

# 基于模糊综合评判的绵阳市地质灾害易发性评价

王哲, 易发成, 陈廷方

西南科技大学环境与资源学院, 四川绵阳 621010

**摘要** 在综合分析研究区孕灾环境、致灾因子与地质灾害分布关系基础上, 建立了绵阳市地质灾害易发性评价指标体系, 并根据评价指标量化分级标准和方法, 运用层次分析法确定各评价指标对地质灾害易发性贡献率。将层次分析法与模糊数学综合评判法结合, 根据建立的隶属度函数构造模糊判断矩阵, 对整个研究区的地质灾害易发程度进行二级模糊综合评判, 得到了4个等级的地质灾害易发性分区。其中, 地质灾害不易发区共为810个网格单元, 面积约12960km<sup>2</sup>; 地质灾害低易发区共为157个网格单元, 面积约2512km<sup>2</sup>; 地质灾害中易发区共为66个网格单元, 面积约1056km<sup>2</sup>; 地质灾害高易发区共为253个网格单元, 面积约4048km<sup>2</sup>。根据易发性评价结果绘制了各易发程度分区图件, 并对各易发分区进行了分区评价。

**关键词** 地质灾害; 易发性评价; 层次分析法; 模糊综合评判

**中图分类号** P642.5

**文献标识码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.31.008

## Geo-hazard Susceptibility Evaluation of Mianyang City Based on Fuzzy Comprehensive Evaluation

WANG Zhe, YI Facheng, CHEN Tingfang

School of Environment and Resources, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, Sichuan Province, China

**Abstract** On the basis of the relation distribution of geological hazards with prenatal environment and induced factors of geological hazards, the system of evaluation index and the standard and method for index quantification are established. At the same time, the weights of assessment indicators for geo-hazard susceptibility evaluation are ascertained by using analytic hierarchy process. And then, the fuzzy distinguish matrix upon the strength of membership function is established by combining analytical hierarchy process with fuzzy synthesize evaluation. The fuzzy synthesize assessment method selects the two-level model, and the evaluation set has four-stage standard, that is, the degree of geological hazard occurrence probability is divided into four stages. The not easy occurrence zone of geological hazards includes 810 grid units, its area is 12960km<sup>2</sup>, the low probability occurrence zone of geological hazards includes 157 grid units, its area is 2512km<sup>2</sup>, the middle probability occurrence zone of geological hazards includes 66 grid units, its area is 1056 km<sup>2</sup>, and the high probability occurrence zone of geological hazards includes 253 grid units, its area is 4048km<sup>2</sup>. At the same time, zoned maps are drawn in the light of the evaluation result.

**Keywords** geological hazards; susceptibility evaluation; analytical hierarchy process; fuzzy comprehensive evaluation

### 0 引言

基于对地质灾害发生的控制条件和诱发条件的综合分析, 评价地质灾害发生的可能性, 并进行易发性分区称为地质灾害易发性评价。这是地质灾害调查评价的一项重要任务, 制定一个地区的地质灾害防治规划, 必须根据实际情况

划定地质灾害易发区<sup>[1]</sup>。

20世纪60年代, 美、英、日等就开始了灾害地质调查与评价研究工作, 主要针对单一灾害类型(如泥石流、滑坡、地震等)以及公众对灾害的应急对策和小区域的危险性区划进行重点研究, 较少进行综合性区域地质灾害评价研究<sup>[2]</sup>。20世

收稿日期: 2012-08-14; 修回日期: 2012-09-10

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2011BAK12B02)

作者简介: 王哲, 博士, 研究方向为地质灾害区划和工程地质, 电子邮箱: wz2004@126.com

纪 70 年初期, Fotheringham<sup>[3]</sup>提出用 Zermos 法进行滑坡危险性分区研究, 该理论认为滑坡的空间分布不是单因素能够控制的, 需要两个及两个以上因素才能控制其发育, 并利用两种主控因素建立了滑坡分区的数学模型, 对法国局部山区进行了滑坡危险性分区研究。20 世纪 80 年代以后, 各国普遍开始了区域滑坡稳定性分区及预测问题的研究。随着滑坡研究的不断深入, 对采用多因素综合预测法进行滑坡危险性分区研究基本达成共识。1995 年, Chung 等<sup>[4]</sup>在研究哥伦比亚滑坡灾害时, 利用地质图、地貌复合图、地形坡度图和土地利用图等 40 个指标和该地区 1960 年以前发生的滑坡灾害数据, 采用多元回归分析方法得到了对该区历史滑坡贡献最大的因子, 并进一步得出该地区 1960—1980 年时段滑坡灾害预测图, 以甚低、低、中等、高和甚高 5 个级别划分滑坡灾害区划。1976 年, Radbruch-Hall 等<sup>[5]</sup>开展了全美大陆 1:750 万比例尺滑坡灾害评价图研绘, 从滑坡形成发育条件出发, 选择岩性、构造、地貌、降雨、滑坡类型、滑坡发生频率等为评价指标, 将区域自然地理单元划分为高发、中发、低发, 以及高易损、中易损和低易损区等 6 种类型。1990 年, Gupta 等<sup>[6]</sup>在喜马拉雅山麓 Rungana 流域滑坡灾害危险性评价中, 选择了滑坡发育的控制因素, 建立了一个滑坡危险性评价指标, 将滑坡灾害风险分为低、中、高 3 个等级, 勾绘了滑坡危险性分区图。

国内从 20 世纪 80 年代初期开始进行地质灾害的综合区划研究, 先后使用不同方法对各种灾害进行了分区评价。主要方法有两种, 一种是以地质灾害分布图和各因素图的叠加, 定量、半定量确定地质灾害敏感性指标, 然后对各敏感性指标进行叠加处理; 另一种是地质灾害影响因素与地质灾害关系的理论分析, 采用打分或评级的方法赋予各因素以权重系数, 再对各权重系数进行相关数学运算, 从而得到地质灾害区划的定量依据。

