

丁丽宏,马强.基于组合权重的模糊物元模型在边坡稳定性评价中的应用[J].地震工程学报,2017,39(5):946-950.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.946.

DING Lihong, MA Qiang. Application of Fuzzy Matter-element Model Based on Coefficients of Combined Weights to Evaluate Slope Stability[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(5): 946-950. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2017.05.946

基于组合权重的模糊物元模型 在边坡稳定性评价中的应用^①

丁丽宏¹, 马 强²

(1. 宁夏大学数学统计学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏大学民族预科教育学院, 宁夏 银川 750021)

摘要: 鉴于边坡稳定性评价的复杂性及其影响因素的不确定性和模糊性, 运用模糊物元分析理论, 分别使用层次分析法和熵权法计算各影响因子的主、客观权重值, 建立兼顾主、客观因素的组合权重模糊物元评价模型。该模型有效避免了权重分配困难的问题, 既能得到综合评价信息, 也能反映评价对象的稳定状态。主、客观权重法既利用了样本资料的统计信息, 又反映了专家的理论知识和经验, 可得到较为客观、合理的指标权重。工程实例分析表明, 该方法能准确反映边坡稳定性状况, 为边坡稳定性的综合评价提供一条新的思路。

关键词: 边坡; 稳定性评价; 组合权重; 模糊物元; 熵

中图分类号: TU457

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2017)05-0946-05

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2017.05.0946

Application of Fuzzy Matter-element Model Based on Coefficients of Combined Weights to Evaluate Slope Stability

DING Lihong¹, MA Qiang²

(1. School of Mathematics and Statistics, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China;

2. School of Preparatory Education for Nationalities, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China)

Abstract: In view of the complexity, uncertainty, and fuzziness of the factors involved in evaluating slope stability, based on the fuzzy matter-element theory, we calculated the objective and subjective weights of the influence factors using the analytic hierarchy process and the entropy weight method. Then, we established a fuzzy matter-element model based on the coefficients of combined weights that considers both objective and subjective factors. The problem of weight allocation can be avoided by employing our proposed method. A comprehensive evaluation can be made by using this matter-element model along with the subjective and objective weighting method, both of which make the best use of statistical information from samples, based on expert theories and experience, to obtain reasonable index weights. We conduct a case study to demonstrate that this method can not only accurately estimate the slope stability but also provides a new way to evaluate slope stability.

① 收稿日期: 2016-12-15

基金项目: 宁夏大学自然科学基金(ZR1238)

作者简介: 丁丽宏(1978-), 女, 硕士, 副教授, 主要从事岩土工程中智能理论应用方面的研究。E-mail: ayshe.ding@163.com。

Key words: slope; evaluation of stability; combined weight; fuzzy matter-element; entropy

0 引言

边坡是具有一定坡度的斜坡,它所赋存介质是自然界中广泛存在的岩土材料,所以一旦其失稳破坏,就会出现大面积的破坏现象,常常会造成严重的工程事故,毁坏铁路、桥梁,淹没村庄,造成灾难性的后果。因此边坡的稳定性分析对保证各种工程项目的安全运营及保护人民的财产安全具有重要的实用意义和经济意义。

边坡破坏过程中,非线性是边坡变形破坏行为的本质特征。为了适应岩体工程的非确定性特征,一些学者提出了很多新的评价方法,如模糊数学法、灰色理论、主成分分析及聚类分析等^[1-3]。然而由于各单项评价指标的评价结果往往是不相容的,直接利用评价标准难以做出确切的评价,并且这些方法在权重确定时或采用主观赋权,或采用客观赋权,使得评价结果或受评判者主观影响较大,或在评价中不能表达评判者的主观意志。

而本文利用物元分析理论,结合模糊集合和欧氏贴近度的概念,应用基于欧氏贴近度的模糊物元分析方法,将熵值法计算所得客观权重和层次分析法所得主观权重进行组合,得到组合权重,可克服上述缺陷,同时构造复合模糊物元模型,较客观地对边坡稳定进行分析。

1 模糊物元模型

1.1 复合物元的概念^[4]

