

基于投影寻踪模型的滑坡危险性等级评价

谢贤健¹, 韦方强^{2*}, 张继³, 石勇国^{4,5}, 韩光中¹, 胡学华¹

1. 内江师范学院地理与资源科学学院, 四川内江 641000

2. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川成都 610041

3. 四川省地质矿产勘查开发局成都水文地质工程地质队, 四川成都 610072

4. 内江师范学院数学与信息科学学院, 四川内江 641000

5. 内江师范学院四川省高等学校数值仿真重点实验室, 四川内江 641000

摘要: 危险性评价是滑坡灾害预防与减灾工作首要解决的重要内容。在地理信息系统技术支持下, 以山地灾害频发区——小江流域作为研究对象, 选取坡度、土体粘聚力和内摩擦角这3个评价指标构建滑坡危险性分级评价指标体系, 将投影寻踪技术运用到滑坡危险性等级评价中, 对评价样本的各指标因素进行线性投影, 以最优投影方向所对应的投影特征值作为评价依据, 建立了滑坡危险性等级综合评价模型, 绘制了滑坡危险性等级分布图。结果表明: 研究区极高危险区、高危险区、中等危险区、低危险区和极低危险区的面积比例为 14.28 : 9.41 : 69.12 : 7.00 : 0.19; 根据所建立的5级评价指标体系对研究区60个土质滑坡点资料进行了验证, 在占研究区总面积 23.69% 的高、极高危险区的小范围内, 实际发生土质滑坡数量 45 个, 占总土质滑坡数量的 75.00%; 中等危险性级别以上区域拥有的土质滑坡数量占全部土质滑坡的 96.67%; 不同危险性级别的滑坡体积方量统计结果表明, 滑坡体积方量密度随危险性级别的提高而迅速增加。对比评价结果及实测结果可知, 投影寻踪分级结果符合实际情况, 证实了该方法的正确性, 为滑坡危险性评价提供了一条新思路。

关键词: 投影寻踪; 滑坡; 危险性; 评价模型; 坡面稳定性。

中图分类号: P642

文章编号: 1000-2383(2015)09-1598-09

收稿日期: 2015-03-03

Application of Projection Pursuit Model to Landslide Risk Classification Assessment

Xie Xianjian¹, Wei Fangqiang^{2*}, Zhang Ji³, Shi Yongguo^{4,5}, Han Guangzhong¹, Hu Xuehua¹

1. School of Geography & Resource Science, Neijiang Normal University, Neijiang 641000, China

2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041, China

3. Chengdu Hydrogeological Engineering Geological Team, Sichuan Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration, Chengdu 610072, China

4. School of Maths and Informations Science, Neijiang Normal University, Neijiang 641000, China

5. Key Laboratory of Numerical Simulation in the Sichuan Province College, Neijiang Normal University, Neijiang 641000, China

Abstract: It's a top priority to estimate risk of landslides for landslide disaster prevention and disaster reduction. In this paper, taking Xiaojiang ravine, a frequent debris flow occurring area as the study area, a classification assessment system of landslide risk is built by selecting 3 evaluation indexes including slope, cohesive force and internal friction angle based on the geographic information system support. Moreover, the projection pursuit technique is applied to evaluate landslide risk classification. According to linear projection of index factors of evaluation samples, the projection pursuit model to classification evaluation of landslide risk is built and the classification map of landslide risk zoning is drawn by the optimal projection direction of the projection characteristic value. The results show that the area ratio of extremely high risk zone, high risk zone, medium risk zone, low risk zone, extremely low risk zone in the study area is 14.28 : 9.41 : 69.12 : 7.00 : 0.19. A total of 60 landslides were

基金项目: 四川省教育厅科研创新团队基金项目(No. 14TD0026); 国家公益性行业(气象)专项项目(No. GYHY201006039).

作者简介: 谢贤健(1978-), 男, 副教授。主要研究方向为水土保持理论及技术研究。E-mail: xxj007-14@tom.com

* **通讯作者:** 韦方强, E-mail: fqwei@imde.ac.cn

引用格式: 谢贤健, 韦方强, 张继, 等. 2015. 基于投影寻踪模型的滑坡危险性等级评价. 地球科学——中国地质大学学报, 40(9): 1598-1606.

verified in the study area according to the established evaluation index system of level 5. The high and extremely high risk zones cover 23.69% of the study area, but the actual number of soil landslides is 45, and the number of soil landslides in those risk zones is 75.00% of the total. The number of soil landslides in medium risk level and above risk zones is 96.67% of the total. The statistical results of landslide risk point density in the classification map of landslide risk zoning show that the density of landslides' volume increases rapidly with the increase of risk level. The evaluation results are relatively more consistent with actual situation and more reasonable compared with the measured results. The model proves to be a new perspective for landslide risk prediction.

Key words: projection pursuit; landslide; risk; evaluation model; slope stability.

