



SWAT 2009

理论基础

S.L.Neitsch J.G.Arnold

J.R.Kiniry J.R.Williams 著

龙爱华 邹松兵 许宝荣 陆志翔 尹振良 汪党献 译

肖洪浪 钟 勇 王蔚华 梁犁丽 李常斌 校



黄河水利出版社

SWAT 2009 理论基础

S. L. Neitsch J. G. Arnold J. R. Kiniry J. R. Williams 著
龙爱华 邹松兵 许宝荣 陆志翔 尹振良 汪党献 译
肖洪浪 钟 勇 王蔚华 梁犁丽 李常斌 校

黄河水利出版社

· 郑州 ·

内 容 提 要

本书概述了 SWAT 的发展与特点,分八章详细介绍了构建模型的方程、理论与方法,包括气候系统方程(能量平衡、大气水、天气发生器、气候情景);水文系统方程(地表径流、蒸散发、土壤水、地下水);营养物/杀虫剂方程(氮、磷、杀虫剂、细菌、碳)、侵蚀过程(沉积物搬运、营养物迁移、杀虫剂迁移、细菌迁移、水质参数)、土地覆盖/植被过程(生长周期、最佳生长状况、实际生长状况)、管理实践(常规管理、水管理、城镇、污水系统、过滤带与植草水道)、主河道过程(流量、泥沙、富营养化、杀虫剂、细菌、重金属的演算)、水体过程(蓄水、泥沙、营养物、杀虫剂、细菌)。

本书可供污染物评估、水文及水利工程、环境科学与工程、水资源评价与管理、气候变化影响评估等领域的科技工作者参考,也可作为高等院校相关教师、研究生、本科生的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

SWAT 2009 理论基础/(美)尼奇(Neitsch, S. L.)
等著;龙爱华等译. —郑州:黄河水利出版社,2011. 12
书名原文:Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009
ISBN 978 - 7 - 5509 - 0164 - 3

I. ①S… II. ①尼… ②龙… III. ①土壤污染 - 环境生态评价 - 评价模型②水污染 - 环境生态评价 - 评价模型 IV. ①X53②X52

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 260415 号

策划组稿:王 琦 电话:0371 - 66023343 E-mail:wq3563@163.com

出 版 社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371 - 66026940, 66020550, 66028024, 66022620(传真)

E-mail:hhslebs@126.com

承印单位:河南省瑞光印务股份有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:24.25

字数:560 千字

印数:1—1 000

版次:2012 年 6 月第 1 版

印次:2012 年 6 月第 1 次印刷

定价:78.00 元

前言

SWAT 作为一个在非点源污染模拟领域的国际性模型已持续 30 多年的发展,以美国农业部农业研究局与得克萨斯农工大学为主开发,包括美国环境保护署、美国自然资源保护局、美国国家海洋与大气管理局以及美国印第安事务局都为该模型做出了重要贡献,在世界范围内的许多大学与专家为该模型的发展做出了贡献。

SWAT 在国内的研究典范是国家重点基础研究发展规划项目“黄河流域水资源演化规律与可再生性维持机理”,通过借鉴其模型构建与应用,为我国水文模型的发展提供了思路。之后,SWAT 在我国湿润半湿润区、干旱半干旱区以及高寒区域进行了广泛的应用研究,涉及水质、泥沙、营养物和径流等方面的模拟与预测,通过与空间技术耦合,为缺资料流域的水资源评价提供了可能,在与生态过程、地下水过程与社会经济过程的耦合研究中有过大量成功的尝试。国内许多与水文水资源相关的研究机构和学者都对该模型进行过较为系统的研究。

本系列译著包括《SWAT 2009 理论基础》、《SWAT 2009 输入输出文件手册》与《ArcSWAT 2009 用户指南》三部,得到国家科技支撑计划课题(2008BAB42B09、2008BAB42B03、2011BAC07B05)、国家自然科学基金(40801021)、冻土工程国家重点实验室开放基金(SKLFSE200905)、兰州大学交叉学科青年创新研究基金(LZUJC200916)、中央高校基本科研业务费专项资金(LZUJBKY-2012-140)、兰州市科技支撑项目(2009KJLQ)联合资助。

本书翻译校稿工作非常艰辛,得到了很多领导和专家的帮助与指导,在此表示衷心的感谢。感谢中国科学院寒区旱区环境与工程研究所程国栋院士、康尔泗研究员、冯起研究员、赵文智研究员、陈仁升研究员、周茅先博士、赵亮博士的支持与帮助,感谢新疆维吾尔自治区水利厅邓铭江总工程师,感谢新疆水利水电规划设计管理局李湘权局长、章毅总工程师、雷雨高级工程师、谢蕾高级工程师、梁立功高级工程师、雪克莱提高级工程师,感谢新疆水文水资源局王志杰局长、苏宏超副局长、尤平达教高、王娇妍教高、马金玲高级工程师,感谢中国科学院新疆生态与地理研究所陈曦所长、张捷斌研究员、包安明研究员、许文强博士。在校稿中,得到了清华大学杨大文教授、北京大学郑春苗教授的热情鼓励与支持。同时,对网络 QQ 论坛【水科学(专家):108544773】群主左其亭教授及广大水科学行业的同仁们表示衷心感谢。该书原著的作者 S. L. Neitsch 教授、J. G. Arnold 教授、J. R. Kiniry 教授和 J. R. Williams 教授在本书的出版上提供了帮助,在此一并感谢。