本文在分析绵阳市区域地质环境条件、地质灾害发生机理及其区域性规律的基础上<sup>[7]</sup>, 科学合理地建立评价指标体系和确定评价指标权重, 建立地质灾害易发性区划数学模型, 划定不同级别的地质灾害易发区域, 为编制地质灾害防治区域规划提供科学依据, 从而有计划地展开地质灾害防治, 减少灾害损失; 同时, 也为实现区域地质灾害风险评价与管理奠定良好的基础。

## 1 地质灾害易发性评价

地质灾害易发性综合评价的关键是数学模型的建立。研究初期, 本着复杂问题简单化的原则, 把地质灾害系统作为一个线性系统来处理, 因此建立的模型主要以线性模型为主, 常用的模型主要有多元回归模型、聚类分析模型等统计分析模型。随着对地质灾害认识的深入以及非线性科学的发展, 人类在认识和揭示地质灾害这个复杂系统的过程中, 逐渐将非线性的一些模型应用于地质灾害研究中, 这些模型主要有模糊综合评判模型、神经网络模型等, 其中以模糊综合评判理论最为成熟。模糊综合评判模型是应用模糊变换原理

和最大隶属原则, 综合考虑与被评价事物相关的各个要素, 评价模糊系统的综合评价方法。该方法以模糊推理为主, 定性和定量相结合、精确与非精确相统一的分析评判方法。

在影响地质灾害易发性的因素中, 既有可以量化表达的因子, 又有只能定性描述的因子, 而其界限又是不分明的, 各因素在地质灾害发生过程中所起的作用和方式也是复杂和模糊的, 但它具有系统性和层次性。因此, 应用模糊综合评判法对绵阳市地质灾害易发性进行综合评价, 可以对地质灾害易发程度分区, 为地质灾害防治规划制定提供科学依据。

## 2 模糊综合评判法应用

对于地质灾害这样一个复杂系统来说, 影响地质灾害易发性的因素较多, 且权重的分配较难做到合理, 这样经常会造成样本的错判或漏判, 致使评判结果不理想。为了克服这一缺点, 首先要遵循地质灾害发生的规律, 将评价总目标划分为多个子目标, 每个子目标又对应数个评价因素指标, 对每个子目标进行模糊综合评判, 然后再以子目标为评价因素, 对评价总目标进行二级或多级模糊综合评判<sup>[8-10]</sup>。因此在进行评价时, 首先将地质灾害易发性划分为 4 个等级: 不易发区、低易发区、中易发区和高易发区, 然后将各参评要素的各项因子按易发性等级划分指标基准值, 确定单因子评价的隶属函数, 计算各因子隶属某个评价等级的隶属度; 其次, 利用层次分析法确定各因子和各要素的权值, 并运用模糊变换算子进行模糊运算, 得到一级综合评价模糊集合; 最后, 对一级评价模糊集合与二级综合评价权值进行模糊运算, 得到二级综合评价模糊集合, 利用模糊变换原理和最大隶属度原则<sup>[11-13]</sup>, 依权重大小均衡兼顾, 得到最终的评价结果。模糊综合评价流程如图 1 所示。下面结合绵阳市地质灾害易发性综合评价, 讨论模糊综合评判法的具体应用过程。

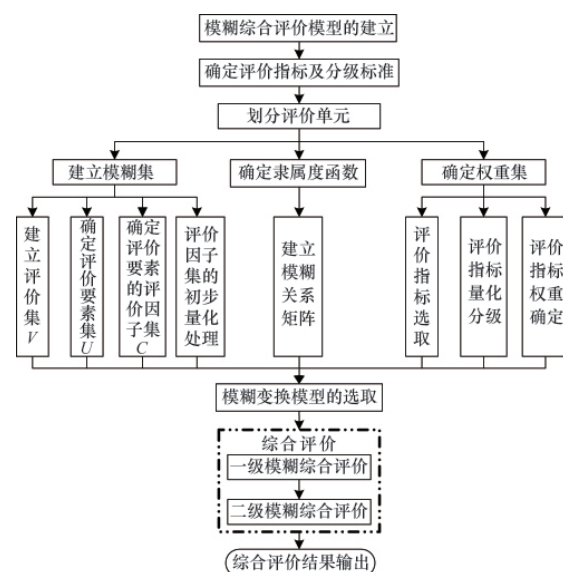


图 1 地质灾害易发性模糊综合评价流程

Fig. 1 Flowchart of fuzzy comprehensive evaluation model for the occurrence probability of geological hazard in Mianyang City

### 2.1 确定评价指标体系和分级标准

评价指标的选择是一个系统分解、逐层控制的过程。将问题分解为不同的组成因素,然后按照因素间的相互关联以及隶属关系将因素按不同层次聚集组合,从而形成一个多层

次的递阶结构<sup>[14-15]</sup>。因此,以地质灾害易发性评价为目标层,以孕灾因素、致灾因素、灾害历史状况为类指标层,以各影响因素为基础指标层,建立如图2所示的绵阳市地质灾害易发性评价的层次结构模型。

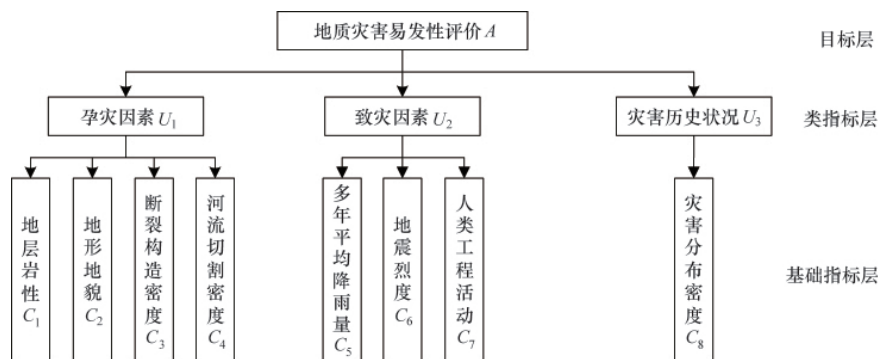


图2 绵阳市地质灾害易发性评价指标体系

Fig. 2 Evaluation index system of geological hazard occurrence probability in Mianyang City

