

# 灰绿耦合基础设施空间布局优化对城市内涝缓解效果的研究

李君豪<sup>1</sup>, 常震<sup>2,3</sup>, 王硕<sup>1</sup>, 昂加<sup>1</sup>

(1. 华北水利水电大学 生态环境学院, 河南 郑州 450046; 2. 河南省城乡规划设计研究总院股份有限公司, 河南 郑州 450044; 3. 河南省水质保障与水环境修复工程技术研究中心, 河南 郑州 450044)

**摘要:** 在城市化与气候变化背景下, 传统灰色基础设施难以应对日益严峻的城市内涝问题。现有研究缺乏针对不同内涝风险区的灰绿设施协同布局优化与耦合效应量化分析。以郑州市七里河片区为例, 构建SWMM-GRMS(storm water management model-gravitational RMS acceleration)耦合模型, 模拟50年一遇暴雨下不同灰绿设施布局的水文响应, 并基于上、中、下游内涝点提出差异化治理策略。结果表明: 灰色设施具有较强峰控能力, 其中H2点削减率80%, 但响应陡峭; 绿色设施可延峰平程, 削减率为15%~25%, 但容量有限; 灰绿耦合则显著提升峰值削减率, H1、H2、H3分别为83%、85%、79%, 过程线更平缓稳定。研究验证了基于空间分布差异的灰绿耦合布局对提升城市内涝综合防治能力的有效性。

**关键词:** 城市内涝; 灰绿耦合基础设施; 低影响开发(LID, low-impact development); 空间布局优化; 水文水动力模型  
**中图分类号:** TU998.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-7716(2026)05-0038-08

## Study on Effect of Optimizing Spatial Layout of Gray-Green Coupled Infrastructure on Alleviating Urban Waterlogging

LI Junhao<sup>1</sup>, CHANG Zhen<sup>2,3</sup>, WANG Shuo<sup>1</sup>, ANG Jia<sup>1</sup>

(1. College of Ecological Environment, North China University of Water Conservancy and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 2. Henan Urban and Rural Planning and Design Institute Co., Ltd., Zhengzhou 450044, China; 3. Henan Provincial Engineering Technology Research Center for Water Quality Assurance and Water Environment Restoration, Zhengzhou 450044, China)

**Abstract:** In the context of urbanization and climate change, the traditional grey infrastructure is hard to cope with increasingly severe urban waterlogging problem. Existing research lacks the quantitative analysis on the collaborative layout optimization and coupling effects of gray-green facilities in different waterlogging risk areas. Taking Qilihe Area in Zhengzhou as an example, a coupled model of SWMM-GRMS (storm water management model - gravitational RMS acceleration) is established to simulate the hydrological response of various grey-green infrastructure layouts under the once-in-50-years torrential rain. And the differentiated management strategies are proposed on the basis of the waterlogging points in the upstream, midstream and downstream areas. The results demonstrate that the grey facilities have the stronger peak flow control capacity, in which the reduction rate of H2 point is 80%, but the response is steep. The green facilities can delay the peak and flatten the level. The reduction rates are 15%~25%, but its capacity is limited. In contrast, the grey-green coupled approach significantly enhances the peak reduction rates to 83%, 85% and 79% at H1, H2 and H3, respectively, and the level line is more gradual and stable, which verifies that the effectiveness of the gray-green coupling layout based on spatial distribution differences in enhancing the comprehensive prevention and control capacity of urban waterlogging.

**Keywords:** urban waterlogging; grey-green coupled infrastructure; low-impact development (LID); spatial layout optimization; hydrological and hydrodynamic model

收稿日期: 2025-12-02

基金项目: 河南省住房和城乡建设科学技术计划项目(HNJS-2022-K33); 河南规划总院科技研发项目(HNGH-KY-2022-0018)

作者简介: 李君豪(2000—), 男, 硕士, 从事城市内涝风险诊断与防控研究工作。

## 0 引言

随着我国城市化快速推进, 在促进社会经济发展的同时, 也显著改变了自然下垫面结构, 导致雨水下渗能力下降、地表汇流时间缩短, 城市内涝灾害频

发,严重威胁人民生命财产安全和城市可持续发展<sup>[1-4]</sup>。因此,内涝治理已成为城市规划和雨洪管理的重要课题。

传统灰色基础设施,如管网扩容、调蓄池等,虽在雨水快速排放与峰值控制方面效果显著,但也存在响应过程陡峭、系统韧性不足、成本高昂等问题<sup>[3-4]</sup>。绿色基础设施(GI, green infrastructure)及低影响开发(LID, low-impact development)理念通过增强入渗、滞蓄与蒸发等自然水文过程,提升雨洪管理的生态性与适应性<sup>[5]</sup>,但在极端降雨下仍面临容量有限、调控能力不足的局限<sup>[3-6]</sup>。

灰绿耦合基础设施作为综合雨洪管理的新范式,旨在通过灰色与绿色设施的协同布局,实现水文性能、生态效益与工程可行性的统一<sup>[7]</sup>。现有研究多聚焦于设施类型比选与单一设施效能评估,而针对不同内涝风险区的空间分异特征进行协同布局优化,并量化其耦合效应的研究仍较缺乏<sup>[4]</sup>。近年来,多目标优化、成本效益分析及冗余策略整合等新思路,为量化灰绿设施协同效应提供了方法支持<sup>[8-10]</sup>。尤其在高密度建成区,如何结合地域特征与内涝机制提出差异化、可操作的灰绿设施配置方案,是当前研究的难点与重点<sup>[11-12]</sup>。

