eta_{tmp,ly}$ 为硝化和氨挥发温度因子， $T_{soil,ly}$ 为土壤层温度（°C）。

硝化水分因子为：

$$\eta_{sw,ly} = \frac{SW_{ly} - WP_{ly}}{0.25 \cdot (FC_{ly} - WP_{ly})} \quad \text{if } SW_{ly} - WP_{ly} < 0.25 \cdot (FC_{ly} - WP_{ly}) \quad 10.3.2$$

$$\eta_{sw,ly} = 1.0 \quad \text{if } SW_{ly} - WP_{ly} \geq 0.25 \cdot (FC_{ly} - WP_{ly}) \quad 10.3.3$$

第 10 章 方程：氮

式中： $\eta_{sw,ly}$ 为硝化水分因子， SW_{ly} 模拟日土层 ly 土壤含水量(mm H₂O)， WP_{ly} 土层 ly 凋萎点含水量(mm H₂O)， FCL_{ly} 土层 ly 田间持水量(mm H₂O)，

挥发深度因子为：

$$\eta_{midz,ly} = 1 - \frac{z_{mid,ly}}{z_{mid,ly} + \exp[-0.706 - 0.305 \cdot z_{mid,ly}]} \quad 10.3.4$$

式中： $\eta_{midz,ly}$ 为挥发深度因子， $z_{mid,ly}$ 为土层中央距离土壤表面的深度 (mm)。

在某一土层中环境因子对硝化和氨挥发的影响通过硝化调节参数和挥发调节参数来定义。硝化调节参数为：

$$\eta_{nit,ly} = \eta_{tmp,ly} \cdot \eta_{sw,ly} \quad 10.3.5$$

挥发调节参数为：

$$\eta_{vol,ly} = \eta_{tmp,ly} \cdot \eta_{midz,ly} \quad 10.3.6$$

式中： $\eta_{nit,ly}$ 为硝化调节参数， $\eta_{vol,ly}$ 为挥发调节参数， $\eta_{tmp,ly}$ 为硝化/挥发温度因子， $\eta_{sw,ly}$ 为硝化水分因子， $\eta_{midz,ly}$ 为挥发深度因子。

硝化和挥发引起的氨损失采用一级动力反应方程(Reddy et al., 1979):

$$N_{nit|vol,ly} = NH4_{ly} \cdot \left(-\exp[-\eta_{nit,ly} - \eta_{vol,ly}] \right) \quad 10.3.7$$

式中： $N_{nit|vol,ly}$ 为第 ly 层硝化和挥发引起的氨损失(kg N/ha)， $NH4_{ly}$ 为第 ly 层中氨氮含量(kg N/ha)， $\eta_{nit,ly}$ 为硝化调节参数， $\eta_{vol,ly}$ 为挥发调节参数。

为了区分硝化和挥发所产生的 $N_{nit|vol,ly}$ ，两个过程分别产生的氨氮损失分数分别采用下式计算：

$$fr_{nit,ly} = 1 - \exp \left[-\eta_{nit,ly} \right] \quad 10.3.8$$

$$fr_{vol,ly} = 1 - \exp \left[-\eta_{vol,ly} \right] \quad 10.3.9$$

式中： $fr_{nit,ly}$ 为硝化产生损失的分数， $fr_{vol,ly}$ 为挥发产生损失的分数， $\eta_{nit,ly}$ 为硝化调节参数， $\eta_{vol,ly}$ 为挥发调节参数。

由于硝化而从氨氮库中移除的氮量为：

$$N_{nit,ly} = \frac{fr_{nit,ly}}{fr_{nit,ly} + fr_{vol,ly}} N_{nit|vol,ly} \quad 10.3.10$$

由于挥发而从氨氮库中移除的氮量为：

$$N_{vol,ly} = \frac{fr_{vol,ly}}{fr_{nit,ly} + fr_{vol,ly}} N_{nit|vol,ly} \quad 10.3.11$$

式中： $N_{nit,ly}$ 为第 ly 层中 NH_4^+ 转化为 NO_3^- 的氮量 (kg N/ha)， $N_{vol,ly}$ 为第 ly 层中 NH_4^+ 转化为 NH_3 的氮量 (kg N/ha)， $fr_{nit,ly}$ 为硝化产生损失的分数， $fr_{vol,ly}$ 为挥发产生损失的分数， $N_{nit|vol,ly}$ 为第 ly 层硝化和挥发引起的氨损失 (kg N/ha)。

10.4 反硝化

反硝化是指在厌氧条件下从硝酸盐、 NO_3^- 到 N_2 或 N_2O 气的细菌还原。反硝化取决于含水量、温度、碳源和硝酸盐。

总得来说，当充满的水孔隙超过 60% 时，反硝化在土壤中观察到。随着土壤含水量的增加，厌氧条件发育，因为氧在土壤的传播速率要比其在空气

中慢 10,000 倍。因为水中氧传播速率随着水文增加而变慢，因此水温也会对反硝化有一定影响。

在需要蓄水的作物种植系统，如稻田，可能由于反硝化损失大部分施肥。对于通常的作物系统，大约 10-20% 氮肥会由于反硝化而损失。在稻田系统，50% 损失。在水淹没的作物系统，水深具有重要作用，因为它影响氧到达土壤而需要穿过的水量。

SWAT 根据下式确定反硝化所引起的硝酸盐损失：

$$N_{denit,ly} = NO3_{ly} \cdot \left(1 - \exp \left[-1.4 \cdot \gamma_{tmp,ly} \cdot orgC_{ly} \right] \right) \quad \text{if } \gamma_{sw,ly} \geq 0.95 \quad 10.4.1$$

$$N_{denit,ly} = 0.0 \quad \text{if } \gamma_{sw,ly} < 0.95 \quad 10.4.2$$

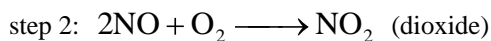
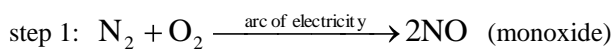
式中： $N_{denit,ly}$ 为反硝化所产生的氮损失 (kg N/ha)， $NO3_{ly}$ 第ly层中的硝酸盐含量(kg N/ha)， $\gamma_{tmp,ly}$ 为方程10.2.2计算的营养物循环温度因子， $\gamma_{sw,ly}$ 为方程10.2.2计算的营养物循环水分因子， $orgC_{ly}$ 土壤层中有机碳含量(%)。

Table 10-3: SWAT input variables that pertain to denitrification.

Variable Name	Definition	Input File
SOL_CBN	$orgC_{ly}$: Amount of organic carbon in the layer (%)	.sol

10.5 降水中的氮

闪电可以将大气中的 N_2 转化为硝酸，然后通过降水传输到土壤。其中涉及的化学步骤为：



step 3: $3\text{NO}_2 + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow 2\text{HNO}_2 + \text{NO}$ (nitric acid and monoxide)

与闪电发生较少的地区相比，在闪电发生较多的地区会有更多的氮被传输到土壤。

由降水作用而增加的土壤硝酸盐为：

$$N_{rain} = 0.01 \cdot R_{NO_3} \cdot R_{day} \quad 10.5.1$$

式中： N_{rain} 为降水作用增加的硝酸盐 (kg N/ha) ， R_{NO_3} 为降水中的氮浓度(mg N/L) ， R_{day} 为模拟日的降雨量(mm H₂O)。降雨所增加的硝酸盐量添加到地表 10 mm 土壤。

Table 10-4: SWAT input variables that pertain to nitrogen in rainfall.

Variable Name	Definition	Input File
RCN	R_{NO_3} : Concentration of nitrogen in the rain (mg N/L)	.bsn

10.6 固化

豆类可以通过固化空气中的 N₂ 来获得其部分氮需求，该过程通过与其共生的根瘤菌完成。植物通过向这些细菌提供碳水化合物作为交换。

当土壤不能提供足够的植物生长氮需求时，SWAT 模拟豆类的氮固化。通过固化获取的氮直接转化为植物生物量，而不进入土壤（除非植物生物量作为植物收割后的残余物而施加到土壤）。豆类的固氮方程将在第 18 章介绍。

10.7 水中硝酸盐的向上运动

随着地表水分的蒸发，地表的含水量降低，在土壤剖面中产生了梯度。在下一层土壤中的水分会向上运动，并携带了营养物质。SWAT 允许第一层土壤中的硝酸盐输移到地表 10mm：

$$N_{evap} = 0.1 \cdot NO3_{ly} \cdot \frac{E''_{soil,ly}}{SW_{ly}}$$

式中： N_{evap} 为第一层土壤中的硝酸盐输移到地表10mm的量（kg N/ha）， $NO3_{ly}$ 为第ly层中的硝酸盐含量（kg N/ha）， $E''_{soil,ly}$ 为由于蒸发而从第一层土壤移除的水量（mm H₂O）， SW_{ly} 为第一层土壤中的含水量（mm H₂O）。

10.8 渗滤

植物关键营养物的大部分为阳离子，可以被带有负电荷的土壤颗粒吸引。随着植物从土壤溶液中吸收这些阳离子，土壤颗粒释放束缚的阳离子进入土壤溶液，使得溶液中营养物质和土壤颗粒上的营养物质的比例区域平衡。事实上，土壤缓冲溶液中的阳离子浓度。

相反地，硝酸盐为阴离子，不被土壤颗粒吸引。因为土壤滞留的硝酸盐很少，硝酸盐十分易于渗滤。SWAT计算硝酸盐渗滤的算法同时求解地表径流和侧向流中的硝酸盐损失。这些算法将在第14章介绍。

10.9 NOMENCLATURE

- $E''_{soil,ly}$ Amount of water removed from layer ly by evaporation (mm H₂O)
 FC_{ly} Water content of layer ly at field capacity (mm H₂O)

- $N_{dec,ly}$ Nitrogen decomposed from the fresh organic N pool (kg N/ha)
 $N_{denit,ly}$ Amount of nitrogen lost to denitrification (kg N/ha)
 N_{evap} Amount of nitrate moving from the first soil layer to the soil surface zone (kg N/ha)
 $N_{mina,ly}$ Nitrogen mineralized from the humus active organic N pool (kg N/ha)
 $N_{minf,ly}$ Nitrogen mineralized from the fresh organic N pool (kg N/ha)
 $N_{nit,ly}$ Amount of nitrogen converted from NH_4^+ to NO_3^- in layer ly (kg N/ha)
 $N_{nit|vol,ly}$ Amount of ammonium converted via nitrification and volatilization in layer ly (kg N/ha)
 N_{rain} Nitrate added by rainfall (kg N/ha)
 $N_{trns,ly}$ Amount of nitrogen transferred between the active and stable organic pools (kg N/ha)
 $N_{vol,ly}$ Amount of nitrogen converted from NH_4^+ to NH_3 in layer ly (kg N/ha)
 NH_4_{ly} Ammonium content of layer ly (kg $\text{NH}_4\text{-N}$ /ha)
 $\text{NO}_3_{conc,z}$ Concentration of nitrate in the soil at depth z (mg/kg or ppm)
 NO_3_{ly} Nitrate content of soil layer ly (kg $\text{NO}_3\text{-N}$ /ha)
 $P_{solution,ly}$ Solution phosphorus content of soil layer ly (kg P/ha)
 R_{day} Amount of rainfall on a given day (mm H_2O)
 R_{NO_3} Concentration of nitrogen in the rain (mg N/L)
 SW_{ly} Soil water content of layer ly (mm H_2O)
 $T_{soil,ly}$ Temperature of layer ly ($^{\circ}\text{C}$)
 WP_{ly} Water content of layer ly at wilting point (mm H_2O)
- $conc_N$ Concentration of nitrogen in a layer (mg/kg or ppm)
 $depth_{ly}$ Depth of the layer (mm)
 fr_{actN} Fraction of humic nitrogen in the active pool
 $fr_{nit,ly}$ Estimated fraction of nitrogen lost by nitrification
 $fr_{vol,ly}$ Estimated fraction of nitrogen lost by volatilization
 $orgC_{ly}$ Amount of organic carbon in the layer (%)
 $orgN_{act,ly}$ Nitrogen in the active organic pool in layer ly (mg/kg or kg N/ha)
 $orgN_{frsh,ly}$ Nitrogen in the fresh organic pool in layer ly (kg N/ha)
 $orgN_{hum,ly}$ Concentration of humic organic nitrogen in the layer (mg/kg or ppm)
 $orgN_{sta,ly}$ Nitrogen in the stable organic pool in layer ly (mg/kg or kg N/ha)
 $orgP_{frsh,ly}$ Phosphorus in the fresh organic pool in layer ly (kg P/ha)
 rsd_{ly} Residue in layer ly (kg/ha)
 z Depth below soil surface (mm)
 $z_{mid,ly}$ Depth from the soil surface to the middle of the layer (mm)
- β_{min} Rate coefficient for mineralization of the humus active organic nutrients
 β_{rsd} Rate coefficient for mineralization of the residue fresh organic nutrients
 β_{trns} Rate constant for nitrogen transfer between active and stable organic pools (1×10^{-5})
 $\delta_{nr,ly}$ Residue decay rate constant
 $\varepsilon_{C:N}$ Residue C:N ratio in the soil layer
 $\varepsilon_{C:P}$ Residue C:P ratio in the soil layer

第 10 章 方程：氮

$\gamma_{ntr,ly}$	Nutrient cycling residue composition factor for layer ly
$\gamma_{sw,ly}$	Nutrient cycling water factor for layer ly
$\gamma_{tmp,ly}$	Nutrient cycling temperature factor for layer ly
$\eta_{midz,ly}$	Volatilization depth factor
$\eta_{nit,ly}$	Nitrification regulator
$\eta_{sw,ly}$	Nitrification soil water factor
$\eta_{tmp,ly}$	Nitrification/volatilization temperature factor
$\eta_{vol,ly}$	Volatilization regulator
ρ_b	Bulk density of the layer (Mg/m^3)

10.10 REFERENCES

- Godwin, D.C., C.A. Jones, J.T. Ritchie, P.L.G. Vlek, and L.G. Youngdahl. 1984. The water and nitrogen components of the CERES models. p. 95-100. *In* Proc. Intl. Symp. on Minimum Data Sets for Agrotechnology Transfer, March 1983, Patancheru, India. Intl. Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics.
- Reddy, K.R., R. Khaleel, M.R. Overcash, and P.W. Westerman. 1979. A nonpoint source model for land areas receiving animal wastes: II. Ammonia volatilization. *Trans. ASAE* 22:1398-1404.
- Seligmand, N.G. and H. van Keulen. 1981. PAPRAN: A simulation model of annual pasture production limited by rainfall and nitrogen. p. 192-221. *In* M.J. Frissel and J.A. van Veed. (eds) Simulation of nitrogen behaviour of soil-plant systems, Proc. Workshop. Wageningen, Jan.-Feb. 1980.

第 11 章 方程:磷

虽然植物对磷的需求要比对氮的需求少，但是磷是许多关键官能。其中磷最重要的作用之一是能量存储和转移。通过光合作用和碳水化合物的新陈代谢所得到的能量存储在磷化合物中，供以后生长和生殖过程运用。

11.1 磷循环

在无机土壤中存在的三种主要形态的磷为：腐植质中的有机磷、不可溶解的无机磷和植物可利用的土壤溶液中的磷。磷可以通过施肥、粪肥和残余物施用等方式添加到土壤。磷通过植物吸收和侵蚀从土壤中移除。图 11-1 图示了磷循环的主要过程。

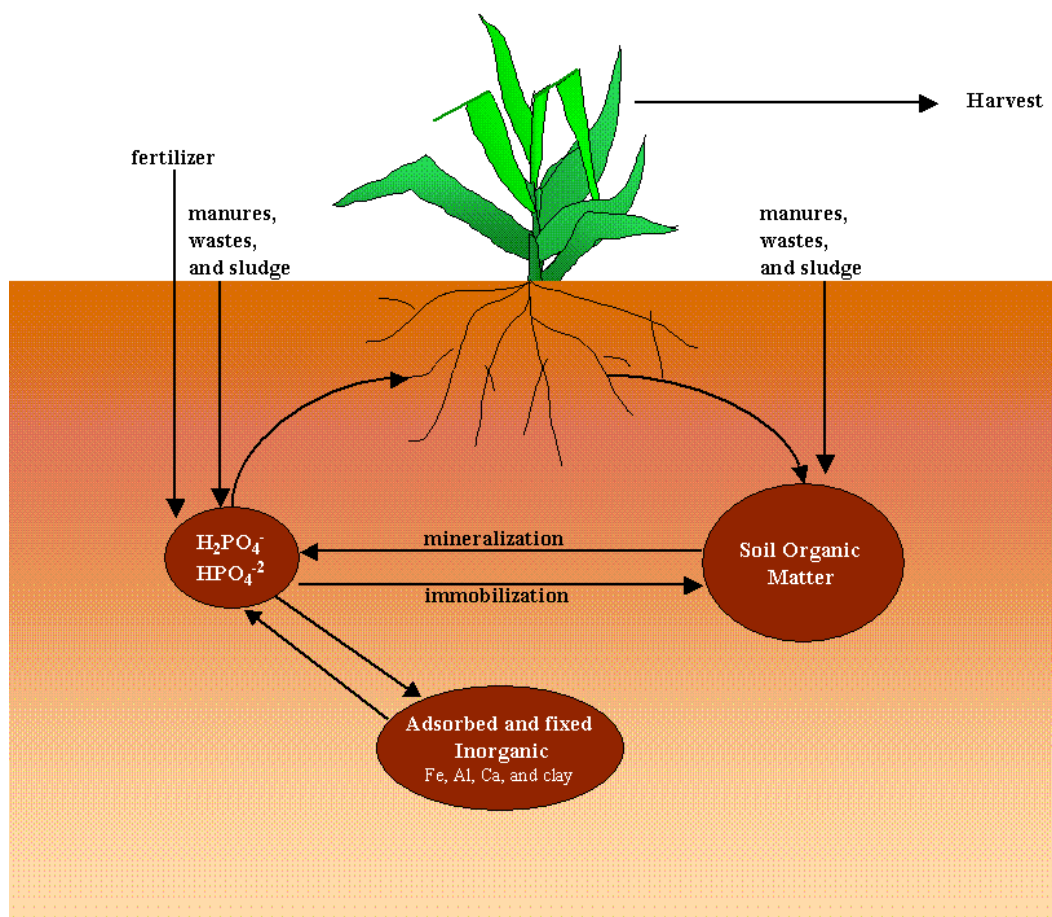


Figure 11-1: The phosphorus cycle

与高活性的氮不同，磷溶性在大多数环境中是有限的。磷可以与其他离子结合形成一些不可溶的化合物从溶液中沉淀。这些特性使得磷在土壤表面累积，从而易于地表径流的传输。Sharpley and Syers (1979)发现地表径流是磷从流域输出的主要机制。

SWAT 在土壤中模拟六个不同的磷库 (图 11-2)。三个库为无机态磷，其它三个为有机态磷。Fresh P 存在于作物残余物和微生物生物量中，活性和稳态磷存在于土壤腐植质中。腐植质中的有机磷被分成两个库，以考虑可以矿化的磷的变化。土壤无机磷被分为溶液、活性和稳态三个库。溶液库可以与活性库之间快速达到平衡 (几天或几个星期)。活性库与稳态库之间的平衡过程缓慢。

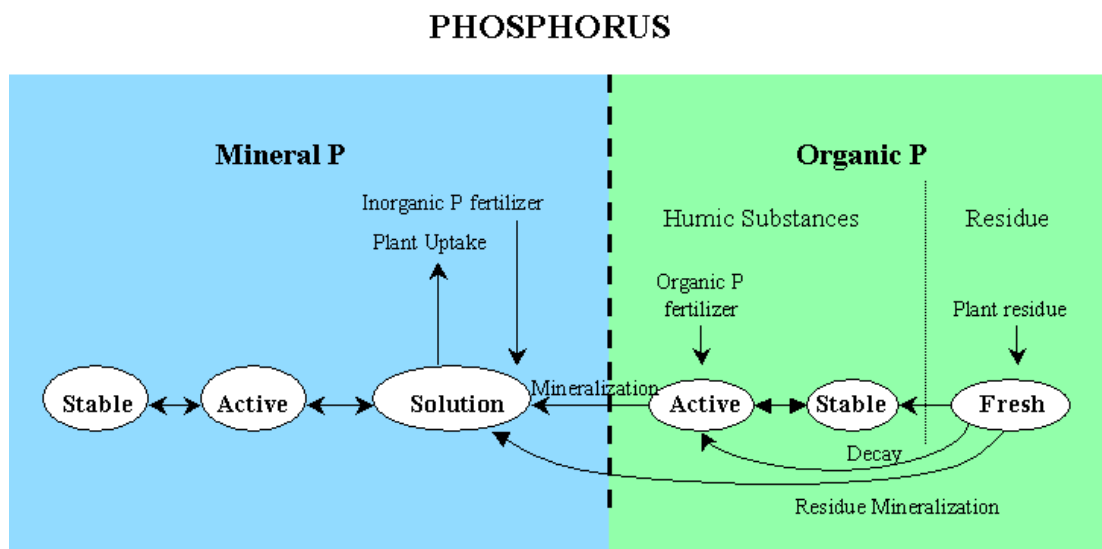


Figure 11-2: SWAT soil phosphorus pools and processes that move P in and out of pools.

11.1.1 土壤磷水平初始化

用户可以定义模拟开始时,土壤各层中的腐植质中有机磷和溶解态磷的含量。

如果用户没有指定初始磷浓度, SWAT 会自动初始不同库的磷初始水平。

各层土壤中的磷溶液浓度初始化为 5 mg/kg 土壤。这一浓度典型代表了自然植被条件下无管理的土地。在耕作层中 25 mg/kg 土壤具有代表性(Cope et al., 1981)。

活性无机库中的磷浓度为(Jones et al., 1984)：

$$\min P_{act,ly} = P_{solution,ly} \cdot \frac{1 - pai}{pai} \quad 11.1.1$$

式中： $\min P_{act,ly}$ 活性无机库中的磷浓度为(mg/kg), $P_{solution,ly}$ 为溶液中的磷浓度(mg/kg), pai 为磷可得性指数。

稳态无机库中的磷浓度为(Jones et al., 1984)：

$$\min P_{sta,ly} = 4 \cdot \min P_{act,ly} \quad 11.1.2$$

式中： $\min P_{sta,ly}$ 为稳态无机库中的磷浓度(mg/kg), $\min P_{act,ly}$ 为活性无机库中的磷浓度为(mg/kg)。

有机磷浓度根据假设腐植质中的 N:P 比为 8:1 来计算。土层中腐植质有机磷的浓度为：

$$\text{org}P_{hum,ly} = 0.125 \cdot \text{org}N_{hum,ly} \quad 11.1.3$$

式中： $\text{org}P_{hum,ly}$ 为土层中腐植质有机磷的浓度(mg/kg), $\text{org}N_{hum,ly}$ 为土层中腐植质有机氮的浓度(mg/kg)。

Fresh 有机磷库中的磷设为 0 ,除了在地表 10mm 的土壤中。在地表 10mm 的土壤中 , Fresh 有机磷库磷设为土壤表面残余物的 0.03%。

$$orgP_{frsh,surf} = 0.0003 \cdot rsd_{surf} \quad 11.1.4$$

式中： $orgP_{frsh,surf}$ 为地表10mm的土壤中Fresh 有机磷库磷含量(kg P/ha) , rsd_{surf} 为地表10mm的土壤中残余物质量(kg P/ha)。

SWAT营养物水平以浓度单位输入，但在实际运算中以质量单位。为了将浓度转换为质量，需要将浓度乘以容积密度和土层厚度，并除以100：

$$\frac{conc_P \cdot \rho_b \cdot depth_{ly}}{100} = \frac{\text{kg P}}{\text{ha}} \quad 11.1.5$$

式中： $conc_P$ 土层中磷浓度(mg/kg or ppm) , ρ_b 为土层的容积密度(Mg/m³) , $depth_{ly}$ 土层的厚度 (mm) 。

Table 11-1: SWAT input variables that pertain to nitrogen pools.

Variable Name	Definition	Input File
SOL_SOLP	$P_{solution,ly}$: Initial soluble P concentration in soil layer (mg/kg or ppm)	.chm
SOL_ORGP	$orgP_{hum,ly}$: Initial humic organic phosphorus in soil layer (mg/kg or ppm)	.chm
PSP	pai : Phosphorus availability index	.bsn
RSDIN	rsd_{surf} : Material in the residue pool for the top 10mm of soil (kg ha ⁻¹)	.hru
SOL_BD	ρ_b : Bulk density of the layer (Mg/m ³)	.sol

11.2 矿化、降解和固化

降解是 fresh organic 残余物离解为简单有机物。矿化是将有机的、植物不可利用的磷通过微生物转化为无机的、植物可利用的磷。固化是将植物可利用的无机磷通过微生物转化为植物不可利用的有机磷。

SWAT 中的磷矿化算法为 net 矿化算法，其中包括了固化。SWAT 中的算法与 Jones et al (1984) 开发的磷矿化算法相似。矿化有两个来源：作物残余物和微生物生物量中的 fresh 有机磷库，以及土壤腐植质中的活性有机磷库。矿化和降解只有在土壤层温度高于 0°C 时发生。

矿化和降解依赖于水分可得性和温度。在矿化和降解方程中考虑了温度和水对这些过程的影响的两个因素。

营养物循环温度因素：

$$\gamma_{tmp,ly} = 0.9 \cdot \frac{T_{soil,ly}}{T_{soil,ly} + \exp \left[\frac{193 - 0.312 \cdot T_{soil,ly}}{10} \right]} + 0.1 \quad 11.2.1$$

式中： $\gamma_{tmp,l}$ 为ly土层的营养物循环温度因素， $T_{soil,ly}$ 为ly土层温度 (°C)。

营养物循环温度因素不低于0.1。

营养物循环水分因素：

$$\gamma_{sw,ly} = \frac{SW_{ly}}{FC_{ly}} \quad 11.2.2$$

式中： $\gamma_{sw,ly}$ 为ly土层的营养物循环水分因素， SW_{ly} 为ly土层模拟日的含水量(mm H₂O)， FC_{ly} 为ly土层模拟日的田间持水量(mm H₂O)。营养物循环水分因素不低于0.05。

11.2.1 腐植质矿化

根据腐植质中活性有机氮和稳态有机氮的比例，存在于腐植质中的磷可以分为活性和稳态有机库。存在于活性和稳态有机库的磷分别为：

$$orgP_{act,ly} = orgP_{hum,ly} \cdot \frac{orgN_{act,ly}}{orgN_{act,ly} + orgN_{sta,ly}} \quad 11.2.3$$

$$orgP_{sta,ly} = orgP_{hum,ly} \cdot \frac{orgN_{sta,ly}}{orgN_{act,ly} + orgN_{sta,ly}} \quad 11.2.4$$

式中： $orgP_{act,ly}$ 为活性有机库中的磷含量(kg P/ha)， $orgP_{sta,ly}$ 为稳态有机库中的磷含量(kg P/ha)， $orgP_{hum,ly}$ 为土层中腐植质有机磷的浓度(kg P/ha)， $orgN_{act,ly}$ 为活性有机库中的氮含量(kg N/ha)， $orgN_{sta,ly}$ 为稳态有机库中氮的含量(kg N/ha)。

腐植质活性有机 P 的矿化为：

$$P_{mina,ly} = 1.4 \cdot \beta_{min} \cdot \gamma_{tmp,ly} \cdot \gamma_{sw,ly}^{1/2} \cdot orgP_{act,ly} \quad 11.2.5$$

式中： $P_{mina,ly}$ 为腐植质活性有机P矿化量(kg N/ha)， β_{min} 为腐植质有机磷矿化系数， $\gamma_{tmp,ly}$ 为ly土层的营养物循环温度因素， $\gamma_{sw,ly}$ 为ly土层的营养物循环水分因素， $orgN_{act,ly}$ 为在活性有机库中的磷量(kg N/ha)。

11.2.2 残余物降解和矿化

Fresh 有机磷库的降解和矿化只在第一土壤层存在。降解和矿化通过每日更新的衰减系数来控制。衰减系数根据残余物中的 C:N 比和 C:P 比，以及温度和土壤含水量计算。

$$\varepsilon_{C:N} = \frac{0.58 \cdot rsd_{ly}}{orgN_{frsh,ly} + NO3_{ly}} \quad 11.2.6$$

式中： $\varepsilon_{C:N}$ 为土层中残余物的C:N比， rsd_{ly} 为土层ly中的残余物量(kg/ha)，0.58为残余物中的碳含量分数， $orgN_{frsh,ly}$ 为土层ly中fresh有机氮库的氮量(kg/ha)， $NO3_{ly}$ 为土层ly中的硝酸盐含量(kg/ha)。

残余物的 C:P 比为：

$$\varepsilon_{C:P} = \frac{0.58 \cdot rsd_{ly}}{orgP_{frsh,ly} + P_{solution,ly}} \quad 11.2.7$$

式中： $\varepsilon_{C:P}$ 为土层中残余物的C:P比， rsd_{ly} 为土层ly中的残余物量(kg/ha)，0.58为残余物中的碳含量分数， $orgP_{frsh,ly}$ 为土层ly中fresh有机库的磷量(kg/ha)， $P_{solution,ly}$ 为土层ly溶液中的磷含量(kg/ha)。

衰减系数定义残余物降解的分数。衰减系数采用下式计算：

$$\delta_{ntr,ly} = \beta_{rsd} \cdot \gamma_{ntr,ly} \cdot \gamma_{tmp,ly} \cdot \gamma_{sw,ly} \quad 11.2.8$$

式中： $\delta_{ntr,ly}$ 为残余物衰减系数， β_{rsd} 为残余物fresh有机营养物质矿化的速率系数， $\gamma_{ntr,ly}$ 为ly层营养物质循环残余物降解因子， $\gamma_{tmp,ly}$ 为ly层营养物质循环温度因子， $\gamma_{sw,ly}$ 为ly层营养物质循环水分因子。

营养物质循环残余物降解因子为：

$$\gamma_{ntr,ly} = \min \left\{ \begin{array}{l} \exp \left[-0.693 \cdot \frac{\varepsilon_{C:N} - 25}{25} \right] \\ \exp \left[-0.693 \cdot \frac{\varepsilon_{C:P} - 200}{200} \right] \\ 1.0 \end{array} \right. \quad 11.2.9$$

式中： $\gamma_{ntr,ly}$ 为ly层营养物质循环残余物降解因子， $\varepsilon_{C:P}$ 为土层中残余物的C:P比， $\varepsilon_{C:N}$ 为土层中残余物的C:N比。

残余物fresh有机磷库中磷矿化计算公式为：

$$P_{minf,ly} = 0.8 \cdot \delta_{ntr,ly} \cdot orgP_{frsh,ly} \quad 11.2.10$$

式中： $P_{minf,ly}$ 为残余物fresh有机磷库中磷矿化 (kg N/ha) ， $\delta_{ntr,ly}$ 为残余物降解系数 ， $orgP_{frsh,ly}$ 为土层ly中fresh有机磷库的氮量 (kg/ha) 。Fresh 有机磷库矿化的磷，添加到该层溶液磷库。

残余物fresh有机磷库中磷降解计算公式为：

$$P_{dec,ly} = 0.2 \cdot \delta_{ntr,ly} \cdot orgP_{frsh,ly} \quad 11.2.11$$

式中： $P_{dec,ly}$ 为残余物fresh有机磷库中磷降解 (kg N/ha) ， $\delta_{ntr,ly}$ 为残余物降解系数 ， $orgP_{frsh,ly}$ 为土层ly中fresh有机磷库的磷量 (kg/ha) 。Fresh 有机氮库降解的氮，添加到该层溶液磷库。

Table 11-2: SWAT input variables that pertain to mineralization.

Variable Name	Definition	Input File
CMN	β_{min} : Rate coefficient for mineralization of the humus active organic nutrients	.bsn
RSDCO	β_{rsd} : Rate coefficient for mineralization of the residue fresh organic nutrients	.bsn
RSDCO_PL	β_{rsd} : Rate coefficient for mineralization of the residue fresh organic nutrients	crop.dat

11.3 无机磷的吸附

许多研究表明在溶解态磷肥施用后，由于与土壤发生反应，溶液磷浓度随时间显著降低。在这一过程中，最初磷浓度下降迅速，之后速度变慢，甚至会持续几年(Barrow and Shaw, 1975; Munns and Fox, 1976; Rajan and Fox, 1972; Sharpley, 1982)。为了考虑溶液磷最初的快速降低，SWAT 假设在溶液磷和一个“活性”无机库之间存在一个快速的平衡。随后的缓慢反应通过假设在“活性”

和“稳态”无机库之间存在一个缓慢的平衡过程来模拟。计算无机磷在这三个库中运动的算法是 Jones et al. (1984) 开发的。

活性无机库和溶液磷的平衡取决于磷可得性指数。这一指数指定了，潜伏期（快速反应期）后，存在于溶液中的磷占磷肥的分数。

有许多计算磷可得性指数的方法。Jones et al. (1984) 建议采用 Sharpley et al. (1984) 开发的方法，该方法中溶液磷以 K_2HPO_4 的形式进入土壤。将土壤湿润至田间持水量，接着在 $25^\circ C$ 干化。当干化后，土壤再用去离子水湿润。在 6 个月的“潜伏期”内，土壤经过多次干湿循环。在“潜伏期”结束之后，溶液磷可以通过阴离子交换剂的提取来确定。可以用下式确定磷可能性指数：

$$pai = \frac{P_{solution,f} - P_{solution,i}}{fert_{minP}} \quad 11.3.1$$

式中 pai 为磷可得性指数， $P_{solution,f}$ 为在施肥和“潜伏期”后溶液中磷含量， $P_{solution,i}$ 为施肥前溶液中磷含量， $fert_{minP}$ 为肥料中的溶解态磷含量。

在溶液和活性无机库之间的磷运动取决于平衡方程：

$$P_{sol|act,ly} = P_{solution,ly} - minP_{act,ly} \cdot \left(\frac{pai}{1 - pai} \right) \quad \text{if } P_{solution,ly} > minP_{act,ly} \cdot \left(\frac{pai}{1 - pai} \right) \quad 11.3.2$$

$$P_{sol|act,ly} = 0.1 \cdot \left(P_{solution,ly} - minP_{act,ly} \cdot \left(\frac{pai}{1 - pai} \right) \right) \quad \text{if } P_{solution,ly} < minP_{act,ly} \cdot \left(\frac{pai}{1 - pai} \right) \quad 11.3.3$$

第 11 章 方程：磷

式中： $P_{sol|act,ly}$ 为在溶解态和活性无机磷库之间转化的磷(kg P/ha)， $P_{solution,ly}$ 为溶液中磷的含量(kg P/ha)， $minP_{act,ly}$ 为活性无机库中磷的含量(kg P/ha)， pai 为磷可得性指数。当 $P_{sol|act,ly}$ 为正时，磷从溶液向活性无机库运动；当 $P_{sol|act,ly}$ 为负时，磷从活性无机库向溶液运动。注意，从活性无机库向溶液运动的速率为从溶液向活性无机库运动速率的1/10th。

SWAT通过假设活性无机库与稳态无机库之间存在缓慢平衡来模拟缓慢的磷吸附过程。在平衡时，稳态无机库为活性无机库的4倍。

当没有平衡时，稳态和活性无机库之间的磷运动取决于方程：

$$P_{act|sta,ly} = \beta_{eqP} \cdot \left(\frac{minP_{act,ly}}{minP_{sta,ly}} - 1 \right) \cdot minP_{act,ly} \quad \text{if } minP_{sta,ly} < 4 \cdot minP_{act,ly} \quad 11.3.4$$

$$P_{act|sta,ly} = 0.1 \cdot \beta_{eqP} \cdot \left(\frac{minP_{act,ly}}{minP_{sta,ly}} - 1 \right) \cdot minP_{act,ly} \quad \text{if } minP_{sta,ly} > 4 \cdot minP_{act,ly} \quad 11.3.5$$

式中： $P_{act|sta,ly}$ 为稳态和活性无机库之间转化的磷(kg P/ha)， β_{eqP} 为缓慢平衡速率常数 (0.0006 d⁻¹)， $minP_{act,ly}$ 为活性无机库中的磷含量(kg P/ha)， $minP_{sta,ly}$ 为稳态无机库中的磷含量(kg P/ha)。当 $P_{act|sta,ly}$ 为正时，磷从活性无机库向稳态无机库运动；当 $P_{act|sta,ly}$ 为负时，磷从稳态无机库向活性无机库运动。注意，从稳态无机库向活性无机库运动的速率为从活性无机库向稳态无机库运动速率的1/10th。

Table 11-3: SWAT input variables that pertain to inorganic P sorption processes.

Variable Name	Definition	Input File
---------------	------------	------------

PSP	<i>pai</i> : Phosphorus availability index	.bsn
-----	--	------

11.4 渗滤

磷在土壤中的主要运动机制为弥散。弥散为离子由于土壤溶液中的浓度梯度，而产生的短距离（1-2mm）迁移。浓度梯度，是由植被根系从土壤溶液中吸收可溶性磷，耗尽植物根系区溶液磷，所产生的。

由于磷的低活性，SWAT 允许溶解态磷从表层 10mm 土壤进入第一层土层，迁移量由下式计算：

$$P_{perc} = \frac{P_{solution,surf} \cdot w_{perc,surf}}{10 \cdot \rho_b \cdot depth_{surf} \cdot k_{d,perc}} \quad 11.4.1$$

式中： P_{perc} 为从表层10mm土壤进入第一层土层的磷(kg P/ha)， $P_{solution,surf}$ 为表层10mm土壤溶液中磷的含量(kg P/ha)， $w_{perc,surf}$ 为模拟日从表层10mm土壤渗漏到第一层土层的磷(kg P/ha)， ρ_b 表层10mm土壤的容积密度(kg P/ha)（假设与第一层土壤相同）， $depth_{surf}$ 为表层深度(10mm)， $k_{d,perc}$ 磷渗漏系数($10 \text{ m}^3/\text{Mg}$)。磷渗漏系数为表层10mm土壤溶液中磷浓度与渗漏液中磷浓度的比例。

Table 11-4: SWAT input variables that pertain to phosphorus leaching.

Variable Name	Definition	Input File
SOL_BD	ρ_b : Bulk density of the layer (Mg/m^3)	.sol
PPERCO	$k_{d,perc}$: Phosphorus percolation coefficient ($10 \text{ m}^3/\text{Mg}$)	.bsn

11.5 NOMENCLATURE

- FC_{ly} Water content of layer ly at field capacity (mm H₂O)
 $NO3_{ly}$ Nitrate content of soil layer ly (kg NO₃-N/ha)
 $P_{act|sta,ly}$ Amount of phosphorus transferred between the active and stable mineral pools (kg P/ha)
 $P_{dec,ly}$ Phosphorus decomposed from the fresh organic P pool (kg P/ha)
 $P_{mina,ly}$ Phosphorus mineralized from the humus active organic P pool (kg P/ha)
 $P_{minf,ly}$ Phosphorus mineralized from the fresh organic P pool (kg P/ha),
 P_{perc} Amount of phosphorus moving from the top 10 mm into the first soil layer (kg P/ha)
 $P_{solution,ly}$ Amount of phosphorus in solution (mg/kg)
 $P_{sol|act,ly}$ Amount of phosphorus transferred between the soluble and active mineral pool (kg P/ha)
 SW_{ly} Soil water content of layer ly (mm H₂O)
 $T_{soil,ly}$ Temperature of layer ly (°C)
- $conc_P$ Concentration of phosphorus in a layer (mg/kg or ppm)
 $depth_{ly}$ Depth of the layer (mm)
 $k_{d,perc}$ Phosphorus percolation coefficient (10 m³/Mg)
 $minP_{act,ly}$ Amount of phosphorus in the active mineral pool (mg/kg or kg P/ha)
 $minP_{sta,ly}$ Amount of phosphorus in the stable mineral pool (mg/kg or kg P/ha)
 $orgN_{act,ly}$ Nitrogen in the active organic pool in layer ly (mg/kg or kg N/ha)
 $orgN_{frsh,ly}$ Nitrogen in the fresh organic pool in layer ly (kg N/ha)
 $orgN_{hum,ly}$ Amount of nitrogen in humic organic pool in the layer (mg/kg or kg N/ha)
 $orgN_{sta,ly}$ Nitrogen in the stable organic pool in layer ly (mg/kg or kg N/ha)
 $orgP_{act,ly}$ Amount of phosphorus in the active organic pool (kg P/ha)
 $orgP_{frsh,ly}$ Phosphorus in the fresh organic pool in layer ly (kg P/ha)
 $orgP_{hum,ly}$ Amount of phosphorus in humic organic pool in the layer (mg/kg or kg P/ha)
 $orgP_{sta,ly}$ Amount of phosphorus in the stable organic pool (kg P/ha)
 pai Phosphorus availability index
 rsd_{ly} Residue in layer ly (kg/ha)
 $w_{perc,ly}$ Amount of water percolating to the underlying soil layer on a given day (mm H₂O)
- β_{eqP} Slow equilibration rate constant (0.0006 d⁻¹)
 β_{min} Rate coefficient for mineralization of the humus active organic nutrients
 β_{rsd} Rate coefficient for mineralization of the residue fresh organic nutrients
 $\delta_{ntr,ly}$ Residue decay rate constant
 $\epsilon_{C:N}$ Residue C:N ratio in the soil layer
 $\epsilon_{C:P}$ Residue C:P ratio in the soil layer
 $\gamma_{ntr,ly}$ Nutrient cycling residue composition factor for layer ly
 $\gamma_{sw,ly}$ Nutrient cycling water factor for layer ly

$\gamma_{tmp,ly}$ Nutrient cycling temperature factor for layer ly
 ρ_b Bulk density of the layer (Mg/m^3)

11.6 REFERENCES

- Barrow, N.J. and T.C. Shaw. 1975. The slow reactions between soil and anions. 2. Effect of time and temperature on the decrease in phosphate concentration in soil solution. *Soil Sci.* 119:167-177.
- Cope, J.T., C.E. Evans, and H.C. Williams. 1981. Soil test fertility recommendations for Alabama crops. Alabama Agric. Station Circular No. 251.
- Jones, C.A. C.V. Cole, A.N. Sharpley, and J.R. Williams. 1984. A simplified soil and plant phosphorus model. I. Documentation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48:800-805.
- Munns, D.N. and R.L. Fox. 1976. The slow reaction which continues after phosphate adsorption: Kinetics and equilibrium in some tropical soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 40:46-51.
- Rajan, S.S.S. and R.L. Fox. 1972. Phosphate adsorption by soils. 1. Influence of time and ionic environment on phosphate adsorption. *Commun. Soil. Sci. Plant Anal.* 3:493-504.
- Sharpley, A.N. 1982. A prediction of the water extractable phosphorus content of soil following a phosphorus addition. *J. Environ. Qual.* 11:166-170.
- Sharpley, A.N., C. Gray, C.A. Jones, and C.V. Cole. 1984. A simplified soil and plant phosphorus model. II. Prediction of labile, organic, and sorbed P amounts. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48:805-809.
- Sharpley, A.N. and J.K. Syers. 1979. Phosphorus inputs into a stream draining an agricultural watershed: II. Amounts and relative significance of runoff types. *Water, Air and Soil Pollution* 11:417-428.

第 12 章 方程:杀虫剂

在早期的耕作制度中，耕地和收获的主要目的是尽可能去除田地中的植物残余物，以致于在下一个生长季节到来之前没有食物来源。由于研究表明侵蚀与土地覆被缺乏有关，农民开始减少耕地次数，改变收获方式以保留更多的残余物。害虫控制的机械方法效果很小，因此化学方法开始在有害生物体管理中扮演重要的作用。

杀虫剂是有害的，因此人们关心它们在环境中的存在对人类健康和环境质量的影响。杀虫剂的迁移和转化取决于它的某些性质，如水溶性、可挥发性和

第 12 章 方程：杀虫剂

可降解性。SWAT 采用的模拟杀虫剂运动和转化的算法来自 GLEAMS(Leonard et al., 1987)。

施用在 HRU 中的杀虫剂，其中一部分被植物叶片截留，令一部分到达土壤。杀虫剂也可以通过翻耕进入土壤。SWAT 模拟在叶片和土壤层中的杀虫剂。

图 12-1 SWAT 模拟的路径和过程。

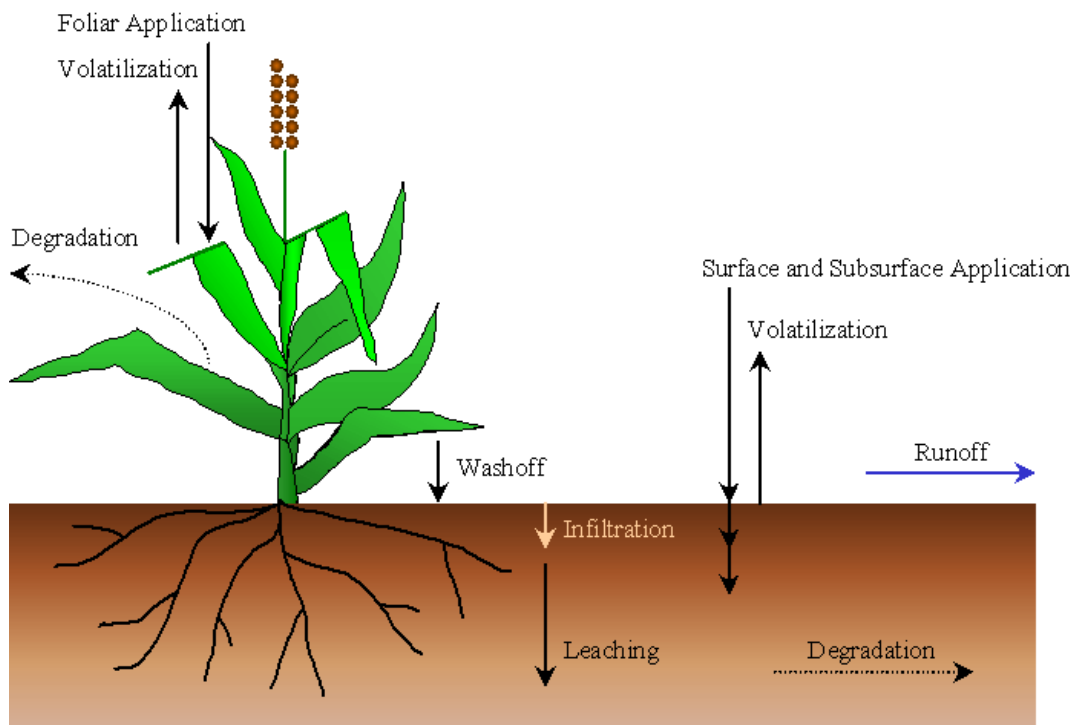


Figure 12-1: Pesticide fate and transport in SWAT.

12.1 冲刷

植物叶片上的杀虫剂可以被雨水冲刷。被冲刷掉部分与植物形态、杀虫剂可溶性和降水的历时和强度有关。当降水超过 2.54mm 时发生冲刷。

在一次降水事件中从植物叶片冲刷的杀虫剂量采用下式计算：

$$pst_{f,wsh} = fr_{wsh} \cdot pst_f \quad 12.1.1$$

式中： $pst_{f,wsh}$ 为在一次降水事件中从植物叶片冲刷到土壤表面的杀虫剂量 (kg pst/ha)， fr_{wsh} 为杀虫剂的冲刷分数， pst_f 植物叶片存在的杀虫剂量 (kg pst/ha)。冲刷分数表示植物叶片上杀虫剂 dislodgable 的部分。

Table 12-1: SWAT input variables that pertain to pesticide wash-off.

Variable Name	Definition	Input File
WOF	fr_{wsh} : Wash-off fraction for the pesticide	pest.dat

12.2 降解

降解是将化合物转化为相对不太复杂的形式。土壤中的化合物可能在光照条件下降解（光降解），与土壤中其它化学物质反应（化学降解）或作为生物体的霉（生物降解）。

目前施用的杀虫剂，大多数为有机化合物。因为有机化合物中含有碳（碳可以被微生物通过生物反应来产生能量），有机杀虫剂可能易于微生物降解。相对地，无机杀虫剂不易于微生物降解。非降解的杀虫剂的例子有铅砷酸盐、通常在果园中施用的金属盐、砷酸（一种用来施用棉花脱桃的化合物）。

第 12 章 方程：杀虫剂

杀虫剂的可降解性不同。具有链状结构的化合物较胶环状或其它复杂结构的化合物易于分解。杀虫剂的可降解性采用杀虫剂半生命周期来定义。

半生命周期定义为一定杀虫剂浓度减少到一半所需要的天数。杀虫剂在土壤中的半生命周期是一个综合性参数，包括挥发净效应、光分解作用、水解、生物降解和化学反应。因为叶片上的杀虫剂比土壤中的降解得快，SWAT 模型允许为叶片上的杀虫剂定义不同的半生命周期。

在土壤各层中的杀虫剂降解或去除采用一介动力方程：

$$pst_{s,ly,t} = pst_{s,ly,o} \cdot \exp \left[-k_{p,soil} \cdot t \right] \quad 12.2.1$$

式中： $pst_{s,ly,t}$ 为时刻 t 土壤层中的杀虫剂含量(kg pst/ha)， $pst_{s,ly,o}$ 为土层中初始杀虫剂含量(kg pst/ha)， $k_{p,soil}$ 为土壤中杀虫剂的降解或去除速率常数 (1/day)， t 为从模拟开始的时间到模拟计算时间的的时间间隔 (days)。速率常数与土壤半生命周期之间的关系：

$$t_{1/2,s} = \frac{0.693}{k_{p,soil}} \quad 12.2.2$$

式中： $t_{1/2,s}$ 为土壤中杀虫剂的半生命周期 (days)。

叶片上杀虫剂降解方程为：

$$pst_{f,t} = pst_{f,o} \cdot \exp \left[-k_{p,foliar} \cdot t \right] \quad 12.2.3$$

式中： $pst_{f,t}$ 为时刻 t 叶片上杀虫剂量(kg pst/ha)， $pst_{f,o}$ 为叶片上杀虫剂的初始含量(kg pst/ha)， $k_{p,foliar}$ 为土壤中杀虫剂的降解或去除速率常数(1/day)， t 为从模拟开始的时间到模拟计算时间的的时间间隔 (days)。速率常数与叶片杀虫剂半生命周期之间的关系：

$$t_{1/2,f} = \frac{0.693}{k_{p,foliar}} \quad 12.2.4$$

式中： $t_{1/2,s}$ 为叶片上土壤中杀虫剂的半生命周期 (days)。

Table 12-2: SWAT input variables that pertain to pesticide degradation.

Variable Name	Definition	Input File
HLIFE_S	$t_{1/2,s}$: Half-life of the pesticide in the soil (days)	pest.dat
HLIFE_F	$t_{1/2,f}$: Half-life of the pesticide on foliage (days)	pest.dat

12.3 渗滤

强水溶性杀虫剂可以随着渗漏进入深层的土壤剖面，可以潜在地污染浅层地下水系统。SWAT 中计算渗滤的算法，同时考虑了杀虫剂在地表径流和侧向流中的损失。这些算法会在第 15 章中介绍。

12.4 NOMENCLATURE

- fr_{wsh} Wash-off fraction for the pesticide
- $k_{p,foliar}$ Rate constant for degradation or removal of the pesticide on foliage (1/day)
- $k_{p,soil}$ Rate constant for degradation or removal of the pesticide in soil (1/day)
- pst_f Amount of pesticide on the foliage (kg pst/ha)
- $pst_{f,wsh}$ Amount of pesticide on foliage that is washed off the plant and onto the soil surface on a given day (kg pst/ha)
- $pst_{s,ly}$ Amount of pesticide in the soil (kg pst/ha)
- t Time elapsed since the initial pesticide amount was determined (days)
- $t_{1/2,f}$ Half-life of the pesticide on foliage (days)
- $t_{1/2,s}$ Half-life of the pesticide in the soil (days)

12.5 REFERENCES

第 12 章 方程：杀虫剂

Leonard, R.A., W.G. Knisel., and D.A. Still. 1987. GLEAMS: Groundwater loading effects of agricultural management systems. Trans. ASAE. 30:1403-1418.

第 13 章 方程:泥沙

降雨径流产生的侵蚀采用修正的通用土壤流失方程计算(MUSLE)(Williams, 1975)。MUSLE 为 Wischmeier 和 Smith (1965, 1978)开发的通用土壤流失方程 (USLE) 的修正形式。

USLE 根据预测降雨能量计算平均年总侵蚀量。在 MUSLE 中，降雨能量因子采用径流因子替代。这一变化改进了对泥沙产量的预测，不需要输移比，并且可以将该方程应用到次降雨时间。泥沙产量预测精度的提高是因为径流是前期土壤湿度条件和降雨能量的函数。USLE 中需要输移比 (在河道任意点的泥沙产量与该点之上的源侵蚀之比) ，因为降雨因素只代表分离作用中的能量。而在 MUSLE 中不需要输移比因为径流因素代表了分离和输移泥沙的能量。

13.1 MUSLE

修正土壤流失方程 (Williams, 1995) :

$$sed = 11.8 \cdot Q_{surf} \cdot q_{peak} \cdot area_{hru}^{0.56} \cdot K_{USLE} \cdot C_{USLE} \cdot P_{USLE} \cdot LS_{USLE} \cdot CFRG \quad 13.1.1$$

式中： sed 为模拟日的泥沙产量 (tons)， Q_{surf} 为地表径流 (mm H₂O/ha)， q_{peak} 为径流洪峰 (m³/s)， $area_{hru}$ 为HRU面积 (ha)， K_{USLE} 为USLE土壤可蚀性因子； C_{USLE} 为USLE植被覆盖和作物管理因子； P_{USLE} 为USLE保持措施因子； LS_{USLE} 为USLE地形因子， $CFRG$ 为直径大于2mm的粗碎块因子。地表径流和径流洪峰的计算在第六章已有介绍。USLE因子将在下面的部分进行介绍。

13.1.1 土壤可蚀性因子

即使在其它条件相同时，一些土壤比另一些土壤更容易侵蚀。这一区别成为土壤可蚀性，根据土壤自身的属性来计算。Wischmeier and Smith (1978)将土壤可蚀性因子定义为：土壤在单位土块，单位侵蚀指数的土壤流失速率。单位田块 22.1m 长，纵向坡度为 9%，且连续休耕，耕作方向与坡向相同。连续休耕定义为至少两年没有植被覆盖的已经翻耕的土地。MUSLE 中的 USLE 土壤可蚀性因子的单位在数值上等于传统的英制单位 0.01(ton acre hr)/(acre ft-ton inch)。

Wischmeier and Smith (1978)注意到，不管沙粒和粘粒分数是否增加，土壤的可蚀性随粉粒的含量降低而降低。

第 13 章 方程：泥沙

可蚀性因子的直接测量是十分消耗时间和金钱的。Wischmeier et al. (1971)开发了一个通用方程来计算可蚀性因子，该方程适用于粉粒和极细沙粒分数不超过 70% 土壤颗粒分布的情况：

$$K_{USLE} = \frac{0.00021 \cdot M^{1.14} \cdot (2 - OM)^{-2} \cdot (3.25 - c_{soilstr})^{-2} \cdot (2.5 - c_{perm})^{-3}}{100} \quad 13.1.2$$

式中： K_{USLE} 为USLE土壤可蚀性因子， M 为颗粒尺度参数， OM 为有机物含量百分比（%）， $c_{soilstr}$ 为土壤分类中的土壤结构代码， c_{perm} 为土壤剖面可渗透性类别。

颗粒尺度参数， M ，为：

$$M = (m_{silt} + m_{vfs}) \cdot (100 - m_c) \quad 13.1.3$$

式中： m_{silt} 为粒径在0.002~0.05mm的淤泥、细沙百分含量， m_{vfs} 为粒径在0.05~0.10mm极细沙粒百分含量， m_c 为粒径<0.002mm的粘土百分含量。

有机物含量百分比， OM ，为

$$OM = 1.72 \cdot orgC \quad 13.1.4$$

式中： $orgC$ 为有机碳百分比含量（%）。

土壤结构为将主要土壤粒径聚合为混合颗粒，这些混合颗粒之间临近聚合体之间有弱表面分离。一个单独的土壤聚合体成为土壤自然结构体。土壤结构的田间描述为自然结构体的形状和排列，自然结构体的大小和显著自然结构体的区别和耐久力。USDA 的土壤结构调查术语包括定义三个不同属性

的不同体系的术语。自然结构体的形状和排列为土壤结构的 type，结构体大小为 class，区别度为 grade。

方程 13.1.2 的土壤结构代码定义为土壤结构的 type 和 class。主要有 4 种土壤结构 type：

- 扁平状，颗粒分布在一个平面周围，通常是水平的
- 棱柱状，颗粒分布在一个垂线周围并且局限于相对平坦的垂直表面
- 块状或多面体，颗粒分布在一个点周围，并且局限于平坦或圆形表面，这些表面为周围结构体面形成的模子。
- 类似球体或多面体，可以分布在一个点周围，并且局限于曲面或十分不规则的表面，这些表面与周围结构体不相适应。

上述最后三种 type 都有两种 subtypes：

棱柱状，

棱晶形：没有圆形上端面

筒柱形：有圆形上端面

块状

有棱角：界限面之间有相对锐利的角

次棱角形：具有平面和圆面混合的表面，且定点较圆滑

球体

第 13 章 方程：泥沙

粒状：相对没有孔隙

碎屑状：有较多孔隙

Class 的大小标准随结构 type 而变化，总结于表 13-1 中。赋予 *csoilstr* 的代

码值为：

- 1 极细颗粒
- 2 细颗粒
- 3 中等或较粗颗粒
- 4 块状、扁平、棱柱状或厚重的

Table 13-1: Size classes of soil structure

Size Classes	Shape of structure			
	Platy	Prismatic and Columnar	Blocky	Granular
Very fine	< 1 mm	< 10 mm	< 5 mm	< 1 mm
Fine	1-2 mm	10-20 mm	5-10 mm	1-2 mm
Medium	2-5 mm	20-50 mm	10-20 mm	2-5 mm
Coarse	5-10 mm	50-100 mm	20-50 mm	5-10 mm
Very coarse	> 10 mm	> 100 mm	> 50 mm	> 10 mm

渗透性定义为土壤传输水和空气透过最限制性土层的能力。剖面渗透性分类

基于剖面的最低饱和水力传导率。赋予 *cperm* 的代码值为：

- 1 快 (>150 mm/hr)
- 2 中等 - 快 (50-150 mm/hr)
- 3 中等 (15-50 mm/hr)
- 4 慢 - 中等 (5-15 mm/hr)
- 5 慢 (1-5 mm/hr)
- 6 十分慢 (<1mm/hr)

1995 年 Williams 提出了另一个替换方程：

$$K_{USLE} = f_{csand} \cdot f_{cl-si} \cdot f_{orgc} \cdot f_{hisand} \quad 13.1.5$$

式中， f_{csand} ：粗糙沙土质地土壤侵蚀因子； f_{cl-si} ：粘壤土土壤侵蚀因子；

f_{orgc} ：土壤有机质因子； f_{hisand} ：高沙质土壤侵蚀因子。

各因子计算公式如下：

$$f_{csand} = \left(0.2 + 0.3 \cdot \exp \left[-0.256 \cdot m_s \cdot \left(1 - \frac{m_{silt}}{100} \right) \right] \right) \quad 13.1.6$$

$$f_{cl-si} = \left(\frac{m_{silt}}{m_c + m_{silt}} \right)^{0.3} \quad 13.1.7$$

$$f_{orgc} = \left(1 - \frac{0.25 \cdot orgC}{orgC + \exp [1.72 - 2.95 \cdot orgC]} \right) \quad 13.1.8$$

$$f_{hisand} = \left(1 - \frac{0.7 \cdot \left(1 - \frac{m_s}{100} \right)}{\left(1 - \frac{m_s}{100} \right) + \exp \left[-5.51 + 22.9 \cdot \left(1 - \frac{m_s}{100} \right) \right]} \right) \quad 13.1.9$$

式中， m_s 为粒径在 0.05~2.00mm 沙粒的百分含量； m_{silt} 为粒径在

0.002~0.05mm 的淤泥、细沙百分含量； m_c 为粒径<0.002mm 的粘土百分含量； $orgC$ 为各土层中有机碳含量（%）。

13.1.2 植被覆盖和管理因子

植被覆盖和作物管理因子 C_{USLE} 表示植物覆盖和作物栽培措施对防止土壤侵蚀的综合效益（Wischmeier 和 Smith，1978），其含义是在地形、土壤、降雨条件相同的情况下，种植作物或林草地的土地与连续休闲地土壤流失量的比值，最大取值为 1.0。由于植被覆盖受植物生长期的影响，SWAT 模型通过下面的方程调整植被覆盖和作物管理因子 C_{USLE} ：

$$C_{USLE} = \exp\left(\ln(0.8) \ln C_{USLE,mm}\right) \cdot \exp\left[-0.00115 \cdot rsd_{surf} + \ln C_{USLE,mm}\right] \quad 13.1.10$$

式中， $C_{USLE,mm}$ 为最小植被覆盖和作物管理因子值， rsd_{surf} 为地表植物残留量（ kg/hm^2 ）。

最小 C_{USLE} 因子可以由已知年平均 C_{USLE} 值通过以下方程（Arnold et al., 1995）计算：

$$C_{USLE,mm} = 1.463 \ln C_{USLE,aa} + 0.1034 \quad 13.1.11$$

式中， $C_{USLE,aa}$ 为不同植被覆盖的年均 C_{USLE} 值。

13.1.3 保持措施因子

保持措施因子 P_{USLE} 是指有保持措施的地表土壤流失与不采取任何措施的地表土壤流失的比值，这里的保持措施包括等高耕作、带状种植和梯田。等高耕作对于中低强度的降雨侵蚀具有保护水土流失的作用，但对于高强度的降

雨保护作用则很小，等高耕作对坡度为 3%~8% 之间的土地非常有效。不同坡度等高耕作的 P_{USLE} 值见表 13-2。带状种植是指中耕作物和小粒谷类作物的等距带状种植，建议 P_{USLE} 取值见表 13-3。

Table 13-2: P factor values and slope-length limits for contouring (Wischmeier and Smith, 1978).

Land slope (%)	P_{USLE}	Maximum length (m)
1 to 2	0.60	122
3 to 5	0.50	91
6 to 8	0.50	61
9 to 12	0.60	37
13 to 16	0.70	24
17 to 20	0.80	18
21 to 25	0.90	15

Table 13-3: P factor values, maximum strip width and slope-length limits for contour stripcropping (Wischmeier and Smith, 1978).

Land slope (%)	P_{USLE} values ¹			Strip width (m)	Maximum length (m)
	A	B	C		
1 to 2	0.30	0.45	0.60	40	244
3 to 5	0.25	0.38	0.50	30	183
6 to 8	0.25	0.38	0.50	30	122
9 to 12	0.30	0.45	0.60	24	73
13 to 16	0.35	0.52	0.70	24	49
17 to 20	0.40	0.60	0.80	18	37
21 to 25	0.45	0.68	0.90	15	30

¹P values:

A: For 4-year rotation of row crop, small grain with meadow seeding, and 2 years of meadow. A second row crop can replace the small grain if meadow is established in it.

B: For 4-year rotation of 2 years row crop, winter grain with meadow seeding, and 1-year meadow.

C: For alternate strips of row crop and winter grain

梯田为山坡上一系列水平田埂。有几种形式的梯田。宽梯田在坡度较缓坡地上，沟道和田埂与 interterrace area 相同。steep backslope 梯田，经常出现在

较陡的坡地上。Impoundment 梯田具有地下出水口。

梯田将山坡分成与梯田水平间隔相等的间隔段。梯田的坡长为其间隔段。

对于 broadbase 梯田，水平梯田间隔为田埂中点到下一个间隔的沟道中点的距离。Steep backslope 梯田的水平间隔为田埂底部开垦开始点与下一个 frontslope 底部之间的距离。

登高耕作梯田的 PUSLE 值见表 13-4。这些值适用于 broadbase、steep backslope 和 level 梯田。但应注意表 13-4 中的值没有考虑梯田对侵蚀控制的所有好处。由于在计算坡长因子是采用了较短的坡长，也使得产沙量降低。

Table 13-4: P factor values for contour-farmed terraced fields¹

Land slope (%)	Farm planning				Computing sediment yield ³	
	Contour factor ²	P	Stripcrop factor	P	Graded channels sod outlets	Steep backslope underground outlets
1 to 2	0.60		0.30		0.12	0.05
3 to 8	0.50		0.25		0.10	0.05
9 to 12	0.60		0.30		0.12	0.05
13 to 16	0.70		0.35		0.14	0.05
17 to 20	0.80		0.40		0.16	0.06
21 to 25	0.90		0.45		0.18	0.06

¹Slope length is the horizontal terrace interval. The listed values are for contour farming. No additional contouring factor is used in the computation.

² Use these values for control of interterrace erosion within specified soil loss tolerances.

³ These values include entrapment efficiency and are used for control of offsite sediment within limits and for estimating the field's contribution to watershed sediment yield.

13.1.4 地形因子

地形因子， LS_{USLE} ，为期望的田地坡度与 22.1m 长，均匀 9% 坡度单位面积土

壤流失的比例。地形因子 LS_{USLE} 的计算公式如下：

$$LS_{USLE} = \left(\frac{L_{hill}}{22.1} \right)^m \cdot \left[5.41 \cdot \sin^2 \alpha_{hill} + 4.56 \cdot \sin \alpha_{hill} + 0.065 \right] \quad 13.1.12$$

式中， L_{hill} 为坡长； m 为坡长指数； α_{hill} 为坡度（角度）；坡长指数 m 的计算公式如下：

$$m = 0.6 \cdot \left[-\exp \left[-35.835 \cdot slp \right] \right] \quad 13.1.13$$

式中， slp 为 HRU 的坡度，表示为坡高与坡水平长度的比例（m/m）。 α_{hill} 和 slp 的关系为：

$$slp = \tan \alpha_{hill} \quad 13.1.14$$

13.1.5 粗碎块因子

粗碎块因子计算的如下：

$$CFRG = \exp \left[-0.053 \cdot rock \right] \quad 13.1.15$$

式中： $rock$ 为粗碎块在第一层中的百分含量（%）。

Table 13-5: SWAT input variables that pertain to sediment yield.

Variable Name	Definition	Input File
USLE_K	K_{USLE} : USLE soil erodibility factor (0.013 metric ton m ² hr/(m ³ -metric ton cm))	.sol
USLE_C	$C_{USLE,m}$: Minimum value for the cover and management factor for the land cover	crop.dat
USLE_P	P_{USLE} : USLE support practice factor	.mgt
SLSUBBSN	L_{hill} : Slope length (m)	.hru
SLOPE	slp : Average slope of the subbasin (% or m/m)	.hru
ROCK	$rock$: Percent rock in the first soil layer (%)	.sol

13.2 USLE

为了比较的目的，SWAT 输出采用 USLE 计算的泥沙负荷。这些值在模型中没有应用，只是为了比较。通用土壤流失方程为(Williams, 1995)：

$$sed = 1.292 \cdot EI_{USLE} \cdot K_{USLE} \cdot C_{USLE} \cdot P_{USLE} \cdot LS_{USLE} \cdot CFRG \quad 13.2.1$$

式中： sed 为模拟日泥沙产量 (metric tons/ha)， EI_{USLE} 为降雨侵蚀指标 (0.017 m-metric ton cm/(m² hr))， K_{USLE} 为 USLE 土壤可蚀性因子(0.013 metric ton m² hr/(m³-metric ton cm))， C_{USLE} 为 USLE 植被覆盖和管理因子， P_{USLE} 为 USLE 保持措施因子， LS_{USLE} 为 USLE 地形因子， $CFRG$ 为粗碎块因子。上述因子中，除了 EI_{USLE} 外均与前面部分论述的含义相同。

13.2.1 降雨侵蚀力指标

EI_{USLE} 的值为总降雨乘以最大 30 分钟降雨强度的积。暴雨能量表示降雨和径流量，30 分钟降雨强度表示持续的剥蚀和径流峰值速率。

$$EI_{USLE} = E_{storm} \cdot I_{30} \quad 13.2.2$$

式中： EI_{USLE} 为降雨侵蚀指标 (0.017 m-metric ton cm/(m² hr))， E_{storm} 为总暴雨能量 (0.0017 m-metric ton cm/m²)， I_{30} 为最大 30 分钟降雨强度 (mm/hr)。

暴雨能量为降雨量和暴雨各时段强度的函数。因为降雨的输入为日值，因此假设了降雨强度的分布的变化。假设降雨强度随时间的变化是指数分布：

$$i_t = i_{mx} \cdot \exp\left(-\frac{t}{k_i}\right) \quad 13.2.3$$

式中： i_t 为时刻 t 的降雨强度 (mm/hr)， i_{mx} 为最大降雨强度 (mm/hr)， t 为时间 (hr)， k_i 为降雨强度的衰减常数 (hr)。

USLE 能量方程为：

$$E_{stom} = \Delta R_{day} \cdot \left(12.1 + 8.9 \cdot \log_{10} \left[\frac{\Delta R_{day}}{\Delta t} \right] \right) \quad 13.2.4$$

式中： ΔR_{day} 为在时间间隔内的降雨量 (mm H₂O)， Δt 为时间间隔 (hr)。

这一方程的解析形式为：

$$E_{stom} = 12.1 \int_0^{\infty} i_t dt + 8.9 \int_0^{\infty} i_t \log_{10} i_t dt \quad 13.2.5$$

将方程 13.2.5 与方程 13.2.3 结合并积分，可得估算日降雨能量的方程：

$$E_{stom} = \frac{R_{day}}{1000} \cdot \left[12.1 + 8.9 \cdot \log_{10} \left[\frac{R_{day}}{i_{mx}} - 0.434 \right] \right] \quad 13.2.6$$

式中： R_{day} 为模拟日的降水量 (mm H₂O)， i_{mx} 为最大降雨强度 (mm/hr)。

为了计算最大降雨强度， i_{mx} ，将方程 13.2.3 积分得到：

$$R_{day} = i_{mx} \cdot k_i \quad 13.2.7$$

和

$$R_t = R_{day} \cdot \left(1 - \exp\left[-\frac{t}{k_i}\right] \right) \quad 13.2.8$$

式中： R_{day} 为模拟日的降水量 (mm H₂O)， i_{mx} 为最大降雨强度 (mm/hr)， k_i 为降雨强度的衰减常数 (hr)， R_t 为时间间隔内的降雨量 (mm H₂O)， t 为时间间隔 (hr)。对某一降水事件的最大半小时降雨为：

$$R_{0.5} = \alpha_{0.5} \cdot R_{day} \quad 13.2.9$$

式中： $R_{0.5}$ 最大半小时降雨 (mm H₂O)， $\alpha_{0.5}$ 最大半小时降雨占模拟日降雨的分数， R_{day} 为模拟日的降水量 (mm H₂O)。 $\alpha_{0.5}$ 的计算在第四章进行了介绍。将方程13.2.9和13.2.7代入到方程13.2.8中，可以求解到最大降雨强度：

$$i_{mx} = -2 \cdot R_{day} \cdot \ln(-\alpha_{0.5}) \quad 13.2.10$$

式中： i_{mx} 为最大降雨强度 (mm/hr)， R_{day} 为模拟日的降水量 (mm H₂O)， $\alpha_{0.5}$ 最大半小时降雨占模拟日降雨的分数。

最大 30 分钟降雨强度为：

$$I_{30} = 2 \cdot \alpha_{0.5} \cdot R_{day} \quad 13.2.3$$

式中： I_{30} 为最大30分钟降雨强度 (mm/hr)， $\alpha_{0.5}$ 最大半小时降雨占模拟日降雨的分数， R_{day} 为模拟日的降水量 (mm H₂O)。

Table 13-6: SWAT input variables that pertain to USLE sediment yield.

