

多情景视角的上海中心城区地铁 暴雨内涝暴露性分析

权瑞松

(华东政法大学科学研究院 上海 201620)

摘要:随着城市化水平的不断提高,包括上海在内的诸多特大城市地下空间被大量开发使用。在极端天气频发的背景下,城市地下空间设施的安全设防问题至关重要。以典型的地下空间设施——上海中心城区地铁为例,从多情景视角出发,分析评价了上海中心城区地铁暴露性整体状况。研究结果显示:上海中心城区地铁在暴雨内涝灾害中的暴露性程度整体水平不高;娄山关路3号口和上海西站1号口内涝暴露性水平较高,有18个地铁出口处于中等暴露水平,20个地铁出口在暴雨内涝灾害中的暴露性程度相对较小;总体而言,2号线和11号线暴露性最大,8号线和10号线暴露性处于中等水平,1、4、7、9号线暴露性最小。研究结果可为地方政府改善内涝风险管理提供参考依据。

关键词:地铁;情景分析;暴露性;暴雨内涝;上海

中图分类号:X43 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-0690(2015)04-0471-05

当前,蓬勃发展的城市地下空间虽然缓解了城市空间紧缺的问题,但在极端降水事件频发的背景下,它们面临的暴雨内涝灾害形势异常严峻^[1],东京、上海以及纽约等地地铁均出现过因暴雨内涝而停运的事件^[2]。基于风险三角理论^[3],风险是由(致灾因子)危险性、(承灾体)暴露性和脆弱性三者相互作用形成、缺一不可;其中暴露性是指暴露于一定概率、强度致灾因子中的承灾体的数量与价值,是危险性与脆弱性之间联系(或作用)的纽带。一般来说,很难改变自然灾害的发生概率与强度,但通过减少暴露性和脆弱性来降低灾害风险却是可行的、有效的^[4]。日益严峻的城市地下空间设施灾害形势已引起学术界的重视,但当前国内相关研究多聚焦于人为灾害,忽视了对城市地下空间设施的自然灾害研究。近年来,基于多情景视角的灾害分析方法已成为洪涝灾害研究的热点^[5-7]。本文在前期研究基础上^[8],以上海中心城区地铁为例,对地铁系统暴雨内涝灾害暴露性进行探究,尝试建立城市地下空间内涝灾害暴露性分析框架,以丰富城市地下空间灾害研究理论与

实证案例,为城市地下空间设施灾害风险管理提供参考。

1 研究方法

1.1 数据来源及预处理

本研究所需数据包括:①华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室提供的2006年上海市航空遥感影像;②上海市排水公司提供的雨水排水泵站分布矢量图,基于泰森多边形原理^[9],利用ArcGIS生成研究区排水泵站服务范围图;③基于上海暴雨强度公式^[10],设定了50 a一遇(90 mm/h)、100 a一遇(101 mm/h)、500 a一遇(130 mm/h)和1000 a一遇(144 mm/h)4种情景,另外,按照国家标准^[11],上海地铁排水泵站设防能力为90 mm/h,因此本文以降水为90 mm/h情景下研究区地铁出口内涝情况来判断情景模拟方法的可靠性;④2005年上海市测绘局实测地面高程点数据库,利用ArcGIS生成研究区DEM;⑤通过实地调研获取的研究区地铁100座车站344个出口的经纬度、台阶高度、附近道路台阶高度、地铁站点泵站排水能

收稿日期:2014-11-14;修订日期:2015-01-13

基金项目:国家自然科学基金项目(40730526,41201550,41401600)、教育部人文社科项目(12YJCZH257)资助。

作者简介:权瑞松(1984-),男,山东菏泽人,博士,助理研究员,主要研究方向为城市灾害风险评估与社会公共安全。E-mail:quanruisong@ecupl.edu.cn

力以及防汛挡板高度等数据。

1.2 多情景视角的暴露性分析方法

从多情景模拟的视角出发,充分考虑地铁等城市地下空间特殊性与复杂性,基于城市内涝模型^[8],引入内涝影响频率概念模型^[12],构建了基于多情景视角城市地铁暴雨内涝灾害暴露性分析框架(图1)。

