

SWAT 分布式流域水文物理模型的改进及应用研究

张 东^{1, 2}, 张万昌¹, 朱 利¹, 朱求安¹

(1. 南京大学国际地球系统科学研究所, 江苏 南京 210093 2. 南京师范大学地理科学学院, 江苏 南京 210097)

摘要: SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 模型是一个集成遥感 (RS)、地理信息系统 (GIS) 和数字高程模型 (DEM) 技术的先进的分布式流域水文物理模型。为了推动该模型在中国的适应性研究及应用, 并改进模型以提高水文模拟的精度, 针对模型在中国西北寒旱区的黑河流域和中西部湿润的汉江流域的水文模拟中发现的问题进行了扩充和改进, 增加了土壤粒径转换模块和天气发生器 (WGEN) 数据预处理模块, 改进了模型中的 WGEN 算法、潜在蒸散量模拟算法以及气象参数的空间离散方法。利用扩充和改进后的模型对汉江褒河上游江口流域的降雨-径流过程进行了系统的研究。结果表明, 不仅模型的使用效率有明显提高, 而且改进后模型的效率系数和相关系数也比改进前有较大改善。

关键词: SWAT 模型; 土壤粒径转换; 天气发生器; 蒸散量; 空间插值

中图分类号: P339.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2005)04-0434-07

引 言

水文模型是水文科学研究中重要的方法和手段之一^[1]。近年来, 集成 RS、GIS 和 DEM 技术的分布式流域水文模型研究成为现代水文模拟研究的热点^[2~6], 通过三种技术的集成获取空间分布的气象、水文和模型参数, 模拟流域内土壤-植被-大气系统中水的运动, 解决气候变化和人类活动对水文水资源分配造成的影响。其中, SWAT 模型以强大的功能、先进的模型结构以及高效的计算, 在分布式水文模型中占有重要地位, 在北美和欧洲的许多流域取得了较好的模拟结果^[7~9]。中国近年来也开始利用 SWAT 模型进行水文水资源模拟研究, 如王中根等^[10]、黄清华等^[11]对西北寒旱区黑河流域水文过程的模拟, 刘昌明等^[12]对黄河河源区的大尺度流域水文模拟等。

总的来看, SWAT 模型目前在国外研究的比较广泛和深入, 但是在中国, 这方面的研究相对较少。主要原因如下: SWAT 模型是针对北美的土壤、植被和流域水文结构来设计的, 模型自带的土壤数据库、植被参数库和中国的实际情况有较大出入, 导致模型使用效率低下; 模型土壤数据库使用

的数据标准和中国现有的数据标准不一致, 增加了模型数据库改造和使用的难度; 模型采用了国外先进的概念性或经验性公式来描述不同的水文物理过程, 但是可能出现经验公式在中国应用效果不好或模拟精度不高的问题; 模型驱动所需的站点气象参数观测不全或难以获取, 也大大地限制了模型的使用。为了提高该模型的使用和模拟效率, 推广模型在中国流域的管理、水资源研究等领域的应用, 本文针对以上问题对模型进行了扩展和改进, 对模型参数化方案进行了移植和完善。并利用改进后的模型在汉江褒河上游江口流域进行了降水-径流过程模拟实验, 取得了理想的模拟效果。

1 模型简介

SWAT 模型是 Arnold J. G. 博士等为美国农业部 (USDA) 下属的农业研究局 (ARS) 开发的大、中尺度的长时段流域环境模拟模型^[4], 该模型具有很强的水文物理机制, 可以预测在不同的土壤条件、土地利用类型和管理措施下人类活动对流域水文过程、河道产输沙变化、农药化学污染在流域内的传播、迁移等的长期影响。因此, 模型本身也是

收稿日期: 2004-06-02 修订日期: 2004-10-11

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (2001CB309404)、海外青年学者合作研究基金 (40128001)。

