矿山安全生产影响因素分析与风险评价模型研究*

卢学专[1],朱明[2,3],王亚军[2,3],张海云[2,3]

(1.兰州有色冶金设计研究院有限公司, 甘肃 兰州 730099;
2.长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012;
3.国家金属采矿工程技术研究中心, 湖南 长沙 410012)

摘要:针对矿山安全生产影响因素较多、作用关系复杂和量化评估具有模糊性的特点,建立了基于DEMATEL-ISM-CM的影响因素分析与风险评价模型。首先,从人员、设备、环境、管理、技术5个维度,构建矿山安全生产风险评价指标体系;然后,集成DEMATEL-ISM法,识别关键影响因素,绘制多层递阶结构图,并根据影响因素的中心度计算指标权重值;最后,以湖南省某铅锌矿为研究背景,进行矿山安全生产风险等级评定。结果表明:工程地质条件、安全防护装置配备、开采工艺的先进性、安全生产投入、应急管理制度是影响矿山安全生产的关键因素,设备机械化程度、设备智能化水平为根本致因;基于评价综合云图,判定该矿山安全生产风险为较低等级(Ⅳ级),符合工程实际,验证了该模型的可靠性和适用性;多层递阶结构图能够明晰风险因素传递路径,可为矿山企业安全管理提供理论指导。

关键词:矿山安全;风险评价;DEMATEL-ISM;云模型;递阶结构

中图分类号:TD79 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)03-0198-09

Analysis of Influencing Factors of Mine Safety and Risk Assessment Model

LU Xuezhuan[1], *ZHU Ming*[2,3], *WANG Yajun*[2,3], *ZHANG Haiyun*[2,3]

(1.Lanzhou Engineering & Research Institute of Nonferrous Metallurgy Co., Ltd., Lanzhou, Gansu 730099, China;
2.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
3.National Engineering Research Center for Metal Mining, Changsha, Hunan 410012, China)

Abstract: Aiming at the characteristics of many influencing factors of mine safety production, complex interaction relationship and fuzzy quantitative evaluation, an influencing factor analysis and risk evaluation model based on DEMATEL-ISM-CM was established. Firstly, a risk evaluation index system for mine safety was constructed from five dimensions: personnel, equipment, environment, management and technology. Then, the DEMATEL-ISM method was applied to identify key influencing factors, the multi-layer hierarchical structure diagram was drawn, and the index weights were calculated according to the centrality of the influencing factors. Finally, a lead-zinc mine in Hunan Province was selected as a case study to assess its mine safety risk level. The results show that the key factors affecting mine safety include engineering geological conditions, safety protection equipment, advanced mining technology, safety production investment and emergency management system, and the degree of mechanization and intelligent level of equipment are the fundamental causes. Based on the comprehensive evaluation cloud diagram model, the safety production risk of the mine was classified as low (level Ⅳ), which is consistent with engineering practice and confirms the reliability and applicability of the model. The multi-layer hierarchical structure diagram can clarify the transmission path of risk factors and provide theoretical guidance for the safety management of mining enterprises.

Key words: Mine safety, Risk assessment, DEMATEL-ISM, Cloud model, Hierarchical structure

0 引言

地下金属矿山深部开采面临复杂的水文与工程地质条件,使得矿山安全生产事故频发[1-2]。因此,科学识别关键风险因素,合理开展安全风险评价,对于提升矿山企业安全管控能力具有重要的现实意义。

* **收稿日期**:2025-04-02
基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC2904001)
作者简介:卢学专(1977—),男,河南新野人,高级工程师,主要从事非煤矿山采矿、安全相关的研究及设计工作。E-mail:2081805857@qq.com
通信作者:张海云(1992—),男,湖南怀化人,硕士,工程师,主要从事金属矿山开采技术研究工作。E-mail:510213771@qq.com

目前,在矿山安全理论研究方面,胡建华等[3]研发了矿山安全分级评价与隐患排查治理的双控体系管理平台,提升了矿山安全管理智能化水平;朱必勇等[4]针对矿井通风系统安全评价的模糊性、随机性特点,运用G1法获取指标权重,引入了二元联系数统一处理定性、定量指标数据,提出了通风系统可靠性投影灰靶决策模型;王莉等[5]综合考虑了矿井火灾风险的多因素耦合性,建立了改进相互作用矩阵-模糊认知图的矿井火灾风险等级评价模型;景国勋等[6]从人、机、环、管等4个方面构建了瓦斯爆炸风险评价指标体系,提出了基于SPA-VFS的瓦斯爆炸风险综合评价模型;向韫[7]针对深井矿山岩爆应急管理能力评价的未知性特点,通过构建盲数矩阵量化定性指标数据,建立了岩爆应急管理能力评价可拓云模型。通过分析发现,现有的矿山安全生产风险评价的系统性、针对性并不充分,难以有效指导矿山安全生产实践。矿山安全生产评价是一个复杂的决策过程,影响因素之间具有交互性,因此,有必要准确识别关键指标因素,厘清指标因素之间的关系,开展系统性分析和评价,为矿山安全事故预防与研究提供科学的理论依据。

DEMATEL-ISM可以有效识别关键影响因素,分析研究指标因素间的相互作用关系,为复杂系统的科学决策提供理论参考[8-9]。刘艳彪等[10]应用DEMATEL-ISM法对采空区稳定性影响因素的相互作用关系进行了分析,并准确确定了采空区稳定性等级;赵天亮等[11]基于DEMATEL-ISM全面剖析了人因视角下的煤矿事故致因因素,可为煤矿事故预防提供技术支撑;马小林等[12]运用DEMATEL-ISM探究了煤矿企业安全管理主要影响因子,并提出了合理化建议。

鉴于此,本文在构建金属矿山安全生产风险评价指标体系基础上,引入DEMATEL-ISM法研究指标因素重要程度,确定指标因素间的相互作用关系,并利用云模型(CM)进行安全生产风险等级评价,建立了基于DEMATEL-ISM-CM的矿山安全生产风险因素分析与评价模型。最后,以湖南省某铅锌矿为研究背景进行实例分析,验证了该模型的有效性。

