

文章编号:1671-1637(2014)02-0028-06

## 基于熵值理论的泥石流评价因子选取

王英杰<sup>1</sup>, 王磊<sup>1</sup>, 荣起国<sup>2</sup>, 熊东<sup>3</sup>

(1. 吉林大学 建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 北京大学 工学院, 北京 100871;  
3. 武警工程大学 基础部, 陕西 西安 710086)

**摘要:**针对地质灾害危险度评价中评价因子权重确定方法的缺陷,依据最小熵分析理论,将评价因子形成线性无关的成分,根据评价因子对泥石流系统贡献率的大小进行评价因子优选与权重的确定,将权重代入经典的泥石流危险度评价模型进行评估,并将评估结果与计算结果进行了对比。分析结果表明:优选出的主要评价因子为一次泥石流最大冲出量、频率、流域面积、主沟长度、主沟床弯曲系数、植被覆盖率、松散固体物质储量、流域切割密度和泥沙补给段长度比,得到的权重分别为0.235 3、0.235 3、0.079 1、0.079 1、0.079 1、0.079 1、0.073 0、0.073 0、0.073 0;极度、重度、中度和轻度危险的泥石流沟分别为3、3、6、0条,评价结果与研究区泥石流的实际情况和发展趋势吻合度较高,从而证明将最小熵分析理论应用到地质灾害评价领域的可行性。

**关键词:**泥石流;最小熵分析理论;评价因子;贡献率

**中图分类号:**U416.165

**文献标志码:**A

## Evaluation index selection of debris flow based on entropy value theory

WANG Ying-jie<sup>1</sup>, WANG Lei<sup>1</sup>, RONG Qi-guo<sup>2</sup>, XIONG Dong<sup>3</sup>

(1. School of Construction Engineering, Jilin University, Changchun 130026, Jilin, China; 2. School of Engineering, Peking University, Beijing 100871, China; 3. Department of Basic Courses, Engineering University of China Armed Police Force, Xi'an 710086, Shaanxi, China)

**Abstract:** Aiming at solving the deficiencies of index weight determination in evaluating risk of geological disaster, the theory of minimum entropy analysis was used to form nonlinear independent components. The index optimization and weight determination were done based on their contributions to debris flow. The index weights were evaluated in the classic debris flow risk evaluation model. The evaluation results were compared with the calculated results. Analysis result shows that the main optimal indexes are the maximum rushed amount for a debris flow, frequency, basin area, main gully length, main gully bed tortuosity coefficient, vegetation coverage, the reserve of loose solid material, basin cutting density and sediment supply length ratio. The corresponding weight values of these indexes are 0.235 3, 0.235 3, 0.079 1, 0.079 1, 0.079 1, 0.079 1, 0.073 0, 0.073 0 and 0.073 0 respectively. The numbers of extreme, heavy, moderate and slight debris flows are 3, 3, 6 and 0 respectively. The calculated results are consistent with the real situation and development trend of studied debris flow area. It proves the

收稿日期:2013-10-18

基金项目:国家973计划项目(2010CB731503)

作者简介:王英杰(1984-),男,吉林四平人,吉林大学工学博士研究生,从事地质灾害研究。

导师简介:王磊(1968-2014),男,黑龙江伊春人,吉林大学教授,工学博士。

reasonability of minimum entropy analysis theory applied in geological disaster risk evaluation.  
3 tabs, 14 refs.

**Key words:** debris flow; minimum entropy analysis theory; evaluation index; contribution rate

**Author resumes:** WANG Ying-jie(1984-), male, doctoral student, +86-431-85862037, 929031081@qq.com; WANG Lei(1968-2014), male, professor, PhD, +86-431-85862037, wanglei0431@126.com.

