基于 Grey-DEMATEL-ISM-MICMAC 的金属矿山开采安全影响因素系统分析*

滕杰田[1]，王宝亮[1]，杨家宁[2]，张照浩[3]，张海云[4,5]

（1.招金有色矿业有限公司， 山东 招远市 265400；
2.贵州兴达矿业有限责任公司， 贵州 黔东南苗族侗族自治州 556000；
3.招金矿业股份有限公司大尹格庄金矿， 山东 招远市 265400；
4.长沙矿山研究院有限责任公司， 湖南 长沙 410012；
5.国家金属采矿工程技术研究中心， 湖南 长沙 410012）

摘要：为精准识别地下金属矿山开采安全的关键影响因素，厘清各影响因素的内在作用逻辑，构建了基于 Grey-DEMATEL-ISM-MICMAC 的矿山开采安全影响因素集成分析模型。通过文献归纳与案例分析，从人员、设备、环境、管理、技术 5 个维度，筛选确定了 17 项影响因素；运用 Grey-DEMATEL 法量化分析各因素的重要程度，结合 ISM 法构建多级递阶层次结构模型，揭示因素间的相互作用关系；最后运用 MICMAC 法分析因素的属性特征。研究结果表明，17 个影响因素可划分为 6 个层级、3 种类型；员工培训及教育、安全生产管理制度、安全隐患排查治理、开采工艺合理性是矿山开采安全的核心影响因素，具有高驱动、低依赖特性；安全防护装置可靠性、设备日常更新维护、环境危险源控制、作业环境条件、关键技术应用、技术创新为直接影响因素，呈现高依赖特征；对此，结合工程实际情况，提出了以管理体系现代化、实用化为牵引，以人员素养综合提升为核心，以作业环境改善为基础，以技术装备升级为支撑的针对性优化措施。研究结果可为提升矿山安全管理水平提供理论依据与决策参考。

关键词：矿山开采安全；Grey-DEMATEL-ISM-MICMAC 集成模型；影响因素分析；优化措施

中图分类号：TD853 **文献标识码**：A **文章编号**：1005-2763(2026)08-0132-11

Systematic Analysis of Factors Influencing Mining Safety in Metal Mines Based on Grey-DEMATEL-ISM-MICMAC

Teng Jietian[1], *Wang Baoliang*[1], *Yang Jianing*[2], *Zhang Zhaohao*[3], *Zhang Haiyun*[4,5]

(1.Zhaojin Nonferrous Metal Mining Co., Ltd., Zhaoyuan, Shandong 265400, China;
2.Guizhou Xingda Mining Co., Ltd., Qiandongnan Miao and Dong Autonomous Prefecture, Guizhou 556000, China;
3.Dayingezhuang Gold Mine, Zhaojin Mining Industry Co., Ltd., Zhaoyuan, Shandong 265400, China;
4.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
5.National Engineering Research Center for Metal Mining, Changsha, Hunan 410012, China)

Abstract: To accurately identify the key factors influencing the mining safety of underground metal mines and clarify the internal interaction logic among the influencing factors, an integrated analysis model for factors affecting mine mining safety based on Grey-DEMATEL-ISM-MICMAC was constructed. Through literature review and case analysis, 17 influencing factors were screened and identified from five dimensions: personnel, equipment, environment, management and technology. The Grey-DEMATEL method was employed to quantitatively analyze the importance of each factor. Combined with the ISM method, a multi-level hierarchical structure model was constructed to reveal the interrelationships among the factors. Finally, the MICMAC method was used to analyze the attribute characteristics of the factors. The research results indicate that the 17 influencing factors can be divided into 6 levels and 3 types. Employee training and education, safety production management system, safety hazard identification and rectification, and rationality of mining technology are the core influencing factors of mine mining safety, possessing characteristics of high driving force and low dependency. The reliability of safety protection devices, daily equipment renewal and maintenance, environmental hazard source control, working environment conditions, key

* **收稿日期**：2026-02-03
基金项目：国家重点研发计划资助项目(2022YFC2905102)
作者简介：滕杰田(1977—)，男，山东招远人，高级经济师，主要从事采矿工程与地质环境研究工作。E-mail:349237251@qq.com

technology application, and technological innovation are direct influencing factors, exhibiting high dependency characteristics. In response, combined with the actual engineering situation, targeted optimization measures are proposed, guided by the modernization and practicability of the management system, centered on the comprehensive improvement of personnel quality, based on the improvement of the working environment, and supported by the upgrading of technical equipment. The research results can provide theoretical basis and decision-making reference for enhancing the level of mine safety management.

Key words: Mine mining safety, Grey-DEMATEL-ISM-MICMAC integrated model, Influencing factor analysis, Optimization measure

0 引言

随着金属矿山开采逐步向深部延伸,水文地质条件与开采环境日趋复杂,矿山安全生产面临着多重挑战[1-2]。深部矿山开采的安全影响因素繁杂,强化风险因素的精准识别与分级管控,可有效防范和遏制重大安全生产事故,对保障地下金属矿山安全、高效、可持续开采具有重要的现实意义[3]。

在矿山开采安全理论研究领域,毛亚军等[4]基于 WSR 法筛选了硫化矿石自燃事故影响因素,采用决策试验和评价实验室法(Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory, DEMATEL)分析了各影响因素之间的相互关系,识别了矿石自燃事故的关键致因,为提高矿山开采安全性提供了理论支撑。陈铁华等[5]为深入探究矿长安全意识的影响因素与作用路径,通过文献调研与问卷调查的方法确定了安全意识影响指标,运用解释结构模型分析出了 4 个层级与 4 条影响路径。裴子平等[6]针对煤矿工人安全意识影响因素开展分析研究,发现安全设施状况与安全制度是影响员工安全意识最本质的影响因素,并提出了针对性建议。陈铁华等[7]运用文献法、专家访谈法、归纳法系统构建了煤矿安全管理执行力的评价指标体系,并引入结构方程模型测算了各影响因素间的标准化路径系数,证实了安全监督机制等 6 个指标因素对安全管理执行力的影响显著,为提升矿山安全管理执行力提供了理论参考。王海涛[8]采用结构方程模型对煤炭安全投入影响因素进行了定量研究。成连华等[9]在系统总结煤矿安全生产影响因素的基础上,通过结构解释模型分析了各影响因素的因果关系路径,指出人的不安全行为是影响矿山安全生产的核心因素。上述研究成果为矿山安全管理提供了一定的理论依据,而矿山开采安全是典型的复杂系统工程,影响因素众多,且存在强关联性,需从复杂系统视角开展系统化、全维度的影响因素分析,以此为矿山事故预防提供坚实的理论基础。

