

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.21.019

# 基于差分进化算法的雨水调蓄设施优化调度研究

李俊德<sup>1</sup>, 范功端<sup>1</sup>, 邹建勇<sup>2</sup>

(1. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108; 2. 安徽省城建设计研究总院股份有限公司, 安徽 合肥 230051)

**摘要:** 针对目前雨水调蓄利用设施削减径流峰值效果不佳、调度决策滞后等问题, 结合不同的实际调度需求, 提出了一种调度决策方案, 即在区域暴雨洪水管理模型(SWMM)分析的基础上, 利用临近降雨预报数据构建临近降雨预测序列, 应用差分进化算法驱动 SWMM 模型进行决策值寻优, 以获取最优目标值下的决策方案。利用 Python 完成相应决策系统的构建后, 通过分析决策方案的特点, 深入探究方案在实际应用中的优势与局限。模拟结果表明, 该方案能够有效降低区域出口的径流峰值流量, 减轻区域内涝压力。

**关键词:** 雨水调蓄设施; 实时调度优化; 差分进化算法; 暴雨洪水管理模型; Python  
**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)21-0119-06

## Optimal Scheduling of Rainwater Storage Facilities Based on Differential Evolution Algorithm

LI Jun-de<sup>1</sup>, FAN Gong-duan<sup>1</sup>, ZOU Jian-yong<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 2. Anhui Urban Construction Design and Research Institute Co. Ltd., Hefei 230051, China)

**Abstract:** At present, the rainwater storage and utilization facilities have the problems such as poor performance to reduce the runoff peak and the lag of scheduling decision. A scheduling decision method was thus proposed according to different actual scheduling requirements. Based on the analysis of regional storm water management model (SWMM), the data of the precipitation now-casting was used to establish the forecast sequence of the near rainfall, and the differential evolution algorithm was applied to drive the SWMM to search for the optimal decision value to obtain the optimal decision scheme. After using Python to complete the establishment of the corresponding decision system, the advantages and limitations of the scheme in practical application were deeply explored by analyzing the characteristics of the decision-making scheme. According to the simulation results, the proposed scheme effectively reduced the peak runoff at the regional outlet and reduced the regional waterlogging pressure.

**Key words:** rainwater storage facility; real-time scheduling optimization; differential evolution algorithm; storm water management model; Python

基金项目: 福建省住房和城乡建设系统科学技术项目(2016-K-42、2019-K-50); 福建省自然科学基金资助项目(2019Y3003)

通信作者: 范功端 E-mail: fgdfz@fzu.edu.cn

雨水调蓄设施的合理建设可以减轻市政雨水管网的排水压力,提升区域整体防洪能力<sup>[1-2]</sup>。程江等人<sup>[3]</sup>研究表明,进水模式、泵站和调蓄池控制系统整合等对雨水调蓄设施的调蓄效果影响较大。但目前的雨水调蓄设施控制大多较为粗放,难以有效发挥设施削减径流洪峰的能力。部分雨水调蓄设施采用的预案式调度虽能够在一定程度上提升调蓄效果,但由于不同场次降雨强度分布存在差异,少数的几套预案仍难以充分适应每场降雨的特征并进行针对性调控,且预案执行的时机往往也难以准确掌握,导致调蓄设施调度运行效果欠佳。

针对上述问题,笔者提出并利用 Python 实现一种调蓄设施调度优化方法,以完成小区域内兼具雨水利用功能的雨水调蓄设施的实时调度优化决策:通过获取临近降雨预报数据以构建降雨序列,结合暴雨洪水管理模型(SWMM)进行临近降雨径流模拟,使用差分进化算法驱动 SWMM 进行调度决策寻优,从而确定调蓄设施调度方案。同时,通过比较差分进化算法在处理不同决策变量下的表现,研究分析方案在工程实际应用中的特点与适用情况。

