

中文引用格式:张洽, 憨瑞东, 陈涛. 基于 PSO 算法的煤矿瓦斯事故致因分析[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(2): 104-110.

英文引用格式:ZHANG Qia, HAN Ruidong, CHEN Tao. Causes analysis of coal mine gas accident based on PSO algorithm [J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(2): 104-110.

基于 PSO 算法的煤矿瓦斯事故致因分析*

张洽 副教授, 憨瑞东, 陈涛

(西安科技大学 管理学院, 陕西 西安 710600)

中图分类号: X928.7

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.02.0280

【摘要】 为科学防治煤矿瓦斯事故, 系统分析我国煤矿瓦斯事故风险因素以及因素耦合关系, 采用 Python 软件, 建立基于粒子群优化 (PSO) 算法的关联规则挖掘模型, 并进行验证; 结合人因分析与分类系统 (HFACS) 事故风险模型, 对煤矿瓦斯事故风险因素进行分类, 并使用 PSO-频繁模式增长 (FP-growth) 算法挖掘煤矿瓦斯事故调查报告的关联规则。结果表明: PSO-FP-growth 算法相较于 PSO-Apriori 算法运行速度及关联规则效果更优; 根据瓦斯事故风险因素关联规则可视化及高支持度关联因素显示, 我国煤矿瓦斯事故发生的主要风险因素是煤矿企业安全监督管理存在缺陷、瓦斯防治技术不到位、员工安全意识淡薄以及现场管理人员管理意识和技术不到位造成的。

【关键词】 粒子群优化 (PSO) 算法; 煤矿瓦斯事故; 事故致因; 关联规则; 人因分析与分类系统 (HFACS)

Causes analysis of coal mine gas accident based on PSO algorithm

ZHANG Qia, HAN Ruidong, CHEN Tao

(School of Management, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an Shaanxi 710600, China)

Abstract: In order to further scientifically prevent and control coal mine gas accidents and systematically analyze the risk factors and coupling relationships of coal mine gas accidents in my country, an association rule mining model based on the PSO algorithm using Python software was established and verified. The risk factors of coal mine gas accidents were classified in combination with the HFACS accident risk model, and the constructed PSO-FP (Frequent Pattern)-growth algorithm was used to mine association rules for coal mine gas accident investigation reports. The results show that the PSO-FP-growth algorithm has better running speed and association rule effect than the PSO-Apriori algorithm. According to the visualization of association rules of gas accident risk factors and high-support association factors, the main risk factors for coal mine gas accidents in my country are defects in safety supervision and management of coal mine enterprises, inadequate gas prevention and control technology, weak safety awareness of employees, and inadequate management awareness and technology of on-site managers.

Keywords: particle swarm optimization (PSO) algorithm; coal mine gas accident; accident causation; association rules; human factors analysis and classification system (HFACS)

0 引言

在我国, 煤炭是一项重要的能源, 而煤层普遍呈

现“三低一强”特性^[1-2], 随着煤矿开采深度增加, 井下环境变得复杂, 导致瓦斯事故频发, 使得我国煤矿瓦斯安全形势复杂多变^[3]。

针对煤矿瓦斯事故,国内外学者采用数量统计和文本挖掘等方法,开展了诸多研究,如景国勋等^[4]采用改进的人因分析与分类系统(Human Factors Analysis and Classification System, HFACS)模型、卡方检验和让步对比分析法,分析瓦斯事故致因;付恩三等^[5]从事故类型、事故伤亡、事故发生时空地域等维度,结合数理统计分析煤矿事故特征;DURSUN^[6]以土耳其煤炭开采业为研究样本,采用层次分析法研究煤矿事故;徐腾飞等^[7]从所有制、事故地点、事故原因、煤矿产能、发生时间、事故诱因、事故类型7个维度分析煤矿瓦斯事故的特征;张江石等^[8]结合自然语言处理技术与事故致因“2-4”模型分析煤矿事故报告的事故致因分类;HUR等^[9]将气象数据纳入瓦斯事故预测模型,并开展数据挖掘研究;田水承等^[10]采用文本挖掘分析煤矿瓦斯事故致因;张津嘉等^[11]运用统计分析法归纳出一般瓦斯爆炸事故的核心条件、差异条件和扩大条件;张宁等^[12]通过贝叶斯网络分析煤矿瓦斯事故致因;SHAHANI等^[13]统计和分析了巴基斯坦地下煤矿的死亡人数;WANG Yuxin等^[14]通过建模分析中国煤矿瓦斯事故致因并提出相应的预防策略;JIA Qingsong^[15]通过文本分类和事故致因理论开展了煤矿瓦斯事故原因分析;WANG Yuxin等^[16]基于网络理论建模和分析了煤矿瓦斯事故不安全行为。综上,国内外学者研究煤矿瓦斯事故致因时缺乏针对分层关联方面的研究。

