

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.11.020

管网缺陷对城市排水系统模拟结果的影响

宋瑞宁¹, 戴正晖², 王 宇¹, 唐宇飞¹, 任梦瑶¹, 赵 杨¹, 窦秋萍²

(1. 北京雨人润科生态科技有限责任公司, 北京 100009; 2. 华霖富水利环境技术咨询
<上海>有限公司, 上海 200092)

摘 要: 排水管网作为排水系统的核心部分, 长期以来由于受重视程度不够, 存在着诸多缺陷和问题。闭路电视(CCTV)检测技术可以快速、直观定位管道内部缺陷, 提供准确的基础影像, 快速反映排水管网运行状态, 为管道修复、养护、改造提供依据。基于管网缺陷对应的模型表达方法, 采用城市综合流域模型(InfoWorks ICM)模拟分析管网缺陷对城市排水系统的影响。结果表明, 排水管网受沉积和腐蚀等缺陷影响, 排水能力不满足 1 年一遇的管道增加了 7.4%, 满足 3 年一遇的管道减少了 2.8%。在 3 年一遇 2 h 的设计降雨条件下, 积水范围比管网无缺陷时增大了 13.8%。因此, 在模型构建过程中应充分考虑管网缺陷对城市排水系统运行带来的影响, 从而为确定管网修复优先等级以及改造等提供依据。

关键词: 排水管网; CCTV 检测; 结构性缺陷; 功能性缺陷; InfoWorks ICM 模型

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)11-0125-06

Influence of Pipe Network Defects on Simulation Results of Urban Drainage System

SONG Rui-ning¹, DAI Zheng-hui², WANG Yu¹, TANG Yu-fei¹, REN Meng-yao¹,
ZHAO Yang¹, DOU Qiu-ping²

(1. Beijing Yuren Rainwater Eco-technology Co. Ltd., Beijing 100009, China; 2. HR Wallingford
Hydraulic Environment Technology Consulting <Shanghai> Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: As a core part of the drainage system, drainage pipe network has many defects and problems due to the lack of insufficient attention for a long time. Closed-circuit television (CCTV) detection technology can quickly and intuitively locate the internal defects of pipelines, provide accurate basic images, quickly reflect the running state of drainage pipe network, and provide a basis for pipeline repair, maintenance and transformation. Based on model expression method corresponding to the pipe network defects, influence of pipe network defects on urban drainage system was simulated and analyzed by using urban integrated catchment management model (InfoWorks ICM). Affected by the defects such as deposition and corrosion, the pipelines with drainage capacity not meeting 1-year return period increased by 7.4%, while those with drainage capacity meeting 3-year return period decreased by 2.8%. Under the condition of 2-hour design rainfall with 3-year return period, the waterlogging area increased by 13.8% compared with that without defects in the pipe network. Therefore, the impact of pipe network defects on urban drainage system should be fully considered in model construction, so as to provide a basis for determining the priority level of pipe network repair and reconstruction.

Key words: pipe network; closed-circuit television detection; structural defect; functional defect; InfoWorks ICM model

排水管网作为排水系统的核心部分,长期以来由于受重视程度不够,存在诸多缺陷和问题。排水管网的健康状况差、运行效率低,是影响城市排水防涝的主要瓶颈问题之一,也是采用水力模型对城市排水系统评估^[1-3]时不可忽略的因素。目前,国内外采用成熟的闭路电视(CCTV)检测技术^[4]对排水管网运行状况进行评估,它可以快速、直观定位管道内部缺陷,提供准确的基础影像,快速反映排水管网运行状态,不仅为管道修复、养护、改造提供了依据,也为排水管网模型提供了详实的基础数据。但在排水管网模型构建过程中一般只考虑了管道淤积对排水能力的影响,并未考虑其他管网缺陷的影响。为此,笔者在汇水区产、汇流参数相同的基础上,分析管网缺陷对城市管网排水能力及内涝积水情况的影响,提出了一种管网缺陷对应的模型表达方法,以期合理地构建排水管网模型提供依据。

1 研究区域概况

选取某城市的独立排水分区作为研究对象,面积为 165 hm²。研究区域内下垫面主要为建筑屋面、市政道路、绿地、水体以及其他硬化地面,面积分别为 62.0、19.1、16.5、0.9、66.5 hm²。

