

# Logistic 分析法在顺层岩质滑坡稳定预测中的应用

于文静,肖诗荣,胡志强,沈 健

(三峡大学 土木与建筑学院,湖北 宜昌 443002)

**摘要:**为评价顺层岩质滑坡的稳定性,分析了影响顺层岩质滑坡稳定性的主要因素,包括地形坡度、坡面走向与岩层走向夹角、地层岩性、岩层倾角以及软弱夹层。在综合分析顺层岩质滑坡统计数据的基础上,建立了基于 Logistic 回归的顺层岩质滑坡稳定预测模型,并藉此对顺层岩质滑坡稳定性及评价因子进行了定量分析。实例验证表明,该模型预测结果与实际情况基本吻合。

**关 键 词:**空间预测; Logistic 回归; 评价因子; 顺层岩质滑坡

**中图法分类号:** P642

**文献标志码:** A

**DOI:**10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.09.013

顺层边坡是自然界中一类分布相当广泛的边坡,其中顺层岩质滑坡以其隐蔽性、突发性、高速、规模大、灾害损失大等特点成为工程界及学界关注的重点。因此开展顺层岩质滑坡空间预测预报对于防灾减灾具有十分重要的指导意义。

对滑坡灾害进行空间预测的目的是希望通过各种地质因素和外界因素的变化,建立一种可以反映滑坡危险性程度的函数关系,对滑坡的稳定性进行评价。把滑坡空间危险性程度看成是随地质因素和外界因素变化而变化的随机变量,进行多元统计分析,常用的分析方法有多元回归分析、聚类分析和判别函数分析等。

本文通过资料统计和整理,建立了含 136 个已经发生的顺层岩质滑坡以及 50 个非顺层岩质滑坡单元的数据库,并以此数据库为基础建立顺层岩质滑坡 Logistic 回归模型,分析斜坡稳定性与影响因子之间的关系,为顺层岩质滑坡灾害空间预测提供方法支持。

## 1 二元 Logistic 回归预测模型

二元 Logistic 回归是指因变量为二分类变量时的回归分析,是在一个因变量和多个自变量之间形成多

元回归关系。设因变量为  $y$ , 当其取值为 1 时表示事件发生,取值为 0 时表示事件未发生;影响  $y$  的  $n$  个自变量分别记为  $x_1, x_2, \dots, x_n$ 。假设用  $P$  表示滑坡事件发生的概率,取值范围为  $[0, 1]$ ,  $1 - P$  为滑坡不发生的可能性。当  $P$  的取值接近于 0 或 1 时,  $P$  的变化就很难捕捉,因此需要对  $P$  值进行变换。一般取  $P/(1 - P)$  的自然对数  $\ln[P/(1 - P)]$ , 即对  $P$  做 logit 变换,有  $\text{logit}P = \ln[P/(1 - P)]$ ,  $\text{logit}P$  的取值范围为  $(-\infty, +\infty)$ 。

以  $P$  为因变量建立多变量的回归方程

$$\text{logit}P = \ln\left(\frac{P}{1 - P}\right) = a + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n \quad (1)$$

可以得到

$$P = \frac{e^{a + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n}}{1 + e^{a + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n}} \quad (2)$$

式中,  $x_1, x_2, \dots, x_n$  为影响因变量结果概率的因子;  $b_1, b_2, \dots, b_n$  为回归预测模型的系数;  $a$  为常数。

概率  $P$  值作为滑坡预测指数来描述影响因子对滑坡的影响程度或者滑坡发生的可能性的,从而

收稿日期:2015-01-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41272310)

