

基于改进组合赋权和可拓学的泥石流危险性评价

梁一敏

(珠海市水库管理中心, 广东 珠海 519000)

摘要 本文以广西全州县尹家沟泥石流为研究对象, 根据现场的勘察资料, 选择合理的评价因子及评价等级, 用层次分析法确定主观权重, 同时利用灰色关联度法确定客观权重, 再将两者耦合得到组合权重, 最后结合可拓学建立物元来建立单沟泥石流危险性评价模型。运用该模型对尹家沟的主沟和六条支沟作危险性评价, 所得到的评价结果基本符合现场的勘察情况, 表明这种新的评价方法是一种可行的优化算法。

关键词 泥石流; 危险性评价; 组合赋权; 可拓学

中图分类号: X82

文献标识码: A

文章编号: 1007-0745(2023)08-0015-04

泥石流危险性评价是泥石流灾害预测预报和防灾减灾的重要内容, 是对研究区域范围内泥石流发生的可能性进行的综合评价, 这项工作有助于消除或减轻因泥石流发生给当地居民带来的生命和财产损失, 也有助于管理部门科学地制定出应对泥石流的防灾措施和办法^[1]。

泥石流系统具有很明显的时空变异性, 目前还没有统一的评价规范要求^[2]。根据模型权重的确定情况, 我们将评价方法大致分为三种: 第一种是主观赋权法, 如专家打分法、层次分析法等, 但该方法从评价因子的选取到权重值获得都有较大的人为因素在里面, 故一定程度上不能完全客观地表示不同地域的危险程度^[3]。第二种是客观赋权法, 主要包括熵值法、灰色关联度法、粗糙集理论等, 但过分依赖数学的定量方法^[4]。第三种是组合赋权法, 能同时兼顾评价因子的主观性和客观性, 但目前该方法在偏好系数取值时, 大多是偏向于决策者的主观意愿来分配主观权重和客观权重的偏好系数, 不同研究者得出的结论会有差异^[5-6]。可拓学用形式化的模型来探讨事物拓展的可能性、方法及规律, 并用来解决矛盾问题, 能解决泥石流普遍具有多样性和不确定性的问题^[7]。但当前基于可拓学的泥石流危险性评价研究多采用单一的方法, 不能同时兼顾主客观因素^[8]。

1 研究区域概况

研究区位于广西桂林市全州县文桥镇尹家沟内, 距离文桥镇 9.8km, 距离县城 36km, 属亚热带湿润季风气候, 四季分明, 雨量充沛。年平均气温 16℃~18.5℃, 7~8 月会出现大于 37℃ 高温。全州县多年平

均降雨量 1156mm~2601mm, 降雨主要集中在 4~7 月, 占年降雨量的 57%~75%, 为丰水期。2017 年 7 月 1 日全州县最大小时降雨量为 80.0mm, 最大日降水量为 480.0mm, 降雨量为 50 年一遇, 为泥石流灾害的发生提供了充分的水源条件。

尹家泥石流位于万乡河右岸, 主沟流域为典型的中山峡谷地貌, 海拔最高 1125m, 最低 165m, 相对高差 960m, 集雨面积 3.18km²。支沟较为发育, 呈“树枝状”, 沟谷总体上为深切“V”型谷, 两岸坡体较为陡峭, 局部直立。沟谷弯曲狭窄, 地形起伏大, 极利于降雨在短时间内汇集, 冲蚀坡面, 为泥石流爆发提供有利地形条件。据野外调查, 尹家沟有一条主沟和六条支沟, 植被覆盖率约 60%。沟域内出露的主要地层为上覆第四系堆土和残坡积黏土, 下伏基岩为奥陶系田口岭组细砂岩、长石石英砂岩、岩屑质砂岩、不等粒砂岩及页岩互层。沟谷两侧堆积较厚的第四系残坡积松散堆积物, 厚 1m~5m, 局部可达 8m 以上, 崩塌、滑坡较发育, 为泥石流形成的物源条件。