在评价指标体系确定后,根据评价目标和区域地质环境特点,确定各指标的分级标准。依据国土资源部颁布的《县(市)地质灾害调查与区划基本要求实施细则》的相关规定,将地质灾害易发性划分为高易发性、中易发性、低易发性和

不易发4个等级。同时,参照中国地质调查局《区域环境地质调查总则》(DD 2004—02)等规范、标准将评价指标的界限按其质量状况也分为4个等级,并结合研究区的实际情况,尽量使其量化。评价指标等级基准值详见表1。

表1 绵阳市地质灾害易发性评价指标等级基准值

Table 1 Standard values for the evaluation index system of geological hazard occurrence probability in Mianyang City

评价指标	地质灾害易发性等级划分			
	不易发(I)	低易发性(II)	中易发性(III)	高易发性(IV)
孕灾因素				
地层岩性	岩浆岩类	松散岩类	碳酸盐岩类	变质岩类、碎屑岩类
地形地貌	构造剥蚀丘陵和侵蚀堆积河谷平坝(切割深度<200m)	构造剥蚀低山(切割深度200—500m)	前龙门山侵蚀溶蚀构造中山(切割深度500—1000m)	岷山构造侵蚀高山和后龙门山侵蚀构造中山(切割深度>1000m)
断裂构造密度/(km·km <sup>-2</sup> )	≤0.05	0.05—0.10	0.10—0.20	≥0.20
河流切割密度/(km·km <sup>-2</sup> )	≤0.10	0.10—0.30	0.30—0.50	≥0.50
致灾因素				
多年平均降雨量/mm	≤800	800—1000	1000—1200	≥1200
地震烈度/(°)	6	7	8	9
人类工程活动				
采矿工程强度/km <sup>-2</sup>	≤0.01	0.01—0.05	0.05—0.10	≥0.10
交通网密度/(km·km <sup>-2</sup> )	≤0.02	0.02—0.15	0.15—0.35	≥0.35
灾害现状				
地质灾害分布密度/km <sup>-2</sup>	≤0.05	0.05—0.10	0.10—0.20	≥0.20

### 2.2 划分评价单元

为定量评价研究区内地质灾害易发性,需对整个研究区进行单元划分。本研究按照区域地质环境特征和地质灾害发育特征,将研究区划分为形状和大小相同的4km×4km的网格单元。同时,为了减少工作量,对境域边界不足网格面积1/2或要素特征与相邻网格相似的不编号,全区共划分为1286个评价单元。

### 2.3 建立模糊集

(1) 建立地质灾害易发性评价等级集合V

地质灾害易发性评价等级集合  $V=\{V_1, V_2, V_3, V_4\}$ ,  $V_1$  为不易发区,  $V_2$  为低易发区,  $V_3$  为中易发区,  $V_4$  为高易发区。

(2) 确定类指标集合U

类指标集合  $U=\{U_1, U_2, U_3\}$ , 即地质灾害易发性评价这个总目标的子目标。其中,  $U_1$  为孕灾因素,  $U_2$  为致灾因素,  $U_3$  为

灾害历史状况。

### (3) 确定基础评价指标集合 $C$

基础评价指标集合  $C(U_1)=\{C_1, C_2, C_3, C_4\}, C(U_2)=\{C_5, C_6, C_7\}, C(U_3)=\{C_8\}$ , 即地质灾害易发性评价子目标所包含的具体评价因素指标。其中,  $C_1$  为地层岩性,  $C_2$  为地形地貌,  $C_3$  为断裂构造密度,  $C_4$  为河流切割密度,  $C_5$  为多年平均降雨量,  $C_6$  为地震烈度,  $C_7$  为人类工程活动,  $C_8$  为地质灾害分布密度。

## 2.4 评价指标隶属度函数的确定

根据模糊集理论, 隶属度反映评价指标隶属于各级地质灾害易发性的程度, 隶属度一般由隶属函数确定, 隶属函数是用来定量描述评价指标对地质灾害易发性级别隶属程度的函数。

由于影响地质灾害易发性的因素相互作用、相互影响以及地质环境本身的复杂性和模糊性等特点, 对于离散型因素, 一般按照经验给出隶属度, 对于连续变化的定量指标采用线性隶属函数、正态分布函数等。本文参照已有有关隶属函数构造的经验, 针对研究区内地质环境特点和地质灾害易发性评价的影响因素、指标构成特征, 采用如下方法构建隶属度函数。

假定评价标准划分为  $n$  级, 如果评价指标的实际性状数据低于 I 级标准, 则它对于 I 级标准的隶属度就是 1, 对其他级别的隶属度则为 0; 同样, 如果评价指标的实际性状数据较第  $n$  级标准高, 则它对第  $n$  级标准的隶属度为 1, 其余为 0。

但是, 评价等级标准的划分是一个区间值, 为此引入了分级代表值的概念来确定实测数据对各相邻等级之间的隶属度。分级代表值是指对于某一等级来说最具代表性的数值, 它是确定评价因子性状数据的隶属度的基础。具有  $m$  等级的因子, 第 I 级和最后一级评价标准一般只有一个界限值, 第 I 级只有后界限值, 而最后一级只有前界限值, 所以第 I 级和最后一级的分级代表值分别取后界限值和前界限值, 记为  $e(I)$  和  $e(m)$ ; 中间等级区间具有前后界限值, 取评价标准区间前后界限值的平均值作为其分级代表值。如果评价等级标准分为  $m$  级, 则有  $m$  个代表值:  $e(I), e(II), \dots, e(m)$ 。

