

文章编号: 1000-582X(2012)02-128-07

中小型滑坡隐患点状态判别分析法及结果分析

吴越¹, 陆新¹, 刘东升², 朱建凯¹

(1. 后勤工程学院 建筑工程系, 重庆 400041; 2. 重庆市地质矿产勘查开发局, 重庆 400039)

摘要: 针对中小型滑坡灾害的特点, 比较了各种稳定性评估方法的优缺点, 得出工程类比法更加符合中小型滑坡灾害隐患点状态评估的现状。为此, 将一种多元统计分析的判别函数法应用到滑坡灾害隐患点状态的评估中, 建立了一种以历史资料为基础的工程类比法。首先确定了中小型滑坡灾害影响因素, 根据历史资料分析了影响因素指标与稳定性的相关性然后将稳定性作为多维统计变量, 投影到一维直线上, 使得由不同稳定性总体产生的投影点尽可能分开, 再利用距离判别法来建立判别准则。以重庆市武隆为例, 进行实际评估, 并验证了该方法的正确率和适用范围, 得出该方法作为一种定性评估方法具有一定的实用性, 适用于重庆市或具有类似地质环境的地区。

关键词: 滑坡灾害; 稳定性评估; Fisher 判别函数

中图分类号: TU443

文献标志码: A

Stability assessment method for small and medium potential landslides and results analysis

WU Yue¹, LU Xin¹, LIU Dong-Sheng², ZHU Jiang-kai¹

(1. Department of Civil Engineering, Logistical Engineering University of PLA, Chongqing 400041, P. R. China; 2. Chongqing Bureau of Geology and Minerals Exploration, Chongqing 400039, P. R. China)

Abstract: Small and medium landslides are widely distributed, the prediction mainly relies on the monitoring and controlling systems executed by the masses. The advantages and disadvantages of various stability assessment methods are compared. The engineering analogy method accords with the requirements for small and medium landslide assessment. A method is illustrated based on Fisher discriminant function to cope with the small and medium potential landslide stability assessment. The impact factors of landslides is explored with the historical data. The stability is taken as a multi-dimensional statistical variable and project into one-dimensional straight line. Distance discriminant method is used to construct a classification criterion. The applicability of this method is explored, and assessed the landslides in Chongqing Wulong by this method. The results show that accuracy of this method is about eighty percent. This method is suitable for the city of Chongqing or other areas with the similar geological environment.

Key words: landslides; stability assessment; fisher discriminant function

收稿日期: 2011-08-09

基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项经费资助项目(200811024)

作者简介: 吴越(1981-), 男, 后勤工程学院博士, 主要从事地质灾害风险评估, (E-mail) wuyue_linyi@163.com。

滑坡灾害是一种常见的自然灾害,其威胁仅次于地震灾害^[1]。尤其是我国西南山区,滑坡灾害频发,给社会经济和公共安全造成了巨大损失和严重威胁。滑坡灾害险情按威胁程度分为小型、中型、大型和特大型。其中中小型滑坡灾害占总灾害数的绝大部分。随着城市化建设不断向山区延伸和极端气候的影响,地质灾害具有不可避免性,但采取有效的防灾减灾措施,可以大大降低灾害的损失和伤亡^[2]。灾害隐患点稳定性评估就是一种预防灾害的有效措施。目前对于大型、特大型滑坡灾害采用精密的检测手段和复杂的数学力学分析,是可以实现预警的。但对于规模小、分布广、影响大的中小型滑坡灾害,很大程度依赖于群测群防体系。而且中小型滑坡灾害,尤其是小型滑坡灾害,不具有典型滑坡成灾机理。不适于采用条分法等较成熟的稳定性评价方法进行计算,多数情况下只需做出定性的评估。可见对于中小型滑坡灾害而言,需要一种实用的易于在群测群防体系中推广的定性评价方法。关于定性或半定量评价方法,有信息量法、聚类法、回归分析法等^[3-6]。

