

基于混合交叉赋权—可拓理论的边坡稳定性分析

孙慧珍¹, 周宗红², 李 晋², 刘 剑²

(1. 昆明理工大学 公共安全与应急管理学院, 昆明 650093;

2. 昆明理工大学 国土资源与工程学院, 昆明 650093)

摘要:随着开采深度的增加,露天矿山边坡的稳定性逐渐降低,对矿山安全造成严重影响。对此,目前尚无准确的评价方法。以边坡岩层内聚力、岩石内摩擦角、大气年降水量、边坡坡高、坡角等五个影响因素为评价指标,采用变异系数法(CV)、G1法、乘法组合、混合交叉组合四种方法确定权重,而后引入物元可拓法,对国内外具有代表性的13类露天矿山边坡进行稳定性分析,对比四种赋权方法的准确率。结果表明:岩层内聚力和岩石内摩擦角对边坡稳定性影响较大,改进的混合交叉赋权法得到的权重结果更加合理。将混合交叉赋权—可拓理论运用于云南长安金矿露天边坡稳定性评价,所得结果与现场实测一致,应用效果显著。

关键词:变异系数法;G1法;混合交叉赋权;可拓学理论;边坡稳定性;矿山安全

中图分类号:TD854.6

文献标志码:A

文章编号:1671-4172(2022)02-0039-07

Slope stability analysis based on hybrid cross-weighting-extension theory

SUN Huizhen¹, ZHOU Zonghong², LI Jin², LIU Jian²

(1. Faculty of Public Safety and Emergency Management, Kunming University of Science and Technology,

Kunming 650093, China;

2. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: As the mining depth increases, the stability of the open-pit mine slope is gradually decreasing, which has a serious impact on mine safety. In this regard, there is currently no accurate evaluation method. In this paper, five influencing factors including slope rock cohesion, rock internal friction angle, atmospheric annual precipitation, slope height, and slope angle were used as evaluation indicators. Coefficient of Variation (CV), G1 method, multiplication combination, and mixed cross combination were used. Four methods were used to determine the weight, and then the matter-element extension method was introduced to analyze the stability of 13 types of open-pit mine slopes at home and abroad, and compared the accuracy of the four weighting methods. The results show that the cohesion of the rock formation and the internal friction angle of the rock have a greater impact on the stability of the slope, and the weight results obtained by the improved hybrid cross weighting method are more reasonable. The hybrid cross-weighting-extension theory is applied to the open-pit slope stability evaluation of the Chang'an gold mine in Yunnan. The results obtained are consistent with the field measurements and obtained obvious effect.

Key words: coefficient of variation method; G1 method; mixed cross weighting; extension theory; slope stability; mine safety

边坡是露天矿山开采活动中的重要组成部分,其稳定性直接影响露天矿的安全生产和经济效益。边坡发生失稳破坏,不仅会破坏周边环境,造成人员

伤亡、财产损失,同时也会严重影响矿山的正常生产作业。因此,开展露天矿边坡稳定性研究显示出其必要性与重要性^[1-2]。

由于边坡稳定性属于多因素、非线性和动态不确定性问题,且各因素之间关联性很强,单一的数值模拟方法难以综合考虑多种因素,故构建合理的评价模型显得尤为重要。目前,TOPSIS^[3]、云模型^[4]、

收稿日期:2021-10-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51864023, 51264018)

作者简介:孙慧珍(1997—),女,硕士,安全工程专业,研究方向为矿山安全、岩石力学。

模糊综合评判模型^[5]、距离判别赋权模型^[6]等评价模型在边坡稳定性分析中广泛应用。在多种定性定量评价指标的影响下,合理科学确定各指标权重成为分析准确的前提^[7]。现阶段主要的赋权方式分为主观和客观两种。主观赋权为主的评价体系带有一定的主观随意性,不能很好地反映客观实际,客观赋权为主的评价体系能够充分利用客观信息进行分析评价,但是缺乏专家的经验判断或者主观评价。虽然已有的主客观乘法组合赋权法在对评价指标进行赋权时既反映了专家或决策者的主观愿望,又反映了评价指标的实际数据信息,但是并非赋权方法的有效本质组合,而且组合系数的选择通常是人为主观确定,使得组合权重不够科学统一^[8]。CV-G1法的混合交叉赋权可使赋权结果更加合理,避免了上述单一赋权法的缺点同时使组合方式更加科学。

