

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.06.007

灰绿耦合雨洪系统多目标优化建模与应用

李江云, 李瑶, 胡子欣

(武汉大学土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要:以中山市某开发区为例,以灰绿基础设施总成本、径流系数和节点总溢流量为目标函数,以子汇水区内涝风险等级作为罚函数构建灰绿耦合排水系统多目标优化模型,基于NSGA-II算法,编写SWMM接口程序,调用SWMM进行雨洪模型计算及方案寻优,对24h设计暴雨条件下的灰色调蓄设施和绿色LID设施的规模进行多目标优化设计及综合评估。结果表明:绿色LID设施径流系数和节点总溢流量削减量均随其成本的增加呈近似线性下降的趋势,并随重现期增加而加快;灰色调蓄设施容积与节点总溢流量曲线存在明显拐点,拐点后规模增大的边际效益趋0;提出的灰绿耦合基础设施优化模型及求解程序对初始种群设置技术要求低,且能稳定收敛,可为城市雨洪管理方案的制定提供支持和依据。

关键词:雨洪系统;排水系统;灰色调蓄设施;绿色LID设施;NSGA-II算法;多目标优化

中图分类号:TU992 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)06-0049-07

Multi-objective optimization modeling and application of grey-green coupling stormwater system// LI Jiangyun, LI Yao, HU Zixin (School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Taking a development zone in Zhongshan City as an example, taking the total cost of gray-green infrastructure, runoff coefficient and total node overflow as the objective function, and taking the waterlogging risk level of sub catchment area as the penalty function, a multi-objective optimization model of gray-green coupling drainage system was constructed. Based on NSGA-II algorithm, the SWMM interface program was compiled, and the SWMM was constructed to calculate the rain flood model and optimize the scheme. The scale of gray storage facilities and green LID facilities under 24h design rainstorm conditions was optimized and comprehensively evaluated. The results show that the runoff coefficient and the reduction of total node overflow decrease linearly with the increase of the cost of green LID facilities, and accelerate with the increase of the return period. There is an obvious inflexion point in the curve between the volume of storage facilities and the total node overflow, and the marginal benefit of the scale increase after the inflexion point tends to zero. The proposed grey-green coupling infrastructure optimization model and solution program have low technical requirements for initial population setting and can converge stably, providing support and basis for the formulation of urban stormwater management scheme.

Key words: stormwater system; drainage system; grey storage facilities; green LID facilities; NSGA-II algorithm; multi-objective optimization

城市内涝频发和雨水径流引发的面源污染带来了一系列的水安全和水环境问题,灰色和绿色基础设施是解决前述问题的有效手段^[1-2]。灰色调蓄设施排水效率较高,在保障极端降雨事件安全性方面具有重要作用,而绿色LID设施在径流污染控制、减少径流量、雨水资源综合利用等方面效果良好,二者有机结合有助于增强雨水系统的可靠性^[3-4]。

灰色和绿色基础设施投资成本大,雨洪模拟系

统复杂,控制参数量大面广,商业软件对参数调控的灵活性难以把握,计算结果的可解释性不强。因此,基于大数据经验研究灰绿耦合措施雨洪模型的优化算法,全面掌控方案迭代过程,并对最终结果进行综合评估,具有重要价值。前人研究主要集中在灰色和绿色基础设施布设位置、规模及组合等方面^[5-8],对二者耦合方式也进行了有益的探索^[9-10],但在排水系统建模基础上进行灰绿基础设施优化配置,并

通过综合评价确定最优方案的研究较少^[11-12]。本文以中山市某开发区为例,综合考虑经济性、区域径流控制能力和内涝风险性,量化评估灰色调蓄设施和绿色 LID 设施经济效益变化规律^[13],研究灰色调蓄设施和绿色 LID 设施规模优化方法,并对最终方案进行综合评估。

1 灰绿耦合雨洪模型的建立

1.1 研究区用地类型

中山市某开发区占地面积 59.36 km²,地势西南高、东北低,地势平坦开阔,河网交织,排水体制为分流制。根据遥感卫星图像对用地类型进行划分(图 1)。该区严重内涝点多发生在地势低洼区及排水管网未覆盖或者设计标准偏低的区域,假设雨水管网系统一定,可优化调控的灰色调蓄设施为调蓄池位置及容积,绿色 LID 设施特指常用 LID 措施。

