

3D 遥感影像模型在古乡沟泥石流 地质灾害预警中的应用

冯雨林¹, 陈江¹, 姜琦刚², 杨利军¹

(1. 沈阳地质矿产研究所, 沈阳 110032; 2. 吉林大学, 长春 130026)

摘要: 建立灾害体的3D仿真模型,提取泥石流灾害体的特征信息;对信息进行归一化处理,并对其
进行等级划分和赋值。建立“灰色类别模型”,对古乡沟泥石流进行危险性评价。灾害体的危险性评价
结果与前人实地调查的情况基本吻合,具有较高的准确性,能够为防灾避难提供科学依据。

关键词: 遥感;3D模型;古乡沟;泥石流;灾害预警

中图分类号: P642.23 **文献标识码:** A

近年来,随着人类活动范围的扩大,地质灾害日趋频发,其危害程度也越来越严重。泥石流以其暴发突然、来势凶猛、迅速之特点,并兼有崩塌、滑坡和洪水破坏的多重作用,其危害程度比单一的崩塌、滑坡和洪水更为严重,所到之处,一切皆被摧毁。鉴于其严重的危害,中国地质调查局设立了多项灾害专题研究。

古乡沟位于西藏东南波密县古乡村境内,属帕隆藏布江中下游右岸的一级支流,即处于G318线K4 042~K4 047处,坐标位置为:E95°27.108',N29°54.594'。由于其所处的特殊地理位置,泥石流地质灾害时常发生。

泥石流,是松软松散土体和水的混合体在重力作用下沿自然坡面或沟谷坡面或压力坡流动的现象,是泥流、泥石流和水石流的总称^[1],属于土壤重力侵蚀的范畴,是由内、外地质营力共同作用于地表或地下一定深度的物质而产生的物质流动过程中的产物,易受地质、地貌、水文、气候和人类经济活动等多种因素制约^[2]。

遥感技术对地质灾害调查具有独到之处。泥石流在遥感图像上有明显的反映,尤其是在直观、形象的三维遥感图像模型上。它能够方便快捷地获取典型灾害点的大地构造、地形地貌、水系和植被等综合特征参数;有时,还可以发现一些地面地质工作所不

能或难以发现的现象,以及各种现象之间的联系,以解决一些常规地面工作方法所不能解决的问题。

1 三维遥感影像模型的建立

利用数字地形图和遥感图像数据,建立泥石流灾害体形态的三维遥感图像模型。DEM(digital elevation models 数字高程模型),是利用一个任意坐标场中大量选择的已知 X 、 Y 、 Z 的坐标点对连续地面的一个简单的统计表示,其 X 、 Y 表示二维平面坐标, Z 表示对应点的高程值。三维遥感图像模型,是在DEM的基础上建立的,它是采用纹理映射技术来实现的。所谓纹理映射就是把纹理空间的坐标系映射到多边形坐标系,将纹理图像“粘贴”于几何图形表面来增强图形的真实感的一种计算机仿真技术;这种仿真技术既能提高场景的丰富度,又不影响几何图形本身的复杂度。利用DEM和遥感影像图进行三维地形显示和分析,能够使人们对地表信息有着更加直观的了解。

生成DEM的地形数据,采用的是1:25万数字地形图,部分灾害点则是以1:10万纸质地形图为底图由人机交互矢量化而来的;映射的纹理图像,是以ETM⁺影像为主,部分典型灾害点采用的4~6 m分辨率的彩红外航片。

