

李奥, 向代勤, 董研, 等. 综合考虑经济和水文效益的海绵小区灰-绿结合设施布局优化[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2025, 23(1): 130-140. LI A, XIANG D Q, DONG Y, et al. Layout optimization of gray-green combined facilities in sponge community considering economic and hydrological benefits[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2025, 23(1): 130-140. (in Chinese)

# 综合考虑经济和水文效益的海绵小区 灰-绿结合设施布局优化

李奥<sup>1</sup>, 向代勤<sup>1,2</sup>, 董研<sup>1</sup>, 郭家力<sup>1,3,4</sup>, 李英海<sup>1,3,4</sup>, 李颖<sup>1,3,4</sup>

(1. 三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 宜昌市住房和城乡建设局, 湖北 宜昌 443000;  
3. 水电工程施工与管理湖北省重点实验室(三峡大学), 湖北 宜昌 443002;  
4. 三峡大学水资源信息化研究所, 湖北 宜昌 443002)

**摘要:** 基于海绵城市建设理念, 针对现阶段建筑小区尺度上灰-绿结合海绵设施缺乏科学配置与布局优化的问题, 以宜昌市某建筑小区为研究对象, 构建精细化的城市雨洪模型与以经济效益和水文效益为导向的优化算法, 对研究区灰-绿海绵设施进行多目标优化, 得出灰-绿海绵设施空间布局优化方案。该优化方案与研究区规划方案相比, 成本提高 20.46%, 但溢流控制量和径流控制率分别提升了 28.30% 和 25.82%; 与可布设的最大灰-绿海绵设施方案相比, 成本降低了 17.97%, 而溢流控制量和径流控制率分别降低了 10.99% 和 3.36%, 并在 30 年一遇长历时暴雨情景下实现小区底层住户不进水。优化方案有着良好的经济与水文效益, 研究成果可提高海绵城市设施布局的科学性与合理性, 为缓解现阶段同类城市面临的内涝难题, 推动海绵城市建设从试点走向示范提供一定技术支撑。

**关键词:** 城市内涝; 灰-绿结合; 海绵城市; 经济水文效益; InfoWorks ICM 模型

**中图分类号:** TV122; TU992 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2025.0013

城市化进程的加快改变了原始下垫面的特征, 破坏了自然界先前稳定的水循环系统, 增加城市洪涝灾害的发生概率<sup>[1-3]</sup>。近年来, 海绵城市建设理念不断发展, 提出了“绿、灰、蓝”基础设施概念<sup>[4-7]</sup>。其中: 绿色基础设施等同于低影响开发措施(Low-impact development, LID); 灰色基础设施是指与城市雨洪管理有关的传统排水管网、滞蓄设施及污水处理设施; 蓝色基础设施指增加河湖面积、打通断头河、控制河道水位等措施, 在城市中主要利用城市河道与城市公园对内涝积水进行暂存<sup>[8]</sup>。“蓝、绿、灰”基础设施的有效融合可降低城市洪涝风险, 实现城市绿色低碳发展, 维系城市化进程中“人水和谐”。海绵城市建设过程中, 建筑小区的海绵化改造是一个重要内容。越来越多的学者<sup>[9]</sup>基于

建筑小区尺度展开了海绵设施的科学与布局研究, 成果丰富。李俊德等<sup>[10]</sup>以排放口峰值流量为目标, 对某大学学生生活区调蓄设施进行优化设计。陈前虎等<sup>[11]</sup>在建筑小区尺度下对调蓄池进行优化。陈龙等<sup>[12]</sup>以建造成本、径流总量控制率和污染物去除率为多目标函数对住宅组团绿色海绵设施布局进行优化。Liang 等<sup>[13]</sup>以径流峰值削减最大为目标对生物滞留设施与透水铺装进行优化设计。刘富勤等<sup>[14]</sup>以径流控制、设施成本、节点溢流时间为目标对绿色设施进行优化。以上学者以水量(径流量、峰值量)、水质(污染物)、经济(成本)为目标对建筑小区尺度下的雨洪控制设施进行了系统化的研究, 但主要研究集中在单一的绿色设施布局或灰色设施布局上, 建筑小区尺度上的灰-绿结

收稿日期: 2024-05-16 修回日期: 2024-09-03 网络出版时间: 2024-09-29

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.tv.20240927.0921.004>

基金项目: 国家自然科学基金项目(52179018; 42471030); 湖北省建设科技计划项目(01104325X/2023-19934-172); 宜昌市城建项目(YCZ1980-202301-01F)

作者简介: 李奥(2001—), 男, 湖北荆州人, 主要从事城市雨洪模拟研究。E-mail: 1461234001@qq.com

通信作者: 郭家力(1984—), 男, 湖北孝感人, 副教授, 博士, 主要从事城市雨洪模拟研究。E-mail: Jiali.guo@ctgu.edu.cn

合海绵设施科学配置与布局优化相关的研究仍较少。在当前海绵城市建设从试点到示范全域系统化推进的过程中,必须将经济成本(经济效益)与雨洪削减效果(水文效益)置于同等重要的地位进行考虑。因此,基于灰-绿设施的有效结合并构建考虑经济、水文之间关系<sup>[15]</sup>的多目标优化雨洪管理模型进行模拟评估就显得尤为重要。

为探寻建筑小区尺度上的灰-绿结合设施经济效益与水文效益的优化方案,以宜昌市某小区为例,提出基于城市雨洪模型与优化算法模型的海绵城市灰绿结合设施布局优化方法。通过构建海绵建筑小区尺度雨洪模型与以灰绿海绵城市设施规模为决策变量、以经济效益和水文效益为目标函数的优化算法模型,模拟评估不同灰-绿结合布局方案下

的优化效果,以服务于优化海绵城市灰绿设施空间布局。

## 1 研究区概况

### 1.1 研究区域与基础资料

研究区域(30°43'25"N, 111°18'13"E)地处宜昌市西陵区,是宜昌市“十四五”第二批系统化全域推进海绵城市建设示范工作的重点改造区域。小区总面积 6.69 hm<sup>2</sup>,其中,植被 1.94 hm<sup>2</sup>,建筑物 1.42 hm<sup>2</sup>,人行道路 1.38 hm<sup>2</sup>,硬化铺装 1.94 hm<sup>2</sup>。高程范围为 69.82~85.95 m。气候属亚热带季风型气候,年平均气温 16.8℃,年平均降水量 1 164.1 mm。暴雨来临时研究区域的管网收集雨水排放至求索溪。研究区概况见图 1。