### 1 差分进化算法决策系统的基本构建

本研究利用 Python 进行差分进化算法实时决策系统的构建,如图 1 所示。

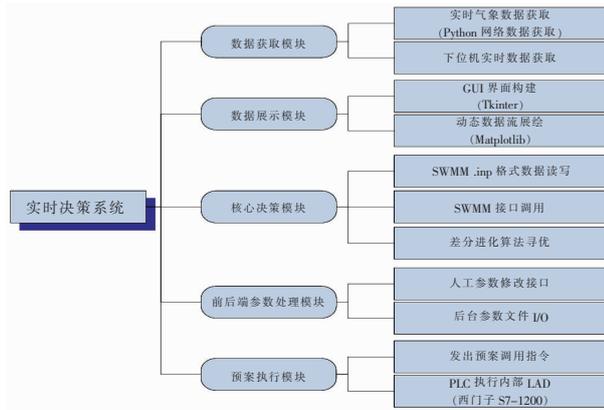


图 1 实时决策系统架构

Fig. 1 Architecture of real-time decision system

在本研究中,所获取的外界信息主要为气象数据提供商发布的基本气象信息与临近降雨预报信息。在 Python 中,利用 request 库访问气象信息提供商的 WebAPI,根据地区经纬度、地区编号等信息,获取相应 URL 内的 JSON 数据,利用 JSON 库进行解析并存储至程序内部变量中,为决策提供基本数据支持。此外,为便于系统后续的投产使用,研究中

设计了相应的可编程逻辑控制器(PLC)通讯接口以实现传感器采集信息的回传与执行命令的下达。在图形用户界面(GUI)的构建方面,本研究利用 Tkinter 库构建基本图形界面,结合 Matplotlib 进行实时监控数据与计算数据的展示,如图 2 所示。

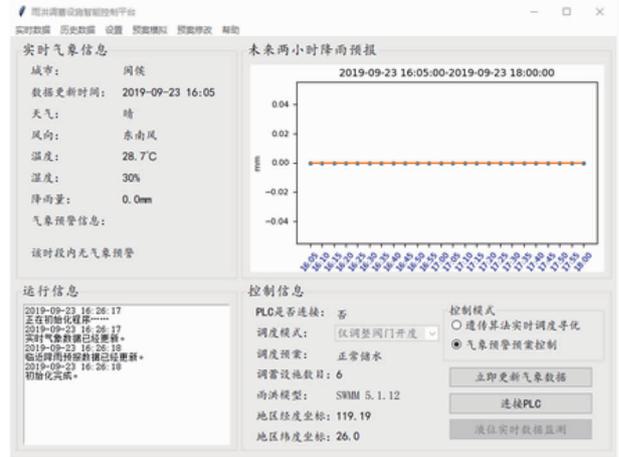


图 2 决策系统图形用户界面

Fig. 2 Graphical user interface of decision support system

作为核心,决策模块的作用在于将采集的信息与初始构建完成的 SWMM 模型进行配合,完成实时预案的决策模拟寻优。首先对气象数据进行处理,用于 GUI 界面的更新,并写入临近降雨序列至 SWMM 的 .inp 文件中,为差分进化算法寻优提供基础。应用差分进化算法进行参数寻优时,根据种群中个体向量的值将对应的控制语句写入 .inp 文件,并在 Python 中调用 SWMM 接口<sup>[4-5]</sup>,读取写入完成的 .inp 文件进行种群中个体的评估。种群个体评价的计算过程利用研究中所设计的并行计算架构进行优化;在变异、交叉、选择操作中,利用 NumPy 库进行大规模矩阵计算,以提高计算效率。

前后端参数处理中,通过 GUI 界面提供的用户参数修改接口,实现系统用户指定参数的修改;通过后台文件的储存与读取,实现相关参数的保存与自动初始化。完成寻优决策值的确定后,系统进行内部计算转换,将寻优决策值转为输入 PLC 的通讯传输值,与 PLC 进行通讯,完成预案执行。

