

基于峰值导向型粒子群优化算法的城市水文模型自动率定方法

许王辰^{1,2}, 陈瑞弘^{1,2}, 孙岸炜^{1,2}

(1. 上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200335; 2. 三峡智慧水务科技有限公司, 上海 200335)

摘要: 针对城市多参数水文模型中径流及峰现时间人工率定效率低、精度不足的问题, 提出一种基于改进粒子群优化(PSO)算法的模型参数自动率定方法。该方法在 PSO 算法中引入 Logistic 映射和莱维飞行, 分别用于粒子初始化和位置更新, 以避免陷入局部最优; 同时结合城市产汇流模型特征, 构建包含整体拟合、峰值及峰现时间的加权多目标适应度函数, 以提高模型对关键水文特征的捕捉能力。通过 Python 实现该方法与机理模型(雨洪管理模型, SWMM)的交互, 并利用试验场实测数据对 10 个关键水文参数进行率定, 比较不同权重取值的适应度函数的拟合效果。结果表明, 构建的加权多目标适应度函数在城市排水系统应急调度应用中更具优势, 尤其在提高峰值与峰现时间模拟精度方面表现更优。将该方法应用于九江实际排水系统, 峰值误差和峰现时间误差分别为 0.56% 和 -6.82%, 验证了方法的可行性与准确性。

关键词: 城市水文模型; 多目标适应度函数; 粒子群优化算法; 自动率定; SWMM

中图分类号: TV12

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2025)04-0031-08

Automatic calibration method for urban hydrological models based on peak-oriented particle swarm optimization algorithm//XU Wangchen^{1,2}, CHEN Ruihong^{1,2}, SUN Anwei^{1,2}(1. Shanghai Investigation, Design and Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200335, China; 2. Three Gorges Smart Water Technology Co., Ltd., Shanghai 200335, China)

Abstract: To address the issues of low efficiency and insufficient accuracy in manual calibration of runoff and peak time for multi-parameter urban hydrological models, this study proposed an automatic parameter calibration method based on the improved particle swarm optimization (PSO) algorithm. The method introduces Logistic mapping for particle initialization and Lévy flight for position updating within the PSO framework to avoid local optima. Additionally, considering the characteristics of urban runoff generation and concentration processes, a weighted multi-objective fitness function incorporating overall fitting, peak flow, and peak time was constructed to enhance the model's ability to capture key hydrological features. The proposed method was implemented in Python and coupled with a mechanistic model (storm water management model, SWMM). Using field monitoring data from a test site, ten key hydrological parameters were calibrated, and the performance of fitness functions with different weight assignments was compared. The results demonstrate that the weighted multi-objective fitness function is more advantageous for urban drainage system emergency management, particularly in improving the simulation accuracy of peak flow and peak time. When applied to a real drainage system in Jiujiang City, the method achieved peak flow and peak time errors of 0.56% and -6.82%, respectively, confirming its feasibility and accuracy.

Key words: urban hydrological model; multi-objective fitness function; particle swarm optimization algorithm; automatic calibration; SWMM

中小型降雨是城市雨水调蓄调控的主要目标, 自动化控制协助下的精细化管控, 使得城市水文、水环境管理已经逐步从传统的场次径流量估算向分钟级径流量实时解析方向发展^[1]。早在 20 世纪 50 年

代, 为了应对这一挑战, 科学家和工程师们开发了一系列先进的模型, 并广泛应用于城市排水系统的预警和预报领域, 例如美国环保署开发的暴雨管理模型(storm water management model, SWMM)、丹麦水

基金项目: 上海勘测设计研究院有限公司项目(2022HJ(83)-011)

作者简介: 许王辰(1994—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事智慧水务研究。E-mail: xu_wangchen@ctg.com.cn

通信作者: 陈瑞弘(1989—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事智慧水务研究。E-mail: chen_ruihong@ctg.com.cn

协会开发的 MIKE Urban、英国 Wallingford 软件公司开发的 InfoWorks 等多个成熟的商用模型体系,涵盖了多类型半经验、半理论地表产汇流模型。新兴径流模型在机理上较好地描述了城市产汇流的基本过程,但是海量参数的人工率定难度大、耗时久且受模型工程师主观因素影响较大,导致城市水文预警预报精度受到较大限制。

近年来,基于启发式算法的自动率定方法受到广泛关注。启发式算法依赖特定的搜索策略进行优化,常见算法包括粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 算法^[2-3]、遗传算法^[4]、差分进化算法^[5-7]等。杨森雄等^[8]通过改进和声搜索算法作为优化算法,与 SWMM 模型耦合后实现了多个水文模型参数的自动率定。王菲菲等^[4]利用遗传算法结合 Python 开源工具 PySWMM 实现了自动优化迭代计算,结果表明降雨特征对 SWMM 水文模型参数的率定结果有较大影响。其中,PSO 算法凭借参数少、收敛速度快、易于实现等优势,成为相关研究中常用的寻优算法^[2]。而针对 PSO 算法的劣势,如在全局搜索与局部搜索的平衡方面存在的局限性、难以保证种群的多样性、易陷入局部最优、搜索精度低等问题^[9],已有不少研究提出了相应的改进策略,包括引入惯性权重因子^[9]、可变加速因子、莱维飞行^[10]等改进搜索步长,提升跳出局部极值的能力;引入混沌映射用于优化种群初始状态,提升种群多样性^[11-12],包括 Sine 混沌映射^[13]、Tent 混沌映射^[14]、Logistic 映射和 Lozi 映射^[15]等,在部分特定场景取得了良好的应用效果。