Variable Name	Definition	Input File
USLE_K	K_{USLE} : USLE soil erodibility factor (0.013 metric ton m ² hr/(m ³ -metric ton cm))	.sol
USLE_C	$C_{USLE,mm}$: Minimum value for the cover and management factor for the land cover	crop.dat
USLE_P	P_{USLE} : USLE support practice factor	.mgt
SLSUBBSN	L_{hill} : Slope length (m)	.hru
SLOPE	slp : Average slope of the subbasin (% or m/m)	.hru
ROCK	$rock$: Percent rock in the first soil layer (%)	.sol

13.3 积雪覆盖效应

降雨和径流的侵蚀能力在有积雪覆盖的情况下会有所降低。HRU 中有雪覆盖的时期，SWAT 采用下式来修正泥沙产量：

$$sed = \frac{sed'}{\exp\left[\frac{3 \cdot SNO}{25.4}\right]} \quad 13.3.1$$

式中： sed 为模拟日泥沙产量 (metric tons)， sed' 为采用 MULSE 计算的泥沙产量 (metric tons)， SNO 为积雪中的含水量 (mm H₂O)。

13.4 地表径流中的泥沙延迟

在大的子流域，汇流时间超过 1 天，只有一部分地表径流进入主河道。SWAT 考虑到地表径流的这一特性，允许地表径流的一部分延迟进入主河道。地表径流中的泥沙也同样延迟。

一旦确定了地表径流的泥沙负荷，进入主河道的泥沙采用下式计算：

$$sed = (sed' + sed_{stor,i-1}) \left(1 - \exp\left[\frac{-surlag}{t_{conc}}\right] \right) \quad 13.4.1$$

式中： sed 为模拟日进入主河道的泥沙产量 (metric tons)， sed' 为采用 MULSE 计算的泥沙产量 (metric tons)， $sed_{stor,i-1}$ 为前一天存储和延迟在流域中的泥沙 (metric tons)， $surlag$ 为地表径流延迟系数， t_{conc} 为 HRU 的汇流时间 (hrs)。

方程 13.4.1 中的表达式 $\left(1 - \exp\left[\frac{-surlag}{t_{conc}}\right] \right)$ 表示模拟日进入主河道的泥沙占总泥沙产量的分数。图 13-1 图示了这一表达式随不同 $surlag$ 和 t_{conc} 值的变化。

第 13 章 方程：泥沙

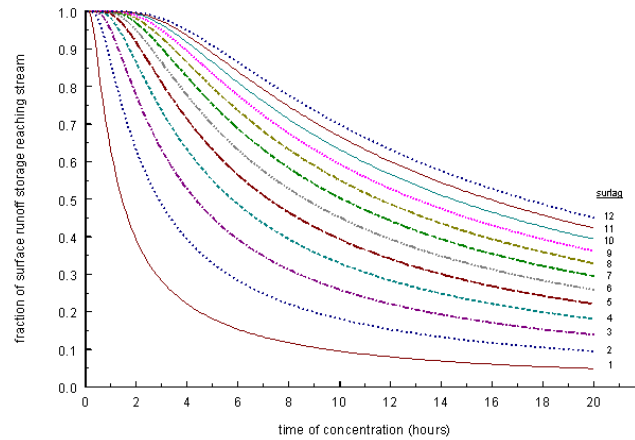


Figure 13-1: Influence of *surlag* and t_{conc} on fraction of surface runoff and sediment released.

应注意，对于给定的汇流时间，*surlag* 值降低会导致更多泥沙滞留在流域内。

Table 13-7: SWAT input variables that pertain to sediment lag calculations.

Variable Name	Definition	Input File
SURLAG	<i>surlag</i> : surface runoff lag coefficient	.bsn

13.5 侧向流和地下径流中的泥沙

SWAT 允许侧向流和地下径流携带泥沙进入主河道，计算公式为：

$$sed_{lat} = \frac{Q_{lat} + Q_{gw}}{1000} \cdot area_{hru} \cdot conc_{sed} \quad 13.5.1$$

式中： sed_{lat} 为侧向流和地下径流泥沙负荷 (metric tons)， Q_{lat} 为模拟日侧向流量 (mm H₂O)， Q_{gw} 为模拟日地下径流量 (mm H₂O)， $area_{hru}$ 为 HRU 的面积 (km²)， $concsed$ 为侧向流和地下径流的泥沙浓度 (mg/L)。

Table 13-8: SWAT input variables that pertain to sediment lag calculations.

Variable Name	Definition	Input File
LAT_SED	$conc_{sed}$: Concentration of sediment in lateral and groundwater flow (mg/L)	.hru

13.6 NOMENCLATURE

- C_{USLE} USLE cover and management factor
 $C_{USLE,aa}$ Average annual C factor for the land cover
 $C_{USLE,mn}$ Minimum value for the cover and management factor for the land cover
 $CFRG$ Coarse fragment factor
 E_{storm} Total storm energy (0.0017 m-metric ton/m²),
 EI_{USLE} Rainfall erosion index (0.017 m-metric ton cm/(m² hr))
 I_{30} Maximum 30 minute intensity (mm/hr)
 K_{USLE} USLE soil erodibility factor (0.013 metric ton m² hr/(m³-metric ton cm))
 L_{hill} Slope length (m)
 LS_{USLE} USLE topographic factor
 M Particle-size parameter for estimation of USLE K factor
 OM Percent organic matter (%)
 P_{USLE} USLE support practice factor
 Q_{gw} Groundwater flow for a given day (mm H₂O)
 Q_{lat} Lateral flow (mm H₂O)
 Q_{surf} Surface runoff volume (mm H₂O/ha)
 R_{day} Amount of rainfall on a given day (mm H₂O)
 SNO Water content of the snow cover (mm H₂O)
- $area_{hru}$ HRU area (ha or km²)
 c_{perm} Profile-permeability class
 $c_{soilstr}$ Soil-structure code used in soil classification
 $conc_{sed}$ Concentration of sediment in lateral and groundwater flow (mg/L)
 f_{cl-si} Factor that gives low soil erodibility factors for soils with high clay to silt ratios
 f_{csand} Factor that gives low soil erodibility factors for soils with high coarse-sand contents and high values for soils with little sand
 f_{hisand} Factor that reduces soil erodibility for soils with extremely high sand contents
 f_{orgc} Factor that reduces soil erodibility for soils with high organic carbon content
 i_{mx} Maximum rainfall intensity (mm/hr)
 i_t Rainfall intensity at time t (mm/hr)
 k_i Decay constant for rainfall intensity (hr)
 m Exponential term in USLE LS factor calculation
 m_c Percent clay content (< 0.002 mm diameter particles)
 m_s Percent sand content
 m_{silt} Percent silt content (0.002-0.05 mm diameter particles)
 m_{vfs} Percent very fine sand content (0.05-0.10 mm diameter particles)
 $orgC_{ly}$ Amount of organic carbon in the layer (%)
 q_{peak} Peak runoff rate (m³/s)

第 13 章 方程：泥沙

rock Percent rock in soil layer (%)

rsd_{surf} Amount of residue on the soil surface (kg/ha)

sed Sediment yield on a given day (metric tons)

sed_{lat} Sediment loading in lateral and groundwater flow (metric tons)

sed_{stor,i-1} Sediment stored or lagged from the previous day (metric tons)

slp Average slope of the subbasin (m/m)

surlag Surface runoff lag coefficient

t Time (hr)

t_{conc} Time of concentration for a subbasin (hr)

$\alpha_{0.5}$ Maximum half-hour rainfall expressed as a fraction of daily rainfall

α_{hill} Angle of the slope

13.7 REFERENCES

- Arnold, J.G. and J.R. Williams. 1995. SWRRB—A watershed scale model for soil and water resources management. p. 847-908. In V.P. Singh (ed) Computer models of watershed hydrology. Water Resources Publications.
- Williams, J.R. 1975. Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor. p. 244-252. In Present and prospective technology for predicting sediment yield and sources: Proceedings of the sediment-yield workshop, USDA Sedimentation Lab., Oxford, MS, November 28-30, 1972. ARS-S-40.
- Williams, J.R. 1995. Chapter 25: The EPIC model. p. 909-1000. In V.P. Singh (ed.) Computer models of watershed hydrology. Water Resources Publications.
- Wischmeier, W.H., C.B. Johnson, and B.V. Cross. 1971. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. Journal of Soil and Water Conservation 26:189-193.
- Wischmeier, W.H. and D.D. Smith. 1965. Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains. Agriculture Handbook 282. USDA-ARS
- Wischmeier, W.H. and D.D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. Agriculture Handbook 282. USDA-ARS

第 14 章 方程:营养物输移

营养物质从陆地到河流和水体的输移是土壤风化和侵蚀过程的必然结果。过多的营养物负荷进入河流和水体会加速富营养化，使得水资源不适合人类利用。本章将介绍无机和有机形式的氮和磷从陆地到河网的运动方程。

14.1 硝酸盐运动

在正常 PH 下大多数土壤无机物具有负电荷，因此与阴离子，如硝酸盐，的作用结果是使其从粒子表面排斥。这一排斥成为负吸附或阴离子表面排斥。

由于对阳离子的吸引，阴离子在与无机物表面临近区域排斥。这一过程对阴离子在土壤中的输移有直接的影响，因为这一过程有效地将阴离子排除在土壤水分运动最慢的部分（土壤颗粒表面附近）。事实上，阴离子在土壤中的迁移路径比在所有土壤水均被利用条件下的迁移路径要短(Thomas and McMahon, 1972)。

硝酸盐可以在地表径流、侧向流或渗漏过程中输移。为计算随水分运动的硝酸盐量，需要计算在自由水中的硝酸盐浓度。这一浓度乘以不同路径中运动的水量，可以得到土层中损失的硝酸盐量。

在自由水中的硝酸盐浓度，采用下式计算：

$$conc_{NO3, mobile} = \frac{NO3_{ly} \cdot \exp\left[\frac{-w_{mobile}}{(-\theta_e)SAT_{ly}}\right]}{w_{mobile}} \quad 14.1.2$$

式中： $conc_{NO3, mobile}$ 为土层自由水中的硝酸盐浓度(kg N/mm H₂O)， $NO3_{ly}$ 为土层中的硝酸盐含量(kg N/ha)， w_{mobile} 为土层中的 (mm H₂O)， θ_e 为因子屏蔽的土壤孔隙的分数， SAT_{ly} 为土层的饱和含水量 (mm H₂O)。土层中的自由水量为损失的地表径流、侧向流和渗漏量：

第 14 章 方程: 营养物输移

$$W_{mobile} = Q_{surf} + Q_{lat,ly} + W_{perc,ly} \quad \text{for top 10 mm} \quad 14.1.3$$

$$W_{mobile} = Q_{lat,ly} + W_{perc,ly} \quad \text{for lower soil layers} \quad 14.1.4$$

式中： W_{mobile} 为土层中的自由水量 (mm H₂O) ， Q_{surf} 为地表径流量 (mm H₂O) ， $Q_{lat,ly}$ 为以侧向流从土层排泄的水量 (mm H₂O) ， $w_{perc,ly}$ 为以渗漏方式从土层排泄的水量 (mm H₂O) 。地表径可以与地表10mm土层中的营养物质反应和输移。

从地表径流中输移的硝酸盐为：

$$NO3_{surf} = \beta_{NO3} \cdot conc_{NO3, mobile} \cdot Q_{surf} \quad 14.1.5$$

式中： $NO3_{surf}$ 为地表径流输移的硝酸盐 (kg N/ha) ， β_{NO3} 为硝酸盐渗漏系数 ， $conc_{NO3, mobile}$ 为土层自由水中的硝酸盐浓度(kg N/mm H₂O) ， Q_{surf} 为地表径流量 (mm H₂O) 。硝酸盐渗漏系数为地表径流中的硝酸盐浓度与渗漏中浓度的分数。

侧向流输移的硝酸盐：

$$NO3_{lat,ly} = \beta_{NO3} \cdot conc_{NO3, mobile} \cdot Q_{lat,ly} \quad \text{for top 10 mm} \quad 14.1.6$$

$$NO3_{lat,ly} = conc_{NO3, mobile} \cdot Q_{lat,ly} \quad \text{for lower layers} \quad 14.1.7$$

式中： $NO3_{lat,ly}$ 为侧向流输移的硝酸盐 (kg N/ha) ， β_{NO3} 为硝酸盐渗漏系数 ， $conc_{NO3, mobile}$ 为土层自由水中的硝酸盐浓度(kg N/mm H₂O) ， $Q_{lat,ly}$ 为侧向流量 (mm H₂O) 。

通过渗漏向下层土壤输移的硝酸盐量：

$$NO3_{perc,ly} = conc_{NO3, mobile} \cdot W_{perc,ly} \quad 14.1.8$$

式中： $NO3perc,ly$ 为通过渗漏向下层土壤输移的硝酸盐量 (kg N/ha) ，
 $concNO3, mobile$ 为土层自由水中的硝酸盐浓度(kg N/mm H₂O) ， $wperc,ly$ 为渗漏到下层土层的水量 (mm H₂O) 。

Table 14-1: SWAT input variables that pertain to nitrate transport.

Variable Name	Definition	Input File
ANION_EXCL	θ_e : Fraction of porosity from which anions are excluded	.sol
NPERCO	β_{NO3} : Nitrate percolation coefficient	.bsn

14.2 地表径流中的有机氮

附着在土壤颗粒的有机氮可以通过地表径流输移进入主河道。这种形式的氮通常与HRU的泥沙负荷联系在一起，因此有机氮负荷的可以反映泥沙负荷的变化。随泥沙负荷输移进入河道的有机氮量，采用McElroy et al. (1976)开发并由Williams and Hann (1978)修正的负荷函数来计算：

$$orgN_{surf} = 0.001 \cdot conc_{orgN} \cdot \frac{sed}{area_{hru}} \cdot \epsilon_{N:sed} \quad 14.2.1$$

式中： $orgN_{surf}$ 为地表径流输移进入主河道的有机氮量 (kg N/ha) ，
 $conc_{orgN}$ 为地表10mm土层中的有机氮浓度 (g N/ metric ton soil) ， sed 为模拟日的泥沙产量 (metric tons) ， $area_{hru}$ 为HRU的面积 (ha) ， $\epsilon_{N:sed}$ 为氮富集系数。

地表土层中有机氮浓度， $conc_{orgN}$ ，的计算公式为：

$$conc_{orgN} = 100 \cdot \frac{orgN_{frsh,surf} + orgN_{sta,surf} + orgN_{act,surf}}{\rho_b \cdot depth_{surf}} \quad 14.2.2$$

式中： $orgN_{frsh,surf}$ 为 fresh organic 库中氮在地表 10mm 中的量 (kg N/ha)， $orgN_{sta,surf}$ 为稳态有机库中氮在地表 10mm 中的量 (kg N/ha)， $orgN_{act,surf}$ 为活性有机库中氮在地表 10mm 中的量 (kg N/ha)， ρ_b 为第一层土壤的容积密度 (Mg/m³)， $depth_{surf}$ 为第表土层的深度 (10 mm)。

14.2.1 富集系数

当地表径流流经土壤表面，部分的水能用来输移土壤颗粒。小颗粒较轻，较粗颗粒容易输移。输移泥沙的土壤颗粒粒径分布与土壤表层颗粒粒径分布相比较，进入主河道的泥沙中黏土粒径的比例较高。换句话说，泥沙负荷对黏土粒有富集作用。土壤中的有机氮主要吸附在胶质 (黏土) 颗粒，因此在泥沙负荷中的有机氮浓度较地表土壤中为高。

富集系数定义为泥沙负荷中有机氮浓度与地表土层中有机氮浓度的比例。SWAT 会计算每一次暴雨事件的富集系数，或者允许用户定义固定的有机氮富集系数。为了计算富集系数，SWAT 采用了 Menzel (1980) 定义的富集系数与泥沙浓度存在对数关系。用来计算每次暴雨事件中的氮富集系数， $\epsilon_{N:sed}$ ，的方程为：

$$\epsilon_{N:sed} = 0.78 \cdot conc_{sed,surq}^{0.2468} \quad 14.2.3$$

式中： $concsed,surq$ 为地表径流中泥沙浓度 (Mg sed/m³ H₂O)。地表径流中泥沙浓度计算公式为：

$$conc_{sed,surf} = \frac{sed}{10 \cdot area_{hru} \cdot Q_{surf}} \quad 14.2.4$$

式中： sed 为模拟日的泥沙产量(metric tons)， $area_{hru}$ 为HRU的面积(ha)， Q_{surf} 为模拟日地表径流量(mm H₂O)。

Table 14-2: SWAT input variables that pertain to organic N loading.

Variable Name	Definition	Input File
SOL_BD	ρ_b : Bulk density (Mg/m ³)	.sol
ERORGN	$\epsilon_{N:sed}$: Organic nitrogen enrichment ratio	.hru

14.3 溶解态磷的运动

土壤中主要的磷运动机制为扩散。扩散为土壤溶液中的离子对浓度梯度的响应，在短距离内迁移。由于溶液中磷的低活性，地表径流只能与地表 10mm 中的部分溶液磷反应。地表径流输移的溶液磷为：

$$P_{surf} = \frac{P_{solution,surf} \cdot Q_{surf}}{\rho_b \cdot depth_{surf} \cdot k_{d,surf}} \quad 14.3.1$$

式中： P_{surf} 地表径流输移的溶液磷(kg P/ha)， $P_{solution,surf}$ 为地表10mm中溶液中的磷(kg P/ha)， Q_{surf} 为模拟日的地表径流量(mm H₂O)， ρ_b 为第一层土壤的容积密度(Mg/m³)， $depth_{surf}$ 为第表土层的深度(10 mm)， $k_{d,surf}$ 为磷土壤分离系数(m³/Mg)。磷土壤分离系数为土壤10mm可溶性磷的浓度与地表径流中可溶性磷浓度的比例。

Table 14-3: SWAT input variables that pertain to soluble P runoff.

Variable Name	Definition	Input File
---------------	------------	------------

SOL_BD	ρ_b : Bulk density (Mg/m ³)	.sol
PHOSKD	$k_{d,surf}$: Phosphorus soil partitioning coefficient (m ³ /Mg)	.bsn

14.4 地表径流中吸附在泥沙上的有机和无机磷

吸附在土壤颗粒上的有机和无机磷可以通过地表径流输移到主河道。这种形式的磷通常与HRU的泥沙负荷联系在一起，因此有机磷负荷的可以反映泥沙负荷的变化。随泥沙负荷输移进入河道的有机磷量，采用McElroy et al. (1976)开发并由Williams and Hann (1978)修正的负荷函数来计算：

$$sedP_{surf} = 0.001 \cdot conc_{sedP} \cdot \frac{sed}{area_{hru}} \cdot \varepsilon_{P:sed} \quad 14.4.1$$

式中： $sedP_{surf}$ 为随泥沙被地表径流输移到主河道的磷量(kg P/ha)， $concsedP$ 为地表10面貌中吸附在土壤颗粒上的磷(g P/ metric ton soil)， sed 为模拟日的泥沙产量(metric tons)， $areahru$ 为HRU的面积 (ha)， $\varepsilon_{P:sed}$ 为磷富集系数。

地表吸附在土壤颗粒上的磷浓度， $concsedP$ ，为：

$$conc_{sedP} = 100 \cdot \frac{\min P_{act,surf} + \min P_{sta,surf} + orgP_{hum,surf} + orgP_{frsh,surf}}{\rho_b \cdot depth_{surf}} \quad 14.4.2$$

式中： $\min P_{act,surf}$ 为地表10mm土层中活性有机库中的磷(kg P/ha)， $\min P_{sta,surf}$ 为地表10mm土层中稳态无机库中的磷(kg P/ha)， $orgP_{hum,surf}$ 为地表10mm土层中腐植质有机库中的磷(kg P/ha)， ρ_b 为第一层土壤的容积密度 (Mg/m³)， $depth_{surf}$ 为第表土层的深度 (10 mm)。

14.4.1 富集系数

富集系数定义为泥沙负荷中磷的浓度与地表土层中磷的浓度的比例。SWAT 会计算每一次暴雨事件的富集系数,或者允许用户定义固定的磷的富集系数。为了计算富集系数,SWAT 采用了 Menzel (1980) 定义的富集系数与泥沙浓度存在对数关系。用来计算每次暴雨事件中的氮富集系数, $\varepsilon_{P:sed}$, 的方程为:

$$\varepsilon_{P:sed} = 0.78 \cdot \left(conc_{sed,surq} \right)^{0.2468} \quad 14.4.3$$

式中: $conc_{sed,surq}$ 为地表径流中泥沙浓度 (Mg sed/m³ H₂O)。地表径流中泥沙浓度计算公式为:

$$conc_{sed,surq} = \frac{sed}{10 \cdot area_{hru} \cdot Q_{surf}} \quad 14.4.4$$

式中: sed 为模拟日的泥沙产量(metric tons), $area_{hru}$ 为HRU的面积(ha), Q_{surf} 为模拟日地表径流量 (mm H₂O)。

Table 14-4: SWAT input variables that pertain to loading of P attached to sediment.

Variable Name	Definition	Input File
SOL_BD	ρ_b : Bulk density (Mg/m ³)	.sol
ERORGP	$\varepsilon_{P:sed}$: Phosphorus enrichment ratio	.hru

14.5 地表径流和侧向流中的营养物延迟

在大的子流域，汇流时间超过 1 天，只有一部分地表径流和侧向流进入主河道。SWAT 考虑到地表径流的这一特性，允许地表径流和侧向流的一部分延迟进入主河道。地表径流和侧向流中的营养物质也同样延迟。

一旦确定了地表径流和侧向流的营养物负荷，进入主河道的营养物采用

下式计算：

$$NO3_{surf} = (NO3'_{surf} + NO3_{surstor,i-1}) \left(1 - \exp\left[\frac{-surlag}{t_{conc}} \right] \right) \quad 14.5.1$$

$$NO3_{lat} = (NO3'_{lat} + NO3_{latstor,i-1}) \left(1 - \exp\left[\frac{-1}{TT_{lat}} \right] \right) \quad 14.5.2$$

$$orgN_{surf} = (orgN'_{surf} + orgN_{stor,i-1}) \left(1 - \exp\left[\frac{-surlag}{t_{conc}} \right] \right) \quad 14.5.3$$

$$P_{surf} = (P'_{surf} + P_{stor,i-1}) \left(1 - \exp\left[\frac{-surlag}{t_{conc}} \right] \right) \quad 14.5.4$$

$$sedP_{surf} = (sedP'_{surf} + sedP_{stor,i-1}) \left(1 - \exp\left[\frac{-surlag}{t_{conc}} \right] \right) \quad 14.5.5$$

式中： $NO3_{surf}$ 为模拟日由地表径流输移进入主河道的硝酸盐量(kg N/ha)，

$NO3'_{surf}$ 为模拟日HRU中产生地表径流中的硝酸盐量(kg N/ha)， $NO3_{surstor,i-1}$

为前一天存储或延迟的地表径流中的硝酸盐量(kg N/ha) , $NO3_{lat}$ 为模拟日由侧向流输移进入主河道的硝酸盐量(kg N/ha) , $NO3'_{lat}$ 为模拟日HRU中产生侧向流中的硝酸盐量(kg N/ha) , $NO3_{latstor,i-1}$ 为前一天存储或延迟的侧向流中的硝酸盐量(kg N/ha) , $orgN_{surf}$ 为模拟日由地表径流输移进入主河道的有机氮量(kg N/ha) , $orgN'_{surf}$ 为模拟日HRU中产生地表径流中的有机氮量(kg N/ha) , $orgN_{stor,i-1}$ 为前一天存储或延迟的地表径流中的有机氮量(kg N/ha) , P_{surf} 为模拟日由地表径流输移进入主河道的溶液磷量(kg P/ha) , P'_{surf} 为模拟日HRU中产生地表径流中的溶液磷量(kg P/ha) , $P_{stor,i-1}$ 为前一天存储或延迟的地表径流中的溶液磷量(kg P/ha) , $sedP_{surf}$ 为模拟日由地表径流输移进入主河道的吸附态磷量(kg P/ha) , $sedP'_{surf}$ 为模拟日HRU中产生地表径流中的吸附态磷量(kg P/ha) , $sedP_{stor,i-1}$ 为前一天存储或延迟的地表径流中的吸附态磷量(kg P/ha) , $surlag$ 为地表径流延迟系数 , $tconc$ 为HRU的汇流时间 (hrs) , $TTlag$ 为侧向流传播事件 (days) 。

Table 14-5: SWAT input variables that pertain to nutrient lag calculations.

Variable Name	Definition	Input File
SURLAG	$surlag$: surface runoff lag coefficient	.bsn
LAT_TTIME	TT_{lag} : Lateral flow travel time (days)	.hru

14.6 NOMENCLATURE

$NO3_{lat,ly}$ Nitrate removed in lateral flow from a layer (kg N/ha)

$NO3'_{lat}$ Amount of lateral flow nitrate generated in HRU on a given day (kg N/ha)

第 14 章 方程:营养物输移

- $NO3_{latstor,i-1}$ Lateral flow nitrate stored or lagged from the previous day (kg N/ha)
 $NO3_{ly}$ Amount of nitrate in the layer (kg N/ha)
 $NO3_{perc,ly}$ Nitrate moved to the underlying layer by percolation (kg N/ha)
 $NO3_{surf}$ Nitrate removed in surface runoff (kg N/ha)
 $NO3'_{surf}$ Amount of surface runoff nitrate generated in HRU on a given day (kg N/ha)
 $NO3_{surstor,i-1}$ Surface runoff nitrate stored or lagged from the previous day (kg N/ha)
 $P_{solution,surf}$ Amount of phosphorus in solution in the top 10 mm (kg P/ha)
 $P_{stor,i-1}$ Solution P loading stored or lagged from the previous day (kg P/ha)
 P_{surf} Amount of soluble phosphorus lost in surface runoff (kg P/ha)
 P'_{surf} Amount of solution P loading generated in HRU on a given day (kg P/ha)
 Q_{lat} Lateral flow from soil layer (mm H₂O)
 Q_{surf} Accumulated runoff or rainfall excess (mm H₂O)
 SAT_{ly} Saturated water content of the soil layer (mm H₂O)
 TT_{lag} Lateral flow travel time (days)
- $area_{hru}$ HRU area (ha)
 $conc_{NO3,mobile}$ Concentration of nitrate in the mobile water for a given layer (kg N/mm H₂O)
 $conc_{orgN}$ Concentration of organic nitrogen in the soil surface top 10 mm (g N/ metric ton soil)
 $conc_{sed,surq}$ Concentration of sediment in surface runoff (Mg sed/m³ H₂O)
 $conc_{sedP}$ Concentration of phosphorus attached to sediment in the top 10 mm (g P/ metric ton soil)
 $depth_{surf}$ Depth of the “surface” layer (10 mm)
 $k_{d,surf}$ Phosphorus soil partitioning coefficient (m³/Mg)
 $minP_{act,ly}$ Amount of phosphorus in the active mineral pool (kg P/ha)
 $minP_{sta,ly}$ Amount of phosphorus in the stable mineral pool (kg P/ha)
 $orgN_{act,ly}$ Nitrogen in the active organic pool (mg/kg or kg N/ha)
 $orgN_{frsh,surf}$ Nitrogen in the fresh organic pool in the top 10mm (kg N/ha)
 $orgN_{sta,ly}$ Nitrogen in the stable organic pool (mg/kg or kg N/ha)
 $orgN_{stor,i-1}$ Surface runoff organic N stored or lagged from the previous day (kg N/ha)
 $orgN_{surf}$ Amount of organic nitrogen transport to the main channel in surface runoff (kg N/ha)
 $orgN'_{surf}$ Amount of surface runoff organic N generated in HRU on a given day (kg N/ha)
 $orgP_{frsh,ly}$ Phosphorus in the fresh organic pool in layer ly (kg P/ha)
 $orgP_{hum,ly}$ Amount of phosphorus in humic organic pool in the layer (kg P/ha)
 sed Sediment yield on a given day (metric tons)
 $sedP_{stor,i-1}$ Sediment-attached P stored or lagged from the previous day (kg P/ha)
 $sedP_{surf}$ Amount of phosphorus transported with sediment to the main channel in surface runoff (kg P/ha)
 $sedP'_{surf}$ Amount of sediment-attached P loading generated in HRU on a given day (kg P/ha)
 $surlag$ Surface runoff lag coefficient

- t_{conc} Time of concentration for a subbasin (hr)
 w_{mobile} Amount of mobile water in the layer (mm H₂O)
 $w_{perc.ly}$ Amount of water percolating to the underlying soil layer on a given day (mm H₂O)
- β_{NO_3} Nitrate percolation coefficient
 θ_e Fraction of porosity from which anions are excluded
 $\varepsilon_{N:sed}$ Nitrogen enrichment ratio
 $\varepsilon_{P:sed}$ Phosphorus enrichment ratio
 ρ_b Bulk density (Mg/m³)

14.7 REFERENCES

- Jury, W.A., W.R. Gardner, and W.H. Gardner. 1991. Soil physics, 5th edition. John Wiley & Sons, Inc. New York, N.Y.
- McElroy, A.D., S.Y. Chiu, J.W. Nebgen, A. Aleti, and F.W. Bennett. 1976. Loading functions for assessment of water pollution from nonpoint sources. Environ. Prot. Tech. Serv., EPA 600/2-76-151.
- Menzel, R.G. 1980. Enrichment ratios for water quality modeling. p. 486-492. In W.G. Knisel (ed.) CREAMS, A field scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems. U.S. Dept. Agric. Conserv. Res. Rept. No. 26.
- Thomas, G.W. and M. McMahan. 1972. The relation between soil characteristics, water movement and nitrate concentration of ground water. Univ. of Kentucky Water Resources Institute Research Report No. 52, Lexington, KY.
- Williams, J.R. and R.W. Hann. 1978. Optimal operation of large agricultural watersheds with water quality constraints. Texas Water Resources Institute, Texas A&M Univ., Tech. Rept. No. 96.

第 15 章 方程:杀虫剂输移

杀虫剂从陆地到河流和水体的输移是土壤风化和侵蚀过程的必然结果。过多的杀虫剂负荷进入河流和水体会产生对水生生物有毒的条件，使得水资源不适合人类利用。本章将介绍溶解和吸附形式的杀虫剂从陆地到河网的运动方程。SWAT 中的杀虫剂输移算法源自 EPIC(Williams, 1995)。

15.1 杀虫剂的相分布

土壤环境中的杀虫剂可以在溶液或吸附在泥沙上输移。区分在溶液和土壤相中的杀虫剂通过杀虫剂的土壤吸附系数来定义。土壤吸附系数为在土壤或固相中的杀虫剂浓度与溶液或液相中杀虫剂浓度的比例：

$$K_p = \frac{C_{solidphase}}{C_{solution}} \quad 15.1.1$$

式中： K_p 为土壤吸附系数((mg/kg)/(mg/L) or m³/ton)， $C_{solidphase}$ 为吸附在固相的杀虫剂浓度(mg chemical/kg solid material or g/ton)， $C_{solution}$ 为溶液中的杀虫剂浓度(mg chemical/L solution or g/ton)。方程15.1.1中定义的土壤吸附系数假设杀虫剂吸附过程是与浓度是线性的关系，且瞬时可逆。

因为杀虫剂的区分与土壤中有机物含量有关，模型输入的土壤吸附系数对有机碳含量归一化。土壤吸附系数和对有机碳进行归一化后的土壤吸附系数的关系为：

$$K_p = K_{oc} \cdot \frac{orgC}{100} \quad 15.1.2$$

式中： K_p 为土壤吸附系数((mg/kg)/(mg/L) or m³/ton)， K_{oc} 为对有机碳进行归一化后的土壤吸附系数((mg/kg)/(mg/L) or m³/ton)， $orgC$ 为土壤中有机碳百分含量。

Table 15-1: SWAT input variables that pertain to pesticide phase partitioning.

Variable Name	Definition	Input File
SOL_CBN	$orgC_y$: Amount of organic carbon in the layer (%)	.sol

SKOC

K_{oc} : Soil adsorption coefficient normalized for soil organic
carbon content (ml/g or (mg/kg)/(mg/L) or L/kg)

15.2 溶解态杀虫剂的运动

溶解态的杀虫剂可以随地表径流、侧向流和渗漏输移。由于径流作用输移的溶解态杀虫剂，导致土层中杀虫剂的变化与事件浓度和径流量有关：

$$\frac{dpst_{s,ly}}{dt} = 0.01 \cdot C_{solution} \cdot w_{mobile} \quad 15.2.1$$

式中： $pst_{s,ly}$ 为土层中杀虫剂的量(kg pst/ha)， $C_{solution}$ 为溶液中的杀虫剂浓度(mg/L or g/ton)， w_{mobile} 为模拟日的自由水量(mm H₂O)。土层中的自由水量为通过地表径流、侧向流和渗漏损失的水量：

$$w_{mobile} = Q_{surf} + Q_{lat,surf} + w_{perc,surf} \quad \text{for top 10 mm} \quad 15.2.2$$

$$w_{mobile} = Q_{lat,ly} + w_{perc,ly} \quad \text{for lower soil layers} \quad 15.2.3$$

式中： w_{mobile} 为土层中的自由水量 (mm H₂O)， Q_{surf} 为地表径流量 (mm H₂O)， $Q_{lat,ly}$ 为以侧向流从土层排泄的水量 (mm H₂O)， $w_{perc,ly}$ 为以渗漏方式从土层排泄的水量 (mm H₂O)。地表径可以与地表10mm土层中的营养物质反应和输移。

土层中的总杀虫剂量为吸附态和溶解态之和：

$$pst_{s,ly} = 0.01 \cdot [C_{solution} \cdot SAT_{ly} + C_{solidphase} \cdot \rho_b \cdot depth_{ly}] \quad 15.2.4$$

式中： $pst_{s,ly}$ 土层中的杀虫剂量(kg pst/ha)， $C_{solution}$ 为溶液中的杀虫剂浓度(mg/L or g/ton)， SAT_{ly} 为饱和状态下土层含水量 (mm H₂O)， $C_{solidphase}$ 为吸附在固相中的杀虫剂浓度(mg/kg or g/ton)， ρ_b 为土层的容积密度

(Mg/m³), $depth_{ly}$ 为土层深度 (mm)。将方程15.1.1重置求解, $C_{solidphase}$, 并将其代入15.2.4得:

$$pst_{s,ly} = 0.01 \cdot C_{solution} \cdot SAT_{ly} + C_{solution} \cdot K_p \cdot \rho_b \cdot depth_{ly} \quad 15.2.5$$

将上式重置可得:

$$C_{solution} = \frac{pst_{s,ly}}{0.01 \cdot SAT_{ly} + K_p \cdot \rho_b \cdot depth_{ly}} \quad 15.2.6$$

联合方程 15.2.6 和 15.2.1 得:

$$\frac{dpst_{s,ly}}{dt} = \frac{pst_{s,ly} \cdot w_{mobile}}{SAT_{ly} + K_p \cdot \rho_b \cdot depth_{ly}} \quad 15.2.7$$

积分方程 15.2.7 得:

$$pst_{s,ly,t} = pst_{s,ly,o} \cdot \exp \left[\frac{-w_{mobile}}{SAT_{ly} + K_p \cdot \rho_b \cdot depth_{ly}} \right] \quad 15.2.8$$

式中: $pst_{s,ly,t}$ 为t时刻土层中的杀虫剂含量(kg pst/ha), $pst_{s,ly,o}$ 为土层中初始杀虫剂含量(kg pst/ha), SAT_{ly} 为饱和状态下土层含水量(mm H₂O), K_p 为土壤吸附系数((mg/kg)/(mg/L) or m³/ton), ρ_b 为土层的容积密度(Mg/m³), $depth_{ly}$ 为土层深度 (mm)。

为了计算径流去除的溶解态杀虫剂,将杀虫剂最终含量由初始含量中减去得:

$$pst_{flow} = pst_{s,ly,o} \cdot \left(1 - \exp \left[\frac{-w_{mobile}}{SAT_{ly} + K_p \cdot \rho_b \cdot depth_{ly}} \right] \right) \quad 15.2.9$$

式中: pst_{flow} 径流去除的杀虫剂(kg pst/ha), 其它表达式与前面所述的意义相同。

在自由水中杀虫剂的浓度采用下式计算:

$$conc_{pst,flow} = \min \begin{cases} pst_{flow} / w_{mobile} \\ pst_{sol} / 100. \end{cases} \quad 15.2.10$$

式中： $conc_{pst,flow}$ 为自由水中杀虫剂的浓度(kg pst/hamm H₂O)， pst_{flow} 为径流中去除的杀虫剂量(kg pst/ha)， w_{mobile} 为土层中的自由水量 (mm H₂O)， pst_{sol} 为杀虫剂在水中的溶度 (mg/L)。

杀虫剂通过渗漏进入下层土壤的量：

$$pst_{perc,ly} = conc_{pst,flow} \cdot w_{perc,ly} \quad 15.2.11$$

式中： $pst_{perc,ly}$ 为杀虫剂通过渗漏进入下层土壤的量(kg pst/ha)， $conc_{pst,flow}$ 为土层中自由水中杀虫剂浓度(kg pst/hamm H₂O)， $w_{perc,ly}$ 为渗漏进入下层土壤的自由水量 (mm H₂O)。

通过侧向流从土层中去除的杀虫剂量：

$$pst_{lat,surf} = \beta_{pst} \cdot conc_{pst,flow} \cdot Q_{lat,surf} \quad \text{for top 10 mm} \quad 15.2.12$$

$$pst_{lat,ly} = conc_{pst,flow} \cdot Q_{lat,ly} \quad \text{for lower layers} \quad 15.2.13$$

式中： $pst_{lat,ly}$ 为侧向流从土层中去除的杀虫剂量(kg pst/ha)， β_{pst} 为杀虫剂渗漏系数， $conc_{pst,flow}$ 为土层中自由水中杀虫剂浓度(kg pst/hamm H₂O)， $Q_{lat,ly}$ 为土层中产生的侧向流量 (mm H₂O)。杀虫剂渗漏系数允许用户设置地表径流、地表10mm土层中侧向流中的杀虫剂浓度与滤液中浓度的分数。

地表径流去除的杀虫剂量：

$$pst_{surf} = \beta_{pst} \cdot conc_{pst,flow} \cdot Q_{surf} \quad 15.2.14$$

式中： pst_{surf} 为地表径流去除的杀虫剂量(kg pst/ha)， $concpst_{flow}$ 为土层中自由水中杀虫剂浓度(kg pst/hamm H₂O)， Q_{surf} 为模拟日产生的地表径流量 (mm H₂O)。

Table 15-2: SWAT input variables that pertain to pesticide transport in solution.

Variable Name	Definition	Input File
SOL_BD	ρ_b : Soil bulk density (Mg m ⁻³)	.sol
WSOL	pst_{sol} : Solubility of the pesticide in water (mg/L)	pest.dat
PERCOP	β_{pst} : Pesticide percolation coefficient	.bsn

15.3 吸附态杀虫剂的输移

吸附于土壤颗粒的杀虫剂可以通过地表径流输移进入主河道。固相中的杀虫剂与 HRU 的泥沙负荷相关，吸附态杀虫剂负荷的变化可以反映出泥沙负荷的变化。随泥沙负荷输移进入河道的杀虫剂量，采用 McElroy et al. (1976)开发并由 Williams and Hann (1978)修正的负荷函数来计算：

$$pst_{sed} = 0.001 \cdot C_{solidphase} \cdot \frac{sed}{area_{hru}} \cdot \epsilon_{pst:sed} \quad 15.3.1$$

式中： pst_{sed} 为通过地表径流输移进入主河道杀虫剂量 (kg pst/ha)， $C_{solidphase}$ 为地表10mm土层中杀虫剂的浓度 (g pst/ metric ton soil)， sed 为模拟日泥沙产量 (metric tons)， $area_{hru}$ 为HRU面积 (ha)， $\epsilon_{pst:sed}$ 杀虫剂富集系数。

土层中杀虫剂总量为吸附态和溶解态杀虫剂的总和：

$$pst_{s,ly} = 0.01 \cdot \left(C_{solution} \cdot SAT_{ly} + C_{solidphase} \cdot \rho_b \cdot depth_{ly} \right) \quad 15.3.2$$

式中： $pst_{s,ly}$ 土层中杀虫剂总量 (kg pst/ha)， $C_{solution}$ 溶液中杀虫剂浓度 (mg/L or g/ton)， SAT_{ly} 为饱和状态下土层含水量 (mm H₂O)， $C_{solidphase}$ 为吸附在固相中的杀虫剂浓度 (mg/kg or g/ton)， ρ_b 为土层的容积密度 (Mg/m³)， $depth_{ly}$ 为土层深度 (mm)。将方程15.1.1重置求解， $C_{solidphase}$ ，并将其代入15.2.4得：

$$pst_{s,ly} = 0.01 \cdot \left(\frac{C_{solidphase}}{K_p} \cdot SAT_{ly} + C_{solidphase} \cdot \rho_b \cdot depth_{ly} \right) \quad 15.3.3$$

将上式重置可得：

$$C_{solidphase} = \frac{100 \cdot K_p \cdot pst_{s,ly}}{SAT_{ly} + K_p \cdot \rho_b \cdot depth_{ly}} \quad 15.3.4$$

式中： $C_{solidphase}$ 为吸附在固相中的杀虫剂浓度(mg/kg or g/ton)， K_p 为土壤吸附系数((mg/kg)/(mg/L) or m^3/ton)， $pst_{s,ly}$ 为土层中的杀虫剂含量(kg pst/ha)， SAT_{ly} 为饱和状态下土层含水量 (mm H_2O)， ρ_b 为土层的容积密度(Mg/m^3)， $depth_{ly}$ 为土层深度 (mm)。

15.3.1 富集系数

当地表径流流经地表时，部分水能量用来输移土壤颗粒。小颗粒较轻，较粗颗粒容易输移。输移泥沙的土壤颗粒粒径分布与土壤表层颗粒粒径分布相比较，进入主河道的泥沙中黏土粒径的比例较高。换句话说，泥沙负荷对黏土粒有富集作用。土壤中的吸附态杀虫剂主要吸附在胶质（黏土）颗粒，因此在泥沙负荷中的吸附态杀虫剂浓度较地表土壤中为高。

富集系数定义为泥沙负荷中吸附态杀虫剂浓度与地表土层中吸附态杀虫剂浓度的比例。SWAT会计算每一次暴雨事件的富集系数，或者允许用户定义固定的有机氮富集系数。为了计算富集系数，SWAT采用了Menzel (1980) 定义的富集系数与泥沙浓度存在对数关系。用来计算每次暴雨事件中的氮富集系数， $\epsilon_{pst:sed}$ ，的方程为：

$$\epsilon_{pst:sed} = 0.78 \cdot \left(conc_{sed,surq} \right)^{0.2468} \quad 15.3.5$$

式中： $conc_{sed,surq}$ 为地表径流中泥沙浓度 ($Mg \text{ sed}/m^3 \text{ H}_2O$)。地表径流中泥沙浓度计算公式为：

第 15 章 方程:杀虫剂输移

$$conc_{sed,surf} = \frac{sed}{10 \cdot area_{hru} \cdot Q_{surf}} \quad 15.3.6$$

式中 : sed 为模拟日的泥沙产量(metric tons) , $area_{hru}$ 为HRU的面积(ha) ,
 Q_{surf} 为模拟日地表径流量 (mm H₂O) 。

Table 15-3: SWAT input variables that pertain to sorbed pesticide loading.

Variable Name	Definition	Input File
SOL_BD	ρ_b : Bulk density (Mg/m ³)	.sol
PSTENR	$\epsilon_{pst:sed}$: Pesticide enrichment ratio	.chm

15.4 地表径流和侧向流中的杀虫剂延迟

在大的子流域，汇流时间超过 1 天，只有一部分地表径流和侧向流进入主河道。SWAT 考虑到地表径流的这一特性，允许地表径流和侧向流的一部分延迟进入主河道。地表径流和侧向流中的杀虫剂也同样延迟。

一旦确定了地表径流和侧向流的营养物负荷，进入主河道的杀虫剂采用下式计算：

$$pst_{surf} = \left(pst'_{surf} + pst_{surstor,i-1} \right) \left(1 - \exp \left[\frac{-surlag}{t_{conc}} \right] \right) \quad 15.4.1$$

$$pst_{lat} = \left(pst'_{lat} + pst_{latstor,i-1} \right) \left(1 - \exp \left[\frac{-1}{TT_{lat}} \right] \right) \quad 15.4.2$$

$$pst_{sed} = \left(pst'_{sed} + pst_{sedstor,i-1} \right) \left(1 - \exp \left[\frac{-surlag}{t_{conc}} \right] \right) \quad 15.4.3$$

式中： pst_{surf} 为模拟日由地表径流输移进入主河道的杀虫剂量 (kg pst/ha)， pst'_{surf} 为模拟日 HRU 中产生地表径流中的杀虫剂量 (kg pst/ha)， $pst_{surstor,i-1}$ 为前一天存储或延迟的地表径流中的杀虫剂量 (kg pst/ha)， pst_{lat} 为模拟日由侧向流输移进入主河道的杀虫剂量 (kg pst/ha)， pst'_{lat} 为模拟日 HRU 中产生侧向流中的杀虫剂量 (kg pst/ha)， $pst_{latstor,i-1}$ 为前一天存储或延迟的侧向流中的杀虫剂量 (kg pst/ha)， pst_{sed} 为模拟日由地表径流输移

进入主河道的杀虫剂量(kg pst/ha) , pst'_{sed} 为模拟日HRU中产生地表径流中的杀虫剂量(kg pst/ha) , $pst_{sedstor,i-1}$ 为前一天存储或延迟的地表径流中的杀虫剂量(kg pst/ha) , $surlag$ 为地表径流延迟系数 , $tconc$ 为HRU的汇流时间 (hrs) , $TTlag$ 为侧向流传播事件 (days) 。

Table 15-4: SWAT input variables that pertain to pesticide lag calculations.

Variable Name	Definition	Input File
SURLAG	$surlag$: surface runoff lag coefficient	.bsn
LAT_TTIME	$TTlag$: Lateral flow travel time (days)	.hru

15.5 NOMENCLATURE

- $C_{solidphase}$ Concentration of the pesticide sorbed to the solid phase (mg/kg or g/ton)
- $C_{solution}$ Concentration of the pesticide in solution (mg/L or g/ton)
- K_{oc} Soil adsorption coefficient normalized for soil organic carbon content (ml/g or (mg/kg)/(mg/L) or L/kg)
- K_p Soil adsorption coefficient ((mg/kg)/(mg/L))
- Q_{lat} Lateral flow from soil layer (mm H₂O)
- Q_{surf} Accumulated runoff or rainfall excess (mm H₂O)
- SAT_{ly} Soil water content of layer ly at saturation (mm H₂O)
- $TTlag$ Lateral flow travel time (days)

- $area_{hru}$ HRU area (ha)
- $conc_{pst,flow}$ Concentration of pesticide in the mobile water (kg pst/ha-mm H₂O)
- $conc_{sed,surg}$ Concentration of sediment in surface runoff (Mg sed/m³ H₂O)
- $depth_{ly}$ Depth of the soil layer (mm)
- $orgC_{ly}$ Amount of organic carbon in the layer (%)
- pst_{flow} Amount of pesticide removed in the flow (kg pst/ha)
- $pst_{lat,ly}$ Pesticide removed in lateral flow from a layer (kg pst/ha)
- pst'_{lat} Amount of lateral flow soluble pesticide generated in HRU on a given day (kg pst/ha)
- $pst_{latstor,i-1}$ Lateral flow pesticide stored or lagged from the previous day (kg pst/ha)
- $pst_{perc,ly}$ Pesticide moved to the underlying layer by percolation (kg pst/ha)
- $pst_{s,ly}$ Amount of pesticide in the soil (kg pst/ha)
- pst_{sed} Amount of sorbed pesticide transported to the main channel in surface runoff (kg pst/ha)
- pst'_{sed} Sorbed pesticide loading generated in HRU on a given day (kg pst/ha)

- $pst_{sedstor,i-1}$ Sorbed pesticide stored or lagged from the previous day (kg pst/ha)
- pst_{sol} Solubility of the pesticide in water (mg/L)
- pst_{surf} Pesticide removed in surface runoff (kg pst/ha)
- pst'_{surf} Amount of surface runoff soluble pesticide generated in HRU on a given day (kg pst/ha)
- $pst_{surstor,i-1}$ Surface runoff soluble pesticide stored or lagged from the previous day (kg pst/ha)
- sed Sediment yield on a given day (metric tons)
- $surlag$ Surface runoff lag coefficient
- t_{conc} Time of concentration for a subbasin (hr)
- w_{mobile} Amount of mobile water in the layer (mm H₂O)
- $w_{perc,ly}$ Amount of water percolating to the underlying soil layer on a given day (mm H₂O)
- β_{pst} Pesticide percolation coefficient
- $\epsilon_{pst:sed}$ Pesticide enrichment ratio
- ρ_b Soil bulk density (Mg m⁻³)
- ρ_w Density of water (1 Mg m⁻³)

15.6 REFERENCES

- McElroy, A.D., S.Y. Chiu, J.W. Nebgen, A. Aleti, and F.W. Bennett. 1976. Loading functions for assessment of water pollution from nonpoint sources. Environ. Prot. Tech. Serv., EPA 600/2-76-151.
- Menzel, R.G. 1980. Enrichment ratios for water quality modeling. p. 486-492. *In* W.G. Knisel (ed.) CREAMS, A field scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems. U.S. Dept. Agric. Conserv. Res. Rept. No. 26.
- Williams, J.R. 1995. Chapter 25: The EPIC model. p. 909-1000. *In* V.P. Singh (ed.). Computer models of watershed hydrology. Water Resources Publications.
- Williams, J.R. and R.W. Hann. 1978. Optimal operation of large agricultural watersheds with water quality constraints. Texas Water Resources Institute, Texas A&M Univ., Tech. Rept. No. 96.

第 16 章 方程:水质参数

除了泥沙、营养物质和杀虫剂外，SWAT 可以计算通过地表径流进入主河道的水藻、溶解氧和碳生化需氧量（CBOD）。这三个参数的负荷是监测河流水质所需要的。本章介绍描述从陆地进入河网的水藻、溶解氧和碳生化需氧量的算法。

16.1 藻类

通常认为悬浮的水藻生物量与叶绿素a成正比。因此河流水藻生物量负荷可以作为叶绿素a从陆地的负荷。Cluis et al. (1988) 在加拿大North Yamaska 河流建立了营养富集指标 (总N：总P)、叶绿素a和水藻生长潜力之间的关系：

$$(AGP + chla) \cdot v_{surf} = f \cdot \left(\frac{TN}{TP} \right)^g \quad 16.1.1$$

式中：AGP为水藻生长潜力 (mg/L)，*chla* 为地表径流中的叶绿素浓度 (μg/L)，*v_{surf}*

为地表径流速率 (m³/s)，*TN* 为总凯氏氮负荷 (kmoles)，*TP* 为总磷负荷 (kmoles)，*f* 为一个系数，*g*为一个指数。

地表径流中叶绿素 a 浓度在 SWAT 中采用 Cluis et al. (1988)提出方程的简化形式计算：

$$chla = 0 \quad \text{if } (v_{surf} < 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}) \text{ or } (TP \text{ and } TN < 10^{-6}) \quad 16.1.2$$

$$chla = \frac{0.5 \cdot 10^{2.7}}{v_{surf}} \quad \text{if } v_{surf} > 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}, \text{ and } (TP \text{ and } TN > 10^{-6}) \quad 16.1.3$$

$$chla = \frac{0.5 \cdot 10^{0.5}}{v_{surf}} \quad \text{if } v_{surf} > 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}, \quad TP < 10^{-6} \quad \text{and} \quad TN > 10^{-6} \quad 16.1.4$$

16.2 碳生化需氧量

碳生化需氧量 (CBOD) 定义为降解地表径流输移的有机物质所需要的氧量。

SWAT中计算CBOD的负荷函数基于Thomann and Mueller (1987)所描述的关系：

$$cbod_{surq} = \frac{2.7 \cdot orgC_{surq}}{Q_{surf} \cdot area_{hru}} \quad 16.2.1$$

式中： $cbod_{surq}$ 为地表径流中CBOD浓度 (mg CBOD/L) ， $orgC_{surq}$ 为地表径流中的有机碳 (kg orgC) ， Q_{surf} 为模拟日的地表径流 (mm H₂O) ， $area_{hru}$ HRU的面积 (km²) 。

地表径流中有机碳含量采用下式计算：

$$orgC_{surq} = 1000 \cdot \frac{orgC_{surf}}{100} \cdot sed \cdot \varepsilon_{C:sed} \quad 16.2.2$$

式中： $orgC_{surq}$ 为地表径流中的有机碳 (kg orgC) ， $orgC_{surf}$ 为地表10mm土层中有机碳含量百分比 (%) ， sed Sed 为HRU的泥沙负荷 (metric tons) ， $\varepsilon_{C:sed}$ 为碳富集系数。

16.2.1 富集系数

当地表径流流经地表时，部分水能量用来输移土壤颗粒。小颗粒较轻，较粗颗粒容易输移。输移泥沙的土壤颗粒粒径分布与土壤表层颗粒粒径分布相比较，进入主河道的泥沙中黏土粒径的比例较高。换句话说，泥沙负荷对黏土粒有富集作用。土壤中的有机碳主要吸附在胶质（黏土）颗粒，因此在泥沙负荷中的有机碳浓度较地表土壤中为高。

富集系数定义为泥沙负荷中有机碳浓度与地表土层中有机碳浓度的比例。SWAT会计算每一次暴雨事件的富集系数，或者允许用户定义固定的有

机氮富集系数。为了计算富集系数，SWAT采用了Menzel (1980) 定义的富集系数与泥沙浓度存在对数关系。用来计算每次暴雨事件中的有机碳富集系数， $\varepsilon_{C:sed}$ ，的方程为：

$$\varepsilon_{C:sed} = 0.78 \cdot \left(conc_{sed,surf} \right)^{0.2468} \quad 16.2.3$$

式中： $conc_{sed,surf}$ 为地表径流中泥沙浓度 (Mg sed/m³ H₂O)。地表径流中泥沙浓度计算公式为：

$$conc_{sed,surf} = \frac{sed}{10 \cdot area_{hru} \cdot Q_{surf}} \quad 16.2.4$$

式中： sed 为模拟日的泥沙产量 (metric tons)， $area_{hru}$ 为HRU的面积 (ha)， Q_{surf} 为模拟日地表径流量 (mm H₂O)。

Table 16-1: SWAT input variables that pertain to CBOD in surface runoff.

Variable Name	Definition	Input File
SOL_CBN	$orgC_{ly}$: Percent organic carbon in the top 10 mm of soil (%)	.sol

16.3 溶解氧

通常认为降水中氧是饱和的。为计算地表径流中的溶解氧浓度，需要将径流中耗氧物质消耗的氧量从饱和氧浓度中减去。

$$Ox_{surf} = Ox_{sat} - K_1 \cdot cbod_{surf} \cdot \frac{t_{ov}}{24} \quad 16.3.1$$

式中： Ox_{surf}

为地表径流中的溶解氧浓度 (mg O₂/L)， Ox_{sat} 为饱和溶解氧浓度 (mg O₂/L)， K_1 为CBOD耗氧速率(day⁻¹)， $cbod_{surf}$ 为地表径流中的CBOD

浓度(mg CBOD/L) , t_{ov} 为坡面汇流事件。对于由HRUs产生的负荷 ,SWAT
假设 $K1$ 为 1.047 day^{-1} 。

16.3.1 氧饱和浓度

可以溶解在水中的氧量为温度、溶解的固体颗粒的浓度和大气压的
函数。APHA (1985) 开发了一个计算饱和溶解氧的方程：

$$Ox_{sat} = \exp \left[-139.34410 + \frac{1.575701 \times 10^5}{T_{wat,K}} - \frac{6.642308 \times 10^7}{T_{wat,K}^2} + \frac{1.243800 \times 10^{10}}{T_{wat,K}^3} - \frac{8.621949 \times 10^{11}}{T_{wat,K}^4} \right] \quad 16.3.2$$

式中： Ox_{sat} 为 1.00 atm 下饱和溶解氧浓度 (mg O₂/L) , $T_{wat,K}$ 为
水的 Kelvin 温度 ($273.15 + ^\circ\text{C}$) 。

16.4 NOMENCLATURE

- AGP* Algal growth potential (mg/L)
Ox_{sat} Saturation oxygen concentration (mg O₂/L)
Ox_{surf} Dissolved oxygen concentration in surface runoff (mg O₂/L)
Q_{surf} Surface runoff on a given day (mm H₂O)
T_{wat,K} Water temperature in Kelvin (273.15+°C)
TN Total Kjeldahl nitrogen load (moles)
TP Total phosphorus load (moles)
- area_{hru}* Area of the HRU (km²)
cbod_{surq} CBOD concentration in surface runoff (mg CBOD/L)
chl_a Chlorophyll *a* concentration in the surface runoff (µg/L)
conc_{sed,surq} Concentration of sediment in surface runoff (Mg sed/m³ H₂O)
f Coefficient
g Exponent

$orgC_{surf}$	Percent organic carbon in the top 10 mm of soil (%)
$orgC_{surq}$	Organic carbon in surface runoff (kg orgC),
sed	Sediment loading from the HRU (metric tons)
t_{ov}	Time of concentration for overland flow (hr)
v_{surf}	Surface runoff flow rate (m^3/s)
$\varepsilon_{C:sed}$	Carbon enrichment ratio
κ_1	CBOD deoxygenation rate (day^{-1})

16.5 REFERENCES

- American Public Health Association. 1985. Standard methods for the examination of water and wastewater, 16th edition. American Public Health Association, Inc.
- Cluis, D., P. Couture, R. Bégin, and S.A. Visser. 1988. Potential eutrophication assessment in rivers; relationship between produced and exported loads. *Schweiz. Z. Hydrol.* 50:166-181.
- Menzel, R.G. 1980. Enrichment ratios for water quality modeling. p. 486-492. *In* W.G. Knisel (ed.) CREAMS, A field scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems. U.S. Dept. Agric. Conserv. Res. Rept. No. 26.
- Thomann, R.V. and J.A. Mueller. 1987. Principles of surface water quality modeling and control. Harper & Row Publishers, New York.

第 17 章 方程:生长循环

植物生长循环通过植物生长数据库中总结的植物属性和管理文件中列出的管理措施实施时间的控制。本章将介绍用来控制植物生长循环的热量单位原理。第二十章将中点介绍用户输入的管理措施对植物生长的影响。

17.1 热量单位

温度是控制植物生长的最重要引入之一。每一种植物都有最低、最高和最优生长温度。对于任何植物只有在温度超过最低或基温，才可能生长。超过基温后，温度越高植物生长速率越快，当超过最优温度后植物生长速率开始降低，直到最高温度，植物停止生长。

在 1920s 和 1930s，罐头厂寻找种植甜花生的时间，以使得罐头厂可以获得最优花生供给。在春季，作物的种植时间相差几周，而其成熟时间只相差 1-2 天或 6-8 天 (Boswell, 1926; 1929)。罐头厂采用了热量单位理论 (Boswell, 1926; Magoon and Culpepper, 1932 ; Barnard, 1948; Phillips, 1950) 来确定保证获取稳定花生收获的种植时间。

热量单位理论假设植物所需热量可以定量化并与成熟时间联系。因为植物在平均温度低于基温时不能生长，因此平均温度中只有超过基温的部分对植物生长有贡献。为了测量植物所需热量需求，在植物生长周期内记录超过植物基温的累积日平均气温，并将其表示为热量单位。例如，假设甜花生的生长基温为 5°C 。如果某一天的平均气温为 20°C ，改日累积的热量单位为 $20-5 = 15$ 热量单位。如果直到种植日期，成熟日期，基温和平均日气温，植物成熟所需的总得热量单位可以计算得到。

SWAT 中应用的热量指标为直接的求和指标。日平均气温高于基温的每一度计算为一个热量单元。这一方法假设植物生长速率与温度的升高成正

比。需要注意这种没有高温截止的热量单位理论，没有考虑有害高温的影响。

SWAT 假设高于基温的所有热量加速植被的生长。

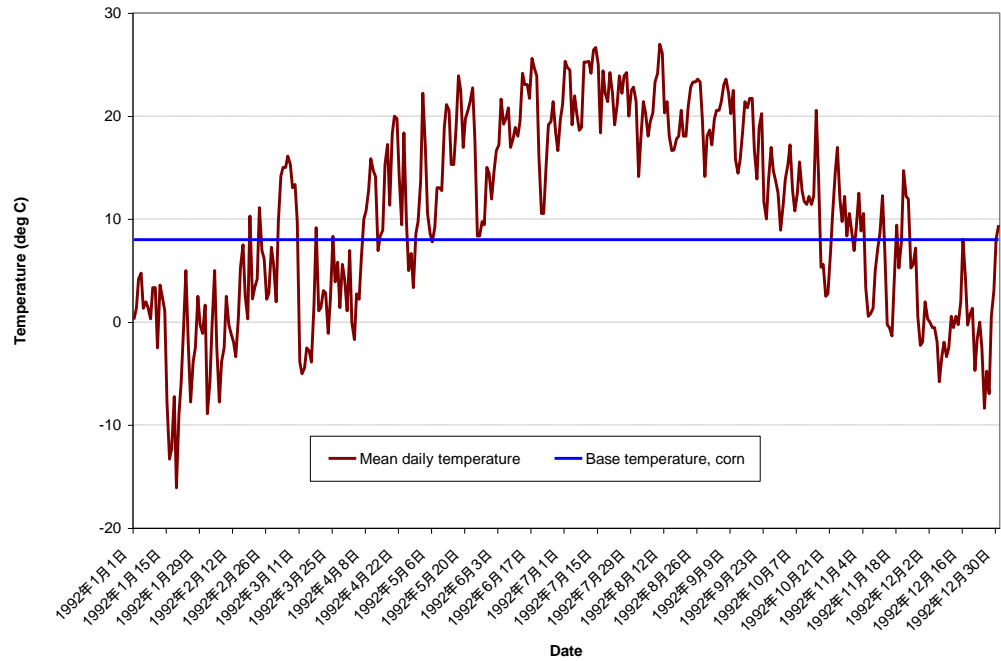


Figure 17-1: Mean daily temperature recorded for Greenfield, Indiana

图 17-1 图示了 1992 年印第安那 Greenfield 的日平均温度平均温度，棉花的基温为 8°C。作物生长只在平均日气温超过基温的日子发生。每天的累积热量单位为：

$$HU = \bar{T}_{av} - T_{base} \quad \text{当} \quad \bar{T}_{av} > T_{base} \quad 17.1.1$$

式中：HU 为模拟日累积的热量单位 (hear units)， \bar{T}_{av} 为日平均温度 (°C)， T_{base} 为植物生长基温 (°C)。植物成熟所需的总热量单位为：

$$PHU = \sum_{d=1}^m HU \quad 17.1.2$$

式中：PHU 为植物成熟所需的总热量单位 (hear units) ，HU 为模拟日累积的热量单位 (hear units) 。PHU 也成为潜在热量单位。

当计算某一种植物的潜在热量单位是，达到成熟所需的天数必需直到。对于大多数作物，这些数字已经量化并且易于得到。对于其它植物，例如森林或草原，植物开始发芽的时间应该被用作生长周期的开始，植物种子达到成熟的时间为生长周期的借宿。以印第安那 Greenfiled 为例，120 天的杂交玉米在五月 15 日种植，求日热量单位和，玉米成熟需要的总热量单位为 1456。

17.1.1 热量单位的时间分布

热量单位理论被证明为可靠的预测收获作物日期的方法，该方法已经被修改用来预测其它植物，如花卉，的生长阶段(Cross and Zuber,1972)。由于热量单位理论在预测植物生长阶段的成功，它也被用来安排管理措施。

SWAT 允许管理措施以日期的形式或热量单位的形式来安排。对于每一个操作，模型检查是否被某一天被指定了某一操作，如果提供了该信息，SWAT 会在指定日期执行指定操作。如果没有以日期的形式安排操作，模型需要指定植物生长所需的潜在热量单位。总的来说，如果知道不同操作的确定日期，尽量以日期的形式安排各种操作。

以热量单位来安排操作，就会允许模型根据温度来执行不同的操作。这种方法在以下几种情况下是有效的。当在大流域进行模拟时，流域内气候空间变化足以影响各种操作的时间时，以热量单位来安排比较合理。应用热

量单位安排，对于一种土地利用形式只需要一个通过管理文件。这一系列的通用操作可以用在流域内所有的该种土地利用类型。如果流域气候的年际变化很大，以热量单位来安排操作的方法也会根据气候条件来改变操作的时间安排。

以热量单位来安排操作，操作时间表示为植物潜在热量单位的分数或成熟度分数。在印第安那采用的玉米操作实例为：

Date	Operation	Heat Accumulated	Units	Fraction of PHU
April 24	Tandem disk			
April 30	Tandem disk			
May 7	Field cultivator			
May 15	Plant corn ($PHU = 1456$)	0		.00
June 3	Row cultivator	165		.11
June 17	Row cultivator	343		.24
October 15	Harvest & Kill	1686		1.16
October 29	Tandem disk			
November 5	Chisel			

不同操作所对应的热量单位通过对从种植日期 (5 月 15 日) 开始，到操作日期结束的每天的热量单位之和。为了计算操作发生时 PHU 的分数，用操作发生时的的累积热量单位除以 PHU 得到。

应注意收获操作的 PHU 分数为 1.16。这一分数高于 1，因为允许玉米在收获之前变干。模型模拟植物生长过程，直到植物成熟。从植物成熟开始，

将不再散发或吸收营养物质和水分。植物将存在于 HRU 中，直到转化为残余物或被收获。

当根据 PHU 分数确定操作时间，在无作物生长时期的操作（包括种植）必需也必需执行。为了安排这些操作，SWAT 纪律第二中热量指标，即对全年以基温为 0°C 求热量单位。这一热量指标，只是气候的函数，称为零基温热量指标。对于零基温热量指标，模拟日累积的热量单位为：

$$HU_0 = \bar{T}_{av} \quad \text{when} \quad \bar{T}_{av} > 0^\circ\text{C} \quad 17.1.3$$

式中： HU_0 为模拟日累积的零基温热量单位（heat units）， \bar{T}_{av} 为日平均温度（°C）。全年总热量单位为：

$$PHU_0 = \sum_{d=1}^{365} HU_0 \quad 17.1.4$$

式中： PHU_0 为全年总零基温热量单位（heat units）， HU_0 为模拟日累积的零基温热量单位（heat units）。与 PHU 不同， PHU_0 为 SWAT 根据 .wgn 文件提供长系列天气资料计算的平均值。

以印第安那的流域为例， $PHU_0 = 4050$ 。剩余操作的热量分数，用 PHU_0 作为潜在热量单位。

Date	Operation	Base Heat Accumulated	Zero Units	Plant Heat Units Accumulated	Fraction of PHU_0 ($PHU_0 = 4050$)	Fraction of PHU ($PHU = 1456$)
April 24	Tandem disk	564			.14	
April 30	Tandem disk	607			.15	
May 7	Field cultivator	696			.17	
May 15	Plant corn ($PHU = 1456$)	826		0	.20	
June 3	Row cultivator	1136		165		.11

第 17 章 方程:生长循环

June 17	Row cultivator	1217	343	.24
October 15	Harvest & Kill	3728	1686	1.16
October 29	Tandem disk	3860		.95
November 5	Chisel	3920		.97

如前所述，SWAT 记录零基温热量单位。在 HRU 中没有植物生长时（在收割操作和下一次种植操作之间的时间），采用零基温热量单位安排操作。一旦植物生长开始，模型转换到采用植物热量单位来安排操作，直到植物被收割。

下面的热量单位分数，可以提供合理操作安排：

0.15 种植

1.0 收获 /收割，没有 dry-down

1.2 收获 /收割，有 dry-down

0.6 除草

Table 17-1: SWAT input variables that pertain to heat units.

Variable Name	Definition	Input File
PHU	<i>PHU</i> : potential heat units for plant that is growing at the beginning of the simulation in an HRU	.mgt
HEAT UNITS	<i>PHU</i> : potential heat units for plant whose growth is initiated with a planting operation.	.mgt
HUSC	Fraction of potential heat units at which operation takes place.	.mgt
T_BASE	T_{base} : Minimum temperature for plant growth (°C)	crop.dat

17.2 休眠

SWAT 假设数目、多年生和一年生冷季作物可以在日长接近最短或最小日常时休眠。在休眠期，植物不生长。

休眠开始和结束通过阈值日长来确定。阈值日长采用下式计算：

$$T_{DL,thr} = T_{DL,mn} + t_{dorm} \quad 17.2.1$$

式中： $T_{DL,thr}$ 为休眠开始的阈值日长 (hrs)， $T_{DL,mn}$ 为流域的最短日长 (hrs)， t_{dorm} 为休眠阈值 (hrs)。当日长短于， $T_{DL,thr}$ ，除暖季一年生植物外，将会进入休眠状态。当日长超过， $T_{DL,thr}$ ，植物休眠结束。

休眠阈值随纬度变化：

$$t_{dorm} = 1.0 \quad \text{if } \phi > 40^\circ \text{ N or S} \quad 17.2.2$$

$$t_{dorm} = \frac{\phi - 20}{20} \quad \text{if } 20^\circ \text{ N or S} \leq \phi \leq 40^\circ \text{ N or S} \quad 17.2.3$$

$$t_{dorm} = 0.0 \quad \text{if } \phi < 20^\circ \text{ N or S} \quad 17.2.4$$

式中： t_{dorm} 为休眠阈值 (hrs)， ϕ 为以正值表示的纬度 (degree)。

在乔木开始休眠后，叶片生物量被转化为残余物，叶面积指数设为最小值 (在植物生长数据库中定义)。多年生植物在休眠开始后，95%的生物量转化为残余物，叶面积指数设为最小值。对于冷季一年生植物，生物量不转化为残余物。

17.3 植物类型

SWAT 将植物分为 7 中不同的类型：暖季一年生豆类，冷季一年生豆类，多年生豆类，暖季一年生植物，冷季一年生植物，多年生植物和乔木。

在 SWAT 中，这些不同类型植物之间的区别为：

1. 暖季一年生豆类
 - 模拟固氮
 - 由于根系生长，模拟植物根系在生长周期内的变化
2. 冷季一年生豆类
 - 模拟固氮
 - 由于根系生长，模拟植物根系在生长周期内的变化
 - 当日长小于阈值日长时，秋季种植的植被会发生休眠
3. 多年生豆类
 - 模拟固氮
 - 植物根系在生长周期内始终等于土壤和植物所允许的深度，当日长小于阈值日长时，植被会发生休眠
4. 暖季一年生植物
 - 由于根系生长，模拟植物根系在生长周期内的变化
5. 冷季一年生植物
 - 由于根系生长，模拟植物根系在生长周期内的变化
 - 当日长小于阈值日长时，秋季种植的植被会发生休眠
6. 多年生植物
 - 植物根系在生长周期内始终等于土壤和植物所允许的深度
 - 当日长小于阈值日长时，植被会发生休眠
7. 乔木
 - 植物根系在生长周期内始终等于土壤和植物所允许的深度

新生体被分为叶片/针叶（30%）和木本生长（70%）。在每一个生长季节结束时，在叶片中的生物量被转化为残余物。

17.4 NOMENCLATURE

HU Number of heat units accumulated on a given day where base temperature is dependant on the plant species (heat units)

HU₀ Number of base zero heat units accumulated on a given day (heat units)

- PHU Potential heat units or total heat units required for plant maturity where base temperature is dependant on the plant species (heat units)
- PHU_0 Total base zero heat units or potential base zero heat units (heat units)
- T_{base} Plant's base or minimum temperature for growth ($^{\circ}C$)
- $T_{DL, mn}$ Minimum daylength for the watershed during the year (hrs)
- $T_{DL, thr}$ Threshold daylength to initiate dormancy (hrs)
- \bar{T}_{av} Mean air temperature for day ($^{\circ}C$)
- t_{dorm} Dormancy threshold (hrs)
- ϕ Latitude expressed as a positive value (degrees)

17.5 REFERENCES

- Barnard, J.D. 1948. Heat units as a measure of canning crop maturity. The Canner 106:28.
- Boswell, V.G. 1929. Factors influencing yield and quality of peas—Biophysical and biochemical studies. Maryland Agr. Exp. Sta. Bul. 306.
- Boswell, V.G. 1926. The influence of temperature upon the growth and yield of garden peas. Proc. Amer. Soc. Hort. Sci. 23:162-168.
- Cross, H.Z. and M.S. Zuber. 1972. Prediction of flowering dates in maize based on different methods of estimating thermal units. Agronomy Journal 64:351-355.
- Magoon, C.A. and C.W. Culpepper. 1932. Response of sweet corn to varying temperatures from time of planting to canning maturity. U.S.D.A. tech. Bull. 312.
- Phillips, E.E. 1950. Heat summation theory as applied to canning crops. The Canner 27:13-15.

