

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.03.013

基于SWMM和InfoWorks ICM模型的大红门排水区暴雨内涝模拟

廖如婷^{1,2}, 徐宗学^{1,2}, 叶陈雷^{1,2}, 舒心怡^{1,2}, 杨东明³

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室, 北京 100875; 3. 北京市北运河管理处, 北京 101199)

摘要:为探究不同暴雨情景下北京市大红门排水区内涝过程演化规律,构建SWMM和InfoWorks ICM-2D耦合城市暴雨内涝模型,模拟分析了大红门排水区不同重现期降雨下管网排水能力、地表淹没情况及内涝危险性。结果表明:SWMM和InfoWorks ICM-2D耦合模型在大红门排水区暴雨内涝模拟中具有较好的适用性;大红门排水区70%以上的管道排水能力不足5年一遇设计标准,随着降雨重现期增大,溢流节点和超载管道数量增多,超载时长增加,但溢流节点超载时长增幅减小;易涝区和中高危险区主要分布在大红门排水区中部和东南部下凹桥区;随着降雨重现期增大,内涝区积水深度增加、积水范围扩大,0.2 m以上水深区域占比增加,低危险区主要向高危险区转化,较少向极高危险区转化。

关键词:内涝模拟;淹没水深;淹没面积;SWMM;InfoWorks ICM-2D;大红门排水区

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)03-0109-09

Simulation of rainstorm waterlogging in Dahongmen Drainage Area based on SWMM and InfoWorks ICM models
// LIAO Ruting^{1,2}, XU Zongxue^{1,2}, YE Chenlei^{1,2}, SHU Xinyi^{1,2}, YANG Dongming³ (1. College of Water Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, Beijing 100875, China; 3. Beijing North Canal Administration Department, Beijing 101199, China)

Abstract: In order to explore the evolution law of urban waterlogging process under different rainstorm scenarios, taking Dahongmen Drainage Area in Beijing as an example, an SWMM and InfoWorks ICM-2D coupled urban rainstorm waterlogging model was constructed to simulate and analyze the drainage capacity of pipe network, surface inundation and waterlogging risk under different return periods of rainfall in the study area. The results show that the coupled model of SWMM and InfoWorks ICM-2D has good applicability in the simulation of rainstorm waterlogging in the study area. The drainage capacity of more than 70% of pipelines in the study area is less than the design standard of 5-year return period. As the rainfall return period increases, the number of overflow nodes and overloaded pipelines increases, and the overload duration increases. However, the increase range of overload duration of overflow nodes decreases. Waterlogging prone areas and medium to high risk areas are mainly distribute in the central part and the concave bridge area in southeast part of the study area. As the return period of rainfall increases, the depth and range of waterlogging in waterlogged areas increase, and the proportion of areas with a depth of more than 0.2 m increases. Low risk areas mainly transform into high risk areas, with fewer transforming into extremely high risk areas.

Key words: waterlogging simulation; inundation depth; inundation area; SWMM; InfoWorks ICM-2D; Dahongmen Drainage Area

从2012年京津冀“7·21”特大暴雨到2015年武汉、南京、上海、昆明等地汛期特大暴雨,再到

2021年以郑州市为代表的“7·20”河南特大暴雨,近年来我国多座城市发生了严重的暴雨内涝灾

基金项目:国家自然科学基金重点项目(52239003);北京师范大学博一学科交叉基金(BNWXKJC2024)

作者简介:廖如婷(1994—),女,博士研究生,主要从事城市洪涝研究。E-mail: liaoruting@mail.bnu.edu.cn

通信作者:徐宗学(1962—),男,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail: zxxu@bnu.edu.cn

害^[1],造成了巨大的人员伤亡、财产损失和社会影响。在人类活动和全球气候变化的共同影响下,城市水循环过程及其要素发生了深刻变化,城市热岛效应、雨岛效应凸现^[2],极端暴雨事件频率增加、强度增大,导致城市内涝灾害问题日益严重,已成为影响我国城市公共安全和经济社会发展的重要因素^[3]。此外,城市排水系统能力不足、蓄滞洪空间与源头减排措施建设不完善、城市水系闸泵库联合调度方案不完善,地铁、地下商场等关键基础设施避险能力不足等,加重了暴雨内涝灾害对城市防洪安全的影响。城市暴雨内涝模拟研究可以揭示城市内涝过程中的水文水动力学机理,为编制城市内涝预警预案、实施内涝防治工程与非工程措施、提升内涝防御韧性等提供科学依据^[4],因此,开展城市暴雨内涝模拟研究具有十分重要的现实意义。

到目前为止,国内外许多专家学者已经在城市暴雨内涝领域做了大量研究,主要包括城市内涝过程机理分析^[5]、内涝成因分析^[6]、洪水风险图编制^[7]、城市内涝模型改进与应用^[8-10]、城市内涝风险评估^[11-14]以及降雨、下垫面、低影响开发(low impact development, LID)措施对城市内涝的影响^[15-17]等。在城市内涝模拟研究过程中,常用的模型包括SWMM(storm water management model)、WCA2D、TELEMAC-2D、LISFLOOD-FP等开源或部分开源模型,以及MIKE、InfoWorks ICM、PCSWMM、HEC-RAS等非开源模型。其中,SWMM界面友好易于操作,具有较完备的管网汇流、LID和水质模拟功能,且模型开源易于实现二次开发,因此得到了广泛的应用。但城市雨洪过程伴随着街道洪水演进、河道漫溢、面源污染等多过程,各过程之间又进行着水量的交换,仅采用SWMM难以实现多过程模拟。为了扩展SWMM地表淹没过程模拟功能,有研究将其与水动力模型进行耦合,目前已采用模型有LISFLOOD-FP^[18]、MIKE21^[19]、TELEMAC-2D^[20]。InfoWorks ICM作为一款计算模块完整、计算引擎高度集成的水文水动力模型,其二维模块可以较为快速准确地模拟城市内涝过程中水流在复杂地形上的流动速度、方向和深度等。目前将SWMM与InfoWorks ICM二维模块(以下简称IMC-2D)耦合的研究较少,其耦合模型的模拟精度尚不明确。因此,本研究以北京市大红门排水区为研究对象,将SWMM与ICM-2D松散耦合,构建城市暴雨内涝模型并验证其可靠性,基于此定量模拟分析不同设计暴雨情景下城市管网排水能力、地表淹没以及内涝分布情况,以期为大红门排水区土地利用规划和洪水风险管理提供参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