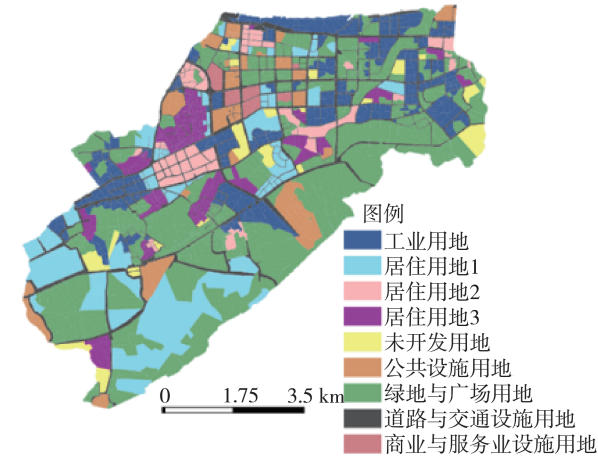


图 1 研究区用地类型
Fig.1 Land use type of study area

1.2 现状条件建模及模型率定

根据区域现状雨水管网设计图、用地类型图、DEM 高程数据等资料及地勘校正,采用 SWMM 建模,研究区概化图见图 2。概化模型包括 1706 个检查井节点、466 个排水口节点、1701 根雨水管网,雨水就近排入河涌,采用泰森多边形法划分子汇水区,进一步与用地类型以及规划汇水区图层叠加,明确各子汇水区排水节点。

采用中山市暴雨强度公式(式(1)),设计暴雨雨型采用芝加哥雨型,雨峰系数 0.35。根据典型降雨条件分析需求,利用该地区现状条件下,年径流控制率为 80% 对应降雨($P \approx 0.06$ a 设计降雨)、 $P = 3$ a 设计降雨及 $P = 20$ a 设计降雨分别反映小雨、中雨、大雨 3 种典型的降雨边界条件建模,并由此构建 SWMM 模型。



图 2 研究区概化示意图
Fig.2 Schematic map of study area

$$i = \frac{8.283(1 + 0.4979 \lg P)}{(t + 3.67)^{0.5686}} \quad (1)$$

式中: i 为暴雨强度; P 为重现期; t 为降雨历时。

采用综合径流系数法^[14]率定模型中不可测参数,结合地勘内涝位置综合评估参数设置合理性。该区域属建筑较密集区域,综合径流系数范围为 0.5~0.7^[15];根据实测数据,将 $P = 1$ a 设计暴雨作为率定工况,在 2 h 设计暴雨条件下,模拟径流系数取 0.69;下渗模型选择 Horton 模型,最大入渗速率为 45 mm/h,最小入渗速率为 2.5 mm/h,衰减系数为 4 h⁻¹;透水与不透水区域洼地蓄水量分别为 5 mm、3 mm,粗糙系数 n 分别为 0.015、0.25;管道粗糙系数为 0.015;西南区地面坡度设为 5%,其余设为 8‰;子汇水区宽度为面积开方^[16]。图 3 为模拟与实测内涝点对比,可见实测内涝点共计 11 个,模拟内涝区域共计 13 处,模拟及实测内涝点分布基本吻合,可认为模型参数设置合理。

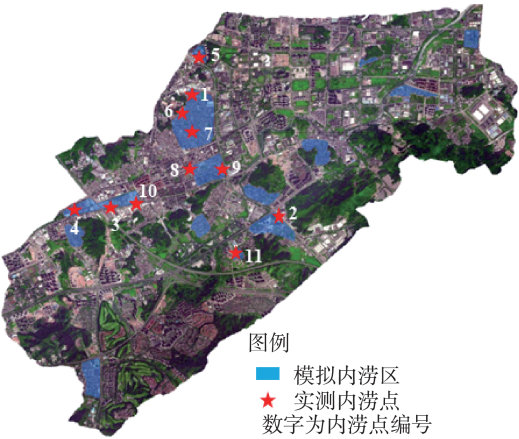


图 3 模拟及实测内涝点对比
Fig.3 Comparison of simulated and measured waterlogging points

1.3 灰色调蓄设施及绿色 LID 设施初选

研究区暴雨频繁,下垫面地下水位高,黏土渗透性差,灰绿基础设施应以调蓄错峰缓排作用为主,并

在现状模型基础上添加。灰色调蓄设施的形式主要包括但不限于调蓄池,还可以是多功能的深隧或行洪通道等,模型计算的目的是得到调蓄类设施的位置和容积,布设时应综合考虑内涝点位置可行性及空间合理性等因素。结合现状内涝情况分析,共布设 11 处调蓄池(图 4)。与之配合的绿色 LID 设施主要根据用地类型及建设可行性确定,不同用地类型的 LID 组合初选结果及其最大布设比例见表 1。



图 4 灰色调蓄池布设分布
Fig. 4 Layout of storage ponds

表 1 不同用地类型的绿色 LID 设施及最大布设比例
Table 1 Combination scheme and maximum layout proportion of green LID facilities of different land types

用地类型	最大布设比例/%				
	下凹式绿地	雨水花园	绿色屋顶	雨水桶	渗透铺装
工业用地	20		20	5	20
居住用地 1		30	10	10	20
居住用地 2	20	10	10	10	20
居住用地 3	10	10	30	10	20
商业与服务设施用地	10		10	10	20
道路与交通设施用地	20	20			30
绿地与广场用地	30	30			20
公共设施用地	20	20	20	10	20
未开发用地	40	40			

