

# 非点源模型中的水文模拟

## ——以 SWAT 模型在芦溪小流域的应用为例

胡远安, 程声通, 贾海峰

(清华大学 环境科学与工程系 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084)

**摘要:** 结合分散参数非点源模型 SWAT 在芦溪小流域的应用, 讨论了连续模拟非点源模型水文模块的计算结果。由讨论结果来看, SWAT 能够有效模拟长时间序列的水文过程。一般来说, 长期径流量模拟准确, 短期径流量的结果较差, 尤其是对日径流量的模拟存在着系统性的误差, 这主要是由模型的内部结构和数据的时间精度决定的。

**关键词:** SWAT; 分散参数模型; 非点源

**中图分类号:** X522      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001 - 6929(2003)05 - 0029 - 04

### Hydrologic Simulation in NPS Models :Case of Application of SWAT in Luxi Watershed

HU Yuan-an , CHENG Sheng-tong , JIA Hai-feng

(State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control ,Department of  
Environmental Science and Engineering ,Tsinghua University ,Beijing 100084 ,China)

**Abstract:** Based on the research of applying Soil and Water Assessment Tool(SWAT) ,a distributed-parameter model for non-point sources(NPS) ,in Luxi Watershed ,the output of the hydrologic module of continuous simulation model for NPS is discussed. The results suggested that SWAT could well describe the long-time hydrologic process. Generally speaking ,the output of the model fits the measured data better when the time step is longer ,and the systematical fault is found in daily runoff simulation. This is due to the inherit characteristics of the model and the time precision of the inputs.

**Key words:** SWAT; distributed-parameter model ; nonpoint source

狭义的非点源污染是指在降雨 - 径流的淋溶和冲刷作用下, 大气、地面和地下的污染物进入江河、湖泊和海洋等水体造成的污染。与点源污染相比, 非点源污染具有分布广泛、污染物不确定、监测困难等特点。目前, 非点源模型在非点源研究和管理中发挥着重要的作用。

早期的非点源模型以单次暴雨模型和常年平均模型为主, 前者如 AGNPS<sup>[1]</sup>, 后者如 USLE<sup>[2]</sup>。一般来说, 单次暴雨模型在实时降雨 - 径流 - 污染预测、极端情况下污染物的流失预测方面发挥着重要作用; 而常年平均模型则在识别污染频发地带、量化长期的非点源污染负荷等方面具有优势。随着非点源污染机理研究

和计算机技术的进一步发展, 长时间序列模拟模型逐渐得到广泛应用。长时间序列非点源模型在一定程度上可视为多个单次暴雨模拟模型的有机连接, 综合了前两者的优势, 但模拟内容也大大复杂化。

笔者结合芦溪小流域的非点源研究情况, 着重讨论分散参数非点源模型 SWAT(Soil and Water Assessment Tool) 在水文模拟方面的应用情况。

#### 1 研究区域概况

芦溪小流域位于江西省萍乡市芦溪县境内, 袁水(赣江主要支流)上游。流域面积约为 334 km<sup>2</sup>。流域内多山地丘陵, 上、下游落差达 1 700 多 m。主要土壤类型为红壤。大部分山地植被覆盖状况良好, 以常绿林为主; 部分丘陵原有植被遭到破坏, 但并未开垦, 植被以自然生长的草本植物为主; 耕地以水田为主, 其他类型(如旱地、菜地)所占比例不足 10%。流域内工、矿、企业不发达, 点源污染较少。

收稿日期: 2002 - 12 - 24

基金项目: 国家环境保护总局、江西省环境保护局科研基金资助项目; 清华大学环境科学与工程研究院 985 基金资助项目

作者简介: 胡远安(1977 - ), 女, 浙江东阳市人, 博士研究生。

流域出口即为芦溪水文站,可以提供径流量、降雨量数据。研究区域的应用资料包括: TM (Thematic Mapper) 影像,含 7 个波段数据; GIS 数据:1 250 000 等高线;1 1 000 000 土壤普查图; 其他数据:1996—1999 年流域内逐日降雨量,1996—1999 年流域出口日径流量,由统计年鉴或通过补充现场调查获得的各类数据等。

