

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.11.017

基于情景模拟的丘陵城市内涝治理方案研究

郭紫波, 张春洋, 范丹, 刘冠琦, 王生旺, 王家卓
(中规院<北京>规划设计有限公司, 北京 100044)

摘要: 为研究蓝-绿-灰设施耦合对城市洪涝的影响,有效提升城市内涝韧性,对信阳市高密度老城区新申河流域的内涝治理系统方案开展案例分析。运用InfoWorks ICM模型耦合片区管网、地形、河道,分析了不同动态情景模拟工况下,5种内涝治理方案的实施效果,验证了蓝-绿-灰设施耦合排涝对城市洪涝韧性的提升作用。研究表明,蓝-绿-灰设施对河道不同断面水位、风险区面积、溢流节点数、超载管道长度、积水体积的影响有所不同。在30年一遇24 h设计降雨条件下,蓝-绿-灰综合改造方案可使风险区面积减少22.00 hm²,使内涝峰值时刻延缓45 min,采用蓝-绿-灰融合的内涝治理方案改造效益显著。在此基础上,结合韧性城市建设、洪涝风险图管理等相关非工程措施,城区内涝积水风险可得到有效管控。

关键词: 内涝治理; 丘陵城市; 蓝-绿-灰设施; 韧性城市; 实施方案

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)11-0119-11

Waterlogging Control Scheme in Hilly Cities Based on Scenario Simulation

GUO Zi-bo, ZHANG Chun-yang, FAN Dan, LIU Guan-qi, WANG Sheng-wang,
WANG Jia-zhuo

(CAUPD Beijing Planning & Design Consultants Ltd., Beijing 100044, China)

Abstract: In order to study the impact of blue-green-gray coupling on urban flooding and effectively improve the resilience of urban flooding, a case study was carried out on the waterlogging control system scheme of Xinshen River basin, a high-density old urban area of Xinyang City. The InfoWorks ICM model was used to couple the pipe network, topography and river channel in the study area. The implementation outcomes of five waterlogging control schemes under various dynamic scenario simulation conditions were analyzed, and the effect of blue-green-gray facilities coupling drainage on the improvement of urban flood resilience was verified. The results showed that the blue-green-gray facilities had different effects on water level, risk area, the number of overflow nodes, the length of overloaded pipeline, and water accumulation volume across different river sections. Under the condition of 24-hour design rainfall with 30-year return period, the comprehensive blue-green-gray transformation scheme could reduce the risk area by 22.00 hm² and delay the peak time of waterlogging by 45 min, indicating significant benefits of this scheme. The risk of waterlogging in urban areas can be further effectively controlled after incorporation of relevant non-engineering measures such as resilient city construction and flood risk map management.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3001404); 住房和城乡建设部研究开发项目(2022-k-037)

通信作者: 张春洋 E-mail: zcycaupd@qq.com

Key words: waterlogging control; hilly city; blue-green-gray facilities; resilient city; implementation scheme

近年来,由气候变化及城镇化导致的雨洪灾害频发,我国众多城市均受到了不同类型、不同程度的内涝灾害影响。如何因城施策,合理确定城市内涝的整治措施和技术手段已成为行业广泛研究的热点问题^[1]。

关于城市内涝治理的系统方法,相关学者已进行了大量研究^[1-2],但当前开展的内涝治理方案研究多聚焦于内涝防治工程设施规模的设计,针对不同内涝防治措施下城市洪涝韧性动态过程的研究较少。此外,传统内涝治理措施更侧重于灰色基础设施,如排水管网、泵站和调蓄池,相较于蓝色和绿色内涝防治基础设施,灰色基础设施的维护成本更高,多功能性相对较低,且容易损坏,对气候的适应性较差^[3]。在新发展理念下,如何用统筹的方法有机融合蓝-绿-灰基础设施,协同开展城市内涝综合治理,是许多城市的实际迫切需求。

丘陵城市相较于平原城市径流系数大、汇流时间短,因此雨水径流总量大、峰值高,在洪涝响应过程中呈现雨急、坡陡、径流快的特征,加之汛期往往存在外洪入城风险,雨洪叠加情况下城市内涝防治压力较大^[4]。此外,很多丘陵城市老城区前期开发建设阶段对雨洪风险评估不足,洪涝通道、调蓄水面及低洼地等自然蓝绿空间被开发为建设用地,进一步加剧了内涝风险。因此,亟须开展基于动态内涝风险评估的城市内涝治理方案编制技术方法研究,这对科学识别城市洪涝韧性不足的具体原因、厘清城市内涝治理工作重点以及优化雨洪系统具有重要意义。

鉴于此,以信阳市新申河流域作为研究对象,基于该流域内涝问题成因分析,综合考虑上游山洪、下游外河顶托等复杂条件的影响,借助模型模拟方法耦合地表、管网和河道系统,精准评估蓝-绿-灰设施耦合方案在不同降雨情景下的内涝治理效果,构建了基于动态情景评估的城市内涝治理方案决策体系,提出了丘陵城市蓝-绿-灰设施融合实施内涝防治的具体思路,以期为其他类似城市的内涝治理提供经验参考。

1 研究区域概况

信阳市为淮河流域典型的丘陵城市,属亚热带向温暖带过渡地区季风气候,多年平均降雨量约为1 066 mm,降雨集中在5月—8月。2021年,信阳市中心城区共排查发现21处积水区段,其中80%的积水点分布在老城区,部分老城区滨河地势低洼段汛期积水深度超过1.00 m,开展城市内涝治理的民生需求迫切。新申河流域地处信阳市老城区,其洪涝问题成因较为复杂且具有代表性。新申河流域面积为17.31 km²,其排水系统如图1所示。流域内河道总长14.56 km,雨水管道总长58.80 km。新申河是流域内的主要雨洪排放通道,对片区防洪排涝安全起决定性作用,流域为重力自排方式,平均坡度约为2%。研究区域内城市防洪标准为50年一遇,城市内涝防治标准为30年一遇,管道设计重现期(P)标准为3年一遇。

