

# 基于积水特征和暴露脆弱性的城市内涝风险评估

王成坤<sup>1</sup>, 黄纪萍<sup>1</sup>, 曾 胜<sup>1</sup>, 叶淦升<sup>2</sup>, 林春生<sup>2</sup>

(1. 中国城市规划设计研究院 深圳分院, 广东 深圳 518000; 2. 东莞市水务局, 广东 东莞 523009)

**摘 要:** 提出了一种基于 GIS 和 MIKE FLOOD 计算平台, 将反映积水深度和积水时间的城市内涝积水特征数据和反映城市人口密度分布等城市内涝暴露脆弱性数据进行耦合计算, 实现对城市内涝风险进行综合评估的模型。该模型采用层次分析法确定每个因子的权重, 将 GIS 模糊评价技术和空间制图技术相结合, 实现了城市内涝风险分布的清晰和直观表达, 该研究结果对于高效的的城市内涝管理政策和应急预案的制定可起到科学的支撑作用。

**关键词:** 城市内涝; 风险评估; 积水; 暴露脆弱性

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)05-0125-06

## Urban Flooding Risk Assessment Based on Coupling of Waterlogging Characteristics and Exposed Vulnerability

WANG Cheng-kun<sup>1</sup>, HUANG Ji-ping<sup>1</sup>, ZENG Sheng<sup>1</sup>, YE Gan-sheng<sup>2</sup>,  
LIN Chun-sheng<sup>2</sup>

(1. Shenzhen Branch, China Academy of Urban Planning & Design, Shenzhen 518000, China; 2. Dongguan Water Affairs Bureau, Dongguan 523009, China)

**Abstract:** An urban flooding risk comprehensive assessment model was proposed based on GIS and MIKE FLOOD computing platform, in which the urban waterlogging characteristic data reflecting the depth & duration and the urban waterlogging exposure vulnerability data such as urban population density distribution were coupled to calculate. In this model, the weight of each factor was determined by the analytic hierarchy process, and the clear and intuitive expression of urban waterlogging risk distribution was realized by a combination of GIS fuzzy evaluation technology and spatial mapping technology. The results can be scientifically used to support the formulation of efficient urban waterlogging management policies and emergency plans.

**Key words:** urban flooding; risk assessment; waterlogging; exposed vulnerability

由于全球气候变化和排水防涝基础设施建设相对滞后,城市内涝综合防治已经成为我国大多数地区海绵城市建设所面临的首要问题。风险评估可直观反映内涝风险的空间分布,其结果对于排水设计重现期的确定、排涝通道和设施的设置、内涝防治应急预案的制定等具有重要的参考价值,是指导城市

防涝规划、减少内涝灾害损失的有效途径。当前,城市内涝风险评估方法主要包括历史灾情统计法、指标体系法和情景模拟法。其中,历史灾情统计法和指标体系法均可直接反映城市建设特征、人口经济分布等对内涝灾害的响应程度,但由于缺少内涝积水直观结果的支撑,其评估结果一般为区域性风险,

无法有效反映城市内部灾害风险分布的空间差异性<sup>[1]</sup>。情景模拟法可模拟不同降雨情景下城市局部区域的产汇流全过程,是一种空间可视化的内涝风险评估方法,可直观反映城市内涝积水分布的空间差异性,但由于缺乏对积水区域经济、人口等信息的描述,因而也无法有效反映城市内涝风险情况<sup>[2-3]</sup>。鉴于此,笔者提出了一种将城市人口分布等暴露脆弱性和内涝积水特征进行空间耦合,从而实现对城市内涝风险进行综合评估的方法。该方法采用 MIKE FLOOD 计算平台研究内涝积水的空间分布特征,借助 GIS 空间分析和模糊计算功能,实现城市内涝积水和暴露脆弱性的空间耦合。

### 1 研究区概况

东莞中心城区位于珠江口东岸、东江下游,总面积为 234.6 km<sup>2</sup>,中心城区内河水系以东引运河为界,分为运河支流内河水系和万江河网水系。运河支流内河涌以南北走向的高地丘陵为分水岭,分为运河城区支流和黄沙河支流两部分。从地形高程看,东莞中心城区整体呈现南高北低的态势,东引运河以西的万江区属珠江三角洲围区,地势平坦低洼,大部分场地高程在 3.5 m 左右(见图 1),低于东江 50 年一遇设计洪水位。东引运河和黄沙河沿线场地高程较低,属现状内涝高发区域。

