

中文引用格式:王国栋,胡家瑜. 基于 ANP-VIKOR 的青藏高原金属矿山智慧应急能力综合评价[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(8): 253-262.

英文引用格式:WANG Guodong, HU Jiayu. Comprehensive evaluation of intelligent emergency capability of metal mines on Qinghai-Tibet plateau based on ANP-VIKOR [J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(8): 253-262.

基于 ANP-VIKOR 的青藏高原金属矿山 智慧应急能力综合评价*

王国栋^{1,2}会计师, 胡家瑜^{**3}

(1 中国矿业大学(北京)文法学院, 北京 100083; 2 中国黄金集团
资产管理有限公司 北京 100011; 3 中国职业安全健康协会, 北京 100029)

中图分类号:X913.4

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.08.1530

【摘要】 为提升青藏高原金属矿山的应急管理能力和智慧应急能力,基于智能技术的应用,构建智慧应急能力综合评价模型;通过分析青藏高原地区的特殊地理条件与复杂的矿山作业环境,提出包含智能技术、行为安全、资源配置、制度机制及社群关系 5 个维度的评价指标体系;运用网络层次分析法(ANP)方法确定指标权重,使用多准则妥协解排序法(VIKOR)系统评估青藏高原 3 座典型金属矿山(矿山 Y、矿山 V、矿山 J)的智慧应急能力。结果表明:基于 ANP-VIKOR 的智慧应急能力综合评价体系涵盖“智能技术、行为安全、资源配置、制度机制、社群关系”5 大维度共 20 项评价指标,充分融合高原地区复杂地理环境、极端气候条件与矿山运营特征,有助于弥补高原地区智慧应急能力量化研究的不足。实例中,矿山 J 的智慧应急管理能力表现最优,尤其在智能技术和应急响应方面具有显著优势;矿山 Y 在技术应用上表现出中等水平,后期应急管理能力有所提升;矿山 V 在资源配置与应急响应速度上存在改进空间,三者智慧应急能力方面差异明显,反映出高原矿区智慧管理水平的不均衡性,验证了所构建模型的有效性与适应性。

【关键词】 网络层次分析法(ANP); 多准则妥协解排序法(VIKOR); 青藏高原; 金属矿山; 智慧应急能力; 综合评价

Comprehensive evaluation of intelligent emergency capability of metal mines on Qinghai-Tibet plateau based on ANP-VIKOR

WANG Guodong^{1,2}, HU Jiayu³

(1 School of Humanities and Law, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100091, China; 2 China National Gold Group Asset Management Co., Ltd., Beijing 100011, China; 3 China Occupational Safety and Health Association, Beijing 100029, China)

Abstract: In order to enhance the emergency management capabilities of metal mines on Qinghai-Tibet Plateau, a comprehensive intelligent emergency capability evaluation model was developed based on the application of intelligent technology. By analyzing the region's unique geographical conditions and complex mining operations, a five-dimensional evaluation index system was proposed, encompassing intelligent

* 文章编号:1003-3033(2025)08-0253-10; 收稿日期:2025-04-14; 修稿日期:2025-06-18

** 通信作者:胡家瑜(1993—),男,山东烟台人,博士研究生,主要研究方向为安全生产与应急管理。E-mail:332845325@qq.com。

technology, behavioral safety, resource allocation, institutional mechanisms, and community relations. This study employed ANP method to determine indicator weights and applied the VIKOR multi-criteria decision-making method to systematically assess the intelligent emergency capabilities of three representative metal mines (Mines Y, V, and J) on the Qinghai-Tibet Plateau. The findings indicate that the comprehensive evaluation system of smart emergency capability based on ANP-VIKOR covers 5 dimensions, including " intelligent technology, behavior safety, resource allocation, mechanism, and community relationship ", with a total of 20 evaluation indicators. It fully integrates the complex geographical environment, extreme climatic conditions, and mining operation characteristics of the region. It is helpful to make up for the lack of quantitative research on smart emergency capability in plateau areas. In the case, the mine J exhibits the strongest intelligent emergency management capabilities, particularly excelling in intelligent technology and emergency response. Mine Y demonstrates a moderate level of technological application with notable improvements in emergency management over time, while Mine V shows room for improvement in resource allocation and emergency response speed. The significant differences in emergency capabilities reflect the uneven development of intelligent emergency systems in plateau mining areas. The effectiveness and adaptability of the constructed model are verified.

Keywords: analytic network process (ANP); vlsekriterijumska optimizacija kompromisno resenje (VIKOR); Qinghai-Tibet plateau;metal mines; intelligent emergency capability

0 引言

青藏高原作为世界第三极,拥有 10 个主要成矿带,是我国金属矿产资源最丰富的地区之一。据统计,仅冈底斯成矿带东段的墨竹工卡县-尼木县-谢通门县一带,铜资源探明储量已超过 4 500 万 t,占全国(不含港澳台地区)总储量的 50%,是中国最重要的铜矿资源接续基地。此外,该地区还蕴藏着大量的铬铁矿和稀有金属矿,如铍、钽、铌等,具有极高的经济和战略价值^[1]。青藏高原的资源开发并非易事,该地区地势高峻,气候条件极为严酷,且地质构造复杂,给矿产资源的勘探和开采带来极大困难。近年来,青藏高原矿区频发安全事故,进一步凸显出该地区在应急管理方面所面临的严峻挑战,开展智慧应急管理研究具有重要的现实意义。

