

# 地质灾害综合评估与区划模型

鲁光银<sup>1, 2</sup>, 韩旭里<sup>2</sup>, 朱自强<sup>1</sup>, 许和言<sup>3</sup>

- (1. 中南大学 信息物理工程学院, 湖南 长沙, 410083;
2. 中南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙, 410083;
3. 烟台东方电子信息产业股份有限公司, 山东 烟台, 264000)

**摘要:** 利用模糊数学的相关理论, 建立了基于多源信息融合的地质灾害综合评估数学模型; 在该数学模型的基础上, 通过 GIS 的空间分析功能, 动态地获取数学模型中所涉及的参数, 进而根据这些动态参数与空间数据库中的相关属性数据, 采用快速判别分析的方法对评价单元的地质灾害进行区划研究。将该模型应用于湖南省地质灾害灾情的综合评估与区划工作中。实际应用结果表明, 运用该模型能够动态、快速、准确地评估地质灾害灾情, 并且其评估与区划的结果合理、可信。

**关键词:** 地质灾害; 综合评估; 区划; GIS 技术

中图分类号: P694 文献标识码: A 文章编号: 1672-7207(2005)05-0877-05

## Synthetical evaluation and classification model of geological hazards

LU Guang-yin<sup>1, 2</sup>, HAN Xu-li<sup>2</sup>, ZHU Zi-qiang<sup>1</sup>, XU He-yan<sup>3</sup>

- (1. School of Info-physics and Geomatics Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;
2. School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;
3. Yantai East Elec. Info. Industry Co. Ltd., Yantai 264000, China)

**Abstract:** After analyzing these factors and integrated with the advanced GIS technology, which has the strong power of space analysis and acquiring data dynamically, a regionalization model of the geological hazards is established based on the amalgamation method with many data resources and fuzzy judge synthetically. Then the parameters of the model are acquired dynamically by the space analysis of GIS, and with these parameters and the attribute data from the special database, the classification is accomplished. Since it doesn't need a defined artificial criteria, therefore, this method is much more objective. After applied in the investigation and evaluation of geological hazards of Hunan province, its result shows that the model can evaluate the geological disaster dynamically, quickly and exactly, and the result is very effective, reasonable and creditable.

**Key words:** geological hazards; synthetical evaluation; classification; GIS

地质灾害综合评估及区划是地质灾害评估中的主要内容之一, 但是由于影响地质灾害综合评估与预测的因素多, 范围广, 关系复杂, 造成地质灾害综合评估及预测困难<sup>[1, 2]</sup>。目前, 我国进行地质灾

害评价的方法很多, 除传统的成因机理分析和统计分析方法外, 主要还有危险性评价、易损性评价、破坏损失评价、防治工程效益评价、风险性评价等方法, 评价过程也由定性评价逐渐转化为半定量评

收稿日期: 2004-12-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50099620); 国家计委资助项目(计国土函[1997]20)

作者简介: 鲁光银(1976-), 男, 湖北宜昌人, 讲师, 博士, 主要从事“3S”技术研究

论文联系人: 鲁光银, 男, 讲师, 博士; 电话: 0731-8877075(O); E-mail: 13975894898@hnmcc.com

价或定量评价<sup>[376]</sup>。近几年来,以 GIS 空间技术为支撑的地质灾害评价的应用也取得了较大进展<sup>[7-10]</sup>,在诸如在洪涝、林火、地震、地面沉降、滑坡、泥石流等方面进行了许多尝试,但是其研究方法及其成果的可操作性、适用性欠佳,而将 GIS 技术结合应用于地质灾害区划与防治研究的较少<sup>[11-14]</sup>。

综合考虑地质灾害,无论是其自然属性,还是其孕灾诱灾因素都因研究区域的不同而各异,即属于空间型评判问题。GIS 技术以其强大的空间分析功能为地质灾害评价中多源数据的有机整合提供了全新的解决方案,而且为建立灵活的分析模型提供了方便<sup>[8, 9]</sup>。为此,本文作者运用 GIS 的动态属性提取功能和空间分析功能,采用快速判别分析的方法进行分级的方案,建立对地质灾害的危险程度进行评估与区划的模型,并结合湖南省地质灾害的实际情况,探讨了该模型基于 GIS 技术的动态、快速的实现方法,以达到动态、准确、快速地评估湖南省主要地质灾害、灾情的目的。

