

# Water Balance Analysis in the Uncontrolled Area of Dongting Lake Basin

Kang Xie<sup>1</sup>, Xiaojing Zhang<sup>1</sup>, Xiaojing Wei<sup>1\*</sup>, Pan Liu<sup>1</sup>, Ping Song<sup>2</sup>, Ying Zheng<sup>2</sup>, Nan Xie<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>HunanHydro & Power Design Institute, Changsha Hunan

Email: \*55759519@qq.com

Received: Jan. 11<sup>th</sup>, 2019; accepted: Jan. 26<sup>th</sup>, 2019; published: Feb. 2<sup>nd</sup>, 2019

## Abstract

Dongting Lake possesses an important regulation capability in the Yangtze River basin. Because there are no flow-gauged stations in the area below the three inlets and four tributaries, the intervening runoff derived from precipitation cannot be observed directly. The quantitative related analysis is still scarce. To address this issue, the SWAT and Xin'anjiang models are established with various objective functions, respectively, to simulate the runoff from 1991 to 2009, which is verified by the annual total intervening runoff calculated by the water balance equation. The results show that: 1) The deterministic coefficient (DC) incorporated with the total relative errors (RE) provides better performance in the SWAT model; 2) A positive intervening runoff constraint considered with the sum of squares for residuals can improve the simulation accuracy for the Xin'anjiang model; and 3) It can be inferred that the relationship between rainfall and runoff may change around 1995 and 1996, based on runoff coefficients during 1991 to 2009 and simulated results of the hydrological models. Therefore, split-sample calibration is used and produces more accurate simulation during calibration and validation periods for both SWAT and Xin'anjiang models. The proposed method can relieve the water balance problem and provide a basis for water balance analysis in uncontrolled areas of Dongting Lake basin.

## Keywords

Dongting Lake, SWAT Model, Xin'anjiang Model, Intervening Runoff, Split-Sample Calibration

# 洞庭湖流域未控区间水量平衡分析

谢康<sup>1</sup>, 张晓菁<sup>1</sup>, 卫晓婧<sup>1\*</sup>, 刘攀<sup>1</sup>, 宋平<sup>2</sup>, 郑颖<sup>2</sup>, 谢南<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>湖南省水利水电勘测设计研究总院, 湖南 长沙

Email: \*55759519@qq.com

作者简介: 刘攀, 教授, 研究方向: 水文水资源。

\*通讯作者。

收稿日期：2019年1月11日；录用日期：2019年1月26日；发布日期：2019年2月2日

## 摘要

洞庭湖是长江流域重要的调蓄湖泊，由于三口四水以下区域未设控制测站，该部分面积降雨形成的径流量无法直接观测，定量研究较少。针对该问题，本研究分别建立了SWAT模型和新安江模型，选取了不同的目标函数，模拟1991~2009年的区间径流，以反推的区间径流年总量值进行验证。结果表明：1) 在SWAT模型方案中，目标函数同时纳入确定性系数和总量相对误差所得的区间径流模拟精度最高；2) 在新安江模型方案中，在以残差平方和为目标函数的基础上，引入区间径流为正值的约束，模拟效果最好；3) 基于洞庭湖区间的径流系数以及水文模型的模拟结果，发现1995年和1996年前后，该流域的降雨径流关系可能发生了变化，因此采用分段率定的方式，在率定期和检验期均可获得具有较高精度的模拟结果，两个模型的水量平衡问题得到了很大的改进。提出的模型和方法可为洞庭湖流域未控区间水量平衡分析提供依据。

## 关键词

洞庭湖，SWAT模型，新安江模型，区间径流，分段率定

Copyright © 2019 by authors and Wuhan University.

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

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



Open Access

## 1. 引言

洞庭湖位于中国湖南省北部，长江荆江河段以南，洞庭湖流域总面积 26.22 万 km<sup>2</sup>，它是长江流域重要的调蓄湖泊，具有强大的蓄洪能力[1] [2]。由于洞庭湖湘、资、沅、澧四水和长江三口控制站以下的区间河道纵横，水系复杂[3]，在该区域未设水文测站，称为未控区间。三口四水控制站以下未控区间的洞庭湖平原区面积为 5.26 万 km<sup>2</sup>，占洞庭湖流域总面积的 20%。目前涉及到洞庭湖的各项科学研究与规划，均未考虑该区间面积的径流量[4]，一般只做概化处理，对成果精度影响较大。开展三口四水以下洞庭湖未控区间径流研究，对提高洞庭湖乃至长江水情分析成果的准确度，从而合理确定洞庭湖及长江治理规划方案具有十分重要的意义。

水文学方法在区间径流模拟中均表现出水量不平衡的问题，根本原因是各种误差在未控区间上累积。纵观以往研究发现，处理未控区间问题主要通过水量平衡方法修正[5]，历史和场次洪水分析等经验分析方法[6]，数据驱动方法[7]和建立 TOPMODEL [8]和 SWAT 等分布式流域模型[9] [10]。水文学方法多关注于流域出口洪量的模拟[11]，未控区间降雨径流关系模拟一直是有待深入研究和探讨的问题。目前的研究很难建立预报方案，加之洞庭湖地区地形和河网复杂，其他方法无法直接移用。此外，洞庭湖未控区间的各年径流系数差异很大，降雨径流关系错综复杂，固定不变的流域参数适用性较差[12] [13]。因此，本文在洞庭湖未控区间分别建立了 SWAT 模型和新安江模型，研究未控区间的水量平衡问题。

