

中文引用格式:陈铁华,刘瑞康,李红霞. 基于SD-BPNN法的矿工安全生产责任压力演化建模与仿真[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(9): 70-77.

英文引用格式:CHEN Tiehua, LIU Ruikang, LI Hongxia. Modeling and simulation research of miners' work safety responsibility pressure evolution based on SD-BPNN method[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(9): 70-77.

基于SD-BPNN法的矿工安全生产责任压力演化建模与仿真^{*}

陈铁华 副教授, 刘瑞康, 李红霞 教授
(西安科技大学 管理学院, 陕西 西安 710054)

中图分类号: X921 文献标志码: A DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.09.1537

基金项目: 国家社会科学基金资助(20XGL025)。

【摘要】 为提高煤矿企业安全生产管理的科学性和有效性, 以矿工安全生产责任压力为主题进行建模与仿真研究。根据矿工安全生产责任压力量表构建系统动力学(SD)因果反馈图, 并收集问卷数据; 基于Matlab 2023b软件的神经网络拟合工具, 构建反映自变量与因变量关系的反向传播神经网络(BPNN); 通过Simulink平台构建系统流程图, 进而进行动态仿真与情景模拟。研究表明: 矿工安全生产责任压力及其各维度压力随时间呈现不断扩大趋势; 压力源独立作用时, 惩罚担忧发挥主导作用, 压力源同步作用时, 认知压力维度呈现非线性抑制; 在压力管理过程中, 应注重多维度压力源的综合考量与平衡调整, 从而提升煤矿企业安全生产管理体系的效能。

【关键词】 系统动力学(SD); 反向传播神经网络(BPNN); 矿工; 安全生产责任压力; 情景模拟

Modeling and simulation research of miners' work safety responsibility pressure evolution based on SD-BPNN method

CHEN Tiehua, LIU Ruikang, LI Hongxia

(College of Management, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an Shaanxi 710054, China)

Abstract: To enhance the scientificity and effectiveness of work safety management in mining enterprises, modeling and simulation studies were conducted focusing on the miners' safety responsibility pressure. A SD causal feedback diagram was constructed based on miners' work safety responsibility pressure scale, and questionnaire data was collected. The BPNN reflecting the relationship between independent and dependent variables was built by using the Neural Network Fitting tool in Matlab 2023b. Furthermore, a system flowchart was established through the Simulink platform to conduct dynamic simulation and scenario simulation. The results show that miners' work safety responsibility pressure and the pressure dimensions tend to increase over time. When pressure sources act independently, the punishment apprehension plays a dominant role, whereas when pressure sources act synchronously, the cognitive pressure dimension demonstrates nonlinear inhibition. In the process of pressure management, comprehensive consideration and balanced adjustment of multidimensional stressors should be emphasized.

* 文章编号: 1003-3033(2025)09-0070-08; 收稿日期: 2025-04-13; 修稿日期: 2025-07-15

to enhance the effectiveness of work safety management system in coal mining enterprises.

Keywords: system dynamics (SD); backpropagation neural networks (BPNN); miner; work safety responsibility pressure; scenario simulation

0 引言

压力是影响煤矿安全和工人健康的重要因素之一^[1],在煤矿工作中,复杂多变的地质结构、笨重的机械设备,严苛的生产指标等多种压力源,不仅会加剧矿工的心理负担,导致认知功能下降,增加事故隐患,长期累积还会引发矿工一系列身体健康问题。因此,研究矿工压力对于提升煤矿生产的安全性和效率,保障矿工生命安全和身体健康,促进煤矿行业可持续发展具有重要意义。

当前对矿工的压力研究多集中于工作压力^[2]、角色压力^[3]、生产压力^[4]等方面。其中,针对工作压力,学者们主要探讨了矿工工作压力的来源、分类及压力反应^[5],工作压力对矿工不安全行为^[6]等方面的影响。对于角色压力,学者们主要考察了角色压力的调节路径^[7],并揭示了角色压力对矿工不安全行为的显著影响^[3]。对于生产压力则主要围绕其产生原因及对安全绩效的影响展开^[4]。这些研究从较为宏观的压力层面揭示了矿工职业环境中的多重负担,但往往忽略了安全生产责任制度在矿工心理压力形成与演变过程中的重要作用。

