

文章编号: 1008-2786-(2015)3-356-09

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000045

# 基于“综合赋权”复合模糊物元的重庆市综合 灾害模糊风险评价

王 龙<sup>1</sup> 徐 刚<sup>2,3\*</sup>

(1. 华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062;

2. 西南大学 地理科学学院, 重庆 400715; 3. 西南大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715)

**摘 要:** 综合灾害风险是当前灾害研究领域中的热点和核心议题之一。灾害风险评价是综合灾害风险研究的重要基础环节,厘定风险并摸清成因,可为综合灾害风险管理提供科学依据。在区域灾害系统分析的基础上,以重庆市 38 个区县作为基本评价单元,以公开资料和政府统计数据作为主要的数据来源,基于“ $R=f(h) \times f(v)$ ”的综合灾害风险概念模型,根据“科学性、系统性、独立性和可操作性”原则,构建了反映致灾因子危险性、承灾体暴露性、灾损敏感性和防灾减灾能力四个方面的“重庆市综合灾害模糊风险评价指标体系”;使用集成层次分析法(AHP)和熵权法(EVM)的“综合赋权法”为指标体系赋权;在上述基础上采用“复合模糊物元(FME)”模型对重庆市各区县综合灾害模糊风险构成要素及整体风险进行了定量研究,并对灾害风险成因进行了初步分析。研究得出结论:重庆市致灾因子危险性整体水平略微偏高,承灾体易损性整体水平较低,综合灾害模糊风险整体水平居中;渝中区、涪陵区和渝东北的城口县、开县、云阳县、奉节县各类灾害发生及造成损失的可能性较大,是未来防灾减灾工作的重点。

**关键词:** 灾害风险评价; 模糊物元; 模糊风险; 综合赋权; 重庆市

**中图分类号:** X43

**文献标志码:** A

随着“综合灾害风险管理理论”<sup>[1-2]</sup>在各个国家和地区防灾减灾实践中的不断深入,综合灾害风险研究正成为灾害研究领域的热点和核心议题。进入本世纪以来,在以“全球变暖”为主要特征的全球变化的背景下,全球灾害呈现出新的发展趋势和特点。仅 2004—2013 年,10 a 间全球共发生重大自然灾害  $8.30 \times 10^3$  起,因灾直接经济损失达  $1.59 \times 10^4$  亿美元<sup>[3]</sup>。数次巨灾更是给相关国家和地区造成重大人员伤亡和财产损失<sup>[4]</sup>。未来,随着全球平均气温持续上升、发展中国家“城市化”进程的加快,各类灾害发生的不确定性增强。另一方面,传统的

面向单一灾种的防灾减灾体系已逐渐不能满足综合灾害风险管理的需求。因此,降低各类灾害风险,保障人类社会可持续发展意义重大。

灾害风险评价是灾害风险管理的重要基础环节之一。风险评价可以界定风险,对风险进行排序,从而为降低风险提供一套科学和系统的方法<sup>[5]</sup>。近年来,国内外灾害风险相关研究,取得了一定的成果。评价方法和模型主要包括以下 4 种<sup>[6]</sup>: 基于 3S 手段、基于指标体系、基于情景模拟和基于风险概率。前人研究主要集中在单一灾种灾害风险定量研究<sup>[7-12]</sup>,或以自然灾害系统为主的灾害风险研

收稿日期(Received date): 2014-08-31; 修回日期(Accepted): 2014-10-11。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金(项目编号: 41372177)。[Supported by National Nature Science Foundation of China. Grant no. 41372177.]

作者简介(Biography): 王龙(1988-),男,在读博士研究生。主要研究方向:地貌与第四纪地质。[Wang Long(1988-),male,Candidate of PHD,Research field: Geomorphology and Quaternary Geology.] E-mail: red\_missile@163.com

\* 通信作者(Corresponding author): 徐刚(1959-),男,硕士生导师,教授。[Xu Gang(1959-),male,supervisor of master,professor.] E-mail: xuliumin@swu.edu.cn

究<sup>[13-16]</sup>等方面。综合灾害风险研究已引起了越来越多的学者关注,国内外部分学者进行了有益的尝试<sup>[17-21]</sup>,但较为成熟的理论、方法体系尚未形成。基于“灾害系统”角度的集成自然灾害、环境灾害和人为灾害于一体的区域综合灾害风险定量研究的相关成果,还较为少见。

重庆市孕灾环境复杂,致灾因子类型多样,每年因各类灾害造成的经济损失达数十亿元<sup>[22]</sup>。各类灾害的发生,威胁辖区人民生命财产安全,阻碍区域社会经济健康发展。因此,研究重庆市综合灾害风险成因及其空间分布,对于规避和减缓灾害风险,保障人民生命财产安全具有重要意义。本研究立足灾害系统整体,构建“区域综合灾害模糊风险评价指标体系”,采用“综合赋权”复合模糊物元模型,对重庆市各区县综合灾害风险进行定量评价与排序。试图对区域综合灾害模糊风险定量评价的方法与手段有所改进和创新,旨在对重庆市综合灾害风险管理和科学防灾减灾提供一定的科技支撑及理论参考。

## 1 研究背景

### 1.1 研究区概况

重庆市是我国中西部地区唯一的中央直辖市,是建设中的长江上游的经济中心,位于长江上游、四川盆地东部,地处我国第二、三级阶梯的自然过渡地带,辖区范围 $28^{\circ}10' \sim 32^{\circ}13'N$ , $105^{\circ}11' \sim 110^{\circ}11'E$ ,南北长约450 km,东西宽约470 km,总面积约 $82\,403\text{ km}^2$ <sup>[23]</sup>。截至2013年年末,全市辖38个区县,总人口3 343.44万人<sup>[24]</sup>。

重庆市属亚热带季风湿润气候区,年均降水量1 100~1 300 mm,时空分布不均。境内河流众多,长江自西向东横贯全境。地貌以山地为主,受河流切割强烈,地形起伏较大。境内出露岩层以沉积岩为主,岩性软弱,易受侵蚀<sup>[25]</sup>。以干旱、洪涝为主的气象水文灾害和以滑坡、崩塌、泥石流为主的各类地质灾害频发。环境灾害中,主城区空气污染、渝东北和渝东南高海拔地区水土流失较为突出。另一方面,重庆市人口集聚特征突出,城镇密集,城市建设、资源开发活动较为频繁,人类对自然环境的扰动强烈。以交通事故、火灾等安全生产责任事故为主的人为灾害易于发生。