由于译校者水平有限,书中还存在着不完善和需要改进的地方,也难免会存在一些问题,希望与学界的专家学者共同探讨,恳请读者批评指正,以便更好的完善与进步。

译校者

2012 年 2 月 25 日

单位说明

单位简写	单位全称	说明
km	kilometer	千米
m	meter	米
cm	centimeter	厘米
mm	millimeter	毫米
μm	micron meter	微米
ft	foot	英尺(长度单位) 1 ft = 0.304 8 m
km^2	square kilometer	平方千米(平方公里)
m^2	square meter	平方米
hm^2	hectare	公顷
acre		英亩(面积单位)
m^3	cubic meter	立方米
cm^3	cubic centimeter	立方厘米(体积单位)
L	litre	升
mL	millilitre	毫升
cc	cubic centimeter	容积单位 1 cc = 1 mL
$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	摄氏度
K		开氏温度
s	second	秒
min	minute	分(分钟)
h	hour	小时
d	day	天
month		月
a	year	年
Mg		兆克(质量单位)
kg	kilogram	千克

单位简写	单位全称	说明
g	gram	克
mg	milligram	毫克
μg		微克(质量单位)
t	metric tons	吨(公吨)
MJ		兆焦耳(热量单位)
kJ		千焦耳(热量单位)
J		焦耳(热量单位)
cfu	colony – forming unit	菌落形成单位
N		牛顿(简称牛)
heat unit		热单位
dd	decimal degree	十进制的度单位 dd = 度 + 分/60 + 秒/3 600
rad		弧度(角度单位) 1 rad ≈ 57.3°
°		度(角度单位)
ppm	parts per million	表示气体浓度或溶液浓度,百万分率 1 ppm = 1 mg/kg = 1 mg/L
ppb		表示气体浓度或溶液浓度 1 ppm = 1 000 ppb
AU		天文单位 1 AU = 1.496 × 10 ⁸ km
Pa		帕(是帕斯卡的简称) 压力单位
kPa		千帕(压力单位) 1 kPa = 10 ³ Pa
MPa		兆帕(压力单位)
atm		标准大气压(压力单位) 1 atm = 101 325 Pa
kmol		千摩尔(物质的量的单位)
mol	mole	摩尔(物质的量的单位)
μmol		微摩尔(物质的量的单位)
persons		人数
dS/m		电导率单位

目 录

前 言

单位说明

绪 论	(1)
第一节 SWAT 模型的发展	(1)
第二节 SWAT 模型概述	(3)
第一章 气 候	(15)
第一节 方程:能量	(15)
第二节 方程:大气水	(28)
第三节 方程:天气发生器	(36)
第四节 方程:气候情景定制	(51)
第二章 水 文	(56)
第一节 方程:地表径流	(56)
第二节 方程:蒸散发	(73)
第三节 方程:土壤水	(85)
第四节 方程:地下水	(98)
第三章 营养物/杀虫剂	(106)
第一节 方程:氮	(106)
第二节 方程:磷	(120)
第三节 方程:杀虫剂	(128)
第四节 方程:细菌	(131)
第五节 方程:碳	(137)
第四章 侵 蚀	(145)
第一节 方程:泥沙	(145)
第二节 方程:营养物迁移	(156)
第三节 方程:杀虫剂迁移	(162)
第四节 方程:细菌迁移	(169)
第五节 方程:水质参数	(172)
第五章 土地覆盖/植被	(176)
第一节 方程:生长周期	(176)
第二节 方程:最佳生长状况	(183)
第三节 方程:实际生长状况	(201)
第六章 管理措施	(207)
第一节 方程:常规管理	(207)

第二节 方程:水管理	(220)
第三节 方程:城镇	(224)
第四节 方程:污水系统	(231)
第五节 方程:过滤带和植草水道	(239)
第七章 主河道过程	(249)
第一节 方程:流量演算	(249)
第二节 方程:泥沙演算	(260)
第三节 方程:水流中的营养物质过程	(272)
第四节 方程:河流中的杀虫剂转化	(288)
第五节 方程:细菌演算	(295)
第六节 方程:重金属演算	(298)
第八章 水体	(299)
第一节 方程:蓄水演算	(299)
第二节 方程:水体中的泥沙	(309)
第三节 方程:水体中的营养物质	(312)
第四节 方程:水体中的杀虫剂	(318)
第五节 方程:水体中的细菌	(326)
附录 A 变量列表	(328)
附录 B 专业术语	(364)
附录 C 翻译工具书	(378)

