

廖如婷, 徐宗学, 叶陈雷, 等. 典型 LID 设施多尺度径流调控效应研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(3): 61-75. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.03.005

LIAO Ruting, XU Zongxue, YE Chenlei, et al. Study on the runoff regulation effects of typical low impact development facilities in multiple scale regions[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(3): 61-75. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.03.005

典型 LID 设施多尺度径流调控效应研究

廖如婷^{1,2}, 徐宗学^{1,2}, 叶陈雷^{1,2}, 舒心怡^{1,2}, 黄亦轩^{1,2}, 贾书惠³

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室, 北京 100875; 3. 中国城市规划设计研究院, 北京 100044)

摘要:【目的】为明晰海绵城市在缓解城市内涝中的作用, 以山西省晋城市金村起步区为研究对象, 深入分析 LID 设施不同空间尺度径流及内涝调控效应。【方法】通过构建 SWMM 与 InfoWorks ICM 二维模块耦合的城市暴雨内涝模型, 模拟多种暴雨情景和 LID 布设方案下地块、排水区、区域降雨径流过程, 分析其产汇流和内涝淹没特征。【结果】LID 设施能有效降低径流峰值、削减径流总量、加快径流消退, 减少溢流节点和超载管段, 缩减内涝面积、降低内涝水深。不同空间尺度下 LID 设施调控效果差异不大, 都在 1~5 a 重现期间表现良好, 1 a 重现期降雨下 LID 设施最大面积布设方案可削减 75% 以上地表径流。【结论】LID 设施应对短重现期暴雨效果良好, 对长重现期暴雨内涝调控能力有限, 尤其对严重内涝点调控能力不足。扩大 LID 设施规模可有效提高其径流调控能力。

关键词: 海绵城市; 径流调控; LID 设施; 城市内涝; 地块; 降雨; 气候变化; SWMM

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.03.005

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV122.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)03-0061-15



Study on the runoff regulation effects of typical low impact development facilities in multiple scale regions

LIAO Ruting^{1,2}, XU Zongxue^{1,2}, YE Chenlei^{1,2}, SHU Xinyi^{1,2}, HUANG Yixuan^{1,2}, JIA Shuhui³

(1. College of Water Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, Beijing 100875, China; 3. China Academy of Urban Planning and Design, Beijing 100044, China)

Abstract: [Objective] In order to investigate the role of sponge cities in mitigating urban waterlogging by selecting the Jincun development area of Jincheng City as a research area and analyzing the regulation effects of low impact development (LID) facilities on runoff and waterlogging at different spatial scales. [Methods] A coupled urban stormwater and waterlogging model was developed by integrating the Storm Water Management Model (SWMM) and the two-dimensional module of InfoWorks ICM. The model simulated various storm scenarios and LID layout schemes to analyze rainfall-runoff processes and waterlogging characteristics in plots, drainage zones, and regions. [Results] The findings indicated that LID facilities effectively reduced runoff peak values, decreased total runoff, accelerated runoff recession, and mitigated overflow nodes and overloaded pipe segments. They also significantly reduced areas affected by waterlogging and lowered water depths. The regulation effect of LID facilities showed minor variation across different spatial scales and performed well within a 1 to 5-year recurrence period. Specifically, under

收稿日期: 2024-02-17; 修回日期: 2024-05-13; 录用日期: 2024-05-21; 网络出版日期: 2024-06-20

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(52239003)

作者简介: 廖如婷(1994—), 女, 博士研究生, 主要从事城市洪涝模拟、海绵城市研究。E-mail: liaoruting@mail.bnu.edu.cn

通信作者: 徐宗学(1962—), 男, 教授, 博士研究生导师, 博士, 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: zxxu@bnu.edu.cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

1-year recurrence period rainfall, the largest LID layout scheme reduced surface runoff by more than 75%. [Conclusion] LID facilities demonstrate strong efficacy for short-recurrence-period storms but have limited capacity for long-recurrence-period waterlogging control, particularly at severe waterlogging points. Expanding the scale of LID facilities can substantially enhance their runoff regulation capacity.

Keywords: sponge city; runoff regulation; low impact development facilities; urban waterlogging; plots; rainfall; climate-change; SWMM

0 引言

IPCC(政府间气候变化专门委员会)第六次评估报告指出,在全球气候变化和城市化快速发展的共同影响下,水循环过程及要素发生了剧烈变化,极端暴雨、洪水等气候灾害呈现增多增强的趋势^[1]。根据近十年《中国水旱灾害公报》统计,我国年均约 160 座城市发生洪涝灾害,直接经济损失超过 2000 亿元,特别是以 2012 年北京“7·21”、2021 年郑州“7·20”、2023 年北京“23·7”为代表的特大暴雨洪涝灾害事件,为我国城市洪涝防治工作敲响了警钟。为了应对和解决我国城市水问题,海绵城市理念应运而生。现有研究表明,海绵城市建设能够有效对内涝防治设计重现期以内的强降雨,使城市在适应气候变化、抵御暴雨灾害等方面具有良好“弹性”和“韧性”^[2]。2015 年以来,财政部、住房城乡建设部、水利部共确定了 30 座海绵城市建设试点城市和 60 座海绵城市建设示范城市,为扎实推动全国海绵城市建设,增强城市防洪排涝能力提供了有力支持。2022 年 6 月,山西省晋城市入选第二批海绵城市建设示范城市,这对晋城市防洪排涝能力提出了更高要求,晋城市的海绵城市建设经验和研究成果也将为我国其他示范城市提供重要参考。

近年来,我国海绵城市建设蓬勃发展,海绵城市关键形式 LID 设施的结构设计、规划布局、运行管理、效果评估等得到了广泛关注。目前海绵城市水文相关研究可分为以下几方面:(1)海绵设施关键参数敏感性分析。LIU 等^[3]模拟了不同基质和降雨特征下绿色屋顶的水文响应,得出绿色屋顶径流最敏感的参数是初始基质含水量,其次为基质饱和导水率,储水层深度对径流滞留性能有轻微影响。EUNG^[4]对 LID 设施参数敏感性分析发现,绿色屋顶的敏感参数为表层蓄水深度、土壤孔隙度和萎蔫点,雨水桶敏感参数为储水桶高度,雨水花园的敏感参数为表层蓄水深度和植被密度。(2)海绵设施雨洪削减能力评估。ZHA 等^[5]研究发现校园规模 1 a、5 a、10 a、20 a 重现期降雨下,透水路面、雨水花园、下沉式绿地和绿色屋

顶最优组合方案分别降低了 43.91%、43.93%、45.95%和 47.11%的径流总量,LID 设施可以有效减少轻度至中度雨水径流和洪峰流量。康永德等^[6]利用水文水力模型模拟分析了不同降雨情景下实施海绵措施前后年径流总量控制率变化特征,1 a 一遇情景下径流总量控制率从 62.38%提高至 89.81%;30 a 一遇情景下径流总量控制率从 59.77%提高至 74.50%;100 a 一遇情景下径流总量控制率从 54.03%提高至 67.34%。LUAN 等^[7]研究发现 LID 措施能有效控制 5 a 重现期以内暴雨事件,尤其是 1 a 重现期的暴雨事件。(3)海绵设施优化配置,如设施尺寸、设施种类、布设位置和规模、组合方式等。蒋春博等^[8]总结了常见海绵设施的关键设计参数和效果评估指标,如生物滞留系统影响其运行效能的设计参数除了填料种类及其组合方式外,还与内部淹没区高度、重现期、汇流比等有关。NINON 等^[9]研究发现 LID 设施不同空间分布对径流量减少影响不大,但对于减少流域下游排水口径流峰值效果较好。(4)海绵城市建设效益评价。SARAH 等^[10]提出了一个综合考虑 LID 成本、效益、可行性和需求的 LID 方案排名评估模型,通过多种情景模拟得出渗沟综合性能表现最好,2 a、5 a、10 a、25 a、50 a、100 a 重现期 1 h 设计降雨下不同渗沟布设方案径流削减率为 35.0%~61.1%,径流峰值削减率为 42.8%~54.3%。刘波等^[11]选取绿色屋顶、雨水花园、透水铺装和雨水罐 4 种 LID 设施,分析 LID 设施组合方案的径流控制和雨水污染负荷减排效益,发现老旧小区改造中将 LID 设施布设在上中游分区效果最好。

目前海绵城市相关研究应用较为成熟的模型包括美国的 SWMM 模型、英国的 InfoWorks ICM 模型、丹麦的 MIKE URBAN 模型等。其中,SWMM 模型因易于操作、所需数据资料少、代码开源、模拟效果好等特点得到广泛应用。城市内涝淹没过程具有明显的二维水流特征,为了研究 LID 设施对城市内涝的影响,一般可将二维水力模型与 SWMM 模型耦合,扩展其城市内涝过程模拟功能,一般常用的二维水力模型有 LISFLOOD-FP、WCA2D、TELEMAC-2D 等^[12-14]。

为了充分发挥海绵设施雨水消纳作用, 实现海绵城市年径流总量控制目标, 明确 LID 设施水文效应是海绵城市建设的前提。综合上述研究发现 LID 设施削减中低重现期暴雨径流效果较好, 但 LID 设施在不同尺度区域能否呈现相同的调控效应还值得进一步探讨。本文在前期北京市大红门排水区内涝模拟研究^[15]的基础上, 进一步检验 SWMM 模型与 InfoWorks ICM 二维模块(以下简称为 ICM-2D)耦合方法的适用性, 以晋城市海绵城市建设示范区金村起步区为研究对象, 从地块、排水区、开发区全域角度分析 LID 设施径流及内涝调控效应, 以期为城市空间规划、海绵设施优化配置和区域内涝风险防范提供有益参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

晋城市地处山西省东南部, 晋豫两省接壤处, 全市总面积 9 490 km², 全境居丹河、沁河流域中下游盆地之中, 地形复杂, 主要以山地和丘陵为主, 总体地势呈东西高、中部低的簸箕状。晋城市属暖温带半湿润大陆性季风气候, 四季分明, 年平均降雨量 570.9 mm, 降雨主要出现在夏季 6—9 月, 占全年降水量的 56.4%^[16]。本文研究区金村起步区(见图 1)位于晋城市主城区东部(35°31'N—35°34'N, 112°55'E—112°59'E), 是丹河新城率先建设区, 也是晋城市全域海绵城市建设示范区之一, 承担着推动晋城市高质量转型发展的重任。金村起步区规划总面积约