DEMATEL 基于矩阵理论,通过计算各因素的中心度和原因度,可准确识别关键影响因素,明确各指标因素在复杂系统中的地位和作用,在影响因素关系相互交织、作用机制不明的复杂问题处理方面具有显著优势[10-11];解释结构模型(Interpretative Structural Modeling, ISM)通过与 DEMATEL 联用,可构建影响因素的多层递阶结构模型,可视化展现各影响因素之间的具体作用路径,为复杂问题的改善优化提供决策方向[12];交叉影响矩阵相乘法(Matrices Impacts Croises-Multiplication Appliance, Classement, MICMAC)通过矩阵运算,得到各指标因素的驱动力与依赖度值,可深度剖析影响因素的本质属性,助力核心指标的精准识别[13]。

DEMATEL-ISM-MICMAC 集成模型可充分发挥模型自身优势和算法上的优势互补效应,系统分析各影响因素的重要性和本质属性,明确指标因素的层级结构,为复杂性问题的分析处理提供了全新的研究思路。郭慧敏等[14]应用该集成模型开展了煤矿瓦斯爆炸致因分析。边璐等[15]运用 DEMATEL-ISM-MICMAC 模型对城市地下综合管廊建设期风险因素进行研究。刘永国[16]基于 DEMATEL-ISM-MICMAC 模型研究了装配式建筑减排路径,取得了良好的应用效果,证实了集成模型在影响因素识别与分析领域的突出优势与适用性。但该模型目前在矿山开采安全影响因素系统分析研究方面尚无应用。

鉴于此,本研究将 DEMATEL-ISM-MICMAC 集成模型引入到矿山开采安全影响因素分析中,基于文献归纳法与典型事故案例分析法,筛选矿山开采安全影响因素,精准识别关键核心因素,明晰各指标因素的层级关系与属性特征,揭示各指标因素对矿山开采安全的影响,以期为矿山安全管理水平的提升提供理论指导。

1 影响因素体系

地下金属矿山开采安全受多维度因素的综合作用,本文采用文献归纳法与典型事故案例分析法开展影响因素识别。影响因素识别遵循全面性、系统性、科学性、典型性、代表性5项原则[17-18]。首先,以“矿山安全评价模型”“矿山安全影响因素”等为关键词,借助中国知网、Web of Science等数据库进行检索,获取相关学术研究文献资源,梳理矿山开采安全影响因素信息,通过去重、比较和合并,初步构建系统完善的影响因素体系框架;其次,结合近年金属矿山开采安全事故案例,深入挖掘事故背后的影响因素,对初步指标体系的构建进行完善补充,保证影响因素的工程适用性;最后,邀请矿山相关领域的专家和现场技术人员对影响因素指标体系进行论证,结合现行矿山安全规范,从人员、设备、技术、管理和环境5个方面,构建地下金属矿山开采安全影响因素集合,见表1。

表1 矿山开采安全影响因素

Table 1 Influencing factors of mine mining safety

一级影响因素	二级影响因素	影响因素编号
人员因素	员工培训及教育	X_1
	安全生产意识与态度	X_2
	操作规范性	X_3
	员工身心健康状况	X_4
设备因素	设备适应性与自动化水平	X_5
	安全防护装置可靠性	X_6
	设备日常更新维护	X_7
环境因素	环境危险源控制	X_8
	作业环境条件	X_9
管理因素	安全生产管理制度	X_{10}
	安全文化氛围	X_{11}
	安全生产投入	X_{12}
	事故应急能力	X_{13}
	安全隐患排查治理	X_{14}
技术因素	开采工艺合理性	X_{15}
	关键技术应用	X_{16}
	技术创新	X_{17}

2 评估模型构建

2.1 Grey-DEMATEL模型

DEMATEL法依托专家主观经验与矩阵理论,可量化测算各指标因素在整个评估体系中的重要程度,并通过有向图形式直观展现指标因素之间的关联性,为明确复杂系统中各影响因素的因果关系提供了简洁、高效的方法。但DEMATEL法在计算过程中,过分依赖专家主观判断,使各影响因素评估结果具有一定的模糊性和不确定性。灰色系统理论可通过少量、有限信息进行收集处理,筛选出重要信息,在处理“信息少”“样本量少”等问题方面表现突出,能够有效减轻专家打分的主观偏差,提升数据结果的客观性。将灰数理论和决策试验与评价实验室法相结合得到Grey-DEMATEL,基于模糊语义变量扩展传统的DEMATEL法,可有效避免专家打分的盲目性,利用较少的数据信息,获得更为可靠的评估结果。Grey-DEMATEL法的具体实施步骤如下[19]。

(1) 构建直接影响矩阵$\boldsymbol{O}$。邀请m位矿山安全评估领域的专家学者与现场安全管理人员,参照灰数理论方法,采用Likert 5级量表对矿山开采安全影响因素进行两两比较,即专家采用0,1,2,3,4共5个判断语义变量,描述不同指标因素之间的相互影响程度,分别代表指标X_i对指标X_j无影响、影响程度较小、影响程度一般、影响程度较大、影响程度极大。为此构建直接影响矩阵$\boldsymbol{O}$。

(2) 建立区间灰数的直接影响矩阵。根据专家两两指标因素的相互影响程度(见表2),将专家语义变量信息转换为灰数矩阵。在影响因素相互影响程度区间灰数赋值过程中,考虑到专家组成员的认知水平差异对评分可靠性的影响,引入不同专家的权重值,表征和量化专家对评价对象做出准确判断的权威性。专家权威性量化标准见表3。

表2 专家评估语义变量

Table 2 Semantic variables evaluated by experts

数值	语义变量	区间灰数
0	无影响	[0,0]
1	影响程度较小	(0,0.25]
2	影响程度一般	(0.25,0.50]
3	影响程度较大	(0.50,0.75]
4	影响程度极大	(0.75,1.00]

表3 专家权威性量化标准

Table 3 Quantitative criteria of expert authority

语义变量	区间灰数
影响力较小	[0,0.30]
影响力一般	(0.30,0.50]
权威	(0.40,0.70]
较权威	(0.50,0.90]
非常权威	(0.70,1.00]

