

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.03.017

基于PCSWMM的海口主城区内涝成因和措施研究

马超^{1,2}, 陈姿帆^{2,3}, 夏金金^{2,4}, 齐文超^{1,2}, 赵凯^{1,2}

(1. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300350; 2. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300350; 3. 中水北方勘测设计研究有限责任公司, 天津 300222; 4. 长江生态环保集团有限公司, 湖北 武汉 430062)

摘要: 城市内涝问题已成为制约城市发展的重要因素, 充分掌握城市内涝成因, 针对性地制定防灾策略, 是当前亟待解决的难题。以海口市主城区为例, 基于PCSWMM软件构建一维、二维耦合内涝模型, 根据多情景模拟结果, 分析内涝灾害特征及分类成因, 并针对性地提出组合减灾方案。结果表明, 基于PCSWMM的内涝模型可提供支撑成因分析和防灾决策的可靠信息。海口市主城区积水成因主要包括降雨量超标、潮位顶托、河道和管道排水能力不足以及地势低洼和地形平坦。通过管道、河道改造结合增设蓄水池和排涝泵站的组合减灾方案可以有效缓解区域内涝。

关键词: 城市内涝成因; PCSWMM; 组合措施; 海口市

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)03-0109-07

Causes and Control Measures of Waterlogging in Haikou City Based on PCSWMM

MA Chao^{1,2}, CHEN Zi-fan^{2,3}, XIA Jin-jin^{2,4}, QI Wen-chao^{1,2}, ZHAO Kai^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 3. China Water Resources Beifang Investigation, Design and Research Co. Ltd., Tianjin 300222, China; 4. Yangtze Ecology and Environment Co. Ltd., Wuhan 430062, China)

Abstract: Urban waterlogging has become an important factor restricting urban development, and the urgent problems to be solved include fully understanding the causes of urban waterlogging and formulating corresponding disaster prevention strategies. A one-dimensional and two-dimensional coupled waterlogging model was constructed based on PCSWMM software. According to the results of multi-scenario simulation, the characteristics and different causes of waterlogging disasters in the main urban area of Haikou City were analyzed, and a combined disaster control scheme were proposed. The waterlogging model based on PCSWMM was capable of providing reliable information to support cause analysis and disaster prevention decision-making. The causes of waterlogging in the main urban area of Haikou City mainly included excessive rainfall, tidal backwater, insufficient drainage capacity of river channels and pipelines, low lying and flat terrain. The regional waterlogging was effectively alleviated through the pipelines and river channels reconstruction in combination with the addition of reservoirs and

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51679159)

通信作者: 马超 E-mail: mac_tju@tju.edu.cn

drainage pumping stations.

Key words: cause of urban waterlogging; PCSWMM; combined measure; Haikou City

近年来,随着全球气候变化不断加剧及城市化的快速发展,城市极端洪涝灾害频发,影响范围逐渐扩大^[1]。城市内涝灾害的频繁发生,暴露出了我国城市建设规划中的许多问题^[2]。充分掌握城市内涝成因,针对性地制定防灾策略,应对变化条件下的城市发展需求,是当前急需关注和解决的难题。

基于高精度的数值模拟模型进行城市内涝过程模拟和成因分析,是当前的主流思路。目前应用较多的数值模拟模型主要有SWMM模型、MIKE模型、InfoWorks ICM模型等。在城市内涝成因分析方面,当前研究主要集中在宏观上的气候变化、城市化、规划建设等因素^[3-6],仅有少部分研究借助雨洪模型从排涝系统出发分析内涝成因,但这些研究多采用一维模型,未考虑管道与河道、一维排水系统与二维地表淹没系统之间的动态水量交互过程,无法真实模拟复杂的积水过程^[1]。同时,目前的研究大多关注漫溢检查井和满载管道,将其作为薄弱点加以改造,较少结合排涝与积水过程,进行多维度、深层次的内涝成因分析^[7-9]。

