

# 基于情景模拟的上海中心城区建筑 暴雨内涝脆弱性分析

权瑞松

(华东政法大学科学研究院, 上海 201620)

**摘要:**暴雨内涝灾害是上海市最主要的自然灾害类型之一。在全球气候变化与海平面上升背景下,随着城市人口、财富的不断积聚,沿海城市的脆弱性增强,面临的暴雨内涝灾害风险形势更加严峻。基于情景分析视角,结合前人研究成果,分析、评价上海中心城区建筑暴雨内涝灾害脆弱性。结果显示:仓库与旧式住宅是暴雨内涝灾害中脆弱性程度最大的建筑类型。整体上,杨浦、普陀、徐汇区建筑脆弱性程度最大,长宁、虹口、闸北建筑脆弱性程度处于中等水平,卢湾、静安与黄浦区建筑脆弱性程度相对较低。

**关键词:**暴雨内涝;脆弱性曲线;情景模拟;上海

**中图分类号:**X43      **文献标识码:**A      **文章编号:**1000-0690(2014)11-1399-05

沿海地区 2/3 的自然灾害是由风暴、台风、强降雨等极端天气诱发的,而受气候变化与海平面上升的叠加作用影响,未来极端天气事件将更加频繁<sup>[1]</sup>。在全球气候变化与城市化过程的耦合背景下,日益突出的多致灾因子群发、链发现象对沿海城市安全构成严重威胁<sup>[2]</sup>。当前,全球 23% 的人口生活在离海岸线 100 km 的沿海地区,其中约 1 000 万人口暴露在洪涝灾害中,而受气候变化与城市化过程的叠加作用影响,预计到 2030 年将会有 50% 的沿海人口暴露于洪涝灾害之中<sup>[3,4]</sup>。因此,针对沿海城市特征,开展高效的城市灾害风险评估与防范已成为当前政府和学术界关注的热点和科学前沿<sup>[5]</sup>。近年来,脆弱性研究作为灾害风险评估的核心与关键问题备受重视<sup>[6]</sup>。与其他领域相比,灾害脆弱性研究在中国尚处于起步阶段,理论方法尚未成熟,更缺乏典型案例研究<sup>[7,8]</sup>。本文基于情景分析的视角,选取饱受暴雨内涝灾害影响的上海中心城区开展实证研究,丰富、充实了国内脆弱性研究的理论方法与案例,可为上海市自然灾害风险防范决策提供依据,具有较高的科研价值与现实意义。

## 1 研究方案

### 1.1 数据来源

本文所需数据包括: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,基于 GIS 软件解译影像并将建筑分为仓库、公共建筑、工商业建筑、别墅式住宅、新式住宅及旧式住宅;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<sup>[9]</sup>,利用 ArcGIS 生成研究区排水泵站的服务范围图;③ 2005 年上海市测绘局实测地面高程点数据库,利用 ArcGIS 中 3D Analyst 模块,生成研究区 DEM;④ 基于上海市暴雨强度公式<sup>[10]</sup>,设定 81 mm/h(重现期  $T=30$ )、90 mm/h(重现期  $T=50$ )、101 mm/h(重现期  $T=100$ )、130 mm/h(重现期  $T=500$ )和 144 mm/h(重现期  $T=1\ 000$ )5 种情景。

### 1.2 简化城市暴雨内涝模型

本研究采用笔者构建的简化城市暴雨内涝模型<sup>[11,12]</sup>模拟不同情境下的内涝状况,该模型集城市地形模型、城市降雨径流模型、地形影响修正模型和 GIS 空间分析模块为一体。

**收稿日期:**2013-09-06; **修订日期:**2013-11-02

**基金项目:**国家自然科学基金项目(编号:40730526,41201550)、教育部人文社会科学研究项目(12YJCZH257)资助。

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

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

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

式中, $i$ 为行数; $j$ 为列数; $A$ 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),若栅格所表示的用地类型为建筑,则 $B_{ij}=1$ ,反之,则 $B_{ij}=0$ ;为精确获取建筑物占地面积以提高城市地形模型的精度,笔者构建了建筑密度修正参数 $P_{ij}$ 并参照民用建筑设计通则(GB 50352-2005)<sup>[13]</sup>,将仓库、公共建筑、工商业建筑、别墅式住宅、新式住宅及旧式住宅的 $P_{ij}$ 分别确定为0.6、0.5、0.5、0.2、0.33和0.3;  $R_{ij}$ 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, $P$ 为一次降雨的总量(mm);  $Q$ 为径流深度(mm);  $S$ 为流域当时的最大可能滞留量(mm)。模型制作者引入CN(Curve Number, 值为 $C_{CN}$ )以确定 $S$ ,并规定:

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

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。地形影响修正模型是在修正城市地形后,考虑排水的基础上,最终计算出贴近现实的地面积水深度。公式如下:

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

式中, $Q_{\text{remain}}$ 为积水深度(mm);  $Q$ 为径流深度(mm);  $Q_{\text{pipe}}$ 为排水量(mm/h);  $t$ 为降雨历时(h),这里 $t=1$ ;  $Q_{\text{add}}$ 为地形影响修正量(mm)。在计算 $Q_{\text{add}}$ 时引入下式:

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

式中, $\mu$ 代表土地利用类型,若为建筑,则 $\mu=1$ ,若为其它土地利用类型,则 $\mu=0$ ;  $f$ 为建筑占地面积( $\text{m}^2$ ),  $d$ 为道路广场面积( $\text{m}^2$ )。

### 1.3 脆弱性建模

构建脆弱性曲线(或称灾损曲线)是量化分析

脆弱性的关键<sup>[14]</sup>。洪涝灾害对城市建筑造成的损失包括建筑结构损失和室内财产损失两部分<sup>[15]</sup>。当前国内脆弱性研究聚焦于承灾体室内财产,却忽视了建筑结构脆弱性(即建筑自身脆弱性)因此,为全面分析城市建筑内涝灾害脆弱性状况,本文从建筑结构脆弱性和室内财产脆弱性两方面开展研究。

1) 建筑结构脆弱性建模。有研究表明,水灾损失主要与水淹没深度有关,受洪水淹没历时、水流冲击等因素的影响相对较小<sup>[16]</sup>,因此建立承灾体水深-灾损率曲线至关重要。由于研究区历史涝灾数据的缺失,考虑到上海的城市发展水平已达到或接近西方发达国家水平,可以认为其建筑脆弱性程度较为接近,因此,基于研究区建筑财产调研结果,选取较为成熟的澳大利亚 ANUFLOOD 建筑结构水深-损失率曲线<sup>[15]</sup>并对其进行本地化拟合修正,建立了适用于本地区的建筑结构脆弱性曲线,表达式如下:

$$y = 0.006x^3 - 0.032x^2 + 0.169x + 0.041 \quad (6)$$

式中, $y$ 为灾损率, $x$ 为水深(m)。

2) 室内财产脆弱性建模。有研究表明,不同类型的住宅室内财产在遭受水灾侵袭时,其损失率趋于一致,即脆弱性曲线基本一致<sup>[17,18]</sup>。本文基于2008年8月25日静安区涝灾室内财产灾损数据及2008年9月20日浦东临园等社区涝灾室内财产灾损数据,结合研究区住宅室内财产调研结果,以石勇构建的上海住宅水灾脆弱性曲线<sup>[18]</sup>为基础进行拟合修正,建立了适用于本研究区的住宅室内财产涝灾脆弱性函数,公式如下:

$$y = -0.026x^3 \times 10^{-9} - 0.049x^2 \times 10^{-6} + 0.742x \times 10^{-3} - 0.115 \quad (7)$$

式中, $y$ 为灾损率, $x$ 为水深(m)。

当前,国内建筑水灾脆弱性曲线较少且大都聚焦于住宅类建筑,考虑到上海的城市发展水平已达到或接近西方发达国家水平,可认为其非住宅类建筑室内财产脆弱性程度较为接近,因此基于研究区建筑室内财产调研结果,选取较为成熟 ANUFLOOD 非住宅建筑室内财产水深-灾损率曲线<sup>[15]</sup>并对其进行本地化拟合修正,建立了研究区工商业建筑、仓储及公共建筑3类建筑室内财产涝灾脆弱性函数,公式如下:

$$y = -0.152x^3 \times 10^{-9} - 0.82x^2 \times 10^{-6} + 1.479x \times 10^{-3} - 0.009 \quad (8)$$