第 18 章 方程:最优生长

在模拟过程中的每一天,需要计算潜在植物生长,即植物在理想生长条件下的生长。理想生长条件包括足够的水分、营养物供给和适宜的气候条件。不同植物种类生长的不同通过植物生长数据库中的参数来定义。

18.1 潜在生长

植物生长模拟叶面积发展、光能截留和将光能转化为生物量 (假设不同植物种类的辐射利用效率) 。

18.1.1 生物量产量

植物叶片截留的日太阳辐射采用比尔定律 (Monsi and Saeki, 1953) :

$$H_{phosyn} = 0.5 \cdot H_{day} \cdot \left(-\exp(-k_l \cdot LAI) \right) \quad 18.1.1$$

式中 : H_{phosyn} 为截留的促进光合作用的活性太阳辐射量 (MJ m^{-2}) , H_{day} 为太阳辐射入射量 (MJ m^{-2}) , $0.5 H_{day}$ 为入射的促进光合作用的活性太阳辐射量 (MJ m^{-2}) , k_l 为消光系数 , LAI 为叶面积指数。在SWAT中 , 消光系数对于所有的植物设为0.65。

促进光合作用的活性太阳辐射的波长在400和700nm之间 (McCree, 1972) 。直接太阳辐射中大概含有45%的促进光合作用的活性太阳辐射 , 而漫辐射中含有60%的促进光合作用的活性太阳辐射(Monteith, 1972; Ross, 1975)。促进光合作用的活性太阳辐射所占的比例随着每天云覆盖条件不同而变化 , 但是在欧洲和以色列的研究表明50%为代表平均值 (Monteith, 1972; Szeicz, 1974; Stanhill and Fuchs, 1977)。

辐射利用系数为单位截留太阳辐射所产生的干生物量。辐射利用系数在植物生长数据库中定义，并且被假设为与植物生长阶段独立。截留的促进光合作用的活性太阳辐射最大日生物量增长采用下式估算(Monteith, 1977)：

$$\Delta bio = RUE \cdot H_{phosyn} \quad 18.1.2$$

式中： Δbio 为总植物生物量的日潜在增长 (kg/ha)， RUE 为植物的辐射利用系数 ((kg/ha (MJ/m²)-1 or 10⁻¹ g/MJ))， H_{phosyn} 为日截留的促进光合作用的活性太阳辐射 (MJ m⁻²)。方程18.1.2假设植物冠层的光合速率与辐射能量呈线性关系。

模拟日， d ，的总生物量采用下式计算：

$$bio = \sum_{i=1}^d \Delta bio_i \quad 18.1.3$$

式中： bio 为模拟日总生物量 (kg/ha)， Δbio_i 为总植物生物量的日增长 (kg/ha)。

18.1.1.1 气候对辐射利用效率的影响

辐射利用效率对大气中二氧化碳的浓度敏感，SWAT中已经引入了相应的方程来修改默认的植物生长数据库中的辐射利用效率值，以研究气候变化影响。根据二氧化碳浓度来修改辐射利用效率的方程如下 (Stockle et al., 1992)：

$$RUE = \frac{100 \cdot CO_2}{CO_2 + \exp(-r_2 \cdot CO_2)} \quad 18.1.4$$

式中： RUE 为植物的辐射利用系数 (kg/ha MJ/m^2)， CO_2 为大气中的二氧化碳的浓度 (ppmv)， r_1 and r_2 为形状系数。

形状系数通过方程18.1.4和已知的两个点(RUE_{amb} , CO_{2amb}) and (RUE_{hi} , CO_{2hi})来推求：

$$r_1 = \ln \left[\frac{CO_{2amb}}{0.01 \cdot RUE_{amb}} \right] - CO_{2amb} + r_2 \cdot CO_{2amb} \quad 18.1.5$$

$$r_2 = \frac{\left(\ln \left[\frac{CO_{2amb}}{0.01 \cdot RUE_{amb}} \right] - CO_{2amb} \right) - \left(\ln \left[\frac{CO_{2hi}}{0.01 \cdot RUE_{hi}} \right] - CO_{2hi} \right)}{CO_{2hi} - CO_{2amb}}$$

18.1.6

式中： r_1 为第一形状系数， r_2 为第二形状系数， CO_{2amb} 为周围环境大气二氧化碳的浓度 (ppmv)， RUE_{amb} 为在周围环境大气二氧化碳的浓度下的辐射利用效率 (kg/ha MJ/m^2)， CO_{2hi} 为高大气二氧化碳的浓度 (ppmv)， RUE_{hi} 为高大气二氧化碳的浓度下的辐射利用效率 (kg/ha MJ/m^2)。方程18.1.4 的开发条件为，周围环境大气二氧化碳的浓度为330 ppmv，并在二氧化碳浓度在330-660 ppmv范围内有效。即使周围环境大气二氧化碳的浓度高于330 ppmv，这一关系仍然使用。如果周围环境大气二氧化碳的浓度低于330 ppmv，模型定义 $RUE = RUE_{amb}$ 。

Stockle and Kiniry (1990) 知道植物的辐射利用效率受水汽压亏损的影响。对于一个植物，在水汽压亏损超过某一阈值后植物的辐射利用效率开响应水汽压亏损而降低。修正的辐射利用效率为：

$$RUE = RUE_{vpd=1} - \Delta rue_{dcl} \cdot (vpd - vpd_{thr}) \quad \text{if } vpd > vpd_{thr} \quad 18.1.7$$

$$RUE = RUE_{vpd=1} \quad \text{if } vpd \leq vpd_{thr} \quad 18.1.8$$

式中 : RUE 为根据水汽压亏损修正的辐射利用效率($\text{kg/ha}(\text{MJ/m}^2)^{-1}$ 1or 0^{-1} g/MJ) , $RUE_{vpd=1}$ 为在水汽压亏损为 1 kPa 的植物辐射利用效率 ($\text{kg/ha}(\text{MJ/m}^2)^{-1}$ 1or 0^{-1} g/MJ) , Δrue_{dcl} 为单位水汽压亏损造成的辐射利用效率下降速率($\text{kg/ha} (\text{MJ/m}^2)^{-1} \text{ kPa}^{-1}$ or $(10^{-1} \text{ g/MJ}) \text{ kPa}^{-1}$) , vpd 为水汽压亏损 (kPa) , vpd_{thr} 为水汽压亏损阈值 , 超过该值后 , 植物辐射利用效率降低 (kPa) 。植物辐射利用效率值 , 根据植物生长数据库中的 , RUE_{amb} , 或者根据高二氧化碳浓度修正值 , $RUE_{vpd=1}$ 。植物辐射利用效率的水汽压亏损阈值对于所有植物设置为 1.0 Kpa ($vpd_{thr} = 1.0$) 。

辐射利用效率不低于 RUE_{amb} 的 27% 。这一最小值是根据田间观测得到的 (Kiniry, personal communication, 2001) 。

18.1.2 冠层覆盖和高度

SWAT 模型模拟的冠层高度和叶面积的季节变化 , 如图 18-1 和 18-2 所示。图中采用的为 Alamo Switchgrass 的参数。

第 18 章 方程:最优生长

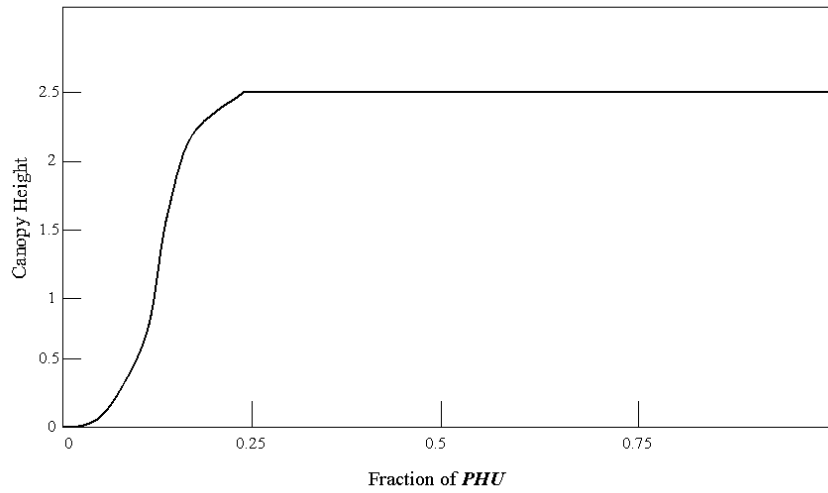


Figure 18-1: Seasonal change in plant canopy height during growing season.

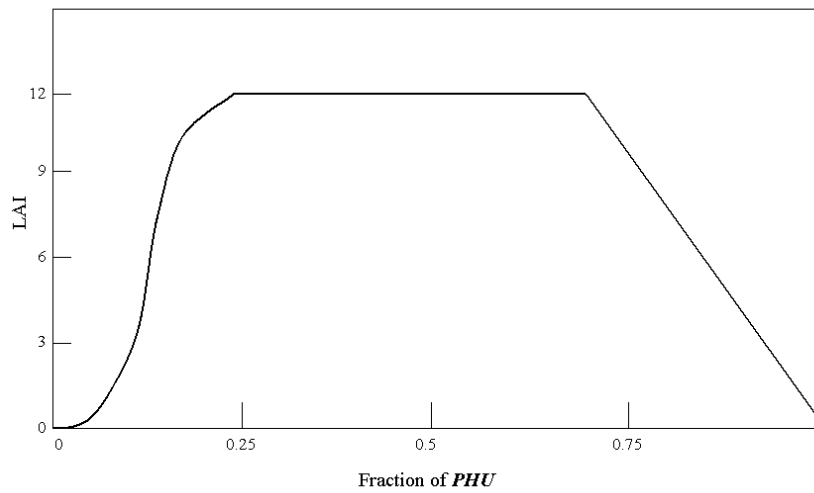


Figure 18-2: Seasonal change in plant leaf area index during growing season.

在最初的生长阶段，冠层高度和叶面积发展由最优叶面积发展曲线控制：

$$fr_{LAI_{mx}} = \frac{fr_{PHU}}{fr_{PHU} + \exp(-l_1 - l_2 \cdot fr_{PHU})} \quad 18.1.9$$

式中 $fr_{LAI_{mx}}$ 为由给定植物潜在热量单位分数所确定的植物最大叶面积指数， fr_{PHU}

为在生长季节的模拟日累积的潜在热量单位分数， l_1 和 l_2 为形状系数。累积潜在热量单位分数由下式计算：

$$fr_{PHU} = \frac{\sum_{i=1}^d HU_i}{PHU} \quad 18.1.10$$

式中 fr_{PHU} 为生长季节中模拟日累积的潜在热量单位分数， HU 为第 i 天累积的热量单位(heat units)， PHU 为植物总潜在热量单位(heat units)。

形状系数通过方程 18.1.9 和两个已知点 ($fr_{LAI,1}, fr_{PHU,1}$) 和 ($fr_{LAI,2}, fr_{PHU,2}$)求解：

$$l_1 = \ln \left[\frac{fr_{PHU,1}}{fr_{LAI,1}} - fr_{PHU,1} \right] + l_2 \cdot fr_{PHU,1} \quad 18.1.11$$

$$l_2 = \frac{\left(\ln \left[\frac{fr_{PHU,1}}{fr_{LAI,1}} - fr_{PHU,1} \right] - \ln \left[\frac{fr_{PHU,2}}{fr_{LAI,2}} - fr_{PHU,2} \right] \right)}{fr_{PHU,2} - fr_{PHU,1}} \quad 18.1.12$$

式中： l_1 为第一形状系数， l_2 为第二形状系数， $fr_{PHU,1}$ 为相应于最优叶面积发展曲线上第一点的生长季节分数(即总潜在热量单位的分数)， $fr_{LAI,1}$ 为相应于最优叶面积发展曲线上第一点的最大植物叶面积指数分数

(即, LAI_{mx} 的分数), $fr_{PHU,2}$ 为相应于最优叶面积发展曲线上第二点的生长季节分数, $fr_{LAI,2}$ 为相应于最优叶面积发展曲线上第二点的最大植物叶面积指数分数。

模拟日的冠层高度采用下式计算:

$$h_c = h_{c,mx} \cdot \sqrt{fr_{LAI_{mx}}} \quad 18.1.13$$

式中: h_c 为模拟日的冠层高度 (m), $h_{c,mx}$ 为植物最大冠层高度 (m), $fr_{LAI_{mx}}$ 为相应于给定潜在热量单位分数的植物最大叶面积植物分数。可以从图18-1中看出,一旦达到最大冠层高度, h_c 会保持不变直到植物被砍伐。

冠层覆盖以叶面积指数的形式表示,第*i*天增加的叶面积由下式计算:

$$\Delta LAI_i = \left(fr_{LAI_{mx},i} - fr_{LAI_{mx},i-1} \right) LAI_{mx} \cdot \left(-\exp \left(- \left(LAI_{i-1} - LAI_{mx} \right) \right) \right) \quad 18.1.14$$

总叶面积指数为:

$$LAI_i = LAI_{i-1} + \Delta LAI_i \quad 18.1.15$$

式中: ΔLAI_i 为第*i*天增加的叶面积, LAI_i 和 LAI_{i-1} 为第*i*和*i-1*天的叶面积指数, $fr_{LAI_{mx},i}$ 和 $fr_{LAI_{mx},i-1}$ 为采用方程18.1.9计算的第*i*和*i-1*天的最大叶面积指数分数, LAI_{mx} 为植物最大叶面积指数分数。

叶面积指数定义为单位土地的绿色叶片面积 (Watson, 1947)。如图18-2所示,一旦达到最大叶面积, LAI 会保持不变直到叶片衰老。一旦叶片衰老称为主要的生长过程,叶面积指数采用下式计算:

$$LAI = LAI_{mx} \cdot \left(-fr_{PHU} \right) \quad fr_{PHU} > fr_{PHU, sen} \quad 18.1.16$$

式中： LAI 为模拟日叶面积指数， LAI_{mx} 为最大叶面积指数， fr_{PHU} 为生长季节中模拟日植物累积潜在热量单位分数， $fr_{PHU, sen}$ 为叶片衰老称为主要生长过程的生长季节分数（PHU）。

18.1.3 根系发展

在植物幼苗阶段根系系统占总植物生物量的 30-50%，当植物成熟时减少到 5-20%（Jones, 1985）。在植物成熟时，SWAT 将根系占总生物量分数从 0.40 变为 0.20。日根系生物量分数采用下式计算：

$$fr_{root} = 0.40 - 0.20 \cdot fr_{PHU} \quad 18.1.17$$

式中： fr_{root} 为生长季节中的某一天根系占总生物分数， fr_{PHU} 为生长季节中的某一天植物累积的潜在热量单位分数。

不同植物计算根系深度的方法不同。SWAT 假设，在生长季节中，多年生植物和乔木的根系达到土壤定义的最大根系深度：

$$z_{root} = z_{root, mx} \quad 18.1.18$$

式中： z_{root} 为模拟日根系发展深度（mm）， $z_{root, mx}$ 为土壤中最大根系发展深度（mm）。一年生植物的根系深度从生长开始时的 0.0 mm，在 $fr_{PHU} = 0.40$ 时变为最大根系深度，其计算公式如下：

$$z_{root} = 2.5 \cdot fr_{PHU} \cdot z_{root, mx} \quad \text{if } fr_{PHU} \leq 0.40 \quad 18.1.19$$

$$z_{root} = z_{root, mx} \quad \text{if } fr_{PHU} > 0.40 \quad 18.1.20$$

式中： z_{root} 为模拟日根系发展深度（mm）， fr_{PHU} 为生长季节中的某一天植物累积的潜在热量单位分数， $z_{root, mx}$ 为土壤中最大根系发展深度（mm）。

最大根系深度 通过比较植物生长数据库中的最大潜在根系深度 (crop.dat 文件中的 RDMX) 和土壤输入文件 (.sol 文件中的 SOL_ZMX , 如果该值没有规定 , 模型将设其为土壤剖面最大深度) 中最大潜在根系深度来定义。两者中较小者被用来定义 $z_{root, mx}$ 。

18.1.4 成熟

当累积潜在热量单位分数 , fr_{PHU} , 等于 1.00 时 , 植物成熟。一旦成熟 , 植物停止散发和摄取水分和营养物质。模拟的植物生物量保持不变 , 直到植物被收获或砍伐。

Table 18-1: SWAT input variables that pertain to optimal plant growth.

Variable Name	Definition	Input File
BIO_E	RUE_{amb} : Radiation use efficiency in ambient CO ₂ ((kg/ha)/(MJ/m ²))	crop.dat
CO2HI	CO_{2hi} : Elevated CO ₂ atmospheric concentration (ppmv)	crop.dat
BIOEHI	RUE_{hi} : Radiation use efficiency at elevated CO ₂ atmospheric concentration value for CO2HI ((kg/ha)/(MJ/m ²))	crop.dat
WAVP	$\Delta r_{ue_{dc}}$: Rate of decline in radiation-use efficiency per unit increase in vapor pressure deficit (kg/ha·(MJ/m ²) ⁻¹ ·kPa ⁻¹ or (10 ⁻¹ g/MJ)·kPa ⁻¹)	crop.dat
PHU	PHU : potential heat units for plant growing at beginning of simulation (heat units)	.mgt
HEAT UNITS	PHU : potential heat units for plant whose growth is initiated in a planting operation (heat units)	.mgt
FRGRW1	$fr_{PHU,1}$: Fraction of the growing season corresponding to the 1 st point on the optimal leaf area development curve	crop.dat
LAIMX1	$fr_{LAI,1}$: Fraction of the maximum plant leaf area index corresponding to the 1 st point on the optimal leaf area development curve	crop.dat
FRGRW2	$fr_{PHU,2}$: Fraction of the growing season corresponding to the 2 nd point on the optimal leaf area development curve	crop.dat
LAIMX2	$fr_{LAI,2}$: Fraction of the maximum plant leaf area index corresponding to the 2 nd point on the optimal leaf area development curve	crop.dat

CHTMX	$h_{c,mx}$: Plant's potential maximum canopy height (m)	crop.dat
BLAI	LAI_{mx} : Potential maximum leaf area index for the plant	crop.dat
DLAI	$fr_{PHU,sen}$: Fraction of growing season at which senescence becomes the dominant growth process	crop.dat
SOL_ZMX	$z_{root,mx}$: Maximum rooting depth in soil (mm)	.sol
RDMX	$z_{root,mx}$: Maximum rooting depth for plant (mm)	crop.dat

18.2 植物的水分吸收

从土壤表层到根系区任何深度的潜在水分吸收，采用下式计算：

$$w_{up,z} = \frac{E_t}{1 - \exp(-\beta_w)} \left[1 - \exp\left(-\beta_w \cdot \frac{z}{z_{root}}\right) \right] \quad 18.2.1$$

式中： $w_{up,z}$ ，为模拟日从土壤表层到给定深度 z 的潜在水分吸收(mm H₂O)， E_t 为模拟日最大植物散发量(mm H₂O)， β_w 为水利用分配参数， z 为距离土壤表面的深度(mm)， z_{root} 为模拟日根系发展深度(mm)。从任何土壤层的潜在水分吸收，通过在土壤层顶层和底层深度求解方程18.2.1，并将其相减得到：

$$w_{up,ly} = w_{up,zl} - w_{up,zu} \quad 18.2.2$$

式中： $w_{up,ly}$ 为土壤层ly中的潜在水分吸收(mm H₂O)， $w_{up,zu}$ 为土层底部的潜在水分吸收(mm H₂O)， $w_{up,zl}$ 为土层顶部的潜在水分吸收(mm H₂O)。

因为根系密度在接近土壤表层处最大，然后随深度增加而降低，因此在上层土层中的水分吸收比下层中要多得多。水利用分配系数， β_w ，在SWAT中设为1.0。采用这一数值，50%的水分吸收会发生在根系区上层6%。图18-3图示根系区不同深度水分吸收。

第 18 章 方程:最优生长

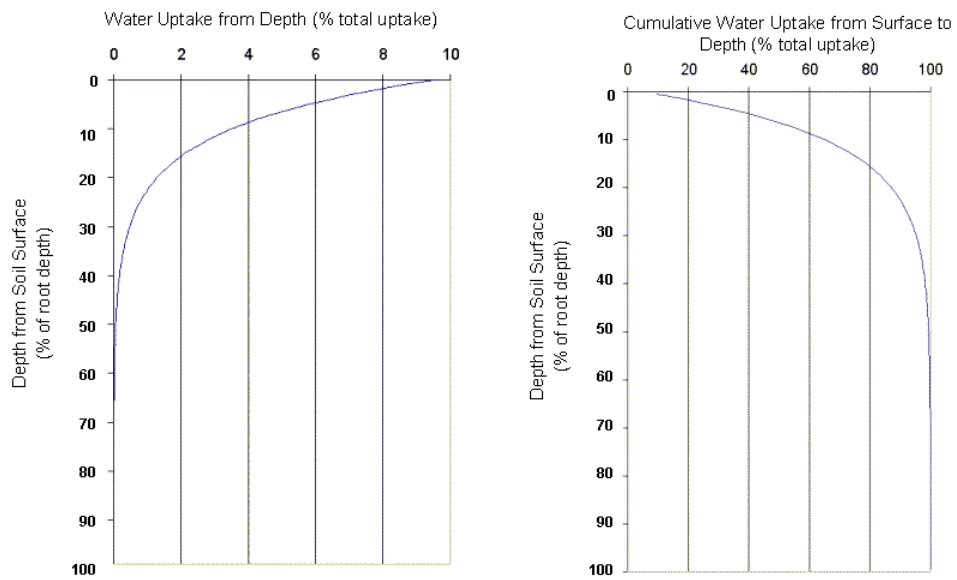


Figure 18-3: Depth distribution of water uptake

模拟日的水分吸收为植物散发所需水量， E_t ，和土壤可利用水量SW的函数。方程18.2.1和18.2.2 只根据散发的水量需求和方程18.2.1计算的水分深度分配来计算潜在水分吸收。SWAT修正了给定土层的最初潜在水分吸收，以反映土壤可利用水量。

如果土壤剖面的上层土壤中没有足够的水分以满足方程18.2.2计算的潜在水分吸收，用户可以允许底层土壤来弥补。计算修正的潜在水分吸收的方程为：

$$w'_{up,ly} = w_{up,ly} + w_{demand} \cdot epco \quad 18.2.3$$

式中： $w'_{up,ly}$ 为修正的土壤ly的潜在水分吸收(mm H₂O)， $w_{up,ly}$ 为方程18.2.2计算的土壤ly的潜在水分吸收(mm H₂O)， w_{demand} 为上覆土层没有满足的土壤水分需求(mm H₂O)， $epco$ 为植被吸收补偿系数。植被吸收补偿系数可以在0.01和1.00范围内变化。当 $epco$ 趋近于1.0时，模型允许更多的水分吸收需求通过下层土层来满足。当 $epco$ 趋近于0.0时，模型不允许较大地改变18.2.1所描述的深度分配。

随着土壤含水量的降低，土壤水与土壤颗粒的结合越来越紧密，植物提取水分越来越困难。为了反应植物从较干土壤中提取水分效率的降低，潜在水分吸收采用下式来修正：

$$w''_{up,ly} = w'_{up,ly} \cdot \exp \left[5 \cdot \left(\frac{SW_{ly}}{0.25 \cdot AWC_{ly}} - 1 \right) \right] \quad \text{when } SW_{ly} < 0.25 \cdot AWC_{ly} \quad 18.2.4$$

$$w''_{up,ly} = w'_{up,ly} \quad \text{when } SW_{ly} \geq 0.25 \cdot AWC_{ly} \quad 18.2.5$$

式中： $w_{up,ly}''$ 为根据初始土壤含水量修正的潜在水分吸收(mm H₂O)， $w_{up',ly}$ 为方程18.2.2计算的土壤ly的潜在水分吸收(mm H₂O)， SW_{ly} 为土层中的土壤含水量(mm H₂O)， AWC_{ly} 为土层ly中可利用水量(mm H₂O)。可利用水量采用下式计算：

$$AWC_{ly} = FC_{ly} - WP_{ly} \quad 18.2.6$$

式中： AWC_{ly} 为土层ly中可利用水量(mm H₂O)， FC_{ly} 为土层的田间持水量(mm H₂O)， WP_{ly} 为土层凋萎点含水量(mm H₂O)。

针对土壤水分条件修正潜在水分吸收后，土层的实际水分吸收量采用下式计算：

$$w_{actualup,ly} = \min \left[w_{up,ly}'', \left(SW_{ly} - WP_{ly} \right) \right] \quad 18.2.7$$

式中： $w_{actualup,ly}$ 为土层ly的实际水分吸收(mm H₂O)， SW_{ly} 为土层中的土壤含水量(mm H₂O)， WP_{ly} 为土层凋萎点含水量(mm H₂O)。模拟日总的水分吸收为：

$$w_{actualup} = \sum_{ly=1}^n w_{actualup,ly} \quad 18.2.8$$

式中： $w_{actualup}$ 为模拟日总的水分吸收(mm H₂O)， $w_{actualup,ly}$ 为土层ly的实际水分吸收(mm H₂O)，n 为土壤层数。方程18.2.8计算总的植物水分吸收也就是实际散发量。

$$E_{t,act} = w_{actualup} \quad 18.2.9$$

式中： $E_{t,act}$ 为模拟日实际散发量(mm H₂O)， $w_{actualup}$ 为模拟日总的水分吸收(mm H₂O)。

Table 18-2: SWAT input variables that pertain to plant water uptake.

Variable Name	Definition	Input File
EPCO	<i>epco</i> : Plant uptake compensation factor	.bsn, .hru

18.3 营养物吸收

SWAT 模拟氮和磷的植被吸收。

18.3.1 氮吸收

植物的氮吸收通过植物氮方程来控制。植物氮方程根据最优生长条件下的植物生长阶段来计算植物生物量中的氮分数。

$$fr_N = \left(fr_{N,1} - fr_{N,3} \right) \left[1 - \frac{fr_{PHU}}{fr_{PHU} + \exp \left(n_1 - n_2 \cdot fr_{PHU} \right)} \right] + fr_{N,3} \quad 18.3.1$$

式中： fr_N ，为模拟日植物生物量中的氮分数， $fr_{N,1}$ ，为出苗期植物生物量中的正常的氮分数， $fr_{N,3}$ ，为成熟期植物生物量中的正常的氮分数， fr_{PHU} ，为在生长季节中模拟日积累的潜在热量单元分数。 n_1 和 n_2 ，为形状系数。

形状系数通过根据已知的两个点 ($fr_{N,2}$, $fr_{PHU,50\%}$) 和 ($fr_{N,3}$, $fr_{PHU,100\%}$)，求解方程 18.3.1 来确定：

$$n_1 = \ln \left[\frac{fr_{PHU,50\%}}{\left(1 - \frac{fr_{N,2} - fr_{N,3}}{fr_{N,1} - fr_{N,3}} \right)} - fr_{PHU,50\%} \right] + n_2 \cdot fr_{PHU,50\%} \quad 18.3.2$$

$$n_2 = \frac{\left(\ln \left[\frac{fr_{PHU,50\%}}{\left(1 - \frac{fr_{N,2} - fr_{N,3}}{fr_{N,1} - fr_{N,3}} \right)} - fr_{PHU,50\%} \right] - \ln \left[\frac{fr_{PHU,100\%}}{\left(1 - \frac{fr_{N,3} - fr_{N,3}}{fr_{N,1} - fr_{N,3}} \right)} - fr_{PHU,100\%} \right] \right)}{fr_{PHU,100\%} - fr_{PHU,50\%}} \quad 18.3.3$$

式中： $n1$ ，为第一形状系数。 $n2$ ，为第二形状系数， $frN,1$ ，为出苗期植物生物量中的正常的氮分数， $frN,2$ ，为50%成熟期植物生物量中的正常的氮分数， $frN,3$ ，为成熟期植物生物量中的正常的氮分数， $frN,\sim 3$ ，为近成熟期植物生物量中的正常的氮分数， $frPHU,50\%$ ，为在植物半成熟时($frPHU,50\%=0.5$)积累的潜在热量单元分数， $frPHU,100\%$ ，为在植物半成熟时($frPHU,100\%=1.0$)积累的潜在热量单元分数。在方程18.3.3中采用近成熟期植物生物量中的正常的氮分数 ($frN,\sim 3$)，以确保分母项 $\left(1 - \frac{fr_{N,\sim 3} - fr_{N,3}}{fr_{N,1} - fr_{N,3}}\right)$ 不等于1。模型假设

$$fr_{N,\sim 3} - fr_{N,3} = 0.00001。$$

为了计算在模拟日，存储在植物生物量中的氮量，将氮分数与总同植物生物量相乘：

$$bio_{N,opt} = fr_N \cdot bio \quad 18.3.4$$

式中： $bio_{N,opt}$ ，为当前生长阶段植物生物量中存储的最优氮量(kg N/ha)， fr_N ，为模拟日植物生物量中的氮分数， bio ，为模拟日的总植物生物量(kg/ha)。

植物在模拟日的氮需求，为植物生长阶段期望的氮含量与实际氮含量之差：

$$N_{up} = bio_{N,opt} - bio_N \quad 18.3.5$$

式中： N_{up} ，为潜在氮吸收量(kg N/ha)， $bio_{N,opt}$ 为当前生长阶段，植物生物量中的最优氮存储量(kg N/ha)， bio_N 为植物生物量中的实际氮存储量(kg N/ha)。

氮吸收的深度分布采用下式计算：

$$N_{up,z} = \frac{N_{up}}{1 - \exp(-\beta_n)} \left[1 - \exp\left(-\beta_n \cdot \frac{z}{z_{root}}\right) \right] \quad 18.3.6$$

式中： $N_{up,z}$ ，为深度 z 处的潜在氮吸收量(kg N/ha)， N_{up} ，为潜在氮吸收量(kg N/ha)， β_n ，为氮吸收分布参数， z 为土层距地表距离(mm)， z_{root} ，为植物根系发展深度(mm)。

方程 18.3.6 在形式上与水分吸收深度分布方程 18.2.1 相似。某一层土壤的潜在氮吸收量通过求解 18.3.6 求得，首先计算土层上边界和土层下边界深度的潜在氮吸收量，两者之差即为该土层的潜在氮吸收量。

$$N_{up,ly} = N_{up,zl} - N_{up,zu} \quad 18.3.7$$

式中： $N_{up,ly}$ ，为土层 ly 的潜在氮吸收量(kg N/ha)， $N_{up,zl}$ 为地表至土层下边界的潜在氮吸收量(kg N/ha)， $N_{up,zu}$ 为地表至土层上边界的潜在氮吸收量(kg N/ha)。

根系密度在近地表处最大，因此植物吸收在上层也较下层为多。氮吸收的深度分布通过 β_n ，氮吸收的深度分布参数，控制。图 18-4 说明对于 4 中不同的参数值，氮吸收作为深度的函数的变化。

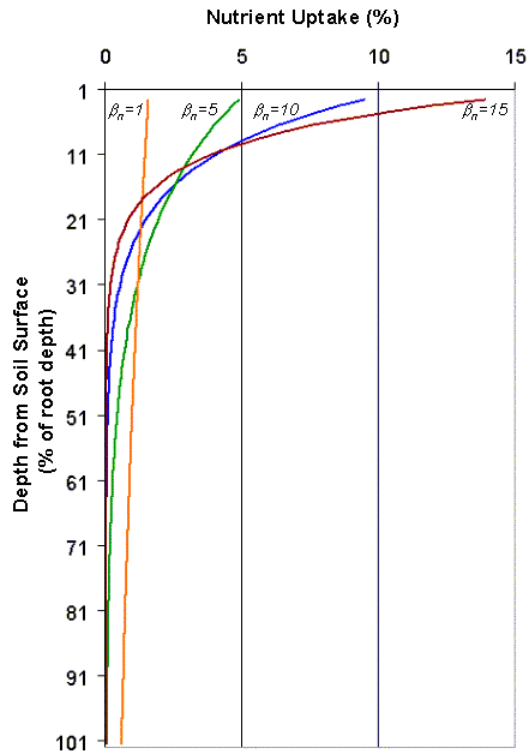


Figure 18-4: Depth distribution of nitrogen uptake

植物从土壤中吸收的氮来自硝酸盐氮库。氮吸收分布参数的重要性在于，他可以控制硝酸盐氮库中的最大氮去除量。因为表层 10mm 土壤与地表径流相互作用明显，因此但吸收分布参数将决定地表径流可传输的硝酸盐量。模型允许根系区深层土壤，可以补偿上层土壤中氮的亏缺，因此对于不同的 β_n 值，缺氮压力不会有显著变化。

从某一土层中，实际去除的氮量为：

$$N_{actualup,ly} = \min \left[N_{up,ly} + N_{demand}, NO3_{ly_} \right] \quad 18.3.8$$

式中： $N_{actualup,ly}$ 为ly 土层的实际氮吸收量(kg N/ha)， $N_{up,ly}$ 为ly 土层的潜在氮吸收量(kg N/ha)， N_{demand} 为上层土壤没有满足的氮吸收需求量(kg N/ha)， $NO3ly$ 为ly 土层的硝酸盐量(kg NO₃-N/ha)。

18.3.1.1 固氮

如果根系区的硝酸盐含量，不足以满足豆类，SWAT 允许植物通过固氮作用获取额外的氮。固氮根据土壤水分，土壤硝酸盐氮量和植物生长阶段计算：

$$N_{fix} = N_{demand} \cdot f_{gr} \cdot \min(f_{sw}, f_{no3}, 1) \quad 18.3.9$$

式中： N_{fix} 为固氮作用所增加的植物生物量(kg N/ha)， N_{demand} 为上层土壤没有满足的氮吸收需求量(kg N/ha)， f_{gr} 为生长阶段因子 (0.0-1.0)， f_{sw} 为土壤水分因子 (0.0-1.0)， f_{no3} 为土壤硝酸盐因子 (0.0-1.0)，最大可能固氮量由 N_{demand} 决定。

$$f_{gr} = 0 \quad \text{when } fr_{PHU} \leq 0.15 \quad 18.3.10$$

$$f_{gr} = 6.67 \cdot fr_{PHU} - 1 \quad \text{when } 0.15 < fr_{PHU} \leq 0.30 \quad 18.3.11$$

$$f_{gr} = 1 \quad \text{when } 0.30 < fr_{PHU} \leq 0.55 \quad 18.3.12$$

$$f_{gr} = 3.75 - 5 \cdot fr_{PHU} \quad \text{when } 0.55 < fr_{PHU} \leq 0.75 \quad 18.3.13$$

$$f_{gr} = 0 \quad \text{when } fr_{PHU} > 0.75 \quad 18.3.14$$

式中： f_{gr} 为生长阶段因子 (0.0-1.0)， fr_{PHU} 为植物生长季节，模拟日累积的潜在热量单元分数。植物生长阶段因子反应植物根系固氮菌的增加和下降。

由于土壤硝酸盐氮的上移，土壤硝酸盐氮抑制固氮作用。土壤硝酸盐氮因子采用下式计算：

$$f_{no3} = 1 \quad \text{when } NO3 \leq 100 \quad 18.3.15$$

$$f_{no3} = 1.5 - 0.0005 \cdot NO3 \quad \text{when } 100 < NO3 \leq 300 \quad 18.3.16$$

$$f_{no3} = 0 \quad \text{when } NO3 > 300 \quad 18.3.17$$

式中： f_{no3} 为土壤硝酸盐因子（0.0-1.0）， $NO3$ 为土壤剖面中的硝酸盐含量(kg NO_3 -N/ha)。

由于土壤干化，土壤水分因子抑制固氮作用。土壤水分因子的计算如下：

$$f_{sw} = \frac{SW}{.85 \cdot FC} \quad 18.3.18$$

式中： f_{sw} 为土壤水分因子（0.0-1.0）， SW 为土壤剖面中的土壤水含量(mm H_2O)， FC 为田间持水量时土壤含水量(mm H_2O)。

18.3.2 磷吸收

植物的氮吸收通过植物磷方程来控制。植物磷方程根据最优生长条件下的植物生长阶段来计算植物生物量中的磷分数。

$$fr_P = \left(fr_{P,1} - fr_{P,3} \right) \left[1 - \frac{fr_{PHU}}{fr_{PHU} + \exp(p_1 - p_2 \cdot fr_{PHU})} \right] + fr_{P,3} \quad 18.3.19$$

式中： fr_P ，为模拟日植物生物量中的磷分数， $fr_{P,1}$ ，为出苗期植物生物量中的正常的磷分数， $fr_{P,3}$ ，为成熟期植物生物量中的正常的磷分数， fr_{PHU} ，为在生长季节中模拟日积累的潜在热量单元分数。 p_1 和 p_2 ，为形状系数。

形状系数通过根据已知的两个点 ($fr_{p,2}$, $fr_{PHU,50\%}$) 和 ($fr_{p,3}$, $fr_{PHU,100\%}$), 求解方程 18.3.19 来确定:

$$p_1 = \ln \left[\frac{fr_{PHU,50\%}}{\left(1 - \frac{fr_{p,2} - fr_{p,3}}{fr_{p,1} - fr_{p,3}}\right)} - fr_{PHU,50\%} \right] + p_2 \cdot fr_{PHU,50\%} \quad 18.3.20$$

$$p_2 = \frac{\left(\ln \left[\frac{fr_{PHU,50\%}}{\left(1 - \frac{fr_{p,2} - fr_{p,3}}{fr_{p,1} - fr_{p,3}}\right)} - fr_{PHU,50\%} \right] - \ln \left[\frac{fr_{PHU,100\%}}{\left(1 - \frac{fr_{p,\sim 3} - fr_{p,3}}{fr_{p,1} - fr_{p,3}}\right)} - fr_{PHU,100\%} \right] \right)}{fr_{PHU,100\%} - fr_{PHU,50\%}} \quad 18.3.21$$

式中： p_1 ，为第一形状系数。 p_2 ，为第二形状系数， $fr_{p,1}$ ，为出苗期植物生物量中的正常的磷分数， $fr_{p,2}$ ，为50%成熟期植物生物量中的正常的磷分数， $fr_{p,3}$ ，为成熟期植物生物量中的正常的磷分数， $fr_{p,\sim 3}$ ，为近成熟期植物生物量中的正常的磷分数， $fr_{PHU,50\%}$ ，为在植物半成熟时 ($fr_{PHU,50\%}=0.5$)积累的潜在热量单元分数， $fr_{PHU,100\%}$ ，为在植物成熟时 ($fr_{PHU,100\%}=1.0$)积累的潜在热量单元分数。在方程18.3.21中采用近成熟期

植物生物量中的正常的磷分数 ($fr_{p,\sim 3}$)，以确保分母项 $\left(1 - \frac{fr_{p,\sim 3} - fr_{p,3}}{fr_{p,1} - fr_{p,3}}\right)$ 不等于1。模型假设 $\frac{fr_{p,\sim 3} - fr_{p,3}}{fr_{p,1} - fr_{p,3}} \approx 0.00001$ 。

为了计算在模拟日，存储在植物生物量中的磷量，将磷分数与总同植物生物量相乘：

$$bio_{P,opt} = fr_P \cdot bio \quad 18.3.22$$

式中： $bioP_{opt}$ ，为当前生长阶段植物生物量中存储的最优磷量(kg N/ha)， frP ，为模拟日植物生物量中的磷分数， bio ，为模拟日的总植物生物量 (kg/ha)。

植物在模拟日的磷需求，为植物生长阶段期望的磷含量与实际磷含量之差：

$$P_{up} = 1.5 \cdot (bioP_{opt} - bioP) \quad 18.3.23$$

式中： P_{up} ，为潜在磷吸收量(kg N/ha)， $bioP_{opt}$ 为当前生长阶段，植物生物量中的最优磷存储量(kg N/ha)， $bioP$ 为植物生物量中的实际磷存储量(kg N/ha)。方程18.3.23中，将植物生物量中的最优磷存储量与实际磷存储量之差乘以1.5，是对奢侈磷吸收的考虑。

磷吸收的深度分布采用下式计算：

$$P_{up,z} = \frac{P_{up}}{1 - \exp(-\beta_p \cdot \frac{z}{z_{root}})} \quad 18.3.24$$

式中： $P_{up,z}$ ，为深度z处的潜在磷吸收量(kg P/ha)， P_{up} ，为潜在磷吸收量(kg P/ha)， β_p ，为磷吸收分布参数， z 为土层距地表距离 (mm)， z_{root} ，为植物根系发展深度 (mm)。某一层土壤的潜在磷吸收量通过求解18.3.24求得，首先计算土层上边界和土层下边界深度的潜在磷吸收量，两者之差即为该土层的潜在磷吸收量。

$$P_{up,ly} = P_{up,zl} - P_{up,zu} \quad 18.3.25$$

式中： $P_{up,ly}$ ，为土层ly的潜在磷吸收量(kg P/ha)， $P_{up,zl}$ 为地表至土层下边界的潜在磷吸收量(kg P/ha)， $P_{up,zu}$ 为地表至土层上边界的潜在磷吸收量(kg P/ha)。

根系密度在近地表处最大，因此植物吸收在上层也较下层为多。磷吸收的深度分布通过 β_p ，氮吸收的深度分布参数，控制。图 18-4 同时也对磷吸收作为深度的函数的变化的说明有效。

植物从土壤中吸收的磷来自溶液磷库。磷吸收分布参数的重要性在于，他可以控制溶液磷库中的最大氮去除量。因为表层 10mm 土壤与地表径流相互作用明显，因此磷吸收分布参数将决定地表径流可传输的溶液磷量。模型允许根系区深层土壤，可以补偿上层土壤中磷的亏缺，因此对于不同的 β_p 值，缺磷压力不会有显著变化。

从某一土层中，实际去除的磷量为：

$$P_{actualup,ly} = \min \left[P_{up,ly} + P_{demand}, P_{solution,ly} \right] \quad 18.3.26$$

式中： $P_{actualup,ly}$ 为ly土层的实际磷吸收量(kg P/ha)， $P_{up,ly}$ 为ly土层的潜在磷吸收量(kg P/ha)， P_{demand} 为上层土壤没有满足的磷吸收需求量(kg P/ha)， $P_{solution,ly}$ 为ly土层的溶液磷量(kg P/ha)。

Table 18-3: SWAT input variables that pertain to plant nutrient uptake.

Variable Name	Definition	Input File
BN(1)	$fr_{N,1}$: Normal fraction of N in the plant biomass at emergence	crop.dat
BN(2)	$fr_{N,2}$: Normal fraction of N in the plant biomass at 50% maturity	crop.dat

BN(3)	$fr_{N,3}$: Normal fraction of N in the plant biomass at maturity	crop.dat
UBN	β_n : Nitrogen uptake distribution parameter	.bsn
BP(1)	$fr_{P,1}$: Normal fraction of P in the plant biomass at emergence	crop.dat
BP(2)	$fr_{P,2}$: Normal fraction of P in the plant biomass at 50% maturity	crop.dat
BP(3)	$fr_{P,3}$: Normal fraction of P in the plant biomass at maturity	crop.dat
UBP	β_p : Phosphorus uptake distribution parameter	.bsn

18.4 作物产量

当执行收获或者收获/收割操作时，植物生物量的一部分作为作物产量从 HRU 中去除。营养物和植物物质被假设从系统（流域）中去除，而不被添加到土壤中剩余植物残余物和有机营养物库。相反地，收割操作将所有的生物量转化为残余物。

收获指数是指，地上植物干生物量中可以作为经济产量的分数。对于大多数农作物，收获指数在 0.0 和 1.0 之间。但是，对于将根系作为主要收获对象的植物，如土豆等，收获指数会大于 1.0。

大多数商业作物的经济产量是指，其可再生的部分。多年的作物育种，已经通过栽培变种和杂交，将植物收获指数最大化。通常情况下，收获指数相对于环境条件而言较稳定。

SWAT 通过下面的关系计算生长季节每天的收获指数：

$$HI = HI_{opt} \cdot \frac{100 \cdot fr_{PHU}}{100 \cdot fr_{PHU} + \exp[1.1 - 10 \cdot fr_{PHU}]} \quad 18.4.1$$

式中： HI 为模拟日潜在收获指数， HI_{opt} 为理想生长条件下，植物成熟时的收获指数， fr_{PHU} 为在植物生长期，模拟日累积的潜在热量单元分数。图18-5 图示了在生长季节最优收获指数的变化。

作物产量采用下式计算：

$$yld = bio_{ag} \cdot HI \quad \text{when } HI \leq 1.00 \quad 18.4.2$$

$$yld = bio \cdot \left(1 - \frac{1}{(+HI)} \right) \quad \text{when } HI > 1.00 \quad 18.4.3$$

式中： yld 作物产量 (kg/ha)， bio_{ag} 为收获日期的地上生物量 (kg/ha)， HI 为模拟日潜在收获指数， bio 为收获日期的总生物量 (kg/ha)，其中地上生物量的计算为：

$$bio_{ag} = (1 - fr_{root}) \cdot bio \quad 18.4.4$$

式中： fr_{root} 为收获日期根系部分占总生物量的分数， bio 为收获日期的总生物量 (kg/ha)。

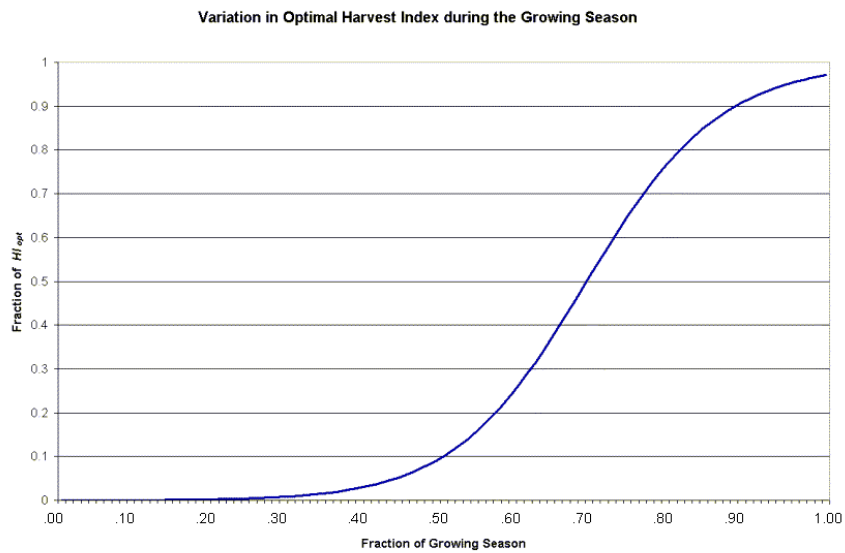


Figure 18-5: Variation in optimal harvest index (HI_i/HI_{opt}) with fraction of growing season (fr_{PHU})

通过作物产量而去除的营养物量：

$$yld_N = fr_{N,yld} \cdot yld \quad 18.4.5$$

$$yld_P = fr_{P,yld} \cdot yld \quad 18.4.6$$

式中： $yldN$ 为作物产量中去除的氮量(kg N/ha)， $yldP$ 为作物产量中去除的磷量(kg P/ha)， frN,yld 为作物产量中氮所占分数， frP,yld 为作物产量中磷所占分数， yld 为作物产量(kg/ha)。

如果在收获操作时采用的收获指数大于 1，模型假设除种子外，植物生物量的很大一部分被去除。因此，将不采用植物生长数据库中的氮、磷产量分数，模型将采用总生物量中的氮、磷分数来确定去除的氮和磷的量：

$$yld_N = fr_N \cdot yld \quad 18.4.7$$

$$yld_P = fr_P \cdot yld \quad 18.4.8$$

式中： $yldN$ 为作物产量中去除的氮量(kg N/ha)， $yldP$ 为作物产量中去除的磷量(kg P/ha)，

frN 为植物生物量中的氮分数（由方程18.3.1计算）， frP 为为植物生物量中的氮磷分数（由方程18.3.19计算）， yld 为作物产量(kg/ha)。

Table 18-4: SWAT input variables that pertain to crop yield.

Variable Name	Definition	Input File
HVSTI	HI_{opt} : Potential harvest index for the plant at maturity given ideal growing conditions	crop.dat
CNYLD	$fr_{N,yld}$: Fraction of nitrogen in the yield	crop.dat
CPYLD	$fr_{P,yld}$: Fraction of phosphorus in the yield	crop.dat

18.5 NOMENCLATURE

- AWC_{ly} Available water capacity for layer ly (mm H₂O)
- CO_2 Concentration of carbon dioxide in the atmosphere (ppmv)
- CO_{2amb} Ambient atmospheric CO₂ concentration (330 ppmv)
- CO_{2hi} Elevated atmospheric CO₂ concentration (ppmv)
- E_t Maximum transpiration rate (mm d⁻¹)

- $E_{t,act}$ Actual amount of transpiration on a given day (mm H₂O)
 FC Water content of soil profile at field capacity (mm H₂O)
 FC_{ly} Water content of layer ly at field capacity (mm H₂O)
 H_{day} Solar radiation reaching ground on current day of simulation (MJ m⁻² d⁻¹)
 H_{phosyn} Intercepted photosynthetically active radiation on a given day (MJ m⁻²)
 HI Potential harvest index for a given day
 HI_{opt} Potential harvest index for the plant at maturity given ideal growing conditions
 HU Number of heat units accumulated on a given day (heat units)
 LAI Leaf area index of the canopy
 LAI_{mx} Maximum leaf area index for the plant
 $N_{actualup,ly}$ Actual nitrogen uptake for layer ly (kg N/ha)
 N_{demand} Nitrogen uptake demand not met by overlying soil layers (kg N/ha)
 N_{fix} Amount of nitrogen added to the plant biomass by fixation (kg N/ha)
 N_{up} Potential nitrogen uptake (kg N/ha)
 $N_{up,ly}$ Potential nitrogen uptake for layer ly (kg N/ha)
 $N_{up,z}$ Potential nitrogen uptake from the soil surface to depth z (kg N/ha)
 $N_{up,zl}$ Potential nitrogen uptake from the soil surface to the lower boundary of the soil layer (kg N/ha)
 $N_{up,zu}$ Potential nitrogen uptake from the soil surface to the upper boundary of the soil layer (kg N/ha)
 $NO3$ Nitrate content of the soil profile (kg NO₃-N/ha)
 $NO3_{ly}$ Nitrate content of soil layer ly (kg NO₃-N/ha)
 $P_{actualup,ly}$ Actual phosphorus uptake for layer ly (kg P/ha)
 P_{demand} Phosphorus uptake demand not met by overlying soil layers (kg P/ha)
 P_{up} Potential phosphorus uptake (kg P/ha)
 $P_{up,ly}$ Potential phosphorus uptake for layer ly (kg P/ha)
 $P_{up,z}$ Potential phosphorus uptake from the soil surface to depth z (kg P/ha)
 $P_{up,zl}$ Potential phosphorus uptake from the soil surface to the lower boundary of the soil layer (kg P/ha)
 $P_{up,zu}$ Potential phosphorus uptake from the soil surface to the upper boundary of the soil layer (kg P/ha)
 PHU Potential heat units or total heat units required for plant maturity (heat units)
 $P_{solution,ly}$ Phosphorus content of soil solution in layer ly (kg P/ha)
 RUE Radiation-use efficiency of the plant (kg/ha·(MJ/m²)⁻¹ or 10⁻¹ g/MJ)
 RUE_{amb} Radiation-use efficiency of the plant at ambient atmospheric CO₂ concentration (kg/ha·(MJ/m²)⁻¹ or 10⁻¹ g/MJ)
 RUE_{hi} Radiation-use efficiency of the plant at the elevated atmospheric CO₂ concentration, CO_{2hi} , (kg/ha·(MJ/m²)⁻¹ or 10⁻¹ g/MJ)
 $RUE_{vpd=1}$ Radiation-use efficiency for the plant at a vapor pressure deficit of 1 kPa (kg/ha·(MJ/m²)⁻¹ or 10⁻¹ g/MJ)
 SW Amount of water in soil profile (mm H₂O)
 SW_{ly} Soil water content of layer ly (mm H₂O)
 WP_{ly} Water content of layer ly at wilting point (mm H₂O).

bio Total plant biomass on a given day (kg/ha)

第 18 章 方程:最优生长

- bio_{ag} Aboveground biomass on the day of harvest (kg ha^{-1})
- bio_N Actual mass of nitrogen stored in plant material (kg N/ha)
- $bio_{N,opt}$ Optimal mass of nitrogen stored in plant material for the growth stage (kg N/ha)
- bio_P Actual mass of phosphorus stored in plant material (kg P/ha)
- $bio_{P,opt}$ Optimal mass of phosphorus stored in plant material for the current growth stage (kg P/ha)
- $epco$ Plant uptake compensation factor
- f_{gr} Growth stage factor in nitrogen fixation equation
- f_{no3} Soil nitrate factor in nitrogen fixation equation
- f_{sw} Soil water factor in nitrogen fixation equation
- $fr_{LAI,1}$ Fraction of the maximum plant leaf area index corresponding to the 1st point on the optimal leaf area development curve
- $fr_{LAI,2}$ Fraction of the maximum plant leaf area index corresponding to the 2nd point on the optimal leaf area development curve
- $fr_{LAI_{mx}}$ Fraction of the plant's maximum leaf area index corresponding to a given fraction of potential heat units for the plant
- fr_N Optimal fraction of nitrogen in the plant biomass for current growth stage
- $fr_{N,1}$ Normal fraction of nitrogen in the plant biomass at emergence
- $fr_{N,2}$ Normal fraction of nitrogen in the plant biomass at 50% maturity
- $fr_{N,3}$ Normal fraction of nitrogen in the plant biomass at maturity
- $fr_{N,\sim 3}$ Normal fraction of nitrogen in the plant biomass near maturity
- $fr_{N,yld}$ Fraction of nitrogen in the yield
- fr_P Fraction of phosphorus in the plant biomass
- $fr_{P,1}$ Normal fraction of phosphorus in the plant biomass at emergence
- $fr_{P,2}$ Normal fraction of phosphorus in the plant biomass at 50% maturity
- $fr_{P,3}$ Normal fraction of phosphorus in the plant biomass at maturity
- $fr_{P,\sim 3}$ Normal fraction of phosphorus in the plant biomass near maturity
- $fr_{P,yld}$ Fraction of phosphorus in the yield
- fr_{PHU} Fraction of potential heat units accumulated for the plant on a given day in the growing season
- $fr_{PHU,1}$ Fraction of the growing season corresponding to the 1st point on the optimal leaf area development curve
- $fr_{PHU,2}$ Fraction of the growing season corresponding to the 2nd point on the optimal leaf area development curve
- $fr_{PHU,50\%}$ Fraction of potential heat units accumulated for the plant at 50% maturity ($fr_{PHU,50\%}=0.5$)
- $fr_{PHU,100\%}$ Fraction of potential heat units accumulated for the plant at maturity ($fr_{PHU,100\%}=1.0$)
- $fr_{PHU,sen}$ Fraction of growing season at which senescence becomes the dominant growth process
- fr_{root} Fraction of total biomass in the roots on a given day in the growing season
- h_c Canopy height (cm)
- $h_{c,mx}$ Plant's maximum canopy height (m)
- k_ℓ Light extinction coefficient
- n_1 First shape coefficient in plant nitrogen equation

- n_2 Second shape coefficient in plant nitrogen equation
 p_1 First shape coefficient in plant phosphorus equation
 p_2 Second shape coefficient in plant phosphorus equation
 r_1 First shape coefficient for radiation-use efficiency curve
 r_2 Second shape coefficient for radiation-use efficiency curve
 vpd Vapor pressure deficit (kPa)
 vpd_{thr} Threshold vapor pressure deficit above which a plant will exhibit reduced radiation-use efficiency (kPa)
 $w_{actualup}$ Total plant water uptake for the day (mm H₂O)
 $w_{actualup,ly}$ Actual water uptake for layer ly (mm H₂O)
 w_{demand} Water uptake demand not met by overlying soil layers (mm H₂O)
 $w_{up,ly}$ Potential water uptake for layer ly (mm H₂O)
 $w'_{up,ly}$ Adjusted potential water uptake for layer ly (mm H₂O)
 $w''_{up,ly}$ Potential water uptake when the soil water content is less than 25% of plant available water (mm H₂O)
 $w_{up,z}$ Potential water uptake from the soil surface to a specified depth, z , on a given day (mm H₂O)
 $w_{up,zl}$ is the potential water uptake for the profile to the lower boundary of the soil layer (mm H₂O)
 $w_{up,zu}$ is the potential water uptake for the profile to the upper boundary of the soil layer (mm H₂O)
 yld Crop yield (kg/ha)
 yld_N Amount of nitrogen removed in the yield (kg N/ha)
 yld_P Amount of phosphorus removed in the yield (kg P/ha)
 z Depth below soil surface (mm)
 z_{root} Depth of root development in the soil (mm)
 $z_{root,mx}$ Maximum depth for root development in the soil (mm)
- β_n Nitrogen uptake distribution parameter
 β_p Phosphorus uptake distribution parameter
 β_w Water-use distribution parameter
 ΔLAI_i Leaf area added on day i
 Δbio Potential increase in total plant biomass on a given day (kg/ha)
 $\Delta r_{ue_{dcl}}$ Rate of decline in radiation-use efficiency per unit increase in vapor pressure deficit (kg/ha·(MJ/m²)⁻¹·kPa⁻¹ or (10⁻¹ g/MJ)·kPa⁻¹)
 ℓ_1 First shape coefficient for optimal leaf area development curve
 ℓ_2 Second shape coefficient for optimal leaf area development curve

18.6 REFERENCES

- Jones, C.A. 1985. C-4 grasses and cereals. John Wiley & Sons, Inc., New York.
419 pp.

- McCree, K.J. 1972. The action spectrum, absorption and quantum yield of photosynthesis in crop plants. *Agric. Met.* 9:191-216.
- Monsi, M. and T. Saeki. 1953. Uber den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und sein Bedeutung fur die Stoffproduktion. *Japan J. Bot.* 14:22-52.
- Monteith, J.L. 1972. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *J. Appl. Ecol.* 9:747-766.
- Monteith, J.L. 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britian. *Phil. Trans. Res. Soc. London Ser. B* 281:277-329.
- Ross, J. 1975. Radiative transfer in plant communities. p. 13-55 *In* J.L. Monteith (ed.) *Vegetation and the atmosphere*, Vol. 1. Academic Press, London.
- Stanhill, G. and M. Fuchs. 1977. The relative flux density of photosynthetically active radiation. *J. Appl. Ecol.* 14:317-322.
- Stockle, C.O. and J.R. Kiniry. 1990. Variability in crop radiation-use efficiency associated with vapor-pressure deficit. *Field Crops Res.* 25:171-181.
- Stockle, C.O., J.R. Williams, N.J. Rosenberg, and C.A. Jones. 1992. A method for estimating the direct and climatic effects of rising atmospheric carbon dioxide on growth and yield of crops: Part 1—Modification of the EPIC model for climate change analysis. *Agricultural Systems* 38:225-238.
- Szeicz, G. 1974. Solar radiation for plant growth. *J. Appl. Ecol.* 11:617-636.
- Watson, D.J. 1947. Comparative physiological studies on the growth of field crops. 1. Variation in net assimilation rate and leaf area index between species and varieties and within and between years. *Ann. Bot. N.S.* 11:41-76.
- Williams, J. R., C.A. Jones, and P.T. Dyke. 1984. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. *Trans. ASAE* 27:129-144.

第 19 章 方程:实际生长

实际生长与潜在生长不同，因为极端温度，水分缺乏和营养物缺乏等因素的影响。本章将回顾生长限制因素，以及用户可以通过超控（overrides）来忽略这些生长限制。

19.1 生长限制

植物生长会受到，极端温度，水分不充足，以及营养物（氮、磷）缺乏的影响。这四种参数的影响，将以日为时间单位计算，计算方程将在下面部分详细介绍。

19.1.1 水压力

水分缺乏通过比较实际和潜在植物蒸散发来模拟：

$$wstrs = 1 - \frac{E_{t,act}}{E_t} = 1 - \frac{w_{actualup}}{E_t} \quad 19.1.1$$

式中： $wstrs$ 为模拟日的水分缺乏， E_t 为最大植物蒸散发(mm H₂O)， $E_{t,act}$ 为实际植物蒸散发(mm H₂O)， $w_{actualup}$ 为植物吸收水分总量(mm H₂O)，最大蒸散发的计算在第七章已经详细介绍，实际植物水分吸收/蒸散发在第18章中有介绍。

19.1.2 温度压力

温度压力是日平均气温和最优植物生长温度的函数。在接近最优温度时，植物生长将不会有温度压力。但是当温度离最优温度较远时，植物生长开始产生温度压力，抑制生长。用来确定温度压力的方程为：

$$tstrs = 1 \quad \text{when } \bar{T}_{av} \leq T_{base} \quad 19.1.2$$

第 19 章 方程：实际生长

$$tstrs = 1 - \exp\left[\frac{-0.1054 \cdot \left(\frac{T_{opt} - \bar{T}_{av}}{T_{opt} - T_{base}}\right)^2}{\left(\frac{T_{opt} - \bar{T}_{av}}{T_{opt} - T_{base}}\right)^2}\right] \quad \text{when } T_{base} < \bar{T}_{av} \leq T_{opt} \quad 19.1.3$$

$$tstrs = 1 - \exp\left[\frac{-0.1054 \cdot \left(\frac{T_{opt} - \bar{T}_{av}}{T_{opt} - T_{base}}\right)^2}{\left(\frac{T_{opt} - \bar{T}_{av}}{T_{opt} - T_{base}}\right)^2}\right] \quad \text{when } T_{opt} < \bar{T}_{av} \leq 2 \cdot T_{opt} - T_{base} \quad 19.1.4$$

$$tstrs = 1 \quad \text{when } \bar{T}_{av} > 2 \cdot T_{opt} - T_{base} \quad 19.1.5$$

式中： $tstrs$ 为模拟日温度压力，表示为最优植物生长的分数， \bar{T}_{av} 为日平均气温 ($^{\circ}\text{C}$)， T_{base} 为植物生长基温 ($^{\circ}\text{C}$)， T_{opt} 植物生长最优温度 ($^{\circ}\text{C}$)。

图19-1图示了日平均气温对植物生长的影响，其中基温假设为 0°C ，最优温度假设为 15°C 。

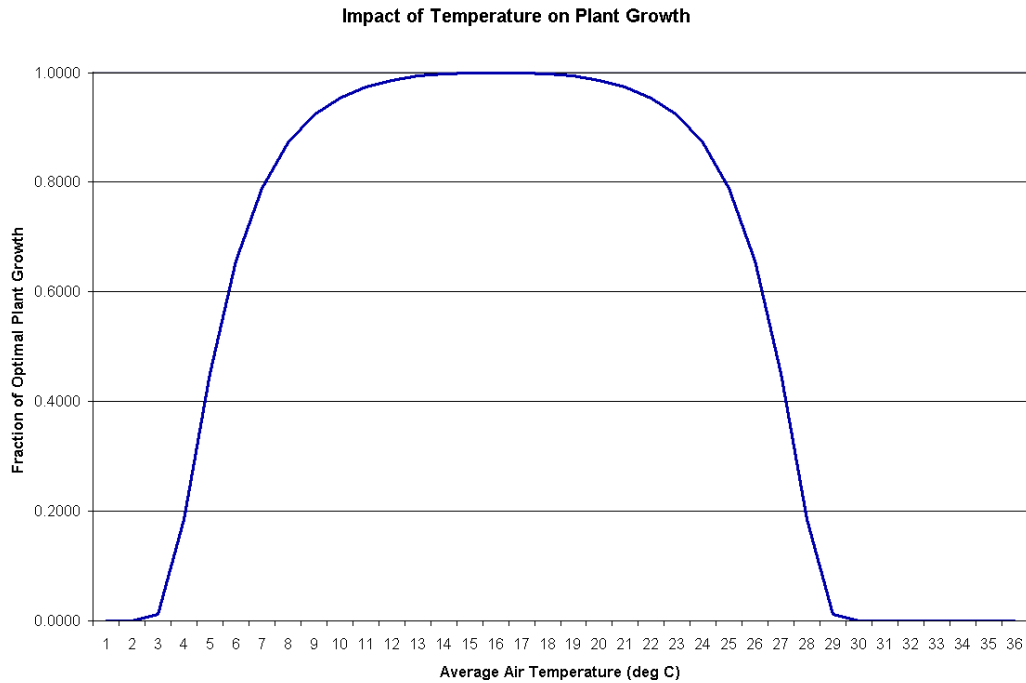


Figure 19-1: Impact of mean air temperature on plant growth for a plant with $T_{base}= 0^{\circ}\text{C}$ and $T_{opt}=15^{\circ}\text{C}$

19.1.3 氮压力

氮压力只对非豆类植物计算。SWAT 不模拟豆类植物的氮压力。

氮压力的计算通过比较实际和最优植物氮水平求得。氮压力在 0.0（最优氮含量时），和 1.0（当植物氮含量为 50%或少于最优值时）之间非线性变化。氮压力的计算公式为：

$$nstrs = 1 - \frac{\varphi_n}{\varphi_n + \exp[.535 - 0.02597 \cdot \varphi_n]} \quad 19.1.6$$

式中： $nstrs$ 为模拟日的氮压力， φ_n 为氮压力的变换因子。变换因子采用下式计算：

$$\varphi_n = 200 \cdot \left(\frac{bio_N}{bio_{N,opt}} - 0.5 \right) \quad 19.1.7$$

式中： $bio_{N,opt}$ 为当前生长阶段，植物物质中存储的最优氮量(kg N/ha)， bio_N 为实际植物中的氮存储量(kg N/ha)。

19.1.4 磷压力

与氮相似，磷压力的计算通过比较实际和最优植物氮水平求得。磷压力在 0.0（最优磷含量时），和 1.0（当植物磷含量为 50%或少于最优值时）之间非线性变化。磷压力的计算公式为：

$$pstrs = 1 - \frac{\varphi_p}{\varphi_p + \exp[.535 - 0.02597 \cdot \varphi_p]} \quad 19.1.8$$

第 19 章 方程：实际生长

式中： p_{strs} 为模拟日的磷压力， Φ_p 为磷压力的变换因子。变换因子采用下式计算：

$$\phi_p = 200 \cdot \left(\frac{bio_P}{bio_{P,opt}} - 0.5 \right) \quad 19.1.9$$

式中： $bio_{P,opt}$ 为当前生长阶段，植物物质中存储的最优磷量(kg P/ha)， bio_P 为实际植物中的氮存储量(kg P/ha)。

Table 19-1: SWAT input variables that pertain to stress on plant growth.

Variable Name	Definition	Input File
T_BASE	T_{base} : Base temperature for plant growth (°C)	crop.dat
T_OPT	T_{opt} : Optimal temperature for plant growth (°C)	crop.dat

19.2 实际生长

植物生长因子确定模拟日，植物生长占潜在生长的分数：

$$\gamma_{reg} = 1 - \max(wstrs, tstrs, nstrs, pstrs) \quad 19.2.3$$

式中： γ_{reg} 为植物生长因子（0.0-1.0）， $wstrs$ 为模拟日的水压力， $tstrs$ 为模拟日的温度压力，表示为最优生长的分数， $nstrs$ 为模拟日的氮压力， $pstrs$ 为模拟日的磷压力。

如果四个植物生长压力因子大于 0.0，方程 18.1.2 给出潜在生物量预测需要调整：

$$\Delta bio_{act} = \Delta bio \cdot \gamma_{reg} \quad 19.2.1$$

式中： Δbio_{act} 为总植物生物量的实际增长（kg/ha）， Δbio 为总植物生物量的潜在增长（kg/ha）， γ_{reg} 为植物生长因子（0.0-1.0）。

模拟日增加的潜在叶面积，也需根据植物生长压力调整：

$$\Delta LAI_{act,i} = \Delta LAI_i \cdot \sqrt{\gamma_{reg}} \quad 19.2.2$$

式中： $\Delta LAI_{act,i}$ 为模拟日世界叶面积增加值， ΔLAI_i 为模拟日潜在叶面积增加值，由方程 18.1.14 计算得到， γ_{reg} 为植物生长因子（0.0-1.0）。

19.2.1 生物量 OVERRIDE

模型允许用户指定植物每年可以产生的总生物量。当生物量 override 在植物操作（.mgt）设定时，生长条件的不同对植物生长的影响将被忽略，即 γ_{reg} 始终为 1.0。

当生物量 override 设定后，生物量变化的计算采用下式：

$$\Delta bio_{act} = \Delta bio_i \cdot \frac{(bio_{trg} - bio_{i-1})}{bio_{trg}} \quad 19.2.4$$

式中： Δbio_{act} 为实际总生物量增加值 (kg/ha)， Δbio_i 为第 i 天总植物生物量的潜在增长 (kg/ha)， bio_{trg} 为用户设定的目标生物量值 (kg/ha)， bio_{i-1} 模拟日前一天总植物生物量 (kg/ha)。

Table 19-2: SWAT input variables that pertain to actual plant growth.

Variable Name	Definition	Input File
BIO_TARG	$bio_{trg}/1000$: Biomass target (metric tons/ha)	.mgt

19.3 实际作物产量

方程 18.4.1 预测的作物收获因子受到水缺乏的影响：

$$HI_{act} = (HI - HI_{min}) \frac{\gamma_{wu}}{\gamma_{wu} + \exp[1.13 - 0.883 \cdot \gamma_{wu}]} + HI_{min} \quad 19.3.1$$

式中： HI_{act} 为实际收获因子， HI 为潜在收获因子，由方程18.4.1计算得到， HI_{min} 为干旱条件下植物收获因子，代表最小植物收获因子， γ_{wu} 为水缺乏因子，其计算公式为：

$$\gamma_{wu} = 100 \cdot \frac{\sum_{i=1}^m E_a}{\sum_{i=1}^m E_o} \quad 19.3.2$$

式中： Ea 为实际蒸散发， Eo 为潜在蒸散发， i 为植物生长季节的第 i 天， m 为收获日期，如果植物在其成熟前被收获或者生长季节的最后一天，如果植物在其成熟后收获。

19.3.1 收获指数 OVERRIDE

在种植和收获操作（.mgt），模型允许用户指定目标守候指数。在种植操作中设定的目标收获指数，将在收获/收割操作时采用。在收获操作中设定的目标收获指数，将在特定收获操作时执行。

一旦收获指数 override 被设定，override 值将替代模型计算的收获指数来计算作物产量。并且，不会针对生长阶段和水分缺乏而调整。

$$HI_{act} = HI_{trg} \quad 19.3.3$$

式中： HI_{act} 为实际收获因子， HI_{trg} 为目标收获指数。

19.3.2 收获效率

在收获操作中，模型允许用户指定收获效率。收获效率定义了收获工具去除的产量生物量的分数。剩余的产量生物量将转化为残余物，并添加到地表 10 mm 的残余物库中。如果收获效率没有设定，或者为 0.00，模型假设用户忽略收获效率，并将其设为 1.0，HRU 的所有作物产量将会被去除。

$$yld_{act} = yld \cdot harv_{eff} \quad 19.3.4$$

第 19 章 方程：实际生长

式中： yld_{act} 为实际作物产量 (kg/ha) ， yld 为方程18.4.2 或18.4.3 计算的作物产量 (kg/ha) ， $harveff$ 为收获操作的效率 (0.01 – 1.00) 。剩余作物产量生物量将转化为残余物：

$$\Delta rsd = yld \cdot (1 - harveff) \quad 19.3.5$$

$$rsd_{surf,i} = rsd_{surf,i-1} + \Delta rsd \quad 19.3.6$$

式中： Δrsd 为模拟日残余物库增加的生物量值 (kg/ha) ， yld 为方程18.4.2 或18.4.3 计算的作物产量 (kg/ha) ， $rsd_{surf,i}$ 为第*i*天地表10mm土层残余物库中的生物量 (kg/ha) ， $rsd_{surf,i-1}$ 为第*i-1*天地表10mm土层残余物库中的生物量 (kg/ha) ，

Table 19-3: SWAT input variables that pertain to actual plant yield.