### 1 基本数学概念

费歇准则<sup>[15]</sup>: 设有 A 和 B 2 个母体,若从 A 中抽取  $n_A$  个样品,从 B 中抽取  $n_B$  个样品,每个样品有  $p$  个变量  $x_1, x_2, \dots, x_p$ , 用  $i = 1, 2, \dots, n_A$  (或  $n_B$ ) 代表样品,  $j = 1, 2, \dots, p$  代表变量,则  $x_{Aij}$  代表 A (或 B) 第  $i$  样品第  $j$  个变量取值。判别分析则是根据  $n$  个样品的  $p$  个变量进行线性组合,归结为一个综合指标  $y$ , 即

$$y = \sum_{j=1}^p C_j x_j \tag{1}$$

其中:  $C_j$  为待定系数。假定判别函数已经建立,显然,将每个样品的  $p$  个变量代入(1)式即可求得一个  $y$  值,  $n$  个样品则有  $n$  个判别值, 记为

$$y_{Ai} = \sum_{j=1}^p C_j x_{Aij}, y_{Bi} = \sum_{j=1}^p C_j x_{Bij} \tag{2}$$

设  $\bar{y}_A$  和  $\bar{y}_B$  是每类样品判别值的平均值, 则,

$$\bar{y}_A = \frac{1}{n} \sum_{Ai=1}^{n_A} y_{Ai}, \bar{y}_B = \frac{1}{n} \sum_{Bi=1}^{n_B} y_{Bi} \tag{3}$$

则费歇准则即为:

要求待定系数  $C_j$ , 使得,

$$\begin{cases} | \bar{y}_A - \bar{y}_B | = \max \\ H = \sum_{i=1}^{n_A} (y_{Ai} - \bar{y}_A)^2 + \sum_{i=1}^{n_B} (y_{Bi} - \bar{y}_B)^2 = \min \end{cases} \tag{4}$$

### 2 评估与区划模型的建立

构建模型是进行地质灾害灾情评估与区划的基础<sup>[12-13]</sup>。在构建本模型中,首先根据各类地质信息如地形地貌、地质构造、岩土体性质等,将待评价地区综合分为不同的地质灾害评价区,当然,每个区的崩一滑(崩塌、滑坡)、泥石流、地面塌陷的灾害程度不同,根据各区地质背景特点及历史上发生的灾害情况,进行统计分析,并赋予每一区关于崩一滑(崩塌、滑坡)、泥石流、地面塌陷 3 种地质灾害不同的权重向量。然后,在地质灾害区的基础上,将待评价地区按区(一般为县级行政区、乡镇行政区)划为基本评价单元,根据历史上发生的地质灾害的规模、频次对每一评价单元的地质灾害历史强度进行评价;并根据地质条件、岩土体性质、气候植被特征、人为活动情况对每一单元作潜在强度进行评价。最后,由历史强度和潜在强度得出灾害的危险系数以划分出灾害危险性等级,在此基础上进行分级区划。

#### 2.1 历史强度评价

一般情况,选择历史地质灾害的规模、密度、频次作为评价因子,即地质灾害历史强度因子的论域  $Y$  为<sup>[14]</sup>:

$$Y = \{ \text{规模, 密度, 频次} \}$$

则地质灾害种类及评价因子对应关系如表 1 所示。

表 1 地质灾害种类与评价因子

**Table 1** Classification of geological hazards and factors of evaluation

	规模	密度	频次
崩塌、滑坡	$Y_{b1}$	$Y_{b2}$	$Y_{b3}$
泥石流	$Y_{n1}$	$Y_{n2}$	$Y_{n3}$
地面塌陷	$Y_{t1}$	$Y_{t2}$	$Y_{t3}$

