

# Comparative Study on the Performance of SWAT and Xin'anjiang Models in Xunhe Basin

Zejun Li<sup>1,2</sup>, Pan Liu<sup>1,2</sup>, Wang Zhang<sup>1,2</sup>, Xizhen Chen<sup>1,2</sup>, Chao Deng<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan

<sup>2</sup>Hubei Provincial Collaborative Innovation Center for Water Resources Security, Wuhan

Email: [lizejun09@163.com](mailto:lizejun09@163.com)

Received: Jun. 19<sup>th</sup>, 2014; revised: Jun. 25<sup>th</sup>, 2014; accepted: Jul. 2<sup>nd</sup>, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## Abstract

In this study, the SWAT and Xin'anjiang models were selected respectively as the representatives of the distributed and lumped hydrological models to simulate rainfall-runoff process in the Xunhe basin, with the measurements of the Nash-Sutcliffe efficiency coefficient, relative error and root mean square. The results illustrated that both models work well at daily rainfall-runoff process simulation, and the Xin'anjiang model outperforms the SWAT model. Based on the results of various flow (10% high flow, 50% middle flow and 40% low flow), the SWAT model effectively simulates the water quantity of middle and low flows, although can't compete with Xin'anjiang model in simulation of high flow. The results also show that selecting Nash-Sutcliffe efficiency coefficient as the objective function causes that the model priors fit the high flow better than the middle and low flow, because the mean square error of high flow is larger than that of the middle and low flow.

## Keywords

SWAT Model, Xin'anjiang Model, Xunhe Basin, Runoff Simulation

# SWAT模型和新安江模型在汉江旬河流域的应用比较研究

李泽君<sup>1,2</sup>, 刘攀<sup>1,2</sup>, 张旺<sup>1,2</sup>, 陈西臻<sup>1,2</sup>, 邓超<sup>1,2</sup>

作者简介: 李泽君(1991-), 男, 山西晋城人, 研究生, 主要从事水文预报研究。

<sup>1</sup>武汉大学, 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉

<sup>2</sup>水资源安全保障湖北省协同创新中心, 武汉

Email: [lizejun09@163.com](mailto:lizejun09@163.com)

收稿日期: 2014年6月19日; 修回日期: 2014年6月25日; 录用日期: 2014年7月2日

## 摘要

选取分布式模型中的SWAT模型与集总式模型中的新安江模型进行流域径流模拟, 以旬河流域为例, 以确定性系数、相对误差以及均方根误差作为模型模拟效果的评价指标, 探究不同结构的模型在径流模拟中的差异性。模拟结果表明: SWAT模型和新安江模型在日径流过程模拟中都表现出较好的适用性, 新安江模型优于SWAT模型; 从不同流量等级(10%高水, 50%中水, 40%低水)的模拟效果来看, SWAT模型在中、低水的流量模拟中表现较好, 但高水部分的模拟效果较新安江模型差; 由于高水流量的均方差较中水、低水大, 当采用确定性系数作为参数率定的目标函数时, 会引起模型优先拟合高水部分, 导致中、低水模拟效果不够理想。

## 关键词

SWAT模型, 新安江模型, 旬河, 径流模拟

## 1. 引言

径流是自然物质和能量输移的重要载体, 准确模拟径流是解决水资源、水环境、水生态以及水灾害等问题的基本环节。流域水文模型可实现径流模拟。集总式水文模型通常将流域视为一个整体或几个单元, 对降雨径流进行概化。分布式水文模型不仅考虑了降雨时空分布的不均匀, 同时也充分考虑下垫面条件和人类活动对水文过程的影响, 其模型结构和参数都具有较强的物理意义, 具有较强的适应性[1]。

SWAT (Soil and Water Assessment Tool)模型是由 USDA(美国农业部)开发的分布式水文模型。国外进行 SWAT 模型降雨径流模拟研究起步较早, 成果较多。如美国的 Nueces 河流域(约 7700 km<sup>2</sup>)、巴西的 Pípiripau 河流域(约 200 km<sup>2</sup>)和美国的 Lower Walnut Creek 流域(约 22 km<sup>2</sup>)等[2]-[4], 结果表明 SWAT 模型适用于不同空间尺度的径流模拟。国内关于 SWAT 模型的研究起步相对较晚, 但目前已取得一定成果。SWAT 模型在我国西北旱寒地区、北方干旱地区和南方湿润地区得到了应用并取得较好的效果[5]-[8]。