物元分析中所描述的事物 M 及其特征 C 和量值 x 组成物元 $R=(M,C,x)$,同时把事物的名称、特征和量值称为物元三要素。如果物元模型中的量值 x 具有模糊性,便称其为模糊物元。事物 M 有 n 个特征 C_1, C_2, \dots, C_n 及其相应的量值 x_1, x_2, \dots, x_n , 则称 R 为 n 维模糊物元。 m 个事物的 n 维物元组合在一起,便构成 m 个事物的 n 维复合模糊物元,即

$$\mathbf{R}_{nm} = \begin{bmatrix} M_1 & \cdots & M_m \\ c_1 & x_{11} & \cdots & x_{1m} \\ c_2 & x_{21} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_n & x_{n1} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中: \mathbf{R}_{nm} 为 m 个事物的 n 维复合物元; M_j 为第 j 个事物 ($j=1, 2, \dots, m$), C_i 为 i 个特征 ($i=1, 2, \dots, n$), x_{ij} 为第 j 个事物第 i 个特征对应的模糊量值。

1.2 从优隶属度原则

模糊物元各单项指标相应的模糊量值,从属于最优方案中各对应指标相应模糊量值的隶属程度,称为从优隶属度。从优隶属度一般为正值,由此建立的原则称为从优隶属度原则。由于各指标特征值对于量化结果来说,有的是越大越优,有的是越小越优,因此对于不同的隶属度分别采用不同的计算公式。为了更合理地反映边坡评价各指标的相对性,对越大越优型指标,采用下式

$$u_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_i x_{ij}}{\max_i x_{ij} - \min_i x_{ij}} \quad (2)$$

对越小越优型指标,采用下式

$$u_{ij} = \frac{\max_i x_{ij} - x_{ij}}{\max_i x_{ij} - \min_i x_{ij}} \quad (3)$$

其中: $\min_i x_{ij}, \max_i x_{ij}$ 分别为各事物中第 i 项特征所对应的所有量 x_{ij} 中的最小值和最大值。

由此可构建从优隶属度模糊物元 $\tilde{\mathbf{R}}_{nm}$

$$\tilde{\mathbf{R}}_{nm} = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & \cdots & M_m \\ c_1 & u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{1m} \\ c_2 & u_{21} & u_{22} & \cdots & u_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ c_n & u_{n1} & u_{n2} & \cdots & u_{nm} \end{bmatrix} \quad (4)$$

1.3 标准模糊物元与差平方复合模糊物元

标准模糊物元 \tilde{R}_0 是由从优隶属度模糊物元 $\tilde{\mathbf{R}}_{nm}$ 中各量化指标的从优隶属度的最大值或最小值构成,本文以最大值作为最优,即各指标从优隶属度均为 1。若以 $\Delta_{ij} (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m)$ 表示最优模糊物元 \tilde{R}_0 与复合从优隶属度模糊物元 $\tilde{\mathbf{R}}_{nm}$ 中各项差的平方,则组成差平方复合模糊物元 $\tilde{\mathbf{R}}_{\Delta}$, 即 $\Delta_{ij} = (\mu_{0i} - \mu_{ij})^2$, $\tilde{\mathbf{R}}_{\Delta}$ 可表示为

$$\tilde{\mathbf{R}}_{\Delta} = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & \cdots & M_m \\ c_1 & \Delta_{11} & \Delta_{12} & \cdots & \Delta_{1m} \\ c_2 & \Delta_{21} & \Delta_{22} & \cdots & \Delta_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ c_n & \Delta_{n1} & \Delta_{n2} & \cdots & \Delta_{nm} \end{bmatrix} \quad (5)$$

2 组合权重计算

只注重对数据客观信息进行分析,过分依赖客观数据,会使结果中客观因素所占比例过大;而只注重通过专家评分来对权重结果进行数学分析,又会使结果中主观因素干扰过大。为了避免产生以上两种不

符合实际规律的结果,本文研究采用熵权法和层次分析法分别计算各因子对边坡稳定影响的客观权重和主观权重,最后通过偏好系数,综合考虑主、客观权重,得到综合权重。

2.1 客观权重的确定

在信息论中,熵值^[5-6]反映了信息无序化程度,其值越小,系统的无序度越小,故可以用信息熵评价所获系统信息的有序度及其效用,即由评价指标构成的判断矩阵来确定指标权重。它能尽量消除各指标权重计算的人为干扰,使其评价结果更符合实际。其计算方法如下:

(1) 构建 m 个事物 n 个评价指标的判断矩阵

$$\mathbf{R} = (x_{ij})_{nm} \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m)$$

(2) 将判断矩阵进行归一化处理。为消除由评价指标物理量纲不同带来的影响,在评价之前需将评价矩阵中各指标无量纲化处理。本文采用线性插值法的标准化方法对原始数据进行无量纲化处理。一般情况下,所有指标可划分为效益型指标和成本型指标。效益型指标是指数值越大越好的指标,其标准化

方法为 $b_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$; 成本型指标是指数值越小越

好的指标,其标准化方法为 $b_{ij} = \frac{x_{\max} - x_{ij}}{x_{\max} - x_{\min}}$, 从而得到归一化判断矩阵 \mathbf{B} 。

(3) 根据熵的定义,第 i 个评价指标的熵为

$$H_i = \frac{1}{\ln m} \left(\sum_{j=1}^m f_{ij} \ln f_{ij} \right) \quad (6)$$

$$f_{ij} = \frac{b_{ij}}{\sum_{j=1}^m b_{ij}} \quad (7)$$

当 $f_{ij} = 0$ 时, $f_{ij} \ln f_{ij} = 0$; 当 $f_{ij} = 1$ 时, $f_{ij} \ln f_{ij} = 0$, 对 f_{ij} 进行修正, 即为

$$f_{ij} = \frac{1 + b_{ij}}{\sum_{j=1}^m 1 + b_{ij}} \quad (8)$$

(4) 计算评价指标熵权 $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$, 其中第 i 个指标的熵权为

$$\omega_i = \frac{1 - H_i}{n - \sum_{i=1}^n H_i} \quad \text{且满足} \quad \sum_{i=1}^n \omega_i = 1 \quad (9)$$

2.2 主观权重的确定

层次分析法是一种对复杂问题简单化、层次化后有效结合专家和分析者的主观意见,兼顾定性 with 定量分析的一种决策方法。在实际应用中,由于人为判断的片面性,两两比较的结果不一定具有客观一致性,因此通常需要一致性检验。若不能通过检验,则用估计来调整判断矩阵,但此方法带有主观性和盲目性,

有时需要经过多次调整才能通过一致性检验。为此,本文采用 3 标度法^[7-8],该方法自然满足一致性要求,不需要进行一致性检验,与其他标度相比具有良好的判断传递性与标度值的合理性,有利于决策者在两两比较判断过程中提高准确性。其分析步骤如下:

(1) 构造两两比较矩阵,即 3 标度的判断矩阵

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{表示 } i \text{ 比 } j \text{ 重要} \\ 0 & \text{表示 } i \text{ 与 } j \text{ 同等重要} (i, j = 1, 2, \dots, n) \\ -1 & \text{表示 } i \text{ 不如 } j \text{ 重要} \end{cases}$$

(2) 计算各评价因素重要性排序,即各因素的权重值。各因素的权重值为上述判断矩阵的最大特征根所对应的特征向量。对于特征向量的计算方法有很多种,如几何平均法、规范列平均法等。这里采用几何平均法,首先计算判断矩阵每一行因素的乘积 $M_i = \prod_{j=1}^n a_{ij}$, 然后计算 M_i 的 n 次方根 $\bar{W}_i = \sqrt[n]{M_i}$, 得到向量 $\bar{\mathbf{W}} = [\bar{W}_1 \quad \bar{W}_2 \quad \cdots \quad \bar{W}_n]^T$, 对该向量进行归一化处理, 即 $z_i = \bar{W}_i / (\sum_{i=1}^n \bar{W}_i)$, 得到权重向量 $\mathbf{z}_i = (z_1, z_2, \dots, z_n)$ 。