注: 下标 b 代表崩塌、滑坡; n 代表泥石流; t 代表地面塌陷; 1 代表规模; 2 代表密度; 3 代表频次

进而,地质灾害历史强度评价的数学模型则为:

$$\begin{cases} A = X \cdot Y = \left( x_1, x_2, x_3 \right) \cdot \begin{bmatrix} Y_{b1} & Y_{b2} & Y_{b3} \\ Y_{n1} & Y_{n2} & Y_{n3} \\ Y_{t1} & Y_{t2} & Y_{t3} \end{bmatrix} \\ Z = \prod_{i=1}^3 (a_i) \end{cases} \tag{5}$$

式中:  $Z$  指某单元地质灾害历史强度, 由综合评判结果向量集  $A$  中 3 个元素之积确定。 $A$  指综合评判结果, 是一个  $1 \times 3$  阶行矩阵, 即灾害历史强度评价向量集;  $a_i$  指  $A$  中的元素。 $X$  指某单元各类地质灾害的权重向量,  $1 \times 3$  阶行矩阵,  $X = (x_1, x_2, x_3)$ , 由灰关联分析方法计算得到。

## 2.2 潜在强度评价

### 2.2.1 潜在强度因子论域

地质灾害的发育涉及地质构造、新构造运动、岩石性质和岩土体结构、地貌类型、相对高差、山坡坡度、年降雨量、4~9 月份(雨季)降雨量、植被覆盖率、矿山、工程密度、地下水活动、已发生灾害的人口密度等 10 余种因子, 当然, 对于不同的地质灾害种类所涉及的环境因子也各不相同, 因此, 在选择潜在强度的评价因子时需要综合考虑。本文采用层次分析法对其特性进行研究, 其中第一层次为:

$Y = \{ \text{地质条件, 地形地貌条件, 气候植被条件, 人为条件} \}$ 。

$Y$  中的 4 个因素均为第一层次的条件因子, 各自又可以划分为几个第二层次的因子, 如图 1 所示, 第一层次因子的评分由第二层次因子的得分值综合分析后给出<sup>[5]</sup>, 根据各灾害种类的不同, 第二层次的因子在各种灾害中略有差异。

### 2.2.2 建立数学模型

根据各种灾害中地质条件、地形地貌条件、气候植被条件、人为条件“的权重向量以及上述 4 个因子的评分值, 得出该种灾害的潜在强度向量集:

$$P_i = \begin{pmatrix} W_{Di} \\ W_{Xi} \\ W_{Qi} \\ W_{Ri} \end{pmatrix} \cdot (Y_{Di}, Y_{Xi}, Y_{Qi}, Y_{Ri}) = (P_{Di}, P_{Xi}, P_{Qi}, P_{Ri}) \quad (6)$$

式中:  $P_i$  指某种灾害的潜在强度的向量集;  $W_{Di}$ ,  $W_{Xi}$ ,  $W_{Qi}$  和  $W_{Ri}$  分别指地质条件、地形地貌条件、气候植被条件和人为条件的影响权重, 由统计值得到;  $Y_{Di}$ ,  $Y_{Xi}$ ,  $Y_{Qi}$  和  $Y_{Ri}$  分别指地质条件、地形地貌条件、气候植被条件和人为条件的评分值。

由崩-滑、泥石流、地面塌陷 3 种灾害的潜在强度向量集组成一个  $3 \times 4$  阶矩阵, 即:

$$B = \begin{pmatrix} P_{Db} & P_{Xb} & P_{Qb} & P_{Rb} \\ P_{Dn} & P_{Xn} & P_{Qn} & P_{Rn} \\ P_{Dt} & P_{Xt} & P_{Qt} & P_{Rt} \end{pmatrix}$$

其中: 下标 D 代表地质条件; X 代表地形地貌条件; Q 代表气候植被条件; R 代表人为条件。

$B$  由评价单元中 3 种灾害所对应的权重向量以及关系矩阵得出评判结果。需要指出的是, 由于每一个评价单元(县级行政单元)所对应的 3 种灾害的权重来源于地质灾害评价区, 因此, 存在这样的现象, 即某一个评价单元同时跨 2 个或者多个评价区。解决方法是借助于 GIS 的叠置分析功能, 首先对评价单元和地质灾害评价区所在图层进行叠置分析, 然后以叠置结果层为基础按照面积权重逐个统计每一个评价单元的综合权重值:

$$A \cdot B = C \quad (7)$$

$A$  由历史数据统计分析得到;  $Z_q$  为  $C$  向量集中各种影响条件潜在强度之和:  $Z_q = P_D + P_X + P_Q + P_R$ , 它表示各种条件对地质灾害潜在强度的影响作用权重;  $P_D$ ,  $P_X$ ,  $P_Q$  和  $P_R$  分别为地质条件, 地形地貌条件, 气候植被条件和人为条件的潜在强度。

