非煤矿山安全生产预警“一张图”系统的研发与应用*

刘允秋[1,2,3],李正灿[4],席浩睿[1,2],唐晋[1,2],曲发科[5],李官兵[6],邵重阳[7]

(1.金属矿山开采安全与灾害防治全国重点实验室, 安徽 马鞍山市 243000;
2.中钢集团马鞍山矿山研究总院股份有限公司, 安徽 马鞍山市 243000;
3.中国矿业大学 深地工程智能建造与健康运维全国重点实验室, 江苏 徐州市 221116;
4.山东黄金矿业(鑫汇)有限公司, 山东 青岛市 266715;
5.福建省政和县源鑫矿业有限公司, 福建 南平市 350016;
6.山东黄金矿业股份有限公司新城金矿, 山东 烟台市 261499;
7.玉溪大红山矿业有限公司, 云南 玉溪市 653100)

摘要:针对非煤矿山安全生产监测预警中普遍存在的多源异构数据割裂、风险识别滞后与监管协同不足等工程难题,构建了一套基于多源数据融合技术的非煤矿山安全生产预警“一张图”系统。系统依托多源数据融合、实时状态监控、安全风险四色图可视化等核心技术,设计了政府监管端-企业监管端协同耦合的双轨架构。政府端聚焦宏观合规性监管与应急联动指挥,企业端侧重微观风险隐患闭环整改,二者通过数据共享协同机制,形成一体化的闭环监管新模式。该系统在六安市3家矿山企业的工程应用结果表明,该“一张图”协同预警系统可使政府端安全监管效率提升约22%,风险评估准确性达到90%以上;企业监管端隐患处理时间缩短30.5%,事故发生率下降15%;多源数据协同应用端数据利用率提高20%。研究可为非煤矿山智能化安全监管提供一套有效的技术实现路径,对推动行业数字化转型具有参考价值。

关键词:矿山安全生产;一张图;矿产资源;风险预警
中图分类号:TD76 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)06-0071-11

Development and Application of the “One Map” System for Safety Production Early Warning in Non-Coal Mines

Liu Yunqiu[1,2,3], *Li Zhengcan*[4], *Xi Haorui*[1,2], *Tang Jin*[1,2], *Qu Fake*[5], *Li Guanbing*[6], *Shao Chongyang*[7]

(1.State Key Laboratory of Metal Mine Safety and Disaster Prevention, Maanshan, Anhui 243000, China;
2.Sinosteel Maanshan Mining Research Institute Co., Ltd., Maanshan, Anhui 243000, China;
3.State Key Laboratory of Intelligent Construction and Healthy Operation and Maintenance of Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;
4.Shandong Gold Mining (Xinhui) Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266715, China;
5.Fujian Zhenghe County Yuanxin Mining Co., Ltd., Nanping, Fujian 350016, China;
6.Xincheng Gold Mine, Shandong Gold Mining Co., Ltd., Yantai, Shandong 261499, China;
7.Yuxi Dahongshan Mining Co., Ltd., Yuxi, Yunnan 653100, China)

Abstract: To address the prevalent engineering challenges of safety production monitoring and early warning in non-coal mines, such as the fragmentation of multi-source heterogeneous data, lagging risk identification, and insufficient regulatory collaboration, a “One Map” system for safety production early warning in non-coal mines based on multi-source data fusion technology was constructed. Relying on core technologies including multi-source data fusion, real-time status monitoring, and safety risk four-color map visualization, the system designed a dual-track architecture that couples government supervision terminal and enterprise supervision terminal collaboratively. The government terminal focused on macro-level compliance supervision and emergency linkage command, while the enterprise terminal emphasized micro-level closed-loop rectification of

* **收稿日期**:2025-08-26
基金项目:国务院国资委中央企业WLCY课题(054-24YF-67-0001)
作者简介:刘允秋(1988—),男,山东泰安人,硕士生导师,高级工程师,主要从事智慧矿山等方面的教学与研究工作。E-mail:578192969@qq.com
通信作者:席浩睿(2000—),男,辽宁鞍山人,硕士,主要从事智慧矿山方面的研究。E-mail:1625475168@qq.com

risks and hidden dangers. Through a data sharing and collaboration mechanism, a new integrated closed-loop supervision model was formed. The engineering application results of this "One Map" collaborative early warning system in three mining enterprises in Lu'an City show that the system improves the safety supervision efficiency at the government terminal by approximately 22% and achieves a risk assessment accuracy of over 90%. At the enterprise supervision terminal, the hidden danger handling time is reduced by 30.5%, and the accident rate is decreased by 15%. The data utilization rate at the multi-source data collaborative application terminal is increased by 20%. The research provides an effective technical implementation path for intelligent safety supervision in non-coal mines and holds reference value for promoting the digital transformation of the industry.

