

基于 SWAT 模型的汉江流域径流模拟

夏智宏¹ 周月华¹ 许红梅²

(1. 武汉区域气候中心, 武汉 430074; 2. 国家气候中心)

提 要: 应用 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)分布式水文模型对汉江流域 1971—2000 年 30 年逐月径流进行了模拟。结果表明:模型模拟精度高于评价标准(模拟效率 $Ens > 0.5$, 相关系数 $r^2 > 0.6$), SWAT 模型适用于汉江流域的径流模拟; 水量平衡各要素中, 30 年月、年平均蒸散发量、地表径流量、土壤对地下水补给量、土壤含水变化量、地下水侧流量分别占降水量的 55.97%、25.88%、17.64%、0.26%、0.25%, 蒸散发是该流域水量的主要输出项; 各月 30 年平均降水量变化趋势与地表径流量变化趋势较一致, 而与基流量变化趋势一致性较差; 30 年流域降水量年变化趋势与地表径流量、基流量的变化趋势较一致; 30 年月、年地表径流量对降水的响应程度高于基流。

关键词: SWAT 模型 汉江流域 径流模拟

Runoff Simulation in Hanjiang River Basin Based on SWAT Model

Xia Zhihong¹ Zhou Yuehua¹ Xu Hongmei²

(1. Wuhan Regional Climate Center, Wuhan 430074; 2. Laboratory for Climate
Studies of China Meteorological Administration, National Climate Center)

Abstract: Monthly runoff in the Hanjiang River Basin from 1971 to 2000 was simulated by using the SWAT model. The results show that SWAT simulation precision is higher than the criterion($Ens > 0.5$, $r^2 > 0.6$), and the SWAT model is appropriate to simulate the runoff in the Hanjiang River Basin. Among the essentials of water balance, the percentages of 30a monthly/annual mean evapotranspiration, surface runoff, percolation, soil water, lateral flow to the amount of rainfall are 55.97%, 25.88%, 17.64%, 0.26%, and 0.25% respectively, and evapotranspiration is the main output item of rainfall. The trend of monthly mean rainfall from 1971 to 2000 is in accordance with the trend of surface runoff in Hanjiang River

基金项目: 中国气象局气候变化专项“未来 50 年南水北调中线水源区水资源变化分析”(CCSF2007-22)

收稿日期: 2008 年 2 月 29 日; 修定稿日期: 2009 年 4 月 23 日

Basin, but is not in accordance with base flow; the trend of annual mean rainfall from 1971 to 2000 is in accordance with the trend of surface runoff and base flow; the 30a monthly/yearly surface runoff's response to rainfall is higher than base flow.

Key Words: SWAT (soil and water assessment tool) model Hanjiang River Basin runoff simulation

引 言

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 模型是由美国农业部(USDA)的农业研究中心(ARS)研发的,比较适用面向水资源管理的长时段的分布式水文过程模拟。SWAT 模型于 20 世纪 90 年代早期正式推出,ARS 在 1998 年发布了 SWAT 与 GIS 软件(如 GRASS、Arcview)的集成版本^[1]。SWAT 模型的有效性已经得到了国内外许多研究项目和研究者的证明^[2-8],并已广泛地应用于美国国家项目 HUMUS (Hydrological Unit Modeling of United States)。SWAT 模型在我国的应用和植入研究刚刚起步,还很薄弱。国内学者杨桂莲、郝芳华等基于 SWAT 模型与数字滤波技术对河南洛河流域的径流中的基流进行估算和比较,结果表明模型对基流的模拟有较高精度^[5]。张雪松在卢氏流域(4623km²)应用 SWAT 模型进行中尺度流域的产流产沙模拟试验,得出模型在长期连续径流和泥沙负荷模拟中具有较好的适用性^[6]。胡远安等的研究也证明 SWAT 能够有效地模拟长时间序列的水文过程^[7]。朱利应用 SWAT 模型研究了汉江上游区径流对气候变化的响应,指出汉江上游区的降水变化对水资源的影响大于气温变化对水资源的影响^[8]。本文利用 SWAT 模型模拟整个汉江流域 1971—2000 年逐月径流,分析该流域水量平衡状况、径流变化及其对降水变化的响应,为汉江流域的水资源管理与研究提供一种新的有效方法。

