

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.17.020

基于情景模拟的城市排水能力及内涝风险评估

王俊佳, 王川涛, 曾 胜

(中国城市规划设计研究院 深圳分院, 广东 深圳 518000)

摘 要: 采用情景模拟法,利用 ArcGIS 和 Mike 工具构建不同降雨重现期下雨水管渠、水系和地表径流模块,通过 Mike Flood 工具将三者进行耦合分析,模拟设计降雨工况下的城市内涝积水情况。基于模拟结果分析排水管渠水力负荷,评估城市雨水管渠系统排水能力,同时利用 ArcGIS 对积水深度、积水时间及地区重要性进行叠加分析,采用层次分析法将研究区域划分为高风险内涝区、中风险内涝区和低风险内涝区,为城市排水管渠改造、内涝点治理、竖向规划、用地规划等提供科学依据,同时提高了城市防涝管理水平。

关键词: 排水能力; 内涝风险; 情景模拟法; 层次分析法

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)17-0115-06

Assessment of Urban Drainage Capacity and Waterlogging Risk Based on Scenario Simulation

WANG Jun-jia, WANG Chuan-ao, ZENG Sheng

(Shenzhen Branch, China Academy of Urban Planning and Design, Shenzhen 518000, China)

Abstract: Rain water pipes, river systems and surface runoff modules in different rainfall return periods were constructed by using scenario simulation method and ArcGIS and Mike tools, and urban waterlogging under the design rainfall condition was simulated through coupling analysis of the three by Mike Flood tool. Based on the simulation results, hydraulic load of drainage pipes was analyzed, and drainage capacity of urban rain water pipe was evaluated. Meanwhile, overlay analysis of ponding depth, time and regional importance was carried out by ArcGIS, and the study area was divided into high risk waterlogging area, middle risk waterlogging area and low risk waterlogging area by analytic hierarchy process (AHP). The works desired to provide scientific basis for urban drainage pipes renovation, waterlogging control, vertical planning and land use planning, and improved the level of urban waterlogging prevention and management.

Key words: drainage capacity; waterlogging risk; scenario simulation method; analytic hierarchy process

随着城市的快速发展,城市规模不断扩大,城市建设过程中侵占排水河(沟)道,造成河道断面缩小,排水能力下降;城市调蓄水体、低洼地被填埋,滞蓄空间减小;城市排水设施建设滞后,排水系统不完善,排水管道设计标准偏小;城市下垫面硬化严重,透水率降低,雨水径流总量增加;极端天气频发等多种因素导致城市内涝频繁发生,逢雨必涝现象不断

增多。

为有效缓解城市内涝,提高城市防涝治涝水平,笔者通过模拟不同降雨重现期下的雨水管渠排水工况及内涝积水情况,对现状排水管渠的排水能力进行评估,并识别城市内涝风险区域,旨在为城市排涝系统规划、现状排水管渠改造、城市用地布局等提供科学的理论支撑。

1 项目概况及内涝现状分析

研究区地处江苏省西北部、华北平原东南部,为温带半湿润季风气候,项目范围约 573 km²,建设用地面积约 160 km²。区内地势较为平坦,总体地形为西高东低,大部分地面高程在 31~33 m 之间(故黄河高程,下同),故黄河横穿研究区,并高出两侧地面 4~6 m,成为“悬河”。根据遥感影像对区内现状下垫面进行分类,西部老城区和新城区建筑密度高、绿地率较低,东南部郊区建筑密度较低,主要以农田、绿地和森林为主。

研究区现状排水设施主要有排涝泵站和排水管网,根据统计资料及勘探资料对现状排水设施进行整理,其中排涝泵站有 20 座,雨水及合流制管渠约 1 249 km。虽然研究区域已建成庞大的排水系统,但由于城市建设过程中侵占排水河(沟)道,部分河道被改造为排水暗渠,渠道淤积严重,部分水体、低洼地被填埋,调蓄空间减少,城市下垫面硬化严重,不透水率增加等导致城市径流系数变大;同时,排水系统建设缺乏系统性的考虑,导致部分管渠不成系统,大管接小管现象较为普遍,造成排水系统难以发挥其最大的排水功能;根据水务局防洪办公室统计,现状易淹易涝点共 38 个,主要集中在徐运新河、三八河、奎河、荆马河流域。

