

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2024.01.003

代理模型参数率定方法在 TOPKAPI 模型中的应用

汤 岭¹, 王海军², 李致家¹, 黄迎春¹, 盛奕华¹

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 山东省水文中心, 山东 济南 250013)

摘要: 为提高复杂水文模型参数优化效率, 通过 Morris 参数敏感性分析确定敏感参数, 随后将多目标自适应代理模型优化(MO-ASMO)算法应用在 TOPKAPI 模型的参数率定中, 通过最小欧几里得距离筛选 Pareto 解集中的相对最优解, 从解集分布和每场洪水模拟效果两个维度与传统多目标优化方法 NSGA-II、NSGA-III 进行比较。结果表明: 在相同模型运行次数下, MO-ASMO 相较于 NSGA-II 和 NSGA-III 具有更优的 Pareto 前沿; 无论是率定期还是验证期, MO-ASMO 算法的评价指标均表现较好, 综合表现优于 NSGA-II、NSGA-III 算法, MO-ASMO 算法有效提升了模型参数优化效率。

关键词: TOPKAPI 模型; 代理模型; 多目标算法; NSGA-II; NSGA-III; 洪水预报; 临沂流域

中图分类号: P338

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2024)01-0021-08

Application of surrogate modeling parameter calibration method in TOPKAPI model

TANG Ling¹, WANG Haijun², LI Zhijia¹, HUANG Yingchun¹, SHENG Yihua¹

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Hydrology Center of Shandong Province, Jinan 250013, China)

Abstract: In order to improve the efficiency of parameter optimization for complex hydrological models, sensitive parameters are determined through the Morris parameter sensitivity analysis. Subsequently, the multi-objective adaptive surrogate model optimization (MO-ASMO) algorithm is applied in the parameter calibration of the TOPKAPI model. The relative optimal solutions in the Pareto solution set are then selected based on the minimum Euclidean distance. The performance of MO-ASMO is compared with traditional multi-objective optimization methods, such as NSGA-II and NSGA-III, from two dimensions in terms of solution set distribution and simulation effectiveness of each flood event. The results indicate that, under the same number of model runs, MO-ASMO has a superior Pareto front compared to NSGA-II and NSGA-III. Both in the calibration and validation periods, the evaluation indicators of the MO-ASMO algorithm show better performance, overall surpassing the NSGA-II and NSGA-III algorithms, and as a result, the MO-ASMO algorithm effectively improves the efficiency of model parameter optimization.

Key words: TOPKAPI model; surrogate model; multi-objective algorithm; NSGA-II; NSGA-III; flood forecast; Linyi Basin

随着计算机技术的发展, 水文模型发展迅速, 从单一模型不断优化改进为综合模型^[1-3], 再到如今广泛使用的基于物理基础的分布式水文模型^[4-7]。分布式水文模型大多以 DEM 网格为计算单位, 参数均具有明确的物理意义, 每个网格代表的实际下垫面情况均可以通过参数反映^[8], 水流运动一般通过连续方程和动力方程求解, 能较全面地描述水文过程。但由于其计算量大、参数数量多^[9-10], 模型需要较长时间的模拟, 且相比单目标优化^[11-13], 多目标优化更是需要长时间运行模型才能找到全局最优解。因此, 分布式水文模型参数优化的时效问题成为了热点和难点问题^[14-16], 制约了模型的实用性。

基于代理建模的优化方法是一种减少参数优化计算量的有效方法, 已广泛应用于水文建模和水资源管理中^[17]。近年来, 出现了许多基于代理建模的多目标优化方法, 其中一些是基于经典的多目标非支配排序, 使用廉价代理模型替代昂贵的动态模型。例如: Syberfeldt 等^[18]提出了多目标并行代理辅助进化算法(multi

基金项目: 国家自然科学基金项目(52079035)

作者简介: 汤岭(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事水文预报与水文模型研究。E-mail: 934275011@qq.com

通信作者: 李致家(1962—), 男, 教授, 博士, 主要从事水文预报与水文模型研究。E-mail: zhijia-li@vip.sina.com

引用本文: 汤岭, 王海军, 李致家, 等. 代理模型参数率定方法在 TOPKAPI 模型中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(1): 21-28.

TANG Ling, WANG Haijun, LI Zhijia, et al. Application of surrogate modeling parameter calibration method in TOPKAPI model[J].

Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2024, 52(1): 21-28.