13 km², 区域内主要排水河道为北石店河和丹河, 主干道路有金村大道、珏山路、府城街等。据气象资料显示, 近 10 a 来, 晋城市几乎每年发生一次暴雨事件, 随着全球极端暴雨事件增多增强, 晋城市海绵城市建设及调控能力分析工作至关重要。

1.2 数据资料

下垫面数据: DEM 数据采用 5 m 分辨率, 由中国城市规划设计研究院提供。土地利用数据采用中国科学院空天信息创新研究院刘良云研究员团队对外发布的 2020 年全球 30 m 分辨率地表覆盖精细分类产品(见图 2)。子汇水区划分和 LID 设施布设参考晋城市规划设计研究院提供的金村起步区控制性详细规划用地图(以下简称控规图)。金村起步区排水分区现状图由中国城市规划设计研究院提供。

排水管网数据: 由中国城市规划设计研究院提供, 全长约 6.2 km, 管径大小在 0.50~1.65 m 之间(见图 3)。

设计降雨: 根据《晋城市中心城市海绵城市建设设计导则》(2020 版)晋城市暴雨强度公式以及芝加哥雨型, 分别计算 1 a、3 a、5 a、10 a、50 a、100 a 重现期设计降雨, 降雨历时设置为 2 h, 雨峰系数选 0.4。不同重现期降雨过程如图 4 所示。晋城市暴雨强度公式如下

$$i = \frac{14.594(1 + 0.846 \lg P)}{(t + 15.503)^{0.769}} \quad (1)$$

式中, i 为设计暴雨强度(mm/min); t 为降雨历时(min); P 为设计暴雨重现期(a)。

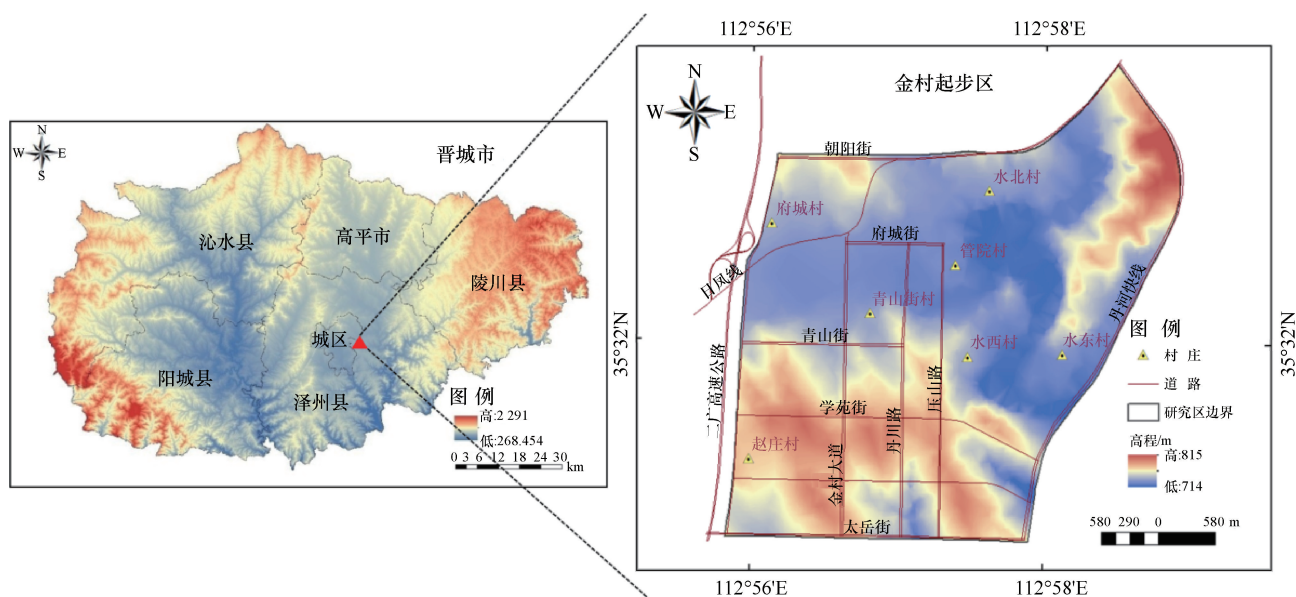


图 1 研究区地理位置

Fig. 1 Geographic location of the study area

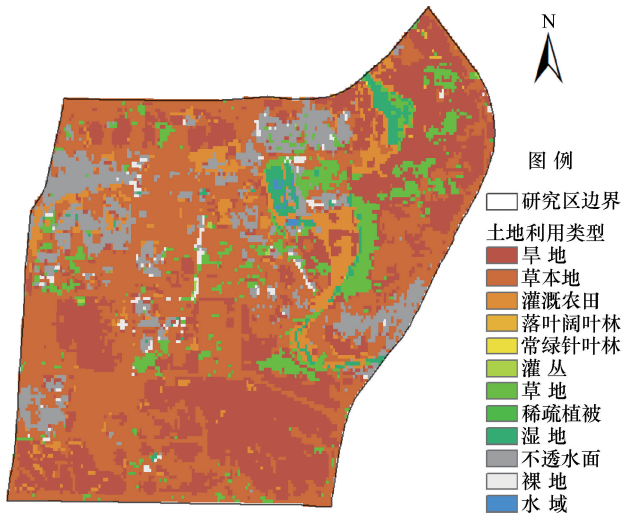


图2 金村起步区 2020 年土地利用

Fig. 2 Land use in Jincun development area in 2020

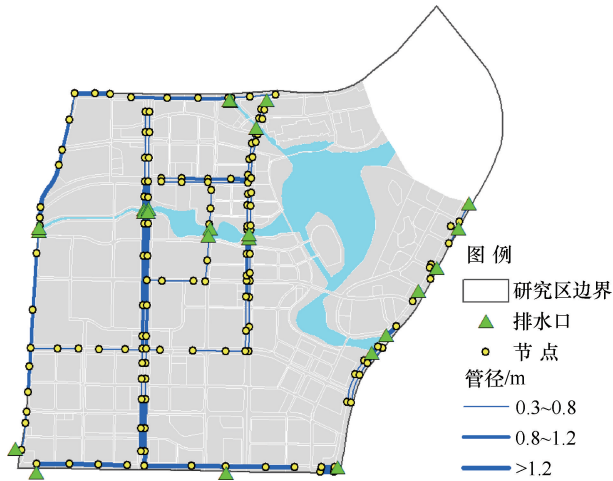


图3 金村起步区现状排水管网分布

Fig. 3 Distribution of existing drainage network in Jincun development area

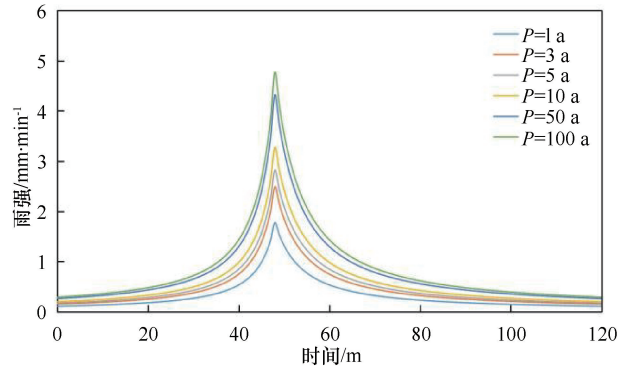


图4 不同重现期设计降雨过程

Fig. 4 Rainfall processes for different recurrence periods

2 研究方法

2.1 研究区划分

模型中排水管网经概化共有 149 根管道、143 个检查井节点和 24 个排水口。根据研究区主要道路、河流和概化后的排水管网将研究区划分为 24 个排水区。参考研究区高精度遥感影像和控规图，根据次要道路、排水管网和地块边界将研究区细划为 380 个地块。不同尺度研究区划分情况如图 5 所示。

2.2 模型构建

SWMM 模型中地表产流计算选用参数较少且可以较好描述下渗率随降雨时间变化的 Horton 模型，地表汇流计算采用非线性水库法，管网汇流模拟选用动力波法。ICM-2D 模型设置非结构网格最小单元面积为 25 m²，最大单元面积为 50 m²，计算步长取 10 s，设置二维模拟边界为 Vertical Wall，模拟时间为 3 h。提取 SWMM 模型中节点溢流过程作为 ICM-2D 模型地表漫流过程的点源输入，实现两个模型间的单向耦合，从而得到金村起步区内涝淹没情况。SWMM 与 ICM-2D 模型耦合原理如图 6 所示。

