

# 基于 DEMATEL 法的充填管道磨损风险评估可拓云模型\*

向韞

(长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南长沙 410012)

**摘要:**为科学合理地确定充填管道磨损风险等级,引入了 DEMATEL 法和可拓云理论,建立了充填管道磨损风险评估 DEMATEL-改进 CRITIC-可拓云模型。在构建评价体系基础上,应用 DEMATEL 法研究指标因素之间的影响关系,采用 DEMATEL 中心度-改进 CRITIC 法获取指标综合权重,根据可拓云理论原理,以 4 座矿山为例,通过计算云综合关联度,评估磨损风险状况。结果显示,管径和料浆浓度是深井充填管道磨损的关键因素,4 座矿山管道磨损风险均处于较大风险等级,与未确知测度和可变模糊集理论的评判结果完全一致,表明 DEMATEL-改进 CRITIC-可拓云模型在管道磨损风险评估方面具有适用性和有效性。

**关键词:**充填采矿法;管道磨损;DEMATEL 法;可拓云;风险评估

**中图分类号:**TD853 **文献标识码:**A

**文章编号:**1005-2763(2024)06-0172-09

## 0 引言

充填采矿法既能提高尾砂利用率,又能有效应对深部开采环境应力,已经成为深部矿产资源开采的首选方法<sup>[1]</sup>。深井充填存在充填倍线小、料浆流速大、压力大等特点,极易导致充填管道磨损甚至管道破损等现象,从而引发跑浆漏浆、钻孔堵塞等问题,延误井下正常生产,给矿山经济效益带来不可估量的损失<sup>[2]</sup>。因此,科学合理地开展深井充填管道磨损风险评估,对于实现矿山安全、高效、连续开采具有重要意义。

在充填管道磨损机理及风险等级预测与评估方面,江科<sup>[3]</sup>通过设计正交试验,利用 RSM-BBD 法研究建立了料浆浓度、料浆流速及管道内径 3 种因素交互作用的管道磨损响应面回归模型,结果表明,料浆质量浓度与管径交互作用对管道磨损影响程度最大,为充填管道磨损风险评估提供了理论依据;WANG Yingying 等<sup>[4]</sup>通过研制管道磨损试验系统,重点研究了料浆浓度、料浆流速、灰砂比对管道磨损率的影响,

结果显示,管道磨损率与料浆浓度成线性关系,与料浆流速成非线性关系,为合理确定灰砂比和料浆流速提供了理论参考;程国华等<sup>[5]</sup>考虑了充填管道磨损风险评估的模糊性特点,构建了基于集对分析与未确知测度的综合评价模型,以 5 座矿山为例,验证了模型的可行性;骆正山等<sup>[6]</sup>应用 KPCA 法识别管道磨损主要影响因素,建立了基于 APSO 算法优化 LSSVM 的充填磨损风险等级预测模型,提高了磨损风险等级预测精度。随着数学理论模型研究不断深入,诸如突变级数法<sup>[7]</sup>、改进未确知测度<sup>[8]</sup>、可变模糊集<sup>[9]</sup>、云模型<sup>[10]</sup>、属性识别<sup>[11]</sup>、有序多分类 Logistic 模型<sup>[12]</sup>等理论已经广泛应用到管道磨损风险评估中,进一步提升了评价工作效率。充填管道磨损风险评估影响因素较多,存在定性指标和定量指标混存的现象,且影响因素之间具有较强的关联性。通过研究发现,现有的理论虽然对管道磨损影响因素进行了识别,但很少关注管道磨损影响因素之间的相互作用关系,从而影响评估结果的准确性。决策实验室分析法 (DEMATEL) 可以体现指标之间的作用关系,有效判别关键指标因素,在煤矿自燃灾害事故影响因素分析<sup>[13]</sup>、矿山智能化水平建设评估<sup>[14]</sup>、尾矿库溃坝风险评估<sup>[15]</sup>等方面取得了良好的应用效果。

鉴于此,本文建立了充填管道磨损风险评估 DEMATEL-改进 CRITIC-可拓云模型。在构建评价体系基础上,应用 DEMATEL 法研究指标因素的相互作用关系,利用 DEMATEL-改进 CRITIC 和拉格朗日算法获取均衡合理的指标权重,对 4 座矿山的充填管道磨损风险等级进行了评估,检验模型的可靠性。

## 1 指标体系

基于充填管道磨损机理,总结现有文献资料和咨询相关专家,结合工程实际,构建系统、完善、高效

\* 收稿日期:2023-10-25

作者简介:向韞(1984—),女,湖南长沙人,硕士,工程师,主要从事矿山安全技术研究,E-mail:14912827@qq.com。

的充填管道磨损风险综合评价指标体系。在料浆特性方面,主要考虑料浆浓度(均为质量浓度)、料浆密度、加权平均粒径、骨料形状、料浆腐蚀性和粗颗粒占比等指标因素;在管道属性方面,主要考虑管道绝对

粗糙度、管道内径等指标因素;在施工工艺方面,主要考虑钻孔偏斜率和管道铺设的不平整度等指标因素;在充填技术方面,确定充填倍线和料浆流速与临界流速之比两个指标因素。风险等级划分标准见表1。

表1 指标分级标准

Table 1 Index grading standards

| 等级         | 料浆浓度<br>$X_1/$<br>% | 料浆密度<br>$X_2/$<br>( $t \cdot m^{-3}$ ) | 偏斜率<br>$X_3/$<br>% | 管道绝对<br>粗糙度<br>$X_4$ | 充填倍线<br>$X_5$ | 加权平均<br>粒径 $X_6/$<br>$\mu m$ | 不平整度<br>$X_7$ | 管道内径<br>$X_8/$<br>mm | 粗颗粒<br>占比 $X_9/$<br>% | 流速与临<br>界流速之<br>比 $X_{10}$ | 充填骨料<br>形状<br>$X_{11}$ | 料浆<br>腐蚀性<br>$X_{12}$ |
|------------|---------------------|--|--------------------|----------------------|---------------|------------------------------|---------------|----------------------|-----------------------|----------------------------|------------------------|-----------------------|
| 一般风险 $C_1$ | (0,30]              | (0,1.5]                                | (0,1]              | (0,100]              | (7,10)        | (2.5,10)                     | (0,1]         | (200,300)            | (0,20]                | (0,1]                      | (3,4)                  | (3,4)                 |
| 较大风险 $C_2$ | (30,40]             | (1.5,1.7]                              | (1,3]              | (100,300]            | (5,7]         | (0.7,2.5]                    | (1,3]         | (150,200]            | (20,40]               | (1,1.2]                    | (2,3]                  | (2,3]                 |
| 重大风险 $C_3$ | (40,50]             | (1.7,1.9]                              | (3,5]              | (300,500]            | (3,5]         | (0.3,0.7]                    | (3,5]         | (100,150]            | (40,60]               | (1.2,1.5]                  | (1,2]                  | (1,2]                 |
| 特大风险 $C_4$ | (50,80)             | (1.9,2.1]                              | (5,7]              | (500,700)            | (0,3]         | (0,0.3]                      | (5,8)         | (0,100]              | (60,80)               | (1.5,5)                    | (0,1]                  | (0,1]                 |

