

DOI:10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2020.0008

周铮,吴剑锋,杨蕴,等.基于 SWAT 模型的北山水库流域地表径流模拟[J].南水北调与水利科技,2020,18(1):66-73. ZHOU Z, WU J F, YANG Y, et al. Surface runoff simulation based on SWAT model in Beishan reservoir watershed[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(1): 66-73. (in Chinese)

# 基于 SWAT 模型的北山水库流域地表径流模拟

周铮<sup>1</sup>, 吴剑锋<sup>1</sup>, 杨蕴<sup>2</sup>, 陈干<sup>1</sup>, 宋健<sup>1</sup>, 孙晓敏<sup>3</sup>, 林锦<sup>3</sup>

(1. 南京大学 地球科学与工程学院, 南京 210023; 2. 河海大学 地球科学与工程学院, 南京 210098;  
3. 南京水利科学研究所, 南京 210029)

**摘要:**为评价北山水库流域地表水资源,选用 SWAT 软件构建了该流域的分布式水文模型。基于 2016—2018 年实测水文数据以及高程、土地利用类型、土壤类型等数据,完成了对北山水库流域的 SWAT 模型构建,利用 SWAT-CUP 软件对参数进行率定及敏感性分析,选取决定系数( $R^2$ )、纳什效率系数(NSE)、平均相对误差绝对值(MARE)和均方根误差(RMSE)作为模型评价指标。结果表明:北山水库月蓄水量模拟值与实测值吻合良好,模型率定期和验证期的  $R^2$  均达到 0.89, NSE 分别达到 0.88 与 0.85, MARE 分别为 5.04% 与 4.23%, RMSE 分别为  $1.15 \times 10^6 \text{ m}^3$  与  $0.90 \times 10^6 \text{ m}^3$ , 由此表明该模型能近似反映研究区的径流变化特征,展示了 SWAT 模型在该流域的适用性。此外,基于验证的水文模型对主要参数进行敏感性分析,表明影响该区径流模拟最为显著的两个参数是浅层地下水回归阈值和径流曲线数。

**关键词:** SWAT; 径流模拟; 敏感性分析; 中小流域; 水文模型

中图分类号: TV121; P641 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Surface runoff simulation based on SWAT model in Beishan reservoir watershed

ZHOU Zheng<sup>1</sup>, WU Jianfeng<sup>1</sup>, YANG Yun<sup>2</sup>, CHEN Gan<sup>1</sup>, SONG Jian<sup>1</sup>, SUN Xiaomin<sup>3</sup>, LIN Jin<sup>3</sup>

(1. School of Earth Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** SWAT software was used to employ the distributed hydrological model to evaluate the surface water resources in the Beishan Reservoir watershed. Based on measured hydrological data from 2016 to 2018 provided by the local watershed management institution, and the elevation, land use, and soil type data, the SWAT and SWAT-CUP software were used to calibrate and analyze the sensitivity of the parameters in the Beishan reservoir watershed. The coefficient of determination ( $R^2$ ), Nash-Sutcliffe efficiency (NSE), mean absolute relative error (MARE) and root-mean-square error (RMSE) was selected as the model evaluation indexes. The results indicated that the simulated value of Beishan reservoir's monthly water storage showed good agreement with the measured value. The model evaluation indexes  $R^2$ , NSE, MARE and RMSE, were 0.89, 0.88, 5.04% and  $1.15 \times 10^6 \text{ m}^3$  in calibration period, and 0.89, 0.85, 4.23% and  $0.90 \times 10^6 \text{ m}^3$  during validation period, respectively. This suggested that the calibrated model can approximately reflect the characteristics of runoff in the study area, indicating the displayed best applicability of SWAT model in the watershed. Moreover, the sensitivity analysis of the main parameters based on the validated hydrological model indicated that GWQMN (threshold of shallow groundwater regression flow) and CN2 (number of SCS runoff curves) were the most important parameters showed significant effect on the model results.

收稿日期: 2019-09-16 修回日期: 2019-11-18 网络出版时间: 2019-11-25  
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20191125.1523.006.html>  
基金项目: 国家自然科学基金(41772254)  
作者简介: 周铮(1996—), 男, 江苏常州人, 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: 513706630@qq.com  
通信作者: 吴剑锋(1971—), 男, 江西九江人, 教授, 博士生导师, 主要从事水资源模拟优化研究。E-mail: jfwu@nju.edu.cn

**Key words:** SWAT; runoff simulation; sensitivity analysis; small and medium-sized watershed; hydrological model

SWAT(soil and water assessment tool)是一种复杂的、基于物理机制的、半分布式水文模型。该模型已经被广泛地应用于世界范围内不同流域的水资源评价中<sup>[1-2]</sup>,是目前应用最为广泛的水文模型之一<sup>[3]</sup>。SWAT 模型由日降雨水文模型 CREAMS、作物生长模块 EPIC、河道演算模块 ROTO 构成最初的版本,经过不断的修改与完善并在 20 世纪 90 年代与 GIS 技术的结合,显著提升了该模型应用于实际流域的能力。其主要功能在于研究流域水文循环、营养物质循环以及气候变化、土地利用类型变化对流域径流、营养物质迁移等方面的影响。因此,已被推广应用于涉及流域水量、泥沙量平衡以及非点源污染相关的水资源、水环境评价领域。在实际建模过程中,该模型通过分析数字高程数据、土地利用类型、土壤类型以及水文气象数据建立主要的源汇项特征,然后模拟流域内水流、沉积物、营养物质等迁移特征<sup>[4]</sup>。SWAT 利用数字高程模型将研究区划分为多个子流域,然后依据子流域的土地利用类型、土壤类型以及坡度信息进一步将其划分为若干水文响应单元(HRU)。HRU 是 SWAT 模型中最基本空间组成单元,代表相同土地利用、土壤类型和坡度值的组合<sup>[5]</sup>。

