

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2026.01.010

<https://xuebao.xaut.edu.cn>

引文格式:王思敏,姜仁贵,解建仓,吴景霞,张志霞,杨柳.基于情景模拟的城市内涝响应特征研究[J].西安理工大学学报,2026,42(1):101-109.

Wang Simin, Jiang Rengui, Xie Jiancang, Wu Jingxia, Zhang Zhixia, Yang Liu. A study on response characteristics of urban waterlogging based on scenario simulation [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2026, 42(1): 101-109.

# 基于情景模拟的城市内涝响应特征研究

王思敏<sup>1</sup>, 姜仁贵<sup>1</sup>, 解建仓<sup>1</sup>, 吴景霞<sup>2</sup>, 张志霞<sup>2</sup>, 杨柳<sup>1</sup>

(1. 西安理工大学 旱区水工程生态环境全国重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. 西安市水利规划勘测设计院, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 为探究城市内涝灾害对不同影响因素的响应规律,耦合暴雨洪水管理模型(SWMM)和地理信息系统(GIS)建立城市暴雨内涝模拟模型,对不同降雨特性、管网水平和城镇化水平下的城市内涝过程进行情景模拟。构建汇水区分级划分和节点信息确定方法以应对快速城市化进程下的复杂下垫面以及管网资料缺失情况。以莲湖区为研究区域,开展模型参数率定与实例应用。结果表明:区域内积水时间的减少幅度随管径的增大而不断减小,优化管径可有效延迟管网超载开始时间、缩短超载持续时间;下垫面不透水率减小可使节点积水情况有所缓解,但从变化幅度来看,仅靠改变下垫面条件难以显著缓解内涝,且城墙以外区域采用低影响开发措施的防涝效果更好;不同内涝防治措施的组合应用效果最佳,但其缓解效果随着暴雨重现期的增大而减弱,因此,针对超标降水,需采取雨洪行泄通道或自然蓄滞空间等方式进行应对。

**关键词:** 城市内涝;暴雨洪水管理模型;情景模拟;响应特征;莲湖区

**中图分类号:** TV212.5+3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-4710(2026)01-0101-09

## A study on response characteristics of urban waterlogging based on scenario simulation

Wang Simin<sup>1</sup>, Jiang Rengui<sup>1</sup>, Xie Jiancang<sup>1</sup>, Wu Jingxia<sup>2</sup>, Zhang Zhixia<sup>2</sup>, Yang Liu<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Water Engineering Ecology and Environment in Arid Area,

Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Xi'an Water Conservancy

Planning Survey and Design Institute, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** To investigate the response patterns of urban waterlogging for different influencing factors, a storm water management model (SWMM) and a geographic information system (GIS) were integrated to develop an urban rainstorm waterlogging simulation model. Scenario simulations were conducted for urban waterlogging processes with varying rainfall characteristics, drainage pipe network conditions, and urbanization levels. A method for classifying watershed sub-catchments and determining node information was established to address complex underlying surface conditions and missing pipe network data in rapidly urbanizing areas. The Lianhu District was selected as the study area for model parameter calibration and practical application. The results show that the reduction in waterlogging time gradually decreases as the pipe diameter increases, and that optimizing pipe diameter can effectively delay the onset of pipe network overload and shorten its duration. Reducing the impervious rate of the underlying surface can alleviate node flooding, but the degree of improvement is limited. Relying solely on modifying surface conditions does not significantly

收稿日期: 2024-09-14; 网络首发日期: 2024-12-27

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1294.N.20241226.1635.002>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52209034); 陕西省水利厅科技计划项目(2025slkj-5); 陕西省创新能力支撑计划项目(2020KJXX-092); 陕西省教育厅重点科学研究计划项目(21JY028)

第一作者: 王思敏,女,博士生,研究方向为城市暴雨洪涝灾害应急应对。E-mail: wsimin0429@163.com

通信作者: 姜仁贵,男,博士,教授,博导,研究方向为城市防洪减灾与适应性管理决策。E-mail: jrengui@163.com

mitigate waterlogging, with low-impact development measures applied in the areas outside the city wall showing better flood-control effects. The combined application of different waterlogging prevention measures yields the best results, although their effectiveness diminishes with increasing rainstorm return periods. Therefore, for rainfall events exceeding design standards, measures such as flood discharge channels or natural storage spaces should be adopted.

**Key words:** urban waterlogging; SWMM; scenario simulation; response characteristics; Lianhu District

20 世纪 90 年代以来,城市暴雨内涝灾害发生频率显著增加,灾害损失也明显加重,对社会经济发展与居民生命财产安全造成了严重威胁<sup>[1-6]</sup>。据应急管理部统计,2022 年全国 28 个省份遭受暴雨洪涝侵袭,3 385.3 万人次受灾,因灾死亡失踪 171 人,直接经济损失 1 289 亿元。日趋严重的暴雨内涝灾害已成为影响城市公共安全与社会经济发展的突出问题,受到各国政府和专家学者的广泛关注<sup>[7-8]</sup>。

城市内涝灾害模拟旨在揭示内涝特征及其形成机理,可为科学防控城市暴雨内涝灾害,提高城市韧性提供依据<sup>[9]</sup>。诸多专家学者开展了城市暴雨内涝灾害模拟研究,例如,栾震宇<sup>[10]</sup>、徐宗学<sup>[11]</sup>等对不同降雨重现期下典型区域的暴雨积涝情况进行了模拟分析;Chen<sup>[12]</sup>、Sarkar<sup>[13]</sup>等利用不同水文模型模拟了不同降雨重现期下的内涝程度及其对道路的影响;Pedrozo-acuña 等<sup>[14]</sup>识别出不同降雨雨型下墨西哥塔斯科州的易涝点及应对措施。下垫面条件、管网排水能力等作为城市内涝灾害的重要影响因素也受到了一定程度的关注。刘家宏等<sup>[15]</sup>在社区尺度的研究表明,城市下垫面的空间格局对内涝淹没的时空变化过程有一定影响;Eckart 等<sup>[16]</sup>研究表明,低影响开发措施能有效减少径流峰值流量。现有文献主要集中于降雨重现期、降雨雨型以及低影响开发措施对城市内涝的影响,受限于地下排水

