

刘华超, 周民华, 甘立建, 等. 基于气候变化情景下的片区排水防涝模型构建与分析[J]. 净水技术, 2023, 42(10): 139-146.

LIU H C, ZHOU M H, GAN L J, et al. Construction and analysis of drainage and waterlogging prevention model based on climate change scenario [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(10): 139-146.

基于气候变化情景下的片区排水防涝模型构建与分析

刘华超¹, 周民华², 甘立建^{1,*}, 徐薇¹, 梁风超¹, 赵日祥¹

(1. 济南市市政工程设计研究院<集团>有限责任公司, 山东济南 250001; 2. 东营市东凯人才发展集团有限公司, 山东东营 257000)

摘要 排水防涝模型作为一种新兴的排水防涝系统规划、设计与管理的重要手段, 近些年来得到了迅速发展。然而, 传统的水动力学模型均根据当地暴雨强度公式进行降雨事件的设定, 尚未考虑气候变化对于降雨量的影响。研究利用 CMIP5 数据探究气候变化对降雨量的影响, 利用 InfoWorks ICM 软件构建片区水动力学模型, 进行不同场景下的排水能力评估及内涝风险评估。评估结果表明, 在考虑气候变化的条件下, 区域管网系统相较于原始情景管网排水能力达标率降低, 内涝风险增加。因此, 相关人员在规划、设计与管理片区排水防涝系统时, 应考虑气候变化因素, 增强片区应对内涝风险的韧性, 确保区域整体的水安全。

关键词 气候变化 排水能力评估 内涝风险评估 水动力学模型 韧性

中图分类号: TU992 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2023)10-0139-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2023.10.018

Construction and Analysis of Drainage and Waterlogging Prevention Model Based on Climate Change Scenario

LIU Huachao¹, ZHOU Minhua², GAN Lijian^{1,*}, XU Wei¹, LIANG Fengchao¹, ZHAO Rixiang¹

(1. Jinan Municipal Engineering Design & Research Institute <Group> Co., Ltd., Jinan 250001, China; 2. Dongying Dongkai Talent Development Group Co., Ltd., Dongying 257000, China)

Abstract As an important means of planning, design and management of drainage and waterlogging system, drainage and waterlogging model has developed rapidly in recent years. However, traditional hydrodynamic models are based on local rainstorm intensity formula to set rainfall events, without considering the impact of climate change on rainfall. In this study, CMIP5 (coupled model intercomparison project phase 5) data was used to explore the impact of climate change on rainfall, was used Infoworks ICM software to build a hydrodynamics model of the area, and was carried out drainage capacity assessment and waterlogging risk assessment under different scenarios. The evaluation results showed that under the condition of climate change, compared with the original scenario, the drainage capacity compliance rate of regional network system decreased and the risk of waterlogging increased. When planning, designing and managing the drainage and waterlogging prevention system in the region, relevant personnel should take the influence of climate change factors into consideration, enhance the resilience of the region cope with waterlogging risks, and ensure the overall water security of the region.

Keywords climate change drainage capacity assessment waterlogging risk assessment hydrodynamic model resilience

传统的城市排水管网系统规划设计, 是根据区

域的设计降雨条件利用经验数学公式进行管道水力计算, 设计成果缺乏行之有效的评估方法^[1]。城市排水防涝模型的出现有效缓解了这一困境, 通过模型模拟对城市排水管网系统进行排水能力评估与内涝风险评估, 能够较为真实地评价规划设计成果^[2]。在构建城市排水防涝模型的过程中, 设计降

[收稿日期] 2022-11-09

[作者简介] 刘华超(1979—), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要从事市政给水排水、海绵城市、智慧水务方面的工程咨询设计工作, E-mail: lhc@jnszy.com。

[通信作者] 甘立建(1981—), 男, 高级工程师, E-mail: glj@jnszy.com。

雨事件是重要组成部分,通过设置降雨量、降雨历时、降雨时程分配,可有效模拟贴近真实情况的降雨情况^[3]。目前的模型研究大多利用芝加哥雨型公式法,根据区域暴雨强度公式构建降雨事件,从而开展区域排水能力评估、内涝风险评估、海绵设施建设效果评估等^[4-6]。上述研究采用单一情景下降雨事件进行模拟分析,尚未考虑气候变化对模型构建的影响。

随着以 CO₂ 为主的温室气体的大量排放,全球气候呈现出较为明显的变暖态势,在全球气候变暖背景下,我国大部分区域年降雨量及极端降水事件呈现上升趋势^[7-9]。目前,CMIP5 (coupled model intercomparison project phase 5) 因其成熟性,在不同区域气候变化相关研究中得到了广泛应用,研究^[10-13]表明采用 CMIP5 数据对未来降雨量进行预测是可行的。再者,根据《城镇给水排水技术规范》(GB 50788—2012),片区排水管道系统的服务年限不应低于 50 年,所以规划设计人员在开展片区雨水管线规划设计时,应适当考虑气候变化导致降雨量变化的因素,合理预测未来降雨量,确保排水管网系统在其服务年限内仍满足要求。

