基于专家经验知识的金属非金属地下矿山安全综合评价研究与应用*

蒋瑛[1,2,3],戴军[1,2,3],廖文景[1,2,3],吕旭[1,2,3]

(1.长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012;
2.湖南铭生安全科技有限责任公司, 湖南 长沙 410012;
3.金属矿山安全技术国家重点实验室, 湖南 长沙 410012)

摘要:基于矿山安全专家经验知识,从安全设施"三同时"程序、安全生产组织保障、安全教育培训、双重预防机制、生产系统安全保障、危险物品及危险作业管理、应急管理与外包工程管理等8个方面建立了多层级地下矿山安全综合评价指标体系和评价模型,采用层次分析法计算各指标权重,并建立安全综合评价集判定金属非金属矿山安全综合评价结果。实际应用表明:衡阳某金属地下矿山安全综合评价得分为73.1分,判定为"中",其中矿山在危险物品及危险作业管理、生产系统安全保障、应急管理与外包工程管理方面得分率较低,建立的安全综合评价结果基本符合矿山实际情况,能有效提高金属非金属地下矿山安全综合评价的科学性和实用性,评价过程不仅能帮助企业找出安全生产薄弱环节,还能为进一步夯实安全基础、强化安全管理、提升安全水平提供理论依据。

关键词:安全综合评价;层次分析法;专家经验;指标权重

中图分类号:TD76 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)12-0162-07

Research and Application of Safety Comprehensive Evaluation for Metal and Non-Metal Underground Mines Based on Experience and Knowledge of Experts

JIANG Ying[1,2,3], *DAI Jun*[1,2,3], *LIAO Wenjing*[1,2,3], *LYU Xu*[1,2,3]

(1.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
2.Hunan Mingsheng Safety Technology Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
3.State Key Laboratory of Safety Technology for Metal Mines, Changsha, Hunan 410012, China)

Abstract: Based on the experiential knowledge of mine safety experts, a multi-level safety comprehensive evaluation index system and evaluation model for underground mines were established from 8 aspects, including the "three synchronizations" procedure for safety facilities, safety production organization guarantee, safety education and training, dual prevention mechanism, production system safety guarantee, hazardous materials and hazardous operation management, emergency management, and outsourced project management. The analytic hierarchy process (AHP) was adopted to calculate the weight of each index, and a safety comprehensive evaluation set was established to determine the comprehensive safety evaluation results of metal and non-metal mines. Practical application demonstrates that a certain underground metal mine in Hengyang has achieved a comprehensive safety evaluation score of 73.1, which is classified as "Medium". Among the evaluation aspects, the mine has obtained relatively low scoring rates in hazardous materials and hazardous operation management, production system safety guarantee, as well as emergency management and outsourced project management. The established comprehensive safety evaluation results are basically consistent with the actual situation of the mine, and can effectively improve the scientificity and practicality of the safety comprehensive evaluation for underground metal and non-metal mines. The evaluation process not only helps enterprises identify weak links in safety production, but also provides a theoretical basis for further consolidating the safety foundation, strengthening safety management, and enhancing the safety level.

Key words: Safety comprehensive evaluation, Analytic hierarchy process, Expert experience, Index weight

* **收稿日期**:2024-10-30
作者简介:蒋瑛(1988—),女,湖南永州人,硕士,高级工程师,主要研究方向为非煤矿山安全管理。E-mail:332613864@qq.com
通信作者:廖文景(1983—),男,湖南汨罗人,硕士,高级工程师,主要从事非煤矿山安全技术方面的研究工作。E-mail:65323569@qq.com

