

基于模糊关系理论的冰川泥石流活动性评价方法

陈 杰, 崔 鹏, 韦方强, 邹 翔

(中国科学院
成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041)
水 利 部

摘 要: 选择流域面积、沟床比降、岩性系数、构造系数、冰川坡度、平均坡度、可移方量、最大淤积、冰川面积与流域面积的比值等因素作为冰川泥石流活动性评价的主要因素, 应用因子分析方法确定了各因素的权重, 并运用模糊关系理论建立了冰川泥石流活动性的评价方法。以川藏公路西藏境内 30 条具有良好工作基础的冰川泥石流沟为例, 利用此方法进行了泥石流活动性评价, 结果表明该方法可行的。

关键词: 冰川泥石流; 活动性评价; 模糊综合评判

中图分类号: P642 23

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2003)02-0001-04

Evaluation of Activity Degree of Glacier Debris Flow Based on Fuzzy Theory

CHEN Jie, CU I Peng, WEI Fang-qiang, ZOU Xiang

(Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese

Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: The study area is located in Tibet along the Sichuan-Tibet highway where 30 glacier debris flow gullies are selected for study. After analyze the present data of these glacier debris flow gullies, 9 factors are chosen as main factors for evaluating the activity degree of these gullies. Factor analysis method is used to determine the weights of the factors. Using the evaluation methods of activity of rainfall debris flow gullies for reference, the fuzzy comprehensive evaluation is an effective method and it is took to this study. Correlating the evaluation result with the fuzzy degree of membership from the activity of debris flow gullies to the class of activity, it helps to explain the result. And according with the reference result, it shows that the method is available.

Key words: glacier debris-flow; evaluation of activity degree; fuzzy comprehensive evaluation

1 前 言

冰川泥石流指发育在高山冰川和积雪的边缘地带, 以冰碛物、冰崩雪崩堆积物为主要固体物质补给来源, 在冰川积雪融水、冰崩雪崩融水和冰碛湖溃决等激发下形成的泥石流。对流域上游的寒冻风化物和中游的冰碛物具有强烈的侵蚀与搬运作用, 并危害通过流域内的交通线路和流域下游的建筑物和居民区。因此, 对冰川泥石流的活动性进行评价不仅可以评价流域的侵蚀强度, 还可以反映泥石流的危害性, 对冰川泥石流减灾具有重要意义。

对于降雨型泥石流的活动性评价, 前人已做了大量卓有成效的研究, 但对冰川泥石流活动性评价的研究较少。在降雨型泥石流活动性的评价方法上, 早期以定性研究为主^[6], 到后来引入了更为量化和客观的评价方法^[7~9]。随着研究程

度的不断深入, 更多实用性的数学模型运用到泥石流活动性评价中来, 其中模糊综合评判法被认为是其中较理想的方法中的一种^[7]。本文即在借鉴降雨泥石流活动性评价方法的基础上, 利用模糊关系理论, 探讨建立冰川泥石流活动性的评价方法。

川藏公路沿线特别是帕隆藏布流域由于地处特殊的地形条件和气候环境, 是我国海洋性冰川的主要分布地区, 也是我国冰川泥石流的主要集中发育地段。因其严重危害川藏公路, 过去对这一区域的冰川泥石流研究较深, 具有良好的工作基础。选择该区域 30 条典型冰川泥石流沟为例探讨基于模糊关系理论的冰川泥石流活动性评价方法, 并验证其活动性。

收稿日期: 2002-12-10

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目(KZCX2 - 306)。

作者简介: 陈杰(1977-), 男, 四川眉山人, 硕士研究生, 主要从事泥石流研究。

2 理论基础

模糊综合评价方法以模糊数学为基础,处理象泥石流这类具有大量模糊因素的现象有一定的优势。其基本原理可表述如下^[10,11]:

设有 n 件事物的某一特征等待评价,这 n 件事物构成对象集

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$$

又知因素集

$$U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$$

和评价集

$$V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$$

设对因素的权重分配为 V 上的模糊子集 A ,计为:

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_p\}$$

式中: a_i ——第 i 个因素 u_i 所对应的权,且一般均规定

$$\sum_{i=1}^n a_i = 1$$

对第 i 个因素的单因素模糊评判为 V 上的模糊子集

$$R_i = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{im})$$

于是单因素评判矩阵 R 为:

$$R = \begin{matrix} & \begin{matrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & \dots & r_{1m} \end{matrix} \\ \begin{matrix} r_{21} \\ r_{22} \\ r_{23} \\ \dots \\ r_{2n} \end{matrix} & \begin{matrix} r_{21} & r_{22} & r_{23} & \dots & r_{2m} \end{matrix} \\ \begin{matrix} r_{n1} \\ r_{n2} \\ r_{n3} & \dots & r_{nm} \end{matrix} \end{matrix}$$

则对该评判对象的模糊综合评判 B 是 V 上的模糊子集

$$B = A \quad R$$

其中“ \circ ”为算子符,再根据最大隶属度原则便可确定被评判对象的评判等级。

3 冰川泥石流活动性评价方法

把待评价的冰川泥石流沟全体作为对象集 $X = \{x_1, x_2, \dots\}$, 每一条冰川泥石流沟 x_i 的活动性都由与之有关的 n 种环境因素决定,即对每条泥石流沟都有因素集 $u_i (i = 1, 2, \dots, n)$, 各因素的权重值构成模糊集合 A 。泥石流的活动性划分为 m 个等级, $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ 。可以建立从 U 到 V 的模糊关系:

$$R: X \times U \rightarrow [0, 1]$$

最后,通过模糊变换 $B = A \circ R$, 并利用最大隶属度原则确定冰川泥石流沟的活动性。

据此,以川藏公路西藏境内典型冰川泥石流沟为例,对基于模糊关系理论的冰川泥石流沟的活动性评价方法简述如下:

3.1 评价因素的选择

由于冰川泥石流的形成机制不同于一般暴雨泥石流,所以在评价因素的选择上也不同。根据文献[1]对冰川泥石流形成机制的分析,并运用文献[2]中的数据,本文选择流域面积 u_1/km^2 、沟床比降 (u_2)、岩性系数 (u_3)、构造系数 (u_4)、冰川坡度 $u_5/^\circ$ 平均坡度 $u_6/^\circ$ 可移方量 ($u_7/10^4 \text{ m}^3$)、最大淤积 ($u_8/10^4 \text{ m}^3$)、冰川面积与总流域面积之比 (u_9) 等 9 个因素。原始数据见表 1。

表 1 各泥石流沟的环境条件

沟名	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5	u_6	u_7	u_8	u_9
差普	21.8	0.080	8.5	6.5	45	34.0	2504	62.8	0.0183
嘎浪	61.6	0.128	8.5	6.9	15	34.0	13323	434.6	0.0682
次浪	30.7	0.220	8.5	6.9	3	37.4	3837	173.7	0.0228
唐不朗沟	75.7	0.137	7.3	6.2	23	43.9	23693	982.7	0.1242
扎的弄巴	81.9	0.119	7.8	6.0	27	48.4	4737	208.9	0.0073
105 拉月桥	14.0	0.328	8.0	8.0	40	40.1	1811	107.3	0.0214
大塌方西沟	7.1	0.432	8.0	8.0	36	36.0	5500	371.3	0.3099
培龙贡支	86.1	0.132	7.8	8.0	32	32.0	57728	1830.2	0.3008
通德沟	28.7	0.348	7.8	8.0	33	33.5	3704	209.2	0.0174
塞龙卡区	25.6	0.247	7.8	8.0	35	35.6	6500	303.9	0.0781
加龙坝曲	12.2	0.373	7.8	8.0	33	33.4	4138	244.9	0.123
索通沟	43.4	0.288	7.8	8.0	34	34.2	23591	1188.2	0.2212
北通曲	23.6	0.251	7.8	8.0	25	25.2	6153	249.5	0.0890
角弄弄巴	21.2	0.271	7.8	8.0	37	37.5	8952	455.7	0.1509
卡贡弄巴	25.2	0.374	7.8	8.0	37	36.9	20072	1240.2	0.3214
扎塔弄巴	21.8	0.222	7.8	8.0	31	30.7	8085	239.4	0.1468
地质弄巴	22.2	0.163	7.8	8.0	37.3	35.0	8682	322.8	0.1441
多洛弄巴	62.4	0.121	7.8	8.0	37	37.3	25097	859.8	0.1426
兴空沟	3.7	0.444	7.8	8.0	42	42.6	504	37.3	0.0270
沙拢沟	13.2	0.257	7.8	8.0	39	39.2	3804	192.9	0.0909
冬茹弄巴	23.7	0.214	7.8	8.0	31	30.6	6880	270.8	0.1266
冬茹东沟	10.7	0.388	7.8	8.0	35	35.4	3743	232.9	0.1495
甲忠义沟	2.1	0.464	7.8	8.0	42	42.6	794	60.6	0.1429
米堆弄巴	117.5	0.064	7.8	8.0	33	32.5	62456	1533.9	0.2681
曲都弄巴	28.4	0.183	7.7	8.0	16	16.0	10262	287.5	0.2570
迫弄沟	13.5	0.189	6.7	7.0	19	19.0	3651	110.5	0.1778
桑钱弄巴	55.1	0.114	4.7	6.0	18	18.0	6802	146.1	0.0871
格曲	36.3	0.102	9.8	6.0	43	48.0	18816	785.8	0.1680
森格宗沟	58.6	0.159	9.8	6.0	11	43.0	5174	223.2	0.0102
洛若龙巴	22.3	0.189	7.8	6.0	11	44.0	1282	60.7	0.0045