研究区域为雨污分流制,雨水管径为 DN300 ~

1 200、 $\varnothing 300$ mm \times 500 mm ~ $\varnothing 1$ 200 mm \times 1 400 mm,总长度为 21.1 km。由于管线建设时间较早,缺乏有效的维护管理,管线破损淤堵现象明显。通过管网 CCTV 检测技术,发现了 205 处管网缺陷,主要分为结构性缺陷(变形、腐蚀、错口、脱节、支管暗接、异物穿入)和功能性缺陷(沉积、结垢、障碍物、残墙),其中,以管道沉积和腐蚀缺陷为主,分别占管网缺陷总量的 41.5%、45.9%,详见图 1。

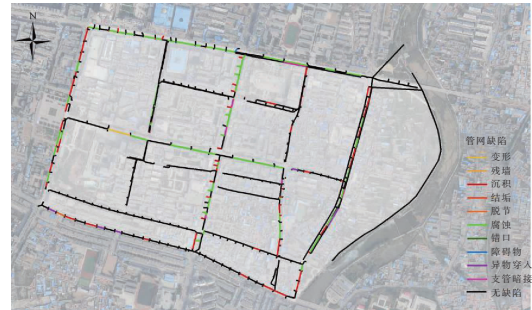


图 1 排水管网缺陷分布

Fig. 1 Defects distribution of drainage pipe network

2 管网缺陷模型表达方法

在管网模型中根据 CCTV 检测缺陷的位置、类型和等级,参考《城镇排水管道检测与评估技术规范》及相关资料^[5]进行相应的建模表达,见表 1。

表 1 CCTV 管网缺陷对应的模型表达

Tab. 1 Model expression of pipe network defects used CCTV

缺陷名称	等级	描述	模型表达
变形	1	变形不大于管道直径的 5%	断面改为椭圆形,断面高减少 5%、宽增加 5%
	2	变形为管道直径的 5% ~ 15%	断面改为椭圆形,断面高减少 10%、宽增加 10%
	3	变形为管道直径的 15% ~ 25%	断面改为椭圆形,断面高减少 20%、宽增加 20%
	4	变形大于管道直径的 25%	断面改为椭圆形,断面高减少 25%、宽增加 25%
腐蚀	1	轻度腐蚀:表面轻微剥落,管壁出现凹凸面	修改管道糙率系数 n 为 0.014
	2	中度腐蚀:表面剥落显露粗骨料或钢筋	修改管道糙率系数 n 为 0.015
	3	重度腐蚀:粗骨料或钢筋完全暴露	修改管道糙率系数 n 为 0.017
错口	1	轻度错口: 相接的两个管口偏差小于管壁厚度的 1/2	通过模型中管内底标高设置
	2	中度错口: 相接的两个管口偏差为管壁厚度的 1/2 ~ 1 之间	
	3	重度错口: 相接的两个管口偏差为管壁厚度的 1 ~ 2 倍之间	
	4	严重错口: 相接的两个管口偏差为管壁厚度的 2 倍以上	
脱节	1	轻度脱节:管道端部有少量泥土挤入	模型已经表达,进入模型进一步复核
	2	中度脱节:脱节距离 ≤ 20 mm	
	3	重度脱节:脱节距离为 20 ~ 50 mm	
	4	严重脱节:脱节距离 > 50 mm	

续表 1 (Continued)

缺陷名称	等级	描述	模型表达
支管暗接	1	支管进入主管内的长度不大于主管管径的 10%	局部水头损失系数为 0.05
	2	支管进入主管内的长度在主管管径的 10% ~ 20% 之间	局部水头损失系数为 0.10
	3	支管进入主管内的长度大于主管管径的 20%	局部水头损失系数为 0.15
异物穿入	1	异物在管道内且占用过水断面面积不大于 10%	添加孔口进行限流,孔口面积为管线的 95%
	2	异物在管道内且占用过水断面面积的 10% ~ 30%	添加孔口进行限流,孔口面积为管线的 80%
	3	异物在管道内且占用过水断面面积大于 30%	添加孔口进行限流,孔口面积为管线的 70%
沉积	1	沉积物厚度为管径的 20% ~ 30%	淤积 25% 过水断面
	2	沉积物厚度为管径的 30% ~ 40%	淤积 35% 过水断面
	3	沉积物厚度为管径的 40% ~ 50%	淤积 45% 过水断面
	4	沉积物厚度大于管径的 50%	淤积 55% 过水断面
结垢	1	硬质结垢造成的过水断面损失不大于 15%	淤积 10% 过水断面
	2	硬质结垢造成的过水断面损失在 15% ~ 25% 之间	淤积 20% 过水断面
	3	硬质结垢造成的过水断面损失在 25% ~ 50% 之间	淤积 35% 过水断面
	4	硬质结垢造成的过水断面损失大于 50%	淤积 50% 过水断面
障碍物	1	过水断面损失不大于 15%	淤积 10% 过水断面
	2	过水断面损失在 15% ~ 25% 之间	淤积 20% 过水断面
	3	过水断面损失在 25% ~ 50% 之间	淤积 35% 过水断面
	4	过水断面损失大于 50%	淤积 50% 过水断面
残墙	1	过水断面损失不大于 15%	添加孔口进行限流,孔口面积为管线的 90%
	2	过水断面损失在 15% ~ 25% 之间	添加孔口进行限流,孔口面积为管线的 80%
	3	过水断面损失在 25% ~ 50% 之间	添加孔口进行限流,孔口面积为管线的 65%
	4	过水断面损失大于 50%	添加孔口进行限流,孔口面积为管线的 50%