0 引言

根据国家统计局统计数据,2012 年至 2023 年间,我国工矿商贸企业就业人员 10 万人生产安全事故死亡率从 1.64 人降至 1.244 人[1-2],安全生产形势总体向好。近年来,国家高度重视金属非金属矿山安全高质量发展工作,相继出台一系列指导意见和举措,包括严格矿山安全生产准入、推进矿山转型升级、防范化解重大安全风险、强化企业安全生产主体责任等[3-5]。在全行业的共同努力下,我国矿山安全生产水平较以往已显著提升,逐步扭转了长期落后于国际水平的局面。但是,目前我国大部分地区金属非金属矿山"多、小、散、乱、差"的局面没有根本性改变[6],矿山安全生产仍然处于爬坡过坎的关键时期,面临着结构性、系统性、区域性、不确定性等多重风险挑战[7],尤其是地下矿山。对地下矿山进行安全综合评价,有助于直观呈现矿山的整体危险性,全面掌握安全生产实际状况和薄弱环节,提前制定防范措施,明确安全生产工作重点,对促进矿山安全生产具有实际意义,也可为监管部门制定监管计划、明确监管重点提供依据。

梳理统计已有研究成果发现,采矿业关于矿山安全生产、安全生产系统、安全风险评价的研究多聚集于煤矿领域的评价分析,如王学琛等[8]通过对煤矿专家的调查访问,确定了煤矿安全生产风险评价的 12 大类主要影响因素、78 个二级指标,基于组合赋权 TOPSIS 法建立煤矿安全生产评价模型,经实例验证与实际情况相符,评价方法有效。刘晨君等[9]依据法律法规、技术规程等规定以及应急管理专家知识,确定影响煤炭企业安全应急等级的 10 个主要因素及其权重,运用模糊综合评判方法进行综合评价,评价结果有利于识别煤矿危险源和评估其危险程度。宋陈澄等[10]从作业环境风险、人员配置风险、设备操作风险、安全管理风险构建了煤炭企业安全生产风险评价指标体系,并基于熵权理论构建了模糊综合评价模型。金属非金属矿山方面,葛珊珊[11]从"人-物-管-环"4 类致灾因子进行识别,构建了金属非金属矿山风险评价指标体系,基于层次分析法确定各指标的权重,并采用模糊数学法建立了金属非金属矿山企业模糊综合评价模型。胡辉等[12]认为地下金属矿山的安全问题受到工作人员、机器设备、工作环境、安全管理等多因素共同作用的影响,将上述 4 个因素及文化素质、技术操作水平、健康状况、设备老化程度、机械化率、噪声、有毒有害气体、安全意识、安全宣传、安全教育等 20 个子因素建立了模糊综合评价体系,并在实际矿山进行应用,指导矿山安全管理工作。

结合以往文献的研究成果,本研究依据《安全生产法》《矿山安全法》《金属非金属矿山安全规程》等相关法规标准,通过实地调研、专家调查法(共识会议法)等方式,并基于矿山安全专家知识和层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)确定指标分值和权重[13-14],建立金属非金属地下矿山安全综合评价模型,汲取行业专家的专业经验和知识,以提高评价的科学性和实用性。

1 建立金属非金属地下矿山安全综合评价指标体系

1.1 指标选择原则

金属非金属矿山尤其是地下矿山作为高风险、事故频发的场所,事故发生的主要原因包括人员违规操作、设备设施缺陷或作业环境不安全等,同时涉及企业管理制度不完善、外部环境影响等其他因素[15]。评价指标的选择要充分考虑上述因素,指标选择一般要遵循科学性、系统性、全面性、可比性和定性结合定量等原则。其中,科学性原则是指指标的选取具有科学性,能够反映客观实际;系统性原则是指各个指标同时存在于一个系统,是一个整体;可比性和定性结合定量原则是指各个指标不仅能在空间和时间上进行比较,在数量和质量上也能进行比较。

1.2 金属非金属地下矿山安全综合评价指标体系

本文结合以往文献的研究成果,依据《安全生产法》《矿山安全法》《金属非金属矿山安全规程》等相关法规标准,通过实地调研、专家调研法(共识会议法)等手段,从安全设施"三同时"程序、安全生产组织保障、安全教育培训、双重预防机制、生产系统安全保障、应急管理、危险物品及危险作业管理与外包工程管理等方面,建立了多层级金属非金属地下矿山安全综合评价指标体系,如图 1 所示(图中阿拉伯数字表示该二级指标下属三级指标的数量),其中一级指标 8 项,二级指标 78 项,三级指标 147 项。



图 1 金属非金属地下矿山安全综合评价指标体系(二级)