可拓学借助形式化的模型来研究事物拓展的可能性^[9]。物元可拓理论适用于不同类型矿山的边坡稳定性评价,能够将所测数据进行充分利用,通过定性分析与定量分析,建立更为合理的物元可拓边坡稳定性评价模型。

在结合前人的研究之后,本文提出了基于CV-G1法的混合交叉赋权确定权重的物元可拓理论评价模型,使评判结果更接近矿山实际情况,从而为露天矿山边坡稳定性评价提供一种新的思路。

1 组合赋权方法

1.1 变异系数法(CV)赋权原理

变异系数简称CV,也称相对标准偏差(RSD),是一种根据统计学方法计算得出系统的各指标变化程度的方法,属于客观赋权法^[10]。该方法根据各评价指标当前值与目标值的变异程度来对各指标进行赋权,当各指标的现有值与目标值差距较大时,说明该指标较难实现目标值,应赋予较大的权重,反之则应赋予较小的权重。具体步骤如下:

1) 建立原始指标数据矩阵(A)

假设有 n 个待评价样本, p 项评价指标,形成原始指标数据矩阵(A)

$$A = (x_{ij})_{np} = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1p} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & \cdots & x_{np} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, x_{ij} 表示第 i 个样本,第 j 项评价指标的数值。

2) 计算第 j 项指标的变异系数(δ_j)

$$\delta_j = \frac{\sigma_j}{\bar{x}_j} \quad (2)$$

式中, $j = 1, 2, 3, \dots, p$; σ_j 为第 j 项指标的均方差。

3) 对变异系数进行归一化处理,计算第 j 项指标的权重(ω_j)

$$\omega_j = \frac{\delta_j}{\sum_{j=1}^p \delta_j} \quad (3)$$

则经过计算得到的最终指标权重为 $W = \{\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_p\}$, 且满足 $\sum_{j=1}^p \omega_j = 1$

1.2 G1法赋权原理

G1法又称序关系分析法,是东北大学郭亚军教授提出的一种主观赋权方法^[11],在层次分析法(AHP)的基础上进行改进,避开AHP的一些缺点,且无需进行一致性检验,主要是通过对评价指标进行重要程度排序,确定唯一序关系,而后赋值,从而确定各个指标的权重^[12]。具体步骤如下:

1) 确定序关系

规定当评价指标 H_i 相对于某一评价准则的重要程度大于(或不小于) H_j 时,记为 $H_i > H_j$ 。则对于评价指标集 $\{H_1, H_2, H_3, \dots, H_p\}$ 可以确定唯一序关系:

$$H_i > H_j > \cdots > H_k \quad i, j, k = 1, 2, 3, \dots, p$$

2) 确定相邻评价指标的相对重要程度

序关系中相邻指标 H_i 和 H_j 之间的重要程度之比为:

$$\frac{\omega_i^a}{\omega_j^a} = r_j^a \quad i, j = 1, 2, \dots, p \quad (4)$$

式中, r_j^a 为第 α 位专家判断相邻指标 H_i 和 H_j 之间的权重比值, $j-1=i$ 。 r_j 的取值一般为1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8^[13]。

3) 计算指标 H_m 的权重 ω_m

根据相邻指标之间的权重比值,得出第 m 项评价指标的权重值 ω_m ^[14]。

$$\omega_m^a = \frac{1}{1 + \sum_{k=2}^m (\prod_{j=k}^m r_j^a)} \quad (5)$$

式中, $k = 2, 3, \dots, m, \dots, p$; ω_m^a 为根据第 α 位专家给出的序关系所计算的第 m 项评价指标的权重值。

4) 计算出其它指标的权重

$$\omega_{m-1}^a = \omega_m^a \times r_m^a, m = 2, 3, \dots, p \quad (6)$$

1.3 组合赋权法

变异系数法(CV)属于客观方法取得权重,设由变异系数法得到的客观权重,权重向量为 $\mathbf{H} = (\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_j, \dots, \eta_p)$ 。G1 法属于主观赋权法,设由 G1 法得到的主观权重的权重向量为 $\mathbf{\Delta} = (\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_m, \dots, \delta_p)$ 。采取乘法组合法^[15],最终权重指标 ω_m 为:

$$\omega_m = \frac{\eta_m \delta_m}{\sum_{m=1}^p \eta_m \delta_m}, m = 1, 2, \dots, p \quad (7)$$