2 改进组合赋权和可拓学物元评价模型

2.1 经典域和节域的确定

2.1.1 经典域

$$R_j = (N_j, C_j, V_j) = \begin{bmatrix} C_1 & V_{j1} \\ C_2 & V_{j2} \\ \vdots & \vdots \\ C_n & V_{jn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 & (a_{j1}, b_{j1}) \\ C_2 & (a_{j2}, b_{j2}) \\ \vdots & \vdots \\ C_n & (a_{jn}, b_{jn}) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: R_j 代表物元; N_j 是泥石流危险性评价等级; C_i 表示评价中的第 i 个指标; V_{ji} 为经典域, 表示 C_i 在

N_j 等级时的量值范围; a_{ji} 为下限值, b_{ji} 为上限值。

2.1.2 节域

$$R_p = (P, C_j, V_p) = \begin{bmatrix} C_1 & V_{p1} \\ C_2 & V_{p2} \\ \vdots & \vdots \\ C_n & V_{pn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 & (a_{p1}, b_{p1}) \\ C_2 & (a_{p2}, b_{p2}) \\ \vdots & \vdots \\ C_n & (a_{pn}, b_{pn}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: R_p 是物元; P 代表了危险性评价全体评价等级; V_{pi} 为节域, 代表量值范围。 a_{pi} , b_{pi} 分别为节域的下限值和上限值。

2.2 待评物元的确定

根据研究区泥石流危险性评价指标实际值, 按照上述经典域和节域形式, 可以将其用物元的形式表示出来, 推断出待评物元, 公式为:

$$R = (p, C, v_i) = \begin{bmatrix} C_1 & v_1 \\ C_2 & v_2 \\ \vdots & \vdots \\ C_n & v_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: R 为研究区泥石流危险性待评物元; p 代表待评价的泥石流沟; v_i 为评价指标 C_j 的实际量值。

2.3 确定关联度

各待评价指标对各泥石流危险性等级的关联函数为:

$$K_j(v_i) = \begin{cases} \frac{\rho(v_i, V_{ji})}{\rho(v_i, V_{pi}) - \rho(v_i, V_{ji})} & (v_i \notin V_{ji}) \\ \frac{-\rho(v_i, V_{ji})}{|V_{ji}|} & (v_i \in V_{ji}) \end{cases} \quad (4)$$

$$\rho(v_i, V_{pi}) = \left| v_i - \frac{a_{pi} + b_{pi}}{2} \right| - \frac{b_{pi} - a_{pi}}{2}$$

$$\rho(v_i, V_{ji}) = \left| v_i - \frac{a_{ji} + b_{ji}}{2} \right| - \frac{b_{ji} - a_{ji}}{2}$$

式中: $K_j(v_i)$ 为关联度, $|V_{ji}| = |b_{ji} - a_{ji}|$ 。

2.4 判断评价物元所属等级

泥石流灾害危险度级别:

$$K_j(p) = \sum_{i=1}^m \omega_i K_j(v_i) \quad (5)$$

$$K_j(p) = \max_{j \in \{1, 2, \dots, m\}} K_j(p)$$

式中: ω_i 为组合权重; p 为所要评价危险性的泥石流沟; j 为最终泥石流 p 所评定的等级。

3 计算各评价因子组合权重

3.1 层次分析法(AHP)确定主权重

AHP法于1980年由美国数学家Saaty首次提出的^[9]。针对泥石流危险性评价来说, 它是通过建立层次分析

结构模型以及构造判断矩阵, 并采用了求特征值的方法, 来确定各评价因子的重要性权重^[10]。首先将被评价的指标因子按评价的目标层次进行排列, 建立层次结构的评价指标体系。再根据决策者对每一层次影响因子的重要性所做出的判断, 采用数字1~9及其倒数标度法, 来构造判断矩阵。

接下来确定权重、最大特征根和特征向量。

$$AW = \lambda_{\max} W, W = [W_1, W_2, \dots, W_n]^T \quad (6)$$

式中: A 为判断矩阵; λ_{\max} 为最大特征根; W 为归一化后的特征向量。 W_1 、 W_2 、 \dots 、 W_n 为各评价指标相应的权重。

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} W_j}{W_i} \quad (7)$$

式中: a_{ij} 为判断矩阵中元素; n 为评价指标的个数。

由于判断矩阵在满足一致性的条件下, 得到的评价因子权重才是科学的, 所以必须要进行判断矩阵的一致性检验。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}, CR = \frac{CI}{RI} \quad (8)$$