3 模型构建

3.1 模型选择

由于城市综合流域模型 (InfoWorks ICM) 同时具有管道沉积物设置功能和二维地面洪水淹没分析功能,故本研究选用 InfoWorks ICM 软件模拟研究区域排水系统。对研究区域内的管网普查数据进行拓扑结构分析与检查后导入模型中,共计 976 条雨水管道、467 个雨水口、468 个检查井、2 个排口。

为了使排水管网模型与现实管网系统更加吻合,模型中道路以雨水口为节点进行汇水区的划分^[6],地块以检查井为节点进行汇水区的划分,共划分 901 个汇水区,通过 InfoWorks ICM 的面积提取工具 (ATO) 自动为每个汇水区计算产流表面面积。

3.2 参数设置

InfoWorks ICM 采用分布式的降雨 - 径流过程,降雨经地表截留、填洼、渗透后产生径流,然后通过节点汇入管道系统,最终进入受纳水体。由于缺少研究区域的下渗参数,故产流模型采用固定径流系数模型,汇流模型采用 SWMM 汇流模型,管道水力计算采用完全求解的圣维南方程组。为了对比分析

管网有缺陷和无缺陷对排水系统的影响,两种方案中的汇水区产、汇流参数设置均一致。根据 2016 年版《室外排水设计规范》(GB 50014—2006)、SWMM 用户手册及相关文献^[7]确定参数,具体见表 2。

表 2 汇水区产、汇流模型参数设置

Tab. 2 Parameters setting of catchment runoff model and routing model

产流表面	初损类型	初期损失值/mm	径流量类型	固定径流系数	汇流模型	汇流参数
建筑屋面	Abs	2	Fixed	0.90	SWMM	0.013
道路	Abs	2	Fixed	0.95	SWMM	0.013
绿地	Abs	4	Fixed	0.15	SWMM	0.150
其他硬化地面	Abs	3	Fixed	0.85	SWMM	0.013
水体	Abs	0	Fixed	0	SWMM	0.010

3.3 降雨事件

短历时设计降雨主要用于计算机模型对现状管网及排涝系统的模拟评估,在短时期内遭遇强降雨,排除河道湖泊对城市管网的影响,可以单独评估管网的排水能力及城市内涝风险。本研究采用芝加哥雨型对研究区域的排水系统进行模拟研究。

$$q = \frac{1\,341 \times (1 + 1.201 \lg P)}{(t + 8.308)^{0.763}} \quad (1)$$

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

此次雨峰位置系数为 0.35, 经计算, 在时间间隔为 5 min 的条件下, 1、2、3、5 年一遇 2 h 降雨量分别为 23.7、32.3、37.3、43.7 mm。