### 1.2 综合灾害模糊风险

综合灾害风险是区域内各类灾害发生及造成损

失的可能性。凡是基于模糊集表述方法推断出来的风险结论,均称为模糊风险(Fuzzy Risk)<sup>[26]</sup>。本研究基于模糊物元模型,因此评价结果隶属模糊风险范畴。为从灾害系统角度对区域灾害整体风险进行定量研究,在借鉴前人研究成果的基础上<sup>[27]</sup>,本研究采用综合灾害模糊风险概念模型<sup>[28]</sup>

$$R = f(h, p) = f(h) \times f(p) \quad (1)$$

$$f(p) = f(e) \times f(s) \times [1 - f(c)] \quad (2)$$

式中:  $R$  为灾害风险(risk),  $h$  为致灾因子危险性(hazard),  $p$  为易损性(vulnerability),  $e$  为承灾体暴露性(exposure),  $s$  为灾损敏感性(susceptibility),  $c$  为防灾减灾能力(coping capacity);  $f$  为各风险要素的函数。风险表达式中使用 $[1 - f(c)]$ 反映防灾减灾能力对于区域灾害风险的作用影响。其中,暴露性、灾损敏感性和防灾减灾能力共同构成承灾体易损性。

### 1.3 评价单元

评价单元的选取,涉及数据输入和结果输出两个方面。本研究考虑到灾害系统的开放性、复杂性与作用机理的非线性,兼顾原始数据的可获取性及数据间的兼容,以区、县作为基本评价单元。根据重庆市最新的区县行政区划,将研究区划分为38个基本评价单元。

### 1.4 数据来源

本研究以公开资料、文献和政府部门的统计数据作为主要的数据来源。其中,致灾因子危险性中水文气象灾害的原始数据来源于《气象灾害大典》(重庆卷)<sup>[29]</sup>、《重庆市环境状况公报》(2003—2012)<sup>[30]</sup>、《重庆市水土保持公报》(2012)<sup>[31]</sup>;地质灾害数据来自重庆市国土房屋管理局地质环境处,安全生产责任事故数据来自重庆市安全生产监督管理局。承灾体易损性原始数据主要来源于《重庆统计年鉴》(2000—2013)<sup>[24]</sup>,各区县水库库容数据来自重庆市水利局,各区县耕地面积数据来自重庆市国土房屋管理局的国土“二调”数据。

## 2 综合灾害模糊风险评价指标体系

### 2.1 指标体系构建

本研究依据“科学性、系统性、独立性和可操作性”原则,参考借鉴国内外已有成果,结合重庆市灾害系统特点<sup>[22]</sup>及现实数据,选用了反映重庆市综合灾害风险构成要素4个方面的24个指标( $u_{ij}$ ),构建了“重庆市综合灾害模糊风险评价指标体系”。

其中 致灾因子危险性(  $U_1$  ) :  $U_{11} \sim U_{14}$  反映区域内各区县自然灾害的变异危险程度;  $U_{15} \sim U_{16}$  反映区域内环境灾害的危险程度;  $U_{17}$  反映区域内以各类安全生产责任事故为主的人为灾害的危险程度。承灾体暴露性(  $U_2$  ) :  $U_{21}$  反映人口在空间上的暴露程度 ,  $U_{22} \sim U_{24}$  反映社会财富、资产暴露状况 ,  $U_{25}$  反映区域交通市政基础设施的暴露程度 ,  $U_{26}$  反映区域农业资产空间暴露状况。灾损敏感性(  $U_3$  ) :  $U_{31} \sim U_{34}$  反映区域人口结构中灾损高敏感人群的承灾体灾损敏感性。防灾减灾能力(  $U_4$  ) :  $U_{41}$  反映区域水利设施对旱灾的应对能力 ,  $U_{42}$  反映区域水利设施对洪灾的减缓能力 ,  $U_{43}$  反映区域财政的减灾投资能力 ,  $U_{44} \sim U_{45}$  反映区域城乡居民应对灾害的生产自救能力 ,  $U_{46}$  反映区域医疗基础设施对伤员的救治能力 ,  $U_{47}$

反映区域应对灾害的信息传递和通讯保障能力。

2.2 指标体系赋权

指标体系中 ,各参评因子所具有的重要性不同 ,即指标权重不同。指标体系赋权方法主要有三类<sup>[32]</sup> : 主观赋权法、客观赋权法和综合赋权法。本研究权重系数采用基于“层次分析法”( AHP )<sup>[33]</sup> 和“熵权法”( EVM )<sup>[34]</sup> 的“综合赋权法”。

指标体系综合权值计算采用公式

$$w_i = \lambda \alpha_i + ( 1 - \lambda ) \beta_i \tag{3}$$

式中  $w_i$  是通过“综合赋权法”计算得到的指标体系综合权值  $\alpha_i$  和  $\beta_i$  分别是 AHP 和 EVM 确定的指标权重  $\lambda$  是综合定权系数。本研究中 ,主、客观权重比重相等 ,即  $\lambda = 0.5$ 。由此 得到“重庆市综合灾害模糊风险评价指标体系权重”( 表 1 )。