-objective parallel substitute-assisted evolution algorithm, MOPSA-EA),该算法使用一个 ANN 作为代理,考虑了代理计算的不确定性和并行性;宋晓猛等^[19]使用响应曲面对新安江模型进行参数优化,认为代理模型可有效降低计算效率且稳定性较好;Kourakos 等^[20]开发了一种基于模块化神经网络代理的多目标优化算法 MOSA (multi-objective surrogate assisted algorithm),在希腊圣托里尼的含水层管理中应用效果很好。

为解决复杂水文模型参数优化的时效问题,本文以沂河下游临沂水文站以上流域(临沂流域)为研究区进行洪水模拟,将多目标自适应代理模型优化(multi-objective adaptive surrogate modeling-based optimization, MO-ASMO)算法应用在 TOPKAPI(topographic kinematic approximation and integration)模型的参数率定中,并与传统多目标优化算法 NSGA-II(non-dominated sorting genetic algorithm II)、NSGA-III 进行比较,以期提高 TOPKAPI 模型在湿润半湿润地区的模拟精度。

1 研究方法

1.1 TOPKAPI 模型

TOPKAPI 模型由 Todini^[21] 基于运动学和流域地形学结合的理念构建,该模型将研究区域细分为多个网格,并假设当前计算网格只与下游唯一的网格相连接,通过网格之间的高程差计算径流路线。空间上采用非线性运动波方程模拟水流运动,以 3 个结构上相似的非线性水库方程分别描述土壤、地表和河道中的水流运动规律,从而得到整个流域的水文过程。

1.2 NSGA-II、NSGA-III

NSGA-II 是 Deb 等^[22] 于 2002 年提出的多目标优化算法,由 NSGA 改进而来,降低了计算复杂度,并能保持种群的多样性;引入了精英策略,扩大了采样空间,防止最佳个体的丢失。具体流程如图 1 所示。

NSGA-II 在求解目标维数较低的问题时较为有效,但面对三维及以上的高维目标优化问题效果不理想^[23]。NSGA-III 的整体流程与 NSGA-II 一致,皆通过交叉变异和非支配排序得到 Pareto 前沿,两者的区别在保持种群多样性方面,NSGA-II 是利用拥挤度比较操作,NSGA-III 则通过参考点机制。NSGA-III 具体流程如图 2 所示。

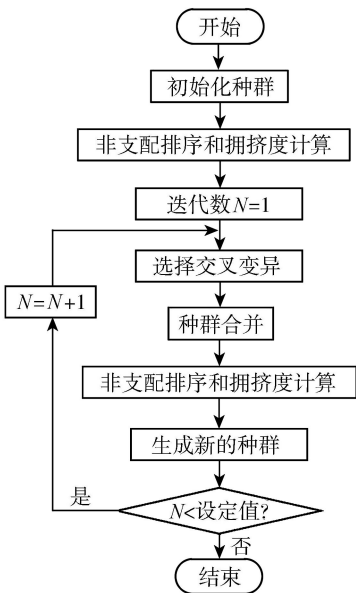


图 1 NSGA-II 流程
Fig. 1 Flow chart of NSGA-II

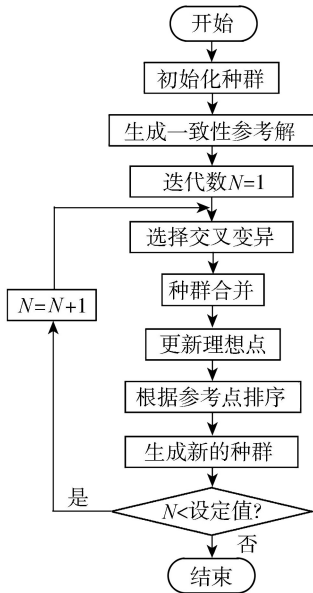


图 2 NSGA-III 流程
Fig. 2 Flow chart of NSGA-III

1.3 MO-ASMO 算法

MO-ASMO 算法可以满足复杂的基于物理基础的分布式水文模型的参数优化^[24],主要有 3 个步骤:
a. 选择最合适的初始采样和代理建模算法。用好格子点法^[25]作为初始采样方法,高斯回归(GPR)^[26]作为代理建模算法。GPR 是一种具有多种协方差函数的灵活回归方法,可以适应不同的插值和回归任务。此外,超参数值还可以控制 GPR 的行为。例如,如果噪声项设置为 0,则 GPR 可视为多维插值方法。如果特

征长度较大,则 GPR 是平滑的,如果较小,则 GPR 对输出的微小变化很敏感。为了选择合适的超参数值,使用 SCE-UA 算法最大化边缘似然函数。

b. 使用最具代表性的 Pareto 子集进行模拟。这种自适应抽样策略可以简单而有效地平衡收敛性和多样性。

c. 通过设置 MO-ASMO 算法参数调整模型运行终止条件,本文设置算法参数为运行迭代次数。

MO-ASMO 算法具体流程如下:①采用 GLP 抽样生成初始待率定参数矩阵,放入 TOPKAPI 模型生成模拟流量过程线并计算目标函数矩阵。②将参数矩阵和目标函数矩阵输入 GPR 代理模型,得到相关关系。③原 MO-ASMO 算法用 NSGA-Ⅱ 对代理模型进行多目标优化,本文考虑到有 3 个目标函数,将其改进使用 NSGA-Ⅲ 对代理模型优化得到 Pareto 解集,取 20% 的 Pareto 最优解放入 TOPKAPI 模型运行并生成目标函数矩阵。④利用新生成参数矩阵和目标函数矩阵更新训练数据,再次构建代理模型,在满足回归迭代次数条件前,重复步骤②~④。⑤输出最终 Pareto 前沿对应的参数样本和目标函数值。

