

城市地下空间开发防灾效益量化评价研究*

王 洋^{1,2}

(1. 同济大学地下建筑工程系, 上海 200092; 2. 同济大学地下空间研究中心, 上海 200092)

摘 要: 鉴于目前对城市地下空间开发效益的认识尚不够明确, 很多研究只是停留在定性层面上, 操作性较差。城市地下空间开发效益分为直接效益和间接效益, 间接效益又包括社会效益、环境效益、防灾效益三部分。本文选择城市地下空间的防灾效益作为研究对象, 从地震、战争和气象灾害三个方面出发, 通过“有无对比法”和“地上地下对比法”, 提出了城市地下空间开发防灾效益的计算模型, 对于城市地下空间开发的决策及开发价值具有很好的参考意义。

关键词: 城市地下空间; 防灾效益; 定量模型

中图分类号: TU984.11⁺3 文献标识码: A 文章编号: 1673-0836(2012)增1-1560-07

Research on Quantitative Assessment of Disaster-Prevention Benefit for Urban Underground Space Development

Wang Yang^{1,2}

(1. Research Center for Underground Space, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Since the benefit from urban underground space development has not been known clearly enough, currently, many researches are at qualitative level with poor operability. The benefit from urban underground space development includes direct and indirect ones. The indirect benefit consists of three parts: social benefit, environmental benefit and disaster-prevention benefit. In this paper, the disaster prevention benefit of urban subsurface space is chosen as research object. From the aspects of earthquake, warfare and meteorology disasters, through the comparison of “ground facility with underground one” method, a model for calculating benefit of urban underground space is presented, which serves as a good reference for decision-making and development of urban underground space.

Keywords: urban underground space; disaster prevention benefit; quantitative model

1 引 言

中国是一个自然灾害多发的国家, 1990~2007年自然灾害损失占全国GDP总量基本均在1.0%以上(如图1), 尽管自然灾害损失占GDP的比例有所下降, 自然灾害损失整体上仍然呈上升趋势。

绝大多数灾害对于高度集中的城市人口和城市经济都具有很大的破坏力, 地下空间对于大部分

来自外部的灾害, 如战争、地震、飓风、雪灾等, 都有较强的抗御能力, 对于某些灾害, 例如核武器袭击, 能起到地面空间不可能起的防护作用^[1]。

城市地下空间开发经济效益可以分为直接经济效益和间接经济效益两部分, 间接经济效益又包括社会效益、环境效益和防灾效益(如图2)。地下空间作为城市防灾体系的一部分对一般的外部灾害(旱灾除外)均具有较高的抗御能力。本文选取

* 收稿日期: 2012-05-10(修改稿)

作者简介: 王洋(1985-), 男, 江苏人, 博士生, 主要从事城市地下空间规划方面的研究。

E-mail: marsion@163.com

地震、战争和气象灾害作为地下空间开发防灾效益的评价指标。后面对于城市地下空间防灾效益均是通过“地上地下对比法”来进行研究的,即假定这些地下功能或地下结构均位于地面上,则发生灾害的时候及灾后所造成的损失就表现为地下空间的防灾效益。

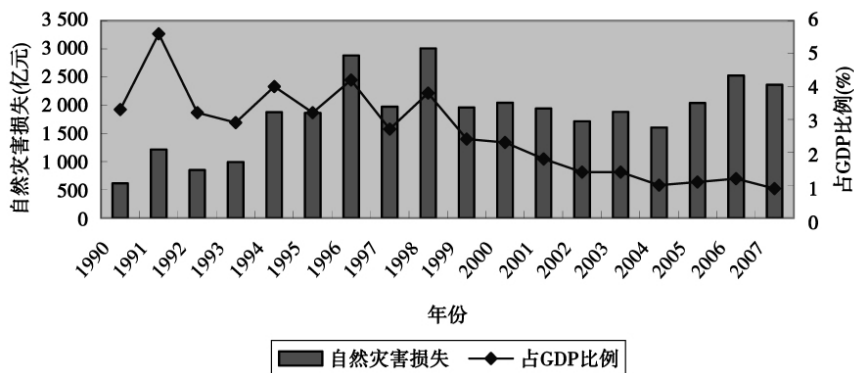


图1 中国1990~2007年历年自然灾害损失值及占GDP的比例
Fig.1 Losses from natural disaster and their proportions in GDP from 1990 to 2007 in China
注: 上图由国家统计年鉴及中国国家统计局公布相关数据整理而得

