

刘晓然, 王威. 城市潜在地震次生火灾风险属性区间识别理论[J]. 灾害学, 2017, 32(4): 43–50. [LIU Xiaoran and WANG We. Potential Risk Analysis of Urban Post-earthquake Fire Based on Attribute Interval Recognition Theory[J]. Journal of Catastrophology, 2017, 32(4): 43–50. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2017.04.008.]

# 城市潜在地震次生火灾风险属性区间识别理论<sup>\*</sup>

刘晓然<sup>1</sup>, 王 威<sup>2</sup>

(1. 北京建筑大学, 北京 102616; 2. 北京工业大学 抗震减灾研究所, 北京 100124)

**摘 要:** 针对城市地震潜在次生火灾风险分析影响因素的复杂性, 首先构建了基于属性区间识别理论的城市地震潜在次生火灾风险评价模型, 并采用综合权重法确定权重向量, 以最大程度地消除各种不确定性; 其次从风险的角度综合考虑地震潜在次生火灾系统中致灾因子和孕灾环境的危险性, 承灾体的易损性和暴露性, 及城市地震潜在次生火灾风险的抗灾因子, 构建了城市地震潜在次生火灾风险评价指标体系, 并制定了相应评价指标的等级标准; 最后, 应用属性识别理论对某城市地震潜在次生火灾系统中危险性、易损性、暴露性, 及抗灾能力进行了计算, 并应用证据理论对区域火灾风险性进行了验证分析。结果表明: 当城市发生Ⅵ、Ⅶ、Ⅷ度地震时, 中等风险以上的区域面积分别达到了 50.20%、61.00%、64.90%, 说明针对城市的风险级别较高的区域单元应重点防范并采取相应的措施以降低风险。文章证实了属性区间识别理论及证据理论在城市地震潜在次生火灾风险评估中的应用, 提高了风险评价结果的稳定性和可靠性, 为城市地震潜在次生火灾风险评估提供一种易操作且可行的方法。

**关键词:** 城市; 地震; 次生火灾; 属性区间识别; 证据理论; 最大熵原理; 风险分析

**中图分类号:** TU981; X43; P315 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2017)03-0043-08

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2017.03.008

我国地震活动频繁、破坏性大。破坏性地震发生后, 极易引发次生灾害。现代城市是区域政治、经济和文化中心, 燃气管道、压力管道、城市电网等各种管道错综复杂。这都将使人口集中、建筑物集中、生产经营集中、财富集中的现代化城市更容易在震后集中发生特大火灾和燃爆事故, 有时甚至超过地震直接损失。城市地震潜在次生火灾是地震次生灾害最重要的方面, 因此应当引起高度重视。为了有效地减轻地震次生火灾灾害, 减少火灾损失, 有必要进行地震次生火灾风险分析及风险性区划的基础性研究工作<sup>[1]</sup>。

目前, 国内外关于城市火灾风险的研究已经取得了一些成果<sup>[2-5]</sup>, 日本的“城市等级法”, 美国的“灭火分级制”等, 都是根据区域建筑物、环境密度等来确定区域风险等级, 进而设置消防设施。我国近年才展开了对城市火灾风险评估的研究, 主要方法有统计分析法、指数法、专家调查法、层次分析法等, 但以上这些理论与方法大多

是针对城市平时整体火灾风险或危险评估, 对地震次生火灾不是十分适用。向琴琴<sup>[6]</sup>、张志华<sup>[7]</sup>建立了城市小区地震次生火灾危险性评估模型, 但对于如何考虑地震破坏的影响没有具体可行的好办法。

城市地震火灾风险分析是对致灾因子和孕灾环境的危险性、承灾体的易损性和暴露性、城市抗灾防灾能力的分析。以往研究的主要特点是, 确定区域灾害风险评价的指标, 通过数学处理手段进行综合得到风险评价结果。然而, 如何解决灾害风险指标的不确定性及其间的相互影响仍值得进一步研究, 也是关系到风险评价结果准确性的一个重要问题。属性区间识别理论模型<sup>[8-9]</sup>是一种以最小代价原则、最大测度原则、置信度准则和评分准则为基础的综合评价方法, 同时最大熵原理可排除人为因素、风险因素等的干扰, 最大化反映评价对象的客观信息。目前以城市区域为研究对象, 以区域地震次生火灾风险评估为研究

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2017-02-14 修回日期: 2017-04-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51678017); 北京市教育委员会科技计划一般项目(KM201610005029); 北京市优秀人才培养资助青年骨干个人项目(00921917202); 北京建筑大学博士科研启动基金项目(00331616019)

