数据驱动的煤矿瓦斯爆炸风险评估体系研究

李　爽[1,2,3,4],鹿　乘[1,2],徐宁可[1,2],张　祎[1,2],张圳安[1]
(1. 中国矿业大学 经济管理学院,江苏 徐州　221116;2. 中国矿业大学 安全科学与应急管理研究院,江苏 徐州　221116;
3. 北京理工大学 前沿交叉科学院,北京　100081;4. 西安交通大学 管理学院,陕西 西安　710049)

摘要: 瓦斯爆炸是煤矿井下具有毁灭性且频发的重大灾害类型,现有风险评估体系在准确性、客观性与实时性方面仍存在不足. 针对煤矿瓦斯爆炸风险评估中的实际需求与挑战,本文构建了一种数据驱动的煤矿瓦斯爆炸风险评估体系. 首先,通过文本挖掘和灾害机理的混合驱动指标体系构建方法,构建覆盖监测情况、管理情况、隐患现状、环境条件等多维度的三层级指标体系,能够支撑多源异构数据的实时采集与表达. 其次,基于领域知识制定三级定性指标的评分规则和二级指标的阈值规则,为模型输入提供标准化支撑. 再次,融合FAHP、CRITIC、线性加权、基于端点混合型三角白化权函数和风险等级-风险值转化模型,构建多层级、多模型融合的风险评估方法,兼顾解释性与数据处理能力. 最后,在低瓦斯、高瓦斯和突出矿井3个类型煤矿的采煤工作面与采区回风巷开展工业性测试. 结果表明:该评估体系能够实时融合多源异构数据,实现多区域、多层级风险评估,准确率达到98.3%. 对比分析显示,相较于单一赋权方法和传统灰色聚类模型,其评估准确率分别提升1.6%和8.7%. 该体系可在不同工况下实现煤矿瓦斯爆炸风险的实时、准确与自适应评估,明显优于传统模型,具备良好的工业适应性与推广应用前景.

关键词: 煤矿瓦斯爆炸风险评估;数据驱动;多源异构数据;工业应用;智能化管控
中图分类号: TP18;TD712.7　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1000-1964(2026)02-0350-20

Research on data driven coal mine gas explosion risk assessment system

LI Shuang[1,2,3,4], LU Cheng[1,2], XU Ningke[1,2], ZHANG Yi[1,2], ZHANG Zhen'an[1]
(1. School of Economics and Management, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 2. Safety Science and Emergency Management Research Institute, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 3. School of interdisciplinary Science, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; School of Management, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China)

Abstract: Gas explosion is a destructive and frequent major disaster type in coal mines, and the existing risk assessment system still has shortcomings in accuracy, objectivity, and real-time performance. In response to the practical needs and challenges in coal mine gas explosion risk assessment, this article constructs the data-driven coal mine gas explosion risk assessment system. First, a three-level indicator system covering multiple dimensions such as monitoring, manage-

收稿日期: 2025-04-19　　**修回日期:** 2025-05-22　　**DOI:** 10.13247/j.cnki.jcumt.20250125
基金项目: 国家自然科学基金重点项目(U23B2092);中国矿业大学研究生创新计划资助项目(2024WLKXJ093);江苏省研究生科研与实践创新计划资助项目(KYCX24_2962)
第一作者: 李　爽(1981—),女,湖南省长沙市人,教授,博士生导师. E-mail:lishuangchina@cumt.edu.cn
通信作者: 鹿　乘(1996—),男,山东省淄博市人,博士研究生. E-mail:TB23070008A41@cumt.edu.cn
引用格式: 李　爽,鹿　乘,徐宁可,等.数据驱动的煤矿瓦斯爆炸风险评估体系研究[J].中国矿业大学学报,2026,55(2):350-369.
LI Shuang, LU Cheng, XU Ningke, et al. Research on data driven coal mine gas explosion risk assessment system[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2026, 55(2): 350-369.

ment, hidden danger status, and environmental conditions was constructed by using the hybrid-driven method integrating text mining and disaster mechanisms, which enabled real-time collection and expression of multi-source heterogeneous data. Second, scoring rules for third-level indicators and threshold rules for second-level indicators were formulated based on domain knowledge to provide standardized support for model inputs. Third, a multi-level and multi-model fusion risk assessment method was developed by integrating FAHP, CRITIC, linear weighting models, end-point mixed triangular whitenization weight functions, and risk level-risk value transformation models, achieving a balance between interpretability and data processing capabilities. Finally, industrial testing was conducted on coal working faces and return airways of three types of coal mines: low-gas, high-gas, and outburst mines. The results indicate that the proposed assessment system can integrate multi-source heterogeneous data in real time, enabling risk assessment across multiple regions and levels with an accuracy rate of 98.3%. Comparative analysis demonstrates that its assessment accuracy is improved by 1.6% and 8.7% respectively compared to single weighting method and traditional grey clustering model. The system achieves real-time, accurate, and adaptive coal mine gas explosion risk assessment under various working conditions, significantly outperforming traditional models and demonstrating strong industrial applicability and promising prospects for widespread adoption.

Key words: coal mine gas explosion risk assessment; data-driven; multi source heterogeneous data; industrial application; intelligent control

煤炭作为我国的主要能源，在国民经济中占据重要地位，但伴随煤炭开采的风险不可忽视[1-2]. 瓦斯爆炸是煤矿中严重的灾害，具有较强的破坏性、突发性[3]. 在煤矿工程系统中，由于井下环境的复杂性，爆炸事故会造成巨大的人员损失、财产损失和环境破坏. 据不完全统计，2000—2023年，其中瓦斯爆炸事故301起，死亡7 154人，近年来尽管事故数量有所减少，但是如2024年安徽淮河能源控股集团谢桥煤矿“3·11”较大瓦斯爆炸事故、2023年陕西延安延川县新泰煤矿“8·21”重大瓦斯爆炸事故等重大事故依然层出不穷，对煤矿安全生产构成重大威胁.

因此，如何实时感知煤矿瓦斯爆炸风险状态来控制事故成为新的难题. 煤炭开采的环境变化是一个动态复杂过程，煤矿安全生产的信息来源种类多、规模大、数据分析要求高，但是目前大部分煤矿企业对瓦斯爆炸风险状态的分析还主要基于现场人员和专家的知识和主观判断，这类传统方法很难及时获取瓦斯爆炸风险状态. 现代信息手段尽管可以实现对风险因素的实时监测，但当前在动态风险评估方面研究不足，从而导致煤矿瓦斯爆炸事故仍然时有发生.

传统的煤矿瓦斯爆炸风险评估体系以专家先验知识为核心依据，主要分为两类：1)基于多属性决策(MADM)的风险评估. 通过构建指标体系，以专家经验作为指标数据来源，通过IAHP-改进的三角白化权函数[4]、前景理论-区间数[5]、模糊故障树[6]、灰色关联-物元可拓[7]、AHP-SPA[8]、AHP-集对分析-可变模糊集[9]、模糊DEMATEL-云模型[10]、C-OWA算法-交互矩阵[11]等模型实现风险评估. 此类模型结构清晰，但由于评估数据主要来源于专家判断，导致其主观性强、实时性差、动态适应性不足. 2)基于贝叶斯网络的风险评估. 该类方法以专家知识和事故致因理论为基础，构建风险因素间的因果结构，通过贝叶斯网络实现瓦斯爆炸风险可能性评估. 相较于MADM类方法，贝叶斯网络模型在因果关系表达与逻辑推理方面更具优势，能够揭示风险因素间的层级结构与传播路径[12-15]. 但其网络结构与参数设定仍高度依赖专家经验，缺乏基于实时监测数据的动态更新机制.

随着传感器技术、数据采集手段的提升，数据驱动的风险评估方法逐渐成为研究热点. 部分学者的研究也实现了全过程数据驱动的煤矿瓦斯爆炸风险评估，构建了客观的评价指标体系，基于大量的实时监测数据，利用AHP-未知测度理论[16]、灰色-IAHP[17]实现了评估. 但是这些方法依赖于最大隶属度原则，仅关注隶属度最高的风险等级，

容易忽略其他风险等级的重要信息,导致潜在风险信息丢失.对于煤矿瓦斯爆炸风险而言,这种信息丢失是不可接受的,因为任何潜在风险的忽视都可能引发严重事故.

同时,井下通风条件、地质构造等煤矿环境条件因素和煤矿安全管理、法规执行、人员培训等煤矿管理现状因素对瓦斯爆炸风险的影响尚未被充分探讨,包括未纳入指标体系、无法客观量化和实时获取等问题,如果构建的煤矿瓦斯爆炸风险指标体系不够全面且难以量化,那么会严重影响评估的准确性.

综上所述,尽管过往学者采用了多种技术来实现煤矿瓦斯爆炸风险评估,但在评估的准确性、客观性和实时性方面仍然面临巨大的挑战.因此,本研究构建了数据驱动的煤矿瓦斯爆炸风险评估体系,通过以下三方面来提高评估的准确性、客观性和实时性:1)构建了全面的、客观的煤矿瓦斯爆炸风险三级指标体系.这套指标体系考虑了瓦斯、引火源的监测情况、管理情况、隐患现状、环境条件等情况等26个三级指标,考虑了与瓦斯爆炸机理直接相关的7个二级指标,所有的指标均可通过煤矿智能监测系统、人工统计、传感器感知等方式实时获取客观的多源异构数据.2)构建了煤矿瓦斯爆炸风险二级指标的阈值规则和三级指标的评分规则.三级指标的评分规则能够将煤矿环境条件和管理情况等难以量化的定性指标信息转化为定量数据,二级指标的阈值规则能够根据国家规章制度对煤矿区域的不同要求设定个性化的阈值,以此更合理地转换指标数据,为评估提供准确的数据基础.3)构建了数据驱动的煤矿瓦斯爆炸风险评估模型.本研究集合FAHP、CRITIC、线性加权法、灰色聚类分析这些传统的多属性决策算法构建了煤矿瓦斯爆炸风险评估模型,该模型具有多层结构,模型逻辑清晰简洁,评估的所有过程均具备可解释性,而且能够迅速处理大规模数据,在通过专家先验知识确定初始主观权重和阈值规则后,模型就完全是数据驱动的.同时本研究改进了基于端点混合三角白化权函数的灰色聚类评估模型,使得模型考虑了所有的风险概率,提高了评估模型的准确性.

最后,本研究提出的数据驱动的煤矿瓦斯爆炸风险评估体系在低瓦斯矿井、高瓦斯矿井、突出矿井的采煤工作面和采区回风巷进行了工业性试验,结果表明该体系能够实现煤矿瓦斯爆炸风险的实时、客观、准确评估,在不同环境条件下的自适应性强.该体系具有良好的工业应用前景,对煤矿瓦斯爆炸风险控制具有重要意义.

1 构建煤矿瓦斯爆炸风险指标体系

1.1 数据集

本研究使用煤矿瓦斯爆炸事故调查报告作为数据来源,这些报告由国家矿山安全监察局和应急管理部根据《煤矿生产安全事故报告和调查处理规定》发布,具有准确性、权威性和法律效力.报告内容包括:①事故单位基本情况;②事故经过、救援情况及类别;③人员伤亡及经济损失;④事故直接、间接原因及性质;⑤责任认定及处理建议;⑥防范和整改措施.本研究的案例数据来自国家矿山安全监察局(https://www.chinamine-safety.gov.cn/)、各省级局官网、煤矿安全生产网(https://www.mkaq.org/)及安全管理网(https://www.safehoo.com/).