假定某个评价指标的实测性状数据为  $x$ , 该评价对各个评价等级的隶属度为

$$U_i(x) = \begin{cases} 1 & x \leq e(I) \\ [e(II) - x] / [e(II) - e(I)] & e(I) < x \leq e(II) \\ 0 & x > e(II) \end{cases}$$

$$U_{II}(x) = \begin{cases} 1 - U_I(x) & e(I) < x \leq e(II) \\ [e(III) - x] / [e(III) - e(II)] & e(II) < x \leq e(III) \\ 0 & x \leq e(I), x > e(III) \end{cases}$$

$$\vdots$$

$$U_m(x) = \begin{cases} 1 - U_{m-1}(x) & e(m-1) < x \leq e(m) \\ [e(m+1) - x] / [e(m+1) - e(m)] & e(m) < x \leq e(m+1) \\ 0 & x \leq e(m-1), x > e(m+1) \end{cases}$$

$$U_{m+1}(x) = \begin{cases} 0 & x \leq e(m) \\ 1 - U_m(x) & e(m) < x < e(m+1) \\ 1 & x \geq e(m+1) \end{cases}$$

式中,  $U_I(x), U_{II}(x), \dots, U_{m+1}(x)$  分别为评价指标  $x$  对 I 级, II 级,  $\dots, m+1$  级评价等级标准的隶属度。

在选取的指标中有量化的指标和非量化的指标, 在分级标准(表 1)基础上, 量化的指标直接通过前述方法建立隶属函数确定; 不能直接量化的指标通过咨询专家意见, 并结合定性评价指标在评价单元内所占的面积构造隶属度函数。

另外, 对于分类指标越大越好的定量指标, 采用升半梯形分布隶属函数曲线确定其隶属度; 对于定量指标越小越好的定量指标, 采用降半梯形分布隶属函数曲线确定其隶属度。下面分别讨论定性指标和定量指标的隶属度函数。

### 2.4.1 定性指标的隶属度函数的确定

#### (1) 地层岩性的隶属度函数

研究区内的地层岩性分为岩浆岩类与松散岩类、碳酸盐岩类、变质岩类和碎屑岩类 4 大分区, 每个岩性分区作为一个易发性等级。若评价单元内只包含某一个岩性分区, 则对应的该岩性分区的隶属度值就为 1, 其余岩性分区就为 0; 对于采样单元介于两个或两个以上不同岩性的分区, 采用包含在该评价单元内各岩性分区面积占评价单元面积的比例来对其进行初步量化, 并进行归一化处理, 以确定各岩性指标在综合评价中的单因素模糊关系矩阵。因此, 地层岩性的隶属度函数  $X_i$  为

$$X_i = \frac{L_i}{S} \quad i=1, 2, \dots, n$$

式中,  $S$  为采样单元面积,  $L_i$  为某一岩性分区在单元内的面积。

#### (2) 地形地貌的隶属度函数

研究区内的地形地貌划分为龙门山山地和四川盆地两大类型, 根据地貌形态和成因又划分为 6 个二级地貌单元, 综合分析后划分为 4 个地貌分区, 分别为构造剥蚀丘陵和侵蚀堆积河谷平坝区、构造剥蚀低山、前龙门山侵蚀溶蚀构造中山区、后龙门山侵蚀构造中山和岷山构造侵蚀高山区, 每个分区作为一个易发性等级, 其隶属度值的确定原则同上。因此, 地形地貌的隶属度函数  $Y_i$  为

$$Y_i = \frac{T_i}{S} \quad i=1, 2, \dots, n$$

式中,  $T_i$  为某一地貌分区在单元内的面积。

#### (3) 地震烈度的隶属度函数

研究区内的基本地震烈度分为 VI、VII、VIII 和 IX 4 个烈度, 每个烈度分区作为一个易发性等级, 其隶属度值的确定原则同上。因此, 地震烈度的隶属度函数  $Z_i$  为

$$Z_i = \frac{E_i}{S} \quad i=6, 7, 8, 9$$

式中,  $E_i$  为采样单元内某级烈度所占面积。

### 2.4.2 定量指标的隶属度函数的确定

#### (1) 构造密度隶属度函数

$$U_I(x) = \begin{cases} 1 & x \leq 0.05 \\ (0.075-x)/0.025 & 0.05 < x \leq 0.075 \\ 0 & x > 0.075 \end{cases}$$

$$U_{II}(x) = \begin{cases} 1-U_I(x) & 0.05 < x \leq 0.075 \\ (0.15-x)/0.075 & 0.075 < x \leq 0.15 \\ 0 & x \leq 0.05, x > 0.15 \end{cases}$$

$$U_{III}(x) = \begin{cases} 1-U_{II}(x) & 0.075 < x \leq 0.15 \\ (0.2-x)/0.05 & 0.15 < x \leq 0.2 \\ 0 & x \leq 0.075, x > 0.2 \end{cases}$$

$$U_{IV}(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 0.15 \\ 1-U_{III}(x) & 0.15 < x < 0.2 \\ 1 & x \geq 0.2 \end{cases}$$

#### (2) 河流切割密度隶属度函数

$$U_I(x) = \begin{cases} 1 & x \leq 0.1 \\ (0.2-x)/0.1 & 0.1 < x \leq 0.2 \\ 0 & x > 0.2 \end{cases}$$

$$U_{II}(x) = \begin{cases} 1-U_I(x) & 0.1 < x \leq 0.2 \\ (0.4-x)/0.2 & 0.2 < x \leq 0.4 \\ 0 & x \leq 0.1, x > 0.4 \end{cases}$$

$$U_{III}(x) = \begin{cases} 1-U_{II}(x) & 0.2 < x \leq 0.4 \\ (0.5-x)/0.1 & 0.4 < x \leq 0.5 \\ 0 & x \leq 0.2, x > 0.5 \end{cases}$$

$$U_{IV}(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 0.4 \\ 1-U_{III}(x) & 0.4 < x < 0.5 \\ 1 & x \geq 0.5 \end{cases}$$