1 评价指标体系建立

金属矿山安全生产影响因素较多,评价指标体系复杂,在选取指标时,应兼顾客观、全面、可测、可估的原则。文献[13]从人员、设备、井下环境、安全管理4个方面,选取了28个影响因素,构建评价指标体系;文献[14]考虑了企业安全管理能力、员工安全水平、企业风险防控能力以及安全数智化水平4个方面,开展了金属矿山安全管控能力评价;文献[15]将安全技术应用确定为安全生产评价的重要部分,进一步丰富了评价指标体系。在参考相关文献与查阅矿业领域安全技术规范基础上,结合“人-机-环-管-技”5个方面归纳整理形成初步评价指标体系,包含21个风险因素;然后,邀请矿山安全领域专家并征求现场技术人员建议优化指标体系;最后,结合矿山安全事故发生特点和工程实际,确定矿山安全生产风险评价指标体系,见图1。

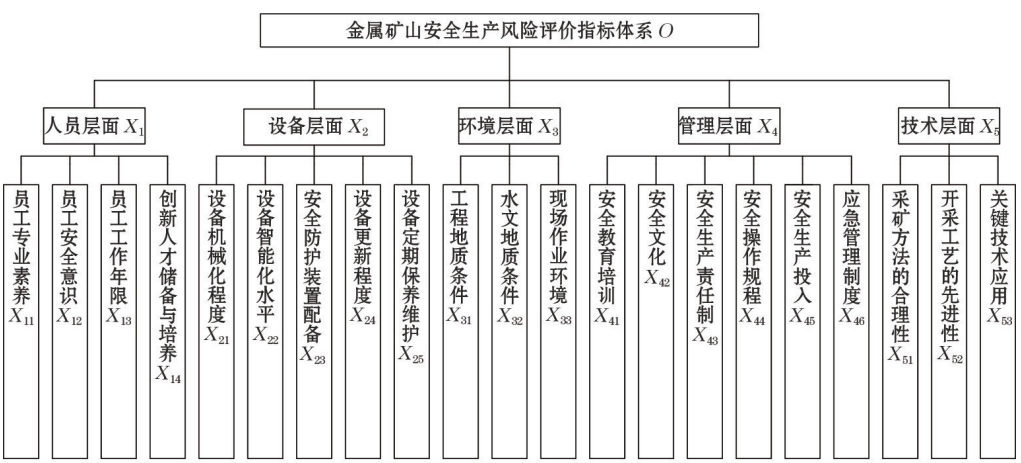


图1 矿山安全生产风险评价指标体系

Fig.1 Evaluation index system for mine safety production risks

2 理论基础

2.1 DEMATEL-ISM 法

DEMATEL-ISM 法具体计算过程如下[16]。

(1) 建立直接影响矩阵 $\boldsymbol{A}$。

经过专家讨论,基于 0～4 标度法为全体要素之间的相互作用程度进行赋值,建立直接影响矩阵 $\boldsymbol{A}$。

(2) 计算综合影响矩阵 $\boldsymbol{T}$。

利用行和最大值法规格化处理直接影响矩阵 $\boldsymbol{A}$,建立规范影响矩阵 $\boldsymbol{B}$。根据式(1),计算综合影响矩阵 $\boldsymbol{T}$。

$$\boldsymbol{T}=\boldsymbol{B}\frac{\boldsymbol{E}-\boldsymbol{B}^{n-1}}{\boldsymbol{E}-\boldsymbol{B}}=\boldsymbol{B}(\boldsymbol{E}-\boldsymbol{B})^{-1} \tag{1}$$

式中,$\boldsymbol{E}$ 为单位矩阵。

(3) 计算要素“四度”。

将综合影响矩阵 $\boldsymbol{T}$ 按行、按列求和,结果分别记为 F_i 和 H_i,分别表示指标因素的影响度和被影响度;然后,将指标因素 i 的影响度与被影响度求和,记为 M_i,代表指标因素的中心度;对影响度与被影响度求差,记为 N_i,代表指标因素的原因度。其中,中心度越大,表明该指标因素在整个评价体系中处于关键位置,对其他指标因素影响越大;当原因度 N_i 为正时,将因素列为原因类因素,即要素 i 对其他要素影响显著;当原因度 N_i 为负时,将因素列为结果类因素,即因素 i 受其他因素影响显著。

指标中心度可以表示该指标在评估体系的作用和位置,因此,对其进行归一化处理,并确定为指标因素的权重。

$$w_i=\frac{M_i}{\sum_{i=1}^{n}M_i} \tag{2}$$

式中:w_i 为指标因素权重值。

(4) 计算整体影响矩阵 $\boldsymbol{G}$ 和可达矩阵 $\boldsymbol{K}$。

按照式(3) 计算整体影响矩阵 $\boldsymbol{G}$[17-18]。

$$\boldsymbol{G}=\boldsymbol{T}+\boldsymbol{E} \tag{3}$$

引入阈值 λ[19],将整体影响矩阵 $\boldsymbol{G}$ 中影响作用相对较弱的关系路径予以剔除,转化为可达矩阵 $\boldsymbol{K}$,以进一步简化指标因素的关系层次结构,便于分析重要影响路径。

$$\boldsymbol{K}=[k_{ij}]=\begin{cases}1, & g_{ij}\geqslant\lambda\\ 0, & g_{ij}<\lambda\end{cases}(i,j=1,2,\cdots,n) \tag{4}$$

式中:λ 一般取综合影响矩阵 $\boldsymbol{T}$ 的均值 α 与标准差 β 之和;g_{ij} 为整体影响矩阵要素。

(5) 构建多层递阶结构图。

根据可达矩阵 $\boldsymbol{K}$,确定可达集 $R(x_i)$、先行集 $Q(x_i)$ 和共同集 $C(x_i)$。然后,采用优先抽取法获取不同指标要素的层级,并绘制多层递阶结构图。

