

# The Application of SWAT to Simulate the Runoff in the Xiangjiang Basin and the Parameter Sensitivity Analysis

Yukun Hou<sup>1,2</sup>, Xiao Huang<sup>2</sup>, Hua Chen<sup>1,2</sup>, Chongyu Xu<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>School of Water Resources and Hydropower Engineering, Wuhan University, Wuhan

Email: [ben\\_monkey@163.com](mailto:ben_monkey@163.com)

Received: Nov. 24<sup>th</sup>, 2013; revised: Jan. 25<sup>th</sup>, 2014; accepted: Feb. 12<sup>th</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

A distributed SWAT model was introduced and applied in Xiangjiang basin. To construct the database of SWAT, those data, including DEM, land use, soil and hydro-meteorology have been collected, transformed and analyzed. The sensitive analysis of parameters, as well as their calibration and validation, was carried out in five sub-basins, by using the daily rainfall and runoff data from 1991 to 2005. The result shows that among these parameters, the alpha coefficient and Manning coefficient have high sensitivity in the five regions when the Nash-Sutcliffe efficiency coefficient ( $E_{ns}$ ) was the objective function. During the validation period from 2001 to 2005, the Nash-Sutcliffe efficiency coefficients of five sub-basins in Xiangjiang basin are all over 0.6, and the coefficients of water balance in five sub-basins are all within 10%, which shows that SWAT model has a good performance in simulating daily runoff in Xiangjiang basin.

## Keywords

Swat Model, Xiangjiang Basin, Database, Daily Runoff, SUFI-2

# 湘江流域SWAT模型建立及参数敏感性分析

侯雨坤<sup>1,2</sup>, 黄 道<sup>2</sup>, 陈 华<sup>1,2</sup>, 许崇育<sup>1,2</sup>

作者简介: 侯雨坤(1991-), 男, 江苏南京人, 硕士研究生, 主要从事气候变化对水文水资源影响研究。

<sup>1</sup>水资源与水电工程科学国家重点实验室，武汉大学，武汉

<sup>2</sup>水利水电学院，武汉大学，武汉

Email: [ben\\_monkey@163.com](mailto:ben_monkey@163.com)

收稿日期：2013年11月24日；修回日期：2014年1月25日；录用日期：2014年2月12日

## 摘要

本文以湘江流域为研究区域，构建SWAT模型数字高程、土壤、土地利用及水文气象数据库，利用该流域1991~2005年日雨量和日径流资料，对湘江流域的涟水、渌水、洙水、衡阳以上以及衡阳到湘潭区间5个区域进行参数敏感性分析及率定。研究表明，在SWAT模型的参数中，alpha基流因子、河道曼宁系数等参数在以径流效率系数为优化目标的参数率定过程中具有较强敏感性；在检验期2001~2005年，湘江干流衡阳站和湘潭站的径流效率系数 $E_{ms}$ 均达到0.7以上，3个支流站径流效率系数也超过0.6，且水量平衡系数RE绝对值均控制在10%以内，说明湘江流域SWAT模型日径流模拟效果良好。

## 关键词

SWAT模型，湘江，数据库，日径流，SUFI-2

## 1. 引言

随着社会经济的发展，我国水资源问题与水灾害问题得到了越来越多的关注。近些年来，由于气候变化与人类影响，湘江水系出现了不同程度的特枯水位及警戒水位现象，严重影响了湘江流域的水资源使用，产生了较多的水灾害问题，因此，精确模拟径流过程是有效进行水资源规划和水灾害防治的重要前提工作，而具有良好物理基础的分布式水文模型则成为了有效的工具。SWAT(Soil and Water Assessment Tool)作为美国农业部农业研究中心(USDA-ARS)开发的流域尺度模型，具备在不同土地利用和管理、不同土壤类型的大尺度复杂流域上，模拟预测流域内水文循环要素的长期变化，用以协调流域尺度的水资源管理利用的功能。

在我国，基于SWAT模型对于水量、非点源污染以及泥沙等方面的研究在近些年广泛展开。SWAT模型在汉江流域、黄河源区、淮河海河等地区的气候变化、土地利用变化对水资源的影响研究中取得了较好的效果[1]-[3]。本文以湘江流域为研究区域，收集了1991~2005年261个雨量站的雨量资料和5个水文站径流资料，利用DEM、土壤数据和植被数据构建SWAT模型的空间数据库，采用SUFI-2算法分区域对SWAT模型的参数进行敏感性分析和参数率定。在全球气候变化背景下，湘江流域水文循环规律发生了巨大变化，水资源时空分布不均的现象进一步加剧，水文气象等极端灾害事件越发频繁。因此，全面了解流域的自然情况，掌握气候变化规律，分析流域水资源的变化趋势，对于实现水资源的优化配置，流域的生态保护和经济发展具有重大的意义。本次水文模型的建立将为湘江流域的水资源规划与灾害防治提供科学支持与参考。