(3) 灰数矩阵清晰化处理。假设$\otimes x_{ij}^t$为第t位

专家的矿山开采安全影响因素 i 对因素 j 的评分,$\otimes x_{ij}^t \in [\underline{\otimes} x_{ij}^t, \overline{\otimes} x_{ij}^t]$,$Y_{ij}^t$ 为第 t 位专家对因素 $i \to j$ 的清晰化系数;$\Delta_{\min}^{\max}$ 为全局极差,即 $\Delta_{\min}^{\max} = \max \overline{\otimes} x_{ij}^t - \min \underline{\otimes} x_{ij}^t$,根据式(1)至式(3),对区间灰数评分进行标准化、清晰化处理后,得到清晰化值 z_{ij}^t。同时,按照相应步骤,完成专家权威性清晰化处理后,得到专家权重值 w_i。

$$\begin{cases} \overline{\otimes} \tilde{x}_{ij}^t = (\overline{\otimes} x_{ij}^t - \min \overline{\otimes} x_{ij}^t)/(\max \overline{\otimes} x_{ij}^t - \min \underline{\otimes} x_{ij}^t) \\ \underline{\otimes} \tilde{x}_{ij}^t = (\underline{\otimes} x_{ij}^t - \min \underline{\otimes} x_{ij}^t)/(\max \overline{\otimes} x_{ij}^t - \min \underline{\otimes} x_{ij}^t) \end{cases} \tag{1}$$

$$Y_{ij}^t = (\underline{\otimes} \tilde{x}_{ij}^t (1 - \underline{\otimes} \tilde{x}_{ij}^t) + (\overline{\otimes} \tilde{x}_{ij}^t \times \overline{\otimes} \tilde{x}_{ij}^t))/(1 - \underline{\otimes} \tilde{x}_{ij}^t + \overline{\otimes} \tilde{x}_{ij}^t) \tag{2}$$

$$z_{ij}^t = \min \underline{\otimes} x_{ij}^t + Y_{ij}^t \Delta_{\min}^{\max} \tag{3}$$

根据区间灰数清晰化值 z_{ij}^t 及专家权重值 w_i,得到最终的专家权威性直接影响矩阵 $\boldsymbol{Z}$。

$$Z_{ij} = w_1 \times z_{ij}^1 + w_2 \times z_{ij}^2 + \cdots + w_n \times z_{ij}^n \tag{4}$$

式中,Z_{ij} 表示第 i 个指标因素对第 j 个指标因素的专家权威矩阵值。

(4) 计算综合影响矩阵 $\boldsymbol{T}$。取专家权威矩阵 $\boldsymbol{Z}$ 的行和最大值为基准,对专家权威矩阵 $\boldsymbol{Z}$ 进行自身规范化处理,得到规范化直接矩阵 $\boldsymbol{B}$。结合单位矩阵 $\boldsymbol{E}$,利用 MATLAB 软件,计算综合影响矩阵 $\boldsymbol{T}$。

$$\boldsymbol{T} = \boldsymbol{B} + \boldsymbol{B}^2 + \cdots + \boldsymbol{B}^n = \boldsymbol{B} \frac{\boldsymbol{E} - \boldsymbol{B}^{n-1}}{\boldsymbol{E} - \boldsymbol{B}} = \boldsymbol{B}(\boldsymbol{E} - \boldsymbol{B})^{-1} \tag{5}$$

(5) 计算指标因素“四度”。DEMATEL 法利用影响因素的影响度、被影响度、中心度和原因度,体现各指标因素在系统中的重要性。将综合影响矩阵 $\boldsymbol{T}$ 按行求和,记为 F_i,反映第 i 个指标对其他指标的影响度;将综合影响矩阵 $\boldsymbol{T}$ 按列求和,记为 H_i,反映第 i 个指标因素受其他指标因素的被影响度;将影响度 F_i 和被影响度 H_i 求和,记为 M_i,即指标中心度,M_i 越大,反映该指标在系统中越重要,是识别关键因素的重要判据;将影响度 F_i 和被影响度 H_i 求差值,记为 N_i,即指标原因度,是划分原因因素、结果因素的依据。

(6) 绘制因果关系图。在笛卡尔坐标系中,以中心度为横坐标,原因度为纵坐标绘制因果关系图,可进一步识别关键指标因素和重点管控指标因素,提出合理化改进措施。

2.2 ISM 模型

ISM 可将复杂系统拆解为多级递阶结构,将复杂系统清晰化、层次化、可视化,展现各指标因素的复杂逻辑关系,帮助分析和解决复杂系统实际问题。具体操作步骤如下。

(1) 计算整体影响矩阵 $\boldsymbol{G}$。将综合影响矩阵 $\boldsymbol{T}$ 与单位矩阵 $\boldsymbol{E}$ 相加,得到包含因素自影响的整体影响矩阵 $\boldsymbol{G}$,用于综合反映不同指标因素之间以及指标因素自身对系统的影响程度。具体计算公式为:

$$\boldsymbol{G} = \boldsymbol{T} + \boldsymbol{E} \tag{6}$$

(2) 计算可达矩阵 $\boldsymbol{K}$。为简化复杂结构网络,删减影响关系偏弱的作用信息,直观展现重要影响路径,引入阈值 λ 对整体影响矩阵 $\boldsymbol{G}$ 进行简化处理,得到可达矩阵 $\boldsymbol{K}$。其中,阈值 λ 取综合影响矩阵 T 的均值与标准差之和[20]。

$$\boldsymbol{K} = [k_{ij}] = \begin{cases} 1, & g_{ij} \geqslant \lambda \\ 0, & g_{ij} < \lambda \end{cases} (i, j = 1, 2, \cdots, n) \tag{7}$$

式中:k_{ij} 为可达矩阵的元素;g_{ij} 为整体影响矩阵元素。

(3) 划分递阶结构关系。基于可达矩阵 $\boldsymbol{K}$,依据式(8)的定义,依次计算每个因素的可达集 $R(X_i)$、先行集 $Q(X_i)$ 和共同集 $C(X_i)$,采用结果优先抽取法对各指标因素进行层级划分,将共同集 $C(X_i)$ 与可达集 $R(X_i)$ 相同的影响因素划分到同一层级,并将该指标因素确定为多层递阶结构的第一层,将第一层影响因素从可达矩阵 $\boldsymbol{K}$ 中对应的行、列划去,按照上述步骤,重复操作,直到划去所有指标因素,最终,自上而下构建完整的指标因素多层递阶结构图。

$$\begin{cases} R(X_i) = \{X_j \mid X_j \in X, k_{ij} \neq 0\}, (i = 1, 2, \cdots, n) \\ Q(X_i) = \{X_j \mid X_j \in X, k_{ji} \neq 0\}, (i = 1, 2, \cdots, n) \\ C(X_i) = \{X_j \mid R(X_i) \cap Q(X_i) = R(X_i)\} \end{cases} \tag{8}$$