图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

### 1.2 数据来源

搭建的管网-地形城市雨洪模型包括管网资料、下垫面和水文气象数据,数据具体获取来源与时间见表 1。

表 1 数据获取来源与时间

Tab. 1 Time and source of data acquisition

数据类型	获取时间/年	获取来源
管网数据	城市管道	2022 武汉市政工程设计研究院
	城市雨水井	2022 武汉市政工程设计研究院
下垫面数据	卫星影像	2022 水经微图
	高程	2018 武汉市政工程设计研究院
水文气象数据	降雨	2023 宜昌市气象局
	水位、流量	2023 实地监测

a.管网数据。InfoWorks ICM 构建所需的基础数据资料包括雨水井和城市管道数据等。管网数据由武汉市政工程设计研究院提供,并经过 RTK 等

进行实地校验勘测。

b.下垫面数据。下垫面数据分为土地利用类型和数字高程模型(digital elevation model, DEM)两类;土地利用数据来源于水经微图卫星影像手动解译;DEM 高程数据由武汉市政工程设计研究院提供,分辨率为 8 m 网格。

c.水文气象数据。水文气象数据分为降雨数据与实测检查井水位及流量变化数据。降雨数据来源于宜昌市气象局,检查井水位和流量变化数据来源于实地监测,监测设备采用上海航征 HZ-RLS-60L 系列雷达水位计监测。

## 2 数据与方法

建立城市雨洪模型并耦合优化算法,分析计算海绵小区灰-绿结合设施布设范围,具体流程见图 2。首先,依据研究区域基础数据建立精确的城市雨洪模型并演算研究区灰-绿海绵设施的雨洪模拟值。

其次,采用多项式拟合法建立多项海绵设施与径流控制、溢流控制和建设成本的代理函数。然后,通过 NSGA-III 算法对代理函数进行优化求解得出海绵小区灰绿结合设施布设范围的优化解集。最后,

利用熵权法对优化解集进行综合指标排序,得出评分最高的方案并与研究区现状、原有规划及允许布设最大海绵设施方案进行对比分析。

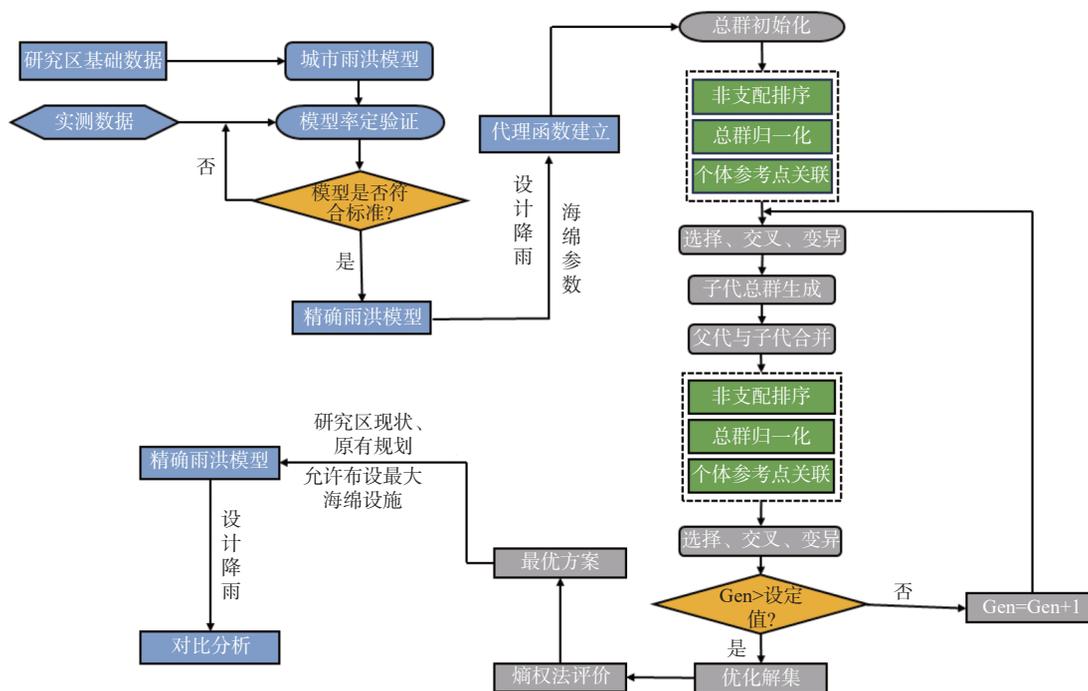


图 2 耦合模型优化灰-绿海绵设施面积流程

Fig. 2 Flow chart of coupled model optimization of gray-green sponge facility area

## 2.1 城市雨洪模型搭建

依据市政排水管网 CAD 资料、卫星影像和地形高程,利用 ArcGIS 软件对管网数据与管网属性进行连接。对影像图层进行解译分析,概化为人行道、建筑物、植被和硬化铺装 4 类。对地形高程进行反距离权重插值<sup>[16]</sup>,将高程分辨率精细化为 1 m。接着利用 InfoWorks ICM 软件对管网进行拓朴、概化、流向纠正<sup>[17]</sup>,采取泰森多边形法对汇水区域进行划分,对建筑物设置空白区,并将道路下降 0.15 m 以反映真实模拟情况<sup>[18]</sup>。概化后研究区排水系统共有 73 个子汇水区、73 根管道、1 个排口和 1 008 个三角网格(三角网格最小为 25 m<sup>2</sup>,最大为 100 m<sup>2</sup>)。最后耦合管网模型与地表模型得到研究区域的城市雨洪模型。

## 2.2 城市雨洪模型率定与验证

模型的率定与验证是城市雨洪模型模拟城市暴雨过程的重要环节<sup>[19]</sup>。依据《城镇内涝防治系统数学模型构建和应用规程(T/CECS 647—2019)》:“模型参数率定与验证的纳什效率系数(Nash-Sutcliffe efficiency coefficient, NSE)不得小于 0.5,模型峰值偏差不大于 25%”。选取 2023 年 4 月 17 日、2023

年 6 月 11 日、2023 年 8 月 26 日 3 场场次降雨和监测点水位、流量变化数据进行模型率定验证(4 月 17 日、6 月 11 日的降雨、水位、流量数据的间隔均为 5 min; 8 月 26 日降雨数据间隔为 1 min,水位、流量监测数据间隔为 10 min,率定验证时模型输出数据与监测数据的时间步长保持一致)参数取值范围参考用户手册及相关文献<sup>[20]</sup>。率定后各参数最终取值结果见表 2,实测水位与模拟水位的对比结果见图 3,实测数据与模拟数据对比见表 3。

由图 3 和表 2 可知,监测点水位、流量与降雨的响应趋势总体一致,模拟值和实测值的拟合程度总体较好。3 场降雨的模拟对比,水位峰现时间分别偏差分别为 0、0 和 10 min,流量峰现时间偏差分别为 0、0 和 10 min,水位峰值偏差分别为 8.62%、13.70% 和 0.55%,流量峰值偏差分别为 10.34%、6.60% 和 12.82%,水位 NSE 值分别为 0.85、0.92 和 0.81,流量 NSE 值分别为 0.84、0.92 和 0.83。率定验证结果满足《城镇内涝防治系统数学模型构建和应用规程(T/CECS 647—2019)》第 5 章的相关规定,模型可用于下一步内涝数据模拟与分析。