Key words: Mine safety production, One Map, Mineral resources, Risk early warning

0 引言

矿业作为我国国民经济的基础产业,为国家建设和经济发展提供了核心的物质资源保障。但矿山安全始终是行业发展与社会关注的焦点,直接关系到人民群众的生命财产安全、社会的和谐稳定。近年来,随着非煤矿山开采规模的持续扩大,井下开采环境日益复杂,传统的矿山安全生产管理模式难以满足现代矿山安全监管的复杂需求[1-3]。

国内外学者围绕矿山安全生产预警系统开展了大量研究,取得了一系列具备工程应用价值的研究成果。例如,基于多源数据融合的矿山精细化建模技术,可精准还原矿山的地质结构与开采环境,为矿山安全生产提供了翔实的基础数据支撑[4-7];矿山风险分级管控与隐患排查治理预防信息系统,实现了对矿山安全风险的分级分类管控,有效提升了安全监管的针对性和有效性[8-9]。但现有的非煤矿山安全生产预警系统仍存在功能单一、局部应用受限等短板,缺乏从全局视角出发的综合预警能力。在数据集成与共享方面,多数系统之间信息相互割裂,未预留与第三方系统的标准化对接接口,导致多源数据流通不畅、数据价值无法实现高效共享和充分利用[10-12]。此外,部分系统的风险评估与预警精准度不足,难以实现潜在风险的超前识别与及时预警,影响了安全监管的效率和精准度。

针对上述问题,本研究创新性地提出了一种基于多源数据融合和 WebGIS 技术的非煤矿山安全生产预警"一张图"系统[13-15]。该系统突破了传统矿山安全监管模式的局限,整合了矿山安全生产数据与矿产资源数据,涵盖开采进度、设备运行状态、人员实时分布等动态生产数据,以及地质结构、矿体分布等静态基础数据,为全面、动态地掌握矿山安全生产态势奠定了坚实的数据基础,确保监管人员获取精准、实时的全维度信息,从而有效识别潜在的安全风险。系统依托 WebGIS 技术的空间可视化与空间分析核心优势,将复杂的矿山安全生产数据以直观的地理空间图形形式呈现,使监管人员能够清晰地观察到矿山各个区域的安全生产状况,实现全局可视化监控,为风险精准预警提供有力的技术支撑。同时,系统构建了政府与企业双端协同的安全生产监管平台,不仅实现了对矿山安全生产态势的全局可视化监控与精准预警,还通过引入智能化分析预警机制实现政企双向数据互动,打破了政府与企业之间的信息壁垒,实现了信息的及时共享与流通,大幅提升了安全监管效率[16-18]。该系统可为政府和企业的安全决策提供科学、高效的数据支撑,全面提升矿山安全监管的科学性和及时性。

以六安市非煤矿山为例,该矿山现有安全监管系统普遍存在智能化程度低、数据信息孤立等问题,难以满足现代化安全监管的核心需求。本研究依托六安市现有的电子政务外网、云系统等信息化基础资源,通过部署数据采集设备、物联网网关实现全要素数据上传,构建标准化数据接口,实现多源数据集成与同步,最终完成安全生产预警"一张图"系统的搭建与落地。该系统的成功实施,可帮助相关部门从全局、整体层面快速、准确地掌握非煤矿山企业的运行和安全状态,实现对重大风险源的动态评估与闭环管控,显著提高矿山生产本质安全水平。同时,该系统推动了政府部门信息化、数字化、智能化的安全生产危险源管理系统建设,促进了矿山企业安全生产标准化与隐患排查治理双重预防体系建设,实现了隐患排查全过程的记录与闭环管理,全面提升了非煤矿山安全生产监管的规范化水平。

本研究可为非煤矿山安全生产监管提供新的技术思路和方法,通过提升矿山安全监管的信息化、数

字化水平,实现安全生产态势的全局可视化监控与预警,有效提升矿山安全生产监管的效能与智能化水平,推动非煤矿山行业向更安全、更高效、更智能的方向发展[19-20]。

1 安全生产预警“一张图”系统设计框架

1.1 目标提出

本研究以非煤矿山安全生产管控需求为核心导向,通过构建安全生产预警“一张图”系统,显著降低矿山事故发生率。系统具备全局监控与实时预警功能,可精准识别井下潜在风险,为安全管控提供科学决策支持,最大程度减少事故造成的人员伤亡与经济损失。同时,系统为矿山企业提供数据支持与管理工具,助力企业提升安全生产精细化管理水平,推动非煤矿山行业安全管理的规范化与科学化发展。此外,系统为政府监管部门提供高效、精准的数字化监管手段,可显著提升安全监管效能,实现矿山安全生产全流程的动态监管与智能决策支持,从而全面优化矿山安全生产监管效能。