2 研究方法

目前,城市内涝风险评估应用较多的方法包括历史灾情统计法、指标体系评估法和情景模拟评估法^[1]。3 种方法各有优劣,历史灾情统计法是基于数理统计的概率分析方法,要求有长时间序列的历史灾情数据资料,适用于缺乏详细地理数据、降雨资料、管网资料等基础资料的城市,但该方法评估结果为区域性风险,不能反映灾害风险的空间差异;指标体系评估法是通过建立一个合适的指标体系,确定指标影响权重后对区域的内涝风险进行评估,但指标的选取主观性较强,可能出现“以点代面”的现象,不能完全反映灾害风险空间分布特征;情景模拟法以现状下垫面、场地竖向、降雨和现状排水系统为基础条件,并考虑外江水位对区域内排水的影响,通过构建排水系统模型,可以较为真实地反映区域降雨、地面汇流、管渠排水工况及地面积水情况,是一种可视化、动态的内涝风险评估方法^[2-4]。因此,本研究采用情景模拟法,建立不同设计降雨工况下的排水管网水力模型,对研究区域内排水管渠的排水

能力进行评估,同时,采用 Mike Flood 模型对降雨、排水管网、地形、下垫面及河道水系等多因素耦合,模拟城市在内涝防治设计重现期下的积水情况,识别城市易涝区域。排水能力及内涝风险评估技术路线见图 1。

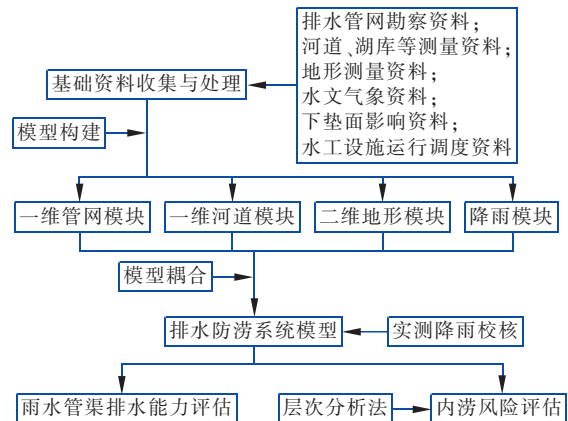


图1 排水能力及内涝风险评估技术路线

Fig. 1 Technical research route of drainage capacity and waterlogging risk assessment

3 模型构建

3.1 雨型分析

研究区内排水管网建设年份较早,设计标准多为 1~3 年,因此,本次采用 1、2、3 和 5 年的短历时设计降雨评估雨水管渠排水能力。将暴雨强度公式、设计暴雨重现期(T)、设计降雨历时(t)和雨峰系数(r)代入根据暴雨强度公式导出的芝加哥雨型公式,计算出雨峰前后瞬时降雨强度及各个时段内的平均降雨强度,最终确定出重现期为 1、2、3 和 5 年,降雨历时为 120 min 的芝加哥雨型。不同重现期下短历时降雨过程见图 2。

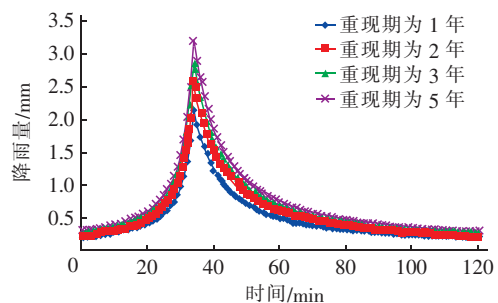


图2 不同重现期下短历时降雨过程

Fig. 2 Short duration rainfall process of different return periods

研究区排涝标准为 30 年一遇,规划采用江苏省

暴雨等值线图法对30年一遇设计降雨进行时程分配,得到30年一遇设计降雨的24 h时程分配过程线,见图3。

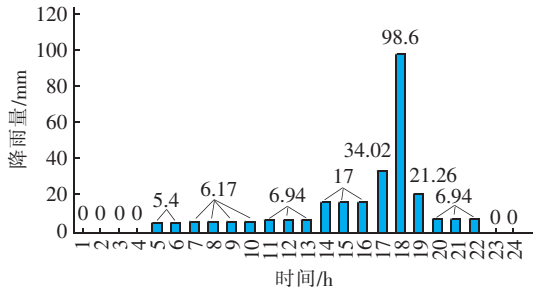


图3 30年一遇设计降雨时程分配过程线

Fig. 3 Distribution process line of designed rainfall with return periods of 30 years