安全生产责任压力特指矿工在安全生产责任制度环境下感受到的心理和生理压力^[4],源于对安全生产责任的认知、对事故后果的潜在担忧以及履行安全职责过程中的挑战与困难,涉及制度环境的各个环节。安全生产责任压力对矿工的工作态度、行为决策及生产安全具有影响。过高的压力会引发矿工焦虑、紧张等负面情绪,损害其认知能力并增加操作失误风险^[4],长期处于高压状态还可能导致工作倦怠和注意力分散等问题^[8],进而诱发安全事故,对煤矿安全产生深远影响。目前,学术界对于矿工安全生产责任压力的研究主要聚焦于量表开发^[4]以及对矿工不安全行为的影响^[9]方面,尚未充分揭示其多维度、深层次的动态演变过程。

因此,笔者拟以煤矿井下直接参与原煤生产的矿工为研究对象,从矿工安全生产责任压力量表出发,结合系统动力学(System Dynamics,SD)理论与反向传播神经网络(Backpropagation Neural Network,BPNN),建立仿真模型,探讨多重压力源在复杂情境下如何动态影响矿工压力状态,以期揭示

压力演化机制,为制定压力干预策略提供理论依据。

1 压力的建模与仿真研究概况

1.1 压力的建模研究

学者们从多方面构建了压力模型,以探讨其形成机制、影响因素及应对策略。

1) 压力的理论建模。压力的理论模型倾向于探讨压力的产生机制、本质属性及多维特征。部分模型从个体内部出发审视压力,如教师职业压力理论模型^[10]。部分模型针对环境因素考察压力,如压力源二维框架模型将环境压力源划分为挑战性和阻碍性 2 类^[11]。更多模型则关注压力全貌,力图从压力的产生到作用结果全面认识压力,如工作压力动态过程模型认为工作压力是一个动态循环过程,涵盖了压力源、个性特征、应对策略和压力结果 4 个核心要素^[12]。KOESKE 等^[13]提出的压力源-压力状态-结果理论模型认为个体在特定情境下对客观事件的困扰感知会反映为相应的压力状态,该模型以其系统化和结构化的分析框架,成为研究压力的重要工具。

2) 压力的其他建模。除理论模型外,王洁宁等^[14]调研总结了管制员的职业特点与压力源,建立了压力产生过程模型。贺琦等^[15]通过深度访谈与问卷调查,运用模糊综合评价法构建了矿工工作压力评价模型。DAHAL 等^[16]结合心率变异性 and 随机森林算法建立了全局压力检测模型。这些建模方法呈现出鲜明的技术迭代性,智能化特征渐趋显著。

当前研究通过多维视角构建了理论、仿真、评价等模型解析压力机制,但存在可比性不足、通用性有限等问题。未来需融合多学科知识,结合新技术开发更精准的模式。

1.2 压力的仿真研究

个体认知和环境的相互作用共同塑造着人的行为^[17],当前对压力的仿真研究侧重于依托压力模型与场景模拟进行。

1) 模型仿真。王洁宁等^[14]运用逻辑建模语言对构建的管制员压力产生过程模型展开动态仿真,而基于压力模型展开的仿真研究尚不够广泛和深入。

2) 场景模拟仿真。场景模拟在医学教育等领域应用广泛。JUDD 等^[18]采用 100 mm 视觉模拟量表测量了研究对象在仿真与真实环境下心理压力的差异。NAKAYAMA 等^[19]通过五阶段仿真试验,结合动态心电图数据与过程评价分析,揭示了护理学生的压力动态变化。场景仿真中压力的检测方法也较为多样,除动态心电图外,唾液 α -淀粉酶^[20]、李克特量表^[21]等生物标志物和心理评估工具也为压力仿真提供支持。

压力仿真研究多关注职业环境下的压力产生机制,但较少涉及组织结构、个体特质等多因素交互及其非线性特征,相关模型仿真仍较缺乏。未来需深入解析压力源的作用机制,动态模拟多情境下压力对心理与行为的影响。

