

胡育晓. 多因素耦合下绿色设施对城市排水防涝效益研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2026, 57(8): 78-92. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.08.006

HU Yuxiao. Research on drainage and flood control benefits of green facilities under multi-factor coupling[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2026, 57(8): 78-92. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.08.006

多因素耦合下绿色设施对城市排水防涝效益研究

胡育晓^{1,2}

(1. 上海市水务规划设计研究院, 上海 200233; 2. 上海市海洋规划设计研究院, 上海 200233)

摘要:【目的】为了优化城市自排区域的排水防涝体系,提升区域应对极端降雨的能力,【方法】以上海市青浦新城中央商务区为研究对象,基于 Infoworks ICM 构建一维二维排水管网耦合模型,分析河道水位、布设比例等多因素对绿色设施积水削减效益的影响。选取下凹式绿地、雨水花园和透水铺装3种典型绿色设施,模拟短历时(120 min)和长历时(24 h)降雨条件下的积水总量以及积水面积指标,定量评估不同布设比例和水位边界条件下的设施效益。【结果】结果表明,在两种降雨历时条件下,绿色设施的削减效果均随布设比例的增加而提升,但下凹式绿地的积水削减效益显著高于雨水花园及透水铺装;三种绿色设施在短历时降雨条件下的削减效益均优于长历时降雨条件。河道水位变化对绿色设施的积水削减效益影响较小。【结论】研究提出的多因素耦合绿色设施布设比例优化框架为城市排水系统优化设计和海绵城市建设提供了重要参考。

关键词: 绿色设施; Infoworks ICM; 自排区域; 多因素影响; 排水防涝; 积水削减; 极端降雨; 海绵城市

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.08.006 开放科学(资源服务)标志码(OSID): 中图分类号: TU992.1 文献标志码: A 文章编号: 1000-0860(2026)08-0078-15



Research on drainage and flood control benefits of green facilities under multi-factor coupling

HU Yuxiao^{1,2}

(1. Shanghai Water Planning and Design Research Institute, Shanghai 200233, China; 2. Shanghai Ocean Planning and Design Research Institute, Shanghai 200233, China)

Abstract: [Objective] To optimize the drainage and flood control system in urban self-draining areas and enhance their capacity to cope with extreme rainfall. [Methods] Taking the Central Business District of Qingpu New City in Shanghai as a case study, a 1D~2D coupled drainage pipe network model was constructed based on Infoworks ICM. The effects of multiple factors, such as river water level and layout proportion, on the waterlogging reduction benefits of green facilities were analyzed. Three typical types of green facilities were selected: sunken greenbelt, rain garden, and permeable pavement. The total waterlogging volume and waterlogging area under short-duration (120 min) and long-duration (24 h) rainfall conditions were simulated to quantitatively evaluate the benefits of these facilities under different layout proportions and water level boundary conditions. [Results] The result showed that under both short-and long-duration rainfall conditions, the reduction effectiveness of green facilities increased with increasing layout proportion. However, the waterlogging reduction benefit of the sunken greenbelt was

收稿日期: 2025-05-13; 修回日期: 2025-06-30; 录用日期: 2025-07-14; 网络出版日期: 2025-09-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(42371030); 上海市科学技术委员会科研计划项目(21DZ1202602); 上海市水务局(上海市海洋局)科研项目(沪水科 2025-07)

作者简介: 胡育晓(1992—),女,工程师,硕士,主要从事水务规划研究。E-mail: huyuxiao1992@126.com

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

significantly higher than that of rain gardens and permeable pavements. The three types of green facilities exhibited superior performance in reduction benefits under short-duration rainfall conditions compared to long-duration conditions. Variations in river water level had a minor influence on the waterlogging reduction benefits of green facilities. [Conclusion] The optimization framework for green facility layout proportion under multi-factor coupling proposed in this research provides an important reference for the optimized design of urban drainage systems and the construction of sponge cities.

Keywords: green facilities; Infoworks ICM; self-draining area; multi-factor influences; drainage and flood control; waterlogging reduction; extreme rainfall; sponge city

0 引言

受全球气候变化影响,近年来城市面临的灾害性天气在发生频率和强度上均显著增强^[1]。上海市自排区域对超标准降雨及“风暴潮洪”四碰头灾害的抵御能力明显不足^[2]。2021年“烟花”台风以及2024年“普拉桑”台风导致上海多个自排区域出现严重的积水问题^[3]。当前上海市自排区域面积占比虽高,但现状排水管网设计标准普遍为1 a一遇,远低于国家规范要求的3~5 a一遇标准。传统灰色设施为主的排水系统在应对极端降雨事件时表现明显不足,其局限性日益显现,这促使研究者将注意力转向了更为韧性的解决方案。

绿色设施作为新型雨洪管理理念,已成为缓解城市内涝、改善生态的重要途径。主要通过采用下凹式绿地、透水铺装、雨水花园等设施,通过下渗、截留、蒸发等自然过程,有效削减地表径流峰值与总量,同时兼具美化城市环境、提升生态服务功能等多重效益^[4]。李军等^[5]对绿色设施组合方案在甘肃省天水市某小区的排水防涝、径流污染及成本效益等综合评价开展了评估;翁时超等^[6]研究了杭州某坡地小区在短历时不同重现期降雨情景下绿色设施对水量、水质及径流峰值的控制效果。绿色设施已在各个尺度的城市建设中应用,但主要以小尺度的居住区建设为主^[7-8]。

在单项绿色设施提升效益的研究方面,DIETZ等^[9]提出单一的雨水花园措施在径流控制方面具有较好的表现。KAZEMI等^[10]研究了不同类型的透水铺装对水质改善的影响。随着研究的深入,国内外对绿色设施的研究对象从单一措施转向组合措施的综合应用^[11]。KHANSAT等^[12]基于指数法、MCDA以及多准则模型工具对绿色设施组合方案的优化进行探讨,但该方法更多聚焦于地理空间因素,未能对排水防涝效益开展有效评估。DINIZ等^[13]在解决巴西Natal市的洪涝风险时,提出绿色设施组合方案较单一绿色设施表现更佳。随着绿色设施布局研究的深

入,更多学者结合多种优化算法来实现组合方案在排水防涝效益、环境效益与成本效益等多方面的平衡,并通过模型模拟或实际工程验证。SANIEI等^[14]结合NSGA-II算法,提出了兼顾排水除涝及减少污染的最佳绿色设施组合方案。

近年来,水力模型在评价绿色设施排水除涝效益中发挥关键作用,SWMM、InfoWorks ICM等模型被广泛用于模拟绿色基础设施在排水系统中的表现^[15]。这些模型通过集成绿色设施的水文效应,评估其对径流总量、峰值流量和污染负荷的削减效果。学者们通过构建此类模型对绿色设施的水文效益、环境效益和经济效益进行了相应评估。韩松磊等^[16]采用SWMM工具提出了针对强排系统的绿灰耦合设施的有效提标布局和设计方案;QI等^[17]基于SWMM工具提出绿色设施结合灰色基础设施可有效削减峰值流量;CHENG等^[18]采用Infoworks ICM模型基于洪涝控制目标部署的绿色设施组合方案,在有效提升区域除涝能力的同时降低设施成本;LU等^[19]基于情景评估框架,开发绿色-灰色-蓝色基础设施系统,通过动态多准则决策过程优化基础设施设计,验证组合设施的韧性效益。LI等^[20]研究表明,由绿色屋顶、下沉式绿地和透水铺装构成的绿色组合措施可将总径流量减少41.7%~25.89%,减轻城市的洪涝影响。

上述研究表明,绿色设施组合方案的优化已是当今雨洪管理的重点研究方向^[21]。已建自排区域排水能力提升通常受到多种因素的限制,如空间受限、基础设施既有格局约束以及河道水位顶托等特殊问题。面对极端降雨事件时,更易出现积水内涝等问题,亟需有效的优化策略来增强其排水防涝能力。然而,现有研究在绿色设施的选择及布设比例方面缺乏复杂水文条件下的定量评估框架,尤其针对如上海等平原感潮河网的自排地区,未充分考虑诸多因素的综合影响,例如河道水位动态波动的复杂水文条件,仍缺少针对此类区域的定量评估研究案例^[22-24]。另外,现有研究多聚焦于强排系统或新建区域的绿色设施规划与设计,而对已建自排区域的设施研究相对薄弱。因

此，已建自排区域的绿色设施选择及布设比例优化面临更大的挑战。

本文以上海市青浦新城中央商务区为研究对象，针对已建自排区域绿色设施优化难题，基于 Infoworks ICM 构建一维二维管网耦合模型，提出“多因素耦合-多目标量化”研究框架。探讨绿色设施的适用类型和布设方案，模拟分析河道水位、布设比例以及降雨时长等因素对绿色设施排水防涝的影响。提出了一套具有可操作性的绿色设施优化方案，为该区域的排水防涝提供了科学依据，同时也为其他城市的类似研究提供了参考范例。