1 研究区域概况

汉江是长江中游的重要支流,发源于秦岭南麓,流经陕西、甘肃、四川、河南、湖北五省。其干流流经陕西和湖北两省,于武汉市汇入长江,全长 1577km,落差 1964m,流域面积 $15.9 \times 10^4 \text{ km}^2$,流域水系呈叶脉状,支流众多^[9-10]。汉江流域属于北亚热带边缘湿润季风气候区,由于受秦岭、米仓山、巴山地形的影响,同时兼有暖温带和中温带山地气候的特征,气候温和,四季分明,雨量较充沛(多年平均达 960mm 左右);降水年内分配不均,每年 5—9 月的总降水量占全年降水量的 70%;降水年际变化大,无霜期长。汉江流域径流补给以降水形成的地表径流为主(多年平均达 249.28mm),地下径流为次(多年平均达 154.72mm),径流分布规律为南多北少,山地多川道盆地少。径流年内分配不均,夏秋多,春冬少;径流多年变化过程与降水多年变化过程基本一致。

2 资料收集与处理

2.1 气象观测数据

汉江流域气象数据来源于中国气象局国家气象信息中心,包括 15 个气象台站(图 1a,见彩页)的 1971—2000 年逐日气温(平均、最高、最低)、降水、相对湿度、风速等气象要素,用于驱动 SWAT 水文模型进行径流模拟。

2.2 流量数据

流量数据来源于水利部水文局,包括

1983、1985 年荆紫关水文站(位于汉江上游支流,33.25°N、111.02°E)逐月平均径流量,2000 年安康水文站(位于汉江上游干流,32.67°N、109.00°E)逐月平均径流量,上述水文站点分布如图 1a(见彩页)。其中,1983 年荆紫关站逐月径流量数据用于率定 SWAT 模型的参数,1985 年荆紫关站以及 2000 年安康站逐月径流量数据用于检验模型模拟精度。

2.3 地理空间数据

2.3.1 数字高程模型

DEM 数据来源于国家 1:25 万基本比例尺地形图,空间分辨率重采样为 1km×1km(图 1b,见彩页)。利用 Arcview 的空间分析功能提取水流方向、水流长度、河流网络、划分子流域以及水文模拟单元,计算地形因子,获取 SWAT 模型所需要的地形、水系、汇流区域等信息。

2.3.2 土地利用覆盖数据

土地利用覆盖数据来源于美国地质调查局(USGS)1976 年获取的土地利用覆盖栅格图,空间分辨率为 1km×1km,在汉江流域内分布有 15 种类型。根据 USGS Land Use/Land Cover System 与 SWAT 模型中土地利用覆盖分类标准的对应转化关系重新分类,获得符合 SWAT 土地利用覆盖分类标准的 9 种类型(图 1d,见彩页)。

2.3.3 土壤数据

土壤数据来源于中国地图出版社 1978 年出版的中国土壤分类基础图,比例尺为 1:4000 000,在汉江流域内分布有 11 种土壤类型。考虑到汉江流域土壤属性特征以及 SWAT 模型中土壤物理特性的美制标准,在采纳前人的经验和知识的前提下^[11-12],将一些物理特性近似或者面积较小的类型归为同一类型,在原分类基础上对土壤进行重分类,重

分类后的汉江流域土壤类型有 7 种,分别是粘土(NT)、粘壤土(NRT)、沙粘壤土(SNRT)、沙壤土(SRT)、粉沙壤土(FSRT)、粉沙粘壤土(FSNRT)和粉沙土(FST),如图 1c(见彩页)所示。

2.4 定制 WGEN

WGEN(Weather Generator)是根据气象因子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,通过平均气象数据来模拟周期性的日气象数据变化过程^[13-14]。SWAT 模型通过与 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者缺失地区的水文过程模拟。本研究中需要输入的多年月平均气象统计数据共有 14 类 168 个,分别为月平均最高气温及相应标准差、月平均最低气温及相应标准差、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。上述数据的统计计算工作量比较大且繁琐,因此,在实际的 WGEN 数据准备过程中,根据各输入数据的统计方法,利用 Microsoft SQL 编写存储过程读取长时段气象数据,快速计算天气发生器所需的气象统计数据。在此基础上利用 WGEN 和气象要素实测数据建立 SWAT 模型气象数据库,模拟出模型运行所需的气象驱动资料。

