

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.06.006

城市高密度区域排水系统优化方案模拟评价

王心舒¹, 江思珉¹, 郑茂辉^{2,3}, 张虎¹

(1. 同济大学水利工程系, 上海 200092; 2. 同济大学上海防灾救灾研究所, 上海 200092;
3. 城市安全风险监测预警应急管理部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 以上海市核心建成区虹口北外滩为研究区域, 构建融合管网拓扑优化与地表微地形修正的 1D-2D 耦合模型, 精细化模拟城市高密度区域的暴雨内涝过程, 并基于 2020—2024 年多场实测暴雨事件对模型的可靠性和适用性进行动态验证, 同时基于该模型对北外滩区域的 2 套排水系统优化方案(方案 1: 新增雨水干管+滨江泵站扩容; 方案 2: 干管改造+既有泵站效能提升)进行评估。结果表明: 不同降雨条件下, 构建的 1D-2D 耦合模型能够准确模拟城市高密度区域的暴雨内涝过程; 在 10 年一遇设计暴雨情景下, 方案 1 可使溢流节点减少 52.5%, 淹没面积缩减 44.6%, 较方案 2(溢流节点减少 47.3%, 淹没面积减少 42.2%)展现出更优的系统韧性。

关键词: 城市暴雨内涝; 城市高密度区域; 排水系统优化; 1D-2D 耦合模型; 上海

中图分类号: P333.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2025)06-0049-08

Simulation evaluation of drainage system optimization schemes in urban high-density areas

WANG Xinsu¹, JIANG Simin¹, ZHENG Maohui^{2,3}, ZHANG Hu¹

(1. Department of Hydraulic Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Shanghai Institute of Disaster Prevention and Relief, Tongji University, Shanghai 200092, China;

3. Key Laboratory of Urban Safety Risk Monitoring and Early Warning, Ministry of Emergency Management of the People's Republic of China, Shanghai 200092, China)

Abstract: By taking the North Bund area in Shanghai's Hongkou District, the core built-up area, as the study region, a 1D-2D coupled model integrating pipe network topology optimization and surface micro-topography refinement was developed to precisely simulate rainstorm waterlogging processes in urban high-density areas. The model's reliability and applicability were dynamically validated using multiple recorded storm events from 2020 to 2024. Based on this model, two drainage system optimization schemes for the North Bund area were evaluated (Scheme 1: adding new main stormwater pipelines + upgrading the riverside pumping station; Scheme 2: retrofitting main pipelines + enhancing the efficiency of existing pumping stations). Results indicate that the constructed 1D-2D coupled model accurately simulates rainstorm waterlogging processes in urban high-density areas under various rainfall conditions. Under the design rainstorm scenario with a 10-year return period, Scheme 1 achieves a 52.5% reduction in overflow nodes and a 44.6% decrease in inundated area, demonstrating superior system resilience compared to Scheme 2 (47.3% overflow nodes reduction and 42.2% inundation area reduction)

Key words: urban rainstorm waterlogging; urban high-density area; drainage system optimization; 1D-2D coupled model; Shanghai

随着全球气候变化和城市化进程的加速, 极端降水事件频发, 城市内涝问题日益严重^[1-2]。特别是在城市高密度区域, 人口与基础设施高度集聚, 下垫面硬化程度高, 天然水循环被严重割裂, 导致地表径流系数剧增、排水系统超载风险陡升。如何通过精细化模拟与系统性优化破解城市高密度区域内涝治理难题, 已成为城市水文学领域的前沿课题。

城市排水系统的优化设计通常涉及多个目标, 如减少内涝风险、降低建设与运营成本、提高水质等。SWMM、MIKE URBAN 等模型被广泛应用于城市排水系统的模拟与优化^[3-5], 如刘军等^[4]基于 SWMM 和

基金项目: 上海市科技创新行动计划项目(21DZ1201205)

作者简介: 王心舒(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事城市暴雨内涝模拟研究。E-mail: 2232323@tongji.edu.cn

通信作者: 郑茂辉(1976—), 男, 副研究员, 博士, 主要从事城市水文学与洪涝灾害防控研究。E-mail: zmh@tongji.edu.cn

引用本文: 王心舒, 江思珉, 郑茂辉, 等. 城市高密度区域排水系统优化方案模拟评价[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(6): 49-56.

WANG Xinsu, JIANG Simin, ZHENG Maohui, et al. Simulation evaluation of drainage system optimization schemes in urban high-density areas[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(6): 49-56.

NSGA-Ⅲ算法,对城市排水系统进行了多目标优化研究,认为优化后的系统在不同重现期降雨条件下均能显著降低内涝风险。然而,单独使用排水管网模型难以全面反映地下排水系统与地表漫流的耦合作用,可能导致模拟结果偏差较大。近年来,高分辨率的水动力模型被开发用于更精准地模拟城市内涝过程^[6-12],成为城市排水系统优化研究的重要方向。

在排水系统优化策略方面,传统工程措施(管网扩容、泵站升级)与绿色基础设施(low-impact development, LID)的结合被认为是提升排水系统韧性的有效途径。徐宗学等^[13-15]的研究表明,通过优化绿色和灰色基础设施的布局和规模,可以显著缓解城市内涝。不过,城市高密度区域受空间限制, LID 措施实施率较低,仍需以灰色基础设施为主^[16]。

