

路 遥, 徐林荣, 陈舒阳, 等. 基于博弈论组合赋权的泥石流危险度评价 [J]. 灾害学, 2014, 29(1): 194–200. [Lu Yao, Xu Linrong, Chen Shuyang, et al. Combined Weight Method Based on Game Theory for Debris Flow Hazard Risk Assessment [J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29(1): 194–200.]

基于博弈论组合赋权的泥石流危险度评价^{*}

路 遥, 徐林荣, 陈舒阳, 曹禄来

(中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

摘要: 多目标模糊优选模型是地质灾害评价中的常用模型, 多采用层次分析法等传统主观权重计算方法确定指标权重, 存在判断矩阵偏主观、一致性检验过程较繁琐的问题。鉴于此, 结合灰色系统理论与二元比较法, 提出了一种自然满足一致性要求的关联度—二元比较分析法, 同时基于博弈论集结模型对主、客观权重进行组合赋权, 充分挖掘、利用关联度—二元比较分析法的主观权重信息与熵值法的客观权重信息, 从而克服单一权重的片面性。将该组合赋权法在泥石流灾害危险度评价中进行了实例应用及验证, 分析表明: 该方法评价结果准确、在泥石流危险度评价中切实可行, 可为类似项目提供参考和借鉴。

关键词: 博弈论集结模型; 泥石流危险度评价; 主观赋权法; 客观赋权法; 组合赋权法

中图分类号: P694; X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–811X(2014)01–0194–07

doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2014.01.035

随着我国社会经济发展, 特别是西部大开发及汶川地震灾区的恢复和建设, 山区泥石流的危害越来越大, 有效地防治泥石流灾害已刻不容缓^[1–2]。国内外的大量防灾减灾实践表明, 防灾减灾工作的合理开展, 都需要以准确的灾害风险评价结果为基础依据, 可见泥石流灾害危险度评价的重要意义。

泥石流危险性一般是指人类及所在环境中的一切事物遭受泥石流损害的可能性大小, 而危险度即是表征这种可能性大小的量度。评价中评价模型及其指标赋权是需要考虑的主要问题。目前, 泥石流危险度评价的基本模型与方法已有初步发展, 在现有的评价模型中, 多目标模糊优选模型^[3]已被证明行之有效; 该模型中评价指标权重的确定方法一直是研究的热点与难点。目前常用方法主要有层次分析法、灰色关联度法^[4–5]、熵值法等, 这些方法无外乎主观方法与客观方法两种。主观方法中, 传统的层次分析法快速简便、易于计算, 故被广泛应用^[6], 但其主观随意性强, 评价指标权重的计算结果往往因人而异。且该方法对求得的判断矩阵需进行一致性验算, 计算过程繁琐, 判断结果的准确性也难以保证^[6]。另外,

标度的选择与使用也是导致 AHP 法构造的判断矩阵不一致的原因之一^[7]。而客观赋权方法(灰色关联度法、熵值法等)虽避免了上述问题, 但客观数据依赖性高, 容易受数据波动干扰, 常导致计算结果精确性较差^[7]。

为此, 有国内外学者开展了评价指标权重的方法改进研究, 并着眼于组合赋权思想, 对多种方法计算所得的权重进行线性组合加权, 在泥石流危险度评价中得到了应用。有学者进一步指出, 在到组合赋权法中加权系数的确定是重中之重, 并开展了研究, 如: 文献[8]中则引入多个权重之间距离函数的概念, 并通过求解约束条件下的线性规划问题获得加权系数。笔者所在课题组对指标权重的确定也进行了相关研究, 如匡乐红等^[6]提出了一种综合分析方法确定加权系数并进行了实例验证。课题组还分别基于可拓方法^[9]、层次分析法的可拓学理论^[10]以及模糊数学的可拓方法^[11]对泥石流危险性评价进行了有益尝试。但时至今日, 泥石流灾害危险度评价仍没有一个通用的方法。

而博弈论主要研究两个及两个以上因素在对抗性或竞争性局势下, 如何做出有利决策的科学

* 收稿日期: 2013–06–07 修回日期: 2013–07–16

基金项目: 国家自然科学基金“泥石流危害桥隧工程承灾链特征与工程易损度动态评价方法研究”(41272376); 铁道部专项项目“高速铁路灾害防治与应急救援技术措施研究”(2011G017–C); 西部交通建设科技项目“活动断裂区高速公路泥石流灾害防治技术与推广应用研究”(200831800087)