笔者以海口市主城区为研究对象进行内涝成因分析。基于PCSWMM软件构建海口市主城区一维、二维耦合内涝模拟模型,获得降雨和潮位组合情景下的主城区积水程度及内涝分布特征;在此基础上,揭示内涝形成机制和关键影响因素,并从整体层面提出可行的整治方案,以期对海口市主城区的内涝防治提供科学可靠的决策支持。

1 研究区域概况

海口市地处低纬度热带北缘,属于热带海洋气候,全市多年平均降雨量为1 827 mm,其中5月—10月为雨季,降雨量占全年降雨量的78.1%;9月为降雨高峰期,平均降雨量为300.7 mm,占全年的16.5%。海口市主城区位于海口市北部,濒临琼州海峡,是海南省政治、经济、科技、文化中心和最大的交通枢纽。受强降雨与风暴潮影响,海口市内涝呈突发、频发和高危害的特征。

2 海口市主城区内涝模型构建

2.1 PCSWMM简介

PCSWMM是加拿大水力计算研究所以SWMM

为核心持续开发并改进的水文水动力模型,除支持常见的降雨产汇流、管网水动力传输和水质模拟外,还支持一维和二维模型的耦合,软件操作方便,计算效率高,结果表达直接形象。

本研究采用动力波方法进行水动力计算,控制方程如下:

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

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial (Q^2/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + gAS_f + gAh_L = 0 \quad (2)$$

式中: x 为长度,m; A 为过流面积, m^2 ; Q 为过流量, m^3/s ; t 为时间,s; H 为水头,m; S_f 为摩阻坡度,m/m; h_L 为单位长度局部水头损失,m/m; g 为重力加速度, m/s^2 。

下渗计算采用霍顿模型,如下所示:

$$f_t = (f_0 - f_c)e^{-\beta t} + f_c \quad (3)$$

式中: f_t 为 t 时刻的下渗率,mm/h; f_c 为稳定下渗率,mm/h; f_0 为初始土壤下渗率,mm/h; β 为下渗衰减系数,与土壤特性有关, h^{-1} ; t 为时间,h。

2.2 模型构建和参数率定

根据管网、检查井与河道信息(来源于海口市水务局),以及下垫面利用信息和地形高程数据(遥感解析)等,构建海口市主城区一维、二维耦合内涝模拟模型。所构建模型共包含子汇水区139个、地表网格62 920个、管段13 122根、检查井13 073个、河道10条、排水口47处,其中在龙昆沟出海口等35处设置挡潮闸。挡潮闸运行方式:当闸上游水位高于闸下游潮水位时,开闸排水,反之关闸挡潮。

采用2014年威马逊台风期间海口市的降雨和潮位数据作为输入边界条件,以区域内各内涝点实测深度与模拟深度作为评判对象,对模型参数进行率定。实测与模拟结果的对比情况见图1。实测积水深度范围为20~80 cm,模拟积水深度范围为22~75 cm,平均值分别为47.3、46.8 cm,仅相差0.5 cm。线性回归决定系数(R^2)、纳什效率系数(NSE)以及相对误差(R_e)分别为0.80、0.796、0.9%,一般认为当 $R^2 > 0.6$ 、 $NSE > 0.5$ 、 $|R_e| < 20\%$ 时,模型的拟合