Variable Name	Definition	Input File
WSYF	HI_{min} : Harvest index for the plant in drought conditions, the minimum harvest index allowed for the plant	crop.dat
HITAR	HI_{trg} : Harvest index target	.mgt
HIOVR	HI_{trg} : Harvest index target	.mgt
HARVEFF	$harveff$: Efficiency of the harvest operation	.mgt

19.4 NOMENCLATURE

- E_a Actual amount of evapotranspiration on a given day (mm H₂O)
- E_o Potential evapotranspiration (mm d⁻¹)
- E_t Maximum transpiration rate (mm d⁻¹)
- $E_{t,act}$ Actual amount of transpiration on a given day (mm H₂O)
- HI Potential harvest index for a given day
- HI_{act} Actual harvest index
- HI_{min} Harvest index for the plant in drought conditions and represents the minimum harvest index allowed for the plant
- HI_{trg} Target harvest index
- T_{base} Plant's base or minimum temperature for growth (°C)

- T_{opt} Plant's optimal temperature for growth ($^{\circ}\text{C}$)
 \bar{T}_{av} Mean air temperature for day ($^{\circ}\text{C}$)
- bio_N Actual mass of nitrogen stored in plant material (kg N/ha)
 $bio_{N,opt}$ Optimal mass of nitrogen stored in plant material for the growth stage (kg N/ha)
 bio_P Actual mass of phosphorus stored in plant material (kg P/ha)
 $bio_{P,opt}$ Optimal mass of phosphorus stored in plant material for the current growth stage (kg P/ha)
 bio_{trg} Target biomass specified by the user (kg/ha)
 $harv_{eff}$ Efficiency of the harvest operation
 $nstrs$ Nitrogen stress for a given day
 $pstrs$ Phosphorus stress for a given day
 $rsd_{surf,i}$ Material in the residue pool for the top 10mm of soil on day i (kg ha^{-1})
 $tstrs$ Temperature stress for a given day expressed as a fraction of optimal plant growth
 $w_{actualup}$ Total plant water uptake for the day ($\text{mm H}_2\text{O}$)
 $wstrs$ Water stress for a given day
 yld_{act} Actual yield (kg ha^{-1})
- ΔLAI_i Leaf area added on day i (potential)
 $\Delta LAI_{act,i}$ Actual leaf area added on day i
 Δbio Potential increase in total plant biomass on a given day (kg/ha)
 Δbio_{act} Actual increase in total plant biomass on a given day (kg/ha)
 Δrsd Biomass added to the residue pool on a given day (kg ha^{-1})
 γ_{reg} Plant growth factor (0.0-1.0)
 γ_{wu} Water deficiency factor
 ϕ_n Scaling factor for nitrogen stress equation
 ϕ_p Scaling factor for phosphorus stress equation

第 20 章 方程:常规管理

管理操作控制植物生长过程，施肥和杀虫剂的时间和植物生物量的去除将在本章中介绍。水管理和城市模拟将会在随后的章节介绍。

20.1 种植/生长季节开始

种植操作初始植物的生长。这一操作可以用来指定农作物种植的时间，或者在春季初始多年生植物（森林、果园等）开始生长。

只有当 HRU 中没有植物生长时，SWAT 才允许种植操作。在种植一种新的植物之前，此前的植被必需被去除，通过收割或收获操作。如果两个种植操作同时在一个管理文件中，并且在第二次种植操作之间没有通过收割或者收获操作终止第一次种植操作，那么第二次种植操作将会被模型忽略。

种植操作的信息包括操作的时间（月和日，或者零潜在热量单元分数），植被成熟所需的热量单元，HRU 中模拟的植被类型。如果植被被移植，需要提供植被移植时的叶面积指数和植被生物量。同时，对于移植的植被，达到成熟所需的热量单元应该为植被移植是所需的热量单元（而非从播种开始）。热量单元在第十七章已经介绍。用户可以改变 HRU 的曲线数的年内变化。新的曲线数值可以在种植操作、翻耕操作和收获/收割操作是输入。对于这些操作所输入曲线数是湿润 II 条件下。SWAT 每日都根据土壤水含量调整曲线数。

如果作物产量和生物量需要达到一定的量，用户可以通过设定目标收获指数和目标生物量来实现。这些目标只有在采用收获或收割操作时是有效的。

Table 20-1: SWAT input variables that pertain to planting.

Variable Name	Definition	Input File
<i>Variables in plant operation line:</i>		
MONTH/DAY or HUSC	Timing of planting operation.	.mgt
MGT_OP	Operation code. MGT_OP = 1 for plant operation	.mgt
HEAT UNITS	<i>PHU</i> : Total heat units required for plant maturity (heat units)	.mgt
NCR	Plant/land cover code from crop.dat	.mgt
<i>Optional inputs:</i>		
HITAR	<i>HI_{trg}</i> : Target harvest index	.mgt
BIO_TARG	<i>bio_{trg}</i> : Target biomass specified by the user (kg/ha)	.mgt
ALAINIT	<i>LAI</i> : Leaf area index of the canopy for transplanted species	.mgt
BIOINIT	<i>bio</i> : Total plant biomass on a given day (kg/ha)	.mgt
CNOP	<i>CN₂</i> : Moisture condition II curve number	.mgt
<i>Variables in second line of .mgt file</i>		
IGRO	Land cover status code	.mgt
<i>Inputs for plants growing at the beginning of the simulation</i>		
NCRP	Plant/land cover code from crop.dat	.mgt
ALAI	<i>LAI</i> : Leaf area index of the canopy	.mgt
BIO_MS	<i>bio_{trg}</i> : Target biomass specified by the user (kg/ha)	.mgt
PHU	<i>PHU</i> : Total heat units required for plant maturity (heat units)	.mgt

20.2 收获操作

收获操作将去除植物生物量，而不杀死植被。这一操作通常针对干草或草地。

收获操作所需的唯一信息是其操作日期。但是，收获指数 *override* 和收获效率可以设定。

当没有设定收获指数 *override* 时，SWAT 采用植被生长数据库中的植被收获指数来计算去除的生物量分数。植被生长数据库中的植被收获指数用来定义植物生物量中农作物种子的部分和收割干草操作中去除的生物量分数。

如果用户想设定不同的生物量去除分数，则需将收获指数 *override* 值设定为特定值。

对于收获操作，用户可以定义收获效率。这一效率定义了收获的植物生物量中从 HRU 中去除的部分。剩余部分转化为地表残余物。如果收获效率为零或者没有设置，那么模型将不考虑收获效率，100%的收获生物量将被去除（没有生物量被转化为残余物）。

在生物量被收获操作去除后，植物的叶面积指数和累积的热量单元将根据去除的生物量相应减少。减少累积的热量单元将会把植物生长阶段前移到植物生长发育较快的阶段。

Table 20-2: SWAT input variables that pertain to harvest.

Variable Name	Definition	Input File
<i>Variables in harvest operation line:</i>		
MONTH/DAY or HUSC	Timing of harvest operation.	.mgt
MGT_OP	Operation code. MGT_OP = 7 for harvest operation	.mgt
<i>Optional inputs:</i>		
HIOVR	HI_{trg} : Harvest index override or target harvest index	.mgt
HARVEFF	$harv_{eff}$: Efficiency of the harvest operation	.mgt

20.3 放牧操作

放牧操作模拟植物生物量的去除和粪肥在一定时间段的累积。这一操作用来模拟动物在草原或农场的放牧活动。

放牧操作所需要的信息包括放牧开始的时间（月份和日期，或者植物潜在生长单元的分数），放牧的时间长度，每天去除的生物量，每天累积的粪肥，以及粪肥的种类。践踏的生物量将是可选择的输入。

放牧操作中的生物量去除与收获操作相似。但是，并不是指定去除的生物量分数，而是设置每天去除的生物量绝对值。在一些情况下，可以导致生物量降低到很低的水平，导致 HRU 土壤侵蚀的增加。为了防止这种情况的发生，放牧所产生的最小生物量需要设定（BIO_MIN，.mgt 文件的第二行）。当植物生物量降到 BIO_MIN 值以下时，模型将不允许放牧、践踏或者粪肥的累积。

如果用户指定了由于践踏，每天去除的生物量，这些生物量将会被转化为残余物。

放牧所产生的粪肥中的营养物分数参数必需存储在化肥数据库中。粪肥营养物负荷将会加到地表 10mm 的土壤中，这一部分土层将会与地表径流发生作用

在生物量被放牧或践踏去除后，植物的叶面积指数和累积的热量单元将根据去除的生物量相应减少。

Table 20-3: SWAT input variables that pertain to grazing.

Variable Name	Definition	Input File
<i>Variables in grazing operation line:</i>		

MONTH/DAY or HUSC	Time grazing operation is initiated (1 st day of grazing)	.mgt
MGT_OP	Operation code. MGT_OP = 9 for grazing operation	.mgt
NDGRAZ	Number of days of grazing.	.mgt
BMEAT	<i>bio</i> : Dry weight plant biomass consumed daily (kg/ha)	.mgt
IGFTYP	Manure code from fert.dat	.mgt
WMANURE	<i>fert</i> : Amount of manure applied—dry weight (kg/ha)	.mgt
<i>Optional inputs:</i>		
BMTRMP	<i>bio</i> : Dry weight plant biomass trampled daily (kg/ha)	.mgt
<i>Variables in second line of .mgt file</i>		
BIO_MIN	<i>bio</i> : Minimum plant biomass for grazing to occur (kg/ha)	.mgt

20.4 收获&销毁操作

收获&销毁操作将停止 HRU 中植物的生长。植物收获指数中设定的生物量分数 (在植物生长数据库中) 将作物产量从 HRU 中去除。剩余的植物生物量将转化为土壤表面残余物。

收获&销毁操作所需的唯一参数为这一操作的时间 (日期 , 潜在热量单元的分) 。用户也可以在这一操作中更新湿润 II 条件下曲线数。

Table 20-4: SWAT input variables that pertain to harvest & kill.

Variable Name	Definition	Input File
<i>Variables in harvest & kill operation line:</i>		
MONTH/DAY or HUSC	Timing of harvest and kill operation.	.mgt
MGT_OP	Operation code. MGT_OP = 5 for harvest/kill operation	.mgt
<i>Optional inputs:</i>		
CNOP	CN ₂ : Moisture condition II curve number	.mgt

20.5 销毁/生长季节结束

销毁操作停止 HRU 中植物的生长。所有的植物生物量转化为残余物。

销毁操作所需的唯一参数为其操作时间日期，潜在热量单元的分数)。

Table 20-5: SWAT input variables that pertain to kill.

Variable Name	Definition	Input File
<i>Variables in kill operation line:</i>		
MONTH/DAY or HUSC	Timing of kill operation.	.mgt
MGT_OP	Operation code. MGT_OP = 8 for kill operation	.mgt

20.6 翻耕

翻耕操作将对残余物、营养物、农药和细菌等在土壤剖面中进行再分配。这一操作所需的信息包括：这一操作的时间（日期，潜在热量单元的分数），翻耕操作的类型。

用户可以在年内改变 HRU 的曲线数。新的曲线数可以在种植操作、翻耕操作和收获/销毁操作中输入。输入的曲线数相对应于湿润条件 II。SWAT 以日为单位修正曲线数以反应土壤含水量的变化。

翻耕操作的混合效率定义了：每一土壤层中残余物、营养物、农药和细菌库中被翻耕操作在土壤纵向深度混合和分数。为了说明对土壤组分的再分配，这里假设土壤剖面中的硝酸盐分布如下：

Layer #	Depth of Layer	NO ₃ Content
---------	----------------	-------------------------

surface layer	0-10 mm	50 kg/ha
1	10-100 mm	25 kg/ha
2	100-400 mm	20 kg/ha
3	400-1050 mm	10 kg/ha
4	1050-2000 mm	10 kg/ha

如果这一土壤被耕田机翻耕，将会在 100mm 深度内以 30%的效率混合。硝酸盐的分布变为：

Layer #	Depth of Layer	Initial NO ₃	Unmixed NO ₃ (70%)	Mixed NO ₃ (30%)	Redistribution of Mixed NO ₃	Final NO ₃
surface layer	0-10 mm	50 kg/ha	35 kg/ha	15 kg/ha	$22.5 \times 10\text{mm}/100\text{mm} = 2.25 \text{ kg/ha}$	37.25 kg/ha
1	10-100 mm	25 kg/ha	17.5 kg/ha	7.5 kg/ha	$22.5 \times 90\text{mm}/100\text{mm} = 20.25 \text{ kg/ha}$	37.75 kg/ha
2	100-400 mm	20 kg/ha	20 kg/ha			20 kg/ha
3	400-1050 mm	10 kg/ha	10 kg/ha			10 kg/ha
4	1050-2000 mm	10 kg/ha	10 kg/ha			10 kg/ha
				Total mixed:	22.5 kg/ha	

因为土壤只在 100mm 深度内混合，所以只有地表和第一层中的硝酸盐被再分配。为了计算再分配，土层的深度除以翻耕混合深度，并乘以总硝酸盐混合量。为了计算最终硝酸盐含量，再分配的硝酸盐将被添加到每一层中没有被混合的硝酸盐库中。

所有的残余物、营养物、农药和细菌库中的物质均采用上述方法计算再分配。

细菌被混合进入非表层土壤层中后被假设死亡。

20.6.1 生物混合

生物混合指土壤中物质被生物活动的再分配 (如蚯蚓等) 。研究表明 , 生物混合在不经常被扰动的土壤中较为显著。通常来讲 , 管理系统从传统翻耕向保守翻耕和无翻耕转变时 , 生物混合增加。SWAT 允许生物混合发生在 300mm 深度 (如果土壤底部深度小于 300mm , 则可以发生在土壤底部) 。生物混合的效率是用户定义的。生物混合对营养物的再分配采用与翻耕操作相似的方法计算。

Table 20-6: SWAT input variables that pertain to tillage.

Variable Name	Definition	Input File
<i>Variables in tillage operation line:</i>		
MONTH/DAY or HUSC	Timing of planting operation.	.mgt
MGT_OP	Operation code. MGT_OP = 6 for tillage operation	.mgt
TILLAGE_ID	Tillage implement code from till.dat	.mgt
<i>Optional inputs:</i>		
CNOP	CN ₂ : Moisture condition II curve number	.mgt
<i>Variables in second line of .mgt file</i>		
BIOMIX	Biological mixing efficiency	.mgt
<i>Variable in tillage database:</i>		
EFFMIX	Mixing efficiency of tillage operation.	till.dat
DEPTIL	Depth of mixing by tillage operation.	till.dat

20.7 施肥

施肥操作将化肥和粪肥添加到土壤中。

十分操作需要的信息包括：这一操作的时间（日期，潜在热量单元的分
数），施用的化肥和粪肥的类型，施用量，以及肥料的深度分布

SWAT 假设地表径流与地表 10mm 土层作用。在地表所含营养物可以通过地表径流传输到河道中。施肥操作允许用户定义被施加到地表 10mm 土层的肥料部分。剩余的肥料将被添加到第一层土壤中。

在肥料数据库中，定义了肥料中不同种类营养物和细菌的重量分数。被添加到土壤中不同库中的营养物，采用下式计算：

$$NO3_{fert} = fert_{minN} \cdot \left(- fert_{NH4} \right) \cdot fert \quad 20.7.1$$

$$NH4_{fert} = fert_{minN} \cdot fert_{NH4} \cdot fert \quad 20.7.2$$

$$orgN_{frsh,fert} = 0.5 \cdot fert_{orgN} \cdot fert \quad 20.7.3$$

$$orgN_{act,fert} = 0.5 \cdot fert_{orgN} \cdot fert \quad 20.7.4$$

$$P_{solution,fert} = fert_{minP} \cdot fert \quad 20.7.5$$

$$orgP_{frsh,fert} = 0.5 \cdot fert_{orgP} \cdot fert \quad 20.7.6$$

$$orgP_{hum,fert} = 0.5 \cdot fert_{orgP} \cdot fert \quad 20.7.7$$

$$bact_{psol,fert} = fert_{pbact} \cdot k_{bact} \cdot fert \quad 20.7.8$$

$$bact_{psorb,fert} = fert_{pbact} \cdot \left(- k_{bact} \right) \cdot fert \quad 20.7.9$$

$$bact_{psol,fert} = fert_{pbact} \cdot k_{bact} \cdot fert \quad 20.7.10$$

$$bact_{psorb,fert} = fert_{pbact} \cdot \left(- k_{bact} \right) \cdot fert \quad 20.7.11$$

式中： $NO3_{fert}$ 为施肥操作添加到土壤中硝酸盐的量(kg N/ha)， $NH4_{fert}$ 为施肥操作添加到土壤中氨氮的量(kg N/ha)， $orgN_{frsh,fert}$ 为施肥操作添加到土壤中fresh有机库的氮量(kg N/ha)， $orgN_{act,fert}$ 为施肥操作添加到土壤中活性有机库的氮量(kg N/ha)， $P_{solution,fert}$ 为施肥操作添加到土壤中溶液态磷库中的磷量(kg P/ha)， $orgP_{frsh,fert}$ 为施肥操作添加到土壤中fresh有机库的磷量(kg P/ha)， $orgP_{hum,fert}$ 为施肥操作添加到土壤中腐植质有机库的磷量(kg P/ha)， $bact_{psorb,fert}$ 为施肥操作添加到土壤中吸附态库中的非稳态细菌的量(# bact/ha)， $bact_{psol,fert}$ 为施肥操作添加到土壤中溶液态库中的稳态细菌的量(# bact/ha)， $bact_{psorb,fert}$ 为施肥操作添加到土壤中吸附态库中的稳态细菌的量(# bact/ha)， $fert_{minN}$ 为肥料中无机氮的含量分数， $fert_{NH4}$ 为肥料中无

机氮的氮含量分数, $fert_{orgN}$ 为肥料中有机氮含量分数, $fert_{minP}$ 为肥料中无机磷含量分数, $fert_{orgP}$ 为肥料中有机磷含量分数, $fert_{lpbact}$ 为肥料中非稳态细菌的浓度(# bact/kg fert), $fert_{pbact}$ 为肥料中稳态细菌的浓度(# bact/kg fert), k_{bact} 为细菌分离系数, $fert$ 施用于土壤中的肥料量 (kg/ha)。

Table 20-7: SWAT input variables that pertain to fertilizer application.

Variable Name	Definition	Input File
<i>Variables in fertilizer operation line:</i>		
MONTH/DAY or HUSC	Timing of fertilizer operation.	.mgt
MGT_OP	Operation code. MGT_OP = 3 for fertilizer operation	.mgt
FERT_ID	Type of fertilizer/manure applied (code from fert.dat).	.mgt
FRT_KG	$fert$: Amount of fertilizer/manure applied (kg/ha)	.mgt
FRT_LY1	Fraction of fertilizer applied to top 10 mm	.mgt
<i>Variables in fertilizer database:</i>		
FMINN	$fert_{minN}$: Fraction of mineral nitrogen in the fertilizer	fert.dat
FMINP	$fert_{minP}$: Fraction of mineral P in the fertilizer	fert.dat
FORGN	$fert_{orgN}$: Fraction of organic N in the fertilizer	fert.dat
FORGP	$fert_{orgP}$: Fraction of organic P in the fertilizer	fert.dat
FNH3N	$fert_{NH4}$: Fraction of mineral N in the fertilizer that is ammonium	fert.dat
BACTPDB	$fert_{pbact}$: Concentration of persistent bacteria in manure (# bact/kg)	fert.dat
BACTLPDB	$fert_{lpbact}$: Concentration of less-persistent bacteria in manure (# bact/kg)	fert.dat
BACTKDDB	k_{bact} : Bacterial partition coefficient	fert.dat

20.8 自动肥料施用

HRU 中的肥料施用可以由用户安排, 也可以自动模拟。当用户选择在 HRU 中自动施肥时, 需要指定氮压力阈值。这一氮压力阈值为潜在植物生长的分

数。任何时候，实际生长由于氮压力低于这一阈值分数，模型将会自动施加肥料与 HRU。用户指定肥料类型，施用于地表的肥料分数，一年内的最大肥料施用量，一次施肥的最大肥料施用量，以及施肥效率。

为了确定施肥量，需要估计作物产量去除的氮量。对于第一年的模拟，模型没有关于植被从土壤中去氮量的信息。氮产量的初始估计采用下式计算：

$$yld_{est,N} = 350 \cdot fr_{N,yld} \cdot RUE \quad \text{if } HI_{opt} < 1.0 \quad 20.8.1$$

$$yld_{est,N} = 1000 \cdot fr_{N,yld} \cdot RUE \quad \text{if } HI_{opt} \geq 1.0 \quad 20.8.2$$

式中： $yld_{est,N}$ 为氮产量估计 (kg N/ha)， $fr_{N,yld}$ 为产量中氮的分数，RUE 为植物辐射利用效率(kg/ha (MJ/m²)⁻¹ or 10⁻¹ g/MJ)， HI_{opt} 为理想生长条件下植物在成熟时的潜在收获指数。氮产量估计在每一年模拟结束后，采用下式计算：

$$yld_{est,N} = \frac{yld_{est,Nprev} \cdot yr_{sim} + yld_{yr,N}}{yr_{sim} + 1} \quad 20.8.3$$

式中： $yld_{est,N}$ 为对当前年氮产量估计的更新 (kg N/ha)， $yld_{est,Nprev}$ 为前一年的氮产量估计的更新 (kg N/ha)， yr_{sim} 为模拟的年份， $yld_{yr,N}$ 为当前年的氮产量目标 (kg N/ha)。氮产量目标在收获时采用下式计算：

$$yld_{yr,N} = bio_{ag} \cdot fr_N \cdot fert_{eff} \quad 20.8.4$$

式中： $yld_{yr,N}$ 为当前年的氮产量目标 (kg N/ha)， bio_{ag} 为收获时地表生物量 (kg/ha)， fr_N 为方程18.3.1计算的植物生物量中氮分数， $fert_{eff}$ 为用户指

定的肥料施用效率。肥料施用效率允许用户修改根据植物生长需求调整肥料施用量。如果用户希望施用附加的肥料以考虑径流引起的损失, $fert_{eff}$ 可以大于1。如果用户希望仅仅施用足够的肥料以满足期望的需求, $fert_{eff}$ 设为1。如果用户希望仅满足需求的一部分, $fert_{eff}$ 设为小于1。

最优无机氮的施用采用下式计算:

$$minN_{app} = yld_{est,N} - (NO_3 + NH_4) \cdot bio_N \quad 20.8.5$$

式中 $minN_{app}$ 为无机氮施用量(kg N/ha), $yld_{est,N}$ 为氮产量估计(kg N/ha), NO_3 为土壤剖面中的硝酸盐含量(kg NO₃-N/ha), NH_4 为土壤剖面中的氨氮含量(kg NH₄-N/ha), bio_N 为植物物质中存储的氮量(kg N/ha)。如果方程20.8.5计算的无机氮氮超过最大次允许施用量, $minN_{app}$ 被重新设置为最大值 $minN_{app} = minN_{app,max}$ 。一年中的总氮肥施用量也与最大允许施用量相比较。一旦施用量达到年最大允许量($minN_{app,mxyr}$), SWAT将不会施用附加的肥料, 即使存在氮压力。

一旦无机氮施用量确定后, 总肥料施用量通过下式计算:

$$fert = \frac{minN_{app}}{fert_{minN}} \quad 20.8.6$$

式中 $fert$ 为肥料施用量(kg/ha), $minN_{app}$ 为无机氮施用量(kg N/ha), $fert_{minN}$ 为肥料中的无机氮分数。

HRU中施用的肥料种类由用户定义。除了无机氮外，有机氮、磷和无机氮磷也可以施用于HRU。每一种营养物的含量通过肥料施用量和不同营养物种类的分数计算。

由于模型不考虑根据磷压力来施肥，因此模型也不计算磷压力。如果磷压力导致植物生长降到潜在生长的 75%，模型将忽略肥料中的无机磷分数，并施加无机磷量等于 $\frac{1}{7} \cdot \min N_{app}$ 。

Table 20-8: SWAT input variables that pertain to auto-fertilization.

Variable Name	Definition	Input File
<i>Variables in auto-fertilizer operation line:</i>		
MONTH/DAY or HUSC	Timing of fertilizer operation.	.mgt
MGT_OP	Operation code. MGT_OP = 11 for auto-fertilizer operation	.mgt
FERT_ID	Type of fertilizer/manure applied (code from fert.dat).	.mgt
AFRT_LY1	Fraction of fertilizer applied to top 10 mm	.mgt
AUTO_NSTR	$nstrs$: Nitrogen stress that triggers fertilizer application	.mgt
AUTO_EFF	$fert_{eff}$: Application efficiency	.mgt
AUTO_NMXS	$\min N_{app, mx}$: Maximum amount of mineral N allowed to be applied on any one day (kg N/ha)	.mgt

Table 20-8, cont.: SWAT input variables that pertain to auto-fertilization.

Variable Name	Definition	Input File
AUTO_NMXA	$\min N_{app, mxyr}$: Maximum amount of mineral N allowed to be applied during a year (kg N/yr)	.mgt
<i>Other variables:</i>		
CNYLD	$fr_{N, yld}$: Fraction of nitrogen in the yield	crop.dat
BIO_E	RUE : Radiation use efficiency ((kg/ha)/(MJ/m ²))	crop.dat
HVSTI	HI_{opt} : Potential harvest index for the plant at maturity given ideal growing conditions	crop.dat
FMINN	$fert_{minN}$: fraction of mineral N in the fertilizer	fert.dat

20.9 杀虫剂施用

杀虫剂操作将向 HRU 中施用杀虫剂，这一操作所需的信息包括：操作时间（日期，或植物潜在生长热量单元分数），杀虫剂种类，以及施用量。

田间试验证明，即使有很小的风或没有风，施用的一部分杀虫剂将损失。适用于叶片或地表的杀虫剂部分通过杀虫剂的效率来定义。达到地面的杀虫剂量为：

$$pest' = ap_{ef} \cdot pest \quad 20.9.1$$

式中： $pest'$ 为有效杀虫剂施用量(kg pst/ha)， $apef$ 为杀虫剂施用效率， $pest$ 为实际杀虫剂施用量(kg pst/ha)。

达到地表的杀虫剂量和达到叶片的杀虫剂量根据地表面覆盖计算。植被的地表覆盖度为：

$$gc = \frac{1.99532 - \operatorname{erfc} \left[\frac{.333 \cdot LAI - 2}{2.1} \right]}{2.1} \quad 20.9.2$$

式中： gc 为植被覆盖的地表分数， erfc 为互补误差， LAI 为叶面积指数。

图 20-1 图示， $\operatorname{erf}(\beta)$ 在 -1 和 +1 之间变化，而 $\operatorname{erfc}(\beta)$ 在 0 到 +2 之间变化。互补误差方程只有在自变量为负值时才大于 1。

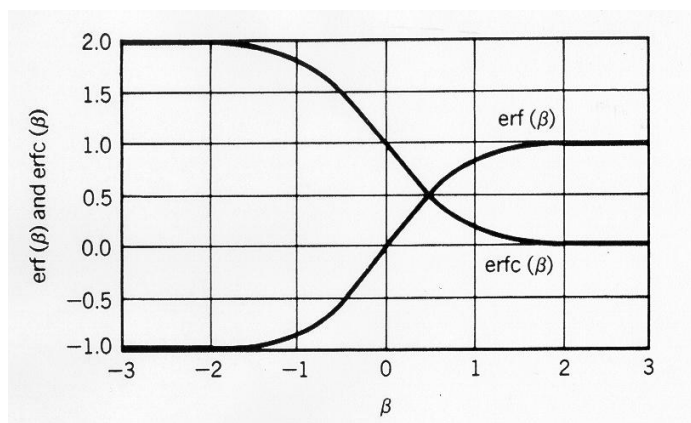


Figure 20-1: $\text{erf}(\beta)$ and $\text{erfc}(\beta)$ plotted versus β (from Domenico and Schwartz, 1990)

如果直到植被覆盖地表的分数,则可以采用下式计算施用于叶片的杀虫剂量:

$$pest_{fol} = gc \cdot pest' \quad 20.9.3$$

适用于地表的杀虫剂量则为:

$$pest_{surf} = (-gc) \cdot pest' \quad 20.9.4$$

式中: $pest_{fol}$ 为施用于叶片的杀虫剂量(kg pst/ha), $pest_{surf}$ 为施用于地表的杀虫剂量(kg pst/ha), gc 为植被覆盖的地表分数, $pest'$ 为有效杀虫剂施用量(kg pst/ha),

Table 20-9: SWAT input variables that pertain to pesticide application.

Variable Name	Definition	Input File
<i>Variables in pesticide operation line:</i>		
MONTH/DAY or HUSC	Timing of pesticide operation.	.mgt
MGT_OP	Operation code. MGT_OP = 4 for pesticide operation	.mgt
PEST_ID	Type of pesticide applied (code from pest.dat).	.mgt
PST_KG	$pest$: Amount of pesticide applied (kg/ha)	.mgt
<i>Variables in pesticide database:</i>		
AP_EF	ap_{ef} : Pesticide application efficiency	pest.dat

20.10 缓冲带

在 HRU 中可以定义在田地边缘的缓冲带。地表径流中的泥沙、营养物、杀虫剂和细菌负荷在地表径流流经缓冲带时减少。

缓冲带对细菌的截留效率为：

$$trap_{ef,bact} = 1 - \frac{(2 + 4.5 \cdot width_{filtstrip})}{100} \quad 20.10.1$$

式中 $trap_{ef,bact}$ 为缓冲带截留的细菌分数, $width_{filtstrip}$ 为缓冲带宽度(m)。

缓冲带对泥沙、营养物和杀虫剂的截留效率采用下式计算：

$$trap_{ef} = 0.367 \cdot (width_{filtstrip})^{0.2967} \quad 20.10.2$$

式中： $trap_{ef}$ 为被缓冲带截留的组分负荷的分数， $width_{filtstrip}$ 为缓冲带宽度 (m)。

Table 20-10: SWAT input variables that pertain to filter strips.

Variable Name	Definition	Input File
FILTERW	$width_{filtstrip}$: Width of filter strip (m)	.hru

20.11 NOMENCLATURE

CN_2 Moisture condition II curve number

HI_{opt} Potential harvest index for the plant at maturity given ideal growing conditions

HI_{trg} Target harvest index

LAI Leaf area index of the canopy

NH_4 Ammonium content of the soil profile (kg NH_4 -N/ha)

NH_{4fert} Amount of ammonium added to the soil in the fertilizer (kg N/ha)

NO_3 Nitrate content of the soil profile (kg NO_3 -N/ha)

第 20 章 方程:常规管理

- $NO3_{fert}$ Amount of nitrate added to the soil in the fertilizer (kg N/ha)
- $P_{solution,fert}$ Amount of phosphorus in the solution pool added to the soil in the fertilizer (kg P/ha)
- PHU Potential heat units or total heat units required for plant maturity where base temperature is dependant on the plant species (heat units)
- RUE Radiation-use efficiency of the plant ($kg/ha \cdot (MJ/m^2)^{-1}$ or $10^{-1} g/MJ$)
- ap_{ef} Pesticide application efficiency
- $bact_{lpsol,fert}$ Amount of less persistent bacteria in the solution pool added to the soil in the fertilizer (# bact/ha)
- $bact_{lpsorb,fert}$ Amount of less persistent bacteria in the sorbed pool added to the soil in fertilizer (# bact/ha)
- $bact_{psol,fert}$ Amount of persistent bacteria in the solution pool added to the soil in the fertilizer (# bact/ha)
- $bact_{psorb,fert}$ Amount of persistent bacteria in the sorbed pool added to the soil in fertilizer (# bact/ha)
- bio Total plant biomass on a given day (kg/ha)
- bio_{ag} Aboveground biomass on the day of harvest ($kg ha^{-1}$)
- bio_N Actual mass of nitrogen stored in plant material (kg N/ha)
- bio_{trg} Target biomass specified by the user (kg/ha)
- $fert$ Amount of fertilizer applied (kg/ha)
- $fert_{eff}$ Fertilizer application efficiency assigned by the user
- $fert_{lpbact}$ Concentration of less persistent bacteria in the fertilizer (# bact/kg fert)
- $fert_{minN}$ Fraction of mineral nitrogen in the fertilizer
- $fert_{minP}$ Fraction of mineral P in the fertilizer
- $fert_{NH4}$ Fraction of mineral N in the fertilizer that is ammonium
- $fert_{orgN}$ Fraction of organic N in the fertilizer
- $fert_{orgP}$ Fraction of organic P in the fertilizer
- $fert_{pbact}$ Concentration of persistent bacteria in the fertilizer (# bact/kg fert)
- fr_N Optimal fraction of nitrogen in the plant biomass for current growth stage
- $fr_{N,yld}$ Fraction of nitrogen in the yield
- gc Fraction of the ground surface covered by plants
- $harv_{eff}$ Efficiency of the harvest operation
- k_{bact} Bacterial partition coefficient
- $minN_{app}$ Amount of mineral nitrogen applied (kg N/ha)
- $minN_{app,mx}$ Maximum amount of mineral N allowed to be applied on any one day (kg N/ha)
- $minN_{app,mxyr}$ Maximum amount of mineral N allowed to be applied during a year (kg N/ha)
- $nstrs$ Nitrogen stress for a given day
- $orgN_{act,fert}$ Amount of nitrogen in the active organic pool added to the soil in the fertilizer (kg N/ha)
- $orgN_{frsh,fert}$ Amount of nitrogen in the fresh organic pool added to the soil in the fertilizer (kg N/ha)

- $orgP_{frsh,fert}$ Amount of phosphorus in the fresh organic pool added to the soil in the fertilizer (kg P/ha)
- $orgP_{hum,fert}$ Amount of phosphorus in the humus organic pool added to the soil in the fertilizer (kg P/ha)
- $pest$ Actual amount of pesticide applied (kg pst/ha)
- $pest'$ Effective amount of pesticide applied (kg pst/ha)
- $pest_{fol}$ Amount of pesticide applied to foliage (kg pst/ha)
- $pest_{surf}$ Amount of pesticide applied to the soil surface (kg pst/ha)
- $trap_{ef}$ Fraction of the constituent loading trapped by the filter strip
- $trap_{ef,bact}$ Fraction of the bacteria loading trapped by the filter strip
- $width_{filtstrip}$ Width of filter strip (m)
- $yld_{est,N}$ Nitrogen yield estimate (kg N/ha)
- $yld_{est,Nprev}$ Nitrogen yield estimate from the previous year (kg N/ha)
- $yld_{yr,N}$ Nitrogen yield target for the current year (kg N/ha)
- yr_{sim} Year of simulation

20.12 REFERENCES

- Domenico, P.A. and F.W. Schwartz. 1990. Physical and chemical hydrology. John Wiley & Sons, New York, NY.

第 21 章 方程:水管理

准确地描述水管理措施是模型数据输入中最复杂的部分。因为水管理影响水文平衡，所以模型可以模拟不同管理措施是至关重要的。SWAT 模拟的水管理措施包括灌溉、瓦沟排水、蓄水/洼地、输水、消耗性用水，以及点源负荷。

21.1 灌溉

HRU 中的灌溉可以由用户安排或者由模型自动模拟。除了需指定灌溉操作的时间和灌溉量外，用户需指定灌溉水源。

施用于 HRU 的水可以来自 5 种水源：河道、水库、浅层地下水、深层地下水，或者流域外调水。除了水源类型，模型必需直到水源的位置（除了流域外调水）。对于河道、浅层地下水、深层地下水，SWAT 需要知道水源的子流域代码。如果水库为水源，SWAT 必需知道水库代码。

如果灌溉水源为河道，SWAT 允许附加的参数设定。这些参数用来防止河道中的流量因为灌溉而变为 0。用户可以定义最小河道流量，每日最大灌溉水量，以及河道中可以被用来灌溉的水量分数。

对于给定的灌溉事件，SWAT 确定水源的可利用水量。可利用水量与灌溉操作中指定的水量相比较，如果可得水量小于指定水量，SWAT 将只施加可得水量。

HRU 中施加的水量用来充满土壤层至田间持水量，充满的顺序从表层开始向下，直到所有的水耗尽或达到土壤底部。如果灌溉操作指定的水量超过充满土层所需水量，多余的水被返还到水源。对于被定义为壶穴或洼地的 HRU，灌溉水被添加到地表积蓄的水中。

21.1.1 自动灌溉

当用于选择自动灌溉时，需要指定水压力阈值。水压力阈值为潜在植物生长的分数。任何时候，实际植物生长由于水压力而降落到这一阈值分数，模型将施加水到该 HRU。如果水是从灌溉水源获取，模型将添加水分到土壤直到达到田间持水量。

水压力阈值通常设在 0.90 到 0.95 之间。

Table 21-1: SWAT input variables that pertain to irrigation.

Variable Name	Definition	Input File
<i>Variables in irrigation operation line:</i>		
MONTH/DAY or HUSC	Timing of irrigation operation.	.mgt
MGT_OP	Operation code. MGT_OP = 2 for irrigation operation	.mgt
IRR_AMT	Depth of irrigation water applied on HRU (mm)	.mgt
<i>Variables in .hru file</i>		
IRR	Type of water body from which irrigation water is obtained	.hru
IRRNO	Source location	.hru
FLOWMIN	Minimum in-stream flow (m ³ /s)	.hru
DIVMAX	Maximum daily irrigation diversion (mm or 10 ⁴ m ³)	.hru
FLOWFR	Fraction of available flow allowed to be used for irrigation	.hru
<i>Variables in auto-irrigation operation line:</i>		
MONTH/DAY or HUSC	Initialization of auto-irrigation	.mgt
MGT_OP	Operation code. MGT_OP = 10 for auto-irrigation	.mgt
AUTO_WSTR	Water stress that triggers irrigation	.mgt

21.2 瓦沟排水

为了在 HRU 中模拟瓦沟排水，用户必需指定地表至排水沟的深度，排水将土壤含水量降到田间持水量所需的时间，水进入瓦沟到水流出瓦沟的进入河道的时间延迟。

瓦沟排水在土壤含水量超过田间持水量时发生。在瓦沟所安装的土层，某一天进入排水系统的水量采用下式计算：

$$tile_{wtr} = \left(W_{ly} - FC_{ly} \right) \left(1 - \exp \left[\frac{-24}{t_{drain}} \right] \right) \quad \text{if } SW_{ly} > FC_{ly} \quad 21.2.1$$

式中： $tile_{wtr}$ 为从土层中去除的水量 (mm H₂O)， SW_{ly} 土层的含水量(mm H₂O)， FC_{ly} 土层田间持水量(mm H₂O)， t_{drain} 为将土壤排水至田间持水量所需时间 (hrs)。

进入瓦沟的水，同层间流相似，采用第8章中介绍的方程来计算其延迟时间。

Table 21-2: SWAT input variables that pertain to tile drainage.

Variable Name	Definition	Input File
DDRAIN	Depth to subsurface drain (mm).	.hru
TDRAIN	t_{drain} : Time to drain soil to field capacity (hrs)	.hru
GDRAIN	$tile_{lag}$: Drain tile lag time (hrs)	.hru

21.3 蓄水/洼地

蓄水/洼地被模拟为HRU中覆盖土壤剖面上的水体。这种蓄水系统需要用来模拟水稻、酸果蔓，或者其它需要在浸水植物的生长。与蓄水/洼地相关的模拟和管理操作将在第27章介绍。

21.4 调水

当水分从水体去除，用来灌溉时，SWAT允许水分从一个水体转移到另一个水体。这一操作有流域配置文件中的一个命令来完成。

调水命令可以用来将水从水库或河道转移到其它的水库或河道。用户必需输入水源种类、位置，接收水的水体种类、位置，以及调水量。

有三种选择来指定调水量：水源水量的分数；水源剩余水量；或者调水量。

调水可以发生在模拟过程的每一天。

从一个水体向另一个水体调水也可以通过其它方法实现。例如，水可以通过消耗性用水的方式去除，也可以通过点源的方式添加到另一个水体。

Table 21-3: SWAT input variables that pertain to water transfer.

Variable Name	Definition	Input File
DEP_TYPE	水源类型	.fig
DEP_NUM	水源位置	.fig
DEST_TYPE	目标类型	.fig

DEST_NUM	目标为之	.fig
TRANS_AMT	传输的水量	.fig
TRANS_CODE	决定谁传输的代码	.fig

21.5 消耗性用水

消耗性用水是从流域去除水分的一种管理方式。通过消耗性用水去除的水分被认为从流域中消失。SWAT允许水分从浅层地下水、深层地下水、河道以及子流域池塘中去除。水分也可以从水库中通过消耗性用水去除。

消耗性用水可以以月为单位变化。对于每一个月，可以指定水分去除的平均日流量。对于水库，用户可以指定可以去除的水的分数。在去除过程中损失的水编程水库的出流。

Table 21-4: SWAT input variables that pertain to consumptive water use.

Variable Name	Definition	Input File
WUPND(1-12)	Average daily water removal from pond in subbasin (10^4 m^3)	.wus
WURCH(1-12)	Average daily water removal from reach in subbasin (10^4 m^3)	.wus
WUSHAL(1-12)	Average daily water removal from shallow aquifer in subbasin (10^4 m^3)	.wus
WUDEEP(1-12)	Average daily water removal from deep aquifer in subbasin (10^4 m^3)	.wus
WURES(1-12)	Average daily water removal from reservoir (10^4 m^3)	.res
WURTNF	Fraction of water removal lost in transfer and returned as reservoir outflow.	.res

21.6 点源负荷

SWAT直接模拟水、泥沙和其它组分来自路面的负荷。为了模拟非路面水和污染物负荷（如污水处理厂），SWAT允许在河道网络的任一点读入点源信息。点源负荷可以以日、月、年或者多年平均为单位。

包含点源负荷的文件由用户创建。污染物负荷被读入模型，并用recday、recmon、recyear或者reccnst命令在河道网络中演算。SWAT可以读入水、泥沙、有机氮、有机磷、硝酸盐、溶解态磷、氨氮、亚硝酸盐、重金属以及细菌数据。第31章将介绍流域配置文件的命令行格式，第43章将介绍点源文件的格式。

21.7 NOMENCLATURE

SW_{ly} Water content of the layer on a given day (mm H₂O)

FC_{ly} Field capacity water content of the layer (mm H₂O)

t_{drain} Time required to drain the soil to field capacity (hrs)

$tile_{wtr}$ Amount of water removed from the layer on a given day by tile drainage (mm H₂O)

第 22 章 方程:城市用地

大多数流域内有城市用地。估计城市用地的径流量和质量对于总和管理来说是必需的。SWAT 应用 SCS 径流曲线数法或 Green & Ampt 方程计算城市用地的径流量。泥沙和营养物负荷的计算有两个选择。第一种为 USGS 开发的估计暴雨径流量和组分负荷的线性回归方程(Driver and Tasker, 1988)。另一种为模拟污染物的累积和冲刷机制，与 SWMM (Storm Water Management Model , Huber and Dickinson, 1988)相似。

22.1 城市用地的特点

城市用地的不透水面积比例与农村用地不同。建筑物、停车场和路面的建设，增加了不同水面积，减少了下渗。随着城市发展，空间产流模式改变，人工河道、边石和暴雨排水和收集装置使得水流的水力效率增加。这些变化的直接效果是径流量和速率的增加，以及较高的峰值径流。

不透水地面可以分为两个不同的族：与排水系统有水力联系的区域和没有水力联系的区域。一个例子是，假设有一座被庭院包围的房子，屋顶上产生的径流会流入院子，并渗入土壤。屋顶是不透水的，但是与排水系统没有水力联系。相反地，如果停车场的径流进入排水系统，则其为有水力联系。

表 22-1 列出了不同的城市土地类型的典型的不透水面积比率以及直接与排水系统联系的不透水面积比率。

Table 22-1: Range and average impervious fractions for different urban land types.

Urban Land Type	Average total impervious	Range total impervious	Average directly connected impervious	Range directly connected impervious
Residential-High Density (> 8 unit/acre or unit/2.5 ha)	.60	.44 - .82	.44	.32 - .60
Residential-Medium Density (1-4 unit/acre or unit/2.5 ha)	.38	.23 - .46	.30	.18 - .36
Residential-Med/Low Density (> 0.5-1 unit/acre or unit/2.5 ha)	.20	.14 - .26	.17	.12 - .22
Residential-Low Density (< 0.5 unit/acre or unit/2.5 ha)	.12	.07 - .18	.10	.06 - .14
Commercial	.67	.48 - .99	.62	.44 - .92
Industrial	.84	.63 - .99	.79	.59 - .93

Transportation	.98	.88 - 1.00	.95	.85 - 1.00
Institutional	.51	.33 - .84	.47	.30 - .77

在干旱季节，灰尘、泥土和其它污染物在不透水地面累积。当降水发生时，不透水地面产生径流，径流将携带污染物进入排水系统，并进入流域河网。

22.2 城市用地的地表径流

在城市土地，地表径流的计算需针对直接水力联系的不透水地面和不直接联系的不透水地面/透水地面分别计算。对于不直接联系的不透水地面/透水地面，将采用一个复合的曲线数来计算地表径流，其计算公式为 (Soil Conservation Service Engineering Division, 1986)：

$$CN_c = \frac{CN_p \cdot \left(1 - imp_{tot} + \frac{imp_{dcon}}{2}\right) + 98 \cdot \left(\frac{imp_{dcon}}{2}\right)}{1 - imp_{con}} \quad \text{if } imp_{tot} \leq 0.30 \quad 22.2.1$$

$$CN_c = \frac{CN_p \cdot (-imp_{tot}) + 98 \cdot imp_{dcon}}{1 - imp_{con}} \quad \text{if } imp_{tot} > 0.30 \quad 22.2.2$$

式中： CN_c 为湿润条件II下的复合曲线数， CN_p 为此前的湿润条件II下的曲线数， imp_{tot} HRU中不透水面积比率(包括有水力联系和无水力联系)， imp_{con} 为HRU中直接水力联系的不透水地面面积比率， imp_{dcon} 为HRU中无直接水力联系的不透水地面面积比率。

Table 22-2: SWAT input variables that pertain to surface runoff calculations in urban areas.

**Input
File**

Variable Name	Definition	
CN2	CN_p : SCS moisture condition II curve number for pervious areas	.mgt
CNOP	CN_p : SCS moisture condition II curve number for pervious areas specified in plant, harvest/kill and tillage operation	.mgt
FIMP	imp_{tot} : fraction of urban land type area that is impervious	urban.dat
FCIMP	imp_{con} : fraction of urban land type area that is connected impervious	urban.dat

22.3 USGS 回归方程

SWAT中采用的回归方程是由Driver 和Tasker (1988)开发的。回归模型是在国家城市水质数据的基础上开发的。该模型考虑了径流复合与城市物理特征、土地利用和气候条件。USGS开发这些方程的目的是预测无测站流域的负荷。

回归模型根据总暴雨径流量、流域面积和不透水面积计算负荷。其一般形式为：

$$Y = \frac{\beta_0 \cdot (R_{day}/25.4)^{\beta_1} \cdot (DA/2.59)^{\beta_2} \cdot (imp_{tot} \cdot 100 + 1)^{\beta_3} \cdot \beta_4}{2.205} \quad 22.3.1$$

式中： Y 为总组分负荷 (kg) ， R_{day} 为日降雨量(mm H₂O) ， DA 为HRU面积 (km²) ， imp_{tot} HRU中不透水面积比率 (包括有水力联系和无水力联系) ， β ， 为回归系数。回归方程中采用的英制单位，所以单位转换用来计算其公制单位：25.4 mm/inch, 2.59 km²/mi², and 2.205 lb/kg。

USGS 基于年降雨量，得到三套不同的回归系数。第一类系数应用在年降雨量少于 508 mm 的流域。第二类系数 应用在年降雨量在 508 和 1016 mm

之间的流域。第三类系数应用在降雨量在 1016 mm 之上的流域。SWAT 根据气相生成器中的月降雨数据，确定每一个子流域的年降雨类别。

回归系数被用来估算悬浮固体负荷、总氮负荷、总磷负荷以及 CBOD (carbonaceous oxygen demand)。SWAT 可以计算悬浮固体负荷、总氮负荷和总磷负荷 (不能计算 CBOD)。针对这些组分的回归系数列在表 22-3 中。

一旦计算完成总氮和总磷，将根据 Northern Virginia Planning District Commission (1979)，提供的关系来确定有机和无机形态的比率。总氮负荷包含 70% 的有机氮和 30% 的无机氮。总磷负荷被分为 75% 的有机磷和 25% 的正磷酸盐。

Table 22-3: Urban regression coefficients (from Driver and Tasker, 1988).

Loading	Precipitation					
	Category	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4
suspended solids	I	1778.0	0.867	0.728	0.157	2.367
	II	812.0	1.236	0.436	0.202	1.938
	III	97.7	1.002	1.009	0.837	2.818
total nitrogen	I	20.20	0.825	1.070	0.479	1.258
	II	4.04	0.936	0.937	0.692	1.373
	III	1.66	0.703	0.465	0.521	1.845
total phosphorus	I	1.725	0.884	0.826	0.467	2.130
	II	0.697	1.008	0.628	0.469	1.790
	III	1.618	0.954	0.789	0.289	2.247
COD	I	407.0	0.626	0.710	0.379	1.518
	II	151.0	0.823	0.726	0.564	1.451
	III	102.0	0.851	0.601	0.528	1.978

I = annual precipitation < 508 mm

II = 508 mm < annual precipitation < 1,016 mm

III = annual precipitation > 1,016 mm

Table 22-4: SWAT input variables that pertain to urban modeling with regression equations.

Variable Name	Definition	Input File
IURBAN	Urban simulation code	.hru
URBLU	Urban land type identification number from urban database	.hru

FIMP	Fraction of HRU that is impervious. $imp_{tot} = FIMP \cdot 100$	urban.dat
PRECIPITATION	R_{day} : Precipitation on a given day (mm H ₂ O)	.pcp
HRU_FR	Fraction of total watershed area in HRU	.hru
DA_KM	Area of watershed (km ²)	.bsn
PCPMM(mon)	Average amount of precipitation falling in month (mm H ₂ O)	.wgn

22.4 累积/冲刷

在不透水区域，灰尘、泥土和其它组分，在干季会不断累积。累积可以是时间、交通流量、干沉降和道路清洗的函数。在暴雨径流事件，这些累积的物质被冲刷进入排水系统。虽然累积/冲刷在概念是可行的，但是模拟的可靠性和可信度在没有当地资料的情况下是很难保障的 (Huber and Dickinson, 1988)。

当选择使用 SWAT 中的累积冲刷功能时，城市 HRU 被分为透水和不透水区。除冲洗之外的管理操作将只在透水部分执行。冲洗操作营养固体物质在不透水区域的累积。对于 HRU 中的透水部分，泥沙、营养物负荷采用第 13 和 14 章介绍的方法计算。HRU 的不透水部分采用累积/冲刷算法来确定泥沙和营养物负荷。

累积冲刷算法计算固体物质的累积和冲刷。固体物质被假设含有固定的有机和无机氮、磷，不同的城市类型氮磷浓度不同。

固体物质的累积在干季，采用 Michaelis-Menton 方程计算：

$$SED = \frac{SED_{mx} \cdot td}{C_{half} + td} \quad 22.4.1$$

式中： SED 为固体物质累积量 (kg/curb km)， td 为距离最后一次 $SED = 0$ kg/curb km 事件的天数， SED_{mx} 为城市土地利用类型的最大可能固体物质累积量(kg/curb km)， t_{half} 为固体物质从 0 累积到 $\frac{1}{2} SED_{mx}$ 所需事件(days)。干日的定义为该日的降水量小于 0.1 mm。图 22-1 为一个累积曲线的例子。如图所示，Michaelis-Menton function 在初始阶段增加较快，然后逐渐变慢。

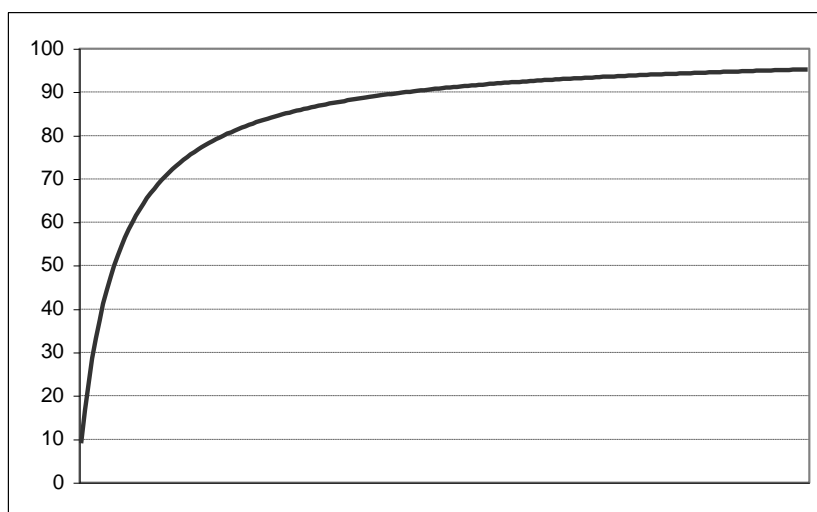


Figure 22-1: Build-up function for solids in urban areas.

决定累积函数曲线的的两个参数为 SED_{mx} 和 t_{half} 。这两个参数是城市土地利用类型的函数。

冲刷是在径流事件中不透水地表累积组分被侵蚀和溶解的过程。SWAT 采用指数关系来模拟冲刷过程(Huber and Dickinson, 1988):

$$Y_{sed} = SED_0 \cdot (1 - e^{-kk \cdot t}) \quad 22.4.2$$

式中： Y_{sed} 为在时刻 t 固体物质的累积冲刷量(kg/curb km)， SED_0 为降水事件开始时不透水地表累积的固体物质质量 (kg/curb km)，and kk 为系数。

系数, kk , 通过假设其于径流峰值成正比来估算：

$$kk = urb_{coef} \cdot q_{peak} \quad 22.4.3$$

式中： urb_{coef} 为冲刷系数 (mm^{-1})， q_{peak} 为径流峰值(mm/hr)。

urb_{coef} 的初始默认值为 0.18 mm^{-1} 并假设每小时 13mm 总径流将冲刷 90%的地表初始累积物。之后 urb_{coef} 的估计值在 $0.02-0.26 \text{ mm}^{-1}$ 之间。Huber and Dickinson (1988) 注意到 urb_{coef} 的估计值在 0.039 and 0.390 mm^{-1} 之间时，估算的泥沙浓度比较符合实际监测情况。他们同时也建议采用实测数据来校准该变量。

为了将泥沙符合的单位由 $kg/curb \text{ km}$ 转换为 kg/ha ，冲刷去除的泥沙符合需乘以道路密度。道路密度为城市土地利用类型的函数。来自不透水地表的氮和磷负荷，根据污染物浓度和泥沙负荷来求得。

22.4.1 街道清洗

城市地区通常采用街道清洗来控制固体物质和垃圾的累积。虽然长期以来街道清洗被认为会提高城市径流质量，EPA 的研究表明街道清洗对径流质量的影响甚微，除非每天进行清洗(U.S. Environmental Protection Agency, 1983)。

SWAT 只有在采用累积冲刷算法计算城市污染物负荷时，才会执行清洗操作。街道清洗只在干日执行，干日是指地表径流小于 0.1 mm 。清洗去除方程为(Huber and Dickinson, 1988)：

$$SED = SED_0 \cdot \left(-fr_{av} \cdot reff \right) \quad 22.4.4$$

式中： SED 为冲洗后剩余的固体物质(kg/curb km)， SED_0 为清洗前存在的固体物质(kg/curb km)， fr_{av} 为清洗道路长度的分数(可得性因子)， $reff$ 为清洗设备的去除效率。可得性因子和去除效率由用户设定。

Table 22-5: Removal efficiencies (fraction removed) from street cleaner path (from Pitt, 1979)

Street Cleaning Program and Conditions			Total Solids	BOD ₅	COD	KN	PO ₄	Pesticides
Vacuum Street Cleaner (5.5-55 kg/curb km)								
1 pass			.31	.24	.16	.26	.08	.33
2 passes			.45	.35	.22	.37	.12	.50
3 passes			.53	.41	.27	.45	.14	.59
Vacuum Street Cleaner (55-280 kg/curb km)								
1 pass			.37	.29	.21	.31	.12	.40
2 passes			.51	.42	.29	.46	.17	.59
3 passes			.58	.47	.35	.51	.20	.67
Vacuum Street Cleaner (280-2820 kg/curb km)								
1 pass			.48	.38	.33	.43	.20	.57
2 passes			.60	.50	.42	.54	.25	.72
3 passes			.63	.52	.44	.57	.26	.75
Mechanical Street Cleaner (50-500 kg/curb km)								
1 pass			.54	.40	.31	.40	.20	.40
2 passes			.75	.58	.48	.58	.35	.60
3 passes			.85	.69	.59	.69	.46	.72
Flusher			.30	<i>a</i>	<i>a</i>	<i>a</i>	<i>a</i>	<i>a</i>
Mechanical Street Cleaner followed by a Flusher			.80	<i>b</i>	<i>b</i>	<i>b</i>	<i>b</i>	<i>b</i>

a: efficiency fraction estimated .15 to .40

b: efficiency fraction estimated .35 to 1.00

可得性因子， fr_{av} ，清洗道路长度的分数。通常情况下将会清洗总道路长度。

街道清洗的去除效率为清洗设备的函数。去除效率根据清洗组分而变化，对于微粒组分效率较高。氮、磷的去除效率通常小于固体颗粒的去除效率(Pitt, 1979)。因为 SWAT 假设在固体物质中营养物组分有一定的浓度，所以对于所有组分的去除效率是相同的。表 22-5 提供了不同街道清洗操作的去除效率。

Table 22-6: SWAT input variables that pertain to build up/wash off.

Variable Name	Definition	Input File
IURBAN	Urban simulation code	.hru
URBLU	Urban land type identification number from urban database	.hru
DIRTMX	SED_{mx} : maximum amount of solids allowed to build up on impervious areas (kg/curb km)	urban.dat
THALF	t_{half} : number of days for amount of solids on impervious area to build up from 0 kg/curb km to $\frac{1}{2} SED_{mx}$	urban.dat
URBCOEF	urb_{coef} : wash off coefficient (mm^{-1})	urban.dat
CURBDEN	curb length density in urban land type (km/ha)	urban.dat
TNCONC	concentration of total nitrogen in suspended solid load (mg N/kg)	urban.dat
TPCONC	concentration of total phosphorus in suspended solid load (mg N/kg)	urban.dat
TNO3CONC	concentration of nitrate in suspended solid load (mg N/kg)	urban.dat
SWEEPEFF	$reff$: removal efficiency of the sweeping equipment	.mgt
AVWSP	fr_{av} : fraction of the curb length that is sweepable.	.mgt

22.5 NOMENCLATURE

CN Curve number

DA HRU drainage area (km^2)

R_{day} Amount of rainfall on a given day (mm H_2O)

SED Solid build up (kg/curb km)

SED_{mx} Maximum accumulation of solids possible for the urban land type (kg/curb km)

- Y Total constituent load (kg)
- Y_{sed} Cumulative amount of solids washed off at time t (kg/curb km)
- fr_{av} Fraction of the curb length available for sweeping (the availability factor)
- imp_{con} Fraction of the HRU area that is impervious and hydraulically connected to the drainage system
- imp_{dcon} Fraction of the HRU area that is impervious but not hydraulically connected to the drainage system
- imp_{tot} Fraction of the HRU area that is impervious (both connected and disconnected)
- kk Coefficient in urban wash off equation
- q_{peak} Peak runoff rate (mm/hr)
- re_{ff} Removal efficiency of the sweeping equipment
- t_{half} Length of time needed for solid build up to increase from 0 kg/curb km to $\frac{1}{2} SED_{mx}$ (days)
- urb_{coef} Wash off coefficient (mm^{-1})
- β_0 Coefficient for USGS regression equations for urban loadings
- β_1 Coefficient for USGS regression equations for urban loadings
- β_2 Coefficient for USGS regression equations for urban loadings
- β_3 Coefficient for USGS regression equations for urban loadings
- β_4 Coefficient for USGS regression equations for urban loadings

22.6 REFERENCES

- Driver, N.E. and G.D. Tasker. 1988. Techniques for estimation of storm-runoff loads, volumes, and selected constituent concentrations in urban watersheds in the United States. U.S. Dept. of the Interior, U.S. Geological Survey: Books and Open-File Reports Section 88-191.
- Huber, W.C. and R.E. Dickinson. 1988. Storm water management model, version 4: user's manual. U.S. Environmental Protection Agency, Athens, GA.
- Northern Virginia Planning District Commission. 1979. Guidebook for screening urban nonpoint pollution management strategies: a final report prepared for Metropolitan Washington Council of Governments. Northern Virginia Planning District Commission, Falls Church, VA.
- Pitt, R. 1979. Demonstration of non-point pollution abatement through improved street cleaning practices. EPA-600/2-79-161 (NTIS PB80-108988), U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH.

第 22 章 方程:城市用地

Soil Conservation Service Engineering Division. 1986. Urban hydrology for small watersheds. U.S. Department of Agriculture, Technical Release 55.

U.S. Environmental Protection Agency. 1983. Results of the nationwide urban runoff program; Volume 1 final report. NTIS PB84-185552, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C.

第 23 章 方程:水流演算

露天河道水流定义为具有自由水面的河道水流，如河流或非充满管道水流。SWAT 采用 Manning 公式来计算水流的流量和速率。水流在河道网络中的运动，采用变量存储法或 Muskingum 法演算。这两种方法军委动力波模型的变体。关于动力波洪水演算模型的详细介绍可参考 Chow et al. (1988)。

23.1 河道特征

SWAT 假设主河道、子河道的形状为梯形 (Figure 23-1).

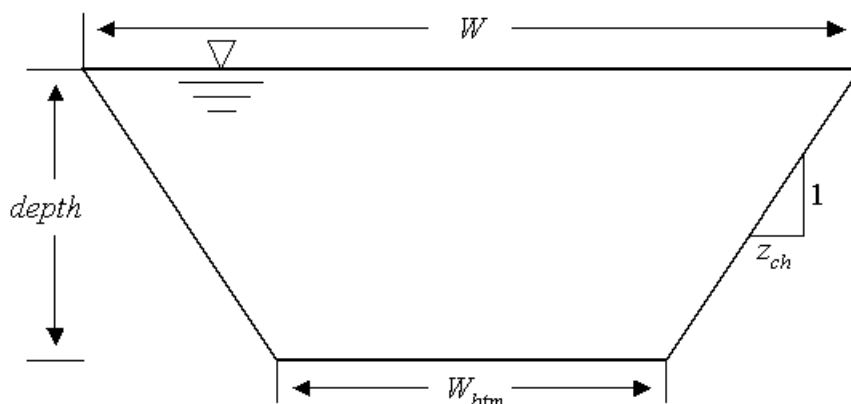


Figure 23-1: Trapezoidal channel dimensions

用户需要定义河道长度，河道溢出时的宽度和深度，沿河长的河道坡度，以及 Manning 参数“n”。SWAT 假设河道两岸高宽高比为 2:1 ($z_{ch} = 2$)。河道岸边的坡度为 $\frac{1}{2}$ or 0.5。底部宽度根据河道溢出时的齐岸宽度和深度来计算：

$$W_{btm} = W_{bnkfull} - 2 \cdot z_{ch} \cdot depth_{bnkfull} \quad 23.1.1$$

式中： W_{btm} 为河道底部宽度(m)， $W_{bnkfull}$ 河道溢出时的齐岸宽度 (m)， z_{ch} 为河道岸边坡度的倒数， $depth_{bnkfull}$ 河道溢出时的深度 (m)。由于假设 $z_{ch} = 2$ ，因此方程 23.1.1 计算的底部宽度可能为负或 0。如果这种情况发生，模型将设

$W_{btm} = 0.5 \cdot W_{bnkfull}$ ，并根据方程 23.1.1 计算 z_{ch} ：

$$z_{ch} = \frac{W_{bnkfull} - W_{btm}}{2 \cdot depth_{bnkfull}} \quad 23.1.2$$

对于一定深度的河道水流，在水面的河道宽度为 g :

$$W = W_{btm} + 2 \cdot z_{ch} \cdot depth \quad 23.1.3$$

式中： W 水面的河道宽度 (m)， W_{btm} 为河道底部宽度(m)， z_{ch} 为河道岸边坡度的倒数， $depth$ 河道水流深度 (m)。河道水流横截面采用下式计算：

$$A_{ch} = (W_{btm} + z_{ch} \cdot depth) \cdot depth \quad 23.1.4$$

式中： A_{ch} 河道水流横截面 (m^2)， W_{btm} 为河道底部宽度(m)， z_{ch} 为河道岸边坡度的倒数， $depth$ 河道水流深度 (m)。河道的湿周为：

$$P_{ch} = W_{btm} + 2 \cdot depth \cdot \sqrt{1 + z_{ch}^2} \quad 23.1.5$$

式中： P_{ch} 河道的湿周 (m)。水力半径采用下式计算：

$$R_{ch} = \frac{A_{ch}}{P_{ch}} \quad 23.1.6$$

式中： R_{ch} 一定深度水流的水力半径 (m)， A_{ch} 河道水流横截面(m^2)， P_{ch} is 河道的湿周 (m)。河道中的水流体积为：

$$V_{ch} = 1000 \cdot L_{ch} \cdot A_{ch} \quad 23.1.7$$

式中： V_{ch} 河道中的水流体积 (m^3)， L_{ch} 河道长度 (km)， A_{ch} 河道水流横截面 (m^2)。

当河道中的水体积超过河道可以持蓄的最大体积时，多余的水漫过河漫滩。SWAT 中假设的河漫滩形状如图 23-2 所示。

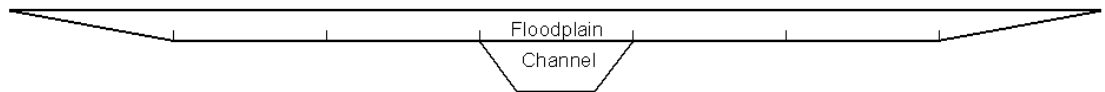


Figure 23-2: Illustration of flood plain dimensions.

河漫滩底部宽度, $W_{btm, fld}$, 为 $W_{btm, fld} = 5 \cdot W_{bnkfull}$ 。SWAT 假设河漫滩岸边坡的宽高比为 4:1 ($z_{fld} = 4$)。河漫滩岸边坡为 $1/4$ or 0.25。

当水流进入河漫滩后, 水流深度、横截面和湿周的计算, 需总和河道和河漫滩部分:

$$depth = depth_{bnkfull} + depth_{fld} \quad 23.1.8$$

$$A_{ch} = (W_{btm} + z_{ch} \cdot depth_{bnkfull}) \cdot depth_{bnkfull} + (W_{btm, fld} + z_{fld} \cdot depth_{fld}) \cdot depth_{fld} \quad 23.1.9$$

$$P_{ch} = W_{btm} + 2 \cdot depth_{bnkfull} \cdot \sqrt{1 + z_{ch}^2} + 4 \cdot W_{bnkfull} + 2 \cdot depth_{fld} \cdot \sqrt{1 + z_{fld}^2} \quad 23.1.10$$

式中: $depth$ 水流总深度 (m), $depth_{bnkfull}$ 河道水流齐岸深度(m), $depth_{fld}$ 河漫滩水流深度(m), A_{ch} 河道水流横截面 (m^2), W_{btm} 为河道底部宽度 (m), z_{ch} 为河道岸边坡度的倒数, $W_{btm, fld}$ 河漫滩底部宽度(m), z_{fld} 为河漫滩岸边坡度的倒数, P_{ch} 一定水流深度的水力半径 (m), $W_{bnkfull}$ 河道水流齐岸宽度 (m)。

Table 23-1: SWAT input variables that pertain to channel dimension calculations.

Variable name	Definition	File Name
CH_W(2)	$W_{bnkfull}$: Width of channel at top of bank (m)	.rte
CH_D	$depth_{bnkfull}$: Depth of water in channel when filled to bank (m)	.rte
CH_L(2)	L_{ch} : Length of main channel (km)	.rte

23.2 流量和速率

针对河道等速水流 Manning 方程 用来计算给定时段河段内的水流流量和速率:

$$q_{ch} = \frac{A_{ch} \cdot R_{ch}^{2/3} \cdot slp_{ch}^{1/2}}{n} \quad 23.2.1$$

$$v_c = \frac{R_{ch}^{2/3} \cdot slp_{ch}^{1/2}}{n} \quad 23.2.2$$

式中： q_{ch} 河道水流流量 (m^3/s), A_{ch} 河道水流横截面 (m^2), R_{ch} 给定深度水流的水力半径 (m), slp_{ch} 河道坡度 (m/m), n 为河道 Manning “n” 系数, and v_c 河道水流流速 (m/s)。

SWAT 以体积为单位演算水流。水流横截面的日均值, A_{ch} , 通过重置方程 23.1.7 来求解：

$$A_{ch} = \frac{V_{ch}}{1000 \cdot L_{ch}} \quad 23.2.3$$

式中： A_{ch} 为河道水流横截面 (m^2), V_{ch} 河道内存储的水量 (m^3), and L_{ch} 河道长度 (km)。通过重置方程 23.1.4 可以计算给定时段的水流深度：

$$depth = \sqrt{\frac{A_{ch}}{z_{ch}} + \left(\frac{W_{bim}}{2 \cdot z_{ch}}\right)^2} - \frac{W_{bim}}{2 \cdot z_{ch}} \quad 23.2.4$$

式中： $depth$ 河道水流深度 (m), A_{ch} 为河道水流横截面(m^2), W_{bim} 河道底部宽度 (m), z_{ch} 为河道岸边坡度的倒数。方程 23.2.4 在水流没有有漫过河岸时有效。如果水流漫过河岸, 进入河漫滩, 则水深采用下式计算：

$$depth = depth_{bnkfull} + \sqrt{\frac{A_{ch} - A_{ch,bnkfull}}{z_{fld}} + \left(\frac{W_{bim,fld}}{2 \cdot z_{fld}}\right)^2} - \frac{W_{bim,fld}}{2 \cdot z_{fld}} \quad 23.2.5$$

式中： $depth$ 水流深度(m), $depth_{bnkfull}$ 为水流齐岸时的河道深度 (m), A_{ch} 为水流横截面(m^2), $A_{ch,bnkfull}$ 为齐岸时河道水流横截面 (m^2), $W_{bim,fld}$ 河漫滩底部宽度 (m), z_{fld} 为河漫滩岸边坡度的倒数。

第 23 章 方程:水流演算

一旦深度确定,可以利用方程 23.1.5 (或者 23.1.10) 和 23.1.6 计算湿周和水力半径。至此,计算水流流量和速率的所有参数都已知,可以求解方程 23.2.1 和 23.2.2。

Table 23-2: SWAT input variables that pertain to channel flow calculations.

Variable name	Definition	File Name
CH_S(2)	slp_{ch} : Average channel slope along channel length ($m\ m^{-1}$)	.rte
CH_N(2)	n : Manning's "n" value for the main channel	.rte
CH_L(2)	L_{ch} : Length of main channel (km)	.rte

23.3 变量存储演算方法

变量存储演算方法是由 Williams (1969)开发，并应用在 HYMO (Williams and Hann, 1973)和 ROTO (Arnold et al., 1995)模型中。

对于某一河段，存储演算根据连续方程：

$$V_{in} - V_{out} = \Delta V_{stored} \quad 23.3.1$$

式中： V_{in} 给定时段的入流量 ($m^3\ H_2O$)， V_{out} 给定时段的出流量($m^3\ H_2O$)，

ΔV_{stored} 给定时段河道存储量的变化 ($m^3\ H_2O$)。这一方程也可以写为：

$$\Delta t \cdot \left(\frac{q_{in,1} + q_{in,2}}{2} \right) - \Delta t \cdot \left(\frac{q_{out,1} + q_{out,2}}{2} \right) = V_{stored,2} - V_{stored,1} \quad 23.3.2$$

式中： Δt 时段长度 (s), $q_{in,1}$ 该时段开始时的入流速率 (m^3/s), $q_{in,2}$ 该时段结束时的入流速率 (m^3/s), $q_{out,1}$ 该时段开始时的出流速率(m^3/s), $q_{out,2}$ 该时段结束时的出流速率(m^3/s), $V_{stored,1}$ 该时段开始时的存储量 ($m^3\ H_2O$), $V_{stored,2}$ is 该时段结束时的存储量 ($m^3\ H_2O$). 重置方程 23.3.2，将所有已知参数安排在左边，

$$q_{in,ave} + \frac{V_{stored,1}}{\Delta t} - \frac{q_{out,1}}{2} = \frac{V_{stored,2}}{\Delta t} + \frac{q_{out,2}}{2} \quad 23.3.3$$

式中： $q_{in,ave}$ 时段内的平均入流速率： $q_{in,ave} = \frac{q_{in,1} + q_{in,2}}{2}$.

