文章编号:1674-2869(2025)01-0105-08

基于AHP-CRITIC-云模型的非煤矿山突水安全风险评估

王伦平[1],周德红[*1],曾 旺[2],张坤岩[2]
1. 武汉工程大学资源与安全工程学院,湖北 武汉 430074;
2. 中南勘察基础工程有限公司,湖北 武汉 430081

摘 要:为了提高非煤矿山突水安全风险评估的全面性和准确性,避免从传统的纯技术方面分析非煤矿山突水的影响因素,从安全科学系统论和综合论的角度建立非煤矿山突水安全风险评估体系,并提出AHP-CRITIC组合赋权法确定指标权重;引入云模型评估理论,利用MATLAB构建评估指标的隶属度函数,从而构建非煤矿山突水安全风险评估模型;最后引入湖北某矿山实例,与现场专家打分结果进行对比验证。结果表明:基于AHP-CRITIC-云模型的非煤矿山突水安全风险评估模型具有科学性、准确性和实用性,解决了传统评估方法存在的不全面性和主观性等问题,提高了对非煤矿山突水安全风险评估结果的精确性。

关键词:突水;安全风险;组合赋权;云模型
中图分类号:X936 **文献标识码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202305018

Safety risk assessment of water inrush in non-coal mines based on AHP-CRITIC-cloud model

WANG Lunping[1], *ZHOU Dehong*[*1], *ZENG Wang*[2], *ZHANG Kunyan*[2]
1. School of Resource & Safety Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;
2. Zhongnan Reconnaissance Foundation Engineering Co., Ltd, Wuhan 430081, China

Abstract: To improve the comprehensiveness and accuracy of safety risk assessment for water inrush in non-coal mines, a safety risk assessment system was established based on safety science system theory and synthesis theory, overcoming the limitations of traditional sole technical analyses of influencing factors. A combined AHP-CRITIC weighting method was proposed to determine the weights of indicators, and the cloud model theory was introduced to construct the membership functions of the evaluation indicators using MATLAB, thereby developing a safety risk assessment model for water inrush. The model was validated through a case study of a mine in Hubei Province, with comparative analysis against on-site expert evaluations. The results demonstrate that the proposed AHP-CRITIC-cloud model exhibits scientific validity, accuracy, and practicality, effectively addressing the incompleteness and subjectivity in traditional methods while significantly enhancing the precision of safety risk assessment outcomes.

Keywords: water inrush; safety risk; combined weighting; cloud model

近年来,随着国家对非煤矿山安全生产工作的重视,整体矿山安全事故有所减缓,但非煤矿山安全形势仍然不容忽视。据统计,2013—2017年全国的非煤矿山事故中水害事故占到20%,非煤矿山水患事故数量和死亡人数均高于煤矿。另外,地表、地下水的流失还会导致井泉干涸、河流

收稿日期:2023-05-23
作者简介:王伦平,硕士研究生。Email:1732038115@qq.com
***通信作者**:周德红,博士,教授。Email:dhzhou@wit.edu.cn
引文格式:王伦平,周德红,曾旺,等. 基于AHP-CRITIC-云模型的非煤矿山突水安全风险评估[J]. 武汉工程大学学报,2025,47(1):105-112.

断流，严重影响了生态环境平衡和农业生产[1]。因此，如何有效防范水害事故，减少人员伤亡和财产损失，开展非煤矿山矿山突水安全风险的研究非常有必要，是大势所趋。

矿山突水灾害是指在矿山生产活动中，由于地质因素、人为钻探、采掘等影响矿层透水性或者由于地表水的涌入，导致矿山井下被水淹没的事故[2]。2013年，刘仕瑞[3]根据安全系统理论的原理建立矿山突水安全风险评估体系，并采用AHP-FCE法建立了评估模型，2013年胡建华等[4]以突水通道脆弱性为评估对象，以脆弱性视角构建了矿山突水通道评估体系。2016年，刘磊等[5]构建了中心点白化权函数，并利用灰色理论评估分析矿山突水危险性。2021年王建军等[6]分别从突水水源、充水通道、地质因素、工程因素、人为因素5个方面分析了矿山突水的影响因素。2022年，陈懋等[7]利用层次分析法和熵权法组合赋权，得出了矿山突水安全风险评价云。

当前对于矿山突水的研究，以煤矿为主，对于非煤矿山的研究相对较少。而且对于矿山突水安全风险评估体系的构建普遍以技术性因素为主，而管理因素其实是实际生产中影响矿山水患安全的十分重要的环节。依据《金属非金属地下矿山防治水安全技术规范》(AQ 2061—2018)、《有色金属矿山水文地质勘探规范》(GB 51060—2014)等规范，并结合矿山实际情况，构建的非煤矿山突水安全风险评估体系更具备实用性和全面性；邀请10位专家依据评估要素对非煤矿山进行现场调研并打分作为实际结果，采用AHP-CRITIC对各指标因素权重进行综合权重计算，依据云模型对非煤矿山突水进行安全风险评估，将AHP-CRITIC-云模型评估所得的结果与实际结果进行对比研究，综合得出一种更优的非煤矿山突水安全风险评估模型。