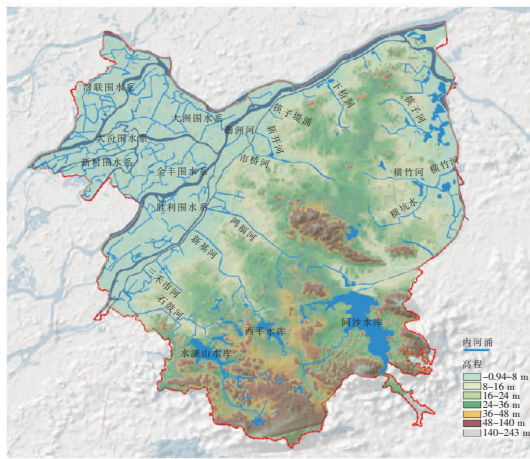


图 1 东莞中心城区地形高程和水系分布

Fig. 1 Distribution of elevation and hydrographic net in central urban area of Dongguan

东莞中心城区建设用地面积约为 152.4 km<sup>2</sup>,人口密度较大。水体、绿地(含耕地、草地、园地、林地)、道路、屋顶(含商住和工业屋面)和地面铺装占比分别为 6.4%、28.7%、40.1%、11.4% 和 13.4%。

## 2 城市内涝风险综合评估模型构建

### 2.1 评估模型概况

#### 2.1.1 模型框架

城市内涝综合风险评估模型包括两个子模型,即城市内涝积水灾害模型和城市积水暴露脆弱性模型(如图 2 所示)。本研究基于 MIKE FLOOD 计算平台构建城市内涝积水模型,得到设计情景下城市内涝积水范围、深度、时间等信息,然后采用 GIS 模糊评价工具,得到基于积水深度和积水时间的城市内涝风险分级结果。城市积水暴露脆弱性模型构建包括脆弱性因子识别和脆弱性因子数据的空间栅格化两部分,采用 GIS 模糊评价工具,对脆弱性因子数据进行分级,得到基于暴露脆弱性的城市内涝风险评估结果。最后将上述两个模型进行耦合,得到城市内涝风险综合评估结果,各因子权重采用层次分析法确定。

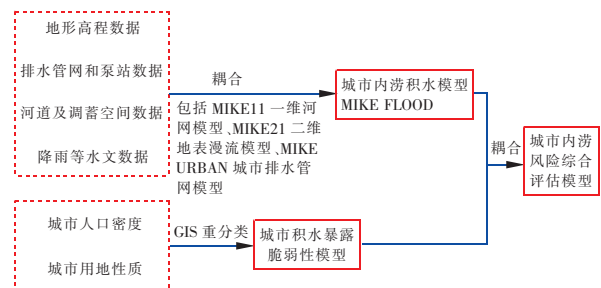


图 2 城市内涝风险综合评估模型框架

Fig. 2 Comprehensive assessment model framework for urban flooding risk

#### 2.1.2 模型基础数据来源

模型基础数据来源如表 1 所示。

表 1 模型基础数据来源及说明

Tab. 1 Data sources used in the risk assessment model

项 目	来源	说明
地形高程数据	东莞市国土局	矢量数据,精度为 1 : 500
排水管网和泵站数据	东莞市 2014 年市政管网普查数据	矢量数据
河道及调蓄空间数据	实测数据	矢量数据
降雨等水文数据	东莞国家气象站	东莞国家气象站 1980 年—2014 年的自记雨量记录,并新编暴雨强度公式
人口密度、用地性质等	东莞市规划局	《东莞市城市总体规划(2016 年—2030 年)》公布的相关数据

模型所采用的地形高程、排水设施、气象数据等资料来自东莞市相关专业管理部门,河道规格等数据为实际测量所得,数据精度满足建模要求。

### 2.1.3 模型概化与边界条件

根据河流水系与地形特征,将东莞中心城区划分为17个排涝分区,对每个排涝分区构建基于MIKE FLOOD计算平台的水力模型。根据1:500地形高程数据,采用GIS计算平台概化为数字高程图(DEM),雨水管网、河道、泵站概化为MIKE 11模型一维拓扑结构,雨水管网为圆形断面、河道为梯形断面形式。