3.2 水位边界条件确定

研究区以不牢河、故黄河作为排水边界,通过多年降雨及河道水位统计资料分析,当研究区域遭遇30年一遇降雨时,不牢河和故黄河水位约为10年一遇。因此,以不牢河和故黄河10年一遇水位为边界条件。

3.3 模型概化

根据地形、水系分布结合排水管渠将研究区划分为37个排水分区,并在此基础上利用GIS和Mike工具建立排水管网系统、河道、水工设施一维拓扑关系,建立Mike11河流水动力模型、Mike21地表漫流模型和Mike Urban排水管网水动力模型,然后通过Mike Flood模型将三者进行耦合,模拟不同降雨工况下排水管渠水力负荷及内涝积水情况。

3.4 模型率定

为了验证模型设置参数与实际情况的吻合度,利用1997年7月17日实测24 h降雨资料进行率定,根据研究区域内17个雨量站的观测记录统计,24 h平均降雨量为345 mm,降雨量达到100年一遇。该场暴雨导致老城区奎河流域内段庄环岛、建国西路与纺织东路路口等地发生严重内涝,积水深度为0.3~0.5 m。由于老城区内涝频繁,内涝情况严重,更具有代表性,所以规划采用老城区作为模型率定流域。

从模型结果(见图4)看出,老城区排水流域内涝积水严重,积水面积约为218.3 hm²,积水深度超过0.15 m的约为66.8 hm²。其中工农南路、段庄环岛以及建国西路与纺织东路路口内涝积水严重,工

农南路积水深度约为0.4 m,段庄环岛、建国西路与纺织东路路口积水深度接近0.5 m。可见,模型计算结果与实际内涝积水调查资料基本一致,模型具有较高的可靠性。



图4 老城区100年一遇内涝积水模拟结果

Fig. 4 Waterlogging simulation results with return periods of 100 years in old town

4 排水管渠排水能力评估

当城市降雨强度超过排水管渠排水能力时,可能会导致管道负荷过大,排水不畅,雨水无法及时排走,造成地面积水。根据不同设计工况下降雨时程分布,模拟1、2、3和5年一遇设计降雨下的雨水管渠排水状态,分析出现状排水管渠的排水能力。基于模拟结果(见图5)分析,排水管渠排水能力小于1年一遇的管道长度为623.9 km,约占50%;排水能力为1~2年一遇、2~3年一遇、3~5年一遇、大于5年一遇的管道长度分别为79.3、40、46.2、459.6 km,占比为6.3%、3.2%、3.7%和36.8%。