作者简介:于文静,女,硕士研究生,研究方向为地质灾害治理及预测预报。E-mail: ywj629jw@163.com

通讯作者:肖诗荣,男,副教授,主要从事地质工程教学、科研及生产工作。E-mail: xsr\_0827@qq.com

预测滑坡未来的空间分布特征。

## 2 数据来源以及顺层岩质滑坡影响因素

### 2.1 数据来源

本文采用的数据来源为根据文献资料和三峡库区地质灾害调查资料统计的已发生的 136 个顺层岩质滑坡以及 50 个非顺层岩质滑坡单元。

### 2.2 顺层岩质滑坡影响因素

顺层岩质滑坡即坡面走向、倾向与岩层走向和倾向一致或接近一致的层状结构岩体斜坡。顺层岩质滑坡的发育受地形地貌、地层岩性、地质构造以及岩体结构等地质环境的影响较大。

#### 2.2.1 地形地貌

地形地貌条件对顺层岩质滑坡的稳定性具有较大的影响,而坡高和坡角是单体滑坡地形地貌最基本的两个要素。

从图 1 对不同坡度滑坡所占滑坡总数百分率的统计结果可见,顺层岩质滑坡的坡度在  $15^{\circ} \sim 25^{\circ}$  区间最为发育, $25^{\circ} \sim 30^{\circ}$  发育程度次之。滑坡坡度区间划分时没有采用等间距的划分方式,而是对坡度集中区段细划,使坡度指标更有针对性。

图 2 是不同坡高滑坡占滑坡总数百分率的统计结果,从图中可以看出,顺层岩质滑坡的坡高在  $100 \sim 200 \text{ m}$  区间最为发育,坡高在  $200 \sim 300 \text{ m}$  区间发育程度次之,坡高小于  $100 \text{ m}$  滑坡很少发育。

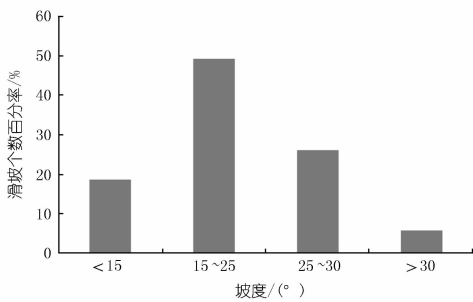


图 1 不同坡度滑坡占滑坡总数百分率统计

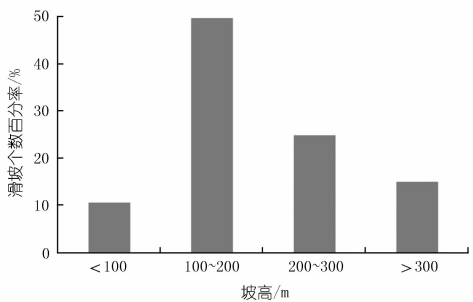


图 2 不同坡高滑坡占滑坡总数百分率统计

#### 2.2.2 地层岩性

由统计的滑坡数据来看,顺层岩质滑坡集中发育在三叠系中统巴东组、侏罗系沙溪庙组及侏罗系中下统地层中。也有少量顺层岩质滑坡发育在志留系、二叠纪、泥盆纪等地层中。滑坡与地层岩性相关统计见图 3。

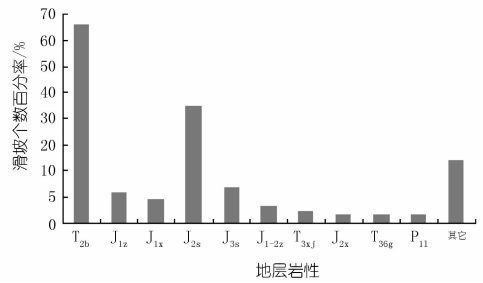


图 3 不同地层岩性占滑坡总数百分率统计

#### 2.2.3 地质构造

岩层倾角及岩层走向与滑坡走向的夹角是影响顺层岩质滑坡发育和变形破坏模式的重要构造因素。

(1) 岩层倾角大小的影响。岩层倾角的大小是影响顺层岩质滑坡的稳定重要影响因素之一。一般来说,当岩层倾角比较小时,滑坡的稳定性一般相对比较好;而当岩层倾角在  $25^{\circ}$  左右时,为滑坡提供了一定的下滑力和下滑空间,此时最易发生大型的顺层滑坡;当岩层倾角比较大时,边坡一般比较稳定。从图 4 可以看出,顺层岩质滑坡发育程度最高的是岩层倾角为  $15^{\circ} \sim 35^{\circ}$ ,尤其是  $15^{\circ} \sim 25^{\circ}$ ,而  $15^{\circ}$  以下顺层岩质滑坡最不发育。

