基于ANP-TOPSIS的非煤地下矿山安全绩效评估*

刘业娇[1,2,3,4],高富[1],滕婷[1],佟瑞鹏[5],姜丰懿[1],闫文杰[1],马敏[6]

(1.内蒙古科技大学 矿业与煤炭学院, 内蒙古 包头市 014010;
2.内蒙古自治区矿业工程重点实验室, 内蒙古 包头市 014010;
3.内蒙古自治区煤炭安全开采与利用工程技术研究中心, 内蒙古 包头市 014010;
4.内蒙古煤炭绿色开采与绿色利用协同创新中心, 内蒙古 包头市 014010;
5.中国矿业大学(北京)应急管理与安全工程学院, 北京 100083;
6.鲁南技师学院, 山东 临沂市 276000)

摘要:为评估非煤地下矿山安全管理工作实施成效,建立了非煤地下矿山安全绩效评估指标体系,其中包括6项一级指标和30项二级指标;构建了基于ANP法和TOPSIS法的非煤地下矿山安全绩效评估方法,通过ANP法确定评估指标权重,结合TOPSIS法进行综合评估;最后以XD公司为例进行实证研究。评估结果显示:XD公司2023年的安全绩效评分最高,安全绩效为Ⅱ级,2020—2023年安全绩效综合得分年均增幅为5.36%;XD公司在安全教育培训方面相对较好,在风险分级管控与隐患排查治理方面相对薄弱;评估结果可为矿山企业的安全管理工作提供指导。

关键词:非煤地下矿山;安全绩效;指标体系;网络层次分析法;优劣解距离法

中图分类号:TD79 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)09-0125-10

Safety Performance Evaluation of Non-Coal Underground Mines Based on ANP-TOPSIS

LIU Yejiao[1,2,3,4], *GAO Fu*[1], *TENG Ting*[1], *TONG Ruipeng*[5], *JIANG Fengyi*[1], *YAN Wenjie*[1], *MA Min*[6]

(1.School of Mining and Coal, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou, Inner Mongolia 014010, China;
2.Inner Mongolia Key Laboratory of Mining Engineering, Baotou, Inner Mongolia 014010, China;
3.Inner Mongolia Research Center for Coal Safety Mining and Utilization Engineering and Technology, Baotou, Inner Mongolia 014010, China;
4.Inner Mongolia Cooperative Innovation Center for Coal Green Mining and Green Utilization, Baotou, Inner Mongolia 014010, China;
5.School of Emergency Management and Safety Engineering, China University of Mining & Technology-Beijing, Beijing 100083, China;
6.Lunan Technician College, Linyi, Shandong 276000, China)

Abstract: In order to evaluate the implementation effect of safety management in non-coal underground mines, a safety performance evaluation index system of non-coal underground mines was established, including 6 first-level indicators and 30 second-level indicators. The safety performance evaluation method of non-coal underground mines based on ANP method and TOPSIS method was constructed. The weight of evaluation index was determined by ANP method, and the comprehensive evaluation was carried out by TOPSIS method. Finally, XD company was taken as an example for empirical research. The evaluation results show that the safety performance score of XD company in 2023 is the highest, and the safety performance is grade Ⅱ. The average annual growth rate of safety performance comprehensive score from 2020 to 2023 is 5.36%. XD company is relatively good in safety education and training, and relatively weak in risk classification control and hidden danger

* **收稿日期**:2024-09-25

基金项目:国家自然科学基金项目(52464019, 52074302);内蒙古自然科学基金项目(2021MS05059, 2024LHMS05031);内蒙古自治区直属高校基本科研业务费项目(2023QNJS095, 2024QNJS044);内蒙古自治区重点研发和成果转化计划项目(2025SYFDZ0453、2025SYFSH0663)

作者简介:刘业娇(1982—),女,山东临沂人,博士,副教授,主要从事矿山灾害防治与风险管理研究。E-mail:liuyejiao408@163.com

通信作者:高富(2000—),男,山东德州人,硕士研究生,主要从事矿山风险管理研究。E-mail:17852979022@163.com

investigation and management. The evaluation results can provide guidance for the safety management of mining enterprises.

Key words: Non-coal underground mine, Safety performance, Index system, Analytic network process, Technique for order preference by similarity to an ideal solution

0 引言

非煤矿山主要是指开采除能源矿产之外的各种金属、非金属矿物资源的矿山。与煤矿相比,尽管非煤矿山不会发生瓦斯爆炸,但由于各种原因,仍存在诸多安全隐患,使得其安全风险较高[1-2]。井下开采的事故发生率普遍高于地面露天开采,通常是露天开采的1~2倍。尽管近年来非煤地下矿山安全生产形势逐渐好转,但地下矿山的生产环境较差,易出现矿井透水、大面积冒顶片帮、尾矿库溃坝等事故,安全生产形势依旧严峻。准确完成对非煤矿山安全管理的评估工作是矿山安全生产建设的重要一环,安全绩效的考核是衡量安全管理工作实际成效的重要手段之一。

国内外在安全绩效评估方法方面的研究也较多,李英攀等[3]从人、机、料、法、环等5要素出发,使用标准云与评价云,提出一种安全绩效云模型评价方法。QI Haonan等[4]采用非参数数据包络分析方法(DEA)对2003—2019年江苏、浙江和上海三个地区的建筑安全绩效进行了定量分析评价。LIU Yejiao等[5]构建了一套适用于煤矿安全管理绩效的评价指标体系,并运用BP神经网络对煤矿安全管理的绩效进行了评估。纪成君等[6]设计了装配式建筑项目安全绩效的评价体系,并采用偏序集方法对项目的安全绩效进行评定,克服了传统方法中指标权重难以精准确定的难题。杨鑫刚等[7]利用蒙特卡洛法的特点,通过大量试验对企业的安全绩效进行了快速且精确的评估。以上学者在对安全绩效评估指标进行设计时大多考虑滞后指标,较少考虑主动性指标。

