

# 基于数量化理论 III 的滑坡发育 影响因素及耦合作用强度分析

李军霞<sup>1</sup>, 王常明<sup>1</sup>, 王钢城<sup>1</sup>, 刘伟<sup>2</sup>

(1. 吉林大学 建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 西藏自治区地质环境监测总站, 西藏 拉萨 850001)

**摘要:** 探讨西藏朗县研究区内滑坡发育的地质环境影响因素, 借助 GIS 技术将影响因素指标量化, 采用数量化理论 III 对滑坡发育的影响因素及其耦合作用强度进行分类分析。结果表明, 对区内滑坡发育起主导作用的是降雨因素、坡体岩性、平均坡度、坡体前缘河流影响距, 起重要作用的是坡体高度、外营力与人类工程活动、地震烈度因素, 起一般作用的是土地利用因素; 确定出年均降雨量、含残坡积物和绢云母千枚岩的滑坡体岩性、200 m 内的河流影响距、35°~45°的平均坡度、地震烈度、高于 200 m 的坡体高度因素为滑坡发育的主控因素, 可为区内开展滑坡评价工作提供依据; 区内 29 个滑坡的影响因素耦合作用强度以±0.01 为界进行强、中等、弱分级, 耦合作用强度越高, 滑坡发育程度及潜在危险性越高, 对区内防灾减灾具有重要的指导意义; 对分析结果以实地调查的可靠性验证, 表明数量化理论 III 的可行性与适用性, 为滑坡灾害影响因素的研究提供新的思路。

**关键词:** 边坡工程; 滑坡; 数量化理论 III; 影响因素

**中图分类号:** P 642.22

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2010)06 - 1206 - 08

## ANALYSIS OF LANDSLIDE INFLUENTIAL FACTORS AND COUPLING INTENSITY BASED ON THIRD THEORY OF QUANTIFICATION

LI Junxia<sup>1</sup>, WANG Changming<sup>1</sup>, WANG Gangcheng<sup>1</sup>, LIU Wei<sup>2</sup>

(1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130026, China;

2. Geological Environmental Monitoring Station of Tibet Autonomous Region, Lhasa, Tibet 850001, China)

**Abstract:** Geographic information system(GIS) and the third theory of quantification are used to analyze the influential factors of landslide development and the coupling intensity of the factors, and to discuss the geological environment factors of landslide development in the study area of Langxian in Tibet. The results show that rainfall, lithology, average slope and the distance from the slope forward to the river are the leading factors of landslide development. The height of slope, outside force, human engineering activities and seismic intensity play important roles in landslide. The land use affects the landslide slightly. Average annual rainfall, the landslide lithology with residual slope wash and sericite phyllite, the distance within 200 m from the slope forward to the river, the average slope of 35° - 45°, seismic intensity and the height of slope higher than 200 m can be taken as the controlling factors which can provide reference for the assessment of landslide. The coupling intensity of influential factors of 29 landslides in the study area can be divided into 3 levels as strong, medium and weak which are bounded by ±0.01. The higher the coupling intensity is, the higher the risk of landslide and the degree of

**收稿日期:** 2010 - 02 - 25; **修回日期:** 2010 - 03 - 23

**基金项目:** 中国地质调查局项目(1212010640702)

**作者简介:** 李军霞(1982 -), 女, 2006 年毕业于长春工程学院勘查技术与工程专业, 现为吉林大学博士研究生, 主要从事岩土力学及地质灾害方面的研究工作。E-mail: lijx6study@163.com

landslide development are. The above-mentioned conclusions are important to the disaster prevention and mitigation. The analytical results have been verified by site investigation which certifies the feasibility and the adaptation of third theory of quantification and they can provide new idea for analyzing the factors of landslides.

**Key words:** slope engineering; landslide; third theory of quantification; influential factors

## 1 引言

滑坡形成和发育受到气候、地形地貌、区域地质和社会经济活动等多因素的影响和控制, 且这些因素大多具有随机性、模糊性和不确定性。如何有效地识别和筛选影响滑坡发育的主导因素, 预测各因素对滑坡发生的耦合作用强度, 已成为滑坡危险性评价和预报研究的主要问题之一, 对最大限度地防灾减灾具有重大意义。

滑坡作为一种突发性地质灾害, 其影响和危害程度重大, 常给基础设施及人民生命财产带来严重损失。为有效避免滑坡致灾和减少滑坡灾害带来的损失, 谢全敏等<sup>[1~7]</sup>通过分析滑坡灾害发生的地质环境条件和各种影响因素, 进行滑坡灾害危险性、风险性等多方面的评价, 是目前区域性滑坡灾害预测比较可行的方法。然而滑坡发育是多种因素共同作用的结果, 不同的地质环境因素对滑坡发育的影响程度也不同, 李晓等<sup>[8~11]</sup>对影响滑坡发育各因素的敏感程度进行了确定性分析, 有助于揭示滑坡空间分布特征, 但这方面的研究还需探索, 有必要深入研究滑坡发生的影响因素并进行有效筛选, 确定出主控因素, 定量分析各影响因素对滑坡的耦合作用强度, 为有效地开展滑坡评价工作奠定基础。