3.2 各因素权重的确定

权重的确定方法一般有两种,一种是采用专家打分,另

一种是用数学方法确定。本文采用因子分析的方法确定各因素的权重^[4]。

将原始数据作因子分析, 以方差贡献率大于 93% 确定 重确定各因素的权重。见表 2。
公共因子个数(5 个), 再根据各因素在公共因子中方差的比

表 2 各单因素的权重值

u_1	u_2	u_3	u_4	u_5	u_6	u_7	u_8	u_9
0.10812	0.11502	0.11814	0.09865	0.11564	0.11605	0.11434	0.11398	0.10006

3.3 泥石流活动等级的划分

将冰川泥石流的活动性划分为轻微活动性(I), 轻度活动性(II), 中等活动性(III), 强活动性(IV), 极强活动性(V)五个等级。划分各活动性的区间值时, 先统计出冰川泥石流沟各因素的最小值 x_1 , 平均值 x_2 , 并使平均值 x_2 位于强活

动性中间, 在此基础上, 在 x_1 与 x_2 之间分出 3.5 个区间。定义下列界限值: $a = x_1, b = x_1 + \frac{x_2 - x_1}{3.5}, c = x_1 + \frac{2(x_2 - x_1)}{3.5}, d = x_1 + \frac{3(x_2 - x_1)}{3.5}, e = x_2 + \frac{x_2 - x_1}{7}$, 各活动等级的界限值见表 3。

表 3 沟谷单因素形态对应的活动性等级

因素	轻微($a \sim b$)	轻度($b \sim c$)	中等($c \sim d$)	强($d \sim e$)	极强($> e$)
u_1/km^2	2.1~11.50	11.50~20.91	20.91~30.31	30.31~39.71	> 39.71
u_2	0.064~0.1124	0.1124~0.1608	0.1608~0.2092	0.2092~0.2576	> 0.2576
u_2	4.7~5.60	5.60~6.50	6.50~7.41	7.41~8.31	> 8.31
u_4	6~6.4	6.4~6.8	6.8~7.2	7.2~7.7	> 7.7
$u_5/(\%)$	3~10.7	10.7~18.4	18.4~26.2	26.2~33.9	> 33.9
$u_6/(\%)$	16~21.5	21.5~27.0	27.0~32.5	32.5~37.9	> 37.9
$u_7/10^4\text{m}^3$	504~3858.4	3858.4~6926	6926~10137	10137~13348	> 13348
$u_8/10^4\text{m}^3$	37.3~154.52	154.52~271.74	271.74~388.97	388.97~506.19	> 506.19
u_9	0.0045~0.03957	0.03957~0.07464	0.07464~0.10970	0.10970~0.14477	> 0.14477