## 2. SWAT 模型介绍

SWAT是由美国农业部农业研究中心开发的流域尺度分布式水文模型，具有在不同土地利用和管理、不同土壤类型的大尺度复杂流域上，模拟预测流域内水文循环要素的长期变化，以此来协调流域尺度的水资源管理利用的功能[4]。模型主要由气象、水文、土壤、泥沙、作物生长、营养物、化学品以及管理

模式八个部分组成,其中水文模块是整个过程最为基本、重要的一个环节,是其它模块的基础与驱动[5]。

SWAT 模型在具体应用时又发展出了许多新的改进模型。例如基于 SWAT 和 MATSULA 模型,并集成了 GRASS 模型的 SWIM 模型,在区域尺度上拥有更简便的操作性与更强的模拟能力[6];耦合了 MODFLOW 的 SWATMOD 模型,改良了 SWAT 在地下水模块的集总式处理[7];通过对 SWAT 模型中渗透和壤中流的计算修正,SWAT-G 模型很好地应用到了山地地区[8];而集成了 Qual2E 的 ESWAT 模型,拥有更好的水质模拟功能[9]。

### 3. 湘江流域 SWAT 模型数据库构建

#### 3.1. 数据来源

本文 SWAT 模型构建采用的空间数据包括 DEM、土地利用情况、土壤情况。所有空间数据都经过 WGS-1984-UTM-Zone-49N 平面投影处理。此外,还需要气象站点的实测气象数据、雨量站的雨量数据和水文站点的实测逐日流量,本论文广泛收集了上述资料,按照模型要求建立了各项数据库,见表 1。

#### 3.2. 空间数据库

空间数据库包括 DEM、土地利用、土壤数据、生成的流域分区子流域、水系等空间特征数据等。

数字高程模型 DEM 是流域地形地貌的离散化数字表达。SWAT 模型通过对 DEM 图的处理计算,对整个流域经行子流域划分、水系生成。图 1 为湘江流域初始 DEM 图以及 ArcSWAT 的处理结果,共划分出 56 个子流域。

本文的土地利用类型图采用湘江地区 2005 年比例尺为 1:25 万的土地覆盖数据。数据库构建中,通过转换,将其与 SWAT2009 土地利用属性表相匹配。根据流域实际情况对土地利用类型进行概化处理,重分类为 10 类,具体见图 2。

本文的土壤类型图采用湘江流域 1:100 万土壤分布图,根据流域的实际情况进行概化处理,最终重分类出 22 类土壤类型,具体见图 3。

我国已经完成的两次土壤普查中,分别采用苏联制和国际制计算土壤属性。而 SWAT 模型数据库采用美国制描述土壤质地。

#### 3.3. 水文气象数据库

本文采用的 11 个气象站点,包括 SWAT 模型所需的日最高最低温度、平均相对湿度、辐射量、平均风速,由于这些变量的空间分布差异相对较小,且 11 个气象站空间分布相对均匀,本次论文直接使用。

**Table 1. Input database for SWAT model**  
**表 1. SWAT 模型输入数据库**

数据	数据项	尺度
空间数据	DEM	30 m
	土地利用	1:25 万
	土壤	1:100 万
土壤属性数据库	土壤成分、容重、水力传导度等	
气象观测数据	气温、相对湿度、风速、日照	日
降雨观测数据	降雨量	日
水文观测数据	径流量	日