#### (3) 多年平均降雨量隶属度函数

$$U_I(x) = \begin{cases} 1 & x \leq 800 \\ (900-x)/100 & 800 < x \leq 900 \\ 0 & x > 900 \end{cases}$$

$$U_{II}(x) = \begin{cases} 1-U_I(x) & 800 < x \leq 900 \\ (1100-x)/200 & 900 < x \leq 1100 \\ 0 & x \leq 800, x > 1100 \end{cases}$$

$$U_{III}(x) = \begin{cases} 1-U_{II}(x) & 900 < x \leq 1100 \\ (1200-x)/100 & 1100 < x \leq 1200 \\ 0 & x \leq 900, x > 1200 \end{cases}$$

$$U_{IV}(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 1100 \\ 1-U_{III}(x) & 1100 < x < 1200 \\ 1 & x \geq 1200 \end{cases}$$

#### (4) 采矿工程强度隶属度函数

$$U_I(x) = \begin{cases} 1 & x \leq 0.01 \\ (0.03-x)/0.02 & 0.01 < x \leq 0.03 \\ 0 & x > 0.03 \end{cases}$$

$$U_{II}(x) = \begin{cases} 1-U_I(x) & 0.01 < x \leq 0.03 \\ (0.075-x)/0.045 & 0.03 < x \leq 0.075 \\ 0 & x \leq 0.01, x > 0.075 \end{cases}$$

$$U_{III}(x) = \begin{cases} 1-U_{II}(x) & 0.03 < x \leq 0.075 \\ (0.1-x)/0.025 & 0.075 < x \leq 0.1 \\ 0 & x \leq 0.03, x > 0.1 \end{cases}$$

$$U_{IV}(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 0.075 \\ 1-U_{III}(x) & 0.075 < x < 0.1 \\ 1 & x \geq 0.1 \end{cases}$$

#### (5) 交通网密度隶属度函数

$$U_I(x) = \begin{cases} 1 & x \leq 0.02 \\ (0.085-x)/0.065 & 0.02 < x \leq 0.085 \\ 0 & x > 0.085 \end{cases}$$

$$U_{II}(x) = \begin{cases} 1-U_I(x) & 0.02 < x \leq 0.085 \\ (0.25-x)/0.165 & 0.085 < x \leq 0.25 \\ 0 & x \leq 0.02, x > 0.25 \end{cases}$$

$$U_{III}(x) = \begin{cases} 1-U_{II}(x) & 0.085 < x \leq 0.25 \\ (0.35-x)/0.1 & 0.25 < x \leq 0.35 \\ 0 & x \leq 0.085, x > 0.35 \end{cases}$$

$$U_{IV}(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 0.25 \\ 1-U_{III}(x) & 0.25 < x < 0.35 \\ 1 & x \geq 0.35 \end{cases}$$

#### (6) 地质灾害点密度隶属度函数

$$U_I(x) = \begin{cases} 1 & x \leq 0.05 \\ (0.075-x)/0.025 & 0.05 < x \leq 0.075 \\ 0 & x > 0.075 \end{cases}$$

$$U_{II}(x) = \begin{cases} 1-U_I(x) & 0.05 < x \leq 0.075 \\ (0.15-x)/0.075 & 0.075 < x \leq 0.15 \\ 0 & x \leq 0.05, x > 0.15 \end{cases}$$

$$U_{III}(x) = \begin{cases} 1-U_{II}(x) & 0.075 < x \leq 0.15 \\ (0.2-x)/0.05 & 0.15 < x \leq 0.2 \\ 0 & x \leq 0.075, x \geq 0.2 \end{cases}$$

$$U_{IV}(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 0.15 \\ 1-U_{III}(x) & 0.15 < x < 0.2 \\ 1 & x \geq 0.2 \end{cases}$$

### 2.4.3 建立模糊关系矩阵

利用隶属函数求评价指标对各易发性等级的隶属度,建立模糊关系矩阵。首先建立单个参评要素的一级评价模糊关系矩阵:

$$R_U = (r_{ij})_{n \times 4}$$

其中,  $r_{ij}$  为参评要素  $U$  中的  $i$  指标对于评价等级  $j$  的隶属度;  $n$  为参评要素  $U$  的评价指标个数。

在建立单个参评要素的一级评价模糊关系矩阵的基础上,建立二级评价模糊关系矩阵:

$$R = (R_U)_{m \times 4}$$

其中,  $m$  为参评要素个数。

### 2.5 确定权重集

本研究采用层次分析法确定各指标的权重,并采用和法得到权重值  $W^{[6]}$ ,其结果见表 2—4。判断矩阵的最大特征根  $\lambda_{\max}$  用于计算一致性指标  $CI$ ,有  $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$ ;  $RI$  为平均随机一

致性指标,可由查表得出; $CR$  为一致性比例, $CR=CI/RI$ ,当阶数  $n \leq 2$  时,矩阵总有完全一致性;当阶数  $n > 2$  时,应用上式计算  $CR$  值,当  $CR < 0.10$  时,认为判断矩阵的一致性是可以接受的,否则应对判断矩阵进行适当修正。

表 2 一级判别矩阵(A-U)

Table 2 One grade distinguish matrix (A-U)

A-U	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$W$
$U_1$	1	1	2	0.4
$U_2$	1	1	2	0.4
$U_3$	1/2	1/2	1	0.2