第一作者简介: 刘晓然(1988-), 女, 山东聊城人, 博士, 讲师, 研究方向为地震灾害系统仿真与灾害模拟技术等方面的研究。

E-mail: xiaoran1227@126.com

内容, 建立针对区域地震次生火灾风险评估模型, 还没有完整的、现成的方法可供使用。

## 1 基于属性区间识别理论模型

基于以上所述, 本文提出了基于属性区间识别理论及证据理论对城市地震潜在次生火灾风险进行评价与分析, 详细技术路线如图 1 所示。

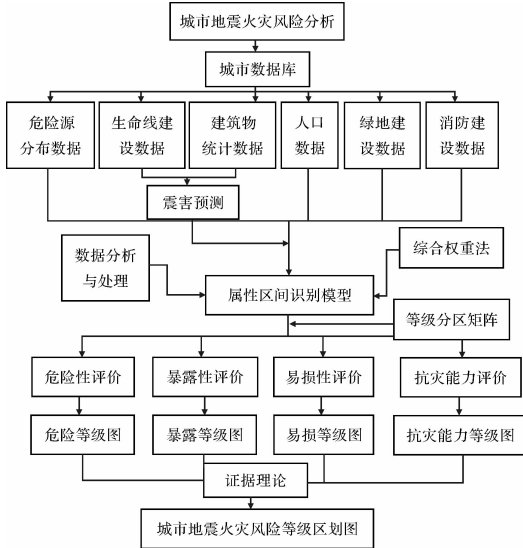


图 1 城市地震火灾风险评价技术路线

城市地震潜在次生火灾风险评价中, 已知  $n$  个评价单元的  $m$  个指标  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ , 根据  $k$  个风险等级构造区间矩阵  $I_{ab} = ([a, b]_{jk})$ , 式中  $j = 1, 2, \dots, m$ ;  $k = 1, 2, \dots, K$ 。  $j$  和  $k$  分别是地震潜在次生火灾风险评价指标数目和风险等级评价级别数目<sup>[9-12]</sup>。上届风险矩阵为  $A = [a]_{jk}$ , 下届风险矩阵为  $B = [b]_{jk}$ 。

步骤 1: 建立上下届标准隶属度矩阵  $S = [sjk]_{(m \times K)}$  和样本值相对于上下届的隶属度矩阵  $F = [f_{jk}]_{(m \times n)}$ 。具体计算如下:

$$s_{jk} = (a_{jk} - a_{j1}) / (a_{jk} - a_{j1}) \quad (1)$$

正指标:

$$f_{ij} = \begin{cases} 0, & x_{ij} < a_{j1}; \\ (x_{jk} - a_{j1}) / (a_{jk} - a_{j1}), & a_{jk} \leq x_{ij} \leq a_{jk}; \\ 1, & x_{ij} > a_{jk} \end{cases} \quad (2)$$

负指标:

$$f_{ij} = \begin{cases} 1, & x_{ij} < a_{j1}; \\ (x_{jk} - a_{j1}) / (a_j - a_{j1}), & a_{jk} \leq x_{ij} \leq a_{jk}; \\ 0, & x_{ij} > a_{jk} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $j = 1, 2, \dots, m$ ,  $k = 1, 2, \dots, K$ 。

步骤二: 采用层次分析法和熵权法相结合的综合权重法确定危险、暴露、易损、抗灾防灾能

力等级权重向量。

$$\omega_j = \eta \alpha_j + (1 - \eta) \beta_j, \quad j = 1, 2, 3, \dots, n. \quad (4)$$

式中:  $\omega_j$  为各项评价指标的权重;  $\alpha_j$ 、 $\beta_j$  分别为第  $j$  个评价指标的主、客观权重;  $0 \leq \eta \leq 1$  为各评价指标主、客观权重的偏好系数, 且  $\sum_{j=1}^m \omega_j = 1$ ,  $\omega_j \geq 0$ 。

步骤三: 属性测度区间计算。为消除随机性和模糊性, 引入最大熵原理计算  $\mu_{ik}$  和  $\bar{\mu}_{ik}$ :

$$\mu_{ik} = \exp \left[ -B \times \sum_{j=1}^m \omega_j |f_{ij} - s_{jk}| / \exp \left[ -B \times \sum_{k=1}^K \omega_j |f_{ij} - s_{jk}| \right]; \quad (5)$$

$$\bar{\mu}_{ik} = \exp \left[ -B \times \sum_{j=1}^m \omega_j |f_{ij} - s_{jk}| / \exp \left[ -B \times \sum_{k=1}^K \omega_j |f_{ij} - s_{jk}| \right]. \quad (6)$$

式中:  $B$  一般取 10。

步骤四: 综合属性测度计算。采用均化系数对属性测度区间进行转换, 得到样本  $x_i$  属于第  $k$  类的综合属性测度。

$$H_{ik} = \alpha \mu_{ik} + (1 - \alpha) \bar{\mu}_{ik}. \quad (7)$$

式中:  $\alpha$  为属性测度区间均化系数。

步骤五: 评价样本类别识别。

风险的危险性、暴露性、危险性、易损性和抗震防灾能力的评价等级确定方法为:

$$H_i = \sum_{k=1}^K k \mu_{ik}. \quad (8)$$

另一种算法是采用置信度准则评价样本等级:

$$H_i = \min(k : \sum_{l=1}^K \mu_{il} \geq \lambda, (1 \leq k \leq K)). \quad (9)$$