大红门排水区(图1)为凉水河大红门闸以上控制流域,地理位置在116°9'E~116°25'E, 39°48'N~39°56'N之间,干流河长为25.71 km,控制面积为131.47 km²。区域内整体地势西高东低,坡度较小,平原区约占整个排水区的75%以上,土地利用类型主要为建设用地和工矿用地(图2)。区域内水系丰富,主要有水衙沟、新丰草河、造玉沟、马草河等支流。大红门排水区多年平均降水量为522.4 mm,降水主要集中在6—9月,汛期降水约占全年降水量的81.6%,降水年际变化大且年内分布不均匀。凉水河发源于石景山区首钢退水口,流经石景山区、丰台区、朝阳区、大兴区、通州区,于通州区榆林庄闸汇入北运河,是北京市城南主要的排洪河道,也是北京内涝防御的重点区域之一。近年来,北京城区极端降雨持续增多,城区流域遭受河道洪水、区域内涝双重考验,内涝灾害防御难度极高^[21],这也使大红门排水区内涝灾害风险大大增加,如2012年“7·21”特大暴雨,降水量为192 mm,最大平均雨强68 mm/h,

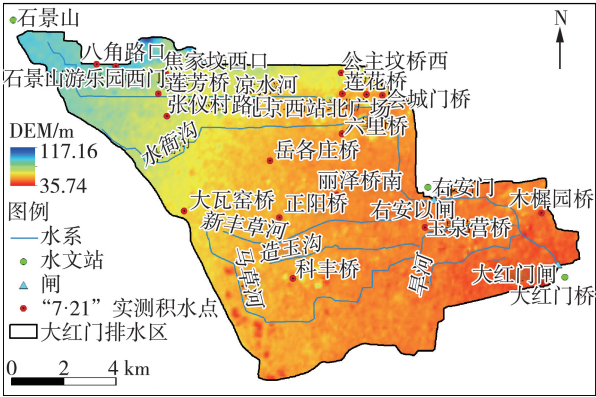


图1 大红门排水区概况

Fig. 1 Overview of Dahongmen Drainage Area

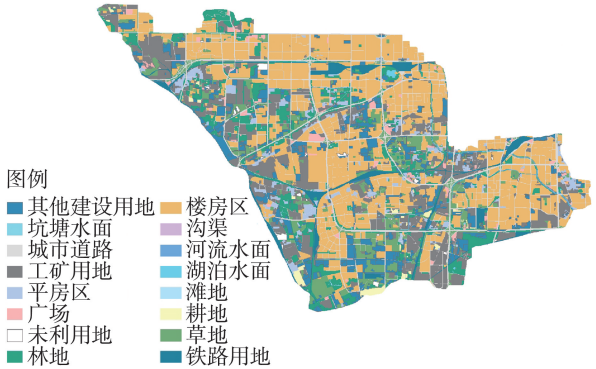


图2 大红门排水区2017年土地利用类型

Fig. 2 Land use type of Dahongmen Drainage Area in 2017

远超大红门排水区道路排水能力,造成区域内多处严重积水^[22]。

1.2 数据来源

建模所需的数据资料包括研究区降雨流量数据、地形数据、遥感影像数据、排水管网数据、河道及水系数据等。降雨资料为石景山、右安门、大红门水文站 20110623、20110726、20110814、20120721 分钟级实测降水量摘录数据,根据雨量站位置划分泰森多边形后,输入到相应子汇水区中;流量资料为 2011—2012 年右安门闸和大红门闸实测分钟级流量摘录数据,水文站和测流闸门位置见图 1。降雨和流量数据均由凉水河管理处提供。本文模拟情景均为场次暴雨过程,因此蒸散发损失的水量可以忽略不计。DEM 数据来源于中国科学院地理空间数据云平台 (<https://www.gscloud.cn/>),空间分辨率为 30 m。土地利用数据采用清华大学解译的 2017 年 10 m 分辨率土地利用数据 ([http://data.ess.tsinghua.edu.cn/ fromglc10_2017v01. html](http://data.ess.tsinghua.edu.cn/fromglc10_2017v01.html))。排水管网资料来源于北京市城市规划设计研究院,排水管道主要为圆管且管径在 0.6~1.4 m 之间。河长、河道断面尺寸、河道中心线等资料由北京市水文总站提供。暴雨淹没资料主要为从文献及新闻报道等整理出的 2012 年“7·21”暴雨过程中各主要城市道路积水深度大于 0.3 m 的观测点,积水点位置分布如图 1 所示。

2 城市暴雨内涝模型构建

2.1 研究区概化

排水管网概化是构建城市暴雨内涝模型的关键,其结果关系到管网汇流模型以及地表二维淹没模型的精度。对收集到的排水管网数据进行拓扑关系和纵断面检查,简化支管和部分节点,实测易涝点处尽可能减少概化,保证管网上下游连接、埋深、坡度等方面的合理性,最终将排水系统概化为 167 条排水管段、294 个节点以及 1 个排放口。子汇水区是 SWMM 水量演算的最小单元,根据实地建筑特征和管网走向将研究区划分为 461 个子汇水区。根据河网资料和子汇水区进而将河网划分为 125 条河段。大红门排水区 SWMM 概化结果见图 3。

2.2 模拟方法及参数设置

根据 SWMM 中不同产流计算方法对下渗机理的描述以及研究区下垫面特点,选择参数较少且适用于城市区域的 Horton 模型计算地表产流。SWMM 将地表汇流过程概化为非线性水库,通过联立水量平衡方程与曼宁公式进行计算。SWMM 中提供了恒定流法、运动波法和动力波法用于管网和