式中: CI 为判断矩阵一致性指标, CR 为一致性比率。

当 $CR \leq 0.1$ 时, 判断矩阵具有满意的一致性, 也意味着判断矩阵的构造是正确的, 否则就需要对判断矩阵做出重新调整, 直到满意为止。最后根据公式(6)得到的 W 即为主观权重。

3.2 灰色关联度法确定客观权重

灰色关联度法是灰色系统理论的一种, 由邓聚龙教授于1982年提出^[11]。对泥石流危险性评价问题来说, 灰色关联度法可以看作是泥石流各项影响指标与不同泥石流危险性等级接近度的一种距离分析和聚类判别^[12]。

3.2.1 将评价因子组成数列并均值无量纲化

假设共有:

$$X'_i(n) = \frac{X_i(n)}{\frac{1}{b} \sum_{n=0}^b X_i(n)} \quad (9)$$

式中: a 为评价因子个数, b 为泥石流沟数量, 数列 $X_i = \{X_i(1), X_i(2), \dots, X_i(b)\}$; $i=1, 2, 3, \dots, a, n=1, 2, \dots, a$; $i=0, 1, \dots, b$ 。

3.2.2 计算绝对差

$$\Delta_{ij}(n) = |X'_i(n) - X'_j(n)| \quad (10)$$

式中: $\Delta_{ij}(n)$ 为比较序列 X_i 与参考序列 X_j 的绝对差值; $n=1, 2, \dots, a$; $i=0, 1, \dots, b$ 。其中对于参考序列的选取问题: 可以以评价指标的最大值或最小值构成, 也可以选择其他的指标数据列作为参考序列。

表 1 尹家泥石流危险性评价因子实际取值表

名称	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	S ₈	S ₉
尹家主沟	57.5	17	3.18	1.82	0.96	40	1.54	60	130.8
支沟 G1	0.334	10	0.04	0.26	0.168	40	6.5	51	130.8
支沟 G2	0.545	11	0.05	0.25	0.156	40	5	44	130.8
支沟 G3	3.074	24	0.25	0.93	0.4	30	3.72	59	130.8
支沟 G4	1.275	29	0.09	0.34	0.222	45	3.78	71	130.8
支沟 G5	0.793	18	0.06	0.3	0.223	40	5	69	130.8
支沟 G6	9.737	9	1.11	1	0.18	25	0.9	30	130.8

3.2.3 计算关联系数

$$\varepsilon_{ij}(n) = \frac{\Delta_{\min} + \rho\Delta_{\max}}{\Delta_{ij}(n) + \rho\Delta_{\max}} \quad (11)$$

式中: Δ_{\max} 与 Δ_{\min} 分别为绝对差数列的最大值、最小值; ρ 为分辨系数, 取值为 $[0, 1]$, 一般取 0.5。

3.2.4 计算各因子间关联度

$$r_{ij}(n) = \frac{1}{b} \sum_{n=1}^b \varepsilon_{ij}(n) \quad (12)$$

依次交换参数序列, 重复之前的步骤, 求关联矩阵。

3.2.5 计算因子权重

$$\omega_i = \frac{r_i}{\sum_{i=0}^a r_i} \quad (13)$$

3.3 组合赋权

组合权重是将层次分析法得到的主客观权重 ω_1 和灰色关联度法得到的客观权重 ω_2 , 通过线性函数耦合得到的:

$$\omega = a\omega_1 + b\omega_2 \quad (14)$$

式中: a 为主观权重 ω_1 的偏好系数, b 为客观权重 ω_2 的偏好系数。先用待定系数法求出 a_1 和 b_1 。

$$a_1 = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \omega_1 x_{ij}}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \omega_1 x_{ij})^2 + (\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \omega_2 x_{ij})^2}} \quad (15)$$

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \omega_2 x_{ij}}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \omega_1 x_{ij})^2 + (\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \omega_2 x_{ij})^2}}$$

