

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.13.019

NSGA-Ⅲ耦合的LID设施布局多目标优化设计

钟 炜, 张俊鹏

(天津理工大学 管理学院, 天津 300384)

摘 要: 针对短时突发暴雨对城市造成内涝和水体污染的问题,优化城市低影响开发(LID)设施布局,运用NSGA-Ⅲ算法实现暴雨情景下LID设施布局的径流系数控制、径流污染控制和成本控制多目标优化,将优化的帕累托解集中的最优结果输入SWMM模型中进行模拟。以天津市滨海新区生态城突发暴雨情况为实例进行研究,结果表明,优化后的LID设施布局可使管渠积水深度降低18.6%,径流污染物综合削减率达到41.4%,在总支出成本相同的情况下,优化后的LID设施布局使径流污染物排放量减少了5.82%,可有效解决城市内涝和径流污染问题。

关键词: 城市内涝; 低影响开发(LID)设施布局; 径流污染控制; 成本控制; NSGA-Ⅲ算法

中图分类号: TU992 文献标识码: A 文章编号: 1000-4602(2025)13-0131-06

Multi-objective Optimization Design of LID Facility Layout with NSGA-Ⅲ Coupling

ZHONG Wei, ZHANG Jun-peng

(School of Management, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract: This study optimized the layout of urban low impact development (LID) facilities to address the issues of urban waterlogging and water pollution caused by sudden and intense rainfall events. The NSGA-Ⅲ algorithm was employed to achieve multi-objective optimization for runoff coefficient control, runoff pollution control, and cost control of the LID facilities layout under heavy rainfall scenarios. The optimal solution from the Pareto-optimized solution set was then integrated into the SWMM model for simulation. An example-based study was conducted on the occurrence of sudden heavy rainfall in the Sino-Singapore Tianjin Eco-City. The findings indicated that the optimized LID facilitated layout could decrease the pipe channel water depth by 18.6%, with the comprehensive runoff pollutants reduction rate of 41.4%. Under the same total expenditure cost, the optimized LID facilities layout further reduced runoff pollutants emission by 5.82%. This approach can effectively address urban waterlogging and runoff pollution issues.

Key words: urban flooding; layout of LID facilities; runoff pollution control; cost control; NSGA-Ⅲ algorithm

近年来,我国极端强降雨频发,导致城市洪涝灾害和降雨径流污染增加,严重影响人民生命安全和

基金项目: 天津市智能制造专项资金资助项目(20201195)

通信作者: 张俊鹏 E-mail: jpzhang0810@163.com

城市水体水质,为此引入了低影响开发(LID)雨洪管理技术。LID设施通过源头控制实现对暴雨所产生的洪峰、径流和污染的控制^[1],其优化布置可有效增加雨水下渗率,通过植物吸收、过滤、下渗、滞蓄等多种途径有效净化控制径流中的磷、氮等污染物。影响LID设施布局优化的关键因素包括城市地形、土地利用类型、降雨情况、土壤类型等^[2]。目前针对LID设施布局优化的相关研究侧重于洪峰流量、径流量、污染物控制和成本效益管控等方面^[3-5],耦合SWMM模型进行LID控制效果模拟,分析不同暴雨重现期下的控制情况。但目前多目标优化研究算法集中在NSGA-Ⅱ算法、多目标进化算法(MOEA)、粒子群算法和遗传算法耦合(PSO-GA)等^[6-7],目标函数设定较为简单,多为两个目标函数,且经济成本未考虑时间因素。鉴于此,笔者引入NSGA-Ⅲ算法,可解决3个以上目标的LID设施布局优化问题^[8],并考虑净现值和边际成本两个要素,选取帕累托最优解;在此基础上引入空间化表征的GIS模型^[9],在城市地形及土地利用类型等背景下,考虑径流量、径流污染物削减率和LID建设成本多目标优化,模拟分析城市各子汇水区域洪涝情况和径流污染情况,以期为解决城市内涝和水体污染问题提供参考。