精度即满足要求^[10]。综上可知,构建的内涝模型能较好地模拟海口市主城区的积水与排涝过程。

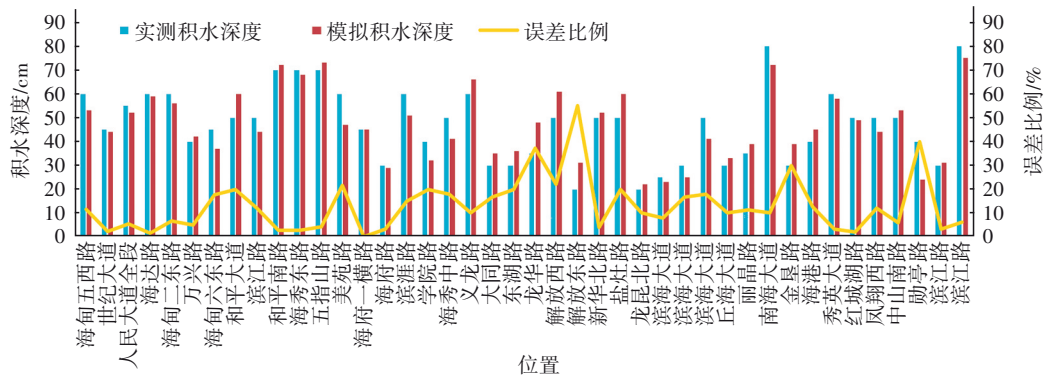


图1 威马逊台风期间海口市实测与模拟地表积水深度对比

Fig.1 Comparison between measured and simulated surface ponding depth in Haikou City during typhoon Rammasun

3 模拟研究及结果分析

利用所构建模型得出不同设计降雨耦合频率潮位情景下海口市主城区的内涝情况如下:当重现期分别为2、5、10、20、50年时,积水面积分别为11.13、14.50、16.67、18.29、20.94 km²,积水体积分别为227.90×10⁴、348.68×10⁴、419.68×10⁴、491.22×10⁴、620.21×10⁴ m³,平均积水深度分别为0.20、0.24、0.25、0.27、0.30 m。50年一遇情景下的最大积水深度及其分布如图2所示。

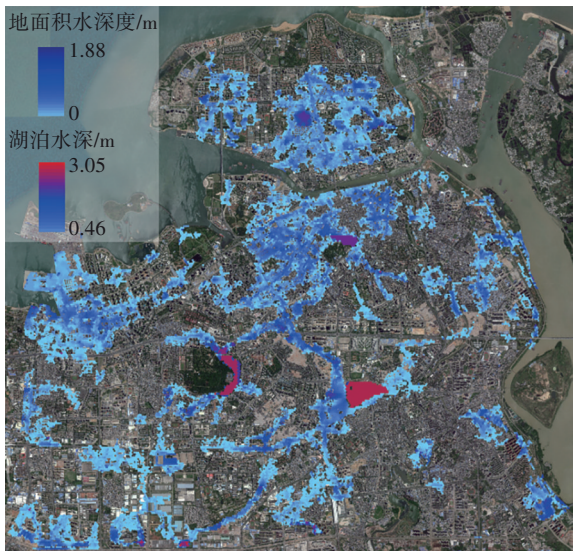


图2 50年一遇情景下海口市主城区的内涝情况

Fig.2 Waterlogging in the main urban area of Haikou City under 50-year return period

模拟结果表明,在2年一遇降雨情景下,研究区域的积水面积占总面积的12.7%;在50年一遇情景下,积水面积、积水体积、平均积水深度较2年一遇情景下分别增加了88%、172%、50%,积水体积的增

加幅度明显大于积水面积,表明积水产生后难以排出,内涝风险随重现期的增加而显著增加。海甸岛及龙昆沟排水子系统内滨海大道、道客沟-龙昆沟、大同沟-大同分洪沟沿线区域为严重内涝区。海甸岛与龙昆沟排水子系统是海口市主城区内涝灾害高风险区域。