本文在非煤地下矿山安全生产管理工作的基础上进行研究,考虑在事故发生前可以切断事故发生链条的控制因素(即主动性指标)与事故发生后的一些统计数据(即滞后指标),构建非煤地下矿山安全绩效评估指标体系;利用网络层次分析法(Analytic Network Process,ANP)分析不同指标之间的影响关系,计算安全绩效评估指标权重,结合优劣解距离法(Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution,TOPSIS)建立基于ANP-TOPSIS法的非煤地下矿山安全绩效评估方法,进行实证研究,得到相应企业安全绩效评估等级。该实证研究能够有效掌握企业安全管理工作实施成效,且对于非煤地下矿山企业安全绩效评估具有指导意义。

1 非煤地下矿山安全绩效评估指标体系

通过参考有关文献,对企业性质、作业内容、管理模式及非煤地下矿山相似企业的安全绩效评估研究[8-16]等内容进行了梳理,汇总初步识别的安全绩效影响因素。对初始安全绩效相关指标语义合并降维,结合企业安全管理工作实际情况、非煤地下矿山生产特点及最新的安全生产法,筛选出对非煤地下矿山安全生产具有重要影响的30项指标,将其分为组织管理、安全教育培训、风险分级管控与隐患排查治理、工作场所与设备设施、外包工程管理、应急与事故管理共6大类,建立的非煤地下矿山安全绩效评估指标体系如图1所示。

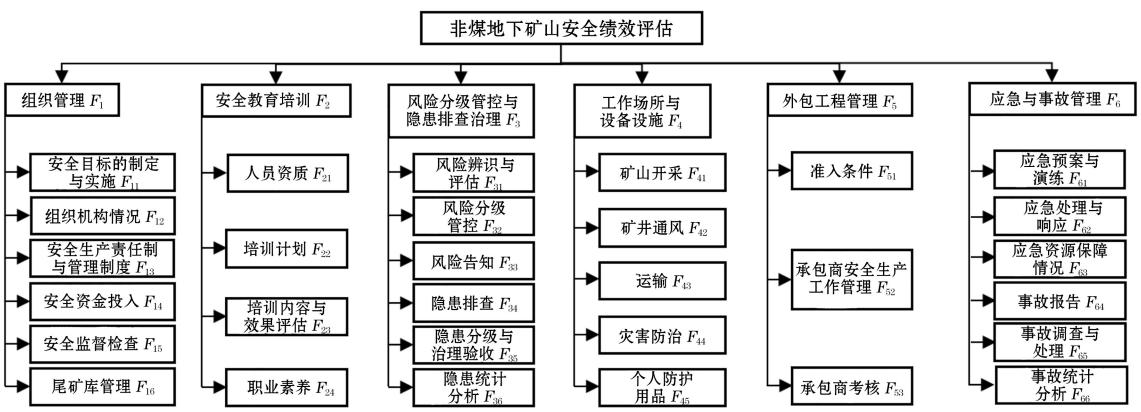


图1 非煤地下矿山安全绩效评估指标体系

Fig.1 Index system of safety performance evaluation of non-coal underground mines

2 基于 ANP-TOPSIS 的非煤地下矿山安全绩效评估方法

2.1 基于 ANP 确定指标权重

由于非煤地下矿山安全绩效评价因素之间的关系呈网络形式,采用层次分析法(Analytic Hierarchy Process,AHP)无法考虑各影响因素内在的复杂交互影响关系,因此,采用 ANP 法确定评价指标的权重。相对于 AHP 法来说,ANP 法考虑了因素间的相关性,引入反馈机制来解决系统内部因素的相互影响关系,以此克服 AHP 方法的局限性。ANP 方法的主要步骤包括因素相关性分析、构建 ANP 网络模型、构造未赋权超矩阵及计算赋权超矩阵和极限矩阵。

2.1.1 构建未赋权超矩阵

采用 1～9 标度法的专家调查问卷对网络层因素间的重要性进行两两比较,构造判断矩阵:

$$\boldsymbol{w}_{ij}=\begin{bmatrix} \boldsymbol{w}_{i1}^{j1} & \boldsymbol{w}_{i1}^{j2} & \cdots & \boldsymbol{w}_{i1}^{jmj} \\ \boldsymbol{w}_{i2}^{j1} & \boldsymbol{w}_{i2}^{j2} & \cdots & \boldsymbol{w}_{i2}^{jmj} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \boldsymbol{w}_{ini}^{j1} & \boldsymbol{w}_{ini}^{j2} & \cdots & \boldsymbol{w}_{ini}^{jmj} \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中:$\boldsymbol{w}_{ij}$ 为第 i 个指标与同级第 j 个指标的比较判断矩阵;$\boldsymbol{w}_{ini}^{jmj}$ 为安全绩效评估指标 F_{ini} 对 F_{jmj} 的影响程度;n_i 表示在第 i 个指标下的第 n 个指标;m_j 表示在第 j 个指标下的第 m 个指标。

评估指标相互影响的未赋权超矩阵为:

$$\boldsymbol{W}_m=\begin{bmatrix} \boldsymbol{w}_{11} & \boldsymbol{w}_{12} & \cdots & \boldsymbol{w}_{1j} \\ \boldsymbol{w}_{21} & \boldsymbol{w}_{22} & \cdots & \boldsymbol{w}_{2j} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \boldsymbol{w}_{i1} & \boldsymbol{w}_{i2} & \cdots & \boldsymbol{w}_{ij} \end{bmatrix} \tag{2}$$

2.1.2 计算赋权超矩阵

对未赋权超矩阵 $\boldsymbol{W}_m$ 进行归一化处理得到特征向量 $(x_{1j},x_{2j},\cdots,x_{ij},\cdots,x_{hj})$,其中 i 表示第 i 个指标,j 表示与第 i 个指标同一层级的第 j 个指标,h 表示相同层级指标的总个数。若第 i 个指标与同一层级的第 j 个指标无相互影响关系,则记为 $x_{ij}=0$。