表 1 重庆市综合灾害模糊风险评价指标体系权重

Table 1 Comprehensive weight of Chongqing Disaster Risk assessment system

目标层	权重	准则层	权重	指标层	AHP 权重	EVM 权重	综合权重
Target layer	Weight	Griterion layer	Weight	Indicator layer	AHP Weight	EVM Weight	Synthetic weight
区域 综合 灾害 模糊 风险	1.000	致灾因子危险性 ( H )	0.345	地质灾害点密度( 个/ km <sup>2</sup> )	0.147	0.112	0.130
				年均暴雨洪灾天数( d )	0.270	0.133	0.206
				干旱灾害发生率	0.295	0.129	0.217
				年均寒潮与冻害天数( d )	0.096	0.236	0.161
				空气综合污染指数	0.121	0.133	0.127
				水土流失强度( t/ km <sup>2</sup> · a )	0.051	0.131	0.089
				重大安全事故发生率	0.021	0.127	0.071
				人口密度( 人/ km <sup>2</sup> )	0.153	0.119	0.139
				人均 GDP( 元/ 人 )	0.280	0.187	0.241
				城镇化率	0.184	0.189	0.186
		暴露性( E )	0.251	单位面积全社会固定资产投资规模( 万元/ km <sup>2</sup> )	0.234	0.107	0.180
				路网密度( km/ km <sup>2</sup> )	0.100	0.195	0.140
				土地垦殖率	0.050	0.203	0.115
				老人和少年人口比重	0.403	0.248	0.316
				在校学生人数比重	0.202	0.252	0.230
				女性人口比重	0.118	0.252	0.193
				最低生活保障人数比重	0.277	0.249	0.262
		灾损敏感性 ( S )	0.151	单位面积水库兴利库容( 万 m <sup>3</sup> / km <sup>2</sup> )	0.160	0.150	0.154
				单位面积水库防洪库容( 万 m <sup>3</sup> / km <sup>2</sup> )	0.140	0.150	0.145
				人均财政收入( 元/ 人 )	0.297	0.148	0.210
				城镇居民可支配收入( 元/ 人 )	0.064	0.139	0.108
				农村居民人均纯收入( 元/ 人 )	0.037	0.143	0.099
				每万人卫生技术人员数( 人/ 万人 )	0.109	0.149	0.133
				广播电视覆盖率	0.194	0.121	0.151
		防灾减灾能力 ( C )	0.253				

### 3 基于综合赋权的灾害风险模糊物元评价

综合灾害风险是典型的模糊不相容多要素事物,各要素之间具有一定程度的不相容性。传统的数学模型方法,在研究此类对象时具有一定的局限性。物元分析又称可拓学,可有效解决事物分析过程中的不相容问题,同时该方法在灾害相关领域已得到了实践应用<sup>[35-36]</sup>。经与模糊综合评判<sup>[25]</sup>、综合指数法<sup>[17]</sup>等风险评价方法进行实验、比较,本研究采用复合模糊物元作为综合灾害模糊风险评价的基本方法,并构建复合模糊物元模型。

#### 3.1 模糊物元及复合模糊物元

事物  $M$ 、特征  $C$  及量值  $x$  组成了事物有序三元组的基本元,即物元。当其中的某些特征的量值具有模糊性,则将其称为模糊物元<sup>[37]</sup>,即  $R = (M, C, x)$ 。

若事物有  $n$  个特征  $C_1, K, C_n$  及其对应的模糊量值  $x_1, K, x_n$ ,则称  $R$  为  $n$  维模糊物元。 $m$  个事物的  $n$  维模糊物元组合在一起,构成复合模糊物元  $R_{mn}$ <sup>[36]</sup>:

$$R_{mn} = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & L & M_m \\ C_1 & x_{11} & x_{21} & L & x_{m1} \\ C_2 & x_{12} & x_{22} & L & x_{m2} \\ L & L & L & L & L \\ C_n & x_{1n} & x_{2n} & L & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

#### 3.2 从优隶属度复合模糊物元

模糊物元各单项指标相应的模糊量值从属于标准方案各对应评价指标相应的模糊量值隶属程度,称为从优隶属度<sup>[38]</sup>。本研究中,对于评价目标“综合灾害模糊风险”,将评价指标分为正向指标和逆向指标两类。其中,致灾因子危险性( $H$ )、暴露性( $E$ )和灾损敏感性( $S$ )各指标为“正向指标”,防灾减灾能力( $C$ )各指标为“逆向指标”。对于不同的指标采用不同的从优隶属度计算方法:

$$\text{对于正向指标: } u_{ji} = x_{ji} / \max x_{ji} \quad (5)$$

$$\text{对于逆向指标: } u_{ji} = \min x_{ji} / x_{ji} \quad (6)$$

式中  $u_{ji}$  是各指标模糊量值对应的从优隶属度,  $\max x_{ji}$  是指标体系中各指标模糊量值的最大值,  $\min x_{ji}$  是指标体系中各指标模糊量值的最小值。

根据从优隶属原则,通过上述过程得到从优隶属度复合模糊物元  $R_{mn}$ :

$$\bar{R}_{mn} = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & L & M_m \\ C_1 & u_{11} & u_{21} & L & u_{m1} \\ C_2 & u_{12} & u_{22} & L & u_{m2} \\ L & L & L & L & L \\ C_n & u_{1n} & u_{2n} & L & u_{mn} \end{bmatrix} \quad (7)$$

#### 3.3 标准模糊物元和差平方复合模糊物元

$\bar{R}_{mn}$  中各评价样本从优隶属度的最大值或最小值可构成标准模糊物元  $R_{On}$ <sup>[39]</sup>。标准模糊物元  $R_{On}$  与从优隶属度模糊物元  $\bar{R}_{mn}$  对应各项差的平方,组成差平方复合模糊物元  $R_{\Delta}$ :

$$R_{\Delta} = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & L & M_m \\ C_1 & \Delta_{11} & \Delta_{21} & L & \Delta_{m1} \\ C_2 & \Delta_{12} & \Delta_{22} & L & \Delta_{m2} \\ L & L & L & L & L \\ C_n & \Delta_{1n} & \Delta_{2n} & L & \Delta_{mn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中  $\Delta_{ji} = (u_{Oj} - u_{ji})^2$  ( $j = 1, 2, K, m; i = 1, 2, K, n$ )  $u_{Oj}$  取  $\bar{R}_{mn}$  中各评价样本  $u_{ji}$  的最大值或最小值。本研究中  $u_{Oj}$  取  $\bar{R}_{mn}$  中各评价样本  $u_{ji}$  的最大值。

#### 3.4 欧式贴近度复合模糊物元

欧式贴近度用来描述被评价样品与标准样品两者之间的互相接近的程度,利用贴近度可对评价样本进行优劣排序,也可根据标准值的贴近度进行类别划分<sup>[35]</sup>。通过上述过程,得到欧式贴近度复合模糊物元  $R_{PH}$ :

$$R_{PH} = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & M_3 & L & M_m \\ PH_j & PH_1 & PH_2 & PH_3 & L & PH_m \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中 欧式贴近度  $PH_j = 1 - \sqrt{\sum_{i=1}^n \omega_i \Delta_{ji}}$  ( $j = 1, 2, K, m$ );  $\omega_i$  是指标权重。 $PH_j$  即是通过复合模糊物元评价模型计算得到的结果。

