

文章编号: 1000-7598 (2011) 01-0186-07

DDA 法和 Fisher 判别法在潜在滑坡判识中的应用比较

李秀珍^{1,2}, 王成华^{1,2}, 邓宏艳²

(1. 中国科学院山地灾害与表生过程重点实验室, 成都 610041; 2. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041)

摘 要: 选择地貌特征 (包括地形坡度、沟谷切割状况、洼地封闭状况、前缘临空状况)、滑面特征 (包括滑面倾角、滑面形态、滑面阻抗比)、滑体结构和近期活动迹象 4 大类 9 个因子作为古 (老) 滑坡类潜在滑坡的判识指标, 以三峡库区和岷江上游地区相同数量的典型滑坡作为学习样本, 依据距离判别分析 (DDA) 和 Fisher 线性判别分析 (FLDA) 方法, 分别建立了两个研究区潜在滑坡的 DDA 判识模型和 FLDA 判识模型。实例分析结果表明, DDA 方法对两个研究区学习样本和测试样本的误判率均为 0, 而 FLDA 方法对两个研究区测试样本的误判率分别为 5.56% 和 11.11%, 对学习样本的错判率分别为 11.1% 和 0%。因此, 在三峡库区和岷江上游地区潜在滑坡的判识中, DDA 法比 FLDA 法判识准确性更高、适用性更强。

关 键 词: 距离判别分析法; Fisher 判别分析法; 潜在滑坡; 判识指标; 判识模型

中图分类号: P 642.22

文献标识码: A

A comparison of distance and Fisher discrimination methods applied to identifying potential landslides

LI Xiu-zhen^{1,2}, WANG Cheng-hua^{1,2}, DENG Hong-yan²

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Processes, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;

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

Abstract: In view of old landslides, four kinds of indices including nine secondary factors, i.e. landform characters, slip surface characters, landslide body structures and recent activities signs, were chosen as the discrimination indices for potential landslides. According to discriminant analysis theories, distance discriminant analysis (DDA) models and Fisher liner discriminant analysis (FLDA) models were respectively built for potential landslides in the Three Gorges Reservoir and the upper Minjiang River areas based on the same number of training samples. The results show the error rates of DDA method were both 0% for testing and training samples, while the error rates of FLDA method were respectively 11.1% and 0% for testing samples and 5.56% and 11.11% for training sample in the two study areas. So, DDA method has much higher prediction accuracy than that of FLDA method for discrimination of potential landslides in the two study areas.

Key words: distance discriminant analysis; Fisher liner discrimination method; potential landslides; discrimination index; discrimination model

1 引 言

潜在滑坡是指具备滑坡发生的条件, 已有一些微量的蠕动和变形, 但尚未发生明显整体移动的斜坡岩土体, 在自然的、人为的或综合因素的作用下, 有演变为滑坡灾害趋势的坡体。潜在滑坡因其具有隐蔽性, 不仅危害严重, 而且数量巨大。如, 在长

达 2 000 余公里的三峡库区需要提出对策或治理的潜在滑坡约有 7 000 余处, 其中, 直接威胁移民城镇迁建而必须治理的潜在滑坡约 1 100 余处。

潜在滑坡的判识是滑坡防灾减灾中最根本、最基础的工作。目前, 已有的潜在滑坡判识研究成果大多集中于以地质环境特征为基础的定性分析和简单的定量判断及初步的遥感判译^[1-5]。近年来, 国

收稿日期: 2009-08-03

基金项目: 中科院知识创新工程重要方向项目 (No. KZCX2-YW-Q03-5-2); 国家科技支撑计划项目 (No. 2006BAC10B04); 国家自然科学基金项目 (No. 40802072); 中科院山地灾害与地表过程重点实验室开放基金项目 (No. 110100L104)。

第一作者简介: 李秀珍, 女, 1975 年生, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事地质灾害评价与预测研究。E-mail: lxzljt@sina.com

内外研究者还利用航空激光扫描器和前兆信息等识别潜在滑坡等灾害^[5-6]。随着现代数学理论和计算智能分析理论的发展,数理统计和人工智能分析方法也逐渐被应用于工程地质领域的研究中^[7-9]。由于潜在滑坡具有隐蔽性,且带来的潜在经济损失巨大。因此,应该加快、加强潜在滑坡的判识研究,为基础工程建设和防灾减灾工作提供科学依据^[10]。