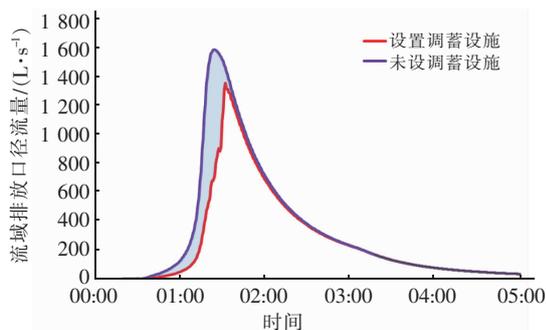
### 2 决策优化原理分析

雨水调蓄利用设施可分为两大类,一类是合流制或分流制排水系统中进行初期径流污染控制的雨水调蓄设施<sup>[6]</sup>,在运行中的调蓄目标主要是尽可能多地收集污染程度较重的初期雨水;而另一类则是

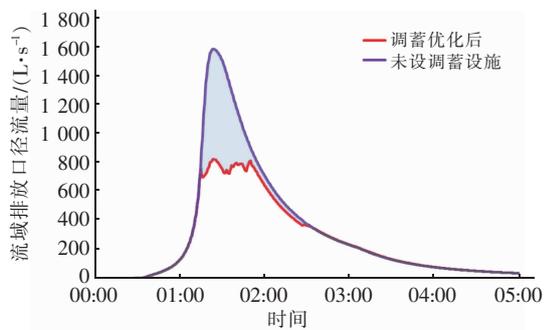
兼具雨水利用或景观用途的调蓄设施与调蓄水体,主要存蓄污染物浓度较低的中后期雨水,以降低雨水利用/处理设施的处理负荷或维持稳定的水体水质。本研究针对的是兼具雨水利用功能的雨水调蓄设施,需要对初期雨水直接弃流,选定合适的开闸时机以接纳雨水管网进水。

在独立降雨过程中,降雨强度往往会呈现先增大后减小的变化趋势<sup>[7]</sup>。而径流流量变化虽在时间上迟滞于降雨强度的变化,但二者的总体变化趋势依然相似<sup>[8]</sup>。在普通的降雨过程中,降雨初期的径流量在雨水排水系统的承载范围内,并不会对区域排水安全构成威胁,往往在降雨中后期径流量较大、超过排水系统的排水能力时,内涝才会发生。

如图 3(a)所示,在雨水调蓄设施运行过程中,如果不加区分地收集初期降雨径流,将占用大量调蓄容积,使得调蓄设施在超出系统排水能力的高位径流到来之前就已耗尽调蓄库容,导致无法有效缓解内涝。反之,如图 3(b)所示,如果合理设置开闸时机,并通过调整进水阀门开度及进水水泵等方法控制调蓄设施的进水流量,则能充分利用调蓄库容,针对性地削减径流峰值,起到良好的调节效果。



a. 设置雨水调蓄设施且未进行调度优化



b. 设置雨水调蓄设施并进行调度优化

图 3 雨水主干管汇流排放口径流峰值对比

Fig. 3 Comparison of peak runoff at confluence outfall of rainwater main pipe

在本研究中,进行调度控制的目标在于充分削减区域汇流出口的径流峰值,以防管道中出现超出容纳能力的洪峰。同时,较低的径流峰值也能减轻下游区域排水管网的排水压力,进一步提升下游地区的排水安全。

### 3 基于临近降雨预报的实时决策

考虑到基于已有预案下的调度只能适应单一的情况,并不能很好地适应不同场次降雨条件下的不同雨型雨量分布,本研究提出了一种能够自适应每场降雨分布的调蓄设施优化调度方法,依托于前述决策平台,基于临近降雨预报构建降雨序列,并进行实时寻优,以适应每场降雨的特点。具体步骤如图 4 所示。