## 4 结果与分析

#### 4.1 综合灾害模糊风险评价结果

依据上述方法和步骤,对重庆市综合灾害模糊风险进行了定量评价。通过一级评价,分别得到致灾因子危险度( $H$ )、暴露性( $E$ )、灾损敏感性( $S$ )和防灾减灾能力( $C$ )评价结果。二级评价中,对暴露性、敏感性和防灾减灾能力进行模糊物元合成运算得到承灾体易损性( $V$ )评价结果。之后,采用(1)式通过一次线性乘法运算得到综合灾害模糊风险度( $R$ )。最终,采用“自然裂点法(Natural breaks)”确

表 2 重庆市综合灾害模糊风险分级标准

Table 2 Classification standard of fuzzy integrated Disaster risk in Chongqing

评价目标	I 高风险	II 较高风险	III 中等风险	IV 较低风险	V 低风险
Evaluation objectives	High risk	Higher risk	Medium risk	Lower risk	Low risk
致灾因子危险性( <i>H</i> )	>0.458	0.405 ~ 0.458	0.362 ~ 0.405	0.334 ~ 0.362	<0.334
承灾体易损性( <i>V</i> )	>0.445	0.374 ~ 0.445	0.358 ~ 0.374	0.341 ~ 0.358	<0.341
暴露性( <i>E</i> )	>0.394	0.297 ~ 0.394	0.226 ~ 0.297	0.156 ~ 0.226	<0.156
灾损敏感性( <i>S</i> )	>0.704	0.632 ~ 0.704	0.589 ~ 0.632	0.529 ~ 0.589	<0.529
防灾减灾能力( <i>C</i> )	>0.700	0.615 ~ 0.700	0.498 ~ 0.615	0.298 ~ 0.498	<0.298
综合灾害模糊风险( <i>R</i> )	>0.190	0.160 ~ 0.189	0.140 ~ 0.159	0.120 ~ 0.139	<0.119

表 3 重庆市综合灾害模糊风险评价结果及等级

Table 3 Ranks and Results of fuzzy integrated disaster risk assessment in Chongqing

区县 County	危险性	等级	易损性	等级	综合灾害风险	等级
	Risk ( H )	Classifi- cation	Vulnera- bility( V )	Classifi- cation	Interg rated disaoter risk( R )	Classifi- cation
渝中区	0.362	Ⅳ	0.564	I	0.204	I
大渡口区	0.348	Ⅳ	0.410	Ⅱ	0.142	Ⅲ
江北区	0.359	Ⅳ	0.428	Ⅱ	0.154	Ⅲ
沙坪坝区	0.393	Ⅲ	0.375	Ⅲ	0.147	Ⅲ
九龙坡区	0.327	V	0.366	Ⅲ	0.120	Ⅳ
南岸区	0.324	V	0.392	Ⅱ	0.127	Ⅳ
北碚区	0.452	Ⅱ	0.340	V	0.154	Ⅲ
渝北区	0.430	Ⅱ	0.336	V	0.145	Ⅲ
巴南区	0.419	Ⅱ	0.360	Ⅲ	0.151	Ⅲ
綦江区	0.523	I	0.348	Ⅳ	0.182	Ⅱ
大足区	0.319	V	0.358	Ⅳ	0.114	V
涪陵区	0.508	I	0.375	Ⅲ	0.190	I
长寿区	0.354	Ⅳ	0.342	Ⅳ	0.121	Ⅳ
江津区	0.402	Ⅲ	0.348	Ⅳ	0.140	Ⅲ
合川区	0.481	I	0.355	Ⅳ	0.171	Ⅱ
永川区	0.371	Ⅲ	0.354	Ⅳ	0.131	Ⅳ
南川区	0.384	Ⅲ	0.319	V	0.122	Ⅳ
潼南县	0.334	V	0.361	Ⅲ	0.121	Ⅳ
铜梁县	0.388	Ⅲ	0.339	V	0.131	Ⅳ
荣昌县	0.418	Ⅱ	0.350	Ⅳ	0.146	Ⅲ
璧山县	0.405	Ⅲ	0.337	V	0.137	Ⅲ
万州区	0.484	I	0.374	Ⅲ	0.181	Ⅱ
梁平县	0.452	Ⅱ	0.351	Ⅳ	0.159	Ⅱ
城口县	0.499	I	0.394	Ⅱ	0.197	I
丰都县	0.312	V	0.355	Ⅳ	0.111	V
垫江县	0.325	V	0.355	Ⅳ	0.116	Ⅳ
忠县	0.415	Ⅱ	0.372	Ⅲ	0.154	Ⅲ
开县	0.458	Ⅱ	0.412	Ⅱ	0.189	I
云阳县	0.476	I	0.397	Ⅱ	0.189	I
奉节县	0.487	I	0.445	Ⅱ	0.217	I
巫山县	0.343	Ⅳ	0.411	Ⅱ	0.141	Ⅲ
巫溪县	0.376	Ⅲ	0.346	Ⅳ	0.130	Ⅳ
黔江区	0.355	Ⅳ	0.323	V	0.115	Ⅳ
武隆县	0.450	Ⅱ	0.329	V	0.148	Ⅲ
石柱县	0.344	Ⅳ	0.333	V	0.115	V
秀山县	0.379	Ⅲ	0.333	V	0.126	Ⅳ
酉阳县	0.458	Ⅱ	0.341	V	0.156	Ⅱ
彭水县	0.419	Ⅱ	0.404	Ⅱ	0.170	Ⅱ

