

SWAT 模型及其应用

晋利^{1,2}, 郑粉莉^{1,2}

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨陵 712100;
2. 西北农林科技大学, 陕西 杨陵 712100)

摘要: SWAT 模型是美国农业部开发的长时段的流域分布式水文模型。它能够利用 GIS 和 RS 提供的空间数据信息, 模拟复杂大流域中多种不同的水文物理过程, 包括水、沙、化学物质和杀虫剂的输移与转化过程。从 SWAT 模型的原理、结构、应用及评价等方面对该模型作一综合性评述, 为我国水文模型的建立提供参考。
关键词: SWAT; 分布式水文模型; 应用及评价
中图分类号: S 157. 1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-3409(2004) 04-0128-03

SWAT Model and Its Application

DING Jin-li^{1,2}, ZHENG Fen-li^{1,2}

(1. The State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau,
Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China;
2. Northwest Sci-tech University of Agriculture & Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: SWAT model physically based is the acronym for Soil and Water Assessment Tool, developed by the USDA. By using GIS and RS, SWAT was developed to predict the impact of land management practices on water, sediment and agricultural chemical yields in large complex watersheds with varying soils, land use and management conditions in the long-term. The SWAT model enables users to study long-term impacts. The principle, structure, appliance and assessment of SWAT are presented in order to offer reference for our country's hydrological models.
Key words: SWAT; a watershed scale model; appliance and assessment

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 是美国农业部(USDA)开发的流域尺度的分布式模型,用于模拟预测长期土地管理措施对于具有多种土壤类型、土地利用和管理条件的大面积复杂流域的径流、泥沙负荷和营养物流失的影响^[1], SWAT 模型对径流和泥沙负荷的预测能力在美国已经得到广泛的验证^[2]。模型应用 TOPOAZ (Topographic Parameterization) 自动进行数字地形分析的软件包,基于最陡坡度原则和最小给水面积阈值的概念^[3-6],对输入栅格型 DEM 进行处理,定义流域范围,划分亚流域,确定河网结构和计算子流域参数。当集水区面积阈值(形成河流的最小集水面积)被划定之后,自动划分亚流域。在亚流域划分的基础上其采用代表性基本单元概念划分计算单元,根据不同土地利用和土壤类型的组合在每一个亚流域内进一步划分 HRU (Hydrologic Response Unit), HRU 以非空间方式模拟,即以在某一亚流域中土壤和土地利用协同变化特征的概率分布来表征。

1 SWAT 模型机理

SWAT 模型可以模拟流域内多种不同的水循环物理过

程。为了减小流域下垫面和气候因素时空变异对该模型的影响, SWAT 模型通常将研究流域细分成若干个单元流域。流域离散的方法有三种:自然子流域(subbasin)、山坡(hillslop)和网格(grid)。SWAT 模拟的流域水文过程分为两部分:坡面产流和汇流部分及河道汇流部分。前者控制着每个子流域内主河道的水、沙和化学物质等的输入量;后者决定水、沙等物质从河网向流域出口的输移情况^[7]。

1.1 坡面产流和汇流部分

流域内蒸发量随植被覆盖和土壤的不同而变化,可通过水文响应单元(HRU)^[8]的划分来反映这种变化。在具体的应用计算中,通常需要考虑气候、植被覆盖及水文这三个方面的因素^[7,8]。

1.1.1 气候、植被因素

流域气候控制着水量平衡尤其是湿度和能量的输入对其起决定性作用。SWAT 模型所需要输入的气候因素变量包括:日降水量、最大最小气温、太阳辐射、风速和相对湿度。这些变量的数值可通过模型自动生成,也可直接输入实测数据。植被覆盖度直接影响降水再分配过程,植被的生长受温度、水分及养分的影响, SWAT 模型可利用某个单一的植物生长模型模拟所有类型的植被覆盖。

① 收稿日期: 2004-07-10
基金项目: 国家自然科学基金重点项目(40335050); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-442)
作者简介: 晋利(1978-), 女, 硕士研究生, 研究方向为坡面土壤侵蚀过程与机理。

1.1.2 水文因素

降水可被植被截留或直接降落到地面。降到地面上的水将重新分配其中一部分入渗到土壤; 另一部分形成地表径流。入渗到土壤中的水形成壤中流或被蒸发, 其中一部分经由地下路径缓慢流入地表水系统。地表径流快速汇入河道, 对短期河流响应影响很大。