1 指标体系建设

从安全科学系统论和综合论的角度，认为人、机、环境、管理是故事产生的4大综合要素，主张将工程技术硬手段与教育、管理软手段等结合起来，采取综合措施。从人为操作、工程设备设施、管理水平以及环境影响因素4个方面(指标代码为B_1~B_4)构建一级指标，这4个指标之间互相独立。再结合我国关于非煤矿山突水管理相关法律法规和矿山实际情况，对矿山突水(指标代码为A)事故的致因分析，研究其影响因素，分析出12个二级指标(指标代码为C_1~C_{12})和45个三级指标(指标代码为D_1~D_{45})，见图1。

2 评估模型

2.1 基于AHP的权重计算

AHP法是Satty[8]提出的一种可以将研究目标剖析成不同的层级进行研究的方法，它能分析影响研究问题的各个组成要素，对每个层级的要素之间的相对重要度进行计算，形成判断矩阵，从

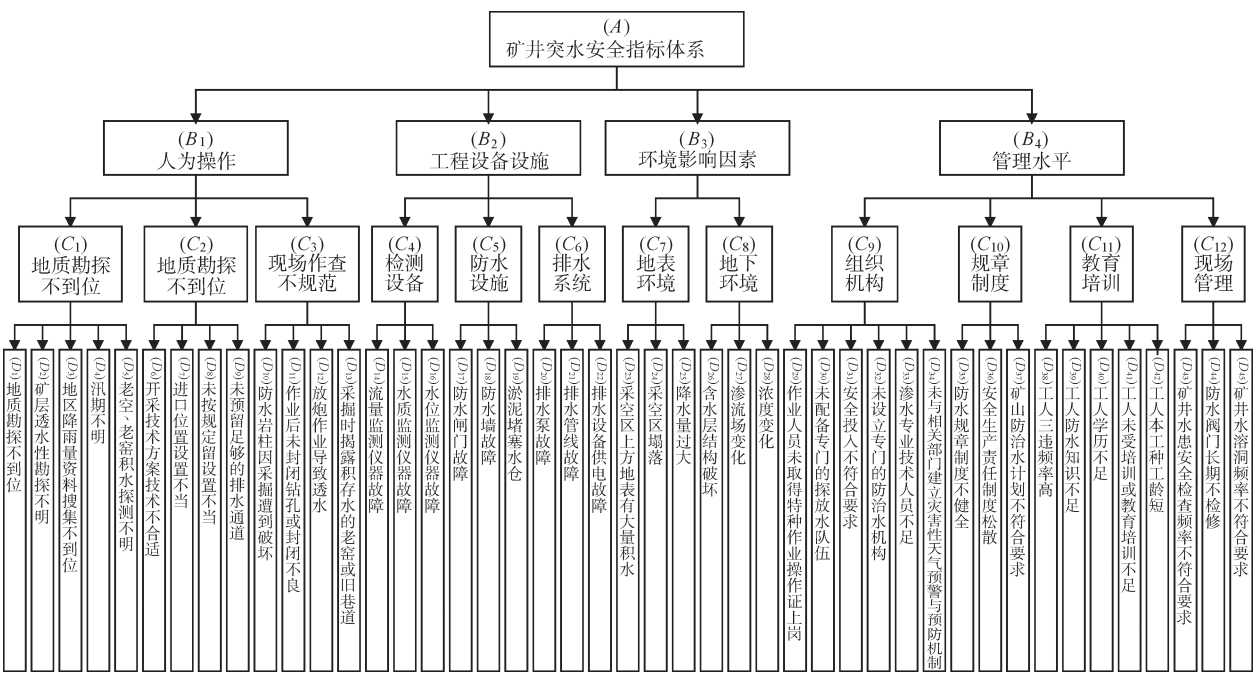

图1 非煤矿山突水安全风险评估体系

Fig. 1 Safety risk assessment system of water inrush in non-coal mines

而得到每个层级各因素的权重。

在该方法中，核心步骤在于要确定每一层级的指标要素对上一层级的影响程度，通过两两比较得出具体比率数值，并依据1–9标度法构建出判断矩阵进行计算，以便得到各个因素的实际权重。AHP方法属于主观赋权法的一种，能够帮助人们更好地解决各种实际问题。计算指标的主观权重为φ_i。

2.2　基于CRITIC的权重计算

CRITIC法是Diakoulaki等[9]提出的一种适用于确定指标客观权重的方法，通过指标内数据的变异程度和指标之间的冲突程度来衡量该指标的重要性[10]。一般情况下，用变异系数来标定同一指标的n个数值之间的差异性，变异系数越大，表明该指标本身的变异程度越大，即包含的信息量越大，指标重要度越高。用相关系数标定不同指标之间的冲突性，相关系数越大，表明指标间的信息量有相似性，即权重越小[11]。

另一种客观赋权法——熵权法，只考虑指标值的变异程度[12]，而实际各指标间具有一定的相关性，因此用CRITIC法确定客观权重更加科学，其步骤如下：

(1)构建初始矩阵。将各指标记为i，关于该指标的评估样本数据记为j，构建一个以x_{ij}为元素的m行、n列的初等矩阵。即有m个评估指标，每个评估指标有n个数据样本。