在映射的过程中,务必使DEM模型和纹理图

像具有统一的投影方式和相同的地理坐标,这样才能使二者完全映射在一起,来逼真地模拟地貌形态。映射过程如图1所示。

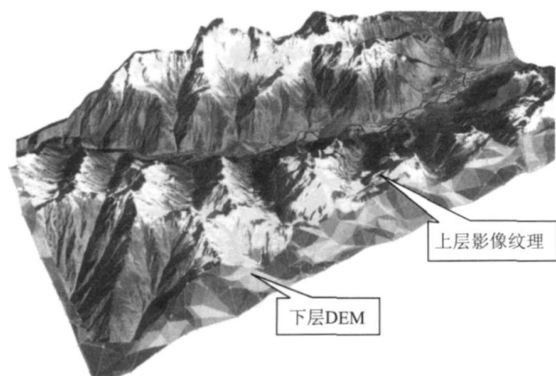


图1 纹理映射示意图

Fig.1 The sketch map of texture

2 泥石流特征信息的提取

信息提取本着一个原则:借助于3D 遥感图像模型,把注意力从灾害发生点扩大到灾害发生源区的地质环境上,提取灾害点的特征参数。

提取的方法是:基于二维影像和3D 模型,在二维平面图像上,提取相关的长度、面积和指数信息;在三维空间上,提取高程、坡度等信息。

陡峻的山坡、沟谷地形、丰富的松散固体物质和集中大量的降水是泥石流形成的3个基本条件^[3]。日本学者高桥保也提出泥石流所具备3个条件:

(1) 泥石流是泥砂、石块等固体物质与水的混合物在重力作用下而发生运动的连续体。

(2) 泥石流是一种流动现象,在运动中,其内部一面产生连续的变形,一面又以相当的速度移动。

(3) 水在泥石流中起着重要作用^[4]。泥石流在遥感影像上很容易辨认,一般标准型泥石流流域可清楚地看到3个区:形成区呈瓢形或围椅形,山坡陡峻,岩石风化严重,松散堆积物丰富,伴有小型崩塌、滑坡产生;流通区沟床较短直,纵坡较形成区段缓,但较堆积区地段陡,沟谷一般较窄,呈“V”字型;堆积区位于沟谷出口处,纵坡平缓,地形开阔,常形成洪积扇或冲积锥,洪积扇轮廓明显。古乡沟泥石流即是如此,如3D 模型图2和图3所示。

影响泥石流的因素较多,有主控因子、诱导因子和偶发因子等。下面,就以这些参数来描述泥石流特征。

2.1 泥石流控制因子

(1) 泥石流的形态特征

指物源区、流通区和堆积区各段的形态特征。



图2 古乡沟泥石流3D 遥感图像模型

Fig.2 The 3D remote Sensing image models of Guxiang gully debris flow



图3 古乡沟泥石流堆积区全貌

Fig.3 The panorama of Guxiang gully debris flow deposition

参数可由3D 模型获得。

(2) 一次发生泥石流的最大冲出量

泥石流的冲出物越多,其沟口堆积量越大,危害也会随之增加;同时,它也反映出本区域地表破碎状况,风化程度,固体松散堆积物的多少及降雨强度的大小。其获取是实地测得的堆积扇面积与其厚度的均值之积。

(3) 泥石流发生的频率

单位时间内暴发泥石流的次数为频率,这个时间一般是以100 a为单位。若暴发频繁,其累积造成的危害是相当大的。数值主要靠有关文献记载为准,也可间接计算出来^[5]。

(4) 流域面积

一般由3部分组成:物源区、流通区和堆积区。其中物源区的特征最为重要,它决定松散固体物质的储量,影响到一次泥石流的最大冲出量。

(5) 主沟长度

主要指流通区域沟谷的长度,其越长,沿途所接纳的松散固体物质会越多。

(6) 流域最大相对高差

指流域内最高点海拔高度与最低点海拔高度之差,它反映流体的势能和所携带固体物质的破坏能力。

(7) 流域切割密度

指单位面积内沟谷总长度,综合反映流域内地形地貌、地质构造、新构造运动、岩性、风化程度和水系格局等状况。

(8) 地震震级及烈度

地震是诱发泥石流的偶发因素,震级表示其释放能量的大小,而烈度则表示其破坏能力的大小,二者对泥石流的危害程度起着重要作用,可由有关文献记载上获取。

(9) 主沟床弯曲系数系指主沟床实际长度与直线长度之比。它反映出流体排泄的难易程度,比值越大,其流体流速越小,破坏力也就相应的减小。

(10) 泥沙补给段长度比指泥沙沿途补给累计长度与主沟长度之比。它反映泥沙补给范围和补给量,其值越大,则表明泥沙补给条件越好。

(11) 24 h 最大降雨量

水是泥石流液体的重要组成部分,也是其激发条件,尤其是对暴雨型泥石流。它的发生,有一个最低的激发雨量,称之为警戒临界雨量,一般是以 24 h 雨量 100 mm 为临界值。其数据一般由气象部门获得,并通过数值插值获得。