定了“重庆市综合灾害模糊风险分级标准”(表 2)。由此,将评价结果划分为 5 类,分别对应“高风险、较高风险、中等风险、较低风险和低风险”5 个等级。

4.2 评价结果分析

4.2.1 致灾因子危险性分析

致灾因子危险性等级的高低,反映评价单元致灾因子发生频度和变异强度。致灾因子危险性评价结果表明:重庆市致灾因子危险性整体水平略微偏高。全市 38 个区县中,高危险及较高危险等级区县 17 个,占总数的 44.74%。致灾因子危险性等级的空间分布表明:重庆市渝东北区县整体危险性高于渝东南、渝西地区整体危险性等级则相对为最低。高危险等级区县主要分布在河流交汇的合川区、涪陵区,以及渝东北的城口县、三峡库区的万州区、奉节县、云阳县。较高危险等级区县主要集中在嘉陵江下游的北碚区、渝北区以及乌江沿岸的武隆县、彭水县和酉阳县。今后需加强上述重点区县的灾害监测与防御工作。

4.2.2 承灾体易损性分析

承灾体易损性反映灾害风险情景下社会经济系统易于遭受损失的程度。承灾体易损性评价结果表明:重庆市承灾体易损性整体水平相对较低。同时区县之间易损性等级及成因存在差异。各区县的易损性等级空间变化较为复杂:重庆市渝西地区整体易损性以低及较低易损为主,主城区易损性则相对较高;渝东北区县较高易损性等级区县集中分布;渝东南区县整体为低易损等级。

渝中区具有高暴露性和高灾损敏感性,总体易损性为全市最高。较高易损性区县包括主城区的江北区、南岸区、大渡口区,渝东南的彭水县以及渝东北城口、开县等五县。上述区县较高易损的原因不同,可分为两类:1. 主城区较高易损主要是由于高暴露、高灾损敏感;2. 渝东北和渝东南较高易损区县则主

要是由于高灾损敏感及较低的防灾减灾能力。

#### 4.2.3 综合灾害模糊风险分析

综合灾害模糊风险反映未来区域内各类灾害发生及造成损失的可能性。评价结果表明: 重庆市整体综合灾害模糊风险等级中等。综合灾害模糊风险空间分布: 除渝中区外, 主城区及邻近区县综合风险等级以中等及较低为主; 渝东北区县整体风险等级偏高; 渝东南区县整体风险等级以中等为主(图1)。

依据模糊物元综合评判结果: 1. 重庆市高风险等级区县6个, 包括: 渝中区、涪陵区以及渝东北的城口县、开县、云阳县和奉节县。上述区县灾害发生及造成损失的可能性较大。其中, 渝中区致灾因子变异频度和强度水平较低, 但作为全市的政治、经济、文化中心, 人口、财产高度集聚, 社会经济系统易损程度高, 由此引起渝中区总体灾害风险等级高。涪陵区地处乌江与长江干流交汇处, 易于发生洪涝和干旱, 社会经济易损性在全市处于中等水平, 但总体灾害风险较高。渝东北的城口县、开县、云阳县和奉节县, 主要由于自然致灾因子变异频度和强度较高, 同时叠加高灾损敏感性、低防灾减灾能力引起的社会经济系统高易损, 致使总体灾害风险相对较高。

2. 较高风险等级区县6个, 包括: 合川区、綦江区、梁

平县、万州区、彭水县和酉阳县。其中, 合川区、綦江区、梁平县、万州区、酉阳县5个区县, 致灾因子危险等级较高, 而社会经济易损性则相对较低, 但总体灾害风险水平较高; 彭水县暴雨、寒潮灾害发生率较高, 水土流失相对严重, 致灾因子危险性较高, 同时高灾损敏感和较低的防灾减灾能力导致易损性等级偏高, 引起综合灾害风险较高。3. 中等风险区县主要分布在主城及其周边, 包括: 江北区、沙坪坝区、大渡口区、渝北区、北碚区、巴南区、江津区、璧山县、荣昌县、忠县、巫山县和武隆县。上述中等风险区县, 整体发生各类灾害及造成损失的可能性相对居中。4. 较低风险等级区县, 包括: 南岸区、九龙坡区、潼南县、铜梁县、永川区、垫江县、长寿区、南川区, 渝东北的巫溪县和渝东南的黔江区、秀山县。其中, 南岸区、九龙坡区虽然经济发展水平较高, 人口、财产暴露度高, 但致灾因子危险性水平低; 其余区县致灾因子危险性和社会经济易损性整体均以较低为主。5. 低风险等级区县3个, 包括大足区、丰都县和石柱县。这些区县的致灾因子危险性和社会经济易损性在全市范围内均处于较低水平, 各类灾害发生及造成损失的可能性较小。