(2)数据标准化。由于各指标的打分情况所参考的依据有差异，因此各指标之间单位不同会对指标产生影响，通常需要进行归一化处理，本研究采用正向极值标准化法[13]，见式(1)：

$$s_{ij}=\frac{x_{ij}-x_{\min}}{x_{\max}-x_{\min}} \tag{1}$$

其中：s_{ij}为标准化值，x_{ij}为原始值，$x_{\max}$为指标i的j个数据的最大值，$x_{\min}$为最小值。

(3)计算变异系数。指标内的变异大小，通常用每个指标的变异系数来衡量，见式(2)和式(3)：

$$\sigma_i=\sqrt{\sum_{j=1}^{n}\frac{\left(S_{ij}-\bar{S}\right)^2}{n}} \tag{2}$$

$$V_i=\frac{\sigma_i}{\bar{S}} \tag{3}$$

其中：σ_i为指标i的标准差，$\bar{S}$为指标i的j个数据的平均值，V_i为指标i的变异系数。

(4)计算指标间冲突性。指标间的冲突性可用相关系数表明，以皮尔逊相关系数[14]计算，每个指标的冲突性计算见式(4)：

$$T_i=\sum_{j=1}^{n}\left(1-r_{ij}\right) \tag{4}$$

其中：T_i为指标的冲突性量化值，r_{ij}为皮尔逊相关系数。

(5)计算信息量。

$$C_i=V_i\times T_i \tag{5}$$

(6)计算客观权重。对指标i的信息量进行归一化处理，得到CRITIC法的权重，见式(6)：

$$\omega_i=C_i/\sum_{j=1}^{m}C_j \tag{6}$$

其中：ω_i为指标i的客观权重，C_j为各个指标信息量。

2.3　指标综合权重计算

AHP法偏向决策者对研究问题的主观判断，CRITIC法偏向数据本身的客观信息，使用两种方法综合赋权，所得指标权重结果更合理。使用AHP-CRITIC法确定指标的综合权重为

$$\tau_i=\mu_1\varphi_i+\mu_2\omega_i \tag{7}$$

其中：μ_1、μ_2分别为主观权重和客观权重的重要度系数，取0.5；τ_i为指标综合权重。

2.4　云模型评估法

云模型[15]是李德毅院士提出的一种适用于定性和定量转化的数学模型，能够反映研究问题的模糊性和随机性。为了表达这种不确定性，用期望(E_x)、熵(E_n)、超熵(H_e)3个数值特征值来表征定性和定量之间的映射关系。

其中E_x表示数学期望，反映了数域空间最能代表定性概念的样本点[16]；E_n表示概念的不确定性，反映了定性概念云滴的分布范围；H_e用来度量熵的不确定性，即熵的熵[17]。

2.4.1　正态云发生器

正态云发生器是将概念的数值特征向定量数据集合转变的算法。依据(E_x，E_n，H_e)3个数值特征可生成n个云滴[18]，如图2所示。

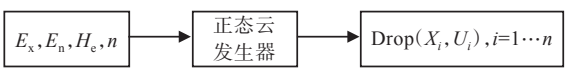

图2　正态云发生器

Fig. 2　Normal cloud generator

2.4.2　云图计算

(1)标准云C_V。

标准云代表了云模型的评估标准，是依据风险等级划分计算出的，公式如下：

$$E_{x_v}=\frac{d_{\max}+d_{\min}}{2},E_{n_v}=\frac{d_{\max}-d_{\min}}{6},H_{e_v}=kE_{n_v} \tag{8}$$

式(8)中：$d_{\max}$、$d_{\min}$分别为分值区间的最大值和最

小值，k为熵与超熵的某种线性关系，取0.01[19]。

将指标等级划分为高风险、较高风险、较低风险、低风险4个等级，分别对应数值区间[0,20)，[20,40)，[40,60)，[60,80)，[80,100]，依据式(8)计算标准云模型特征值，具体情况见表1。

表1 风险等级划分

Tab. 1 Risk levels

风险等级	安全评级	分值区间	特征值(E_x,E_n,H_e)
低风险	优秀	[80,100]	(90.00,3.333,0.033 33)
较低风险	良好	[60,80)	(70.00,3.333,0.033 33)
较高风险	较差	[40,60)	(50.00,3.333,0.033 33)
高风险	差	[20,40)	(30.00,3.333,0.033 33)
极高风险	极差	[0,20)	(10.00,3.333,0.033 33)

将数据导入MATLAB，画出标准云图，见图3。

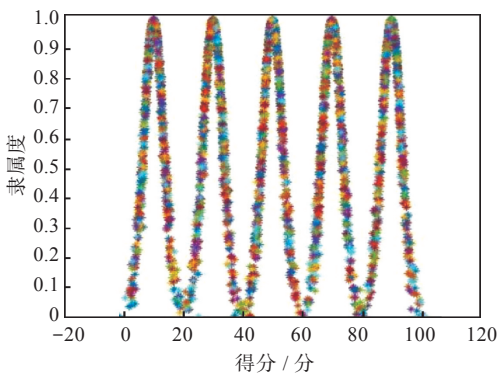

图3 标准云图

Fig. 3 Standard cloud

(2)评估云C_u。

利用3个数值特征值E_{x_u},E_{n_u},H_{e_u}可得出评估云，计算公式(9)如下：

$$E_{x_u}=\bar{X}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i,E_{n_u}=\sqrt{\frac{\pi}{2}}\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|x_i-E_{x_u}\right|,$$
$$H_{e_u}=\sqrt{|E_{n_u}{}^2-S^2|} \tag{9}$$