0 引言

滑坡是一种非线性动力学过程,是受时空变化的内外因素综合作用的结果(陈冠等,2011).滑坡一旦发生,其影响和危害程度极大,常对当地居民生命财产和基础设施造成严重破坏.如何科学有效地评价滑坡可能发生的危险程度,对防灾和减灾具有重大现实意义.目前,滑坡危险性评价方法较多(戴自航和卢才金,2006;李守定等,2006;柴波等,2007;黄波林和陈小婷,2007;王志旺等,2007;唐海等,2011;陈国金等,2013;吴益平等,2014),可以分为定性和定量评价两大类型.定性的评价方法主要是根据主观经验对滑坡的变形失稳危险性进行定性描述,如专家打分法、启发式方法等;定量的评价方法主要是基于滑坡空间数据的获取,利用数学模型和计算机技术,对滑坡发生失稳的可能性进行估计,如统计模型、物理模型等.一般根据具体的滑坡和稳定性评价目的来选用不同的方法,某一特定的方法在评价滑坡危险性时都具有一定的适用条件和局限性;另一方面,由于影响滑坡演化趋势的因素众多,各因素之间的关系复杂,因此滑坡稳定性评价所采用的方法还不统一,也难以统一.

地质灾害的危险性和滑坡稳定性常用综合方法进行评价(谢礼立,2005;全佳等,2006;Lee and Pradhan, 2007).投影寻踪法作为综合评价方法之一,是一种可用于高维数据分析的有效降维技术,适于高维、非线性、非正态问题的分析和处理,评价结果与实际相符率高,已经广泛应用于灾情评估等相关领域(唐启义,2010),但其在滑坡危险性评价中的应用研究并不多见.因此,为了使滑坡危险性评价趋于标准化和定量化,本研究选择山地灾害频发区——云南省小江流域作为研究对象,通过野外采样和室内测定分析获得的滑坡危险性数据,在综合考虑影响滑坡危险性各因素的基础上,应用投影寻踪评价模型构建出滑坡危险性评价的指标体系和分级标准,建立投影寻踪滑坡危险性等级评价模型,对

区内滑坡危险程度进行分级研究,以期为滑坡危险性评价趋于标准化和定量化提供依据,为滑坡空间预测、防灾、减灾提供科学依据和新思路.

1 投影寻踪模型计算理论

投影寻踪是将高维数据向低维空间投影,通过分析低维空间的投影特性来研究高维数据的特征,从而找到反映数据结构特征的最优投影,是处理多指标问题的统计方法(付强和赵小勇,2007).其具体思路是将影响问题的多因素指标通过投影寻踪分析得到反映其综合指标特性的最优投影特征值,然后建立投影特征值与因变量的一一对应关系,通过分析一维的投影值来对样本做出更加合理的分级和评价.其原理如下:

设等级评价表中各指标值的样本集为 $\{x_{ij} \mid i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m\}$,其中 x_{ij} 是第 i 个样本的第 j 个指标值,则建立投影寻踪评价模型的步骤如下.

1.1 数据预处理

即对数据进行归一化处理,消除各指标值的量纲和统一各指标值的变化范围.

$$\text{对于越大越优的指标: } x_{ij}^* = \frac{x_{ij}}{x_{j\max}}, \quad (1)$$

$$\text{对于越小越优的指标: } x_{ij}^* = \frac{x_{j\max} - x_{ij}}{x_{j\max}}, \quad (2)$$

其中, x_{ij} 是标准化前的数据样本值, x_{ij}^* 是标准化后的数据样本值, $x_{j\max}$ 为第 j 指标的最大值.

1.2 构造投影指标函数

把 m 维数据综合成某一方向上的一维投影值,并要求投影值散布特征为局部投影点尽可能密集,整体上各个点团之间尽可能散开.

用 m 维的单位向量 $\mathbf{a}(a_1, a_2, \dots, a_m)$ 表示某一投影方向,样本 i 在该方向上的投影值则可表示为:

$$z_i = \sum_{j=1}^m a_j x_{ij}^*, i = 1, 2, \dots, n. \quad (3)$$

设 $S(\mathbf{a})$ 为投影值的标准差, $D(\mathbf{a})$ 为投影值的

局部密度,则投影指标函数可以表示为:

$$Q(\mathbf{a}) = S(\mathbf{a})D(\mathbf{a}), \quad (4)$$

其中, $S(\mathbf{a}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_i - \bar{Z}_i)^2}{n-1}}$, \bar{Z}_i 为投影方向上投影

值的平均值, $D(\mathbf{a}) = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n (R - r_{ik}) f(R - r_{ik})$, $r_{ik} = |z_i - z_k|$, R 为局部密度的窗口半径,可取 $r_{\max} + \frac{m}{2} \leq R \leq 2m$, 函数 f 为单位跃阶函数, $R - r_{ik} \geq 0$ 时,其值为 1, $R - r_{ik} < 0$ 时,其值为 0.

1.3 估计最佳投影方向

$Q(\mathbf{a})$ 值与投影方向 \mathbf{a} 有关,当 $Q(\mathbf{a})$ 取最大值时的 \mathbf{a} 方向是最能反映数据结构特征的方向. 所以可以通过求解投影指标函数优化问题来估计最佳投影方向,即求解:

$$\begin{cases} \max Q(\mathbf{a}), \\ \text{s. t. } \|\mathbf{a}\| = 1; \end{cases} \quad (5)$$

可以利用遗传算法来解决该优化问题.

1.4 等级评价

得到近似最佳投影方向后,计算各经验等级样本点的投影值,根据各经验等级及其对应的投影值建立基于投影值的等级评价方法,然后计算归一化处理后的待评价样本投影值,利用投影值等级评价方法得到评价样本的所属等级.