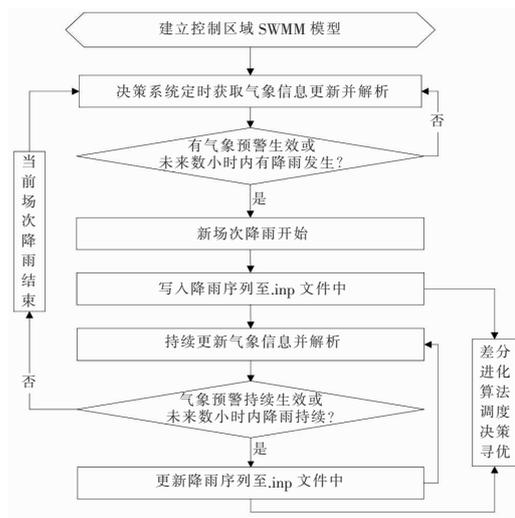


图 4 基于临近降雨预报的实时决策实现步骤

Fig. 4 Real-time decision making steps based on precipitation now-casting

本研究通过直接获取临近降雨预报数据,解析未来数小时内的分钟级降雨预报数据,用以构建降雨序列,具体分为以下步骤:①从 WebAPI 获得以 JSON 格式储存的临近降雨预报数据后,利用 Python 的 JSON 库对数据进行解析,将数据提取为 Python 的列表,并进行序列值的逐一判断;②若判断序列中有非零值(即未来数小时内有降雨发生),或有暴雨气象预警、雷电气象预警生效,则记录当前时刻为本场次降雨开始时刻,将时间序列与降雨序列写入至 .inp 文件中 [TIMESERIES] 栏目下的时间系列中,并在 [RAINGAGES] 中设置雨量计的数据源,同时将雨量格式设置为 VOLUME,时间步长根据气象数据提供方提供的降雨序列密度进行设置,完成降雨序列

的设置后即进行差分进化算法的寻优;③根据气象数据提供高的临近降雨预报数据更新频率,持续获取临近降雨预报信息的更新,若临近降雨预报序列中仍有非零值,或气象预警仍在生效时,则用更新后的降雨预报序列替换前一次预报序列更新中当前时刻及其后的降雨序列,完成降雨序列的更新;④若预报序列中各时间段降雨量数据均为 0,且没有气象预警仍在生效,则确定当前场次降雨结束,清空降雨序列并回到步骤①。

进行差分进化算法寻优时,SWMM 中阀门开度与开阀时间的设置通过在 SWMM 的输入文件中写入的条件控制规则完成:以模拟时间(SIMULATION TIME)作为条件,以连接调蓄池(Storage Unit)的孔口管段(Orifices)或者堰管段(Weirs)的开启分数(SETTING)作为被控对象,在 .inp 文件中写入对应的控制语句,同时需要根据实际工程的控制模式,设置相应的进水管段关闭规则。需要注意的是,建模过程中需要根据实际工程中的阀门类型、阀门型号确定 SWMM 模型中连接管道的类型(孔口管段或者堰管段)与具体的设施参数。此外,由于 SWMM 模型求解计算量较大,限于 Python 的全局解释器锁机制,多线程的程序架构在大计算量的工作中效率不佳<sup>[9]</sup>,研究中利用 Multiprocessing 库进行多进程并行计算,所使用的进程数与算法中的种群个体数相同,多个进程可自动分配给空闲的 CPU 进行计算,从而充分利用 CPU 中多个核心与子线程以提高计算效率。

#### 4 实例分析

以某大学学生生活区为例进行研究,结合现场踏勘与设计图纸原始资料,建立区域 SWMM 模型。在进行子汇水区的划分与参数率定时,以雨水斗与雨水口作为收水节点,利用泰森多边形法进行子汇水区划分,并结合区域 DEM 数据,利用 ArcGIS 中的坡度分析工具确定各个子汇水区的坡度<sup>[10]</sup>。完成建模后,共确定 193 个子汇水区、325 个节点、331 条管段、6 个调蓄节点与 1 个排放口,总调蓄容积为 1 245 m<sup>3</sup>。研究区域的雨水管网与子汇水区划分情况如图 5 所示。

应用芝加哥雨型构建测试降雨序列,结果见图 6。考虑到历史降雨过程统计结果<sup>[7]</sup>,峰值系数  $r$  取 0.4。降雨序列采用当地暴雨强度公式,重现期为 62.5 年,降雨历时为 3 h,降雨总量为 100.0 mm。