Fig.1 Indicator system of safety comprehensive evaluation of metal and non-metal underground mines (second-level)

2 安全综合评价模型

2.1 层次分析法确定一级指标权重

层次分析法是一种定性和定量相结合的,系统性、层次化的多目标决策分析方法,是公认较好的权重确定方法,其核心是将决策者的经验判断定量化,增强了决策依据的准确性,在目标结构较为复杂且缺乏统计数据的情况下更为实用[16-18],层次分析法确定权重的步骤本文不再赘述。

本文基于九分位的比例标度,邀请了 36 名矿山安全专家对一级指标进行权重打分,根据专家从业经历、职称等分为行业资深专家(从事矿山安全工作 15 a 以上,具有高级职称及以上)和行业一般专家,充分汲取各专家的专业知识和行业经验。根据各位专家评分计算可得金属非金属地下矿山安全综合评价指标体系权重 W_i,i 表示各一级指标;并基于评分专家专业知识和经验,分别赋予 60%、40%的权重,一级指标权重 W_i 及加权权重 W_j 计算结果见表 1。

表 1 一级指标权重计算结果

Table 1 Calculation results of the weights of first-level indicators

专家	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	W_6	W_7	W_8	$C \cdot R$
专家 1	0.05	0.19	0.09	0.16	0.06	0.36	0.04	0.05	0.019
专家 2	0.20	0.20	0.10	0.07	0.11	0.16	0.05	0.10	0.056
专家 3	0.11	0.22	0.08	0.24	0.06	0.23	0.03	0.05	0.091
专家 4	0.23	0.23	0.10	0.06	0.11	0.18	0.05	0.05	0.026
专家 5	0.29	0.15	0.05	0.07	0.05	0.28	0.03	0.06	0.019
专家 6	0.19	0.18	0.10	0.03	0.06	0.19	0.19	0.06	0.012
专家 7	0.17	0.20	0.12	0.09	0.05	0.29	0.04	0.04	0.036
专家 8	0.10	0.30	0.04	0.02	0.15	0.33	0.03	0.04	0.092
专家 9	0.36	0.16	0.03	0.07	0.07	0.19	0.07	0.04	0.050

续表

专家	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	W_6	W_7	W_8	$C \cdot R$
专家 10	0.26	0.11	0.14	0.05	0.06	0.20	0.10	0.08	0.095
专家 11	0.17	0.29	0.09	0.09	0.05	0.24	0.04	0.02	0.059
专家 12	0.06	0.18	0.10	0.06	0.03	0.50	0.03	0.03	0.053
专家 13	0.24	0.13	0.10	0.10	0.05	0.21	0.10	0.08	0.050
专家 14	0.30	0.17	0.09	0.14	0.09	0.03	0.10	0.10	0.007
专家 15	0.29	0.15	0.05	0.07	0.05	0.28	0.03	0.06	0.019
专家 16	0.04	0.24	0.11	0.22	0.07	0.26	0.02	0.02	0.069
专家 17	0.05	0.21	0.12	0.19	0.08	0.21	0.08	0.07	0.076
专家 18	0.06	0.07	0.13	0.17	0.19	0.05	0.19	0.15	0.057
专家 19	0.28	0.15	0.09	0.11	0.06	0.23	0.04	0.04	0.059
专家 20	0.18	0.20	0.08	0.12	0.03	0.32	0.03	0.03	0.039
专家 21	0.09	0.18	0.07	0.18	0.03	0.39	0.03	0.04	0.049
专家 22	0.26	0.17	0.05	0.13	0.03	0.29	0.03	0.03	0.054
专家 23	0.28	0.17	0.05	0.13	0.03	0.28	0.02	0.03	0.050
专家 24	0.09	0.14	0.08	0.22	0.04	0.37	0.02	0.03	0.083
专家 25	0.09	0.15	0.08	0.22	0.04	0.38	0.02	0.03	0.077
专家 26	0.19	0.18	0.06	0.20	0.03	0.26	0.03	0.05	0.032
专家 27	0.27	0.18	0.06	0.15	0.04	0.26	0.03	0.03	0.050
专家 28	0.11	0.12	0.06	0.23	0.04	0.39	0.02	0.03	0.056
专家 29	0.09	0.15	0.06	0.25	0.03	0.35	0.02	0.04	0.095
专家 30	0.22	0.19	0.06	0.17	0.04	0.25	0.03	0.03	0.049
专家 31	0.20	0.18	0.06	0.20	0.03	0.25	0.03	0.05	0.029
专家 32	0.17	0.24	0.05	0.18	0.03	0.25	0.02	0.05	0.047
专家 33	0.14	0.21	0.05	0.16	0.03	0.34	0.03	0.06	0.034
专家 34	0.19	0.18	0.06	0.21	0.03	0.27	0.02	0.05	0.049
专家 35	0.12	0.25	0.06	0.14	0.02	0.36	0.02	0.03	0.071
专家 36	0.05	0.19	0.09	0.16	0.06	0.36	0.04	0.05	0.019
加权权重 W_j	0.18	0.19	0.08	0.13	0.06	0.26	0.05	0.05	