在利用寻优算法进行参数率定时,需针对特定率定场景构建足够描述结果特性、率定目标的适应度函数。常见的适应度函数包括均方误差、平均绝对误差等,强调整体拟合程度,对城市排水模型而言更为关键的峰现时间和峰值大小的重要性强调不足^[5-6, 16-17]。Vrugt 等^[17]认为单目标函数无法全面刻画水文过程的动力特性,容易陷入局部最优。而多目标函数的构建具有灵活性,求解时可采用多目标优化分解法中的加权和法将问题转换为单目标问题,降低求解难度。Guo 等^[6]采用均四次方误差和均方对数误差强调大小流量的拟合;Gao 等^[5]利用峰值流量偏差、峰现时间偏差是否满足误差阈值的布尔值以及纳什系数构建多目标适应度函数,利用惩罚系数体现布尔值施加的惩罚力度。Kamali 等^[2]引入了 4 个目标构建适应度函数,发现多目标优化的目标数量并非越多越好,过多的目标可能增加计算复杂度,而未必显著提升优化效果。因此,面向城市水文模型率定场景,响应排水管理工作中对

径流峰值大小以及峰现时间的精度要求,构建多目标适应度函数仍有进一步探究空间。

本文提出了一种基于 Logistic 混沌映射和莱维飞行的改进 PSO 算法和基于该算法的模型参数自动率定方法,并构建了兼顾整体拟合程度、峰值和峰现时间的多目标适应度函数,以提升城市水文模型参数率定精度。采用试验场的模拟结果和九江排水系统的实测数据,对该方法的优化性能和适用性进行了验证。

1 研究方法

1.1 改进 PSO 算法

1.1.1 Logistic 混沌映射的粒子位置及速度初始化

为了增加初始值的多样性、提高算法的收敛效率,引入 Logistic 混沌映射生成具有随机性和复杂性的序列。根据式(1),将位于范围 $[0, 1]$ 的随机数 p_0 迭代 j 次,获得参数相应的混沌映射值 p_{j+1} 。根据参数个数生成初始参数组合,将这些参数组合映射到实际参数范围内,构成初始位置/速度矩阵(式(2))。

$$p_{j+1} = rp_j(1 - p_j) \quad (1)$$

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \hat{e}^{x_{11}} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ \hat{e}^{x_{i1}} & \cdots & x_{in} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{u} \\ \vdots \\ \hat{u} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: p_{j+1} 为迭代计算结果; j 为迭代次数; r 为范围 $[0, 4]$ 内的系统参数; $\mathbf{X}$ 为数据(位置)/优化方向(速度)矩阵; n 为参数维度; i 为粒子数; x_{in} 为映射到实际参数范围的值。

1.1.2 莱维飞行的粒子更新方法

为提高算法的全局搜索能力,增加随机行走的每一步中出现较大步长的概率,引入莱维飞行。利用式(3)更新粒子位置与速度:

$$x_{i,d+1} = x_{i,d} + v_{i,d+1} + \alpha \oplus \text{Lévy}(\lambda) \quad (3)$$

式中: $x_{i,d+1}$ 为第 $d+1$ 代的位置; $v_{i,d+1}$ 为第 $d+1$ 代的速度; α 为步长系数; $\oplus$ 为点对点乘法;Lévy(λ)为服从莱维分布的随机数。

1.1.3 强调径流峰值和峰现时间的适应度函数

GB/T 22482—2008《水文情报预报规范》(以下简称“水文规范”)定义场次洪水的三要素为洪峰流量、洪水总量和洪水过程线。洪水过程线的单目标适应度函数虽在一定程度上考虑了洪峰流量和洪水总量的影响,但其重要性往往不能得到充分体现。针对城市径流流量的时间序列特性,本研究分别引入径流总量偏差、峰值流量偏差、峰现时间偏差 3 个目标函数,以强调径流峰值精度,保证其在城市水量调度中的关键作用。

a. 径流总量偏差目标函数。参考传统水文率

定方法,基于洪水总量计量方式,进一步提升完整径流过程时序变化规律的预测能力,综合采用监测间隔与计算时间步长特点,以单一时刻计算流量与实测流量的偏差为核心,采用均方误差 E_{MS} 描述整体流量偏差,构建径流总量偏差目标函数。

b. 峰值流量偏差目标函数。根据水文规范中洪峰预报许可误差的定义,以径流过程中计算最大流量与实测最大流量的偏差为核心,采用流量峰值的百分比偏差 E_{PQ} 评估模型在流量峰值上的表现,构建峰值流量偏差目标函数。

c. 峰现时间偏差目标函数。城市下垫面基流深度较浅,降雨事件与城市径流事件相关性较好,峰现时间采用以降雨为起点的相对时间进行计算。根据水文规范中峰现时间预报许可误差的定义,径流过程中计算径流最大流量所在时间点与实测径流最大流量所在时间点的偏差为核心,采用峰现时间的百分比偏差 E_{PT} 强调峰值位置,构建径流峰现时间偏差目标函数。