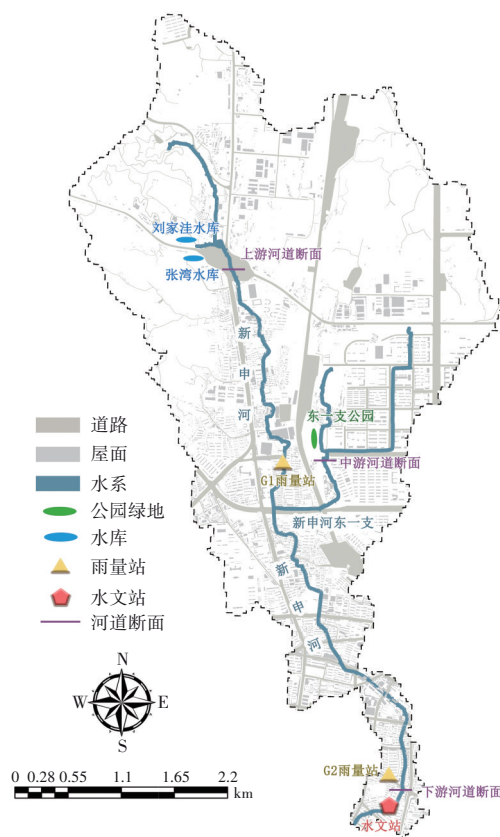


图1 研究区域的排水系统示意
Fig.1 Drainage system of study area

2 研究区域的耦合水动力模型仿真

2.1 耦合模型的构建

采用InfoWorks ICM模型构建研究区域的仿真模型,该模型具有强大的数据接口和模型构建检查工具,可高效耦合排水管网水力模型、河道水力模型和二维城市/流域洪涝淹没模型,被广泛用于城市的雨洪研究中。本研究案例构建的流域综合洪涝模型共概化管道 58.80 km、河道 14.56 km、子集水区 1 857 个。在边界条件设置方面,研究范围为封闭流域,无其他径流汇入,采用自由出流工况。

在地形高程模型方面,为提高二维地表漫流模型模拟结果的精度与可靠性,对地块的标高通过设置网格化区间抬升 30 cm,表征房屋门槛或台阶的挡水作用,并对修正后的地面高程模型进行 2D 区间网格化,共划分 75.85×10^4 个网格,其中最大网格面积为 50 m^2 、最小网格面积为 25 m^2 。

在降雨数据输入方面,采用本地长历时设计降雨(时间间隔为 5 min、降雨总历时为 24 h)对研究区域进行情景模拟,模拟设计降雨条件下的内涝动态淹没过程。信阳市不同重现期下的设计降雨雨型如图 2 所示。信阳市本地设计降雨雨型具有“单峰型、来得快、强度大、尾巴长”的特点,峰值时间为第 143 个 5 min 时段,即降雨过程的 715 min。5、10、30、50 及 100 年重现期下对应的 24 h 降雨总量分别为 211.72、247.85、305.12、331.75 和 367.89 mm,对应的最大小时降雨量分别为 56.53、66.18、81.46、88.58 和 98.22 mm。

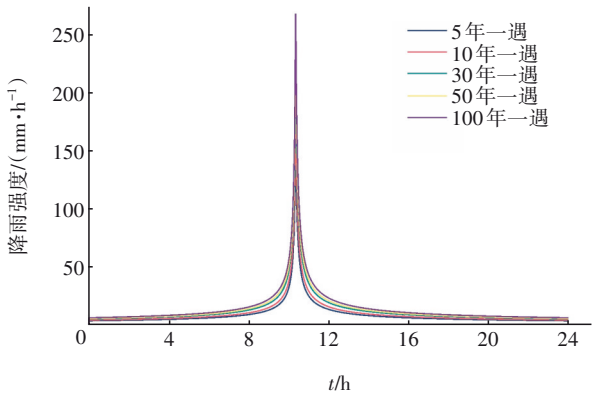


图2 不同重现期下 24 h 设计降雨雨型

Fig.2 24-hour design rainfall pattern under different return periods

共设置 5 种降雨情景:①情景一和情景二分别采用 5 和 10 年重现期,模拟超过管网系统设计标

准、但不超过内涝防治设计标准的降雨工况;②情景三为 30 年重现期,模拟内涝防治标准下的降雨工况;③情景四为 50 年重现期,模拟超过内涝防治标准的降雨工况;④情景五为 100 年重现期,模拟极端降雨工况。

2.2 模型参数的选取

本研究中,下垫面数据采用最新即第 3 次国土调查现状土地利用矢量数据,并将下垫面概化为硬地、裸地、坑塘水面、城区屋面、道路和绿地共六类,不同下垫面的产汇流参数率定后的取值如表 1 所示。研究范围内的土壤类型以黏土为主。考虑坑塘的调蓄功能,在模型中将坑塘水面概化为调蓄设施节点,当调蓄节点储满时,对应产流表面的雨水径流再汇入排水系统,因此设置其产流表面径流系数为 1。

表 1 模型主要参数校验取值

Tab.1 Verification values of main parameters in model

项目	径流量类型	固定径流系数	初渗率/ ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)	稳渗率/ ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)	衰减率/ h^{-1}	汇流模型	汇流参数
城区屋面	Fixed	0.9~1	—	—	—	SWWM	0.012
道路	Fixed	0.9~1	—	—	—	SWWM	0.013
硬地	Fixed	0.7~1	—	—	—	SWWM	0.020
裸地	Horton	—	70	3	3	SWWM	0.080
绿地	Horton	—	45	2	4	SWWM	0.150
坑塘水面	Fixed	1	—	—	—	SWWM	0.005

2.3 模型参数的率定与验证

数据采用信阳市中心城区水环境智慧管理平台 2021 年 7 月—2022 年 7 月的监测数据对模型进行率定与验证,包括 2 个雨量站点及 1 个河道水位监测站点,其位置分布详见图 1。河道水位和雨量站的监测数据采集频率分别为 5 和 1 min。值得注意的是,由于城市化地区降雨时空分布不均匀比较普遍,在模型率定及验证过程中,应选择分区和雨量站数据,以提高模型率定和验证的有效性。例如,2022 年 6 月 23 日—24 日的场次降雨,上游 G1 雨量站的降雨总量是下游 G2 雨量站的 3 倍。本研究案例中采用划分泰森多边形的方法合理确定 2 座雨量站的具体服务面积,并分区加载对应的实测降

雨。基于智慧管理平台已有实测数据,选取4场独立降雨开展模型的率定与验证,其中2场降雨(2022年6月4日—5日、6月23日—24日)用于率定、另2场降雨(2022年3月17日—18日、4月25日—26日)用于验证,结果显示,总体上模拟水位曲线与实测水位曲线基本吻合,表明模型较为可靠。在2022年4月25日—26日降雨过程中,河道峰值水位相对误差为14.8%,Nash-Sutcliffe效率系数为0.95,峰现时间和流量过程基本一致,满足《城镇内涝防治系统数学模型构建和应用规程》(T/CECS 647—2019)中模型参数验证要求,表明经概化的流域综合模型具有一定的科学性和可靠性。