4 结果与分析

4.1 管道排水能力评估

分别采用 1、2、3 和 5 年一遇 2 h 设计降雨模拟分析排水管网在有缺陷和无缺陷 2 种工况条件下的排水能力, 结果见图 2 和图 3。

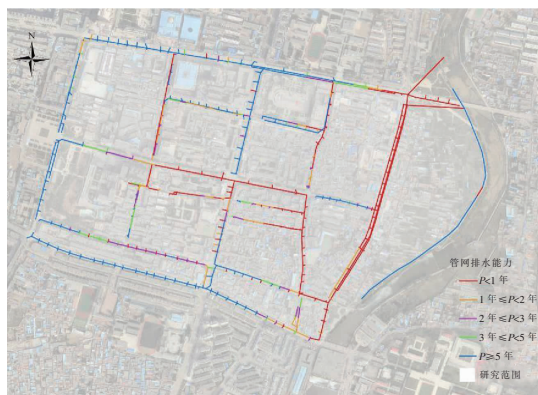


图 2 管网无缺陷条件下的排水能力

Fig. 2 Drainage capacity of pipe network without defects

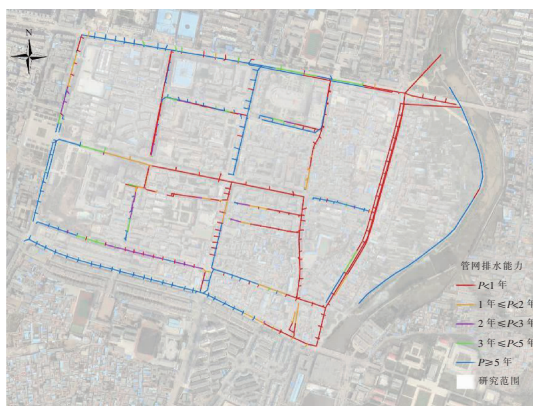


图 3 管网有缺陷条件下的排水能力

Fig. 3 Drainage capacity of pipe network with defects

根据充满度评估法对研究区域的排水管网进行排水能力分析可知, 在现状排水管网不考虑缺陷的条件下, 排水能力低于 1 年一遇的管道长度为 7.68 km, 占管网总长度的 36.4%; 排水能力超过 3 年一遇的管道长度为 9.63 km, 占管网总长度的 45.6%。

在现状排水管网考虑缺陷的条件下, 排水能力低于 1 年一遇的管道长度为 9.23 km, 占管网总长度的 43.8%; 排水能力超过 3 年一遇的管道长度为 9.04 km, 占管网总长度的 42.8%。由此可见, 在排水管网模型考虑管网缺陷的条件下, 管网排水能力进一步下降, 不满足 1 年一遇的管道长度增加了 7.4%, 满足 3 年一遇的管道长度减少了 2.8%。具体管网排水能力见表 3。上、中、下游典型管道有缺陷和无缺陷的水深过程线如图 4 所示。

表 3 研究区域内的管网排水能力

Tab. 3 Drainage capacity of pipe network in study area

项 目	重现期/a	管网长度/km	所占比例/%
管网无缺陷	<1	7.68	36.4
	1~2	2.33	11.0
	2~3	1.47	7.0
	3~5	1.12	5.3
	>5	8.51	40.3
管网有缺陷	<1	9.23	43.8
	1~2	1.71	8.1
	2~3	1.12	5.3
	3~5	1.19	5.6
	>5	7.85	37.2

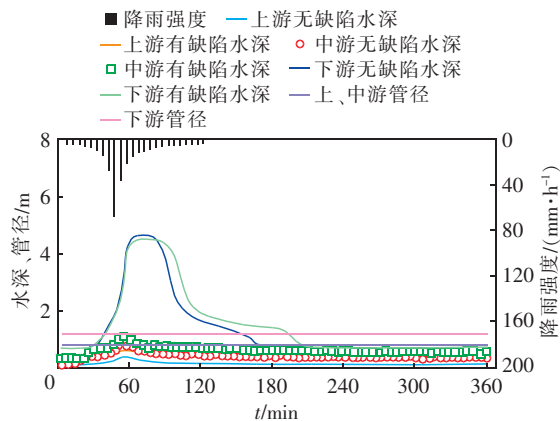


图 4 不同位置典型管道有缺陷和无缺陷水深过程线

Fig. 4 Water depth of typical pipelines with and without defects at different locations

由管网 CCTV 检测结果可知, 管道缺陷以沉积和腐蚀为主, 其他缺陷占比较小。管道沉积导致管道过水断面面积在缺陷处减少, 引起上游壅水, 局部形成排水瓶颈, 排水能力降低; 管道腐蚀造成管道糙率系数增加, 进而影响管道流速, 导致排水能力降低。上游管网只承担自身汇水区域内的降雨径流, 因此排水能力受管网沉积、腐蚀的影响最大; 中游管网承担上游管网和自身汇水区域的降雨径流, 管道

容量已经被上游来水占据部分空间,再加上管道沉积、腐蚀的影响,排水能力也有所降低;而下游管网承担了整个排水分区的降雨径流,管道的排水能力有限,即使加上管道沉积、腐蚀的缺陷,排水能力受管网缺陷的影响较小。

