

# 滑坡灾害稳定度综合评判模型

王念秦 樊珂奇

(西安科技大学地质与环境工程学院, 西安 710054)

摘要: 以滑坡灾害稳定度影响因素分析为基础, 基于粗糙集理论(RS 理论)对原始地质数据进行挖掘, 获取各项参评地质因素的权重系数, 运用模糊数学中多级模糊评判的理论和方法, 建立滑坡灾害稳定度多级模糊综合评判模型, 并以 212 国道宕昌—武都段六处堆积层滑坡为例验证模型方法, 效果良好。

关键词: 滑坡; 粗糙集理论; 模糊数学; 综合评判

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2011)01-0114-04

稳定分析与评价是研究滑坡灾害的重要内容,也是对其防治的基本依据。研究方法很多,具有从定性分析向定量评价、从经验评判向数值分析、从单因素分析向综合评判发展的特点和趋势。传统的历史成因分析法、工程地质类模拟法、平衡核算法等从定性、半定量的角度刻画滑坡的稳定状态,新兴的数学算法、数值方法,如遗传算法<sup>[1]</sup>、尖点突变预测、最危险滑面搜索<sup>[2]</sup>、灰色预测法<sup>[3]</sup>等,从不同角度、不同侧面进行分析、评价,都发挥了重要作用。然而,滑坡灾害的孕育、发展、演化过程十分复杂,且受制于众多因素,因此滑坡灾害的分析、评价方法也在不断地深入、深化。

已经证明模糊数学在从区域上综合判断可能滑坡灾害的稳定度,指导人类的工程建设方面有较好的应用前景。但是,在模糊建模中,参评地质因素的多少、权重确定比较困难,过去常用专家咨询、无差异折衷以及相关分析等方法确定权重,虽有一定作用,但也有一定局限性。近来粗糙集理论定权法受到重视,本文基于粗糙集理论讨论,结合典型区域滑坡灾害特征,进行新的滑坡灾害稳定度综合评判模型研究尝试。

## 1 粗糙集理论简介

Rough Set 理论(RS)是 20 世纪 80 年代初波兰数学家 Z. Pawlak 首先提出的一种分析数据的数学理

论。它是一种刻画不完整性和不确定性数据的数学工具,其主要思想是在保持信息系统的分类能力不变的前提下,通过知识约简导出问题的决策或分类规则。能有效地分析不精确(imprecise)、不一致(inconsistent)和不完整(incomplete)等各种不完备信息,可以对数据进行分析 and 推理,从中发现隐含的知识、揭示潜在的规律<sup>[4-5]</sup>。其主要特点是无需提供问题所需处理的数据集合之外的任何先验信息。这是它与证据理论和模糊集合理论的最主要区别,也是最重要的优点。具体地说,在证据理论中,对属性、数据或知识等局部的信息以及计算全局信息的函数,以及在模糊集合论中对隶属度与隶属函数的确定,因均需要人为的干预而使不确定性的确定带有强烈的主观色彩。而 RS 理论无需先验知识、无需对知识或数据的局部给出主观评价、无需提供除问题所需处理数据集合之外的任何先验信息,仅根据观测数据删除冗余信息,比较不完整知识的程度—粗糙度、属性间的依赖性与重要性,抽取分类规则等能力。

## 2 基于粗糙集理论的定权法

首先将信息量概念引入粗糙集的信息系统,并通过“知识”信息量对属性的重要性进行定义,然后根据属性的重要性定权<sup>[3,6-8]</sup>。

定义 1: 四元组  $S = (U, A, V, f)$  是一个信息系统,其中,  $U$  表示对象的非空有限集合,称为论域;  $A$  表示属性的非空有限集合;  $V = \bigcup_{a \in A} V_a$ ,  $V_a$  是属性  $a$  的值域;  $f$  表示  $U \times A \rightarrow V$  是一个信息函数,它赋予每个对象的每个属性一个信息值,即  $\forall a \in A, x \in U, \text{有 } f(x, a) \in V_a$ 。