2.3 MICMAC 模型

MICMAC 是 DEMATEL-ISM 方法的延伸,基于可达矩阵 $\boldsymbol{K}$ 计算各指标因素的依赖度值与驱动力值,绘制影响因素的依赖度-驱动力坐标图,可进一步明确各影响因素在系统中的重要程度和属性特征,为制定针对性对策建议提供方向和思路。各影响因素的驱动力值、依赖度值计算公式为:

$$\begin{cases} d_i = \sum_{i=1}^{n} k_{ij}, (i = 1, 2, \cdots, n) \\ r_i = \sum_{j=1}^{n} k_{ij}, (j = 1, 2, \cdots, n) \end{cases} \tag{9}$$

式中,d_i、r_i 分别表示第 i 个影响因素的驱动力值和依赖度值。

2.4 Grey-DEMATEL-ISM-MICMAC 集成模型架构

为全面系统地开展地下金属矿山开采安全影响因素分析,明确因素间的因果关系传导路径,本文从复杂系统视角出发,构建了基于 Grey-DEMATEL-ISM-MICMAC 的集成分析模型。以 ISM 法为集成模型主体,利用 Grey-DEMATEL 法测算各指标因素的中心度、原因度,识别核心因果因素,结合 ISM 法的可达矩阵,引入 MICMAC 法研究各影响因素之间的依附关系,最终实现 3 种复杂问题处理模型的互相补充、关联。基于 Grey-DEMATEL-ISM-MICMAC 的矿山开采安全影响因素分析集成模型框架如图 1 所示。

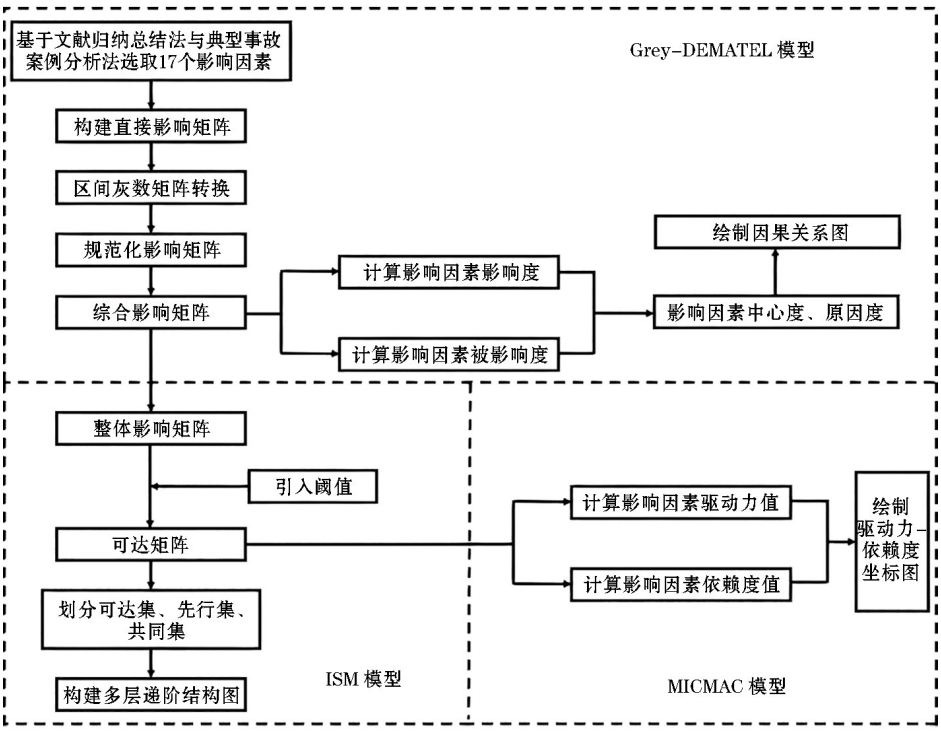


图 1 基于 Grey-DEMATLE-ISM-MICMAC 的集成模型框架

Fig.1 Integrated model framework based on Grey-DEMATLE-ISM-MICMAC

3 模型应用

以山东省某金矿为工程背景,运用前文所构建的 Grey-DEMATEL-ISM-MICMAC 集成模型,对矿山开采安全影响因素开展系统性分析,以期提出针对性优化措施,全面提升矿山开采的安全水平与可持续发展能力。根据模型计算流程,首先邀请相关领域专家,组建临时评估专家组,然后基于矿山安全影响因素指标体系,由专家结合自身经验与矿山开采安全现状,对指标间两两因素的相互影响程度进行打分。参考 DEMATEL-ISM 耦合模型的工程案例,组织 3~8 名专家即可满足案例分析与应用需求。因此,本次邀请了 3 位长期从事矿山安全评估方面的专家和 2 位现场安全管理人员共同参与评价,开展该矿山开采安全影响因素分析。5 位专家相关信息及权威性见表 4。

表 4 专家基础信息及权威性

Table 4 Basic information and authority of experts

专家编号	专家类型	基础信息	灰度下限	灰度上限
ZJ_1	教授	从事矿山开采安全评估 26 a,具有扎实的理论基础和丰富的实践经验,在行业内认可度极高。	0.7	1.0
ZJ_2	副教授	从事矿山安全理论学术研究 8 a,熟悉安全管理体系,但现场安全管理经验不足。	0.3	0.5
ZJ_3	教授	从事安全评估 17 a,具备较强分析能力,理论知识较为丰富。	0.5	0.9
ZJ_4	工程师	在矿山安全管理岗位工作 11 a,熟悉安全管理规章和制度规范。	0.4	0.7
ZJ_5	高级工程师	在矿山安全管理岗位工作 18 a,对安全生产具有独到见解。	0.5	0.9

3.1 Grey-DEMATEL-ISM 法计算过程与结果分析

3.1.1 模型计算过程

(1) 建立直接影响矩阵。

针对矿山开采安全影响因素体系,设计 Likert 5 级评价量表。由专家按照 0～4 标度法独立完成两两影响程度赋值。收集汇总各位专家打分结果后,对照灰数语义变量对应表,按照式(1)至式(4)对专家语义变量进行标准化、清晰化处理,同时耦合各专家权重值,计算得到专家权威性直接影响矩阵 $\boldsymbol{Z}$,具体计算结果见表 5。