由表 2 可以得出, $\lambda_{\max}=3.0, CI=0, RI=0.58, CR=0 < 0.10$ ,满足一致性检验。

表 3 二级判别矩阵(U<sub>1</sub>-C)

Table 3 Two grade distinguish matrix (U<sub>1</sub>-C)

$U_1-C$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$W$
$C_1$	1	1	3	1	0.30
$C_2$	1	1	3	1	0.30
$C_3$	1/3	1/3	1	1/3	0.10
$C_4$	1	1	3	1	0.30

由表 3 可以得出, $\lambda_{\max}=4.0, CI=0, RI=0.90, CR=0 < 0.10$ ,满足一致性检验。

表 4 二级判别矩阵(U<sub>2</sub>-C)

Table 4 Two grade distinguish matrix (U<sub>2</sub>-C)

$U_2-C$	$C_5$	$C_6$	$C_7$	$W$
$C_5$	1	5	3	0.6333
$C_6$	1/5	1	1/3	0.1062
$C_7$	1/3	3	1	0.2605

由表 4 可以得出, $\lambda_{\max}=3.0387, CI=0.0194, RI=0.58, CR=0.0334 < 0.10$ ,满足一致性检验。

由于参评要素  $U_3$  中只包含一个评价指标,所以地质灾害分布密度  $C_8$  的权重值是 1, $\lambda_{\max}=1.0, CI=0, RI=0, CR=0 < 0.1$ ,显然满足一致性检验。

利用表 2—4 从高到低逐层总排序(A-C),结果见表 5。

## 2.6 模糊变换与综合评价

为了完全反映各评价指标对地质灾害易发性控制程度,将权重集  $W_U$  与单指标因素模糊关系矩阵  $R_U$ “合成”得到综合隶属度  $B_U$ ,即通过  $B_U=W_U \cdot R_U$  求出模糊集  $B_U=(b_{U_1}, b_{U_2}, \dots, b_{U_n})(0 \leq b_{U_j} \leq 1; j=1, 2, \dots, n)$ 。进行  $W_U$  与  $R_U$  复合运算的算子较多,但  $M(\cdot, +)$  型在评价时既考虑了主因素的作用,也考虑了次要因素的作用,能保留全部有用信息,评判结果相对较准确、合理,故采用该模糊变换算子进行一级和二级模糊变换。

### 2.6.1 一级模糊综合评判

一级模糊综合评判是指按某一类参评要素中的各指标进行综合评价。假设对第  $U$  类要素中的第  $i$  个指标  $c_{U_i}$  评价,

表 5 层次组合总排序(A-C)

Table 5 Combination compositor total sequential table (A-C)

层次 $C_j$	层次 $U_i$			层次 $C$ 组合排序权重值 $W_i$
	$U_1$	$U_2$	$U_3$	
	0.4	0.4	0.2	
$C_1$	0.30	0	0	0.1200
$C_2$	0.30	0	0	0.1200
$C_3$	0.10	0	0	0.0400
$C_4$	0.30	0	0	0.1200
$C_5$	0	0.6333	0	0.2533
$C_6$	0	0.1062	0	0.0425
$C_7$	0	0.2605	0	0.1042
$C_8$	0	0	1	0.2000

评价对象隶属于评价集中第  $j$  个元素的隶属度为  $r_{uj}$  ( $u=1, 2, \dots, m; i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, k$ ),构建一级模糊综合评判的单指标模糊评价矩阵为

$$R_U = \begin{bmatrix} r_{u11} & r_{u12} & \dots & r_{u1k} \\ r_{u21} & r_{u22} & \dots & r_{u2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{un1} & r_{un2} & \dots & r_{unk} \end{bmatrix}$$

于是,第  $U$  类要素的模糊综合评判集合为

$$B_U = W_U \cdot R_U = (w_{U_1}, w_{U_2}, \dots, w_{U_n}) \cdot \begin{bmatrix} r_{u11} & r_{u12} & \dots & r_{u1k} \\ r_{u21} & r_{u22} & \dots & r_{u2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{un1} & r_{un2} & \dots & r_{unk} \end{bmatrix} = (b_{U_1}, b_{U_2}, \dots, b_{U_n})$$

### 2.6.2 二级模糊综合评判

一级模糊综合评判仅是对某一类参评要素中的各指标进行综合,若进一步考虑各类参评要素对地质灾害易发性的综合影响,必须在各类之间进行综合,即二级模糊综合评判(图 3)。

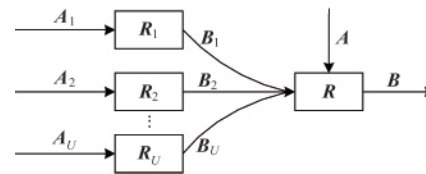


图 3 二级模糊数学综合评判模型

Fig. 3 Model of second fuzzy comprehensive evaluation

由图 3 可知,二级模糊综合评判的单因素评价矩阵就是一级模糊综合评价集合  $B_U$ ,所以有

$$R = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_1 \cdot R_1 \\ W_2 \cdot R_2 \\ \vdots \\ W_U \cdot R_U \end{bmatrix} = [r_{U_j}]_{m \times k}$$

于是,二级模糊综合评判集合  $B$  为

$$B=W \cdot R=W \cdot \begin{bmatrix} W_1 \cdot R_1 \\ W_2 \cdot R_2 \\ \vdots \\ W_U \cdot R_U \end{bmatrix}=(b_1, b_2, \dots, b_k)$$