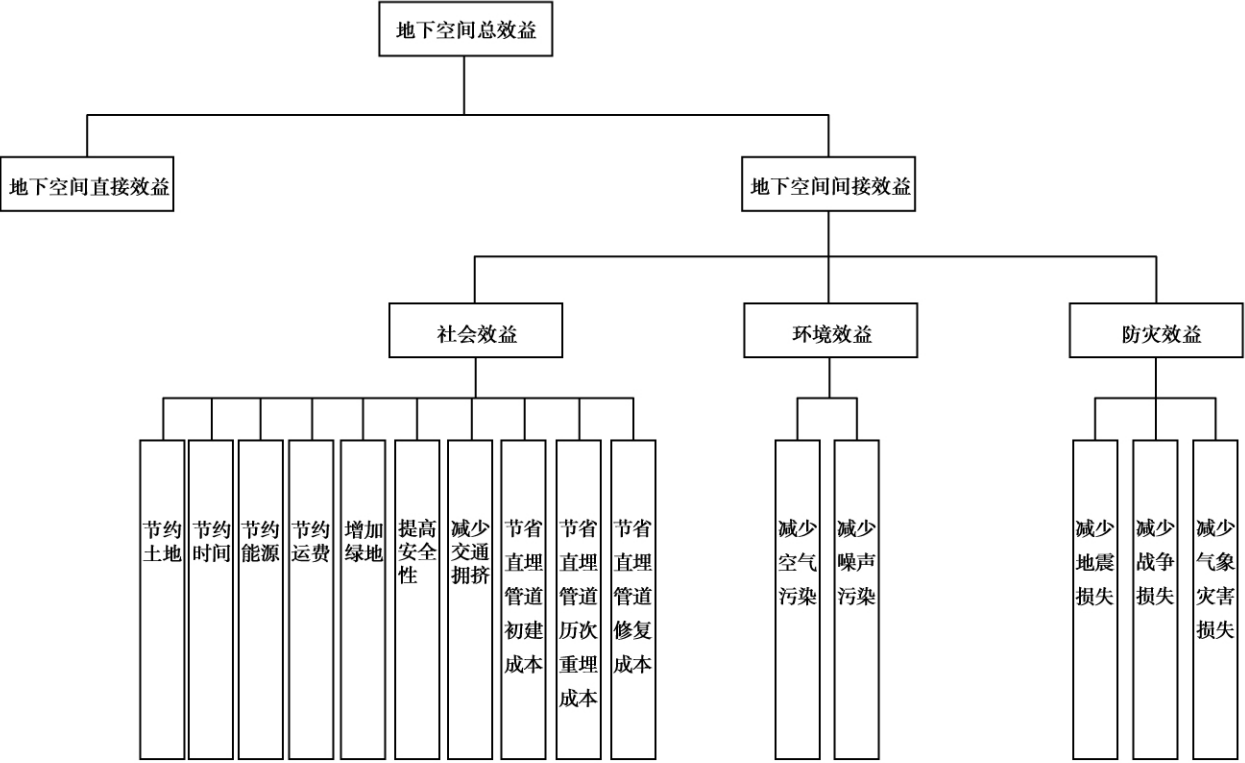


图2 城市地下空间开发效益图
Fig.2 Benefit from urban underground space development

2 减少地震损失效益

地下空间(不包括地下综合管廊)减少地震损失效益的模型采用“地上地下对比法”,假定这些地下结构全部置于地上,当发生地震时,这些结构的损失主要分为:直接经济损失、间接经济损失、震后救援费用及震后修复费用四部分。地下综合管