文本挖掘可从大规模文本集中发现事务的新关系,已在建筑^[17]、石油^[18]以及交通^[19]等领域广泛应用。关联规则是一种通常用于发现数据集中项目之间的耦合关系的数据挖掘技术,能通过算法快速深入挖掘数据样本间隐藏的联系。通过分析大量数据,算法可找出频繁出现在同一事务中的项目集,从而揭示它们之间的耦合性。在煤矿瓦斯事故风险耦合分析中,关联规则可帮助识别导致事故发生的共同因素或模式,从而提供对潜在风险因素的洞察和预防措施的指导。

鉴于此,笔者拟基于改进的 HFACS 事故风险分层模型,并结合粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)-FP-growth(Frequent Pattern growth, PSO-FP-growth)算法,进行关联规则文本挖掘,从多层次角度分析瓦斯事故风险因素,并分析各层事故风险因素的关联规则,以期为我国建立更高效、科学、安全的煤矿管理体系提供参考。

1 PSO-FP-growth 算法构建

1.1 PSO 算法基本原理

PSO 算法是一种基于群体智能的优化方法,其灵感来源于鸟群和鱼群等社会性群体的行为^[20]。该算法通过模拟粒子在解空间中的协同运动来寻找最优解。在 PSO 算法中,解空间中的每个粒子表示一个可能的解,其运动由速度和位置的动态更新决定。粒子通过学习自身的历史最佳位置(个体最优)以及群体中的最佳位置(全局最优)来调整自己的运动方向,最终在多次迭代中逐渐逼近最优解。此外,将 PSO 算法与关联算法相结合,可更有效地挖掘煤矿事故致因的潜在特征,为研究事故致因特点提供了创新性的方法。

PSO 算法的核心机制包括速度和位置的更新。速度更新公式为:

$$v_{id}^{t+1} = wv_{id}^t + c_1r_1(p_{id} - x_{id}^t) + c_2r_2(p_{gd} - x_{id}^t) \quad (1)$$

式中: v_{id}^{t+1} 为粒子*i*在维度*d*上的速度; w 为惯性权重; c_1 和 c_2 为加速系数; r_1 和 r_2 为随机数; p_{id} 为粒子*i*在维度*d*上的个体最优位置; p_{gd} 为整个群体中的全局最优位置; x_{id}^t 为粒子*i*在维度*d*上的位置。

位置更新公式为:

$$x_{id}^{t+1} = x_{id}^t + v_{id}^{t+1} \quad (2)$$

通过式(1)、式(2),粒子的速度和位置在每次迭代中都会得到调整,逐步接近目标函数的最优解。在煤矿事故致因分析中,通过结合 PSO 算法的全局优化能力和关联算法的规则挖掘功能,可提取事故原因间的高关联性特征,揭示事故致因的多维关系结构。

为进一步优化,算法会在每次迭代中更新粒子的个体最优位置和全局最优位置。若粒子的新位置 x_i^{t+1} 对应的目标函数值优于当前个体最优位置 $p_i^{(t)}$,则更新为 $p_i = x_i^{t+1}$ 。同样地,若 x_i^{t+1} 的目标函数值优于全局最优位置 $p_g^{(t)}$,则更新为 $p_g^{(t)} = x_i^{t+1}$ 。惯性权重 w 在算法中起到平衡作用,加速系数 c_1 和 c_2 确保粒子既能探索新的解空间区域,又能快速向最优解收敛。将 PSO 与关联算法结合后,粒子可以在优化过程中根据关联规则调整搜索策略,从而更全面地分析煤矿事故致因的特点。