本研究共收集了2012—2024年中国发生的64起煤矿瓦斯爆炸事故的调查报告.需要说明的是,受数据来源限制及事故调查的滞后性影响,本研究样本存在一定的不完全性.

1.2 基于文本挖掘的瓦斯爆炸风险因素初步筛选

本研究使用文本挖掘从海量的瓦斯爆炸事故调查报告中提取风险因素.主要参考文献[18-19]的研究,通过数据处理和风险因素提取来从事故报告中进行文本挖掘.

数据预处理.数据清洗:去除报告中的无关信息,如页眉、页脚、签名等,以及进行编码转换,确保文本数据的统一性.分词与标注:使用JIEBA分词对文本进行分词处理,并去除停用词(如“的”“了”等常见但无实际意义的词).词性标注:对分词后的词语进行词性标注,以便后续筛选出关键性的名词和动词.

风险因素提取.使用TF-IDF算法提取分词结果的关键词,结合已经制定的规则,筛选出与事故致因相关的关键词,这些关键词就是煤与瓦斯突出事故的致因因素.

根据TF-IDF计算的关键词,存在着意义不大但TF-IDF值高的情况,这些关键词在停用阶段未被考量到位,如“不力”“部分”“继续”“地方”等,所以在进行人工筛选处理后,对于无法表述其事故原因的词语都进行了过滤,共计50个,剩余102个

关键词，其中不含否定语义的关键词，实际表述为该方面的问题，如“整改”意为“整改不到位”. 这些关键词根据 TF-IDF 值的大小呈现在图 1 中.

将文本挖掘获取到的煤矿瓦斯爆炸关键词作为领域知识，将这些关键信息转化为风险因素，最终获取到了瓦斯爆炸隐患情况、瓦斯监测监控情况、瓦斯治理情况、通风系统情况、瓦斯爆炸相关环境条件、安全管理情况、开采情况、安全培训情况、安全投入情况 9 个类别风险因素，部分转换见表 1.



图 1　瓦斯爆炸关键词的词云图

Fig. 1　Word cloud map of keywords related to gas explosion

表 1　煤矿瓦斯爆炸风险因素转换

Table 1　Conversion of coal mine gas explosion risk factors

关键词	风险因素
放炮	安全管理情况
越界开采	开采情况
安全管理混乱	瓦斯爆炸相关环境条件
采空区瓦斯涌出	环境情况
培训	安全培训情况
通风设备故障或不足	通风系统情况
人员配备	安全投入情况
传感器	瓦斯监测监控情况
安全意识淡薄	安全培训情况
瓦斯积聚	瓦斯治理情况
隐患	瓦斯爆炸隐患情况

1.3　风险因素转换

根据上述风险因素，本研究基于指标可量化原则，将 9 类风险因素分解为具体的可量化指标，共分解为 26 个指标，具体的指标、指标含义、指标必要性见表 2.

表 2　指标类别、量化指标、指标含义和指标必要性

Table 2　Indicator categories, quantification, meaning, necessity

瓦斯爆炸风险因素类别	瓦斯爆炸风险因素量化指标	指标含义	指标必要性解释
瓦斯爆炸隐患情况	瓦斯爆炸事故历史情况	煤矿历史上发生瓦斯爆炸事故的次数及严重程度.	历史事故频次越高，表明矿井瓦斯管理存在系统性漏洞，爆炸风险显著增加.
	瓦斯爆炸类重大隐患历史情况	煤矿历史上与瓦斯爆炸直接相关的重大安全隐患数量.	重大隐患未整改可能直接引发爆炸，需作为风险预警核心指标.
	瓦斯爆炸类型 B 类以上隐患数量	B 类及以上(按隐患等级划分)的瓦斯爆炸相关隐患的具体数量.	B 类隐患具有较高触发爆炸的可能性.
瓦斯监测监控情况	瓦检员空班漏检、假检次数	瓦斯检测员未按时到岗检测(空班漏检)或伪造检测数据(假检)的累计次数.	漏检或假检可能导致瓦斯浓度数据失真，掩盖真实风险.
	甲烷电、风电闭锁	甲烷电、风电闭锁出现的次数.	闭锁失效会直接增加电火花引燃瓦斯的概率.
	瓦斯传感器超限次数	瓦斯传感器检测到甲烷浓度超过安全阈值的累计次数.	超限次数越多，瓦斯积聚风险越高.
	瓦斯传感器超限时长	瓦斯传感器检测到甲烷浓度持续超限的总时间长度.	超限时间越长，爆炸概率呈指数级上升(如浓度≥5% 且持续 30 min 即为高危状态).
瓦斯治理情况	综合防治措施	煤矿采用的瓦斯综合防治技术(如通风、监测等)的实施效果评估.	防治措施失效可能导致瓦斯失控.
	瓦斯抽采效果检验	瓦斯抽采系统的效率及抽采后瓦斯浓度是否达标的具体检验结果.	抽采不达标会导致残余瓦斯积聚.
通风系统情况	主通风系统	煤矿主通风系统设计的合理性及运行稳定性评估.	通风不足会直接引发局部瓦斯超限，是稀释瓦斯的基础保障.
	通风专业与瓦斯相关三违数量	通风作业中涉及瓦斯的违章指挥、违章操作、违反劳动纪律的累计次数.	三违行为可能破坏通风平衡，导致瓦斯异常积聚.

续表2

瓦斯爆炸风险因素类别	瓦斯爆炸风险因素量化指标	指标含义	指标必要性解释
	局部通风机馈电异常未报警	局部通风机供电异常但未触发报警的故障次数.	馈电异常未报警可能导致停风引发瓦斯积聚.
	风速异常报警	煤矿内风速超过安全范围触发报警的次数.	风速过低无法驱散瓦斯,过高可能扬起煤尘引发二次爆炸.
瓦斯爆炸相关环境条件	工作面与地质构造带距离	采掘工作面与地质断层、破碎带等高风险区域的最小距离.	距离越近,瓦斯涌出量越大.
	煤层自燃倾向性	煤层发生自燃的基本条件,分为容易自燃、自燃和不易自燃.	自燃倾向性高的煤层可能因氧化发热引燃瓦斯.
	煤尘爆炸指数	煤中含有的挥发分占可燃物质的百分数,是确定煤尘爆炸危险性的一个参数.	高爆炸指数煤尘会扩大爆炸范围.
	巷道支护材料可燃性	巷道支护是否使用阻燃材料的情况.	可燃材料在火灾中会助燃并延长火势,增加瓦斯爆炸概率.
	矿井瓦斯等级	根据瓦斯涌出量划分的矿井等级,分为低瓦斯、高瓦斯、煤与瓦斯突出矿井.	等级越高,瓦斯爆炸风险越大.
安全管理情况	应断未断电次数	监测到瓦斯超限或异常时未及时切断电源的累计次数.	未断电可能导致电气设备产生火花或高温,直接引燃瓦斯.
	防灭火设计	防灭火设计的完善程度.	设计不完善可能导致初期火灾失控,增加引发瓦斯爆炸概率.
	火源管理	对煤矿爆破、电气火花等潜在火源的控制措施及防灭火管理制度情况.	火源失控是瓦斯爆炸的直接触发条件.
开采情况	多煤层联合采掘工作面数量	同时进行多煤层开采或掘进的工作面数量.	反映开采复杂度,数量越多,瓦斯叠加涌出风险越高.
	工作面采煤工艺	煤矿使用的采煤方法,如综采、炮采等方式.	采煤工艺不同会导致不同的瓦斯释放速度和火源风险,炮采导致煤层剧烈破碎,瓦斯集中释放,爆破作业本身产生高温火焰,瓦斯爆炸风险最高.
安全培训情况	安全培训情况	员工接受瓦斯防治相关安全培训的覆盖率及考核合格率.	培训不足可能导致操作失误等情况,增加瓦斯爆炸概率.
	持证上岗情况	涉及瓦斯作业的员工持有相关安全操作证书的比例及有效性.	无证上岗可能引发技术性失误,增加瓦斯爆炸概率.
安全投入情况	吨煤安全费用提取标准	企业按吨煤产量提取的专项资金中用于安全的费用.	投入不足可能导致设备老化、技术滞后,增加瓦斯爆炸概率.

1.4 基于灾害机理的瓦斯爆炸风险指标挖掘

现有研究已经明确了煤矿瓦斯爆炸机理.瓦斯爆炸是以甲烷为主的可燃性气体和空气组成的爆炸性混合气体,在火源引发下发生的一种迅猛的氧化反应的结果.瓦斯爆炸必须具备3个条件:即甲烷的浓度处于爆炸范围,氧气浓度超过失爆的氧浓度,引火源的能量大于最小点燃能量、温度高于最低点燃温度和点燃时间长于感应期[20].

根据煤矿瓦斯爆炸机理,瓦斯、引火源、氧气是瓦斯爆炸的必要条件,因此确定瓦斯浓度、温度、氧气浓度以及风速(风速会直接影响瓦斯浓度的分布),作为煤矿瓦斯爆炸风险指标.

1.5 构建煤矿瓦斯爆炸指标体系

文本挖掘出的指标都是静态指标,表示瓦斯、引火源的监测情况、管理情况、隐患现状、环境条件等,间接影响瓦斯爆炸,指标数据的采集周期长,也不存在区域异质性,与瓦斯爆炸机理挖掘出的指标无法直接对比,因此本研究将这些指标作为三级指标,根据指标的含义将其归类为瓦斯静态风险、引火源静态风险以及综合静态风险.

根据上述指标特点将瓦斯爆炸风险指标体系划分为3个层级:一级指标为瓦斯爆炸风险;二级

指标有7个，为瓦斯浓度、氧气浓度、温度、风速、瓦斯静态风险、引火源静态风险和综合静态风险；第三级指标是衡量瓦斯静态风险、引火源静态风险和综合静态风险的26个具体指标，具体见表3.

本研究通过选取瓦斯静态风险、引火源静态风险和综合静态风险这3个静态指标来描述煤矿瓦斯爆炸风险的监测情况、管理情况、隐患现状、环境条件等，通过瓦斯浓度、温度、风速、氧气浓度这4个动态指标来从煤矿瓦斯爆炸机理的角度实时监测风险现状. 以此通过7个二级指标来全面衡量煤矿瓦斯爆炸风险. 动态风险指标基于瓦斯爆炸机理，体现物理科学性，静态风险指标源自事故报告数据，反映系统风险，最终构建的指标体系科学全面，兼具自然与管理维度的覆盖性，为风险评估提供了可靠支撑.