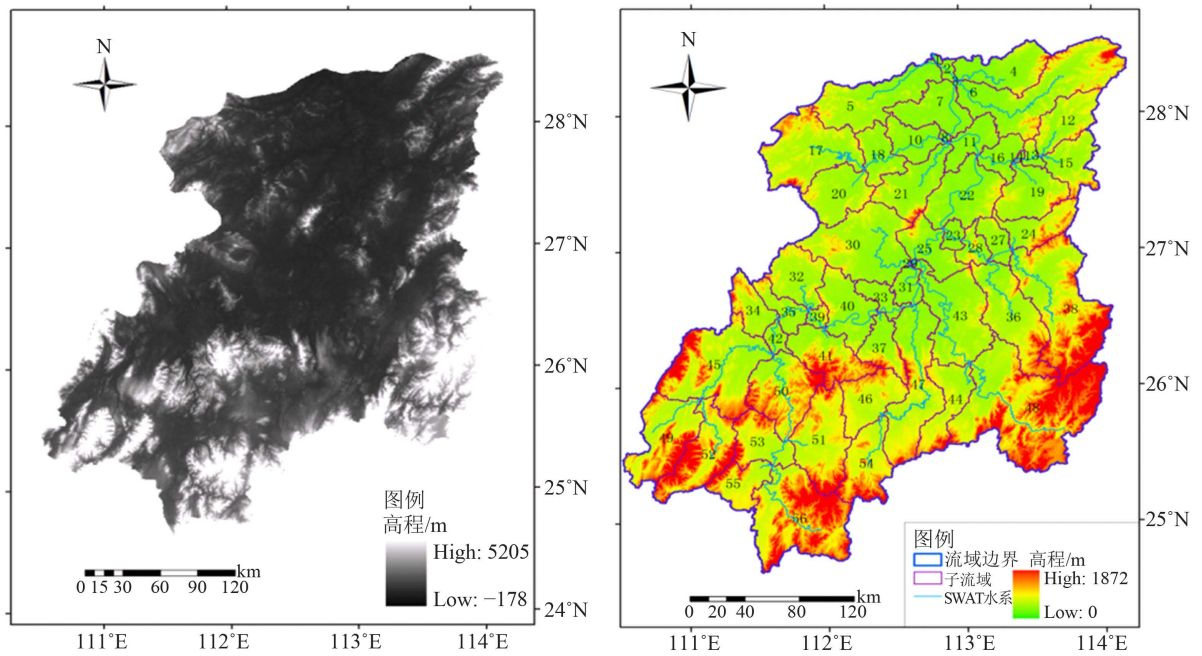


Figure 1. DEM map and digital stream and subbasin map of Xiangjiang basin  
 图 1. 湘江流域 DEM 图及水系、子流域生成图