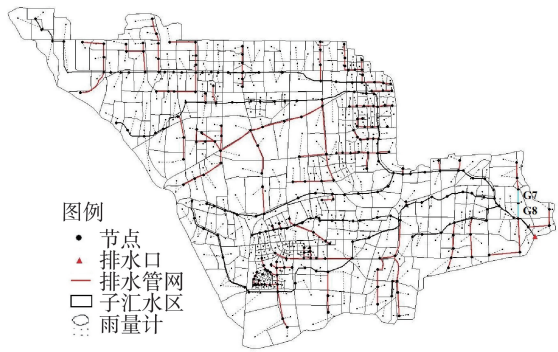


图 3 研究区概化结果

Fig.3 Study area generalization results

河道汇流计算,动力波法通过求解完整的圣维南方程组可以模拟管道蓄水、下游水位顶托、进出口损失和压力流等复杂流态,相对而言模拟结果更为准确,因此选择该方法进行计算。

SWMM 建模所需的参数包括物理参数和过程参数。对于子汇水区面积、坡度、不透水率、特征宽度等物理参数,根据研究区基础数据资料在 ArcGIS 中计算得到;对于曼宁系数、洼地蓄水量、最大入渗率、最小入渗率等过程参数,为了提高参数率定效率,在对参数进行敏感性分析的基础上,根据参数物理意义或经验设置一个合理的初值,再通过实测降雨流量资料进行参数率定。文献[23]中已经利用 SWMM 模型的开源优势,对模型水文过程参数进行了较为深入的研究,得出透水区曼宁系数和最小入渗率是大红门排水区 SWMM 模拟洪峰流量和径流系数的敏感参数,为接下来模型参数率定提供了有利基础。

2.3 参数率定及验证

采用 20110623、20110726 两场洪水事件对参数进行率定,20110814、20120721 两场洪水事件进行验证。参数率定结果见表 1。

表 1 SWMM 主要参数率定结果

Table 1 Main parameter calibration results of SWMM				
模块	参数代号	参数名称	单位	率定结果
子汇水区模块	N-Imperv	不透水区曼宁系数		0.04
	N-Perv	透水区曼宁系数		0.4
	Dstore-Imperv	不透水区洼地蓄水量	mm	10
	Dstore-Perv	透水区洼地蓄水量	mm	16
产流下渗模块	MaxRate	最大入渗率	mm/h	145
	MinRate	最小入渗率	mm/h	85
	Decay	入渗衰减系数	h^{-1}	23
	DryTime	干燥时间	d	7
管网汇流模块	Manning-N	曼宁糙率系数		0.015
河道汇流模块	Manning-N	曼宁糙率系数		0.02

选用纳什效率系数(NSE)、洪峰流量相对误差(R_{Ep})、峰现时间绝对误差(A_{Etp})评估建立的 SWMM

精度,结果见表2。可见,率定期与验证期的NSE均在0.8以上, R_{Ep} 均在10%以内,且 A_{Ep} 均不超过1h,说明建立的SWMM满足GB/T 22482—2008《水文情报预报规范》精度要求,适用于大红门排水区内涝模拟研究。

表2 率定期与验证期洪水过程模拟结果
Table 2 Simulation results at calibration and validation periods

时期	暴雨场次	降水量/mm	NSE	$R_{Ep}/\%$	A_{Ep}/min
率定期	20110623	110.6	0.94	8.4	0
	20110726	66.8	0.88	4.7	-40
验证期	20110814	66.9	0.80	7.0	-20
	20120721	197.4	0.95	7.5	-20

注:峰现时间绝对误差的“-”代表模拟洪峰流量滞后于实测洪峰流量。

2.4 模型耦合

一维模型与二维模型的耦合方式一般有松散耦合、紧密耦合等方式。本文采用松散耦合方式,提取不同降雨情景下SWMM各节点的溢流过程,作为点边界条件输入ICM-2D,完成一二维过程的单向松散耦合。ICM-2D根据研究区DEM、排水管网节点位置以及溢流节点的流量过程,运行得到溢流节点处的最大淹没水深、淹没范围、最大流速等,尽管该方法难以对内涝淹没过程进行详细、精确地刻画,但对于最大淹没时刻的模拟效果与实际情况较为接近。设置ICM-2D中非结构网格最小网格单元面积为 100 m^2 ,最大网格单元面积为 500 m^2 ,网格边界采用模型内置的Vertical Wall,使水量不会经过边界溢出。

利用大红门排水区2012年“7·21”暴雨观测积水数据,对构建的SWMM与ICM-2D耦合城市暴雨内涝模型进行验证。图4为“7·21”暴雨大红门排水区实测与模拟积水情况,可以看出,模拟积水点与实测积水点空间位置较为一致。实测积水深度大于0.3 m的岳各庄桥、丽泽桥南、正阳桥、科丰桥、焦家坟路口、大瓦窑桥等地模拟积水深度均达到实测

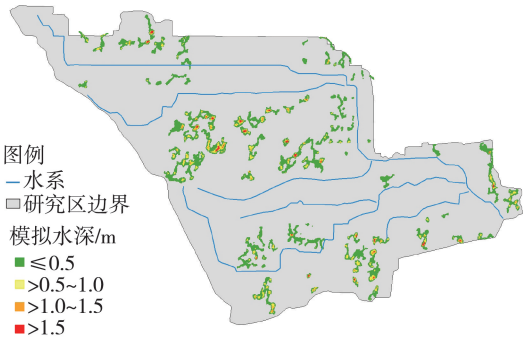


图4 “7·21”暴雨大红门排水区实测与模拟积水情况
Fig.4 Location of measured and simulated inundation sites in Dahongmen Drainage Area for “7·21” rainstorm

