

基于粗糙集和模糊模型识别的斜坡危险性区划

柴 波¹, 殷坤龙², 杜 娟²

(1. 中国地质大学 环境学院, 武汉 430074; 2. 中国地质大学 工程学院, 武汉 430074)

摘 要: 为了在斜坡危险性区划中考虑岩体结构的控制作用, 将粗糙集和模糊模型识别理论用于区域斜坡岩体结构识别, 并结合信息量法对斜坡单元进行空间危险性预测。尝试在指标中考虑深部岩体结构特征和岩层变形构造(断层、岩层曲率), 将该方法应用于巴东新城区库岸斜坡危险性区划。结果表明: 巴东新城区滑坡的主要影响因素有坡向和岩层倾向关系、坡角和岩层倾角关系、构造条件, 可将斜坡分为 3 种结构类型。不同结构类型斜坡在危险性评价时各指标的影响程度或权重不同, 可将巴东新城区划分为 4 个危险性等级, 与现有滑坡比较验证了结果的合理性。

关 键 词: 危险性区划; 粗糙集; 模糊模式识别; 岩体结构; 滑坡

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

Slope hazard zoning based on rough set and fuzzy pattern recognition

CHAI Bo¹, YIN Kun-long², DU Juan²

(1. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

2. Engineering Faculty, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to consider rock mass structures in slope hazard zoning, rough set theory and fuzzy pattern recognition was used to classify the slope units with different slope structures; and then, the slope units' hazard was predicted by information value model. Above method was used to analyze slope hazard zoning of the New Badong county in Three Gorges reservoir area. It indicates that the main influencing factors of landslides include the relationship between slope aspect and strata tendency, the relationship between slope angle and strata inclination, tectonic condition. The slope units could be divides into three kinds that have different weight indices when predict the slope hazard zoning. The shoreline slope of the New Badong county is divided into four hazard ranks. The result of slope hazard is reasonable compared with landslides in New Badong county.

Key words: hazard zoning; rough set; fuzzy pattern recognition; rock mass structure; landslide

1 引 言

近些年, 滑坡灾害危险性区划发展非常迅速^[1-7], 涵盖了小比例尺的全国、省市区划和大比例尺的具体工程场地区划。通常把地表容易获取的地形、地质、水文等信息作为评价指标, 通过信息量、多元统计等模型计算各指标对滑坡稳定性的影响程度, 进而预测区内滑坡灾害危险性^[8]。以往评价对岩体结构控制斜坡变形破坏的作用考虑不足, 仅把组成岩体结构的要素作为孤立的指标, 同时也没涉及深部岩体结构特征。

本文将粗糙集和模糊模式识别引入斜坡危险性区划, 充分考虑岩体结构对斜坡稳定性的控制作用,

具体思路是: 首先, 利用粗糙集在分析不确定、不完整问题方面的优势, 根据不完整的滑坡描述表, 建立典型斜坡结构模型; 然后, 通过模糊模型识别对待评价斜坡单元进行斜坡结构归类; 最后, 采用信息量法评价斜坡单元的稳定性。将该方法用于巴东新城区库岸斜坡危险性区划, 并尝试在评价指标中考虑深部岩体结构特征。

2 粗糙集和模糊模型识别

采用模糊模型识别方法, 依据组成典型斜坡岩体结构模型的要素和规则, 对未知或待评价斜坡进行分类, 并将粗糙集引入岩体结构模型要素提取和模糊权重求解。

2.1 模糊模型识别原理

设有 n 个待识别的斜坡单元组或单元集 (待识别样本) $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 和 m 个斜坡岩体结构指标 (因素) 组成指标集: $x_j = (x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj})^T (j=1, 2, \dots, n)$; 则形成了实测斜坡岩体结构指标矩阵 $X = (x_{ij})_{m \times n}$ 。若 m 项指标按 c 级标准模式进行分类, 即 c 个典型斜坡岩体结构模型, 则有指标标准矩阵 $Y = (y_{ih})_{m \times c}$, $2 \leq c < m$ 。