传播时间通过将水流量除以水流速度求得：

$$TT = \frac{V_{stored}}{q_{out}} = \frac{V_{stored,1}}{q_{out,1}} = \frac{V_{stored,2}}{q_{out,2}} \quad 23.3.4$$

式中： TT 为传播时间(s), V_{stored} 为存储量 ($m^3 H_2O$), q_{out} 为出流速率 (m^3/s).

为得到传播时间与存储系数的关系，将方程 23.3.4 代入代入 23.3.3

$$q_{in,ave} + \frac{V_{stored,1}}{\left(\frac{\Delta t}{TT}\right) \cdot \left(\frac{V_{stored,1}}{q_{out,1}}\right)} - \frac{q_{out,1}}{2} = \frac{V_{stored,2}}{\left(\frac{\Delta t}{TT}\right) \cdot \left(\frac{V_{stored,2}}{q_{out,2}}\right)} + \frac{q_{out,2}}{2} \quad 23.3.5$$

上式可以简化为：

$$q_{out,2} = \left(\frac{2 \cdot \Delta t}{2 \cdot TT + \Delta t}\right) \cdot q_{in,ave} + \left(1 - \frac{2 \cdot \Delta t}{2 \cdot TT + \Delta t}\right) \cdot q_{out,1} \quad 23.3.6$$

上面的方程与系数方程相似：

$$q_{out,2} = SC \cdot q_{in,ave} + (-SC) \cdot q_{out,1} \quad 23.3.7$$

式中： SC 为存储系数。方程 23.3.7 为 SCS convex 演算方法(SCS, 1964) 和 Muskingum 法的基础 (Brakensiek, 1967; Overton, 1966)。根据 23.3.6，方程 23.3.7 中的存储系数定义为：

$$SC = \frac{2 \cdot \Delta t}{2 \cdot TT + \Delta t} \quad 23.3.8$$

可得

$$(-SC) \cdot q_{out} = SC \cdot \frac{V_{stored}}{\Delta t} \quad 23.3.9$$

代入方程 23.3.7 得

$$q_{out,2} = SC \cdot \left(q_{in,ave} + \frac{V_{stored,1}}{\Delta t} \right) \quad 23.3.10$$

将速率转化为容量，需要将方程两边同时乘以时间长度：

$$V_{out,2} = SC \cdot (I_{in} + V_{stored,1})$$

23.3.11

23.4 MUSKINGUM 演算方法

Muskingum 演算模型采用楔形和棱形存储来模拟河道中的存储容量

(Figure 23-3)。

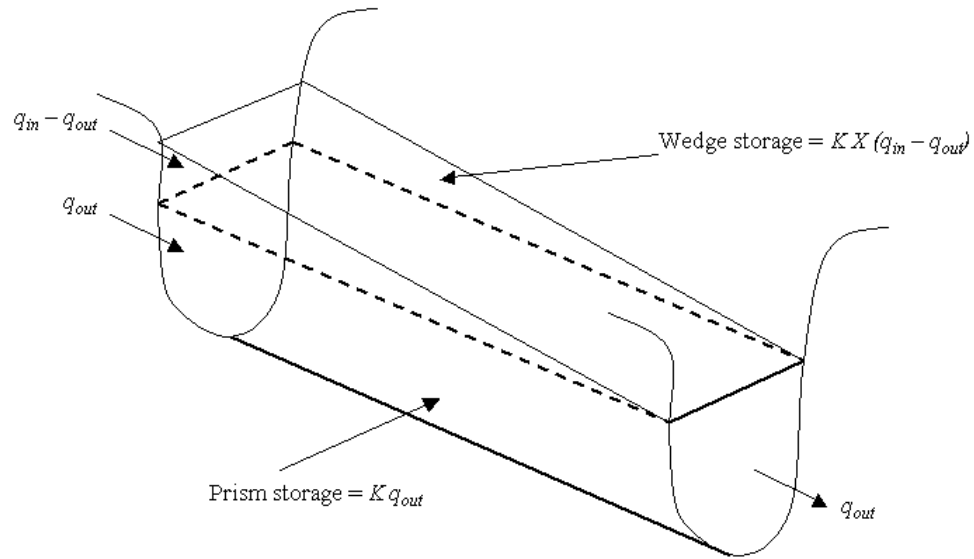


Figure 23-3: Prism and wedge storages in a reach segment (from Chow et al., 1988)

当洪水波进入河段时，入流超过出流，产生楔形存储。随着洪水波的消退，出流超过入流，产生负楔形存储。除了楔形存储，河段包括棱形存储，如图所示，棱形存储为整个河段中最小横截面乘以河长得到。

根据 Manning 方程 (equation 23.2.1)，水流的横截面被假设为与给定河段出流成正比。根据这一假设，棱形存储可以表示为出流的函数， $K \cdot q_{out}$ ， K 为存储与出流的比例，其单位为时间。采用相似的方法，楔形存储的容量可以表示为 $K \cdot X \cdot (q_{in} - q_{out})$ ， X 为入流出流决定河道存储量的相对重要性的权重因子。将上面两相相加：

$$V_{stored} = K \cdot q_{out} + K \cdot X \cdot (q_{in} - q_{out}) \quad 23.4.1$$

式中： V_{stored} 存储容量 ($\text{m}^3 \text{H}_2\text{O}$), q_{in} 为入流速率 (m^3/s), q_{out} 出流速率 (m^3/s), K 河道存储时间常数 (s), X 为权重因子。这一方程可以重新安排为：

$$V_{stored} = K \cdot (X \cdot q_{in} + (1 - X) \cdot q_{out}) \quad 23.4.2$$

这一形式于方程 23.3.7 相似。

权重因子, X , 最低为 0.0, 最高为 0.5。这一因子为楔形存储的函数。对于水库存储, 没有楔形存储, $X = 0.0$ 。对于完全楔形, $X = 0.5$ 。自然河道, X 通常在 0.0 和 0.3 之间, 平均为 0.2。

方程 23.4.2 中存储容量的定义可以引入到连续方程 (23.3.2) 中, 并简化为：

$$q_{out,2} = C_1 \cdot q_{in,2} + C_2 \cdot q_{in,1} + C_3 \cdot q_{out,1} \quad 23.4.3$$

式中： $q_{in,1}$ 该时段开始时的入流速率(m^3/s), $q_{in,2}$ 该时段结束时的入流速率 (m^3/s), $q_{out,1}$ 该时段开始时的出流速率(m^3/s), $q_{out,2}$ 该时段结束时的出流速率 (m^3/s),

$$C_1 = \frac{\Delta t - 2 \cdot K \cdot X}{2 \cdot K \cdot (1 - X) \cdot \Delta t} \quad 23.4.4$$

$$C_2 = \frac{\Delta t + 2 \cdot K \cdot X}{2 \cdot K \cdot (1 - X) \cdot \Delta t} \quad 23.4.5$$

$$C_3 = \frac{2 \cdot K \cdot (1 - X)}{2 \cdot K \cdot (1 - X) \cdot \Delta t} \quad 23.4.6$$

式中： $C_1 + C_2 + C_3 = 1$ 。为了将所有的值表示为容量单位, 方程 23.4.3 两边

同时乘以时间长度：

$$V_{out,2} = C_1 \cdot V_{in,2} + C_2 \cdot V_{in,1} + C_3 \cdot V_{out,1} \quad 23.4.7$$

为了保持数值稳定性，避免计算负的出流，则必需满足下面的条件：

$$2 \cdot K \cdot X < \Delta t < 2 \cdot K \cdot (X) \quad 23.4.8$$

权重因子的值， X ，由用户输入。 存储时间常数值根据下式估算：

$$K = coef_1 \cdot K_{bnkfull} + coef_2 \cdot K_{0.1bnkfull} \quad 23.4.9$$

式中： K 河段的存储时间常数 (s), $coef_1$, $coef_2$ 用户输入的权重系数， $K_{bnkfull}$ 河道在齐岸水流时的存储时间常数(s), $K_{0.1bnkfull}$ 十分之一齐岸水流时计算的河段存储时间常数(s). 采用 Cunge (1969)开发的方程来计算 $K_{bnkfull}$ 和 $K_{0.1bnkfull}$ ：

$$K = \frac{1000 \cdot L_{ch}}{c_k} \quad 23.4.10$$

式中： K 存储时间常数 (s), L_{ch} 河道长度(km), c_k 一定深度下额水流快速响应(m/s)。 Celerity 是河道水流速度变化的速率，其定义为：

$$c_k = \frac{d}{dA_{ch}} (q_{ch}) \quad 23.4.11$$

式中水流流量, q_{ch} , 通过 Manning 方程来计算。 将方程 23.2.1 对横截面积微分得到：

$$c_k = \frac{5}{3} \cdot \left(\frac{R_{ch}^{2/3} \cdot slp_{ch}^{1/2}}{n} \right) = \frac{5}{3} \cdot v_c \quad 23.4.12$$

式中 c_k 为 celerity (m/s), R_{ch} 一定深度条件下的水力半径 (m), slp_{ch} 河道坡度 (m/m), n 为河道的 Manning 参数 “n”, v_c 水流速率 (m/s)。

Table 23-3: SWAT input variables that pertain to Muskingum routing.

Variable name	Definition	File Name
MSK_X	X: weighting factor	.bsn

MSK_CO1	$coef_1$: weighting factor for influence of normal flow on storage time constant value	.bsn
MSK_CO2	$coef_2$: weighting factor for influence of low flow on storage time constant	.bsn

23.5 传播损失

根据河流接收的地下水，可以分为瞬时河流、间歇性河流和常年河流。

瞬时河流在暴雨事件期间和之后很短时间内有水流，在其它时间为干涸的。

间歇性河流，在一年中的部分时间是干涸的，但是当地下水水位高时以及暴雨期有水流。常年河流，在整年都接收地下水供给，有常年水流。

在河流没有接收地下水供给的时段，河道可能通过向两岸和底部传播损失水分。传播损失通过下式计算：

$$t_{loss} = K_{ch} \cdot TT \cdot P_{ch} \cdot L_{ch} \quad 23.5.1$$

式中： t_{loss} 为河道传播损失 ($m^3 H_2O$)， K_{ch} 为河道淤积层的有效水力传导滤 (mm/hr)， TT 水流输移时间 (hr)， P_{ch} 为湿周 (m)， L_{ch} 为河道长度(km)。主河道的传播损失，被假设进入河岸存储或深层地下水。

不同淤积物质的 K_{ch} 的典型值见表 23-4. 对于连续接收地下水供给的常年河流，有效水力传导率为 0。

Table 23-4: Example hydraulic conductivity values for various bed materials (from Lane, 1983).

Bed material group	Bed material characteristics	Hydraulic conductivity
1	Very high loss rate	Very clean gravel and large sand
		> 127 mm/hr
2	High loss rate	Clean sand and gravel, field conditions
		51-127 mm/hr
3	Moderately high loss rate	Sand and gravel mixture with low silt-clay content
		25-76 mm/hr
4		

Moderate loss rate 5	Sand and gravel mixture with high silt-clay content	6-25 mm/hr
Insignificant to low loss rate	Consolidated bed material; high silt-clay content	0.025-2.5 mm/hr

Table 23-5: SWAT input variables that pertain to transmission losses.

Variable name	Definition	File Name
CH_K(2)	K_{ch} : Effective hydraulic conductivity of channel (mm/hr)	.rte
CH_L(2)	L_{ch} : Length of main channel (km)	.rte

23.6 蒸发损失

河道的蒸发损失，采用下式计算：

$$E_{ch} = coef_{ev} \cdot E_o \cdot L_{ch} \cdot W \cdot fr_{\Delta t} \quad 23.6.1$$

式中： E_{ch} 河道日均蒸发量 ($m^3 H_2O$)， $coef_{ev}$ 为蒸发系数， E_o 为潜在蒸发 ($mm H_2O$)， L_{ch} 为河道长度 (km)， W 水面河道的宽度 (m)， $fr_{\Delta t}$ 水流在河道中时间占时间步长的分数。

蒸发系数是用户可调参数，其变化范围为：0.0 - 1.0。

水流在河道中时间占时间步长的分数将传输时间除以时间步长得到。

Table 23-6: SWAT input variables that pertain to evaporation losses.

Variable name	Definition	File Name
EVRCH	$coef_{ev}$: Reach evaporation adjustment factor	.bsn
CH_L(2)	L_{ch} : Length of main channel (km)	.rte

23.7 BANK STORAGE

模拟日进入河岸存储的水量采用下式计算：

$$bnk_{in} = tloss \cdot (-fr_{trns}) \quad 23.7.1$$

式中： bnk_{in} 为进入河岸存储的水量($m^3 H_2O$)， $tloss$ 为河道传播损失($m^3 H_2O$)， fr_{trns} 为进入深层地下水的河道传播损失分数。

河道存储补给子流域中的主河道或河段。岸边流通过回归曲线模拟，方法与地下水补给相似。由河岸存储进入河道的水量由下式计算：

$$V_{bnk} = bnk \cdot (-\alpha_{bnk}) \quad 23.7.2$$

式中： V_{bnk} 为通过回归流，从河岸存储进入河道的水量 ($m^3 H_2O$)， bnk 为河岸存储的水量($m^3 H_2O$)， α_{bnk} 为岸边流回归常数。

水分可以从河岸存储进入临近的非饱和区。SWAT 根据蒸散发水分需求模拟水分向非饱和区的运动。为了避免与土壤蒸发和散发的混淆，这一过程被定义为‘revap’。这一过程在饱和区距地面较浅或植物根系较深的流域十分显著。从河岸存储的‘revap’由子流域中最后一个 HRU 的地下水在蒸发系数确定。

模拟日从河岸存储通过‘revap’去除的最大水量为：

$$bnk_{revap,mx} = \beta_{rev} \cdot E_o \cdot L_{ch} \cdot W \quad 23.7.3$$

式中： $bnk_{revap,mx}$ 响应水分短缺进入非饱和区的最大水量 ($m^3 H_2O$)， β_{rev} 再蒸发系数， E_o 模拟日潜在蒸散发 ($mm H_2O$)， L_{ch} 河道长度 (km)， W 水面河道宽度 (m)。模拟日实际再蒸发量由下式计算：

$$bnk_{revap} = bnk \quad \text{if } bnk < bnk_{revap,mx} \quad 23.7.4$$

$$bnk_{revap} = bnk_{revap, mx} \quad \text{if } bnk \geq bnk_{revap, mx} \quad 23.7.5$$

式中： bnk_{revap} 响应水分短缺进入非饱和区的实际水量($\text{m}^3 \text{H}_2\text{O}$), $bnk_{revap, mx}$ 响应水分短缺进入非饱和区的最大水量($\text{m}^3 \text{H}_2\text{O}$), bnk 模拟日开始的河岸存储($\text{m}^3 \text{H}_2\text{O}$)。

Table 23-7: SWAT input variables that pertain to bank storage.

Variable name	Definition	File Name
TRNSRCH	fr_{rms} : Fraction of transmission losses partitioned to the deep aquifer	.bsn
ALPHA_BNK	α_{bnk} : Bank flow recession constant or constant of proportionality	.rte
GW_REVAP	β_{rev} : Revap coefficient	.gw

23.8 河道水量平衡

在时间步长结束时，河道中的水存储量：

$$V_{stored,2} = V_{stored,1} + V_{in} - V_{out} - tloss - E_{ch} + div + V_{bnk} \quad 23.8.1$$

式中： $V_{stored,2}$ 为时间步长结束时，河道中的水存储量 ($\text{m}^3 \text{H}_2\text{O}$)， $V_{stored,1}$ 为时间步长开始时，河道中的水存储量 ($\text{m}^3 \text{H}_2\text{O}$)， V_{in} 为时间步长内进入河道的水量 ($\text{m}^3 \text{H}_2\text{O}$)， V_{out} 为时间步长内流出河道的水量 ($\text{m}^3 \text{H}_2\text{O}$)， $tloss$ 通过河床的河道水流传播损失 ($\text{m}^3 \text{H}_2\text{O}$)， E_{ch} 为模拟日河道的蒸发量 ($\text{m}^3 \text{H}_2\text{O}$)， div 调水对河道水量的改变 ($\text{m}^3 \text{H}_2\text{O}$)， V_{bnk} 岸边存储通过回归流增加的河道水量 ($\text{m}^3 \text{H}_2\text{O}$)。

SWAT 将方程 23.3.11 或 23.4.7 计算的出流，作为河道水量的净去除量。当计算传播损失，蒸发和其它水分损失时，进入下一河段的出流相应减少。出流和其它损失之和应与方程 23.3.11 或 23.4.7 的计算值相等。

23.9 NOMENCLATURE

- A_{ch} Cross-sectional area of flow in the channel (m^2)
 $A_{ch,bnkfull}$ Cross-sectional area of flow in the channel when filled to the top of the bank (m^2)
 $C1$ Coefficient in Muskingum flood routing equation
 $C2$ Coefficient in Muskingum flood routing equation
 $C3$ Coefficient in Muskingum flood routing equation
 E_{ch} Evaporation from the reach for the day ($m^3 H_2O$)
 E_o Potential evapotranspiration ($mm d^{-1}$)
 K Storage time constant for the reach (s)
 $K_{0.1bnkfull}$ Storage time constant calculated for the reach segment with one-tenth of the bankfull flows (s)
 $K_{bnkfull}$ Storage time constant calculated for the reach segment with bankfull flows (s)
 K_{ch} Effective hydraulic conductivity of the channel alluvium (mm/hr)
 L_{ch} Length of main channel (km)
 P_{ch} Wetted perimeter for a given depth of flow (m)
 R_{ch} Hydraulic radius for a given depth of flow (m)
 SC Storage coefficient for variable storage flow routing
 TT Travel time (s)
 V_{bnk} Volume of water added to the reach via return flow from bank storage ($m^3 H_2O$)
 V_{ch} Volume of water stored in the channel (m^3)
 V_{in} Volume of inflow during the time step ($m^3 H_2O$)
 V_{out} Volume of outflow during the time step ($m^3 H_2O$)
 V_{stored} Volume of water stored in water body or channel ($m^3 H_2O$)
 W Width of channel at water level (m)
 $W_{bnkfull}$ Top width of the channel when filled with water (m)
 W_{bm} Bottom width of the channel (m)
 $W_{bm, fld}$ Bottom width of the flood plain (m)
 X Weighting factor in Muskingum routing

 bnk Total amount of water in bank storage ($m^3 H_2O$)
 bnk_{in} Amount of water entering bank storage ($m^3 H_2O$)
 $bnk_{revap, mx}$ Maximum amount of water moving into the unsaturated zone in response to water deficiencies ($m^3 H_2O$)
 c_k Celerity corresponding to the flow for a specified depth (m/s)
 $coef_1$ Weighting coefficient for storage time constant calculation
 $coef_2$ Weighting coefficient for storage time constant calculation
 $coef_{ev}$ Evaporation coefficient
 $depth$ Depth of water in the channel (m)
 $depth_{bnkfull}$ Depth of water in the channel when filled to the top of the bank (m)
 $depth_{fld}$ Depth of water in the flood plain (m)

- div* Volume of water added or removed from the reach for the day through diversions ($\text{m}^3 \text{H}_2\text{O}$)
- fr_{trns}* Fraction of transmission losses partitioned to the deep aquifer
- fr _{Δt}* Fraction of the time step in which water is flowing in the channel
- n* Manning's roughness coefficient for the subbasin or channel
- q_{ch}* Average channel flow rate ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)
- q_{in}* Inflow rate (m^3/s)
- q_{out}* Outflow rate (m^3/s)
- slp_{ch}* Average channel slope along channel length (m m^{-1})
- tloss* Channel transmission losses ($\text{m}^3 \text{H}_2\text{O}$)
- v_c* Average channel velocity (m s^{-1})
- Z_{ch}* Inverse of the channel side slope
- Z_{fld}* Inverse of the flood plain side slope
- α_{bnk}* Bank flow recession constant or constant of proportionality
- β_{rev}* Revap coefficient
- Δt* Length of the time step (s)

23.10 REFERENCES

- Arnold, J.G., J.R. Williams, and D.R. Maidment. 1995. Continuous-time water and sediment routing model for large basins. *Journal of Hydraulic Engineering* 121(2): 171-183.
- Brakensiek, D.L. 1967. Kinematic flood routing. *Transactions of the ASAE* 10(3):340-343.
- Chow, V.T., D.R. Maidment, and L.W. Mays. 1988. *Applied hydrology*. McGraw-Hill, Inc., New York, NY.
- Cunge, J.A. 1969. On the subject of a flood propagation method (Muskingum method). *J. Hydraulics Research* 7(2):205-230.
- Lane, L.J. 1983. Chapter 19: Transmission Losses. p.19-1–19-21. In *Soil Conservation Service. National engineering handbook, section 4: hydrology*. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
- Overton, D.E. 1966. Muskingum flood routing of upland streamflow. *Journal of Hydrology* 4:185-200.

Soil Conservation Service. 1964. Chapter 17: Flood routing, Section 4, Hydrology, National engineering handbook. U.S. Department of Agriculture. U.S. Gov't Printing Office, Washington, D.C.

Williams, J.R. 1969. Flood routing with variable travel time or variable storage coefficients. Transactions of the ASAE 12(1):100-103.

Williams, J.R. and R.W. Hann. 1973. HYMO: Problem-oriented language for hydrologic modeling—User's manual. USDA, ARS-S-9

第 24 章 方程:泥沙演算

河道中的泥沙输移包括两个过程，沉积和冲刷，这两个过程同时在河道中发生。

SWAT 在整个模拟过程中采用相同的河道形态计算沉积和冲刷。同时 SWAT 也可以模拟河道的深切和扩展，并在模拟过程中更新河道形态。

24.1 泥沙河道输移

此前的 SWAT 版本采用径流功率预测冲刷和沉降速度以估算河道内的泥沙沉积 (Arnold et al, 1995)。Williams (1980) 采用 Bagnold (1977) 定义的河流功率开发了根据河道坡度和速率计算冲刷的方程。在本版本中，这些方程被简化，河段可输移的最大泥沙量为河道水流峰值流速的函数。河道水流峰值速率 $v_{ch, pk}$ 为：

$$v_{ch, pk} = \frac{q_{ch, pk}}{A_{ch}} \quad 24.1.1$$

式中： $q_{ch, pk}$ 河道峰值径流 (m^3/s)， A_{ch} 河道水流的横截面积(m^2)。河道峰值径流为：

$$q_{ch, pk} = prf \cdot q_{ch} \quad 24.1.2$$

式中： prf 为峰值径流调整因子， q_{ch} 河道平均流量 (m^3/s)。平均流量， q_{ch} 的计算，以及水流横截面面积， A_{ch} ，在第 23 已经介绍。

河段的最大可输移泥沙量：

$$conc_{sed, ch, mx} = c_{sp} \cdot v_{ch, pk}^{spexp} \quad 24.1.3$$

式中： $conc_{sed, ch, mx}$ 为河道可输移的最大泥沙浓度(ton/m^3 or kg/L)， c_{sp} 为用户定义的系数， $v_{ch, pk}$ 河道峰值流速 (m/s)， $spexp$ 为用户定义的指数。指数， $spexp$ ，通常在 1.0 - 2.0 之间变化，在初始的 Bagnold 河道功率方程中设为 1.5 (Arnold et al., 1995)。

方程 24.1.3 中的最大泥沙浓度需与时间步长开始时河道泥沙浓度比较。

如果 $conc_{sed,ch,i} > conc_{sed,ch,mx}$ ，沉积是河道的主要过程，净沉积量采用下式计算：

$$sed_{dep} = (conc_{sed,ch,i} - conc_{sed,ch,mx}) V_{ch} \quad 24.1.4$$

式中： sed_{dep} 河段沉积的泥沙量 (metric tons), $conc_{sed,ch,i}$ 河道初始泥沙浓度 (kg/L or ton/m³), $conc_{sed,ch,mx}$ 为河道可输移的最大泥沙浓度 (kg/L or ton/m³), V_{ch} 河段中的水量 (m³ H₂O).

如果 $conc_{sed,ch,i} < conc_{sed,ch,mx}$ ，冲刷是河道的主要过程，净再悬浮的泥沙量为：

$$sed_{deg} = (conc_{sed,ch,mx} - conc_{sed,ch,i}) V_{ch} \cdot K_{CH} \cdot C_{CH} \quad 24.1.5$$

式中： sed_{deg} 河段再悬浮的泥沙量(metric tons), $conc_{sed,ch,mx}$ 为河道可输移的最大泥沙浓度 (kg/L or ton/m³), $conc_{sed,ch,i}$ 河道初始泥沙浓度 (kg/L or ton/m³), V_{ch} 河段中的水量(m³ H₂O), K_{CH} 为河道可蚀性因子 (cm/hr/Pa), C_{CH} 为河道覆盖因子。

确定沉积和冲刷量后，河道的最终泥沙量可以确定：

$$sed_{ch} = sed_{ch,i} - sed_{dep} + sed_{deg} \quad 24.1.6$$

式中： sed_{ch} 河道中的悬浮泥沙量(metric tons), $sed_{ch,i}$ 时间步长开始时河道中的悬浮泥沙量 (metric tons), sed_{dep} 河段沉积的泥沙量(metric tons), sed_{deg} 河段再悬浮的泥沙量 (metric tons).

河道中输出的泥沙量为：

$$sed_{out} = sed_{ch} \cdot \frac{V_{out}}{V_{ch}} \quad 24.1.7$$

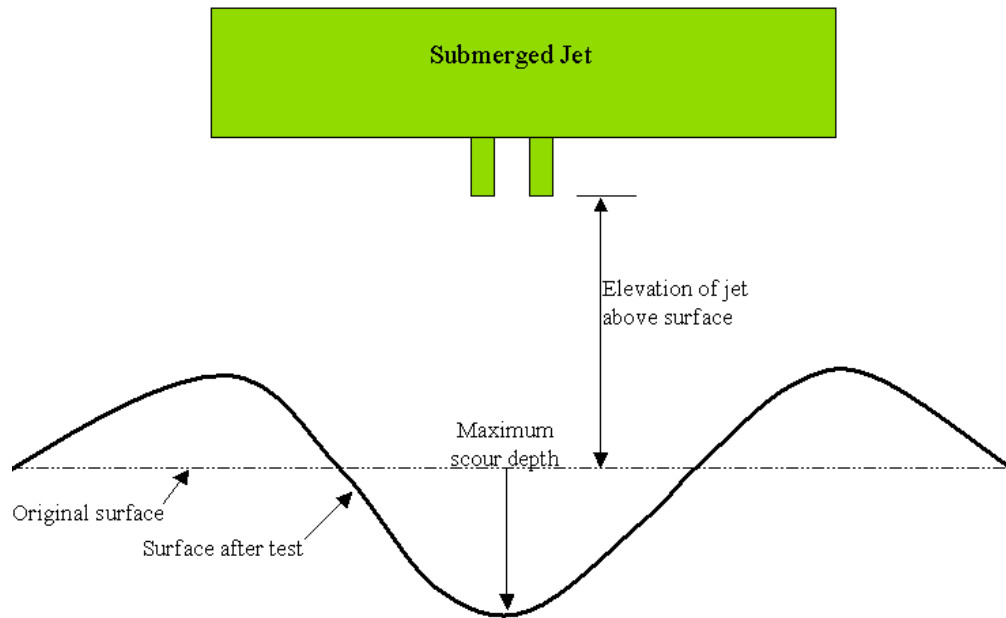
式中： sed_{out} 河道中输出的泥沙量 (metric tons), sed_{ch} 河道中的悬浮泥沙量 (metric tons), V_{out} 时间步长内的出流量 ($m^3 H_2O$), V_{ch} 河段中的水量 ($m^3 H_2O$)。

24.1.1 河道可蚀性因子

河道可蚀性因子在概念上与 USLE 方程中土壤可蚀性因子相似。河道可蚀性因子是河床或河岸性质的函数。

河道可蚀性可以用水中垂直射流装置来测量。这一试验的基本前提是，裸露或有植被覆盖的河道的侵蚀和局部冲采射流下面的局部冲刷是水力压力、边界形态和被侵蚀物质的性质总和作用的结果。Hanson (1990) 开发了一个确定原地河道侵蚀性系数的方法，该方法采用水中垂直射流。Allen et al. (1999) 应用这一方法确定了 Texas 三十多处研究区的河道可蚀性因子。

水下，垂直射流装置与河床垂直，在该射流装置影响区域附近引起侵蚀(Figure 24-1)。侵蚀过程的重要变量包括：射流过程去除的物质质量，射流装置距地面的距离，射流关口的直径，射流速度，时间，流体密度和可蚀性系数。



Fi

Figure 24-1: Simplified cross-section of submerged jet test.

Hanson (1991) 定义了一个射流指数， J_i ，以将可蚀性与水下射流装置产生的冲刷量联系。射流指数为单位时间射流装置下的冲刷量深度和射流速度的函数。

射流指数是根据 ASTM 标准 D 5852-95 的步骤，通过最小二乘法回归确定的。

一旦射流指数确定，河道可蚀性系数采用下式计算：

$$K_{CH} = 0.003 \cdot \exp [85 \cdot J_i] \quad 24.1.8$$

式中： K_{CH} 河道可蚀性系数 (cm/h/Pa) and J_i 射流指数。一般情况下，河道可蚀性比土壤可蚀性小一个数量级。

24.1.2 河道覆盖因子

河道覆盖因子， C_{CH} ，定义为一定植被覆盖度下的河道冲刷量与没有植被覆盖河道冲刷量的比率。植被减小近河床表面的水流速率，及其侵蚀动力，以致侵蚀量减小。

Table 24-1: SWAT input variables that pertain to sediment routing.

Variable Name	Definition	Input File
PRF	<i>prf</i> : Peak rate adjustment factor	.bsn
SPCON	<i>c_{sp}</i> : Coefficient in sediment transport equation	.bsn
SPEXP	<i>s_{exp}</i> : Exponent in sediment transport equation	.bsn
CH_COV	C_{CH} : Channel cover factor	.rte
CH_EROD	K_{CH} : Channel erodibility factor (cm/hr/Pa)	.rte

24.2 河道深切和加宽

传统地，对泥沙输移的计算，在模拟过程中河道形态是不变的。SWAT 可以模拟河道的深切和加宽。当河道深切和家宽被模拟时，河道形态在模拟时间段内是可以变化的。

三个河道形态参数可以在河道深切和加宽模拟中调整：齐岸深度， $depth_{bnkfull}$ ，河道宽度， $W_{bnkfull}$ ，河道坡度， slp_{ch} 。当河道水量超过 $1.4 \times 10^6 \text{ m}^3$ 时，河道形态根据下面的方程更新。

深切量采用下式计算(Allen et al., 1999)：

$$depth_{dcut} = 358 \cdot depth \cdot slp_{ch} \cdot K_{CH} \quad 24.2.1$$

式中： $depth_{dcut}$ 深切量 (m)， $depth$ 河道水深(m)， slp_{ch} 河道坡度(m/m)， K_{CH} 河道可蚀性系数(cm/h/Pa)。

新的齐岸深度为：

$$depth_{bnkfull} = depth_{bnkfull,i} + depth_{dcut} \quad 24.2.2$$

式中： $depth_{bnkfull}$ 齐岸深度(m)， $depth_{bnkfull,i}$ 此前的齐岸深度， $depth_{dcut}$ 深切量(m)。

新的河岸宽度为：

$$W_{bnkfull} = ratio_{WD} \cdot depth_{bnkfull} \quad 24.2.3$$

式中： $W_{bnkfull}$ 河道齐岸宽度 (m)， $ratio_{WD}$ 河道宽深比， $depth_{bnkfull}$ 河道新的齐岸深度 (m)。

新的河道坡度为：

$$slp_{ch} = slp_{ch,i} - \frac{depth_{dcut}}{1000 \cdot L_{ch}} \quad 24.2.4$$

式中： slp_{ch} 新的河道坡度 (m/m)， $slp_{ch,i}$ 此前的河道坡度 (m/m)， $depth_{bnkfull}$ 河道新的齐岸深度(m)， L_{ch} 河道长度 (km)。

Table 24-2: SWAT input variables that pertain to channel downcutting and widening.

Variable Name	Definition	Input File
IDEG	Channel degradation code	.cod
CH_WDR	$ratio_{WD}$: Channel width to depth ratio	.rte

24.3 NOMENCLATURE

A_{ch} Cross-sectional area of flow in the channel (m²)

第 24 章 方程：泥沙演算

C_{CH} Channel cover factor

J_i Jet index used to calculate channel erodibility

K_{CH} Channel erodibility factor (cm/hr/Pa)

L_{ch} Channel length (km)

V_{ch} Volume of water in the reach segment (m^3 H₂O)

V_{out} Volume of outflow during the time step (m^3 H₂O)

$W_{bnkfull}$ Top width of the channel when filled with water (m)

c_{sp} Coefficient in sediment transport equation

$conc_{sed,ch,i}$ Initial sediment concentration in the reach (kg/L or ton/ m^3)

$conc_{sed,ch,mx}$ Maximum concentration of sediment that can be transported by the water (kg/L or ton/ m^3)

$depth$ Depth of water in channel (m)

$depth_{bnkfull}$ Depth of water in the channel when filled to the top of the bank (m)

$depth_{dcut}$ Amount of downcutting (m)

prf Peak rate adjustment factor

q_{ch} Average rate of flow in the channel (m^3/s)

$q_{ch,pk}$ Peak flow rate (m^3/s)

$ratio_{WD}$ Channel width to depth ratio

sed_{ch} Amount of suspended sediment in the reach (metric tons)

sed_{deg} Amount of sediment reentrained in the reach segment (metric tons)

sed_{dep} Amount of sediment deposited in the reach segment (metric tons)

sed_{out} Amount of sediment transported out of the reach (metric tons)

slp_{ch} Average channel slope along channel length ($m\ m^{-1}$)

$spexp$ Exponent in sediment transport equation

$v_{ch,pk}$ Peak channel velocity (m/s)

24.4 REFERENCES

Allen, P.M., J. Arnold, E. Jakubowski. 1999. Prediction of stream channel erosion potential. *Environmental and Engineering Geoscience* 5:339-351.

American Society for Testing and Materials. 1995. Annual book of ASTM standards, Vol. 04.08, Designation: D 5852-5. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA. p. 653-657.

Arnold, J.G., J.R. Williams, and D.R. Maidment. 1995. Continuous-time water and sediment-routing model for large basins. *Journal of Hydraulic Engineering*. 121:171-183.

- Bagnold, R.A. 1977. Bedload transport in natural rivers. *Water Resour. Res.* 13:303-312.
- Hanson, G.J. 1990. Surface erodibility of earthen channels at high stresses. Part II-Developing an *in situ* testing device. *Trans. ASAE* 33:132-137.
- Hanson, G.J. 1991. Development of a jet index method to characterize erosion resistance of soils in earthen spillways. *Trans. ASAE* 34:2015-2020.
- Williams, J.R. 1980. SPNM, a model for predicting sediment, phosphorus, and nitrogen yields from agricultural basins. *Water Resour. Bull.* 16:843-848.

第 25 章 方程:河道内营养物循环过程

程

影响水质的参数可以认为是污染指标，包括营养物、总固体、生化需氧量、硝酸盐以及微生物(Loehr, 1970; Paine, 1973)。次重要的参数包括：气味、味道以及混浊度 (Azevedo and Stout, 1974)。

SWAT 模型的河道内水质算法采用 QUAL2E 模型(Brown and Barnwell, 1987)。本章的介绍主要来自 Brown and Barnwell (1987)的文献。

河道内营养物转化的模拟已经称为 SWAT 模型的可选功能。如果不想模拟河道内营养物的转化，可以将输入控制文件 (.cod) 中的变量 IWQ 设为 0，如果想激活该项功能可以降 IWQ 设为 1。

25.1 藻类

在白天，藻类通过光合作用增加水体中的溶解氧浓度。在晚上，藻类通过呼吸作用减少溶解氧浓度。藻类的生长和死亡，组成河道内的部分营养物质循环。本节将总结模拟河道中藻类生长的方程。

25.1.1 叶绿素 A

叶绿素 a 被假设为与浮游藻类生物量浓度成正比。

$$chla = \alpha_0 \cdot algae \quad 25.1.1$$

式中： $chla$ 为叶绿素 a 浓度 ($\mu\text{g chla/L}$)， α_0 为叶绿素 a 与藻类生物量的比例($\mu\text{g chla/mg alg}$)， $algae$ 藻类生物量浓度 (mg alg/L)。

25.1.2 藻类生长

藻类/叶绿素 a 的生长和衰减作为生长速率、呼吸速率、沉淀速率和河道中藻类物质的函数计算。藻类生物量在模拟日的变化为：

$$\Delta algae = \left(\mu_a \cdot algae - \rho_a \cdot algae - \left(\frac{\sigma_1}{depth} \cdot algae \right) \right) \cdot TT \quad 25.1.2$$

式中： $\Delta algae$ 为藻类生物量浓度变化 (mg alg/L)， μ_a 局部藻类生长速率 (day^{-1})， ρ_a 局部藻类呼吸和死亡速率 (day^{-1})， σ_1 局部藻类沉淀速率 (m/day)， $depth$ 河道水流深度 (m)， $algae$ 模拟日开始时的藻类生物量浓度 (mg alg/L)， TT 为水流在河道内的传输时间(day)。河道水流深度和传输时间的计算已在第 23 章中介绍。

25.1.2.1 局部藻类生长速率

局部藻类生长速度是所需营养物可得性、光和温度的函数。

SWAT 首先计算 20°C 条件下的生长速率，然后根据水温调整该速率。用户用三种选择来计算营养物和光对生长的影响：倍乘、限制营养物和调和平均。

倍乘选择将光、氮和磷生长因子相乘以确定其对局部藻类生长速率的净效应。这一选择的生物学基础为光合作用中酶过程的倍乘关系：

$$\mu_{a,20} = \mu_{max} \cdot FL \cdot FN \cdot FP \quad 25.1.3$$

式中： $\mu_{a,20}$ 20°C 条件下局部藻类生长速率 (day^{-1})， μ_{max} 最大藻类生长速率(day^{-1})， FL 光造成的藻类生长衰减， FN 氮限制因素造成的藻类生长衰减， FP 为磷限制因素造成的藻类生长衰减。最大藻类生长速率由用户确定。

营养物限制选择，根据光和（氮或磷）的限制来计算藻类生长。

营养物/光效应是倍乘关系，但是营养物/营养物效应是可替换的。藻类生长速率由限制因子较小的营养物控制。这一方法与 Liebig 最小定理相似：

$$\mu_{a,20} = \mu_{max} \cdot FL \cdot \min \left(FN, FP \right) \quad 25.1.4$$

式中： $\mu_{a,20}$ 20°C 条件下局部藻类生长速率(day^{-1})， μ_{max} 最大藻类生长速率(day^{-1})， FL 光造成的藻类生长衰减， FN 氮限制因素造成的藻类生

长衰减, FP 为磷限制因素造成的藻类生长衰减。最大藻类生长速率由用户确定。

调和平均在数学上与两个并行电阻的总阻抗相似, 可以认为是方程 25.1.3 和 25.1.4 的调和。藻类生长速率由光和营养物的倍乘关系控制, 营养物/营养物效应由调和平均确定:

$$\mu_{a,20} = \mu_{max} \cdot FL \cdot \frac{2}{\left(\frac{1}{FN} + \frac{1}{FP}\right)} \quad 25.1.5$$

式中: $\mu_{a,20}$ 局部藻类生长速率 (day^{-1}), μ_{max} 最大藻类生长速率 (day^{-1}), FL 光造成的藻类生长衰减, FN 氮限制因素造成的藻类生长衰减, FP 为磷限制因素造成的藻类生长衰减。最大藻类生长速率由用户确定。

光、氮和磷生长限制因子的计算在下面的部分介绍。

藻类生长光限制因子

目前存在一些光合作用与光的关系方程。所有的关系都表明光合作用随光的增加而增加, 直到达到一定的光最大或饱和值。藻类生长光限制因子的计算采用 Monod 半饱和方法。根据这一方法, 藻类生长光限制因子定义为:

$$FL_z = \frac{I_{phosyn,z}}{K_L + I_{phosyn,z}} \quad 25.1.6$$

式中: FL_z 深度 z 的藻类生长光限制因子, $I_{phosyn,z}$ 为水面下 z 深度处, 促进光合作用的光强度 ($\text{MJ}/\text{m}^2\text{-hr}$), K_L 为光的半饱

和系数(MJ/m²-hr)。促进光合作用的光为波长在 400 - 700nm 的辐射。光的半饱和系数定义为藻类生长速率为最大生长速率 50%时的光强度。光的半饱和系数是由用户定义的。光合作用被假设在整个水体中发生。光强度随深度的变化根据 Beer 定义计算：

$$I_{phosyn,z} = I_{phosyn,hr} \exp(-k_{\ell} \cdot z) \quad 25.1.7$$

式中： $I_{phosyn,z}$ 为促进光合作用的光强度(MJ/m²-hr), $I_{phosyn,hr}$ 是在一小时内到达地表/水面促进光合作用的太阳辐射 (MJ/m²-hr), k_{ℓ} 消光系数(m⁻¹), z 为距离水面的深度(m). 将方程 25.1.7 代入方程 25.1.6 , 对于水流深度积分得到：

$$FL = \left(\frac{1}{k_{\ell} \cdot depth} \right) \cdot \ln \left[\frac{K_L + I_{phosyn,hr}}{K_L + I_{phosyn,hr} \exp(-k_{\ell} \cdot depth)} \right] \quad 25.1.8$$

式中： FL 水柱中的藻类生长光限制因子, K_L 为光的半饱和系数 (MJ/m²-hr), $I_{phosyn,hr}$ 在一小时内到达地表/水面促进光合作用的太阳辐射 (MJ/m²-hr), k_{ℓ} 消光系数 (m⁻¹), $depth$ 河道水流深度 (m)。促进光合作用的太阳辐射采用下式计算：

$$I_{phosyn,hr} = I_{hr} \cdot fr_{phosyn} \quad 25.1.9$$

式中： I_{hr} 为模拟当日一小时内到达地表/水面促进光合作用的太阳辐射 (MJ m⁻² h⁻¹) , fr_{phosyn} 太阳辐射中促进光合作用的部分的分数。 I_{hr} 的计算已经在第 2 章中介绍。太阳辐射中促进光合作用的部分的分数是由用户定义的。

对于日模拟，采用在白天期间的藻类生长光限制因子平均值。

该值采用方程 25.1.8 的修正式：

$$FL = 0.92 \cdot fr_{DL} \cdot \left(\frac{1}{k_{\ell} \cdot depth} \right) \cdot \ln \left[\frac{K_L + \bar{I}_{phosyn,hr}}{K_L + \bar{I}_{phosyn,hr} \exp(-k_{\ell} \cdot depth)} \right]$$

25.1.10

式中： fr_{DL} 有日光的小时数占日长的分数， $\bar{I}_{phosyn,hr}$ is the 日平均促进光合作用的光强度 (MJ/m²-hr)。其它变量的定义与前面相同。有日光的小时数占日长的分数由下式计算：

$$fr_{DL} = \frac{T_{DL}}{24} \quad 25.1.11$$

式中： T_{DL} 为日长 (hr)。 $\bar{I}_{phosyn,hr}$ 用下式计算：

$$\bar{I}_{phosyn,hr} = \frac{fr_{phosyn} \cdot H_{day}}{T_{DL}} \quad 25.1.12$$

式中： fr_{phosyn} 为促进光合作用的太阳辐射的分数， H_{day} 为模拟日到达水面的太阳辐射 (MJ/m²)， T_{DL} 为日长(hr)。 H_{day} 和 T_{DL} 的计算在第 2 章中已经介绍。

消光系数， k_{ℓ} ，根据藻类密度，采用下式计算：

$$k_{\ell} = k_{\ell,0} + k_{\ell,1} \cdot \alpha_0 \cdot algae + k_{\ell,2} \cdot (\alpha_0 \cdot algae)^3 \quad 25.1.13$$

式中： $k_{\ell,0}$ 为非藻类部分的消光系数(m⁻¹)， $k_{\ell,1}$ 线性藻类自遮蔽系数 (m⁻¹ (μg-chla/L)⁻¹)， $k_{\ell,2}$ 为非线性藻类自遮蔽系数 (m⁻¹ (μg-chla/L)^{-2/3})， α_0 为叶绿素 *a* 与藻类生物量的比率 (μg chla/mg alg)，*algae* 为藻类生物量浓度 (mg alg/L)。

方程 25.1.13 可以模拟不同的藻类自遮蔽、消光关系。当 $k_{\ell,1} = k_{\ell,2} = 0$ ，则不模拟藻类自遮蔽。当 $k_{\ell,1} \neq 0$ 且 $k_{\ell,2} = 0$ ，模拟线性藻类自遮蔽。当 $k_{\ell,1}$ 和 $k_{\ell,2}$ 均不为 0，模拟非线性藻类自遮蔽。

Riley 方程 (Bowie et al., 1985) 定义

$$k_{\ell,1} = 0.0088 \text{ m}^{-1} \left(\text{ug - chla/L} \right) \quad \text{和}$$

$$k_{\ell,2} = 0.054 \text{ m}^{-1} \left(\text{ug - chla/L} \right)^{3/3}.$$

藻类生长营养物限制因子.

藻类生长限制氮因子根据 Monod 表达式定义。假设藻类同时利用氨氮和硝酸盐作为无机氮的来源。

$$FN = \frac{\left(C_{NO3} + C_{NH4} \right)}{\left(C_{NO3} + C_{NH4} \right) + K_N} \quad 25.1.14$$

式中： FN 藻类生长的氮限制因子， C_{NO3} 为河道中硝酸盐浓度(mg N/L)， C_{NH4} 河道氨氮浓度 (mg N/L)， K_N 为氮的 Michaelis-Menton 半饱和常数 (mg N/L)。

藻类生长的磷限制因子也是根据 Monod 表达式定义：

$$FP = \frac{C_{solP}}{C_{solP} + K_P} \quad 25.1.15$$

式中： FP 藻类生长的磷限制因子， C_{solP} 为溶解态磷浓度 (mg P/L)， K_P 为磷的 Michaelis-Menton 半饱和常数(mg P/L)。

氮和磷的 Michaelis-Menton 半饱和常数为藻类生长限制在最大生长速率 50% 时的氮、磷浓度。 K_N 的典型范围为 0.01 - 0.30 mg N/L, K_P 为 0.001 - 0.05 mg P/L。

一旦计算 20°C 下藻类生长速率, 生长速率需根据温度效应, 采用 Streeter-Phelps 公式调整:

$$\mu_a = \mu_{a,20} \cdot 1.047^{(T_{water}-20)} \quad 25.1.16$$

式中: μ_a 为局部藻类生长速率 (day^{-1}), $\mu_{a,20}$ 0°C 下藻类生长速率 (day^{-1}), T_{water} 为平均日水温 ($^{\circ}\text{C}$)。

25.1.2.2 藻类局部呼吸速率

藻类的局部呼吸或死亡速率表示三种过程的净效果: 藻类的内生呼吸、藻类磷向有机磷的转化, 以及藻类氮向有机氮的转化。用户定义 20°C 下局部呼吸速率。呼吸速率根据局部水温调整:

$$\rho_a = \rho_{a,20} \cdot 1.047^{(T_{water}-20)} \quad 25.1.17$$

式中: ρ_a 局部呼吸速率 (day^{-1}), $\rho_{a,20}$ 20°C 下局部呼吸速率 (day^{-1}), T_{water} 为平均日水温 ($^{\circ}\text{C}$)。

25.1.2.3 藻类局部沉淀速率

局部沉淀速率代表由于沉淀而去除的净藻类量。用户定义在 20°C 下的局部沉淀速率。沉淀速率根据局部水温调整:

$$\sigma_1 = \sigma_{1,20} \cdot 1.024^{(T_{water}-20)} \quad 25.1.18$$

式中： σ_1 局部沉淀速率 (m/day), $\sigma_{1,20}$ 20°C 下的局部沉淀速率 (m/day), T_{water} 为平均日水温 (°C)。

Table 25-1: SWAT input variables used in algae calculations.

Variable name	Definition	File Name
AI0	α_0 : Ratio of chlorophyll <i>a</i> to algal biomass ($\mu\text{g chl}a/\text{mg alg}$)	.wwq
MUMAX	μ_{max} : Maximum specific algal growth rate (day^{-1})	.wwq
K_L	K_L : Half-saturation coefficient for light ($\text{MJ}/\text{m}^2\text{-hr}$)	.wwq
TFACT	$f_{r_{phosyn}}$: Fraction of solar radiation that is photosynthetically active	.wwq
LAMBDA0	$k_{\ell,0}$: Non-algal portion of the light extinction coefficient (m^{-1})	.wwq
LAMBDA1	$k_{\ell,1}$: Linear algal self shading coefficient ($\text{m}^{-1} (\mu\text{g-chl}a/\text{L})^{-1}$)	.wwq
LAMBDA2	$k_{\ell,2}$: Nonlinear algal self shading coefficient ($\text{m}^{-1} (\mu\text{g-chl}a/\text{L})^{-2/3}$)	.wwq
K_N	K_N : Michaelis-Menton half-saturation constant for nitrogen (mg N/L)	.wwq
K_P	K_P : Michaelis-Menton half-saturation constant for phosphorus (mg P/L)	.wwq
RHOQ	$\rho_{a,20}$: Local algal respiration rate at 20°C (day^{-1})	.wwq
RS1	$\sigma_{1,20}$: Local algal settling rate at 20°C (m/day)	.swq

25.2 氮循环

在有氧水体中,有机氮可以一步一步转化为氨氮、亚硝酸盐和硝酸盐。

有机氮也可以通过沉淀去除。本节将介绍模拟河道内氮循环的方程。

25.2.1 有机氮

河道中有机氮可以通过藻类生物量氮转化为有机氮而增加。河道中有机氮浓度也可以通过转化为氨氮或随泥沙沉淀而减少。模拟日的有机氮变化为：

$$\Delta orgN_{str} = (\alpha_1 \cdot \rho_a \cdot algae - \beta_{N,3} \cdot orgN_{str} - \sigma_4 \cdot orgN_{str}) \cdot TT \quad 25.2.1$$

式中： $\Delta orgN_{str}$ 有机氮浓度变化 (mg N/L)， α_1 藻类生物量中氮的分数 (mg N/mg alg biomass)， ρ_a 局部藻类呼吸死亡速率 (day^{-1})， $algae$ 在模拟日开始时的藻类密度 (mg alg/L)， $\beta_{N,3}$ 有机氮水解为氨氮的速率常数 (day^{-1})， $orgN_{str}$ 模拟日开始时有机氮浓度 (mg N/L)， σ_4 有机氮沉淀速率系数 (day^{-1})， TT 水流在河道中的传播时间 (day)。藻类生物量中的氮分数是由用户定义的。方程 25.1.17 描述局部藻类呼吸速率的计算。传播时间的计算已在第 23 章介绍。

用户定义 20°C 下有机氮水解为氨氮的速率常数，该常数根据局部水温调整：

$$\beta_{N,3} = \beta_{N,3,20} \cdot 1.047^{(T_{water}-20)} \quad 25.2.2$$

式中： $\beta_{N,3}$ 局部有机氮水解为氨氮的速率常数 (day^{-1})， $\beta_{N,3,20}$ 20°C 下有机氮水解为氨氮的速率常数 (day^{-1})， T_{water} 为日均水温 (°C)。

用户定义 20°C 下有机氮沉淀速率，该速率根据局部水温调整：

$$\sigma_4 = \sigma_{4,20} \cdot 1.024^{(T_{water}-20)} \quad 25.2.3$$

式中： σ_4 为局部有机氮沉淀速率系数 (day^{-1})， $\sigma_{4,20}$ 20°C 下局部有机氮沉淀速率系数 (day^{-1})， T_{water} 为日均水温 (°C)。

25.2.2 氨氮

河道中氨氮量可以通过有机氮的矿化和河床泥沙中氨氮扩散而增加。

河道中氨氮浓度也可以通过转化为亚硝酸盐或者被藻类吸收而减少。模拟日的氨氮变化为：

$$\Delta NH4_{str} = \left(\beta_{N,3} \cdot orgN_{str} - \beta_{N,1} \cdot NH4_{str} + \frac{\sigma_3}{(1000 \cdot depth)} \right) \cdot fr_{NH4} \cdot \alpha_1 \cdot \mu_a \cdot algae \cdot TT \quad 25.2.4$$

式中： $\Delta NH4_{str}$ 为氨氮浓度的变化 (mg N/L)， $\beta_{N,3}$ 有机氮水解为氨氮的速率常数 (day^{-1})， $orgN_{str}$ 模拟日开始时有机氮浓度(mg N/L)， $\beta_{N,1}$ 氨氮的生物氧化速率常数 (day^{-1})， $NH4_{str}$ 模拟日开始时氨氮浓度(mg N/L)， σ_3 泥沙氨氮来源速率 (mg N/m²-day)， $depth$ 为河道水流深度 (m)， fr_{NH4} 藻类从氨氮库中吸收的氮分数， α_1 为藻类生物量中氮分数(mg N/mg alg biomass)， μ_a 局部藻类生长速率 (day^{-1})， $algae$ 模拟日开始时的藻类密度 (mg alg/L)， TT 河道内水流传播时间 (day)。有机氮水解为氨氮的速率常数采用方程 25.2.2 计算。

25.1.2.1 节描述了计算局部藻类生长速率的方法第 23 章介绍了计算水流深度和传播时间的方法。

氨氮的生物氧化速率常数随河道内氧浓度和温度变化。该速率常数计算如下：

$$\beta_{N,1} = \beta_{N,1,20} \cdot \left(-\exp \left[-0.6 \cdot Ox_{str} \right] \right) \cdot 1.083^{(T_{water} - 20)} \quad 25.2.5$$

式中： $\beta_{N,1}$ 氨氮的生物氧化速率常数(day^{-1})， $\beta_{N,1,20}$ 20°C 下氨氮的生物氧化速率常数(day^{-1})， Ox_{str} 河道中溶解氧浓度(mg O₂/L)， T_{water} 为日均水温 (°C)。方程 25.2.5 右边第 2 项， $\left(-\exp \left[-0.6 \cdot Ox_{str} \right] \right)$ ，为硝化作用限制修正因子。这一因子限制在低溶解氧浓度下的硝化作用。

用户定义 20°C 下氨氮泥沙来源速率，该速率根据局部水温调整：

$$\sigma_3 = \sigma_{3,20} \cdot 1.074^{(T_{water} - 20)} \quad 25.2.6$$

式中： σ_3 泥沙氨氮来源速率(mg N/m²-day)， $\sigma_{3,20}$ 20°C 下氨氮泥沙来源速率 (mg N/m²-day)， T_{water} 为日均水温 (°C)。

藻类从氨氮库中吸收的氮分数，采用下式计算：

$$f_{r_{NH_4}} = \frac{f_{NH_4} \cdot NH_{4_{str}}}{f_{NH_4} \cdot NH_{4_{str}} + (1 - f_{NH_4}) \cdot NO_{3_{str}}} \quad 25.2.7$$

式中： $f_{r_{NH_4}}$ 藻类从氨氮库中吸收的氮分数， f_{NH_4} 为氨氮的偏好因子， $NH_{4_{str}}$ 为河道氨氮浓度(mg N/L)， $NO_{3_{str}}$ 河道硝酸盐浓度 (mg N/L)。

25.2.3 亚硝酸盐

河道中的亚硝酸盐量将通过氨氮转化为亚硝酸盐而增加，同时由于亚硝酸盐转化为硝酸盐而减少。亚硝酸盐转化为硝酸盐过程比氨氮转化为亚硝酸盐的过程快得多，因此河道中的亚硝酸盐通常很少。模拟日的亚硝酸盐量变化为：

$$\Delta NO_{2_{str}} = \beta_{N,1} \cdot NH_{4_{str}} - \beta_{N,2} \cdot NO_{2_{str}} \cdot TT \quad 25.2.8$$

式中： $\Delta NO_{2_{str}}$ 为亚硝酸盐量变化 (mg N/L)， $\beta_{N,1}$ 为氨氮的生物氧化速率常数 (day^{-1})， $NH_{4_{str}}$ 模拟日开始时的氨氮浓度 (mg N/L)， $\beta_{N,2}$ 亚硝酸盐转化为硝酸盐的生物氧化速率 (day^{-1})， $NO_{2_{str}}$ 模拟日开始时的亚硝酸盐浓度 (mg N/L)， TT 河道中水流传播时间 (day)。氨氮的局部生物养护速率采用方程 25.2.5 计算。第 23 章介绍了传播时间的计算。

亚硝酸盐转化为硝酸盐的生物氧化速率随河道内氧浓度和温度变化。该速率常数的计算为：

$$\beta_{N,2} = \beta_{N,2,20} \cdot \left(\exp \left[-0.6 \cdot O_{x_{str}} \right] \cdot 1.047^{(T_{water} - 20)} \right) \quad 25.2.9$$

式中： $\beta_{N,2}$ 亚硝酸盐转化为硝酸盐的生物氧化速率常数 (day^{-1})， $\beta_{N,2,20}$ 20°C 下亚硝酸盐转化为硝酸盐的生物氧化速率常数 (day^{-1})， $O_{x_{str}}$ 河道中溶解氧浓度 ($\text{mg O}_2/\text{L}$)， T_{water} 日平均水温 ($^{\circ}\text{C}$)。方程 25.2.9 右边第二项 $\left(\exp \left[-0.6 \cdot O_{x_{str}} \right] \right)$ 为硝化作用限制修正因子。这一因子限制在低溶解氧浓度下的硝化作用。

25.2.4 硝酸盐

河道中硝酸盐的量通过亚硝酸盐的生物氧化而增加，由于藻类吸收而减少。模拟日硝酸盐变化为：

$$\Delta NO3_{str} = \beta_{N,2} \cdot NO2_{str} - \left(-fr_{NH4} \right) \alpha_1 \cdot \mu_a \cdot algae \cdot TT \quad 25.2.10$$

式中： $\Delta NO3_{str}$ 硝酸盐浓度变化(mg N/L)， $\beta_{N,2}$ 亚硝酸盐转化为硝酸盐的生物氧化速率常数(day^{-1})， $NO2_{str}$ 模拟日开始时的亚硝酸盐浓度(mg N/L)， fr_{NH4} 藻类从氨氮库中吸收的氮分数， α_1 藻类生物量中的氮分数 ($\text{mg N/mg alg biomass}$)， μ_a 局部藻类生长速率 (day^{-1})， $algae$ 为模拟日开始时藻类生物量浓度(mg alg/L)， TT 河道中水流传播时间 (day)。亚硝酸盐转化为硝酸盐的生物氧化速率常数采用方程 25.2.9 计算，藻类从氨氮库中吸收的氮分数采用方程 25.2.7 计算。25.1.2.1 节描述了计算局部藻类生长速率的方法，第 23 章介绍了计算水流深度和传播时间的方法。

Table 25-2: SWAT input variables used in in-stream nitrogen calculations.

Variable name	Definition	File Name
---------------	------------	-----------

AI1	α_1 : Fraction of algal biomass that is nitrogen (mg N/mg alg biomass)	.wwq
RHOQ	$\rho_{a,20}$: Local algal respiration rate at 20°C (day ⁻¹)	.wwq
BC3	$\beta_{N,3,20}$: Local rate constant for hydrolysis of organic nitrogen to NH ₄ ⁺ at 20°C (day ⁻¹ or hr ⁻¹)	.swq
RS4	$\sigma_{4,20}$: Local settling rate for organic nitrogen at 20°C (day ⁻¹)	.swq
BC1	$\beta_{N,1,20}$: Rate constant for biological oxidation of ammonia nitrogen at 20°C (day ⁻¹)	.swq
RS3	$\sigma_{3,20}$: Benthos (sediment) source rate for ammonium nitrogen at 20°C (mg N/m ² -day or mg N/m ² -hr)	.swq
P_N	f_{NH4} : Preference factor for ammonia nitrogen	.wwq
BC2	$\beta_{N,2,20}$: Rate constant for biological oxidation of nitrite to nitrate at 20°C (day ⁻¹ or hr ⁻¹)	.swq

25.3 磷循环

磷循环与氮循环相似。藻类的死亡将藻类磷转化为有机磷。有机磷被矿化为可被藻类吸收的溶解态磷，有机磷也可以通过沉淀去除。本节将介绍模拟河道内磷循环的方程。

25.3.1 有机磷

河道中的有机氮量可以通过藻类生物量磷转化为有机磷而增加。有机磷浓度也可以通过有机磷转化为可溶性磷或者有机磷随泥沙沉淀而减少。模拟日有机磷的变化为：

$$\Delta orgP_{str} = \alpha_2 \cdot \rho_a \cdot algae - \beta_{P,4} \cdot orgP_{str} - \sigma_5 \cdot orgP_{str} \quad (25.3.1)$$

式中： $\Delta orgP_{str}$ 为有机磷浓度的变化(mg P/L)， α_2 为藻类生物量中的磷分数 (mg P/mg alg biomass)， ρ_a 为藻类呼吸或死亡速率 (day⁻¹)， $algae$ 模拟日开始时的藻类生物量浓度 (mg alg/L)， $\beta_{P,4}$ 有机氮矿化速率常数 (day⁻¹)， $orgP_{str}$ 模拟日开始时的有机磷浓度(mg P/L)， σ_5 为有机磷沉淀速率系数(day⁻¹)， TT i

为河道水流传播时间 (day). 为藻类生物量中的磷分数是用户定义的。 方程 25.1.17 描述的了藻类局部呼吸速率的计算。第 23 章介绍了水流传播时间的计算。

用户定义 20°C 下有机氮矿化速率常数，该常数根据局部水温调整：

$$\beta_{P,4} = \beta_{P,4,20} \cdot 1.047^{\left(T_{water}-20\right)} \quad 25.3.2$$

式中： $\beta_{P,4}$ 为有机磷矿化的局部速率常数(day^{-1}), $\beta_{P,4,20}$ 20°C 下有机氮矿化速率常数(day^{-1})， T_{water} 为日均水温 ($^{\circ}\text{C}$)。

用户定义 20°C 下有机磷沉淀速率，该速率根据局部水温调整：

$$\sigma_5 = \sigma_{5,20} \cdot 1.024^{\left(T_{water}-20\right)} \quad 25.3.3$$

式中： σ_5 为局部有机磷沉淀速率(day^{-1}), $\sigma_{5,20}$ 为 20°C 下局部有机磷沉淀速率 (day^{-1})， T_{water} 为日均水温 ($^{\circ}\text{C}$)。

25.3.2 无机/溶解态磷

溶解态、无机磷的量可以通过有机磷的矿化和河床泥沙中无机磷的扩散而增加，也可以通过藻类的吸收的减少。模拟日溶解态磷的变化为：

$$\Delta solP_{str} = \left(\beta_{P,4} \cdot orgP_{str} + \frac{\sigma_2}{1000 \cdot depth} - \alpha_2 \cdot \mu_a \cdot algae \right) \cdot TT \quad 25.3.4$$

式中： $\Delta solP_{str}$ 溶解态磷浓度的变化 (mg P/L), $\beta_{P,4}$ 为有机磷矿化速率常数 (day^{-1}), $orgP_{str}$ 模拟日开始时有机磷浓度 (mg P/L), σ_2 溶解态磷的泥沙来源速率常数 ($\text{mg P/m}^2\text{-day}$), $depth$ 河道水流深度 (m), α_2 藻类生物量中的磷分数 (mg P/mg alg biomass), μ_a 局部藻类生长速率 (day^{-1}), $algae$ 模拟日开始时

的藻类生物量浓度(mg alg/L) , TT 河道水流传播时间 (day)。局部有机磷矿化速率常数采用方程 25.3.2 计算。25.1.2.1 部分描述了局部藻类生长速率的计算。第 23 章介绍了河道水流深度和水流传播时间的计算。

用户定义 20°C 下溶解态磷的泥沙来源速率常数 , 该常数根据水温调整 :

$$\sigma_2 = \sigma_{2,20} \cdot 1.074^{(T_{water}-20)} \quad 25.3.5$$

式中 : σ_2 溶解态磷的泥沙来源速率常数 (mg P/m²-day), $\sigma_{2,20}$ 20°C 下溶解态磷的泥沙来源速率常数(mg P/m²-day) , T_{water} 为日均水温(°C)。

Table 25-3: SWAT input variables used in in-stream phosphorus calculations.

Variable name	Definition	File Name
AI2	α_2 : Fraction of algal biomass that is phosphorus (mg P/mg alg biomass)	.wwq
RHOQ	$\rho_{a,20}$: Local algal respiration rate at 20°C (day ⁻¹)	.wwq
BC4	$\beta_{P,4,20}$: Local rate constant for organic phosphorus mineralization at 20°C (day ⁻¹)	.swq
RS5	$\sigma_{5,20}$: Local settling rate for organic phosphorus at 20°C (day ⁻¹)	.swq
RS2	$\sigma_{2,20}$: Benthos (sediment) source rate for soluble phosphorus at 20°C (mg P/m ² -day)	.swq

25.4 碳生化需氧量

水体的碳需氧量(CBOD) 指降解水中有机物质所需的氧量。CBOD 通过地表径流或点源进入河道。在河道内有两个过程影响 CBOD 的水平, 这两个过程都减少碳需氧量。模拟日河道内 CBOD 的变化为 :

$$\Delta cbod = -\kappa_1 \cdot cbod + \kappa_3 \cdot cbod \quad 25.4.1$$

式中： $\Delta cbod$ CBOD 浓度的变化 (mg CBOD/L), κ_1 为 CBOD 脱氧速率 (day^{-1}), $cbod$ CBOD 浓度(mg CBOD/L), κ_3 CBOD 沉淀速率 (day^{-1}) , TT 河道水流传播时间 (day)。第 23 章介绍了河道水流深度和水流传播时间的计算。

用户定义 20°C 下 CBOD 脱氧速率，该速率根据局部水温调整：

$$\kappa_1 = \kappa_{1,20} \cdot 1.047^{(T_{water}-20)} \quad 25.4.2$$

式中： κ_1 为 CBOD 脱氧速率(day^{-1}), $\kappa_{1,20}$ 20°C 下 CBOD 脱氧速率(day^{-1}), T_{water} 为日均水温($^{\circ}\text{C}$)。

用定义 20°C 下 CBOD 沉淀速率，该速率根据局部水温调整：

$$\kappa_3 = \kappa_{3,20} \cdot 1.024^{(T_{water}-20)} \quad 25.4.3$$

式中： κ_3 CBOD 沉淀速率(day^{-1}), $\kappa_{3,20}$ 20°C 下 CBOD 沉淀速率(day^{-1}), T_{water} 为日均水温($^{\circ}\text{C}$)。

Table 25-4: SWAT input variables used in in-stream CBOD calculations.

Variable name	Definition	File Name
RK1	$\kappa_{1,20}$: CBOD deoxygenation rate at 20°C (day^{-1})	.swq
RK3	$\kappa_{3,20}$: Settling loss rate of CBOD at 20°C (day^{-1})	.swq

25.5 氧

足够的溶解氧浓度是健康水生生态系统的基本要求。河道中溶解氧浓度为大气赋氧、光合作用、植物和动物呼吸作用、泥沙需求、生化需氧量、硝化、含盐量和温度的函数。模拟日溶解氧量的变化为：

$$\Delta O_{x_{str}} = (\kappa_2 \cdot (O_{x_{sat}} - O_{x_{str}}) - (\kappa_3 \cdot \mu_a - \alpha_4 \cdot \rho_a) \cdot algae - \kappa_1 \cdot cbod - \frac{\kappa_4}{1000 \cdot depth})$$

$$-\alpha_5 \cdot \beta_{N,1} \cdot NH4_{str} - \alpha_6 \cdot \beta_{N,2} \cdot NO2_{str}) \cdot TT \quad 25.5.1$$

式中： $\Delta O_{x_{str}}$ 为溶解氧浓度的变化(mg O₂/L), κ_2 菲克扩散赋氧速率(day⁻¹), $O_{x_{sat}}$ 饱和溶解氧浓度 (mg O₂/L), $O_{x_{str}}$ 河道内溶解氧浓度 (mg O₂/L), α_3 单位藻类光合作用产生氧的速率(mg O₂/mg alg), μ_a is the local specific growth rate of algae (day⁻¹), α_4 单位藻类呼吸作用吸收氧的速率 (mg O₂/mg alg), ρ_a 为局部藻类呼吸和死亡速率 (day⁻¹), $algae$ 模拟日开始时的藻类生物量浓度 (mg alg/L), κ_1 为 CBOD 脱氧速率 (day⁻¹), $cbod$ CBOD 浓度 (mg CBOD/L), κ_4 泥沙需氧速率 (mg O₂/(m²·day)), $depth$ 河道水流深度 (m), α_5 单位氨氮氧化耗氧速率(mg O₂/mg N), $\beta_{N,1}$ 氨氮生物氧化速率常数 (day⁻¹), $NH4_{str}$ 模拟日开始时氨氮的浓度 (mg N/L), α_6 单位亚硝酸盐氧化耗氧速率 (mg O₂/mg N), $\beta_{N,2}$ 亚硝酸盐生物氧化转化为硝酸盐的速率常数(day⁻¹), $NO2_{str}$ 模拟日开始时亚硝酸盐的浓度(mg N/L), TT 河道水流传播时间 (day)。

用户定义单位藻类光合作用产生氧的速率, 单位藻类呼吸吸收氧的速率, 单位氨氮氧化耗氧速率以及单位亚硝酸盐氧化耗氧速率。25.1.2.1 部分介绍计算藻类生长的计算, 方程 25.1.17 描述了局部藻类呼吸速率的计算。方程 25.2.5 介绍了氨氮氧化耗氧速率, 方程 25.2.9 介绍了亚硝酸盐氧化耗氧速率, CBOD 脱氧速率采用方程 25.4.2 计算。第 23 章介绍了河道水流深度和水流传播时间的计算。

用户定义 20°C 下的泥沙需氧速率, 该值根据局部水温调整:

$$\kappa_4 = \kappa_{4,20} \cdot 1.060^{\left(\text{water} - 20\right)} \quad 25.5.2$$

式中： κ_4 泥沙需氧速率 ($\text{mg O}_2/(\text{m}^2\cdot\text{day})$), $\kappa_{4,20}$ 20°C 下的泥沙需氧速率($\text{mg O}_2/(\text{m}^2\cdot\text{day})$), T_{water} 为日均水温($^{\circ}\text{C}$)。

25.5.1 饱和溶解氧浓度

水体可以溶解的氧量为温度、溶解固体浓度和大气压强的函数。采用 APHA (1985) 开发的方程来计算饱和溶解氧浓度：

$$Ox_{sat} = \exp \left[-139.34410 + \frac{1.575701 \times 10^5}{T_{wat,K}} - \frac{6.642308 \times 10^7}{T_{wat,K}^2} + \frac{1.243800 \times 10^{10}}{T_{wat,K}^3} - \frac{8.621949 \times 10^{11}}{T_{wat,K}^4} \right] \quad 25.5.3$$

式中： Ox_{sat} 为在 1.00 atm 下氧饱和平衡浓度($\text{mg O}_2/\text{L}$), T_{water} 为日均水温 ($273.15+^{\circ}\text{C}$)。

25.5.2 赋氧

赋氧指紊流造成水和空气的混合，使得大气中的氧扩散到河道中。

25.5.2.1 根据菲克定理的赋氧速率

用户定义 20°C 下的赋氧速率，该值根据局部水温调整：

$$\kappa_2 = \kappa_{2,20} \cdot 1.024^{(T_{water}-20)} \quad 25.5.4$$

式中： κ_2 赋氧速率 (day^{-1}), $\kappa_{2,20}$ 20°C 下的赋氧速率(day^{-1}), T_{water} 为日均水温 ($^{\circ}\text{C}$)。

很多方法可以计算 20°C 下的赋氧速率, $\kappa_{2,20}$ 。下面列出其中的几种。Brown and Barnwell (1987) 介绍其它方法。

应用田间试验测量, Churchill, Elmore 和 Buckingham (1962) 得到下面的关系:

$$\kappa_{2,20} = 5.03 \cdot v_c^{0.969} \cdot depth^{-1.673} \quad 25.5.5$$

式中: $\kappa_{2,20}$ 20°C 下的赋氧速率(day^{-1}), v_c 平均流速(m/s), $depth$ 河道水流平均深度 (m)。

O'Connor 和 Dobbins (1958) 在他们开发的方程中引入了河流湍流特征。对于低速且各项同性的河流:

$$\kappa_{2,20} = 294 \cdot \frac{D_m \cdot v_c}{depth^{1.5}} \quad 25.5.6$$

式中: $\kappa_{2,20}$ 20°C 下的赋氧速率(day^{-1}), D_m 分子扩散系数 (m^2/day), v_c 平均流速 (m/s), $depth$ 河道水流平均深度 (m)。对于高速且各项异性的河流:

$$\kappa_{2,20} = 2703 \cdot \frac{D_m^{0.5} \cdot slp^{0.25}}{depth^{1.25}} \quad 25.5.7$$

式中: $\kappa_{2,20}$ 20°C 下的赋氧速率(day^{-1}), D_m 分子扩散系数(m^2/day), slp 河床坡度 (m/m), $depth$ 河道水流平均深度 (m)。分子扩散系数为:

$$D_m = 177 \cdot 1.037^{\bar{T}_{water}-20} \quad 25.5.8$$

式中: D_m 分子扩散系数 (m^2/day), T_{water} 为日均水温 ($^{\circ}\text{C}$)。

Owens et al. (1964) 针对较浅的(0.1 和 3.4m),运动较快的(0.03 to 1.5 m/s) 河流开发了赋氧方程。

$$\kappa_{2,20} = 5.34 \cdot \frac{v_c^{0.67}}{depth^{1.85}} \quad 25.5.9$$

中： $\kappa_{2,20}$ 20°C 下的赋氧速率(day^{-1}), v_c 平均流速 (m/s), $depth$ 河道水流平均深度 (m).