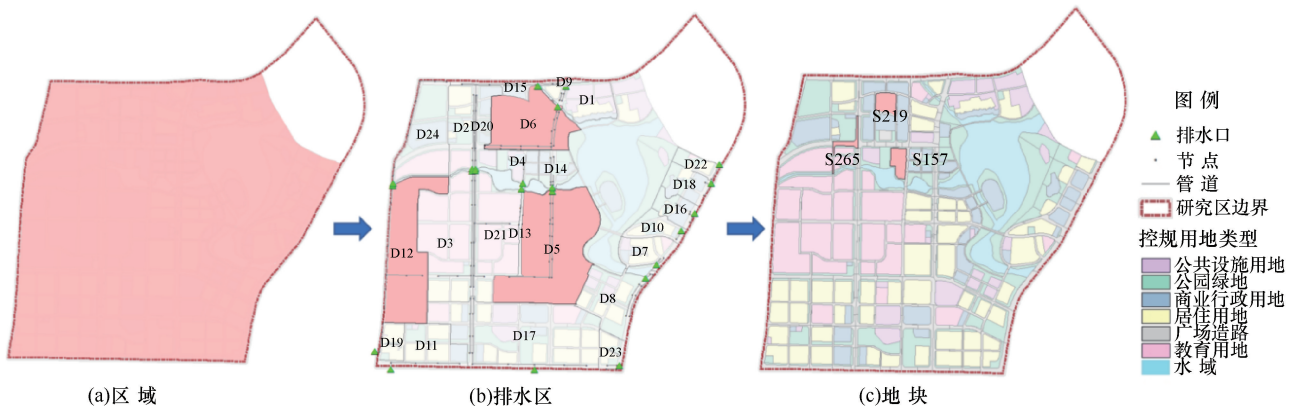


图5 研究区划分

Fig. 5 Division of the study area

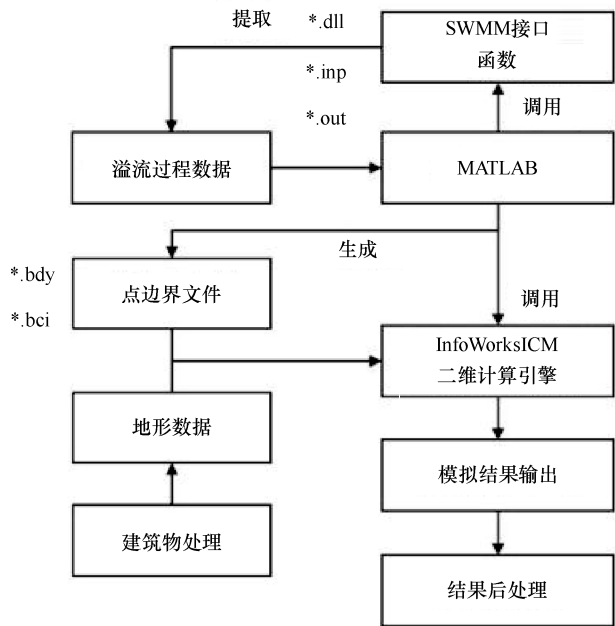


图6 SWMM与ICM-2D耦合原理

Fig. 6 Coupling principle of SWMM and ICM-2D

北京市凉水河流域属于暖温带半湿润半干旱季风气候, 四季分明, 多年平均降水量约为 576 mm, 汛期主要集中在 6—9 月, 占全年降水量的 80% 以上, 与本文研究区具有一定水文相似性^[17]。由于缺乏晋城市金村起步区实测水文数据, 采用参数移植法^[18]将大红门排水区 SWMM 模型参数作为金村起步区模型参数初值, 再根据晋城市规划设计研究院提供的《晋城市中心城区排水防涝设施建设规划》中实测分区径流系数值, 采用综合径流系数法^[19]对模型进行率定验证。

从金村起步区 2020 年土地利用 (见图 2) 可以看出, 该区域城市化程度不高, 主要为农田和草地, 建设用地较少, 因此确定研究区为城镇建筑稀疏区。根据《室外排水设计规范》(2016 年版)^[20] (以下简称《规范》), 城镇建筑稀疏区综合径流系数为 0.20~0.45, 以此为基准在 1 a 重现期降雨下对模型参数进行反复调整率定, 使各排水区径流系数均处于 0.32~0.44 之间, 符合《规范》要求范围。与金村起步区实测分区径流系数对比发现, 各排水区模拟径流系数误差均在 15% 以内 (见表 1), 说明本文构建的 SWMM 模型可以较好地刻画金村起步区产流过程, 模型参数取值如表 2 所列。

SWMM 与 ICM-2D 耦合模型模拟得到的 5 a 重现期降雨下金村起步区现状下垫面积水分布情况如图 7 所示。从图 7 可以看出, 积水点多位于地势低洼区域和道路密集区, 符合现状地形条件下积水分布特征,

表 1 排水区综合径流系数模拟结果

Table 1 Simulated results of comprehensive runoff coefficient for drainage areas

排水区	模拟径流系数	实测分区径流系数	相对误差/%
D2	0.43	0.39	10
D20	0.38	0.39	-3
D24	0.44	0.39	13
D6	0.35	0.39	-10
D4	0.43	0.39	10
D14	0.41	0.39	5
D12	0.37	0.33	12
D3	0.26	0.27	-4
D21	0.35	0.33	6
D5	0.32	0.33	-3

表 2 SWMM 模型主要参数取值

Table 2 Parameters values of the SWMM model

模块	参数	取值
子汇水区	不透水区曼宁系数	0.05
	透水区曼宁系数	0.5
	不透水区洼地蓄水量/mm	8
产流入渗	透水区洼地蓄水量/mm	2
	最大入渗率/mm·h ⁻¹	142.4
	最小入渗率/mm·h ⁻¹	29.6
	入渗衰减系数/h ⁻¹	28.2
管道汇流	干燥时间/d	7
	管道曼宁系数	0.013

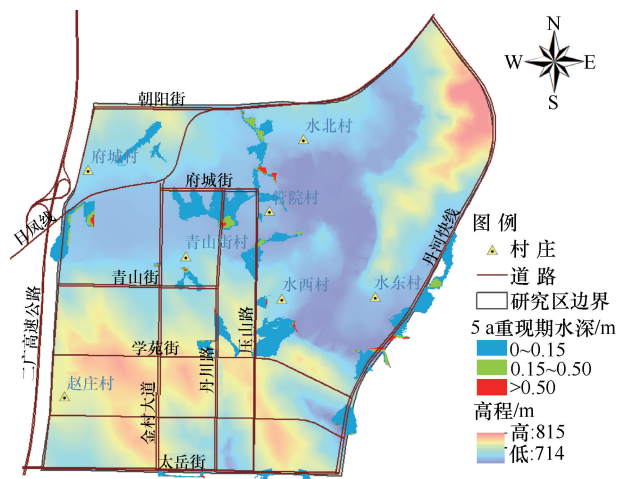


图 7 5 a 重现期降雨下研究区积水分布

Fig. 7 Waterlogging distribution in the study area under 5-year recurrence period rainfall

从而进一步表明本研究城市暴雨内涝模型的可靠性。

2.3 LID 设施参数设置

根据金村起步区水资源特点、建筑密度、土地利用等条件, 结合区域控规图, 选取绿色屋顶、生物滞留设施、透水铺装 3 类具有代表性且适用性较好的典型 LID 设施。参考《海绵城市建设技术指南——低影

响开发雨水系统构建(试行)》(以下简称《指南》)、SWMM 手册以及相关文献^[21-22] 设置 LID 设施参数,

绿色屋顶、生物滞留设施、透水铺装参数取值如表 3 所列。

表 3 LID 设施参数取值
Table 3 Parameter values of LID facilities

功能层	参 数	绿色屋顶	生物滞留设施	透水铺装
表面层	蓄水高度/mm	100	300	0
	植被覆盖率	0.6	0.4	0.0
	曼宁系数	0.150	0.200	0.015
	表面坡度/%	0.5	5.0	0.5
铺装层	厚度/mm	—	—	80
	孔隙率	—	—	0.3
	不透水率	—	—	0.3
	渗透率/mm·h ⁻¹	—	—	200
土壤层	厚度/mm	150	400	200
	孔隙率	0.3	0.3	0.4
	田间持水率	0.2	0.2	0.2
	萎蔫点	0.1	0.1	0.1
	导水率/mm·h ⁻¹	50	50	200
	导水率坡度	5	5	5
	吸水头/mm	90	90	90
蓄/排水层	厚度/mm	50	400	200
	孔隙率	0.5	0.5	0.5
	渗透速率/mm·h ⁻¹	—	200	250
	曼宁系数	0.1	—	—
暗 渠	流量系数/mm·h ⁻¹	—	1.4	1.3
	流量指数	—	0.5	0.5
	偏移高度/mm	—	300	0

3 结果分析

3.1 地块尺度 LID 设施径流调控效应分析

根据金村起步区控规图在建筑屋面布设绿色屋顶、公园绿地布设生物滞留设施、道路广场布设透水铺装。参考《指南》中典型案例,选取坡度较小且具有一定承载能力的建筑屋顶建设绿色屋顶,绿色屋顶面积比例设置为 20%、30%、50%;考虑研究区实际汇水面积,生物滞留设施面积比例设置为 20%、40%、60%;根据道路广场荷载要求和导水需求,透水铺装面积比例设置为 40%、50%、60%。研究区各地块 LID 设施布设方案及分布如表 4 和图 8 所示。

表 4 LID 设施布设方案
Table 4 LID layout schemes

方 案	LID 设施面积比例
1	无 LID 设施
2	20%绿色屋顶、20%生物滞留设施、40%透水铺装
3	30%绿色屋顶、40%生物滞留设施、50%透水铺装
4	50%绿色屋顶、60%生物滞留设施、60%透水铺装

以仅布设绿色屋顶、仅布设生物滞留设施和仅布设透水铺装的 S157、S219、S265 地块为例,分析不同降雨重现期下地块尺度单一 LID 设施径流调控效



图 8 地块 LID 设施分布

Fig. 8 Distribution of LID facilities in plots

应。1~100 a 重现期降雨下,绿色屋顶、生物滞留设施、透水铺装所在地块出流过程如图 9—图 11 所示,可见布设 LID 设施后地块出流峰值降低、出流量减少。相同重现期降雨下,LID 设施面积增大,地块出流减少,这表明扩大 LID 设施规模是一种有效削减地块径流的手段。与方案 1 无 LID 设施相比,1 a 重现