3.4 各因素对活动等级隶属度的确定

计算各因素对评价等级的模糊隶属度时, 用类似于升岭

形隶属函数分布^[5], 并依据当 x 位于两界限值的中间时隶属度为 1 的原则, 当 x 离开中间值增大或减少时, 该变量对该

表 4 各区间值对应的隶属函数

区间	I	II	III	IV	V
$a \leq x \leq \frac{a+b}{2}$	$\frac{1}{4} - \frac{1}{4} \sin \frac{2\pi}{b-a} (x - \frac{3a+b}{4})$	$\frac{3}{4} + \frac{1}{4} \sin \frac{2\pi}{b-a} (x - \frac{3a+b}{4})$	0	0	0
$\frac{a+b}{2} < x \leq b$	0	$\frac{1}{4} - \frac{1}{4} \sin \frac{2\pi}{b-a} (\frac{3b+a}{4} - x)$	0	0	0
$b < x \leq \frac{b+c}{2}$	0	0	$\frac{1}{4} - \frac{1}{4} \sin \frac{2\pi}{c-b} (x - \frac{3b+c}{4})$	0	0
$\frac{b+c}{2} < x \leq c$	0	0	$\frac{3}{4} + \frac{1}{4} \sin \frac{2\pi}{c-b} (\frac{3c+b}{4} - x)$	0	0
$c < x \leq \frac{c+d}{2}$	0	0	0	$\frac{1}{4} - \frac{1}{4} \sin \frac{2\pi}{d-c} (x - \frac{3c+d}{4})$	0
$\frac{c+d}{2} < x \leq d$	0	0	0	$\frac{3}{4} + \frac{1}{4} \sin \frac{2\pi}{d-c} (\frac{3d+c}{4} - x)$	0
$d < x \leq \frac{d+e}{2}$	0	0	0	0	$\frac{1}{4} - \frac{1}{4} \sin \frac{2\pi}{e-d} (x - \frac{3d+e}{4})$
$\frac{d+e}{2} < x \leq e$	0	0	0	0	$\frac{3}{4} + \frac{1}{4} \sin \frac{2\pi}{e-d} (\frac{3e+d}{4} - x)$
$x > e$	0	0	0	$\frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{2x}$	$1 - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{2x}$

等级的隶属度从 1 开始减少, 当取边界值(a, b, c, d, e)时, 隶属度为 $1/2$ ^[3]。最后确定的隶属函数为 $f(x) = \frac{3}{4} + \frac{1}{4} \sin \frac{\pi}{b-a} (x - \frac{b+a}{2})$, 划分的区间及对应隶属函数见表 4。

3.5 泥石流沟活动性评价

用求出的权重矩阵 A , 各因素的隶属度矩阵 R , 采用公式 $B = A \cdot R$, 求出泥石流沟对各活动性等级的隶属度。本文采

用矩阵相乘的运算法则。取 B 中最大元素代表的活动性等级作为评价结果。以著名的卡贡弄巴(古乡沟)为例, 其流域面积 25.2 km^2 , 介于 c 和 $(c+d)/2$ 之间, 则它对五个评价等级的模糊隶属度分别为 $\mu_I = 0; \mu_{II} = 0; \mu_{III} = \frac{1}{4} - \frac{1}{4} \sin \frac{2\pi}{d-c} (x - \frac{3c+d}{4}) = \frac{1}{4} - \frac{1}{4} \sin \frac{2\pi}{30.31-20.91} (25.2 - \frac{3 \times 20.91 + 30.31}{4}) = 0.0093; \mu_{IV} = 1 - \mu_{III} = 0.9907; \mu_V = 0$ 。同

理, 依次计算出其它 8 个因素对五个等级的模糊隶属度, 得到如下的隶属度矩阵。

$$R = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.0093 & 0.9907 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.4414 & 0.5586 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0216 & 0.9784 \\ 0 & 0 & 0 & 0.4991 & 0.5009 \\ 0 & 0 & 0 & 0.4957 & 0.5043 \\ 0 & 0 & 0 & 0.6510 & 0.3490 \\ 0 & 0 & 0 & 0.4324 & 0.5676 \\ 0 & 0 & 0 & 0.3250 & 0.6750 \end{bmatrix}$$

再利用 $B = A \times R$, 计算出评价矩阵 $B = [0.0000.000100.08710.4585830.540408]$ 。取最大元素 0.540408, 它对应的活动等级为“极强”, 所以最后古乡沟的活动性等级评价为“极强”。对其它沟谷的评价结果见表 5。