2 研究区滑坡分布及影响因素

小江为金沙江下游右岸的一级支流,发源于滇东高原的车湖(俗称清水海),流经云南的寻甸县、东川区和会泽县,处于东经 $102^{\circ}52' \sim 103^{\circ}22'$ 和北纬 $25^{\circ}32' \sim 26^{\circ}35'$ (杜榕恒等, 1987),全长 141.9 km,流域面积 3 044.3 km². 流域地处横断山东部边缘、云贵高原与川西南山地的过渡地带,河谷沿小江深大断裂带发育,区内地质构造复杂、地震活动频繁、新构造运动强烈,山高坡陡、地表破碎、地形高差悬殊,气候水文条件垂直分异显著,雨季降雨丰沛,使该流域成为长江上游地区、我国、乃至全球山地灾害活动最强烈、暴发频率最高和危害最严重的地区之一.

2.1 研究区滑坡分布

小江流域坡面稳定性差、滑坡众多,笔者在分析已有研究成果的基础上,通过大量野外调查并结合遥感解译,现已查明的体积大于 50 000 m³ 的滑坡就多达 176 个(中科院成都山地所,小江流域滑坡编目, 2002; Ma *et al.*, 2003),其在流域内的分布见

图 1. 由图 1 可知,小江流域的滑坡主要分布在小江干流、一级支流和二级支流的两岸,其中大部分滑坡分布在流域的中下游. 流域中小型滑坡 4 个,中型滑坡 41 个,大型滑坡 80 个,特大型滑坡 51 个. 小江流域以大型滑坡和特大型滑坡分布为主,是泥石流的高发地带.

2.2 滑坡形成条件及影响因素

现场调查和民访综合分析表明,区内滑坡是基本因素(地貌、地质构造等)和诱发因素(降雨、不合理土地利用等)耦合作用的产物.

2.2.1 地貌 小江流域总体地势为南高北低,小江自南向北流入金沙江. 小江河谷为沿深大断裂带发育的构造性河谷,两岸地形陡峭,岭谷相对高度大(图 2),地势高差悬殊. 流域最低点为海拔 695 m,最高点海拔 4 344 m,高差达 3 649 m(图 3)造成流域内沟谷发育,侵蚀强烈. 因强烈的侵蚀切割影响,流域内山高谷深、地势陡峭,呈两山夹一江的地貌格局.

2.2.2 地层岩性 本区分布有前震旦纪昆阳系板岩和千枚岩,下震旦纪澄江砂岩,上震旦纪灯影灰岩,下寒武纪的泥质页岩及板状页岩,石炭纪以砂岩与页岩互层为主并夹有煤层,下二叠纪阳新灰岩及峨眉山玄武岩以及三叠纪和侏罗纪的砂岩与砂质页