作者简介: 路遥(1987–), 男, 山东济南人, 硕士研究生, 主要从事路基灾害防治研究. E-mail: 09290122@163.com

通讯作者: 徐林荣(1964–), 男, 浙江嘉兴人, 博士后, 教授, 博导, 主要从事地质灾害防治与预警预报、特殊土路基设计理论与施工技术, 地基处理和土工合成材料在土木工程上应用研究. E-mail: lrxu@mail.csu.edu.cn

问题,其作为一门发展较为成熟的方法论,在评价方法中已有应用^[12],这也为泥石流危险度评价指标主观与客观组合赋权提供了新思路。本文则围绕这一思路,提出一种关联度-二元比较分析计算主观权重的方法,基于博弈论集结模型理论对由关联度-二元比较法确定的主观权重与熵值法确定的客观权重进行组合赋权,进而求得各评价指标的组合权重,以期对泥石流的危险度做出合理、准确、科学地评价。

1 泥石流危险度评价模型及其指标体系选择

在泥石流危险度评价中,一般需要解决模型的合理选择与指标体系合理赋权这两个关键问题。

1.1 泥石流危险度评价模型

目前,陈守煜等^[3]提及的可变多目标模糊优选模型可通过对原始数据形成的判断矩阵标准化

得到相对优属度矩阵,由此避免定量赋值等主观方法确定相对优属度矩阵时产生的人为误差。故本文选用该模型作为泥石流危险度的评价模型。可变多目标模糊优选基本模型为:

$$u_i = \left\{ 1 + \left[\frac{\left\{ \sum_{j=1}^n [w_j(1 - r_{ij})]^p \right\}^{\frac{1}{p}}}{\left\{ \sum_{j=1}^n (w_j r_{ij})^p \right\}^{\frac{1}{p}}} \right]^\beta \right\}^{-1} \quad (1)$$

式中: U_i 为泥石流沟*i*的相对优属度; p 为距离参数($p = 2$,为欧式距离; $p = 1$,为海明距离); β 为优化准则参数($\beta = 2$,二乘方优化准则; $\beta = 1$,为最小一乘方优化准则)。 r_{ij} 为泥石流沟危险度的第*j*个影响因素; w_j 为基于组合赋权法求得的第*j*个影响因素的组合权重; r_{ij} 为 $\beta = 1, p = 1$ 相对优属度矩阵,由原始数据形成的判断矩阵经标准化处理得到。

为了评出各泥石流沟的危险度等级,模型中 β 、 p 的搭配采用 $\beta = 1, p = 1$,采用的隶属度函数按照正逆指标的不同分别采用正指标型隶属段函数和逆指标型隶属度函数,如表1、表2所示。

表1

逆指标型隶属度函数

区间	等级			
	I	II	III	IV
$x \leq a_3$	0	0	$\frac{x}{2a_3}$	$1 - \frac{x}{2a_3}$
$a_3 < x \leq \frac{a_2 + a_3}{2}$	0	0	$1 - \frac{(a_3 + a_2) - 2x}{2(a_2 - a_3)}$	$\frac{(a_3 + a_2) - 2x}{2(a_2 - a_3)}$
$\frac{a_2 + a_3}{2} < x \leq a_2$	0	$\frac{2x - (a_3 + a_2)}{2(a_2 - a_3)}$	$1 - \frac{2x - (a_3 + a_2)}{2(a_2 - a_3)}$	0
$a_2 < x \leq \frac{a_1 + a_2}{2}$	0	$1 - \frac{(a_2 + a_1) - 2x}{2(a_1 - a_2)}$	$\frac{(a_2 + a_1) - 2x}{2(a_1 - a_2)}$	0
$\frac{a_1 + a_2}{2} < x \leq a_1$	$\frac{2x - (a_2 + a_1)}{2(a_1 - a_2)}$	$1 - \frac{2x - (a_2 + a_1)}{2(a_1 - a_2)}$	0	0
$x > a_1$	$1 - \frac{a_1}{2x}$	$\frac{a_1}{2x}$	0	0