## 2 理论基础

### 2.1 DEMATEL 法

DEMATEL 法能够有效分析系统中各因素之间的内在关联性和体现各因素在系统中的贡献度,为复杂问题的解决处理提供了科学理论<sup>[16]</sup>。充填管道磨损风险评估中各指标因素之间交互影响、关系复杂,利用 DEMATEL 法可以得到各指标因素影响层次关系,为风险评估提供理论依据。DEMATEL 方法具体实施步骤如下<sup>[17]</sup>。

(1) 建立直接影响矩阵  $A$ 。组织相关专家,以发放充填管道磨损风险评估影响因素调查问卷形式,由专家结合自身经验和工程实际,按照 0~4 标度法,量化指标因素之间的关联性。评价标度取值设定为:0 表示两个指标因素之间没有明显影响,1 表示两个指标之间影响较小,2 表示两个指标因素之间影响程度一般,3 表示两个指标因素之间影响程度较强,4 表示两个指标因素之间具有强烈影响。根据各位专家赋值结果,建立初始直接影响矩阵  $A$  ( $A = [a_{ij}]_{n \times n}$ )。

(2) 建立规范化影响矩阵  $B$ 。为便于指标因素间分析比较,需要对直接影响矩阵  $A$  ( $A = [a_{ij}]_{n \times n}$ ) 进行规范化处理,得到规范化影响矩阵  $B$  ( $B = [b_{ij}]_{n \times n}$ ),规范化处理后, $b_{ij}$  值为[0,1]。具体计算公式为:

$$B = \frac{1}{\max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n a_{ij}} A \quad (1)$$

式中, $n$  为指标个数。

(3) 计算综合影响矩阵  $T$ 。综合影响矩阵  $T$  ( $T = [t_{ij}]_{n \times n}$ ) 计算公式为:

$$T = B + B^2 + \dots + B^n = B \frac{E - B^{n+1}}{E - B} \quad (2)$$

式中, $E$  为单位矩阵。

因为  $0 \leq b_{ij} \leq 1$ , 所以有  $\lim_{n \rightarrow \infty} B^{n+1} = 0$ , 因此, 上式可以简化为:

$$T = B \frac{E - B^{n+1}}{E - B} = B (E - B)^{-1} \quad (3)$$

(4) 计算指标因素“四度”。根据综合影响矩阵  $T$  ( $T = [t_{ij}]_{n \times n}$ ), 计算矩阵  $T$  中各行、列综合影响因素值  $t_{ij}$  累加值, 按照式(4) 和式(5) 分别得到第  $i$  个指标因素的影响度  $F_i$  和被影响度  $H_i$ , 其中, 影响度  $F_i$  表示在充填管道磨损评估中, 第  $i$  个因素对其他指标因素的影响程度, 被影响程度  $H_i$  表示在充填管道磨损评估中, 其他指标因素对第  $i$  个因素的影响程度。

$$F_i = \sum_{j=1}^n t_{ij}, i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$$H_i = \sum_{j=1}^n t_{ji}, i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

根据式(6)、式(7), 计算指标因素中心度  $M_i$  和原因度  $N_i$ 。其中, 中心度  $M_i$  表示第  $i$  个指标因素在充填管道磨损风险评估中的综合影响程度, 中心度  $M_i$  越大, 表明该因素对充填管道磨损风险影响程度越大; 原因度  $N_i$  表示第  $i$  个指标因素在充填管道磨损风险评估中的净影响程度, 当原因度  $N_i$  大于 0 时, 表明第  $i$  个因素对其他因素影响显著, 将该指标因素确定为原因因素; 当原因度  $N_i$  小于 0 时, 表明其他因素显著影响第  $i$  个因素, 将该指标因素确定为结果因素。

$$M_i = F_i + H_i, i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

$$N_i = F_i - H_i, i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

## 2.2 计算指标权重

### 2.2.1 DEMATEL 法计算指标主权重

DEMATEL 法中的中心度  $M_i$  表征指标因素在充填管道磨损风险评估系统中的总影响程度,因此,可以用于计算指标主权重  $w_i^{[18]}$ 。具体计算公式为:

$$w_i^1 = \frac{M_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad (8)$$

### 2.2.2 改进 CRITIC 法计算指标客观权重

改进 CRITIC 法是根据指标对比强度(标准差)和冲突性(相关系数)分配权重的常规计算模型,计算过程具体见文献[19]。

### 2.2.3 综合权重

为均衡权重结果的主观性和客观性,基于最小熵原理,计算指标组合权重  $w_i$ ,计算公式为:

$$\begin{aligned} \min f &= \sum_{i=1}^n w_i (\ln w_i - \ln \alpha_i) + \sum_{i=1}^n w_i (\ln w_i - \ln \beta_i) \\ &\quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \\ \text{s.t.} &\quad \sum_{i=1}^n w_i = 1, w_i > 0 \end{aligned} \quad (9)$$

式中,  $w_i$  为第  $i$  个指标综合权重;  $\alpha_i$  为 DEMATEL 中心度法确定的主权重;  $\beta_i$  为改进 CRITIC 法确定的指标客观权重。

基于拉格朗日算法,确定综合权重  $w$  为:

$$w = \frac{\sqrt{\alpha_i \times \beta_i}}{\sum_{i=1}^n \sqrt{\alpha_i \times \beta_i}} \quad (10)$$

## 2.3 可拓云理论

### 2.3.1 可拓云模型

云模型采用  $E_x$ 、 $E_n$ 、 $H_e$  三个云的数字特征定性反映待评对象的整体属性,通过正向或逆向云发生器,实现待评对象定性分析向定量评估的转化,是分析处理模糊性、随机性问题的经典模型。其中,期望  $E_x$  表示待评对象定性中心值;熵  $E_n$  体现待评对象定性离散程度;超熵  $H_e$  是熵  $E_n$  的熵,体现待评对象定性模糊性。云的数字特征计算公式为:

$$\left. \begin{aligned} E_x &= \frac{c_{\max} + c_{\min}}{2} \\ E_n &= \frac{c_{\max} - c_{\min}}{6} \\ H_e &= k \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中,  $c_{\max}$ 、 $c_{\min}$  分别表示指标分级标准端点值;  $k$  为常数,一般取 0.01。