SWAT 模型在国内外都有很多成功的研究案例,并且应用于多种不同的研究领域。国外方面,Abbaspour 等<sup>[6]</sup>使用 SWAT 构建并校准了欧洲大陆的区域水文模型,模拟了不同的水资源组成且考虑了作物产量和水质,同时模拟了淋溶作用进入地下水中的硝酸盐的迁移。模拟结果为《欧洲水框架指令》提供了信息支撑,也为进一步评估气候变化对水资源利用和水质的影响奠定了基础;Serpa 等<sup>[7]</sup>利用 SWAT 模型评估了湿润和干燥地中海流域气候及土地利用变化对径流和泥沙的影响;Woldesenbet 等<sup>[8]</sup>采用 SWAT 模型与偏最小二乘回归法相结合的方法,量化了埃塞俄比亚上青尼罗盆地源区各土地利用类型对水文过程的影响。而从国内方面来说,刘宁等<sup>[9]</sup>使用 SWAT 模型完成了碧流河流域径流模拟,并通过 SWAT-CUP 中的 SUFI2 算法评价分析精度和不确定性指标,除径流极值模拟不理想外,流量过程模拟良好;周帅等<sup>[10]</sup>采用拉丁超立方采样对 SWAT 模型进行参数敏感性分析,并基于 SUFI2 算法对其中 10 个参数进行不确定性分析,并且定量评价了参数交互作用对黄河

上游径流模拟的影响。在 SWAT 模型与土地利用、气候变化结合方面,窦小东等<sup>[11]</sup>运用 SWAT 模型,结合 RCP4.5 和 RCP8.5 两种气候情景对大盈江流域径流变化进行了预测,并取得了较好的结果;叶加俊等<sup>[12]</sup>将 SWAT 模型与 SDSM 降尺度模型耦合,在 RCP2.6 和 RCP 两种情境下模拟了汉江上游气候变化下径流响应过程;王博威等<sup>[13]</sup>基于 SWAT 模型,利用四期不同的土地利用类型数据在潘家口水库控制流域研究了土地利用变化对径流的影响。在污染研究方面,徐畅等<sup>[14]</sup>使用 SWAT 构建了枣阳市滚河流域非点源污染模型,并据此提出了污染物排放总量控制措施和负荷削减方案;姜德娟<sup>[15]</sup>在小青河流域通过 SWAT 模型模拟了总氮输出荷载,并识别了污染源。在模型改进方面李蔚等<sup>[16]</sup>在东江流域通过增加水库供水发电调度规则改进了 SWAT 模型中水库算法模块,从而提高了模拟精度。

北山水库为江苏省重点中型水库,现为句容市饮用水一级保护区和重要的生态功能保护区。因此,北山水库的水环境安全对当地居民的生活、生产用水具有至关重要的作用。本文拟利用 SWAT 模型构建北山水库流域的水文模型,以有效预测该流域的径流变化特征,并为研究区水资源评价、流域水资源管理以及水环境风险预警提供科学依据。

## 1 研究区概况

研究区为江苏省句容市饮用水一级水源地北山水库流域(119°06'12"E~119°14'45"E,32°04'27"N~32°08'22"N),地处句容市北部宁镇山脉南侧的句容河上游大卓、亭子两乡境内,距句容市 14 km。北山水库是典型的山谷型水库,也是句容市范围内水域面积最大的水库,属长江水系秦淮河流域。水库有东、中、西三条渠道,东支通过陈武镇(今边城镇),中支与句容河相通,西支到石狮镇,集水面积 59.5 km<sup>2</sup>。研究区属北亚热带季风气候,多年平均气温 15.1℃,年平均相对湿度 78%。多年平均降雨量 1 018.6 mm,主要集中在 6—8 月,占全年降水量的 30%~50%。北山水库总库容 4 814.3 万 m<sup>3</sup>,兴利库容 2 601 万 m<sup>3</sup>,库区面积 4.3 km<sup>2</sup>。水库下游为句容城镇,防洪保护人口 16 万人,保护耕地 1.33 万 hm<sup>2</sup>,每日向句容城区供水 8 万~10 万 m<sup>3</sup>。