上海市作为长江三角洲超大城市,其内涝治理具有典型示范意义。其中,外环内中心城区城镇化率达 100%,历史排水标准较低,河湖水面率不足 7%,雨水调蓄空间不足,在极端降雨事件中频发严重内涝^[17]。2023 年“7·21”暴雨期间,部分水文站小时雨强达 130 mm,造成 114 个小区、37 处下立交及 102 条道路出现积水,暴露了排水系统在气候变化适应性方面的固有缺陷。现有研究虽对上海市内涝机理及影响进行了多角度解析^[18-22],但针对高密度城区的排水系统优化仍缺乏可量化评估的技术方案。

本文选取位于上海市中心城区的北外滩排水片区为研究对象,通过构建融合管网拓扑优化与地表微地形修正的 1D-2D 耦合模型,实现城市高密度区域“地-管”水动力过程精细化模拟,量化评估管网扩容、泵站升级等灰色基础设施在城市高密度区域的协同效应,并通过设计暴雨与历史暴雨的多情景验证,揭示优化方案在气候变化背景下的鲁棒性,以期为排水防涝规划方案的落地实施提供技术支撑,也为其他城市高密度区域内涝治理提供理论支撑和实践参考。

1 研究区概况

研究区位于上海市虹口区南部,东起大连路,西至吴淞路,南交黄浦江,北邻周家嘴路、海宁路沿线,总面积约 3.27 km²。区内水面率仅 2.33%,主要水体虹口港由北向南贯穿研究区(图 1),入江口设防潮水闸,平时关闸水位为 3.20 m,雨天为 2.80 m。气候类型为亚热带季风气候,年均降水量约 1 144 mm。区内地势低平,地面标高为 2.7~3.5 m,地下水位较高,距地面约 0.5~1.5 m。研究区建筑密集,硬化地面占比高,当前排水管网设计标准较低,为 1 年一遇,区内雨水需通过排水泵站提升后,排入河道,最终汇入黄浦江。

作为外滩的延伸,北外滩地区与陆家嘴金融贸易区隔江相望,与外滩、陆家嘴共同构成黄金三角,是黄浦江两岸综合开发重点地区之一。为适应新时期北外滩地区发展目标,优化提升北外滩排水系统能力势在必行。根据《北外滩区域排水系统规划(2020—2035 年)》,该片区雨水设计标准将提升为 5 年一遇,主要依靠管网扩容和泵站排水能力提升来优化片区防洪除涝的能力。

本文主要对《北外滩区域排水系统规划(2020—2035 年)》中提供的 2 套候选优化方案(图 2)进行模拟和比较。方案 1 和方案 2 的共同点:调整东长治路原合流干管为 DN1 650(代表管径为 1 650 mm)的雨水干管,沿公平路新建 DN2 200~DN3 000 的合流干管,唐山路规划 DN1 000~DN2 000 的合流干管,昆明路规划 DN1 000~DN1 800 的合流干管。不同点:方案 1 沿高阳路新建 DN1 000~DN3 000 雨水干管,在滨江附近新建雨水泵站,规划雨水泵站流量为 15.7 m³/s,汉阳泵站维持原规模 18.5 m³/s;方案 2 规划东余杭路排水干管管径为 DN1 800,公平路(东余杭路—唐山路)合流干管管径扩大为 DN2 200,规划大名泵站 18 m³/s,汉阳泵站维持原规模 18.5 m³/s。2 套优化方案均在现状排水系统的基础上进行改进,主要是通过管网拓扑优化、排水管道扩容和提升泵站效率实现优化,目标是减少溢流节点和地面积水,提升排水韧性。

