

# 多灾种综合风险评估软层次模型

薛 晔<sup>1,2</sup>, 陈报章<sup>1</sup>, 黄崇福<sup>3</sup>, 严建武<sup>1</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

2. 太原理工大学经济管理学院, 太原 030024;

3. 北京师范大学减灾与应急管理研究院, 北京 100875)

**摘 要:** 在复杂的灾害风险系统中, 风险并非简单相加, 但目前的研究成果基本是单一灾种简单相加得到的综合风险, 缺乏可靠性。因此, 此研究基于灾害风险系统理论, 引入模糊信息粒化方法和模糊转化函数, 利用模糊近似推理理论和方法, 建立一个多灾种综合风险评估软层次模型。研究表明该模型的优势: 1) 不仅考虑了灾害风险系统中的确定性, 而且还包括了随机不确定性和模糊不确定性; 2) 利用模糊信息粒化方法不仅减少了数据的不确定性, 而且还包括了一些主观信息, 使得评估结果更加接近实际, 理论与实际紧密结合, 更有利于风险管理者和决策者为减少损失规避风险提供依据; 3) 通过模糊转化函数将不同灾种得到的不同量纲的量转化同一量纲的量, 以便于综合分析和模糊近似推理, 获得多灾种综合风险。以云南省丽江地区(市)的地震-洪水灾害为例, 验证多灾种综合风险评估软层次模型的实用性, 并将其结果与世界银行灾害管理中心和哥伦比亚大学灾害和风险研究中心所建议的风险评估模型(HMU-CHRR模型)的结果进行比较分析, 讨论了本研究建模在多灾种综合风险评估中的特点。

**关 键 词:** 模糊信息粒; 模糊转化函数; 地震风险; 洪水风险; 模糊近似推理

## 1 引言

综合自然灾害风险评估是风险和灾害领域的研究热点和难点。从国内外有关综合自然灾害风险评估的文献来看, 直到进入21世纪, 学术界的研究方向才逐渐从“自然灾害风险评估”向“多灾种综合风险评估”转变, 即由“因素的综合”向“灾种的综合”转变。所以, 目前对多灾种综合风险评估的研究成果甚少, 且为数不多的模型也相对较简单。

大多数研究者考虑到灾害风险系统中的随机不确定性, 利用概率论与数理统计方法首先得到单一灾种的风险, 然后将其简单相加得到多灾种的综合风险。例如, Joseph 和 Donald<sup>[1]</sup>基于条件损失分布, 提出综合风险就是年总损失的超越概率。在栅格理论和致灾因子危险性、承灾体的脆弱性的基础上, Delley 和 Chen 等<sup>[2-3]</sup>提出了地震、洪水、干旱、火山、泥石流和飓风6种灾害死亡人员和经济损失的

栅格尺度的综合风险评估模型(式1)。式中:  $Y_i^*$  表示第  $i$  个栅格中, 6 种灾害综合期望死亡人数目;  $M_h$  为致灾因子  $h$  导致的死亡人数目;  $P_h$  为受致灾因子  $h$  影响的人口数目;  $r_h$  为死亡率;  $M_{hi}$  为栅格  $i$  中期望死亡人数目;  $P_i$  为栅格  $i$  中的人口数目;  $j$  为脆弱性等级;  $w_{hi}$  为致灾因子的危险性。将该模型应用于全球的风险分析中, 进而得到全球的综合高风险区划图。

$$\left\{ \begin{array}{l} Y_i^* = \sum_{h=1}^6 M_{hij}^* \\ M_{hij}^* = M'_{hij} * M_{hi} / \sum_{i=1}^n M'_{hij} \\ M'_{hij} = r_{hj} * w_{hi} * P_i \\ M_{hij} = r_{hj} * P_i \\ M_{hi} = r_h * P_i \\ r_h = M_h / P_h \end{array} \right. \quad (1)$$

收稿日期: 2011-10; 修订日期: 2012-02.

基金项目: 国家科技支撑计划专题项目(2008BAK50B06-02); 国家自然科学基金青年科学基金项目(41101507); 国家自然科学基金基金项目(70973086)。

作者简介: 薛晔(1974-), 女, 博士、副教授、硕士生导师, 主要研究方向为模糊决策、风险分析与风险管理、模糊信息优化处理。  
E-mail: xueye0412@126.com

通讯作者: 陈报章(1963-), 江苏邳州人, 研究员, 博士生导师, 中科院“百人计划”入选者, 主要从事基于环境遥感、集成陆面过程模型模拟和自然灾害风险评估方面的研究。E-mail: baozhang.chen@igsrr.ac.cn

灾害风险指标计划<sup>[4-5]</sup> (Disaster Risk Index, DRI)共选取了24个涵盖社会、经济和环境等方面的变量,可以针对不同的灾种选择相应的脆弱性指标;然后通过一个复合对数回归模型对一系列社会、经济和环境指数进行统计分析,DRI可以检验每个灾种的风险,多灾种的风险等于单一灾种的风险简单相加。美洲计划<sup>[6-7]</sup>不仅有死亡和经济损失的风险等硬指标,而且还计算了灾害管理的一些软指标;首次计算了省级及城市级物质风险和总风险,并以波哥大为典型实证地区研究,利用GIS绘制出其物质风险和总风险的分布图。Silvia和Dilley<sup>[8]</sup>将用灾害风险指标计划和美洲计划分别计算出的全球灾害风险结果进行了比较和排序。Chen<sup>[9]</sup>等基于系统工程方法设计多灾种风险分析系统概念框架。Thierry等<sup>[10]</sup>利用火山喷发、不稳定的斜坡和地震等致灾因子的强度和频率两个指标建立场景矩阵进行叠加,对喀麦隆山进行了多灾种风险评估和区划。颜兆林等<sup>[11]</sup>介绍概率风险评价系统时,其中综合风险计算模型为:

$$R_{total} = \sum_{i=1}^n R_i = \sum_{i=1}^n f_i c_i \tag{2}$$

式中:  $R_{total}$  为综合风险;  $f_i$  为第  $i$  个致灾因子发生的频率;  $c_i$  为第  $i$  个致灾因子对应的货币损失;  $R_i$  为第  $i$  个致灾因子的风险值;  $n$  为致灾因子的数目。陈报章等<sup>[12]</sup>借助风险矩阵得到单灾种的风险损失度的概念模型,进而利用不同灾种风险度的算术平均数与损失度的算术平均数的乘积计算得到多灾种的综合风险损失度。尹占娥等<sup>[13-14]</sup>采用多次实地调查获得的内涝损失数据,拟合出居民房屋和室内财产的灾损曲线;利用灾损曲线评估脆弱性、暴露要素和损失,建立超越概率-损失曲线,创建基于GIS栅格城市暴雨内涝灾害的风险评估模型与范式,为制订城市暴雨内涝灾害风险管理和规划奠定了基础等<sup>[15-16]</sup>。但是,这些模型仅考虑了灾害风险评估中的随机不确定性,缺乏反映以不精确、模糊和不完全为特征的模糊不确定性。另外,多灾种的综合风险等于单一灾种风险简单相加的计算方法缺乏可靠性。

鉴于此,Adrian等<sup>[17]</sup>在《Risk Engineering》一书中提出了模糊风险分析方法:

$$\tilde{R} = f(\tilde{C}_i, \tilde{P}_i) \tag{3}$$

$$\tilde{C}_i = \tilde{A} \cdot \tilde{\delta} \cdot \tilde{f}_A \cdot \tilde{f}_m \tag{4}$$

式中:  $\tilde{R}$  为模糊风险;  $\tilde{P}_i$  为第  $i$  事件结果的概率评估;  $\tilde{C}_i$  为第  $i$  事件的结果;  $\tilde{A}$  为受影响的区域;  $\tilde{\delta}$  为

人口密度;  $\tilde{f}_A$  为受影响区域人口分布的区域修正因子;  $\tilde{f}_m$  为减灾的修正因子;并将其应用于对区域灾害风险的评估。该方法将所有的参数视为L-R型模糊数的语言变量,参数间的运算也没用复杂的模糊数四则运算而是普通的集合运算。最后还根据事件值和事件结果概率值的交叉区域面积大小对所研究区的所有风险源进行了排序。这个方法操作比较简单,更贴近现实,更直观,但是将模糊运算简化和排序方法是否合理都还有待于进一步验证。黄崇福等<sup>[18-19]</sup>考虑了灾害描述(包括致灾因子特征的描述和承灾体脆弱性的描述)的模糊不确定性,在用于实际风险估算时,概率风险评估模型的可行性和可靠性仍存在问题。于是,引入灾害可能性风险概念,利用模糊信息优化处理技术,提出单一灾种灾害风险分析的可能性风险模型。任鲁川基于城市灾害风险分析的可能性模型之上,利用模糊集理论,提出多灾种综合风险评估模型<sup>[20]</sup>:

$$f(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_N)(x) = \sup_{1-(1-a)(1-b)\dots(1-c)=x} \min\{\pi_1(a), \pi_2(b), \dots, \pi_N(c)\} \tag{5}$$

式中:  $\pi_i$  为第  $i$  种致灾因子导致的区域灾害可能性风险;  $N$  为致灾因子总数目。但是,此模型只考虑了灾害风险系统中的致灾因子,并没有讨论承载体和孕灾环境,有悖于灾害风险系统理论。

因此,本研究基于灾害风险评估系统理论<sup>[21-23]</sup>,利用模糊信息粒化方法<sup>[24]</sup>和模糊转化函数<sup>[25]</sup>,建立一个经三层逐级放大的多灾种综合风险评估软层次模型,可以让评估者比较全面的认识自然灾害综合风险评估各个方面及其相互关系,使决策者从中可以了解到更多的信息,为决策者有效地指导防灾与备灾工作,从而减少自然灾害所造成的损失提供科学依据。

## 2 软层次模型的建立

采用从简单到复杂、从抽象到具体的分析方法,建立一个实用的逐渐具体化的3个层次的多灾种综合风险评估软层次模型:①基础层——概念模型,定性的描述多灾种综合风险评估模型所包括的各个子模型及其相互间关系;②中间层——过渡模型,抽象量化描述各个子模型包含的因素及其相互关系;③顶层——实用模型,针对具体的致灾因子,根据各种灾害的实际数据资料,确定各个模型中的参数具体量化表示形式,再代入相应计算式中得到

表1 综合风险评估软层次模型层次间关系

Tab.1 Relationship between layers in soft hierarchical model of integrated risk assessment			
层 次	层次间关系	抽象等级	与灾害类型的关系
基础层-概念模型	是综合风险评估模型的基础	抽象	无关
中间层-过渡模型	由放大的各个子模型和模糊信息粒方法得到	较具体	无关
顶层-实用模型	用概率统计分析、模糊语言变量和模糊信息粒化等方法,得到具体的灾害参数粒	具体	有关