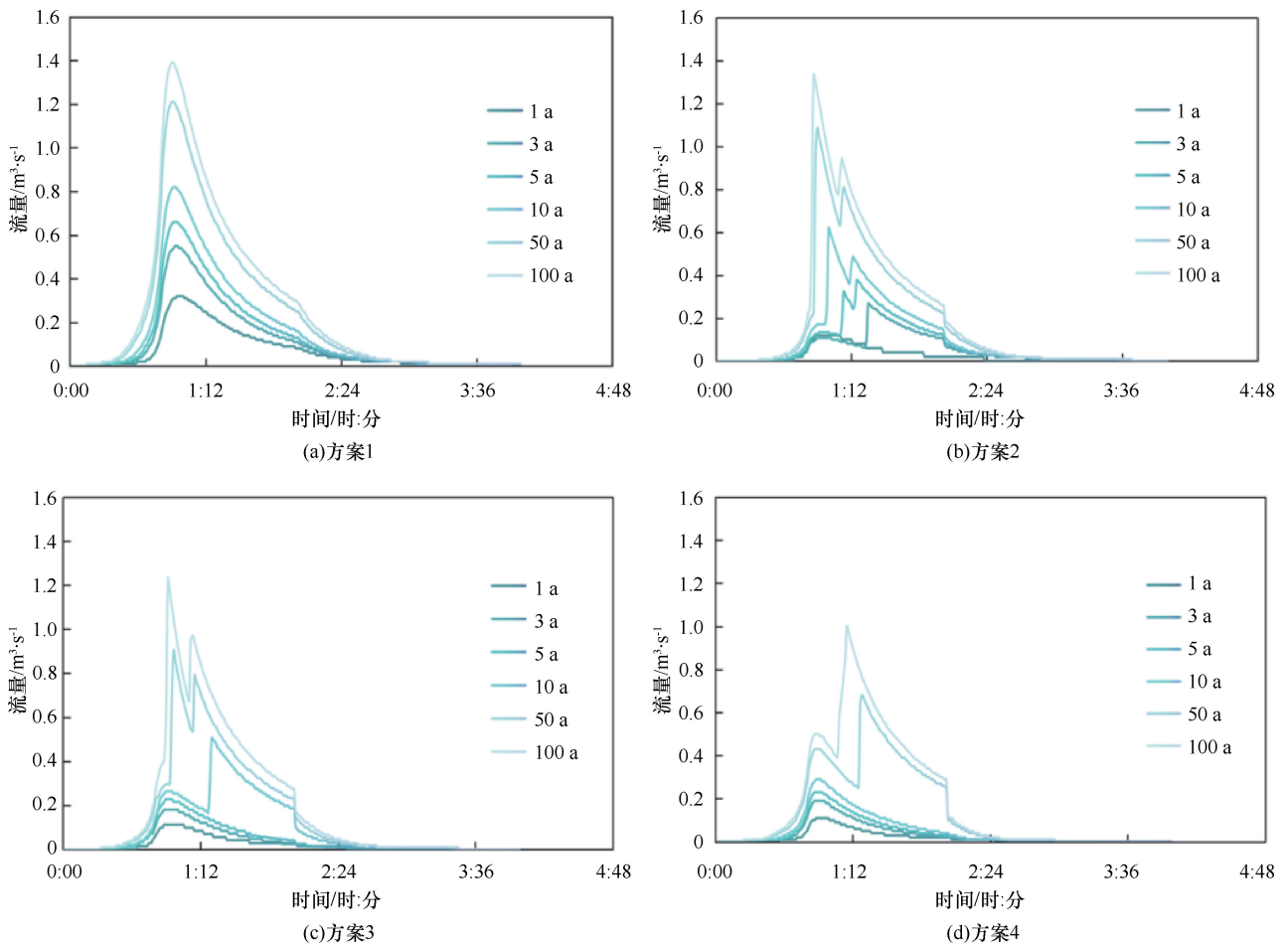


图9 绿色屋顶不同重现期降雨下出流过程

Fig. 9 Outflow processes of green roofs under different recurrence periods

期时, 方案 2—方案 4 的地块平均峰值流量削减率约为 70%, 方案 4 的出流总量削减率约为 75%, 说明在 1 a 重现期降雨下, 方案 2—方案 4 均能够基本实现 70% 降雨就地消纳的海绵城市建设目标。当降雨重现期增加到 5 a 时, 地块峰值流量削减率和出流总量削减率均降低至 50% 以下; 100 a 重现期时, 方案 2—方案 4 的地块峰值流量削减率降至 20%~30%, 出流总量削减率降至 25%~35%。这反映出随着降雨重现期的增加, 土壤逐渐接近饱和状态, LID 设施的可滞蓄容量逐渐减少, 其调控能力逐渐减弱。对于 5 a 以下短重现期降雨径流, LID 设施可以有效实现就地消纳, 然而, 当面临超过 LID 设施蓄存能力的强降雨时, 则需要联合其他蓄排水设施共同调控。LID 设施的 5 a 重现期有效调控阈值与黄若琳等^[23]、JIANG 等^[24]、CHENG 等^[25]的研究结论一致。

值得注意的是, 绿色屋顶出流过程在不同降雨重现期出现了明显或不明显的“双峰”型态, 方案 2 出现“双峰”流量过程的降雨重现期为 3~100 a, 方案 3 出现“双峰”流量过程的降雨重现期为 5~

100 a, 方案 4 出现“双峰”流量过程的降雨重现期为 50~100 a, 随着绿色屋顶面积增大, 地块出现“双峰”流量过程对应的降雨重现期越大。分析认为出现“双峰”流量过程, 一方面可能是本文绿色屋顶基质导水率、初始基质含水量^[26]等敏感参数取值偏小导致下渗量偏小; 另一方面可能是绿色屋顶基质层厚度有限性所致^[27], 强降雨下屋顶不能及时将多余水量排出, 产生的径流在屋顶积存, 导致屋顶出流在退水过程中再次形成洪峰。另外, 低重现期时方案 2—方案 4 生物滞留设施径流削减程度相差不大, 可能是本文设置的生物滞留设施基质渗透系数和蓄水层深度偏大, 导致小规模生物滞留设施可以起到较好的蓄滞效果^[28-29]。由此看来改变 LID 设施填料和内部结构可以影响其渗蓄能力, 进而影响其径流调控效果, 海绵城市建设过程中优化 LID 设施填料和结构, 使其保水性与透水性达到植物生长与排水防涝平衡十分关键。

3.2 排水区尺度 LID 设施径流调控效应分析

排水区内 LID 设施占比根据表 4 四种方案设置,

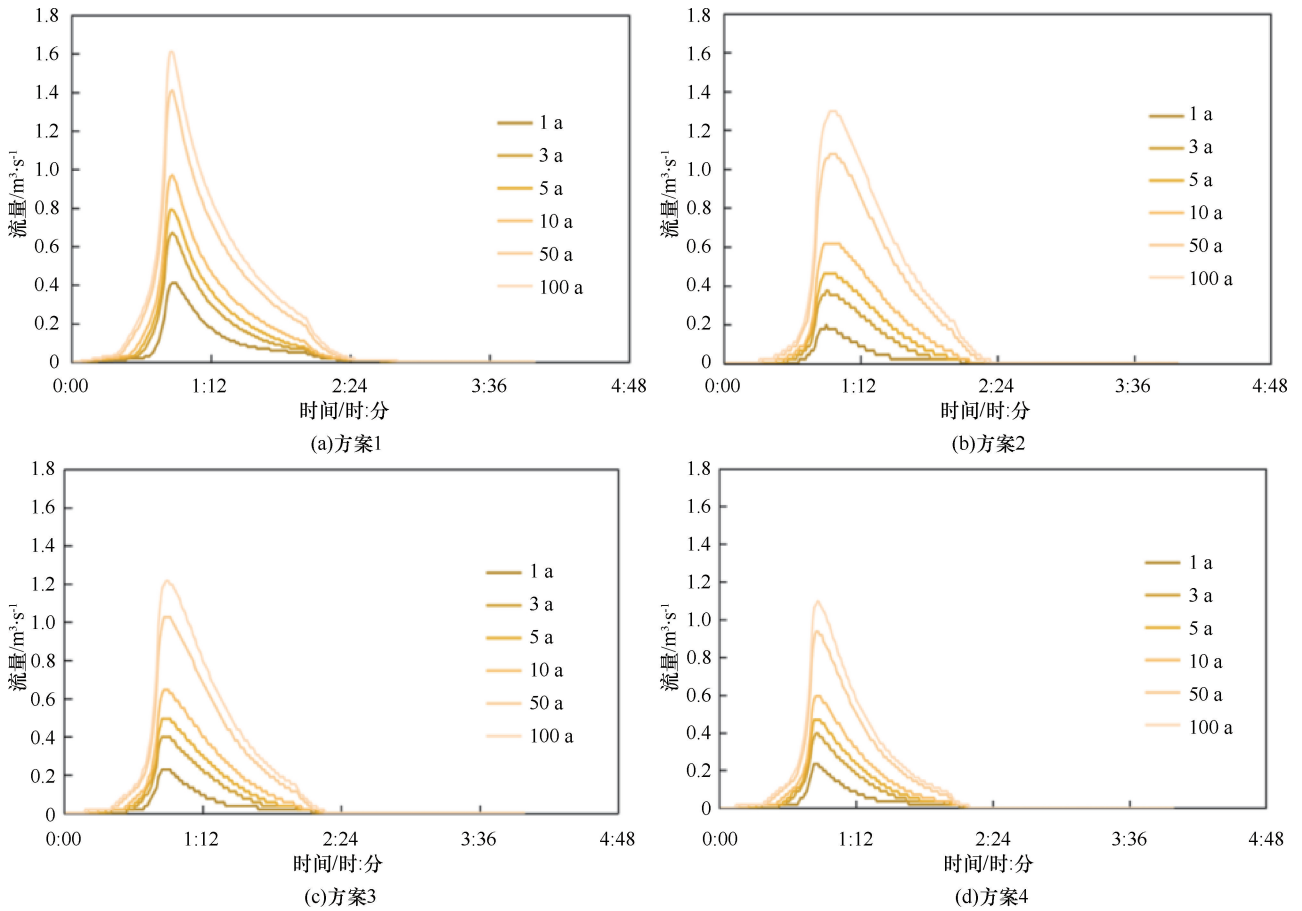


图 10 生物滞留设施不同重现期降雨下绿色屋顶出流过程

Fig. 10 Outflow processes of bioretention facilities under different recurrence periods of rainfall on green roofs

