

# 神经科学赋能矿山工程项目管理研究现状可视化分析\*

江松<sup>1,2</sup> 刘迪真<sup>1</sup> 崔智翔<sup>1</sup> 饶彬舰<sup>3</sup> 王会杰<sup>4</sup> 刘仲光<sup>4</sup>

(1. 西安建筑科技大学资源工程学院, 陕西 西安 710055;

2. 中钢集团马鞍山矿山研究总院有限公司, 安徽 马鞍山 243000;

3. 西安建筑科技大学管理学院, 陕西 西安 710055;

4. 中钢集团赤峰金鑫矿业, 内蒙古 赤峰 024000)

**摘要:** 基于 CiteSpace 知识谱图可视化分析方法, 系统整理并分析矿山工程项目建设管理的研究现状和存在的不足之处, 并提出未来研究趋势。运用神经科学技术支撑矿山工程项目管理研究与实践, 为矿山智能化建设科学合理地发展提供坚实基础。基于 2015—2025 年 Web of Science 核心数据库中矿山工程项目管理的相关文献, 采用 CiteSpace 系统整合矿山工程项目管理的目前整体发展趋势、主要关键词、面临挑战及未来发展趋势等相关信息。研究表明, 神经科学技术可为矿山工程项目管理的效率与智能化水平提升提供有效手段。研究旨在为后续矿山领域广泛采用该技术奠定坚实的理论依据。

**关键词:** 神经科学; 矿山工程; 知识图谱; 项目管理; 矿山智能化

## 0 引言

随着神经科学、人工智能、大数据分析等技术的迅猛发展, 基于神经科学的矿山项目工程管理研究逐渐获得学者们的重视。神经科学技术在预测与预警方面具有显著优势, 该技术能够有效预警矿工可能出现的不良行为, 进而帮助学者更精确地捕捉并分析矿工人的作业模式。根据以往研究, 一系列事故致因理论都将人的不安全行为视为导致事故发生的直接原因<sup>[1]</sup>。而人处在复杂环境下, 易受外界环境等多种因素的影响, 导致其做出不安全行为, 进而引发事故<sup>[2-3]</sup>。通过神经科学技术对人体行为能力展开研究, 可以更为精确地评估生理行为指标, 为矿山工程项目管理提供有力的技术支撑。

基于人的不安全行为在矿山工程管理中的重要性, 国内学者利用神经科学技术对矿工人行

为能力的研究逐渐增多。同时, 国内外学者也从多个角度出发, 运用多种方法来深入探索矿工人的行为能力, 并取得了丰富的研究成果<sup>[4-8]</sup>。权学良等<sup>[9]</sup>研究与开发了能够识别、解释、处理和模拟人类情感的理论、方法与系统, 脑电、心电、皮肤电等生理信号是情感计算重要的输入信号, 并结合近年来基于脑电等生理信号的情感计算, 研究处理个体差异的迁移学习、降低数据标注量的主动学习等算法。聂兴信等<sup>[10]</sup>通过生理、心理指标, 探究了热湿环境对人体机能和矿工人健康呈负相关关系。田水承等<sup>[11]</sup>发现高温联合噪声环境会导致矿工人安全行为能力降低, 增大了矿工人不安全行为发生的概率。

近年来, 矿山工程安全管理领域越来越被重视, 成为保障生产安全与人员健康的关键一环。在此大背景下, 深入理解和改善矿工人的安全行为尤为重要<sup>[12-15]</sup>。传统上, 国内学者多倾向于

\* 基金项目: 国家自然科学基金面上项目“露天金属矿高陡岩质边坡采动裂隙超视距智能识别与演化防控机制研究”(52374136); 陕西省重点研发计划基金项目“基于数据驱动的露天矿高陡岩质边坡智能识别与演化预警研究”(2024GX-YBXM-495)。

采用人本主义理论来指导安全行为研究,心理学指出,安全心理对个体的安全行为具有极为显著的影响。然而,尽管传统方法提供了一定程度的洞见,但仅限于心理层面的探讨,对于神经科学在矿山工人生理、心理行为影响方面的研究尚显不足。鉴于此,通过神经科学技术能够更科学、准确地评估个人行为能力状况,从而为深入探究矿山工人的生理行为能力,以及优化矿山工程项目管理策略提供一种更为精确的方法。