式中, $y$ 为灾损率, $x$ 为水深(m)。

## 2 结果与分析

在GIS环境下运行简化城市暴雨内涝模型,分别计算5种情景下建筑室内积水深度<sup>[11]</sup>,然后利用GIS栅格运算工具运行承灾体脆弱性曲线函数(6~8),最终得到不同情景条件下的建筑结构灾损率与室内财产灾损率结果。

### 2.1 建筑结构脆弱性分析

建筑结构灾损率计算结果(图1)主要显示:  
① 不同类型的建筑结构灾损率差异显著,由于设防标准较低,仓库是建筑结构最易受损的建筑类型,其次是旧式住宅。② 不同情境下的建筑结构灾损率差异显著,随着降水强度的增大,建筑结构灾损程度加重,结构受损的建筑类型与数量增多;30年一遇暴雨内涝灾害造成上海中心城区11.67%的建筑出现结构受损,其中建筑结构损失率最大值为6.84%,结构受损的建筑类型仅包括仓库与旧式住宅,而1000年一遇的暴雨内涝灾害造成研究区93.06%的建筑出现结构受损,其中建筑结构损失率最大值增至14.3%,结构受损的建筑覆盖了全部建筑类型。③ 研究区建筑结构灾损程度整体不高但区域差异显著,杨浦建筑结构受损最为严重,黄浦区建筑结构受损相对较小。

### 2.2 室内财产脆弱性分析

室内财产经济损失率计算结果(图2)显示:  
① 不同类型的建筑室内财产灾损率差异显著,仓库室内财产最易受到暴雨内涝灾害的威胁。② 室

内财产经济损失率随着降水强度的增大而增大。  
③ 室内财产受损的建筑类型与数量均随着降水强度的增大而增多;在30年一遇、50年一遇的情景下,仅有仓库室内财产受损,其余5种建筑室内财产均不会受损,室内财产受损的建筑仅占中心城区建筑总数的0.84%;而在1000年一遇的情景下,各类建筑的室内财产均会受损,室内财产受损的建筑占研究区建筑总数的91.68%。④ 不同情境下室内财产灾损程度区域差异显著,在30年一遇、50年一遇和100年一遇情境下,除静安与闸北区外其余各区均出现室内财产受损现象,当降水强度增至500年一遇后,研究区的9个行政区均有建筑出现室内财产受损。⑤ 区域室内财产灾损程度空间差异显著,杨浦区室内财产受损程度最严重,黄浦区室内财产灾损程度较小。⑥ 同等降水条件下,结构受损的建筑数量高于室内财产受损的建筑数量,但室内财产灾损率一般高于建筑结构灾损率。

### 2.3 脆弱性评价

为深入分析研究区建筑脆弱性的整体状况,将上述建筑灾损率模拟结果分为7级:Ⅰ级( $0 < y \leq 10\%$ )、Ⅱ级( $10\% < y \leq 20\%$ )、Ⅲ级( $20\% < y \leq 30\%$ )、Ⅳ级( $30\% < y \leq 40\%$ )、Ⅴ级( $40\% < y \leq 50\%$ )、Ⅵ级( $50\% < y \leq 60\%$ )、Ⅶ级( $y > 60\%$ ),并建立脆弱性指数( $W_v$ )以直观反映研究区建筑暴雨内涝灾害脆弱性程度,计算公式如下:

$$W_v = \sum_{i=1}^m \lambda_i(u_j) \times \beta_i (i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n) \quad (9)$$