因此,本研究以郑州市七里河片区为例,集成地理信息与遥感数据,构建SWMM-GRMS耦合水文水动力模型,模拟50年一遇暴雨下不同灰绿设施布局的水文响应。研究依据内涝点空间分布(上、中、下游)提出差异化治理策略,系统评估灰色、绿色及灰绿耦合设施对积水过程的影响,以揭示协同作用机制,并为高密度城市内涝防治与海绵城市建设提供理论依据与优化路径<sup>[13-14]</sup>。

## 1 研究区域概况

本研究选取郑州市七里河片区为研究对象,区域范围如图1所示,位于金水区东部,属郑东新区核心区域,总面积约15.3 km<sup>2</sup>。七里河为贾鲁河右岸一级支流,是郑州市重要的行洪通道,部分河段防洪标准已达50年一遇。该区域兼具高强度城市开发、生态廊道与排涝通道等多重功能,是城市水系统治理与内涝防控的典型区域,其防洪排涝能力对保障城市生态安全与可持续发展具有重要意义。

## 2 数据与研究方法

### 2.1 设计暴雨

研究采用郑州市暴雨强度公式(见式(1)),设计

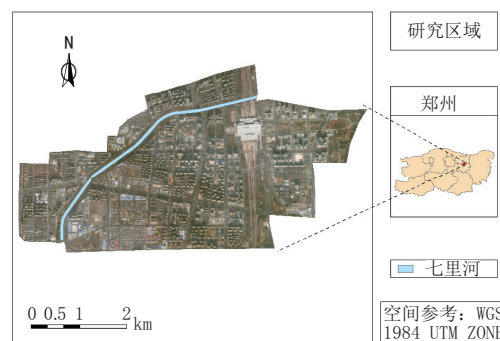


图1 研究区域范围图

暴雨雨型采用芝加哥雨型,雨峰系数取值0.4。

$$q = \frac{2001.829(1 + 3.264 \lg P)}{(t + 24.8)^{0.856}} \quad (1)$$

式中: $q$ 为设计暴雨强度, $L/(s \cdot \text{km}^2)$ ;  $P$ 为重现期,年; $t$ 为降雨历史,min。

依据《室外排水设计标准》(GB50014—2021),特大城市中心城区的重要区域(对应核心城区)内涝防治设计重现期应不低于50年一遇至100年一遇。基于此规范要求,本研究以郑州市核心城区为研究对象,其设计暴雨强度取值不应低于50年一遇标准。据此,本研究采用郑州市暴雨强度公式,结合芝加哥雨型合成方法,推求了重现期为50年一遇、降雨历时为2 h的完整设计暴雨过程线。该设计暴雨过程线将作为后续城市内涝模拟模型的关键输入条件。

### 2.2 研究区用地类型

在子汇水区尺度的水文与低影响开发(LID)研究中,用地类型的精准划分是重要基础。不同用地类型因其地表特性与水文功能差异,直接影响LID措施的选择与空间配置<sup>[15-16]</sup>。同时,用地类型也是决定不透水地表比例的关键因子,该参数直接控制地表径流量、峰值流量及污染物负荷,对区域水循环过程具有显著影响<sup>[17-18]</sup>。因此,科学划分用地类型是优化LID布局、评估水文响应及推进海绵城市建设的必要前提<sup>[15,19]</sup>。

本研究采用中国地质大学(武汉)研究团队于2025年发表于《Scientific Data》的郑州市用地类型数据,该数据将城市用地划分为公园与绿地、户外运动空间、交通空间、水体空间及背景用地五类。结合研究需求,进一步将其归并为公园与绿地、户外运动用地、交通道路用地、水体及建筑用地五种类型(见图2)。

### 2.3 模型构建

#### 2.3.1 模型介绍

SWMM(storm water management model)是由美国

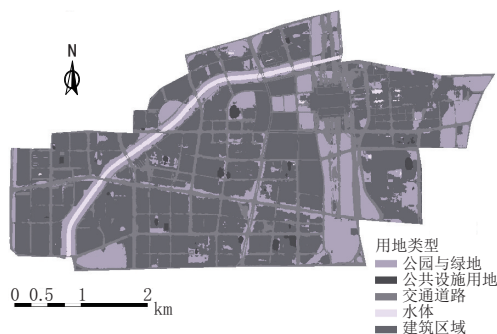


图2 用地类型图

环保署开发的一款开源、动态水文水动力模型,专门用于模拟城市或小流域的雨水系统<sup>[20]</sup>。它能精确模拟单场或长期降雨事件中,雨水在地表的产汇流(包括下渗、蒸发)、在排水管网(管道、渠道等)和蓄水设施中的复杂流动(包括满流、回水等水力现象),以及伴随的污染物迁移转化过程<sup>[21]</sup>,并内置强大的低影响开发(LID)措施模拟功能,广泛应用于城市内涝风险评估、排水系统设计优化、合流制溢流控制、水质管理及海绵城市建设等领域<sup>[22-24]</sup>。