考虑待评对象的指标不相容性和复杂性特点,学者蔡元提出了物元可拓模型,应用一组有序数组

$R = (N, C, V)$  来量化待评对象特征。在本文中,  $N$  表示磨损风险等级,  $C$  表示评估指标,  $V$  表示指标量化值。物元经典模型表示为  $R_j$ :

$$R_j = (N_j, C, V_j) = \begin{bmatrix} N_j & c_1 & V_{j1} \\ & c_2 & V_{j2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & V_{jn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_j & c_1 & [a_{j1}, b_{j1}] \\ & c_2 & [a_{j2}, b_{j2}] \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & [a_{jn}, b_{jn}] \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中,  $a_{ji}$ 、 $b_{ji}$  分别表示指标分级标准取值。

在物元可拓模型中,  $V$  为确定数,无法较好地体现充填管道磨损风险评估模糊性和随机性特点,以云模型中云的数字特征代替物元可拓模型中的  $V$  值,融合两大模型定性评价的突出优势。可拓云模型可以表示为  $R^{[20]}$ :

$$R = \begin{bmatrix} N & c_1 & V_1 \\ & c_2 & V_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N & c_1 & (E_{x1}, E_{n1}, H_{e1}) \\ & c_2 & (E_{x2}, E_{n2}, H_{e2}) \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & (E_{xn}, E_{nm}, H_{en}) \end{bmatrix} \quad (13)$$

### 2.3.2 计算单指标云关联度

单指标关联度  $\mu$  计算公式为:

$$\mu(x) = e^{-\frac{(x-E_x)^2}{2E_n^2}} \quad (14)$$

### 2.3.3 确定风险等级

充填管道磨损风险评估是多属性综合决策过程,需要统筹考虑多个方面,在计算单指标云关联度的基础上,需要确定云综合关联度。具体计算公式为:

$$S = \sum_{i=1}^m \mu_{mn} w \quad (15)$$

式中,  $S$  为云综合关联度。

最后,按照最大隶属度判别准则综合确定充填管道磨损风险等级。

## 2.4 充填管道磨损风险评价流程

如前所述,基于 DEMATEL - 改进 CRITIC - 可拓云的充填管道磨损风险评估模型流程见图 1。

## 3 模型应用

以金川龙首矿( $K_1$ )、河东金矿( $K_2$ )、新城金矿( $K_3$ )和贡北金矿( $K_4$ )4 座矿山为例,进行管道磨损风险等级评估,检验模型的适用性。通过查阅相关文献资料,结合矿山充填系统实际,确定 4 座矿山 12 个指标因素数据,各矿山指标赋值结果见表 2。

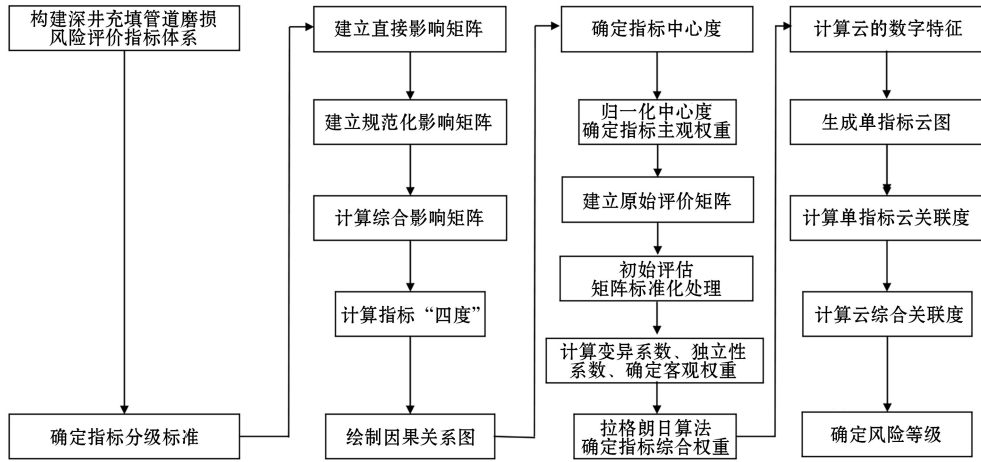


图 1 充填管道磨损风险评估流程

Fig.1 Risk assessment process for filling pipeline wear

表 2 各矿山指标赋值结果

Tab.2 Assignment of indicators for each mine

| 矿山名称  | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | $X_4$ | $X_5$ | $X_6$ | $X_7$ | $X_8$ | $X_9$ | $X_{10}$ | $X_{11}$ | $X_{12}$ |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|
| $K_1$ | 56    | 1.98  | 2.72  | 300   | 3.8   | 0.58  | 2.71  | 199   | 38    | 1.3      | 1        | 2        |
| $K_2$ | 24    | 1.68  | 1.65  | 200   | 6.8   | 6.51  | 0.56  | 82    | 52    | 1.6      | 2        | 3        |
| $K_3$ | 52    | 1.94  | 1.27  | 200   | 5.8   | 0.11  | 1.27  | 107   | 33    | 3.5      | 4        | 3        |
| $K_4$ | 58    | 1.86  | 0.98  | 500   | 9.6   | 0.05  | 1.32  | 160   | 35    | 3.1      | 1        | 2        |

### 3.1 DEMATEL 法指标影响关系分析

本文应用 DEMATEL 法分析量化充填管道磨损风险评价指标之间相关影响关系,为此,邀请了 5 位长期从事充填管道磨损理论研究和风险评估的专家,由专家结合自身经验和工程实际,按照 0~4 的评估规则,对充填管道磨损风险评价指标相互影响程度进行赋值。

#### 3.1.1 直接影响矩阵 $A$ 及规范化结果

为消除专家主观差异性,以专家评分均值记为

最终指标打分结果,构建直接影响矩阵  $A$ ,根据式(1),计算规范化矩阵  $B$ ,结果见表 3 至表 4。其中,直接影响矩阵  $A$  各行之和最大值为 29.9。