2 多目标优化模型

在前述现状雨洪模型及灰绿基础设施初选结果基础上构建多目标优化模型。灰色调蓄设施和绿色 LID 设施的规模为非线性优化问题,维数高,易于陷入局部点,本文采用基于二元锦标赛法和精英选择策略的 NSGA-II 算法,其计算效率高、搜索范围广^[17]。根据开发区规模,设置种群规模为 60,最大进化代数为 100,交叉概率为 0.9,变异概率为 0.1。采用 C++ 编写优化算法,通过调用 SWMM 动态链

接库实现自动迭代。以灰绿基础设施总成本、径流系数和节点总溢流量为目标函数,以调蓄池容积和 LID 设施面积为决策变量,以布设规模范围作为约束条件,不同内涝风险等级对应不同惩罚因子构建惩罚函数,由此构建多目标优化模型。

2.1 目标函数

a. 成本目标。总成本 E 作为灰绿基础设施目标函数 F_1 , E 为绿色 LID 设施成本 E_G 和灰色调蓄设施成本 E_Y 之和。采用单位面积成本法估算绿色 LID 设施成本:

$$E_G = \sum_{i=1}^{N_L} \sum_{j=1}^{N_m} C_{ij} A_{ij} \quad (2)$$

式中: C_{ij} 为第 i 个子汇水区第 j 种绿色 LID 设施的单价,元/ m^2 ; A_{ij} 为第 i 个子汇水区第 j 种绿色 LID 设施的布设面积, m^2 ; N_m 为第 i 个子汇水区应用的绿色 LID 设施种类数量; N_L 为研究区域子汇水区总数量。LID 设施单价参考《海绵城市建设指南》并结合当地经济发展水平及工程实践确定,雨水花园、下凹式绿地、绿色屋顶、渗透铺装、雨水桶单价分别为 450 元/ m^2 、85 元/ m^2 、300 元/ m^2 、320 元/ m^2 、100 元/ m^2 ^[5]。灰色调蓄池成本参考文献[18]估算:

$$E_Y = \sum_{i=1}^{N_S} 2\,768 V_i^{0.773} \quad (3)$$

式中: N_S 为研究区域布设的调蓄设施总数量; V_i 为第 i 个调蓄设施的容积, m^3 。

b. 径流控制目标。将径流总量 R 与降雨总量 R_1 的比值,即径流系数 φ ,作为径流控制目标 F_2 。

c. 内涝控制目标。积水点溢流总量与渗透及调蓄设施、管网转输及泵闸排放、地下水位或河流水位等多因素相关,反映内涝程度,因此将其作为内涝风险目标函数 F_3 :

$$F_3 = Q = \sum_{i=1}^{N_J} Q_i \quad (4)$$

式中: Q 为节点溢流总量, m^3 ; Q_i 为第 i 个节点的溢流量, m^3 ; N_J 为研究区节点总数量。

2.2 决策变量

在确定灰色调蓄设施布设位置、绿色 LID 设施适建比例的基础上对二者规模进行优化。灰色调蓄设施决策变量为各个调蓄池容积 V_i ;绿色 LID 设施决策变量为各个子汇水区 LID 布设面积 A_{ij} 。

2.3 约束条件

为保证决策变量范围设置的合理性,加快优化过程的收敛,分别对灰色调蓄设施和绿色 LID 设施规模添加如下约束:

a. 绿色 LID 设施约束条件:

$$\begin{cases} A_{ijmin} < A_{ij} < A_i P_{CTij} \\ \sum_{j=1}^{N_L} A_{ij} \leq A_i \end{cases} \quad (5)$$

式中: A_i 为第 i 个子汇水区面积, m^2 ; A_{ijmin} 为第 i 个子汇水区第 j 种绿色 LID 设施最小布设面积, m^2 ; P_{CTij} 为第 i 个子汇水区的第 j 种绿色 LID 设施最大布设比例。

b. 灰色调蓄设施约束条件: 在现状模型中, 将最大降雨重现期降雨作为输入条件, 根据模拟所得各调蓄池最大容积确定调蓄池容积上限, 即 $0 < V_i < 400\,000$ 。

2.4 罚函数

为限制高风险个体的出现, 以人员密度区分地区重要性, 结合积水时间和深度划分内涝风险等级。人员密集及稀疏区域内涝风险等级划分标准见表 2^[19]。内涝风险等级 D 与惩罚因子 M 设置关系如下: $D=0, M=1$ 为无风险, $D=1, M=1.2$ 为低风险, $D=2, M=1.5$ 为中风险, $D=3, M=2$ 为高风险。内涝风险等级越高, 惩罚因子越大, 对应目标函数越大, 从而可降低该个体进入下一代的概率。