管网资料的缺失,不同降雨情景下管网排水能力的评估研究相对较少,且对于不同内涝防治措施组合效应的量化研究也相对缺乏。

鉴于此,本文针对快速城市化进程下的复杂下垫面以及管网资料缺失的情况,采用汇水区分级划分和节点信息确定方法,并考虑社区尺度下不同降雨特性、管网水平以及城镇化进程对内涝灾害的影响,开展多情景城市暴雨内涝灾害模拟。从不同视角对模拟结果进行评估分析,解析各类情景与内涝灾害之间的定量关系,揭示不同因素影响下城市内涝积水的变化规律以及不同优化措施的实施效果,以为城市防洪减灾提供理论依据和决策支持。

## 1 数据与方法

### 1.1 研究区域

西安市地处关中平原中部,城市总面积约 10 108 km<sup>2</sup>。受季风气候影响,西安市降水时空分布不均,夏季炎热多雨,伏旱突出,降雨常以短时暴雨的形式出现。近年来,西安市多次发生暴雨内涝灾害,例如,2024 年 7 月 5 日,西安市气象台发布暴雨蓝色预警,强降水影响下,雁塔、曲江、莲湖、未央、长安等城区的多个路段因内涝积水事件进入封控状态。本文选择西安市主城区之一的莲湖区作为研究区域(图 1)。

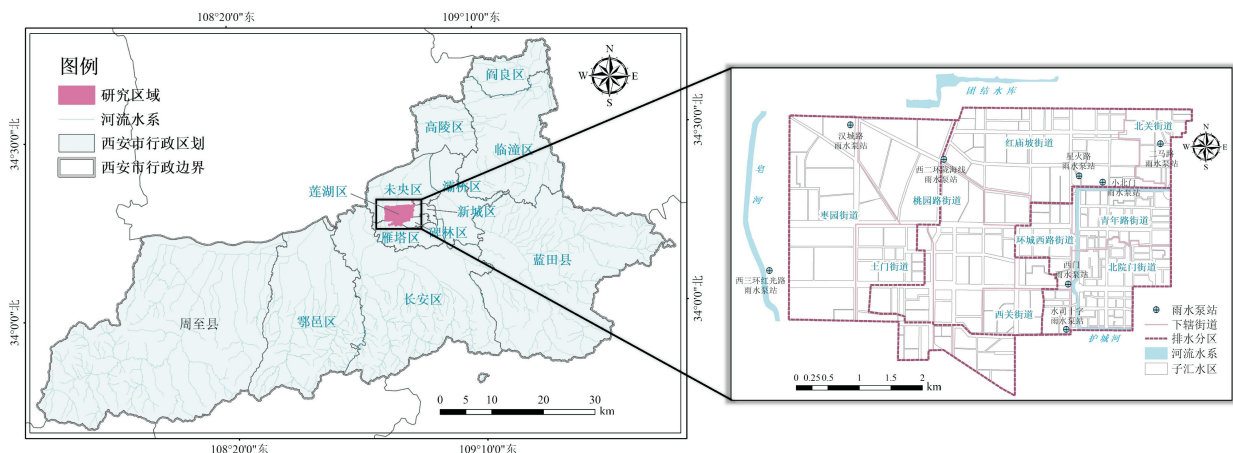


图 1 研究区域概况

Fig. 1 Overview of the study area

注:此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号为 GS(2019)1822 的标准地图制作,底图无修改。

莲湖区区域面积约 43 km<sup>2</sup>,下辖 9 个街道,为高度城市化区域。其下垫面主要由建筑物和错综复杂的硬化道路组成,下渗能力较低,易发生暴雨内涝。

## 1.2 数据来源

采用的数据主要包括:排水管网数据、地形高程数据、土地利用类型数据、行政区划数据及水文数据等。管网数据源于西安市排水管网图;地形高程数据源于地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn/>),分辨率为 30m;土地利用类型数据通过解译高分一号卫星遥感影像得到,遥感影像数据源自地理空间数据云,分辨率为 16m;行政区划数据源于中国科学院资源环境科学数据平台(<https://www.resdc.cn/>);水文数据源自陕西省水利厅雨情简报、中国气象数据网(<https://data.cma.cn/>)。

## 1.3 模型构建

暴雨洪水管理模型(storm water management model, SWMM)是美国环境保护署(EPA)开发的一款动态降雨-径流-水质预测和管理模型,因其出色的水文、水力模拟能力以及免费、开源、界面友好等特点被广泛应用于城市暴雨内涝灾害模拟<sup>[17]</sup>。本文通过耦合 SWMM 和 GIS 构建城市内涝模型,并基于模型进行西安市内涝灾害情景模拟,以分析其响应特征。

### 1.3.1 排水管网概化

城市排水系统主要由错综复杂的排水管网和河网水系构成,本文依据排水管网图来构建研究区域的管网拓扑关系。管道均设置为圆形断面,护城河河道为梯形断面,护城河西北退水口连接的暗渠为矩形断面。由于莲湖区西北部与北部部分管段的水流是经由其他区域的管道排入河道,可将这部分管段的末端节点处理为排水口。

