

基于可拓灰色关联分析法的泥石流危险性评价

金星^a, 刘高^{a,b}, 魏蒙恩^a, 毛举^a

(兰州大学 a. 土木工程与力学学院; b. 西部灾害与环境力学教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 基于可拓灰色关联分析法,对黄河上游某水电站坝址区的泥石流沟进行研究。利用可拓法建立泥石流沟危险性评价的物元模型,结合灰色关联分析法分析各评价因子的权重值,建立可拓灰色关联分析模型,对泥石流沟进行危险性评价。最后将模糊数学法和规范法两种方法进行对比,结果非常接近,与现场勘察情况吻合,说明可拓灰色关联分析法在对泥石流危险性评价中有很好的适用性,也很好解决了泥石流的多样性、复杂性及评价结果不确定性等问题。

关键词: 泥石流; 可拓法; 灰色关联分析; 危险性评价

中图分类号: X43

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)04-0079-05

Assessment of debris flow hazard based on method of extension grey relational analysis

JIN Xing^a, LIU Gao^{a,b}, WEI Mengen^a, MAO Ju^a

(a. School of Civil Engineering and Mechanics; b. Key Laboratory of Disaster and Environment Mechanics in Western China of MOE, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The paper studied the debris flow gully of hydropower station dam area in the upperstream of Yellow river based on the method of extension grey relational analysis. By applying the method of extension theory, the matter-element model of hazard evaluation for debris flow gully was established. According to the weighted value of evaluation factors in method of grey relational analysis, it then set up analysis model and analyzed the hazard of debris flow gully. Comparing with the method of fuzzy mathematics and standard, the results are very similar and coincides with field investigation. The conclusion shows that the method is well applicable in assessment of debris flow risk, and solved the diversity, complexity and uncertainty of debris flow.

Key words: debris flow; method of extension theory; grey relational analysis; hazard assessment

1 研究背景

泥石流是我国山区最常见的一种突发性地质灾害,给人民的生命财产带来巨大威胁。其主要危害是冲毁城镇、工厂、矿山、房屋等工程设施,对农作物和林地破坏也非常严重,尤其是发生在水电站附近的泥石流,直接影响到水电站的正常运行和下游居民的安全。为了避免和减小泥石流所造成的危害,对泥石流的危险性进行准确的评价非常必要。

目前,泥石流危险性评价的方法很多,如规范法、模糊综合评判法、层次分析法、人工神经网络法和可拓法等^[1-3],但各种评价方法都有其局限性^[1]。

如规范法需要的评价因子较多,其中多数为定性且不易收集的,量化的较少;王念秦等^[1]运用模糊数学的方法来探讨泥石流的危险性,但需结合权的最小平方方法计算权重来配合分析,且关联函数计算比较复杂;赵源等^[3]运用人工神经网络的方法对泥石流进行风险评估,但存在收敛速度慢和目标函数存在局部极小点的缺点。由于泥石流危险性影响因子存在区域性、不确定性和评判标准的差异性,泥石流的运动也很复杂,目前还没有一种公认的危险性评价方法^[4],有必要对各种方法进行尝试。

针对泥石流的发生特点和影响因素,利用可拓法解决泥石流与各危险等级的关联度问题^[5-11],并

收稿日期:2014-03-31; 修回日期:2014-06-02

基金项目:国家重大基础研究发展计划(973计划)项目(2014CB744701)

作者简介:金星(1988-),男,山西长治人,硕士,主要研究方向为地质灾害。

通讯作者:刘高(1970-),男,重庆开县人,博士,教授,主要研究方向为岩石力学与工程、工程地质和地质灾害。

结合灰色关联分析法求各评价因子的权重^[12],建立可拓灰色关联分析模型,对泥石流的危险性进行评价。该方法将定性与定量评价结合起来,克服了其他方法中存在的不足,使评价结果更合理可靠。