## 2 SWAT 模型水文模块

非点源模型 (SWAT) 是一个流域水文水质模型,适用于大流域的长时间序列连续模拟计算。其水文模块的模拟内容见图 1,建模的基本思想是总量平衡。来水包括降雨、降雪和流域外引水,出水包括地表径流、壤中流(侧向径流)和地下水反补给。流域含水量主要包括土壤含水量、地下水量。

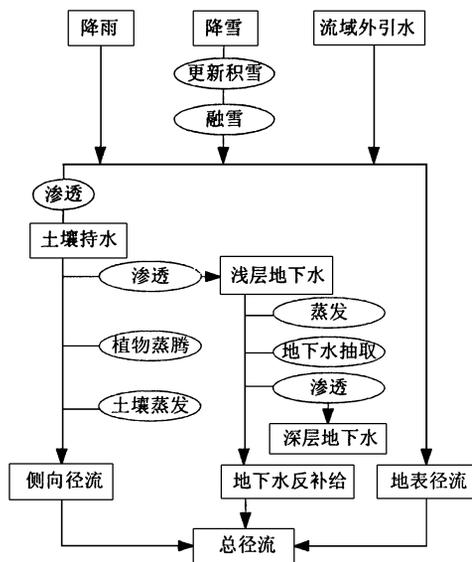


图 1 SWAT 水文模拟流程

Fig. 1 Processes of the hydrologic cycle in SWAT

### 2.1 SWAT 模型的基本公式<sup>[3]</sup>

地表径流的计算采用 SCS 模型,基本形式如下:

$$Q = \begin{cases} \frac{(P - S)^2}{P + (1 - )S}, & P > S \\ 0, & P \leq S \end{cases}$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

式中,  $Q$  为日地表径流量, mm;  $P$  为日降雨量, mm;  $S$  为降雨初损量, mm, 其中  $254$  为常数, 美国水土保持局提出的最佳值为 0.2;  $S$  为流域最大雨水滞留量, mm;  $CN$  为反映降雨前土壤蓄水特征的一个综合参数, 可以根据土地利用类型、土壤性质、植被覆盖、土壤前期湿润条件等查表得出。

壤中流主要包括渗透、孔隙流和侧向流。渗透是

最普遍、最重要的水量传输过程。当土壤中的水分含量超过最大持水量时,水分由上层土壤向下层土壤渗透。其基本公式为:

$$w = w_s \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{T}\right) \right]$$

式中,  $w$  为渗透水量, mm;  $w_s$  为土壤中超过最大持水量的部分, mm;  $t$  为模拟时间步长, d;  $T$  为所需渗透时间, d。对于某些特殊土壤或特殊条件下的土壤,水分通过土壤中缝隙的流动不可忽略。当表层土壤渗透率远远大于底层土壤渗透率时,水分往往以侧向流的形式传输,并有相当部分进入河道、湖泊等水体。

地下水的补给和反补给过程与渗透过程近似。

### 2.2 模型应用于小流域的局部修改

SWAT 模型对水田在蓄水期的降雨 - 径流过程的模拟过于简单,主要体现在:难以体现不同时期的蓄水要求;难以模拟灌溉措施等。相应地,笔者对 SWAT 的修改主要集中在水田模拟部分,将水田划分为蓄水与非蓄水时期分别进行计算。蓄水时期的水田具有以下特点:

a. 降雨 - 径流。在降雨时,只有在水田原有蓄水量及入水量(包括降雨和非降雨水量)的加和大于水田的最大容量时才产生径流;水田的最大容量可以根据水田的生长季节进行调节。