选取面积大小和土地利用类型相似的 D5、D6、D12 排水区，以此分析 LID 设施对排水区产汇流过程的影响，示例排水区位置如图 5 所示。

3.2.1 排口水位

图 12—图 14 为不同重现期降雨下排水区出口水位变化过程。添加 LID 设施后各排水区出口水位过程线显著降低，峰现时间略有滞后；随着降雨重现期增大，排水区出口水位过程线逐渐接近无 LID 设施调控状态，5 a 和 50 a 重现期降雨下水位变化过程线出现了重合，且降雨量越大，重合时间越久，表明 LID 设施具有降低径流峰值、延迟峰现时间和缩短雨水管道满管排水时间的作用，但 LID 设施的调控效果随雨量和雨强的增大减弱，体现了 LID 设施对短重现期降雨径流调控的有效性^[30]。对比不同 LID 方案的退水过程线，方案 2—方案 4 排水区出流消退时间逐渐提前，表明 LID 设施面积对排水区径流消退速度有影响，设施面积越大，出流消退的越快，这是由于海绵设施增大了土壤入渗量与蓄存量，可以使地表径流更快的被消纳^[31]。

3.2.2 排水区径流系数

不同 LID 方案下 D5、D12 排水区径流系数如图

13 所示，可以看出布设 LID 设施后排水区径流系数明显减小。D5 排水区按方案 4 最大 LID 设施比例布设，1 a 一遇降雨下径流系数减少约 70%，5 a 一遇降雨下径流系数减少约 50%，100 a 一遇降雨下径流系数减少约 30%，地表径流削减效果随降雨重现期增大呈减弱趋势，说明 LID 设施的调蓄能力是有限的。对比不同 LID 方案径流系数得出，排水区径流削减效果受 LID 设施面积影响，LID 设施规模扩大，径流削减效果随之提高。然而，LID 设施的规模不应盲目扩大。一方面，应考虑 LID 设施的实际服务区域面积；另一方面，LID 设施面积增加对径流削减具有边际效应^[32]。

3.3 区域尺度 LID 设施内涝调控效应分析

根据控规图和高清遥感影像在金村起步区（见表 4）面积比例布设 LID 设施，以此探讨 LID 设施对地下排水管网系统和内涝积水的调控效应。

3.3.1 排水管网

不同重现期降雨和 LID 方案排水管网情况如表 5 所列。由表 5 可以看出，LID 设施可以有效减少溢流

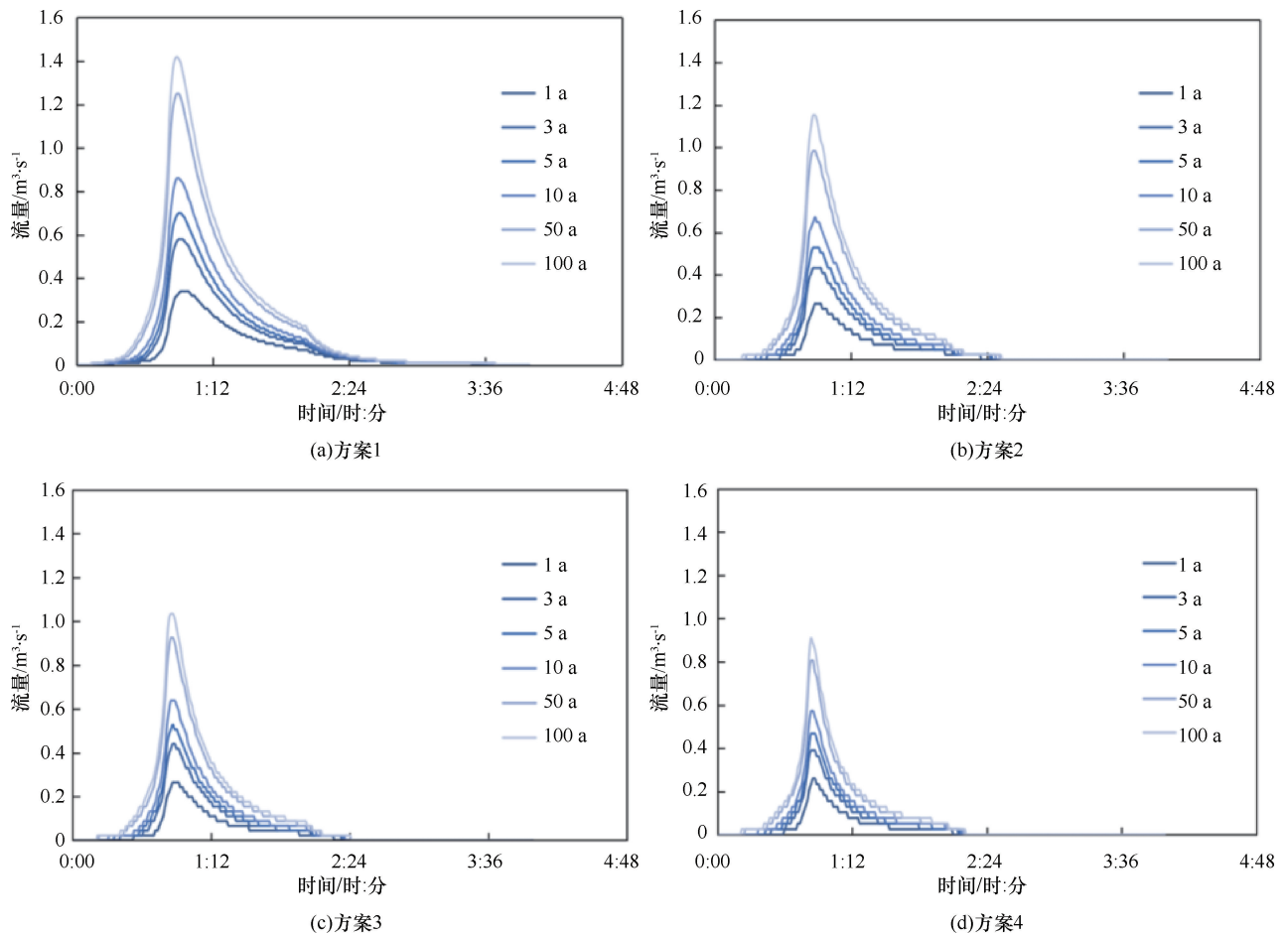


图 11 透水铺装不同重现期降雨下出流过程

Fig. 11 Outflow processes of permeable pavements under different recurrence periods of rainfall

节点和超载管道数目^[33], 在给定的布设方案下 LID 设施管网排水调控效果在 1~5 a 重现期间较为显著, 可减少约 30%~40% 的溢流节点以及 20%~30% 的超载管道。金村起步区有效排水管段随着 LID 设施面积占比增大而增多, 但是对比不同 LID 方案下排水管网超载情况, 发现 LID 设施对于严重溢流和超载的排水管网改善作用较弱。以 5 a 重现期降雨情景为例 (见图 14), 不同 LID 方案下 2 h 以上溢流节点和超载管段数量变化不大, 主要位于中北部府城街和珺山路交汇处。分析认为管网严重超载原因, 一方面是管道存在大管接小管的混接情况, 导致下游管道过水能力不足; 另一方面, 该路段管道埋深不合理, 下游管道出现严重逆坡运行情况, 应对下游管道管径和埋深进行调整。LID 设施对于溢流和超载 2 h 以内节点和管道调控效果较好, 通过对进入管网系统的雨水削减和延滞, 能够有效缩短管网超载时长, 使大部分超载管道恢复正常运行。

3.3.2 区域内涝

根据《城镇内涝防治技术规范》(GB 51222—

2017) 和《室外排水设计规范》(GB 50014—2021) 中地面积水设计标准要求, 道路中一条车道积水深度不超过 15 cm, 住宅和工商业建筑物底层不进水, 参考一般防汛板高度, 将淹没水深划分为小于 0.15 m、0.15~0.50 m、大于 0.50 m 三个区间。

1~100 a 重现期降雨各 LID 方案下不同水深淹没面积全域占比情况如图 15 所示。可见不同情景下积水深度低于 0.15 m、0.15~0.50 m、高于 0.5 m 的内涝区约占总淹没面积的 85%、10%、5% 左右, 虽然结果显示金村起步区以低水深内涝积水为主, 但在 100 a 一遇暴雨且无 LID 设施情况下 0.5 m 以上积水范围可达 0.1 km² 以上, 严重积水区域内涝防治仍然不可忽视。对比不同方案下内涝积水情况可以看出, 通过布设 LID 设施可使内涝淹没范围和淹没水深减小^[34], 1~100 a 重现期降雨下, 方案 1 中的总淹没面积全域占比为 3.4%~13.6%, 加入 LID 设施的三个方案总淹没面积全域占比分别为 1.3%~10.7%、0.8%~9.6%、0.7%~8.5%, 均低于方案 1。降雨重

