

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.02.003

目标函数对滦河流域 SWAT 模型径流模拟不确定性的影响

冯 平, 张立斌, 李建柱, 张 婷, 许心怡

(天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300350)

摘要:针对水文模型参数和径流模拟结果不确定性问题,选取 Nash-Sutcliffe 效率系数(NSE)、改进的决定系数(R_m^2)、相对误差(PBIAS)、Kling-Gupta 效率系数(KGE)4 种目标函数,对构建的滦河流域潘家口水库上游 SWAT 模型进行参数率定及验证,分析了不同目标函数下模型参数的敏感性差异及径流模拟的不确定性。结果表明:参数敏感性会随迭代次数增加和抽样范围变化发生改变,不同目标函数下率定的参数范围和最优值显著不同;NSE 和 KGE 作为目标函数在各站点径流模拟中更稳健,分别表现出较高的模拟精度和较低的模拟不确定性。

关键词:SWAT 模型;径流模拟;不确定性;目标函数;参数敏感性;滦河流域

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)02-0017-08

Influence of objective function on uncertainty of SWAT model runoff simulation in the Luanhe River Basin //
FENG Ping, ZHANG Libin, LI Jianzhu, ZHANG Ting, XU Xinyi (State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: Aiming at the uncertainty of hydrological model parameters and runoff simulation results, four objective functions, namely Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (NSE), modified determination coefficient (R_m^2), relative error (PBIAS) and Kling-Gupta efficiency coefficient (KGE), were selected to calibrate and verify the parameters of the constructed SWAT model at the upstream of Panjiakou Reservoir in the Luanhe River Basin. The sensitivity difference of model parameters under different objective functions and the uncertainty of runoff simulation were analyzed. The results show that the parameter sensitivity will change with the increase of the number of iterations and the change of the sampling range, and the parameter range and the optimal value of the calibration are significantly different under different objective functions. As the objective function, NSE and KGE are more robust in runoff simulation at each station, showing higher simulation accuracy and lower simulation uncertainty, respectively.

Key words: SWAT model; runoff simulation; uncertainty; objective function; parameter sensitivity; Luanhe River Basin

水文模型是降雨径流模拟的重要工具,是人们对高度复杂、非线性水文过程的一种抽象化和概念化认识,定量反映水文现象的演变过程及物理机制^[1]。水文模型的发展对水资源管理与规划、水文预报、水库优化调度等具有重要的意义。根据对空间特征的描述程度,水文模型可分为集总式、半分布式和分布式 3 种。随着水文理论和科学技术的发展,分布式水文模型的研究和应用越来越广泛。然而,由于水文过程形成的理论认识不足导致模型结构简化,使得模型的构建并不完善^[2]。另外,由于降水、下垫面等模型输入数据的精度和时空变异性

问题,不同的水文模型结构和目标函数会导致模拟结果的差异^[3-4],成为限制水文模型预报能力的瓶颈^[5]。水文模拟中的不确定性问题已成为水文科学研究的热点和难点。模型参数作为流域水文过程概化的关键因子,是反映流域产汇流过程的重要指标^[6-7],参数选择的合理性直接影响模拟的精度。传统的模型参数优化率定采用的单一目标函数优化结果往往不能充分反映流域的水文过程^[8-9],因此多目标率定逐渐成为水文模型参数率定的发展趋势。Qi 等^[10]将参数的鲁棒性作为目标函数建立了多目标优化框架;Abou-Rafee 等^[11]使用了百分比偏

基金项目:国家自然科学基金(52079086)

作者简介:冯平(1964—),男,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:fengping@tju.edu.cn

通信作者:张立斌(1997—),男,硕士研究生,主要从事水文过程研究。E-mail:15098812157@163.com

差、决定系数 (R^2)、Kling-Gupta 效率系数 (KGE)、Nash-Sutcliffe 效率系数 (NSE)、标准偏差率等多个指标进行参数率定;贺新月等^[12]将融合 AR 模型的改进 MCMC 方法 (AR-MCMC) 应用于水文模拟的不确定性分析中,减少了模型参数的不确定性,提高了模型预测性能。

SWAT 模型是降雨径流模拟方面广泛应用的一种分布式水文模型,能够较好地反映气象和人类活动因素对水文过程的影响,具有先进的结构和不确定性分析功能^[13],尤其是在长系列径流模拟中适应性较好^[14-15]。目前,利用 SWAT 模型进行水文模拟多采用单一目标函数下的参数优化与率定,不同目标函数下参数的敏感性以及径流模拟的不确定性研究尚不完善。而目标函数的选取具有较大的经验性和主观性,不同目标函数对应不同的流域水文特性,这导致了水文模拟水平的差异,进而影响水资源规划与管理、径流预报等的可靠性。

鉴于此,本文以滦河潘家口水库控制流域为研究区,构建 SWAT 模型,采用 SWAT-CUP 进行模型参数的敏感性分析,探索多目标函数对 SWAT 模型参数敏感性及径流模拟的不确定性影响,以期对潘家口水库的入库径流模拟以及制定唐山、天津供水决策提供参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

研究区如图 1 所示。滦河发源于河北省张家口的巴彥古尔图山北麓,地跨冀蒙辽 3 省区,属于海河流域北部重要水系。潘家口水库是滦河上的一座大型水库,控制流域面积 33 700 km²,约占滦河流域总面积的 75%,地理位置为 115.5°E~118.9°E,40.3°N~42.7°N。研究区海拔为 100~2 200 m,西北高东南低,多伦县以上为内蒙古草原,其余区域地形以山地为主。流域西北部位于温带大陆性气候区,降水

稀少且集中在夏季;东南部位于温带季风气候区,冬季寒冷干燥,夏季高温多雨。流域多年平均气温 2.5~10.5℃,由西北向东南递增。流域多年平均降水量为 560 mm,年内降水集中且空间分布不均,降水量总体上由北向南递增。一级支流有小滦河、兴州河、伊逊河、武烈河、老牛河、柳河和瀑河。