值;实测积水深度大于2 m的莲花桥、玉泉营桥,模拟积水深度偏小,原因可能是研究采用的DEM数据精度较低,对于城市下垫面特别是下凹桥区刻画得不够准确,导致实测严重积水区模拟效果一般。但高精度DEM数据在建立地表二维模型时网格尺寸小、密度大,会大大降低模型计算效率,可在今后的研究中采用更高精度的基础数据,并结合机器学习算法等技术手段对模型进一步完善。总体来看,本文构建的城市暴雨内涝模型能够较为真实地反映实际积水点情况,具有较好的模拟效果。

3 结果与分析

3.1 设计暴雨

为了分析研究区不同降雨情景下的内涝淹没情况,本研究设计了多组降雨情景作为模型输入边界条件。参考2012年“7·21”暴雨至2022年的暴雨内涝灾害资料^[24],致灾暴雨历时多为24 h左右,因此推求了重现期 P 分别为5 a、10 a、50 a、100 a的24 h逐分钟设计暴雨过程,如图5所示。不同重现期设计降水量根据《北京市水文手册》(第一分册)暴雨图集及设计雨量计算公式推求。设计雨型依据DB11/T969—2013《城市雨水系统规划设计暴雨径流计算标准》,基于给定的各个时段降雨占设计时段最大降水量的比例进行分配。

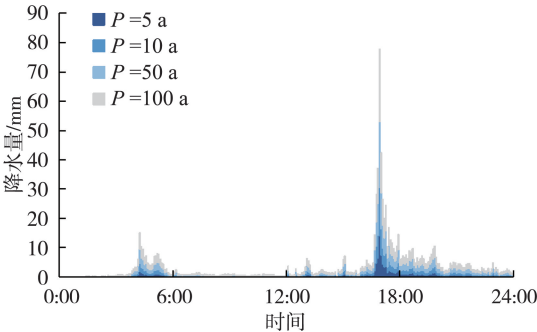


图5 不同重现期下设计暴雨过程
Fig.5 Design rainstorm process under different return periods

3.2 管网排水能力

参考住建部GB50014—2006《室外排水设计规范》(2016年版)中超大城市雨水管渠设计要求,研究区属于中心城区,排水管网应满足3~5 a重现期设计标准。利用建立的城市暴雨内涝模型分别模拟5 a、10 a、50 a、100 a重现期设计暴雨情景下管网运行情况,为了完整体现管网水位变化过程,模拟时长设置为48 h。当水力坡度小于管道坡度或水力坡度大于管道坡度时,管道为超负荷状态,对不同重现期降雨下超载管道即超负荷状态时的管道进行统计,结果见表3。

表 3 不同重现期条件下节点溢流和管道超载情况

Table 3 Overflow node and overload pipeline under different return periods

重现期/a	降水量/mm	溢流节点数量/个	溢流节点比例/%	节点平均超载时长/h	最大超载管道数量/段	超载管道比例/%	管道平均超载时长/h
5	142	139	47.3	13.3	124	74.3	11.1
10	189	148	50.3	14.5	131	78.4	12.4
50	302	155	52.7	17.6	145	86.8	15.4
100	352	157	53.4	18.9	149	89.2	16.7

从溢流节点的统计结果来看,当重现期从 5 a 增大到 10 a 时,溢流节点数量增加 3.1%,平均超载时长增加 1.2 h;当重现期从 5 a 增大到 50 a 时,溢流节点数量增加 5.4%,平均超载时长增加 4.3 h;当重现期从 5 a 增大到 100 a 时,溢流节点数量增加 6.1%,平均超载时长增加 5.6 h。说明在长历时暴雨情况下,随着重现期增大,溢流节点数量和节点平均超载时长均呈现增加的趋势,但增幅随着重现期增大相对降低。这与叶陈雷等^[25]、吴海春等^[26]在其他城市的研究结果相似。

从超载管道的统计结果来看,排水能力不足 5 a 重现期的管道占比为 74.3%,平均超载时长 11.1 h;排水能力不足 10 a 重现期的管道占比为 78.4%,平均超载时长 12.4 h;排水能力不足 50 a 重现期的管道占比为 86.8%,平均超载时长 15.4 h;排水能力不足 100 a 重现期的管道占比为 89.2%,平均超载时长 16.7 h。5 a 重现期条件下超载管道分布如图 6 所示,可以看出超载管道主要分布在研究区西北部、中部和东南部。研究结果表明,研究区排水管网整体排水能力不足,超过一半的管道排水能力不足 5 年一遇,且随着重现期增大,超载管道增多,管道超载时长增加。出现这一结果的原因可能是研究区排水管网设计标准偏低、整体管径偏小,下游地势低洼地区管道数量较少且多为小管径管道。虽然研究区河流水系较为丰富,但由于排水管网自身过流能力不足以及下游管道排水能力不足等原因,导致研究区排水管网整体超载比例较高。

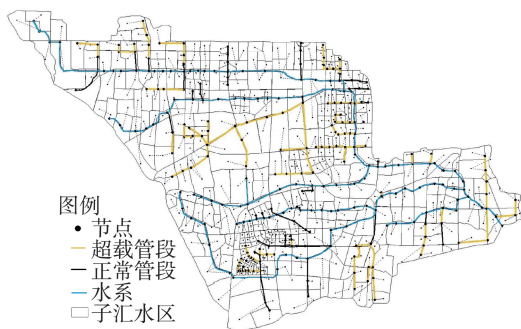
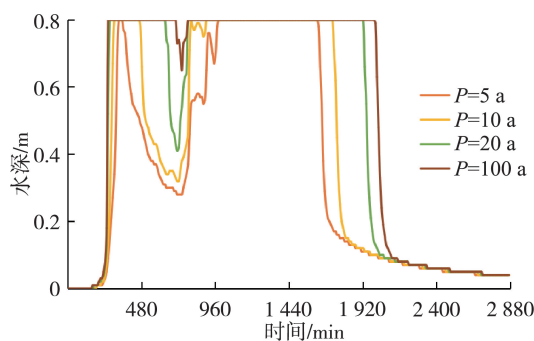