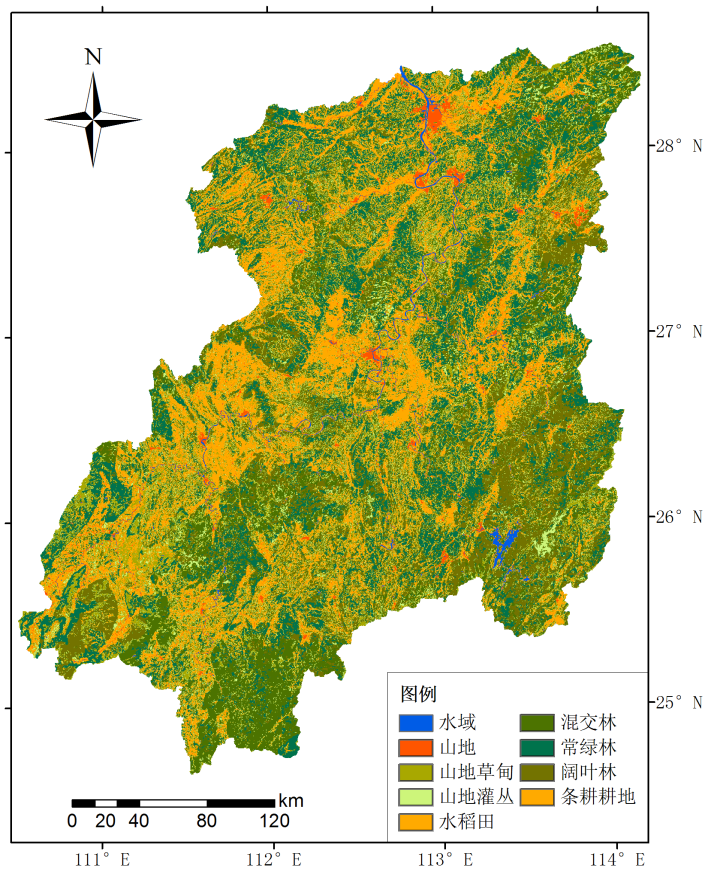


Figure 2. Landuse map in Xiangjiang basin  
 图 2. 湘江流域土地利用图



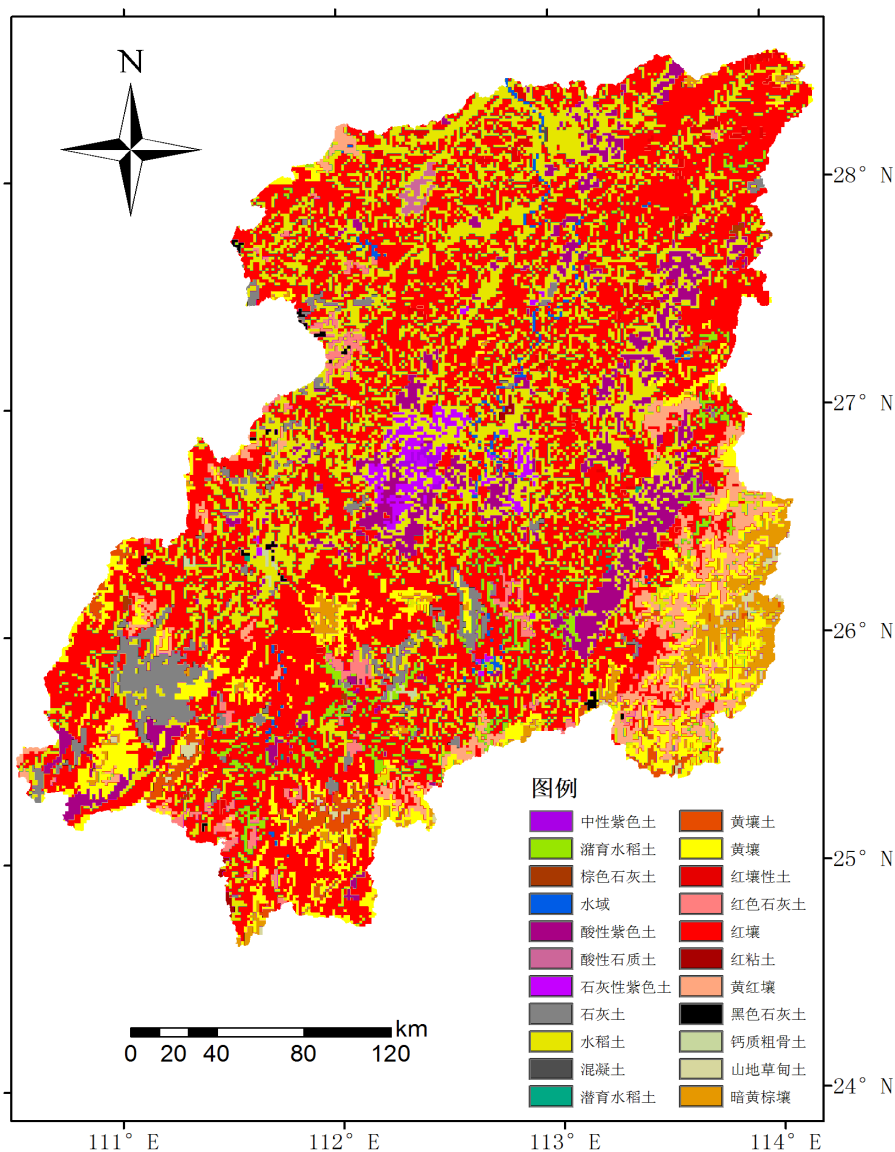


Figure 3. Soil map in Xiangjiang Basin  
图 3. 湘江流域土壤类型图

对于 261 个降雨站点，本次论文选取各个子流域以内以及周边靠近的若干雨量站点数据，通过 SWAT 内嵌的泰森多边形法插值得到子流域面的降雨，并制作相应的降雨数据库，水系及站点具体的分布情况见图 4。

## 4. 湘江流域 SWAT 模型参数敏感性分析及率定

### 4.1. 流域分区划分方法

整理和收集了湘江干流衡阳、湘潭两个水文站以及湘江支流洙水、渌水及涟水各一个水文站的日径流资料。其中衡阳站以上流域、洙水、渌水以及涟水之间并无水力联系，可对各控制站以上的子流域进行合并，单独对这四个区域进行参数的敏感性分析及率定。最终保持这四个区域的率定参数不变，以湘潭站作为控制站，进行衡阳 - 湘潭区间的参数率定与分析。