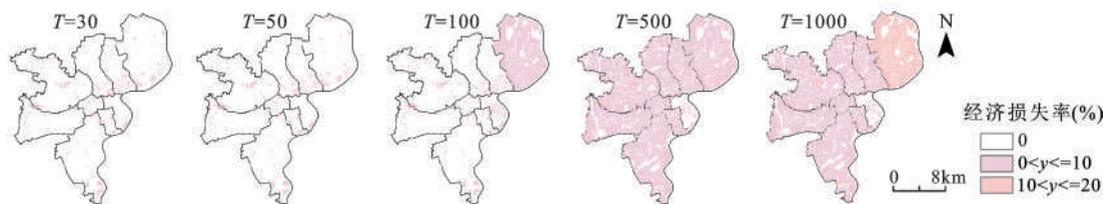


图1 建筑结构经济损失率

Fig. 1 Loss rates of building structure

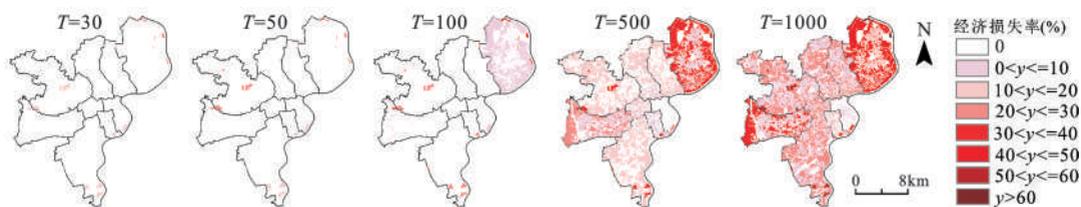


图2 室内财产经济损失率

Fig. 2 Loss rates of the indoor properties

表1 中心城区建筑脆弱性指数

Table 1 Vulnerability index of building in Shanghai central urban area

暴雨强度(mm/h)		$W_i$								
		卢湾	徐汇	普陀	杨浦	虹口	长宁	闸北	静安	黄浦
81	建筑结构	0.05	0.19	0.20	0.19	0.12	0.09	0.09	0.04	0.02
	室内财产	0.37	0.83	1.04	3.00	0.01	0.12	0	0	0.63
90	建筑结构	0.05	0.19	0.20	0.19	0.12	0.09	0.09	0.04	0.02
	室内财产	0.35	1.65	1.89	0.87	0.01	0.23	0	0	1.00
101	建筑结构	0.01	0.05	0.06	0.75	0.03	0.03	0.03	0.01	0.04
	室内财产	0.25	1.21	1.53	4.13	0.01	0.87	0	0	2.00
130	建筑结构	0.03	0.58	0.69	1.27	0.09	0.20	0.11	0.03	0.01
	室内财产	0.15	2.87	3.41	9.58	0.29	4.15	0.37	0.11	0.07
144	建筑结构	0.04	0.35	0.37	1.63	0.17	0.23	0.14	0.04	0.02
	室内财产	0.33	3.82	4.46	13.19	0.64	4.43	0.76	0.22	0.13

式中,  $\lambda_i(u_j)$  为  $j$  区内处于脆弱性级别为  $i$  级的建筑占地面积与研究区处于同等脆弱性级别的建筑总占地面积的比值, 这里  $m=7, n=9$ ;  $\beta_i$  为脆弱性等级为  $i$  的权重, 脆弱性等级 I、II、III、IV、V、VI、VII 的权重分别为 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7。在计算  $\lambda_i(u_j)$  时, 引入下式:

$$\lambda_i(u_j) = \frac{\rho_i(u_j)}{\sum_{j=1}^n \rho_i(u_j)} \quad (10)$$

式中,  $\rho_i(u_j)$  为  $j$  区内脆弱性为  $i$  级的建筑占地面积。

基于脆弱性指数计算公式(9~10), 在 GIS 环境中分别计算研究区建筑结构脆弱性指数与室内财产脆弱性指数(表1)。总体看, 建筑脆弱性呈现出区域差异显著的特征, 根据脆弱性指数计算结果, 可将研究区各行政区分为以下3类: ① 建筑在暴雨内涝灾害中脆弱性较高的地区, 杨浦、普陀、徐汇; ② 建筑在暴雨内涝灾害中的脆弱性处于中等程度的地区, 长宁、虹口、闸北; ③ 建筑暴雨内涝灾害脆弱性程度较低的地区, 卢湾、静安与黄浦。

### 3 结论与讨论

1) 本文从情景分析的角度出发, 借鉴国内外相对成熟的承灾体脆弱性曲线, 基于前期研究成果, 从建筑结构与室内财产两方面对上海中心城区建筑的内涝脆弱性特征进行了实证研究, 结果显示: 上海市中心城区不同情景下的建筑脆弱性程度差异显著, 随着降水强度的增大, 结构与室