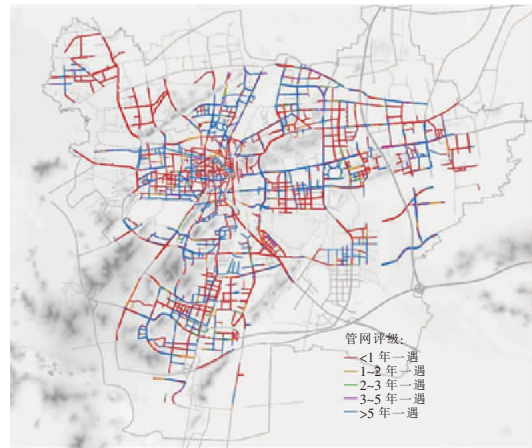


图5 现状排水管渠排水能力评估

Fig. 5 Assessment of drainage capacity of current drainage pipes

5 内涝风险评估与区划

5.1 内涝风险评估方法

按照灾害风险理论,灾害风险是由致灾因子危险性、承灾体的暴露性和脆弱性相互作用而构成的有机整体,内涝灾害风险的影响因子主要包括危险性影响因子、暴露性影响因子和脆弱性影响因子^[5-6]。其中危险性影响因子和暴露性影响因子主要包括排涝系统、下垫面、地形等,情景模拟法将危险性影响因子和暴露性影响因子通过积水深度和积水时间来综合表征其对内涝风险的影响。暴露性影响因子主要包括行政中心、医院、学校、交通枢纽等重要地区。而城市内涝严重程度主要取决于积涝程度和地区的重要性,积涝程度主要反映为积水深度和积水时间。因此,城市内涝风险评估可通过积水深度、积水时间和地区的重要性综合评价,根据三者的影响权重采用层次分析法划分研究区域的内涝风险。层次分析法将决策问题的有关元素分解为目标层、准则层和基准层等,并在此基础上进行定性和定量分析。确定上下层元素关系,建立递阶层次结构,每一层次均按照某一准则对该层元素进行重要性判断,并构建判断矩阵 $A = (\alpha_{ij})_{n \times n}$,其中, $\alpha_{ii} = 1, \alpha_{ij} = 1/\alpha_{ji}, \alpha_{ij} = \alpha_{ik} \cdot \alpha_{kj}$ 。并通过矩阵特征值确定元素权重,计算出各层元素对目标的权重。由于判断是估计的,不是很精确,必须进行一致性检验,一致性检验是通过计算一致性指标和一致性比率进行的^[7-8]。若一致性比率 $CR < 0.10$,则认为比较判断矩阵的一致性可以接受,否则应适当修正判断矩阵。判断矩阵中各元素确定的标度见表1。

表1 判断矩阵中各元素确定的标度

Tab.1 Scale determined by each element in judgment matrix

α_{ij}	两目标相比
1	i 因素与 j 因素一样重要
3	i 因素较 j 因素稍微重要一点
5	i 因素较 j 因素明显重要
7	i 因素较 j 因素重要得多
9	i 因素较 j 因素绝对重要
2,4,6,8	i 与 j 两因素重要性介于上述两个相邻判断尺度之间
以上各数的倒数	两因素反过来比较

5.2 内涝风险影响等级划定

① 积水深度

根据2014版《室外排水设计规范》(GB 50014—2006),当路面积水深度超过15 cm时,车道

可能因机动车熄火而完全中断,15 cm积水深度为内涝风险评估标准之一。因此,本研究以15 cm为划分起点,同时结合积水模拟结果将积水深度划分为5个等级,即0~0.15 m为1级、0.15~0.3 m为2级、0.3~0.5 m为3级、0.5~1 m为4级、>1 m为5级。

② 积水时间

长时间内涝将对生活和生产产生严重影响,以1 h积水时间为起划点将积水时间划分为5个等级,即0~1 h为1级、1~2 h为2级、2~3 h为3级、3~5 h为4级、>5 h为5级。

③ 地区重要性

城市行政中心、学校、医院、交通枢纽、商业集聚区、大型基础设施等抗涝要求高,若发生内涝积水将对城市安全、交通运营产生严重影响,因此将地区重要性作为影响内涝风险评估的重要因子之一。地区重要性等级划分如下:一般地区(公园、广场等雨天人类活动较少的地区)为1级、重要地区(学校、商业中心、行政中心等地区)为3级、特别重要地区(城市主干道、医院、交通枢纽、大型基础设施等地区)为5级。

5.3 内涝风险区域划定

由于各影响因子的类型不同,对城市内涝影响程度有所差异,目前尚没有统一评价标准,因此本研究借助专家的经验,通过层次分析法,构建判断矩阵,对各因子进行叠加分析,对矩阵特征值进行求解,然后对其进行归一化处理,即可得到各评价因子的权重 W_i ^[9-10]。若积水深度对内涝风险评估的影响程度为1,积水时间对内涝风险评估的影响程度是积水深度的1/2倍,地区重要性的影响是积水深度的1/3倍,依次构建判断矩阵 A 。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 0.5 & 1 & 1.5 \\ 0.33 & 0.66 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