智慧应急管理源于信息技术与应急管理的深度融合。国外智慧应急管理方面的研究起步较早,但针对高寒高海拔地区矿山应急管理的研究案例较为有限(主要集中在安第斯山脉)。VALERO 等^[2]针对 Codelco Andina 铜矿研究表明:高寒地区矿山活动易受雪崩和极端天气的影响。CACCIUTTOLO 等^[3]从环境影响的角度出发,评估了安第斯山脉地区铜矿和金矿尾矿泄漏造成的后果。CARREÑO^[4]研究了安第斯社会与矿业活动之间的关系,在环境安全和文化保留方面需要进行有机平衡。HALABI 等^[5]探讨了加拿大偏远高海拔地区矿山面临的安全与职业健康挑战。国内学者在青藏高原地区矿山

应急管理开展了相关研究。在地质灾害及应对方面,崔鹏等^[6]指出随着气候变暖和人类活动的增加,青藏高原及周边地区的冰川灾害风险也在加大。张永双等^[7]重点分析了青藏高原东缘的活动断裂及其地质灾害效应,为高原地区的灾害危险源分析提供了科学依据。在事故及致因研究方面,黄知恩等^[8]基于人因分析与分类系统模型,分析了高原矿山作业中的疲劳与人因失误率。在智慧矿山相关技术应用方面,丁文清等^[9]指出,青藏高原地区矿产资源丰富、地势偏远、岩体裸露,这些条件非常适合高光谱遥感技术的应用,能进一步提升矿山智能化水平。综上,现有研究还存在以下不足:①现有体系仍存在系统性不足、科学性有待提升,特别是在高寒高海拔矿区的应用方面仍较为零散,缺乏针对该特殊环境的综合性、定量化智慧应急能力评价框架。②对于一般应急能力综合评价体系来说,指标体系的量化程度往往不足,需要进一步探索和完善。③现有研究多集中在非金属矿山和煤矿的应急管理,对金属矿山应急管理,特别是高海拔地区金属矿山智慧应急管理,研究的深度和广度还有待加强。

鉴于此,笔者拟组合网络层次分析法(Analytic Network Process, ANP)及多准则妥协解排序法(VlseKriterijumska Optimizacija Kompromisno Resenje, VIKOR),构建青藏高原金属矿山智慧应急能力综合评价模型,弥补高寒高海拔地区智慧应急管理研究的不足,以期提升青藏高原矿山企业的应急管理水平。

1 智慧应急能力综合评价指标体系

1.1 智慧应急能力综合评价指标体系构建原则

在青藏高原金属矿山的智慧应急能力评价体系中,指标的选取需结合该区域矿山独特的地理环境、复杂的气候条件以及高风险特征进行考量,同时,要关注智慧应急管理的前沿技术应用和全局协调需求。基于这些特征,提出以下5项原则:

1) 环境适应性与鲁棒性原则。针对青藏高原的高海拔、低氧和寒冷等特殊自然条件,应急管理体系需具备强大的环境适应性和鲁棒性,以保障各类监测、预警和响应技术在恶劣环境下依然能高效稳定运作。指标选取集中在技术设备的耐候性、人员适应力和系统应变能力,确保智慧应急管理能够在极端条件下可靠运行^[10]。

2) 智能响应与动态平衡原则。面对高原地区频繁发生的地质灾害(如滑坡、雪崩、泥石流)与远程通信难、交通不畅等制约条件,智慧应急体系应具备快速、智能的响应能力,并在突发事件中动态调整资源与策略。该原则强调通过智能技术的运用,实现实时监测、数据分析和快速预警,确保决策的精准性和执行的及时性,进而在复杂情境中保持动态平衡^[11]。

3) 系统工程与资源整合原则。在地广人稀、资源配置分散的青藏高原,智慧应急管理需以系统工程理念推进“人-技-物-制”的协同融合。指标体系需围绕各子系统间的资源配置和协同效率,以实现资源的最优配置,并增强应急响应的整体效能^[12]。

4) 社区合作与风险管控原则。青藏高原区域的应急管理不仅涉及企业内部风险,还关系到当地社区的整体安全与相互信任。该原则关注社区的参与度、信息共享及舆情监测,通过社区合作强化社会资源的整合,提升应急系统的社会适应性与公众认可度,确保风险能及时得到有效管控^[13]。

5) 简约性与可操作性原则。指标体系在构建过程中需避免过度复杂化,确保指标设计简洁明了、结构清晰,减少冗余与重复。同时,需确保各项指标在实际应用中的可操作性,方便数据采集、分析与结果解释,提升评价体系的实用性与可推广性。

1.2 综合评价指标体系选取与确定

针对青藏高原金属矿山的智慧应急能力综合评价体系,采用科学严谨的多轮专家评分方法,以确保指标体系的全面性与适用性。首先,选取11位具有丰富矿山应急管理经验和专业学术背景的专家,涵

盖矿山工程、安全管理、环境保护等领域,以确保专家组的多样性和代表性^[14]。指标初选时,基于青藏高原的独特环境和实际应急需求,通过理论综述与事故原因分析,筛选出5个一级指标和21个二级指标。

在第一轮评分中,对初选指标进行肯德尔和谐系数 W 检验,结果表明:专家评分具备较高一致性($W=0.607, p=0.000$)。基于此,设定筛选界值,包括算术平均值、变异系数(Coefficient of Variance, CV)和满分频率等关键指标,确定是否保留某一指标。根据筛选结果,删除争议较大的法规遵循度和合作协议综合效益2项指标,同时,增设物资储备充足性这一符合高原实际需求的指标。经过优化后,二轮评分显示,专家意见进一步趋于一致,系统化后的5个一级指标和20个二级指标平均得分均高于4.5, CV均低于0.3, 满分频率达80%以上,肯德尔系数增至($W=0.783, p=0.000$),说明优化后的评价体系在实用性和科学性方面得到专家的高度认可,最终形成一个涵盖技术、行为、安全、资源、制度和社群关系的智慧应急能力评价体系。