(12) 流域内人口密度

由于人类的生产活动,如开山修路、切坡筑道、毁林开矿等,会加速灾害的形成和发展。其数据由有关政府部门获得。

(13) 流域内植被密度

植被的种类和密度,直接影响到生态环境状况和水土流失,对泥石流的产生和发展起到至关重要的作用。其相关指数,可从遥感影像提取。

2.2 古乡沟泥石流特征信息提取

基于二维影像和 3D 模型,提取古乡沟泥石流的特征信息如表 1 所示。

如果一次泥石流的最大冲出量和泥石流发生的频率无法直接获取,可依下式间接求得:

$$L_1 = 0.97 \times (-2 + 0.26 S_1 + 0.41 S_6 + 0.002 1 S_8)$$

$$L_2 = 0.882 \times (-80.659 6 - 2.830 2 S_1 + 12.138 S_6 + 0.020 9 S_8)$$

其中, L_1 为一次泥石流的最大冲出量; L_2 为泥石流发生的频率; S_1 为流域面积; S_6 为流域切割密度; S_8 为流域内松散固体物质总储量^[5]。

表 1 古乡沟泥石流特征表

Table 1 The character of Guxiang gully debris flow

泥石流的形态特征	形成区:三面环山,中间低洼,形成冰蚀围谷,海拔 4 000 m 以上为冰雪覆盖区,冻融风化强烈;4 000~3 800 m 为基岩裸露区;海拔 3 800~3 600 m 为草原森林覆盖区。整个区域有大量的冰碛风化物,为泥石流的形成提供物质基础。流通区:对称“V”字型山谷,切割深,比降达 256‰。堆积区:位于 2 700 m 以下,呈扇形;流体特征如剖面图 4 所示。	
	一次泥石流的最大冲出量/ 10^4 m^3	1 240
泥石流发生的频率(次/100 a)		3 000
流域面积/ km^2		25.2
主沟长度/km		8.7
灾害规模		扇形,堆积面积达 4.23 km^2 ,平均厚度 1.5 m
流域最大相对高差/km		3
流域切割密度(km/km^2)		5.11
主沟床弯曲系数		1.235
泥沙补给段长度比		0.45
第四纪松散固体物质储量/ 10^4 m^3		3.6×10^4
年平均降雨量/mm		884.5(河谷),>2 000(冰雪区)
24 h 最大降雨量/mm		73
地震震级及烈度		8.5 级,度
流域内人口密度(人/ km^2)		1.81 ^[6]
流域内植被密度状况		植被覆盖中等,几乎没被破坏

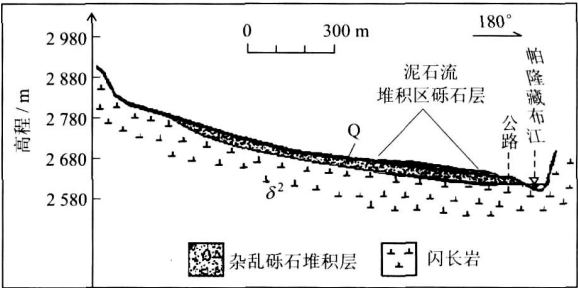


图 4 古乡沟泥石流纵剖面图(赵松江)

Fig. 4 The profile of Guxiang gully debris flow (Zhao song-jiang)

3 泥石流灾害体评价模型的建立

泥石流的暴发,是众多因子综合作用的结果。这些众多因子,根据对泥石流暴发的贡献大小,可以分为主要因子和次要因子。那么,如何从影响泥石流危险性暴发的众多因子中筛选出主要危险因子,是判定泥石流危险度的关键所在。本文中,借鉴刘希林(成都山地所)的建模思路,建立“灰色类别模型”,采用各因子的赋值与自身权重乘积之和来评价灾害体危险性。建模过程如下:

3.1 泥石流危险因子的选取和权重的确定

关于泥石流危险因子选取的问题,许多专家进

行过研究。刘希林依据灰色关联度理论,给出了泥石流 10 个危险因子,并排出了各自权重的高低。本文中,根据古乡沟泥石流自身特点,植被覆盖度和地震等级在灾害发生中也起着重要作用,所以本模型中,增加 2 个危险因子,并重新排序:一次泥石流的最大冲出量 L_1 = 泥石流发生的频率 $L_2 > 24$ h 最大降雨量 $S_{10} >$ 流域面积 $S_1 >$ 流域切割密度 $S_6 >$ 主沟长度 $S_2 >$ 流域最大相对高差 $S_3 >$ 地震等级 $T_1 >$ 泥砂补给段长度比 $S_9 >$ 植被覆盖率(地表裸露率) $T_2 >$ 流域内人口密度 $S_{14} >$ 主沟床弯曲系数 S_7 。其中,一次泥石流的最大冲出量和泥石流发生的频率为主要危险因子,24 h 最大降雨量为触发因子,其余为次要危险因子。具体权重是这样给出的:根据

表 2 各危险因子的权数和权重
Table 2 The respective index weight of risk factors

危险因子	S_7	S_{14}	T_2	S_9	T_1	S_3	S_2	S_6	S_1	S_{10}	L_1	L_2
权数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20	20
权重	0.010 5	0.021 1	0.031 6	0.042 1	0.052 6	0.063 2	0.073 7	0.084 2	0.094 7	0.105 3	0.210 5	0.210 5

3.2 泥石流危险因子的等级划分及其赋值

不同的危险因子,数值变幅很大,无法制定统一的标准进行比较,所以首先要进行归一化处理,然后对其进行等级划分和赋值。其主要依据如下:

各因子之间的关联度大小,从关联度最小的次要危险因子开始,给定一个基本单位 10^n (n 为整数,这里 n 取 0) 为起始权数,以此基本单位为公差,依次呈等差级数向关联度增大的方向递增次要危险因子的权数。为了突出主要危险因子与次要危险因子从量变到质变的区别,触发因子排在次要因子的最高位,主要危险因子的权数以最大次要危险因子(触发因子)的权数为基数,以 2 为公比,呈等比级数继续递增^[8]。相应的各危险因子的权重值,则是各自的权数与所有危险因子权数和的比值,所有危险因子的权重之和应该等于 1。各因子的权数和权重值具体如下表 2 所示。

- (1) 结合专家的经验^[8],进行等级划分和赋值。
- (2) 用先划分标准的计算结果反馈新的标准,反复修正,最终的结果如表 3 所示。

表 3 泥石流危险因子等级划分及其赋值

Table 3 The risk factors classification standard and evaluation of debris flow

危险因子	项目	危险因子等级分类及赋值					
一次泥石流的最大冲出量 $L_1/10^4\text{ m}^3$	等级	极小	小	中	大	巨大	极大
	真值	1	(1) ~ 5	(5) ~ 10	(10) ~ 50	(50) ~ (100)	100
	赋值	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
泥石流发生的频率 L_2 (次/100 a)	等级	极小	小	中	大	巨大	极大
	真值	5	(5) ~ 10	(10) ~ 20	(20) ~ 50	(50) ~ (100)	100
	赋值	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
流域面积 S_1/km^2	等级	极小	小	中	大	巨大	极大
	真值	0.5	0.5 ~ 2	(2) ~ 5	(5) ~ 10	(10) ~ (35)	35
	赋值	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
主沟长度 S_2/km	等级	极小	小	中	大	巨大	极大
	真值	0.5	(0.5) ~ 1	(1) ~ 2	(2) ~ 5	(5) ~ (10)	10
	赋值	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
流域最大相对高差 S_3/km	等级	极小	小	中	大	巨大	极大
	真值	0.2	(0.2) ~ 0.5	(0.5) ~ 0.7	(0.7) ~ 1	(1) ~ (1.5)	1.5
	赋值	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
流域切割密度 S_6 (km/ km^2)	等级	极小	小	中	大	巨大	极大
	真值	2	(2) ~ 5	(5) ~ 10	(10) ~ 15	(15) ~ (20)	20
	赋值	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
主沟床弯曲系数 S_7	等级	极小	小	中	大	巨大	极大
	真值	1.1	(1.1) ~ 1.2	(1.2) ~ 1.3	(1.3) ~ 1.4	(1.4) ~ (1.5)	1.5
	赋值	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
泥砂补给段长度比 S_9	等级	极小	小	中	大	巨大	极大
	真值	0.1	(0.1) ~ 0.2	(0.2) ~ 0.3	(0.3) ~ 0.4	(0.4) ~ (0.6)	0.6
	赋值	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
日最大降雨量 S_{10}/mm	等级	极小	小	中	大	巨大	极大
	真值	25	(25) ~ 50	(50) ~ 75	(75) ~ 100	(100) ~ (150)	150
	赋值	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
流域内人口密度 S_{14} (人/ km^2)	等级	极小	小	中	大	巨大	极大
	真值	10	(10) ~ 30	(30) ~ 70	(70) ~ 100	(100) ~ (150)	150
	赋值	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
地震震级 T_1	等级	极小	小	中	大	巨大	极大
	真值	2	(2) ~ 4	(4) ~ 5	(5) ~ 7	(7) ~ (8.5)	8.5
	赋值	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
地表裸露率(%) T_2	等级	极小	小	中	大	巨大	极大
	真值	10	(10) ~ 30	(30) ~ 50	(50) ~ 70	(70) ~ (85)	85
	赋值	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1