作者简介: 张 东 (1975-), 男, 江苏通州人, 博士研究生, 主要从事分布式陆面水文过程研究。Email: zhangdong@njnu.edu.cn

一个优秀的分布式水文模型。

模型由站点的气象资料驱动,以水文响应单元 (Hydrologic Response Units, HRUs) 为最小水文模拟单元进行流域水文过程模拟,在 HRUs 上利用水量平衡理论描述陆相水文循环过程^[4-12],计算得到模拟单元内每一天的产流,然后利用改进的推理方法计算单元产流对主河道的水量贡献;在河道内采用变动储水系数模型或者马斯京根法计算河道的汇流,扣除水面蒸发、传输损失以及流域内人、畜用水,得到河道出口的逐日断面流量。同时可以得到各子流域的其它水文参量如降水融雪量、潜在蒸散量、实际蒸散量、土壤含水量、下渗水量、地表径流、地下径流等。

2 模型的扩充和改进

2.1 土壤粒径转换模块的扩充

SWAT 模型中,土壤数据是主要的输入参数之一,土壤数据质量的好坏会对模型的模拟结果产生重要影响^[11]。在土壤数据中最重要的一类数据是土壤粒径级配数据,其它的许多土壤参数如体积分

重、饱和导水率、田间有效持水量、土壤可蚀性系数等都可从土壤的粒径级配数据来导出。但是由于 SWAT 模型采用的土壤粒径级配标准是 USDA 简化的美制标准,而中国的土壤粒径级配标准使用不规范,从收集到的黑河流域和汉江流域的土壤资料来看,分别采用了前苏联制标准、中国 1975 年试用的土壤粒径标准以及几种标准混合在一起的粒径分级标准等^[13],这样大大增加模型土壤数据库建设和模型使用的难度。

不同粒径分级标准之间的转换采用土壤粒径累积频率曲线来实现。根据累积频率曲线的统计原理设计了土壤粒径转换模块,模块中累积频率曲线图的横坐标可采用线性坐标或半对数坐标,纵坐标为累积频率。不同粒径组之间的插值转换方法采用以下 3 种,分别为线性插值、抛物插值和光滑不等距插值。实际运算中发现,当土壤粒径数据分组较密时,不管采用那种坐标方式和插值转换方法的组合,得到的插值结果差别不大;而当粒径分组较粗时,插值结果的差别就比较明显(表 1)。

表 1 不同坐标和转换方法组合下土壤粒径转换结果比较

Table 1 Comparison of grain contents converting results by different combinations of coordinating types and converting methods

转换前的土壤分级标准		转换后的 USDA 土壤分级标准						
粒径范围	含量	粒径范围	含量 (%)					
(mm)	(%)	(mm)	A +	A +	B +	B +	C +	C +
0.0~0.001	16.28	0~0.002	19.61	25.29	29.97	23.76	21.99	24.99
0.001~0.01	29.94	0.002~0.05	28.79	39.72	18.42	42.18	26.99	40.96
0.01~1.0	53.78	0.05~2.0	51.61	34.98	51.61	34.06	51.02	34.05
>1.0	0.00	>2.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

表中符号含义: A 为线性插值; B 为抛物插值; C 为光滑不等距插值; I 为线性坐标; II 为半对数坐标。

根据实际分析对照认为,选择半对数坐标和光滑不等距插值的组合来实现粒径级配转换效果较好,可以满足模型对土壤粒径分级的要求。将粒径转换数据结合美国华盛顿州立大学开发的土壤水特性软件 SPAW,可以方便地建立起模型所需的流域土壤数据库。

2.2 天气发生器 (WGEN) 的数据预处理及改进

WGEN 根据气象参数随时间变化所遵循的随机过程、弱稳定过程等数理统计原理,通过月平均气象数据来模拟周期性的日气象数据变化过程^[14]。SWAT 模型通过和 WGEN 的耦合来完成气象数据序列的补缺,可以实现气象数据不全或缺失