1.2 数据来源

构建 SWAT 模型需要数字高程 (DEM)、土壤、土地利用等空间数据,以及降水、径流、气温等属性数据^[16]。DEM 来源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn>),空间分辨率为 90 m。土壤数据来源于国家青藏高原科学数据中心 (<http://westdc.westgis.ac.cn>),比例为 1:100 万。土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心 (<https://www.resdc.cn>),空间分辨率为 1 km,考虑与降雨径流数据的时间序列相对应,采用 2005 年的土地利用数据,包括耕地、林地、草地、水域、居民地和未利用土地 6 个一级类型。气象数据采用流域内及流域附近 6 个气象站 1997—2011 年的逐日最高和最低气温、平均风速、太阳辐射和相对湿度,来源于国家气象科学数据中心 (<http://data.cma.cn>)。逐日降水数据为滦河流域三道河子、承德、下板城等 10 个雨量站 1997—2011 年的实测资料,来源于《海河流域水文年鉴》。径流数据为滦河流域内三道河子、承德、下河南等 8 个水文站 1997—2011 年的实测资料,来源于《海河流域水文年鉴》。雨量站、气象站及水文站分布如图 1 所示。

2 模型构建与参数优化

2.1 SWAT 模型构建

根据已有数据构建土壤数据库、气象数据库、土地利用数据库,将研究区划分为 43 个子流域和 2 465 个水文响应单元 (HRU)。SWAT 空间数据及子流域划分结果见图 2。详细的模型构建步骤可参考文献^[17]。

2.2 目标函数选取与参数优化

2.2.1 目标函数及适用性评价

参数率定采用 SWAT-CUP 软件,包含 11 个目标函数,常用的有 R^2 、NSE、改进的决定系数 (R_m^2)、相对误差 (PBIAS)、KGE、标准化均方根误差 (RSR) 等。其中 NSE、RSR 和 R^2 均是基于偏差平方最小化的效率标准^[18], R_m^2 可以综合体现量级差异和相关性。不同目标函数的侧重点和稳健性不同,单一目标函数容易造成模拟结果偏差较大,因此,选择 NSE、 R_m^2 、PBIAS、KGE 4 种不同类型的目标函数进行模型参数率定和验证。各目标函数的评价标准见

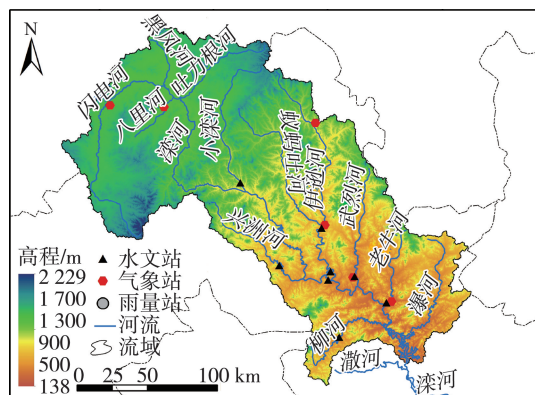


图 1 研究区概况

Fig.1 Overview of study area

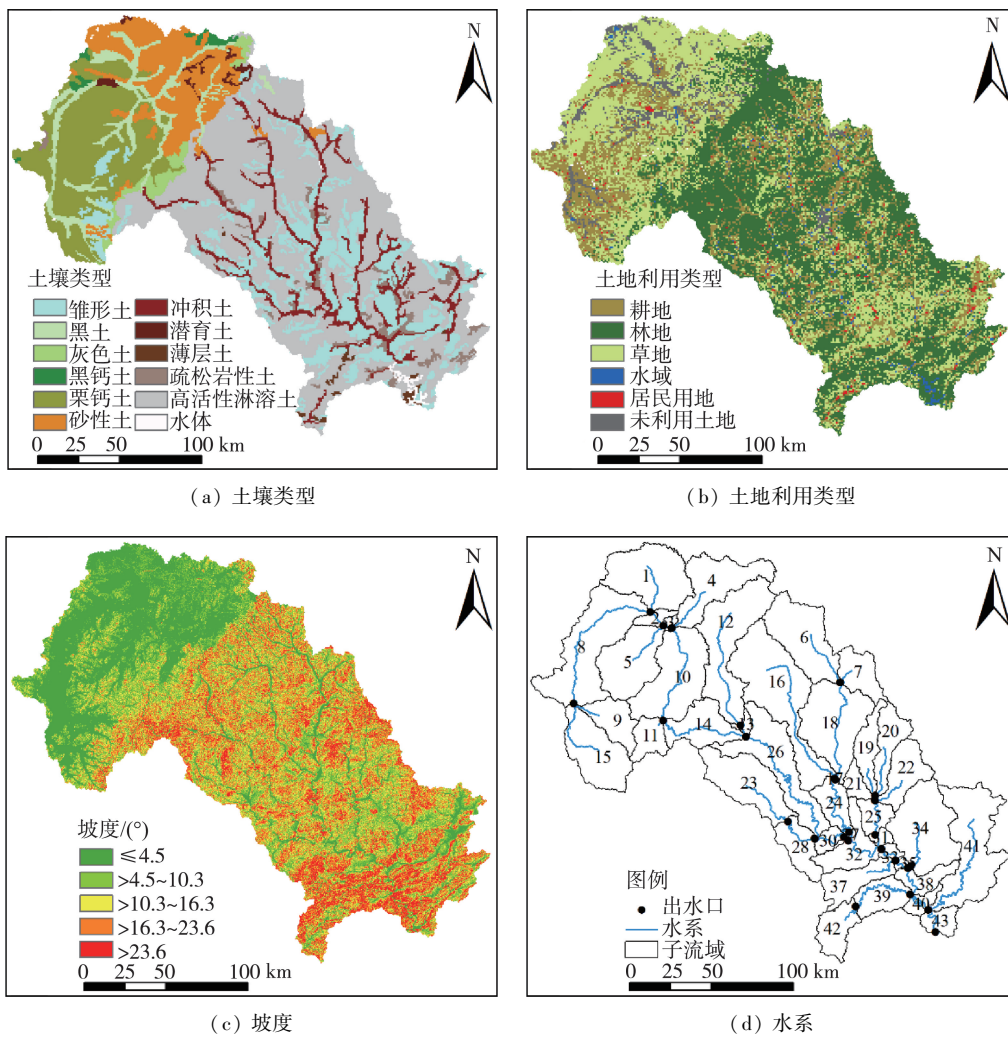


图2 SWAT空间数据及子流域划分结果

Fig.2 SWAT spatial database and sub-basin division

表1,计算公式分别为

$$N = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{si})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - \bar{Q}_o)^2} \quad (1)$$

$$R_m^2 = \begin{cases} |b| R^2 & |b| \leq 1 \\ |b|^{-1} R^2 & |b| > 1 \end{cases} \quad (2)$$