1.4 混合交叉赋权法

通过评价指标的变异系数确定相邻指标的重要性程度之比,代替 G1 法中人为主观确定比值,使主观赋权法与客观赋权法进行有效的本质组合^[8]。

1)确定序关系。

2)由式(2)计算出各指标的变异系数。

3)通过各评价指标的变异系数值确定相邻指标 H_i 和 H_j 之间的重要性程度之比(其中 $j-1=i$)

$$r_j = \begin{cases} \frac{\delta_i}{\delta_j}, \delta_i \geq \delta_j \\ 1, \delta_i < \delta_j \end{cases} \quad i, j = 1, 2, \dots, p \quad (8)$$

4)根据式(8)计算得到的 r_j 值,通过式(5)计算得出指标 H_m 的权重 ω_m 。

5)由式(6)得出其它指标的权重。

2 可拓学理论的基本原理

可拓学^[16]是将给定事物的名称 N 、对应事物的特征 C 及其量值 V ,以有序三元组 $R = (N, C, V)$ 表示。将可拓数学原理与物元理论相结合,对研究对象进行定性、定量评价。采用可拓理论分析的基本步骤如下^[17-19]:

1)确定经典域 R_j

$$R_j = (N_j, C_i, V_{ji}) = \begin{bmatrix} N_j & c_1 & v_{j1} \\ & c_2 & v_{j2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_{jn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_j & c_1 & (a_{j1}, b_{j1}) \\ & c_2 & (a_{j2}, b_{j2}) \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & (a_{jn}, b_{jn}) \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中, N_j 为边坡稳定性等级评价的第 j 个评价等级; C_i 为第 j 个评价等级的特征; V_{ji} 为指标 i 在等级 j 上的取值范围; a_{jn} 为表示相应特征指标的取值下限; b_{jn} 为表示相应特征指标的取值上限。

2)确定节域 R_p

$$R_p = (N_p, C_i, V_{pi}) = \begin{bmatrix} N_p & c_1 & v_{p1} \\ & c_2 & v_{p2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_{pn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_p & c_1 & (a_{p1}, b_{p1}) \\ & c_2 & (a_{p2}, b_{p2}) \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & (a_{pn}, b_{pn}) \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中, N_p 为所有评估等级; V_{pi} 为评估等级对应指标 C_i 的取值范围。

3)确定待评物元 R_t

$$R_t = (F_t, C_i, V_i) = \begin{bmatrix} F_t & c_1 & v_1 \\ & c_2 & v_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_n \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中, F_t 为待评物元; C_i 为待评物元 F_t 的特征指标; V_i 为各指标的实际量值。

4)确定关联度和等级

$$k_j(N_v) = \sum_{i=1}^n \omega_i K_j(v_i) \quad (12)$$

$$K_j(N_i) = \begin{cases} \frac{\rho(v_i, x_{ji})}{\rho(v_i, x_{pi}) - \rho(v_i, x_{ji})} & v_i \notin x_{ji} \\ \frac{-\rho(v_i, x_{ji})}{|x_{ji}|} & v_i \in x_{ji} \end{cases} \quad (13)$$

式中, ω_i 为指标权重; $K_j(N_v)$ 为 N_v 的关联函数; $|x_{ji}|$ 为指标 i 经典域的绝对值; $\rho(v_i, x_{ji})$ 为待评物元量值与经典域之间的距离; $\rho(v_i, x_{pi})$ 为待评物元量值与节域之间的距离。

$$\begin{cases} \rho(v_i, x_{ji}) = \left| v_i - \frac{1}{2}(a_{pi} + b_{pi}) \right| - \frac{1}{2}(b_{pi} - a_{pi}) \\ \rho(v_i, x_{pi}) = \left| v_i - \frac{1}{2}(a_{pi} + b_{pi}) \right| - \frac{1}{2}(b_{pi} - a_{pi}) \end{cases}$$

