

基于相对差异函数和博弈论的泥石流敏感性分析

阮云凯¹, 陈剑平¹, 史明远¹, 李严严²
(1. 吉林大学 建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 中国科学院 地质与地球物理研究所, 北京 100029)

摘 要: 引入可变模糊理论中的相对差异函数, 建立泥石流敏感性分析模型. 选取内蒙古赤峰抽水蓄能电站下库区 11 条泥石流沟, 确定 7 个主要影响因子即单位面积物源量、泥砂补给段长度比、主沟平均比降、山坡平均坡度、流域切割密度、主沟床弯曲系数和植被贫瘠率. 利用优序图法确定因子的主观权重, 熵值法确定客观权重, 由博弈论确定各个影响因子的组合权重分别为 0.19, 0.14, 0.19, 0.10, 0.09, 0.18, 0.11. 计算分析得出, 该库区 11 条泥石流的敏感性有 6 条为轻度敏感, 5 条为中度敏感. 将评价结果与现场实际调查情况对比分析可知, 11 条泥石流沟的敏感度水平与泥石流实际发育情况相符, 证明该方法的可行性.

关 键 词: 泥石流; 组合赋权; 敏感性; 相对差异函数; 评价模型

中图分类号: P 642.23 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2016)12-1800-05

Debris Flow Susceptibility Analysis Based on Relative Difference Function and Game Theory

RUAN Yun-kai¹, CHEN Jian-ping¹, SHI Ming-yuan¹, LI Yan-yan²
(1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China; 2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China. Corresponding author: RUAN Yun-kai, E-mail: ruanyunkai@163.com)

Abstract: A relative different function of the variable fuzzy theory was introduced to the building of a sensitivity analysis model for debris flow. 11 debris flow catchments located in Chifeng pumped storage power station in Inner Mongolia were investigated. Seven major factors, namely, loose material volume per square kilometer, loose material supply length ratio, average gradient of the main channel, average hill slope, drainage density, curvature of the main channel, and poor vegetation area ratio, were selected for debris flow susceptibility analysis. Precedence chart was used for objective weighting and entropy method was used for subjective weighting. Combination weighting was calculated by game theory. Combination weights of major factors for the investigated 11 debris flow catchments are 0.19, 0.14, 0.19, 0.10, 0.09, 0.18 and 0.11, respectively. Susceptibility results show that the susceptibility of 6 debris flow catchments are very low and 5 are low. Comparing the susceptibility results with field observations, 11 debris flow catchments agrees very well with real status of debris flow, proved the feasibility of this method.

Key words: debris flow; combination weighting; susceptibility; relative different function; assessment model

泥石流是最危险的地质灾害之一, 多发生在山区沟谷地带. 它通常在极短的时间内暴发, 能量高, 流速快, 破坏力极大^[1]. 泥石流大多伴随山区洪水而发生, 它与一般洪水的区别在于泥石流除了水还包含大量的泥沙块石等碎屑物质, 因此比一般洪水更具有破坏力. 统计数据表明, 在中国 29 个省 771 个城市受泥石流危害的年平均率为每个城市每年发生 18 条泥石流. 自 1970 年来, 泥石流导致死亡人数多达 3 700 人/年^[2], 因此, 研究泥石流的敏感性对我国防灾减灾工作具有一定的

实际意义^[3].

目前,学者对泥石流敏感性研究较多.刘希林等^[4]将定性定量分析有效结合起来,提出多因子综合评判泥石流敏感性模型;Han 等提出以计算机数值模拟代替传统的物理模拟,进行了泥石流风险概率的评价^[5];Shen 等^[6]应用多元统计分析模型进行了台湾花莲县泥石流的敏感性评价;Kavzoglu 等^[7]构建了人工神经网络的敏感性评价模型,并应用于委内瑞拉 Jabonosa 河盆地内的地质灾害评价. Zhang 等^[8]利用可拓及 GIS 技术对研究区泥石流进行敏感性等级分类. Niu 等^[9]基于逐步判别理论对评价指标优化提取,建立了泥石流敏感性评价的可拓模型.综上所述,现有的研究模型所选取的指标因子与研究区工程地质条件基本吻合,然而,影响泥石流敏感性的因子具有不确定性、模糊性和非线性.可变模糊集理论中的相对差异函数可有效地处理影响因子间的模糊性问题^[11].应用可变模糊集理论可为泥石流敏感性评价模型提供新的方向.

