

城市内涝洪水演进模拟及影响分析

——以江西省某城市片区为例

张闯¹, 黄河², 蒋水华¹, 常志璐^{1,3}, 李彧玮², 张建华²

(1. 南昌大学 工程建设学院, 江西 南昌 330031; 2. 中铁水利水电规划设计集团有限公司, 江西 南昌 330029; 3. 南昌大学 资源与环境学院, 江西 南昌 330031)

摘要:近年来极端降雨事件频发,城市内涝灾害愈发严峻,已严重威胁城镇居民人身与财产安全,同时也造成了重大的社会经济损失。准确模拟极端降雨情景下城市内涝洪水演进过程是评估和防控内涝灾害风险的前提,然而准确模拟内涝洪水演进过程具有一定的挑战性。为此,以江西省某城市片区为例,通过 MIKE FLOOD 平台构建 MIKE URBAN 和 MIKE 21 耦合模型,分别模拟研究区在典型历史降雨事件和极端降雨情景下(10、20 a 一遇 2 h 降雨)城市内涝洪水演进过程,分析管网排水能力、最大淹没水深和易涝点积水深度的变化规律,并结合现场内涝积水数据验证了所构建耦合分析模型的有效性。结果表明:MIKE FLOOD 平台模拟城市内涝洪水演进的效率较高,模拟结果可靠;研究区排水管网排水能力在小于 10 a、10~20 a 和大于 20 a 一遇的占比分别为 77.3%、2.1% 和 20.6%,且积水深度等级以轻度积水(<0.15 m)为主,有 6 个易涝点达到重度积水等级,最大积水深度超过 1.00 m;易涝点积水深度先快速增大至最大积水深度,后缓慢下降并趋于平稳,易涝点最大积水深度随着降雨强度的增大而缓慢增大。研究成果可为其他类似城市内涝洪水演进模拟、灾害防治及海绵城市建设提供参考。

关键词:城市内涝;城市管网;排水能力评估;洪水演进模拟;MIKE FLOOD

中图分类号:TU992

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2024)06-0023-10

Flood evolution simulation and impact analysis of urban waterlogging:

A case study of a city district in Jiangxi Province

ZHANG Chuang¹, HUANG He², JIANG Shuihua¹, CHANG Zhilu^{1,3}, LI Yuwei², ZHANG Jianhua²

(1. School of Infrastructure Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 2. China Railway Water

Conservancy & Hydropower Planning and Design Group Co., Ltd., Nanchang 330029, China;

3. School of Resources & Environment, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: In recent years, extreme heavy rainfall events occurred frequently, and urban waterlogging disasters became increasingly severe, which have seriously threatened the lives and property of urban residents, resulting in significant social and economic losses. Accurate modeling of urban waterlogging evolution under extreme rainfall situations is the premise of assessing and controlling the waterlogging disaster risk; however, accurately simulating the progression of floodwater faces certain challenges. To this end, a district in a city of Jiangxi Province is selected as the case study, and the coupling model of MIKE URBAN and MIKE 21 is constructed at MIKE FLOOD platform for the analysis. With this coupling model, the evolution processes of urban waterlogging under a typical historical rainfall event and extreme rainfall scenarios (10 a and 20 a) in the study area are simulated respectively. Then, the variations of drainage capacity of pipe network, maximum inundation depth and water depth at vulnerable waterlogging points are analyzed, and the effectiveness of the proposed model is verified by field waterlogging data. The results show that MIKE FLOOD platform can simulate the urban waterlogging evolution with high efficiency

收稿日期:2024-04-18; 修回日期:2024-07-15

基金项目:国家优秀青年科学基金项目(52222905);江西省水利科技计划项目(202325ZDKT07、202426ZDKT12);江西省自然科学基金项目(20242BAB24001、20232ACB204031、20224ACB204019);江西省研究生创新专项资金项目(YC2023-S208)

作者简介:张闯(1999—),男,湖北应城人,硕士研究生,主要从事城市雨洪模拟与内涝防治方面的研究。

通讯作者:蒋水华(1987—),男,江西九江人,博士,教授,博士生导师,主要从事水利水电工程灾害风险评估方面的研究。

and reliable prediction results. In the study area, the proportions of the drainage capacity of the drainage pipe network for less than 10 a, 10 – 20 a and more than 20 a return periods are 77.3%, 2.1% and 20.6%, respectively. Most water depths are less than 0.15 m, and there are six vulnerable waterlogging points reaching the severe level with the maximum water depth more than 1 m. The water accumulation depths at the waterlogging points rapidly increase to the maximum depth, and then slowly decrease and remain stable. The maximum water accumulation depths at vulnerable waterlogging points gradually increase with the increase of rainfall intensity. The research results can provide references for flood evolution simulation, disaster prevention and sponge city construction in other cities facing the problem of urban waterlogging.

Key words: urban waterlogging; urban pipe network; drainage capacity assessment; flood evolution simulation; MIKE FLOOD

1 研究背景

近年来,由于全球气候变暖导致极端暴雨天气频发,同时随着城市化进程加速推进,城市内涝问题日趋严峻。尤其是低海拔及人口与建筑密集地区受城市内涝影响更大,已严重威胁到城镇居民人身与财产安全及基础设施的正常运行,因此,加强极端暴雨情景下城市内涝灾害防治研究十分紧迫^[1-2]。根据水利部相关数据,2022年全国有29个省(自治区、直辖市)发生了不同程度的洪涝灾害,共造成3385.26万人受灾,171人死亡,3.13万间房屋倒塌,农作物受灾面积达341.37万 hm^2 ,直接经济损失达1288.99亿元,其中,江西、福建、广东、辽宁、湖南和广西等6省(自治区)的城市内涝灾情较重,造成直接经济损失782.39亿元,占当年全国自然灾害直接经济损失的68.46%^[3]。为解决城市内涝问题,亟需开展城市内涝致灾机理、洪水演进过程及减灾对策等方面的研究,这对我国城市内涝灾害科学防控具有重要的科学意义^[4]。