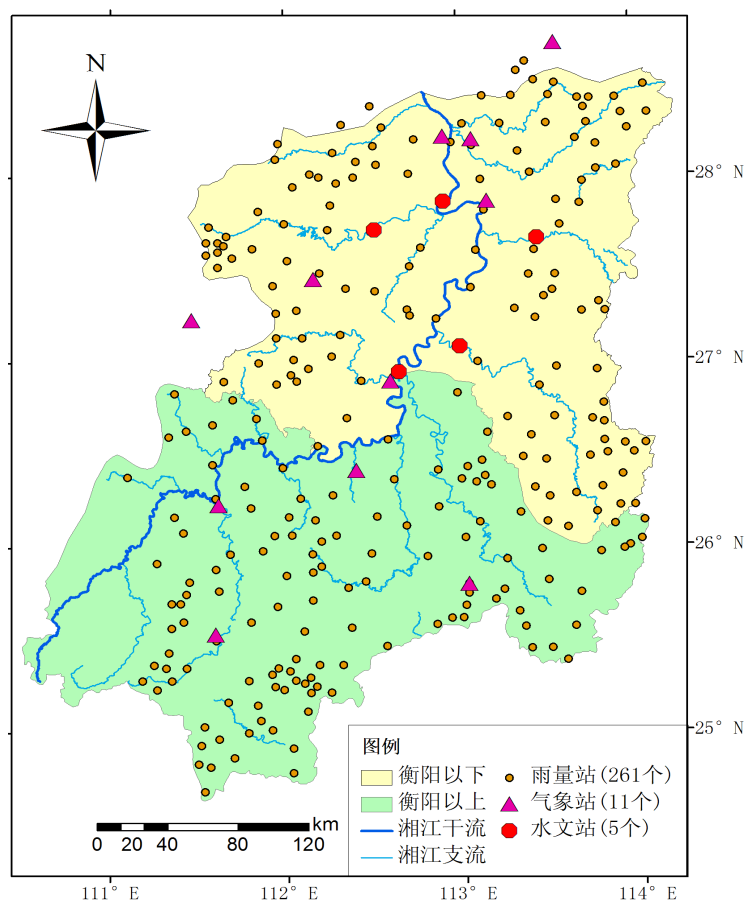


Figure 4. The stream of Xiangjiang basin and hydro meteorological stations location

图 4. 湘江流域河流水系和站点分布图

#### 4.2. SUFI-2 算法参数优化

SWAT 模型模拟过程涉及众多参数，在模型参数的率定检验过程中，部分参数对结果影响巨大，而部分则对结果的改进作用甚小。本次采用 SWAT-CUP 中的 SUFI-2 算法对湘江流域五个水文站的控制区域 1991~2000 年间进行敏感性分析。本次率定牵涉 SWAT 常用 10 个参数，根据 SWAT-CUP 中给出的初始不确定性范围，结合前人研究经验，对各区域均进行 800 次模拟，结果如表 2 所示。

在表 2 中， $t$  值表示参数敏感性的大小，其绝对值越大，代表该参数在某一区域越敏感； $p$  值表示该参数敏感性的置信水平，其值越接近 0，代表该参数越重要。本文认为，在  $p$  值小于等于 0.05 的情况下，该参数比较敏感重要；而在  $p$  值大于等于 0.3 的情况下，该参数不敏感。

对于 5 个区域进行总体的分析发现，ALPHA\_BF(基流回退系数)、CH\_N2(主河道曼宁系数)、GW\_DELAY(地下水的延迟系数)这三个参数普遍比较敏感。ALPHA\_BF 参数除了在涑水地区外，在其余地区皆为最为敏感的参数，这主要也是因为这些地区的汇流处高程落差明显较大，流速也明显较快，而 ALPHA\_BF 反映基流的大小与快慢。在基础流速较大的情况下，ALPHA\_BF 的变化会对径流过程产生很明显的影响，故而该参数也最为敏感。CH\_N2 为主河道曼宁系数，在地表径流较大，河网密布的情况下会对产流产生较大的影响，而湘江流域地处南方湿润地区，降雨较为充沛，土壤的缺水率较小，汛期主要以类似蓄满产流的方式为主。在这样的情况下，曼宁系数会具有较高的敏感性。GW\_DELAY 代表地

**Table 2.** Parameter sensitivity of five controlled area in Xiangjiang basin  
**表 2.** 湘江流域 5 大控制区域参数敏感性

参数名称	衡湘区间		衡阳以上		洙水		渌水		涟水	
	t 值	p 值	t 值	p 值	t 值	p 值	t 值	p 值	t 值	p 值
CN2	0.05	0.96	8.11	0.00	0.26	0.79	10.15	0.00	6.15	0.00
GW_DELAY	-0.14	0.89	-4.47	0.00	-3.14	0.00	-3.93	0.00	-2.55	0.01
GWQMN	0.00	1.00	0.49	0.62	-2.72	0.01	1.95	0.05	0.69	0.49
GW_REVAP	-0.01	0.99	-0.98	0.33	-2.99	0.00	-2.97	0.00	2.28	0.02
ESCO	-0.15	0.88	4.07	0.00	-27.25	0.00	0.73	0.47	1.46	0.14
CH_K2	0.02	0.98	2.95	0.00	-2.87	0.00	0.99	0.32	0.19	0.85
SOL_AWC	0.07	0.94	0.35	0.73	0.33	0.74	-0.75	0.45	1.03	0.31
SOL_K	0.05	0.96	0.30	0.77	0.40	0.69	-6.56	0.00	-2.50	0.01
CH_N2	-2.25	0.02	0.92	0.36	-3.45	0.00	10.74	0.00	7.69	0.00
ALPHA_BF	7.44	0.00	27.18	0.00	-2.44	0.02	24.71	0.00	25.10	0.00