表2

正指标型隶属度函数

区间	等级			
	I	II	III	IV
$x \leq a_1$	$1 - \frac{x}{2a_1}$	$\frac{x}{2a_1}$	0	0
$a_1 < x \leq \frac{a_1 + a_2}{2}$	$\frac{(a_1 + a_2) - 2x}{2(a_2 - a_1)}$	$1 - \frac{(a_1 + a_2) - 2x}{2(a_2 - a_1)}$	0	0
$\frac{a_1 + a_2}{2} < x \leq a_2$	0	$1 - \frac{2x - (a_1 + a_2)}{2(a_2 - a_1)}$	$\frac{2x - (a_1 + a_2)}{2(a_2 - a_1)}$	0
$a_2 < x \leq \frac{a_2 + a_3}{2}$	0	$\frac{(a_2 + a_3) - 2x}{2(a_3 - a_2)}$	$1 - \frac{(a_2 + a_3) - 2x}{2(a_3 - a_2)}$	0
$\frac{a_2 + a_3}{2} < x \leq a_3$	0	0	$1 - \frac{2x - (a_2 + a_3)}{2(a_3 - a_2)}$	$\frac{2x - (a_2 + a_3)}{2(a_3 - a_2)}$
$x > a_3$	0	0	$\frac{a_3}{2x}$	$1 - \frac{a_3}{2x}$

1.2 泥石流危险度评价指标体系及等级划分标准

本文按文献[13]中的方法,选取一次泥石流(可能)最大冲出量 C_1 、泥石流发生频率 C_2 、流域面积 C_3 、主沟长度 C_4 、流域最大相对高差 C_5 、流域切割密度 C_6 、主沟床弯曲系数 C_7 、泥砂补给段长度比 C_8 、24 h最大降雨量 C_9 、人口密度 C_{10} 等10个因子作为泥石流危险性评价因子。各危险度影响因子的正逆性及其特征描述如表3所示,并据此建立了泥石流危险性评价指标体系(图1)。应用该评价指标体系对云南东川的8条典型泥石流沟的危险性进行评价,各评价因子取值如表4所示,评价因子等级划分标准^[13]如表5所示。

表3 泥石流沟危险度影响因子
及其特征描述

危险度影响因子	特征描述
一次性最大冲出量 C_1	正向型指标,直接影响因子之一,主要危险因子
发生频率 C_2	正向型指标,直接影响因子之一,主要危险因子
流域面积 C_3	正向型指标,反映流域的产沙和汇流状况,次要危险因子
主沟长度 C_4	正向型指标,对泥石流流程及固体物质存储有影响,次要危险因子
流域相对高差 C_5	正向型指标,反映流域势能及携带固体物质的能力,次要危险因子
流域切割密度 C_6	正向型指标,反映流域地质构造、岩性、产沙和汇流等,次要危险因子
主沟床弯曲系数 C_7	逆向性指标,反映沟道泄流的难易状况,次要危险因子
泥砂补给段长度 C_8	正向型指标,泥石流启动条件之一,影响泥石流规模,次要危险因子
24 h最大降雨量 C_9	正向型指标,泥石流启动条件之一,次要危险因子
人口密度 C_{10}	正向型指标,不合理的人类活动会加速泥石流的形成,次要危险因子

表4 待评泥石流危险度评价因子取值^[13]

沟道名称	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}
蒋家沟	195.1	1500	47.10	12.00	2.19	23.8	1.45	0.8	102.0	260
大桥河	105.0	450	53.10	18.35	2.92	21.2	1.28	0.62	97.0	210
石羊沟	7.8	20	10.61	4.61	1.66	12.8	1.12	0.40	100.4	290
达德沟	10.0	30	14.1	8.00	1.94	17.8	1.10	0.35	100.4	310
黑水河	1.8	80	4.20	2.10	1.19	12.3	1.11	0.42	100.4	318
大白泥沟	82.0	1200	18.05	11.8	1.66	22.8	1.39	0.72	100.4	0
深沟	9.0	50	28.32	9.05	2.80	15.6	1.22	0.45	100.4	260
黑沙沟	5.0	50	3.28	2.30	1.13	22.0	1.28	0.78	98.0	276

表5 泥石流危险性评价指标等级划分表^[13]