将所有特征向量综合起来获得赋权矩阵 $\boldsymbol{X}_m$,即:

$$\boldsymbol{X}_m=\begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1j} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2j} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{i1} & x_{i2} & \cdots & x_{ij} \end{bmatrix} \tag{3}$$

通过对未赋权超矩阵 $\boldsymbol{W}_m$ 中的因素进行加权,得到赋权超矩阵 $\overline{\boldsymbol{W}}_m$:

$$\overline{\boldsymbol{W}}_m=\begin{bmatrix} x_{11}w_{11} & x_{12}w_{12} & \cdots & x_{1j}w_{1j} \\ x_{21}w_{21} & x_{22}w_{22} & \cdots & x_{2j}w_{2j} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{i1}w_{i1} & x_{i2}w_{i2} & \cdots & x_{ij}w_{ij} \end{bmatrix} \tag{4}$$

2.1.3 计算极限超矩阵

为了揭示各个因素之间的相互依赖性,需计算极限相对排序向量,具体计算公式如下:

$$\overline{\boldsymbol{W}}_m^{\infty}=\lim_{k\to\infty}(\overline{\boldsymbol{W}}_m)^k \tag{5}$$

式中:$\overline{\boldsymbol{W}}_m^{\infty}$ 是极限超矩阵;k 为一个趋近无穷大的数。

若存在收敛且唯一的极限,则极限矩阵内每行的数值为该行对应因素的指标权重向量 $\boldsymbol{Q}_{il}$。

2.2 基于 ANP-TOPSIS 的安全绩效评估方法

优劣解距离法(TOPSIS)是一种解决多属性多项式决策问题的高效手段。其核心思想是:对归一化处理后的原始数据矩阵进行分析,确定多个方案中的正理想解和负理想解,将正理想解看作是最优解,负理想解看作是最劣解,测度每个方案逼近最优解和远离最劣解的距离,通过比较这些距离,得出各评价对象相对于最优方案的相对接近程度,据此进行排序,排序结果能精确地反映各评价方案之间的差距。ANP-TOPSIS 法的基本步骤如下。

2.2.1 构建原始决策矩阵

收集计算各指标值所需要的数据,进而构建原始决策矩阵 $\boldsymbol{A}'$,即:

$$\boldsymbol{A}'=\begin{bmatrix} a'_{11} & a'_{1j} & \cdots & a'_{1n} \\ a'_{i1} & a'_{ij} & \cdots & a'_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a'_{m1} & a'_{mj} & \cdots & a'_{mn} \end{bmatrix} \tag{6}$$

式中:m 为评估方案即一级指标的个数;n 为评估方案下的指标个数。

2.2.2 建立标准化矩阵

评估指标需要进行同趋势化,对原始决策矩阵 $\boldsymbol{A}'$ 进行处理,得到矩阵 $\boldsymbol{A}$,即:

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix} a_{11} & a_{1j} & \cdots & a_{1n} \\ a_{i1} & a_{ij} & \cdots & a_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & a_{mj} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \tag{7}$$

其中,

$$\begin{cases} a_{ij}=\dfrac{a'_{ij}}{\max(a'_{ij})} & \text{正向指标} \\ a_{ij}=\dfrac{\min(a'_{ij})}{a'_{ij}} & \text{负向指标} \end{cases} \tag{8}$$

式中:$\max(a'_{ij})$为第 j 个指标的评分最大值;$\min(a'_{ij})$为第 j 个指标的评分最小值。

对原始数据矩阵进行归一化处理,即:

$$b_{ij}=\frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m}a_{ij}^{2}}} \tag{9}$$

式中,b_{ij} 为a_{ij} 经归一化处理后得到的各指标评分数据。

由此得出标准化矩阵 $\boldsymbol{B}$ 为:

$$\boldsymbol{B}=\begin{bmatrix} b_{11} & b_{1j} & \cdots & b_{1n} \\ b_{i1} & b_{ij} & \cdots & b_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{m1} & b_{mj} & \cdots & b_{mn} \end{bmatrix} \tag{10}$$

2.2.3 构造赋权标准化矩阵

利用ANP法求得各指标的权重,z_i 表示第 i 个一级指标在非煤地下矿山安全绩效系统中所占的比重,将权重乘以标准化矩阵 $\boldsymbol{B}$,得到赋权标准化矩阵 $\boldsymbol{C}$。

$$\boldsymbol{C}=\begin{bmatrix} b_{11}z_1 & b_{1j}z_1 & \cdots & b_{1n}z_1 \\ b_{i1}z_i & b_{ij}z_i & \cdots & b_{in}z_i \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{m1}z_m & b_{mj}z_m & \cdots & b_{mn}z_m \end{bmatrix} \tag{11}$$

2.2.4 正、负理想解计算

$$C^{+}=\{(\max(c_{ij})\mid j\in J),i=1,\cdots,m\}=\{c_1^{+},\cdots,c_n^{+}\} \tag{12}$$

$$C^{-}=\{(\min(c_{ij})\mid j\in J),i=1,\cdots,m\}=\{c_1^{-},\cdots,c_n^{-}\} \tag{13}$$

式中:C^{+} 是正理想解;C^{-} 是负理想解;J 为指标集合。

2.2.5 计算欧式距离和相对贴近度

样本指标与理想解之间的欧式距离和相对贴近度的计算公式如下:

$$D_i^{+}=\sqrt{\sum_{j=1}^{n}(c_{ij}-c_j^{+})^2} \tag{14}$$

$$D_i^{-}=\sqrt{\sum_{j=1}^{n}(c_{ij}-c_j^{-})^2} \tag{15}$$

$$E_i=\frac{D_i^{-}}{D_i^{+}+D_i^{-}} \tag{16}$$

式中:D_i^{+}、D_i^{-} 分别为指标 i 到正、负理想解之间的距离;E_i 为相对贴近度,通常情况下,$E_i\in(0,1)$。通过贴近度排序可以实现对指标的优劣评价,E_i 值越大,表明评估对象越优。