将各类管道附属物概化为不同属性值的节点。除参照西安市排水管网分布图外,还应遵循《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)确定雨水口节点位置:①在管段交汇处、道路交汇处及管径变化处设置节点;②子汇水区各对应一个节点;③节点间距为 25~35 m,若纵坡坡度大于 2%,节点间距可大于 50 m。无资料或新增节点的内底标高可依据已知节点的内底标高计算得到。若已知节点内底标高为  $h$ ,两节点间管段长度为  $L$ ,依据《室外排水设计标准》确定管径  $d$  对应的最小设计坡度  $S$ ,则新增节点的

内底标高  $H$  的表达式为:

$$H = h - L \sin(\arctan S) \quad (1)$$

基于高程数据提取节点地面高程,则节点深度可通过地面高程减去内底标高得到。《室外排水设计标准》规定人行道下管顶最小覆土深度为 0.6 m,车行道为 0.7 m,且雨水口深度不宜大于 1 m,综合考虑计算结果和规范要求,确定新增或无资料节点的深度和内底标高。对研究区域进行概化,排水管网包含 436 段管道、427 个节点和 15 个出水口(图 2)。根据管网资料与区域实际情况得到管道管径、坡度和埋深等属性数据。

### 1.3.2 子汇水区划分

为尽可能如实反映区域内的水流运移情况,在考虑自然、社会二元信息的基础上进行子汇水区划分。首先,遵循区域内自然汇水特征,依据下辖街道和河流水系等因素进行汇水单元初步划分;其次,依据道路规划、管网布局及地形走势对子汇水区进行精细划分;最后,采用交互式监督分类法对各子汇水区内建筑、道路、绿地、水体和其他 5 种地块进行分类提取,并计算下垫面不渗透系数。此外,综合运用模型用户手册推荐公式以及 ArcGIS 属性表的“字段计算器”功能进行子汇水区特征宽度计算。利用 ArcGIS 的 3D Analyst Tools 工具将高程数据转为坡度栅格数据,并结合面要素图层对各地块所覆盖的所有像元取平均值,计算得到各子汇水区平均坡度。完成子汇水区划分后,依据就近分配原则和自然坡降确定各子汇水区与雨水口的对应关系。

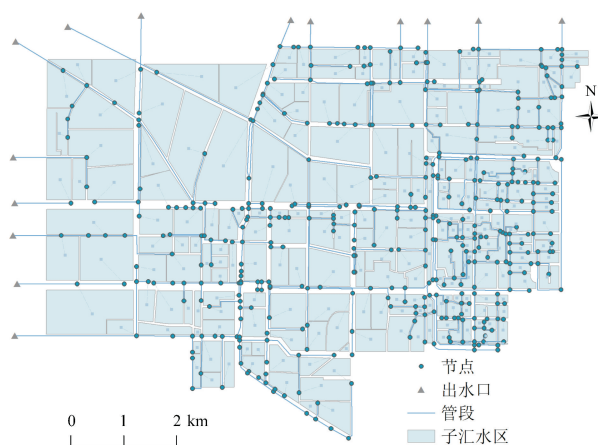


图 2 排水管网与汇水区的概化结果

Fig. 2 Generalized results from drainage network and catchment

注:此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号为 GS(2019)1822 的标准地图制作,底图无修改。

### 1.4 参数率定与模型验证

#### 1.4.1 模型参数率定

除特征参数外,模型还需确定曼宁系数、洼蓄量及衰减常数等经验参数。参考模型用户手册确定各参数初始取值,利用模拟径流量与区域降雨量的比值确定模拟径流系数<sup>[18]</sup>,将其与依据《室外排水设计标准》所得的区域综合径流系数进行对比,并根据2020年7月10日及30日研究区域内两次暴雨内涝事件的模拟结果进行参数率定。最终确定不透水区曼宁系数和透水区曼宁系数分别为0.012和0.3,管道糙率和河道糙率分别为0.013和0.015,不透水区洼蓄量和透水区洼蓄量分别为2.54 mm和7.62 mm,Horton入渗模型中最大下渗率、最小下渗率与衰减常数分别为76.2 mm/h、3.81 mm/h和4。

#### 1.4.2 模型验证

以西安市2021年7月18日降雨事件(20210718)为例,基于出水口流量变化和内涝点空间分布对模型进行验证。对此次降雨事件进行全过程模拟推演,实测降雨过程及研究区排水口(以O<sub>1</sub>、O<sub>2</sub>、O<sub>3</sub>为例)的模拟流量过程如图3。由图可知,排水口流量变化过程与降雨过程基本吻合,流量峰值发生时间均与暴雨峰值时段接近,且流量发生时段(4:00—20:00)比降雨持续时间(3:00—18:00)延长约1h,符合城市降雨的一般规律。

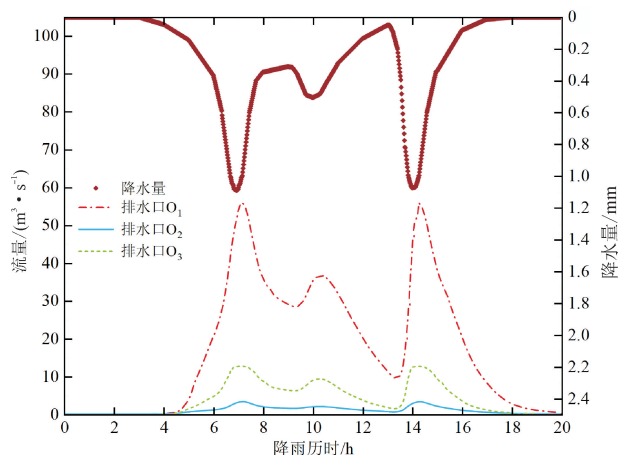


图3 “20210718”降雨过程与排水口模拟流量过程  
Fig. 3 Rainfall process and simulated discharge process of outfalls in “20210718”