地区的水文过程模拟。

WGEN 需要输入的多年月平均气象统计数据共有 14 类 168 个,分别是月平均最高、最低气温及相应的标准差;月平均降雨量及标准差、降雨天数、降雨偏度系数、降雨干湿概率和湿湿概率;月最大半小时降雨量;月平均太阳辐射、露点温度及风速。这些数据的统计计算工作量比较大而且繁琐,因此,在实际的数据准备时,根据输入数据各自的统计计算原理,利用 C++ 编制了数据预处理模块,通过读入长时段气象数据,自动快速生成符合模型所需格式的站点月平均数据文件 (*.wgn)。在此基础上利用 WGEN 可以方便地建立起模型的气象数

张掖地区土壤普查办公室. 张掖地区土壤. 内部资料, 1986.
<http://www.byssewsu.edu/saxton/>

数据库, 模拟出模型运行所需的气象驱动资料。

但是在运行 WGEN 时发现, 在进行气温和太阳辐射模拟时, 随机噪声矩阵的引入会带来一些逻辑错误, 如模拟的日最高气温低于日平均气温、日最低气温高于日平均气温以及模拟结果产生异常振荡等问题, 如图 1a 黑河流域张掖站气温模拟结果所示, 气温模拟的年份为从 1990~2001 年, 为了突出问题, 图中仅列出了 1997 年的模拟结果, 其它年份类似。针对这些问题, 在实际模拟过程中, 首先通过引入逐日平均气温来修正生成的最高、最低气温结果, 以随机值作为比例因子控制模拟值接近日平均气温以及背离月平均最高或最低气温的程度, 对发生逻辑错误的模拟值进行修正, 保证模拟趋势的正确性, 然后通过求 5 日滑动平均的方法来光滑模拟的气象结果, 对模型内嵌的天气发生器进行改进^[14]。改进后模拟精度的对比见图 1b 和表 2。从表 2 可以看出, 天气发生器改进后, 气温模拟数据的相关系数 (R)、剩余标准差 (Residual Standard Error RSE) 以及确定性系数 (Nash-Sutcliffe Criterion NSC) 都有较大程度的改善和提高。

2.3 潜在蒸散量 (ET_0) 计算方法的改进

SWAT 模型本身提供了 3 种计算 ET_0 的可选方案, 分别是: Penman-Monteith (PM) 法、Pristley-Taylor 法和 Hargreaves 法。其中 PM 法以能量平衡和水汽扩散理论为基础, 综合考虑了作物的生理特征和空气动力学参数的变化, 适用范围最广, 模拟精度较好^[15]。因此, 利用 PM 法分别对湿润的汉江流域和西北寒旱区的黑河流域进行了 ET_0 模拟, 利用各气象站的实测小型蒸发数据通过逐月的蒸发皿系数和水面蒸发与陆面蒸发转化系数折算成陆面潜在蒸散量^[1], 与模拟值进行相关分析, 在汉江流域相关系数均大于 0.94 黑河流域稍低, 也达到 0.86 以上。