应用加权和法,引入权重系数 $w_1、w_2、w_3$,衡量上述 3 个目标的重要性。考虑每个目标的计算量级不同,引入量纲修正系数 $k_0、k_1、k_2$,以整体流量偏差为基准,调整各目标的计算量级, k_0 取 1,其他目标的权重系数以均方误差的计算量级为基准。通过以上 3 个目标的加权和,构造多目标适应度函数,见式(4):

$$\min(k_0w_0E_{MS}+k_1w_1|E_{PQ}|+k_2w_2|E_{PT}|) \quad (4)$$

1.2 改进 PSO 算法与机理模型的交互

本研究利用 Python 语言编写的自动率定算法由机理模型与改进 PSO 算法融合构成,降雨产汇流等基础过程由机理模型概化,机理模型的具体参数则通过改进 PSO 算法进行确定,具体流程见图 1。

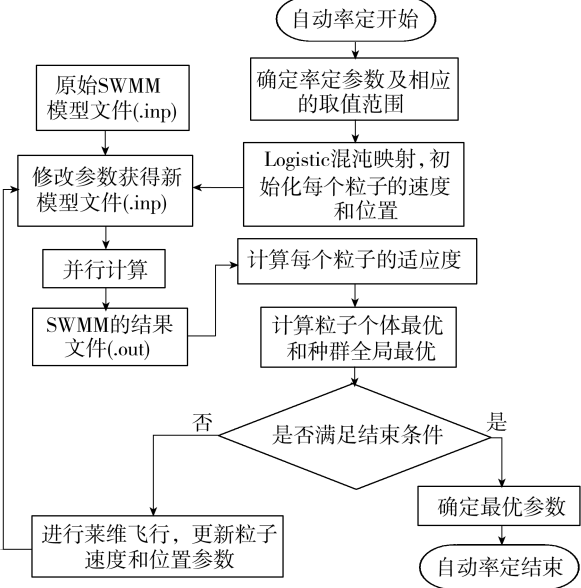


图 1 基于改进 PSO 算法的自动率定流程

针对 SWMM 模型在运行计算过程中涉及的 2 个主要文件^[18],即工程文件(.inp)和结果文件(.out),利用 Python 语言进行相关的功能开发,包括:①针对纯文本格式的工程文件,根据其特定的文本结构,开发了各模块的读取、修改、保存的接口,以实现各参数组的模型批量生成;②针对二进制结构的结果文件,根据源代码中结果的写入方式,开发了各要素(节点、管道、汇水区)的结果读取函数,以实现一个或者多个要素、一个或者多个指标的批量提取;③利用原有动态链接库中模型运行计算的接口,完成并行计算的功能改造,以提升算法的执行速度。

2 研究对象和数据来源

2.1 试验场

试验场的下垫面为长 17 m、宽 11 m 的长方形,占地 187 m²。整个区域由彩钢瓦、草地、低势草地、树木、水泥地面和不透水砖路面组成,平面图见图 2,详细下垫面组成信息见表 1。试验场采用美国 FULLJET 公司生产的旋转下喷式降雨喷头进行人工降雨试验。下垫面通过路堤和坡度设计避免与外部区域进行水量交换,最终试验区域径流经排水渠排出,使用体积法记录试验场的出流量。径流方向

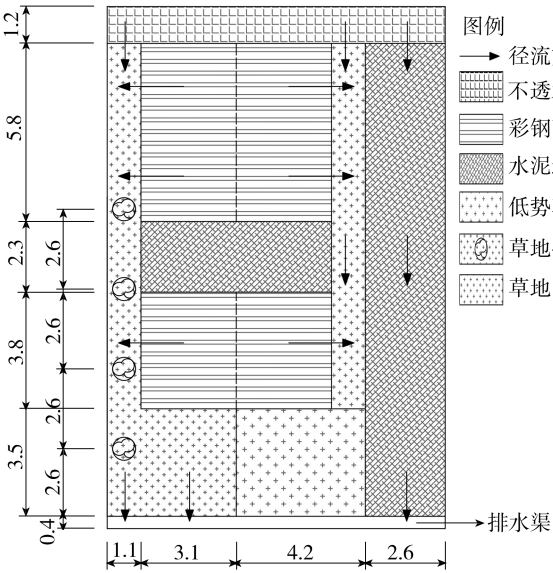


图 2 试验场下垫面试验平面图(单位:m)

表 1 试验场各下垫面占比

类型	下垫面	面积/m ²	占比/%	总占比/%
不透水区域	不透水砖	13.20	7.23	59.56
	彩钢瓦	59.52	32.60	
	水泥地面	54.30	29.74	
透水区域	低势草地	14.70	8.05	30.44
	草地+树	16.94	9.28	
	草地	23.94	13.11	