## 2 研究区 SWAT 模型构建

### 2.1 数据来源及处理

北山水库流域 SWAT 模型的建立主要需要空间数据和属性数据两大类资料,其中空间数据包括数字高程数据(DEM)、土地利用类型数据、土壤类型数据等,属性数据主要包括土壤理化属性、作物生长、农业管理、水文气象数据等。本次研究中主要使用到的数据类型及其来源见表 1。SWAT 中使用的各个图层需保持统一的坐标系,因此所有图层均采用 CGCS2000 投影坐标系进行投影变换。

表 1 SWAT 模型主要数据类型及来源  
Tab.1 SWAT model main data types and sources

数据类型	数据描述	格式	来源
数字高程	30 m×30 m 分辨率	TIFF	地理空间云数据平台
土地利用类型	1:5000	TIFF	句容市国土资源局
土壤类型图	1:100 万	GRID	黑河数据中心
气象数据	2000—2018 年逐日数据	TXT	中国气象科学数据网
水库数据	2016—2018 年逐月数据	TXT	北山水库管理所

#### 2.1.1 数字高程

模型所使用的数字高程数据由地理空间数据云下载,分辨率为 30 m×30 m,在 ArcGIS 中通过投影变换、掩膜提取得到北山水库流域的 DEM 数据。DEM 可提取子流域所需的地形参数,包括面积、坡度、坡长、高程等,主要用于生成流域内河网和划分子流域,数据见图 1。

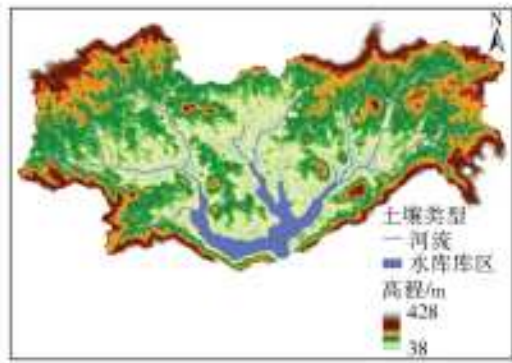


图 1 研究区 DEM  
Fig.1 DEM of the study area

#### 2.1.2 土地利用类型

土地利用类型是 SWAT 模型必不可少的输入数据,其类型直接影响着流域内的水文循环过程。

本次研究中所使用的数据是由句容市国土资源局提供的 1:5 000 土地利用类型现状图,见图 2。

研究区总土地面积为 5 578.8 hm<sup>2</sup>,根据全国第二次土地调查分类,共划分 25 种土地利用类型。根据 SWAT 土地利用数据库,将二调分类结果与 SWAT 分类对照,共划分 11 种土地利用类型,分别为耕地、果园、林地、干草、交通用地、水域、公共用地、裸地、居民区(中低密度)、居民区(低密度)、工业用地。其中林地分布最为广泛,面积约为 2 450.2 hm<sup>2</sup>,占土地总面积的 44.32%;其次是耕地,面积约 887.8 hm<sup>2</sup>,占土地总面积的 16.06%;果园、水域、工业用地面积分别为 790.5 hm<sup>2</sup>、518.7 hm<sup>2</sup>、343.0 hm<sup>2</sup>,占比分别为 14.30%、9.38%、6.20%;其余土地利用类型分布均较少。具体土地利用数据见表 2。为减少水文响应单元(HRU)的划分,在 HRU Definition 中将土地利用类型阈值设置为 2%,即忽略面积占比低于 2%的类型。

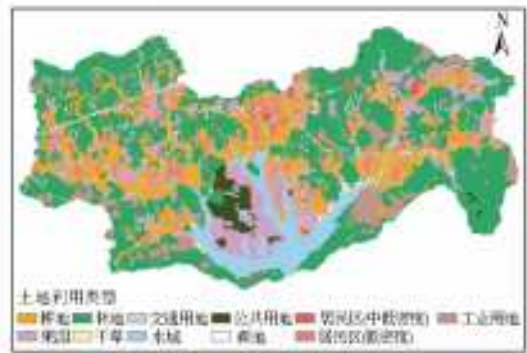


图 2 研究区土地利用类型  
Fig.2 The land cover map of the study area

表 2 北山水库流域土地利用类型详情

Tab.2 Detail of land cover types in the Beishan Reservoir basin

序号	代码	类别	面积/hm <sup>2</sup>	占比/%
1	FRST	林地	2 450.2	44.32
2	AGRL	耕地	887.7	16.06
3	ORCD	果园	790.5	14.30
4	WATR	水域	518.7	9.38
5	UIDU	工业工地	343.0	6.20
6	URLD	居民区(低密度)	222.3	4.02
7	UTRN	交通用地	122.7	2.22
8	UINS	公共用地	114.2	2.07
9	URML	居民区(中低密度)	44.3	0.80
10	HAY	干草	34.0	0.61
11	BARR	裸地	1.1	0.02