1 模型构建

1.1 NSGA-Ⅲ模型

NSGA-Ⅲ算法是在NSGA-Ⅱ的基础上进一步提出的更为先进的算法,可用于解决多目标优化问题,通过理想点机制,使其所得解在非支配层上分布均匀,解决局部最优问题,具有较好的收敛性与多样性^[10]。NSGA-Ⅲ算法的目标参数处于对抗关系时,几个参数的增加伴随着其他几个参数的减少。因此,很难找到满足NSGA-Ⅲ多目标优化中所有目标的最佳结果,而是得到一组帕累托(Pareto)最优解,称为帕累托前沿。本研究通过考虑边际成本实现帕累托解集中最优解的选取。

1.2 目标函数

本研究针对城市LID设施布局优化问题,以降雨区域径流系数最小、径流污染物总体削减率最高和LID设施建设成本最小为目标,进行LID设施布局的多目标优化。

径流系数最小的目标函数如下:

$$W_1 = \min \frac{\varphi_0 \times A_0 + \sum_{i=1}^4 \varphi_i \times A_i}{A} \quad (1)$$

式中: φ_0 为未设置LID设施区域的径流系数; A_0 为未设置LID设施区域的面积, m^2 ; φ_i 表示第*i*种LID设施的径流系数,具体见表1; A_i 为第*i*种LID设施的布设面积, m^2 ;A为研究区域的总面积, m^2 。

表1 LID设施的基本参数

Tab.1 Basic parameters of LID facilities

项目	径流系数	SS去除率/%	TP去除率/%	氨氮去除率/%	COD去除率/%	建设费用/(元· m^{-2})	维护成本/(元· a^{-1})	使用期限/a
植草沟	0.375	70	50	55	25	150	5	15
绿色屋顶	0.327	55	65	30	35	400	8	15
透水铺装	0.028	80	60	35	35	200	5	10
雨水花园	0.119	40	40	50	40	600	5	15

径流污染物削减率的目标函数如下:

$$W_2 = \max \frac{\sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 (C_{ij} \times \sigma_j \times A_i)}{A} \quad (2)$$

$$C_{ij} = \frac{V_j - V_{ij}}{V_j} \quad (3)$$

式中: V_j 为无LID设施时第*j*种污染物的排放量, mg/L ; V_{ij} 为布设第*i*种LID设施后第*j*种污染物的排放量, mg/L ; σ_j 为第*j*种污染物的综合权重系数; A_i 为研究区域第*i*种LID设施的建设面积, m^2 。

LID设施建设成本的目标函数如下:

$$W_3 = \min \frac{\sum_{i=1}^4 A_i \times P_i \times (1 + M_i)}{(1 + r)^n} \quad (4)$$

式中: P_i 为第*i*种LID设施的建设费用; M_i 为第*i*种LID设施每年的维护费用,具体见表1; r 为折现率,取值为10%; n 为设施使用期限,在该研究中*n*取15年。

1.3 约束条件

径流量以汇水单元水量平衡作为约束条件,采用曼宁公式可以很好地解决明渠道流体为非恒定均匀流的计算问题^[11],考虑水深和汇水面积构建水量平衡公式如下:

$$\frac{dQ}{dt} = S \frac{dh}{dt} = S \times q \times 10^{-3} - Q_{\text{out}} \quad (5)$$

式中: Q 为径流总量; S 为汇水单元面积; q 为*t*时段的径流量,由降雨量减去蒸发量和下渗量得

到; Q_{out} 为降雨量流出部分。

根据《天津市排水专项规划(2020—2035年)》,结合研究区域的LID设施达标面积评估标准,可以得到:

$$\frac{\sum_{i=1}^4 A_i}{A} \times 100\% \geq 60\% \quad (6)$$

为保证布置LID设施之后的雨水径流控制效果达到年径流量削减率的标准,考虑到海滨城市性质,确定雨水综合径流系数在0.3~0.7之间,即 $0.3 \leq W_1 \leq 0.7$ 。