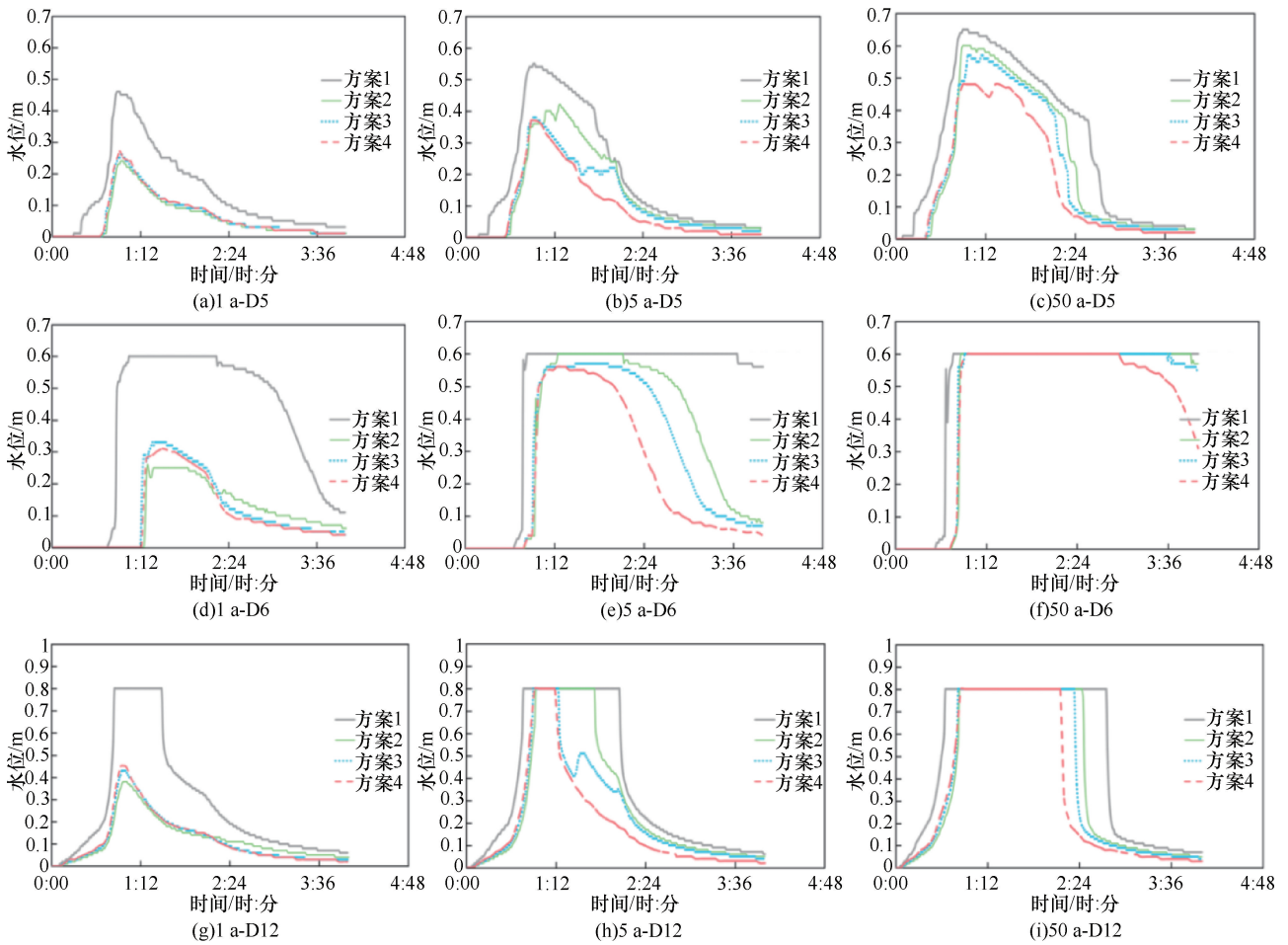


图 12 不同 LID 方案下 D5、D6、D12 排水区出口水位过程

Fig. 12 Outlet water levels in drainage area D5, D6 and D12 under different LID schemes

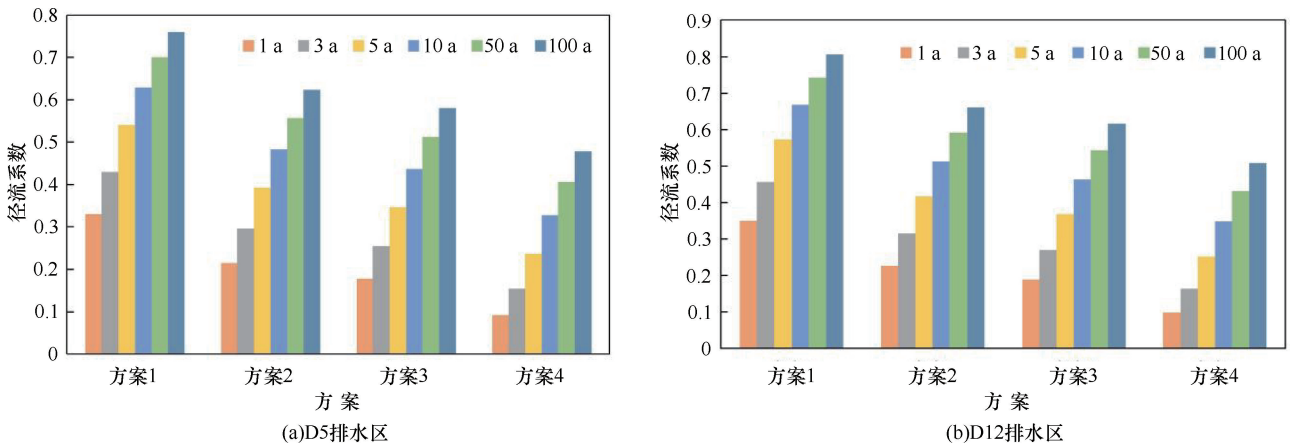


图 13 不同 LID 方案下排水区径流系数

Fig. 13 Runoff coefficients of drainage areas under different LID schemes

现期超过 5 a 后, 内涝面积受 LID 设施调控缩减效果逐渐减弱, 这与俞茜等^[35]的研究结果相似, 方案 2—方案 4 对低水深内涝还表现出部分削减作用, 表明扩大 LID 设施规模对缓解城市内涝有一定促进作用。

以积水最显著的 100 a 重现期降雨内涝分布为例分析严重内涝区所在位置 (见图 16)。金村起步区主要有 4 个易涝区, 分别位于日凤县公路南部、青山街村附近、丹川路北以及珥山路与府城街交汇处, 这与黄亦轩等^[36]研究中的内涝高风险区位置较为一致。

表 5 不同重现期降雨和 LID 布设方案下管网情况

Table 5 Conditions of drainage network under different rainfall recurrence periods and LID layout schemes

重现期/a	节点溢流率				管道超载率			
	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
1	37.8	25.9	25.9	25.9	51.0	34.9	36.2	36.2
3	50.3	28.7	28.7	30.1	54.4	40.9	41.6	43.0
5	55.9	34.3	32.2	32.9	67.8	47.0	45.0	45.0
10	60.1	42.7	35.0	34.3	69.1	54.4	47.0	47.0
50	65.0	60.1	58.7	41.3	73.2	69.1	67.8	53.0
100	66.4	64.3	62.2	51.7	75.2	72.5	69.8	61.1

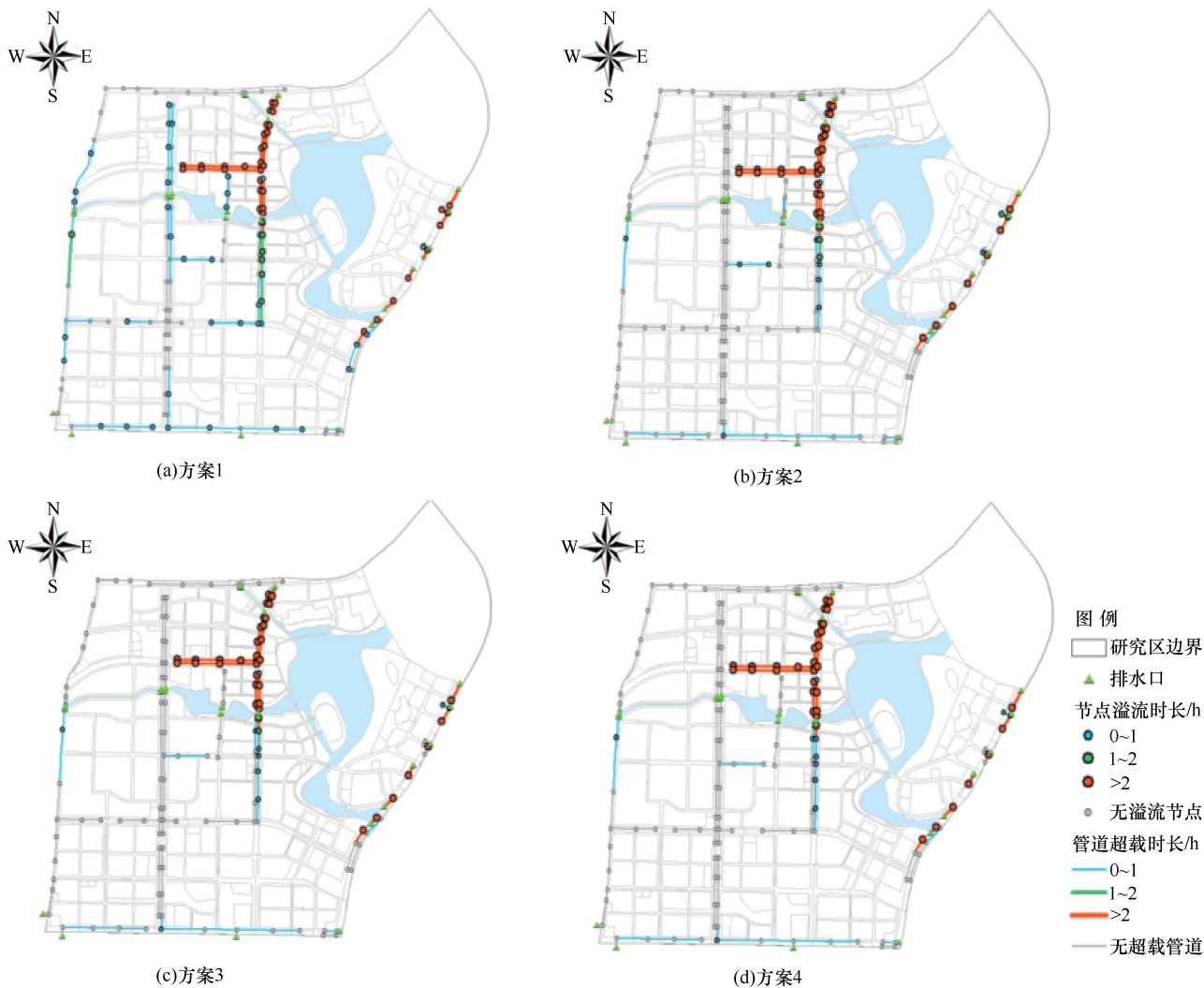


图 14 5 a 重现期降雨不同 LID 方案下研究区节点和管道情况

Fig. 14 Conditions of nodes and pipelines in the study area under 5-year recurrence period rainfall with different LID schemes