本文提出的新方法是基于相对差异函数和博弈论构建泥石流敏感性评价模型.文献[8-10]最终确定影响泥石流敏感性最主要的 7 个指标对内蒙古赤峰抽水蓄能电站库区 11 条泥石流沟进行敏感性评价.具体步骤如下:①基于 3S 技术确定影响大规模泥石流敏感性的主要因素;②利用优序图法确定各评价因子主观权重,熵值法确定其客观权重,博弈论确定其综合权重;③构建泥石流敏感性的相对差异函数评价模型^[11].

1 构建评价模型

1.1 确定影响因子权重

优序图法是由美国学者穆蒂提出的,是基于主观判断的方法,需要大量的经验积累.而熵值法可以挖掘数据本身的信息,结果相对客观.综合考虑,本文采用优序图法与熵值法综合权重确定方法.

1) 优序图.如图 1 所示,在空白位置写上“0”或“1”.其中,“1”代表进行比较两个元素中相对“重要的”、“优的”、“大的”,而“0”代表与之对立的.若两者相等,则填“0.5”.剩下的类推即可.同时,对优序图进行总体检验和互补检验.

计算优序图的权重,就是将每一行格子填写的数字横向求和,再分别用总数 $T(T = n(n - 1) / 2)$ 除以它就可以获得各因子的权重值.

2) 信息熵确定评价指标的客观权重.熵值法应用较多,不赘述.

	P_1	P_2	P_3	\cdots	P_n
P_1		1	0		
P_2	0				
P_3	1				
\vdots					
P_n					

图 1 优序图法的空白格式

Fig. 1 Blank format of precedence chart method

3) 博弈论组合赋权.

对于一个权重向量 $\delta = \{\delta_1, \delta_2, \cdots, \delta_n\}$,其线性组合为

$$\delta = \sum_{k=1}^n \alpha_k \delta_k^T \quad (\alpha_k > 0). \quad (1)$$

式中 α_k 为权重系数.

在可能的线性组合集中寻找最优解 δ^* .优化权重系数 α_k ,使得目标 δ 和各个 δ_k 的离差达到极小化值,即

$$\min = \left\| \sum_j \alpha_j \times \delta_j^T - \delta_i^T \right\|_2, (i = 1, 2, \cdots, n). \quad (2)$$

由矩阵微分的性质可得,对式(2)进行一阶求导,其方程组形式如下:

$$\begin{bmatrix} \delta_1 \cdot \delta_1^T & \delta_1 \cdot \delta_2^T & \cdots & \delta_1 \cdot \delta_n^T \\ \delta_2 \cdot \delta_1^T & \delta_2 \cdot \delta_2^T & \cdots & \delta_2 \cdot \delta_n^T \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \delta_n \cdot \delta_1^T & \delta_n \cdot \delta_2^T & \cdots & \delta_n \cdot \delta_n^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_1 \cdot \delta_1^T \\ \delta_2 \cdot \delta_2^T \\ \vdots \\ \delta_n \cdot \delta_n^T \end{bmatrix}. \quad (3)$$

解方程组并进行归一化,最终获得组合权重值

$$\delta^* = \sum_{k=1}^n \alpha_k^* \cdot \delta_k^T. \quad (4)$$

1.2 相对差异函数确定泥石流敏感性评价隶属度评价模型

设 A 为论域 U 上的一个模糊概念,任意元素 $u(u \in U)$,位于相对隶属度函数连续数轴的任一点,用 $u_A(u)$ 表示 u 对 A 吸引性质的相对隶属度, $u_{A^c}(u)$ 表示排斥性质 A^c 的相对隶属度,设 $D(u) = u_A(u) - u_{A^c}(u)$, $D(u)$ 为 u 对 A 的相对差异度.映射 $D: U \rightarrow [-1, 1]$, $u \rightarrow D(u) \in [-1, 1]$,则 u 对 A 的相对差异函数^[11-12]可表示为图 2 的形式.