综上, 多目标优化模型可表示为

$$\begin{cases} \min F_1 = \min \left(\sum_{i=1}^{N_L} \sum_{j=1}^{N_m} C_{ij} A_{ij} + \sum_{i=1}^{N_S} 2\,768 V_i^{0.773} \right) \\ \min F_2 = \min \frac{R}{R_1} \\ \min F_3 = \min \sum_{i=1}^{N_J} Q_i \\ M = \begin{cases} 1 & D=0 \\ 1.2 & D=1 \\ 1.5 & D=2 \\ 2 & D=3 \end{cases} \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} A_{ijmin} < A_{ij} < A_{imax} P_{CTij} \\ \sum_{j=1}^{N_L} A_{ij} \leq A_i \\ 0 < V_i < 400\,000 \end{cases} \quad (7)$$

3 结果与分析

基于多目标优化模型, 降雨边界条件采用 80% 年径流总量控制率对应降雨 ($P \approx 0.06\text{ a}$)、 $P=3\text{ a}$ 、 $P=20\text{ a}$ 的 24 h 设计暴雨分别反映小雨、中雨、大雨 3 种典型降雨, 首先研究灰色调蓄设施及绿色 LID 设施效能与经济效益的相关性, 其次对二者规模进行多目标优化, 最后综合评价迭代过程, 并选择最具经济效益的灰绿耦合设施实施方案。

3.1 灰绿基础设施经济效益分析

a. 绿色 LID 设施经济效益分析。各子汇水区中不同绿色 LID 设施以步长 S_{ij} 递增至最大布设面积, 同时计算相应规模所产生的效益, 步长公式为

$$S_{ij} = \frac{A_{ijmax} - A_{ijmin}}{n} \quad (8)$$

式中: A_{ijmax} 为第 i 个子汇水区第 j 种绿色 LID 设施最大布设面积, m^2 ; n 为 A_{ij} 由 A_{ijmin} 增长至 A_{ijmax} 的次数, 本文取 100。

小雨、中雨、大雨 3 种典型降雨条件下, 绿色 LID 设施成本 E_C 与节点总溢流量 Q 、径流系数 φ 关系如图 5 所示。可见, 3 种降雨条件下, E_C - Q 曲线最大切线斜率分别为 0.008 4、0.85 和 1.5, E_C - φ 曲线最大切线斜率分别为 0.002 2、0.003 0 和 0.003 2, 均近似为直线, 可据此估算投资成本产生效益或者根据规划设计目标估算投资成本。根据曲线最大切线斜率可计算单位成本绿色 LID 设施产生降雨重现期提升的边际效益。

b. 灰色调蓄设施经济效益分析。与绿色 LID 设施类似, 在现状雨洪模型的基础上添加灰色调蓄设施, 每个调蓄池容积以步长 $1\,000\text{ m}^3$ 从 0 开始增长至 50 万 m^3 , 并计算相应效益。3 种降雨条件下, 调蓄设施容积 V 与成本 E_V 、节点总溢流量 Q 关系如图 6 所示。可见, V 与 E_V 接近线性关系, 因此 V - Q 曲线趋势可反映 E_V - Q 曲线趋势。 V - Q 曲线存在明显的拐点, 拐点后规模/成本的增加并未产生额外效益, 即降低节点中溢流量的边际效益趋 0。因此设计方案中调蓄池总容积应小于拐点对应容积 V_T 。

表 2 内涝风险等级划分标准

Table 2 Classification standard of waterlogging risk grade

积水深度/m	人员密集区			人员稀疏区		
	积水时间 15 ~ 30 min	积水时间 30 ~ 60 min	积水时间 60 ~ 120 min	积水时间 15 ~ 30 min	积水时间 30 ~ 60 min	积水时间 60 ~ 120 min
0.15 ~ 0.3	低	低	中	无	低	低
>0.3 ~ 0.5	中	中	高	低	中	高
>0.5	中	高	高	中	中	高