注:下垫面统计未包含排水渠。

如图 2 中箭头所示。

2.2 工程研究区域

实际排水系统中难以找到边界清晰的单一径流汇水区以测试该率定方法,因此,本研究选取污水管上游存在少量且明确混错接区域的子系统进行方法测试。

江西省九江市两河南片区为存在混错接的分流制排水片区。根据实际管线数据情况),污水检查井 201WS548 上游生活污水来源为学校 and 住宅区,存在雨水管错接 1 处,错接汇水区为学校,汇水面积达 3.8 hm²。该子系统符合上游混错接区域边界明确的标准,且旱季生活污水边界相对简单。其模型经旱季水量率定后,即可应用该自动率定方法,对错接区域的相关水文参数进行校准测试。为获得雨季合流污水流量数据,在该井处安装临时流量计,数据采集从整点开始,时间间隔为 5 min。

2.3 降雨场次数据

试验场的径流试验于旱季进行,试验间隔为 10 d,使下垫面有充足的时间进行下渗速率的恢复,保证每次试验的初始状态一致。九江两河南片区存在 1 个翻斗式雨量计,数据间隔为 5 min。收集 2 次试验和 2 次九江实际降雨事件的相关数据,见表 2。

表 2 降雨事件及数据信息

事件	日期	降雨信息	用途
1	2021 年 7 月 20 日	恒定雨强降雨,持续 10 min, 累计雨量 8.34 mm	试验率定
2	2021 年 7 月 30 日	恒定雨强降雨,持续 10 min, 累计雨量 15.17 mm	试验验证
3	2023 年 11 月 5 日	单峰多场次降雨,持续 95 min,累计雨量 19 mm	实际验证
4	2023 年 11 月 9 日	单峰多场次降雨,持续 150 min,累计雨量 28 mm	实际率定

3 模型率定

3.1 模型搭建

3.1.1 试验场模型

搭建试验场的 SWMM 模型,汇水区的形状由面积和特征宽度描述,汇水区示意图见图 3(a)。排水渠以矩形管道的形式概化,宽 0.4 m,长 11 m。模拟计算得到排口处的流量即为排水渠出流状态。

3.1.2 实际模型

搭建污水检查井 201WS548 上游排水系统的

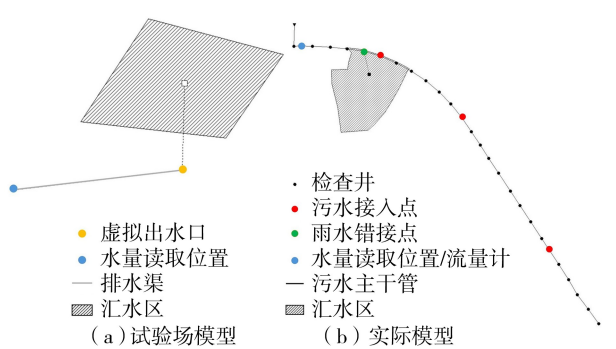


图 3 汇水区概化模型

SWMM 模型,汇水区的形状根据现场实际描绘(图 3(b))。获取与建模时间相近的 Landsat8 遥感影像(2023 年 9 月 9 日,网格精度 30 m×30 m),估算了建筑、道路、绿地等性质的占比,得到汇水区的不透水面积占比(表 3)。最终模型包括 27 个检查井、27 根管道、1 个排水口和 1 个子汇水区。模型范围内的用水量数据由自来水公司提供,根据小区出户管道位置,挂接至污水主管,见图 3(b)的污水接入点。

表 3 实际模型各下垫面占比

类型	下垫面	面积/hm ²	占比/%	总占比/%
不透水区域	房屋	2.0	53.8	55.6
	道路	0.1	1.8	
	其他	0	0	
透水区域	绿地	1.7	44.4	44.4

3.2 水文模型及率定参数

SWMM 模型将汇水区产汇流过程分为下渗模型和非线性水库模型两部分,本文采用霍顿下渗与非线性水库组合模型来概述径流过程。对单一出口汇水区,面积、不透水区域面积占比、不透水区没有洼地(滞留)蓄水区域占比为汇水区自身属性,根据试验场或现场实际情况确定具体数值(表 4)。基于已有研究对城市水文模型参数敏感性分析的结果,汇水区属性的特征宽度、平均坡度是影响径流的主要因素^[19],该参数由径流流行路径中具体地形决定,主要受建筑排水系统、小区局部地形、小区排水系统综合影响,无法根据实际地块几何特性进行分析得出。除此之外,糙率及下渗速率也是主要影响因素,结合工程经验进一步选取霍顿下渗和非线性水库模型中 8 个常见的率定参数^[2-4]。最终共选取 10 个参数进行优化组合率定(表 5),在取值范围内寻找最优参数组合,使模型模拟值与实测值尽可能相符。

表 4 SWMM 改进的霍顿下渗与非线性水库组合模型固定参数

模型	参数	单位	试验场取值	实际模型取值
改进的霍顿下渗模型	最大可能下渗体积	mm	0	0
	汇水区面积	hm ²	0.0187	3.8
非线性水库模型	不透水区域面积占比	%	69.6	55.6
	不透水区没有洼地(滞留)蓄水区域占比	%	0	0

表 5 SWMM 改进的霍顿下渗与非线性水库组合模型待定参数

模型及分类	参数	单位	试验场取值范围 ^[4,8,18,20-22]	实际模型取值范围 ^[4,8,18,20-22]
改进的霍顿下渗模型	最大渗透速率	mm/h	14~50	14~50
	最小渗透速率	mm/h	1.27~5.1	1.27~5.1
	衰减速率常数	h ⁻¹	2~7	2~7
	干燥时间	d	2~14	2~14
非线性水库模型	不透水区的曼宁系数		0~1	0~1
	透水区的曼宁系数		0~1	0~1
	不透水区的洼地(滞留)蓄水	mm	0~5	0~5
	透水区的洼地(滞留)蓄水	mm	0~10	0~10
汇水区性质	汇水区特征宽度	m	0~11	0~250
	汇水区平均坡度	%	0.01~5	0.1~5