若 $K_j = \max K_j(N_v)$, 则待评物元属于 j 等级。

3 数据统计分析

经统计分析,选取了国内外具有代表性的 13 类露天矿山边坡^[20-22]、5 项评价指标数据进行稳定性分析与评价分级^[23]。用式(14)对原始评价矩阵和分级标准进行归一化处理^[24],得到标准化评价矩阵和标准化分级标准,其中 I、II、III、IV、V 五个等级,分别对应稳定、较稳定、一般稳定、不稳定和极不稳定(表 1)。

$$\begin{cases} b_{ij} = \frac{x_{ij} - \min x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}} & \text{正指标} \\ b_{ij} = \frac{\max x_{ij} - x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}} & \text{负指标} \end{cases} \quad (14)$$

式中, x_{ij} 为第 i 个评价指标的第 j 个值。

经式(1)~(8)计算得出不同赋权方式下边坡岩层内聚力、岩石内摩擦角、大气年降水量、边坡坡高、坡角等五个露天边坡稳定性评价指标的

权重,见表2。

根据表2及式(9)~(13)计算出各露天矿山在不同赋权方式下稳定性等级的关联度,并确定其稳定性等级,结果见表3。基于评价结果,结合13个样本工程实例,可以看出单一的主客观赋权及简单的乘法组合法准确率均在85%以上, CV-G1 混合交叉赋权法所得结果与实际结果完全相同,准确率较其它三种有所提高。

表1 露天边坡稳定性分级标准(归一化)

Table 1 Classification standard of open-pit slope stability(normalized)

稳定性等级	内聚力/MPa	内摩擦角/(°)	年降水量/mm	坡高/m	坡角/(°)
I	(0.50,1.00]	(0.33,1.00]	(0.85,1.00]	(0.88,1.00]	(0.78,1.00]
II	(0.20,0.50]	(0.28,0.33]	(0.75,0.85]	(0.80,0.88]	(0.67,0.78]
III	(0.10,0.20]	(0.22,0.28]	(0.60,0.75]	(0.60,0.80]	(0.61,0.67]
IV	(0.05,0.10]	(0.11,0.22]	(0.40,0.60]	(0.40,0.60]	(0.56,0.61]
V	(0.00,0.05]	(0.00,0.11]	(0.00,0.40]	(0.00,0.40]	(0.00,0.56]

表2 各评价指标权重值

Table 2 Weight values of each evaluation indexes

赋权方法	内聚力/MPa	内摩擦角/(°)	年降水量/mm	坡高/m	坡角/(°)
CV 法	0.31	0.30	0.15	0.10	0.14
G1 法	0.33	0.24	0.17	0.12	0.14
乘法组合法	0.45	0.30	0.11	0.05	0.09
混合交叉法	0.31	0.30	0.16	0.09	0.14

表3 露天矿山边坡关联度计算结果及等级确定

Table 3 Calculation results and grade determination of slope correlation degree of open-pit mine