注:() 的数学含义表示不包含其内的数值

4 古乡沟泥石流危险性评价

根据对古乡沟泥石流信息提取的结果,选取一次泥石流的最大冲出量 L_1 、泥石流发生的频率 L_2 、流域面积 S_1 、主沟长度 S_2 、流域最大相对高差 S_3 、

地震等级 T_1 、流域切割密度 S_6 、主沟床弯曲系数 S_7 、泥砂补给段长度比 S_9 、地表裸露率 T_2 、流域内人口密度 S_{14} 和 24 h 最大降雨量 S_{10} 作为泥石流发生的控制因子,获取各自的数值,根据表 1 和表 3 来划分危险因子的等级并对其进行赋值。结果如表 4。

表 4 古乡沟泥石流危险性因子等级划定及其赋值

Table 4 The risk factors classification standard and evaluation of Guxiang gully debris flow												
危险因子项目	L_1	L_2	S_1	S_2	S_3	T_1	S_6	S_7	S_9	S_{10}	T_2	S_{14}
真实值	240	3 000	25.2	8.7	3	8.5	5.11	1.235	0.45	73	25	1.81
等级	极大	极大	巨大	巨大	极大	巨大	中	中	巨大	中	小	极小
赋值(G_L 或 G_S)	1	1	0.8	0.8	1	0.8	0.4	0.4	0.8	0.4	0.2	0

至此,泥石流危险因子的贡献值及其权重都已经知道了,根据公式就可以来计算泥石流危险度 $Rd^{[7]}$:

$$Rd = 0.210\ 5\ G_{L1} + 0.210\ 5\ G_{L2} + 0.094\ 7\ G_{S1} + 0.073\ 7\ G_{S2} + 0.063\ 2\ G_{S3} + 0.084\ 2\ G_{S6} + 0.010\ 5\ G_{S7} + 0.042\ 1\ G_{S9} + 0.105\ 3\ G_{S10} + 0.021\ 1\ G_{S14} + 0.052\ 6\ G_{T1} + 0.031\ 6\ G_{T2}$$
$$= 0.210\ 5 \times 1 + 0.210\ 5 \times 1 + 0.094\ 7 \times 0.8 + 0.073\ 7 \times 0.8 + 0.063\ 2 \times 1 + 0.084\ 2 \times 0.4 + 0.010\ 5 \times 0.4 + 0.042\ 1 \times 0.8 + 0.105\ 3 \times 0.4 + 0 + 0.052\ 6 \times 0.8 + 0.031\ 6 \times 0.2$$
$$= 0.781$$

据下表 5 可知,古乡沟泥石流属于高度危险。

表 5 泥石流危险度与泥石流活动危害特点(刘希林等)

Table 5 The hazard assessment and the risk character of debris flow (Liu xi-lin)				
危险度等级评价	轻度危险	中度危险	高度危险	极度危险
危险度值	0.35	0.35~0.6	0.6~0.85	0.85

该处泥石流所处的地理位置,决定其有多种因素促使泥石流的形成。

(1) 特殊而有利的地形轮廓。古乡沟源头及上游地区三面环山,山峰均在海拔 5 000 m 以上,中间低洼,是高山环抱的冰蚀围谷地貌形态。

(2) 丰富的物质基础。目前在古乡沟围谷区内,储备的冰碛物和冲洪积物总量近 $4.0 \times 10^8\text{ m}^3$,一般处于不稳定状态,是泥石流的重要组成部分。