#### 2.1.3 土壤类型

本次研究所使用的土壤类型是黑河数据中心下载的基于世界土壤数据库(HWSD)的土壤数据集,其中研究区数据源为 1995 年全国第二次土地调

查南京土壤所提供的 1:100 万土壤数据。研究区内主要土壤类型包括黄棕壤、酸性粗骨土、红色石灰土、黏盘黄褐土和水域,具体分布见图 3。



图 3 研究区土壤类型

Fig. 3 Map of soil types of the study area

### 2.1.4 水文气象数据

SWAT 模型中气象数据主要包括天气发生器

和模拟期实测气象数据两部分,主要输入数据包括日降水量、日最高最低气温、日相对湿度、日平均风速和日太阳辐射。由于研究区较小,区内除了北山水库雨量站外没有气象站分布,因此本次模拟采用中国气象科学数据网提供的南京站 2000—2018 年逐日气象资料来计算 SWAT 模型中的天气发生器所需参数,采用北山水库 2016—2018 年逐日气象资料作为实测气象数据输入模型。实测气象数据来源及时间序列见表 3。

水库数据主要包括水库基本参数和水库管理数据,基本参数包括水库运行时间、警戒水位对应水域面积、警戒水位蓄水量、正常水位对应水域面积、正常水位蓄水量、初始蓄水量以及沉降和蒸发相关参数;管理数据主要是水库的蓄水量、出流量、供水量等数据。水库蓄水量数据为 2016—2018 年逐月数据。

表 3 气象资料时间序列及来源

Tab. 3 Time series and sources of meteorological data

气象数据	日降水量	日气温数据	日相对湿度	日太阳辐射	日平均风速
站点	南京站、北山水库雨量站	南京站	南京站	南京站	南京站
时间序列	2016—2018 年	2016—2018 年	2016—2018 年	2016—2018 年	2016—2018 年

为初步评价 SWAT 模型在北山水库小流域的适用性,利用北山水库 2016—2018 年实测逐日降水

量与逐日水位绘制关系曲线,以研究该区域降雨与水位响应特征,见图 4。

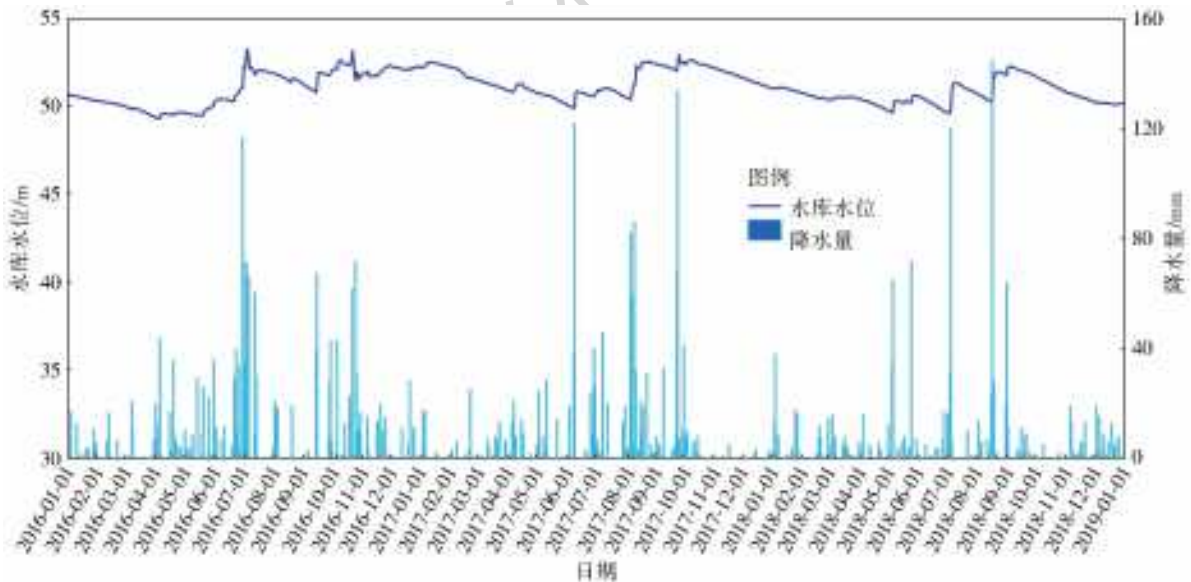


图 4 研究区降水-水位关系曲线

Fig. 4 The relationship curve of precipitation and water level in the study area

### 2.2 模型率定及验证

本次研究通过 DEM 数据提取和预设水系将北山水库流域共划分为 29 个子流域,详情如图 5,并结合土地利用类型、土壤类型、坡度等信息将研究区共划分为 655 个水文响应单元。根据文献,目前水文模型率定和验证中使用最为广泛的性能指标为决

定系数( $R^2$ )和纳什效率系数(NSE)<sup>[17]</sup>,但本次研究为了更全面的评价模型模拟结果,除这两个指标外还加入平均相对误差绝对值(MARE)和均方根误差(RMSE)。由于北山水库流域径流实测资料有限,仅有北山水库管理所提供的 2016—2018 年逐月蓄水量资料,因此采用北山水库蓄水量对模型进行



率定及验证。模型预热期为 2016 年,率定期为 2017 年,验证期为 2018 年。



图 5 研究区子流域划分

Fig. 5 Sub-watershed map of the study area

### 2.2.1 参数敏感性分析

SWAT 模型影响径流的参数众多,一些较为敏感的参数很小的变化都会对模拟结果造成较大的影响,为了降低参数率定的复杂程度,需通过参数敏感性分析挑选出对模拟结果影响明显的参数。