#### 3.1.2 建立综合影响矩阵 $T$

根据式(2)至式(3),计算综合影响矩阵  $T$ ,结果见表 5。

#### 3.1.3 计算指标“四度”

根据式(4)至式(7),计算指标影响度  $F_i$ 、被影响度  $H_i$ 、中心度  $M_i$  和原因度  $N_i$ ,具体计算结果见表 6。

表 3 直接影响矩阵结果

Table 3 Direct impact matrix

| 指标       | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | $X_4$ | $X_5$ | $X_6$ | $X_7$ | $X_8$ | $X_9$ | $X_{10}$ | $X_{11}$ | $X_{12}$ |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|
| $X_1$    | 0.0   | 2.3   | 3.1   | 3.3   | 1.8   | 2.4   | 3.5   | 2.8   | 2.3   | 3.5      | 2.4      | 2.5      |
| $X_2$    | 1.8   | 0.0   | 2.8   | 2.1   | 2.5   | 1.8   | 2.6   | 2.5   | 1.5   | 2.8      | 2.1      | 1.8      |
| $X_3$    | 1.5   | 2.4   | 0.0   | 3.8   | 2.6   | 1.2   | 2.8   | 2.2   | 1.8   | 2.4      | 1.5      | 1.5      |
| $X_4$    | 2.1   | 2.5   | 1.2   | 0.0   | 2.5   | 1.5   | 2.3   | 3.1   | 3.6   | 2.9      | 2.1      | 2.8      |
| $X_5$    | 2.5   | 1.4   | 0.8   | 1.5   | 0.0   | 0.6   | 0.5   | 0.9   | 0.4   | 0.3      | 1.2      | 0.5      |
| $X_6$    | 1.2   | 1.8   | 2.3   | 1.8   | 0.6   | 0.0   | 2.7   | 2.5   | 3.2   | 1.6      | 1.8      | 0.4      |
| $X_7$    | 2.8   | 2.5   | 1.8   | 1.5   | 0.6   | 1.5   | 0.0   | 2.9   | 2.3   | 2.1      | 1.8      | 1.1      |
| $X_8$    | 3.6   | 3.1   | 3.5   | 2.7   | 1.5   | 2.8   | 3.2   | 0.0   | 2.8   | 2.5      | 2.1      | 0.8      |
| $X_9$    | 2.3   | 2.1   | 1.8   | 1.5   | 0.6   | 3.2   | 2.8   | 3.4   | 0.0   | 2.5      | 2.1      | 0.5      |
| $X_{10}$ | 2.8   | 2.4   | 3.2   | 3.5   | 2.2   | 2.6   | 2.3   | 1.9   | 1.6   | 0.0      | 1.3      | 0.7      |
| $X_{11}$ | 1.8   | 1.3   | 2.7   | 2.5   | 1.2   | 2.7   | 2.4   | 3.2   | 2.8   | 1.8      | 0.0      | 0.4      |
| $X_{12}$ | 0.6   | 0.3   | 1.8   | 2.3   | 1.1   | 1.5   | 2.7   | 1.8   | 0.8   | 0.5      | 0.5      | 0.0      |

表4 影响矩阵规范化处理

Table 4 Normalization of impact matrix

| 指标              | X <sub>1</sub> | X <sub>2</sub> | X <sub>3</sub> | X <sub>4</sub> | X <sub>5</sub> | X <sub>6</sub> | X <sub>7</sub> | X <sub>8</sub> | X <sub>9</sub> | X <sub>10</sub> | X <sub>11</sub> | X <sub>12</sub> |
|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| X <sub>1</sub>  | 0.0000         | 0.0769         | 0.1037         | 0.1104         | 0.0602         | 0.0803         | 0.1171         | 0.0936         | 0.0769         | 0.1171          | 0.0803          | 0.0836          |
| X <sub>2</sub>  | 0.0602         | 0.0000         | 0.0936         | 0.0702         | 0.0836         | 0.0602         | 0.0870         | 0.0836         | 0.0502         | 0.0936          | 0.0702          | 0.0602          |
| X <sub>3</sub>  | 0.0502         | 0.0803         | 0.0000         | 0.1271         | 0.0870         | 0.0401         | 0.0936         | 0.0736         | 0.0602         | 0.0803          | 0.0502          | 0.0502          |
| X <sub>4</sub>  | 0.0702         | 0.0836         | 0.0401         | 0.0000         | 0.0836         | 0.0502         | 0.0769         | 0.1037         | 0.1204         | 0.0970          | 0.0702          | 0.0936          |
| X <sub>5</sub>  | 0.0836         | 0.0468         | 0.0268         | 0.0502         | 0.0000         | 0.0201         | 0.0167         | 0.0301         | 0.0134         | 0.0100          | 0.0401          | 0.0167          |
| X <sub>6</sub>  | 0.0401         | 0.0602         | 0.0769         | 0.0602         | 0.0201         | 0.0000         | 0.0903         | 0.0836         | 0.1070         | 0.0535          | 0.0602          | 0.0134          |
| X <sub>7</sub>  | 0.0936         | 0.0836         | 0.0602         | 0.0502         | 0.0201         | 0.0502         | 0.0000         | 0.0970         | 0.0769         | 0.0702          | 0.0602          | 0.0368          |
| X <sub>8</sub>  | 0.1204         | 0.1037         | 0.1171         | 0.0903         | 0.0502         | 0.0936         | 0.1070         | 0.0000         | 0.0936         | 0.0836          | 0.0702          | 0.0268          |
| X <sub>9</sub>  | 0.0769         | 0.0702         | 0.0602         | 0.0502         | 0.0201         | 0.1070         | 0.0936         | 0.1137         | 0.0000         | 0.0836          | 0.0702          | 0.0167          |
| X <sub>10</sub> | 0.0936         | 0.0803         | 0.1070         | 0.1171         | 0.0736         | 0.0870         | 0.0769         | 0.0635         | 0.0535         | 0.0000          | 0.0435          | 0.0234          |
| X <sub>11</sub> | 0.0602         | 0.0435         | 0.0903         | 0.0836         | 0.0401         | 0.0903         | 0.0803         | 0.1070         | 0.0936         | 0.0602          | 0.0000          | 0.0134          |
| X <sub>12</sub> | 0.0201         | 0.0100         | 0.0602         | 0.0769         | 0.0368         | 0.0502         | 0.0903         | 0.0602         | 0.0268         | 0.0167          | 0.0167          | 0.0000          |