考虑 X 中 $x_j (j=1, 2, \dots, n)$ 作单指标评判, 从指标 x_j 考虑待识别斜坡单元对指标标准矩阵 Y 的隶属度 $r_j = (r_{ij})_{m \times c}$ 。隶属度 r_j 是考虑待识别斜坡单元到典型滑坡单元的一个模糊关系, 在所考虑的 m 个指标之间, 各指标在决策中所起的作用不同, 于是定义一个权重 $\tilde{w}'$, $\tilde{w}'$ 称 X 的指标重要度模糊子集, 可表示为

$$\tilde{w}' = \{w'_1, w'_2, \dots, w'_m\} \quad (1)$$

当重要度模糊子集 $\tilde{w}'$ 和隶属度模糊矩阵 r_j 已知时, 即可做模糊变换进行综合评判, 即

$$\tilde{B}_j = \tilde{w}' r_j = \{b_1, b_2, \dots, b_i, \dots, b_c\} \quad (2)$$

式中: $b_i = \bigvee_{i=1}^m (w'_i \wedge r_{ih})$, 即取大取小运算: $\tilde{B}_j = \tilde{w}' r_j = \{b_1, b_2, \dots, b_c\}$, 为待识别斜坡单元的等级模糊子集, 可以根据最大隶属度原则确定其类型。

隶属度函数可以有两种形式: 连续型和离散型, 前者常采用正态、正弦、三角模糊和分段连续等函数表达; 后者则采用隶属度取值表进行赋值, 可参见文献[9]。一般而言, 隶属函数 $u_{r_{ih}}(x_{ij})$ 满足 $u_{r_{ih}}(r_{ih}) = 1$, 当 x_{ij} 远离 r_{ih} 时, 函数值应变小。

2.2 粗糙集求指标模糊权重

区域斜坡危险性区划通常无详细的描述数据, 无法对其组成各因素进行详细地统计分析, 获得指标权重。而专家打分法又存在主观性强的缺点, 为了解决这些问题, 将粗糙集理论引入从粗糙描述数据中求组成斜坡结构各因素的重要性^[10]。

信息表知识表达系统 $S = (U, R, V, f)$, 这里 U 是样本的集合, $R = C \cup D$ 是属性集合, C 和 D 分别为条件属性和决策属性, $V = \bigcup_{r \in R} V_r$ 是属性值的集合, V_r 表示属性 $r \in R$ 的属性值范围, $f: U \times R \rightarrow V$ 是一个信息函数, 它指定 U 中每个样本的属性值。

(1) 不可分辨关系

对于每个属性子集 $B \subseteq R$, 定义一个不可分辨关系 $IND(B)$, 即

$$IND(B) = \{(x, y) | (x, y) \in U^2, \forall b \in B (b(x) = b(y))\} \quad (3)$$

显然, $IND(B)$ 是一个等价关系 (满足自反性、对称性和传递性), 且 $IND(B) = \bigcap_{b \in B} IND(\{b\})$ 。

(2) 上、下近似集

给定知识表达系统 $S = (U, R, V, f)$, 对于每个子集 $X \subseteq R$ 和不可分辨关系 B , X 的上近似集和下近似集定义如下:

$$B_-(X) = \bigcup \{Y_i | (Y_i \in U | IND(B) \wedge Y_i \subseteq X)\} \quad (4)$$

$$B^-(X) = \bigcup \{Y_i | (Y_i \in U | IND(B) \wedge Y_i \cap X \neq \emptyset)\} \quad (5)$$

集合 $BN_B(X) = B^-(X) / B_-(X)$, 称 X 的 B 边界; $POS_B(X) = B_-(X)$ 称 X 的 B 正域, $NEG_B(X) = U / B_-(X)$ 称 X 的 B 负域。