综合风险评估实用模型。各层次的具体关系如表1所示。因为该模型是基于模糊信息粒化软计算的方法上建立层次模型,所以将其称为软层次模型。

2.1 基础层——概念模型

根据综合风险评估的定义,综合灾害风险  $\widetilde{risk}$  是致灾可能性  $\widetilde{P}_0$  和灾害损失  $\widetilde{W}$  的乘积(公式6),如果灾害发生可能性为零,即灾害发生是不可能事件或灾害根本不发生,那么就不存在风险,更谈不上风险评估了。

$$\widetilde{risk} = \widetilde{P}_0 \cdot \widetilde{W} \tag{6}$$

例如:处于板块中心的某农村,虽有许多脆弱性的群体,但是发生地震可能性为零。所以不存在地震灾害风险,也就没必要进行地震灾害风险评估的工作。另一方面,如果灾害结果可能性为零,即灾害可能造成的损失为零或者说灾害不可能造成任何损失,那么也同样不存在风险,同样不必进行风险评估的研究工作。例如:在偏僻的荒无人烟的光秃秃的石山上发生8级地震,也不会造成任何损失。因此,本文所讨论的灾害发生可能性和灾害结果可能性的取值范围都是(0,1],这样才能达到自然灾害风险评估的目的,才能真正对规避风险,减少损失起到实用价值。

2.2 中间层——过渡模型

过渡模型实质是对各个子模型及其关系的抽象量化描述。

2.2.1 致灾可能性评估模型

根据灾害发生的可能性  $\widetilde{P}'_0$  是由致灾因子危险性  $\widetilde{D}_H$  和承灾体脆弱性  $\widetilde{V}_{ob}$  两个因素共同决定,得到灾害发生可能性的模型如下:

$$\widetilde{P}'_0 = \widetilde{D}_H \cdot \widetilde{V}_{ob} \tag{7}$$

为了减少分散程度和符合可能性的数学量化描述,用转化函数式(7)将其转化为  $\widetilde{P}_0$ 。

$$\widetilde{P}_0 = \frac{1}{2} \left( \frac{\log(\widetilde{P}'_0)}{\int \log(\widetilde{P}'_0)} \right) \tag{8}$$

2.2.1.1 致灾因子危险性  $\widetilde{D}_H$

第一步,计算历史危险性。

$$\widetilde{D}_{li} = \widetilde{V}_i \cdot \widetilde{F}_i \cdot \widetilde{M}_i \tag{9}$$

式中:  $\widetilde{D}_{li}$  表示研究区内第  $i$  类致灾因子的历史危险性;  $\widetilde{V}_i$  表示研究区内第  $i$  类灾害的规模;  $\widetilde{F}_i$  表示研究区内第  $i$  类灾害的频次;  $\widetilde{M}_i$  表示研究区内第  $i$  类灾害分布密度。

第二步,计算潜在危险性  $\widetilde{D}_{2i}$ ,即计算研究区内将来某个时间  $t$  的第  $i$  类致灾因子危险性。潜在危险性是历史危险性的函数,并且随着时间  $t$  的变化而变化,危险性的变化是由相关变系数  $\widetilde{a}_{oi}$  决定,变系数一般是由致灾因子的孕灾环境决定。

$$\widetilde{D}_{2i} = \widetilde{D}_{li} + \widetilde{a}_{oi} t \tag{10}$$

第三步,计算致灾因子危险性,即计算研究区内将来某段时间  $\Delta t$  内  $n$  类致灾因子危险性。首先,计算研究区内将来某段时间  $\Delta t$  内第  $i$  类致灾因子危险性  $\widetilde{D}_{Hi}$ :

$$\widetilde{D}_{Hi} = \widetilde{D}_{li} + \int_t^{t+\Delta t} \widetilde{a}_{oi} dt \tag{11}$$

然后,假设  $w_{Hi}$  为研究区内第  $i$  类致灾因子的权重系数,则得到研究区内将来某段时间  $\Delta t$  内  $n$  类致灾因子危险性  $\widetilde{D}_H$ :

$$\widetilde{D}_H = \sum_{i=1}^n w_{Hi} \widetilde{D}_{Hi} \tag{12}$$

2.2.1.2 承灾体的脆弱性  $\widetilde{V}_{ob}$

第一步,计算历史脆弱性,即计算某承灾体的人类社会经济系统对第  $i$  类致灾因子的敏感(反应)度。历史脆弱性是由承灾体的暴露程度、承灾体的适应能力和承灾体的抗灾能力决定的。

$$\widetilde{V}_{li} = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^T \widetilde{E}_{ij} \cdot (\widetilde{A}_{ij} + \widetilde{R}_{ij})^{-1} \tag{13}$$

式中:  $\widetilde{V}_{li}$  表示承灾体对第  $i$  类致灾因子的历史脆弱性;  $T$  为所统计的灾害总年份;  $\widetilde{E}_{ij}$  表示承灾体当年暴露于第  $i$  类致灾因子的程度;  $\widetilde{A}_{ij}$  表示承灾体当年对第  $i$  类致灾因子的适应能力;  $\widetilde{R}_{ij}$  表示承灾体当年对第  $i$  类致灾因子的抵抗能力。将其划分为非常差、差、一般、好和很好5个等级。根据承灾体当年的宏观性质,通过一个三维“if-then-system”,其所有输入参数是语言变量值{差、中等、好}的模糊参数,利用表2所展示的“if-then”规则<sup>[17]</sup>和表3中“if-then”规则定义,得到抗灾能力(输出参数)(图1)。