1.4 Morris 法

Morris 法是 Morris^[27] 于 1991 年提出的一种全局敏感性分析法,通过独立随机的“一次变化法”抽样,再评价每个参数值的改变对目标函数的影响,从而可以定性分析出敏感参数。

2 实例应用

2.1 研究区概况

临沂流域面积为 10 316 km²,呈扇形,属温带大陆性季风气候。该流域雨量分布时空不均,夏秋多,冬春少,年降水量约 800 mm;最高气温 36.5℃,最低气温-11℃,全年平均气温 14.1℃,沂河上兴建了大量的水利拦河工程,有跋山水库、唐村水库、岸堤水库、许家崖水库 4 个大型水库,4 个水库控制区域产生的径流作为入流处理。

2.2 基础数据及预处理

TOPKAPI 模型需要输入的数据包括 DEM、土壤类型、气象数据等。本文 DEM (图 3) 来自地理空间数据云 SRTM 数据,分辨率为 1 km;土壤类型数据(图 4(a))来自世界土壤数据库,分辨率为 1 km;土地利用数据(图 4(b))来自中国科学院资源环境科学数据中心,采用中国土地利用现状遥感监测数据库数据集,分辨率为 1 km;通过 Strahler 方法(图 4(c))对河道分级;气温数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>),采用中国地面气候资料日值数据集(V3.0);降水量、实测流量和实测入流等数据由淮河水文局提供,时间跨

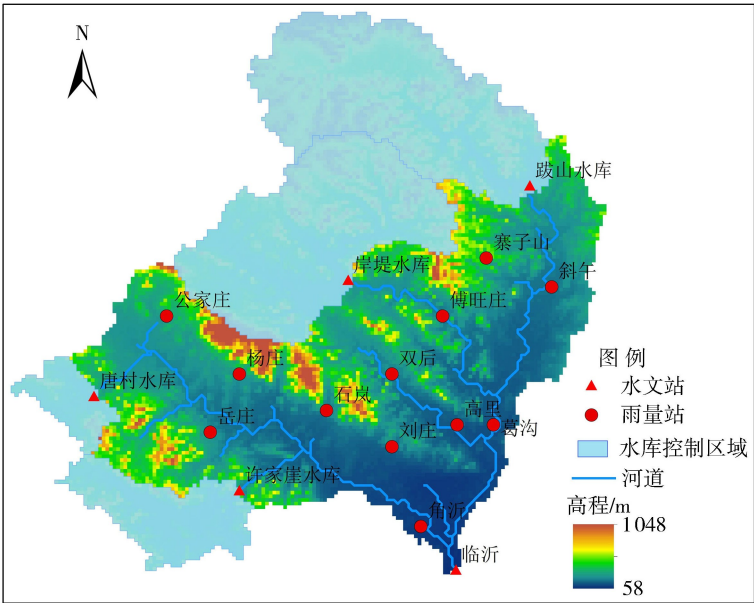


图 3 临沂流域 DEM

Fig.3 DEM of Linyi Basin

度为 2011—2021 年,时段间隔为 2 h。

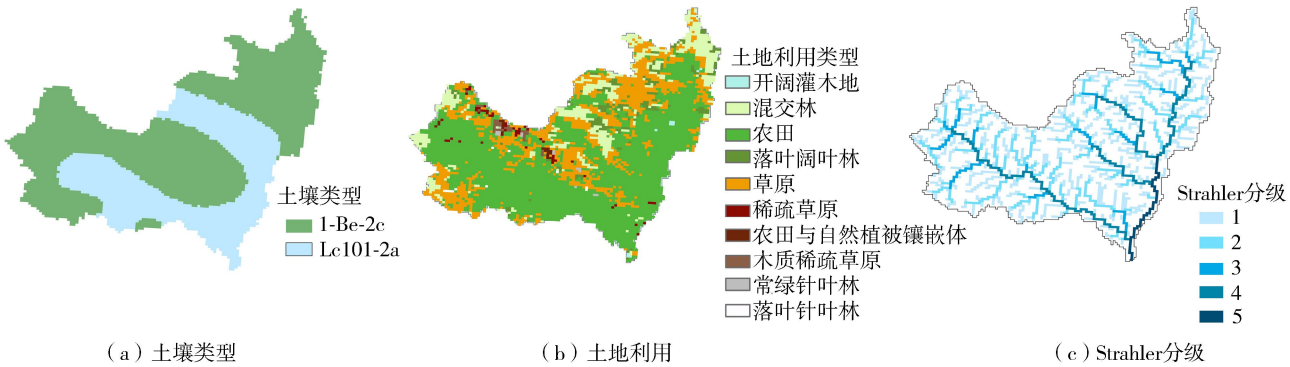


图 4 临沂流域土壤类型、土地利用分布和 Strahler 分级

Fig.4 Soil type, land use distribution and Strahler grading chart in the Linyi Basin