2.4 现状评估分析

依据《河南省中心城区内涝风险评估报告编制纲要(试行)》,信阳市内涝风险区范围依据积水深度、积水时间及积水深度与流速的乘积三项指标划定,如表2所示。将三项指标均为Ⅲ级、三项中有一

项为Ⅲ级、三项均不符合Ⅲ级且有一项为Ⅱ级的判定为风险区域。

表2 内涝风险区划定标准

Tab.2 Criteria for delineating waterlogging risk areas

分级	积水深度/ cm	积水时间/ min	积水深度与流速的 乘积/($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
I	15~40	<60	<0.4
II	40~60	60~120	0.4~0.8
III	≥ 60	≥ 120	≥ 0.8

图3为5种重现期下研究区域现状风险区分布与8处历史内涝积水点的对比情况。总体而言,历史积水点基本位于风险区内。5、10、30、50和100年重现期下风险区面积分别为1.20、1.29、1.62、1.76和1.91 km^2 。从空间分布上,风险区主要位于流域下游老城区,主因是河道排水能力不足及部分滨河区域地势低洼,流域上游局部地势低洼的坑塘、农田及绿地等也存在内涝风险。

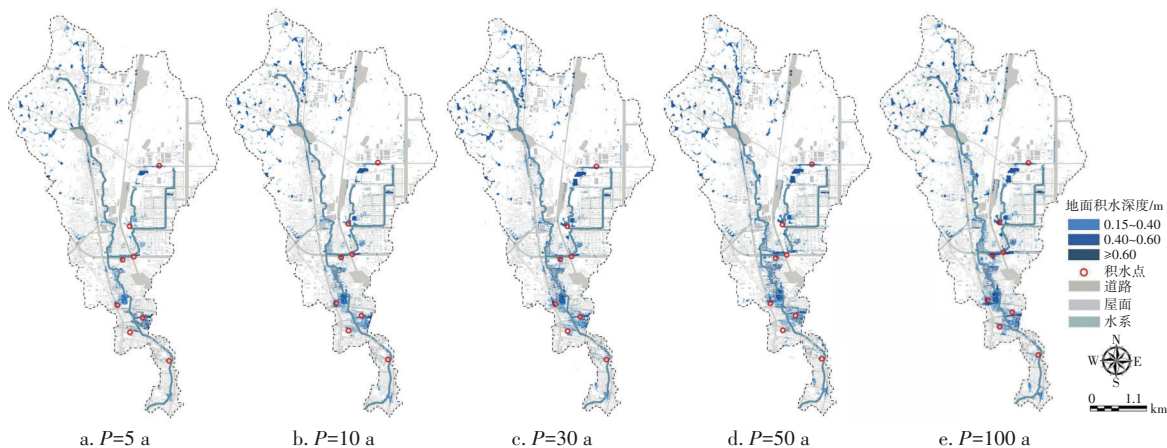


图3 模拟淹没风险区域与易涝点位置对比情况

Fig.3 Comparison of simulated inundation risk areas and location of flood prone points

结合模型评估结果及调研分析结果,从不同尺度研判新申河流域内涝的具体情况如下:①在流域层面,一是蓝绿天然雨洪调蓄能力仍有挖潜空间。例如,东一支公园是研究区域内具有0.50 hm^2 景观水体的公共开敞绿地空间(位置见图1),因现状公园未与河道水系联动,汛期公园绿地的雨洪蓄滞削峰功能尚未得到充分挖潜。二是外河水位顶托加剧了汛期内涝风险。新申河入外河狮河处的河底高程为71.10 m,相较狮河常水位低1.70 m,相较狮河50年一遇洪水位低4.25 m,外洪限制了流域内雨水的排出。②在城市层面,一是新申河下游老城区

骨干河道部分被侵占,16.28%的河道断面过流能力不足5年一遇,如图4所示。二是部分滨河地势低洼地被开发为建设用地,竖向管控不足导致其汛期积水风险高。如图4所示,徐家湾滨河区段因地势低洼,现状河段排水能力不足5年一遇,据调查该区域历史最大积水深度可达到1.50 m。三是智慧调度和信息化水平有待进一步提升,刘家洼水库及张湾水库是新申河上游的天然雨洪调蓄空间(位置见图1),但是现状水库主要按照防洪要求实施水位调度,未统筹考虑内涝防治标准下的峰值削减控制调度需求。

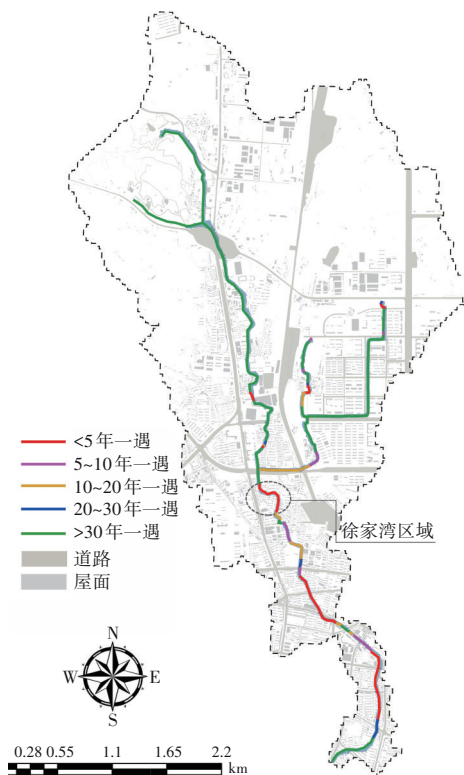


图4 河道能力评估结果示意

Fig.4 Diagram of river capacity assessment results

2.5 不同内涝治理方案设计情景

开展方案设计时,按照“生态优先,先蓄后排,近远结合”的基本原则,制定了“上蓄、中疏、下拓”的内涝治理策略。首先,挖潜流域存量蓝绿调蓄空间,突出源头峰值径流控制;其次,新建雨水箱涵,增加排水出路,疏解中游排水压力;再次,拓宽下游主干河道“卡脖子”点。据此制定了5种内涝治理方案,其中,方案1为现状工况。方案2和3均为充分发挥蓝绿基础设施调蓄削峰作用的方案,其中,方案2为优化湖库调度,主要是实施上游刘家洼水库和张湾水库智慧化调度改造,充分发挥既有水库 $2.00\times 10^4\text{ m}^3$ 调蓄空间的削峰功能;方案3在方案2的基础上,结合流域内实际建设情况实施东一支公园海绵化改造,新增调蓄能力为 $2.00\times 10^4\text{ m}^3$ 。方案4和5为蓝-绿-灰基础设施耦合方案。考虑征拆难度,采用大直径雨水箱涵代替大规模的河道拓宽,方案4在方案3的基础上,新增沿北京大道的 2.60 km 雨水箱涵,尺寸为 $4\text{ m}\times 4\text{ m}\sim 6\text{ m}\times 4\text{ m}$ (见图5);方案5在方案4的基础上,综合考虑拆迁难度,实施 1.40 km 骨干河道卡点拓宽(见图5),拓宽标准按照内涝防治标准30年一遇进行设计。