4 内涝成因分析

以内涝程度最严重的龙昆沟排水子系统为例,开展内涝成因分析。在50年一遇情景下,龙昆沟排水子系统的内涝分布如图3所示。

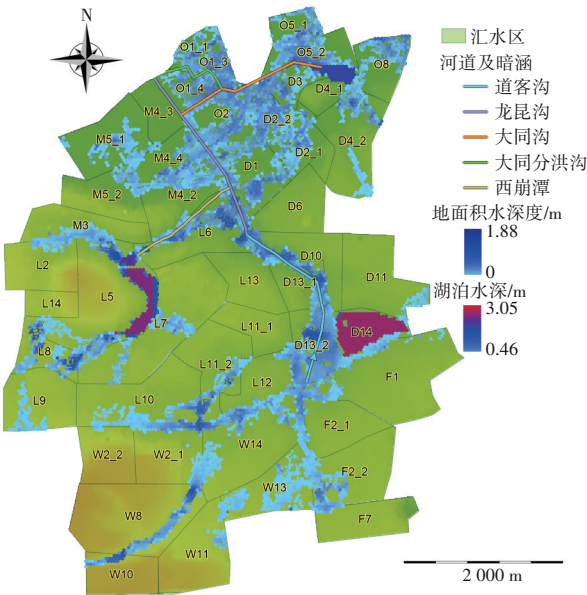


图3 50年一遇重现期下内涝积水分布

Fig.3 Distribution map of waterlogging under 50-year return period

4.1 区域积水与区域参数关联性

采取 Pearson 相关性分析法,以子汇水区为单

元,研究龙昆沟区域积水特征与区域参数之间的关联性。区域参数共 5 个,其中积水面积占比是指最大积水时刻子汇水区内积水网格面积与子汇水区面积之比;积水体积是指最大积水时刻子汇水区内的积水量;平均积水深度是指最大积水时刻子汇水区内积水量与子汇水区面积之比;综合积水程度是通过熵权法对积水面积占比、积水体积及积水时长求取权重后的归一化加权值,其值越小,对应的积水程度越严重。关联性结果如表 1 所示。可知,坡度与积水面积占比、综合积水程度分别呈显著相关、显著弱相关关系;平均高程与积水面积占比、平均积水深度、综合积水程度分别呈显著强相关、显著弱相关、显著相关关系;积水情况与管道长度的相关关系较弱。因此,区域积水程度受平均高程与坡度的影响较大。

表 1 龙昆沟区域特征参数与积水情况的相关性指数

Tab.1 Correlation index between regional characteristic parameters and waterlogging characteristics of Longkun Ditch

项 目		坡度	平均高程	管道长度
积水面积占比	相关系数	-0.43	-0.66	-0.04
	显著系数	0	0	0.80
积水体积	相关系数	-0.02	-0.16	-0.01
	显著系数	0.91	0.29	0.96
平均积水深度	相关系数	-0.23	-0.34	-0.13
	显著系数	0.12	0.02	0.38
积水时长	相关系数	-0.13	-0.26	0
	显著系数	0.40	0.08	0.98
综合积水程度	相关系数	0.32	0.51	0.05
	显著系数	0.03	0	0.74

注：①相关系数 r 的绝对值在 0.8~1.0 之间是极强相关,在 0.6~0.8 之间是强相关,在 0.4~0.6 之间是中等程度相关,在 0.2~0.4 之间是弱相关,在 0~0.2 之间是极弱相关或不相关。②显著系数 P 表征分析结果是否有统计学意义,当 $P<0.05$ 时即认为显著、有统计学意义。

4.2 典型积水区域内涝成因分析

选取典型积水区域,按照雨水传输路径分析积水区域的内涝成因。

4.2.1 降雨量超标和潮位顶托

相同潮位和不同降雨重现期组合情景下龙昆沟下游区域的内涝情况如表 2 所示。50 年一遇重现期时下游积水面积与积水量较 2 年一遇分别增加了

336%、654%。因此,降雨量超标是导致严重内涝的重要原因。

表 2 不同降雨强度对应的下游内涝区域积水情况

Tab.2 Ponding results of downstream waterlogging area under different rainfall intensities

下游积水区域	重现期/a		积水面积/ km^2	积水量/ 10^4 m^3	平均积水深度/m
	降雨	潮位			
现状工况	50	50	8.16	365.04	0.45
对照工况	2	50	1.87	48.40	0.26

提取潮位顶托下龙昆沟、大同分洪沟出口排涝过程与大同沟水位,如图 4 所示。可知,在 08:45—11:30 期间,受潮位顶托作用,河道排涝流量减小,出现间断排涝或者无法排涝情况,导致水位快速上升,大同沟水位超过堤防高程(2.80 m),造成漫溢,急剧降低了河道对后续来水的调蓄能力。