但是通过实测数据和模拟数据的对比发现, 虽然两者之间相关系数较高, 但是数值大小偏差较大, 且随着站点高程的增加, 数值之间的偏差呈增大趋势 (表 3)。

对各站点相关曲线的斜率与站点高程之间进行相关分析可知, 两者之间存在强线性相关关系, 在汉江流域, 相关系数达到 0.97 (图 2); 在黑河流

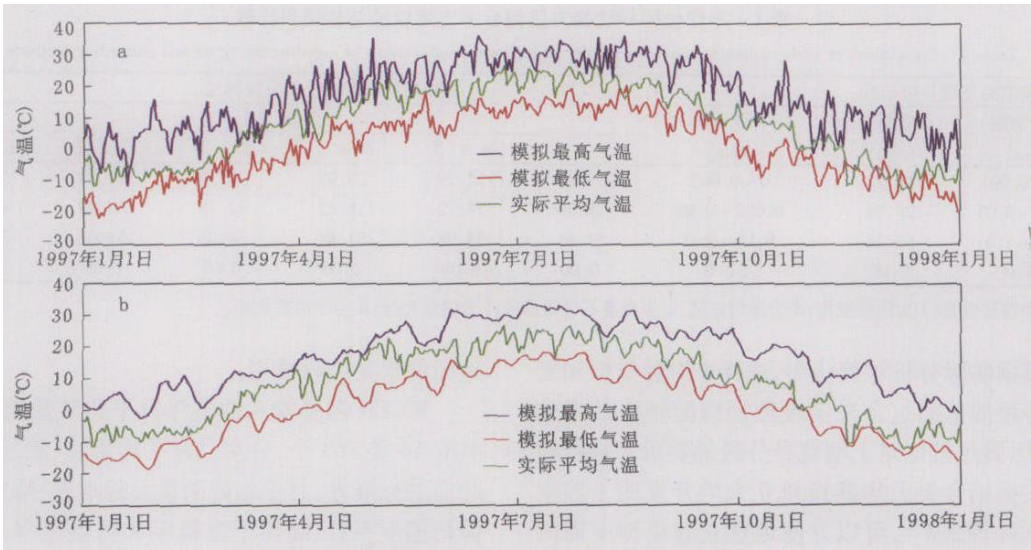


图 1 天气发生器改进前 (a) 后 (b) 气温模拟结果比较

Fig. 1 Comparison of daily temperature simulations by using original (upper) and improved (lower) WGEN

表 2 天气发生器改进前后气温模拟精度比较

比较项	改进前		平均气温修正		平均气温修正 + 5 日滑动平均	
	最高气温	最低气温	最高气温	最低气温	最高气温	最低气温
R	0.80	0.89	0.86	0.92	0.90	0.94
RSE (°C)	6.86	5.03	5.79	4.47	4.98	3.97
NSC	0.62	0.79	0.73	0.83	0.80	0.87

表 3 研究站点高程及相关曲线斜率对照表

Table 3 Elevation and slope of the regressed linear curve of each study station

汉江流域			黑河流域		
站名	高程 (m)	斜率	站名	高程 (m)	斜率
安康	290.8	1.47	平利	569.9	1.52
白河	322.5	1.45	山阳	660.2	1.55
洋县	468.6	1.56	柞水	818.2	1.64
石泉	484.9	1.45	宁陕	858.4	1.72
城固	486.4	1.42	凤县	985.9	1.76
汉中	509.5	1.49	太白	1 543.1	2.01
勉县	548.1	1.53			
			正义峡	1 280	1.18
			高崖	1 370	1.31
			莺落峡	1 700	1.33
			新地	1 880	1.56
			冰沟	2 040	1.69
			祁连	2 789	0.89
			扎马什克	2 810	0.89

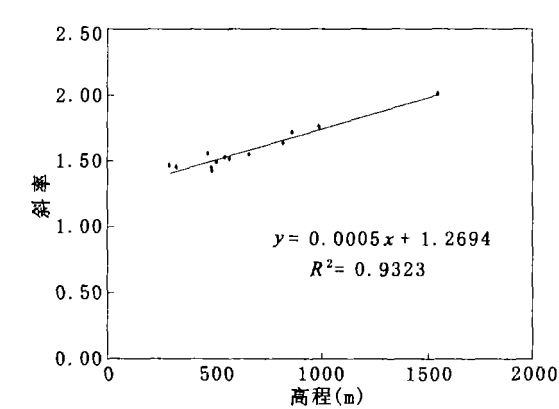


图 2 汉江流域相关曲线斜率与高程相关图

Fig. 2 Plot of the slope of the regressed linear curve versus the elevation of each station at the Hanjiang River basin

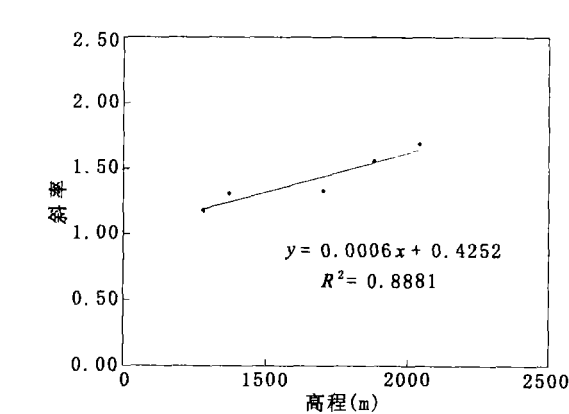


图 3 黑河流域相关曲线斜率与高程相关图

Fig. 3 Plot of the slope of the regressed linear curve versus the elevation of each station at the Heihe River basin