2 SD 模型构建

2.1 矿工安全生产责任压力构成

陈铁华等^[4]厘清了矿工安全生产责任压力,包含 5 个维度,并据此设计测量量表(表 1)。同时,根据该量表题项提炼变量,作为仿真模型构成要素。

表 1 矿工安全生产责任压力量表

Table 1 Miners' work safety responsibility pressure scale	
因子	题项
规制压力	安全生产责任制度会带来心理约束感
	安全培训 and 安全教育增加了我的工作负担
	规制下的安全程序让我觉得复杂
	惩罚机制给我带来压力
	督查和绩效考核让我感到焦虑
责任风险压力	我害怕承担事故责任
	对强制的法律责任感到本能的畏惧
	岗位角色的问责和追究让我倍感压力
	责任追究的代价我不能承受
安全生产要求	安全生产的硬性指标让我焦虑
	严格的安全管理要求让我感到压力
	倒班、加班等工作时间区间让我产生压力
	安全环境、劳动条件艰苦,我担心不能按进度完成任务
职业素养	自身经验和技能不足让我感到压力
	在作业中,时刻谨慎和规范操作让我感到疲累
	事故应急能力和规避意识的不足让我感到压力
	年龄和身体状况让我产生心理压力
认知压力	在安全培训中,由于自身条件限制,我并不能完全了解安全生产责任制
	制度环境复杂性和不确定性让我产生心理压力
	面对制度规范,我会产生心理约束
	因为了解的不全面,使我心理安全感不足

2.2 矿工安全生产责任压力因果反馈构建

1) 模型变量的确定。结合矿工安全生产责任压力量表中的题项表述整理相关变量,所设变量及符号见表 2。

表 2 变量汇总

Table 2 Variables summary table	
变量类别	变量名称
水平变量 L	安全生产责任压力 L_1 、规制压力 L_2 、责任风险压力 L_3 、职业素养压力 L_4 、安全生产要求压力 L_5 、认知压力 L_6
速率变量 R	安全生产责任压力变化量 R_1 、规制压力变化量 R_2 、责任风险压力变化量 R_3 、职业素养压力变化量 R_4 、安全生产要求压力变化量 R_5 、认知压力变化量 R_6
辅助变量 A	应急能力不足 A_1 、制度约束感 A_2 、培训负担 A_3 、责任追究代价 A_4 、制度规范 A_5 、安全感缺失 A_6 、操作疲劳 A_7 、安全培训成效 A_8 、管理严格度 A_9
常量 K	程序复杂性 K_1 、惩罚担忧 K_2 、考核紧张 K_3 、事故责任 K_4 、法律畏惧 K_5 、岗位问责 K_6 、硬性指标焦虑 K_7 、工作时间负担 K_8 、环境条件 K_9 、经验技能匮乏 K_{10} 、制度复杂性 K_{11} 、年龄身体负担 K_{12}

2) 因果反馈图构建。角色清晰度可从目标明确性和流程清晰度 2 个维度定义^[22]。角色压力理论表明:当个体无法满足角色要求时,会因职责认知不足而产生心理压力^[23]。由此可知:①矿工职业素养不足会削弱培训效果,增加工作负担并引发管理严格化;②规制压力加剧会导致操作疲劳;③安全生产压力增大会加重心理负担,加剧能力与制度规范的失衡。此外,年龄增长导致的体能衰退也会加大培训负担,而经验技能不足又会削弱应急能力。综上所述,结合各变量间的内在关系,构建矿工安全生产责任压力的因果反馈,如图 1 所示。

2.3 问卷数据收集与分析

采用安全生产责任压力量表收集问卷数据。问卷内容包含矿工个人特征与 21 项测量题项,采用李克特 7 级评分法进行评定。为便于数据分析和解释,将原始分值转化为百分制,转化公式为:

$$S = (X - L) / (U - L) \times 100 \quad (1)$$

式中: S 为转化分; X 为原始得分; L 为理论最低分; U 为理论最高分。

采用简单随机抽样法,使用问卷星平台对陕西榆林一家煤矿展开问卷调查。问卷总计收回 789

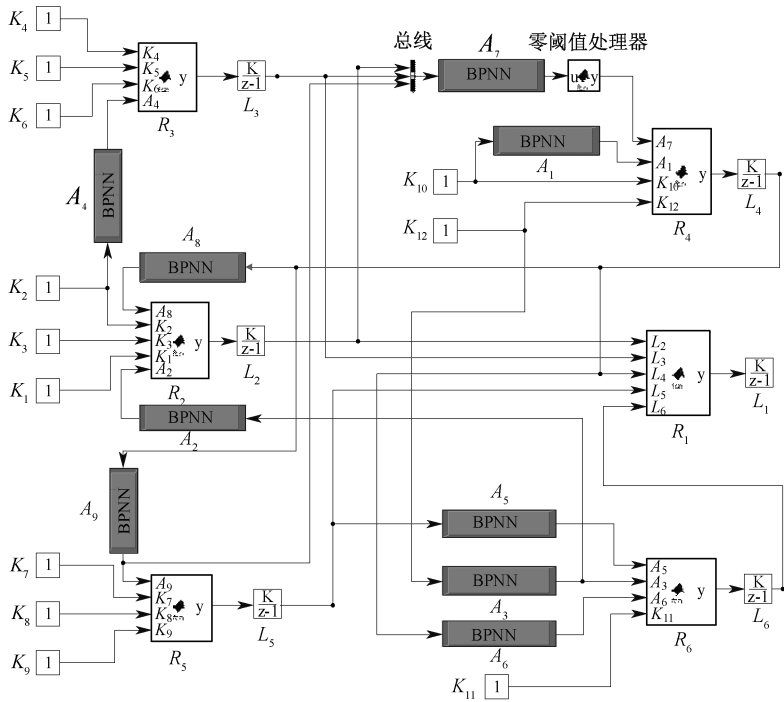


图 4 矿工安全生产责任压力系统流图

Fig. 4 Flow diagram of miners' work safety responsibility pressure

表 3 模型验证结果

Table 3 Model validation results

数据集	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6
训练集	932.67	242.54	205.03	164.08	183.56	137.46
验证集	945.84	237.01	224.85	171.54	170.77	141.66
误差/%	1.39	2.33	8.82	4.35	7.49	2.97

3 压力仿真结果及情景模拟分析

3.1 矿工安全生产责任压力仿真结果分析

矿工安全生产责任压力及各维度压力仿真结果如图 5 所示。

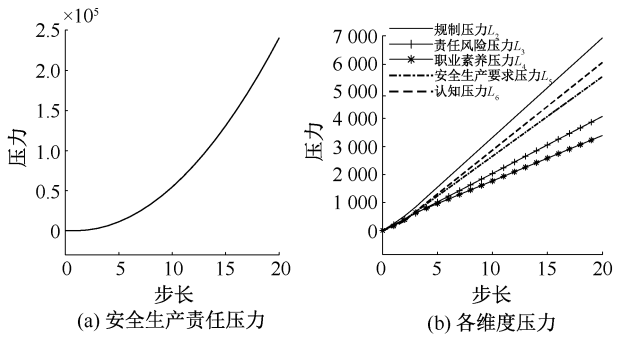


图 5 各压力仿真结果

Fig. 5 Simulation results for each pressure

仿真结果显示：①矿工安全生产责任压力持续增大；②各维度压力中，规制压力增幅最大，认知压

力和安全生产要求压力增幅次之，责任风险压力与职业素养压力增速相对平稳但趋势明显。这表明：①制度规范的刚性约束对矿工压力产生显著影响；②复杂作业环境持续消耗矿工的认知资源，层层传导的安全生产制度不断推高安全生产要求压力；③日趋严格的行业监管与社会预期持续强化责任风险，而快速迭代的技术要求对职业素养构成持续挑战。

3.2 矿工安全生产责任压力情景模拟分析

1) 单因素情景模拟。采用单因素扰动法评估单一压力源的影响：将常量初始值提高 10%，将模型输出值与初始状态下输出的首个非 0 值对比，计算压力的变化率，表征该常量对压力的扰动程度，计算公式为：

$$\delta = |(D - R)| / R \times 100\% \quad (2)$$

式中： δ 为变化率； D 为扰动值； R 为基准值。

单因素扰动下压力变化率如图 6 所示，其中，最内圈表征压力变化率为 0 或接近 0，表示该常量对压力的扰动程度微乎其微。

安全生产责任压力中，惩罚担忧影响最大 ($\delta \approx 3.7\%$)；管理类压力源（事故责任 ($\delta \approx 0.48\%$)、法律畏惧 ($\delta \approx 0.53\%$)、岗位问责 ($\delta \approx 0.58\%$)、考核紧张 ($\delta \approx 0.64\%$)、硬性指标焦虑 ($\delta \approx 0.6\%$)）因执行滞后性而影响较小；环境与个人类压力源（环境条