表3　煤矿瓦斯爆炸风险三级指标体系

Table 3　Three level indicator system for coal mine gas explosion risk

一级指标	二级指标	指标编号	三级指标	指标编号
瓦斯爆炸风险	瓦斯浓度	GE1		
	氧气浓度	GE2		
	温度	GE3		
	风速	GE4		
	综合风险静态风险	GE5	瓦斯爆炸事故历史情况	GE51
			瓦斯爆炸类重大隐患历史情况	GE52
			吨煤安全费用提取标准	GE53
			综合防治措施	GE54
			瓦检员空班漏检、假检次数	GE55
			甲烷电、风电闭锁	GE56
			瓦斯爆炸类型B类以上隐患数量	GE57
			安全培训情况	GE58
			持证上岗情况	GE59
			工作面采煤工艺	GE510
	瓦斯静态风险	GE6	矿井瓦斯等级	GE61
			多煤层联合采掘工作面数量	GE62
			风速异常报警	GE63
			主通风系统	GE64
			通风专业与瓦斯相关三违数量	GE65
			局部通风机馈电异常未报警	GE66
			瓦斯传感器超限次数	GE67
			瓦斯传感器超限时长	GE68
			瓦斯抽采效果检验	GE69
			工作面与地质构造带距离	GE610
	引火源静态风险	GE7	煤层自燃倾向性	GE71
			煤尘爆炸指数	GE72
			应断未断电次数	GE73
			火源管理	GE74
			防灭火设计	GE75
			巷道支护材料可燃性	GE76

2 煤矿瓦斯爆炸风险阈值规则和评分规则

2.1 确定二级指标阈值规则

煤矿瓦斯爆炸风险指标阈值规则在风险评估中起着至关重要的作用.这些规则通过设定特定的数值界限,将指标的多源异构数据进行精准转换,实现指标数据的预处理.

本研究根据煤矿安全规程和企业规章制度等相关文件制定煤矿瓦斯爆炸风险二级指标阈值规则.煤矿是一个复杂的工程系统,涉及到井下区域、地面和采区3个区域,容易发生瓦斯爆炸事故的主要是采区的采掘工作面、回采工作面等,每个区域的瓦斯和引火源的危险性不同的,需要设定的阈值规则也是不通用的.本研究构建了煤矿瓦斯爆炸风险二级指标的通用阈值规则,在通用阈值规则的基础上,本研究以采煤工作面和采区回风巷为例,给出了这2个区域的个性化阈值规则.煤矿瓦斯爆炸风险二级指标的阈值规则如表4所示

表4 二级指标阈值规则

Table 4 Threshold rules for second level indicators

阈值规则	二级指标	数据采集周期	单位	低风险 100	较低风险 75	中风险 50	较高风险 25	高风险 0	阈值参考
煤矿瓦斯爆炸风险通用阈值规则	氧气浓度	实时	%	[0,12]或[23.5,100]	[12,14)	[14,16)	[16,19)	[19,23.5]	《煤矿安全规程》(2022版)第135条
	瓦斯浓度	实时	%	[0,0.2)	[0.2,0.6)	[0.6,0.8)	[0.8,1)	[1,100)	《煤矿安全规程》(2022版)第498条
	风速	实时	m/s	[0.25,4]	[0.2,0.25) or (4,4.5]	[0.15,0.2) or (4.5,5]	[0.1,0.15) or (5,5.5]	[0,0.1) or $N>5.5$	《煤矿安全规程》(2022版)第136条
	温度	实时	℃	[15,25)	[5,10)	[10,15)	[26,30)	$N\geqslant30$ or $N<5$	《煤矿安全规程》(2022版)第279条、第655条
	瓦斯静态风险	实时	分	[90,100]	[80,90)	[70,80)	[60,70)	[0,60)	企业规章制度
	引火源静态风险	实时	分	[90,100]	[80,90)	[70,80)	[60,70)	[0,60)	企业规章制度
	综合静态风险	实时	分	[90,100]	[80,90)	[70,80)	[60,70)	[0,60)	企业规章制度
采煤工作面瓦斯爆炸风险阈值规则	采煤工作面氧气浓度	实时	%	[20-21]	[19,20)	[18,19)	[17,18)	[0,17]	《煤矿安全规程》(2022版)第135条
	采煤工作面瓦斯浓度	实时	%	[0,0.8)	[0.8,1)	[1,3)	[3,5)	[5,100]	《煤矿安全规程》(2022版)第498条
	采煤工作面风速	实时	m/s	[0.25,4]	[0.2,0.25) or (4,4.5]	[0.15,0.2) or (4.5,5]	[0.1,0.15) or (5,5.5]	[0,0.1) or $N>5.5$	《煤矿安全规程》(2022版)第136条
	采煤工作面温度	实时	℃	[15,25)	[5,10)	[10,15)	[26,30)	$N\geqslant30$ or $N<5$	《煤矿安全规程》(2022版)第279条、第655条
	瓦斯静态风险	实时	分	[90,100]	[80,90)	[70,80)	[60,70)	[0,60)	企业规章制度
	引火源静态风险	实时	分	[90,100]	[80,90)	[70,80)	[60,70)	[0,60)	企业规章制度
	综合静态风险	实时	分	[90,100]	[80,90)	[70,80)	[60,70)	[0,60)	企业规章制度
采区回风巷瓦斯爆炸风险阈值规则	采区回风巷氧气浓度	实时	%	[20-21]	[19,20)	[18,19)	[17,18)	[0,17]	《煤矿安全规程》(2022版)第135条
	采区回风巷瓦斯浓度	实时	%	[0,1)	[1,1.5)	[1.5,3)	[3,5)	[5,100]	《煤矿安全规程》(2022版)第498条
	采区回风巷风速	实时	m/s	[0.25,6]	[0.2,0.25) or (6,6.5]	[0.15,0.2) or (6.5,7]	[0.1,0.15) or (7,7.5]	[0,0.1) or $N>7.5$	《煤矿安全规程》(2022版)第136条

续表 4

阈值规则	二级指标	数据采集周期	单位	低风险 100	较低风险 75	中风险 50	较高风险 25	高风险 0	阈值参考
	采区回风巷温度	实时	℃	[15,25)	[5,10)	[10,15)	[26,30)	$N\geqslant30$ or $N<5$	《煤矿安全规程》(2022 版)第 279 条、第 655 条
	瓦斯静态风险	实时	分	[90,100]	[80,90)	[70,80)	[60,70)	[0,60)	企业规章制度
	引火源静态风险	实时	分	[90,100]	[80,90)	[70,80)	[60,70)	[0,60)	企业规章制度
	综合静态风险	实时	分	[90,100]	[80,90)	[70,80)	[60,70)	[0,60)	企业规章制度

注：N为相关物理量的取值.

2.2　确定三级指标评分规则

本研究主要是从煤矿瓦斯爆炸风险的环境条件和管理情况等方面来考虑静态风险的具体衡量指标，瓦斯静态风险的具体衡量指标共有 10 个，引火源静态风险具体衡量指标共有 6 个，综合风险静态指标共有 10 个.

煤矿瓦斯爆炸风险三级指标存在大量的定性指标，如综合防治措施、瓦斯抽采效果检验、火源管理等，这些指标难以量化. 煤矿瓦斯爆炸风险三级指标评分规则的主要目的是客观、合理地将这些难以量化的定性指标信息转化成无量纲的定量数据，为后续评估提供准确的数据基础.

由于静态指标衡量整个煤矿瓦斯爆炸风险的环境条件和管理情况，并不存在区域性，因此静态指标的评分规则无需根据煤矿区域的变化而改变. 煤矿瓦斯爆炸风险三级指标的评分规则具体如表 5 所示.

表 5　煤矿瓦斯爆炸风险三级指标的评分规则

Table 5　Scoring rules for the third level indicators of coal mine gas explosion risk

二级指标	三级指标	数据采集周期	阈值规则	评分参考
综合静态风险	瓦斯爆炸事故历史情况	变更时	没有发生过，取值 100 分；半年内发生过 1 起一般事故，取值 50 分，半年内发生过 1 起一般以上事故或 2 起以上一般事故，取值 25 分.	《煤矿安全生产标准化管理体系基本要求及评分方法》(试行)第 7 部分事故隐患排查治理
	瓦斯爆炸类重大隐患历史情况	变更时	没有存在过，取值 100 分；半年内存在过 1 次，取值 75 分；半年内存在过 2 次及以上，取值 50 分.	《煤矿安全生产标准化管理体系基本要求及评分方法》(试行)第 7 部分事故隐患排查治理
	吨煤安全费用提取标准	变更时	吨煤安全费用提取大于 30 元，取值 100 分，否则取值 60 分.	《企业安全生产费用提取和使用管理办法》
	综合防治措施	变更时	1.完成矿井通风阻力测定，确保通风系统合理性，得 10 分；2.严格执行测风制度，定期进行风量瓦斯的检查监测，确保各供风地点配风合理、风量充足，得 15 分；3.严格执行通风设施设置、施工和验收程序以及检查和维护制度，确保通风设施质量完好，得 15 分；4.局部通风机实现“三专两闭锁”和“双风机双电源”自动切换，并设专人管理，得 10 分；5.巷道失修、断面缩小、巷道积水造成的通风阻力超标，立即整改，得 10 分；6.回风配巷和其它闲散巷道，未经检查风量和瓦斯，人员不得进入，得 10 分；7.严格执行瓦斯巡回检查、“一炮三检”、“三人连锁放炮”和电气设备管理制度，得 10 分；8.建立完善有效的安全监控系统，得 20 分.	企业规章制度
	瓦检员空班漏检、假检次数	每周	空岗次数 0 次，取值 100 分；1 周内累计出现 1 次扣 15 分；当天空岗 1 次再扣 25 分.	企业规章制度
	甲烷电、风电闭锁	实时	累计 1 周内未出现，取值 100 分；1 周内累计出现 1 次扣 25 分；当天出现 1 次再扣 30 分.	《煤矿安全规程》(2022 版)第 164 条