在此背景下,本文研究了气候变化情景下的片区级排水防涝模型构建与分析。首先利用 InfoWorks ICM 软件构建华东某市 JTH 流域雨洪模型,开展研究区规划排水系统能力评估及内涝风险分析;其次利用 CMIP5 数据定量分析气候升温背景下未来降雨量的变化情况;最后利用 InfoWorks ICM 软件构建基于气候变化情景下的降雨事件,分析降雨量变化对模拟结果的影响,为后续开展片区级雨水管网规划设计提供参考。值得注意的是,因 CMIP5 模型与 ICM 模型的研究尺度存在一定差异,本研究假设 CMIP5 模型的单元网格精度也即研究区域内均位于同一网格,降雨量变化具有相同的变化趋势。

1 研究区概况

研究选取某市 JTH 流域作为研究区域,区域面积约为 5.252 4 km²(表 1)。区域属北温带湿润大区鲁淮区,为温暖半湿润季风性气候,多年平均降水量为 669.30 mm。如图 1 所示,区域地貌单元属黄河冲积平原,地形较平坦,整体呈南高北低、西高东低,海拔高程为 19.1~21.9 m。区域尚未进行开发,

现状为农田,灌溉渠和现状水系相互贯通,水系发达。区域排水体制为雨污分流制,雨水管渠设计标准为 3 年一遇,除涝标准为 50 年一遇。

表 1 研究区规划用地
Tab. 1 Planning Land Use in Study Area

用地名称	用地面积/ km ²	不同类别 用地占比
公共管理与公共服务设施用地	0.003 1	0.1%
商业服务设施用地	0.041 6	0.8%
公共管理与商业服务设施混合用地	0.244 5	4.7%
工业用地	1.635 2	31.1%
物流仓储用地	0.327 1	6.2%
道路与交通设施用地	0.856 0	16.3%
公用设施用地	0.008 4	0.2%
绿地与广场用地	0.835 2	15.9%
区域交通设施用地	0.058 5	1.1%
水域	0.273 6	5.2%
农林用地	0.819 7	15.6%
预留用地	0.149 5	2.8%

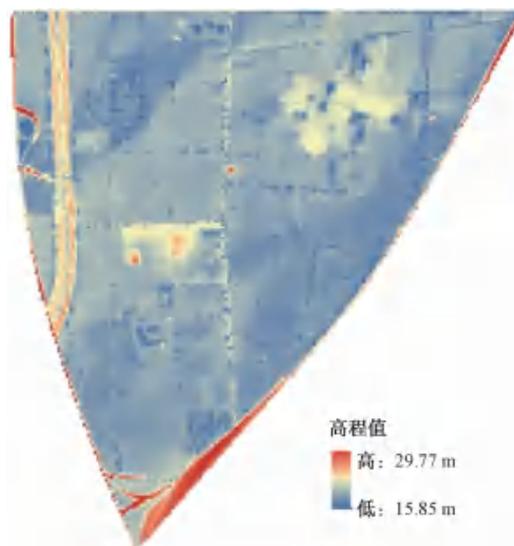


图 1 研究区现状高程

Fig. 1 Elevation of the Current Study Area

2 模型建设

研究对规划管网进行了优化,设定了外部降雨事件与边界条件,利用 InfoWorks ICM 软件构建片区排水模型,包含研究区域的一维网络模型、二维网络模型以及二者耦合模型。

2.1 降雨条件

研究采用芝加哥降雨过程线法生成设计降雨事

件。研究区域具体暴雨强度如式(1)。

$$q = \frac{1\,421.481(1 + 0.932\lg P)}{(t + 7.347)^{0.617}} \quad (1)$$

其中: q ——设计暴雨强度, $L/(s \cdot hm^2)$, $1\,hm^2 = 0.01\,km^2$;

P ——设计重现期, a ;

t ——设计降雨历时, min 。

根据暴雨强度公式和芝加哥雨型分别设计不同重现期下的降雨。本研究通过建立1年一遇、2年一遇、3年一遇的2h降雨事件,进行区域规划排水系统排水能力评估,通过建立50年一遇的3h降雨事件进行内涝风险评估。