## 1 研究方法及数据来源

### 1.1 研究方法

本文采用 CiteSpace 文献分析软件<sup>[16]</sup>对神经科学和矿山项目管理相关文献进行分析,该软件通过对某种特定领域的文献集分析,旨在发现该领域的学术演化特征。目前, CiteSpace 软件已普遍采用于全球科学计量学研究领域。相较于其他文献分析软件,该软件所呈现的知识谱图更为直观,可视化分析效果更好,更利于学者研究不同领域的现状及未来发展趋势。

### 1.2 数据来源

本文数据来源于 Web of Science 文献资料库,对 2015—2025 年涉及神经科学领域和矿山工程领域两方面的文献进行检索分析,全部数据检索要求见表 1。本文最终收集到 2015—2025 年期间中英文论文共 352 篇。其中包括期刊、综述等文献类型,包括神经科学、矿山项目管理等研究领域。文献年度发表量及年度累计发表总量如图 1 所示。由图 1 中各年度发文数量可看出,2015—2025 年间发表的与矿山神经科学相关的文章数据总量整体呈现上升趋势。

表 1 全部数据检索要求

检索类型	检索范围
发表年份	2015—2025 年
文献类型	期刊、综述、会议论文
检索关键词	神经科学、矿山、项目管理、脑电技术、心电技术、眼动技术、智能化

(续)

检索类型	检索范围
研究领域	神经科学技术、矿山项目管理、矿山智能化
国家/地区	中国、美国、葡萄牙、英格兰、加拿大

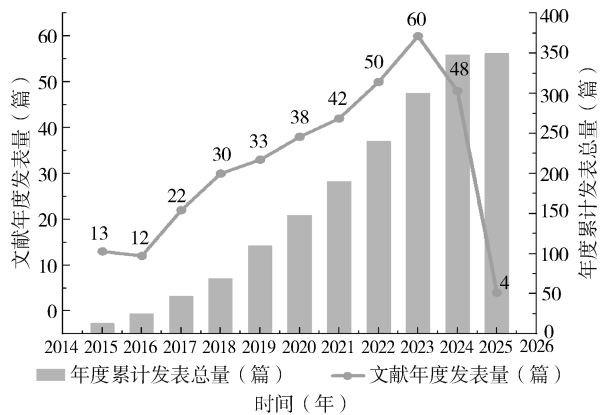


图 1 文献年度发表量及年度累计发表总量

截至 2024 年,累计发表文献量达 348 篇,2025 年 1 月已有 4 篇发表。这说明神经工程管理近期仍受到大量关注。高被引文献主要围绕通过神经科学技术来监测矿山工人行为活动和导致矿山工程事故发生的各项因素,涵盖矿山工人的人为因素<sup>[17-20]</sup>、环境因素<sup>[21-23]</sup>、系统管理<sup>[24-25]</sup>等方面。其中,矿山工人人为因素在工程项目管理中占据较大比例。通过分析矿山工人的不安全行为<sup>[26]</sup>对矿山工程项目管理的影响及矿工作业时产生的生理变化,可以看出,矿山工人的不安全行为是矿山工程项目管理中不可忽视的关键因素。该结论反映当前矿山项目管理的研究热点,即聚焦于矿山工人不安全行为评估及其行为能力对矿山项目管理的影响。本文使用 CiteSpace 对文献关键词进行分析,关键词分析图如图 2 所示。