(3) 粗糙集度量

假设集合 X 是论域 U 上的一个关于知识 B 的粗糙集, 定义其 B 精度 $d_B(X)$ 和粗糙度 $P_B(X)$:

$$d_B(X) = \frac{card(B_-(X))}{card(B^-(X))} \quad (6)$$

$$P_B(X) = 1 - d_B(X) \quad (7)$$

式中: $X \neq \emptyset$; 如果 $X \neq \emptyset$ 可定义 $d_B(X) = 1$, $card(\cdot)$ 为集合的势。精确度 $d_B(X)$ 用于表示了解集合 X 的知识完全程度。 $d_B(X)$ 越大, 表示由 X 引起的不确定性就越小; 反之, 引起的不确定性越大。

(4) 因素重要性判断

设集合簇 $F = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}, (U = \bigcup_{i=1}^n X_i)$ 是论域 U 上定义的知识, B 是一个属性子集, 定义 B 对 F 近似分类的质量为 $r_B(F)$ 为

$$r_B(F) = \sum_{i=1}^n card(B_-(X_i)) / card(U) \quad (8)$$

B 对 F 近似分类的精度描述的是当使用知识 B (属性子集 B) 对样本进行分类时, 在所有可能的决策中确定决策所占的比例; B 对 F 近似分类的质量是应用知识 B 对样本进行分类时, 能够确定决策的样本在论域中所占的比例。

对于 F 是属性集 D 导出的分类, 属性子集 B' 在属性集 B 中的重要性 ($B' \subseteq B$, 如果属性集 B 是默认的条件属性全集, 则可简称为属性子集 B' 的重要性) 定义为

$$SGF(B', B, D) = r_B(F) - r_{B/B'}(F) \quad (9)$$

式 (9) 表示属性集中去掉属性子集 B' 对近似分类的影响程度。

3 巴东新城区典型斜坡结构模型

3.1 斜坡岩体结构划分指标权重

斜坡岩体结构分类的目的是用于预测其危险性，因此，分类时必须考虑所选择分类指标对滑坡类型、规模等的贡献程度。选择区内的几处典型滑坡的实测参数，滑坡序号见表 1，为了便于计算，将影响滑坡的要素分别为 a 、 b 、 $\dots$ 、 f ，各要素分类采用数字编号，将坡向分为 4 类、坡角与岩层倾向角关系分为 3 类、滑面形态分为 3 类、岩性分为 3 类、构造特征分为 5 类，滑坡体积分 4 类、破坏类型分为 4 类，具体见表 1。条件属性为： $C = \{a, b, c, d, e\}$ ，决策属性为 $D = \{f, g\}$ ，根据粗糙集求指标权重，各集合的势如下：

$$\left. \begin{aligned} U|IND(a, b, c, d, e) &= \{1, 2, 3, \{4, 5\}, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12\} \\ U|IND(b, c, d, e) &= \{1, 2, 3, \{4, 5\}, \{6, 7\}, 8, 9, 10, 11, 12\} \\ U|IND(a, c, d, e) &= \{1, 2, 3, \{4, 5\}, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12\} \\ \dots \dots \\ U|IND(c, d, e) &= \{1, 2, 3, \{4, 5, 6, 7\}, 8, 9, 10, 11, 12\} \\ \dots \dots \\ U|IND(d, e) &= \{1, 2, \{3, 11\}, \{4, 5, 6, 7\}, 8, 9, 10, 12\} \\ \dots \dots \\ U|IND(f, g) &= \{\{1, 9\}, 2, \{3, 4, 5, 8\}, \{6, 10\}, 7, 11, 12\} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