2.2 模型构建

研究中构建的模型包括管网模型、下垫面模型、二维地面积水模型以及河道模型^[14]。管网模型应基于现有市政管线设计资料,采取一定的模型数据转换方法,划分子集水区,概化管道、检查井等信息^[15]。构建管网模型应进行拓扑关系检查,确保管网系统拓扑关系无误。下垫面模型应根据现有地块规划资料,构建绿地、道路与地块等下垫面类型,通过查阅规范等方式确定不同下垫面的参数。构建下垫面模型应进行下垫面相交检验,确保不同下垫面之间相互独立。二维地面积水模型应基于现有数字高程模型(DEM),将建筑物与道路分别设置为空白区与网格化区间,实现一维管网模型与二维地面模型的耦合。河道模型应基于河道中心线及横断面数据,设置河道排放系数与模式上限。构建河道模型应借助软件的创建河岸连接功能,实现河道模型与其他模型的耦合。

2.3 模型参数

根据相关文献资料^[14,16],绿地汇流参数取0.15,初期入渗率为200mm/h,极限入渗率为6.3mm/h,衰减因子取4;铺装汇流参数为0.013;建筑物汇流参数为0.013。

根据《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)相关指标,确定研究区域不同下垫面径流系数值。其中,地块径流系数按35%绿地、35%道路及30%房屋建筑加权计算,具体指标如表2所示。

2.4 模拟结果与分析

2.4.1 排水能力评估

研究采用管渠最大充满度评估法依次对1年一

表2 研究区域下垫面径流参数

Tab. 2 Runoff Parameters of Underlying Surface in Study Area

地面种类	规范径流系数	研究径流系数	模型径流量类型
屋面、混凝土或沥青路面	0.85~0.95	0.90	Fixed
公园或绿地	0.10~0.20	0.20	Fixed
地块	-	0.66	Fixed

注:研究中管道的材质均为钢筋混凝土管,管道粗糙系数取0.013。

遇、2年一遇、3年一遇重现期的设计降雨事件下研究区域雨水排水模型运行结果进行分析^[17]。结果表明:在相应降雨条件下,研究区域雨水管道系统排水能力良好,管道排水能力评估统计如表3所示。

表3 管网排水能力评估统计

Tab. 3 Statistics of Drainage Capacity of Pipelines Network

重现期	长度/m	占比
小于1年	0.00	0
1~2年	0.00	0
2~3年	13.90	0.05%
≥3年	23 828.70	99.95%

研究区域内雨水管渠设计重现期为3年一遇。评估结果如图2所示,在1年一遇2h以及2年一遇2h降雨条件下,区域雨水管渠最大充满度均小于1,区域雨水管渠排水能力整体达标,在3年一遇2h降雨条件下,部分管段最大充满度大于1,区域雨水管渠排水能力达标率为99.95%。



图2 雨水管渠排水能力评估

Fig. 2 Capacity Assessment of Storm Water Drain

2.4.2 内涝风险评估

基于雨水管网模型、地面模型与河道模型,结合

区域重要程度与行人安全,研究采用情景模拟评估法与双因子评价法进行内涝风险评估,分析确定不同情景下的内涝淹没范围与易涝点^[18]。研究中,双因子评价法的指标选取积水深度与积水时间,不同的积水深度与积水时间对应相应的风险等级,具体信息如表4所示^[19]。

表4 城市内涝风险等级划分

等级	深度/m	时间/min	颜色
I	>0.50	>0	红色
II	0.25~0.50	>30	红色
III	0.25~0.50	0~30	黄色
IV	0.15~0.25	>30	黄色
V	0.15~0.25	0~30	蓝色

根据研究区域建设方案及人口数量,确定内涝防治标准为50年一遇。根据《室外排水设计标准》(GB 50014—2021),采用数学模型法对区域内涝防治系统进行模拟时,降雨历时一般采用3~24 h,参考美国丹佛市的《城市暴雨排水标准》,服务面积小于10平方英里(约25.9 km²),最小降雨历时为2 h,确定本研究中内涝风险评估采用50年一遇3 h降雨是合理可行的。具体降雨曲线如图3所示。根据降雨曲线,降雨历时为180 min,峰值比例为0.656,降雨总量为157.51 mm,平均雨强为0.875 mm/min。