$$V = V_0 + V_p + V_i - V_{max} \cdot$$

式中,  $V$  为径流量;  $V_0$  为降雨前水田蓄水量;  $V_p$  为降雨形成的水田水量;  $V_i$  为降雨以外其他途径的注入水量;  $V_{max}$  为水田的年最大蓄水量;  $\cdot$  为不同生长时期最大蓄水量的调节系数。

b. 连续模拟无降雨时期的水田蓄水量。水量损失主要包括蒸发与下渗;当田间水深低于水深下限时进行灌溉,水源为地表水,包括河流与湖泊。

c. 蓄水、排水模拟。当水田的最大容量改变、蓄水期开始、蓄水期结束时,增加或释放水量。

## 3 SWAT 模型应用

### 3.1 非点源数据建库

#### 3.1.1 土地利用类型

主要利用遥感手段获取研究区域的土地利用信息。遥感数据源为 TM (Thematic Mapper) 影像,含 7 个波段数据。成像时间为 1998 - 10 - 03,图幅为东经 113.85°~ 114.25°,北纬 27.41°~ 27.71°。根据非点源污染的特征,采用分层分类法<sup>[4]</sup>获取以下信息:耕地、居民点:可能的污染负荷最大的土地利用类型;林地:研究区域内最主要的土地利用类型,林地的信息提取包括植被的类型及覆盖度等级等直接影响林

地污染负荷的信息; 主要的水库:可能对污染物的迁移产生显著的影响。研究中忽略道路等线性信息。

### 3.1.2 地形数据库与分析<sup>[5]</sup>

用于地形数据库与分析的数据源包括 1 250 000的等高线图和水系分布图。主要处理流程:等高线图和辅助信息,生成栅格式 DEM(Digital Elevation Model); 利用栅格式 DEM 进行水文、地形分析,主要包括:流域边界提取和流域面积计算、水系提取、河流比降和河长测量、坡长坡度计算等。

### 3.1.3 其他非点源数据的建库

除以上数据外,SWAT 的输入数据还包括气候气象、土壤类型、管理措施、农村居民点、点源、化肥农药性质、作物生长参数等。将数据主要分为以下三类:以栅格格式存贮的空间数据,如土壤类型;以 Coverage 格式存贮的空间数据,如气象站点分布;以 DBF 格式存贮的属性数据和监测数据,如土壤理化性质等。不同数据之间保有一定的独立性,以方便数据的修改与更新,并能够通过标识码相互链接。

### 3.2 子单元划分与计算

根据流域的自然产、汇流特征,将芦溪小流域划分为 137 个子流域,并进一步将每个子流域划分为 2~5 个 HRU(Hydrologic Response Unit)单元。在 SWAT 模型中,同一子流域具有相同气象因子(降雨量、气温、日照等),地形因素(坡度、坡长),河流河道特征,地下水特征等等。同一 HRU 除具有相同的土地利用类型与土壤类型外,也具有相同的作物类型、管理措施。同一子单元内的 HRU 空间分布状况被忽略。同一子流域内的河流具有相同的坡度、河宽、河床渗透率等。

在 GIS 的辅助下,提取各子流域、HRU 单元、河流、水体的有关参数,作为 SWAT 模型的输入,利用 1996—1999 年的降雨资料模拟研究区域的径流情况。

