

韧性视角下低影响开发设施布局多目标优化

李锐¹, 王凯凯¹, 叶城², 耿娟¹, 李婷¹

(1. 西安建筑科技大学 城市发展与现代交通学院, 陕西 西安 710055; 2. 中国石油天然气管道工程有限公司, 河北 廊坊 065000)

摘要: 为缓解近年来越来越严重的城市内涝积水问题, 以西安市西咸新区某区域为研究案例, 首先建立研究区域雨洪管理模型, 进行节点韧性分析; 其次, 利用节点韧性分析结果改进 OPUT 方法, 对韧性较差节点进行追踪, 确定研究区域 LID 设施布设区域与种类; 最后, 以提升雨水系统韧性、LID 布设面积最小以及成本最小为优化目标, 建立多目标优化模型, 利用 NSGA2、AGEMOEA、SMSEMOA 三种多目标优化算法进行求解对比分析。研究结果表明: (1) SMSEMOA 算法的帕累托前沿解集质量最高, AGEMOEA 算法的求解速率最快; (2) SMSEMOA 算法韧性偏向下的典型方案对系统雨洪控制效果提升最大; (3) 优化模型求解方案在 $P=5$ a 时地表径流削减能力最优, $P>5$ a 后优化方案功能逐渐下降。

关键词: 城市内涝; SWMM 模型; 韧性; LID 设施; 多目标优化

中图分类号: TU992

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)04-0122-08

Multi-objective Optimization on Layout of Low Impact Development Facilities from Perspective of Resilience

LI Rui¹, WANG Kaikai¹, YE Cheng², GENG Juan¹, LI Ting¹

(1. Xian University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. China Petroleum and Natural Gas Pipeline Engineering Co., Ltd., Langfang 065000, China)

Abstract: In order to alleviate the more and more serious urban waterlogging problems in recent years, taking a certain area of Xixian New District of Xi'an City as a case study, a model is established to study the regional rainwater and flood management and to analyze the node toughness. By using the results of node toughness analysis, the OPUT method is improved to track the nodes with poor toughness. The layout area and types of LID facilities in the studied area are determined. Finally, with the optimization objectives of improving the toughness of the rainwater system, minimizing the LID layout area and minimizing the cost, a multi-objective optimization model is established. Three multi-objective optimization algorithms of NSGA2, AGEMOEA and SMSEMOA are used for solution, comparison and analysis. The results show that: (1) SMSEMOA algorithm has the highest quality of Pareto front solution set, and AGEMOEA algorithm has the fastest solution rate; (2) The typical scheme under the toughness bias of SMSEMOA algorithm has the greatest improvement of the system rainwater and flood control effects. (3) When $P=5$ a, the surface runoff reduction ability of the optimization model solution is the best, and the function of the optimization scheme gradually decreases after $P>5$ a.

Keywords: urban waterlogging; SWMM model; toughness; LID facilities; multi-objective optimization

0 引言

随着城市化建设加速, 截止 2023 年底, 我国城市化率达到 66.16%, 城市不透水面积与规模不断增加。

此外, 在气候变化的影响下, 传统城市排雨水系统难以应对城市化进程加快所引起的巨大排水压力, 导致雨季时全国多地发生内涝灾害事件^[1]。2020 年, 党的十九届五中全会审议通过的政策文件首次提出建设“韧性城市”。在国家大规模促进海绵城市与韧性城市建设的背景下, 迫切需要精准高效布设 LID 设施的理论和实践, 以此促进海绵城市与韧性城市的高效可持续发展, 完善我国内涝防治理论, 提高城市韧性。

在韧性量化研究方面, 国内外学者已进行了广

收稿日期: 2024-11-20

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划(2021JM354); 西安建筑科技大学 2022 年度新型城镇化专项研究基金项目(2022SCHZ14)

作者简介: 李锐(1975—), 女, 博士, 副教授, 从事市政公用设施规划、总图运输优化研究。

泛的研究。Seith等^[2]进行了城市雨水系统在遇到随机故障事件下的系统性能变化研究,据此提出了弹性指数的计算公式;付春等^[3-4]以地面内涝网格数作为雨水系统弹性计算的主要参数,进行系统弹性的重新定义与研究;宋川等^[5]基于MIKE FLOOD模型通过设置不同雨型研究城市雨水系统韧性。

在LID设施布设问题上,利用SWMM模型和智能优化算法进行优化研究是其中重要的一方面。程麒铭等^[7],对比分析了NSGA2、NSGA3、PICEA-g、MOEAPSL、CAMOE7、MOEAD与CCMO七种多目标进化算法对LID设施布局优化问题的帕累托解集和算法性能评价指标,并提出最佳方案;夏怡杰等^[8]以削减洪峰流量和降低LID成本为优化目标,通过GWO-PSO算法进行求解,并进行模拟分析;武昕^[9]利用成本效益分析法分析不同LID布设方案对弹性的影响,制定了成本效益和弹性提升综合最优的方案;刘柯涵^[10]利用智能优化算法进行参数率定并优化LID设施方案;施力铭等^[11]以地表径流削减效果、悬浮物负荷削减效果、全生命周期成本、LID设施建设面积为优化目标,探究LID设施的优化方案;钟炜等^[12]在经济成本有限的基础上,以地表径流控制效果和污染物削减效果为优化目标,利用NSGA-III算法通过偏好顺序结构评估方法确定优化目标的优先级,获得满足污染物综合去除率最大效益的LID设施布设方案。