每一个属性子集  $P \subseteq A$  决定了一个二元不可区分

收稿日期: 2010-04-01; 修订日期: 2010-06-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40972174); 教育部科学技术研究重点项目(208145); 铁三院地路处科研项目(科研 06-2)

作者简介: 王念秦(1964-),男,教授,博士,主要从事岩土体稳定与地质灾害防治方面的教学和研究工作。

E-mail: younglock@163.com

关系  $IND(P)$  :

$$IND(P) = \{ (x, y) \in U \times U \mid \forall a \in P, f(x, a) = f(y, a) \}$$

易证  $IND(P)$  是论域  $U$  上的等价关系, 从而关系  $IND(P)$  在  $U$  上构成了  $U$  的一个划分, 用  $U/IND(P)$  表示, 其中任一元素称为等价类。信息系统  $(U, A, V, f)$  也称为知识  $A$ 。

在信息系统中引入信息量的概念。

定义 2: 设  $S = (U, A, V, f)$  是一个信息系统,  $P \subseteq A$ ,  $U/IND(P) = \{ X_1, X_2, \dots, X_n \}$ 。则知识信息量定义为:

$$I(P) = \sum_{i=1}^n \frac{|X_i|}{|U|} \left( 1 - \frac{|X_i|}{|U|} \right) = 1 - \frac{1}{|U|^2} \sum_{i=1}^n |X_i|^2$$

式中:  $|X|$  —— 集合  $X$  的基数;

$$\frac{|X_i|}{|U|} \text{—— 等价类 } X_i \text{ 在 } U \text{ 中的概率。}$$

定义 3: 设  $S = (U, A, V, f)$  是一个信息系统, 属性  $a \in A$  在  $A$  中的重要性定义为:

$$Sig_{A-(a)}(a) = I(A) - I(A - a)$$

特别当  $A = \{a\}$  时, 用  $Sig(a)$  表示  $Sig_{A-(a)}(a)$  :

$$Sig(a) = Sig_{A-(a)}(a) = I(A) - I(\Phi) = I(\{a\})$$

式中:  $U/IND(\Phi) = \{U\}$ ,  $I(\Phi) = 0$

这说明属性  $a_i$  在  $A$  中的重要性由  $A$  中的去掉  $a$  后引起的信息量变化的大小来度量。

定义 4:  $S = (U, A, V, f)$  是一个信息系统, 则属性  $a_i \in A = \{ a_1, a_2, \dots, a_n \}$  的权重为:  $w_i =$

$$\frac{Sig_{A-\{a_i\}}(a_i)}{\sum_{j=1}^n Sig_{A-\{a_j\}}(a_j)} = \frac{I(A) - I(A - \{a_i\})}{nI(A) - \sum_{j=1}^n I(A - \{a_j\})}$$

### 3 建立滑坡灾害稳定度模糊综合评判模型

#### 3.1 确定模糊综合评判因素集<sup>[9-10]</sup>

综合分析已有滑坡稳定性评价因素, 以滑坡详细野外调查的实际资料为基础, 选择地质构造、地形地貌、水文等 3 个方面 7 个特征要素为指标, 建立滑坡灾害稳定度评价因素集 (图 1)。