续表5

二级指标	三级指标	数据采集周期	阈值规则	评分参考
	瓦斯爆炸类型B类以上隐患数量	每天	无此类隐患,取值100分,产生1个扣10分.	《煤矿安全生产标准化管理体系基本要求及评分方法》(试行)第7部分事故隐患排查治理
	安全培训情况	变更时	安全培训率×100分.	《煤矿安全生产标准化管理体系基本要求及评分方法》(试行)第5部分
	持证上岗情况	变更时	持证上岗率×100分.	《煤矿安全生产标准化管理体系基本要求及评分方法》(试行)第5部分;《煤矿安全规程》(2022版)第9条
	工作面采煤工艺	变更时	综采,取值100;综放,取值75;普采,取值50;炮采,取值25.	《煤矿安全规程》(2022版)第114、115、116条
瓦斯静态风险	矿井瓦斯等级	变更时	低瓦斯矿井,取值100分;高瓦斯矿井,取值75分;突出煤层管理,取值50分;突出矿井,取值25分.	《煤矿安全规程》(2022版)第169条
	多煤层联合采掘工作面数量	变更时	无联合开采,取值100;2个工作面,取值75分;3个工作面,取值50;大于3工作面,取值25.	《煤矿安全规程》(2022版)第95条
	风速异常报警	实时	累计1周内未报警,取值100分;累计1周出现1次扣15分;当天发生1次再扣25分.	《煤矿安全规程》(2022版)第136条
	主通风系统	变更时	单一煤层生产,通风系统正规,无串联通风,风量满足要求,取值100分;单一煤层生产,存在串联通风,取值75分;二个及以上煤层同时生产,不存在串联通风,取值60分;多煤层生产存在串联通风,取值10分.	《煤矿安全规程》(2022版)第142条
	通风专业与瓦斯相关三违数量	每天	发生0次,取值100分;1周内累计出现1次扣15分,当天产生1次再扣25分.	《煤矿安全生产标准化管理体系基本要求及评分方法》(试行)第5部分
	局部通风机馈电异常未报警	实时	1周内未出现,取值100分;1周内累计出现1次扣20分,当天出现1次再扣30分.	《煤矿安全生产标准化管理体系基本要求及评分方法》(试行)第8部分
	瓦斯传感器超限次数	每周	超限次数0次,取值100;累计1周内出现1次扣15分,当天超限1次再扣30分.	企业规章制度
	瓦斯传感器超限时长	每周	超限时长小于1 min,取值100;[1,30),扣25分;[30,60),扣50分;大于60 min,扣75分;出现两次超限扣100分.	企业规章制度
	瓦斯抽采效果检验	变更时	工作面瓦斯抽采达标、抽采接续合理,取值100分,否则取值60分.	《煤矿瓦斯抽采达标暂行规定》安检总煤装〔2011〕163号第15条、第16条
	工作面与地质构造带距离	变更时	大于200m,取值100分;[150,200),取80;[100,150),取60;[50,100),取40;小于50m,取20分.	《煤矿采掘工作面遇断层等构造带安全防治规定(试行)》
引火源静态风险	煤层自燃倾向性	变更时	不易自燃,取值100分;自燃,取值75分;容易自燃,取值50分;容易自燃且发火期小于1个月,取值25分.	《煤矿安全规程》(2022版)第260条、《煤矿防灭火细则》第12条
	煤尘爆炸指数	变更时	[0,10),取值100分;[10,15),取值75分;[15,28),取值50分;[28,100],取值25分.	《煤矿井下粉尘综合防治技术规范》第6章
	应断未断电次数	变更时	累计1周内未出现取值100分;1周内累计出现1次扣15分,当天出现1次再扣30分.	企业规章制度
	火源管理	变更时	严格执行爆破管理、电气设备管理和防灭火管理制度,取值100分,否则取值60分.	《煤矿防灭火细则》第7条
	防灭火设计	变更时	有完善防灭火设计,取值100分;未制定防灭火设计,取值40分.	《煤矿防灭火细则》第7条
	巷道支护材料可燃性	变更时	巷道支护采用阻燃材料,取值100分;巷道支护未采用阻燃材料,取值40分.	《煤矿防灭火细则》第37条

3　评估模型

3.1　赋权模型

赋权模型从数据来源上可以分为主观赋权模型和客观赋权模型，主观赋权模型是根据专家经验等主观数据进行计算的，具有准确的特点，但是无法实时获取．客观赋权模型根据客观数据的数据特征进行计算，具有客观、动态的特点，但是权重计算经常和管理需求相差较远．因此，往往将主客观赋权模型进行融合使用．

3.1.1　三级指标赋权模型

本研究并未选择客观赋权模型来计算三级指标权重．客观赋权模型在原理上存在局限性：在指标数据没有变化时，CRITIC 法、熵权法则无法运行．在指标数据相似程度过高时，独立性权系数法会因为指标数据的共线性过高而无法运行．

三级指标数据变化周期长，在此情况下使用根据指标数据变异程度计算权重的客观赋权模型（如熵权法、CRITIC 法等）会出现这类指标权重无法计算或者极小的极端情况，这样的权重分配会降低煤矿瓦斯爆炸风险评估的准确性．因此，在煤矿瓦斯爆炸风险评估中，客观赋权模型并不适用于计算那些变化幅度有限的三级指标的权重．相比之下，主观赋权模型结合专家的实际经验，能够更合理地反映这些静态指标在风险评估中的重要性，避免了上述客观赋权模型的局限性．这也是本研究在三级指标赋权过程中更倾向于使用主观赋权模型的原因．

主观权重计算的主要难点在于如何将专家先验知识转化为定量数据，通常采取的量表会直接将专家对指标重要性的主观感知转化为定量数据，因为时间和知识的限制，有时很难给出指标的定量评估值，所以转化过程是粗糙的、不准确的．因此，本研究希望通过模糊语言术语来提高专家先验知识转化的准确性，引入一种三角模糊数与 AHP 相结合的 FAHP 方法来确定三级指标的权重，相比于传统的 AHP 方法，FAHP 在处理不确定性和模糊性方面有以下几个优势：能够处理模糊性，减少判断误差，能够提高决策稳定性、决策信息转化准确性，这是本研究使用 FAHP 进行主观赋权的主要原因．目前 FAHP 已经应用在了安全风险评估领域，基本步骤如下[21]．

1）　专家先验知识的转换

决策者使用模糊语言确定两两指标相比的重要程度，然后将模糊语言转换为三角模糊数，模糊语言转换规则见表 6．

表 6　模糊语言转换规则

Table 6　Fuzzy language conversion rules

模糊语言	整数标度	三角模糊数
同等重要	1	(1,1,1)
同等重要和微重要之间	2	(1,2,3)
微重要	3	(2,3,4)
微重要和重要之间	4	(3,4,5)
重要	5	(4,5,6)
重要和十分重要之间	6	(5,6,7)
十分重要	7	(6,7,8)
十分重要和极端重要之间	8	(7,8,9)
极端重要	9	(8,9,9)

2）　模糊集概念及基本运算

设论域 U，那么从 U 到区间 $[0,1]$ 的任一映射 $\mu_A: U\to[0,1]$ 称为 U 上的一个模糊集，记作 $\overline{A}$，$\mu_{\overline{A}}$ 为模糊集 $\overline{A}$ 的隶属度函数，$\mu_{\overline{A}}(e)$ 为 e 属于 $\overline{A}$ 的程度，简称为隶属度．

对任意三角模糊数的值 x 介于 l,m,u 三点之间，如果 $\overline{B}$ 是一个三角模糊函数，则它的隶属度函数为：

$$u_{\overline{B}}(x)=\begin{cases}0 & x<l,\\ (x-l)/(m-l) & l\leqslant x<m,\\ (u-x)/(u-m) & m\leqslant x\leqslant u,\\ 0 & x>u.\end{cases}\tag{1}$$

设 2 个三角模糊数分别为 $d_1=(l_1,m_1,u_1)$，$d_2=(l_2,m_2,u_2)$，则三角模糊数的基本计算方法如下：

$$\begin{cases}d_1\oplus d_2=(l_1+l_2,m_1+m_2,u_1+u_2),\\ d_1\otimes d_2=(l_1l_2,m_1m_2,u_1u_2),\\ \dfrac{1}{d}\approx\left(\dfrac{1}{u},\dfrac{1}{m},\dfrac{1}{l}\right).\end{cases}\tag{2}$$

3）建立三角模糊成对比较矩阵．通过三角模糊数来整合决策者的评估结果，进一步建立出三角模糊成对比较矩阵：

$$A^k=\begin{bmatrix}d_{11}^k & d_{12}^k & \cdots & d_{1n}^k\\ d_{21}^k & d_{22}^k & \cdots & d_{2n}^k\\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\ d_{n1}^k & d_{n2}^k & \cdots & d_{nn}^k\end{bmatrix},\tag{3}$$

式中　$d_{ij}^k=(l_{ij},m_{ij},r_{ij})$ 为第 k 个专家对第 i 个指标与第 j 个指标比较的三角模糊标度．

4）群体整合．当存在 K 个决策者时，计算每个

决策者偏好的平均值，d_{ij}的计算表达式如下：

$$d_{ij}=\frac{\sum_{k=1}^{K} d_{ij}^{k}}{K}. \tag{4}$$

5)根据多个决策者的平均偏好，更新成对比较模糊矩阵：

$$A=\begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n1} & d_{n2} & \cdots & d_{nn} \end{bmatrix}. \tag{5}$$

6)计算每个指标的模糊比较值的几何平均值：

$$r_j=\left(\prod_{i=1}^{n} d_{ij}\right)^{\frac{1}{n}},\quad i=1,2,\cdots,n. \tag{6}$$

7)计算指标模糊权重：

$$\begin{aligned}\tilde{w}'_j &= r_j\otimes(r_1\oplus r_2\oplus\cdots\oplus r_n)^{-1}\\ &=(l'_j,m'_j,u'_j).\end{aligned} \tag{7}$$

8)解模糊化．为了求取各因素的权重值，必须将上述步骤所计算出的模糊权重值解除模糊化，求得各模糊数的非模糊值，作为各项指标权重的综合评断标准．

$$\hat{w}'_j=\frac{l'_j+m'_j+u'_j}{3}. \tag{8}$$

9)归一化处理：

$$w_j=\frac{\hat{w}'_j}{\sum_{j=1}^{n}\hat{w}'_j}, \tag{9}$$

式中 w_j为三级指标权重．

3.1.2 二级指标赋权模型

二级指标能够实时监测且不断变化，满足客观赋权原理．合理的权重分配既需要依赖于主观赋权法中专家经验来满足管理需求，也需要结合客观赋权法的数据特征来实现评估的科学性和客观性，以确保在动态环境中的准确性和实用性．因此，本研究使用主客观结合的方法来确定二级指标权重．

1)主观权重

本研究使用前文提到的FAHP法对三级指标的初始主观权重进行计算．在煤矿井下，无论是引火源还是氧气浓度都很难控制．瓦斯爆炸事故多发生于采掘工作面，有大量的工人作业，如果将氧气浓度控制在失爆氧浓度以下，工人是无法生存的．在氧气浓度和瓦斯浓度都达到爆炸范围的情况下，当出现引火源时，瓦斯爆炸的感应期在几毫秒到几秒之内，在这么短的时间内非常难以控制．因此，应该主要从瓦斯浓度方面进行控制瓦斯爆炸风险，理应赋予瓦斯浓度相关指标较高的权重．

在使用FAHP法确定主观权重时，则能通过专家先验知识充分考虑上述指标特点．因此本研究使用FAHP计算得到二级指标主观权重 W'_j．

2) 客观权重

本研究选用CRITIC法确定权重，主要基于三方面考虑：首先，该方法兼顾指标变异性和相关性，避免熵权法或独立权重系数法的极端赋权问题[22]；其次，能有效处理瓦斯爆炸风险指标间的复杂关联性，如风速与瓦斯浓度的相互作用；最后，对数据波动敏感，能动态提升风险显著变化指标的权重，增强模型动态能力．具体的计算步骤如下：

(1)数据标准化．因为本文的数据标准化仅用于权重计算，所以保留数据变化特征则能达到计算需求．因此本研究不再考虑数据类型进行不同的标准化处理，收集的数据用公式(10)进行标准化，公式如下：

$$x_{ij}=\frac{X_{ij}-X_{j\min}}{X_{j\max}-X_{j\min}}, \tag{10}$$

式中：X_{ij}和x_{ij}为第j个指标的第i个原始值和标准化值，$X_{j\max}$和$X_{j\min}$为第j个指标的最大原始值和最小原始值．

(2)计算指标变异性，如式(11)：

$$S_j=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_{ij}-\bar{x}_j)^2}{n-1}}, \tag{11}$$

式中 $\bar{x}_j=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_{ij}$.

