

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2020.02.001

基于 SWAT 模型的泾河流域月径流分布式模拟

王尹萍¹, 姜仁贵^{1,2,3}, 解建仓¹, 赵勇³, 吕喜玺²

(1. 西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048; 2. 新加坡国立大学 地理系, 新加坡 117570; 3. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要: 受气候变化和人类活动变化的影响, 流域水循环和基于物理机制的分布式水文模型已成为研究热点。本文采用泰森多边形计算泾河流域 2008—2015 年每月面降水量, 对中国大气同化数据集 (CMADS) 和传统气象站降水量变化趋势及其相关关系进行分析。构建基于 SWAT 的泾河流域分布式水文模型, 并采用 CMADS 驱动 SWAT 模型, 通过对流域内张家山(二)水文站 2008—2015 年月径流的率定和验证, 评价 CMADS+SWAT 模式在泾河流域的适用性, 并采用 SUFI-2 算法对模型参数进行敏感性分析和模型不确定性分析。结果表明: 泾河流域 CMADS 数据集和气象站监测数据相关性较高, 可采用 CMADS 数据集驱动 SWAT 模型。所构建的泾河流域径流模拟模型中 12 个参数敏感性较高, 包括平均坡度 (HRU_SLP)、土壤表层到底层的深度 (SOL_Z())、主河道河床有效水力传导度 (CH_K2) 等。采用确定性系数 (R^2)、纳什效率系数 (NSE)、百分比偏差 (PBIAS) 和均方根差与标准偏差的比值 (RSR) 四个指标对模型结果进行评价, 率定期和验证期的 R^2 和 NSE 均达到 0.8 以上, RSR 均小于 0.7, 且 PBIAS 均介于 $\pm 25\%$, 表明 CMADS+SWAT 模式在泾河流域的模拟结果较好。对于整个模拟期, 验证期的模拟效果优于率定期。模型率定期和验证期的 p -因子均大于 0.7, r -因子均接近于 1, 不确定性较小。研究结果可为泾河流域水资源开发利用与管理提供参考, 同时 CMADS+SWAT 模式能够为我国气象观测资料匮乏地区的水资源管理、土地利用和非点源污染研究等提供基础支撑。

关键词: SWAT 模型; 径流模拟; CMADS; SUFI-2; 泾河流域

中图分类号: TV12

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2020)02-0135-10

Research on the monthly runoff distributed simulation and its application in Jinghe River Basin based on SWAT model

WANG Yinping¹, JIANG Rengui^{1,2,3}, XIE Jiancang¹, ZHAO Yong³, LÜ Xixi²

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Department of Geography, National University of Singapore, 117570, Singapore;

3. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Affected by the changing environment of climate change and human activities, the watershed water cycle and distributed hydrological model based on physical mechanism have become research hotspots. The paper used Thiessen polyssens to calculate the monthly precipitation of Jinghe River from 2008 to 2015, analyzed the change trends and correlations of precipitation between the China Meteorological Assimilation Datasets (CMADS) and traditional meteorological stations, built the distributed hydrological model for Jinghe River Basin runoff simulation based on the Soil and Water Assessment Tool (SWAT), used CMADS to drive the SWAT model, and

收稿日期: 2019-12-27; **网络出版日期:** 2020-05-15

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.n.20200514.1737.008.html>

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2016YFC0401409); 国家自然科学基金资助项目 (51509201, 51679188, 51979221); 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目 (2018JM5031)

第一作者: 王尹萍, 女, 博士生, 研究方向为水利信息化及水资源管理。E-mail: 2279144800@qq.com

通信作者: 姜仁贵, 男, 博士, 副教授, 研究方向为城市防洪减灾与应急管理。E-mail: jrengui@163.com

evaluated the applicability of CMADS and SWAT model by the calibration and verification of monthly runoff in Zhangjiashan hydrological station from 2008 to 2015. Further, the Sequential Uncertainty Fitting (SUFI-2) was employed to analyze the sensitivity of model parameters and its uncertainty. The results show that the CMADS data set in the Jinghe River has a high correlation with the monitoring data from meteorological stations, and therefore the CMADS data set can be used to drive the SWAT model. The 12 parameters for the runoff simulation model of Jinghe River Basin are highly sensitive, including average slope (HRU_SLP), soil depth from surface to bottom (SOL_Z()), effective hydraulic conductivity of main channel bed (CH_K2), etc. R^2 , Nash-Sutcliffe efficiency (NSE), Percent bias (PBIAS) and RMSE-observations standard deviation ratio (RSR) were used to evaluate the simulation result by the SWAT model. As for the calibration and validation period, R^2 and NSE were both over 0.8, RSR were less than 0.7, and PBIAS were between -25% and 25%, indicating that the simulation result of CMADS and SWAT model in the Jinghe River Basin is good. For the whole simulation period, the simulation result of the verification period was better than that of the calibration period. Moreover, the p -factors of the calibration period and the validation period were both greater than 0.7, and the r -factors close to 1, indicating that the model uncertainty is small. The results can provide reference for the development, utilization and management of water resources in Jinghe River Basin, and CMADS and SWAT model can provide a basic support for water resources management, land use and non-point source pollution research in the areas where meteorological observation data are scarce in China.

Key words: SWAT model; runoff simulation; CMADS; SUFI-2; Jinghe River Basin

径流模拟是水文模拟研究的重要环节,也是研究其他水文问题的基础^[1],由于人类活动对环境的影响增强^[2],下垫面变化显著,采用集总式水文模型不能反映出下垫面空间差异性造成的径流和营养物质的变化,而 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 模型作为典型的基于物理机制的分布式水文模型,能够将整个流域划分为属性几乎一致的小单元进行研究,模拟结果更接近真实,主要用于径流模拟、气候变化和人类活动影响下的水文效应分析、非点源污染等研究^[3-4]。其中,针对径流模拟的研究多为 SWAT 模型的适用性和模型的不确定性分析等,模型模拟的适用性主要在于通过相关评价指标判断所构建的 SWAT 模型能否适用于研究区域,模型的不确定性主要与模型输入数据精度、模型参数、流域划分精度等相关。对于模型模拟的适用性,已有学者证明 SWAT 模型适用于黄河源区、西北寒区、高海拔山区等多个区域^[5-6]。对于模型的不确定性,Senent-Aparicio 等^[7]将机器学习引入 SWAT 模型模拟瞬时峰值流量,并在 Ladra 流域验证了其模拟结果的优越性,降低了模型的不确定性。孟现勇等^[8]将融雪模块与 SWAT 模型耦合,开展了“温度指数法”和“能量平衡法”融雪模型的对比研究,进一步提高了径流模拟的精度。同时,还有学者通过采用不同分辨率的 DEM 数据构建 SWAT 模型等方式,降低模型的不确定性,提高模型径流模拟精度^[9]。可见,SWAT 模型的应用主要还是集中在模