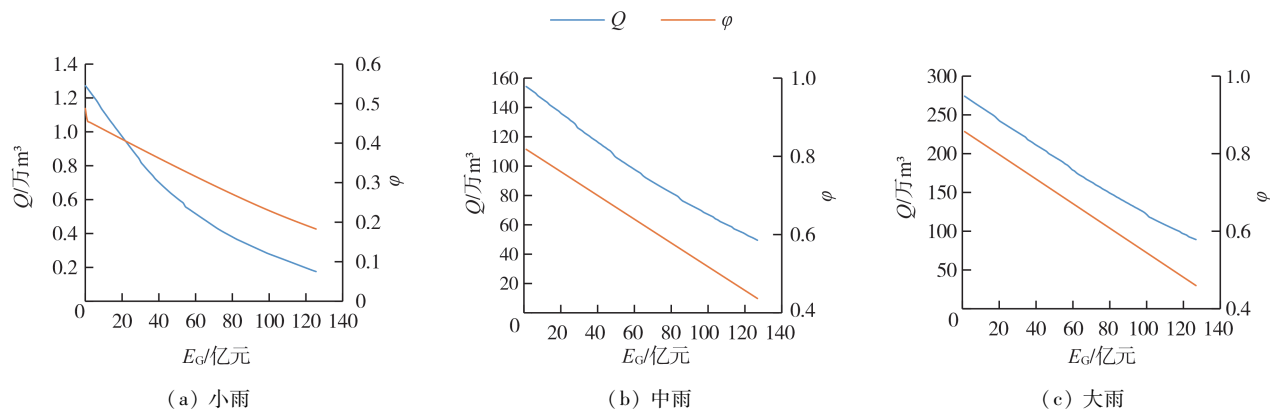


图 5 不同降雨条件下 E_G - Q 及 E_G - φ 关系曲线

Fig. 5 E_G - Q and E_G - φ curves under different rainstorm conditions

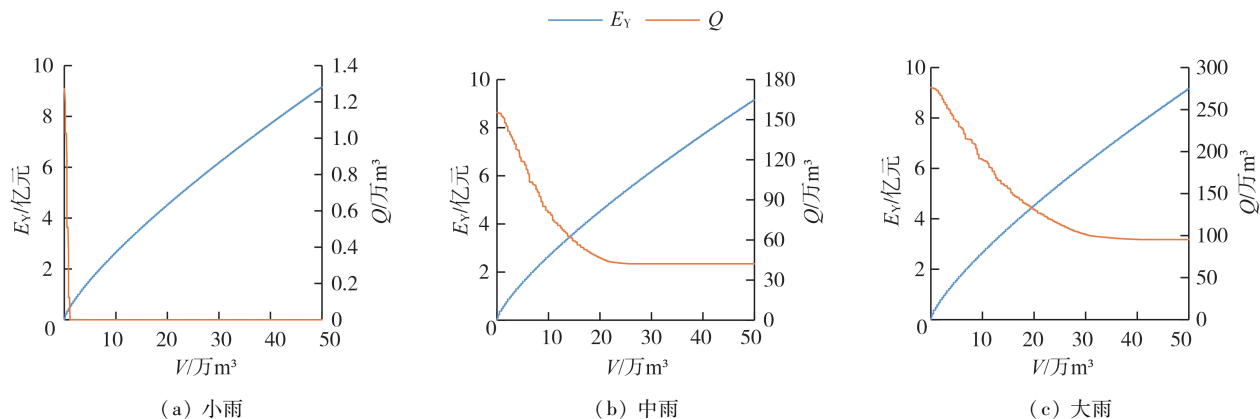


图 6 不同降雨条件下 V - E_Y 及 V - Q 关系曲线

Fig. 6 V - E_Y and V - Q curves under different rainstorm conditions

3 种降雨条件下拐点处的容积 V_T 、成本 E_{YT} 、 V - Q 曲线拐点前最大切线斜率 k_1 以及 V - E_Y 曲线拐点前最大切线斜率 k_2 见表 3, k_1 和 k_2 代表了拐点前单位容积灰色调蓄设施所削减内涝水量和成本。根据拐点相关参数可评估调蓄池规模合理性, k_1 和 k_2 均随重现期增加而增加, 与绿色 LID 设施相比, 相同降雨条件下, 灰色调蓄设施单位成本节点总溢流量削减量远大于绿色 LID 设施。综合绿色 LID 设施经

表 3 各降雨条件下曲线拐点处参数

Table 3 Parameters at inflection point under different rainfall conditions

降雨条件	V_T /万 m^3	E_{YT} /亿元	k_1	k_2
小雨	1.2	0.5120	1.2	2.960
中雨	22.4	4.9187	5.3	25.997
大雨	34.0	6.7911	5.5	29.564

表 4 不同降雨条件各目标函数收敛值

Table 4 Convergence value of each objective function under different rainfall conditions

降雨条件	收敛值			与初代相比优化幅度		
	φ	Q /万 m^3	E /亿元	φ	Q /万 m^3	E /亿元
小雨	0.173	0	61.05	0.004	0	7.11
中雨	0.575	23.0	67.80	0.007	12.5	0.60
大雨	0.590	82.5	67.90	0.004	10.4	0.50

济效益分析结果, 若需提升区域径流控制能力, 绿色 LID 设施是必要的, 但灰色调蓄设施更为经济, 可根据灰色调蓄设施和绿色 LID 设施特点辅助设计方案决策。

3.2 多目标优化结果

在前述建立的多目标优化模型基础上, 对 3 种典型降雨条件下绿色 LID 设施和灰色调蓄设施规模同时进行优化。在预设的种群规模及最大进化代数下, 各目标函数均可稳定收敛, 说明 NSGA-II 算法适用于灰绿基础设施规模多目标优化问题, 表 4 列出了各目标函数收敛值及其与初代相比优化幅度。

不同降雨条件下达到稳定收敛时, 灰绿基础设施单独布设的节点总溢流量削减量以及耦合布设节

点总溢流量削减量对比见表 5,可以发现,灰色调蓄设施和绿色 LID 设施单独布设产生效果小于耦合布设产生效果,灰绿设施耦合效果并非单独布设效果叠加,因此应将灰绿基础设施纳入同一模型模拟评估。

表 5 不同降雨条件下布设灰绿基础设施节点总溢流量削减量

Table 5 Reduction of total node overflow of gray-green infrastructure under different rainfall conditions