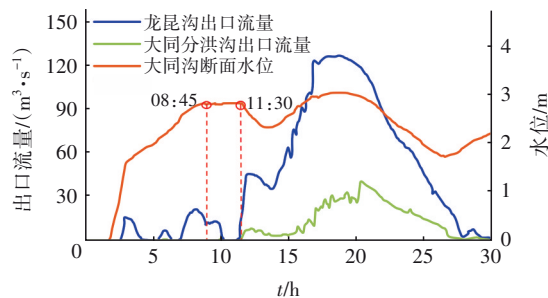


图 4 潮位对排涝过程的影响

Fig.4 Impact of tidal level on drainage process

为研究潮峰与雨峰相对位置对排涝过程的影响,对比潮峰与雨峰时刻重合以及超前或滞后 2 h 和 4 h 共 5 种情景下龙昆沟排水子系统的总积水量,如图 5 所示。可知,潮峰位置对排涝过程存在显著影响,潮峰滞后雨峰时,将导致汇集涝水高峰与高潮位重叠,涝水无法自流排出,加剧内涝。最大影响对应的潮峰滞后时间与区域降雨产汇流过程和排水系统的排水特征均相关。

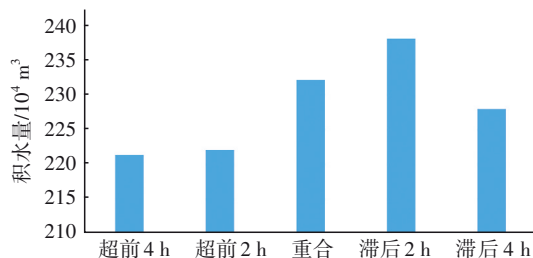


图 5 不同潮位条件下龙昆沟排水子系统的积水量

Fig.5 Ponding volumes of Longkun Ditch drainage subsystem under different tidal levels

4.2.2 管道排水能力不足

滨河路某管道流量过程及管道周边地表积水过程、管道与大同沟相交断面水位过程见图6(管道流量为负代表河道涝水倒灌进入管道)。可知,高潮位与强降雨时段,河道水位较高,管道流量较小甚至变为负值,而地表积水深度与河道水位变化趋势一致。因此,当管道排水受河道顶托与倒灌影响时,区域内涝程度显著增加。