域呈分段线性关系: 高程位于 2 000 m 以下时, 两者呈正相关, 相关系数达到 0.94(图 3), 模拟值小于陆面潜在蒸散量; 当高程大于 2 000 m 时, 相关曲线斜率开始减小, 在 2 500 m 左右, 相关曲线斜率为 1; 当高程大于 2 500 m 时, 相关曲线斜率小于

1, 模拟值大于陆面潜在蒸散量。

因此, 最终经过高程修正后的 Perma n - Monteih法计算公式如下:

$$ET_{(H)} = A \cdot ET_{(P)} \tag{1}$$

式中, $ET_{(P)}$ 为由原始 Perma n - Monteih公式计算得到的潜在蒸散量; $ET_{(H)}$ 为高程修正后的潜在蒸散量; A 为高程修正因子。在湿润的汉江流域, 取

$$A = 1.2694 + 5 \times 10^{-4} \cdot EL \tag{2}$$

在寒旱区的黑河流域, 取

$$A = 0.4252 + 6.0 \times 10^{-4} \cdot EL \quad (EL \leq 2\,000\text{ m}) \tag{3}$$

$$A = 3.8961 - 1.1 \times 10^{-3} \cdot EL \quad (EL > 2\,000\text{ m}) \tag{4}$$

利用高程的修正, 使 Perma n - Monteih 公式明显地考虑了高程对潜在蒸散量的影响, 可以使模拟 ET_0 和陆面潜在蒸散量之间不仅能够保持很好的线性相关性, 而且数据大小接近。

2.4 气象参数空间插值方法的改进

气象站观测得到的或由 WGEN 模拟得到的气象数据一般都是单站点数据, 在模型运行时, 需要将其离散到流域面上。SWAT 模型的空间插值方式采用邻近站点的原则, 将距离子流域中心最近站点的气象数据直接作为该子流域面上的气象数据, 从而实现单站点数据的空间离散。这种空间插值方法本身存在的局限性会对流域水文模拟产生较大影响^[4]。为了适应不同气候环境条件下气象参数的空间离散, 提高 SWAT 模型的适用性, 增加了 3 种新的插值方法——反距离加权法、泰森多边形法和基于 DEM 的 PRISM 插值法^[16-17], 与 SWAT 模型进行了松散耦合。首先根据三种插值方法各自的插值原理求出每一个栅格上的气象要素值, 然后将子流域图层栅格化, 与栅格气象要素层进行空间叠加, 求出同一子流域内栅格气象要素的平均值,

即为该子流域的气象要素值。

3种插值方法的选择可以根据站点的实际分布情况以及站点气象要素随高程的变化情况来选择。具体应用时,在SWAT模型外部首先根据所选用的插值方法进行空间插值,生成时间序列的子流域气象要素文件,然后通过修改模型输入数据接口的方式,将子流域气象要素值读入模型内部,直接分配到相应的子流域和HRUs上,进行水文模拟运算。经降雨-径流模拟试验表明,对气象要素特别是降雨量进行空间插值方法的改进,可很大程度上改善模型冬春季节的径流模拟精度,使模拟的径流量更接近实测值。

3 模型改进后的径流模拟试验

为了检验改进后SWAT模型的水文模拟情况,选择汉江褒河上游江口流域作为研究区域,进行降雨-径流模拟试验。江口流域集水面积约2413 km²,海拔高程900~3400 m,106°48′15″~107°25′34″E、33°38′03″~34°11′08″N。流域边界及子流域划分如图4所示,共划分了37个子流域和344个HRUs。在研究区内选择了11个雨量站和3个气象站的气象水文资料进行模拟,其中流域的断面流量控制站点为江口站。