## 2 矿山神经工程管理研究现状

### 2.1 矿山工人作业安全管理

人的不安全行为是由于作业人员违反了有关安全规章制度、安全操作等安全规定而可能直接或

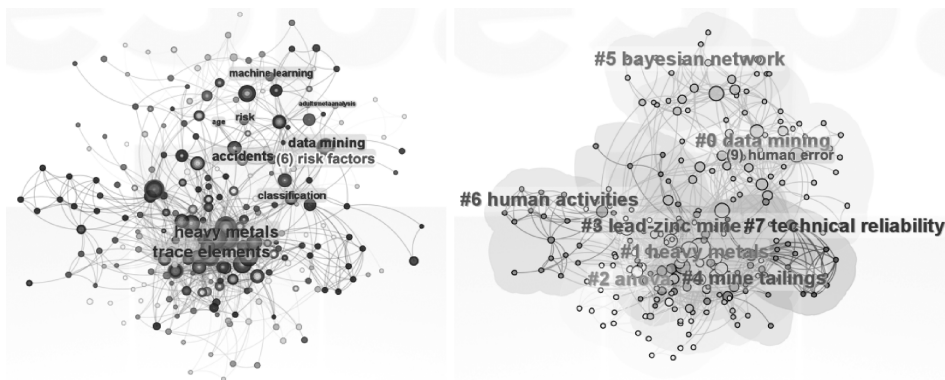


图2 关键词分析图

a) 文献关键词检索图 b) 关键词聚类图

间接引发的安全事故的行为。矿工的不安全行为往往与注意力密切相关，注意力不集中或降低是导致不安全行为发生的重要因素。因此，实时监测矿山工人作业安全行为对于矿山工程项目管理具有重要意义。

注意力是大脑进行感知、记忆、思维等认识活动的基本条件，涉及视觉、听觉、触觉等感知集中在某一事物上的能力，是一个人专注于某一件事情或某一项活动时的心理状态。良好的注意力不仅可以在一定程度上有效提高工作效率，还能减少安全事故的发生率。Li 等<sup>[27]</sup>通过模拟煤矿下不同照明梯度来测试照明对人体疲劳、注意力、反应力等生理行为的影响。结果表明，注意力受照度的影响最为显著，并且照度在 50lx ~ 75lx 或以上的梯度，能减少事故的发生概率。邹亚双<sup>[28]</sup>针对低照明和高噪声对作业人员疲劳程度的影响，研究发现：75lx 照度环境有利于延缓作业人员的视觉疲劳程度，但低于 15lx 照度反而会加速作业人员的疲劳程度；噪声高于 80dB 会加速疲劳增长。

目前，已有部分学者采用脑电 (Electroencephalography, EEG)、心电 (Electrocardiogram, ECG)、眼动等神经科学技术对矿山工程项目进行研究，利用神经科学技术评估矿工行为能力，预测和识别不安全行为和危险信号。然而，研究所得的评估结果与实际情境存在一定的误差，这些技术对危险信号的判断和监测仍存在不足，未来应更加深入地研究矿山工程管理的评估方法，为矿

山工程项目管理提供科学合理的理论支撑。

## 2.2 矿山工人作业状态评估

矿山工人作业状态评估与矿山工人自身、外界环境等因素息息相关。矿山工人的疲劳程度、心理负荷、情绪状态和矿山工人年龄等自身因素，以及作业时外部噪声、光照、粉尘等外界环境因素都会造成矿山工人注意力降低，进而导致不安全行为的发生。

通过对已有脑电信号等神经科学技术手段的研究分析，可以深入了解矿山工人作业时的疲劳程度、心理负荷、情绪状态，以及环境因素等对矿山工人产生的影响。这些研究提供了宝贵的数据支持，有助于更全面地评估矿工人的作业状态，从而采取相应的措施来保障他们的健康与安全，提高工作效率。Jia 等<sup>[29]</sup>通过主观任务和实际调查，研究精神疲劳对风险决策的影响。结果表明，精神疲劳与风险决策呈显著正相关。Li 等<sup>[30]</sup>建立了一种新型煤矿井下环境生物模拟小鼠模型，通过模拟井下工作场景，探究煤矿工人不良情绪和认知受损的发生。Li 等<sup>[31]</sup>通过构建煤矿照明仿真实验系统对不同照度水平下矿工人心率、皮肤活动和呼吸指标三个指标的影响，分析得出当照度恢复 100lx 后所有指标逐渐恢复正常，而小于 10lx 时事故发生率增加。Lutz 等<sup>[32]</sup>通过工作任务、轮班和不同类型的耳塞评估控制噪声的有效性，研究反映了矿工听力受损率的发展趋势，发现尽管采取措施，但噪声仍超过限值。

综上所述, 现有研究多为单因素对矿山工人作业状态的评估, 与实际中矿山工人处于复杂环境下作业仍存在一定的偏差, 且对矿山工人的疲劳程度、情绪状态和心理压力等监测也存在困难。而矿山工程项目安全管理旨在对矿山工人进行全方位、全时段的实时监测, 并建立更科学、更先进、更准确的安全管理体系。2015—2025 年高被引关键词见表 2。由表 2 可知, 近 10 年来, 人为因素 (human factors)、危险因素 (risk factors) 及系统管理 (system) 的高被引情况表明, 它们在矿山领域仍受到密切关注, 且对矿山工程项目管理产生较大影响。