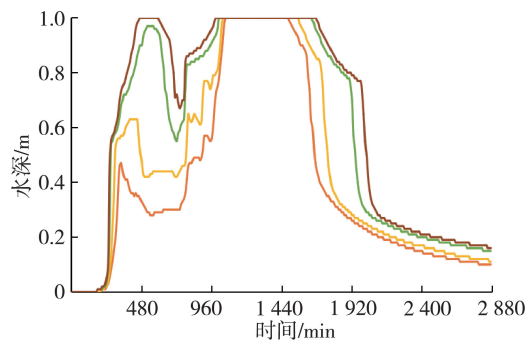
图 6 5 a 重现期条件下超载管网分布

Fig. 6 Distribution of overload pipelines under 5-year return period

为了进一步分析研究区管网排水能力,选择研究区下游地势低易超载且水位变化明显的 G7、G8 管段(位置见图 3),分析不同重现期条件下管段内水位变化情况。G7、G8 管段具有相同埋深,管径分别为 800 mm 和 1000 mm。由图 7 可见,降雨开始大约 3 h 后,G7、G8 管段内水位迅速上涨,短暂保持最大水深即满管流状态后逐渐下降,到第二个雨峰降雨产生的径流汇入管道后,G7、G8 管段内水位再次上升,管段水位较长时间保持在最大水深,之后管段内水位逐渐下降呈自由出流状态。5 a、10 a、50 a、100 a 重现期条件下,G7 管段分别在降雨开始 16.5 h、15 h、13 h、13 h 后达到满流,满流时长分别为 10.8 h、13.8 h、19.2 h、20.3 h;G8 管段分别在降雨开始 18 h、17.5 h、17 h、16.5 h 后达到满流,满流时长分别为 7.2 h、8.7 h、10.7 h、11.5 h。表明随着重现期增加,管道达到满流的时间提前,管道水位下降的时间滞后,管道满流时长增加,这与前述研究区排水管



(a) G7 管段



(b) G8 管段

图 7 不同重现期条件下 G7、G8 管段水深变化

Fig. 7 Water depth in G7 and G8 pipe sections under different return periods

网超载时长随重现期增大而增加表现一致。总体而言,研究区多数排水管网排水能力不足5年一遇设计标准,接近一半的节点易发生溢流,70%以上的管道易出现超负荷状态,研究区内涝风险较大,需要对研究区西北部、中部和东南部的排水管网进行提标改造。

3.3 地表淹没情况

利用建立的城市暴雨内涝模型模拟不同重现期条件下各节点处地表淹没情况,根据二维淹没计算结果,参考GB 51222—2017《城镇内涝防治技术规范》和GB 50014—2021《室外排水设计规范》以及相关文献^[27-28],将淹没水深划分为0~0.2 m、>0.2~2 m、>2 m 3个区间,不同重现期条件下地表淹没水深及范围如图8所示。由图8可见,不同重现期条件下内涝区域主要分布在研究区中部和东南部,水衙沟与新丰草河之间、马草河以南以及大红门排水口东南部。出现这一结果可能是由于:①研究区地势西北高、东南低,中部和东南部地势较低且下凹桥区较多,容易聚积洪水;②该区域多为城市建设用地,下垫面不透水率较高,从而导致积水难以入渗消减;③研究区排水管网系统排水能力不足,难以及时将多余的涝水排出,加重了研究区中部和东南部内涝积水情况。具体来看,5~10 a 重现期条件下,积水点主要位于岳各庄桥、丽泽桥南;10 a 重现期条件下,积水点主要位于岳各庄桥、丽泽桥南、科丰桥;50 a 重现期条件下,新增积水点有焦家坟西口、南四环中路以南等;100 a 重现期条件下,除上述积水点外,正阳桥、大瓦窑桥下积水也较深。这一结果与赵小伟等^[21]、叶超凡等^[29]的研究结果较为相符,可以说明内涝易发点主要分布在城市交通主干道及立交

桥下。

基于不同重现期条件下地表淹没情况,统计分析各淹没水深区间对应的淹没面积及其占总淹没面积的比例,结果见表4。可以看出,5 a、10 a、50 a、100 a 重现期条件下,积水点最大淹没水深分别为2.4 m、2.7 m、3.2 m、3.3 m,总淹没面积占研究区总面积的比例分别为4.1%、5.1%、7.5%、8.2%。由此得出,随着重现期的增加,地表积水深度逐渐增加,积水范围逐渐扩大。从不同水深淹没面积变化情况可以看出,不同重现期条件下,研究区最大淹没水深在0.2 m 以下的积水区面积约占60%,说明研究区整体内涝情况较为乐观,严重积水区主要位于前述几个易涝点。但从不同水深淹没面积占比变化来看,随着重现期增大,0.2 m 以下水深淹没范围占比逐渐减小,0.2 m 以上水深淹没范围占比逐渐增大,研究区浅水积水区域将逐渐被深水替代,内涝情况将不容乐观。另外,为了提高模型计算效率,本研究在构建排水管网模型时对雨篦和部分支管进行了简化,可能会导致部分原本产生溢流的节点被忽略,从而使模拟溢流量偏小或部分实际积水点未显示。因此,研究区实际内涝情况可能比模拟结果更为严重,需要对易涝区域加以关注,并及时采取合理的应对措施。

3.4 城市内涝危险性

英国定义的内涝危险性主要关注洪水对人的危险性,英国环保局采用危险性指数为评价指标,并将其定义为流速和水深的组合函数,在经历了试验数据分析、专题研究和编制规范3个阶段后,最终确定了内涝危险性的函数表达式和等级划分阈值^[30]。本文采用该方法评价研究区内涝危险性,内涝危险