1.2 系统设计思路

首先,系统聚焦于整合矿山安全生产数据和矿产资源数据,打破各业务系统间的数据孤岛,构建一个全面且共享的数据中心,既为全功能模块落地提供坚实的数据基础,也保障了全量数据的准确性和时效性。其次,在系统架构上,采用政府监管端和企业监管端的两大子系统。其中,政府监管端聚焦于宏观层面的监管需求,提供全面的监管工具和分析功能;企业监管端侧重于矿山日常安全生产的微观精细化管理需求,支撑企业隐患排查、风险管控、设备运维等全流程安全生产管理活动。两个子系统通过数据共享与协同工作,形成政府与企业协同监管、企业自我管理相结合的政企协同管控新模式。在信息展示方面,系统采用“一张图”的可视化呈现形式,将复杂的矿山安全数据和地理信息进行直观、简洁的可视化呈现。该模式大幅提高了信息的可读性和易懂性,使监管人员和企业管理人员可快速抓取关键安全信息,支撑及时、精准的管控决策。最后,系统建立了完善的风险预警与闭环处置机制,通过对矿山生产环节关键指标的实时监控,及时发出预警信号,并提供相应的处置建议和措施,保障风险隐患能够得到及时有效控制,全面提升矿山安全生产的本质水平。系统设计思路技术路线见图1。

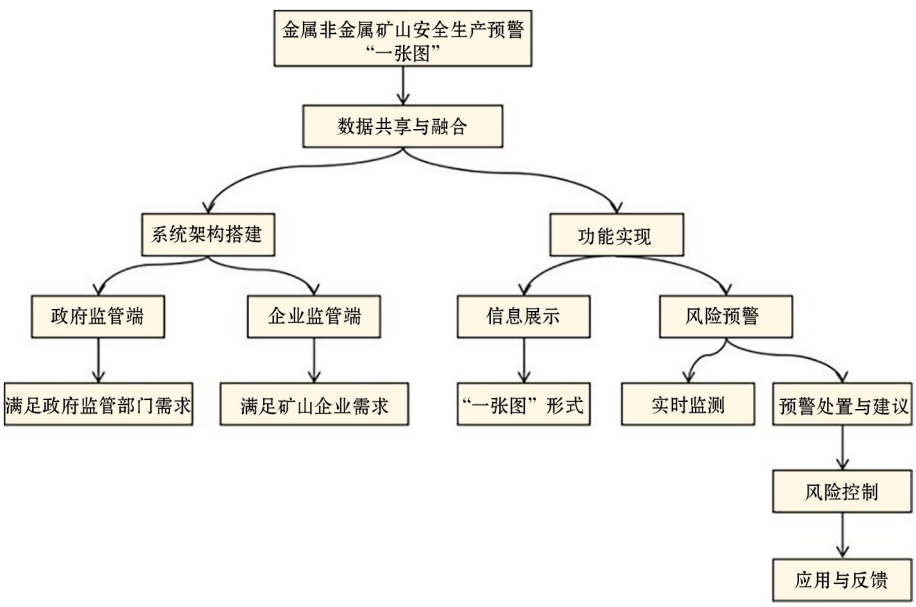


图1 系统设计思路技术路线

Fig.1 The technical roadmap of the design concept for the system

1.3 核心技术

1.3.1 多源数据融合技术

多源数据融合技术是安全生产预警“一张图”系统的核心数据的基础,其通过集成非煤矿山安全生产数据与矿产资源数据,打破各业务系统之间的数据孤岛,实现多源数据的共享与融合。在非煤矿山安全生产管理中,该类数据来源广泛,涵盖地质勘探数据、开采过程数据、设备运行状态数据、人员位置

数据、环境监测数据等。通过数据融合,可将分散的多源数据整合为有机整体,为后续的风险分析和决策提供全维度的数据支撑。在地质勘探阶段,融合遥感影像、地质钻孔数据、地球物理测量数据等,可准确地刻画地下矿体的分布和特性,为开采设计提供科学依据。

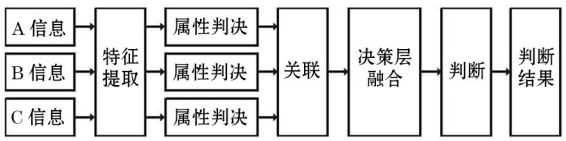


图 2 多源数据融合技术决策层融合

Fig.2 Decision-making level fusion of multi-source data fusion technology

多源数据融合(Multi-source Data Fusion, MDF)是指将不同来源、不同格式、不同分辨率的数据,通过特定的数学模型与算法进行整合处理,最终获得比单一数据源更准确、更全面、更可靠的信息表达的技术。在非煤矿山安全预警系统中,其目标包括以下 4 个方面。