本文由于采用采用 3 标度法,其计算结果自然满足一致性检验。

2.3 综合权重的确定

利用下式综合上面的计算结果,得到边坡稳定性评价的各影响因子的综合权重

$$k = \mu\omega + (1 - \mu)z \quad (10)$$

其中: k 为综合权重, ω 为客观权重, z 为主观权重; μ 和 $1 - \mu$ 分别为熵权和层次分析法所得权重各占的比例,也即为主、客观权重偏好系数,且 $\mu \in [0, 1]$ 。

3 贴近度和综合评价

贴近度是指各评价方案与最优方案互相接近的程度,其值越大表示两者越接近,反之则相离较远。计算贴近度的公式有很多,考虑到本文的具体评价意义,采用 $M(\cdot, +)$ 算法,即先乘后加运算,计算欧氏贴近度 ρH_j (ρH_j 为第 j 个评价方案与标准方案接近的程度),以此来构建欧式贴近度复合模糊物元 $\mathbf{R}_{\rho H}$ ^[5]

$$R_{\rho H} = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & & M_m \\ \rho H_j & \rho H_1 & \rho H_2 & \rho H_m \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中: $\rho H_j = 1 - \sqrt{\sum_{i=1}^n K_i \Delta_{ij}}$ ($j = 1, 2, \dots, m$)。

4 工程应用

4.1 边坡稳定性的评价指标和分类标准

边坡稳定受多种因素共同影响,通过对前人研究经验的总结^[9-10]、工程岩体分级标准(GB 50218-

94)及现场实测结果和资料分析,选取 7 个指标作为边坡稳定性评价的综合指标,如表 1 所列。由于影响边坡稳定的指标都存在于某个区间内,而有的则不存在最大值,如内摩擦角应大于 37°,但是为了数据便于归一化,限定了一个区间范围为(37,46),若在后续计算中待测边坡评价指标实际值超过了限定范围,则归一化过程中按区间的最大值进行计算。

用上述方法对文献[9]中的渝黔高速公路边

表 1 边坡稳定性影响等级标准

Table 1 The grade standards of slope stability

等级	ROD	岩体结构特征	地应力/MPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	坡高	日最大降雨量/mm
稳定 I	90~100	90~100	0~2	0.22~0.32	37~45	0~30	0~20
较稳定 II	75~90	75~90	2~8	0.12~0.22	29~37	30~45	20~40
基本稳定 III	50~75	50~75	8~14	0.08~0.12	21~29	45~60	40~60
不稳定 IV	25~50	30~50	14~20	0.05~0.08	13~21	60~80	60~100
极不稳定 V	0~25	0~30	20~25	0~0.05	0~13	80~100	100~150
待评边坡	72	15	0.44	0.024	12	46	120

坡(P1)和文献[10]中的某矿区边坡 P2~P4 进行稳定性分析。4 个边坡各指标实测值见表 2。

4.2 建立评价模型

(1) 构建复合模糊物元。根据表 1 和表 2 的数据,对 5 个分级标准和 4 个待测边坡建立 9 个样品 7 个指标的复合模糊物元。对分级标准,从模糊概念(如稳定性)的工程安全角度考虑,可取边坡分级标准中指标 j 区间的上限作为模糊物元的量值。

(2) 依据式(2)构建从优隶属度模糊物元 R_{mm} 。

(3) 根据标准模糊物元和 R_{mm} 构建差方平方模糊物元 R_{Δ} 。

(4) 利用熵权法确定权重。

建立判断矩阵,并进行归一化得到判断矩阵 B 。

表 2 边坡稳定性指标的实测值

Table 2 Measured values of indexes for slope stability

边坡	ROD	岩体结构特征	地应力 /MPa	黏聚力 /MPa	内摩擦角/(°)	坡高 /m	日最大降雨量/mm
P1	72.00	15	0.44	0.024	12.0	46	120
P2	65.23	63	3.65	0.13	44.5	43	344
P3	87.21	82	6.77	0.22	46.0	51	344
P4	89.46	84	12.23	0.21	42.0	47	344