降雨条件	节点总溢流量削减量/万 m ³		
	灰色调蓄设施	绿色 LID 设施	耦合布设
小雨	0.54	1.27	1.27
中雨	111.03	62.79	132.36
大雨	99.27	108.54	204.70

不同降雨条件下典型种群个体分布如图 7 所示,其中小雨条件下,所有节点无积水,节点总溢流量为 0。由于种群个体变化,相较于初代,总成本、径流系数和节点总溢流量均呈现降低趋势,说明经过优化,降低成本的同时效益也得到提升,主要通过调整灰绿基础设施成本占比实现。图 8 为不同降雨条件下灰绿基础设施成本随遗传代数变化,可见小雨条件下,节点无积水,灰色调蓄设施成本由 4.29 亿元降至 0.33 亿元;中、大雨条件下,绿色 LID 设施成本呈现下降趋势,原因在于其径流和内涝控制效果下降,经济效益降低。小雨、中雨、大雨条件

下,灰色调蓄设施成本收敛值分别为 0.30 亿元、2.8 亿元、3.05 亿元,灰色调蓄设施成本占比分别为 1.6%、4.0%、4.5%,即降雨重现期越大,灰色调蓄设施成本占比越大,说明调蓄设施是解决内涝问题的有效手段。

3.3 优化方案集的综合评价优选

根据多目标优化可得到典型降雨条件下的优化方案集,进而对该解集中的方案进行综合评价,以获取最优实施方案。本文以灰绿基础设施总成本、径流系数和节点总溢流量为评价指标,优化解集个体数为 60,采用客观赋权法中的熵权法进行赋权,由于评价指标数及个体数均较少,为充分利用原始信息,进一步采用 TOPSIS 法对各方案进行综合评价。

以第 100 代种群作为评价群体,3 种降雨条件下,各指标权重及综合评价所得最优个体目标函数值见表 6。可见,降雨由小至大,最大权重指标分别为径流系数、灰绿基础设施总成本以及节点总溢流量,根据权重分析结果,实际工程中,若以控制出现频次较多的小降雨工况为主要目标,建议更多采用绿色 LID 设施,而若以保障极端降雨安全性为目标,则建议结合灰色调蓄设施。此外,建议在中雨条件下对灰绿耦合排水系统进行优化,避免降雨过小或过大时,某种措施失效从而导致优化结果偏离实际,或者应当综合考虑多种降雨工况进行方案优选。最

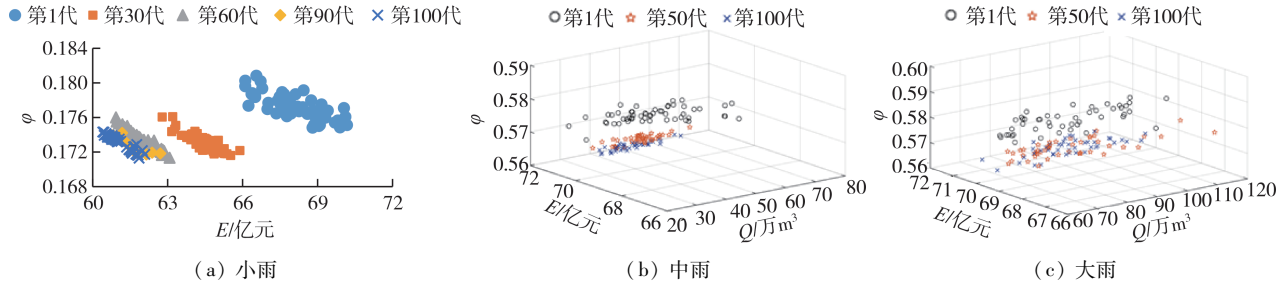


图 7 不同降雨条件下典型种群个体分布

Fig. 7 Individual distribution of typical population under different rainfall conditions