1.2 基于 PSO 与 FP-growth 算法构建

结合 PSO 和 FP-growth 算法的流程如图 1 所示。

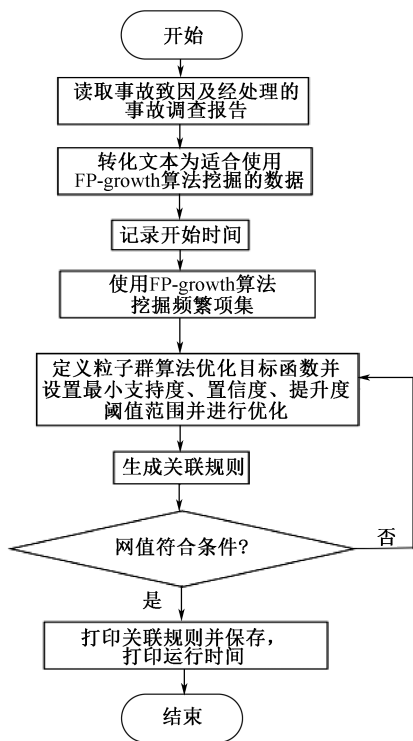


图1 算法流程

Fig. 1 Algorithm flow chart

- 1) 初始化粒子群。随机生成一群粒子,每个粒子表示一个可能的频繁项集。
- 2) 计算适应度。使用 FP-growth 算法计算每个粒子表示的频繁项集的支持度作为适应度。
- 3) 更新个体最优和全局最优。对于每个粒子,根据适应度更新个体最优位置。根据整个群体中适应度最高的粒子更新全局最优位置。
- 4) 更新速度和位置。使用 PSO 算法的速度更新和位置更新公式,调整粒子的速度和位置。
- 5) 迭代更新。重复步骤 2 到步骤 4,直到满足停止条件。
- 6) 输出结果。输出全局最优位置对应的频繁项集作为最终结果。

由于在算法实现过程中,选取 $[0, 1]$ 上的随机数 r_1 和 r_2 和初始化粒子群时的随机性选取,故每次调用算法的结果不尽相同。此外,算法参数设置的不同和上述随机性的影响,可能会造成算法结果陷入局部最优的风险。但从整体来看,PSO-FP-growth 算法在分析瓦斯事故致因因素及探索其关联规则上具有很好的适用性和高效性。

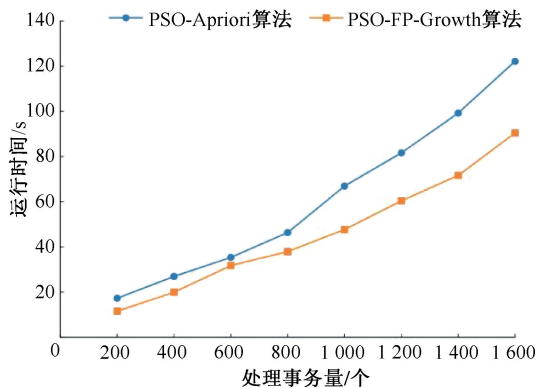
2 PSO 算法效率对比验证

2.1 PSO 算法运行效率对比

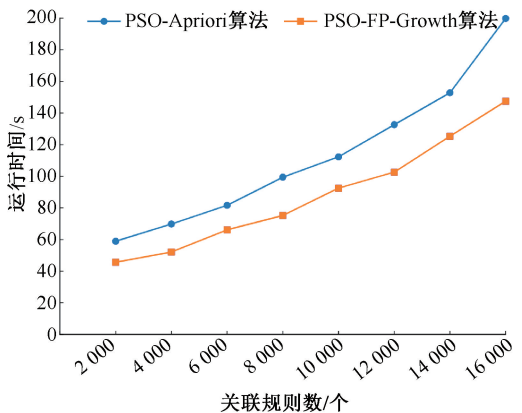
为验证结合 PSO 算法的 FP-growth 关联规则效

率比 Apriori 关联规则效率更高,从国家矿山安全监察局、煤矿安全生产网及其他网站搜集到 1 600 份矿山类事故调查报告进行验证。主要验证 2 种算法在相同支持度、置信度阈值条件下处理相同事务量数与生成相同关联规则量下的两者运行时间效率。