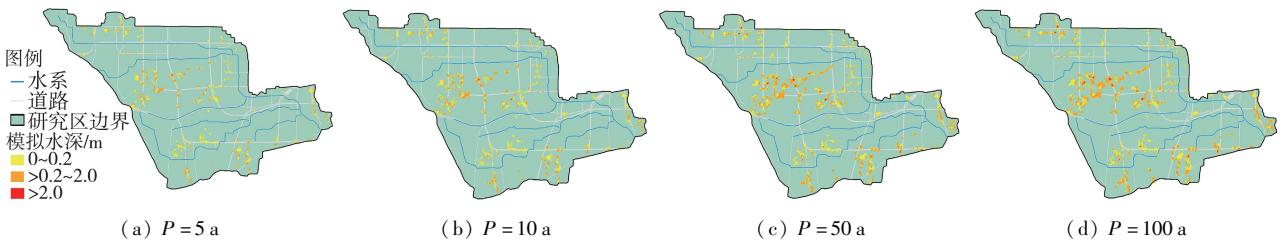


图8 不同重现期条件下研究区最大淹没水深和淹没范围

Fig. 8 Maximum inundation depth and inundation range in study area under different return periods

表4 不同重现期条件下地表淹没情况

Table 4 Inundation of land surface under different return periods

重现期/a	最大淹没水深/m	总淹没面积/hm ²	总淹没面积占比/%	不同水深淹没面积/hm ²			不同水深淹没面积占比/%		
				0~0.2 m	>0.2~2 m	>2 m	0~0.2 m	>0.2~2 m	>2 m
5	2.4	535.5	4.1	361.2	173.9	0.5	67.4	32.5	0.1
10	2.7	668.2	5.1	420.0	246.8	1.3	62.9	36.9	0.2
50	3.2	979.5	7.5	536.1	436.9	6.6	54.7	44.6	0.7
100	3.3	1083.6	8.2	554.8	519.2	9.6	51.2	47.9	0.9

性指数计算公式为

$$H_R = h(v + 0.5) + D_F \tag{1}$$

式中： H_R 为危险性指数； h 为积水深度； v 为流速； D_F 为泥石流因子，指洪水中因携带泥石流而增加的危险系数。根据研究区水深和流速，不同下垫面类型的 D_F 取值不同。当 $h \leq 0.25\text{ m}$ 时， D_F 均取 0；当 $0.25\text{ m} < h \leq 0.75\text{ m}$ 时， D_F 在耕地或草地取 0、林地取 0.5、城市用地取 1；当 $h > 0.75\text{ m}$ 或 $v > 2\text{ m/s}$ 时， D_F 在耕地或草地取 0.5、林地和城市用地取 1。

根据计算出的危险性指数，将内涝危险性等级^[31]划分见表 5。

表 5 内涝危险性等级划分
Table 5 Waterlogging risk classification

H_R	危险等级	含义
0 ~ 0.75	低	需要注意，区域内水深较浅但流速大，或流速极小但水深较大
>0.75 ~ 1.25	中	对于部分人危险（如老弱病幼），区域内水深或流速较大
>1.25 ~ 2.5	高	对于大部分人危险，区域内水深和流速均较大
>2.5	极高	对于所有人和行动均危险，区域内水深和流速均极大

为了进一步评估研究区内涝危险性情况，基于构建的城市暴雨内涝模型，模拟得到水深、流速等一系列内涝关键指标，计算研究区内涝危险性，对积水深度和流速进行叠加计算，得到 5 a、10 a、50 a、100 a 重现期条件下的内涝危险性空间分布如图 9 所示。可以看出，各重现期条件下内涝危险区主要位于研究区中部和东南部，且随着重现期增加，中高危险区分布范围增大。5 a 重现期时，中高危险区多集中于研究区中部；100 a 重现期时，中高危险区分布于研究区中部、南部和东南部多处，可能是由于该区域地

势较低，发生溢流的管网节点较多，积水深度较大，加之城市建筑用地占比较高，导致区域内危险性指数较高，危险性等级偏高。

统计分析不同重现期条件下内涝危险性分区面积，结果如表 6 所示。结合图 9 可以看出，随着重现期增加，低、中、高、极高危险区的面积不断增大。说明随着降雨强度增加，内涝区的水深和流速不断增大，淹没范围也不断扩大。从不同危险区面积占比变化情况还可以看出，随着重现期增加，低危险区面积占比减小，中、高、极高危险区面积占比呈增大趋势。当重现期从 5 a 增加到 100 a 时，低危险区面积占比从 71.4% 降低到 55.8%，减少了 15.6%；中、高、极高危险区面积占比则分别增加了 1.1%、13.6%、0.9%，说明随着重现期增加，低危险区主要向高危险区转化，较少向极高危险区转化。这一结果一方面表明，大红门排水区内原本积水较浅、流速较小的区域将逐渐转变为高流速的深水区域，需要重视研究区内涝防治问题；另一方面表明，对于极端降雨情景，大红门排水区防涝体系具有一定的抗风险能力，出现极高危险的区域较少。

4 结 论

a. SWMM 与 InfoWorks ICM-2D 耦合模型在北京市大红门排水区城市暴雨内涝模拟中具有较好的适用性，模拟结果可以较为真实地反映区域内涝情况。

b. 长历时暴雨下，重现期增大，溢流节点数量和节点平均超载时长增加，但增幅随之相对减小；超载管道数量增多，管道达到满流的时间提前，管道水位下降时间滞后，管道超载时长增加。在对研究区