2.3 评价指标

在半湿润半干旱的淮河流域,洪水过程常常历时短、涨水退水过程迅速,因此选择洪峰流量、峰现时间和纳什效率系数为主要评价指标。

洪峰流量误差 RE_p 表示单场洪水过程实测洪峰与模拟洪峰的相对误差绝对值,越小表明预报洪峰流量偏离实测洪峰流量的幅度越小。峰现时间误差 TE_p 表示单场洪水过程模拟的峰现时间与实测峰现时间的绝对误差;纳什效率系数 NSE 表示单场洪水过程模拟系列与实测系列之间拟合程度,越接近 1,表明模拟系列与实测系列整体拟合越好。设 MRE_p 、 MTE_p 、 $MNSE$ 分别为多场洪水的平均洪峰流量误差、峰现时间误差和纳什效率系数。

2.4 Morris 法分析结果

TOPKAPI 模型参数众多^[28],优化不敏感参数会降低率定效率。因此本文采用 Morris 法对 23 个 TOPKAPI 模型参数抽样 100 次,对得到的 2 300 组样本进行敏感性分析,选取率定期 10 场洪水的各参数敏感性平均值作为该参数的整体敏感性,敏感性分析结果见表 1。

表 1 敏感性分析结果

Table 1 Sensitivity analysis results

参数类型	参数名称	符号	MNSE		MTE _p		MRE _p	
			σ	μ	σ	μ	σ	μ
土壤厚度	1-Be-2c	L1	2.06	4.75	6.14	5.78	0.55	0.74
	Lc101-2a	L2	1.71	2.20	3.73	3.27	0.29	0.37
纵向饱和水力传导度	1-Be-2c	k _{sv1}	0.17	0.24	0.57	0.30	0.02	0.03
	Lc101-2a	k _{sv2}	0.05	0.08	0.08	0.08	0.01	0.01
横向饱和水力传导度	1-Be-2c	k _{sh1}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Lc101-2a	k _{sh2}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
河道曼宁系数	一级河道	n _{c1}	0.02	0.02	0.28	0.22	0.00	0.00
	二级河道	n _{c2}	0.05	0.04	0.95	0.58	0.01	0.01
	三级河道	n _{c3}	0.07	0.05	0.32	0.36	0.01	0.02
	四级河道	n _{c4}	0.70	0.56	2.91	3.48	0.18	0.22
	五级河道	n _{c5}	0.43	0.30	1.64	2.62	0.09	0.10
地表曼宁系数	开阔灌木地	n _{o1}	0.00	0.00	0.06	0.02	0.00	0.00
	混交林	n _{o2}	0.05	0.06	0.30	0.17	0.01	0.01
	农田	n _{o3}	0.18	0.13	0.62	0.90	0.03	0.04
	落叶阔叶林	n _{o4}	0.01	0.01	0.10	0.06	0.00	0.00
	草原	n _{o5}	0.06	0.05	0.18	0.21	0.01	0.02
	稀疏草原	n _{o6}	0.00	0.00	0.06	0.01	0.00	0.00
	农田与自然植被镶嵌体	n _{o7}	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
	木质稀疏草原	n _{o8}	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00
	常绿针叶林	n _{o9}	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
	落叶针叶林	n _{o10}	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00

注:σ、μ 分别为参数敏感性指数均值和方差,值越大表明参数敏感性越强。

可以看到影响 3 个目标函数的敏感参数具有高度相似性,土壤厚度为最敏感的一类参数,其次为汇流参数中的河道曼宁系数,主要是四级和五级河道的曼宁系数影响较大,土壤横、纵向水力传导度对目标函数也有一定的影响,地表曼宁系数中存在部分类别对峰现时间误差有一定的影响。综合上述结果,选取影响最大的 12 个参数进行参数率定,分别为 L1、L2、ksv1、ksv2、n_c1、n_c2、n_c3、n_c4、n_c5、n_o2、n_o3、n_o5。

2.5 参数率定结果

从临沂流域 2011—2021 年资料中选取 15 场洪水进行模拟分析,其中前 10 场洪水为率定期,后 5 场为验证期。考虑到计算机的运行效率,3 种多目标优化方法均驱动原始模型(TOPKAPI 模型)5 400 次,不同参数优化方法得到 Pareto 前沿如图 5 所示。

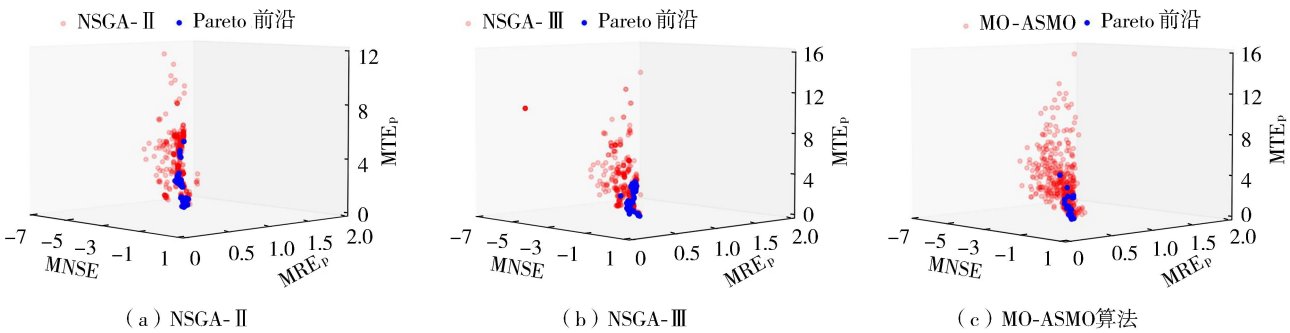


图 5 NSGA-II、NSGA-III 和 MO-ASMO 算法的 Pareto 前沿
Fig. 5 Pareto frontiers of NSGA-II, NSGA-III and MO-ASMO