下水的延迟时间,对于枯水期的河道径流补给具有重要的意义,而湘江流域枯水期主要依靠地下水补给调剂,在这个时间段内地下水延迟时间对产流影响较大。同时,CN2(径流曲线数)参数在衡阳以上、渌水、涟水三个地区比较敏感。CN2 值是 SCS 径流曲线法中反映降雨前期流域特征的无量纲参数。由于在本次 SWAT 模型中产流采用 SCS 径流曲线法,且降雨较为充沛,所以 CN2 对于地表径流的模拟起着至关重要的作用。说明在面积较小的区域上,下垫面的不透水性对径流的生成具有很强的影响。

对于不同地区的参数敏感性分析而言,在渌水、涟水两个地区,ALPHA\_BF、CH\_N2、GW\_DELAY 三个参数依次最为敏感。衡阳以上地区 CH\_N2 参数不敏感,这主要是因为衡阳以上地区面积较大,但生成的河网较短,河网密度较低,从而使得曼宁系数对河道中地表径流影响降低,导致参数不太敏感。衡湘地区除了 ALPHA\_BF 与 CH\_N2 参数以外,其余参数均不敏感,这也是由于衡湘地区并不是水力独立的区域,受到其余四个区域入境水量的影响,自身产流相较于四个区域入境水量而言明显偏小,本身的水文过程功能被大大地弱化。所以反应基流大小与快慢的 ALPHA\_BF 与影响河道流量的 CH\_N2 可以调节所有水量,对最终径流结果产生影响,从而在该地区具有一定的敏感性,而其余参数基本不敏感。洙水地区 ESCO(土壤蒸发补偿系数)最为敏感,这是由于洙水地区所在地区雨量站平均降雨量较其余地区降雨量小,蒸发量对洙水地区径流产生影响更加明显,从而导致 ESCO 参数更加敏感。

#### 4.3. 湘江流域 SWAT 模型率定与检验

模型的率定就是寻找使模型的模拟值与对应实测值尽可能一致的参数。本文采用 SWAT-CUP 软件自带的 SUFI-2 模块进行参数的自动率定。各区域的率定检验期 Nash-Sutcliffe 效率系数如表 3 所示(率定检验期的第一年为模型预热),并给出了相应的径流总量相对误差系数 RE。

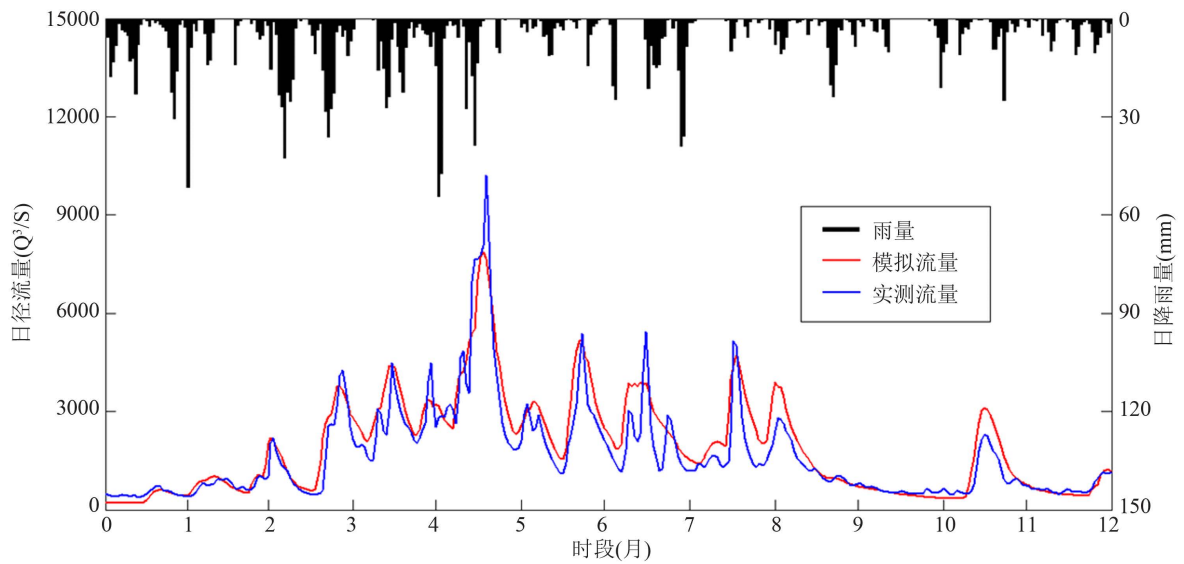
表 3 表明,对于湘江干流两个区域的率定检验,日模拟效率系数均达到 70% 以上,而对于渌水、涟水、洙水等流量相对较小的湘江支流区域,日模拟效率系数也达到了 60% 以上。此外,5 个控制区域率定检验期的径流总量相对误差系数均控制在 10% 以内。综上所述,湘江流域整体的日模拟率定取得了较好的效果。