目前,国内外学者围绕城市内涝灾害的致灾机理与损失风险评价问题,主要采用数值模拟方法,结合已开发的多种相关模型,如暴雨洪水管理模型(storm water management model, SWMM)、Info Works模型和MIKE系列模型等开展了一系列研究,并取得了丰硕的成果^[5]。其中,Zakizadeh等^[6]利用SWMM模型,模拟了伊朗德黑兰大都会城市流域的水质和径流过程;Hu等^[7]通过SWMM模型对合肥市海绵城市设施改造的效果进行了评价;李碧琦等^[8]将SWMM模型与二维水动力模型耦合,分析了民治片区城市的内涝情况,并构建城市内涝风险评估指标体系;黄国如等^[9]基于Info Works模型,根据调查结果采用合成曲线法评估了内涝损失;Liu

等^[10]基于SWMM 5.1模型,采用最大溢流深度、最大溢流容积和溢流能力3个指标评价了城市内涝治理工程的效果,并提出了一种新的排水管网改造方法;Bisht等^[11]将SWMM模型与城市管网模型MIKE URBAN相结合,评估了印度理工大学在极端降雨条件下的淹没情况,为改善管网排水能力提供了参考;栾震宇等^[12]通过耦合MIKE URBAN模型与MIKE 21模型,对湖南省新化县排涝情景进行了模拟。可见,上述模型在城市内涝模拟、水质模拟和海绵城市低影响开发研究中得到了广泛应用^[13],且不同模型在城市内涝模拟方面各有优缺点。其中,SWMM模型软件免费且适合二次开发,但只能进行一维城市管网模拟;Info Works模型实现了城市排水管网模型与河道模型的整合,但价格昂贵且需要大量基础资料,建模比较困难;相比之下,MIKE系列模型结果显示更加直观、界面友好、功能全面且计算精度更高,该系列模型已被广泛应用于城市内涝灾害的危险性和风险评估方面^[14-15]。

综上所述,由于城市内涝灾害的致灾机理复杂,内涝洪水演进过程受到多种因素的影响。目前的分析方法面临数据获取困难、模型耦合不充分和验证不足等问题,这些问题导致分析城市内涝洪水演进过程及影响的基础相对薄弱,因此亟需对其开展深入系统的研究。

本文以江西省某城市片区为例,在收集研究区管网设计资料、实地考察与内涝新闻报道和气象数据(<https://rp5.ru>)的基础上,通过MIKE FLOOD平台建立城市内涝耦合分析模型,模拟不同降雨情景下城市内涝洪水演进过程,并结合现场数据对比验证了耦合分析模型的有效性。在此基础上,根据模拟结果进行城市内涝灾害影响分析,包括评估管网排水能力等级、揭示城市内涝积水深度变化规律和分析易涝区域的内涝成因,研究成果可为制定针对

性的城市内涝灾害防治措施和提升城市防洪排涝能力提供参考。

2 城市内涝耦合分析模型

2.1 洪水演进控制方程

在现代城市基础设施系统中,地下排水管网是地表径流排放的重要组成部分,城市排水管网通过检查井(人孔)和排放口分别与地表、河道和大海进行水量交换^[16]。本文基于 MIKE FLOOD 平台,将 MIKE URBAN 城市管网模型和 MIKE 21 水动力模型耦合,构建极端降雨情景下城市内涝洪水演进耦合分析模型。其中,MIKE URBAN 模型包括降雨径流计算模块和排水管网水动力计算模块两部分,分别用于模拟雨水在地表的产生、流动和雨水流入排水管网后的流动情况。该模型将水流视为非恒定流,并采用一维非恒定圣维南方程组模拟管网的水流状态。一维圣维南方程组见公式(1)、(2)^[17]。

$$\frac{\partial Q}{\partial s} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial s} + \frac{\partial(\alpha Q^2/A)}{\partial s} + gA \frac{\partial h}{\partial s} + \frac{gQ|Q|}{C^2AR} = 0 \quad (2)$$

式中: Q 为过水断面流量, m^3/s ; A 为过水断面面积, m^2 ; s 为沿水流长度, m ; t 为计算时间, s ; g 为重力加速度, m/s^2 ; h 为水深, m ; R 为水力半径, m ; α 为垂向速度分布系数; C 为谢才系数。

在 MIKE 21 水动力模型中,采用二维圣维南方程作为控制方程组,选择交替方向隐式差分法(alternating direction implicit, ADI)格式进行求解计算,以减少计算成本^[18]。MIKE 21 水动力模型可以通过人孔连接和侧向连接方式,与 MIKE 11、MIKE URBAN 模型耦合,进行二维地表漫流水动力模拟,并计算城市内涝洪水淹没范围、流速、水深和淹没时间等数据。二维圣维南控制方程组见公式(3)^[19]; x 方向上的二维水流动量方程为公式(4)。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial \bar{h}\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{h}\bar{v}}{\partial y} = hS \quad (3)$$

式中: t 为计算时间, s ; x 、 y 为笛卡尔坐标系坐标; h 为水深, m ; \bar{u} 、 \bar{v} 为流速在 x 、 y 方向上的分量平均值, m/s ; S 为源汇项。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{h}\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{h}\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial \bar{h}\bar{u}\bar{v}}{\partial y} = f\bar{v}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \\ \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{hx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial S_{sx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial x} \right) + \frac{\partial(hT_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(hT_{xy})}{\partial x} + hu_s S \end{aligned} \quad (4)$$

式中: η 为水面到基准面的高度即水位, m ; P_a 为当地大气压, Pa ; ρ 为水的密度, kg/m^3 ; ρ_0 为参考水密度, kg/m^3 ; f 为柯式力, N , $f = 2\omega \sin \varphi$, ω 为地球自转角速度, rad/s , φ 为当地纬度, $(^\circ)$ 。 S_{xx} 、 S_{xy} 为辐射应力分量, Pa ; T_{xx} 、 T_{xy} 为水平黏滞应力, Pa ; τ_{sx} 、 τ_{hx} 为水面与河床边界水流切应力在 x 方向上的分量, Pa ; u_s 为源汇项水流流速, m/s 。

2.2 MIKE URBAN 模型

城市管网模型 MIKE URBAN 是基于地理信息系统平台 ArcGIS 开发的较为完整的城市洪水模拟系统^[20]。该模型通过 2 个步骤建立,一是利用 ArcGIS 10.2 和 Excel 软件提前对数据进行预处理,再将处理后的数据导入 MIKE URBAN 软件中,当管网数据和拓扑结构检查无误后,即可开始构建城市内涝洪水演进模型;二是应用 MIKE URBAN 城市管网模型中降雨产流-管网汇流模块,分别模拟雨水在地表的产生、流动和雨水流入排水管网后的流动情况。其中,降雨径流计算主要用于模拟雨水在地表的汇流过程,以便为城市排水管道的水动力模拟提供降雨边界条件。值得注意的是,模型构建过程中需要提前划分集水区,并确定不同下垫面的不透水率等参数。本文根据泰森多边形自动划分集水区,采用就近原则将集水区连接至最近的检查井。