## 2. 流域概况

如图 1 所示，研究对洞庭湖三口四水控制站以下未控区间流域进行实地调研、水文调查以及科学数据查询，收集所需流域下垫面数据以及水文气象数据如下：

DEM 数据采用 90 m 分辨率 SRTM 数据;土地利用数据来源于国家地球系统科学数据平台,分辨率为 1 km,数据时期为 2010 年;土壤数据为南京土壤所测量的 1:100 万土壤数据,数据时期为 2009 年,土壤分类系统为 FAO-90。

气象数据采用石门、澧县、临澧、南县、华容、安乡、岳阳、常德、汉寿、沅江、湘阴、益阳、宁乡、汨罗、平江、长沙、株洲、双江口、桃源、桃江、月田、毛田等 22 个气象站点的雨量和气温数据。

研究选用三口四水控制站实测流量资料作为区间来水流量,包括 1990~2009 年沙道观、新江口、弥陀寺、康家岗、管家铺、石门、桃源、桃江和湘潭水文站逐日流量资料。由于洞庭湖湖泊水域面积大,特别在洪水期间调蓄作用明显。而模型对洞庭湖调蓄作用还不能有效模拟,故本研究采用东洞庭湖、南洞庭湖和西洞庭湖水位容积曲线,通过南嘴、小河嘴、营田和城陵矶(七)站逐日水位计算调蓄的水量,并折算为流域出口城陵矶站的流量。流域区间流量没有实测值,只能通过水量平衡计算得到反推的区间流量值。

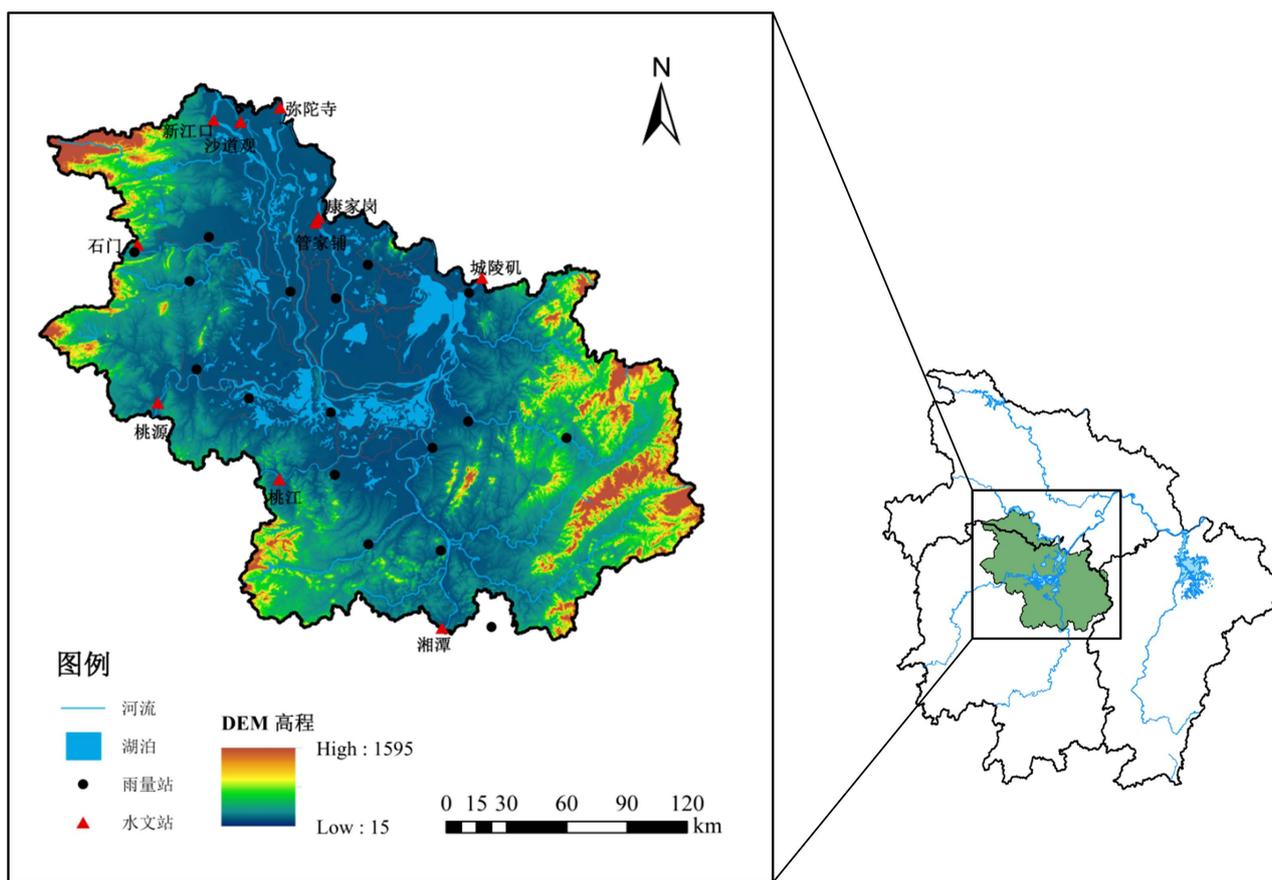


Figure 1. Location map of the uncontrolled area of Dongting Lake basin

图 1. 洞庭湖未控区间流域位置示意图

本研究中使用 1990 年资料进行模型“预热”,并以 1991~2000 年为率定期,2001~2009 年为检验期,利用城陵矶水文站反推流量数据对径流进行校准和验证。

分别计算洞庭湖流域区间各年的径流系数,如表 1 所示,洞庭湖 1990~2009 年共计 20 年的平均径流系数为 0.47。最大值为 0.84,发生在 1998 年;最小年径流系数为 0.27,发生在 2007 年,年间差异较大。因此,洞庭湖流域收集的资料存在水量不平衡的现象,会直接导致计算年尺度模拟的区间径流总量的水量与实测相差很大。