土地利用/覆被图和土壤图。利用扩充的土壤粒径转换模块,快速方便地把研究区收集到的土壤资料转化成符合USDA标准的土壤数据。使用改进后的气象数据预处理模块和天气发生器可以从有限的气象观测数据中模拟得到模型运转所需的气象数据库。DEM由1:25万比例尺的地形图数字化生成,土壤图由1:25万比例尺的土壤类型图数字化生成,空间分辨率为60 m。该流域的土地利用/覆被图由2001年7月28日的Landsat+ETM(Pass36 Row128)遥感影像经过监督分类解译得到表4列出了江口流域的主要模型水文参数。

表 4 主要的模型水文参数
Table 4 Mainly hydrological parameters

参数名	参数描述	参数值
SMFMX	最大融雪度日因子	5.5 mm/℃
SMFMN	最小融雪度日因子	4.5 mm/℃
SNOCVMX	100% 积雪覆盖时雪水阈值	300.0 mm
SURLAG	地表径流延迟时间	4 d
FFCB	初始土壤水与田间持水量比	0.7
LAT_TTIME	土层侧流延迟时间	8 d
ESCO	土壤蒸发补偿系数	0.95
EPCO	植被吸收补偿系数	0.05
CW_DELAY	地下径流延迟时间	90 d
ALPHA_BF	基流消退系数	0.009

模拟过程中将前3年的气象、水文资料用于模型参数的率定,后2年用于模型的验证。图5给出了模型改进前后的月径流模拟结果比较。在模型率定期,改进前模型效率系数为0.47,相关系数为0.79;模型改进后,模型效率系数和相关系数分别提高到0.92和0.98;在模型验证期,改进前模型效率系数为0.08,相关系数为0.68;模型改进后,模型效率系数和相关系数分别提高到0.94和0.97。从图5可以看出,模型改进后对径流峰值的模拟有明显改善,模拟的精度比模型改进前有很大的提高。

利用改进后的模型在寒旱区的黑河上游山区莺落峡流域也进行了相应的径流模拟试验,分析结果见参考文献[11]。通过在不同水文、气候条件流域的水文模拟结果来看,SWAT模型有较好的气候条件适应性,而且精度较高,可以用于月、年尺度的水文模拟和预测。这主要是和模型采用SCS径流曲线数法进行地表产流计算分不开的。径流曲线数法是一种经验性的降雨-径流计算方法,它避开了传统的干旱区超渗产流、湿润区蓄满产流理论

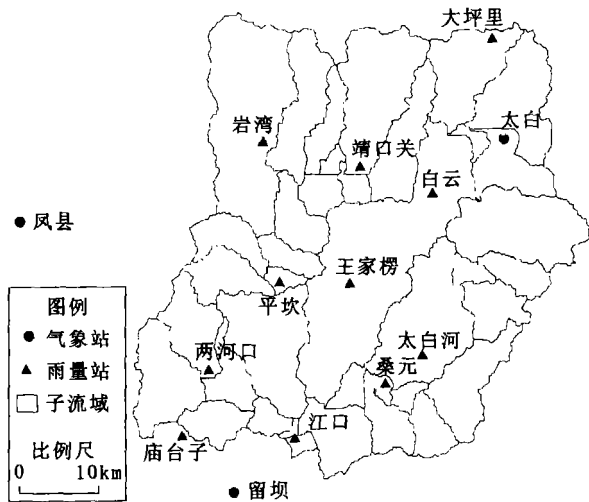


图 4 江口流域水文、气象站点分布图
Fig. 4 Location of hydrological meteorological stations in the Jiangkou catchment

模型驱动使用的气象资料包括实测降雨量资料和天气发生器模拟的最高最低气温、太阳辐射、相对湿度和风速资料,时间序列从1981~1985年。模型驱动使用的另一类资料主要是流域的DEM、