以上学者主要考虑了以径流削减率、污染物削减率和成本为优化目标,忽略了雨水系统韧性能,而韧性在描述雨水系统性能方面有更全面的优势。针对现有韧性与LID优化方面的研究,本文以雨水系统韧性、LID布设面积和全生命周期成本为优化目标,基于SWMM耦合Python平台,利用3种优化算法进行求解并对比寻优,最后通过模拟分析确定优化方案,并分析方案效果。

1 韧性量化与分析

1.1 韧性量化

1.1.1 节点韧性量化

“韧性”起源于拉丁语“resilio”,意为“回弹至原始状态”,该词语描述了系统或主体在受到干扰以后,能够快速地作出反应,且及时恢复到初始状态的能力。本文中汇水区节点韧性基于Bruneau等^[13]提出的4R理论构建韧性测度模型。

节点性能随时间的变化如图1所示。本文将节

点与其所在汇水区视为一个系统,图中节点性能曲线用黑色实线表示,代表初始节点性能,也是节点在面对降雨情景下的最低性能。

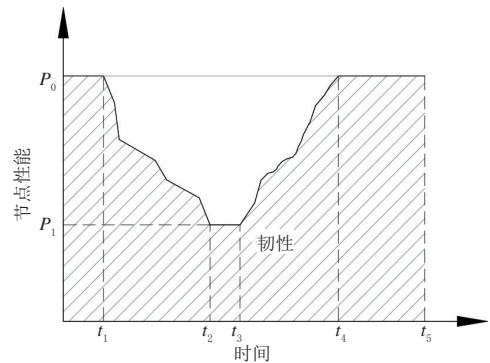


图1 汇水区节点性能理论变化曲线

对城市汇水区节点来说,当发生溢流时,节点性能小于1,其余任何状态下节点性能都等于1。损失的节点性能用节点的溢流量与汇水区的地表径流量的比值表示,未产生溢流情况时,节点的损失值为0,由于溢流量总小于径流量,因此将节点在未产生溢流时的原始性能设为1,用1与节点损失的差值来表示节点性能,如式(1):

$$P(t) = 1 - V_s(t)/V_l(t) \quad (1)$$

式中: $P(t)$ 为 t 时刻时节点性能; $V_s(t)$ 为 t 时刻时节点总溢流量; $V_l(t)$ 为 t 时刻时节点总入流量。

因此,节点的性能和坐标轴的面积即为该研究区域内汇水区的节点韧性值,如式(2):

$$R(t) = \left[\int_0^T P(t) dt \right] / T \quad (2)$$

式中: $R(t)$ 为 t 时刻节点的韧性; T 为模拟时长。

1.1.2 系统韧性量化

系统韧性基于本文第1.1.1节中的节点韧性,为了便于计算,将节点性能曲线 $P(t)$ 简化为矩形,系统性能如图2所示。简化后的雨水管网系统韧性公式可将复杂的积分计算转化为易于计算的乘法运算。

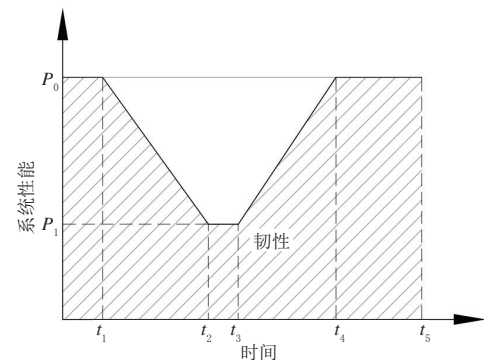


图2 简化后系统性能理论变化曲线

简化后,系统性能随时间变化过程将用汇水区平均洪流时长与模拟时长的比值来替代,以此得到雨水管网系统韧性公式,如式(3)所示。此时系统韧性为系统在模拟时长内的整体韧性定值,不同于节点韧性随模拟时长变化的变量。

$$R = 1 - (V_s \Delta t)/(V_i T) \tag{3}$$

式中: i 为研究区域子汇水区数量; Δt 为子汇水区平均洪流时长, h ; T 为降雨历时, h ; V_s 为降雨事件内的地面溢流总量, m^3 ; V_i 为降雨事件内管网的入流总量, m^3 。

1.2 韧性分析

1.2.1 SWMM模型构建与降雨设计

研究区域位于陕西西安的西咸新区沣东新城北部,其东部为太平河流域,西部为沣河流域,北部为渭河流域,南部为西安市科统片区,研究区域面积为12.75 km²,居住人口约15.4万人。