式中:  $\lambda$  为置信度, 值越大越趋向于保守。

步骤六: 风险等级确定。

为有效获得样本的风险评价等级, 采用证据理论 Dempster 合成法则对步骤四计算的综合属性测度进行耦合<sup>[13]</sup>:

$$m(A) = m_1(A) + m_2(A) + \dots + m_n(A) = \frac{1}{k} \sum_{A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n = A} m_1(A_1) m_2(A_2) \dots m_n(A_n). \quad (10)$$

其中:

$$k = \sum_{A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n \neq \emptyset} m_1(A_1) m_2(A_2) \dots m_n(A_n). \quad (11)$$

式中:  $A$  为可能的结果的集合;  $m(A)$  为命题  $A$  的基本信度;  $k$  为归一化系数, 反映证据间冲突的大小。

信任函数:

$$Bel(A) = \sum_{B \subset A} m(B) (\forall A \subset \Theta). \quad (12)$$

式中:  $B$  表示  $A$  的子集, 则该函数为  $\Theta$  上的信任函数, 表示  $A$  的全部子集所对应的基本信任分配之和。

似然函数:

$$Pls(A) = 1 - Bel(\bar{A}) = \sum_{B \cap \bar{A} \neq \emptyset} m(D)。 \quad (13)$$

表示  $A$  不否定的信任度, 是所有  $A$  相交子集的基本信任分配之和。式中:  $\bar{A}$  表示集合  $A$  的补集,  $B$  表示和  $A$  相交不为空集的集合。似然函数与信任函数之差为不确定性的度量。

## 2 城市地震潜在次生火灾风险指标体系

城市地震潜在次生灾害风险评价<sup>[12]</sup>涉及致灾因子、孕灾环境及承灾体等众多因素。且由于许多因子无统一量标准, 使得评价指标体系很复杂, 难以操作。从灾害风险生成的动力学角度看, 防灾减灾能力与灾害风险生成的作用方向是相反的, 即特定地区的防灾减灾能力越强, 灾害危险性、易损性和暴露性生成灾害风险的作用力就越会受到限制。本文基于灾害系统理论, 从致灾因子、孕灾环境、承灾体、抗灾能力出发, 遵循系统性、易量化、可操作、普适性的原则, 构建了城市地震潜在次生火灾风险综合评价指标体系(图2)。

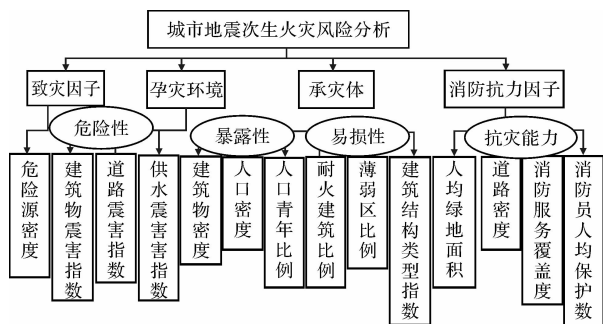


图2 城市地震风险评价指标体系

(1) 危险性指标。地震发生造成的建筑物倒塌、危险品泄露是引发次生火灾的主要原因, 而交通系统和供水系统的震害程度影响到次生火灾救援的便利性, 震害指数越大, 救援的不利因素越多, 火灾蔓延速度越大, 故选取危险源密度、建筑物震害指数和主要生命线系统震害指数作为危险性评价指标。建筑物或主要生命线震害指数, 指一定地区范围内所有建筑物或生命线工程的震害指数的平均值, 即各破坏等级的建筑物或生命线工程所占的比率与其相应的震害程度量化值乘积之和。危险源的级别不同造成灾害程度不同, 重大危险源主要是指有危险品仓库的化工企业、加油站等, 一般危险源主要是指民用危险源。

(2) 暴露性指标。城市地震火灾承灾体的暴露性主要体现在人和财富上, 所以选取人口密度和建筑物密度为暴露性因子。

(3) 易损性指标。易损性主要是体现承灾体的易损程度, 同暴露性, 承灾体是人和建筑物。易损性人口因子选取人口老少比例(年龄中大于65, 小于14人口所占总人口比例), 建筑物因子选取建筑结构类型指数、薄弱区比例(多为1~3层的老旧民宅)、3、4级或无耐火建筑比例为易损性指标。其中建筑结构类型指数是指各类建筑结构类型指数乘以相应建筑面积所占权重所得。综合考虑建筑物的耐火等级及抗倒塌能力所得, 各类建筑结构类型指数如表1所示。