表 2 模型率定参数

Tab. 2 Model calibration parameters

类型	汇流参数/管道曼宁系数		初期损失值/m		固定径流系数		径流量类型
	范围	取值	范围	取值	范围	取值	
建筑物	0.001~0.015	0.012	0.001~0.010	0.002 0	0.5~1.0	0.88	Fixed
硬化铺装	0.001~0.015	0.013	0.001~0.010	0.001 0	0.5~1.0	0.88	Fixed
人行道路	0.001~0.015	0.013	0.001~0.010	0.001 5	0.5~1.0	0.90	Fixed
植被	0.100~0.300	0.200	0.001~0.010	0.006 0	-	-	Horton
管道	0.011~0.400	0.014	-	-	-	-	-

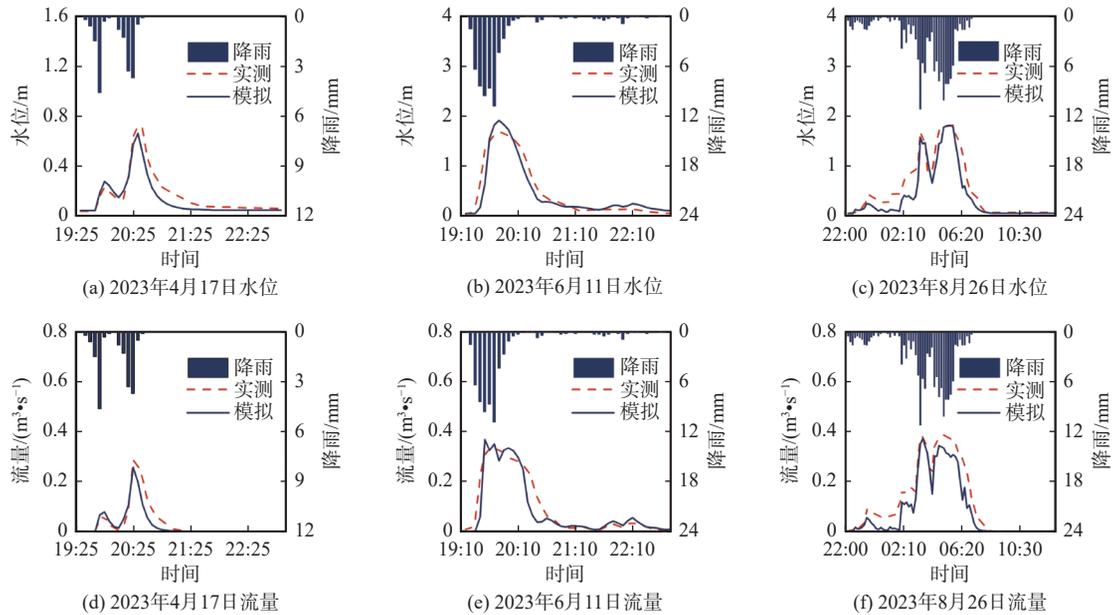


图 3 模拟数据与实测数据变化对比

Fig. 3 Comparison diagram between simulated data and measured data

表 3 实测数据与模拟数据对比

Tab. 3 Comparison between measured data and simulated data

参数	日期	实测峰现时间	模拟峰现时间	实测峰值	模拟峰值	峰值偏差/%	NSE
水位/m	2023-04-17(率定期)	20:30	20:30	0.72	0.66	8.62	0.85
	2023-06-11(率定期)	19:50	19:50	1.68	1.91	13.70	0.92
	2023-08-26(验证期)	5:40	5:30	1.81	1.80	0.55	0.81
流量/(m³·s⁻¹)	2023-04-17(率定期)	20:30	20:30	0.29	0.26	10.34	0.84
	2023-06-11(率定期)	19:50	19:50	0.33	0.35	6.60	0.92
	2023-08-26(验证期)	4:40	4:30	0.39	0.34	12.82	0.83

### 2.3 设计降雨

依据《宜昌市海绵城市建设技术导则》，宜昌市西陵区海绵城市的年径流总量控制率为75%(对应的设计降雨量为22.6 mm)。内涝防治目标为：在重现期为30年的长历时暴雨时，居民小区的底层住户不进水(实地调研小区居民门槛平均高度为5 cm)。2个目标在模型中的体现为径流量与溢流量。本文采用宜昌市住房和城乡建设局公示的暴雨强度公式，选取设计2 h的短历时芝加哥雨型暴雨<sup>[21]</sup>(总降

雨量22.6 mm,雨峰系数0.46,对重现期为1年的设计降雨采用同倍率缩放)与30年一遇24 h的长历时暴雨(总降雨量206.35 mm),两场设计降雨见图4。暴雨强度公式为

$$i = \frac{12.592 \times (1 + 0.685 \lg P)}{(t + 19.445)^{0.639}} \quad (1)$$

式中： $P$ 为设计重现期，a； $t$ 为降雨历时，min； $i$ 为暴雨强度，mm/min。

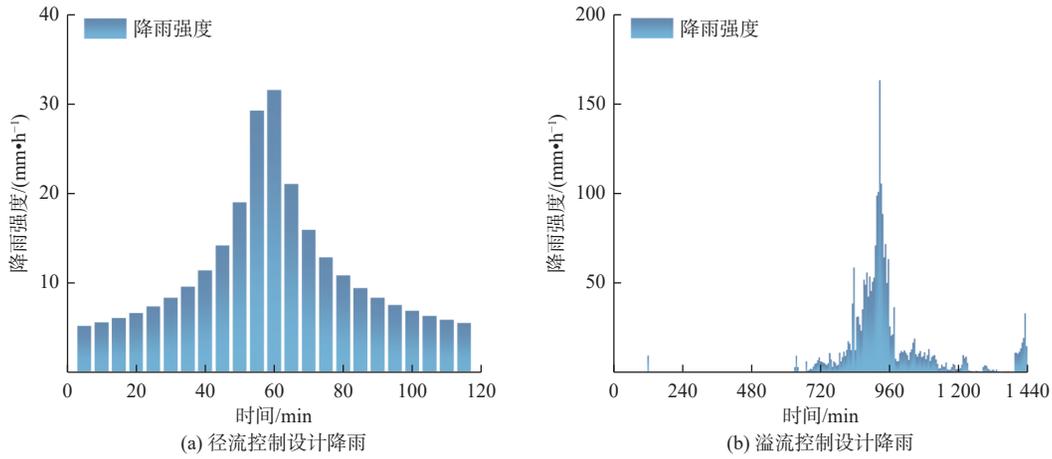


图 4 设计降雨

Fig. 4 Designing rainfall

## 2.4 灰绿海绵设施设计

布置海绵城市灰绿设施时, 需要结合当地情况因地制宜。依据《宜昌市海绵城市建设技术导则》与研究区域现状, 对研究区域共选用了 1 种灰色设施与 3 种绿色设施。灰色设施为调蓄池; 绿色设施分别是下沉式绿地、绿色屋顶和透水铺装。参

考学者的众多研究和暴雨管理模型(storm water management model, SWMM)手册, 绿色海绵设施主要参数<sup>[22]</sup>见表 4。研究区海绵设施中的工程造价估算参考现有研究成果<sup>[23-24]</sup>, 按照式(2)~(5)进行概化计算。