1.2.1 简化城市暴雨内涝模型

简化城市暴雨内涝模型^[8]包括3部分,具体如下:

1) 城市地形模型。对地表高程进行建筑影响修正以生成与现实相近的城市地表高程。公式如下:

$$R_{ij} = H_{ij} + A \times B_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

式中, A 为常数,因考虑到城市内涝积水一般不会超过 10 m,取 $A=10$; H_{ij} 为原地形栅格单元高程值(m); B_{ij} 为城市建筑二值栅格单元值(m),若栅格表征的是建筑,则 $B_{ij}=1$,反之,则 $B_{ij}=0$; R_{ij} 为修正后的栅格单元高程值(m)。

2) 城市降雨径流模型。采用成熟的经验水文模型——SCS模型作为城市降雨径流模型。SCS基本产流公式为:

$$Q = \begin{cases} (P - 0.2S)^2 / (P + 0.8S) & P \geq 0.2S \\ 0 & P < 0.2S \end{cases} \quad (2)$$

式中, Q 为径流深度(mm); P 为降雨量(mm); S 为最大可能滞留量(mm),其计算公式为:

$$S = 25400 / C_{CN} - 254 \quad (3)$$

式中, C_{CN} 是反映降雨前流域特征的一个综合参数。

3) 地形影响修正模型。在修正城市地形基础上,考虑排水因素以计算贴近现实的地面积水深度。公式如下:

$$Q_{remain} = Q - Q_{pipe} \times t + Q_{add} \quad (4)$$

式中, Q_{remain} 为积水深度(mm); Q 为径流深度(mm); Q_{pipe} 为排水量(mm/h); t 为降雨历时(h),这里 $t=1$; Q_{add} 为地形影响修正量(mm),其计算公式为:

$$Q_{add} = \begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^n Q_i \times f_i}{\sum_{j=1}^m d_j} & \mu = 1 \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m) \\ 0 & \mu = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中, μ 代表用地类型,若为建筑,则 $\mu=1$,否则, $\mu=0$; f 为建筑基地面积(m^2), d 为道路广场面积(m^2)。

1.2.2 暴雨内涝影响频率概念模型

由于城市地下空间的特殊性与复杂性,往往很难精确模拟计算地下空间的积水深度以精确分析地下空间的暴露性程度。因此本文引入暴雨内涝影响频率概念模型^[12](图2)以快速判断研究区地铁口暴露性程度。暴雨内涝影响频率概念模型认为:假定3个情景,① 如果某承灾体在3个情景中均被淹,那么其属于高暴露性;② 如果某承灾体在2个情景中被淹,那么其属于中等暴露性;③ 如果某承灾体仅在1个情景中被淹,那么其暴露性程度较低。

1.2.3 暴露性指数

为了深入分析研究区各地铁线路暴露性的整体状况,笔者构建了地铁暴雨内涝灾害暴露性指数 E_s ,其计算公式如下:

$$E_s = \sum_{j=1}^m B_i(u_j) \times W_i \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

式中, E_s 为暴露性指数; $B_i(u_j)$ 为 j 号线中暴雨内涝暴露性程度为 i 级的地铁出口数与处于同等暴露性级别的地铁出口总数的比值,这里 $m=3, n=8$; W_i 为暴雨内涝暴露性等级为 i 的系数,低、中、高3个暴露性等级的系数分别是 1, 2, 3。在计算 $B_i(u_j)$ 时

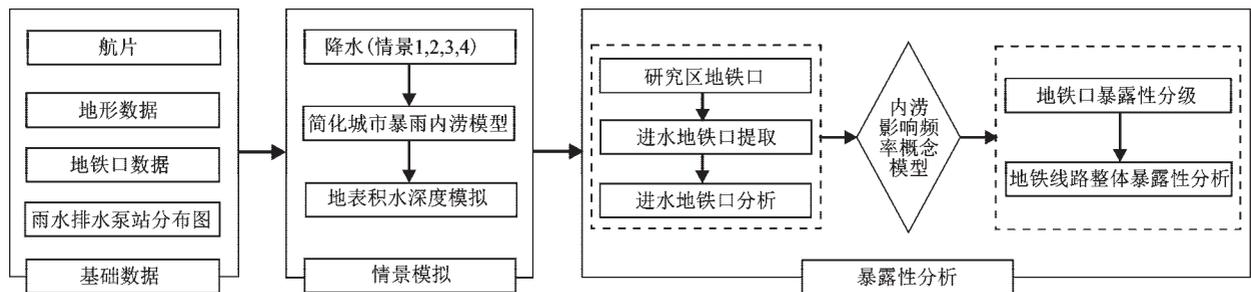
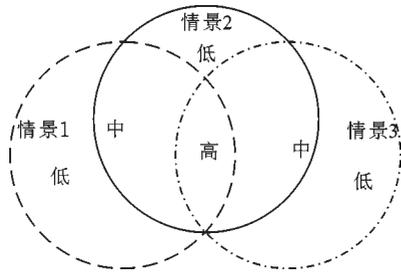