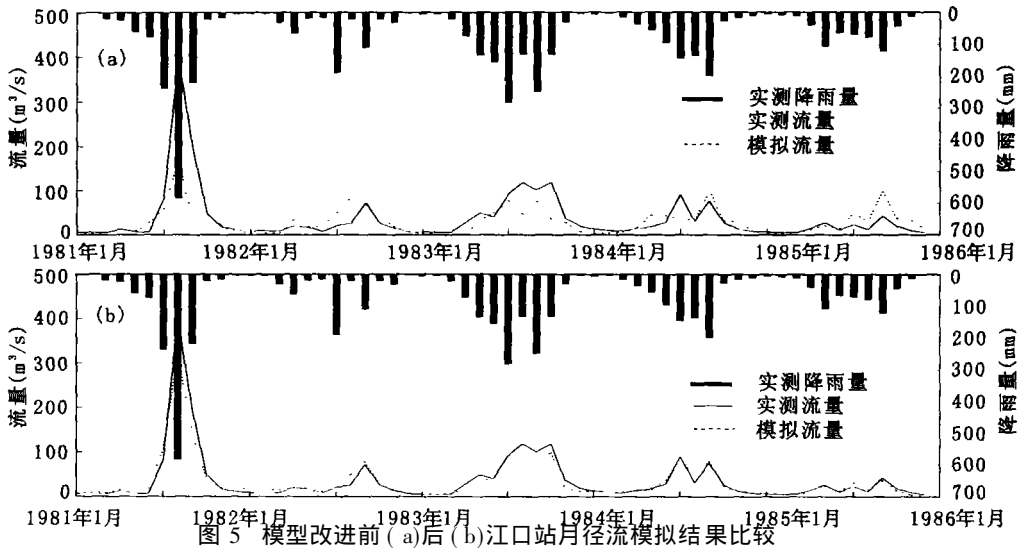


图 5 模型改进前 (a)后 (b)江口站月径流模拟结果比较
Fig 5 Comparison of monthly runoff simulation results by using original (upper) and improved (lower) SWAT model in Jiangkou Station

对气候条件的依赖,而是利用经验关系通过划分不同的水文单元组来计算地表产流,从而使模型具备了不同水文、土壤、气候条件下流域水文模拟的能力。

4 结论和讨论

为了推动 SWAT 模型在中国的适应性研究及应用,提高模型的水文模拟精度及可移植性,针对中国水文气象台站观测项目不齐全、土壤分类标准与欧美国家不一致而导致的模型效率低下的问题,完善了模型中部分参数化方案,并对模型进行了扩充和改进,增加了土壤粒径转换模块和天气发生器数据预处理模块,改进了模型中的天气发生器算法、潜在蒸散量模拟算法和气象水文参数的空间插值方法,使模型的使用效率得到很大提高。利用改进后的模型在汉江褒河上游江口流域进行了降雨-径流模拟检验,可以看出,不管在模型率定期还是验证期,改进后模拟的精度比改进前有很大的提高,而且径流峰值有明显改善,整个模拟时段不仅数值比较吻合,径流过程也很接近实测过程。这为我们进一步利用 SWAT 模型进行水资源管理和规划、产输沙模拟、环境监测、营养物输移等研究提供了坚实的模拟平台。

参考文献:

[1] 赵人俊. 流域水文模拟——新安江模型与陕北模型 [M]. 北

京: 水利电力出版社, 1984.

[2] 王中根, 刘昌明, 吴险峰. 基于 DEM 的分布式水文模型研究综述 [J]. 自然资源学报, 2003 18(2): 168~ 173.

[3] Abbott M B, Bathurst J C. An introduction to the European hydrological system [J]. Journal of Hydrological Process, 1986, 87: 45~ 77.

[4] Arnold JG, Srinivasan R, Ramarayanan T S, et al. Water Resources of the Texas Gulf Basin [J]. Wat Sci Tech 1999 39 (3): 121~ 133.

[5] Liang Xu, Xie Zhenghui. A new surface runoff parameterization with subgrid-scale soil heterogeneity for land surface models [J]. Advances In Water Resources 2001 24 1173~ 1193.

[6] 郭生练, 熊立华, 杨井, 等. 基于 DEM 的分布式流域水文物理模型 [J]. 武汉水利电力大学学报, 2000 33(6): 1~ 5.