因此，因素重要性指数如下：

$$\left. \begin{aligned} r_c(D) &= \text{card}\{1, 2, \dots, 12\} / \text{card}\{U\} = 12/12 = 1 \\ r_{c-a}(D) &= \text{card}\{1, \dots, 5, 8, \dots, 12\} / \text{card}\{U\} = \\ &10/12 = 0.833 \\ r_{c-b}(D) &= r_{c-c}(D) = \text{card}\{1, 2, \dots, 12\} / \text{card}\{U\} = \\ &12/12 = 1; \\ r_{c-a-b}(D) &= \text{card}\{1, 2, 3, 8, \dots, 12\} / \text{card}\{U\} = \\ &8/12 = 0.667 \\ r_{c-a-c}(D) &= r_{c-a-d}(D) = r_{c-a-e}(D) = 10/12 = 0.883 \\ r_{c-a-b-c}(D) &= \text{card}\{1, 2, 8, 9, 10, 12\} / \text{card}\{U\} = \\ &6/12 = 0.5 \\ r_{c-a-b-d}(D) &= \text{card}\{3, 8, 9, 10\} / \text{card}\{U\} = \\ &4/12 = 0.333 \\ r_{c-a-b-e}(D) &= \text{card}\{3, 8, 12\} / \text{card}\{U\} = \\ &3/12 = 0.25 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

应用层次分析法的原理判断条件因素的重要性，所有要素同等比较时最重要因子为 a ，去除 a 后比较时，得到最重要因子为 b ；去除 a 、 b 比较时，其重要性排序为 $e > d > c$ 。由此所得滑坡要素重要排序为 $a > b > e > d > c$ ，各要素权重为 0.4、0.24、0.16、0.13、0.07，在进行斜坡岩体结构划分时可选择 a （坡向与岩层倾向关系）， b （坡角与岩层倾向关系）， e （构造条件）3 个指标。

表 1 巴东新城区代表性滑坡岩体结构分类参数表
Table 1 Rock mass structure parameters of representative landslides in New Badong county

滑坡		坡向与岩层倾向关系		坡角 α 与岩层倾向角 β		滑面形态		地层岩性		构造特征		滑坡规模		破坏类型	
名称	序号	坡向	a	α 与 β 关系	b	形态	c	岩性	d	特征	e	体积 $/ (10^4 \text{ m}^3)$	f	类型	g
黄土坡	1	顺向、反向复合型	4	$\alpha < \beta$	1	起伏波状	3	T_2b^3/T_2b^2	3	内部发育次级褶皱	4	6 934	4	蠕滑、倾倒复杂岩质滑坡	3
岩湾桥	2	顺向坡	1	$\alpha < \beta$	1	前缓后陡弧形	2	T_2b^3	1	无	0	18.5	2	崩积物土质滑坡	4
大园子	3	顺向坡	1	$\alpha < \beta$	1	直线型	1	T_2b^2	2	无	0	33	2	顺层岩质滑坡	1
董家梁子	4	顺向坡	1	$\alpha \approx \beta$	3	前缓后陡弧形	2	T_2b^3	1	官渡口向斜核部、断层	2	29	2	顺层岩质变形体	1
红石包	5	顺向坡	1	$\alpha \approx \beta$	3	前缓后陡弧形	2	T_2b^3	1	官渡口向斜核部、断层	2	30	2	顺层岩质滑坡	1
谭家坪	6	顺向-反向组合	4	$\alpha \geq \beta$	2	前缓后陡弧形	2	T_2b^3	1	官渡口向斜核部、断层	2	300	3	顺层-切层两段滑坡	3
榨房坪	7	反向坡	2	$\alpha \geq \beta$	2	前缓后陡弧形	2	T_2b^3	1	官渡口向斜核部、断层	2	559	3	切层滑坡	2
白岩沟桥西	8	斜交坡	3	$\alpha < \beta$	1	直线型	1	T_2b^3	1	官渡口向斜平缓段	1	22	2	顺层块体滑移	1
赵树岭	9	顺向、反向复合型	4	$\alpha \approx \beta$	3	多级起伏	3	T_2b^3/T_2b^2	3	发育断层、内部发育次级褶皱	3	5 000	4	顺层、切层复合岩质滑坡	3
西五路	10	顺向坡	1	$\alpha \leq \beta$	1	前缓后陡弧形	2	T_2b^2	2	临近断层	3	240	3	顺层、切层复合岩质滑坡	3
西壤坡西	11	斜交坡	3	$\alpha > \beta$	2	前缓后陡弧形	2	T_2b^2	2	无	0	400	3	顺层推移滑坡	1
童家坪	12	斜交坡、顺层复合	4	$\alpha \approx \beta$	3	多级起伏	3	T_2b^2	2	内部发育次级褶皱	4	966	3	顺层、斜交土石混合滑坡	4