表 4 海绵设施主要参数

Tab. 4 Main parameters of sponge facilities

设施	表面层			土壤层		蓄水层/垫层		
	表面高度/mm	植被体积分数	表面糙率	土壤厚度/mm	孔隙率	蓄水层/垫层厚/mm	孔隙率	渗透速率/(mm·h <sup>-1</sup> )
下沉式绿地	200	0.8	0.15	250	0.5	-	-	-
绿色屋顶	5	0.6	0.20	150	0.5	75	0.50	-
透水铺装	100	-	0.20	500	0.5	200	0.75	10

调蓄池建设费用公式为

$$Y_1 = 2768x_1^{0.773} \quad (2)$$

式中:  $Y_1$  为调蓄池建设费用, 万元;  $x_1$  为调蓄池体积,  $m^3$ 。

下沉式绿地建设费用公式为

$$Y_2 = (0.335a + 31.54)x_2 \quad (3)$$

式中:  $Y_2$  为下沉式绿地建设费用, 万元;  $a$  为下沉式绿地下沉深度,  $m$ ;  $x_2$  为下沉式绿地建设面积,  $m^2$ 。

绿色屋顶建设费用公式为

$$Y_3 = (167.3b + 455.32)x_3 \quad (4)$$

式中:  $Y_3$  为绿色屋顶建设费用, 万元;  $b$  为绿色屋顶建设厚度,  $m$ ;  $x_3$  为绿色屋顶建设面积,  $m^2$ 。

透水铺装建设费用公式为

$$Y_4 = (44.79 - 7.116c^2 + 163.8)x_4 \quad (5)$$

式中:  $Y_4$  为透水铺装建设费用, 万元;  $c$  为透水铺装

建设厚度,  $m$ ;  $x_4$  为透水铺装建设面积,  $m^2$ 。

## 2.5 优化模型建立

### 2.5.1 代理函数构建

代理模型是利用代理方法对离散的数据进行拟合的数学模型。借鉴代理模型的概念, 依据《宜昌市海绵城市建设技术导则》对海绵小区的相关规定: “下沉式绿地面积不得小于绿地总面积的 30%、绿色屋顶面积占宜建屋顶绿化的屋顶面积的比例不应低于 20%、透水铺装占比不得少于硬化路面面积的 50%。” 实地调研统计研究区域可布设海绵设施规模, 将灰色海绵设施调蓄池高度固定为 2  $m$ , 底面积按照起始底面积为 50  $m^2$ , 最大底面积为 350  $m^2$ , 公差为 50  $m^2$  的等差数列设置; 各种绿色海绵设施的面积比例按照公差为 10% 的等差数列设置<sup>[25]</sup>。即: 调蓄池设置容积为 100~700  $m^3$ ; 下沉式绿地、绿色屋顶和透水铺装的布设面积分别为研究区植被

面积的 30%~100%、建筑物面积的 20%~100% 和硬化铺装面积的 50%~100%,共设计 29 组方案。调用 InfoWorks ICM 中对不同方案的短历时设计暴雨径流模块模拟结果与长历时 30 年一遇暴雨溢流模块模拟数据,建立关于灰、绿海绵设施布设规模与径流控制、内涝积水消减之间的代理函数(见图 5、图 6)。计算表达式为

$$\begin{bmatrix} R_i \\ Q_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_0 & a_{1,i} & \cdots & a_{n,i} \\ b_0 & b_{1,i} & \cdots & b_{n,i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中:  $R_i$  为研究区海绵设施径流控制量,  $\text{m}^3$ ;  $Q_i$  为研究区海绵设施溢流控制量,  $\text{m}^3$ ;  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 、 $x_4$  为研究区调蓄池、下沉式绿地、绿色屋顶、透水铺装的布设规模,  $\text{m}^3/\text{m}^2$ ;  $a_0$ 、 $b_0$  为多元回归方程的常数项;  $a_{n,i}$ 、 $b_{n,i}$  为多元回归方程各项系数。

由图 5 和图 6 可知,不同面积灰-绿海绵设施对径流、溢流控制关系拟合效果良好,  $R^2$  均接近 1。

调蓄池、下沉式绿地、绿色屋顶以及透水铺装随着布设规模增加,径流量与溢流量的控制效果逐渐增大,控制效果增加的幅度趋于平缓。即灰-绿海绵设施面积对径流量与溢流量的控制效果并不是呈现线性增加,其增长幅度逐渐减少,这与一些学者<sup>[26-27]</sup>的研究成果相符。其中,在调蓄池对径流量和溢流量控制的拟合曲线中,研究区调蓄池布设面积不断增大,对径流量控制稳定为一定值,此定值为在设计降雨量为 22.6 mm 时调蓄池可储蓄利用的最大水量。总之,各种灰、绿海绵设施设置规模增大时,对径流与溢流削减控制的幅度逐渐趋于平稳,意味着在海绵城市建设过程中,海绵设施对于洪涝响应控制的增长幅度会随着其投入规模的增加而逐渐变缓,盲目对海绵设施加大投入会造成人力、财力的浪费。这为后续进行多目标算法优化奠定了基础。