1 研究区域概况

研究区域位于上海市青浦区的中央商务区，总面积约 6.5 km²，东至上海绕城高速，西至胜利路，南至盈港路，北至崧泽大道(见图 1)。该区域是青浦区职能和公共服务功能最集中的片区之一，也是“十四五”期间创新资源投放与人力资本导入的重点。青浦区的中央商务区因其在区域发展中的核心定位以及规划重点等方面原因，排水能力提升不仅对本区域的发展至关重要，而且具有较好的推广价值和示范效应。

1.1 蓝色设施概况

研究区域位于青松大控制范围内(见图 2)，共涉及 6 个圩区，分别是胜利圩、朝阳圩、向阳河东圩、夏阳圩、余家埭圩以及跃进圩。圩外河道现状最高水位约为 3.50 m，常年控制水位为 2.60 m；圩内河道现状最高水位约为 2.80 m，常年控制水位为 2.50 m；圩区现状平均河湖水面率 6.1%，圩区除涝泵站总规模 101 m³/s，现状除涝能力已达到规划要求的 20 a 一遇。

1.2 灰色设施概况

研究区域现状雨水的排水模式采用圩内自排，排水体制为分流制，现状排水能力基本为 1 a 一遇，西北片圩内小部分地区可达到 3~5 a 一遇。规划采用 5 a 一遇排水标准。

区域内城市开发边界内现状市政道路已基本同步配套雨水管道，雨水收集后就近排入河道。现状市政道路总长约 29.9 km，已建 DN150—DN1 600 雨水管道总计约 28.7 km，管网覆盖率达到 95.9%。