本文选取 SWAT 模型和新安江模型进行汉江旬河流域的径流模拟, 比较分析两个模型的适用性。

## 2. 研究方法

### 2.1. 新安江模型

新安江模型采用蓄满产流假定进行产流计算, 将流域内各点不同土壤含水容量概化成蓄水容量曲线。蒸散发计算采用三层蒸发模式计算, 将土壤层划分为上层、下层以及深层[9]。三水源新安江模型将净雨划分成地面径流、壤中流以及地下径流[10], 其中地面径流采用单位线进行汇流计算, 壤中流和地下径流经过线性水库的调蓄分别作为地下水出流和壤中流出流。

### 2.2. SWAT 模型

SWAT 模型是一个确定性模型, 有较强的物理基础, 可进行长时段连续时间序列的降雨径流模拟,

并可适用于不同土壤类型、不同土地覆被情况下的复杂流域[11]。

SWAT 模型根据 DEM 数据将流域划分为不同的子流域, 在子流域中又根据地表特征(包括土壤、坡度、植被等因素)进一步离散化为集总式的水文响应单元(HRU)。在水文响应单元上应用概念性模型 SCS (Soil Conservation Service)模型来计算净雨, 然后进行产汇流计算, 最后通过马斯京根河道洪水演算推求流域出口流量[12]。

### 2.3. 评价方法

选取确定性系数  $E_{ns}$ 、相对误差  $R$  和均方根误差  $RMSE$  作为模型模拟效果的评价指标[13] [14], 各评价指标计算公式为:

$$E_{ns} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N (Q_t^{obs} - Q_t^{sim})^2}{\sum_{t=1}^N (Q_t^{obs} - Q_{avg}^{obs})^2} \quad (1)$$

$$R = \frac{\left| \sum_{t=1}^N Q_t^{obs} - \sum_{t=1}^N Q_t^{sim} \right|}{\sum_{t=1}^N Q_t^{obs}} \times 100\% \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^N (Q_t^{obs} - Q_t^{sim})^2}{N}} \quad (3)$$

式中:  $N$  表示流量序列长度,  $Q_t^{obs}$  和  $Q_t^{sim}$  分别表示  $t$  时刻实测流量和模拟流量,  $Q_{avg}^{obs}$  表示实测流量均值。

## 3. 旬河流域概况及基本资料

如图 1 所示, 旬河发源于秦岭中段沙沟岭南麓, 流经旬阳县汇入汉江。全长 218 km, 流域面积约 6300 km<sup>2</sup>, 是汉江上游最大的一条支流。旬河流域坐落在东经 108°24'~109°26', 北纬 32°52'~33°55' 之间, 海拔高度从 200 m 变化到近 3000 m, 流域多山地, 地形变化较大。流域地表覆被主要有阔叶林、针叶林、草甸和耕地等类型, 植被相对较差, 水土流失严重, 且受人类活动影响较大[15]。流域属北亚热带温暖湿润气候区, 表现为雨热同期, 年均降水量约 850 mm, 年均气温约 15℃。

构建 SWAT 模型需要 DEM 数据、土壤数据、土地利用类型数据和气象数据。其中, DEM 数据为 ASTER GDEM 30 米数据; 土壤数据为南京土壤所提供的 1:100 万土壤数据, 土壤分类系统为 FAO-90; 土地利用数据为马里兰大学发布的全球土地覆盖数据中国子集, 精度为 1 km; 气象数据来源于国家基本气象站日观测数据。