式中S^2为样本方差。

(3)综合云C。

基于对各指标的打分情况确定云模型特征值，再结合AHP-CRITIC所得到的权重得到综合云特征值。计算公式(10)如下所示：

$$\begin{cases}E_{x_n}=\sum_{i=1}^{n}\tau_{i\,Ex_i}\\ E_{n_n}=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(\tau_{i\,En_i}\right)^2}\\ H_{e_n}=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(\tau_{i\,He_i}\right)^2}\end{cases} \tag{10}$$

式中，$(E_{x_i},E_{n_i},H_{e_i})(i=1,2,\cdots,n)$为$n$朵云，$\tau_i(i=1,2,\cdots,n)$分别为每朵云对应的权重，$(E_{x_n},E_{n_n},H_{e_n})$为加权的综合云，得到综合云后需将其与标准云进行比较[20]。

(4)隶属度分析。

通常以隶属度函数$\mu_{(x)}$结果作为综合云风险等级的评估依据，云模型隶属度是随机变量，需要对云发生器运行多次增加结果的信度，最后计算结果取均值。

$$\mu_{(x)}=\exp\left(-\frac{\left(x-E_x\right)^2}{2E_n^2}\right) \tag{11}$$

其中，(x,u)是论域中的一个云滴，利用MATLAB对4个风险等级的云模型分别计算1 000次，得到4个风险等级平均隶属度分别为：$\overline{\mu_1}$、$\overline{\mu_2}$、$\overline{\mu_3}$、$\overline{\mu_4}$。根据最大隶属度原则，隶属度最大的数值对应该指标的风险等级[21]。

3 实例分析

湖北某金属矿山位于湖北省大冶市城区270°方向约4 km，有鸡冠咀、桃花嘴两个矿区，开采方式为地下开采。矿区周边环境和地质条件复杂多变，地质报告将矿区水文地质条件定性为中等偏复杂，因此，矿山防治水工作任重道远，需引起足够重视，确保矿山安全生产。

3.1 权重计算

为了确保数据的可靠性，通过实地调查走访矿山，收集了大量资料，将资料整理后依据指标体系设置调查问卷，并邀请10位专家根据《金属非金属地下矿山防治水安全技术规范》(AQ 2061—2018)、《有色金属矿山水文地质勘探规范》GB 51060—2014等标准并结合矿山实际情况，以百分制(见表1)对各指标打分，得到评分结果见表2。

表2 十位专家打分表

Tab. 2 Scores of ten experts

专家编号	分值									
	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#	10#
D_6	61	78	77	82	74	72	86	67	85	73
D_7	77	67	88	54	61	73	67	79	89	75
D_8	88	75	57	86	74	73	85	75	71	61
D_9	54	72	66	71	76	57	83	68	88	76

依据图1构建的指标体系，根据德尔菲法，多次采集专家意见，使用yaahp计算得出煤矿山突水安全风险评估体系各因素的主观权重结果φ_i，如表3所示。

客观权重计算以三级指标中开采技术方案不合适(D_6)、井口位置设置不当(D_7)、未按规定留设防水岩柱(D_8)、未预留足够的排水通道(D_9)4项指标为例。

按式(1)处理，得到标准化矩阵

$$\boldsymbol{S}=\begin{pmatrix}0.000\,0 & 0.680\,0 & 0.640\,0 & 0.840\,0 & 0.520\,0 & 0.440\,0 & 1.000\,0 & 0.240\,0 & 0.960\,0 & 0.480\,0\\ 0.657\,1 & 0.371\,4 & 0.971\,4 & 0.000\,0 & 0.200\,0 & 0.542\,9 & 0.371\,4 & 0.714\,3 & 1.000\,0 & 0.600\,0\\ 1.000\,0 & 0.580\,6 & 0.000\,0 & 0.935\,5 & 0.548\,4 & 0.516\,1 & 0.903\,2 & 0.580\,6 & 0.451\,6 & 0.129\,0\\ 0.000\,0 & 0.529\,4 & 0.325\,9 & 0.500\,0 & 0.647\,1 & 0.088\,2 & 0.825\,9 & 0.411\,8 & 1.000\,0 & 0.647\,1\end{pmatrix}$$

按式(2)和式(3)计算各行向量$\boldsymbol{s}_i$的标准差向量$\boldsymbol{\sigma}$，得到变异系数向量$\boldsymbol{V}$。

$$\boldsymbol{\sigma}=\left(\sigma_1,\sigma_2,\sigma,\sigma_4\right)=(0.314\,0,0.317\,9,0.327\,6,0.310\,5)$$

$$\boldsymbol{V}=\left(V_1,V_2,V_3,V_4\right)=(0.541\,4,0.585\,6,0.580\,3,0.617\,4)$$

将数据导入SPSS软件，计算线性相关系数r_{ij}，得到相关矩阵$\boldsymbol{R}$。

$$\boldsymbol{R}=\begin{pmatrix}1.000\,0 & -0.156\,0 & -0.047\,0 & 0.782\,0\\ -0.156\,0 & 1.000\,0 & -0.558\,0 & -0.016\,0\\ -0.047\,0 & -0.558\,0 & 1.000\,0 & -0.130\,0\\ 0.782\,0 & -0.016\,0 & -0.130\,0 & 1.000\,0\end{pmatrix}$$