处理相同事务量运行时间对比如图 2a 所示,生成相同关联规则个数时两者运行时间如图 2b 所示。



(a) 处理事务量与运行时间对比



(b) 关联规则数与运行时间对比

图2 PSO 算法效率对比

Fig. 2 Comparison of experimental efficiency of PSO

由图 2 可知:结合 PSO-FP-growth 算法在相同支持度、置信度阈值下运行效率要比结合 PSO-Apriori 算法的效率要高。

2.2 基于改进的 PSO 算法的关联规则效率对比

为验证结合后的 PSO-FP-growth 算法在进行关联规则挖掘时的关联规则数量以及质量要优于 PSO-Apriori 算法,模拟在相同事务量、相同置信度阈值下,运行时间和关联规则数量随支持度变化对比如图 3a、图 3b 所示,关联规则数量随事物数量变化对比如图 3c 所示。

由图 3 可知:在控制各种变量的对比下,PSO-FP-growth 算法在产生关联规则的数量以及质量方面效果优于 PSO-Apriori 算法效果。因此,采用

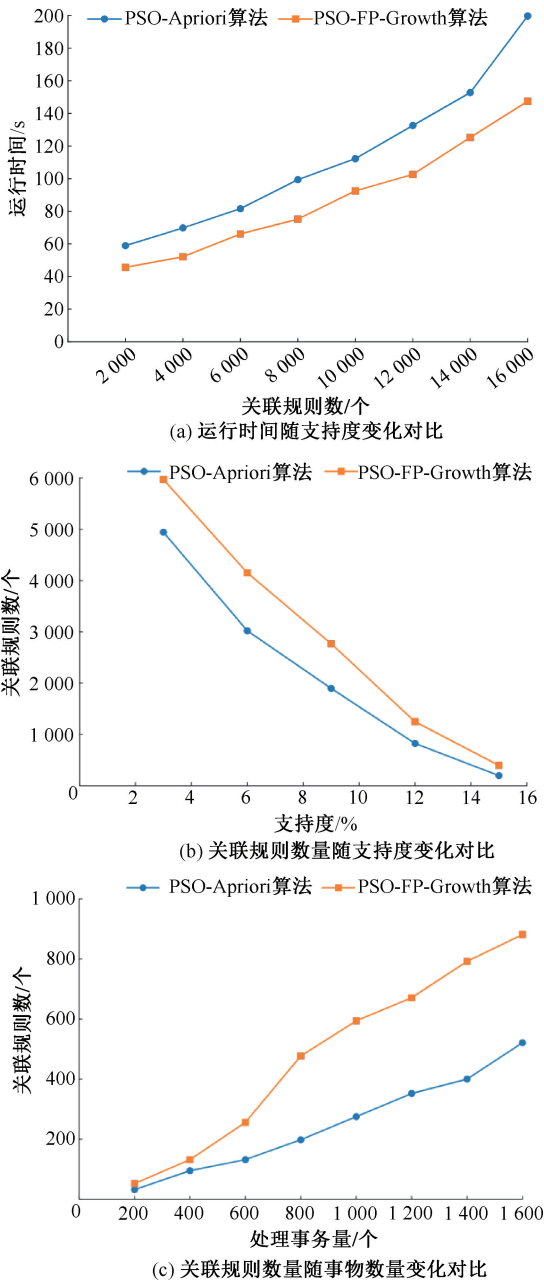


图 3 关联规则对比

Fig. 3 Comparison of rules of association

PSO-FP-growth 算法来研究煤矿瓦斯事故致因关联分析。

3 基于 PSO-FP-growth 算法的事故致因分析

3.1 事故实例编码及参数选择

试验数据主要来源于国家矿山安全监察局和煤矿生产安全网的瓦斯事故调查报告,以 155 份煤矿瓦斯事故调查报告为基础,通过文本挖掘并参考以往相关文献,结合 HFACS 事故致因模型从不安全行