新安江模型的输入为降水和蒸发数据。流域面雨量根据雨量站站点位置采用泰森多边形法计算, 流域平均蒸发量根据柞水站和青泥湾站实测蒸发数据求得。

流域出口断面流量采用向家坪水文站日流量数据。研究时段为 1980~1990 年, 其中率定期为 1980~1986 年, 检验期为 1987~1990 年。

## 4. 结果分析

选取确定性系数  $E_{ns}$  和相对误差  $R$  作为日尺度径流过程模拟效果的评价指标, 分别对全部流量和不同流量等级的模拟效果进行对比。

SWAT 模型和新安江模型的模拟结果见表 1, 可以看出, SWAT 模型和新安江模型都能够较好的进

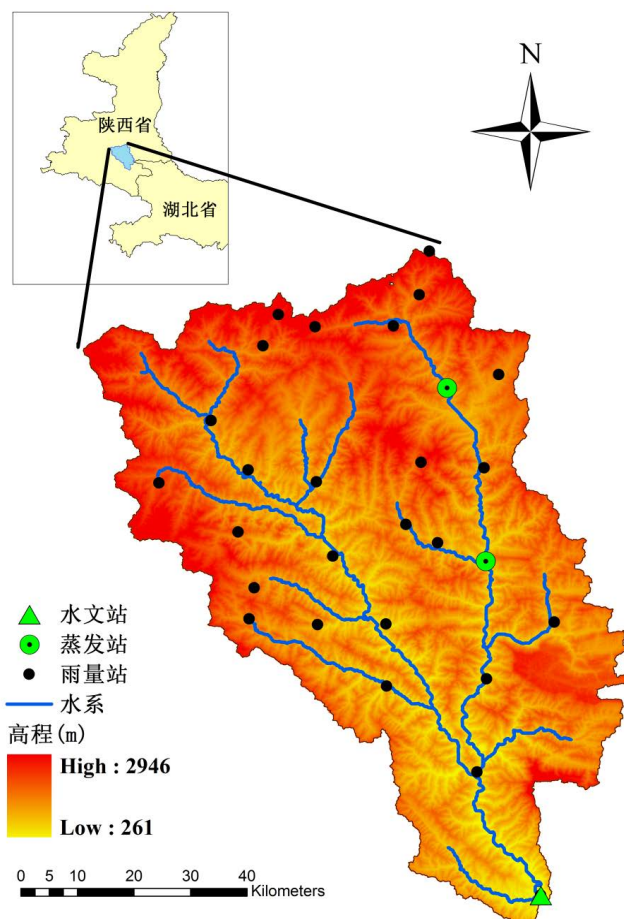


Figure 1. Map of Xunhe River basin and locations of meteorological and hydrological stations

图 1. 旬河流域图及水文气象站点分布

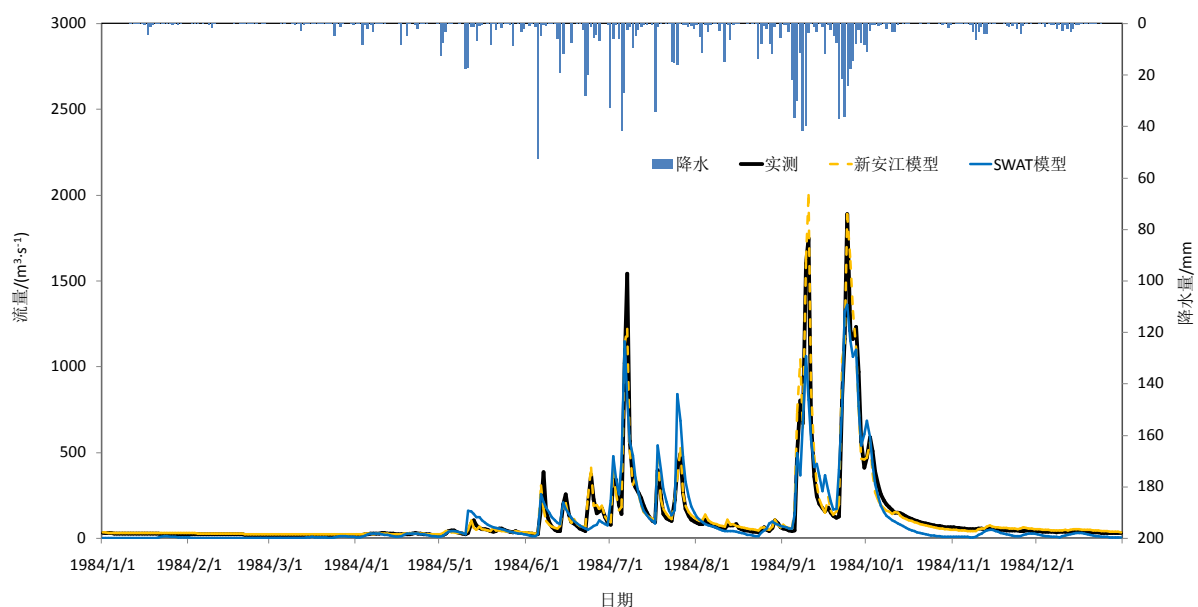
Table 1. Simulation performance of SWAT model and Xin'anjiang model