25.5.2.2 坝体湍流造成的赋氧

当水流经过水坝、桥墩或其它河道中的建筑时会发生赋氧为了模拟这种形式的赋氧，可以使用流域配置文件 (.fig) 中的“structure”命令。

赋氧量为亏氧量和赋氧系数的函数：

$$\Delta O_{x_{str}} = D_a - D_b = D_a \left(1 - \frac{1}{rea} \right) \quad 25.5.10$$

式中： $\Delta O_{x_{str}}$ 为溶解氧浓度变化($\text{mg O}_2/\text{L}$), D_a 经过建筑物之前的氧亏量 ($\text{mg O}_2/\text{L}$), D_b 经过建筑物之后的氧亏量 ($\text{mg O}_2/\text{L}$), rea 为赋氧系数。

经过建筑物之前的氧亏量, D_a , 采用下式计算：

$$D_a = O_{x_{sat}} - O_{x_{str}} \quad 25.5.11$$

式中： $O_{x_{sat}}$ 平衡饱和溶解氧浓度 ($\text{mg O}_2/\text{L}$), $O_{x_{str}}$ 河道中溶解氧浓度 ($\text{mg O}_2/\text{L}$).

Butts and Evans (1983) 给出了可以估算赋氧系数的公式：

$$rea = 1 + 0.38 \cdot coef_a \cdot coef_b \cdot h_{fall} \cdot \left(-0.11 \cdot h_{fall} \right) \cdot \left(+0.046 \cdot \bar{T}_{water} \right) \quad 25.5.12$$

式中： rea 为赋氧系数, $coef_a$ 为经验水质因子， $coef_b$ 经验水坝赋氧系数, h_{fall} 水流降落的高度 (m), \bar{T}_{water} 平均水温($^{\circ}\text{C}$).

经验水质因子可以根据河道情况分类：

$coef_a = 1.80$ 清洁水

$coef_a = 1.60$ 轻微污染

$coef_a = 1.00$ 中度污染

$coef_a = 0.65$ 严重污染

经验水坝赋氧系数可以根据建筑物类型来赋值：

$coef_b = 0.70 - 0.90$ 宽的平顶堰

$coef_b = 1.05$ 平坡面的尖顶堰

$coef_b = 0.80$ 垂直面的尖顶堰

$coef_b = 0.05$ 有水下出流的水闸门

Table 25-5: SWAT input variables used in in-stream oxygen calculations.

Variable name	Definition	File Name
RK2	$\kappa_{2,20}$: Reaeration rate at 20°C (day ⁻¹)	.swq
AI3	α_3 : Rate of oxygen production per unit algal photosynthesis (mg O ₂ /mg alg)	.wwq
AI4	α_4 : Rate of oxygen uptake per unit algal respiration (mg O ₂ /mg alg)	.wwq
RHOQ	$\rho_{a,20}$: Local algal respiration rate at 20°C (day ⁻¹)	.wwq
RK1	$\kappa_{1,20}$: CBOD deoxygenation rate at 20°C (day ⁻¹)	.swq
RK4	$\kappa_{4,20}$: Sediment oxygen demand rate at 20°C (mg O ₂ /(m ² ·day))	.swq
AI5	α_5 : Rate of oxygen uptake per unit NH ₄ ⁺ oxidation (mg O ₂ /mg N)	.wwq
AI6	α_6 : Rate of oxygen uptake per unit NO ₂ oxidation (mg O ₂ /mg N)	.wwq
AERATION_COEF	<i>rea</i> : Reaeration coefficient	.fig

25.6 NOMENCLATURE

C_{NH4}	Concentration of ammonium in the reach (mg N/L)
C_{NO3}	Concentration of nitrate in the reach (mg N/L)
C_{solP}	Concentration of phosphorus in solution in the reach (mg P/L)
D_a	Oxygen deficit above the structure (mg O ₂ /L)
D_b	Oxygen deficit below the structure (mg O ₂ /L)

第 25 章 方程:河道内营养物循环过程

D_m	Molecular diffusion coefficient for oxygen (m^2/day)
FL	Algal growth attenuation factor for light for the water column
FL_z	Algal growth attenuation factor for light at depth z
FN	Algal growth limitation factor for nitrogen
FP	Algal growth limitation factor for phosphorus
H_{day}	Solar radiation reaching ground on current day of simulation ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)
I_{hr}	Solar radiation reaching ground during specific hour on current day of simulation ($\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$)
$I_{phosyn,hr}$	Photosynthetically-active solar radiation reaching ground during specific hour on current day of simulation ($\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$)
$I_{phosyn,z}$	Photosynthetically-active light intensity at a depth z below the water surface ($\text{MJ/m}^2\text{-hr}$)
$\bar{I}_{phosyn,hr}$	Daylight average photosynthetically-active light intensity ($\text{MJ/m}^2\text{-hr}$)
K_L	Half-saturation coefficient for light ($\text{MJ/m}^2\text{-hr}$)
K_N	Michaelis-Menton half-saturation constant for nitrogen (mg N/L)
K_P	Michaelis-Menton half-saturation constant for phosphorus (mg P/L)
$NH4_{str}$	Ammonium concentration in the stream (mg N/L)
$NO2_{str}$	Nitrite concentration in the stream (mg N/L)
$NO3_{str}$	Nitrate concentration in the stream (mg N/L)
Ox_{sat}	Saturation oxygen concentration ($\text{mg O}_2/\text{L}$)
Ox_{str}	Dissolved oxygen concentration in the stream ($\text{mg O}_2/\text{L}$)
T_{DL}	Daylength (h)
T_{water}	Average daily water temperature ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{wat,K}$	Water temperature in Kelvin ($273.15+^{\circ}\text{C}$)
\bar{T}_{water}	Average water temperature ($^{\circ}\text{C}$)
TT	Travel time (day)
$algae$	Algal biomass concentration (mg alg/L)
$cbod$	Carbonaceous biological oxygen demand concentration (mg CBOD/L)
chl_a	Chlorophyll a concentration ($\mu\text{g chl}_a/\text{L}$)
$coef_a$	Empirical water quality factor
$coef_b$	Empirical dam aeration coefficient
$depth$	Depth of water in the channel (m)
f_{NH4}	Preference factor for ammonia nitrogen
fr_{DL}	Fraction of daylight hours
fr_{NH4}	Fraction of algal nitrogen uptake from ammonium pool,
fr_{phosyn}	Fraction of solar radiation that is photosynthetically active
h_{fall}	Height through which water falls (m)
k_{ℓ}	Light extinction coefficient (m^{-1})
$k_{\ell,0}$	Non-algal portion of the light extinction coefficient (m^{-1})
$k_{\ell,1}$	Linear algal self shading coefficient ($\text{m}^{-1} (\mu\text{g-chl}_a/\text{L})^{-1}$)
$k_{\ell,2}$	Nonlinear algal self shading coefficient ($\text{m}^{-1} (\mu\text{g-chl}_a/\text{L})^{-2/3}$)
$orgN_{str}$	Organic nitrogen concentration in the stream (mg N/L)

- $orgP_{str}$ Organic phosphorus concentration in the stream (mg P/L)
 rea Reaeration coefficient
 slp Slope of the streambed (m/m)
 v_c Average stream velocity (m/s)
 z Depth from the water surface (m)
- α_0 Ratio of chlorophyll *a* to algal biomass ($\mu\text{g chla}/\text{mg alg}$)
 α_1 Fraction of algal biomass that is nitrogen (mg N/mg alg biomass),
 α_2 Fraction of algal biomass that is phosphorus (mg P/mg alg biomass)
 α_3 Rate of oxygen production per unit algal photosynthesis (mg O₂/mg alg)
 α_4 Rate of oxygen uptake per unit algal respiration (mg O₂/mg alg)
 α_5 Rate of oxygen uptake per unit NH₄⁺ oxidation (mg O₂/mg N)
 α_6 Rate of oxygen uptake per unit NO₂ oxidation (mg O₂/mg N)
 $\beta_{N,1}$ Rate constant for biological oxidation of ammonia nitrogen (day⁻¹ or hr⁻¹)
 $\beta_{N,1,20}$ Rate constant for biological oxidation of ammonia nitrogen at 20°C (day⁻¹ or hr⁻¹)
 $\beta_{N,2}$ Rate constant for biological oxidation of nitrite to nitrate (day⁻¹ or hr⁻¹)
 $\beta_{N,2,20}$ Rate constant for biological oxidation of nitrite to nitrate at 20°C (day⁻¹ or hr⁻¹)
 $\beta_{N,3}$ Rate constant for hydrolysis of organic nitrogen to ammonia nitrogen (day⁻¹ or hr⁻¹)
 $\beta_{N,3,20}$ Local rate constant for hydrolysis of organic nitrogen to NH₄⁺ at 20°C (day⁻¹ or hr⁻¹)
 $\beta_{P,4}$ Rate constant for mineralization of organic phosphorus (day⁻¹ or hr⁻¹)
 $\beta_{P,4,20}$ Local rate constant for organic phosphorus mineralization at 20°C (day⁻¹ or hr⁻¹)
 $\Delta algae$ Change in algal biomass concentration (mg alg/L)
 $\Delta NH4_{str}$ Change in ammonium concentration (mg N/L)
 $\Delta NO2_{str}$ Change in nitrite concentration (mg N/L)
 $\Delta orgN_{str}$ Change in organic nitrogen concentration (mg N/L)
 $\Delta orgP_{str}$ Change in organic phosphorus concentration (mg P/L)
 $\Delta O_{x, str}$ Change in dissolved oxygen concentration (mg O₂/L)
 $\Delta solP_{str}$ Change in solution phosphorus concentration (mg P/L)
 κ_1 CBOD deoxygenation rate (day⁻¹ or hr⁻¹)
 $\kappa_{1,20}$ CBOD deoxygenation rate at 20°C (day⁻¹ or hr⁻¹)
 κ_2 Reaeration rate for Fickian diffusion (day⁻¹ or hr⁻¹)
 $\kappa_{2,20}$ Reaeration rate at 20°C (day⁻¹ or hr⁻¹)
 κ_3 Settling loss rate of CBOD (day⁻¹ or hr⁻¹)
 $\kappa_{3,20}$ Settling loss rate of CBOD at 20°C (day⁻¹ or hr⁻¹)
 κ_4 Sediment oxygen demand rate (mg O₂/(m²·day))
 $\kappa_{4,20}$ Sediment oxygen demand rate at 20°C (mg O₂/(m²·day) or mg O₂/(m²·hr))
 ρ_a Local respiration rate of algae (day⁻¹ or hr⁻¹)
 $\rho_{a,20}$ Local algal respiration rate at 20°C (day⁻¹ or hr⁻¹)
 σ_1 Local settling rate for algae (m/day or m/hr)
 $\sigma_{1,20}$ Local algal settling rate at 20°C (m/day or m/hr)
 σ_2 Benthos (sediment) source rate for soluble P (mg P/m²-day or mg P/m²-hr)

- $\sigma_{2,20}$ Benthos (sediment) source rate for soluble phosphorus at 20°C (mg P/m²-day or mg P/m²-hr)
- σ_3 Benthos (sediment) source rate for ammonium (mg N/m²-day or mg N/m²-hr)
- $\sigma_{3,20}$ Benthos (sediment) source rate for ammonium nitrogen at 20°C (mg N/m²-day or mg N/m²-hr)
- σ_4 Rate coefficient of organic nitrogen settling (day⁻¹ or hr⁻¹)
- $\sigma_{4,20}$ Local settling rate for organic nitrogen at 20°C (day⁻¹ or hr⁻¹)
- σ_5 Rate coefficient for organic phosphorus settling (day⁻¹ or hr⁻¹)
- $\sigma_{5,20}$ Local settling rate for organic phosphorus at 20°C (day⁻¹ or hr⁻¹)
- μ_a Local specific growth rate of algae (day⁻¹ or hr⁻¹)
- $\mu_{a,20}$ Local specific algal growth rate at 20°C (day⁻¹ or hr⁻¹)
- μ_{max} Maximum specific algal growth rate (day⁻¹ or hr⁻¹)

25.7 REFERENCES

American Public Health Association. 1985. Standard methods for the examination of water and wastewater, 16th edition. American Public Health Association, Inc.

Azevedo, J., and P.R. Stout. 1974. Farm animal manures: An overview of their role in the agricultural environment (Service Manual no. 44). University of California, Agricultural Experiment Station Extension.

Bowie, G.L. W.B. Mills, D.B. Porcella, C.L. Campbell, J.R. Pagenkopt, G.L. Rupp, K.M. Johnson, P.W.H. Chan, and S.A. Gherini. 1985. Rates, constants, and kinetic formulations in surface water quality modeling, 2nd ed. EPA/600/3-85/040, U.S. Environmental Protection Agency, Athens, GA.

Brown, L.C. and T.O. Barnwell, Jr. 1987. The enhanced water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS documentation and user manual. EPA document EPA/600/3-87/007. USEPA, Athens, GA.

Butts, T.A. and R.L. Evans. 1983. Small stream channel dam aeration characteristics. Journal, Environmental Engineering Division, ASAE 109:555-573.

Churchill, M.A., H.L. Elmore, and R.A. Buckingham. 1962. The prediction of stream reaeration rates. International Journal of Air and Water Pollution. 6: 467-504.

Loehr, R.C. 1970. Drainage and pollution from beef cattle feedlots (Proceedings paper No. 7726). Journal of the Sanitary Engineers Division, American Society of Civil Engineers, 96 (SA6): 1295-1309.

O'Connor, D.J. and W.E. Dobbins. 1958. Mechanism of reaeration in natural streams. Trans. ASCE. 123:641-684.

Owens, M. R.W. Edwards, and J.W. Gibbs. 1964. Some reaeration studies in streams. International Journal of Air and Water Pollution 8:469-486.

Paine, M.D. 1973. Confined animals and public environment (Great Plains Beef Cattle Feeding Handbook, GPE-7000/EC-72-246). Lincoln: University of Nebraska, College of Agriculture, Cooperative Extension Service.

第 26 章 方程:河道内杀虫剂转化

SWAT 采用 Chapra (1997)开发的质量守恒方程来模拟河道内的杀虫剂的迁移转化。模型假设在泥沙层上存在一层完全混合的水体。只有一种杀虫剂可以在河道中演算。杀虫剂的演算由.bsn 文件中的 IRTPEST 变量来定义。

26.1 水体中的杀虫剂

河道中的杀虫剂由于入流、再悬浮和从泥沙中扩散而增加，同时通过出流、降解、挥发、沉淀和扩散进入泥沙而减少。

26.1.1 固体 - 液体分割

杀虫剂将被分为颗粒态和溶解态两种形式。杀虫剂在每一相中的分数由杀虫剂分割系数和河段的悬浮固体浓度决定：

$$F_d = \frac{1}{1 + K_d \cdot \text{conc}_{sed}} \quad 26.1.1$$

$$F_p = \frac{K_d \cdot \text{conc}_{sed}}{1 + K_d \cdot \text{conc}_{sed}} = 1 - F_d \quad 26.1.2$$

式中： F_d 为在溶解态相中的杀虫剂分数， F_p 在颗粒态相中的杀虫剂分数， K_d 杀虫剂分割系数 (m^3/g)， conc_{sed} 河段的悬浮固体浓度 (g/m^3)。

杀虫剂分割系数可以根据 octanol-water 分割系数估算 (Chapra, 1997):

$$K_d = 3.085 \times 10^{-8} \cdot K_{ow} \quad 26.1.3$$

式中： K_d 杀虫剂分割系数 (m^3/g)， K_{ow} 杀虫剂的 octanol-water 分割系数 ($\text{mg m}^{-3}_{\text{octanol}} / \text{mg m}^{-3}_{\text{water}}$)。octanol-water 分割系数的值在很多资料中可以查到。如果不能找到已发表的数值，可以根据溶解性来估计 (Chapra, 1997)：

$$\log K_{ow} = 5.00 - 0.670 \cdot \log \left[\frac{K_{st}}{K_{sol}} \right] \quad 26.1.4$$

式中： pst'_{sol} 杀虫剂可溶解性 ($\mu\text{moles/L}$)。单位转化为：

$$pst'_{sol} = \frac{Pst_{sol}}{MW} \cdot 10^3 \quad 26.1.5$$

式中： pst'_{sol} 杀虫剂可溶解性 ($\mu\text{moles/L}$), Pst_{sol} 杀虫剂可溶解性 (mg/L), MW 分子重量 (g/mole).

26.1.2 降解

存在于颗粒态和溶解态杀虫剂均受到降解作用的影响。通过降解去除的杀虫剂量为：

$$pst_{deg,wtr} = k_{p,aq} \cdot pst_{rchwtr} \cdot TT \quad 26.1.6$$

式中： $pst_{deg,wtr}$ 为降解去除的杀虫剂量 (mg pst), $k_{p,aq}$ 降解去除的杀虫剂的速率常数 ($1/\text{day}$), pst_{rchwtr} 为模拟日开始时的杀虫剂量 (mg pst), TT 水流传播时间(days)。速率常数与水成半衰期有关：

$$k_{p,aq} = \frac{0.693}{t_{1/2,aq}} \quad 26.1.7$$

式中： $k_{p,aq}$ 为降解去除的杀虫剂的速率常数($1/\text{day}$), $t_{1/2,aq}$ 杀虫剂的水成半衰期 (days).

26.1.3 挥发

溶解态的杀虫剂可以挥发。通过挥发去除的杀虫剂量为：

$$pst_{vol,wtr} = \frac{v_v}{depth} \cdot F_d \cdot pst_{rchwtr} \cdot TT \quad 26.1.8$$

式中： $pst_{vol,wtr}$ 为通过挥发去除的杀虫剂量 (mg pst), v_v 挥发质量传输系数 (m/day), $depth$ 为水流深度 (m), F_d 总杀虫剂中在溶解相中的分数, pst_{rchwtr} 为水体中的杀虫剂量(mg pst), TT 水流传输时间 (days)。

挥发质量传输系数可以根据 Whitman 的双膜理论或双阻尼理论计算 (Whitman, 1923; Lewis and Whitman, 1924 as described in Chapra, 1997)。相对于假设气液相被假设为完全混合且均质, 双膜理论假设在这两相中运动的物质在两个层流边界处遇到最大阻力, 传输为分子扩散的方程。在这种系统中的传输系数或速率为:

$$v_v = K_l \cdot \frac{H_e}{H_e + R \cdot T_K \cdot (K_l / K_g)} \quad 26.1.9$$

式中： v_v 为挥发质量传输系数(m/day), K_l 为液体层流中的质量传输系数 (m/day), K_g 为气体层流中的质量传输系数 (m/day), H_e 为 Henry 常数 (atm m³ mole⁻¹), R 为普遍气体常数 (8.206 × 10⁻⁵ atm m³ (K mole)⁻¹), T_K 为温度 (K)。

对于水流为湍流的河流, 传输系数根据表面更新理论估算 (Higbie, 1935; Danckwerts, 1951; as described by Chapra, 1997)。表面更新理论将系统看作在一定时段内将包裹的水体运送到表面。流体单元被假设为随机地离开气/水界面, 即流体单元进入大气过程通过统计分布来描述。液相和气相的传输系数计算如下:

$$K_l = \sqrt{r_l \cdot D_l} \quad K_g = \sqrt{r_g \cdot D_g} \quad 26.1.10$$

式中： K_l 为液体层流层中的质量传输系数(m/day), K_g 气体层流层中的质量传输系数 (m/day), D_l 液体分子扩散系数 (m^2/day), D_g 为气体分子扩散系数 (m^2/day), r_l 为液体表面更新速率(1/day), r_g 为气体表面更新速率(1/day).

O'Connor and Dobbins (1958) 定义表面更新速率为平均水流速率与水深的比率：

$$r_l = \frac{86400 \cdot v_c}{depth} \quad 26.1.11$$

式中： r_l 为液体表面更新速率 (1/day), v_c 平均水流流速 (m/s) , $depth$ 水流深度 (m).

26.1.4 沉淀

水中颗粒态的杀虫剂可以通过沉淀去除。沉淀将杀虫剂从水中传输到泥沙层中。通过沉淀去除的杀虫剂量为：

$$pst_{stl,wtr} = \frac{v_s}{depth} \cdot F_p \cdot pst_{rchwtr} \cdot TT \quad 26.1.12$$

式中： $pst_{stl,wtr}$ 为通过沉淀去除的杀虫剂量 (mg pst), v_s 为沉淀速率(m/day), $depth$ 为水流深度 (m), F_p 总杀虫剂量在固相中的分数, pst_{rchwtr} 水体中杀虫剂的量 (mg pst), TT 水流传输时间 (days)。

26.1.5 出流

杀虫剂通过出流离开河段，去留减少河道中溶解态和颗粒态的杀虫剂量为：

$$pst_{sol,o} = Q \cdot \frac{F_d \cdot pst_{rchwtr}}{V} \quad 26.1.13$$

$$pst_{sorb,o} = Q \cdot \frac{F_p \cdot pst_{rchwtr}}{V} \quad 26.1.14$$

式中： $pst_{sol,o}$ 出流去除的杀虫剂量(mg pst), $pst_{sorb,o}$ 为出流去除的颗粒态杀虫剂量(mg pst), Q 为出流速率 ($m^3 H_2O/day$), F_d 总杀虫剂量在溶解相中的分数, F_p 总杀虫剂量在固相中的分数, pst_{rchwtr} 水中杀虫剂量 (mg pst), V 为河段中水的体积 ($m^3 H_2O$).

Table 26-1: SWAT input variables that pesticide partitioning.

Variable Name	Definition	Input File
CHPST_KOC	K_d : Pesticide partition coefficient (m^3/g)	.swq
CHPST_REA	$k_{p,aq}$: Rate constant for degradation or removal of pesticide in the water (1/day)	.swq
CHPST_VOL	v_v : Volatilization mass-transfer coefficient (m/day)	.swq
CHPST_STL	v_s : Pesticide settling velocity (m/day)	.swq

26.2 泥沙中的杀虫剂

泥沙中的杀虫剂通过沉积和水体向泥沙的扩散而增加,通过降解、再悬浮和由泥沙向水体的扩散而减少。

26.2.1 固体 - 液体分割

与水层相似,泥沙中的杀虫剂将被分为颗粒态和溶解态。计算泥沙层中固体 - 液体分割需要悬浮固体的浓度。泥沙层中固体颗粒浓度定义为:

$$conc_{sed}^* = \frac{M_{sed}}{V_{tot}} \quad 26.2.1$$

式中: $conc_{sed}^*$ 泥沙层中固体颗粒浓度 (g/m^3), M_{sed} 为泥沙层中固体颗粒的质量(g), V_{tot} 泥沙层的总体积 (m^3).

质量和体积也用来定义孔隙率和泥沙层密度。杂泥沙层,孔隙率为总体积中液相的分数:

$$\phi = \frac{V_{wtr}}{V_{tot}} \quad 26.2.2$$

式中: ϕ 为孔隙率, V_{wtr} 泥沙层中的水体积(m^3), V_{tot} 泥沙层的总体积 (m^3).

固相的体积分数可以定义为:

$$1 - \phi = \frac{V_{sed}}{V_{tot}} \quad 26.2.3$$

式中: ϕ 为孔隙率, V_{sed} 泥沙层中的固体体积(m^3), V_{tot} 泥沙层的总体积 (m^3).

泥沙颗粒的密度为：

$$\rho_s = \frac{M_{sed}}{V_{sed}} \quad 26.2.4$$

式中： ρ_s 为颗粒密度 (g/m^3)， M_{sed} 为泥沙层中的固体颗粒质量(g)， V_{sed} 为泥沙层中固体的体积 (m^3)。

求解方程 26.2.3 可得 V_{tot} ，求解 26.2.4 得到 M_{sed} ，并将其代入方程 26.2.1 可得：

$$conc_{sed}^* = (\phi) \rho_s \quad 26.2.5$$

式中： $conc_{sed}^*$ 为泥沙层中固体颗粒的密度 (g/m^3)， ϕ 为孔隙率， ρ_s 为颗粒密度 (g/m^3)。

假设 $\phi = 0.5$ ， $\rho_s = 2.6 \times 10^6 \text{ g}/\text{m}^3$ ，泥沙层中固体颗粒的密度为 $1.3 \times 10^6 \text{ g}/\text{m}^3$ 。

在每一相中的杀虫剂分数可以计算为：

$$F_{d,sed} = \frac{1}{\phi + (\phi) \rho_s \cdot K_d} \quad 26.2.6$$

$$F_{p,sed} = 1 - F_{d,sed} \quad 26.2.7$$

式中： $F_{d,sed}$ 为泥沙中杀虫剂在溶解相中的分数， $F_{p,sed}$ 为泥沙中杀虫剂在固相中的分数， ϕ 为孔隙率， ρ_s 为颗粒密度 (g/m^3)， K_d 杀虫剂分割系数 (m^3/g)。杀虫剂分割系数在泥沙层和水层中均相等。

26.2.2 降解

在颗粒和溶解相中的杀虫剂会发生降解，降解去除的泥沙中杀虫剂的量为：

$$pst_{deg, sed} = k_{p, sed} \cdot pst_{rchsed} \quad 26.2.8$$

式中： $pst_{deg, sed}$ 降解去除的泥沙中杀虫剂的量 (mg pst), $k_{p, sed}$ 为降解去除的泥沙中杀虫剂的速率常数 (1/day), pst_{rchsed} 为泥沙中杀虫剂的量(mg pst)。降解去除的泥沙中杀虫剂的速率常数与泥沙中杀虫剂的半衰期有关：

$$k_{p, sed} = \frac{0.693}{t_{1/2, sed}} \quad 26.2.9$$

式中： $k_{p, sed}$ 为降解去除的泥沙中杀虫剂的速率常数 (1/day), $t_{1/2, sed}$ 为泥沙中杀虫剂的半衰期 (days).

26.2.3 再悬浮

泥沙层中的杀虫剂可以被再悬浮，再悬浮去除泥沙中杀虫剂的量为：

$$pst_{rsp, wtr} = \frac{v_r}{depth} \cdot pst_{rchsed} \cdot TT \quad 26.2.10$$

式中： $pst_{rsp, wtr}$ 为再悬浮去除泥沙中杀虫剂的量 (mg pst), v_r 为再悬浮速率 (m/day), $depth$ 为水流深度 (m), pst_{rchsed} 泥沙中杀虫剂的量 (mg pst), TT 水流传播时间 (days). 再悬浮过程去除的泥沙中的杀虫剂被添加到水层中。s

26.2.4 扩散

溶解相中的杀虫剂可以扩散。扩散将杀虫剂在水和泥沙层之间转移,杀虫剂的运动方向通过杀虫剂浓度控制。杀虫剂将从高浓度区域向低浓度区域运动。

通过扩散在水和泥沙之间转移的杀虫剂量为:

$$pst_{dif} = \left| \frac{v_d}{depth} \cdot F_{d, sed} \cdot pst_{rchsed} - F_d \cdot pst_{rchwtr} \right| \cdot TT \quad 26.2.11$$

式中: pst_{dif} 扩散在水和泥沙之间转移的杀虫剂量 (mg pst), v_d 扩散或混合速率 (m/day), $depth$ 水流深度 (m), $F_{d, sed}$ 总泥沙杀虫剂中在固相的分数, pst_{rchsed} 泥沙中杀虫剂的量 (mg pst), F_d 总泥沙杀虫剂中在溶解相的分数, pst_{rchwtr} 水中杀虫剂的量 (mg pst), TT 水流时间 (days). 如果 $F_{d, sed} \cdot pst_{rchsed} > F_d \cdot pst_{rchwtr}$, pst_{dif} 从泥沙向水层转移。如果 $F_{d, sed} \cdot pst_{rchsed} < F_d \cdot pst_{rchwtr}$, pst_{dif} 从水向泥沙层转移。

扩散混合速率, v_d , 可以根据经验公式(Chapra, 1997)估算:

$$v_d = \frac{69.35}{365} \cdot \phi \cdot MW^{-2/3} \quad 26.2.12$$

式中: v_d 为扩散混合速率 (m/day), ϕ 为泥沙孔隙率, MW 杀虫剂混合物的分子重量。

26.2.5 埋藏

泥沙层中的杀虫剂可以通过埋藏而损失。通过埋藏而损失的泥沙层中的杀虫剂量为：

$$pst_{bur} = \frac{v_b}{D_{sed}} \cdot pst_{rchsed} \quad 26.2.13$$

式中： pst_{bur} 为通过埋藏而损失的泥沙层中的杀虫剂量 (mg pst), v_b 为埋藏速率 (m/day), D_{sed} 活性泥沙层深度(m), pst_{rchsed} 泥沙中杀虫剂的量 (mg pst).

Table 26-2: SWAT input variables related to pesticide in the sediment.

Variable Name	Definition	Input File
CHPST_KOC	K_d : Pesticide partition coefficient (m^3/g)	.swq
SEDPST_REA	$k_{p, sed}$: Rate constant for degradation or removal of pesticide in the sediment (1/day)	.swq
CHPST_RSP	v_r : Resuspension velocity (m/day)	.swq
SEDPST_ACT	D_{sed} : Depth of the active sediment layer (m)	.swq
CHPST_MIX	v_d : Rate of diffusion or mixing velocity (m/day)	.swq
SEDPST_BRY	v_b : Pesticide burial velocity (m/day)	.swq

26.3 质量守恒

对于完全混合的河段和完全混合的泥沙层，上面所述的过程可以总和为质量守恒方程：

$$\begin{aligned} \Delta pst_{rchwtr} = & pst_{in} - (pst_{sol,o} + pst_{sorb,o}) + pst_{deg,wtr} - pst_{vol,wtr} \\ & - pst_{stl,wtr} + pst_{rsp,wtr} \pm pst_{dif} \end{aligned} \quad 26.3.1$$

$$\Delta pst_{rchsed} = -pst_{deg,sed} + pst_{stl,wtr} - pst_{rsp,wtr} - pst_{bur} \pm pst_{dif} \quad 26.3.2$$

式中： $\Delta p_{st_{rchwtr}}$ 水层中杀虫剂量的变化 (mg pst), $\Delta p_{st_{rchsed}}$ 为泥沙层中杀虫剂质量的变化 (mg pst), $p_{st_{in}}$ 为入流增加的河段杀虫剂量 (mg pst), $p_{st_{sol,o}}$ 为出流去除的河段杀虫剂量 (mg pst), $p_{st_{sorb,o}}$ 出流去除的颗粒态杀虫剂量 (mg pst), $p_{st_{deg,wtr}}$ 为降解从水中去除的杀虫剂量 (mg pst), $p_{st_{vol,wtr}}$ 为挥发去除的杀虫剂量 (mg pst), $p_{st_{stl,wtr}}$ 沉淀去除的杀虫剂量 (mg pst), $p_{st_{rsp,wtr}}$ 再悬浮去除的杀虫剂量 (mg pst), $p_{st_{dif}}$ 扩散在水与泥沙之间转移的杀虫剂量 (mg pst), $p_{st_{deg,sed}}$ 为降解去除的泥沙中的杀虫剂量 (mg pst), $p_{st_{bur}}$ 埋藏去除的杀虫剂量 (mg pst)。

26.4 NOMENCLATURE

- D_g Gas molecular diffusion coefficient (m^2/day)
 D_l Liquid molecular diffusion coefficient (m^2/day)
 D_{sed} Depth of the active sediment layer (m)
 F_d Fraction of total pesticide in the dissolved phase
 $F_{d,sed}$ Fraction of total sediment pesticide in the dissolved phase
 F_p Fraction of total pesticide in the particulate phase
 $F_{p,sed}$ Fraction of total sediment pesticide in the particulate phase
 H_e Henry's constant ($atm\ m^3\ mole^{-1}$)
 K_d Pesticide partition coefficient (m^3/g)
 K_g Mass-transfer velocity in the gaseous laminar layer (m/day)
 K_l Mass-transfer velocity in the liquid laminar layer (m/day)
 M_{sed} Mass of solid phase in the sediment layer (g)
 MW Molecular weight of the pesticide compound
 Q Rate of outflow from the reach segment ($m^3\ H_2O/day$)
 R Universal gas constant ($8.206 \times 10^{-5}\ atm\ m^3\ (K\ mole)^{-1}$)
 V_{sed} Volume of solids in the sediment layer (m^3)
 V_{tot} Total volume of the sediment layer (m^3)
 V_{wtr} Volume of water in the sediment layer (m^3)

 $conc_{sed}$ Concentration of suspended solids in the water (g/m^3)
 $conc_{sed}^*$ "Concentration" of solid particles in the sediment layer (g/m^3)
 $depth$ Depth of flow (m)

第 26 章 方程:河道内杀虫剂转化

- $k_{p,aq}$ Rate constant for degradation or removal of pesticide in the water (1/day)
 $k_{p,sed}$ Rate constant for degradation or removal of pesticide in the sediment (1/day)
 pst_{bur} Amount of pesticide removed via burial (mg pst)
 $pst_{deg,sed}$ Amount of pesticide removed from the sediment via degradation (mg pst)
 $pst_{deg,wtr}$ Amount of pesticide removed from the water via degradation (mg pst)
 pst_{dif} Amount of pesticide transferred between the water and sediment by diffusion (mg pst)
 pst_{rchsed} Amount of pesticide in the sediment (mg pst)
 pst_{rchwtr} Amount of pesticide in the water (mg pst)
 $pst_{rsp,wtr}$ Amount of pesticide removed from sediment via resuspension (mg pst)
 $pst_{sol,o}$ Amount of dissolved pesticide removed via outflow (mg pst)
 $pst_{sorb,o}$ Amount of particulate pesticide removed via outflow (mg pst)
 $pst_{stl,wtr}$ Amount of pesticide removed from the water due to settling (mg pst)
 $pst_{vol,wtr}$ Amount of pesticide removed via volatilization (mg pst)
 r_g Gaseous surface renewal rate (1/day)
 r_l Liquid surface renewal rate (1/day)
 $t_{1/2,aq}$ Aqueous half-life for the pesticide (days)
 $t_{1/2,sed}$ Sediment half-life for the pesticide (days)
 v_b Pesticide burial velocity (m/day)
 v_c Average stream velocity (m/s)
 v_d Rate of diffusion or mixing velocity (m/day)
 v_r Resuspension velocity (m/day)
 v_s Settling velocity (m/day)
 v_v Volatilization mass-transfer coefficient (m/day)
- Δpst_{rchwtr} Change in pesticide mass in the water layer (mg pst)
 Δpst_{rchsed} Change in pesticide mass in the sediment layer (mg pst)
 ϕ Porosity
 ρ_s Particle density (g/m^3)

26.5 REFERENCES

- Chapra, S.C. 1997. Surface water-quality modeling. WCB/McGraw-Hill, Boston, MA.
- Danckwerts, P.V. 1951. Significance of liquid-film coefficients in gas absorption. Ind. Eng. Chem. 43:1460-1467.
- Higbie, R. 1935. The rate of adsorption of a pure gas into a still liquid during short periods of exposure. Trans. Amer. Inst. Chem. Engin. 31:365-389.
- Lewis, W.K. and W.G. Whitman. 1924. Principles of gas absorption. Ind. Eng. Chem. 16:1215-1220.

O'Connor, D.J. and Dobbins, W.E. 1958. Mechanisms of reaeration in natural streams. *Trans ASAE* 123: 641-666.

Whitman, W.G. 1923. The two-film theory of gas adsorption. *Chem. Metallurg. Eng.* 29:146-148.

第 27 章 方程:蓄水演算

蓄水在水供给和洪水控制中起到重要的作用。SWAT 模拟四种水体：池塘、湿地、洼地/壶穴，以及水库。池塘、湿地和洼地/壶穴存在于子流域中非主河道部分。流入这些水体的水流必须来自其所在的子流域。水库则位于主河道上，接收其上游所有子流域的来水。

27.1 水库

水库为存在于主河道网络上的蓄水体。自然发生和认为建造的结构没有区别。图 27.1 图示了蓄水体的特征。

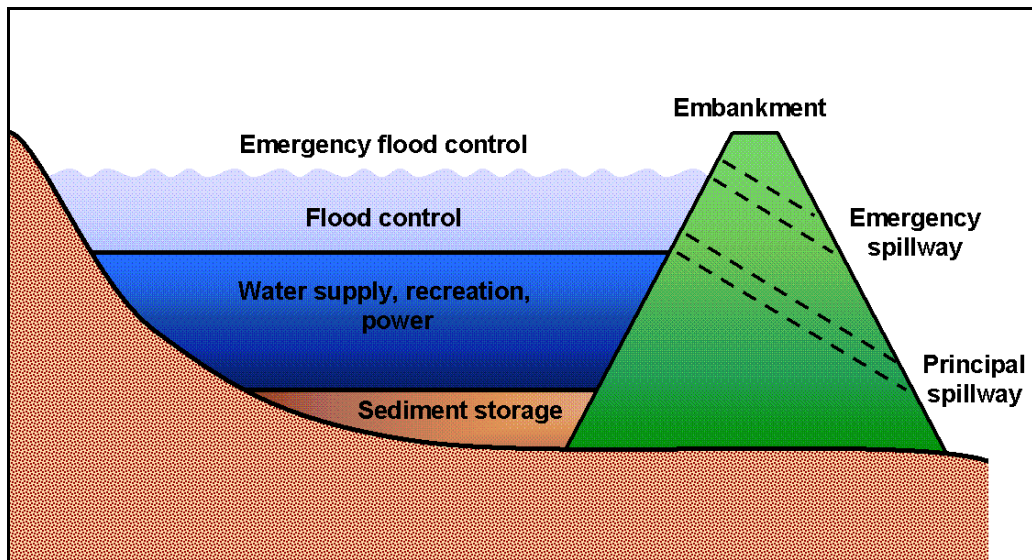


Figure 27.1: Components of a reservoir with flood water detention features.

水库的水量平衡方程为：

$$V = V_{stored} + V_{flowin} - V_{flowout} + V_{pcp} - V_{evap} - V_{seep} \quad 27.1.1$$

式中： V 模拟日结束时蓄水体中的水量($m^3 H_2O$), V_{stored} 为模拟日开始时蓄水体中的水量($m^3 H_2O$), V_{flowin} 为模拟日进入蓄水体中的水量 ($m^3 H_2O$), $V_{flowout}$ 为模拟日流出蓄水体中的水量 ($m^3 H_2O$), V_{pcp} 模拟日中降水落在蓄水体上的水量($m^3 H_2O$), V_{evap} 通过蒸发从蓄水体去除的水量($m^3 H_2O$), V_{seep} 渗漏从蓄水体去除的水量 ($m^3 H_2O$)。

27.1.1 表面积

模型需要蓄水体的表面积来计算落在其上的降水量,以及蒸发和渗漏。表面积随水库中水体积而变化。每日的表面积采用下式计算:

$$SA = \beta_{sa} \cdot V^{expsa} \quad 27.1.2$$

式中: SA 为水体的表面积(ha), β_{sa} 为系数, V 为蓄水的体积 ($m^3 H_2O$), $expsa$ 为指数。

系数, β_{sa} , 和指数, $expsa$, 通过已知的两个点求解方程 27.1.2 来计算。已知两个点的信息为常规库容和防洪库容的表面积和水量。

$$expsa = \frac{\log_{10} SA_{em} - \log_{10} SA_{pr}}{\log_{10} V_{em} - \log_{10} V_{pr}} \quad 27.1.3$$

$$\beta_{sa} = \left(\frac{SA_{em}}{V_{em}} \right)^{expsa} \quad 27.1.4$$

式中: SA_{em} 为防洪库容时水体的表面积 (ha), SA_{pr} 为常规库容时水体的表面积 (ha), V_{em} 为防洪库容 ($m^3 H_2O$), V_{pr} 常规库容 ($m^3 H_2O$).

27.1.2 降水

降落在水库上的降水量为:

$$V_{pcp} = 10 \cdot R_{day} \cdot SA \quad 27.1.5$$

式中: V_{pcp} 模拟日降落在水库上的降水量 ($m^3 H_2O$), R_{day} 模拟日的降水量 (mm H_2O), SA 为水体表面积 (ha).

27.1.3 蒸发

模拟日蒸发引起的水量损失为：

$$V_{evap} = 10 \cdot \eta \cdot E_o \cdot SA \quad 27.1.6$$

式中： V_{evap} 模拟日蒸发去除的水量($m^3 H_2O$)， η 为蒸发系数 (0.6)， E_o 模拟日潜在蒸发 ($mm H_2O$)， SA 为水体表面积 (ha)。

27.1.4 渗漏

渗漏引起水库水量损失为：

$$V_{seep} = 240 \cdot K_{sat} \cdot SA \quad 27.1.7$$

式中： V_{seep} 为渗漏引起水库水量损失 ($m^3 H_2O$)， K_{sat} 水库底部有效饱和水力传导率 (mm/hr)， SA 为水体表面积 (ha)。

27.1.5 出流

可以采用四种不同的方法计算出流体积：实测日出流，实测月出流，无控制水库的年平均出流，根据排泄目标控制的出流。

27.1.5.1 实测日出流

当采用实测日出流方法(IRESKO = 3)时，用户必需提供一个文件，

其中包含水库每天的出流量。水库出流体积为：

$$V_{flowout} = 86400 \cdot q_{out} \quad 27.1.8$$

式中： $V_{flowout}$ 为水体日出流量($m^3 H_2O$)， q_{out} 为出流速率 (m^3/s)。

第 27 章 方程:蓄水演算

27.1.5.2 实测月出流

当采用实测月出流方法(IRESKO = 1)时,用户必需提供一个文件,其中包含水库每月的出流量。水库出流体积采用方程 27.1.8.

27.1.5.3 无控制水库的年平均出流

当采用年平均排泄率方法 (IRESKO = 0)时,水库在容量超过常规库容, V_{pr} , 时泄水, 水库出流量采用下式计算:

$$V_{flowout} = V - V_{pr} \quad \text{if } V - V_{pr} < q_{rel} \cdot 86400 \quad 27.1.9$$

$$V_{flowout} = q_{rel} \cdot 86400 \quad \text{if } V - V_{pr} > q_{rel} \cdot 86400 \quad 27.1.10$$

如果水库库容超过防洪库容时, 出流量采用下式计算:

$$V_{flowout} = (V - V_{em}) + (V_{em} - V_{pr})$$

$$\text{if } V_{em} - V_{pr} < q_{rel} \cdot 86400 \quad 27.1.11$$

$$V_{flowout} = (V - V_{em}) + q_{rel} \cdot 86400$$

$$\text{if } V_{em} - V_{pr} > q_{rel} \cdot 86400 \quad 27.1.12$$

式中: $V_{flowout}$ 模拟日水库出流量 ($\text{m}^3 \text{H}_2\text{O}$), V 为水库中的水量($\text{m}^3 \text{H}_2\text{O}$), V_{pr} 常规库容 ($\text{m}^3 \text{H}_2\text{O}$), V_{em} 防洪库容 ($\text{m}^3 \text{H}_2\text{O}$), q_{rel} 日平均常规库容排泄率 (m^3/s).

27.1.5.4 根据排泄目标控制的出流

当采用目标排泄(IRESKO = 2)方法时, 水库排泄量为两相目标储量的函数。

目标排泄率方法是对水库管理人员常规操作的模拟。虽然方法简单，不能考虑所有的决策标准，但是可以较为实际地模拟主要出流和枯季出流。

对于目标排泄方法，常规库容考虑了最大洪水控制，而防洪库容没有洪水控制余地。模型要求输入丰水期的开始月和结束月。在枯水期，不要洪水控制预留，目标储量为防洪库容。在丰水期，需要考虑洪水控制，洪水控制预留为土壤水分的函数。在湿润土壤条件下洪水控制预留最大，在干旱土壤条件下，洪水控制预留设置为最大的 50%。

目标存储可以由用户以月为时间步长指定，也可以由模型根据洪水期和土壤含水量计算。如果目标存储为用户指定：

$$V_{targ} = starg \quad 27.1.13$$

式中： V_{targ} 模拟日水库目标容量($m^3 H_2O$)， $starg$ 为该月模拟日目标水库容量 ($m^3 H_2O$)。如果目标存储没有指定，则采用下式计算：

$$V_{targ} = V_{em} \quad \text{if } mon_{fld,beg} < mon < mon_{fld,end} \quad 27.1.14$$

$$V_{targ} = V_{pr} + \frac{\left(1 - \min\left[\frac{SW}{FC}, 1\right]\right)}{2} \cdot (V_{em} - V_{pr}) \quad \text{if } mon \leq mon_{fld,beg} \text{ or } mon \geq mon_{fld,end} \quad 27.1.15$$

式中： V_{targ} 为模拟日目标水库容量 ($m^3 H_2O$)， V_{em} 为防洪库容 ($m^3 H_2O$)， V_{pr} 为常规库容 ($m^3 H_2O$)， SW 子流域平均土壤含水量 (mm)

H_2O), FC 子流域土壤田间持水量 ($mm H_2O$), mon 为一年中的月份, $mon_{fld,beg}$ 为洪水季节开始的月份, $mon_{fld,end}$ 洪水季节结束的月份。

一旦确定目标存储, 出流可采用下式计算:

$$V_{flowout} = \frac{V - V_{targ}}{ND_{targ}} \quad 27.1.16$$

式中: $V_{flowout}$ 模拟日水库的出流量 ($m^3 H_2O$), V 水库中存储的水量 ($m^3 H_2O$), V_{targ} 为模拟日目标水库容量 ($m^3 H_2O$), ND_{targ} 为水库达到目标存储所需要的天数。

一旦出流根据以上四种方法确定, 用户可以指定最大和最小排泄率, 以检验初始出流估计。如果出流没有满足最小排泄率或超过最大排泄率, 出流量需要修正以满足标准。

$$V_{flowout} = V'_{flowout} \quad \text{if} \quad q_{rel,mn} \cdot 86400 \leq V'_{flowout} \leq q_{rel,mx} \cdot 86400 \quad 27.1.17$$

$$V_{flowout} = q_{rel,mn} \cdot 86400 \quad \text{if} \quad V'_{flowout} < q_{rel,mn} \cdot 86400 \quad 27.1.18$$

$$V_{flowout} = q_{rel,mx} \cdot 86400 \quad \text{if} \quad V'_{flowout} > q_{rel,mx} \cdot 86400 \quad 27.1.19$$

式中: $V_{flowout}$ 为水库日出流量 ($m^3 H_2O$), $V'_{flowout}$ 为水库日出流量的初始估计 ($m^3 H_2O$), $q_{rel,mn}$ 为最小日出流速率 (m^3/s), $q_{rel,mx}$ 为最大日出流速率 (m^3/s)。

Table 27-1: SWAT input variables that pertain to reservoirs.

Variable name	Definition	File Name
RES_ESA	SA_{em} : Surface area of the reservoir when filled to the emergency spillway (ha)	.res
RES_PSA	SA_{pr} : Surface area of the reservoir when filled to the principal spillway (ha)	.res
RES_EVOL	V_{em} : Volume of water held in the reservoir when filled to the emergency spillway ($10^4 m^3 H_2O$)	.res
RES_PVOL	V_{pr} : Volume of water held in the reservoir when filled to the principal spillway ($10^4 m^3 H_2O$)	.res

RES_K	K_{sat} : Effective saturated hydraulic conductivity of the reservoir bottom (mm/hr)	.res
IRESKO	Outflow method	.res
RES_OUTFLOW	q_{out} : Outflow rate (m^3/s)	resdayo.dat
RESOUT	q_{out} : Outflow rate (m^3/s)	resmono.dat
RES_RR	q_{rel} : Average daily principal spillway release rate (m^3/s)	.res
STARG(mon)	$starg$: Target reservoir volume specified for a given month ($m^3 H_2O$)	.res
IFLOD1R	$mon_{fld,beg}$: Beginning month of the flood season	.res
IFLOD2R	$mon_{fld,end}$: Ending month of the flood season	.res
NDTARGR	ND_{targ} : Number of days required for the reservoir to reach target storage	.res
OFLOWMN(mon)	$q_{rel,mn}$: Minimum average daily outflow for the month (m^3/s)	.res
OFLOWMX(mon)	$q_{rel,mx}$: Maximum average daily outflow for the month (m^3/s)	.res

27.2 池塘/湿地

池塘和湿地为位于子流域的水体，并从子流域的部分面积接收入流。用于模拟这两种水体的算法只在允许计算出流方面有所不同。

湿地的水量平衡为：

$$V = V_{stored} + V_{flowin} - V_{flowout} + V_{pcp} - V_{evap} - V_{seep} \quad 27.2.1$$

式中： V 模拟日结束时蓄水体体积 ($m^3 H_2O$)， V_{stored} 为模拟日开始时蓄水体体积 ($m^3 H_2O$)， V_{flowin} 为模拟日进入水体的水量 ($m^3 H_2O$)， $V_{flowout}$ 为模拟日流出水体的水量 ($m^3 H_2O$)， V_{pcp} 落在水体上的降水量 ($m^3 H_2O$)， V_{evap} 蒸发去除的水体中的水量 ($m^3 H_2O$)， V_{seep} 为渗漏造成的水体水量损失 ($m^3 H_2O$)。

27.2.1 表面积

池塘或湿地的表面积需要用来计算落在水体上的降水量，以及蒸发和渗漏量。表面积随着蓄水体中的水量变化。日表面积采用下式计算：

$$SA = \beta_{sa} \cdot V^{exp_{sa}} \quad 27.2.2$$

第 27 章 方程:蓄水演算

式中： SA 为水体的表面积 (ha)， β_{sa} 为系数， V 蓄水体中的水量 ($\text{m}^3 \text{H}_2\text{O}$)， $expsa$ 为指数。

系数， β_{sa} ，和指数， $expsa$ ，通过已知的两个点求解方程 27.1.2 来计算。对于池塘，已知两个点的信息为常规容量和防洪容量的表面积和水量。

$$expsa = \frac{\log_{10} \left(\frac{SA_{em}}{V_{em}} \right) - \log_{10} \left(\frac{SA_{pr}}{V_{pr}} \right)}{\log_{10} V_{em} - \log_{10} V_{pr}} \quad 27.2.3$$

$$\beta_{sa} = \left(\frac{SA_{em}}{V_{em}} \right)^{expsa} \quad 27.2.4$$

式中： SA_{em} 为防洪库容时水体的表面积 (ha)， SA_{pr} 为常规库容时水体的表面积 (ha)， V_{em} 为防洪库容 ($\text{m}^3 \text{H}_2\text{O}$)， V_{pr} 常规库容 ($\text{m}^3 \text{H}_2\text{O}$)。

对于湿地，已知两个点的信息为最大和正常水位的表面积和水量。

$$expsa = \frac{\log_{10} \left(\frac{SA_{mx}}{V_{mx}} \right) - \log_{10} \left(\frac{SA_{nor}}{V_{nor}} \right)}{\log_{10} V_{mx} - \log_{10} V_{nor}} \quad 27.2.5$$

$$\beta_{sa} = \left(\frac{SA_{mx}}{V_{mx}} \right)^{expsa} \quad 27.2.6$$

式中： SA_{mx} 为最高水位时水体的表面积 (ha)， SA_{nor} 为正常水体的表面积 (ha)， V_{mx} 为最高水位时的容量 ($\text{m}^3 \text{H}_2\text{O}$)， V_{nor} 正常水体的容量 ($\text{m}^3 \text{H}_2\text{O}$)。

27.2.2 降水

降落在池塘或湿地上的降水量为：

$$V_{pcp} = 10 \cdot R_{day} \cdot SA \quad 27.1.5$$

式中： V_{pcp} 模拟日降落在水体上的降水量 ($\text{m}^3 \text{H}_2\text{O}$)， R_{day} 模拟日的降水量 (mm H_2O)， SA 为水体表面积 (ha)。

27.2.3 入流

模拟日进入池塘或湿地的水量为：

$$V_{flowin} = fr_{imp} \cdot 10 \cdot (Q_{surf} + Q_{gw} + Q_{lat}) \cdot (Area - SA) \quad 27.2.8$$

式中： V_{flowin} 为模拟日进入池塘或湿地的水量 ($m^3 H_2O$), fr_{imp} 向蓄水体供水的子流域面积分数, Q_{surf} 模拟日子流域产生的地表径流 ($mm H_2O$), Q_{gw} 模拟日子流域产生的地下径流 ($mm H_2O$), Q_{lat} 为模拟日子流域产生的侧向流 ($mm H_2O$), $Area$ 子流域面积 (ha), SA 为水体表面积 (ha)。进入池塘或湿地的水量从地表径流、侧向流和地下径流中减去。

27.2.4 蒸发

模拟日蒸发引起的水量损失为：

$$V_{evap} = 10 \cdot \eta \cdot E_o \cdot SA \quad 27.1.6$$

式中： V_{evap} 模拟日蒸发去除的水量($m^3 H_2O$), η 为蒸发系数 (0.6), E_o 模拟日潜在蒸发 ($mm H_2O$), SA 为水体表面积 (ha).

27.2.5 渗漏

渗漏引起池塘或湿地水量损失为：

$$V_{seep} = 240 \cdot K_{sat} \cdot SA \quad 27.1.7$$

式中： V_{seep} 为渗漏引起池塘或湿地水量损失 ($m^3 H_2O$), K_{sat} 池塘或湿地底部有效饱和水力传导率 (mm/hr), SA 为水体表面积 (ha).

27.2.6 出流

池塘或湿地的主要区别在于计算出流的方法不同。

27.2.6.1 池塘出流

池塘出流根据目标储量计算。目标储量基于洪水季节和土壤含水量。

目标池塘容量为：

$$V_{targ} = V_{em} \quad \text{if } mon_{fld,beg} < mon < mon_{fld,end} \quad 27.2.11$$

$$V_{targ} = V_{pr} + \frac{\left(1 - \min\left[\frac{SW}{FC}, 1\right]\right)}{2} \cdot (V_{em} - V_{pr})$$

if $mon \leq mon_{fld,beg}$ or $mon \geq mon_{fld,end}$ 27.2.12

式中： V_{targ} 为模拟日目标池塘容量(m^3 H₂O)， V_{em} 池塘防洪容量 (m^3 H₂O)， V_{pr} 池塘常规容量(m^3 H₂O)， SW 子流域平均土壤含水量(mm H₂O)， FC 子流域土壤田间持水量 (mm H₂O)， mon 一年中的月份， $mon_{fld,beg}$ 为洪水期开始的月份， $mon_{fld,end}$ 为洪水期结束的月份。

确定目标储量后，采用下式计算出流：

$$V_{flowout} = \frac{V - V_{targ}}{ND_{targ}} \quad 27.2.13$$

式中： $V_{flowout}$ 为水体的日出流量 (m^3 H₂O)， V 池塘中的水储量 (m^3 H₂O)， V_{targ} 模拟日池塘的目标储量 (m^3 H₂O)， ND_{targ} 达到目标储量所需要的天数。

27.2.6.2 湿地出流

湿地在水位超过正常水位, V_{nor} , 是出流, 其计算公式为:

$$V_{flowout} = 0 \quad \text{if } V < V_{nor} \quad 27.2.14$$

$$V_{flowout} = \frac{V - V_{nor}}{10} \quad \text{if } V_{nor} \leq V \leq V_{mx} \quad 27.2.15$$

$$V_{flowout} = V - V_{mx} \quad \text{if } V > V_{mx} \quad 27.2.16$$

式中: $V_{flowout}$ 为水体的日出流量 ($\text{m}^3 \text{H}_2\text{O}$), V 湿地中的水储量($\text{m}^3 \text{H}_2\text{O}$), V_{mx} 最高水位时湿地的水量 ($\text{m}^3 \text{H}_2\text{O}$), V_{nor} 正常水位时湿地的水量($\text{m}^3 \text{H}_2\text{O}$).

Table 27-2: SWAT input variables that pertain to ponds and wetlands.

Variable name	Definition	File Name
PND_ESA	SA_{em} : Surface area of the pond when filled to the emergency spillway (ha)	.pnd
PND_PSA	SA_{pr} : Surface area of the pond when filled to the principal spillway (ha)	.pnd
PND_EVOL	V_{em} : Volume of water held in the pond when filled to the emergency spillway ($10^4 \text{m}^3 \text{H}_2\text{O}$)	.pnd
PND_PVOL	V_{pr} : Volume of water held in the pond when filled to the principal spillway ($10^4 \text{m}^3 \text{H}_2\text{O}$)	.pnd
WET_MXSA	SA_{mx} : Surface area of the wetland when filled to the maximum water level (ha)	.pnd
WET_NSA	SA_{nor} : Surface area of the wetland when filled to the normal water level (ha)	.pnd
WET_MXVOL	V_{mx} : Volume of water held in the wetland when filled to the maximum water level ($\text{m}^3 \text{H}_2\text{O}$)	.pnd
WET_NVOL	V_{nor} : Volume of water held in the wetland when filled to the normal water level ($\text{m}^3 \text{H}_2\text{O}$)	.pnd
PND_FR	fr_{imp} : Fraction of the subbasin area draining into the pond	.pnd
WET_FR	fr_{imp} : Fraction of the subbasin area draining into the wetland	.pnd

Table 27-2, cont.: SWAT input variables that pertain to ponds and wetlands

Variable name	Definition	File Name
PND_K	K_{sat} : Effective saturated hydraulic conductivity of the pond bottom (mm/hr)	.pnd
WET_K	K_{sat} : Effective saturated hydraulic conductivity of the wetland bottom (mm/hr)	.pnd

IFLOD1	$mon_{fld,beg}$: Beginning month of the flood season	.pnd
IFLOD2	$mon_{fld,end}$: Ending month of the flood season	.pnd
NDTARG	ND_{targ} : Number of days required for the reservoir to reach target storage	.pnd

27.3 洼地/壶穴

在低地或地质发育较晚的地区，排水系统发育不完全。在这些地区的流域，可能有许多闭合的洼地，或称壶穴。这些地区产生的径流流入较低的壶穴，而不是河道。在水文学上与壶穴相似的系统有：沙漠的绿洲、水稻田。本节中介绍的算法用于模拟这类系统。

定义 HRU 为壶穴，用户必需将 IPOT 设为 HRU 的代码。初始化蓄水，需要在 .mgt 文件中设置排泄/蓄水操作：

$$V = V_{stored} + V_{flowin} - V_{flowout} + V_{pcp} - V_{evap} - V_{seep} \quad 27.3.1$$

式中： V 为模拟日结束时蓄水体中的水量 ($m^3 H_2O$)， V_{stored} 为模拟日开始时蓄水体中的水量 ($m^3 H_2O$)， V_{flowin} 模拟日进入蓄水体的水量 ($m^3 H_2O$)， $V_{flowout}$ 模拟日流出水体的水量 ($m^3 H_2O$)， V_{pcp} 为降落在水体上的降水量 ($m^3 H_2O$)， V_{evap} 为蒸发去除的水量 ($m^3 H_2O$)， V_{seep} 渗漏损失的水量 ($m^3 H_2O$)。

27.3.1 表面积

壶穴需要用来计算落在水体上的降水量，以及蒸发和渗漏量。表面积随着蓄水体中的水量变化。日表面积采用下式计算：

$$SA = \frac{\pi}{10^4} \cdot \left(\frac{3 \cdot V}{\pi \cdot slp} \right)^{2/3} \quad 27.3.2$$

式中： SA 为水体的表面积 (ha), V 蓄水体中的水量 ($m^3 H_2O$), slp HRU 坡度 (m/m).

27.3.2 降水

降落在壶穴上的降水量为：

$$V_{pcp} = 10 \cdot R_{day} \cdot SA \quad 27.1.5$$

式中： V_{pcp} 模拟日降落在水体上的降水量 ($m^3 H_2O$), R_{day} 模拟日的降水量 (mm H_2O), SA 为水体表面积 (ha).

27.3.3 入流

模拟日进入壶穴的水量可以来自子流域中的任意 HRU。演算 HRU 水流进入壶穴，需要将 $I POT (.hru)$ 变量设为 HRU 的代码， $POT_FR (.hru)$ 变量设为排水进入壶穴的 HRU 的面积分数。

从其它 HRUs 向壶穴演算水流只有在蓄水体被激活时才进行(.mgt 文件中的排泄/蓄水操作)。也可以通过灌溉操作添加水流进入壶穴。第 21 章介绍了灌溉操作。

壶穴的入流计算为：

$$V_{flowin} = irr + \sum_{hru=1}^n [fr_{pot,hru} \cdot 10 \cdot (Q_{surf,hru} + Q_{gw,hru} + Q_{lat,hru}) \cdot area_{hru}] \quad 27.3.4$$

式中： V_{flowin} 为模拟日壶穴的入流量 ($m^3 H_2O$), irr 模拟日灌溉水量 ($m^3 H_2O$), n 向壶穴供给水的 HRUs 的代码， $fr_{pot,hru}$ 为向壶穴排水的 HRU 的面积分数, $Q_{surf,hru}$ 为模拟日 HRU 的地表径流 (mm H_2O), $Q_{gw,hru}$ 为模拟日 HRU 的

地下径流 (mm H₂O), $Q_{lat,hru}$ 为模拟日 HRU 的侧向流 (mm H₂O), $area_{hru}$ HRU 的面积 (ha)。

27.3.4 蒸发

模拟日蒸发损失的水量为：

$$V_{evap} = 10 \cdot \left(1 - \frac{LAI}{LAI_{evap}} \right) \cdot E_o \cdot SA \quad \text{if } LAI < LAI_{evap} \quad 27.3.5$$

$$V_{evap} = 0 \quad \text{if } LAI \geq LAI_{evap} \quad 27.3.6$$

式中： V_{evap} 模拟日蒸发去除的水量(m³ H₂O), η 为蒸发系数 (0.6), E_o 模拟日潜在蒸发 (mm H₂O), SA 为水体表面积 (ha), LAI 为壶穴植被的叶面积指数, LAI_{evap} 为没有蒸发发生的叶面积指数。

27.3.5 渗漏

渗漏引起壶穴水量损失为壶穴底部土壤含水量的函数：

$$V_{seep} = 240 \cdot K_{sat} \cdot SA \quad \text{if } SW < 0.5 \cdot FC \quad 27.3.7$$

$$V_{seep} = 240 \cdot \left(1 - \frac{SW}{FC} \right) \cdot K_{sat} \cdot SA \quad \text{if } 0.5 \cdot FC \leq SW < FC \quad 27.3.8$$

$$V_{seep} = 0 \quad \text{if } SW \geq FC \quad 27.3.9$$

式中： V_{seep} 为渗漏引起池塘或湿地水量损失 (m³ H₂O), K_{sat} 壶穴底部第一层土壤有效饱和水力传导率 (mm/hr), SA 为水体表面积 (ha), SW 土壤含水量 (mm H₂O), FC 土壤田间持水量 (mm H₂O)。渗漏造成的损失进入土壤剖面。

27.3.6 出流

壶穴水分损失有三种形式。当壶穴中的水量超过最大存储量,多余水分被假设出流,进入子流域的河道。当壶穴挡墙或截水沟被去除时(这一操作通过.mgt 文件中的排泄/蓄水命令完成),所有的壶穴蓄水会进入主河道。第三中出流是通过瓦沟排水。

27.3.6.1 溢流

溢流产生的壶穴出流为:

$$V_{flowout} = V - V_{pot, mx} \quad \text{if } V > V_{pot, mx} \quad 27.3.10$$

式中: $V_{flowout}$ 为模拟日流出水体的水量 ($\text{m}^3 \text{H}_2\text{O}$), V 为壶穴中的蓄水量 ($\text{m}^3 \text{H}_2\text{O}$), $V_{pot, mx}$ 为壶穴最大蓄水量 ($\text{m}^3 \text{H}_2\text{O}$).

27.3.6.2 排泄操作

当安排排泄操作后,壶穴中的所有水量变为出流:

$$V_{flowout} = V \quad 27.3.11$$

式中: $V_{flowout}$ 为模拟日流出水体的水量 ($\text{m}^3 \text{H}_2\text{O}$), V 为壶穴中的蓄水量 ($\text{m}^3 \text{H}_2\text{O}$).

27.3.6.3 瓦沟排水

如果壶穴中安装了瓦沟,壶穴可以向主河道出流。瓦沟排水产生的壶穴出流为:

$$V_{flowout} = q_{tile} \cdot 86400 \quad \text{if } V > q_{tile} \cdot 86400 \quad 27.3.12$$

$$V_{flowout} = V \quad \text{if } V \leq q_{tile} \cdot 86400 \quad 27.3.13$$

式中： $V_{flowout}$ 为模拟日流域水体的水量 ($\text{m}^3 \text{H}_2\text{O}$), q_{tile} 为平均水流速率 (m^3/s), V 为壅穴中存储的水量 ($\text{m}^3 \text{H}_2\text{O}$)。

Table 27-3: SWAT input variables that pertain to potholes.

Variable name	Definition	File Name
I POT	Number of HRU that is impounding water (that contains the pothole)	.hru
<i>Variables in release/impound operation line:</i>		
MONTH/DAY or HUSC	Timing of release/impound operation.	.mgt
MGT_OP	Operation code. MGT_OP = 13 for release/impound operation	.mgt
IREL_IMP	Release/impound action code: 0: impound, 1: release	.mgt
SLOPE	slp : Slope of the HRU (m/m)	.hru
POT_FR	fr_{poi} : Fraction of the HRU area draining into the pothole	.hru
EVLAI	LAI_{evap} : Leaf area index at which no evaporation occurs from the water surface	.bsn
POT_VOLX	$V_{pot, mx}$: Maximum amount of water that can be stored in the pothole ($\text{m}^3 \text{H}_2\text{O}$)	.hru
POT_TILE	q_{tile} : Average daily tile flow rate (m^3/s)	.hru

27.4 NOMENCLATURE

- $Area$ Subbasin area (ha)
- E_o Potential evapotranspiration for a given day (mm H_2O)
- FC Water content of the soil at field capacity (mm H_2O)
- K_{sat} Effective saturated hydraulic conductivity of the reservoir bottom (mm/hr)
- LAI Leaf area index of the plants growing in the pothole
- LAI_{evap} Leaf area index at which no evaporation occurs from the water surface
- ND_{targ} Number of days required for the reservoir to reach target storage
- Q_{gw} Groundwater flow generated in a subbasin on a given day (mm H_2O)
- Q_{lat} Lateral flow generated in a subbasin on a given day (mm H_2O)
- Q_{surf} Surface runoff from the subbasin on a given day (mm H_2O)
- R_{day} Amount of precipitation falling on a given day (mm H_2O)
- SA Surface area of the water body (ha)
- SA_{em} Surface area of the reservoir or pond when filled to the emergency spillway (ha)
- SA_{mx} Surface area of the wetland when filled to the maximum water level (ha)
- SA_{nor} Surface area of the wetland when filled to the normal water level (ha)
- SA_{pr} Surface area of the reservoir when filled to the principal spillway (ha)

- SW Average soil water content (mm H₂O)
 V Volume of water in the impoundment at the end of the day (m³ H₂O)
 V_{em} Volume of water held in the reservoir when filled to the emergency spillway (m³ H₂O)
 V_{evap} Volume of water removed from the water body by evaporation during the day (m³ H₂O)
 V_{flowin} Volume of water entering the water body during the day (m³ H₂O)
 $V_{flowout}$ Volume of water flowing out of the water body during the day (m³ H₂O)
 $V'_{flowout}$ Initial estimate of the volume of water flowing out of the water body during the day (m³ H₂O)
 V_{mx} Volume of water held in the wetland when filled to the maximum water level (m³ H₂O)
 V_{nor} Volume of water held in the wetland when filled to the normal water level (m³ H₂O)
 V_{pcp} Volume of precipitation falling on the water body during the day (m³ H₂O)
 $V_{pot,mx}$ Maximum amount of water that can be stored in the pothole (m³ H₂O)
 V_{pr} Volume of water held in the reservoir when filled to the principal spillway (m³ H₂O)
 V_{seep} Volume of water lost from the water body by seepage (m³ H₂O)
 V_{stored} Volume of water stored in the water body at the beginning of the day (m³ H₂O)
 V_{targ} Target reservoir volume for a given day (m³ H₂O)
- $area_{hru}$ HRU area (ha)
 $expsa$ Exponent for impoundment surface area calculation
 fr_{imp} Fraction of the subbasin area draining into the impoundment
 fr_{pot} Fraction of the HRU area draining into the pothole
 irr Amount of irrigation water added on a given day (m³ H₂O)
 mon Month of the year
 $mon_{fld,beg}$ Beginning month of the flood season
 $mon_{fld,end}$ Ending month of the flood season
 q_{out} Outflow rate (m³/s)
 q_{rel} Average daily principal spillway release rate (m³/s)
 $q_{rel,mn}$ Minimum average daily outflow for the month (m³/s)
 $q_{rel,mx}$ Maximum average daily outflow for the month (m³/s)
 q_{tile} Average daily tile flow rate (m³/s)
 slp Slope of the HRU (m/m)
 $starg$ Target reservoir volume specified for a given month (m³ H₂O)
- β_{sa} Coefficient for impoundment surface area equation
 η Evaporation coefficient (0.6)

第 28 章 方程:水体中的泥沙

SWAT 引入了一个简单质量守恒模型来模拟进入和流出水体的泥沙。SWAT 定义四种水体：池塘、湿地、水库和壅穴。在这四种水体中的泥沙模拟是相同的。

当计算泥沙在水体中输移时，SWAT 假设系统是完全混合的。在完全混合的系统，随着泥沙进入水体，立即分布于整个系统。

28.1 质量守恒

水体中的泥沙质量守恒方程为：

$$sed_{wb} = sed_{wb,i} + sed_{flowin} - sed_{stl} - sed_{flowout} \quad 28.1.1$$

式中： sed_{wb} 为模拟日结束时水体中的泥沙量 (metric tons), $sed_{wb,i}$ 为模拟日开始时水体中的泥沙量 (metric tons), sed_{flowin} 为入流增加的水体中泥沙量 (metric tons), sed_{stl} 为沉淀从水体中去除的泥沙量 (metric tons), $sed_{flowout}$ 为流输出的泥沙量 (metric tons)。

28.2 沉淀

模拟日水体中沉淀的悬浮泥沙量根据浓度计算 初始悬浮泥沙浓度为：

$$conc_{sed,i} = \frac{sed_{wb,i} + sed_{flowin}}{V_{stored} + V_{flowin}} \quad 28.2.1$$

式中： $conc_{sed,i}$ 为初始悬浮泥沙浓度 (Mg/m^3), $sed_{wb,i}$ 为模拟日开始时水体中的泥沙量 (metric tons), sed_{flowin} 为入流增加的水体中泥沙量 (metric tons), V_{stored} 为模拟日开始时水体或河道中的水量 ($m^3 H_2O$), V_{flowin} 为进入水体的水量 ($m^3 H_2O$)。

只有在水体中泥沙浓度超过用户定义的平衡浓度, $conc_{sed,eq}$ 时, 才发生沉淀。

模拟日结束时水体中的泥沙浓度为：

$$conc_{sed,f} = (conc_{sed,i} - conc_{sed,eq}) \exp[-k_s \cdot t \cdot d_{50}] + conc_{sed,eq}$$

$$\text{if } conc_{sed,i} > conc_{sed,eq} \quad 28.2.2$$

$$conc_{sed,f} = conc_{sed,i} \quad \text{if } conc_{sed,i} \leq conc_{sed,eq} \quad 28.2.3$$

式中： $conc_{sed,f}$ 为水体中泥沙浓度最终值 (Mg/m^3), $conc_{sed,i}$ 为水体中泥沙初始浓度 (Mg/m^3), $conc_{sed,eq}$ 为水体中泥沙平衡浓度 (Mg/m^3), k_s 为衰减系数 (1/day), t 为时间步长 (1 day), d_{50} 为入流泥沙的粒径中值 (μm)。假设 99% 的 $1 \mu m$ 粒径的颗粒将在 25 天内从溶液中沉淀, $k_s = 0.184$ 。入流泥沙的粒径中值计算如下：

$$d_{50} = \exp\left(0.41 \cdot \frac{m_c}{100} + 2.71 \cdot \frac{m_{silt}}{100} + 5.7 \cdot \frac{m_s}{100}\right) \quad 28.2.4$$

式中： d_{50} 入流泥沙的粒径中值 (μm), m_c 子流域表层土壤黏土百分比, m_{silt} 子流域表层土壤粉沙百分比, m_s 子流域表层土壤沙粒百分比。

模拟日沉淀的泥沙量计算如下：

$$sed_{stl} = (conc_{sed,i} - conc_{sed,f}) \cdot V \quad 28.2.5$$

式中： sed_{stl} 沉淀从水体中去除的泥沙量 (metric tons), $conc_{sed,i}$ 为水体中初始悬浮泥沙浓度 (Mg/m^3), $conc_{sed,f}$ 为水体中最终悬浮泥沙浓度 (Mg/m^3), V 是蓄水体中的水量 ($m^3 H_2O$)。

Table 28-1: SWAT input variables that pertain to sediment settling.