型自身以及模型模拟结果的不确定性等方面,对模型的进一步开发与模型间耦合的研究相对较少。

作为渭河流域的一级支流、黄河流域的二级支流,泾河流域径流的精确化模拟,对区域内水资源管理与社会经济发展有重要影响。已有研究大多基于传统气象站数据建立 SWAT 模型进行径流模拟^[10],但泾河流域面积为 45 421 km²,流域内传统气象站较少,分布密度低,而降水的空间变异性对产流过程有较大影响^[11],导致 SWAT 模型模拟结果不确定性高^[12]。CMADS V1.1 数据集能够直接驱动 SWAT 模型,且 CMADS 系列数据集引入了中国气象局大气同化系统,利用了数据循环嵌套、模式推算等多种技术,其空间分辨率为 1/4°,保证了气象数据的分布密度。孟现勇等^[13-14]在黑河流域和精博河流域采用 CMADS 驱动 SWAT,结果表明 CMADS+SWAT 模式能够更好地提高 SWAT 模型在站点稀少流域的模拟效果。张春辉和王炳亮^[15]在苦水河流域对比分析了 CMADS 数据和传统气象站数据驱动 SWAT 模型的模拟效果,结果表明 CMADS 驱动下的模拟精度高于传统气象站。本文以 CMADS 数据集驱动 SWAT 模型,对泾河流域 2008—2015 年的月径流进行率定和验证,并通过 SWAT-CUP 中的 SUFI-2 算法对模型参数进行敏感性分析和模型不确定性分析。通过构建基于 SWAT 的泾河流域径流模拟模型,为流域水资源开发利用与管理提供参考。

1 材料与amp;方法

1.1 研究区域

泾河是渭河的一级支流,干流全长 455.1 km,流域面积 45 421 km²,横跨陕甘宁三省,多年平均年降水量 522.74 mm,张家山(二)水文站多年平均年

径流量为 11.90×10⁸ m³,年内分配不均,主要集中在汛期(7~10月)^[16]。本文以张家山(二)水文站以上的流域为研究区域,SWAT 模型的模拟面积为 45 236.61 km²,占流域总面积的 99.59%,能够很好地代表泾河流域的整体情况,如图 1 所示。

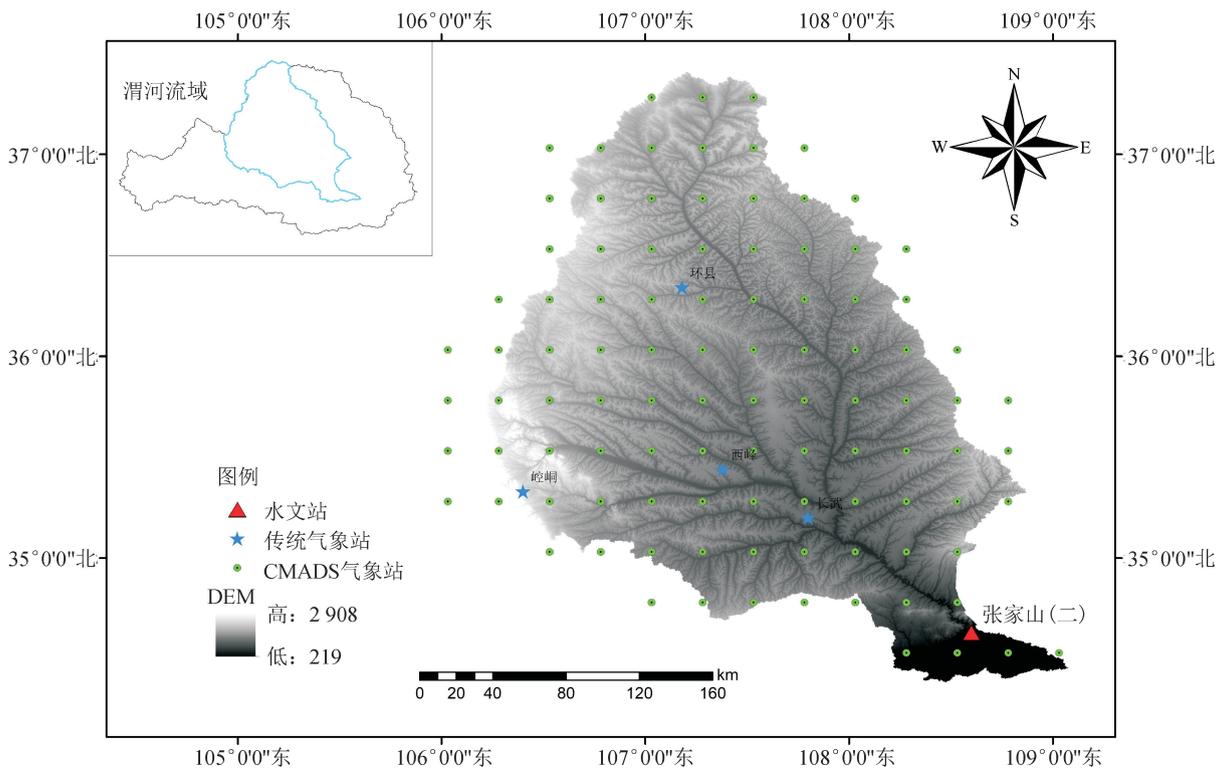


图 1 研究区域图

Fig.1 Study area map

1.2 基础数据

构建 SWAT 模型需要大量基础数据,本文建立泾河流域 SWAT 模型的输入数据如表 1 所示。主要包括构建模型的输入数据和模型率定与验证的水

文数据。构建模型的输入数据主要包括空间数据和属性数据^[17],本文采用的水文数据为 2008—2015 年张家山(二)水文站的月径流数据。

表 1 模型输入数据列表
Tab.1 SWAT model input data

数据名称	数据描述	数据来源
DEM 数据	GDEMDEM 30m 数据集(高程、坡度)	地理空间数据云
土地利用数据	2015 年中国土地利用现状遥感监测数据 (土地利用类型空间分布)	中国科学院资源环境科学数据中心
土壤数据	世界土壤数据库(HWSD)的中国土壤数据集 V1.1 (土壤空间分布及土壤属性)	国家冰川冻土沙漠科学数据中心
气象数据	CMADS 数据集(日降水量、最高温、最低温、太阳辐射量、风速、相对湿度) 0.5°×0.5°格网数据集(日降水量)	The China Meteorological Assimilation Driving Datasets for the SWAT model (CMADS) 中国气象数据网
水文数据	张家山(二)水文站(2008—2015 年月径流量)	中华人民共和国水文年鉴黄河流域水文资料