根据式(4)、(5)、(6)计算出客观权重。

$$\boldsymbol{\omega}=\left(\omega_1,\omega_2,\omega_3,\omega_4\right)=$$

$$(0.154\,0,0.336\,4,0.307\,4,0.202\,2)$$

按照此计算步骤计算出各指标的客观权重，根据式(7)计算各指标综合权重，最终权重结果如表3所示。

3.2　指标云模型特征值计算

依据式(9)计算出三级指标云模型特征值，见表4。

表3　非煤矿山突水安全风险评估指标体系各因素权重

Tab. 3　Weight of each factor in non-coal mine water inrush safety risk assessment index system

指标代码	φ_i	ω_i	τ_i	指标代码	φ_i	ω_i	τ_i	指标代码	φ_i	ω_i	τ_i
A	1.000 0	1.000 0	1.000 0	D_5	0.323 2	0.296 4	0.309 8	D_{26}	0.527 8	0.533 6	0.530 7
B_1	0.099 0	0.091 4	0.095 20	D_6	0.094 1	0.154 0	0.124 1	D_{27}	0.139 6	0.100 2	0.119 9
B_2	0.206 6	0.122 3	0.164 5	D_7	0.315 6	0.336 4	0.326 0	D_{28}	0.332 6	0.366 2	0.349 4
B_3	0.429 5	0.485 2	0.457 3	D_8	0.427 6	0.307 4	0.367 5	D_{29}	0.300 8	0.288 5	0.294 7
B_4	0.264 9	0.301 1	0.283 0	D_9	0.162 7	0.202 2	0.182 4	D_{30}	0.219 5	0.185 6	0.202 5
C_1	0.539 6	0.411 3	0.475 5	D_{10}	0.154 5	0.145 4	0.150 0	D_{31}	0.071 2	0.152 3	0.111 7
C_2	0.297 0	0.233 6	0.265 3	D_{11}	0.092 6	0.125 6	0.109 1	D_{32}	0.195 2	0.085 6	0.140 4
C_3	0.163 4	0.355 1	0.259 2	D_{12}	0.508 0	0.562 3	0.535 1	D_{33}	0.151 9	0.210 3	0.181 1
C_4	0.157 1	0.233 8	0.195 5	D_{13}	0.244 9	0.166 7	0.205 8	D_{34}	0.061 4	0.077 7	0.069 6
C_5	0.593 6	0.525 1	0.559 3	D_{14}	0.221 1	0.352 6	0.286 8	D_{35}	0.319 6	0.255 6	0.287 6
C_6	0.249 3	0.241 1	0.245 2	D_{15}	0.505 1	0.199 5	0.352 3	D_{36}	0.122 0	0.325 2	0.223 6
C_7	0.333 3	0.289 9	0.311 6	D_{16}	0.273 8	0.447 9	0.360 9	D_{37}	0.558 4	0.419 2	0.488 8
C_8	0.666 7	0.710 1	0.688 4	D_{17}	0.259 8	0.625 6	0.592 0	D_{38}	0.375 4	0.322 6	0.349 0
C_9	0.274 1	0.201 3	0.237 7	D_{18}	0.319 6	0.248 1	0.283 8	D_{39}	0.121 3	0.263 3	0.192 3
C_{10}	0.104 4	0.088 5	0.096 5	D_{19}	0.420 6	0.126 3	0.124 2	D_{40}	0.080 4	0.069 7	0.075 1
C_{11}	0.471 7	0.431 3	0.451 5	D_{20}	0.558 4	0.486 3	0.522 3	D_{41}	0.262 3	0.193 3	0.227 8
C_{12}	0.149 8	0.278 9	0.214 3	D_{21}	0.319 6	0.336 5	0.328 1	D_{42}	0.160 6	0.151 1	0.155 8
D_1	0.190 6	0.215 6	0.203 1	D_{22}	0.122 0	0.177 2	0.149 6	D_{43}	0.157 1	0.322 6	0.239 9
D_2	0.309 3	0.287 3	0.298 3	D_{23}	0.225 5	0.256 3	0.240 9	D_{44}	0.593 6	0.152 6	0.373 1
D_3	0.087 8	0.094 9	0.091 30	D_{24}	0.673 8	0.721 0	0.697 4	D_{45}	0.249 3	0.524 8	0.387 0
D_4	0.089 1	0.105 8	0.097 5	D_{25}	0.100 7	0.022 7	0.061 7				

表4　部分三级指标评估云特征值

Tab. 4　The evaluation cloud eigenvalues of some tertiary indicators

指标代码	云模型特征值(E_{x_u},E_{n_u},E_{e_u})
D_6	(75.70,7.395,5.073)
D_7	(72.70,6.524,2.275)
D_8	(73.50,6.552,3.524)
D_9	(70.60,8.613,2.369)

根据前文求得各指标权重，结合式(10)计算出人为操作、工程设备设施、环境影响因素、管理水平4个一级指标和矿山突水综合风险的数值特征，导入MATLAB计算出平均隶属度，得出最终的风险等级，并以云图的形式可视化展现出来，见图4。