冠层截留: 当采用 Green&Ampt 计算地表径流时, 需要单独计算冠层截留; 采用 SCS 曲线(CN number) 方法时, 需要输入冠层最大截留量和时段叶面指数(*LAI*) 来计算地表径流。

入渗: 计算入渗需要考虑初始入渗率及最终入渗率(土壤饱和水力传导度)。当用 Green & AmptCS 曲线法计算地表径流时, 只需要输入次降雨数据就可以直接模拟入渗。采用 SCS 曲线(CN number) 方法时, 由于计算时间步长为日, 不能直接模拟入渗。

再分配: 是指降水或灌溉停止时水在土壤剖面中的持续运动^[8]。土壤水再分配过程受土壤温度的影响, 当温度低于零度时该土层中的水停止运动。SWAT 中的再分配过程采用存储演算技术预测根系区每个土层中的水流。当某个土层中的蓄水量超过田间持水量, 而其下一土层处于非饱和态时, 便发生渗漏, 其速率由土层饱和水力传导率控制。

蒸腾蒸发: 蒸散蒸发包括水面蒸发、裸地蒸发和植被蒸腾。潜在土壤水蒸发由潜在蒸散发和叶面指数估算。实际土壤水蒸发用土壤厚度和含水量的指数关系式计算。植物蒸腾由潜在蒸散发和叶面指数的线性关系式计算。潜在蒸散发有三种计算方法: Hargreaves^[9]、Priestley – Taylor^[10] 和 Penman – Monteith^[11]。

壤中流: 壤中流的计算与再分配同时进行, 该模型考虑水力传导度、坡度和土壤含水量的时空变化并采用动态存储模型预测。

地表径流: 地表径流量的计算可用 SCS 曲线(CN number) 方法或 Green & Ampt 方法计算。SWAT 可模拟每个水文响应单元的地表径流量和洪峰流量。

池塘: 池塘是子流域内的蓄水结构。池塘被假定远离主河道, 不接受上游子流域的来水。池塘蓄水量是池塘蓄水量、日入流和出流、渗漏和蒸发的函数。

支流河道: SWAT 模型在某个子流域内定义了主河道和支流河道其中支流河道不接受地下水。该模型根据支流河道的特性计算子流域汇流时间。

输移损失: 输移损失主要发生在短期或间歇性河流地区(如干旱半干旱地区), 该地区只在特定时期有地下水补给或全年根本无地下水补给。当支流河道中输移损失发生时, 需要调整地表径流量和洪峰流量。

地下径流: SWAT 将地下水分为浅层地下水和深层地下水。浅层地下径流汇入流域内河流; 深层地下径流汇入外河流^[7]。

1.2 河道汇流部分

河道汇流部分主要考虑水、沙、营养物(N, P) 和杀虫剂在河网中的输移, 包括主河道以及水库的汇流计算^[7]。

1.2.1 主河道汇流

主河道的计算分为水、泥沙、营养物和有机化学物质等四部分。计算方法多采用变动存储系数模型或 Muskingum

方法, 其中进行洪水计算时若水流向下游, 其一部分被蒸发和通过河床流失, 另一部分被人类取用, 同时直接降雨或点源输入可作为补充的来源。

1.2.2 水库汇流

水库水量平衡包括: 入流、出流、降雨、蒸发和渗漏。利用 SWAT 计算水库出流时有三种估算方法, 分别是: (1) 输入实测出流数据; (2) 对于小的无观测值的水库, 需要规定一个出流量; (3) 对于大水库, 需要一个月调控目标^[7]。

2 SWAT 模型结构

SWAT 模型结构框图^[18]:

3 SWAT 模型的应用

3.1 基础数据处理

研究区 DEM 采用 1 250 000 国家基础地理信息系统数据, 在 GIS 技术支持下对 DEM 进行图幅拼接, 应用 Arc/Info 将该投影转换为单位为 m 的 ALBERS 投影。此外, 水文和气象测站的空间分布信息、土壤类型与土地利用的空间分布数据、降水系列数据、蒸发系列数据也作为模型的输入数据。应用 VisualBasic 语言自行编制程序, 根据研究区某年段的气象数据计算模型所需的气温、相对湿度、太阳辐射以及风速等参数。