绪 论

SWAT 由土壤(Soil) – 水(Water)评估(Assessment)工具(Tool)单词的首字母组成,是美国农业部(USDA)农业研究中心(Agricultural Research Service, ARS) Jeff Arnold 博士所开发的流域尺度模型。模型开发的最初目的是在具有不同土壤类型、土地利用和管理条件特征的大尺度复杂流域内,预测土地管理措施长期对产水、产沙及农业化学污染物负荷等的影响。为此,模型有以下特征:

(1) 基于物理机制。模型没有使用回归方程式来描述输入变量和输出变量之间的关系,而是需要输入流域内气象、土壤属性、地形、植被和土地管理措施等详细信息,直接模拟水流、泥沙运移、作物生长和营养物质循环等物理过程。

该方法的优点在于:①可模拟没有观测数据(如河流测量数据)的流域;②可量化输入参数(如管理措施、气候、植被等变化)对水质或其他变量的相对影响。

(2) 输入变量易获取。可用于研究诸如细菌迁移等较特殊过程,所需基本数据通常可从政府部门获得。

(3) 计算效率高。不用投入过多财力和时间,就可模拟特大流域或多种管理方案。

(4) 可对流域进行长期模拟。污染物累积效应及其对下游水体的影响常常需要数十年的运行结果。

SWAT 是一个连续时间模型,如长期的产量模型,但不能用于模拟详细的单事件洪水演算过程。

第一节 SWAT 模型的发展

SWAT 模型是在 SWRRB^① 模型(Simulator for Water Resources in Rural Basins)基础上发展而来,并集成了几个 ARS 模型特点(Williams et al., 1985; Arnold et al., 1990)。对其发展影响很大的模型有 CREAMS^② 模型(Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems)(Knisel, 1980)、GLEAMS^③ 模型(Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems)(Leonard et al., 1987)和 EPIC^④ 模型(Erosion – Produc-

① SWRRB 模型(Simulator for Water Resources in Rural Basins,农村流域水资源模型)是一个用于模拟流域中非点源物质运移的连续时间模型。

② 20 世纪 70 年代初,为了响应“清洁水行动”,USDA – ARS 联合全国各地多名科学家组织了一个多学科的研究队伍,开发了一个基于过程的非点源模拟模型。CREAMS 模型(Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems)是一个田间尺度模型,用于模拟不同土地管理对产水、产沙、营养物质及杀虫剂流失的影响。

③ GLEAMS 模型(Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems)是一个非点源模型,集中模拟地下水中的农药和营养物运移。

④ EPIC 模型(Erosion – Productivity Impact Calculator)最初开发的目的是模拟侵蚀对农作物生产力的影响,现在已发展为综合的农业管理、田间尺度非点源负荷模型。

tivity Impact Calculator) (Williams et al., 1984)。

SWRRB 模型起源于 CREAMS 的日降水水文模型,进行的主要改进有:①进行了扩展,可在多个子流域上同时运算来预测流域产水量;②增加了地下水径流或回归流组件;③增加了水库蓄水组件,用于计算坑塘和水库对产流与产沙的影响;④增加了气象模拟模块,综合了降水、太阳辐射和温度等数据,便于进行长期模拟以及提供特定时间和空间上的典型天气;⑤改进了洪峰流量的预测方法;⑥加入 EPIC 植物生长模块,用于考虑植物生长的年际变化;⑦增加了简单洪水演算组件;⑧增加了泥沙运移组件,模拟泥沙在坑塘、水库、河流和河谷中的运动;⑨集成了传输损失量的计算。

20 世纪 80 年代末,为了用于水质评估,SWRRB 模型引进了 GLEAMS 杀虫剂组件;可选的,用于估算洪峰流量的 SCS 法;新建的产沙方程,从而扩展了模型性能,可用于处理各种流域管理问题。

这时美国印第安事务局(the Bureau of Indian Affairs)急需一个模型来估算亚利桑那州及新墨西哥州的印第安保留地内水资源管理措施对下游的影响。SWRRB 模型可以应用于数百平方千米的流域,但该事务局为了能够用其模拟几千平方千米的流域,需将研究流域划分成几百个子流域。然而,SWRRB 模型最多可划分为 10 个子流域,且直接对子流域到流域出口的水和泥沙进行了演算。于是,ROTO(Routing Outputs to Outlet)模型问世(Arnold et al., 1995)。它连接多个 SWRRB 模型运行结果,并对穿过河道和水库的水流进行演算。ROTO 模型提供河段演算方法,通过将多个 SWRRB 运行结果“链接”在一起,克服了 SWRRB 模型对子流域数量的限制。尽管该方法很有效,但多个 SWRRB 文件的输入和输出非常烦琐,需要非常大的计算机存储量,且对于河道与水库演算而言,所有的 SWRRB 模型必须独立运行,随后才能将结果输入到 ROTO 模型。为解决上述问题,SWRRB 模型与 ROTO 模型整合,形成一个单独模型,即 SWAT。SWAT 保留了上述模型的所有特征,可进行广泛领域的模拟,这也突显出 SWRRB 模型的模拟价值。