3 实证研究

XD公司始建于1989年,现有员工近600人,矿石生产能力在3 000 t/d以上。公司下设7个分矿,1个选冶厂。矿山开采方式为地下开采,开拓系统为平硐竖井联合开拓,采矿方法以浅孔留矿法为主,辅以全面法、中深孔采矿法。目前,XD公司是以黄金生产为主,集矿产资源勘查、开采、选冶为一体的矿业公司。以该公司为例,对其安全绩效进行评估。

3.1 ANP法确定指标权重

利用山西元决策软件公司开发的Yaanp V2.9软件进行辅助计算,并构建矿山安全绩效评估ANP网络层次结构模型,其中6个一级指标即为模型中的6个簇[16-18],二级指标分别为簇中的节点因素,所构建出的模型如图2所示。

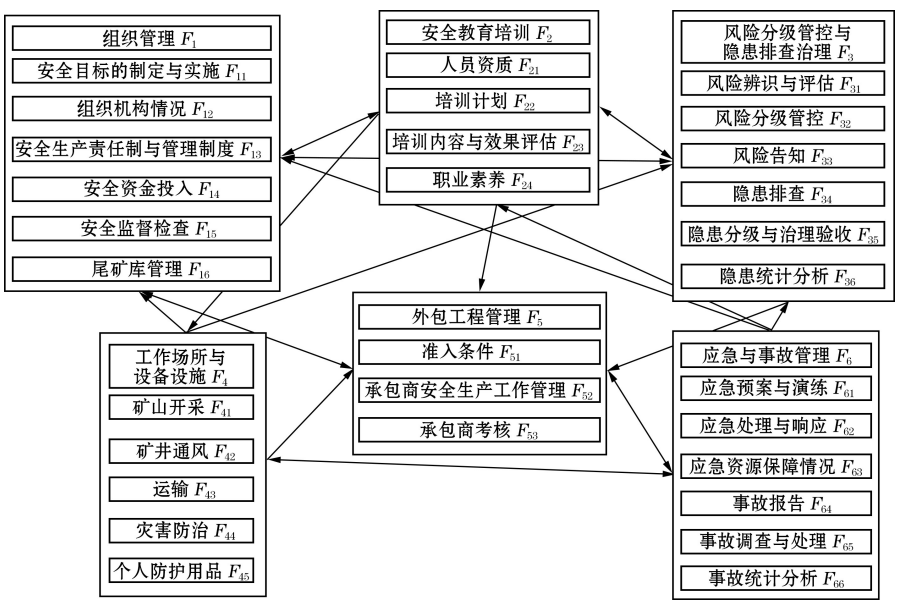


图2 非煤地下矿山安全绩效评估ANP网络模型

Fig.2 ANP network model for safety performance evaluation of non-coal underground mines

邀请 18 位专家对各项指标的重要度进行打分,专家成员信息见表 1,涉及安全、采矿、机械、应急救援等领域,包括安全管理者、技术专家、安全科研工作者等。以问卷星的形式向专家发放调研问题,评分标准见表 2。将问卷调查结果导入软件,进行一致性检验,对不一致判断矩阵进行修正,计算得到未赋权超矩阵、赋权超矩阵和极限超矩阵,当极限收敛且唯一时,得到基于专家群决策的非煤地下矿山安全绩效评估指标体系各二级指标及一级指标的权重[19],见表 3。

表 1 专家信息

Table 1 Information of experts

序号	专业领域	人数/人	说明
1	安全管理	9	包含安全负责人、安全管理人员、安全工程师等,多数具有 10 a 以上矿山相关工作经验。
2	采矿	3	技术人员、操作人员,具有 10 a 以上矿山工作经验。
3	机械、电气	3	技术人员、工程师,具有 10 a 以上矿山工作经验。
4	应急救援	3	矿山救援人员,具有 10 a 以上矿山工作经验。