2.3 MIKE 21 模型

由于高程数据对二维地表漫流模型精度影响较大,为获得更加符合实际情况的数字高程信息(digital elevation model, DEM),本文在提取管网 CAD 图纸中的高程数据点后,将其添加到 ArcGIS 平台中并转换为 DEM 栅格数据文件,取栅格单元尺寸为 $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$,坐标系为 WGS_1984_50N;然后将 DEM 数据导出为 ASCII 格式;最后,将 ASCII 格式的 DEM 数据转换为与 MIKE 21 模型相匹配的 dfs2 格式文件。例如,本文根据文献[21],利用 MIKE ZERO 工具箱将房屋高程数据拔高 10.00 m 、道路高程数据降低 0.15 m ,以体现房屋和道路对内涝洪水演进造成的影响。

2.4 MIKE FLOOD 软件平台

为准确反映城市排水管网中水流运动情况,并模拟管道水流与地表水之间的相互作用,本文基于 MIKE FLOOD 反映管道和地面水流特性的耦合仿真平台,将 MIKE URBAN 和 MIKE 21 模型进行耦合连接,根据管网水流和地表积水之间的水量交换,准确模拟研究区域地面的积涝和退水全过程,输出内涝洪水的淹没水深、流速等重要信息^[22-23]。具体耦合

分析步骤如下:(1)在保证已经建好的 MIKE URBAN 和 MIKE 21 模型均能正常运行的前提下,将2个模型加载至 MIKE FLOOD 耦合平台;(2)通过人孔连接方式将 MIKE URBAN 模型中的各节点与 MIKE 21 的中相应网格进行耦合;(3)模拟研究区在不同降雨情景下城市内涝洪水演进过程。

本文以江西省某城市为例,利用所建立的城市内涝耦合分析模型模拟不同极端降雨情景下城市内涝洪水演进过程,并分析城市内涝灾害的影响。

3 模型建立与验证

3.1 研究区域概况

本文选择江西省某城市片区为研究对象,该研究区属于亚热带季风气候,降水量丰沛,年均降水量为 1 805 mm。降水主要集中在夏季,期间大到暴雨频发,极易发生城市内涝洪水灾害,已严重威胁当地居民的生命财产安全,限制了当地的经济发[24]。研究区域常态实景图如图 1 所示。



图 1 研究区域常态实景图

该城市片区总面积为 0.89 km^2 ,海拔在 27.6 ~ 69.9 m 之间,整体地势东高西低。由于研究区域原有的排水渠已废弃,存在多处碍洪建筑物,渠道过水断面窄,且南河沿岸地势较低加之南河河道淤塞,行洪不畅,遇到持续暴雨后涝水上岸,导致城市主干道经常受淹[25]。例如,2020年7月7—9日,当地遇到连续特大暴雨,48 h 累计降雨量超过 400 mm,同时由于南河水位暴涨,导致南河两岸的一些村庄和居民小区受灾严重,部分街道淹没水深达 1.5 ~ 2.0 m。为解决该区域常年内涝灾害问题,2023年在南

河北岸修建了防洪墙和大型排水泵站,使得其现状排水管网不再受南河水位的顶托作用,同时南河水位上涨也不会影响到南河北岸的居民。

3.2 数据处理与模型构建

在 MIKE FLOOD 城市内涝模拟中,涉及到的数据主要有 5 类。分述如下。

(1)排水管网数据,用于模拟城市排水管网运行情况。根据该片区 2022 年完成的雨污分流改造工程 CAD 设计图纸,先对数据进行整理和鉴别,筛选掉不合理的数据,然后进行修正和完善;再将排水管网数据导入到 ArcGIS 中,创建节点和管道数据并构建空间拓扑关系。排水管网数据主要包括节点和管道数据,其中节点数据需要细化的属性包括节点序号、类别(人孔、排口、蓄水池、连接点和渗水单元)、位置坐标、地表标高和井底标高;管道数据需要完善的属性包括管道起点序号、终点序号、上游底高程、下游底高程以及管道序号、材质、形状(圆形、方形、O形、蛋形和自然渠道)和尺寸等。经过整理后的排水管网包括检查井 347 个、蓄水池 1 个、排放口 1 个。

(2)土地利用类型和不透水率数据,用于模拟降雨入渗和径流产生过程。根据该片区 2022 年的卫星影像图,提取绿地、道路、房屋和其他硬化地面图层信息作为土地利用类型。

(3)道路和建筑数据,用于更好地模拟城市内涝水流路径和淹没情况。

(4)子集水区划分数据,用于模拟城市地表的产汇流过程。根据泰森多边形自动划分子集水区,并采用就近原则将集水区连接至最近的检查井,以检查井为出水口的子集水区共计 347 个。

(5)DEM 数据,用于模拟城市的地形和地势特征。经过处理后的研究区排水管网、节点分布及土地利用类型见图 2。图 3 为研究区集水区划分及处理后的 DEM 空间分布图。

根据不同的土地利用类型,设定相应的不透水率等参数,模型内各子汇水区的不透水率参考文献[26],采用综合径流系数方法计算,即先统计子汇水区中各土地利用类型的面积占比和各土地利用类型对应的不透水率,再自动计算子汇水区的综合不透水率。

在此基础上,利用 MIKE URBAN 和 MIKE 21 模型分别构建研究区一维排水管网模型和二维水动力学模型;在 MIKE FLOOD 平台中,将 MIKE URBAN 和 MIKE 21 模型进行耦合连接,建立研究区城市内