4 结果与讨论

(1) 本方法是在算出各条沟的活动性对各等级的模糊隶属度的基础上, 再根据最大隶属度原则确定的, 因此, 如果将

表 5 各泥石流沟活动性评价结果

沟名	I	II	III	IV	V	评价结果	参考结果 ^[2]
差普	0.163744	<u>0.304319</u>	0.123404	0.195246	0.213288	轻度	活跃
嘎浪	0	0.194761	0.160622	0.266677	<u>0.37794</u>	极强	活跃
次浪	0.214838	0.158413	0.0954309	<u>0.282551</u>	0.248767	强	强
唐不朗沟	0	0.213631	0.17839	0.240887	<u>0.367091</u>	极强	活跃
扎的弄巴	0.0962729	0.172854	0.272923	0.146424	<u>0.311526</u>	极强	活跃
105 拉月桥	0.115595	0.237157	0.0837478	0.322611	0.240889	强	极强
大塌方西沟	0.107578	0.114188	0.0695358	0.441272	0.267426	强	极强
培龙贡支	0	0.0049765	0.172674	0.3058	0.51655	极强	强
通德沟	0.0664977	0.148532	0.181609	0.250218	0.353143	极强	极强
塞龙卡区	0	0.0673784	0.116491	0.555838	0.260293	强	极强
加龙坝曲	0	0.185501	0.150939	0.218297	0.445263	极强	极强
索通沟	0	0	0	0.360008	0.639992	极强	极强
北通曲	0	0.261639	0.177907	0.347871	0.212583	强	强
角弄弄巴	0	0	0.158751	0.452521	0.388728	强	极强
卡贡弄巴	0	0	0.00100871	0.458583	0.540408	极强	极强
扎塔弄巴	0	0.0901002	0.184106	0.41362	0.312173	强	强
地质弄巴	0	0	0.216378	0.395095	0.388527	强	强
多洛弄巴	0	0.0413753	0.0736447	0.359204	0.525776	极强	强
兴空沟	0.244979	0.191521	0	0.209588	0.353912	极强	极强
沙拢沟	0.0573183	0.110633	0.169133	0.323356	0.339559	极强	极强
冬茹弄巴	0	0.114323	0.236605	0.313002	0.33607	极强	强
冬茹东沟	0.115669	0.206214	0.0145572	0.324459	0.339101	极强	极强
甲忠义沟	0.144625	0.191815	0	0.25959	<u>0.40397</u>	极强	极强
米堆弄巴	0.05751	0.05751	0.058025	0.287057	<u>0.539898</u>	极强	弱活跃
曲都弄巴	0.058025	0.155682	0.139616	<u>0.376347</u>	0.27033	强	活跃
迫弄沟	0.279876	0.0978272	0.275634	<u>0.294518</u>	0.052145	强	弱活跃
桑钱弄巴	0.178252	<u>0.442894</u>	0.180309	0.139365	0.0591801	轻度	极弱
格曲	0.129295	0.0843746	0	<u>0.414099</u>	0.372231	强	强
森格宗沟	0.087406	<u>0.33929</u>	0.230994	0.161691	0.180619	轻度	活跃
洛若龙巴沟	0.168542	<u>0.315446</u>	0.21312	0.12791	0.174982	轻度	活跃

评价结果与泥石流沟的活动性对各活动等级的模糊隶属度结合起来, 更有助于对评价结果的说明。参照表 5, 以本区域两条著名的冰川泥石流沟培龙贡支和卡贡弄巴为例。其中培龙贡支曾于 1983 年 7 月 28~ 29 日、1985 年 5 月 29 日暴发大型泥石流; 卡贡弄巴于 1950 年、1953 年、1954 年、1972 年都曾发生破坏性巨大的大型泥石流^[1], 活动性比较强烈。从评价结果看, 培龙沟的活动性等级对“强”和“极强”的隶属度分别为 0.305 798 和 0.516 498, 两者之和占五个等级隶属度之总和的 82%; 卡贡弄巴的活动性等级对“强”和“极强”的隶属度为 0.458 594 和 0.540 297, 两者之和占隶属度总和的 99%, 从两条沟隶属度的集中区域和集中程度, 表明了

其活动性的强烈程度。更进一步讲, 在同是被评为“极强”的泥石流沟中, 其活动性差别也可从中看出。

(2) 文献[2]把冰川泥石流的活动性分为极弱、弱、活跃、强、极强五个等级, 因此, 在评价结果上, 除嘎浪、唐不朗沟、扎的弄巴、米堆弄巴、迫弄沟等五条沟, 本方法与文献[2]的评价结果有较大差距外, 其余 25 条沟总体上比较一致, 吻合程度达 80% 以上。由于目前研究条件和研究水平的限制, 该方法还有需要完善的地方(如因子的选择和分析可以更深入), 但从两种结果的吻合程度, 说明了该方法的准确性。