针对研究区域下垫面高精度数据资料的短缺问题,将节点积水空间概化为圆锥体的蓄水设施进行积水深度计算<sup>[19]</sup>,以对比分析模拟与实际积水情况。依据《城镇内涝防治技术规范》(GB 51222—2017)和《民用建筑设计统一标准》(GB 50352—2019)将节点积水深度划分为4个等级:水深小于0.03 m属于无积水点,水深介于0.03~0.15 m属于轻度积水点,水深介于0.15~0.30 m属于中度积水点,水深大于0.30 m属于重度积水点。西安市发布的实际积水点位与模拟结果如图4所示,模拟积水节点位置与实际积水点的分布情况基本相符。

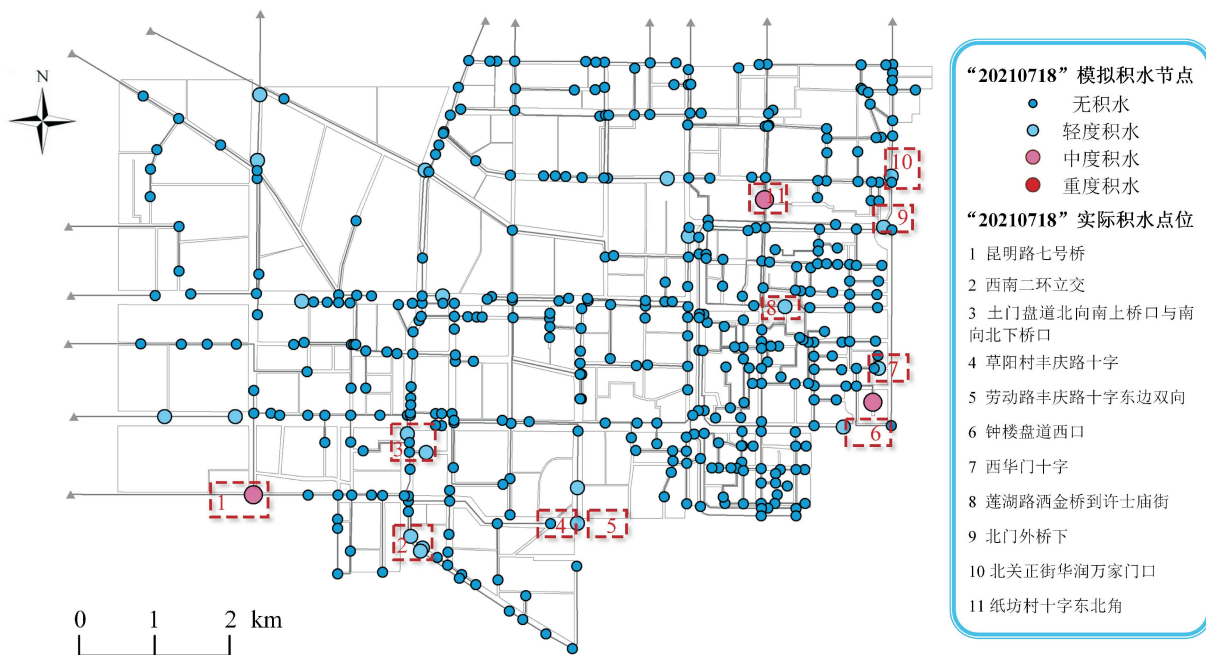


图4 “20210718”降雨事件的实际与模拟积水情况

Fig. 4 Actual and simulated waterlogging conditions for rainfall event “20210718”

注:此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2019)1822的标准地图制作,底图无修改。

市政排水部门将积水平均深度为 0.15 m 的路段设为轻度积水路段,将 0.27 m 积水线设为汛期临时交通管制警示线,而它对 11 处积水路段均未实施交通管制,说明这些积水路段的水深均在 0.15~0.27 m 之间。点位 1、2、4、5、7、8、10、11 处节点的模拟积水深度均为 0.13~0.30m,与实际积水深度范围相近,而点位 3、6、9 处的模拟积水深度偏小,可能与所采用的 DEM 数据精度不足有关,导致局部低洼地形的高程未能得到准确刻画。综合来看,本文构建的城市暴雨内涝模型模拟效果较好,与区域实际积水情况基本吻合。

### 1.5 情景设计

西安市短时强降雨以单峰型居多,故选择芝加哥雨型作为模型设计暴雨雨型<sup>[20]</sup>。结合西安市暴雨强度公式(式(2))推求设计暴雨过程:

$$q = \frac{2210.87(1 + 2.915 \lg p)}{(t + 21.933)^{0.974}} \quad (2)$$

式中: $q$  为设计暴雨强度, $L/(s \cdot \text{hm}^2)$ ;  $p$  为降雨重现期, $a$ ;  $t$  为降雨历时, $\text{min}$ 。

滞后的排水系统建设与城市排水需求之间的矛盾是城市内涝灾害的重要诱因。根据《室外排水设

计标准》中雨水管道设计重现期的相关规定,选择降雨重现期为 10a、雨峰系数为 0.4、降雨历时为 180min 的降雨情景,采用 +0m、+0.1m、+0.2m、+0.3m 四种方案对研究区小重现期管道管径进行优化,研究暴雨内涝对不同管网水平的响应情况。

莲湖区城镇化程度高,子汇水区不透水率高达 99%。选择降雨重现期为 10a、雨峰系数为 0.4、降雨历时为 180 min 的降雨情景,采用 -0%、-10%、-20%、-30% 四种方案对各子汇水区下垫面的不透水率进行优化,模拟分析不同下垫面情景下城市内涝灾害情况。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同管网水平情景分析