SWAT 创建于 20 世纪 90 年代初,进行了多次修订和性能扩展。各版本的主要修订内容如下:

(1)SWAT 94.2:引入多个水文响应单元(Hydrologic Response Units,HRUs)。

(2)SWAT 96.2:管理措施选项中增加了自动施肥与自动灌溉操作;引入冠层截留;在作物生长模型中引进 CO_2 组件来分析气候变化的影响;增加了 Penman - Monteith 潜在蒸散发方程;引入了基于动力存储模型的土壤中的侧向流;增加了基于 QUAL2E 模型的河流中营养物水质方程和河流中的杀虫剂演算。

(3)SWAT 98.1:改进了融雪模块和河流中的水质计算;扩充了营养物循环模块;管理措施中增加了放牧、施用粪肥以及瓦管排水等选项;对模型在南半球的应用进行了修正。

(4)SWAT 99.2:改进了营养物循环模块以及稻田/湿地模块;增加了水库/坑塘/湿地中因沉降作用引起的营养物迁移量演算,河段水流的河岸调蓄,通过河段的金属演算;年份表示由后 2 位变成 4 位;增加了 SWMM 模型中的城镇累积/冲刷方程和 USGS 中的回归方程。

(5)SWAT 2000:增加了细菌运移模块和 Green & Ampt 下渗模块;改进了天气发生器;可以读取或生成日太阳辐射、相对湿度和风速等;可以读取或计算流域的潜在蒸散发;

提供多种潜在蒸散发计算方法;改进了高程带中的各种过程;能够对不限数量的多个水库进行模拟;增加了马斯京根演算法;修正了热带地区植被休眠期的计算。

(6)SWAT 2009: 改进了细菌运移模块;增加了天气预测情景模拟、日以下时间步长的降水量生成器;逐日 CN 计算中用到的滞留参数可能是土壤含水量或植被蒸散发的函数;更新了植被过滤带模型;改善了硝态氮与铵态氮干湿沉降的计算;增加了对当地污水系统的建模。

除上述改进外,模型界面有 Windows(Visual Basic)、GRASS 和 ArcView 等。SWAT 得到了广泛的验证。

第二节 SWAT 模型概述

SWAT 可以模拟流域内发生的各种物理过程。本部分对其进行了简要介绍,详细内容请查阅相关章节。

建模时可能需将流域划分成若干子流域。当流域内不同区域的土地利用或土壤属性等差异明显足以影响水文过程时,在模拟中就需划分子流域。通过划分子流域,可以对流域各区域从空间上进行相互对照。图 0-2 给出了图 0-1 所示流域的子流域划分图。

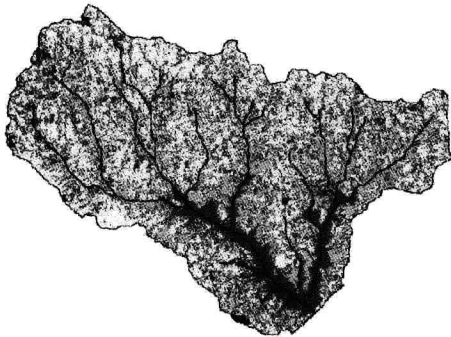


图 0-1 得克萨斯州东北部 Lake Fork 流域的土地利用分布和河网图

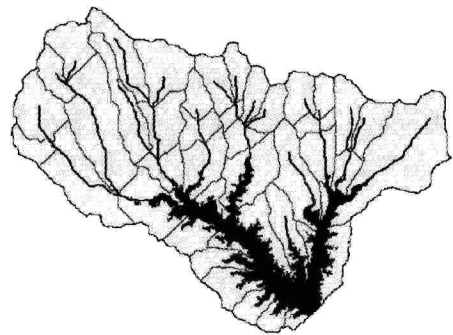


图 0-2 Lake Fork 流域的子流域划分

各子流域的输入有:气候、HRUs、坑塘/湿地、地下水及子流域排水的主河道或河段。水文响应单元在子流域内呈块状分布,包含有唯一的土地覆盖、土壤和管理措施。

在 SWAT 研究的各种问题中,水量平衡始终是流域内所有过程的驱动力。为了准确预测杀虫剂、泥沙或营养物等的运移,所模拟的水文循环必须与流域内的相一致。流域水文建模可划分为两个主要阶段:第一种是水文循环的陆地阶段,如图 0-3 所示,它控制每个子流域内水流、泥沙、营养物和杀虫剂负荷等向主河道的输入;第二种是水文循环的汇流阶段或演算阶段,指流域河网中的水流、泥沙等向出水口的运移过程。