为、不安全行为的前提、不安全监督和组织影响 4 个层面分析事故原因并编号,见表 1。

表 1 瓦斯事故风险分类及编码

Table 1 Gas accident risk classification and coding

事故致因分类	事故致因因子集合及编码
不安全行为	违章放炮 H_0 ; 冒险作业 H_1 ; 瓦斯抽放有效时间不足 H_2 ; 人为造成甲烷传感器失效 H_3 ; 图纸作假 H_4 ; 实施区域和局部防突措施不到位 H_5 ; 没有形成全风压通风 H_6 ; 综掘机割煤诱发突出 H_7 ; 超强度掘进 H_8 ; 贯通采空区 H_9 ; 人为导致瓦斯积聚 H_{10} ; 违章指挥 H_{11}
不安全行为的前提	未发放必要的劳动保护用品 E_0 ; 发放民用爆炸物品的品种 E_1 ; 安全风险辨识差 E_2 ; 未按规定为从业人员配备自救器 E_3 ; 特种作业人员无证上岗 E_4 ; 特种作业人员配备不足 E_5 ; 轻安全 E_6 ; 出现突出预兆后仍冒险组织作业 E_7 ; 制度不执行 E_8 ; 安全措施不落实 E_9 ; 安全发展理念不牢 E_{10} ; 拒不执行监管指令 E_{11} ; 现场安全管理混乱 E_{12}
不安全监督	以包代管 B_0 ; 主体责任不落实 B_1 ; 安全生产管理机构不健全 B_2 ; 安全管理不到位 B_3 ; 对煤矿安全生产工作重视不够 B_4 ; 对企业隐患排查监督指导不力 B_5 ; 通风管理不到位 B_6 ; 未能及时准确掌握煤矿安全生产动态 B_7 ; 未能及时发现煤矿隐蔽作业地点 B_8
组织影响	安全教育培训不到位 W_0 ; 技术管理不到位 W_1 ; 现场检查流于形式 W_2 ; 自保互保意识差 W_3 ; 蓄意逃避安全监管 W_4 ; 隐患排查治理不到位 W_5 ; 无备用局部通风机 W_6 ; 不严格按照煤矿作业规程作业 W_7

3.2 事故致因词云图

通过运用文本挖掘技术得到煤矿瓦斯事故风险因素,绘制词云图如图 4 所示。各个事故风险因素出现的频次高低由词云字体的大小表示,其中,不安全行为中的违章指挥和冒险作业、不安全行为前提中的现场安全管理混乱、不安全监督中的安全生产管理机构不健全和安全管理不到位、组织影响中的安全教育培训不到位和不严格按照煤矿作业规程作业等因素出现的频次较高,是煤矿瓦斯事故的主要风险因素。

3.3 关联规则可视化分析

对 155 份我国煤矿瓦斯事故调查报告进行去除停用词、文本降噪等预处理以避免出现维数过量问题,使其适用于 PSO-FP-growth 算法进行文本关联规则挖掘。使用 Python 3.10.10 进行关联规则挖

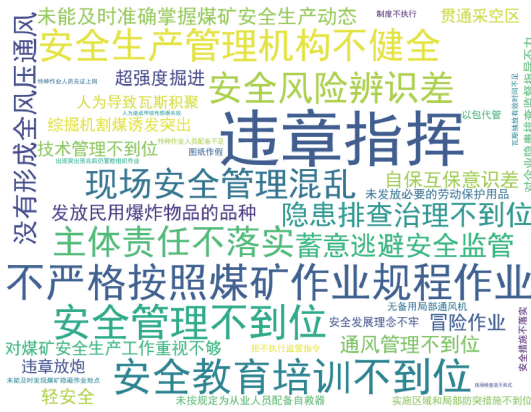


图4 词云图

Fig.4 Word cloud map

掘,将最小支持度设置为 0.020,最小可信度设置为 0.700。

结合 PSO 算法与 FP-Growth 算法共挖掘出 789 条煤矿瓦斯事故风险因素关联规则,剔除其中部分重合的和关联结果无意义的关联规则,共得到 643 条对于构建煤矿安全管理体系有效的煤矿瓦斯事故风险关联规则。