表1 各类建筑结构类型指数

结构类型	钢筋混凝土	砖结构	钢结构	石结构	木结构
类型指数	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9

(4) 抗灾能力指标。绿地对次生火灾的蔓延具有阻力作用, 道路的等级及覆盖度对震后火灾救援具有重要意义。消防能力的大小取决于消防有效覆盖度及消防人员的数量, 根据易量化原则, 选取人均绿地面积、道路覆盖度、消防覆盖度(消防服务面积所占区域面积比)、消防人员人均保护数量为抗灾因子, 其中道路覆盖度取决于区域单元内道路等级、道路宽度、道路冗余度。城市地震潜在次生火灾风险评价指标尚无明确的统一标准, 在参考国家、行业及地方规定或颁布的有关标准基础上, 引用相关文献中确定标准的方法, 结合研究区域经济发展及次生火灾源的实际情况和特点, 将地震次生火灾危险、暴露、易损、风险、抗灾能力等级均分为极低、低、中等、高、极高5个等级, 具体等级区间值如表2所示<sup>[13-17]</sup>。

## 3 实例应用

以某城市为研究对象, 为综合考虑城市区域自然环境和建设环境特点、行政管理权限, 从抗震防灾的角度, 将该城市划分为110个疏散分区(图3)。因为划分单元数量过多, 根据建设用地功能的不同, 选取不同功能用地作为示例单元进行计算说明, 8-4工业区、9-6居住区、12-13风景旅游区、13-3商贸区。示例单元及所取值如表3所示。

表 2 城市地震潜在次生火灾风险指标分区标准

指标	影响因子	A	B	C	D	E
危害性因子	重大危险源密度/(个/km <sup>2</sup> )	<0.1	0.1~0.5	0.5~1.0	1.0~2.5	>2.5
	一般危险源密度/(个/km <sup>2</sup> )	<100	100~500	500~1000	1000~2000	>2000
	燃气管网密度/(km/km <sup>2</sup> )	<1	1~4	4~7	7~10	>10
	建筑震害指数	≤0.1	0.1~0.3	0.3~0.55	0.55~0.85	>0.85
	交通震害指数	≤0.2	0.2~0.4	0.4~0.6	0.6~0.8	>0.8
	供水震害指数	≤0.1	0.1~0.3	0.3~0.5	0.5~0.7	>0.7
暴露性因子	建筑物密度	<0.1	0.1~0.15	0.15~0.25	0.25~0.35	>0.35
	人口密度/(万人/km <sup>2</sup> )	<0.1	0.1~0.5	0.5~1.0	1.0~2.5	>2.5
易损性因子	老少比例	<0.1	0.1~0.15	0.15~0.2	0.2~0.3	>0.3
	建筑结构类型指数	<0.25	0.25~0.35	0.35~0.45	0.45~0.55	>0.55
	薄弱区比例	<0.002	0.005~0.01	0.015~0.03	0.03~0.06	>0.06
	3、4级或无耐火建筑比例	<0.25	0.25~0.35	0.35~0.45	0.45~0.6	>0.6
抗灾防灾因子	人均绿地面积(m <sup>2</sup> /人)	>5.5	3.5~5.5	1.5~3.5	0.5~1.5	<0.5
	消防覆盖度	>0.75	0.55~0.75	0.35~0.55	0.15~0.35	<0.15
	道路覆盖度	>0.9	0.8~0.9	0.6~0.8	0.4~0.6	<0.4
	消防员人均保护数	<1000	1000~2500	2500~4000	4000~5500	≥5000

表 3 示例单元地震潜在次生火灾风险指标取值

指标	影响因子	8-4	9-5	12-13	13-3
危害性因子	重大危险源密度/(个/km <sup>2</sup> )	0.43	1.01	0.13	0.16
	一般危险源密度/(个/km <sup>2</sup> )	2752.29	126.98	52.91	2752.29
	燃气管网密度/(km/km <sup>2</sup> )	0.63	1.17	0.21	0.98
	建筑震害指数	0.15	0.15	0.10	0.10
	交通震害指数	0.15	0.17	0.12	0.11
	供水震害指数	0.16	0.12	0.16	0.12
暴露性因子	建筑物密度	0.15	0.80	0.10	0.70
	人口密度/(万人/km <sup>2</sup> )	0	1.38	0.063	0.026
易损性因子	老少比例	0.10	0.18	0.10	0.18
	建筑结构类型指数	0.27	0.22	0.38	0.27
	薄弱区比例	0.016	0.02	0	0.098
	3、4级或无耐火建筑比例	0.245	0.21	0.31	0.245
抗灾防灾因子	人均绿地面积(m <sup>2</sup> /人)	6	0.18	0	307.8
	消防覆盖度	0.05	0.9	0	0
	道路覆盖度	0.30	1.0	0.60	0.50
	消防员人均保护数	1000	10000	6666.7	1111