## 0 引 言

泥石流作为一种常见的自然灾害,它是由暴雨、冰川、冰雪融水等诱发的,产生于沟谷或山坡上的一种夹带大量泥沙块石等固体物质的特殊洪流,具有暴发突然、历时短暂、危害性强等特点,是近年来国内外许多学者重点研究的一种灾害类型。泥石流受多种因素制约,是自然与人类系统交互作用产生的结果<sup>[1]</sup>,泥石流地质灾害频发,对人类的生命财产安全造成了极大的威胁<sup>[2]</sup>。进入 21 世纪以来,随着人类改造自然的强度增加,近些年中国因泥石流灾害已致使上百人死亡,财产损失达数百亿元。特别是在中国的多山地区,泥石流暴发对公路的安全造成了极大的威胁。由此可见,对泥石流进行危险度评价具有极其重要的意义<sup>[3]</sup>。

刘希林最早在中国运用因子权重和定量打分的方法开展了单沟泥石流危险度评价的研究<sup>[4]</sup>。由于泥石流受到多种因素制约,在评价过程中,根据研究对象客观条件,合理地选择评价因子和确定因子权重仍是国内外学者研究的重点问题。目前,对评价指标选取的方法主要有主成分分析法、投影寻踪法、逐步判别分析法和灰色关联度法等<sup>[5-10]</sup>。刘希林以灰色关联度理论,确定一次泥石流最大冲出量和发生频率为泥石流危险度评价的主要评价因子,流域面积、切割密度等为次要评价因子<sup>[4]</sup>,但因为评价因子数量众多,且在不同的研究区内泥石流的影响因素各不相同,每个因子对泥石流危险度的贡献率大小也不同,因此,泥石流的评价因子应该根据研究区的客观情况来选定;苏鹏程等建立了泥石流危险度投影寻踪聚类模型,不仅能客观地确定各评价因子的权重,而且还可以以平均贡献率的大小揭示不同评价因子对评价结果的影响,从而筛选出关键评价因子<sup>[7]</sup>;孟凡奇等依据逐步判别分析法,按照评价因子对泥石流危险度贡献率的大小选筛选出具有客观性的评价因子<sup>[8]</sup>,但是没有考虑消除因子之间的相关性,如流域高差和主沟床比降往往具有一定的相关性;陈鹏宇等基于 Spearman 等级相关系数得到

评价结果,突出了物源条件和动力条件对泥石流危险度的贡献<sup>[10]</sup>。在优选出评价因子后,确定其权重也是进行泥石流危险度评价的关键。目前确定权重的方法主要有层次分析法、熵权法等<sup>[8]</sup>,其中层次分析法主观性太强,熵权法容易丢失信息,所得结果可靠性差。此外,以上因子优选或者筛选方法在消除各评价因子之间的相关性方面也存在一定的局限性。最小熵分析理论作为一种基于熵值的新的变量选择、因子权重确定和数据分析方法,具有可靠性和客观性强的特点,近年来已逐步在地质灾害评价领域里得到应用<sup>[11]</sup>。本文依据最小熵分析理论,按照因子对系统的贡献率,优选出主要评价因子,赋予权重,并以 37 条典型泥石流沟作为对象进行了具体研究。

## 1 最小熵分析理论

最小熵分析理论首先在化学数据分析中得到应用,之后推广到泥石流的危险性评价中,取得了较好的结果<sup>[11]</sup>,在变量的选择时,设一个逻辑回归模型  $P_i(\bar{x})$ ,模型中含有  $N$  个可以通过试验测得的变量,  $\bar{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ ,该回归模型可以揭示一个未知系统的行为相关联系。变量  $x_i$  通常是根据试验估算的,它们对系统的影响及彼此间相关性需进一步确定。

逻辑回归模型  $P_i(\bar{x})$  的变量经过各种组合后会产生  $2^N - 2$  个子集,每个子集构成一个以  $P_S(\bar{x}_{S_i})$  为变量概率密度分布函数的子模型,其中  $\bar{x}_{S_i} \in \bar{x}$  为第  $S$  个子模型的第  $i$  个变量。

各子模型通过 Logit 模型  $R(\bar{x})$  关联各个变量。若变量关联判定结果,  $R(\bar{x})$  为 1; 如果变量不与判定结果关联,  $R(\bar{x})$  为 0。Logit 模型为

$$R(\bar{x}) = \frac{\exp\left(\sum_{i=1}^N \beta_i x_i\right)}{1 + \exp\left(\sum_{i=1}^N \beta_i x_i\right)} \quad (1)$$