4.2 内涝积水评估

《城镇内涝防治技术规范》(GB 51222—2017)中规定地面积水标准为道路中一条车道的积水深度不超过 15 cm,基于市面上主流小汽车的排气管高度主要集中在 25 ~ 35 cm 之间、进气口高度主要集中在 44 ~ 80 cm 之间^[8],当路面积水深度 > 25 cm 时,将可能导致城市交通瘫痪,给城市居民的生命财产安全带来严重威胁,因此将内涝积水划分为 4 个等级: <0.15、0.15 ~ 0.25、0.25 ~ 0.50、>0.50 m。采用 3 年一遇 2 h 设计降雨模拟分析排水管网有缺陷和无缺陷 2 种工况条件下的内涝积水情况,最不利条件下的积水分布如图 5 和图 6 所示。

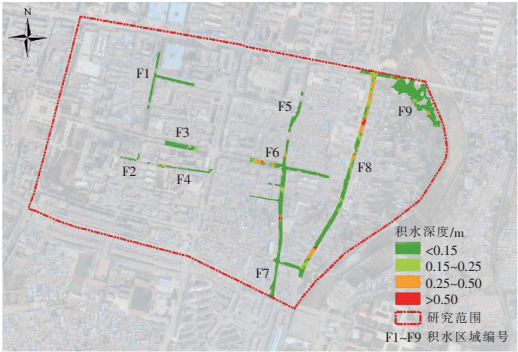


图 5 管网无缺陷条件下的积水深度
Fig. 5 Depth of waterlogging without pipe network defects

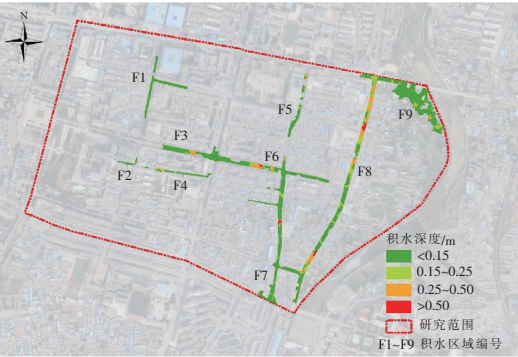


图 6 管网有缺陷条件下的积水深度
Fig. 6 Depth of waterlogging with pipe network defects
根据模拟结果可知,研究区域在管网无缺陷的

情况下,积水深度 < 0.15 m 的区域面积为 5.22 hm²,积水深度 ≥ 0.15 m 的区域面积为 1.31 hm²,总积水区域面积为 6.53 hm²。在管网有缺陷的情况下,积水深度 < 0.15 m 的区域面积为 5.87 hm²,比管网无缺陷时增加了 12.4%;积水深度 ≥ 0.15 m 的区域面积为 1.56 hm²,比管网无缺陷时增加了 19.1%;总积水区域面积为 7.43 hm²,比管网无缺陷时增加了 13.8%。积水区域面积统计见表 4。

表 4 研究区域内的积水面积

Tab. 4 Waterlogging area in study area

项 目	积水深度/m	积水面积/hm ²	总积水面积/hm ²
管网无缺陷	<0.15	5.22	6.53
	0.15 ~ 0.25	0.72	
	0.25 ~ 0.50	0.52	
	>0.50	0.07	
管网有缺陷	<0.15	5.87	7.43
	0.15 ~ 0.25	0.84	
	0.25 ~ 0.50	0.62	
	>0.50	0.10	

对比分析管网有缺陷和无缺陷的积水深度图可知,研究区域在管网无缺陷的情况下本身就存在积水现象,积水区域主要分布在中游、下游的道路上。在管网增加缺陷之后,虽然主要积水区域位置未发生改变,但积水深度有所升高,积水区域面积进一步增加。由此可知,管网缺陷对内涝积水深度、积水面积影响较大,而对于积水区域分布位置影响较小。

由于研究区域地势西高东低、北高南低,尽管上游管网在增加缺陷之后排水能力有所降低,但是上游管网的储水容量能够满足汇水区域内的降雨径流从而未发生漫溢。通过对比积水深度图中的 F3 和 F7 积水区域可知,中游管网在增加缺陷之后,管道储水容量无法满足上游来水和自身汇水区域内的降雨径流,下游管道由于管道容量被占,从而导致中游管道的径流漫溢至地表,随后沿地表向地势较低处漫流,导致积水面积增加。下游管道处于地势最低处,本身管道储水容量严重不足,势必会造成下游道路积水,再加上管道缺陷之后,积水深度进一步增加,而道路积水面积基本变化不大。