1.3 下垫面特征

现状下垫面以屋面及工业用地为主(见图 3)，与规划用地类型差异显著。规划用地以住宅、商业及绿地为主导(见图 4)，为绿色设施布设提供空间基础。

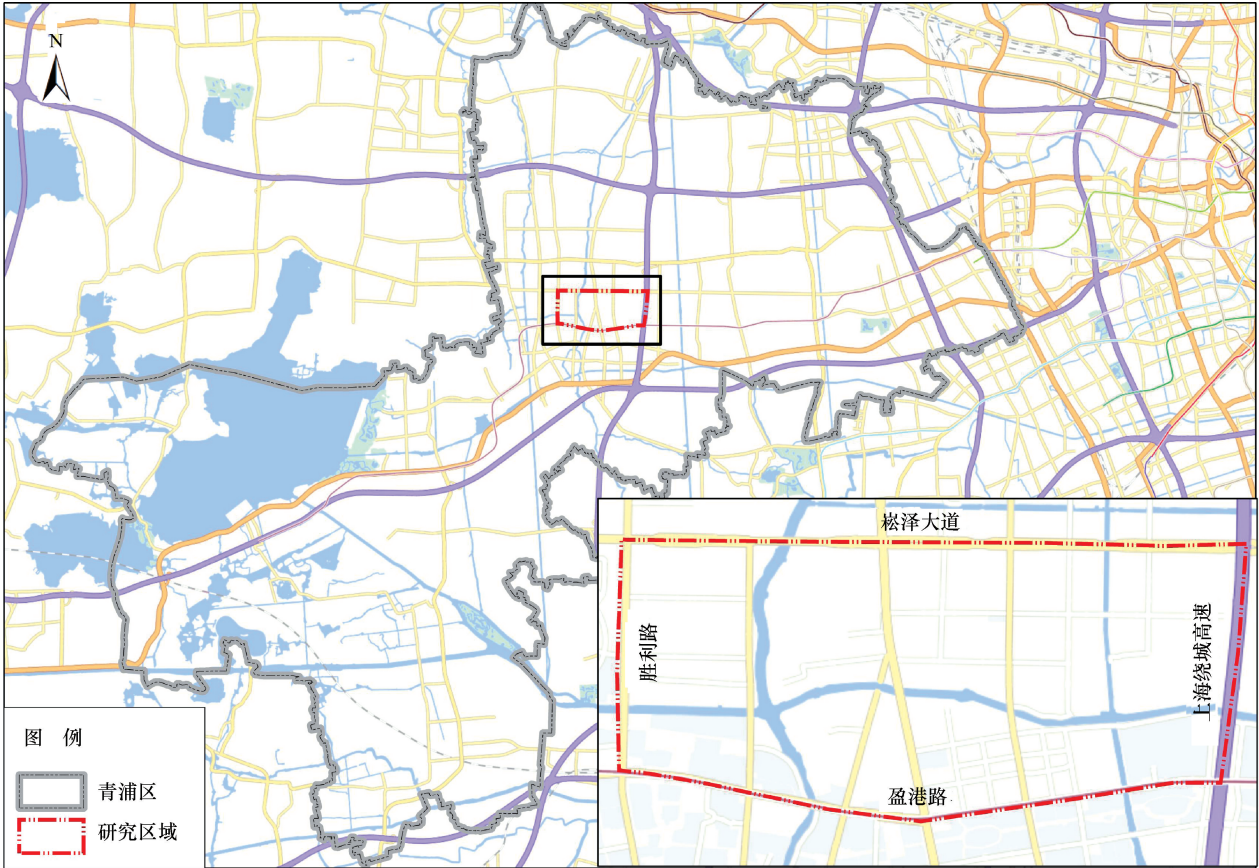


图 1 研究区域地理位置示意
Fig. 1 Geographical location of the study area

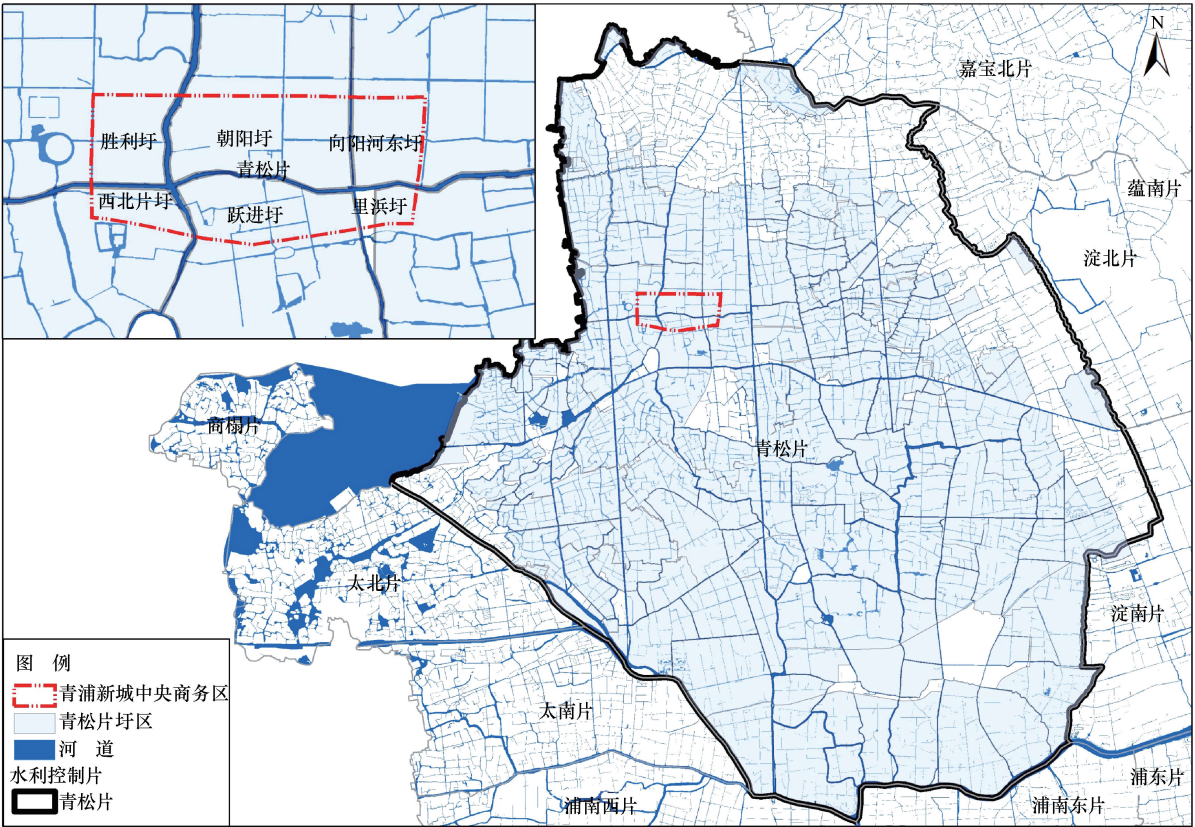


图 2 研究区域蓝色设施概况示意

Fig. 2 Overview of blue facilities in the study area

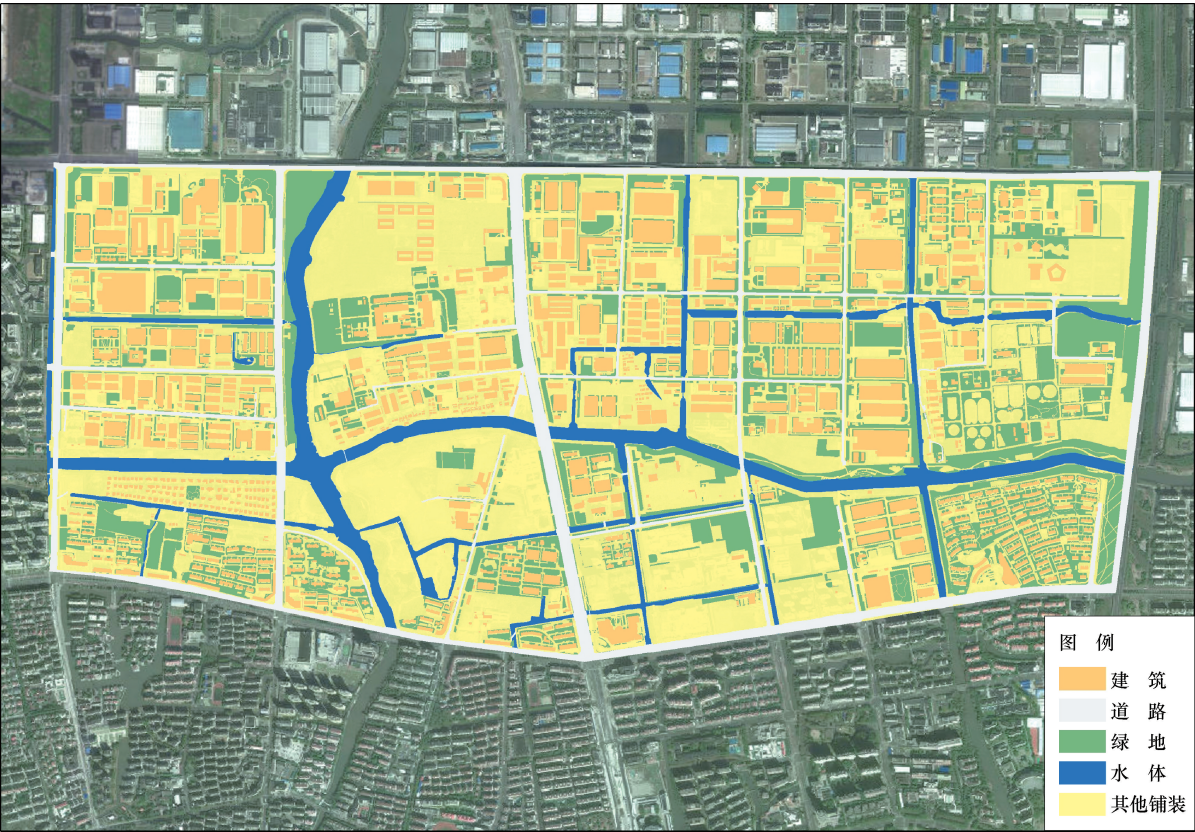


图 3 现状下垫面解析

Fig. 3 Analysis of current underlying surface



图 4 研究区域规划用地类型
Fig. 4 Planned land use types in the study area

2 研究方法

2.1 Infoworks ICM 模型构建

参照《排水系统数学模型构建及应用标准》进行了雨水系统模型构建工作^[25]。现状排水管网模型的构建以最新的排水设施 GIS 数据为基础，结合城镇排水设施防汛能力普查数据和近期管道改造工程图以及现场勘察信息作为补充，构建整个研究范围内的一维排水管网模型。

一维排水管网模型是整个研究的基础，主要用于模拟管道内的水流情况。在此基础上，通过整合地面高程数据和二维计算网格，进一步构建了一维二维管网耦合模型。该模型能够模拟地表漫流过程，考虑地面高程、下垫面类型等因素对洪水流动的影响，从而更精确地模拟地面积水和退水情况。Infoworks ICM 是一个综合性的水力模型软件，能够处理复杂的水文和水力模拟任务，包括排水管网、地表漫流和河道水位等多因素耦合模拟，可用于构建和整合所有相关的水动力模型和排水管网模型。SWMM 汇流模型是一个经典的水力模型，主要用于模拟城市排水管网的汇流过程，是 Infoworks ICM 中的一个模块，用于处理排水管网的水流汇流计算^[26]。

基于以上资料建立了研究区域所涉及的 6 个圩区的整体一维排水管网模型，包含管段 16 995 根，管道长度 280 km，管道范围 DN100—DN1 600，节点 17 285 个。下垫面类型分为道路、建筑物、植被、水系、道路铺装以及其他 6 类，参照相关标准规范选取产汇流参数，并进行率定验证。产流模型采用固定径流系数(Fixed)与霍顿产流模型(Horton)。汇流统一采用城市 SWMM 汇流模型，具体产汇流参数设置如表 1 所列。

利用高程点数据生成地面高程 TIN 模型，按不同的水力边界要素进行二维计算网格划分，如图 5 所示，共划分了 6.4 万个三角网格，网格尺寸设置为 25 m²。通过管道出口节点连接的方式，将一维排水管网模型与二维计算网格中的地表单元直接相连。通过设置管道节点中的洪水类型为 2D，将这些节点作为水流从管网进入地表的转换点，确保管网排水能够准确地流入地表，模拟洪水地面二维漫流过程^[27]。

2.2 设计雨型

2.2.1 短历时降雨

设计暴雨采用芝加哥雨型分析短历时强降雨下的积水风险^[28-29]。降雨历时 120 min，雨峰位置系数

表 1 模型产汇流参数取值

Table 1 Parameter values of runoff generation and concentration models

下垫面类型	汇流参数	产流模型	表面类型	初期损失值/m	固定径流系数
道路	0.013	Fixed	Imperious	0.000 071	0.85
建筑物	0.013	Fixed	Imperious	0.000 071	0.90
植被	0.050	Horton	Pervious	0.000 28	—
水系	0.050	—	—	—	—
道路铺装	0.050	Fixed	Imperious	0.000 071	0.70
其他	0.030	Fixed	Unknown	0.000 071	0.60



图 5 研究区域一维二维管网耦合模型示意

Fig. 5 Schematic diagram of 1D~2D coupled pipe network model of the study area

$r=0.4$ ，设计重现期取 5 a 一遇，如图 6 所示，对应最大小时降雨强度为 58 mm。

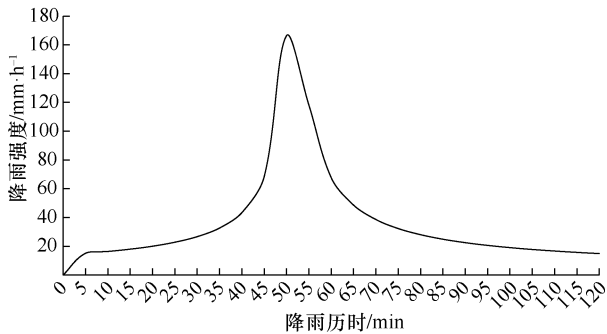


图 6 5 a 一遇 120 min 芝加哥雨型 ($r=0.4$)

Fig. 6 120 minute Chicago rainfall pattern with 5-year return period ($r=0.4$)

2.2.2 长历时降雨

采用上海市地方标准《治涝标准》(DB31/T 1121—2018)规定的本市 24 h 暴雨强度公式，降雨历时 24 h，设计雨型“639”暴雨，设计重现期取 30 a

一遇，如表 2 所列，对应最大 24 h 面暴雨量 213.1 mm^[30]。

2.3 水位边界

采用静态耦合模拟方式实施，体现河道水位的顶托影响。通过设置排口的水位，将河道水位曲线作为下游边界条件输入到排水管网模型中。研究区域位于青松片，共涉及 6 个圩区。青浦新城水利规划中不同圩区水位边界控制条件如表 3 所列，分别按照预降最低水位、常水位以及除涝最高控制水位进行设置。

2.4 二维耦合模型验证

为确保模拟的计算结果与实际情况相符合，根据已有内涝历史记录资料，开展模型计算成果的合理性验证。对照历史内涝调查分布图，核查高风险区域与历史内涝记录趋势符合程度，如表 4 所列、图 7 所示，积水高风险区域与历史内涝点的空间重叠率达到 80% 以上。

2.5 评价指标选取

通过定义积水总量和积水范围指标，对研究区域的绿色提标措施的排水防涝效益进行量化分析。各项提标措施应对各个暴雨重现期的排水防涝能力应综合考虑以上积水指标。

积水总量用于表示地面积水的总体严重程度，综合反映了积水的范围和深度，是评估积水对区域影响的重要指标。该指标定义为：积水区域(超出地面以上 0 m)覆盖的积水总量/m³。