表 1. SWAT 模型和新安江模型模拟结果

	年份	SWAT 模型			新安江模型		
		$R$ (%)	$E_{ns}$	$RMSE$ (m <sup>3</sup> /s)	$R$ (%)	$E_{ns}$	$RMSE$ (m <sup>3</sup> /s)
模型率定	1981	22.12	0.64	82.38	1.95	0.93	35.54
	1982	7.89	0.59	46.75	0.31	0.94	24.75
	1983	28.66	0.64	199.44	9.53	0.96	74.67
	1984	11.69	0.83	99.86	4.76	0.96	89.32
	1985	13.55	0.81	44.85	6.78	0.92	93.94
	1986	14.74	0.59	44.93	2.01	0.88	96.01
	<b>均值</b>	<b>16.44</b>	<b>0.68</b>	<b>86.37</b>	<b>4.22</b>	<b>0.93</b>	<b>69.04</b>
模型验证	1987	3.63	0.62	122.96	7.94	0.92	56.89
	1988	25.39	0.62	69.89	0.93	0.84	44.58
	1989	21.48	0.51	80.63	1.11	0.86	39.98
	1990	26.48	0.66	64.22	12.73	0.83	45.55
	<b>均值</b>	<b>19.25</b>	<b>0.60</b>	<b>84.43</b>	<b>5.68</b>	<b>0.86</b>	<b>46.75</b>

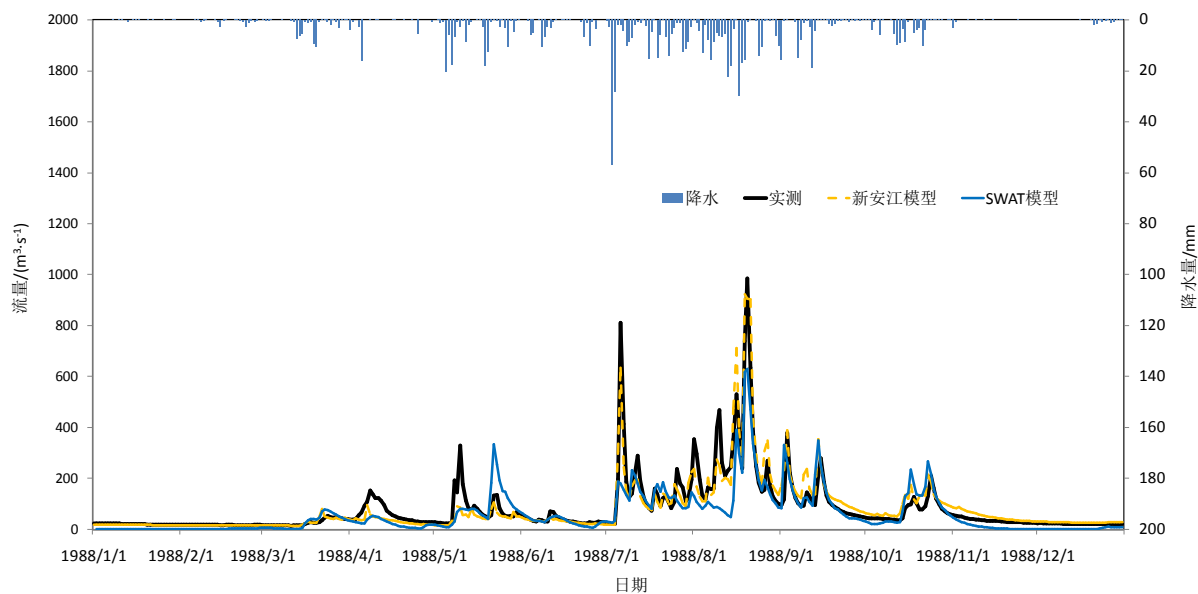
行旬河流域的降雨径流模拟，但新安江模型对旬河流域日流量过程的模拟结果优于 SWAT 模型。其中，率定期 SWAT 模型径流总量平均相对误差比新安江模型高 12.22%，平均确定性系数低 0.26；验证期 SWAT 模型径流总量平均相对误差比新安江模型高 13.56%，平均确定性系数低 0.28。日径流过程对比图见图 2，可见新安江模型对流量峰值的模拟表现出良好的效果，然而 SWAT 模型对峰值模拟普遍偏低，仅在少数几个峰值达到了较为满意的效果。

