

# SWIM 水文模型在王家坝地区的适用性评估

高超<sup>1</sup>, 陆苗<sup>2</sup>, 姚梦婷<sup>2</sup>, 孙艳伟<sup>1</sup>

(1. 宁波大学 地理与空间信息技术系, 浙江 宁波 315211; 2. 安徽师范大学 国土资源与旅游学院, 安徽 芜湖 241000)

**摘要:** [目的] 评估 SWIM 水文模型参数值变化对模拟王家坝地区径流精度的影响, 为王家坝地区洪涝灾害的预报和减灾提供科学支持, 并为 SWIM 在其他地区应用提供参照。[方法] 利用王家坝地区率定期 (1959—1978 年) 和验证期 (1979—2008 年) 的实测数据, 得到最优参数组合后定量分析 SWIM 在王家坝地区对 7 个可率定参数的敏感性。[结果] 率定期和验证期模拟日径流量纳西效率分别达 0.79 和 0.81, 相对误差分别为 22% 和 7.8%。随着参数  $thc$  (计算潜在蒸腾时对大气散射率的校准因子) 值的增大, 相对误差显著下降, 其对  $thc$  值的敏感性强于纳西系数。  $roc_1$  (河道汇流系数) 比  $roc_2$  (河道汇流系数) 更能影响日径流, 而  $roc_2$  对径流影响汛期大于非汛期。随着参数  $scor$  (饱和和传导率校正因子) 值的增大, 模拟精度在汛期提高非汛期降低。[结论] 率定后的 SWIM 模型在王家坝地区适用性良好; SWIM 模拟结果在王家坝地区对  $thc$ ,  $cnum_1$  (曲线数法代码为 1 时, CN 条件 1),  $cnum_3$  (曲线数法代码为 1 时, CN 条件 3),  $roc_2$ ,  $roc_1$ ,  $scor$  取值变化比较敏感, 对参数  $bff$  (基流因子),  $gwq_0$  (初始地下水对径流量的贡献) 和  $abf_0$  (地下水阿尔法因子) 取值变化不敏感。

**关键词:** SWIM 模型; 纳西效率; 模型适用性; 参数敏感性; 王家坝地区

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2018)01-0152-08

中图分类号: P333.9

**文献参数:** 高超, 陆苗, 姚梦婷, 等. SWIM 水文模型在王家坝地区的适用性评估[J]. 水土保持通报, 2018, 38(1):152-159. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2018.01.027. Gao Chao, Lu Miao, Yao Mengting, et al. Applicability evaluation of the SWIM hydrological model in Wangjiaba Region of China[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(1):152-159.

## Applicability Evaluation of the SWIM Hydrological Model in Wangjiaba Region of China

GAO Chao<sup>1</sup>, LU Miao<sup>2</sup>, YAO Mengting<sup>2</sup>, SUN Yanwei<sup>1</sup>

(1. Department of Geography & Spatial Information Techniques, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China;

2. College of Territorial Resources and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu, Anhui 241000, China)

**Abstract:** [Objective] The paper aims to evaluate the influence of changes in parameters of SWIM (soil and water integrated model) on the simulation accuracy of runoffs in Wangjiaba region, and provides scientific support for flood forecasting and disaster reduction, and provides a reference for the application of SWIM in other areas. [Methods] Based on the measured data at Wangjiaba region during the calibration period (1959—1978) and the validation period (1979—2008), the optimal parameter combination was obtained, and the sensitivity of SWIM to the seven calibratable parameters in Wangjiaba region was quantitatively analyzed. [Results] The Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) coefficients of runoffs in the calibration and validation periods were 0.79 and 0.81, respectively, with relative errors of 22% and 7.8%, respectively. With the increase of the  $thc$  parameter (correction factor for potential evapotranspiration on sky emissivity), the relative error increased significantly, and its sensitivity to the  $thc$  value was higher than that of the NSE coefficient.  $roc_1$  (river routing coefficient) was more effective than  $roc_2$  (river routing coefficient), while  $roc_2$  had a larger effect on runoff in flooding season than in non-flooding season. With the increase of the  $scor$  parameter (correlation factor for saturated conductivity), the simulation accuracy increased during the flooding season and decreased during the non-flooding season. [Conclusion] The calibrated SWIM model shows good applicability in Wangjiaba region. The results of SWIM simulation in Wangjiaba region are sensitive to variations in the parameters

收稿日期: 2017-06-27

修回日期: 2017-07-21

资助项目: 国家自然科学基金项目“不同空间尺度农业旱涝灾害气象因子致灾阈值的确定: 以淮河上游地区为例”(41571018)

第一作者: 高超(1978—), 男(汉族), 安徽省全椒县人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事气候变化与水文水资源研究。E-mail: gaoqinchaol@163.com.

通讯作者: 孙艳伟(1983—), 男(汉族), 内蒙古赤峰市人, 博士, 讲师, 主要从事遥感地学分析研究。E-mail: sunyanwei@nbu.edu.cn.

the,  $cnum_1$  (CN condition 1 when the curve number method code is 1),  $cnum_3$  (CN condition 3 when the curve number method code is 1),  $roc_2$ ,  $roc_4$  and  $sccor$ , but not to variations in the parameters  $bff$  (base flow factor),  $gwq_0$  (contribution of initial groundwater flow to runoff) and  $abf_0$  (groundwater alpha factor).