判别分析法是根据观测样本的若干数量特征(简称判别因子)对新获得的样本进行归类、识别,判断其所属类型的一种统计分析方法。该方法是由英国统计学家 Pearson 在 1921 年首先提出,已在自然科学和社会科学的各个领域得到了广泛的应用^[11]。尽管如此,判别分析法在潜在滑坡的判识研究中鲜有报道。本文依据统计判别分析的基本理论和方法,建立了不同研究区潜在滑坡的距离判别模型和 Fisher 判别模型,并通过工程实例的分析比较,探讨了两种判别模型在不同地区潜在滑坡判识中的适宜性和准确性。

2 DDA 法和 Fisher 判别法

距离判别分析法(distance discriminant analysis, DDA)^[11]的基本思想就是从各训练样本中提取已有的总体信息,构造一定的判别准则,从而来判断新样品属于那个总体。

2.1 DDA 法

2.1.1 基本原理^[11]

距离判别分析的基本原理是:样品和那个总体的距离最近,就判它属于那个总体。

在统计分析中,常用的距离统计量是马氏距离(Mahalanobis distance)。下面引入马氏距离的概念。

设总体 $G = (X_1, X_2, \dots, X_m)^T$ 是 m 元总体(考察 m 个指标),其中样本 $X = (x_1, x_2, \dots, x_m)^T$ 。令 $\mu_j = E(X_j)$, $j = 1, 2, \dots, m$, 则总体的均值向量 $\mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_m)^T$; 总体 $G = (X_1, X_2, \dots, X_m)^T$ 的协方差矩阵为

$$\Sigma = \text{Cov}(G) = E[(G - \mu)(G - \mu)^T] \quad (1)$$

则样本 $X = (x_1, x_2, \dots, x_m)^T$ 与总体 G 的马氏距离定义为

$$d^2(X, G) = (X - \mu)^T \Sigma^{-1} (X - \mu) \quad (2)$$

2.1.2 计算步骤^[11]

考虑 2 个总体的距离判定情况。假设有 2 个总体 G_1 、 G_2 , 从第 1 个总体中抽取 n_1 个样品, 从第 2

个总体中抽取 n_2 个样品, 每个样品观测 p 个指标。已知来自总体 $G_i (i=1, 2)$ 的训练样本为

$$X_{(t)}^{(i)} = (x_{t1}^{(i)}, x_{t2}^{(i)}, \dots, x_{tp}^{(i)})^T \quad (t=1, 2, \dots, n_i) \quad (3)$$

具体的计算步骤如下:

(1) 计算两类样本的平均值 $\bar{X}^{(i)}$

$$\bar{X}^{(i)} = \left(\frac{1}{n_i} \sum_{t=1}^{n_i} x_{t1}^{(i)}, \dots, \frac{1}{n_i} \sum_{t=1}^{n_i} x_{tp}^{(i)} \right)^T = (\bar{x}_1^{(i)}, \dots, \bar{x}_p^{(i)})^T \quad (i=1, 2) \quad (4)$$

(2) 计算两类样本的协方差阵 S_i 和总样本的协方差阵 S

$$S_i = \frac{1}{n_i - 1} \sum_{t=1}^{n_i} (X_{(t)}^{(i)} - \bar{X}^{(i)})(X_{(t)}^{(i)} - \bar{X}^{(i)})^T \quad (i=1, 2) \quad (5)$$

当 $\Sigma_1 = \Sigma_2 = \Sigma$ 时, 反映分散性的协方差矩阵 Σ 的无偏估计即为总样本的协方差阵 S :

$$S = \frac{(n_1 - 1)S_1 + (n_2 - 1)S_2}{n_1 + n_2 - 2} \quad (6)$$

(3) 建立判别函数

假设 $\Sigma_1 = \Sigma_2 = \Sigma$, 此时判断给定的待判样本 $X = (x_1, x_2, \dots, x_p)^T$ 属于哪个总体, 很直观地想法是分别计算样本 X 到 2 个总体的马氏距离, 并按距离 $d^2(X, G_1)$ 和 $d^2(X, G_2)$ 最近准则判别归类。

利用马氏距离的定义及 2 个总体协方差矩阵相等的假设, 简化马氏距离的计算公式如下:

$$\begin{aligned} d^2(X, G_i) &= (X - \bar{X}^{(i)})^T S^{-1} (X - \bar{X}^{(i)}) = \\ &= X^T S^{-1} X - 2[(S^{-1} \bar{X}^{(i)})^T X - \frac{1}{2}(\bar{X}^{(i)})^T S^{-1} \bar{X}^{(i)}] = \\ &= X^T S^{-1} X - 2Y_i(X) \quad (i=1, 2) \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $Y_i(X)$ 为 X 的线性函数。