积水范围：用于表示地面发生积水在空间上的严重程度。该指标定义为：积水区域(超出地面以上 0 m)的积水面积，单位为 km²。

3 绿色措施的选择

3.1 不同绿色设施的适用性分析及选择

根据《海绵城市建设技术标准》，对研究区域内不同用地类型对多种海绵设施的适用性进行分析^[31-32]。研究区域内规划用地类型主要有居住用地、商业用地、道路广场用地、公共设施用地及绿地等，

表 2 青松片不同重现期的最大 24 h 面暴雨量

Table 2 Maximum 24-hour areal rainfall with different return periods in Qingsong area

水利片	100 a	50 a	30 a	20 a	10 a	5 a
青松片	267.9 mm	235.7 mm	213.1 mm	192.9 mm	160.1 mm	126.8 mm

表 3 不同圩区水位边界控制条件

Table 3 Water level boundary control conditions for different polder areas

所属圩区	预降最低水位/m	常水位/m	除涝最高控制水位/m
胜利圩	1.5	2.8	3.0
朝阳圩	1.5	2.8	3.0
向阳河东圩	1.5	2.8	3.0
西北片圩	1.5	2.6	2.8
跃进圩	1.5	2.6	2.8
里浜圩	1.5	2.5	2.6

适用的海绵设施类型较多，因此具体选用需要进一步分析。

经分析，研究区域适用的海绵设施主要是分散布置的滞蓄型海绵设施，设施底部均需做防渗处理，铺设下排水管道防止积水、被地下水淹没及雨水渗透污染地下水。参照不同海绵设施的适用用地类型、

表 4 模型验证结果

Table 4 Model validation results

历史暴雨积水点	结果验证
双盈路	✓
竹盈路	✓
新达路	✓
盈港路	✓
华浦路	✓
城中北路城北大桥	✓
新业路	✓
崧泽大道	✓
盈港东路	×
盈秀路	×
新永路	×

区域特征、空间需求及其控制效果，结合研究区域的特征，本研究海绵设施选择标准为：不考虑设施的渗透功能；具有改造的实际可行性；尽可能少占用土地。由此确定适用的海绵设施为底部不透型的

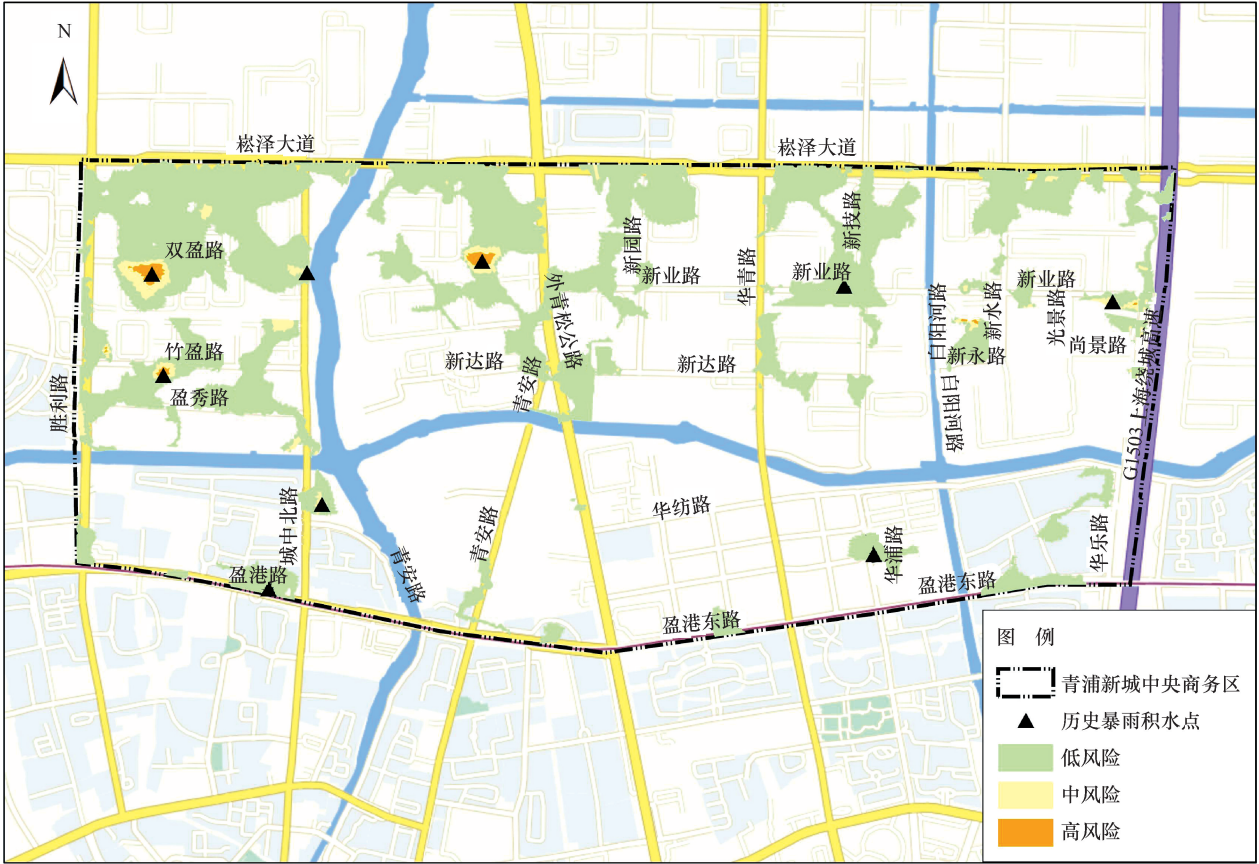


图 7 一维二维管网耦合模型地面积水验证结果

Fig. 7 Validation results of surface waterlogging for 1D~2D coupled pipe network model

生物滞留池、底部不透型的透水铺装及下沉式绿地。雨水直接利用在高密度城区的费用-效益不佳，因此不作为主要措施。根据研究范围特征选择的3种适用海绵设施类型，可以在模型软件中进行模拟，符合应用目标。

3.2 研究区域绿色设施的布设方案

本研究参考临港新城已建海绵城市案例，结合区域下垫面情况及规划用地类型，依据《上海市海绵城市建设技术导则》，确定透水铺装、雨水花园、下凹式绿地等为主要海绵设施^[33]。透水铺装主要布设在住宅用地内，参考《上海市城市规划管理技术规定》及《上海市绿化条例》^[34]，以建筑密度30%、绿化率35%计算，将透水铺装按35%比例布置在住宅用地内，总面积0.79 km²，占研究区域12.1%。雨水花园则分散布置于地势平坦、排水性良好的场地，本次选用研究区内较大绿地，布设面积0.64 km²，占比9.9%。下凹式绿地选择沿河绿地(除雨水花园外)作为布设范围，总面积0.40 km²，占研究区域6.2%。市政道路和零星绿化不布置绿色设施。按照上述规划，完成研究区域绿色设施的空间布置，具体布局如图8所示、表5所列。

3.3 绿色措施的参数设置

参照相关LID手册和临港地区已建海绵城市建设

表5 研究区域绿色设施布设占比情况 %

Table 5 Proportion of green facility layout in the study area %

绿色设施类型	透水铺装	雨水花园	下凹式绿地
占研究区域总面积比	12.1	9.9	6.2

的研究成果，结合研究区域的特征，采用的3种绿色设施的设计值与模型参数如表6所列。

表6 模型海绵设施参数

Table 6 Model parameters of sponge facilities

参 数	下凹式绿地	雨水花园	渗透铺装
护坡高度/mm	100	150	50
植被体积分	0.1	0.1	0.0
表层糙率/Manning's n	0.050	0.024	0.024
表面坡度/n·m ⁻¹	0.001	0.000	0.500
铺装层厚度/mm	—	—	150
铺装阻塞系数	—	—	0.15
导水率/mm·hr ⁻¹	—	—	100
土壤厚度/mm	300	500	150
土壤孔隙率	0.50	0.50	0.15
田间持水量	0.200	0.200	0.105
凋萎点	0.100	0.100	0.047
蓄水层厚度/mm	1	—	300
蓄水层孔隙率	0.3	—	0.5
渗透速率/mm·h ⁻¹	12.0	12.7	12.7
流量系数/mm·h ⁻¹	0.5	—	0
流量指数	0.5	0.3	—
偏移高度/mm	0	—	150