2.2 云模型

云模型通过云发生器可以实现定性概念与定量数值之间的双向转换。云模型的数字特征一般用期望 Ex、熵 En、超熵 He 来表示,反映待评对象的整体特征[20]。云模型具体计算步骤如下。

(1) 构建评价标准云。根据指标分级标准,计算云的数字特征。

$$\begin{cases}Ex=\dfrac{Q_{\max}+Q_{\min}}{2}\\ En=\dfrac{Q_{\max}-Q_{\min}}{6}\\ He=k\end{cases} \tag{5}$$

式中:$Q_{\max}$、$Q_{\min}$ 分别表示指标分级标准的上限值与下限值;k 为常数,一般取 0.1。

(2) 计算指标云数字特征。基于逆向云算法,根据式(6),分别确定各指标因素的云数字特征。

$$\begin{cases}Ex_j=\dfrac{1}{q}\sum_{i=1}^{q}x_{ij}\\ En_j=\sqrt{\dfrac{2}{\pi}}\dfrac{1}{q}\sum_{i=1}^{q}\mid x_{ij}-Ex_j\mid\\ He_j=\sqrt{\mid S_j^2-En_j^2\mid}\\ S_j^2=\dfrac{1}{q-1}\sum_{i=1}^{q}(x_{ij}-Ex_j)^2\end{cases} \tag{6}$$

式中:Ex_j、En_j、He_j 表示第 j 个指标因素的云数字特征;q 表示待评对象个数;x_{ij} 表示第 x 个评价对象第 j 个指标的赋值;S_j^2 表示待评对象第 j 个指标样本数据方差。

(3) 计算综合云数字特征。根据式(7),计算待评对象综合云数字特征。

$$\begin{cases}Ex^*=\dfrac{\sum_{j=1}^{n}w_jEx_j}{\sum_{j=1}^{n}w_j}\\ En^*=\dfrac{\sum_{j=1}^{n}w_j^2En_j}{\sum_{j=1}^{n}w_j^2}\\ He^*=\dfrac{\sum_{j=1}^{n}w_j^2He_j}{\sum_{j=1}^{n}w_j^2}\end{cases} \tag{7}$$

式中,Ex^*、En^*、He^* 表示综合评价云的数字特征。

(4) 绘制云图。基于标准云数字特征和综合云数字特征,通过 MATLAB 软件编写程序代码,生成综合云图,并确定最终矿山安全生产风险等级。

基于 DEMATEL-ISM-CM 的金属矿山安全生产影响因素分析与风险等级评价实现过程见图 2。

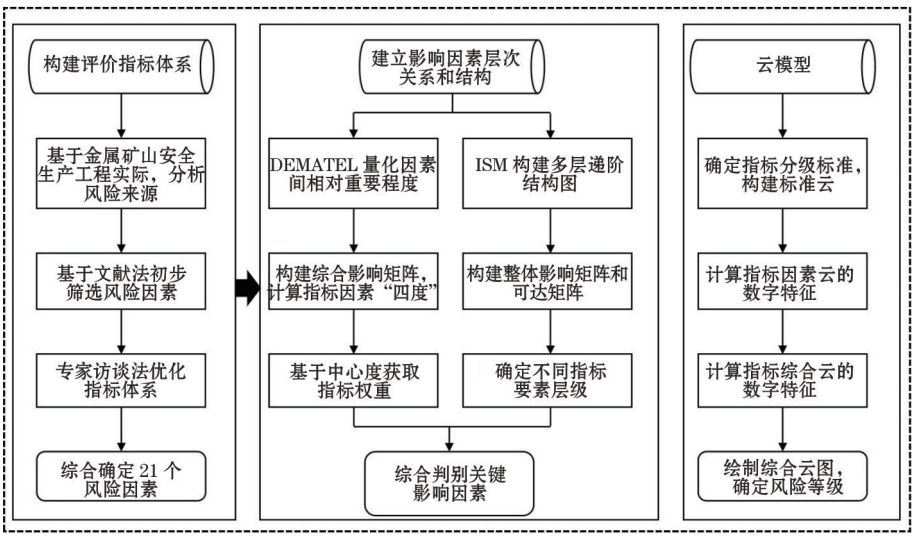


图 2 综合评价模型流程

Fig.2 Flow chart of comprehensive evaluation model

3 模型应用

以湖南省永州市某地下铅锌矿为研究背景,基于 DEMATEL-ISM 模型,分析各影响因素之间的相互作用关系,建立多层递阶结构图,进一步明晰直接致因、过渡致因及根本致因,识别安全生产关键影响因素,并基于云模型理论,确定该矿山安全生产风险等级。该矿建矿已 50 余年,采用平硐与盲斜井联合开拓方式,矿区内矿岩断裂、节理发育,生产条件相对复杂,在开采过程中存在潜在安全风险。因此,需要综合判定该矿安全生产的风险等级,以明确提升安全管控能力的方向和思路。

3.1 基于 DEMATEL-ISM 影响因素研究

3.1.1 DEMATEL 分析

为科学、全面地反映该矿山安全生产实际,组织了包括高校教授(3 名)、高级工程师(1 名)、现场管理人员(1 名)在内的 5 位长期从事安全生产理论研究与风险评估的专家,基于 0～4 标度法,讨论确定各指标因素之间的相互影响程度,建立直接影响矩阵 $\boldsymbol{A}$。根据式(1),计算综合影响矩阵 $\boldsymbol{T}$,结果见表 1。

