

# 滑坡危险度评价的地形判别法

樊晓一<sup>1, 2</sup>, 乔建平<sup>1</sup>

(1. 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; 2. 中国科学院研究生院地理科学学院, 北京 100039)

**摘 要:**选取影响滑坡发育的坡度、坡形、坡向、坡体的相对高度和地形与地层产状的组合关系 5 个主要地形因素, 结合三峡库区重点滑坡段(云阳- 巫山) 205 个滑坡统计资料, 利用地形判别法, 对典型滑坡危险度进行评价。将各地形判别因子在区域滑坡发育上的贡献率作为评价典型滑坡危险度的评价值, 利用层次分析法, 建立典型滑坡危险度判别矩阵。将判别矩阵的归一化特征向量作为判别因子的权重, 得到典型滑坡的危险度。通过建立典型滑坡危险度评价表, 对滑坡进行有效的管理。此研究方法有效地避免了对评价因子赋值的主观性, 并提出了对不同危险度等级的滑坡管理措施。

**关键词:**典型滑坡 滑坡危险度 地形判别法

中图分类号: P342. 22

文献标识码: A

我国 70% 地域为山区, 滑坡发生密度大, 频率高, 是世界上受滑坡危害最严重的国家之一。通过滑坡危险度评价, 对局部场地或区域进行滑坡灾害的危险度评价, 从而对各类滑坡进行有效的管理, 以减少滑坡灾害造成的生命及财产损失。滑坡灾害危险度判别是减轻灾害损失的非工程性重要措施。在对滑坡危险度评价的研究中, 日本滑坡专家曾采用坡度、切割密度等因素对日本部分流域滑坡危险度进行区划<sup>[1]</sup>; 美国滑坡专家采用了地形因素和岩性因素等对滑坡危险性进行评价<sup>[2]</sup>。本文通过对三峡库区重点滑坡段(云阳- 巫山) 的 205 个滑坡的统计分析, 建立滑坡危险度的地形因子判别模型。

## 1 地形判别法

滑坡危险度评价的地形判别法, 是将与滑坡发育相关的地形因素及滑坡发育的现状经过建立的数学模型分析计算, 判别滑坡的危险度, 并按一定的等级划分。本研究中选择了坡度、坡形、坡向、坡体的相对高度和地形与地层产状的组合关系 5 个地形因子作为地形判别法的判别因子, 进行滑坡危险度的

判别。地形是滑坡发生的重要控制因素, 任何滑坡的发生都具备了特定的地形条件。并且不同的地形因子在滑坡危险度判别中的具有不同的权重。

### 1.1 坡度

坡度对滑坡的发育具有重要的影响作用。坡体的临空面是否能成为有效临空面<sup>[3]</sup>, 与坡体的坡度关系极大。但是当坡度、坡体岩层等条件特别组合时, 即使可能转化为滑动面的坡体结构面大于坡面倾角时, 也有可能发生拱溃型顺层岩质滑坡<sup>[4]</sup>。此外, 坡体内的软弱结构面大于坡面倾角, 滑动面前段(抗滑段)通过倾角更缓的卸荷裂隙而发育。根据对三峡库区重点滑坡段(云阳- 巫山) 的 205 个滑坡的统计结果(图 1): 坡体坡度在 0°~ 5°和 > 41°的滑坡发育较少, 仅有 4 和 6 个, 占总数的 2.0% 和 2.9%。在 6°~ 10°、31°~ 35°和 36°~ 40°的滑坡发育数为 11、17 和 18 个, 占 5.4%、8.3% 和 8.8%。坡体坡度为 11°~ 15°、16°~ 20°、21°~ 25°和 26°~ 30°的滑坡发育最多, 分别有 30、39、36 和 44 个, 占 14.6%、19.0%、17.6% 和 21.4%, 四者合计占统计数的 72.6%。其累计频数分布曲线如图 2, 可以看出, 坡度从 10°开始, 曲线的斜率急剧增大, 是滑坡大量开

收稿日期(Received date): 2004- 03- 04; 改回日期(Accepted): 2004- 08- 10。

基金项目(Foundation item): 中国科学院重要知识创新项目研究(编号 KJCX2- SW- L1- 6) 资助。[Supported by The Important Knowledge Innovation Project of CAS (No. KJCX2- SW- L1- 6).]

