

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2009.01.05

SWAT 模型在伊河上游径流模拟中的应用

李 晓,李致家,董佳瑞

(河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098)

摘要:为了探讨 SWAT 模型在中国半湿润半干旱地区的适用性,依托 GIS 软件平台,将模型应用于中国伊河流域潭头以上地区,同时与新安江模型的同系列模拟结果进行了比较.结果表明,研究流域属于混合产流区,以蓄满产流为主的年份的模拟效果要好于以超渗产流为主的年份.

关键词: SWAT 模型;新安江模型;径流模拟;伊河上游

中图分类号: P334 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1980(2009)01-0023-04

SWAT(soil and water assessment tool)模型是由美国农业部(USDA)开发的流域尺度分布式模型,可用来模拟预测在具有多种土壤类型、土地利用和管理条件的复杂大流域中土地管理措施对水、沙、化学物质等的长期影响^[1]. SWAT 模型的模拟时段可根据需要分为年、月、日 3 种,但不能进行次洪模拟.不同于采用回归方程来描述输入输出变量间关系的传统模型, SWAT 模型考虑了水情、土壤特性、地形、植被、土地管理措施等方面的流域信息,并将这些信息与水循环、泥沙运动、氮循环等过程相结合.由此可知, SWAT 模型是具有一定物理基础的水文模型.

为了考虑流域内下垫面特性和气候因素空间分布的非均匀性, SWAT 模型首先将整个研究流域细分为若干个子流域,对每个子流域分别进行模拟计算,再将各子流域的模拟结果叠加在一起作为整个研究流域的模拟结果.子流域内的水文过程模拟可分为坡面水文循环过程模拟和河道水文循环过程模拟 2 个部分.前者控制每个子流域内主河道水量、沉积物、氮和化学物质等的输入量,后者控制水、沙等物质从河网汇集到流域出口的过程^[2].

为了探讨 SWAT 模型在我国半湿润半干旱地区的适用性,本文将 SWAT 模型应用于伊河流域潭头以上地区,并将该模型的模拟结果与新安江模型的模拟结果进行了比较.

1 模型应用

1.1 流域概况

伊河发源于熊耳山南麓的栾川县,流经嵩县、伊川,穿伊阙而入洛阳,至偃师杨村注入洛水.伊河全长 368 km,流域面积约 6 100 km². 本文的研究区域为伊河河源地区,位于东经 111°~112°、北纬 33.5°~34.5°之间,以潭头水文站作为流域控制出口,面积 1 695 km².

伊河流域属于暖温带大陆型季风性气候区内的伏牛山北坡干旱气候区,冬季干燥寒冷,夏季潮湿炎热.年平均气温 12℃,1 月平均气温 -0.8℃,7 月平均气温 23.4℃,大于或等于 10℃的年积温为 4 030.7℃.年降水量 700~900 mm,而 50%左右的降水量集中在 7~9 月.年平均相对湿度 68%,无霜期 198 d 左右,盛行西北风.流域内的气候水平地带性变化不大,垂直地带性却较明显,且地形复杂,导致了森林小气候的多样化.

1.2 基础数据处理

研究区基础地形构建采用 NOAA 发布的 1 km×1 km 的 DEM 栅格地图以及同精度的土地利用地图(来自 USGS)和土壤图(来自 FAO).因缺乏天气模拟器资料,故移用美国同纬度、同气候带、相近高程站点的资料.日降雨和径流资料采用流域内陶湾、栾川、庙子、白狮、河西、大清沟、潭头 7 个站点 1980~1990 年共 11 a 的降雨资料以及潭头站同系列的实测流量资料.

将资料输入 SWAT 模型,按水系分布情况将研究流域划分为 16 个子流域(图 1),每个子流域再按土地利用状况和土壤特性划分为若干个水文响应单元(HRU),并将 HRU 作为模拟基本单元.蒸发计算采用 Hargreaves 法^[3],地表产流计算采用 SCS 曲线法,河道汇流计算采用变动存储系数法.

1.3 参数率定

SWAT 模型涉及的产汇流参数有 30 多个,确定每个参数的准确值十分困难,因此,根据相关文献^[4-5]的做法,主要率定对流域水量平衡和径流过程有较大影响的变量,而对于其他变量,只进行微调或根据流域状况赋值.

参数率定所遵循的原则是:先上游后下游;先调整水量平衡,再调整过程;先调整地表径流,再调整土壤水、蒸发和地下径流^[6].