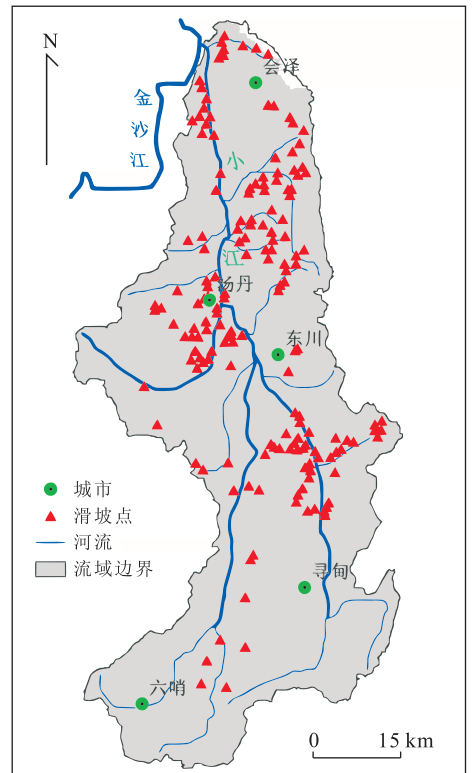


图 1 小江流域滑坡分布

Fig. 1 Landslide distribution of Xiaojiang ravine

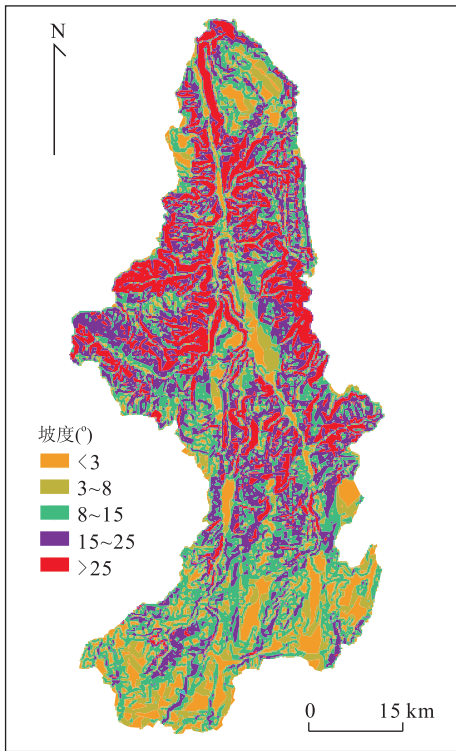


图 2 小江流域坡度分布

Fig. 2 Slope distribution of Xiaojiang ravine

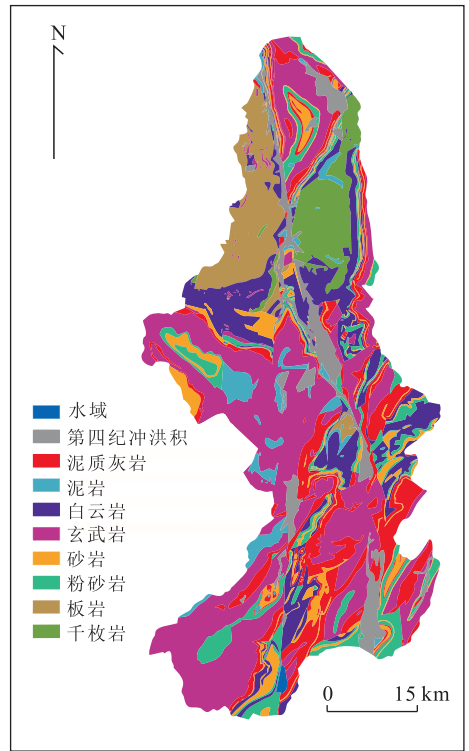


图 4 小江流域岩性分布

Fig. 4 Lithological distribution of of Xiaojiang ravine

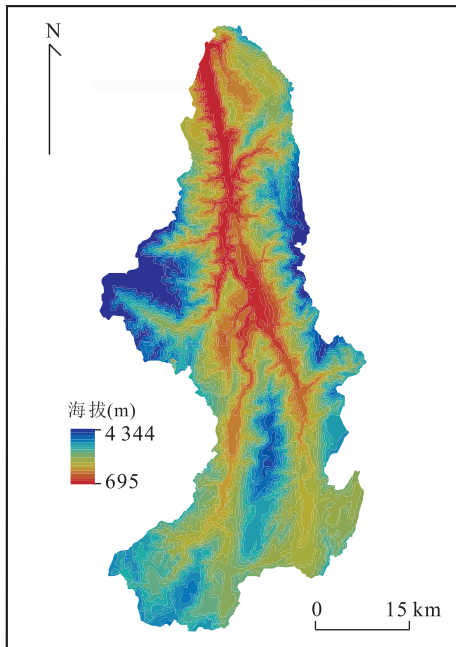


图 3 小江流域地貌

Fig. 3 Geomorphological sketch of Xiaojiang ravine

加深、节理发育以及风化强烈,为本区滑坡的发育提供了条件。

2.2.3 降雨强度 小江流域的降水主要集中在雨季(5月~10月),降水量占全年降水量的88%;干季(11月至次年4月)晴朗少雨,降水量仅占全年降水量的12%左右。显示出雨季湿热,冬季干燥的气候特点。降水量随着海拔高度的升高而增加,1 600 m以下区域年降水量仅为700 mm,而2 400 m以上区域则增加到1 000 mm。同时,受地形影响,小江流域内常形成范围小、历时短和强度大的局地暴雨,滑坡在此期间频发且变形程度加剧,降雨强度是滑坡发生的决定性诱发因素。

2.2.4 人类工程活动 小江流域常住人口48.6万人,流动人口约2万人,人口平均密度164人/km²。从小江流域人口的分布来看,随海拔的升高,人口有明显减少的趋势,人口主要分布在700~1 800 m高度带。由于人口的增加,造成乱砍乱伐、陡坡耕种以及过度放牧现象增加,加上开采矿石(主要为铜矿),修建公路铁路,没有注意保护环境,加速了生态环境的恶化,人类不合理的工程活动成为诱发和加剧滑坡灾害发生的重要因素。

2.3 滑坡危险性评价指标体系构建

滑坡的形成和发展与地质环境条件有一定的相

岩互层;此外,该区第四纪的残积、坡积、冲积和洪积层分布于河谷山坡、山麓和沟口(图4)。这些岩层长期受构造运动作用和气候因素的影响,造成岩层孔隙度和裂隙较大,强度和稳定性差,岩石破碎、变质

关性,其影响因素众多.考虑对斜坡稳定性影响的重要性,同时遵循客观性、系统性及易获取性原则,本文选择坡度、黏聚力和內摩擦角这 3 个指标作为滑坡危险性评价指标.

2.3.1 坡度 斜坡的坡度一直被认为是影响滑坡稳定性的重要因素,它从几何特征上决定了滑坡的分布;同时,坡度直接决定斜坡的应力分布,控制着滑坡的稳定性(兰恒星等,2002).

2.3.2 滑坡力学参数 分析滑坡稳定性的关键是获得较为准确的滑动面力学参数(沈强等,2006).黏聚力和內摩擦角作为评价滑坡的力学参数与滑坡稳定性系数呈正相关关系,岩土의抗剪强度参数(黏聚力、內摩擦角)对滑坡稳定性系数的影响最显著(刘红帅等,2008).

2.4 滑坡危险性分级标准

滑坡危险性评价等级的划分目前尚未统一.笔者参照李军霞(2011)的评价标准和滑坡现场调查特征,将滑坡危险性划分为极高危险、高危险、中等危险、低危险和极低危险 5 个级别.各评价指标的分级评价标准参考《中华人民共和国国家标准—工程岩体分级标准》(1995)进行划分.

2.5 滑坡危险性评价指标的特征分布及比较

2.5.1 坡度分布特征 坡度是影响滑坡的一个重要因素.一般情况下,坡度越大的斜坡也越容易发生滑坡灾害.研究区坡度计算采用地理信息系统(geographic information system,简称 GIS)栅格分析中的坡度计算方法,使用空间分辨率为 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ 的高程栅格计算坡度栅格分布图,同时统计不同坡度级的面积比例,见图 5.