表 2 2015—2025 年高被引关键词

序号	首次出现	被引强度	关键词
1	2017 年	1.64	human factors
2	2018 年	1.40	climate
3	2018 年	1.23	health risk
4	2019 年	2.39	risk factors
5	2019 年	1.57	age
6	2019 年	1.23	air pollution
7	2018 年	1.49	human exposure
8	2017 年	1.13	management
9	2017 年	2.63	system
10	2023 年	1.45	technology

### 3 研究挑战与展望

随着矿山智能化、矿山神经科学、人工智能多领域的不断发展, 神经科学与矿山智能化建设相结合的方式已逐步应用于矿山工程项目管理中。相较于传统矿山工程项目管理, 引入神经科学技术、实时监测技术等智能化技术后, 矿山工程项目管理在准确性、高效性方面得到了显著提升。然而, 当前矿山神经工程领域依然面临着诸多严峻的挑战, 针对这些挑战, 需要结合未来的发展趋势和重点研究方向寻求突破。矿山神经工程管理面临的挑战与未来发展趋势如图 3 所示。

#### 3.1 矿山神经工程管理研究的不足

尽管人工智能技术在矿山工程项目管理中被

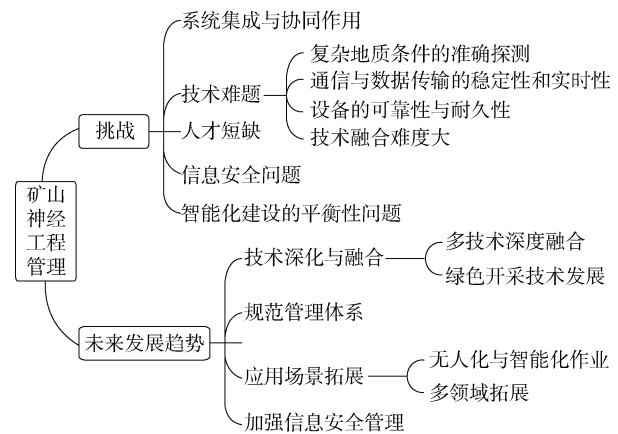


图 3 矿山神经工程管理面临的挑战与未来发展趋势

逐步引入和应用, 但在借助神经科学原理进行智能化改进时, 仍面临众多严峻挑战。矿山地下环境条件恶劣, 对所采集到的脑电、心电等信号传输和处理造成了极大困扰。在该复杂环境下, 数据的准确采集、传输和分析面临着巨大障碍。同时, 神经科学技术设备, 如脑电采集设备, 其采集过程具有一定的空间局限性, 且采集方式相对复杂, 因此对设备的维护工作提出较高要求。而长期处于高温、高湿、粉尘等条件下, 对设备的可靠性和耐久性提出较高要求。

智能化设备的引入对物联网、大数据、5G 等众多先进技术的深度融合提出较高要求。然而, 当前既懂矿业又精通信息技术的复合型人才相对匮乏, 导致这些技术在矿山领域的融合应用尚不成熟。在矿山的数据采集和传输过程中, 由于涉及众多敏感信息, 信息安全问题尤为突出。因此, 确保数据的安全性和完整性成为矿山工程项目管理中亟待解决的关键问题。

#### 3.2 研究方法适用性

鉴于矿山作业环境的复杂多变, 矿山工人的认知过程极易受到设备噪声、光照强度、高温高湿及粉尘等多重环境因素的影响。为了构建更加完善的矿山工程项目管理体系, 神经科学领域的脑电、心电、眼动等技术在矿山工程项目管理中呈现出一定程度的适用性与局限性。神经科学技术在矿山领域中的适用性见表 3。