(3)评价指标k和指标j之间的相关系数，如式(12)：

$$r_{kj}=\frac{\sum_{i}^{n}(x_{ij}-\bar{x}_j)(x_{ik}-\bar{x}_k)^2}{\sqrt{\sum_{i}^{n}\sqrt{(x_{ij}-\bar{x}_j)^2}\sqrt{(x_{ik}-\bar{x}_k)^2}}}. \tag{12}$$

(4)计算指标冲突性，如式(13)：

$$R_j=\sum_{k=1}^{n}(1-r_{kj})r_{kj}. \tag{13}$$

(5)计算指标信息量，如式(14)：

$$C_j=S_j\sum_{i=1}^{n}(1-r_{ij})=S_j\times R_j. \tag{14}$$

(6)计算指标动态客观权重，如式(15)：

$$W''_j=\frac{C_j}{\sum_{j=1}^{m} C_j}. \tag{15}$$

3) 组合权重

本文引入欧氏距离的概念将FAHP得到的主观权重 W'_j和CRITIC法确定的客观权重 W''_j进行组合赋权，将主观权重向量 W'_j和客观权重向量 W''_j的欧式距离映射为主客观权重系数的差异程

度，以此寻求主观权重和客观权重的最优组合系数，这种方法已经在安全科学领域得到了广泛应用[21,23]，欧式距离函数权重如式(16)所示：

$$\mathrm{d}(W'_j,W''_j)=\left[\frac{1}{2}\sum_{j=1}^{n}(W'_j-W''_j)^2\right]^{\frac{1}{2}}. \tag{16}$$

根据下述公式求解相应的组合权重，即：$W_j=\alpha W'_j+\beta W''_j$，$\alpha$、$\beta$分别为权重分配系数.

$$\begin{cases} W_j=\alpha W'_j+\beta W''_j, \\ \mathrm{d}(W'_j,W''_j)^2=(\alpha-\beta)^2, \\ \alpha+\beta=1. \end{cases} \tag{17}$$

3.2　评价模型

3.2.1　二级指标风险评价模型

由于本研究构建的三级指标评分规则将三级指标的定性信息转化为了无量纲的定量数据，只需将指标数据和权重进行加权计算即可，无需再使用复杂的模型. 本研究选用线性加权模型三级指标数据和权重进行融合，得到煤矿瓦斯爆炸风险二级指标数据. 具体步骤如下：

$$r_{tj}=\sum_{j=1}^{n}xtj\times wj, \tag{18}$$

式中：r_{ij}为第j个二级指标在周期t的值；x_{tj}为第j个三级指标在周期t的值；w_j为第j个三级指标的权重.

3.2.2　一级指标风险评价模型

灰色聚类评估适用于煤矿瓦斯爆炸风险评估中数据不完整的情况. 该方法通过白化权函数，利用有限指标数据实现风险等级划分，克服了传统方法对全面数据的依赖，能更好适应煤矿环境的复杂性和差异性. 本研究采用了一种基于端点混合三角白化权函数的灰色聚类模型，以解决灰色类别多重交叉的问题. 该模型避免了对指标取值范围两端点进行延拓的复杂操作，还确保了各个灰色类别的隶属度之和为1，从而使得隶属度的概率互补特性得以实现.

进一步地，为了解决灰色聚类模型遵循最大隶属度原则容易丢失风险信息的问题，本研究提出了一种改进的基于端点混合三角白化权函数的灰色聚类模型，确保风险评估结果能够考虑所有的风险信息. 具体步骤如下[21,24]：

1)确定指标阈值规则

按照评估需求将各个指标的取值范围划分s个灰色类别，如j指标的取值范围为$[a_1,a_{s+1}]$，则能够将j指标的取值范围划分为$[a_1,a_2]$，…，$[a_{k-1},a_k]$，…，$[a_{s-1},a_s]$，$[a_s,a_{s+1}]$，这些灰色类别也就是煤矿瓦斯爆炸风险指标的风险区间.

2) 确定灰色类别转折点

确定$[a_1,a_2]$，…，$[a_{k-1},a_k]$，…，$[a_{s-1},a_s]$，$[a_s,a_{s+1}]$对应的灰色类别1，…，$k-1$，…，$s-1$，s转折点λ_1，…，λ_{k-1}，…，λ_{s-1}，λ_s，同时计算各个灰色类别的几何中点$\lambda_k=(a_k+a_{k+1})/2$，$k=1,2,\cdots,s$.

3)构造白化权函数

将所有指标数据分别构造白化权函数，对于灰类k($k\in\{2,3,\cdots,s-1\}$)，同时连接点$(\lambda_k,1)$与灰类$k-1$的几何中点$(\lambda_{k-1},0)$(或者灰类1的转折点$(\lambda_1,1)$)以及$(\lambda_k,1)$与灰类$k+1$的几何中点$(\lambda_{k+1},1)$(或灰类s的转折点$(\lambda_s,0)$)，得到指标属于灰类k的三角白化权函数$y=f_k(x)$(图2). 表7为具体的白化权函数及其公式.

a_1、a_2、a_{k-1}、a_k、a_{s-1}、a_s分别对应灰类等级的分类界限值，$\lambda_1=\frac{1}{2}(a_1+a_2)$，$\lambda_k=\frac{1}{2}(a_{k-1}+a_k)$，$\lambda_s=\frac{1}{2}(a_{s-1}+a_s)$.

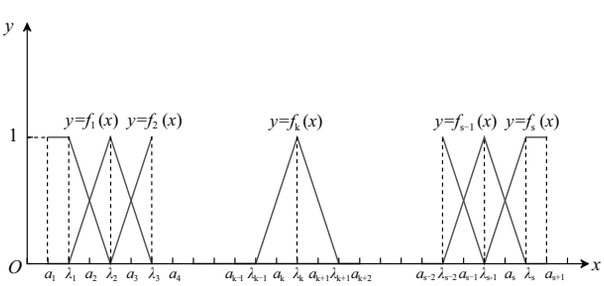


图2　端点混合三角白化权函数示意图

Fig. 2　Schematic diagram of end-point mixed triangular whitenization weight function

表7　白化权函数公式

Table 7　Whitening weight function formula

白化权函数	公式
下限未知测度白化权函数	$f_{ij}^1=\begin{cases}0 & x_{ij}\notin[a_1,\lambda_j^2]\\ 1 & x_{ij}\in[a_1,\lambda_j^1]\\ \dfrac{\lambda_j^2-x_{ij}}{\lambda_j^2-\lambda_j^1} & x_{ij}\in[\lambda_j^1,\lambda_j^2]\end{cases}$
适中未知测度白化权函数	$f_{ij}^k=\begin{cases}0 & x_{ij}\notin[\lambda_j^{k-1},\lambda_j^{k+1}]\\ \dfrac{x_{ij}-\lambda_j^{k-1}}{\lambda_j^k-\lambda_j^{k-1}} & x_{ij}\in[\lambda_j^{k-1},\lambda_j^k]\\ \dfrac{\lambda_j^{k+1}-x_{ij}}{\lambda_j^{k+1}-\lambda_j^k} & x_{ij}\in[\lambda_j^k,\lambda_j^{k+1}]\end{cases}$
上限未知测度白化权函数	$f_{ij}^s=\begin{cases}0 & x_{ij}\notin[\lambda_j^{s-1},a_{s+1}]\\ \dfrac{x_{ij}-\lambda_j^{s-1}}{\lambda_j^s-\lambda_j^{s-1}} & x_{ij}\in[\lambda_j^{s-1},\lambda_j^s]\\ 1 & x_{ij}\in[\lambda_j^s,a_{s+1}]\end{cases}$

注：f_{ij}^s和f_{ij}^k分别是x_{ji}属于s和k子类的白化权值.

4)确定灰类等级

计算评价对象的灰色聚类系数矩阵,如式(19)所示:

$$(\sigma_i^1,\cdots,\sigma_i^k,\cdots,\sigma_i^s)=\sum_{j=1}^{m} f_{ji}^k(x)\cdot W_j. \quad (19)$$

根据最大隶属度原则$\sigma_i^k=Max(\sigma_i^1,\cdots,\sigma_i^k,\cdots,\sigma_i^s)$,则可判断评估对象属于灰类$k$.

5)改进方法

基于端点混合三角白化权函数的灰色聚类评估模型根据最大隶属度原则,只考虑了最高概率的灰色类别,忽略了其他灰色类别的概率.本文提出一种灰色聚类等级-风险转化值模型,使得最终的风险评价等级考虑到了灰色类别的全部隶属度,避免因忽略其他灰色类别概率导致的不准确问题.

由灰色聚类模型的白化权函数计算得到的煤矿瓦斯爆炸风险的白化权函数,通过灰色聚类等级-风险转化值模型进行转化,具体计算步骤如下:

$$r_{tj}=L_1\times D_{tj1}+L_2\times D_{tj2}+\cdots+L_n\times D_{tjn}, \quad (20)$$

式中:r_{tj}为t周期的第j个二级指标的风险转化值;L_1,L_n分别为划分的第1个和第n个风险等级的设定值;D_{tj1},D_{tjn}为第j个二级指标在t周期的第1个和第n个风险等级的隶属度.

4 工业性试验

4.1 煤矿简介

本研究提出的煤矿瓦斯爆炸评估体系目前已经在中国陕西省一所大型国有企业展开建设,该体系属于该企业智能保障体系的煤矿瓦斯爆炸风险评估功能模块.本研究选择了该企业的3座环境条件不同的煤矿进行工业性试验,这3座煤矿分别是低瓦斯矿井A煤矿、高瓦斯矿井B煤矿和突出矿井C煤矿.试验有两方面目的,一方面是检验煤矿瓦斯爆炸风险评估体系是否能够实现实时、准确、客观的评估,另一方面是检验该体系在不同环境条件煤矿的自适应性.

4.2 数据采集

4.2.1 客观数据采集

本研究选取A(低瓦斯)、B(高瓦斯)、C(突出矿井)三类典型矿井为研究对象,针对采煤工作面及采空区回风巷开展瓦斯爆炸风险多维度评估.研究设计遵循空间异质性与时序完整性原则,按以下层次构建数据采集体系:

1)样本选取依据.选择集团内智能化建设水平相当的3类矿井,分别为A(低瓦斯)、B(高瓦斯)、C(突出矿井)构成对比组,通过统一管理标准消除制度性偏差,确保多源异构数据的可比性.

2)制定数据采集方案.各矿按10个周期(周期跨度=7 d)实施周频次采集采煤工作面和采取回风巷的二级指标数据和整个煤矿的三级指标数据,共获取1 020组样本(3矿×10周期×26三级指标+3矿×2区域×10周期×4二级指标).数据集包含340组/矿的多源异构数据,其中三级指标的260组数据主要来源于系统平台与人工填报,系统数据来自于煤矿的安全监控系统、矿山安全生产综合信息系统和双重预防管理信息系统;二级指标的80组数据主要来自于传感器,综合静态风险、瓦斯静态风险和引火源静态风险为多属性指标,数据为三级指标融合数据.数据采集标准见表8和表9.