注:$C \cdot R$ 为层次分析法中权重计算判断矩阵的一致性比率,$C \cdot R < 0.10$ 则认为判断矩阵具有满意的一致性。

2.2 评价指标标准分值确定

依据国家法律法规及相关政策规定和要求,基于矿山安全专家知识通过共识会议法建立综合评价指标体系,并对指标进行标准分值赋值,各一级指标标准分值见表 2。指标赋值按从上而下的方式分配到二级、三级指标,经专家充分讨论,通过横向和纵向对比验证各指标标准分值的合理性与科学性,最终确定各指标的标准分值;依据国家、地方政府相应法律法规、规章与标准要求,编制指标评分准则,结合矿山实际情况得出各指标具体分值,经安全综合评价计算公式(见式(1))计算得到各矿山的得分。

表 2 一级指标标准分值

Table 2 Standard scores of first-level indicators

目标	一级指标	标准分值 D
金属非金属地下矿山安全综合评价体系	安全设施"三同时"程序	60
	安全生产组织保障	105
	安全教育培训	70
	双重预防机制	65
	危险物品及危险作业管理	50
	生产系统安全保障	550
	应急管理	50
	外包工程管理	50

安全综合评价计算公式:

$$r = \frac{\sum W_j \cdot D_j}{\sum D_i - \sum F_i} \times 100\% \tag{1}$$

式中:r 为安全综合评价得分;D_i 为各一级指标标准分值;D_j 为各一级指标实际得分;F_i 为不涉及指标标准分值。

2.3 建立安全综合评价集

根据定性和定量的安全衡量标准,以及以往的经验[9],本文构造 4 个等级(优,良,中,差)的安全综合评价集,对应的量化区间值见表 3,凡是存在表 4 任一判定情形的安全综合评价直接判定为"差"。

表 3 安全综合评价集

Table 3 Safety comprehensive evaluation set

安全综合评价集	区间值
优	(90,100]
良	(80,90]
中	(60,80]
差	(0,60]

表 4 直接判定为“差”的情形

Table 4 The cases directly judged as“poor”

判定情形	依据
1.未依法取得采矿许可证、安全生产许可证擅自从事矿产资源开采的。	中办国办〔2023〕21 号文 国家矿山局〔2022〕4 号文[注 1]
2.安全生产许可证有效期满未提出延期换证申请,经限期整改仍不申请办理延期换证手续的。	中办国办〔2023〕21 号文 国家矿山局〔2022〕4 号文
3.相邻非煤矿山之间最小距离不满足安全要求且拒不实施整合的。	国家矿山局〔2022〕4 号文
4.存在持勘查许可证采矿、以采代建、以采代探(掘)等违法行为且拒不整改的。	中办国办〔2023〕21 号文
5.违反建设项目安全设施“三同时”规定,拒不执行安全监管监察指令、逾期未完善“三同时”相关手续的。	国家矿山局〔2022〕4 号文
6.与煤共(伴)生金属非金属矿山不具备煤矿国家标准或者行业标准规定的安全生产条件,经停产整顿仍不具备的。	中办国办〔2023〕21 号文 国家矿山局〔2022〕4 号文
7.使用国家或者地方政府明令淘汰的落后工艺、技术和装备,在规定期限内拒不整改的。	中办国办〔2023〕21 号文 国家矿山局〔2022〕4 号文
8.存在重大事故隐患[注 2],一百八十日内三次或者一年内四次受到本法规定的行政处罚的。	
9.经停产停业整顿,仍不具备法律、行政法规和国家标准或者行业标准规定的安全生产条件的。	
10.不具备法律、行政法规和国家标准或者行业标准规定的安全生产条件,导致发生重大、特别重大生产安全事故的。	《安全生产法》第一百一十三条
11.拒不执行负有安全生产监督管理职责的部门作出的停产停业整顿决定的。	