廊的效益采用“有无对比法”,假定综合管廊中的管线全部采用浅埋独立管道埋设,当发生地震时,这些管线的损失即为地下综合管廊的效益,表现为三部分:直接经济损失、间接经济损失及震后修复费用。人员的伤亡损失需慎重考虑,故不计入人员伤亡损失。从以往的多次地震灾后调查资料来看,地下结构(不包括地下管网)的震害损失是轻微

的,故忽略地下结构的震后修复费用,即假定地下结构的震后修复费用为 0。

2.1 地震直接经济损失

假定发生地震时,若地下结构全部置于地面,其直接经济损失主要表现为:房屋建筑及道路的直接经济损失和室内财产损失。假定地面房屋建筑由砌体结构和钢筋混凝土结构两种组成,道路按一般城市市政道路级别考虑,则房屋建筑及道路的直接经济损失为:

$$B_{dh} = \sum_{s=1}^2 \sum_{j=1}^5 T_s \cdot \lambda_s(j) \cdot \eta_s(j) \cdot B_s \quad (1)$$

室内财产损失的直接经济损失为:

$$B_{dw} = \sum_{s=1}^2 \sum_{j=1}^2 T_s \cdot \lambda_s(j) \cdot W_s(j) \quad (2)$$

式中: B_{dh} 为地面房屋建筑及道路直接经济损失值(元); B_{dw} 为室内财产损失值(元); T_s 为 S 类结构总面积(m^2); $\lambda_s(j)$ 为第 S 类结构 j 级破坏破坏比(%),可参照表 2~表 5 云南地区历次地震不同烈度区(评估区)房屋建筑的地震破坏比取值; $\eta_s(j)$ 为第 S 类结构 j 级破坏损失比(%),按表 6 取值; B_s 为第 S 类结构的重建单价(元/ m^2); $W_s(j)$ 为第 S 类结构 j 级破坏单位室内财产的损失比,其中 $W_s(j) = \frac{LL_s(j)}{T_s(j)}$, $LL_s(j)$ 为第 S 类结构 j 级破坏室内财产的损失。

表 1 房屋破坏等级^[8]
Table 1 Damage levels for building^[8]

破坏等级	状态描述
基本完好(含完好)	房屋承重构件完好,个别非承重构件轻微破坏,不加修理可继续使用。
轻微破坏	个体承重构件出现可见裂缝,非承重构件有明显裂缝,不需修理或稍加修理可继续使用。
中等破坏	多数承重构件出现轻微裂缝,部分有明显裂缝,个别非承重构件破坏严重,需要一般修理。
严重破坏	多数承重构件破坏严重,或局部倒塌,需要大修,个别房屋修复困难。
毁坏	多数承重构件严重破坏,结构濒于崩溃或已倒塌,已无修复可能。

表 2 云南地区Ⅵ度区内房屋建筑的破坏比统计(%)^[9]
Table 2 Statistics for damage ratio of buildings in Ⅵ-degree areas, Yunnan province (%)^[9]

破坏等级	结构类型			
	框架结构	砖混结构	砖木结构	土木结构
毁坏	0.00	0.00	0.02	0.01
严重破坏	0.00	0.17	0.41	0.65
中等破坏	1.32	3.36	4.88	6.95
轻微破坏	18.68	21.46	22.51	25.84
基本完好	80.04	74.96	72.17	66.56

表 3 云南地区Ⅶ度区内房屋建筑的破坏比统计(%)^[9]
Table 3 Statistics for damage ratio of buildings in Ⅶ-degree areas, Yunnan province (%)^[9]