2 评价因子选取

2.1 工程概况

本文研究的是黄河上游某水电站坝址区的泥石流沟,坝址区的冲沟较为发育,左右两岸共有 12 条冲沟(图 1),如果发生泥石流,会影响水电站的施工和运营安全。

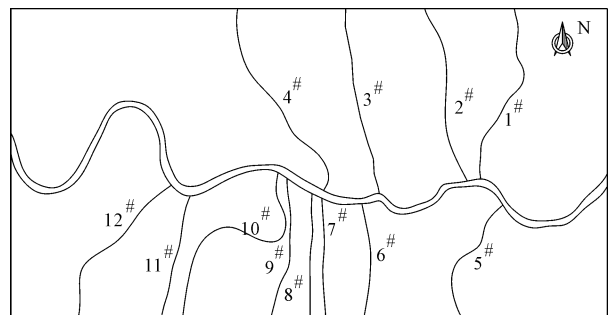


图1 研究区泥石流沟的分布图

上游右岸的 3[#]沟,距右岸取水口较近,极可能造成进水口段严重淤积和堵塞;坝下游的 3 条沟,包括右岸 4[#]沟和左岸 6[#]沟、7[#]沟,均位于导游洞出口、出水口和溢洪道出口附近,泥石流暴发及堆积不仅会掩埋和摧毁相关构筑物,而且因淤积导致雍水抬高。这些都会严重影响工程的施工安全和运营安全以及效益的发挥。为了工程建设的安全性及可控性,有必要对近坝区主要泥石流沟进行危险性评价。

2.2 评价因子

泥石流的形成环境条件极其复杂,影响其危险性的因子也很多,有定性的,也有定量的。为了准确地评价其危险性,应尽量将影响因子量化。定性因子一般采用打分方式,有较多人为因素参与,不能很好地量化;而定量因子应该具有一定的代表性和明确的物理意义。

根据上述标准和现场调查资料,选出其中影响最显著的评价因子,主要有河床比降 c_1 、流域面积 c_2 、松散堆积物贮量 c_3 、流域的相对高差 c_4 、主沟长度 c_5 、主沟长的弯曲系数 c_6 等 6 个因子。

3 关联度

各泥石流沟对于危险性关联度的确定,先将各评价因子划分危险等级,并建立物元模型,即确定经

典域、节域和物元,再运用关联函数求各危险等级的关联度。

3.1 等级划分

物元模型构建之前,首先要对上述评价因子进行危险性等级划分^[13]。根据多年工程实践总结,将危险性等级划分为无危险 N_1 、轻度危险 N_2 、中度危险 N_3 、高度危险 N_4 ,具体等级划分见表 1。

表1 泥石流沟危险因子评价等级划分

评价因子	危险等级划分			
	N_1	N_2	N_3	N_4
c_1	≤ 100	100 ~ 250	250 ~ 300	> 300
c_2	≤ 5	5 ~ 20	20 ~ 50	> 50
c_3	≤ 5	5 ~ 15	15 ~ 40	> 40
c_4	≤ 100	100 ~ 300	300 ~ 500	> 500
c_5	≤ 1	1 ~ 5	5 ~ 10	> 10
c_6	≤ 1.0	1.0 ~ 1.5	1.5 ~ 2.0	> 2.0

3.2 经典域

危险性评价的各等级对于相应评价因子的取值范围,即经典域 R_{ki} ,可表达为:

$$R_{ki} = (N_i, C_j, V_{ij}) = \begin{bmatrix} N_i & c_1 & V_{i1} \\ & c_2 & V_{i2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & V_{in} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: N_i 为各泥石流沟危险性评价的第 i 个等级; c_j 为泥石流危险性等级 N_i 的第 j 个评价因子; V_{ij} 分别为 N_i 关于 c_j 所规定的分段取值范围($i = 1, 2, 3, 4; j = 1, 2, \dots, 6; k = 1, 2, \dots, 12$); R_{ki} 为泥石流沟等级 N_i 对于各评价因子 c_j 的经典域。

由式(1)和表 1 可知,各危险等级的经典域 R 表示为:

$$R_{k1} = \begin{bmatrix} N_1 & c_1 & < 0, 100 > \\ & c_2 & < 0, 5 > \\ & c_3 & < 0, 5 > \\ & c_4 & < 0, 100 > \\ & c_5 & < 0, 1 > \\ & c_6 & < 0, 1.0 > \end{bmatrix}$$
$$R_{k2} = \begin{bmatrix} N_2 & c_1 & < 100, 250 > \\ & c_2 & < 5, 20 > \\ & c_3 & < 5, 15 > \\ & c_4 & < 100, 300 > \\ & c_5 & < 1, 5 > \\ & c_6 & < 1.0, 1.5 > \end{bmatrix}$$

$$R_{k3} = \begin{bmatrix} N_3 & c_1 & < 250,300 > \\ & c_2 & < 20,100 > \\ & c_3 & < 15,40 > \\ & c_4 & < 300,500 > \\ & c_5 & < 5,10 > \\ & c_6 & < 1.5,2.0 > \end{bmatrix}$$
$$R_{k4} = \begin{bmatrix} N_4 & c_1 & < 300,500 > \\ & c_2 & < 100,500 > \\ & c_3 & < 40,150 > \\ & c_4 & < 500,1500 > \\ & c_5 & < 10,60 > \\ & c_6 & < 2.0,5.0 > \end{bmatrix}$$