图1 基于多情景的地铁暴雨内涝暴露性分析框架

Fig.1 Framework of exposure analysis of rainstorm waterlogging on subway based on multiple scenarios

图2 暴雨内涝影响频率概念图^[12]Fig.2 Conceptual map of rainstorm waterlogging affected frequency^[12]

引入下式:

$$B_i(u_j) = \frac{C_i(u_j)}{\sum_{j=1}^n C_i(u_j)} \quad (7)$$

式中, $C_i(u_j)$ 为 j 号线内暴露性为 i 级的地铁出口。

2 结果与分析

2.1 情境模拟

将4种情景输入城市暴雨内涝模型,分别提取不同情景下进水地铁口信息并将结果输出(图3)。

结果显示,不同情境下暴露于暴雨内涝中的地铁出口数量差异显著,受暴雨内涝影响的地铁口数量随降水强度的增大而增加(图3),具体表现为:① 当降水强度为90 mm/h时,研究区地铁口不受地面积水影响,由于上海市地铁出口的排水泵站暴雨设防标准均为50 a一遇(90 mm/h),上述结果表明本文所采用的情景模拟方法是较为可靠的;② 当降水强度增至101 mm/h时,仅2号线的娄山关路3号口和11号线的上海西站1号口暴露在内涝灾害中;③ 当降水为130 mm/h时,受暴雨内涝灾害的影响地铁增至20个,覆盖了研究区全

部地铁线路;④ 当降水为144 mm/h时,受到暴雨内涝灾害影响的地铁出口数增至40个。

此外,在不同的降水强度下,研究区各地铁线路受暴雨内涝灾害影响的地铁出口数量差异显著;地铁1、7、9和11号线受暴雨影响的地铁出口数量均先增加后保持不变,而地铁2、4、8和10号线受暴雨影响的地铁出口数量均呈增加趋势(图4)。

2.2 暴露性分析

基于多情景模拟结果,依据内涝灾害影响频率概念模型内涵,对研究区受涝灾影响的地铁口的暴露性程度进行分级。研究区地铁口暴露性程度较低,仅有11.6%的地铁口暴露于内涝灾害,其中高暴露性地铁口仅2个,中暴露性地铁口18个,低暴露性地铁口20个(表1)。

根据公式(6)、(7),计算了上海中心城区地铁内涝暴露性指数,结果显示(表2),上海中心城区各条地铁线路在暴雨内涝灾害中的暴露性程度有显著差异性。根据暴露性指数 E_s 值,可以将研究区地铁线路分为以下3类:(1)地铁2、11号线为最易暴露于暴雨内涝灾害中的地铁线路;(2)地铁8、10号线为暴露性程度为中等水平;(3)地铁1、4、7、9号线暴露性程度最小。

3 结论与讨论

本文从多情景视角出发,基于前期研究成果,聚焦上海市中心城区地铁系统开展了实证研究,提出了城市地下空间设施暴雨内涝灾害暴露性分析的方法。结果显示:上海中心城区地铁暴雨内涝灾害暴露性程度整体水平不高,可能暴露于暴雨内涝灾害中的地铁出口数为40个,仅占总数的11.6%。娄山关路3号口和上海西站1号口内涝暴露性水平较高,徐家汇4号口等18个地铁口处

