

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.12.002

基于水力排水模型的宁波海绵试点区内涝风险评估

张海行, 张伟, 杨文辉, 国小伟

(中国市政工程华北设计研究总院有限公司 北京分公司, 北京 100044)

摘要: 随着城市化进程的不断加快,城市内涝灾害频发,利用水力排水系统模型对城市内涝风险进行评估已被广泛应用。针对平原河网城市内涝频发的现象,以宁波海绵城市试点区为例,基于 InfoWorks ICM 模型构建排水系统模型,模拟短历时不同重现期设计降雨(5、10、20、50 a)和长历时不同重现期设计降雨(10、50 a)下试点区内涝风险情况。结果表明,随着降雨强度的增加,风险区面积呈递增趋势,短历时设计降雨模拟显示中风险区的平均增长率约为 21%,低、高风险区面积平均增长率约 10%;50 年一遇长历时设计降雨模拟显示试点区内涝风险等级分布以中、高风险为主,总占比约为 91%,高风险区占比约 51%。

关键词: 城市内涝; 风险评估; InfoWorks ICM

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)12-0008-06

Assessment of Urban Waterlogging Risk in Ningbo Sponge City Pilot Area Based on Hydraulic Drainage Model

ZHANG Hai-xing, ZHANG Wei, YANG Wen-hui, GUO Xiao-wei

(Beijing Branch, North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd.,
Beijing 100044, China)

Abstract: With the acceleration of urbanization, the urban waterlogging disasters occur frequently. The hydraulic drainage model has been widely used to evaluate the risk of urban waterlogging. In view of the frequent occurrence of waterlogging in the plain water network cities, a drainage system model based on the InfoWorks ICM was established in the pilot area of the Ningbo sponge city to simulate the waterlogging risk under short duration design rainfall (5-year, 10-year, 20-year, 50-year) and long duration design rainfall (10-year, 50-year). The results showed that the risk area increased with the increase of rainfall intensity. The simulation results of short-duration design rainfall showed that the average growth rate of middle-risk areas was about 21%, while those of low and high risk areas were about 10%. According to the simulation results of the long duration design 50-year repetition period of rainfall, the distribution of waterlogging risk in the pilot area was mainly medium and high risk, accounting for about 91% in total, and 51% in the high risk area.

Key words: urban waterlogging; risk assessment; InfoWorks ICM

近年来,随着我国社会经济的高速发展,城市化进程不断加快,城市内涝频发。据调查,每年我国不同规模的城市内涝高达 200 多起,2008 年—2010 年全国 351 座城市发生不同程度的内涝^[1],城市内涝

给人们的生命及财产安全带来了极大威胁。在南方平原河网密集的城市,地势低洼、水动力条件差,内部排水管网相对短小、管网能力有限,且雨水排口多处于淹没或半淹没状态,在极端降雨条件下,内部雨

水无法排出,造成积水,形成内涝。在城市化的快速发展与气候变化的双重影响下^[2],我国南方平原河网城市武汉、杭州、深圳、广州、上海、宁波等相继发生了城市内涝事件,给当地的社会经济发展带来了很大损失。

目前对内涝风险评估的方法主要有基于水力排水系统模型的评估、内涝风险指标体系法综合评估以及历史灾情数理统计法评估^[3]。目前,利用水力排水模型评估城市内涝风险已进入大力推广的阶段,通过水力排水系统模型以获得地表径流的流态、河道水位变化、城市内部积水范围、积水深度和积水时间等信息^[4],并依据内涝风险等级划分标准评估出城市内涝灾害的危害性。

以宁波市海绵城市试点区为研究对象,构建区域排水系统模型,并以此对研究区域进行内涝风险评估,其内涝风险评估结果将为后期宁波海绵城市试点区积水点治理提供数据支撑,也可为其他具有同类型特征的城市内涝风险评估提供借鉴。

1 研究区域及数据来源

1.1 研究区域概况

宁波市地处宁绍平原,位于我国海岸线中段、长江三角洲南翼,是典型的南方平原水网城市。宁波海绵城市建设试点区地处宁波的三江平原(姚江、奉化江、甬江流域),位于江北区姚江-慈城片区,总面积30.95 km²。试点区内部河网密布,水系丰富,河道坡降较小,水体流动性差,具有典型的平原河网特征。试点区所在区域降雨量大,常出现风、暴、潮、洪“三碰头”“四碰头”现象。2013年—2019年宁波市遭遇暴雨、台风等极端天气,试点区内出现不同程度的积水,特别是老旧小区、道路等,如2013年“菲特”台风期间,老城区小区、道路和下穿立交积水等共262处,其中海曙96处、江东125处、江北41处。因此,以宁波海绵城市试点区为例,研究平原河网城市在长历时及短历时设计降雨条件下的内涝特征具有一定的典型意义。