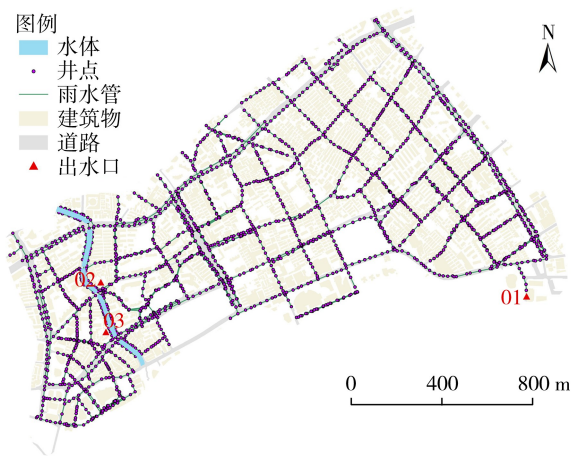


图 1 研究区排水系统概况

Fig. 1 Overview of drainage system in study area

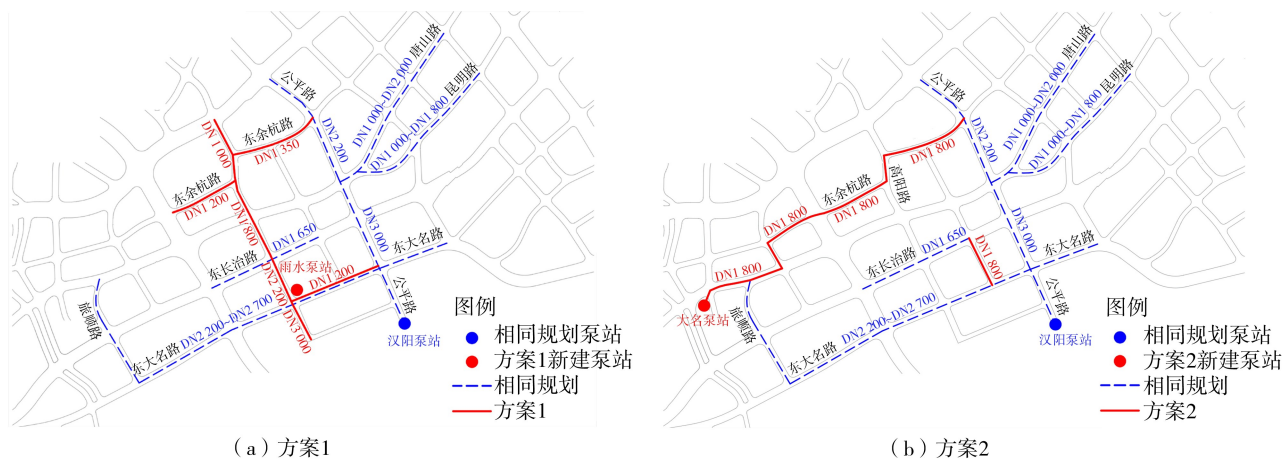


图 2 研究区排水系统优化方案示意图
Fig. 2 Schematic illustrations of drainage system optimization schemes within study area

2 研究方法

通过构建一维排水管渠与二维地表漫流耦合的暴雨内涝数值模型,精细化模拟研究区域雨涝扩散过程。首先,基于研究区现状排水系统建立暴雨内涝模型,并利用不同场次强降雨过程进行模拟验证;然后,针对两套排水系统优化方案分别建立模型,模拟分析设计暴雨条件下排水系统性能和内涝积水状况,评价优化方案的有效性。

2.1 模型基本理论

2.1.1 一维排水管渠模拟

采用 SWMM 进行一维排水管渠模拟。降雨产流过程采用 Horton 入渗模型,描述降雨过程中土壤入渗速率随时间的变化。在计算降雨入渗量和有效降水量后,采用非线性水库法模拟各子汇区内雨水的蓄积和排放过程,从而确定径流量和流量变化。采用动态波法求解圣维南方程,模拟排水管渠内的流量和水位变化,计算管渠中的排水情况和溢流点。动态波法能够准确模拟管渠内水流的非恒定变化,适用于复杂的城市排水系统,特别是在处理管渠中的雨水汇流和排放时具有较高的精度。

2.1.2 二维地表漫流模拟

采用英国布里斯托大学开发的 LISFLOOD-FP 模型,结合浅水方程模拟地表水流的扩散和淹没情况。浅水方程包括连续性方程和动量方程:

$$\frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial Q_x}{\partial x} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial Q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q_x^2}{A} \right) + gA \frac{\partial (h + z)}{\partial x} + \frac{gn^2 Q_x^2}{R^{\frac{4}{3}} x} = 0 \tag{2}$$

式中: Q_x 为 x 方向上的流量; A 为水流横截面积; h 为水深; z 为底部高程; g 为重力加速度; n 为曼宁摩擦系数; R 为水力半径; t 为时间。

2.1.3 边界条件设置

依据研究区水文水力特征,设定上游流量边界、下游水位边界及地表漫流边界。上游流量边界基于上海市暴雨强度公式计算不同重现期降雨,并结合 SWMM 产汇流模拟确定入流条件。下游水位边界结合黄浦江潮汐变化和排水闸门运行设定,常态排水取平均低潮位 2.8 m,暴雨期间最不利工况取最高静水位 3.2 m,并采用时间序列输入模拟动态交互过程。地表漫流边界中,建筑物墙体设为不透水边界,街道交叉口设为自由边界,允许局部水流汇聚再分散,以更真实地模拟城市高密度区域的水流路径。

2.1.4 1D-2D 耦合模型

通过 1D-2D 耦合机制,实现城市高密度区域排水系统的精细化模拟,确保溢流、积水及排水过程的合理性。雨水井是管渠和地面径流交互的重要节点。雨水井一方面负责收集地表径流,汇入管渠系统;另一方

面,当降雨强度超过管网排水能力时,雨水从井口溢出地表,形成积水。雨水井点采用堰流与孔口流模型,模拟雨水管网-地表水的动态交换。一维、二维模型的时间同步是模型耦合的另一个关键:一维模型采用固定时间步长,二维模型采用可变自适应时间步长,二者的数据交换需要进行同步匹配。模型耦合机制和具体实现方法参见文献[6-7]。

2.2 模型构建及验证

2.2.1 管网概化与 DEM 修正

研究区排水管网、土地利用分布和地面高程点数据由北外滩开发建设管理办公室提供。利用 ArcGIS 对管网数据进行拓扑检查和必要的概化处理,最终得到雨水节点 1971 个、排水通道 2118 条。鉴于研究区地势平坦,地形高程点相对稀疏,充分利用雨水井的地面标高数据,使用 ArcGIS 进行克里金插值,重采样获得 2 m×2 m 分辨率的 DEM 数据。研究区建筑物密集分布,为反映建筑物和道路分布对雨水径流的影响,叠加 DEM 和建筑物、道路数据,对地面高程进行相应修正,其中建筑物高度统一设置为 20 m,修正后的 DEM 数据如图 3 所示。