赋权方法	序号	I	II	III	IV	V	计算等级	实际等级
CV 法	1	-0.516 55	-0.210 70	-0.435 10	-0.281 22	-0.513 29	II	II
	2	-0.364 21	-0.172 68	-0.341 34	-0.301 54	-0.534 14	II	II
	3	-0.395 60	-0.244 73	-0.083 20	-0.288 87	-0.498 49	III	III
	4	-0.080 22	-0.606 87	-0.637 80	-0.644 14	-0.719 18	I	I
	5	-0.355 89	-0.182 15	-0.150 59	-0.361 68	-0.526 76	III	II
	6	-0.664 32	-0.534 88	-0.345 30	0.048 98	-0.329 30	IV	IV
	7	-0.329 63	0.051 28	-0.313 22	-0.382 93	-0.515 90	II	II
	8	-0.257 56	-0.416 48	-0.472 19	-0.285 71	-0.553 37	I	III
	9	-0.174 81	-0.414 32	-0.303 85	-0.455 97	-0.645 53	I	I
	10	-0.637 69	-0.550 15	-0.552 04	-0.572 33	-0.344 64	V	V
	11	-0.513 24	-0.237 46	-0.452 32	-0.310 68	-0.498 75	II	II
	12	-0.361 39	-0.149 70	-0.330 12	-0.331 35	-0.537 09	II	II
	13	-0.403 47	-0.275 55	-0.082 69	-0.277 44	-0.494 82	III	III
G1 法	1	-0.512 80	-0.187 60	-0.447 36	-0.336 82	-0.545 34	II	II
	2	-0.361 42	-0.162 97	-0.367 17	-0.349 47	-0.556 63	II	II
	3	-0.433 41	-0.260 57	-0.078 80	-0.295 07	-0.507 54	III	III
	4	-0.089 89	-0.577 15	-0.610 77	-0.617 53	-0.698 68	I	I
	5	-0.297 01	-0.215 95	-0.300 91	-0.415 60	-0.576 45	II	II
	6	-0.667 92	-0.533 50	-0.338 30	0.040 51	-0.346 08	IV	IV
	7	-0.353 32	0.018 92	-0.338 78	-0.402 72	-0.527 72	II	II
	8	-0.519 00	-0.339 51	-0.062 40	-0.289 41	-0.520 23	III	III
	9	-0.165 83	-0.439 04	-0.361 39	-0.494 63	-0.672 84	I	I
	10	-0.675 08	-0.591 39	-0.594 89	-0.602 38	-0.338 33	V	V
	11	-0.380 95	-0.262 08	-0.184 37	-0.411 66	-0.531 94	III	II
	12	-0.360 96	-0.140 84	-0.358 94	-0.374 02	-0.558 95	II	II
	13	-0.443 26	-0.292 09	-0.077 06	-0.281 55	-0.503 12	III	III

(续)

赋权方法	序号	I	II	III	IV	V	计算等级	实际等级
乘法组 合法	1	-0.474 52	-0.075 25	-0.397 98	-0.255 31	-0.463 92	II	II
	2	-0.316 67	-0.081 75	-0.316 54	-0.281 48	-0.493 62	II	II
	3	-0.416 42	-0.213 51	0.031 25	-0.275 31	-0.460 26	III	III
	4	0.065 77	-0.602 05	-0.673 35	-0.691 09	-0.745 62	I	I
	5	-0.350 29	-0.173 81	-0.144 78	-0.359 54	-0.521 97	III	II
	6	-0.700 79	-0.550 02	-0.314 58	0.151 68	-0.293 53	IV	IV
	7	-0.284 69	0.184 42	-0.286 46	-0.370 80	-0.483 21	II	II
	8	-0.528 60	-0.304 80	0.076 55	-0.217 15	-0.451 50	III	III
	9	-0.057 57	-0.447 30	-0.358 60	-0.506 23	-0.658 56	I	I
	10	-0.669 55	-0.591 30	-0.575 91	-0.580 36	-0.208 02	V	V
	11	-0.465 89	-0.113 64	-0.418 14	-0.285 94	-0.450 44	II	II
	12	-0.316 40	-0.055 10	-0.302 62	-0.310 12	-0.496 56	II	II
	13	-0.429 70	-0.261 09	0.029 65	-0.256 61	-0.454 35	III	III
混合交 叉法	1	-0.516 55	-0.210 70	-0.435 10	-0.281 22	-0.513 29	II	II
	2	-0.364 21	-0.172 68	-0.341 34	-0.301 54	-0.534 14	II	II
	3	-0.395 60	-0.244 73	-0.083 20	-0.288 87	-0.498 49	III	III
	4	-0.080 22	-0.606 87	-0.637 80	-0.644 14	-0.719 18	I	I
	5	-0.240 70	-0.230 97	-0.309 72	-0.419 81	-0.575 29	II	II
	6	-0.664 32	-0.534 88	-0.345 30	0.048 98	-0.329 30	IV	IV
	7	-0.329 63	0.051 28	-0.313 22	-0.382 93	-0.515 90	II	II
	8	-0.494 66	-0.315 35	-0.029 18	-0.275 55	-0.508 10	III	III
	9	-0.174 81	-0.414 32	-0.303 85	-0.455 97	-0.645 53	I	I
	10	-0.637 69	-0.550 15	-0.552 04	-0.572 33	-0.344 64	V	V
	11	-0.513 24	-0.237 46	-0.452 32	-0.310 68	-0.498 75	II	II
	12	-0.361 39	-0.149 70	-0.330 12	-0.331 35	-0.537 09	II	II
	13	-0.403 47	-0.275 55	-0.082 69	-0.277 44	-0.494 82	III	III