注 1:“中办国办〔2023〕21 号文”原文《中共中央办公厅 国务院办公厅关于进一步加强矿山安全生产工作的意见》(厅字〔2023〕21 号);“国家矿山局〔2022〕4 号文”原文《国家矿山安全监察局关于印发〈关于加强非煤矿山安全生产工作的指导意见〉的通知》(2022 年 4 号文)。

注 2:重大事故隐患判定依据《金属非金属矿山重大事故隐患判定标准》(矿安〔2022〕88 号)和《金属非金属矿山重大事故隐患判定标准补充情形》(矿安〔2024〕41 号)。

3 综合评价实例

3.1 衡阳某金属地下矿山概况

衡阳某金属地下矿山主要矿产资源为钨矿,该矿山于 1982 年开展勘探坑道施工与采矿作业,现已建成采矿、选矿、尾矿处理、供水、供电系统及配套辅助系统,生产规模为 75.9 万 t/a,矿区面积 5.160 1 km^2,开采标高为+370～+110 m。矿区工程地质条件复杂程度为中等,采矿方法主要采用分段凿岩阶段出矿嗣后充填法;采用平硐+盲斜坡道开拓、无轨运输,目前主要有 6 条平硐;采用机械通风;矿区水文地质条件属简单类型,采用平硐自流方式排水。

3.2 数据收集及安全综合评价结果

本次研究以该矿山安全管家服务为基础开展数据收集工作,结合 2023 年 12 月和 2024 年 5 月开展的现场安全技术服务形成的总结报告,发现现场存在部分重大事故隐患,如个别安全出口周边 50 m 范围内存放木材等易燃材料、部分图纸未及时更新、现场作业人员未随身携带自救器等。经检查对比分析,生产现场重复出现或同类型隐患占比约 60%,如井下多处电缆、管线悬挂不规范,个别巷道存在片帮现象、垮落松石未及时清理堵塞排水沟,硐室杂物未及时清理,现场作业人员未正确佩戴劳动防护用品等。安全管理方面重复出现或同类型隐患占比约 20%,如安全投入计划或记录不规范、对外包单位的检查和记录不规范等。

根据衡阳某金属地下矿山实际情况对比表 4 情形进行判别,该矿山不存在表 4 所述情形。经评价,该矿山安全综合评价结果见表 5,由于评价指标得分表格篇幅过长,本文仅列出基于一级指标权重的安全综合评价结果。

表 5 衡阳某金属地下矿山基于一级指标权重的安全综合评价结果

Table 5 Safety comprehensive evaluation results of a metal underground mine in Hengyang based on the weights of first-level indicators

一级指标	D_i	D_j	F_i	W_j	加权得分
安全设施“三同时”程序	60	60	0	0.18	10.80
安全生产组织保障	105	87	0	0.19	16.53
安全教育培训	70	60	0	0.08	4.80
双重预防机制	65	57	0	0.13	7.41
危险物品及危险作业管理	50	32	6	0.06	2.18
生产系统安全保障	550	291	143	0.26	102.23
应急管理	50	34	0	0.05	1.70
外包工程管理	50	32	0	0.05	1.60
基于加权得分归一化计算最终得分(百分制)					73.10