评价指标	低度危险	中度危险	高度危险	极度危险
泥石流(可能)规模 $C_1/10^4 \text{ m}^3$	≤ 1	1 ~ 10	10 ~ 100	≥ 100
泥石流发生频率 $C_2/\%$	≤ 10	10 ~ 50	50 ~ 100	≥ 100
流域面积 C_3/km^2	≤ 0.5	0.5 ~ 10	10 ~ 35	≥ 35
主沟长度 C_4/km	≤ 1	1 ~ 5	5 ~ 10	≥ 10
流域最大相对高差 C_5/km	≤ 0.2	0.2 ~ 0.5	0.5 ~ 1.0	≥ 1.0
流域切割密度 $C_6/(\text{km}/\text{km}^2)$	≤ 5	5 ~ 10	10 ~ 20	≥ 20
主沟床弯曲系数 C_7	≤ 1.1	1.1 ~ 1.25	1.25 ~ 1.4	≥ 1.4
泥砂补给段长度比 C_8	≤ 0.1	0.1 ~ 0.3	0.3 ~ 0.6	≥ 0.6
24 h最大降雨量 C_9/mm	≤ 25	25 ~ 50	50 ~ 100	≥ 100
人口密度 $C_{10}/\text{人}/\text{km}^2$	≤ 50	50 ~ 150	150 ~ 250	≥ 250

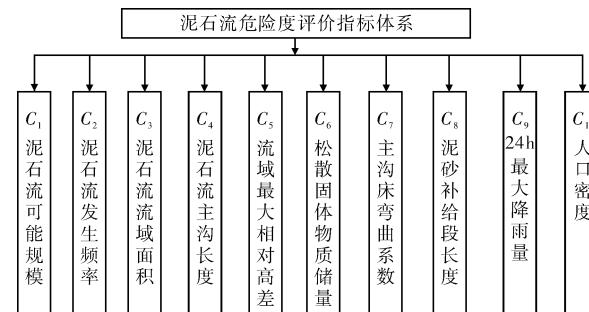


图1 泥石流危险度评价指标体系

2 关联度 - 二元比较的指标权重分析法

本文提出的灰色关联度 - 二元比较分析法是在传统灰色关联度及二元比较法^[3]基础上改进而来的一种方法,无需进行一致性检验,计算过程较简便,可代替如层次分析法等传统方法来确定泥石流危险度指标的主观权重。

2.1 灰色关联度法

关联度分析法^[14]通过对部分已知信息的生成、开发、提取有价值的信息,主要步骤如下:

(1) 确定关联系数

设数据无量纲化后构建的参考序列和比较

序列分别为 x_i 和 x_j , 在 k 点, 两个因子差的绝对值 $\Delta_{ij}(k)$ 为:

$$\Delta_{ij}(k) = |x_i(k) - x_j(k)|, k = 1, 2, \dots, m。 \quad (2)$$

两个因子最小和最大绝对差分别为:

$$\Delta_{\min} = \min_j \min_k |x_i(k) - x_j(k)|, \quad (3)$$

$$\Delta_{\max} = \max_j \max_k |x_i(k) - x_j(k)|。 \quad (4)$$

定义数列 x_j 与数列 x_i 在 k 点的关联系数为:

$$\zeta_{ij}(k) = \frac{\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}}{|x_i(k) - x_j(k)| + \rho \Delta_{\max}}。 \quad (5)$$

式中: ρ 为分辨率, 取值范围 $[0, 1]$ 。 ρ 若取值过小, 则计算结果的区分度不大; 若取值过大, 则结果可能偏离实际情况, 因而一般取中间值 0.5。

(2) 计算关联度

可通过下式计算关联度 ζ_{ij} :

$$\zeta_{ij} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \zeta_{ij}(k)。 \quad (6)$$

式中符号如前所述。

2.2 关联度 - 二元比较分析法

泥石流活动的影响因素具有区域性差异, 故各影响因素的重要度排序关系若能综合专家“主观”意见和原始“客观”数据的信息共同确定, 得到的结果将更加符合实际情况。因此, 本文在 2.1 节基础上, 以“使用客观的灰色关联度法和专家判断相结合的方法确定各影响因素的重要度排序”为思路, 使得灰色关联度 - 二元比较法成为一种主客观相结合的赋权方法。灰色关联度 - 二元比较法基本步骤如下:

(1) 确定影响因素重要度排序

将泥石流危险度各影响因素按重要性程度进行排序, 若危险度影响因素 u_i 重要性程度不小于 u_j 时, 记为 $u_i > u_j$ 。记排序后各影响因素分别为 u_1^* , u_2^* , \dots , u_n^* , 并且各危险度影响因素 u_1, u_2, \dots, u_n 相对重要性关系满足一下关系:

$$u_1^* > u_2^* > \dots > u_n^*。 \quad (7)$$

即称危险度影响因素 u_1, u_2, \dots, u_n 之间按“ $>$ ”确立了重要度排序关系。

上述排序关系可通过 2.1 节中的灰色关联度分析法确定。值得注意的是, 使用灰色关联度法时需要确定某一因子的序列作为参考序列, 在泥石流危险度评价中, 根据刘希林等^[13]的研究可以采用双系列关联度分析方法, 分别将候选因子与泥石流规模和发生频率进行关联度分析。本文采取该方法, 按照每个候选因子与泥石流规模和发生频率得出的两个关联度的平均值的大小进行排序, 进而初步确

定排序关系。后根据专家判断并结合上述排序做出适当调整, 最终确定出最能体现实际情况的合理排序关系。

(2) 标度的选择与权重系数 c_k 的计算

关于危险度各影响因素的重要度比较往往借助于一定的标度, 如 9 标度法、比例标度法等, 常用的 1 ~ 9 标度如表 6 所示。尤其是影响因素较多时, 这些标度方法在构造判断矩阵时常会与人们的思维一致性相脱节^[7]。例如因素 A 比 B 强烈重要, 而因素 B 比 C 极端重要, 那么因素 A 与 C 的重要性因为在表 6 中没有给出相应的定义而无法描述。除此之外, 专家在利用这些标度构造判断矩阵时, 由于因素两两比较的相对重要程度难以把握, 因此在实际应用中存在一定的困难。

表 6 1 ~ 9 标度含义

重要性标度	标度含义
1	两个因素同等重要
3	一个因素比另一个因素稍微重要
5	一个因素比另一个因素明显重要
7	一个因素比另一个因素强烈重要
9	一个因素比另一个因素极端重要

针对上述问题, 借助于二元比较法中的标度方法, 提出如下解决方法, 使得各因素之间的重要关系只要满足弱一致性即可。

按照各影响因素的排序关系, 从表 7 中为各影响因素选取合适的语气算子及模糊隶属度。选取语气算子时必须严格按专家调整后的排序关系, 使得语气算子满足弱一致性, 即将每一个指标依次与最重要的指标进行两两比较, 并且每个指标的相对重要性都能从表 6 中找到相应的描述。表 7 中标度与隶属度的关系可采用如图 2 所示的关系曲线进行表达, 当语气算子介于表 7 中某两个语气算子之间时,

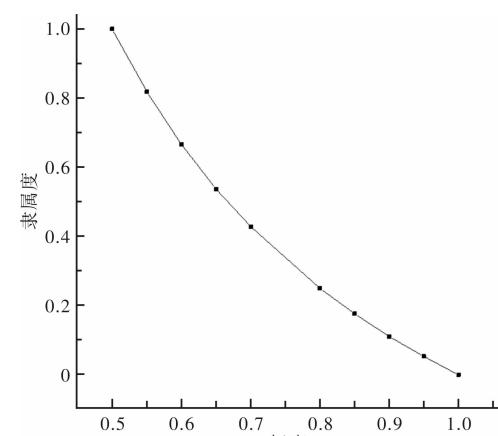


图 2 标度与隶属度的关系曲线

表 7

语气算子、标度与模糊隶属度

语气算子	同样	稍稍	略微	较为	明显	十分	非常	极其	极端	无可比拟
标度(v)	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00
模糊隶属度($\frac{1-v}{v}$)	1.000	0.818	0.667	0.538	0.429	0.250	0.176	0.111	0.053	0.000

可采用内插方法从图2中求得模糊隶属度。最后以各因素的模糊隶属度作为权重系数构建向量矩阵，并作归一化处理即得权重向量 $B = (b_{ij})_{1 \times n}$ 。