图 5 研究区域的雨水管网与子汇水区划分情况  
Fig. 5 Rainwater drainage system and subcatchments in study area

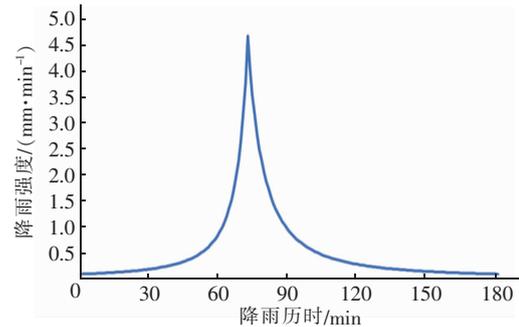


图 6 测试降雨序列  
Fig. 6 Testing rainfall sequence

#### 4.1 差分进化算法决策变量与算法参数的选取

在基于临近降雨预报的实时决策中,目标函数为排放口峰值流量。有多种决策变量组合可选取,本研究制定了两种决策变量组合进行分析,如下:

① 统一开阀时间 + 阀门开度决策变量组合:以统一的开阀时间与每个调蓄设施的进水管阀门开度作为决策变量进行寻优,共有  $n + 1$  个决策变量 ( $n$  为调蓄设施数量),在此寻优模式下,开阀时间的寻优区间根据排放初期雨水的需求进行确定。

② 独立开阀时间 + 阀门开度决策变量组合:根据每个调蓄设施情况设置不同的开阀时间与阀门开度进行寻优,共有  $2n$  个决策变量,在此寻优模式下,每个调蓄设施有独立的开阀时间决策变量与阀门开度决策变量,能进行更加精细化的调度控制。

利用降雨历时为 3 h 的测试降雨序列,结合构建的学生生活区 SWMM 模型进行研究。在未设置任何调蓄设施的情况下,径流峰值为 1 579.61 L/s,

设置调蓄设施后,径流峰值为 1 351.41 L/s,未优化状态下的径流峰值削减率仅能达到 14.45%。研究中采用差分进化算法 DE/target - To - Best/1/bin<sup>[11]</sup>进行寻优,进化代数设置为 30 代,差分进化算法中基向量矩阵参数  $k$  的取值为 0.5,差分变异缩放因子  $F$  取 0.8,交叉概率  $pc$  取 0.2,针对每种决策变量方案与种群个体数取值,重复进行 20 组蒙特卡洛仿真,并将结果取均值,考察算法在实际应用中的表现;并在进化代数为 600 代、种群个体数为 16 的情况下进行实验,考察算法的总体收敛表现,所得实验结果如图 7 和图 8 所示(测试计算机 CPU:i7 - 4790,四核八线程)。

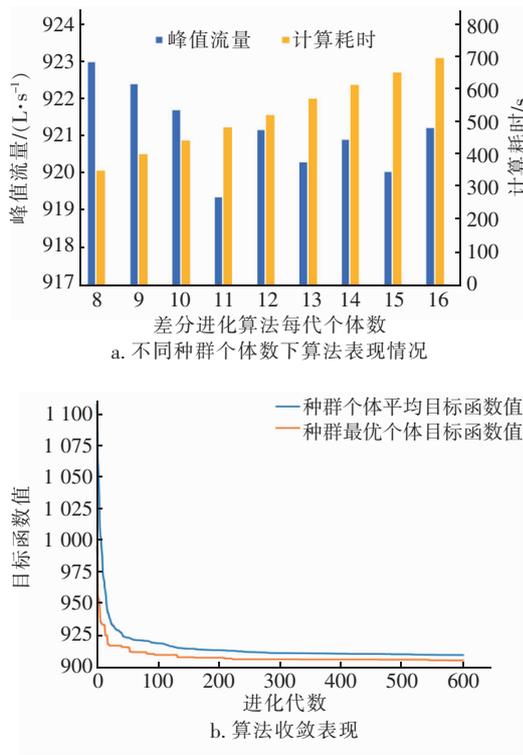


图 7 统一开阀时间 + 阀门开度决策变量组合实验结果  
Fig.7 Combination experiment results of unified valve opening time and valve opening decision variable