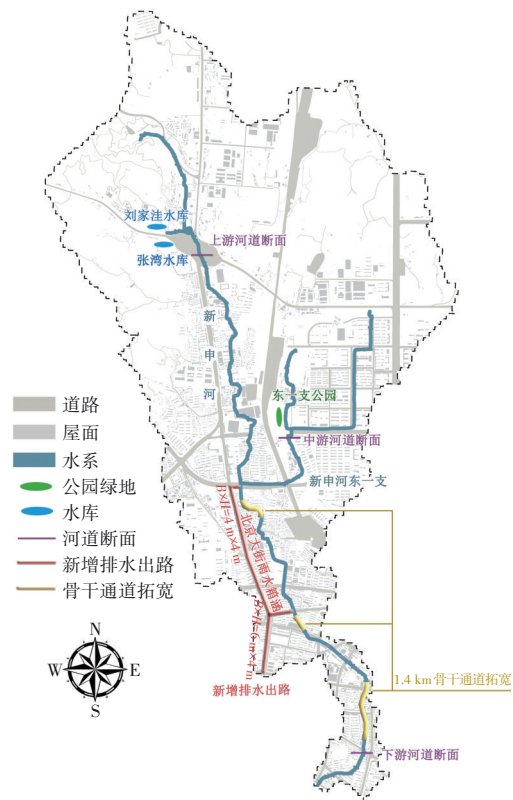


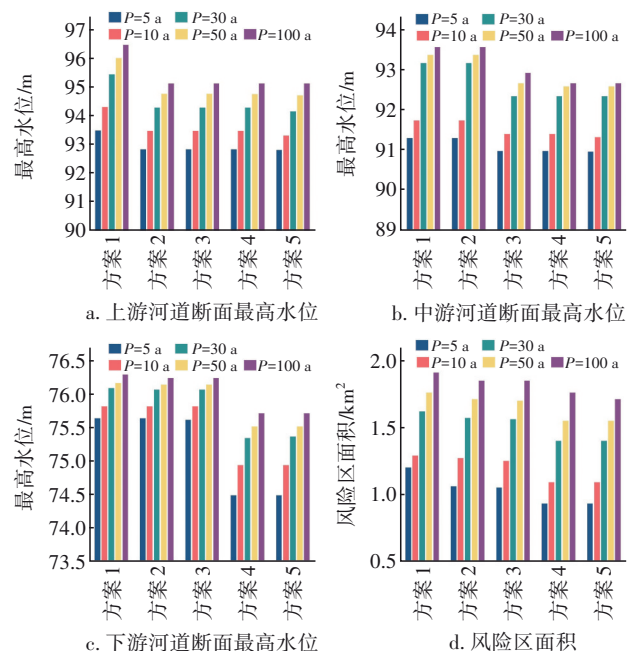
图5 研究区域的排涝设施布局示意

Fig.5 Waterlogging control system in study area

3 结果与分析

3.1 不同方案的内涝风险控制效果对比

5种重现期下新申河最高水位、风险区面积、管网溢流节点数量及超载管网长度见图6。随着重现期的增加,以上指标均呈现增加趋势。



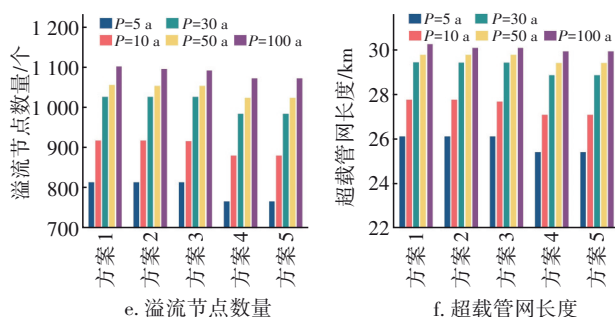


图6 不同降雨重现期下内涝治理方案的模拟结果

Fig.6 Simulation results of waterlogging control schemes under different rainfall return periods

图6(a)、(b)和(c)为河道峰值水位控制效果。以30年重现期为例,方案2新增蓝色调蓄设施后,上游断面最高水位比方案1降低0.58 m;方案3新增蓝绿调蓄设施后,上游断面最高水位比方案1降低0.41 m。但在方案2和方案3中,下游河道峰值水位无显著变化。这表明方案2和方案3设置的上游蓝绿基础设施对河道上游峰值水位的控制作用显著,但对下游河道峰值水位控制作用有限。在方案2和方案3的基础上,通过新增下游排水出路和拓宽骨干排水通道,下游河道峰值水位显著降低。方案4实施后,下游河道最高水位比方案3降低

0.29 m,比方案1降低0.30 m。这表明蓝-绿-灰设施耦合对上游和下游河道断面峰值水位均有较好的控制效果。图6(d)、(e)和(f)为风险区面积和管网溢流控制效果。以30年重现期为例,方案3的风险区面积相比方案1减少了6.00 hm^2 ,管网溢流节点数量及超载管网长度与方案1基本一致,这表明仅设置蓝绿调蓄设施可有效缓解内涝风险,但在管网溢流风险控制方面效果一般。相比方案1,方案5的风险区面积减少了22.00 hm^2 ,管网溢流节点减少了21个,超载管网长度减少了0.57 km,这表明蓝-绿-灰设施耦合可有效降低风险区面积,改善管网溢流风险。其他重现期下5种方案在河道峰值水位控制、内涝风险区降低和管网溢流风险控制方面的规律与30年重现期类似。

图7为方案5在不同重现期下的内涝风险区分布情况。5、10、30、50和100年重现期下的风险区面积分别为0.93、1.09、1.40、1.55和1.71 km^2 ,相较于方案1分别降低了22.50%、15.50%、13.58%、11.93%和10.47%,说明蓝-绿-灰综合改造方案在低设计重现期下对内涝风险区的改善效果更加显著。