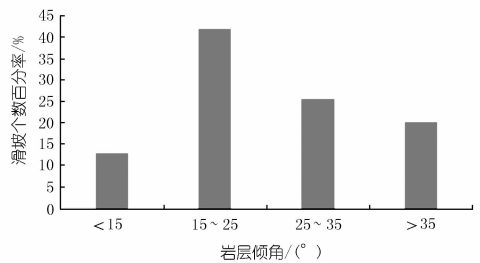


图 4 不同岩层倾角占滑坡总数百分率统计

(2) 坡面走向与岩层走向间夹角大小的影响。坡面走向与岩层走向间夹角增大会增加边坡的稳定性,且夹角越大,边坡的稳定性就越高。主要原因在于随坡面走向与岩层走向间夹角的增大,边坡滑动的约束条件增加,有效临空面变小,软弱夹层暴露宽度减小,因而发生大型滑坡的几率大大降低<sup>[1]</sup>。图 5 是岩层走向与坡面走向夹角占滑坡总数百分率的统计结果,夹角在小于  $10^{\circ}$  和  $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$  区间时顺层岩质滑坡最发育,而当夹角大于  $30^{\circ}$  时滑坡不是很发育。

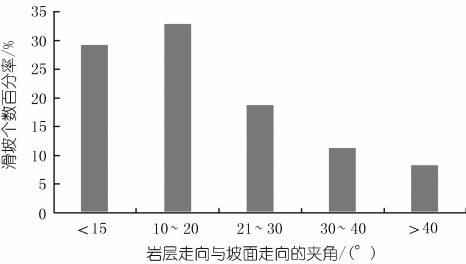


图 5 岩层走向与坡面走向夹角占滑坡总数百分率统计

3 基于 Logistic 回归模型的滑坡空间预测

3.1 选择预测变量

滑坡空间预测需要考虑多种影响因子的综合作用。本文根据上述对顺层岩质滑坡各类影响因素的分析以及前人的研究成果,初步选定滑坡高程、地形坡度、岩层走向与坡面走向的夹角、地层岩性、岩层倾角以及软弱夹层作为模型评价因子。

由于初步选定的变量具有相关性,同时不能完全满足建立数学模型的需要,有必要对变量进行筛选和变换处理<sup>[2]</sup>。上述变量多属于连续型变量,少数属于离散型。对统计的 136 个已经发生顺层岩质滑坡的连续型变量进行相关系数计算。如果变量间的相关系数较大,则在选入方程时会造成变量信息的叠加,对预测精度造成干扰。通过计算,可以看出选定的连续型变量间的相关系数都很小,都可以作为变量选入方程。表 1 为连续型变量的相关系数计算结果。

表 1 连续型变量相关系数计算结果

项目	地形 坡度	坡面走向与岩层 走向夹角	岩层 倾角	滑坡 高程
地形坡度	1.00			
坡面走向与岩层走向夹角	-0.02	1.00		
岩层倾角	0.32	0.04	1.00	
滑坡高程	-0.06	0.27	0.10	1.00

通过对预测变量的选择和进一步筛选与分析,共确定了包含滑坡高程、地形坡度、岩层走向与坡面走向的夹角、地层岩性、岩层倾角以及软弱夹层在内的 6 类预测变量,并将各种变量类型进行编码(表 2)<sup>[3]</sup>。

3.2 建立预测模型

Logistic 回归分析模型在建模过程中能够自身挑选变量,即只有对因变量贡献率达到一定程度的自变量才能进入回归模型中,对因变量没有贡献或者贡献很小的变量,最终会被剔除<sup>[4]</sup>。