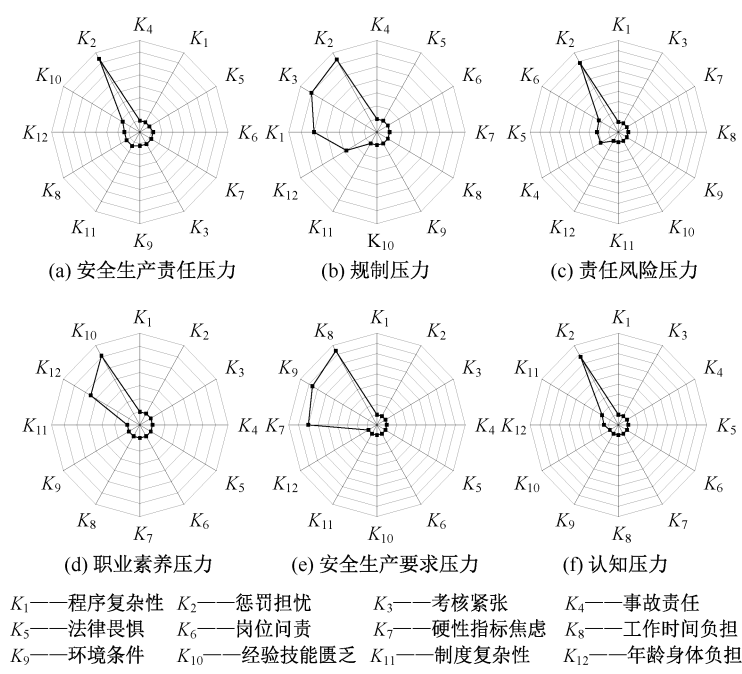


图 6 单因素扰动下压力变化率

Fig. 6 Pressure variation rate under single-factor perturbation

件($\delta \approx 0.65\%$)、经验技能($\delta \approx 0.9\%$)、工作时间($\delta \approx 0.72\%$))则因隐性持续及依赖个体适应性而效果有限。

规制压力中,惩罚担忧($\delta \approx 2.65\%$)和考核紧张($\delta \approx 2.46\%$)影响最大;程序复杂性($\delta \approx 1.99\%$)作为基础工作特征也具有重要影响;而非规制压力源的年龄身体负担($\delta \approx 0.92\%$)也产生一定影响,表明生理变化会间接导致规制压力。

责任风险压力中,惩罚担忧影响最大($\delta \approx 13.7\%$);岗位问责($\delta \approx 2.65\%$)、法律畏惧($\delta \approx 2.4\%$)和事故责任($\delta \approx 2.19\%$)则通过明确责任归属、法律约束和事故后果,形成持续压力。

职业素养压力中,经验技能匮乏($\delta \approx 5.11\%$)和年龄身体负担($\delta \approx 3.52\%$)影响显著。前者直接制约矿工风险应对能力,后者通过降低工作效率等途径间接提升职业要求。

安全生产要求压力中,工作时间负担($\delta \approx 3.66\%$)和环境条件($\delta \approx 3.29\%$)影响最大,直接制约矿工身体状态与工作效率;而硬性指标($\delta \approx 3.05\%$)因明确稳定,影响相对较小。

认知压力中,惩罚担忧影响最显著($\delta \approx 33.54\%$);制度复杂性($\delta \approx 4.56\%$)影响有限;而年龄身体负担($\delta \approx 2.36\%$)主要通过长期的生理机能衰退产生作用,影响最小。

总体来看,惩罚担忧在安全生产责任压力及多

数维度压力中占据主导位置,建议规范运用惩罚措施以优化压力-安全平衡。

2) 全因素耦合情景模拟。采用全因素扰动法评估压力源复合影响:以初始压力非 0 值为基准,所有常量提升 10%,计算系统综合响应变化率。对比单因素变化率代数和与全因素耦合结果,见表 4。

表 4 全因素耦合与单因素情景模拟对比

Table 4 Full-factor coupling versus single-factor scenario simulation comparison %

压力	单因素变化率代数和 $\sum \delta$	全因素变化率 δ	偏差 ($\delta - \sum \delta$)
L_1	10.723	10.717	-0.006
L_2	6.174	6.186	0.012
L_3	20.932	20.945	0.013
L_4	8.655	8.631	-0.024
L_5	10.016	9.993	-0.023
L_6	40.473	6.915	-33.558

在全因素同步扰动下,由表 4 可知:①责任风险压力 L_3 变化率最为显著,这可能源于事故后果的不可逆性与法律追责的确定性产生的乘数效应;②安全生产要求压力 L_5 和职业素养压力 L_4 呈现中等响应强度,其变化受到制度刚性约束与经验代偿能力的动态平衡;③规制压力 L_2 和认知压力 L_6 响应最弱,反映出制度系统的自调节机制和认知适应的缓冲作用;④安全生产责任压力 L_1 作为综合指标,其相对稳定的响应特征体现了五维度压力源的协同调