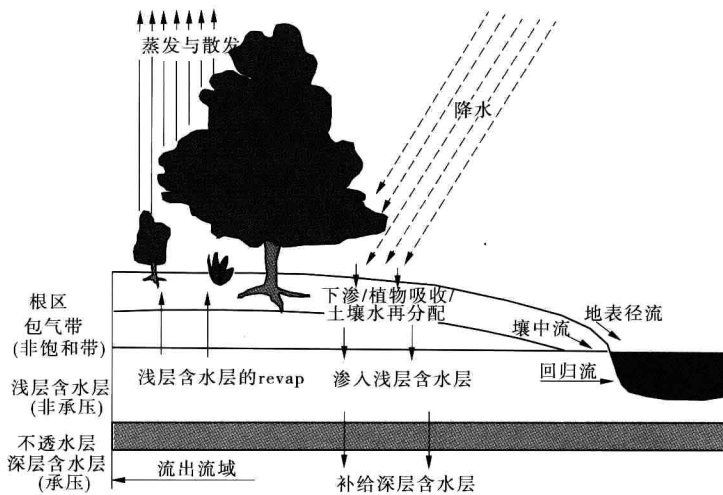


图 0-3 水文循环示意图

一、水文循环陆地阶段

SWAT 模拟的水文循环基于水量平衡方程进行：

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

式中： SW_t 表示土壤最终含水量，mm； SW_0 表示第 i 天的土壤初始含水量，mm； t 表示时间，d； R_{day} 表示第 i 天的降水量，mm； Q_{surf} 表示第 i 天的地表径流量，mm； E_a 表示第 i 天的蒸散发量，mm； W_{seep} 表示第 i 天从土壤剖面进入包气带的水量，mm； Q_{gw} 表示第 i 天回归流的水量，mm。

模型通过细分流域来反映不同作物和土壤类型的蒸散发差异。分别预测出各水文响应单元的径流量，然后演算得到流域的总径流量，可提高模拟精度，较好地描述水量平衡的物理过程。

图 0-4 给出了 SWAT 模拟水文循环陆地阶段的一般过程。以下部分对其包含的各种输入和过程进行简要说明。

(一) 气候

流域的气候提供了水文循环的水分和能量输入，控制着水量平衡，决定了水文循环不同要素的相对重要性。

SWAT 所需的气候变量包括日降水量、最高/最低气温、太阳辐射、风速和相对湿度。它们可以以实测数据记录方式输入或在模拟过程中由模型生成。

1. 天气发生器

日尺度的气象数据可由月均数据生成。可单独生成各子流域内一系列的气象数据，所生成的数据在子流域间不存在空间相关性。

• 降水量的生成。SWAT 运用 Nicks(1974)开发的模型可生成没有实测数据模拟中的日降水量数据，也可以填补实测记录中的缺失数据。降水量生成器运用一阶马尔科夫

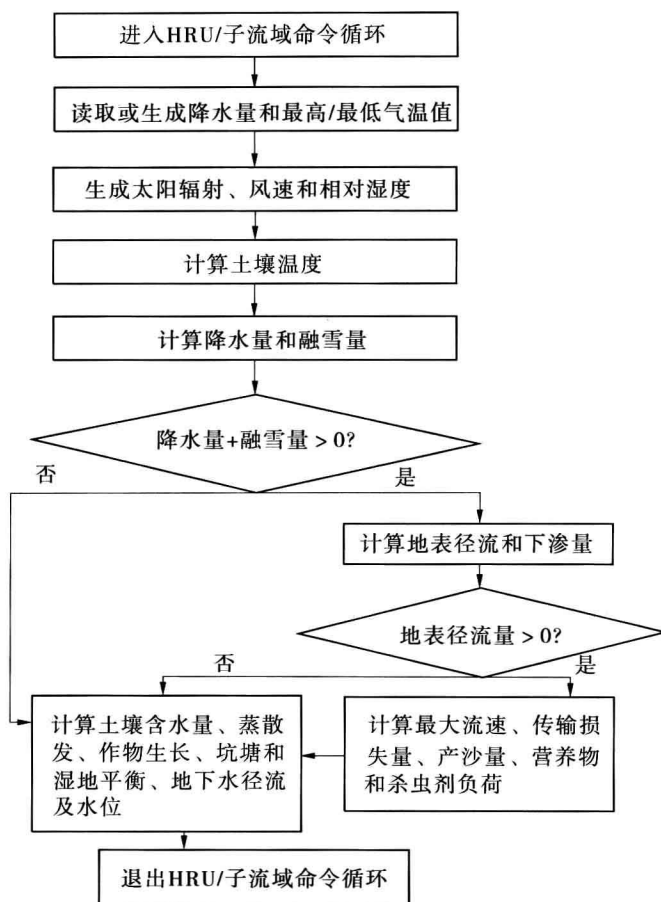


图 0-4 HRU/子流域命令串

链模型,通过比较所生成的随机数(0~1.0)与用户输入的逐月雨-晴概率,来定义当天是雨天还是晴天。如果为雨天,可根据偏态分布或修正的指数分布生成当天的降水量。

- 日以下时间步长的雨型。如果需要输入日以下时间步长的降水量,可运用双指数函数来反映暴雨的强度。该函数中,雨强随时间呈指数增大到最大值或峰值强度后,呈指数减小,直到暴雨结束。