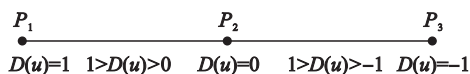


图 2 相对差异函数

Fig. 2 Relative different function

泥石流敏感性评价模型中设标准区间矩阵为 $[a, b]_{ij}$, 变动区间矩阵为 $[c, d]_{ij}$, M 为吸引域区间 $[a, b]$ 中 $D(u) = 1$ 的点值. 则 n 条泥石流沟 m 个影响因素待评价样本特征矩阵为

$$X = (x_{ij}) = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}.$$

(5)

式中: x_{ij} 为第 j 条泥石流沟影响因素 i 的特征值, $i = 1, 2, \cdots, m, j = 1, 2, \cdots, n$.

比较第 j 条泥石流沟影响因素 i 的特征值 x_{ij} 与评价等级 $k(k = 1, 2, 3, 4)$ 因子 i 的 M_{ik} 值, 若 x_{ij} 落在 M_{ik} 左侧, 隶属度函数:

$$u_A(x_{ij})_n = 0.5 \left(1 + \frac{x_{ij} - a_{ik}}{M_{ik} - a_{ik}} \right), x_{ij} \in [a_{ik}, M_{ik}];$$

(6)

$$u_A(x_{ij})_n = 0.5 \left(1 - \frac{x_{ij} - a_{ik}}{c_{ik} - a_{ik}} \right), x_{ij} \in [c_{ik}, a_{ik}].$$

(7)

若 x_{ij} 落在 M_{ik} 右侧, 隶属度函数:

$$u_A(x_{ij})_n = 0.5 \left(1 + \frac{x_{ij} - b_{ik}}{M_{ik} - b_{ik}} \right), x_{ij} \in [M_{ik}, b_{ik}];$$

(8)

$$u_A(x_{ij})_n = 0.5 \left(1 - \frac{x_{ij} - b_{ik}}{d_{ik} - b_{ik}} \right), x_{ij} \in [b_{ik}, d_{ik}].$$

(9)

泥石流沟 j 因子 i 对各级别的相对隶属度矩阵为

$$P = u_A(x_{ij})_k.$$

(10)

泥石流沟 j 对级别 k 的综合相对隶属度:

$$jP_k = \left\{ 1 + \left[\frac{\sum_{i=1}^m [\delta^* (1 - u_A(x_{ij})_k)]^b}{\sum_{i=1}^m [\delta^* u_A(x_{ij})_k]^b} \right]^{\frac{a}{b}} \right\}^{-1}.$$

(11)

式中: δ^* 为影响因素权重; a 为优化准则参数; b 为距离参数.

1.3 泥石流敏感性评价指标及等级划分标准

本文按文献[8]中的方法, 选取泥石流的单位面积物源量 C_1 ($10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$), 泥砂补给段长度比 C_2 , 主沟平均比降 C_3 , 山坡平均坡度 C_4 ($^\circ$), 流域切割密度 C_5 (km/km^2), 主沟床弯曲系数 C_6 和植被贫瘠率 C_7 (%) 共 7 个因子作为泥石流敏感性评价因子, 并据此建立了泥石流敏感性评价指标体系(图 3). 应用该评价体系对内蒙古赤峰抽水蓄能电站下库区 11 条泥石流沟进行敏感性评价, 各影响因素的取值见表 1, 影响因素

等级划分标准^[4]见表 2.