对 10a、20a、50a、100a、500a 五种降雨重现期下各管径管道的超载情况进行统计分析(图 5),管径小于 0.6 m 的管道超载率高且在总超载管道中占比大,故采用设计方案对其进行优化。对 +0 m 和 +0.3 m 情景下的管网排水能力进行对比分析,并从初始超载、超载峰值及恢复退水三个阶段各选取某一时刻管网状态进行展示,如图 6、图 7 所示。

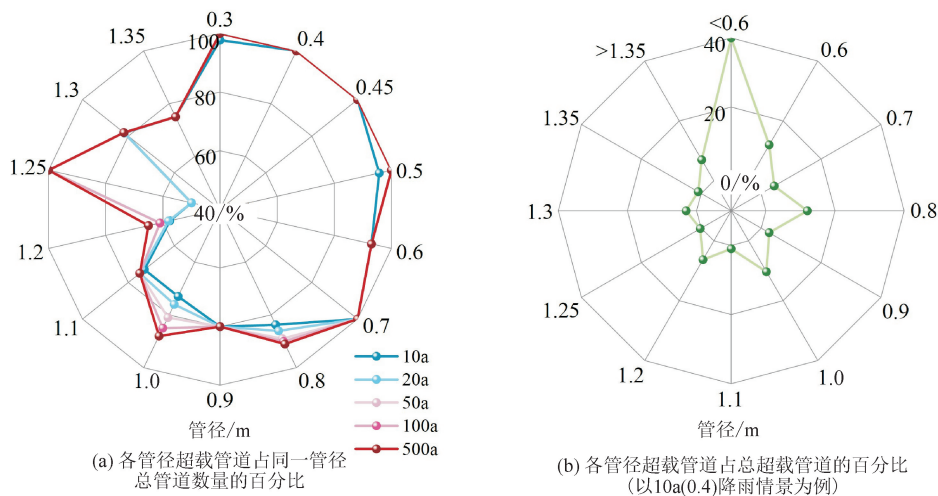


图 5 不同降雨重现期下各管径管道的超载情况

Fig. 5 Overloading of pipes with various pipe diameters at different rainfall recurrence periods

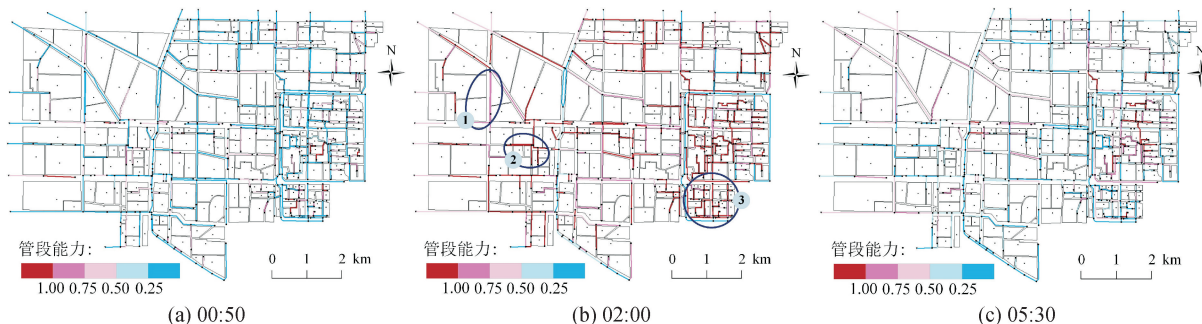


图 6 +0 m 情景下不同时刻管网状态

Fig. 6 State of the pipeline network at different times in the +0 m scenario

注:此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号为 GS(2019)1822 的标准地图制作,底图无修改。

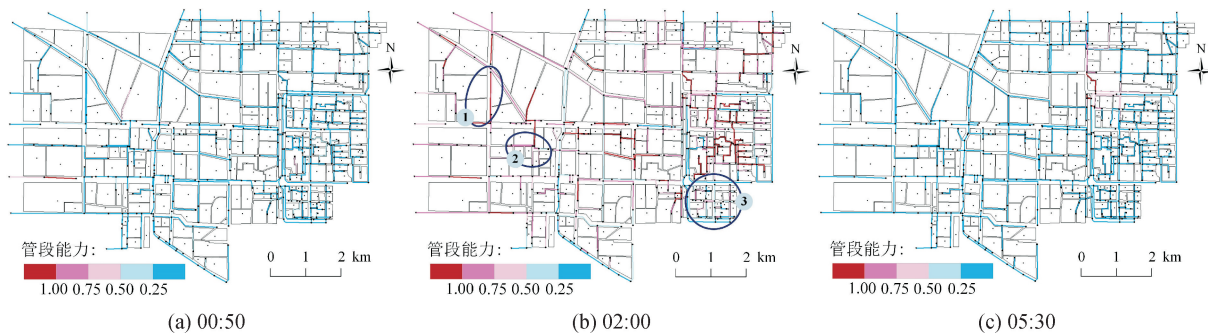


图 7 +0.3 m 情景下不同时刻管网状态

Fig. 7 State of the pipeline network at different times in the +0.3 m scenario

注:此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号为 GS(2019)1822 的标准地图制作,底图无修改。

管段能力等于 1 时,管段处于超载状态。00:50,降雨强度逐渐增加,+0 m 情景下少数管段超载,而+0.3 m 情景下仅管段 L372 发生超载;02:00,降雨强度已经减小,两种情景下超载管段数量基本达到峰值,+0 m 情景下的部分超载管段(2 号、3 号)在优化情景下恢复排水能力,而少数未超载管道(1 号)在优化情景下发生超载;05:30,降雨停止,+0 m 情景下 5.1%的管段已恢复退水能力,而优化情景下仅 5 段管道处于超载状态。从管网整体来看,优化管径对于延迟超载开始时间、缩短超载持续时间具有积极作用;但对于单一管段,增大管径会增强其输水能力,反而可能导致下游未优化管段因排水不及而发生超载。建议在管道改造方案设计时,统筹考虑管网系统,尽可能避免增加其他管道的超载风险。此外,城墙以内区域的管道超载情况受管径影响相对较