1.3 智慧应急能力综合评价指标间关系

智能技术通过实时监测、数据分析、智能预警和紧急避险系统,帮助及时识别并应对高原环境下的突发事件,提升事故预防和响应能力^[15];行为安全关注高原环境下的特殊作业需求,如应急演练、团队协作、安全教育和安全检查等,以减少因高原反应或环境因素导致的人为失误^[16];资源配置(如物资、人员和资金等)的有效调度至关重要,需确保在紧急情况下能够克服高原的交通和供给障碍,实现快速反应^[17];制度机制通过分级响应、分级救援、内控和风险管理,确保管理体系的协调性和执行力,尤其是在应对突发灾害时,能提供稳定支持^[18];社群关系通过社区参与、信息共享、合作协议和舆情监测,加强与当地社区的协作,确保应急措施得到周边居民的理解和配合,避免次生灾害的扩大^[19]。5个一级指标和20个二级指标相互影响,形成系统化的应急管理网络,为青藏高原独特环境下的矿山安全管理提供科学、全面的智慧应急管理支持。综合评价指标关系如图1所示。

在确定一级指标关系的基础上,进一步分析和评估20个二级指标间的相互关系。在专家组的协助下,确定每对二级指标是否存在直接或间接影响,若存在影响则标记为1,若不存在影响则标记为0,最终形成二级指标关系矩阵,见表1。

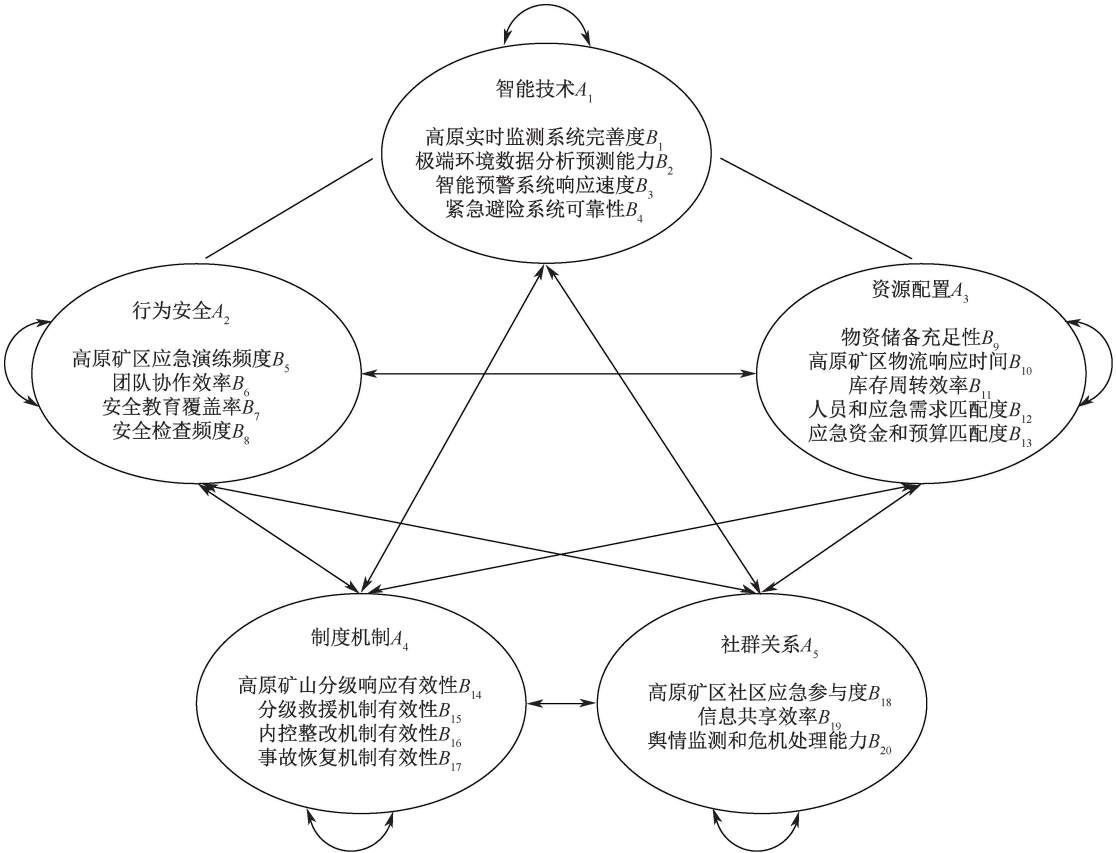


图 1 综合评价指标关系

Fig. 1 Relationship diagram of comprehensive evaluation indicators

表 1 二级指标关系矩阵

Table 1 Relationship matrix of secondary indicators

指标	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6	B_7	B_8	B_9	B_{10}	B_{11}	B_{12}	B_{13}	B_{14}	B_{15}	B_{16}	B_{17}	B_{18}	B_{19}	B_{20}
B_1		1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	1
B_2	0		0	1	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1
B_3	0	0		1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1
B_4	0	0	0		1	0	1	1	0	0	0	1	1	1	0	1	0	1	1	1
B_5	0	1	1	1		1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
B_6	1	1	1	0	1		1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0
B_7	1	0	1	1	1	0		0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1
B_8	1	1	1	1	1	1	1		0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
B_9	1	0	0	0	0	1	0	0		1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	1
B_{10}	1	1	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	1	0	1	0	0	1	0
B_{11}	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0		0	0	1	0	1	0	0	0	1
B_{12}	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0		0	1	1	1	0	1	1	1
B_{13}	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0		0	1	0	1	0	1	0
B_{14}	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0		1	1	1	1	1	1
B_{15}	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0		0	0	1	1	1
B_{16}	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	0	1	1		0	1	1	1
B_{17}	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0		1	1	1
B_{18}	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1		1	1
B_{19}	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	0		0
B_{20}	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	