表5 综合影响矩阵计算结果

Table 5 Calculation results of comprehensive impact matrix

| 指标              | X <sub>1</sub> | X <sub>2</sub> | X <sub>3</sub> | X <sub>4</sub> | X <sub>5</sub> | X <sub>6</sub> | X <sub>7</sub> | X <sub>8</sub> | X <sub>9</sub> | X <sub>10</sub> | X <sub>11</sub> | X <sub>12</sub> |
|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| X <sub>1</sub>  | 0.0000         | 0.0769         | 0.1037         | 0.1104         | 0.0602         | 0.0803         | 0.1171         | 0.0936         | 0.0769         | 0.1171          | 0.0803          | 0.0836          |
| X <sub>2</sub>  | 0.0602         | 0.0000         | 0.0936         | 0.0702         | 0.0836         | 0.0602         | 0.0870         | 0.0836         | 0.0502         | 0.0936          | 0.0702          | 0.0602          |
| X <sub>3</sub>  | 0.0502         | 0.0803         | 0.0000         | 0.1271         | 0.0870         | 0.0401         | 0.0936         | 0.0736         | 0.0602         | 0.0803          | 0.0502          | 0.0502          |
| X <sub>4</sub>  | 0.0702         | 0.0836         | 0.0401         | 0.0000         | 0.0836         | 0.0502         | 0.0769         | 0.1037         | 0.1204         | 0.0970          | 0.0702          | 0.0936          |
| X <sub>5</sub>  | 0.0836         | 0.0468         | 0.0268         | 0.0502         | 0.0000         | 0.0201         | 0.0167         | 0.0301         | 0.0134         | 0.0100          | 0.0401          | 0.0167          |
| X <sub>6</sub>  | 0.0401         | 0.0602         | 0.0769         | 0.0602         | 0.0201         | 0.0000         | 0.0903         | 0.0836         | 0.1070         | 0.0535          | 0.0602          | 0.0134          |
| X <sub>7</sub>  | 0.0936         | 0.0836         | 0.0602         | 0.0502         | 0.0201         | 0.0502         | 0.0000         | 0.0970         | 0.0769         | 0.0702          | 0.0602          | 0.0368          |
| X <sub>8</sub>  | 0.1204         | 0.1037         | 0.1171         | 0.0903         | 0.0502         | 0.0936         | 0.1070         | 0.0000         | 0.0936         | 0.0836          | 0.0702          | 0.0268          |
| X <sub>9</sub>  | 0.0769         | 0.0702         | 0.0602         | 0.0502         | 0.0201         | 0.1070         | 0.0936         | 0.1137         | 0.0000         | 0.0836          | 0.0702          | 0.0167          |
| X <sub>10</sub> | 0.0936         | 0.0803         | 0.1070         | 0.1171         | 0.0736         | 0.0870         | 0.0769         | 0.0635         | 0.0535         | 0.0000          | 0.0435          | 0.0234          |
| X <sub>11</sub> | 0.0602         | 0.0435         | 0.0903         | 0.0836         | 0.0401         | 0.0903         | 0.0803         | 0.1070         | 0.0936         | 0.0602          | 0.0000          | 0.0134          |
| X <sub>12</sub> | 0.0201         | 0.0100         | 0.0602         | 0.0769         | 0.0368         | 0.0502         | 0.0903         | 0.0602         | 0.0268         | 0.0167          | 0.0167          | 0.0000          |

表6 “四度”计算结果

Table 6 Calculation results of influence degree, affected degree, centrality degree and causal degree

| 指标              | 影响度    | 影响度排序 | 被影响度   | 被影响度排序 | 中心度    | 中心度排序 | 原因度     | 原因度/结果度排序 | 因素属性 |
|-----------------|--------|-------|--------|--------|--------|-------|---------|-----------|------|
| X <sub>1</sub>  | 4.2543 | 1     | 3.3853 | 7      | 7.6396 | 2     | 0.8689  | 原1        | 原因因素 |
| X <sub>2</sub>  | 3.4571 | 5     | 3.3056 | 9      | 6.7627 | 8     | 0.1515  | 原4        | 原因因素 |
| X <sub>3</sub>  | 3.3912 | 7     | 3.5982 | 4      | 6.9895 | 5     | -0.2070 | 结3        | 结果因素 |
| X <sub>4</sub>  | 3.7622 | 3     | 3.7753 | 3      | 7.5375 | 3     | -0.0131 | 结1        | 结果因素 |
| X <sub>5</sub>  | 1.6415 | 12    | 2.5278 | 11     | 4.1692 | 11    | -0.8863 | 结5        | 结果因素 |
| X <sub>6</sub>  | 2.9868 | 10    | 3.1636 | 8      | 6.1505 | 10    | -0.1768 | 结2        | 结果因素 |
| X <sub>7</sub>  | 3.1591 | 9     | 3.9717 | 1      | 7.1309 | 4     | -0.8126 | 结4        | 结果因素 |
| X <sub>8</sub>  | 4.1746 | 2     | 3.9086 | 2      | 8.0832 | 1     | 0.2660  | 原3        | 原因因素 |
| X <sub>9</sub>  | 3.4187 | 6     | 3.4121 | 6      | 6.8307 | 7     | 0.0066  | 原7        | 原因因素 |
| X <sub>10</sub> | 3.5652 | 4     | 3.4142 | 5      | 6.9795 | 6     | 0.1510  | 原5        | 原因因素 |
| X <sub>11</sub> | 3.3877 | 8     | 2.8081 | 10     | 6.1957 | 9     | 0.5796  | 原2        | 原因因素 |
| X <sub>12</sub> | 2.0330 | 11    | 1.9607 | 12     | 3.9938 | 12    | 0.0723  | 原6        | 原因因素 |

结合表6的数据,以中心度-原因度建立笛卡尔坐标系,体现指标因素之间的因果关系,见图2。

由DEMATEL模型计算结果可知以下几个方面的内容。

(1) 原因度分析。原因因素是充填管道磨损风险影响的核心指标。原因度越大,表明该指标对其他指标影响程度越显著。由表6及图2可知,充填管道磨损风险评估影响因素的原因因素有7个,从大至小依次为:料浆浓度X<sub>1</sub>、充填骨料形状X<sub>11</sub>、管

道内径X<sub>8</sub>、料浆密度X<sub>2</sub>、料浆流速与临界流速之比X<sub>10</sub>、充填料浆腐蚀性X<sub>12</sub>、粗颗粒占比X<sub>9</sub>,其中料浆浓度X<sub>1</sub>、充填骨料形状X<sub>11</sub>、管道内径X<sub>8</sub>为突出原因因素,这3个指标因素对其他指标因素影响最大,因此,矿山企业需要格外关注。为降低充填管道磨损风险等级,需要合理确定料浆浓度、选取合适的管径,尽量选用圆形或近圆形等规则形状的尾砂作为充填骨料,以保持充填管道长久的可靠性和安全性。



(2) 结果度分析。结果因素是充填管道磨损风险影响的直接因素,结果度越大,表明该指标受其他指标因素影响程度越大。由表 6 及图 2 可知,充填管道磨损风险评估影响因素的结果因素有 5 个,从大至小依次为:管道绝对粗糙度  $X_4$ 、加权平均粒径  $X_6$ 、偏斜率  $X_3$ 、管道铺设的不平整度  $X_7$ 、充填倍线  $X_5$ ,其中管道绝对粗糙度  $X_4$ 、加权平均粒径  $X_6$ 、偏斜率  $X_3$  为主要结果因素,对充填管道可靠性提升较为明显,如选用高质量的充填管道,在施工时注意控制钻孔偏斜率,充填骨料注意合理级配,可以显著提升充填管道稳定性。

(3) 中心度分析。中心度体现指标因素与其他指标因素之间的关联性,中心度越大,表明该指标与其他指标因素关联越密切。由表 6 及图 2 可知,充填管道磨损风险指标因素中心度从大至小排序为:管道内径  $X_8$ 、料浆浓度  $X_1$ 、管道绝对粗糙度  $X_4$ 、管道铺设的不平整度  $X_7$ 、偏斜率  $X_3$ 、料浆流速与临界流速之比  $X_{10}$ 、粗颗粒占比  $X_9$ 、料浆密度  $X_2$ 、充填料浆腐蚀性  $X_{12}$ 、加权平均粒径  $X_6$ 、充填倍线  $X_5$ 、