将样本模型导入 SPSS 统计软件中进行二元 Logistic 回归分析,采用向前 LR 逐步似然比的方法筛选变量,进行多次迭代过程后,坡面走向与岩层走向的夹

角、倾角、软弱夹层等 3 类显著性小于 0.05 的因子,其他因子由于显著性较差,被剔除。

表 2 预测因子

因子	变量类型	变量	因子	变量类型	变量
地形坡度	<15°	哑变量 $x_1$	$J_{3a}$	哑变量	$x_{14}$
	15°~24°	哑变量 $x_2$	$J_{1-2x}$	哑变量	$x_{15}$
	25°~30°	哑变量 $x_3$	$T_{3xj}$	哑变量	$x_{16}$
	>30°	参考变量 $x_4$	其他	参考变量	$x_{17}$
坡面走向与 岩层走向夹角	<10°	哑变量 $x_5$	软弱夹层		$x_{22}$
	10°~20°	哑变量 $x_6$	坡高	<100	哑变量 $x_{23}$
	20°~30°	哑变量 $x_7$		100~200	哑变量 $x_{24}$
	30°~40°	哑变量 $x_8$		200~300	哑变量 $x_{25}$
	>40°	参考变量 $x_9$		>300	参考变量 $x_{26}$
地层岩性	$T_{2b}$	哑变量 $x_{10}$	岩层倾角	<15°	哑变量 $x_{27}$
	$J_{1z}$	哑变量 $x_{11}$		15°~25°	哑变量 $x_{28}$
	$J_{1x}$	哑变量 $x_{12}$		25°~35°	哑变量 $x_{29}$
	$J_{2x}$	哑变量 $x_{13}$		>35°	参考变量 $x_{30}$

表 3 预测变量的 Logistic 回归系数

影响因子	变量	回归 系数	显著 性	影响因子	变量	回归 系数	显著 性		
坡面走向与	<10°	$x_5$	1.865	0.001	倾角	<15°	$x_{23}$	-0.757	0.021
岩层走向夹角	10° ~ 20°	$x_6$	2.038	0.001		15° ~ 25°	$x_{24}$	1.026	0.006
	21° ~ 30°	$x_7$	2.793	0.000		25° ~ 35°	$x_{25}$	-0.097	0.000
	30° ~ 40°	$x_8$	1.821	0.013	软弱夹层		$x_{18}$	11.133	0.000
常数项			-1.051	0.047					

由各评价因子的回归系数可以看出,影响顺层岩质滑坡发育的主要因素依次为软弱夹层、0°~30°的坡面走向与岩层走向夹角、15°~25°的倾角。

根据表 3,得到顺层岩质滑坡回归预测模型为

$$P_i = \frac{e^{1.865x_5 + 2.038x_6 + \cdots - 0.097x_{25} - 1.051}}{1 + e^{1.865x_5 + 2.038x_6 + \cdots - 0.097x_{25} - 1.051}} \quad (3)$$

4 工程实例及模型检验

为了对顺层岩质滑坡回归预测模型进行检验和验证,本文选取三峡库区奉节县安坪乡一段顺层岸坡进行实例分析。

奉节县位于重庆市东部,长江三峡的西端,东邻巫山县,南界湖北省恩施市,西连云阳县,北接巫溪县,地跨东经 109°1'17"~109°45'58",北纬 30°29'19"~31°22'33"。

根据顺层岩质滑坡回归预测模型,将统计得到的安坪乡斜坡稳定影响因子代入(3)式,得到各个斜坡单元的回归预测值。

对于单体斜坡单元的易发性评价,目前采用最多的是四级和五级划分,本文对单体斜坡单元回归预测值采取等距法划分,以 0.20 为公差进行五级划分(见

表 4)。

表 5 为安坪乡 23 个斜坡单元回归预测值(斜坡单元分布见图 6),其中已知为顺层岩质滑坡斜坡单元有 11 个。根据收集的文献资料,这些已知为滑坡的斜坡单元具有极易产生顺层岩质滑坡的地形地质条件,在降雨、库水位升降以及人类工程活动的影响下,这些滑坡有可能产生局部变形甚至整体失稳破坏,其回归预测值均大于 0.8,与实际情况基本相符。12 个预测斜坡单元中有 3 个预测值大于 0.8,为潜在滑坡;有 2 个斜坡预测值小于 0.25,发生滑坡的可能性较小;其余为中高预测值。预测检验表明,本滑坡预测模型的可靠性较好。