2 金属矿山智慧应急能力综合评价

2.1 金属矿山智慧应急能力评价方法的选择

基于青藏高原金属矿山智慧应急能力评价的复杂性和多维性考虑,通过组合 ANP 方法和 VIKOR 方法构建综合评价模型。

ANP 适用于处理具有复杂相互依存关系的评价体系。在青藏高原智慧应急能力评价中,5 个一级指标和 20 个二级指标之间存在显著的相互影响和反馈关系。这种复杂的关系使得传统的层次分析法难以适用,而 ANP 可更好地捕捉到指标间的相互作用,量化各指标的相对权重。ANP 通过构建超矩阵,计算各指标的相对权重,以反映不同指标在智慧应急管理中的重要性。最终,ANP 提供的权重值为 VIKOR 方法的评价计算提供量化依据。

VIKOR 方法利用 ANP 确定的权重,对不同矿山的智慧应急能力进行排序。该方法基于理想解和负理想解的概念,计算各方案在所有指标上的接近程度,并综合考虑群体效用值 S 和个体遗憾值 R ,最终得到综合妥协指数 Q 值,用于对各矿山的智慧应急能力进行排名。由于青藏高原金属矿山在智能技术、资源配置和应急响应方面可能存在冲突,如智能技术的高投入可能影响资源配置的灵活性,VIKOR 方法通过平衡多个目标,确定最优方案,为矿山企业优化智慧应急管理提供科学依据。

2.2 金属矿山智慧应急能力评价指标权重确定

1) 构建初始超矩阵。在网络结构中,每个群集之间的关系可用超矩阵表示。假设系统中有 n 个群集,每个群集中有多个节点,初始超矩阵 M 表示为:

$$M = [C_{ij}]_{n \times n} \quad (1)$$

式中 C_{ij} 为群集 i 中的节点对群集 j 中节点的影响程度。

2) 归一化超矩阵。为使超矩阵的每列和为 1,需要归一化处理初始超矩阵。加权超矩阵 M_w 定义为:

$$M_w = \begin{bmatrix} \frac{C_{11}}{\sum_{k=1}^n C_{k1}} & \frac{C_{12}}{\sum_{k=1}^n C_{k2}} & \dots & \frac{C_{1n}}{\sum_{k=1}^n C_{kn}} \\ \frac{C_{21}}{\sum_{k=1}^n C_{k1}} & \frac{C_{22}}{\sum_{k=1}^n C_{k2}} & \dots & \frac{C_{2n}}{\sum_{k=1}^n C_{kn}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{C_{n1}}{\sum_{k=1}^n C_{k1}} & \frac{C_{n2}}{\sum_{k=1}^n C_{k2}} & \dots & \frac{C_{nn}}{\sum_{k=1}^n C_{kn}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

3) 计算极限超矩阵。通过将加权超矩阵不断进行幂次乘法,最终得到的矩阵称为极限超矩阵 M_∞ :

$$M_\infty = \lim_{k \rightarrow \infty} M_w^k \quad (3)$$

式中 k 为幂次。该极限超矩阵中的每一列均为稳定的权重值,代表各个指标的综合权重。

4) 计算最终权重。极限超矩阵的每一列经过归一化后,即为各个评价指标的最终权重 M_0 :

$$M_0 = \frac{M_\infty}{\sum M_\infty} \quad (4)$$

最终权重 M_0 可用于后续的综合评价和决策分析。

2.3 金属矿山智慧应急能力综合评价过程

1) 确定理想解和负理想解。对于每个指标,确定理想解 f_j^* 和负理想解 f_j^- 。理想解通常是指标的最大值或最小值,取决于指标的优化方向。

计算方案与理想解的距离:使用 L_1 范数和 L_∞ 范数分别计算每个方案与理想解和负理想解之间的加权距离,具体公式如下:

L_1 范数(综合距离):

$$S_k = \sum_{j=1}^n w_j \cdot \frac{f_j^* - x_{kj}}{f_j^* - f_j^-} \quad (5)$$

L_∞ 范数(最大距离):

$$R_k = \max_j \left(w_j \cdot \frac{f_j^* - x_{kj}}{f_j^* - f_j^-} \right) \quad (6)$$

式中: w_j 为第 j 个指标的组权重; x_{kj} 为第 k 个方案在第 j 个指标上的得分。

2) 计算综合评价指数 Q 。综合考虑 S_k 和 R_k ,通过下列公式计算每个方案的综合评价指数 Q_k :

$$Q_k = v \cdot \frac{S_k - S^*}{S^- - S^*} + (1 - v) \cdot \frac{R_k - R^*}{R^- - R^*} \quad (7)$$

式中: S^* 、 S^- 分别为 S_k 的最小值和最大值; R^* 、 R^- 分别为 R_k 的最小值和最大值; v 为决策者对群体妥协与个人最佳的偏好系数。通常 $v=0.5$,用于平衡综合贴进度和个体贴进度的影响。