表 1 综合影响矩阵计算结果

Table 1 Calculation results of comprehensive impact matrix

指标	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{21}	X_{22}	X_{23}	X_{24}	X_{25}	X_{31}	X_{53}
X_{11}	0.123 8	0.206 4	0.130 2	0.149 3	0.095 4	0.102 9	0.173 3	0.096 7	0.169 6	0.126 0	0.163 2
X_{12}	0.168 4	0.158 4	0.133 1	0.153 8	0.100 4	0.108 5	0.191 2	0.101 2	0.174 8	0.131 8	0.167 7
X_{13}	0.156 2	0.180 2	0.074 5	0.128 1	0.078 5	0.084 9	0.137 9	0.079 1	0.134 9	0.103 3	0.142 5
X_{14}	0.155 9	0.182 7	0.110 1	0.115 2	0.091 0	0.098 0	0.139 2	0.104 4	0.148 5	0.118 9	0.169 2
X_{21}	0.236 4	0.292 8	0.167 5	0.232 4	0.153 3	0.219 1	0.250 4	0.194 8	0.258 4	0.238 8	0.234 3
X_{22}	0.265 3	0.299 9	0.179 1	0.236 0	0.220 0	0.180 2	0.267 9	0.220 5	0.275 4	0.268 6	0.262 9
X_{23}	0.223 4	0.292 2	0.167 0	0.219 5	0.194 6	0.219 5	0.209 8	0.195 0	0.244 6	0.251 6	0.233 7
X_{24}	0.193 9	0.243 8	0.133 0	0.204 2	0.172 1	0.195 4	0.218 7	0.131 9	0.214 5	0.209 7	0.205 5
X_{25}	0.200 7	0.248 9	0.154 5	0.182 7	0.150 5	0.160 9	0.211 2	0.151 0	0.165 8	0.199 8	0.184 1
X_{31}	0.262 7	0.309 0	0.190 3	0.258 3	0.202 6	0.216 2	0.276 8	0.203 2	0.258 2	0.209 6	0.247 3
X_{53}	0.208 3	0.261 2	0.143 8	0.231 8	0.182 1	0.180 5	0.233 8	0.169 7	0.228 7	0.235 9	0.178 7

根据综合影响矩阵 $\boldsymbol{T}$,计算各指标因素“四度”, 结果见表 2。

表 2 基于 DEMATEL 法的指标因素“四度”计算结果

Table 2 “Four degree” calculation results of index factors based on DEMATEL method

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	因素属性
X_{11}	3.163 4	18	4.398 5	13	7.561 8	19	−1.235 1	结果因素
X_{12}	3.279 2	19	5.370 9	1	8.650 1	14	−2.091 8	结果因素
X_{13}	2.627 6	21	3.138 2	21	5.765 7	21	−0.510 6	结果因素
X_{14}	2.966 9	20	4.300 4	16	7.267 2	20	−1.333 5	结果因素
X_{21}	4.972 0	5	3.415 4	11	8.387 3	16	1.556 6	原因因素
X_{22}	5.377 1	1	3.696 0	18	9.073 1	9	1.681 2	原因因素
X_{23}	4.954 1	6	4.688 3	7	9.642 4	2	0.265 8	原因因素
X_{24}	4.223 9	15	3.429 3	20	7.653 3	18	0.794 6	原因因素
X_{25}	4.040 5	17	4.576 9	8	8.617 4	15	−0.536 4	结果因素
X_{31}	5.297 7	2	4.410 9	12	9.708 6	1	0.886 8	原因因素
X_{32}	4.630 7	7	3.687 5	19	8.318 1	17	0.943 2	原因因素
X_{33}	4.459 9	13	4.199 2	17	8.659 2	13	0.260 7	原因因素
X_{41}	4.598 6	8	4.358 5	14	8.957 1	10	0.240 1	原因因素
X_{42}	4.119 4	16	4.821 5	5	8.940 8	11	−0.702 1	结果因素
X_{43}	4.531 7	11	4.883 6	4	9.415 3	6	−0.351 9	结果因素
X_{44}	4.580 4	9	4.708 1	6	9.288 5	7	−0.127 7	结果因素
X_{45}	5.143 4	3	4.441 7	10	9.585 1	4	0.701 7	原因因素
X_{46}	4.470 1	12	4.969 9	2	9.439 9	5	−0.499 8	结果因素
X_{51}	4.243 5	14	4.935 7	3	9.179 2	8	−0.692 2	结果因素
X_{52}	5.060 4	4	4.545 8	9	9.606 2	3	0.514 5	原因因素
X_{53}	4.576 7	10	4.340 8	15	8.917 5	12	0.235 9	原因因素

(1) 中心度分析。由表 2 可知,在矿山安全生产评价指标体系中,中心度排名前五的指标因素依次为:工程地质条件(M=9.708 6)、安全防护装置配备(M=9.642 4)、开采工艺的先进性(M=9.606 2)、安全生产投入(M=9.585 1)、应急管理制度(M=9.439 9)。这 5 个指标因素是矿山安全生产关键风险因素,需要矿山重点关注。进一步分析发现,上述 5 个指标因素主要集中在环境层面、管理层面、设备层面和技术层面,因此,矿山要不断健全完善安全生产管理制度,严格落实安全生产责任制,加大现场监督检查力度;同时,做好通风、照明、降噪、除尘等基础性工作,持续改善井下作业环境,为员工提供舒适的工作条件;此外,还应加强开采关键环节技术攻关,不断优化采矿工艺流程,切实提升开采工作质效。

(2) 原因度分析。由表 2 可知,在 21 个指标因素中,原因类因素有 11 个,结果类因素有 10 个。排名前三的原因因素分别为:设备智能化水平(N=1.681 2)、设备机械化程度(N=1.556 6)、水文地质条件(N=0.943 2)。针对该类因素,矿山企业要不断加大安全生产投入,引进自动化与机械化程度更高的设备,保障矿山生产的安全性和高效性;同时,要加强水文地质勘察,完善水文地质资料,为矿山设计、施工和开采提供坚实支撑;排名前三的结果因素分别为:员工安全意识 X_3(N=−2.091 8)、创新人才储备与培养(N=−1.333 5)、员工专业素养(N=−1.235 1),主要集中在人员层面。对此,矿山企业要常态化开展安全生产教育培训和操作技能培训,提升员工安全生产意识和综合素质;同时,需加强创新人才储备,健全完善人才选拔、培养机制,为矿山技术革新与安全生产提供强有力的人才支持。