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{si})}{\sum_{i=1}^n Q_{oi}} \times 100\% \quad (3)$$

$$K = 1 - \sqrt{(r' - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad (4)$$

式中: N 为NSE值; I 为PBIAS值; K 为KGE值; Q_{oi} 、 Q_{si} 分别为流量实测数据和模拟数据; n 为数据量; b 为实测径流与模拟径流的回归系数; r' 为实测径流与模拟径流的相关系数; α 、 β 分别为模拟径流与实测径流的标准差、均值之比。

表1 目标函数的评价标准

Table 1 Evaluation standard of objective function

等级	NSE	R_m^2	PBIAS/%	KGE
合格	0.5 ~ 0.65	≥ 0.4	$\pm 25 \sim \pm 15$	0.5 ~ 0.65
良好	>0.65 ~ 0.75	≥ 0.4	$\pm 15 \sim \pm 10$	>0.65 ~ 0.75
优秀	>0.75 ~ 1.0	≥ 0.4	$\pm 10 \sim 0$	>0.75 ~ 1.0

2.2.2 参数优化

SWAT模型中包含5种模型率定方法:SUFI-2算法、GLUE算法、ParaSol算法、MCMC算法和PSO算法。其中,SUFI-2算法和GLUE算法考虑了所有的不确定性来源(包括输入数据、概念模型、驱动参数等),Wu等^[19]通过研究发现,SUFI-2算法对于径流模拟的不确定性分析更加全面,结果更加合理。因此,本文采用SUFI-2算法^[20-21]进行半自动参数优化,分别以NSE、 R_m^2 、PBIAS和KGE4种目标函数对研究区域SWAT模型进行参数率定,在给定的初始范围内基于拉丁超立方随机采样方法处理大量参数并代入模型获得目标函数值,在迭代过程中同步进行全局参数敏感性分析和参数率定^[22]。利用流域

内 8 个水文站及潘家口水库的实测径流资料进行率定和验证。根据各站点控制流域关系,从上游至下游依次率定,率定过程的抽样次数依次为 2 000 次、1 000 次以及 500 次。一般迭代 5 次或 6 次以内即可得到较为理想的结果^[23],因此当站点率定目标函数值基本不变或迭代次数到达 6 次时,终止该站点的率定。另外,为了评估目标函数选择不同对参数率定结果的影响,控制参数的初始范围及同一站点的迭代次数相同,对单次迭代和多次迭代下的结果综合分析。

SWAT 模型中产汇流参数较多,不同参数对径流模拟的敏感程度也不相同,选择敏感性较高的参数有助于提高模型率定的效率,减少调参的盲目性^[24]。可能影响径流模拟的参数共 28 个,其中,融雪相关参数 (SFTMP、SMTMP、SMFMX、SMFMN、TIMP)、河道蒸散发调控系数 (EVRCH)、地表径流滞后系数 (SURLAG) 等 7 个参数为流域参数,需首先进行率定,以避免影响其他参数的率定过程,率定结果见表 2,在后续的敏感性分析中不再对其进行分析。另外,CANMX 为最大冠层截留量,参数值与地表覆盖类型相关,故分为耕地 (AGRL)、林地 (FRST)、草地 (PAST) 3 个参数分别进行率定。因此,后续需进行敏感性分析的参数共 23 个。

表 2 流域参数率定结果

Table 2 Watershed parameter calibration results				
参数	物理意义	单位	初始范围	率定结果
SFTMP	降雪平均气温	℃	-5 ~ 5	0.75
SMTMP	雪融最低气温	℃	-5 ~ 5	-4.22
SMFMX	最大融雪因子	mm/(℃·d)	0 ~ 10	5.69
SMFMN	最小融雪因子	mm/(℃·d)	0 ~ 10	2.57
TIMP	结冰气温滞后系数		0 ~ 1	0.51
EVRCH	河道蒸散发调控系数		0.05 ~ 1	0.10
SURLAG	地表径流滞后系数		0.05 ~ 24	7.32

a. 参数敏感性及其空间特异性。分析以 NSE 为目标函数进行迭代过程中 23 个参数的敏感性及其空间特异性情况。在模拟时进行了 5 000 次抽样的 6 次迭代。在空间上根据参数敏感性变化特征分为很敏感、前期敏感、后期敏感、不敏感 4 种类型,8 个水文站以及潘家口水库参数敏感性如图 3 所示。

随着迭代次数的增加以及给定抽样范围的变化,参数敏感性也会随之改变。其中,土壤水相关参数 SOL_K、SOL_BD 一直表现出较高敏感性,而有些参数则一直不敏感,如 ALPHA_BF、REVAP、CH_K2、CH_N2、CH_N1 等。部分参数在最初表现不敏感,但随着优化次数的增加逐渐表现出较高的敏感性,如 GW_REVAP、ESCO 等,这些参数的敏感