式中:参数  $\beta_i$  常用极大似然估计得到<sup>[12]</sup>。

将式(1)归一化后,得到一个与给定子集  $P(\bar{x})$

响应的概率分布函数

$$P(\bar{x}) = R(\bar{x})/Z = \frac{1}{Z} \frac{\exp\left(\sum_{i=1}^N \beta_i x_i\right)}{1 + \exp\left(\sum_{i=1}^N \beta_i x_i\right)} \quad (2)$$

$$Z = \sum \frac{\exp\left(\sum_{i=1}^N \beta_i x_i\right)}{1 + \exp\left(\sum_{i=1}^N \beta_i x_i\right)}$$

式中:  $Z$  为经过归一化得到的常量。

$P_S(\bar{x}_{S_i})$  的最小熵值为

$$S(P_S) = - \sum_{\bar{x}_{S_i} \in \bar{x}} P_S(\bar{x}_{S_i}) \ln[P_S(\bar{x}_{S_i})] \quad (3)$$

式中:  $S(P_S)$  为所求第  $S$  个子模型的最小熵值;  $P_S(\bar{x}_{S_i})$  为在第  $S$  个子模型中变量  $\bar{x}_{S_i}$  出现概率密度值。

根据从小到大的顺序将每个子模型所得到的熵值排队,选取熵值最小的前  $m$  个子模型,统计全部子模型中每个响应判定结果的变量概率,进而优选出对研究系统的贡献最大的变量。因变量对系统贡献与变量的出现概率成正相关,贡献越大,变量的出现概率越大。

## 2 实例分析

### 2.1 研究区概况

研究区地处云南省,该处土体物源量丰富,为泥石流的发生提供了物质基础,其中蒋家沟形成区和流通区呈“V”字型,沟谷两侧古滑坡古堆积体发育,裸露原岩结构破碎,风化严重,物源量超过  $1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

研究区气候类型较复杂,四季分明,雨热同季,夏季高温多雨,还常常有局部暴雨。因地形原因,山区河流有着特别剧烈的流水侵蚀以及搬运作用。沟谷多呈“V”字型,可见卡口和叠水发育。

各泥石流沟汇水区海拔范围为 1 200~2 300 m,主要江河流向为由南向北,切割深度巨大。山坡平均坡度在  $30^\circ \sim 45^\circ$  之间,其中切割程度较深的部分区域山坡坡度可达  $60^\circ$  以上。此外,主沟平均比降居于 0.1~0.5 之间,为泥石流的产生提供了有利的地形条件。

近些年来经济快速发展,人口数量剧增且活动范围增大,所需建筑数量的增多,对矿产、能源挖掘的速度和广度的加快,造成了植被大规模快速消失,沙漠化日趋严重,以及地表土质疏松、土体结构破坏等诸多问题,都加剧了泥石流发生的频率和强度。

本文选取研究区内 37 条典型泥石流沟作为研

究对象,用来优选主要评价因子和确定因子权重。

### 2.2 优选评价因子

对泥石流进行危险度评价的结果取决于泥石流评价因子的选取,评价因子中主要评价因子有 1 个或 2 个,次要评价因子则可有很多<sup>[13-14]</sup>。刘希林总结了相关研究成果,指出影响泥石流的 16 个因素分别为流域内人口密度  $C_1$  (人· $\text{km}^{-2}$ )、年平均降雨量  $C_2$  (mm)、主沟床弯曲系数  $C_3$ 、日最大降雨量  $C_4$  (mm)、泥沙补给段长度比  $C_5$ 、主沟平均比降  $C_6$ 、垦殖指数  $C_7$  (%)、植被覆盖率  $C_8$  (%)、流域面积  $C_9$  ( $\text{km}^2$ )、主沟长度  $C_{10}$  (km)、流域最大相对高差  $C_{11}$  (km)、松散固体物质储量  $C_{12}$  ( $10^4 \text{ m}^3$ )、泥石流发生频率  $C_{13}$  (次·百年<sup>-1</sup>)、流域切割密度  $C_{14}$  ( $\text{km} \cdot \text{km}^{-2}$ )、形成区山坡平均坡度  $C_{15}$  ( $^\circ$ ) 和一次泥石流最大冲出量  $C_{16}$  ( $10^4 \text{ m}^3$ )<sup>[4]</sup>。