3 基于博弈论的泥石流危险度评价指标组合赋权法

3.1 熵值赋权法

与层次分析法不同,熵值法^[15]充分利用了原始数据信息,是一种客观的赋权方法。熵值法利用信息熵反映指标的变异程度,并可以进行综合评价。熵值法计算权重公式如下:

$$E(j) = -K \sum_{i=1}^m F_{ij} \ln F_{ij},$$

$$F_{ij} = \frac{q_{ij}}{\sum_{j=1}^n q_{ij}}, \omega(j) = \frac{1 - E(j)}{\sum_{j=1}^n (1 - E(j))} \quad (8)$$

式中: $E(j)$ 表示第 j 项评价指标的熵值,其值越大表示该指标在灾害产生中的贡献越小; $K = 1/\ln n$,其值越大,表示研究对象越少。 F_{ij} 为评价指标 j 在泥石流灾害产生过程中出现的频率; q_{ij} 表示指标原始数据去量纲化后形成的判断矩阵, $\omega(j)$ 表示第 j 项评价指标的熵权。 $q_{ij} = 0$ 时,为了使 $F_{ij} \ln F_{ij}$ 有意义, $F_{ij} \ln F_{ij} = 0$ 。

3.2 引入博弈论的组合赋权

为提高评价指标赋值权重的科学性,在关联度-二元比较分析法与熵值法基础上,采用博弈集结模型形成一种组合赋权新方法进行组合权重确定。

该模型既避免了决策者的意愿偏好,又反映了方案集(或评价对象)中客观数据对决策的贡献度,有利于提高评价结论的可靠性^[12]。模型的基本思想是在不同方法确定的权重之间寻找一致或妥协,即极小化可能的权重与各个基本权重之间的各自偏差。假设使用 L 种方法对指标分别赋权并得到 L 个指标权重向量:

$w(k) = [w_{k1}, w_{k2}, \dots, w_{kn}]$, $k = 1, 2, \dots, L$ 。记 L 个权重向量的任意线形组合为:

$$w = \sum_{k=1}^L \alpha_k w_k^T \quad (9)$$

式中: α_k 为线性组合系数; w 的全体 $\{w \mid w = \sum_{k=1}^L \alpha_k w_k^T, \alpha_k > 0\}$ 表示可能的权重向量集。根据博弈集结模型的思想,寻找最满意的权重向量就归结为对式(9)中 L 个线性组合系数 α_k 进行优化,从而使 w 与各 w_k 的离差极小化。由此,推导出对策模型如下:

$$\min \parallel \sum_{j=1}^L \alpha_j w_j^T - w_i^T \parallel (i = 1, 2, \dots, L) \quad (10)$$

根据矩阵的微分性质可得出式(10)的最优化一阶导数条件为:

$$\sum_{j=1}^L \alpha_j w_i w_j^T = w_i w_i^T \quad (i = 1, 2, \dots, L) \quad (11)$$

由式(11)计算求得 $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_L)$,然后对其进行归一化处理。即: $\alpha_k^* = \alpha_k / \sum_{k=1}^L \alpha_k$,因此可求得组合权重为:

$$w^* = \sum_{k=1}^L \alpha_k^* w_k^T \quad (12)$$

最后,本文采用关联度-二元比较分析法和熵值法分别计算出主观权重和客观权重,再代入式(12)计算得组合权重,然后利用表1、表2的隶属度函数确定出各条泥石沟的相对隶属度,最后通过式(1)计算出危险度大小并对泥石流的危险度作出评价。

4 实例分析

4.1 权重及相对隶属度的确定

利用本文提出的赋权方法及已选择的评价指标体系,对如表4所示的8条泥石沟进行单沟危险度计算与判断,具体步骤如下。

(1) 关联度-二元比较法确定权重

记泥石流危险度评价指标为: $U = \{C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7, C_8, C_9, C_{10}\}$ 。对原始数据进行去量纲化处理,将表中数据代入式(2)、(3)、(4)、(5)、(6)、(7)可得其关联度及排序如下: $C_1 = C_2 > C_3$

$$> C_6 > C_4 > C_5 > C_8 > C_9 > C_{10} > C_7。$$

根据上述排序并参考表 7, 给出 M 与各因素相比后的模糊隶属度, 见表 8。

表 8 M 与各因素相对重要性关系

因素	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}
模糊隶属度	1	1	0.538	0.429	0.350	0.500	0.053	0.250	0.200	0.111