作者简介(Biography): 樊晓一(1974- ), 男(汉族), 四川双流人, 博士研究生。从事滑坡预测预报及危险度评价研究。[Fan Xiaoyi, male, Han nationality, borned in Shuangliu, Sichuan, Master, major in the landslide forecast and the assessment of hazard degree.]

始发生的一个转折点(突增点)。

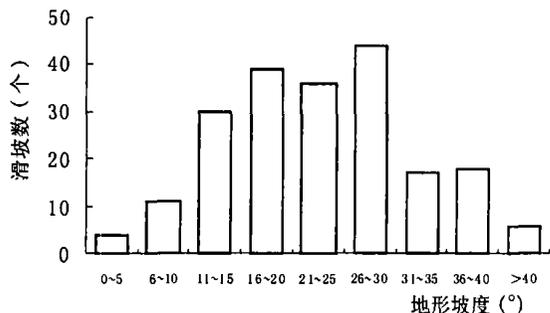


图1 三峡库区云阳-巫山段滑坡的地形坡度统计分布图

Fig. 1 The statistical distributing graph of topography gradient of the emphasis landslide sections(Yunyang-Wushan) in the area of Three Gorge Reservoir(TGR)

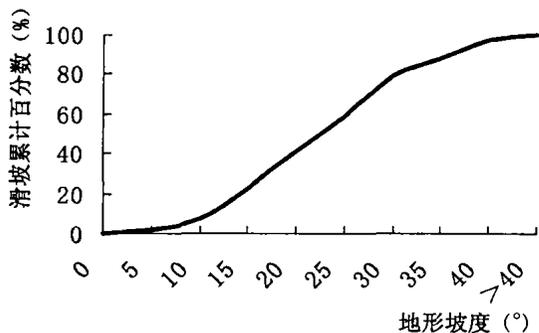


图2 云阳-巫山段滑坡累积百分数与地形坡度的关系

Fig. 2 The relation between the cumulative percentage and topography gradient of the emphasis landslide sections (Yunyang-Wushan) in the area of TGR

### 1.2 坡形

滑坡的形态在垂直纵剖面上可以很直观地划分为直线形坡、凸形坡、凹形坡, 以及由这三种坡形的不同组合而构成的复合形坡: 上凹下凸坡和上凸下凹坡。滑坡的坡形直接地反映了在内外营力作用下坡体演变的历史过程。凸形坡反映地壳隆升强烈、河流下切速度大于坡体剥蚀速度的演变历史。凹形坡是河流侵蚀基准面长期处于稳定时期的产物。直线形坡则意味着内外营力对坡体的作用处于平衡状态。因此不同坡形所反映的内外营力也同样控制着坡体上的滑坡发育状态, 表现为凸形坡的稳定性差, 其上的滑坡发育数量多, 凹形坡较稳定, 其上发育的滑坡数量最少, 直线形坡介于二者之间。不同的坡形在滑坡危险度评价中具有不同的权重, 图3给出了上述5种坡形在三峡库区重点滑坡段(云阳-巫山)的分布规律。

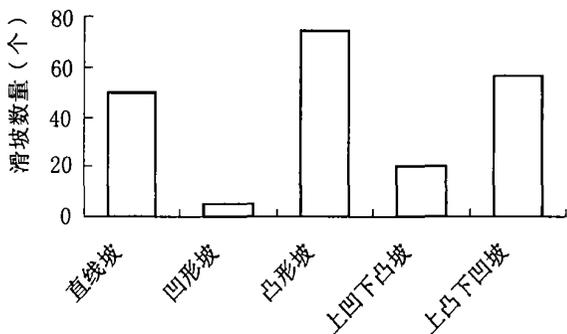


图3 云阳-巫山段滑坡坡形统计分布图

Fig. 3 The statistical distributing graph of the shape of the emphasis landslide sections(Yunyang-Wushan) in the area of TGR

### 1.3 坡向

坡向是指临空面的朝向。因此有南坡、北坡、东坡和西坡之分, 相应的也有西南坡、西北坡、东北坡和东南坡之分。通常在我国将南坡作为标准的阳坡, 它与东南坡和西南坡统称为阳坡。而将北坡作为标准的阴坡, 它与东北坡和西北坡统称为阴坡。