3.1.2 ISM 法分析

根据式(3),计算整体影响矩阵 $\boldsymbol{G}$,结果见表 3。根据综合影响矩阵 $\boldsymbol{T}$ 计算结果,可得其均值 α=0.207 1,标准差 β=0.046 5,则阈值 λ=0.253 6。根据式(4)计算可达矩阵 $\boldsymbol{K}$ 并据此确定指标因素层次结构,结果见表 4。最后,绘制多层递阶结构图,见图 3。

表 3 整体影响矩阵计算结果

Table 3 Calculation results of overall impact matrix

指标	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{21}	X_{22}	X_{23}	X_{24}	X_{25}	X_{31}	X_{53}
X_{11}	1.123 8	0.206 4	0.130 2	0.149 3	0.095 4	0.102 9	0.173 3	0.096 7	0.169 6	0.126 0	0.163 2
X_{12}	0.168 4	1.158 4	0.133 1	0.153 8	0.100 4	0.108 5	0.191 2	0.101 2	0.174 8	0.131 8	0.167 7
X_{13}	0.156 2	0.180 2	1.074 5	0.128 1	0.078 5	0.084 9	0.137 9	0.079 1	0.134 9	0.103 3	0.142 5
X_{14}	0.155 9	0.182 7	0.110 1	1.115 2	0.091 0	0.098 0	0.139 2	0.104 4	0.148 5	0.118 9	0.169 2

续表

指标	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{21}	X_{22}	X_{23}	X_{24}	X_{25}	X_{31}	X_{53}
X_{21}	0.236 4	0.292 8	0.167 5	0.232 4	1.153 3	0.219 1	0.250 4	0.194 8	0.258 4	0.238 8	0.234 3
X_{22}	0.265 3	0.299 9	0.179 1	0.236 0	0.220 0	1.180 2	0.267 9	0.220 5	0.275 4	0.268 6	0.262 9
X_{23}	0.223 4	0.292 2	0.167 0	0.219 5	0.194 6	0.219 5	1.209 8	0.195 0	0.244 6	0.251 6	0.233 7
X_{24}	0.193 9	0.243 8	0.133 0	0.204 2	0.172 1	0.195 4	0.218 7	1.131 9	0.214 5	0.209 7	0.205 5
X_{25}	0.200 7	0.248 9	0.154 5	0.182 7	0.150 5	0.160 9	0.211 2	0.151 0	1.165 8	0.199 8	0.184 1
X_{31}	0.262 7	0.309 0	0.190 3	0.258 3	0.202 6	0.216 2	0.276 8	0.203 2	0.258 2	1.209 6	0.247 3
X_{53}	0.208 3	0.261 2	0.143 8	0.231 8	0.182 1	0.180 5	0.233 8	0.169 7	0.228 7	0.235 9	1.178 7

表 4　指标因素层次结构

Table 4　Hierarchy of index factors

因素(X_i)	可达集合 $R(x_i)$	先行集合 $Q(x_i)$	共同集 $C(x_i)$
X_{11}	X_{11}	X_{11}，X_{22}，X_{31}	X_{11}
X_{12}	X_{12}	X_{12}，X_{21}，X_{22}，X_{23}，X_{31}，X_{32}，X_{33}，X_{41}，X_{43}，X_{44}，X_{45}，X_{46}，X_{51}，X_{52}，X_{53}	X_{12}
X_{13}	X_{13}	X_{13}	X_{13}
X_{14}	X_{14}	X_{14}，X_{31}	X_{14}
X_{21}	X_{12}，X_{21}，X_{25}，X_{42}，X_{43}，X_{44}，X_{46}，X_{51}，X_{52}	X_{21}	X_{21}
X_{22}	X_{11}，X_{12}，X_{22}，X_{23}，X_{25}，X_{31}，X_{41}，X_{42}，X_{43}，X_{44}，X_{45}，X_{46}，X_{51}，X_{52}，X_{53}	X_{22}	X_{22}
X_{23}	X_{12}，X_{23}，X_{42}，X_{43}，X_{46}，X_{51}，X_{52}	X_{22}，X_{23}，X_{31}，X_{45}，X_{52}	X_{23}，X_{52}
X_{24}	X_{24}	X_{24}	X_{24}
X_{25}	X_{25}	X_{21}，X_{22}，X_{25}，X_{31}，X_{45}	X_{25}
X_{31}	X_{11}，X_{12}，X_{14}，X_{23}，X_{25}，X_{31}，X_{41}，X_{42}，X_{43}，X_{44}，X_{45}，X_{46}，X_{51}，X_{52}	X_{22}，X_{31}，X_{45}，X_{52}	X_{31}，X_{45}，X_{52}
X_{32}	X_{12}，X_{32}，X_{51}	X_{32}	X_{32}
X_{33}	X_{12}，X_{33}	X_{33}	X_{33}
X_{41}	X_{12}，X_{41}，X_{46}	X_{22}，X_{31}，X_{41}，X_{45}	X_{41}
X_{42}	X_{42}	X_{21}，X_{22}，X_{23}，X_{31}，X_{42}，X_{45}，X_{52}	X_{42}
X_{43}	X_{12}，X_{43}，X_{46}	X_{21}，X_{22}，X_{23}，X_{31}，X_{43}，X_{44}，X_{45}，X_{52}	X_{43}
X_{44}	X_{12}，X_{43}，X_{44}	X_{21}，X_{22}，X_{31}，X_{44}，X_{45}，X_{52}	X_{44}
X_{45}	X_{12}，X_{23}，X_{25}，X_{31}，X_{41}，X_{42}，X_{43}，X_{44}，X_{45}，X_{46}，X_{51}	X_{22}，X_{31}，X_{45}，X_{52}	X_{31}，X_{45}
X_{46}	X_{12}，X_{46}	X_{21}，X_{22}，X_{23}，X_{31}，X_{41}，X_{43}，X_{45}，X_{46}，X_{52}	X_{46}
X_{51}	X_{12}，X_{51}	X_{21}，X_{22}，X_{23}，X_{31}，X_{32}，X_{45}，X_{51}，X_{52}，X_{53}	X_{51}
X_{52}	X_{12}，X_{23}，X_{31}，X_{42}，X_{43}，X_{44}，X_{45}，X_{46}，X_{51}，X_{52}	X_{21}，X_{22}，X_{23}，X_{31}，X_{52}	X_{23}，X_{31}，X_{52}
X_{53}	X_{12}，X_{51}，X_{53}	X_{22}，X_{53}	X_{53}