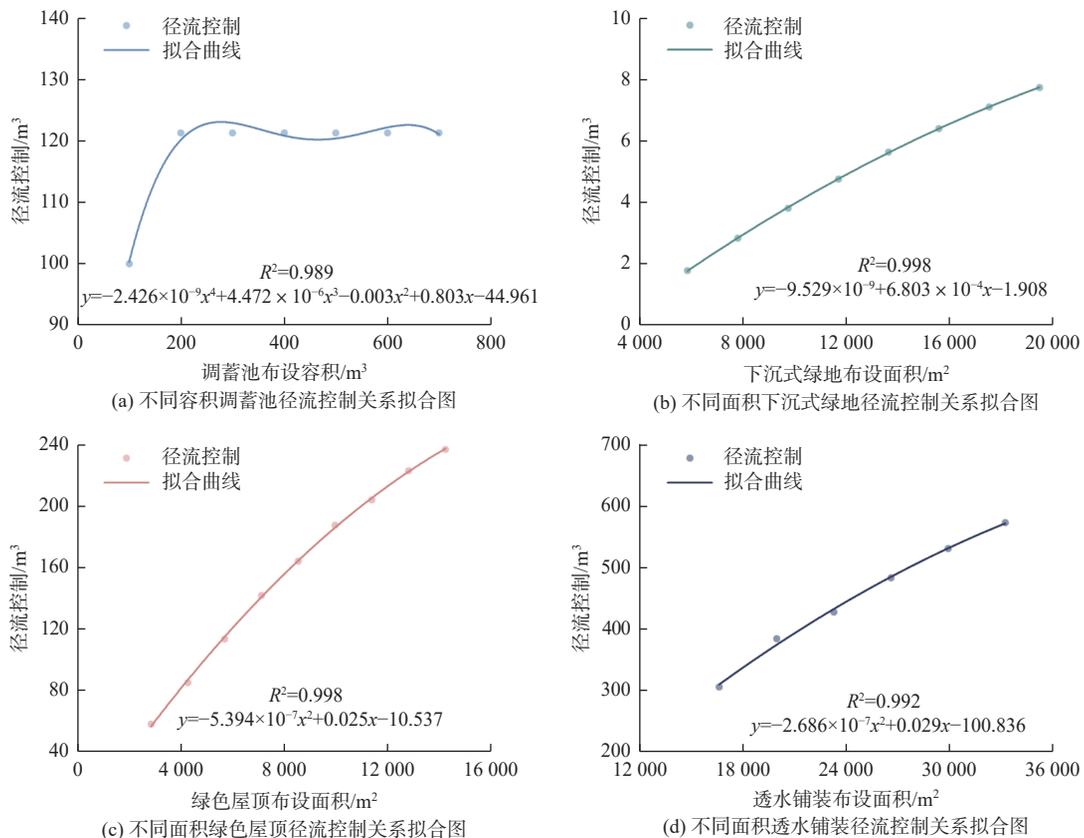


图 5 不同灰绿海绵设施径流控制拟合曲线

Fig. 5 Fitting curves of runoff control pipelines for different grey and green sponge facilities

### 2.5.2 代理函数构建

灰-绿组合海绵设施配置优化问题属于非线性优化问题,其优化目标一般  $\geq 3$  个,维度高,容易陷入局部最优解。采用基于参考点的非支配排序

NSGA-III 算法来解决该问题,该算法具有收敛速度快、不易陷入局部最优、计算效率高、能保持种群多样性、保证种群具有良好分布性等优点,能够有效地解决多维多目标问题。

综合考虑海绵小区灰-绿结合设施的经济与水文效益并对灰绿海绵设施进行组合<sup>[28-29]</sup>。在研究区灰-绿组合海绵配置布局多目标优化中,追求以下 3 个目标:一是灰-绿海绵设施的建造成本最低;二是区域溢流量控制最高;三是区域径流总量控制率最高。基于以上 3 个目标,构建 NSGA-III 算法中的 3 个目标函数,依次如式(7)~(9)所示。

$$\text{minimize } F_1 = Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4 \quad (\text{建设成本最低}) \quad (7)$$

$$\text{maximize } F_2 = Q(x_1, x_2, \dots, x_i) \quad (\text{溢流量控制最高}) \quad (8)$$

$$\text{maximize } F_3 = \frac{R(x_1, x_2, \dots, x_i) + R'}{P} \quad (\text{径流控制率最高}) \quad (9)$$

式中:  $x_i$  为海绵设施的布置规模,  $\text{m}^3/\text{m}^2$ ;  $R'$  为原始控制径流量,  $\text{m}^3$ ;  $P$  为总降雨量,  $\text{m}^3$ 。

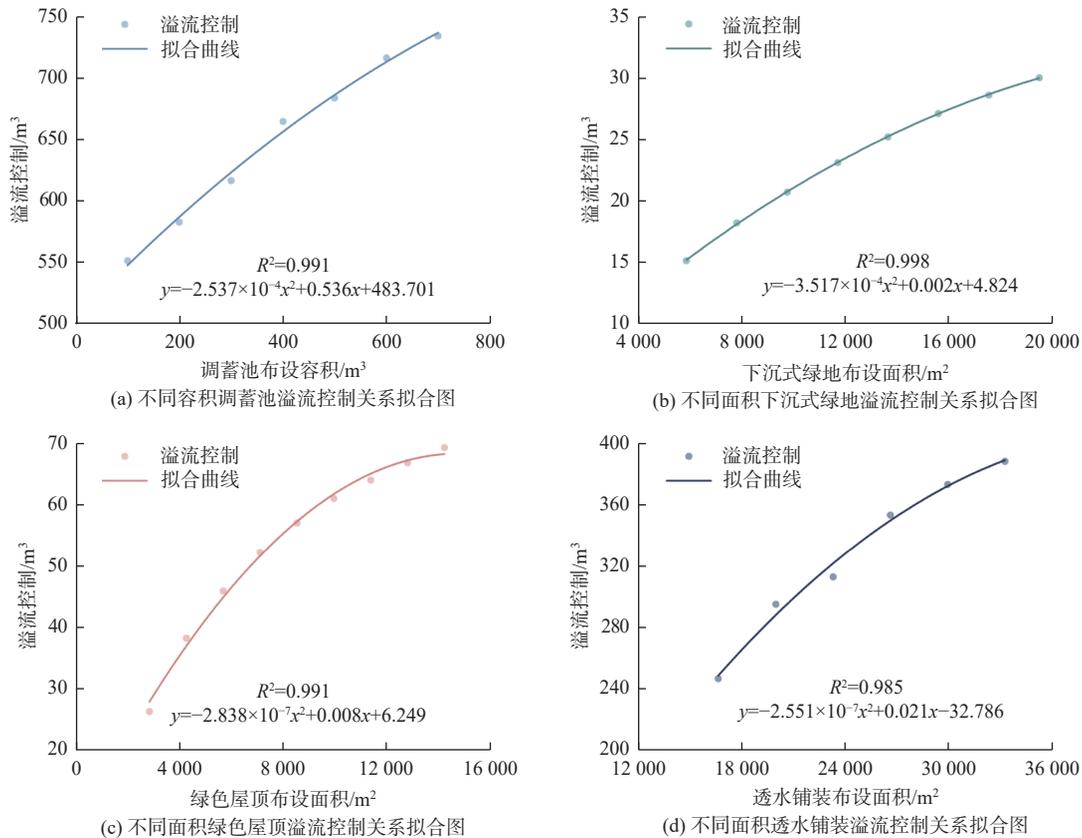


图 6 不同灰绿海绵设施溢流控制拟合曲线

Fig. 6 Fitting curves of overflow control pipelines of different grey and green sponge facilities

约束条件是对定义域即决策变量的取值区间进行的约束。在实际工程设计中,要综合考虑场地条件、政策规范要求等要素,因此设定多目标优化中的约束条件为

$$x_i \in [S_{i,\min}, S_{i,\max}] \quad (10)$$

式中:  $S_{i,\min}$ 、 $S_{i,\max}$  为灰-绿海绵设施建设最小、最大规模。

### 2.5.3 综合评价指标优选

熵权法能够客观地反映不同指标之间的差异性和重要程度,计算结果较为准确且不受主观因素的影响<sup>[30]</sup>。主要步骤包括:数据标准化;计算指标比重;计算信息熵;确定各指标的权重;计算综合得分。成本为负向指标,径流控制与溢流控制为正向指标,标准化与计算最终得分采用式(11)~(13)计算。

$$x' = \frac{x_{j,\max} - x_{ij}}{x_{j,\max} - x_{j,\min}} \quad (\text{负向指标标准化}) \quad (11)$$

$$x'' = \frac{x_{ij} - x_{j,\min}}{x_{j,\max} - x_{j,\min}} \quad (\text{正向指标标准化}) \quad (12)$$

$$s_i = \sum_{j=1}^m w_j \cdot x_{ij} \quad (\text{计算综合得分}) \quad (13)$$

式中:  $x_{ij}$  为第  $i$  个样本的第  $j$  个指标值;  $x'$ 、 $x''$  为标准化后的指标值;  $x_{j,\max}$ 、 $x_{j,\min}$  分别为第  $j$  个指标的最大和最小值;  $s_i$  为综合得分;  $w_j$  为各个指标的权重,由熵权法对经济效益指标与水文效益指标客观计算。