**Table 1.** Annual runoff coefficient of uncontrolled area in Dongting Lake basin  
**表 1.** 洞庭湖流域未控区间年径流系数表

年份	区间年降雨量/mm	区间年径流深/mm	年径流系数
1990	1416	470	0.33
1991	1386	689	0.50
1992	1242	439	0.35
1993	1654	706	0.43
1994	1484	457	0.31
1995	1638	787	0.48
1996	1490	804	0.54
1997	1431	644	0.45
1998	1886	1577	0.84
1999	1698	975	0.57
2000	1349	501	0.37
2001	1232	603	0.49
2002	1997	1141	0.57
2003	1314	740	0.56
2004	1372	637	0.46
2005	1350	543	0.40
2006	1270	527	0.42
2007	1063	282	0.27
2008	1279	446	0.35
2009	1200	464	0.39
平均	1438	672	0.47

### 3. 研究方法

#### 3.1. SWAT 模型

SWAT (Soil and Water Assessment Tool)模型是由美国农业部(USDA, United States Department of Agriculture)开发的分布式水文模型[14]。SWAT 模型具有明确的物理机制,这一特点减少了模型对资料的依赖性,是充分考虑下垫面条件并且较为成熟的分布式水文模型,可用于无资料的平原水网地区的径流模拟预测。SWAT 模型基于数字高程模型(DEM)提取流域河流水系并将流域分成若干个子流域[15][16],对于每一个子流域,根据其中土壤类型、土地利用和管理措施的组合情况,进一步划分为多个水文响应单元(HRU, Hydrological Response Unit)。

SWAT 模型参数采用自动率定(SWAT Calibration and Uncertainty Programs, SWAT-CUP)软件进行,选用序贯不确定拟合(SUFI-2)算法作为参数估计的最优化方法。实际研究表明,只将确定性系数 DC 作为平原水网流域 SWAT 模型参数率定的目标函数,区间水量难以达到平衡。为此,选取确定性系数 DC 和总量相对误差 RE 共同作为日尺度径流过程模拟效果的目标函数:

$$\max DC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{\text{出},i} - \hat{Q}_{\text{出},i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{\text{出},i} - \bar{Q})^2} \tag{1}$$

$$\min |RE| = \frac{\left| \sum_{i=1}^n Q_{\text{区间},i} - \sum_{i=1}^n \hat{Q}_{\text{区间},i} \right|}{\sum_{i=1}^n Q_{\text{区间},i}} \times 100\% \tag{2}$$

式中： $\hat{Q}_{\text{出},i}$  为流域出口的模拟流量值， $Q_{\text{出},i}$  为流域出口的实测流量值， $\bar{Q}$  分别为实测流量值均值， $n$  为资料序列长度， $Q_{\text{区间},i}$ 、 $\hat{Q}_{\text{区间},i}$  为区间入流的反推值和模拟值。

### 3.2. 新安江模型

新安江模型[17]被广泛应用在我国南方湿润和半湿润地区，且应用结果良好，流程图如图 2 所示。该模型以降雨和潜在蒸散发为输入，采用三层蒸发模型，主要产流方式为蓄满产流[18]。蓄满产流是指，当包气带蓄水量未达到田间持水量时，所有降雨均被土壤吸收；当包气带蓄水量达到田间持水量后，才开始产流。三水新安江模型将总径流被划分为地表径流、壤中流、地下径流三种。对三种径流分别使用不同的方法进行汇流，其中地表水使用单位线法，土壤水和地下水采用线性水库法。最后，地表出流、壤中出流和地下水出流之和形成流域出口断面的流量。