表 4 不同烈度下危险性指标权重

地震烈度	危险性指标					
	重大危险源密度 /(个/km <sup>2</sup> )	一般危险源密度 /(个/km <sup>2</sup> )	燃气管网密度 /(km/km <sup>2</sup> )	建筑震害指数	交通震害指数	供水震害指数
Ⅵ	0.164	0.168	0.201	0.172	0.158	0.137
Ⅶ	0.168	0.173	0.204	0.167	0.153	0.132
Ⅷ	0.170	0.175	0.205	0.166	0.152	0.131

表 5 基于属性区间识别模型危险性评价结果

	一级 指标	计算 单元	综合属性测度					特征值 式(8)	置信度准则 式(9)	等级
			1	2	3	4	5			
危 险 性	Ⅵ度	8-4	0.385	0.467	0.134	0.013	0.000	1.777	2	低危险
		9-5	0.233	0.287	0.291	0.163	0.026	2.462	2	低危险
		12-13	0.536	0.421	0.040	0.003	0.000	1.512	1	极低危险
		13-3	0.406	0.479	0.106	0.008	0.000	1.717	2	低危险
	Ⅶ度	8-4	0.209	0.593	0.175	0.023	0.000	2.012	2	低危险
		9-5	0.083	0.402	0.329	0.163	0.023	2.642	3	中等危险
		12-13	0.396	0.530	0.067	0.007	0.000	1.685	2	低危险
		13-3	0.257	0.603	0.127	0.012	0.000	1.894	2	低危险
	Ⅷ度	8-4	0.074	0.199	0.449	0.267	0.011	2.941	3	中等危险
		9-5	0.018	0.087	0.334	0.453	0.108	3.545	4	高危险
		12-13	0.181	0.387	0.344	0.086	0.003	2.343	2	低危险
		13-3	0.084	0.316	0.468	0.128	0.004	2.652	3	中等危险

表 6 不同烈度下城市地震潜在次生火灾危险等级分区数对比

地震烈度	单元对比	极低危险	低危险	中等危险	高危险
Ⅵ度	单元个数	57	48	5	0
	面积所占比/%	59.4	37.2	3.4	0
Ⅶ度	单元个数	0	80	30	0
	面积所占比/%	0	77.0	23.0	0
Ⅷ度	单元个数	0	2	93	15
	面积所占比/%	0	7.1	82.7	10.2



图 3 城市疏散分区图

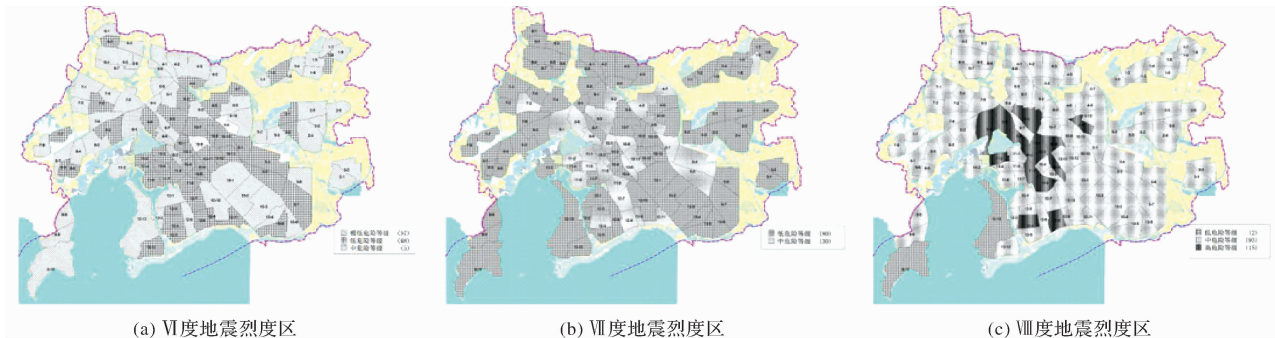


图 4 城市火灾危险性分区图

### 3.1 地震次生火灾危险性评价

按照前述属性区间识别模型的计算步骤首先进行危险性计算。首先可判断评价样本数目  $n = 110$ , 指标数目  $m = 6$  以及评价等级  $K = 5$ 。因为不同的地震烈度导致不同的建筑震害指数、交通震害指数、供水震害指数, 按照层次分析法和熵权法组合权重法, 参考文献<sup>[18]</sup>确定  $\eta = 0.6$ , 可以得到不同地震烈度下危险性指标权重如表 4 所示。采用式(4)~式(8)计算各评价样本的  $\mu_{ik}$  和  $\bar{\mu}_{ik}$ , 取均化系数为 0.5, 得到综合属性测度, 并根据式

(8)和式(9)确定样本所属危险等级, 其中取置信度为 0.5, 同理可得暴露性、易损性、抗震防灾能力等级, 详细计算结果见表 5。由结果绘制地震烈度Ⅵ、Ⅶ、Ⅷ度下该城市地震潜在次生火灾的危险性专题图, 见图 4。