## 3 结果分析

### 3.1 优化模型结果分析

以不同灰-绿海绵设施在研究区的设置大小为参数,设置 NSGA-III 算法的种群规模  $N=100$ 、最大遗传代数  $G=100$ 、交叉概率  $P_c=0.9$ 、变异概率  $P_m=$

0.1,得到包含 86 个非劣解的帕累托前沿面(图 7)。建造成本为 562.8 万~1 455.63 万元,可实现的区域径流总量控制率范围达到 68.66%~96.04%、溢流量控制达到 1 110.44~1 526.96 m<sup>3</sup>。每个解都代表着一组灰-绿海绵设施布设方案,其中包含着灰色调蓄设施的建设容积和每种绿色 LID 设施的建设面积及其对应的径流控制和积水削减目标等信息。但当目标函数数量大于两个时,NSGA-III 算法无法计算出唯一的最优解,而是生成由多种优化方案组成的帕累托前沿面。故采取熵权综合评价分析方法进一步对这多种优化方案进一步评价(表 5),其综合得分越接近 1 则表明该方案越优。

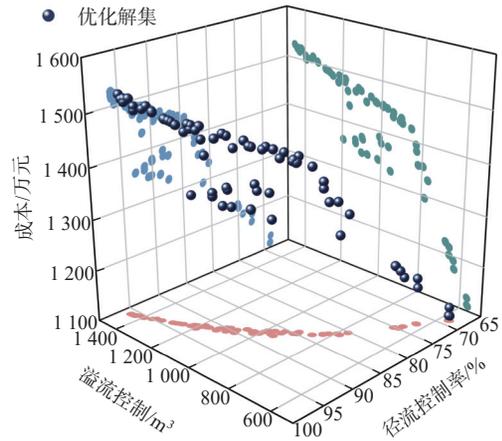


图 7 NSGA-III 优化帕累托前沿面  
Fig. 7 NSGA-III optimized Pareto front surface

表 5 优化解集综合评价排序

Tab. 5 Ranking of comprehensive evaluation of optimal solution set

方案	调蓄池容积/m <sup>3</sup>	下沉式绿地面积/m <sup>2</sup>	绿色屋顶面积/m <sup>2</sup>	透水铺装面积/m <sup>2</sup>	综合得分
1	278.55	6 968.65	10 188.87	33 230.00	0.58
2	296.75	6 938.40	8 423.09	32 771.16	0.55
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
86	700.00	19 470.00	3 054.12	33 210.70	0.33

### 3.2 海绵城市建设标准结果对比分析

将熵权综合评价的优化方案中综合得分最高的方案命名为优化模式,与现状、原有规划和最大模

式(对研究区域的海绵设施比例全部布设为最大值)进行对比分析,对比结果见表 6 和图 8。

表 6 灰-绿海绵设施布设对比分析

Tab. 6 Comparative analysis of grey - green sponge facilities layout

	现状	原有规划	优化方案	最大方案
调蓄池容积/m <sup>3</sup>	0	700.00	278.55	700.00
下沉式绿地面积/m <sup>2</sup>	0	19 470.00	6 968.65	19 470.00
绿色屋顶面积/m <sup>2</sup>	0	11 392.00	10 188.87	14 240.00
透水铺装面积/m <sup>2</sup>	0	16 615	33 230	33 230
造价/万元	0	991.21	1 194.09	1 455.72
溢流控制/m <sup>3</sup>	0	1 037.90	1 361.62	1 529.78
径流控制率/%	38.13	66.97	92.79	96.15

从表 6 和图 8 可以看出,优化方案仅花费 1 194.09 万元就能达到 92.79% 的径流控制率与 1 361.62 m<sup>3</sup> 的溢流控制量。原有规划情景下,造价花费 991.21 万元,径流控制率为 66.97%,不能满足宜昌市年径流控制率为 75% 的标准,且在 30 年一遇长历时暴雨情景下仍有部分积水进入小区底层住户。主要原因是原有规划过度重视下沉式绿地的作用,对于透水铺装的投入过少,在未来的建设中可考虑增加透水铺装的投入。最大方案情景下,

花费 1 455.72 万元实现 96.15% 的径流控制率与 1 529.78 m<sup>3</sup> 的溢流控制量。该优化方案与研究区规划方案相比,成本提高 20.46%,但溢流控制量和径流控制率分别提升 28.30% 和 25.82%;与可布设的最大灰-绿海绵设施方案相比,成本降低 17.97%,而溢流控制量和径流控制率分别降低 10.99% 和 3.36%,同样实现了 30 年一遇长历时暴雨情景下小区底层住户不积水的目标。优化方案相较于原有规划与最大方案,经济效益与水文效益有着显著的提升。