(1) 信息互补:弥补单一传感器在监测精度、覆盖范围、响应时间上的局限性。

(2) 冗余剔除:消除重复、冲突或无效数据,降低系统预警误报率。

(3) 风险动态感知:实现对矿山环境、设备运行状态、人员行为等关键要素的动态感知与趋势预测。

(4) 决策支持优化:为"一张图"系统提供统一、实时、可视化的数据底座,支撑分级预警与应急联动响应。

根据数据处理深度与抽象程度,非煤矿山安全预警系统中的多源数据融合可分为 3 个层级(见表 1)。

表 1 多源数据融合层级

Table 1 The hierarchy of multi-source data fusion

融合层级	处理对象	典型算法	应用场景示例
数据级融合	原始传感器数据	加权平均、卡尔曼滤波、小波融合	温湿度、气体浓度、振动信号的实时融合
特征级融合	提取后的特征向量	主成分分析(PCA)、模糊聚类、神经网络	设备故障特征、岩体稳定性指标融合
决策级融合	各子系统的识别结果	D-S 证据理论、贝叶斯推理、专家系统	多源预警结果的冲突消解与等级判定

其中,D-S 证据理论在非煤矿山火灾、地压灾害等多源异构数据融合场景中应用广泛,可有效处理不确定性信息;神经网络与深度学习则适用于高维非线性数据的特征提取与模式识别,可显著提升预警系统的自适应能力。

在金属非金属矿山复杂环境中,多源数据融合需解决以下关键技术问题。

(1) 时空对齐与标准化处理:矿山数据来源于卫星遥感(天基)、无人机航拍(空基)、地下传感器网络(地基)等多个平台,需通过统一坐标系统、时间戳校准、空间重采样等手段进行数据的预处理,确保多源数据在"一张图"中实现无缝空间叠加。

(2) 动态权重分配机制:针对传感器精度差异、井下环境干扰等问题,构建基于数据可信度的动态权重模型。例如在井下隧道地质预报中,可对隧道地震超前预报、地质雷达与钻探数据分别赋予 0.35, 0.25, 0.40 的融合权重,显著降低灾害误报率。

(3) 跨域数据语义融合:融合地质、气象、设备运维、人员定位等多领域数据,构建非煤矿山安全知识图谱,实现"人-机-环-管"全要素的关联分析。

(4) 实时性与可扩展性设计:采用边缘计算与云计算协同架构,对高频传感数据进行本地融合与初步过滤,仅上传关键特征至云端进行全局融合,降低网络传输负载并提升系统预警响应速度。

融合效果的评估需兼顾客观指标与业务需求。其中,客观指标包括均方根误差、信息熵、边缘保持度等,用于量化融合后的数据精度与图像质量;业务指标包括预警准确率、误报率、漏报率、应急响应时间等,需通过非煤矿山现场工程案例进行验证。

此外,系统需具备自适应优化能力:通过在线学习与模型更新机制,基于历史预警结果与事故案例,动态调整融合参数与预警阈值,持续提升系统鲁棒性。

综上,多源数据融合技术不仅是"一张图"系统的数据中枢,更是实现非煤矿山安全生产从事后响应向事前预防、从经验决策向智能决策转型的核心技术支撑。

1.3.2 实时监控技术

实时监控技术是"一张图"系统实现动态风险管控的核心支撑,它利用传感器网络、高清视频监控、人员精准定位等物联网手段,对非煤矿山生产过程中的人员、设备等关键要素进行实时监测。通过实

时监控,可动态掌握矿山生产现场的安全生产态势,及时识别安全隐患并采取相应措施。通过在矿山关键区域、高风险作业点安装传感器,实时监测粉尘浓度、温度等环境参数,一旦监测数据超出阈值,系统可立即触发声光警报,提醒相关人员及时采取措施,避免事故发生。

1.3.3 风险四色图展示技术

风险四色图是"一张图"系统实现风险可视化管控的核心载体,其底层逻辑为"风险评估—阈值分割—色彩映射—动态渲染"四步闭环技术体系。红、橙、黄、蓝四色并非经验配色,而是与《风险管理指南》(GB/T 24353—2022)及《金属非金属矿山安全规程》(GB 16423—2020)中"重大、较大、一般、低"四级风险一一对应,且在 CIE 1976 Lab * 均匀色空间中保持 $\Delta E>30$,确保人眼可瞬间分辨风险。

(1) 风险评估模型。

采用行业通用的"作业条件风险分析法(LEC 法)"进行风险评估:

$$R(t)=L(t)\times E(t)\times C(t)$$

式中:$L(t)$为事故发生的可能性(Likelihood),通过历史数据、专家经验或概率模型进行量化,取值范围 0.1~10;$E(t)$为人员暴露于危险环境的频繁程度(Exposure),依据暴露频率划分为连续暴露、每日暴露、每周暴露、每月暴露、每年暴露等级别,赋值为 0.5~10;$C(t)$为事故后果的严重程度(Consequence),依据可造成人员伤亡、财产损失或环境影响程度,设定为 1~100 的等级;最终风险值 $R=L\times E\times C$,分值越高,代表作业点的风险等级越高。