将表 9 中的模糊隶属度值组成向量矩阵, 经归一化可得指标的权重向量为: $U_1 \{0.23, 0.23, 0.12, 0.09, 0.08, 0.10, 0.01, 0.06, 0.05, 0.03\}$ 。

(2) 熵值法确定权重

将由表 4 数据构成的判断矩阵代入式(8), 计算可得各评价指标的熵权组成的权重向量为:

$$U_2 = \{0.19, 0.21, 0.09, 0.07, 0.08, 0.06, 0.05, 0.07, 0.12, 0.06\}。 \quad (13)$$

(3) 计算组合权重

将由关联度 - 二元比较分析法计算得到的主观权重向量 U_1 及由熵值法确定的客观权重向量 U_2 代入式(11)及式(12), 即可得组合权重:

$$w^* = \{0.22, 0.23, 0.11, 0.09, 0.08, 0.08, 0.02, 0.06, 0.07, 0.04\}。 \quad (14)$$

分别将关联度 - 二元比较法、熵值法及基于博弈论的组合赋权法计算所得的权重列于表 9。可以看出组合权重充分利用了主客观的权重信息, 避免了单一方法计算权重的片面性。

(4) 泥石流沟危险度计算

使用组合赋权法得到的权重, 由表 1、表 2 计算即可得各泥石流沟的相对隶属度, 把原始数据形成的判断矩阵和计算得到的相对隶属度代入式(1)可得各条沟的危险度大小(表 10), 进而可据此判断出危险度等级, 结果见表 11。

表 9 各种权重计算方法结果比较

权重计算方法	权重计算结果
关联度 - 二元比较法	{0.23, 0.23, 0.12, 0.09, 0.08, 0.10, 0.01, 0.06, 0.05, 0.03}
熵值法	{0.19, 0.21, 0.09, 0.07, 0.08, 0.06, 0.05, 0.07, 0.12, 0.06}
博弈论组合赋权法	{0.22, 0.23, 0.11, 0.09, 0.08, 0.08, 0.02, 0.06, 0.07, 0.04}

表 10 各泥石流沟道危险度数值

沟道名称	低度危险	中度危险	高度危险	极度危险
蒋家沟	0	0	0.270	0.710
大桥河	0	0	0.347	0.633
石羊沟	0.058	0.470	0.339	0.114
达德沟	0	0.397	0.433	0.149
黑水沟	0.123	0.404	0.325	0.129
大白泥沟	0.040	0.020	0.411	0.509
深沟	0	0.249	0.551	0.180
黑沙沟	0.051	0.484	0.266	0.179

4.2 评价结果分析

从表 12 的评价结果及沟道的实际活动趋势可知, 蒋家沟、大桥河和大白泥沟为极度危险泥石流沟, 石羊沟和黑水沟为中度危险泥石流沟, 本文评价方法和基于灰色聚类法^[13]以及基于可拓方法^[10]预测的结果一致; 从表 12 的调查可知, 达德沟和黑沙沟均处于发展旺盛期, 文献[13]中的评价结果偏低^[13], 对此原文献已做出说明, 而本文对达德沟的评价为高度危险, 更符合沟道活动趋势; 深沟的评价结果为高度危险, 与文献[10]中基于层次分析法的可拓方法评价的结果一致。因此综合来看本文方法评价结果与待评泥石流沟的危害现状及活动趋势更为吻合, 证明了本文方法的可行性和有效性。

表 11

待评泥石流沟的评价结果

沟道名称	文献[13]方法评价	文献[10]可拓评价	本文方法	沟道活动趋势 ^[13]
蒋家沟	极度危险	极度危险	极度危险	活动旺盛, 被称为东川泥石流之王
大桥河	极度危险	极度危险	极度危险	最盛时期, 一年达十几次
石羊沟	中度危险	中度危险	中度危险	小规模泥石流一年可多次发生, 修建的拦砂坝和排导槽对泥石流发展有所控制
达德沟	中度危险	中度危险	高度危险	近年来发生三次大规模泥石流, 发展旺盛
黑水沟	中度危险	中度危险	中度危险	泥石流活动趋势有所减弱
大白泥沟	极度危险	极度危险	极度危险	曾 7 次堵断小江, 目前仍处于强盛期
深沟	中度危险	高度危险	高度危险	爆发大规模粘性泥石流的可能性依然存在
黑沙沟	中度危险	中度危险	中度危险	1980 年后, 又重新复活, 现处于发展旺盛期