破坏等级	结构类型			
	框架结构	砖混结构	砖木结构	土木结构
毁坏	0.00	0.16	0.08	0.30
严重破坏	1.58	5.23	3.22	5.97
中等破坏	7.65	14.13	21.33	19.71
轻微破坏	30.07	30.17	33.82	35.30
基本完好	60.70	50.30	41.54	38.71

表 4 云南地区Ⅷ度区内房屋建筑的破坏比统计(%)^[9]

Table 4 Statistics for damage ratio of buildings in Ⅷ-degree areas , Yunnan province (%)^[9]

破坏等级	结构类型			
	框架结构	砖混结构	砖木结构	土木结构
毁坏	0.00	0.85	1.21	4.17
严重破坏	1.88	11.76	17.89	19.92
中等破坏	9.73	38.35	36.50	37.84
轻微破坏	77.17	32.92	36.25	31.17
基本完好	11.21	19.45	13.92	7.02

表 5 云南地区Ⅸ度区内房屋建筑的破坏比统计(%)^[9]

Table 5 Statistics for damage ratio of buildings in Ⅸ-degree areas , Yunnan province (%)^[9]

破坏等级	结构类型			
	框架结构	砖混结构	砖木结构	土木结构
毁坏	0.00	11.00	13.00	15.00
严重破坏	12.00	38.10	40.00	44.15
中等破坏	33.00	14.50	28.00	26.30
轻微破坏	34.00	18.05	19.00	14.60
基本完好	21.00	18.30	0.00	0.00

表 6 非简易房屋破坏损失比(%)^[9]

Table 6 Loss proportion for non-simple building damage (%)^[9]

结构类别	毁坏	严重破坏	中等破坏	轻微破坏	基本完好
框架结构	81 ~ 100	46 ~ 80	16 ~ 45	6 ~ 15	0 ~ 5
砖混结构	81 ~ 100	46 ~ 80	16 ~ 45	6 ~ 15	0 ~ 5

参照《地震灾害直接损失初评估工作指南》及 GB/T 18208.4《地震现场工作 第 4 部分: 灾害直接损失评估》的直接经济损失评估方法,地下管线的震害直接经济损失在缺乏历史地震资料地区可以参照全国平均模型计算:

$$L_h = \sum S_h \cdot R_h \cdot D_h \cdot P_h \tag{3}$$

$$B_{dp} = \beta \cdot L_h \cdot \frac{\alpha}{1 - \alpha} \tag{4}$$

式中: B_{dp} 为地下管线的地震直接经济损失(元); L_h 为房屋破坏总损失(元); S_h 为该评估子区同类房屋总建筑面积(m^2); R_h 为该评估子区同类房屋某种破坏等级的破坏比(%); D_h 为该评估子区同类房屋某种破坏等级的损失比(%); P_h 为该评估子区同类房屋重置单价,可参考近期地震评估报告的重置单价(元/ m^2); α 为地下管线损失占房屋破坏损失经验比值,可参照表 7 取值(%); β 为地区修

正系数,表 33 给出的经验比值只是云南地区 1993—2003 年地震的统计值,其他地区需结合当地实际情况进行修正,对于发达地区可以酌情取大于 1.0,对于欠发达地区可取小于等于 1.0。

表 7 云南地区生命线工程损失占震害总损失的比值 α 统计表(1993—2003 年)^[9]

Table 7 Statistics of ratio of lifeline project loss to total earthquake loss in Yunnan area (1993—2003)^[9]

震级范围	生命线工程损失占总损失的比值 α (%)	
	算术平均值	范围值
5.0 ≤ M ≤ 5.4	3.5	0 ~ 18.3
5.5 ≤ M ≤ 5.9	8.9	1.0 ~ 31.1
6.0 ≤ M ≤ 6.4	8.0	1.4 ~ 18.8
6.5 ≤ M ≤ 6.9	4.8	3.5 ~ 11.0
7.0 ≤ M ≤ 7.4	7.3	7.3