结合表 1 事故风险分类及编号和 643 条关联规则,借助 Python 语言中的可视化第三方库绘制煤矿瓦斯事故风险力导向图,在复杂网络理论中的力导向图中,每个节点代表一个事故风险因素,如 W_7 对应于不严格按照煤矿作业规程作业、 H_{11} 对应于违章指挥,边表示这些风险因素之间的耦合关系。节点的大小和编号用于显示风险因素在网络中的关联度,即该风险因素与其他风险间的关联频率。节点和编号越大,关联度越大。力导向图通过自动调整节点位置,使高关联度的风险因素聚集在一起,清晰地揭示事故风险之间的关系结构。

煤矿瓦斯事故风险因素关联规则如图 5 所示。关联规则显示,在煤矿瓦斯事故中,存在着多个组织影响、不安全行为及不安全监管因素,它们之间相互关联紧密。

具体而言,不安全行为主要有违章指挥和冒险作业,而不安全监督方面则涉及安全生产管理机构不健全、安全管理不到位以及通风管理不到位。此外,组织影响因素也在煤矿瓦斯事故中扮演着重要角色,主要体现在安全教育培训不到位、不严格按照煤矿作业规程作业。以上 7 个事故风险因素与其他事故风险因素之间有很强的关联。

3.4 高支持度强关联因素结果

按照支持度阈值筛选挖掘到的 643 条强关联规

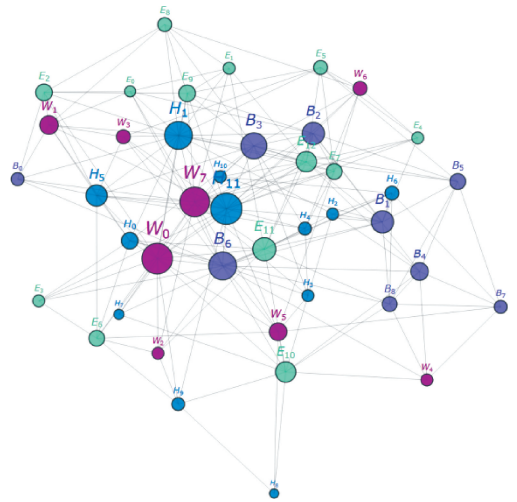


图5 煤矿瓦斯事故风险因素力导向图

Fig.5 Force-oriented diagram of coal mine gas accident risk factors

则,共筛选出 17 个与其他因素高关联的因素,如图 6 所示。

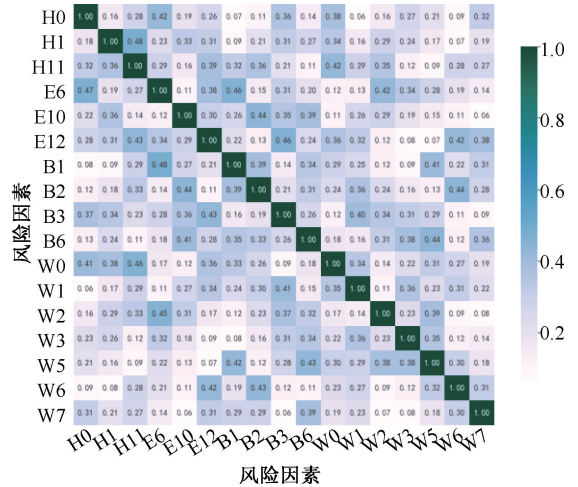


图6 高支持度关联规则热力图

Fig.6 High support association rule heat map

由图 6 可知:这 17 个与其他因素强关联的因素的支持度阈值均超过 5%,属于高支持度的强关联因素。对于挖掘出的强关联因素,在不安全行为的前提下, E_6 和 E_{12} 是造成瓦斯事故的不安全行为的重要前提;在不安全监督因素中, B_1 、 B_2 和 B_3 是多项强关联规则的先导,以上几个问题应得到煤矿监管人员的更多注意;在组织影响因素中, W_0 、 W_1 、 W_2 、 W_6 是组织因素的先导,应加强以上几个方面的培训并不断完善。这些强关联规则结果表明:我国煤矿瓦斯事故发生的主要原因是煤矿企业安全监督管理存在缺陷、瓦斯防治技术不到位、员工安全意识淡薄以及现场管理人员管理意识和技术不到位造成的。

3.5 瓦斯安全事故防范措施

基于煤矿瓦斯事故数据,在分析上述瓦斯事故强关联规则的基础上,客观地提出以下对策:

1) 对于煤矿企业,应加强安全生产管理制度的建设,确保其健全和完善。同时投入更多资源研发和应用瓦斯防治技术,确保技术水平到位。定期检查和维修瓦斯防治设备,确保其正常运行。

2) 对于煤矿监管人员,提升安全监管的力度,加强对煤矿企业的监督和检查,及时发现和纠正安全管理中存在的缺陷。

3) 对于一线员工,应定期进行安全培训,加强安全意识,提高员工对煤矿安全的重视和认识。强化安全文化建设,使员工养成安全操作的习惯。对现场管理人员进行培训,提升其管理意识和技术水平,避免现场检查流于形式。制定并执行更加严格的作业规程,确保作业过程中符合安全要求。

这些对策旨在综合考虑煤矿瓦斯事故的多个因素,从管理、技术和制度等方面入手,提升煤矿安全管理水平,减少瓦斯事故发生的可能性。

4 结 论

1) PSO-FP-growth 算法在相同支持度、置信度

阈值条件下,处理相同事务量数与生成相同关联规则量下的运行时间效率优于 PSO-Apriori 算法。将 PSO-FP-growth 算法应用于煤矿瓦斯事故致因耦合分析,能够对我国煤矿瓦斯事故提供有效科学防治。

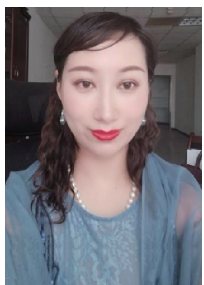
2) 煤矿瓦斯事故是多种因素共同作用所导致的结果,将 155 份煤矿瓦斯事故调查报告进行去除停用词和文本降噪处理后分析,并针对煤矿瓦斯事故风险因素数据量大且分散等特点,通过改进 HFACS 事故风险模型结合 PSO-FP-growth 算法共得出 4 种煤矿瓦斯事故风险因素类型、42 个风险因素、643 条有效的煤矿瓦斯事故风险关联规则以及 17 个强关联规则因素。

3) 文中得出煤矿瓦斯事故的关键风险因素、风险关联规则以及强关联因素,其中,组织影响和 unsafe 行为等方面风险可直接或间接导致其他事故风险因素的发生,应当受到煤矿企业各个层级高度重视,企业可依据此研究结果采取针对性措施解决相应问题。同时未来可以考虑深入分析组织管理因素的重要作用,以提高煤矿企业瓦斯安全管理的有效性。

参 考 文 献

- [1] 刘全龙,法子薇,李新春,等. 数据为证: 各类煤矿事故致因差异化分析与危险源管控研究[J]. 管理工程学报, 2024, 38(5): 277-291.
LIU Quanlong, FA Ziwei, LI Xinchun, et al. Evidence based on data: risk analysis of accident-causing factors and hazards precautions in coal mines[J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2024, 38(5): 277-291.
- [2] 刘全龙,张晓霖,张悦倩,等. 基于事故致因的标准化煤矿建筑规范库构建[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(5): 128-133.
LIU Quanlong, ZHANG Xiaolin, ZHANG Yueqian, et al. Construction of a database of standardized coal mine building regulation based on accident causation[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(5): 128-133.
- [3] 张培森,张晓乐,董宇航,等. 2008—2021 年我国煤矿事故规律分析及预测研究[J]. 矿业安全与环保, 2023, 50(2): 136-140, 146.
ZHANG Peisen, ZHANG Xiaole, DONG Yuhang, et al. Law analysis and prediction research of coal mine accidents in China from 2008 to 2021[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2023, 50(2): 136-140.
- [4] 景国勋,穆璐璐. 煤矿瓦斯爆炸事故统计分析及其应急管理研究[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(10): 3 657-3 665.
JING Guoxun, MU Lulu. Study on statistical analysis and emergency management of coal mine gas explosion accident[J]. Journal of Safety and Environment, 2023, 23(10): 3 657-3 665.
- [5] 付恩三,白润才,刘光伟,等. “十三五”期间我国煤矿事故特征及演变趋势分析[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(12): 88-94.
FU Ensan, BAI Runcai, LIU Guangwei, et al. Analysis on characteristics and evolution trend of coal mine accidents in our country during "13th five-year" plan period [J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(12): 88-94.