5 结论

(1) 基于博弈论集结模型将改进形成的相关度 - 二元比较分析法确定的主观权重与熵值法确定的客观权重进行组合赋权。并将该组合赋权法应用于 8 条泥石流沟的危险度评价中, 与文献[13]及文献[10]中的评价结果相比, 本文方法评价结果与待评泥石流沟的危害现状及活动趋势更为吻合。

(2) 本文改进形成的相关度 - 二元比较分析法自然满足一致性要求, 解决了传统主观权重确定方法中判断矩阵偏主观、一致性检验过程较繁琐等问题。

(3) 基于博弈论的组合赋权法充分挖掘、利用主客观权重信息, 协调和均衡了两种权重的作用和影响, 克服了单一权重的片面性, 使得评价结果更趋科学、合理。

参考文献:

- [1] 韩征, 徐林荣, 苏志满, 等. 基于流域形态完整系数的泥石流容重计算方法 [J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(2): 100–105.
- [2] 韩征, 徐林荣, 苏志满, 等. 泥石流 V 型排导槽防淤设计方法及其应用研究 [J]. 灾害学, 2012, 27(2): 14–20.

- [3] 陈守煜, 袁晶瑄, 郭瑜. 可变模糊决策理论及其在水库防洪调度决策中应用 [J]. 大连理工大学学报, 2008, 48(2): 259–262.
- [4] 涂长红, 商建林, 谢叶彩, 等. 改进的灰色关联分析在滑坡危险性评价中的应用 [J]. 灾害学, 2007, 22(1): 86–89.
- [5] 李阔, 唐川. 泥石流危险性评价研究进展 [J]. 灾害学, 2007, 22(1): 106–110.
- [6] 匡乐红, 徐林荣, 刘宝琛. 组合赋权法确定地质灾害危险性评价指标权重 [J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(6): 1063–1067.
- [7] 王学军, 郭亚军. 基于 G1 法的判断矩阵的一致性分析 [J]. 中国管理科学, 2006, 14(3): 65–70.
- [8] 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.
- [9] 匡乐红, 徐林荣, 刘宝琛. 基于可拓方法的泥石流危险性评价 [J]. 中国铁道科学, 2006, 27(5): 1–6.
- [10] 罗冠枝, 徐林荣. 基于层次分析法的可拓学理论在山区公路泥石流危险性评价中的应用 [J]. 地质灾害与环境保护, 2008, 19(4): 128–133.
- [11] 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.
- [12] 山成菊, 董增川, 樊孔明等. 组合赋权法在河流健康评价权重计算中的应用 [J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2012, 40(6): 622–628.
- [13] 刘希林, 唐川. 泥石流危险性评价 [M]. 北京: 科学出版社, 1995: 12–22.
- [14] 邹翔, 崔鹏, 韦方强, 等. 灰色关联度法在泥石流活动性评价中的应用 [J]. 山地学报, 2003, 21(3): 360–364.
- [15] 闫文周, 顾连胜. 熵权决策法在工程评标中的应用 [J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2004, 36(1): 98–100.

Combined Weight Method Based on Game Theory for Debris Flow Hazard Risk Assessment

Lu Yao, Xu Linrong, Chen Shuyang and Cao Lulai

(School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410004, China)

Abstract: Multi-objective fuzzy optimization models are commonly used in the evaluation of geological disasters, which mostly adopt traditional subjective weighting methods such as analytic hierarchy process (AHP) to determine the index weight, with a series of problems such as judgment matrix is too subjective, and consistency check process is too complicated. In view of this, based on the binary comparison method and the grey system theory, this paper put forward a kind of correlation, which could meet the demand of consistency, namely, binary comparison analysis method. Meanwhile, a combined subjective and objective weight based on the game theory model are given, which can fully exert and utilize the subjective weight information of the correlation binary analysis method and the objective weight information of entropy value method. Thus, the one-sidedness of the single weight can be overcome. In order to verify the combination weight method in the debris flow disaster risk evaluation, case analysis is conducted. The accurate evaluation results show that the method is feasible in the debris flow risk assessment, which can provide reference for similar projects.

Key words: aggregated model based on game theory; debris flow hazard risk assessment; subjective weight method; objective weight method; combined weight method