根据最大隶属度原则确定评价单元的地质灾害易发性等级。

### 2.7 计算实例

以第 705 号评价单元为例说明上述方法的应用。

根据上述条件,利用隶属度函数和模糊判断矩阵得到

表 6 第 705 号单元的评价指标实测参数  
Table 6 Actual parameters of the 705th unit

地层岩性	地貌类型	断裂构造密度 /(km·km <sup>-2</sup> )	河流切割密度 /(km·km <sup>-2</sup> )	多年平均降雨量 /mm	地震烈度 /(°)	人类工程活动 /(km·km <sup>-2</sup> )	灾害点数
碳酸盐岩	后龙门山构造侵蚀中山	0.2206	0.1515	1410.52	VIII	交通网密度为 0	1
碎屑岩类	前龙门山侵蚀溶蚀中山						

$$R_{U_1}=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.5656 & 0.4344 \\ 0 & 0 & 0.8296 & 0.1704 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0.4850 & 0.5150 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_{U_2}=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_{U_3}=[0 \quad 0.9017 \quad 0.0983 \quad 0]$$

进行一级模糊变换得到

$$B_{U_1}=W_{U_1} \cdot R_{U_1}=[0.30 \quad 0.30 \quad 0.10 \quad 0.3] \cdot$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.5656 & 0.4344 \\ 0 & 0 & 0.8296 & 0.1704 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0.4850 & 0.5150 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$=[0.1455 \quad 0.1545 \quad 0.4186 \quad 0.2814]$$

$$B_{U_2}=W_{U_2} \cdot R_{U_2}=[0.6333 \quad 0.1062 \quad 0.2605] \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$=[0.2605 \quad 0 \quad 0.1062 \quad 0.6333]$$

$$B_{U_3}=W_{U_3} \cdot R_{U_3}=[1] \cdot [0 \quad 0.9017 \quad 0.0983 \quad 0]$$

$$=[0 \quad 0.9017 \quad 0.0983 \quad 0]$$

由上面的一级模糊判断矩阵可以得到二级模糊判断矩阵  $R$

$$R=\begin{bmatrix} 0.1455 & 0.1545 & 0.4186 & 0.2814 \\ 0.2605 & 0 & 0.1062 & 0.6333 \\ 0 & 0.9017 & 0.0983 & 0 \end{bmatrix}$$

进行二级模糊变换得到

$$B=W \cdot R=[0.4 \quad 0.4 \quad 0.2] \cdot \begin{bmatrix} 0.1455 & 0.1545 & 0.4186 & 0.2814 \\ 0.2605 & 0 & 0.1062 & 0.6333 \\ 0 & 0.9017 & 0.0983 & 0 \end{bmatrix}$$

$$=[0.1624 \quad 0.2421 \quad 0.2295 \quad 0.3659]$$

根据最大隶属度原则判别该评价单元属于 IV 级,为地质灾害高易发性单元。

### 3 绵阳市地质灾害易发性评价结果及分区评价概述

将研究区内划分为 1286 个评价网格单元,通过层次分析法确定各评价指标的权重,利用两级模糊综合评判法得到绵阳市地质灾害易发性综合评价分区图(图 4)。

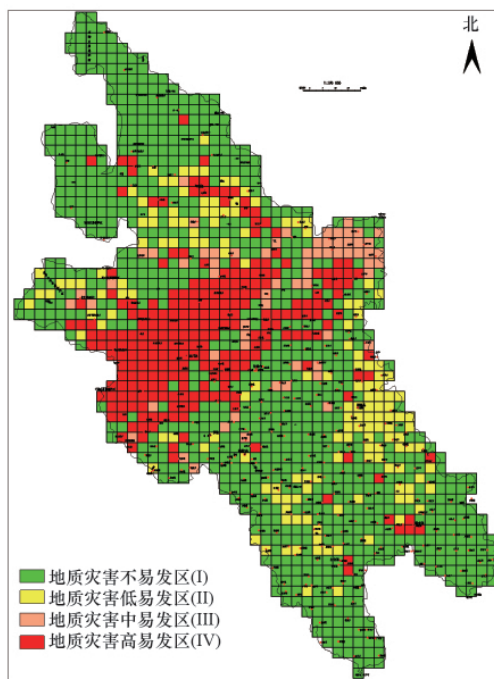


图 4 绵阳市地质灾害易发性评价分区

Fig. 4 Zoned map of fuzzy comprehensive evaluation on the occurrence probability of geological hazard in Mianyang City

#### (1) 地质灾害不易发区

地质灾害不易发区共为 810 个网格单元,面积约为 12960km<sup>2</sup>,约占全市面积 62.99%。该分区主要分布于涪江、安昌河沿岸的河谷平坝区,盐亭、三台、梓潼、江油的丘陵区,平武、北川的中高山无人区。

#### (2) 地质灾害低易发区

地质灾害低易发区共为 157 个网格单元,面积约为

2512km<sup>2</sup>,约占全市面积 12.21%。该分区以前龙门山为界分为两个片区,分别是四川盆地区地质灾害低易发区和中高山区地质灾害低易发分区。其中,四川盆地区地质灾害低易发片区主要分布于丘陵平坝区的观太镇—中太镇—丰谷镇—泸溪镇—刘营镇—三台县等绵阳市周边乡镇,以及构造侵蚀低山区的梓潼片区内,面积约为 1600km<sup>2</sup>,约占全市面积 7.78%;中高山区地质灾害低易发片区主要分布于岷山构造侵蚀高山区的片口,以及后龙门山构造侵蚀中山区内北川县的白什羌族藏族乡、小坝羌族藏族乡辖区和平武县的土城乡—银厂沟—徐塘乡平南乡、水柏—水田乡—水观乡两线区域内,面积约为 912km<sup>2</sup>,约占全市面积 4.43%。

### (3) 地质灾害中易发区

地质灾害中易发区共为 66 个网格单元,面积约为 1056km<sup>2</sup>,约占全市面积 5.13%。该分区主要分布于江油市境内的通口镇—平驿—白洋洞—六合乡—敬元乡—雁门一线区域内。