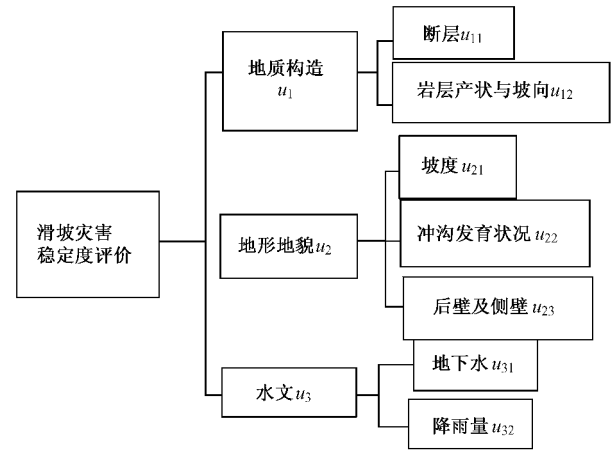


图 1 滑坡灾害模糊综合评判因素集

Fig.1 Factors set for Fuzzy Comprehensive Evaluation of landslide hazard

由图 1 可知, 滑坡灾害稳定度评价可在两个层次上进行, 第一层, 总目标因素集  $u = (u_1, u_2, u_3)$ ; 第二层, 子目标因素集  $u_1 = (u_{11}, u_{12})$ ,  $u_2 = (u_{21}, u_{22}, u_{23})$ ,  $u_3 = (u_{31}, u_{32})$ 。

#### 3.2 建立综合评判评语集

评语集是对各层次评价指标的一种语言描述, 是对各评价指标所给出的评语的集合。本模型的评语分为四个等级, 不同等级确定的依据标准见表 1。

$$V = (v_1, v_2, v_3, v_4) =$$

表 1 各因素的等级确定标准

Table 1 Standard for determining the level of each factor

	不稳定(4)	欠稳定(3)	基本稳定(2)	稳定(1)
断层	规模大且从中穿过	近距离通过	距离较远	规模小且远距
软弱结构层	发育且隔水性能好			
岩层产状与坡向	倾向与坡面一致	倾向与坡面小角度斜交	倾向与坡面大角度斜交	倾向与坡面垂直或相反
坡面平均坡度	> 45°	30° ~ 45°	15° ~ 30°	< 15°
冲沟发育状况	不很发育, 但规模较大	中等发育, 且有新冲沟出现	不发育, 规模较小	不发育
裂缝	发育且有明显变位, 贯通性好	数量较多, 贯通性一般	局部分布	无分布
地下水	大规模泉水涌出或消失	泉眼较多、流量不稳定	有泉, 但泉水流量稳定	无泉眼出露
降雨情况	暴雨、长历时降雨后, 可见明显变形迹象	暴雨、长历时降雨后, 变形迹象不明显	暴雨、长历时降雨后, 无变形迹象	暴雨、长历时降雨后, 无变形迹象

(不稳定、欠稳定、基本稳定、稳定)

设相对于各等级  $v_j$  规定的参数列向量为:

$$C = (c_1 \quad c_2 \quad c_3 \quad c_4)^T$$

$$= (0.4 \quad 0.3 \quad 0.2 \quad 0.1)^T$$

### 3.3 应用粗糙集理论求权重

G212 线陇南段沿线 6 个主要滑坡的稳定地质因素评价结果见表 2。

权值反映不同地质因素相对于综合评判结果重要性程度的差异,而基于粗集理论确定模糊综合评判权重系数实际上就是确定构成被评判地质因素知识库中的各个属性集的重要度。而属性的重要度则是依据信息表中去掉该属性后信息的变化量来取得的。根据求得的重要度,进行权值化处理,最后得到各参评地质因素的权值,达到确定权值的目的。

表 2 各滑坡评价信息表  
Table 2 Assessment information of landslide

滑坡名称	评价指标赋值						
	断层	产状	坡度	冲沟发育状况	裂缝	地下水	降雨
鲁班崖	2	4	4	2	1	2	2
秦峪	4	2	2	4	4	4	2
石阙子	1	3	1	2	4	2	3
清水子	3	2	2	4	2	2	2
凤安山	3	2	4	4	4	3	2
固水子	3	2	2	2	2	1	4