3 SWAT 模型产流模拟原理

SWAT 模型的产流模拟不同于一般的统计模型,它具有很强的物理机制^[15],气温控制降水形态、冰雪融化、蒸散发、地下径流补给等物理过程,并最终导致产流量的变化,SWAT 模型中产流过程如图 2 所示。该模型采用 SCS 方法^[16]和 Green&Ampt^[17]入渗方法计算地表径流。在计算蒸散发时,考虑

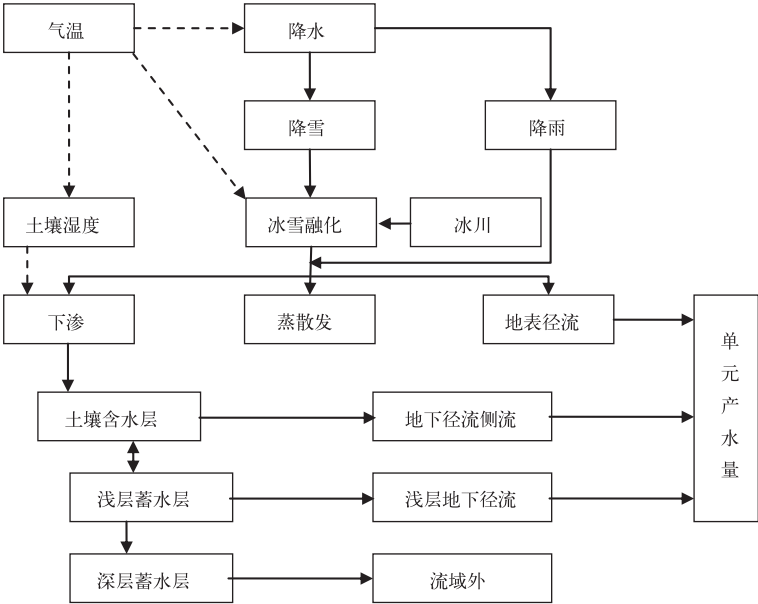


图 2 产流过程示意图

水面蒸发、裸地蒸发和植被蒸发,并分开模拟土壤水蒸发和植被蒸腾。潜在土壤水蒸发由潜在蒸散发和叶面积指数估算,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积指数的线性关系式计算,并提供 3 种潜在蒸散发计算方法 (Penman-Montieth 法^[18]、Priestley-Talor 法^[19]、Hargreaves 法^[20]) 供选择。壤中流采用动力贮水模型^[21] 计算,考虑水力传导度、坡度和土壤含水量的时空变化。

4 实例研究

输入研究区域水文气象资料、土地利用覆盖资料、土壤类型资料、DEM 资料以驱动 SWAT2005 运行,在研究区域内共提取 35 个子流域,129 个水文响应单元(HRUs),提取的集水区面积为 126683km² (如图 3 所示)。在划分子流域内水文响应单元时,土地利用覆盖类型占子流域面积阈值取10%,土

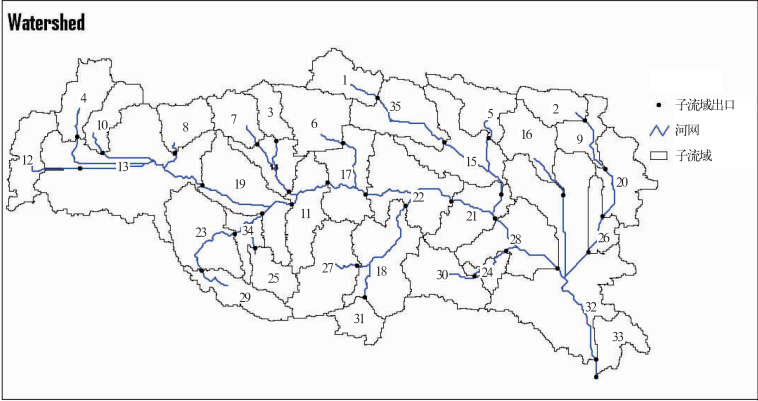


图 3 汉江流域子流域划分

壤类型占土地利用覆盖面积阈值取值 10%。采用 SCS 法计算地表径流, Penman-Monteith 法计算潜在蒸发, 模拟 1971—2000 年汉江流域逐月径流。

4.1 参数敏感性分析与率定

选取 27 个模型输入参数进行参数敏感

性分析试验, 设置参数值采样间隔为 10, 每次参数变化值为 0.05, 利用 AVSWAT2005 自动敏感性分析工具进行了 280 次比较判断, 选取了敏感性等级最高的 6 个参数(如表 1 所示)进行模型率定。