表 2 安全指标评分标准

Table 2 Scoring criteria of safety indexes

序号	一级指标	二级指标	指标说明(分值)
1	组织管理 F_1	安全目标的制定与实施 F_{11}	(1) 制定了适合企业的安全方针、目标并分解至各部门、个人(30); (2) 定期进行考核(70)。
2		组织机构情况 F_{12}	(1) 依据相关要求设置了安全生产管理机构(60); (2) 按要求配备了安全管理人员和专业技术人员(40)。
3		安全生产责任制与管理制度 F_{13}	(1) 建立了安全生产责任制,并分解到岗位,定期进行考核(30); (2) 建立了安全管理制度、规章及操作规程等,并落实执行(70)。
4		安全资金投入 F_{14}	(1) 制定并执行了安全生产费用使用计划(60); (2) 依法缴纳工伤保险,投保安责险(40)。
5		安全监督检查 F_{15}	(1) 是否按要求进行日常性、周期性的内部监督自查(80); (2) 外部检查的隐患数量(20)。
6		尾矿库管理 F_{16}	(1) 是否制定作业计划,严格做好尾矿库排砂、筑坝、回水排水、防汛、抗震等日常安全管理(70); (2) 是否对坝体进行安全监测,定期复核坝体安全性。(30)
7	安全教育培训 F_2	人员资质 F_{21}	(1) 矿级负责人与专职安全管理人员满足相应的任职条件(50); (2) 新员工经安全培训合格后上岗,特种作业人员持证上岗(50)。
8		培训计划 F_{22}	(1) 是否根据员工不同岗位的不同需求制定相应培训计划(40); (2) 制定了定期的培训计划(60)。
9		培训内容与效果评估 F_{23}	(1) 安全培训是否覆盖所有员工,对新上岗、调换工种或长期停工后复工的员工安全培训符合相关要求(80); (2) 定期组织事故案例警示教育(10); (3) 开展培训效果评估(10)。
10		职业素养 F_{24}	(1) 熟悉本岗位的安全生产责任制、操作规程、危险有害因素及控制措施,掌握应急处置措施(50); (2) 规范操作,及时整改事故隐患,正确穿戴个人防护用品,参加各项安全培训(50)。
11	风险分级管控与隐患排查治理 F_3	风险辨识与评估 F_{31}	(1) 是否选择合适的方法开展风险评估,划分风险辨识单元,全面辨识危险有害因素(60); (2) 是否进行风险评估,确定风险等级,绘制风险分布四色图并公示,建立各级风险清单(40)。
12		风险分级管控 F_{32}	(1) 是否按照不同的风险和等级制定风险控制措施,划分明确风险管控责任部门、责任人,实施风险分级管控(70); (2) 重大风险管控是否由主要负责人组织制定并实施管控方案,按规定上报重大风险(30)。
13		风险告知 F_{33}	将风险评估结果及所采取控制措施对员工进行告知和培训,制定风险告知卡并向全体员工发放,告知卡内容应动态更新(100)。
14		隐患排查 F_{34}	(1) 是否根据不同需求明确不同排查周期,并定期开展隐患排查(80); (2) 建立了隐患排查台账,按照规定上报重大事故隐患(20)。
15		隐患分级与治理验收 F_{35}	(1) 一般隐患能立即治理须当班整改消除,不能立即治理的应及时汇报,制定具体措施并组织实施,重大隐患由主要负责人组织制定和实施专项治理方案,并及时上报(70); (2) 治理完成后由验收部门组织验收,合格后予以销号(30)。
16		隐患统计分析 F_{36}	(1) 建立了隐患排查治理台账,定期统计与分析隐患排查治理数据,据此重新梳理风险分级管控措施及隐患治理措施(80); (2) 建立了隐患排查奖惩机制(20)。

续表

序号	一级指标	二级指标	指标说明(分值)
17	工作场所与设备设施 F_4	矿山开采 F_{41}	(1) 采用了安全成熟的采矿工艺,采矿设备符合有关规定,且选择合适的井巷支护方式,定期检查维护(50); (2) 安全间距、设施、出口设置是否符合规定(20); (3) 供电电源电压符合规定,供电系统设置保护接地,配备电气保护,井下作业场所照明及电气硐室设置符合要求(30)。
18		矿井通风 F_{42}	(1) 井下空气成分、风量、温度、湿度及各类井巷风速符合规定(60); (2) 对通风系统是否进行监测和动态调整,通风构筑安全可靠(40)。
19		运输 F_{43}	(1) 提升系统及设施是否符合规定,定期进行检查维护(60); (2) 带式输送机是否采用阻燃型输送带并设置安全防护设施,有轨运输人员的设备设施、线路符合规定,无轨运输采用矿山专用设备(40)。
20		灾害防治 F_{44}	(1) 建立了分级顶板管理制度并制定相应安全技术措施(30); (2) 制定防水措施,设置地表及井下排水系统(30); (3) 设置井下消防系统,制定井下防灭火措施(20); (4) 综合防尘措施完善,防尘设备设施齐全,使用正常(20)。
21		个人防护用品 F_{45}	(1) 是否针对不同的工作场所的员工提供合适的个人防护用品(70); (2) 定期更换过期或破损的个人防护用品(30)。
22	外包工程管理 F_5	准入条件 F_{51}	(1) 承包商已合法获取矿山安全生产许可证及相应级别的施工资质(20); (2) 设立安全生产管理机构或配备专业安全生产管理人员,建立健全了安全生产管理制度和责任制度,员工培训合格后上岗(80)。
23		承包商安全生产工作管理 F_{52}	(1) 签订安全生产管理协议,将承包商的安全生产工作纳入统一管理(50); (2) 定期对其安全生产情况进行监督检查(50)。
24		承包商考核 F_{53}	定期对承包商资质等级、管理水平、技术与服务质量进行考核(100)。
25	应急与事故管理 F_6	应急预案与演练 F_{61}	(1) 制定了应急救援预案,包括综合预案、专项预案、现场处置方案等,并进行评审(70); (2) 制定了应急演练计划和方案,定期进行预案演练(30)。
26		应急处置与响应 F_{62}	(1) 在突发事件发生后,是否迅速启动应急预案,组织专业人员进行救援(80); (2) 处置完成后,对整个应急处置过程进行总结评估(20)。
27		应急资源保障情况 F_{63}	配备应急救援物资、设备设施及应急响应队伍(100)。
28		事故报告 F_{64}	(1) 明确了内外部事故事件报告的程序(50); (2) 按规定对事故事件进行报告(50)。
29		事故调查与处理 F_{65}	(1) 对事故事件进行调查,按规定编写事故事件调查报告(40); (2) 根据调查报告,落实整改措施(60)。
30		事故统计分析 F_{66}	建立事故事件管理台账,并定期进行数据统计与分析工作(100)。