3.3 安全综合评价结果分析

衡阳某金属地下矿山安全综合评价得分为73.1分,根据表3的评价标准,该矿山安全综合评价判定为"中",该矿山在安全设施"三同时"程序执行、安全教育培训和双重预防机制建设方面得分率均大于85%,但在危险物品及危险作业管理、生产系统安全保障、应急管理与外包工程管理方面得分率均低于75%。

结合该矿山近两次开展的安全技术服务总结情况,现状隐患排查未治理、治理不到位或同类型隐患反复出现问题比较突出,生产系统现场、作业现场安全管理以及外包工程管理方面仍存在一定的不足,员工安全意识有待提升、安全基础有待进一步夯实、安全管理亟需进一步强化。综上,安全综合评价得分基本符合矿山实际情况,评价结果可为矿山企业找出安全生产薄弱环节,进一步夯实安全基础、强化安全管理提供科学依据。

4 结论

(1) 从安全综合评价结果来看,衡阳某金属地下矿山安全综合评价得分为73.1分,判定为"中",其中矿山在危险物品及危险作业管理、生产系统安全保障、应急管理与外包工程管理方面得分率较低,与该矿山近两次开展的安全技术服务现场检查情况对比分析来看,基本符合矿山实际情况。建议充分发挥以双重预防机制体系为核心和基础的安全生产标准化成果优势,优化矿山安全管理结构、规范管理程序、创新管理方式,推动生产现场安全基础不断夯实,促进全员安全意识和安全能力有效提升,以进一步提高生产系统安全水平和应急管理水平。

(2) 基于矿山安全专家经验知识的金属非金属地下矿山安全综合评价指标体系和评价模型充分汲取行业专家经验知识,并根据专家资历在指标权重的基础上进行加权计算,再建立安全评价集进行判定,能有效提升金属非金属地下矿山安全综合评价的科学性和实用性,进而为矿山进一步提升安全水平提供理论依据。

(3) 由于指标体系较为繁杂,在对比实际情况进行打分时工作量大、耗时长,下一步拟考虑进行信息化研究。

参考文献(References):

[1] 国家统计局.中华人民共和国2012年国民经济和社会发展统计公报[J].中国统计,2013(3):6-13.
National Bureau of Statistics. Statistical communique of the People's Republic of China on the 2012 national economic and social development[J].China Statistics,2013(3):6-13.

[2] 国家统计局.中华人民共和国2023年国民经济和社会发展统计公报[J].中国统计,2024(3):4-21.
National Bureau of Statistics. Statistical communique of the People's Republic of China on the 2023 national economic and social development[J].China Statistics,2024(3):4-21.

[3] 中国政府网.中共中央办公厅 国务院办公厅关于进一步加强矿山安全生产工作的意见[EB/OL].(2023-09-06)[2024-10-29]. https://www.gov.cn/zhengce/202309/content_6902466.htm.

[4] 国家矿山安全监察局.国家矿山安全监察局关于印发《关于加强非煤矿山安全生产工作的指导意见》的通知矿安〔2022〕4号[EB/OL].(2022-02-16)[2024-10-29].https://www.chinamine-safety.gov.cn/zfxxgk/fdzdgknr/tzgg/202202/t20220216_408015.shtml.

[5] 国务院安委办、应急管理部持续推进安全生产专项整治三年行动[J].中国安全生产科学技术,2020,16(8):166.
Continuously advancing the three-year action for special safety production rectification by the office of the work safety committee of the state council and ministry of emergency management[J].Journal of Safety Science and Technology,2020,16(8):166.

[6] 李垚萱,崔益源,卢尧,等.2001—2022年我国非煤矿山行业重特大事故发生规律及对策措施[J].有色金属(矿山部分),2024,76(4):1-6.
LI Yaoxuan, CUI Yiyuan, LU Yao, et al. Patterns and countermeasures of major andextraordinary accidents in non-coal mines from 2001 to 2022 year in China[J].Nonferrous Metals(Mining Section),2024,76(4):1-6.

[7] 胡善志,廖文景,戴军,等.湖南省非煤矿山安全事故统计分析与预防措施[J].矿业研究与开发,2023,43(12):138-143.
HU Shanzhi, LIAO Wenjing, DAI Jun, et al. Statistical analysis and preventive measures of safety accidents in non-coal mines in Hunan Province[J]. Mining Research and Development,2023,43(12):138-143.