(2) 阈值设定依据。

以 ALARP(As Low As Reasonably Practicable)原则为框架,引入"社会风险曲线 F-N"与"个体风险上限 10^{-3}/年"双约束条件,反演得到非煤矿山三维风险度阈值,其中 F 为事故发生频率,N 为死亡人数。

红色(重大):$R\geqslant 200$ 或 $10^{-2}/F\geqslant 1\times 10^{-3}$(不可接受区);

橙色(较大):$50\leqslant R<200$;

黄色(一般):$10\leqslant R<50$;

蓝色(低):$R<10$。

(3) 动态更新机制。

数据层:井下混合网络周期回传多类传感数据,边缘节点采用滤波算法抑制野值;

模型层:时变可能性每 10 min 用新数据做一次贝叶斯更新,后验均值若相对先验漂移>15%,立即触发阈值重算。

渲染层:前端基于着色器实现像素级颜色插值,在保持画面流畅帧率下延迟极低,满足实时要求。

风险四色图并非简单的"颜色叠加",而是融合矿山物联网、贝叶斯更新、ALARP 风险判据的完整技术体系,其评估模型、阈值设定与动态更新机制均通过行业标准和现场验证,可为非煤矿山安全生产提供量化、实时、可追溯的决策支持。

1.3.4 数据分析与决策支持技术

数据分析与决策支持技术是"一张图"系统的核心应用深化,其通过对融合后的多源数据进行深度挖掘与智能分析,结合风险四色图可视化呈现,为非煤矿山安全生产政企协同管理提供科学、精准的决策支撑。

首先采用多源异构时空对齐方法,将地质、测量、通风、设备传感等时空数据统一至同一语义空间,实现几何配准与秒级语义同步;继而运用分布式增量式 ETL 流水线,完成数据清洗、缺失值多重插补与噪声小波阈值滤波,确保数据质量合格率不低于 95%,为后续深度分析奠定数据基础。

在决策支持层面,系统以风险四色图为可视化引擎,集成深度时空预测与多目标优化模型。其一,构建融合注意力机制的时空混合网络,对多源监测数据进行时序—空间联合建模,实现 72 h 内非煤矿山重大灾害预测发生率 $P\geqslant 0.85$ 的提前预警;其二,基于强化学习的策略搜索算法(Safe-DQN),构建以"风险-成本-产量"为核心的三维回报函数。最终,通过 WebGL 加速的体渲染与增强现实叠加技术,将预测风险以体素热图形式无缝投射至"一张图"实景三维模型中,辅助监管人员一键溯源、分钟级决策,形成可解释、可验证、可闭环的非煤矿山安全智慧决策新范式。

1.3.5 地理信息系统(GIS)技术

地理信息系统(GIS)作为"一张图"系统的空间载体与可视化引擎,为非煤矿山安全生产预警提供了统一的空间基准框架、空间分析能力与多维度可视化展示手段,其组成如图 3 所示。其核心作用是将矿山地质、工程、监测、管理等离散信息映射到连续地理空间中,实现"数据-模型-场景"的一体化集成,支撑安全风险的可视化研判、动态预警与应急指挥。

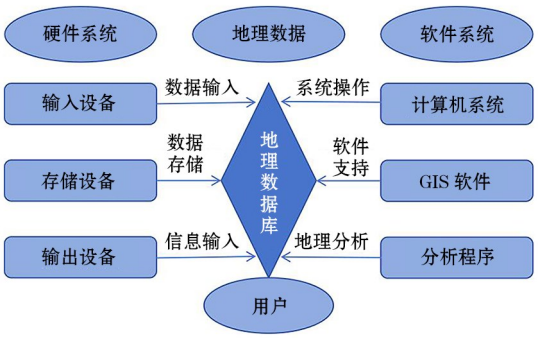


图 3 地理信息系统组成

Fig.3 The composition of geographic information system

针对金属非金属矿山井上下一体化管控需求，GIS 的功能可归纳为“三基三维”。

(1) 基础数据管理：对矿山地质、地形、井巷工程、采空区、地表设施等空间数据进行分层、分要素管理，构建矿山统一的空间数据库。

(2) 基准空间分析：基于 GIS 空间分析工具(叠加分析、缓冲区分析、网络分析、视域分析等)，实现隐患点的空间关联分析、风险影响范围评估与应急逃生路径智能规划。

(3) 基线可视化展示：通过二三维一体化展示引擎，将实时监测数据、风险预警结果、应急资源分布等信息在“一张图”上叠加呈现，形成“一屏览全矿”。

(4) 三维场景构建：利用倾斜摄影、三维激光点云、BIM-GIS 融合技术，构建井上下一体化三维实景模型，实现地质体－工程体－监测体的全空间耦合。

(5) 多维时空动态：支持时间轴历史回放、风险演化趋势推演，直观展示安全风险演化的时空过程。

(6) 多端协同联动：实现桌面端、Web 端、移动端、指挥大屏端数据同源同步，满足企业－矿区－班组多级协同需求。

综上，GIS 技术通过空间化、时序化、可视化的手段，将非煤矿山“人－机－环－管”全要素映射到统一空间坐标系中，为安全生产预警提供了“看得见、算得准、管得住”的技术支撑，是“一张图”系统不可或缺的核心组成。