文中针对重庆市地质灾害的特点,根据滑坡灾害发生机理,分析灾害影响因素的作用,依据重庆市几年来发生滑坡灾害的历史资料,基于多元统计分析的判别函数,提出一种中小型滑坡灾害隐患点稳定状态的定性评估方法,该方法简单实用,便于在群测群防体系中推广使用。以武隆为例,验证了该方法的适用性和正确率。该方法可以比较准确地评价武隆中小型滑坡灾害隐患点的稳定状态。

1 研究区地质灾害特点

重庆市属山区地形,特殊的地理位置和城镇分布模式使得地质灾害的类型、规模以及分布规律都有其自身的特点。

据 2009 年排查结果,重庆全市 15 082 处地质灾害隐患点中灾害类型情况见图 1。由图 1 可见,

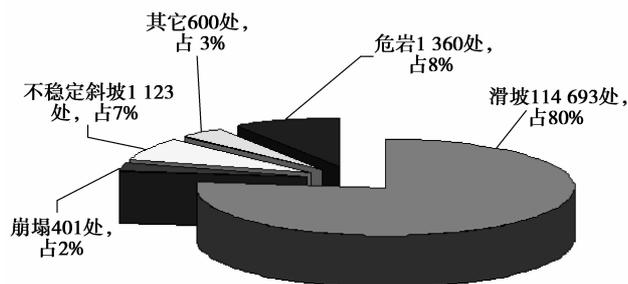


图 1 重庆市地质灾害类型饼图

重庆市地质灾害类型的特点是:以滑坡灾害为主,占 80%左右,兼有各种灾害类型,包括:滑坡、崩塌、危岩、泥石流、不稳定斜坡、地面塌陷、地裂缝、塌岸、变形体等。

根据 2009 年地质灾害隐患点排查结果,统计了各区县各类地质灾害隐患点数量,如图 2 所示。由图可分析得出重庆市地质灾害分布特点。

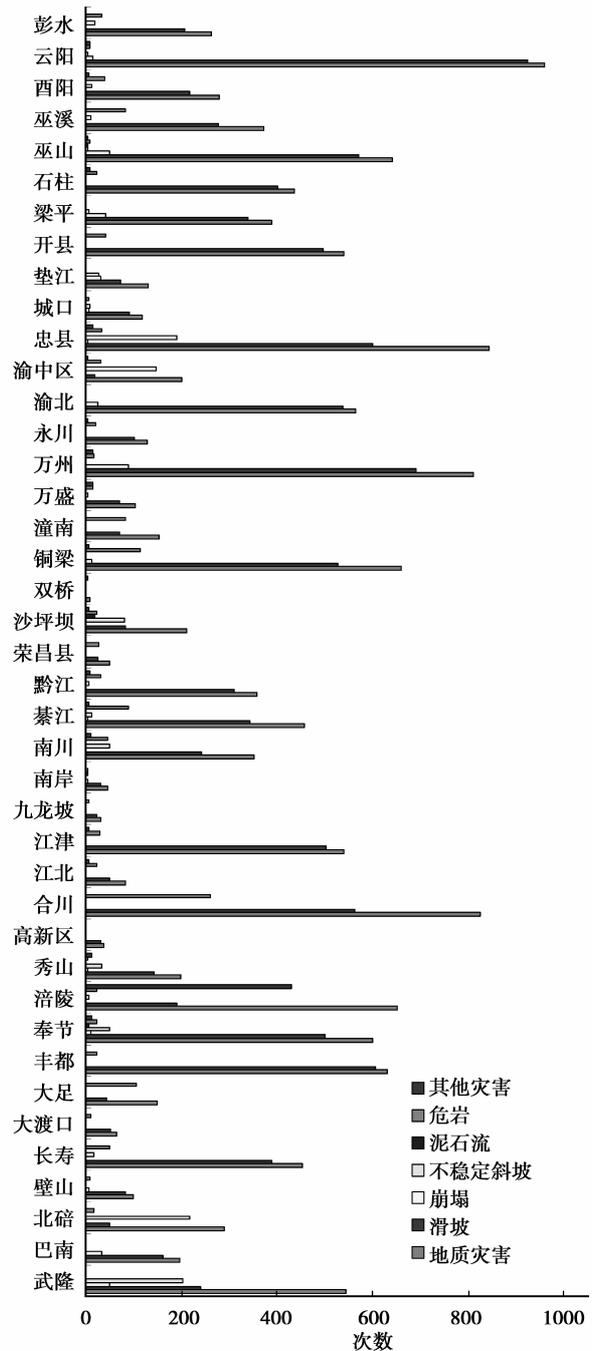


图 2 重庆市地质灾害分布情况

1)分布广。全市所辖 41 个区县均有不同数量和类型的地质灾害存在。

2) 主要分布在小城镇和农村。

3) 各区县灾害种类各有侧重, 如合川、大足、铜梁的危岩灾害较多, 丰都、奉节、万州、巫山等滑坡灾害最为严重, 而其他灾害较少。

统计了重庆市受现存的 15 082 处地质灾害隐患点威胁的人员和财产情况, 见图 3、图 4。