表 5 专家权威性直接影响矩阵

Table 5 Direct influence matrix of expert authority

因素	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_{13}	X_{14}	X_{15}	X_{16}	X_{17}
X_1	0.000	0.717	0.950	0.417	0.232	0.232	0.417	0.117	0.117	0.145	0.145	0.078	0.078	0.078	0.150	0.150	0.150
X_2	0.417	0.000	0.717	0.717	0.117	0.117	0.117	0.117	0.117	0.145	0.212	0.078	0.078	0.078	0.150	0.150	0.150
X_3	0.117	0.417	0.000	0.417	0.765	0.465	0.465	0.484	0.484	0.078	0.078	0.078	0.078	0.078	0.266	0.266	0.266
X_4	0.117	0.417	0.417	0.000	0.117	0.117	0.117	0.117	0.117	0.078	0.145	0.011	0.011	0.011	0.050	0.050	0.050
X_5	0.147	0.147	0.398	0.098	0.000	0.698	0.698	0.465	0.465	0.098	0.098	0.098	0.098	0.098	0.432	0.432	0.432
X_6	0.098	0.098	0.398	0.050	0.398	0.000	0.698	0.465	0.465	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.132	0.132	0.132
X_7	0.098	0.098	0.398	0.050	0.698	0.698	0.000	0.465	0.465	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.280	0.280	0.280
X_8	0.184	0.184	0.417	0.117	0.417	0.417	0.417	0.000	0.717	0.117	0.117	0.117	0.117	0.117	0.150	0.150	0.150
X_9	0.184	0.184	0.417	0.117	0.417	0.417	0.417	0.717	0.000	0.117	0.117	0.117	0.117	0.117	0.150	0.150	0.150
X_{10}	0.434	0.734	0.734	0.434	0.434	0.434	0.434	0.434	0.434	0.000	0.734	0.434	0.434	0.734	0.468	0.468	0.468
X_{11}	0.168	0.468	0.468	0.235	0.134	0.134	0.134	0.201	0.201	0.350	0.000	0.350	0.350	0.350	0.168	0.168	0.168
X_{12}	0.134	0.134	0.134	0.134	0.650	0.650	0.650	0.201	0.201	0.134	0.134	0.000	0.134	0.134	0.384	0.384	0.384
X_{13}	0.134	0.134	0.134	0.134	0.350	0.350	0.350	0.650	0.650	0.134	0.134	0.134	0.000	0.650	0.168	0.168	0.168
X_{14}	0.434	0.434	0.434	0.434	0.434	0.434	0.434	0.434	0.434	0.650	0.650	0.650	0.650	0.000	0.468	0.468	0.468
X_{15}	0.117	0.117	0.384	0.084	0.732	0.432	0.432	0.450	0.450	0.084	0.084	0.084	0.084	0.084	0.000	0.684	0.684
X_{16}	0.084	0.084	0.350	0.050	0.432	0.432	0.432	0.150	0.150	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.384	0.000	0.684
X_{17}	0.084	0.084	0.350	0.050	0.432	0.432	0.432	0.150	0.150	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.684	0.684	0.000

(2) 确定各因素之间的相互影响关系。

按照式(5)对直接影响矩阵进行归一化处理,得到规范化直接矩阵 $\boldsymbol{B}$,结合单位矩阵 $\boldsymbol{E}$ 计算得到综合影响矩阵 $\boldsymbol{T}$,进一步求解各指标因素的影响度、被影响度、中心度和原因度,识别关键影响因素并厘清指标因素之间的关联性,具体计算结果见表 6。

表 6 DEMATEL 法计算结果

Table 6 Calculation results of DEMATEL method

因素	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	因素类别
X_1	1.025 2	9	0.718 5	12	1.743 7	13	0.306 8	原因因素
X_2	0.847 6	15	1.048 1	10	1.895 6	12	−0.200 5	结果因素
X_3	1.162 1	6	1.769 9	2	2.932 0	2	−0.607 7	结果因素
X_4	0.485 0	17	0.852 5	11	1.337 5	17	−0.367 5	结果因素
X_5	1.203 1	4	1.776 0	1	2.979 1	1	−0.572 9	结果因素
X_6	0.830 8	16	1.701 9	4	2.532 6	6	−0.871 1	结果因素
X_7	1.004 9	10	1.737 4	3	2.742 2	3	−0.732 5	结果因素
X_8	0.980 6	11	1.484 5	5	2.465 1	7	−0.503 9	结果因素
X_9	0.980 6	12	1.484 5	6	2.465 1	8	−0.503 9	结果因素
X_{10}	2.089 9	1	0.541 3	17	2.631 2	4	1.548 5	原因因素
X_{11}	1.070 5	8	0.640 5	13	1.711 0	15	0.430 0	原因因素
X_{12}	1.143 9	7	0.551 6	15	1.695 5	16	0.592 2	原因因素
X_{13}	1.169 7	5	0.551 6	16	1.721 4	14	0.618 1	原因因素
X_{14}	2.011 0	2	0.603 6	14	2.614 6	5	1.407 4	原因因素
X_{15}	1.224 7	3	1.143 2	9	2.368 0	9	0.081 5	原因因素
X_{16}	0.868 1	14	1.217 7	7	2.085 7	11	−0.349 6	结果因素
X_{17}	0.942 8	13	1.217 7	8	2.160 4	10	−0.274 9	结果因素

根据各影响因素的中心度和原因度,以影响因素的中心度为横坐标,原因度为纵坐标,绘制矿山开采安全影响因素的因果关系图,如图 2 所示。根据矿山开采安全评价指标中心度计算结果,得到各影响因素中心度均值约为 2.24。以中心度 $X=2.24$ 为纵轴分界,原因度 $Y=0$ 为横轴分界,将影响因素的因果关系图划分为Ⅰ~Ⅳ四个象限。