控机制。

对比单因素与全因素扰动结果发现:① $L_1 \sim L_5$ 压力变化率差异不显著,表明其作用机制相对独立;②认知压力 L_6 呈现显著负向偏差,表明存在压力抑制效应,反映出矿工认知系统对多重压力的自适应调节。

3.3 矿工安全生产责任压力管理建议

1) 优化惩罚机制。基于惩罚担忧的主导性影响,建议推行“培训-奖惩”联动机制,配套专项安全培训、案例警示及安全绩效挂钩制度。

2) 智能分级干预。针对压力耦合的非线性特征,开发智能监测系统,如生理指标手环,设置心理疏导→排班调整→强化培训的分级响应机制,实现精准防控。

4 结 论

1) 多重压力源交互作用会显著加剧矿工的安全生产责任压力,各维度压力的增长幅度由大到小依次为:规制压力、认知压力、安全生产要求压力、责任风险压力、职业素养压力。

2) 单因素扰动下,惩罚担忧对矿工压力产生的扰动幅度占据主导地位。全因素同步扰动下,除认知压力因非线性抑制显著降低外,矿工安全生产责任压力与其他维度压力呈线性累积。

3) 受时间限制,文中样本未能充分代表所有煤矿类型,未来应扩大样本范围,进一步完善指标体系,为煤矿行业提供更为全面的安全管理指导。

参 考 文 献

- [1] 于海淼,徐泽鹏,张硕,等. 煤矿工人职业健康研究进展的知识图谱分析[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(3): 230-236.
YU Haimiao, XU Zepeng, ZHANG Shuo, et al. Knowledge graph analysis of research progress in occupational health of coal miners [J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(3): 230-236.
- [2] 燕勇,栗继祖. 智能化变革背景下矿工工作压力对风险行为的影响研究[J]. 煤矿安全, 2021, 52(8): 253-258.
YAN Yong, LI Jizu. Study on influence of working pressure on risky behavior of miners under the background of intelligent change [J]. Safety in Coal Mines, 2021, 52(8): 253-258.
- [3] 吕威建,吕卫. 角色压力对矿工不安全行为的影响研究[J]. 煤矿安全, 2021, 52(4): 255-259.
LYU Weijian, LYU Yongwei. Study on the influence of role stressors on miners unsafe behavior [J]. Safety in Coal Mines, 2021, 52(4): 255-259.
- [4] 陈铁华,秦瑞林,李红霞. 矿工安全生产责任压力量表开发[J]. 西安科技大学学报, 2022, 42(6): 1 243-1 253.
CHEN Tiehua, QIN Ruilin, LI Hongxia. Development of pressure scale for miner safety production responsibility [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2022, 42(6): 1 243-1 253.
- [5] 庞晓华,栗继祖,徐丽丽,等. 新生代矿工挑战性-阻碍性压力对工作倦怠的影响:基于组织公平感与心理弹性的作用机制[J]. 中国安全生产科学技术, 2023, 19(10): 93-99.
PANG Xiaohua, LI Jizu, XU Lili, et al. Influence of challenge-hindrance stress on job burnout of new generation miners: action mechanism of organizational justice and psychological resilience [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2023, 19(10): 93-99.
- [6] 张子鸣,王新平,苏畅. 差序氛围视角下知识型矿工安全行为研究:基于 PT-MA 理论的演化博弈分析[J]. 安全与环境工程, 2022, 29(6): 1-9.
ZHANG Ziming, WANG Xinping, SU Chang. Research on the safety behavior of knowledge miners from the perspective of chaxu climate: an evolutionary game analysis based on PT-MA theory [J]. Safety and Environmental Engineering, 2022, 29(6): 1-9.
- [7] 王新平,张子鸣,孙林辉,等. 工作场所正念视角下智慧矿山矿工安全行为演化博弈[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(2): 125-131.
WANG Xinping, ZHANG Ziming, SUN Linhui, et al. Evolutionary game on safety behavior of miners in smart mine from perspective of workplace mindfulness [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2022, 18(2): 125-131.
- [8] MICHIE S. Causes and management of stress at work [J]. Occupational and Environmental Medicine, 2002, 59(1): 67-72.
- [9] 陈铁华,张祯侯,李红霞. 安全生产责任压力对矿工不安全行为的影响机制研究[J]. 煤矿安全, 2024, 55(6): 249-256.
CHEN Tiehua, ZHANG Zhenyu, LI Hongxia. Study on the influence mechanism of safety production responsibility