SWAT2012 之前版本所自带的参数调整及敏

感性分析模块由于运算效率较低,无法满足调参需求,因此采用 SWAT-CUP2019 软件。该软件具有运行快、界面简洁明了、校准方法多等优势。SWAT-CUP 中较为常用的校准算法为 SUFI2,该算法优化时间短,虽然精度相比于其他算法略低,但是适用于本次研究这种径流变化相对简单的流域<sup>[18]</sup>。该算法采用拉丁超立方采样随机生成不同的参数实现<sup>[19]</sup>,根据每次实现的运算结果不断缩小参数的范围。

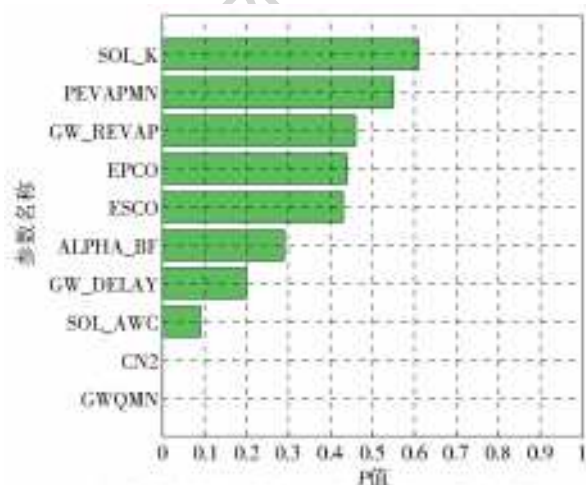
本次研究结合以往经验,参考 SWAT 模型用户手册及文献<sup>[20]</sup>,选取了 10 个对径流影响较大的参数进行敏感性分析,分析方法采用全局敏感性分析<sup>[21]</sup>和单次敏感性分析<sup>[22]</sup>相结合,分析结果如表 4,敏感性指标见图 6。

参数调整选用相对比例调整方式,即调整后参数=原参数×(1+r%)。SUFI2 校验方法中全局敏感性用 P 值和 t 检验来衡量结果。P 检验代表敏感性的显著水平,越接近于 0 则参数越显著,当 P<0.05 时表示该参数对结果的影响极为显著<sup>[23]</sup>;t 检验代表参数的敏感性,t 绝对值越大则参数越敏感。

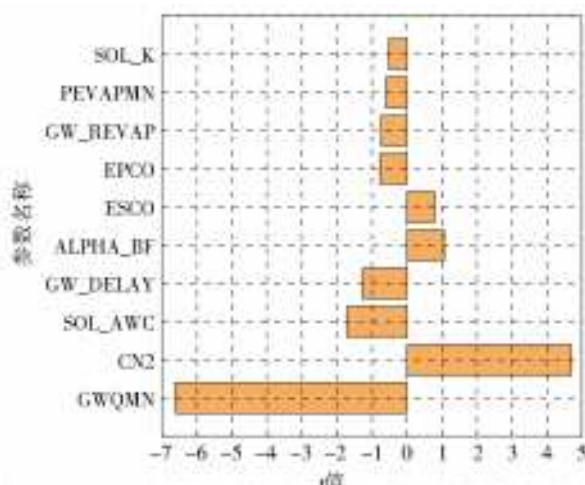
表 4 参数敏感性分析及率定结果

Tab. 4 Parameter sensitivity analysis and calibration results

参数	描述	最小值	最大值	t 检验	P 检验	排序	最优值
GWQMN	浅层地下水回归流阈值/mm	0	5 000	-6.63	0	1	-0.009
CN2	SCS 径流曲线数	0	98	4.70	0	2	0.135
SOL_AWC	土壤有效可利用水量/(mm·mm <sup>-1</sup> )	0	1	-1.72	0.09	3	0.059
GW_DELAY	地下水延迟时间/d	10	30	-1.28	0.20	4	-0.157
ALPHA_BF	基流 α 因子	0	1	1.07	0.29	5	-0.189
ESCO	土壤蒸发补偿系数	0	1	0.79	0.43	6	0.157
EPCO	作物吸水补偿系数	0	1	-0.77	0.44	7	-0.397
GW_REVAP	浅层地下水再蒸发系数	0.02	0.2	-0.74	0.46	8	-0.063
REVAPMN	浅层地下水再蒸发阈值/mm	0	500	-0.60	0.55	9	0.123
SOL_K	土壤饱和水力传导率/(mm·h <sup>-1</sup> )	0	2 000	-0.52	0.61	10	0.017



(a) 参数敏感性显著水平比较(P值越小代表参数影响越显著)



(b) 参数敏感性比较(t绝对值越大代表参数越敏感)

图 6 敏感性分析评价结果(各参数表征意义参见表 4)

Fig. 6 Sensitivity analysis and evaluation results (Parameters are defined in Table 4)

### 2.2.2 模型率定及验证

本次研究选用的水文模型性能指标为决定系数( $R^2$ )、纳什效率系数(NSE)、平均相对误差绝对值(MARE)和均方根误差(RMSE),计算公式为

$$R^2 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - O_{avr})(P_i - P_{avr})}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_{avr})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - P_{avr})^2} \right] \quad (1)$$

$$NSE = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_{avr})^2} \right] \quad (2)$$

$$MARE = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{P_i - O_i}{O_i} \times 100\% \right|}{n} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (4)$$