3.2 巴东新城区典型斜坡岩体结构

根据以上 3 个指标可将巴东新城区典型斜坡岩体结构模型概括为以下几种：缓-中倾顺向坡结构、

层面和节理面组合斜交坡结构、顺向-反向复合坡结构、反向坡结构和结构面密集碎裂结构。对整个城区进行评价时，单一评价单元通常包含多种结构，因此，

只选择区内分布最为普遍的 3 种结构作为城区岩体结构稳定性评价的基本模型。指标分类标准见表 2，采用模糊模式识别法进行，前两项分类指标为连续变量，第 3 项为离散变量，按照文献[8]的方法数字化，采用三角隶属度，指标权重参考前述粗糙集法所获得的权重。巴东新城区斜坡岩体结构分类结果见图 1。

表 2 巴东城区斜坡岩体结构分类标准表
Table 2 Classification standard of slope structure in New Badong county

斜坡岩体结构	岩层倾向与坡向夹角/(°)	岩层倾向和坡角之差/(°)	构造条件
缓-中倾顺向坡结构(I)	0~30	-10~10	无跨越斜坡单元褶皱和断裂
层面和节理面组合斜交坡结构(II)	25~155	-20~20	节理延伸长、发育数量多
顺向-反向复合坡结构(III)	0~30 和 150~180 复合	-10~10	斜坡单元跨越褶皱核部

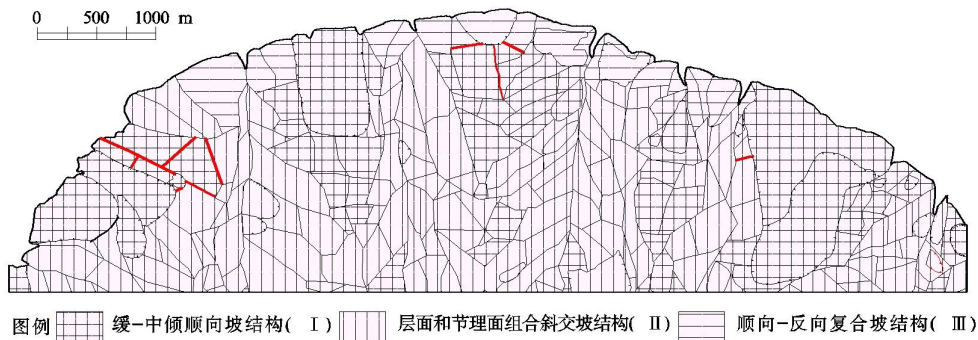


图 1 巴东新城区库岸斜坡岩体结构分类图
Fig.1 Classification of slope units in New Badong county

4 巴东新城区滑坡灾害危险性评价

4.1 评价基础网格和指标

巴东新城区是三峡库区内地质灾害最为发育的地段之一，较大规模滑坡有黄土坡滑坡、赵树岭滑坡、童家坪滑坡等。对巴东新城区岩体结构稳定性评价采用不规则单元网，根据地形、已有滑坡面积确定划分评价网格，保证网格可构成独立斜坡岩体结构（图 1）。

评价斜坡岩体结构稳定性的指标可分为两类：内在结构因素和外在诱发因素，其中内在结构因素包括临空结构和岩体结构，外在诱发因素考虑水的作用和人类工程活动。根据巴东新城区深 300 余米监测钻孔资料，笔者尝试将深部岩体结构指标应用于斜坡危险性区划，而并不局限于以往仅考虑地表岩体特征。 T_2b^3 岩体强度依据深层岩体结构强度估算结果分为 4 个等级，由 $T_2b^3-1\sim T_2b^3-4$ 逐级变好。指标分级依据统计和经验，具体见表 3。