空间数据主要包括研究区数字高程模型(digital elevation model, DEM)、土地利用类型空间分布和土壤空间分布。DEM数据在GDDEM 30 m数据集中获得,土地利用数据采用的是2015年中国土地利用现状遥感监测数据,分辨率为1 km,土壤数据从HWSD中获取。对空间数据进行统一投影,投影坐标为WGS_1984_UTM_Zone_49N。

由于SWAT模型是基于美国的土地利用类型进行分类,需要将研究区域内的土地利用类型与SWAT模型中的土地利用类型对应,对土地利用数据进行重分类。泾河流域的土地利用类型分为9类,分别为耕地(42.65%)、牧场(38.20%)、林地(10.05%)、草地(6.22%)、低密度居民区(1.81%)、

水域(0.50%)、居民区(0.35%)、工业用地(0.18%)和裸地(0.04%)。

属性数据包括天气发生器相关参数的计算和土壤属性数据。天气发生器可以模拟研究区域内缺测的气象要素,可以通过SwatWeather.exe进行相关参数的计算。土壤属性数据包括土壤化学属性数据和土壤物理属性数据,由于本文只对流域进行径流模拟,只需建立土壤物理属性数据库。土壤物理属性的部分参数可以从HWSD数据集直接获取,部分参数需要通过SPAW(Soil Plant Air Water Field & Pond Hydrology)软件进行计算,部分参数需要通过公式计算,其他数据取默认值,泾河流域土壤类型数据如表2所示。

表2 土壤类型及分布表

Tab.2 Types and distribution of soil

土壤类型	SWAT 代码	面积/km ²	占比/%
石灰性雏形土(Calcaric Cambisols)	CMc1	3 680	8.14
	CMc2	30 176	66.71
潜育雏形土(Gleyic Cambisols)	CMg1	1 984	4.38
	CMg2	4 103	9.07
石灰性冲积土(Calcaric Fluvisols)	FLc1	652	1.44
	FLc2	1 209	2.67
肥熟旱耕人为土(Fimic Anthrosols)	ATf	770	1.70
钙积黑钙土(Calacic Chernozems)	CHk2	559	1.24
饱和雏形土(Eutric Cambisols)	CMe2	476	1.05

注:SWAT代码中所加数字表示对于同一土壤类型,由于其部分参数不同,对其进行再分类,以便区分。

1.3 模型建立

SWAT模型作为典型的基于物理机制的分布式水文模型,主要用于径流模拟、土地利用/植被覆盖变化的水文效应分析、气候变化的水文效应分析和非点源污染研究,本文主要通过构建泾河流域SWAT模型进行径流模拟。SWAT模型根据DEM数据、河网数据以及给定的阈值将研究区域划分为若干个子流域,再根据土地利用数据、土壤数据和坡度将子流域划分为不同的水文响应单元(hydrologic response units, HRUs),对其进行模拟计算,本文将泾河流域划分为29个子流域,328个HRUs,如图2所示,张家山(二)水文站位于第27号子流域。对于地表径流计算,SWAT模型中有改进的径流曲

线法(soil conservation service, SCS)和Green&Ampt法两种方法,本文选用的是改进的SCS曲线法,该方法计算过程简单,所需参数较少。对于潜在蒸散发(potential evapotranspiration, PET),可以直接读入PET数据,也可以通过3种方法进行计算,分别为Hargreaves、Priestley-Taylor和Penman/Monteith,本文选用的是Penman/Monteith方法,其为联合国粮农组织(FAO)推荐的计算蒸散发的标准方法,且为目前应用较为广泛的方法之一。河道水流演算方法有变动存储系数法和马斯京根法两种,本文选用的是马斯京根法,其计算过程简单,所需资料较少,且模拟结果较为满意^[5]。