充填料浆腐蚀性  $X_{12}$ 。由此可以看出,管道内径  $X_8$ 、料浆浓度  $X_1$  是充填管道磨损的关键因素。

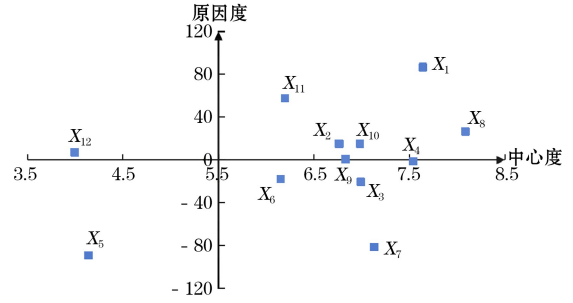


图 2 因果关系

Fig.2 Causal relationship of evaluation indicators

### 3.2 确定指标权重

- (1) 根据式(8),结合指标中心度  $M_i$ ,计算指标主观权重  $\omega_1$ ;
- (2) 根据文献[19],计算指标客观权重  $\omega_2$ ;
- (3) 根据式(9)至式(10),确定综合权重  $\omega$ 。指标权重计算结果见表 7。

表 7 指标权重计算结果

Table 7 Weights of indicators

| 指标            | $\omega_1$ | $h_j$  | $\omega_2$ | $\omega$ | 指标                   | $\omega_1$ | $h_j$ | $\omega_2$ | $\omega$ |
|---------------|------------|--------|------------|----------|----------------------|------------|-------|------------|----------|
| 料浆浓度 $X_1$    | 0.0974     | 3.011  | 0.0473     | 0.0732   | 管道铺设不平整度 $X_7$       | 0.0909     | 5.722 | 0.0899     | 0.0973   |
| 料浆密度 $X_2$    | 0.0862     | 0.646  | 0.0102     | 0.0333   | 管道内径 $X_8$           | 0.1031     | 3.572 | 0.0561     | 0.0822   |
| 偏斜率 $X_3$     | 0.0891     | 4.689  | 0.0737     | 0.0879   | 粗颗粒占比 $X_9$          | 0.0871     | 2.541 | 0.0399     | 0.0631   |
| 管道绝对粗糙度 $X_4$ | 0.0961     | 4.599  | 0.0723     | 0.0901   | 料浆流速与临界流速之比 $X_{10}$ | 0.0889     | 4.498 | 0.0707     | 0.0859   |
| 充填倍线 $X_5$    | 0.0531     | 3.953  | 0.0621     | 0.0621   | 充填骨料形状 $X_{11}$      | 0.0791     | 7.428 | 0.1167     | 0.1041   |
| 加权平均粒径 $X_6$  | 0.0784     | 20.371 | 0.3201     | 0.1717   | 充填料浆腐蚀性 $X_{12}$     | 0.0506     | 2.606 | 0.0409     | 0.0493   |

### 3.3 可拓云模型计算结果

#### 3.2.1 云的数字特征计算

根据式(11),计算各指标不同等级下云的数字特征,结果见表 8。基于 MATLAB 软件,绘制典型

单指标云图,如图 3 所示。

#### 3.2.2 计算云关联度

以金川龙首矿( $K_1$ )为例,根据式(12)至式(14),计算单指标云关联度,具体计算结果见表 9。

表 8 指标云的数字特征

Table 8 Digital characteristics of clouds

| 评价指标     | 指标云的数字特征          |                   |                   |                   |
|----------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|          | C <sub>1</sub> 级  | C <sub>2</sub> 级  | C <sub>3</sub> 级  | C <sub>4</sub> 级  |
| $X_1$    | (15,5.000,0.01)   | (35,1.667,0.01)   | (45,1.667,0.01)   | (65,5,0.01)       |
| $X_2$    | (0.75,0.250,0.01) | (1.6,0.033,0.01)  | (1.8,0.033,0.01)  | (2,0.033,0.01)    |
| $X_3$    | (0.5,0.167,0.01)  | (2,0.333,0.01)    | (4,0.333,0.01)    | (6,0.333,0.01)    |
| $X_4$    | (50,16.667,0.01)  | (200,33.333,0.01) | (400,33.333,0.01) | (600,33.333,0.01) |
| $X_5$    | (8.5,0.600,0.01)  | (6,0.333,0.01)    | (4,0.333,0.01)    | (1.5,0.600,0.01)  |
| $X_6$    | (6.25,1.250,0.01) | (1.6,0.133,0.01)  | (0.5,0.067,0.01)  | (0.15,0.050,0.01) |
| $X_7$    | (0.5,0.167,0.01)  | (2,0.333,0.01)    | (4,0.333,0.01)    | (6.5,0.500,0.01)  |
| $X_8$    | (250,16.667,0.01) | (175,8.333,0.01)  | (125,8.333,0.01)  | (50,16.667,0.01)  |
| $X_9$    | (10,3.333,0.01)   | (30,3.333,0.01)   | (50,3.333,0.01)   | (70,3.333,0.01)   |
| $X_{10}$ | (0.5,0.167,0.01)  | (1.1,0.033,0.01)  | (1.35,0.050,0.01) | (3.25,0.583,0.01) |
| $X_{11}$ | (3.5,0.167,0.01)  | (2.5,0.167,0.01)  | (1.5,0.167,0.01)  | (0.5,0.167,0.01)  |
| $X_{12}$ | (3.5,0.167,0.01)  | (2.5,0.167,0.01)  | (1.5,0.167,0.01)  | (0.5,0.167,0.01)  |