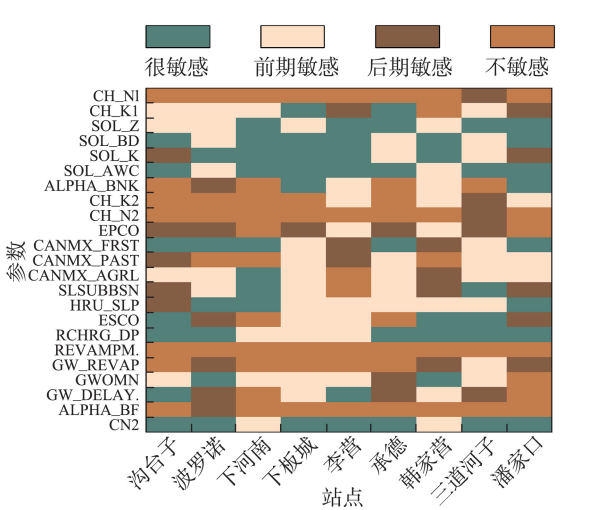


图 3 各站点参数敏感性

Fig. 3 Sensitivity of each sub-basin parameter

性无法通过单次迭代分析确定。总体来说,大部分敏感参数可以通过首次迭代确定。以上参数敏感性随迭代次数的变化情况可以用参数间的复杂相关性^[20]以及有限次抽样的局限性解释,各个参数之间并不是独立的,一个参数的变化会引起其他参数的响应,从而随着迭代次数的变化参数敏感性也会发生改变。同时,参数敏感性在不同子流域间存在明显差异,如 ALPHA_BNK、GW_DELAY 等。CN2、RCHRG_DP 以及土壤相关参数在各子流域均表现得非常敏感,地下水再蒸发相关系数 GW_REVAP 和 REVAP、基流消退系数 ALPHA_BF 以及河道曼宁系数等在多数子流域表现不敏感。50% 以上子流域的植物吸收补偿系数 EPCO 在迭代后期才表现出敏感性。另外,对于 CANMX,不同土地利用类型的敏感性也会不同,林地和农田的 CANMX 较为敏感,而草地的 CANMX 敏感性相对较低。

b. 参数对目标函数的敏感性。以韩家营站为例,对 NSE、 R_m^2 、PBIAS 和 KGE 4 种目标函数下率定过程中的参数敏感性进行对比分析。采用上述率定方法,首先对 2 000 次抽样单次迭代的参数敏感性进行对比,参数对不同目标函数的敏感性存在显著差异,在目标函数 PBIAS 和 KGE 下筛选到的敏感性参数最多,23 个参数中有 15 个参数通过了 0.05 显著性检验;其次是 NSE,参数对目标函数 R_m^2 最不敏感,仅有 8 个参数的敏感性达到 0.05 显著性水平。综合各目标函数的单次敏感性分析结果,径流模拟中较为敏感的参数为地表径流参数 CN2、地下水相关参数 RCHRG_DP 以及土壤水相关参数 SOL_AWC、SOL_K、SOL_Z,这些参数对不同目标函数均有较高的敏感性。为了进一步验证各目标函数首次迭代得到的敏感性参数是否可以作为率定参数的选

取依据,结合多次迭代下的敏感性分析结果(图4)进行对比分析。相比于 PBIAS 和 KGE,目标函数 NSE 和 R_m^2 在单次迭代下无法有效识别出所有的敏感参数,尤其是 R_m^2 存在较多的参数会随着迭代次数的增加才会表现出较为显著的敏感性。PBIAS 和 KGE 通过单次迭代识别的敏感性参数基本可以作为模型率定的参数集。

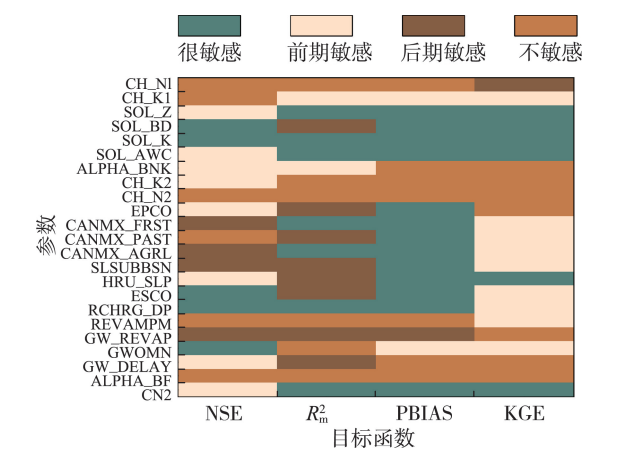


图4 不同目标函数下多次迭代参数敏感性分析结果
Fig.4 Parameter sensitivity analysis of multiple iteration under different objective functions

综上,除已经预先进行率定的7个流域参数外,研究区域模型率定的参数集可以选取较为敏感的18个参数(不包括敏感性低的 CH_N1、CH_N2、GW_REVAP、REVAPM 和 ALPHA_BF 参数)。

3 不确定性分析

结合已有研究成果^[17],分析滦河流域降水径流变化趋势及变异性,可知流域降水呈不显著的下降趋势,年径流和汛期径流呈显著下降趋势,降水和径流序列变异点为1998年,径流序列表现出了显著的非一致性。考虑水文非一致性和模型初始运行条件对径流模拟精度的影响^[25],选取1997—1998年对模型进行预热,1999—2008年为率定期,2009—2011年为验证期。

3.1 不同目标函数下的模拟精度

对不同目标函数的模拟效果、站点的综合模拟精度以及各目标函数的特点和适用性进行对比分析。比较不同目标函数下的模拟精度,NSE作为目标函数的表现最稳健,率定验证结果中不合格指标数量最少;其次是KGE,各指标基本均能达到合格标准;而PBIAS和 R_m^2 作为目标函数的表现则不稳健,在共计45个不合格的指标中分别占19个和15个。

根据结果验证最优解对应的评价指标是否与目标函数相对应,例如下板城站,当NSE作为目标函

数时率定期和验证期5项评价指标达到最优,而 R_m^2 为0项,说明下板城站以NSE作为目标函数比其他3种更优。但在李营站 R_m^2 具有更好的表现,承德、韩家营、三道河子站和潘家口水库表现最好的目标函数则为KGE。说明不同流域的水文特征差异性会使得目标函数表现有所不同,最佳目标函数的选取具有空间差异性。但总体来说,NSE和KGE的性能更加稳健。当选取的评价指标与目标函数相同时,除承德站率定期的PBIAS、承德和三道河子站验证期的 R_m^2 、三道河子站验证期的NSE外,其余模拟结果在率定期和验证期均能得到满意的结果。