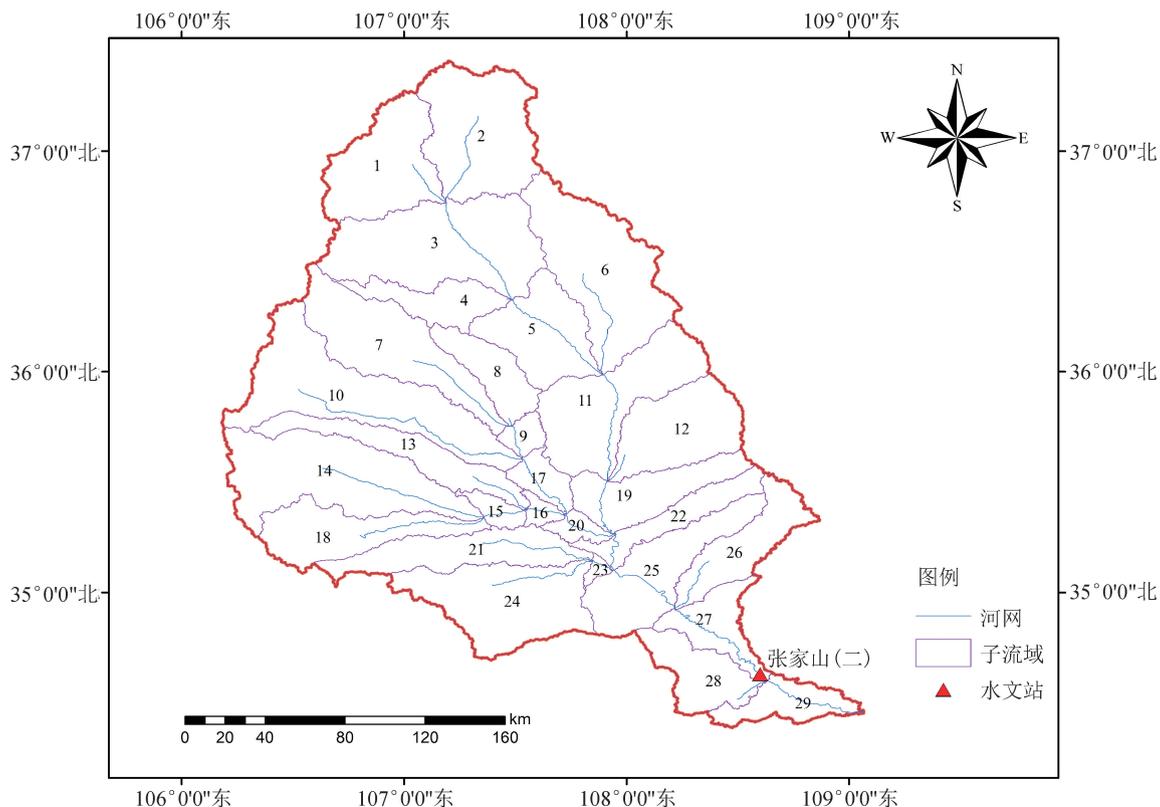


图2 泾河流域子流域分布图

Fig.2 Distribution map of Jinghe River Basin sub-watershed

SWAT 模型在研究区域的适用性可以通过 R^2 、 NSE 、 $PBIAS$ 、 RSR 、Mean Square Error (MSE) 等指标进行评价,本文选取 R^2 、 NSE 、 $PBIAS$ 和 RSR 四个指标进行模型适用性评价。 R^2 通过实测值与模拟值的线性回归计算,表征模拟流量与实测流量变化趋势的一致性水平。 NSE 代表模拟值与观测值在 1:1 水平上的相似程度^[18],如 $NSE=0.6$,则表示 60% 的模拟值与实测值相似。 $PBIAS$ 能够衡量模拟值与观测值差值的平均变化趋势, $PBIAS>0$,则表示模拟值偏小, $PBIAS<0$,则模拟值偏大^[19]。 RSR 是通过观测值的标准差($STDEV_{obs}$)将均方根误差($RMSE$)进行标准化^[20], RSR 的绝对值越小, $RMSE$ 也就越小,模型模拟效果越好。4 个评价指标的计算公式分别为:

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_1 - \bar{Q}_1)(Q_2 - \bar{Q}_2)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_1 - \bar{Q}_1)^2 \sum_{i=1}^n (Q_2 - \bar{Q}_2)^2}} \right]^2 \quad (1)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_1 - Q_2)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_1 - \bar{Q}_1)^2} \quad (2)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_1 - Q_2) \times 100}{\sum_{i=1}^n Q_1} \quad (3)$$

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_1 - Q_2)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_1 - \bar{Q}_1)^2}} \quad (4)$$

式中: Q_1 为月实测径流量, m^3/s ; Q_2 为月模拟径流量, m^3/s ; \bar{Q}_1 为月实测平均径流量, m^3/s ; \bar{Q}_2 为月模拟平均径流量, m^3/s ; n 为观测数据个数。

对于指标的评价标准,不同的学者可能会选用不同的评价标准。根据 Moriasi^[21] 的评价指南,本文采用的评价标准为:当 $R^2>0.7$, $NSE>0.5$, $RSR \leq 0.7$ 且 $PBIAS$ 介于 $\pm 25\%$ 时,则认为模拟结果是满意的。

1.4 参数估计 SUFI-2 算法

由于水文模型的不确定性,目前很多学者都在对其进行量化研究。SWAT-CUP 中内含 SUFI-2、广义似然不确定性算法、粒子群优化算法、参数求解方法和蒙特卡洛马尔科夫链 5 种方法,本文在 SWAT-CUP 中选用 SUFI-2 算法进行模型的率定验证、参数的敏感性分析以及模型的不确定分析。

SUFI-2 算法主要是通过 p -因子和 r -因子两个

因子进行模型不确定性评价, p -因子是指在95%预测不确定性区间内观测数据所占百分比,即95PPU,其取值范围为0~100%; r -因子是通过95PPU间隔带平均宽度与观测数值标准偏差的比值计算而来的,其取值范围为0~ $+\infty$ 。当 p -因子越接近于100%同时 r -因子越接近1,则模拟效果最好^[22],但是SUFI-2算法是一个连续的过程,使用该算法,在迭代次数增加的同时,其 p -因子越小,同时 r -因子也随之减小^[23]。本文对不确定性分析的评价标准为:当 p -因子 >0.7 且 r -因子的值与1的距离

较小时,则说明模型的不确定性小^[24]。

2 结果与分析

2.1 降水数据精度分析

CMADS数据集的降水数据为每日20:00到次日20:00的降水量,传统气象站的降水数据同样选取每日20:00到次日20:00的日降水量,采用泰森多边形方法分别计算泾河流域2008—2015年每月的面降水量,将两者进行对比分析,如图3所示。

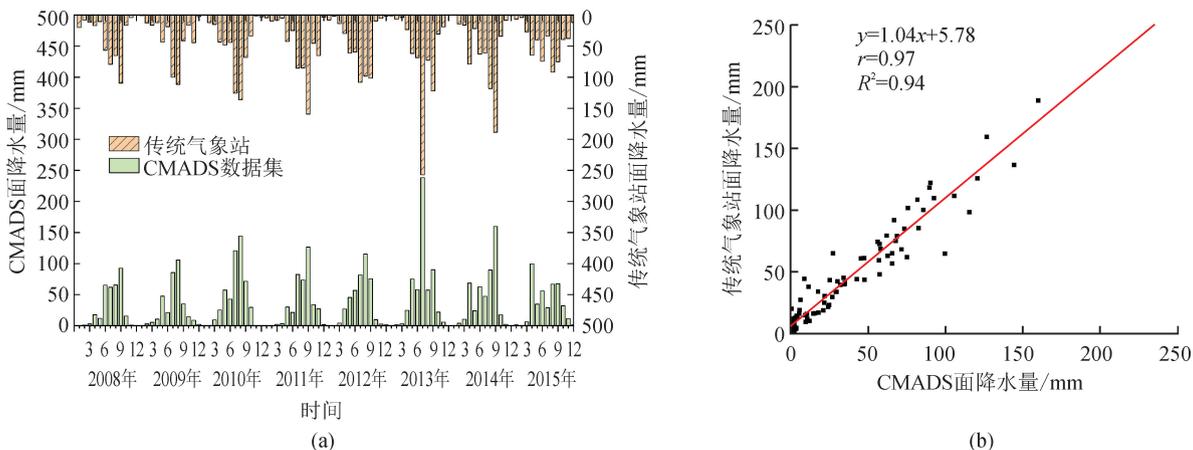


图3 CMADS与传统气象站面降水量对比图

Fig. 3 Surface rainfall comparison between CMADS and traditional meteorological station data