式中: $O_i$ 表示第*i*次观测值; $O_{avr}$ 表示整个研究期的平均观测值; $P_i$ 表示第*i*次模拟值; $P_{avr}$ 表示整个研究期平均预测(模拟)值。

根据文献[24-25],月径流模拟中  $NSE > 0.5$ 、 $R^2 > 0.7$  时认为模拟取得了较好的结果。本次研究中以北山水库管理所提供的 2017 年水库月蓄水量作为率定参考数据,其参数率定结果参见表 4。采

用表 4 中参数的率定结果,手动输入 ArcSWAT 中运行程序,以北山水库 2018 年逐月蓄水量作为验证参考数据。如图 7 所示,在率定期内,北山水库蓄水量的性能指标决定系数( $R^2$ )、纳什效率系数(NSE)、平均相对误差绝对值(MARE)和均方根误差(RMSE)分别为 0.89、0.88、5.04%和  $1.15 \times 10^6$   $m^3$ ,表明率定结果较好;在验证期内, $R^2$ 、NSE、MARE 和 RMSE 分别达到 0.89、0.85、4.23%和  $0.90 \times 10^6$   $m^3$ ,满足模拟精度要求,模型可以较好地反映北山水库流域径流量的变化规律。

## 3 结果分析

### 3.1 降雨-水位响应特征分析

由图 4 可见,北山水库水位与降水具有较好的响应关系,水位起伏变化与降水量增减基本保持一致(两者相关系数约 0.7),峰值出现的时间也基本相同,略有滞后,主要集中在夏季,说明降水量对研究区的径流过程有显著影响,适合采用 SWAT 来模型。北山水库水位基本稳定,变化幅度不大,但对于水库而言,较小的水位变幅也意味着很大水量的改变,因此在径流资料缺乏的情况下,使用水库蓄水量代替地表径流量进行模型校验基本也能满足精度要求。

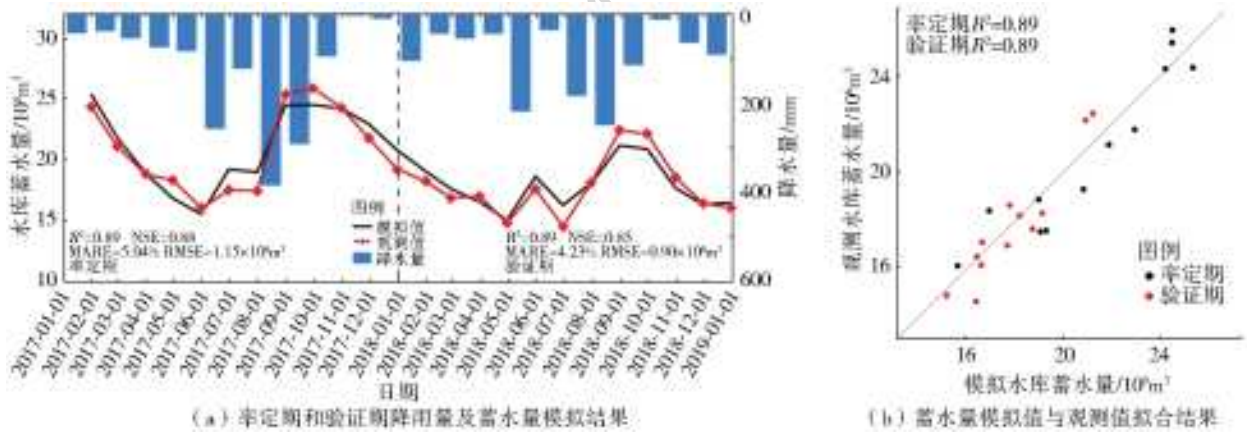


图 7 水库蓄水量模拟情况  
Fig. 7 Reservoir water storage simulation

### 3.2 敏感性分析

由表 4 及图 7 可见,GWQMN 和 CN2 两个参数  $P$  值为 0,即对模型结果具有极其显著的影响;另一方面,这两个参数  $t$  值绝对值分别为 6.63、4.7,通常说来,参数  $t$  值的绝对值大于 2 时,即可认为对径流影响幅度较大<sup>[26-27]</sup>,由此也说明其对径流影响显著。SOL\_AWC、GW\_DELAY、ALPHA\_BF 这三个参数  $P$  值处于 0.05~0.2,属于较为敏感的参数,

其余参数相对而言对模拟结果影响较小。

### 3.3 率定及验证结果分析

从北山水库水量变化来看,水库蓄水量的大小与降水量的大小有较好的响应,呈现正相关关系,局部时间段水量变化略滞后于降水。验证期内水库蓄水量在 9 月达到峰值,在 5 月达到谷值。