$$R_{nm} = \begin{bmatrix} & P_1 & P_2 & P_3 & P_4 & I & II & III & IV & V \\ C_1 & 0.720 0 & 0.652 3 & 0.872 1 & 0.894 6 & 1.000 0 & 0.900 0 & 0.750 0 & 0.500 0 & 0.250 0 \\ C_2 & 0.150 0 & 0.630 0 & 0.650 0 & 0.840 0 & 1.000 0 & 0.900 0 & 0.750 0 & 0.500 0 & 0.300 0 \\ C_3 & 0.982 4 & 0.854 0 & 0.729 2 & 0.506 8 & 1.000 0 & 0.920 0 & 0.680 0 & 0.440 0 & 0.200 0 \\ C_4 & 0.075 0 & 0.406 2 & 0.687 5 & 0.656 2 & 1.000 0 & 0.690 0 & 0.380 0 & 0.250 0 & 0.160 0 \\ C_5 & 0.260 8 & 0.967 4 & 1.000 0 & 0.913 0 & 1.000 0 & 0.804 3 & 0.630 4 & 0.456 5 & 0.282 6 \\ C_6 & 0.540 0 & 0.570 0 & 0.490 0 & 0.530 0 & 1.000 0 & 0.700 0 & 0.550 0 & 0.400 0 & 0.200 0 \\ C_7 & 0.651 2 & 1.000 0 & 1.000 0 & 1.000 0 & 1.000 0 & 0.941 8 & 0.883 7 & 0.825 6 & 0.709 3 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$R_{\Delta} = \begin{bmatrix} & P_1 & P_2 & P_3 & P_4 & I & II & III & IV & V \\ C_1 & 0.078 4 & 0.120 9 & 0.016 4 & 0.111 & 0.000 0 & 0.01 & 0.062 5 & 0.25 & 0.562 5 \\ C_2 & 0.722 5 & 0.136 9 & 0.122 5 & 0.025 6 & 0.000 0 & 0.01 & 0.062 5 & 0.25 & 0.490 0 \\ C_3 & 0.000 3 & 0.021 3 & 0.073 3 & 0.243 2 & 0.000 0 & 0.006 4 & 0.102 4 & 0.313 6 & 0.640 0 \\ C_4 & 0.855 6 & 0.352 5 & 0.097 7 & 0.118 2 & 0.000 0 & 0.096 1 & 0.384 4 & 0.562 5 & 0.705 6 \\ C_5 & 0.546 4 & 0.001 1 & 0.000 0 & 0.007 6 & 0.000 0 & 0.038 3 & 0.136 6 & 0.295 4 & 0.514 6 \\ C_6 & 0.211 6 & 0.184 9 & 0.260 1 & 0.220 9 & 0.000 0 & 0.09 & 0.202 5 & 0.360 0 & 0.640 0 \\ C_7 & 0.121 7 & 0.000 0 & 0.000 0 & 0.000 0 & 0.000 0 & 0.003 4 & 0.013 5 & 0.030 4 & 0.087 7 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} & P_1 & P_2 & P_3 & P_4 \\ C_1 & 0.720 & 0.652 & 0.872 & 0.894 \\ C_2 & 0.150 & 0.630 & 0.650 & 0.840 \\ C_3 & 0.982 & 0.854 & 0.729 & 0.506 \\ C_4 & 0.075 & 0.406 & 0.687 & 0.656 \\ C_5 & 0.260 & 0.967 & 1.000 & 0.913 \\ C_6 & 0.540 & 0.570 & 0.490 & 0.530 \\ C_7 & 0.651 & 1.000 & 1.000 & 1.000 \end{bmatrix} \quad (13)$$

经计算得到熵和熵权分别如式(14)所示。

$$H = [0.998 \ 8 \quad 0.989 \ 9 \quad 0.996 \ 3 \quad 0.989 \ 2 \quad 0.988 \ 7 \quad 0.999 \ 8 \quad 0.997 \ 6] \quad (14)$$

$$\omega = [0.171 \ 9 \quad 0.145 \ 7 \quad 0.303 \ 9 \quad 0.280 \ 4 \quad 0.033 \ 2 \quad 0.041 \ 6 \quad 0.023 \ 3] \quad (15)$$

$$z = [0.034 \ 1 \quad 0.378 \ 3 \quad 0.023 \ 4 \quad 0.153 \ 6 \quad 0.093 \ 8 \quad 0.057 \ 3 \quad 0.250 \ 0] \quad (15)$$