#### 4.4. 模型模拟结果比较分析

图 5 和图 6 给出了检验期湘潭站的模拟实测效果对比图,可以进一步比较 SWAT 模型径流过程模拟效果。

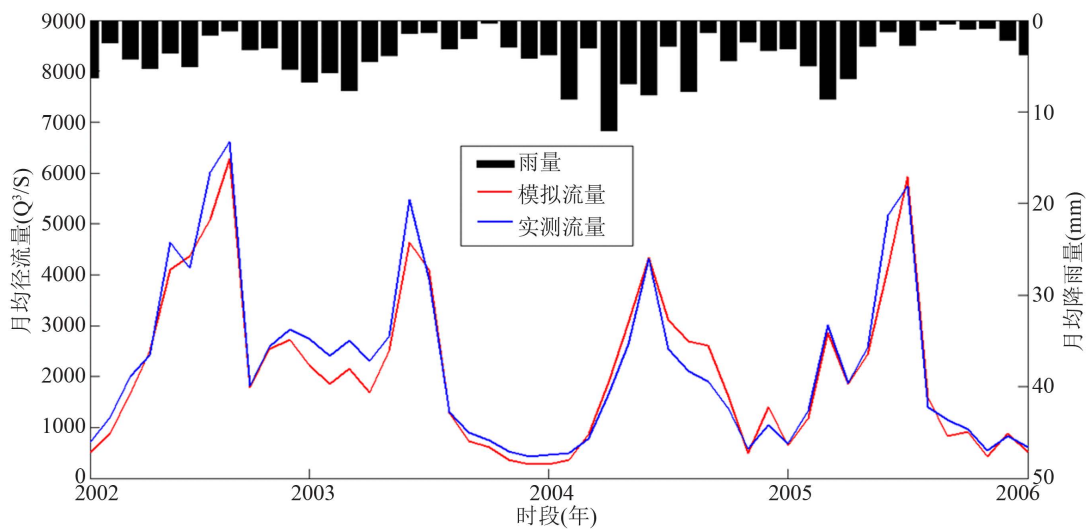
**Table 3.** Statistical index of daily simulation in calibration and validation period  
**表 3.** SWAT 模型日模拟率定检验结果

控制站	率定期(1992~2000 年)		检验期(2002~2005 年)	
	ENS(%)	RE(%)	ENS(%)	RE(%)
衡湘站	83	-8.49	82	-4.96
湘潭站	76	-3.96	71	-7.51
渌水站	64	-10.0	62	0.56
涟水站	69	-3.61	65	-5.40
洙水站	72	-2.4	68	3.61



**Figure 5.** Daily flow in 2004 of validation period at Xiangtan station

**图 5.** 湘潭站检验期 2004 年日径流过程线



**Figure 6.** Monthly flow between 2002 and 2005 at Xiangtan station

**图 6.** 湘潭站检验期 2002~2005 年月径流过程线



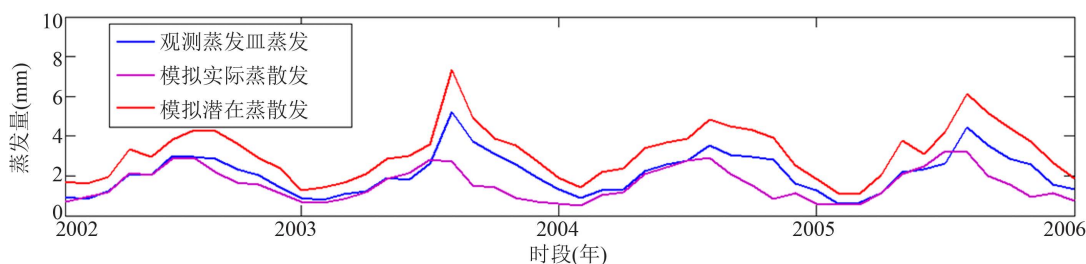


Figure 7. Comparison of monthly simulated evapotranspiration in Xiangjiang basin

图 7. 湘江流域蒸散发月模拟效果对比

由于土壤含水量的实测资料较难获得，流域的水面蒸发较易获得，故统一对 SWAT 模型模拟的流域潜在蒸散发能力、实际蒸散发量与蒸发皿观测值进行对比，用以反映模型对于土壤植物水文过程模拟的合理性，如图 6 所示。