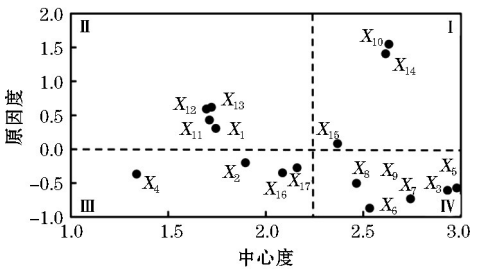


图 2 影响因素的因果关系图

Fig.2 Causal relationship diagram of influencing factors

由图 2 可知,根据各象限中心度、原因度分布特点,第Ⅰ象限(强原因区域)包含安全生产管理制度(X_{10})、安全隐患排查治理(X_{14})、开采工艺合理性(X_{15}),该类影响因素的中心度、原因度均较高,在整个矿山开采安全影响因素体系中重要性强,且对其他因素具有显著的驱动作用;第Ⅱ象限(弱原因区域)包含员工培训及教育(X_1)、安全文化氛围(X_{11})、安全生产投入(X_{12})、事故应急能力(X_{13}),该类因素的原因度为正但中心度较低,对其他因素影响较高,在整体矿山开采安全影响因素体系中的重要性相对较弱;第Ⅲ象限(弱结果区域)包含安全生产意识与态度(X_2)、员工身心健康状况(X_4)、关键技术应用(X_{16})、技术创新(X_{17}),该类因素的中心度、原因度均较低,在整个矿山开采安全评价体系中重要性偏弱,易受其他因素影响;第Ⅳ象限(强结果区域)包含操作规范性(X_3)、设备适应性与自动化水平(X_5)、安全防护装置可靠性(X_6)、设备日常更新维护(X_7)、环境危险源控制(X_8)、作业环境条件(X_9),该类影响因素的中心度较高、原因度偏低,在整体评估体系中处于相对重要位置,高度依赖其他影响因素。

(3) 建立多层递阶结构图。

基于 ISM 模型原理,结合 Grey-DEMATEL 法计算得到的综合影响矩阵,按照式(6)计算整体影响矩阵 $\boldsymbol{G}$。经计算,整体影响矩阵元素的均值为 0.065 9、标准差为 0.040 7,因此取阈值 λ 为 0.106 6。按照式(7)进行截集处理得到可达矩阵 $\boldsymbol{K}$,并在此基础上将影响因素划分为可达集、先行集、共同集 3 类,采用结果优先抽取法,建立影响因素的多层递阶结构图。其中,可达矩阵 $\boldsymbol{K}$ 计算结果见表 7,矿山开采安全影响因素分级见表 8,多层递阶结构如图 3 所示。

表 7 可达矩阵

Table 7 Reachability matrix

因素	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_{13}	X_{14}	X_{15}	X_{16}	X_{17}
X_1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
X_2	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
X_3	0	0	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
X_4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
X_5	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
X_6	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
X_7	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
X_8	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
X_9	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
X_{10}	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1
X_{11}	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
X_{12}	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
X_{13}	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0
X_{14}	0	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
X_{15}	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
X_{16}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
X_{17}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1

表 8 矿山开采安全影响因素分级

Table 8 Grading of factors affecting mine mining safety

层级	要素集合	因素类别
第 1 层因素	X_4、X_6、X_7、X_8、X_9、X_{16}、X_{17}	表层影响因素
第 2 层因素	X_5、X_{13}	中间影响因素
第 3 层因素	X_3、X_{12}、X_{15}	中间影响因素
第 4 层因素	X_2、X_{11}	中间影响因素
第 5 层因素	X_1、X_{14}	本质影响因素
第 6 层因素	X_{10}	本质影响因素

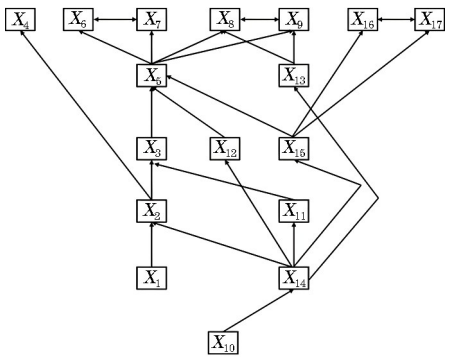


图 3 基于 ISM 模型的影响因素多层递阶结构

Fig.3 Multi-level hierarchical structure of influencing factors based on ISM model

3.1.2 模型结果分析

(1) 底层影响因素层面。

由表 8 和图 3 可知,安全生产管理制度(X_{10})位于最底层,对几乎所有其他影响因素均存在传导作用,对矿山开采安全具有决定性影响,属于本质影响因素。员工培训及教育(X_1)与安全隐患排查治理(X_{14})处于第 5 层,这两个影响因素同样对大多数影响因素具有显著的传导作用,也应当视作本质影响因素。

因此,矿山企业需重点围绕 X_1、X_{14}、X_{10} 这 3 个影响因素制定针对性措施,从根源上提升矿山开采本质安全水平。首先,在安全生产管理制度方面,需结合矿山实际,健全安全生产责任制、岗位操作规程、隐患排查制度等全套管理体系,明确各级人员的安全职责,并根据现场条件动态化修订管理制度,确保制度的适用性、连贯性与可操作性;同时建立制度执行监督机制,定期开展管理制度落实情况专项检查,对制度执行偏离、严重不到位的责任主体追究责任。在员工培训及教育方面,要建立健全培训考核机制,坚持培训合格持证上岗,考核不合格人员严禁上岗;定期邀请安全管理专家,结合事故案例开展警示教育,强化人员安全生产意识,同时由一线资深操作人员开展现场教学和帮带,提升作业人员的实操技能,严格规范作业。在安全隐患排查治理方面,要严格落实隐患排查整改验收销号制度,建立隐患排查整改台账,明确责任人员、整改时限与整改要求,常态化开展巡检和全面排查。

(2) 中间影响因素层面。

安全生产意识与态度(X_2)、安全文化氛围(X_{11})位于第 4 层,操作规范性(X_3)、安全生产投入(X_{12})、开采工艺合理性(X_{15})位于第 3 层,设备适应性与自动化水平(X_5)、事故应急能力(X_{13})位于第 2 层,以上因素均为中间影响因素,具有传递属性,既受第 5 层、第 6 层影响因素的影响,同时也会对第 1 层影响因素产生关联作用。在矿山开采过程中,若不加以控制和合理优化,在多重耦合与相互作用下,将对表层影响因素产生叠加影响。结合表 6 可知,操作规范性(X_3)、设备适应性与自动化水平(X_5)的中心度值排名靠前,属于矿山开采安全重要影响因素。在操作规范性方面,矿山企业可结合工种、岗位实际特点编制标准化作业手册,明确各工序操作流程、技术要点与严禁行为等,并要求作业人员严格遵守、熟练掌握,在复杂作业现场设置操作提示牌,强化现场作业监督与技术指导。在设备和自动化水平方面,加大安全设备投入,引入智能化采掘设备,减少危险工序的人工作业占比。此外,根据表 6 和图 2 可知,安全生产投入(X_{12})、事故应急能力(X_{13})属于弱原因因素,会对其他结果因素产生一定影响。在安全生产投入方面,要加大设施费用的投入,重点保障应急救援物资水平,加大安全设施设备更新及井下作业环境改善力度,切实提升突发安全事故的应急能力。在事故应急能力方面,要组建专业化应急救援队伍,常态化定期开展应急救援培训,持续优化应急预案,建立与当地消防、应急、医疗等部门的联动机制,提升突发事故的协调处置能力。