第二步,计算潜在脆弱性(计算将来某个时间



表2 “if-then”规则的输入和输出参数  
Tab.2 Input and output parameters of “if-then” rules

输入参数			输出参数
工程措施	非工程措施	风险意识	抗灾能力
差	差	差	非常差
差	差	中等	非常差
⋮	⋮	⋮	⋮
好	好	好	很好

表3 “if-then”的定义  
Tab.3 The definition of “if-then” rules

抗灾能力等级	数量化描述
非常差	$x^2$
差	$x$
一般	$2x$ if $x < 0.5$
	$2(1-x)$ if $x \geq 0.5$
好	$1-x$
很好	$(1-x)^2$

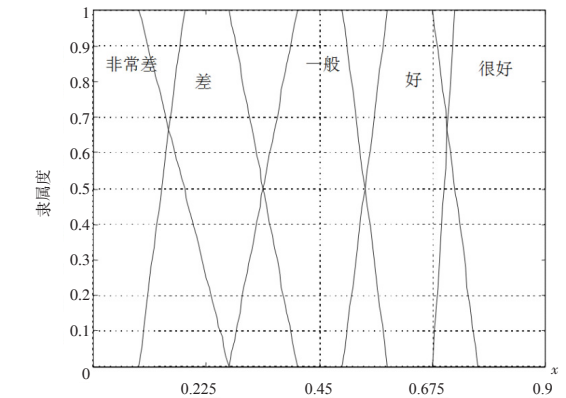


图1 抗灾能力成员函数

Fig.1 The membership functions of resistive ability

$t$  时承灾体对第  $i$  类致灾因子的脆弱性)。潜在脆弱性是历史脆弱性的函数,并且随着时间的变化而变化,脆弱性的变化是由相关变系数  $\tilde{b}_{0i}$  决定,变系数一般是由承灾体的环境因素如面积变化率、人口变化率和 GDP 变化率决定。

$$\tilde{V}_{2i} = \tilde{V}_{1i} + \tilde{b}_{0i}t \tag{14}$$

第三步,计算承灾体脆弱性,即计算将来某段时间  $\Delta t$  内承灾体对  $n$  类致灾因子的脆弱性。先计算将来某段时间  $\Delta t$  内承灾体对第  $i$  类致灾因子脆弱性:

$$\tilde{V}_{obi} = \tilde{V}_{1i} + \int_t^{t+\Delta t} \tilde{b}_{0i}dt \tag{15}$$

然后,假设  $w_{obi}$  为研究区内第  $i$  类致灾因子的权重系数,则得到将来某段时间  $\Delta t$  内承灾体的  $n$  类致灾因子脆弱性:

$$\tilde{V}_{ob} = \sum_{i=1}^n w_{obi} \tilde{V}_{obi} \tag{16}$$

2.2.2 灾害损失评估模型

第一步,计算历史损失。 $\tilde{W}_{1i} = \tilde{G}_i + \tilde{K}_i$  (17)

其中,

$$\tilde{G}_i = \frac{1}{T} \left( \sum_{k=s_{1i}}^{s_{mi}} \sum_{j=1}^T \tilde{D}_{Hik} [(\tilde{G}_{1ijk} + \tilde{G}_{2ijk} + \tilde{G}_{3ijk}) \cdot \tilde{P}_{eijk}] \right) \tag{18}$$

$$\tilde{K}_i = \frac{1}{2} (\tilde{K}_{1i} + \tilde{K}_{2i}) \tag{19}$$

式中:  $\tilde{G}_i$  表示研究区当年发生第  $i$  类灾害的人员伤亡可能性;  $\tilde{D}_{Hik}$  表示研究区当年发生第  $i$  类灾害强度为  $k$  的概率;  $\tilde{G}_{1ijk}$  表示研究区当年发生第  $i$  类灾害强度为  $k$  的人员死亡率;  $\tilde{G}_{2ijk}$  表示研究区当年发生第  $i$  类灾害强度为  $k$  的人员受伤率;  $\tilde{G}_{3ijk}$  表示研究区当年发生第  $i$  类灾害强度为  $k$  的人员无家可归率;  $\tilde{P}_{eijk}$  表示研究区当年发生第  $i$  类灾害强度为  $k$  的受影响的人口数;  $\tilde{K}_i$  表示研究区当年发生第  $i$  类灾害的经济损失;  $\tilde{K}_{1i}$  表示研究区当年发生第  $i$  类灾害的直接经济损失;  $\tilde{K}_{2i}$  表示研究区当年发生第  $i$  类灾害的间接经济损失。

第二步,计算潜在损失的可能性。潜在损失基于历史损失评估之上,并随着所研究区的人口分布和经济结构的变化而变化,因此,潜在损失评估模型为:

$$\tilde{W}_{2i} = \tilde{W}_{1i} + (\tilde{c}_{0i} + \tilde{d}_{0i})t \tag{20}$$

式中:  $\tilde{W}_{2i}$  为潜在损失的可能性;  $\tilde{c}_{0i}$  为人口分布的变系数;  $\tilde{d}_{0i}$  为经济结构的变系数。

第三步,计算灾害结果可能性。先计算研究区内将来某段时间  $\Delta t$  内第  $i$  类灾害结果的可能性:

$$\tilde{W}'_i = \tilde{W}_{1i} + \int_t^{t+\Delta t} (\tilde{c}_{0i} + \tilde{d}_{0i})dt \tag{21}$$

为了减少分散程度和符合可能性的数学量化描述,用转换函数将其转化为  $\tilde{W}_i$ 。

$$\tilde{W}_i = \frac{1}{2} \left( \frac{\log(\tilde{W}'_i)}{\ln(\log(\tilde{W}'_i))} - 1 \right) \tag{22}$$