(3) 地形条件。古乡沟床比降为 256 ‰,为泥石流活动提供了良好的能量条件。

(4) 充沛的水源。区内最近年降水平均 884.5 mm;同时,由于冰川融水汇集到泥石流沟内,增加了泥石流的水源,并侵蚀冰碛物,易形成大规模的泥

石流。

以上条件决定,如果在地震、暴雨、冰川跃动等偶发因素的影响下,造成大型泥石流暴发的可能性是很大的。

5 小结

通过建立 3D 遥感影像模型,提取泥石流灾害体的特征信息,建立“灰色类别模型”,对古乡沟泥石流进行危险性评价。灾害体的危险性评价结果与前人实地调查的情况基本吻合,具有较高的准确性,能够为防灾避难提供相关的科学数据。

致谢 本文是在地调基金的支持下,在刘占声教授和姜琦刚教授的悉心指导下完成的,在此深表感谢!

参考文献

[1] 韩慕吾,臧新炽,孙全德.西北铁路沿线水石流防治[A].全国泥石流防治经验交流论文集[C].科学技术文献出版社重庆分社,1983,(8):16,126.

[2] 付炜.土壤重力侵蚀灰色系统模型研究[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1996,12,2(4):9-17.

[3] 韩慕吾,臧新炽,孙全德.西北铁路沿线水石流防治[A].全国泥石流防治经验交流论文集[C].科学技术文献出版社重庆分社,1983,(8):18.

[4] 商向朝,郝惠.日本泥石流研究进展[J].泥石流,科学技术文献出版社重庆分社,1986,(5):150-151.

[5] 刘希林,唐川.泥石流危险性评价[M].科学技术出版社,2004,(4):19.

[6] 2002 年全国行政区划统计资料, <http://www.xzqh.org>.

[7] 刘希林,唐川.泥石流危险性评价[M].科学技术出版社,2004,(4):15,20.

[8] 张春山.北京北山地区泥石流灾害危险性评价[J].北京地质,1996,(2):11-20.

THE APPLICATION OF 3D REMOTE SENSING IMAGE MODEL OF DEBRIS FLOW DISASTER WARNING IN GU-XIANG GULLY, TIBET

FENG Yu-lin¹, CHEN Jiang¹, JIANG Qi-gang², YANG Li-jun¹

(1. Shenyang Institute of Geology and Mineral Resources, Shenyang 110032, China;

2. Jilin University, Changchun 130026, China)

Abstract: The 3D Remote Sensing image models of debris flow disaster is constructed for interpretation, normalization, classification and evaluation of the disaster feature information. The "Grey Class Model" is constructed, and then the danger degree has been assessed on Guxiang gully debris flow. The evaluation is almost consistent with what experts have been investigated previously, and the result is greatly reliable to provide the scientific avoiding disaster datum for people.

Key words: remote sensing; 3D; Guxiang gully; debris flow; disaster warning

作者简介: 冯雨林(1980-),男,河南省人,工程师,硕士,毕业于吉林大学遥感与地理信息系统专业,现于沈阳地质矿产研究所勘查技术室,主要研究方向为遥感地质。

(上接第 113 页)

APPLICATION OF EXTENSION CLASSIFIED PREDICTION METHOD FOR RISK ASSESSMENT ON GEOLOGICAL HAZARDS

LIU Yong-jian, ZHANG Li-juan, YANG Xue-qiang

(Institute of Geotechnical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Based on the matter-element model and the classified analysis method, an extension classification prediction method for risk assessment on geological hazards is proposed. In the method, 9 influence factors on geological hazards are adopted to establish the classical and extensional matter elements, and the dependent function of material element and extension set is applied to establish prediction model for risk assessment on geological hazards. The predicting results of the stability of rock-mass slopes are obtained by applying the classified analysis. Through risk assessment on landslide and debris flow in Zhaotong county of Yunnan Province, the results show that extension classified prediction is available in risk assessment on geological hazards.

Key words: geological hazards; risk assessment; extension set; classified analysis; landslide; debris flow

作者简介: 刘勇健(1968-),女,博士,副教授,主要从事岩土工程的教学与研究工作。