Variable Name	Definition	Input File
RES_NSED	$conc_{sed,eq}$: Equilibrium sediment concentration in water body (mg/L)	.res
PND_NSED	$conc_{sed,eq}$: Equilibrium sediment concentration in water body (mg/L)	.pnd
WET_NSED	$conc_{sed,eq}$: Equilibrium sediment concentration in water body (mg/L)	.pnd

POT_NSED	$conc_{sed,eq}$: Equilibrium sediment concentration in water body (mg/L)	.hru
CLAY	m_c : Percent clay in the surface soil layer in the subbasin	.sol
SILT	m_{silt} : Percent silt in the surface soil layer in the subbasin	.sol
SAND	m_s : Percent sand in the surface soil layer in the subbasin	.sol

28.3 泥沙出流

模拟日从水体中输出的泥沙量为最终泥沙浓度的函数。初始悬浮泥沙

浓度为：

$$sed_{flowout} = conc_{sed,f} \cdot V_{flowout} \quad 28.3.1$$

式中： $sed_{flowout}$ 为出流从水体中输出的泥沙量 (metric tons), $conc_{sed,f}$ 为水体中最终泥沙浓度 (Mg/m^3), $V_{flowout}$ 蓄水体的出流量 ($m^3 H_2O$)。

28.4 NOMENCLATURE

V Volume of water in the impoundment ($m^3 H_2O$)

V_{flowin} Volume of water entering water body on given day ($m^3 H_2O$)

$V_{flowout}$ Volume of outflow from the impoundment ($m^3 H_2O$)

V_{stored} Volume of water stored in water body or channel ($m^3 H_2O$)

$conc_{sed}$ Concentration of suspended solids in the water (Mg/m^3)

$conc_{sed,eq}$ Equilibrium concentration of suspended solids in the water body (Mg/m^3)

d_{50} Median particle size of the inflow sediment (μm)

k_s Decay constant (1/day)

t Length of the time step (1 day)

m_c Percent clay in the surface soil layer in the subbasin

m_s Percent sand in the surface soil layer in the subbasin

m_{silt} Percent silt in the surface soil layer in the subbasin

sed_{flowin} Amount of sediment added to the water body with inflow (metric tons)

$sed_{flowout}$ Amount of sediment transported out of the water body (metric tons)

sed_{stl} Amount of sediment removed from the water by settling (metric tons)

sed_{wb} Sediment in the water body (metric tons)

第 29 章 方程:水体中的营养物质

SWAT 采用简单的经验模型预测水体的营养状态。对于需要详细模拟水库水质的研究，SWAT 可以与分布式水质模型，如 WASP 等联合应用。

SWAT 定义了 4 种不同的水体：池塘、湿地、水库和洼地（壶穴）。在池塘、湿地和水库中的营养物质过程是相同的。在壶穴中，SWAT 尚不能模拟营养物质过程。

29.1 营养物转化

当计算营养物在水体中的转化时，SWAT 假设系统是完全混合的。在完全混合的心痛，营养物质一进入水体，即在整体水体完全分布。完全混合系统的假设忽略了水库的分层和跃温层浮游植物的变化。

模拟日水体中初始氮磷量，通过该日进入水体的营养物量和已经存在的营养物量之和来计算。

$$M_{initial} = M_{stored} + M_{flowin} \quad 29.1.1$$

式中： $M_{initial}$ 模拟日水体中初始营养物量 (kg), M_{stored} 前一天结束时营养物量 (kg), M_{flowin} 该日进入水体的营养物量 (kg).

相同地，初始水体水量也可由下式计算：

$$V_{initial} = V_{stored} + V_{flowin} \quad 29.1.2$$

式中： $V_{initial}$ 模拟日水体中初始水量 ($\text{m}^3 \text{H}_2\text{O}$), V_{stored} 前一天结束时的水量($\text{m}^3 \text{H}_2\text{O}$), V_{flowin} 该日进入水体的水量 ($\text{m}^3 \text{H}_2\text{O}$).

水体中初始营养物质浓度通过初始营养物量和初始水量相除得到。

池塘、湿地和水库中的营养物质过程只限于营养物的沉淀。不同营养物库之间的物质转化被忽略 (如 $\text{NO}_3 \Leftrightarrow \text{NO}_2 \Leftrightarrow \text{NH}_4$)

沉淀损失可以表达为水土界面的物质通量(图 29-1) (Chapra, 1997).

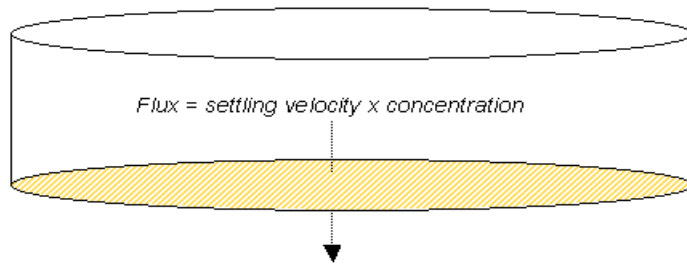


Figure 29-1: Settling losses calculated as flux of mass across the sediment-water interface.

沉淀损失的营养物质量，由通量与水土界面面积相乘得到：

$$M_{\text{settling}} = v \cdot c \cdot A_s \cdot dt \quad 29.1.3$$

式中： M_{settling} 沉淀损失的营养物质量 (kg), v 表观沉淀速率 (m/day), A_s 水土界面面积 (m^2), c 水体中初始营养物质浓度 ($\text{kg}/\text{m}^3 \text{H}_2\text{O}$), dt 为时间步长 (1 day). 沉淀速率为“表观”，因为它表示不同过程输移营养物进入泥沙的净效果。假设水体深度均一，水土界面面积与水体表面积相等。

表观沉淀速率统称以 m/year 为单位，这也是输入模型的数值单位。对于自然湖泊，实测的磷沉淀速率通常在 5 - 20 m/year，虽然也有低于 1 m/year 和高于 200 m/year 的报道(Chapra, 1997)。Panuska and Robertson (1999) 注意到人工湖泊的表观沉淀速率比自然湖泊高得多 Higgins and Kim (1981) 报告说表观沉淀速率在 Tennessee 的 18 个水库的变化范围为 -90 to 269 m/year，其中值为 42.2 m/year。

对于 27 个中西部水库，Walker and Kiihner (1978) 报告磷表观沉淀速率在-1 to 125 m/year 之间变化，平均值为 12.7 m/year。负的沉淀速率表示水库泥沙为氮或磷的来源，正值表示水库泥沙为氮或磷的汇。

一些入流和蓄水体性质会影响水体的表观沉淀速率。比较重要的影响因子有入流中磷的形式（溶解态或颗粒态），颗粒态部分磷的沉淀速率。在蓄水体中，平均深度、潜在泥沙再悬浮、泥沙的磷释放将会影响表观沉淀速率 (Panuska and Robertson, 1999)。具有较高内源磷释放的水体，具有较低的磷保持力和较低的磷表观沉淀速率(Nürnberg, 1984)。表 29-1 总结了不同系统中典型的磷沉淀速率范围。

Table 29-1: Recommended apparent settling velocity values for phosphorus (Panuska and Robertson, 1999)

Nutrient Dynamics	Range in settling velocity values (m/year)
Shallow water bodies with high net internal phosphorus flux	$v \leq 0$
Water bodies with moderate net internal phosphorus flux	$1 < v < 5$
Water bodies with minimal net internal phosphorus flux	$5 < v < 16$
Water bodies with high net internal phosphorus removal	$v > 16$

与营养物在池塘、湿地和水库中沉淀相关的 SWAT 输入变量在表 29-2 中列出。模型允许用户针对每一种营养物质定义两个沉淀速率，以及每一个速率应用的时间段。沉淀速率的变化可以反映温度和其它季节性因素的影响。如果只采用一个速率，可以将上述两个值设为相等。如果将所有变量设为 0，则模型会忽略水体中的营养物沉淀。

确定水体中营养物损失之后，可以将最终营养物质量除以初始水量，以得到最终营养物浓度。出流的营养物浓度与最终营养物浓度相等。营养物出流量，可以将出流营养物浓度和出流量来计算。

Table 29-2: SWAT input variables that control settling in ponds, wetlands and reservoirs.

Variable Name	Definition	Input File
IPND1	Beginning month of mid-year nutrient settling period for pond and wetland modeled in subbasin	.pnd
IPND2	Ending month of mid-year nutrient settling period for pond and wetland modeled in subbasin	.pnd
PSETL1	Phosphorus settling rate in pond during mid-year nutrient settling period ($IPND1 \leq month \leq IPND2$) (m/year)	.pnd
PSETL2	Phosphorus settling rate in pond during time outside mid-year nutrient settling period ($month < IPND1$ or $month > IPND2$) (m/year)	.pnd
NSETL1	Nitrogen settling rate in pond during mid-year nutrient settling period ($IPND1 \leq month \leq IPND2$) (m/year)	.pnd
NSETL2	Nitrogen settling rate in pond during time outside mid-year nutrient settling period ($month < IPND1$ or $month > IPND2$) (m/year)	.pnd
PSETLW1	Phosphorus settling rate in wetland during mid-year nutrient settling period ($IPND1 \leq month \leq IPND2$) (m/year)	.pnd
PSETLW2	Phosphorus settling rate in wetland during time outside mid-year nutrient settling period ($month < IPND1$ or $month > IPND2$) (m/year)	.pnd
NSETLW1	Nitrogen settling rate in wetland during mid-year nutrient settling period ($IPND1 \leq month \leq IPND2$) (m/year)	.pnd
NSETLW2	Nitrogen settling rate in wetland during time outside mid-year nutrient settling period ($month < IPND1$ or $month > IPND2$) (m/year)	.pnd
IRES1	Beginning month of mid-year nutrient settling period for reservoir	.lwq
IRES2	Ending month of mid-year nutrient settling period for reservoir	.lwq
PSETLR1	Phosphorus settling rate in reservoir during mid-year nutrient settling period ($IRES1 \leq month \leq IRES2$) (m/year)	.lwq
PSETLR2	Phosphorus settling rate in reservoir during time outside mid-year nutrient settling period ($month < IRES1$ or $month > IRES2$) (m/year)	.lwq
NSETLR1	Nitrogen settling rate in reservoir during mid-year nutrient settling period ($IRES1 \leq month \leq IRES2$) (m/year)	.lwq
NSETLR2	Nitrogen settling rate in reservoir during time outside mid-year nutrient settling period ($month < IRES1$ or $month > IRES2$) (m/year)	.lwq

29.2 总平衡

假设水体中水量保持平衡，上面所描述的过程（入流、沉淀和出流）可以结合为下面的质量平衡方程。

$$V \cdot \frac{dc}{dt} = W - Q \cdot c - v \cdot c \cdot A_s \quad 29.2.1$$

式中： V 为系统的体积 ($\text{m}^3 \text{H}_2\text{O}$)， c 系统中营养物浓度 ($\text{kg}/\text{m}^3 \text{H}_2\text{O}$)， dt 为时间步长 (1 day)， $W(t)$ 为在时间步长内进入水体的营养物量 (kg/day)， Q 为出流速率 ($\text{m}^3 \text{H}_2\text{O}/\text{day}$)， v 表观沉淀速率 (m/day)， A_s 为水土界面积 (m^2)。

29.3 富营养化

在适宜的光和温度条件下，过量的氮磷可以增加水体中藻类和其它植物的生长。其结果是增加富营养化，即从营养物质贫乏到营养物质丰富的自然生态过程。富营养化定义为水体中溶解营养物（如磷）富集，刺激水生生物的生长，通常损耗溶解氧的过程(Merriam-Webster, Inc., 1996)。

运动水体和湖泊的营养物富集为土壤风化和侵蚀过程的正常结果。冰河时期的湖泊组建演化为沼泽，最终由于富营养化作用变成有机土壤。但是这一过程可以通过含高浓度营养物的排放来加速。一个例子为 Erie 湖，其在 15 年的富营养化过程可以相当于自然条件下 150 年的进程。

加速富营养化造成的过量植物生长可以导致水的停滞。停滞是由的植物残余物降解造成的生物需氧量的增加，而引起的。生化需氧量的增加，可以导致厌氧条件，抑制鱼类和有氧生物的生长。

氮、碳和磷对于水生生物的生长十分重要。由于难于控制氮和碳在大气和水体之间的交换，以及绿色藻类的固氮作用，所以消减富营养化的措施主要集中在磷的输入上。在淡水系统，磷通常为限制因素。通过控制磷的负荷，可以缓解加速的富营养化作用。

在磷为主要的，可控的限制营养物因素时，水体中磷的量可以用来估计水体的富营养化状态。

29.3.1 磷/叶绿素 A 相互关系

一些经验方程，可以根据总磷浓度来计算叶绿素 a 的水平。SWAT 采用 Rast and Lee (1978) 开发的方程来计算水体中叶绿素 a 的浓度。

$$Chla = 0.551 \cdot p^{0.76} \quad 29.3.1$$

式中： $Chla$ 叶绿素 a 的浓度 ($\mu\text{g/L}$) p 总磷浓度 ($\mu\text{g/L}$)。

方程已经修正为可以添加用户定义的系数：

$$Chla = Chla_{co} \cdot 0.551 \cdot p^{0.76} \quad 29.3.2$$

用户定义的系数， $Chla_{co}$ ，允许用户调整其它限制营养物对叶绿素 a 的浓度预测的影响。当 $Chla_{co}$ 设为 1.00，方程 29.3.2 与方程 29.3.1 相等。对于大多数水体，原始方程已经足够。

29.3.2 叶绿素 A/西奇盘深度相关关系

西奇盘深度是令一种测量水体营养状态的方法。西奇盘深度定量水的清澈度，一种容易为大众理解的性质。西奇盘深度可以根据叶绿素 *a* 的浓度计算 (Chapra, 1997) :

$$SD = 6.35 \cdot Chla^{-0.473} \quad 29.3.3$$

式中：*SD* 西奇盘深度 (m)，*Chla* 叶绿素 *a* 的浓度 (μg/L).

在 SWAT 中，方程 29.3.3 被修改，以考虑用户定义的系数：

$$SD = SD_{co} \cdot 6.35 \cdot Chla^{-0.473} \quad 29.3.4$$

用户定义的系数，*SD_{co}*，允许用户考虑悬浮泥沙和其它颗粒态物质对水清澈度的影响。当 *SD_{co}* 设为 1.00，方程 29.3.4 与方程 29.3.3 相等。对于大多数水体，原始方程已经足够。

虽然西奇盘深度测量来评价水质是主观的，还是有些经验关系用西奇盘深度来预测水质。其中一个针对缅因州的 Annebessacook 湖的经验关系(EPA, 1980) 在表 29-3 中给出。

Table 29-3: Relationship between secchi-disk depth and public perception of water quality.

Secchi-disk depth (m)	Public perception of water quality
0.0 – 0.9	gross pollution; water body totally unsuitable for recreation
1.0 – 1.9	algae blooms still evident; quality unacceptable for most uses
2.0 – 2.9	some complaints of declining water quality; some impairment of water use
3.0 – 3.9	satisfactory quality; no impairment of water use
4.0 – 4.9	excellent water quality; a positive factor encouraging use of lake
5.0 +	exceptional quality

Table 29-4: SWAT input variables that impact eutrophication calculations in ponds, wetlands and reservoirs.

Variable	Input
----------	-------

Name	Definition	File
CHLA	$Chla_{co}$ variable for calculation of chlorophyll a concentration in a pond	.pnd
CHLAW	$Chla_{co}$ variable for calculation of chlorophyll a concentration in a wetland	.pnd
CHLAR	$Chla_{co}$ variable for calculation of chlorophyll a concentration in a reservoir	.lwq
SECCI	SD_{co} variable for calculation of secchi-disk depth in a pond	.pnd
SECCIW	SD_{co} variable for calculation of secchi-disk depth in a wetland	.pnd
SECCIR	SD_{co} variable for calculation of secchi-disk depth in a reservoir	.lwq

29.4 NOMENCLATURE

- A_s Area of sediment-water interface (m^2)
 $Chla$ Chlorophyll a concentration ($\mu g/L$)
 $Chla_{co}$ User-defined coefficient to adjust predicted chlorophyll a concentration
 M_{flowin} Mass of nutrient entering water body on the given day (kg)
 $M_{initial}$ Initial mass of nutrient in water body for the given day (kg)
 $M_{settling}$ Mass of nutrient lost via settling on a given day (kg)
 M_{stored} Mass of nutrient in water body at end of previous day (kg)
 Q Volumetric flow rate for water exiting water body ($m^3 H_2O/day$)
 SD Secchi-disk depth (m)
 SD_{co} User-defined coefficient to adjust predicted secchi-disk depth
 V Volume of water in water body (assumed constant) ($m^3 H_2O$)
 V_{flowin} Volume of water entering water body on given day ($m^3 H_2O$)
 $V_{initial}$ Initial volume of water in water body on given day ($m^3 H_2O$)
 V_{stored} Volume of water in water body at end of previous day ($m^3 H_2O$)
 $W(t)$ Rate of nutrient loading (kg/day)
- c Concentration of nutrient in the water ($kg/m^3 H_2O$)
 dt Length of time step (1 day)
 p Total phosphorus concentration ($\mu g P/L$)
- v Apparent settling velocity (m/day)

29.5 REFERENCES

- Chapra, S.C. 1997. Surface water-quality modeling. WCB/McGraw-Hill, Boston, MA.
- Higgins, J.M. and B.R. Kim. 1981. Phosphorus retention models for the Tennessee Valley Authority reservoirs. Wat. Resour. Res. 17:571-576.

第 29 章 方程:水体中的营养物质

- Merriam-Webster, Inc. 1996. Merriam-Webster's collegiate dictionary, 10th edition. Merriam-Webster, Inc. Springfield, MA.
- Nürnberg, G.K. 1984. The prediction of internal phosphorus load in lakes with anoxic hypolimnia. *Limnol. Oceanogr.* 29:111-124.
- Panuska, J.C. and D.M. Robertson. 1999. Estimating phosphorus concentration following alum treatment using apparent settling velocity. *Lake and Reserv. Manage.* 15:28-38.
- Rast, W. and Lee, G.F. 1978. Summary analysis of the North American project (US portion) OECD eutrophication project: nutrient loading-lake response relationships and trophic state indices. USEPA Corvallis Environmental Research Laboratory, Corvallis, OR. EPA-600/3-78-008.
- USEPA. 1980. Lake restoration in Cobbossee watershed. Capsule Rept. Office of Water Planning and Standards Div., ORD, Cincinnati, OH. EPA-624/2-80-027.
- Walker, W.W. and J. Kihner. 1978. An empirical analysis of factors controlling eutrophication in midwestern impoundments. Paper presented at the International Symposium on the Environmental Effects of Hydraulic Engineering Works, Univ. of Tenn., Knoxville.

第 30 章 方程:水体中的杀虫剂

SWAT 采用 Chapra (1997)开发的简单的经验模型预测水体中杀虫剂的迁移转化。模型假设在泥沙层上存在一层完全混合的水层。图 30-1 图示了影响水体中杀虫剂质量平衡的机制。

SWAT 定义了 4 种不同的水体：池塘、湿地、水库和洼地（壶穴）。在池塘、湿地和水库中的营养物质过程是相同的。在壶穴中，SWAT 尚不能模拟杀虫剂过程。

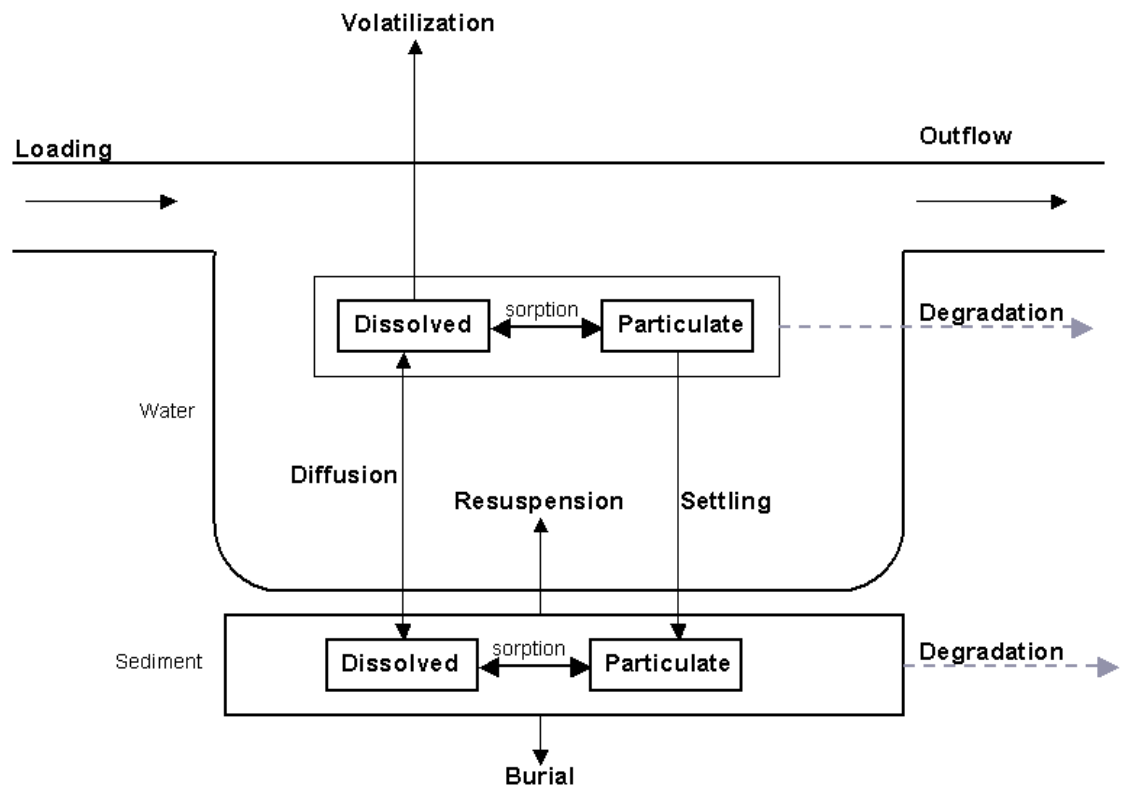


Figure 30-1: Pesticide mass balance for well-mixed water body with sediment layer.

30.1 水体中的杀虫剂

完全混合水体中的杀虫剂可以通过入流、再悬浮和从泥沙层的扩散而增加，通过出流、降解、挥发、沉淀和向泥沙层扩散而减少。

30.1.1 固液分割

杀虫剂将被分为颗粒和溶解态两种形式。在每一相中的杀虫剂的分数可以根据分割系数和水体中悬浮固体浓度计算：

$$F_d = \frac{1}{1 + K_d \cdot conc_{sed}} \quad 30.1.1$$

$$F_p = \frac{K_d \cdot conc_{sed}}{1 + K_d \cdot conc_{sed}} = 1 - F_d \quad 30.1.2$$

式中： F_d 为在溶解态相中的杀虫剂分数， F_p 在颗粒态相中的杀虫剂分数， K_d 杀虫剂分割系数， $conc_{sed}$ 水体中的悬浮固体浓度(g/m^3)。

杀虫剂分割系数可以根据 octanol-water 分割系数估算 (Chapra, 1997)：

$$K_d = 3.085 \times 10^{-8} \cdot K_{ow} \quad 30.1.3$$

式中： K_d 杀虫剂分割系数 (m^3/g)， K_{ow} 杀虫剂的 octanol-water 分割系数 ($mg m_{octanol}^{-3} / mg m_{water}^{-3}$)。octanol-water 分割系数的值在很多资料中可以查到。如果不能找到已发表的数值，可以根据溶解性来估计 (Chapra, 1997)：

$$\log K_{ow} = 5.00 - 0.670 \cdot \log pst'_{sol} \quad 30.1.4$$

式中： pst'_{sol} 杀虫剂可溶解性 ($\mu moles/L$)。单位转化为：

$$pst'_{sol} = \frac{pst_{sol}}{MW} \cdot 10^3 \quad 30.1.5$$

式中： pst'_{sol} 杀虫剂可溶解性 ($\mu moles/L$)， pst_{sol} 杀虫剂可溶解性 (mg/L)， MW 分子重量 ($g/mole$)。

30.1.2 降解

存在于颗粒态和溶解态杀虫剂均受到降解作用的影响。通过降解去除的水体杀虫剂量为：

$$pst_{deg,wtr} = k_{p,aq} \cdot pst_{lkwtr} \quad 30.1.6$$

式中： $pst_{deg,wtr}$ 为降解去除的杀虫剂量 ($mg\ pst$)， $k_{p,aq}$ 降解去除的杀虫剂的速率常数 ($1/day$)， pst_{rchwtr} 为模拟日开始时的杀虫剂量 ($mg\ pst$)。速率常数与水成半衰期有关：

$$k_{p,aq} = \frac{0.693}{t_{1/2,aq}} \quad 30.1.7$$

式中： $k_{p, aq}$ 为降解去除的杀虫剂的速率常数(1/day), $t_{1/2, aq}$ 杀虫剂的水成半衰期 (days)。

30.1.3 挥发

溶解态的杀虫剂可以挥发。通过挥发去除的杀虫剂量为：

$$pst_{vol, wtr} = v_v \cdot SA \cdot \frac{F_d \cdot pst_{lkwtr}}{V} \quad 30.1.8$$

式中： $pst_{vol, wtr}$ 为通过挥发去除的杀虫剂量 (mg pst), v_v 挥发质量传输系数 (m/day), SA 为水体表面积(m^2), F_d 总杀虫剂中在溶解相中的分数, pst_{rchwtr} 为水体中的杀虫剂量(mg pst), V 为水体中的水量($m^3 H_2O$)。

挥发质量传输系数可以根据 Whitman 的双膜理论或双阻尼理论计算 (Whitman, 1923; Lewis and Whitman, 1924 as described in Chapra, 1997)。相对于假设气液相被假设为完全混合且均质，双膜理论假设在这两相中运动的物质在两个层流边界处遇到最大阻力，传输为分子扩散的方程。在这种系统中的传输系数或速率为：

$$v_v = K_l \cdot \frac{H_e}{H_e + R \cdot T_K \cdot (K_l / K_g)} \quad 30.1.9$$

式中： v_v 为挥发质量传输系数(m/day), K_l 为液体层流中的质量传输系数 (m/day), K_g 为气体层流中的质量传输系数 (m/day), H_e 为 Henry 常数 ($atm m^3 mole^{-1}$), R 为普遍气体常数 ($8.206 \times 10^{-5} atm m^3 (K mole)^{-1}$), T_K 为温度 (K)。

对于湖泊，传输系数采用停滞膜方法计算：

$$K_l = \frac{D_l}{z_l} \quad K_g = \frac{D_g}{z_g} \quad 30.1.10$$

式中： K_l 为液体层流层中的质量传输系数(m/day), K_g 气体层流层中的质量传输系数 (m/day), D_l 液体分子扩散系数(m²/day), D_g 为气体分子扩散系数 (m²/day), z_l 为液膜厚度 (m), z_g 为气膜厚度(m).

作为替代，传输系数可以采用下面的方程估算：

$$K_l = K_{l,O_2} \cdot \left(\frac{32}{MW} \right)^{0.25} \quad 30.1.11$$

$$K_g = 168 \cdot \mu_w \cdot \left(\frac{18}{MW} \right)^{0.25} \quad 30.1.12$$

式中： K_l 为液体层流层中的质量传输系数 (m/day), K_g 气体层流层中的质量传输系数 (m/day), K_{l,O_2} 为氧传输系数 (m/day), MW 为混合物分子重量, μ_w 为风速(m/s). Chapra (1997) 介绍了可以计算 K_{l,O_2} 的不同方程。

30.1.4 沉淀

水中颗粒态的杀虫剂可以通过沉淀去除。沉淀将杀虫剂从水中传输到泥沙层中。通过沉淀去除的杀虫剂量为：

$$p_{stl, wtr}^{st} = v_s \cdot SA \cdot \frac{F \cdot p_{lkwtr}^{st}}{V} \quad 30.1.13$$

第 30 章 方程：水体中的杀虫剂

式中： $pst_{stl,wtr}$ 为通过沉淀去除的杀虫剂量 (mg pst), v_s 为沉淀速率(m/day), $depth$ 为水流深度 (m), SA 为水体表面积(m^2), F_d 总杀虫剂中在溶解相中的分数, pst_{rchwtr} 为水体中的杀虫剂量(mg pst), V 为水体中的水量($m^3 H_2O$)。

30.1.5 出流

杀虫剂通过出流离开水体，出流减少水体中溶解态和颗粒态的杀虫剂量为：

$$pst_{sol,o} = Q \cdot \frac{F_d \cdot pst_{lkwtr}}{V} \quad 30.1.14$$

$$pst_{sorb,o} = Q \cdot \frac{F_p \cdot pst_{lkwtr}}{V} \quad 30.1.15$$

式中： $pst_{sol,o}$ 出流去除的杀虫剂量(mg pst), $pst_{sorb,o}$ 为出流去除的颗粒态杀虫剂量(mg pst), Q 为出流速率 ($m^3 H_2O/day$), F_d 总杀虫剂量在溶解相中的分数, F_p 总杀虫剂量在固相中的分数, pst_{rchwtr} 水中杀虫剂量 (mg pst), V 为水体中水的体积 ($m^3 H_2O$)。

Table 30-1: SWAT input variables that pesticide partitioning.

Variable Name	Definition	Input File
LKPST_KOC	K_d : Pesticide partition coefficient (m^3/g)	.lwq
LKPST_REA	$k_{p,aq}$: Rate constant for degradation or removal of pesticide in the water (1/day)	.lwq
LKPST_VOL	v_v : Volatilization mass-transfer coefficient (m/day)	.lwq
LKPST_STL	v_s : Pesticide settling velocity (m/day)	.lwq

30.2 泥沙中的杀虫剂

泥沙中的杀虫剂通过沉积和水体向泥沙的扩散而增加，通过降解、再悬浮、由泥沙向水体的扩散和埋藏而减少。

30.2.1 固 - 液分割

与水层相似，泥沙中的杀虫剂将被分为颗粒态和溶解态。计算泥沙层中固体 - 液体分割需要悬浮固体的浓度。泥沙层中固体颗粒浓度定义为：

$$conc_{sed}^* = \frac{M_{sed}}{V_{tot}} \quad 30.2.1$$

式中： $conc_{sed}^*$ 泥沙层中固体颗粒浓度 (g/m^3)， M_{sed} 为泥沙层中固体颗粒的质量(g)， V_{tot} 泥沙层的总体积 (m^3)。

质量和体积也用来定义孔隙率和泥沙层密度。杂泥沙层，孔隙率为总体积中液相的分数：

$$\phi = \frac{V_{wtr}}{V_{tot}} \quad 30.2.2$$

式中： ϕ 为孔隙率， V_{wtr} 泥沙层中的水体积(m^3)， V_{tot} 泥沙层的总体积 (m^3)。

固相的体积分数可以定义为：

$$1 - \phi = \frac{V_{sed}}{V_{tot}} \quad 30.2.3$$

式中： ϕ 为孔隙率， V_{sed} 泥沙层中的固体体积(m^3)， V_{tot} 泥沙层的总体积 (m^3)。

泥沙颗粒的密度为：

$$\rho_s = \frac{M_{sed}}{V_{sed}} \quad 30.2.4$$

式中： ρ_s 为颗粒密度 (g/m^3), M_{sed} 为泥沙层中的固体颗粒质量(g), V_{sed} 为泥沙层中固体的体积 (m^3)。

求解方程 30.2.3 可得 V_{tot} , 求解 30.2.4 得到 M_{sed} , 并将其代入方程 30.2.1 可得：

$$conc_{sed}^* = (\phi) \rho_s \quad 30.2.5$$

式中： $conc_{sed}^*$ 为泥沙层中固体颗粒的密度 (g/m^3), ϕ 为孔隙率, ρ_s 为颗粒密度 (g/m^3)。

细密纹理的泥沙的典型孔隙率和颗粒浓度分别为 $\phi = 0.8-0.95$, $\rho_s = 2.4-2.7 \times 10^6 \text{ g/m}^3$ (Chapra, 1997)。假设 $\phi = 0.8$, $\rho_s = 2.6 \times 10^6 \text{ g/m}^3$, 泥沙层中固体颗粒的密度为 $5.2 \times 10^6 \text{ g/m}^3$ 。

在每一相中的杀虫剂分数可以计算为：

$$F_{d,sed} = \frac{1}{\phi + (\phi) \rho_s \cdot K_d} \quad 30.2.6$$

$$F_{p,sed} = 1 - F_{d,sed} \quad 30.2.7$$

式中： $F_{d,sed}$ 为泥沙中杀虫剂在溶解相中的分数, $F_{p,sed}$ 为泥沙中杀虫剂在固相中的分数, ϕ 为孔隙率, ρ_s 为颗粒密度 (g/m^3), K_d 杀虫剂分割系数 (m^3/g)。

杀虫剂分割系数在泥沙层和水层中均相等。

30.2.2 降解

在颗粒和溶解相中的杀虫剂会发生降解，降解去除的泥沙中杀虫剂的量为：

$$pst_{deg, sed} = k_{p, sed} \cdot pst_{lksed} \quad 30.2.8$$

式中： $pst_{deg, sed}$ 降解去除的泥沙中杀虫剂的量 (mg pst), $k_{p, sed}$ 为降解去除的泥沙中杀虫剂的速率常数 (1/day), pst_{lksed} 为泥沙中杀虫剂的量(mg pst)。降解去除的泥沙中杀虫剂的速率常数与泥沙中杀虫剂的半衰期有关：

$$k_{p, sed} = \frac{0.693}{t_{1/2, sed}} \quad 30.2.9$$

式中： $k_{p, sed}$ 为降解去除的泥沙中杀虫剂的速率常数 (1/day), $t_{1/2, sed}$ 为泥沙中杀虫剂的半衰期 (days)。

30.2.3 再悬浮

泥沙层中的杀虫剂可以被再悬浮，再悬浮去除泥沙中杀虫剂的量为：

$$pst_{rsp, wtr} = v_r \cdot SA \cdot \frac{pst_{lksed}}{V_{tot}} \quad 30.2.10$$

式中： $pst_{rsp, wtr}$ 为再悬浮去除泥沙中杀虫剂的量 (mg pst), v_r 为再悬浮速率 (m/day), SA 水体表面积 (m), pst_{lksed} 泥沙中杀虫剂的量 (mg pst), V_{tot} 泥沙层的总体积(m^3)。泥沙层的体积计算如下：

$$V_{tot} = SA \cdot D_{sed} \quad 30.2.11$$

式中： V_{tot} 泥沙层的总体积 (m^3), SA 水体表面积 (m^2), D_{sed} 为活性泥沙层的深度 (m)。再悬浮过程去除的泥沙中的杀虫剂被添加到水层中。

30.2.4 扩散

溶解相中的杀虫剂可以扩散。扩散将杀虫剂在水和泥沙层之间转移, 杀虫剂的运动方向通过杀虫剂浓度控制。杀虫剂将从高浓度区域向低浓度区域运动。

通过扩散在水和泥沙之间转移的杀虫剂量为：

$$pst_{dif} = \left| v_d \cdot SA \cdot \left(\frac{F_{d, sed} \cdot pst_{lk sed}}{V_{tot}} - \frac{F_d \cdot pst_{lk wtr}}{V} \right) \right| \quad 30.2.12$$

式中： pst_{dif} 扩散在水和泥沙之间转移的杀虫剂量 ($mg\ pst$), v_d 扩散或混合速率 (m/day), SA 为水体表面积 (m), $F_{d, sed}$ 总泥沙杀虫剂中在固相的分数, $pst_{lk sed}$ 泥沙中杀虫剂的量 ($mg\ pst$), F_d 总泥沙杀虫剂中在溶解相的分数, $pst_{lk wtr}$ 水中杀虫剂的量 ($mg\ pst$), V_{tot} 为泥沙层的体积 (m^3), 如果

$\frac{F_{d, sed} \cdot pst_{lk sed}}{V_{tot}} > \frac{F_d \cdot pst_{lk wtr}}{V}$, pst_{dif} 从泥沙向水层转移。 如果

$\frac{F_{d, sed} \cdot pst_{lk sed}}{V_{tot}} < \frac{F_d \cdot pst_{lk wtr}}{V}$, pst_{dif} 从水向泥沙层转移。

扩散混合速率, v_d , 可以根据经验公式(Chapra, 1997)估算：

$$v_d = \frac{69.35}{365} \cdot \phi \cdot MW^{-2/3} \quad 30.2.13$$

式中： v_d 为扩散混合速率 (m/day), ϕ 为泥沙孔隙率, 埋藏 MW 杀虫剂混合物的分子重量。

30.2.5 埋藏

泥沙层中的杀虫剂可以通过埋藏而损失。通过埋藏而损失的泥沙层中的杀虫剂量为：

$$pSt_{bur} = v_b \cdot SA \cdot \frac{pSt_{lksed}}{V_{tot}} \quad 30.2.14$$

式中： pSt_{bur} 为通过埋藏而损失的泥沙层中的杀虫剂量 (mg pst), v_b 为埋藏速率 (m/day), SA 为水体表面积 (m^2), pSt_{lksed} 泥沙中杀虫剂的量 (mg pst), V_{tot} 为泥沙层的体积 (m^3)。

Table 30-2: SWAT input variables related to pesticide in the sediment.

Variable Name	Definition	Input File
LKPST_KOC	K_d : Pesticide partition coefficient (m^3/g)	.lwq
LKPST_REA	$k_{p, sed}$: Rate constant for degradation or removal of pesticide in the sediment (1/day)	.lwq
LKPST_RSP	v_r : Resuspension velocity (m/day)	.lwq
LKPST_ACT	D_{sed} : Depth of the active sediment layer (m)	.lwq
LKPST_MIX	v_d : Rate of diffusion or mixing velocity (m/day)	.lwq
LKPST_BRY	v_b : Pesticide burial velocity (m/day)	.lwq

30.3 质量守恒

The processes described above can be combined into mass balance equations for the well-mixed water body and the well-mixed sediment layer:

$$\Delta pSt_{lkwtr} = pSt_{in} - pSt_{sol,o} + pSt_{sorb,o} - pSt_{deg,wtr} - pSt_{vol,wtr} - pSt_{stl,wtr} + pSt_{rsp,wtr} \pm pSt_{dif} \quad 30.3.1$$

$$\Delta pSt_{lksed} = pSt_{deg,sed} + pSt_{stl,wtr} - pSt_{rsp,wtr} - pSt_{bur} \pm pSt_{dif} \quad 30.3.2$$

式中： $\Delta p_{st_{rchwtr}}$ 水层中杀虫剂量的变化 (mg pst), $\Delta p_{st_{rchsed}}$ 为泥沙层中杀虫剂质量的变化 (mg pst), $p_{st_{in}}$ 为入流增加的河段杀虫剂量 (mg pst), $p_{st_{sol,o}}$ 为出流去除的河段杀虫剂量 (mg pst), $p_{st_{sorb,o}}$ 出流去除的颗粒态杀虫剂量 (mg pst), $p_{st_{deg,wtr}}$ 为降解从水中去除的杀虫剂量 (mg pst), $p_{st_{vol,wtr}}$ 为挥发去除的杀虫剂量 (mg pst), $p_{st_{stl,wtr}}$ 沉淀去除的杀虫剂量 (mg pst), $p_{st_{rsp,wtr}}$ 再悬浮去除的杀虫剂量 (mg pst), $p_{st_{dif}}$ 扩散在水与泥沙之间转移的杀虫剂量 (mg pst), $p_{st_{deg,sed}}$ 为降解去除的泥沙中的杀虫剂量 (mg pst), $p_{st_{bur}}$ 埋藏去除的杀虫剂量 (mg pst)。

30.4 NOMENCLATURE

- D_g Gas molecular diffusion coefficient (m^2/day)
 D_l Liquid molecular diffusion coefficient (m^2/day)
 D_{sed} Depth of the active sediment layer (m)
 F_d Fraction of total pesticide in the dissolved phase
 $F_{d,sed}$ Fraction of total sediment pesticide in the dissolved phase
 F_p Fraction of total pesticide in the particulate phase
 $F_{p,sed}$ Fraction of total sediment pesticide in the particulate phase
 H_e Henry's constant ($atm\ m^3\ mole^{-1}$)
 K_d Pesticide partition coefficient (m^3/g)
 K_g Mass-transfer velocity in the gaseous laminar layer (m/day)
 K_l Mass-transfer velocity in the liquid laminar layer (m/day)
 K_{l,O_2} Oxygen transfer coefficient (m/day)
 M_{sed} Mass of solid phase in the sediment layer (g)
 MW Molecular weight of the pesticide compound
 Q Rate of outflow from the water body ($m^3\ H_2O/day$)
 R Universal gas constant ($8.206 \times 10^{-5}\ atm\ m^3\ (K\ mole)^{-1}$)
 SA Surface area of the water body (m^2)
 V Volume of water in the water body ($m^3\ H_2O$)
 V_{sed} Volume of solids in the sediment layer (m^3)
 V_{tot} Total volume of the sediment layer (m^3)
 V_{wtr} Volume of water in the sediment layer (m^3)
 $conc_{sed}$ Concentration of suspended solids in the water (g/m^3)

- $conc_{sed}^*$ “Concentration” of solid particles in the sediment layer (g/m^3)
- $k_{p,aq}$ Rate constant for degradation or removal of pesticide in the water (1/day)
- $k_{p,sed}$ Rate constant for degradation or removal of pesticide in the sediment (1/day)
- pst_{bur} Amount of pesticide removed via burial (mg pst)
- $pst_{deg,sed}$ Amount of pesticide removed from the sediment via degradation (mg pst)
- $pst_{deg,wtr}$ Amount of pesticide removed from the water via degradation (mg pst)
- pst_{dif} Amount of pesticide transferred between the water and sediment by diffusion (mg pst)
- pst_{in} Pesticide added to the water body via inflow (mg pst)
- $pst_{lk,sed}$ Amount of pesticide in the sediment (mg pst)
- $pst_{lk,wtr}$ Amount of pesticide in the water (mg pst)
- $pst_{rsp,wtr}$ Amount of pesticide removed from sediment via resuspension (mg pst)
- $pst_{sol,o}$ Amount of dissolved pesticide removed via outflow (mg pst)
- $pst_{sorb,o}$ Amount of particulate pesticide removed via outflow (mg pst)
- $pst_{stl,wtr}$ Amount of pesticide removed from the water due to settling (mg pst)
- $pst_{vol,wtr}$ Amount of pesticide removed via volatilization (mg pst)
- $t_{1/2,aq}$ Aqueous half-life for the pesticide (days)
- $t_{1/2,sed}$ Sediment half-life for the pesticide (days)
- v_b Pesticide burial velocity (m/day)
- v_d Rate of diffusion or mixing velocity (m/day)
- v_r Resuspension velocity (m/day)
- v_s Settling velocity (m/day)
- v_v Volatilization mass-transfer coefficient (m/day)
- z_g Thickness of the gas film (m)
- z_l Thickness of the liquid film (m)
- ϕ Porosity
- $\Delta pst_{lk,wtr}$ Change in pesticide mass in the water layer (mg pst)
- $\Delta pst_{lk,sed}$ Change in pesticide mass in the sediment layer (mg pst)
- ρ_s Particle density (g/m^3)
- μ_w Wind speed (m/s)

30.5 REFERENCES

- Chapra, S.C. 1997. Surface water-quality modeling. WCB/McGraw-Hill, Boston, MA.
- Lewis, W.K. and W.G. Whitman. 1924. Principles of gas absorption. Ind. Eng. Chem. 16:1215-1220.
- Whitman, W.G. 1923. The two-film theory of gas adsorption. Chem. Metallurg. Eng. 29:146-148.

第 30 章 方程：水体中的杀虫剂

附录 A 变量列表

附录 A 变量列表

- A 3×3 matrix of elements defined to ensure serial and cross correlation of generated temperature and radiation values $A = M_1 \cdot M_0^{-1}$
- A_{ch} Cross-sectional area of flow in the channel (m^2)
- $A_{ch,bnkfull}$ Cross-sectional area of flow in the channel when filled to the top of the bank (m^2)
- A_s Area of sediment-water interface (m^2)
- A_{surf} Amplitude of the surface fluctuations in soil temperature ($^{\circ}C$)
- AGP Algal growth potential (mg/L)
- $Area$ Subbasin area (km^2 or ha)
- AU Astronomical unit (1 AU = 1.496×10^8 km)
- AWC Available water capacity (mm H_2O)
- AWC_{ly} Available water capacity for layer ly (mm H_2O)
- B 3×3 matrix of elements defined to ensure serial and cross correlation of generated temperature and radiation values $B \cdot B^T = M_0 - M_1 \cdot M_0^{-1} \cdot M_1^T$
- BFD Number of baseflow days for the watershed
- C Runoff coefficient in peak runoff rate calculation
- $C1$ Coefficient in Muskingum flood routing equation
- $C2$ Coefficient in Muskingum flood routing equation
- $C3$ Coefficient in Muskingum flood routing equation
- C_{CH} Channel cover factor
- C_{NH4} Concentration of ammonium in the reach (mg N/L)
- C_{NO3} Concentration of nitrate in the reach (mg N/L)
- $C_{solidphase}$ Concentration of the pesticide sorbed to the solid phase (mg chemical/kg solid material)
- C_{solP} Concentration of phosphorus in solution in the reach (mg P/L)
- $C_{solution}$ Concentration of the pesticide in solution (mg chemical/L solution)
- C_{USLE} USLE cover and management factor
- $C_{USLE,aa}$ Average annual C factor for the land cover
- $C_{USLE,mm}$ Minimum value for the cover and management factor for the land cover
- $CFRG$ Coarse fragment factor
- $Chla$ Chlorophyll a concentration ($\mu g/L$)
- $Chla_{co}$ User-defined coefficient to adjust predicted chlorophyll a concentration
- CN Curve number
- CN_1 Moisture condition I curve number
- CN_2 Moisture condition II curve number
- CN_{2s} Moisture condition II curve number adjusted for slope
- CN_3 Moisture condition III curve number
- CO_2 Concentration of carbon dioxide in the atmosphere (ppmv)
- CO_{2amb} Ambient atmospheric CO_2 concentration (330 ppmv)
- CO_{2hi} Elevated atmospheric CO_2 concentration (ppmv)
- CV Total aboveground biomass and residue present on current day ($kg\ ha^{-1}$)
- D_a Oxygen deficit above the structure (mg O_2/L)
- D_b Oxygen deficit below the structure (mg O_2/L)
- D_g Gas molecular diffusion coefficient (m^2/day)
- D_l Liquid molecular diffusion coefficient (m^2/day)

D_m	Molecular diffusion coefficient for oxygen (m^2/day)
D_{sed}	Depth of the active sediment layer (m)
DA	HRU drainage area (km^2)
E	Depth rate evaporation (mm d^{-1})
E_0	Eccentricity correction factor of earth ($(r_0/r)^2$)
E_a	Actual amount of evapotranspiration on a given day ($\text{mm H}_2\text{O}$)
E_{can}	Amount of evaporation from free water in the canopy on a given day ($\text{mm H}_2\text{O}$)
E_{ch}	Evaporation from the reach for the day ($\text{m}^3 \text{H}_2\text{O}$)
E_o	Potential evapotranspiration (mm d^{-1})
E'_o	Potential evapotranspiration adjusted for evaporation of free water in the canopy ($\text{mm H}_2\text{O}$)
E_s	Maximum sublimation/soil evaporation on a given day ($\text{mm H}_2\text{O}$)
E'_s	Maximum sublimation/soil evaporation adjusted for plant water use on a given day ($\text{mm H}_2\text{O}$)
E''_s	Maximum soil water evaporation on a given day ($\text{mm H}_2\text{O}$)
$E_{soil,ly}$	Evaporative demand for layer ly ($\text{mm H}_2\text{O}$)
$E'_{soil,ly}$	Evaporative demand for layer ly adjusted for water content ($\text{mm H}_2\text{O}$)
$E''_{soil,ly}$	Amount of water removed from layer ly by evaporation ($\text{mm H}_2\text{O}$)
$E_{soil,z}$	Evaporative demand at depth z ($\text{mm H}_2\text{O}$)
E_{storm}	Total storm energy ($0.0017 \text{ m-metric ton}/\text{m}^2$),
E_{sub}	Amount of sublimation on a given day ($\text{mm H}_2\text{O}$)
E_t	Transpiration rate (maximum) (mm d^{-1})
$E_{t,act}$	Actual amount of transpiration on a given day ($\text{mm H}_2\text{O}$)
EI_{USLE}	Rainfall erosion index ($0.017 \text{ m-metric ton cm}/(\text{m}^2 \text{ hr})$)
EL	Elevation (m)
EL_{band}	Mean elevation in the elevation band (m)
EL_{gage}	Elevation at the precipitation, temperature, or weather generator data recording gage (m)
F_d	Fraction of total pesticide in the dissolved phase
$F_{d,sed}$	Fraction of total sediment pesticide in the dissolved phase
F_{inf}	Cumulative infiltration at time t ($\text{mm H}_2\text{O}$)
F_p	Fraction of total pesticide in the particulate phase
$F_{p,sed}$	Fraction of total sediment pesticide in the particulate phase
FC	Water content of soil profile at field capacity ($\text{mm H}_2\text{O}$)
FC_{ly}	Water content of layer ly at field capacity ($\text{mm H}_2\text{O}$)
FL	Algal growth attenuation factor for light for the water column
FL_z	Algal growth attenuation factor for light at depth z
FN	Algal growth limitation factor for nitrogen
FP	Algal growth limitation factor for phosphorus
G	Heat flux density to the ground ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)
H_0	Extraterrestrial daily irradiation ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)
H_b	Net outgoing long-wave radiation ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)
H_{day}	Solar radiation reaching ground on current day of simulation ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)
H_e	Henry's constant ($\text{atm m}^3 \text{mole}^{-1}$)
H_L	Long-wave radiation ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)

附录 A 变量列表

H_{MX}	Maximum possible solar radiation ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)
H_{net}	Net radiation on day ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)
H_o	Saturated thickness normal to the hillslope at the outlet expressed as a fraction of the total thickness (mm/mm)
H_{phosyn}	Intercepted photosynthetically active radiation on a given day (MJ m^{-2})
H_R	Radiant energy ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)
HI	Potential harvest index for a given day
HI_{act}	Actual harvest index
HI_{min}	Harvest index for the plant in drought conditions and represents the minimum harvest index allowed for the plant
HI_{opt}	Potential harvest index for the plant at maturity given ideal growing conditions
HI_{trg}	Target harvest index
HU	Number of heat units accumulated on a given day where base temperature is dependant on the plant species (heat units)
HU_0	Number of base zero heat units accumulated on a given day (heat units)
I_0	Extraterrestrial daily irradiance incident on a horizontal surface ($\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$)
I_{0n}	Extraterrestrial daily irradiance incident on a normal surface ($\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$)
I_{30}	Maximum 30 minute intensity (mm/hr)
I_a	Initial abstractions which includes surface storage, interception and infiltration prior to runoff ($\text{mm H}_2\text{O}$)
I_{frac}	Fraction of daily solar radiation falling during specific hour on current day of simulation
I_{hr}	Solar radiation reaching ground during specific hour on current day of simulation ($\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$)
$I_{phosyn,hr}$	Photosynthetically-active solar radiation reaching ground during specific hour on current day of simulation ($\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$)
$I_{phosyn,z}$	Photosynthetically-active light intensity at a depth z below the water surface ($\text{MJ/m}^2\text{-hr}$)
I_{SC}	Solar constant ($4.921 \text{ MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$)
$\bar{I}_{phosyn,hr}$	Daylight average photosynthetically-active light intensity ($\text{MJ/m}^2\text{-hr}$)
J_i	Jet index used to calculate channel erodibility
K	Storage time constant for the reach (s)
$K_{0.1bnkfull}$	Storage time constant calculated for the reach segment with one-tenth of the bankfull flows (s)
K_1	Dimension coefficient in Penman-Monteith equation
$K_{bnkfull}$	Storage time constant calculated for the reach segment with bankfull flows (s)
K_{ch}	Effective hydraulic conductivity of the channel alluvium (mm/hr)
K_{CH}	Channel erodibility factor
K_d	Pesticide partition coefficient (m^3/g)
K_e	Effective hydraulic conductivity (mm/hr)
K_g	Mass-transfer velocity in the gaseous laminar layer (m/day)
K_l	Mass-transfer velocity in the liquid laminar layer (m/day)
K_L	Half-saturation coefficient for light ($\text{MJ/m}^2\text{-hr}$)
K_{l,O_2}	Oxygen transfer coefficient (m/day)
K_N	Michaelis-Menton half-saturation constant for nitrogen (mg N/L)

K_{oc}	Soil adsorption coefficient normalized for soil organic carbon content (ml/g or (mg/kg)/(mg/L) or L/kg)
K_p	Soil adsorption coefficient ((mg/kg)/(mg/L))
K_P	Michaelis-Menton half-saturation constant for phosphorus (mg P/L)
K_{sat}	Saturated hydraulic conductivity (mm/hr)
K_{USLE}	USLE soil erodibility factor (0.013 metric ton m ² hr/(m ³ -metric ton cm))
L	Channel length from the most distant point to the subbasin outlet (km)
L_c	Average flow channel length for the subbasin (km)
L_{cen}	Distance along the channel to the subbasin centroid (km)
L_{ch}	Length of main channel (km)
L_{gw}	Distance from the ridge or subbasin divide for the groundwater system to the main channel (m)
L_{hill}	Hillslope length (m)
L_{slp}	Subbasin slope length (m)
LAI	Leaf area index of the canopy
LAI_{evap}	Leaf area index at which no evaporation occurs from the water surface
LAI_{mx}	Maximum leaf area index for the plant
LS_{USLE}	USLE topographic factor
M	Particle-size parameter for estimation of USLE K factor
M_0	3 × 3 matrix of correlation coefficients between maximum temperature, minimum temperature and solar radiation on same day
M_1	3 × 3 matrix of correlation coefficients between maximum temperature, minimum temperature and solar radiation on consecutive days
M_{flowin}	Mass of nutrient entering water body on the given day (kg)
$M_{initial}$	Initial mass of nutrient in water body for the given day (kg)
M_S	Mass of the solids (Mg)
M_{sed}	Mass of solid phase in the sediment layer (g)
$M_{settling}$	Mass of nutrient lost via settling on a given day (kg)
M_{stored}	Mass of nutrient in water body at end of previous day (kg)
MW	Molecular weight of the pesticide compound
N	Time lapsed since the start of the recession (days)
$N_{actual,ly}$	Actual nitrogen uptake for layer ly (kg N/ha)
$N_{dec,ly}$	Nitrogen decomposed from the fresh organic N pool (kg N/ha)
N_{demand}	Nitrogen uptake demand not met by overlying soil layers (kg N/ha)
$N_{denit,ly}$	Amount of nitrogen lost to denitrification (kg N/ha)
N_{evap}	Amount of nitrate moving from the first soil layer to the soil surface zone (kg N/ha)
N_{fix}	Amount of nitrogen added to the plant biomass by fixation (kg N/ha)
$N_{mina,ly}$	Nitrogen mineralized from the humus active organic N pool (kg N/ha)
$N_{minf,ly}$	Nitrogen mineralized from the fresh organic N pool (kg N/ha)
$N_{nit,ly}$	Amount of nitrogen converted from NH ₄ ⁺ to NO ₃ ⁻ in layer ly (kg N/ha)
$N_{nit vol,ly}$	Amount of ammonium converted via nitrification and volatilization in layer ly (kg N/ha)
N_{rain}	Nitrate added by rainfall (kg N/ha)
$N_{trns,ly}$	Amount of nitrogen transferred between the active and stable organic pools (kg N/ha)

附录 A 变量列表

N_{up}	Potential nitrogen uptake (kg N/ha)
$N_{up,ly}$	Potential nitrogen uptake for layer ly (kg N/ha)
$N_{up,z}$	Potential nitrogen uptake from the soil surface to depth z (kg N/ha)
$N_{up,zl}$	Potential nitrogen uptake from the soil surface to the lower boundary of the soil layer (kg N/ha)
$N_{up,zu}$	Potential nitrogen uptake from the soil surface to the upper boundary of the soil layer (kg N/ha)
$N_{vol,ly}$	Amount of nitrogen converted from NH_4^+ to NH_3 in layer ly (kg N/ha)
ND_{targ}	Number of days required for the reservoir to reach target storage
NH_4	Ammonium content of the soil profile (kg NH_4 -N/ha)
NH_4_{fert}	Amount of ammonium added to the soil in the fertilizer (kg N/ha)
NH_4_{ly}	Ammonium content of layer ly (kg NH_4 -N/ha)
NH_4_{str}	Ammonium concentration in the stream (mg N/L)
NO_2_{str}	Nitrite concentration in the stream (mg N/L)
NO_3	Nitrate content of the soil profile (kg NO_3 -N/ha)
$NO_3_{conc,z}$	Concentration of nitrate in the soil at depth z (mg/kg or ppm)
NO_3_{fert}	Amount of nitrate added to the soil in the fertilizer (kg N/ha)
$NO_3'_{lat}$	Amount of lateral flow nitrate generated in HRU on a given day (kg N/ha)
$NO_3_{lat,ly}$	Nitrate removed in lateral flow from a layer (kg N/ha)
$NO_3_{latstor,i-1}$	Lateral flow nitrate stored or lagged from the previous day (kg N/ha)
NO_3_{ly}	Nitrate content of soil layer ly (kg NO_3 -N/ha)
$NO_3_{perc,ly}$	Nitrate moved to the underlying layer by percolation (kg N/ha)
NO_3_{str}	Nitrate concentration in the stream (mg N/L)
NO_3_{surf}	Nitrate removed in surface runoff (kg N/ha)
$NO_3'_{surf}$	Amount of surface runoff nitrate generated in HRU on a given day (kg N/ha)
$NO_3_{surstor,i-1}$	Surface runoff nitrate stored or lagged from the previous day (kg N/ha)
OM	Percent organic matter (%)
Ox_{sat}	Saturation oxygen concentration (mg O_2 /L)
Ox_{str}	Dissolved oxygen concentration in the stream (mg O_2 /L)
Ox_{surf}	Dissolved oxygen concentration in surface runoff (mg O_2 /L)
P	Atmospheric pressure (kPa)
$P_{actualup,ly}$	Actual phosphorus uptake for layer ly (kg P/ha)
$P_{act sta,ly}$	Amount of phosphorus transferred between the active and stable mineral pools (kg P/ha)
P_{ch}	Wetted perimeter for a given depth of flow (m)
$P_{dec,ly}$	Phosphorus decomposed from the fresh organic P pool (kg P/ha)
P_{demand}	Phosphorus uptake demand not met by overlying soil layers (kg P/ha)
$P_i(D/D)$	Probability of a dry day on day i given a dry day on day $i - 1$
$P_i(D/W)$	Probability of a dry day on day i given a wet day on day $i - 1$
$P_i(W/D)$	Probability of a wet day on day i given a dry day on day $i - 1$
$P_i(W/W)$	Probability of a wet day on day i given a wet day on day $i - 1$
$P_{mina,ly}$	Phosphorus mineralized from the humus active organic P pool (kg P/ha)
$P_{minf,ly}$	Phosphorus mineralized from the fresh organic P pool (kg P/ha),
P_{perc}	Amount of phosphorus moving from the top 10 mm into the first soil layer (kg P/ha)

- $P_{solution,fert}$ Amount of phosphorus in the solution pool added to the soil in the fertilizer (kg P/ha)
- $P_{solution,ly}$ Phosphorus content of soil solution in layer ly (kg P/ha)
- $P_{sol|act,ly}$ Amount of phosphorus transferred between the soluble and active mineral pool (kg P/ha)
- $P_{stor,i-1}$ Solution P loading stored or lagged from the previous day (kg P/ha)
- P_{surf} Amount of soluble phosphorus lost in surface runoff (kg P/ha)
- P'_{surf} Amount of solution P loading generated in HRU on a given day (kg P/ha)
- P_{up} Potential phosphorus uptake (kg P/ha)
- $P_{up,ly}$ Potential phosphorus uptake for layer ly (kg P/ha)
- $P_{up,z}$ Potential phosphorus uptake from the soil surface to depth z (kg P/ha)
- $P_{up,zl}$ Potential phosphorus uptake from the soil surface to the lower boundary of the soil layer (kg P/ha)
- $P_{up,zu}$ Potential phosphorus uptake from the soil surface to the upper boundary of the soil layer (kg P/ha)
- P_{USLE} USLE support practice factor
- PHU Potential heat units or total heat units required for plant maturity where base temperature is dependant on the plant species (heat units)
- PHU_0 Total base zero heat units or potential base zero heat units (heat units)
- Q Volumetric flow rate for water exiting water body ($m^3 H_2O/day$)
- Q_{gw} Groundwater flow, or base flow, into the main channel (mm H_2O)
- $Q_{gw,0}$ Groundwater flow at the start of the recession (mm H_2O)
- $Q_{gw,N}$ Groundwater flow on day N (mm H_2O)
- Q_{lat} Lateral flow; water discharged from the hillslope outlet (mm H_2O/day)
- $Q_{latstor,i-1}$ Lateral flow stored or lagged from the previous day (mm H_2O)
- Q_{stor} Surface runoff stored or lagged (mm H_2O)
- Q_{surf} Surface runoff on a given day (mm H_2O)
- R Universal gas constant ($8.206 \times 10^{-5} atm m^3 (K mole)^{-1}$)
- $R_{0.5sm}$ Smoothed maximum half-hour rainfall for a given month (mm H_2O)
- $R_{0.5x}$ Extreme maximum half-hour rainfall for the specified month (mm H_2O)
- $R_{\Delta t}$ Amount of rain falling during the time step (mm H_2O)
- R_{band} Precipitation falling in the elevation band (mm H_2O)
- R_{ch} Hydraulic radius for a given depth of flow (m)
- R_{day} Amount of rainfall on a given day (mm H_2O)
- R'_{day} Amount of precipitation on a given day before canopy interception is removed (mm H_2O)
- R_h Average relative humidity for the day
- R_{hDmon} Average relative humidity of the month on dry days
- R_{hLmon} Smallest relative humidity value that can be generated on a given day in the month
- R_{hmon} Average relative humidity for the month
- R_{hUmon} Largest relative humidity value that can be generated on a given day in the month
- R_{hWmon} Average relative humidity for the month on wet days
- R_{INT} Amount of free water held in the canopy on a given day (mm H_2O)
- R_{NO3} Concentration of nitrogen in the rain (mg N/L)

附录 A 变量列表

- R_{tc}* Amount of rain falling during the time of concentration (mm H₂O)
RUE Radiation-use efficiency of the plant (kg/ha·(MJ/m²)⁻¹ or 10⁻¹ g/MJ)
RUE_{amb} Radiation-use efficiency of the plant at ambient atmospheric CO₂ concentration (kg/ha·(MJ/m²)⁻¹ or 10⁻¹ g/MJ)
RUE_{hi} Radiation-use efficiency of the plant at the elevated atmospheric CO₂ concentration, *CO_{2hi}*, (kg/ha·(MJ/m²)⁻¹ or 10⁻¹ g/MJ)
RUE_{vpd=1} Radiation-use efficiency for the plant at a vapor pressure deficit of 1 kPa (kg/ha·(MJ/m²)⁻¹ or 10⁻¹ g/MJ)
S Retention parameter in SCS curve number equation (mm)
S₃ Retention parameter for the moisture condition III curve number
S_{frz} Retention parameter adjusted for frozen conditions (mm)
S_{max} Maximum value the retention parameter can achieve on any given day (mm)
SA Surface area of the water body (m²)
SA_{em} Surface area of the reservoir/pond when filled to the emergency spillway (ha)
SA_{mx} Surface area of the wetland when filled to the maximum water level (ha)
SA_{nor} Surface area of the wetland when filled to the normal water level (ha)
SA_{pr} Surface area of the reservoir/pond when filled to the principal spillway (ha)
SAT Amount of water in the soil profile when completely saturated (mm H₂O),
SAT_{ly} Amount of water in the soil layer when completely saturated (mm H₂O)
SC Storage coefficient for variable storage flow routing
SD Secchi-disk depth (m)
SD_{co} User-defined coefficient to adjust predicted secchi-disk depth
SED Solid build up (kg/curb km)
SED_{mx} Maximum accumulation of solids possible for the urban land type (kg/curb km)
SND_{day} Standard normal deviate for the day
SNO Water content of snow cover on current day (mm H₂O)
SNO₁₀₀ Amount of snow above which there is 100% cover (mm H₂O)
SNO_{mt} Amount of snow melt on a given day (mm H₂O)
SW Amount of water in soil profile (mm H₂O)
SW_{ly} Soil water content of layer *ly* (mm H₂O)
SW_{ly,excess} Drainable volume of water stored layer (mm H₂O)
T_{bare} Temperature of soil surface with no cover (°C)
T_{base} Plant's base or minimum temperature for growth (°C)
T_{DL} Daylength (h)
T_{DL,mn} Minimum daylength for the watershed during the year (hrs)
T_{DL,thr} Threshold daylength to initiate dormancy (hrs)
T_{hr} Air temperature during hour (°C)
T_K Mean air temperature in Kelvin (273.15 + °C)
T_{mt} Threshold temperature for snow melt (°C)
T_{mn} Minimum air temperature for day (°C)
T_{mn,band} Minimum daily temperature in the elevation band (°C)
T_{mx} Maximum air temperature for day (°C)
T_{mx,band} Maximum daily temperature in the elevation band (°C)
T_{opt} Plant's optimal temperature for growth (°C)
T_{s-r} Rain/snow boundary temperature (°C)

T_{snow}	Snow pack temperature on a given day (°C)
T_{soil}	Soil temperature (°C)
$T_{soil,ly}$	Temperature of layer ly (°C)
T_{SR}	Time of sunrise in solar day (h)
T_{SS}	Time of sunset in solar day (h)
T_{ssurf}	Soil surface temperature (°C)
$T_{wat,K}$	Water temperature in Kelvin (273.15+°C)
T_{water}	Average daily water temperature (°C)
\bar{T}_{AA}	Average annual soil temperature (°C)
\bar{T}_{AAair}	Average annual air temperature (°C)
\bar{T}_{av}	Mean air temperature for day (°C)
$\bar{T}_{av,band}$	Mean daily temperature in the elevation band (°C)
\bar{T}_{water}	Average water temperature (°C)
TN	Total Kjeldahl nitrogen load (moles)
TP	Total phosphorus load (moles)
TT	Travel time (s)
TT_{lag}	Lateral flow travel time (days)
TT_{perc}	Travel time for percolation (hrs)
V	Volume of water in water body (m ³ H ₂ O)
V_A	Volume of air (m ³)
V_{bnk}	Volume of water added to the reach via return flow from bank storage (m ³ H ₂ O)
V_{ch}	Volume of water stored in the channel (m ³)
V_{em}	Volume of water held in the reservoir when filled to the emergency spillway (m ³ H ₂ O)
V_{evap}	Volume of water removed from the water body by evaporation during the day (m ³ H ₂ O)
V_{flowin}	Volume of water entering water body on given day (m ³ H ₂ O)
$V_{flowout}$	Volume of water flowing out of the water body during the day (m ³ H ₂ O)
$V'_{flowout}$	Initial estimate of the volume of water flowing out of the water body during the day (m ³ H ₂ O)
V_{in}	Volume of inflow during the time step (m ³ H ₂ O)
$V_{initial}$	Initial volume of water in water body on given day (m ³ H ₂ O)
V_{mx}	Volume of water held in the wetland when filled to the maximum water level (m ³ H ₂ O)
V_{nor}	Volume of water held in the wetland when filled to the normal water level (m ³ H ₂ O)
V_{out}	Volume of outflow during the time step (m ³ H ₂ O)
V_{pcp}	Volume of precipitation falling on the water body during the day (m ³ H ₂ O)
$V_{pot,mx}$	Maximum amount of water that can be stored in the pothole (m ³ H ₂ O)
V_{pr}	Volume of water held in the reservoir when filled to the principal spillway (m ³ H ₂ O)
V_S	Volume of solids (m ³)
V_{sed}	Volume of solids in the sediment layer (m ³)
V_{seep}	Volume of water lost from the water body by seepage (m ³ H ₂ O)

附录 A 变量列表

V_{stored}	Volume of water stored in water body or channel ($m^3 H_2O$)
V_T	Total soil volume (m^3)
V_{targ}	Target reservoir volume for a given day ($m^3 H_2O$)
V_{tot}	Total volume of the sediment layer (m^3)
V_W	Volume of water (m^3)
V_{wtr}	Volume of water in the sediment layer (m^3)
W	Width of channel at water level (m)
$W(t)$	Rate of nutrient loading (kg/day)
$W_{bnkfull}$	Top width of the channel when filled with water (m)
W_{bim}	Bottom width of the channel (m)
$W_{bim, fld}$	Bottom width of the flood plain (m)
WP	Water content at wilting point (mm H_2O)
WP_{ly}	Water content of layer ly at wilting point (mm H_2O)
X	Weighting factor in Muskingum routing
Y	Total constituent load (kg)
Y_{sed}	Cumulative amount of solids washed off at time t (kg/curb km)
a	Constant in equation used to calculate the cloud cover adjustment factor
a_1	Constant in equation used to calculate net emissivity
a_r	Unit channel regression intercept (m^3)
a_x	Regression intercept for a channel of length L and width W (m^3)
aa	Exponent between 0 and 1 that varies with atmospheric stability and surface roughness that is used in calculating wind speed at different heights
$adj_{0.5\alpha}$	Peak rate adjustment factor
adj_{hmd}	Change in relative humidity expressed as a fraction
adj_{pcp}	% change in rainfall
adj_{rad}	Change in radiation ($MJ m^{-2} d^{-1}$)
adj_{tmp}	Change in temperature ($^{\circ}C$)
$algae$	Algal biomass concentration (mg alg/L)
ap_{ef}	Pesticide application efficiency
aq_{dp}	Amount of water stored in the deep aquifer (mm H_2O)
aq_{sh}	Amount of water stored in the shallow aquifer (mm H_2O)
$aq_{shthr,q}$	Threshold water level in shallow aquifer for base flow (mm H_2O)
$area_{hru}$	HRU area (ha or km^2)
b	Constant in equation used to calculate the cloud cover adjustment factor
b_1	Constant in equation used to calculate net emissivity
b_H	Scaling factor that controls the degree of deviation in relative humidity caused by the presence or absence of precipitation
b_{m1t}	Melt factor for the day (mm $H_2O/day-^{\circ}C$)
b_{m1t6}	Melt factor for June 21 (mm $H_2O/day-^{\circ}C$)
b_{m1t12}	Melt factor for December 21 (mm $H_2O/day-^{\circ}C$)
b_r	Unit channel regression slope
b_R	Scaling factor that controls the degree of deviation in solar radiation caused by the presence or absence of precipitation