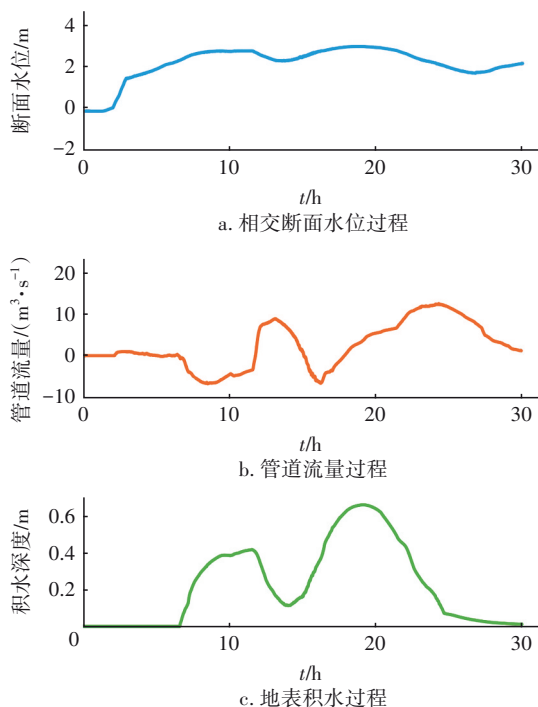


图6 河道、管道与地表积水的响应关系

Fig.6 Response relationship among river channel, pipeline and surface inundation

龙昆南路沿线涝水漫溢严重,沿程最大流量如图7所示。此段下游排水管道尺寸显著减小且存在逆坡,使得涝水无法有效排出,中间段涝水汇入后反方向流向上游,产生沿程漫溢。

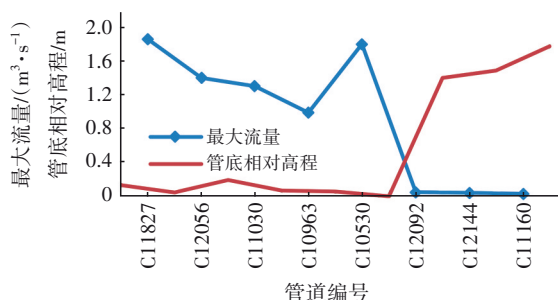


图7 龙昆南路管线最大流量

Fig.7 Maximum flow of Longkun South Road pipeline

4.2.3 河道排水能力不足

大同沟周边区域为内涝高风险区,其上游和下游断面流量过程如图8所示。可知,在降雨高峰时段,受河道排水能力制约,大同沟入口和出口断面流量峰值相差 $26.9 \text{ m}^3/\text{s}$,导致涝水沿程漫溢至地表。道客沟下游段也存在相同问题。

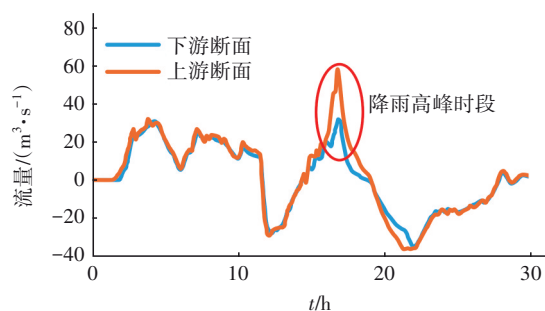


图8 大同沟排涝过程

Fig.8 Drainage process of Datong Ditch

4.2.4 地形地势

地形地势决定涝水扩散路径,对内涝演变过程和分布格局具有重要影响。以下游区域子汇水区O2为例,其地形与内涝过程如图9所示。可知,O2子汇水区地势中间高、四周低。西南方向子汇水区地表积水到达图中A点后顺着高程低的龙昆北路与龙华路流入O2子汇水区,汇水量达 $62.06 \times 10^4 \text{ m}^3$ (未扣除O2子汇水区进入其他排水分区的涝水量),远超管道漫溢水量。因此,地形平坦、地势过低将加剧区域涝水汇入,加重内涝程度。

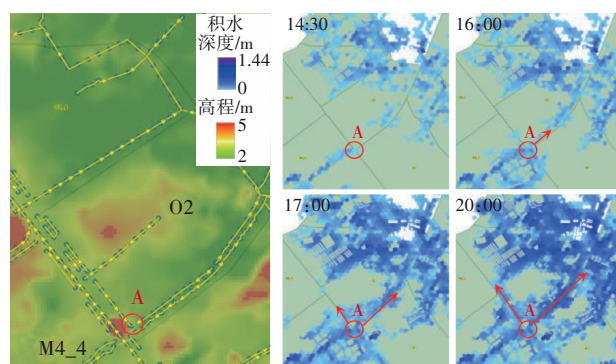


图9 O2子汇水区地形及内涝过程

Fig.9 Topography and ponding process of O2 sub-catchment area

除O2子汇水区外,红城湖西侧子汇水区D13_2地势明显低于南部与西部相邻区域,南部与西部涝水向地势较低的北部和东部区域流动,导致大面积、长时间积水(见图10),总积水量达 $16.6 \times 10^4 \text{ m}^3$,