**Keywords:** SWIM hydrological model; Nash-Sutcliffe efficiency; model applicability; parameter sensitivity; Wangjiaba region

在气候急剧变化的背景下,水文序列的稳定性遭到了破坏,使得极端水文事件频发<sup>[1-2]</sup>。利用水文模型可为探索水文过程在气候变化下的响应关系与极端水文事件发生规律提供科学依据和实现平台<sup>[3-6]</sup>。然而,水文模型结构较为复杂,模型的各个参数具有时空变异性,尤其是具有物理基础的分布式水文模型,其参数与下垫面条件有着密切的联系。因此,评估模型参数取值变化对模拟精度的影响,可为水文模型的高效优化和率定工作提供基础支撑<sup>[7-8]</sup>。

分布式水文模型是一种较为真实科学模拟水文过程的有效途径<sup>[9]</sup>,HBV (hydrologiska fyrens vattenbalans modell)<sup>[10-11]</sup>、SWAT (soil and water assessment tool)<sup>[12-13]</sup>、新安江模型<sup>[14]</sup>等模型在中国应用较广。SWIM (soil and water integrated model) 模型由德国波茨坦研究所在 SWAT 和 MATSALU 模型基础上开发,该模型整合了流域尺度内的水文、植被、侵蚀和养分输送等各个方面,具有良好的物理基础,且相较于 SWAT,SWIM 模型能实现日尺度的模拟,对流域进行空间上划分为多个子流域,结合适当的水资源管理数据等,以及适中的数据需求都是该模型的重要优点<sup>[15]</sup>。有学者研究得出 SWIM 模型的模拟在中国淮河流域、黑龙江流域等均具有较好的适应性,适合气候变化背景下的水文过程研究<sup>[16]</sup>。然而,SWIM 模型在中国尚未得到广泛应用,目前国内对于 SWIM 模型的研究仍然有限,主要集中在研究模型的尺度效应问题<sup>[17]</sup>,探讨模型在不同区域的适用性,利用模型研究下垫面对水文过程的影响,水文要素对气候变化的响应等<sup>[18-19]</sup>,但对模型参数的率定大多基于经验进行,率定过程的科学性有所欠缺。有学者比较了 SWIM 模型中 7 个可率定参数与模型的敏感性<sup>[18]</sup>,但是缺少分析这 7 个参数的取值变化对模型精度的影响。因此,本研究通过人工扰动分析法对重点参数确定调整范围并手动赋值,分析并检验特定参数变化对模型输出结果的影响。

综上,本研究拟以淮河流域王家坝地区为研究区,利用王家坝地区率定期(1959—1978 年)和验证期(1979—2008 年)的实测数据,自动率定 SWIM 水文模型,得到最优的参数组合,并对率定好的 SWIM 模型的模拟精度进行评价,讨论 SWIM 模型在王家坝地区的适用性,为王家坝地区洪涝灾害的预报和减

灾提供科学支持,旨在为 SWIM 模型参数率定工作提供参照,推进 SWIM 模型率定工作的科学化。

## 1 研究区概况

本研究区是利用 SWIM 水文模型,以中国淮河流域上游地区王家坝闸(115°47'E,32°19'N)为出口断面,基于数字高程图(DEM)划分得到的王家坝闸的集水区,研究区范围为淮河流域以内、自王家坝闸以上至桐柏地区的区域,总面积约 2 050 500 hm<sup>2</sup>,地处淮河流域中游和上游之间,在蒙洼蓄洪区的上游,王家坝闸水文站的地理坐标位置为东经 115°47',北纬 32°19'。研究区地势整体上呈西高东低的态势,地貌类型丰富,海拔高度最高可达 869 m。研究区内属半湿润季风气候,降水年际变化大,多年平均年降水量为 1 018 mm。据资料记载,王家坝地区分别在 1954,1964,2003 年以及 2007 年发生了大洪水。

## 2 数据来源

实测气象数据包括研究区内 8 个气象站点(桐柏、平玉、新蔡、正阳、息县、信阳、罗山、潢川)的 1959 年 1 月 1 日至 2008 年 12 月 31 日实测气象数据,由中国气象局国家气候中心提供。包括最高温、最低温、平均温、降水、湿度、日照时数、日辐射量等。

径流数据主要是指王家坝闸 1959 年 1 月 1 日至 2008 年 12 月 31 日的实测径流数据,由淮河水利委员会提供。涉及到的地理数据主要包括研究区内 DEM 数据,土地利用数据和土壤数据。DEM 数据为 90 m 空间分辨率的 SRTM 数据,来自中国科学院的地理空间数据云网站(<http://www.gscloud.cn>)。土壤数据空间分辨率为 800 m,由联合国粮农组织(FAO)全球土壤数据库(<http://www.fao.org/>)提供。土地利用数据为 1:100 000,由中国科学院资源环境科学数据中心提供。所有地理数据在输入 SWIM 水文模型之间,均需要对像元大小进行重采样至 400 m×400 m。

## 3 模型参数与率定

### 3.1 自动率定

本研究中 SWIM 模型采用自动率定方法,分别对模型的 7 个可调节参数进行率定。考虑到模型存

在预热期,自动率定以除第一年以外计算出的纳西效率系数为判定标准。基本思想为:从第一个可调节参数开始,在其取值范围内以一定的步长取数,运行模型并计算纳西效率系数,取最优值并记录,再以同样的方法调节所有参数并记录下他们的最优值,此为一个循环。考虑到不同参数组合会有不同效果,自动率定过程一般进行多个循环,直到纳西效率系数不再提高时,得到最优结果。

### 3.2 参数的物理意义及范围

SWIM 模型水文过程的模拟总体上涉及到 10 个过程,分别是融雪计算过程、地表径流计算过程、径流峰值计算过程、下渗量计算过程、侧向壤中流计算过程、潜在蒸散计算过程、土壤蒸发和植物蒸腾计算过程、地下径流计算过程、传输损耗的计算过程以及最终的径流汇流过程。其中,对模拟结果影响最大的主要是地表径流计算过程、潜在蒸散计算过程以及径流汇流过程,其参数具有明确的物理意义,其中可调节的主要包括以下 7 个参数<sup>[15]</sup>。

(1) thc。SWIM 模型基于 Priestley-Taylor 公式计算潜在蒸散,thc 是模型在潜在蒸散计算模块中,对大气散射率的校正因子。该参数取值范围为 0~1,为 0 时代表不考虑大气散射率因子,为 1 时代表考虑大气散射率因子。