根据旬河流域流量特征，将实测流量序列从高到低进行排序，取前 10% 的流量为高水，中间 50% 流



(a) Calibration period (in 1984, for example)

(a) 率定期(以 1984 年为例)



(b) Validation period (in 1988, for example)

(b) 验证期(以 1988 年为例)

Figure 2. Comparison of daily runoff simulation performance for the SWAT and Xin'anjiang models

图 2. SWAT 模型和新安江模型日流量模拟效果对比

量为中水,后 40% 的流量为低水。选取径流总量相对误差  $R$ 、确定性系数  $E_{ns}$  和均方根误差  $RMSE$  为评价指标,对不同流量等级的模型模拟效果进行对比,结果见表 2。

从表 2 可以看出,在率定期,新安江模型对高水和低水部分的径流总量模拟效果优于 SWAT 模型,而中水部分 SWAT 模型径流总量相对误差为 0.88%,优于新安江模型的 4.1%;新安江模型的均方根误差低于 SWAT 模型,但是仅在高水部分表现出明显的优势。验证期内,新安江模型的径流总量相对误差和均方根误差均低于 SWAT 模型,然而同样是在高水部分的优势比较明显。另外,SWAT 模型和新安江模型对不同等级的流量模拟中,确定性系数出现了负值,如 SWAT 模型在率定期和验证期的中水和低水部分确定性系数均出现了负值,新安江模型在验证期的中水模拟中确定性系数出现负值。确定性系数出现负值,一方面原因是中、低水部分流量值均方差较小(高中低流量范围及统计值见表 3),造成公式(3)中  $\sum_{t=1}^N (Q_t^{obs} - Q_{avg}^{obs})^2$  项相对较小。另一方面,确定性系数最大的缺点在于,计算公式中模拟值和实测值之间的差值是以平方值来计算的,这就导致在一段时间序列的流量过程模型率定中,流量值较大的部分比流量值小的部分权重较大。图 3 给出了径流序列在率定期和验证期不同等级流量的水量组成比例。由图 3 可知,在模型率定期,高水部分比例超过 50%,由于在参数率定过程中,目标函数反映的是包括高水、中水和低水在内的整个率定期流量值的模拟效果,所以为了达到更高的确定性系数值,模型优先率定高水部分,导致中水和低水部分模拟效果不够理想。由于在 SWAT 模型和新安江模型参数率定中都出现了确定性系数为负值的情况,本研究选取均方根误差  $RMSE$  对模拟效果做进一步评价,结果列于表 2。

**Table 2.** Simulation results of the SWAT and Xin'anjiang models in three flow levels  
**表 2.** SWAT 模型和新安江模型在 3 个不同流量等级的模拟结果

指标	模型	率定期			验证期		
		高水	中水	低水	高水	中水	低水
$R$ (%)	SWAT	23.53	0.88	42.21	38.86	6.02	17.3
	新安江	5.6	4.1	4.45	12.57	4.7	6.66
$E_{ns}$	SWAT	0.5	-0.52	-22.44	0.11	-4.2	-8.23
	新安江	0.92	0.59	0.18	0.79	-0.07	0.07
$RMSE$ (m <sup>3</sup> /s)	SWAT	304.14	40.75	13.19	358.84	90.92	35.26
	新安江	121.38	21.22	2.46	175.41	43.21	11.2