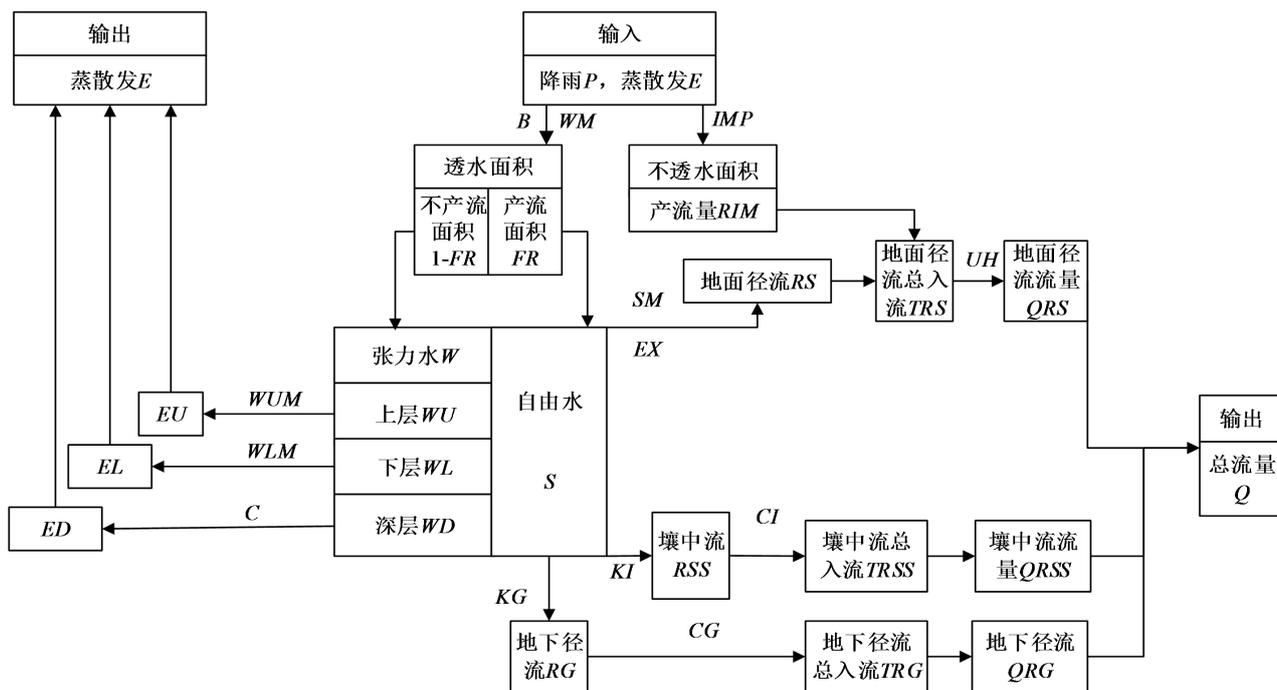


Figure 2. Flow chart of Xin'anjiang model  
图 2. 三水源新安江模型计算流程图

三水源新安江模型共包含 15 个参数，本研究以遗传算法(Genetic) [19]的结果作为优化参数的初值，然后采用罗森布朗克(Rosenbrock) [20]方法计算，最后采用单纯形(Simplex) [21]方法得到模型的最优参数。对于洞庭湖流域，新安江模型的目标函数一般为残差平方和(SSR):

$$\min F = \sum_{i=1}^n \left( Q_{\text{出},i} - \hat{Q}_{\text{区间},i} - \hat{Q}_{\lambda,i} \right)^2 \quad (3)$$

式中： $\hat{Q}_{\lambda,i}$  为演进到流域出口的上游入流的模拟值。

但考虑到水量平衡的问题，在目标函数中加入洪量模拟的评价指标 RE：

$$\min F = \sum_{i=1}^n \left( Q_{\text{出},i} - \hat{Q}_{\text{区间},i} - \hat{Q}_{\lambda,i} \right)^2 \cdot (1 + RE) \quad (4)$$

另一方面，理论上，由流域出口流量减去单位线演进后的上游入湖流量的模拟值，可得区间流量匹配的目标序列，该目标序列应均为正值，所以可在目标函数中加入约束：

$$\begin{cases} \min F = \sum_{i=1}^n \left( Q_{\text{出},i} - \hat{Q}_{\lambda,i} - \hat{Q}_{\text{区间},i} \right)^2 \\ \text{s. t. } Q_{\text{出},i} - \hat{Q}_{\lambda,i} \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

### 3.3. 评价指标

研究采用以下指标对水文模型计算结果进行评定分析：

- 1) 确定性系数 DC [22]。
- 2) 径流区间年总量相对误差 RE。

由于流域区间流量一般没有实测值，只能通过水量平衡计算得到反推的区间流量值，该反推区间流量值在年尺度上较为准确，因此采用第  $j$  年径流总量相对误差 RE 来评价模拟的区间流量：

$$RE_j = \frac{\left( \sum_{i=1}^m Q_{\text{区间},i} - \sum_{i=1}^m \hat{Q}_{\text{区间},i} \right)}{\sum_{i=1}^m Q_{\text{区间},i}} \times 100\% \quad (6)$$

式中： $m$  为第  $j$  年包含的时间步长数。

## 4. 结果及讨论

### 4.1. SWAT 模型模拟区间流量

在洞庭湖流域三口四水控制站以下，城陵矶出口以上的未控区间建立 SWAT 模型，以确定性系数 DC 作为目标函数，日尺度模型模拟的结果显示，在率定期的确定性系数 DC 为 90%，检验期为 88%，说明该分布式模型能较好的反应洞庭湖流域的降雨径流关系。然而，每年三口四水来水的水量占城陵矶出口水量的比例就接近 80%，模型在堤垸区较多、地形复杂的洞庭湖区依然存在着水量不平衡问题。

研究分别对 1991~2009 年实测和模拟的流量序列每年的区间水量进行计算，表 2 列出了传统 SWAT 模型模拟的 1991~2009 年逐年的区间年总水量误差。由方案 1 可以看出，率定期 10 年的区间水量年总量为 3640.5 亿  $\text{m}^3$ ，模拟的区间水量年总量为 3785.2 亿  $\text{m}^3$ ，总量相对误差偏大 3.9%；检验期 9 年的区间水量年总量为 2585.2 亿  $\text{m}^3$ ，模拟的区间水量年总量为 2657.3 亿  $\text{m}^3$ ，总量相对误差偏大 2.7%，而且每年的相对误差相差也较大。率定期 1992、1993、1994 和 1995 年，检验期 2005、2007 和 2008 年相对误差均超过了 20%。以上结果表明，传统 SWAT 模型结果区间水量不平衡，在率定期和检验期均表现出模拟水量偏大的问题。因此，只将确定性系数 DC 作为平原水网流域参数率定的目标函数，区间水量难以达到平衡。

为此，选取确定性系数 DC 和总量相对误差 RE 共同作为日尺度径流过程模拟效果的目标函数，由方案 2 可以看出组合目标函数方案的结果，率定期 10 年的区间水量年总量为 3640.5 亿  $\text{m}^3$ ，模拟的区间水量年总量为

3352.2 亿  $m^3$ ，总量相对误差偏小 7.9%，但每年的相对误差相差依然较大。1991、1993 年和 2000 年总量模拟较好，相对误差在 10% 以下；1994、1995、1997、1998 和 1999 年相对误差在 10% 至 30% 之间；而 1992 年和 1996 年的年总量相对误差超过了 30%。检验期 9 年的区间水量年总量为 2585.2 亿  $m^3$ ，模拟的区间水量年总量为 2519.2 亿  $m^3$ ，总量相对误差偏小 2.6%，但每年相对误差整体上较率定期低。2003 年、2004 年、2006 年和 2009 年相对误差在 10% 以内；2001 年和 2008 年的相对误差在 10% 至 20% 以内；而 2002 年和 2007 年在 20% 至 30% 以内。以上结果表明，改进目标函数的 SWAT 模型结果在检验期区间水量平衡结果一般，率定期区间水量平衡在 1995 和 1996 年前后差别很大。