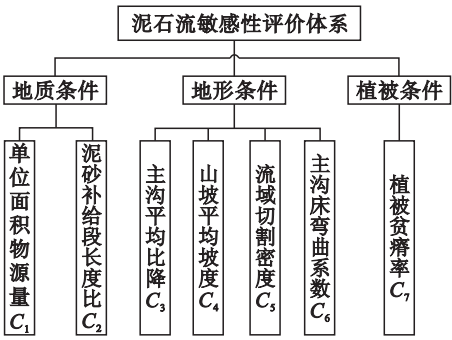


图 3 泥石流敏感性评价体系
Fig. 3 Debris flow sensitivity evaluation system

表 1 各影响因素指标值
Table 1 Values of index

泥石流沟	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7
大石门沟	0.13	0.55	0.21	29	1.93	1.23	0.85
空沟	0.50	0.15	0.16	26	3.57	1.07	0.80
骡子沟	0.29	0.60	0.19	25	4.73	1.22	0.70
车台沟	0.22	0.60	0.14	27	4.51	1.15	0.85
大茅沟	0.05	0.30	0.15	28	2.77	1.07	0.75
小南沟	0.15	0.40	0.15	22	6.30	1.01	0.75
大东沟	0.07	0.55	0.11	19	3.99	1.13	0.80
石板沟	0.06	0.40	0.11	17	5.21	1.07	0.75
大峰山沟	0.10	0.31	0.12	28	7.76	1.35	0.75
兴盛永沟	0.18	0.53	0.17	19	3.91	1.06	0.85
后地后沟	0.31	0.35	0.14	18	4.73	1.14	0.75

表 2 泥石流敏感性影响因素等级划分表
Table 2 Boundaries for susceptibility classes

敏感性等级	轻度	中度	高度	极度
C_1	≤ 30	30 ~ 100	100 ~ 1 000	$\geq 1 000$
C_2	≤ 0.1	0.1 ~ 0.3	0.3 ~ 0.6	≥ 0.6
C_3	≤ 0.1	0.1 ~ 0.2	0.2 ~ 0.3	≥ 0.3
C_4	≤ 20	20 ~ 30	30 ~ 35	≥ 30
C_5	≤ 5	5 ~ 10	10 ~ 20	≥ 20
C_6	≤ 1.1	1.10 ~ 1.25	1.25 ~ 1.40	≥ 1.40
C_7	≤ 0.2	0.2 ~ 0.3	0.3 ~ 0.4	≥ 0.4

2 研究区概况

内蒙古赤峰抽水蓄能电站位于经棚镇与赤峰市之间的芝瑞镇. 电站初拟装机容量为 1 200 MW, 额定水头为 340 m, 规模为大(1)型. 下水库修建于百岔河上, 水库正常蓄水位 1 136 m, 死水位 1 122 m, 库容 1 080 万 m^3 . 下库区百岔河两岸分布有多条泥石流沟, 各泥石流沟轮廓见图 4.

该地区地面高程 1 100 ~ 1 700 m, 山脉整体走

向为 NE 方向. 河谷横断面呈“U”字型,河谷两侧坡面较陡,坡度介于 $30^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 之间,局部位置有陡崖分布,研究区域内河床宽度约为 200 ~ 500 m. 区内地形大体上西高东低,百岔河左岸(西岸)陡峻的山峰为多,从山峰往河谷的方向坡度呈现较大变化趋势,右岸(东岸)大多为比较宽缓的山坡地形.