3.3　结果分析与对比验证

通过专家对三级指标现场打分，得到表6所示的打分结果。

表5 综合评估云参数

Tab. 5 Comprehensive evaluation of cloud parameters

指标代码	加权数值特征值(E_{x_n},E_{n_n},E_{e_n})	平均隶属度($\overline{\mu_1}$,$\overline{\mu_2}$,$\overline{\mu_3}$,$\overline{\mu_4}$)	最大隶属度	风险等级
B_1	(80.52,5.342,3.125)	(8.632×10^{-5},8.652×10^{-4},0.575 6,0.235 8)	0.575 6	较低风险
B_2	(91.14,6.322,2.142)	(4.553×10^{-6},4.333×10^{-4},$4.406\times\times10^{-3}$,0.931 8)	0.931 8	低风险
B_3	(87.93,7.854,1.036)	(3.803×10^{-6},7.235×10^{-4},6.282×10^{-3},0.889 7)	0.889 7	低风险
B_4	(92.55,6.746,2.256)	(7.036×10^{-6},6.011×10^{-4},1.743×10^{-3},0.953 3)	0.953 3	低风险
A	(88.62,7.362,2.334)	(5.003×10^{-6},2.322×10^{-4},$3.452\times\times10^{-3}$,0.876 2)	0.876 2	低风险

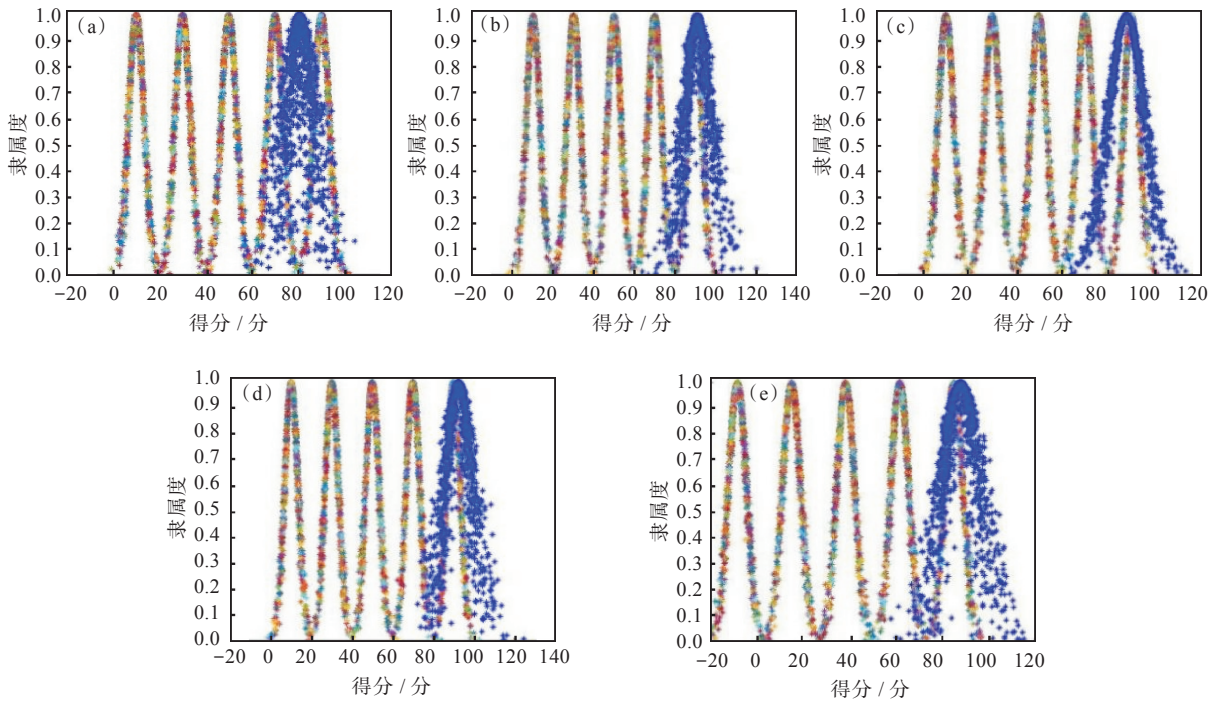

图4 风险评估云图:(a)B_1人为操作风险云图,(b)B_2工程设备设施风险云图,(c)B_3环境因素风险云图,(d)B_4管理水平风险云图,(e)A矿井突水综合风险云图

Fig. 4 Risk assessment cloud: (a)B_1 human operation risk, operations, (b)B_2 engineering equipment and facilities risk, (c)B_3 nvironmental factors risk, (d)B_4 management proficiency risk, (e)A integrated mine water inrush risk

表6 专家现场打分结果

Tab. 6 Experts' on-site scores

指标代码	均值	指标代码	均值	指标代码	均值	指标代码	均值	指标代码	均值
D_1	72.20	D_{10}	76.20	D_{19}	84.10	D_{28}	89.50	D_{37}	88.20
D_2	86.20	D_{11}	92.30	D_{20}	82.20	D_{29}	89.20	D_{38}	94.10
D_3	71.00	D_{12}	88.40	D_{21}	93.20	D_{30}	86.50	D_{39}	85.30
D_4	71.50	D_{13}	79.50	D_{22}	95.60	D_{31}	84.20	D_{40}	89.00
D_5	81.30	D_{14}	83.40	D_{23}	75.80	D_{32}	87.50	D_{41}	92.0
D_6	81.50	D_{15}	95.00	D_{24}	94.20	D_{33}	78.20	D_{42}	93.60
D_7	80.00	D_{16}	85.20	D_{25}	85.60	D_{34}	94.10	D_{43}	95.10
D_8	74.50	D_{17}	89.30	D_{26}	89.20	D_{35}	83.00	D_{44}	84.20
D_9	81.10	D_{18}	88.50	D_{27}	83.50	D_{36}	91.10	D_{45}	92.10