图3(a)为根据CMADS数据集和传统气象站的日降水量所计算的每月面降水量的变化趋势图,从图中可以看出,两者变化趋势相似,CMADS数据集平均年降水量为434.27 mm,传统气象站实测平均年降水量为520.06 mm,两者的相对误差绝对值为16%,在可接受范围内。图3(b)为两者相关关系的散点图,从图中可以看出,两者的皮尔逊相关系数 r 为0.97,相关系数 R^2 为0.94,说明两者相关性强,可见,CMADS数据集能够代表泾河流域的实际情况。CMADS数据集中包括SWAT模型模拟径流所需的所有气象要素,采用该数据集驱动SWAT模型,无需通过天气发生器进行无实测资料的气象要素模拟,同时多个研究表明,采用CMADS数据集驱动SWAT模型的模拟精度高于传统气象站^[23,25]。

2.2 参数敏感性分析

本文选取28个与径流模拟相关的参数^[26],在SWAT-CUP中采用SUFI-2算法进行迭代运算, SUFI-2算法中对参数敏感性分析有全局敏感性分析和one-at-a-time敏感性分析两种方法,本文采用的是全局敏感性分析,其通过 t -Stat和 P -Value表示参数的敏感性和显著性, t -Stat的绝对值越大且 P -Value越接近于0,参数的敏感性越强。通过对参

数的敏感性进行分析,得到敏感性较大的12个参数进行模型的率定,如表3所示。

从表3中可以看出,用于泾河流域SWAT模型率定的12个参数主要与地表径流(CN2)、潜在和实际蒸散发(ESCO、EPCO和SOL_ALB())、地下水(GWQMN和ALPHA_BF)和侧向流(HRU_SLP)等水文循环过程相关。12个参数的敏感性排序如图4所示。

根据 t -Stat和 P -Value的值,从图4中可以看出,对泾河流域SWAT模型径流模拟影响较大的前5个参数分别为平均坡度(HRU_SLP)、土壤表层到底层的深度(SOL_Z())、主河道河床有效水力传导度(CH_K2)、生物混合效率(BIOMIX)和基流alpha因子(ALPHA_BF)。HRU_SLP为平均坡度,主要影响侧向流,坡度的变化与产流量的变化呈正相关。SOL_Z()主要与土壤水相关,调节土壤水分的蒸发和渗透,潜在增加土壤水分的流失。CH_K2主要是在子流域的水汇入主河道时,用于控制地表径流的传输损失。BIOMIX与土壤成分的变化相关,进而影响径流。ALPHA_BF反映了地下水径流对补给量变化的响应,说明泾河流域的基流对补给较敏感,这与Liu等^[27]采用Differential Evolution Adaptive Metropolis(DREAM)算法所得到的结论一致。由于采用不同

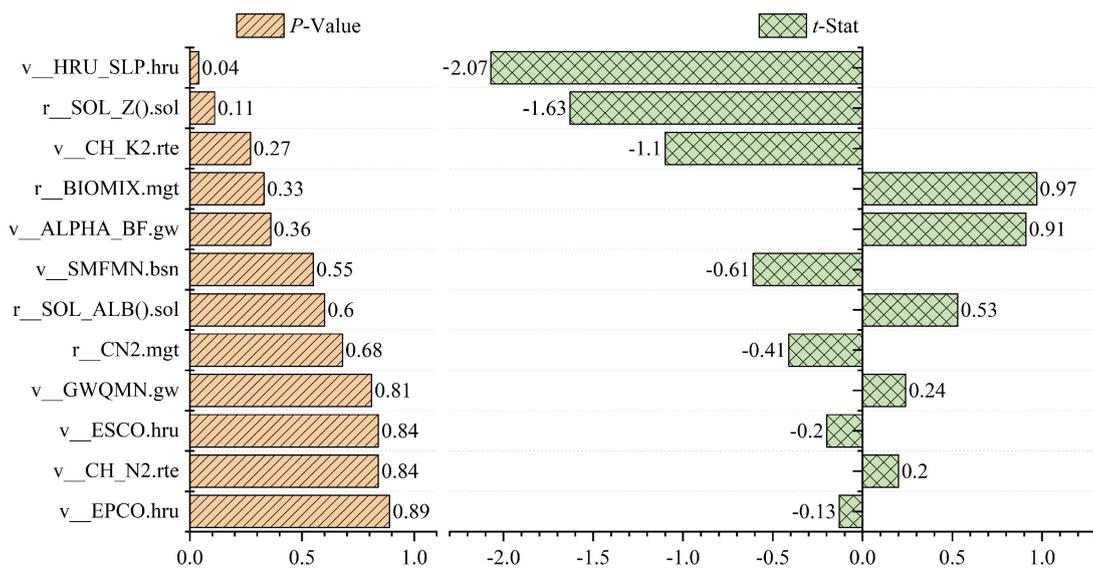
时间段和不同精度数据建立泾河流域 SWAT 模型,采用不同算法对模型进行参数敏感性分析,所得到的敏感性参数存在一定的区别,但多个研究结果^[11,27]表明,泾河流域敏感性参数主要为平均坡度(HRU_SLP)、

土壤表层到底层的深度(SOL_Z())、主河道河床有效水力传导度(CH_K2)和基流 alpha 因子(ALPHA_BF),这与本研究结果基本一致。同时,其他参数也对产汇流过程有一定的影响。

表 3 模型参数率定

Tab. 3 Calibration of model parameters

参数名称	参数含义	初始范围		最终范围	
		最小值	最大值	最小值	最大值
CN2	湿润条件 II 下的初始 SCS 径流曲线数	-0.2	0.2	-0.14	-0.02
ALPHA_BF	基流 alpha 因子/d	0	1	0.34	0.78
SOL_Z()	土壤表层到底层的深度/mm	0	1	0	0.42
ESCO	土壤蒸发补偿系数	0	1	0.67	1
EPCO	植物吸收补偿因子	0	1	0.55	1
GWQMN	浅层蓄水层补偿深度/mm	0	5 000	3 507	5 000
CH_N2	主河道河床曼宁系数	-0.01	0.3	-0.01	0.08
SMFMN	最小融雪因子/(mm·(°C·d) ⁻¹)	0	20	2.81	8.46
HRU_SLP	平均坡度/(m·m ⁻¹)	0	1	0	0.38
BIOMIX	生物混合效率	0	1	0.19	0.58
SOL_ALB()	湿润土壤反照率	0	1	0.22	0.66
CH_K2	主河道河床有效水力传导度/(mm·hr ⁻¹)	-0.01	500	301	447