**Table 2.** Simulation results of annual total intervening water volume in SWAT model  
**表 2.** SWAT 模型区间水量年总量模拟结果

年份	实测区间水量(亿 $m^3$ )	方案 1 (以 DC 为目标)		方案 2 (以 DC 和 RE 为目标)		
		模拟区间水量(亿 $m^3$ )	年总水量误差	模拟区间水量(亿 $m^3$ )	年总水量误差	
1991	331.0	355.7	-7.4%	330.5	0.2%	
1992	210.9	300.6	-42.8%	279.3	-32.4%	
1993	339.2	426.3	-25.4%	356.0	-5.0%	
1994	219.3	334.8	-52.6%	276.3	-26.0%	
率定期	1995	377.9	472.3	-25.3%	468.1	-23.8%
	1996	386.3	271.4	29.9%	225.1	41.7%
	1997	309.2	293.5	5.6%	234.3	24.2%
	1998	757.6	594.9	21.3%	553.3	27.0%
	1999	468.5	451.3	3.7%	381.9	18.5%
2000	240.6	284.5	-18.1%	247.5	-2.9%	
总计	3640.5	3785.2	-3.9%	3352.2	7.9%	
2001	289.7	264.9	8.6%	250.8	13.5%	
2002	547.9	444.0	19.0%	425.4	22.4%	
2003	355.4	370.0	-4.1%	357.1	-0.5%	
检验期	2004	305.9	287.8	5.9%	272.8	10.8%
	2005	260.6	322.4	-23.8%	305.2	-17.1%
	2006	253.2	257.4	-1.4%	243.1	4.0%
	2007	135.4	186.8	-38.2%	172.7	-27.5%
	2008	214.2	268.2	-24.9%	252.8	-18.0%
2009	222.9	255.8	-15.1%	239.3	-7.4%	
总计	2585.2	2657.3	-2.7%	2519.2	2.6%	

#### 4.2. 新安江模型模拟区间流量

仅以残差平方和为目标函数时(公式(1))，新安江模型率定期的确定性系数为 96.72%，总量相对误差偏大 6.30%，检验期的确定性系数为 96.59%，总量相对误差偏小 1.56%。可知，新安江模型能很好的模拟城陵矶的出口流量。在目标函数中加入 RE 后(公式(2))，率定期的确定性系数为 96.21%，总量相对误差偏大 0.32%，检验期的确定性系数为 96.03%，总量相对误差偏小 9.3%。因加入了 RE，确定性系数会下降，率定期相对误差下

降,但检验期相对误差增大。在残差平方和的基础上引入区间流量为正值的约束后(公式(3)),率定期的确定性系数为 96.73%,总量相对误差偏大 6.81%,检验期的确定性系数为 96.60%,总量相对误差偏小 0.71%。加入约束后,确定性系数略有提升,且检验期相对误差是三个方案中最小的。对 1991~2009 年实测和各方案模拟的流量序列每年的区间水量进行计算,表 3 列出了 1991~2009 年逐年的区间年总水量误差。

Table 3. Simulation results of annual total intervening water volume in Xin'anjiang model

表 3. 新安江模型洞庭湖区间水量年总量模拟结果

年份	实测区间水量(亿 m <sup>3</sup> )	方案 1 (以 SSR 为目标)		方案 2 (以 SSR 和 RE 为目标)		方案 3 (在 SSR 基础上引入约束)		
		模拟区间水量(亿 m <sup>3</sup> )	年总水量误差	模拟区间水量(亿 m <sup>3</sup> )	年总水量误差	模拟区间水量(亿 m <sup>3</sup> )	年总水量误差	
1991	331.0	358.0	-8.2%	376.1	-13.7%	389.0	-17.5%	
1992	210.9	271.9	-28.9%	278.8	-32.2%	297.1	-40.9%	
1993	339.2	381.4	-12.4%	396.4	-16.9%	416.4	-22.8%	
1994	219.3	359.5	-63.9%	302.8	-38.1%	341.3	-55.6%	
1995	377.9	492.4	-30.3%	465.3	-23.1%	481.3	-27.3%	
率定期	1996	386.3	349.8	9.4%	313.7	18.8%	342.3	11.4%
1997	309.2	299.3	3.2%	253.8	17.9%	285.2	7.8%	
1998	757.6	573.4	24.3%	575	24.1%	585.5	22.7%	
1999	468.5	468.6	0.0%	436.6	6.8%	461	1.6%	
2000	240.6	315.5	-31.2%	253.7	-5.5%	289.3	-20.2%	
总计	3640.5	3869.8	-6.3%	3652.2	-0.3%	3888.4	-6.8%	
2001	289.7	271.6	6.3%	229.5	20.8%	266.5	8.0%	
2002	547.9	525.1	4.2%	526.4	3.9%	535.5	2.3%	
2003	355.4	379.2	-6.7%	344.8	3.0%	374.8	-5.5%	
2004	305.9	269	12.1%	244.8	20.0%	280.3	8.4%	
检验期	2005	260.6	276.9	-6.3%	280.3	-7.6%	292.1	-12.1%
2006	253.2	242.8	4.1%	218.7	13.6%	248.9	1.7%	
2007	135.4	158.8	-17.3%	127.5	5.8%	158.6	-17.1%	
2008	214.2	197.3	7.9%	158.7	25.9%	190.1	11.3%	
2009	222.9	224.2	-0.6%	214.1	3.9%	220.1	1.2%	
总计	2585.2	2544.9	1.6%	2344.8	9.3%	2566.9	0.7%	