表8 三级指标的数据采集标准

Table 8 Data collection standards for third level indicators

二级指标	三级指标	数据采集周期	数据来源	指标权重
综合风险静态得分	瓦斯爆炸事故历史情况	变更时	人工填报	0.044
	瓦斯爆炸类重大隐患历史情况	变更时	人工填报	0.044
	吨煤安全费用提取标准	变更时	人工填报	0.101
	综合防治措施	变更时	人工填报	0.227
	瓦检员空班漏检、假检次数	每周	人工填报	0.139
	甲烷电、风电闭锁	实时	安全监控系统	0.121
	瓦斯爆炸类型B类以上隐患数量	每天	双重预防管理信息系统	0.09
	安全培训情况	变更时	矿山安全生产综合信息系统	0.101
	持证上岗情况	变更时	矿山安全生产综合信息系统	0.08
	工作面采煤工艺	变更时	矿山安全生产综合信息系统	0.053

续表 8

二级指标	三级指标	数据采集周期	数据来源	指标权重
瓦斯积聚风险静态得分	矿井瓦斯等级	变更时	矿山安全生产综合信息系统	0.19
	多煤层联合采掘工作面数量	变更时	人工填报	0.072
	风速异常报警	实时	安全监控系统	0.066
	主通风系统	变更时	人工填报	0.19
	通风专业与瓦斯相关三违数量	每天	双重预防管理信息系统	0.101
	局部通风机馈电异常未报警	实时	安全监控系统	0.064
	瓦斯传感器超限次数	每周	安全监控系统	0.095
	瓦斯传感器超限时长	每周	安全监控系统	0.097
	瓦斯抽采效果检验	变更时	人工填报	0.09
	工作面与地质构造带距离	变更时	矿山安全生产综合信息系统	0.035
引火源风险静态得分	煤层自燃倾向性	变更时	矿山安全生产综合信息系统	0.113
	煤尘爆炸指数	变更时	矿山安全生产综合信息系统	0.125
	应断未断电次数	变更时	安全监控系统	0.192
	火源管理	变更时	人工填报	0.352
	防灭火设计	变更时	人工填报	0.109
	巷道支护材料可燃性	变更时	人工填报	0.109

表 9　二级指标数据采集标准

Table 9　Data collection standards for second level indicators

一级指标	二级指标	数据采集周期	数据来源	采集区域
采煤工作面瓦斯爆炸风险	采煤工作面氧气浓度	实时	氧气传感器	采煤工作面
	采煤工作面瓦斯浓度	实时	瓦斯传感器	采煤工作面上隅角
	采煤工作面风速	实时	风速传感器	采煤工作面
	温度	实时	温度传感器	采煤工作面
	综合静态风险	实时	计算数据	煤矿
	瓦斯静态风险	实时	计算数据	煤矿
	引火源静态风险	实时	计算数据	煤矿
采区回风巷瓦斯爆炸风险	采区回风巷氧气浓度	实时	氧气传感器	采区回风巷
	采区回风巷瓦斯浓度	实时	瓦斯传感器	采区回风巷
	采区回风巷风速	实时	风速传感器	采区回风巷
	温度	实时	温度传感器	采区回风巷
	综合静态风险	实时	计算数据	煤矿
	瓦斯静态风险	实时	计算数据	煤矿
	引火源静态风险	实时	计算数据	煤矿

4.2.2　主观数据采集

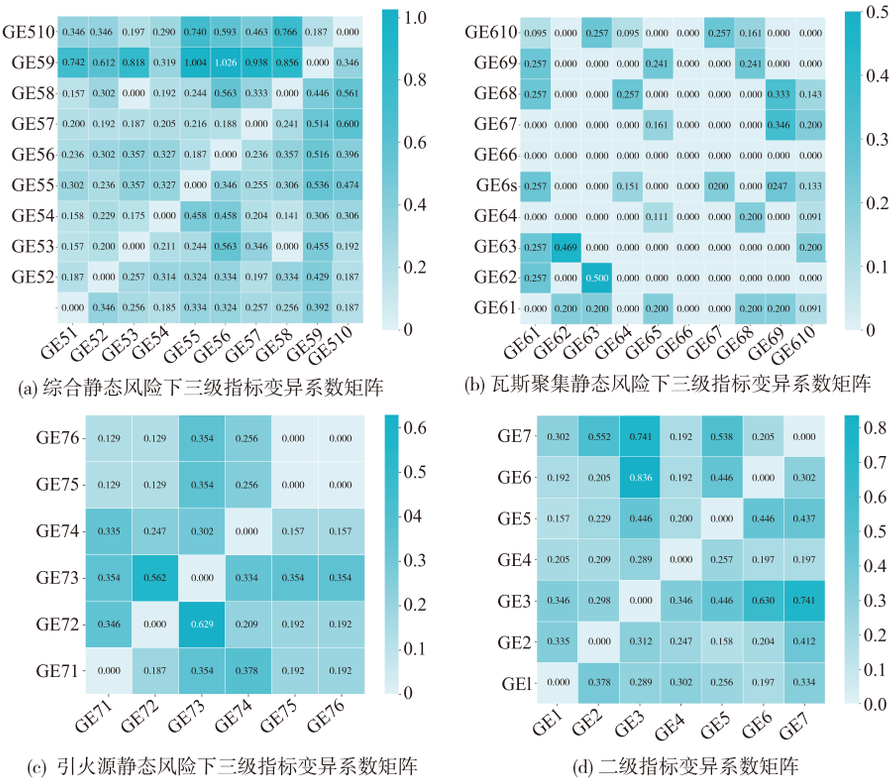
邀请4名专家组成评估小组，煤矿瓦斯爆炸风险专家评估小组的遴选要求为：1)从事井工煤矿安全生产工作(研究)；2)10年及以上工作经验．专家评估组基本情况见表10.

本研究采用德尔菲法进行专家咨询．4位专家对1组二级指标和3组三级指标根据表4的评分规则分别进行对比，对三角模糊数解模糊化后，计算各指标评分的变异系数(CV)，并设定质量控制标准：当CV＜0.3时，判定专家意见协调性高；0.3≤CV＜0.5时，视为合理认知差异；CV≥0.5且超过20%指标时，触发专家重评机制．最终经过3轮问询，4个专家评分矩阵的变异系数均满足要求，4个对比矩阵的变异系数如图3所示．

表 10 专家组简介

Table 10 Introduction to the expert group

专家	年龄	性别	受教育程度	从事工作(研究)方向	类型	工龄
专家 1	58	男	大专	煤矿井下通风安全	专业性	39
专家 2	53	男	本科	煤矿井下瓦斯安全	专业性	28
专家 3	39	男	博士研究生	煤矿井下机电安全	专业性	10
专家 4	45	男	博士研究生	煤矿瓦斯灾害防治	学术性	13



(a) 综合静态风险下三级指标变异系数矩阵 (b) 瓦斯聚集静态风险下三级指标变异系数矩阵

(c) 引火源静态风险下三级指标变异系数矩阵 (d) 二级指标变异系数矩阵

图 3 专家评分变异系数

Fig. 3 CV of expert rating matrix

4.3 评估结果

4.3.1 二级指标数据计算结果

根据 4 位专家的评价矩阵,计算三级指标的权重,通过式(18)将三级指标权重和三级指标数据进行融合,得到综合静态风险、瓦斯静态风险和引火源静态风险 3 个二级指标的数据,如表 11 所示.

表 11 静态风险值

Table 11 Static risk value

静态风险	煤矿	周期 1	周期 2	周期 3	周期 4	周期 5	周期 6	周期 7	周期 8	周期 9	周期 10
综合静态风险	A 煤矿	94.51	94.51	94.51	96.60	96.60	96.60	91.11	88.08	88.08	92.62
	B 煤矿	93.46	93.46	91.19	94.60	94.60	94.60	95.92	92.89	92.89	90.62
	C 煤矿	90.09	90.09	96.90	87.94	87.11	90.51	87.11	84.08	87.49	89.29
瓦斯静态风险	A 煤矿	84.61	76.92	82.19	81.82	83.47	83.36	83.62	84.90	84.90	84.90
	B 煤矿	83.59	75.20	80.87	78.62	82.79	88.00	73.17	82.79	82.79	82.79
	C 煤矿	70.18	69.60	69.60	70.88	67.03	70.45	66.80	70.97	69.69	69.69
引火源静态风险	A 煤矿	73.97	88.05	88.05	88.05	73.97	83.25	88.05	88.05	88.05	88.05
	B 煤矿	94.05	91.17	91.17	85.41	91.17	94.05	85.41	91.17	91.17	91.17
	C 煤矿	88.35	88.35	83.55	88.35	88.35	88.35	74.27	77.15	91.23	91.23

4.3.2　二级指标权重计算结果

首先，根据 4 位专家的评价矩阵，由 FAHP 计算得到二级指标的主观权重．然后，根据瓦斯爆炸风险二级指标的客观数据来计算客观权重．因为每个煤矿的每个区域的客观监测数据不同，分别计算得到每个煤矿的每个区域瓦斯爆炸风险二级指标的客观权重．最后根据组合权重确定模型计算每个区域的主客观权重分配系数，得到组合权重，具体如图 4 所示．

主观赋权模型与客观赋权模型的赋权机理存在本质差异：前者基于专家领域知识对风险要素进行经验性判断，其权重分配反映实际风险管理需求；后者则通过数学方法提取数据统计特征（如方差、相关性系数），使权重受数据波动性及相关性影响．以 B 煤矿采煤工作面的氧气浓度为例，其主观权重较低（专家赋权 0.07）源于双重预防机制的理论逻辑[25-26]——作业空间需维持 21% 的氧气浓度以满足安全生产标准，该指标本质属于不可控的固有风险条件，风险管控应聚焦于可干预的瓦斯浓度及引火源指标．而客观权重较高（CRITIC 赋权 0.192）则源于监测数据的变异性和冲突性显著高于其他指标，数据特征导致其统计显著性被放大．这种赋权差异揭示了风险管理中经验认知与数据表征的辩证关系，为后续风险评估提供多维特征权重．