2 安全生产预警“一张图”系统

2.1 系统架构

本研究依托六安市电子政务外网、云系统等现有信息化资源，研发构建了非煤矿山安全生产预警“一张图”系统。系统采用分层解耦框架设计，整体分为数据采集层、数据处理层、业务逻辑层和应用展示层四层结构，各层之间相互协作，共同实现系统全功能模块的功能。

数据采集层：通过前端智能采集设备、物联网网关、标准化数据接口，实现矿山监测数据和视频数据的实时采集与上传。数据来源涵盖矿山企业的生产数据、环境监测数据、设备运行数据等，保障基础数据的全面性和准确性。

数据处理层：对采集的原始数据开展清洗、转换和融合等预处理操作，剔除噪声数据，统一数据格式，为后续的数据分析与智能研判提供高质量的数据支撑；同时，依托数据挖掘和机器学习等技术，从海量数据中提取风险特征和演化规律，为风险评估和预警提供依据。

业务逻辑层：围绕非煤矿山安全生产预警的核心业务需求，构建标准化业务逻辑与算法模型。核心包括风险评估模型、智能预警规则引擎等，对预处理后的数据进行深入分析和计算，实现对矿山企业安全生产状况的实时监测、风险评估和预警生成。

应用展示层：通过轻量化、可视化的交互界面，向用户直观呈现安全生产预警信息。建设安全生产预警“一张图”可视化系统，实现对全市矿山企业的宏观监管和企业自身的安全管理。用户可通过电脑、手机等终端设备访问系统，实时获取风险信息、预警处置情况及隐患排查工作等信息，为安全管控决策提供数据支持。

系统设置政府监管端和企业监管端两个子系统，分别匹配政府监管部门和矿山企业的不同需求。

政府监管端主要面向政府监管部门，实现对全市非煤矿山企业的宏观监管。通过“一张图”可视化展示，监管部门可全面掌握全市矿山企业风险信息、预警处置及隐患排查工作，从全局视角把控企业安全生产状况，为制定监管政策提供科学依据；同时政府监管端还具备数据统计分析、报表生成等功能，帮助监管部门更好地进行安全生产管理。

企业监管端聚焦矿山企业自身的安全管理工作。企业可以通过该子系统，实时监控井下作业人员位置、活动轨迹、设备运行状态、风险预警信息等核心内容，及时识别安全隐患并启动相应措施，全面提升企业自身的安全管理水平；同时企业监管端还提供了安全管理工具和知识库，助力企业加强安全

文化建设，增强员工的安全意识和应急处置能力。

2.2　政府监管端“一张图”子系统

依据市、区、县对非煤矿山企业的安全监督管理办法和执法检查标准，建设政府监管端“一张图”子系统，如图 4 所示。矿山企业按照全市数据标准和模板进行上报，建立六安市非煤矿山企业全要素数据库，将数据统一汇聚于市系统，结合企业上报的动态数据和静态数据进行非煤矿山企业数据的可视化分析，支撑市应急管理部门远程调阅、实时查看非煤矿山企业及周边环境全维度信息，核心涵盖区域企业信息概况、区域实时矿区作业人员统计分析、区域企业预警信息、区域企业风险等级信息、区域企业隐患处置信息等内容。

政府监管端“一张图”子系统从全域监管角度，将全市非煤矿山企业安全生产总体情况、风险总体信息、预警处置情况、隐患排查治理情况等进行分析和展示，以“一张图”形式展示非煤矿山安全生产总体态势(见图 5)，构建应急管理局全流程、全层级监管视角，助力监管部门从全局角度掌握企业总体安全生产情况，提供决策辅助。



图 4　政府监管端“一张图”

Fig.4　“One Map” for government supervision

该子系统主要子模块和功能包括六个方面。

(1) 全市非煤矿山基础信息总览：结合应急地理信息系统(EGIS)地图可视化技术，以空间可视化方式展示六安市各类非煤矿山的位置分布；综合展示全市非煤矿山基本信息，包括矿山数量、矿山位置、矿山规模、矿山种类、矿山状态、矿山风险等级等，实现全市非煤矿山开采深度、井下作业人数等关键信息展示。同步展示全市非煤矿山风险程度统计结果。