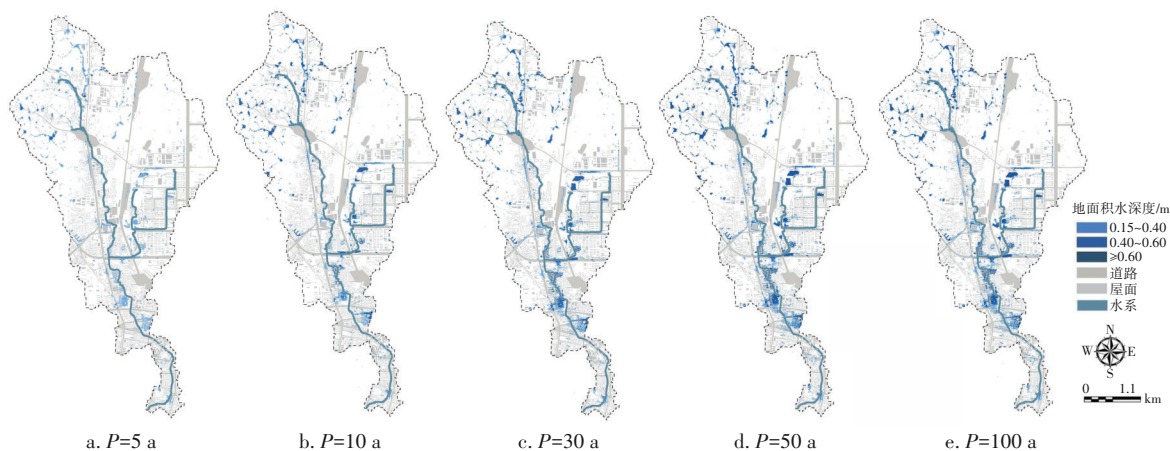


图7 方案5在不同降雨重现期下的淹没水深模拟结果

Fig.7 Simulation results of inundation depth in scheme 5 under different rainfall return periods

3.2 洪涝响应过程分析

3.2.1 地表积水量

不同重现期下地表积水量随时间的响应变化过程曲线如图8所示。总体而言,方案2~5的积水量峰值均显著低于方案1。如图8(b)所示,相较方案1,方案2~5的峰值时刻积水量分别降低了1.33%、4.24%、12.20%和12.36%,表明蓝色、绿色

及灰色设施均能有效控制场地内地表积水情况。另外,对比不同重现期下峰值时刻积水量的削减比例,发现30年重现期的积水量峰值削减效果最佳。以方案5为例,在5、30和100年重现期下,峰值时刻积水量的削减比例分别为7.53%、12.36%和9.49%,这表明设计方案在30年一遇的内涝防治设计标准下性能最优。经分析,主要是因为上游蓝绿

调蓄设施的水位调度规则是基于内涝防治标准30年一遇设计降雨情景下设置的,在低重现期(5年一遇)和超标重现期(100年一遇)下,蓝绿调蓄设施对降雨峰值径流的控制效果有所下降。

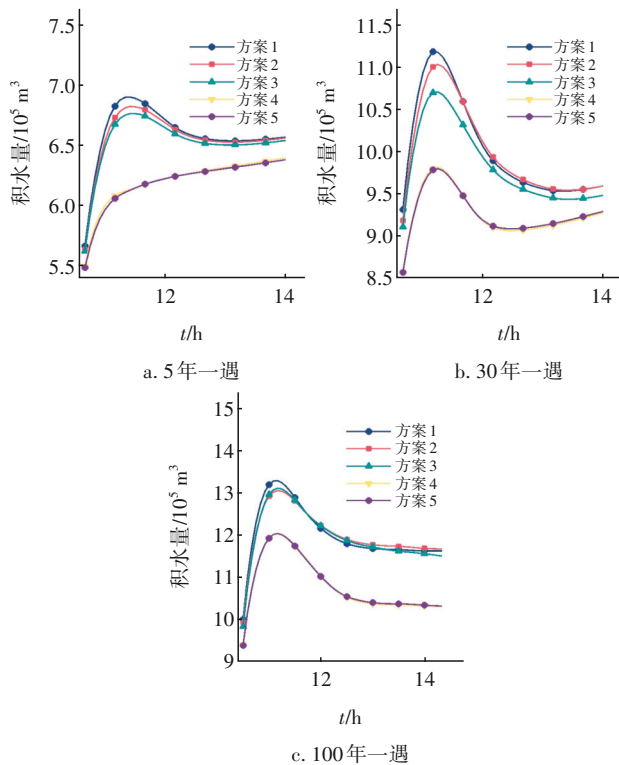


图8 地表积水量随时间的变化

Fig.8 Change in water accumulation on the ground over time

研究表明,在工程实践中,可结合实际调度需求,设置不同设计降雨情景下蓝绿调蓄设施的精细化水位调度规则,充分挖掘蓝绿基础设施对峰值径流的削减功能。

3.2.2 河道水位

30年重现期下5种方案中新申河不同断面水深随时间的变化如图9所示。图9(a)显示,相比方案1,方案2的上游河道断面最高水位降低16.02%,但内涝峰值时间无显著变化,这表明方案2通过优化水库调度对上游河段峰值时刻水位控制作用相对较为显著。图9(b)显示,相比方案1,方案3~5的中游河道断面最高水位分别降低11.33%、18.74%和24.15%,但内涝峰值时间无显著变化,这表明实施东一支公园海绵化改造、新增排水出路和拓宽骨干河道均能有效改善中游河道峰值时刻排水压力。图9(c)显示,相比方案1,方案4和5的下游河道水

位线在整个降雨过程中均显著降低,且峰值时刻最高水位分别降低9.70%和10.26%,峰值水位出现时间延迟45 min,这表明新增下游排水出路和拓宽骨干排水通道对缓解河道下游排水压力具有重要意义。