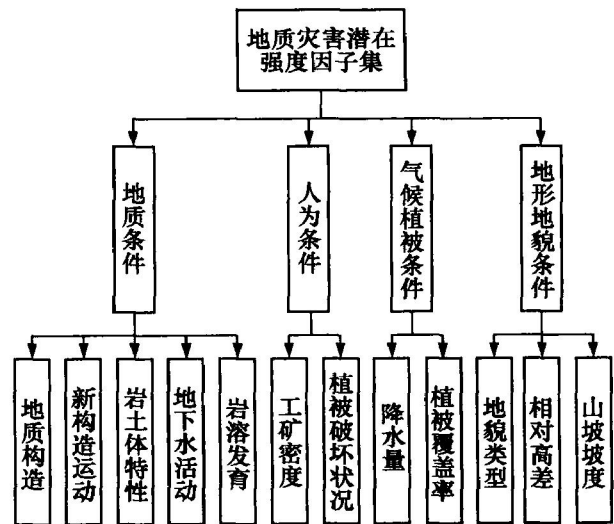


图 1 地质灾害潜在强度因子层次图

Fig. 1 Factors hierarchy of latent geological hazards

## 2.3 区划分类

### 2.3.1 危险性分析

由于历史强度和潜在强度的计算采用的是相同的评价单元, 因此, 可以直接计算出每一个评价单元的危险性指数:

$$Z = Z_1 \cdot A_1 + Z_q \cdot A_q \quad (8)$$

其中:  $Z_1$  和  $Z_q$  分别指已评价出的历史强度和潜在强度;  $A_1$  和  $A_q$  分别指历史强度权重和潜在强度权重, 由专家根据经验给定。

### 2.3.2 信息分配函数

为使对各个评价单元的评判结果具有横向可比性, 需要为上面所述各论域中因子的取值选择一种合适的信息分配函数, 这里采用线性函数来确定各

因子的等级分, 函数形式为:

$$V_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max(x_{1j}, x_{2j}, x_{3j}, \dots, x_{mj})} \quad (9)$$

式中,  $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n; m$  和  $n$  分别为灾害类别数和灾害因子数。这样, 就可以把各指标的评分值压缩到  $[0, 1]$  区间内。这里不采用极值标准化, 使各因子的取值更符合客观实际。

### 2.3.3 确定灾区的分级

分级标准的确定按照如下方法: 假设共有基本单元  $p$  个, 所得到的综合评分集为:

$$D = \{d_1, d_2, d_3, d_4, \dots, d_p\} \quad (10)$$

将这  $p$  个基本单元的地质灾害划分为以下 5 类:

$L = \{l_1: \text{极重灾区}; l_2: \text{重灾区}; l_3: \text{中度灾区}; l_4: \text{微度灾区}; l_5: \text{基本无灾区}\}$ 。

希望类别之间有较大的距离, 而在同类单元之间的距离要尽可能小, 为此, 可以采用判别分析法<sup>[15]</sup>, 先将综合评分集以参变量  $k$  为界分为 2 组, 然后将这 2 组按照同样的方法进行划分, 也可以视实际情况只将其中的某一组进行细分。设  $w_1(k)$  和  $w_2(k)$  分别为落入 2 组中的评分点数,  $M_1(k)$  和  $M_2(k)$  为组内平均值,  $\sigma_1(k)$  和  $\sigma_2(k)$  为组内方差, 总平均值为  $M_T$ , 则组内总方差为:

$$\sigma_w^2 = w_1 \sigma_1^2 + w_2 \sigma_2^2 \quad (11)$$

组间方差为:

$$\sigma_b^2 = w_1(M_1 - M_T)^2 + w_2(M_2 - M_T)^2 = w_1 w_2 (M_1 - M_2)^2 \quad (12)$$