(2) bff。基流因子,用于计算回流的行进时间,取值范围为 0~1。回流时间可被用于计算土壤层的渗透量。其取值与流域的特性有关,不同特性河流的基流因子取值参考值如表 1 所示。

表 1 不同河流基流因子参考值

河流特性	bff 取值参考值
>75%的时间有径流	1.00
55%~75%的时间有径流	0.75
40%~55%的时间有径流	0.50
20%~40%的时间有径流	0.25
<20%的时间有径流	0

(3) cnum<sub>1</sub>, cnum<sub>3</sub>。SWIM 模型基于 SCN-CN 模型(即径流曲线数法)计算地表径流, cnum<sub>1</sub> 和 cnum<sub>3</sub> 分别为径流曲线数法中条件 1 和条件 3 下的 CN 值,仅当参数 icn 为 1 时, cnum<sub>1</sub> 和 cnum<sub>3</sub> 才可作为率定参数。其取值范围为 1~100,且 cnum<sub>1</sub> < cnum<sub>2</sub> < cnum<sub>3</sub>。

(4) gwq<sub>0</sub>。gwq<sub>0</sub> 是初始地下流对径流量的贡献,单位为 mm/d,取值范围为 0.01~1。

(5) abf<sub>0</sub>。abf<sub>0</sub> 为地下水阿尔法因子,与地下水回流到地表径流的速率有关,用于反映地下水的衰退

特征,其取值范围是 0.01~1。

(6) roc<sub>2</sub>, roc<sub>4</sub>。roc<sub>2</sub>, roc<sub>4</sub> 是河道的汇流系数,受河道的长度和流速影响。其取值范围为 1~100,且 roc<sub>2</sub> < roc<sub>4</sub>。

(7) sccor。为饱和传导率校正因子,其取值范围为 0.01~10。

### 3.3 参数率定的目标函数

模型采用 Nash-Sutcliffe 效率系数和相对误差作为目标函数对模型进行率定。Nash-Sutcliffe 效率系数的计算公式如下<sup>[18]</sup>:

$$Ens = 1 - \frac{\sum (Q_{OBS} - Q_{SIM})^2}{\sum (Q_{OBS} - \bar{Q}_{OBS})^2} \quad (1)$$

式中:Q<sub>OBS</sub>——实测径流量(m<sup>3</sup>/s); Q<sub>SIM</sub>——模拟径流量(m<sup>3</sup>/s);  $\bar{Q}_{OBS}$ ——实测径流量时间序列平均值。下同。相对误差 R 的计算公式如下:

$$R = \frac{\sum Q_{SIM} - \sum Q_{OBS}}{\sum Q_{OBS}} \times 100\% \quad (2)$$

公式(1)中 Ens 的取值范围是 -∞~1。Ens 值越接近 1,模拟精度越高,反之,则模拟精度越低。当 Ens 小于 0 时,说明 Q<sub>OBS</sub> 对 Q<sub>SIM</sub> 的偏离程度大于对  $\bar{Q}_{OBS}$  的偏离程度,即模拟径流量与实测径流量偏差过大,模拟精度差。

R 的取值范围是 0~100%,R 越小,表示模拟误差越小,模拟精度越高。

### 3.4 参数率定结果

SWIM 模型的 7 个参数通过步长加速法进行率定,并利用纳西效率来判断最优参数组合,结果如表 2 所示。

表 2 参数率定过程及结果

参数	取值范围	步长	率定最优值
thc	0~1	0.05	0
bff	0~1	0.05	0.95
cnum <sub>1</sub> , cnum <sub>3</sub>	1~100	1.00	35,37
gwq <sub>0</sub>	0.01~1	0.01	0.01
abf <sub>0</sub>	0.01~1	0.01	0.01
roc <sub>2</sub> , roc <sub>4</sub>	1~100	0.01	5.95, 20.8
sccor	0.01~10	0.01	1

### 3.5 模拟精度评价

3.5.1 日序列模拟总体精度评价 利用最优参数组合率定后的 SWIM 模型对率定期(1959—1978 年)及验证期(1979—2008 年)日径流量序列模拟的结果如图 1 所示,纳西效率分别达到 0.79 及 0.81,相对误差 R 分别为 22% 及 7.8%,总体上率定期及验证期 SWIM 模型模拟的径流量与实测径流量相关性较好。模拟的日径流量序列总体略高于实测日径流量序列,特别是在低值区和极端高值区。这主要是由于

SWIM 模型模拟的逐日径流量序列是天然的径流量序列,而实测的径流量则是受到一系列人类活动影响

之后所测得的径流量。例如水利工程的修建,生活用水、工业用水以及农业用水对径流的损耗等。

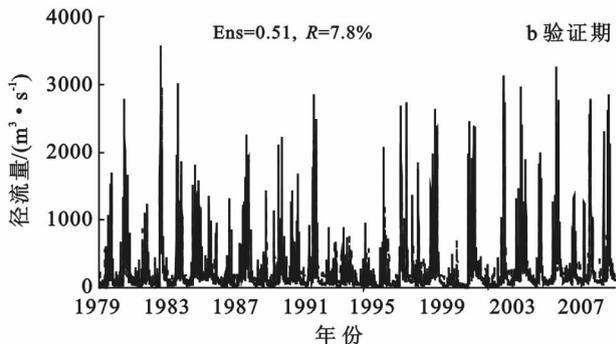
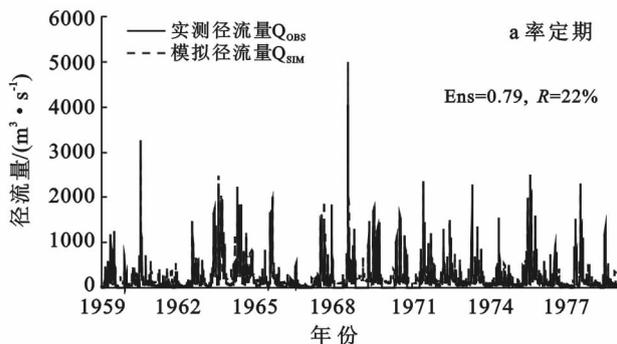