对给定的待判样本 X , 计算其到各总体的马氏距离, 只须计算:

$$Y_i(X) = (S^{-1} \bar{X}^{(i)})^T X - \frac{1}{2}(\bar{X}^{(i)})^T S^{-1} \bar{X}^{(i)} \quad (i=1, 2) \quad (8)$$

式中: $Y_i(X)$ 即为线性判别函数。

(4) 判别准则

2 个总体的距离判别准则为

$$\begin{cases} X \in G_1 & (Y_1(X) > Y_2(X)) \\ X \in G_2 & (Y_1(X) \leq Y_2(X)) \end{cases} \quad (9)$$

(5) 判别准则的评价

考察判别准则的优良性, 可以采用以训练样本为基础的交叉确认估计法来计算误判率 η 。

$$\eta = \frac{n_{12} + n_{21}}{n_1 + n_2} \quad (10)$$

式中: n_{12} 表示将属于总体 G_1 的样本误判为总体 G_2 的个数, n_{21} 表示将属于总体 G_2 的样本误判为 G_1 的个数。

2.2 Fisher 判别法

2.2.1 基本原理^[11]

Fisher 线性判别分析(Fisher liner discriminant analysis, FLDA)其基本思想就是根据最大化类间离散度最小化类内离散度(即各总体的方差尽可能小, 不同总体均值之间的差距尽可能大)的原则, 确定原始向量的投影方向, 使训练样本投影到该方向时各类之间最大程度地分离, 从而达到正确分类的目的。

2.2.2 计算步骤^[11]

假设有 2 个总体 G_1 、 G_2 , 从第 1 个总体中抽取 n_1 个样品, 从第 2 个总体中抽取 n_2 个样品, 每个样品观测 p 个指标。

Fisher 线性判别方法的具体计算步骤如下:

(1) 计算两类样本的平均值 $\bar{X}^{(i)}$ 同公式 (4)

(2) 计算两类样本的协差阵 S_i 和总样本的协差阵 S , 同公式 (5)、(6)。

(3) 建立判别函数

最优判别函数的系数 $C_1, C_2, \dots, C_p$ 可通过下式求得:

$$\begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \dots \\ C_p \end{bmatrix} = S^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \bar{x}_1^{(1)} - \bar{x}_1^{(2)} \\ \bar{x}_2^{(1)} - \bar{x}_2^{(2)} \\ \dots \\ \bar{x}_p^{(1)} - \bar{x}_p^{(2)} \end{bmatrix} \quad (11)$$

(4) 计算判别临界值 y_0

在两总体先验概率相等的假设下, 一般常取 Y_0 为 $\bar{Y}^{(1)}$ 和 $\bar{Y}^{(2)}$ 的加权平均值, 即:

$$Y_0 = \frac{n_1 \bar{Y}^{(1)} + n_2 \bar{Y}^{(2)}}{n_1 + n_2} \quad (12)$$

其中: $\bar{Y}^{(1)} = C_1 \bar{x}_1^{(1)} + C_2 \bar{x}_2^{(1)} + \dots + C_p \bar{x}_p^{(1)}$; $\bar{Y}^{(2)} = C_1 \bar{x}_1^{(2)} + C_2 \bar{x}_2^{(2)} + \dots + C_p \bar{x}_p^{(2)}$ 。

(5) 判别准则

对于一个新样品 $X = (x_1, x_2, \dots, x_p)'$ 代入判别函数中所得的值记为 Y , 若 $\bar{Y}^{(1)} > \bar{Y}^{(2)}$, 则建立判别标

准为

$$\begin{cases} \text{当 } Y > Y_0, \text{判 } X \in G_1 \\ \text{当 } Y < Y_0, \text{判 } X \in G_2 \\ \text{当 } Y = Y_0, \text{待判} \end{cases} \quad (13)$$

若 $\bar{Y}^{(1)} < \bar{Y}^{(2)}$, 则建立判别标准为

$$\begin{cases} \text{当 } Y < Y_0, \text{判 } X \in G_1 \\ \text{当 } Y > Y_0, \text{判 } X \in G_2 \\ \text{当 } Y = Y_0, \text{待判} \end{cases} \quad (14)$$

(6) 判别准则的评价

也可以采用以训练样本为基础的交叉确认估计法来计算误判率(见公式(10))。

3 实例分析应用

本文以古(老)滑坡类潜在滑坡为例, 采用数理统计判别方法对潜在滑坡进行判识研究。为对比各模型在不同地区潜在滑坡判识中的应用效果, 各模型均选取相同数量的学习样本和检验样本。