GRMS模型云是由浙江贵仁信息科技股份有限公司基于EPA-SWMM 5.0架构二次开发的水文水动力综合建模平台,具备模型计算核心、专业建模工具与云平台管理三位一体的功能体系。该平台在继承SWMM一维管网水力模型的基础上,深度融合了高精度二维地表水动力模型,实现了管网与地表的水力耦合模拟。耦合机制体现为:一维模型计算管网内水流,二维模型模拟地表淹没过程,两者通过节点连接进行双向动态水量交换,真实反映城市内涝中“管网-地表”交互影响。

GRMS模型的二维淹没模拟采用结构化网格系统,网格分辨率可根据地形复杂度与模拟精度需求灵活设定,本研究采用5 m×5 m网格。计算稳定性通过自适应时间步长与数值格式优化保障,确保在强降雨与复杂地形条件下模拟结果的收敛性与可靠性。

### 2.3.2 子汇水区划分

本研究采用分级划分子汇水区:首先基于地形与河道耦合完成宏观流域划分,继而应用泰森多边形法生成子汇水区,并辅以人工局部修正。水文分析基于ArcGIS平台,所需数字高程模型(DEM)由原始数字表面模型(DSM)经预处理获得。预处理包括两个关键步骤:(1)对建筑区栅格进行平整化处理,消除建筑物引起的高程异常,生成初步裸地DEM;(2)利用实测地面控制点(GCPs),在Global Mapper中

进行空间配准与高程校正,将相对高程转换至绝对基准,最终生成符合水文分析精度要求的DEM。

利用处理后的DEM数据进行水文分析,初步划分研究区域流域;结合管网与道路数据人工修正后,最终确定研究区汇水分区,如图3所示。研究共划分出子汇水区145个,子汇水区平均面积为0.106 km<sup>2</sup>,最大子汇水区面积为0.929 km<sup>2</sup>最小子汇水区面积为0.019 8 km<sup>2</sup>。



图3 七里河流域子汇水区概化图

### 2.3.3 模型率定与验证

水文水动力模型中的水文水力模块为核心计算单元,其参数可划分为确定性参数与不确定性参数两类。确定性参数依据实测资料直接确定,包括排水管网的几何与空间属性(如管段长度、坡度与管底高程)及子汇水区物理特征(如面积、不透水率、平均坡度与特征宽度)。不确定性参数则需通过率定优化,主要涉及地表水文过程与水流阻力相关系数,例如透水区与不透水区的地表曼宁糙率、洼地蓄水深度、下渗参数(最大与最小下渗速率、渗透衰减系数)以及前期干旱天数;管道曼宁系数亦属此类。这些参数无法直接准确获取,需经率定以提升模型精度与可靠性。

在参数率定过程中,结合实测水文数据与模拟结果进行直接比对分析,同时采用纳什效应系数作为关键验证指标评估模型精度,从而实现对模型性能的多维度验证,显著提升模型的可信度与可靠性评估的客观性。

为获取模型验证所需的实测水文数据,本研究在出水口J267处布设了水量监测云平台,对该出水口的流量及水位进行实时监测。本研究选取2024年7月5日、8日及22日的3场实测降雨数据作为参考,将实测出水口水深与模型模拟结果进行直接比对分析,具体对比结果如图4所示。模拟结果与实测数据变化趋势和数值上均高度吻合,初步验证了所建模型的有效性与可靠性。

同时采用纳什效率系数(nash-sutcliffe efficiency

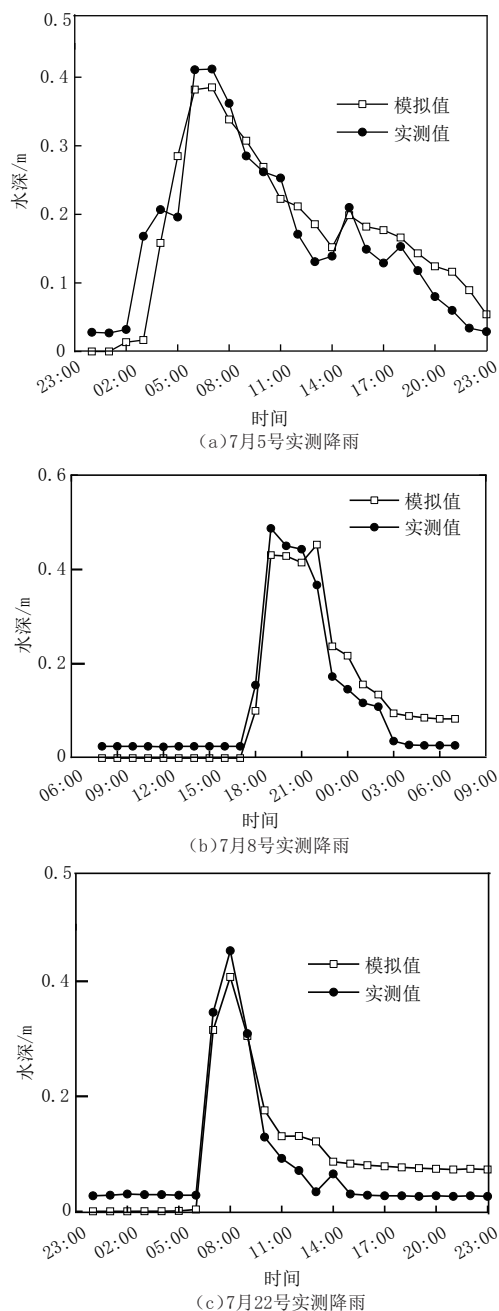


图4 出水口实测水深与模拟水深对比图

coefficient, NSE)作为评价SWMM模型径流模拟精度的指标,其计算公式如下;

$$K_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_{ij})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - y_k)^2} \quad (2)$$