目标为使函数

$$F(k) = \sigma_b^2 / \sigma_w^2 \quad (13)$$

取得最大值, 由此得到分组阈值  $k$ , 进而确定各个基本研究单元所属的类别。

## 3 基于 GIS 的分区实现及应用实例

借助 GIS 的计算和分析功能实现地质灾害的分区, 需要进行以下工作: 数据的预处理及入库、数据运算、空间分析和模型运算等。由于在数据入库时属性数据和图形数据已经建立一一对应关系, 因此, 可以对属性数据和图形数据进行复杂的联合操作, 从而得到可以直接代入模型进行运算的模型参数。在各类矢量图形的基础上, 利用 GIS 软件的编辑功能进行点、线、面等图形对象的增、删、改、分割、合并等操作, 还可以对各个图层中的所有对象进行叠置分析、缓冲区分析等空间分析操作。这样不仅可以动态地生成各种专题图件如地质灾害的自然因素综合强度分区图、社会经济状况分区图等,

还可以灵活地对分区进行合并删除等操作, 最终结果更能够体现专家的经验结论和具体需要。

将经过预处理的属性数据代入分区模型进行上述各步的计算和分析操作, 最终可以得到地质灾害历史强度、地质灾害潜在强度以及地质灾害危险程度分区图及其属性数据。图 2 所示为将上述模型应用于湖南省地质灾害灾情及孕灾环境综合评估后的地质灾害危险程度分区图(待定区域指属性数据不全者), 在得到分区图的同时也提取出了每一个分区的特征属性。作者对比了 2002 年以前的地质灾害点及其特征作为评价模型的初始参数, 然后以最新的地质灾害调查资料进行佐证, 结果表明该方法具有较高的可信度。

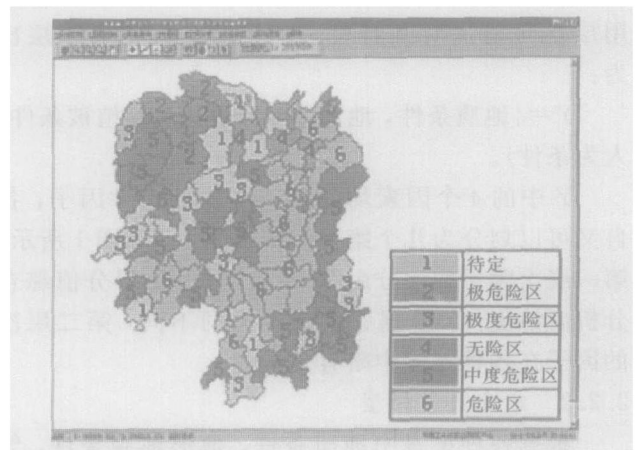


图 2 地质灾害危险程度分区图

Fig. 2 Criticality classification of geological hazards in Hunan Province

## 4 结 论

a. 由于地质灾害的致灾因素众多而且既有定量的因子又有定性的因子, 要融合这些复杂的因素, 需要建立合理的区划和分级数学模型。

b. 利用模糊数学的方法, 采用快速综合评判的方法, 在对地质灾害的历史强度和潜在强度评价的基础之上, 结合 GIS 技术, 可以准确快速实时地对地质灾害危险程度进行综合区划研究, 从而提高了地质灾害综合评估与预测的实时性, 可以更好地反映当前的实际情况, 提高预测的准确率;

c. 借助于 GIS 的空间分析和运算功能, 以及动态获取空间数据的特点, 可以快速获得各种信息, 从而更方便地研究地质灾害的空间展布特点, 且能达到快速、直观和动态地进行灾害区划的目的;