然后,假设  $w_i$  为研究区内第  $i$  类致灾因子的权重系数,则得到研究区内将来某段时间  $\Delta t$  内  $n$  类灾害结果的可能性  $\tilde{W}$ :

$$\tilde{W} = \sum_{i=1}^n w_i \tilde{W}_i \tag{23}$$

2.3 软层次模型的顶层——实用模型

针对具体的致灾因子,根据各种灾害的实际资料,确定上述各个模型中的参数具体形式,代入相应计算式中即得到综合灾害风险评估实用模型。

例如,灾害的规模  $\tilde{V}$ 。一般与速率有关,在地震灾害风险评估中,用地面峰值加速度表示。但是

由于大部分地区没有或缺乏强震记录,不能直接得到峰值加速度的衰减曲线。本文根据烈度衰减关系式(24)<sup>[26]</sup>以及GB/T 17742-1999中对烈度和峰值加速度关系的描述,采用SPSS(statistical package for the social science)统计软件的曲线拟合得到烈度与峰值加速度的关系曲线式(25)。将式(24)代入式(25)整合得到峰值加速度与震级、震中距的关系式(26)。

$$\tilde{I}=a_1+a_2\widetilde{M}-a_3\ln(R_0+R)-a_4\ln(R_0'+R)$$

或

$$\tilde{I}=a_1+a_2\widetilde{M}-a_3\ln(R_0+R) \tag{24}$$

式中： $a_1,a_2,a_3,R_0,a_4,R_0'$  是由地震等震线拟合求得； $\widetilde{M}$  为震级； $R$  为震中距。

$$\widetilde{V}=b_1e^{b_2\tilde{I}} \tag{25}$$
$$\widetilde{V}=b_1e^{b_2\widetilde{M}}(b_3+R)^{-b_4}(b_5+R)^{-b_6}$$

或

$$\widetilde{V}=b_1e^{b_2\widetilde{M}}(b_3+R)^{-b_4} \tag{26}$$

式中： $b_1,b_2,b_3,b_4,b_5,b_6$  是式(24)中的常数  $a_1,a_2,a_3,R_0,a_4,R_0'$  和式(25)中的系数 0.01 和 0.691 推导出的参数值。

3 实例分析

以中国云南省丽江地区(市)地震和洪水灾害为例,用本研究所建的软层次模型计算得到丽江地区的地震-洪水灾害综合风险。所用的数据包括：1989-2008 年震级为 5.0 及 5.0 以上、烈度为 VI 度及 VI 度以上的地震灾害目录(表 4)、洪水灾害目录(表 5)和相关基础地理数据(表 6)。用模糊信息粒化方法将表 4 和表 5 的数据进行模糊粒化,以减少数据本身的模糊不确定性(表 7~8)。

将表 6~8 输入到本研究所建模型的顶层计算所有参数,例如,地震灾害的规模  $\tilde{V}$ 。根据毛玉平、韩新民<sup>[24]</sup>对云南地区强震的烈度衰减关系研究结果,可以得到丽江地区(市)烈度衰减关系式(27),然后将式(27)代入式(28)整合得到峰值加速度与震级、震中距的关系式：

$$\tilde{I}=11.75+1.35\widetilde{M}-1.62\ln(10+R)-2.35\ln(32+R) \tag{27}$$

$$\widetilde{V}=0.01e^{0.691\tilde{I}} \tag{28}$$

$$\widetilde{V}=33.19e^{0.93\widetilde{M}}(10+R)^{-1.12}(32+R)^{-1.62} \tag{29}$$

表 4 1989–2008 年云南省丽江地区(市)震级为 5.0 级以上、烈度为 VI 度以上的地震目录

Tab.4 Earthquake records at Lijiang from 1989 to 2008 (M≥5 and I≥VI)								
序号	震级/里氏震级	震中烈度	受影响面积/km <sup>2</sup>	受影响人口数/万人	当年直接经济损失/万元	死亡人数/人	受伤人数/人	无家可归人数/人
1	5.4	VI	68	0.482	1100	1	112	0
2	5.1	VI	22	0.23	787	0	30	0
3	7.0	IV	18720	85.048	250000	309	16920	188229
4	5.2	VI	185	0.75	2182	2	57	0
5	5.7	VII	927	4.449	3058	1	141	0
6	5.3	VI	63	3.7017	2680	0	1	0
7	6.2	VIII	69	0.376	25328	5	1487	25706
8	5.3	VII	711	2.484	9033	0	32	7738
9	5.8	VII	500	4.4639	5860	0	32	1040
10	6.0	VII	2492	23.137	41050	1	220	19074

数据来源:《云南减灾年鉴》和《云南省地震目录》。

表 5 1989–2008 年云南省丽江地区(市)洪水灾害目录

Tab.5 Flood records at Lijiang from 1989 to 2008								
序号	降雨量/mm	暴雨历时/h	受影响面积/km <sup>2</sup>	受影响人口数/万人	当年直接经济损失/万元	死亡人数/人	受伤人数/人	无家可归人数/人
1	127	48	54000	3400	3	12	0	12500
2	123.7	1.4	10000	22266.7	6	0	0	8300
3	96	24	52931	1934.2	0	1	0	4432.5
4	105.5	24	7653	1717.33	2	0	0	1170
5	206	24	40900	140	0	0	0	287
6	93.2	8	37700	5386.67	8	21	114	1318
7	128.8	24	43637	1224	2	2	0	838.3
8	30.4	12	3000	713.333	0	0	0	517.25
9	75.6	24	824	67.5333	4	0	0	421