- 气温和太阳辐射的生成。最高、最低气温和太阳辐射根据正态分布生成。发生器引入连续性方程,来考虑雨晴状况引起的气温和太阳辐射变化。在模拟雨天时,下调最高气温和太阳辐射,反之上调,使模型生成的长时段月均最高气温和月太阳辐射量与相应的输入值保持一致。

- 风速生成。给定月均风速时,可以根据修正的指数方程来生成日均风速。

- 相对湿度的生成。根据月均相对湿度,运用三角分布函数来生成日均相对湿度。同气温和辐射一样,需要考虑雨晴状况,对日均相对湿度进行调整。

2. 积雪

SWAT 运用日均气温将降水划分为降雨和冻雨/降雪。

- 积雪覆盖。SWAT 中的积雪覆盖模块从简单、单一积雪覆盖模型改进成较复杂的模型,考虑了由遮挡、飘雪、地形和土地覆盖引起的非均质覆盖。用户可定义雪深阈值,高于此阈值,积雪将覆盖整个区域;反之,积雪覆盖面积将依据面积消融曲线呈非线性减小。

- 融雪。融雪由气温、积雪温度、消融速率以及积雪覆盖面积等因子控制。当最高气温超过 0°C 时,积雪开始融化,融雪量根据积雪温度与最高气温的均值,再与积雪阈值温度求差值,构建线性函数进行计算。在估算径流和渗透时,融雪等价于降水。融雪的降水能量为 0,通过假定 24 h 内积雪均匀消融来估测洪峰流量。

- 高程带。模型最多可将子流域划分成 10 个高程带。在各高程带上,单独模拟积雪覆盖和融雪。由此,可以估测由地形对降水和气温影响引起的积雪覆盖和融雪差异。

3. 土壤温度

土壤温度影响土壤水运动和残留物的腐殖速率。需要计算土壤表面和各土层中心的日均土壤温度。土壤表面的温度是积雪覆盖、植被覆盖、残留物覆盖、裸土表面温度、土壤前一天表面温度的函数。土层温度是地表温度、年均气温以及恒温土层临界深度的函数。其中的恒温土层温度不受气候变化影响,临界深度为阻尼深度,取决于土块密度和土壤含水量。

(二) 水文

降水过程中,水分或被冠层截留或到达土壤表面。到达土壤表面的水分渗入土壤剖面或者形成地表径流,地表径流很快汇入河道,形成短期水文响应。下渗水流可能存留在土壤中,随后发生蒸散发,或由地下通道慢慢汇入地表水系统。在 HRU 中, SWAT 模拟的水流运动潜在路径如图 0-5 所示。

1. 冠层截留

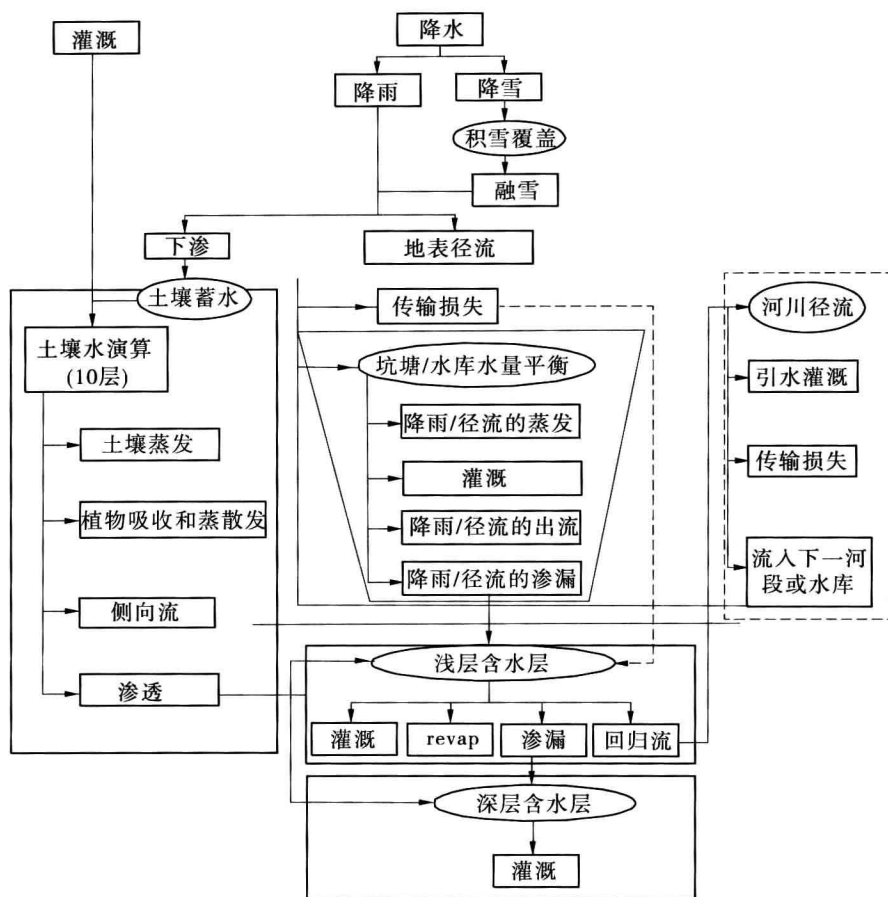
冠层截留指植物表面(即冠层)拦截的水量,消耗于蒸发。运用 SCS 曲线数法计算地表径流时,考虑冠层截留;而运用 Green & Ampt 等方法模拟下渗和径流时,必须单独模拟冠层截留。用户可在 SWAT 中输入对应于土地覆盖下最大叶面积指数的最大冠层截留量;模型运用该值和土地覆盖/作物生长时段的叶面积指数,来计算相应的最大截留量。计算蒸发量时,首先去除冠层截留量。