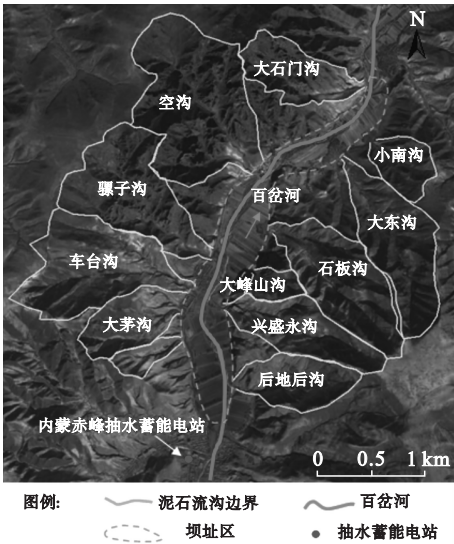


图 4 各泥石流沟地理位置

Fig. 4 Geographical position of debris flows

3 相对差异函数的泥石流敏感性评价模型

3.1 计算影响因子权重

由式(1) ~ 式(4),计算评价因子综合权重:
 $\delta_k^* = [\delta_1^*, \delta_2^*, \dots, \delta_7^*] = [0.19 \ 0.14 \ 0.19 \ 0.10 \ 0.09 \ 0.18 \ 0.11].$

3.2 构造敏感性评价隶属度矩阵

取各因子的敏感性等级论域为 $U = (\text{轻度}, \text{中度}, \text{高度}, \text{极度})$,泥石流沟按 4 个级别因子标准区间进行敏感性评价. 构建各级别评价因子的标准区间矩阵 $I_{ab} = [[a, b]_{i1}, [a, b]_{i2}, [a, b]_{i3}, [a, b]_{i4}]$ 和变动矩阵 $I_{cd} = [[c, d]_{i1}, [c, d]_{i2}, [c, d]_{i3}, [c, d]_{i4}]$. 确定区间 $[a, b]$ 中的相对隶属度 $u_A(x_{ij})_k = 1$ 的点,构造矩阵 $M = (M_{i1}, M_{i2}, M_{i3}, M_{i4}) = (M_{ik})$. 比较待评价泥石流沟特征值 x_{ij} 与 M_{ik} 值. 待评价样本的特征值矩阵为

$$X = \begin{bmatrix} 0.13 & 0.55 & 0.21 & 29 & 1.93 & 1.23 & 0.85 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0.31 & 0.35 & 0.14 & 18 & 4.73 & 1.14 & 0.75 \end{bmatrix}^T.$$

构造矩阵

$$I_{ab} =$$

$$\begin{bmatrix} [0,30] & [30,100] & [100,1\,000] & [1\,000,1\,800] \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ [0,0.2] & [0.2,0.3] & [0.3,0.4] & [0.4,1.0] \end{bmatrix},$$

$$I_{cd} =$$

$$\begin{bmatrix} [0,100] & [0,1\,000] & [30,1\,800] & [100,1\,800] \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ [0,0.3] & [0,0.4] & [0.2,1.0] & [0.3,1.0] \end{bmatrix},$$

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 65 & 550 & 1\,400 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0.25 & 0.6 & 0.65 \end{bmatrix}.$$

利用已求泥石流敏感性影响因子综合权重 $\delta_k^* = [\delta_1^*, \delta_2^*, \dots, \delta_7^*] = [0.19 \ 0.14 \ 0.19 \ 0.10 \ 0.09 \ 0.18 \ 0.11]$,结合式(5) ~ 式(11)确定各条泥石流沟的相对隶属度,并对泥石流沟敏感性作出评价,见表 3.

表 3 泥石流敏感度分析结果
Table 3 Susceptibility results of debris-flows

泥石流沟	级别特征值 H	本文方法	可拓学方法
大石门沟	1.23	轻度	轻度
空沟	2.24	中度	中度
骡子沟	1.85	中度	轻度
车台沟	1.31	轻度	轻度
大茅沟	1.11	轻度	轻度
小南沟	1.35	轻度	轻度
大东沟	1.92	中度	中度
石板沟	2.11	中度	中度
大峰山沟	1.25	轻度	轻度
兴盛永沟	1.76	中度	轻度
后地后沟	1.27	轻度	轻度

3.3 评价结果分析

从表 3 可以看出,本文评价结果和可拓学方法评价结果基本吻合,仅有骡子沟和兴盛永沟评价结果有所差异. 但是通过现场调查(表 1)可知,骡子沟、兴盛永沟的泥沙补给段长度比、主沟平均比降和植被贫瘠率都比较大,以上 3 项指标均有利于诱发泥石流的形成. 同时 2013 年 8 月 14 日下午 4 点的一场强降雨验证了这一观点. 强降雨后第 14 天,通过 GPS 和野外调查,兴盛永沟降雨前,扇的周长为 4 m,高约 0.5 m;雨后堆积扇高约 1.5 m,长 4 m,宽 2.5 m. 可见有新的堆积物由沟内冲出,降雨前后堆积扇形态与规模如图 5 所示. 因此,本文的评价结果偏于保守是合理的,更加吻合现场泥石流的发育情况.