依粗糙集理论及表 2 可得出:

$$w_{11} = 0.66 \quad w_{12} = 0.34 \quad w_{21} = 0.4 \quad w_{22} = 0.2$$

$$w_{23} = 0.4 \quad w_{31} = 0.66 \quad w_{32} = 0.34$$

一级评判指标也照此方法计算得:

$$w_1 = 0.4 \quad w_2 = 0.3 \quad w_3 = 0.3$$

### 3.4 滑坡稳定性模糊评判<sup>[11-12]</sup>

为了满足模糊数学评判计算的要求,需要对各评价因子加以定量化。这里,将各一级评价因子分为优、良、中、差 4 级,结果见表 3。 $v_1、v_2、v_3、v_4$  分别表示隶属于优、良、中、差级的隶属度即确定隶属度(函数)。

表 3 隶属度取值表  
Table 3 Membership values

	$v_1$	$v_2$	$v_3$	$v_4$
优	0.55	0.25	0.15	0.05
良	0.25	0.55	0.15	0.05
中	0.05	0.15	0.55	0.25
差	0.05	0.15	0.25	0.55

以鲁班崖滑坡为例。

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.05 & 0.15 & 0.55 & 0.25 \\ 0.40 & 0.35 & 0.20 & 0.05 \end{bmatrix}$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0.15 & 0.5 & 0.35 \\ 0 & 0.25 & 0.65 & 0.10 \\ 0.15 & 0.25 & 0.5 & 0.10 \end{bmatrix}$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} 0.25 & 0.55 & 0.15 & 0.05 \\ 0.25 & 0.55 & 0.15 & 0.05 \end{bmatrix}$$

那么由  $A_1 = (0.66 \quad 0.34)$ ,  $A_2 = (0.4 \quad 0.2 \quad 0.4)$ ,  $A_3 = (0.66 \quad 0.34)$  可得到地质构造和地形地貌的评价向量:

$$B_1 = A_1 \times R_1 = (0.169 \quad 0.218 \quad 0.431 \quad 0.182)$$

$$B_2 = A_2 \times R_2 = (0.060 \quad 0.210 \quad 0.520 \quad 0.210)$$

$$B_3 = A_3 \times R_3 = (0.068 \quad 0.151 \quad 0.599 \quad 0.182)$$

所以

$$R = \begin{bmatrix} 0.153 & 0.218 & 0.431 & 0.182 \\ 0.060 & 0.210 & 0.520 & 0.210 \\ 0.068 & 0.151 & 0.599 & 0.182 \end{bmatrix}$$

再由  $A = (0.4 \quad 0.3 \quad 0.4)$  就可以得到“滑坡稳定度”的综合评价向量:

$$B = A \times R = (0.0996 \quad 0.1955 \quad 0.5081 \quad 0.1904)$$

同理计算其余 5 个滑坡,结果如下:

#### ②秦峪滑坡

$$B = A \times R = (0.407 \quad 0.326 \quad 0.205 \quad 0.041)$$

#### ③石阙子滑坡

$$B = A \times R = (0.302 \quad 0.380 \quad 0.245 \quad 0.067)$$

#### ④清水子滑坡

$$B = A \times R = (0.244 \quad 0.304 \quad 0.393 \quad 0.720)$$

#### ⑤凤安山滑坡

$$B = A \times R = (0.360 \quad 0.326 \quad 0.245 \quad 0.067)$$

#### ⑥固水子滑坡

$$B = A \times R = (0.233 \quad 0.284 \quad 0.342 \quad 0.143)$$

由于各等级规定的参数列向量为  $C = (0.4 \quad 0.3 \quad 0.2 \quad 0.1)^T$ ,各滑坡评判结果为:

$$P' = B * C = \begin{pmatrix} 0.2182 \\ 0.3057 \\ 0.2905 \\ 0.2746 \\ 0.2975 \\ 0.2611 \end{pmatrix}$$

计算结果表明 6 个滑坡稳定性从差到好的排序为:秦峪滑坡,凤安山滑坡,石阙子滑坡,清水子滑坡,固水子滑坡,鲁班崖滑坡。与文献[13]、[14]及实际调查结果基本一致。可见粗糙集求权重的评价结果与