根据判断矩阵计算基准层归一化权重矩阵 W ,计算出判断矩阵的每一行的数值成绩 $M_i, W_i = \frac{3}{\sqrt{M_i}}$ 。

$\sum W_i = 3.327, W = W_i / \sum W_i$,得出归一化权重矩阵:

$$W = [0.546 \quad 0.273 \quad 0.181] \quad (2)$$

同时进行一致性检验,得出检验系数 $CR = 0.006 < 0.10$,满足一致性检验。

研究区内涝风险评估值见图 6。根据上述叠加计算结果,结合《城市排水(雨水)防涝综合规划编制大纲》的要求,将研究区域划分为低、中、高 3 个内涝风险等级,其中低风险区面积约为 84.9 km²、中风险区面积约 37.2 km²、高风险区面积约 12.2 km²,见表 2 和图 7。高风险区主要分布在现状各个立交桥及东北部郊区低洼地区,包括沈场立交、中山路立交、下淀路立交、复兴北路立交、白云山立交、建国路立交、郭庄路东三环立交、七里沟立交、迎宾大道东三环立交和欣欣路立交,以及欣欣路与长安路路口、学苑路与上海路路口、十里社区、七里沟地块、206 国道与钱江路路口等,其主要原因是地势低洼,且为城市交通主干道。东北部地区现状主要以农田和鱼塘为主,地势低洼,内涝风险高,在城市规划建

设过程中应作为雨水调蓄空间予以保留。

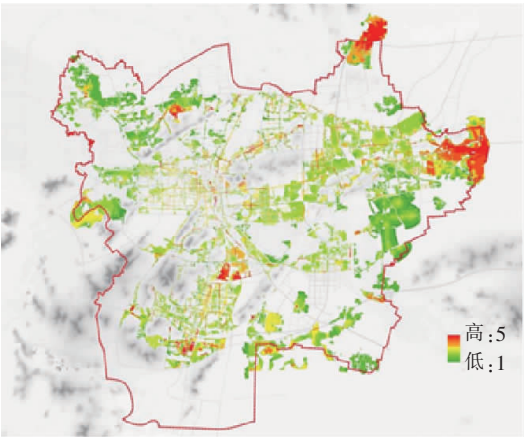


图 6 研究区内涝风险评估值

Fig. 6 Assessment of waterlogging risk in study area

表 2 内涝风险区划结果

Tab. 2 Waterlogging risk regionalization results

项 目	评估值	风险描述	总面积/km ²
低风险区	1 ~ 2.2	积水深度 < 0.15 m, 且区域内无特别重要公共设施; 积水深度介于 0.15 ~ 0.3 m, 积水时间不超过 1 h, 且区域内无重要公共设施	84.9
中风险区	2.2 ~ 3.5	积水深度 < 0.15 m, 区域有特别重要公共设施; 积水深度介于 0.15 ~ 0.3 m, 积水时间 > 1 h, 区域内无重要公共设施; 积水深度 > 0.3 m, 积水时间 < 1 h, 区域内无重要公共设施	37.2
高风险区	3.5 ~ 5	积水深度介于 0.15 ~ 0.3 m, 区域内有重要公共设施; 积水深度 > 0.3 m, 积水时间 < 1 h, 区域内有重要公共设施; 积水深度 > 0.3 m, 积水时间 > 1 h 的区域	12.2
合计	—	—	134.3

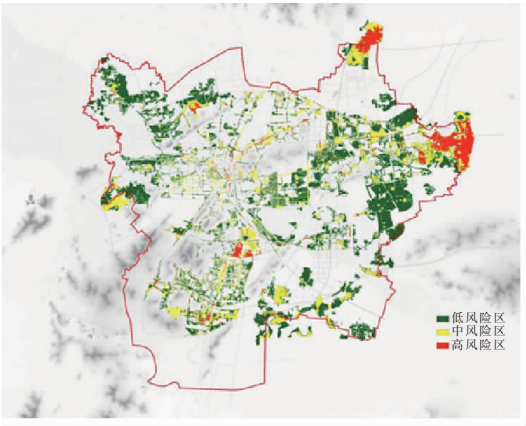


图 7 内涝风险区划

Fig. 7 Waterlogging risk regionalization

6 结论

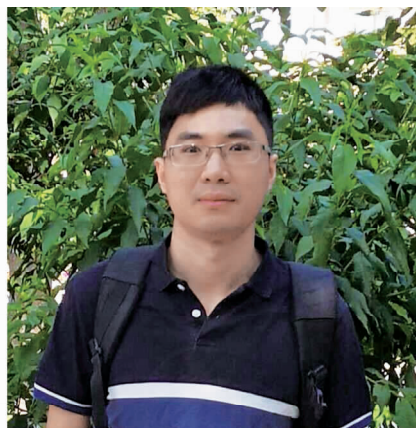
根据降雨、排水管渠、地形、下垫面、河道水位等基础资料,构建排水管渠水力模型、水系河道模型和城市地表漫流模型,模拟不同设计降雨工况下的排