3.1 判识指标

对于一个斜坡要判断其是否为潜在滑坡, 首先就要分析该斜坡是否具备滑坡发生的基本条件, 即斜坡坡体本身是否具备有利于滑坡发生的地质、地貌条件。它们是滑坡发生的内因和根据的体现, 是形成潜在滑坡的必要条件。它们对于每一个滑坡的发生都是必不可少的。只有具备了这些条件, 斜坡坡体才具备滑坡的可能性。

对于古(老)滑坡, 人们习惯于认为古(老)滑坡一定会复活, 工程建设要避而远之。然而事实上, 并非所有的古(老)滑坡都会复活, 其复活与否(即能否形成潜在滑坡)仍然取决于滑坡目前所处的地质环境及其自身结构^[12]。

在参考文献[14]的基础上, 本文主要根据潜在滑坡孕育和形成的地质地貌等基本条件确定判识指标, 对各判识指标的定量化按定性分析结果(级别)赋值, 可按从不利至有利依次赋值 1、0.5、0 (如表 1 所示)。

对定性指标的量化是在综合分析判识指标对滑坡发生影响程度的基础上, 按定性分析结果(级别)赋予量化值, 一般遵循这样一个原则: 越容易发生滑坡, 则量化值越大, 为消除各判识因子量纲和数量级不同所带来的影响, 可以对各指标数据进行极值化处理, 也可以按照其所属级别赋予量化值。

表 1 古(老)滑坡类潜在滑坡判识指标^[13]
Table 1 Discrimination indices for potential landslides aiming at ancient (old) landslides^[13]

一级指标	二级指标	不利	一般	有利
	坡面平均坡度	$\geq 30^\circ$	$10 \sim 30^\circ$	$\leq 10^\circ$
地貌特征	前缘临空面状况	临空高 >50 m, 临空坡度 $\geq 30^\circ$	临空高 $20 \sim 50$ m, 坡度 $15 \sim 30^\circ$	临空高 <20 m, 坡度小于 15°
	沟谷切割深度	未切至滑床	接近滑床	已切至滑床
	洼地封闭状况 (或地下水补给条件)	封闭洼地 (好)	半封闭洼地 (中)	无洼地 (差)
	滑面平均倾角	$\geq 30^\circ$	$10 \sim 30^\circ$	$\leq 10^\circ$
滑面特征	滑动面形态	平面	椅状	起伏不平
	滑面阻抗比	≤ 0.3	$0.3 \sim 0.5$	≥ 0.5
	滑体结构	散体结构	碎裂结构	块裂结构
	近期活动迹象	明显变形	局部变形	未变形
	量化值	1	0.5	0

3.2 三峡库区潜在滑坡判识模型

以文献[14]中详细研究的三峡库区典型滑坡为例,选取 18 个滑坡作为学习样本,其中 6 个为潜在滑坡样本(1 类总体),12 个为稳定滑坡样本(2 类总体),并以最后的 9 个滑坡样本作为待判样本进行判识检验。以地形坡度、沟谷切割状况等 9 个因子作为判识指标,分别建立三峡库区潜在滑坡的 DDA 判识模型和 Fisher 判识模型。

三峡库区潜在滑坡的 DDA 判识模型:

$$Y_1(X) = 0.437 \ 2x_1 - 1.460 \ 3x_2 + 54.400 \ 3x_3 + 48.449 \ 5x_4 - 8.912 \ 4x_5 + 137.031 \ 8x_6 + 61.277 \ 7x_7 - 12.265 \ 4x_8 + 4.136 \ 0x_9 - 78.862 \ 8$$

$$Y_2(X) = -27.374 \ 6x_1 + 6.032 \ 6x_2 + 59.189 \ 4x_3 + 52.167 \ 8x_4 - 9.442 \ 8x_5 + 153.825 \ 2x_6 + 63.925 \ 9x_7 - 11.779 \ 1x_8 + 2.166 \ 3x_9 - 78.993 \ 4$$

将待判样本的各指标值代入上述两式,再根据以下判别准则进行判别:

$$\left. \begin{aligned} X \in \text{稳定滑坡} & \quad (Y_1(X) > Y_2(X)) \\ X \in \text{潜在滑坡} & \quad (Y_1(X) \leq Y_2(X)) \end{aligned} \right\}$$