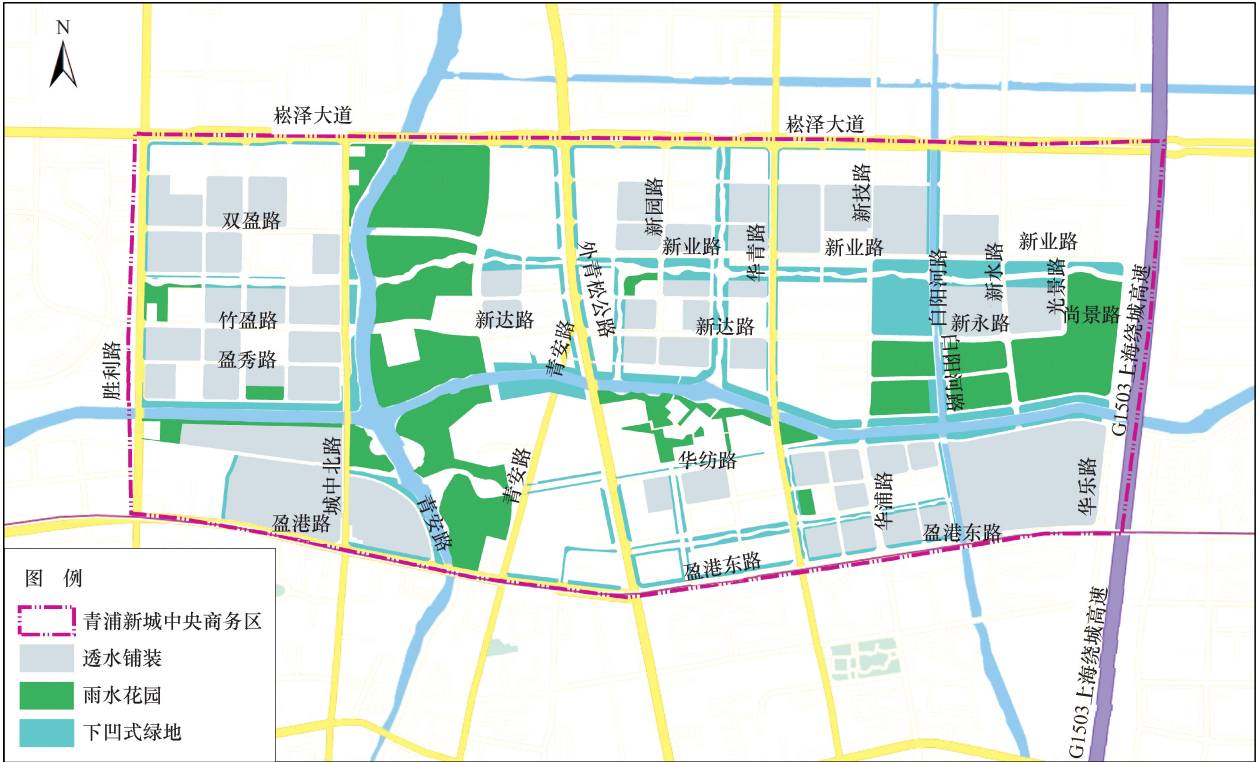


图8 研究区域绿色设施布设示意

Fig. 8 Layout of green facilities in the study area

InfoWorks ICM 中提供多种绿色设施的模拟方法,包括一维排水管网模型、一维二维管网耦合模型以及水文模型的模拟方法。由于研究区域现状下垫面解析情况与规划用地类型差异较大,本次研究采用以地块为单位对绿色设施进行概化布设,采用水文学方法模拟,对适合布设绿色措施的集水区设置各类绿色措施。

4 多因素条件对排水防涝效益的影响分析

4.1 水位边界对单项绿色提标措施的排水防涝效益分析

单项提标措施以表 5 研究区域绿色设施布设占比(100%)为基础。水位边界采用根据青浦新城水利规划圩内河道水位,分别按照预降最低水位、常水位以及除涝最高控制水位进行控制。降雨采用芝加哥设计雨型分析短历时 5 a 一遇(58.0 mm)强降雨下计算积水风险(见图 9)。

(1) 积水总量。模拟结果如图 9(a) 所示,不同绿色设施在不同水位条件下的积水总量削减率差异较小,整体敏感度较弱。其中,下凹式绿地对水位条件的敏感度稍高于雨水花园和透水铺装,主要原因是其布设在滨河绿地,受水位影响较大。具体来看,下凹式绿地在不同水位条件下的积水总量削减率差异仅为 1%,且在常水位条件下削减率最高;透水铺装的积水总量削减率随水位增加而降低,低水位条件下最高,高水位条件下最低,但不同水位条件下的差异仅为 0.8%;雨水花园在常水位和高水位条件下的积水

总量削减率差异不明显,仅为 0.4%。

从积水总量削减效益来看,下凹式绿地的削减率最高,其次为雨水花园,透水铺装的削减效益最低。若考虑布设范围大小的差异,并将各项绿色措施的效益按照布设单位面积统一折算,则在高水位条件下,各项措施的积水总量削减效益分别为:下凹式绿地 45.1%/km² > 雨水花园 11.4%/km² > 透水铺装 9.1%/km²。由此可见,下凹式绿地的积水总量削减效益最为显著,每 km² 可削减 45.1% 的积水量。

(2) 积水面积。如图 9(b) 所示,水位边界条件对绿色设施的积水面积改善效益的敏感度较低。其中,雨水花园在不同水位条件下的敏感度相对较高,不同水位间的积水面积削减效益差异为 3.2%;而下凹式绿地和透水铺装对水位条件的敏感度较低。

从总体削减效益来看,下凹式绿地的削减率最高,其次为雨水花园,透水铺装的削减效益最低。若考虑布设范围大小的差异,并将各项绿色措施的效益按照布设单位面积统一折算,则在高水位条件下,各项措施的积水面积削减效益分别为:下凹式绿地 41%/km² > 雨水花园 11.5%/km² > 透水铺装 7.8%/km²。由此可见,下凹式绿地的积水范围削减效益最佳,其次为雨水花园,透水铺装对积水面积的削减效益较低。

4.2 不同降雨条件对不同单项绿色措施布设比例的排水防涝分析

4.2.1 短历时降雨条件

本研究通过模拟分析短历时降雨条件和单项绿色

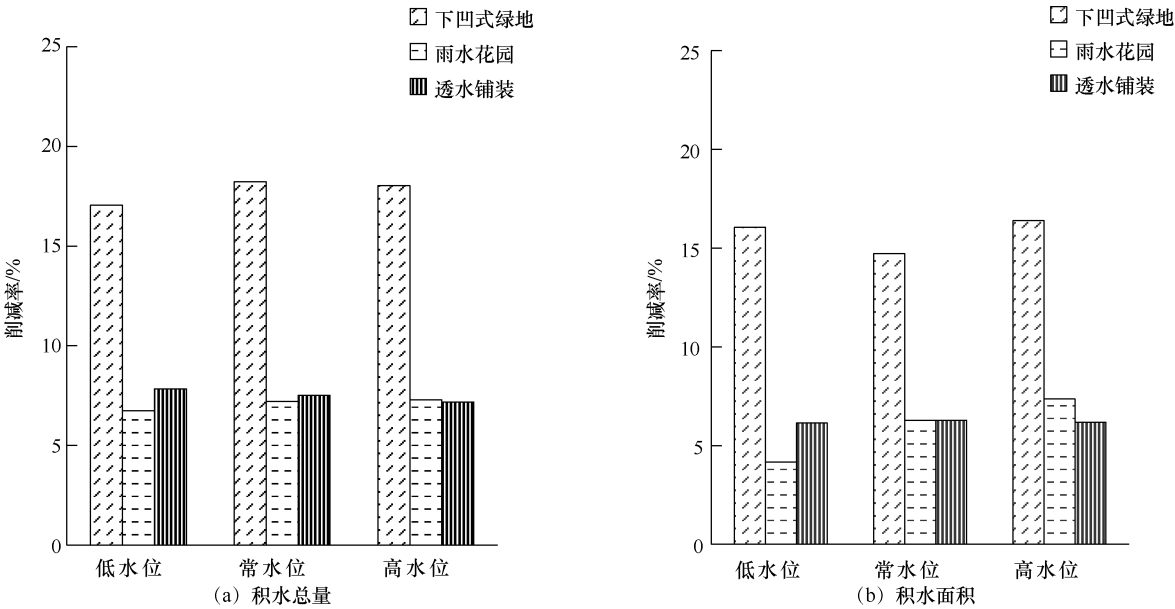


图 9 水位边界对各项绿色提标措施的积水削减效益的影响

Fig. 9 Impact of water level boundaries on waterlogging reduction benefits of different green facility upgrading measures

措施的布设比例敏感性,如表5所列。研究区域绿色设施布设占比(100%)为基础,探讨不同布设比例(0%、20%、40%、60%、80%、100%)在不同历时降雨场景下对绿色措施与排水防涝的削减效益。为消除不同绿色措施之间的相互影响,本研究仅改变单项绿色措施的布设比例,同时保持其他两项绿色措施的布设比例保持固定值(0%)。水位边界依据青浦新城水利规划中的圩内河道水位进行控制,分别设置为预降最低水位、常水位和除涝最高控制水位。降雨边界采用芝加哥设计雨型分析短历时5 a一遇(58.0 mm)强降雨下的积水风险。结果如图10所示。