4 实例应用

为了验证基于混合交叉赋权法的物元可拓理论模型用于露天矿山边坡稳定性分析的合理性,本文以云南金平长安金矿边坡为例进行分析。矿区出露地层由新至老主要地层有第四系人工堆积废石、废渣和冲洪积泥砂、砾石、残坡积砂、转石及黏土、腐植土;三叠系上统歪古村组、中统上兰组、二叠系峨眉山玄武岩等。目前,边坡高度达410 m,总边坡角约40°,内聚力为2.55 MPa,内摩擦角为41.4°,年最大降雨量2 963 mm,最小降雨量1 720 mm,多年平均降雨量2 603.20 mm,其中80%以上集中在5~10月的雨季,11月至次年4月为旱季,降雨量少。

4.1 经典域和节域的确定

边坡稳定性 I ~ V 级($j = 1 \sim 5$)的经典域分别为:

$$R_1 = \begin{bmatrix} N_1 & c_1 & (0.50, 1) \\ & c_2 & (0.33, 1) \\ & c_3 & (0.85, 1) \\ & c_4 & (0.88, 1) \\ & c_5 & (0.78, 1) \end{bmatrix}$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} N_2 & c_1 & (0.20, 0.50) \\ & c_2 & (0.28, 0.33) \\ & c_3 & (0.75, 0.85) \\ & c_4 & (0.80, 0.88) \\ & c_5 & (0.67, 0.78) \end{bmatrix}$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} N_3 & c_1 & (0.10, 0.20) \\ & c_2 & (0.22, 0.28) \\ & c_3 & (0.60, 0.75) \\ & c_4 & (0.60, 0.80) \\ & c_5 & (0.61, 0.67) \end{bmatrix}$$

$$R_4 = \begin{bmatrix} N_4 & c_1 & (0.05, 0.10) \\ & c_2 & (0.11, 0.22) \\ & c_3 & (0.40, 0.60) \\ & c_4 & (0.40, 0.60) \\ & c_5 & (0.56, 0.61) \end{bmatrix}$$

$$R_5 = \begin{bmatrix} N_5 & c_1 & (0, 0.05) \\ & c_2 & (0, 0.10) \\ & c_3 & (0, 0.40) \\ & c_4 & (0, 0.40) \\ & c_5 & (0, 0.56) \end{bmatrix}$$

节域取决于评价指标的取值范围,一般为评价指标稳定等级的全体。

$$R_p = \begin{bmatrix} N_p & c_1 & (0, 1.00) \\ & c_2 & (0, 1.00) \\ & c_3 & (0, 1.00) \\ & c_4 & (0, 1.00) \\ & c_5 & (0, 1.00) \end{bmatrix}$$

4.2 待评物元的确定

根据归一化后的露天矿山边坡各评价指标值可确定待评物元。

$$R_t = \begin{bmatrix} N_1 & c_1 & 1.00 \\ & c_2 & 0.46 \\ & c_3 & 0.00 \\ & c_4 & 0.18 \\ & c_5 & 0.56 \end{bmatrix}$$

4.3 指标权重的确定

根据 CV-G1 的混合交叉赋权法得出五项评价指标得组合权重为

$$W = (0.307\ 08, 0.295\ 87, 0.151\ 51, 0.101\ 62, 0.143\ 92)$$

4.4 边坡稳定性的关联度计算

根据式(12)~(13),计算待评边坡与各稳定性等级的关联度,确定稳定性级别,结果见表4。边坡的稳定性等级为 I 级(稳定),与矿山实际等级一致,可得出基于混合交叉赋权法的物元可拓理论模型用于露天矿山边坡稳定性分析可应用到工程实际中。

表 4 关联度计算结果

Table 4 Calculation results of correlation degree

稳定性等级	I	II	III	IV	V	稳定性级别
关联度	-0.249 39	-0.652 59	-0.649 34	-0.645 85	-0.722 92	I