三峡库区潜在滑坡的 Fisher 判识模型:

$$Y(X) = 1.738 \ 2x_1 - 0.468 \ 3x_2 - 0.299 \ 3x_3 - 0.232 \ 4x_4 + 0.033 \ 2x_5 - 1.049 \ 6x_6 - 0.165 \ 5x_7 - 0.030 \ 4x_8 + 0.123 \ 1x_9$$

$$\text{判别临界值 } Y_0 = \frac{n_1 \bar{Y}^{(1)} + n_2 \bar{Y}^{(2)}}{n_1 + n_2} = -0.182 \ 5$$

由于 $\bar{Y}^{(1)} = 0.514 \ 8 > \bar{Y}^{(2)} = -0.531 \ 1$, 该判识模型的判别准则为

$$\left\{ \begin{aligned} & \text{当 } Y > -0.182 \ 5, \text{ 判 } X \in \text{潜在滑坡} \\ & \text{当 } Y < -0.182 \ 5, \text{ 判 } X \in \text{稳定滑坡} \\ & \text{当 } Y = -0.182 \ 5, \text{ 待判} \end{aligned} \right.$$

3.3 岷江上游地区潜在滑坡判识模型

以文献[15]中详细研究的典型滑坡为例。选取前 18 个滑坡作为学习样本,其中 6 个潜在滑坡样本,即不稳定滑坡(1 类总体),12 个稳定滑坡样本(2 类总体),以最后的 9 个滑坡样本作为待判样本进行判识检验。并以地形坡度、沟谷切割状况等 9 个因子作为潜在滑坡的判识指标,分别建立岷江上游地区潜在滑坡的 DDA 判识模型和 Fisher 判识模型。

岷江上游地区潜在滑坡的 DDA 判识模型:

$$Y_1(x) = -4.846 \ 6x_1 - 0.137 \ 7x_2 + 0.114 \ 6x_3 + 10.782 \ 9x_4 + 4.664 \ 8x_5 - 0.709 \ 4x_6 + 0.618 \ 6x_7 + 1.795 \ 8x_8 + 23.826 \ 6x_9 - 12.607 \ 3$$

$$Y_2(x) = 2.942 \ 6x_1 - 5.236 \ 4x_2 + 0.143 \ 7x_3 + 10.018 \ 3x_4 + 3.056 \ 6x_5 + 5.171 \ 5x_6 + 1.584 \ 4x_7 + 4.478 \ 7x_8 - 2.890 \ 5x_9 - 2.768 \ 2$$

岷江上游地区潜在滑坡的 Fisher 判识模型:

$$Y(X) = -0.486 \ 8x_1 + 0.318 \ 7x_2 - 0.001 \ 8x_3 + 0.047 \ 8x_4 + 0.100 \ 5x_5 - 0.367 \ 6x_6 - 0.060 \ 4x_7 - 0.167 \ 7x_8 + 1.669 \ 8x_9$$

$$\text{判别临界值 } Y_0 = \frac{n_1 \bar{Y}^{(1)} + n_2 \bar{Y}^{(2)}}{n_1 + n_2} = -0.442 \ 9$$

由于 $\bar{Y}^{(1)} = 1.131 \ 0 > \bar{Y}^{(2)} = 0.098 \ 9$, 该判识模型的判别标准为

$$\left\{ \begin{aligned} & \text{当 } Y > -0.442 \ 9, \text{ 判 } X \in \text{潜在滑坡} \\ & \text{当 } Y < -0.442 \ 9, \text{ 判 } X \in \text{稳定滑坡} \\ & \text{当 } Y = -0.515 \ 8, \text{ 待判} \end{aligned} \right.$$

3.4 判识模型计算结果比较

根据上述所建的 DDA 模型和 Fisher 模型,分别对三峡库区和岷江上游汶川—较场段的潜在滑坡进行判识,结果如表 2、3 所示。此外,根据式(10),可计算各地区不同判识模型对学习样本和检验样本的误判率(见表 4)。

从表 1~3 可以看出, Fisher 判别法对三峡库区

滑坡学习样本的误判率为 5.56%，检验样本的误判率为 11.1%，而在岷江上游汶川一较场段的学习样本误判率为 11.11%，检验样本的误判率为 0。因此，Fisher 判别法在岷江上游汶川一较场段潜在滑坡的判识准确度比三峡库区潜在滑坡判识的准确度更高。此外，DDA 法在两个研究区的学习样本误判率和检验样本误判率均为 0。因此，DDA 法在两个地区潜在滑坡的判识中均具有较高的精度，可以在潜在滑坡判识实践中加以推广和应用。