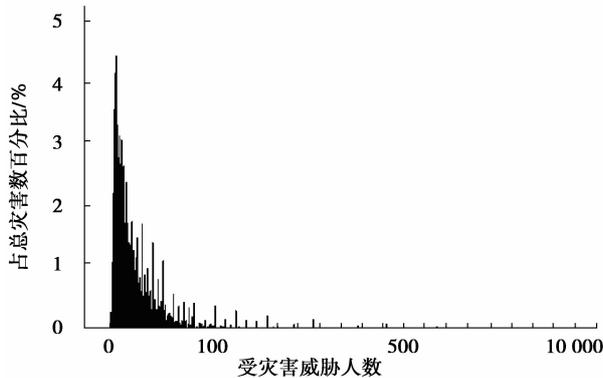


图 3 重庆市地质灾害隐患点受威胁人数

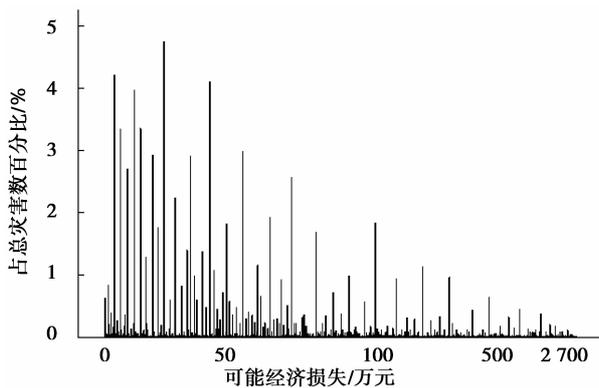


图 4 重庆市地质灾害隐患点可能经济损失

根据《重庆市地质灾害防治条例》, 受灾害威胁, 需搬迁转移人员在 100 人以下, 或可能造成经济损失 500 万元以下的, 属于小型地质灾害。由图可见受威胁人数小于 100 人的灾害数占总灾害数的 88%, 可能经济损失小于 500 万的灾害数占总灾害数的 97.3%。受灾害威胁, 需搬迁转移人员在 100 人以上 500 人以下, 或可能造成经济损失 500 万元以上 5 000 万元以下的属于中型地质灾害。由图可见受威胁人数大于 100 小于 500 的为 10.5%, 可能经济损失小于 5 000 万大于 500 万的为 2.4%。

由上可知, 重庆市地质灾害除个别大型、特大型地质灾害外, 其余 97% 左右属于中小型地质灾害, 其中主要为滑坡灾害。

综上所述, 根据重庆市地质灾害资料统计分析的结果, 总结了重庆地质灾害类型、分布模式以及危害等级的特点。可为相关部门决策提供依据, 同时也是进行地质灾害预测预报的基础。

2 基于判别分析的稳定性评价方法

根据前面的分析, 重庆市中小型滑坡灾害点多面广、规模小影响大。对分布在广大农村的中小型滑坡灾害采用大型、特大型灾害的预报手段是不现实。因此目前中小型滑坡灾害主要依靠群策群防体系。很多成功预报的案例说明, 依靠群众是一个非常有效而实用的预测预报途径。对于基层预报员而言, 急需一种简单实用的预报方法。基于以上背景, 首先对中小型滑坡灾害的影响因素进行分析, 然后提出一种基于判别分析法的实用评估方法。