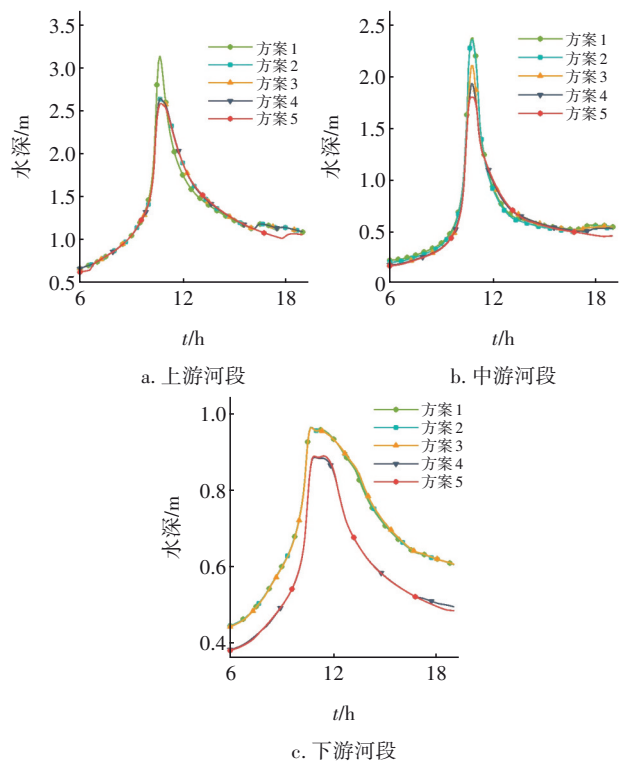


图9 新申河不同断面的水深随时间的变化

Fig.9 Change in water depth at different sections of Xinshen River over time

3.3 洪涝叠加不利工况下的积水风险应对

30年重现期下50年一遇洪水位顶托和自由出流两种边界条件下的积水情况对比如图10所示。图10(a)显示,相比自由出流条件,外洪顶托条件下5种方案的风险区面积增加了8.48%~10.20%,新增风险区面积0.14~0.15 km²。图10(b)显示,总体而言,相较自由出流条件,50年一遇洪水位顶托条件下积水量显著增加,其中在峰值时刻积水量增加了12.75%。经分析,在内涝积水峰值时刻,洪水位顶托及自由出流两种边界条件下的河道流量及流速基本一致,主要是因为峰值时刻河道内水流为压力流,外洪水位顶托作用相对较弱。但在内涝积水峰值时刻前后,河道主要为重力流排放,受外洪顶托影响,河道流量及流速均显著降低,导致外洪顶托下流域内积水量显著增加。

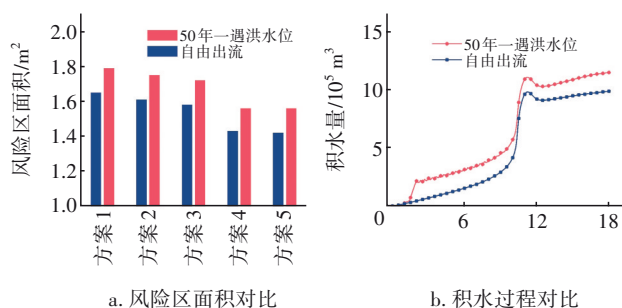


图10 外洪水位对内涝过程的影响

Fig.10 Impact of flood level on waterlogging process

方案5在30年重现期下50年一遇洪水位顶托相比自由出流的新增风险区分布情况如图11所示。从空间分布上看,新增风险区域主要集中在流域下游申城大道南侧地块等狮河滨江区域。经现场调研,汛期此区域时有积水发生。考虑“十四五”期间对该积水区域新增排涝泵站等灰色设施落地实施难度较大,近期主要结合信阳市中心城区内涝风险评估图编制工作,将相关风险区域纳入汛期城市内涝风险管理区域,并通过移动泵车、强化紧急避险和转移安置等非工程措施进行有效应对。远期结合城市更新改造,系统提升该区域洪涝风险应对能力。



图11 50年一遇外洪水位顶托下新增风险区域分布

Fig.11 Distribution map of new risk areas under the support of 50-year flood level

3.4 地势低洼处积水风险应对

方案5在30年重现期下徐家湾滨河地势低洼处 3.96 hm^2 积水风险区域分布情况如图12所示。该区域内最不利时刻积水总量达到 $5.48 \times 10^3 \text{ m}^3$ 。经分析,该处积水风险区域主要集中在高程约80~81 m的地势低洼处,而该河段在30年重现期下的最高

水位为81~82 m,这表明河道设计最高水位高于河岸周边区域,降雨峰值时刻河段漫溢导致该区域存在积水风险。

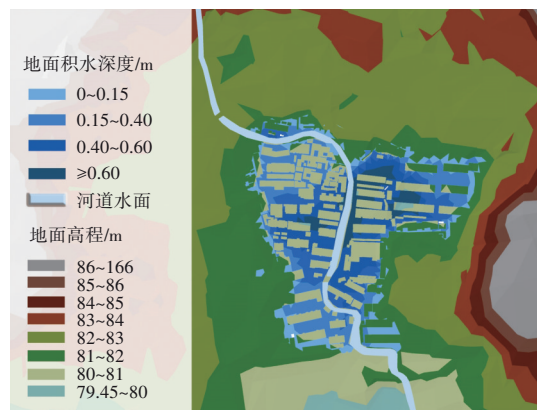


图12 滨河地势低洼处徐家湾区域内涝风险分布图

Fig.12 Waterlogging risk distribution map of Xujiawan area in low-lying riverside terrain

“分级设防、雨旱两宜、人进水退、人退水进”的滨河公共开放空间弹性利用方式被各城市广泛接纳,但在高密度老城区,由于城市基础设施傍水发展,众多住宅、商业和市政基础设施分布于滨江沿河地带,建设初期对雨洪风险的冗余和排水系统的韧性重视不足,导致存量的地势低洼风险区沿河分布。结合新申河流域实际情况,近期将沿河地势低洼区全部进行地表高程抬高改造的可行性较低,改造难度较大、投资成本高,主要考虑采用非工程措施应对高风险频率的内涝积水,包括调整风险区域内低层建筑的使用功能,完善应急避险设施配置等。在应急措施方面,建成区应急排涝能力按照不低于 $100 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{km}^2)$,高风险区应急排涝能力按照不低于 $150 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{km}^2)$,群众防汛队伍按照每千米堤防100人组织常备队,防汛物资按照《防汛物资储备定额编制规程》(SL 298—2004)足额储备。此外,充分吸取郑州“7·20”特大暴雨洪涝事件的经验教训,针对近期无法搬迁的低于设计洪涝水位的供排水、通信等设施设备,近期强化保护措施,远期结合城市更新改造计划,统筹滨河道路、建筑、景观和空间安全,有序实施沿河低洼地带老旧小区搬迁改造。

4 讨论

4.1 丘陵城市内涝治理关键措施

丘陵城市地形起伏大、地形复杂的地貌特征导

致河流比降大、汇流急,涝水形成机理方面具有时间短、峰值流量大的特征^[4]。加之丘陵城市傍水发展,适宜开发利用空间狭小,因此在城市开发过程中天然坑塘、渠道等蓝绿空间未能得到充分保护,流域主要排水通道及调蓄空间被侵占,水文循环受阻,城区内涝风险进一步增加^[1]。此外,滨水地带存在外河水位顶托和城区内涝的复合威胁。结合信阳市研究案例,此类城市在制定内涝方案时应重点关注以下几个方面:一是涝水通道有预留。相较平原城市,丘陵城市应充分利用自然排水条件好的竖向优势,按照城市内涝防治标准预留或新增涝水排放径流通廊。二是蓄滞空间有保护。丘陵城市因高低起伏的地势形成了天然水域坑塘等丰富的立体蓄滞水空间,信阳市结合这一特征,在城区划定109处天然水域坑塘蓝线保护范围,制定具体保护方案,结合东一支公园等具有景观水体的公园绿地海绵化改造,充分拓展城区蓄滞空间。值得注意的是,内涝防治标准下24 h降雨径流总量大、峰值高,应通过科学设置调蓄水位等充分发挥城区内存量的区域蓄滞空间对径流峰值的削减作用,尤其是注重流域上游湖库的径流峰值调蓄,降低涝水转移至内河及下游地区的速度,从而有效削弱内涝防治压力。三是外洪顶托有应对。随着城市洪涝模型的精细化程度和精度不断提高,结合模型定量评估分析,可精准识别外洪顶托下的内涝风险区域,并纳入城市洪涝风险图管理。