DDA 法和 Fisher 判别法均属于统计判别分析方法，但它们分别遵循不同的判别准则：马氏距离准则和 Fisher 准则。马氏距离准则是通过比较样品和两总体间的马氏距离确定的。而 Fisher 准则中需要确定两类总体的分界点，其分界点的选取是在假定两类总体先验概率相等的条件下，确定的一个加权平均值，具有一定的人为性。当分界点的取值与实际问题的分界点不相符时，会对判别结果产生较大的影响。

表 2 三峡库区潜在滑坡判识结果
Table 2 Identification results of potential landslides in the Three Gorges Reservoir areas

序号	名称	判识指标									判识结果		
		坡面平均坡度	前缘临空面状况	沟谷切割深度	洼地封闭状况	滑面平均倾角	滑动面形态	滑面阻抗比	滑体结构	近期活动迹象	实际结果	DDA 方法	Fisher 方法
1	流来观滑坡	0.5	1	0.5	1	0	0.5	0.5	0.5	0	稳定	稳定	稳定
2	范家坪滑坡	0	0.5	1	0	0.5	0.5	0.5	0.5	0	稳定	稳定	稳定
3	大坪滑坡	0.5	1	1	0	0	0.5	0.5	0.5	0	稳定	稳定	稳定
4	黄腊石滑坡	1	1	0.5	1	0	0.5	0.5	1	1	潜在	潜在	潜在
5	作揖沱滑坡	0.5	0.5	0.5	1	1	0.5	0.5	1	0	稳定	稳定	稳定
6	向家湾滑坡	1	1	0	1	0	0.5	0.5	0.5	0.5	潜在	潜在	潜在
7	白鹤坪滑坡	0.5	0.5	0	1	0	0.5	1	0.5	0	稳定	稳定	稳定
8	鸭浅湾滑坡	1	0.5	0	1	0	0.5	0.5	0.5	0	潜在	潜在	潜在
9	大湾滑坡	0.5	1	0.5	0	0	0.5	1	0.5	0	稳定	稳定	稳定
10	水竹园滑坡	0	0	1	1	0	0	0.5	0	0	稳定	稳定	稳定
11	鲤鱼沱滑坡	0	0.5	0	1	0	0.5	0.5	0.5	0	稳定	稳定	稳定
12	刘家屋场滑坡	0.5	0.5	1	0.5	0	0.5	0	0.5	0	稳定	稳定	稳定
13	关庙沱滑坡	0.5	1	0.5	0.5	0	0.5	0.5	0.5	1	稳定	稳定	稳定
14 *	白衣庵滑坡	0.5	0.5	0	1	0	0.5	0.5	1	0.5	稳定	稳定	潜在
15	茭草沱滑坡	1	0.5	0.5	1	0	0.5	0.5	1	0	潜在	潜在	潜在
16	百换坪滑坡	0.5	0.5	1	1	0	0.5	0	0.5	0	稳定	稳定	稳定
17	三蹬子滑坡	1	0.5	0.5	1	0	0.5	0.5	1	0	潜在	潜在	潜在
18	云阳西城滑坡	1	0.5	0.5	1	0	0.5	0.5	0.5	1	稳定	稳定	稳定
19	太白岩滑坡	0	0.5	1	1	0.5	0.5	1	0.5	0	稳定	稳定	稳定
20	吊岸坪滑坡	0	0.5	0.5	1	0.5	0.5	0.5	0	0	稳定	稳定	稳定
21	后槽滑坡	0.5	0.5	0	1	0	0.5	0.5	0.5	0.5	稳定	稳定	稳定
22	猫须子滑坡	0.5	0.5	0	1	1	0.5	1	0.5	0.5	稳定	稳定	稳定
23	龙王庙滑坡	1	0.5	0.5	1	0	0.5	0.5	0.5	1	潜在	潜在	潜在
24	陈家吊屋滑坡	0	0.5	1	0	0.5	0.5	0	0	0	稳定	稳定	稳定
25 *	坝脚滑坡	0	0	0.5	1	0	0	1	0.5	0.5	稳定	稳定	潜在
26	桃园滑坡	0	0	0	1	1	0	1	0.5	0.5	稳定	稳定	稳定
27	重钢高炉滑坡	0	0	0	1	0	0	0.5	0	0.5	稳定	稳定	稳定

注：“*”表示误判样本。

表 3 岷江上游汶川—较场段潜在滑坡判识结果

Table 3 Identification results of potential landslides in Wenchuan-Jiaochang section of upstream of Minjiang River