3.3 节域

泥石流危险性评价节域可表示为：

$$R_p = (P, C, V_{pj})$$
$$= \begin{bmatrix} P & c_1 & V_{p1} \\ & c_2 & V_{p2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & V_{pn} \end{bmatrix} \tag{2}$$

式中： P 为各泥石流危险性评价的所有等级； V_{pj} 为各等级 P 关于 c_j 的总取值范围。

根据式(2) 和经典域 R_{ki} ,可得泥石流危险性评价的节域 R_p 为：

$$R_p = \begin{bmatrix} p & c_1 & < 0,500 > \\ & c_2 & < 0,500 > \\ & c_3 & < 0,150 > \\ & c_4 & < 0,1500 > \\ & c_5 & < 10,60 > \\ & c_6 & < 0,5.0 > \end{bmatrix}$$

3.4 物元

对待评泥石流 $k^\#$,将实测资料用物元 R_k 表示：

$$R_k = (k^\#, c_j, v_j)$$
$$= \begin{bmatrix} k^\# & c_1 & v_1 \\ & c_2 & v_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_n \end{bmatrix} \tag{3}$$

式中： R_k 为物元，即待评物元； v_j 为泥石流沟 $k^\#$ 中收集得到关于评价因子 c_j 的实测值（表 2）。

以 1[#] 沟为例，由式(3) 和表 2 可得物元为：

$$R_1 = \begin{bmatrix} 1^\# & c_1 & 113.25 \\ & c_2 & 11.44 \\ & c_3 & 32.25 \\ & c_4 & 870 \\ & c_5 & 7.70 \\ & c_6 & 1.158 \end{bmatrix}$$

表 2 泥石流沟危险性评价因子实测值

%，km²，10⁴ m³/km²，m，km

沟号 $k^\#$	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6
1	113.25	11.44	32.25	870	7.70	1.158
2	121.10	18.72	63.15	1300	11.52	1.129
3	120.80	12.56	42.42	1290	10.65	1.070
4	69.56	39.12	38.43	1380	17.13	1.223
5	30.39	443.91	145.73	1390	54.60	1.413
6	221.60	1.92	19.99	920	4.43	1.216
7	261.10	1.16	58.61	720	2.76	1.045
8	139.50	3.94	15.52	920	4.57	1.118
9	216.40	1.32	32.85	760	3.52	1.085
10	136.60	7.16	79.10	1040	7.60	1.124
11	250.50	1.10	37.48	620	2.42	1.008
12	101.76	30.25	65.93	1270	12.50	1.120

3.5 关联度

待评泥石流沟关于各危险等级的关联函数表示为：

$$K_i(v_j) = \begin{cases} -\frac{\rho(v_j, V_{ij})}{|V_{ij}|} & v_j \in V_{ij} \\ \frac{\rho(v_j, V_{ij})}{\rho(v_j, V_{pj}) - \rho(v_j, V_{ij})} & v_j \notin V_{ij} \end{cases} \tag{4}$$

式中： $\rho(v_j, V_{ij}) = |v_j - (a_{ij} + b_{ij})/2| - (a_{ij} - b_{ij})/2$ ； $|V_{ij}| = b_{ij} - a_{ij}$ ； $\rho(v_j, V_{pj}) = |v_j - (a_{pj} + b_{pj})/2| - (a_{pj} - b_{pj})/2$ 。

对于 1[#] 沟，根据式(4) 和表 2 ,可得到其关联函数值如下表 3。

表 3 1[#] 沟的关联函数值

$K_i(v_j)$	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6
K_1	-0.105	-0.360	-0.458	-0.550	-0.465	-0.120
K_2	0.088	0.429	-0.348	-0.475	-0.260	0.316
K_3	-0.547	-0.428	0.310	-0.370	0.460	-0.228
K_4	-0.623	-0.886	-0.194	0.370	-0.230	-0.421