大,对此区域可着重考虑管道和排水泵站的提标改造。另外,对于区域内存在的排水管网雨污混接、错接等问题,可采取通管、清管行动,积极推进源头治理以及雨污分流改造,合理提升雨水管网的排水防涝能力。

不同管网水平下的区域积水情况如图 8。优化管径后,管网平均超载时间和平均积水时间缩短,且缩减幅度随管径的增大而减小,如平均积水时间缩减幅度由+0.1 m 情景下的 16.67%减小到+0.3 m 情景的 8.34%,管径对管网退水能力的约束减弱。在管道提标改造时,应对排水管道现状进行系统排查,开展管网补测补绘,形成改造清单;同时,统筹考虑管网排水防涝能力、实际需求、建设成本等因素,确定最优提升幅度,以避免资源浪费。

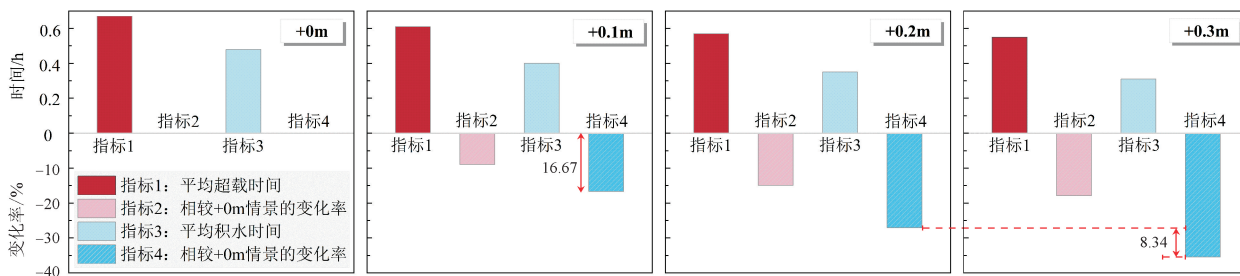


图 8 不同管网水平下研究区域节点积水及管网超载情况

Fig. 8 Waterlogging at nodes and overloading of pipe networks in the study area in different pipe network implementation levels

### 2.2 不同下垫面情景分析

节点积水情况可表征暴雨内涝的严重程度。对不同下垫面情景下区域内积水峰值时段的积水点空间分布进行模拟,如图 9。-0%情景下,无节点发生重度积水,74 处节点发生中度积水,约 47.1%的节点未出现积水;-10%情景下,未发生积水的节点数量占比超 49.4%;-20%情景下,中度积水节点 53 处,无积水节点达 51.3%;而-30%情景下,超

55%的节点未发生积水,轻度积水节点约占 36.3%,46 处节点发生中度积水,且无重度积水节点。从变化趋势来看,下垫面不透水率减小,积水节点数量随之减少,同一节点处的积水深度降低,区域积水情况得到一定程度的缓解。但从变化幅度来看,仅靠改变下垫面条件难以显著缓解内涝,必须与其他防洪排涝措施配合使用。此外,城墙以外区域受下垫面不透水率的影响相对较大,可着重考虑应

用透水路面、生态植草沟、下凹式绿地等低影响开发 措施提升其防涝能力。

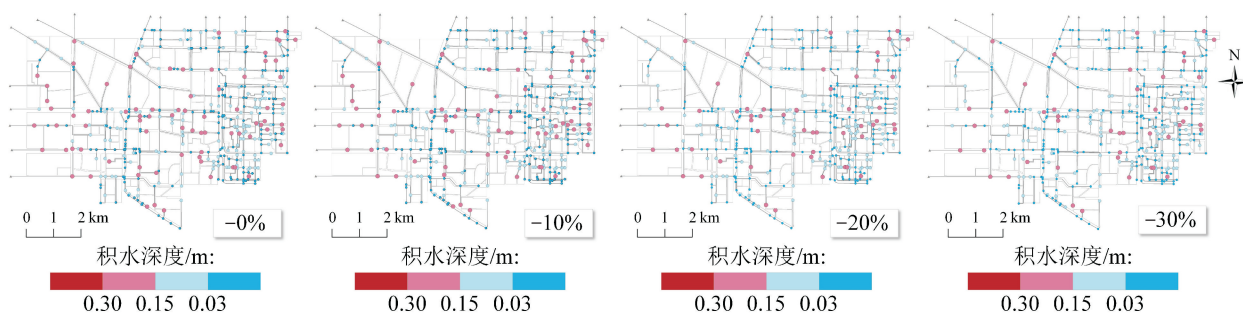


图9 不同情景下区域内积水点分布

Fig. 9 Distribution of waterlogging points in the area in different scenarios

注:此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2019)1822的标准地图制作,底图无修改。

### 2.3 多因素联合分析

为探究降雨特性、管网水平以及下垫面状况等因素共同作用下的城市暴雨内涝灾害变化情况,设计多种组合情景进行城市内涝多因素联合分析。1a、

10a、100a 与 500a 四种降雨重现期下,分别选择不同内涝防治措施构成 16 种组合情景,如表 1 所示。对各情景进行模拟推演,统计分析不同情景下区域内的积水情况,如图 10。