5 结论

1)有针对性地选取边坡岩层内聚力、岩石内摩擦角、大气年降水量、边坡坡高和坡角五个露天边坡稳定性影响因素为指标,采用 CV 法和 G1 法的混合交叉赋权得出各指标的权重,运用可拓理论建立了露天矿山边坡稳定性的分级方法,评价结果与现场实测值一致。

2)在分析过程中,通过对 CV 法、G1 法、简单乘法组合赋权、混合交叉赋权四种方法得出的权重进行分析,得出混合交叉赋权-物元可拓模型得出结果的准确率较其它三种方法更高,更具有代表性。

3)通过可拓学物元原理确定各待测指标与评价等级的关联度,充分考虑客观因素的影响,同时能够将所测数据进行充分的利用,从而使结果更加接近实际情况。理论上更加严谨,为边坡稳定性预测提供了一个可行的方法。

参 考 文 献

- [1] 孙玉科,杨志法,丁恩保.中国露天矿边坡稳定性研究[M].北京:中国科学技术出版社,1999:17-20.
SUN Yuke, YANG Zhifa, DING Enbao. Research on slope stability of open-pit mines in China[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1999: 17-20.
- [2] 黄斌.华联锌铜露天矿边坡风险评估[D].昆明:昆明理工大学,2019.
HUANG Bin. Risk assessment of Hualian zinc-indium open-pit mine slope[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2019.

- [3] 姜安民,董彦辰,刘霁,等.基于改进熵权 TOPSIS 模型的岩质边坡稳定性评价[J].土木工程与管理学报,2019,36(4):133-139.
JIANG Anmin, DONG Yanchen, LIU Ji, et al. Evaluation of rock slope stability based on improved entropy weight TOPSIS model[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2019, 36(4): 133-139.
- [4] 吴孟龙,叶义成,胡南燕,等.RAGA-PPC 云模型在边坡稳定性评价中的应用[J].中国安全科学学报,2019,29(9):57-63.
WU Menglong, YE Yicheng, HU Nanyan, et al. The application of RAGA-PPC cloud model in slope stability evaluation[J]. China Safety Science Journal, 2019, 29(9): 57-63.
- [5] 曹仁举,岳跃宁,陈绪超.基于模糊综合评判的露天矿软岩边坡稳定性分析[J].煤炭技术,2020,39(5):143-145.
CAO Renju, YUE Yuening, CHEN Xuchao. Stability analysis of open-pit mine soft rock slope based on fuzzy comprehensive evaluation[J]. Coal Technology, 2020, 39(5): 143-145.
- [6] 闫长斌.边坡稳定性预测的粗糙集-距离判别模型及其应用[J].工程地质学报,2016,24(2):204-210.
YAN Changbin. Rough set-distance discriminant model for slope stability prediction and its application[J]. Journal of Engineering Geology, 2016, 24(2): 204-210.
- [7] 王黎蝶,侯克鹏,孙华芬,等.基于改进的博弈论-变权可拓模型的边坡稳定评估[J].有色金属工程,2021,11(9):100-106.
WANG Lidie, HOU Kepeng, SUN Huaafen, et al. Slope stability evaluation based on improved game theory-variable weight extension model[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2021, 11(9): 100-106.
- [8] 祝志川.基于变异系数-G1 法的混合交叉赋权方法[J].统计与决策,2017(12):78-81.