利用GIS工具对研究区域雨水管网与检查井节点进行概化,概化后的管段数量为85根、节点数量为85个、排放口为7个。子汇水区的划分采用泰森多边形法与人工划分法相结合的方式,通过ArcMap中的领域分析命令,并基于检查井的地面高程和位置,最终将研究区域共划分为85个子汇水区。将研究区域内的管段、节点、排放口、子汇水区的所有参数在ArcMap中处理、设置完成,生成SWMM模型,如图3所示。

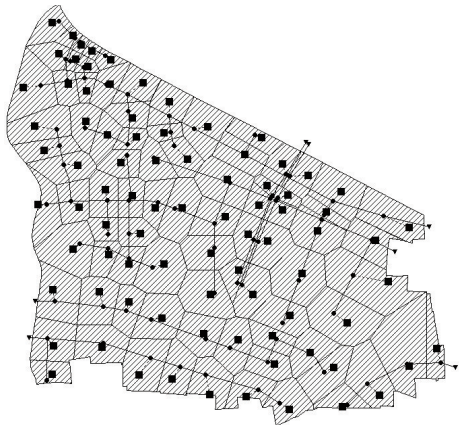


图3 SWMM管网模型

本文分别选取西咸新区5、10、20、50、100 a这5种降雨重现期进行模拟,5种降雨重现期的降雨历时均为120 min。

西咸新区暴雨强度公式如式(4):
$$q = [6\,789.002 \times (1 + 2.297 \lg P)] / (t + 30.251)^{1.141} \tag{4}$$

式中: i 为降雨强度,mm/min; P 为暴雨重现期,a; t 为降雨历时,min; r 为峰值比例(西安市雨峰系数为0.3~0.5,本文所有设计降雨 r 均取0.4)。

根据式(3)暴雨强度公式确定了这5种降雨过

程线,如图4所示。

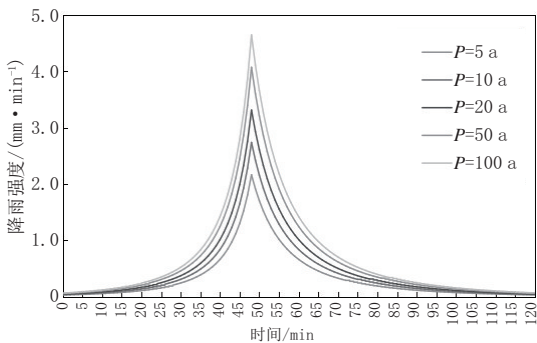


图4 5种降雨重现期降雨过程图

通过对5种降雨重现期降雨过程进行模拟,得到地表径流连续性误差,分别为-0.03%、-0.04%、-0.04%、-0.04%和-0.04%,流量演算连续性误差分别为-0.49%、-0.31%、-0.24%、-0.14%和-0.11%,5种降雨重现期的连续性误差值均在2%以内,满足要求。

1.2.2 节点溢流分析

利用以上5种降雨重现期降雨数据进行模拟,雨水管网溢流情况随5种降雨重现期的变化见表1。由模拟结果可知:当降雨重现期为5 a时,研究区域内有44%的节点发生溢流情况;当降雨重现期为100 a时,研究区域内溢流节点已达到83%。节点溢流情况随着降雨重现期的增大而愈发严重,模拟时长为2 h: $P=5$ a时,节点最大溢流时长已达到0.75 h; $P=100$ a时,节点最大溢流时长达到1.47 h。由此可知,研究区域在暴雨情景下排水能力严重不足,区域内涝问题严重。

表1 不同降雨重现期节点溢流模拟结果

重现期 P/a	溢流量/ m^3	高峰溢流量/ $(m^3 \cdot s^{-1})$	溢流时 长/h	溢流点 个数	溢流点 百分比/%
5	25 498	43.5	0.750	38	44.71
10	66 454	88.6	0.983	57	67.06
20	123 038	136.6	1.183	65	76.47
50	212 689	212.7	1.383	67	78.82
100	291 610	270.6	1.467	71	83.53

1.2.3 节点韧性分析

基于上文中节点韧性量化理论,未产生溢流情况的节点韧性为1,故对本文第1.2.2节中不同降雨重现期时产生溢流的节点进行韧性分析,其韧性变化情况和范围见图5和表2。由于节点数量较多,图5只以节点8为例。

由图5和表2可知:随着降雨重现期的增大,同一节点韧性最低值越来越小,0~0.6、0.6~0.8、0.8~0.9三个范围内节点数量不断增加;节点与系统排水能力严重不足,韧性较低节点数量显著增加。

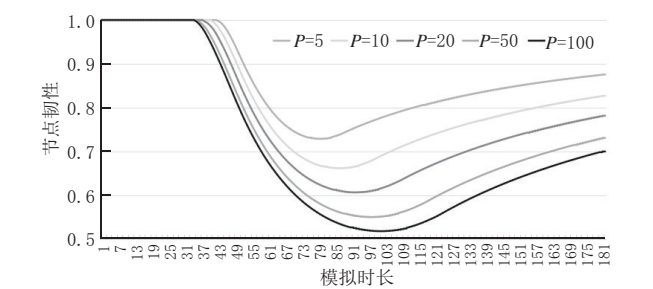


图5 不同降雨重现期节点韧性变化图(节点8)