许多区域调查资料表明, 不同坡向向坡体上的滑坡发育状况有很大的差异。近些年来的研究资料也表明, 坡向对滑坡发育的影响作用是内、外营力的反映。一些研究者认为坡向对滑坡发育的影响作用与新构造应力场有关<sup>[5]</sup>。坡向影响到水热条件的差异, 使自然地理诸要素有规律性分异, 从而导致滑坡发育存在坡向性。从图4中可以看出, 三峡库区发生滑坡的坡向为 136°~ 180°的数量最多, 其次是 181°~ 225°、91°~ 135°和 0°~ 45°, 约占总数的 64%。

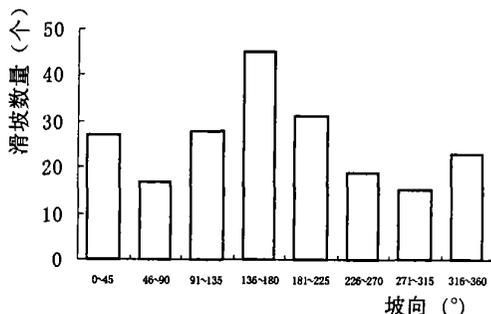


图4 云阳-巫山段滑坡坡向统计分布图

Fig. 4 The statistical distributing graph of the aspect of slope of the emphasis landslide sections(Yunyang-Wushan) in the area of TGR

### 1.4 相对高度

相对高度对滑坡发育有显著的影响, 它决定了滑坡滑动、势能的大小。高坡体不仅有利于滑坡的发育, 而且还制约着滑坡的运动特征。但滑坡的相对

高度与坡体的坡度、坡体的岩性和坡形等因素有关。三峡库区重点滑坡段(云阳-巫山)滑坡的相对高度主要分布在 150 m 以下,占滑坡总数的 83.4%(图 5)。

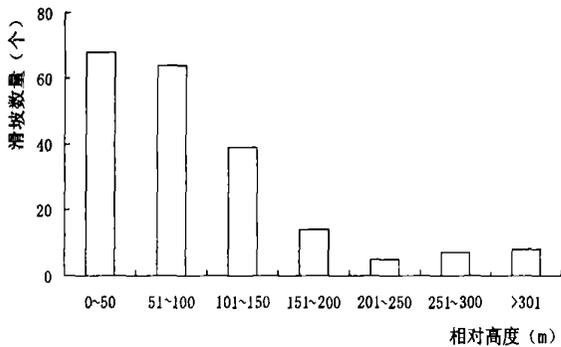


图 5 云阳-巫山段滑坡相对高度统计图

Fig. 5 The cartogram of relative height difference of the emphasis landslide sections (Yunyang-Wushan) in the area of TGR

### 1.5 地形与岩层产状

根据上覆物质与下伏基岩的组合关系,可将滑坡划分为顺层滑坡、切层滑坡两种主要类型<sup>[6]</sup>。根据已有资料统计三峡库区 31 个基岩滑坡分析<sup>[7]</sup>,基岩顺层滑坡数量共 29 个,占基岩滑坡总数的 93.5%。基岩切层滑坡仅 2 个,占基岩滑坡总数的 6.5%。

## 2 判别模型的建立

### 2.1 判别矩阵

利用层次分析模型<sup>[8]</sup>建立滑坡危险度判别矩阵

$$A = (a_{ij})_{n \times n}, a_{ij} > 0, a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}} \quad (1)$$