注:r表示原参数值乘以(1+率定值);v表示用率定值替换原参数值。

图 4 参数敏感性分析图

Fig. 4 Analysis of parameters sensitivity

2.3 模型率定与验证

在泾河流域 SWAT 模型径流模拟过程中,将 2008 年作为预热期,以 2009—2012 年为模型的率定期,2013—2015 年为验证期。以 R^2 、NSE、PBIAS 和 RSR 四个指标对模型的适用性进行评价。设置预热期主要为了减小初始参数所带来的模拟误差,故对其结果不做展示,模型在率定期和验证

期的月流量模拟结果如图 5 所示。

从图 5 中可以看出,在整个模拟期中,2012 年的模拟效果较差,其余年份模拟效果均较为接近。对于峰值流量,2010 年和 2011 年峰值流量的模拟值小于实测值,其余年份的峰值流量模拟情况均较好。有研究表明,采用传统气象站数据建立的 SWAT 模型,模拟的峰值流量存在高估现象^[11],与

其相比,本研究结果与实测峰值流量更接近,可见通过 CMADS 驱动 SWAT 模型进行径流模拟,峰值模拟情况较好。

表 4 为泾河流域 SWAT 模型月径流模拟结果评价,从表中可以看出,率定期和验证期的 R^2 均达到 0.7 以上,可见模拟流量与实测流量具有很好的—致性。率定期的 NSE 为 0.87,可见在 2009—2012 年期间,有 87% 的模拟流量与实测流量相似,而验证期比率定期的模拟结果更佳,存在 96% 的模拟流量与实测流量相似。率定期和验证期的 $PBIAS$ 分别为 -1.4% 和 3.5% ,说明率定期平均模拟流量比平均实测流量偏大,验证期则相反,但两者的绝对值均远远小于 25%。通过对平均流量的计

算,可知率定期平均每月模拟流量为 $23.64 \text{ m}^3/\text{s}$,平均每月实测流量为 $23.30 \text{ m}^3/\text{s}$,验证期平均每月模拟流量为 $19.69 \text{ m}^3/\text{s}$,平均每月实测流量为 $20.41 \text{ m}^3/\text{s}$ 。对比率定期和验证期平均每月模拟流量和实测流量结果,与 $PBIAS$ 分析的结果一致。率定期和验证期的 RSR 分别为 0.36 和 0.21,均小于 0.7,表明 $RMSE$ 较小,模型模拟结果较好。

综上所述,通过 R^2 、 NSE 、 $PBIAS$ 和 RSR 四个指标的评价结果可知,CMADS+SWAT 模式在泾河流域有很好的适用性,同时可以看出,验证期的评价结果优于率定期的评价结果,可能是因为在建立泾河流域 SWAT 模型时所采用的土地利用数据为 2015 年的数据,故验证期的模拟效果优于率定期。

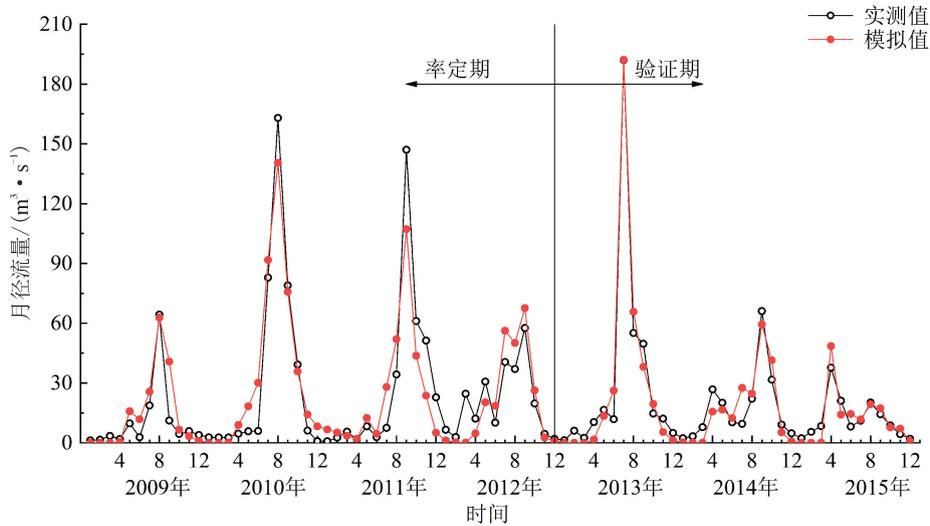


图 5 模型率定期和验证期模拟结果

Fig. 5 Simulation results of calibration period and validation period

表 4 泾河流域 SWAT 模型月径流模拟结果评价

Tab. 4 Evaluation of model simulation results of SWAT model in Jinghe River Basin

时间段	R^2	NSE	$PBIAS/\%$	RSR
率定期(2009—2012 年)	0.87	0.87	-1.4	0.36
验证期(2013—2015 年)	0.96	0.96	3.5	0.21

从图 5 中可以看出,张家山(二)水文站的峰值流量一般出现在汛期(7~10 月),而对于整个模拟期(2009—2015 年),峰值流量的模拟效果均较好,这可能与模型模拟评价指标 NSE 有关, NSE 偏向于峰值流量^[28],而泾河流域率定期和验证期的 NSE 值均较高。为了验证泾河流域 SWAT 模型对汛期和非汛期的模拟效果是否一致,通过计算率定期(2009—2012 年)、验证期(2013—2015 年)和模拟

期(2009—2015 年)平均每月实测流量与模拟流量的相对误差 Re 来分别对 3 个时间段每月的模拟结果进行对比分析。通过计算率定期、验证期和模拟期 3 个时间段每月 Re 绝对值的平均值,对每月的相对误差值采用单值对比,进而得出年内每月模拟结果的平均水平,为了排除 3 个时间段内 Re 值正负相抵的影响,采用 Re 绝对值的平均值作为评价标准。相对误差对比结果如图 6 所示。