此外,采用推理公式法进行内涝防治校核时,需提高径流系数。当设计重现期为30~50年时,宜将径流系数提高20%~25%,当计算的径流系数大于

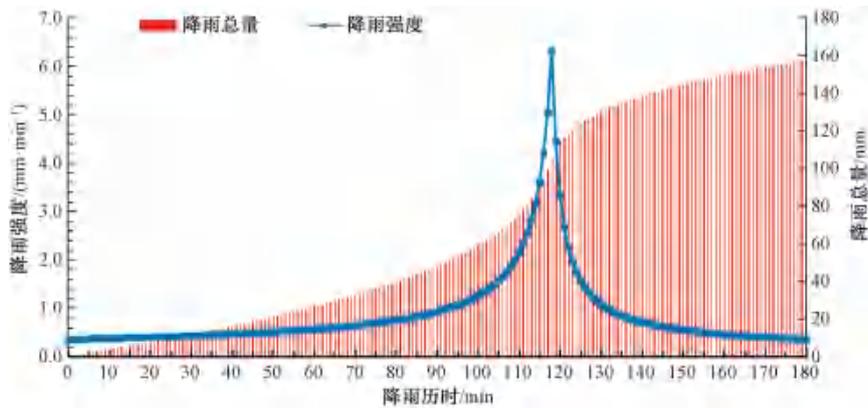


图3 50年一遇3 h降雨曲线

Fig. 3 3 h Rainfall Curve of 50-Year

1时,应按1取值。研究确定长历时降雨条件下道路径流系数为1,地块径流系数为0.82,绿地径流系数为0.25。

基于模拟结果,研究绘制50年一遇3 h降雨条件下的内涝风险图,结果如图4所示。城市内涝风险评估结果表明:在50年一遇3 h降雨条件下,积水0.15~0.25 m的区域面积约为5 860 m²,积水0.25~0.50 m的区域面积约为630 m²,积水水深超过0.50 m的区域面积约为14 190 m²。目前研究区域的排水管网在排除城市内涝的能力上具有较高的水平,服务范围内出现较少积水区域。

研究绘制了50年一遇3 h降雨条件下的内涝点分布图。如图5所示,在发生超标降雨时,区域1、区域2、区域3、区域4易发生内涝积水现象,产生积水现象原因为区域低洼,雨水累积无法正常排出。

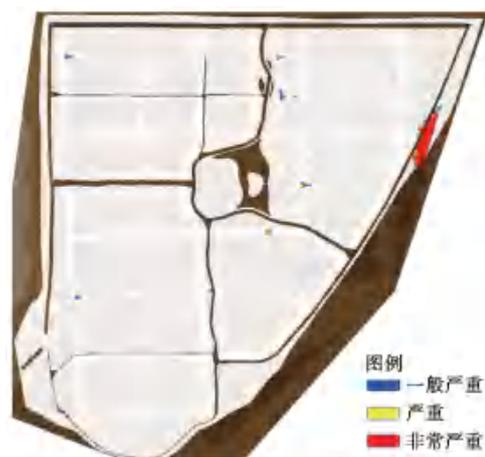


图4 50年一遇3 h内涝风险

Fig. 4 3 h Waterlogging Risk of 50-Year Return Period

其中,区域3处风险级别最高,积水原因为该处为立交桥,桥下地势低洼,雨期需根据需要进行工程措

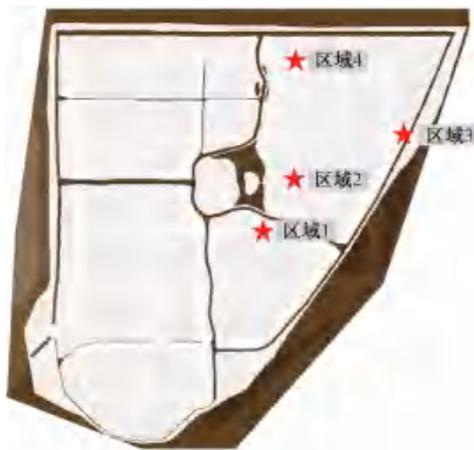


图5 50年一遇3h内涝点分布

Fig. 5 3 h Distribution of Waterlogging Points of 50-Year Return Period

施,如蓄水池开挖、布置泵站等。

3 未来气候变化情景设定

为探讨在未来全球气温上升的情境下,研究区域降水活动的变化情况,研究选取 CMIP5 中 CSIRO-MK3-6-0 模式的模拟结果进行分析。CSIRO-MK3-6-0 模式由法国研究学者所研发,水平分辨率

为 256×128 (纬向 \times 经向),历史气候情境时间为 1850 年—2005 年,试验时间为 2006 年—2100 年,该模式空间模拟能力较好^[20]。

典型浓度路径 (RCP) 场景是以未来人口、经济、科技、能耗及土地利用等因素的变化为前提条件,描述未来温室气体的排放量、大气成分的浓度等,其包括高排放情景 (RCP8.5)、中排放情景 (RCP6.0 和 RCP4.5) 以及低排放情景 (RCP2.6),不同场景模式的区别主要体现在未来土地利用规划中。CSIRO-MK3-6-0 模式分别对 RCP8.5、RCP6.0、RCP4.5、RCP2.6 这 4 种情景进行了分析,分析结果如图 6 所示。根据分析结果,2006 年—2100 年,随着全球气温的增高,在 4 种场景下,年降雨总量呈现较为微弱的增加趋势。