滑坡灾害空间危险性评价方法采用常用的信息量法，具体计算过程可参见文献[9]，不再赘述。表 3 为不同类型斜坡岩体结构稳定性评价指标的信息量计算结果。从表中可以看出，不同类型斜坡岩体结构其评价指标的信息值排序不同，也即意味着各评价指标对斜坡稳定性的影响程度不尽相同。例如：对于缓-中倾顺向坡结构，信息量最高的评价指标为

表 3 评价指标信息量计算结果表
Table 3 Information values of evaluation indices of different slope structures

指标	二级指标 /(°)	I		II		III	
		信息量 /bit	排序	信息量 /bit	排序	信息量 /bit	排序
坡度 (X_1)	$X_1\leq 10$	0.322	5	-0.018	10	-1.414	19
	$10<X_1\leq 15$	0.250	7	-0.293	14	-0.065	14
	$15<X_1\leq 20$	-0.106	14	0.428	5	0.412	9
	$20<X_1\leq 25$	-0.029	10	0.246	6	0.607	5
	$25<X_1\leq 30$	-0.037	11	-0.300	15	0.238	11
	$30<X_1\leq 40$	-0.083	13	-0.102	13	-0.090	15
	$40<X_1\leq 50$	-0.332	17	-0.639	17	-1.288	18
岩层曲率 (X_2)	$X_1>50$	-0.065	12	-0.063	12	-0.960	17
	高	0.785	2	-2.191	18	0.883	4
	中	-0.218	16	0.122	8	0.055	12
岩体强度 (X_3)	低	-0.138	15	-0.062	11	0.000	
	T_2b^2	0.395	3	0.952	3	0.000	
	T_2b^3-1	-5.608	20	4.155	1	1.020	3
	T_2b^3-2	0.134	8	-0.622	16	0.357	10
	T_2b^3-3	-0.552	18	-4.750	20	-0.824	16
断层(X_4)	T_2b^3-4	-8.918	21			0.433	8
	后缘	-1.481	19	1.255	2	1.219	2
库水变动带(X_5)	侧边界	0.115	9	-2.249	19	1.884	1
	影响区	0.852	1	0.444	4	0.003	13
	冲沟(X_6)	0.267	6	0.114	9	0.506	7
	居民区(X_7)	0.431	4	0.192	7	0.527	6

库水变动带，其次为岩层曲率、岩体强度、坡度及居民区，由上述几个主要影响因素可以总结出区内顺向坡结构斜坡在受水库影响，构造作用强烈、软弱泥岩组成的缓倾斜坡，当人类工程活动频繁时易诱发滑坡。同样可以总结其他两类结构斜坡评价指标对稳定性的影响程度。

4.2 评价结果分析

综合评价网格单元信息量与单元数的相关关系图（如图 2），根据信息量区间分布频数和累计分布频数，综合对比两者相关关系拐点的位置，结合巴东县新城区滑坡灾害分布规律，确定斜坡岩体结构稳定性分级的信息量阈值，将巴东新城区斜坡危险性划分为极高危险区、高危险区、中等危险区和低危险区 4 个级别（图 3）。

斜坡岩体结构分类后不同危险性的平面面积统计见表 4，结果表明，具有顺向坡结构斜坡稳定性最差，集中在极高和高危险区，其次为顺向和反向复合结构，斜交坡稳定性略高于以上两类结构。

表 5 为研究区斜坡稳定性汇总表，研究区内已发生的滑坡有 98%落在极高危险及高危险区内，低危险区内无滑坡的发生。随危险性等级的提高，分区内发生滑坡的面积增大，同时滑坡发生的实际比率（ b_0/a_0 ，即分区内发生滑坡的密度与研究区总的滑坡密度的比值）也逐渐增大，且极高危险区的 b_0/a_0 值远大于 1。说明评价结果与实际滑坡的发生情况吻合，评价结果比较理想。