根据《海绵城市建设效果监测与评估规范》(DB 11/T 1673—2019),为保证城区LID设施建设达到标准,确定年径流污染物削减率 $W_2 \geq 20\%$ 。

2 场景分析

2.1 场景设计

选取天津市滨海新区生态城某区域构建SWMM模型,其土壤类型属于潮土类,整体的土壤渗透率较低,主要为微透水,局部地区为弱透水,因此滞水现象比较严重。根据研究区域的相关地形地势,对接GIS地图信息,获取该区域的土地使用类型、建筑类型分布以及雨水排水管网的走向和排水分区现状,确定防涝重点区域,总面积约为4 km²,共划分为62个子汇水区域、43条雨水管道、2个排水口,研究区域概化如图1所示。

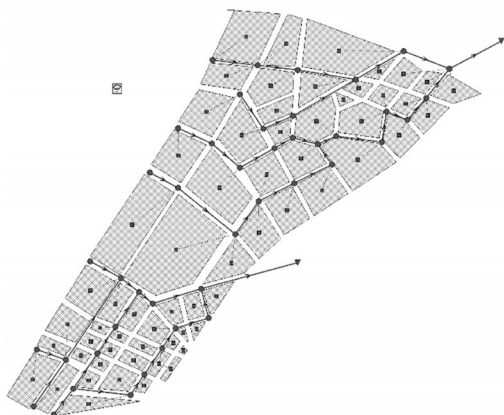


图1 研究区域的SWMM模型概化示意

Fig.1 SWMM model generalization for study area

通过GIS地图信息获取不同城市功能区的SWMM不确定性参数取值,输入到SWMM模型中。研究区域主要包括工商业区、居住区和公共用地3种功能区,工商业区以硬化路面为主,居住区域的绿化程度较好、地面粗糙度较大,公共用地以停车

场、园林为主,具体参数如表2所示。

表2 不同城市功能区的SWMM不确定性参数

Tab.2 SWMM uncertainty parameters for different urban functional areas

项目	透水区 注蓄量/ mm	不透水 区注蓄 量/mm	最大入 渗率/ (mm·h ⁻¹)	最小入 渗率/ (mm·h ⁻¹)	透水区 曼宁系 数	不透水 区曼宁 系数
工商业区	2.73	1.91	31.69	3.0	0.17	0.01
居住区	5.97	4.16	41.66	4.5	0.48	0.14
公共用地	12.07	11.94	67.74	7.0	0.65	0.40