表 3 安全绩效评估指标权重

Table 3 Index weights for safety performance evaluation

一级指标	权重	二级指标	簇归一化权重	权重
组织管理 F_1	0.169	安全目标的制定与实施 F_{11}	0.213	0.036
		组织机构情况 F_{12}	0.290	0.049
		安全生产责任制与管理制度 F_{13}	0.225	0.038
		安全资金投入 F_{14}	0.118	0.020
		安全监督检查 F_{15}	0.095	0.016
		尾矿库管理 F_{16}	0.059	0.010
安全教育培训 F_2	0.132	人员资质 F_{21}	0.144	0.019
		培训计划 F_{22}	0.288	0.038
		培训内容与效果评估 F_{23}	0.348	0.046
		职业素养 F_{24}	0.220	0.029
风险分级管控与隐患排查治理 F_3	0.174	风险辨识与评估 F_{31}	0.333	0.058
		风险分级管控 F_{32}	0.167	0.029
		风险告知 F_{33}	0.092	0.016
		隐患排查 F_{34}	0.109	0.019
		隐患分级与治理验收 F_{35}	0.190	0.033
		隐患统计分析 F_{36}	0.109	0.019
工作场所与设备设施 F_4	0.274	矿山开采 F_{41}	0.343	0.094
		矿井通风 F_{42}	0.208	0.057
		运输 F_{43}	0.182	0.050
		灾害防治 F_{44}	0.197	0.054
		个人防护用品 F_{45}	0.069	0.019
外包工程管理 F_5	0.117	准入条件 F_{51}	0.291	0.034
		承包商安全生产工作管理 F_{52}	0.504	0.059
		承包商考核 F_{53}	0.205	0.024

续表

一级指标	权重	二级指标	簇归一化权重	权重
应急与事故管理 F_6	0.134	应急预案与演练 F_{61}	0.313	0.042
		应急处置与响应 F_{62}	0.201	0.027
		应急资源保障情况 F_{63}	0.134	0.018
		事故报告 F_{64}	0.134	0.018
		事故调查与处理 F_{65}	0.104	0.014
		事故统计分析 F_{66}	0.112	0.015

3.2 矿山安全绩效基本模型仿真及结果分析

根据 XD 公司的安全生产实际情况,并结合安全相关标准,对模型中 30 个评价指标按由优到劣划分Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ共 4 个评价等级,并进行赋值[20],对如人员资质这样的安全管理要求较高的指标,在划分等级赋分时赋值较高,见表 4。邀请专家对矿山安全绩效评价的 30 个二级指标进行评分,XD 公司 2020—2023 年的安全绩效评价指标的平均得分见表 4 中的后 4 列数据。

表 4 XD 公司安全绩效评估分级标准及专家评分结果

Table 4 Grading standards of safety performance evaluation and expert rating results for XD company

一级指标	二级指标	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	平均分值			
						2020 年	2021 年	2022 年	2023 年
组织管理 F_1	安全目标的制定与实施 F_{11}	95	90	85	75	86.6	89.1	89.2	89.5
	组织机构情况 F_{12}	95	90	85	75	91.4	91.3	94.0	94.1
	安全生产责任制与管理制度 F_{13}	95	90	85	75	89.5	92.4	92.8	93.1
	安全资金投入 F_{14}	97	92	88	75	90.3	91.6	93.2	93.5
	安全监督检查 F_{15}	95	90	85	75	91.5	91.4	94.3	94.3
	尾矿库管理 F_{16}	95	90	85	75	90.3	89.9	91.1	91.0
安全教育培训 F_2	人员资质 F_{21}	97	92	88	75	94.1	94.5	95.5	95.6
	培训计划 F_{22}	95	90	85	75	91.1	91.1	92.2	92.5
	培训内容与效果评估 F_{23}	95	90	85	75	91.6	91.6	92.3	93.1
	职业素养 F_{24}	95	90	85	75	90.7	91.5	90.3	92.5
风险分级管控与隐患排查治理 F_3	风险辨识与评估 F_{31}	95	90	85	75	87.4	86.8	89.9	90.2
	风险分级管控 F_{32}	95	90	85	75	85.3	86.9	89.6	91.0
	风险告知 F_{33}	95	90	85	75	84.2	84.6	88.5	89.5
	隐患排查 F_{34}	95	90	85	75	89.7	90.5	91.2	91.4
	隐患分级与治理验收 F_{35}	95	90	85	75	88.5	89.2	91.5	91.5
	隐患统计分析 F_{36}	95	90	85	75	83.9	85.1	85.8	87.0
工作场所与设备设施 F_4	矿山开采 F_{41}	95	90	85	75	90.1	90.8	91.8	92.0
	矿井通风 F_{42}	95	90	85	75	89.5	89.5	91.7	91.8
	运输 F_{43}	95	90	85	75	90.1	92.2	92.5	92.6
	灾害防治 F_{44}	95	90	85	75	89.0	90.5	93.3	93.5
	个人防护用品 F_{45}	95	90	85	75	89.2	90.3	91.2	91.8
外包工程管理 F_5	准入条件 F_{51}	95	90	85	75	89.4	90.8	93.4	93.4
	承包商安全生产工作管理 F_{52}	95	90	85	75	88.5	89.5	91.0	91.3
	承包商考核 F_{53}	95	90	85	75	88.4	87.8	88.5	88.4
应急与事故管理 F_6	应急预案与演练 F_{61}	95	90	85	75	88.5	89.5	90.9	91.2
	应急处置与响应 F_{62}	95	90	85	75	92.2	92.9	92.5	92.8
	应急资源保障情况 F_{63}	95	90	85	75	90.5	90.9	92.0	92.5
	事故报告 F_{64}	95	90	85	75	89.2	89.2	89.5	89.0
	事故调查与处理 F_{65}	95	90	85	75	89.5	89.8	90.8	91.0
	事故统计分析 F_{66}	95	90	85	75	88.5	89.6	89.9	89.3

用 SPSSPRO 软件对基于 ANP-TOPSIS 的矿山安全绩效评估进行辅助计算分析,经过运算最终得到正、负理想解距离和 XD 公司安全绩效最终综合评估得分,见表 5。

表 5 2020—2023 年 XD 公司的安全绩效评估综合得分

Table 5 Comprehensive scores of safety performance evaluation for XD company from 2020 to 2023

年份	正理想解距离(D^+)	负理想解距离(D^-)	综合得分值	排序	评估等级
2020	0.299 408 59	0.720 371 15	0.706 398 77	4	Ⅲ
2021	0.262 743 10	0.758 912 10	0.742 826 05	3	Ⅲ
2022	0.194 025 76	0.827 753 58	0.810 109 92	2	Ⅱ
2023	0.177 380 43	0.843 642 10	0.826 271 78	1	Ⅱ