[8] 王学琛,李墨潇,郭昕耀.基于组合赋权的煤矿安全生产风险评价分析[J].武汉理工大学学报(信息与管理工程版),2016,38(5):538-542.
WANG Xuechen, LI Moxiao, GUO Xinyao. Risk assessment of coal mine safety production based on combination weighting[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Information & Management Engineering),2016,38(5):538-542.

[9] 刘晨君,沈孝威.基于应急专家知识的煤矿安全生产系统等级模糊综合评价研究[J].华北科技学院学报,2021,18(5):8-15.
LIU Chenjun, SHEN Xiaowei. Fuzzy comprehensive evaluation of coal mine safety production system based on emergency expert knowledge[J]. Journal of North China Institute of Science and Technology,2021,18(5):8-15.

[10] 宋陈澄,陈培友,夏宗洋.基于熵权模糊综合法的煤炭企业安全生产风险评价研究[J].煤炭经济研究,2018,38(1):26-31.

SONG Chencheng, CHEN Peiyou, XIA Zongyang. Study on risk evaluation of safety production in coal enterprises based on entropy weight fuzzy comprehensive method[J]. Coal Economic Research,2018,38(1):26-31.

[11] 葛珊珊.金属非金属矿山企业安全生产风险评价研究:以SY矿山有限公司为例[D].天津:河北工业大学,2020.
GE Shanshan. Research on safety production risk assessment of metal and nonmetal mining enterprises: take SY Mine Co., Ltd. as an example[D]. Tianjin: Hebei University of Technology,2020.

[12] 胡辉,胡涛,骆浩浩,等.模糊综合评价法在地下矿山安全生产中的应用研究[J].价值工程,2017(29):66-68.
HU Hui, HU Tao, LUO Haohao, et al. Application of fuzzy comprehensive evaluation method in safety production of underground mine[J].Value Engineering,2017(29):66-68.

[13] 蒋瑛,叶义成,王琴.加权时间序列预测模型及其在矿业安全系统中的应用[J].化工矿物与加工,2011,40(2):21-24.
JIANG Ying, YE Yicheng, WANG Qin. Weighted time series prediction model and its application in mining safety system[J]. Industrial Minerals & Processing,2011,40(2):21-24.

[14] 张乐,曹爽,李士雪,等.层次分析法的改进及其在权重确定中的应用[J].中国卫生统计,2016,33(2):154-155.
ZHANG Le, CAO Shuang, LI Shixue, et al. Improvement of analytic hierarchy process and its application in weight determination[J].Chinese Journal of Health Statistics,2016,33(2):154-155.

[15] 廖文景,曾凡超,焦文宇,等.基于24Model与CSQCA的金属非金属矿山安全事故组态构型[J].矿业研究与开发,2022,42(4):112-119.
LIAO Wenjing, ZENG Fanchao, JIAO Wenyu, et al. Configuration of safety accidents in metal and non-metal mines based on 24Model and CSQCA[J].Mining Research and Development,2022,42(4):112-119.

[16] 陈光伸,胡辉,胡涛,等.基于AHP-SCA-模糊综合评价法的露天矿安全评价应用研究[J].有色金属(矿山部分),2021,73(2):47-52.
CHEN Guangshen, HU Hui, HU Tao, et al. Application research on the open-pit safety evaluation on the basis of AHP-SCA-Fuzzy comprehensive evaluation method[J]. Nonferrous Metals (Mining Section),2021,73(2):47-52.

[17] CHAI Yi, WANG Yungang, WANG Yuansheng, et al. Safety evaluation of human-caused errors in civil aviation based on analytic hierarchy process and fuzzy comprehensive evaluation method[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology,2024,96(6):826-837.

[18] 常建娥,蒋太立.层次分析法确定权重的研究[J].武汉理工大学学报(信息与管理工程版),2007,29(1):153-156.
CHANG Jian'e, JIANG Taili. Research on the weight of coefficient through analytic hierarchy process[J].Journal of Wuhan University of Technology (Information & Management Engineering),2007,29(1):153-156.