如图 5 所示,小江流域的斜坡坡度主要处于 $8^\circ \sim 25^\circ$; $8^\circ \sim 25^\circ$ 斜坡的分布面积占总面积的 57.2%,可见小江流域以中缓坡为主,且绝大部分为低于 35° 的斜坡.

2.5.2 力学特征差异性规律 (1)采样原则:结合风化作用类型及岩石风化影响因素分析,严格排除显示出现代剥蚀堆积迹象的采样地点,保证原岩风化;相同外部环境不同岩性的风化采样尽可能控制在同一流域;选择典型流域(5 个),即沙湾、大白泥沟、大桥河、蒋家沟及大沟流域.(2)野外采样方案:根据岩石风化工程地质分类及常见岩石类型风化习性设计采样方案,将采样地分为 3 类:Ⅰ为地势相对较高的平坦地区;Ⅱ为坡段非剥蚀堆积区;Ⅲ为地势较低的河谷及阶地区.采样方式:对Ⅰ和Ⅲ类采样地进行坑探采样;对Ⅱ类采样地采用剥槽采样.(3)试

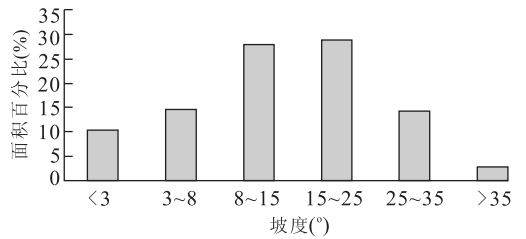


图 5 不同坡度级所占面积百分比

Fig. 5 Area percentages of different slope grades

验分析方法:根据小江流域岩性的分布规律,同时依据岩石风化工程地质分类及常见岩石类型风化习性设计采样方案,在小江流域采集 19 组不同岩性样品,带回实验室进行直剪实验.选用 ZJ 应变控制式四联直剪仪,对各采集样品的含水量分别控制在 5%、7%、9%、11%、13%、15%、17%、19%、21%、25%和 30%条件下进行不排水不固结快剪试验,施加的垂直应力为 50、100、200 和 300 kPa.室内共完成 19 个样品的不同含水量的 190 组直剪实验.根据直剪成果,对各岩性风化物的抗剪强度参数依据含水量高低依次进行平均值处理,从而获得小江流域 9 种类型岩石风化物的峰值 C 和 φ 值分布(表 1).

土体的黏聚力随含水量的增加而突变的现象,反映了土体随含水量变化的强度的质的变化,对斜坡土体的失稳滑动研究有着重要意义.如表 1 所示,各岩性风化土体黏聚力的峰值抗剪强度为 23.08~152.74 kPa,其变化顺序依次为泥质灰岩、板岩、第四纪冲洪积、粉砂岩、白云岩、玄武岩、千枚岩、泥岩和砂岩.在显著水平 $p < 0.05$ 下,采用 Duncan 法(卢纹岱,2003)对不同岩性风化土体黏聚力进行差异性比较,白云岩和玄武岩之间差异不显著,其他岩土之间黏聚力差异显著.

不同岩性风化土体内摩擦角的峰值为 $26.8^\circ \sim 40.4^\circ$,其变化顺序依次为板岩、第四纪冲洪积、白云岩、砂岩、灰岩、千枚岩、泥岩、粉砂岩和玄武岩.在显著水平 $p < 0.05$ 下,采用 Duncan 法(卢纹岱,2003)对不同岩性风化土体内摩擦角进行差异性比较,不同岩石土体之间的差异性较为显著.

通过对不同岩性风化土样的力学特征参数进行差异性分析可知,不同岩性风化土体的力学特征分布均有较大差异,可为滑坡的危险性分析提供可靠数据支持;另一方面,针对不同的力学特征指标,同一岩性对滑坡形成的影响程度也不同,因而在评价岩性对滑坡的危险性时,应综合分析.

表 1 小江流域不同岩性风化产物的力学特征

Table 1 Mechanics characteristics of different lithological weathering products in Xiaojiang ravine

岩性	黏聚力峰值含水量(%)	黏聚力 C(kPa)	内摩擦角峰值含水量(%)	内摩擦角 $\varphi(^{\circ})$
泥质灰岩	15.70	152.74	17.9	33.5
泥岩	13.00	34.16	10.0	33.3
白云岩	15.50	48.50	15.2	36.9
玄武岩	16.50	46.75	19.5	26.8
砂岩	11.00	23.08	12.0	35.2
粉砂岩	10.00	53.23	11.2	33.2
第四纪冲洪积	11.00	57.57	12.0	37.0
板岩	10.70	99.10	10.8	40.4
千枚岩	9.20	40.70	10.7	33.3

3 滑坡危险性投影寻踪等级评价模型

3.1 滑坡危险性等级表

根据《中华人民共和国国家标准——工程岩体分级标准》，对评价指标的稳定性进行级别划分，构建滑坡危险性评价的指标体系和分级标准表(表 2)。

3.2 模型计算

首先对数据进行归一化，因为黏聚力和內摩擦角与稳定性等级呈正相关，坡度与稳定性等级呈负相关，所以分别利用公式(1)和(2)对各评价指标进行归一化。然后利用数据处理系统 DPS9.5 软件，计算最优投影方向，根据该投影方向利用公式(3)计算各经验等级样本点的投影特征值(表 3)。