利用 1983 年荆紫关站逐月流量序列对月径流模拟进行率定, 根据“先调整水量平衡, 再

表 1 模型率定的主要参数

等级	输入文件	校准参数	参数含义	值域/文化范围	参数值
1	*, mgt	CN2	半湿润径流曲线系数	+/-25%	75.8
2	*, sol	SOL_AWC	土壤前期含水量	0.00~1	0.02
3	*, hru	ESCO	土壤蒸发补偿系数	0.00~1	0.00
4	*, gw	GW_REVAP	地下水蒸发系数	0.02~0.20	0.02
5	*, gw	REVAPMN	浅层地下水下渗的深度阈值	0.00~500.000	1.00
6	*, gw	GWQMN	其流产生阈值	0.00~5000.000	0.00

调整过程; 先调整地表径流, 再调整土壤水、蒸散发和地下径流”的原则^[22], 首先调整 CN₂、SOL_AWC、ESCO 来拟合地表径流, 随后调整 GW_REVAP、REVAPMN、GWQMN 来拟合基流。参数率定结果如表 1 所示。

4.2 径流模拟验证

利用荆紫关站 1985 年和安康站 2000 年逐月流量数据进行模型验证, 并采用 Nash-Sutcliffe 模拟效率系数 Ens 和相关系数 r^2 对模型的验证结果进行评价。Nash-Sutcliffe 越大, 相关系数 r^2 越高, 表明模拟效率越高。如果 $Ens < 0$, 说明模型模拟值比实测值可信度更低, 通常取 $Ens > 0.5$ 作为径流模拟效率的评价标准^[23]。 r^2 越接近 1, 说明模拟径流量与实测径流量越接近(模拟径流对实测径流的解释度越高), 通常取 $r^2 > 0.6$ 作为径流模拟与实测值相关程度评价标准。

荆紫关站率定期, 荆紫关站和安康站验证期月径流模拟效率及拟合情况见表 2、图 4、图 5。模型效率系数 Ens 、相关系数 r^2 值表明, SWAT 模型适用于模拟汉江流域径流变化。

表 2 SWAT 模型月径流模拟效率

站名	时段	相关系数 r^2	模拟效率 Ens
荆紫关站	1983.01—1983.12	0.65	0.57
荆紫关站	1985.01—1985.12	0.73	0.68
安康站	2000.01—2000.12	0.71	0.65

Nash-Sutcliffe 系数:

$$Ens = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (1)$$

相关系数:

$$r^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})(Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2 \sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})^2} \quad (2)$$

其中, Ens 为 Nash-Sutcliffe 效率系数; r^2 为相关系数平方; $Q_{obs,i}$ 为天然流量; $Q_{sim,i}$ 为模拟流量; $\bar{Q}_{obs}$ 为多年平均天然流量; $\bar{Q}_{sim}$ 为多年平均模拟流量; n 为模拟流量序列长度。