中部地势最低点积水深度达到1.7 m。因此,区域如存在地势较低情况,将极易形成严重内涝。

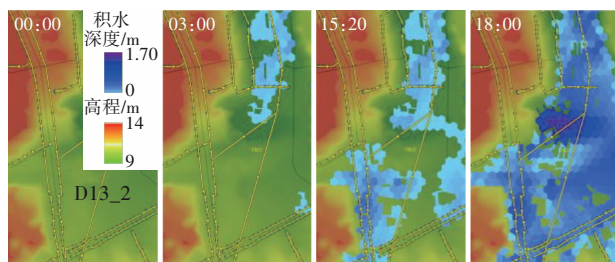


图10 上游区域地表积水过程

Fig.10 Surface ponding process in upstream area

5 区域内涝治理方案

依据区域内涝成因,提出龙昆沟排水子系统整治方案,包括管道和河道改造及增设蓄水池和雨水泵站,具体见图11。治理前后积水情况对比见图12。



图11 内涝治理方案布置

Fig.11 Layout of regional waterlogging control scheme

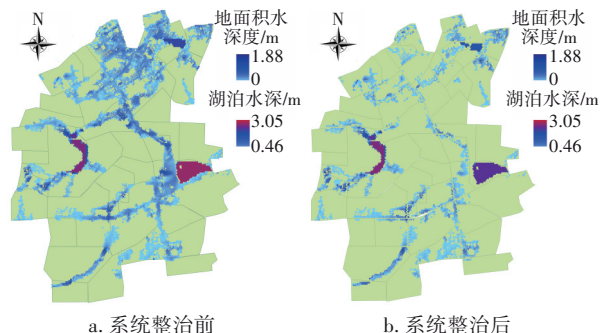


图12 系统整治前后的积水情况

Fig.12 Ponding before and after system improvement

① 管网系统改造

具体措施:在滨河路、义龙东路、大同路等二级道路,改造管道76根、新建管道36根、设置管道拍门15个;在滨河路、华海路周边各增设1座雨水泵站;在红城湖管道沿线修建3处排水出口。

治理效果:下游管道改造所在子汇水区的积水面积与积水体积削减率分别为19.6%、33.0%;上游红城湖管道沿线排水量较改造前增加 $111 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

② 河道改造

具体措施:参考海口市蓝线规划,将大同分洪沟暗涵由8 m拓宽为20 m;大同沟部分断面堤防高程提高至整体堤防高程即2.80 m;道客沟下游段暗涵拓宽至10 m。

治理效果:大同分洪沟最大排涝流量增加了 $33 \text{ m}^3/\text{s}$;道客沟排入龙昆沟的水量增加了 20 m^3 ,上游D13_1子汇水区积水体积减少了30%。

③ 增设蓄水池

具体措施:在滨海新村附近、南大立交桥西南侧、红城湖与龙昆南路之间分别布设蓄水池。

治理效果:蓄水池周边15个子汇水区的积水面积和积水体积分别减少了38.2%、62.2%;红城湖周边子汇水区的汇入水量减少了24.2%。

④ 增设排涝泵站

具体措施:在东西湖周边、上游蓄水池3与道客沟之间分别布设排涝泵站,综合考虑积水程度及成本,上、下游泵站规模分别设置为 $10 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $55 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

治理效果:大同沟沿线及东西湖周边7个子汇水区的积水面积和积水体积分别减少了47.6%、59.3%,蓄水池1和蓄水池3的规模分别降低了85.0%、29.1%。

模拟分析结果验证了所提方案的有效性。方案如实施,龙昆沟排水子系统下游面状积水程度将显著降低,红城湖周边、道客沟-龙昆沟、大同沟-大同分洪沟沿线等内涝严重区域的积水深度及积水面积将明显减少。据统计,积水面积和积水体积将分别减少30%和37%,内涝缓解效果显著。

6 结论

① PCSWMM软件满足开展城市内涝精细化模拟分析研究的需求,在完善基础资料的条件下,基于PCSWMM软件的内涝模拟模型可提供支撑成因分析和防灾决策的可靠信息。

② 受多方面因素影响,海口市主城区易发生

内涝,且内涝程度随降雨和潮位的提高而显著增加。以下游区域为例,50年一遇情景的积水面积与积水量较2年一遇分别增加了336%、654%。应结合城市定位和发展,确定合理的内涝防治标准。