**Table 3.** Intervals of three flow levels and their statistics  
**表 3.** 高中低流量范围及统计值

	统计值	高水	中水	低水
率定期	区间(m <sup>3</sup> /s)	3120~180	180~26	26~8.73
	均值(m <sup>3</sup> /s)	471.84	62.47	18.42
	均方差(m <sup>3</sup> /s)	433.24	36.16	4.31
	Cv	0.918	0.579	0.234
验证期	区间(m <sup>3</sup> /s)	2230~243	243~65	65~11.8
	均值(m <sup>3</sup> /s)	508.19	117.17	31.79
	均方差(m <sup>3</sup> /s)	382.51	43.71	13.87
	Cv	0.753	0.371	0.436

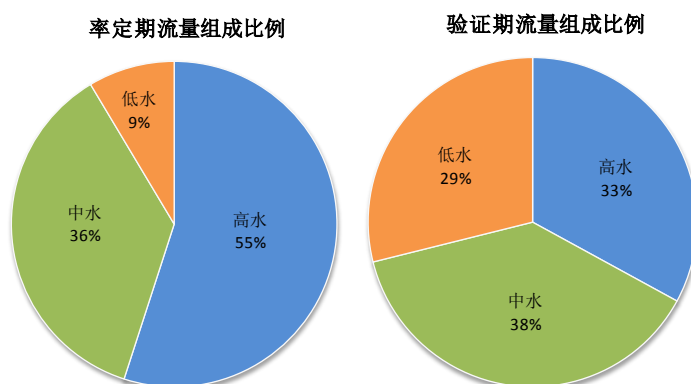


Figure 3. Water quantity composition ratio of various flow levels

图 3. 不同等级流量水量组成比例

可以发现, SWAT 模型在旬河流域的径流模拟效果相比新安江模型较差, 这种差距不仅表现在对日尺度流量过程的模拟效果上, 也表现在不同流量等级的模拟精度上, SWAT 模型仅在中水部分的水量模拟上表现出一定的优势。SWAT 模型是分布式水文模型, 模型输入众多, 相比较于新安江模型需要的气象资料外, 还需要地形、土壤、土地利用等数据, 而每一项输入数据的精度都会影响到 SWAT 模型的模拟效果。如构建 SWAT 模型使用的由马里兰大学发布的土地利用数据完成于 90 年代(约 1992~1993 年), 而本研究模拟时段在 1980~1990 年之间, 由于流域土地利用情况受人类活动影响而不断变化, 本次所用土地利用数据只能近似反映模拟期的实际土地利用情况。但是, 由于 SWAT 模型的建立需要的是流域内的地形、气象、土壤属性、土地利用等数据, 使其模拟无资料地区的径流具有可能性。

## 5. 结论

本研究使用 SWAT 模型和新安江模型对旬河向家坪水文站以上流域进行了日径流过程模拟, 并从日尺度模拟效果以及不同流量等级的模拟效果两个方面进行了对比, 得到如下结论:

- 1) SWAT 模型和新安江模型在旬河流域的日尺度径流过程模拟中均表现出一定的适用性。
- 2) 在不同流量等级的模拟效果对比上, SWAT 模型在中水和低水部分的流量模拟上表现良好, 在高水部分模拟效果与新安江模型相比差距较大。
- 3) 由于确定性系数计算方法的限制, 导致在使用确定性系数作为目标函数进行参数率定时容易造成模型优先拟合流量值较大的部分而流量值较小部分模拟效果较差。

如何改进目标函数, 以及有机结合分布式水文模型和集总式水文模型的优势, 仍有待进一步研究。

## 基金项目

湖北省重大水利科研经费项目; 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-11-0401); 水利部公益性行业科研专项经费项目(201201051)。