3.3 评价指标

目前在城市水文排水领域尚未有类似水文规范的官方文件对预报精度进行定义。因此,本研究除选用适应度函数中的 3 个目标外,还选用水文规范中的决定系数 R^2 对率定和验证效果进行评价。

4 结果与分析

4.1 试验场模型

利用试验场模型,针对降雨事件 1 和 2 的实测径流量数据,进行该参数自动率定方法的可行性测试,分别使用不同权重组合的多目标适应度函数进行综合水文参数自动率定,权重取值见表 6。

表 6 多目标适应度函数中权重取值组合

组合	w_0	w_1	w_2
1	1	0	0
2	1	0	1
3	1	1	0
4	1	1	1

本次研究中,莱维飞行的 α 取 1。试验场流量数据单位为 L/s,为保证多目标权重量级一致,量纲系数 k_1 和 k_2 均为 1.00×10^{-2} 。最终各适应度函数组合归一化后的收敛曲线如图 4 所示,组合 1~4 分别迭代 18、19、44、84 次计算后达到收敛,总体上,适应度函数中目标越多,收敛速度越慢。

表 7 列出了 4 种适应度函数组合下得到的最优参数,4 组参数差异主要体现在汇水区的特征宽度和

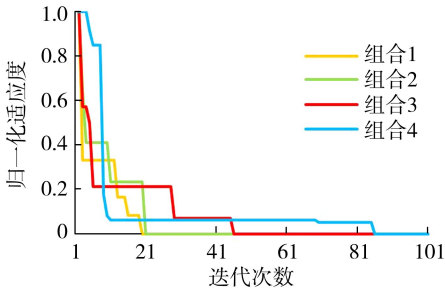


图 4 4 种组合适应度函数的收敛曲线

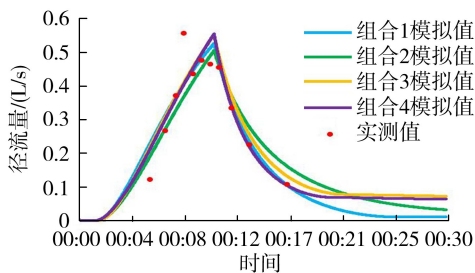
平均坡度上。组合 4 的特征宽度与试验场的相近,汇流长度较短,坡度为 0.05%,接近平坦地形。而组合 1 与组合 2 率定的特征宽度显著小于组合 4 的率定结果,汇流长度较长,坡度较大。整体而言,组合 3 和组合 4 率定结果的参数取值组合相对合理。

将各参数的最优值代入模型,得到降雨事件 1 的综合下垫面径流量模拟值和实测值拟合图(图 5(a)),相关评价指标结果见表 8。组合 1 与 2、组合 3 与 4 的结果相近,说明适应度函数中增加峰现时间在该场景下对率定算法的迭代计算影响较小,由图 5(a) 和表 8 中的率定结果的 E_{PT} 值可知,无论水文参数如何变化,其峰现时间变化较小,这可能是用于测试的试验降雨场次为恒定雨强降雨,变化单一,而实测值与模拟值的峰现时间偏差可能由监测误差引起。

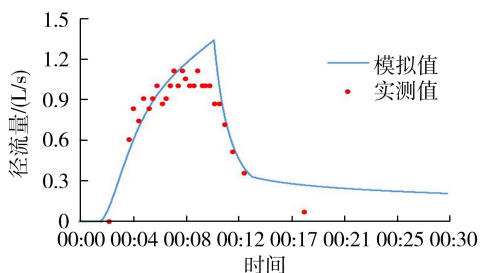
4 种组合的率定结果的确定性系数 R^2 均为 0.966,但拟合侧重不同。组合 3 与组合 4 在拟合过

表 7 试验场模型率定最优参数

模型及分类	参数	单位	组合 1 最优值	组合 2 最优值	组合 3 最优值	组合 4 最优值
改进的霍顿下渗模型	最大渗透速率	mm/h	14.49	16.95	19.69	28.86
	最小渗透速率	mm/h	3.30	4.55	4.61	4.78
	衰减速率常数	h ⁻¹	2.46	6.98	2.52	5.22
	干燥时间	d	13.10	13.63	3.33	14.00
非线性水库模型	不透水区的曼宁系数		0.72	0.98	0.92	0.53
	透水区的曼宁系数		0.02	0.02	0.05	0.03
	不透水区的洼地(滞留)蓄水	mm	4.76	0.10	1.54	2.89
	透水区的洼地(滞留)蓄水	mm	0.30	0.28	0.29	0.11
汇水区性质	汇水区特征宽度	m	0.73	0.43	3.75	9.49
	汇水区平均坡度	%	1.30	3.53	2.80	0.05