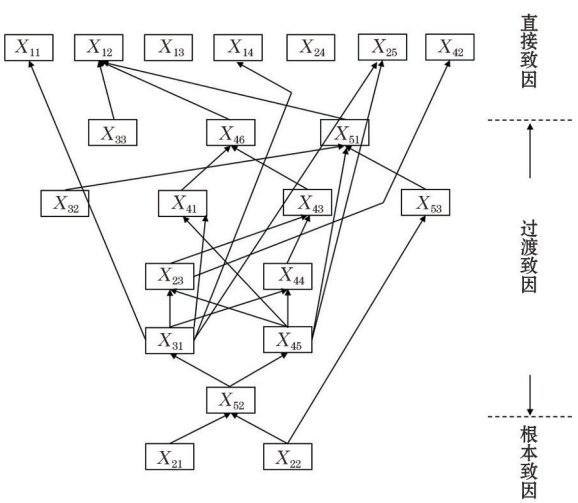


图 3　指标因素多层递阶结构图

Fig.3　Multi level hierarchical structure diagram of index factors

矿山安全生产风险影响因素可以划分为直接致因层、过渡致因层和根本致因层。由图 3 可知，直接致因层包括员工专业素养(X_{11})、员工安全意识(X_{12})、员工工作年限(X_{13})、创新人才储备与培养(X_{14})、设备更新程度(X_{24})、设备定期保养维护(X_{25})、安全文化(X_{42})，这些因素直接影响矿山安全生产状况。因此，矿山企业要注重开展技能培训，常态化实施设备维修保养，进一步营造安全文化氛围，提升员工安全作业意识。

过渡致因层包括现场作业环境(X_{33})、应急管理制度(X_{46})、采矿方法的合理性(X_{51})、水文地质条件(X_{32})、安全教育培训(X_{41})、安全生产责任制(X_{43})、关键技术应用(X_{53})、安全防护装置配备(X_{23})、安全操作规程(X_{44})、工程地质条件(X_{31})、安全生产投入(X_{45})、开采工艺的先进性(X_{52})。其中，管理层面因素居多，表明该矿山需持续加强安全

管理,否则各因素通过传导作用引发连锁反应,将引发较大的安全生产风险。

根本致因层包括设备机械化程度(X_{21})、设备智能化水平(X_{22}),对矿山安全生产体系起到驱动或制约作用。

3.2 指标权重

根据式(2)对指标因素的中心度进行归一化处理,获取各指标因素的权重值,具体结果见表5。

表5 指标因素权重计算结果

Table 5 Calculation results of the weight of index factors

X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{21}	X_{22}	X_{23}
0.041 4	0.047 4	0.031 6	0.039 8	0.045 9	0.049 7	0.052 8
X_{24}	X_{25}	X_{31}	X_{32}	X_{33}	X_{41}	X_{42}
0.041 9	0.047 2	0.053 2	0.045 5	0.047 4	0.049 0	0.049 0
X_{43}	X_{44}	X_{45}	X_{46}	X_{51}	X_{52}	X_{53}
0.051 6	0.050 9	0.052 5	0.051 7	0.050 3	0.052 6	0.048 8

由表5可知,权重值排名前五的指标因素分别为:工程地质条件(w=0.053 2)、安全防护装置配备(w=0.052 8)、开采工艺的先进性(w=0.052 6)、安全生产投入(w=0.052 5)、应急管理制度(w=0.051 7)。根据DEMATEL-ISM法计算结果,上述5个指标均为过渡致因层因素,这些因素既会受到根本致因层指标因素影响,同时基于指标因素间作用关系的传递属性,会对过渡致因层其他指标因素和直接致因层指标因素产生显著影响,因此其权重值相对较大。相比之下,员工工作年限(w=0.031 6)等指标属于直接致因层因素,在矿山安全生产实践过程中,波动较小,影响相对稳定,因此权重值较低。总体来看,指标权重计算结果与DEMATEL-ISM分析结果保持了较好的一致性。

3.3 风险等级确定

3.3.1 确定标准云数字特征

参考以往关于矿山安全生产风险评价的研究成果,将矿山安全生产风险划分为5个等级,并确定指标分级标准。同时,根据式(5)计算标准云数字特征,结果见表6。

表6 矿山安全生产风险等级及标准云的数字特征

Table 6 The risk level of mine safety production and digital characteristics of standard cloud

评价等级	等级区间	标准云数字特征
高风险(Ⅰ级)	[0, 60)	(30.0, 10.0, 0.01)
较高风险(Ⅱ级)	[60, 70)	(65.0, 1.667, 0.01)
一般风险(Ⅲ级)	[70, 80)	(75.0, 1.667, 0.01)
较低风险(Ⅳ级)	[80, 90)	(85.0, 1.667, 0.01)
低风险(Ⅴ级)	[90, 100]	(95.0, 1.667, 0.01)