(2) 全市非煤矿山企业信息总览：综合展示全市非煤矿山企业基本信息，包括非煤矿山企业数量、企业位置、企业规模、企业年产量、企业年产值等。

(3) 矿山人员信息总览：通过对接企业人员管理系统和人员定位系统，实时综合展示全市矿山企业作业人员情况，包括人员数量、人员位置、人员作业情况等信息。

(4) 视频监控信息总览：综合展示全市非煤矿山井下关键安全生产场所及设备的实时监控视频，同步展示企业名称、监控位置、监控录像等信息。

(5) 全市非煤矿山预警信息总览：综合展示全市非煤矿山最新的报警信息并滚动播报，核心包括报警企业位置、报警设备、报警值等关键信息。

(6) 全市风险四色图可视化展示：依托前文风险四色图，综合展示全市非煤矿山风险展示等级，相关风险区域、相关风险矿山等。



图 5 非煤矿山企业信息

Fig.5 Information on non-coal mining enterprises

2.3 企业监管端“一张图”子系统

依据非煤矿山企业安全生产监管业务流程、安全管理规范与执法检查标准,研发建设矿山企业监管端“一张图”子系统,如图 6 所示。



图 6 企业监管综合“一张图”

Fig.6 Comprehensive “One Map” for enterprise supervision

企业按照统一数据标准和模板完成内部数据上报,建立本企业完整性数据库,并汇聚于监测监控系统,结合本企业上报与采集接入的动态数据和静态数据进行,开展企业安全生产数据可视化分析,对企业自身安全监管相关信息的实时展示,涵盖企业信息概况、井下作业人员实时统计、企业预警信息、企业风险等级信息、企业隐患处置信息等内容。

该系统从企业角度,将企业总体情况、风险总体信息、预警及处置情况、排查工作情况开展多维统计分析和展示,以"一张图"形式呈现安全生产总体态势,构建企业全流程管控视角,帮助企业管理者从全局角度掌握企业总体安全生产情况,提供决策辅助。

企业监管端"一张图"子系统主要子模块和功能设计包括以下 6 个方面。

(1) 矿山企业基础信息总览:综合展示矿山企业核心基础信息,包括企业注册位置、生产规模、企业年产量、企业年产值等。同步展示企业矿山基本信息,包括矿山数量、矿山位置、矿山规模、矿山种类、矿山状态、矿山等级等。

(2) 企业安全生产监测监控设备信息总览:综合展示企业安全生产监测监控设备种类和运行状态,包括设备数量、设备种类和设备运行状态等信息。可直观查询矿山区域内各类相关监测监控设备的空间分布,直观展示监测点分布、密度和种类,加强企业监测点的网格化建设,构建全域覆盖感知网络。

(3) 企业矿山人员信息总览:实时综合展示企业矿山作业人员情况,包括人员数量、人员位置、人员作业情况等信息。

(4) 企业视频监控信息总览:综合展示企业井下实时监控视频,包括监控位置、监控录像等信息。视频点位根据企业建设实际情况逐步接入。

(5) 企业预警信息总览:在地图中聚合展示矿山风险点数量与空间分布,综合展示最新的报警信息,并滚动显示,包括报警设备、报警值等信息。

(6) 企业风险四色图可视化展示:依托风险四色图,综合展示该企业非煤矿山风险等级。

3 建设应用

为验证本系统的可行性与科学性,本研究选取六安市安徽马钢张庄矿业有限责任公司、安徽开发矿业有限公司李楼铁矿、安徽金安矿业有限公司草楼铁矿等 3 家不同规模、不同矿种类型的非煤矿山企业作为工程应用验证对象。试验周期为 2024 年 1—12 月,在系统试运行阶段,结合各试点企业的实际生产状况,有序推进系统部署、联调运行与功能优化工作,确保系统在不同作业场景下的稳定性和适用性。

系统试运行期间,通过对生产和监管数据进行记录与对比分析,得到了如下成效。

3.1 政府角度

(1) 监管效率提升。政府监管部门可通过系统实时掌握全市非煤矿山企业的安全生产状况,依托风险四色图展示技术,实现矿山风险等级动态评估,显著提升了监管效率。系统投用后,监管人员的工作效率提高了约 22%,风险评估准确性达到了 90% 以上,试点企业监管效率提升统计结果见表 2。

表 2 监管效率提升率

Table 2 The improvement rate of supervision efficiency

矿山企业	对照期总检查工时/h	对照期检查次数	对照期人均工时/(h/次)	试验期总检查工时/h	试验期检查次数	试验期人均工时/(h/次)	提升率/%
安徽马钢张庄矿业有限责任公司	138.6	49	2.83	112.0	49	2.29	19.1
安徽开发矿业有限公司李楼铁矿	123.5	40	3.09	96.0	40	2.40	22.3
安徽金安矿业有限公司草楼铁矿	104.4	29	3.60	78.3	29	2.70	25.0
平均值	—	—	3.17	—	—	2.46	22.13

(2) 事故率下降。系统投用后,试点非煤矿山六安市事故发生率下降了 15%。截至 2024 年 10 月,六安市应急管理局共检查非煤矿山 42 次,累计排查安全生产隐患问题 133 条。依托系统的应用,隐患问题的处理更加及时有效,有效降低了事故发生率。