式中  $a_{ij} = \frac{a_i}{a_j}$  ( $i, j = 1, 2 \dots n$ ),  $a_i$  为判别因子的取值。

### 2.2 滑坡危险度计算

$$LD = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot w_i \quad (2)$$

式中  $\omega_i$  为判别矩阵 A 的归一化特征向量,  $w_i$  为判别因子的评价价值。

## 3 实例分析

宝塔滑坡位于重庆市云阳县宝塔乡境内,长江

北岸,距离云阳老县城 2 km。地理坐标为  $108^{\circ}54' E \sim 108^{\circ}56' E$ 、 $30^{\circ}57' N \sim 30^{\circ}58' N$ 。是三峡库区 4 个体积大于  $1 \times 10^8 m^3$  的特大型滑坡之一,系由数个滑坡组成的滑坡群,总面积约  $2.5 km^2$ ,体积  $1.04 \times 10^8 m^3$ 。滑坡发育区属低山河谷地貌,滑坡地貌特征明显,呈圈椅状,两侧略高。滑坡的坡度自上而下由陡变缓,上部  $40^{\circ} \sim 30^{\circ}$ ,基岩裸露,植被较少,由砂岩、泥岩互层组成,坡向与岩层的倾向一致;下部  $20^{\circ} \sim 10^{\circ}$ ,大部分为第四系堆积物覆盖。1982-07 因连降暴雨及长江水位急剧上涨滑坡部分复活,形成了著名的鸡扒子滑坡。面积  $0.774 km^2$ ,体积为  $1500 \times 10^4 m^3$ ,前缘约  $180 \times 10^4 m^3$  的土石滑入长江,造成长江航道的淤塞,严重影响长江航道的正常运行。1993 年以来,宝塔滑坡后缘陆续出现拉张裂缝等新的复活迹象<sup>[1]</sup>。

通过对宝塔滑坡实地调查和地形图的分析,各地形判别因子如表 1:

表 1 地形判别因子评价表

Table 1 The evaluation table of the discrimination factors of topography

判别因子	特性	归属域	归属域中波占总数的百分比	评价值 $w_i$
坡度	$25^{\circ}$	$1^{\circ} \sim 30^{\circ}$	72.6	0.726
坡形	凸形坡	凸形坡	36.1	0.361
坡体相对高度	240m	150~250m	22.0	0.22
坡向	$180^{\circ}$	$90^{\circ} \sim 180^{\circ}$	33.2	0.332
与岩层产状的关系	基岩顺层滑坡	基岩顺层滑坡	93.5	0.935

利用地形判别因子的评价值建立成对比较矩阵:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 2.01 & 3.30 & 2.19 & 0.81 \\ 0.50 & 1 & 1.64 & 1.09 & 0.39 \\ 0.30 & 0.61 & 1 & 0.66 & 0.24 \\ 0.46 & 0.92 & 1.52 & 1 & 0.36 \\ 1.29 & 2.59 & 4.25 & 2.82 & 1 \end{bmatrix}$$

由矩阵 A 得出归一化的特征向量  $\omega = (0.283, 0.140, 0.086, 0.129, 0.362)^T$

$$LD = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot w_i = 0.656$$

根据资料和统计分析<sup>[3,9]</sup>,建立典型滑坡危险度判别表(表 2)。根据表 2 的判别原则,宝塔滑坡的危险度等级为 II,即滑坡内部的破坏处于缓慢发展阶段,并逐渐形成整体破坏。由判别矩阵的特征

1) 铁道第二勘察设计院,三峡库区重庆市云阳县宝塔滑坡群防治工程可行性研究报告,2001.11。

向量可得: 影响宝塔滑坡发育最主要的因素为地形与岩层产状的组合关系和滑坡坡度, 其累计权重为

0.645, 其次为滑坡的坡形和坡向。影响滑坡最小的地形因素为滑坡的相对高度。

表 2 典型滑坡危险度判别表

Table 2 The table of danger degree assessment of typical landslide

危险度	判别指数	危险性评价	滑坡变形阶段	采取措施方案
I	$LD > 0.70$	危险性高	坡体加速向滑动发展, 处于临滑阶段	对滑体上的居民实施搬迁, 建立预警预报系统, 避免人员伤亡和财产损失。
II	$0.4 < LD < 0.69$	危险性较高	滑坡内部的破坏处于缓慢发展阶段, 并逐渐形成整体破坏。	建立观测系统, 加强现场观测, 制定防治工程方案, 实施工程防治措施, 稳定坡体, 避免其加速破坏。
III	$LD < 0.39$	危险性低	坡体内部处于局部蠕滑阶段, 破坏处于初始阶段。	尽早采取预防措施, 防止变形扩大, 控制破坏的速度和规模。

## 4 结论

在滑坡危险度评价的许多研究方法中, 对判别因子的赋值具有一定的难度, 并往往带有一定的主观性。本文利用区域滑坡的统计资料, 将各地形判别因子在区域滑坡发育上的贡献率作为评价典型滑坡危险度的评价值, 避免了对评价因子赋值的主观性。并将典型滑坡的危险度评价与区域滑坡发育的地形规律结合起来。

利用层次分析法, 建立成对比较矩阵, 并通过判别矩阵的特征向量, 可以得到对区域和典型滑坡发育影响较大和较小的地形因素。并根据滑坡危险度判别表, 可对不同危险程度的滑坡采取有效的管理措施。

## 参考文献 (References):

[1] Qiao Jianping. Review on risk degree regionalization of landslide[J]. *Journal of Mountain Science*. 2001, 19(2): 157~ 160. [乔建平, 赵宇. 滑坡危险度区划研究述评[J]. 山地学报, 2001, 19(2): 157~ 160.]