1.2 数据来源及梳理

1.2.1 设计降雨数据

① 短历时设计降雨

根据《宁波市暴雨强度公式编制技术总报告》,并考虑到对城市内涝危害最大的是短历时强降雨,采用短历时暴雨强度公式生成设计降雨情景。宁波三江片新编暴雨强度公式如下:

$$q = \frac{6\,576.744 \times (1 + 0.685 \lg P)}{(t + 25.309)^{0.921}} \quad (1)$$

式中 P ——设计重现期, a

q ——设计暴雨强度, L/(s · hm²)

t ——降雨历时, min

设计暴雨的重现期分别为5、10、20、50 a,峰值系数为0.4,降雨历时120 min,设计降雨量分别为71、81、91、104 mm。

② 长历时设计降雨

根据浙江省《城镇防涝规划标准》(DB 33/1109—2015)确定城市内涝标准宜采用长历时设计降雨进行校核,长历时设计降雨雨型及雨量采用宁波市水利局提供的24 h、步长10 min的长历时设计雨型、雨量。设计降雨重现期采用10、50 a,其对应设计降雨量分别为188、282 mm。

1.2.2 研究区域基础数据

研究区域模型基础数据主要包括河道水系资料、水工建筑物资料、排水管网资料、下垫面资料、地形资料等。

① 河道水系

宁波市海绵城市试点区属于姚江流域的江北—镇海水系,南侧为姚江,北侧为慈江、江北大河,形成两块独立封闭区域(见图1)。

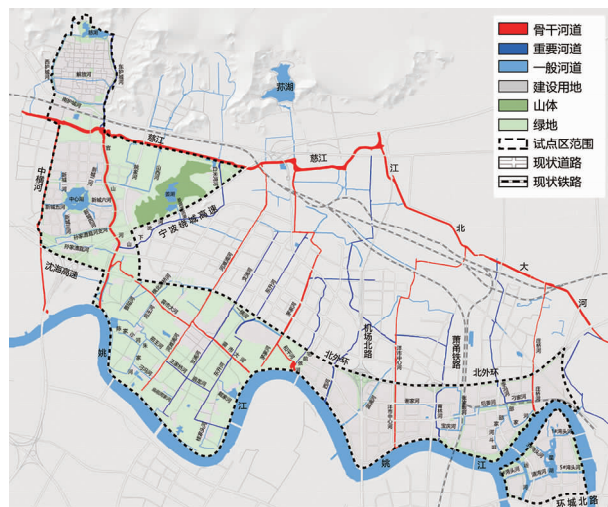


图1 研究区域水系布局

Fig.1 Diagram of water system layout in the study area

试点区内河网分布密集,属典型的南方平原水系,平原河道相互连通成网。试点区内河道共56条,总长度约62.43 km,河道密度为2.02 km/km²。结合水利局网站提供的统计信息,江北内河常水位

为1.10~1.13 m。根据《甬江流域防洪治涝规划》计算成果,江北区20年一遇内河水位约2.6 m,50年一遇内河水位最大约2.7 m,姚江大闸前20年一遇水位为2.6 m,50年一遇水位为2.78 m。故在流域暴雨工况下,江北内河外排能力极为有限。

② 水工建筑物数据

闸门主要分布在试点区内部平原河网与外围姚江和慈江相交汇处。慈江与姚江之间与示范区相关闸门共有36座,其中试点区内闸门共有27座;闸门通常处于关闭状态。慈江与姚江之间与示范区相关泵站共有9座,试点区内泵站共有7座。示范区内河易受外江顶托影响,内河部分主干河道沿外江(姚江)设置闸门和强排泵站,闸门共26座。汛期河道作为涝水排放通道,起到一定的调蓄作用,主要通过姚江的水位差管控内河水位。调度规则:当内河水位>1.3 m且内河水位大于外江水位时,闸门开启;当外江水位高于内河水位时,闸门关闭,通过强排泵站排入姚江。