2.2.2 子汇水区划分

研究区地势平坦,子汇水区的精确划分尤为重要。本文采用多级划分策略:①根据区内排水泵站的服务覆盖范围划分一级子汇水区;②考虑到不同用地类型,特别是道路对地面汇流的影响,在各一级子汇水区内区分道路和街坊地块;③利用雨水井点数据,采用泰森多边形法划分二级子汇水区,确保每个雨水井点对应一个道路网格单元和一个邻接地块网格单元。该划分策略能够较好地反映排水片区雨水汇流状况,同时充分利用泰森多边形划分方法快速、便捷的特点,在保证子汇水区划分效率的同时,还兼顾下垫面不同用地类型对模型的影响,从而实现对城市高密度区域地表径流模拟的精准优化。

2.2.3 模型参数设置

模型所需参数主要分为两类:一类属于基础参数,可通过 ArcGIS 分区计算获得,包括管网数据和子汇水区域属性等;另一类为经验参数,包括曼宁系数、地表洼蓄量以及 Horton 下渗模型相关参数等,可结合 SWMM5.1 操作手册设置初始值,并对其进行率定。此外,根据 GB 50014—2021《室外排水设计规范》所提供的不同用地类型的不透水性参数,确定研究区内各子汇水区的不透水性率。如果子汇水区有多种用地类型,则由加权平均计算得出,研究区不同用地类型不透水性率取值见表 1。

2.2.4 模型验证

为确保模型能够准确模拟研究区的暴雨内涝过程,本文从一维排水管渠流量和二维地表积水两方面对模型进行率定和验证。

一维模型率定采用 2020 年 7 月 7 日、2021 年 7 月 25 日两场不同类型降雨事件,通过出水口的实测流量数据进行率定,即通过调整曼宁系数、地表洼蓄量以及 Horton 下渗模型参数等最小化模拟流量与实测流量的误差。采用 2021 年 8 月 11 日暴雨事件进行独立验证。图 4 给出 3 场暴雨事件中出水口 3(图 1)的实测流量与模型模拟流量过程线,计算得到的纳什效率系数均大于 0.8,表明模型在不同降雨条件下均具有较高的适用性。参数率定结果见表 2。

为进一步验证二维模型可靠性,对 2024 年 9 月 20 日的强降雨过程进行了模拟。受 2024 年 14 号台风“普拉桑”影响,9 月 20 日北外滩地区 24 h 累计雨量达 159.5 mm,其中上午 6:00—10:00 累计雨量 110 mm,占全天雨量的 68.97%。区内安国路、唐山路、东长治路、东大名路等路段积水较为严重。其中,安国路、唐山路附近道路积水严重,致临近小区车库受淹,东长治路多个路段积水 30 cm 以上,致多辆轿车熄火。图 5

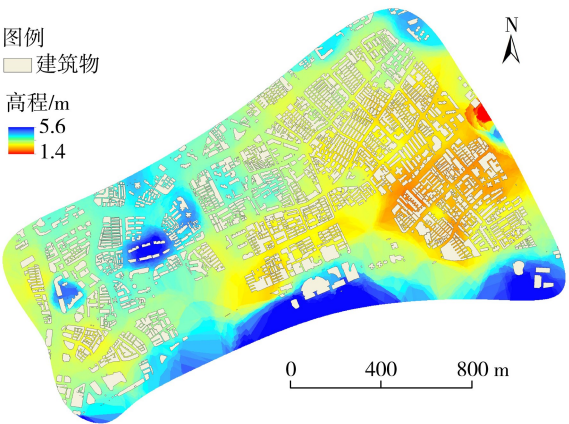


图 3 研究区修正后的 DEM 数据
Fig.3 Corrected DEM data of study area

表 1 不同用地类型的不透水性率和面积占比
Table 1 Impermeability rate and area proportion of different land use types

用地类型	不透水性率	面积占比/%
建筑物	0.95	62.0
绿地	0.20	3.2
道路	0.85	20.7
水体	0	2.7
其他	0.60	11.4

为 20240920 场次降雨条件下研究区最大积水深度分布,模拟结果与实际内涝积水匹配度较高。一维排水管道流量验证和二维地表积水验证表明所构建的 1D-2D 耦合模型能够准确模拟城市高密度区域暴雨内涝过程,可为排水系统优化方案的评估提供可靠支持。

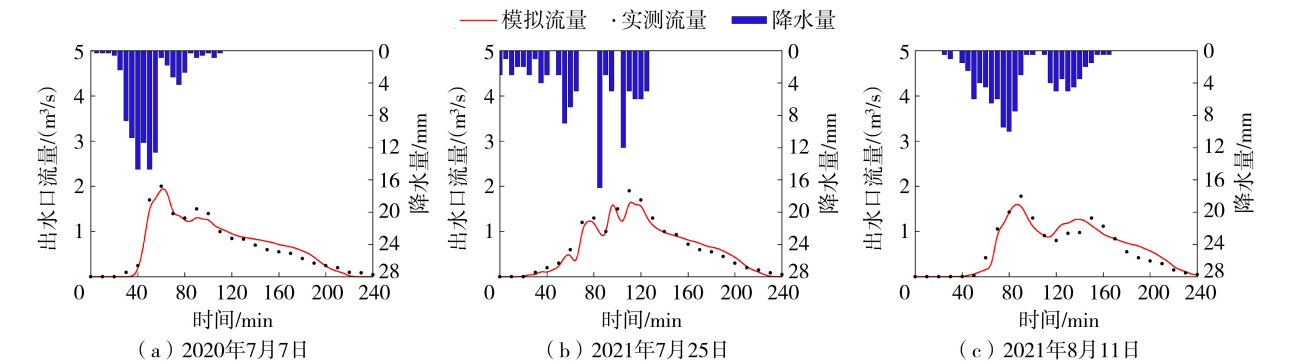


图 4 出口 3 实测流量与模拟流量过程线
Fig. 4 Process lines of measured flow and simulated flow at Exit 3