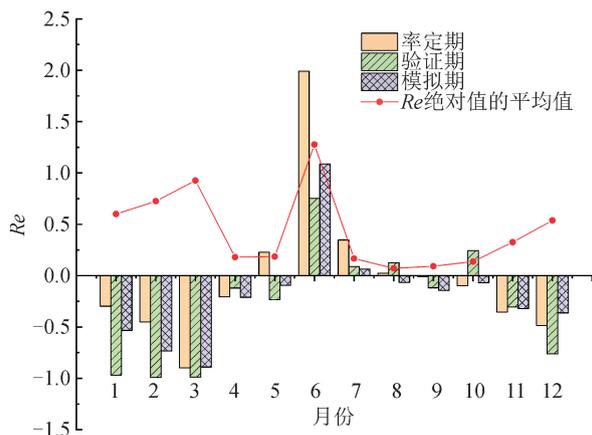


图6 相对误差对比图

Fig. 6 Comparison map of relative error

从图6中可以看出,率定期 Re 的最小值出现在9月,验证期和模拟期的为7月,率定期、验证期和模拟期 Re 的最大值分别出现在6月、2月和6月。从率定期、验证期和模拟期 Re 绝对值的平均值可以看出,其较小值位于7月、8月、9月和10月,而这4个月份正好为泾河流域的汛期。对于非汛期,即11月至翌年6月,由图6可知,4月和5月的 Re 绝对值的平均值较小,从11月到次年3月 Re 绝对值的平均值一直在增加,而6月的 Re 绝对值的平均值为全年最高,可能是由于6月为非汛期与汛期的过渡期,降水与径流均发生了较大的突变,导致模拟效果较差。由此可知,对于泾河流域,SWAT模型对汛期的模拟精度略高于非汛期,这与Chen等^[29]采用SWAT模型在西苜河流域径流模拟所得到的结论一致,可能是由于模型在模拟径流时,不能完全捕捉到水文过程中的基流分量。从全年来看,对8月份的模拟效果最好,对6月份的模拟效果较差。

2.4 不确定性分析

对于SWAT模型,导致其存在不确定性的原因有很多,从数据准备来看,不确定性来源包括DEM数据、土地利用数据、土壤数据的精度,同时在子流域划分、模型输入数据尺度转换和模型参数校准过程中均存在不同的不确定性来源,其影响程度也不同^[30]。本文通过 p -因子和 r -因子两者衡量SWAT模型在泾河流域的不确定性,在SWAT-CUP中由SUFI-2算法的迭代结果可知,率定期和验证期的 p -因子分别为0.73和0.75, r -因子为1.22和1.66。可以看出,相比率定期而言,验证期的 p -因子有所增加,表明观测值落在不确定性区间内的数量有所增加,但同时 r -因子也有所增加,表明验证期的不确定性区间宽度比率定期大。综合 p -因子和 r -因子可知,率定期和验证期的不确定性均在可接受范围,

且两者的不确定性结果基本一致。

3 结论

本文构建了泾河流域SWAT模型所需的空间数据库和属性数据库,建立了泾河流域SWAT模型,采用张家山(二)水文站2008—2015年月径流数据对模型进行率定和验证,并对模型参数进行敏感性分析和模型不确定性分析。

1) 模型参数的敏感性分析结果表明,对于泾河流域,与径流过程相关的参数中有12个参数的敏感性较高,其中对泾河流域模拟影响较大的参数为平均坡度(HRU_SLP)、土壤表层到底层的深度(SOL_Z())、主河道河床有效水力传导度(CH_K2)、生物混合效率(BIOMIX)和基流 α 因子(ALPHA_BF)等。

2) 由 R^2 、NSE、PBIAS和RSR四个指标的评价结果可知,CMADS+SWAT模式在泾河流域是适用的。从整个模拟期来看,验证期(2013—2015年)的模拟效果优于率定期(2009—2012年)。对年内模拟效果来说,汛期(7~10月)的模拟效果略优于非汛期(11月到翌年6月)。从每个月的模拟结果来看,对8月的模拟效果最好,对6月的模拟效果较差。

3) 由SUFI-2算法所得到的不确定性结果可知,率定期和验证期的 p -因子均大于0.7, r -因子均接近于1,表明SWAT模型在泾河流域进行径流模拟的不确定性较小。对于泾河流域,汛期径流模拟结果较好,可以通过构建的SWAT模型进行汛期径流的预测,进而为解决流域内城市内涝问题提供新的思路。

参考文献:

- [1] 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 Model-SWAT and its application[J]. Progress in Geography, 2005, 24(5): 121-130.
- [2] 王小杰,姜仁贵,解建仓,等. 基于分形和R/S分析的渭河干流径流变化特征研究[J]. 水利水运工程学报, 2019(1): 102-108.
WANG Xiaojie, JIANG Rengui, XIE Jiancang, et al. Analysis of runoff variation characteristics in the mainstream of Weihe River based on fractal theory and R/S analysis method[J]. Hydro-Science and Engineering, 2019(1): 102-108.
- [3] WANG Y P, JIANG R G, XIE J C, et al. Soil and water assessment tool (SWAT) model: a systemic review [J]. Journal of Coastal Research, 2019, 93 (sp1):