(3) 表层影响因素层面。

员工身心健康状况(X_4)、安全防护装置可靠性(X_6)、设备日常更新维护(X_7)、环境危险源控制(X_8)、作业环境条件(X_9)、关键技术应用(X_{16})、技术创新(X_{17})位于第 1 层,直接影响矿山开采安全性。在矿山企业日常安全管理过程中,要密切关注、重点管控,才能最大程度降低该类安全生产事故发生率。结合表 6 和图 2 可知,安全防护装置可靠性(X_6)、设备日常更新维护(X_7)两个指标属于强结果型因素,受其他原因因素影响较大。在安全防护

装置可靠性和设备日常更新维护方面,均可以通过加大安全生产投入,引入自动化、智能化机械设备,更新老旧设备,加大对防护装置的管护,定期开展防护装置性能检测等方式,提升机械设备与防护装置的可靠性。

3.2 基于 ISM-MICMAC 模型的计算结果与分析

按照式(9),结合 ISM 法得到的可达矩阵,计算各影响因素的驱动力值 d_i 与依赖度值 r_i,具体计算结果见表 9。

表 9 矿山开采安全影响因素的驱动力值与依赖度值

Table 9 Driving force values and dependency values of influencing factors of mine mining safety

因素	驱动力值 d_i	依赖度值 r_i	因素	驱动力值 d_i	依赖度值 r_i
X_1	3	1	X_{10}	13	1
X_2	3	4	X_{11}	2	3
X_3	6	6	X_{12}	4	2
X_4	1	2	X_{13}	3	2
X_5	5	7	X_{14}	14	2
X_6	2	8	X_{15}	6	4
X_7	3	8	X_{16}	2	5
X_8	2	7	X_{17}	3	5
X_9	2	7			

根据各影响因素的驱动力值、依赖度值计算结果,以依赖度值为横坐标、驱动力值为纵坐标,绘制矿山开采安全影响因素的依赖度-驱动力坐标图,如图 4 所示。以驱动力值 4.35、依赖度值 4.35 分别为横轴、纵轴,将驱动力-依赖度坐标图划分为 4 个象限。结合各区域驱动力值、依赖度值大小分布特点,划分为联动区域、独立区域、自发区域和依赖区域,分别用Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ和Ⅳ表示。

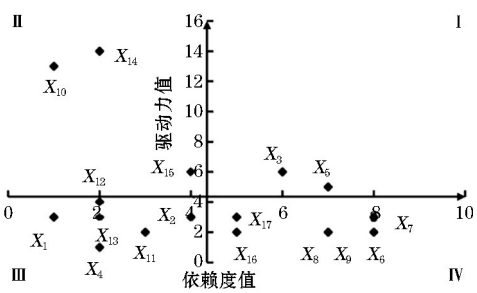


图 4 影响因素的依赖度-驱动力坐标图

Fig.4 Dependency-driving force coordinate plot of influencing factors

由图 4 可知,联动区域(第Ⅰ象限)影响因素包含操作规范性(X_3)和设备适应性与自动化水平(X_5),该类因素具有高驱动、高依赖特点,对比多层递阶结构图,这两个影响因素均位于中间层,不仅受下一层指标因素的影响,同时会对上一层指标因素产生显著作用;独立区域(第Ⅱ象限)影响因素包含安全生产管理制度(X_{10})、安全生产投入(X_{12})、安全隐患排查治理(X_{14})、开采工艺合理性(X_{15}),该类因素具有高驱动、低依赖特征,是影响矿山开采安全最根本的指标因素,必须足够重视,采取强有力的针对性预防措施,切实降低对整体系统的负面影响;自发区域(第Ⅲ象限)影响因素包含员工培训及教育(X_1)、安全生产意识与态度(X_2)、员工身心健康状况(X_4)、安全文化氛围(X_{11})、事故应急能力(X_{13}),对比多层递阶结构图,该类因素与其他因素的交互关联性较低,在系统中独立性较强;依赖区域(第Ⅳ象限)影响因素包含安全防护装置可靠性(X_6)、设备日常更新维护(X_7)、环境危险源控制(X_8)、作业环境条件(X_9)、关键技术应用(X_{16})、技术创新(X_{17}),该类因素均处于解释结构模型的最表层,是矿山开采安全最直接的影响因素,具有高度依赖属性,易受其他因素的影响,矿山企业应提高重视。

3.3 综合分析

综合运用 Grey-DEMATEL-ISM-MICMAC 集成模型对地下金属矿山开采安全系统开展分析。结果表明,集成模型在影响因素分析方面存在内在关联性和结论一致性,其中 ISM 法识别的关键指标因素、直接影响因素与 MIAMAC 法的独立区域、依赖区域具有显著趋同性,结论基本一致。整体来看,员工培训及教育(X_1)、安全生产管理制度(X_{10})、安全隐患排查治理(X_{14})、开采工艺合理性(X_{15})4 个指标是矿山开采安全的核心影响因素,安全防护装置可靠性(X_6)、设备日常更新维护(X_7)、环境危险源控制(X_8)、作业环境条件(X_9)、关键技术应用(X_{16})、技术创新(X_{17})6 个指标是矿山开采安全的直接影响因素。上述结果不仅验证了基于 Grey-DEMATEL-ISM-MICMAC 集成模型在矿山开采安全影响因素分析方面的适用性、有效性,也从复杂系统问题视角,为矿山开采安全管理提供了理论参考和方法支撑。

矿山开采安全风险管控本质上是对“人、机、环、管、技”构成的复杂系统进行动态化、持续化优化的过程。结合前述研究结论,矿山企业要以管理体系现代化、实用化为牵引,以人员素养综合提升为核心,以作业环境改善为基础,以技术装备升级为支撑,搭建各要素之间正向强化、良性互动的治理生

态,最终实现开采安全主动管控,达成本质安全的目的。

4 结论与展望

(1) 综合运用文献归纳总结法和典型事故案例分析法,从人员、设备、环境、管理、技术 5 个方面,筛选了 17 项核心影响指标,构建了矿山开采安全影响因素指标体系,为后续理论分析奠定了基础。