- [6] DURSN A E. Fatal accident analysis and hazard identification in turkish coal-extracting industry using analytic hierarchy process[J]. Mining, Metallurgy & Exploration, 2024, 41(1): 149-172.
- [7] 徐腾飞,王学兵. 近十年我国低瓦斯煤矿瓦斯爆炸事故统计与规律分析[J]. 矿业安全与环保, 2021, 48(3): 126-130.
XU Tengfei, WANG Xuebing. Statistics and regularity analysis of gas explosion accidents in domestic low-gas coal mines in recent ten years[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2021, 48(3): 126-130.
- [8] 张江石,李泳墩,冒香凝,等. 基于 NLP 的煤矿事故原因分类研究[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(6): 20-26.
ZHANG Jiangshi, LI Yongtun, MAO Xiangning, et al. Study on classification of coal mine accident causes based on NLP [J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(6): 20-26.
- [9] HUR Y T, SHIN D, LEE S K. Data mining of gas accident and meteorological data in Korea for a prediction model of gas accidents[J]. Journal of The Korean Institute of Gas, 2012, 16(1): 33-38.
- [10] 田水承,黄权. 基于文本挖掘的煤矿瓦斯事故致因分析[J]. 煤矿安全, 2022, 53(5): 241-245.
TIAN Shuicheng, HUANG Quan. Analysis of causes for coal mine gas accidents based on text mining method[J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(5): 241-245.
- [11] 张津嘉,许开立,王延瞳,等. 特别重大瓦斯爆炸事故致因机制研究[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(1): 48-52.
ZHANG Jinjia, XU Kaili, WANG Yantong, et al. Study on causation mechanism of extraordinary serious gas explosion accidents in coal mines [J]. China Safety Science Journal, 2017, 27(1): 48-52.
- [12] 张宁,盛武. 基于贝叶斯网络的煤矿瓦斯爆炸事故致因分析[J]. 工矿自动化, 2019, 45(7): 53-58.
ZHANG Ning, SHENG Wu. Causes analysis of coal mine gas explosion accidents based on Bayesian network [J]. Journal of Mine Automation, 2019, 45(7): 53-58.
- [13] SHAHANI N M, SAJID M J, ZHENG X, et al. Statistical analysis of fatalities in underground coal mines in Pakistan[J]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2020, 47(1): 2 189-2 204.
- [14] WANG Yuxin, FU Gui, LYU Qian, et al. Accident case-driven study on the causal modeling and prevention strategies of coal-mine gas-explosion accidents: a systematic analysis of coal-mine accidents in China [J]. Resources Policy, 2024, 88: DOI: 10. 1016/J. RESOURPOL. 2023. 104425.
- [15] JIA Qingsong, FU Gui, XIE Xuecai, et al. Enhancing accident cause analysis through text classification and accident causation theory: a case study of coal mine gas explosion accidents[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2024, 185: 989-1 002.
- [16] WANG Yuxin, FU Gui, LYU Qian, et al. Modelling and analysis of unsafe acts in coal mine gas explosion accidents based on network theory[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2023, 170: 28-44.
- [17] XU Na, MA Ling, LIU Qing, et al. An improved text mining approach to extract safety risk factors from construction accident reports[J]. Safety Science, 2021, 138: DOI: 10. 1016/J. SSCI. 2021. 105216.
- [18] GANGANHARI R K, RABIEE M, KHANZODE V, et al. From unstructured accident reports to a hybrid decision support system for occupational risk management: the consensus converging approach[J]. Journal of Safety Research, 2024, 89: 91-104.
- [19] BROWN D E. Text mining the contributors to rail accidents[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 17(2): 346-355.
- [20] EBERHART R, KENNEDY J. A new optimizer using particle swarm theory[C]. Mhs95 6th International Symposium on Micro Machine & Human Science. IEEE, 2002: DOI: 10. 1109/MHS. 1995. 494215.



作者简介: 张 沁 (1981—),女,内蒙古海拉尔人,博士,副教授,主要从事矿业安全方面的研究。E-mail: ankangzhangqia@163.com。