因高排放场景和低排放场景所假设条件与现实条件存在较大差别,研究初步选取中排放场景 (RCP6.0 和 RCP4.5) 作为本研究中的研究场景。考虑当前“碳达峰”与“碳中和”的政策需求,研究最终选取 RCP4.5 场景作为研究未来降雨量变化的依据。RCP4.5 场景是指采取政策推动可再生能源电

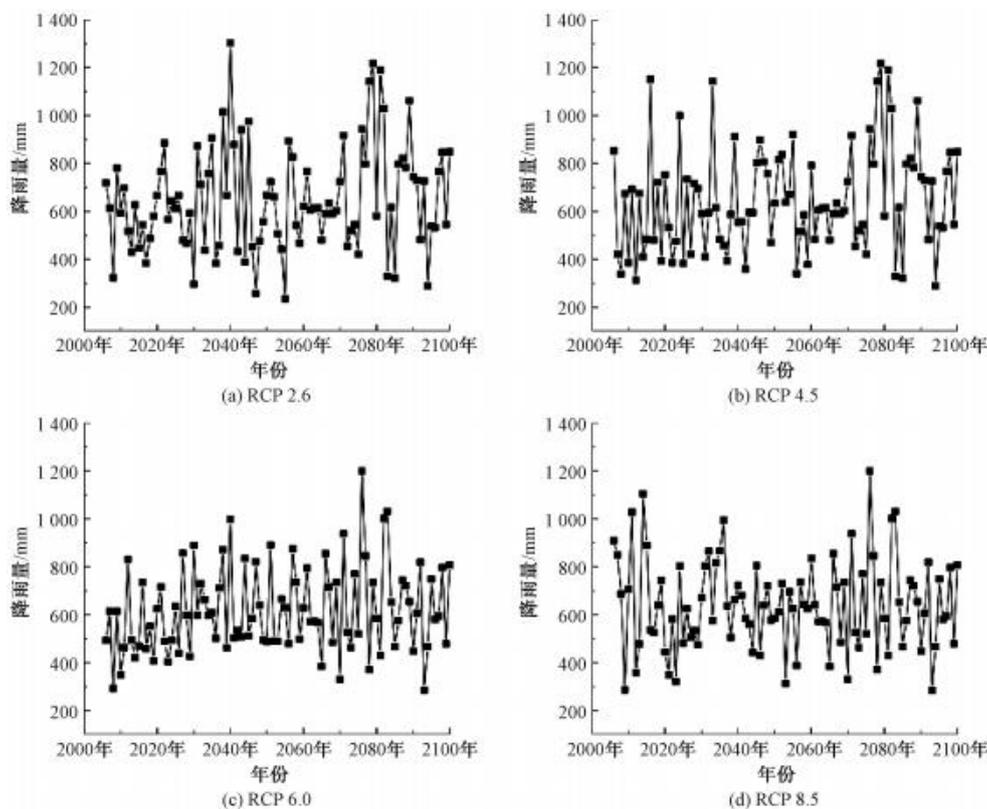


图6 CSIRO-MK3-6-0 模式降雨分析

Fig. 6 Rainfall Analysis in CSIRO-MK3-6-0 Mode

力系统以及碳捕捉系统的建设,减少传统化石燃料的使用率,控制辐射强迫顶点降至 4.5 W/m^2 , CO_2 质量浓度降至 538 mg/L 。

图 6(b) 结果表明,研究区域在气候变化的条件下,降水总量以每年 0.8307 mm 的变率呈增加趋势。即相较于现状条件,研究区域 2050 年年降雨量增加了 6.2% 。

4 未来气候变化情景

基于 CMIP5 数据的处理与分析,开展未来气候

变化情景下研究区域的排水能力以及内涝风险评估。研究内容分为 3 个部分,分别为考虑未来气候变化情景下的降雨事件设定、管道排水能力评估、区域内涝风险评估。

4.1 降雨事件设定

本研究通过调整暴雨强度公式系数,改变芝加哥雨型曲线,实现降雨总量的变化。图 7 展示了考虑气候变化条件下 2050 年研究区域 1 年一遇、2 年一遇、3 年一遇以及 50 年一遇的降雨曲线图。