图 1 率定期(1959—1978 年)与验证期(1979—2008 年)日径流量序列模拟结果

3.5.2 日序列逐年模拟精度评价 率定期(1959—1978 年)模拟径流量日序列逐年纳西效率如图 2(a)所示。20 a 中,有 13 a 的纳西效率在 0.6 以上,1961 和 1966 年纳西效率较低。率定期 SWIM 模型在 1961,1966 和 1978 年的模拟精度很低,这与 SWIM 水文模型对于径流量低值模拟效果较差有一定关系。据历史资料记载,淮河流域 1966 和 1978 年发生一级大旱,1961 年发生 3 级大旱。此外,1968 年 8 月淮河流域发生特大洪水,由于 SWIM 模型在汛期模拟效果较好,致使 1968 年的模拟精度较好,进一步证实了

SWIM 模型对于径流量高值模拟效果较好,对于径流量低值模拟效果较差。

验证期(1979—2008 年)模拟径流量日序列逐年纳西效率如图 2(b)所示。30 a 中,有 25 a 的纳西效率在 0.6 以上,1992,1993 年以及 1999 年纳西效率较低。率定期 SWIM 模型在 1999 年的模拟精度最低。1999 年,淮河流域发生严重旱灾,出现了自 1979 年以后的首次断流,王家坝水文站 8 月多日径流量为 0。SWIM 水文模型对于径流量低值模拟效果较差,故 1999 年模拟精度很低。

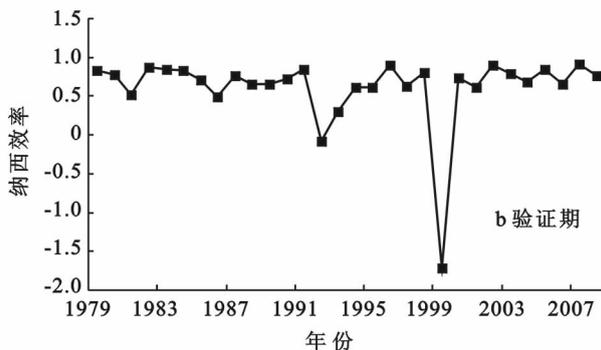
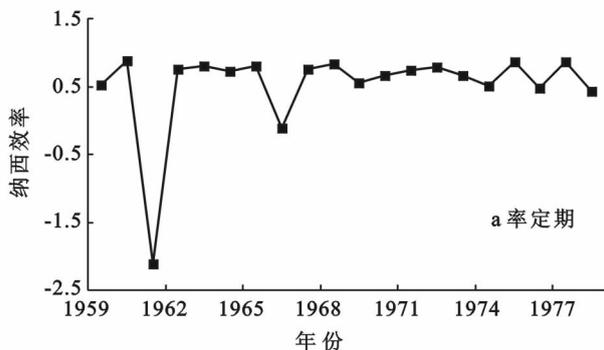


图 2 率定期(1959—1978 年)与验证期(1979—2008 年)模拟径流量日序列逐年纳西效率

3.5.3 SWIM 模型适用性评估 综合 SWIM 模型在率定期和验证期对王家坝地区日径流量序列的模拟精度,可以看出 SWIM 模型总体上对王家坝地区适用性较好,仅在少数干旱年份如 1961,1966,1978 和 1999 年模拟效果较差。SWIM 模型可以用于王家坝地区的径流量模拟,尤其适合研究王家坝地区的洪水预报工作。

变化对模型精度的影响。

#### 4.1 thc 的敏感性评价

为探讨日径流量序列对 thc 取值变化的敏感性,选取王家坝地区典型洪灾年份 2003 年进行讨论。王家坝水文站 2003 年逐日径流量序列随 thc 取值的变化曲线如图 3 所示。

## 4 参数敏感性研究

针对 SWIM 模型中可率定的 7 个参数,选取 1979—2008 年时间段,通过人工扰动分析法对重点参数确定调整范围并手动赋值,分析并检验特定参数

由图 3 可知,王家坝站 2003 年日径流量序列的模拟结果对 thc 取值的变化较敏感,且汛期相对于非汛期而言,更加敏感。根据前文结论,SWIM 模型在汛期模拟精度较高,非汛期模拟精度较低。由此可以进一步验证模拟精度差的时间段对于 thc 取值的变化更为敏感。

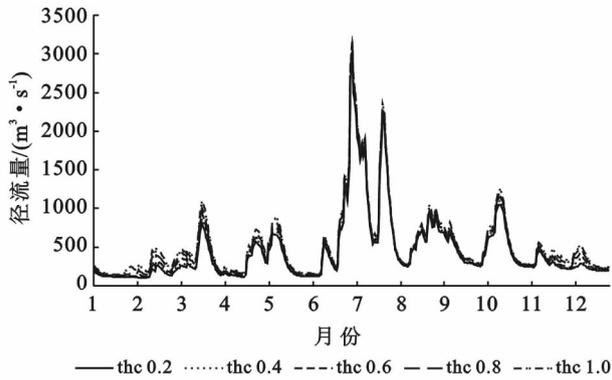


图 3 2003 年日径流量序列对 thc 取值变化的敏感性

选取对 thc 取值的变化较敏感的月份 8—12 月, 进一步研究 thc 取值变化对径流量序列的影响。由图 4 看出, 随着 thc 取值逐渐增大, 模拟的日径流量序列值逐渐增大。在非汛期 SWIM 模型的模拟值偏高, 因此, 随着 thc 取值的增大, SWIM 模型的模拟径流量值会进一步增大, 模拟精度会进一步降低。