模型降雨条件采用东莞中心城区50年一遇设计暴雨,雨型采用Keifer & Chu雨型(芝加哥雨型)。东引运河-寒溪河和东江三角洲水系是东莞中心城区内部涝水排除的外部承接水系,其设计水位作为模型外部边界条件,其中,受东引运河影响的排涝区采用同频率遭遇水位,受东江三角洲水系影响的排涝区采用设计频率暴雨遭遇外部水系5年一遇设计洪(潮)水位。

模型采用的产汇流主要参数如下:道路、屋面、地面铺装、绿地的不透水率分别取90%、90%、80%、15%~20%,地表汇流时间取4~30 min,雨水管(混凝土)、暗渠、天然河道的曼宁系数分别取0.013、0.018~0.025、0.02~0.03。

### 2.1.4 模型校核

本研究采用实测暴雨积水数据对模型进行校核验证。根据东莞国家气象站相关记录,2015年5月20日的24 h总降雨量约为125 mm,最大2 h降雨超过96 mm,与模型采用的设计降雨数据5年一遇的降雨量基本相当。考虑到暴雨分布的不均匀性,选择距离东莞国家气象站最近的易涝点(科技路、黄金路、宏一路)积水情况(积水深度、时间和范围)对模型进行验证,以便更好地校核所构建模型的模拟精度。

## 2.2 城市内涝积水模型

### 2.2.1 基于积水深度和时间的内涝灾害等级划定

根据《城镇内涝防治技术规范》(GB 51222—2017)、浙江省《城镇防涝规划标准》(DB 33/1109—2015)等相关设计规范和文献研究的规定或建议<sup>[4-5]</sup>,将设计暴雨工况下得到的内涝积水深度进行分级。积水深度<0.15 m时,积水不会淹没道路路缘石,基本不影响行人和机动车通行,不会造成建

筑物进水,即认为没有内涝风险;当积水深度为0.15~0.3 m时,影响行人交通,并使车行交通缓慢,但一般不会造成人员伤亡和财产损失,即认为是低内涝风险;当积水深度为0.3~0.5 m时,可以显著影响行人交通,大部分机动车无法通行,并可造成一定的财产损失,即认为是较高内涝风险;当积水深度>0.5 m时,会对人们的日常生活造成严重影响,且有可能造成人员伤亡和较大的财产损失,即认为是高内涝风险。

积水时间是反映城市内涝积水风险程度的另外一个重要因子,目前,针对积水时间对城市运行造成的影响研究不多,根据《城市内涝防治规划标准(征求意见稿)》的建议,当积水深度<0.15 m、积水时间<30 min时,内涝等级为轻微积水;当积水深度<0.3 m、积水时间为30~60 min时,内涝等级为轻微内涝;当积水深度>0.4 m、积水时间>60 min时,内涝等级为严重内涝。上海市有关市政道路积水的标准是:道路积水深度>0.15 m或者道路中心积水时间>1 h。

尽管《城市内涝防治规划标准(征求意见稿)》给出了同时考虑积水深度和积水时间的内涝等级划分标准,但该划分方法并未形成闭合的等级划分结果,比如当积水深度<0.3 m但积水时间>60 min的情形应如何划定内涝等级。根据实际内涝防治经验,积水越深的区域,其积水时间也往往越长,上述内涝等级划分方式有其合理之处。但为不失一般性,本研究提出分别对积水深度和积水时间进行独立内涝等级划分,并对各内涝程度进行相应的量化赋值,然后采用GIS叠加分析方法,可实现完全闭合的内涝风险等级划分结果,实现对内涝风险的定量评价。

城市内涝等级划分标准如下:当积水深度分别为<0.3、0.3~0.5、0.5~0.8、>0.8 m时,内涝程度分别为轻微内涝、较严重内涝、严重内涝、非常严重内涝,分别赋值为1、2、3、4;积水时间分别为<10、10~30、30~60、>60 min时,内涝程度分别为轻微内涝、较严重内涝、严重内涝、非常严重内涝,分别赋值为1、2、3、4。