根据公式(1)、(2)、(4)可以计算得出地下空间开发的减少地震直接经济损失的效益 B_{ed} ,即:

$$B_{ed} = \gamma \cdot (B_{dh} + B_{dw} + B_{dp}) \tag{5}$$

式中: B_{ed} 为地下空间开发的减少地震直接经济损失的效益(元); γ 为修正系数,考虑有些因素未考虑在内,根据情况取 1.0 ~ 1.3。

2.2 地震间接经济损失

表8给出了1976年~2000年的西部、中部、东部部分地区的地震灾害直接、间接经济损失统计

数据。按照经验数据,可近似取地震灾害间接损失/直接损失=1.7,对于经济发达地区可以取1.7~2.5,欠发达地区可以取0.8~1.7。这样,前面已经可以计算得出直接经济损失值,从而可以计算出间接经济损失数值 B_{ei} ,即:

$$B_{ei} = \gamma \cdot B_{ed} \tag{6}$$

式中: γ 为系数,一般地区取1.8,经济发达地区取1.0~2.0,欠发达地区取1.5~2.5。

表8 1976~2000年历次地震灾害直接、间接损失统计^[12]

Table 8 Statistics for direct and indirect losses of previous earthquakes from 1976 to 2000 ^[12]					
地震名称	年份	地名	直接损失/亿元	间接损失/亿元	间接损失/直接损失
唐山地震	1976	唐山市	9.24	20.83	2.25
唐山地震	1976	天津市	31.72	26.07	0.86
包头西地震	1996	包头市	22.73	18.80	0.83
包头西地震	1996	巴彦淖尔盟	2.15	2.36	1.09
包头西地震	1996	伊克昭盟	1.94	1.61	0.83
白玉-巴塘地震	1996	白玉县	0.18	0.16	0.89
普洱地震	1993	普洱县	0.69	0.19	0.27
宁蒗地震	1998	宁蒗县	0.50	1.29	0.26
澄江地震	1999	澄江县	0.66	0.62	0.95
姚安地震	2000	牟定	1.05	0.44	0.41
大同阳高地震	1999	大同县	0.59	1.06	1.80
大同阳高地震	1999	阳高县	0.60	2.06	3.41
阿勒泰地震	1996	布尔津县	0.95	0.22	0.23
皮山地震	1998	皮山县	0.54	1.28	2.36
平均值					1.74

2.3 震后救援费用

震后救援费用可以参照《地震灾害损失评估工作规定》第4.7条初步估计的方法:

$$B_{ep} = \varphi \cdot B_{ed} \tag{7}$$

式中: B_{ep} 为震后救援费用(元); φ 为震后救援费用占直接经济损失的比例(%) ,按表9取值。

表9 震后救援费用占直接经济损失的比例^[8]

Table 9 Percentage of post-earthquake rescue expenses to total direct economic loss ^[8]	
震级	占直接经济损失比例(%)
<6.0	1.5
6.0~7.0	3.5
>7.0	6.0

2.4 震后修复费用

震后修复费用主要考虑人工费、材料费、施工机械使用费、综合费及规费等。按照《危险房屋鉴定标准》(JGJ 125—99)的规定,房屋的危险性鉴定分为4个等级:a级(无危险点)、b级(有危险点)、c级(局部危险)、d级(整体危险)。参照2008年汶川地震《四川省房屋建筑抗震加固工程计价定额》(2008)的规定,可以得出4个等级震后修复费用的经验值,见表10。

表10 单位面积震后修复费用^[11]

Table 10 Post-earthquake restoration cost per unit area ^[11]	
等级	费用(元/m ²)
a级	200
b级	300~400
c级	400~500
d级	500~600