待评滑坡稳定性的危害现状及活动趋势吻合,说明基于粗糙集理论的模糊定权法在滑坡危险性评价的应用是可行的,具有一定的应用价值。

#### 4 结论

在野外滑坡详细调查和前人研究工作的基础上,将 RS 理论与模糊集合论相结合,根据“知识”,利用 RS 理论求出属性重要度,将其权值化,作为模糊综合评判中参评因素的权重系数,提出滑坡灾害稳定度评判模型。并以 212 国道宕昌—武都段 6 处堆积层滑坡为例验证模型方法,效果良好。

模型中将影响滑坡稳定度的因素概化为三个方面(地质构造、地形地貌、水文)七个指标(断层、岩层与坡面关系、坡面平均坡度、冲沟发育状况、裂缝、地下水和降雨情况),是因为研究区滑坡类型单一,均为堆积层滑坡,显然因素考虑并不全面,但作为方法探讨,避免了传统方法确定权重系数的主观性,具有一定意义。

#### 参考文献:

- [1] 安关峰,殷坤龙,唐辉明. 遗传算法在边坡数值计算中的应用[J]. 中国地质大学学报, 2002, 27(3):177-180. [AN G F, YIN K L, TANG H M. Genetic algorithm - hm for slope value calculation [J]. Journal of China University of Geosciences, 2002, 27(3):177-180. (in Chinese)]
- [2] 朱大勇. 边坡临界滑动场及数值模拟[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(1):63-68. [ZHU D Y. Critical slip field of Slope and numerical simulation [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(1):63-68. (in Chinese)]
- [3] 罗冠枝,徐林荣. 基于粗糙集和灰色理论的模糊综合定权法在泥石流危险性评价中的应用[J]. 安全与环境工程, 2008, 9(15):1-4. [LUO G Z, XU L R. Fuzzy Synthetic Method based on rough sets and grey theory in Debris Flow Hazard Assessment [J]. Journal of Safety and Environmental Engineering, 2008, 9(15):1-4. (in Chinese)]
- [4] 陈情来. 模糊综合评判地质灾害的危险性[J]. 油气储运, 2000, 19(5):38-43. [CHEN Q L. Fuzzy comprehensive evaluation of the risk of geological terminator [J]. Journal of Gas Storage and Transportation, 2000, 19(5):38-43. (in Chinese)]
- [5] 张文修,吴伟志,梁吉业,等. 粗糙集理论与方法[M]. 北京:科学出版社, 2001. [ZHANG W X, WU W Z, LIANG J Y *et al.* Rough set theory and method [M]. Beijing: Beijing Science Press, 2001. (in Chinese)]
- [6] 匡乐红,徐林荣,刘宝探. 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(6):1063-1067. [KUANG L H, XU L R, LIU B T. Geological terminator combination weighting method to determine risk weights of evaluation indexes [J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(6):1063-1067. (in Chinese)]
- [7] 陶菊春,吴建民. 综合加权评分法的综合权重确定新探[J]. 系统工程理论与实践, 2001, 2(8):43-48. [TAO J C, WU J M. Comprehensive integrated weighted scoring method to determine the weight of new exploration [J]. Journal of Systems Engineering Theory & Practice, 2001, 2(8):43-48. (in Chinese)]
- [8] 熊萍,程华斌,吴晓平. 基于粗糙集理论的一种综合定权法[J]. 海军工程大学学报, 2003, 15(1):53-56. [XIONG P, CHENG H B, WU X P. Based on Rough Set Theory Synthetic Method [J]. Journal of The University of Naval Engineering, 2003, 15(1):53-56. (in Chinese)]
- [9] 黄建文,李建林,周宜红. 基于 AHP 的模糊评判法在边坡稳定性评价中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 7(S1):2627-2632. [HUANG J W, LI J L, ZHOU Y H. AHP - based Fuzzy evaluation method in slope stability evaluation [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 7(S1):2627-2632. (in Chinese)]
- [10] 李彰明. 模糊分析在边坡稳定性评价中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(5):490-495. [LI Z M. Fuzzy analysis in slope stability evaluation [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1997, 16(5):490-495. (in Chinese)]
- [11] 蔡斌,胡卸文. 模糊综合评判在绵阳市环境地质危险性分区评价中的应用[J]. 水文地质工程地质, 2006, 33(2):67-70. [CAI B, HU X W. Fuzzy Comprehensive Evaluation in Mianyang City where environmental of geological risk evaluation and zoning [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2006, 33(2):67-70. (in Chinese)]
- [12] 赵建军,黄润秋,向喜琼. 某水电站近坝库岸边坡稳定性二次模糊综合评判[J]. 水文地质工程地质, 2004, 31(2):45-49. [ZHAO J J, HUANG R Q, XIANG X Q. Fuzzy comprehensive evaluation of secondary of Slope stability near a dam [J]. Hydrogeology & Engineering geology, 2004, 31(2):45-49. (in Chinese)]