### 2.2.2 内涝积水深度和积水时间

采用所构建的水力模型对东莞中心城区内涝积水深度和积水时间进行模拟,并参照2.2.1节进行内涝灾害等级划定,结果见图3。



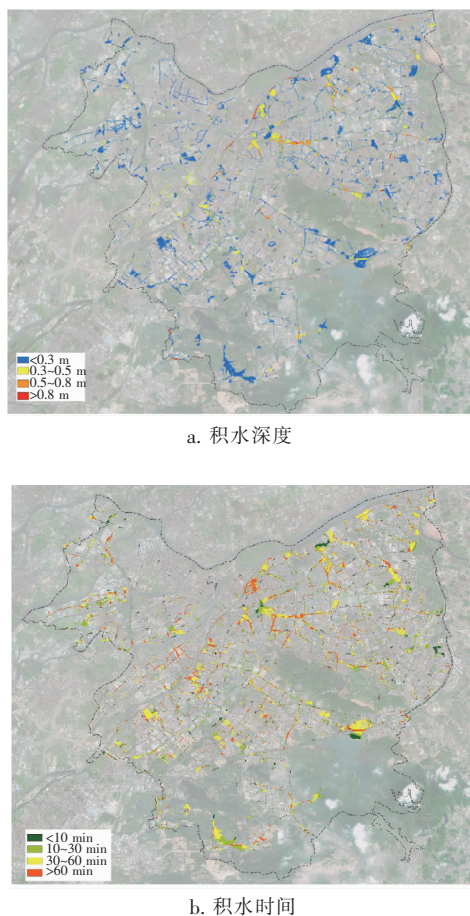


图3 东莞中心城区内涝积水深度和时间的模拟结果  
Fig.3 Simulation results of waterlogging depth and time in central urban area of Dongguan

## 2.3 城市积水暴露脆弱性模型

### 2.3.1 暴露脆弱性因子识别

从内涝积水发生后的城市活动暴露角度分析,道路积水、建筑底层进水等均会对城市居民生活造成极大的不便,严重时会造成生命财产损失。但是,不同类型用地对内涝积水的脆弱敏感程度不同,例如,公共服务设施、商业中心等人们活动频繁地区对内涝积水较为敏感,而绿地、农田等由于人类活动较少而对内涝积水不敏感,据此,本研究将东莞中心城区的用地类型和人口密度分布作为内涝暴露脆弱性因子。

### 2.3.2 暴露脆弱性因子空间分级和栅格化

在确定了暴露脆弱性因子后,如何明确评价因子的最小分析单元和数量是后续进行风险评估的前提<sup>[6]</sup>。在小尺度的内涝风险评价中,一般将建筑小区或者单体建筑作为评估单元<sup>[7-8]</sup>,本研究的对象是东莞市中心城区尺度,采用城市街坊地块作为风

险评估的最小分析单元。从城市空间规划角度看,城市街坊地块与城市用地类型和开发密度即人口密度具有一定的对应关系,因此将街坊地块作为风险评估的最小分析单元,可直接反映用地类型和人口密度的空间属性。从城市内涝风险管理角度看,将城市街坊地块作为评估的最小分析单元的意义主要体现在:一方面,街坊地块可作为控制性详细规划管控要素比如场地标高控制管理实施的单元;另一方面,在城市内涝风险预警管理层面具有实际操作意义,即城市内涝风险管理是以区域为单元而不是单体建筑。在确定了暴露因子的最小评估单元后,将每个评估单元所对应的用地类型和人口密度进行定量分级,采用GIS进行矢量化的栅格处理。

用地类型方面,城市绿地和广场作为城市休闲娱乐的开敞空间,一般不是城市财富集聚区,内涝发生时,这些区域通常被作为临时蓄滞涝水的场所,可认为其对内涝基本没有暴露脆弱性;工业用地和仓储物流用地的城市财富集聚度较低,且一般作为园区存在,人们活动具有一定的组织性,对于城市内涝具有一定的抵抗力,可认为其对内涝具有低暴露脆弱性;居住用地和商业服务业设施用地作为城市居民活动最为频繁的场所,内涝发生在这类用地时会显著影响人们的生活,可认为其对内涝具有较高脆弱性;公共管理与公共服务用地、道路与交通设施用地(含下沉式立交等)、公用设施用地作为城市运行的基础性生命线工程,一旦遭遇严重的内涝,其会对整个城市的运行造成极大影响,甚至局部瘫痪,可认为其对内涝具有高脆弱性。为了利于模型定量评价脆弱程度,对不同脆弱程度进行赋值,即基本无脆弱性、低脆弱性、较高脆弱性、高脆弱性分别赋值为1、2、3、4。