由方案 1 的结果可以看出,仅以残差平方和为目标函数时,率定期 10 年总水量相对误差仅为-6.29%,但每年的相对误差较大。仅 1991、1996、1997 和 1999 年相对误差小于 10%,1992、1994、1995、1998 和 2000 年相对误差均大于 20%,其中 1994 年的模拟效果很差。检验期的模拟结果相对于率定期要好得多,仅 2004 和 2007 年相对误差大于 10%,并且均小于 20%。

方案 2 对比方案 1 的结果可知,加入 RE 后,率定期的模拟结果年间差异下降了,但仍较差。1992、1994、1995、1998 年相对误差均大于 20%,但 1994 年的相对误差显著小于 SWAT 模型结果,1998 年的相对误差也略有改善。但是 1991、1992、1993、1996、1997 和 1999 年的相对误差都有不同程度地上升。在检验期,2002、2003、2007 和 2009 年的相对误差减小,但总体而言在检验期不如方案 1 的结果。

当加入区间流量为正值的约束后, 如方案 3 的结果所示, 个别相对误差较差的年份有了略微改善, 如 1994 年和 2000 年。但 1991~1995 年的模拟仍较差且呈现显著的高估。在检验期则和仅以残差平方和为目标函数的方案相差不大。总体而言优于新安江模型方案 1 和方案 2。

上述结果表明, 改进目标函数的新安江模型在不同方案中的结果率定期区间水量平衡在 1995 和 1996 年前后差别很大, 在检验期区间水量平衡结果一般。1991 年到 1995 年模拟的区间水量年总量整体偏高, 而 1996 年到 2000 年的水量整体呈现低估。作为分布式模型的对照, 可知个别年份模拟较差的原因可能并非完全是模型不合适的缘故。

### 4.3. 分段率定

SWAT 模型和新安江模型同时表明, 1991 年到 1995 年模拟的区间年总水量相对误差 RE 整体偏高, 而 1996 年到 2000 年的水量整体呈现低估, 如图 3 所示。

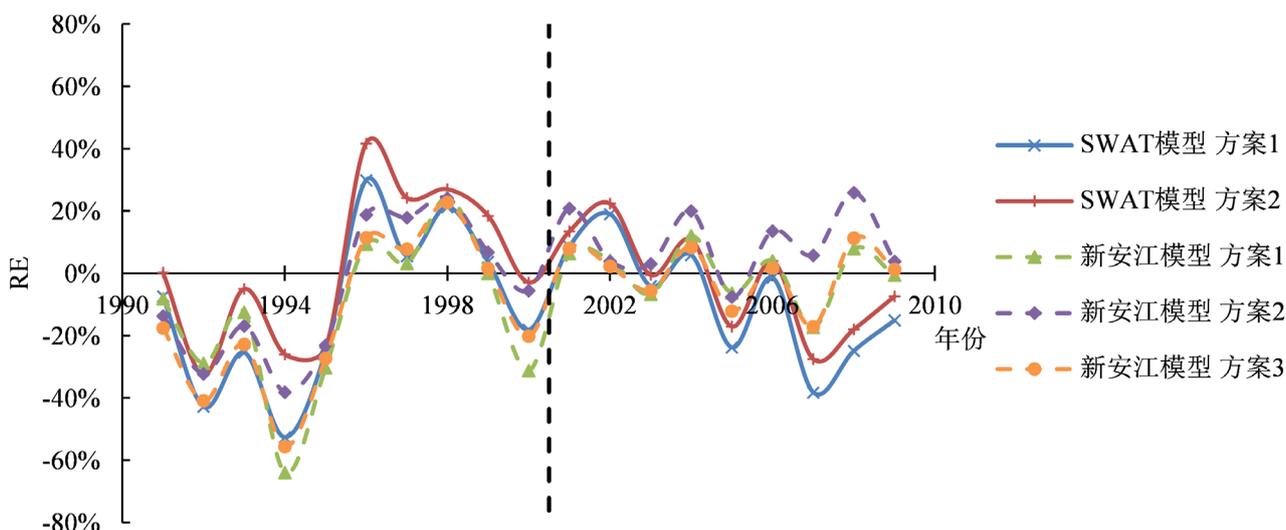


Figure 3. Comparison of annual total water volume error among different schemes

图 3. 各方案区间年总水量误差对比

率定期区间水量平衡在 1995 和 1996 年前后差别很大, 是由于 1995 年到 1996 年间流域降雨径流关系可能发生了变化, 导致流域参数不适用于整个率定期。考虑对 1991 年到 1995 年这一段在 SWAT-CUP 软件中进行单独率定, 于是将率定期分成了两段。基于 4.1 和 4.2 的模拟结果, SWAT 模型同时以 DC 和 RE 作为目标函数, 新安江模型在以 SSR 为目标函数的基础上, 引入区间流量为正值的约束率定参数。分别以 1991~1995 年为第一段率定期, 1996~2009 年为第二段率定期, 检验期使用第二段的参数。研究进一步将模拟时段流量序列按年统计, 对每年的区间流量的年总水量误差进行计算。表 4 列出了分段率定得到的 1991~2009 年逐年的区间年水量。

由表 4 可以看出, 率定期区间水量年总量为 3640.5 亿  $m^3$ , 模拟的区间水量年总量为 3578.1 亿  $m^3$ , 9 年总量相对误差仅为 1.7%, 每年的相对误差也较小。1993、1994、1995、1999 年和 2000 年总量模拟较好, 相对误差在 10% 以下; 1991、1992、1996 和 1998 年的年总量相对误差在 10%~20% 之间; 没有年份超过 20%。在检验期, 9 年区间水量年总量为 2585.2 亿  $m^3$ , 模拟的区间水量年总量为 2512.2 亿  $m^3$ , 9 年总量相对误差仅为 2.7%, 每年相对误差整体上较率定期更低。2003、2006 和 2009 年相对误差在 10% 以内; 2001、2002、2004、2005 和 2009 年的相对误差在 10% 至 20% 以内; 只有 2007 年该年反推区间径流量太小, 相对误差为 26.5%。新安江模型方案中, 率定期 10 年相对误差为 3.1%, 略高于 SWAT 方案, 而检验期 10 年相对误差为 0.8%, 略低于 SWAT 方案。率定期除 1992 和 1998 的相对误差接近 20%, 2000 年略大于 10%, 其余年份均模拟良好, 相对误差小于