表3 神经科学技术在矿山领域中的适用性

适用领域	主要神经科学工具	生理指标	存在问题
人员健康监测	EEG <sup>[33]</sup>	$\alpha$ 波、 $\beta$ 波、 $\theta$ 波、 $\gamma$ 波	设备复杂,难以长时间佩戴检测
	ECG <sup>[34]</sup>	心率、R-R 间期、心率变异性	易受电磁、机械振动等信号干扰
应急决策	EEG <sup>[35]</sup>	$\alpha$ 波、 $\beta$ 波、 $\theta$ 波	数据量较为庞大,信号不稳定,易受干扰
工作状态评估	ECG <sup>[36]</sup>	心率、呼吸频率	设备成本较高,操作较为复杂
人员操作监测	眼动仪 <sup>[37,38]</sup>	眨眼率、注视时间、注视次数、凝聚点分布、扫视轨迹	成本较高,易受粉尘、光线等外界环境影响
培训与模拟			

(1) 脑电技术 (EEG)。该技术是一项通过采集大脑皮层的脑电信号研究人员大脑活动及功能的技术。可以实时监测矿山工人作业的脑电波,便于及时发现疲劳、压力过大、注意力下降等不良状态,预防因疲劳等因素导致的操作失误问题。同时,在紧急情况下,通过脑电波分析快速评估人员的决策能力和反应速度,为应急指挥提供参考。然而,脑电检测设备通常较为笨重,难以在矿山复杂环境下长时间佩戴。并且脑电信号具有数据量庞大、数据复杂等特点,需要更高效的计算方法进行完善和改进,减小技术难度,从而提升处理效率。

(2) 心电技术 (ECG)。该技术是一种用于研究和记录心脏产生的电信号的技术手段,一般由心电图呈现采集到心电信号。矿山工程项目管理中可以通过监测心率、心率变异性等指标,实时评估矿山工人的身体健康状况,预防突发疾病的发生。心率变化还可以反映人员的工作负荷和心理压力,帮助优化工作安排。但矿山环境中的电磁干扰、机械振动等人干扰信号对人员心电检测的准确性具有一定不利影响。

(3) 眼动技术。该技术使研究人员能够追踪和记录眼球的运动,从而深入了解个体的视觉信息处理机制和内在认知过程。通过眼动追踪技术,实时监测矿山工人的视线聚点和操作注意力,确保操作规范和人员安全。在矿山操作培训中,利用眼动技术分析操作人员的注意力和视觉搜索模式,可以优化培训效果。尽管眼动追踪技术在研究中极具价值,但其设备成本相对较高。此外,在矿山这种特殊环境中,粉尘污染和光线变化等

因素都可能对眼动追踪的准确性产生不利影响。

### 3.3 未来发展趋势

针对目前矿山工程项目管理中面临的众多挑战,未来神经科学技术在矿山工程领域中仍然发挥着重要作用。

(1) 跨模态神经数据耦合。随着大数据、人工智能等技术的不断完善和发展,矿山工程可推动物联网、云计算、数字孪生等技术深度融合。为了不断优化矿山工程项目管理水平,通信技术需持续改进,以实现应用矿山设备对作业人员的实时监测、数据收集与分析,并推动智能化决策等方面的发展。

(2) 智能化作业。近年来神经科学技术不断优化,其技术及产品的稳定性不断提升。在神经科学领域,类似“无人驾驶”的智能化技术,如脑机接口设备的渗透率将逐步提高,这些设备能够更精准、更稳定地采集和分析神经信号。此外,智能神经刺激设备、智能神经监测设备等的应用也将更加广泛,进一步提高了神经科学研究的效率和准确性。

(3) 安全性能是矿山神经工程管理中的重要考量因素。未来,将进一步借助先进的信息技术和智能化设备,提高安全性能,降低事故风险。通过实时监测、预警和应急响应系统,实现矿山安全状况的实时掌控,保障人员和资产的安全。同时,在环保要求日益严格的背景下,绿色发展已成为矿山行业的主流趋势。矿山工程项目管理将更加注重环保技术的应用和创新,推动矿山工程向绿色、低碳方向发展。

## 4 结语

神经科学技术在矿山工程项目管理中的融合不仅极大地提升了管理的智能化和精确性,而且实现了对矿山设备、作业环境及人员状态的实时监测与预警。利用神经网络对海量数据的深度挖掘与分析,可以及时发现潜在的故障点和安全隐患,为安全管理部门提供及时、准确的预警信息。尽管目前仍面临研究挑战,但神经科学技术的引入为矿山工程项目管理提供了有力的支撑,为矿山工程项目管理开拓了新的发展思路和领域。