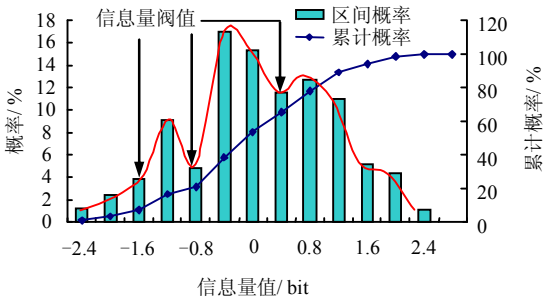


图 2 I 类斜坡岩体结构信息量与单元频数关系
Fig.2 Distribution curve of information value and the units' frequency of first kind of slope structure

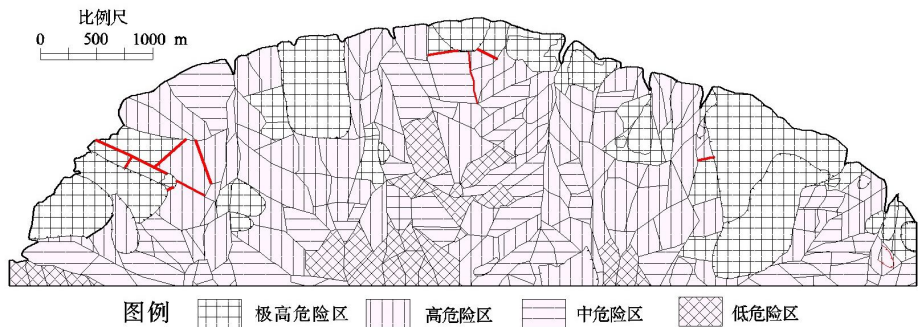


图 3 巴东新城区岩体结构稳定性评价分区图
Fig.3 Slope hazard zonation of the New Badong county

表 4 巴东新城区斜坡岩体结构与稳定性分析结果表
Table 4 Slope stability of different slope structures in New Badong county

危险等级	I 区		II 区		III 区	
	危险等级面积/ m ²	占本区面积比率/ %	危险等级面积/ m ²	占本区面积比率/ %	危险等级面积/ m ²	占本区面积比率/ %
极高	30 324.6	54.20	4 214.2	5.71	5 314.3	38.81
高	18 630.4	33.30	34 083.8	46.17	5 948.7	43.44
中	5 008.3	8.95	25 380.2	34.38	2 430.3	17.75
低	1 986.3	3.55	10 145.0	13.74	0.0	0.00

注：I、II、III 区总面积分别为 55 949.6 m²、73 823.1 m²、13 693.4 m²。

表 5 巴东新城区库岸斜坡稳定性评价表
Table 5 Analyzing of the hazard zoning result in New Badong county

危险度	总面积 / 10 ² m ²	占研究区总面积 百分比 a ₀	已有滑坡个数	区内滑坡数占滑坡 总数的百分比/ %	区内滑坡面积 / 10 ² m ²	区内滑坡面积占滑坡 总面积的百分比 b ₀	b ₀ /a ₀
高	39 853.2	27.78	18	64.29	28 943.8	86.67	3.120
高	61 093.2	42.58	8	28.57	3 916.2	11.73	0.275
中	30 388.5	21.18	2	7.14	535.8	1.60	0.076
低	12 131.2	8.46	0	0.00	0.0	0.00	0.000

5 结 论

针对滑坡统计中不详细和不完整数据的特点,将粗糙集理论和模糊模型识别引入斜坡危险性区划,在斜坡岩体结构分类的基础上,应用信息量模型对分类后的斜坡单元进行空间危险性预测。通过粗糙集理论评价滑坡影响因素指标权重,认为巴东新城滑坡的主要影响因素有坡向与岩层倾向关系、坡角与岩层倾角关系、构造条件 3 个,库岸斜坡危险性区划时可将斜坡分为 3 种结构类型,不同结构类型斜坡的评价指标的影响程度(权重)不同。评价中尝试着考虑深部岩体结构特征和岩层变形构造(断层、岩层曲率)。将巴东新城划分为 4 个危险性等级,与现有滑坡比较验证了结果的合理性。