3.2 模型校准与验证

当模型的结构和输入参数初步确定后, 就需要对模型进行校准(calibration) 和验证(validation)。通常将使用的资料系列分为两部分, 其中一部分用于校准模型, 而另一部分则用于模型的验证^[12]。校准是调整模型参数(经分析得出 SCS 曲线数 CN、土壤中植物可利用水量、土壤蒸发补偿系数为最敏感因子)、初始和边界条件以及限制条件的过程, 以使模型接近于测量值。选用相对误差(*RE*)、线性回归系数(*R*²) 和 Nash – Sutcliffe 模拟系数(*E_{ns}*) 来评估模型在校准和验证过程中的模拟效果。相对误差计算公式为:

$$RE = \frac{P_i - Q_i}{Q_i} \times 100\% \tag{1}$$

式中: *RE* ——模型模拟相对误差; *P_i* ——模拟值; *Q_i* ——实测值。若 *RE* 为正值, 说明模型预测或模拟值偏大; 若 *RE* 为负值; 模型预测或模拟值偏小; 若 *RE* = 0, 则说明模型模拟结果与实测值正好吻合。线性回归系数(*R*²) 在 MS – EXCEL 中应用线性回归法求得, *R*² 也可以进一步用于实测值与模拟值之间的数据吻合程度评价, *R*² = 1 表示非常吻合, 当 *R*² < 1 时, 其值越小反映出数据吻合程度越低。

根据数据获取的完整性, 选用使用 Nash – Sutcliffe 系数 *E_{ns}* 来衡量模型模拟值与观测值之间的拟合度, 其表达式为:

$$E_{ns} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_o - Q_p)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_o - Q_{avg})^2} \tag{2}$$

式中: *Q_o* ——实测值; *Q_p* ——模拟值; *Q_{avg}* ——实测平均值; *n* ——实测数据个数。当 *Q_o* = *Q_p* 时, *E_{ns}* = 1; 如果 *E_{ns}* 为负值, 说明模型模拟平均值比直接使用实测平均值的可信度更低。