(下转第 122 页)

## A study of the monitoring deformation of sinkhole collapse using TDR time domain reflectometry

JIANG Xiao-zhen , LEI Ming-tang , DAI Jian-ling , GUAN Zhen-de , GAO Ming , WANG Yong-hui  
(*Institute of Karst Geology , CAGS , Guilin 541004 , China*)

**Abstract:** Controlled by karst development and groundwater fluctuation , soil cave usually forms indefinitely and develop upward progressively until a sinkhole happens. It is important to find an efficient way to monitor the soil cave formation in good season for decision maker to take treatments. TDR has been used as a cost-effective method to monitor soil voids and sinkholes. The principle of soil void monitored with TDR is introduced in this paper. Cable tester lines need to be plane installed. Coaxial cables are subsequently grouted with cement bonded sand to protect the cable and to ensure that the cables deform with the surrounding sediments. When subsurface void propagates to the coaxial cable , the cement-sands surrounding the cable will be broken and the deformation can be located by detecting the location of a cable. Types of the coaxial cable , intension of the cement bounded sand and the coaxial cable installation will influence the validity of soil-void monitoring and forecasting. Therefore , a series of geotechnical and material tests in a lab and in the field are arranged. The results show that the coaxial cable tensile strength should be lower than 200N and the cement-sands ratio is in the range of 1:3 to 1:4 for karst collapse monitoring and forecasting.

**Key words:** soil-void; sinkhole; TDR; monitoring

责任编辑:汪美华

(上接第 117 页)

[13] 霍张丽,梁收运. 模糊数学方法在滑坡稳定性评价中的应用[J]. 西北地震学报, 2007, 29(3): 35 - 39. [HUO Z L, LIANG S Y. Fuzzy Mathematics in the evaluation of slope stability [J]. Northwestern Seismological Journal, 2007, 29(3): 35 - 39. (in Chinese) ]

[14] 王学究,梁收运. 212 国道陇南段滑坡分布特征及主要因素探讨[J]. 西部探矿工程, 2005, 5(9): 96 - 98. [WANG X J, LIANG S Y. Landslide distribution and the main factors on 212 Nationalway of Longnan Section [J]. China Exploration Engineering, 2005, 5(9): 96 - 98. (in Chinese) ]

## A comprehensive evaluation model for the stability of landslide hazard

WANG Nian-qin , FAN Ke-qi

(*College of Geology and Environment , University of Science and Technology , Xi'an , Shaanxi 710054 , China*)

**Abstract:** This article is based on Rough Set theory (RS) and Fuzzy Mathematics Multi-Level Fuzzy theory and method , combining the factors of landslide stability to data mining on the original geological , Obtain the weight factor of geological factors , overcome traditional method to determine the weight coefficient of subjectivity , Get the model of Landslide stability on multi - level fuzzy comprehensive evaluation . Finally , Case of six Layers landslides on the 212 State Road to Verification this theory , Confirmed that the theory have practical value in production.

**Key words:** landslide; Rough Set; Fuzzy Math; comprehensive evaluation

责任编辑:汪美华