(a) 不同组合适应度函数率定结果



(b) 组合4适应度函数验证结果

图5 试验场径流量模拟值与实测值对比

表8 不同适应度函数下率定和验证结果评价指标

阶段	适应度函数	R^2	$E_{MS}/(m^6/s^2)$	$E_{PQ}/\%$	$E_{PT}/\%$
率定	组合1	0.966	0.004	5.27	29.23
	组合2	0.966	0.005	9.04	29.22
	组合3	0.966	0.004	0.55	29.23
	组合4	0.966	0.004	0.13	29.22
验证	组合4	0.964	0.028	18.61	41.72

程中增加了径流峰值的权重, E_{PQ} 值 (0.55%、0.13%) 也远优于组合1与组合2 (5.27%、9.04%), 其峰值结果相对于组合1与组合2更加接近实测值, 但是一定程度上弱化了地表汇流的长尾特征。组合1的适应度函数追求整体拟合效果, 其率定结果与除峰值点以外的实测点高度吻合, 相比之下能更好地捕捉径流流量的下降过程。由此可知, 在径流总量一致的前提下, 组合3与组合4的适应度函数切实地放大了峰值的重要性, 提高了算法在峰值率定上的准确率, 相对于组合1与组合2的综合率定效果更优, 同时考虑适应度函数的泛化性以及城市排水系统应急调度实际应用中峰现时间的重要性, 组合4为城市排水系统模型率定的最优选择。

利用降雨事件2的径流数据验证组合4适应度函数率定参数的准确性。该场次降水量较大, 由实测值难以确定准确的峰值时间。由图5(b)和表8可知, 组合4的适应度函数验证结果的 R^2 值为0.964, E_{PQ} 略微偏高 (18.61%), 径流变化过程与实测值相对吻合, 拟合效果较好。

组合4的适应度函数通过综合考量径流过程的整体特征, 同时又重点优化了洪峰流量与峰现时间的匹配精度, 显著提升了城市排水系统模型中关键参数的准确性, 有效满足城市排水模型对暴雨洪水事件中峰值流量时序特征的模拟要求。

4.2 实际模型

针对非均匀时序分布特征下的离散型降雨事件 (降雨事件3、4), 基于九江实际模型, 利用组合4多目标适应度函数验证该参数自动率定方法在实际排水系统的适用性。监测流量数据单位为 m^3/h , 量纲系数 k_1 和 k_2 均为 1.00×10^{-5} 。因实际获得流量数

据为合流水量, 首先基于旱季流量对模型中输入的生活污水量和污水日变化曲线进行校准。

图6为九江旱季流量校准结果。由图6可知, 模型中的旱季污水流量较监测值偏高, 但日变化趋势特征拟合良好。而后进行水文参数率定和验证, 结果如表9所示, 数据拟合情况详见图7。由图7(a)可知, 非降雨时段内 (0—5时、16—24时), 模拟值与实测值相近, 表明降雨时段内可忽略由污水流量引起的偏差。降雨前期 (5—9时), 峰现时间与流量变化趋势与实际吻合程度高, 第一个洪峰值 (05:50) 偏大。降雨后期 (9—17时), 降水量变小, 模拟流量趋势与图6中旱季污水结果相近, 表明此期间地表产流贡献率较低。由图7(b)可知, 验证场次在降雨前 (12—15时) 的整体水动力误差趋势与率定结果中的偏差相符, 呈略微偏高趋势。降雨初期汇水区产汇流响应较实际系统更为强烈, 实测流量还未生成峰值突变, 而模拟结果有明显的响应 (17:20)。第二个峰值 (18:35) 整体峰型与实测值

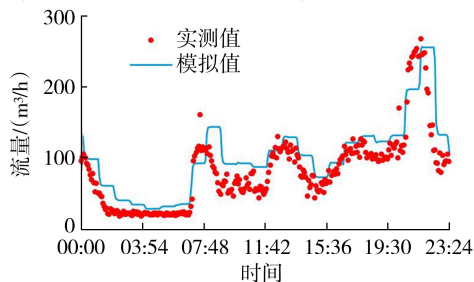


图6 实际模型旱季流量校准结果

表9 实际模型率定最优参数

模型及分类	参数	单位	多目标最优值
改进的霍顿下渗模型	最大渗透速率	mm/h	23.32
	最小渗透速率	mm/h	1.27
	衰减速率常数	h^{-1}	5.70
	干燥时间	d	2.01
非线性水库模型	不透水区的曼宁系数		0.09
	透水区的曼宁系数		0.62
	不透水区的洼地 (滞留) 蓄水	mm	0.57
	透水区的洼地 (滞留) 蓄水	mm	9.98
汇水区性质	汇水区特征宽度	m	173.64
	汇水区平均坡度	%	4.82

相近,但峰现时间略微提前。第三个峰值(21:45)的峰现时间、峰值大小吻合,但雨后(22—24时)整体低于监测值,径流量占比低,表明该率定算法对雨后汇流的捕捉相对欠缺。