(2) 基于复杂系统视角构建了 Grey-DEMATEL-ISM-MICMAC 集成模型,对矿山开采安全影响因素开展了系统分析。结果表明,17 个影响因素可以划分为 6 个层级、3 种类型;员工培训及教育、安全生产管理制度、安全隐患排查治理、开采工艺合理性位于递阶结构图的底层,是矿山开采安全的核心影响因素,具有高驱动、低依赖的特征;安全防护装置可靠性、设备日常更新维护、环境危险源控制、作业环境条件、关键技术应用、技术创新处于递阶结构图的表层,是矿山开采安全的直接影响因素,具有高依赖性。

(3) 针对影响因素、系统分析结果,结合工程实际情况,提出以管理体系现代化、实用化为牵引,以人员素养综合提升为核心,以作业环境改善为基础,以技术装备升级为支撑的针对性优化措施。研究结果可为矿山开采安全系统提升提供理论指导,为同类复杂系统因素问题分析提供新的解决思路。

(4) 本研究明确了地下金属矿山开采安全的关键性、直接性等重点管控影响因素。但矿山开采安全影响因素多、关系复杂,后续还应结合矿山工程实践,进一步丰富和完善指标体系,以提升模型的普适性。

参考文献(References):

[1] 吴云峰.深部高应力巷道围岩宏细观损伤机理及扰动诱发岩爆特征研究[D].北京:北京科技大学,2025.
Wu Yunfeng. Research on macro and microscopic damage mechanism and disturbance-induced rockburst characteristics of surrounding rocks in deep high-stress roadways [D]. Beijing:University of Science and Technology Beijing,2025.

[2] 周子龙,王少锋,蔡鑫,等.深部金属矿异构环境爆破开采诱发岩体动力灾害防控[J].中国有色金属学报,2025,35(1):306-322.
Zhou Zilong, Wang Shaofeng, Cai Xin, et al. Control for rock dynamic disasters induced by blasting mining disturbance under heterogeneous condition in deep metal mines[J].The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2025,35(1):306-322.

[3] 杨小聪,蒋合国.新质生产力引领深部金属矿山安全高效开采:以毛坪铅锌矿深部开采实践为例[J].中国矿业,2024,33(5):9-21.
Yang Xiaocong, Jiang Heguo. New quality productive forces leads the safe and efficient mining of deep metal mines: taking deep mining practice of Maoping Lead-Zinc Mine as an example[J].China Mining Magazine,2024,33(5):9-21.

[4] 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.

[5] 陈铁华,刘景品,李红霞,等.矿长安全意识影响因素及影响路径研究[J].矿业安全与环保,2022,49(1):109-113.
Chen Tiehua, Liu Jingpin, Li Hongxia, et al. Study of influential factors and paths of the mine manager's safety awareness[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2022,49(1):109-113.

[6] 裴子平,赵鹏飞,贺阿红.基于 ISM 的煤矿员工安全意识影响因素研究[J].煤炭技术,2021,40(3):174-177.
Pei Ziping, Zhao Pengfei, He Ahong. Study on influencing factors of miners'safety awareness based on ISM[J]. Coal Technology,2021,40(3):174-177.

[7] 陈铁华,周超,李红霞.煤矿安全管理执行力影响因素研究[J].煤矿安全,2018,49(12):235-238.
Chen Tiehua, Zhou Chao, Li Hongxia. Research on influence factors of coal mine safety management execution [J].Safety in Coal Mines,2018,49(12):235-238.

[8] 王海涛.煤矿安全投入影响因素系统分析及其效率评价研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2020.
Wang Haitao. Influencing factors' systemic analysis and efficiency evaluation study on safety input of coal mine[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, Beijing,2020.

[9] 成连华,郭慧敏.基于 SEM 的煤矿安全生产影响因素系统研究[J].中国安全科学学报,2018,28(1):137-142.
Cheng Lianhua, Guo Huimin. Study on factors influencing coal mine work safety based on SEM [J]. China Safety Science Journal,2018,28(1):137-142.

[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] 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.

[12] 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.

[13] 李季硕,许开立,姚锡文,等.多模型耦合下农村火灾事故致因因素研究[J].安全与环境学报,2025,25(11):4357-4364.
Li Jishuo, Xu Kaili, Yao Xiwen, et al. Investigation of causal factors in rural fire accidents using multi-model coupling[J]. Journal of Safety and Environment, 2025, 25(11):4357-4364.

[14] 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 & Environmental Protection,2023,50(2):114-119.

[15] 边璐,迟超,张江朋.基于 DEMATEL-ISM-MICMAC 的城市地下综合管廊建设期风险因素研究[J].土木建筑工程信息技术,2025,17(4):20-26.
Bian Lu, Chi Chao, Zhang Jiangpeng. Research on risk factors of urban underground comprehensive pipe gallery construction period based on DEMATEL-ISM-MICMAC[J]. Journal of Information Technology in Civil Engineering and Architecture,2025,17(4):20-26.

[16] 刘永国.装配式建筑碳排放影响因素及减排路径研究:基于改进的 DEMATEL-ISM-MICMAC 方法[D].青岛:青岛理工大学,2025.
Liu Yongguo. Research on the influencing factors and emission reduction paths of carbon emissions in prefababricated buildings: based on the improved DEMATEL-ISM-MICMAC method[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology,2025.

[17] 覃美满,寇向宇,鄢德波,等.基于组合赋权-TOPSIS 的地下矿山安全风险评价研究[J].矿冶工程,2025,45(1):35-40.
Qin Meiman, Kou Xiangyu, Yan Debo, et al. Safety risk assessment for underground mines based on combined weighting-TOPSIS [J]. Mining and Metallurgical Engineering,2025,45(1):35-40.

[18] 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.

[19] 王占宝,刘小杰,刘鹏.基于 Grey-DEMATEL 的煤矿隐患关键因素研究[J].中国安全科学学报,2024,34(增刊 1):39-45.
Wang Zhanbao, Liu Xiaojie, Liu Peng. Research on key factors of hidden dangers in coal mines based on Grey-DEMATEL[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(Suppl.1):39-45.

[20] 马奔,张洪铭,冯祥瑞,等.基于 Grey-DEMATEL-ISM 法的化学化工类专业学生实验不安全行为的影响因素研究[J].安全与环境工程,2024,31(5):266-274.
Ma Ben, Zhang Hongming, Feng Xiangrui, et al. Study on the factors influencing experimental unsafe behaviors of chemistry and chemical students based on Grey-DEMATEL-ISM method[J]. Safety and Environmental Engineering, 2024,31(5):266-274.