有些指标,例如关于岩性的相关指标不易获取,且较难量化,因其主要是反映潜在松散物源量的大小,本文考虑单位面积物源量的大小,而不考虑岩性指标。土颗粒大小同样有较难获取以及量化的问题,本文也不予考虑。坡向在滑坡危险度评价中较为重要,但对于泥石流的影响较小,本文也不予考虑。有些评价指标的影响程度具有区域性的差别,本文研究区内居住人口少,地处偏僻,忽略距道路距离。16 个评价因子的选取依据如下<sup>[3,5,9,10]</sup>。

流域内人口密度:人类活动与泥石流关系密切。年平均降雨量及日最大降雨量:水是泥石流发生的激发因素,它可间接反映泥石流潜在动能。主沟床弯曲系数:该因子反映沟道泄流的难易程度,从而影响泥石流流量和规模。泥沙补给段长度比:指泥沙沿途补给泥石流累计长度比上主沟长度,可全面描述泥沙补给的范围和补给量。主沟平均比降、流域最大相对高差和形成区山坡平均坡度:此 3 个因子可表征泥石流物质势能的大小,其值愈大,就需要越充分的动力条件促使泥石流暴发。垦殖指数:反映一地区已开垦的耕地面积占其土地总面积的比例,是衡量一个地区土地资源开发利用程度的指标。植被覆盖率:植被可影响坡体的结构、强度、含水量等物理力学性能,直接决定坡体的稳定性,进而可影响松散固体物质的储量。流域面积:通常流域面积越大,流域产沙量越多,产沙量能够制约一次泥石流最大冲出量,所以,它会很大程度上制约泥石流危险度的判定。主沟长度:泥石流流程大小和沿途松散固体物质补给量受该因素制约,所以,泥石流危险度受此因素的影响也较大。松散固体物质储量:反映流

域可补给泥石流物质的多少,进而影响泥石流发生规模和危害度的大小。泥石流发生频率:直接影响泥石流危害度的大小,属于主要评价因子。流域切割密度:描述流域汇流状况、地质构造、岩性、风化程度和产沙能。一次泥石流最大冲出量:冲出物数量与遭受泥石流危害的可能性成正相关,该因素属于主要评价因子。

为了将最小熵分析理论应用在泥石流评价因子的优选中,要首先确保选出的因子对评价结果有比较

大的影响,那些有很小影响或负面影响的评价因子则要淘汰。由其他专家学术成果得知,云南省 37 条泥石流沟中有 15 条危险性比较小,用“N”标记,有 22 条危险性比较大,用“Y”标记,其中部分见表 1。基于 MATLAB 软件,依照最小熵分析理论,以泥石流的危险度大小为条件,将各评价因子进行随机组合,生成了 8 190 个子模型,并对每个子模型的最小熵值进行了计算,部分结果见表 2,数值 1 表示在每个子模型中该变量被选择,0 表示未被选择。