式中: $y_i$ 为第*i*时刻的实测值; $y_{ij}$ 为第*i*时刻的模拟值; $y_k$ 为实测序列的均值; $n$ 为序列长度。

纳什效率系数NSE的取值范围为 $(-\infty, 1)$ 。该系数值越接近1,表明模型模拟精度越高。根据普遍认可的评价标准,NSE值处于0.50~0.65区间时,模拟结果可视为满意;处于0.65~0.75区间时,模拟结果为良好;当NSE值高于0.75时,则表明模拟结果优异。

本研究选取2024年7月5日、8日及22日的3场实测降雨事件,分别进行模型参数率定与验证。计算得到的纳什效率系数结果显示:率定期NSE值分别为0.77、0.80和0.76,验证期NSE值则分别为0.77、0.80和0.76。所有NSE值均高于0.75,表明模型模拟结果优异,所率定的参数组适用于本研究区域。

表1 SWMM各模块参数率定结果

| 模块      | 参数名称                        | 率定结果  |
|---------|-----------------------------|-------|
| 子汇水区模块  | 不透水区曼宁系数                    | 0.02  |
|         | 透水区曼宁系数                     | 0.4   |
|         | 不透水区洼地蓄水量/mm                | 2.5   |
|         | 透水区洼地蓄水量/mm                 | 10    |
| 产汇流下渗模块 | 最大入渗率/(mm·h <sup>-1</sup> ) | 130   |
|         | 最小入渗率/(mm·h <sup>-1</sup> ) | 30    |
|         | 入渗衰减系数/h <sup>-1</sup>      | 10    |
|         | 干燥时间/d                      | 7     |
| 管网汇流模块  | 曼宁糙率系数                      | 0.013 |
| 河道汇流模块  | 曼宁糙率系数                      | 0.02  |

## 2.4 灰绿设施选择及空间布局优化方案确定

### 2.4.1 灰绿设施选择

灰色设施的选择显著受到空间位置的制约,不同区域在功能属性、地理环境、排水管网形态及工程实施条件等方面存在显著差异,通常需结合工程可行性确定具体的设施类型。为提升模型的可操作性与适用性,本文综合考量各内涝点所需的调蓄容积与管道输送能力,将调蓄池与管道扩容作为代表性灰色设施改造方式,在模型中予以统一表征。

绿色低影响开发(LID)设施的选取需系统考量区域实际条件,包括水文地质特征、土壤类型、地形坡度、土地利用模式及经济可行性等多重因素。在设施类型选择上,应优先考虑具有“净、蓄、滞”功能的设施,审慎选用“渗”与“排”类设施,并系统优化“用”类设施的结构与布局。结合研究区域用地属性与建筑分布特征,本文研究最终确定的绿色LID设施包括透水铺装、下沉式绿地、雨水花园和绿色屋顶。

### 2.4.2 空间布局优化方案确定

根据内涝点与研究区域内主河道的空间位置关系,本研究将其划分为上游、中游和下游三类,并据此制定差异化的系统性治理策略。

上游内涝点通常位于管网稀疏、管径较小且远离河道的区域,汇水路径长。为避免全线改造带来的高成本与技术复杂性,本研究提出以关键管段扩容与配套调蓄设施相结合的协同治理方案,在控制工程规模的基础上提升径流调控与峰值削减能力,

实现经济可行的治理目标。

中游内涝点处于管网衔接关键区,水力条件复杂,系统改造受限。本研究采用能力提升与调蓄协同的综合策略,通过拓宽下游管段增强输水能力,并系统布设调蓄设施以滞蓄峰值流量,从而优化排水系统的整体效能与稳定性。

下游内涝点邻近河道,排水路径短、排出条件好,具备直接改造条件。因此,该类区域以管径扩容为主要措施,通常无需增设调蓄设施,即可实现有效内涝防控。

本研究以50年一遇暴雨强度数据作为输入数据在GRMS模型中进行模拟运行,最终得出二维淹没结果,依据内涝点的空间分布特征及水文响应特性,选取了三个具有代表性的内涝点(H1、H2、H3)作为具体研究对象(见图5)。



图5 研究区域二维淹没结果及具体内涝研究点示意图

根据内涝点位空间分布特点,分别设置不同灰色改造方案,具体情况如表2所示;