由图 5~7 和表 2 知,验证期 MNSE 效果普遍比率定期好,原因可能是率定期的 10 场洪水中出现个别模拟较差的场次,从而拉低了率定期的 MNSE,验证期 MRE_p 与 MTE_p 比率定期稍差。验证期 MO-ASMO 算法和 NSGA-III 表现各有优劣,MTE_p 评价指标方面,NSGA-III 得到更好更集中的 Pareto 前沿,而 MNSE 和 MRE_p 方面,MO-ASMO 算法表现更好。综合来看,在 TOPKAPI 模型中,MO-ASMO 算法比 NSGA-II 和 NSGA-III 能

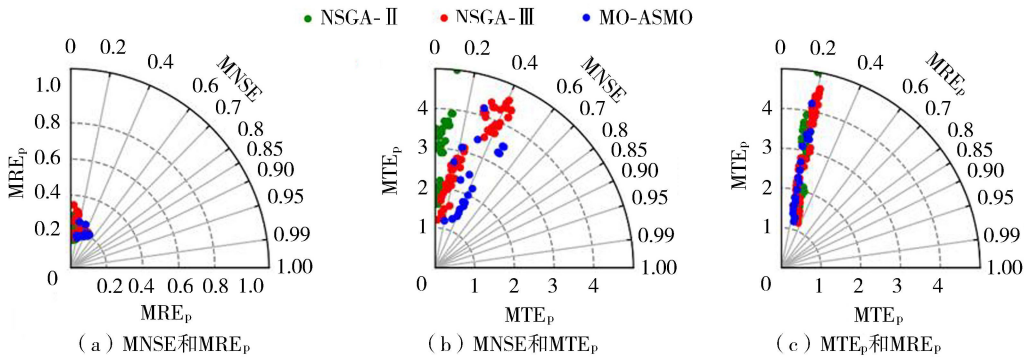


图 6 率定期 3 种算法目标函数比较
Fig. 6 Comparison of objective functions of three algorithms in calibration period

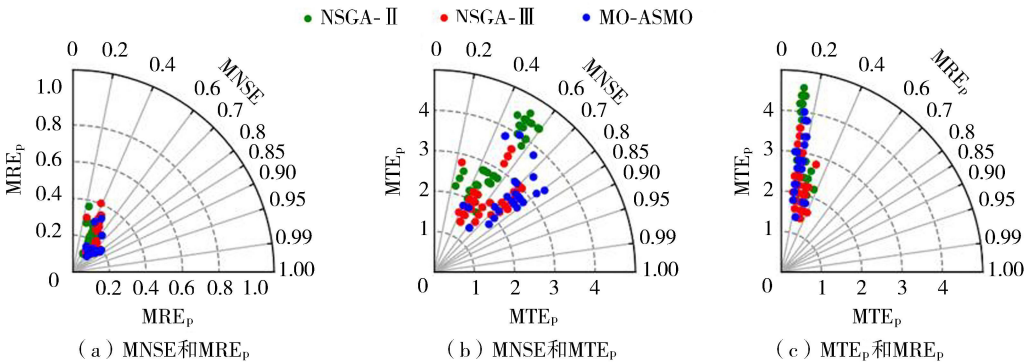


图 7 验证期 3 种算法目标函数比较
Fig. 7 Comparison of objective functions of three algorithms in verification period

取得更好效果。NSGA-Ⅲ和 MO-ASMO 算法各项指标均优于 NSGA-Ⅱ,原因是 NSGA-Ⅲ增加了参考点机制,从而导致样本点分布更分散,自变量多样性增加,从而更容易得到全局最优解。