表 1 泥石流评价因子

Tab. 1 Evaluation indexes of debris flows

泥石流沟名	危险性	$C_1 /$ (人·km <sup>-2</sup> )	$C_2 /$ mm	$C_3$	$C_5$	$C_7 / \%$	$C_8 / \%$	$C_9 /$ km <sup>2</sup>	$C_{10} /$ km	$C_{11} /$ km	$C_{12} /$ 10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	$C_{13} /$ (次·百年 <sup>-1</sup> )	$C_{14} /$ (km·km <sup>-2</sup> )	$C_{16} /$ 10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>
小石洞沟	Y	217	69.6	1.33	0.40	19	26	2.83	2.60	0.43	544	30	8.2	3.5
大石洞沟	N	264	69.3	1.23	0.22	21	22	0.19	1.19	0.27	62	20	8.4	0.4
小南沟	N	84	119.5	1.34	0.69	11	27	5.30	5.84	0.52	191	32	6.4	4.4
黑瞎子沟	N	92	109.4	1.12	0.56	9	32	2.70	2.50	0.36	83	35	5.7	1.5
二道坎子西沟	N	63	109.6	1.16	0.37	8	38	7.74	5.63	0.61	115	16	4.3	6.1
剑窑沟	Y	64	110.5	1.09	0.29	9	43	1.89	2.19	0.29	71	20	4.4	1.8
鞍子沟	Y	197	82.0	1.51	0.52	18	17	12.13	7.40	1.11	471	260	13.9	9.0
山城沟	Y	189	111.0	1.31	0.69	17	12	38.90	16.20	1.40	7 969	50	9.6	27.0
小东沟	Y	168	86.7	1.19	0.38	19	22	18.21	7.30	1.70	3 399	90	11.2	18.0
张家沟	Y	211	87.8	1.38	0.69	25	13	17.91	8.20	1.71	14 000	150	16.9	22.0
川沟	Y	259	111.0	1.34	0.90	20	8	48.80	13.00	2.21	75 000	1 500	23.2	196.3
小夹皮沟	Y	211	96.0	1.31	0.58	17	21	53.20	18.44	2.89	15 000	450	20.3	105.0
榆树沟	Y	314	100.3	1.13	0.42	22	12	4.70	2.20	1.28	1 993	80	12.3	1.8
大梨树沟	Y	0	100.1	1.33	0.73	12	9	18.34	11.40	1.33	16 000	1 200	22.4	84.0
关地沟	Y	0	100.4	1.35	0.80	6	8	12.48	6.00	1.63	14 000	1 000	20.4	60.0
夹道沟	Y	260	100.6	1.22	0.44	7	23	28.55	9.33	2.45	7 000	50	15.3	9.0
二道沟	Y	216	98.0	1.26	0.49	13	14	28.57	11.50	2.50	5 000	70	15.7	11.0
五道沟	Y	267	97.0	1.31	0.81	28	14	3.33	2.23	1.09	823	50	22.0	5.0
蒋家沟	Y	65	122.0	1.66	0.65	4	13	58.34	13.65	2.35	3 835	50	11.5	15.0
四道阳沟	Y	410	121.0	1.31	0.67	12	56	15.70	6.67	1.34	6 000	2	18.1	25.0
高丽沟	N	340	108.9	1.20	0.23	24	12	5.33	4.20	1.23	620	35	3.1	23.0
八宝沟	Y	270	93.0	1.17	0.60	32	12	112.70	14.00	2.32	1 300	70	20.0	22.0
大阳沟	Y	280	94.0	1.23	0.69	26	11	84.60	15.00	1.79	10 000	70	23.0	15.0

Rupert 等在预测泥石流的发生概率时使用了逻辑回归模型,其结果也证明了该方法是可行的<sup>[14]</sup>。所以,本文利用逻辑回归模型对这些沟谷发生泥石流的概率进行预测。

通过计算可以得到每个子模型的最小熵值(表 2),不难看出 8 190 个子模型当中最小熵值小于 3.856 0 的是前 16 个;余下的子模型最小熵值均不小于 3.856 0,其中最大值是 5.087 5。从表 2 可看

出,第 17 个子模型的最小熵值与第 16 个子模型最小熵值之间的差值为 0.181 5,而最小熵值的最大值与最小值之差为 1.453 4,显然 0.181 5 大于 1.453 4 的 10%<sup>[11]</sup>。当把 10%作为最小熵的分辨率水平时,就能够把前 16 个子模型与剩余子模型分开,这前 16 个子模型是最可取的。因为数据精度有限,不足以对这 16 个子模型进行进一步区分优劣,要选择那些对泥石流的发生起主要作用的主导变量,在这

表 2 最小熵值计算结果  
Tab. 2 Calculation results of minimum entropy values

子模型编号	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>7</sub>	C <sub>8</sub>	C <sub>9</sub>	C <sub>10</sub>	C <sub>11</sub>	C <sub>12</sub>	C <sub>13</sub>	C <sub>14</sub>	C <sub>16</sub>	最小熵值
1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	3.634 1
2	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	3.635 0
3	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	3.635 5
4	1	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	3.643 0
5	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	3.654 1
6	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	3.654 4
7	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	3.655 3
8	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	3.656 0
9	0	0	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1	3.664 5
10	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	3.665 7
11	0	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	0	3.666 2
12	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	3.667 5
13	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	3.668 3
14	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	3.669 3
15	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	3.670 9
16	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	3.674 5
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3.856 0
8 190	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	5.087 5

16 个子模型中出现频率越大的评价因子就是主导变量。根据计算结果可以看出,C<sub>3</sub>、C<sub>5</sub>、C<sub>8</sub>、C<sub>9</sub>、C<sub>10</sub>、C<sub>12</sub>、C<sub>13</sub>、C<sub>14</sub>和 C<sub>16</sub>出现的频率分别为 12、12、13、13、13、12、14、13、14,剩余变量出现频率的最大值仅为 8,可知对泥石流危险度评价来说,上述 9 个变量是特别重要的评价因子,C<sub>13</sub>、C<sub>16</sub>为主要评价因子。