表2 灰色方案差异化选定结果

| 淹没点   | 位置    | 灰色方案     | 管道拓宽宽度/m | 调蓄池容积/m <sup>3</sup> |
|-------|-------|----------|----------|----------------------|
| H1、H2 | 上游、中游 | 管道改造+调蓄池 | 0.25     | 1 500                |
|       |       |          |          | 2 000                |
|       |       |          |          | 2 500                |
|       |       |          | 0.5      | 1 500                |
|       |       |          |          | 2 000                |
|       |       |          |          | 2 500                |
|       |       |          | 0.75     | 1 500                |
|       |       |          |          | 2 000                |
|       |       |          |          | 2 500                |
| H3    | 下游    | 调蓄池      |          | 1 500                |
|       |       |          |          | 2 000                |
|       |       |          |          | 2 500                |

本研究对绿色低影响开发(LID)设施的遴选与配置,综合考量了研究区的用地属性与工程可行性。在确定设施类型及其最大布设比例时,遵循了《SWMM手册》的技术准则,并充分借鉴了国内海绵城市建设的实践经验<sup>[25-27]</sup>。基于上述原则所确立

的、适用于不同用地类型的LID设施组合方案及其最大布设比例详见下表。

表3 LID组合初选结果及其最大布设比例<sup>[25-27]</sup>

| 用地类型   | 透水铺装 | 雨水花园 | 绿色屋顶 | 下沉式绿地 |
|--------|------|------|------|-------|
| 公园与绿地  | 20%  | 30%  |      | 30%   |
| 公共设施用地 | 20%  |      | 10%  | 20%   |
| 交通道路   | 30%  | 20%  |      | 20%   |
| 建筑用地   | 20%  | 20%  | 30%  | 20%   |

3 结果与讨论

3.1 灰色优化方案结果分析

针对H1上游内涝点位,按照预先规划方案进行优化改造,以郑州50年一遇暴雨强度数据作为输入数据,在模型中模拟计算,得出结果如图6所示。

根据上游内涝点H1在不同管径拓宽与调蓄池组合情景下的模拟结果,管径增大与调蓄池容积提升可显著降低积水深度并延后峰值出现时间,反映出工程措施对积水过程的有效调控。具体而言,在调蓄池容积固定为2 500 m<sup>3</sup>时,随管径拓宽由0.25 m增至0.75 m,峰值水深削减率由14%提高至70%,表明管径扩大对缓解内涝作用更为显著。

针对中游H2内涝点其多情景模拟结果如图7所示。

本研究模拟了不同管径拓宽(0.25、0.5、0.75 m)与调蓄池容积(1 500、2 000、2 500 m<sup>3</sup>)组合对积水过程的影响。结果表明,增设调蓄池可进一步降低峰值积水深度并推迟洪峰,呈现明显的“削峰延滞”效应。在相同管径下,随调蓄池容积增大,减灾效果增强;其中2 500 m<sup>3</sup>调蓄池的削减作用最为显著,三类管径拓宽对应的峰值削减率分别为15%、60%和80%。综合比较,管径拓宽0.75 m结合2 500 m<sup>3</sup>调蓄池为最优方案,使H2点峰值水深由1.700 4 m降至0.351 m,削减率达80%,具备显著的工程应用价值。

H3内涝点为下游内涝点位,其具体结果如图8所示;

本研究系统分析了不同管径拓宽方案对下游内涝点H3积水过程的影响。随着管径在原有基础上分别增加0.25、0.50、0.75 m,该点的排水能力得到显著改善,积水深度明显降低。具体而言,三种方案的峰值水深削减率分别达到20%、50%和65%,对应的峰值水深从治理前的1.05 m依次降至0.84、0.52、0.37 m。在最优方案“管径增加0.75 m”下,整个积水过程得到有效控制,全程水深均维持在0.40 m以下