从图 7 可以看出，在大部分温度不高的月份，SWAT 模型模拟的实际蒸散发量与观测的蒸发皿比较接近。而在 7, 8, 9 月的模拟精度则稍差，无法模拟出极值，论文认为这一现象的出现很可能是由于在高温月份，蒸发皿温度高于气温，进一步加速了蒸发皿内的水面蒸发速度，使得观测数据高于实际值。对这一部分的数据进行分析，可以发现尽管在高温月份模拟与观测数值相差较大，但是相关系数达到 0.8 以上，可以认为将这一阶段的实测数值乘以一个折算系数，才能真实地反映实际情况。此外，将观测数据与 SWAT 模型模拟的流域潜在蒸散发能力进行对比，相关系数达到 0.9 以上，也在一定程度上说明了模拟的合理性。因此可以认为，SWAT 模型对于湘江流域土壤植物的水文过程模拟是比较正确合理的。

## 5. 结论

本文以湘江流域为研究区域，分析和讨论了 SWAT 模型建立过程中参数的敏感性以及模型在该区域径流模拟的精度，具体结论如下：

- 1) 相对于单一出口断面的径流率定，分区域多站点的率定模式更能反映模型的分布式特点，对提高最终流域出口断面的模拟精度也有一定的帮助；
- 2) 基流  $\alpha$  因子、河道的曼宁系数在以径流模拟效率系数为目标函数的参数优化中，具有较强的敏感性；湿润条件下的 SCS 曲线数对于独立率定的小子流域较为敏感；
- 3) SWAT 模型对于径流的模拟在汛期的极值模拟方面有一定的不足，但是水量误差整体效果好。SWAT 模型在该区域的日径流过程模拟是合理的，符合后续水资源评估的需要。

## 参考文献 (References)

- [1] 夏智宏, 周月华, 许红梅. 基于 SWAT 模型的汉江流域水资源对气候变化的响应[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(2): 158-163.  
XIA Zhihong, ZHOU Yuehua and XU Hongmei. Water resources responses to climate changes in Hanjiang river basin based on SWAT model. Resources and environment in the Yangtze basin, 2010, 19(2): 158-163. (in Chinese)
- [2] 陈利群, 刘昌明. 黄河源区气候和土地覆被变化对径流的影响[J]. 中国环境科学, 2007, 27(4): 559-565.  
CHEN Liqun, LIU Changming. Influence of climate and land-cover change on runoff of the source regions of Yellow River. China Environmental Science, 2007, 27(4): 559-565. (in Chinese)
- [3] 欧春平, 夏军, 王中根, 等. 土地利用/覆被变化对 SWAT 模型水循环模拟结果的影响研究——以海河流域为例 [J]. 水力发电学报, 2009, 28(4): 124-129.  
OU Chunping, XIA Jun, WANG Zhonggen, et al. LUCC influence on SWAT hydrological simulation—A case study of Haihe river basin. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 28(4): 124-129. (in Chinese)
- [4] Arnold, J.G., Neitsch, S.L., Kiniry, J.R., et al. Soil and water assessment tool. Theoretical Documentation, Version 2009, Agriculture Research Service US, 2009.

- [5] 庞靖鹏. 非点源污染分布式模拟[D]. 北京师范大学, 2007.  
PANG Jinpeng. Distributed nonpoint source pollution modeling—A case study on water source areas protection in the Miyun reservoir. Beijing Normal University, 2007. (in Chinese)
- [6] KRYSANOVA, V., MULLER-WOHLFEIL, D. I. and BECKER, A. Integrated modelling of hydrology and water quality in mesoscale watersheds. PIK Report, 1996.
- [7] SOPHOCLEOUS, M. A., KOELLIKER, J. K., GOVINDARAJU, R. S., et al. Integrated numerical modeling for basin-wide water management: The case of the Rattlesnake Creek basin in south-central Kansas. *Journal of Hydrology*, 1999, 214(1-4): 179-196.
- [8] ECKHARDT, K., HAVERKAMP, S., FOHRER, N., et al. SWAT-G, a version of SWAT99.2 modified for application to low mountain range catchments. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2002, 27(9-10): 641-644.
- [9] VAN GRIENSVEN, A., BAUWENS, W. Integral water quality modelling of catchments. *Water Science and Technology*, 2001, 43(7): 321-328.