式中: x_{ij} 为第 i 条泥石流沟的第 j 项危险性评价指标实际值。再将 a_1 和 a_2 做归一化处理:

$$a = \frac{a_1}{a_1 + b_1} \quad b = \frac{b_1}{a_1 + b_1} \quad (16)$$

最后将所得 a 和 b 带入公式 (14) 改进组合赋权模型中即可得到组合权重 ω 值。

4 尹家沟泥石流危险性评价

4.1 建立评价因子体系

泥石流危险性评价因子的选取要根据研究区域环境特点, 全面考虑影响灾害发生的因子。参考 1988 年刘希林等提出的评价方法^[13-14], 结合尹家村泥石流研究区域实际情况, 本文选取以下九个指标作为灰色关联度评价法的评价因子: 一次泥石流最大冲出量 ($10^3 m^3$) S_1 、泥石流发生频率 (次/百年) S_2 、流域面积 (km^2) S_3 、主沟长度 (km) S_4 、流域最大相对高差 (km) S_5 、平均沟谷坡度 ($^\circ$) S_6 、流域切割密度 (km^{-1}) S_7 、泥砂补给段长度比 (%) S_8 、24 小时最大降雨量 (mm) S_9 。

根据现场实地勘察, 可知研究区一条主沟和六条支沟的基础数据资料, 汇总如表 1。

4.2 确定组合权重

1. 层次分析法 (AHP) 确定主观权重。通过相互比较评价指标的重要性, 建立判断矩阵并根据公式 (7)、(8) 以及进行一致性检验, 经计算, 一致性比率 $CR=0.019496 < 0.1$, 则构造的判断矩阵具有满意的一致性, 计算得到的评价指标权重值是科学合理的。经计算得主观权重为:

$$W_{\pm} = \{0.2969, 0.2565, 0.1511, 0.0623, 0.0424, 0.0424, 0.0958, 0.0250, 0.0276\}$$

2. 灰色关联度法确定客观权重。根据公式 (9)~(13) 计算得到客观权重为:

$$W_{*} = \{0.1080, 0.1150, 0.1036, 0.1081, 0.1039, 0.1162, 0.1119, 0.1163, 0.1169\}$$

3. 根据公式(14)~(16)计算得到组合权重:

$$W = \{0.2055, 0.1880, 0.1281, 0.0845, 0.0722, 0.0781, 0.1036, 0.0692, 0.0708\}$$

九种评价因子的组合权重值均处于主观权重和客观权重之间,满足 $W = 0.5161W_{主} + 0.4839W_{客}$ 的线性关系,这表明组合赋权法的优势在于,可以消除主观赋权法和客观赋权法所存在的局限,所得结果更加贴合实际,是一种较有效并实用的求权重方法。

4.3 构造物元

物元是利用可拓学进行危险性评价的基本思想,即将研究对象看作是一个整体,从而将对事物的定性描述变为定量计算。建立以下经典域和节域 R_i :

$$R_4 = N_4 \begin{bmatrix} S_1 & (100,200) \\ S_2 & (100,1600) \\ S_3 & (35,100) \\ S_4 & (10,55) \\ S_5 & (0.8,3.5) \\ S_6 & (32,90) \\ S_7 & (20,35) \\ S_8 & (60,100) \\ S_9 & (100,300) \end{bmatrix} \quad R_1 = P_1 \begin{bmatrix} S_1 & (0,200) \\ S_2 & (0,1600) \\ S_3 & (0,100) \\ S_4 & (0,55) \\ S_5 & (0.3,5) \\ S_6 & (0,90) \\ S_7 & (0,35) \\ S_8 & (0,100) \\ S_9 & (0,300) \end{bmatrix}$$

$$R_1 = N_1 \begin{bmatrix} S_1 & (0,1) \\ S_2 & (0,10) \\ S_3 & (0,0.5) \\ S_4 & (0,1) \\ S_5 & (0,0.2) \\ S_6 & (0,15) \\ S_7 & (0,5) \\ S_8 & (0,20) \\ S_9 & (0,25) \end{bmatrix} \quad R_2 = N_2 \begin{bmatrix} S_1 & (1,10) \\ S_2 & (10,50) \\ S_3 & (0.5,10) \\ S_4 & (1,5) \\ S_5 & (0.2,0.4) \\ S_6 & (15,25) \\ S_7 & (5,10) \\ S_8 & (20,40) \\ S_9 & (25,50) \end{bmatrix} \quad R_3 = N_3 \begin{bmatrix} S_1 & (10,100) \\ S_2 & (50,100) \\ S_3 & (10,35) \\ S_4 & (5,10) \\ S_5 & (0.4,0.8) \\ S_6 & (25,32) \\ S_7 & (10,20) \\ S_8 & (40,60) \\ S_9 & (50,100) \end{bmatrix}$$