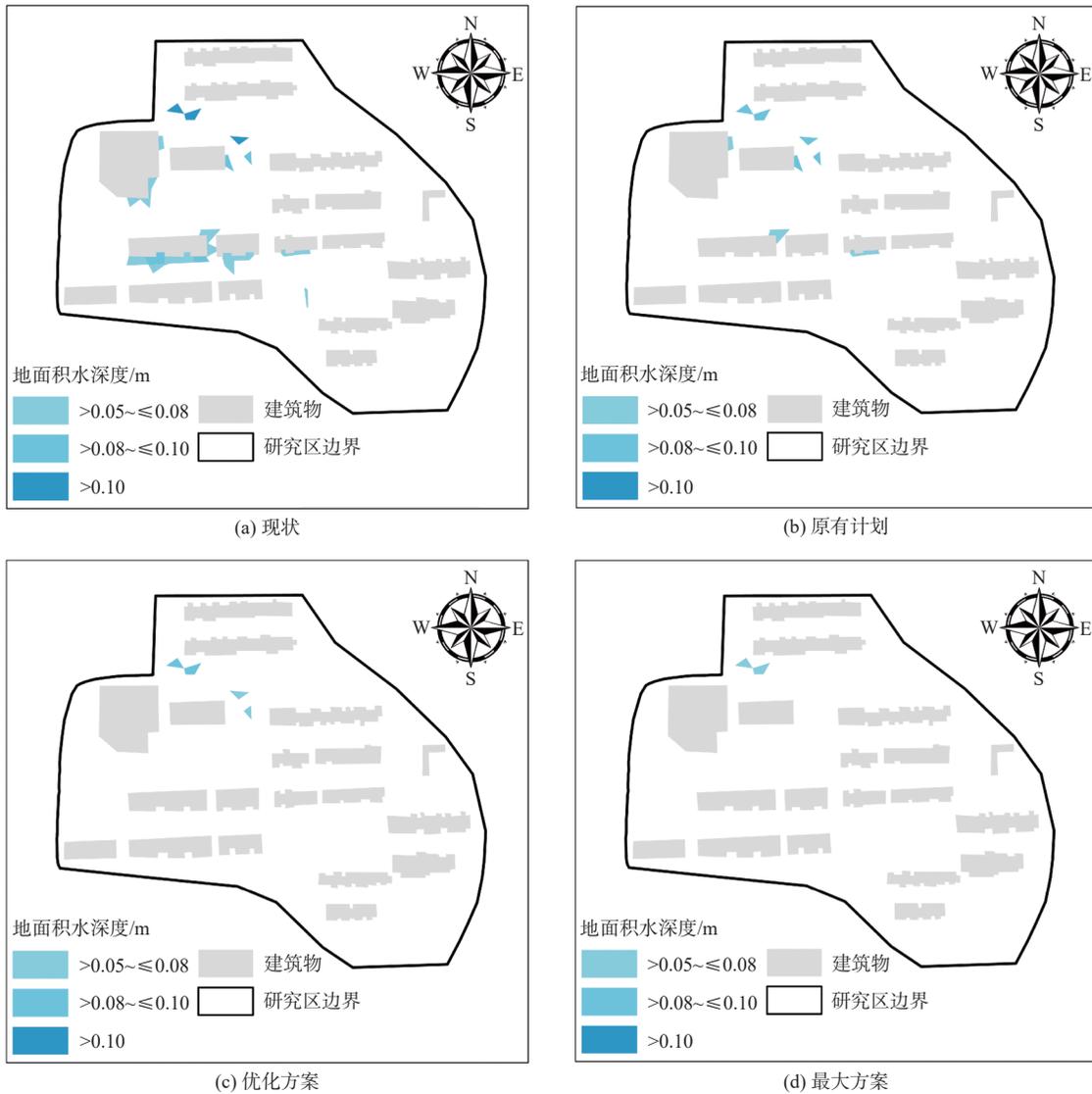


图 8 30 年一遇长历时暴雨最大积水区域对比

Fig. 8 Comparison of the maximum water accumulation area of a long-duration rainstorm in 30 years

需要注意的是,利用熵权法计算的最优解是在仅考虑布设规模而未考虑海绵设施具体空间位置下计算出的最优解,而在实际工程建设中需考虑海绵设施布置的具体位置,使海绵理念与海绵小区规划设计真正相互衔接。比如,在设计方案的确定过程中,需要全面考虑透水铺装的耐磨性,尽量避免在人群密集、车辆活动频繁的区域布置透水铺装。同时,还应考虑下沉式绿地、绿色屋顶的布局位置与小区整体景观设计的融合和协调性。

#### 4 结论与展望

本研究基于海绵城市建设理念,针对现阶段建筑小区灰-绿结合海绵设施缺乏科学配置与布局优化的问题,以宜昌市某建筑小区为研究对象,构建了精细化的城市雨洪模型与以经济效益和水文效益为导向的优化算法模型,对研究区灰-绿海绵设施

进行多目标优化模拟与评价,主要得出以下结论:

在海绵设施建设规模与洪涝响应的函数拟合关系中,各种灰绿海绵设施设置规模增大时,对径流与溢流削减控制的幅度逐渐趋于平稳,意味着在海绵城市建设过程中,海绵设施对于洪涝响应控制的增长幅度会随着其投入规模的增加而逐渐变缓,盲目对海绵设施加大投入会造成人力、财力浪费。

利用熵权法对帕累托前沿面优化解集方案进行综合评价,选取综合得分最高的方案作为优化方案。该优化方案与研究区规划方案相比,成本提高 20.46%,但溢流控制量和径流控制率分别提升了 28.30% 和 25.82%;与可布设的最大灰-绿海绵设施方案相比,成本降低了 17.97%,而溢流控制量和径流控制率分别降低了 10.99% 和 3.36%,并在 30 年一遇长历时暴雨情景下实现小区底层住户不进水,此优化方案有着良好的经济与水文效益。

对于海绵设施的造价是依据现有的研究成果采取的经验公式,并未考虑到不同地区对于海绵设施配置也会引发造价的不同,实际工程建设中需综合考虑当地环境对海绵设施的影响。对于小区尺度下的海绵设施融合主要通过优选与评估的路径,而随着我国海绵城市建设由“试点”到“示范”的不断推进,城市尺度上的海绵城市建设愈发重要。在未来对更大的城市尺度绿-灰-蓝多种设施布局研究中,可采取低影响开发系统构建、排水分区优化、调蓄空间布局,以源头削减-中间控制-末端利用的路径进行绿-灰-蓝设施有效融合,提高城市排水能力。