表 1 多因素组合情景设计

Tab.1 Multi-factor combination scenario design

组合情景	I <sub>a</sub>	I <sub>b</sub>	I <sub>c</sub>	I <sub>d</sub>	II <sub>a</sub>	II <sub>b</sub>	II <sub>c</sub>	II <sub>d</sub>	III <sub>a</sub>	III <sub>b</sub>	III <sub>c</sub>	III <sub>d</sub>	IV <sub>a</sub>	IV <sub>b</sub>	IV <sub>c</sub>	IV <sub>d</sub>
降雨重现期/a	1	1	1	1	10	10	10	10	100	100	100	100	500	500	500	500
管径优化 (+0.3m)	○	◎	○	◎	○	◎	○	◎	○	◎	○	◎	○	◎	○	◎
下垫面优化 (-30%)	○	○	◎	◎	○	○	◎	◎	○	○	◎	◎	○	○	◎	◎

注:○代表未实施,◎代表已实施。

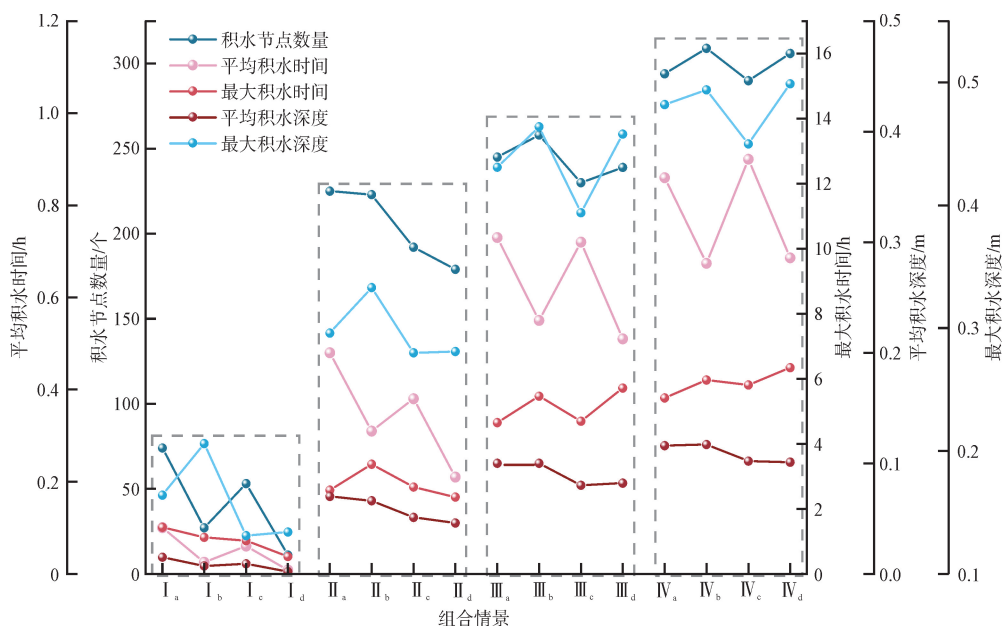


图 10 不同组合情景下区域内积水情况

Fig. 10 Waterlogging conditions in the area in different combination scenarios

由图10可知,情景I下,管径优化或改善汇水区下垫面状况均可使积水节点数量、平均积水时间及平均积水深度减小。组合情景I<sub>d</sub>的效果最佳,I<sub>b</sub>次之,I<sub>b</sub>情景下平均积水时间和平均积水深度分别降低至1.5 min和0.7 cm,区域内积水情况得到缓解,但受上游来水量增大的影响,最大积水节点处的水深增加了4.2 cm。情景II下,组合措施(II<sub>d</sub>)对于内涝的缓解效果仍为最佳,相较原情景II<sub>a</sub>,情景II<sub>d</sub>的积水节点数量、平均积水时间和平均积水深度分别降低20.4%、56.3%和34.3%。II<sub>c</sub>效果次之,II<sub>c</sub>情景下积水节点数量、平均积水时间与平均积水深度均明显下降,但受透水地面曼宁系数影响,最大积水时间随地表漫流时间的增加而略有增加。情景III和IV下,组合措施(III<sub>d</sub>和IV<sub>d</sub>)的平均积水时间和平均积水深度均有所减小(III<sub>d</sub>情景下分别减少30.1%与18%,IV<sub>d</sub>情景下分别减少20.2%与12.9%),但积水节点数量、最大积水时间以及最大积水深度均略有增加。

### 3 结论

1) 优化管径可以有效延迟管网超载开始时间、缩短超载持续时间,但对于单一管段,可能出现下游未优化管道困难以及时输送大量来水而发生超载的情况。故在管径优化前,应对排水管道现状进行系统摸排,开展管网补测补绘,形成改造清单,同时做好统筹规划、协调布局等工作。此外,城墙以内区域的管道超载情况受管径影响相对较大,可着重考虑管道和排水泵站提标改造工程。而对于区域内存在的排水管网雨污混接、错接等问题,可采取通管、清管行动,积极推进源头治理以及雨污分流改造,合理提升雨水管网的排水防涝能力。

2) 不同下垫面情景下积水峰值时段的积水点空间分布表明,不透水率减小,积水节点数量和节点积水深度随之下降,积水情况有所缓解。从变化幅度来看,仅靠改变下垫面条件难以显著缓解内涝,但城墙以外区域的积水情况受下垫面不透水率的影响相对较大,可着重考虑应用透水路面、生态植草沟、下凹式绿地等低影响开发措施提升其防涝能力。

3) 管网提标改造、应用低影响开发措施对提升区域防涝能力具有积极作用,尤以不同措施的联合效果为最佳。但随着暴雨重现期的增大,此类措施的缓解效果明显减弱。因此,对于超过雨水管渠设计重现期的极端暴雨,可设置雨洪行泄通道或恢复自然蓄滞空间以减轻管网排水压力,如恢复丰庆公园调蓄池、莲湖公园调蓄池的调蓄功能,开展河道、