为进一步分析不同目标函数的影响,以适用NSE的下板城站、适用 R_m^2 的李营站、适用KGE的潘家口水库为例对径流模拟结果进行分析。根据Abbaspour等^[26]研究,当 p 因子 ≥ 0.7 , r 因子 ≤ 1.5 时,模拟95%预测不确定性区间(95PPU)中的最优率定结果是可以接受的(p 因子为95PPU包含的观测数据占总体观测数据的比例; r 因子为95PPU上下限平均距离与模拟变量观测值标准偏差的比值)。因此,各站点均得到了较优的模拟结果,其中下板城站率定期效果优于验证期,李营站的验证期效果优于率定期,潘家口的率定期和验证期效果相近,图5为潘家口水库径流模拟结果。

对比潘家口水库模拟与实测径流发现,NSE和KGE下的模拟径流与实测径流吻合程度最高,基本能够模拟出所有的洪峰,且KGE对于大流量的模拟精度更高,这也是KGE在流量较大的承德站、韩家营站、三道河子站和潘家口水库表现更好的原因。 R_m^2 的表现则不稳定,虽然在李营站整体表现较好,但在下板城站中对径流严重低估。相应的PBIAS评价指标接近50%,也可以体现径流的低估,在潘家口水库的径流模拟中对峰值普遍高估。另外,PBIAS作为目标函数时模拟与实测径流过程变化趋势的一致程度最低,虽然整体相对偏差较小,但是低估和高估同时存在,很难反映真实的径流过程。

3.2 参数率定的不确定性

表3为下板城水文站不同目标函数下的参数率定结果,表4为部分站点NSE目标函数下参数率定结果。由表3、表4可见,无论是不同目标函数还是不同站点,参数率定的最优值均存在差异,前者是由目标函数带来的不确定性,后者则是SWAT模型对于空间特异性的表现。另外,在SUFI-2算法中,参数总是以分布形式表示,随着迭代的进行分布区间不断收窄,最终得到的参数范围大小代表了参数率定的不确定性。对比不同目标函数下参数率定的不

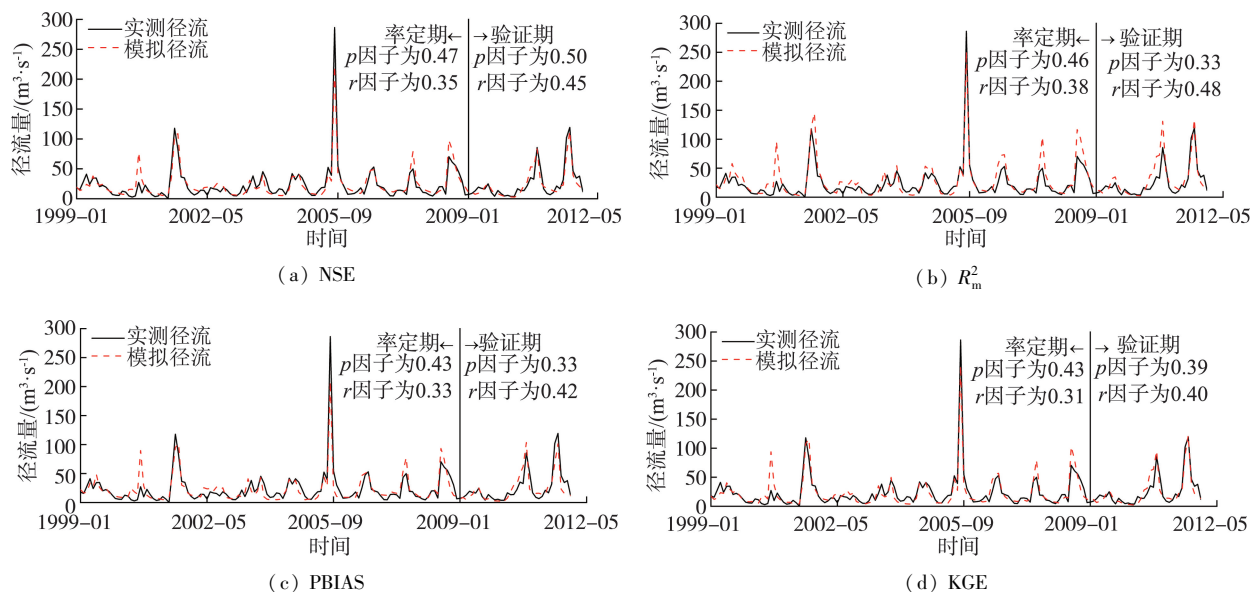


图 5 潘家口水库径流模拟结果

Fig. 5 Monthly runoff simulation results at Panjiakou Reservoir Station

表 3 下板城站不同目标函数下参数率定结果

Table 3 Parameter calibration results under different objective functions at Xiabancheng Station

参数	NSE	R_m^2	PBIAS	KGE
CN2	-0.22	-0.14	0.02	-0.05
GW_DELAY	376.92	118.73	218.48	222.31
GWQMN	1734.19	1908.47	2463.97	1631.45
RCHRG_DP	0.21	0.18	0.34	0.25
ESCO	0.64	0.83	0.94	0.45
HRU_SLP	-0.11	-0.05	0.34	-0.30
SLSUBBSN	-0.10	0.45	0.22	0.40
CANMX_AGRL	64.69	55.78	67.75	94.18
CANMX_PAST	50.27	54.39	94.05	39.00
CANMX_FRST	64.37	5.11	55.33	1.57
EPCO	0.46	0.25	0.63	0.69
CH_K2	90.43	350.46	277.61	161.18
ALPHA_BNK	0.24	0.87	0.24	0.77
SOL_AWC	-0.38	0.34	0.06	-0.14
SOL_K	-0.74	-0.36	0.56	0.03
SOL_BD	0.17	-0.27	-0.24	-0.28
SOL_Z	-0.42	-0.02	-0.21	-0.39
CH_K1	5.44	45.00	189.94	173.71