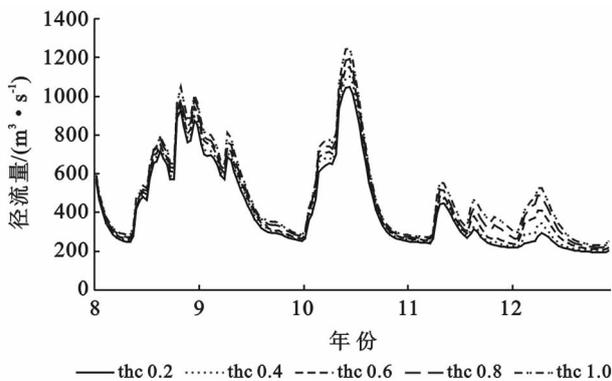


图 4 2003 年 8—12 月日径流量序列对 thc 取值变化的敏感性

对于纳西效率系数和相对误差等指标整体而言, 随着 thc 值的增大, 各年份纳西效率系数显著下降。尤其是纳西效率系数低的年份, 对于 thc 取值的变化更为敏感, 其中 1999 年的纳西效率对 thc 的变化最敏感, 其次是 1992 年。随着 thc 值的增大, 各年份相对误差显著下降。尤其是相对误差高的年份, 对于 thc 取值的变化更为敏感, 且整体上相对误差对 thc 取值的敏感性比纳西效率系数更强。

#### 4.2 bff 的敏感性评价

选取 2003 年日径流量序列, 讨论研究日径流量序列对 bff 取值变化的敏感性。由图 5 可知, 王家坝站 2003 年日径流量序列的模拟结果对 bff 取值的变化较敏感。随着 bff 值的增大, 径流曲线的波动幅度变大, 即模拟径流量序列在峰值区值变大, 在低值区值变小。由于模拟值总体高于实测值, 年内高值区模拟值增高导致模拟精度进一步下降, 低值区模拟值减小, 导致模拟精度上升。二者的叠加作用, 导致各年份纳西效率总体无显著变化。

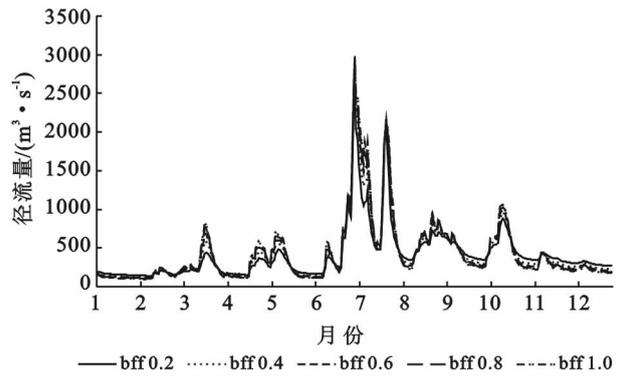


图 5 2003 年日径流量序列对 bff 取值变化的敏感性

对于纳西效率系数和相对误差等指标整体而言, 各年份纳西效率系数与相对误差对 bff 的变化不敏感, 随着 bff 值的升高, 各年份纳西效率系数与相对误差基本没有变化, 仅在 1979 年, 纳西效率与相对误差有细微的变化。因此, 总体上认为率定期纳西效率与相对误差对 bff 取值变化不太敏感。

#### 4.3 cnum<sub>1</sub>, cnum<sub>3</sub> 的敏感性评价

cnum<sub>1</sub>, cnum<sub>3</sub> 的取值范围为 1~100, cnum<sub>2</sub> 模型默认值为 55, 且 cnum<sub>1</sub> < cnum<sub>2</sub> < cnum<sub>3</sub>。模型率定过程得到当 cnum<sub>1</sub> = 5, cnum<sub>3</sub> = 60 时, 模型的模拟精度最高。以  $\Delta cnum_1 = 5$  与  $\Delta cnum_3 = 5$  为步长, 结果如表 3 所示, 当 cnum<sub>3</sub> 值不变, cnum<sub>1</sub> 值增大时, 纳西效率变化不大。当 cnum<sub>1</sub> 值不变, cnum<sub>3</sub> 值增大时, 纳西效率显著下降。SWIM 模型在王家坝地区的模拟精度对 cnum<sub>1</sub> 与 cnum<sub>3</sub> 的变化较敏感(表 3)。

表 3 1979—2008 年纳西效率对 cnum<sub>1</sub>, cnum<sub>3</sub> 取值变化的敏感性

cnum <sub>1</sub>	cnum <sub>3</sub>	纳西效率
5	60	0.83
5	65	0.81
5	70	0.79
5	75	0.75
5	80	0.69
5	85	0.57
10	60	0.82
10	65	0.81
10	70	0.79
10	75	0.75
10	80	0.69
10	85	0.56
15	60	0.82
15	65	0.81
15	70	0.79
15	75	0.75
15	80	0.69
15	85	0.56

#### 4.4 gwq<sub>0</sub> 的敏感性评价

1979—2008 年逐年纳西效率和逐年相对误差对

$gwq_0$  取值变化的敏感性分别如图 6 所示,各年份纳西效率和相对误差对  $gwq_0$  的变化不敏感,随着  $gwq_0$  值的增大,逐年纳西效率和相对误差除 1979 年外,基本无变化。1979 年是率定期第 1 a,受模型预热影响,因此,认为模型逐年模拟精度对  $gwq_0$  变化不敏感。