表2 不同降雨重现期节点韧性最低值范围和个数

重现期 P/a	韧性最低值范围节点个数			
	<0.9	0.9~0.8	0.8~0.6	0.6~0
5	34 个	2 个	2 个	0
10	49 个	6 个	2 个	0
20	49 个	8 个	7 个	1 个
50	43 个	9 个	13 个	2 个
100	37 个	11 个	19 个	4 个

2 LID 适建区域与设施

2.1 改进 OPUT 方法确定布设区域

OPUT (overflow point upstream tracking, OPUT) 方法是一种基于溢流点位上游追踪的 LID 设施布设方法^[15]。其对不同的降雨重现期下产生的溢流节点进行锁定,追踪溢流节点所在的上游管段节点,并将 LID 设施布设在追踪的节点所在的汇水区。本文基于 OPUT 方法,提出利用不同降雨情景下产生的溢流节点韧性最小值作为 OPUT 方法追踪的依据,追踪韧性较差节点所在的上游管段节点,并将 LID 设施布设在追踪节点所在的汇水区。图 6 所示为改进 OPUT 方法示意图。

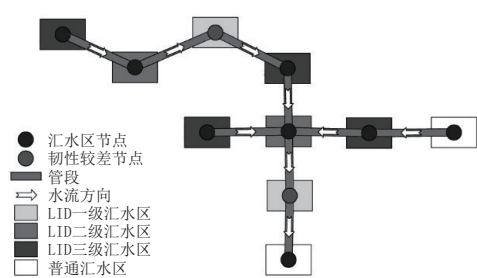


图6 改进 OPUT 方法示意图

选择本文第 1.2.3 节中 $P=100 a$ 时的节点韧性分析结果作为确定 LID 设施布设区域的依据,将韧性最低值小于 0.8 的节点作为追踪起点,并追踪其上游节点与管段,将这些节点与管段所在汇水区逐级分类,确定为 LID 布设的汇水区,最终追踪所得一级汇水区 23 个,二级汇水区 10 个,三级汇水区 4 个,共计 37 个韧性待提高汇水区。研究区域 OPUT 追踪结果

见图 7。

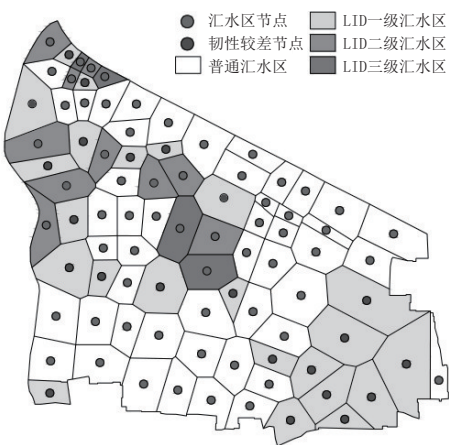


图7 研究区域 OPUT 追踪汇水区

2.2 LID 适建性分析

根据研究区域用地规划布局,将研究区域内 OPUT 追踪汇水区下垫面类型分为 4 种,分别是屋面(屋顶)、道路、公共绿地和河流,如图 8 所示。

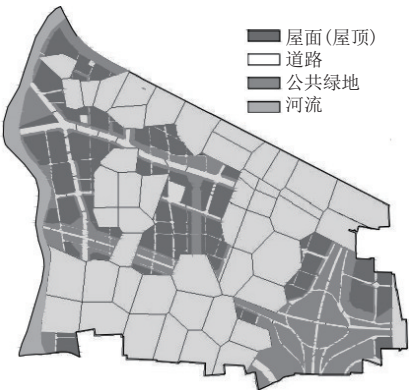


图8 OPUT 追踪汇水区下垫面类型

本文所分析的 LID 设施主要包含绿色屋顶、透水铺装、下沉式绿地、生物滞留设施、植草沟、雨水罐和渗管。各种用地类型中不同设施的适建性见表 3。

表3 各用地类型中 LID 设施适用表

单项设施	用地类型			
	居住用地	道路用地	公共绿地	河流水系
生物滞留设施	●	●	○	○
下沉式绿地	●	●	●	○
绿色屋顶	●	—	—	—
渗管/渠	●	●	●	—
透水铺装	●	●	○	—
雨水罐	●	—	—	—
植草沟	●	●	●	—

注:●为较适用,○为一般适用,—为不适用。

在综合考虑研究区域地质条件与建设条件后,选择适用于研究区域的透水铺装、下沉式绿地、绿色屋顶作为多目标优化的优化设施。居住用地布设为

绿色屋顶,公共绿地布设为下沉式绿地,道路用地布设为透水铺装。

3 LID 设施多目标优化

3.1 多目标优化模型

3.1.1 目标函数

(1)雨水系统韧性

根据本文第2.1节中改进OPUT方法追踪所得的37个韧性待提高汇水区,以第1.1.2节中系统韧性公式计算雨水系统韧性,如式(5)所示:

$$R = 1 - (\alpha V_{Ts} \sum_{i=1}^{37} t_i) / (TV_n) \tag{5}$$

式中: i 为研究区内布设LID设施汇水区数量($i=37$); t_i 为子汇水区洪流时长, h ; T 为降雨历时, h ; V_{Ts} 为降雨历时内的地面溢流总量, m^3 ; V_n 为降雨历时内管网的总入流量, m^3 ; $\alpha=15$ 。