2. 下渗

下渗指水分从土壤表面到土壤剖面的垂向运动过程。伴随着下渗,土壤不断变湿,下渗速率不断减小,直到饱和。初始下渗速率取决于土壤的初始含水量,最终下渗速率等于土壤的饱和渗透系数。SCS 曲线数法计算地表径流时,基于日时间步长,不能直接模拟下渗,下渗量等于降水量减去地表径流量。Green & Ampt 下渗法需要通过更短时间步长的降水量数据模拟下渗,也无法直接模拟。

3. 再分配

再分配指降水或灌溉停止时,水分在土壤剖面中的持续运动。当整个土壤剖面的含水量相同时,停止再分配。SWAT 中的再分配模块使用蓄水演算方法来预测通过根区的各土层水量。当某土层的含水量超过田间持水量,且其下层土壤未饱和时,水流向下运动,或发生渗透,其流速受土层饱和和渗透系数控制。水分的再分配受土壤温度影响,如果某土层的温度等于或低于 0°C ,不再发生水分再分配。



4. 蒸散发

蒸散发指地表附近液态或固态水分变成气态水的所有过程。蒸散发包括河湖、裸土和植被的表面蒸发,植物叶片间的蒸散,冰雪表面的升华等。模型可单独计算土壤和植物的蒸发(Ritchie,1972)。土壤水的潜在蒸发运用潜在蒸散发和叶面积指数之间的函数关系式来计算,而其实际蒸发由土壤深度和含水量的指数函数来估测,植物蒸腾由潜在蒸散发和叶面积指数的线性函数关系式来估测。

● 潜在蒸散发。指在土壤水充分供给的情况下假定不受对流或热存储效应的微气候过程影响,植被生长完全均一的大面积区域上发生的蒸散发。模型中潜在蒸散发的3种估测方法:Hargreaves (Hargreaves et al., 1985)、Priestley - Taylor (Priestley and Taylor, 1972) 和 Penman - Monteith (Monteith, 1965)。

5. 壤中流

壤中流指地表以下、临界饱和带之上的水流。土壤剖面(0~2 m)壤中流同水分再分布一起计算。运用运动存储模型来预测各土层的壤中流,模型考虑了渗透系数、比降和土壤含水量的变化。

6. 地表径流

地表径流指沿坡面的水流。SWAT 运用逐日或日以下时间步长的降水量,来模拟各 HRU 的地表径流量和洪峰流量。

- 地表径流量的估算。可由修正的 SCS 曲线数法(USDA Soil Conservation Service, 1972)或 Green & Ampt 下渗法(Green and Ampt, 1911)来计算。在 SCS 曲线数法中, CN 值随土壤含水量呈非线性变化。当土壤含水量接近凋萎含水量时, CN 值下降,而当土壤含水量达到饱和时, CN 值接近 100。在 Green & Ampt 下渗法中,需要用日以下时间步长的降水量数据,通过湿润锋基质势和有效渗透系数之间函数关系式,来计算下渗量。未下渗水流形成地表径流。SWAT 可以估算冻土的径流量,冻土指第一土层温度小于 0°C 时的土壤。对于该土壤,模型将增加其径流量,但干燥时仍具有很大的下渗量。

- 洪峰流量。用修正的推理模型来计算。简言之,随着雨强瞬间达到 i 的降水持续进行,径流量逐渐增加直到汇流时间 t_c ,此时所有子流域的水流都到达流域出口。在修正的推理模型中,洪峰流量是子流域汇流时间内降雨量占日降水量的分数、日地表径流量及汇流时间的函数。其中,子流域汇流时间内降雨量占日降水量的分数通过随机方法构建的日降水总量函数来计算,汇流时间运用考虑了坡面漫流和河道水流的曼宁公式来估算。