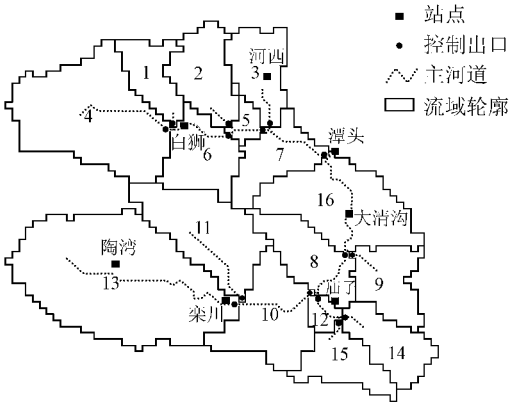


图 1 潭头以上伊河流域划分方案

Fig. 1 Division scheme of Yihe River basin upstream Tantou

表 1 SWAT 模型部分参数值

Table 1 Calibrated parameters of SWAT model

ESCO (土壤蒸发补偿系数)	EPCO (植物蒸腾补偿系数)	ALPHA_BF (基流 α 因子)			CH_N (主河道曼宁系数)		
0.63	0.65	50			0.05		
CH_K (主河道冲积层的有效水力传导度)		CN(径流曲线数)					
		MESQ	FRSE	SPAS	AGRL	AGRR	FRST
0.925		78	56	71	79	80	62

2 模拟结果及分析

2.1 评判准则

选用相对误差(R)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

$$R = (Q_s - Q_o) / Q_o \times 100\%$$
 (1)

式中: R——模型模拟相对误差; Q_s——模拟流量; Q_o——实测流量. R > 0 说明模型模拟值偏大, R < 0 说明模型模拟值偏小, R = 0 说明模型模拟结果与实测值正好吻合.

根据数据获取的完整性,选用 Nash-Suttcliffe 系数(E_{ns})来衡量模型模拟值与观测值之间的拟合度.

$$E_{ns} = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_o - Q_s)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_o - Q_{avg})^2} \right]$$
 (2)

式中: Q_{avg}——实测平均流量; n——实测数据个数.当 Q_o = Q_s 时, E_{ns} = 1; 当 E_{ns} < 0 时,模型模拟值比实测平均值的可信度更低.

2.2 模拟结果

SWAT 模型的模拟结果见表 2.为了检验其模拟效果,采用新安江模型进行同期对比模拟.新安江模型的模拟结果见表 3.

限于篇幅,仅列出 1982 年 6 月 28 日到 9 月 14 日的流量过程线(图 2)作为示例.

由图 2 可知,2 个模型的模拟结果基本一致,即:新安江模型模拟得较好的年份,SWAT 模型的模拟结果也较好,而新安江模型模拟得不好的年份,SWAT 的模拟结果也不甚理想.从径流量来看,2 个模型对丰水年(如 1983 年)的模拟效果要好于对枯水年(如 1986 年)的模拟效果.这样的结果与流域产流方式和模型的结构有关.伊河流域属于混合产流区,降雨的强度、水量和持续时间会对流域产流方式产生很大影响,而 SWAT 模型和新安江模型都采用蓄满产流机制,在以超渗产流为主的年份,模拟结果就不太理想.

2.3 SWAT 模拟影响因素分析

a. 资料精度.一般来说,若 DEM、土壤以及土地利用资料的精度较高,则模拟精度也较高,但输入数据的精度与模拟结果的精度并不呈正比关系^[7]. Chaplot^[8]的研究表明,DEM 栅格大小对径流模拟结果没有影响,而土壤图比例尺对 SWAT 模型的模拟结果有较大影响.本研究采用的 DEM、土地利用和土壤图的规格都为

表 2 SWAT 模型模拟结果

Table 2 Simulated results of SWAT model						
年份	计算总雨量/mm	计算蒸发量/mm	实测径流量/亿 m ³	计算径流量/亿 m ³	洪量相对误差/%	E _{ns}
1980	838.73	664.61	4.0394	4.0627	0.58	0.84
1981	724.70	573.55	3.0726	2.7865	-9.31	0.73
1982	831.66	588.24	5.6011	4.6052	-17.78	0.91
1983	1043.68	562.49	7.9814	8.3556	4.69	0.89
1984	990.36	585.38	7.2758	7.3179	0.58	0.84
1985	835.16	570.16	5.5296	5.4482	-1.47	0.79
1986	572.15	512.19	1.5131	1.5918	5.20	0.41
1987	727.48	562.37	2.5998	2.8170	8.36	0.51
1988	719.81	553.72	3.1568	2.7964	-11.42	0.75
1989	845.37	579.25	4.4384	4.3690	-1.56	0.50
1990	767.43	559.62	3.9573	4.3338	9.51	0.32