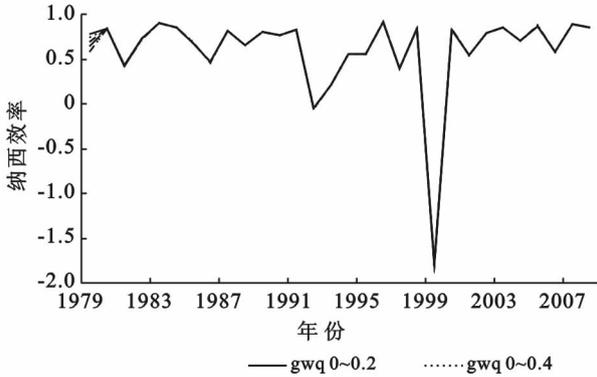


图 6 1979—2008 年逐年纳西效率及相对误差对  $gwq_0$  取值变化的敏感性

#### 4.5 $abf_0$ 的敏感性评价

1979—2008 年逐年纳西效率与相对误差对  $abf_0$  取值变化的敏感性如图 7 所示。由图 7 可以看出,各年份纳西效率与相对误差对  $abf_0$  的取值变化不敏感,基本可以忽略不计。

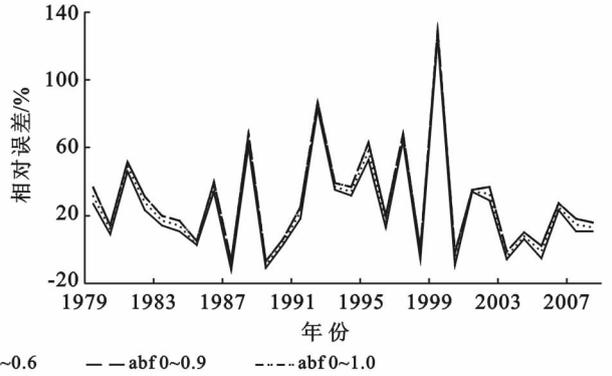
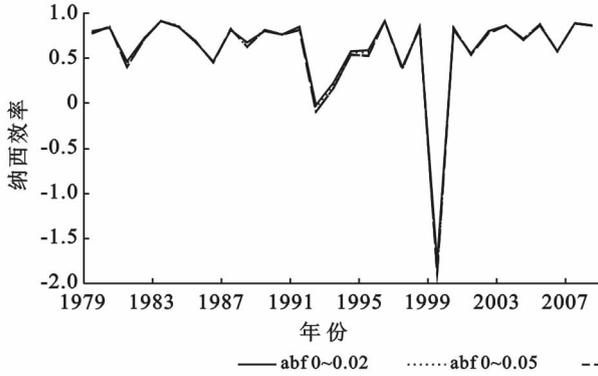
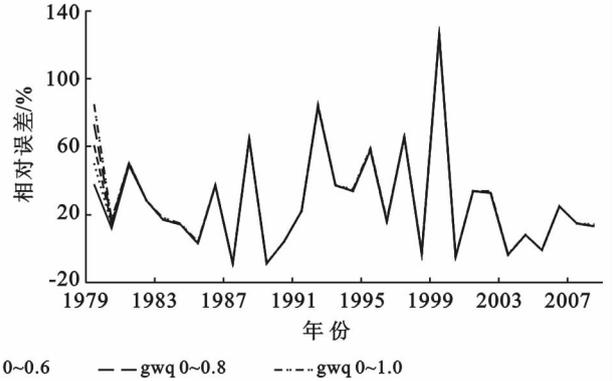


图 7 1979—2008 年逐年纳西效率及相对误差对  $abf_0$  取值变化的敏感性

#### 4.6 $roc_2, roc_4$ 的敏感性评价

王家坝地区 2003 年日径流量序列对  $roc_2$  和  $roc_4$  取值变化的敏感性分别如图 8—9 所示,可见日径流量序列对  $roc_2$  和  $roc_4$  取值的变化均较为敏感,其中:对  $roc_4$  取值的变化更为敏感。对于  $roc_2$  取值的变化,汛期大于非汛期。随着  $roc_4$  取值的增大,径流曲线的波动幅度变小,径流曲线越来越趋向平滑。

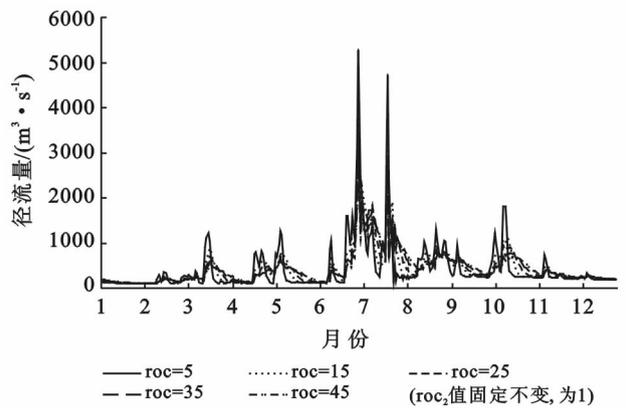
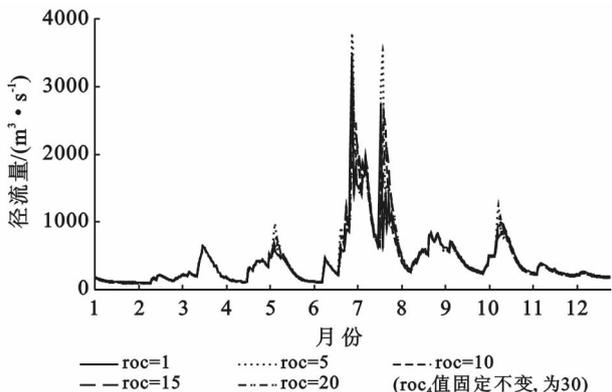


图 9 2003 年日径流量序列对  $roc_4$  取值变化的敏感性

#### 4.7 $sccor$ 的敏感性评价

王家坝水文站 2003 年逐日径流量序列随  $sccor$  取值的变化曲线如图 10 所示,王家坝站 2003 年日径流量序列的模拟结果对  $sccor$  取值的变化较敏感。随着  $sccor$  取值的增大,径流曲线的波动幅度变小,汛期模拟精度提高,非汛期模拟精度降低。