待评价泥石流沟 $k^\#$ 关于危险性等级 N_i 的关联度 $K_i(k^\#)$ 为：

$$K_i(k^\#) = \sum_{j=1}^n \lambda_j K_i(v_j) \tag{5}$$

式中: λ_j 为各评价因子的权重,且 $\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1$ 。

4 权重

由于评价因子对泥石流的重要程度不同,在对泥石流进行危险性评价时,还需要确定各评价因子的权重,权重的确定是影响评价结果准确性的核心问题。普遍采用的经验法,在求权重时存在一些主观性,不能客观的反映实际情况,为了克服判断中的主观因素以及专家打分的难操作性,本文采用了灰色关联度分析法^[12]。步骤如下:

第 1 步,确定参考序列和比较序列,

设 n 个评价因子在 t 条泥石流沟上组成 n 个比较序列表示为:

$$\begin{aligned} V_1 &= (v_1(1), v_1(2), \cdots, v_1(t)) \\ V_2 &= (v_2(1), v_2(2), \cdots, v_2(t)) \\ &\vdots \\ V_n &= (v_n(1), v_n(2), \cdots, v_n(t)) \end{aligned}$$

参考序列为:

$$V_0 = (v_0(1), v_0(2), \cdots, v_0(t))$$

其中, $v_0(k) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n v_j(k)$ 。

第 2 步,求各序列的初值像,

$$v'_j(k) = v_j(k) / \sum_{j=1}^n v_j(k)$$
$$V'_j = (v'_j(1), v'_j(2), \cdots, v'_j(t)) \tag{6}$$

第 3 步,求各点的差序列,

$$\Delta_j(k) = |v'_j(k) - v'_0(k)|$$
$$\Delta_j = (\Delta_j(1), \Delta_j(2), \cdots, \Delta_j(t)) \tag{7}$$

第 4 步,求两极的最大差和最小差,

两极最大差,即差序列中最大值,表达式为:

$$\Delta_{\max} = \max_j \max_k \Delta_j(k);$$

两极最小差,即差序列中最小值,表达式为:

$$\Delta_{\min} = \min_j \min_k \Delta_j(k)。$$

第 5 步,计算关联系数,

关联系数的计算公式为:

$$\gamma_{0j}(k) = \frac{\Delta_{\min} + \xi \Delta_{\max}}{\Delta_j(k) + \xi \Delta_{\max}} \tag{8}$$

式中: ξ 为分辨系数, $\xi \in (0, 1)$,一般取 $\xi = 0.5$ 。

第 6 步,计算关联度,

$$\gamma_{0j} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^n \gamma_{0j}(k) \tag{9}$$

第 7 步,计算权重值,

$$\lambda_j = \gamma_{0j} / \sum_{j=1}^n \gamma_{0j} \tag{10}$$

由式(10) 和表 2 得到各评价因子 $c_1 \sim c_6$ 的权重分别为: $\lambda_1 = 0.1598, \lambda_2 = 0.1518, \lambda_3 = 0.1744, \lambda_4 = 0.1714, \lambda_5 = 0.1700$ 和 $\lambda_6 = 0.1726$ 。

5 可拓灰色关联模型

5.1 模型

根据式(5) 和式(10),可以得到可拓灰色关联模型如下,

$$\begin{cases} K_i(k^\#) = \sum_{j=1}^n \lambda_j K_i(v_j) \\ \lambda_j = \gamma_{0j} / \sum_{j=1}^n \gamma_{0j} \end{cases} \tag{11}$$

由式(11)、表 1 和表 2 得到各泥石流沟对各危险等级的关联度(表 4)。

表 4 各待评泥石流沟与各危险等级的关联度

泥石流 沟号 $k^\#$	关联度			
	$K_1(k^\#)$	$K_2(k^\#)$	$K_3(k^\#)$	$K_4(k^\#)$
1	- 0.4173	- 0.1996	- 0.3385	- 0.2176
2	- 0.3454	- 0.0526	- 0.1229	- 0.3160
3	- 0.3994	- 0.1471	- 0.3431	- 0.2663
4	- 0.3689	- 0.3125	- 0.3009	- 0.2443
5	- 0.6067	- 0.6932	- 0.7527	- 0.1290
6	- 0.2737	- 0.0878	- 0.2446	- 0.3682
7	- 0.2651	- 0.1709	- 0.3181	- 0.3107
8	- 0.2649	- 0.0254	- 0.3195	- 0.4345
9	- 0.2601	- 0.1107	- 0.2560	- 0.3700
10	- 0.3693	- 0.1282	- 0.2862	- 0.2035
11	- 0.2502	- 0.1792	- 0.2963	- 0.3814
12	- 0.3970	- 0.2734	- 0.3286	- 0.1984