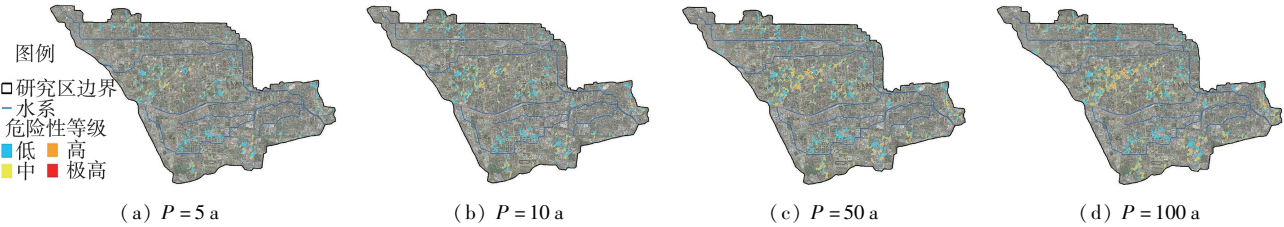


图 9 不同重现期条件下内涝危险性分布

Fig. 9 Distribution of waterlogging risk under different return periods

表 6 不同重现期条件下内涝危险性分区面积

Table 6 Area of waterlogging risk zoning under different return periods

重现期/a	不同等级危险区面积/hm ²				总淹没面积/hm ²	不同等级危险区面积占比/%			
	低	中	高	极高		低	中	高	极高
5	382.4	41.2	110.4	1.5	535.5	71.4	7.7	20.6	0.3
10	448.3	53.4	163.4	3.1	668.2	67.1	8.0	24.4	0.5
50	575.4	89.9	305.1	9.1	979.5	58.7	9.2	31.1	0.9
100	604.8	95.2	370.5	13.2	1 083.6	55.8	8.8	34.2	1.2

排水管网概化的情况下,研究区 70% 以上的管段排水能力不足 5 年一遇设计标准,半数节点易发生溢流,需对超载段排水管网进行优化改造。

c. 大红门排水区积水深度多在 0.2 m 以下,整体内涝情况较为乐观,易涝区主要分布在研究区中部和东南部岳各庄桥、丽泽桥南、公益西桥等下凹桥区,且分布范围随重现期增大而扩大。随着重现期增大,低危险区主要向高危险区转化,较少向极高危险区转化。表明大红门排水区内小流速浅水内涝区将随着重现期增大逐渐转变为大流速深水内涝区,虽然在现有防涝措施的保障下转化为极高危险区的比例较小,但仍需要相关部门重视研究区积水内涝风险,不断优化区域内涝防控方案。

参考文献:

- [1] 姜仁贵,王思敏,解建仓,等. 变化环境下城市暴雨洪涝灾害应对机制[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022,20(1):102-109. (JIANG Rengui, WANG Simin, XIE Jiancang, et al. Response mechanism of urban rainstorm and flood disasters under changing environment [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022,20(1):102-109. (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] 陈文龙,徐宗学,宋利祥,等. 基于流域系统整体观的城市洪涝治理研究[J]. 水利学报,2021,52(6):659-672. (CHEN Wenlong, XU Zongxue, SONG Lixiang, et al. Research on the control measures of pluvial and fluvial urban floods based on holistic view of watershed system [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021,52(6):659-672. (in Chinese))
- [4] 夏军强,董柏良,李启杰,等. 近年城市洪涝致灾的水动力学机理分析与减灾对策研究[J]. 中国防汛抗旱, 2022,32(4):66-71. (XIA Junqiang, DONG Boliang, LI Qijie, et al. Study on hydrodynamic mechanisms and disaster reduction countermeasures of recent urban floods [J]. China Flood & Drought Management, 2022,32(4):66-71. (in Chinese))
- [5] 徐宗学,陈浩,任梅芳,等. 中国城市洪涝致灾机理与风险评估研究进展[J]. 水科学进展,2020,31(5):713-724. (XU Zongxue, CHEN Hao, REN Meifang, et al. Progress on disaster mechanism and risk assessment of urban flood/waterlogging disasters in China[J]. Advances in Water Science, 2020,31(5):713-724. (in Chinese))
- [6] 任梅芳,徐宗学,庞博. 变化环境下城市洪水演变驱动机理:以北京市温榆河为例[J]. 水科学进展,2021,32(3):345-355. (REN Meifang, XU Zongxue, PANG Bo.

Driving mechanisms of urban floods under the changing environment; case study in the Wenyu River Basin [J]. Advances in Water Science, 2021, 32(3):345-355. (in Chinese))

- [7] 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. (in Chinese))
- [8] GUO Yuchen, QUAN Lihong, SONG Lili, et al. Construction of rapid early warning and comprehensive analysis models for urban waterlogging based on AutoML and comparison of the other three machine learning algorithms [J]. Journal of Hydrology, 2022,605:1-15.
- [9] 王静,李娜,程晓陶. 城市洪涝仿真模型的改进与应用[J]. 水利学报, 2010, 41(12):1393-1400. (WANG Jing, LI Na, CHENG Xiaotao. Improvement and application of numerical model for the simulation of flooding in urban area [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(12):1393-1400. (in Chinese))
- [10] ZOU Lianjun, WANG Zhi, LU Qinqing, et al. The rain-induced urban waterlogging risk and its evaluation: a case study in the central city of Shanghai [J]. Water, 2022,14:1-15.
- [11] 黄国如,罗海婉,陈文杰,等. 广州东濠涌流域城市洪涝灾害情景模拟与风险评估[J]. 水科学进展, 2019,30(5):643-652. (HUANG Guoru, LU Haiwan, CHEN Wenjie, et al. Scenario simulation and risk assessment of urban flood in Donghaochong Basin, Guangzhou [J]. Advances in Water Science, 2019,30(5):643-652. (in Chinese))
- [12] 郑德凤,高敏,李钰,等. 基于 GIS 的大连市暴雨洪涝灾害综合风险评估[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022,50(3):1-8. (ZHENG Defeng, GAO Min, LI Yu, et al. Comprehensive risk assessment of rainstorm-flood disaster in Dalian City based on GIS [J]. Journal of Hohai university (Natural Sciences), 2022, 50(3):1-8. (in Chinese))
- [13] LI Chunlin, LIU Miao, HU Yuanman, et al. Spatial distribution patterns and potential exposure risks of urban floods in Chinese megacities [J]. Journal of Hydrology, 2022,610:127838.
- [14] 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. Evaluation of the impacts of urban waterlogging on road traffic based on scenario simulation [J]. Water Resources Protection, 2022,38(6):31-38. (in Chinese))
- [15] 袁绍春,王怀鋈,吕波,等. 基于 InfoWorks_ICM 模型的山地城市老旧建筑小区海绵化改造方案设计及评估[J]. 水资源保护, 2020, 36(5):43-49. (YUAN Shaochun, WANG Huaijun, LYU Bo, et al. Design and