(1)积水总量。如图10(a)~(c)所示,透水铺装的积水总量削减率在不同水位条件下变化趋势相似。积水削减率均随布设比例增加而上升,其中低水位条件下的削减效果最为显著。

下凹式绿地的积水总量削减率在不同水位条件下变化趋势相似。随着布设比例增加,削减率迅速上升,但在20%之后增长速度放缓;在80%~100%时,削减率的增长速度再次上升。这表明下凹式绿地的积水总量削减效果随布设比例的增加而显著

增强。

雨水花园的积水总量削减率在不同水位条件下变化趋势相似。随着布设比例的增加,三种水位条件下的积水总量削减率均快速上升,但当布设比例达到60%后,增长速度放缓。整体来看,雨水花园在不同水位条件下均能有效削减积水总量,且在高布设比例下,低水位和常水位的削减率接近并略高于高水位条件。这表明雨水花园的积水总量削减效果随布设比例的增加而显著增强。

3种绿色措施的积水总量削减率均随布设比例增加而上升。透水铺装和雨水花园在低水位条件下,当透水铺装布设比例达到60%后,其削减效益优于雨水花园;而在常水位和高水位条件下,相同布设比例下雨水花园表现更优。下凹式绿地的削减率在布设比例20%前快速上升,20%~60%间增速放缓,60%后再次显著提升。总体来看,下凹式绿地的削减效果最佳,雨水花园次之,透水铺装仅在低水位高布设比例下表现相对较好。

(2)积水面积。如图10(d)~(f)所示,透水铺装的积水面积削减效果在不同水位条件下走势大致相

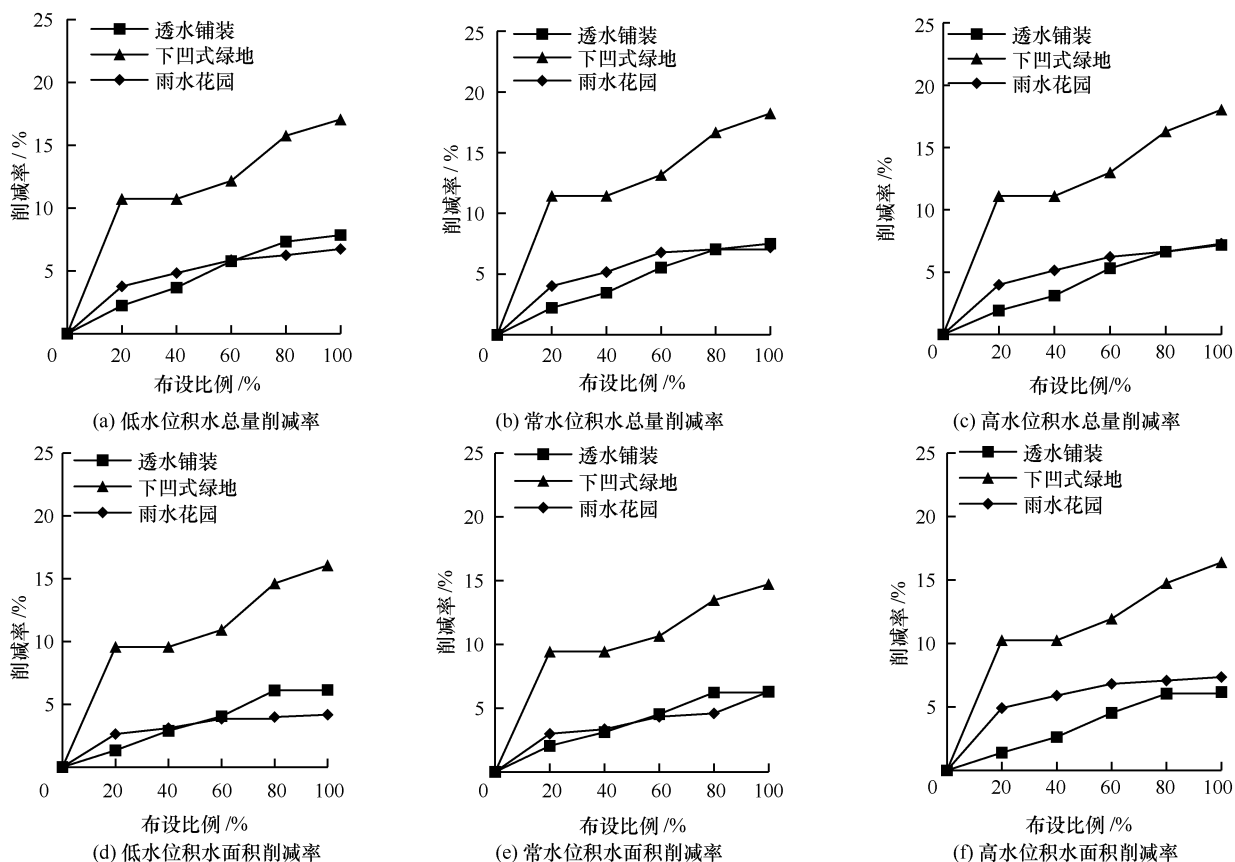


图10 短历时降雨情景下水位边界对单项提标措施的削减效益影响

Fig. 10 Impact of water level boundaries on reduction benefits of individual upgrading measures under short-duration rainfall scenarios

同，随着布设比例增加，削减率也随之增加。常水位条件下的削减效果较其他水位更好，布设比例达到50%后，高水位条件的削减效益高于低水位条件。当布设比例达到80%后，3种水位情况下的削减率趋于稳定。

下凹式绿地的积水面积削减率在不同水位条件下变化趋势相似。随着布设比例增加，削减率迅速上升，在20%~40%之间增长速度放缓，而在60%~100%时，削减率的增长速度再次上升。这表明积水面积的削减效果在高布设比例下表现更佳。另外，高水位条件下的积水面积削减率在大部分布设比例下都高于常水位和低水位。

雨水花园的积水面积削减率在不同水位条件下略微出现差异。在低水位条件下，随着布设比例的增加，削减率逐步上升，但60%后增速减缓；常水位条件下，削减率随布设比例增加而上升，60%~80%增速减缓，80%后再次加速；高水位条件下，削减率随布设比例增加而上升，60%后增速减缓。总体而言，高布设比例下，高水位的削减率最高，常水位次之，低水位最低，雨水花园的积水面积削减效益随布设比例增加而提升。

3种措施的积水面积削减率均随布设比例增加而上升。透水铺装和低水位、常水位条件下，布设比例达60%后效益优于雨水花园；而在高水位条件下，雨水花园的削减效益更高。下凹式绿地在布设比例20%前削减率快速上升，20%~60%间趋于稳定，60%~80%再次上升，80%~100%间趋于平缓。总体

而言，下凹式绿地的削减效果最为显著。

4.2.2 长历时降雨条件

本研究通过模拟分析长历时降雨条件与单项绿色措施的布设比例敏感性。单项措施的布设比例变化条件与短历时降雨条件一致。根据模型计算结果，圩内河道水位在降雨期间维持在除涝最高控制水位，因此长历时降雨条件下的单项绿色措施布设比例敏感性分析仅针对该水位条件进行。结果如图11所示。

(1) 积水总量。如图11(a)所示，3种绿色措施的积水总量削减率均随布设比例增加而上升。透水铺装和雨水花园的削减率随布设比例增加而线性增长。下凹式绿地的削减率在布设比例20%前快速上升，20%~40%和60%~80%间增速放缓，而在40%~60%和80%~100%区间内显著提升。总体来看，下凹式绿地的削减效果最佳，雨水花园次之，透水铺装的削减效果相对较弱。

(2) 积水面积。如图11(b)所示，3种绿色措施的积水面积削减率均随布设比例增加而上升。透水铺装和雨水花园的削减率随布设比例增加而逐步提高。下凹式绿地在布设比例20%前削减率快速上升，20%~40%间趋于稳定，40%~80%再次上升，80%~100%略微回落。总体而言，下凹式绿地的削减效果最为显著，透水铺装次之，雨水花园相对较弱。