涝耦合分析模型。综合考虑研究区范围大小和计算效率,本文按照 2 m × 2 m 的尺寸划分网格,模型共

剖分 611 520 个结构性网格,时间步长为 2 s。构建的耦合分析模型如图 4 所示。

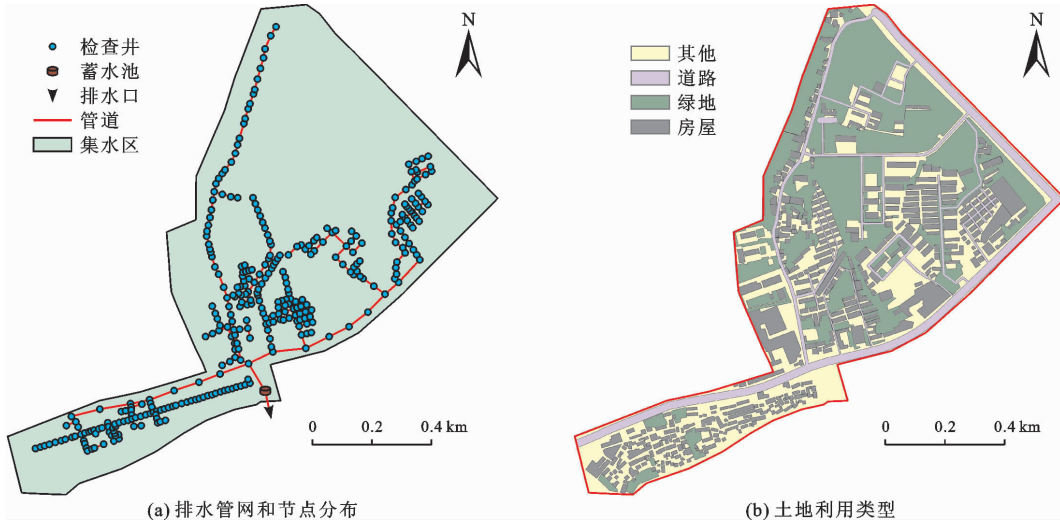


图 2 研究区排水管网和节点分布及土地利用类型

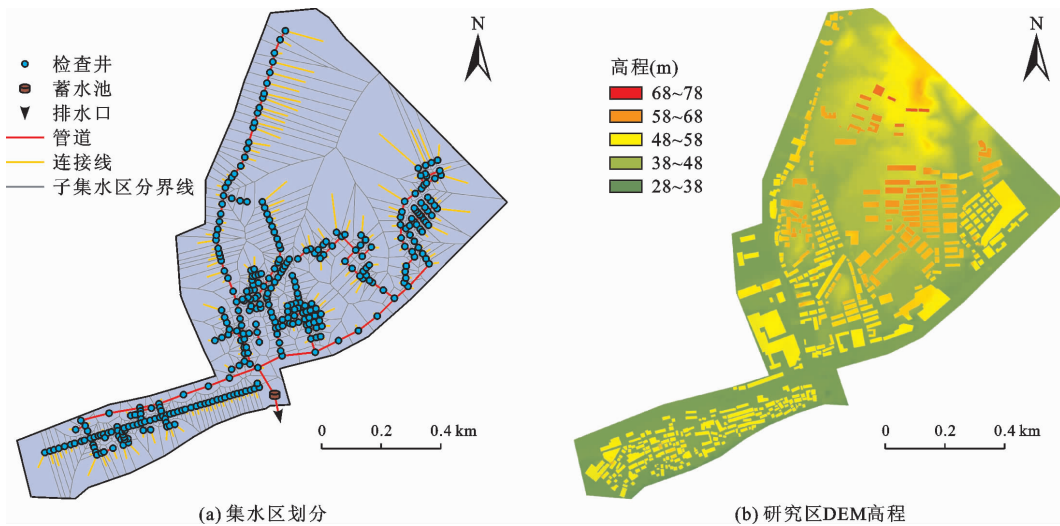


图 3 研究区集水区划分与 DEM 高程图

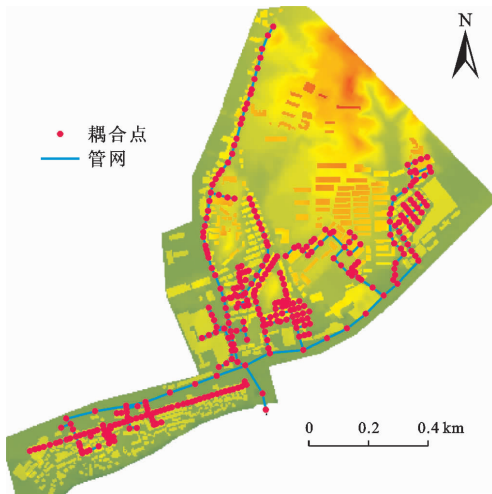


图 4 研究区耦合分析模型示意图

3.3 模型验证

为了验证研究区城市内涝耦合分析模型的有效性,以研究区 2020 年 7 月 7—9 日实测降雨作为模型降雨边界条件(图 5)。其中 2020 年 7 月 7 日 08:00 至 9 日 05:00 实测降雨事件的降雨历时为 45 h,降雨总量为 385 mm。利用研究区域内南河真实水位信息,模拟研究区城市内涝洪水演进过程和淹没情况。选取新厂路、程家新村和新田畈村等 3 个实测积水点水深对模型参数进行率定,将模型内涝洪水演进过程模拟结果与现场实测积水点的积水深度进行比较,定量评价模型的合理性。根据模型参数率定结果可知,排水管网模型主要对不同土地利用类型的不透水率和管道糙率较为敏感,而二维地表漫流模型的积水深度受模型计

算时间步长的影响较大。需要说明的是,本文仅在模型验证时考虑南河河道水位变化,而在后续排水管网和二维地表溢流模拟时不考虑南河水位影响。表1为模型各参数的率定结果。

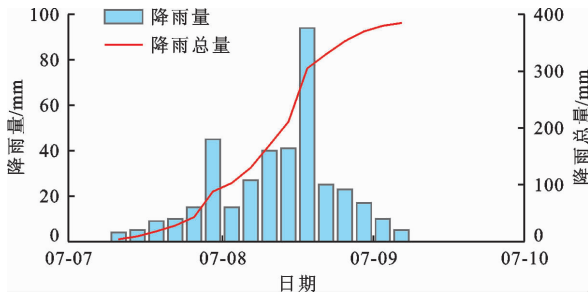


图5 模型验证降雨边界条件

表1 模型各参数率定结果

模型类型	参数	率定值
MIKE URBAN	房屋不透水率/%	88
	道路不透水率/%	85
	绿地不透水率/%	12
	其他不透水率/%	60
	降雨初损/mm	0.6
	水文衰减系数	0.9
	地表平均流速/(m·s ⁻¹)	0.3
	管道糙率	0.012
	干水深/m	0.005
	MIKE 21	淹没水深/m
	糙率	0.031