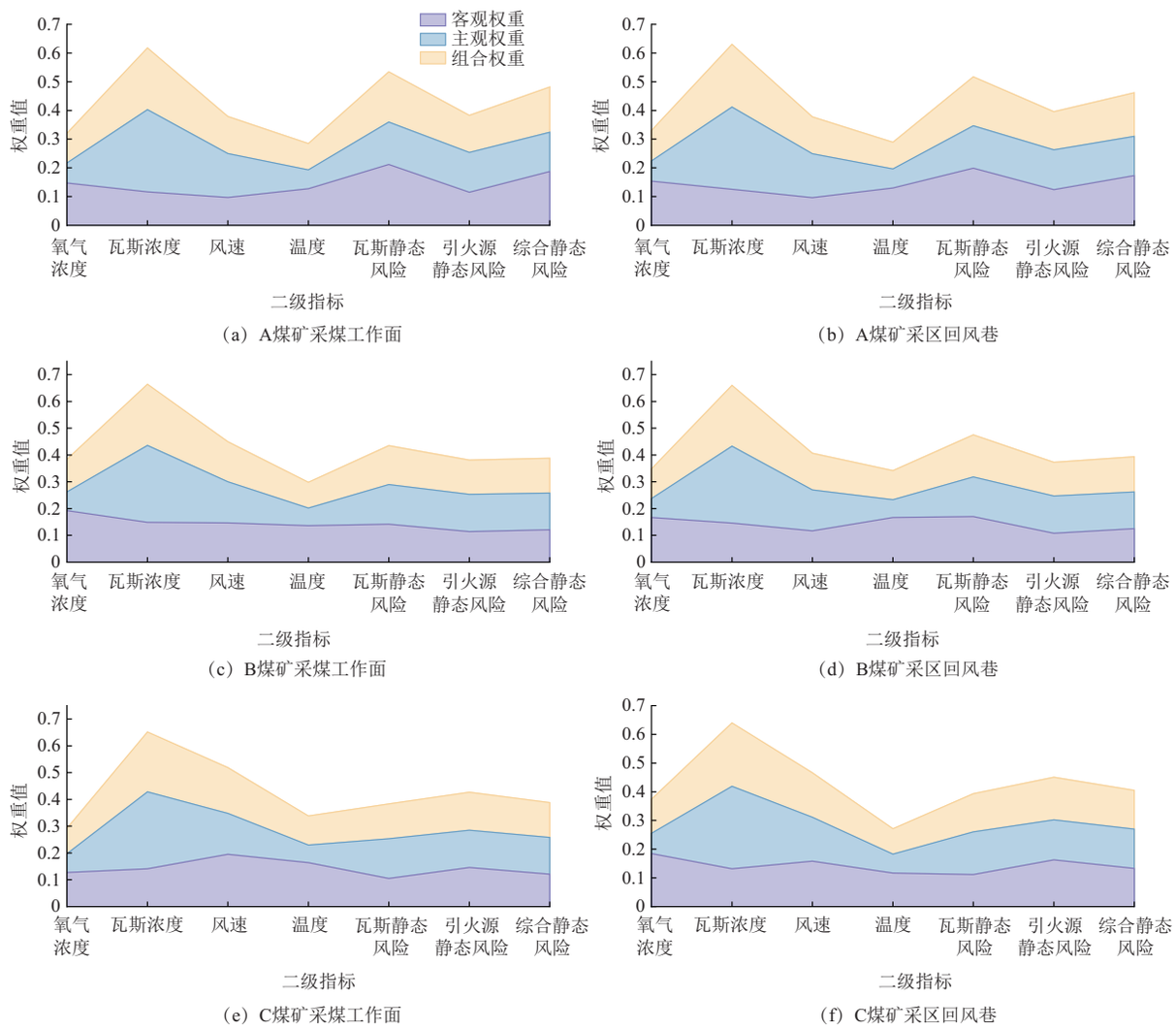


图 4　A，B，C 煤矿各个区域瓦斯爆炸风险二级指标的权重

图 4　Weight of the second level indicators of gas explosion risk in various regions of coal mines A, B, and C

4.3.3　瓦斯爆炸风险评价结果

分别构造各个煤矿各个区域的瓦斯爆炸风险二级指标白化权函数，以构造指标“瓦斯静态风险”的白化权函数为例，根据“瓦斯静态风险”的阈值规则和表 7 的白化权函数公式，构造出的白化权函数如图 5 所示．

以计算周期 1 的 A 煤矿采煤工作面瓦斯爆炸风险为例．第一，根据“瓦斯静态风险”的白化权函数，输入周期 1 的“瓦斯静态风险”的监测数据，计

算得到白化权系数评价矩阵为(0, 0.9605, 0.0395,0,0). 第二,按照上述步骤,计算得到在周期1的A煤矿采煤工作面瓦斯爆炸风险所有的二级指标的白化权系数评价矩阵. 第三,将A煤矿采煤工作面瓦斯爆炸风险二级指标的白化权系数评价矩阵和组合权重进行加权计算,得到A煤矿采煤工作面在周期1的瓦斯爆炸风险的白化权系数评价矩阵为(0.509,0.236,0.147,0.016,0.092). 最后,由灰色聚类等级-风险转化值模型计算得到A煤矿采煤工作面瓦斯爆炸风险分数为76.4,位于“较低风险”和“低风险”之间. 按照上述步骤,计算得到A煤矿、B煤矿、C煤矿的采煤工作面和采区回风巷在10个周期的瓦斯爆炸风险值,具体如图6所示.

根据阈值规则的设定,当风险值为[50,75]时,判定为瓦斯爆炸风险进入中风险和较高风险之间;当风险值为[50,75]时,则判定为瓦斯爆炸风险进入较高风险和高风险之间. 此时需要根据风险等级进行预警和采取管控措施.

通过查询煤矿的内业资料可知,在周期7,8,9,C煤矿的采煤工作面和采区回风巷进行了瓦斯风险预警和管控,其他观测周期各煤矿各区域均未出现预警和管控. 由此可知,本研究提出的瓦斯爆炸评估体系误判了周期9的C煤矿采区回风巷瓦斯爆炸风险,风险评估准确率为98.3%.

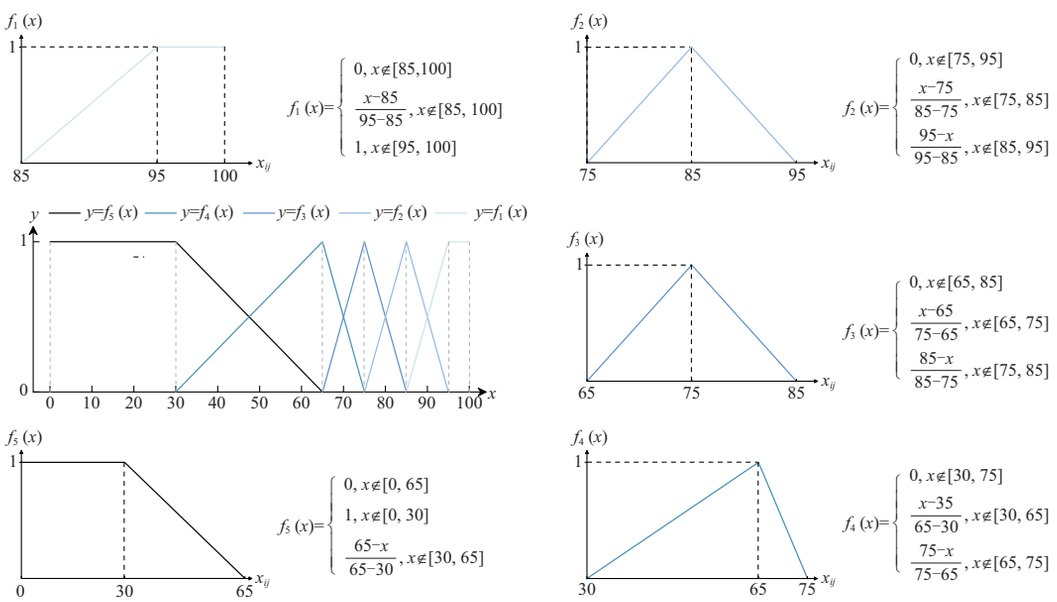


图5 瓦斯静态风险的白化权函数

Fig. 5 Whitening weight function of static gas risk

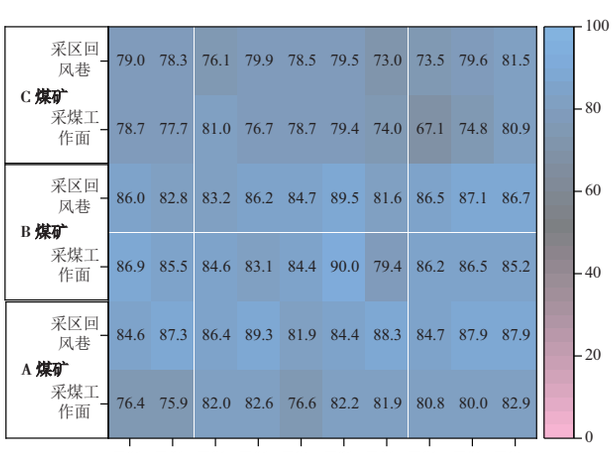


图6 A,B,C煤矿采煤工作面和采区回风巷的瓦斯爆炸风险评估值

Fig. 6 Gas explosion risk assessment values for coal mining faces and return airway incoal mines A, B, and C

4.4 对比分析

4.4.1 改进模型准确性验证

本研究使用传统的基于端点混合三角白化权函数的灰色聚类评估模型作为一级指标评估模型进行评估,与本研究提出的灰色聚类等级-风险转化值模型进行对比,验证本研究提出的改进模型的准确性. 该模型遵循最大隶属度原则,仅能得到风险等级,评估结果如图7所示. 传统的基于端点混合三角白化权函数的灰色聚类评估模型评估的结果显示,所有煤矿的所有区域风险均为低风险和较低风险,无需进行预警和管控,风险误判6次,风险评估准确率为90%. 相比于传统的基于端点混合三角白化权函数的灰色聚类评估模型,本研究提出的灰色聚类等级-风险转化值模型提高了8.3%的风险评估准确率.

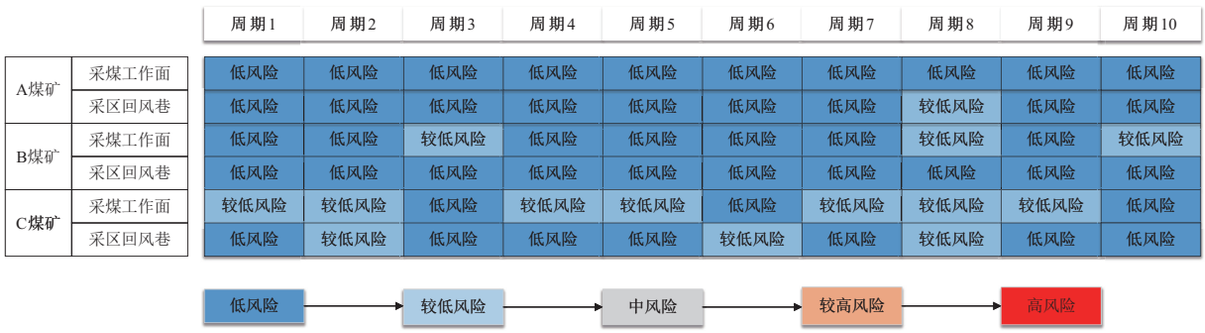


图 7　基于端点混合三角白化权函数的瓦斯爆炸风险评估结果

Fig. 7　Gas explosion risk assessment result based on end-point mixed triangular whitenization weight function

4.4.2　赋权模型准确性验证

进一步的，本研究使用在煤矿瓦斯爆炸风险评估领域广泛使用的FAHP[27-28]作为二级指标赋权模型进行评估，与本研究提出的FAHP+CRITIC融合赋权模型进行对比，验证本研究提出的融合赋权模型的准确性．基于FAHP的评估结果如图8所示．

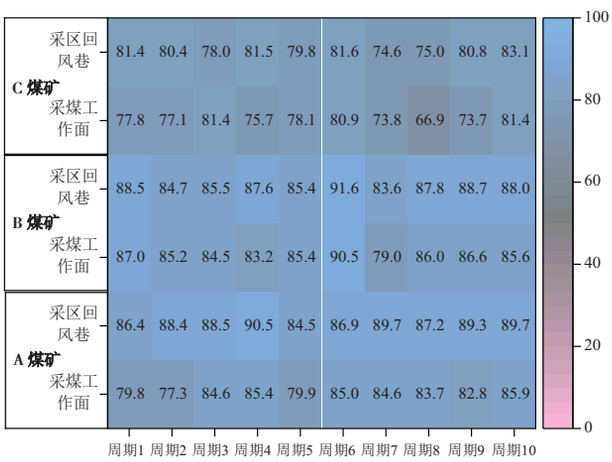


图 8　基于FAHP的瓦斯爆炸风险评估值

Fig. 8　Gas explosion risk assessment value based on FAHP

传统的基于FAHP赋权模型评估的结果显示，周期8和周期9的C煤矿采区回风巷瓦斯爆炸风险无需预警和管控，风险误判2次，风险评估准确率为96.7%．相比于FAHP赋权模型，本研究提出的FAHP+CRITIC融合赋权模型提高了1.6%的风险评估准确率．