未来,矿山工程项目管理体系将进一步融合多领域的神经科学技术,开阔更多元化、科学且精确的研究方向和应用领域。在融合过程中,神经科学技术将发挥其独特优势,进一步优化矿山资源的配置效率。通过精准预测资源需求、动态调整开采计划,实现资源利用最大化与可持续开发,有效避免资源浪费与环境破坏。管理层借助智能化的数据分析与模拟预测能力,能够基于全面、准确的信息,做出更加科学、合理的战略规划与运营调整,有力推动矿山工程项目管理朝着更高效、更安全的方向稳步前行。

## 参考文献

- [1] 卢才武,徐晓慧,高睿阳,等. 热湿环境下矿工注意力对应急决策影响的脑电研究 [J]. 安全与环境学报, 2023, 23 (10): 3641-3647.
- [2] 郭彦豫,栗继祖. 基于 SEM 的矿工情绪智力对其不安全行为的影响研究 [J]. 煤矿安全, 2021, 52 (9): 250-255.
- [3] 杨振宏,李盼,王文杰. 基于社会认知理论的事故体验对矿工不安全行为影响研究 [J]. 安全与环境学报, 2021, 21 (4): 1607-1614.
- [4] YU Z, LI L, ZOU W, et al. The EEG oscillations and psychology propensities of autonomous sensory meridian response [J]. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2023 (31): 1353-1363.
- [5] CONTRERAS-JORDÁN O R, SÁNCHEZ-REOLID R, INFANTES-PANIAGUA Á, et al. Physical exercise effects on university students' attention; an EEG analysis approach [J]. Electronics, 2022, 11 (5): 770.
- [6] 许子明,牛一帆,温旭云,等. 基于脑电信号的认知负荷评估综述 [J]. 航天医学与医学工程, 2021, 34 (4): 339-348.
- [7] 张军鹏,施玉杰,蒋睿,等. 基于脑电信号的认知功能障碍识别与分类进展综述 [J]. 计算机应用, 2023, 43 (10): 3297-3308.
- [8] 张奇良,杨坤华,曲行达,等. 基于多模态生理信号的驾驶人脑力负荷评估 [J]. 深圳大学学报 (理工版), 2022, 39 (3): 278-286.
- [9] 权学良,曾志刚,蒋建华,等. 基于生理信号的情感计算研究综述 [J]. 自动化学报, 2021, 47 (8): 1769-1784.
- [10] 聂兴信,王廷宇,孙锋刚,等. 高温矿井热湿环境对人体机能的影响 [J]. 金属矿山, 2020 (4): 186-193.
- [11] 田水承,张德桃. 高温联合噪声对矿工不安全行为的影响研究 [J]. 煤矿安全, 2019, 50 (2): 241-244.
- [12] 邵舒羽,吴锦涛,周前祥,等. 睡眠-觉醒节律紊乱下注意诱发脑电特征分析与识别 [J]. 航天医学与医学工程, 2021, 34 (6): 439-447.
- [13] 张峻瑜,李颖,张志谋,等. 基于脑电信号分析的正确记忆与错误记忆的差异性 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22 (16): 6430-6441.
- [14] 刘晓君,李丽丽,王萌萌,等. 跨学科知识的交叉与融合机制研究——以脑电技术为例 [J]. 科技管理研究, 2022, 42 (15): 240-248.
- [15] 李琰,杨森. 行为经济学视角下矿工不安全行为仿真分析 [J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14 (1): 18-23.
- [16] 崔贤贤,沈霖,远佳怡,等. 黄土高原土壤调控原理与应用研究知识图谱——基于 CiteSpace 的文献可视化分析 [J]. 水土保持学报, 2024, 38 (1): 396-408.
- [17] KIRIN S, SEDMAK A, LI W, et al. Human factor risk management procedures applied in the case of open pit mine [J]. Engineering Failure Analysis, 2021 (126): 105456.
- [18] ZHANG M, LI H, XIA H, et al. Human factors analysis of coal mine gas accidents based on improved HFACS model [J]. Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries, 2024, 34 (4): 309-324.
- [19] STEMN E, BENYARKU C A, BUABENG A. Human factors issues associated with mobile mining equipment-related injuries of ghanaiian surface gold mines [J]. Mining Metallurgy & Exploration, 2022, 39 (3): 1113-1132.
- [20] AUGUSTINE P C, MONIRI-MORAD A, SHAHSAVAR M, et