基于上述分析, 重庆市综合灾害风险空间分布

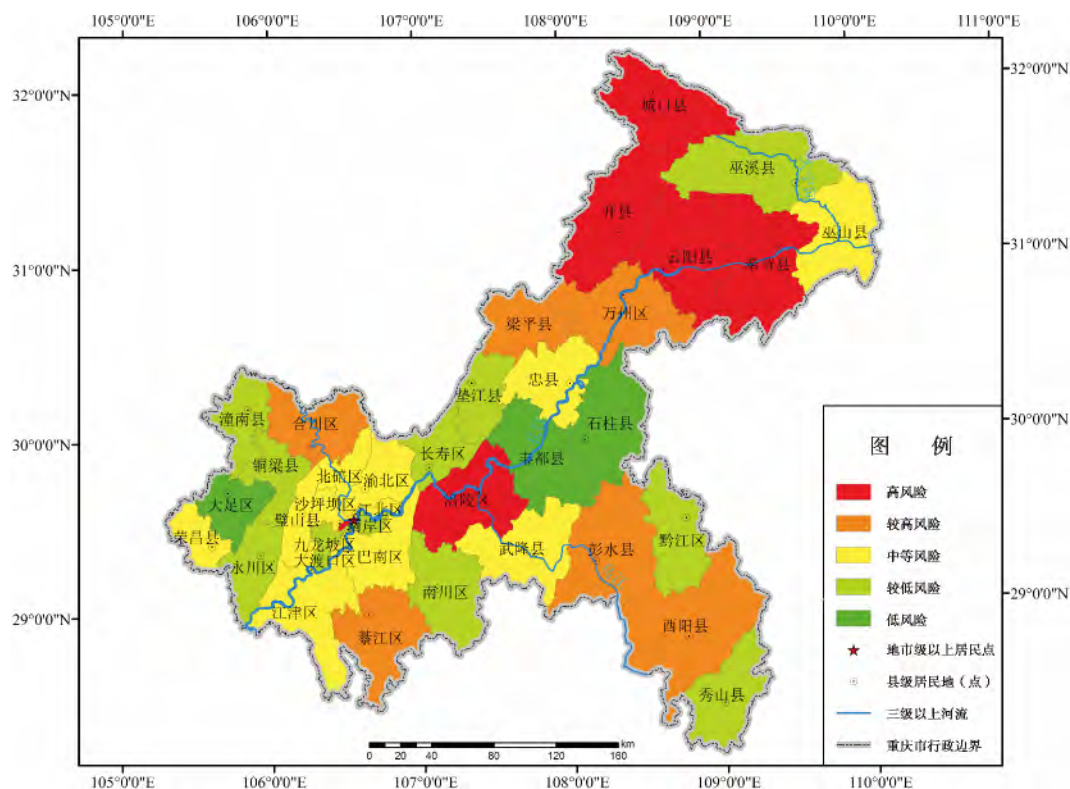


图1 重庆市综合灾害模糊风险等级分布图

Fig. 1 Distribution map of integrated disaster risk level in Chongqing



状况较为复杂,区县之间风险构成及成因存在一定差异性。因此,在灾害风险管理的实践中,应因地制宜、结合实际,避免盲目地“经验照搬”和“模式套用”。同时,尽管整体风险水平居中,但高风险及较高风险等级区县的防灾减灾任务艰巨,未来重庆市综合灾害风险管理与减缓面临较大的挑战。

#### 4.3 结果验证

为进一步评判本研究结果的准确性和可靠性,对灾害风险评价结果进行了验证。在实地踏勘和邀请相关专家进行评审的基础上,将研究得出的综合灾害风险结果与重庆市各区县灾情数据进行对比验证,结果表明本研究得出的风险评判结果较为可靠。研究结果基本从大体反映了重庆市综合灾害模糊风险及其构成要素的空间分布状况,可为该地区综合灾害风险管理提供一定的科学依据。

### 5 结论及讨论

本研究在前期重庆市灾害系统分析的基础上,以“ $R=f(h) \times f(v)$ ”作为综合灾害风险概念模型,通过构建“综合灾害模糊风险评价指标体系”,使用基于“综合赋权”的模糊物元评价模型,对重庆市各区县综合灾害模糊风险进行了定量评价和排序,并对重庆市综合灾害模糊风险的空间分布及成因进行了初步的研究。综合上述研究,得出以下主要结论:

1. 重庆市致灾因子危险性整体水平略微偏高。渝东北区县整体危险性高于渝东南区县,渝西地区整体危险性等级则相对为最低。嘉陵江沿岸的合川区、北碚区、渝北区和乌江沿岸的武隆县、彭水县、酉阳县、渝东北的城口县,及三峡库区的涪陵区、万州区、奉节县、云阳县致灾因子危险性较高。

2. 重庆市承灾体易损性整体水平较低。渝西地区以低及较低易损等级为主,但主城渝中区、江北区、南岸区、大渡口区则相对较高易损;渝东北区县以较高易损等级为主,城口县、开县、云阳县、奉节县和巫溪县承灾体易于遭受损失的风险较高;渝东南除彭水县外,其余区县易损等级为低。

3. 重庆市综合灾害模糊风险整体水平居中。主城区及邻近区县综合风险等级以中等及较低为主;渝东南整体风险等级以中等为主;渝东北整体风险等级则略微偏高。渝中区、涪陵区和渝东北的城口县、开县、云阳县、奉节县各类灾害发生及造成损失的可能性较大,是未来防灾减灾工作的重点。

综合灾害风险相关研究,已经引起了越来越多学者的关注。本研究初步揭示了重庆市综合灾害模糊风险空间分布状况及其成因。研究结果实现了区县之间的风险排序和比较,能够满足中等空间尺度(省、市)风险管理需求。但面对更小空间尺度的风险管理需求,本研究结果的空间分辨率则略显偏低,评价单元有待于进一步细化。同时,本研究中评价指标体系构建受作者理论水平及数据获取约束,后续研究仍有一定的优化空间。不同尺度的区域综合灾害风险动态评价和对比,各灾种风险在综合风险中贡献率探讨,是未来灾害风险相关研究的重要方向。综合灾害风险管理,任重道远、意义重大,在理论和实践过程中,有待不断改进优化、推陈出新。

致谢:向对本研究提出宝贵意见、建议的重庆师范大学赵纯勇教授、西南大学傅瓦利教授、刘敏副教授、周宝同副教授、吕瑜良副教授和周文佐副教授表示感谢。同时向参与本研究“专家问卷调查”的数十位专家、学者表示感谢。

#### 参考文献(References)

- [1] Okada N, Amendola A. Research challenges for integrated disaster risk management [R]. Presentation to the First Annual IASA - DPRIM Meeting on Integrated Disaster Risk Management Reducing Socio - Economic Vulnerability, at IASA, Laxenburg Austria (Aug1 - 4 2001) 2001.
- [2] Okada N. Urban diagnosis and integrated disaster risk management [G]//Proceedings of the China - Japan EQTAP Symposium on Police and Methodology for Urban Earthquake Disaster Management. 9 - 10 November 2003, Xiamen, China
- [3] Munich RE. NatCat Database [DB/OL]. [2014 - 03 - 01]. <http://www.munichre.com>
- [4] Université catholique de Louvain Brussels - Belgium. EM - DAT: The OFDA/CRED International Disaster Database [DB/OL]. [2014 - 03 - 01]. <http://www.emdat.be>
- [5] Du Jun. Assessment and zonation of geohazards risk in China coast zone [D]. Shandong: Ocean University of China 2009. [杜军. 中国海岸带地质灾害风险评价及区划 [D]. 山东: 中国海洋大学, 2009.]
- [6] Yin Jie, Yin Zhane, Xu Shiyuan, et al. Disaster risk theory and risk management method [J]. Journal of Catastrophology 2009 24(2): 8 - 15 [殷杰, 尹占娥, 许世远, 等. 灾害风险理论与风险管理方法研究 [J]. 灾害学 2009 24(2): 8 - 15]
- [7] Zhang Lijuan, Li Wenliang, Zhang Dongyou. Meteorological disaster risk assessment method based on Information Diffusion Theory [J]. Scientia Geographica Sinica 2009 29(2): 250 - 254 [张丽娟, 李文亮, 张冬有. 基于信息扩散理论的气象灾害风险评估方法 [J]. 地理科学 2009 29(2): 250 - 254]
- [8] Liu Guangxu, Dai Erfu, Wu Shaohong, et al. A study on theory and