4.5　工业应用前景

将数据驱动的煤矿瓦斯爆炸风险评估体系在环境条件差异较大的低瓦斯矿井、高瓦斯矿井和突出矿井进行工业性试验，试验表明该体系能够稳定运行，能够实时、准确地获取煤矿各个区域的瓦斯爆炸风险．

数据驱动的煤矿瓦斯爆炸风险评估体系对煤矿的智能化水平有一定的要求．1)统一的数据采集标准．煤矿必须根据统一的标准进行数据采集，标准包括数据采集周期、数据来源和采集区域，以确保数据的一致性和可比性．2)高质量数据．为了保证风险评估的准确性，必须采集准确、实时、完整的高质量数据．这要求煤矿配备高精度的传感器和监测设备，并建立严格的数据管理和校验机制，以确保数据的真实性和可靠性．3)稳定的数据传输．采集到的数据需要通过稳定的网络传输到数据处理系统，数据传输的稳定性和实时性是关键，任何延迟或数据丢失都可能影响风险评估的实时性和准确性．4)数据处理能力．煤矿需要具备一定的数据处理能力，能够快速处理和分析海量数据，确保风险评估的及时性和准确性．通过满足上述要求，该体系能够有效应用于各种类型的煤矿，显著提升煤矿的智能化安全管理水平．

5　结　论

本研究构建了一个基于数据驱动的煤矿瓦斯爆炸风险评估体系，涵盖指标体系构建、定性指标量化、定量指标数据转换、赋权策略融合与多方法集成建模等关键环节，并在典型矿区开展工业性测试，研究结论如下：

1)通过基于文本挖掘和灾害机理的混合驱动指标体系构建方法，形成了煤矿瓦斯爆炸风险三级指标体系，提高了指标体系的全面性和客观性．

2)基于领域知识，开发了三级指标评分规则和二级指标阈值规则，实现了指标数据的精准转换．

3)FAHP+CRITIC融合赋权方法有效整合了专家经验与数据特征，提高了模型的自适应能力和评估精度，相比单一赋权模型更为稳定可靠，评估准确率提高1.6%．

4)引入改进型灰色综合聚类模型，有效提升了

风险等级划分的分辨力与解释性，为后续预警响应提供了清晰依据，风险评估准确率提高8.7%.

综上所述，该体系为煤矿瓦斯爆炸风险的科学评估提供了一种兼具精度、可扩展性与工程实用性的解决方案. 下一步将重点拓展井下传感器布设范围，提升系统实时响应能力，推动构建更完善的煤矿瓦斯爆炸风险防控系统.

参考文献：

[1] 张宏图，韦佳琪，王登科，等.基于改进QSGS法的瓦斯多机制统一传输模型与流动特性研究[J].中国矿业大学学报，2025，54(3)：640-652.
ZHANG Hongtu，WEI Jiaqi，WANG Dengke，et al. Research on the unified multi-mechanism gas transport model and flow characteristics based on improved QSGS method[J].Journal of China University of Mining & Technology，2025，54(3)：640-652.

[2] 杜 锋，王 凯，左晓欢，等.深部含瓦斯煤岩复合结构损伤失效行为及弹性能作用量化模型[J].中国矿业大学学报，2025，54(4)：721-742.
DU Feng，WANG Kai，ZUO Xiaohuan，et al.Damage failure behavior and quantitative model of elastic energy action of deep gas-bearing coal-rock composite structure[J].Journal of China University of Mining & Technology，2025，54(4)：721-742.

[3] 李 敏，王 丹，贺 珊，等.煤矿瓦斯爆炸风险评估研究综述及进展[J].中国安全科学学报，2025，35(2)：127-136.
LI Min，WANG Dan，HE Shan，et al.Research review and progress of coal mine gas explosion risk assessment[J].China Safety Science Journal，2025，35(2)：127-136.

[4] 刘芮葭.煤矿瓦斯爆炸危险性的灰类-IAHP评价[J].中国安全科学学报，2016，26(5)：99-104.
LIU Ruijia.Grey clustering-IAHP evaluation of danger of coal mine gas explosion[J].China Safety Science Journal，2016，26(5)：99-104.

[5] 皮子坤，贾宝山，贾廷贵，等.基于前景理论和区间数的煤矿瓦斯爆炸风险评价[J].中国安全科学学报，2017，27(6)：91-96.
PI Zikun，JIA Baoshan，JIA Tinggui，et al.Assessment of risk of gas explosion in coal mine based on prospect theory and interval number[J].China Safety Science Journal，2017，27(6)：91-96.

[6] SHI S L，JIANG B Y，MENG X R.Assessment of gas and dust explosion in coal mines by means of fuzzy fault tree analysis[J].International Journal of Mining Science and Technology，2018，28(6)：991-998.

[7] 鲁锦涛，任利成，戎 丹，等.基于灰色-物元模型的煤矿瓦斯爆炸风险评估[J].中国安全科学学报，2021，31(2)：99-105.
LU Jintao，REN Licheng，RONG Dan.Assessment of coal mine gas explosion risk based on grey-matter element model[J].China Safety Science Journal，2021，31(2)：99-105.

[8] 汪圣伟，李希建，代芳瑞，等.基于改进AHP-SPA的煤矿瓦斯爆炸风险评价[J].矿业研究与开发，2021，41(4)：113-117.
WANG Shengwei，LI Xijian，DAI Fangrui，et al.Risk assessment of gas explosion based on improved AHP-SPA[J].Mining Research and Development，2021，41(4)：113-117.

[9] 景国勋，陈纪宏.基于SPA-VFS耦合模型的瓦斯爆炸风险评价[J].安全与环境学报，2023，23(7)：2151-2158.
JING Guoxun，CHEN Jihong.Risk assessment of gas explosion based on SPA-VFS coupling model.Risk assessment of gas explosion based on SPA-VFS coupling model[J].Journal of Safety and Environment，2023，23(7)：2151-2158.

[10] XU K，LI S，LU C，et al.Risk assessment of coal mine gas explosion based on cloud integrated similarity and fuzzy DEMATEL[J].Process Safety and Environmental Protection，2023，177：1211-1224.

[11] GUO H M，LI S G，CHENG L H.Multi-factor coupling risk assessment method in relation to coal mine gas explosion[J].Journal of Loss Prevention in the Process Industries，2025，96：105648.

[12] 成连华，解萌玥，左敏昊，等.基于ISM-BN的煤矿瓦斯爆炸风险评判方法及其应用[J].煤矿安全，2022，53(10)：1-8.
CHENG Lianhua，XIE Mengyue，ZUO Minhao，et al.Risk evaluation method of coal mine gas explosion based on ISM-BN and its application[J].Safety in Coal Mines，2022，53(10)：1-8.

[13] 林志军，李 敏，贺 珊，等.基于博弈论-贝叶斯网络的煤矿瓦斯爆炸风险评估[J].煤炭学报，2024，49(8)：3484-3497.
LIN Zhijun，LI Min，HE Shan，et al.Risk assessment of gas explosion in coal mines based on game theory and Bayesian network[J].Journal of China Coal Society，2024，49(8)：3484-3497.

[14] WU Z L，LI Y T，JING Q.Quantitative risk assessment of coal mine gas explosion based on a Bayesian network and computational fluid dynamics[J].Process Safety and Environmental Protection，2024，190：780-793.

[15] 韩　文，余照阳，刘　飞，等．基于熵权法改进的模糊贝叶斯网络瓦斯爆炸危险性评估[J]．煤矿安全，2025，56(1)：52-61.
HAN Wen，YU Zhaoyang，LIU Fei，et al．Risk assessment of gas explosion based on fuzzy Bayesian network improved by entropy weight method [J]．Safety in Coal Mines，2025，56(1)：52-61.

[16] 刘慧玲，牛国庆，李垣志．基于AHP未确知测度模型的瓦斯爆炸风险评价[J]．煤矿安全，2016，47(12)：157-159.
LIU Huiling，NIU Guoqing，LI Yuanzhi．Risk assessment of gas explosion based on AHP and uncertainty measurement theory[J]．Safety in Coal Mines，2016，47(12)：157-159.

[17] 贾宝山，皮子坤，李　锐，等．煤矿瓦斯爆炸灰色-IAHP危险性评价模型及应用[J]．辽宁工程技术大学学报(自然科学版)，2017，36(9)：909-913.
JIA Baoshan，PI Zikun，LI Rui，et al．Coal mine gas explosion grey IAHP risk assessment model and application[J]．Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)，2017，36(9)：909-913.

[18] LU C，LI S，XU N K，et al．Hybrid-driven risk assessment methodology for coal and gas outburst：Integration of complex network，disaster mechanism，and multi-level fusion modeling[J]．Process Safety and Environmental Protection，2025：107226.

[19] LU C，LI S，XU N K，et al．Research on AI-driven complex network and management system of coal and gas outburst accident[J]．Journal of Safety and Sustainability，2025，2(1)：32-44.

[20] 李树刚，林海飞．中国煤矿安全技术与管理：煤矿灾害机理[M]．徐州：中国矿业大学出版社，2014.
LI Shugang，LIN Haifei．Chinese coal mine safety technology and management：coal mine disaster mechanism[M]．Xuzhou：China University of Mining and Technology Press，2014.

[21] LU C，LI S，XU K，et al．Research on data-driven coal mine environmental safety risk assessment system[J]．Safety Science，2025，183：106727.

[22] 俞立平，郑　昆．期刊评价中不同客观赋权法权重比较及其思考[J]．现代情报，2021，41(12)：121-130.
YU Liping，ZHENG Kun．Comparison and consideration of different objective weighting methods in journal evaluation [J]．Journal of Modern Information，2021，41(12)：121-130.

[23] 祁　云，薛凯隆，汪　伟，等．矿井煤与瓦斯突出事故应急救援能力评估模型[J]．中国安全科学学报，2024，34(2)：225-230.
QI Yun，XUE Kailong，WANG Wei，et al．Assessment model of emergency response capability for coal and gas outburst accidents in mines[J]．China Safety Science Journal，2024，34(2)：225-230.

[24] 刘思峰．灰色系统理论及其应用(第九版)[M]．北京：科学出版社，2021.
LIU Sifeng．Grey system theory and applications (9th edition) [M]．Beijing：Science Press，2021.

[25] 李　爽．生产经营单位安全双重预防机制理论与实施[M]．徐州：中国矿业大学出版社，2021.
LI Shuang．Theory and implementation of dual prevention mechanism for safety in production and operation units[M]．Xuzhou：China University of Mining and Technology press，2021.

[26] 李　爽，贺　超，鹿　乘，等．煤矿智能双重预防机制与智能安全管控平台研究[J]．煤炭科学技术，2023，51(1)：464-473.
LI Shuang，HE Chao，LU Cheng，et al．Research on intelligent dual prevention mechanism and intelligent security control platform of coal mine[J]．Coal Science and Technology，2023，51(1)：464-473.

[27] ZHENG X L，CHEN H L，XUE S，et al．Study on explosion risk assessment of low-concentration gas safe combustion system based on FAHP-fuzzy fault tree [J]．Quality and Reliability Engineering International，2022，38(1)：484-500.

[28] LI M，WANG H T，WANG D M，et al．Risk assessment of gas explosion in coal mines based on fuzzy AHP and bayesian network[J]．Process Safety and Environmental Protection，2020，135：207-218.

（责任编辑　仝　腾）