- al. Investigating the effect of human factors on the underground mine evacuation process using agent-based simulation [J]. *Applied Sciences-Basel*, 2024, 14 (24): 11773.
- [21] MILOSEVIC I, STOJANOVIC A, NIKOLIC D, et al. Occupational health and safety performance in a changing mining environment: identification of critical factors [J]. *Safety Science*, 2025 (184): 106745.
- [22] CHEN X H, SHI R Y. Production efficiency evaluation of open-pit coal mines considering environment and safety factors [J]. *Journal of Environmental Protection and Ecology*, 2021, 22 (5): 1880-1887.
- [23] STRZEMECKA J, GOZDZIEWSKA M, SKRODZIUK J, et al. Factors of work environment hazardous for health in opinions of employees working underground in the “Bogdanka” coal mine [J]. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 2019, 26 (3): 409-414.
- [24] MARIA S Q D, ADELINA L F B, TATO D M. Engineering complex systems applied to risk management in the mining industry [J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2017, 27 (4): 611-616.
- [25] ROGERS W P, KAHRAMAN M M, DREWS F A, et al. Automation in the mining industry: review of technology, systems, human factors, and political risk [J]. *Mining Metallurgy & Exploration*, 2019, 36 (4): 607-631.
- [26] WANG C, WANG J, WANG X, et al. Exploring the impacts of factors contributing to unsafe behavior of coal miners [J]. *Safety Science*, 2019 (115): 339-348.
- [27] LI J, WANG Z, QIN Y, et al. Study on the influence of an underground low-light environment on human safety behavior. [J]. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 2022, 28 (1): 305-314.
- [28] 邹亚双. 井工煤矿环境照度和噪声强度对视疲劳的影响研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
- [29] JIA A, GUO X, TIAN S. Experimental study on the influence of mental fatigue on risk decision-making of miners [J]. *Scientific Reports*, 2022, 12 (1): 11902.
- [30] LI L, WANG S, HUANG L, et al. The impacts of workplace environment on coal miners' emotion and cognition depicted in a mouse model [J]. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, 2022 (16): 896545.
- [31] LI J, QIN Y, GUAN C, et al. Lighting for work: a study on the effect of underground low-light environment on miners' physiology [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29 (8): 11644-11653.
- [32] LUTZ E A, REED R J, TURNER D, et al. Effectiveness evaluation of existing noise controls in a deep shaft underground mine [J]. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 2015, 12 (5): 287-293.
- [33] ZHANG Y, GUO L, YOU X, et al. Cognitive response of underground car driver observed by brain eeg signals [J]. *Sensors*, 2024, 24 (23): 7763.
- [34] WANG Y, CHEN Z, TIAN S, et al. Convolutional neural network-based eeg-assisted diagnosis for coal workers [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2023, 20 (1): 9.
- [35] KUANG Y, TIAN S, LI H, et al. EEG-based measurement for detecting distraction in coal mine workers [J]. *Applied Sciences-Basel*, 2025, 15 (1): 273.
- [36] WU Q, HAN L, XU M, et al. Effects of occupational exposure to dust on chest radiograph, pulmonary function, blood pressure and electrocardiogram among coal miners in an eastern province, China [J]. *Bmc Public Health*, 2019, 19 (1): 1229.
- [37] MCDUGALL S J P, CURRY M B, DE BRUIJN O. Measuring symbol and icon characteristics: norms for concreteness, complexity, meaningfulness, familiarity, and semantic distance for 239 symbols [J]. *Behavior Research Methods, Instruments & Computers*, 1999, 31 (3): 487-519.
- [38] UNDERWOOD G. Visual attention and the transition from novice to advanced driver [J]. *Ergonomics*, 2007, 50 (8): 1235-1249. **PMT**

收稿日期: 2025-02-27

#### 作者简介:

江松 (1990—), 男, 教授, 博士后, 研究方向: 矿山人因工程。

刘迪真 (通信作者) (1998—), 女, 研究方向: 矿山人因工程。

崔智翔 (2000—), 男, 研究方向: 智能矿山。

饶彬舰 (1999—), 男, 博士生, 研究方向: 矿山智能化。

王会杰 (1977—), 男, 高级工程师, 研究方向: 智能矿山。

刘仲光 (1987—), 男, 高级工程师, 研究方向: 矿产资源勘查、矿产资源开发。