根据研究区域相关新闻报道和实地考察结果可知,在2020年7月7日的暴雨时段内,新厂路(观测点a)、程家新村(观测点b)和新田畈村(观测点c)等观测区域内涝灾情较为严重。图6为耦合分析模型模拟的水深分布与观测点的空间位置图。

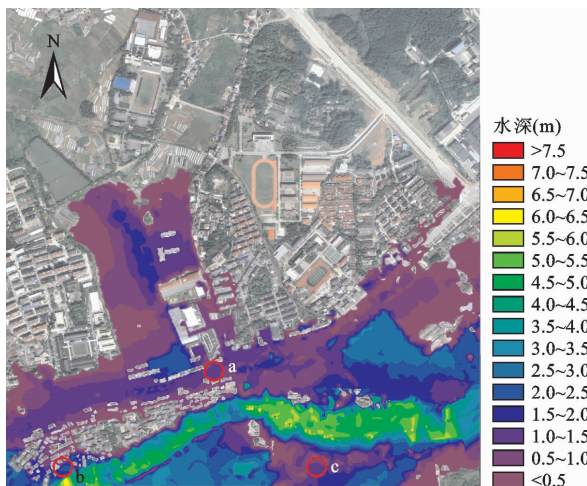


图6 耦合分析模型模拟水深与观测点空间位置

图7为发生内涝灾害时研究区各观测点的现场淹没照片。表2为各观测点实际淹没水深和模拟水深及相对误差。

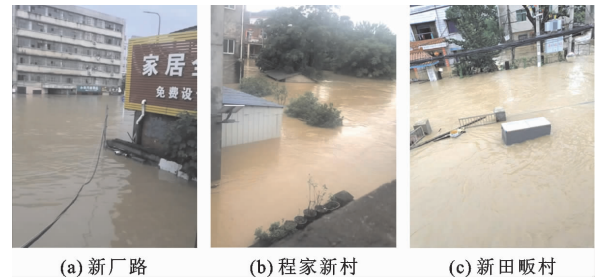


图7 研究区观测点内涝洪水现场

表2 2020年7月7日研究区观测点水深对比

观测点	观测水深/m	模拟水深/m	相对误差/%
a	1.83	2.01	9.83
b	1.62	1.47	9.25
c	1.50	1.42	5.33

结合图7、表2可知,基于MIKE FLOOD平台构建的城市内涝耦合分析模型可靠性较强,模拟结果与现场实际数据吻合度较高。

4 城市内涝影响分析与讨论

4.1 极端降雨情景设计

由于研究区域兴建了大型排涝泵站,因而在长历时降雨情景下发生城市内涝灾害的概率较小,但在短历时极端降雨情景下,超出了排涝泵站的工作极限,极易发生城市内涝灾害。为此,本文重点模拟短历时极端降雨情景下的城市内涝灾害,使用芝加哥雨型来模拟该区域短历时极端降雨过程。芝加哥雨型是基于统计暴雨强度公式设计的降雨过程,并通过雨峰系数 $r(0 \sim 1)$ 来描述降雨峰值发生的时刻^[27]。查询《江西省暴雨强度计算公式表》可确定江西省某市暴雨强度计算公式为

$$q = \frac{2226(1 + 0.61gP)}{(T + 8)^{0.7}} \quad (5)$$

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

在芝加哥雨型设计过程中需要计算的峰前瞬时雨强 i_1 、峰后瞬时雨强 i_2 分别由公式(6)、(7)计算^[28]得到。

$$i_1 = \frac{A(1 + c \lg P)}{[t_1/r + b]^{(1+n)}} \left[\frac{(1-n)t_1}{r} + b \right] \quad (t_1 \leq rT) \quad (6)$$

$$i_2 = \frac{A(1 + c \lg P)}{[t_2/(1-r) + b]^{(1+n)}} \left[\frac{(1-n)t_2}{1-r} + b \right] \quad (t_2 > rT) \quad (7)$$

式中: i_1 、 i_2 分别为峰前、峰后降雨瞬时雨强, mm/min; t_1 、 t_2 分别为峰前、峰后历时, min; r 为雨峰系数, 由于该市降雨雨峰比较靠前, 故取雨峰系数 $r = 0.3$; A 、 b 、 c 、 n 为经验参数, 结合公式(5) 与暴雨强度标准公式 $q = \frac{167A(1 + clg P)}{(t + b)^n}$, 可确定 A 、 b 、 c 、 n 参数的取值为 $A = 13.33$ 、 $b = 8$ 、 $c = 0.6$ 、 $n = 0.7$ 。

根据该城市片区治涝标准, 将远期城市内涝防治标准设定为 20 a 一遇降雨、降雨历时为 2 h 的情景下, 产生的内涝积水在 2 h 内排除, 以确保不淹没重要建筑物。在该城市片区降雨历时 $T = 120$ min、重现期分别为 10、20 a 的 2 种极端降雨情景时, 根据公式(5) 计算得到相应的设计降雨量分别为 85.72 和 95.39 mm, 不同重现期设计暴雨过程如图 8 所示。

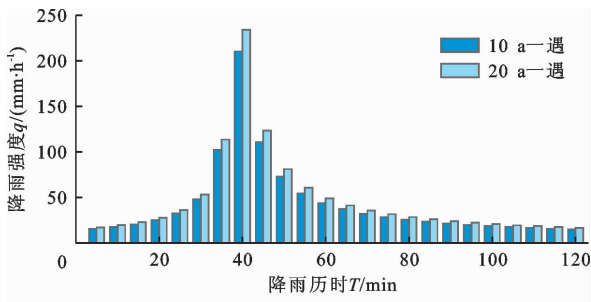


图 8 研究区不同重现期设计暴雨过程

4.2 管网排水能力分析

本文采用 MIKE URBAN 城市管网模型依次对发生概率为 10 a 一遇、20 a 一遇的 2 h 降雨情景进行模拟分析, 通过一维排水管网模型计算得到管道水深(link depth)、管道充满度(pipe filling)、管道承压水头(link flood)和节点溢流水深(node flood)等数据。由于管道充满度不能反映管网极限排水能力, 本文利用管道承压水头来评估管网排水能力。当管网承压水头大于管道地面高程时, 管道中的水会向地表溢流, 表明此时管网排水能力不足, 反之管网排水能力可满足相应的标准^[29]。