5 结论

基于管网 CCTV 检测结果,并将管网缺陷在模型中进行相应表达,采用 InfoWorks ICM 模型对研究区域的排水管网进行了系统研究。主要结论如下:

- ① 排水管网受沉积和腐蚀等缺陷影响,排水

能力不满足1年一遇的管道增加了7.4%,满足3年一遇的管道减少了2.8%。在3年一遇2h设计降雨条件下,积水范围比管网无缺陷时增大了13.8%。

② 在考虑管网缺陷的情况下,模型能够较为真实地反映管网在不同降雨条件下的水力状况,从而为确定管网修复优先等级以及改造等提供依据。因此,为了提高模型的准确性和实际应用中的指导性,在模型构建过程中应充分考虑管网缺陷对排水系统运行所带来的影响。

③ 在现实条件下,应定期对排水管网进行管道检测,及时发现排水管网存在的问题,科学地制定管道养护计划,特别是对过水能力影响较大的管道应加大养护频率和力度。同时,根据管道缺陷类型有针对性地采取疏通、修复和更换等措施,消除缺陷,恢复管道排水能力,延长管道使用寿命,从而保障城市排水管网系统正常运行。

参考文献:

- [1] 金溪,齐同湘,王宏彦,等. 基于水力模型的城市排水系统评估与规划方法研究[J]. 中国给水排水,2016,32(13):136-139.
JIN Xi, QI Tongxiang, WANG Yanhong, *et al.* Assessment and planning of urban stormwater system based on hydraulic model[J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(13):136-139 (in Chinese).
- [2] 杨涛,陈宝玉,王正雄,等. 城市雨水管道排水能力评估中不同方法的对比分析[J]. 中国给水排水,2019,35(23):134-138.
YANG Tao, CHEN Baoyu, WANG Zhengxiong, *et al.* Comparison of different methods applied in drainage capacity assessment of municipal storm sewers[J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(23):134-138 (in Chinese).
- [3] 靳俊伟,黄丽萍,章卫军,等. 基于水力模型的重庆都市核心区排水防涝风险评估[J]. 中国给水排水,2015,31(11):120-123.
JIN Junwei, HUANG Liping, ZHANG Weijun, *et al.* Risk assessment of drainage and waterlogging prevention system for Chongqing core area based on hydraulic model[J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(11):120-123 (in Chinese).
- [4] 齐利华,祖士卿,马骥. 珠海市某区域污水管网 CCTV 检测结果与建议[J]. 中国给水排水,2017,33(22):135-138.
QI Lihua, ZU Shiqing, MA Ji. CCTV inspection and thinking of a regional sewage networks in Zhuhai[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(22):135-138 (in Chinese).
- [5] Drainage services department, Government of the Hong Kong Special Administrative Region. Stormwater Drainage Manual—Planning, Design and Management [EB/OL]. [2020-02-10]. https://www.dsd.gov.hk/EN/Files/Technical_Manual/technical_manuals/SDM_2018_5th.pdf.
- [6] 宋瑞宁,宫永伟,李俊奇,等. 汇水区节点选取对城市雨洪模拟结果的影响[J]. 水利水电科技进展,2015,35(3):75-79.
SONG Ruining, GONG Yongwei, LI Junqi, *et al.* The effect of node type selection for catchment division on urban stormwater simulation[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(3):75-79 (in Chinese).
- [7] 宋晨怡. 平原水网地区城市内涝风险的模块化分析方法研究——以盐城市核心区为例[J]. 给水排水,2019,45(S1):38-41.
SONG Chenyi. Research on modularized analysis method of urban waterlogging risk in plain water network area—a case study of Yancheng core area [J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 45(S1):38-41 (in Chinese).
- [8] 张书函,肖志明,王振昌,等. 北京市城市内涝判定标准量化研究[J]. 中国防汛抗旱,2019,29(9):1-5.
ZHANG Shuhan, XIAO Zhiming, WANG Zhenchang, *et al.* Quantitative study on the criteria for determining urban flood in Beijing [J]. China Flood & Drought Management, 2019, 29(9):1-5 (in Chinese).

作者简介:宋瑞宁(1988-),男,河北邢台人,硕士,工程师,主要从事城市雨洪控制与利用研究。

E-mail: songruining@163.com

收稿日期:2020-04-01

修回日期:2020-05-05

(编辑:刘贵春)