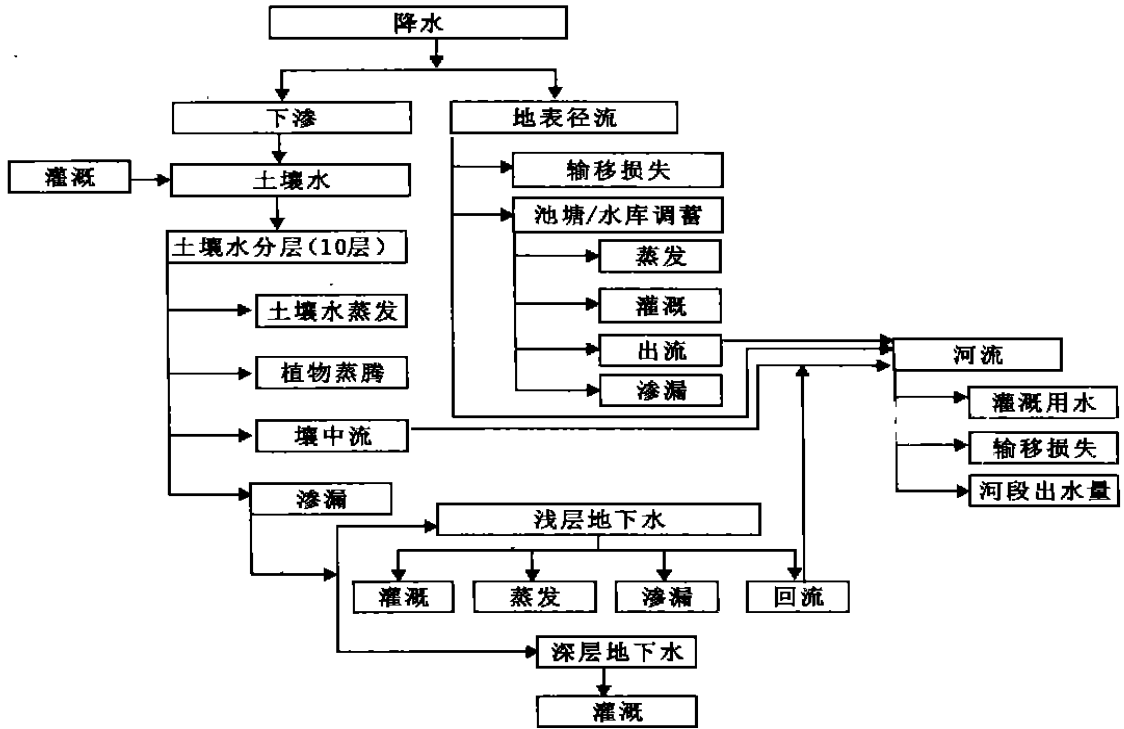


图 1 SWAT 模型结构

通过调整径流曲线数(CN)、地下水再蒸发系数(RWVAPC)、土壤蒸发补偿系数(ESCO)和植物蒸发补偿系数(EPCO)这四个参数使径流模拟值与实测值吻合,其模拟值与实测值年均误差应小于实测值的 15%, 月均值的线性回归系数 $R^2 > 0.6$ 且 $E_{rs} > 0.5$ 。

4 SWAT 模型的评价

4.1 评价方法- 数字滤波法

数字滤波能通过滤波器把输入系列通过一定的运算转换成输出系列。数字滤波器的实现方式之一是利用通用计算机的存储器、运算器和控制器把滤波器所要完成的运算编成程序并采用计算机软件来实现^[14]。滤波法较图解法更加客观, 操作容易, 执行速度快, 且参数较少^[13]。Nathan 和 McMahon 首次采用 Lyne- Hollick 算法^[15]对流量过程进行分析和处理, 从流量过程中分割出基流^[16]。Arnold 在美国西部和东部选取 6 个代表流域对该方法进行验证, 结果表明该方法不仅精度较高, 而且具有较好的客观性和可重复性^[17]。基于 Lyne- Hollick 算法的滤波方程为:

$$q_t = \beta q_{t-1} + (Q_t - Q_{t-1}) \tag{3}$$

式中: q_t —— t 时刻过滤出的快速响应(即直接径流信号, 以日为时间步长); Q ——实测河川总径流; β ——滤波参数。从总径流中过滤出快速响应, 即可得出基流 b_t :

$$b_t = Q_t - q_t \tag{4}$$

Nathan 和 McMahon 及 Arnold 等人采用三通道滤波

器, 将模拟结果与手工分割的结果进行对比研究, 率定出 β 值, 分别定为 0.90~0.95, 0.925^[16]。

4.2 评价结果

SWAT 模型是一个长时段的流域分布式水文模型, 它能够利用 GIS 和 RS 提供的空间数据信息, 模拟地表水和地下水水量与水质和复杂大流域中的径流成分, 并能长期预测土地管理措施对具有多种土壤、土地利用和管理条件的大面积复杂流域的水文、泥沙和农业化学物质产量的影响。综上所述:

(1) SWAT 模型适用于多个事件的洪水过程的模拟, 也比较适用于面向水资源管理的长时段的分式水文过程模拟。

(2) 当 SWAT 模型被应用于模拟水文过程时, 其计算时段以日或月较好。对于不同的流域, 在应用 SWAT 时需对模型的数据库部分进行修改, 特别需要建立用户自己的土壤属性数据库。

(3) 由于降雨空间分布的不均匀性对模拟结果影响很大, 而 AVSWAT 2000 在降雨空间处理上不太理想, 因此, SWAT 模型的实际和参数识别受到了一定程度限制。在今后的研究中, 应加强对降雨空间分布不均匀性描述方法的研究。

(4) SWAT 模型还能用于面源污染、水土流失、土地利用和农业管理等方面的研究, 是一个十分值得推广的综合性流域水文模型。

参考文献:

[1] Texas, Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service[EB/OL]. 2001, <http://www.brc.tam.us.edu/swat/swat2000doc.html>.
[2] Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah R S, et al. Continental scale simulation of the hydrologic balance [J]. Journal of American Water Resources Association, 1999, 35(5): 1037- 1051.