人口密度分布方面,根据第6次人口普查结果,东莞市人口密度约为3 300人/km<sup>2</sup>,其中,中心城区四辖区的东城人口密度约为4 900人/km<sup>2</sup>,莞城人口密度约为12 000人/km<sup>2</sup>。为方便进行数据耦合计算,将不同人口密度所对应的内涝暴露脆弱程度进行分类,并对不同脆弱程度进行赋值:基本无脆弱性对应的人口密度<3 000人/km<sup>2</sup>,赋值为1;低脆弱性对应的人口密度为3 000~5 000人/km<sup>2</sup>,赋值为2;较高脆弱性对应的人口密度为5 000~8 000人/km<sup>2</sup>,赋值为3;高脆弱性对应的人口密度>8 000人/km<sup>2</sup>,赋值为4。

## 2.4 模型耦合

在分别建立了城市内涝积水灾害模型和城市积水暴露脆弱性模型后,采用以下计算公式对两类模型进行耦合,以综合反映城市内涝风险:

$$R = \omega_1 \times (\omega_{11} \times h + \omega_{12} \times t) + \omega_2 \times (\omega_{21} \times j + \omega_{22} \times p) \quad (1)$$

式中: $\omega_1$  为内涝灾害等级权重; $\omega_2$  为内涝暴露脆弱性权重; $\omega_{11}$  为积水深度权重; $\omega_{12}$  为积水时间权重; $\omega_{21}$  为用地类型权重; $\omega_{22}$  为人口密度权重; $h$  为积水深度; $t$  为积水时间; $j$  为用地类型; $p$  为人口密度。

采用层次分析法确定不同评价因子的权重<sup>[9]</sup>。对影响城市内涝风险的各个因子的重要性程度进行两两比较,根据比较结果构造判断矩阵,对矩阵特征值进行求解,即可以得到各评价因子的权重,如表2所示。

表2 不同评价因子权重

Tab. 2 Weight of different evaluation factors

一级因子	权重	二级因子	权重
$\omega_1$	0.5	$\omega_{11}$	0.75
		$\omega_{12}$	0.25
$\omega_2$	0.5	$\omega_{21}$	0.35
		$\omega_{22}$	0.65

## 3 东莞中心城区内涝风险综合评估与区划

### 3.1 内涝风险综合评估结果

在各因子权重确定后,基于GIS空间计算平台,利用上述耦合模型公式,计算东莞中心城区不同区域的城市内涝综合风险值 $R$ , $R$ 值越大,说明城市内涝风险越高。东莞中心城区内涝综合风险空间分布如图4所示。

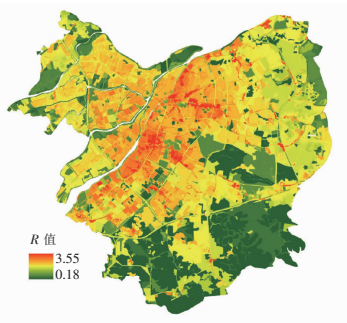


图4 东莞中心城区内涝风险综合评价

Fig. 4 Comprehensive assessment of urban flooding risk in central urban area of Dongguan

### 3.2 内涝风险区划

根据模型计算结果,为便于城市内涝风险管理,

按照 $R$ 值 $<2.5$ 为内涝低风险区域、 $R$ 值在 $2.5 \sim 3.0$ 之间为内涝中风险区域、 $R$ 值 $>3.0$ 为内涝高风险区域的分级标准,对东莞中心城区内涝综合风险进行划分,结果如图5所示。

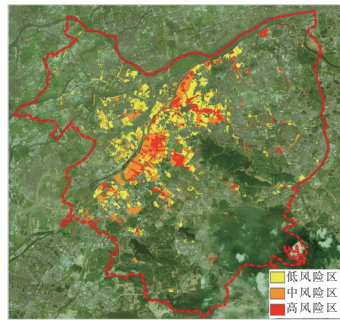


图5 东莞中心城区内涝风险区划

Fig. 5 Regional division of urban flooding risk in central urban area of Dongguan