通过 TOPSIS 法,以综合得分指数来衡量 XD 公司安全绩效,得分越高,代表安全绩效越好。根据表 5 中综合得分值可以看出,在 2020—2023 年这 4 个年度内,XD 公司的安全绩效呈现上升趋势。其中 2020 年得分 0.706 4,评估等级为Ⅲ级;2021 年得分 0.742 8,评估等级为Ⅲ级;2022 年得分 0.810 1,评估等级为Ⅱ级;2023 年得分 0.826 3,评估等级为Ⅱ级。2023 年安全绩效综合得分比 2020 年提高了 16.97%,年均增幅 5.36%。

XD 公司 2020—2023 年的安全绩效综合评估得分的变化趋势如图 3 所示,与该公司实际安全管理状态相符。

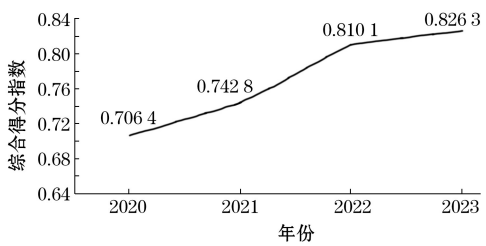


图 3 2020—2023 年 XD 公司安全绩效评估得分的变化趋势

Fig.3 Score change trend of safety performance evaluation of XD company from 2020 to 2023

3.3 矿山不同子系统对安全绩效的影响及结果分析

为了进一步了解 XD 公司安全管理情况,绘制了各二级指标专家打分雷达图,如图 4 所示,并计算了各一级指标的综合评估得分,见表 6。由图 4 和表 6 可知,XD 公司在安全教育培训方面整体水平较高,表明公司重视安全教育培训工作,对人员的安全素质要求严格,能够做到及时更新培训内容,全面培养员工的安全能力[20-21];而在风险分级管控与隐患排查治理方面相对薄弱,这主要归因于公司近年来才开始实施风险分级管控与隐患排查治理,较其他方面缺乏经验,公司尤其需要加强员工风险告知和隐患统计分析方面的工作能力。

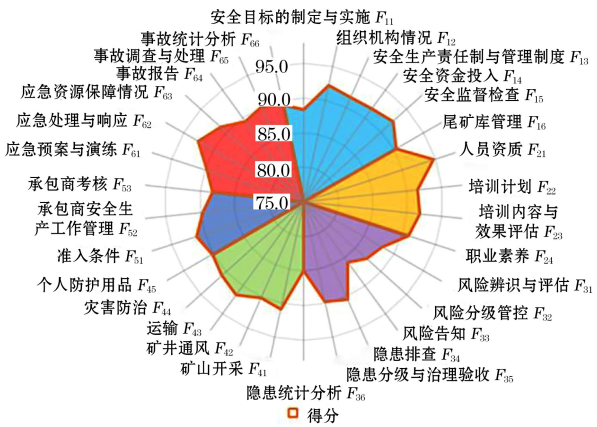


图 4 30 个二级指标的分值雷达图

Fig.4 Scoring radar chart of 30 secondary indexes

表 6 2020—2023 年 XD 公司安全绩效一级评价指标的得分

Table 6 Scores of level 1 indexes of safety performance evaluation for XD company from 2020 to 2023

评估指标	年份			
	2020	2021	2022	2023
组织管理 F_1	0.720 9	0.787 1	0.840 4	0.849 5
安全教育培训 F_2	0.816 9	0.828 3	0.844 1	0.892 3
风险分级管理与隐患排查治理 F_3	0.588 5	0.610 8	0.728 2	0.758 7
工作场所与设施设备 F_4	0.734 2	0.781 5	0.855 0	0.864 4
外包工程管理 F_5	0.686 7	0.723 5	0.795 7	0.801 2
应急与事故管理 F_6	0.729 7	0.762 0	0.798 2	0.799 8

由上述分析可知,本文建立的基于 ANP-TOPSIS 的非煤地下矿山安全绩效评估方法可以考虑单一评估因子对评估结果的影响,能够更客观地对企业进行系统性的安全绩效评估,且可以根据评估结果发现企业安全管理的薄弱环节,为企业制定相应的整改措施,并提供参考依据。

4 结论

(1) 通过参考有关文献,并结合矿山、企业安全管理工作实际情况及非煤地下矿山的生产特点,构建了非煤地下矿山安全绩效评估指标体系,其中包含组织管理、安全教育培训、风险分级管控与隐患排查治理、工作场所与设备设施、外包工程管理、应急与事故管理共 6 个一级指标和 30 个二级指标。

(2) 采用基于 ANP-TOPSIS 构建的非煤地下矿山安全绩效评估方法。结合评估模型对 XD 公司 2020 年至 2023 年的安全绩效进行了评估实证研究。评估结果表明,XD 公司在 2020 年期间安全绩效评分为 0.706 4,评分等级为Ⅲ级;2021 期间安全绩效评分为 0.742 8,评分等级为Ⅲ级;2022 年安全

绩效评分为 0.810 1,评分等级为Ⅱ级;2023 年安全绩效评分为 0.826 3,评分等级为Ⅱ级。XD 公司 2023 年的安全绩效综合得分比 2020 年增加 16.97%,年均增幅 5.36%。XD 公司在安全教育培训方面相对较好,在风险分级管控与隐患排查治理方面相对薄弱,今后应加强员工风险告知和隐患统计分析方面的工作能力。

(4) 基于 ANP-TOPSIS 的安全绩效评估方法得到的评估结果较准确,评估步骤相对较为繁琐,而且在对各个指标选取及权重赋值时具有一定的主观性,在一定程度会影响评估结果的准确性。

参考文献(References):

[1] 王洋,罗志伟.非煤地下矿山生产安全管理现状及分析[J].现代矿业,2021,37(5):222-224.
WANG Yang, LUO Zhiwei. Present situation and analysis of production safety management in non-coal underground mines[J]. Modern Mining,2021,37(5):222-224.