7. 坑塘

坑塘指子流域内拦截地表径流的储水结构。其汇水区仅是所在子流域的一部分。模型中假定坑塘不在主河道上,不接受上游子流域水流补给。储水量是坑塘容量、逐日入流量和出流量、渗漏以及蒸发的函数。必需的输入有储水容量与填满时的表面积。未填满时的表面积是储水量的非线性函数。

8. 支流河道

支流河道子流域内的河道分为两类:干流河道和支流河道。支流河道指从干流分出的次级或更低级河道。各支流河道仅接受部分子流域排水,不接受地下水的补给。所有支流河道中的水流都会沿着干流排出。SWAT 运用支流河道的各种属性来确定子流域的汇流时间。

- 渗漏损失。渗漏损失量指地表水流通过河床时由于渗漏所损失的水量。它仅发生在部分时间受地下水补给或不受地下水补给的临时性或间歇性河道中。SWAT 运用 SCS 水文手册(USDA Soil Conservation Service, 1983)第 19 章中给出的 Lane's 方法,来估算渗漏损失量。河道中损失的水量是河道宽度、长度和径流历时的函数。当支流河道中发生渗漏损失时,需要调整径流量和最大流速。

9. 回归流

回归流又称基流,源于地下水径流。SWAT 将地下水划分为两个含水层系统:一是浅层非承压含水层,可形成回归流最终汇入流域内的河流;二是深层承压含水层,形成回归流最终汇入流域外的河流(Arnold et al., 1993)。渗透根区底部的水分分为两部分,分别补给上述各含水层。除回归流外,在非常干旱条件下浅层含水层中存储的水分可以补给土壤剖面或直接被植物利用。无论是浅层地下水还是深层地下水,都可以用泵抽取。

(三) 土地覆盖/植物生长

SWAT 利用单一植物生长模型来模拟所有类型的土地覆盖。在模型中分为一年生与

多年生植物。一年生植物的生长期从播种到收获,或累积热单位直至等于植物潜在热单位。多年生植物全年供养其根系生长,冬季进入冬眠,当日均气温超过所需最低气温或基温时又恢复生长。植物生长模型可用于评估根区水分和营养物质的迁移、植物的蒸散和生物量/产量。

1. 潜在生长量

某天植物生物量的潜在生长量定义为理想条件下的生物量增量,是所拦截能量与从能量向生物量的植物转化效率的函数。拦截能量通过太阳辐射和植物叶面积指数之间的函数来估计。

2. 潜在蒸散和实际蒸散

植物潜在蒸散的计算过程在蒸散发章节中详细介绍。实际蒸散是潜在蒸散和有效土壤水分的函数。

3. 营养物吸收

植物对 N/P 的利用通过供需方法进行估测。植物 N/P 的日需求量等于植物体内相应的最佳浓度与实际浓度的差。最佳浓度随生长阶段的不同而不同,如 Jones (1983) 所描述。

4. 生长胁迫

由于环境中的各种胁迫因子,植物常常无法达到潜在生长状况和产量。模型对水分、营养物质和温度胁迫下的生长量进行了估测。

(四) 侵蚀

各 HRU 内的侵蚀量和产沙量通过 MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation) 来估测 (Williams, 1975)。USLE 中将降水量作为侵蚀能力的指标,而 MUSLE 中运用径流量模拟侵蚀量和产沙量。这样改进的优点在于:提高了预测精度,去除了输沙率参数,可估算次暴雨事件的产沙量。模型提供了径流量和最大流速的估计,最大流速用于计算子流域面积上的径流侵蚀能力。在径流发生各天,都要重新计算作物管理因子,该因子是地表以上生物量、土壤表面残留物和植物最小 C 因子的函数。侵蚀方程的其他因子通过 Wischmeier & Smith (1978) 给出的方程进行估测。

(五) 营养物的运移和转化

SWAT 可模拟流域内多种形式 N/P 的运移和转化。在土壤中,不同形式 N 的相互转化如图 0-6 所示,土壤中 P 的转化如图 0-7 所示。营养物可以进入干流河道,或者通过地表径流和壤中流向下游迁移。

1. N 的运移和转化

SWAT 可模拟 HRUs 中 N 的不同过程。土壤中的不同 N 库如图 0-6 所示,植物对 N 的利用通过植物生长部分给出的供需方法来估测。除植物吸收外, $\text{NO}_3 - \text{N}$ 和有机 N 可以通过水流带出土壤。径流、壤中流和渗透水流中的 $\text{NO}_3 - \text{N}$ 通过该层中的水量和硝酸盐平均浓度来估算。运用 McElroy et al. (1976) 提出的负荷函数来计算随泥沙运移的有机 N 量,Williams and Hann (1978) 对其进行修订并应用到单独的径流事件模拟中。该负荷函数基于土壤表层有机 N 浓度、产沙量和土壤富集比,可估测有机 N 随径流的日损失量。富集比等于泥沙中的有机 N 浓度与土壤中相应浓度的比值。