(2)占地面积

本文中LID设施占地面积为37个韧性待提高汇水区中3种LID设施面积的总和,使用式(6)计算占地面积。

$$S = \sum_{i=1}^{37} \sum_{j=1}^3 A_{ij} \tag{6}$$

式中: S 为LID设施占地总面积, m^2 ; j 为研究区建设绿色LID设施种类数量($j=3$); A_{ij} 为第 j 种LID设施在第 i 个汇水区的建设面积, m^2 。

(3)LID设施全生命周期成本

LID设施全生命周期成本现值(Present Value of Cost,PVC)计算如式(7):

$$C_{PVC} = C_0 + \sum_{t=0}^T [C_a / (1 + r)^t] \tag{7}$$

式中: C_{PVC} 为生命周期成本现值,元; C_0 为建设费用,元; C_a 为年运营维护成本,元; T 为设施寿命,取15a; t 为时间变化,a; r 为折现系数,根据基础设施的基准收益率设定为0.05。

本文通过在OPUT方法追踪的37个韧性待提高子汇水区上布设下凹式绿地、绿色屋顶和透水铺装3种LID设施,即以37个子汇水区内LID设施的111个布设面积为模型自变量。3种LID设施的全生命周期成本计算如式(8)所示:

$$C_L = \sum_{i=1}^{37} \sum_{j=1}^3 C_{PVC,j} A_{ij} \tag{8}$$

式中: C_L 为绿色LID设施建设总费用,元; i 为研究区内布设LID设施汇水区数量($i=37$); j 为研究区建设绿色LID设施种类数量($j=3$); $C_{PVC,j}$ 为第 j 种LID设施的单位面积全生命周期成本,元/ m^2 ; A_{ij} 为第 j 种LID设施在第 i 个汇水区的建设面积, m^2 。

3.1.2 约束条件

布设LID设施时,其布设面积应满足相关要求。透水铺装和绿色屋顶布设面积上限分别不超过该子汇水区内建筑面积的70%和道路面积的70%^[16],下沉式绿地布设面积不超过该子汇水区内绿地的最大面积^[15]。基于以上约束,确定拟布设LID设施的37个子汇水区内的道路用地、绿地以及建筑用地,进而确定3种LID设施的最大布设面积。各LID设施布设面积上限见表4。

表4 各LID设施布设面积上限				单位: m^2
子汇水区 编号	绿色屋顶面积 上限	透水铺装面积 上限	下沉式绿地面积 上限	
S7	0	24 434.2	115 294	
S8	32 321.1	8 675.1	31 134	
S9	0	20 022.8	60 096	
S10	0	35 025.9	184 563	
S11	109 217.5	71 491.7	156 944	
S13	0	33 313.7	137 209	
S14	0	29 551.2	110 284	
S15	15 294.3	19 891.2	54 235	
S24	131 142.9	57 918.0	117 113	
S25	48 001.8	50 778.0	171 686	
S34	24 578.4	18 827.9	9 291	
S35	43 585.5	47 858.3	88 766	
S36	34 133.4	30 815.4	29 316	
S37	59 787.0	25 139.1	39 277	
S38	80 278.1	23 820.3	34 588	
S40	82 891.9	30 427.6	5 509	
S44	4 6881.1	32 730.6	21 269	
S45	54 124.7	20 201.3	43 620	
S50	74 116.7	51 188.2	65 593	
S51	22 334.2	18 025.0	33 544	
S52	30 080.4	61 175.8	119 734	
S53	81 607.4	25 613.7	6 727	
S54	69 510.0	14 420.0	0	
S55	60 789.4	53 387.6	31 790	
S63	29 135.4	10 414.6	0	
S64	34 845.3	28 116.9	29 454	
S67	12 323.5	19 172.3	21 806	
S68	39 948.3	22 232.0	15 571	
S69	45 862.6	20 394.5	18 247	
S73	70 170.1	27 060.6	99 199	
S75	11 267.2	1 478.4	17 692	
S76	37 302.3	781.9	53 294	
S77	17 320.1	4 446.4	1 305	
S78	12 510.4	2 049.6	1 500	
S79	2 821.0	4 796.4	13 918	
S80	5 835.2	0	10 095	
S81	11 624.2	1 330.0	21 994	

3.1.3 优化模型

综上所述,LID 设施多目标优化模型为:

$$\begin{cases} \text{Max}R = 1 - (\alpha V_{Ts} \sum_{i=1}^{37} t_i)/(TV_{T1}) \\ \text{Min}S = \sum_{i=1}^{37} \sum_{j=1}^3 A_{ij} \\ \text{Min}C_L = \sum_{i=1}^{37} \sum_{j=1}^3 \{c_0 + \sum_{t=0}^T [c_a/(1+r)^t]\} A_{ij} \end{cases} \quad (9)$$