表 4 部分站点 NSE 目标函数下参数率定结果

Table 4 Parameter calibration results under NSE objective function of each site

参数	下板城	李营	承德	韩家营	三道河子	潘家口水库
CN2	-0.22	0.22	0.06	-0.34	-0.49	-0.01
GW_DELAY	376.92	1.64	20.20	182.93	397.25	12.79
GWQMN	1734.19	4089.79	716.55	1157.85	3582.31	4664.43
RCHRG_DP	0.21	0.99	0.79	0.10	0.11	0.35
ESCO	0.64	0.31	0.63	0.99	0.85	0.70
HRU_SLP	-0.11	0.12	-0.41	0.19	0.29	-0.25
SLSUBBSN	-0.10	0.45	-0.20	0.17	0.49	0.28
CANMX_AGRL	64.69	69.26	2.55	1.92	31.82	6.08
CANMX_PAST	50.27	83.81	3.49	24.77	0.85	72.21
CANMX_FRST	64.37	1.89	71.97	28.83	76.01	20.41
EPCO	0.46	0.63	0.36	0.10	0.65	0.31
CH_K2	90.43	335.24	244.81	320.23	71.65	175.28
ALPHA_BNK	0.24	0.35	0.61	0.68	0.57	0.93
SOL_AWC	-0.38	-0.49	0.08	0.34	-0.39	0.00
SOL_K	-0.74	-0.62	-0.02	-0.42	0.41	-0.43
SOL_BD	0.17	-0.03	-0.29	-0.03	-0.37	-0.49
SOL_Z	-0.42	0.23	-0.25	-0.19	-0.41	-0.04
CH_K1	5.44	28.09	4.74	120.18	84.22	0.47

确定性区间及最优值,不同目标函数获得的参数范围和最优值显著不同。以下板城站为例, R_m^2 作为目标函数时模型率定结果较差,其余 3 个目标函数均得到较好的效果,这说明了参数的不确定性,率定结果与选定的目标函数密切相关。

3.3 径流模拟的不确定性

分析各子流域径流模拟结果的不确定性评价指标,并对若干次迭代过程中抽样参数组模拟结果达到合格标准的组数进行统计,结果见表 5。对比模拟结果的 p 因子和 r 因子,发现在径流不确定性模

拟方面同样是 NSE 最优,其次是 KGE,表现为在区间宽度大致相等或更小的情况下将更多的实测径流数据包含在 95PPU 内。除潘家口水库外,其余各站点的 p 因子大多数在 0.7 左右,少数在 0.5 左右; r 因子整体在 1 左右,不确定度整体比较合理。其中,潘家口水库作为流域最下游控制断面,上游大部分子流域经过率定,剩余区域的径流占比较小,因此这部分参数调整对径流的影响不明显,模拟不确定性较低。

表 5 各水文站径流模拟不确定性区间及抽样达标组数

Table 5 Uncertainty interval of runoff simulation at each station and number of sampling groups

站点	目标函数	率定期			验证期		
		p 因子	r 因子	达标组数/总组数	p 因子	r 因子	达标组数/总组数
下板城	NSE	0.86	1.44	2310/4500	0.94	2.34	403/500
	R_m^2	0.43	0.48	3 261/4 500	0.28	0.63	120/500
	PBIAS	0.63	0.80	1 835/4 500	0.56	1.13	282/500
	KGE	0.68	0.69	2 396/4 500	0.78	1.06	484/500
李 营	NSE	0.99	1.05	2 908/4 500	0.97	0.84	500/500
	R_m^2	0.98	1.09	2 722/4 500	1.00	0.89	492/500
	PBIAS	0.87	1.07	1 915/4 500	0.92	0.87	311/500
	KGE	0.98	1.00	2 251/4 500	1.00	0.85	437/500
承 德	NSE	0.71	0.96	1 239/4 500	0.75	0.84	0/500
	R_m^2	0.69	1.95	1 044/4 500	0.86	1.49	0/500
	PBIAS	0.62	0.74	2 008/4 500	0.69	0.62	66/500
	KGE	0.68	1.03	1 607/4 500	0.72	0.87	249/500
韩家营	NSE	0.65	1.02	501/5 000	0.81	0.96	77/500
	R_m^2	0.40	0.59	1 820/5 000	0.33	0.54	452/500
	PBIAS	0.51	0.79	2 525/5 000	0.47	0.61	241/500
	KGE	0.50	0.99	2 456/5 000	0.53	0.85	490/500
三道河子	NSE	0.86	1.86	753/5 000	0.72	1.32	0/500
	R_m^2	0.65	1.64	2 520/5 000	0.53	1.47	0/500
	PBIAS	0.64	1.67	2 518/5 000	0.50	1.33	389/500
	KGE	0.76	1.43	2 394/5 000	0.61	1.05	362/500
潘家口水库	NSE	0.47	0.35	3 924/4 500	0.50	0.45	500/500
	R_m^2	0.46	0.38	3 894/4 500	0.33	0.48	500/500
	PBIAS	0.43	0.33	3 546/4 500	0.33	0.42	500/500
	KGE	0.43	0.31	3 881/4 500	0.39	0.40	489/500