图 5 兴盛永沟堆积扇松散物源强降雨前后变动情况
Fig. 5 Comparison of the loose material volume for the Xingshengyong catchment before and after the heavy rainfall

4 结 论

1) 基于相对差异函数和博弈论组合赋权的方法应用于泥石流敏感性评价中,与可拓学的评价结果对比,骡子沟和兴盛永沟为中度敏感,本文评价结果偏于保守,但更加吻合现场实际情况。

2) 计算得出 5 条泥石流沟敏感性程度为中度,6 条泥石流沟为轻度敏感,结合现场地质现象分析,这与实际相符,很好地验证了这种方法的准确性。

3) 泥石流敏感性分析是一个受多种不确定性因素影响的复杂问题,利用相对差异函数来表征各影响因子的动态变化,更加符合实际。

参考文献:

- [1] Chen N S, Yue Z Q, Cui P, et al. A rational method for estimating maximum discharge of a landslide-induced debris flow: a case study from Southwestern China [J]. *Geomorphology*, 2007, 84(1): 44–58.
- [2] 杨鑫. 基于 3S 技术的汶川强震区潜在突发性泥石流危险性区划及评价研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2012.
(Yang Xin. Wenchuan earthquake meizoseismal area of potential sudden debris flow's hazard zonation and evaluation based on 3S technology [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012.)
- [3] Liu X L, Lei J Z. A method for assessing regional debris flow risk: an application in Zhaotong of Yunnan province (SW China) [J]. *Geomorphology*, 2003, 52: 181–191.
- [4] 刘希林, 唐川. 泥石流危险性评价[M]. 北京: 科学出版社, 1995: 12–22.
(Liu Xi-lin, Tang Chuan. Assessment of debris flow hazard degree [M]. Beijing: Science Press, 1995: 12–22.)
- [5] Han G Q, Wang D G. Numerical modeling of Anhui debris flow [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1996, 122(5): 262–265.
- [6] Shen C W, Lo W C, Chen C Y. Evaluating susceptibility of debris flow hazard using multivariate statistical analysis in Hualien County [J]. *Disaster Advances*, 2012, 5(4): 743–755.
- [7] Gomez H, Kavzoglu T. Assessment of shallow landslide susceptibility using artificial neural networks in Jabonosa River Basin, Venezuela [J]. *Engineering Geology*, 2005, 78: 11–27.
- [8] Zhang W, Chen J P, Wang Q, et al. Susceptibility analysis of large-scale debris flows based on combination weighting and extension methods [J]. *Natural Hazards*, 2013, 66(2): 1073–1100.
- [9] Niu C C, Wang Q, Chen J P, et al. Debris-flow hazard assessment based on stepwise discriminant analysis and extension theory [J]. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 2014, 47(3): 211–222.
- [10] Meng F Q, Li G J, Li M, et al. Application of stepwise discriminant analysis to screening evaluation factors of debris flow [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(9): 2925–2929.
- [11] Chen S Y, Xue Z C, Li M. Variable sets principle and method for flood classification [J]. *Science China Technological Sciences*, 2013, 56(9): 2343–2348.
- [12] 国威, 潘晓东, 蒋曙豪. 基于相对差异函数的隧道群交通安全评价[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(1): 101–105.
(Guo Wei, Pan Xiao-dong, Jiang Shu-hao. Relative difference function-based traffic safety assessment of tunnel groups [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2013, 41(1): 101–105.)