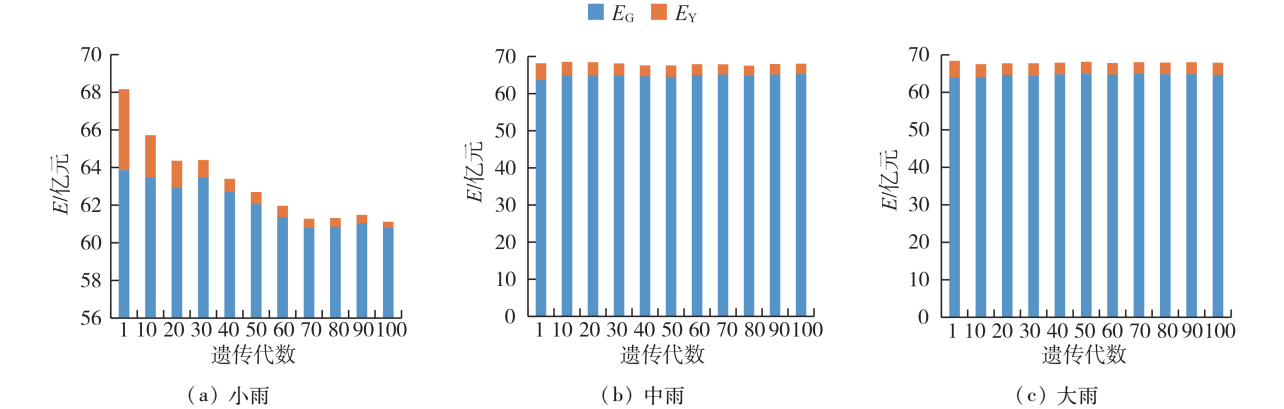


图 8 不同降雨条件下灰绿基础设施成本随遗传代数变化

Fig. 8 Change of grey-green infrastructure cost with genetic algebra under different rainfall conditions

表 6 不同降雨条件各指标权重及最优方案目标函数值

Table 6 Weight of each index and objective function value of optimal scheme under different rainfall conditions

降雨条件	E_G /亿元	E_Y /亿元	φ	Q /万 m^3	E 权重	φ 权重	Q 权重
小雨	61.86	0.239	0.17	0	0.3297	0.6703	0
中雨	66.18	2.59	0.58	31.12	0.5228	0.2648	0.2124
大雨	68.32	3.42	0.59	55.93	0.2939	0.3386	0.3675

终优化方案取得效能为:小雨条件下,径流系数降低 0.32,节点总溢流量减少 1.27 万 m^3 ;中雨条件下,径流系数降低 0.23,节点总溢流量减少 123.21 万 m^3 ;大雨条件下,径流系数降低 0.25,节点总溢流量减少 209.923 万 m^3 ,说明灰绿基础设施对于防洪排涝具有重要意义。

4 结 论

a. 不同降雨条件下,随绿色 LID 设施成本增加,其节点总溢流量削减量和径流系数呈近似线性变化关系,且随降雨重现期增加而加快;灰色调蓄设施规模与节点总溢流量的关系曲线存在拐点,灰色调蓄设施的规模应控制在拐点前,其单位成本节点总溢流量削减量远优于绿色 LID 设施;灰绿基础设施存在协同作用。

b. 降雨条件不同,多目标优化解集及综合评价所得最优方案不同,小雨、中雨、大雨条件下,最优方案权重占比最大的子目标分别为径流系数、灰绿基础设施总成本以及节点总溢流量。降雨条件对多目标优化和综合评价结果有显著影响,应根据不同降雨条件综合评价最终优化方案是否达标。

参考文献:

[1] PAMUNGKAS A, PURWITANINGSIH S. Green and grey infrastructures approaches in flood reduction [J]. International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment, 2019, 10(5) : 343-362.

[2] 翟慧敏,程启先,李书覃,等. 海绵城市理念演变的知识图谱可视化分析[J]. 水资源保护, 2020, 36(2) : 34-40. (ZHAI Huimin, CHENG Qixian, LI Shuqin, et al. Visual analysis of knowledge map of sponge city concept evolution[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(2) : 34-40. (in Chinese))

[3] ALIDA A, BERRY G, ZORAN K, et al. Assessing the co-benefits of green-blue-grey infrastructure for sustainable urban flood risk management [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 239 : 244-254.

[4] 刘家宏,王佳,王浩,等. 海绵城市内涝防治系统的功能解析[J]. 水科学进展, 2020, 31(4) : 611-618. (LIU Jiahui, WANG Jia, WANG Hao, et al. Effectiveness of urban inundation control system in sponge city

construction [J]. Advances in Water Science, 2020, 31 (4) : 611-618. (in Chinese))

[5] 陆海明,邹鹰,孙金华,等. 基于 SWMM 的铁心桥实验基地内涝防治效果模拟[J]. 水资源保护, 2020, 36 (1) : 58-65. (LU Haiming, ZOU Ying, SUN Jinhua, et al. Simulation of waterlogging control effect in Tiexinqiao experimental base based on SWMM [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(1) : 58-65. (in Chinese))

[6] 徐得潜,李星. 雨水管网多目标优化设计研究[J]. 中国给水排水, 2018, 34(7) : 133-138. (YU Deqian, LI Xing. Multi-objective optimization design of rainwater pipe network [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(7) : 133-138. (in Chinese))

[7] 陶涛,肖涛,王林森,等. 海绵城市低影响开发设施多目标优化设计[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(1) : 92-96. (TAO Tao, XIAO Tao, WANG Linsen, et al. Multi-objective optimization design of low-impact development plan in sponge city construction [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019, 47(1) : 92-96. (in Chinese))

[8] ALVES A, GERSONIUS B, SANCHEZ A, et al. Multi-criteria approach for selection of green and grey infrastructure to reduce flood risk and increase co-benefits [J]. Water Resources Management, 2018, 32(7) : 2505-2522.