表 2 参数率定结果
Table 2 Parameter calibration results

参数设定	曼宁系数		地表洼蓄量/mm		入渗率/(mm/h)		渗透衰减 系数/h ⁻¹	排干 时间/h
	不透水区	透水区	不透水区	透水区	最大	最小		
取值范围	0.011~0.50	0.05~0.80	1~20	1~50	80~150	1~50	1~10	3~10
率定结果	0.15	0.24	5	10	103.8	15.4	8.46	7

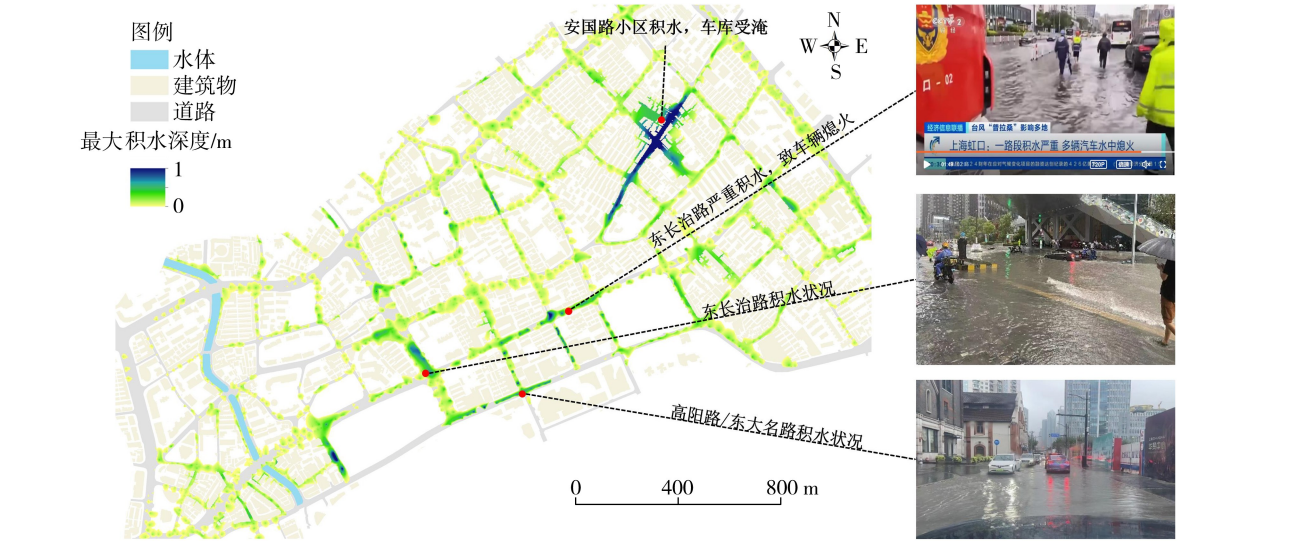


图 5 20240920 场次暴雨模拟最大积水深度分布与验证
Fig. 5 Simulation of maximum water accumulation depth distribution and verification for 20240920 rainfall event

3 排水优化方案评估

基于构建的 1D-2D 耦合模型,选取溢流节点和淹没面积作为评估指标,分别对现状排水系统以及方案 1、方案 2 进行模拟评估。利用上海市暴雨强度公式计算重现期为 5、10 a 的 2 h 暴雨过程,模拟时长为 4 h。对于 5 年一遇设计暴雨,2 套排水系统优化方案均表现良好,从模拟结果看研究区仅出现若干短时溢流点,未造成明显的地表积水。为此以下着重比较分析 10 年一遇设计暴雨条件下的模拟结果。

3.1 溢流节点分布分析

溢流节点的数量和分布反映了排水管网的承载能力。由表 3、图 6 可知,对于现状排水管网,出现溢流节点 516 个,占节点总数的 26.18%,且溢流节点的积水时间整体较长,积水时间处于 60~120 min 和 >120 min 的节点数量分别为 158 个和 145 个。其中,唐山路、大连路、东余杭路等区域存在较为严重的积水

问题。经优化后,方案 1 的溢流节点数降至 245 个,较现状减少 52.5%;方案 2 则降至 272 个,减少 47.3%。积水时间较长的节点数量均明显减少,占井点总数的 5%以下。这是因为方案 1 和方案 2 主要专注于积水严重的区域采取了一系列有针对性的设计措施:①增加排水管道和井点,通过更密集的管道网络提高管网汇水能力;②扩大管径,提高水流速度和排水效率;③新增或提升泵站设施,减少雨水在管网中停滞的时间。这些改进措施共同作用,使水体更快速地被排除,从而有效减少了积水节点和积水时长。此外,方案 1 所减少的溢流节点不仅仅局限于新规划的管段或泵站位置,而且涵盖了其他区域,这一特征相对于方案 2 优化得更加显著,从而表明方案 1 对研究区的整体防涝治理都发挥了促进作用。统计分析显示,方案 1 溢流节点削减效果较好,在积水峰值消退方面也略优于方案 2,表明新增主干管路并配合泵站扩容能够有效提升高密度城区的排水系统韧性,与 Tansar 等^[15]对高密度城区排水优化的研究结论一致。