若不考虑通胀及人工费等波动,可以得出震后修复费用为:

$$B_{er} = \sum_{i=1}^4 P_i \cdot A_i \quad (8)$$

式中: B_{er} 为节省震后修复费用效益(元); P 为单位面积震后修复费用(元/ m^2),参照表 10; A 为各破坏等级房屋的面积(m^2)。

前面分别给出了地震直接经济效益、间接经济效益、震后救援费用和震后修复费用的计算模型,则可以得到地下空间减少地震损失效益 B_e 为该地区地震发生概率 P_e 与式(5)+(6)+(7)+(8)之积:

$$B_e = P_e \cdot (B_{ed} + B_{ei} + B_{ep} + B_{er}) \quad (9)$$

3 减少战争损失效益

由于地下空间天然的隐蔽特性,地下空间的开发具有很强的人防意义。战争的直接和间接经济损失是一种物质资源的消耗,表现为战争的物质成本。但是,战争最突出的特征在于流血。因此,战争损失应该包括生命的损失^[4]。

假定没有发生全面战争,地下空间减少战争损失效益(战备效益)包括两个部分:直接经济效益和间接经济效益。直接经济效益主要表现为战时减少的人员、设备及物资的损失;间接经济效益主要表现为减少企业或产业在战时及战后社会生产能力下降的损失。假定地下空间在战时主要用于人员掩蔽、物资及设备的储存;假定所开发的地下空间有 90% 可以在战争中作为人防空间,这些地下空间的防护效率假定为 90%,则可以得到有效防护空间的利用效率为 80%。可以得出地下空间减少战争直接经济效益损失效益计算模型为:

$$B_{wd} = \beta \cdot \sum_i \alpha_i \cdot P_i \cdot A \quad (10)$$

式中: β 为利用效率,一般可近似取 0.8;

α 为功能所占的比例(%); P 为单位面积上所掩蔽的人员生命、设备或物资的价值(元/ m^2); A 为地下空间的总面积(m^2)。

设备和物资的价值可以按照实际价值考虑。1997 年,世界银行采用根据工资比例折合生命价值推算出的中国人的生命价值,城市人口为 6 万美元,农村人口为 3.18 万美元^[19],考虑工资增长、人民币升值、通胀等因素,则目前城市人口生命价值

约为 65 万人民币,农村人口生命价值约为 35 万人民币。因战争发生与否以及发生的时间不确定,姑且取生命价值的 1.2 倍作为未来人员的生命价值,即城市人口为 78 万元,农村人口为 42 万元。

地下空间减少战争损失的间接经济效益作为战争间接经济损失的一部分很难进行准确量化,可以从以往的数据来进行衡量,表 11 为上个世纪所爆发的战争的经济损失统计数据。战争所造成的间接经济损失一般是直接经济损失的数倍,参照表 11 的统计数据,地下空间减少战争间接经济损失的效益为直接经济损失的 3~7 倍,即:

$$B_{wi} = \gamma \cdot B_{wd} \quad (11)$$

式中: B_{wi} 为地下空间减少战争间接经济损失值(元); γ 为系数,可取 3.0~7.0,若预测战争持续时间越久,经济越发达则系数值越大。

表 11 20 世纪几场重要战争造成的经济损失统计数据^[4,13,14]

Table 11 Statistical data for economic loss due to some wars in the 20th century^[4,13,14]

战争	受损国家	直接经济损失 (亿美元)	间接经济损失 (亿美元)	间接损失/ 直接损失
日本侵华战争	中国	1 000	5 000	5:1
科索沃战争	南联盟	40	260	6.5:1
海湾战争	伊拉克	2 000	>6 000	>3:1

从而,地下空间减少战争损失经济效益为战争直接经济损失和间接经济损失之和与战争发生概率 P_w 之积,即:

$$B_w = P_w \cdot (B_{wd} + B_{wi}) \quad (12)$$

4 减少气象灾害损失效益

气象灾害损失可以利用灾害评估理论,认为气象灾害导致的损失是由气象灾害的危险性、功能系统的脆弱性、损失比及功能系统的货币价值所决定的,即:

$$\text{气象灾害损失} = \text{气象灾害危险性} \times \text{易损性} \times \text{损失比} \times \text{系统价值} \quad (13)$$