4.2 高密度区内涝治理关键措施

高密度开发建设城区内涝灾害具有以下特点:一是内涝灾害突发性强,城区下垫面变化催生了“雨岛效应”等气候变化,局部易突发短历时强降雨;二是致灾速度快,城市密集开发建设导致城市水文循环系统被破坏,内涝峰值流量增大,内涝峰值时间提前,叠加短时强降雨,形成“脉冲式”暴雨内涝灾害;三是内涝灾害损失大,人口及基础设施稠密,城市生命线等防御难度较大^[5]。此类区域在制定内涝方案时应重点关注以下几个方面:一是提升排涝工程系统韧性,挖潜流域存量蓄排空间。以新申河流域为例,地上空间限制的区域可通过利用地下空间新增排水出路,并有序实施骨干排水出路拓宽,结合水库调蓄、公园绿地调蓄等,在流域尺度布局多元分散、蓄排结合的工程措施体系。二是提升城市生命系统韧性。信阳市充分结合城市更新、

旧城改造等工作,对潜在的内涝风险区进行生命线等基础设施的主动防护,缓解人口密集区的内涝防治压力。三是完善洪涝智慧调度体系。信阳市基于中心城区智慧水务管理平台,设计了在线预报预警内涝模型,强化城市洪涝智能预警与智慧调度系统建设,提升城市应对内涝风险的应急响应能力。

4.3 蓝-绿-灰措施分析

为充分发挥蓝-绿-灰综合方案的整体效益,蓝色设施可从以下几个方面开展具体措施:一是保护蓝色空间,如上海市按照10.5%的水面率严格控制河湖用地^[6];二是挖潜蓝色调蓄空间,通过实施水系连通、断头浜整治等措施提升水系连通性,并结合联排联调等优化湖库水位调度,实施精细化智慧调度管理,提高蓝色空间效用;三是建设蓝绿融合的行泄通道,通过降低沿河绿地高程、河岸生态化改造措施等,建设旱涝皆宜的弹性河道。绿色设施方面,可采用在灰色基础设施管网前设置雨水花园等小型分散绿色基础设施,或在灰色基础设施管网末端设置湿地公园等绿色基础设施。值得注意的是,绿地景观破碎化程度较低的区域一般内涝程度较小,Armson等^[7]研究证实,当绿斑面积达到9 m²,可有效减少地表径流。同时要注重提升绿色基础设施质量,更健康或更密集的植被对雨水径流的拦截和储存效果更优^[8]。

本研究案例中,30年重现期下蓝绿设施、灰色设施及蓝-绿-灰综合改造方案对内涝风险区面积的削减比例分别为6.00%、16.00%和22.00%。相较蓝绿设施,新申河流域灰色设施的径流控制效果更好。这主要是因为流域内高密度开发区建设,蓝绿设施空间规模受限。而新城区蓝绿生态资源丰富,蓝绿设施对径流的控制效果比灰色设施更好,如Chen等^[9]在山东烟台的新城区经济技术开发区的研究案例表明,蓝绿设施及灰色设施对峰值径流的削减率分别为36.11%和22.61%。此外,不难发现,新申河流域采用蓝-绿-灰综合改造方案对内涝风险区控制效果最佳。蓝-绿-灰综合改造方案既具备绿色和蓝色基础设施的弹性和可持续性,也具备灰色基础设施的可靠性,因此其在内涝缓解方面综合效益最佳。Li等^[10]在南宁城区竹排冲流域的研究表明,在30年重现期下蓝-绿-灰综合措施对暴雨径流的控制率可达25.5%。Wang等^[11]在东营市的研究表明,按照规划系统实施蓝-绿-灰综合措施

后,至远期30年重现期下的洪水风险降低率可达到85.5%。

4.4 情景模拟的局限性分析

东一支调蓄公园改造工程主体完工后,中游河道断面模拟及实测水位的对比情况如图13所示。

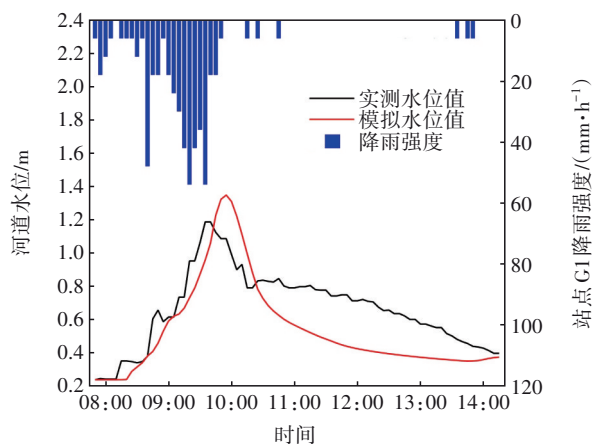


图13 新申河中游断面模拟及实测水位对比

Fig.13 Comparison of simulated and measured water levels in midstream section of Xinshen River

在2024年3月23日场次降雨中,最大小时降雨量为32.5mm,降雨总量为44mm。模拟水位与实测水位总体较为吻合,其中河道峰值水位相对误差为12.0%,Nash-Sutcliffe效率系数为0.92,峰现时间偏差为15min,这表明经率定和验证后的模型在方案工况情景下仍具有一定的适用性。然而,实测水位数据与模拟水位过程曲线之间仍存在偏差,表明模型模拟结果具有一定的局限性。这主要是由于模型参数存在不确定性。Lewellyn等^[12]和Mobilia等^[13]大量研究表明,降雨曲线形状、降雨强度和持续时间会影响蓝-绿-灰措施的效能,因此同一组参数难以应用于所有降雨事件。此外,本研究还存在以下不足:第一,受限于工程实施进展及实测数据,仅采用1场降雨事件中部分工程的实施效果进行校验;第二,仅对内涝治理效果进行分析,未考虑水质、成本等多重目标需求;第三,液位器在读取水位数据时存在时间间隔的制约和数据传输的不稳定性,致使获取的水位数据存在一定误差。另外,本案例模拟分析中存在的主要困难包括:第一,有效数据获取难度较大,本研究因获取的河道流量数据与降雨数据的对应关系较差,实际模拟分析中仅采用可靠性相对较高的水位数据;第二,情景分析需要的数据及仿真结果精度较高,导致模型构建及训