## 4 计算与讨论

### 4.1 长期径流量计算

由图 2 可知,1996—1999 年径流量的模拟十分准确,误差均在 ±3 % 以内;月径流量(图 3)的模拟结果

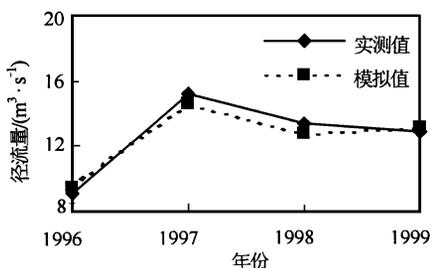


图 2 1996—1999 年径流量

Fig. 2 Annual runoff from 1996 to 1999

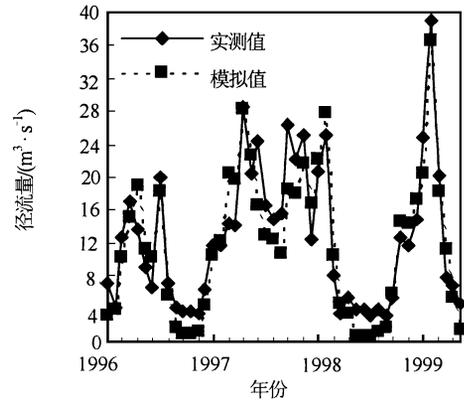


图 3 1996—1999 月径流量

Fig. 3 Monthly runoff from 1996 to 1999

略逊,直接对比模拟值(y)与实测值(x)得: $y = 0.95x - 0.21, R^2 = 0.86$ 。

SWAT 模型对枯水期的径流量普遍低估,最大误差发生在 1998 年 11 月,实测径流量为  $3.98 \text{ m}^3/\text{s}$ ,模拟值仅为  $0.82 \text{ m}^3/\text{s}$ ;丰水期模拟误差较小,基本上在 ±15 % 以内。造成这一现象的原因可能是:河道汇流模拟偏差较大,高估了河道的水量损失;流域内存在模拟过程中未曾考虑的水量调节因素。

非点源污染的主体是地表径流,因此在实际应用中,地表径流的模拟情况是非点源研究中最关心的课题。SWAT 的地表径流量与地下径流量可以根据输出文件分别统计;常规监测数据为总径流量,笔者采用递推法划分实际的流域日地表径流量与日地下水反补给量<sup>[6]</sup>。基本公式如下:

$$q_t = \alpha \cdot q_{t-1} + (1 - \alpha) / 2 \cdot (Q_t - Q_{t-1})$$

式中, $t$  为时间步长,1 d; $q_t$  为地表径流量; $Q_t$  为总径流量; $\alpha$  为递推系数。

芦溪小流域地表径流量的模拟情况见表 1,可以看出,SWAT 对长期径流的模拟结果比较准确。

表 1 1996—1999 年地表径流量

Table 1 Surface runoff from 1996 to 1999  $10^5 \text{ m}^3$

年份	模拟值	实测值	误差 / %
1996	1 080	1 030	4.85
1997	1 896	1 977	- 4.13
1998	1 311	1 377	- 4.79
1999	1 608	1 579	1.86
总计	5 895	5 963	- 1.14

### 4.2 短期径流量计算

SWAT 的日径流量模拟存在系统性的误差(如图 4 所示):模拟波峰提前,模拟曲线略陡于实测值。图 4 中所示时段内总径流量、第 1 次波峰、第 2 次波峰的模

拟误差依次为 0.10% ,7.44% ,6.17% 。

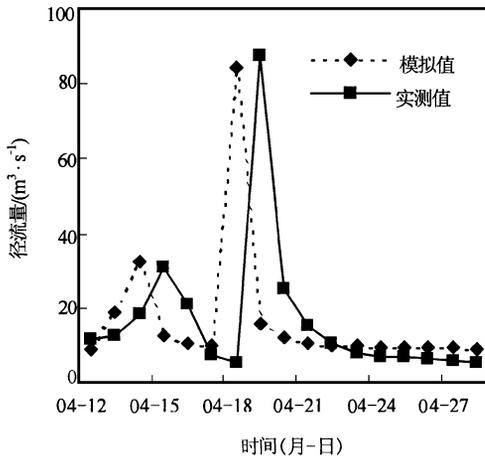


图 4 日径流量模拟与实测值

Fig. 4 Simulated and actual data of daily runoff

为了尽量排除径流过程中错峰的影响,选择完整的径流过程(起涨 - 峰值 - 回落)作为评价单位。在常规监测径流量中搜索符合下列条件的时间点  $t: Q_t, Q_{t+1} > Q_t$ 。以上述时间点为断点,1996—1999 年共被划分为 257 个时间单元,每个单元包括一个完整的降雨 - 径流过程。短期径流量的主要对比内容包括一次径流过程的总径流量和地表径流量。