根据表1的权重结果,用三级指标(D_1~D_{45})的打分值分别乘以各自综合权重τ_i,得到二级指标(C_1~C_{12})的打分结果;用二级指标的打分结果乘以各自综合权重得到一级指标(B_1~B_4)的打分结果;用一级指标的打分结果乘以各自综合权重得到最终矿井突水(A)的打分结果,见表7。依据各指标的打分结果参照表1的风险等级划分得到该指标的风险等级。

计算过程以B_1为例：

权重集$\boldsymbol{M}_1=(0.475\,5\ \ 0.265\,3\ \ 0.259\,2)$

$\boldsymbol{C}_1=(0.203\,1\ \ 0.298\,3\ \ 0.091\,3\ \ 0.097\,5\ \ 0.309\,8)$

$\boldsymbol{C}_2=(0.124\,1\ \ 0.326\,0\ \ 0.367\,5\ \ 0.182\,4)$

$\boldsymbol{C}_3=(0.150\,0\ \ 0.109\,1\ \ 0.535\,1\ \ 0.205\,8)$

打分集

$$\boldsymbol{J}_1=\begin{pmatrix}72.20\\86.20\\71.00\\71.50\\81.30\end{pmatrix};\boldsymbol{J}_2=\begin{pmatrix}81.50\\80.00\\74.50\\81.10\end{pmatrix};\boldsymbol{J}_3=\begin{pmatrix}76.20\\92.30\\88.40\\79.50\end{pmatrix}$$

打分值$\boldsymbol{B}_1=\boldsymbol{M}_1\cdot\begin{pmatrix}\boldsymbol{C}_1\cdot\boldsymbol{J}_1\\\boldsymbol{C}_2\cdot\boldsymbol{J}_2\\\boldsymbol{C}_3\cdot\boldsymbol{J}_3\end{pmatrix}=80.44$

表7　专家打分法评估结果

Tab.7　Evaluation results of the expert scoring method

指标代码	打分值	风险等级
A	88.10	低风险
B_1	80.44	低风险
B_2	88.22	低风险
B_3	88.81	低风险
B_4	89.48	低风险

模型评估结果显示，湖北某矿山的水患安全风险预警评估结果为低风险，其中人为操作风险等级为较低风险，工程设备设施风险等级为低风险，环境因素风险等级为低风险，管理水平安全风险等级为低风险，根据云图可以看出各综合云图与标准云的“重叠程度”，综合云的正态分布函数与哪个评估区间的标准正态分布函数“重叠程度”越高，即隶属度越高，则说明该指标的风险等级即为该评估区间对应的风险等级。评估因素B_1的综合云图在较低风险和低风险之间，难从云图直观判断，因此需要借助式(11)的隶属度函数计算，判断人为操作的风险等级为较低风险。

通过专家现场打分法的结果与模型结果对比显示，专家打分结果均为低风险。经过计算，其中“B_1人为操作”的评估结果与模型评估结果不一致。可以看出B_1的期望值在80~90之间，说明专家打分结果均值偏向低风险。这是由于专家打分法的主观性导致的，没有对每个数据进行深入挖掘。对于这种情况，通过传统的专家打分主观判断很难确定准确的风险等级，而模型评估法则可以利用计算机语言对数据进行多次抽样模拟，得出如图4所示的云图，再根据隶属度函数的多次计算取均值，更准确地判断指标的风险落在哪个区间。这也说明了模型评估法的准确性。

4　结　论

(1)从安全科学和综合论的角度，从人为操作、工程设备设施、管理水平以及环境影响因素4个方面构建一级指标，再结合我国关于非煤矿山突水管理相关法律法规和矿山实际情况，对矿山突水事故的致因分析，研究其影响因素，建立非煤矿山突水安全风险预警评估体系，所建体系较传统更全面更科学。

(2)利用AHP-CRITIC组合赋权对建立的指标进行权重计算，不仅考虑到主客观权重对指标重要性的影响，同时利用云模型可以将定性和定量指标相互转化，并以云图的形式直观表征指标的随机性和模糊性的特点。

(3)利用云模型进行评估，引入实例计算，结果表明基于AHP-CRITIC-云模型的非煤矿山突水安全风险评估模型具有科学性、准确性和实用性，解决了传统评估方法存在的不全面性和主观性等问题，提高了对非煤矿山突水安全风险评估结果的精确性。

参考文献

[1] 《2017年全国非煤矿山生产安全事故统计分析报告》发布[J]. 职业卫生与应急救援，2018，36(3)：284.

[2] 赵良杰，夏日元，易连兴，等. 基于流量衰减曲线的岩溶含水层水文地质参数推求方法[J]. 吉林大学学报(地球科学版)，2015，45(6)：1817-1821.

[3] 刘仕瑞. 对兖矿集团Y煤矿突水的安全评价研究[D]. 太原：中北大学，2013.

[4] 胡建华，林阳帆，周科平，等. 地下矿山突水通道脆弱性的模糊层次评价[J]. 灾害学，2013，28(4)：16-21.

[5] 刘磊，于小鸽，王丹丹，等. 基于灰色理论的底板突水危险性评价[J]. 矿业安全与环保，2016，43(5)：45-49，61.

[6] 王建军，周英烈，饶斌，等. 矿山突水灾害影响因素分析及防治措施研究[J]. 采矿技术，2021，21(6)：69-72，76.

[7] 陈懋，姚锡文，许开立. 基于AHP-EWM-云模型的金属矿山突水危险性评价[J]. 有色金属工程，2022，12：102-110.