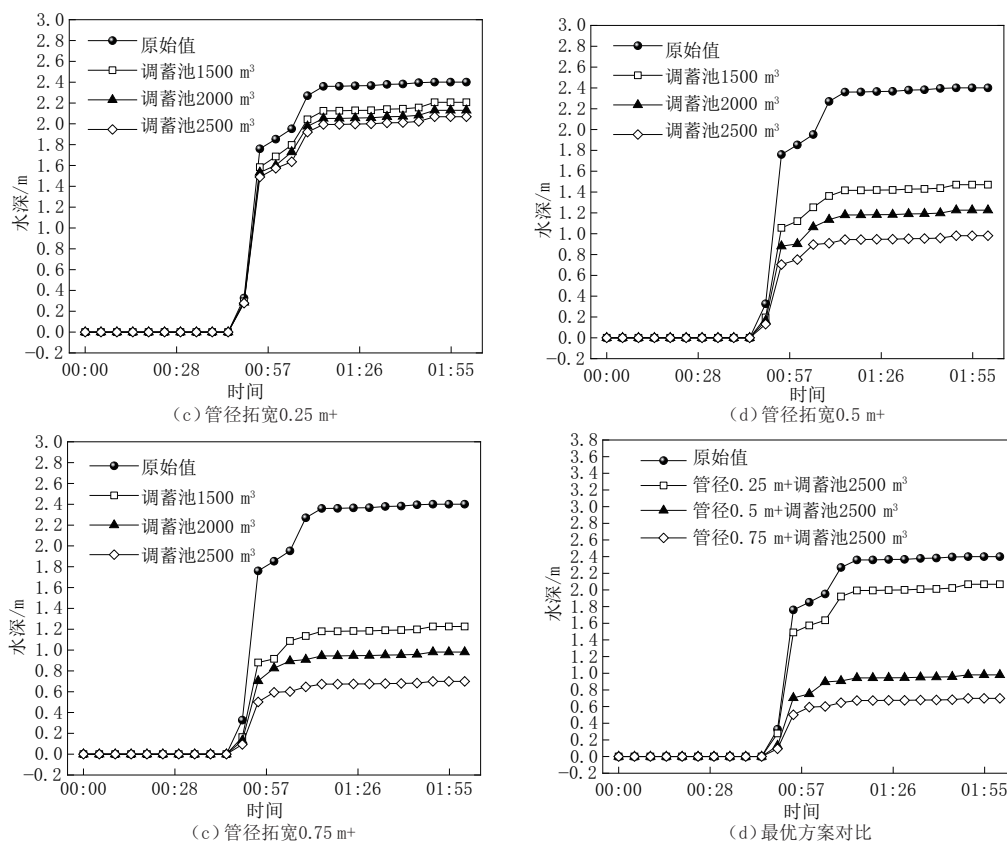


图6 上游内涝点H1灰色优化前后水深随时间变化曲线图

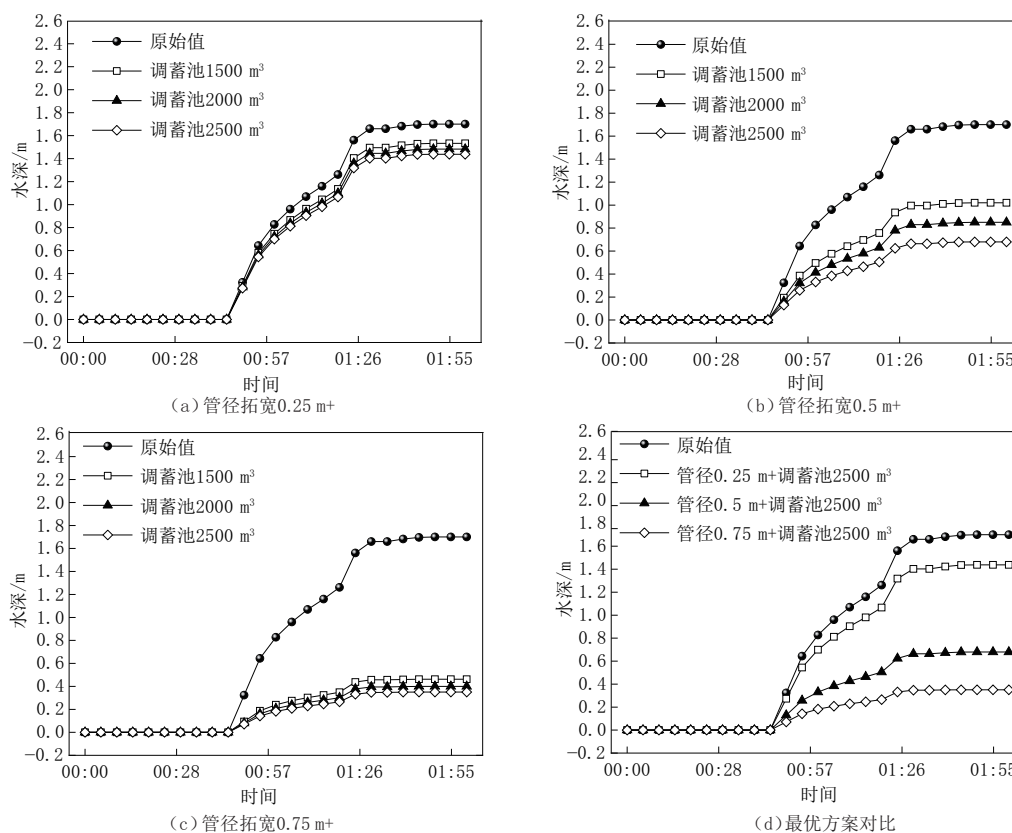


图7 中游内涝点H2灰色优化前后水深随时间变化曲线图

的较低水平。

### 3.2 绿色优化方案结果分析

根据设定好的LID措施对研究区域进行绿色改

造,得到三个内涝点的水深随时间变化情况,与初始数据进行对比,具体结果如图9所示。

基于H1、H2与H3三个典型内涝点在LID措施

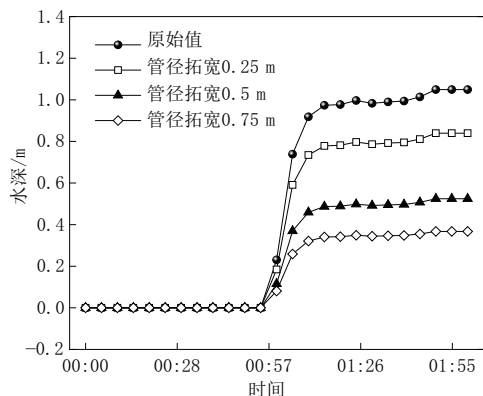
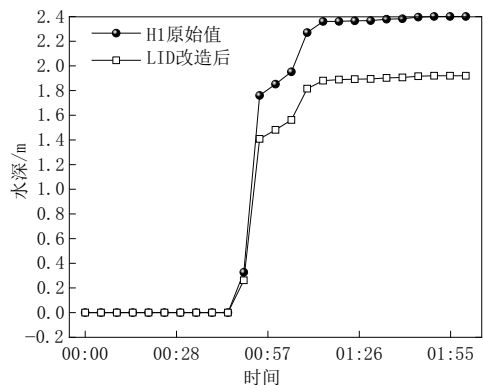
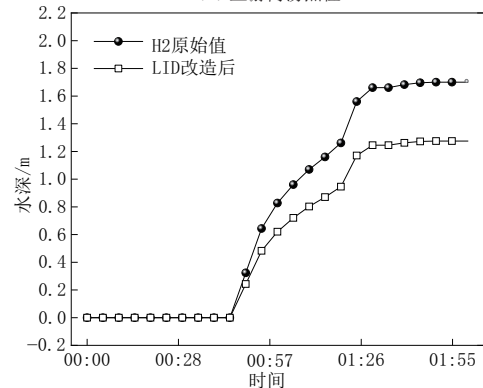


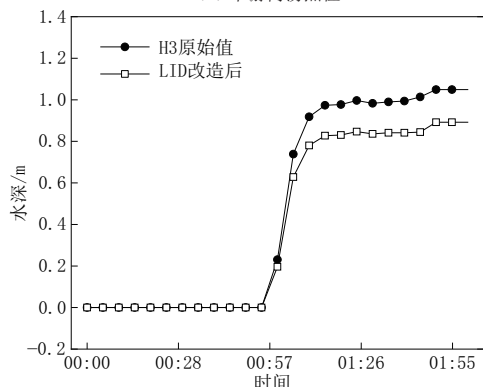
图8 下游内涝点位H3灰色优化前后水深随时间变化曲线图



(a) 上游内涝点位



(b) 中游内涝点位



(c) 下游内涝点位

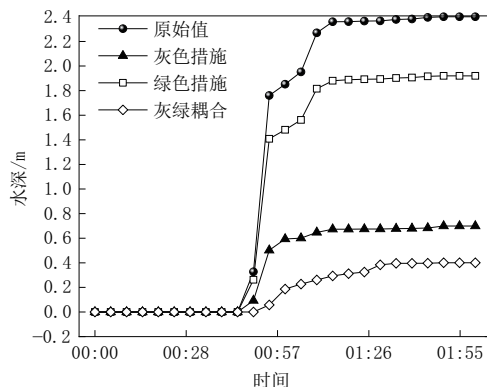
图9 上、中、下游内涝点位绿色优化前后水深随时间变化曲线图