③ 排水管网数据

排水管网普查资料通过宁波市勘测规划研究院提供的2017年原始物探资料获得。试点区内雨水排水管线总长131.11 km,其中,合流管23.01 km,雨水管网长108.10 km,占比为82%,入河排口主干管57%以上的管径<DN500,排口的主干管80%以上长度<800 m;试点区排口共有431个,根据排水口与河道水位关系确定,排水口46%处于自由出流,54%处于部分淹没出流或完全淹没出流。排口的出流方式直接决定着管道雨水能否顺利排出,同时也制约着试点区内部积水快速排出。

④ 下垫面资料

下垫面数据通过2017年宁波市住建局的试点区航拍图遥感解析获得(见图2)。

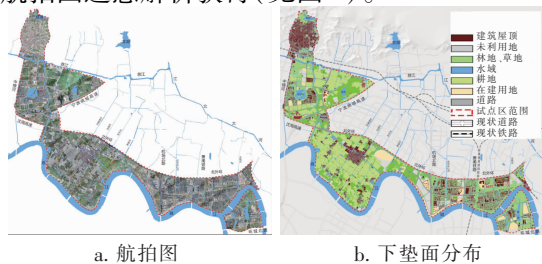


图2 研究区域现状航拍图及下垫面分布

Fig.2 Current aerial image and underlying surface distribution in the study area

下垫面主要分为建筑屋顶、道路广场、林地/草地、农田、未利用地等,其中建筑屋顶、道路以及在建地块面积为11.97 km²,占总面积的38.7%;耕地和林地、草地占总面积约49.4%;宁波当地土质为淤泥质黏土和淤泥质粉质黏土,地下水位高,土壤不易下渗,透水面径流系数相较于一般城市偏高。

⑤ 地形资料

研究区域地形资料是由宁波市勘测局提供的1:2 000的高程点数据,通过GIS工具分析高程点数据,获取研究区域的数字高程模型(DEM)。

2 研究方法

结合宁波海绵城市试点区特点,基于水力排水系统模型建立综合除涝、排水、防洪为一体的宁波海绵城市试点区排水系统模型,实现地表产汇流、管网汇流、河网汇流以及地面积水流动的模拟。本文采用的水力排水系统模型为InfoWorks ICM模型^[5]。

2.1 模型构建

2.1.1 模型建立

试点区排水系统模型包括一维水力排水模型和二维地表漫流模型。本模型是基于研究区域基础数据构建的宁波试点区排水系统模型。最终模型管网总长322.4 km(含小区、市政管网数据),其中雨水管287.7 km、合流管34.7 km;模型河道总长度101.6 km,其中试点区内62.4 km,试点区外39.2 km;模型共录入9座泵站、35座闸门数据,其中试点区内27座,主要导入闸门泵站的底高、宽度、设计流量等信息;模型导入在GIS中利用邻域内插法生成2 m×2 m精度的栅格数据,其中将建筑物范围导入模型,保证模拟时积水无法进入建筑区域,同时道路高程降低10~20 mm^[6],使行洪路径模拟更加精确。

在完成研究区域的二维地表漫流模型构建后,将已构建一维水力模型的网络节点洪水类型“Stored”改为“2D”。若有雨水从排水管网的节点溢出,则通过堰流公式,将节点溢出的水流与二维地面网格模型进行衔接,从而实现一维、二维耦合计算^[7]。

2.1.2 模型边界条件设定

宁波市的排水系统特点是水系稠密,管网路径相对较短,排水多为淹没或半淹没状态,基本为重力流自排入试点区平原内部河网中,内部河道的水位直接决定了管网的边界条件,因此针对不同设计降雨工况设定常水位、不同重现期水位,实现内河与管

网的边界条件的界定。试点区内河与外江之间通过闸门和泵站连通,根据内河与外江水位关系及调度规则,确定闸门和泵站的开启与关闭状态。因此本模型以闸门、泵站运行状态实现内、外水位的调整,并以此作为内河排江的边界条件。