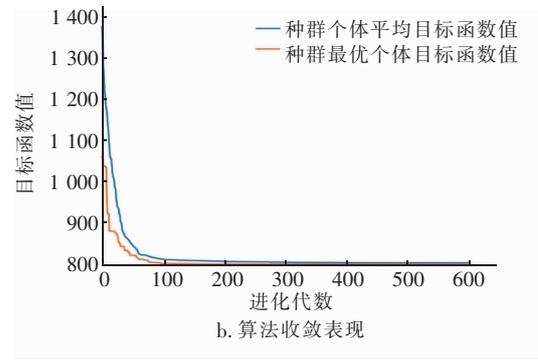
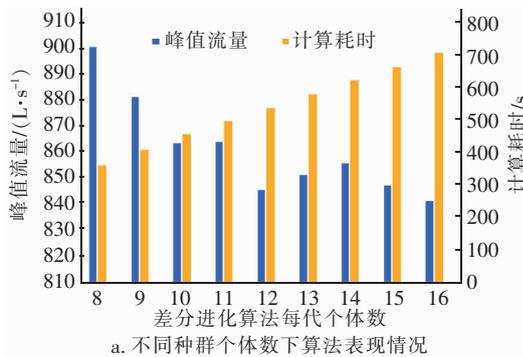


图 8 独立开阀时间 + 阀门开度决策变量组合实验结果  
Fig.8 Combination experiment results of independent valve opening time and valve opening decision variable

分析实验结果可知,在统一开阀时间 + 阀门开度决策变量组合下,当子代个体数达到 11 个及以上时,算法最终优化后的径流峰值在 925 L/s 左右收敛;600 代进化后,径流峰值在 905.31 L/s 收敛,径流峰值削减率仅能达到 42.69%,相较于穷举得出的最优结果 818.23 L/s,出现明显早熟现象,陷入局部最优。在实际应用过程中,若采用此方法,可考虑将种群个体数设为 11 代。

而在独立开阀时间 + 阀门开度决策变量组合下,当子代个体数达到 12 个及以上时,算法最终优化后的径流峰值在 850 L/s 左右收敛;同时,在 600 代进化的实验中,算法也能够较快地收敛到最优值 797.14 L/s,径流峰值削减率达到 49.53%,寻优情况较为理想。在实际应用中,采用此方法时将种群个体数设为 12 代较为合理。

#### 4.2 应用分析

结合实际应用场景进一步分析,在统一开阀时间 + 阀门开度决策变量组合中,虽然该变量组合能够减少算法的决策变量数目并缩小小搜索空间,但因算法陷入局部最优,调蓄后的径流峰值较大,调蓄效果反而劣于阀门开度决策变量组合;此决策变量组合对上位机计算能力的要求不高,但应用中需克服算法陷入局部最优的问题,需进一步改进算法在变异过程中所采用的方法,或修改算法中变异步骤的缩放因子与交叉概率。

独立开阀时间 + 阀门开度决策变量组合下,限于测试计算机的计算能力,算法在 10 min 内难以收敛,但最终仍可达到较好的调蓄效果,同时随着迭代代数的增多,算法最终能较快地收敛于较优值。在实际工程应用中,上位计算机若能尽量选用核心数

较高、线程数较多的 CPU,提高多子代个体下的并行计算能力,将能够得到更优的调度寻优结果。

此外,具体工程中的实际计算量、算法耗时与 SWMM 模型的规模、复杂程度、调蓄设施数量等因素关系密切,特别是调蓄设施数量将直接影响决策变量个数,对算法的收敛与消耗时间影响较大。实际工程中,需根据临近降雨预报的发布时间间隔、具体预报时间精度等技术参数,结合区域内 SWMM 模型的复杂程度及上位机的计算能力等因素进行综合考虑,确定适合的决策变量组合与算法参数。