根据地震烈度Ⅵ、Ⅶ、Ⅷ度下城市地震火灾危险等级图的对比, 可得到各烈度下各危险等级的单元个数, 见表 6。极高危险等级单元个数均为 0, 在此不列出。

由表 6 可看出地震烈度Ⅵ度时, 区域灾害危险性主要集中在低危险等级以下, 地震烈度Ⅶ、Ⅷ



度时,危险等级高的单元个数及面积明显增加。其中4-9、8-1、9-5、9-6、9-8、10-1、10-2、10-3、10-6、10-8、11-2、11-8、11-9、12-4、12-8均为老城区,老旧房屋、道路失修所占比例多,导致建筑、道路震害指数大且一般危险源数目较多导致危险等级较高,属于重点防范区。

### 3.2 地震潜在次生火灾暴露性、易损性、抗震防灾能力评价

同理可得基于属性区间识别模型的暴露性、易损性、抗震防灾能力的计算结果如表7所示。由结果绘制该城市地震潜在次生火灾的暴露性、易损性及抗震防灾能力专题图层(图5、图6、图7)。从图5中可以看出,由于老城区的人口和建筑物密集,导致老城区分区单元的暴露性较高。由图6可以看出,1-9、4-3、4-4、7-1、7-2、7-5、8-5、9-1、12-6易损等级较高,主要是因为城中的较为发达,导致大量青年进城工作,城市外围的老少人口较多,且较不发达地区的房屋多为砖混结构,建筑结构类型指数高、耐火等级低导致的这些区域单元易损性高。由图7可以看出,2-3、4-3、4-8、7-6、9-4抗灾防灾能力较差,主要是道路等级低导致的有效覆盖度不够级消防设置不完善导致。

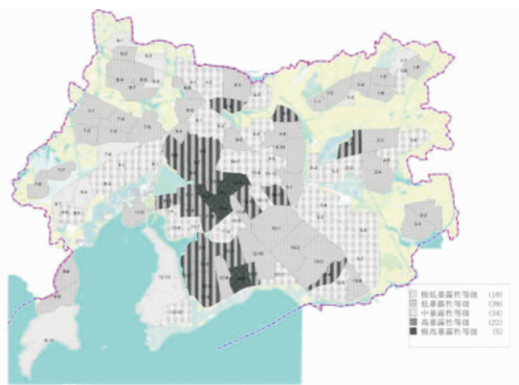


图5 城市地震潜在次生火灾承灾体暴露性等级图

### 3.3 基于证据理论的城市地震潜在次生火灾风险评价

城市地震潜在次生火灾风险等于区域危险性与承灾体暴露性、易损性及抗灾防灾能力的耦合,且风险值随危险性、暴露性、易损性的增大而增大,随抗灾防灾能力的增大而减小。第一步首先采用危险性、暴露性、易损性、抗灾能力的属性测度分别作为证据1、证据2、证据3和证据4,应用式(11)计算冲突系数 $k$ 。第二步多证据组合。以下片区为例,应用式(10)、(12)及(13)计算各

片区在地震烈度分为Ⅶ度、Ⅷ度、Ⅸ度下的质量函数、信任函数和似然函数(表8)。根据烈度Ⅵ、Ⅶ、Ⅷ度下城市地震潜在次生火灾风险等级对比,可得到各烈度下各风险等级的单元个数及各风险等级面积所占比(表9)。