[2] R. Lschuster & R. J. Krized. Landslide analysis and control[M]. Translated by the northwest institute of the science academe of railway department[M]. Beijing: China Railway Press, 1987. 48. [R. L. 舒斯特, R. J. 克利泽克. 滑坡分析与防治[M]. 铁道部科学研

究院西北研究所译. 北京: 中国铁道出版社, 1987. 48.]

[3] Qiao Jianping. The theory and practice of landslide alleviating disaster[M]. Beijing: Science Press. 1997. 34~ 35. [乔建平. 滑坡减灾理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 1997. 34~ 131.]

[4] Chen zisheng. A simple discussion about the vaulted and debacle rocky landslide[J]. *Research of Mountain Science*. 1991, 9(4): 231~ 235. [陈自生. 浅论拱溃型顺层岩质滑坡[J]. 山地研究(现山地学报), 1991, 9(4): 231~ 235.]

[5] A. E. Scheidegger, Ai Nanshan. The construction significance of landslide and debris flow in Wudu, Gansu Province[A]. Beijing: China Railway Press. 1988. 73~ 78. [A. E. 沙伊得格, 艾南山. 武都地区的滑坡和泥石流及其构造意义[A]. 北京: 中国铁道出版社, 1988. 73~ 78.]

[6] Qiao Jianping. Structure and shape of landslide[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*. 2002, 21(9): 1355~ 1358. [乔建平. 滑坡体结构与坡形[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(9): 1355~ 1358.]

[7] Du Ronghuan, Liu Xinmin, Yuan Jianmo, et al.. A study on landslide and debris-flow in the Reservoir Area of the Three Gorges Project[J]. Sichuan Science and Technology Press. 1990. 4: 11~ 20. [杜榕桓, 刘新民, 袁建模, 等. 长江三峡工程库区滑坡泥石流研究[M]. 四川科学技术出版社, 1990. 4: 11~ 20.]

[8] Jiang Qiyuan. Mathematical Model(the second edition)[M]. Higher Education Press. 1993. 8: 305~ 335. [姜启源. 数学模型(第二版)[M]. 高等教育出版社, 1993. 8: 305~ 335.]

[9] Wang Chenghua, Kong Jiming. The discrimination of dangerous slope causing by high-speed landslide[J]. *Journal of Engineering Geology*. 2001, 9(2) 127~ 132. [王成华, 孔纪名. 高速滑坡发生的危险斜坡判别[J]. 工程地质学报, 2001, 9(2) 127~ 132.]

# Topography Discriminance of the Assessment of Landslide Hazard Degree

FAN Xiaoyi<sup>1,2</sup>, QIAO Jianping<sup>2</sup>

(1. *Institute of Mountain Hazards and Environment of Chinese Academy of Sciences  
and Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041, China*

2. *School of Earth Science, Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

**Abstract:** In the research of the landslide hazard degree assessment, the quantification assessment of the discriminant factors is a more comparatively difficult problem. Sometimes, there are a lot of subjectivity. It has evaluated the hazard degree of the typical landslide according to the five main topography factors, including gradient, shape, aspect of slope, relative height of slope and the combination relation between landslide topography and stratum attitude, effecting on landslide development, combining to the statistic datum of the 205 landslides in the emphasis landslide sections (Yunyang-Wushan) in the area of Three Gorge Reservoir (TGR) and utilizing the topography discriminance. It has been established the discriminant matrix of the typical landslide by utilizing the Analytic Hierarchy Process (AHP) and acting the contribution rate of every topography factor, in the area of landslides development, as the evaluation value. The united eigenvector of the discriminant matrix has been acted as the weight of the discriminant factor and we can acquire the hazard degree of the typical landslide. we can administer effectively the landslide by established the table of the hazard degree assessment of the typical landslide. The research means can avoid effectively the subjectivity of evaluating the discriminant factor and bring forward the administerial measures for the landslides of the different hazard degree rank.

**Key words:** typical landslide; landslide hazard degree; topography discriminance