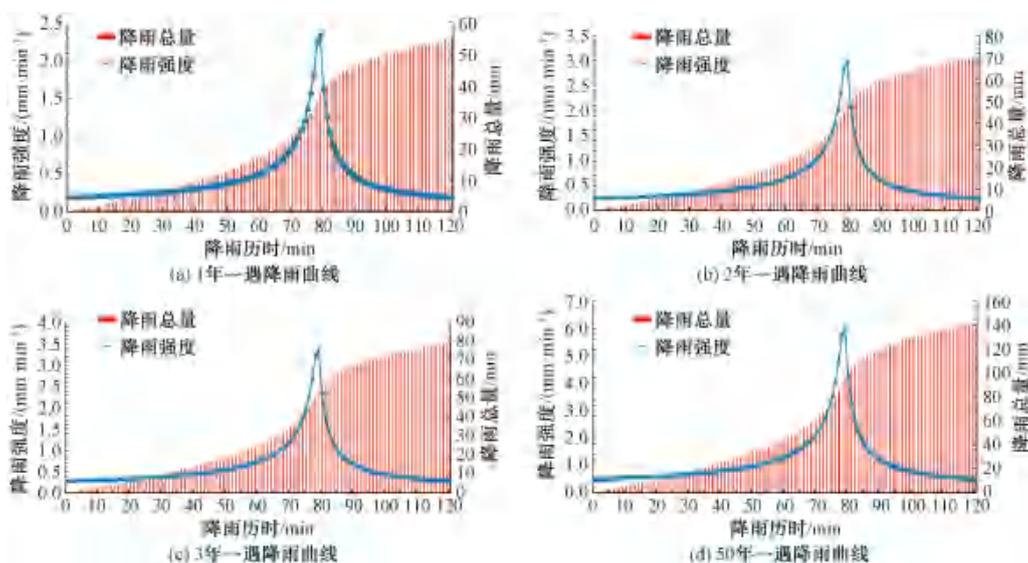


图 7 2050 年降雨曲线

Fig. 7 Rainfall Curves in 2050

4.2 排水能力评估

基于 InfoWorks ICM 软件设置的 2050 年降雨事件,开展 2050 年研究区域雨水管道排水能力评估。

图 8 为未考虑气候变化以及考虑气候变化条件下的管网排水能力评估。结果表明,在考虑气候变化的条件下,片区 2050 年雨水管道达标率为 86.03% ,其

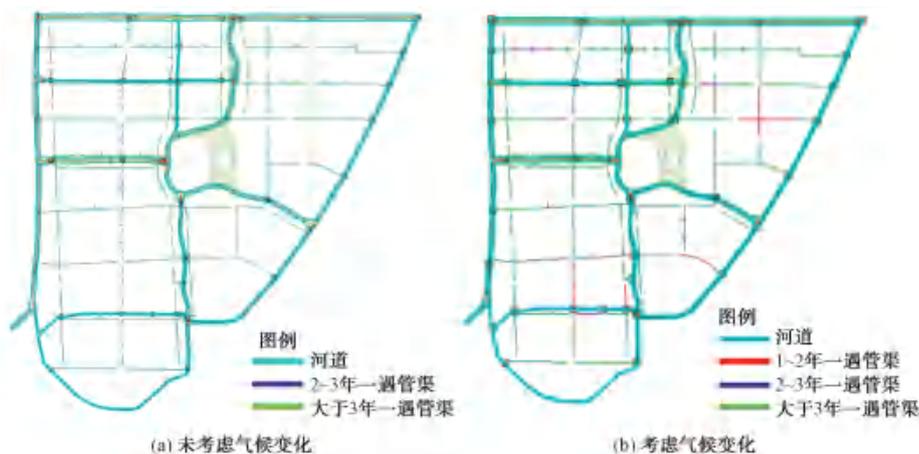


图 8 管网排水能力评估对比

Fig. 8 Comparison of Drainage Capacities Evaluation of Pipelines Network

中,不满足2年一遇标准的管道总长度为1 012 m,不满足3年一遇标准的管道总长度为2 318.4 m。

4.3 内涝风险评估

基于InfoWorks ICM软件设置的2050年降雨事件,开展2050年研究区域内涝风险评估。图9为未考虑气候变化以及考虑气候变化条件下的内涝风险评估。结果表明,在考虑气候变化的条件下,研究区

域易涝点以及风险区域呈现增加趋势,其中,积水深度为0.15~0.25 m的区域面积约为11 250 m²,相比未考虑气候变化情景增加5 390 m²;积水深度为0.25~0.50 m的区域面积为5 240 m²,相比未考虑气候变化情景增加4 610 m²;积水水深超过0.50 m的区域面积为14 830 m²,相比未考虑气候变化情景增加640 m²。