影响滑坡发育的因素既有定量因素, 又有定性因素, 有些定性因素甚至起决定性作用, 其难以量化研究制约着滑坡评价工作的深入研究。日本数量统计学者林知己夫<sup>[12]</sup>提出的数量化理论适宜处理多维定性变量数据并已得到良好应用, 如周国云和陈光齐<sup>[12]</sup>利用 GIS 和数量化理论 II 研究预测滑坡危险性; 汪茜和李广杰<sup>[13]</sup>应用数量化理论 I 进行泥石流灾害预测预报; 王卫红和张文君<sup>[14]</sup>采用遥感与数量化 II 研究滑坡危险度划分。相较于数量化理论 I 和 II 的定量与定性基准变量, 数量化理论 III 则未涉及基准变量, 是一种可将多个定性因素和定量因素结合建立综合评价模型的方法, 具有分类功能, 但目前应用数量化理论 III 进行滑坡影响因素方面的研究还比较少。

本文通过对西藏朗县境内滑坡发育的地质环境条件深入分析, 借助 GIS 技术予以因素量化, 采用数量化理论 III 对滑坡发育的多个影响因素进行了分类研究, 确定出滑坡发育的主控因素并量化描述了各影响因素对滑坡发育的耦合作用强度, 利用实地调查结果对典型滑坡的分类结果进行了对比验证, 可为滑坡空间预测奠定基础。

## 2 数量化理论 III 基本原理

数量化理论 III 是一种可以同时对待定性变量和定量进行处理的分析方法, 其基本思想是以反应矩阵为基础, 对各类目或各样品赋予适当的得分, 使得反应情况接近的类目或样品有相近的得分, 类目得分(或样品得分)作为类目(或样品)的一种数量表示, 可以全面地表现出类目(或样品)间的关系, 分析出说明变量或样品中起支配作用的主要因素成分, 并据此实现对说明变量或样品的分类<sup>[15]</sup>。

在数量化理论中, 定性变量叫做项目, 每个定性变量的各种不同的取“值”叫做类目。假定在说明变量中有  $s$  个定量变量, 有  $m$  个项目, 其中第  $j$  个项目有  $r_j$  个类目, 共有  $r = \sum_{j=1}^m r_j$  ( $1 \leq j \leq m$ ) 个类目, 则  $n$  个样品的说明变量数据就构成了一个  $n$  行  $r+s$  列的反应矩阵  $\mathbf{X}$ :

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \delta_{1(1,1)} & \cdots & \delta_{1(1,r_1)} & \cdots & \delta_{1(m,1)} & \cdots & \delta_{1(m,r_m)} & u_{11} & \cdots & u_{1s} \\ \delta_{2(1,1)} & \cdots & \delta_{2(1,r_1)} & \cdots & \delta_{2(m,1)} & \cdots & \delta_{2(m,r_m)} & u_{21} & \cdots & u_{2s} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \delta_{n(1,1)} & \cdots & \delta_{n(1,r_1)} & \cdots & \delta_{n(m,1)} & \cdots & \delta_{n(m,r_m)} & u_{n1} & \cdots & u_{ns} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中,

$$\delta_i(j, r_j) = \begin{cases} 1 & \text{(当第 } i \text{ 样品中 } j \text{ 项目的} \\ & \text{定性数据为 } r_j \text{ 类目时)} \\ 0 & \text{(当第 } i \text{ 样品中 } j \text{ 项目的} \\ & \text{定性数据不为 } r_j \text{ 类目时)} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\delta_i(j, r_j)$  ( $1 \leq i \leq n$ ,  $1 \leq j \leq m$ ) 为第  $i$  样品在  $j$  项目之  $r_j$  类目上的反应, 式(1)中后  $s$  列中  $u(i, k)$  ( $1 \leq k \leq s$ ) 是  $k$  定量变量在  $i$  样品中的取值。数量化理论 III 分析中对  $r+s$  维类目反应赋以得分, 表达形式为

$$\mathbf{b} = \{b_{11}, \dots, b_{1n}, \dots, b_{m1}, \dots, b_{mn}, \dots, a_1, \dots, a_s\}^T \quad (3)$$

第  $i$  个样品的平均得分为

$$y_i = \frac{1}{m+s} \left( \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^{r_j} b_{jk} \delta_i(j, k) + \sum_{k=1}^s a_k u_{ik} \right) \quad (4)$$

这样, 数量化理论 III 分析的主要问题转化为求解向量  $\mathbf{b}$  和  $y_i$ 。  $\mathbf{b}$  表现类目之间的关系;  $y_i$  则反映样品之间的关系, 具体求解步骤如下:

(1) 记各样品得分为  $\mathbf{Y} = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}^T$ , 各样品在  $j$  项目的  $k$  类目上的反应之和为  $g_{jk} = \sum_{i=1}^n \delta_i(j, k)$ ,

$$\mathbf{g} = \left\{ g_{11}, \dots, g_{1n}, \dots, g_{m1}, \dots, g_{mn}, \overbrace{0, \dots, 0}^{s \uparrow} \right\}^T, \text{ 则}$$

样品得分  $\mathbf{Y} = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}^T = \frac{1}{m+s} \mathbf{X}\mathbf{b}$ ,  $n$  个样品得分的总平均值为

$$\bar{y} = \frac{1}{n(m+s)} \mathbf{g}^T \mathbf{b} \quad (5)$$

(2) 将每个样品看作一组, 组间方差为

$$\sigma_b^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \frac{1}{n(m+s)^2} \mathbf{b}^T \mathbf{H}\mathbf{b} \quad (6)$$

其中,

$$\mathbf{H} = \mathbf{X}^T \mathbf{X} - \frac{1}{n} \mathbf{g}\mathbf{g}^T$$

由式(6)可得

$$n(m+s)^2 \sigma_b^2 = \mathbf{b}^T \mathbf{H}\mathbf{b}$$

(3)  $\mathbf{G}$  为  $r+s$  阶对角矩阵, 样品总方差为

$$\sigma^2 = \frac{1}{n(m+s)} \left( \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^{r_j} b_{jk}^2 g_{jk} + n \sum_{i=1}^s a_i^2 \right) - \bar{y}^2 = \frac{1}{n(m+s)} \mathbf{b}^T \mathbf{L}\mathbf{b} \quad (7)$$