数据来源:《云南减灾年鉴》。

表 6 基础地理数据  
Tab.6 Basic geographic data

年份	GDP /万元	耕地面积 /km <sup>2</sup>	人口 /万人	人口密度 /(人/m <sup>2</sup> )
1992	104018	1056.07	103.3	49.2
1996	208614	1031	106.91	50.43
1997	238662	1016	107.83	50.86
1998	266061	1012	108.62	51.24
1999	287127	1010	109.3	51.56
2000	308135	1008	110	51.84
2001	334024	1008	110.8	52.22
2002	369480	1008	111.2	52.5
2003	414050	1008	111.9	52.7
2004	521775	1008	112.7	53.1
2008	1011000	1008	119.5	56.32

数据来源:《云南统计年鉴》。

另外,洪水灾害的规模,根据魏一鸣等<sup>[27]</sup>对洪水风险管理的指标体系的研究,我们选择了降雨强度来描述灾害的规模,得到降雨强度 $\tilde{\nu}$ 和降雨量 $\tilde{L}$

之间的关系式(30)。  
$$\tilde{\nu}=e^{3.035-0.056\tilde{L}} \tag{30}$$

由式(9)到式(12)得到未来 10 年丽江地区地震-洪水灾害综合危险性为:

$$\widetilde{D}_H=(0.126648,0.1978339;0.0414109,0.0804205)$$

由式(13)到式(16)得到未来 10 年丽江地区地震-洪水灾害综合脆弱性为:

$$\widetilde{V}_{0b}=(0.208668,0.2191399;0.0171159,0.0095495)$$

由式(7)到式(8)得到未来 10 年丽江地区地震-洪水灾害发生的可能性为:

$$\widetilde{P}_0=(0.132126924,0.216766508;0.003543934,0.003839863)$$

由式(17)到式(23)得到未来 10 年丽江地区地震-洪水灾害综合损失的可能性为:

$$\widetilde{W}=(0.527228,0.538253;0.000877,0.000757)$$

由式(6)得到未来 10 年丽江地区(市)地震-洪水灾害综合风险为:

$$\widetilde{risk}=(0.069666,0.116675;0.026697,0.054821)$$

表 7 地震灾害数据的模糊信息粒

Tab.7 Fuzzy information granulation of data in Table 4

震级/ 里氏震级		震中 烈度	受影响面积 /km <sup>2</sup>	受影响人口数 /万人	当年直接经济损失 /万元	死亡人数 /人	受伤人数 /人	无家可归人数 /人
1	(5.3,5.5;0.1,0.1)	VI	(48,88;40,40)	(4570,5070;250,250)	(1080,1120;20,20)	(0,2;0,2)	(110,114;3,3)	(0,10;0,50)
2	(5.0,5.2;0.0,0.1)	VI	(2,42;40,40)	(2050,2550;250,250)	(767,807;20,20)	(0,1;0,2)	(28,32;3,3)	(0,10;0,50)
3	(6.9,7.1;0.1,0.1)	IX	(18700,18740; 40,40)	(850230,850730;250,250)	(249980,250020;20, 20)	(308,310;1, 1)	(16918,16922; 3,3)	(188219,188239;50, 50)
4	(5.1,5.3;0.1,0.1)	VI	(165,205;40,40)	(7250,7750;250,250)	(2162,2202;20,20)	(1,3;1,1)	(55,59;3,3)	(0,10;0,50)
5	(5.6,5.8;0.1,0.1)	VII	(907,947;40,40)	(51640,52140;250,250)	(3038,3078;20,20)	(0,2;0,2)	(139,143;3,3)	(0,10;0,50)
6	(5.2,5.4;0.1,0.1)	VI	(43,83;40,40)	(36767,37267;250,250)	(2660,2700;20,20)	(0,1;0,2)	(0,3;0,3)	(0,10;0,50)
7	(5.2,5.4;0.1,0.1)	VIII	(691,731;40,40)	(24590,25090;250,250)	(9113,9153;20,20)	(0,1;0,2)	(30,34;3,3)	(7728,7748;50,50)
8	(6.1,6.3;0.1,0.1)	VII	(3162,3202;40,40)	(104080,104580;250,250)	(46771,46811;20,20)	(4,6;1,1)	(1485,1489;3,3)	(25696,25716;50,50)
9	(5.7,5.9;0.1,0.1)	VII	(480,520;40,40)	(44389,44889;250,250)	(5840,5880;20,20)	(0,1;0,2)	(30,34;3,3)	(1030,1050;50,50)
10	(5.9,6.1;0.1,0.1)	VII	(2472,2512;40,40)	(2231120,2231620;250,250)	(41030,41070;20,20)	(0,2;0,1)	(218,222;3,3)	(19064,19084;50,50)