总坝高则为:

$$H = \left[\frac{dh^e + rN^6}{d} \right]^{\frac{1}{e}} + h$$

其中 $m = m_1 + m_2$

计算出坝体方量后, 将其换算为经济指标, 即得建坝费用。

4.4 建坝费用

坝的建坝费用取决于坝高, 坝越高坝费用越大。设坝高为 h , 坝顶宽度 b_0 , 上、下游坡率分别为 m_1, m_2 。对于一般沟道断面, 若沟底宽度 L_0 , 则沟道的宽高关系可表示为: $L = L_0 + \sigma_1 H^{\sigma_2}$, 式中: σ_1, σ_2 为回归常数。

从而得坝体土方量为:

$$W = L_0 b_0 H + \frac{1}{2} m L_0 H^2 + \frac{\sigma_1 b_0}{\sigma_2 + 1} H^{\sigma_2 + 1} + \frac{\sigma_1 m}{(\sigma_2 + 1)(\sigma_2 + 2)} H^{\sigma_2 + 2}$$

参考文献:

[1] 辛树帜, 蒋德麒. 中国水土保持概论[M]. 北京: 农业出版社, 1982.

[2] 辛全才, 王静. 淤地坝坝体土方量, 淤地面积和库容的简易推算[J]. 中国水土保持, 1994, (6): 18– 20.

[3] 蒋定生. 试论黄土高原梯田断面设计[J]. 水土保持学报, 1987, 1(2): 28– 35.

[4] 赵蔚静. 黄河中游地区淤地坝结构形式改进初探[J]. 中国水土保持, 1982, (3): 38– 41.

[5] 揭曾佑. 试论黄河中游治理中的淤地坝、水库和水土保持措施[J]. 中国水土保持, 1988, (12): 31– 32.

[6] 崔云鹏, 蒋定生. 水土保持工程学[M]. 西安: 陕西人民出版社, 1997.

(上接第 130 页)

[3] Douglas D H. Experiments to locate ridges and channels to create a new type of digital elevation models[J]. Cartographica, 1986, 23(4): 29– 61. 1991, 30(6): 1 681– 1 692.

[4] Fairfield J P Leymarie. Drainage networks from grid digital elevation models[J]. Water Resources Research, 1991, 30(6): 1681– 1692.

[5] Mark D M. Automatic detection of drainage networks from digital elevation models[J]. Cartographica, 1984, 21(2/ 3): 168– 178.

[6] Martz L, Garbrecht W J. Numerical definition of drainage network and subcatchment areas from digital elevation models[J]. Computers and Geosciences, 1992, 18(6): 747– 761.

[7] 王中根, 刘昌明, 黄友波. SWAT 模型的原理结构及应用研究[J]. 2003, 22(1): 79– 87.

[8] Neitsch S L, Arnold J G., Kiniry J R, et al. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation, Version 2000 [EB/ OL]. http: // www. brc. tamus. edu/ swat /. 2001.

[9] Hargreaves G L, Hargreaves G H, Riley J P. Agricultural benefits for Senegal River Basin[J]. Irrig. and Drain. Engr., 1985, 111(2): 113– 124.

[10] Priestley C H, Taylor R J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters[J]. Mon. Weather Rav, 1972, 100: 81– 92.

[11] Penman H L. Evaporation: A nintroductory survey[J]. Netherlands Journal of Agricultural Science, 1956, (4): 7– 29.

[12] Nash J E. Suttleiliffe River flow forecasting through conceptual models, Part1 AD is cussion of Principle[J]. Journal of Hydrology, 1970, 10(3): 282– 290.

[13] Furey P R, Gupta V K. A physical lipase filter for separating baseflow form stream flow times series[J]. Water Resources Research, 2001, 37(11): 2 709– 2 722.

[14] Rabiner L R, Gold B. Theory and application of digital signal processing[M]. 史令启译. 北京: 国防工业出版社, 1982.

[15] Lyne V, Hollick M. Stochastic time variable rainfall runoff modeling[A]. Hydrology and Water Resources Symposium Berth, Proceedings[C]. Australia: National Committee on Hydrology and Water Resources of the Institution of Engineers, 1979, 89– 92.

[16] Nathan R J, McMahon T A. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analysis[J]. Water Resources Research, 1990, 26(7): 1 465– 1 473.

[17] Arnold J G, Allen P M. Automated methods for estimating baseflow and ground water recharge from stream flow[J]. Journal of the American Water Resources Association, 1999, 35(2): 411– 424.