## 参考文献 (References)

- [1] 徐宗学. 水文模型: 回顾与展望[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2010, 46(3): 278-289.  
XU Zongxue. Hydrological models: Past, present and future. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2010, 46 (3): 278-289.
- [2] CHAPLOT, V. Impact of DEM mesh size and soil map scale on SWAT runoff, sediment, and  $\text{NO}_3\text{-N}$  loads predictions. Journal of Hydrology, 2005, 312(1): 207-222.
- [3] STRAUCH, M., BERNHOFER, C., KOIDE, S., VOLK, M., LORZ, C. and MAKESCHIN, F. Using precipitation data

- ensemble for uncertainty analysis in SWAT streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 2012, 414-415: 413-424.
- [4] TOBIN, K. J., BENNETT, M. E. Using SWAT to model streamflow in two river basins with ground and satellite precipitation data. *Journal of the American Water Resources Association*, 2009, 45(1): 253-271.
- [5] 李其峰, 苏飞. SWAT 模型在径流模拟中的研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2013, 41(23): 9871-9872.  
LI Qifeng, SU Fei. Progress in application of runoff simulation based on SWAT. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2013, 41(23): 9871-9872.
- [6] 程磊, 徐宗学, 罗睿, 米艳娇. SWAT 在干旱半干旱地区的应用——以窟野河流域为例[J]. *地理研究*, 2009, 28(1): 65-73.  
CHENG Lei, XU Zongxue, LUO Rui and MI Yan-jiao. SWAT application in arid and semi-arid region: A case study in the Kuye river basin. *Geographical Research*, 2009, 28(1): 65-73.
- [7] 冯夏清, 章光新, 尹雄锐. 基于 SWAT 模型的乌裕尔河流域气候变化的水文响应[J]. *地理科学进展*, 2010, 29(7): 827-832.  
FENG Xiaqing, ZHANG Guangxin and YIN Xiongrui. Study on the hydrological response to climate change in Wuyur river basin based on the SWAT model. *Progress in Geography*, 2010, 29(7): 827-832.
- [8] 林凯荣, 魏新平, 黄淑娴, 何艳虎. SWAT 模型在东江流域的应用研究[J]. *水文*, 2013, 33(4): 32-36.  
LIN Kairong, WEI Xinping, HUANG Shuxian and HE Yanhu. Application of SWAT model in Dongjiang river basin. *Journal of China Hydrology*, 2013, 33(4): 32-36.
- [9] 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.  
ZHAO Renjun. Watershed hydrological simulation: Xin'anjiang model and Shanbei model. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1984.
- [10] 赵人俊, 王佩兰, 胡凤彬. 新安江模型的根据及模型参数与自然条件的关系[J]. *河海大学学报: 自然科学版*, 2004, 20(1): 52-59.  
ZHAO Renjun, WANG Peilan and HU Fengbin. Relations between parameter values and corresponding natural conditions of Xin'anjiang model. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2004, 20(1): 52-59.
- [11] 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.  
WANG Zhonggen, LIU Changming and HUANG Youbo. The theory of SWAT model and its application. *Progress in Geography*, 2003, 22(1): 79-86.
- [12] SHI, P., CHEN, C., SRINIVASAN, R., ZHANG, X., CAI, T., FANG, X. and LI, Q. Evaluating the SWAT model for hydrological modeling in the Xixian watershed and a comparison with the XAJ model. *Water Resources Management*, 2011, 25(10), 2595-2612.
- [13] LEGATES, D. R., MCCABE, G. J. Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*, 1999, 35(1): 233-241.
- [14] 董磊华, 熊立华, 万民. 基于贝叶斯模型加权平均方法的水文模型不确定性分析[J]. *水利学报*, 2011, 42(9): 1065-1074.  
DONG Leihua, XIONG Lihua and WAN Min. Uncertainty analysis of hydrological modeling using the Bayesian Model Averaging Method. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 42(9): 1065-1074.
- [15] 刘移胜, 熊立华. 气候与土地利用变化对旬河流域径流的影响研究[J]. *水资源研究*, 2013, 2(3): 181-187.  
LIU Yisheng, XIONG Lihua. Research on streamflow responses to land use change and climate variability in Xunhe catchment. *Journal of Water Resources Research*, 2013, 2(3): 181-187.