表 4 单体斜坡易发性分级及特点

易发度	易发度分级	斜坡单元特点
0.0~0.2	极不易发	斜坡不具备产生顺层岩质滑坡的地形地貌、地层岩性等基本条件
0.2~0.4	低易发	斜坡具备偶然产生顺层岩质滑坡的地形地貌、地层岩性等基本条件
0.4~0.6	中易发	斜坡具备了产生顺层岩质滑坡的地形地貌、地层岩性等基本条件
0.6~0.8	高易发	斜坡具备了易产生顺层岩质滑坡的地形地貌、地层岩性等基本条件
0.8~1.0	极高易发	斜坡具备了极易产生顺层岩质滑坡的地形地貌、地层岩性等基本条件

表 5 回归预测值

已知斜坡单元	回归预测值	预测斜坡单元	回归预测值	已知斜坡单元	回归预测值	预测斜坡单元	回归预测值
2	1	1	0.863	12	0.863	17	0.494
4	0.882	3	0.858	13	0.882	18	0.241
5	0.832	6	0.728	14	0.863	19	0.141
9	1	7	0.672	16	0.672	20	0.662
10	0.882	8	0.514	23	0.858	21	0.662
11	0.863	15	0.557			22	0.843

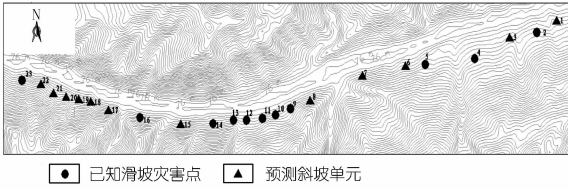


图 6 奉节县安坪乡斜坡单元及滑坡预测分布

5 结 语

(1) 对统计资料的分析表明:坡度在 15°~25°、坡高在 100~200 m 之间的顺层岩质滑坡最为发育;坡面走向与岩层走向之间的夹角在 0°~20°区间时顺层岩质滑坡最发育。

(2) 影响顺层岩质滑坡稳定性的主要因素依次为软弱夹层、坡面走向与岩层走向的夹角、岩层倾角。

(3) 基于 Logistic 回归的滑坡空间预测模型选取三峡库区奉节县安坪乡一段顺层岸坡进行实例分析,预测结果基本符合实际情况,说明该回归预测模型较为可靠。

参考文献:

[1] 白云峰,周德培,王科,等.顺层滑坡的发育环境及分布特征[J].自然灾害学报,2004,13(3):39-43.

[2] 张桂荣.基于 WEBGIS 的滑坡灾害预测预报与风险管理[D].武汉:中国地质大学,2006.

[3] 彭令,牛瑞卿,陈丽霞.GIS 支持下三峡库区秭归县滑坡灾害空间预测[J].地理研究,2004,29(10):1889-1898.

[4] 周伟.基于 Logistic 回归和 SINMAP 模型的白龙江流域滑坡危险性评价研究[D].兰州:兰州大学,2012.

(编辑:赵凤超)

Application of Logistic analysis method in stability prediction of bedding rockslides

YU Wenjing, XIAO Shirong, HU Zhiqiang, SHEN Jian

(College of Civil Engineering & Architecture, Three Gorges University, Yichang 443002, China)

**Abstract:** To evaluate the stability of bedding rockslides, the factors influencing the stability of bedding rockslides such as the landform gradient, the angle between slope strike and stratum strike, stratum lithology, stratum inclination and weak interlayer are analyzed. By comprehensive analysis of the statistics of bedding rockslides, the stability prediction model is established on the basis of Logistic regression. The stability of bedding rockslides is analyzed and the evaluation factors are studied quantitatively. The measured data show that the predicted results agree well with the practical situation.

**Key words:** spatial prediction; Logistic regression; evaluation factors; bedding rockslides