$$k = [0.031 \ 6 \quad 0.304 \ 6 \quad 0.064 \ 3 \quad 0.223 \ 8 \quad 0.210 \ 5 \quad 0.024 \ 7 \quad 0.135 \ 6] \quad (16)$$

$$R_{\rho H} = \begin{bmatrix} & P_1 & P_2 & P_3 & P_4 & I & II & III & IV & V \\ \rho H_j & 0.257 \ 8 & 0.618 \ 6 & 0.810 \ 2 & 0.733 \ 9 & 1.000 \ 0 & 0.760 \ 6 & 0.633 \ 7 & 0.447 \ 5 & 0.291 \ 4 \end{bmatrix} \quad (17)$$

4.3 结果分析

将计算得出的4个边坡与分级标准的贴进度进行比较可知,边坡P₁为极不稳定边坡,边坡P₂为基本稳定边坡,P₃为稳定边坡,P₄为较稳定边坡。其计算结果与灰关联分析及可拓学评价^[9-11]结果一致(表3),这表明基于权重的模糊物元模型在边坡稳定性评价中是合理可行的。

表3 待测边坡评价结果对比

Table 3 Comparison between of evaluation results of measured slopes

边坡	模糊物元评价	灰关联分析	可拓评价
P1	V	V	V
P2	III	III	III
P3	I	I	I
P4	II	II	II

5 结论

(1) 影响边坡稳定的因素众多,且具有不确定性和信息的有限性,将模糊物元理论应用到边坡稳定性评价中,建立了模糊物元评价模型,工程实例分析表明,该模型具有一定的可行性和可靠性。

(2) 使用层次分析法计算边坡稳定影响因子的主观权重,因为不需要实际的数据资料,计算过程比较简单直观,但由于是通过主观的评分来确定评价的基础资料,因此存在一定的主观影响。

(3) 引入熵值理论,从数据本身所反映的信息无序化效用值来计算权重系数,可以有效减少其计算的主观性。

(4) 对主、客观权重通过偏好系数进行综合,可

(5) 利用层次分析法确定主观权重如式(15)所示。

(6) 计算综合权重

考虑实际情况及工程评价经验等,取 $\mu = 0.6$,并根据式(10)计算得到组合权重如式(16)所示。

(7) 计算贴进度。

由式(11)可以得到4个待测边坡的贴进度 $R_{\rho H}$ 如式(17)所示

以较好地平衡两者的影响作用,提高权重分析的准确性。

参考文献(References)

[1] 霍张丽,梁收运.模糊数学方法在滑坡稳定性评价中的应用[J].西北地震学报,2007,29(1):35-39.
HUO Zhangli, LIANG Shouyun. Application of Fuzzy Mathematics Method on Landslide Stability Assessment[J]. Northwestern Seismological Journal, 2007, 29(1): 35-39.

[2] 贾东远,阴可,李艳华.岩石边坡稳定性分方法[J].地下空间,2004,24(2):250-255.
JIA Dongyuan, YIN Ke, LI Yanhua. Analytical Method for Slope Stability[J]. Underground Space, 2004, 24(2): 250-255.

[3] 罗泽华,黄吕卫,刘高,等.基于因子敏感性的灰色关联度及其在斜坡稳定性预测中的应用[J].兰州大学学报:自然科学版,2016,52(4):429-433.
LUO Zehua, HUANG Lüwei, LIU Gao, et al. Grey Correlation Degree Based on Sensitivity Coefficient and Its Application in Predicting the Stability of Slope[J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 2016, 52(4): 429-433.

[4] 张斌,雍岐东,肖芳淳.模糊物元分析[M].北京:石油工业出版社,1997.
ZHANG Bin, YONG Qidong, XIAO Fangchun. Fuzzy Matter Element Analysis[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997.

[5] 张先起,梁川.基于熵权的模糊物元模型在水质综合评价中的应用[J].水利学报,2005,36(9):1057-1061.
ZHANG Xianqi, LIANG Chuan. Application of Fuzzy Matter-element Model Based on Coefficients of Entropy in Comprehensive Evaluation of Water Quality[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(9): 1057-1061.