练成本较高。

结合本研究案例实际情况,提出情景模拟分析的主要实践建议如下:一是合理设置模型参数,结合不同降雨情景,构建本地模型参数数据库,减少模型不确定性对结果的影响;二是注重数据质量和预处理,对水位、流量等数据进行必要的筛选、清洗和转换,确保输入数据的质量、完整性和一致性;三是明确模拟的目标和需求,权衡好模型复杂度与精度,合理概化模型,控制计算成本,如没有内涝积水风险的区域可通过设置较大网格面积提升计算效率;四是结合智慧平台建设等工作强化内涝数据的收集与监测,有效提高模型的准确性和可靠性。此外,Bates^[14]研究表明,采用大数据技术可有效解决模拟数据不足的问题。

5 结论

① 构建了精细化的流域内涝风险评估模型,并基于不同情景开展涝水动态过程模拟分析,精准评估城市内涝综合治理方案实施效果,相关模型评估方法可为类似丘陵城市制定城市洪涝韧性提升方案提供借鉴参考。

② 提出了优先挖潜老城区存量蓝绿调蓄空间,再布置灰色排水设施的内涝治理方法,该方法具有普适性。新申河流域采取的“上蓄、中疏、下排”的内涝治理策略可为其他老城区有机融合蓝-绿-灰基础设施、统筹考虑存量与增量内涝防治提供经验参考。本研究案例表明,蓝绿调蓄方案对流域上游的内涝风险控制效果相对较好,在30年重现期下可降低风险区面积6.00hm²;蓝-绿-灰综合改造方案可以进一步缓解流域下游河道断面排水压力,在30年重现期下可降低风险区面积22.00hm²,延缓内涝峰值时刻45min。

③ 对于高密度老城区难以通过工程措施实现内涝防治要求达标的区域,近期应综合考虑移动泵车等非工程措施效果,结合韧性城市建设等管控措施提升城市应对雨洪灾害的冗余性和稳健性。

参考文献:

- [1] 杨海燕,黄明阳,周广宇,等.基于流域的沿海山地城市防洪排涝规划方案设计[J].中国给水排水,2023,39(5):133-138.
YANG Haiyan, HUANG Mingyang, ZHOU Guangyu, et al. Design of flood control and drainage planning scheme for

- coastal mountainous cities based on watershed [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(5): 133-138 (in Chinese).
- [2] 李昂臻, 沈旭, 王勇, 等. 陕西省省级城市内涝治理实施方案编制的探索与思考[J]. 中国给水排水, 2022, 38(12): 125-131.
- LI Angzhen, SHEN Xu, WANG Yong, *et al.* Exploration and reflection on the compilation of the provincial implementation plan of urban waterlogging control in Shaanxi Province [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(12): 125-131 (in Chinese).
- [3] 胡坚, 王红武, 赵宝康, 等. 镇江虹桥港区灰-绿-蓝设施组合构建海绵系统[J]. 中国给水排水, 2018, 34(12): 5-8.
- HU Jian, WANG Hongwu, ZHAO Baokang, *et al.* Sponge system construction by coupling gray, green and blue infrastructure in Hongqiaogang, Zhenjiang City [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(12): 5-8 (in Chinese).
- [4] 杨楠, 张练, 陈兵, 等. 西南丘陵地区排水(雨水)防涝综合规划研究[J]. 中国给水排水, 2019, 35(22): 24-29.
- YANG Nan, ZHANG Lian, CHEN Bing, *et al.* Study on comprehensive planning of drainage (stormwater) flood control in southwest hilly area [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(22): 24-29 (in Chinese).
- [5] 刘家宏, 王开博, 徐多, 等. 高密度老城区海绵城市径流控制研究[J]. 水利水电技术, 2019, 50(11): 9-17.
- LIU Jiahong, WANG Kaibo, XU Duo, *et al.* Study on runoff control for sponge city construction of high-density old urban district [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(11): 9-17 (in Chinese).
- [6] 李学峰, 赵敏华, 林发永. 上海市排水防涝“蓝-绿-灰”海绵空间融合探索[J]. 中国防汛抗旱, 2023, 33(5): 14-18.
- LI Xuefeng, ZHAO Minhua, LIN Fayong. Exploration of the integration of “blue-green-grey” sponge space for drainage and flood management in Shanghai [J]. China Flood & Drought Management, 2023, 33(5): 14-18 (in Chinese).
- [7] ARMSON D, STRINGER P, ENNOS A R. The effect of street trees and amenity grass on urban surface water runoff in Manchester, UK [J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2013, 12(3): 282-286.
- [8] ZHANG Q F, WU Z F, PAOLO T. Investigating the role of green infrastructure on urban waterlogging: evidence from metropolitan coastal cities [J]. Remote Sensing, 2021, 13(12): 2341.
- [9] CHEN J X, WANG S S, WU R B, *et al.* Optimization of the integrated green-gray-blue system to deal with urban flood under multi-objective decision-making [J]. Water Science & Technology, 2024, 89(2): 434-453.
- [10] LI Q Y, YANG Y C, LIAO H X, *et al.* The simulation, regulation capacity assessment and coping strategy of rainstorm runoff waterlogging in Zhu pai-chong Basin of Nanning, China [J]. Journal of Environmental Management, 2023, 332: 117395.
- [11] WANG J, LIU J H, MEI C, *et al.* A multi-objective optimization model for synergistic effect analysis of integrated green-gray-blue drainage system in urban inundation control [J]. Journal of Hydrology, 2022, 609: 127725.
- [12] LEWELLYN C, LYONS C E, TRAVER R G, *et al.* Evaluation of seasonal and large storm runoff volume capture of an infiltration green infrastructure system [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2016, 21(1): 04015047.
- [13] MOBILIA M, LONGOBARDI A. Impact of rainfall properties on the performance of hydrological models for green roofs simulation [J]. Water Science and Technology, 2020, 81(7): 1375-1387.
- [14] BATES P. Fundamental limits to flood inundation modelling [J]. Nature Water, 2023, 1(7): 566-567.
- 作者简介:**郭紫波(1992-),女,湖南常德人,硕士,工程师,主要从事城市生态与基础设施规划设计工作。
- E-mail:**941286812@qq.com
- 收稿日期:**2024-04-04
- 修回日期:**2024-05-09

(编辑:刘贵春)