### 2.3 各评价因子权重的确定

通过刘希林对泥石流的主要评价因子的研究可知,一次泥石流最大冲出量 C<sub>16</sub>与泥石流发生频率 C<sub>13</sub>是主要评价因子,并且占 47.06%的权重,其余次要危险因子占 52.94%<sup>[4]</sup>。通过最小熵的计算,9 个主要评价因子 C<sub>3</sub>、C<sub>5</sub>、C<sub>8</sub>、C<sub>9</sub>、C<sub>10</sub>、C<sub>12</sub>、C<sub>13</sub>、C<sub>14</sub>、C<sub>16</sub>的权重分别为 0.079 1、0.073 0、0.079 1、0.079 1、0.079 1、0.073 0、0.235 3、0.073 0、0.235 3。

### 2.4 危险度评价

将确定的 9 个评价因子权重值代入刘希林提出的经典的泥石流危险度评价模型<sup>[4]</sup>

$$F_r = \sum_{j=1}^n p_j \omega_j$$

式中:F<sub>r</sub>为第 r 个泥石流沟综合危险度指数,r=1,2,⋯,n;p<sub>j</sub>为第 r 个泥石流沟第 j 个评价指标量纲为 1 后的取值;ω<sub>j</sub>为评价指标的权重值,由最小熵理论求得。依据此模型对所选取的部分泥石流沟进

行危险度评价,并将评价结果与文献[4]中的计算结果进行比较,见表 3。

表 3 评价结果对比  
Tab. 3 Comparison of evaluation results

沟名	本文		文献[4]	
	计算结果	危险度	计算结果	危险度
蒋家沟	1.000 0	极度	0.999 8	极度
八宝沟	0.958 8	极度	0.977 3	极度
四道阳沟	0.498 7	中度	0.514 5	中度
川沟	0.514 7	中度	0.545 3	中度
小南沟	0.536 8	中度	0.561 6	中度
关地沟	0.882 8	极度	0.860 1	极度
山城沟	0.856 6	极度	0.833 6	重度
鞍子沟	0.533 7	中度	0.549 8	中度
小东沟	0.631 5	重度	0.648 4	重度
大石洞沟	0.503 2	中度	0.508 7	中度
剑窑沟	0.679 3	重度	0.691 0	重度
大梨树沟	0.575 9	中度	0.591 0	中度

## 3 评价结果分析

基于最小熵分析理论优选出的评价因子能更直接、客观地反映研究区泥石流的发育特征,同时说明不同地区所发育的泥石流所受的到主要影响

因素也是有所差别的。由表3可知,本文评价结果与文献[4]的计算结果有一定差异,从野外调查的结果看,山城沟泥石流在堵江频率和危害度方面与小东沟泥石流相似,但是山城沟最长一次堵江时间达24 h,且沟床冲刷深度和滑坡活动程度近年来有所加剧,故其危险度水平比小东沟高是合理的。

## 4 结 语

(1)最小熵分析理论作为一种基于熵值的变量选择和数据分析方法,过程简单,很容易扩展应用到含有多个相关或非相关变量的复杂的地质资料分析中,既能克服变量优选过程中的人为主观性,在消除因子间相关性的基础上,又能全面地优选出系统的主要评价因子,还可对因子赋予一种量化标准。

(2)最小熵分析理论提供了一种基于大量数据进行优选和分析的方法。本文采用最小熵分析理论对泥石流影响因子进行优选和赋权,结果表明,最小熵分析理论应用在泥石流危险度评价中是可行的。

(3)采用最小熵分析理论得到的评价结果与文献[4]所得结果略有差异,但对比现场调查资料分析可知,本文评价结果更加符合泥石流实际危险度状态。另外,数据准确性直接决定计算结果是否合理,因此,在评价指标实测过程中,应确保其准确性。至于最小熵分析理论是否具有普适性,还需大量实例工程的检验。