2.1 中小型滑坡灾害影响因素分析

影响滑坡灾害的因素大体分为 2 大类: 孕灾环境因素和诱发因素^[7-8]。诱发因素主要是对灾害发生时间的影响, 文中暂不研究。主要针对孕灾环境因素, 研究空间预测方法。孕灾环境因素及指标如图 5 所示。

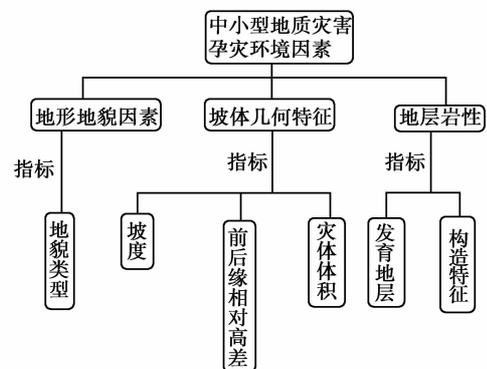


图 5 中小型地质灾害孕灾环境因素及指标

以武隆为例, 根据《地质灾害危险性评估技术规范》^[9], 研究区滑坡的特点, 将稳定性划分为: 稳定、欠稳定和不稳定 3 种状态。对现存的 150 处滑坡灾害隐患点的各种特征参数进行统计分析。其中为了便于统计处理, 将地貌类型、发育地层类型以及构造特征指标进行量化, 见表 1。(由于目前资料直接反映岩性的指标, 只有发育地层的地质年代, 该指标反映了地层沉积的程度, 某种程度上也可反映岩性。)

表 1 影响因素指标及其量化值

发育地 层类型	侏罗 系 J	三叠 系 T	二叠 系 P	石灰 系 C	泥盆 系 D	志留 系 S	奥陶 系 O
量化值	1	2	3	4	5	6	7
地貌类型	丘陵		低山		中山		
量化值	1		2		3		
岩层构 造特征	反向坡		斜交坡		顺向坡		
量化值	1		2		3		

进行成份分析,得到各因素对稳定性变异性贡献率(该指标反映了影响因素与稳定性的相关性)^[10],见表 2。

表 2 稳定性变异性分析 %

影响因素	变异性的贡献率	变异性累积贡献率
地貌类型	31.180	31.180
坡度	20.800	51.980
前后缘相对高差	16.347	68.327
灾体体积	14.453	82.780
发育地层类型	11.052	93.832
岩层构造特征	6.168	100.000

可见地貌类型和坡度对稳定性的变异性影响较其他指标稍大,岩层构造特征影响最小,其他指标的影响相差不多。

下面对各种稳定状态的影响因素指标进行统计分析。

1)地貌类型对稳定性的影响

统计了各种稳定状态地貌类型。限于篇幅只给出了不稳定和稳定 2 种状态的地貌类型情况。

由图 6 可见,处于稳定状态的灾害点中有 70% 左右是丘陵地貌,30% 左右为低山地貌,没有中山地貌。而处于不稳定状态的灾害点中丘陵所占比例减

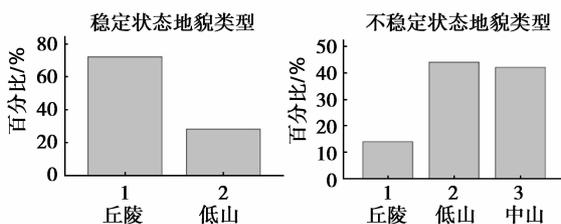


图 6 坡地貌类型

小了,只占到 15% 左右,低山和中山地貌所占比例增加,低山占 45% 左右,中山地貌则从 0 增加到 40% 左右。由此可知稳定地貌趋向于丘陵,不稳定地貌趋向于中山。