4.3 模拟径流结果分析

通过模型检验后, 对 1971—2000 年 30 年逐月径流量进行了模拟, 分析了汉江流域

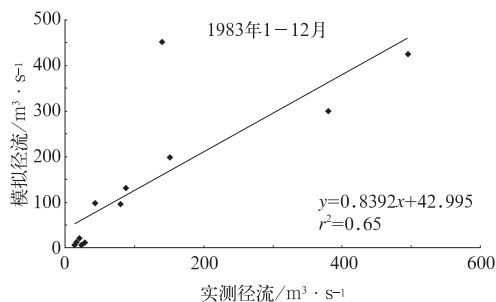


图4 荆紫关率定期实测与模拟径流拟合图

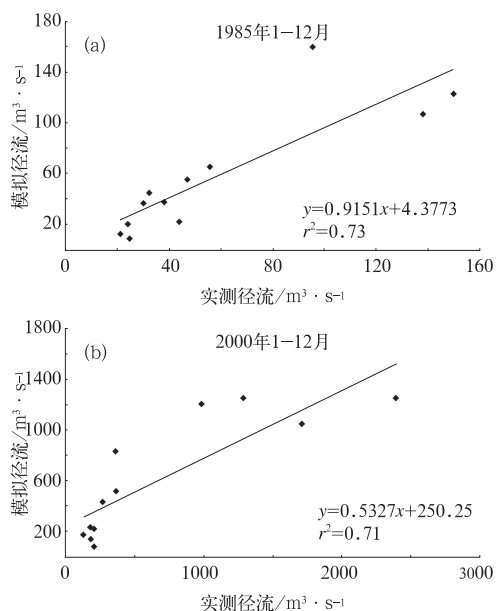


图5 (a) 荆紫关率定期实测与模拟径流拟合图;
(b) 安康站验证期实测与模拟径流拟合图

的水量平衡以及径流变化情况。

4.3.1 汉江流域水量平衡分析

流域的水循环过程对水量水质状况产生重要影响,对于生态环境的可持续发展有着重要作用,而流域水量平衡各分量特别是支出项的观测比较困难,探求流域内各水量的分配,需借助模型模拟的研究手段^[24-25]。作者借助 SWAT 模型对汉江流域 30 年月、年水量平衡进行了分析,其水量平衡方程如下。

$$PREC = SURQ + PERCOLATE + LATQ + ET + \Delta S \quad (3)$$

式中, $PREC$ 为降水量(mm), $SURQ$ 为地表径流量(mm), $PERCOLATE$ 为土壤对地下水补给量(mm), $LATQ$ 为地下侧流量(mm), ET 为实际蒸散发量(mm), ΔS 为土壤含水量变化(mm)。

(1) 1971—2000 年月平均水量平衡分析

汉江流域 1971—2000 年 1—12 月 30 年平均的水量平衡分析结果(如表 3)表明,30 年月平均降水量为 80.27mm,地表径流量为 20.77mm,土壤对地下水补给量为 14.16mm,地下水侧流量为 0.20mm,实际蒸散发量为 44.93mm,土壤含水变化量 0.21mm;月平均蒸散发量、地表径流量、土壤对地下水补给量、土壤含水变化量、地下水侧流量分别占降水量的 55.97%、25.88%、17.64%、0.26%、0.25%,蒸散发量是该流域水量的主要输出项;按季节划分,流域地表径流量、土壤对地下水补给量、地下水侧流量、实际蒸散发量、土壤含水变化量的最大值分别在夏季(146.05mm)、秋季(68.63mm)、秋季(0.71mm)、夏季(311.66mm)、秋季(37.5mm);最小值分别在冬季(2.43mm)、冬季(17.71mm)、春季(0.51mm)、冬季(23.23mm)、冬季(2.16mm)。

(2) 1971—2000 年 30 年年平均水量平衡分析

如表 4 所示,汉江流域 30 年年平均降水量为 963.22mm,地表径流量为 249.28mm,土壤对地下水补给量为 169.93mm,实际蒸散发量 539.10mm,土壤含水变化量 2.48mm;蒸散发是该流域水量的主要输出项,年均蒸散发量占年均降水量的 55.97%,但是年际变化不大(年均变化率为 5%);地表径流占年均降水量的 25.88%,受降水影响地表径流年际变化较大(年均变化率为 41%);年均土壤对地下水补给量占降水量的 17.64%,土壤对地下水的补给量与降水量关系密切,呈正相关关系,并直接影响基流量的

表 3 汉江流域 1971—2000 年 30 年平均的 1—12 月水量平衡表

月份	降水量/mm	地表径量/mm	土壤对地下水补给量/mm	地下侧流量/mm	实际蒸散发/mm	土壤含水量变化/mm
1	12.36	0.61	5.22	0.20	6.39	-0.06
2	17.31	1.32	5.60	0.16	11.05	-0.82
3	43.74	4.95	12.12	0.16	20.97	5.54
4	67.62	13.07	17.08	0.16	37.24	0.07
5	103.49	26.19	18.50	0.18	66.50	-7.88
6	125.12	36.12	11.13	0.19	92.80	-15.12
7	190.29	65.66	13.96	0.21	123.30	-12.84
8	148.19	44.27	10.80	0.21	95.56	-2.65
9	124.09	32.02	19.86	0.22	45.50	26.49
10	82.28	19.08	29.19	0.25	23.00	10.76
11	36.59	5.49	19.58	0.25	11.01	0.26
12	12.15	0.50	6.89	0.24	5.80	-1.28
平均	80.27	20.77	14.16	0.20	44.93	0.21
比例/%	—	25.88	17.64	0.25	55.97	0.26

注:该流域季节划分为春季(3—5月)、夏季(6—8月)、秋季(9—11月)、冬季(12—2月)

表 4 汉江流域 30 年(1971—2000 年)年平均水量平衡表(单位:mm)