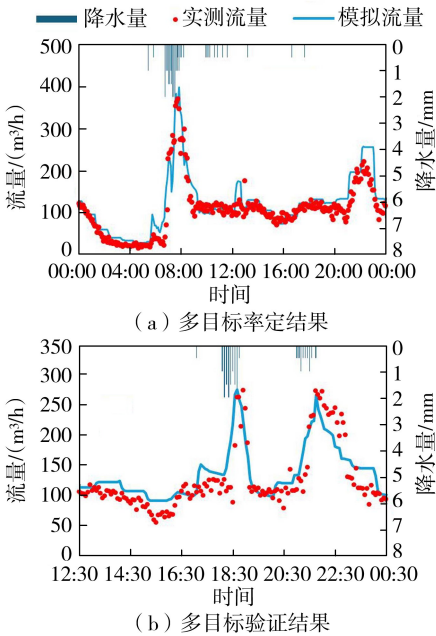


图7 实际模型径流量模拟值与实测值对比

从各项统计指标(表10)来看,验证结果拟合度相较于率定结果偏低,但误差在允许范围之内,仍满足工程精度要求,表明通过自动率定获得的参数能够较好地反映该汇水区的水文响应特性,该算法在复杂城市排水系统模型中具有良好的工程适用性。

表10 多目标适应度函数下九江实际模型率定和验证结果评价指标

阶段	R^2	$E_{MS}/(m^6/h^2)$	$E_{PQ}/\%$	$E_{PT}/\%$
率定	0.75	988.69	7.88	4.35
验证	0.55	1584.37	0.56*	-6.82*

注: * 为两个峰的平均值。

4.3 方法对比

该自动率定方法适用于单一汇水区的综合水文参数率定。从具有明确边界的试验场模型到实际排水系统中的单一汇水区模型,系统复杂性显著增加,多源水量的不确定性和不可避免的边界概化等因素直接影响了率定结果的准确性。

a. 降水量不确定性。降雨是产汇流模型的主要外力因素^[4]。九江市地形复杂,由丘陵、山地和平原交错构成,降水分布极不均衡^[19]。模型所用雨量站位于庐山山脚,距离错接汇水区约2 km,可能与实际降水有偏差。为提高降雨输入的代表性,应采用面降雨数据,从中提取相应的降雨边界条件。

b. 污水、外水等其他水源水量不确定性。选定的实际子排水系统为上游存在错接的污水管,且建模时未考虑外水入渗量,污水和外水的存在导致进

行 PSO 寻优时的拟合目标本身的准确性下降。本文研究从两个方面降低了多源水量偏差带来的拟合影响:①在确定水文参数之前进行生活污水校准,从而相对准确地从雨季合流水量中剥离径流量;②采用强调径流峰值的适应度函数,降低整体拟合度的比重,侧重于径流峰值和峰现时间的捕捉,在进行长时段模拟时,有效降低生活污水、外水占比较高的雨前、雨后汇流过程对 PSO 寻优飞行方向的干扰。

c. 边界概化。在实际排水系统应用该方法时,可能还会遇到难以孤立出明确的汇水分区的问题。常设流量监测设备的监测分区通常包含多个汇水区,它们在用地类型分布、管网接入点距离等方面可能存在较大差异。直接应用该方法所得参数可能与实际情况存在较大偏差。下游流量实测值与上游多个汇水区间匹配的数据局限性,也是传统率定方法的固有缺陷。因此有必要提高监测密度,合理划分同质雨水汇水分区,自上游至下游增设相应临时流量计,依次完成水文参数率定,以获得高精度模型。

5 结论

开发配套 SWMM 模型相关接口,基于传统 PSO 算法,分别采用 Logistic 混沌映射和莱维飞行对粒子的位置和速度进行初始化和迭代更新,根据城市产汇流特征,提出融合径流总量偏差、峰值流量偏差和峰现时间偏差的多目标函数,构成更适用于城市水文模型的参数率定方法。基于试验场的等效 SWMM 模型,以水文参数寻优为例,探究多目标适应度函数中不同权重组合的影响。结果证明等权重的多目标适应度函数除了考量径流过程的整体特征,更侧重于径流峰值和峰现时间的捕捉,在城市排水系统应急调度应用中更具优势。基于九江现场数据进行等权重的多目标适应度函数的验证,结果表明,针对连续场次降雨情况,该率定方法获得的相关参数能够较为准确地反映所选片区的水文特性,径流峰现时间、峰值与实测值的吻合程度较高,具有较高的应用可能性。

参考文献:

[1] YASEEN Z M, JAAFAR O, DEO R C, et al. Stream-flow forecasting using extreme learning machines: a case study in a semi-arid region in Iraq [J]. Journal of Hydrology, 2016, 542: 603-614.

[2] KAMALI B, MOUSAVI S J, ABBASPOUR K C. Automatic calibration of HEC-HMS using single-objective and multi-objective PSO algorithms [J]. Hydrological Processes, 2013, 27(26): 4028-4042.