- 22-30.
- [4] 李家科,刘健,秦耀民,等. 基于 SWAT 模型的渭河流域非点源氮污染分布式模拟[J]. 西安理工大学学报, 2008,24(3):278-285.
- LI Jiake, LIU Jian, QIN Yaomin, et al. Distributed simulation on Nitrogen non_point source pollution in the Weihe River watershed based on SWAT model[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2008, 24(3): 278-285.
- [5] 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, HUANG Youbo. The theory of SWAT model and its application in Heihe basin[J]. Progress in Geography, 2003, 22(1):79-86.
- [6] 黄清华,张万昌. SWAT 分布式水文模型在黑河干流山区流域的改进及应用[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2004,28(2):22-26.
- HUANG Qinghua, ZHANG Wanchang. Improvement and application of GIS-based distributed SWAT hydrological modeling on high altitude, cold, semi-arid catchment of Heihe River Basin, China[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2004, 28(2): 22-26.
- [7] SENENT-APARICIO J, JIMENO-SAEZ P, BUENOCRESPO A, et al. Coupling machine-learning techniques with SWAT model for instantaneous peak flow prediction[J]. Biosystems Engineering, 2019, 177: 67-77.
- [8] 孟现勇,吉晓楠,刘志辉,等. SWAT 模型融雪模块的改进与应用研究[J]. 自然资源学报, 2014, 29(3): 528-539.
- MENG Xianyong, JI Xiaonan, LIU Zhihui, et al. Research on improvement and application of snowmelt module in SWAT[J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(3): 528-539.
- [9] SUN J, LI Y P, HUANG G H, et al. Analysis of interactive effects of DEM resolution and basin subdivision level on runoff simulation in Kaidu River Basin, China [J]. Hydrology Research, 2017, 48(4): 1100-1117.
- [10] 降亚楠,王蕾,魏晓妹,等. 基于 SWAT 模型的气候变化对泾河径流量的影响[J]. 农业机械学报,2017,48(2):262-270.
- JIANG Ya'nan, WANG Lei, WEI Xiaomei, et al. Impacts of climate change on runoff of Jinghe River based on SWAT model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 262-270.
- [11] YIN J, HE F, XIONG Y J, et al. Effect of land use/land cover and climate changes on surface runoff in a semi-humid and semi-arid transition zone in northwest China[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2017, 21(1):183-196.
- [12] SINGH V P. Effect of spatial and temporal variability in rainfall and watershed characteristics on stream flow hydrograph[J]. Hydrological Processes, 1997, 11(12):1649-1669.
- [13] 孟现勇,师春香,刘时银,等. CMADS 数据集及其在流域水文模型中的驱动作用:以黑河流域为例[J]. 人民珠江,2016,37(7):1-19.
- MENG Xianyong, SHI Chunxiang, LIU Shiyin, et al. CMADS datasets and its application in watershed hydrological simulation: a case study of the Heihe River Basin[J]. Pearl River, 2016, 37(7): 1-19.
- [14] 孟现勇,王浩,雷晓辉,等. 基于 CMDAS 驱动 SWAT 模式的精博河流域水文相关分量模拟、验证及分析[J]. 生态学报,2017,37(21):7114-7127.
- MENG Xianyong, WANG Hao, LEI Xiaohui, et al. Simulation, validation, and analysis of the hydrological components of Jing and Bo River Basin based on the SWAT model driven by CMADS[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(21): 7114-7127.
- [15] 张春辉,王炳亮. CMADS 与传统气象站数据驱动下的 SWAT 模型模拟效果评价:以苦水河流域为例[J]. 中国农村水利水电,2018(6):52-57.
- ZHANG Chunhui, WANG Bingliang. Evaluation of runoff simulation effects of the SWAT model driven by CMADS and traditional meteorological station data: taking the case study in Kushui River Basin[J]. China Rural Water and Hydropower, 2018(6): 52-57.
- [16] 王娇,姜仁贵,解建仓,等. 泾河流域径流量变化特征研究[J]. 水资源与水工程学报,2018,29(6):88-93.
- WANG Jiao, JIANG Rengui, XIE Jiancang, et al. Analysis on characteristics of runoff variation in Jinghe River[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2018, 29(6):88-93.
- [17] 李丹,冯民权,苟婷. 气候变化对汾河(运城段)径流影响模拟[J]. 水利水运工程学报,2016(2):54-61.
- LI Dan, FENG Minquan, GOU Ting. Simulation of climate change impacts on runoff of Yuncheng reach of Fenhe River[J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(2): 54-61.
- [18] NASH J E, SUTCLIFFE J V. River flow forecasting through conceptual models Part 1: a discussion of principles[J]. Journal of Hydrology, 1970, 10(3): 282-290.

- velopment & Economy, 2015(2): 145-148.
- [22] 李丽华, 韩思宁. 暴恐事件网络舆情传播机制及预防研究——英国典型案例的实证分析[J]. 情报杂志, 2019, 38(11): 102-111.
LI Lihua, HAN Sining. Spreading mechanism of network public opinion and prevention of terrorist incidents: an empirical analysis of typical cases in Britain [J]. Journal of Intelligence, 2019, 38(11): 102-111.
- [23] 兰月新, 夏一雪, 刘冰月, 等. 网络舆情传播阶段精细化建模与仿真研究[J]. 现代情报, 2018, 38(1): 76-86.
LAN Yuexin, XIA Yixue, LIU Bingyue, et al. The research on propagation phase accurate model and simulation of network public opinion [J]. Modern Information, 2018, 38(1): 76-86.
- [24] 郑昌兴, 苏新宁, 刘喜文. 突发事件网络舆情分析模型构建——基于利益相关者视阈[J]. 情报杂志, 2015, 34(4): 71-75.
ZHENG Changxing, SU Xinning, LIU Xiwen. Analysis model on online public opinion for emergency based on the stakeholder theory [J]. Journal of Intelligence, 2015, 34(4): 71-75.
- (责任编辑 王绪迪)
-
- (上接第 144 页)
- [19] GUPTA H V, SOROOSHIAN S, YAPO P O. Status of automatic calibration for hydrologic models: comparison with multilevel expert calibration [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 1999, 4(2): 135-143.
- [20] SINGH J, KNAPP H V, DEMISSIE M, et al. Hydrological modeling of the Iroquois River watershed using HSPF and SWAT [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2005, 41(2): 343-360.
- [21] 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.
- [22] SINGH V, BANKAR N, SALUNKHE S S, et al. Hydrological stream flow modelling on Tungabhadra catchment: parameterization and uncertainty analysis using SWAT CUP [J]. Current Science, 2013, 104(9): 1187-1199.
- [23] MENG X Y, WANG H, LEI X H, et al. Hydrological modeling in the Manas River Basin using soil and water assessment tool driven by CMADS [J]. Tehnicki Vjesnik-Technical Gazette, 2017, 24(2): 525-534.
- [24] 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.
- [25] MENG X Y, WANG H. Significance of the China Meteorological Assimilation Driving Datasets for the SWAT Model (CMADS) of East Asia [J]. Water, 2017, 9(10): 765.
- [26] 左德鹏, 徐宗学. 基于 SWAT 模型和 SUFI-2 算法的渭河流域月径流分布式模拟 [J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2012, 48(5): 490-496.
ZUO Depeng, XU Zongxue. Distributed hydrological simulation using SWAT and SUFI-2 in the Wei River Basin [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2012, 48(5): 490-496.
- [27] LIU Y R, LI Y P, HUANG G H, et al. A Bayesian-based multilevel factorial analysis method for analyzing parameter uncertainty of hydrological model [J]. Journal of Hydrology, 2017, 553: 750-762.
- [28] BHATTA B, SHRESTHA S, SHRESTHA P K, et al. Evaluation and application of a SWAT model to assess the climate change impact on the hydrology of the Himalayan River Basin [J]. CATENA, 2019, 181: 104082.
- [29] CHEN Y, XU C Y, CHEN X W, et al. Uncertainty in simulation of land-use change impacts on catchment runoff with multi-timescales based on the comparison of the HSPF and SWAT models [J]. Journal of Hydrology, 2019, 573: 486-500.
- [30] 杨凯杰, 吕昌河. SWAT 模型应用与不确定性综述 [J]. 水土保持学报, 2018, 32(1): 17-24, 31.
YANG Kaijie, LÜ Changhe. Reviews on application and uncertainty of SWAT model [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(1): 17-24, 31.
- (责任编辑 周 蓓)