- b_T Scaling factor that controls the degree of deviation in temperature caused by the presence or absence of precipitation
- b_x Regression slope for a channel of length L and width W
- $bact_{lpsol,fert}$ Amount of less persistent bacteria in the solution pool added to the soil in the fertilizer (# bact/ha)
- $bact_{lpsorb,fert}$ Amount of less persistent bacteria in the sorbed pool added to the soil in fertilizer (# bact/ha)
- $bact_{psol,fert}$ Amount of persistent bacteria in the solution pool added to the soil in the fertilizer (# bact/ha)
- $bact_{psorb,fert}$ Amount of persistent bacteria in the sorbed pool added to the soil in fertilizer (# bact/ha)
- b_{cv} Weighting factor for impact of ground cover on soil surface temperature
- bio Total plant biomass on a given day (kg/ha)
- bio_{ag} Aboveground biomass on the day of harvest (kg ha⁻¹)
- bio_N Actual mass of nitrogen stored in plant material (kg N/ha)
- $bio_{N,opt}$ Optimal mass of nitrogen stored in plant material for the growth stage (kg N/ha)
- bio_P Actual mass of phosphorus stored in plant material (kg P/ha)
- $bio_{P,opt}$ Optimal mass of phosphorus stored in plant material for the current growth stage (kg P/ha)
- bio_{trg} Target biomass specified by the user (kg/ha)
- bnk Total amount of water in bank storage (m³ H₂O)
- bnk_{in} Amount of water entering bank storage (m³ H₂O)
- $bnk_{revap,mx}$ Maximum amount of water moving into the unsaturated zone in response to water deficiencies (m³ H₂O)
- c Concentration of nutrient in the water (kg/m³ H₂O)
- c_k Celerity corresponding to the flow for a specified depth (m/s)
- c_p Specific heat of moist air at constant pressure (1.013×10^{-3} MJ kg⁻¹ °C⁻¹)
- c_{perm} Profile-permeability class
- $c_{soilstr}$ Soil-structure code used in soil classification
- c_{sp} Coefficient in sediment transport equation
- can_{day} Maximum amount of water that can be trapped in the canopy on a given day (mm H₂O)
- can_{mx} Maximum amount of water that can be trapped in the canopy when the canopy is fully developed (mm H₂O)
- $cbod$ Carbonaceous biological oxygen demand concentration (mg CBOD/L)
- $cbod_{surq}$ CBOD concentration in surface runoff (mg CBOD/L)
- chl_a Chlorophyll a concentration (µg chl_a/L)
- $coef_1$ Weighting coefficient for storage time constant calculation
- $coef_2$ Weighting coefficient for storage time constant calculation
- $coef_a$ Empirical water quality factor
- $coef_b$ Empirical dam aeration coefficient
- $coef_{crk}$ Adjustment coefficient for crack flow
- $coef_{ev}$ Evaporation coefficient
- $conc_N$ Concentration of nitrogen in a layer (mg/kg or ppm)
- $conc_{NO_3,mobile}$ Concentration of nitrate in the mobile water for a given layer (kg N/mm H₂O)

附录 A 变量列表

$conc_{orgN}$	Concentration of organic nitrogen in the soil surface top 10 mm (g N/ metric ton soil)
$conc_P$	Concentration of phosphorus in a layer (mg/kg or ppm)
$conc_{pst,flow}$	Concentration of pesticide in the mobile water (kg pst/ha-mm H ₂ O)
$conc_{sed}$	Concentration of sediment in lateral and groundwater flow (mg/L)
$conc_{sed}^*$	“Concentration” of solid particles in the sediment layer (g/m ³)
$conc_{sed,ch,i}$	Initial sediment concentration in the reach (kg/L or ton/m ³)
$conc_{sed,ch,mx}$	Maximum concentration of sediment that can be transported by the water (kg/L or ton/m ³)
$conc_{sed,eq}$	Equilibrium concentration of suspended solids in the water body (Mg/m ³)
$conc_{sed,surq}$	Concentration of sediment in surface runoff (Mg sed/m ³ H ₂ O)
$conc_{sedP}$	Concentration of phosphorus attached to sediment in the top 10 mm (g P/ metric ton soil)
cov_1	Snow cover areal depletion curve shape coefficient
cov_2	Snow cover areal depletion curve shape coefficient
cov_{sol}	Soil cover index
crk	Total crack volume for the soil profile on a given day (mm)
crk_{ly}	Crack volume for the soil layer on a given day expressed as a depth (mm)
$crk_{ly,d-1}$	Crack volume for the soil layer on the previous day (mm)
$crk_{ly,i}$	Initial crack volume calculated for the soil layer on a given day expressed as a depth (mm)
crk_{max}	Potential crack volume for the soil profile expressed as a fraction of the total volume
$crk_{max,ly}$	Maximum crack volume possible for the soil layer (mm)
d	Zero plane displacement of the wind profile (cm)
d_{50}	Median particle size of the inflow sediment (μm)
d_n	Day number of year, 1 on January 1 and 365 on December 31
$days_{dry}$	Number of dry days in the month
$days_{tot}$	Total number of days in the month
$days_{wet}$	Number of wet days in the month
dd	Damping depth (mm)
dd_{max}	Maximum damping depth (mm)
$depth$	Depth of water in the channel (m)
$depth_{bnkfull}$	Depth of water in the channel when filled to the top of the bank (m)
$depth_{dcut}$	Amount of downcutting (m)
$depth_{fld}$	Depth of water in the flood plain (m)
$depth_{ly}$	Depth of the soil layer (mm)
df	Depth factor used in soil temperature calculations
div	Volume of water added or removed from the reach for the day through diversions (m ³ H ₂ O)
dt	Length of time step (1 day)
dur_{flw}	Duration of flow (hr)
e	Actual vapor pressure on a given day (kPa)
e_{mon}	Actual vapor pressure at the mean monthly temperature (kPa)
e^o	Saturation vapor pressure on a given day (kPa)
e_{mon}^o	Saturation vapor pressure at the mean monthly temperature (kPa)

$epco$	Plant uptake compensation factor
$esco$	Soil evaporation compensation coefficient
$expsa$	Exponent for impoundment surface area calculation
f	Coefficient
f_{cl-si}	Factor that gives low soil erodibility factors for soils with high clay to silt ratios
f_{cld}	Factor to adjust for cloud cover in net long-wave radiation calculation
f_{csand}	Factor that gives low soil erodibility factors for soils with high coarse-sand contents and high values for soils with little sand
f_{gr}	Growth stage factor in nitrogen fixation equation
f_{hisand}	Factor that reduces soil erodibility for soils with extremely high sand contents
f_{inf}	Infiltration rate (mm/hr)
f_{NH4}	Preference factor for ammonia nitrogen
f_{no3}	Soil nitrate factor in nitrogen fixation equation
f_{orgc}	Factor that reduces soil erodibility for soils with high organic carbon content
f_{sw}	Soil water factor in nitrogen fixation equation
$fert$	Amount of fertilizer applied (kg/ha)
$fert_{eff}$	Fertilizer application efficiency assigned by the user
$fert_{ipbact}$	Concentration of less persistent bacteria in the fertilizer (# bact/kg fert)
$fert_{minN}$	Fraction of mineral nitrogen in the fertilizer
$fert_{minP}$	Fraction of mineral P in the fertilizer
$fert_{NH4}$	Fraction of mineral N in the fertilizer that is ammonium
$fert_{orgN}$	Fraction of organic N in the fertilizer
$fert_{orgP}$	Fraction of organic P in the fertilizer
$fert_{pbact}$	Concentration of persistent bacteria in the fertilizer (# bact/kg fert)
fr_{actN}	Fraction of humic nitrogen in the active pool
fr_{av}	Fraction of the curb length available for sweeping (the availability factor)
fr_{bnd}	Fraction of subbasin area within the elevation band
fr_{DL}	Fraction of daylight hours
$fr_{g, mx}$	Fraction of the maximum stomatal conductance, $g_{l, mx}$, achieved at the vapor pressure deficit, vpd_{fr}
fr_{imp}	Fraction of the subbasin area draining into the impoundment
$fr_{LAI,1}$	Fraction of the maximum plant leaf area index corresponding to the 1 st point on the optimal leaf area development curve
$fr_{LAI,2}$	Fraction of the maximum plant leaf area index corresponding to the 2 nd point on the optimal leaf area development curve
$fr_{LAI mx}$	Fraction of the plant's maximum leaf area index corresponding to a given fraction of potential heat units for the plant
fr_N	Optimal fraction of nitrogen in the plant biomass for current growth stage
$fr_{N,1}$	Normal fraction of nitrogen in the plant biomass at emergence
$fr_{N,2}$	Normal fraction of nitrogen in the plant biomass at 50% maturity
$fr_{N,3}$	Normal fraction of nitrogen in the plant biomass at maturity
$fr_{N,-3}$	Normal fraction of nitrogen in the plant biomass near maturity
$fr_{N,yld}$	Fraction of nitrogen in the yield
fr_{NH4}	Fraction of algal nitrogen uptake from ammonium pool,
$fr_{nit,ly}$	Estimated fraction of nitrogen lost by nitrification
fr_P	Fraction of phosphorus in the plant biomass

附录 A 变量列表

$fr_{P,1}$	Normal fraction of phosphorus in the plant biomass at emergence
$fr_{P,2}$	Normal fraction of phosphorus in the plant biomass at 50% maturity
$fr_{P,3}$	Normal fraction of phosphorus in the plant biomass at maturity
$fr_{P,\sim 3}$	Normal fraction of phosphorus in the plant biomass near maturity
$fr_{P,yld}$	Fraction of phosphorus in the yield
fr_{phosyn}	Fraction of solar radiation that is photosynthetically active
fr_{PHU}	Fraction of potential heat units accumulated for the plant on a given day in the growing season
$fr_{PHU,1}$	Fraction of the growing season corresponding to the 1 st point on the optimal leaf area development curve
$fr_{PHU,2}$	Fraction of the growing season corresponding to the 2 nd point on the optimal leaf area development curve
$fr_{PHU,50\%}$	Fraction of potential heat units accumulated for the plant at 50% maturity ($fr_{PHU,50\%}=0.5$)
$fr_{PHU,100\%}$	Fraction of potential heat units accumulated for the plant at maturity ($fr_{PHU,100\%}=1.0$)
$fr_{PHU,sen}$	Fraction of growing season at which senescence becomes the dominant growth process
fr_{pot}	Fraction of the HRU area draining into the pothole
fr_{root}	Fraction of total biomass in the roots on a given day in the growing season
fr_{trns}	Fraction of transmission losses partitioned to the deep aquifer
$fr_{vol,ly}$	Estimated fraction of nitrogen lost by volatilization
fr_{wsh}	Wash-off fraction for the pesticide
$fr_{\Delta t}$	Fraction of the time step in which water is flowing in the channel
g	Exponent
g_{ℓ}	Leaf conductance ($m s^{-1}$)
$g_{\ell, mx}$	Maximum conductance of a single leaf ($m s^{-1}$)
g_{mon}	Skew coefficient for daily precipitation in the month
gc	Fraction of the ground surface covered by plants
h_c	Canopy height (cm)
$h_{c, mx}$	Plant's maximum canopy height (m)
h_{fall}	Height through which water falls (m)
h_{wtbl}	Water table height (m)
$harv_{eff}$	Efficiency of the harvest operation
hr	Hour of day (1-24)
i	Rainfall intensity (mm/hr)
i_{mx}	Maximum rainfall intensity (mm/hr)
imp_{con}	Fraction of the HRU area that is impervious and hydraulically connected to the drainage system
imp_{dcon}	Fraction of the HRU area that is impervious but not hydraulically connected to the drainage system
imp_{tot}	Fraction of the HRU area that is impervious (both connected and disconnected)
irr	Amount of irrigation water added on a given day ($m^3 H_2O$)
k	Von Kármán constant
k_{bact}	Bacterial partition coefficient
$k_{d,perc}$	Phosphorus percolation coefficient ($10 m^3/Mg$)

- $k_{d,surf}$ Phosphorus soil partitioning coefficient (m^3/Mg)
 k_i Decay constant for rainfall intensity (hr)
 k_ℓ Light extinction coefficient
 $k_{\ell,0}$ Non-algal portion of the light extinction coefficient (m^{-1})
 $k_{\ell,1}$ Linear algal self shading coefficient ($\text{m}^{-1} (\mu\text{g-chla/L})^{-1}$)
 $k_{\ell,2}$ Nonlinear algal self shading coefficient ($\text{m}^{-1} (\mu\text{g-chla/L})^{-2/3}$)
 $k_{p,aq}$ Rate constant for degradation or removal of pesticide in the water (1/day)
 $k_{p,foliar}$ Rate constant for degradation or removal of the pesticide on foliage (1/day)
 $k_{p,sed}$ Rate constant for degradation or removal of pesticide in the sediment (1/day)
 $k_{p,soil}$ Rate constant for degradation or removal of the pesticide in soil (1/day)
 k_r Decay factor ($\text{m}^{-1} \text{km}^{-1}$)
 k_s Sediment settling decay constant (1/day)
 kk Coefficient in urban wash off equation
 m Exponential term in USLE LS factor calculation
 m_c Percent clay content
 m_s Percent sand content
 m_{silt} Percent silt content (0.002-0.05 mm diameter particles)
 m_{vfs} Percent very fine sand content (0.05-0.10 mm diameter particles)
 $minN_{app}$ Amount of mineral nitrogen applied (kg N/ha)
 $minN_{app,mx}$ Maximum amount of mineral N allowed to be applied on any one day (kg N/ha)
 $minN_{app,mxyr}$ Maximum amount of mineral N allowed to be applied during a year (kg N/ha)
 $minP_{act,ly}$ Amount of phosphorus in the active mineral pool (mg/kg or kg P/ha)
 $minP_{sta,ly}$ Amount of phosphorus in the stable mineral pool (mg/kg or kg P/ha)
 mon Month of the year
 $mon_{fld,beg}$ Beginning month of the flood season
 $mon_{fld,end}$ Ending month of the flood season
 n Manning's roughness coefficient for the subbasin or channel
 n_1 First shape coefficient in plant nitrogen equation
 n_2 Second shape coefficient in plant nitrogen equation
 $nstrs$ Nitrogen stress for a given day
 $orgC_{ly}$ Amount of organic carbon in the layer (%)
 $orgC_{surq}$ Organic carbon in surface runoff (kg orgC),
 $orgN_{act,fert}$ Amount of nitrogen in the active organic pool added to the soil in the fertilizer (kg N/ha)
 $orgN_{act,ly}$ Nitrogen in the active organic pool (mg/kg or kg N/ha)
 $orgN_{frsh,fert}$ Amount of nitrogen in the fresh organic pool added to the soil in the fertilizer (kg N/ha)
 $orgN_{frsh,surf}$ Nitrogen in the fresh organic pool in the top 10mm (kg N/ha)
 $orgN_{hum,ly}$ Humic organic nitrogen in the layer (mg/kg or kg N/ha)
 $orgN_{sta,ly}$ Nitrogen in the stable organic pool (mg/kg or kg N/ha)
 $orgN_{stor,i-1}$ Surface runoff organic N stored or lagged from the previous day (kg N/ha)
 $orgN_{str}$ Organic nitrogen concentration in the stream (mg N/L)

附录 A 变量列表

- $orgN_{surf}$ Amount of organic nitrogen transport to the main channel in surface runoff (kg N/ha)
- $orgN'_{surf}$ Amount of surface runoff organic N generated in HRU on a given day (kg N/ha)
- $orgP_{act,ly}$ Amount of phosphorus in the active organic pool (kg P/ha)
- $orgP_{frsh,fert}$ Amount of phosphorus in the fresh organic pool added to the soil in the fertilizer (kg P/ha)
- $orgP_{frsh,ly}$ Phosphorus in the fresh organic pool in layer ly (kg P/ha)
- $orgP_{hum,fert}$ Amount of phosphorus in the humus organic pool added to the soil in the fertilizer (kg P/ha)
- $orgP_{hum,ly}$ Amount of phosphorus in humic organic pool in the layer (mg/kg or kg P/ha)
- $orgP_{sta,ly}$ Amount of phosphorus in the stable organic pool (kg P/ha)
- $orgP_{str}$ Organic phosphorus concentration in the stream (mg P/L)
- p Total phosphorus concentration ($\mu\text{g P/L}$)
- p_1 First shape coefficient in plant phosphorus equation
- p_2 Second shape coefficient in plant phosphorus equation
- pai Phosphorus availability index
- $pest$ Actual amount of pesticide applied (kg pst/ha)
- $pest'$ Effective amount of pesticide applied (kg pst/ha)
- $pest_{fol}$ Amount of pesticide applied to foliage (kg pst/ha)
- $pest_{surf}$ Amount of pesticide applied to the soil surface (kg pst/ha)
- $plaps$ Precipitation lapse rate (mm H₂O/km)
- prf Peak rate adjustment factor
- pst_{bur} Amount of pesticide removed via burial (mg pst)
- $pst_{deg,sed}$ Amount of pesticide removed from the sediment via degradation (mg pst)
- $pst_{deg,wtr}$ Amount of pesticide removed from the water via degradation (mg pst)
- pst_{dif} Amount of pesticide transferred between the water and sediment by diffusion (mg pst)
- pst_f Amount of pesticide on the foliage (kg pst/ha)
- $pst_{f,wsh}$ Amount of pesticide on foliage that is washed off the plant and onto the soil surface on a given day (kg pst/ha)
- pst_{flow} Amount of pesticide removed in the flow (kg pst/ha)
- pst_{in} Pesticide added to the water body via inflow (mg pst)
- pst'_{lat} Amount of lateral flow soluble pesticide generated in HRU on a given day (kg pst/ha)
- $pst_{lat,ly}$ Pesticide removed in lateral flow from a layer (kg pst/ha)
- $pst_{latstor,i-1}$ Lateral flow pesticide stored or lagged from the previous day (kg pst/ha)
- pst_{lksed} Amount of pesticide in the sediment (mg pst)
- pst_{lkwtr} Amount of pesticide in the water (mg pst)
- $pst_{perc,ly}$ Pesticide moved to the underlying layer by percolation (kg pst/ha)
- pst_{rchsed} Amount of pesticide in the sediment (mg pst)
- pst_{rchwtr} Amount of pesticide in the water (mg pst)
- $pst_{rsp,wtr}$ Amount of pesticide removed from sediment via resuspension (mg pst)
- $pst_{s,ly}$ Amount of pesticide in the soil (kg pst/ha)
- pst_{sed} Amount of sorbed pesticide transported to the main channel in surface runoff (kg pst/ha)

pst'_{sed} Sorbed pesticide loading generated in HRU on a given day (kg pst/ha)

$pst_{sedstor,i-1}$ Sorbed pesticide stored or lagged from the previous day (kg pst/ha)

pst_{sol} Solubility of the pesticide in water (mg/L)

$pst_{sol,o}$ Amount of dissolved pesticide removed via outflow (mg pst)

$pst_{sorb,o}$ Amount of particulate pesticide removed via outflow (mg pst)

$pst_{stl,wtr}$ Amount of pesticide removed from the water due to settling (mg pst)

pst_{surf} Pesticide removed in surface runoff (kg pst/ha)

pst'_{surf} Amount of surface runoff soluble pesticide generated in HRU on a given day (kg pst/ha)

$pst_{surstor,i-1}$ Surface runoff soluble pesticide stored or lagged from the previous day (kg pst/ha)

$pst_{vol,wtr}$ Amount of pesticide removed via volatilization (mg pst)

$pstrs$ Phosphorus stress for a given day

q_0^* Unit source area flow rate (mm hr⁻¹)

q_{ch} Average channel flow rate (m³ s⁻¹)

q_{ch}^* Average channel flow rate (mm hr⁻¹)

$q_{ch,pk}$ Peak flow rate (m³/s)

q_{in} Inflow rate (m³/s)

q_{out} Outflow rate (m³/s)

q_{ov} Average overland flow rate (m³ s⁻¹)

q_{peak} Peak runoff rate (m³/s or mm/hr)

$q_{peak,f}$ Peak rate after transmission losses (m³/s)

$q_{peak,i}$ Peak rate before accounting for transmission losses (m³/s)

q_{rel} Average daily principal spillway release rate (m³/s)

$q_{rel,mn}$ Minimum average daily outflow for the month (m³/s)

$q_{rel,mx}$ Maximum average daily outflow for the month (m³/s)

q_{tile} Average daily tile flow rate (m³/s)

r Actual earth-sun distance (AU)

r_0 Mean earth-sun distance, 1 AU

r_1 First shape coefficient for radiation-use efficiency curve

r_2 Second shape coefficient for radiation-use efficiency curve

r_a Diffusion resistance of the air layer (aerodynamic resistance) (s m⁻¹)

r_c Plant canopy resistance (s m⁻¹)

r_g Gaseous surface renewal rate (1/day)

r_l Liquid surface renewal rate (1/day)

r_ℓ Minimum effective resistance of a single leaf (s m⁻¹)

$r_{\ell-ab}$ Minimum abaxial stomatal leaf resistance (s m⁻¹)

$r_{\ell-ad}$ Minimum adaxial stomatal leaf resistance (s m⁻¹)

$ratio_{WD}$ Channel width to depth ratio

$reff$ Removal efficiency of the sweeping equipment

$rexp$ Exponent for exponential precipitation distribution

rnd_1 Random number between 0.0 and 1.0

rnd_2 Random number between 0.0 and 1.0

$rock$ Percent rock in soil layer (%)

附录 A 变量列表

rsd_{ly}	Residue in layer ly (kg/ha)
rsd_{surf}	Material in the residue pool for the top 10mm of soil on day i (kg ha^{-1})
sed	Sediment yield on a given day (metric tons)
sed_{ch}	Amount of suspended sediment in the reach (metric tons)
sed_{deg}	Amount of sediment reentrained in the reach segment (metric tons)
sed_{dep}	Amount of sediment deposited in the reach segment (metric tons)
sed_{flowin}	Amount of sediment added to the water body with inflow (metric tons)
$sed_{flowout}$	Amount of sediment transported out of the water body (metric tons)
sed_{lat}	Sediment loading in lateral and groundwater flow (metric tons)
sed_{out}	Amount of sediment transported out of the reach (metric tons)
sed_{stl}	Amount of sediment removed from the water by settling (metric tons)
$sed_{stor,i-1}$	Sediment stored or lagged from the previous day (metric tons)
sed_{wb}	Sediment in the water body (metric tons)
$sedP_{stor,i-1}$	Sediment-attached P stored or lagged from the previous day (kg P/ha)
$sedP_{surf}$	Amount of phosphorus transported with sediment to the main channel in surface runoff (kg P/ha)
$sedP'_{surf}$	Amount of sediment-attached P loading generated in HRU on a given day (kg P/ha)
slp	Average slope of the subbasin (% or m/m)
slp_{ch}	Average channel slope along channel length (m m^{-1})
sno_{cov}	Fraction of the HRU area covered by snow
$spexp$	Exponent in sediment transport equation
$starg$	Target reservoir volume specified for a given month ($\text{m}^3 \text{H}_2\text{O}$)
$surlag$	Surface runoff lag coefficient
t	Number of hours before (+) or after (-) solar noon
$t_{1/2,aq}$	Aqueous half-life for the pesticide (days)
$t_{1/2,f}$	Half-life of the pesticide on foliage (days)
$t_{1/2,s}$	Half-life of the pesticide in the soil (days)
$t_{1/2,sed}$	Sediment half-life for the pesticide (days)
t_{half}	Length of time needed for solid build up to increase from 0 kg/curb km to $\frac{1}{2} SED_{mx}$ (days)
t_{ch}	Time of concentration for channel flow (hr)
t_{conc}	Time of concentration for a subbasin (hr)
t_{dorm}	Dormancy threshold (hrs)
t_{drain}	Time required to drain the soil to field capacity (hrs)
t_i	Solar time at the midpoint of the hour i
t_{ov}	Time of concentration for overland flow (hr)
$tile_{lag}$	Drain tile lag time (hrs).
$tile_{wtr}$	Amount of water removed from the layer on a given day by tile drainage ($\text{mm H}_2\text{O}$)
$tlaps$	Temperature lapse rate ($^{\circ}\text{C/km}$)
$tloss$	Channel transmission losses ($\text{m}^3 \text{H}_2\text{O}$)
$trap_{ef}$	Fraction of the constituent loading trapped by the filter strip
$trap_{ef,bact}$	Fraction of the bacteria loading trapped by the filter strip
$tstrs$	Temperature stress for a given day expressed as a fraction of optimal plant growth
u_z	Wind speed at height z_w (m s^{-1})

u_{z1}	Wind speed (m s^{-1}) at height z_1
u_{z2}	Wind speed (m s^{-1}) at height z_2
urb_{coef}	Wash off coefficient (mm^{-1})
v_b	Pesticide burial velocity (m/day)
v_c	Average channel velocity (m s^{-1})
$v_{ch,pk}$	Peak channel velocity (m/s)
v_d	Pesticide rate of diffusion or mixing velocity (m/day)
v_{lat}	Velocity of flow at the hillslope outlet ($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$)
v_{ov}	Overland flow velocity (m s^{-1})
v_r	Pesticide resuspension velocity (m/day)
v_s	Pesticide settling velocity (m/day)
v_{surf}	Surface runoff flow rate (m^3/s)
v_v	Pesticide volatilization mass-transfer coefficient (m/day)
$vol_{Q_{surf,f}}$	Volume of runoff after transmission losses (m^3)
$vol_{Q_{surf,i}}$	Volume of runoff prior to transmission losses (m^3)
vol_{thr}	Threshold volume for a channel of length L and width W (m^3)
vpd	Vapor pressure deficit (kPa)
vpd_{fr}	Vapor pressure deficit corresponding to $fr_{g,mx}$ (kPa)
vpd_{thr}	Threshold vapor pressure deficit above which a plant will exhibit reduced leaf conductance or reduced radiation-use efficiency (kPa)
w_1	Shape coefficient in retention parameter adjustments for soil moisture content
w_2	Shape coefficient in retention parameter adjustments for soil moisture content
$w_{actualup}$	Total plant water uptake for the day (mm H_2O)
$w_{actualup,ly}$	Actual water uptake for layer ly (mm H_2O)
$w_{crk,btm}$	Amount of water flow past the lower boundary of the soil profile due to bypass flow (mm H_2O)
w_{deep}	Amount of water percolating from the shallow aquifer into the deep aquifer (mm H_2O)
$w_{deep,mx}$	Maximum amount of water moving into the deep aquifer on day i (mm H_2O)
w_{demand}	Water uptake demand not met by overlying soil layers (mm H_2O)
w_{inf}	Amount of water entering the soil profile on a given day (mm H_2O)
w_{mobile}	Amount of mobile water in the layer (mm H_2O)
$w_{perc,ly}$	Amount of water percolating to the underlying soil layer on a given day (mm H_2O)
$w_{pump,dp}$	Amount of water removed from the deep aquifer by pumping (mm H_2O)
$w_{pump,sh}$	Amount of water removed from the shallow aquifer by pumping (mm H_2O)
w_{rchrg}	Amount of water entering the aquifer via recharge (mm H_2O)
w_{revap}	Amount of water moving into the soil zone in response to water deficiencies (mm H_2O)
$w_{revap,mx}$	Maximum amount of water moving into the soil zone in response to water deficiencies on day i (mm H_2O)
w_{seep}	Total amount of water exiting the bottom of the soil profile (mm H_2O)
$w_{up,ly}$	Potential water uptake for layer ly (mm H_2O)
$w'_{up,ly}$	Adjusted potential water uptake for layer ly (mm H_2O)
$w''_{up,ly}$	Potential water uptake when the soil water content is less than 25% of plant available water (mm H_2O)

附录 A 变量列表

$w_{up,z}$	Potential water uptake from the soil surface to a specified depth, z , on a given day (mm H ₂ O)
$w_{up,zl}$	Potential water uptake for the profile to the lower boundary of the soil layer (mm H ₂ O)
$w_{up,zu}$	Potential water uptake for the profile to the upper boundary of the soil layer (mm H ₂ O)
$width_{filtstrip}$	Width of filter strip (m)
$wstrs$	Water stress for a given day expressed as a fraction of total water demand
yld	Crop yield (kg/ha)
yld_{act}	Actual yield (kg ha ⁻¹)
$yld_{est,N}$	Nitrogen yield estimate (kg N/ha)
$yld_{est,Nprev}$	Nitrogen yield estimate from the previous year (kg N/ha)
yld_N	Amount of nitrogen removed in the yield (kg N/ha)
yld_P	Amount of phosphorus removed in the yield (kg P/ha)
$yld_{yr,N}$	Nitrogen yield target for the current year (kg N/ha)
yr_{sim}	Year of simulation (1 - yr_{tot})
yr_{tot}	Total number of calendar years simulated
yrs	Number of years of rainfall data used to obtain values for monthly extreme half-hour rainfalls
z	Depth below soil surface (mm)
z_1	Height of wind speed measurement (cm)
z_2	Height of wind speed measurement (cm)
z_{ch}	Inverse of the channel side slope
z_{fld}	Inverse of the flood plain side slope
z_g	Thickness of the gas film (m)
z_l	Thickness of the liquid film (m)
$z_{l,ly}$	Depth from the surface to the bottom of the soil layer (mm)
$z_{mid,ly}$	Depth from the soil surface to the middle of the layer (mm)
z_{om}	Roughness length for momentum transfer (cm)
z_{ov}	Roughness length for vapor transfer (cm)
z_p	Height of the humidity (psychrometer) and temperature measurements (cm)
z_{root}	Depth of root development in the soil (mm)
$z_{root,mx}$	Maximum depth for root development in the soil (mm)
z_{tot}	Depth to bottom of soil profile (mm)
z_w	Height of the wind speed measurement (cm)
z_d	Ratio of depth in soil to damping depth
α	Short-wave reflectance or albedo
α_0	Ratio of chlorophyll a to algal biomass ($\mu\text{g chl}a/\text{mg alg}$)
$\alpha_{0.5}$	Maximum half-hour rainfall expressed as a fraction of daily rainfall
$\alpha_{0.5L}$	Smallest half-hour rainfall fraction that can be generated on a given day
$\alpha_{0.5mon}$	Average maximum half-hour rainfall fraction for the month
$\alpha_{0.5U}$	Largest half-hour rainfall fraction that can be generated on a given day
α_1	Fraction of algal biomass that is nitrogen (mg N/mg alg biomass),
α_2	Fraction of algal biomass that is phosphorus (mg P/mg alg biomass)
α_3	Rate of oxygen production per unit of algal photosynthesis (mg O ₂ /mg alg)

α_4	Rate of oxygen uptake per unit of algae respired (mg O ₂ /mg alg)
α_5	Rate of oxygen uptake per unit NH ₄ ⁺ oxidation (mg O ₂ /mg N)
α_6	Rate of oxygen uptake per unit NO ₂ oxidation (mg O ₂ /mg N)
α_{bnk}	Bank flow recession constant or constant of proportionality
α_{gw}	Baseflow recession constant
α_{hill}	Slope of the hillslope segment (degrees)
α_{pet}	Coefficient in Priestley-Taylor equation
α_{plant}	Plant albedo (set at 0.23)
α_{soil}	Soil albedo
α_{tc}	Fraction of daily rainfall that occurs during the time of concentration
β_0	Coefficient for USGS regression equations for urban loadings
β_1	Coefficient for USGS regression equations for urban loadings
β_2	Coefficient for USGS regression equations for urban loadings
β_3	Coefficient for USGS regression equations for urban loadings
β_4	Coefficient for USGS regression equations for urban loadings
β_{deep}	Aquifer percolation coefficient
β_{eqP}	Slow equilibration rate constant (0.0006 d ⁻¹)
β_{min}	Rate coefficient for mineralization of the humus active organic nutrients
β_n	Nitrogen uptake distribution parameter
$\beta_{N,1}$	Rate constant for biological oxidation of ammonia nitrogen (day ⁻¹ or hr ⁻¹)
$\beta_{N,1,20}$	Rate constant for biological oxidation of ammonia nitrogen at 20°C (day ⁻¹ or hr ⁻¹)
$\beta_{N,2}$	Rate constant for biological oxidation of nitrite to nitrate (day ⁻¹ or hr ⁻¹)
$\beta_{N,2,20}$	Rate constant for biological oxidation of nitrite to nitrate at 20°C (day ⁻¹ or hr ⁻¹)
$\beta_{N,3}$	Rate constant for hydrolysis of organic nitrogen to ammonia nitrogen (day ⁻¹ or hr ⁻¹)
$\beta_{N,3,20}$	Local rate constant for hydrolysis of organic nitrogen to NH ₄ ⁺ at 20°C (day ⁻¹ or hr ⁻¹)
β_{NO3}	Nitrate percolation coefficient
β_p	Phosphorus uptake distribution parameter
$\beta_{P,4}$	Rate constant for mineralization of organic phosphorus (day ⁻¹ or hr ⁻¹)
$\beta_{P,4,20}$	Local rate constant for organic phosphorus mineralization at 20°C (day ⁻¹ or hr ⁻¹)
β_{pst}	Pesticide percolation coefficient
β_{rev}	Revap coefficient
β_{rsd}	Rate coefficient for mineralization of the residue fresh organic nutrients
β_{sa}	Coefficient for impoundment surface area equation
β_{trms}	Rate constant for nitrogen transfer between active and stable organic pools (1×10 ⁻⁵)
β_w	Water-use distribution parameter
$\chi_i(j)$	3 × 1 matrix for day <i>i</i> whose elements are residuals of maximum temperature (<i>j</i> = 1), minimum temperature (<i>j</i> = 2) and solar radiation (<i>j</i> = 3),
Δ	Slope of the saturation vapor pressure curve (kPa °C ⁻¹)
Δ_{algae}	Change in algal biomass concentration (mg alg/L)
Δ_{bio}	Potential increase in total plant biomass on a given day (kg/ha)
$\Delta_{bio_{act}}$	Actual increase in total plant biomass on a given day (kg/ha)

附录 A 变量列表

$\Delta g_{\ell, dcl}$ Rate of decline in leaf conductance per unit increase in vapor pressure deficit ($\text{m s}^{-1} \text{kPa}^{-1}$)

ΔLAI_i Leaf area added on day i (potential)

$\Delta LAI_{act,i}$ Actual leaf area added on day i

$\Delta NH4_{str}$ Change in ammonium concentration (mg N/L)

$\Delta NO2_{str}$ Change in nitrite concentration (mg N/L)

$\Delta orgN_{str}$ Change in organic nitrogen concentration (mg N/L)

$\Delta orgP_{str}$ Change in organic phosphorus concentration (mg P/L)

$\Delta O_{x, str}$ Change in dissolved oxygen concentration (mg O_2 /L)

Δpst_{lkwtr} Change in pesticide mass in the water layer (mg pst)

Δpst_{lksed} Change in pesticide mass in the sediment layer (mg pst)

Δpst_{rchwtr} Change in pesticide mass in the water layer (mg pst)

Δpst_{rchsed} Change in pesticide mass in the sediment layer (mg pst)

Δrsd Biomass added to the residue pool on a given day (kg ha^{-1})

$\Delta r_{ue, dcl}$ Rate of decline in radiation-use efficiency per unit increase in vapor pressure deficit ($\text{kg/ha} \cdot (\text{MJ/m}^2)^{-1} \cdot \text{kPa}^{-1}$ or $(10^{-1} \text{g/MJ}) \cdot \text{kPa}^{-1}$)

$\Delta solP_{str}$ Change in solution phosphorus concentration (mg P/L)

Δt Length of the time step (s)

δ Solar declination (radians)

δ_{gw} Delay time or drainage time for aquifer recharge (days)

$\delta_{ntr, ly}$ Residue decay rate constant

ε Emissivity

ε' Net emittance

ε_a Atmospheric emittance

$\varepsilon_{C:N}$ Residue C:N ratio in the soil layer

$\varepsilon_{C:P}$ Residue C:P ratio in the soil layer

$\varepsilon_{C: sed}$ Carbon enrichment ratio

ε_i 3×1 matrix of independent random components

$\varepsilon_{N: sed}$ Nitrogen enrichment ratio

$\varepsilon_{P: sed}$ Phosphorus enrichment ratio

$\varepsilon_{pst: sed}$ Pesticide enrichment ratio

ε_{sr} Radiation term for bare soil surface temperature calculation

ε_{vs} Vegetative or soil emittance

ϕ Latitude in radians

ϕ_d Drainable porosity of the soil (mm/mm)

ϕ_{fc} Porosity of the soil layer filled with water when the layer is at field capacity water content (mm/mm)

ϕ_{soil} Porosity of the soil (mm/mm)

γ Psychrometric constant ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$)

$\gamma_{ntr, ly}$ Nutrient cycling residue composition factor for layer ly

γ_{reg} Plant growth factor (0.0-1.0)

$\gamma_{sw, ly}$ Nutrient cycling water factor for layer ly

$\gamma_{tmp, ly}$ Nutrient cycling temperature factor for layer ly

γ_{wu}	Water deficiency factor
η	Evaporation coefficient (0.6)
$\eta_{midz,ly}$	Volatilization depth factor
$\eta_{nit,ly}$	Nitrification regulator
$\eta_{sw,ly}$	Nitrification soil water factor
$\eta_{mp,ly}$	Nitrification/volatilization temperature factor
$\eta_{vol,ly}$	Volatilization regulator
ϕ	Scaling factor for impact of soil water on damping depth
ϕ_n	Scaling factor for nitrogen stress equation
ϕ_p	Scaling factor for phosphorus stress equation
κ_1	CBOD deoxygenation rate (day^{-1} or hr^{-1})
$\kappa_{1,20}$	CBOD deoxygenation rate at 20°C (day^{-1} or hr^{-1})
κ_2	Reaeration rate for Fickian diffusion (day^{-1} or hr^{-1})
$\kappa_{2,20}$	Reaeration rate at 20°C (day^{-1} or hr^{-1})
κ_3	Settling loss rate of CBOD (day^{-1} or hr^{-1})
$\kappa_{3,20}$	Settling loss rate of CBOD at 20°C (day^{-1} or hr^{-1})
κ_4	Sediment oxygen demand rate ($\text{mg O}_2/(\text{m}^2\cdot\text{day})$)
$\kappa_{4,20}$	Sediment oxygen demand rate at 20°C ($\text{mg O}_2/(\text{m}^2\cdot\text{day})$ or $\text{mg O}_2/(\text{m}^2\cdot\text{hr})$)
λ	Latent heat of vaporization (MJ kg^{-1})
ℓ	Lag coefficient that controls influence of previous day's temperature on current day's temperature
ℓ_1	First shape coefficient for optimal leaf area development curve
ℓ_2	Second shape coefficient for optimal leaf area development curve
ℓ_{crk}	Lag factor for crack development during drying
ℓ_{sno}	Snow temperature lag factor
μ	Specific yield of the shallow aquifer (m/m)
μ_{10m}	Mean wind speed for the day at height of 10 meters (m s^{-1})
μ_a	Local specific growth rate of algae (day^{-1})
$\mu_{a,20}$	Local specific algal growth rate at 20°C (day^{-1} or hr^{-1})
μ_{max}	Maximum specific algal growth rate (day^{-1} or hr^{-1})
μ_{mon}	Mean daily rainfall ($\text{mm H}_2\text{O}$) for the month
$\mu_{dew_{mon}}$	Average dew point temperature for the month ($^\circ\text{C}$)
$\mu_{Dmx_{mon}}$	Average daily maximum temperature of the month on dry days ($^\circ\text{C}$)
$\mu_{Drad_{mon}}$	Average daily solar radiation of the month on dry days (MJ m^{-2})
$\mu_{mn_{mon}}$	Average daily minimum temperature for the month ($^\circ\text{C}$)
$\mu_{mx_{mon}}$	Average daily maximum temperature for the month ($^\circ\text{C}$)
$\mu_{rad_{mon}}$	Average daily solar radiation for the month (MJ m^{-2})
$\mu_{tmp_{mon}}$	Mean air temperature for the month ($^\circ\text{C}$)
μ_w	Wind speed (m/s)
$\mu_{Wmx_{mon}}$	Average daily maximum temperature of the month on wet days ($^\circ\text{C}$)
$\mu_{wnd_{mon}}$	Average wind speed for the month (m s^{-1})
$\mu_{Wrad_{mon}}$	Average daily solar radiation of the month on wet days (MJ m^{-2})
v	Apparent settling velocity (m/day)

附录 A 变量列表

θ_e	Fraction of water volume that excludes anions
θ_v	Volumetric moisture content (mm/mm)
θ_z	Zenith angle (radians)
$\rho_0(j,k)$	Correlation coefficient between variables j and k on the same day where j and k may be set to 1 (maximum temperature), 2 (minimum temperature) or 3 (solar radiation)
$\rho_1(j,k)$	Correlation coefficient between variable j and k with variable k lagged one day with respect to variable j
ρ_a	Local respiration rate of algae (day^{-1})
$\rho_{a,20}$	Local algal respiration rate at 20°C (day^{-1} or hr^{-1})
ρ_{air}	Air density (kg m^{-3})
ρ_b	Soil bulk density (Mg m^{-3})
ρ_s	Particle density (Mg m^{-3})
ρ_w	Density of water (1 Mg m^{-3})
σ	Stefan-Boltzmann constant ($4.903 \times 10^{-9} \text{ MJ m}^{-2} \text{ K}^{-4} \text{ d}^{-1}$)
σ_1	Local settling rate for algae (m/day)
$\sigma_{1,20}$	Local algal settling rate at 20°C (m/day or m/hr)
σ_2	Benthos (sediment) source rate for soluble P ($\text{mg P/m}^2\text{-day}$ or $\text{mg P/m}^2\text{-hr}$)
$\sigma_{2,20}$	Benthos (sediment) source rate for soluble phosphorus at 20°C ($\text{mg P/m}^2\text{-day}$ or $\text{mg P/m}^2\text{-hr}$)
σ_3	Benthos (sediment) source rate for ammonium ($\text{mg N/m}^2\text{-day}$ or $\text{mg N/m}^2\text{-hr}$)
$\sigma_{3,20}$	Benthos (sediment) source rate for ammonium nitrogen at 20°C ($\text{mg N/m}^2\text{-day}$ or $\text{mg N/m}^2\text{-hr}$)
σ_4	Rate coefficient of organic nitrogen settling (day^{-1} or hr^{-1})
$\sigma_{4,20}$	Local settling rate for organic nitrogen at 20°C (day^{-1} or hr^{-1})
σ_5	Rate coefficient for organic phosphorus settling (day^{-1} or hr^{-1})
$\sigma_{5,20}$	Local settling rate for organic phosphorus at 20°C (day^{-1} or hr^{-1})
σ_{mon}	Standard deviation of daily rainfall (mm H_2O) for the month
$\sigma_{mn_{mon}}$	Standard deviation for daily minimum temperature during the month ($^\circ\text{C}$)
$\sigma_{mx_{mon}}$	Standard deviation for daily maximum temperature during the month ($^\circ\text{C}$)
$\sigma_{rad_{mon}}$	Standard deviation for daily solar radiation during the month (MJ m^{-2})
ω	Angular velocity of the earth's rotation ($0.2618 \text{ radians h}^{-1}$)
ω_{imp}	Angular frequency in soil temperature variation
Ψ_{wf}	Wetting front matric potential (mm)

附录 B 参考文献

附录 B 参考文献

- Allen, R.G. 1986. A Penman for all seasons. *J. Irrig. and Drain Engng.*, ASCE, 112(4): 348-368.
- Allen, P.M., J. Arnold, E. Jakubowski. 1999. Prediction of stream channel erosion potential. *Environmental and Engineering Geoscience* 5:339-351.
- Allen, R.G., M.E. Jensen, J.L. Wright, and R.D. Burman. 1989. Operational estimates of evapotranspiration. *Agron. J.* 81:650-662.
- American Public Health Association. 1985. Standard methods for the examination of water and wastewater, 16th edition. American Public Health Association, Inc.
- American Society for Testing and Materials. 1995. Annual book of ASTM standards, Vol. 04.08, Designation: D 5852-5. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA. p. 653-657.
- Anderson, E.A. 1976. A point energy and mass balance model of snow cover. NOAA Technical Report NWS 19, U.S. Dept. of Commerce, National Weather Service.
- Arnold, J.G., P.M. Allen, and G. Bernhardt. 1993. A comprehensive surface-groundwater flow model. *J. Hydrol.* 142:47-69.
- Arnold, J.G. and J.R. Williams. 1995. SWRRB—A watershed scale model for soil and water resources management. p. 847-908. In V.P. Singh (ed) *Computer models of watershed hydrology*. Water Resources Publications.
- Arnold, J.G., J.R. Williams and D.R. Maidment. 1995. Continuous-time water and sediment-routing model for large basins. *Journal of Hydraulic Engineering* 121(2):171-183.
- Arnold, J.G., J.R. Williams, A.D. Nicks, and N.B. Sammons. 1990. SWRRB: A basin scale simulation model for soil and water resources management. Texas A&M Univ. Press, College Station, TX.
- Azevedo, J., and P.R. Stout. 1974. Farm animal manures: An overview of their role in the agricultural environment (Service Manual no. 44). University of California, Agricultural Experiment Station Extension.
- Bagnold, R.A. 1977. Bedload transport in natural rivers. *Water Resources Res.* 13(2):303-312.

- Barnard, J.D. 1948. Heat units as a measure of canning crop maturity. *The Canner* 106:28.
- Barrow, N.J. and T.C. Shaw. 1975. The slow reactions between soil and anions. 2. Effect of time and temperature on the decrease in phosphate concentration in soil solution. *Soil Sci.* 119:167-177.
- Bengston, L. 1981. Snowmelt-generated runoff in urban areas. p. 444-451. *In* B.C. Yen (ed.) *Urban stormwater hydraulics and hydrology: proceedings of the Second International Conference on Urban Storm Drainage, held at Urbana, Illinois, USA, 15-19 June 1981.* Water Resources Publications, Littleton, CO.
- Boswell, V.G. 1926. The influence of temperature upon the growth and yield of garden peas. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.* 23:162-168.
- Boswell, V.G. 1929. Factors influencing yield and quality of peas—Biophysical and biochemical studies. *Maryland Agr. Exp. Sta. Bul.* 306.
- Bouma, J. and J. Loveday. 1988. Chapter 5: Characterizing soil water regimes in swelling clay soils. p. 83-96. *In* L.P. Wilding and R. Puentes (ed). *Vertisols: their distribution, properties, classification and management.* Texas A&M University Printing Center, College Station, TX.
- Bouwer, H. 1969. Infiltration of water into nonuniform soil. *Journal Irrigation and Drainage Div., ASCE* 95(IR4):451-462.
- Bowie, G.L. W.B. Mills, D.B. Porcella, C.L. Campbell, J.R. Pagenkopt, G.L. Rupp, K.M. Johnson, P.W.H. Chan, and S.A. Gherini. 1985. Rates, constants, and kinetic formulations in surface water quality modeling, 2nd ed. EPA/600/3-85/040, U.S. Environmental Protection Agency, Athens, GA.
- Brakensiek, D.L. 1967. Kinematic flood routing. *Transactions of the ASAE* 10(3):340-343.
- Bronswijk, J.J.B. 1989. Prediction of actual cracking and subsidence in clay soils. *Soil Science* 148:87-93.
- Bronswijk, J.J.B. 1990. Shrinkage geometry of a heavy clay soil at various stresses. *Soil Science Soc. Am. J.* 54:1500-1502.

附录 B 参考文献

- Brown, L.C. and T.O. Barnwell, Jr. 1987. The enhanced water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS documentation and user manual. EPA document EPA/600/3-87/007. USEPA, Athens, GA.
- Brunt, D. 1932. Notes on radiation in the atmosphere. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 58: 389-418.
- Brunt, D. 1952. *Physical and dynamical meteorology*, 2nd ed. University Press, Cambridge.
- Brutsaert, W. 1975. Comments on surface roughness parameters and the height of dense vegetation. *J. Meteorol. Soc. Japan* 53:96-97.
- Campbell, G.S. 1985. *Soil physics with BASIC: transport models for soil-plant systems*. Elsevier, Amsterdam.
- Carslaw, H.S. and J.C. Jaeger. 1959. *Conduction of heat in solids*. Oxford University Press, London.
- Chapra, S.C. 1997. *Surface water-quality modeling*. McGraw-Hill, Boston.
- Chow, V.T. 1959. *Open-channel hydraulics*. McGraw-Hill, New York.
- Chow, V.T., D.R. Maidment, and L.W. Mays. 1988. *Applied hydrology*. McGraw-Hill, Inc., New York, NY.
- Churchill, M.A., H.L. Elmore, and R.A. Buckingham. 1962. The prediction of stream reaeration rates. *International Journal of Air and Water Pollution*. 6: 467-504.
- Cluis, D., P. Couture, R. Bégin, and S.A. Visser. 1988. Potential eutrophication assessment in rivers; relationship between produced and exported loads. *Schweiz. Z. Hydrol.* 50:166-181.
- Cope, J.T., C.E. Evans, and H.C. Williams. 1981. Soil test fertility recommendations for Alabama crops. *Alabama Agric. Station Circular No.* 251.
- Cross, H.Z. and M.S. Zuber. 1972. Prediction of flowering dates in maize based on different methods of estimating thermal units. *Agronomy Journal* 64:351-355.
- Cunge, J.A. 1969. On the subject of a flood propagation method (Muskingum method). *J. Hydraulics Research* 7(2):205-230.

- Danckwerts, P.V. 1951. Significance of liquid-film coefficients in gas absorption. *Ind. Eng. Chem.* 43:1460-1467.
- Dingman, S.L. 1994. *Physical hydrology*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ.
- Domenico, P.A. and F.W. Schwartz. 1990. *Physical and chemical hydrology*. John Wiley & Sons, New York, NY.
- Doorenbos, J. and W.O. Pruitt. 1977. Guidelines for predicting crop water requirements. *FAO Irrig. and Drain. Paper No. 24*, 2nd ed. FAO, Rome.
- Driver, N.E. and G.D. Tasker. 1988. Techniques for estimation of storm-runoff loads, volumes, and selected constituent concentrations in urban watersheds in the United States. U.S. Dept. of the Interior, U.S. Geological Survey: Books and Open-File Reports Section 88-191.
- Dudal, R. and H. Eswaran. 1988. Chapter 1: Distribution, properties and classification of vertisols. p. 1-22. *In* L.P. Wilding and R. Puentes (ed). *Vertisols: their distribution, properties, classification and management*. Texas A&M University Printing Center, College Station, TX.
- Duffie, J.A. and W.A. Beckman. 1980. *Solar engineering of thermal processes*. Wiley, N.Y.
- Easterling, W.E., N.J. Rosenburg, M.S. McKenney, C.A. Jones, P.T. Dyke, and J.R. Williams. 1992. Preparing the erosion productivity impact calculator (EPIC) model to simulate crop response to climate change and the direct effects of CO₂. *Agricultural and Forest Meteorology* 59:17-34.
- Engman, E.T. 1983. Roughness coefficients for routing surface runoff. *Proc. Spec. Conf. Frontiers of Hydraulic Engineering*.
- Fiering, M.B. 1967. *Streamflow synthesis*. Harvard University Press, Cambridge.
- Godwin, D.C., C.A. Jones, J.T. Ritchie, P.L.G. Vlek, and L.G. Youngdahl. 1984. The water and nitrogen components of the CERES models. p. 95-100. *In* Proc. Intl. Symp. on Minimum Data Sets for Agrotechnology Transfer, March 1983, Patancheru, India. Intl. Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics.

附录 B 参考文献

- Green, W.H. and G.A. Ampt. 1911. Studies on soil physics, 1. The flow of air and water through soils. *Journal of Agricultural Sciences* 4:11-24.
- Haltiner, G.J. and F.L. Martin. 1957. *Dynamical and physical meteorology*. McGraw-Hill, New York.
- Hanson, G.J. 1990. Surface erodibility of earthen channels at high stresses. Part II-Developing an in situ testing device. *Trans. ASAE* 33:132-137.
- Hanson, G.J. 1991. Development of a jet index method to characterize erosion resistance of soils in earthen spillways. *Trans. ASAE* 34:2015-2020.
- Hargreaves, G.H. 1975. Moisture availability and crop production. *Trans. ASAE* 18: 980-984.
- Hargreaves, G.L., G.H. Hargreaves, and J.P. Riley. 1985. Agricultural benefits for Senegal River Basin. *J. Irrig. and Drain. Engr.* 111(2):113-124.
- Hargreaves, G.H. and Z.A. Samani. 1982. Estimating potential evapotranspiration. Tech. Note, *J. Irrig. and Drain. Engr.* 108(3):225-230.
- Hargreaves, G.H. and Z.A. Samani. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture* 1:96-99.
- Hargreaves, G.L., G.H. Hargreaves, and J.P. Riley. 1985. Agricultural benefits for Senegal River Basin. *J. Irrig. and Drain. Engr.* 111(2):113-124.
- Harrison, L.P. 1963. Fundamental concepts and definitions relating to humidity. *In* A. Wexler (ed.) *Humidity and moisture*, Vol. 3. Reinhold Publishing Company, N.Y.
- Hershfield, D.M. 1961. Rainfall frequency atlas of the United States for durations from 30 minutes to 24 hours and return periods from 1 to 100 years. U.S. Dept. Commerce Tech. Paper No. 40.
- Higbie, R. 1935. The rate of adsorption of a pure gas into a still liquid during short periods of exposure. *Trans. Amer. Inst. Chem. Engin.* 31:365-389.
- Higgins, J.M. and B.R. Kim. 1981. Phosphorus retention models for the Tennessee Valley Authority reservoirs. *Wat. Resour. Res.* 17:571-576.
- Hooghoudt, S.B. 1940. Bijdrage tot de kennis van enige natuurkundige grootheden van de grond. *Versl. Landbouwk. Onderz.* 46: 515-707.

- Hubbert, M.K. 1940. The theory of groundwater motion. *Journal of Geology* 48: 785-944.
- Huber, W.C. and R.E. Dickinson. 1988. Storm water management model, version 4: user's manual. U.S. Environmental Protection Agency, Athens, GA.
- Iqbal, M. 1983. An introduction to solar radiation. Academic Press, N.Y.
- Jensen, M.E. (ed.) 1974. Consumptive use of water and irrigation water requirements. Rep. Tech. Com. on Irrig. Water Requirements, Irrig. and Drain. Div., ASCE.
- Jensen, M.E., R.D. Burman, and R.G. Allen (ed). 1990. Evapotranspiration and irrigation water requirements. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 70, ASCE, N.Y.
- Johnson, K.H. 1977. A predictive method for ground water levels. Master's Thesis, Cornell University, Ithica, N.Y.
- Jones, C.A. 1983. A survey of the variability in tissue nitrogen and phosphorus concentrations in maize and grain sorghum. *Field Crops Res.* 6:133-147.
- Jones, C.A. 1985. C-4 grasses and cereals. John Wiley & Sons, Inc., New York. 419 pp.
- Jones, C.A. C.V. Cole, A.N. Sharpley, and J.R. Williams. 1984. A simplified soil and plant phosphorus model. I. Documentation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48:800-805.
- Jury, W.A., W.R. Gardner, and W.H. Gardner. 1991. *Soil physics*, 5th edition. John Wiley & Sons, Inc. New York, N.Y.
- Knisel, W.G. 1980. CREAMS, a field scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems. USDA Conservation Research Rept. No. 26.
- Koorevaar, P., G. Menelik, and C. Dirksen. 1983. *Elements of Soil Physics*. Elsevier, Amsterdam.
- Lane, L.J. 1982. Distributed model for small semi-arid watersheds. *J. Hydraulic Eng., ASCE*, 108(HY10):1114-1131.
- Lane, L.J. 1983. Chapter 19: Transmission Losses. p.19-1–19-21. *In Soil Conservation Service. National engineering handbook, section 4: hydrology*. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.

附录 B 参考文献

- Larson, L.L., and E.L. Peck. 1974. Accuracy of precipitation measurements for hydrologic modeling. *Water Resources Research* 10:857-863.
- Leonard, R.A., W.G. Knisel., and D.A. Still. 1987. GLEAMS: Groundwater loading effects of agricultural management systems. *Trans. ASAE*. 30:1403-1418.
- Leonard, R.A. and R.D. Wauchope. 1980. Chapter 5: The pesticide submodel. p. 88-112. *In* Knisel, W.G. (ed). *CREAMS: A field-scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems*. U.S. Department of Agriculture, Conservation research report no. 26.
- Lewis, W.K. and W.G. Whitman. 1924. Principles of gas absorption. *Ind. Eng. Chem.* 16:1215-1220.
- Loehr, R.C. 1970. Drainage and pollution from beef cattle feedlots (Proceedings paper No. 7726). *Journal of the Sanitary Engineers Division, American Society of Civil Engineers*, 96 (SA6): 1295-1309.
- Magoon, C.A. and C.W. Culpepper. 1932. Response of sweet corn to varying temperatures from time of planting to canning maturity. U.S.D.A. tech. Bull. 312.
- Matalas, N.C. 1967. Mathematical assessment of synthetic hydrology. *Water Resources Res.* 3(4):937-945.
- McCree, K.J. 1972. The action spectrum, absorption and quantum yield of photosynthesis in crop plants. *Agric. Met.* 9:191-216.
- McElroy, A.D., S.Y. Chiu, J.W. Nebgen, A. Aleti, and F.W. Bennett. 1976. Loading functions for assessment of water pollution from nonpoint sources. *Environ. Prot. Tech. Serv., EPA 600/2-76-151*.
- Mein, R.G. and C.L. Larson. 1973. Modeling infiltration during a steady rain. *Water Resources Research* 9(2):384-394.
- Menzel, R.G. 1980. Enrichment ratios for water quality modeling. p. 486-492. *In* W.G. Knisel (ed.) *CREAMS, A field scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems*. U.S. Dept. Agric. Conserv. Res. Rept. No. 26.
- Merriam-Webster, Inc. 1996. *Merriam-Webster's collegiate dictionary*, 10th edition. Merriam-Webster, Inc. Springfield, MA.

- Mitchell, A.R. 1992. Shrinkage terminology: escape from 'normalcy'. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 56:993-994.
- Monsi, M. and T. Saeki. 1953. Uber den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und sein Bedeutung fur die Stoffproduktion. *Japan J. Bot.* 14:22-52.
- Monteith, J.L. 1965. Evaporation and the environment. p. 205-234. *In* The state and movement of water in living organisms. 19th Symposia of the Society for Experimental Biology. Cambridge Univ. Press, London, U.K.
- Monteith, J.L. 1972. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *J. Appl. Ecol.* 9:747-766.
- Monteith, J.L. 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britian. *Phil. Trans. Res. Soc. London Ser. B* 281:277-329.
- Monteith, J.L. 1981. Evaporation and surface temperature. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 107:1-27.
- Morison, J.I.L. 1987. Intercellular CO₂ concentration and stomatal response to CO₂. p. 229-251. *In* E. Zeiger, G.D. Farquhar and I.R. Cowan (ed.) *Stomatal function*. Standford University Press, Palo Alto, CA.
- Morison, J.I.L. and R.M. Gifford. 1983. Stomatal sensitivity to carbon dioxide and humidity. *Plant Physiol.* 71:789-796.
- Munns, D.N. and R.L. Fox. 1976. The slow reaction which continues after phosphate adsorption: Kinetics and equilibrium in some tropical soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 40:46-51.
- Murray, F.W. 1967. On the computation of saturation vapor pressure. *J. Appl. Meteor.* 6:203-204.
- Natural Resources Conservation Service Soil Survey Staff. 1996. National soil survey handbook, title 430-VI. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
- Nearing, M.A., B.Y. Liu, L.M. Risse, and X. Zhang. 1996. Curve number and Green-Ampt effective hydraulic conductivities. *Water Resources Bulletin* 32:125-136.
- Nicks, A.D. 1974. Stochastic generation of the occurrence, pattern and location of maximum amount of daily rainfall. p. 154-171. *In* Proc. Symp. Statistical

附录 B 参考文献

- Hydrology, Tucson, AZ. Aug.-Sept. 1971. USDA Misc. Publ. 1275. U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC.
- Northern Virginia Planning District Commission. 1979. Guidebook for screening urban nonpoint pollution management strategies: a final report prepared for Metropolitan Washington Council of Governments. Northern Virginia Planning District Commission, Falls Church, VA.
- Nürnberg, G.K. 1984. The prediction of internal phosphorus load in lakes with anoxic hypolimnia. *Limnol. Oceanogr.* 29:111-124.
- O'Connor, D.J. and W.E. Dobbins. 1958. Mechanism of reaeration in natural streams. *Trans. ASCE.* 123:641-684.
- Overton, D.E. 1966. Muskingum flood routing of upland streamflow. *Journal of Hydrology* 4:185-200.
- Owens, M. R.W. Edwards, and J.W. Gibbs. 1964. Some reaeration studies in streams. *International Journal of Air and Water Pollution* 8:469-486.
- Paine, M.D. 1973. Confined animals and public environment (Great Plains Beef Cattle Feeding Handbook, GPE-7000/EC-72-246). Lincoln: University of Nebraska, College of Agriculture, Cooperative Extension Service.
- Panuska, J.C. and D.M. Robertson. 1999. Estimating phosphorus concentration following alum treatment using apparent settling velocity. *Lake and Reserv. Manage.* 15:28-38.
- Penman, H.L. 1956. Evaporation: An introductory survey. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 4:7-29.
- Perrin de Brichambaut, Chr. 1975. *Cahiers A.F.E.D.E.S., supplément au no 1.* Editions Européennes Thermique et Industrie, Paris.
- Phillips, E.E. 1950. Heat summation theory as applied to canning crops. The
- Pitt, R. 1979. Demonstration of non-point pollution abatement through improved street cleaning practices. EPA-600/2-79-161 (NTIS PB80-108988), U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH.
- Plate, E.J. 1971. Aerodynamic characteristics of atmospheric boundary layers. U.S. Atomic Energy Comm., Critical Review Series, TID-25465. 190 pp.

- Priestley, C.H.B. and R.J. Taylor. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Mon. Weather Rev.* 100:81-92.
- Rallison, R.E. and N. Miller. 1981. Past, present and future SCS runoff procedure. p. 353-364. In V.P. Singh (ed.). *Rainfall runoff relationship*. Water Resources Publication, Littleton, CO.
- Rajan, S.S.S. and R.L. Fox. 1972. Phosphate adsorption by soils. 1. Influence of time and ionic environment on phosphate adsorption. *Commun. Soil. Sci. Plant Anal.* 3:493-504.
- Rast, W. and Lee, G.F. 1978. Summary analysis of the North American project (US portion) OECD eutrophication project: nutrient loading-lake response relationships and trophic state indices. USEPA Corvallis Environmental Research Laboratory, Corvallis, OR. EPA-600/3-78-008.
- Rawls, W.J. and D.L. Brakensiek. 1985. Prediction of soil water properties for hydrologic modeling. p. 293-299. In E.B. Jones and T.J. Ward (eds). *Watershed management in the 80's*. ASCE, New York, N.Y.
- Reddy, K.R., R. Khaleel, M.R. Overcash, and P.W. Westerman. 1979. A nonpoint source model for land areas receiving animal wastes: II. Ammonia volatilization. *Trans. ASAE* 22:1398-1404.
- Richardson, C.W. 1981. Stochastic simulation of daily precipitation, temperature, and solar radiation. *Water Resources Res.* 17(1):182-190.
- Richardson, C.W. 1982. Dependence structure of daily temperature and solar radiation. *Trans. ASAE* 25(3):735-739.
- Richardson, C.W. and D.A. Wright. 1984. WGEN: a model for generating daily weather variables. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS-8.
- Ritchie, J.T. 1972. A model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resour. Res.* 8:1204-1213.
- Rosenburg, N.J., B.L. Blad, and S.B. Verma. 1983. *Microclimate: the biological environment*, 2nd ed. John Wiley & Sons, New York.

附录 B 参考文献

- Ross, J. 1975. Radiative transfer in plant communities. p. 13-55 In J.L. Monteith (ed.) *Vegetation and the atmosphere*, Vol. 1. Academic Press, London.
- Sangrey, D.A., K.O. Harrop-Williams, and J.A. Klaiber. 1984. Predicting ground-water response to precipitation. *ASCE J. Geotech. Eng.* 110(7): 957-975.
- Seligmand, N.G. and H. van Keulen. 1981. PAPRAN: A simulation model of annual pasture production limited by rainfall and nitrogen. p. 192-221. In M.J. Frissel and J.A. van Veedts. (eds) *Simulation of nitrogen behaviour of soil-plant systems*, Proc. Workshop. Wageningen, Jan.-Feb. 1980.
- Sharpley, A.N. 1982. A prediction of the water extractable phosphorus content of soil following a phosphorus addition. *J. Environ. Qual.* 11:166-170.
- Sharpley, A.N., C. Gray, C.A. Jones, and C.V. Cole. 1984. A simplified soil and plant phosphorus model. II. Prediction of labile, organic, and sorbed P amounts. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48:805-809.
- Sharpley, A.N. and J.K. Syers. 1979. Phosphorus inputs into a stream draining an agricultural watershed: II. Amounts and relative significance of runoff types. *Water, Air and Soil Pollution* 11:417-428.
- Sharpley, A.N. and J.R. Williams, eds. 1990. *EPIC-Erosion Productivity Impact Calculator*, 1. model documentation. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Tech. Bull. 1768.
- Sloan, P.G. and I.D. Moore. 1984. Modeling subsurface stormflow on steeply sloping forested watersheds. *Water Resources Research.* 20(12): 1815-1822.
- Sloan, P.G., I.D. Morre, G.B. Coltharp, and J.D. Eigel. 1983. Modeling surface and subsurface stormflow on steeply-sloping forested watersheds. *Water Resources Inst. Report 142*. Univ. Kentucky, Lexington.
- Smedema, L.K. and D.W. Rycroft. 1983. *Land drainage—planning and design of agricultural drainage systems*, Cornell University Press, Ithica, N.Y.
- Soil Conservation Service. 1964. Chapter 17: Flood routing, Section 4, Hydrology, *National engineering handbook*. U.S. Department of Agriculture. U.S. Gov't Printing Office, Washington, D.C.

- Soil Conservation Service. 1972. Section 4: Hydrology In National Engineering Handbook. SCS.
- Soil Conservation Service Engineering Division. 1986. Urban hydrology for small watersheds. U.S. Department of Agriculture, Technical Release 55.
- Stanhill, G. and M. Fuchs. 1977. The relative flux density of photosynthetically active radiation. *J. Appl. Ecol.* 14:317-322.
- Stefan, H.G. and E.B. Preud'homme. 1993. Stream temperature estimation from air temperature. *Water Resources Bulletin* 29(1): 27-45.
- Stockle, C.O. and J.R. Kiniry. 1990. Variability in crop radiation-use efficiency associated with vapor-pressure deficit. *Field Crops Res.* 25:171-181.
- Stockle, C.O., J.R. Williams, N.J. Rosenberg, and C.A. Jones. 1992. A method for estimating the direct and climatic effects of rising atmospheric carbon dioxide on growth and yield of crops: Part 1—Modification of the EPIC model for climate change analysis. *Agricultural Systems* 38:225-238.
- Stricker, H. and W. Brutsaert. 1978. Actual evapotranspiration over summer period in the 'Hupsel Catchment.' *J. Hydrol.* 39:139-157.
- Szeicz, G. 1974. Solar radiation for plant growth. *J. Appl. Ecol.* 11:617-636.
- Tetens, O. 1930. Uber einige meteorologische Begriffe. *Z. Geophys.* 6:297-309.
- Thomann, R.V. and J.A. Mueller. 1987. Principles of surface water quality modeling and control. Harper & Row Publishers, New York.
- Thomas, G.W. and M. McMahon. 1972. The relation between soil characteristics, water movement and nitrate concentration of ground water. Univ. of Kentucky Water Resources Institute Research Report No. 52, Lexington, KY.
- Thornthwaite, C.W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review* 38:55-94.
- USDA Soil Conservation Service. 1972. National Engineering Handbook Section 4 Hydrology, Chapters 4-10.
- USDA Soil Conservation Service. 1983. National Engineering Handbook Section 4 Hydrology, Chapter 19.

附录 B 参考文献

- USEPA. 1980. Lake restoration in Cobbossee watershed. Capsule Rept. Office of Water Planning and Standards Div., ORD, Cincinnati, OH. EPA-624/2-80-027.
- U.S. Environmental Protection Agency. 1983. Results of the nationwide urban runoff program; Volume 1 final report. NTIS PB84-185552, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C.
- Venetis, C. 1969. A study of the recession of unconfined aquifers. *Bull. Int. Assoc. Sci. Hydrol.* 14(4): 119-125.
- Walker, W.W. and J. Kihner. 1978. An empirical analysis of factors controlling eutrophication in midwestern impoundments. Paper presented at the International Symposium on the Environmental Effects of Hydraulic Engineering Works, Univ. of Tenn., Knoxville.
- Watson, D.J. 1947. Comparative physiological studies on the growth of field crops. 1. Variation in net assimilation rate and leaf area index between species and varieties and within and between years. *Ann. Bot. N.S.* 11:41-76.
- Westerstrom, G. 1981. Snowmelt runoff from urban plot. p. 452-459. In B.C. Yen (ed.) *Urban stormwater hydraulics and hydrology: proceedings of the Second International Conference on Urban Storm Drainage*, held at Urbana, Illinois, USA, 15-19 June 1981. Water Resources Publications, Littleton, CO.
- Westerstrom, G. 1984. Snowmelt runoff from Porson residential area, Lulea, Sweden. p. 315-323. In *Proceedings of the Third International Conference on Urban Storm Drainage* held at Chalmers University, Goteborg, Sweden, June 1984.
- Whitman, W.G. 1923. The two-film theory of gas adsorption. *Chem. Metallurg. Eng.* 29:146-148.
- Williams, J.R. 1969. Flood routing with variable travel time or variable storage coefficients. *Trans. ASAE* 12(1):100-103.
- Williams, J.R. 1975a. Sediment routing for agricultural watersheds. *Water Resour. Bull.* 11(5):965-974.

- Williams, J.R. 1975b. Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor. p. 244-252. In Present and prospective technology for predicting sediment yield and sources: Proceedings of the sediment-yield workshop, USDA Sedimentation Lab., Oxford, MS, November 28-30, 1972. ARS-S-40.
- Williams, J.R. 1980. SPNM, a model for predicting sediment, phosphorus, and nitrogen yields from agricultural basins. *Water Resour. Bull.* 16(5):843-848.
- Williams, J.R. 1995. Chapter 25. The EPIC Model. p. 909-1000. In *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications. Highlands Ranch, CO.
- Williams, J.R. and R.W. Hann. 1973. HYMO, a problem-oriented computer language for building hydrologic models. *Water Resour. Res.* 8(1):79-85.
- Williams, J.R. and R.W. Hann. 1978. Optimal operation of large agricultural watersheds with water quality constraints. Texas Water Resources Institute, Texas A&M Univ., Tech. Rept. No. 96.
- Williams, J.R., C.A. Jones and P.T. Dyke. 1984. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. *Trans. ASAE* 27(1):129-144.
- Williams, J.R., A.D. Nicks, and J.G. Arnold. 1985. Simulator for water resources in rural basins. *Journal of Hydraulic Engineering* 111(6): 970-986.
- Winter, T.C. 1981. Uncertainties in estimating the water balance of lakes. *Water Resources Bulletin* 17:82-115.
- Wischmeier, W.H., C.B. Johnson, and B.V. Cross. 1971. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. *Journal of Soil and Water Conservation* 26:189-193.
- Wischmeier, W.H. and D.D. Smith. 1965. Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains. *Agriculture Handbook* 282. USDA-ARS

附录 B 参考文献

- Wischmeier, W.H., and D.D. Smith. 1978. Predicting rainfall losses: A guide to conservation planning. USDA Agricultural Handbook No. 537. U.S. Gov. Print. Office, Washington, D. C.
- Wright, J.L. and M.E. Jensen. 1972. Peak water requirements of crops in Southern Idaho. J. Irrig. and Drain. Div., ASCE, 96(IR1):193-201.