从率定期和验证期水量过程线趋势来分析,北山水库蓄水量在 11 月至次年 4 月以及 6 月至 8 月观测值基本低于模拟值,而 9 月至 10 月观测值基本

高于模拟值,分析其主要原因可能在于本次 SWAT 模型中未考虑农业活动的影响。

由土地利用类型分布图可以得知研究区内分布大量的耕地、果园和茶园,其主要种植作物为水稻、茶叶及果树。茶树通常需保证田间持水量在 90% 左右才能较好地生长,而年末至次年 4 月期间降水量较少,无法满足茶树灌溉的需要,因此需截取流域内河流以灌溉茶树,使得此期间内流入水库的水量减少,水库实际水量低于模拟值。句容市水稻插秧通常在 6 月中旬,且之后需保持田间水层厚度,需从地表水中截取部分水量以满足需求,因此 6 月至 8 月水库水量低于模拟值。6 月种植的水稻收获期通常在 10 月下旬,收获前需提前一周至半个月将田中水量排除,此举致使 9—10 月有大量水进入地表水系,从而导致水库水量实际值高于模拟值。

#### 4 结 论

本文利用北山水库流域 DEM、土地利用类型、土壤类型数据以及北山水库管理所实测气象和水文数据,构建了北山水库流域 SWAT 径流模型,并利用 SWAT-CUP 软件中的 SUFI2 算法对参数进行率定及敏感性分析,得到以下结论。

(1) 根据参数敏感性分析的结果,对北山水库流域径流过程影响明显的参数依次为 GWQMN(浅层地下水回归流阈值)、CN2(SCS 径流曲线数)、SOL\_AWC(土壤有效可利用水量)、GW\_DELAY(地下水延迟时间)、ALPHA\_BF(基流  $\alpha$  因子),其余参数影响相对较弱。

(2) 模型参数率定和验证结果表明,北山水库流域径流在率定期、验证期的  $R^2$ 、NSE、MARE、RMSE 分别为 0.89、0.88、5.04%、 $1.15 \times 10^6 \text{ m}^3$  和 0.89、0.85、4.23%、 $0.90 \times 10^6 \text{ m}^3$ ,说明模型适用于北山水库这种小流域的模拟。

(3) 北山水库模拟值与实测值的偏差,有多重复杂的原因。但其主要原因可能与本次 SWAT 模型中未考虑农业活动相关。考虑到本文所使用的基础数据相对欠缺,尤其是在土壤类型数据和水文校正数据上,对模拟结果有一定影响,因此在未来的研究中可以搜集分辨率更高的数据来提升模拟精度。

#### 参考文献(References):

[1] GASSMAN PW, SADEGHI AM, SRINIVASAN R, et al. Applications of the SWAT model special section: overview and insights [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2014, 43(1): 1-8. DOI: 10. 2134/jeq2013. 11.

0466.

[2] GASSMAN P W, REYES M R, GREEN C H, et al. The soil and water assessment tool: Historical development, applications, and future research directions [J]. *Transactions of the ASABE*, 2007, 50(4): 1211-1250.

[3] ARNOLD J G, SRINIVASAN R, MUTTIAH R S, et al. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 1998, 34(1): 73-89. DOI: 10. 1111/j. 1752-1688. 1998. tb05961. x.

[4] KRYSANOVA V, WHITE M. Advances in water resources assessment with SWAT: An overview [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2015, 60(5): 771-783. DOI: 10. 1080/02626667. 2015. 1029482.

[5] ARNOLD J G, KINIRY J R, SRINIVASAN R, et al. Soil and water assessment tool: Input/output file documentation [Z]. Version 2009. TX: Agrilife Blackland Research Center: Temple, 2011.

[6] ABBASPOUR K C, ROUHOLAHNEJAD E, VAGHEFI S, et al. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model [J]. *Journal of Hydrology*, 2015 (524): 733-752. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2015. 03. 027.

[7] SERPA D, NUNES J P, SANTOS J, et al. Impacts of climate and land use changes on the hydrological and erosion processes of two contrasting Mediterranean catchments [J]. *The Science of the Total Environment*, 2015(538): 64-77. DOI: 10. 1016/j. scitotenv. 2015. 08. 033.

[8] WOLDESENBET T A, ELAGIB N A, RIBBE L, et al. Hydrological responses to land use/cover changes in the source region of the Upper Blue Nile basin, Ethiopia [J]. *Science of the Total Environment*, 2017(575): 724-741. DOI: 10. 1016/j. scitotenv. 2016. 09. 124.

[9] 刘宁, 张霞, 祝雪萍, 等. 基于 SWAT 模型和 SUFI-2 算法的碧流河流域径流模拟 [J]. *水力发电*, 2019, 45(3): 18-22, 89. (LIU N, ZHANG X, ZHU X P, et al. Runoff simulation using SWAT model and SUFI-2 algorithm in Biliu River basin [J]. *Water Power*, 2019, 45(3): 18-22, 89. DOI: 10. 3969/j. issn. 0559-9342. 2019. 03. 005. (in Chinese))

[10] 周帅, 王义民, 郭爱军, 等. SWAT 模型参数不确定性对黄河上游径流模拟的影响 [J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(8): 144-154. (ZHOU S, WANG Y M, GUO A J, et al. Influence of uncertainties in SWAT model parameters on runoff simulation in upper reaches of the Yellow River [J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edi-*