表 2 3 种算法目标函数对比

Table 2 Comparison of objective functions of three algorithms

时期	洪号	NSE			RE _p [*] /%			TE _p [*]		
		NSGA-Ⅱ	NSGA-Ⅲ	MO-ASMO	NSGA-Ⅱ	NSGA-Ⅲ	MO-ASMO	NSGA-Ⅱ	NSGA-Ⅲ	MO-ASMO
率定期	2010090500	-0.36	0.40	0.50	14.67	4.89	4.06	2	1	2
	2011081800	0.26	0.25	0.66	23.79	11.02	17.92	4	7	6
	2011082600	-0.70	-0.68	0.57	56.35	41.61	37.41	1	2	0
	2011091000	0.82	0.78	0.68	16.12	15.42	48.25	2	0	0
	2012070700	0.70	0.75	0.81	6.52	7.51	6.56	1	0	1
	2012072200	0.48	0.38	0.71	7.64	4.98	8.98	0	0	1
	2013052504	-0.94	-0.21	-1.45	10.75	5.06	6.77	0	1	3
	2017071300	-1.04	-0.57	-0.15	20.92	6.49	36.70	4	3	0
	2018081608	0.71	0.79	0.90	37.71	23.64	12.86	1	1	1
	2019080308	0.46	0.40	0.71	51.73	61.23	25.97	1	1	0
	均 值	0.04	0.23	0.39	24.62	18.18	20.55	1.6	1.6	1.4
验证期	2020072115	0.12	0.52	0.63	8.54	2.87	5.28	2	2	1
	2020080600	0.20	0.38	0.57	54.61	52.42	28.40	3	3	4
	2020081100	0.90	0.88	0.95	25.19	35.66	12.61	1	2	1
	2021082600	0.73	0.84	0.90	19.00	11.99	26.13	4	0	7
	2021092400	0.09	-0.09	0.77	41.53	39.62	13.54	1	2	1
	均 值	0.41	0.51	0.76	29.77	28.51	17.19	2.2	1.8	2.8

注:RE_p^{*} 为洪峰相对误差绝对值,TE_p^{*} 为峰现时间相对误差绝对值。

考虑到 3 种多目标优化算法得到 Pareto 解集个数不一致,本文对每个 Pareto 解集进行归一化,再求其最小欧几里得距离得到一组参数作为各个方法的最终参数,运行 TOPKAPI 模型得到不同方法每场洪水的目标函数值(表 2)。率定期 10 场洪水,NSGA-Ⅱ、NSGA-Ⅲ和 MO-ASMO 算法的洪峰合格率分别为 50%、70%和 60%,峰现时间合格率为 60%、70%和 70%;验证期 5 场洪峰合格率分别为 40%、40%和 60%,峰现时间合格率为 40%、20%和 60%,MO-ASMO 算法在率定期和验证期对洪峰误差的控制较好,峰现时间误差也合格,综合看比其他 2 种方法更优。图 8 为部分洪水实测与模拟结果对比,3 种不同率定方法下各场洪水模拟与实测过程线在低水阶段较吻合,高水处出现不同程度偏差,总体来说 MO-ASMO 算法结果较好,其中 2012070700 号洪水第一个峰 3 种方法模拟均偏大,原因为 TOPKAPI 模型退水时间较长,洪水后期的降雨直接转化为径流,从而导致峰值模拟偏大。

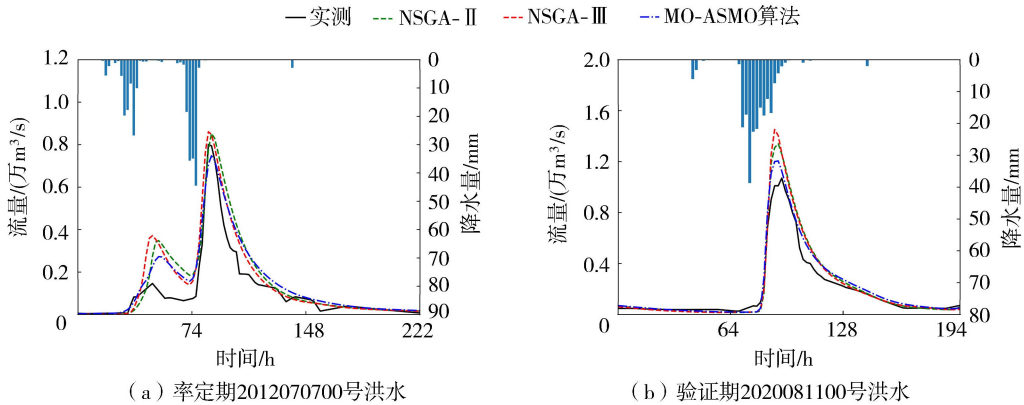


图 8 部分洪水实测与模拟结果对比
Fig. 8 Comparison of partial measured floods and simulated results

3 结 语

为提高复杂水文模型参数优化效率,通过 Morris 敏感性分析方法成功筛选出 12 个敏感性参数,减少了参与率定的参数个数。在多目标参数优化方面,将多目标自适应代理模型优化(MO-ASMO)算法应用在

TOPKAPI 模型的参数率定中,对比 NSGA-II 和 NSGA-III 算法,MO-ASMO 算法在相同模型运行次数下产生更好的 Pareto 前沿。通过分析相对最优解的模拟结果,MO-ASMO 算法在各项指标均取得较高的合格率,有效提高了模型参数优化的效率,验证了该方法的适用性。但本文仅从模型参数率定方面探究其对模拟结果的影响,实际流域的情况比模拟复杂许多,下一步的研究中,需要考虑流域的实时变化,深入探讨代理模型在水文模型中参数实时校正等问题。

参考文献:

[1] 董小涛,李致家,李利琴.不同水文模型在半干旱地区的应用比较研究[J].河海大学学报(自然科学版),2006,34(2):132-135. (DONG Xiaotao,LI Zhijia,LI Liqin. Application and comparison of three hydrological models in semi-arid region[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2006,34(2):132-135. (in Chinese))

[2] 李致家,李兰茹,黄鹏年,等.流域分块对汇流参数的影响[J].河海大学学报(自然科学版),2014,42(4):283-288. (LI Zhijia,LI Lanru,HUANG Pengnian,et al. Effect of watershed subdivision on confluence parameter[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2014,42(4):283-288. (in Chinese))

[3] 李致家,黄鹏年,张建中,等.新安江-海河模型的构建与应用[J].河海大学学报(自然科学版),2013,41(3):189-195. (LI Zhijia,HUANG Pengnian,ZHANG Jianzhong,et al. Construction and application of Xin'anjiang-Haihe model[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2013,41(3):189-195. (in Chinese))

[4] 李致家,姚成,张珂,等.基于网格的精细化降雨径流水文模型及其在洪水预报中的应用[J].河海大学学报(自然科学版),2017,45(6):471-480. (LI Zhijia,YAO Cheng,ZHANG Ke,et al. Research and application of the high-resolution rainfall runoff hydrological model in flood forecasting[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2017,45(6):471-480. (in Chinese))

[5] 张珂,张企诺,陈新宇,等.栅格新安江-地表地下双人工调蓄分布式水文模型[J].水资源保护,2021,37(5):94-101. (ZHANG Ke,ZHANG Qينو,CHEN Xinyu,et al. Gridded Xin'anjiang-dual anthropogenic aboveground and underground regulation distributed hydrological model[J]. Water Resources Protection,2021,37(5):94-101. (in Chinese))

[6] 姚成,李致家,张珂,等.基于栅格型新安江模型的中小河流精细化洪水预报[J].河海大学学报(自然科学版),2021,49(1):19-25. (YAO Cheng,LI Zhijia,ZHANG Ke,et al. Fine-scale flood forecasting for small and medium-sized rivers based on Grid-Xin'anjiang model[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(1):19-25. (in Chinese))

[7] 沙永兵,黄迎春,石彬,等.五强溪水库近坝区洪水预报方法研究[J].河海大学学报(自然科学版),2022,50(4):58-65. (SHA Yongbing,HUANG Yingchun,SHI Bin,et al. Study on flood forecasting method in the near-dam area of Wuqiangxi Reservoir[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(4):58-65. (in Chinese))

[8] 李致家,张珂,王栋,等.现代水文模拟与预报技术[M].南京:河海大学出版社,2021.

[9] 徐杰,李致家,马亚楠,等.基于 TOPKAPI 模型的湿润流域洪水模拟[J].南水北调与水利科技,2020,18(1):18-25. (XU Jie,LI Zhijia,MA Yanan,et al. Flood simulation based on TOPKAPI model in a humid basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2020,18(1):18-25. (in Chinese))

[10] 李致家,臧帅宏,刘志雨,等.新安江模型中河道汇流方法的改进[J].河海大学学报(自然科学版),2020,48(3):189-194. (LI Zhijia,ZANG Shuaihong,LIU Zhiyu,et al. Improvement of channel routing method for Xin'anjiang model[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2020,48(3):189-194. (in Chinese))

[11] 冷梦辉,白桦,李二辉,等.洪水基流分割非参数检验方法优选[J].水资源保护,2021,37(4):82-88. (LENG Menghui,BAI Ye,LI Erhui,et al. Optimization of nonparametric test methods for flood baseflow separation[J]. Water Resources Protection,2021,37(4):82-88. (in Chinese))

[12] 袁华,刘方,刘元会,等.利用单纯形-混沌优化算法确定河流水质模型参数[J].水资源保护,2013,29(6):44-48. (YUAN Hua,LIU Fang,LIU Yuanhui,et al. Simplex-chaos optimization algorithm for parameter estimation of water quality model of river[J]. Water Resources Protection,2013,29(6):44-48. (in Chinese))

[13] 瞿思敏,杨庆一,郑何声园,等.系统微分响应参数率定方法在建阳流域 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 of Jianyang Basin[J]. Water Resources Protection,2023,39(2):118-124. (in Chinese))

[14] 石朋,陆美霞,吴洪石,等.不同算法在水文模型参数率定中的应用与评估[EB/OL].[2022-08-18].https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=rCMvAF-4El1uJeixaQmyGWGrwdyCjM5aw60t9c60Nubnn057hJLHa_5kz90rx0qfFyjZd2lMahdZjSGHC9R9udjEsIjN0XGNIMSScYG0bn9Mfyvmxj32odd_0rdmKpsCsG3IGHo8w=&uniplatform=NZKPT&language=CHS

[15] 徐韧,苏怀智,杨立夫.基于 GP-XGBoost 的大坝变形预测模型[J].水利水电科技进展,2021,41(5):41-46. (XU Ren,SU

Huaizhi, YANG Lifu. Dam deformation prediction model based on GP-XGBoost[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(5): 41-46. (in Chinese))

[16] 李琼芳, 许树洪, 周正模, 等. 基于系统微分响应的暴雨强度公式参数优化[J]. 水资源保护, 2022, 38(5): 8-16. (LI Qiongfang, XU Shuhong, ZHOU Zhengkai, et al. Parameter optimization of rainstorm intensity formula based on system differential response method[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(5): 8-16. (in Chinese))

[17] RAZAVI S, TOLSON B A, BURN D H. Review of surrogate modeling in water resources[J]. Water Resources Research, 2012, 48(7): 2011WR011527.