5 结果讨论

本文提出的方法在积水削减效益评估方面展现出

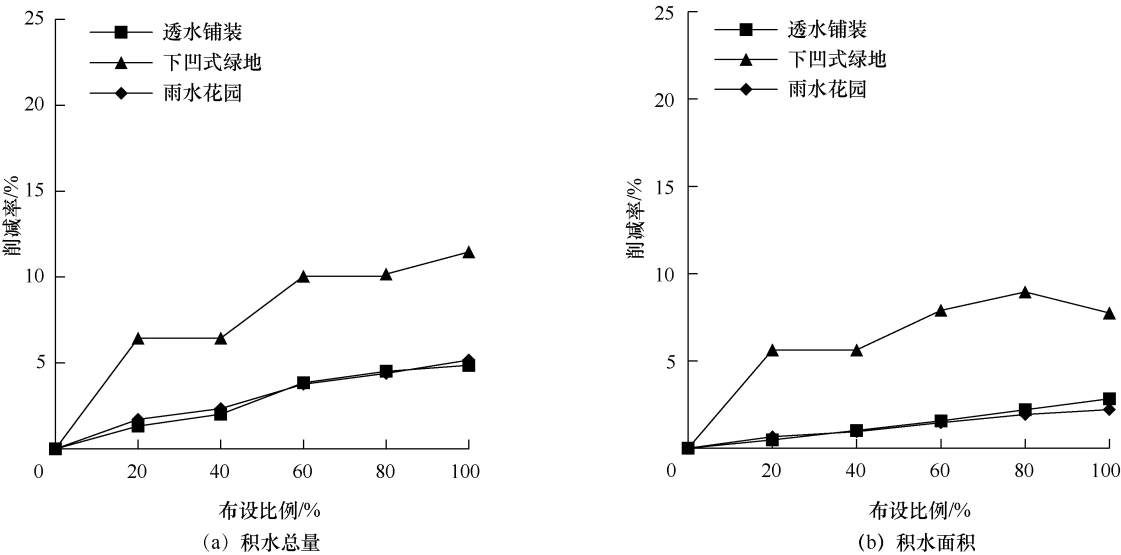


图 11 长历时降雨情景高水位边界对单项提标措施的削减效益影响

Fig. 11 Impact of high water level boundaries on reduction benefits of individual upgrading measures under long-duration rainfall scenarios

了较高的精确性和适应性。基于一维二维管网耦合模型准确地模拟地表漫流与管网排水的交互作用,并结合静态耦合的方式反映河道水位顶托对管网的影响,模拟了多因素条件对绿色设施的积水削减效益。与现有研究相比,本文方法在积水削减效益评估方面具有显著优势。类似研究以单一因素绿色设施的削减效益为主,未深入探讨不同因素对绿色设施积水削减效益的影响^[35-37]。本文提出的“多因素耦合-多目标量化”框架,通过详细的模拟分析,相比传统方法能够更好地适应复杂水文条件,能够更全面地评估绿色设施的布局效益,明确了不同绿色设施在不同因素影响下的积水削减规律,为城市自排区域的优化提供了更具体的指导。

然而,本文的计算结果与类似案例研究相比,仍存在一定差异。例如, SANIEI 等^[16]研究了不同绿色措施组合方案中,其结果表明透水铺装对洪水削减效果最佳,而本文的研究结果则显示,下凹式绿地的削减效益优于透水铺装。这种差异可能源于研究区域的地理特征、降雨强度以及绿色设施的布设比例等因素的不同。因此,在应用本文方法时,需要根据具体的研究区域和条件进行调整和优化。

尽管本文方法取得了一定成果,但仍存在一些不足之处。首先,研究主要关注积水削减效益,但受限于已建自排区域的空间局限性,尚未充分考虑设施的经济性、生态效益及空间布局优化效益,这限制了其在多目标优化场景中的应用。其次,气候变化对降雨模式和设施性能的长期影响尚未被充分纳入模型,这可能导致在未来气候条件下模型预测的不确定性增加。此外,绿色设施的长期运行效果和维护需求缺乏系统评估,这可能影响设施在实际应用中的可持续性。

针对上述不足,未来研究应重点突破以下几个领域:一是集成多目标优化算法,如采用非支配排序遗传算法(NSGA-II),结合控制空间变量以实现防洪、经济和生态目标的综合优化^[38-39];二是结合CMIP6气候模式,量化未来气候变化对设施性能的影响,提升模型的前瞻性和适应性^[40];三是开展绿色设施的长期运行效果和维护需求研究,确保其在实际应用中的可持续性^[41]。通过这些改进,本文方法有望在复杂建成环境中进一步提升绿色设施的优化布局能力,为城市排水系统优化设计和海绵城市建设提供更科学、更全面的决策支持。

综上所述,本文提出的“多因素耦合-多目标量化”框架为复杂水文条件下的绿色设施积水改善效

益评估提供了科学依据。该框架通过详细的模拟分析,揭示了不同绿色设施在短历时与长历时降雨下的积水削减规律,为城市排水系统优化设计和海绵城市建设提供了重要参考。未来研究将进一步优化研究框架,拓展其在多目标优化和气候变化适应性方面的应用能力,为城市防涝和可持续发展提供更全面的决策支持。

6 结 论

本文通过已建自排区域的“多因素耦合-多目标量化”框架,研究了绿色措施的选择、布设比例、降雨条件、河道水位等因素对积水削减效益的影响,并分析了不同绿色措施的优势和特点。主要结论如下。

(1)绿色设施的选择与效益:下凹式绿地、雨水花园和透水铺装是适用于已建自排区域的绿色设施类型。在短历时降雨(120 min)条件下,下凹式绿地的积水削减效益最为显著,其积水总量和积水面积削减率均超过15%;雨水花园和透水铺装的削减率则在10%以内。在长历时降雨(24 h)条件下,下凹式绿地的削减率约为10%,雨水花园和透水铺装的削减率则在5%以内。因此,下凹式绿地在短历时降雨下表现出显著的积水削减能力,是已建自排区域优先推荐的绿色设施类型;雨水花园和透水铺装在长历时降雨下也具有一定的改善作用,但效果相对较弱。

(2)降雨场景的影响:短历时降雨条件下的积水改善效益优于长历时降雨。在高水位条件下,短历时降雨的积水总量削减率较长历时降雨高2%~7%,积水面积削减率高0.2%~9%。这表明在瞬时极端降雨事件中,绿色设施的积水削减效益优势更明显。

(3)河道水位的顶托影响:河道水位变化对绿色设施的积水削减效益影响较小,各项指标的削减率差异均小于3%,可大幅降低已建区域改造条件。其中,下凹式绿地对水位条件的敏感度稍高,但整体影响有限。

(4)布设比例敏感性分析:在短历时及长历时降雨情景下,透水铺装以及雨水花园措施的积水改善效益在布设比例达到80%后表现出不敏感性,而下凹式绿地的积水改善效益则随着布设比例的增加而持续提升。因此,前文表5所示的研究区域海绵设施的空间布置可进行优化调整,建议透水铺装与雨水花园按原布设比例的80%进行布设,下凹式绿地则建议维持原布设比例的100%。

(5)已建自排地区排水防涝的优化建议:本次研

究中绿色基础设施对积水削减具有一定效果,但未能完全消除区域内涝风险,应对极端降雨的能力相对有限。因此,在已建自排区域的排水防涝体系优化中,应优先选用下凹式绿地等绿色设施,并合理确定布设比例,结合灰色设施的改造与完善,形成绿灰结合的综合解决方案,以更好地应对极端降雨事件,提高区域的整体排水防涝水平。

参考文献 (References):

[1] 胡恒智,董强,辛辰,等. 上海汛期极端降雨阈值时空分布与内涝影响评估[J]. 自然灾害学报, 2024, 33(3): 28-38.
HU H Z, DONG Q, XIN C, et al. Spatial-temporal distribution of extreme rainfall thresholds and assessment of urban waterlogging impact during flood seasons in Shanghai [J]. Journal of Natural Disasters, 2024, 33(3): 28-38.

[2] 朋四海,徐连军,胡昊. 自排雨水排水系统强排改造技术研究[J]. 中国市政工程, 2021(2): 42-45.
PENG S H, XU L J, HU H. Research on forced drainage reform technology of self-draining rainwater drainage system [J]. China Municipal Engineering, 2021(2): 42-45.

[3] 沙治银,徐双全,龚成刚,等. 上海市应对 2413 号台风“贝碧嘉”和 2414 号台风“普拉桑”措施及建议[J]. 中国防汛抗旱, 2025, 35(3): 86-88.
SHA Z Y, XU S Q, GONG C G, et al. Measures and suggestions for Shanghai's response to typhoon “bebinca” and “pulasan” [J]. China Flood & Drought Management, 2025, 35(3): 86-88.

[4] 冯娴慧,李明翰. 美国雨水管理理念与实践的发展历程研究与思考[J]. 中国园林, 2018, 34(9): 89-93.
FENG X H, LI M H. Study on the development of American stormwater management theory and practice[J]. Chinese Landscape Architecture, 2018, 34(9): 89-93.

[5] 李军,刘学峰,王德淇,等. 基于 InfoWorks ICM 模型的城市小区 LID 组合方案成本效益研究[J]. 水资源与水工程学报, 2024, 35(4): 66-75.
LI J, LIU X F, WANG D Q, et al. Cost-effectiveness of LID combination schemes for city area based on InfoWorks ICM model [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2024, 35(4): 66-75.

[6] 翁时超. 基于 SWMM 模型的海绵城市措施效果模拟分析: 以坡地小区为例[J]. 净水技术, 2025, 44(2): 166-173.
WENG S C. Simulation analysis of effectiveness of sponge city measures based on SWMM model: Case of a sloping landform community[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(2): 166-173.