1971—2000	降水量/mm	地表径量/mm	土壤对地下水补给量/mm	地下侧流量/mm	实际蒸散发/mm	土壤含水量变化/mm
平均	963.22	249.28	169.93	2.43	539.10	2.48
比例/%	—	25.88	17.64	0.25	55.97	0.26

大小;年均土壤含水变化量占降水量的 0.26%,土壤含水量年均变化率为 0.16%,符合长时间序列土壤剖面水量变化特征。

4.3.2 对 1971—2000 年 30 年径流月变化的模拟

1—12 月 30 年平均径流模拟结果(如图 6)表明,30 年月地表径流量 5—9 月多,1—4 月、10—12 月少;地表径流量月变化趋势与降水量月变化趋势较一致,从年初开始递增,7 月达到最大值后开始减少;月基流量与月降水量无明显相关关系;各月 30 年平均降水量、地表径流量最大值均在 7 月,各月

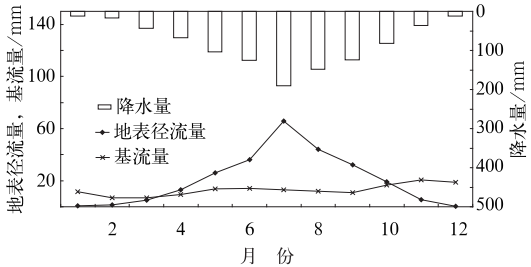


图 6 汉江流域 1971—2000 年 1—12 月平均径流变化

30 年平均基流量最大值出现在 11 月;各月 30 年平均降水量、地表径流量最小值出现在 12 月,各月 30 年平均基流量最小值出现在 2 月;月地表径流量对降水量的响应程度高于月基流量。

各月 30 年平均地表径流量月变率均值高于基流量月均变化率,分别为 0.95、0.22。地表径流量月变率与降水量月变率变化较一致,基流量月变率与降水量月变率无明显相关关系;各月 30 年平均降水量、地表径流量、基流量月变化率最大值分别为 1.53、2.75、0.52,分别出现在 3 月、3 月、10 月;最小值分别为 0.16、0.28、0.01,分别出现在 9 月、9 月、3 月;地表径流量月变率对降水量月变率的响应较明显。

4.3.3 对 1971—2000 年 30 年径流年变化的模拟

如图 7 所示,30 年年平均地表径流深(249.28mm)是基流深(154.72mm)的 1.6 倍。30 年年地表径流量与降水量、基流量最

大值出现的年份一致,均在汉江流域的丰水年 1983 年。30 年年地表径流量与降水量最小值出现的年份一致,均在汉江流域枯水年 1997 年;而基流量最小值出现在 1971 年。降水多的年份,地表径流量、基流量较高;降水较少的年份,地表径流对降水的响应程度比基流对降水的响应程度高。

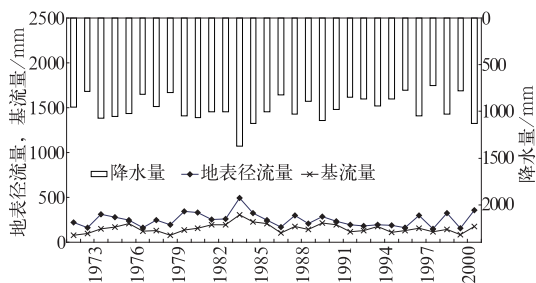


图 7 汉江流域 30 年(1971—2000 年)年平均径流变化

30 年流域地表径流量、基流量的年变化趋势与降水量年变化趋势基本一致,年均变化率分别为 0.41、0.33、0.18,地表径流量年变化率最高,降水量年变化率最低。地表径流量与降水量年变率的变化趋势基本一致,基流量与降水量年变率的变化趋势在个别年份相反,如 1994 年、1995 年、1997 年、1999 年(上述 4 年份的年降水量均小于 30 年年均降水量,为汉江流域降水偏少年)。年流域降水量、地表径流量、基流量变化率最大值分别为 0.45、1.31、1.07,均出现在 2000 年,降水量年际变化率高时,径流变化对降水变化响应较明显;最小值分别为 0.00、0.02、0.01,分别出现在 1982 年、1994 年、1982 年,降水量年际变化率低时,径流变化对降水变化响应不明显。