其中,

$$\mathbf{L} = \mathbf{G} - \frac{1}{n(m+s)} \mathbf{g}\mathbf{g}^T$$

(4) 样品组间方差与总方差的相关比由式(6), (7)求得

$$\eta^2 = \frac{\sigma_b^2}{\sigma^2} = \frac{\mathbf{b}^T \mathbf{H}\mathbf{b}}{(m+s)\mathbf{b}^T \mathbf{L}\mathbf{b}} \quad (8)$$

在式(7)中, 使相关比  $\eta^2$  最大且满足条件  $\mathbf{b}^T \mathbf{L}\mathbf{b} = 1, \mathbf{g}^T \mathbf{b} = 0$  的求解向量  $\mathbf{b}$  的表达式为

$$\mathbf{H}\mathbf{b} = \lambda(m+s)\mathbf{L}\mathbf{b} \quad (9)$$

式中:  $\lambda$  为方程的特征值。

式(9)即为数量化理论 III 的数学模型。

从几何上来看, 数量化理论 III 的特征向量  $\mathbf{b}$  相当于一个因子轴, 样品得分  $y_i$  是样品向量在这个轴的方向上的投影。对应的最大特征根表示这个轴为使投影具有最大分散程度(相关比)的方向。由此可见, 若一维表示不够理想时, 可考虑用多维表示, 即求式(9)的最大前  $A$  个特征根  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_A > 0$  所对应的特征向量  $\mathbf{b}$ , 求得  $y_i$ , 对类目或样品进行分类。

### 3 滑坡发育的影响因素分析

#### 3.1 研究区概况

朗县位于西藏自治区的东南部, 地处喜马拉雅山脉北麓, 雅鲁藏布江中游, 地域面积 4 200 km<sup>2</sup>, 隶属林芝地区, 距自治区首府拉萨 420 km, 离林芝地区所在地八一镇 240 km。朗县东与米林县相邻, 西与山南地区加查县靠近, 南与隆子县接壤, 北与工布江达县毗连, 地理坐标为北纬 28°41'08"~29°29'22", 东经 92°25'47"~93°31'16"。研究区为朗县境内的朗镇、仲达镇、拉多乡及金东乡。

#### 3.2 滑坡发育的影响因素

研究区内地形切割深度较大, 沟谷纵横狭窄, 沟谷形态多呈不对称 V 型, 斜坡陡峻, 属典型高原及高山河谷地貌类型, 平均海拔高度在 3 200 m 以上, 地形上具有滑坡形成和发育的临空条件; 区内广泛出露的晚三叠系修康群绢云母千枚岩、千枚状板岩等受地质风化作用的影响, 表层风化强烈, 岩石较为破碎, 第四系残坡积物普遍发育, 为滑坡形成和发育提供了物质基础和孕育环境; 区内属高原温带半湿润季气候区, 干湿季分明, 日照充足, 年均气温 11.2°, 年降水量在 600 mm 左右, 集中在 5~9 月, 多为夜雨; 新构造运动强烈, 地震活动相对频繁, 人类工程活动主要是在坡体上开挖水渠, 造成大量地表水下渗, 破坏了斜坡自然平衡而失稳, 如朗镇其子村东滑坡, 同时斜坡坡脚受到外营力河流的下切和侧蚀作用, 导致斜坡变形现象也屡有发生。区内滑坡是在地形地貌、地质构造、地层岩性、水文地质及人类经济活动等多因素耦合作用强度下的产物。

选取表征该区滑坡影响因素的指标为滑坡体高度、滑坡体平均坡度、滑坡体岩性、地震基本烈度、年平均降雨量、滑坡体前缘河流影响距、土地利用和人类工程活动, 正是这些不同因素耦合作用强度的不同孕育了不同危险程度的滑坡灾害, 严重影响

着当地经济建设与发展。

### 4 滑坡主控因素及耦合作用强度

借助 GIS 技术与数量化理论 III 的分类功能对滑坡发育的影响因素数据进行提取与分析处理, 可从该区滑坡影响因素指标中筛选出主控因素, 构建滑坡发育因素最佳组合体系, 并对滑坡的影响作用强度进行分类, 为滑坡评价工作奠定基础。

### 4.1 数据准备

在实际应用中, 由式(2)确定的定性变量的类目反应, 往往使研究结果误差较大, 这里采用新的定性变量取值方法反应度法<sup>[16]</sup>, 反应度  $\delta_i(j, r_j) = a$ ,  $a$  为  $r_j$  类目上的反应在  $i$  样品的  $j$  项目中所占比率,  $0 \leq a \leq 1$ , 反应度  $\sum \delta_i(j, r_j) = 1$ 。滑坡影响因素数据则以 GIS 系统作为工作平台, 通过地形图扫描、输入编辑矢量化、格式转换、拓扑生成各影响因素的 GIS 空间层获取, 数据取值如表 1 所示。