- evaluation of sponge city reconstruction scheme for old building district in mountainous city based on InfoWorks ICM model [J]. Water Resources Protection, 2020, 36 (5):43-49. (in Chinese))
- [16] LUO Kaisheng, ZHANG Xuejun. Increasing urban flood risk in China over recent 40 years induced by LUCC[J]. Landscape and Urban Planning, 2022, 219(5):1043-17.
- [17] 叶陈雷, 徐宗学, 雷晓辉, 等. 福州晋安河片区海绵改造对城市内涝的影响[J]. 水资源保护, 2023, 39(1):83-92. (YE Chenlei, XU Zongxue, LEI Xiaohui, et al. Influences of sponge reconstruction of Jin'an river drainage district in Fuzhou City on urban flooding/waterlogging[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(1):83-92. (in Chinese))
- [18] SADEGHI Farzaneh, RUBINATO Matteo, GOERKE Marcel, et al. Assessing the performance of LISFLOOD-FP and SWMM for a small watershed with scarce data availability[J]. Water, 2022, 14(5):748.
- [19] ZHAO Lidong, ZHANG Ting, FU Jun, et al. Risk assessment of urban floods based on a SWMM-MIKE21-coupled model using GF-2 Data [J]. Remote Sensing, 2021, 13(21):1-19.
- [20] 王兆礼, 陈昱宏, 赖成光. 基于 TELEMAC-2D 和 SWMM 模型的城市内涝数值模拟[J]. 水资源保护, 2022, 38(1):117-124. (WANG Zhaoli, CHEN Yuhong, LAI Chengguang. Numerical simulation of urban waterlogging based on TELEMAC-2D and SWMM model[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1):117-124. (in Chinese))
- [21] 赵小伟, 李永坤, 张岑, 等. 基于中长期降雨预测的北京市城区洪涝风险分析[J]. 中国防汛抗旱, 2021, 31(7):1-6. (ZHAO Xiaowei, LI Yongkun, ZHANG Cen, et al. Analysis of flood risk in Beijing urban area based on medium and long-term rainfall forecasts[J]. China Flood & Drought Management, 2021, 31(7):1-6. (in Chinese))
- [22] 李永坤, 臧敏, 潘兴瑶, 等. 北京凉水河暴雨洪水特征规律研究[J]. 中国水利, 2017(19):57-59. (LI Yongkun, ZANG Min, PAN Xingyao, et al. Examination of characters of rainstorm of Liangshui River in Beijing[J]. China Water Resources, 2017(19):57-59. (in Chinese))
- [23] 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方法研究[J]. 水力发电学报, 2022, 41(6):11-21. (LIAO Ruting, XU Zongxue, YE Chenlei, et al. Study on parameter sensitivity analysis method of Storm Water Management Model[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41(6):11-21. (in Chinese))
- [24] 赵小伟, 李永坤, 杨忠山, 等. 超大型城市洪涝演变规律与调度模式分析[J]. 水文, 2022, 42(3):1-7. (ZHAO Xiaowei, LI Yongkun, YANG Zhongshan, et al. Analysis of flood evolution and operation mode in Mega City[J]. Journal of China Hydrology, 2022, 42(3):1-7. (in Chinese))
- [25] 叶陈雷, 徐宗学, 雷晓辉, 等. 基于 SWMM 的城市社区尺度管网排水模拟: 以福州市某排水小区为例[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022, 20(2):271-280. (YE Chenlei, XU Zongxue, LEI Xiaohui, et al. Simulation of pipeline network drainage at urban community scales based on SWMM: a case study in Fuzhou City[J]. South-to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(2):271-280. (in Chinese))
- [26] 吴海春, 黄国如. 基于 PCSWMM 模型的城市内涝风险评估[J]. 水资源保护, 2016, 32(5):11-16. (WU Haichun, HUANG Guoru. Risk assessment of urban waterlogging based on PCSWMM model[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(5):11-16. (in Chinese))
- [27] 李国一, 刘家宏. 基于 TELEMAC-2D 模型的深圳洪涝风险评估[J]. 水资源保护, 2022, 38(5):58-64. (LI Guoyi, LIU Jiahong. Flood risk assessment of Shenzhen City based on TELEMAC-2D Model[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(5):58-64. (in Chinese))
- [28] 傅春, 付耀宗, 肖存艳, 等. 基于 MIKE FLOOD 模型的鹰潭市内涝弹性分析[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(1):33-39. (FU Chun, FU Yaozong, XIAO Cunyan, et al. Analysis of urban waterlogging resilience based on MIKE FLOOD Model in Yingtan City[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(1):33-39. (in Chinese))
- [29] 叶超凡, 张一驰, 程维明, 等. 北京市区快速城市化进程中的内涝现状及成因分析[J]. 中国防汛抗旱, 2018, 28(2):19-25. (YE Chaofan, ZHANG Yichi, CHENG Weiming, et al. Analysis on urban pluvial floods and causes during rapid development in Beijing[J]. China Flood & Drought Management, 2018, 28(2):19-25. (in Chinese))
- [30] HR Wallingford, Flood Hazard Research Centre, Middlesex University Risk & Policy Analysts Ltd. Flood risks to people phase 2, guidance document [R]. London: Defra/Environment Agency, 2006.
- [31] 王静, 李娜, 王杉. 洪水危险性评价指标与等级划分研究综述[J]. 中国防汛抗旱, 2019, 29(12):21-26. (WANG Jing, LI Na, WANG Shan. Review on flood hazard assessment index and grade classification, China Flood & Drought Management, 2019, 29(12):21-26. (in Chinese))

(收稿日期:2022-06-04 编辑:王芳)