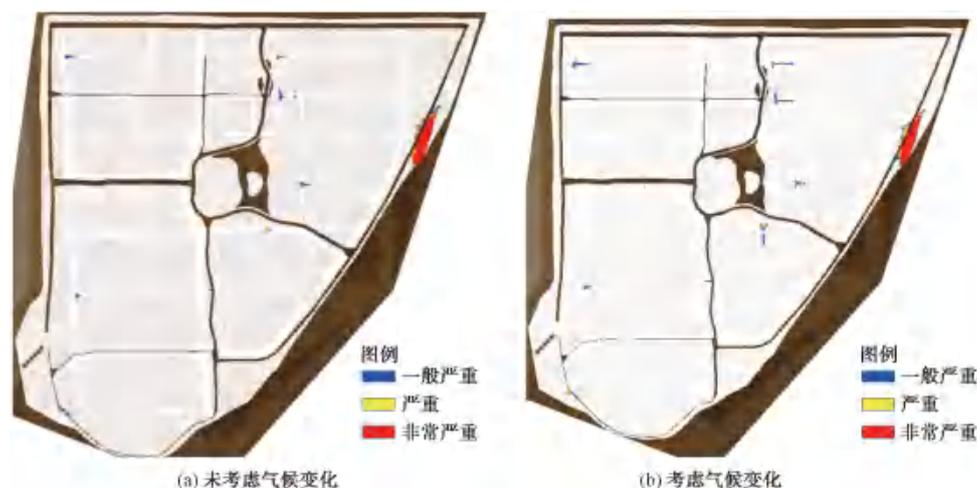


图9 内涝风险评估对比

Fig. 9 Comparison of Waterlogging Risks Assessment

5 结论

(1)在未考虑气候变化影响以及考虑气候变化影响条件下,研究区域雨水管道排水能力达标率分别为99.95%与86.03%。设计人员进行新建片区管网系统设计时,应考虑气候变化对降雨量的影响,保证管网系统在服务年限内满足要求。

(2)在考虑气候变化影响下,研究区域降雨总量呈现上升趋势。根据趋势分析结果,2050年降雨总量相较于现状条件,上升了6.2%。

(3)对未考虑气候变化影响以及考虑气候变化影响条件下的城区内涝风险进行评估,考虑气候变化影响条件下,设计降雨量变大,城市排水系统韧性增强,城市内涝风险区域增多,部分区域风险等级提升。后续需重点关注风险等级较高区域的排水设施规划设计,宜通过设置透水铺装、下沉式绿地、绿色屋顶、生物滞留设施、渗透塘、湿塘等海绵城市工程设施,提升区域应对内涝风险的能力,增强片区的安全韧性。

参考文献

[1] 方定懿,廖子元,艾静,等. 雨水管网设计中推理公式法的

适应性研究[J]. 给水排水, 2018, 54(5): 104-108.

FANG D Y, LIAO Z Y, AI J, et al. Research on the adaptability of reasoning formula method in the design of storm drainage networks [J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 54(5): 104-108.

[2] 周小伟. 基于Infoworks-icm的城市管网规划改造研究[J]. 城市道桥与防洪, 2021(5): 303-305.

ZHOU X W. Study on planning reconstruction of urban pipeline network based on Infoworks-icm [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2021(5): 303-305.

[3] 孔晓光. 基于InfoWorks ICM模型的娄底水洋新区海绵城市规划评估研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.

KONG X G. Design and evaluation of sponge city reconstruction scheme for old building district in mountainous city based on InfoWorks ICM model [D]. Changsha: Hunan University, 2018.

[4] 王丽晶,潘兴瑶,王俊文,等. 基于InfoWorks ICM模型的北京市东城区海绵城市改造效果分析与研究[J]. 中国防汛抗旱, 2021, 31(9): 43-48.

WANG L J, PAN X Y, WANG J W, et al. Analysis and research on the effects of the sponge city construction in Dongcheng District of Beijing based on InfoWorks ICM model [J]. China Flood & Drought Management, 2021, 31(9): 43-48.