3.2 算法求解与寻优对比分析

3.2.1 SWMM 与 Python 耦合

本文借助了 pymoo (Multi-objective Optimization in Python) 提供的算法实现多目标优化的目的。pymoo 是一个开源的、专门用于多目标优化的 Python 库,它提供了一系列的算法和工具,用于解决多目标优化问题,提供了简洁直观的接口,方便用户进行优化。与 SWMM 相关的处理,包括 inp 参数的调整、执行模拟和模拟结果的解析方面,本文使用 swmm-api 库来实现。swmm-api 库提供了细致全面的接口来帮助用户实现对 swmm inp 文件、rpt 文件和 out 文件的操作。

将多目标优化模型中待优化的参数以及求解目标函数的方法进行整理,然后利用不同的优化算法去求解。具体求解流程如下。

(1)参数解析:按照参数定义时规定的顺序,将迭代的参数一一解析出来。

(2)swmm inp 参数设置:将解析出来的参数,设定到对应的 inp 对象中。

(3)执行模拟:将参数设定完成的 inp 保存,并调用模拟接口进行模拟。

(4)模拟结果解析:等待模拟完成,生成 rpt 和 out 结果文件之后,读取结果文件,将计算目标函数值需要的参数解析出来。

(5)计算目标函数值:求解目标函数值,并将目标函数值返回给算法,按照设置的迭代次数进行求解。

3.2.2 帕累托前沿解集质量对比

在降雨重现期为 $P=50$ a 时(后文求解结果与图表分析均为 $P=50$ a 情景下),选用 NSGA2(第二代非支配排序遗传算法)、SMSEMOA(基于主导超容量的多目标优化算法)和 AGEMOEA(基于自适应几何估计的多目标优化算法)3 种 pymoo 支持的多目标优化算法,对上述多目标优化模型进行求解,设置种群 200,迭代次数 150 次。

将算法 150 次迭代结束后产生的帕累托前沿解集进行统计,3 种算法的帕累托前沿解集如图 9 所示。

3 种算法的帕累托前沿解集范围见表 5。

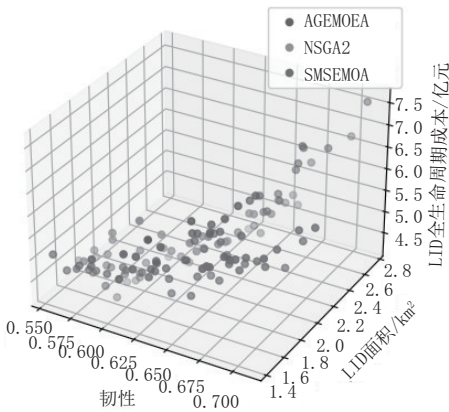


图 9 不同算法帕累托前沿解集对比图 ($P=50$ a)

表 5 3 种算法帕累托前沿解集范围

计算项目		NAGA2	AGEMOEA	SMSMOEA
韧性	最大值	0.689 6	0.694 8	0.709 7
	最小值	0.568 5	0.569 5	0.555 0
面积/hm ²	最大值	239.155 6	251.377 1	274.364 1
	最小值	147.223 1	147.653 6	143.397 1
成本/万元	最大值	66 347.193	68 675.554	75 813.608
	最小值	44 721.644	46 004.433	41 859.960

由图 9 和表 5 分析可知, AGEMOEA 算法和 NSGA2 算法在迭代 150 次之后产生的帕累托前沿解集质量相近,而 SMSEMOA 算法的解集质量明显高于 NAGA2 算法和 AGEMOEA 算法。

3.2.3 寻优速率对比

设置种群 200,迭代次数 150 次执行实验,以迭代次数为自变量,3 个优化目标(韧性、LID 设施总面积、LID 设施全生命周期总成本)为因变量进行算法的对比分析。

(1)韧性目标:由图 10 可知,NSGA2 算法迭代 60 次经由 2 次收敛到韧性最大值 0.689 6, AGEMOEA 算法迭代 37 次经由 4 次收敛到韧性最大值 0.694 8, SMSEMOA 算法迭代 130 次经由 12 次收敛到韧性最大值 0.709 7。

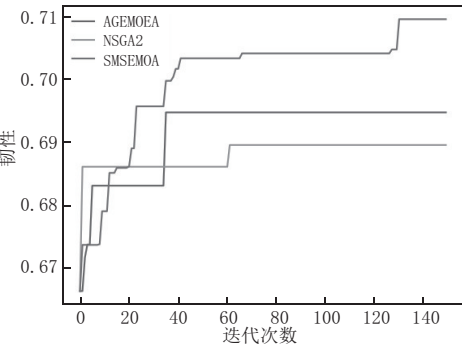


图 10 韧性与迭代次数关系图 ($P=50$ a)

(2)LID 设施总面积目标:由图 11 可知, NSGA2 算法迭代 50 次经由 2 次收敛到最小值 147.223 1 hm²,

AGEMOE A 算法迭代 75 次经由 7 次收敛到最小值 147.653 6 hm², SMSEMOA 算法迭代 132 次经由 5 次收敛到最小值 143.397 1 hm²。