对于某条泥石流沟 $k^\#$ 的危险等级,取最大关联度对应的等级,即满足下式,

$$k_i = \max K_i(k^\#) \tag{12}$$

则该泥石流沟 $k^\#$ 危险等级为最大关联度 k_i 对应的危险等级 N_i 。根据式(12) 和表 4 得到各泥石流沟的危险性等级(表 5),评价结果与现场勘查情况吻合。

5.2 评价结果分析

为进一步检验本文方法的可行性,采用模糊数学法^[1] 和规范法^[14] 对上述实例进行危险性评价,评价结果见表 5。

(1) 模糊数学法计算中,运用表 2 中的评价指标,同样采用灰色关联分析法求权重,最后评价结果与可拓法仅存在 1 处差异;而可拓法在构造关联函

数方面较简单,与模糊数学法相比,可拓法更简单可行。

(2) 规范法中需要的评价因子较多,但大多是定性的,如岩性、构造等因素无法准确的量化,取值不确定,所以结果与文中方法差异较大;而可拓法选取其中影响显著且定量的评价因子,所以可拓法较准确。

表5 各待评泥石流沟危险等级的评价结果				
泥石流沟名 $k^{\#}$	最大关联度 k_i	评价结果		
		本文方法	模糊数学法	规范法
1	-0.1996	轻度	轻度	轻度
2	-0.0526	轻度	高度	轻度
3	-0.1471	轻度	轻度	轻度~中度
4	-0.2443	高度	高度	中度
5	-0.1290	高度	高度	中度
6	-0.0878	轻度	轻度	轻度~中度
7	-0.1709	轻度	轻度	轻度~中度
8	-0.0254	轻度	轻度	轻度
9	-0.1107	轻度	轻度	轻度~中度
10	-0.1282	轻度	轻度	轻度~中度
11	-0.1792	轻度	轻度	轻度
12	-0.1984	高度	高度	中度

6 结 语

可拓法选取的指标较少,避开了定性的指标,选取意义明确和量化的指标,也避免了人为因素参与和打分标准不确定的缺陷,得到的评价结果符合实际。

可拓法在关联度计算方面较简单,可以快速得到关联度,同时充分考虑了评价因子与各危险等级的关系;运用灰色关联分析法,弥补了可拓法中权重值无法确定的不足,在解决泥石流危险性评价问题上,使定性问题定量化,为泥石流危险性评价提供了

新思路。

参考文献:

[1] 王念秦,姚 勇. 基于模糊数学和权的最小平方方法的泥石流易发性评价方法[J]. 灾害学,2008,23(2):5-9.

[2] 铁永波,唐 川. 层次分析法在单沟泥石流危险度评价中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报,2006,17(4):79-84.

[3] 赵 源,刘希林. 人工神经网络在泥石流风险评价中的应用[J]. 地质灾害与环境保护,2005,16(2):135-138.

[4] 蒋小鹏,李少莉,翟明,等. 基于可拓学理论对泥石流危险度的评价[J]. 中国公路,2012,(z1):44-47.

[5] 蔡 文. 物元模型及其应用[M]. 北京:科学技术文献出版社,1994.

[6] 蔡 文. 可拓论及其应用[J]. 科学通报,1999,44(7):673-682.

[7] 张春燕,张拥军,蔡 文. 可拓集合及其应用研究[J]. 数学的实践与认识,2002,32(2):301-308.

[8] Zhu C H, Shen N Q, Wang T, et al. Study on danger evaluation of debris flow using extension method[J]. International Conference on Systems and Informatics, 2012, 12(2):1352-1355.

[9] 匡乐红,刘宝琛,姚京成. 基于模糊可拓方法的泥石流危险度区划研究[J]. 灾害学,2006,21(1):68-72.

[10] 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.

[11] 匡乐红,徐林荣,刘宝琛. 基于可拓方法的泥石流沟危险性评价[J]. 中国铁道科学,2006,27(5):1-6.

[12] 郑立峰,唐见兵. 基于灰色关联分析的系统仿真因素权重确定[J]. 计算机仿真,2007,24(9):76-78.

[13] 刘厚成,谷秀芝. 基于可拓层次分析法的泥石流危险性评价研究[J]. 中国地质灾害与防治学报,2010,21(3):61-66.

[14] 中华人民共和国地质矿产行业标准. DZ/T 0220-2006 泥石流灾害防治工程勘查规范[S]. 北京:中国标准出版社,2006.