3.3.2 基于云模型的风险等级分析

根据矿山生产实际,组织专家结合指标分级标准对各指标因素进行赋值。在此基础上计算评价对象指标云的数字特征,结果见表7。

表7 专家打分情况及指标云数字特征

Table 7 Expert scoring and digital characteristics of index cloud

指标	专家Z_1	专家Z_2	专家Z_3	专家Z_4	专家Z_5	指标云数字特征
X_{11}	73	81	84	77	79	(78.8,3.810,1.638)
X_{12}	78	84	89	93	86	(86.0,5.013,2.523)
X_{13}	82	87	84	89	92	(86.8,3.810,1.088)
X_{14}	83	87	92	89	93	(88.8,3.810,1.297)
X_{21}	94	93	89	92	88	(91.2,2.707,0.793)
X_{22}	87	89	87	94	84	(88.2,3.309,1.659)
X_{23}	83	81	89	87	89	(85.8,3.810,1.147)
X_{24}	89	93	87	92	95	(91.2,3.208,0.307)
X_{25}	78	75	83	79	73	(77.6,3.610,1.331)
X_{31}	76	82	85	78	84	(81.0,4.011,1.024)
X_{32}	83	89	87	92	93	(88.8,3.810,1.297)
X_{33}	77	73	72	75	73	(74.0,2.005,0.146)
X_{41}	74	77	83	79	82	(79.0,3.509,1.089)
X_{42}	75	72	79	74	78	(75.6,2.908,0.393)
X_{43}	83	81	78	88	86	(83.2,3.810,1.088)
X_{44}	85	83	87	82	88	(85.0,2.507,0.466)
X_{45}	74	79	73	76	74	(75.2,2.306,0.618)
X_{46}	86	83	78	89	92	(85.6,5.114,1.775)
X_{51}	79	78	78	83	82	(80.0,2.507,0.885)
X_{52}	83	86	84	78	85	(83.2,2.707,1.540)
X_{53}	82	85	89	84	78	(83.6,3.610,1.809)

根据式(7),计算综合评价云数字特征(Ex^*,En^*,He^*)=(83.089,3.504,1.410),生成相应的评价综合云图,如图4所示。

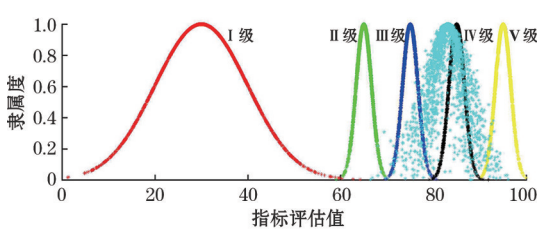


图4 评价综合云图

Fig.4 Evaluation comprehensive cloud chart

由图4可知,标准云风险等级从左向右依次为高风险(Ⅰ级)、较高风险(Ⅱ级)、一般风险(Ⅲ级)、较低风险(Ⅳ级)和低风险(Ⅴ级),综合云云滴主要集中在Ex^*=83.089,与较低风险(Ⅳ级)接近。因此,可以判定该矿山安全生产风险等级为较低风险(Ⅳ级),与专家现场调研情况相符。上述结果表明,基于DEMATEL-ISM-CM的综合评价模型在矿山

安全生产风险评价中具有良好的适用性和可行性,可为矿山企业安全管理提供理论依据和决策参考。

4 结论

(1) 在构建矿山安全生产风险评价指标体系基础上,结合某铅锌矿工程实际,应用 DEMATEL-ISM 法,识别关键风险因素并建立多层递阶结构图。结果显示:工程地质条件、安全防护装置配备、开采工艺的先进性、安全生产投入、应急管理制度是影响矿山安全生产的关键因素;设备机械化程度、设备智能化水平为根本致因因素;员工工作年限等为直接致因因素,在矿山安全生产实践过程中影响较小。

(2) 针对矿山安全生产评价存在的模糊性、随机性和复杂性特点,引入云模型进行矿山安全生产风险等级评价。结果显示,该矿山安全生产风险等级为较低风险(Ⅳ级),与实际情况和专家调研结果相符,验证了基于 DEMATEL-ISM-CM 的综合评价模型在矿山安全生产风险评价中具有良好的适用性和可行性。

(3) 通过集成 DEMATEL-ISM 法构建递阶结构图,可以清楚了解风险因素之间的传递路径,为后续系统提升矿山生产安全管理提供理论支撑;同时,基于 DEMATEL 法计算指标中心度进而获取指标权重值,考虑了各指标因素间的相互作用关系,权重分配结果更加合理可靠,增强了评估结果的科学性。当前,矿山安全生产风险评价理论体系研究仍不完善,后续研究应进一步丰富和优化指标因素体系,提升综合评价模型的实用性和推广价值。

参考文献(References):

[1] 李夕兵,黄麟淇,周健,等.硬岩矿山开采技术回顾与展望[J].中国有色金属学报,2019,29(9):1828-1847.
LI Xibing, HUANG Linqi, ZHOU Jian, et al. Review and prospect of mining technology in hard rock mines[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(9): 1828-1847.

[2] 张家林,杨帆,张望,等.深部资源开采创新成效分析与思考[J].采矿与安全工程学报,2024,41(3):450-461.
ZHANG Jialin, YANG Fan, ZHANG Wang, et al. Innovation effectiveness analysis and technology managemnet reflection of deep resource exploitation[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2024,41(3):450-461.

[3] 胡建华,吴友楠,马凤成,等.矿山安全双控预防性机制信息化平台设计与实现[J].黄金科学技术,2024,32(6):1116-1129.
HU Jianhua, WU Younan, MA Fengcheng, et al. Design and application of information platform for mine safety based on dual control preventive mechanism[J]. Gold Science and Technology,2024,32(6):1116-1129.

[4] 朱必勇,费汉强,史键波.地下金属矿山通风系统可靠性评价模型研究[J].矿业研究与开发,2023,43(11):122-128.
ZHU Biyong, FEI Hanqiang, SHI Jianbo. Research on reliability evaluation model of ventilation system in underground metal mines[J]. Mining Research and Development, 2023, 43(11):122-128.

[5] 王莉,胡一,王涛,等.基于改进相互作用矩阵-模糊认知图的矿井火灾风险评价[J].科学技术与工程,2023,23(13):5812-5818.
WANG Li, HU Yi, WANG Tao, et al. Mine fire risk assessment based on improved interaction matrix and fuzzy cognitive map[J]. Science Technology & Engineering,2023,23(13):5812-5818.