参 考 文 献

- [1] JORDI COROMINAS, JOSÉ MOYA. A review of assessing landslide frequency for hazard zoning purposes[J]. **Engineering Geology**, 2008, 102: 1—21.
- [2] FRATTINI P, CROSTA G B, FUSI N, et al. Shallow landslides in pyroclastic soils: a distributed modelling approach for hazard assessment[J]. **Engineering Geology**, 2004, 73: 277—295.
- [3] GORSEVSKI P V, GESSLER P E, FOLTZ R B, et al. Spatial prediction of landslide hazard using Logistic Regression and ROC analysis[J]. **Transactions in GIS**, 2006, 10(3): 395—415.
- [4] HANEBERG W C. A rational probabilistic method for spatially distributed landslide hazard assessment[J]. **Environmental and Engineering Geoscience**, 2004, X: 27—43.
- [5] 高华喜, 殷坤龙. 降雨与滑坡灾害相关性分析及预警预报阈值之探索[J]. **岩土力学**, 2007, 28(5): 1055—1066.
GAO Hua-xi, YIN Kun-long. Discussion on the correlations between landslides and rainfall and threshold for landslide early-warning and prediction[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(5): 1055—1066.
- [6] 谢全敏, 边翔, 夏元友. 滑坡灾害风险评价的系统分析[J]. **岩土力学**, 2005, 26(1): 71—74.
XIE Quan-min, BIAN Xiang, XIA Yuan-you. Systematic analysis of risk evaluation of landslide hazard[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(1): 71—74.
- [7] 殷坤龙, 陈丽霞, 张桂荣. 区域滑坡灾害预测预警与风险评价[J]. **地学前缘**, 2007, 14(6): 85—97.
YIN Kun-long, CHEN Li-xia, ZHANG Gui-rong. Regional landslide hazard warning and risk assessment[J]. **Earth Science Frontiers**, 2007, 14(6): 85—97.
- [8] 曹文贵, 张永杰. 地下结构岩体质量分类的变权重二级模糊综合评判方法研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2006, 25(8): 1612—1618.
CAO Wen-gui, ZHANG Yong-jie. Study on two-stage fuzzy synthetic judgment method with Changing weight value for rock quality classification in underground structures[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(8): 1612—1618.
- [9] 殷坤龙. 滑坡灾害预测预报[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2004.
- [10] WYGARLKA M. Rough sets and fuzzy sets-some remarks on interrelations[J]. **Fuzzy Sets and Systems**, 1989, 29(3): 241—243.
- [8] 陈厚群, 李敏, 张艳红. 地震危险性分析和地震动输入机制研究[J]. **水力发电**, 2001, (8): 48—50.
CHEN Hou-qun, LI Min, ZHANG Yan-hong. Earthquake-resistant analysis on high arch dam and study on the dynamic stability of dam abutment[J]. **Water Power**, 2001, (8): 48—50.
- [9] 胡进军. 地下地震动参数研究[硕士学位论文 D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2003.
- [10] 胡聿贤. 地震工程学[M]. 北京: 地震出版社, 2006.
- [11] KUHLEMEYER R L, LYSMER J. Finite element method accuracy for wave propagation problems[J]. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE**, 1973, 99(5): 421—427.
- [12] 吕涛, 李海波, 杨建宏, 等. 溪洛渡地下洞室群地震响应的二维及三维数值模型比较分析研究[J]. **岩土力学**, 2009, 30(3): 721—728.
LÜ Tao, LI Hai-bo, YANG Jian-hong, et al. Comparison between 2D and 3D numerical analysis for seismic response of Xiluodu underground caverns[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(3): 721—728.

上接第 3202 页