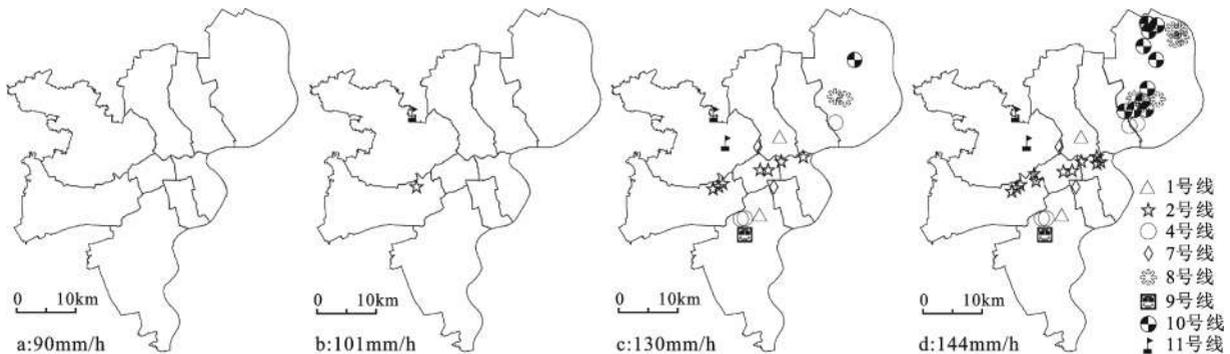


图3 不同情境下进水地铁口分布

Fig.3 Distribution of inundated subway exits in different scenarios

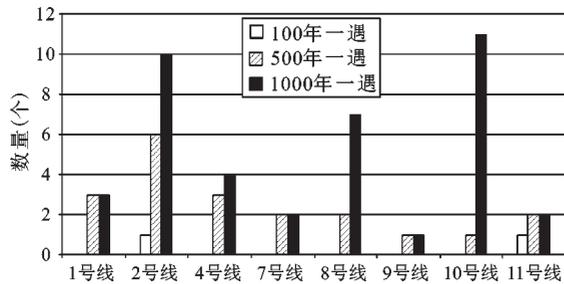


图4 不同情景下进水地铁口数量

Fig.4 The number of inundated subway exits in different scenarios

于中等暴露水平,中山公园5号口等20个地铁出口在暴雨内涝灾害中的暴露性程度相对较小。总体

而言,地铁2、11号线暴露性最大,地铁8、10号线暴露性处于中等水平,地铁1、4、7、9号线暴露性最小。

由于城市地下空间的特殊性与复杂性,很难通过实验室模拟和依靠社会调查获取精确结果,暴露性分析是量化的城市地下空间设施风险评估的难点。本文只是在研究思路与方法上的探索与尝试,还存在诸多不确定性因素,在未来的工作中,应开展城市地下设施管理者与科研人员共同参与、实验室模拟与社会调查相结合、高精度、量化的暴露性研究,从而为城市地下空间设施暴雨内涝灾害风险管理提供坚实的理论基础和强有力的科学工具。

表1 进水地铁出口暴雨内涝灾害暴露性

Table 1 Exposure of inundated subway exits

地铁线路	暴露性		
	低	中	高
1号线	-	徐家汇4号口,人民广场2号口,上海西站5号口	-
2号线	中山公园5、8号口,人民广场7、19号口	娄山关路1、2号口,静安寺1、5号口,南京西路4号口	娄山关路3号口
4号线	临平路3号口	宜山路4、5号口,临平路4号口	-
7号线	-	长寿路7号口,常熟路7号口	-
8号线	市光路1、2、3、4号口,江浦路1号口	鞍山新村1号口,四平路1号口	-
9号线	-	宜山路3号口	-
10号线	新江湾城1、2、6、7号口,殷高东路2号口,同济大学5号口,四平路1、2、3号口,邮电新村2号口	江湾体育场1号口	-
11号线	-	枫桥路1号口	上海西站1号口

注:“-”表示不存在。

表2 上海市中心城区地铁暴露性指数

Table 2 ES value of subway line in Shanghai central urban area

参数	1号线	2号线	4号线	7号线	8号线	9号线	10号线	11号线
$B(u_i)-L$	0	20	5	0	25	0	50	0
$B(u_i)-M$	16.7	27.8	16.7	11.1	11.1	5.6	5.6	5.6
$B(u_i)-H$	0	50	0	0	0	0	0	50
E_s	0.3	2.3	0.4	0.2	0.5	0.1	0.6	1.6