[8] SAATY T L. The analytic hierarchy process：planning，priority setting，resource allocation[M]. New York：McGraw Hill，1990.

[9] DIAKOULAKI D，MAVROTAS G，PAPAYANNAKIS L. Determining objective weights in multiple criteria problems：the CRITIC method[J]. Computers &

Operations Research,1995,22:763-770.
[10] 万林,章国宝,陶杰.基于AHP-CRITIC的电梯安全性评估[J].安全与环境学报,2017,17(5):1696-1700.
[11] 范文杰,肖湘宁,陶顺.基于综合权重的电压暂降严重度多指标评估方法[J].电力电容器与无功补偿,2019,40(4):137-144.
[12] 王淑云,黄芳,谭雄,等.熵权法在铀矿井下空气环境安全评价中的应用研究[J].安全与环境学报,2021,21(2):538-545.
[13] 芦磊,张斌,郑达.基于AHP-CRITIC的公路土质路堑边坡风险评估模型[J].人民长江,2023,54(1):133-139.
[14] 程娟娟.高校科研与教学关系实证研究——基于皮尔逊相关系数的分析[J].中国高校科技,2022(10):46-52.
[15] 李德毅,刘常昱.论正态云模型的普适性[J].中国工程科学,2004(8):28-34.
[16] 韩晓娟,牟志国,魏梓轩.基于云模型的电化学储能工况适应性综合评估[J].电力工程技术,2022,41(4):213-219.
[17] 刘桂花,宋承祥,刘弘.云发生器的软件实现[J].计算机应用研究,2007(1):46-48.
[18] 何菲菲.基于云模型的图像分割方法研究[D].重庆:重庆邮电大学,2016.
[19] 肖振航,周德红,李维东,等.基于云模型的化工园区安全风险评估[J].武汉工程大学学报,2022,44(1):112-118.
[20] 李维东,周德红,肖振航,等.基于Bow-tie正态云模型的LNG储罐风险分析[J].消防科学与技术,2021,40(9):1322-1327.
[21] 郭茜.基于云模型的京津冀物流一体化指标权重研究[J].云南财经大学学报,2018,34(6):96-104.

本文编辑:张 瑞

☆

(上接第63页)

[30] GAO J Z, JAIN A, MOTHERAM R, et al. Fluid bed granulation of a poorly water soluble, low density, micronized drug: comparison with high shear granulation [J]. International Journal of Pharmaceutics, 2002, 237(1/2):1-14.
[31] RAJNIAK P, MANCINELLI C, CHERN R T, et al. Experimental study of wet granulation in fluidized bed: impact of the binder properties on the granule morphology [J]. International Journal of Pharmaceutics, 2007, 334(1/2):92-102.
[32] 李瑞珺,涂家生.基于流化床顶喷技术的异麦芽酮糖醇制粒工艺研究[J].药学与临床研究,2013,24(2):114-117.
[33] ANWAR S H, KUNZ B. The influence of drying methods on the stabilization of fish oil microcapsules: comparison of spray granulation, spray drying, and freeze drying[J]. Journal of Food Engineering, 2011, 105(7):367-378.
[34] 李翔宇,胡雄,肖敏,等.适合在火腿肠中应用的DHA微胶囊配方研究[J].中国食品添加剂,2017(8):148-153.
[35] 刘执健.流化床制备富马酸二甲酯缓释微丸的处方和工艺参数的量化筛选[D].青岛:青岛科技大学,2016.
[36] 尤恒.流化床包衣处方与工艺的量化控制[D].青岛:青岛科技大学,2010.
[37] RAHMATI M R, VATANARA A, PARSIAN A R, et al. Effect of formulation ingredients on the physical characteristics of salmeterol xinafoate microparticles tailored by spray freeze drying[J]. Advanced Powder Technology, 2013, 24(1):36-42.
[38] 程超,朱玉婷,田瑞,等.喷雾冷冻干燥对葛仙米藻蛋白抗氧化特性的影响[J].食品科学,2012,33(13):36-39.
[39] 但济修,岳鹏飞,谢元彪.喷雾冷冻干燥技术及其在难溶性药物微粒中的应用[J].中国医药工业杂志,2016,47(1):106-110.
[40] ROGERS S, WU W D, SAUNDERS J, et al. Characteristics of milk powders produced by spray freeze drying [J]. Drying Technology, 2008, 26(4):404-412.
[41] MALTESEN M J, WEERT M V D. Drying methods for protein pharmaceuticals [J]. Drug Discovery Today Technologies, 2008, 5(2/3):81-88.
[42] 张萌,张恩瑜,段续,等.不同干燥方式对鱼油微胶囊物理特性的影响[J].中国果菜,2022,42(1):16-23.
[43] ELIK A, YANIK D K, GOGUS F. A comparative study of encapsulation of carotenoid enriched-flaxseed oil and flaxseed oil by spray freeze-drying and spray drying techniques[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021,143:111153.
[44] 姜甜,陆文伟,崔树茂,等.静电喷雾干燥微囊化乳双歧杆菌BL03[J].食品与发酵工业,2021,47(7):27-33.
[45] 陈莹.富含二十二碳六烯酸鱼油微胶囊的绿色酶法制备、体外消化及氧化稳定性研究[D].宁波:宁波大学,2020.

本文编辑:张 瑞