3) 对方案进行排序。根据计算得到的综合评价指数 Q_k 对方案进行排序, Q_k 值越小的方案越优。

3 评价模型在青藏高原的实证应用

3.1 青藏高原代表性金属矿山的选择

选择青藏高原地区 3 座具有代表性的金属矿山

(矿山 Y、矿山 V 和矿山 J) 作为评价对象。这些矿山地处不同的地理位置, 矿产资源类型和企业规模不尽相同, 具有典型性和代表性, 能够反映青藏高原地区矿山智慧应急能力的异同, 见表 2。这 3 座矿

山代表了青藏高原不同资源类型和企业规模的典型矿山, 其智慧应急管理能力各具特色。通过综合评价 3 座矿山, 深入探讨青藏高原矿山智慧应急管理的实际表现。

表 2 青藏高原 3 座典型矿山基本情况对比

Table 2 Basic comparison of three representative mines on the Qinghai-Tibet plateau					
编号	所在地区	海拔/ m	资源特征	应急管理做法	主要问题或不足
矿山 Y	西藏昌都市	>4 500	铜、钼, 伴生多种有价金属, 品位较高	建立智能监控系统、应急指挥中心及现场指挥机制, 实现数据集成与实时监控	在资源配置方面相对薄弱, 物流响应时间和库存周转效率有待提升
矿山 V	西藏拉萨市	>4 000	铜为主, 伴生钼、铅、锌等资源	引入应急监控系统和智能化应急指挥平台, 建立数据驱动的安全管理模式	在资源配置与应急响应速度上仍有提升空间
矿山 J	西藏拉萨市	>4 000	铜、金、银、铅、锌等金属资源	部署实时监控设备与数据集成平台, 建立高效指挥机制, 配置尾矿库监控系统	系统集成程度仍有提升空间, 协同演练频次可加强

3.2 指标权重计算结果及分析

为确定各指标的权重, 邀请 15 位无直接关联的专家参与 ANP 数据收集。专家主要依托其专业知识与实践经验进行评价, 全面考虑各指标在青藏高原矿山智慧应急中的重要性。专家通过群决策软件接收到五级量表调查问卷, 两两比

较各指标, 判断其相对重要性, 数据填写完成后进行一致性检验, 确保一致性比率 (Consistency Ratio, CR) 小于 0. 1, 以保证数据的科学性和可靠性。随后, 通过 Python 编程加权计算收集到的数据, 生成稳定的极限超矩阵, 并得出各指标的权重, 见表 3。

表 3 综合评价模型指标权重

Table 3 Subjective weights of indicators in the comprehensive evaluation model						
一级指标	权重/%	二级指标	数据类型	方向	量化方法	权重/%
智能技术	37. 53	高原实时监测系统完善度	占比	正向	1-故障时间/运行时间	11. 85
		极端环境数据分析和预测能力	占比	正向	正确预测次数/总预测次数	7. 59
		智能预警系统响应速度	时间/min	逆向	响应总时间/预警总次数	11. 68
		紧急避险系统可靠性	等级评分(1-5)	正向	根据系统表现评定	6. 41
行为安全	26. 67	高原矿区应急演练频度	占比	正向	实际演练次数/计划次数	7. 30
		团队协作效率	占比	正向	成功任务数/任务总数	5. 82
		安全教育覆盖率	占比	正向	参训总人次/计划人次	2. 90
		安全检查频度	占比	正向	实际检查次数/计划次数	10. 65
资源配置	13. 85	物资储备充足性	占比	正向	可用物资数/物资需求数	2. 46
		物流响应时间	时间/min	逆向	响应总时间/响应次数	2. 65
		库存周转效率	比率	正向	实际使用库存/平均库存	2. 20
		人员和应急需求匹配度	占比	正向	有资质人员数/人员总需求	4. 68
		应急资金和预算匹配度	占比	适度	实际使用应急资金/预算	1. 86
制度机制	9. 33	高原矿区分级响应机制有效性	等级评分(1~5)	正向	根据响应案例评定	2. 84
		分级救援机制有效性	等级评分(1~5)	正向	根据救援案例评定	1. 64
		内控整改机制有效性	等级评分(1~5)	正向	根据整改案例评定	3. 52
		事故恢复机制有效性	等级评分(1~5)	正向	根据恢复案例评定	1. 33
社群关系	12. 62	高原矿区社区应急参与度	占比	正向	参与人数/社区总人数	3. 53
		信息共享效率	占比	正向	共享信息数/应共享信息数	5. 41
		舆情监测和危机处理能力	占比	正向	成功处置事件次数/检测次数	3. 68

通过 ANP 方法获得的权重结果揭示了青藏高原金属矿山智慧应急能力评价体系中各指标的相对重

要性。首先, 智能技术维度占据最高权重(37. 53%)。在高寒高海拔地区, 传统人工监测方式难以实时、高

效地应对突发事件,因此,智能监控、数据分析和智能预警系统的应用至关重要。智能技术能够提供全天候的实时监测,迅速识别潜在风险,并通过快速响应提升整体应急管理的效率和精准度。其中,“高原实时监测系统完善度”不仅关注系统的覆盖范围和数据采集能力,还特别强调其可靠度,确保在极端环境下系统能够长时间稳定运行,为数据分析和预测能力提供精准支持。此外,“智能预警系统响应速度”在应对恶劣气候和复杂地质条件时发挥着显著作用。这表明:未来的应急体系应持续加大智能技术的投入,强化系统的稳定性与可靠性,全面提升事故预防与应急响应的精准性和高效性。

其次,行为安全(26.67%)紧随其后,在保障矿山安全中发挥了重要作用。高原矿山作业的高风险性和人员的易疲劳性,使得应急演练、团队协作和安全教育显得尤为重要。行为安全的高权重反映人在应急管理中不可替代的地位,高强度和高海拔作业