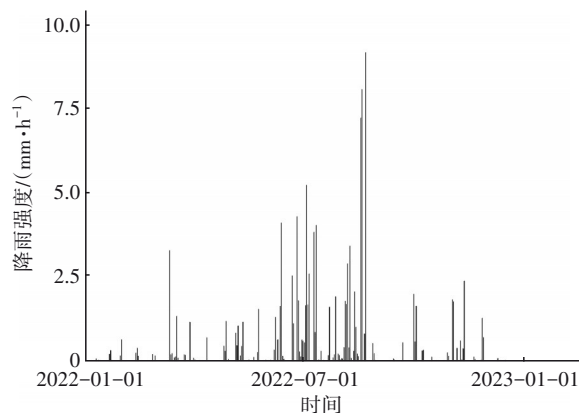
2.2 参数设置

2.2.1 降雨参数

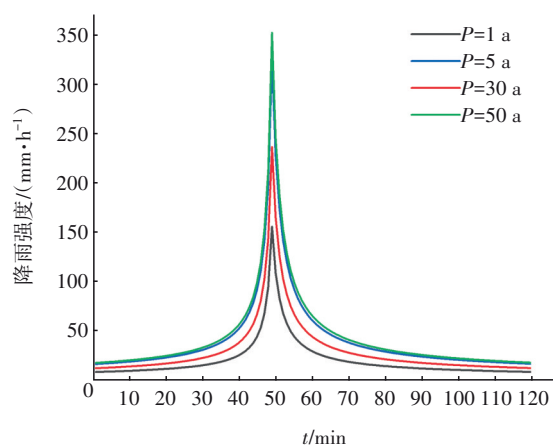
研究区域属于温带大陆性季风气候,降雨主要集中在夏季(6月—8月),夏季的降雨量占全年降雨量的74%,其中7月—8月的降雨量可以占到全年降雨量的53%以上,降雨的过度集中导致城市容易出现内涝,径流量的增加也会使径流污染加剧。为了分析研究区域的降雨径流污染控制情况,选取2022年滨海新区实际降雨数据进行模拟计算,全年总降雨量为583.39 mm,降雨天数共119 d,以1 h为时间间隔,降雨时间序列如图2(a)所示。根据《天津市雨水径流量计算标准》,研究区域的暴雨强度公式如下:

$$q = \frac{2728(1 + 0.7672 \lg P)}{(t + 13.4757)^{0.7386}} \quad (7)$$

式中: q 为设计暴雨强度,mm/min; P 为设计重现期,a; t 为降雨历时,min。采用芝加哥雨型设计降雨场景,设置雨峰系数为0.4,暴雨历时为120 min,降雨重现期为1、5、30、50年一遇,降雨过程线如图2(b)所示。通过芝加哥雨型生成器得出,1、5、30、50年一遇设计降雨在120 min内的累计降雨量分别为53.02、81.45、113.11、122.13 mm。



a. 2022年滨海新区实际降雨情况



b. 设计降雨过程线

图2 降雨参数

Fig.2 Rainfall parameters

2.2.2 模型基本参数

SWMM 模型采用 Horton 下渗模型和动力波方程管网汇流模型,设定污染物增长和冲刷函数均为指数函数^[7]。水质参数的设置,考虑到初始取值随研究区域环境的不同而存在较大差异,通过查阅相关文献、总结研究区域气候条件及环境特征,将研究区域土地类型按照下垫面分为屋面、路面和绿地 3 种,从而确定各水质参数的取值范围。污染物积累参数和冲刷参数设定分别如表 3 和表 4 所示。

表3 污染物积累参数

Tab.3 Pollutant accumulation parameters

项目		SS	NH ₃ -N	TP	COD
屋面	最大积累量/(kg·hm ⁻²)	140	1.5	0.8	100
	积累常数/d ⁻¹	10	0.5	0.1	0.5
路面	最大积累量/(kg·hm ⁻²)	120	6	1.2	120
	积累常数/d ⁻¹	10	0.4	0.08	0.8
绿地	最大积累量/(kg·hm ⁻²)	130	1.5	0.8	50
	积累常数/d ⁻¹	8	0.3	0.1	0.5

表4 污染物冲刷参数

Tab.4 Pollutant flushing parameters

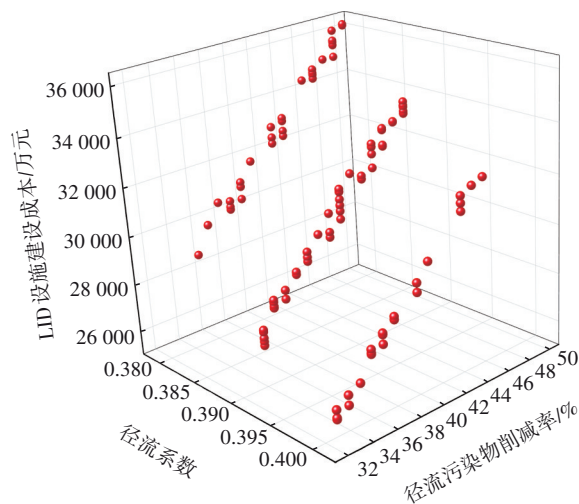
项目		SS	NH ₃ -N	TP	COD
屋面	冲刷系数	0.007	0.004	0.002	0.006
	冲刷指数	1.8	1.7	1.7	1.8
	降解系数 k/d ⁻¹		0.143	0.327	0.305
路面	冲刷系数	0.007	0.004	0.002	0.006
	冲刷指数	1.7	1.6	1.6	1.7
	降解系数 k/d ⁻¹		0.137	0.325	0.305
绿地	冲刷系数	0.007	0.004	0.002	0.006
	冲刷指数	1.7	1.6	1.6	1.7
	降解系数 k/d ⁻¹		0.195	0.405	0.305