**Table 4.** Simulation results of annual total intervening water volume using sectional calibration  
**表 4.** 分段率定区间水量年总量模拟结果

分段	年份	实测区间水量(亿 m <sup>3</sup> )	SWAT 模型		新安江模型	
			模拟区间水量(亿 m <sup>3</sup> )	年总水量误差	模拟区间水量(亿 m <sup>3</sup> )	年总水量误差
率定期一	1991	331.0	281.5	14.9%	327.4	1.1%
	1992	210.9	234.8	-11.3%	252.3	-19.6%
	1993	339.2	312.6	8.0%	342.2	-0.9%
	1994	219.3	237.5	-8.6%	228.6	-4.2%
	1995	377.9	387.1	-2.4%	394.2	-4.3%
率定期二	1996	386.3	343.9	10.8%	370.6	4.1%
	1997	309.2	374.5	-15.3%	282.1	8.8%
	1998	757.6	654.2	11.7%	594.5	21.5%
	1999	468.5	503.7	-7.1%	462.6	1.3%
	2000	240.6	248.3	-1.8%	273.4	-13.6%
总计	3640.5	3578.1	1.7%	3527.9	3.1%	
检验期	2001	289.7	249.1	14.0%	260.8	10.0%
	2002	547.9	428.2	21.9%	550.0	-0.4%
	2003	355.4	354.2	0.4%	377.9	-6.3%
	2004	305.9	272.1	11.0%	283.1	7.4%
	2005	260.6	306.6	-17.8%	292.4	-12.2%
	2006	253.2	241.6	4.8%	250.4	1.1%
	2007	135.4	171.0	-26.5%	154.5	-14.1%
	2008	214.2	252.4	-17.6%	202.2	5.6%
	2009	222.9	240.1	-8.0%	233.7	-4.9%
	总计	2585.2	2512.2	2.7%	2605.1	-0.8%

10%；而率定期内，2001、2002、2003、2004、2006、2008 和 2009 年均模拟较好。总之，未控区间的水量平衡问题在分段率定后得到了很大幅度的改进。

## 5. 结语

本文根据洞庭湖未控区间流域现有资料，分别建立洞庭湖未控区间的 SWAT 分布式模型和新安江模型。在 SWAT 模型的方案中，选取了两种目标函数：1) 仅使用确定性系数 DC；2) 同时考虑 DC 和总量相对误差 RE。而在新安江模型的方案中，选取了三种目标函数：1) 仅使用残差平方和 SSR；2) 在 SSR 的基础上加入 RE；3) 在 SSR 作为目标的基础上，引入区间流量为正值的约束。然后结合 1990~2009 年径流系数的变化，分析不同目标函数下的洞庭湖区间水量年总量模拟的结果，发现率定期期间流域降雨径流关系可能发生了变化，最后采用分段率定的方式，得到最终的模拟结果。研究结论如下：

- 1) 以 SWAT 分布式模型模拟洞庭湖区间径流时，同时考虑 DC 和 RE 能提高模拟精度；
- 2) 以新安江模型模拟洞庭湖区间径流时，在 SSR 作为目标的基础上引入区间流量为正值的约束可以改善模拟效果；

3) 将率定期数据分为 1991~1995 以及 1996~2000 两段, 分别率定水文模型的参数, 结果显示分段率定对洞庭湖流域区间径流模拟具有明显作用, 模拟准确性显著提高。