环境下的员工培训和安全意识提升在此基础上就显得至关重要。因此,建议矿山企业加强定期安全培训,增加演练频次,提升一线员工的应急技能,确保在紧急情况下各部门能够高效协作、快速响应。

最后,资源配置、制度机制和社群关系虽然权重相对较低,但在实际应用中仍起着支持作用,尤其是在高原地区运输不便、资源匮乏的环境下,合理的资源配置和社区协同管理对提升整体应急能力也有积极作用。

3.3 综合评价结果及分析

1) 原始数据。通过收集 3 座矿山 2019—2023 年生产运营记录、应急演练日志和安全检查记录等内部数据。为确保数据的可比性和科学性,所有数据在分析前均经过标准化处理(归一化、去量纲化等),以统一不同单位和尺度。最终, Q_{2019} 、 Y_{2019} 、 J_{2019} 分别表示矿山 V、Y、J 在 2019 年的评估数据,依此类推,见表 4。

表 4 矿山 Y、V、J 综合评价指标原始数据矩阵

Table 4 Raw data matrix of comprehensive evaluation indicators for mines Y, V, and J

评估数据	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6	B_7	B_8	B_9	B_{10}
V_{2019}	90.2	94.1	5.0	97.7	91.2	89.4	97.1	99.1	96.8	48.0
V_{2020}	92.9	91.6	5.0	91.2	91.1	93.1	99.9	97.3	91.4	41.0
V_{2021}	90.4	90.8	5.0	97.1	90.6	99.5	99.9	99.9	94.5	30.0
V_{2022}	91.6	94.4	5.0	98.3	90.7	91.2	97.3	94.8	93.4	29.0
V_{2023}	97.1	85.7	4.0	99.9	94.7	86.2	97.6	92.8	95.9	26.0
Y_{2019}	98.8	96.9	5.0	96.2	92.4	93.8	96.6	97.5	99.9	20.0
Y_{2020}	96.7	94.4	4.0	92.3	98.4	92.0	97.7	91.0	95.6	1.0
Y_{2021}	99.7	86.5	5.0	90.9	91.2	94.4	98.5	95.9	99.5	48.0
Y_{2022}	93.8	96.4	3.0	96.5	97.9	88.2	98.6	92.0	98.5	30.0
Y_{2023}	99.7	87.6	2.0	92.0	97.1	87.4	96.1	92.4	90.2	2.0
J_{2019}	92.2	93.6	1.0	90.6	98.1	99.4	97.9	96.9	98.4	32.0
J_{2020}	93.4	93.7	2.0	93.5	93.8	88.4	99.8	99.5	90.6	8.0
J_{2021}	97.3	89.4	3.0	98.3	93.3	89.7	96.6	95.0	96.3	23.0
J_{2022}	95.4	98.2	3.0	97.7	96.0	92.7	97.6	95.1	91.2	9.0
J_{2023}	95.7	97.7	2.0	93.7	95.8	94.4	99.1	98.4	96.7	15.0
评估数据	B_{11}	B_{12}	B_{13}	B_{14}	B_{15}	B_{16}	B_{17}	B_{18}	B_{19}	B_{20}
V_{2019}	85.1	92.4	95.7	5.0	3.0	4.0	5.0	81.0	97.6	95.2
V_{2020}	95.7	92.0	96.7	3.0	5.0	5.0	5.0	76.2	90.2	89.1
V_{2021}	89.5	97.0	98.1	4.0	4.0	4.0	4.0	91.7	91.3	96.1
V_{2022}	97.9	96.8	97.3	5.0	4.0	5.0	4.0	94.9	94.3	92.8
V_{2023}	94.1	92.7	95.2	4.0	3.0	5.0	4.0	86.1	90.2	97.0
Y_{2019}	99.8	94.1	97.3	3.0	3.0	3.0	4.0	91.3	91.9	95.7
Y_{2020}	96.7	98.2	95.4	3.0	5.0	4.0	5.0	86.4	94.6	92.0
Y_{2021}	95.5	98.7	96.6	5.0	3.0	3.0	5.0	88.9	99.9	97.6
Y_{2022}	87.0	95.7	99.8	3.0	3.0	4.0	4.0	91.5	94.0	93.8
Y_{2023}	86.5	99.7	99.3	4.0	4.0	3.0	5.0	77.4	98.1	93.6
J_{2019}	96.8	97.7	97.2	3.0	5.0	4.0	3.0	82.1	91.9	95.2
J_{2020}	94.3	93.5	95.3	5.0	3.0	3.0	5.0	88.1	92.4	91.2
J_{2021}	98.5	97.5	95.2	5.0	5.0	4.0	3.0	81.3	91.2	93.1
J_{2022}	98.5	98.4	97.7	3.0	4.0	3.0	5.0	93.5	90.9	99.7
J_{2023}	97.6	96.0	96.3	5.0	4.0	3.0	4.0	94.2	92.6	88.0

2) 计算结果。通过计算各方案在各项指标上的最大偏差和最小偏差,确定各方案的折中值(Q 值)。依据 Q 值对各方案进行排序,以衡量其智慧应急能力。最终排序结果(表5)展示了各矿山在智能应急能力上的综合表现,为后续的改进措施提供了科学依据。