表 8 洪水灾害数据的模糊信息粒

Tab.8 Fuzzy information granulation of data in Table 5

降雨量 /mm	暴雨历时 /h	受影响面积 /km <sup>2</sup>	受影响人口数 /万人	当年直接经济损失 /万元	死亡人 数/人	受伤人 数/人	无家可归 人数/人
1 (126.9,127.1;0.1,0.1)	(47.875,48.125;0.125,0.125)	(33.5,34.5;0.5,0.5)	(53900,54100;100,100)	(12485,12515;15,15)	(2,4;1,1)	(10,14;3,3)	(0,10;0,15)
2 (123.6,123.8;0.1,0.1)	(1.275,1.525;0.125,0.125)	(222.2,223.2;0.5,0.5)	(9900,10100;100,100)	(8285,8315,15,15)	(5,7;1,1)	(0,4;0,6)	(0,10;0,15)
3 (95.9,96.1;0.1,0.1)	(23.875,24.125;0.125,0.125)	(18.8,19.8;0.5,0.5)	(52831,53031;100,100)	(4417.5,4447.5;15,15)	(0,2;0,2)	(0,3;0,3)	(0,10;0,15)
4 (105.4,105.6;0.1,0.1)	(23.875,24.125;0.125,0.125)	(16.7,17.7;0.5,0.5)	(7553,7753;100,100)	(1155,1185;15,15)	(1,3;1,1)	(0,4;0,6)	(0,10;0,15)
5 (205.9,206.1;0.1,0.1)	(23.875,24.125;0.125,0.125)	(0.9,1.9;0.5,0.5)	(40800,41000;100,100)	(272,302;15,15)	(0,2;0,2)	(0,4;0,6)	(0,10;0,15)
6 (93.1,93.3;0.1,0.1)	(7.875,8.125;0.125,0.125)	(53.4,54.4;0.5,0.5)	(37600,37800;100,100)	(1303,1333;15,15)	(7,9;1,1)	(20,22;1,1)	(109,119;15,15)
7 (128.7,128.9;0.1,0.1)	(23.875,24.125;0.125,0.125)	(11.7,12.7;0.5,0.5)	(43537,43737;100,100)	(823.3,853.3;15,15)	(1,3;1,1)	(1,3;1,1)	(0,10;0,15)
8 (30.3,30.5;0.1,0.1)	(11.875,12.125;0.125,0.125)	(6.6,7.6;0.5,0.5)	(2900,3100;100,100)	(512.25,542.25;15,15)	(0,2;0,2)	(0,4;0,6)	(0,10;0,15)
9 (75.5,75.7;0.1,0.1)	(23.875,24.125;0.125,0.125)	(0.2,1.2;0.5,0.5)	(724,924;100,100)	(406,436;15,15)	(3,5;1,1)	(0,4;0,6)	(0,10;0,15)

## 4 与HMU-CHRR模型比较

本文同时利用HMU-CHRR模型对云南省丽江地区(市)地震和洪水灾害进行综合风险评估,并将计算结果与本文开发的软层次模型的结果进行了比较。

为了使用HMU-CHRR模型,首先进行一些假设和说明:①将本研究所选的典型区——丽江地区(市)视为一个栅格;② $h=1,2$ 分别代表地震灾害和洪水灾害;③为了与HMU-CHRR模型中的死亡率一致,我们选取2000年的总人口数为 $p_i$ 。

将表7和8中有关死亡人数的数据和表6中总人口数据,代入式(1),再利用表4和表5中有关丽江地区(市)的地震和洪水目录数目,分别计算地震灾害发生的频率和洪水灾害发生的频率分别为0.526和0.474。根据文献[2]中的表3选取地震和洪水脆弱性系数,分别为 $r_{11}=3.17$ 和 $r_{22}=2.22$ 。因此,由式(1)可以得到丽江地区(市)人员伤亡的可能性为 $Y_1^*=0.061$ 。这个结果和软层次模型在 $\alpha=0.625$ 水平下的结果一致,也就是说,相对于软层次模型的计算结果,HMU-CHRR模型的可靠性较低,大概在0.625左右。而且,值得注意的是:①HMU-CHRR模型的结果仅提供人员死亡或经济损失的可能性,而软层次模型的结果不仅包括了综合风险发生的可能性,还包括了人员死亡和经济损失的可能性;②HMU-CHRR模型仅用灾害发生的频率来反映综合风险评估中的随机不确定性,而软层次模型则不仅包含了灾害发生的随机不确定性,还包含了综合风险评估中的模糊不确定性,且减少了数据的模糊不确定性;③所用数据资料比较简单,从而导致了HMU-CHRR模型的可靠性比较低。

## 5 结论

多灾种综合风险评估软层次模型不仅考虑了灾害风险系统中的确定性,而且还包括了随机不确定性和模糊不确定性。例如,人口死亡率、5级地震发生的概率和抗灾能力差等。把灾害三要素(时、空、强)和一要素(经济或人口)的研究推向了定量的五要素(时、空、强、经济、人口)实用化的研究。但是,这些子模型的建立比较简化,还有待于进一步验证。本研究利用模糊信息粒化方法不仅减少了数据的不确定性,而且还包括了一些主观信息,使得评估结果更加接近实际,理论与实际紧密结合,更有利于风险管理者 and 决策者为减少损失规避风

险提供依据。利用模糊转化函数将不同灾种得到的不同量纲的量转化同一量纲的量,以便于综合分析,以得到多灾种综合风险的评估结果。多灾种综合风险评估软层次模型可以针对不同的灾种选择相应的参数,例如地震灾害的灾害规模参数选择峰值加速度,而洪水灾害选择降雨强度等。但是,各种灾害参数的选择还有待于各个研究领域的学者加以验证。

基于云南省丽江地区(市)的历史地震和洪水数据资料建立了地震-洪水灾害综合风险评估软层次模型,对多灾种综合风险评估软层次模型进行验证,并将其结果与HMU-CHRR模型的结果进行了比较分析,充分体现了其在多灾种综合风险评估的优势。