[18] SYBERFELDT A, GRIMM H, NG A, et al. A parallel surrogate-assisted multi-objective evolutionary algorithm for computationally expensive optimization problems[C]// 2008 IEEE Congress on Evolutionary Computation (IEEE World Congress on Computational Intelligence). Hong Kong: IEEE, 2008: 3177-3184.

[19] 宋晓猛, 张建云, 孔凡哲, 等. 基于代理模型的水文模型参数多目标优化[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2014, 46(2): 36-45. (SONG Xiaomeng, ZHANG Jianyun, KONG Fanzhe, et al. Multi-objective optimization for hydrological models using surrogate modeling[J]. Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition), 2014, 46(2): 36-45. (in Chinese))

[20] KOURAKOS G, MANTOGLOU A. Development of a multi-objective optimization algorithm using surrogate models for coastal aquifer management[J]. Journal of Hydrology, 2013, 479: 13-23.

[21] TODINI E. New trends in modelling soil processes from hillslope to GCM scales [C]// OLIVER H R, OLIVER S A. The Role of Water and the Hydrological Cycle in Global Change. Berlin: Springer, 1995: 317-347.

[22] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.

[23] ZHOU J, ZHAO X, ZHANG X, et al. Task allocation for multi-agent systems based on distributed many-objective evolutionary algorithm and greedy algorithm[J]. IEEE Access, 2020, 8: 19306-19318.

[24] GONG W, DUAN Q, LI J, et al. Multi-objective adaptive surrogate modeling-based optimization for parameter estimation of large, complex geophysical models[J]. Water Resources Research, 2016, 52(3): 1984-2008.

[25] 陈镔, 唐煜. 好格子点法设计的进一步研究[J]. 中国科学: 数学, 2020, 50(5): 585-598. (CHEN E, TANG Yu. Further research on the good lattice point design[J]. Scientia Sinica(Mathematica), 2020, 50(5): 585-598. (in Chinese))

[26] 何志昆, 刘光斌, 赵曦晶, 等. 高斯过程回归方法综述[J]. 控制与决策, 2013, 28(8): 1121-1129. (HE Zhikun, LIU Guangbin, ZHAO Xijing, et al. Overview of Gaussian process regression[J]. Control and Decision, 2013, 28(8): 1121-1129. (in Chinese))

[27] MORRIS M D. Factorial sampling plans for preliminary computational experiments[J]. Technometrics, 1991, 33(2): 161-174.

[28] 邓鹏, 李致家, 刘志雨. 分布式 TOPKAPI 模型的数值解法及其应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2009, 37(2): 158-161. (DENG Peng, LI Zhijia, LIU Zhiyu. Numerical algorithm of distributed TOPKAPI model and its application[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2009, 37(2): 158-161. (in Chinese))

(收稿日期: 2022-08-18 编辑: 刘晓艳)

(上接第 20 页)

[28] 于磊, 黄瑞晶, 李容, 等. 基于河道纳污能力的北运河城市副中心段合流制溢流污染控制研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(5): 41-48. (YU Lei, HUANG Ruijing, LI Rong, et al. Research on pollution control of combined sewer overflow in Beijing Municipal Administrative Center section of North Canal based on the ability to decontamination of the river[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(5): 41-48. (in Chinese))

[29] 李俊奇, 周金成, 杨正, 等. 合流制溢流控制指标与标准制定研究[J]. 水资源保护, 2021, 37(1): 124-131. (LI Junqi, ZHOU Jincheng, YANG Zheng, et al. Study on control indicators and standard formulation of combined sewer overflow[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 124-131. (in Chinese))

[30] 康丽娟, 曹勇. 连续降雨条件下典型泵站放江污染特征分析[J]. 水生态学杂志, 2019, 40(2): 20-26. (KANG Lijuan, CAO Yong. Effects of sewage discharge from drainage pumping station on receiving river water quality under the condition of continuous rainfall[J]. Journal of Hydroecology, 2019, 40(2): 20-26. (in Chinese))

[31] 顾一鸣, 马艳. 防汛泵站放江污染削减对策探索[J]. 净水技术, 2021, 40(10): 138-143. (GU Yiming, MA Yan. Discussion on the countermeasures of discharge pollution reduction in stormwater pumping station[J]. Water Purification Technology, 2021, 40(10): 138-143. (in Chinese))

(收稿日期: 2023-03-17 编辑: 刘晓艳)