### (4) 地质灾害高易发区

地质灾害高易发区共为 253 个网格单元,面积约为 4048km<sup>2</sup>,约占全市面积 19.67%。该分区主要集中在分布于前龙门山区、后龙门山区和盐亭县城周边区域内,四川盆地区和平武以北地区有零星分布,主要结果如下。

前龙门山区地质灾害高易发片区主要集中在分布于睢水镇—晓坝镇—永安镇—通口镇—北城乡—马角坝一线区域内,行政区划属安县永安镇,北川县香泉乡、通口镇,江油市含增镇、北城乡、马角坝的大部分区域,区域面积 1136km<sup>2</sup>,占全市总面积的 5.52%。

后龙门山区地质灾害高易发片区主要集中在分布于后龙门区高川乡—茶坪乡—漩坪羌族乡—白坭羌族乡—都坝—平通镇—响岩镇和南坝镇—坝子乡—百草—古城—平武县龙安镇两支线区域内,区域面积 2832km<sup>2</sup>,占全市总面积的 13.76%。

盐亭县周边地质灾害高易发片区位于盐亭县境内,行政区划属盐亭县的云溪镇、两河乡、毛公乡、新农乡地区,区域面积约为 80km<sup>2</sup>,占全市总面积的 0.39%。

## 4 结论

(1) 联合层次分析法和模糊综合评判法,对绵阳市地质灾害易发性进行分区评价,其中:不易发区共为 810 个网格单元,面积约为 12960km<sup>2</sup>,约占全市面积 62.99%;低易发区共为 157 个网格单元,面积约为 2512km<sup>2</sup>,约占全市面积 12.21%;中易发区共为 66 个网格单元,面积约为 1056km<sup>2</sup>,约占全市面积 5.13%;高易发区共为 253 个网格单元,面积约为 4048km<sup>2</sup>,约占全市面积 19.67%。

(2) 采用模糊综合评判法进行地质灾害易发性评价,不仅简便易行,而且综合考虑了各因素的影响,使各因素都真实地参与评价,减少了人为因素的影响;通过多个指标(隶属度)刻画地质灾害的易发性,同时又以最大隶属度原则确定

其等级,消除根据临界值“一刀切”导致的判别失真和不合理现象,能较真实地反映客观实际。

(3) 在模糊综合评价中采用层次分析法确定权重,具有较强的逻辑性、实用性和系统性,能准确地得出各评价指标的权重值,将它应用于地质灾害易发性模糊综合评判,使评价结果更具有客观性。

## 参考文献 (References)

- [1] 钟荫乾. 地质灾害易发性评价[J]. 湖北地矿, 2002, 16(4): 81-86.  
Zhong Yinqian. *Hubei Geology and Mineral Resources*, 2002, 16(4): 81-86.
- [2] Mark E T H. Solution techniques for large regional partitioning problems [J]. *Geographical Analysis*, 1995, 27(3): 230-248.
- [3] Fotheringham A S, Densham P J, Curtis A. The zone definition problem in location-allocation modeling[J]. *Geographical Analysis*, 1995, 27(1): 60-77.
- [4] Chung C F, Fabbri A G, van Westen C J. Multivariate regression analysis for landslide hazard zonation [M]//Carrar A, Guzzetti R. *Geographical Information System in Assessing Natural Hazards*. Oulu: Academic Publishers, 1995.
- [5] Radbruch-Hall D H, Colton R B, Davis W E, et al. Preliminary landslide overview map of the conterminous United States [R]. US Geological Survey Miscellaneous Field Studies Map MF-771, scale 1:7500000, Reston, VA: US Geological Survey, 1976.
- [6] Gupta R P, Joshi B C. Landslided hazard zoning using the GIS approach—A case study from the Ramganga Catchment, Himalayas [J]. *Engineering Geology*, 1990, 28(2): 125-135.
- [7] 王哲. 四川省绵阳市地质灾害易发性综合评价研究 [D]. 绵阳: 西南科技大学, 2007.  
Wang Zhe. Geo-hazard susceptibility evaluation about Mianyang City[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2007.
- [8] Wang Guanyuan. Two-stage comprehensive evaluation of intensity and its application[J]. *Earthquake Engineering*, 1985, 13(1): 67-73.
- [9] Orlovsky S A. Decision-making with a fuzzy preference relation[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1978, 1(3): 155-167.
- [10] Tanion T. Fuzzy preference orderings in group decision making[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1984, 12(2): 117-131.
- [11] 谢季坚, 刘承平. 模糊数学方法及其应用[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2006.  
Xie Jijian, Liu Chengping. Method and its application on fuzzy mathematics[M]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 2006.
- [12] 肖盛燮, 王平义, 吕恩琳. 模糊数学在土木与水利工程中的应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.  
Xiao Shengxie, Wang Pingyi, Lu Enlin. Application of fuzzy mathematics in hydraulic engineering [M]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [13] 任凯珍, 冒建, 陈国洪. 关于地质灾害孕灾因子权重确定的探讨[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2011, 22(1): 80-86.  
Ren Kaizhen, Mao Jian, Chen Guohu. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2011, 22(1): 80-86.
- [14] 李国和, 王思敬, 孙承志. 金沙江水电开发区域工程地质环境综合评价[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2001, 26(3): 309-313.  
Li Guohe, Wang Sijing, Sun Chengzhi. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2001, 26(3): 309-313.
- [15] 赵焕臣, 许树柏, 和金生. 层次分析法[M]. 北京: 科学出版社, 1986.  
Zhao Huanchen, Xu Shubai, He Jinsheng. *The analytic hierarchy process*[M]. Beijing: Science Press, 1986.
- [16] 姜启源. 数学模型[M]. 北京: 高等教育出版社, 1993.  
Jiang Qiyuan. *The mathematical model* [M]. Beijing: Higher Education Press, 1993.

(责任编辑 马宇红, 朱宇)