- 院学报,1989,8(1):37-44.
- JIANG Jinqun.The Initial Fault Process of the Old Roof and Its Mine Pressure[J].Journal of Shandong Mining Institute, 1989,8 (1):37-44.
- [7] 姚庆华.孤岛煤柱冲击地压危险性评价研究[D].青岛山东大学,2006.
- YAO Qinghua. Study on Appraisal of Rockburst Hazard in Isolated Caol Pillar[D]. Qinghai: Shandong University of Science and Technology, 2006.
- [8] 周云东,上官子恒,褚飞飞,等.地震动非一致性对隧道动力响应的影响分析[J].地震工程学报,2017,39(1):8-12.
- ZHOU Yundong, SHANGGUAN Ziheng, CHU Feifei, et al. Influence of Non-consistency of Ground Motion on Tunnel Dynamic Response[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017,39(1):8-12.
- [9] 于儿林.大采高孤岛采场覆岩运动破坏特征和矿压显现研究[D].淮南:安徽理工大学,2007.
- YU Erlin. Failure Characteristics of Overlying Strata Movement and Strata Behaviors Research in Island with Large Mining Height [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2007.
- [10] 秦忠诚,王同旭.深井孤岛综放面支承压力分布及其在底板中的传递规律[J].岩石力学与工程学报,2004,23(7):1127-1131.
- QIN Zhongcheng, WANG Tongxu. Abutment Pressure Distribution and Its transfer Law in Floor of Deep Isolated Full-mechanized Mining Faces Using Sublevel Caving[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23 (7): 1127-1131.
- [11] 石永奎,郝建,韩作振,等.采空区充填复采与灾害预控技术[M].北京:中国矿业大学出版社,2014.
- SHI Yongkui, HAO Jian, HAN Zuozhen, et al. Filling Repeated Mining in Pit Goaf and Disaster Prevention Technology [M]. Beijing: China University of Mining and Technology Press, 2014.
- [12] 姜福兴.采场覆岩空间结构观点及其应用研究[J].采矿及安全工程学报,2006,23(1):30-33.
- JIANG Fuxing. Viewpoint of Spatial Structures of Overlying Strata and Its Application in Coal Mine[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2006, 23(1): 30-33.

(上接第 950 页)

- [6] 邱苑华.管理决策与应用熵学[M].北京:机械工业出版社,2001.
- QIU Wanhua. Management Decision and Applied Entropy[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2001.
- [7] 黄增彦,王广月,李倩.基于可拓学的砂土液化等级评价研究[J].山东大学学报(工学版),2008,38(5):31-35.
- HUANG Zengyan, WANG Guangyue, LI Qian. Rank Evaluation of Sand Liquefaction Based on Extension[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2008, 38 (5): 31-35.
- [8] 吴仲雄,高清平.改进 AHP 法在采矿方法多目标决策中的应用[J].矿业工程,2005,3(5):18-20.
- WU Zhongxiong, GAO Qingping. Improved AHP Application in the Multi-objective Decision for Mining Method Selection [J]. Mining Engineering, 2005, 3(5): 18-20.
- [9] 李克钢,侯克鹏,李旺.指标动态权重对边坡稳定性的影响研究[J].岩土力学,2009,30(2):492-496.
- LI Kegang, HOU Kepeng, LI Wang. Research on Influences of Factors Dynamic Weight on Slope Stability[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(2): 492-496.
- [10] 王润生,李存国,郭立稳.基于可拓理论的高陡边坡稳定性评价[J].矿业安全与环保,2008,35(6):25-28.
- WANG Runsheng, LI Cunguo, GUO Liwen. Research on Evaluation of the High-steep Slope Stability Based on the Extension Theory[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2008, 35(6): 25-28.
- [11] 丁丽宏.基于改进的灰关联分析和层次分析法的边坡稳定性研究[J].岩土力学,2011,32(11):3437-3441.
- DING Lihong. Research on Estimation of Slope Stability Based on Improved Grey Correlation Analysis and Analytic Hierarchy Process [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32 (11): 3437-3441.