注:当降水为90 mm/h时,各地铁线路暴雨内涝暴露性指数均为0。

参考文献:

[1] 杨木壮,张建峰,郑先昌.城市地下空间开发利用的潜在不利影响及其对策[J].现代城市研究,2009,(8):24~28.
 [2] 权瑞松,刘敏,张丽佳.上海市地下轨道交通暴雨内涝脆弱性评价[J].人民长江,2011,42(15):13~17.
 [3] Shi Y, Shi C, Xu S Y, et al. Exposure assessment of rainstorm wa-

terlogging on old-style residences in Shanghai based on scenario simulation[J]. Natural Hazards, 2010, 53(2):259-272.
 [4] 权瑞松,刘敏,张丽佳,等.基于情景模拟的上海中心城区建筑暴雨内涝暴露性评价[J].地理科学,2011,31(2):148~152.
 [5] 温家洪,黄蕙,陈珂,等.基于社区的台风灾害概率风险评估——以上海市杨浦区富禄里居委会地区为例[J].地理科学,2012,32(3):348~355.

- [6] 胡蓓蓓,周俊,王军,等.基于情景模拟的天津市滨海新区2020年暴雨内涝风险评估[J].地理科学,2012,32(7):846~852.
- [7] 殷杰,尹占娥,于大鹏,等.基于情景的上海台风风暴潮淹没模拟研究[J].地理科学,2013,33(1):110~115.
- [8] Quan R,Liu M,Lu M,et al.Waterlogging Risk assessment based on land use/cover change:a case study in Pudong New Area, Shanghai[J].Environmental Earth Science,2010,61(6):1113-1121.
- [9] 汤国安,杨昕.ArcGIS地理信息系统空间分析实验教程[M].北京:科学出版社,2006.
- [10] 尹占娥.城市自然灾害风险评估与实证研究[D].上海:华东师范大学,2009.
- [11] 中华人民共和国建设部.GB50157-2003 地铁设计规范[S].北京:中国标准出版社,2003.
- [12] Islam M M,Sado K.Flood hazard assessment in Bangladesh using NOAA AVHRR data with geographical information system [J].Hydrological Process,2000,14(3):605-620.

Exposure Analysis of Rainstorm Waterlogging on Subway in Central Urban Area of Shanghai Based on Multiple Scenario Perspective

QUAN Rui-song

(Institute of Science, East China University of Political Science and Law, Shanghai 201620, China)

Abstract: Due to rapid urbanization, most cities in the world like Shanghai have a large number of underground facilities including public transport and commercial facilities such as subway, parks, shopping malls, etc. With the continuous development of underground spaces, the threat of rainstorm waterlogging is increasing. One of the significant components of impacts from rainstorm waterlogging is possibility of damage to underground facilities. Under the background of dramatic increase of extreme weather events, the safety issues of underground spaces against rainstorm waterlogging have become an important aspect of urban safety. The present study focused on subway in Shanghai central urban area, and analyzed the exposure of rainstorm waterlogging on subway based on multiple scenario perspective. Considering a series of impact factors of rainstorm waterlogging in urban area, the present study established a framework for exposure analysis of rainstorm waterlogging on subway through the combination of hydrological modeling and concept model for rainstorm waterlogging affected frequency. The results show that the exposure of subway in Shanghai central urban area was not very high. The total number of subway station exits which might suffer rainstorm waterlogging was only 40. Meanwhile, the number of inundated subway exits presents a remarkable increasing trend as increasing rainstorm intensity. Shanghai West Railway Station exit 1 and Loushanguan Road Station exit 3 have high exposure rank. The number of subway station exits with medium exposure was 18. There were 20 subway station exits, which have low exposure rank. The exposure index (ES) value indicates that there are obvious differences of exposure degree between different subway lines. Overall, Subway line 2 and line 11 belong to high exposure subway line; line 8 and line 10 have medium exposure rank; and line 1, line 4, line 7 and line 9 show low waterlogging exposure. These results will provide reference for the local government to improve waterlogging risk management.

Key words: subway; scenario analysis; exposure; waterlogging; Shanghai