本文仅从目标函数和分段率定两个方面改进区间流量的模拟, 在新安江模型中未考虑堤垸区的影响, 这些问题还待进一步研究。

## 基金项目

本论文由湘水科计[2017]230-24, 湘水科计[2016]194-13 和国家自然科学基金项目(51579180)资助。

## 参考文献

- [1] YUAN, Y. J., ZHANG, C., ZENG, G. M., et al. Quantitative assessment of the contribution of climate variability and human activity to streamflow alteration in Dongting Lake, China. *Hydrological Processes*, 2016, 30(12): 1929-1939. <https://doi.org/10.1002/hyp.10768>
- [2] 李义天, 邓金运, 孙昭华, 等. 洞庭湖调蓄量变化及其影响因素分析[J]. *泥沙研究*, 2001(6): 1-7.  
LI Yitian, DENG Jinyun, SUN Shaohua, et al. A study on flood storage capacity in Dongting Lake. *Journal of Sediment Research*, 2001(6): 1-7. (in Chinese)
- [3] 梁亚琳, 黎昔春, 郑颖. 洞庭湖径流变化特性研究[J]. *中国农村水利水电*, 2015(5): 67-71.  
LIANG Yalin, LI Xichun and ZHENG Ying. Study on runoff variation characteristics of Dongting Lake. *China Rural Water and Hydropower*, 2015(5): 67-71. (in Chinese)
- [4] 罗雷, 黎昔春. 洞庭湖的径流组成和变化特性分析[J]. *湖南水利水电*, 2012(5): 51-53.  
LUO Lei, LI Xichun. Analysis of runoff composition and variation characteristics of Dongting Lake. *Hunan Hydro and Power*, 2012(5): 51-53. (in Chinese)
- [5] 郭家力, 郭生练, 李天元, 等. 鄱阳湖未控区间流域水量平衡分析及校验[J]. *水电能源科学*, 2012, 30(9): 30-32.  
GUO Jiali, GUO Shenlian, LI Tianyuan, et al. Analysis and verification of water balance in uncontrolled watershed of Poyang Lake. *International Journal Hydroelectric Energy*, 2012, 30(9): 30-32. (in Chinese)
- [6] 高国甫, 李学春, 王平娃, 等. 黄河河口镇至龙门区间洪水特性分析[J]. *西北水资源与水工程*, 2002, 13(2): 32-35.  
GAO Guofu, LI Xuechun, WANG Pingwa, et al. Analysis on flood characteristics of reach from Hekouzhen to Longmen in the Yellow River. *Water Resources and Water Engineering in Northwest China*, 2002, 13(2): 32-35. (in Chinese)
- [7] 王文圣, 马吉让, 向红莲, 等. 一种径流随机模拟的非参数模型[J]. *水利水电技术*, 2002, 33(2): 8-10.  
WANG Wensheng, MA Jirang, XIANG Honglian, et al. A kind of nonparametric model for runoff stochastic generation. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2002, 33(2): 8-10. (in Chinese)
- [8] 倪用鑫, 冉大川, 杨二, 等. TOPMODEL 模型在黄河中游未控区间的应用研究[J]. *人民黄河*, 2015, 37(9): 24-27.  
NI Yongxin, RAN Dachuan, YANG Er, et al. Study on the application of TOPMODEL for uncontrolled middle reaches of Yellow River. *Yellow River*, 2015, 37(9): 24-27. (in Chinese)
- [9] 孙昭华, 李奇, 严鑫, 等. 洞庭湖区与城陵矶水位关联性的临界特征分析[J]. *水科学进展*, 2017, 28(4): 496-506.  
SUN Shaohua, LI Qi, YAN Xin, et al. Analysis of the critical relationship between the water levels of Dongting Lake and Chenglingji Station. *Advances in Water Science*, 2017, 28(4): 496-506. (in Chinese)
- [10] 王佰伟, 李哲, 田富强, 等. 基于物理机制的分布式水文模型对三峡区间径流的模拟[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2011, 51(2): 209-214.  
WANG Baiwei, LI Zhe, TIAN Fuqiang, et al. Distributed hydrological model based on physical mechanisms for runoff simulation in Three Gorges Region. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2011, 51(2): 209-214. (in Chinese)
- [11] 谢作涛, 张小峰, 谈广鸣. 洞庭湖城陵矶流量逐日预报研究[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2004, 37(2): 5-7.  
XIE Zuotao, ZHANG Xiaofeng and TAN Guangming. Research on forecast of daily discharge of Dongting Lake at Chenglingji hydrologic station. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2004, 37(2): 5-7. (in Chinese)
- [12] RALF, M., JURAJ, P. and GUENTER, B. Time stability of catchment model parameters: Implications for climate impact analyses. *Water Resources Research*, 2011, 47(W02531).
- [13] PATHIRAJA, S., MARSHALL, L., SHARMA, A., et al. Hydrologic modeling in dynamic catchments: A data assimilation approach. *Water Resources Research*, 2016, 52(5): 3350-3372. <https://doi.org/10.1002/2015WR017192>
- [14] 张银辉. SWAT 模型及其应用研究进展[J]. *地理科学进展*, 2005, 24(5): 121-130.  
ZHANG Yinhui. Development of study on SWAT model and its application. *Progress in Geography*, 2005, 24(5): 121-130. (in Chinese)

- [15] 夏智宏, 周月华, 许红梅. 基于 SWAT 模型的汉江流域径流模拟[J]. 气象, 2009, 35(9): 59-67.  
XIA Zhihong, ZHOU Yuehua and XU Hongmei. Runoff simulation in Hanjiang River basin based on SWAT model. Meteorological Monthly, 2009, 35(9): 59-67. (in Chinese)
- [16] 李泽君, 刘攀, 张旺, 等. SWAT 模型和新安江模型在汉江旬河流域的应用比较研究[J]. 水资源研究, 2014, 3(4): 307-314.  
LI Zejun, LIU Pan, ZHANG Wang, et al. A comparative study on the application of SWAT model and Xin'anjiang model in Xunhe River Basin of Hanjiang River. Journal of Water Resources Research, 2014, 3(4): 307-314. (in Chinese)
- [17] 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. Hydrological simulation: Xin'anjiang model and Northern Shaanxi model. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1984. (in Chinese)
- [18] 姬晶, 刘攀, 江炎生, 等. 一种无资料地区山洪灾害临界雨量计算方法研究[J]. 中国农村水利水电, 2017(1): 76-79.  
JI Jing, LIU Pan, JIANG Yansheng, et al. An approach to determine critical precipitation of mountain torrential flood disaster in ungauged basins. China Rural Water and Hydropower, 2017(1): 76-79. (in Chinese)
- [19] WANG, Q. J. The genetic algorithm and its application to calibrating conceptual rainfall-runoff models. Water Resources Research, 1991, 27(9): 2467-2471. <https://doi.org/10.1029/91WR01305>
- [20] ROSENBROCK, H. H. An automatic method for finding the greatest or least value of a function. Computer Journal, 1960, 3(3): 175-184. <https://doi.org/10.1093/comjnl/3.3.175>
- [21] NELDER, J. A., MEAD, R. A simplex-method for function minimization. Computer Journal, 1965, 7(4): 308-313. <https://doi.org/10.1093/comjnl/7.4.308>
- [22] 中华人民共和国水利部. 水文情报预报规范 SL250-2000 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.  
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Specification for hydrological information forecasting SL250-2000. Beijing: China Water and Power Press, 2000. (in Chinese)