[6] 景国勋,陈纪宏.基于 SPA-VFS 耦合模型的瓦斯爆炸风险评价[J].安全与环境学报,2023,23(7):2151-2158.
JING Guoxun, CHEN Jihong. Risk assessment of gas explosion based on SPA-VFS coupling model[J]. Journal of Safety and Environment,2023,23(7):2151-2158.

[7] 向韫.基于 PPRR 理论的岩爆应急管理能力评估模型研究[J].矿业研究与开发,2024,44(4):185-194.
XIANG Yun. Evaluation model of rockburst emergence management capability based on PPRR theory[J]. Mining Research and Development,2024,44(4):185-194.

[8] 郭慧敏,成连华,李树刚.基于 DEMATEL-ISM-MICMAC 的煤矿瓦斯爆炸致因研究[J].矿业安全与环保,2023,50(2):114-119.
GUO Huimin, CHENG Lianhua, LI Shugang. Research on causal factors of coal mine gas explosion based on DEMATEL-ISM-MICMAC[J]. Mining Safety and Environmental Protection,2023,50(2):114-119.

[9] 张振华,杜兆文,陈学华.基于 DEMATEL-ISM 的深部矿山充填管道磨损风险影响因素分析[J].矿业研究与开发,2025,45(2):9-16.
ZHANG Zhenhua, DU Zhaowen, CHEN Xuehua. Analysis on influencing factors of filling pipelines wearing in deep mine based on DEMATEL-ISM[J]. Mining Research and Development,2025,45(2):9-16.

[10] 刘艳彪,刘子涵,王瑞强,等.基于 DEMATEL-ISM 的采空区稳定性模糊评价[J].黄金科学技术,2025,33(1):149-158.
LIU Yanbiao, LIU Zihan, WANG Ruiqiang, et al. Fuzzy evaluation of goaf stability based on DEMATEL-ISM[J]. Gold Science and Technology,2025,33(1):149-158.

[11] 赵天亮,王冰山,台发强,等.基于改进 DEMATEL-ISM-BN 的人因视角下煤矿事故致因研究[J].安全与环境工程,2025,32(1):91-99+117.
ZHAO Tianliang, WANG Bingshan, TAI Faqiang, et al. Study on the causes of coal mine accidents from a human cause perspective based on improved DEMATEL-ISM-BN[J]. Safety and Environmental Engineering,2025,32(1):91-99+117.

[12] 马小林,许素睿,吴兵.集成 DEMATEL/ISM 的煤矿企业安全管理影响因子研究[J].中国煤炭,2017,43(12):146-150.

MA Xiaolin, XU Surui, WU Bing. DEMATEL and ISM-based on study on factors influencing safety management of coal mine enterprises[J].China Coal,2017,43(12):146-150.

[13] 楚明辉,许开立,徐晓虎,等.基于博弈论组合赋权云模型的地下黄金矿山安全风险评价[J].中国矿业,2024,33(11):212-220.
CHU Minghui, XU Kaili, XU Xiaohu, et al. Safety risk assessment of underground gold mine based on cloud model with combination weighting of game theory[J].China Mining Magazine,2024,33(11):212-220.

[14] 高运超,李宏伟,鲍乾,等.基于模糊 DEMATEL-ISM 的矿山企业安全生产系统关键影响因素研究[J].煤炭技术,2024,43(10):198-202.
GAO Yunchao, LI Hongwei, BAO Qian, et al. Research on key influencing factors of safety production system in mining enterprises based on fuzzy DEMATEL-ISM [J]. Coal Technology,2024,43(10):198-202.

[15] 李筱,许钧,张成旭,等.基于 CWM-TOPSIS 模型的金属矿山企业安全管控能力评价[J].黄金科学技术,2024,32(1):100-108.
LI Xiao,XU Jun, ZHANG Chengxu, et al. Evaluation of safety control capacity of metal mining enterprises based on CWM-TOPSIS model[J]. Gold Science and Technology, 2024,32(1):100-108.

[16] 张洋杰,周瑶.基于集成 DEMATEL-ISM 方法的煤矿运输事故致因因素分析与评价[J].中国煤炭,2024,50(10):40-47.
ZHANG Yangjie, ZHOU Yao. Analysis and evaluation of causal factors of coal mine etransportation accidents based on integrated DEMATEL-ISM[J]. China Coal, 2024, 50(10):40-47.

[17] 姜安民,张道兵,王飞飞,等.煤瓦斯隧道施工爆炸风险事故致因机理与推演模型研究[J].安全与环境学报,2025,25(2):476-487.
JIANG Anmin, ZHANG Daobing, WANG Feifei, et al. Investigation into the causal mechanisms and deduction model for explosion risks in coal and gas tunnel construction [J]. Journal of Safety and Environment, 2025, 25(2): 476-487.

[18] 孙中博,赵毅鑫,任建东.废弃矿井地下空间再利用根源因素识别及评价模型构建[J].中国矿业大学学报,2024,53(3):585-599+612.
SUN Zhongbo, ZHAO Yinxin, REN Jiandong. Identification of fundamental factors and construction of evaluation model for the utilization of underground space in abandoned mines[J].Journal of China University of Mining & Technology,2024,53(3):585-599+612.

[19] 潘讯速,刘文昌.基于 DEMATEL-ISM 模型的装配式建筑成本影响因素研究[J].辽宁工业大学学报(社会科学版),2023,25(4):37-43.
PAN Xunsu, LIU Wenchang. Research on factors influencing the cost of prefabricated buildings based on DEMATEL-ISM model[J].Journal of Liaoning University of Technology(Social Science Edition),2023,25(4):37-43.

[20] 苏晓娅,秦林波,韩军,等.基于组合赋权法-云模型的 LNG 化工厂安全评价[J].科学技术与工程,2025,25(7):3071-3077.
SU Xiaoya, QIN Linbo, HAN Jun, et al. Safety evaluation of LNG chemical plants based on combination weighting method and cloud model [J]. Science Technology and Engineering,2025,25(7):3071-3077.