湖塘整治等,以此提高区域行洪排涝能力。

本研究可为区域内涝防治工作的有效开展和区域排水防涝能力的提升提供支撑,但气候变化背景下,未来极端暴雨、城市格局及其对城市内涝的影响仍有待进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] He Lei, Li Shuai, Cui Chenhao, et al. Runoff control simulation and comprehensive benefit evaluation of low-impact development strategies in a typical cold climate area [J]. *Environmental Research*, 2022, 206: 112630.
- [2] 王思敏,姜仁贵,解建仓,等. 基于改进物元可拓模型的城市内涝灾害风险评估[J]. *给水排水*, 2023, 49(2): 145-152.  
Wang Simin, Jiang Rengui, Xie Jiancang, et al. Urban waterlogging hazard risk assessment based on modified matter-element extension model [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2023, 49(2): 145-152.
- [3] Li Wen, Jiang Rengui, Wu Hao, et al. An integrated urban flooding risk analysis framework leveraging machine learning models: a case study of Xi'an, China [J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2024, 112: 104770.
- [4] 陈文龙,夏军. 广州“5·22”城市洪涝成因及对策[J]. *中国水利*, 2020(13): 4-7.  
Chen Wenlong, Xia Jun. Analysis of causes and countermeasures of extraordinary rainstorm in 22nd, May, Guangzhou [J]. *China Water Resources*, 2020(13): 4-7.
- [5] 谌舟颖,孔锋. 河南郑州“7·20”特大暴雨洪涝灾害应急管理碎片化及综合治理研究[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2022, 53(8): 1-14.  
Chen Zhouying, Kong Feng. Study on fragmentation of emergency management during “7·20” extreme rainstorm flood disaster in Zhengzhou of Henan Province and relevant comprehensive treatment [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2022, 53(8): 1-14.
- [6] 杨梅焕,王钰尧,王涛,等. 西北干旱区极端降水时空变化特征及驱动因素[J]. *西安理工大学学报*, 2023, 39(3): 393-403.  
Yang Meihuan, Wang Yuyao, Wang Tao, et al. Spatio-temporal variation characteristics and driving factors of extreme precipitation in arid region of northwest China [J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2023, 39(3): 393-403.
- [7] 王静,李娜. 上海城区动态洪水风险图应用系统及典型暴雨内涝分析[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2024,

- 55(3):61-76.
- Wang Jing, Li Na. The dynamics flood hazard map application system of urban area in Shanghai and typical rainstorm waterlogging analysis[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2024, 55(3): 61-76.
- [8] 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.
- [9] Li Wen, Jiang Rengui, Wu Hao, et al. A system dynamics model of urban rainstorm and flood resilience to achieve the sustainable development goals[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2023, 96(618): 104631.
- [10] 栾震宇,金秋,赵思远,等. 基于 MIKE FLOOD 耦合模型的城市内涝模拟[J]. *水资源保护*, 2021, 37(2): 81-88.
- Luan Zhenyu, Jin Qiu, Zhao Siyuan, et al. Simulation of urban waterlogging based on MIKE FLOOD coupling model[J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(2): 81-88.
- [11] 徐宗学,叶陈雷. 从“城市看海”到“城市看江”:极端暴雨情景下福州市洪涝过程模拟与风险分析[J]. *中国防汛抗旱*, 2021, 31(9):12-20.
- Xu Zongxue, Ye Chenlei. From “looking at sea in city” to “looking at river in city”: simulation and risk analysis of flood and waterlogging process in Fuzhou City under extreme rainstorm scenarios [J]. *China Flood & Drought Management*, 2021, 31(9): 12-20.
- [12] Chen Zipeng, Li Kun, Du Jianhua, et al. Three-dimensional simulation of regional urban waterlogging based on high-precision DEM model[J]. *Natural Hazards*, 2021, 108(3): 2653-2677.
- [13] Sarkar S K, Rahman M A, Esraz-Ul-Zannat M, et al. Simulation-based modeling of urban waterlogging in Khulna City [J]. *Journal of Water and Climate Change*, 2021, 12(2): 566-579.
- [14] Pedrozo-acuña A, Moreno G, Mejia-estrada P, et al. Integrated approach to determine highway flooding and critical points of drainage[J]. *Transportation Research Part D: Transport & Environment*, 2017, 50: 182-191.
- [15] 刘家宏,石虹远,梅超,等. 城市下垫面空间格局对社区尺度内涝过程的影响模拟[J]. *水科学进展*, 2022, 33(6):881-893.
- Liu Jiahong, Shi Hongyuan, Mei Chao, et al. Effect of urban subsurface spatial pattern on community-scale flooding processes via numerical simulation[J]. *Advances in Water Science*, 2022, 33(6): 881-893.
- [16] Eckart K, Mcphee Z, Bolisetti T. Multiobjective optimization of low impact development stormwater controls[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 562: 564-576.
- [17] Wang Simin, Jiang Rengui, Yang Mingxiang, et al. Urban rainstorm and waterlogging scenario simulation based on SWMM under changing environment[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(59): 123351-123367.
- [18] 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 model[J]. *Advances in Water Science*, 2020, 31(1): 29-38.
- [19] 王小杰,夏军强,董柏良,等. 基于汇水区分级划分的城市洪涝模拟[J]. *水科学进展*, 2022, 33(2):196-207.
- Wang Xiaojie, Xia Junqiang, Dong Boliang, et al. Simulation of urban flood using the SWMM with the hierarchical catchment partition method[J]. *Advances in Water Science*, 2022, 33(2): 196-207.
- [20] 侯精明,郭凯华,王志力,等. 设计暴雨雨型对城市内涝影响数值模拟[J]. *水科学进展*, 2017, 28(6): 820-828.
- Hou Jingming, Guo Kaihua, Wang Zhili, et al. Numerical simulation of design storm pattern effects on urban flood inundation[J]. *Advances in Water Science*, 2017, 28(6): 820-828.

(责任编辑 周 蓓)