5 总结与讨论

(1) 利用 SWAT 模型模拟了汉江流域径流过程,模拟精度达到了评价标准,说明 SWAT 模型较适合于汉江流域径流模拟。

(2) 1971—2000 年 30 年月、年平均水量平衡分析结果表明,月、年平均蒸散发量、地表径流量、土壤对地下水补给量、土壤含水量变化量、地下水侧流量分别占降水量的 55.97%、25.88%、17.64%、0.26%、0.25%,蒸散发是该流域水量的主要输出项。

(3) 汉江流域各月 30 年(1971—2000 年)平均降水量变化趋势与地表径流量的变化趋势较一致,而月基流量与月降水量无明显相关关系。

(4) 汉江流域 1971—2000 年 30 年流域降水量年变化趋势与地表径流量、基流量的变化趋势较一致。

(5) 1971—2000 年 30 年月、年地表径流量对降水量的响应程度比基流量对降水量的响应程度高。

尽管 SWAT 模型的模拟效率高于评价标准,但模拟效率仍然不高,这与模型采用的土地利用、覆盖、土壤数据的时空局限性以及流域集水区范围有关。因此,采用多种水文评估模型(如 SWIM、Topmodel、HBV),根据不同时期的下垫面信息分时段分流域模拟径流,以期进一步提高模拟效率,找到更适合于汉江流域径流模拟的水文模型是今后努力解决的问题。

参考文献

- [1] Arnod 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.
- [2] Sophocleous M A, Koelliker J K, Govindaraju R S, et al. Integrated numerical modeling for basinwide water management: the case of the Rattlesnake Creek Basin in South Central Kansas[J]. Journal of Hydrology, 1999, 214:179-196.
- [3] Eckhardt K, Haverkamp S, Fohrer N, et al. SWAT - G, a version of SWAT 99.2 modified for application to low mountain range catchments[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2002, 27(9/10): 641-644.

- [4] Arnold J G, Allen P M. Estimating hydrologic budgets for three Illinois Watersheds[J]. Journal of Hydrology, 1996, 176: 57-77.
- [5] 杨桂莲, 郝芳华, 刘昌明, 等. 基于 SWAT 模型的基本流估算及评价: 以洛河流域为例[J]. 地理科学进展, 2003, 22(5): 463-471.
- [6] 张雪松, 郝芳华, 杨志峰, 等. 基于 SWAT 模型的中尺度流域产流产沙模拟研究[J]. 水土保持研究, 2003, 10(4): 38-42.
- [7] 胡远安, 程声通, 贾海峰. 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[J]. 环境科学研究, 2003, 16(5): 29-36.
- [8] 朱利, 张万昌. 基于径流模拟的汉江上游区水资源对气候变化的响应研究[J]. 资源科学, 2005, 27(2): 16-22.
- [9] 湖北省水利厅, 湖北省防汛抗旱指挥部办公室. 湖北长江防汛[M]. 武汉: 湖北人民出版社, 2000: 11-12.
- [10] 姜允迪. 渭河汉江流域秋雨成灾台风龙王造成福建严重损失[J]. 气象, 2006, 31(1): 126-127.
- [11] 龚子同, 张甘霖, 陈志诚, 等. 以中国土壤系统分类为基础的土壤参比[J]. 土壤通报, 2002, 33(1): 1-5.
- [12] 王庆云, 徐能海. 湖北省土系概要[M]. 武汉: 湖北科技出版社, 2001.
- [13] 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.
- [14] 吴金栋, 王馥堂. 气候变化情景生成技术研究综述[J]. 气象, 1998, 24(2): 3-8.
- [15] 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.
- [16] USDA. Urban Hydrology for Small Watersheds. Engineering Division, Soil Conservation Service, USDA, Technical Release 55, 1986.
- [17] Green W H, Ampt G A. Studies on soil physics, 1. The flow of air and water through soils. Journal of Agricultural Sciences, 1911, 4: 11-24.
- [18] 朱自玺. 美国农业气象和农田蒸散研究[J]. 气象, 1996, 22(6): 3-9.
- [19] Priestley C H B, Taylor R J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters[J]. Mon Weather Rev, 1972, 100: 81-92.
- [20] 田宏, 徐崇浩, 等. 四川盆地干旱动态评估指标的研究[J]. 气象, 1998, 24(4): 11-15.
- [21] Sloan PG, Moore ID. Modeling Subsurface Stormflow on Steeply Sloping Forested Watersheds. Water Resources Research, 1984, 20(12): 1815-1822.
- [22] 朱新军, 王中根, 李新建, 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.
- [23] 盛春淑, 罗定贵. 基于 AVSWAT 丰乐河流域水文预测[J]. 中国农学通报, 2006, 22(9): 493-496.
- [24] 代俊峰, 陈家宙. 不同林草系统对集水区水量平衡的影响研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(4): 435-443.
- [25] 刘巍巍, 安顺清, 等. 以气候适宜降水量为基础的水分距平的计算方法[J]. 气象, 2003, 29(4): 14-23.