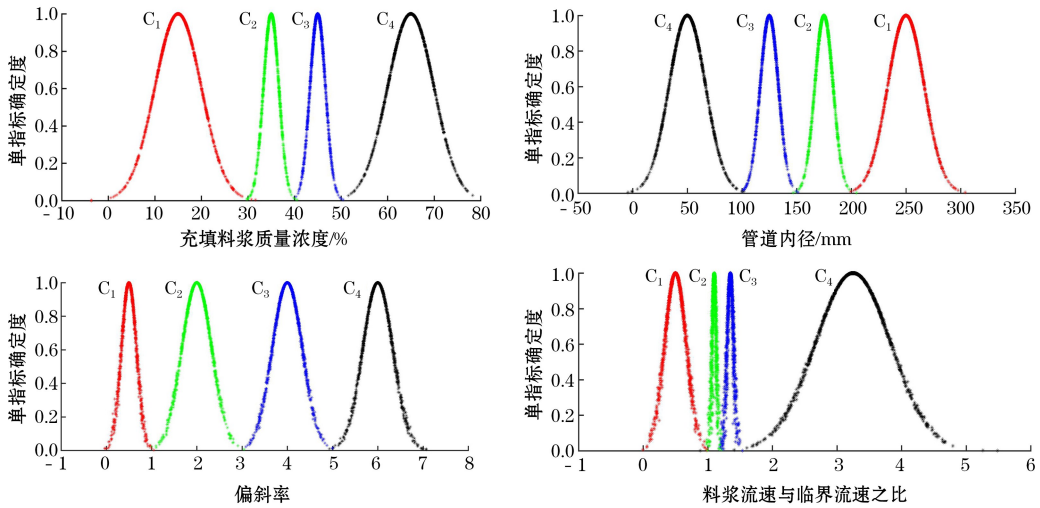


图 3 典型单指标云图

Fig.3 Typical single indicator cloud map

表 9 矿山 K<sub>1</sub> 单指标云关联度计算结果

Table 9 Single Indicator cloud correlation degree of K<sub>1</sub>

| 评价指标            | 单指标云关联度          |                  |                  |                  |
|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
|                 | C <sub>1</sub> 级 | C <sub>2</sub> 级 | C <sub>3</sub> 级 | C <sub>4</sub> 级 |
| X <sub>1</sub>  | 0                | 0                | 0                | 0.013 871        |
| X <sub>2</sub>  | 0                | 0                | 0                | 0.027 392        |
| X <sub>3</sub>  | 0                | 0.007 921        | 0                | 0                |
| X <sub>4</sub>  | 0                | 0                | 0                | 0                |
| X <sub>5</sub>  | 0                | 0.050 842        | 0                | 0                |
| X <sub>6</sub>  | 0                | 0.084 283        | 0                | 0                |
| X <sub>7</sub>  | 0                | 0.010 671        | 0                | 0                |
| X <sub>8</sub>  | 0                | 0.004 922        | 0                | 0                |
| X <sub>9</sub>  | 0                | 0.003 152        | 0                | 0                |
| X <sub>10</sub> | 0                | 0                | 0.041 282        | 0                |
| X <sub>11</sub> | 0                | 0.104 321        | 0                | 0                |
| X <sub>12</sub> | 0                | 0                | 0.049 162        | 0                |

根据式(15),计算云综合关联度,以最大隶属度为等级判定原则,确定磨损风险等级。最后,与未确知测度和可变模糊集理论评估结论进行对比,结果见表 10。根据表 10,4 座矿山管道磨损风险均处于较大风险等级,3 种评价模型结论完全一致,与实际情况相符,表明基于 DEMATEL - 改进 CRITIC - 可拓云模型在充填管道磨损风险评估方面具有可行性。

表 10 评价结果及对比

Table 10 Evaluation results and comparison

| 矿山名称           | 综合云关联度           |                  |                  |                  | 评价结果             |                      |                      |                  |
|----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|----------------------|----------------------|------------------|
|                | C <sub>1</sub> 级 | C <sub>2</sub> 级 | C <sub>3</sub> 级 | C <sub>4</sub> 级 | 本文               | 未确知测度 <sup>[5]</sup> | 可变模糊集 <sup>[9]</sup> | 实际               |
| K <sub>1</sub> | 0                | 0.265 78         | 0.090 28         | 0.041 26         | C <sub>2</sub> 级 | C <sub>2</sub> 级     | C <sub>2</sub> 级     | C <sub>2</sub> 级 |
| K <sub>2</sub> | 0.112 82         | 0.215 29         | 0.153 77         | 0.014 82         | C <sub>2</sub> 级 | C <sub>2</sub> 级     | C <sub>2</sub> 级     | C <sub>2</sub> 级 |
| K <sub>3</sub> | 0.154 11         | 0.231 28         | 0.191 26         | 0.091 69         | C <sub>2</sub> 级 | C <sub>2</sub> 级     | C <sub>2</sub> 级     | C <sub>2</sub> 级 |
| K <sub>4</sub> | 0.030 12         | 0.134 42         | 0.087 58         | 0.020 28         | C <sub>2</sub> 级 | C <sub>2</sub> 级     | C <sub>2</sub> 级     | C <sub>2</sub> 级 |

### 3.4 模型讨论

本文建立了深井充填管道磨损风险评估 DEMATEL - 改进 CRITIC - 可拓云模型,获得了满意的应用效果。未确知测度模型通过构建隶属度函数将定性指标进行等级隶属度量化,在处理不确定性问题方面应用较为广泛,但是该模型由于使用置信度识别准则确定风险等级,而置信度值是人为设置,可能导致最终评估结论的差异化;可变模糊集模型通过构建相对隶属函数,计算距离系数和优化准则参数不同组合下的综合风险等级特征值确定充填管道磨损风险等级,该模型频繁交集计算,过程相对繁琐。与未确知测度和可变模糊集模型相比,本文依托 DEMATEL 法分析影响因素之间关联性对降低管道磨损风险具有重要意义,可拓云模型可以有效处理分析充填管道磨损风险评估等具有复杂性、模糊性特点的问题,将 DEMATEL 法和可拓云理论相结合建立综合评价模型,系统性、科学性和理论性更强,且不需人为设置参数,计算过程相对简便,能够为充填管道磨损风险评估提供可靠的新思路。

## 4 结论

(1) 利用 DEMATEL 法,通过计算管道磨损指标因素“四度”,分析了各影响因素之间相互作用关系,结果显示管道内径和料浆浓度是充填管道磨损风险最关键因素。

(2) 借助 DEMATEL 法,利用中心度值合理确定指标主观权重,能较好地体现指标之间的关联性和相互影响程度,采用改进 CRITIC 法确定指标客观权重,并基于拉格朗日算法确定综合权重,实现了主观、客观权重均衡化,可有效提高评估结果的准确性。

(3) 针对充填管道磨损风险评估复杂性特点,引入了 DEMATEL 法和可拓云理论,建立了充填管道磨损风险评价 DEMATEL-改进 CRITIC-可拓云模型,以 4 座矿山为研究背景,通过与未确知测度、可变模糊集理论和实际情况比较,验证了模型的准确性。

### 参考文献(References):

- [1] 杨震,刘哲明,郭梨.金属矿深井充填管道系统失效风险可视化分析方法[J].金属矿山,2022(4):173-179.  
YANG Zhen, LIU Zheming, GUO Li. Visual analysis method of failure risk of deep filling pipeline system in metal mine[J].Metal Mine,2022(4):173-179.
- [2] 张德明.深井充填管道磨损机理及可靠性评价体系研究[D].长沙:中南大学,2012.  
ZHANG Deming. A study on wear mechanism and the reliability evaluation system for backfilling pipelines in deep mine[D].Changsha:Central South University,2012.
- [3] 江科.基于 RSM-BBD 的充填管道磨损影响因素研究[J].采矿技术,2023,23(3):130-134.  
JIANG Ke. Research on factors influencing wear of filling pipeline based on RSM-BBD[J].Mining Technology,2023,23(3):130-134.
- [4] WANG Yingying, WANG Yong, YANG Gangfeng, et al. Effect of cement-to-tailings ratio and flow rate on the wear performance of filling pipeline [J]. Powder Technology, 2022;397:117027.
- [5] 程国华,康瑞海,石勇,等.基于 SPA 未确知测度模型的充填管道磨损风险性评估[J].矿业研究与开发,2022,42(12):186-191.  
CHENG Guohua, KANG Ruihai, SHI Yong, et al. Risk assessment of filling pipeline wear based on SPA-unascertained measure model [J]. Mining Research and Development,2022,42(12):186-191.
- [6] 骆正山,黄仁惠.基于 KPCA-APSO-LSSVM 的充填管道磨损风险预测[J].有色金属工程,2021,11(3):96-106.