3.3 等级评价

根据各经验等级及其对应的投影值建立基于投影值的等级评价方法，并将待评价样本进行归一化处理后计算其投影值，利用投影值等级评价方法得到评价样本所属等级(表 4)。

3.4 小江流域滑坡危险性等级评价

3.4.1 滑坡危险性等级图

在 GIS 技术支持下，笔者对坡度、岩石土体的黏聚力、內摩擦角进行重新分类，对不同岩性的风化土体赋予实验获取的力学参数，得到坡度、粘聚力和內摩擦力这 3 个因子图层，将 3 个图层进行叠加分析，从而获得研究区的待评数据库，并将待评数据库数据进行归一化处理，利用 DPS 软件进行投影寻踪计算得到数据库中每一待评样本的投影值，利用投影值等级评价方法(表 4)得到待评样本所属等级，进而获得该模型的滑坡危险性等级分布图(图 6)，笔者将研究区滑坡危险性等级分为 5 级:极高危险区、高危险区、中危险区、低危险区和极低危险区。

表 2 斜坡岩石土体稳定性分级

Table 2 Stability classification of slope rock soil mass

坡度($^{\circ}$)	黏聚力 C(kPa)	內摩擦角 $\varphi(^{\circ})$	稳定性级别
<3	>220	>37	I
3~8	120~220	29~37	II
8~15	80~120	19~29	III
15~25	50~80	13~19	IV
>25	<50	<13	V

表 3 各等级的投影特征值

Table 3 Projection value of each stability grade

坡度($^{\circ}$)	黏聚力 C(kPa)	內摩擦角 $\varphi(^{\circ})$	投影特征值
3	220	37	0.0009
8	120	29	0.2117
15	80	19	0.5150
25	50	13	0.9516

表 4 基于投影特征值的滑坡危险性等级分级

Table 4 Stability classification based on projection value

投影特征值	稳定性等级	滑坡危险性评价等级
<0.0009	I	极低危险
0.0009~0.2117	II	低危险
0.2118~0.5150	III	中等危险
0.5151~0.9516	IV	高危险
>0.9516	V	极高危险

3.4.2 评价结果分析

在 GIS 技术支持下，利用滑坡危险性等级分布图和研究区滑坡分布图进行叠加，获取不同滑坡危险性级别的面积及比例和各级别下滑坡相对概率及密度(表 5)。由于研究区滑坡类型不一(176 个滑坡中包括土质滑坡和石质滑坡)，滑坡点密度反映的是滑坡点的数量密集程度，不能准确反映滑坡造成的实际危害程度，如土方的损失量，因此笔者选择了 60 个发生在松散未固结的粘性土或砂性土斜坡上的滑坡点(图 6)，将其在不同危险性级别下的滑坡方量进行密度统计，得到不同危险性级别下土质滑坡方量的密度统计(表 5)。

表 5 危险性级别面积比例和检验滑坡点在各级别中的分布比例

Table 5 Distributing area and quantity of landslides at each risk level

滑坡危险性评价等级	总面积 (km ²)	面积比例 (%)	滑坡个数 (个)	滑坡相对概率 (%)	滑坡方量 (10 ⁴ m ³)	滑坡方量密度 (10 ⁴ m ³ /km ²)
极低危险	5.78	0.19	0	0.00	0	0.00
低危险	213.10	7.00	2	3.33	1 220	5.73
中等危险	2104.22	69.12	13	21.67	11 530	5.48
高危险	286.47	9.41	6	10.00	11 050	38.57
极高危险	434.73	14.28	39	65.00	75 458	173.57

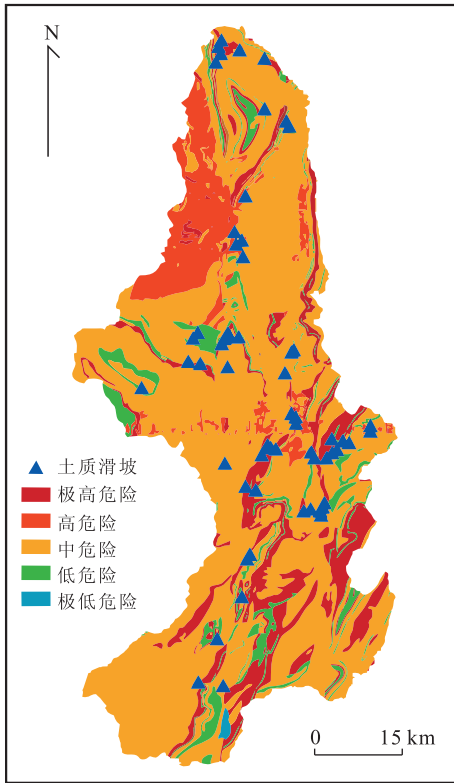


图 6 滑坡危险性等级分布

Fig. 6 Classification distribution of landslide risk zoning

以此来验证评价结果的可靠性。

由表 5 的统计结果可知,极高危险区面积为 434.73 km²,占流域总面积的 14.28%,其中实际发生土质滑坡数量为 39 个,占土质滑坡总数量的 65.00%,分级内土质滑坡方量密度为 173.57 × 10⁴ m³/km²;高危险区面积为 286.47 km²,占流域总面积的 9.41%,其中实际发生土质滑坡数量为 6 个,占土质滑坡总数量的 10.00%,分级内土质滑坡方量密度为 38.57 × 10⁴ m³/km²;中等危险区面积为 2 104.22 km²,占流域总面积的 69.12%,其中实际发生土质滑坡数量为 13 个,占滑坡总数量的 21.67%,分级内土质滑坡方量密度为 5.48 × 10⁴ m³/km²;低危险区面积为 213.10 km²,占流域总面积的 7.00%,其中实际发生土质滑坡数量为 2