## 参考文献:

## References:

- [1] BADOUX A, GRAF C, RHYNER J, et al. A debris-flow alarm system for the Alpine Illgraben catchment: design and performance[J]. *Natural Hazards*, 2009, 49(3): 517-539.
- [2] 蔡文. 可拓学概述[J]. *系统工程理论与实践*, 1998, 18(1): 76-84.  
CAI Wen. Introduction of extenics[J]. *Systems Engineering—Theory and Practice*, 1998, 18(1): 76-84. (in Chinese)
- [3] 肖伟, 黄丹, 黎华, 等. 地质灾害气象预报预警方法研究[J]. *地质与资源*, 2005, 14(4): 274-278.  
XIAO Wei, HUANG Dan, LI Hua, et al. Research on the early warning of geo-hazards based on weather forecasting[J]. *Geology and Resources*, 2005, 14(4): 274-278. (in Chinese)
- [4] 刘希林. 泥石流危险度判定的研究[J]. *灾害学*, 1988(3): 10-15.  
LIU Xi-lin. Study on assessment of debris flow hazards[J]. *Journal of Catastrophology*, 1988(3): 10-15. (in Chinese)
- [5] 张 文, 陈剑平, 秦胜伍, 等. 基于主成分分析的FCM法在泥石流分类中的应用[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2010, 40(2): 368-372.  
ZHANG Wen, CHEN Jian-ping, QIN Sheng-wu, et al. Application of FCM based on principal components analysis in debris flow classification[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2010, 40(2): 368-372. (in Chinese)
- [6] 谷复光, 王 清, 张 晨. 基于投影寻踪与可拓学方法的泥石流危险度评价[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2010, 40(2): 373-377.  
GU Fu-guang, WANG Qing, ZHANG Chen. Debris flow risk assessment by PPC and extenics[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2010, 40(2): 373-377. (in Chinese)
- [7] 苏鹏程, 倪长健, 孔纪名, 等. 区域泥石流危险度评价的影响因子识别[J]. *水土保持通报*, 2009, 29(1): 128-132.  
SU Peng-cheng, NI Chang-jian, KONG Ji-ming, et al. Factor identification for regional danger degree of debris flow[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2009, 29(1): 128-132. (in Chinese)
- [8] 孟凡奇, 李广杰, 李 明, 等. 逐步判别分析法在筛选泥石流评价因子中的应用[J]. *岩土力学*, 2010, 31(9): 2925-2929.  
MENG Fan-qi, LI Guang-Jie, LI Ming, et al. Application of stepwise discriminant analysis to screening evaluation factors of debris flow[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(9): 2925-2929. (in Chinese)
- [9] 张 晨, 王 清, 陈剑平, 等. 金沙江流域泥石流的组合赋权法危险度评价[J]. *岩土力学*, 2011, 32(3): 831-836.  
ZHANG Chen, WANG Qing, CHEN Jian-ping, et al. Evaluation of debris flow risk in Jinsha River based on combined weight process[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(3): 831-836. (in Chinese)
- [10] 陈鹏宇, 乔景顺, 彭祖武, 等. 基于等级相关的泥石流危险因子筛选与危险度评价[J]. *岩土力学*, 2013, 34(5): 1409-1415.  
CHEN Peng-yu, QIAO Jing-shun, PENG Zu-wu, et al. Screening of debris flow risk factors and risk evaluation based on rank correlation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(5): 1409-1415. (in Chinese)
- [11] CHIEN C C, TSENG C Y, DONG J J. New entropy-based method for variables selection and its application to the debris-flow hazard assessment[J]. *Engineering Geology*, 2007, 94(1): 19-26.
- [12] PARESCHI M T, SANTACROCE R, SULPIZIO R, et al. Volcaniclastic debris flows in the Clanio Valley (Campania, Italy): insights for the assessment of hazard potential[J]. *Geomorphology*, 2002, 43(3/4): 219-231.
- [13] HURLIMANN M, RICKENMANN D, MEDINA V, et al. Evaluation of approaches to calculate debris-flow parameters for hazard assessment[J]. *Engineering Geology*, 2008, 102(3): 152-163.
- [14] RUPERT M G, CANNON S H, GARTNER J E, et al. Using logistic regression to predict the probability of debris flows in areas burned by wildfires, Southern California, 2003-2006[R]. Reston: US Geological Survey, 2008.