实施前后的积水过程线,分析了绿色基础设施对内涝的调控效果。结果表明,LID设施可有效重塑积水过程,具体表现为:各点峰值水深显著降低(H1、H2、H3分别削减约20%、25%与15%),峰现时间延后,过

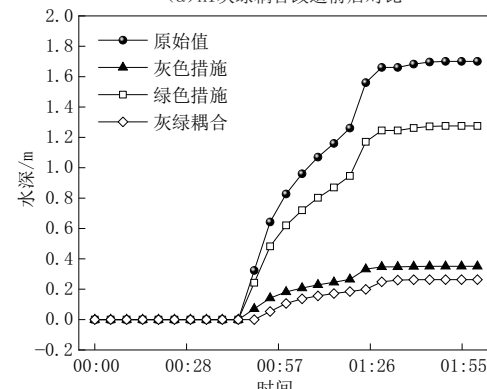
程线形态趋于平缓,反映出LID对径流的滞蓄与延滞作用。综上,LID通过“渗、滞、蓄”协同机制,在不同汇水区均能有效调控内涝过程,为提升区域雨洪韧性提供了可行路径。

### 3.3 灰绿耦合优化方案结果分析

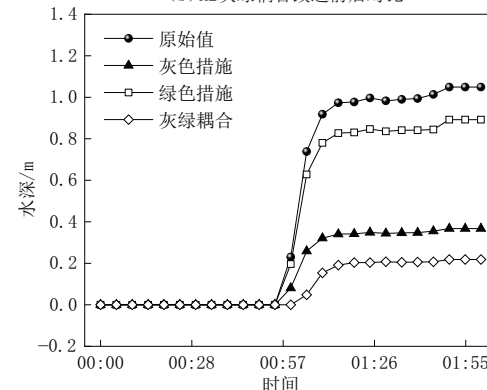
提取各内涝点对峰值水深削减效果最好的一组灰色措施与设置好的绿色设施进行灰绿耦合,在模型中运行得出结果,具体结果如图10所示;



(a) H1灰绿耦合改造前后对比



(b) H2灰绿耦合改造前后对比



(c) H3灰绿耦合改造前后对比

图10 上、中、下游内涝点位灰绿耦合优化水深随时间变化曲线图

对H1、H2及H3内涝点的分析表明,灰色、绿色与灰绿耦合策略的径流控制效果各异。灰色设施能快速强效削峰,但过程线下降急促、柔性不足;绿色措施具有延迟效应,但峰值控制能力有限。灰绿耦合则展现出最优的综合性能,其过程线最为平缓且