根据区划结果,东莞中心城区内涝低风险区、中风险区和高风险区面积分别为 $14.5$ 、 $8.6$ 、 $5.7 \text{ km}^2$ 。万江区内涝高风险区主要分布在大洲围西城路东侧、金丰围泰新路商业街与金鳌路交叉口、万江路与金鳌路交叉口、万江路与永泰西路交叉口等;莞城区内涝高风险区主要分布在东纵路沿线、运河东一路沿线、学院路、新风路、市桥路、东正路等;南城区内涝高风险区主要分布在运河东二路与莞太路沿线、富民商业步行街沿线、黄金路、宏图路沿线、西平二路与东莞大道交叉口、鸿福东路与东莞大道交叉口等;东城区内涝高风险区主要分布在八一路与新街路交叉口、横塘路与宝塘路交叉口、莞福路与振兴路交叉口、东宝路与莞龙路交叉口、莞龙路北侧涌尾路、长恩路、狮长路沿线等。

## 4 结论

基于GIS和MIKE FLOOD计算平台,将反映积水深度、积水时间的城市内涝积水特征数据和反映城市人口密度分布等城市内涝暴露脆弱性数据进行耦合计算,从而实现了城市内涝风险进行综合评估。该方法将GIS模糊评价技术和空间制图技术相结合,实现了城市内涝风险分布的清晰和直观表达,研究结果对于高效的城市内涝管理政策和应急预案的制定可起到科学的支撑作用。

基于空间数据和空间模糊叠加计算的城市内涝风险综合评估方法丰富了城市内涝风险评估理论和方法的内容体系。应当看到,考虑到计算的方便和

数据的可获得性,在反映城市内涝暴露脆弱性方面,该方法仅采用了城市用地类型数据和人口密度分布特征数据,其评估结果可视为对城市内涝风险分布的一种总体评价,进一步的深化研究可可能反映城市财富分布的详细数据与内涝积水模型相耦合,以更加详细地反映城市内涝风险的分布。

### 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[J]. 水利规划与设计,2015(6):40-43.  
Dai Jingjing, Liu Zengxian, Lu Shenjun. Research of urban waterlogging disaster risk assessment based on mathematical model [J]. Water Resources Planning and Design, 2015(6): 40-43 (in Chinese).
- [3] 苏伯尼,黄弘,张楠. 基于情景模拟的城市内涝动态风险评估方法[J]. 清华大学学报:自然科学版,2015,55(6):684-690.  
Su Boni, Huang Hong, Zhang Nan. Dynamic urban waterlogging risk assessment method based on scenario simulations [J]. Journal of Tsinghua University: Science & Technology, 2015, 55(6): 684-690 (in Chinese).
- [4] 王慧斌,荣宏伟,王竞茵. 水力模型在城市内涝灾害风险评估中的应用[J]. 中国给水排水,2015,31(19):133-136.  
Wang Huibin, Rong Hongwei, Wang Jingyin. Application of hydraulic model to risk assessment of urban waterlogging [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(19): 133-136 (in Chinese).
- [5] 高维英,李明,李菁. 西安城市内涝分布特征及其与降雨量的关系[J]. 陕西气象,2014(2):17-20.  
Gao Weiying, Li Ming, Li Jing. Waterlogging distribution of Xi'an City and its relationship with rainfall [J]. Journal of Shaanxi Meteorology, 2014(2): 17-20 (in Chinese).
- [6] Li W F, Chen Q W, Mao J Q. Study on flood risk modeling of Beijing Olympic Village [J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(3): 321-328.
- [7] 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 water-logging [J]. Acta Geographica Sinica, 2010, 65(5): 553-562 (in Chinese).
- [8] 殷杰,尹占娥,王军,等. 基于GIS的城市社区暴雨内涝灾害风险评估[J]. 地理与地理信息科学,2009,25(6):92-95.  
Yin Jie, Yin Zhan'e, Wang Jun, et al. GIS-based disaster risk assessment of the urban community rainstorm waterlogging [J]. Geography and Geo-Information Science, 2009, 25(6): 92-95 (in Chinese).
- [9] 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:王成坤(1981-),男,山东泰安人,博士,高级工程师,研究方向为城市内涝防治规划与设计、海绵城市建设等。

E-mail: 455649889@qq.com

收稿日期:2018-08-03