图 9 为排水管网排水能力分级图, 表 3 为排水管网排水能力分级统计。

由图 9 可知, 随着降雨重现期的增大, 溢流管道数量不断增加, 但增长幅度明显减缓。

由表 3 可知, 研究区内排水管网排水能力按照降雨重现期频率分级统计为: 排水能力小于 10 a 一遇、10 ~ 20 a 一遇、大于 20 a 一遇的占比分别为 77.3%、2.1% 和 20.6%。由于该城市片区管道设计标准普遍偏低, 导致部分地势低洼区积水严重, 该

片区少数区域内涝频发。此外, 长期内涝会加速排水管网的老化, 加大了管网的维护成本, 且排水管网受到大量积水的冲击可能会发生堵塞、破裂的情况, 进而影响排水管网的正常运行。



图 9 研究区排水管网排水能力分级图

表 3 研究区排水管网排水能力分级统计

降雨重现期 P/a	管道长度/km	占比/%
< 10	6.20	77.3
[10, 20]	0.17	2.1
> 20	1.67	20.6

4.3 地表淹没分析

图 10 为不同重现期极端降雨情景下的排水系统溢流量和排水量分布。其中, 节点溢流量为通过检查井溢流到地表的水量; 转移径流量为排水管网和蓄水池中存储的水量; 管网排水量为通过排放口排放到附近水体的水量。总水量是整个研究区产生的总径流量, 其为节点溢流量、转移径流量以及管网排水量之和。

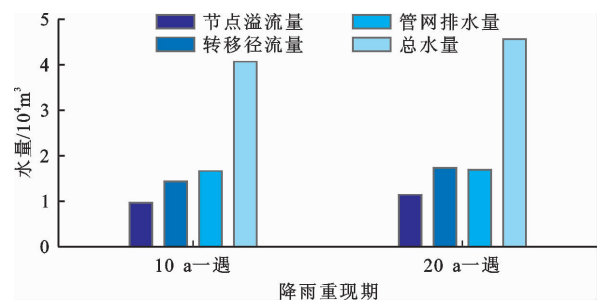


图 10 研究区不同重现期极端降雨情景的排水系统溢流量和排水量分布

由图10可知:当降雨重现期从10 a一遇增加到20 a一遇时,检查井的溢流量从 $0.97 \times 10^4 \text{ m}^3$ (占总水量的23.7%)增大到 $1.14 \times 10^4 \text{ m}^3$ (占总水量的24.9%);2个降雨重现期由于管网排水量变化很小,表明排放口的排水能力明显受限;增加的城市内涝洪水径流量主要存储在蓄水池中,导致管网的转移径流量从 $1.44 \times 10^4 \text{ m}^3$ 增大到 $1.74 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。因此,研究区域在发生10 a一遇、20 a一遇2 h降雨

条件时,排水管网的排水能力受到限制,若想降低节点溢流量,缓解研究区内涝积水情况,需要增大蓄水池容量或开启排涝泵站强行排放蓄水池及管道中的积水。

采用研究区城市内涝耦合分析模型可获得10 a一遇和20 a一遇2种重现期极端降雨情景下研究区内涝积水分布和最大淹没水深分布情况,如图11所示。

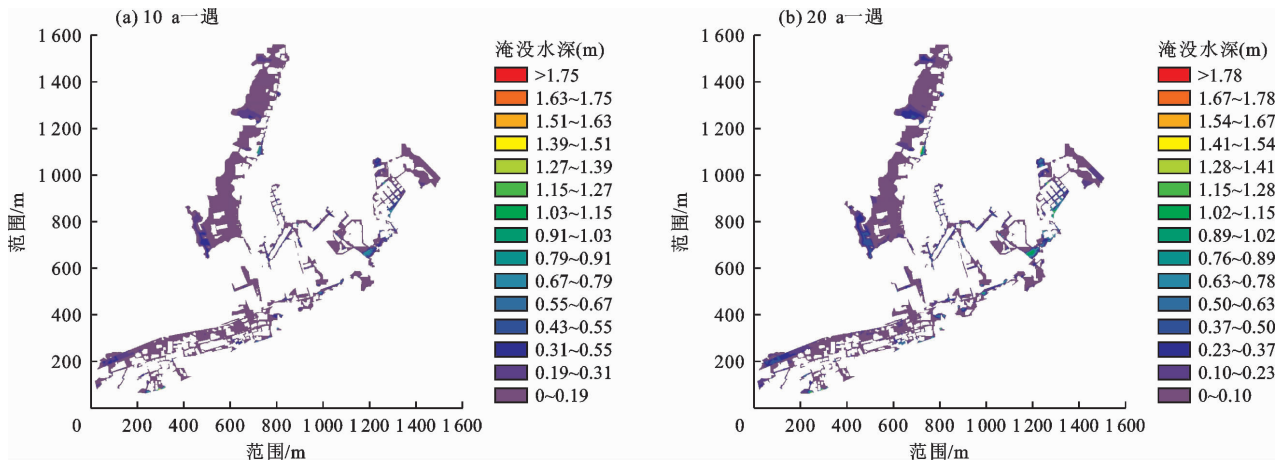


图11 研究区不同重现期极端降雨情景的最大淹没水深分布

由图11可以看出,在研究区域发生10 a一遇、20 a一遇2 h降雨条件时,地面最大淹没水深和淹没范围均发生了明显的变化。随着降雨重现期的增大,研究区域最大淹没水深和淹没范围均呈现不断增大的趋势,其中10 a一遇、20 a一遇的极端降雨情景下淹没面积分别为 0.203 和 0.221 km^2 ,对应的最大淹没水深分别为 1.75 和 1.78 m 。

将研究区积水深度划分为轻度、中度和重度积水3个等级,根据模型计算得到的最大淹没水深,统计不同重现期极端降雨情景下研究区的积水面积,结果见表4。

表4 研究区不同积水深度等级划分及积水面积

积水深度等级划分	积水深度/m	积水面积/ m^2	
		10 a一遇	20 a一遇
轻度积水	(0.00,0.15)	1.65×10^5	1.73×10^5
中度积水	[0.15,0.50)	3.36×10^4	4.14×10^4
重度积水	≥ 0.50	5.13×10^3	6.97×10^3