2)坡体几何特征对稳定性的影响

采用坡度、前后缘相对高差和体积作为坡体几何特征指标。以武隆为例,统计了各种稳定状态坡体几何特征参数,见表 3。可见坡度的大小与稳定性好坏成反比,而前后缘高差及灾体体积较大的稳定性好。

表 3 不稳定灾害体坡体几何特征

对应指标均值	坡度 /°	前后缘相对高差/m	灾体体积 /m ³
稳定	24.70	92.16	85.470
欠稳定	35.64	54.96	17.370
不稳定	45.70	57.06	22.506

3)发育地层对稳定性的影响

统计了各类稳定状态发育地层类型,其中处于稳定滑坡侏罗系较多,占 54% 左右,不稳定滑坡三叠系较多,占 64% 左右。另外统计了不同稳定状态的岩层构造特征(见图 7),可见稳定滑坡反向坡较多,不稳定滑坡顺向坡较多。

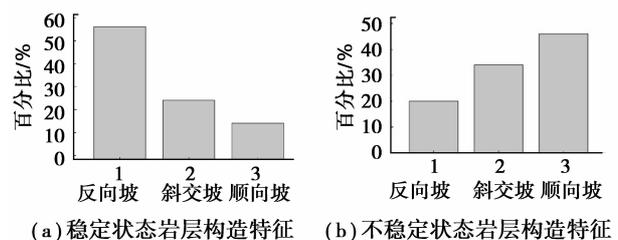


图 7 状态岩层构造特征

2.2 中小型滑坡灾害稳定性评价方法优选

由分析可知,中小型滑坡灾害受到很多因素的影响。设灾害影响因素集为 $[X_1, X_2, \dots, X_n]$,则灾害体稳定性 M ,是影响因素的函数,表示为

$$M = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (1)$$

如何确定公式(1)的具体函数关系式,就是稳定评价研究要解决的问题。也是学术研究的热点课题。可分为 3 大类方法^[11-13]:工程类比法、力学分析法、数值计算方法,在实际的评估中它们各有优缺点。

目前工程中通常采用的条分法和极限分析法等

属于力学分析法,而有限元法、有限差分法等属于数值计算方法^[13-15]。这些方法的优点是基于严格的数学力学推导,在明确灾害发生机理的情况下,评估结果是比较精确的。但目前对地质灾害发生机理认识还不足,尤其是中小型滑坡灾害,这些方法都是在大量简化和假设的基础上推导得出的。而工程类比法则不同,根据类似工程有类似结果的基本原则,基于大量历史数据进行类比分析。

可见,工程类比法更加符合中小型滑坡灾害稳定性评估的需求。但目前关于工程类比法的研究较少。下面将提出一种基于 Fisher 判别函数的稳定性评价方法。

2.3 稳定性评估的判别分析模型

判别分析是根据表明事物特点的变量值和它们所属的类别,求出判别函数。根据判别函数对未知所属类别的事物进行分类的一种分析方法。建立重庆市中小型滑坡灾害稳定性评估的判别模型。

设有 3 个总体 π_1, π_2, π_3 分别代表稳定、欠稳定和欠稳定 3 种状态灾害体的总体。 M_i 代表某个特定灾害体的稳定状态, M_i 是一个 6 维变量,可表示为

$$M_i = f(X_{1i}, X_{2i}, X_{3i}, X_{4i}, X_{5i}, X_{6i}), \quad (2)$$

式中: $X_{1i}, X_{2i}, X_{3i}, X_{4i}, X_{5i}, X_{6i}$ 分别代表 M_i 的 6 个影响因素,与图 5 中影响因素对应。灾害稳定性评估的目的是根据影响因素指标 $X_{1i}, X_{2i}, X_{3i}, X_{4i}, X_{5i}, X_{6i}$ 判别 M_i 属于 $\pi_1 - \pi_3$ 中的哪一个总体。

Fisher 函数判别法的思想是将高维空间中的点投影到一维直线 M 上,使得由不同总体产生的投影点尽可能分开,然后再利用距离判别法来建立判别准则(见图 8)^[10]。