3 结果与讨论

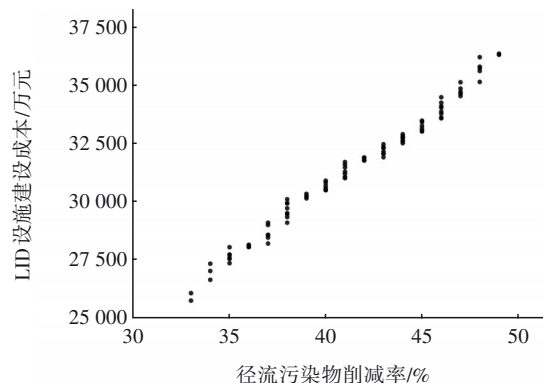
3.1 优化结果分析

通过分析 22 种 LID 设施的功能属性,最终选取径流峰值和污染物控制效果较好的 4 种 LID 设施:植草沟、绿色屋顶、透水铺装、雨水花园;另外,选取 SS、TP、NH₃-N、COD 这 4 种浓度较高的污染物作为评价指标。将 LID 设施布设参数及污染物控制情况输入到 NSGA-III 算法中进行运算。

NSGA-III 算法有效性的关键因素是参照点的选取,为了更准确地搜索 Pareto 最优解,构建超平面参照点选取机制,为保证迭代过程的收敛性,定义初始种群为 100 个,变异概率为 0.1,迭代 200 次进行模拟,得出 Pareto 解集散点图如图 3(a)所示,不同方案的径流系数控制在 0.38~0.40 之间,径流污染物削减率在 33%~48% 之间,LID 设施建设成本在 25 684.31~36 351.07 万元之间。



a. 帕累托解集



b. LID 设施建设成本与污染物削减率的关系

图3 NSGA-III 算法模拟结果

Fig.3 Simulation results of NSGA-III algorithm

从图 3(a)可以看出,LID 设施增加对径流污染

物削减率的影响较大,对径流系数影响较小,证明其对径流污染控制至关重要。考虑边际效益,采用如下公式选取最优解:

$$C_M = dC_T/dW \tag{8}$$

式中: C_M 为边际成本; C_T 为总成本; W 为径流污染物削减率。根据图3(b)所示的LID设施建设成本与径流污染物削减率之间的关系,选取最优方案如下:径流系数为0.40,径流污染物削减率为42%,LID设施建设成本为31 758.64万元。将得出的结果代入SWMM模型中进行模拟。

3.2 LID设施布局优化的径流污染控制效果

为最大化显示径流污染控制效果,选用2022年滨海新区生态城区域全年降雨数据,分析无LID设施、普通布设LID设施和优化布设LID设施对研究区域径流污染物的削减情况,普通布设按照满足海绵城市建设基本要求执行,其建设成本与优化布设的LID设施建设成本一致。模拟结果见表5。

表5 3种LID设施布设方案的径流污染物削减量

Tab.5 Reduction of runoff pollutants in three LID facility deployment schemes kg				
项目	TSS	COD	NH ₃ -N	TP
无LID	192 152.567	39 457.254	1 088.436	239.448
普通LID	120 287.507	23 713.809	682.293	161.867
优化LID	113 177.862	22 451.178	645.449	145.105