[5] 何黎. 基于InfoWorks ICM-2D耦合模型的上海某片区排水

- 系统排水能力分析[J]. 中国市政工程, 2021(4): 36-40.
- HE L. Analysis of drainage capacity of a drainage system in Shanghai based on InfoWorks ICM - 2D coupling model [J]. China Municipal Engineering, 2021(4): 36-40.
- [6] 周天泽, 梁骞, 王艺颖. 基于 InfoWorks ICM 模型的内涝风险评估及综合整治方案构建[J]. 中国防汛抗旱, 2021, 31(5):12-19.
- ZHOU T Z, LIANG Q, WANG Y Y, Waterlogging risk assessment and comprehensive renovation scheme construction based on InfoWorks ICM model [J]. China Flood & Drought Management, 2021, 31(5): 12-19.
- [7] 姜大膀, 富元海. 2 °C 全球变暖背景下中国未来气候变化预估[J]. 大气科学, 2012, 36(2):234-246.
- JIANG D B, FU Y H. Climate change over China with a 2 °C global warming [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2012, 36(2): 234-246.
- [8] HOSSEINZADEHTALAEI P, ISHADI N K, TABARI H, et al. Climate change impact assessment on pluvial flooding using a distribution-based bias correction of regional climate model simulations [J]. Journal of Hydrology, 2021, 598: 126239. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126239.
- [9] CALDEIRA K, KASTING J F. Insensitivity of global warming potentials to carbon dioxide emission scenarios [J]. Nature, 1993, 366(6452): 251-253.
- [10] 胡义明, 罗序义, 梁忠民, 等. 基于藤 Copula 多维联合分布的 CMIP5 多模式降雨综合方法研究[J]. 中国农村水利水电, 2021, 462(4): 10-15.
- HU Y M, LUO X Y, LIANG Z M, et al. Research on CMIP5 multi-model precipitation synthesis method based on vine copula multivariate joint probability distribution [J]. China Rural Water and Hydropower, 2021, 462(4): 10-15.
- [11] 吴滨, 刘卫林, 郭慧芳, 等. 基于 CMIP5 模式的不同集合方法对鄱阳湖流域降水及气温模拟能力的比较[J]. 中国农村水利水电, 2023(1): 119-127.
- WU B, LIU W L, GUO H F, et al. Comparison of simulation capabilities of different ensemble methods based on CMIP5 models for precipitation and temperature in Poyang Lake Basin [J]. China Rural Water and Hydropower, 2023(1): 119-127.
- [12] 刘锋, 薛联青, 魏光辉. 基于 CMIP5 的塔里木河流域未来降水模拟及响应分析[J]. 水电能源科学, 2022, 40(3): 5-8, 148.
- LIU F, XUE L Q, WEI G H. Simulation ability and response to future precipitation in tarim river basin based on CMIP5 [J]. Water Resources and Power, 2022, 40(3): 5-8, 148.
- [13] 张君枝, 袁冯, 王冀, 等. 全球升温 1.5 °C 和 2.0 °C 背景下北京市暴雨洪涝淹没风险研究 [J]. 气候变化研究进展, 2020, 16(1): 78-87.
- ZHANG J Z, YUAN F, WANG J, et al. The rainstorm and flooding disaster risk in Beijing under the global warming of 1.5 °C and 2.0 °C [J]. Climate Change Research, 2020, 16(1): 78-87.
- [14] 刘华超, 梁凤超, 徐薇, 等. 基于 Infoworks ICM 的城市排水(雨水)系统排水能力及内涝风险评估 [J]. 城市道桥与防洪, 2021(12): 71-74.
- LIU H C, LIANG F C, XU W, et al. Evaluation on drainage capacity and waterlogging risk of urban drainage (rainwater) system based on Infoworks ICM [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2021(12): 71-74.
- [15] 刘江涛, 杨伟明, 魏杰, 等. 基于市政管线规划信息的排水管网模型数据转换方法研究 [J]. 中国给水排水, 2021, 37(10): 28-33.
- LIU J T, YANG W M, WEI J, et al. Research on data conversion methods of drainage network modeling based on municipal pipeline planning information [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(10): 28-33.
- [16] 宋瑞宁, 任梦瑶, 闫攀, 等. 基于行人安全的城市内涝风险等级评估 [J]. 给水排水, 2021, 57(2): 40-45.
- SONG R T, REN M Y, YAN P, et al. Urban waterlogging risk level assessment from the perspective of pedestrian safety [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 57(2): 40-45.
- [17] 吴彦成, 丁祥, 杨利伟, 等. 基于 InfoWorks ICM 模型的陕西省咸阳市排水系统能力及内涝风险评估 [J]. 地球科学与环境学报, 2020,42(4):552-559.
- WU Y C, DING X, YANG L W, et al. Evaluation of drainage system capacity and waterlogging risk based on InfoWorks ICM model in Xianyang City, Shaanxi Province [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2020, 42(4): 552-559.
- [18] 张海行, 张伟, 杨文辉, 等. 基于水力排水模型的宁波海绵试点区内涝风险评估 [J]. 中国给水排水, 2020, 36(12): 8-13.
- ZHANG H X, ZHANG W, YANG W H, et al. Assessment of urban waterlogging risk in Ningbo Sponge City pilot area based on hydraulic drainage model [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(12): 8-13.
- [19] 王诗婧. 基于降雨情景模拟的排水系统内涝风险评估与分析 [J]. 中国给水排水, 2020, 36(11):112-116.
- WANG S J. Waterlogging risk assessment and analysis of drainage system based on rainfall scenario simulation [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(11):112-116.
- [20] 周文翀, 韩振宇. CMIP5 全球气候模式对中国黄河流域气候模拟能力的评估 [J]. 气象与环境学报, 2018, 34(6): 42-55.
- ZHOU W C, HAN Z Y. Assessing CMIP5 climate simulations and objective selection of models over the Yellow River Basin [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2018, 34(6): 42-55.