- ZHU Zhichuan. Hybrid cross-weighting method based on the coefficient of variation-G1 method[J]. Statistics and Decision, 2017(12):78-81.
- [9] 蔡文,杨春燕.可拓学的基础理论与方法体系[J].科学通报, 2013,58(13):1190-1199.
- CAI Wen, YANG Chunyan. The basic theory and method system of extenics [J]. Science Bulletin, 2013, 58 (13): 1190-1199.
- [10] 罗月明.基于改进的TOPSIS-CV法的边坡稳定性分析[J].黄金, 2021,42(5):35-39.
- LUO Yueming. Slope stability analysis based on improved TOPSIS-CV method[J]. Gold, 2021, 42(5): 35-39.
- [11] 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(3):65-70.
- WANG Xuejun, GUO Yajun. Consistency analysis of judgment matrix based on G1 method[J]. China Management Science, 2006(3):65-70.
- [12] 郭亚军.综合评价理论与方法[M].北京:科学出版社, 2002.
- GUO Yajun. Comprehensive evaluation theory and method[M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [13] 刘建,郑双忠,邓云峰,等.基于G1法的应急能力评估指标权重的确定[J].中国安全科学学报, 2006(1):30-33.
- LIU Jian, ZHENG Shuangzhong, DENG Yunfeng, et al. Determination of the weights of emergency capability assessment indicators based on G1 method[J]. China Safety Science Journal, 2006(1):30-33.
- [14] 艾欣,赵旭州,胡寰宇,等. G1 - 熵权 - 独立性权法在电网发展态势感知中的应用[J].电网技术, 2020,44(9):3481-3490.
- AI Xin, ZHAO Xuzhou, HU Huanyu, et al. Application of G1-entropy right-independence right method in power grid development situation awareness [J]. Power System Technology, 2020, 44(9):3481-3490.
- [15] 杨宇.多指标综合评价中赋权方法评析[J].统计与决策, 2006(13):17-19.
- YANG Yu. Evaluation and analysis of weighting methods in multi-index comprehensive evaluation [J]. Statistics and Decision, 2006(13):17-19.
- [16] 王新民,康虔,秦健春,等.层次分析法-可拓学模型在岩质边坡稳定性安全评价中的应用[J].中南大学学报(自然科学版), 2013,44(6):2455-2462.
- WANG Xinmin, KANG Qian, QIN Jianchun, et al. Application of analytic Hierarchy process-extenics model in safety evaluation of rock slope stability[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2013, 44(6):2455-2462.
- [17] 张婧静.基于改进物元可拓法的非煤露天矿山安全生产风险等级评定研究[D].西安:西安建筑科技大学, 2020.
- ZHANG Jingjing. Research on safety production risk assessment of non-coal open-pit mines based on improved matter-element extension method[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2020.
- [18] 张向东,姜革鑫.基于可拓学理论的矿山边坡稳定性分析[J].安全与环境学报, 2018,18(6):2141-2145.
- ZHANG Xiangdong, JIANG Gexin. Mine slope stability analysis based on extension theory[J]. Journal of Safety and Environment, 2018, 18(6):2141-2145.
- [19] 谈小龙,徐卫亚,梁桂兰.可拓方法在岩石边坡整体安全评价中的应用[J].岩石力学与工程学报, 2009,28(12):2503-2509.
- TAN Xiaolong, XU Weiya, LIANG Guilan. Application of extension method in overall safety evaluation of rock slopes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(12):2503-2509.
- [20] 何奕良,李牟.基于德尔菲-理想点法的露天矿边坡稳定性分析[J].采矿技术, 2020,20(2):56-59.
- HE Yiliang, LI Mou. Analysis of slope stability of open-pit mine based on Delphi-ideal point method [J]. Mining Technology, 2020, 20(2):56-59.
- [21] 吴安泽.基于博弈论-物元可拓模型的边坡稳定性评价[D].重庆:重庆交通大学, 2015.
- WU Anze. Evaluation of slope stability based on game theory-matter element extension model [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2015.
- [22] 黄文杰.基于物元分析法的露天矿边坡稳定性评价[J].有色金属(矿山部分), 2014,66(1):57-61.
- HUANG Wenjie. Evaluation of open-pit slope stability based on matter-element analysis [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2014, 66(1):57-61.
- [23] 肖海平.中小型露天矿边坡稳定性动态评价方法及应用[D].徐州:中国矿业大学, 2019.
- XIAO Haiping. Dynamic evaluation method and application of slope stability of small and medium open-pit mines [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [24] 陈雪锋,陈文涛,苗永春.基于熵权TOPSIS法的岩爆预测[J].煤炭技术, 2018,37(6):38-40.
- CHEN Xuefeng, CHEN Wentao, MIAO Yongchun. Rockburst prediction based on entropy weight TOPSIS method[J]. Coal Technology, 2018, 37(6):38-40.

(编辑:郭文晶)