表 3 新安江模型模拟结果

Table 3 Simulated results of Xin'anjiang model						
年份	计算总雨量/mm	计算蒸发量/mm	实测径流量/亿 m ³	计算径流量/亿 m ³	洪量相对误差/%	E _{ns}
1980	813.80	541.00	4.0394	4.1710	3.26	0.85
1981	689.40	498.00	3.0726	3.1542	2.66	0.79
1982	812.40	493.10	5.6011	5.0459	-9.91	0.80
1983	1009.10	564.00	7.9814	6.9575	-12.82	0.84
1984	955.80	546.80	7.2758	6.4519	-11.32	0.87
1985	814.40	525.50	5.5296	4.7763	-13.62	0.83
1986	546.70	466.20	1.5131	1.6521	9.19	0.38
1987	716.80	513.60	2.5998	3.0335	16.69	0.50
1988	712.20	492.40	3.1568	3.3899	7.39	0.75
1989	829.00	592.50	4.4384	3.7230	-16.11	0.60
1990	741.70	548.70	3.9573	3.2122	-18.82	0.44

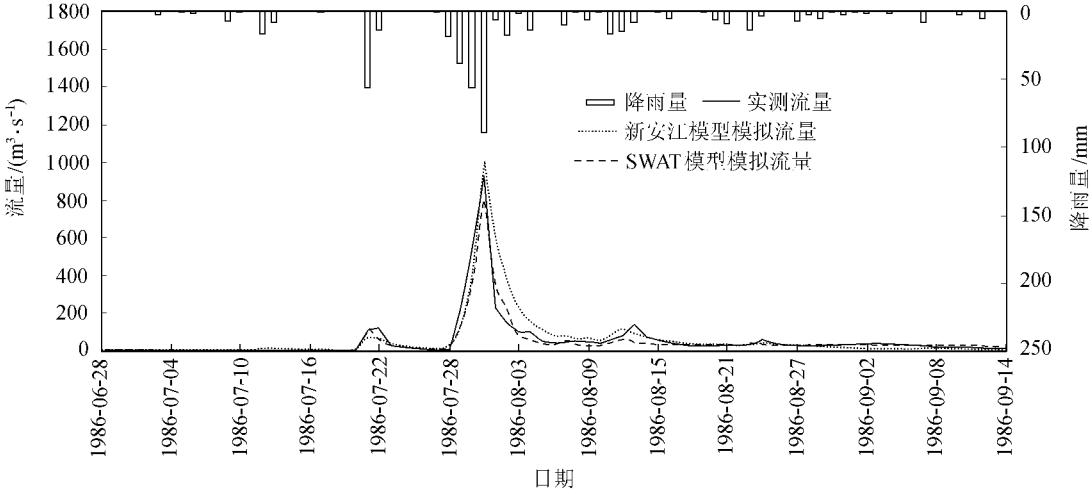


图 2 潭头以上伊河流域模拟径流与实测径流的比较

Fig. 2 Comparison between simulated and measured daily discharges of Yihe River basin upstream Tantou

1 km × 1 km 相对于研究流域的面积来说 精度或许有些低了。

b. 基础数据库. SWAT 模型备用的土地利用和土壤类型数据都来源于美国的统计资料, 如果将该模型应用于美国以外的其他地区, 则需要根据研究区的土地利用和土壤类型另行建立数据库. 这样, 在资料不足的地区, 要应用 SWAT 模型就比较困难^[9]. 而如果采用移用美国统计数据库的方法, 就有可能影响模拟精度。

c. 流域特性. 本研究流域主要由 2 条支流构成, 其水文特性和对降雨的响应情况都有一定的差别. 而降雨的空间分布, 对洪峰和洪量的影响很大, 但是 SWAT 模型对降雨空间分布的处理不太理想^[10], 这会影响参数识别. 另外, 本研究流域气候水平地带性差别不大而垂直地带性差别明显, 森林小气候呈现多样化. 而 SWAT 模型对垂直地带性的描述比较笼统, 反应不够精确。

d. 参数. SWAT 模型参数较多, 要准确地确定出每个参数的值比较困难, 因此率定时主要调整对流域水量平衡和径流过程有较大影响的参数, 其他参数则基本采用固定值, 这也会影响模拟精度。

3 SWAT 模型与新安江模型的比较

3.1 计算单元划分

2 种模型的相似之处是: 首先在每一个计算单元上应用概念性模型来推求净雨, 然后进行产汇流计算, 最后再通过洪水演算来求得流域的出口流量过程. 2 种模型的不同之处是: 新安江模型通常以雨量站为中心, 按泰森多边形法划分计算单元, 这种方法只考虑了降雨空间分布的不均匀性, 而没有考虑流域特性. SWAT 模型则综合多种资料(土地利用和土壤资料等), 将流域划分为水文响应单元(HRU), 使水文响应单元内的流域特性基本达到“各向同性”, 这种方法能够减少由空间差异引起的模拟误差。