4.4 评价结果

根据式(4)、(5)计算出尹家泥石流沟关于不同评价因子等级的关联度,以及尹家泥石流沟对于不同危险性等级的关联度,以此判断尹家泥石流危险性评价结果。

5 结论和建议

1. 基于改进组合赋权和可拓学评价模型对实际工程进行评价,所得评价结果与现场勘察结果一致,验证了所提出的优化模型的有效性,对该地区泥石流灾害的防灾减灾将起到更为有效的指导作用。综合考虑研究区实际情况来确定评价因子,建立评价体系,并将组合赋权与可拓学相结合,既兼顾了主、客观因素,也解决了单一方法对偏好系数取值的局限性,所得结果更贴合实际。

2. 评价结果显示尹家泥石流主沟危险级别属高度

危险,由于泥石流再次发生的地形条件、物源条件和水源条件仍然存在且难以改变,故再次发生泥石流的可能性大。并鉴于本泥石流难以根治,建议除了加大监控力度外,还应尽快做好房屋被损毁居民的安置工作以及危险地带居民的搬迁工作^[15-16]。

参考文献:

- [1] 康志成,李焯芬,马蔼乃,等.中国泥石流研究[M].北京:科学出版社,2004.
- [2] 陈飞飞,姚磊华,赵宏亮,等.泥石流危险性评价问题的探讨[J].科学技术与工程,2018,18(32):114-123.
- [3] 丛威青,潘懋,任群智,等.泥石流灾害多元信息耦合预警系统建设及其应用[J].北京大学学报,2006,42(04):446-450.
- [4] 杨小凤,朱军,曹云刚,等.基于不同方法的泥石流危险性评价对比分析——以四川汶川七盘沟泥石流为例[J].中国地质灾害与防治学报,2017,28(01):22-29.
- [5] 强跃,李莉,李绍红,等.基于改进组合赋权物元可拓模型的泥石流危险性评价[J].南水北调与水利科技,2017,15(05):104-109.
- [6] CAI W, YANG C Y, LIN W C. Extension Engineering Methods[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [7] 杨春燕,蔡文.可拓学的研究、应用与发展[J].系统科学与数学,2016,36(09):1507-1512.
- [8] 毛硕,王运生,曹水合.基于可拓和组合赋权的泥石流危险性评价[J].工业安全与环保,2016,42(01):56-60.
- [9] 刘海,陈华.基于层次分析法的未确知测度理论泥石流危险性评价[J].长江流域资源与环境,2012,21(08):1032-1038.
- [10] 王哲,易发成.基于层次分析法的绵阳市地质灾害易发性评价[J].自然灾害学报,2009,18(01):14-23.
- [11] 曹洪洋,王禹,满兵.基于改进灰色关联分析的泥石流危险性评价[J].南水北调与水利科技,2015,02(01):91-94.
- [12] Zaginaev V, Petrakov D, Erokhin S, et al. Geomorphic control on regional glacier lake outburst flood and debris flow activity over northern Tien Shan[J]. Global and Planetary Change, 2019(176):50-59.
- [13] 刘希林,唐川.泥石流危险性评价[M].北京:科学出版社,2004.
- [14] 刘希林,郭梨花.泥石流易发区灾害可接受程度对比研究——以云南东川和甘肃舟曲为例[J].地理科学,2019,39(01):164-172.
- [15] 郭剑,周传兴,崔圣华.磨西河流域坡面泥石流形成演化机制及防治[J].水电能源科学,2015,33(06):131-135.
- [16] 赵亮,赵德刚.唐山市地质灾害现状及防治对策探析[J].地下水,2017,39(02):155-156.