表 3 10 年一遇设计暴雨节点溢流统计

方案	不同积水时间溢流节点占比/%				溢流节点总占比/%
	$0 < t_1 \leq 30 \text{ min}$	$30 \text{ min} < t_1 \leq 60 \text{ min}$	$60 \text{ min} < t_1 \leq 120 \text{ min}$	$t_1 > 120 \text{ min}$	
现状	5.23	5.58	8.02	7.36	26.19
方案 1	6.19	3.40	2.59	0.25	12.43
方案 2	6.70	3.70	3.15	0.25	13.80

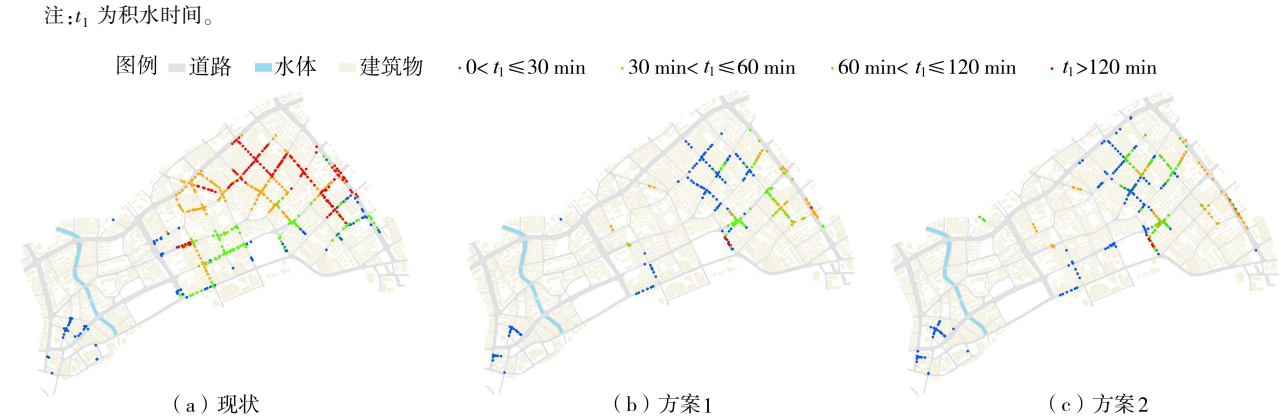


图 6 10 年一遇设计暴雨条件下溢流节点分布

Fig. 6 Distribution of overflow nodes under a design rainstorm scenario with a 10-year return period

3.2 淹没面积分析

由图 7(h_1 为积水深度)和表 4 可知,对于现状排水系统,周家嘴路、舟山路和唐山路等街道出现了不同程度的积水影响,总淹没面积约为 32.07 hm^2 。方案 1 和方案 2 均呈现出明显的改善趋势,方案 1 总淹没面积为 17.77 hm^2 ,减少了 44.6%,方案 2 总淹没面积 18.55 hm^2 ,减少了 42.2%。方案 1 的改善幅度略高,尤其在水深小于 0.3 m 的积水区域,其改善效果更为显著,减少了 14.28 hm^2 。在其他水深范围内,方案 1 同样表现出较为明显的改良趋势。因此,从淹没面积角度分析,方案 1 在减轻地区积水问题和提升城市排水系统效

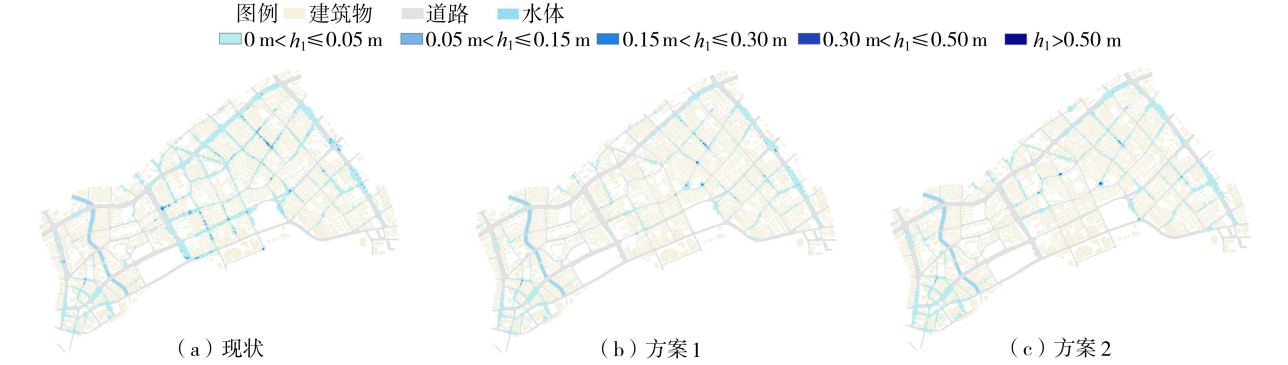


图 7 不同方案下 10 年一遇设计暴雨地表积水深度

Fig. 7 Surface water depth during design rainstorm scenario with a 10-year return period under different schemes