由表4可知,研究区积水深度等级主要以轻度积水为主,其中10 a一遇、20 a一遇降雨情景下轻度积水面积分别占总积水面积的81.0%和78.1%。研究区内中度、重度积水面积所占比例虽然较低,但仍有少数地

势低洼地区的积水严重,淹没水深超过 1.00 m ,造成的危害较大。此外,由于城市内涝会将地面的污染物冲刷到地表河湖等水体中,造成水体污染,积水中的油污等垃圾物质也会对环境造成负面影响。

4.4 易涝点分析

在研究区域内选取6处典型易涝点(A、B、C、D、E、F)进行分析,根据模拟结果和实地调查资料进一步分析2种重现期极端降雨情景下积水深度变化规律。6处易涝点空间位置如图12所示,图13为不同重现期极端降雨情景下易涝点积水深度随降雨历时的变化曲线。

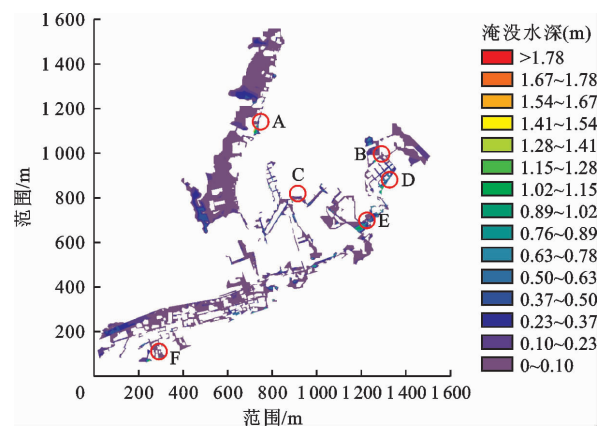


图12 研究区最大淹没水深和易涝点位置分布

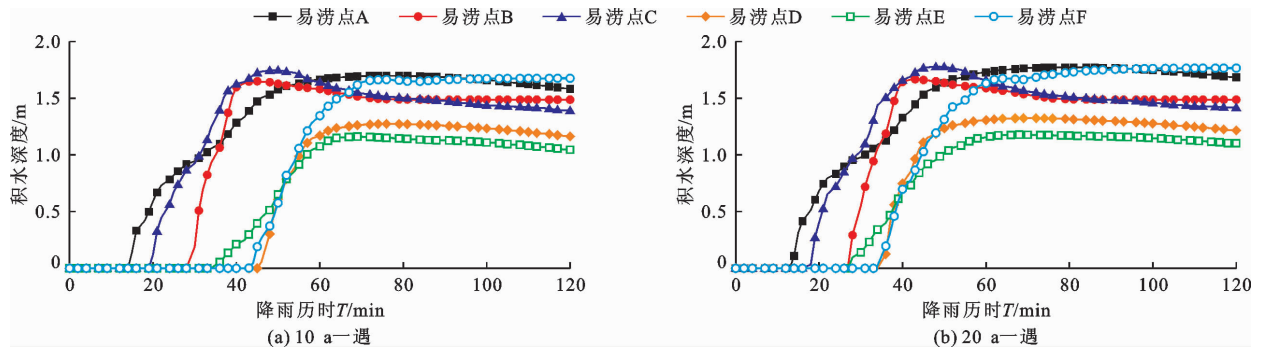


图 13 研究区不同重现期极端降雨情景下易涝点积水深度随降雨历时的变化曲线

由图 13 可以看出,有 2 处易涝点(B 和 C)在降雨过程中积水深度最先达到最大值,然后呈现出缓慢下降并趋于平稳的变化规律。易涝点 F 在降雨雨峰过后,由于地势低洼导致积水不断汇集于此,因此积水深度仍会随着时间缓慢增加。表 5 为 6 处易涝点的最大淹没水深。

表 5 不同降雨情景下易涝点最大淹没水深

易涝点	不同降雨情景下最大淹没水深/m	
	10 a 一遇	20 a 一遇
A	1.69	1.77
B	1.65	1.67
C	1.75	1.78
D	1.27	1.32
E	1.14	1.18
F	1.66	1.77

从表 5 可以看出,在 2 种重现期极端降雨情景下,随着降雨强度的增大,各易涝点的最大积水深度不断增大,但增幅明显放缓,其中易涝点 C 在 20 a 一遇极端降雨情景下,最大积水深度达到了 1.78 m。6 处易涝点积水比较严重,严重的内涝不仅会给行人和车辆的通行带来困难而造成交通拥堵,还会对建筑物和道路造成损坏,甚至影响城市的整体形象和环境质量。

4.5 讨论

在每年的梅雨季节,流经研究区域的南河水位会因降雨而急剧上升,导致城市内涝。目前该片区主要采取防洪墙结合排涝泵站的方法缓解内涝问题。通过对研究区排水管网模型和二维水动力模型耦合模拟分析,结合实地走访调查发现该区域还存在一些问题:(1)2023 年建成的防洪墙和排涝泵站已经投入使用,该片区内涝积水情况虽已得到明显改善,但少数地势低洼区域内涝依旧严峻;(2)该片

区内涝成因与中山市某开发区相似,由于少数区域地势低洼、排水管网设计不合理和房屋建设规划不当等原因,使得内涝积水无法快速流入排水管网,进而排放至调蓄水体;(3)城市排水管网设计标准偏低、排水管网管道较少、汇水面积过大和地势低等因素是造成城市内涝灾害频发的主要原因,而对老城区排水管网进行大规模改造不仅成本高、施工难度大,还会影响居民的正常生活;这些易涝区域的内涝积水问题急需采取“灰绿结合”等措施加以解决^[30]。

结合研究区实际内涝积水情况,对内涝治理措施提出几点建议:(1)针对腊丽山路沿路的排水沟受阻问题,应该对其进行疏通、改造,保证该排水沟的过流断面满足城市排涝要求,使得上游来水能够顺利汇入新厂路建成的排涝泵站蓄水池中,便于内涝积水迅速排放到南河;(2)结合 10、20 a 重现期极端降雨情景下城市内涝演进过程模拟结果和低影响开发研究,对局部不合理管网集中进行工程措施改造,以提升城市内涝灾害防控能力和城市生态环境质量。