[9] 周昕,高玉琴,吴迪. 不同 LID 设施组合对区域雨洪控制效果的影响模拟[J]. 水资源保护, 2021, 37(3) : 26-31. (ZHOU Xin, GAO Yuqin, WU Di. Simulation on influence of regional rain-flood control effect under different combinations of LID measures [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(3) : 26-31. (in Chinese))

[10] 梅胜,许明华,周倩倩,等. 排水管网改造与 LID 径流控制在城市雨洪管理中的应用和组合优化[J]. 水电能源科学, 2018, 36(3) : 67-70. (MEI Sheng, XU Minghua, ZHOU Qianqian, et al. Application and combination strategies of pipe enlargement and LID runoff control measures in urban flood management [J]. Water Resources and Power, 2018, 36(3) : 67-70. (in Chinese))

(下转第 80 页)

- 冲淤与水沙过程响应[J]. 人民长江, 2020, 51(10): 1-6. (FAN Yongyang, HU Chunyan, CHEN Mofei. Response of bed evolution in Jingjiang River to water and sediment process before and after operation of Three Gorges Reservoir[J]. Yangtze River, 2020, 51(10): 1-6. (in Chinese))
- [18] 徐长江, 刘冬英, 张冬冬, 等. 2020 年荆江三口分流分沙变化研究[J]. 人民长江, 2020, 51(12): 203-209. (XU Changjiang, LIU Dongying, ZHANG Dongdong, et al. Research on flow and sediment diversion in three outlets along Jingjiang River[J]. Yangtze River, 2020, 51(12): 203-209. (in Chinese))
- [19] NASH J E, SUTCLIFFE J V. River flow forecasting through conceptual models; Part I. a discussion of principles[J]. Journal of Hydrology, 1970, 10(3): 282-290.
- [20] MORIASI D N, ARNOLD J G, VAN LIEW M W, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations[J]. Transactions of the ASABE, 2007, 50(3): 885-900.
- [21] 李世强, 邹红梅. 长江中游螺山站水位流量关系分析[J]. 人民长江, 2011, 42(6): 87-89. (LI Shiqiang, ZOU Hongmei. Analysis on water level-discharge relation of Luoshan hydrologic station in middle reaches of Yangtze River[J]. Yangtze River, 2011, 42(6): 87-89. (in Chinese))
- [22] 朱玲玲, 陈剑池, 袁晶, 等. 洞庭湖和鄱阳湖泥沙冲淤特征及三峡水库对其影响[J]. 水科学进展, 2014, 25(3): 348-357. (ZHU Lingling, CHEN Jianchi, YUAN Jing, et al. Sediment erosion and deposition in two lakes connected with the middle Yangtze River and the impact of Three Gorges Reservoir[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(3): 348-357. (in Chinese))
- (收稿日期: 2021-09-15 编辑: 施业)

(上接第 55 页)

- [11] 宫永伟, 刘伟勋, 于磊, 等. 合流制溢流控制系统的多目标优化[J]. 环境工程, 2020, 38(4): 128-133. (GUAN Yongwei, LIU Weixun, YU Lei, et al. Multi-objective optimization of combined sewer overflow control system[J]. Environmental Engineering, 2020, 38(4): 128-133. (in Chinese))
- [12] 彭晨蕊. 基于海绵城市理念的雨水系统规划设计优化研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.
- [13] BELL C, WOLFAND J, PANOS C, et al. Stormwater control impacts on runoff volume and peak flow; a meta-analysis of watershed modelling studies[J]. Hydrological Processes, 2020, 34(14): 3134-3152.
- [14] 刘兴坡. 基于径流系数的城市降雨径流模型参数校准方法[J]. 给水排水, 2009, 45(11): 213-217. (LIU Xingpo. Parameter calibration method for urban rainfall-runoff model based on runoff coefficient[J]. Water & Wastewater Engineering, 2009, 45(11): 213-217. (in Chinese))
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 室外排水设计规范: GB50014-2006(2016 年版)[S]. 北京: 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2016.
- [16] 周毅, 余明辉, 陈永祥. SWMM 子汇水区域宽度参数的估算方法介绍[J]. 中国给水排水, 2014, 30(22): 61-64. (ZHOU Yi, YU Minghui, CHEN Yongxiang. Estimation of sub-catchment width in SWMM[J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(22): 61-64. (in Chinese))
- [17] GIACOMONI M H, JOSEPH J. Multi-objective evolutionary optimization and Monte Carlo simulation for placement of low impact development in the catchment scale[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2017, 143(9): 1394-1405.
- [18] 宋文圣. 滇池多层次排水系统雨水调蓄池功效研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- [19] 徐宗学, 陈浩, 任梅芳, 等. 中国城市洪涝致灾机理与风险评估研究进展[J]. 水科学进展, 2020, 31(5): 713-724. (XU Zongxue, CHEN Hao, REN Meifang, et al. Progress on disaster mechanism and risk assessment of urban flood/waterlogging disasters in China[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(5): 713-724. (in Chinese))
- (收稿日期: 2021-09-06 编辑: 王芳)