2.2 模型校核

2.2.1 模型参数设定

透水面产流过程相对复杂,模型采用霍顿产流模型来模拟表达透水面的产流过程。根据宁波土壤类型选定初始对应霍顿参数,以降雨重现期3年一遇降雨径流系数0.25、5年一遇径流系数0.3、20年一遇径流系数0.45为目标进行参数的迭代校正,最终采用了初始渗透90 mm/h、稳定渗透2.5 mm/h、渗透衰减2.25 mm/h作为模型模拟参数。不透水面产流过程相对稳定,故采用固定径流系数法预测雨水径流量,根据《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》与《室外排水设计规范》(GB 50014—2006,2016年版),道路径流系数取0.9,屋面径流系数取0.9,未用地径流系数取0.45。管道糙率根据管道材质按照实际标准取值(0.013~0.014);河道参数,人工渠化河道糙率设置为0.013~0.020,生态河道与自然河道的糙率设置为0.03。

2.2.2 模型校核判别标准

模型校核以实测管网监测数据、积水数据为基础,对模型的水文水力参数进行校核,采用纳什(Nash-Sutcliffe Efficiency, NSE)效率系数作为似然度衡量标准来评估模拟值与实测值的吻合程度。 E 取值为负无穷至1, E 接近1,表示模式质量好,模型可信度高; N 接近0,表示模拟结果接近观测值的平均值水平,即总体结果可信,但过程模拟误差大; N 远远小于0,则模型是不可信的。

2.2.3 模型校核结果及验证

本模型校核采用“地块出水+河道排口+河道水位+积水点”组合对排水模型进行校核。选取地块孙家丽园和对应排水分区作为模型基础校核地块和排水分区。基于2017年11月29日、2018年9月20日两场实测降雨对孙家丽园地块进行模拟,将模拟结果与孙家丽园南门、北门监测点位的实测流量进行对比分析(见图3)。分析结果显示地块两处的校核结果纳什系数分别为0.92和0.82,其模拟结果与实测值在变化趋势上有很好的 consistency。

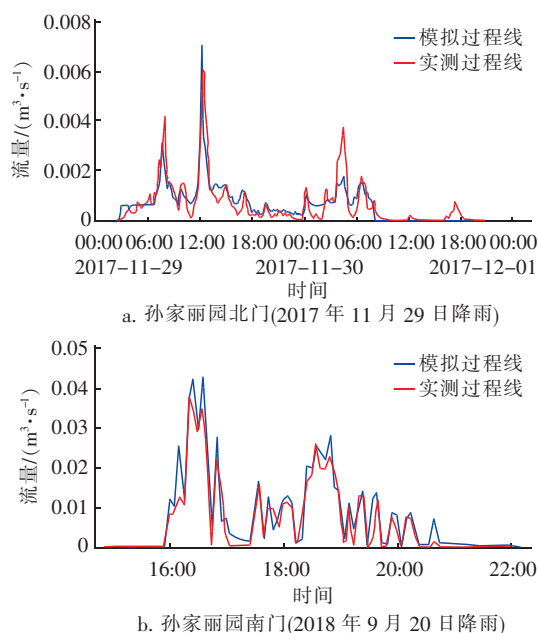


图3 孙家丽园北门、南门监测与模拟流量数据对比

Fig. 3 Comparison of the monitoring and simulation flow data at the Sunjialiyuan's north gate and south gate

在地块校核的基础上,以2018年9月20日和2018年7月23日的实测降雨、流量数据为校核数据基础,分别对孙家丽园对应河道排口(云飞路排口)和宝庆河排口进行模型验证(见图4)。

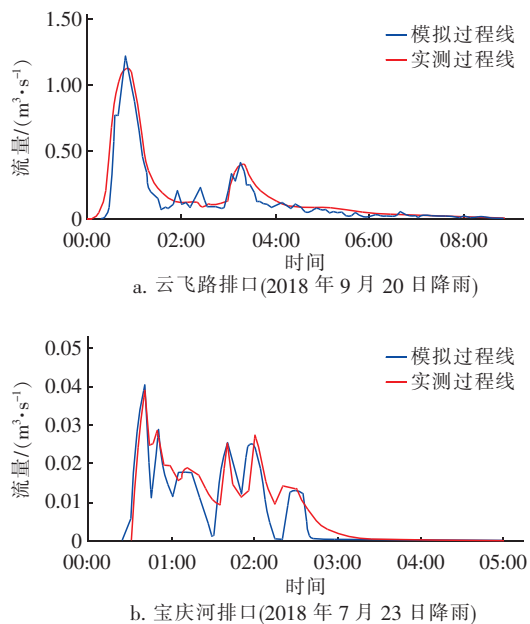


图4 云飞路排口和宝庆河排口监测与模型流量数据对比

Fig. 4 Comparison of monitoring and simulation flow data at the outlets of the Yunfei Road and Baoqing River