- LUO Zhengshan, HUANG Renhui. Risk prediction of filling pipe wear based on KPCA-APSO-LSSVM [J]. Nonferrous Metals Engineering,2021,11(3):96-106.
- [7] 王新民,高翔,荣帅.深井充填管道磨损风险评估模型研究[J].有色金属工程,2019,9(6):84-90.  
WANG Xinmin, GAO Xiang, RONG Shuai. Study on risk assessment model of deep well filling pipeline wear [J]. Nonferrous Metals Engineering,2019,9(6):84-90.
- [8] 丁文智,史秀志,石勇.基于改进未确知测度的充填管道磨损风险性评价模型[J].矿冶工程,2022,42(1):10-14.  
DING Wenzhi, SHI Xiuzhi, SHI Yong. Risk assessment model for wear of backfill pipeline based on improved unascertained measurement [J]. Mining and Metallurgical Engineering,2022,42(1):10-14.
- [9] 薛希龙,王新民,张钦礼.充填管道磨损风险评估的组合权重与可变模糊耦合模型[J].中南大学学报(自然科学版),2016,47(11):3752-3758.  
XUE Xilong, WANG Xinmin, ZHANG Qinli. An integrated model of combination weights and variable fuzzy on evaluating backfill pipeline wear risk [J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2016,47(11):3752-3758.
- [10] 王石,宋学朋,石海天.基于云模型和改进 CRITIC 的深井垂直充填管道磨损风险评估[J].重庆大学学报,2020,43(4):73-84.  
WANG Shi, SONG Xuepeng, SHI Haitian. An improved CRITIC and cloud model evaluation method for predicting the wear risk of vertical filling pipes in deep well[J].Journal of Chongqing University,2020,43(4):73-84.
- [11] 秦秀合.基于属性识别的充填管道磨损风险评估模型研究[J].现代矿业,2023,39(3):254-258.  
QIN Xiuhue. Study on assessment model of backfill pipeline wear risk based on attribute recognition[J].Modern Mining,2023,39(3):254-258.
- [12] 王石,汤艺,冯萧.基于改进 PCA 与有序多分类 Logistic 的充填管道磨损风险评估[J].黄金科学技术,2019,27(5):740-746.  
WANG Shi, TANG Yi, FENG Xiao. Risk assessment of filling pipeline wearing based on improved PCA and ordered multi-class logistic[J].Gold Science and Technology,2019,27(5):740-746.
- [13] 毛亚军,阳富强.基于 WSR-DEMATEL 模型的硫化矿石自燃灾害事故影响因素分析[J].安全与环境工程,2023,30(3):1-6+12.  
MAO Yajun, YANG Fuqiang. Analysis of influencing factors of spontaneous combustion accidents of sulfide ore based on WSR-DEMATEL model [J]. Safety and Environmental Engineering,2023,30(3):1-6+12.
- [14] HE Lin, YUAN Dongliang, REN Lianwei, et al. Evaluation model research of coal mine intelligent construction based on FDEMATEL-ANP [J]. Sustainability, 2023, 15 ( 3 ): 2238-2249.



- [15] ZHENG Binbin, WANG Jiahe, FENG Tingting, et al. Risk evolution study of tailings dam failures disaster based on DEMATEL-MISM[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10.
- [16] CHENG Lianhua, CAO Dongqiang, GUO Huimin. Analysis of coal mine occupational disease hazard evaluation index based on AHP-DEMATEL [J]. *Archives of Environmental and Occupational Health*, 2021, 76 (7): 372-384.
- [17] 张璐, 许开立, 葛及, 等. 基于 DEMATEL-ANP-可拓云模型的铜冶炼企业安全生产风险评价[J]. *安全与环境工程*, 2023, 30(1): 1-8.
- ZHANG Lu, XU Kaili, GE Ji, et al. Safety production risk assessment of copper smelting enterprises based on DEMATEL-ANP-extensible cloud model [J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2023, 30(1): 1-8.
- [18] 梁闫, 陈昊, 张永领, 等. 基于 G1-DEMATEL-测度量化的煤矿应急救援协同能力评价模型[J]. *煤矿安全*, 2022, 53(11): 254-258.
- LIANG Yan, CHEN Hao, ZHANG Yongling, et al. Evaluation model of coal mine emergency rescue collaborative ability based on G1-DEMATEL-measurement quantification[J]. *Safety in Coal Mines*, 2022, 53 (11): 254-258.
- [19] 赵彬. 边坡稳定性评价的组合赋权博弈论云化物元模型[J]. *矿业研究与开发*, 2022, 42(6): 60-67.
- ZHAO Bin. The combination weighting model of game theory and cloud matter-element for slope stability evaluation[J]. *Mining Research and Development*, 2022, 42 (6): 60-67.
- [20] 武乾, 李芊霏, 林皓, 等. 钢筋混凝土旧工业建筑改造施工安全系统韧性研究[J]. *安全与环境学报*, 2023, 23 (8): 2615-2623.
- WU Qian, LI Yufei, LIN Hao, et al. Research on resilience of safety system of reinforced concrete old industrial building reconstruction[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2023, 23(8): 2615-2623.

### Extension Cloud Model for Risk Assessment of Filling Pipeline Wear Based on DEMATEL Method

XIANG Yun

(Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China)

**Abstract:** In order to scientifically and reasonably determine the risk level of filling pipeline wear, DEMATEL method and extension cloud theory were introduced, and DEMATEL-improved CRITIC-extension cloud model for risk assessment of filling pipeline wear was established. On the basis of constructing the evaluation system, the DEMATEL method was used to study the influence relationship between the index factors, and the DEMATEL centrality-improved CRITIC method was used to obtain the comprehensive weight of the index. According to the principle of extension cloud theory, taking four mines as an example, the wear risk status was evaluated by calculating the cloud comprehensive correlation degree. The results show that the pipe diameter and slurry concentration are the key factors of deep well filling pipelines wear. The risk of pipeline wear in four mines is at a large risk level, which is completely consistent with the evaluation results of unascertained measure and variable fuzzy set theory, indicating that the DEMATEL-improved CRITIC-extension cloud model is applicable and effective in pipeline wear risk assessment.

**Key words:** Filling mining method, Pipeline wear, DEMATEL method, Extension cloud, Risk assessment