从表5可以看出,布设LID设施后,对雨水径流污染物的削减效果显著,在2022年全年实际降雨情况下,对研究区域内径流污染物SS、COD、NH₃-N、TP的削减率分别达到41.1%、43.1%、40.7%、39.4%,可得径流污染物综合削减率(根据径流污染物总量变化计算得出)为41.4%;在LID设施建设成本相同的情况下,优化布设LID设施比普通布设LID设施的径流污染物排放总量减少了8 425.882 kg,同比排放率降低了5.82%,可以看出,优化布设LID设施可以较好地降低径流污染。

3.3 城区内涝缓解情况

根据50年一遇暴雨情景的模拟结果,发现第110分钟左右为积水量最大节点,因此选取该时段的积水情况进行分析,得到3种不同方案的LID布设比例与管渠积水深度的对比如图4所示。从模拟结果可以看出,无LID设施方案中共有14段管渠出现积水达1.5 m以上的内涝风险,且最高达到2.52 m;普通布设LID设施方案中出现10段积水在1.5 m

以上的内涝风险,最高为2.1 m;在优化布设LID设施方案中,仅有两段管渠水深超过1.5 m,最深为1.77 m。由此可见,优化布设方案相比无优化布设方案可使积水深度降低18.6%,相比无LID设施方案可使积水深度降低42.4%。

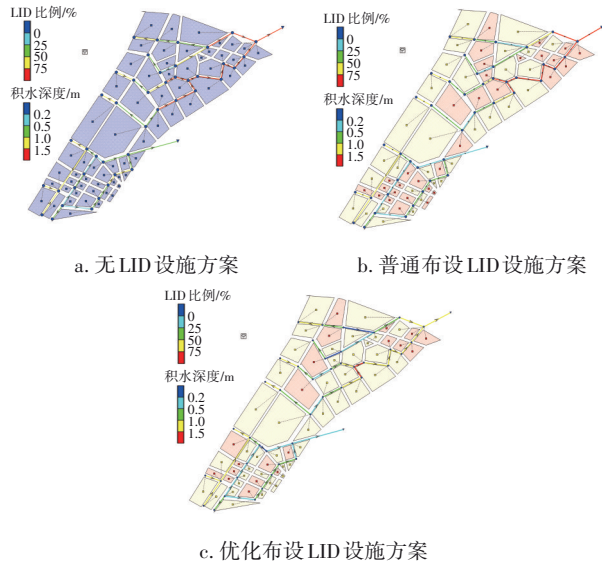


图4 3种LID设施布设方案的管渠积水情况

Fig.4 Pipe and canal ponding in three LID facility deployment schemes

4 结论

① NSGA-Ⅲ算法可通过不同LID设施面积变化实现径流系数控制、径流污染控制和LID设施建设成本3个目标的优化,其中建设成本考虑净现值和时间因素,引入折现率和使用期限,可以更精确地反馈成本支出数据,边际成本计算可通过斜率有效选择帕累托解集中的最优解。

② 优化的LID设施可在同等成本支出情况下,实现更优的防涝减污效果,可在满足海绵城市LID建设标准下,在积水较大区域优化布设比例,实现积水控制,同时针对径流面源污染,可以减少8 425.882 kg污染物的排放,控制效果显著。

③ 为了实现更好的径流量控制和径流污染物控制,LID设施布设应充分考虑城市规划土地类型,分析地表糙率,通过不同土地类型选取不同的LID设施,综合考虑下渗率、蒸发率和积水时间等关键因素。在该研究的水质模拟中,采用一整年的降雨数据进行模拟,可能会因丰水年、平水年、枯水年而对径流污染物的积累与冲刷结果有一定影响,另外,数据间隔只有1 h,未实现以分钟为间隔的精准

模拟;在水质参数率定中,目前仅使用了参考文献的数据,未与当地实测数据复核,后续研究将进一步收集整理相关数据实现精准优化,为LID设施布局优化提供更贴近城市实际需求的方案。

参考文献:

- [1] 李大龙,贾绍凤,吕爱锋,等. 中国城市LID技术设施的成本效益区域差异[J]. 地理科学进展, 2017, 36(11): 1402-1412.
LI Dalong, JIA Shaofeng, LÜ Aifeng, *et al.* Regional difference of cost effectiveness of low impact development (LID) technical facilities in Chinese cities [J]. Progress in Geography, 2017, 36(11): 1402-1412 (in Chinese).
- [2] 刘成帅,韩臻悦,李想,等. 基于BIC-KMeans和SWMM的城市雨洪快速模拟方法[J]. 水资源保护, 2023, 39(5): 79-87.
LIU Chengshuai, HAN Zhenyue, LI Xiang, *et al.* Urban rainstorm flood rapid simulation method based on BIC-KMeans and SWMM [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(5): 79-87 (in Chinese).
- [3] 孙会航,李俐频,田禹,等. 基于多目标优化与综合评价的海绵城市规划设计[J]. 环境科学学报, 2020, 40(10): 3605-3614.
SUN Huihang, LI Lipin, TIAN Yu, *et al.* Sponge city planning and design based on multi-objective optimization and comprehensive evaluation [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40(10): 3605-3614 (in Chinese).
- [4] YANG B, ZHANG T, LI J, *et al.* Optimal designs of LID based on LID experiments and SWMM for a small-scale community in Tianjin, North China [J]. Journal of Environmental Management, 2023, 334: 117442.
- [5] BAEK S S, LIGARAY M, PYO J, *et al.* A novel water quality module of the SWMM model for assessing low impact development (LID) in urban watersheds [J]. Journal of Hydrology, 2020, 586: 124886.
- [6] 陈学凯,刘晓波,董飞,等. 基于SWMM与NSGA-II耦合的城区雨水泵站多目标优化调控[J]. 水利学报, 2023, 54(3): 358-368.
CHEN Xuekai, LIU Xiaobo, DONG Fei, *et al.* Multi-objective optimal operation of urban storm water pump station based on SWMM and NSGA-II [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 54(3): 358-368 (in Chinese).
- [7] 程麒麟,尹超,陈垚,等. 基于多目标进化算法和SWMM的LID设施空间布局优化研究[J]. 水资源保护, 2024, 40(1): 108-116.
CHENG Qiming, YIN Chao, CHEN Yao, *et al.* Spatial layout optimization of LID facilities based on multi-objective evolutionary algorithm and SWMM [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(1): 108-116 (in Chinese).
- [8] LENG L, XU C, JIA H, *et al.* Incorporating receiving waters responses into the framework of spatial optimization of LID-BMPs in plain river network region [J]. Water Research, 2022, 224: 119036.
- [9] 康得军,温儒杰,邱福杰,等. 基于SWMM和GIS的城市内涝4D可视化研究[J]. 中国给水排水, 2023, 39(13): 133-138.
KANG Dejun, WEN Rujie, QIU Fujie, *et al.* 4D visualization of urban flooding based on SWMM and GIS [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(13): 133-138 (in Chinese).
- [10] ZHANG J, CAI J, ZHANG H, *et al.* NSGA-III integrating eliminating strategy and dynamic constraint relaxation mechanism to solve many-objective optimal power flow problem [J]. Applied Soft Computing, 2023, 146: 110612.
- [11] 李雪飞. 屋面雨水系统集水沟排水量计算问题分析[J]. 给水排水, 2021, 47(7): 83-88.
LI Xuefei. Analysis the calculation of flow capacity of the gutter for raindrainage system of building roof [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(7): 83-88 (in Chinese).

作者简介:钟炜(1977-),男,天津人,博士,教授,主要研究方向为工程数字化系统决策及优化、智慧建造及建筑信息模型(BIM)等。

E-mail:zhongwei@tjut.edu.cn

收稿日期:2024-02-27

修回日期:2024-04-07

(编辑:刘贵春)