- pressure on miners' unsafe behavior[J]. *Safety in Coal Mines*, 2024, 55(6):249–256.
- [10] 汤金宝. 中学教师组织支持感对工作满意度、工作压力的作用机制研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2018.
TANG Jinbao. The research on the mechanism of effects of middle school teachers' perceived organizational support on their job satisfaction and stress[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2018.
- [11] CAVANAUGH M A, BOSWELL W R, ROEHLING M V, et al. An empirical examination of self-reported work stress among US managers[J]. *Journal of Applied Psychology*, 2000, 85(1): 65–74.
- [12] WILLIAMS S, COOPER L. Managing workplace stress[J]. *Facilities*, 2002, 20(10): 349–349.
- [13] KOESKE G F, KOESKE R D. A preliminary test of a stress-strain-outcome model for reconceptualizing the burnout phenomenon[J]. *Journal of Social Service Research*, 1993, 17(3/4): 107–135.
- [14] 王洁宁,张聪俊,房晓丹,等. 管制员压力产生过程 LEADSTO 动态仿真分析[J]. *重庆交通大学学报:自然科学版*, 2019, 38(10):116–120.
WANG Jiening, ZHANG Congjun, FANG Xiaodan, et al. LEADSTO dynamic simulation analysis on ATC pressure generation process[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science*, 2019, 38(10):116–120.
- [15] 贺琦,张金锁. 基于信息熵的煤矿高层管理者工作压力评价研究[J]. *西安科技大学学报*, 2019, 39(2):256–262.
HE Qi, ZHANG Jinsuo. Evaluation of the senior coal mine managers' work stress based on information entropy [J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2019, 39(2):256–262.
- [16] DAHAL K, BOGUE-JIMENEZ B, DOBLAS A. Global stress detection framework combining a reduced set of HRV features and random forest model[J]. *Sensors*, 2023, 23(11): DOI:10.3390/s23115220.
- [17] 江新,张腾飞,陈婧,等. 复杂系统视角下洞室施工人员安全认知仿真研究[J]. *中国安全科学学报*, 2024, 34(2): 22–30.
JIANG Xin, ZHANG Tengfei, CHEN Jing, et al. Numerical study on safety cognition of cavern constructors from perspective of complex system [J]. *China Safety Science Journal*, 2024, 34(2):22–30.
- [18] JUDD B K, ALISON J A, WATERS D, et al. Comparison of psychophysiological stress in physiotherapy students undertaking simulation and hospital-based clinical education[J]. *Simulation in Healthcare*, 2016, 11(4): 271–277.
- [19] NAKAYAMA N, ARAKAWA N, EJIRI H, et al. Heart rate variability can clarify students' level of stress during nursing simulation[J]. *PLoS One*, 2018, 13(4): DOI:10.1371/journal.pone.0195280.
- [20] IGNACIO J, DOLMANS D, SCHERPBIER A, et al. Comparison of standardized patients with high-fidelity simulators for managing stress and improving performance in clinical deterioration: a mixed methods study[J]. *Nurse Education Today*, 2015, 35(12): 1161–1168.
- [21] PAI D R, RAM S, MADAN S S, et al. Causes of stress and their change with repeated sessions as perceived by undergraduate medical students during high-fidelity trauma simulation[J]. *The National Medical Journal of India*, 2014, 27(4): 192–197.
- [22] WANG Xiaohong, WANG Meng, XU Feng. The role of synergistic interplay among proactive personality, leader creativity expectations, and role clarity in stimulating employee creativity[J]. *Frontiers in Psychology*, 2022, 13: DOI:10.3389/fpsyg.2022.699411.
- [23] KAHN R L, WOLFE D M, QUINN R P, et al. Organizational stress: studies in role conflict and ambiguity[J]. *American Sociological Review*, 1965, 30(4): DOI:10.2307/2091375.



作者简介: 陈铁华 (1972—),男,江苏丹阳人,博士,副教授,主要从事质量管理与安全管理方面的教学与科研工作。E-mail:137220167@qq.com。