## 参考文献

- [1] Fikse J, Rosenfield D B. Probabilistic methods for risk assessment. *Risk Analysis*, 1982, 2(1): 1-8.
- [2] Dilley M, Chen R S, Deichmann U, et al. *Natural Disaster Hotspots: A Global Risk Analysis*. Washington DC: Hazard Management Unit, World Bank, 2005: 1-132.
- [3] Dilley M, Chen R S, Deichmann U, et al. *Natural Disaster Hotspots: A Global Risk Analysis Synthesis Report*. Washington D C: Hazard Management Unit, World Bank, 2005: 1-29.
- [4] Pelling M, Maskrey A, Ruiz P, et al. *United Nations Development Programme. A global report reducing disaster risk: A challenge for development*. New York: UNDP, 2004: 1-146.
- [5] Pelling M. *Visions of Risk: A Review of International Indicators of Disaster Risk and its Management*. ISDR /UNDP: Kings College, University of London, 2004: 1-56.
- [6] Cardona O D, Hurtado J E, Chardon A C, et al. *Indicators of disaster risk and risk management Summary report for WCDR. Program for Latin America and the Caribbean IADB-UNC/IDEA*, 2005: 1-47.
- [7] Cardona O D, Hurtado J E, Chardon A C, et al. *Indicators of disaster risk and risk management main technical report. Program for Latin America and the Caribbean IADB-UNC/IDEA, World Bank*, 2005: 1-216.
- [8] Mosquera-Machado S, Dilley M. A comparison of selected global disaster risk assessment results. *Natural Hazards*, 2009, 48(3): 439-456.
- [9] Chen Y M, Fan K S, Chen L C. *Requirements and Functional Analysis of a Multi-Hazard Disaster-Risk Analysis System. Human and Ecological Risk Assessment*. 2010, 16(2): 413-428.
- [10] Thierry P, Stieltjes L, Kouokam E, et al. *Multi-hazard risk mapping and assessment on an active volcano: the*



- GRINP project at Mount Cameroon. *Natural Hazards*, 2008, 45(3): 429-456.
- [11] 颜兆林, 龚时雨, 周经纶. 概率风险评价系统. *计算机应用研究*, 2001: 40-42.
- [12] 陈报章, 仲崇庆. 自然灾害风险损失等级评估的初步研究. *灾害学*, 2010, 25(3): 1-5.
- [13] 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. *地理学报*, 2010, 65(5): 553-562.
- [14] 殷杰, 尹占娥, 许世远. 上海市灾害综合风险定量评估研究. *地理科学*, 2009, 29(3): 450-454.
- [15] 葛全胜, 邹铭. 中国自然灾害风险综合评估初步研究. 北京: 科学出版社, 2008.
- [16] Bedford T, Cooke R. *Probabilistic Risk Analysis: Foundations and Methods*. Beijing: World Publishing Corporation, 2003.
- [17] Adrian V G, Mock R. *Risk Engineering*. Switzerland: Kluwer Academic Publishers, 2003.
- [18] 黄崇福. 自然灾害风险评价: 理论与实践. 北京: 科学出版社, 2005.
- [19] Huang CF, Shi Y. Towards Efficient Fuzzy Information Processing: Using the Principle of Information Diffusion. Heidelberg, Germany: Physica-Verlag (Springer), 2002.
- [20] 任鲁川. 区域自然灾害风险分析研究进展. *地球科学进展*, 1999, 14(3): 242-246.
- [21] 史培军, 李宁, 叶谦, 等. 全球环境变化与综合灾害风险防范研究. *地球科学进展*, 2009, 24(4): 428-434.
- [22] 史培军. 四论灾害系统研究的理论与实践. *自然灾害学报*, 2005, 14(6): 1-10.
- [23] 史培军. 五论灾害系统研究的理论与实践. *自然灾害学报*, 2009, 18(5): 1-9.
- [24] Xue Y, Huang C F, Wang X Z. A new method and its application of handling fuzzy uncertainty of data in disaster risk assessment. *Global Congress on Intelligent Systems*. 2009: 431-434.
- [25] Zadeh L A. Fuzzy sets. *Information and Control*, 1965, (8): 338-353.
- [26] 毛玉平, 韩新民. 云南地区强震( $M \geq 6$ )研究. 昆明: 云南科技出版社, 2004.
- [27] 魏一鸣, 金菊良, 杨存建, 等. 洪水灾害风险管理理论. 北京: 科学出版社, 2002.

## Soft Hierarchical Model of Integrated Risk Assessment for Multi-hazards: Taking Earthquake and Flood Disasters in Lijiang, Yunnan as a Case Study

XUE Ye<sup>1,2</sup>, CHEN Baozhang<sup>1</sup>, HUANG Chongfu<sup>3</sup>, YAN Jianwu<sup>1</sup>

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. Department of Management, College of Economics and Management, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

3. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** Integrated risk assessment is one of the important parts of integrated risk management, which can help governments to take measures on preventing and mitigating the losses of disasters. What's more, multi-hazards integrated risk assessment is currently very important and difficult in the field of disaster reduction at home and abroad, with the systematic theory and methodology not yet obtained. Based on the system theory of disaster risk, this study has introduced the methods of fuzzy information granulation and fuzzy transformation function, and built a soft hierarchical model of integrated risk assessment for multi-hazards, which is characterized by the following aspects. 1) Not only the certainty of disaster risk, but also the random uncertainty and fuzzy uncertainty are considered. 2) The approach of fuzzy information granulation can reduce the uncertainty of data, and it includes some subjective information so as to make the results of assessment more realistic, theory and practice more tightly combined, and thus, it is more conducive to risk managers and decision makers to provide the basis of loss reduction and risk aversion. 3) Fuzzy transformation function transforms different types of quantity into the same type of quantity in order to comprehensively analyze and obtain the assessment result of multi-hazards integrated risk. Using earthquake-flood disaster risk as a case study, the demonstration analysis of soft hierarchical model of integrated risk assessment for earthquake-flood disaster illustrates that this soft hierarchical model suggested in this study holds the ability of synthetically assessing multiple disasters.

**Key words:** fuzzy information granulation; fuzzy transformation function; earthquake risk; flood risk

本文引用格式:

薛晔, 陈报章, 黄崇福, 等. 多灾种综合风险评估软层次模型. *地理科学进展*, 2012, 31(3): 353-360.