d. 对致灾因子先进行运算然后进行分级区划

成图。另外,先对各因子分别进行分级区划,然后直接对各个单因子的分级区划专题图进行叠置分析、缓冲区分析和区域对象合并,也可以达到分级区划的目的。

#### 参考文献:

- [1] 罗元华,张梁,张业成. 地质灾害风险评估方法[M]. 北京:地质出版社,1998.  
LUO Yuan-hua, ZHANG Liang, ZHANG Ye-cheng. The risk evaluation methods of geological disaster [M]. Beijing: Geological Press, 1998.
- [2] 向喜琼,黄润秋. 地质灾害风险评价与风险管理[J]. 地质灾害与环境保护, 2000, 11(1): 38-41.  
XIANG Xi-qiong, HUANG Run-qiu. Risk assessment and risk management for slope geohazards [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2000, 11(1): 38-41.
- [3] 崔鹏,杨坤,韦方强. 泥石流灾情综合评估模式[J]. 自然灾害学报, 2002, 11(1): 20-27.  
CUI Peng, YANG Kun, WEI Fang-qiang. Evaluation mode to the situation of mud disaster [J]. Journal of Natural Disasters, 2002, 11(1): 20-27.
- [4] 冯利华. 基于神经网络的洪水预报研究[J]. 自然灾害学报, 2000, 9(2): 45-48.  
FENG Li-hua. Research to the flood prediction based on NP [J]. Journal of Natural Disasters, 2000, 9(2): 45-48.
- [5] Devogele T. On spatial database integration [J]. International Journal of Geographical Information Science, 1998, 12(4): 335-352.
- [6] Majia-Navarro M, Garcia L A. Nature hazard and risk assessment using decision support system application in Glenwood Springs, Colorado [J]. Environment & Engineering Geoscience, 1996, 2(3): 299-324.
- [7] 沈芳,程东,黄润秋. 3S技术在国土资源调查、环境保护及地质灾害评价与预测中的应用展望[J]. 成都理工学院学报, 2000, 27(11): 235-238.  
SHEN Fang, CHEN Dong, HUANG Run-qiu. Prospect for the application of 3S technique to the investigation of land resources, protection of environment, and evaluation and prediction of Geo-hazards [J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2000, 27(11): 235-238.
- [8] 朱良峰,尹坤龙,张良. GIS支持下的地质灾害风险分析[J]. 长江科学院院报, 2002, 19(5): 42-45.  
ZHU Liang-feng, YIN Kun-long, ZHANG Liang. Risk analysis of geological disaster based on GIS [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2002, 19(5): 42-45.
- [9] Majia-Navarro M, Wohl E E. Geological hazard and risk evaluation using GIS: Methodology and model applied to medellin [J]. Colombia, Bulletin of the Association of Engineering Geologist, 1994, 10(4): 459-481.
- [10] Carrara A, cardinali M, Guzzetti F. Uncertainty in assessing landslide hazard risk [J]. ITC Journal, 1992(2): 172-183.
- [11] 张春山,吴满路,张业成. 地质灾害风险评价方法及展望[J]. 自然灾害学报, 2003, 12(2): 96-102.  
ZHANG Chun-shan, WU Man-lu, ZHANG Ye-cheng. Method and prospect of geological disaster risk assessment [J]. Journal of Natural Disasters, 2003, 12(2): 96-102.
- [12] 章伟民. 对地质灾害危险性评估中几个问题的探讨[J]. 甘肃科学学报, 2003, 15(8): 38-41.  
ZHANG Wei-min. Understanding of several problems existing the course of assessing ganger of geological hazard [J]. Journal of Gansu Science, 2003, 15(8): 38-41.
- [13] 涂国强,杨立中,贺玉龙. 地质灾害预测数学模型研究[J]. 四川师范大学学报(自然科学版), 2001, 24(6): 637-639.  
TU Guo-qiang, YANG Li-zhong, HE Yu-long. A mathematics model for geological hazard prediction [J]. Journal of Sichuan Normal University (Nature Science), 2001, 24(6): 637-639.
- [14] 李贵仁,欧阳惠. 湖南省自然灾害遥感综合调查报告[R]. 长沙:湖南省遥感中心,1999.  
LI Gui-ren, OUYANG Hui. Synthetically investigation report about Hunan nature hazards [R]. Changsha: RS Center of Hunan Province, 1999.
- [15] 李公时,谢国柱. 数学地质教程[M]. 长沙:中南工业大学出版社,1989.  
LI Gong-shi, XIE Guo-zhu. Mathematics Geology [M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 1989.