4 讨 论

传统的水文模拟单目标参数优化常常存在不同的参数集得到相近的结果(异参同效)等问题,并且不同目标函数下的参数优化结果也具有较大差异,因此其最优化结果往往不能真实地反映流域的水文过程。本研究区地处半湿润、半干旱大陆性季风气候区,水文过程和产流机制复杂,Li 等^[27]建立了基于敏感参数组合(SPCs)的参数优化系统,得出滦河流域相对敏感的参数包括 CN2、SOL_K、SOL_Z、ALPHA_BNK、SLSUBBSN 以及 ESCO。本研究利用多目标函数下参数敏感性分析得出 CN2、SOL_AWC、SOL_K、SOL_Z 以及 RCHRG_DP 在整个流域对所有目标函数始终相对敏感,而 ALPHA_BNK、SLSUBBSN、ESCO 对目标函数敏感性存在较大差异。ALPHA_BNK、SLSUBBSN 也存在较大的空间差异性,ESCO 则需要经过多次迭代才能体现较高的敏感性。这些研究结果也进一步证明了 Ficklin 等^[28]所提到的模型参数不确定性会导致水文模拟结果的显著差异。另外,最优目标函数在流域内也存在空间差异性,相对稳健的 NSE 在汛期流量大的站点模拟效果不如 KGE,这与 Thavhana 等^[29]的 NSE 模拟值相对较低的研究结果一致。SWAT 模型

运行时所需大量参数进一步展示了不确定性分析的重要性^[30],SUFI-2 算法在建模过程中对不确定性分析较为全面,本研究在此基础上进行不同目标函数下的水文模拟研究,对于水文现象较为复杂地区的径流模拟分析具有一定的指导意义。

本研究中并没有考虑模型输入数据带来的不确定性,对于 SWAT 建模所需的降水数据、数字高程、土地利用等都有不同来源和不同精度的产品,这些输入数据对径流模拟不确定性的影响有待进一步研究,并且关于日尺度与月尺度径流模拟的结果差异也需继续分析。另外,本研究结果对其他气候类型,尤其是干旱地区的适用性尚未经过检验,即使在多目标函数优化的情况下,许多流域仍然存在模型性能问题,值得深入研究。

5 结 论

a. 因参数间具有复杂相关性以及有限次抽样具有局限性,随着迭代次数的增加以及给定抽样范围的变化,参数敏感性也会随之改变;基于单次迭代的敏感性分析可能遗漏部分敏感参数,不同流域间的参数敏感性存在明显差异。

b. 在进行参数敏感性分析时,目标函数 NSE 和 R_m^2 在单次迭代下无法有效识别出所有的敏感参

数,PBIAS 和 KGE 通过单次迭代识别到的敏感性参数基本可以作为模型率定的参数集。其中最敏感的参数为地表径流参数 CN2、地下水相关参数 RCHRG_DP 以及土壤水相关参数 SOL_AWC、SOL_K、SOL_Z。敏感性较低的参数为 CH_N1、CH_N2、GW_REVAP、REVAPPM 和 ALPHA_BF 等,可不进行参数率定。

c. 不同目标函数的选择会影响径流模拟精度,且最优目标函数的选取具有空间差异性。NSE 和 KGE 的表现更稳健,KGE 对于汛期流量大的站点模拟效果更好, R_m^2 在不同流域间的表现不稳定,PBIAS 作为目标函数时会降低其他评价指标值。

d. 除潘家口水库外,下板城、李营、承德、韩家营、三道河子水文站径流模拟不确定性区间的 p 因子大多数在 0.7 左右,少数在 0.5 左右, r 因子整体在 1 左右。除三道河子和承德站外,其他站点均在有限次的迭代中获得了较多的达标参数组,尤其是 NSE 作为目标函数时,搜索到的可行参数组合更多。

参考文献:

- [1] SONG Xiaoming, ZHAN Chesheng, KONG Fanzhe, et al. Advances in the study of uncertainty quantification of large-scale hydrological modeling system [J]. Journal of Geographical Sciences, 2011, 21 (5) : 801-819.
- [2] ZHANG Junlong, LI Yongping, HUANG Guohe, et al. Assessment of parameter uncertainty in hydrological model using a Markov-Chain-Monte-Carlo-based multilevel-factorial-analysis method [J]. Journal of Hydrology, 2016, 538 : 471-486.
- [3] HONG Y, HSU K, MORADKHANI H, et al. Uncertainty quantification of satellite precipitation estimation and Monte Carlo assessment of the error propagation into hydrologic response [J]. Water Resources Research, 2006, 42 (8) : 421.
- [4] 瞿思敏,杨庆一,郑何声园,等. 系统微分响应参数率定方法在 SWAT 模型中的应用 [J]. 水资源保护, 2023, 39 (2) : 118-124. (QU Simin, YANG Qingyi, ZHENG Heshengyuan, et al. Application of system differential response parameter calibration method in SWAT model [J]. Water Resources Protection. 2023, 39 (2) 118-124. (in Chinese))
- [5] 刘永伟,王文,刘元波,等. 水文模型模拟预报的多源数据同化方法及应用研究进展 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2021, 49 (6) : 483-491. (LIU Yongwei, WANG Wen, LIU Yuanbo, et al. Advances in multi-source data assimilation approach and application in simulation and forecast of hydrological model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49 (6) : 483-491. (in Chinese))
- [6] 李紫妍,刘登峰,黄强,等. 定量评估参数不确定性传递对径流模拟的影响 [J]. 水力发电学报, 2019, 38 (3) : 53-64. (LI Ziyen, LIU Dengfeng, HUANG Qiang, et al. Quantitative