水位最低,峰值削减率(83%、85%、79%)均高于单一措施,印证了该策略可通过结构性与非结构性措施的互补,系统提升内涝防治体系的韧性、效率与可持续性。

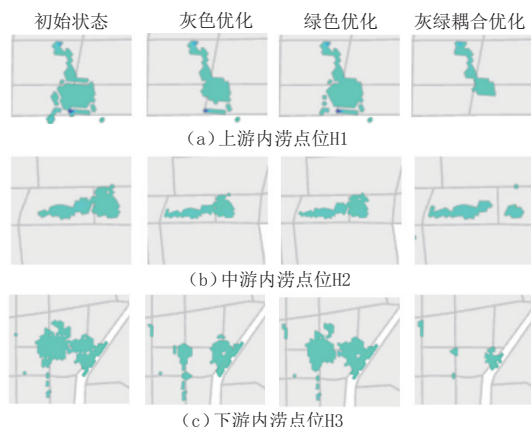


图11 上、中、下游内涝点位三种不同优化方案下  
二维淹没效果对比图

对比上游、中游及下游内涝点在四种情景下的二维淹没范围可见,不同优化策略具有明显的空间分异效应。三种优化方案均能有效缩减各点位淹没面积,其中灰绿耦合方案效果最优,在各点位(尤其是承泄能力最弱的下游H3)实现了最大范围的积水消退,其控制效果显著优于单一方案。此结果从空间维度证实,灰绿耦合的协同治理模式对于系统性缓解城市内涝具有显著优势。

## 4 结 语

(1)灰绿耦合布局能显著提升内涝防控的系统性能。相较于单一灰色或绿色设施,耦合方案在H1、H2、H3点的峰值削减率分别达到83%、85%和79%,且过程线更为平缓,体现了良好的协同增效作用。

(2)基于内涝点空间位置(上、中、下游)的差异化治理策略具有显著优越性。该策略在保障防控效果的同时,兼顾了工程可行性与经济性,尤其适用于管网复杂、改造受限的高密度建成区。

(3)GRMS模型在二维淹没模拟中表现出良好的适用性与稳定性,其与SWMM的耦合机制为城市内涝的精细化模拟与方案优化提供了可靠的技术平台。

(4)本研究提出的“分区分策、灰绿协同”布局模式,可为我国海绵城市建设与城市内涝系统治理提供理论支持与实践参考,具有较高的工程应用与推广价值。

## 参考文献:

- [1] Li J, Gao J, Li N, et al. Risk Assessment and Management Method of Urban Flood Disaster[J]. Water Resources Management, 2023, 37(5): 2001–2018.
- [2] Arya S, Kumar A. Evaluation of stormwater management approaches and challenges in urban flood Control[J]. Urban Climate, 2023, 51: 101643.
- [3] Huang Y, Tian Z, Ke Q, et al. Nature-based solutions for urban pluvial flood risk Management[J]. WIREs Water, 2020, 7(3).
- [4] Seidu S, Chan D W M, Taiwo R. Integrating green and grey infrastructure systems in dense urban regions: A synthesis of critical barriers and effective implementation Guidelines[J]. Clean Technologies and Environmental Policy, 2025.
- [5] Zhu Y, Xu C, Liu Z, et al. Spatial layout optimization of green infrastructure based on Life-cycle multi-objective optimization algorithm and SWMM Model[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2023, 191: 106906.
- [6] Li C, Zhang Y, Wang C, et al. Stormwater and flood simulation of sponge city and LID mitigation benefit Assessment[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 32(22): 13089 – 13105.
- [7] Tansar H, Duan H-F, 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.
- [8] Zhang Y, Yin H, Zhang D, et al. Enhancing resilience of Green-grey infrastructure by integrating two redundancy strategies into a multi-objective optimization and service period assessment Framework[J]. Sustainable Cities and Society, 2025, 128: 106474.
- [9] You J, Wang S, Ha M, et al. Comparative hydrologic performance of cascading and distributed Green-gray infrastructure: Experimental evidence for spatial optimization in urban waterlogging Mitigation[J]. Journal of Hydrology, 2025, 662: 133979.
- [10] Wang Y., Peng L., Yang L. E., Wang Z., & Deng X. (2024). Attributing effects of classified infrastructure management on mitigating urban flood risks: A case study in Beijing, China. Sustainable Cities and Society, 101, 105141.
- [11] Wang L, Zhao J, Xiong Z, et al. Integrating Grey-Green Infrastructure in Urban Stormwater Management: A Multi-Objective Optimization Framework for Enhanced Resilience and Cost Efficiency [J]. Applied Sciences, 2025, 15(7): 3852.
- [12] Wang M, Liu M, Zhang D, et al. Assessing and optimizing the hydrological performance of Grey-Green infrastructure systems in response to climate change and non-stationary time Series[J]. Water Research, 2023, 232: 119720.
- [13] Zhou K. Study of the hydrologic and hydrodynamic coupling model (HHDCM) and application in urban extreme flood Systems[J]. Applied Water Science, 2024, 14(4).
- [14] Sun C, Rao Q, Wang M, et al. Multi-Stage Optimization of Drainage Systems for Integrated Grey - Green Infrastructure under Backward Planning [Z](2024-06-27).
- [15] Zha X, Fang W, Zhu W, 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,