表 1 滑坡影响因素数据  
Table 1 Data of landslide influential factors

编号	样品(滑坡名称)	反映度											
		滑坡体高度				滑坡体平均坡度				滑坡体岩性			
		<100 m	100~200 m	200~300 m	>300 m	<25°	25°~35°	35°~45°	>45°	绢云母千枚岩	千枚状板岩	变质含砾砂岩	第四系残坡积物
1	仲达滑坡	0	0	0	1	0	1	0	0	0.10	0.00	0.20	0.70
2	卧龙村滑坡	0	0	0	1	0	1	0	0	0.10	0.00	0.30	0.60
3	卓岗村滑坡	0	1	0	0	0	0	1	0	0.00	0.20	0.25	0.55
4	冻戈山 1 号滑坡	0	0	0	1	0	0	1	0	0.10	0.00	0.20	0.70
5	冻戈山 2 号滑坡	0	1	0	0	0	1	0	0	0.10	0.00	0.20	0.70
6	冻戈山 3 号滑坡	0	1	0	0	0	1	0	0	0.10	0.00	0.20	0.70
7	冻戈山 4 号滑坡	0	1	0	0	0	1	0	0	0.10	0.00	0.20	0.70
8	冻戈山 5 号滑坡	0	1	0	0	0	1	0	0	0.10	0.00	0.20	0.70
9	西昌巴村滑坡	0	0	1	0	0	0	1	0	0.15	0.00	0.25	0.60
10	鲁嘎滑坡	0	0	0	1	0	0	1	0	0.15	0.00	0.20	0.65
11	吞仓村滑坡	0	1	0	0	0	0	1	0	0.00	0.10	0.20	0.70
12	龙木朗沟滑坡	1	0	0	0	1	0	0	0	0.10	0.00	0.20	0.70
13	堆雪村南侧滑坡	1	0	0	0	0	0	1	0	0.15	0.00	0.25	0.60
14	其子村滑坡	1	0	0	0	0	0	1	0	0.00	0.00	0.15	0.85
15	其子村东滑坡	0	0	1	0	0	0	1	0	0.00	0.00	0.10	0.90
16	许村滑坡	0	0	1	0	0	0	1	0	0.15	0.00	0.20	0.65
17	伟列村滑坡	1	0	0	0	1	0	0	0	0.20	0.00	0.20	0.60
18	伟列村聂沟滑坡	0	1	0	0	0	0	0	1	0.15	0.00	0.30	0.55
19	杂日志滑坡	0	1	0	0	0	1	0	0	0.10	0.00	0.25	0.65
20	朗村西滑坡	1	0	0	0	1	0	0	0	0.00	0.00	0.15	0.85
21	瞎木滑坡	1	0	0	0	1	0	0	0	0.10	0.00	0.30	0.60
22	林古滑坡	1	0	0	0	1	0	0	0	0.10	0.00	0.20	0.70
23	路村切面滑坡	0	0	1	0	0	1	0	0	0.15	0.00	0.00	0.85
24	藏堆河右岸滑坡	1	0	0	0	1	0	0	0	0.10	0.00	0.20	0.70
25	肖朗河滑坡	1	0	0	0	1	0	0	0	0.10	0.00	0.20	0.70
26	增朗河滑坡	1	0	0	0	1	0	0	0	0.15	0.00	0.35	0.50
27	荣村滑坡	0	0	1	0	1	0	0	0	0.10	0.00	0.20	0.70
28	松木才滑坡	0	0	0	1	0	0	1	0	0.00	0.05	0.15	0.80
29	尼阿多滑坡	0	1	0	0	1	0	0	0	0.00	0.00	0.25	0.75

编号	样品(滑坡名称)	反映度											定量变量	
		滑坡体前缘河流影响距				土地利用				外营力与人类工程活动			地震烈度/级	年平均降雨量/mm
		<200 m	200~400 m	400~600 m	>600 m	田地	草地	灌木林	林地	水流冲蚀	开挖路堑	开挖水渠		
1	仲达滑坡	0	0	1	0	0.00	1.00	0.0	0	0.00	1	0.0	7	600
2	卧龙村滑坡	0	0	0	1	0.75	0.15	0.1	0	0.00	0	1.0	7	600
3	卓岗村滑坡	0	0	1	0	0.80	0.10	0.1	0	0.90	0	0.1	7	600
4	冻戈山 1 号滑坡	1	0	0	0	0.00	1.00	0.0	0	1.00	0	0.0	7	600
5	冻戈山 2 号滑坡	1	0	0	0	0.00	1.00	0.0	0	1.00	0	0.0	7	600
6	冻戈山 3 号滑坡	1	0	0	0	0.00	1.00	0.0	0	1.00	0	0.0	7	600
7	冻戈山 4 号滑坡	1	0	0	0	0.00	1.00	0.0	0	1.00	0	0.0	7	600

(续表 1)