[7] Sophocleous M A, Kolliker JK, Govindaraju R S, et al. Integrated numerical modeling for basin-wide water management: The case of the Rattlesnake Creek basin in south-central Kansas [J]. Journal of Hydrology, 1999 214: 179~ 196.

[8] Fontaine T A, Crutckshank T S, Arnold J G, et al. Development of a snowfall-snowmelt routine for mountainous terrain for the soil water assessment tool (SWAT) [J]. Journal of Hydrology, 2002 262 209~ 223.

[9] Eckhardt K, Haverkamp S, Fohrer N, et al. SWAT-G, a version of SWAT99.2 modified for application to low mountain range catchments [J]. Physics and Chemistry of Earth, 2002 27: 641~ 644.

[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] 黄清华, 张万昌. SWAT 分布式水文模型在黑河干流山区流域的改进与应用 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2004 28(2): 22~ 26.

- [12] 刘昌明, 李道峰, 田 英, 等. 基于 DEM 的分布式水文模型在大尺度流域应用研究 [J]. 地理科学进展, 2003, 22(5): 437~445
- [13] 郭兆元. 陕西土壤 [M]. 北京: 科学出版社, 1992
- [14] 张 东, 张万昌. SWAT 2000 气象模拟器的随机模拟原理、验证及改进 [J]. 资源科学, 2004, 26(4): 28~36
- [15] 刘 钰, Pereira L S, Teixeira J L, 等. 参照蒸发量的新定义及计算方法对比 [J]. 水利学报, 1997, 6: 27~33
- [16] Christopher Daly Ronald Gibson. A Statistical-Topographic Model for mapping climatological precipitation over mountainous Terrain [J]. Journal of applied meteorology, 1994, 33(1): 140~158
- [17] 赵登忠, 张万昌, 刘三超. 基于 DEM 的地理要素 PRISM 空间内插研究 [J]. 地理科学, 2004, 24(2): 205~211

Improvement and Application of SWAT —A Physically Based Distributed Hydrological Model

ZHANG Dong^{1,2}, ZHANG Wan-Chang¹, ZHU Li¹, ZHU Qiu-An¹

(1 The International Institute for Earth System Science (ESSI), Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093;

2 School of Geographical Science, Nanjing Normal University, Nanjing, Jiangsu 210097)

Abstract SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model is an advanced physically based distributed hydrological model that is integrated with Remote Sensing (RS), Geographic Information System (GIS) and Digital Elevation Model (DEM) techniques. In order to impel its application study in China and improve the simulation precision of the model in hydrological process studies, some expansions and improvements were made to the modeling system for the real conditions on arid, semiarid Heihe River Basin in the northwestern China and humid Hanjiang River Basin in middle-western China. Firstly, soil grain size transferring module and data pre-processing module for weather generator (WGEN) were added to original SWAT model to encounter the inconsistent problems existed in data standard utilized in Euramerican and Chinese systems. And then the further improvements to the model were done focusing on: 1) three new spatial interpolation methods, including Inverse Distance Weighting method (IDW), Thiessen polygonal method and DEM-based PRISM method, were used as a new choice to replace the original interpolation method that takes the meteorological data from the nearest weather station as the representative weather data for each sub-basin. 2) An advanced approach was proposed to modify the original method in daily maximum and minimum temperature estimations in SWAT for avoiding the logical mistakes in temperature simulations. 3) An areal evapotranspiration estimation module based on improved Penman-Monteith method was developed to replace the original approaches used in SWAT. At last the offline experiment on rainfall-runoff simulations were conducted using the meteorological, land use/cover and soil data from the Jiangkou Basin, the Hanjiang River by means of the improved SWAT model and its original version. The detailed study suggested a significant improvement of modeling performance by the fact that in model calibration period, the Nash-Sutcliffe Criterion (NSC) and correlation coefficient were improved from 0.47 and 0.79 to 0.92 and 0.98 respectively, while in validation period, they were improved from 0.08 and 0.68 to 0.94 and 0.97 accordingly. The improved SWAT model and its software packs will impel the application studies in the relevant disciplines in China.

Key words SWAT model; soil grain size transfer; weather generator; evapotranspiration; spatial interpolation