夏智宏等:基于SWAT模型的汉江流域径流模拟

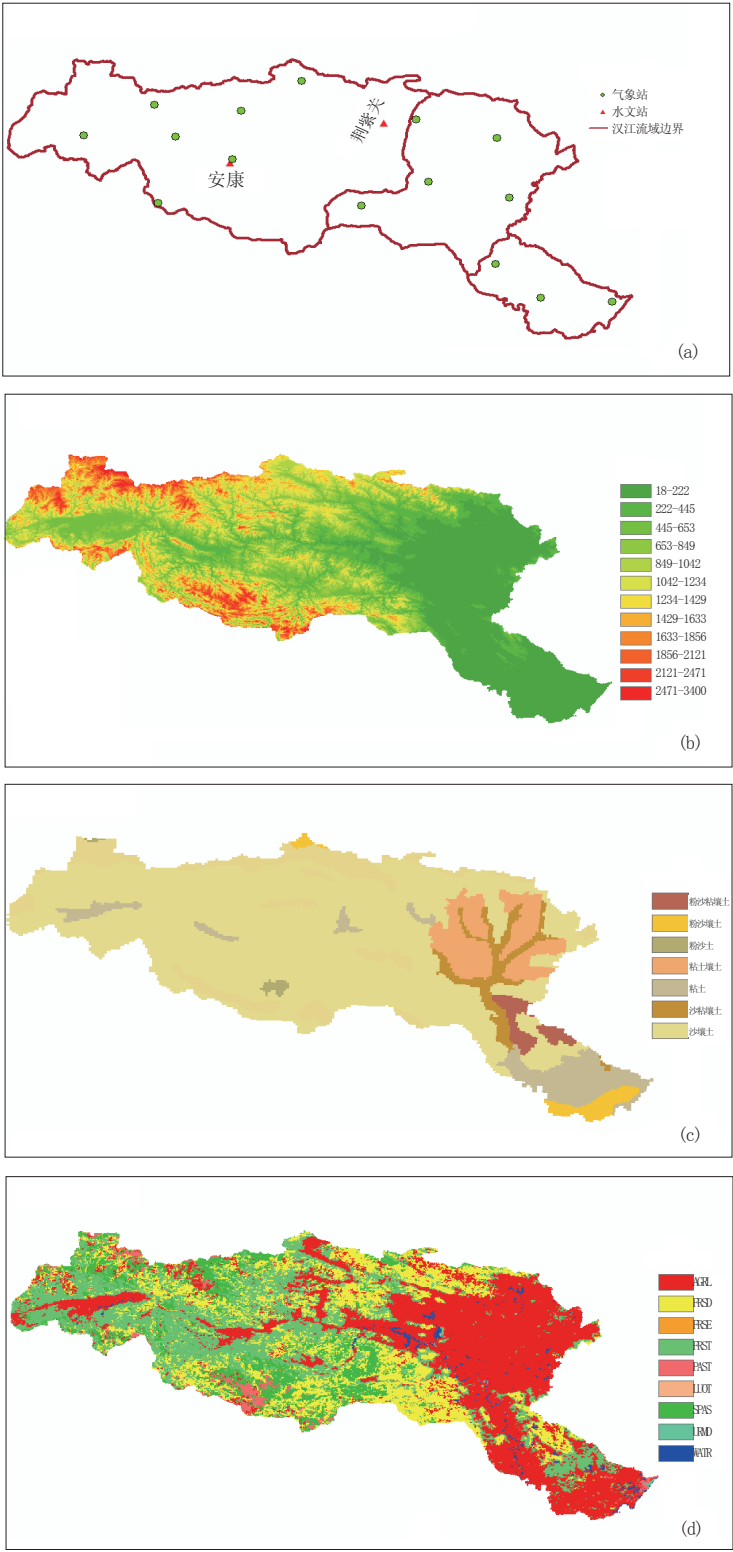


图 1 (a) 气象、水文站点分布; (b) DEM; (c) 土壤分布; (d) 土地利用覆盖