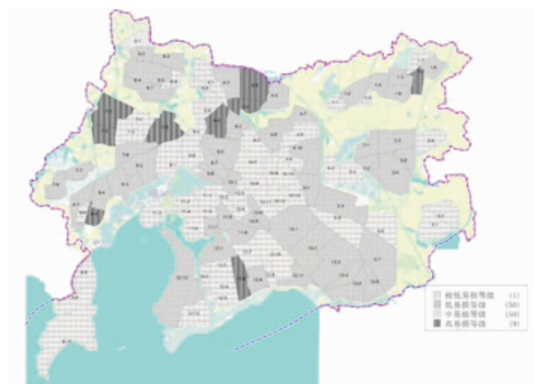


图6 城市地震潜在次生火灾承灾体易损性等级图

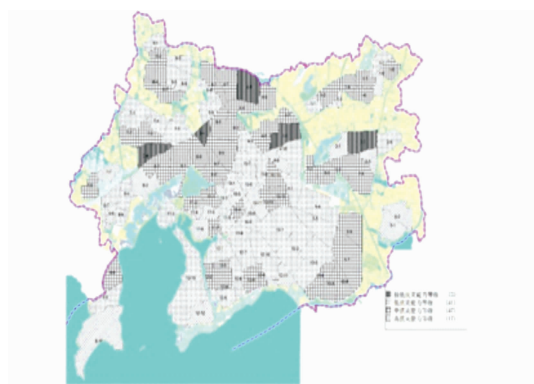


图7 城市地震潜在次生火灾抗灾防灾能力示意图

如表9所示,随着地震烈度的增加,高风险等级的单元个数及所占面积比增加,当地震烈度为Ⅶ时,中等及以上风险等级面积已经达到60%。该城市地震潜在次生火灾风险等级较高,经过结果对比,判定1-9、2-1、4-9、8-8、10-2、10-3、10-11、11-5、11-6、12-8、12-12单元为高风险区,其中4-9、10-2、10-3、10-11、11-5、11-6、12-8属于老城,人口密集、老旧民房较多,一般危险源数目多,危险性、暴露性、易损性等级高,消防配置不够导致风险等级高。1-9、2-1、8-8为工业区或新建区,重大危险源数目较多,主要是危险性等级较高,消防设施不完善导致的风险等级高。根据分区图采取相应措施降低灾害的危险性、承灾体的暴露性与易损性,提高城市的抗震防灾能力,进而降低城市地震潜在次生火灾风险。对于中等风险区,也应采取相应的措施进一步防范。

表 7 暴露性、易损性、抗震防灾能力评价结果

一级 指标	计算 单元	综合属性测度					特征值 式(8)	置信度准则 式(9)	等级
		1	2	3	4	5			
暴露性	8-4	0.702	0.280	0.016	0.002	0.000	1.317	1	极低暴露
	9-5	0.004	0.057	0.381	0.457	0.102	3.595	4	高暴露
	12-13	0.744	0.241	0.014	0.001	0.000	1.273	1	极低暴露
	13-3	0.206	0.326	0.308	0.147	0.013	2.434	2	低暴露
易损性	8-4	0.434	0.457	0.094	0.014	0.001	1.689	2	低易损
	9-5	0.391	0.440	0.139	0.029	0.001	1.809	2	低易损
	12-13	0.210	0.502	0.243	0.043	0.002	2.126	2	低易损
	13-3	0.335	0.419	0.202	0.042	0.002	1.957	2	低易损
抗震防 灾能力	8-4	0.590	0.373	0.035	0.003	0.000	1.451	1	极低抗灾能力
	9-5	0.185	0.342	0.342	0.129	0.002	2.421	2	低抗灾能力
	12-13	0.287	0.411	0.242	0.059	0.001	2.078	2	低抗灾能力
	13-3	0.004	0.024	0.147	0.806	0.019	3.812	4	高抗灾能力

表 8 基于证据理论模型风险性评价结果

地震 烈度	计算 单元	质量函数对应风险等级					信任函数	似然函数	风险等级
		I	II	III	IV	V			
Ⅶ度	8-4	0.7578	0.2422	0.0001	0	0	0.758	0.759	极低风险
	9-5	0.0067	0.2444	0.5232	0.0277	0.198	0.523	0.550	中等风险
	12-13	0.534	0.4651	0.0007	0	0.0002	0.534	0.540	极低风险
	13-3	0.014	0.1955	0.1207	0.005	0.665	0.665	0.670	高风险
Ⅷ度	8-4	0.5715	0.4284	0.0001	0	0	0.572	0.573	极低风险
	9-5	0.002	0.2882	0.498	0.0233	0.1885	0.498	0.518	中等风险
	12-13	0.4019	0.5965	0.0012	0	0.0003	0.403	0.404	低风险
	13-3	0.0073	0.2044	0.1201	0.0062	0.6619	0.662	0.668	高风险
Ⅸ度	8-4	0.484	0.5149	0.001	0	0	0.485	0.486	低风险
	9-5	0.0005	0.0756	0.6132	0.0785	0.2321	0.613	0.691	中等风险
	12-13	0.2929	0.6944	0.0102	0	0.0025	0.304	0.306	低风险
	13-3	0.0008	0.035	0.1448	0.0215	0.7978	0.798	0.818	极高风险

表 9 不同烈度下城市地震潜在次生火灾风险等级对比

地震 烈度	单元对比	极低风险	低风险	中等风险	高风险及以上
Ⅵ度	单元个数	2	47	54	7
	面积所占比/%	1.9	47.9	46.3	3.9
Ⅶ度	单元个数	1	37	64	8
	面积所占比/%	0.6	38.3	56.5	4.6
Ⅷ度	单元个数	1	32	65	12
	面积所占比/%	0.6	34.4	57.6	7.3

4 结论

探讨了属性区间识别理论及证据理论在城市

地震潜在次生火灾风险评估中的应用。在深入分析城市地震潜在次生火灾风险成因的基础上，从城市地震发生后的致灾因子、孕灾环境的灾害状况和承灾体即抗灾防灾能力四个方面构建了城市地震潜在次生火灾风险评价指标体系。以某城市为例，运用基于最大熵理论的属性区间识别理论模型对城市分区单元不同地震烈度下危险等级、暴露性等级、易损等级、抗灾防灾能力等级做出科学合理的计算，并由风险等级分区矩阵得到各评价单元的风险等级，评价结果比其他方法更加客观。根据结果找出区域潜在风险，采取相应措施，与实际情况也较为吻合，提高了风险评价结果的稳定性和可靠性，为城市地震潜在次生火灾