#### 参考文献:

- [1] 徐宗学,程涛.城市水管理与海绵城市建设之理论基础:城市水文学研究进展[J].*水利学报*,2019,50(1):53-61. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20181056.
- [2] 李鹏,徐宗学,赵刚,等.基于SWMM与LISFLOOD-FP模型的城市暴雨内涝模拟:以济南市为例[J].*南水北调与水利科技(中英文)*,2021,19(6):1083-1092. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2021.0111.
- [3] 王凯丰,张洪斌,力刚,等.城市洪涝韧性的研究进展及关键支撑技术综述[J].*水利水电技术(中英文)*,2023,54(11):77-88. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2023.11.0076.
- [4] LENG L, MAO X, JIA H, et al. Performance assessment of coupled green-grey-blue systems for sponge city construction[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 728: 138608. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138608.
- [5] 刘曦,孔露霆,丁兆晖,等.英国蓝绿系统方法剖析及对我国海绵城市建设的启示[J].*中国给水排水*,2020,36(4):24-29. DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.04.005.
- [6] 阳焯,何俊超,朱江,等.基于雨洪适应性的蓝绿灰融合技术路径研究[J].*给水排水*,2023,59(增刊1):134-142. DOI: 10.13789/j.cnki.wwe1964.2022.12.18.0001.
- [7] CHENG T, HUANG B, YANG Z, et al. On the effects of flood reduction for green and grey sponge city measures and their synergistic relationship: Case study in Jinan sponge city pilot area[J]. *Urban Climate*, 2022, 42: 101058. DOI: 10.1016/j.uclim.2021.101058.
- [8] 唐磊,芮文武,张锦森,等.海绵城市规划中融合蓝绿灰设施的技术方法研究[J].*中国给水排水*,2024,40(16):42-47. DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.16.007.
- [9] 蒋春博,李家科,高佳玉,等.海绵城市建设雨水基础设施优化配置研究进展[J].*水力发电学报*,2021,40(3):19-29. DOI: 10.11660/slfjdx.20210302.
- [10] 李俊德,范功端,邹建勇.基于差分进化算法的雨水调蓄设施优化调度研究[J].*中国给水排水*,2021,37(21):119-124. DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.21.019.
- [11] 陈前虎,周明,邹澄昊,等.海绵化改造小区调蓄池优化布局及其雨水径流控制效果:以浙江省嘉兴市烟波苑小区为例[J].*水土保持通报*,2020,40(3):235-242. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2020.03.034.
- [12] 陈龙,龙瀛.基于雨洪管理模型和NSGA-II算法的低影响开发设施空间布局优化:以北京通州某住宅组团为例[J].*国际城市规划*,2022,37(6):42-48. DOI: 10.19830/j.upi.2022.428.
- [13] LIANG C Y, YOU G J Y, LEE H Y. Investigating the effectiveness and optimal spatial arrangement of low-impact development facilities[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 577: 124008. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.124008.
- [14] 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. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2024.04.017.
- [15] 徐宗学,李鹏,程涛.基于海绵城市理念的LID措施优化布局:以济南市黄台桥流域为例[J].*南水北调与水利科技(中英文)*,2022,20(3):552-562. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2022.0056.
- [16] YANG C, ZHAO M, WANG C, et al. Urban road DEM construction based on geometric and semantic characteristics[J]. *Earth Science Informatics*, 2020, 13(4): 1369-1382. DOI: 10.1007/s12145-020-00510-4.
- [17] 黄国如,李碧琦.基于InfoWorks ICM的深圳市内涝灾害居民室内财产损失研究[J].*自然灾害学报*,2021,30(2):71-79. DOI: 10.13577/j.jnd.2021.0207.
- [18] 袁绍春,王怀望,吕波,等.基于InfoWorks\_ICM模型的山地城市老旧建筑小区海绵化改造方案设计及其评估[J].*水资源保护*,2020,36(5):43-49. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2020.05.007.
- [19] 侯精明,李东来,王小军,等.建筑小区尺度下LID措施前期条件对径流调控效果影响模拟[J].*水科学进展*,2019,30(1):45-55. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2019.01.005.
- [20] 刘波,戎贵文,陈情情,等.基于SWMM的LID设施分区布局及减排效益[J].*南水北调与水利科技(中英文)*,2023,21(5):930-939. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2023.0090.
- [21] JIN J G, XIAO Q L, BU Y F, et al. Study on planning and design of blue-green-gray transformation of lakeside cities to deal with the complex urban waterlogging caused by extreme rainstorm[J]. *Land*, 2023, 12(2): 289. DOI: 10.3390/land12020289.
- [22] 张曼,周可可,张婷,等.城市典型LID措施水文效应及雨洪控制效果分析[J].*水力发电学报*,2019,38(5):57-71. DOI: 10.11660/slfjdx.20190507.
- [23] 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.
- [24] 赵莹, 刘家宏, 梅超, 等. 大兴机场海绵设施雨洪控制效果模拟 [J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(3): 512-521. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0051](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0051).
- [25] 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, 55(3): 90-101. DOI: [10.13928/j.cnki.wrahe.2024.03.008](https://doi.org/10.13928/j.cnki.wrahe.2024.03.008).
- [26] 张文晴, 侯精明, 王俊辉, 等. 耦合 NSGA-II 算法与高精度水动力模型的 LID 设施优化设计方法研究 [J]. *水资源与水工程学报*, 2022, 33(04): 133-142. DOI: [10.11705/j.issn.1672-643X.2022.04.18](https://doi.org/10.11705/j.issn.1672-643X.2022.04.18).
- [27] 汤青峰, 彭立云, 蒋永红, 等. 基于 SWMM 的城市河网情景调控与分析研究 [J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(5): 15-26. DOI: [10.13928/j.cnki.wrahe.2023.05.002](https://doi.org/10.13928/j.cnki.wrahe.2023.05.002).
- [28] 谢明坤, 董增川, 成玉宁. 基于数字景观的海绵城市研究框架、关键技术与实践案例: 从水文分析到智能测控 [J]. *中国园林*, 2023, 39(5): 48-54. DOI: [10.19775/j.cla.2023.05.0048](https://doi.org/10.19775/j.cla.2023.05.0048).
- [29] 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. DOI: [10.14042/j.cnki.32.1309.2020.04.015](https://doi.org/10.14042/j.cnki.32.1309.2020.04.015).
- [30] 叶陈雷, 徐宗学, 雷晓辉, 等. 福州晋安河片区海绵改造对城市内涝的影响 [J]. *水资源保护*, 2023, 39(1): 83-92. DOI: [10.3880/j.issn.1004-6933.2023.01.012](https://doi.org/10.3880/j.issn.1004-6933.2023.01.012).

## Layout optimization of gray-green combined facilities in sponge community considering economic and hydrological benefits

LI Ao<sup>1</sup>, XIANG Daiqin<sup>1,2</sup>, DONG Yan<sup>1</sup>, GUO Jiali<sup>1,3,4</sup>, LI Yinghai<sup>1,3,4</sup>, LI Ying<sup>1,3,4</sup>

(1. College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Yichang Housing and Urban Renewal Bureau, Yichang 443000, China; 3. Hubei Key Laboratory of Construction and Management in Hydropower Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 4. Institute of Water Resources Informatics, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

**Abstract:** The acceleration of urbanization has changed the characteristics of the original underlying surface, destroyed the previously stable water circulation system in nature, and intensified the probability of urban flood disaster. In recent years, the concept of sponge city construction is continuously being developed, and the concept of "blue, green and gray" infrastructure has been proposed, which possibly could reduce the risk of urban flooding. In the process of sponge city construction, the sponge transformation of building districts is an important content. However, the recent research at this stage focuses on a single green or gray facility layout, and few scholars have conducted research on the scientific allocation and layout optimization of gray-green combined sponge facilities on the scale of building districts.

The current research on sponge infrastructure should align with the specific requirements of regional sponge city construction. Therefore, a building district in Yichang City was selected as the research area. The urban storm flood model combined with the optimization algorithm model, a multi-objective optimization was carried out to optimize the deployment ratio of sponge infrastructure, and the scheme with the highest score was compared with the current situation of the study area and the scheme with the maximum allowed deployment of sponge facilities.

Compared with the study area planning scheme, the cost of the optimization scheme was increased by 20.46%, but the overflow control volume and runoff control rates were also increased by 28.30% and 25.82%, respectively. Compared with the largest gray-green sponge facility that can be deployed, the cost showed a reduction of 17.97%, while the overflow control volume and runoff control rate were reduced by 10.99% and 3.36%, respectively, and the bottom residents of the community were not flooded under the scenario of a long-lasting rainstorm once in 30 years. The optimization scheme proposed illustrate the economic and hydrological benefits.

The research showed that: (1) When the scale of various grey and green sponge facilities was increased, the range of runoff and overflow reduction control moved gradually towards stability, this means that in the process of sponge city construction, the growth rate of sponge facilities for flood response control will gradually slow down with the increase of their investment scale (2) The optimized sponge construction scheme reveals economic and hydrological benefits, and can provide technical support for future sponge city constructions.

**Key words:** urban waterlogging; grey-green combination; sponge city; economic and hydrological benefit; InfoWorks ICM model