结合前述分析发现易涝点主要与地形和排水管网运载能力有关, 因此, 应在地势低洼且管网排水不畅区域周边加强 LID 设施建设。图 12 显示各 LID 方案下易涝区 2、3 淹没面积变化较明显, 易涝区 1、4 淹没面积变化不大。分析认为: (1) 易涝区 2、3 范围内排水管网密度较大且铺设了 1.2 m 以上管径管道; (2) 易涝区 2、3 范围内 LID 设施种类较丰富, 而易涝区

1、4 主要为绿色屋顶, 相较于多种 LID 设施内涝削减效果较差。由此可知城市内涝治理宜采用组合式 LID 设施以及“灰绿”设施结合的方式^[37-38], 才能更好地发挥海绵城市建设价值。

4 结果讨论

SWMM 与 ICM-2D 耦合模型在北京市凉水河流域

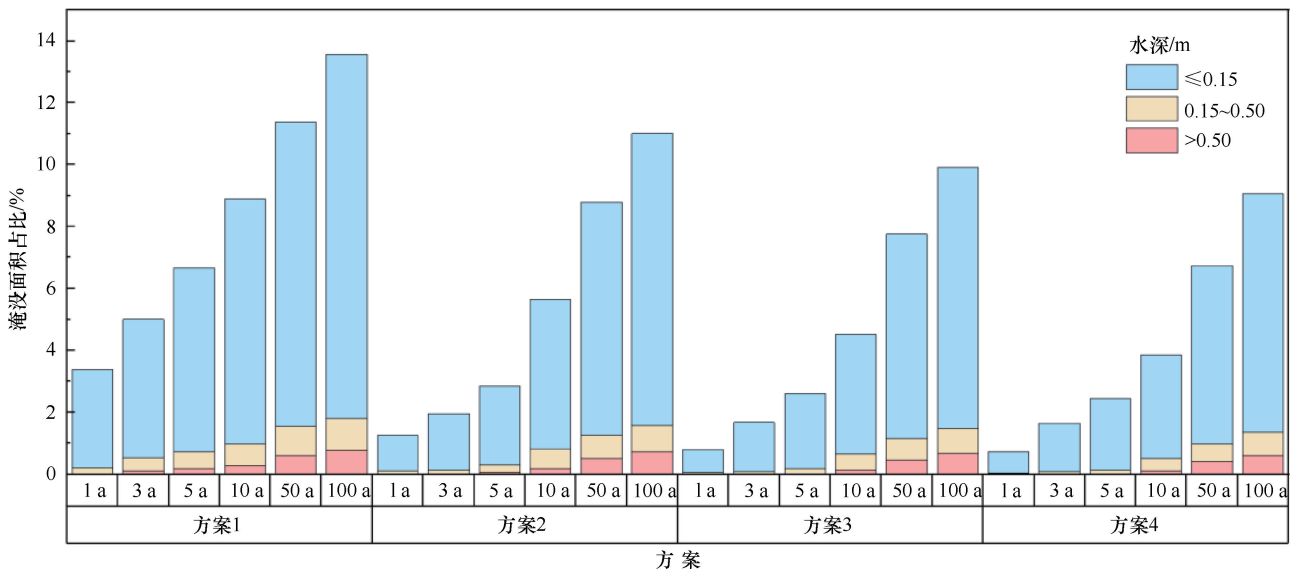


图 15 不同水深淹没面积全域占比

Fig. 15 Proportions of submerged areas with different water depths across the region

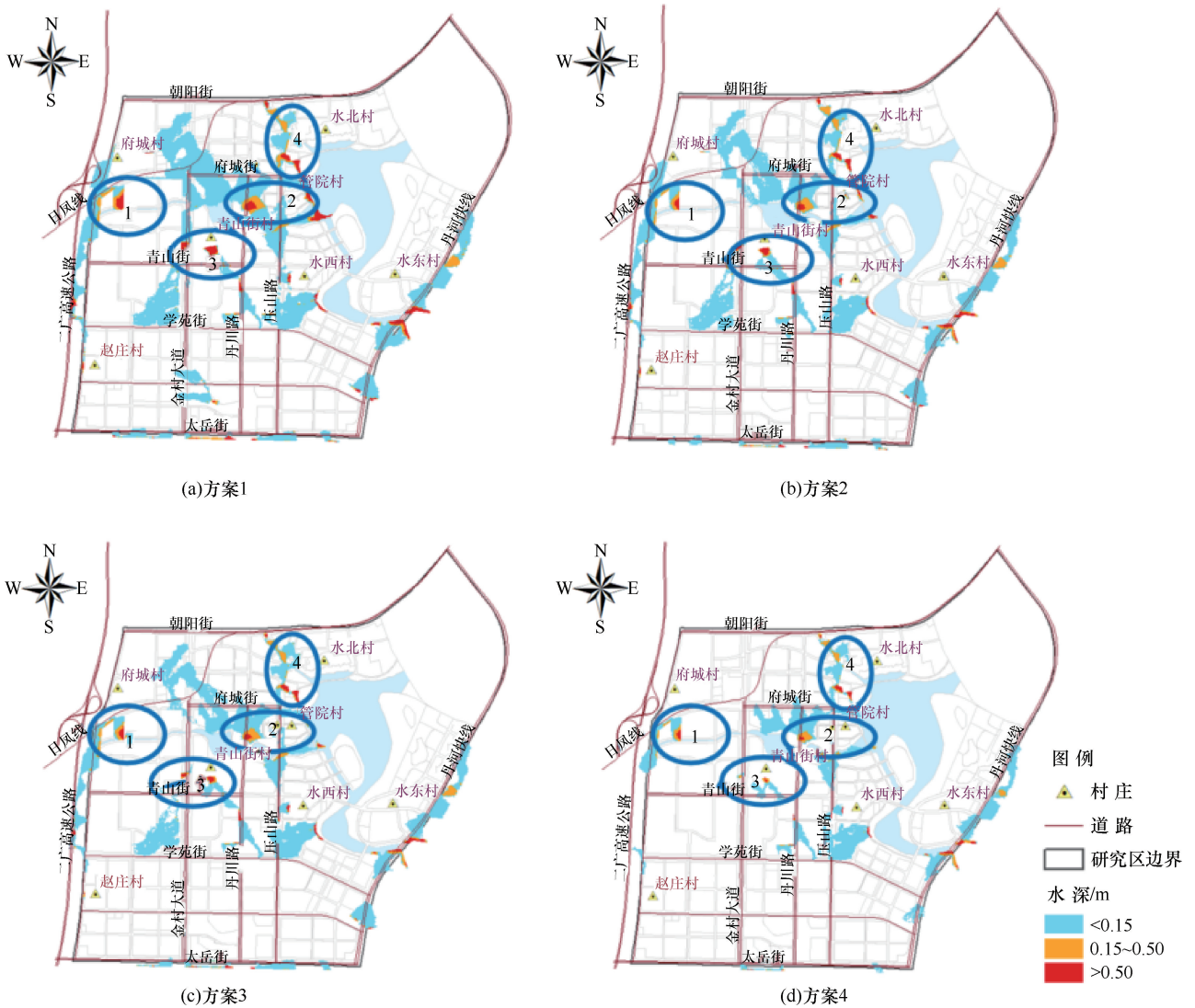


图 16 100 a 重现期降雨不同 LID 方案内涝淹没情况

Fig. 16 Waterlogging conditions under 100-year recurrence period rainfall with different LID schemes

大红门排水区和晋城市金村起步区的应用中, 均展现出了良好的模拟效果, 这充分证明了该模型在城市地区模拟暴雨内涝过程的适用性。为了进一步提升金村起步区模型精度, 我们将继续收集降雨、流量、易涝点水深等实测数据, 以此来优化模型参数并提高模型可靠性。同时, 我们也将将在其他城市区域广泛应用该模型, 以此验证 SWMM 与 ICM-2D 耦合模型的普适性。

关于 LID 设施参数设置, 目前主要参考了《指南》、SWMM 模型手册和相关研究文献。但为了更真实地反映研究区下垫面产汇流特征, 我们计划结合人工模拟降雨试验, 深入分析不同降雨情景下 LID 设施参数变化规律, 从而更合理地设置模型参数。

海绵设施不仅具备削减地表径流的功能, 还能够有效保护城市排水管网, 减轻城市内涝和排水压力。虽然本文已对海绵设施的水文效应进行了深入探讨, 但未来我们还应关注其在水环境、水生态和经济效益方面的表现, 以全面发挥海绵设施的综合效益, 为城市的可持续发展贡献力量。

5 结 论

本文耦合 SWMM 与 ICM-2D 模型构建了晋城市金村起步区暴雨内涝模型, 选取绿色屋顶、生物滞留设施、透水铺装三类典型 LID 设施, 分析了 LID 设施在地块、排水区、区域不同空间尺度下的径流及内涝调控效应。主要结论如下。

(1) LID 设施具有降低径流峰值、削减径流总量、加快径流消退的作用, 最大可减少 30%~40% 的溢流节点以及 20%~30% 的超载管道, 5 a 重现期内能够有效缩减内涝淹没面积、降低内涝积水深度, 但对于严重内涝点调控能力不足。

(2) LID 设施在地块、排水区、区域均表现出对短重现期降雨径流调控效果良好, 对长重现期暴雨内涝调控能力有限的特点。在本文给定的布设方案下, LID 设施在 1~5 a 重现期间调控效果良好, 1 a 重现期时最大可削减 75% 左右的地表径流, 100 a 重现期时地表径流削减率降低到 30% 左右。

(3) 扩大 LID 设施规模是提升 LID 设施径流调控效果的有效手段。对于单一类型 LID 设施, 通过优化 LID 设施填料和结构增大其渗蓄能力也可提高径流调控效果; 针对大范围径流调控, 则需采用多种 LID 设施组合调控和“灰绿”设施协同调控。

参考文献 (References):

[1] IPCC. AR6 Synthesis Report: Climate change 2023[R]. New York:

IPCC, 2023.