编号	样品(滑坡名称)	反映度											定量变量	
		滑坡体前缘河流影响距				土地利用				外营力与人类工程活动			地震烈度/级	年平均降雨量/mm
		<200 m	200~400 m	400~600 m	>600 m	田地	草地	灌木林	林地	水流冲蚀	开挖路堑	开挖水渠		
8	冻戈山 5 号滑坡	0	1	0	0	0.00	0.90	0.10	0.0	1.0	0.0	0.0	7	600
9	西昌巴村滑坡	1	0	0	0	0.60	0.10	0.30	0.0	0.8	0.1	0.1	7	600
10	鲁嘎滑坡	0	0	1	0	0.20	0.40	0.00	0.4	0.5	0.0	0.5	7	600
11	吞仓村滑坡	0	0	1	0	0.10	0.10	0.20	0.6	1.0	0.0	0.0	7	600
12	龙木朗沟滑坡	1	0	0	0	0.00	1.00	0.00	0.0	1.0	0.0	0.0	7	600
13	堆雪村南侧滑坡	1	0	0	0	0.60	0.20	0.20	0.0	1.0	0.0	0.0	7	600
14	其子村滑坡	0	0	1	0	0.10	0.00	0.90	0.0	0.0	0.0	1.0	7	600
15	其子村东滑坡	0	0	1	0	0.80	0.10	0.10	0.0	0.0	0.0	1.0	7	600
16	许村滑坡	0	0	0	1	0.70	0.20	0.10	0.0	0.0	0.0	1.0	7	600
17	伟列村滑坡	0	1	0	0	0.20	0.80	0.00	0.0	0.5	0.0	0.5	7	600
18	伟列村聂沟滑坡	0	0	0	1	0.20	0.10	0.70	0.0	0.0	0.0	1.0	7	600
19	杂日志滑坡	1	0	0	0	0.00	1.00	0.00	0.0	0.0	1.0	0.0	7	600
20	朗村西滑坡	1	0	0	0	0.00	0.60	0.40	0.0	0.0	1.0	0.0	7	600
21	瞎木滑坡	1	0	0	0	0.00	1.00	0.00	0.0	0.0	1.0	0.0	7	600
22	林古滑坡	1	0	0	0	0.00	0.95	0.05	0.0	0.5	0.0	0.5	7	600
23	路村切面滑坡	0	0	0	1	0.00	0.00	1.00	0.0	1.0	0.0	0.0	7	600
24	藏堆河右岸滑坡	1	0	0	0	0.00	0.50	0.50	0.0	1.0	0.0	0.0	7	600
25	肖朗河滑坡	1	0	0	0	0.00	0.25	0.75	0.0	0.0	1.0	0.0	7	600
26	增朗河滑坡	1	0	0	0	0.00	0.00	0.00	1.0	1.0	0.0	0.0	7	600
27	荣村滑坡	0	0	1	0	0.15	0.30	0.55	0.0	0.0	0.0	1.0	7	600
28	松木才滑坡	0	0	0	1	0.60	0.25	0.15	0.0	0.8	0.0	0.2	7	600
29	尼阿多滑坡	1	0	0	0	0.00	1.00	0.00	0.0	0.0	1.0	0.0	7	600

采用自编的数量化理论 III 程序确定影响滑坡发育的主控因素, 样品数为 29, 定量变量数为 2, 6 个项目为滑坡体高度、滑坡体平均坡度、滑坡体岩性、滑坡体前缘河流影响距、土地利用和人类工程活动, 总类目数为 23。经计算所得前 3 个最大特征值  $\lambda_1 = 0.138$ ,  $\lambda_2 = 0.056$ ,  $\lambda_3 = 0.032$  对应的相关比总和已达到 100%, 能够代表滑坡影响因素的全部信息, 最大特征值及滑坡影响因素类目得分见表 2 所示。

#### 4.2 滑坡发育的主控因素筛选

从表 2 可以看出,  $\lambda_1$  特征值的相关比贡献在 50% 以上, 其趋势变化是滑坡影响因素的主要宏观反映, 可作为筛选敏感地质因素的主导因子轴。

对项目贡献的筛选以得分范围和方差比两大指标<sup>[15]</sup>来共同表征滑坡发育的影响因素, 得分范围  $R = \max b_{jk} - \min b_{jk} (1 \leq k \leq r_j, 1 \leq j \leq m)$ , 方差比  $\eta =$

$$\frac{\sigma_j^2}{\sigma_y^2} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i^{(j)} - \bar{X}^{(j)})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}, \text{ 其中, } X_i^j = \sum_{k=1}^{r_j} \delta_i(j, k) b_{jk}$$

$(1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m)$ , 计算结果如表 3 所示,  $R$  和  $\eta$

2 个参数值分布具有明显的区间性, 对应于  $R > 0.4$ ,  $\eta > 0.3$  的区间, 选取对滑坡发育起主导作用的因素是滑坡体岩性、滑坡体平均坡度、滑坡体前缘河流影响距; 起重要作用的因素是滑坡体高度、外营力与人类工程活动; 起一般作用的因素是土地利用。另外, 表 2 中降雨量因素得分高于地震烈度得分, 体现出降雨因素是区内滑坡起主要诱发作用。在区域滑坡危险性评价时可优选上述对滑坡发育起主导作用、重要作用及主要诱发作用的因素构建评价指标体系。

对类目贡献的筛选则是将  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  所对应的类目得分  $b_1, b_2, b_3$  视为空间  $X, Y, Z$  因子轴, 因降雨因素是区内滑坡诱发的最重要因素, 故以其距原点空间距离远近为标准进行类目筛选分类, A 类代表主控因素、B 类代表重要因素及 C 类代表一般因素, 如图 1、表 4 所示。在区内对滑坡发育起主导作用、重要作用的项目类目中, 确定出的 A 类主控因素为年均降雨量、含残坡积物和绢云母千枚岩的滑坡体岩性、200 m 内的河流影响距、 $35^\circ \sim 45^\circ$