- tion), 2019, 47(8): 144-154. (in Chinese))
- [11] 窦小东, 黄玮, 易琦, 等. 气候变化对大盈江流域径流的影响[J/OL]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2019, 1-10. (DOU X D, HUANG W, YI Q, et al. Impacts of climate change on runoff in the Daying River basin[J/OL]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2019, 1-10. (in Chinese))
- [12] 叶加俊, 卢健涛, 银星黎, 等. 基于 SDSM-SWAT 模型的汉江上游径流变化模拟[J]. 水电能源科学, 2019, 37(4): 1-4, 12. (YE J J, LU J T, YIN X L, et al. Simulation of runoff change in the upper reaches of the Hanjiang River based on SDSM-SWAT model[J]. Water Resources and Power, 2019, 37(4): 1-4, 12. (in Chinese))
- [13] 王博威, 李建柱, 冯平. 土地利用变化对潘家口水库控制流域径流影响[J]. 水利学报, 2018, 49(3): 379-386. (WANG B W, LI J Z, FENG P. Impacts of land use change on runoff in Panjiakou reservoir watershed[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(3): 379-386. (in Chinese))
- [14] 徐畅, 彭虹, 夏晶晶. 基于 SWAT 模型的枣阳市滚河流域非点源污染模拟与控制研究[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(2): 63-70, 80. (XU C, PENG H, XIA J J. Simulation and control of non-point source pollution based on SWAT model in Gun River basin of Zaoyang City[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2019, 30(2): 63-70, 80. (in Chinese))
- [15] 姜德娟, 王琼, 李瑞泽, 等. 基于 SWAT 模型的小清河流域总氮输出模拟研究[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(6): 1-7. (JIANG D J, WANG Q, LI R Z, et al. Simulation of total nitrogen transport based on SWAT model in Xiaoqinghe River basin of Shandong Province[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2017, 28(6): 1-7. (in Chinese))
- [16] 李蔚, 陈晓宏, 何艳虎, 等. 改进 SWAT 模型水库模块及其在水库控制流域径流模拟中的应用[J]. 热带地理, 2018, 38(2): 226-235. (LI W, CHEN X H, HE Y H, et al. Modification of reservoir module in SWAT model and its application of runoff simulation in highly regulated basin[J]. Tropical Geography, 2018, 38(2): 226-235. (in Chinese))
- [17] JHA M. SWAT: Model use, calibration, and validation[J]. Transactions of the ASABE, 2012, 55(4): 1345-1352. DOI: 10.13031/2013.42246.
- [18] 张丽, 柳焯, 蔡朵朵, 等. SWAT 模型参数自动校准方法对比及适用性研究: 以泾河中上游地区为例[J]. 中国农村水利水电, 2016, (11): 76-81. (ZHANG L, LIU Y, CAI D D, et al. Comparison and applicability of automatic calibration methods of the parameters in SWAT model: A case study of the middle and upper reaches of the Jinghe River watershed[J]. China Rural Water and Hydropower, 2016, (11): 76-81. (in Chinese))
- [19] ABBASPOUR K C, JOHNSON C A, VAN GENUCHTEN M T. Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure[J]. Vadose Zone Journal, 2004, 3(4): 1340-1352.
- [20] 李丹, 梁新强, 吴嘉平. 水库型饮用水源地水环境模拟与预测[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2018, 44(1): 75-88. (LI D, LIANG X Q, WU J P. Water pollution risk simulation and prediction in a drinking water catchment[J]. Journal of Zhejiang University(Agriculture and Life Sciences), 2018, 44(1): 75-88. (in Chinese))
- [21] GRIENSVEN A V, MEIXNER T, GRUNWALD S, et al. A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models[J]. Journal of Hydrology, 2006, 324(1-4): 0-23. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2005.09.008.
- [22] VAN G A, FRANCO S A, BAUWENS W. Sensitivity analysis and auto-calibration of an integral dynamic model for river water quality[J]. Water Science and Technology, 2002, 45(9): 325. DOI: 10.1016/S0043-1354(01)00232-9.
- [23] LIANG X, WANG Z, ZHANG Y, et al. No-tillage effects on N and P exports across a rice-planted watershed[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(9): 8598-8609. DOI: 10.1007/s11356-016-6112-8.
- [24] MORIASI D N, MORIASI D N, MORIASI D N, et al. Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria[J]. Transactions of the ASABE, 2015, 58(6): 1763-1785.
- [25] MORIASI D N, ARNOLD J G, VAN LIEW M W, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations[J]. Transactions of the ASABE, 2007, 50(3): 885-900.
- [26] RAJIB M A, MERWADE V, YU Z. Multi-objective calibration of a hydrologic model using spatially distributed remotely sensed/in-situ soil moisture[J]. Journal of Hydrology, 2016(536): 192-207. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.02.037.
- [27] WELLEN C, ARHONDITSIS G B, LONG T, et al. Quantifying the uncertainty of nonpoint source attribution in distributed water quality models: A Bayesian assessment of SWAT's sediment export predictions[J]. Journal of Hydrology, 2014(519): 3353-3368. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.10.007.