5 结 论

(1) 在 MIKE FLOOD 平台上能够高效耦合 MIKE URBAN 和 MIKE 21 模型,建立城市内涝耦合分析模型,直观地模拟和展示不同重现期极端降雨情景下城市内涝洪水演进过程,揭示易涝点处积水深度变化规律。

(2) 研究区面对 10 a 一遇 2 h 降雨时,77.3% 的管网会发生溢流;城市内涝以轻度积水(积水深度小于 0.15 m)为主,但局部地势低洼地区积水深度仍会超过 1.00 m。

(3) 城市内涝耦合分析模型计算效率高、计算结果准确。模拟结果可用于评估城市管网排水能力,为老旧城区排水管网改造、城市内涝灾害预警与防治提供参考依据。

参考文献:

- [1] 侯精明,李东来,王小军,等. 建筑小区尺度下 LID 措施前期条件对径流调控效果影响模拟[J]. 水科学进展, 2019,30(1):45-55.
- [2] WU Jiansheng, SHA Wei, ZHANG Puhua, et al. The spatial non-stationary effect of urban landscape pattern on urban waterlogging: a case study of Shenzhen City[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 7369.
- [3] 《中国水旱灾害防御公报》编写组.《中国水旱灾害防御公报 2022》概要[J]. 中国防汛抗旱,2023,33(10):78-82.
- [4] 朱呈浩,夏军强,陈倩,等. 基于 SWMM 模型的城市洪涝过程模拟及风险评估[J]. 灾害学,2018,33(2):224-230.
- [5] ANA E V, BAUWENS W. Modeling the structural deterioration of urban drainage pipes: the state-of-the-art in statistical methods[J]. Urban Water Journal, 2010, 7(1): 47-59.
- [6] ZAKIZADEH F, MOGHADDAM NIA A, SALAJEGHEH A, et al. Efficient urban runoff quantity and quality modeling using SWMM model and field data in an urban watershed of Tehran metropolis [J]. Sustainability, 2022, 14(3): 1086.
- [7] HU Hao, LIU Yankun, DU Jiankang, et al. Systematic assessment on waterlogging control facilities in Hefei City of Anhui Province in east China[J]. Water, 2024, 16(4): 620.
- [8] 李碧琦,罗海婉,陈文杰,等. 基于数值模拟的深圳民治片区暴雨内涝风险评估[J]. 南水北调与水利科技, 2019,17(5):20-28 + 63.
- [9] 黄国如,李碧琦. 基于 InfoWorks ICM 的深圳市内涝灾害居民室内财产损失研究[J]. 自然灾害学报,2021,30(2):71-79.
- [10] LIU Yang, ZHAO Weigao, WEI Yingxia, et al. Urban waterlogging control: a novel method to urban drainage pipes reconstruction, systematic and automated[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 418: 137950.
- [11] BISHT D S, CHATTERJEE C, KALAKOTI S, et al. Modeling urban floods and drainage using SWMM and MIKE URBAN: a case study [J]. Natural Hazards, 2016, 84(2): 749-776.
- [12] 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.
- [13] 夏军,张印,梁昌梅,等. 城市雨洪模型研究综述[J]. 武汉大学学报(工学版),2018,51(2):95-105.
- [14] 穆聪,李家科,邓朝显,等. MIKE 模型在城市及流域水文-环境模拟中的应用进展[J]. 水资源与水工程学报, 2019,30(2):71-80.
- [15] 程麒铭. 基于降雨预报信息的城市内涝实时模拟技术研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2022.
- [16] 袁竹,高亮,张文生,等. 风暴潮与极端暴雨叠加下滨海城市内涝防控方法研究[J/OL]. 水资源保护,2024, [2024-04-12]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1356.TV.20240229.1128.024>
- [17] 黄琳煜,李迷,聂秋月,等. 基于 MIKE FLOOD 的暴雨积涝模型在川沙地区的应用[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(3):127-133.
- [18] 宋英华,张哲,方丹辉. 城市洪涝下承灾体暴露性及行人失稳风险分析[J]. 中国安全科学学报,2020,30(10):105-111.
- [19] 蒋水华,黄中发,黄劲松,等. 蓄滞洪区洪水演进模拟及堤防溃决损失评估方法[J]. 水资源与水工程学报, 2020,31(1):131-139 + 145.
- [20] 张旭,李占斌,何文虹,等. 基于 MIKE URBAN 的西安市中心城区雨洪过程模拟[J]. 水资源与水工程学报, 2019,30(6):157-163.
- [21] 叶沛成,郭帅,陈传辉,等. 基于 GIS - Mike Flood 耦合模型的校园内涝模拟研究[J]. 水电能源科学,2023,41(8):85-89.
- [22] LI Jiak, ZHANG Bei, MU Cong, et al. Simulation of the hydrological and environmental effects of a sponge city based on MIKE FLOOD [J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 77: 32.
- [23] 朱婷,王鑫. 基于 MIKE FLOOD 模型的中顺大围洪水风险研究[J]. 中国水运,2016,37(7):71-74.
- [24] 黄爽. 基于城镇水文模拟的雨洪系统规划对策研究[D]. 重庆:重庆大学,2017.
- [25] 景德镇市城市规划局. 景德镇市中心城区排水(雨水)防涝综合规划(2016—2030)[R]. 景德镇:景德镇市城市规划局,2018.
- [26] 廖如婷,徐宗学,叶陈雷,等. 暴雨洪水管理模型参数敏感性分析[J]. 水力发电学报,2022,41(6):11-21.
- [27] 李品良,覃光华,曹冷然,等. 基于 MIKE URBAN 的城市内涝模型应用[J]. 水利水电技术,2018,49(12):11-16.
- [28] 倪志楠,李琼芳,杜付然,等. 南京市短历时设计暴雨雨型研究[J]. 水资源与水工程学报,2019,30(2):57-62.
- [29] 李杨杨,郭赞,邓佑锋,等. 城市雨水管网排水能力模型评估分析方法探究:以深圳市龙华区为例[J]. 水利水电技术,2019,50(10):84-90.
- [30] 李江云,李瑶,胡子欣. 灰绿耦合雨洪系统多目标优化建模与应用[J]. 水资源保护,2022,38(6):49-55 + 80.