[3] 余宇峰, 贺新固, 张潇, 等. 基于流域日降水量图的相似

- 性搜索方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(2): 19-27. (YU Yufeng, HE Xingu, ZHANG Xiao, et al. A rainfall similarity search method based on daily precipitation images of watershed [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(2): 19-27. (in Chinese))
- [4] 王菲菲, 卿晓霞, 杨森雄, 等. 基于 PySWMM 的 SWMM 参数自动率定研究[J]. 中国给水排水, 2022, 38(21): 124-130. (WANG Feifei, QING Xiaoxia, YANG Senxiong, et al. Automatic calibration of SWMM parameters based on PySWMM [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(21): 124-130. (in Chinese))
- [5] GAO Jiawei, LIANG Ji, LU Yu, et al. Automatic SWMM parameter calibration method based on the differential evolution and Bayesian optimization algorithm[J]. Water, 2023, 15(20): 3582.
- [6] GUO Jun, ZHOU Jianzhong, ZOU Qiang, et al. A novel multi-objective shuffled complex differential evolution algorithm with application to hydrological model parameter optimization[J]. Water Resources Management, 2013, 27(8): 2923-2946.
- [7] 叶陈雷, 徐宗学, 雷晓辉, 等. 基于 SWMM 和 InfoWorks ICM 的城市街区洪涝模拟与分析[J]. 水资源保护, 2023, 39(2): 87-94. (YE Chenlei, XU Zongxue, LEI Xiaohui, et al. Flood simulation and risk analysis on urban block scale based on SWMM and InfoWorks ICM [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(2): 87-94. (in Chinese))
- [8] 杨森雄, 卿晓霞, 朱韵西. 一种耦合 SWMM 计算的参数自动率定算法及实现[J]. 给水排水, 2021, 47(1): 148-154. (YANG Senxiong, QING Xiaoxia, ZHU Yunxi. An auto-calibration method by coupling SWMM with optimization algorithm and its implementation [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(1): 148-154. (in Chinese))
- [9] 王杰文, 李赫男. 粒子群优化算法综述[J]. 现代计算机, 2009(2): 22-27. (WANG Jiewen, LI Henan. Summary of particle swarm optimization algorithm [J]. Modern Computer, 2009(2): 22-27. (in Chinese))
- [10] 李荣雨, 王颖. 基于莱维飞行的改进粒子群算法[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(8): 1685-1691. (LI Rongyu, WANG Ying. Improved particle swarm optimization based on Lévy flights [J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(8): 1685-1691. (in Chinese))
- [11] 唐巍, 李殿璞, 陈学允. 混沌理论及其应用研究[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(7): 67-70. (TANG Wei, LI Dianpu, CHEN Xueyun. Chaos theory and research on its applications [J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(7): 67-70. (in Chinese))
- [12] 桂传志. 混沌序列在优化理论中的应用[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.
- [13] 刘磊, 姜博文, 周恒扬, 等. 融合改进 Sine 混沌映射的新型粒子群优化算法[J]. 西安交通大学学报, 2023, 57(8): 182-193. (LIU Lei, JIANG Bowen, ZHOU Hengyang, et al. A novel particle swarm optimization algorithm incorporating improved Sine chaos mapping [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2023, 57(8): 182-193. (in Chinese))
- [14] 刘志强, 何丽, 袁亮, 等. 采用改进灰狼算法的机器人路径规划[J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(10): 49-60. (LIU Zhiqiang, HE Li, YUAN Liang, et al. Path planning of mobile robot based on TGWO algorithm [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(10): 49-60. (in Chinese))
- [15] 刘道华, 原思聪, 兰洋, 等. 混沌映射的粒子群优化方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2010, 37(4): 764-769. (LIU Daohua, YUAN Sicong, LAN Yang, et al. Method of particle swarm optimization based on the chaos map [J]. Journal of Xidian University, 2010, 37(4): 764-769. (in Chinese))
- [16] CHENG C T, OU C P, CHAU K W. Combining a fuzzy optimal model with a genetic algorithm to solve multi-objective rainfall-runoff model calibration [J]. Journal of Hydrology, 2002, 268(1/2/3/4): 72-86.
- [17] VRUGT J A, GUPTA H V, BASTIDAS L A, et al. Effective and efficient algorithm for multiobjective optimization of hydrologic models [J]. Water Resources Research, 2003, 39(8): 1214.
- [18] ENDRENY T A. Land use and land cover effects on runoff processes: urban and suburban development [M]// ANDERSON M G, ed. Encyclopedia of Hydrological Sciences. Chichester: John Wiley & Sons, 2005.
- [19] 李蓉, 张晶晶, 毛梦妮. 九江市一次锋前降水过程地形作用分析[J]. 江西科学, 2024, 42(1): 182-186. (LI Rong, ZHANG Jingjing, MAO Mengni. Topographic effect analysis of a pre-frontal precipitation process in Jiujiang [J]. Jiangxi Science, 2024, 42(1): 182-186. (in Chinese))
- [20] 袁绍春, 李迪, 陈垚, 等. 基于 BP 神经网络算法的 SWMM 参数自动率定方法[J]. 中国给水排水, 2021, 37(21): 125-130. (YUAN Shaochun, LI Di, CHEN Yao, et al. Automatic calibration procedure of storm water management model parameters based on back propagation neural network algorithm [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(21): 125-130. (in Chinese))
- [21] ROSSMAN L A. Storm water management model [M]. Cincinnati: U. S. Environmental Protection Agency, 2010.
- [22] 李美水, 杨晓华. 基于 Sobol 方法的 SWMM 模型参数全局敏感性分析[J]. 中国给水排水, 2020, 36(17): 95-102. (LI Meishui, YANG Xiaohua. Global sensitivity analysis of SWMM parameters based on Sobol method [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(17): 95-102. (in Chinese))

(收稿日期: 2024-10-08 编辑: 俞云利)