③ 海口市主城区的内涝成因包括:降雨量超标和潮位顶托、河道和管道排水能力不足、地势低洼及地形平坦等。内涝高风险区域分布在海甸岛及龙昆沟排水子系统内的滨海大道、道客沟-龙昆沟、大同沟-大同分洪沟沿线。区域间因河渠和道路连接而紧密联系,应从整体考虑制定防灾策略和方案才能达到预期效果。

④ 龙昆沟排水子系统分析结果表明,管道和河道改造结合增设排涝泵站和蓄水池的组合减灾方案是沿海城市防灾的优选,但应合理确定各类措施的布设位置和规模,同时还需考虑区域间涉水联系来制定精细化调控方案,以达到最佳防灾效果。

参考文献:

- [1] KASPERSEN P S, RAVN N H, ARNBJERG-NIELSEN K, *et al.* Comparison of the impacts of urban development and climate change on exposing European cities to pluvial flooding [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21(8): 4131-4147.
- [2] 周宏,刘俊,高成,等.我国城市内涝防治现状及问题分析[J].*灾害学*,2018,33(3):147-151.
ZHOU Hong, LIU Jun, GAO Cheng, *et al.* Analysis of current situation and problems of urban waterlogging control in China [J]. *Journal of Catastrophology*, 2018, 33(3): 147-151 (in Chinese).
- [3] 宋晓猛,张建云,贺瑞敏,等.北京城市洪涝问题与成因分析[J].*水科学进展*,2019,30(2):153-165.
SONG Xiaomeng, ZHANG Jianyun, HE Ruimin, *et al.* Urban flood and waterlogging and causes analysis in Beijing [J]. *Advances in Water Science*, 2019, 30(2): 153-165 (in Chinese).
- [4] DE KRAKER A M J. Flooding in river mouths: human caused or natural events? Five centuries of flooding events in the SW Netherlands, 1500-2000 [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2015, 19(6): 2673-2684.
- [5] 高峰,刘鹏,黄超然.基于系统思考的武汉市内涝成因分析及对策[J].*灾害学*,2017,32(3):101-106.
GAO Feng, LIU Peng, HUANG Chaoran. Analysis and responses of the waterlogging in Wuhan City based on system thinking [J]. *Journal of Catastrophology*, 2017, 32(3): 101-106 (in Chinese).
- [6] LIU S, LIN M N, LI C L. Analysis of the effects of the river network structure and urbanization on waterlogging in high-density urban areas—a case study of the Pudong New Area in Shanghai [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(18): 3306.
- [7] 刘龙志,马宏伟,杜焱,等.基于Mike模型的海绵城市内涝整治方案效果分析[J].*中国给水排水*,2019,35(12):13-18.
LIU Longzhi, MA Hongwei, DU Yao, *et al.* Analysis of waterlogging renovation effect in sponge city based on Mike model [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(12): 13-18 (in Chinese).
- [8] 寇殿良,彭焱,刘启岚,等.基于SWMM的南宁市仙葫大道内涝点分析及改造[J].*中国给水排水*,2018,34(5):136-138.
KOU Dianliang, PENG Tao, LIU Qilan, *et al.* Cause analysis and modification of waterlogging point in Xianhu Road of Nanning City based on SWMM [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(5): 136-138 (in Chinese).
- [9] HOU J W, DU Y X. Spatial simulation of rainstorm waterlogging based on a water accumulation diffusion algorithm [J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2020, 11(1): 71-87.
- [10] 张余庆,陈昌春,杨绪红,等.信江流域土地利用变化的径流响应研究[J].*水电能源科学*,2013,31(8):27-30,58.
ZHANG Yuqing, CHEN Changchun, YANG Xuhong, *et al.* Studies of runoff response to land use change in Xinjiang basin [J]. *Water Resources and Power*, 2013, 31(8): 27-30, 58 (in Chinese).

作者简介:马超(1981-),男,湖南株洲人,博士,教授,博士生导师,研究方向为城市洪涝防灾。

E-mail:mac_tju@tju.edu.cn

收稿日期:2020-08-05

修回日期:2020-10-12

(编辑:刘贵春)