序号	名称	判识指标									判识结果		
		坡面平均坡度	前缘临空面状况	沟谷切割深度	洼地封闭状况	滑面平均倾角	滑动面形态	滑面阻抗比	滑体结构	近期活动迹象	实际结果	DDA 方法	Fisher 方法
1	青都坡滑坡	1	1	0	1	1	1	1	0.5	1	潜在	潜在	潜在
2	青都坡上游滑坡	0	1	0	0	0	1	0	0	0	稳定	稳定	稳定
3	扣山滑坡	0	1	0.5	0.5	0	0	0	1	0	稳定	稳定	稳定
4*	青坡滑坡	0.5	1	0	0	0.5	0	0.5	0.5	0.5	稳定	稳定	潜在
5	文镇古滑坡	0	1	0	0	0	0	0	1	0	稳定	稳定	稳定
6	苏村滑坡	0.5	1	0	0	0	1	0.5	0.5	0.5	稳定	稳定	稳定
7	石坪滑坡	0.5	1	0	0.5	0.5	1	1	0.5	1	潜在	潜在	潜在
8	凤尾坪滑坡	0	1	0	0	0	0	0	0	0	稳定	稳定	稳定
9	向阳坪滑坡	0.5	0	0	1	0.5	1	0.5	0.5	1	潜在	潜在	潜在
10	周场坪滑坡	1	0	0	1	1	1	1	1	1	潜在	潜在	潜在
11*	日瓦查滑坡	0.5	0	0	1	1	1	1	1	1	潜在	潜在	稳定
12	半坡滑坡	0.5	1	0	1	0.5	1	1	0.5	0.5	稳定	稳定	稳定
13	瓦窑坪西南滑坡	0	1	0	0	0.5	0.5	1	0	0	稳定	稳定	稳定
14	瓦窑坪滑坡	0.5	1	0	0	0.5	0	0	0	0	稳定	稳定	稳定
15	荞面沟滑坡	0.5	0.5	0	0.5	1	1	0.5	0.5	0.5	稳定	稳定	稳定
16	踏水墩西北滑坡	0.5	0.5	0	0.5	0.5	1	0.5	0.5	0.5	稳定	稳定	稳定
17	燕儿岩滑坡	1	1	0	1	1	1	1	1	1	潜在	潜在	潜在
18	燕儿岩对岸滑坡	0.5	1	0	0.5	0.5	1	0.5	0.5	0.5	稳定	稳定	稳定
19	红岩村滑坡	1	1	0	1	1	1	1	0.5	1	潜在	潜在	潜在
20	峨儿寨北侧滑坡	0.5	0.5	0	0.5	0.5	1	0.5	0.5	0.5	稳定	稳定	稳定
21	小沙湾对岸滑坡	0.5	0.5	0	0.5	0.5	1	0.5	0.5	0.5	稳定	稳定	稳定
22	花红园滑坡	1	1	0	0.5	1	1	1	0.5	1	潜在	潜在	潜在
23	擦耳岩滑坡	1	1	0	0.5	1	1	1	0.5	0.5	稳定	稳定	稳定
24	水草坪滑坡	1	1	0	0.5	0.5	1	1	1	1	潜在	潜在	潜在
25	窝窝店滑坡	1	1	0	1	1	1	1	1	0.5	稳定	稳定	稳定
26	野鸡坪滑坡	1	1	0	1	1	1	1	1	0.5	稳定	稳定	稳定
27	沙坝下游处滑坡	0.5	0	0	0.5	1	1	1	1	0.5	稳定	稳定	稳定

注：“*”表示误判样本。

表 4 潜在滑坡判识模型的误判率比较

Table 4 Comparison between error rates of discrimination models of potential landslides by different methods

研究区	DDA 方法		FLDA 方法	
	学习样本	检验样本	学习样本	检验样本
	误判率	误判率	误判率/%	误判率/%
三峡库区	0	0	5.56	11.1
岷江上游汶川—较场段	0	0	11.11	0

4 结 语

潜在滑坡的判识是一个非常复杂的问题，本文采用数理统计分析中的距离判别方法和 Fisher 判别方法，选取地貌特征、滑面特征、滑体结构和近期活动迹象 4 大类 9 个二级指标作为古（老）滑坡类潜在滑坡的判识指标，并依据三峡库区和岷江上游汶川—较场段两个不同研究区的典型滑坡资料，建立了不同研究区潜在滑坡的 DDA 判识模型和

FLDA 判识模型。实例分析结果表明，FLDA 判别法更适宜于岷江上游地区潜在滑坡的判识，而 DDA 法在两个研究区均具有较高的判识准确性。

由于数理统计判别分析方法具有应用简单、快速和准确的特点，可以为潜在滑坡的判识提供一条新的途径。然此类方法的判识准确性直接受潜在滑坡样本数量及质量的影响。因此，在今后的工作中，基于潜在滑坡孕育和形成机制研究的基础上，针对不同类型典型潜在滑坡建立科学、合理、完备的样本库是运用此类方法提高判识准确性的关键。

参 考 文 献

[1] 徐邦栋. 滑坡分析与防治[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2001.