- method in debris flow risk assessment[J]. Progress in Geography, 2012, 31(3): 383–391 [刘光旭,戴尔阜,吴绍洪,等. 泥石流灾害风险评估理论与方法研究[J]. 地理科学进展, 2012, 31(3): 383–391]
- [9] Tang Weian, Tian Hong, Yang Yuanjian, et al. Risk zonation of cold disaster based on GIS: a case study of Anhui Province[J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, 32(3): 356–361 [唐为安,田红,杨元建,等. 基于GIS的低温冷冻灾害风险区划研究——以安徽省为例[J]. 地理科学, 2012, 32(3): 356–361]
- [10] Yin Jie, Dai Erfu, Wu Shaohong. Integrated risk assessment and zoning of typhoon disaster in China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2013, 33(11): 1370–1376 [殷洁,戴尔阜,吴绍洪. 中国台风灾害综合风险评估与区划[J]. 地理科学, 2013, 33(11): 1370–1376]
- [11] Jin Jiangjun, Pan Mao, Li Tiefeng. Regional Landslide disaster risk assessment methods[J]. Mountain Research, 2007, 25(2): 197–201 [金江军,潘懋,李铁锋. 区域滑坡灾害风险评价方法研究[J]. 山地学报, 2007, 25(2): 197–201]
- [12] Muhammad Masood, Kuniyoshi Takeuchi. Assessment of flood hazard, vulnerability and risk of mid-eastern Dhaka using DEM and 1D hydrodynamic model[J]. Natural Hazards, 2012, 61: 757–770
- [13] Xu Shiyuan, Wang Jun, Shi Chun, et al. Research of the natural disaster risk on coast cities[J]. Acta Geographica Sinica, 2006, 61(2): 127–138 [许世远,王军,石纯,等. 沿海城市自然灾害风险研究[J]. 地理学报, 2006, 61(2): 127–138]
- [14] Liu Baoyin, Xu Wei. Comprehensive multi risk assessment of natural hazards to human life in Yangtze River Delta Region[J]. Journal of Natural Disasters, 2012, 21(3): 56–63 [刘宝印,徐伟. 长江三角洲地区人类生命体多自然灾害综合风险度评估[J]. 自然灾害学报, 2012, 21(3): 56–63]
- [15] Zhou Yinkang, Jin Xiaobin, Wang Qian, et al. Comprehensive assessment of natural disaster risk for agricultural production in Guanzhong Region based on GIS[J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, 32(12): 1465–1472 [周寅康,金晓斌,王千,等. 基于GIS的关中地区农业生产自然灾害风险综合评价研究[J]. 地理科学, 2012, 32(12): 1465–1472]
- [16] Jochen Schmidt, Iain Matcham, Stefan Reese, et al. Quantitative multi-risk analysis for natural hazards: a framework for multi-risk modelling[J]. Natural Hazards, 2011, 58: 1169–1192
- [17] Yin Jie, Yin Zhan'e, Xu Shiyuan. Urban disasters composite risk assessment of Shanghai[J]. Scientia Geographica Sinica, 2009, 29(3): 450–454 [殷杰,尹占娥,许世远. 上海市灾害综合风险定量评估研究[J]. 地理科学, 2009, 29(3): 450–454]
- [18] Gai Chengcheng, Weng Wenguo, Yuan Hongyong. Multi-hazard risk assessment using GIS in urban areas[J]. Journal of Tsinghua University: Science & Technology, 2011, 51(5): 627–631 [盖程程,翁文国,袁宏永. 基于GIS的多灾种耦合综合风险评估[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2011, 51(5): 627–631]
- [19] Xue Ye, Chen Baozhang, Huang Chongfu, et al. Soft hierarchical model of integrated risk assessment for multi-hazards: taking earthquake and flood disasters in Lijiang, Yunnan as a case study[J]. Progress in Geography, 2012, 31(3): 353–360 [薛晔,陈报章,黄崇福,等. 多灾种综合风险评估软层次模型[J]. 地理科学进展, 2012, 31(3): 353–360]
- [20] Jacopo Selva. Long-term multi-risk assessment: statistical treatment of interaction among risks[J]. Natural Hazards, 2013, 67: 701–722
- [21] Pradeep k Rawat, Prakash C Tiwari, Charu C Pant. Geo-hydrological database modelling For integrated multiple hazards and risk assessment in Lesser Himalaya: a GIS-based case study[J]. Natural Hazards, 2012, 62: 1233–1260
- [22] Wang Long, Yang Juan, Xu Gang, et al. Analysis of Chongqing disaster system and control strategies[J]. Territory & Natural Resources Study, 2013, 4(3): 62–65 [王龙,杨娟,徐刚,等. 重庆市灾害系统分析及防灾减灾对策研究[J]. 国土与自然资源研究, 2013, 4(3): 62–65]
- [23] Chen Shengqi, Cai Shuliang, Xiao Ting. Chongqing geography [M]. Chongqing: Southwest China Normal University Press, 2003. [陈升琪,蔡书良,肖挺. 重庆地理[M]. 重庆: 西南师范大学出版社, 2003.]
- [24] Chongqing Municipal Bureau of Statistics and NBS Survey Office in Chongqing. Chongqing statistical year book (2000–2013) [J]. Beijing: China Statistics Press, 2000–2013 [重庆统计局,国家统计局重庆调查总队. 重庆统计年鉴(2000–2013) [J]. 北京: 中国统计出版社, 2000–2013]
- [25] Yang Juan, Wang Long, Xu Gang. Fuzzy Comprehensive evaluation of integrated disaster risk in Chongqing[J]. Earth and Environment, 2014, 42(2): 252–259 [杨娟,王龙,徐刚. 重庆市综合灾害风险模糊综合评价[J]. 地球与环境, 2014, 42(2): 252–259]
- [26] Huang Chongfu. Risk Assessment of natural disaster: theory and practice [M]. Beijing: Science Press, 2005. [黄崇福. 自然灾害风险评估理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2005.]
- [27] Yin Zhane. Research of urban natural disaster risk assessment and case study [D]. Shanghai: East China Normal University, 2009. [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.]
- [28] Zhang Guocai. Meteorological disaster risk assessment and zonation methods [M]. Beijing: Meteorological Press, 2010. [章国才. 气象灾害风险评估与区划方法[M]. 北京: 气象出版社, 2010.]
- [29] Editorial Board of Chinese Meteorological Disasters Book. Chinese meteorological disasters book (Chongqing) [M]. Beijing: Meteorological Press, 2008: 14–252 [中国气象灾害大典编委会. 中国气象灾害大典(重庆卷) [M]. 北京: 气象出版社, 2008: 14–252]
- [30] Chongqing Environment Protection Bureau. Chongqing municipality state of the environment (2003–2012) [EB/OL]. [2013–10–01]. <http://www.cepb.gov.cn/zlkz/hjzkgb/60383.htm> [重庆市环境保护局. 重庆市环境状况公报(2003–2012) [EB/OL]. [2013–10–01]. <http://www.cepb.gov.cn/zlkz/hjzkgb/60383.htm>]
- [31] Chongqing Municipal Bureau of Water Resources. Chongqing bulletin of soil and water conservation (2012) [EB/OL]. [2013–12–20]. <http://www.cqsbj.com/> [重庆市水利局. 重庆市水土保持公报(2012) [EB/OL]. [2013–12–20]. <http://www.cqsbj.com/>]