模型校核结果纳什系数分别为 0.89、0.86, 模拟值与实测值在变化趋势上有很好的-致性, 满足模型率定验证要求。

河道水位校核, 以 2018 年 8 月 11 日—8 月 14 日实测降雨为降雨事件进行模型模拟, 以河滩浦河和谢家河为例的模拟结果(见表 1)显示, 峰值相对误差均在 5% 以内, 满足模型验证要求。

表 1 河道水位验证结果统计

Tab. 1 Statistical data of river level verification results

河道	降雨/mm	实测水位/m	模拟峰值结果/m
河滩浦河	38.6	0.60	0.57
谢家河	38.6	1.22	1.17

以 2017 年 10 月 14 日降雨事件和现场调研的积水情况, 验证模型运行效果。根据现场调研, 康庄南路存在一定程度的积水, 比对模型结果, 康庄南路积水深 8 cm, 积水位置和积水发生时间较为一致。

3 风险评估结果

3.1 内涝风险评估标准

根据浙江省《城镇防涝规划标准》(DB 33/1109—2015)、《宁波市江北区防洪排涝专项规划》, 中心城区城市建成区(慈城古城、慈城新城、天水谢家以及湾头等区域)内涝防治标准为 50 年一遇, 乡镇和村庄排涝标准为 10 年一遇。城市内涝积水保证 24 h 降雨 24 h 排除至设计水位, 根据内涝积水深度、时间确定城市内涝风险等级, 具体内涝风险等级见表 2。

表 2 内涝风险等级划分

Tab. 2 Criteria of the waterlogging risk classification

项 目		内涝时间/min		
		0 ~ 30	30 ~ 60	60 ~ 120
内涝深度/m	0.15 ~ 0.3	低	中	高
	0.3 ~ 0.5	中	高	高
	> 0.5	高	高	高

注: 蓝色代表低风险, 黄色代表中风险, 红色代表高风险。

3.2 评估结果分析

3.2.1 短历时风险评估

通过 InfoWorks 软件的时间序列结果分析统计工具, 对积水超过 0.15 m 的位置进行积水时间和积水深度统计, 得到了不同重现期(5 年一遇、10 年一遇、20 年一遇、50 年一遇)短历时工况下, 试点区内的洪水风险面积, 见表 3。在短历时设计降雨情景模拟下, 内涝风险主要集中在慈城古城、机场路东片

区(老旧小区集中区)以及部分农田区域。根据表 3 数据, 随着降雨强度的增加, 风险区面积呈递增趋势, 中风险区的平均增长率约为 21%, 低、高风险区面积平均增长率约 10%; 在不同降雨条件下, 内涝风险区以中、高风险为主, 平均占比约 52%, 高风险平均占比约 25%。

表 3 内涝风险评估评估(短历时)

Tab. 3 Assessment of waterlogging risk (short duration)

内涝风险评估	降雨量/mm	低风险区面积/hm ²	中风险区面积/hm ²	高风险区面积/hm ²	面积总计/hm ²
5 年一遇	71	10.56	25.52	11.81	47.89
10 年一遇	81	18.06	43.60	18.45	80.11
20 年一遇	91	31.05	58.68	29.84	119.57
50 年一遇	104	37.22	92.16	44.51	173.89

3.2.2 长历时风险评估

在试点区内涝防治标准对应设计降雨情景模拟下, 通过 InfoWorks 软件的时间序列结果分析统计工具, 对积水超过 0.15 m 的位置进行积水时间和积水深度统计, 得到了 10 年一遇和 50 年一遇长历时工况下, 试点区内的内涝风险分布图(见图 5), 结果显示内涝以中、高风险为主。

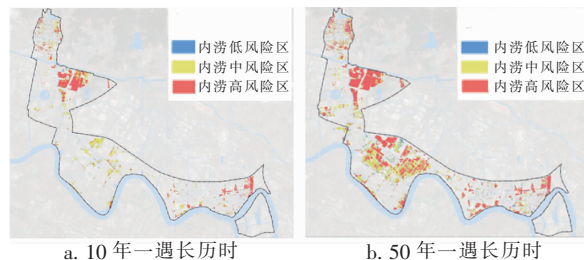


图 5 长历时工况下内涝风险分布

Fig. 5 Distribution of waterlogging risk under long duration

在 10 年一遇和 50 年一遇长历时设计降雨工况下对试点区进行内涝模拟, 并绘制内涝风险评估图。根据内涝风险评估图, 在 50 年一遇工况下试点区内涝风险总面积为 643.87 hm², 具体如表 4 所示。