图 8 2003 年日径流量序列对  $roc_2$  取值变化的敏感性

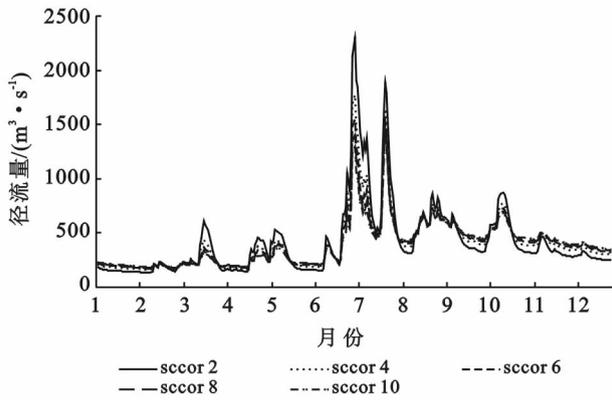


图 10 2003 年日径流量序列对 sccor 取值变化的敏感性

## 5 讨论与结论

(1) 评估 SWIM 模型在王家坝地区适用性:结果表明,率定后的 SWIM 模型在王家坝地区适用性良好,率定期模拟日径流量序列纳西效率达到 0.79,相对误差为 22%,验证期模拟日径流量序列纳西效率达到 0.81,相对误差为 7.8%。

(2) SWIM 模型在王家坝地区参数敏感性分析:根据参数的物理意义和取值范围,分析 SWIM 在王家坝地区对主要 7 个可率定参数的敏感性。结果表明,SWIM 模型模拟结果在王家坝地区对  $thc$ ,  $cnum_1$ ,  $cnum_3$ ,  $roc_2$ ,  $roc_4$ ,  $sccor$  取值变化较敏感,对参数  $bff$ ,  $gwq_0$ ,  $abf_0$  取值变化不敏感。其中:随着参数  $thc$  值的增大,各年份的相对误差显著下降,且整体上相对误差对  $thc$  取值的敏感性比纳西系数更强;相比较  $roc_2$ ,  $roc_4$  取值的变化更能影响日径流序列,而对于  $roc_2$  取值的变化,汛期大于非汛期;随着参数  $sccor$  取值的增大,汛期模拟精度提高,非汛期模拟精度降低。

本研究引入了具有物理基础的分布式水文模型 SWIM 模型,评价了其在王家坝地区的适用性,分析了其参数敏感性,从而得出结论。与常用的水文模型相比,SWIM 模型调参过程中更加重视地下水水文过程。HBV(hydrologiska fyrans vattenbalans)模型在水文模拟过程中可以进行优选的参数有 12 个,分为积融雪模块、土壤模块、响应模块与路径模块。其中:涉及地下水水文过程的参数较少,仅有基流出流系数来调节基流的退水系数,控制基流的多少<sup>[19]</sup>。淮河流域地表水与浅层地下水会发生直接的水力联系,地下水对地表水的补给是水文过程中重要的一部分。在 SWIM 模型中,地下水水文过程中可调节的参数有基流因子(计算回流的行进时间)、初始地下流对径流量的贡献、地下水阿尔法因子(反映地下水的衰退

特征),可以通过调节这些参数,更好地模拟地下水水文过程。在淮河流域水文模型参数率定方面,SWAT (soil and water assessment tool)模型中与水文过程相关的参数包括土壤参数、土地利用参数、地下水径流参数、融雪径流参数、地表特征参数<sup>[20]</sup>。有研究得出 SWAT 模型在淮河上游地区,有效水容量 AWC, SCS 径流曲线数 CNZ,土壤蒸发补偿系数 ESCO 为主要敏感性参数<sup>[21]</sup>,这与本研究结果中关于淮河流域上游 SWIM 模型的敏感参数类型较为一致。目前 SWIM 模型在国内尚未得到广泛应用,关于其参数敏感性方面的研究也较少涉及,在后续研究中可对模型的区域适用性及参数敏感性进行研究,以期提高水文模型模拟的精确性及科学性。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Shi Zhong, Xiu Qunyang. Ensemble simulations of the urban effect on a summer rainfall event in the Great Beijing Metropolitan Area [J]. Atmospheric Research, 2015,153(3):318-334.
- [2] Yang Tao, Wang Xiaoyan, Yu Zhongbo, et al. Climate change and probabilistic scenario of streamflow extremes in an alpine region[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2014,119(14):8535-8551.
- [3] Hesse C, Krysanova V, Stefanova A, et al. Assessment of climate change impacts on water quantity and quality of the multi-river Vistula Lagoon catchment[J]. Hydrological Sciences Journal, 2015,60(5):1-22.
- [4] Krysanova V, Hattermann F, Huang S, et al. Modelling climate and land use change impacts with SWIM: Lessons learnt from multiple applications[J]. Hydrological Sciences Journal, 2015,60(4):606-635.
- [5] 王怀志,高玉琴,袁玉,等.基于 SWAT 模型的秦淮河流域气候变化水文响应研究[J].水资源与水工程学报, 2017,28(1):81-87.
- [6] 宋增芳,曾建军,金彦兆,等.基于 SWAT 模型和 SUFI-2 算法的石羊河流域月径流分布式模拟[J].水土保持通报, 2016,36(5):172-177.
- [7] 黄金柏,王斌,温佳伟,等.基于分布式水文模型的阿伦河流域降雨—径流计算[J].水土保持通报, 2015, 35(1):224-229.
- [8] Gao Jungang, Sheshukov A Y, Yen Haw, et al. Impacts of alternative climate information on hydrologic processes with SWAT: A comparison of NCDC, PRISM and NEXRAD datasets[J]. Catena, 2017,156:353-364.
- [9] Ding Jie, Wallner M, Müller H, et al. Estimation of instantaneous peak flows from maximum mean daily flows using the HBV hydrological model [J]. Hydrological Processes, 2016,30(9):1431-1448.