内财产受损的建筑数量及其灾损率逐渐增大; 仓库与旧式住宅是暴雨内涝灾害中最脆弱的建筑类型; 整体上, 杨浦、普陀、徐汇区建筑脆弱性程度最大, 长宁、虹口、闸北建筑脆弱性程度处于中等水平, 卢湾、静安与黄浦区建筑脆弱性程度相对较低。

2) 脆弱性研究是风险评估的关键, 很难通过实验室模拟或依靠社会调查获取准确结果。本文只是在研究思路与方法上的探索与尝试, 还存在诸多不确定因素, 在未来的工作中, 应开展城市管理者-科研人员-保险公司-公众等利益相关者共同参与、实验室模拟与社会调查相结合、高精度、量化的脆弱性研究, 从而为城市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。

### 参考文献:

- [1] Michel-Kerjan E, Kunreuther H. Redesigning flood insurance[J]. Science, 2011, 333(6041): 408-409.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Zeng N, Ding Y, Pan J, et al. Climate change—the Chinese challenge[J]. Science, 2008, 319(5864): 730-731.
- [5] 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.
- [6] 殷杰, 尹占娥, 于大鹏, 等. 风暴洪水主要承灾体脆弱性分析——黄浦江案例[J]. 地理科学, 2012, 32(9): 1155-1160.

- [7] 谭丽荣,陈珂,王军,等.近20年来沿海地区风暴潮灾害脆弱性评价[J].地理科学,2011,31(9):1111~1117.
- [8] Alexander D.Confronting catastrophe: new perspectives on natural disasters[M].Oxford:Oxford University Press,2006.
- [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:华东师范大学博士论文,2009.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 中华人民共和国建设部 GB 50352-2005.民用建筑设计通则[S].2005.
- [14] 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,2010,29(6):853~857.
- [15] Emergency management Australia. Disaster loss assessment guidelines[M].Sydney:Paragon Printer Australasia Pty Ltd,2002.
- [16] 石勇,许世远,石纯,等.沿海区域水灾脆弱性及风险初步分析[J].地理科学,2009,29(6):853~857.
- [17] Grigg N S,Heiweg O J.State-of-the-art of estimating flood damage in urban areas[J].Journal of the American Water Resources Association,1975,11(2):379-390.
- [18] 石勇.灾害情景下城市脆弱性评估研究——以上海市为例[D].上海:华东师范大学博士论文,2011.

## Vulnerability Analysis of Rainstorm Waterlogging on Buildings in Central Urban Area of Shanghai Based on Scenario Simulation

QUAN Rui-song

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

**Abstract:** Rainstorm waterlogging disaster, as one of the most devastating natural hazards in Shanghai, has badly affected residents' lives and operation of urban system. As the accumulation of population and wealth, in the background of global climate change and sea level rises, the vulnerability of coastal city show an increasing trend which may lead a very serious situation of rainstorm waterlogging disaster risk. From the point view of scenario analysis, the vulnerability of the indoor property and structure of the buildings to rainstorm waterlogging disasters in central urban area of Shanghai was analyzed and evaluated combined with the previous studies. The main conclusions were as follows: 1) The vulnerability of different building types presents significant difference. The warehousing and the old-style residence are the most vulnerable building types when exposure to waterlogging disasters. 2) The loss rate, number, and types of damaged buildings increase as the precipitation intensity increases. 3) The structure of buildings was more vulnerable than the properties in the buildings, but the loss rate of building structure was lower than that of the properties in the building in the same condition. 4) The number of building with damaged structure was higher than that of building with damages property under the same scenario. 5) The spatial difference of the vulnerability of buildings is obvious. Over all, the rainstorm waterlogging disaster has the most serious effects on the buildings in Yangpu, Putuo and Xuhui District; the buildings in Changning, Hongkou and Zhabei District have medium vulnerability rank; the buildings in Luwan, Jing'an and Huangpu District have low vulnerability rank.

**Key words:** rainstorm waterlogging; stage-damage curve; scenario simulation; Shanghai