水管渠水力工况及地面积水情况,识别排水管渠排水能力,并通过层次分析法,利用 ArcGIS 对内涝积水深度、积水时间和地区重要性进行叠加分析,采用层次分析法识别研究区域内内涝高风险区、内涝中风险区和内涝低风险区,其评价结果可有效指导城市用地规划和开发建设,也是城市内涝灾害管理、减少内涝灾害损失的有效途径。

参考文献:

[1] 张冬冬,严登华,王义成,等. 城市内涝灾害风险评估及综合应对研究进展[J]. 灾害学,2014,29(1):144 - 149.
Zhang Dongdong, Yan Denghua, Wang Yicheng, et al. Research progress on risk assessment and integrated strategies for urban pluvial flooding [J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29(1): 144 - 149 (in Chinese).
[2] 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).
- [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] 胡坚, 赵宝康, 刘小梅, 等. 镇江市主城区排水能力与内涝风险评估[J]. *中国给水排水*, 2015, 31(1): 100–103, 108.
- Hu Jian, Zhao Baokang, Liu Xiaomei, *et al.* Assessment of drainage capacity and waterlogging risk in central zone of Zhenjiang City [J]. *China Water & Wastewater*, 2015, 31(1): 100–103, 108 (in Chinese).
- [5] 王祚, 卢璇, 杨子琪, 等. 城市排水系统内涝风险评估方法[J]. *科技创新与应用*, 2018(2): 35–37.
- Wang Zuo, Lu Xuan, Yang Ziqi, *et al.* Methods for risk assessment of waterlogging of storm drainage systems [J]. *Technology Innovation and Application*, 2018(2): 35–37 (in Chinese).
- [6] 尹占娥, 许世远, 殷杰, 等. 基于小尺度的城市暴雨内涝灾害情景模拟与风险评估[J]. *地理学报*, 2010, 65(5): 553–562.
- Yin Zhan'e, Xu Shiyuan, Yin Jie, *et al.* Small-scale based scenario modeling and disaster risk assessment of urban rainstorm waterlogging [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(5): 553–562 (in Chinese).
- [7] 金志森. 基于层次分析法对城市内涝风险评估与区划方法研究——以泉州东海组团为例[J]. *城市住宅*, 2015(12): 97–101.
- Jin Zhisen. Research on risk-assessment and zoning of city waterlogging based on analytic hierarchy process—Case study on Quanzhou Donghai Group [J]. *City & House*, 2015(12): 97–101 (in Chinese).
- [8] 叶春明, 李永林. 城市供水系统风险评估模型研究[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2015.
- Ye Chunming, Li Yonglin. *Research on Risk Assessment Model of Urban Water Supply System* [M]. Shanghai: Fudan University Press, 2015 (in Chinese).
- [9] 邓雪, 李家铭, 曾浩健, 等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. *数学的实践与认识*, 2012, 42(7): 93–100.
- Deng Xue, Li Jiaming, Zeng Haojian, *et al.* Research on computation methods of AHP weight vector and its applications [J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2012, 42(7): 93–100 (in Chinese).
- [10] 常建娥, 蒋太立. 层次分析法确定权重的研究[J]. *武汉理工大学学报: 信息与管理工程版*, 2007, 29(1): 153–156.
- Chang Jian'e, Jiang Taili. Research on the weight of coefficient through analytic hierarchy process [J]. *Journal of Wuhan University of Technology: Information & Management Engineering*, 2007, 29(1): 153–156 (in Chinese).



作者简介: 王俊佳(1988–), 男, 广东清远人, 硕士, 工程师, 研究方向为市政基础设施规划与设计、海绵城市规划等。

E-mail: 3132168032@qq.com

收稿日期: 2019–12–21