表 4 不同方案下 10 年一遇设计暴雨地表淹没情况统计

Table 4 Statistics of surface inundation during design rainstorm scenario with a 10-year return period under different schemes

方案	不同积水深度地表淹没面积/hm ²					总淹没 面积/hm ²
	0<h ₁ ≤0.05 m	0.05 m<h ₁ ≤0.15 m	0.15 m<h ₁ ≤0.3 m	0.3 m<h ₁ ≤0.5 m	h ₁ >0.5 m	
现状	29.87	2.01	0.15	0.03	0.01	32.07
方案 1	16.20	1.42	0.13	0.02	0.00	17.77
方案 2	16.75	1.59	0.19	0.02	0.00	18.55

率方面相对于方案 2,特别是在轻度积水区域的改善方面表现更突出。

4 结 论

- a. 构建的 1D-2D 耦合模型,纳什效率系数均超过 0.8,具有良好的拟合效果,且对 2024 年 9 月 20 日暴雨的积水模拟结果,也验证了模型在城市高密度区域暴雨内涝过程模拟中的可靠性和适用性。
- b. 在 10 年一遇暴雨情景下,方案 1 和方案 2 均有效减少了溢流节点数量,并显著降低了地面积水范围。尤其是方案 1,在新规划管网区域及其他区域都有效减少了溢流点,表现出更优的防涝效果。相较于方案 2,方案 1 在水深小于 0.3 m 的积水区域表现出更为显著的改善效果,进一步提高了排水系统的整体韧性。
- c. 综合评估溢流节点和地表淹水情况后,方案 1 表现出更为优越的改进效果。然而,优化方案的最终选择还需要考虑施工难度、经济成本等实际因素。因此,实际设计与实施过程中应结合区域条件进行详细的可行性分析,确保方案的可行性与经济性。

参考文献:

[1] 徐宗学,卢兴超,施奇妙. 城市暴雨洪涝灾害特征与风险评估研究进展[J]. 水利水电科技进展,2025,45(1):1-9. (XU Zongxue,LU Xingchao,SHI Qimiao. Research progress on urban flooding disaster characteristics and risk assessment[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2025,45(1):1-9. (in Chinese))

[2] 张建云,王银堂,贺瑞敏,等. 中国城市洪涝问题及成因分析[J]. 水科学进展,2016,27(4):485-491. (ZHANG Jianyun,WANG Yintang,HE Ruimin,et al. Discussion on the urban flood and waterlogging and causes analysis in China[J]. Advances in Water Science,2016,27(4):485-491. (in Chinese))

[3] 杨利伟,刘家华,周煜欣,等. 基于 GIS 和 SWMM 的西安市北郊片区排涝模拟与排水系统优化[J]. 给水排水,2024,50(3):134-141. (YANG Liwei,LIU Jiahua,ZHOU Yuxin,et al. Drainage simulation and drainage system optimization in the northern suburbs of Xi'an city based on GIS and SWMM[J]. Water & Wastewater Engineering,2024,50(3):134-141. (in Chinese))

[4] 刘军,高徐军,焦永宝,等. 基于 SWMM 与 NSGA-III 的城市排水系统多目标优化[J]. 中国农村水利水电,2022(9):90-94. (LIU Jun,GAO Xujun,JIAO Yongbao,et al. Multi-objective optimization of the urban drainage system based on SWMM and NSGA-III algorithm[J]. China Rural Water and Hydropower,2022(9):90-94. (in Chinese))

[5] 童旭,覃光华,王俊鸿,等. 基于 MIKE URBAN 模型研究设计暴雨雨型对城市内涝的影响[J]. 中国农村水利水电,2019(12):80-85. (TONG Xu,QIN Guanghua,WANG Junhong,et al. The effect of design storm patterns on urban waterlogging based on MIKE URBAN model[J]. China Rural Water and Hydropower,2019(12):80-85. (in Chinese))

[6] 黄国如,陈文杰,喻海军. 城市洪涝水文水动力耦合模型构建与评估[J]. 水科学进展,2021,32(3):334-344. (HUANG Guoru,CHEN Wenjie,YU Haijun. Construction and evaluation of an integrated hydrological and hydrodynamics urban flood model[J]. Advances in Water Science,2021,32(3):334-344. (in Chinese))

[7] 郑茂辉,姚帅,周念清,等. 一维管网与二维地表双向耦合的城市暴雨内涝模拟[J]. 同济大学学报(自然科学版),2024,52(2):223-231. (ZHENG Maohui,YAO Shuai,ZHOU Nianqing,et al. Simulation of urban rainstorm waterlogging with bidirectional coupling of one-dimensional sewer network and two-dimensional surface[J]. Journal of Tongji University (Natural Science),2024,52(2):223-231. (in Chinese))

[8] 向小华,陈颖悟,吴晓玲,等. 城市二维内涝模型的 GPU 并行方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(6):528-533. (XIANG Xiaohua,CHEN Yingwu,WU Xiaoling,et al. GPU parallelized algorithm of urban two-dimensional inundation model[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2020,48(6):528-533. (in Chinese))

[9] 卢兴超,徐宗学,李永坤,等. 基于 SWMM 与 LISFLOOD-FP 耦合模型的城市街区内涝模拟研究[J]. 水资源保护,2024,40(3):98-105. (LU Xingchao,XU Zongxue,LI Yongkun,et al. Research on urban block waterlogging simulation based on coupling model of SWMM and LISFLOOD-FP[J]. Water Resources Protection,2024,40(3):98-105. (in Chinese))