## 5 结论

本研究提出一种雨水调蓄设施的实时调度优化决策方案。基于临近降雨预报的实时决策方案能够更好地适应每场降雨的雨强分布,可根据所部署上位机的计算能力与区域 SWMM 模型的复杂程度选择不同的决策变量与算法参数,具有较好的灵活性。后续研究中,可进一步针对区域内涝情况,以易涝节点的水位为目标函数进行单目标寻优,或者以易涝节点的水位结合区域出流点的峰值流量进行多变量寻优,也能够区域内起到良好的内涝控制效果。

## 参考文献:

- [1] 张勤,陈思飏,蔡松柏,等. LID 措施与雨水调蓄池联合运行的模拟研究[J]. 中国给水排水,2018,34(9): 134-138.  
ZHANG Qin, CHEN Siyao, CAI Songbai, *et al.* Simulation of LID measures combined with stormwater detention tank[J]. China Water & Wastewater,2018,34(9):134-138(in Chinese).
- [2] 程江. 苏州河储存式雨水调蓄池水环境质量改善效应分析[J]. 中国给水排水,2014,30(1):104-108.  
CHENG Jiang. Analysis of water quality improvement in Suzhou Creek by stormwater detention tanks[J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(1): 104-108(in Chinese).
- [3] 程江,祁继英,许莉. 上海市成都路雨水调蓄池进水模式优化[J]. 中国给水排水,2014,30(5):104-108.  
CHENG Jiang, QI Jiyong, XU Li. Inlet mode optimization of Chengdulu stormwater detention tank in Shanghai[J]. China Water & Wastewater,2014,30(5):104-108(in Chinese).
- [4] 周云峰. SWMM 排水管网模型灵敏参数识别与多目标优化率定研究[D]. 杭州:浙江大学,2018.  
ZHOU Yunfeng. Sensitive Parameter Identification and Multi-objective Optimization Calibration of SWMM Drainage Pipe Network Model[D]. Hangzhou: Zhejiang University,2018(in Chinese).
- [5] RIANO-BRICENO G, BARREIRO-GOMEZ J, RAMIREZ-JAIME A, *et al.* MatSWMM—an open-source toolbox for designing real-time control of urban drainage systems [J]. Environmental Modelling & Software, 2016,83:143-154.
- [6] 王肖军. 初期雨水调蓄池在城市排水系统中的应用[J]. 中国给水排水,2012,28(10):45-47.  
WANG Xiaojun. Application of initial rainwater storage tanks in urban drainage system [J]. China Water & Wastewater,2012,28(10):45-47(in Chinese).
- [7] 殷水清,王杨,谢云,等. 中国降雨过程时程分型特征[J]. 水科学进展,2014,25(5):617-624.  
YIN Shuiqing, WANG Yang, XIE Yun, *et al.* Characteristics of intra-storm temporal pattern over China [J]. Advances in Water Science,2014,25(5):617-624(in Chinese).
- [8] 王兆亮. 雨水调蓄池理论技术研究[D]. 重庆:重庆大学,2013.  
WANG Zhaoliang. Study on Theory and Technology of the Rainwater Detention Tanks [D]. Chongqing: Chongqing University,2013(in Chinese).
- [9] ZACCONE G. Python Parallel Programming Cookbook [M]. Birmingham:Packt Publishing,2019:66-72.
- [10] 杨祺琪,张书亮,戴强,等. 基于 SWMM 和改进差分进化算法的雨水管网优化方法[J]. 中国给水排水,2016,32(17):115-118.  
YANG Qiqi, ZHANG Shuliang, DAI Qiang, *et al.* Optimization of rainwater pipe network based on SWMM and improved algorithm of differential evolution [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(17): 115-118(in Chinese).
- [11] PRICE K V, STORN R M, LAMPINEN J A. Differential Evolution: A Practical Approach to Global Optimization [M]. Berlin: Springer, 2005: 140.

作者简介:李俊德(1998-),男,福建泉州人,本科,研究方向为给排水系统设计运行最优化。

E-mail:lijunde980606@163.com

收稿日期:2019-10-16

修回日期:2020-01-03

(编辑:刘贵春)