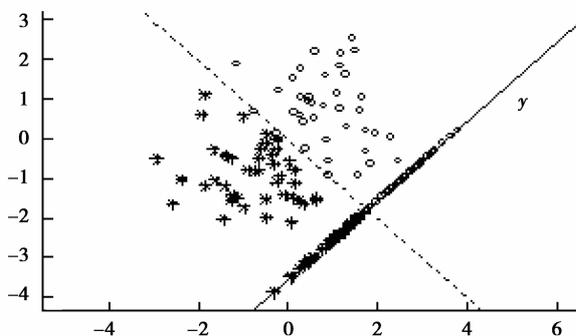


图 8 Fisher 判别原理

直线 y 是影响因素指标的线性组合,因此可以建立 Fisher 判别函数

$$y_i = \sum_{j=1}^{n=6} c_j X_j + d, \quad (3)$$

式中: y_i 为 M_i 在直线 y 上的投影; X_j 为 M_i 对应的影响因素; c_j 为 X_j 对应的系数; d 为常数。

对于多个总体判别分析,根据以上原理,建立多个判别函数,进行比较即可。

综上所述可以得出重庆市中小型滑坡灾害稳定性评估模型,模型逻辑关系见图 9。

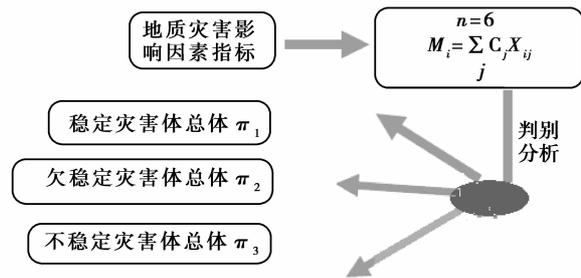


图 9 Fisher 判别法过程

根据前面的论述,基于 Fisher 判别函数的中小型滑坡灾害稳定性评估步骤如下。

1) 以灾害历史资料为基础,计算总体所对应的样本均值和方差-协方差矩阵,建立判别函数 y

$$y = (\bar{x}_1 - \bar{x}_2)^T s^{-1} x, \quad (4)$$

式中: \bar{x}_1, \bar{x}_2 是样本均值; s 是方差协方差矩阵。

2) 得到 Fisher 判别函数领域图。根据需要评估的灾害点的影响因素指标,计算出对应的判别函数值,结合 Fisher 判别函数领域图目测出该灾害点处于那种稳定状态。

3 应用分析

下面将结合实际算例,对文中提出中小型滑坡灾害评估模型的应用步骤进行说明,并对模型的正确性进行验证。以重庆武隆为例,选取 150 处典型滑坡灾害隐患点资料为样本,建立判别函数,其中各影响因素指标及其对应符号见表 4。采用 50 处稳定,50 处欠稳定,50 处不稳定样本作为训练样本。在已知某一灾害点影响因素指标的前提下,判别灾害点的稳定状态。

表 4 影响因素变量表

影响因素指标	地貌类型	坡度	前后缘相对高差	灾害体体积	发育地层类型	地层构造特征
变量	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6

根据前面总结的评估步骤,计算过程如下。

步骤 1:以灾害历史资料为基础,采用统计软件 SPSS 计算 3 种稳定状态总体的均值和方差—协方差矩阵,并得到 Fisher 判别函数系数。表 5 是计算得到的 2 个判别函数的系数。

影响因素指标	Fisher 判别函数	
	1	2
地貌类型 X_1	1.025	-0.324
坡度 X_2	0.111	0.062
前后缘相对高差 X_3	-0.001	0.004
灾体体积 X_4	-0.005	0.008
发育地层类型 X_5	-0.063	-0.385
岩层构造特征 X_6	0.420	-0.116
(常数)	-6.166	-0.879