表 4 内涝风险面积统计(50 年一遇长历时)

Tab. 4 Area statistics of waterlogging risk (the long duration of 50-year repetition period)

内涝风险评估	面积/hm ²	占风险区比例/%	占试点区比例/%
低风险区	57.67	9.0	1.9
中风险区	258.65	40.2	8.3
高风险区	327.55	50.8	10.6
总计	643.87	100.0	20.8

在 50 年一遇长历时设计降雨情景下, 慈城古

城、机场路东为城市内涝高发区,两个片区均为已建区域,其用地以居住用地、商住混合用地、商业用地为主。其中古城区域内涝积水主要由地势低洼、管网排水能力差造成,另机场路东的内涝积水原因以河道为主;10年一遇降雨条件下,主要针对村庄的内涝模拟结果显示,内涝风险主要位于姚江片区的裘市村,造成内涝风险的主要原因是地势低洼和管网能力不足。

4 结论

对宁波海绵试点区的内涝风险通过水力排水系统模型进行评估,依据试点区内河道及水工建筑物分布特征分别构建河道模型和水工建筑物模型。在不同工况模拟过程中,以不同标准下的内部河道水位以及水工建筑物调度原则为模型模拟边界条件,使模型模拟更加契合试点区现状内涝情况。

选取“地块+排口+河道水位+积水”的方式对模型基本参数进行校核,模拟结果与实测值在变化趋势上有很好的 consistency,再利用河道水位与典型积水点积水情况进一步进行校核,以提高模型准确性。该方法适用于大范围研究区域模型校核。

根据宁波试点区内涝风险分布,中、高风险区主要集中在已建区,该区域老旧小区集中,硬化比例较大。根据模型模拟积水点的积水信息,为后期积水点治理提供数据支撑及措施论证,如老旧小区海绵实施布局、排水管网改造规模、新建强排泵站规模、竖向提升依据等。宁波作为典型的平原河网城市,其内涝风险评估研究也可为其他同类型平原河网城市内涝风险评估提供借鉴。

参考文献:

- [1] 张清,骆文广. 河网水系对城市内涝防控的影响探讨[J]. 中国防汛抗旱,2019,29(11):58-61.
Zhang Qing, Luo Wenguang. Discussion on the influence of river network on the prevention and control of urban waterlogging[J]. China Flood & Drought Management, 2019, 29(11): 58-61 (in Chinese).
- [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] 戴晶晶,刘增贤,陆沈钧. 基于数值模拟的城市内涝风

险评估研究——以苏州市城市中心区为例[J]. 中国水利,2015(13):20-23.

Dai Jingjing, Liu Zengxian, Lu Shenjun. Risk-assessment of city waterlogging based on numerical simulation—Case study on urban center of Suzhou [J]. China Water Resources, 2015(13): 20-23 (in Chinese).

- [4] 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).

- [5] Sheng J G, Dan Y D, Liu C S, et al. Study of simulation in storm sewer system of Zhenjiang urban by InfoWorks ICM model [J]. Appl Mech Mater, 2012, 193/194: 683-686.

- [6] 王滢,周小伟. InfoWorks ICM在山地丘陵城市内涝治理中的应用[J]. 中国给水排水,2018,34(19):118-123.

Wang Ying, Zhou Xiaowei. Application of InfoWorks ICM in control of urban waterlogging in mountainous and hilly cities[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(19): 118-123 (in Chinese).

- [7] 黄国如,王欣,黄维. 基于InfoWorks ICM模型的城市暴雨内涝模拟[J]. 水电能源科学,2017,35(2):66-70,60.

Huang Guoru, Wang Xin, Huang Wei. Simulation of rainstorm water logging in urban area based on InfoWorks ICM model [J]. Water Resources and Power, 2017, 35(2): 66-70, 60 (in Chinese).



作者简介:张海行(1988-),男,河北衡水人,硕士,工程师,主要从事海绵城市和水环境治理工作。

E-mail:zhxl12700@163.com

收稿日期:2020-04-08