[2] 赵波.非煤地下矿山危险因素及安全管理对策[J].世界有色金属,2021,46(1):181-182.
ZHAO Bo. Risk factors and safety management countermeasures of non coal underground mine[J]. World Nonferrous Metals,2021,46(1):181-182.

[3] 李英攀,刘名强,王芳,等.装配式建筑项目安全绩效云模型评价方法[J].中国安全科学学报,2017,27(6):115-120.
LI Yingpan, LIU Mingqiang, WANG Fang, et al. Safety performance assessment of fabricated building project based on cloud model[J]. China Safety Science Journal,2017,27(6):115-120.

[4] QI Haonan, ZHOU Zhipeng, LI Nan, et al. Construction safety performance evaluation based on data envelopment analysis (DEA) from a hybrid perspective of cross-sectional and longitudinal[J]. Safety Science,2022,146.

[5] LIU Yejiao, TIAN Zhichao, HUANG Dongmei. Application of BP neural network in coalmine safety management performance evaluation [J]. Advanced Materials Research,2013,2482(734-737):2925-2929.

[6] 纪成君,毛瀛.基于偏序集的装配式建筑项目安全绩效评价[J].辽宁工程技术大学学报(社会科学版),2021,23(6):435-441.
JI Chengjun, MAO Ying. Safety performance evaluation of prefabricated building project based on partial sequence set [J]. Journal of Liaoning Technical University (Social Science Edition),2021,23(6):435-441.

[7] 杨鑫刚,王起全,陈文涛,等.基于蒙特卡洛法的机械制造企业安全绩效评估研究[J].西安科技大学学报,2022,42(6):1189-1197.
YANG Xin'gang, WANG Qiquan, CHEN Wentao, et al. Research on safety performance evaluation for machinery manufacturing enterprises based on Monte Carlo method[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology,2022,42(6):1189-1197.

[8] 齐蕊.地下金属矿山企业安全绩效评估研究[D].北京:中国地质大学,2009.
QI Rui. Study on safety performance evaluation of underground gold mine enterprise [D]. Beijing: China University of Geosciences,2009.

[9] 张良.基于卓越模式的煤矿安全绩效指标体系研究[D].西安:西安科技大学,2015.
ZHANG Liang. Study on index system of mine safety performance based on performance excellence model[D]. Xi'an:Xi'an University of Science and Technology,2015.

[10] 李雪婷.企业安全管理绩效测评方法的设计研究[D].北京:中国地质大学,2019.
LI Xueting. Research on the development of Chinese enterprise safety performance measurement tool [D]. Beijing:China University of Geosciences,2019.

[11] 张凡.中小企业安全生产标准化绩效模型及推进方法研究[D].广州:华南理工大学,2016.
ZHANG Fan. Study on the model and propelling method of small and medium-sized enterprises work safety standardization safety performance[D]. Guangzhou: South China University of Technology,2016.

[12] 贾雯靖.安全绩效测量指标体系建立及其适用性研究[D].北京:中国地质大学,2014.
JIA Wenjing. Establishment and research applicabilityon safety performance measurement indicator system [D]. Beijing:China University of Geosciences,2014.

[13] 田森,陈建宏.基于多理论组合决策的矿山安全绩效评价规律分析[J].中南大学学报(自然科学版),2016,47(6):2073-2082.
TIAN Sen, CHEN Jianhong. Law analysis of performance evaluation for mine safety based on combinatorial decision by multiple theories[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2016,47(6):2073-2082.

[14] 刘业娇,任玉辉,任静静,等.基于 BP 神经网络的煤矿安全管理绩效评价[J].煤炭工程,2013(2):135-137+140.
LIU Yejiao, REN Yuhui, REN Jingjing, et al. Evaluation on mine safety management performances base on BP neural network[J]. Coal Engineering,2013(2):135-137+140.

[15] 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.

[16] 藏英涵,李先福,吝曼卿,等.磷矿井下通风系统风险评估与监测预警研究[J].矿业研究与开发,2023,43(11):115-121.
ZANG Yinghan, LI Xianfu, LIN Manqing, et al. Research on risk assessment and monitoring and early warning of underground ventilation system in phosphate mine [J]. Mining Research and Development,2023,43(11):115-121.

[17] JISKANI I M, HAN Shuai, REHMAN A U, et al. An integrated entropy weight and grey clustering method-based evaluation to improve safety in mines [J]. Mining, Metallurgy & Exploration,2021,38(4):1773-1787.

[18] LIU Yejiao, TENG Ting, CHEN Ying, et al. Research on construction method and information system of double prevention mechanism in iron mine[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,2022,983(1):012069.

[19] CAO Zehao, TIAN Sen, SI Hu, et al. Safety performance evaluation (SPE) of uncertainty quantification based on grey dynamic modeling: case study of a coal mine in China [J]. Geotechnical and Geological Engineering,2020,38(4):3903-3913.

[20] 祁强强.基于 AHP-TOSIS 的集团公司安全管理评价模型研究[J].安全,2022,43(2):60-66.
QI Qiangqiang. Research on safety management evaluation model of group company based on AHP-TOSIS[J]. Safety & Security,2021,43(2):60-66.

[21] 陈颖,陶可,刘业娇,等.非煤矿山风险分级管控和隐患排查治理建设方法研究[J].工业安全与环保,2021,47(5):55-58.
CHEN Ying, TAO Ke, LIU Yejiao, et al. Research on the construction methods of risk classification management and hidden danger investigation and treatment in non-coal mine [J]. Industrial Safety and Environmental Protection,2021,47(5):55-58.