[2] 邵铁全, 彭建兵, 刘云焕, 等. 滑坡灾害超前预判技术研究[J]. 工程地质学报, 2007, 15(4): 564—568.

- SHAO Tie-quan, PENG Jian-bing, LIU Yun-huan, et al. The technique for pre-estimation geological hazard of landslide[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2007, 15(4): 564—568.
- [3] 何满潮, 武雄, 鹿粗, 等. “滑坡岩体”鉴别的试验方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(4): 630—632.
- HE Man-chao, WU Xiong, LU Cu, et al. Research on experimental method for identification of rock body within sliding masses of landslide[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(4): 630—632.
- [4] SCHUSTER R L, KRIZEK R J. 滑坡的分析与防治[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.
- [5] GHIROTTI M, EDOARDO S. The importance of geological and geomorphological factors in the identification of the ancient vaiont landslide[J]. **Landslides from Massive Rock Slope Failure**, 2006, 395—406.
- [6] CHIGIRA M, DUAN F, YAGI H, et al. Using an airborne laser scanner for the identification of shallow landslides and susceptibility assessment in an area of ignimbrite overlain by permeable pyroclastics[J]. **Landslides**, 2004, (1): 203—209.
- [7] 宫凤强, 李夕兵. 距离判别分析法在岩体质量等级分类中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(1): 190—194.
- GONG Feng-qiang, LI Xi-bin. Application of distance discriminant analysis method to classification of engineering quality of rock masses[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(1): 190—194.
- [8] 薛新华, 张我华, 刘红军. 基于 SOFM 神经网络的边坡稳定性评价[J]. 岩土力学, 2008, 29(8): 2236—2240.
- XUE Xin-hua, ZHANG Wo-hua, LIU Hong-jun. Evaluation of slope stability based on SOFM neural network[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(8): 2236—2240.
- [9] 谷琼, 蔡之华, 朱莉, 等. 基于 PCA-GEP 算法的边坡稳定性预测[J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 757—761, 768.
- GU Qiong, CAI Zhi-hua, ZHU Li, et al. Slope stability prediction based on PCA-GEP algorithm[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(3): 757—761, 768.
- [10] 殷跃平. 中国地质灾害减灾战略初步研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004, 15(2): 1—8.
- YIN Yue-ping. Initial study on the hazard-relief strategy of geological hazard in China[J]. **The Chinese Journal of Geological Hazard and Control**, 2004, 15(2): 1—8.
- [11] 于秀林. 多元统计分析[M]. 北京: 中国统计出版社, 1999.
- [12] 殷坤龙. 滑坡预测的若干问题[J]. 地质科技情报, 1986, 5(2): 50—57.
- YIN Kun-long. Some problems of landslide prediction[J]. **Geological Science and Technology Information**, 1986, 5(2): 50—57.
- [13] 李秀珍, 王成华, 宋刚. 基于 Fisher 判别分析法的潜在滑坡判别模型及其应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2009, 20(4): 23—26.
- LI Xiu-zhen, WANG Cheng-hua, SONG Gang. Potential landslide identification model based on Fisher discrimination analysis method and its application[J]. **The Chinese Journal of Geological Hazard and Control**, 2009, 20(4): 23—26.
- [14] 夏元友. 系统加权聚类法及其在滑坡稳定性预测中的应用[J]. 自然灾害学报, 1997, 6(3): 85—90.
- XIA Yuan-you. A hierarchical weighted clustering method and its application to predicting landslide stability[J]. **Journal of Natural Disasters**, 1997, 6 (3): 85—90.
- [15] 蒋良文, 王士天, 刘汉超, 等. 岷江上游汶川—较场段滑坡稳定性的神经网络评判及其堵江可能性浅析[J]. 山地学报, 2000, 18(6): 547—553.
- JIANG Liang-wen, WANG Shi-tian, LIU Han-chao, et al. Evaluation and prediction on stability of landslides in method of nerve network analysis and the possibility of damming river in Wenchuan-Jiaochang section of upstream of Minjiang River[J]. **Journal of Mountain Science**, 2000, 18(6): 547—553.