个,占土质滑坡总数量的 3.33%,分级内土质滑坡方量密度为 5.73 × 10⁴ m³/km²;极低危险区内无滑坡分布.以上分析可以看出土质滑坡方量密度与危险性级别有很强的关系,高危险性级别以上的地区的滑坡方量密度大大高于其他 3 个级别,滑坡方量密度随危险性级别的提高而迅速增加;中等危险性级别以上区域拥有的土质滑坡数量占全部土质滑坡 96.67%.根据评价结果的验证,表明基于投影寻踪模型的滑坡危险性分级评价方法能较好地反映滑坡的危险等级。

4 结论

区域滑坡危险性分级评价是滑坡减灾防灾的重要技术措施,本文在前人研究工作的基础上结合野外采样和室内分析,在 GIS 软件技术支持下,采用投影寻踪技术,对山地灾害频发区的小江流域滑坡危险性进行了综合评价。

(1)笔者应用投影寻踪模型对研究区滑坡危险性进行评价,并对结果进行检验,结果表明在占研究区总面积 23.69%的高、极高危险区的小范围内,实际发生土质滑坡数量 45 个,占总土质滑坡数量的比例为 75.00%;中等危险性级别以上区域拥有的土质滑坡数量占全部土质滑坡 96.67%,说明基于投影寻踪模型对滑坡危险性的实际评价结果良好.基于 5 类不同危险性级别的土质滑坡方量统计图表明,滑坡方量密度随危险性级别的提高而迅速增加。

(2)针对研究区不同坡度和岩性图层的叠加组合,笔者应用投影寻踪模型进行滑坡危险性等级划分和评价,其结果比较合理.原因在于,评价是根据资料本身的特征来进行的,未预先给定各评价因素的权重,避免了在权重给定中的人为主观性;投影特征值作为滑坡危险性等级评价的依据,能直观地比较出研究区不同区域的滑坡危险性程度,为滑坡空间预测、防灾、减灾提供了一定的依据.此外,投影寻

踪法是将大样本数据应用到滑坡危险性等级评价中,可以将高维数据投影到一维空间上进行数据分析,能够找到观察数据结构的最佳角度,使模型的精度大大提高,解决了高维数据全局寻优的难题,减少了寻优工作量.因此,它为涉及多因素的滑坡危险性评价提供了一条新思路.

References

- Chai, B., Yin, K. L., Wang, Y., et al., 2007. Sensitivity Analysis of Landslide Stability Based on Distribution Models of Influencing Factors. *Rock and Soil Mechanics*, 28(12): 2624—2628 (in Chinese with English abstract).
- Chen, G., Meng, X. M., Guo, P., et al., 2011. Landslide Susceptibility Mapping Based on GIS and Information Value Model in Bailong River Basin. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 47(6): 1—6 (in Chinese with English abstract).
- Chen, G. J., Li, C. A., Chen, S., et al., 2013. Landslide Development and Geological Process of Watercourse of Evolution in the Three Gorges Reservoir Area. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 38(2): 411—416 (in Chinese with English abstract).
- Dai, Z. H., Lu, C. J., 2006. Mechanical Explanations on Mechanism of Slope Stability. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 28(10): 1191—1197 (in Chinese with English abstract).
- Du, R. H., Kang, Z. C., Chen, X. Q., et al., 1987. Comprehensive Investigation and Study of Control Plan on Xiaojiang Debris Flow in Yunnan Province. Science and Technical Documentation Press Bureau of Chongqing, Chongqing (in Chinese).
- Fu, Q., Zhao, X. Y., 2007. Principle and Its Application of Projection Pursuit Model. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Huang, B. L., Chen, X. T., 2007. Deformation Failure Mechanism of Baijiabao Landslide in Xiangxi River Valley. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 29(6): 938—942 (in Chinese with English abstract).
- Lan, H. X., Wu, F. Q., Zhou, C. G., et al., 2002. Analysis on Susceptibility of GIS Based Landslide Triggering Factors in Yunnan Xiaojiang Watershed. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 21(10): 1500—1506 (in Chinese with English abstract).
- Lee, S., Pradhan, B., 2007. Landslide Hazard Mapping at Selangor, Malaysia Using Frequency Ratio and Logistic Regression Models. *Landslide*, 4(1): 33—41. doi: 10.1007/s10346—006—0047—y
- Li, J. X., 2011. Hazards in Formation Mechanism and Non-linear Prediction of Landslide Longzi County, Tibet (Dissertation). Jilin University, Changchun, 97—99 (in Chinese with English abstract).
- Lee, S. T., Li, X., Liu, Y. H., 2006. Study on Generation and Evolution of Maoping Landslide on Qingjiang River. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 25(2): 377—384 (in Chinese with English abstract).
- Liu, H. S., Yang, J. B., Bo, J. S., et al., 2008. Influences of Physical and Mechanical Parameters of Geo-material on Stability of Rock Landslide. *Coal Geology & Exploration*, 36(1): 37—40 (in Chinese with English abstract).
- Lu, W. D., 2003. SPSS for Windows Statistical Analysis. Electronic Science and Technology Press, Beijing (in Chinese).
- Ma, Z. Z., He, Y. P., Xie, H., et al., 2003. GIS-Based Mapping and Zonation of Landslide Hazards in Xiaojiang Valley of Southwestern China. *Wuhan University of Natural Sciences*, 8(3): 1 021—1 028.
- Quan, Q., Wang, L. Z., Huang, C. M., 2006. The Assessment and Management of Seismic Risk Based on Information Diffusion Method in Yunnan Province, China. *Northwestern Seismological Journal*, 28(2): 180—183 (in Chinese with English abstract).
- Shen, Q., Chen, C. X., Wang, R., 2006. Analysis of Mechanical Parameters of Slip Surface for Basalt Landslide in Yunnan. *Rock and Soil Mechanics*, 27(12): 2309—2313 (in Chinese with English abstract).
- Tang, H., Wan, W., Liu, J. H., 2011. Evaluation of Underground Cavern Rock Quality Based on Uncertainty Measure Theory. *Rock and Soil Mechanics*, 32(4): 1181—1185 (in Chinese with English abstract).
- Tang, Q. Y., 2010. DPS Data Processing System. Science Press, Beijing (in Chinese).
- The Drawing Group of the People's Republic of China National Standard, 1995. GB50218-94 Engineering Rock Mass Classification Standard. China Planning Press, Beijing (in Chinese).
- Wang, Z. W., Li, D. Y., Wang, X. G., 2007. Zonation of Landslide Hazards Based on Weights of Evidence Model. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 29(8): 1268—1273 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Y. P., Zhang, Q. X., Tang, H. M., et al., 2014. Landslide Hazard Warning Based on Effective Rainfall Intensity. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 39(7): 889—895 (in Chinese with English abstract).
- Xie, L. L., 2005. A Method for Evaluating Cities' Ability of