- [10] 林志强,洪健昌,尼玛吉,等.基于 HBV 模型的尼洋曲流域上游洪水致灾临界面雨量研究[J].水土保持通报,2016,36(4):22-26.
- [11] Romagnoli M, Portapila M, Rigalli A, et al. Assessment of the SWAT model to simulate a watershed with limited available data in the Pampas region, Argentina [J]. Science of the Total Environment, 2017,596:437-450.
- [12] 王强,许有鹏,高斌,等.西苕河流域径流对土地利用变化的空间响应分析[J].自然资源学报,2017,32(4):632-641.
- [13] Lu Zhuo, Han Dawei. Misrepresentation and amendment of soil moisture in conceptual hydrological modeling[J]. Journal of Hydrology, 2016,535:637-651.
- [14] 黄小祥,姚成,李致家,等.栅格新安江模型在天津于桥水库流域上游的应用[J].湖泊科学,2016,28(5):1134-1140.
- [15] Krysannona V, Wechsung F, Arnold,等. SWIM 模型使用指南[M]. 苏布达,曹丽格,翟建青,等译.北京:气象出版社,2011.
- [16] 杨志远,高超,臧淑英,等. SWIM 模型在东北黑土区流域的适用性评价:以乌裕尔河中上游流域为例[J].地理学报,2017,72(3):457-470.
- [17] 高超,金高洁. SWIM 水文模型的 DEM 尺度效应[J].地理研究,2012,31(3):399-408.
- [18] 张淑兰,张海军,王彦辉,等. 泾河流域上游景观尺度植被类型对水文过程的影响[J].地理科学,2015,35(2):231-237.
- [19] 谷一,郝振纯,王国庆,等. HBV 模型在逊毕拉河流域的适用性研究[J].水资源与水工程学报,2017,28(1):20-25.
- [20] 黄清华,张万昌. SWAT 模型参数敏感性分析及应用[J].干旱区地理:中文版,2010,33(1):8-15.
- [21] 丁飞. SWAT 模型小尺度流域模拟的适宜性研究:以淮河上游迎河小流域为例[D].南京:南京农业大学,2007.

## 《水土保持通报》2016 年刊载论文被引频次前 20 位文献参数

(检索范围:中国学术期刊网络出版总库;检索时间:20180223)

- [1] 石小亮,陈珂,何丹.森林蓄水量价格倒算法公式推演与实证研究[J].水土保持通报,2016,36(6):165-168.
- [2] 戴明宏,王腊春,汤淦.基于多层次模糊综合评价模型的喀斯特地区水资源承载力研究[J].水土保持通报,2016,36(1):151-156.
- [3] 周晓艳,宋祯利,宋亚男,等.基于地理加权回归模型的长江中游地区人均耕地面积变化影响因素分析[J].水土保持通报,2016,36(1):136-142,150.
- [4] 杨亚辉,赵文慧,木热提江·阿不拉,等.不同植被对土壤理化性质影响:以王东沟小流域为例[J].水土保持通报,2016,36(1):249-252.
- [5] 程文仕,乔蕻强,刘志,等.基于 RAGA-PPC 模型的土地整治综合效益评价:以甘肃省庆阳市 15 个土地整治项目为例[J].水土保持通报,2016,36(4):257-261,268.
- [6] 石小亮,陈珂,揭昌亮,等.吉林省森林生态系统服务价值评价[J].水土保持通报,2016,36(5):312-319,325.
- [7] 张岩,韦振锋,黄毅.1999—2012 年三江源区植被净初级生产力及固碳释氧量测评[J].水土保持通报,2016,36(1):100-105.
- [8] 高凯,张丽娟,于永奇,等.沙地土壤 pH 值、养分含量对微地形变化的响应[J].水土保持通报,2016,36(1):88-92.
- [9] 塔娜,王健,张慧芸,等.黄土耕作坡面溅蚀过程中微地形响应特征[J].水土保持通报,2016,36(1):110-114,345.
- [10] 赵辉,黎家作,李晶晶.中国水土流失动态监测与评价的现状与对策[J].水土保持通报,2016,36(1):115-119.
- [11] 吴燕锋,巴特儿·巴克,罗那那,等.石河子地区冬小麦生育期需水量变化特征及其气候成因[J].水土保持通报,2016,36(1):69-74.
- [12] 曾建军,史正涛.城市水源地 5 种森林枯落物水文效应特征[J].水土保持通报,2016,36(1):38-43.
- [13] 刘瑜洁,刘俊国,赵旭,等.京津冀水资源脆弱性评价[J].水土保持通报,2016,36(3):211-218.
- [14] 郑华伟,夏梦蕾,张锐,等.基于熵值法和灰色预测模型的耕地生态安全诊断[J].水土保持通报,2016,36(3):284-289,296.
- [15] 申海建,郭荣中.湖南省耕地资源动态变化及其驱动力[J].水土保持通报,2016,36(4):309-314.
- [16] 樊鹏飞,梁流涛,陈常优,等.城市土地集约利用评价及障碍因子诊断:基于生态健康与低碳发展视角[J].水土保持通报,2016,36(4):273-279.
- [17] 孙德亮,张风太.基于 DPSIR-灰色关联模型的重庆市土地生态安全评价[J].水土保持通报,2016,36(05):191-197.
- [18] 买尔孜亚·吾买尔,阿里木江·卡斯木.资源型城市土地利用变化与景观格局:以新疆克拉玛依市为例[J].水土保持通报,2016,36(5):283-287,293.
- [19] 王静,张天佑.全膜覆土穴播种植冬小麦对旱地土壤微生物数量及生物量的影响[J].水土保持通报,2016,36(1):188-192.
- [20] 赵春芳,董朝阳,伍磊,等.浙江省水资源生态足迹时空格局[J].水土保持通报,2016,36(1):242-248.