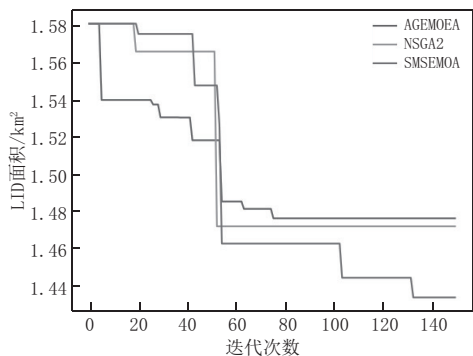


图 11 LID 面积与迭代次数关系图 (P=50 a)

(3) LID 设施全生命周期总成本目标: 由图 12 可知, NSGA2 算法迭代 80 次经由 1 次收敛到最小值 44 721.644 万元, AGEMOE A 算法 56 次经由 2 次收敛到最小值 46 004.43 万元, SMSEMOA 算法迭代 120 次经由 3 次收敛到最小值 41 859.960 万元。

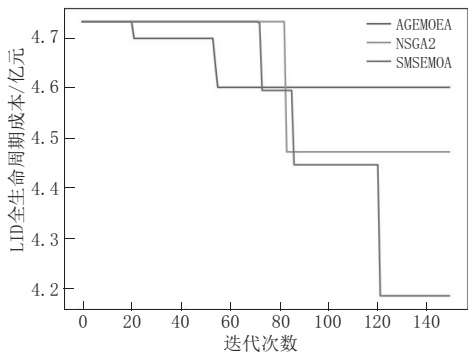


图 12 LID 成本与迭代次数关系图 (P=50 a)

从 3 个优化目标与迭代次数的关系图分析结果来看: NSGA2 算法收敛速度快, 但优化效果较差; AGEMOE A 算法收敛速度较快, 优化效果中等; SMSEMOA 算法收敛速度中等, 优化效果较好。

3.3 优化方案制定和分析

3.3.1 优化方案制定

在未布设 LID 设施时, 利用式(5)计算可得此时韧性为 0.464 7, 根据以上 3 种算法的帕累托前沿解集质量对比和求解速率的对比分析, 选择优化求解效果最优的 SMSEMOA 算法的帕累托前沿解集进行优化方案的制定。SMAEMOA 算法帕累托前沿解集见图 13。前沿解集数量较多, 本文选择 3 个优化目标最优偏向下的 3 种典型方案作为优化方案进行分析。3 种不同偏向下的优化方案见表 6 和图 14。

3.3.2 优化方案分析

为分析不同降雨重现期下优化方案对排水能力的提升效果, 选择本文第 1.2.1 节中 5 种降雨重现期

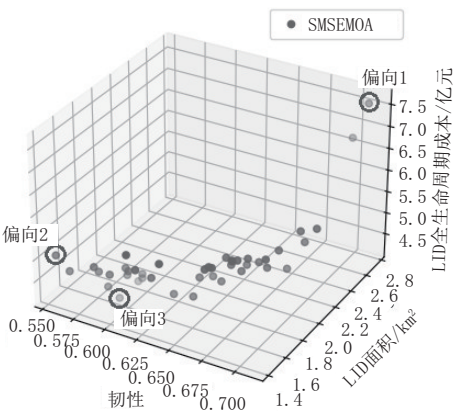
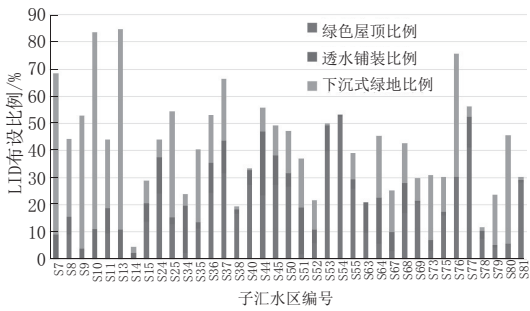


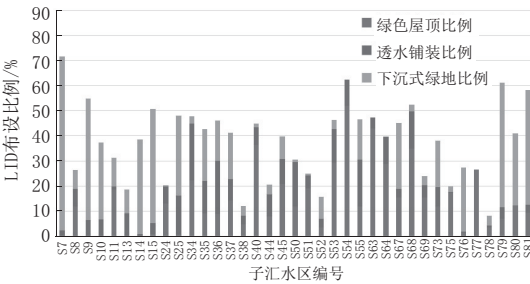
图 13 SMSEMOA 算法帕累托前沿解集 (P=50 a)

表 6 3 种典型偏向下优化结果

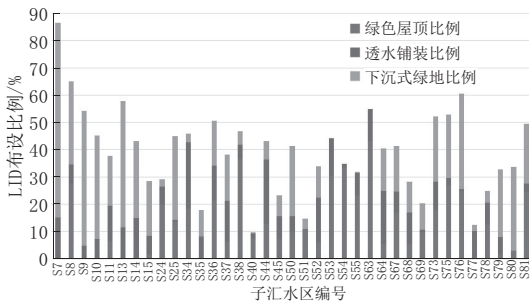
方案	韧性	面积/hm ²	成本/万元
方案 1 (韧性偏向)	0.709 7	274.364 1	75 813.608
方案 2 (面积偏向)	0.555 0	143.397 1	50 662.427
方案 3 (成本偏向)	0.595 0	156.884 3	41 859.960