[10] 赖成光,廖耀星,王兆礼. 不同暴雨情景下的城市内涝响应特征分析[J]. 水资源保护,2023,39(3):101-108. (LAI Chengguang,LIAO Yaoxing,WANG Zhaoli. Analysis of urban waterlogging response characteristics under different rainstorm rainfall scenarios[J]. Water Resources Protection,2023,39(3):101-108. (in Chinese))

[11] 侯俊,陈诚,郑玉磊,等. 基于 MIKE FLOOD 模型的平原水网地区内涝治理效果模拟研究[J]. 水利水电科技进展,2024,44(6):41-47. (HOU Jun, CHEN Cheng,ZHENG Yulei,et al. Simulation study on effectiveness of waterlogging control in plain water network areas based on MIKE FLOOD model[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2024,44(6):41-47. (in Chinese))

[12] YANG Weichao,ZHENG Chuanxing,JIANG Xuelian,et al. Study on urban flood simulation based on a novel model of SWTM coupling D8 flow direction and backflow effect[J]. Journal of Hydrology,2023,621:129608.

[13] 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. (XU Zongxue,LI Peng,CHENG Tao. LID optimization layout facilities in sponge city:a case study of Huangtaiqiao catchment in Jinan city[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2022,20(3):552-562. (in Chinese))

[14] YIN Dingkun,EVANS B,WANG Qi,et al. Integrated 1D and 2D model for better assessing runoff quantity control of low impact development facilities on community scale[J]. Science of the Total Environment,2020,720:137630.

[15] TANSAR H, DUAN Huanfeng, MARK O. A multi-objective decision-making framework for implementing green-grey infrastructures to enhance urban drainage system resilience[J]. Journal of Hydrology,2023,620:129381.

[16] AHIABLAME L M, ENGEL B A, CHAUBEY I. Effectiveness of low impact development practices: literature review and suggestions for future research[J]. Water Air Soil Pollution,2012,223(7):4253-4273.

[17] 李雪峰,谭琼,钱真. 上海市城市内涝风险分析与评估[J]. 中国防汛抗旱,2024,34(6):26-32. (LI Xuefeng,TAN Qiong,QIAN Zhen. Risk Analysis and assessment of urban flooding in Shanghai[J]. China Flood & Drought Management,2024,34(6):26-32. (in Chinese))

[18] ZOU Lanjun,WANG Zhi,LU Qinjing,et al. The rain-induced urban waterlogging risk and its evaluation:a case study in the central city of Shanghai[J]. Water,2022,14(22):3780.

[19] LIU Junbing,ZHENG Maohui,GAO Jinwei,et al. A generalization of the drainage capacity in data-scarce urban areas:an improved equivalent infiltration method[J]. Water,2024,16(4):589.

[20] ZHENG Maohui,LIU Junbing,GAO Jinwei,et al. Navigating urban challenges:quantifying emergency service accessibility and robustness amid meteorological disasters[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction,2024,100:104655.

[21] 贺芳芳,胡恒智,董广涛,等. 上海中心城区复合洪涝淹没模拟及未来重现预估[J]. 灾害学,2020,35(4):93-98. (HE Fangfang,HU Hengzhi,DONG Guangtao,et al. Compound flooding simulation and prediction of future recurrence in Shanghai downtown area[J]. Journal of Catastrophology,2020,35(4):93-98. (in Chinese))

[22] 梅超,陈宇枫,刘家宏,等. 基于情景模拟的城市内涝对道路交通的影响评估[J]. 水资源保护,2022,38(6):31-38. (MEI Chao,CHEN Yufeng,LIU Jiahong,et al. Impact assessment of urban waterlogging on road traffic based on scenario simulation [J]. Water Resources Protection,2022,38(6):31-38. (in Chinese))

(收稿日期:2024-07-29 编辑:刘晓艳)

+++++

(上接第 48 页)

[33] 梅超,刘家宏,王浩,等. 以事件为中心的城市洪涝调度模式研究[J]. 水资源保护,2022,38(5):46-50. (MEI Chao,LIU Jiahong,WANG Hao,et al. Study on an event-centered urban flood regulation mode[J]. Water Resources Protection,2022,38(5):46-50. (in Chinese))

[34] 张金良,罗秋实,王冰洁,等. 城市极端暴雨洪涝灾害成因及对策研究进展[J]. 水资源保护,2024,40(1):6-15. (ZHANG Jinliang,LUO Qiushi,WANG Bingjie,et al. Research progress on causes and countermeasures for extreme rainstorm-induced urban flood disasters[J]. Water Resources Protection,2024,40(1):6-15. (in Chinese))

[35] CHEN Juan,ZHANG Lu,LI Guozhi,et al. Perspectives on risk analysis and control for real-time operation of flood control systems [J]. Water Science and Engineering,2024,17(4):319-322.

[36] 李曦亭,王磊之,商守卫,等. 流域、区域和城镇防洪工程工况与调度变化的洪涝互馈效应研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(2):12-18. (LI Xiting,WANG Leizhi,SHANG Shouwei,et al. Research on mute feed effect of flood and waterlogging under change of working condition and dispatching of flood control project in basin,sub-basin and urban[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2024,52(2):12-18. (in Chinese))

(收稿日期:2024-09-18 编辑:刘晓艳)