表5 VIKOR 分析结果汇总

数据组合	群体效用值	个体遗憾值	折中值	排序
V_{2019}	0.689 8	0.116 8	0.987 6	15
V_{2020}	0.622 4	0.118 5	0.891 1	14
V_{2021}	0.571 8	0.116 8	0.796 9	13
V_{2022}	0.601 6	0.087 6	0.632 3	9
V_{2023}	0.498 8	0.089 7	0.481 8	6
Y_{2019}	0.550 8	0.116 8	0.762 9	12
Y_{2020}	0.520 6	0.116 8	0.714 2	11
Y_{2021}	0.515 2	0.094 5	0.543 2	7
Y_{2022}	0.430 7	0.093 6	0.399 4	4
Y_{2023}	0.508 5	0.058 6	0.270 8	3
J_{2019}	0.501 9	0.116 8	0.684	10
J_{2020}	0.514 9	0.106 5	0.629 8	8
J_{2021}	0.501	0.078 6	0.404	5
J_{2022}	0.424	0.058 4	0.132 4	2
J_{2023}	0.380 4	0.049 9	0	1

3) 结果讨论与分析。青藏高原3座矿山在过去5年中的应急能力评价情况(通过 Q 值衡量)如图2所示。随着时间的推移,3座矿山的应急能力总体上都在逐步提升。在VIKOR评价的基础上,结合各矿山在5类一级指标及其二级指标的标准化得分,系统分析了其在智能技术、行为安全、资源配置、制度机制与社群关系等方面的具体表现,从而提出有针对性的评价与改进建议。

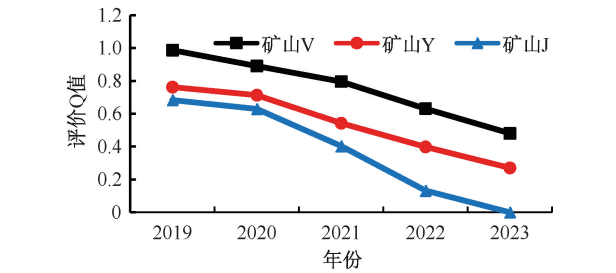


图2 矿山Y、矿山V、矿山J智慧应急能力评价 Q 值
Fig. 2 Evaluation of intelligent emergency capabilities for, mine Y, mine V, and mine J - 'Q' value

从图2可以看出,矿山J的应急能力最为突出,尤其在智能技术和应急响应方面得分较高。该矿山的实时监控系统和智能预警系统的完善度与响应速度显著优于其他矿山。这种技术优势帮助矿山J在

极端气候下保持高效的风险识别和应对能力,显示出其良好的应急管理水平和应急响应能力。在行为安全方面,矿山J的团队协作效率和应急演练频度较高,进一步提升了其在突发事件中的快速反应和协调能力。这表明:智能技术和行为安全的有效结合是矿山J在应急管理中取得优势的关键因素。矿山Y在技术应用上处于中等水平,且在智能技术维度有一定进步空间。尽管其应急响应和数据分析能力有所提升,但在资源配置方面相对薄弱,特别是在物流响应时间和库存周转效率上存在改进空间。矿山Y的资源调度在应对突发事件中受到地理和环境因素的限制,建议加强其物资储备和运输管理能力,以提高整体应急效率。矿山V在资源配置与应急响应速度上较为薄弱,尤其在团队协作和安全教育覆盖率方面仍需进一步优化。虽然矿山V在行为安全和制度机制的建设上作出了一定努力,但在资源配置上仍有较大改进空间。为此,建议矿山V进一步优化人力和物资的配置,注重应急人员的技能培训,确保资源能够迅速调配,以弥补高原地区物流不便的劣势。

4 结 论

1) 基于ANP-VIKOR的智慧应急能力综合评价体系涵盖“智能技术、行为安全、资源配置、制度机制、社群关系”5大维度共20项评价指标,充分融合高原地区复杂地理环境、极端气候条件与矿山运营特征,有助于弥补高原地区智慧应急能力量化研究的不足。

2) 模型应用于3座典型矿山案例,评价结果表明:矿山J在智能化水平和协同响应方面表现最优,具备较强的应急预警与处置能力;矿山Y整体呈上升趋势,在数据分析与应急响应机制方面不断改进;矿山V在资源调配与行为安全建设方面相对滞后,亟需优化人员培训和物资保障机制。差异化的结果不仅反映3座矿山在智慧应急体系建设水平上的不均衡,也验证了所构建模型的有效性与适应性。

3) 基于研究结果,建议青藏高原金属矿山企业立足区域特征,加强智能技术应用、完善应急机制、强化资源整合与公众协同,逐步构建动态、高效、可持续发展的智慧应急管理体系。

4) 尽管笔者基于5年数据进行多期评估,具备一定动态性,但仍属阶段性分析,难以实时反映应急管理能力的变化。鉴于矿山应急能力受技术进步、演练优化等因素影响,未来建议引入实时监测、机器