表 2 滑坡影响因素类目得分

Table 2 Categories scores of landslide influential factors

各影响因素	影响因素编号	$b_1$ (特征值 $\lambda_1$ 的相关比为 52%)	$b_2$ (特征值 $\lambda_2$ 的相关比为 15%)	$b_3$ (特征值 $\lambda_3$ 的相关比为 38%)
滑坡体高度	<100 m	1	0.234 1	0.118 8
	100~200 m	2	0.156 9	-0.175 4
	200~300 m	3	-0.063 8	-0.000 5
	>300 m	4	-0.086 0	-0.001 9
滑坡体平均坡度	<25°	5	0.155 3	-0.053 4
	25°~35°	6	-0.185 6	0.090 0
	35°~45°	7	0.012 8	0.223 8
	>45°	8	0.239 1	-0.109 8
滑坡体岩性	绢云母千枚岩	9	0.083 0	0.032 3
	千枚状板岩	10	0.218 4	0.000 9
	变质含砾砂岩	11	0.465 9	-0.118 0
	第四系残坡积物	12	-0.006 7	0.054 1
滑坡体前缘河流影响距	<200 m	13	0.013 4	0.049 0
	200~400 m	14	0.163 7	0.049 1
	400~600 m	15	-0.239 5	0.040 4
	>600 m	16	-0.162 7	0.150 0
土地利用	田地	17	-0.222 4	-0.457 9
	草地	18	-0.322 4	-0.322 4
	灌木林	19	-0.322 4	-0.322 4
	林地	20	-0.281 3	-0.281 3
外营力与人类工程活动	水流冲蚀	21	-0.051 0	-0.051 0
	开挖路堑	22	-0.200 9	-0.485 1
	开挖水渠	23	-0.203 9	-0.482 8
地震烈度	7 级	24	-0.046 9	-0.046 9
年平均降雨量	600 mm	25	0.000 1	0.000 1

表 3 滑坡影响因素项目筛选表

Table 3 Items screening of landslide influential factors

各影响因素	R	$\eta$	排序
滑坡体高度	0.320 1	0.250 8	4
滑坡体平均坡度	0.424 6	0.338 9	2
滑坡体岩性	0.472 5	0.460 7	1
滑坡体前缘河流影响距	0.403 2	0.310 6	3
土地利用	0.100 0	0.006 6	6
外营力与人类工程活动	0.152 9	0.011 8	5

的平均坡度、地震烈度以及高于 200 m 的坡体高度。

在起主导和重要作用的项目因素中进一步筛选出主控类目因素, 是对区内滑坡影响因素的深层次认识。从实地调查结果来看, 研究区属高原地区, 大多为高山和沟谷深切区, 水系发育, 切割强烈, 斜坡陡峻, 坡度一般为 35°~55°, 具有较高的临空条件; 出露地层的软质绢云母千枚岩抗风化作用能力弱, 岩石破碎, 残坡积松散堆积物普遍发育, 且厚度较大, 为滑坡形成提供了较为丰富的物质基础;

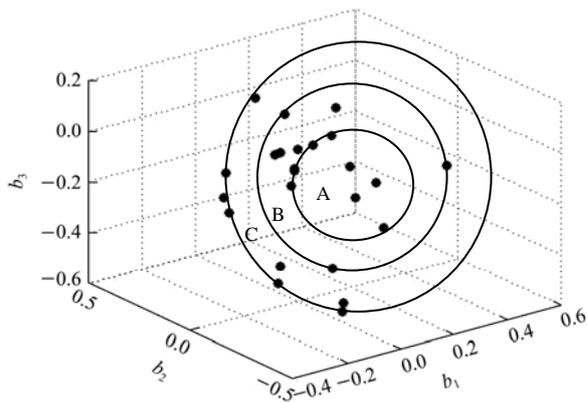


图 1 滑坡影响因素类目空间分布图

Fig.1 Spatial categories distribution of landslide influential factors

表 4 滑坡影响因素类目空间距离统计

Table 4 Spatial categories distance of landslide influential factors

类目编号	空间距离	类别	类目编号	空间距离	类别
1	0.234 2	B	14	0.163 7	B
2	0.158 2	B	15	0.239 5	B
3	0.063 8	A	16	0.165 5	B
4	0.086 0	A	17	0.248 2	C
5	0.155 4	B	18	0.338 7	C
6	0.186 7	B	19	0.338 7	C
7	0.029 3	A	20	0.292 3	B
8	0.241 9	B	21	0.051 1	A
9	0.083 0	A	22	0.269 5	C
10	0.218 4	B	23	0.282 0	C
11	0.466 2	C	24	0.047 0	A
12	0.009 4	A	25	0.000 1	A
13	0.015 7	A			

由于当地人口不集中, 相对稀疏, 土地利用相对较低, 人类工程活动给滑坡带来的影响也相对较小。同时访问当地居民得知, 该区年降雨量的 80% 以上集中在每年的 6~9 月, 降雨集中且强度大, 多以暴雨或特大暴雨形式为主, 滑坡灾害多在汛期频繁发生且破坏强度大, 降雨是区内诱发区内滑坡的主要因素, 坡体在雨水的侵蚀软化作用、增重作用、水劈作用下极易发生滑坡或坡体变形加速现象。实地考察结果表明主控因素的筛选符合当地实情, 主控因素控制着区内滑坡的发育及危险程度。