- [32] Li Qiaoxing. The theoretical research and application of index's weight to be determined in the multiple attribute decision making [D]. Nanning: Guangxi University, 2004. [李桥兴. 多属性决策中标权权重确定的理论研究与应 [D]. 南宁: 广西大学, 2004.]
- [33] Satty T L. Decision making-the analytic hierarchy and network process( AHP/ANP) [J]. Journal of Systems Science and Systems Engineering, 2004, 13(1): 1-35
- [34] Zou Zhihong, Sun Jingnan, Ren Guangping. Study and application on the entropy method for determination of evaluation indicators in Fuzzy Synthetic Evaluation for water quality assessment [J]. Acta Scientiae Circums tantiae, 2005, 25(4): 552-556 [邹志红, 孙靖南, 任广平. 模糊评价因子的熵权法赋权及其在水质评价中的应用 [J]. 环境科学学报, 2005, 25(4): 552-556]
- [35] Yao Yuxin, Zhang Ying, Lu Binli, et al. Application of Fuzzy Matter-Element model to the water environmental Bearing Capacity [J]. Journal of Nanjing Normal University: Engineering and Technology, 2007, 7(2): 82-87 [姚玉鑫, 张英, 鲁斌礼, 等. 模糊物元模型在评价区域水环境承载力中的应用 [J]. 南京师范大学学报: 自然科学版, 2007, 7(2): 82-87]
- [36] Li Hong, Zhou Bo. The catastrophe disaster risk level in China mainland based on FME [J]. Journal of Shenzhen University: Science and Engineering, 2012, 29(1): 18-24 [李红, 周波. 基于 FME 的中国大陆重大自然灾害风险等级评价 [J]. 深圳大学学报: 理工版, 2012, 29(1): 18-24]
- [37] Xiao Fangchun. Study for Fuzzy-Matter analysis and its applications [J]. Structure & Environment Engineering, 1995, 4(2): 51-59 [肖芳淳. 模糊物元分析及其应用研究 [J]. 强度与环境, 1995, 4(2): 51-59]
- [38] Zhang Xianqi, Liang Chuan. Application of fuzzy matter-element model based on coefficients of entropy in comprehensive evaluation of water quality [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(9): 1057-1061 [张先起, 梁川. 基于熵权的模糊物元模型在水质综合评价中的应用 [J]. 水利学报, 2005, 36(9): 1057-1061]
- [39] Liu Li, Xuyilun, Jiang Shanhu, et al. Evaluation of urban vitality based on Fuzzy Matter Element Model [J]. Geography and Geo-Information Science, 2010, 26(1): 73-77 [刘黎, 徐逸伦, 江善虎, 等. 基于模糊物元模型的城市活力评价 [J]. 地理与地理信息科学, 2010, 26(1): 73-77]

## Fuzzy Integrated Disaster Risk Assessment Based on Comprehensive Empowerment Fuzzy Matter Element Model in Chongqing, China

WANG Long<sup>1</sup>, XU Gang<sup>2,3</sup>

(1. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China;

2. School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China;

3. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Environment, Ministry of Education, Southwest University, Chongqing 400715, China)

**Abstract:** Integrated disaster risk is one of the core topic in the current disaster research. Integrated disaster risk assessment is the core aspect of the study in Integrated disaster risk. Determining the risk and to found out the causes can provide scientific basis for the integrated disaster risk management. On the basis of analysis on the regional disaster system, Public and government available statistics been used as data sources, 38 districts and counties as basic unit. A preliminary disaster risk evaluation index system is established according to the principles of scientific, systematic, reliable and simple. This index system reflect elements of risk: hazard, vulnerability, exposure, sensitivity, coping capacity in each unit respectively; index weight empowered by "Synthetic Method". Conception models of comprehensive risk established as " $R = f(h) \times f(v)$ ", fuzzy matter-element model has been adopted. Then through integrated disaster risk fuzzy quantitative assessment and sorting, reasons for the Composition and spatial differences of disaster risk been explained. Finally, main conclusions has been drawn according to the analysis of the results: 1. Average hazard risk level of Chongqing is moderately high. 2. Average vulnerability level of Chongqing is lower. 3. The average integrated disaster risk level of Chongqing is moderate, while spatial differences exist within the counties and districts. Yuzhong District, Fuling District and Chengkou County, Kaixian County, Yuyang County and Fengjie County located in northeast Chongqing stands high integrated disaster risk, meanwhile they are the focus of disaster prevention and mitigation implement in the future.

**Key words:** disaster risk assessment; fuzzy matter element; fuzzy risk; comprehensive empowerment; Chongqing