风险评估提供一种易操作且可行的方法。

## 参考文献:

- [1] 郭惠. 城市地震火灾风险评估指标体系研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2013, 9(3): 56-59.
- [2] USFA. Information on the Risk, Hazard and Value Evaluation [R]. 1999.
- [3] Michael S Wright. Dwelling Risk Assessment Toolkit[R]. 1999.
- [4] 杜霞, 张欣, 刘庭全, 等. 国外区域火灾风险评估技术及应用现状[J]. 消防科学与技术, 2004, 23(2): 137-139
- [5] 连旦军, 董希琳, 吴立志. 城市区域火灾风险评估综述[J]. 消防科学与技术, 2004, 23(3): 240-242.
- [6] 向琴琴. 基于 GIS 的地震次生火灾危险性评估及动态蔓延模拟[D]. 北京: 北京工业大学, 2005.
- [7] 张志华. 城市区域地震次生火灾危险性评估[J]. 消防管理研究, 2008, 27(8): 602-605.
- [8] 刘松涛, 刘文利, 孙旋, 等. 基于能力和脆弱性分析的火灾风险综合评价体系研究[J]. 科技导报 2009, 27(22): 76-80.
- [9] 李群, 宁利. 属性区间识别理论模型研究及其应用[J]. 数学的实践与认识, 2002, 32(1): 50-54.
- [10] 邹强, 周建中, 周超, 等. 基于最大熵原理和属性区间识别理论的洪水灾害风险分析[J]. 水科学进展, 2012, 23(12): 323-333.
- [11] 任政, 郝振纯. 基于属性区间识别理论的水资源可持续利用评价[J]. 水电能源科学, 2009, 27(3): 22-24
- [12] 周晓蔚, 王丽萍, 张验科. 基于最大熵的河流水质恢复能力模糊评价模型[J]. 中国农村水利水电, 2008(1): 23-25.
- [13] 徐秀娟, 牟浩. 基于结构熵权灰色关联和 D-S 证据理论的水库兴利调度综合评价[J]. 水利与建筑工程学报, 2014, 12(2): 21-25.
- [14] 金江军, 潘懋, 徐岳仁. 城市地震灾害风险评价方法研究[J]. 西北地震学报, 2007, 29(2): 109-113.
- [15] 董法军, 吴立志. 基于指标体系的城市区域火灾风险评价系统开发[J]. 火灾科学, 2005, 14(1): 47-54.
- [16] 钟江荣, 张令心, 赵振东, 等. 基于震害的地震次生火灾高危害区模型研究[J]. 地震工程与工程振动, 2010, 30(3): 108-114.
- [17] 周天. 城市火灾风险和防火能力研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
- [18] 陈国良, 胡锐, 卫广昭. 北京市火灾风险综合评估指标体系研究工程师[J]. 中国安全科学学报, 2007(17): 119-124.
- [19] 匡乐红, 徐林荣, 刘宝琛. 组合赋权法确定地质灾害危险性评价指标权重[J]. 地下空间与工程学报, 2006(2): 1063-1068.

# Potential Risk Analysis of Urban Post-earthquake Fire Based on Attribute Interval Recognition Theory

LIU Xiaoran<sup>1</sup> and WANG We<sup>2</sup>

(1. Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 102616, China; 2. Institute of Earthquake Resistance and Disaster Reduction, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** For the influence factors' complexity of the urban post-earthquake fire, theory about the attribute interval recognition is proposed for the potential risk analysis of urban post-earthquake fire. Firstly, an attribute interval recognition model is established to eliminate all kinds of uncertainty to maximize based on the principle of maximum entropy; Secondly, the evaluation index system for the urban post-earthquake fire was presented in terms of urban disaster hazard, exposure and vulnerability of disaster bearing body and disaster prevention and mitigation capability. Meanwhile, the grading standards of evaluation index are also given; finally, potential risk analysis for a city's post-earthquake fire is provided to validate and prove its efficiency and feasibility by the evidence theory and attribute interval recognition theory. The results show that the middle and higher risk area reaches 50.20%, 61.00% and 64.90% respectively when VI, VII, VIII degree earthquake occurs. The application of attribute interval recognition and evidence theory for potential risk assessment of urban post-earthquake fire were verified, which improved the stability and reliability of the risk assessment results, to provide a measurable and achievable approach for the potential risk assessment of urban post-earthquake fire.

**Key words:** urban post-earthquake fire; attribute interval recognition; evidence theory; principle of maximum entropy; risk analysis