- assessment on influence of parameter uncertainties on runoff simulations [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, 38 (3) : 53-64. (in Chinese))
- [7] 曾家俊,麦叶鹏,李志威,等. 广州天河智慧城 SWMM 参数敏感性分析 [J]. 水资源保护, 2020, 36 (3) : 15-21. (ZENG Jiajun, MAI Yepeng, LI Zhiwei, et al. Sensitivity analysis of SWMM parameters in Guangzhou Tianhe wisdom city [J]. Water Resources Protection, 2020, 36 (3) : 15-21. (in Chinese))
- [8] SOROOSHIAN S. Parameter estimation of rainfall-runoff models with heteroscedastic streamflow errors: the noninformative data case [J]. Journal of Hydrology, 1981, 52 (1/2) : 127-138.
- [9] WANG Q J. The genetic algorithm and its application to calibrating conceptual rainfall; runoff models [J]. Water Resources Research, 1991, 27 (9) : 2467-2471.
- [10] QI Wei, ZHANG Chi, FU Guangtao, et al. Impact of robustness of hydrological model parameters on flood prediction uncertainty [J]. Journal of Flood Risk Management, 2019, 12 (Sup1) : e12488.
- [11] ABOU-RAFEE S A, UVO C B, MARTINS J A, et al. Large-scale hydrological modelling of the upper Parana River Basin [J]. Water, 2019, 11 (5) : 882.
- [12] 贺新月,曾献奎,王栋. 融合 AR 模型和 MCMC 方法的水文模拟不确定性分析 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2020, 48 (2) : 116-122. (HE Xinyue, ZENG Xiankui, WANG Dong. Uncertainty analysis of hydrological simulation with auto regressive model and MCMC method [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48 (2) : 116-122. (in Chinese))
- [13] RAJIB M A, MERWADE V, YU Zhiqiang. Multi-objective calibration of a hydrologic model using spatially distributed remotely sensed/in-situ soil moisture [J]. Journal of Hydrology, 2016, 536 : 192-207.
- [14] REN Peizhen, LI Jianzhu, FENG Ping, et al. Evaluation of multiple satellite precipitation products and their use in hydrological modelling over the Luanhe River Basin, China [J]. Water, 2018, 10 (6) : 677.
- [15] 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 Bowei, LI Jianzhu, FENG Ping. Impacts of land use change on runoff in Panjiakou Reservoir watershed [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49 (3) : 379-386. (in Chinese))
- [16] 庞靖鹏,徐宗学,刘昌明. SWAT 模型中天气发生器与数据库构建及其验证 [J]. 水文, 2007 (5) : 28-33. (PANG Jingpeng, XU Zongxue, LIU Changming. Weather generator and database in the SWAT model [J]. Journal of China Hydrology, 2007 (5) : 28-33. (in Chinese))

(下转第 69 页)

- [28] 裴源生,蒋桂芹,翟家齐. 干旱演变驱动机制理论框架及其关键问题[J]. 水科学进展,2013,24(3):449-456. (PEI Yuansheng, JIANG Guiqin, ZHAI Jiaqi. Theoretical framework of drought evolution driving mechanism and the key problems[J]. Advances in Water Science,2013,24(3):449-456. (in Chinese))
- [29] VAN LOONA F, VAN LANEN H A J. A process-based typology of hydrological drought[J]. Hydrology and Earth System Sciences Discussions,2012,16(7):1915-1946.
- [30] LIU Y, ZHU Y, REN L, et al. Understanding the spatiotemporal links between meteorological and hydrological droughts from a three-dimensional perspective [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2019,124(6):3090-3109.
- [31] 吴杰峰,陈兴伟,高路. 水文干旱对气象干旱的响应及其临界条件[J]. 灾害学,2017,32(1):199-204. (WU Jiefeng, CHEN Xingwei, GAO Lu. Response of hydrological drought to meteorological drought and its critical conditions[J]. Journal of Catastrophology,2017,32(1):199-204. (in Chinese))
- [32] WONG G, VAN LANEN H A J, TORFS P J J F. Probabilistic analysis of hydrological drought characteristics using meteorological drought [J]. Hydrological Sciences Journal,2013,58(2):253-270.

(收稿日期:2022-02-16 编辑:王芳)

(上接第 24 页)

- [17] 许心怡. 多源数据下径流模拟的不确定性问题研究 [D]. 天津:天津大学,2021.
- [18] MULETA M K. Model performance sensitivity to objective function during automated calibrations [J]. Journal of Hydrologic Engineering,2012,17(6):756-767.
- [19] WU Hongjing, CHEN Bing. Evaluating uncertainty estimates in distributed hydrological modeling for the Wenjing River watershed in China by GLUE,SUFI-2,and Para Sol methods [J]. Ecological Engineering,2015,76:110-121.
- [20] ABBASPOUR K C, YANG J, MAXIMOV I, et al. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT [J]. Journal of Hydrology,2007,333(2):413-430.
- [21] 杨祎. SWAT 模型径流模拟的不确定性研究 [D]. 杭州:浙江大学,2014.
- [22] ABBASPOUR K C. SWAT-CUP 2012; SWAT calibration and uncertainty programs;a user manual [R]. Bern:Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology,2014.
- [23] 王京晶,徐宗学,赵刚,等. 基流分割对城市雨洪模拟不确定性分析的影响 [J]. 水资源保护,2022,38(5):65-71. (WANG Jingjing, XU Zongxue, ZHAO Gang, et al. Impact of baseflow separation on uncertainty analysis of urban storm water simulation [J]. Water Resources Protection,2022,38(5):65-71. (in Chinese))
- [24] 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.
- [25] 付军,冯平. 降水丰枯及下垫面变化对滦河干流径流量的影响 [J]. 水力发电学报,2015,34(9):10-19. (FU Jun,FENG Ping. Influence of high and low precipitations and underlying surface changes on runoff in the Luan River mainstream [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2015,34(9):10-19. (in chinese))
- [26] 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.
- [27] LI Mei,DI Zhenhua,DUAN Qingyun. Effect of sensitivity analysis on parameter optimization; case study based on streamflow simulations using the SWAT model in China [J]. Journal of Hydrology,2021,603:126896.
- [28] FICKLIN D L,BARNHART B L. SWAT hydrologic model parameter uncertainty and its implications for hydroclimatic projections in snowmelt-dependent watersheds [J]. Journal of Hydrology, 2014, 519: 2081-2090.
- [29] THAVHANA M P,SAVAGE M J,MOELETSI M E. SWAT model uncertainty analysis, calibration and validation for runoff simulation in the Luvuvhu River catchment, South Africa[J]. Physics and Chemistry of the Earth,2018,105:115-124.
- [30] RAFIEI EMAM A,KAPPAS M,HOANG KHANH LINH N,et al. Hydrological modeling in an ungauged basin of central Vietnam using SWAT model [J]. Hydrology and Earth System Sciences Discussions,2016,1:1-33.

(收稿日期:2022-01-05 编辑:王芳)