Reducing Earthquake Disasters. *Northwestern Seismological Journal*, 27(4): 296—304 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 柴波,殷坤龙,汪洋,等,2007. 基于影响因素分布模型的滑坡稳定性敏感分析. *岩土力学*, 28(12): 2624—2628.
- 陈冠,孟兴民,郭鹏,等,2011. 白龙江流域基于GIS与信息量模型的滑坡危险性等级区划. *兰州大学学报(自然科学版)*, 47(6): 1—6.
- 陈国金,李长安,陈松,等,2013. 长江三峡库区滑坡发育与河道演变的地质过程分析. *地球科学——中国地质大学学报*, 38(2): 411—416.
- 戴自航,卢才金,2006. 边坡失稳机理的力学解释. *岩土工程学报*, 28(10): 1191—1197.
- 杜榕恒,康志成,陈循谦,等,1987. 云南小江泥石流综合考察与防治规划研究. 重庆:科学技术文献出版重庆分社.
- 付强,赵小勇,2007. 投影寻踪模型原理及其应用. 北京:科学出版社.
- 黄波林,陈小婷,2007. 香溪河流域白家堡滑坡变形失稳机制分析. *岩土工程学报*, 29(6): 938—942.
- 兰恒星,伍法权,周成虎,等,2002. 基于GIS的云南小江流域滑坡因子敏感性分析. *岩石力学与工程学报*, 21(10): 1500—1506.
- 李军霞,2011. 西藏隆子县滑坡灾害形成机理及非线性预测

研究(博士学位论文). 长春:吉林大学,97—99.

- 李守定,李晓,刘艳辉,2006. 清江茅坪滑坡形成演化研究. *岩石力学与工程学报*, 25(2): 377—384.
- 刘红帅,杨俊波,薄景山,等,2008. 岩土体物理力学参数对岩质滑坡稳定性的影响. *煤田地质与勘探*, 36(1): 37—40.
- 卢纹岱,2003. SPSS for Windows 统计分析. 北京:电子工业出版社.
- 全隼,王玲珍,黄成敏,2006. 基于信息扩散理论的云南省地震风险评估及管理研究. *西北地震学报*, 28(2): 180—183.
- 沈强,陈从新,汪稔,2006. 云南玄武岩滑坡滑动面力学参数分析. *岩土力学*, 27(12): 2309—2313.
- 唐海,万文,刘金海,2011. 基于未确知测度理论的地下洞室岩体质量评价. *岩土力学*, 32(4): 1181—1185.
- 唐启义,2010. DPS 数据处理系统. 北京:科学出版社.
- 中华人民共和国国家标准编写组,1995. GB50218-94 工程岩体分级标准. 北京:中国计划出版社.
- 王志旺,李端有,王湘桂,2007. 证据权法在滑坡危险度区划研究中的应用. *岩土工程学报*, 29(8): 1268—1273.
- 吴益平,张秋霞,唐辉明,等,2014. 基于有效降雨强度的滑坡灾害危险性预警. *地球科学——中国地质大学学报*, 39(7): 889—895.
- 谢礼立,2005. 城市防震减灾能力的定义及评估方法. *西北地震学报*, 27(4): 296—304.