将表 5 中参数代入式(3)可得 2 个 Fisher 判别函数:

$$y_1 = 1.025 X_1 + 0.111 X_2 - 0.001 X_3 - 0.005 X_4 - 0.063 X_5 + 0.42 X_6 - 6.166$$

$$y_2 = -0.324 X_1 + 0.062 X_2 + 0.004 X_3 + 0.008 X_4 - 0.385 X_5 - 0.116 X_6 - 0.879$$

根据以上判别函数计算各类稳定总体判别函数值,得到各类总体二维投影图以及重心位置,如图 10 所示。

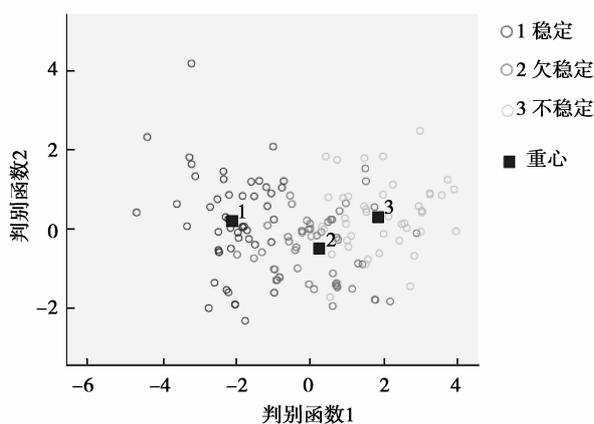


图 10 样本二维投影

步骤 2:根据前面的判别函数和投影图,得到 Fisher 判别领域图(见图 11)。图 11 中,分为 3 个区

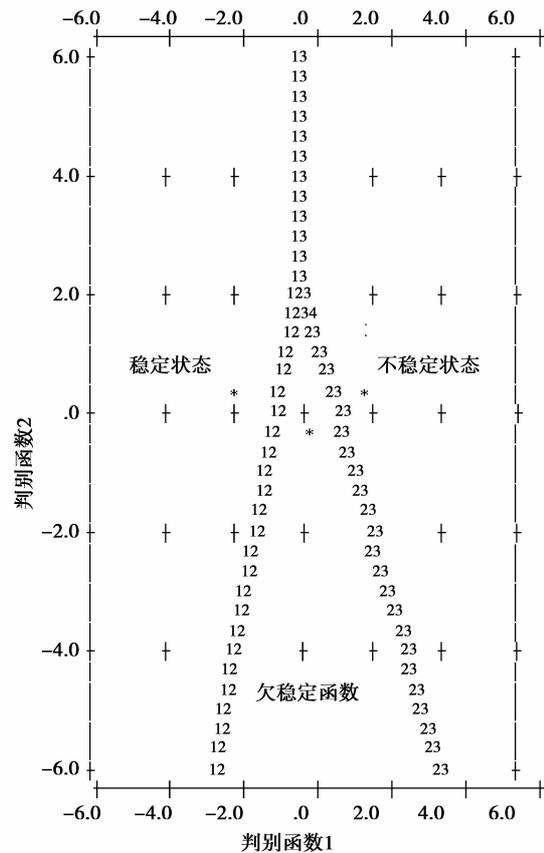


图 11 Fisher 判别领域图

域,根据实际计算得到 2 个判别函数值,对应图中的 1 个点,目测该点所在区域,就是该灾害点的稳定状态。

例如,某一灾害点影响因素指标为:丘陵地貌 ($X_1 = 1$),坡度 $X_2 = 10^0$,前后缘相对高差 $X_3 = 20$ m,灾体体积 $X_4 = 8$ m²,发育地层属三叠系 ($X_5 = 2$),岩层构造受切层坡 ($X_6 = 1$)。计算得到 $y_1 = -3.797$, $y_2 = -1.325$,根据图 11,可知该灾害点处于稳定状态。

4 结果分析

前面对方法的建立过程和应用过程进行了论述,下面将对方法的适用性和正确率进行分析。

首先以原样本为验证对象,对原 150 处训练样本稳定性进行判别,结果如表 6 所示。由表可见原样本中 50 处稳定状态的灾害点,判断结果为稳定的 48 处,正确率 96%。有 2 处被误判为欠稳定。50 处不稳定状态的点有 11 处误判为欠稳定,正确率 78%。平均正确率 84%。