总径流量:  $y = 0.92x + 5.01, R^2 = 0.85$

地表径流量:  $y = 0.94x + 1.05, R^2 = 0.81$

式中,  $y$  为模拟值;  $x$  为实测值。与长期径流量的模拟结果相比, SWAT 对较短时期内径流量, 模拟精度略低。

### 4.3 参数灵敏度分析

SWAT 模型水文部分参数众多, 笔者对主要的参数进行了扰动, 并观察扰动对径流量模拟的影响, 得到的初步结论见表 2。由表 2 可以看出, 随着径流量的细分和时间步长的缩短, 灵敏参数增加。

### 4.4 讨论

对模拟结果的观察可以发现, SWAT 模型对长期径流量的模拟较为准确, 而对短期径流的模拟精度较差。造成这一现象的主要因素可能包括:

a. SWAT 模型中部分关键计算公式的建立基于统计与概率分析, 如汇流坡长、当地的降雨量时间分布参数等, 这都造成了对于长时间多次降雨的总体模拟精度远高于某次独立的降雨。

b. 枯水期的影响在长期径流统计中被淹没。总的来说, SWAT 模型对丰水期的模拟结果较为准确, 枯水期的模拟精度较差, 即使是在一次径流过程中, 对峰

值的模拟精度也明显优于起涨和回落的径流量估算(图 4), 但由于丰水期的水量远大于枯水期, 枯水期的误差在长时间的径流量(年)统计中被淹没。

表 2 径流量的灵敏参数

Table 2 Parameters sensitive to runoff

输出项	主要灵敏参数
长期总径流量	气象输入: 气温、日照、湿度; 植被蒸腾、土壤蒸发的有关参数, 如植被类型、 叶面积指数、土壤蒸发补偿系数等
长期地表径流量	影响长期总径流量的所有参数; CN 值
长期地下水补给量	影响长期地表径流量的所有参数; 地下水对上层干旱土壤的反蒸发系数、反蒸发 发生的阈值; 地下水对土壤、植被蒸发的补偿系数
短期径流量	影响长期径流量的所有参数; 汇流时间(受坡度、坡长、河道长度、河道坡度等 因素的影响); 地表径流滞后系数; 地下水反补给速率

c. 气象输入数据的时间精度不足以体现短期变化。在该模拟中除降雨量为日测数据外, 其他气象数据均为月数据。当缺乏小时降雨量数据时, SWAT 模型默认的起始降雨时间为凌晨零点, 这也是造成模拟峰值往往比实测提前出现的主要原因。由于缺乏日气温、日照量等数据, 在时间跨度远小于 1 个月时, 对蒸发量、土壤温度、土壤含水量的计算会有较大的误差。

## 5 结论

分散参数非点源模型在非点源危险区域识别中发挥着重要的作用, 而成功地模拟降雨 - 径流过程是非点源污染负荷定量的第一步。由计算结果来看, SWAT 能够有效地模拟长时间序列的水文过程, 但随着时间步长的缩短, 模拟精度降低, 尤其是对日径流量的模拟存在着系统性的误差。在进行模型的参数率定和验证时, 建议以一个完整的降雨 - 径流过程为时间步长, 并以地表径流量的模拟结果为精度评价的重点。

### 参考文献:

[ 1 ] Young R A, Onstad C A, Bosch D D, et al. AGNPS: A nonpoint-source pollution model for evaluating agricultural watersheds [J]. J Soil Water Conservation, 1989, 44(2): 168 - 173.

[ 2 ] 白清俊. 流域土壤侵蚀预报模型的回顾与展望[J]. 人民黄河, 1999, 21(4): 18 - 21.