3.2 产流计算模式

新安江模型的产流计算模式是“由总到分”, 即先计算出总的产流量, 然后再将其划分为地表径流、壤中

流与地下径流,而 SWAT 模型的产流计算模式是“由分到总”,即考虑从降雨到流域出流过程中水的运动变化情况,直接计算各种径流成分,再得出总产流量,这种产流计算模式比较符合实际的物理过程。

3.3 蒸发计算

新安江模型中的流域蒸散发能力是通过实测水面蒸发量乘以 k_1, k_2, k_3 3 个系数得到的^[11]。其中 k_1 是蒸发皿系数,通过 k_1 可以把蒸发皿数值换算成大水面数值; k_2 是陆面蒸发能力与水面蒸发能力之比,该系数综合考虑了季节和植被等因素; k_3 反映了蒸发站对全流域的代表性问题,主要显示高程的差别。由于 k_1 夏天约为 0.7,冬天约为 1,而 k_2 夏季为 1.3~1.5,冬季约为 1,因此 $k_1 \times k_2 \approx 1$,故只需考虑 k_3 。这样一来,植被生长情况对蒸发的影响便被弱化了。

SWAT 模型注意到雨水下落过程中,冠层的截留作用会减少到达地面的水量,并减弱雨滴落地时对地面的侵蚀能力,故将冠层蒸发项单独列出计算。这一项对植被稀疏的地区来讲意义不大,而在植被茂盛的森林或阔叶林区,冠层蒸发对蒸发总量具有重要影响。因为计算时模型假设首先蒸发的是冠层截留的水量,只有在冠层水量全部被蒸发后才会考虑其他的蒸发来源。从本文的模拟结果来看,SWAT 模型计算的 actual 蒸发量略大于新安江模型计算的 actual 蒸发量,这应与研究流域较高的森林覆盖率有关。

4 结 语

SWAT 模型基于 ArcView 的运行平台,功能强大,界面友好,是一种很好的流域管理工具。虽然有关研究表明,在干旱、湿润以及半干旱半湿润的气候条件下,SWAT 模型的径流模拟结果都比较令人满意^[12],但从本文的模拟结果来看,在半干旱半湿润气候的混合产流区,SWAT 模型对以超渗产流为主的径流模拟精度还较低。

参考文献:

- [1] NEITSCH S L, ARNOLD J G, KINIRY J R, et al. soil and water assessment tool theoretical documentation: version 2005[M]. Temple: Grassland Soil Water Research Laboratory, 2002.
- [2] 丁晋利, 郝粉莉. SWAT 模型及其应用[J]. 水土保持研究, 2004, 11(4): 128-130.
- [3] HARGREAVES G H, SAMANI Z A. Reference crop evapotranspiration from temperature[J]. Applied Engineering in Agriculture, 1985, 1(2): 96-99.
- [4] 刘吉峰, 霍世青, 李世杰, 等. SWAT 模型在青海湖布哈河流域径流变化成因分析中的应用[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2007, 35(2): 159-163.
- [5] AMOLD J G, ALLEN P M. Estimation hydrologic budgets for three Illinois Watershed[J]. Journal of Hydrology, 1996, 176(1): 57-77.
- [6] 朱新军, 王中根, 李建新, 等. SWAT 模型在漳卫河流域应用研究[J]. 地理科学进展, 2006, 25(5): 105-111.
- [7] 张银辉. SWAT 模型及其应用研究进展[J]. 地理科学进展, 2005, 24(5): 121-130.
- [8] CHAPLOT V. Impact of DEM mesh size and soil map scale on SWAT runoff, sediment, and $\text{NO}_3\text{-N}$ loads predictions[J]. Journal of Hydrology, 2005, 312(10): 207-222.
- [9] 陈军峰, 陈秀万. SWAT 模型的水量平衡及其在梭磨河流域的应用[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2004, 40(2): 265-270.
- [10] 王中根, 刘昌明, 黄友波. SWAT 模型的原理、结构及应用研究[J]. 地理科学进展, 2003, 22(1): 79-86.
- [11] 赵人俊. 流域水文模拟: 新安江模型与陕北模型[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1984: 80.
- [12] VANLIEW M W, GARBRECHT J. Hydrologic simulation of the Little Washita River experimental watershed using SWAT[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2003, 39(2): 413-426.

Application of SWAT model in runoff simulation in upper reaches of Yihe River

LI Xiao, LI Zhi-jia, DONG Jia-rui

(College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to discuss its applicability in the semi-arid and semi-humid regions in China, the SWAT model was applied in the daily runoff process in the Yihe River basin upstream Tantou by use of GIS software. The simulated results were compared with those of the Xin'anjiang model. The results show that the study basin belongs to the mixed runoff generation area, and the simulated precision of runoffs under the saturated storage is higher than that under the excess seepage.

Key words: SWAT model; Xin'anjiang model; runoff simulation; upper reaches of Yihe River