表 6 原训练样本验证情况

	稳定状态	稳定	欠稳定	不稳定	合计
灾害 点数	稳定	48	2	0	50
	中间状态	4	39	7	50
	不稳定	0	11	39	50
百分 比/%	稳定	96.0	4.0	0	100
	中间状态	8.0	78.0	14.0	100
	不稳定	0	22.0	78.0	100

注:平均正确率 84.0%

选取了训练样本以外的灾害隐患点,作为验证点。其中稳定状态 10 处、欠稳定状态 10 处及不稳定状态 10 处,共 30 处训练样本以外的验证点。验证情况见表 7。表 6 和表 7 的验证情况基本相符,可见建立的判别方法,基本反映了该区域的灾害情况,可以作为该区域滑坡灾害稳定性评价的方法。

表 7 非训练样本验证情况

	稳定状态	稳定	欠稳定	不稳定	合计
灾害 点数	稳定	9	1	0	10
	欠稳定	1	7	2	10
	不稳定	0	2	8	10
百分 比/%	稳定	90.0	10.0	0	100
	欠稳定	10.0	70.0	20.0	100
	不稳定	0	20.0	80.0	100

注:平均正确率 80.0%

由表 6、表 7 还可见,没有出现将稳定误判为不稳定和将不稳定误判为稳定的情况,说明该方法虽然有一定误差,但只是对处于欠稳定状态的灾害点误差较大,而对稳定或不稳定状态的灾害点几乎没有误差。因此该方法误差的危害性较小。

需要说明的是,该方法是一种定性多元统计分析方法,正确性和适用范围很大程度取决于训练样本的代表性,因此在选择训练样本时,需要对一些明显不具代表性的数据进行筛选。

5 结 语

文中以重庆市地质灾害历史资料为基础,分析了重庆市地质灾害的现状,得出重庆市地质灾害以中小型滑坡灾害为主,具有点多、面广、规模小、危害大等特点。针对这一特点,提出了基于多元统计分析判别分析法的滑坡灾害稳定性评估方法。该方法简单易行,适合于在群测群防体系中推广。主要

结论如下。

1)总结了重庆市地质灾害的特点,类型以滑坡为主,占 80%左右,多种灾害类型并存;规模以中小型为主,占 97%左右;主要分布在广大农村和小城镇。

2)针对重庆市中小型滑坡灾害的特点,分析了目前滑坡灾害稳定性评估方法的优缺点,认为工程类比法比较符合中小型滑坡灾害稳定性评估的现状。

3)提出了一种基于判别函数的稳定性评估方法,论述了其建模过程。采用该方法进行了实际评估。通过实例验证该方法在一定区域具有适用性,正确率 80%左右。是一种实用的定性评估方法,易于在群测群防体系中推广使用。

参考文献:

- [1] 黄润秋. 20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 434-453.
HUANG RUN-QIU. Large-scale landslide and their sliding mechanisms in China since the 20th century[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 434-453.
- [2] 李东升, 刘东燕. 边坡可靠度风险评价分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2005, 16(2): 150-153.
LI DONG-SHENG, LIU DONG-YAN. Analysis of slope reliability and damage risk evaluation approach [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2005, 16(2): 150-153.
- [3] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析——原理、方法、程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [4] 张桂荣, 殷坤龙. 区域滑坡空间预测方法研究及结果分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(23): 4297-4302.
ZHANG GUI-RONG, YIN KUN-LONG. Study on spaltial prediction method for regional landslides and results analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(23): 4297-4302.
- [5] 张永兴, 胡居义, 文海家. 滑坡预测预报研究现状述评[J]. 地下空间, 2003, 23(2): 200-202.
ZHANG YONG-XING, HU JU-YI, WEN HAI-JIA. Landslide assessment method overview [J]. Underground Space, 2003, 23(2): 200-202.
- [6] DAI F C, LEE C F, NGAI Y Y. Landslide risk assessment and management: an overview [J]. Engineering Geology, 2002, 64: 65-87.
- [7] 樊晓一, 乔建平, 陈永波. 层次分析法在典型滑坡危险度评价中的应用[J]. 自然灾害学报, 2004, 13(1): 72-76.

(下转第 142 页)