[ 3 ] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, et al. Soil and water assessment tool user's manual [EB/OL]. <http://www.brc.tamus.edu/swat>. 2002 - 08 - 15.

(下转第 36 页)

美誉度,美誉度的高低在于视觉和心理上的舒适,在于无论是湖泊群整体,或是单体,其修复和建设都是科学的、可持续的,人们在这里休憩和旅游,不仅享受自然风情和好的环境质量,而且受到生态文化的熏陶。

市场影响力,关键在于其科学内涵、文化品位与外形美是否经得住各方面人士的比较和推敲,“好酒不怕巷子深”,如果我们做的好,东西湖区的发展将大有希望。

适游期,东西湖的旅游主体适合休憩型,其都市郊

区多样的农村乐和文物古迹也可供人游览,因此,其适游期是长的。

### 参考文献:

- [ 1 ] Zonneveld I, Forman R A S. Changing landscape: An ecological perspective [M]. New York: Springer-Verlag, 1990.
- [ 2 ] 许慧,王家骥. 景观生态学的理论与应用 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1993.
- [ 3 ] 钱会,郑西来,凡秀峰. 傍河取水越河稳定渗流问题的三维数值模拟研究 [J]. 水利学报, 1999, (3): 32 - 37.

### (上接第 20 页)

- [ 7 ] Bruckman P, Kersten W. The occurrence of chlorinated and other organic trace compounds in urban air [J]. Chemosphere, 1988, 17: 2363 - 2380.
- [ 8 ] Jose M B, Rose D, Josep C. Applying receptor models to analyze urban/suburban VOCs in Martorell (Spain) [J]. Environ Sci Technol, 1998, 32: 405 - 412.
- [ 9 ] Edgerton S A, Holden M A, Smith D L. Inter-urban comparison of ambient volatile organic compound concentrations in us cities [J]. JAPCA, 1989, 39: 729 - 732.
- [ 10 ] Gee I L, Sollars C J. Ambient air levels of volatile organic compounds in Latin American and Asia cities [J]. Chemosphere, 1998, 36(11): 2497 - 2506.
- [ 11 ] Chan C Y, Chan I Y, Wang X M, et al. Volatile organic compounds in roadside microenvironments of metropolitan Hong Kong [J]. Atmos Environ, 2002, 36(12): 2039 - 2047.

### (上接第 23 页)

### 参考文献:

- [ 1 ] Young R S. Cobalt in biology and biochemistry [M]. London: Academic Press, 1979.
- [ 2 ] 刘雪华,李继云. 微量元素钴研究——河南新乡西四县土壤有效钴的含量分析及钴肥肥效研究 [J]. 土壤学报, 1995, 32(1): 112 - 116.
- [ 3 ] 刘铮. 微量元素的农业化学 [M]. 北京: 农业出版社, 1991.
- [ 4 ] Larssen T, Carmichael G R. Acid rain and acidification in China: the importance of base cation deposition [J]. Environ Pollut, 2000, 110: 89 - 102.
- [ 5 ] 李柱国. 浙江省降水酸度和化学特征分析 [J]. 中国环境科学, 1999, 19(5): 436 - 440.
- [ 6 ] 吴甫成, 吴君维, 王晓燕, 等. 湖南酸雨污染特征 [J]. 环境科学学报, 2000, 20(6): 807 - 809.

### (上接第 32 页)

- [ 4 ] 王长耀, 牛铮, 唐华俊, 等. 对地观测技术与精细农业 [M]. 北京: 科学出版社, 2001. 92 - 100.
- [ 5 ] 曹文志, 洪华生, 岳世平, 等. GIS 在农业非点源污染模拟研究中的应用 [M]. 厦门大学学报(自然科学版), 2001, 40(3): 658 - 663.
- [ 6 ] Arnold J G, Allen P M, Muttiyah R, et al. Automated base flow separation and recession analysis techniques [J]. Ground Water, 1995, 33(6): 1010 - 1018.