### 4.3 滑坡发育的各因素耦合作用强度

滑坡发育程度是各种影响因素耦合作用强度的表现, 各因素耦合作用强度越高, 滑坡发育活动程度高, 发生滑坡的可能性就高, 滑坡潜在危险性高。

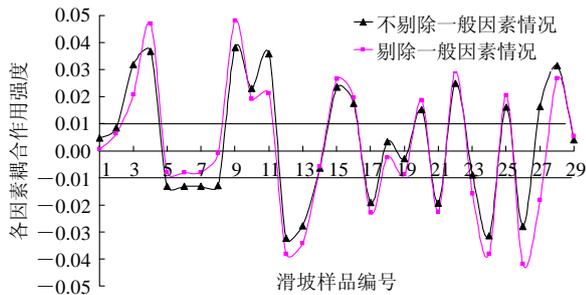


图2 各滑坡样品得分分布图

Fig.2 Scores distribution of landslide samples

由节 4.2 分析可知，影响滑坡发育的土地利用因素为一般因素，在不剔除与不剔除一般因素的情况下，由式(4)可分别得到各因素耦合作用强度下的 29 个滑坡样品得分如图 2 所示。可以看出，在不剔除土地利用因素的情况下与剔除掉土地利用因素的情况下，各滑坡样品得分分布基本吻合，均明显以纵坐标的样品得分±0.01 为界，各因素耦合作用强度可进行强、中等、弱分级。在滑坡样品得分>0.01 区域，各因素耦合作用强度强，滑坡 3, 4, 9, 10, 11, 15, 16, 20, 22, 25, 27 和 28 号发育程度高，危险性高，其中属 9 号西昌巴滑坡危险程度最高；介于-0.01 与 0.01 之间的区域，各影响因素耦合作用强度中等，滑坡 1, 2, 8, 14, 18, 19 和 23 号发育程度中等，危险性中等；在<-0.01 的区域，各影响因素耦合作用强度弱，滑坡 5, 6, 7, 12, 13, 17, 21, 24 号和 26 号发育程度弱，危险性低。

在考虑 2 种情况下的影响因素耦合作用强度及滑坡发育程度，二者结果的基本吻合，进一步表明土地利用因素在各影响因素作用中不占主导或重要作用，对滑坡发育程度影响较低，节 4.2 中所筛选出的主控因素、重要因素及一般因素是正确的，同时评定各因素耦合作用强度，预测滑坡发育程度，可为朗县区内防灾减灾提供关键性指导依据。

#### 4.4 可靠性验证

为使上述滑坡主控因素筛选、各因素耦合作用强度、发育程度及危险性的分析更为有效，现以实地调查的西昌巴滑坡结果进行分析验证。

西昌巴滑坡位于朗县拉多乡西昌巴村北侧，坡体后缘山坡地形陡峭，坡体物质由第四系残坡积碎石土构成，碎石含量约为 40%，块度粒径为 5~30 cm，最大可达 100 cm，土层结构零乱，土质松散，下伏基岩为上三叠系修康群绢云母千枚岩，深部松散堆积层与基岩接触面为控滑结构面。滑坡主滑方

向 SW210°，坡面平均坡度 36°，滑坡体最大长度 400 m，宽 800 m，面积约 25×10<sup>4</sup> m<sup>2</sup>，体积约 400×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>，属大型土质牵引式滑坡。滑体后缘坡体出现多级环形滑塌，表现出滑坡前缘失稳牵引坡体下滑的特征，其横向牵引下拉裂缝长 20~80 m，宽 20~60 cm，可视深度 0.5 m，逐级滑塌的高度为 0.5~5.0 m 不等，在错落陡壁上产生小型次级滑塌，如图 3, 4 所示。



图3 滑坡后缘台坎、残坡积物及后缘滑塌

Fig.3 Platform, residual and slump at slope margin



图4 滑坡后缘裂缝

Fig.4 Edge cracks after landslide

据实地调查结果可知，西昌巴滑坡的发育环境主要是堆积于陡峭斜坡上松散土体，下伏基岩为属软质岩类的绢云母千枚岩，在暴雨及持续降雨的作用下，大量地表水渗入坡体，形成地下水，使土体饱和、自重增加及抗剪强度降低，裂面与潜在滑动面贯通，坡体产生变形裂隙。目前滑坡处于蠕滑变形阶段，稳定性较差，严重威胁着西昌巴村村民的生命安全，危害严重，如图 5 所示。数量化理论分析得到影响西昌巴滑坡发育的降雨、岩性、坡度等为主控因素、各因素耦合作用强度高、滑坡发育程度高及危险性高均与实地调查结果一致，说明该理论用于朗县区内滑坡分类研究可行且结果正确。



图5 受威胁的西昌巴村及公路

Fig.5 Threatened road and Xichangba village

## 5 结 论

(1) 采用数量化理论 III 对西藏朗县区内滑坡发育的影响因素进行分析, 其中起主导作用的因素为降雨因素、滑坡体岩性、滑坡体平均坡度滑坡体前缘河流影响距; 起重要作用的因素是滑坡体高度、外营力与人类工程活动、地震烈度; 起一般作用的因素是土地利用, 这可为区内滑坡评价指标构建提供依据。

(2) 在对滑坡发育起主导作用、重要作用的项目类目中, 确定出的 A 类主控因素为年均降雨量、含残坡积物和绢云母千枚岩的滑坡体岩性、200 m 内的河流影响距、 $35^{\circ}\sim 45^{\circ}$  的平均坡度、地震烈度、高于 200 m 的坡体高度, 是对区内滑坡影响因素的深层认识。

(3) 滑坡影响因素耦合作用强度以样品得分  $\pm 0.01$  为界进行强、中等、弱分级, 各因素耦合作用强度越高, 滑坡发育活动程度高, 发生滑坡的可能性就高, 滑坡潜在危险性高。区内 29 个滑坡的耦合作用强度分类、发育程度、危险性预测结果, 对区内灾害防治起到重要的指导作用。

(4) 应用数量化理论 III 确定出的影响滑坡发育的主控因素、各因素耦合作用强度及其滑坡发育程度、危险性的预测符合实地调查结果, 使得滑坡影响因素的确定更接近客观化、合理化、清晰化, 为受多因素影响的滑坡地质灾害研究提供了新的思路。

## 参考文献(References):

[1] 谢全敏, 边翔, 夏元友. 滑坡灾害风险评价的系统研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(1): 71-74.(XIE Quanmin, BIAN Xiang, XIA Yuanyou. Systematic analysis of risk evaluation of landslide hazard[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(1): 71-74.(in Chinese))