- [2] 徐宗学, 叶陈雷, 廖如婷. 城市洪涝灾害协同治理: 研究进展与应用案例[J]. 地球科学进展, 2023, 38(11): 1107-1120.
XU Zongxue, YE Chenlei, LIAO Ruting. Integrated management technology for urban flooding/waterlogging disaster: Research progress and case study[J]. Advances in Earth Science, 2023, 38(11): 1107-1120.
- [3] LIU W, ENGEL B A, FENG Q. Modelling the hydrological responses of green roofs under different substrate designs and rainfall characteristics using a simple water balance model[J]. Journal of Hydrology, 2021, 602(3): 126786.
- [4] EUNG S K. Analysis of runoff according to application of SWMM-LID element technology (1): Parameter sensitivity analysis[J]. Korean Society of Hazard Mitigation, 2020, 20(6): 437-444.
- [5] ZHA Xianbao, FANG Wei, ZHU Wei, et al. Optimizing the deployment of LID facilities on a campus-scale and assessing the benefits of comprehensive control in Sponge City[J]. Journal of Hydrology, 2024, 635: 131189.
- [6] 康永德, 李伟, 许尔文, 等. 海绵措施下降雨径流模拟及污染物削减率评价[J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55(2): 78-89.
KANG Yongde, LI Wei, XU Erwen, et al. Rainfall runoff simulation and pollutant reduction rate evaluation under sponge measures[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(2): 78-89.
- [7] LUAN Qinghua, FU Xiaoran, SONG Cuiping, et al. Runoff effect evaluation of LID through SWMM in typical mountainous, Low-lying urban areas: A case study in China[J]. Water, 2017, 9(6): 439.
- [8] 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.
JIANG Chunbo, LI Jiako, GAO Jiayu, et al. Advances in research of optimal rainwater infrastructure configuration in sponge city construction[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2021, 40(3): 19-29.
- [9] NINON L F, VINCENTS P, ELHADI M H A, et al. Spatial and cumulative effects of low impact development implementation scenarios [J]. Journal of Hydrology, 2022, 612(1): 128178.
- [10] SARAH K, USMAN T K, MOJGAN A J. A simplified geospatial model to rank LID solutions for urban runoff management[J]. Science of The Total Environment, 2022, 831: 154937.
- [11] 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.
LIU B, RONG G W, CHEN Q Q, et al. Regional distribution and mitigation benefit of LID facility based on SWMM[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(5): 930-939.
- [12] 陈朝晖, 李鹏, 张焯洲, 等. 耦合一二维水动力模型的城市社区

- 暴雨内涝模拟研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55(7): 55-69.
- CHEN Chaohui, LI Peng, ZHANG Yuzhou, et al. Urban community stormwater inundation simulation research on coupling one-and two-dimensional hydrodynamic models[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(7): 55-69.
- [13] 曾照洋, 赖成光, 王兆礼, 等. 基于 WCA2D 与 SWMM 模型的城市暴雨洪涝快速模拟[J]. 水科学进展, 2020, 31(1): 29-38.
- ZENG Zhaoyang, LAI Chengguang, WANG Zhaoli, et al. Rapid simulation of urban rainstorm flood based on WCA2D and SWMM mode [J]. Water Resources Protection, 2020, 31(1): 29-38.
- [14] 王兆礼, 陈昱宏, 赖成光. 基于 TELEMAC-2D 和 SWMM 模型的城市内涝数值模拟[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 117-124.
- WANG Zhaoli, CHEN Yuhong, LAI Chengguang, et al. Numerical simulation of urban waterlogging based on TELEMAC-2D and SWMM model[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 117-124.
- [15] 廖如婷, 徐宗学, 叶陈雷, 等. 基于 SWMM 和 InfoWorks ICM 模型的大红门排水区暴雨内涝模拟[J]. 水资源保护, 2023, 39(3): 109-117.
- LIAO Ruting, XU Zongxue, YE Chenlei, et al. Simulation of rainstorm waterlogging in Dahongmen drainage area based on SWMM and InfoWorks ICM modes [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(3): 109-117.
- [16] 晋城市规划和自然资源局. 晋城市中心城市海绵城市建设导则 [R]. 晋城: 晋城市规划和自然资源局, 2020.
- Jincheng Municipal Bureau of Planning and Natural Resources. Guideline for the sponge city construction in Jincheng central city [R]. Jincheng: Jincheng Municipal Bureau of Planning and Natural Resources, 2020.
- [17] 乔鹤. 典型城市排水河道雨洪资源利用及调控研究: 以凉水河为例[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2021.
- QIAO He. Research on utilization and regulation of rain and flood resources in typical urban drainage channels: Taking Liangshui river as an example[D]. Dalian: Liaoning Normal University, 2021.
- [18] 陈昊荣. 汉江流域参数移植法及水文水动力耦合模型的研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- CHEN Haorong. Research of parameter migration and hydro-hydrodynamic coupling model in Hanjiang river basin [D]. Dalian: Dalian university of technology, 2020.
- [19] 王英, 王浩, 龚家国, 等. 雄安新区城市水系结构规划分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(7): 199-208.
- WANG Ying, WANG Hao, GONG Jianguo, et al. Analysis of urban river system structure planning in Xiongan New Area [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022, 53(7): 199-208.
- [20] 住房和城乡建设部. 室外排水设计规范: GB 50014—2006 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2016.
- Ministry of Housing and Urban-rural Development. Code for Design of Outdoor Wastewater Engineering: GB 50014—2006 [S]. Beijing: China Planning Press, 2016.
- [21] 刘含影. 基于 SWMM 模型的海绵小区雨洪调控措施模拟评估 [D]. 北京: 中国地质大学, 2020.
- LIU Hanying. Simulation Evaluation on Rainwater Control Measures of Sponge Community Based on SWMM Model [D]. Beijing: China university of geosciences, 2020.
- [22] 石佳. 暴雨特性对典型 LID 措施的污染控制效果影响研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
- SHI Jia. Study on the Influence of Rainstorm Characteristics on the Pollution Control Effect of typical LID Measures [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021.
- [23] 黄若琳, 王铎洋, 潘晓骏, 等. 低影响开发设施组合下的城市雨洪调控情景模拟研究 [J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55(4): 22-35.
- HUANG Ruolin, WANG Luoyang, PAN Xiaojun, et al. Scenario simulation study on urban rain flood control under the combination of low impact development facilities [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(4): 22-35.
- [24] JIANG Yu, QIU Ling, GAO Tian, et al. Systematic application of sponge city facilities at community scale based on SWMM [J]. Water, 2022, 14(4): 591.
- [25] CHENG Xinyue, WANG Hao, CHEN Bin, et al. Comparative analysis of flood prevention and control at lid facilities with runoff and flooding as control objectives based on InfoWorks ICM [J]. Water, 2024, 16(3): 374.
- [26] PENG Z J, SMITH C, STOVIN V. The importance of unsaturated hydraulic conductivity measurements for green roof detention modelling [J]. Journal of Hydrology, 2020, 590, 125273.
- [27] 申红彬, 徐宗学, 张书函, 等. 绿色屋顶降雨径流削减效果监测与过程模拟[J]. 农业工程学报, 2020, 36(5): 175-181.
- SHEN Hongbin, XU Zongxue, ZHANG Shuhan, et al. Monitoring and simulation of rainfall-runoff reduction effects and process on green roofs [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(5): 175-181.
- [28] 麦叶鹏, 黄国如, 解河海, 等. 基于 Hydrus-1D 模型的 LID 措施雨水径流控制效应研究[J]. 水利学报, 2022, 53(7): 811-822.
- MAI Yepeng, HUANG Guoru, XIE Hehai, et al. Study on rainwater runoff control effect of LID measures based on Hydrus-1D [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(7): 811-822.
- [29] JIANG Chunbo, LYU Peng, LI Jiake, et al. Rapid Determination Methods for Extent Parameters of Typical LID Facilities in urban stormwater management [J]. Journal of Environmental Engineering, 2022, 148(10): 1-12.
- [30] 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.
- ZHANG Man, ZHOU Keke, ZHANG Ting, et al. Hydrological re-

- sponses and stormwater control effects of typical urban LID measures [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2019, 38(5): 57-71.
- [31] 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.
YE Chenlei, XU Zongxue, LEI Xiaohui, et al. Influences of sponge reconstruction of Jin'an River drainage district in Fuzhou City on urban flooding / waterlogging [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(1): 83-92.
- [32] ZHANG Zhiming, HU Wenhan, WANG Wenliang, et al. The hydrological effect and uncertainty assessment by runoff indicators based on SWMM for various LID facilities [J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 613(21): 128418.
- [33] DING Xingchen, LIAO Weihong, LEI Xiaohui, et al. Assessment of the impact of climate change on urban flooding: A case study of Beijing, China [J]. *Journal of Water and Climate Change*, 2022, 13(10): 3692-3715.
- [34] HUA Pei, YANG Wenyu, QI Xiaochen, et al. Evaluating the effect of urban flooding reduction strategies in response to design rainfall and low impact development [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 242: 118515.
- [35] 俞茜, 李娜, 王杉, 等. 低影响开发设施的综合效益评估指标体系研究[J]. *水力发电学报*, 2020, 39(12): 94-103.
- YU Xi, LI Na, WANG Bin, et al. Study on comprehensive benefit assessment systems for low impact development practices [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2020, 39(12): 94-103.
- [36] 黄亦轩, 徐宗学, 叶陈雷, 等. 局部管道改造对内涝风险的影响: 以晋城市金村起步区为例[J]. *水力发电学报*, 2023, 42(6): 40-52.
HUANG Yixuan, XU Zongxue, YE Chenlei, et al. Effect of local pipeline reconstruction on waterlogging risk: A case study in Jincun, Jincheng City [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2023, 42(6): 40-52.
- [37] 李江云, 李瑶, 胡子欣. 灰绿耦合雨洪系统多目标优化建模与应用[J]. *水资源保护*, 2022, 38(6): 49-55.
LI Jiangyun, LI Yao, HU Zixin, et al. Multi-objective optimization modeling and application of grey-green coupling stormwater system [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(6): 49-55.
- [38] TANSAR H, DUAN H F, OLE M. A multi-objective decision-making framework for implementing green-grey infrastructures to enhance urban drainage system resilience [J], *Journal of Hydrology*, 2023, 620: 129381.

(责任编辑 王璐)