学习预测和动态评价机制,以实现持续跟踪与前瞻性分析,确保评价体系精准反映管理改进情况。

参 考 文 献

- [1] 李光明, 张林奎, 张志, 等. 青藏高原南部的主要战略性矿产: 勘查进展, 资源潜力与找矿方向[J]. 沉积与特提斯地质, 2021, 41(2): 351–360.
- LI Guangming, ZHANG Linkui, ZHANG Zhi, et al. New exploration progresses, resource potentials and prospecting targets of strategic minerals in the southern Qinghai-Tibet Plateau[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2021, 41(2): 351–360.
- [2] VERA V, WEVER N, BÜHLER Y, et al. Modelling wet snow avalanche runout to assess road safety at a high-altitude mine in the central Andes[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2016, 16(11): 2 303–2 323.
- [3] CACCIUTTOLO C, CANO D. Environmental impact assessment of mine tailings spill considering metallurgical processes of gold and copper mining: case studies in the Andean countries of Chile and Peru[J]. Water, 2022, 14(19): DOI: 10.3390/w14193057.
- [4] SALAS C G. Mining and the living materiality of mountains in Andean societies[J]. Journal of Material Culture, 2017, 22(2): 133–150.
- [5] HALABI R, KUMRAL M. Addressing specific safety and occupational health challenges for the Canadian mines located in remote areas where extreme weather conditions dominate[J]. Journal of Sustainable Mining, 2022, 21(3): 180–190.
- [6] 崔鹏, 贾洋, 苏凤环, 等. 青藏高原自然灾害发育现状与未来关注的科学问题[J]. 中国科学院院刊, 2017, 32(9): 985–992.
- CUI Peng, JIA Yang, SU Fenghuan, et al. Natural hazards in Tibetan Plateau and key Issue for feature research[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2017, 32(9): 985–992.
- [7] 张永双, 郭长宝, 姚鑫, 等. 青藏高原东缘活动断裂地质灾害效应研究[J]. 地球学报, 2016, 37(3): 277–286.
- ZHANG Yongshuang, GUO Changbao, YAO Xin, et al. Research on the geohazard effect of active fault on the eastern margin of the Tibetan Plateau[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2016, 37(3): 277–286.
- [8] 黄知恩, 李明, 廖国礼, 等. 基于 HFACS 的高原矿山作业疲劳与人因失误率浅析[J]. 黄金科学技术, 2020, 28(4): 610–618.
- HUANG Zhien, LI Ming, LIAO Guoli, et al. Analysis of human fatigue and error rates in plateau mines based on HFACS[J]. Gold Science and Technology, 2020, 28(4): 610–618.
- [9] 丁文清, 丁林. 岩矿高光谱遥感及其在青藏高原的应用前景[J]. 地质科学, 2022, 57(3): 924–944.
- DING Wenqing, DING Lin. Hyperspectral remote sensing of rock and mineral and its application prospects on the Tibetan Plateau[J]. Chinese Journal of Geology, 2022, 57(3): 924–944.
- [10] 孙华丽, 项美康, 薛耀锋. 不确定信息下应急设施选址-路径鲁棒优化[J]. 系统管理学报, 2019, 28(6): 1 126–1 133.
- SUN Huali, XIANG Meikang, XUE Yaofeng. Robust optimization for emergency location-routing problem with uncertainty [J]. Journal of Systems & Management, 2019, 28(6): 1 126–1 133.
- [11] 杨继星, 房玉东, 边路, 等. 应急救援数字化战场体系研究与应用探索[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(10): 240–246.
- YANG Jixing, FANG Yudong, BIAN Lu, et al. Research and application exploration of digital battlefield system for emergency rescue[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(10): 240–246.
- [12] KYRKOU C, KOLIOS P, THEOCHARIDES T, et al. Machine learning for emergency management: a survey and future outlook[J]. Proceedings of the IEEE, 2022, 111(1): 19–41.

[13] KROGH A H, LO C. Robust emergency management: the role of institutional trust in organized volunteers[J]. Public Administration, 2023, 101(1): 142–157.

[14] 杨山亮, 王鹏, 李革, 等. 基于直觉模糊 VIKOR 方法的装备优选群决策模型[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(9): 2 169–2 175.

YANG Shanliang, WANG Peng, LI Ge, et al. Group decision making model for weapon selection using extended VIKOR method under intuitionistic fuzzy environment[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(9): 2 169–2 175.

[15] 李烨. GIS 技术在矿山应急管理中的应用现状[J]. 中国矿业, 2024, 33(6): 143–147.

LI Ye. Application of GIS technology in mining emergency management[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(6): 143–147.

[16] 王丽, 陈文涛, 关文玲, 等. 面向国家需求的应急技术与管理专业人才培养体系研究[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(5): 9–16.

WANG Li, CHEN Wentao, GUAN Wenling, et al. Research on talent development systems for emergency technology and management majors to meet national needs[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(5): 9–16.

[17] 李晟, 丰景春, 吴凯丽, 等. 政企联合储备应急物资的合作策略研究[J]. 中国管理科学, 2024, 32(11): 222–232.

LI Sheng, FENG Jingchun, WU Kaili, et al. Study on cooperative strategy of government-enterprise joint reserve of emergency supplies[J]. Chinese Journal of Management Science, 2024, 32(11): 222–232.

[18] 邱芹军, 吴亮, 马凯, 等. 面向灾害应急响应的地质灾害链知识图谱构建方法[J]. 地球科学, 2023, 48(5): 1 875–1 891.

QIU Qinjun, WU Liang, MA Kai, et al. A knowledge graph construction method for geohazard chain for disaster emergency response[J]. Earth Science, 2023, 48(5): 1 875–1 891.

[19] 梁爽, 贺山峰, 吴晓涛, 等. “微时代”网络突发舆情下政府应急管理研究: 基于“长春长生疫苗事件”的再分析[J]. 河南理工大学学报: 社会科学版, 2022, 23(2): 53–60.

LIANG Shuang, HE Shanfeng, WU Xiaotao, et al. On government emergency management under network emergency public opinion in the "micro-era": reanalysis of Changchun Changsheng vaccine event[J]. Journal of Henan Polytechnic University: Social Sciences, 2022, 23(2): 53–60.

作者简介: 王国栋 (1993—),男,江苏邳州人,博士研究生,会计师,研究方向为智慧应急管理、公共安全、资产管理。E-mail:wanggd@chinagoldgroup.com。