(a) 方案 1



(b) 方案 2



(c) 方案 3

图 14 各方案子汇水区 LID 布设比例

进行模拟分析,统计3种方案的溢流削减率、高峰溢流削减率和地表径流削减率结果(见表7至表9)。

表7 不同降雨重现期下3种方案溢流削减率

重现期 P/a	方案1	方案2	方案3
5	36.00%	21.86%	23.73%
10	26.30%	18.38%	21.84%
20	22.15%	17.39%	19.41%
50	17.46%	13.72%	15.33%
100	14.90%	12.01%	13.58%

表8 不同降雨重现期下3种方案高峰溢流削减率

重现期 P/a	方案1	方案2	方案3
5	40.14%	24.42%	23.85%
10	30.97%	17.71%	25.42%
20	22.92%	18.97%	22.40%
50	21.46%	18.33%	19.36%
100	20.82%	17.74%	18.72%

表9 不同降雨重现期下3种方案径流削减率

重现期 P/a	方案1	方案2	方案3
5	9.50%	7.25%	8.25%
10	9.36%	7.23%	7.97%
20	9.02%	6.89%	7.87%
50	8.98%	6.51%	7.72%
100	8.22%	6.38%	7.28%

由表7和表8可知:方案1在各降雨重现期下的溢流削减率和高峰溢流削减率均优于其他方案;随着降雨重现期的增加,各方案的溢流削减率和高峰溢流削减率持续下降,这是由于LID设施的蓄水能力逐渐饱和,流入雨水管道的雨水量增大,管道超载产生溢流越来越严重。

由表9可知,方案1在各降雨重现期下径流削减率均优于其他方案。各方案的径流削减率均在 $P=5\text{ a}$ 时达到最大,说明本文构建的LID设施布局多目标优化方案在此时对雨水的储蓄、渗透和排除功能达到最大;当 $P>5\text{ a}$ 后,优化方案功能逐渐下降,进一步验证LID设施在低重现期,尤其是小于管渠系统设计标准下可发挥出明显优势。

4 结 论

(1)从帕累托前沿解集质量和寻优速率两方面

的分析结果可知,SMSEMOA算法解集质量最高,AGEMOEAO算法寻优速率最快。

(2)SMSEMOA算法解集中3种不同偏向下的典型方案均可有效提升系统雨洪控制能力,韧性偏向下的典型方案对系统雨洪控制效果提升最大。

(3)本文构建的LID设施布局多目标优化的求解方案在 $P=5\text{ a}$ 时地表径流削减能力最优, $P>5\text{ a}$ 后优化方案功能逐渐下降。

参考文献:

[1] 戎贵文,甘丹妮,李姗姗,等.不同LID设施的面积比例优选及径流污染控制效果[J].水资源保护,2022,38(3):168-173;204.

[2] SEITH N. A global analysis approach for investigating structural resilience in urban drainage systems[J]. Water Research, 2015 (81): 15-26.

[3] 傅春,付耀宗,肖存艳,等.基于MIKEFLOOD模型的鹰潭市内涝弹性分析[J].水利水电科技进展,2022,42(1):33-39.

[4] 傅春,黄金燕,付耀宗,等.不同城市化程度对内涝弹性的影响研究[J].长江流域资源与环境,2022,31(6):1402-1412.

[5] 宋川,王琳,王浩程,等.降雨雨型对城市雨水系统内涝弹性的影响[J].中国农村水利水电,2024(1):197-206.

[6] 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.

[7] 刘富勤,刘欣然,吴京戎.基于SWMM模型与NSGA-II多目标优化的LID布局研究[J].人民长江,2024,55(4):125-132;141.

[8] 夏怡杰,杨侃,夏超,等.基于GWO-PSO算法的小尺度地区LID布设优化模型研究[J].水利水电技术(中英文),2024(3):90-101.

[9] 武昕.城市雨水排水系统弹性分析及提升措施研究[D].西安:西安建筑科技大学,2023.

[10] 刘柯涵.基于智能算法的SWMM模型参数率定和LID设施布局优化研究[D].西安:西安理工大学,2023.

[11] 施力铭,周悦,孙陶然,等.基于遗传算法的LID设施优化布设[J].中国农村水利水电,2024(5):105-112,121.

[12] 钟炜,朱宝乐.基于NSGA-III算法优化低影响开发设施布局去除径流污染的研究[J].环境污染与防治,2025,47(2):137-143.

[13] BRUNEAU M, CHANG S, EGUCHI R, et al. A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities[J].Earthquake Spectra, 2003(19): 733-752.

[14] 程新月,王昊,李智,等.基于OPUT的城市LID设施防涝布设法[J].清华大学学报(自然科学版),2024(4):638-648.

[15] 李宁.城市内涝灾害风险评估与海绵设施多目标优化配置研究[D].西安:西安理工大学,2022.

[16] GB/T 51345—2018,海绵城市建设评价标准[S].