[2] 单新建, 叶洪, 李焯芬, 等. 基于 GIS 的区域滑坡危险性预测方法与初步应用[J]. 岩土力学与工程学报, 2002, 21(10): 1 507-1 514.(SHAN Xinjian, YE Hong, LEE C F, et al. Prediction method of dangerous areas of regional landslide based on GIS and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(10): 1 507-1 514.(in Chinese))

[3] 高克昌, 崔鹏, 赵纯勇, 等. 基于地理信息系统和信息量模型的滑坡危险性评价——以重庆万州为例[J]. 岩土力学与工程学报, 2006, 25(5): 991-996.(GAO Kechang, CUI Peng, ZHAO Chunyong, et al. Landslide hazard evaluation of Wanzhou based on GIS information value method in the three gorges reservoir[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(5): 991-996.(in Chinese))

[4] 谭儒蛟, 胡瑞林, 刘衡秋, 等. FCJ-GIS 动力区划模型及其在斜坡灾害危险性评价中的应用[J]. 岩土力学与工程学报, 2006, 25(12): 2 552-2 558.(TAN Rujiao, HU Ruilin, LIU Hengqiu, et al. FCJ-GIS Geodynamic zonation model and its application to risk evaluation of slope hazards[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(12): 2 552-2 558.(in Chinese))

[5] 王纯祥, 蒋宇静, 谢谟文, 等. 基于 GIS 区域边坡失稳灾害预测与评价[J]. 岩土力学与工程学报, 2008, 27(12): 2 449-2 454.(WANG Chunxiang, JIANG Yujing, XIE Mowen, et al. Prediction and assessment of regional slope-failure hazard based on GIS[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(12): 2 449-2 454.(in Chinese))

[6] 吴树仁, 金逸民, 石菊松, 等. 滑坡预警判据初步研究——以三峡库区为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2004, 34(4): 596-600.(WU Shuren, JIN Yimin, SHI Jusong, et al. A primary study of landslide warning criterion[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2004, 34(4): 596-600.(in Chinese))

[7] 王卫东, 陈燕平, 钟晟. 应用 CF 和 Logistic 回归模型编制滑坡危险性区划图[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2009, 40(4): 1 127-1 132.(WANG Weidong, CHEN Yanping, ZHONG Sheng. Landslide susceptibility mapped with CF and Logistic regression model[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2009, 40(4): 1 127-1 132.(in Chinese))

[8] 李晓, 李守定, 陈剑, 等. 地质灾害形成的内外动力耦合作用机制[J]. 岩土力学与工程学报, 2008, 27(9): 1 792-1 806.(LI Xiao, LI Shouding, CHEN Jian, et al. Coupling effect mechanism of endogenic and exogenic geological processes of geological hazards evolution[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(9): 1 792-1 806.(in Chinese))

[9] 兰恒星, 伍法权, 周成虎, 等. 基于 GIS 的云南小江流域滑坡因子敏感性分析[J]. 岩土力学与工程学报, 2002, 21(10): 1 500-1 506.(LAN Hengxing, WU Faquan, ZHOU Chenghu, et al. Analysis of susceptibility of GIS based landslide triggering factors in Yunnan Xiaojiang watershed[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(10): 1 500-1 506.(in Chinese))

[10] 李雪平, 唐辉明. 贝叶斯信息标准在滑坡因子敏感性分析中的应用[J]. 岩土力学, 2006, 27(8): 1 393-1 397.(LI Xueping, TANG Huiming. Application of Bayesian information criterion to sensitivity analysis of landslide factor[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(8): 1 393-1 397.(in Chinese))

[11] 薛天放, 杨庆, 栾茂田. 基于 GIS 技术的滑坡空间分布的分形特征研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(2): 347-354.(XUE Tianfang, YANG Qing, LUAN Maotian. Research on fractal characters of spatial distribution of landslide based on GIS[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(2): 347-354.(in Chinese))

[12] 周国云, 陈光齐. 基于 GIS 和数量化理论 II 的滑坡危险性预测[J]. 岩土力学与工程学报, 2008, 27(12): 2 494-2 500.(ZHOU Guoyun, CHEN Guangqi. Landslide risk prediction based on coupling GIS and second theory of quantification[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(12): 2 494-2 500.(in Chinese))

[13] 汪茜, 李广杰. 数量化理论在泥石流灾害预测预报中的应用——以吉林和龙市泥石流为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 18(2): 85-88.(WANG Qian, LI Guangjie. Application of quantification theory in forecasting debris flows—an example of Heleng City, Jilin Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2006, 18(2): 85-88.(in Chinese))

[14] 王卫红, 张文君. 基于遥感与数量化 II 类的滑坡危险度划分[J]. 水土保持学报, 2009, 29(2): 165-167.(WANG Weihong, ZHANG Wenjun. Landslide occurring probability decision based on remote sensing and quantification theory II[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2009, 29(2): 165-167.(in Chinese))

[15] 董文泉, 周光亚, 夏立显. 数量化理论及其应用[M]. 长春: 吉林人民出版社, 1979.(DONG Wenquan, ZHOU Guangya, XIA Lixian. Theory of quantification and its application[M]. Changchun: Jilin People's Publishing House, 1979.(in Chinese))

[16] 张许良, 张子戎, 袁崇孚, 等. 利用数量化理论预测瓦斯含量时反应度的取值方法[J]. 焦作工学院学报(自然科学版), 2001, 20(1): 8-13.(ZHANG Xuliang, ZHANG Zixu, YUAN Chongfu, et al. The method of choosing reaction degree when the application of the theory of quantification in gas content forecast[J]. Journal of Jiaozuo Institute of Technology(Natural Science), 2001, 20(1): 8-13.(in Chinese))