[7] LÄHDE E, DAHLBERG N, PIIRAINEN P, et al. Ensuring ecosystem service provision of urban water nature-based solutions in

infill areas: Comparing green factor for districts and SWMM modeling in scenario assessment[J]. Environmental Processes, 2023, 10(4): 61.

[8] KUOK K K, CHIU P C, RAHMAN M R, et al. Evaluation of total infiltration and storage capacities for different soil types in Sarawak using SWMM[J]. Discover Water, 2023, 3(1): 18.

[9] DIETZ M E, CLAUSEN J C. A field evaluation of rain garden flow and pollutant treatment[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2005, 167(1): 123-138.

[10] KAZEMI F, HILL K. Effect of permeable pavement basecourse aggregates on stormwater quality for irrigation reuse[J]. Ecological Engineering, 2015, 77: 189-195.

[11] WANG Z L, LI S S, WU X Q, et al. Impact of spatial discretization resolution on the hydrological performance of layout optimization of LID practices[J]. Journal of Hydrology, 2022, 612: 128113.

[12] GULSHAD K, SZYDŁOWSKI M, YASEEN A, et al. A comparative analysis of methods and tools for low impact development (LID) site selection[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 354: 120212.

[13] DA SILVA DINIZ G J, SCUDELARI A C, DE MEDEIROS J D F. Performance of low impact development techniques in flood hazard mitigation in a closed urbanised catchment for extreme precipitation events[J]. Urban Water Journal, 2024, 21(8): 987-1002.

[14] SANIEI K, YAZDI J, MAJDZADEHTABATABEI M R. Optimal size, type and location of low impact developments (LIDs) for urban stormwater control[J]. Urban Water Journal, 2021, 18(8): 585-597.

[15] 张克寒,梅超,刘家宏,等. 蓝绿灰基础设施协同的城市内涝调控及关键技术解析[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(6): 26-37.
ZHANG K H, MEI C, LIU J H, et al. Urban waterlogging control and key technology analysis based on the synergy of blue-green-grey infrastructure[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(6): 26-37.

[16] 韩松磊,胡启玲,张楠,等. 绿色海绵设施和灰色调蓄设施对排水系统提标的作用[J]. 中国给水排水, 2024, 40(1): 126-130.
HAN S L, HU Q L, ZHANG N, et al. Role of green sponge facilities and gray storage facilities in upgrading rainwater drainage system[J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(1): 126-130.

[17] QI M, LEHMANN A, HUANG H B, et al. A SWMM-based evaluation of the impacts of LID and detention basin retrofits on urban flooding[J]. Urban Water Journal, 2025, 22(1): 51-65.

[18] CHENG X Y, WANG H, CHEN B, 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.

- [19] LU P J, SUN Y M, STEFFEN N. Scenario-based performance assessment of green-grey-blue infrastructure for flood-resilient spatial solution: A case study of Pazhou, Guangzhou, greater Bay area[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2023, 238: 104804.
- [20] LI J Y, ZENG J J, HUANG G R, et al. Urban flood mitigation strategies with coupled gray-green measures: A case study in Guangzhou City, China[J]. *International Journal of Disaster Risk Science*, 2024, 15(3): 467-479.
- [21] 王永衡, 李春林, 王昊, 等. 绿色基础设施的生态环境领域研究现状及热点[J]. *生态学报*, 2022, 42(6): 2510-2521.
WANG Y H, LI C L, WANG H, et al. Current research status and hotspots of green infrastructure in the field of ecological environment [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(6): 2510-2521.
- [22] 吕佳豪, 侯精明, 李东来, 等. 城市排水管网排水水位变化对城市洪涝过程的影响[J]. *给水排水*, 2023, 59(5): 140-149.
LYU J H, HOU J M, LI D L, et al. Impacts of variation of drainage pipe network outlet water level on urban flood inundation[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2023, 59(5): 140-149.
- [23] 朱悦茹. 顶托作用下雨水管道与河道的水动力相互作用机制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2023.
ZHU Y R. Research on Mechanism of Hydrodynamic Interaction Between Stormwater Pipes and River Under the Effect of Backwater [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2023.
- [24] DONG B L, XIA J Q, LI Q J, et al. Fine-scale damage assessment of urban flooding based on the 1D/2D coupled hydrodynamic model[J]. *River*, 2023, 2(4): 403-420.
- [25] 上海市住房和城乡建设管理委员会. 排水系统数学模型构建及应用标准: DG/TJ 08—2430—2023 [S]. 上海: 同济大学出版社, 2023.
Shanghai Municipal Commission of Housing and Urban-Rural Development and Construction. Standard for Construction and Application of Mathematical Models of Drainage Systems: DG/TJ 08—2430—2023 [S]. Shanghai: Tongji University Press, 2023.
- [26] 蒋双林, 王超, 陈阳, 等. 基于InfoWorks ICM与LSTM的城市河道水位预报方法研究[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2024, 55(12): 1-16.
JIANG S L, WANG C, CHEN Y, et al. Research of urban river level forecast method based on InfoWorks ICM and LSTM [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2024, 55(12): 1-16.
- [27] 周倩倩, 苏炯恒, 梅胜, 等. 1D/1D及1D/2D耦合水动力模型构建方法研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2019, 30(5): 21-25.
ZHOU Q Q, SU J H, MEI S, et al. Research on coupled 1D/1D and 1D/2D hydrodynamic model construction method [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2019, 30(5): 21-25.
- [28] 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.
- LIAO R T, XU Z X, YE C L, 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.
- [29] 上海市质量技术监督局. 暴雨强度公式与设计雨型标准: DB31/T 1043—2017[S]. 上海: 上海科学技术出版社, 2017.
Standard of Rainstorm Intensity Formula and Design Rainstorm Distribution: DB31/T 1043—2017 [S]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2017.
- [30] 上海市市场监督管理局. 治涝标准: DB31/T 1121—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
Standard for Waterlogging Control: DB31/T 1121—2018 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.
- [31] 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.
- [32] 上海市住房和城乡建设管理委员会. 海绵城市建设技术标准: DG/TJ 08—2298—2019 [S]. 上海: 同济大学出版社, 2019.
Shanghai Municipal Commission of Housing and Urban-Rural Development and Construction. Technical Standard for Sponge City Construction: DG/TJ 08- 2298—2019 [S]. Shanghai: Tongji University Press, 2019.
- [33] 吕仁玮. 《城市居住区规划设计标准》居住街坊层级控制体系研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2022.
LYU R W. Research on the Control System of Residential Meighborhood in “Standard for Urban Residential Areas Planning and Design” [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2022.
- [34] 上海市人大常委会. 上海市绿化条例[Z]. 上海: 上海市人大常委会, 2018.
Standing Committee of Shanghai Municipal People's Congress. Regulations on Urban Greening of Shanghai Municipality [Z]. Shanghai: Standing Committee of Shanghai Municipal People's Congress, 2018.
- [35] 徐宗学, 廖如婷, 舒心怡. 城市洪涝治理与韧性城市建设: 变革、创新与启示[J]. *中国水利*, 2024(5): 17-23.
XU Z X, LIAO R T, SHU X Y. Urban flood control and resilient city construction: Transformation, innovation, and reflections[J]. *China Water Resources*, 2024(5): 17-23.
- [36] 胡伟贤, 何文华, 黄国如, 等. 城市雨洪模拟技术研究进展[J]. *水科学进展*, 2010, 21(1): 137-144.
HU W X, HE W H, HUANG G R, et al. Review of urban storm

water simulation techniques[J]. *Advances in Water Science*, 2010, 21(1): 137-144.

[37] LUO P P, YAN P Y, WANG X H, et al. Historical and comparative overview of sponge campus construction and future challenges[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 907: 167477.

[38] FENG W W, WANG C, LEI X H, et al. A simplified modeling approach for optimization of urban river systems[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 623: 129689.

[39] 臧文斌, 赵雪, 李敏, 等. 城市洪涝模拟技术研究进展及发展趋势[J]. *中国防汛抗旱*, 2020, 30(11): 1-13.

ZANG W B, ZHAO X, LI M, et al. Research progress and development trend of urban flood simulation technology[J]. *China Flood & Drought Management*, 2020, 30(11): 1-13.

[40] 吴蔚, 田展, 胡恒智, 等. 上海城市适应气候变化关键技术研究进展[J]. *气象科技进展*, 2017, 7(6): 126-133.

WU W, TIAN Z, HU H Z, et al. Progress of key technologies for climate change adaptation in Shanghai urban[J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2017, 7(6): 126-133.

[41] HUANG M M, JIN S G. A methodology for simple 2-D inundation analysis in urban area using SWMM and GIS[J]. *Natural Hazards*, 2019, 97(1): 15-43.

(责任编辑 王 璐)