上式中,气象灾害危险性是气象灾害发生的概率及等级的综合,是导致灾害损失的直接原因,可以通过地区历史数据分析得出;易损性指不同功能设施

遭受气象灾害及从灾害中恢复能力的特征;损失比指功能破坏的修复费用与重建费用之比;系统价值指地下空间功能系统及配套设施的总价值。

易损性属于灾害学的概念,易损性的确定除了与气象灾害本身的破坏力有关,还与人类及其聚落的社会、经济、文化、习俗、年龄、性别等诸多因素相关。因此,易损性的确定是一个较为复杂的问题,不同地区的灾害易损性是不同的。地下空间作为城市空间的一个子集,并不是在城市的每个角落都有存在,我们姑且认为地下空间开发所在的区域和该地区的易损性是相同的。在实际应用中可以根据当地气象部门的数据近似得出。

5 结 论

防灾效益是地下空间间接效益的一个重要组成部分,当前对于地下空间防灾效益的研究主要停留在定性分析的层面,可操作的定量研究所见不多。故量化分析地下空间的防灾效益对于认识地下空间开发效益是必要的。

选取了地震、战争和气象灾害进行地下空间防灾效益的量化,使得地下空间开发的效益更为明晰。由于地震、战争和气象灾害均为突发性事件,故在计算时需要考虑计算期内灾害发生的概率及强度,可以通过以往的资料及数据进行预测。该模型对于城市地下空间开发的决策及开发价值的评判具有很好的参考意义。

参考文献(References)

- [1] 童林旭. 地下建筑学[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1994.
- [2] 罗周全, 刘望平, 刘晓明, 等. 城市地下空间开发效益分析[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(1): 5-9.
- [3] 崔京浩. 灾害的严重性及土木工程在防灾减灾中的重要性[J]. 工程力学, 2006, 23(增2): 49-77.
- [4] 张允壮. 战争的经济成本与经济承受力研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007.
- [5] 许飞琼. 中国的灾害损失与保险业的发展[J]. 江西财经大学学报, 2008, (5): 35-42.
- [6] 谢家智. 我国自然灾害损失补偿机制研究[J]. 自然灾害学报, 2004, 13(4): 28-32.
- [7] 刘娟, 李永. 中国地震损失分布与巨灾债券定量研究[J]. 财贸研究, 2009, 20(6): 82-88.
- [8] 中国国家地震局. 地震灾害损失评估工作规定[S]. 1997.
- [9] 国家标准化管理委员会. 地震现场工作第4部分: 灾害直接损失评估[S]. 2005.
- [10] 重庆市土地房屋管理局. 危险房屋鉴定标准(JGJ 125-99) [S]. 2000.
- [11] 四川省建设工程造价管理总站. 四川省房屋建筑抗震加固工程计价定额[S]. 2011.
- [12] 钟江荣, 林均歧. 地震间接经济损失研究[J]. 自然灾害学报, 2003, 12(4): 88-92.
- [13] 新华网 <http://www.xinhuanet.com/>.
- [14] 人民网 <http://www.people.com.cn/>.
- [15] Wei Su, Xiaodong Zhang, Zhen Wang, et al. Analyzing disaster-forming environments and the spatial distribution of flood disasters and snow disasters that occurred in China from 1949 to 2000 [J]. Mathematical and Computer Modelling, 2011, 54.
- [16] J. Nouri, N. Mansouri, M. Abbaspour, A. R. et al. Designing a developed model for assessing the disaster induced vulnerability value in educational centers [J]. Safety Science, 2011, 49.
- [17] Mohamed Hamza, Roger Zetter. Structural adjustment, urban systems, and disaster vulnerability in developing countries [J]. Cities, 1998, 15(4), 291-299.
- [18] 王玉怀, 李祥仪. 煤矿事故中生命价值经济评价探讨[J]. 中国安全科学学报, 2004, 14(8): 28-30, 37.