当地的经济效益和人民生活具有十分重要的作用。

表 4 各树种的净收益对照 元

树种名称	退耕前		退耕后		净收益
	年均投资	产值	投资	年均产值	
花椒	8820	1200	696	300	7224
泡桐	1575	300	696	300	879
苹果	60000	4500	696	300	55104
杨树	2250	200	696	300	1654

3 提高退耕还林(草)经济效益的途径和措施

(1) 突出经济效益, 因地制宜, 加快坡耕地的治理与开发。所谓因地制宜是指在退耕还林还草时, 必须考虑当地的实际情况, 充分、合理的利用当地的光、温、水、土等自然资源, 挖掘其潜力, 选择适当的经济树种、草种, 这样才能较大幅度的增加收入, 提高生活水平, 改变面貌, 韩城乔子玄乡政府通过鼓励农民栽花椒、苹果已大获其益。因此, 在一些水土流失严重、偏僻闭塞的地方, 能充分利用自然资源优势, 大搞红枣、花椒、苹果等经济效益显著的产业的开发工作, 做到治理、开发两不误, 达到富县富民的目的。

(2) 以科学技术为依托, 政府行为为手段, 高起点, 全方位地实施造林(含果)种草(含经济作物), 根治水土流失, 美化生态环境; 以三性农业(自给性农业、防护性农业、商品性果牧业)为发展目标, 调整农业结构。在退耕还林(草)工作中, 培植多元化主导产业, 增收减支, 壮大农村经济, 最终实现社会、经济、生态协调发展。

参考文献:

[1] 苏敏, 卢宗凡, 刘文兆, 等. 陕北丘陵沟壑区坡地不同耕作法综合效益研究[J]. 水土保持通报, 2000, 20(5): 19- 24

[2] 吴钦孝, 杨文治. 黄土高原植被建设与持续发展[M]. 北京: 科学出版社, 1998 70- 115

[3] 王雅鹏, 孙全敏, 李云毅, 等. 陕西省农业综合生产能力测评与提高[M]. 西安地图出版社, 1996 108- 126

[4] 于光远. 生态效益和生态效益的关系和我们的环境工作[J]. 水土保持通报, 1984, 4(3): 17- 20

[5] 王佑民, 王忠林. 黄土高原丘陵沟壑区混农林的结构及其防护效益研究[J]. 水土保持学报, 1992, 6(4): 54- 59

[6] 王忠林. 渭北旱塬农林复合植被类型的生态和经济效益调查研究[J]. 水土保持研究, 1994, 1(3): 36- 41

[7] 孟庆权. 黄土高原水土保持[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1996 464- 483

(上接第 4 页)

参考文献:

[1] 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 西藏自治区交通厅科学研究所. 西藏泥石流与环境[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1999 29- 39

[2] 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 中国科学院兰州冰川冻土研究所, 西藏自治区交通厅科学研究所. 川藏公路南线(西藏境内)山地灾害及防治对策[M]. 北京: 科学出版社, 1995 146- 160

[3] 孙广仁, 毕海良. 模糊数学综合评判法在泥石流沟判别与危险度评价中的应用[J]. 青海环境, 1997, 7(2): 72- 77

[4] 韩广, 张桂芳. 风成沙丘固定程度的定量分析[J]. 生态学报, 2001, 21(7): 1057- 1063

[5] 刘普寅, 吴孟达. 模糊理论及其应用[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1998

[6] 中国科学院兰州冰川冻土研究所, 等. 甘肃泥石流[M]. 北京: 人民交通出版社, 1982

[7] 魏永明, 谢又予, 伍永秋. 关联度分析法和模糊综合评判法在泥石流沟谷危险度划分中的应用——以北京市北部山区怀柔、密云两县为例[J]. 自然灾害学报, 1998, 7(2): 109- 116

[8] 刘希林, 张松林, 唐川. 沟谷泥石流危险度评价研究[J]. 水土保持学报, 1993, 7(2): 20- 25

[9] 陈冶, 郑永胜, 王莹. 泥石流危险度的分类评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1997, 8(1): 27- 31

[10] 金长泽. 模糊数学及其应用[M]. 长春: 吉林教育出版社, 1991 136- 145

[11] 肖位枢. 模糊数学基础及应用[M]. 北京: 航空工业出版社, 1992 161- 170