(3) 监管决策科学性增强。依托系统提供的全面、准确、实时的安全生产数据支持,政府监管部门可制定更加科学合理的监管政策和措施,提高了监管决策的科学性和有效性。

3.2 企业角度

(1) 隐患排查治理效率大幅提升。企业通过系统实时监控矿山作业人员、设备运行状态及风险预警信息,实现了隐患排查、登记、评估、报告、监控、治理、

销账的全过程闭环管理。试点企业隐患闭环周期率见表3。从表3可以看出,企业安全生产精细化管理水平显著提升,事故隐患处理时间平均缩短了30.5%。

(2) 生产效率提升。通过系统的智能预警和隐患提前处置,减少了因安全事故导致的停产整顿时间;同时,系统的应用有助于优化企业的生产流程,实现了企业的安全生产和生产效率的提升。

(3) 安全生产意识增强。企业对安全生产的重视程度明显提高,员工的安全生产意识大幅度加强。进一步提升了企业的安全生产水平。

表3 隐患闭环周期缩短率

Table 3 The shortening rate of the hidden danger closed-loop cycle

矿山企业	对照期平均周期/d	试验期平均周期/d	缩短率/%
安徽马钢张庄矿业有限责任公司	11.2	7.8	30.4
安徽开发矿业有限公司李楼铁矿	9.5	6.6	30.5
安徽金安矿业有限公司草楼铁矿	13.7	9.5	30.7
平均值	11.5	8.0	30.5

4 结论

(1) 本文研发了非煤矿山安全生产预警“一张图”系统:一是构建了基于多源数据融合的协同监管体系,整合矿山安全生产全要素数据与矿产资源基础数据,形成政府监管端和企业监管端双子系统,突破了传统矿山安全监管模式单一的局限;二是设计“一张图”可视化展示与智能预警系统,依托安全风险四色图技术,直观呈现矿山安全生产态势,实现了安全风险智能预警;三是建立实时监控与动态闭环管理系统,对矿山生产中的人员、设备等关键要素实时监测,及时处理安全隐患。

(2) 该系统在六安市安徽马钢张庄矿业有限责任公司、安徽开发矿业有限公司李楼铁矿、安徽金安矿业有限公司草楼铁矿等3家矿山企业完成了工程应用与验证。政府监管端通过风险四色图技术实现了矿山风险动态评估,使安全监管效率提升约22%,风险评估准确性达90%以上,事故率降低15%。企业监管端实现了隐患排查治理的全过程闭环管理,事故隐患处理周期平均缩短30.5%,企业安全生产意识增强,生产效率提升。

(3) 本研究确立的“数据融合-风险映射-闭环治理”的通用监管范式,可无缝迁移至其他高风险工业场景,为构建政府-企业协同监管体系提供可复制、可扩展的架构模板。多源异构数据治理、可视化决策方法,对相关领域的安全管控研究具有借鉴意义,为安全监管从案例驱动向机制驱动转型提供了新的实证范式。研究成果不仅为矿山智能监管提供了一种有效的技术实现路径,更对推动行业数字化转型具有重要的参考价值。

参考文献(References):

[1] 鞠建华,韩见,鞠方略.中国智能矿山发展趋势与路径分析[J].中国矿业,2023,32(5):1-7.
Ju Jianhua, Han Jian, Ju Fanglue. Development trend and path analysis of intelligent mines in China[J]. China Mining Magazine,2023,32(5):1-7.

[2] 李鸿一.浅谈矿山安全生产管理体系构建与实践[J].中国设备工程,2024(12):83-86.
Li Hongyi. A brief discussion on the construction and practice of mine safety production management system[J]. China Plant Engineering,2024(12):83-86.

[3] 吴献.我国非煤矿山智能化发展现状及思考[J].中国金属通报,2023(9):4-6.
Wu Xian. Current situation and thoughts on the intelligent development of non-coal mines in China[J]. China Metal Bulletin,2023(9):4-6.

[4] 王江梅,关凯,朱万成,等.多源数据融合的矿山精细化建模方法与虚拟现实平台搭建[J].金属矿山,2025(3):158-167.
Wang Jiangmei, Guan Kai, Zhu Wancheng, et al. Fine modeling method and virtual reality platform construction of mines based on multi-source data fusion[J]. Metal Mine, 2025(3):158-167.

[5] 王福莲.基于多源数据融合的矿山大比例尺地形图测绘方法研究[J].新疆有色金属,2024,47(1):10-11.
Wang Fulian. Research on the mapping method of large-scale mine topographic maps based on multi-source data fusion[J]. Xinjiang Nonferrous Metals,2024,47(1):10-11.

[6] 李江涛.例谈空天地深多源数据融合感知技术在矿山中的应用[J].新疆钢铁,2024(1):104-106.
Li Jiangtao. Example discussion on the application of multi-source data fusion perception technology for space, space, and depth in mines[J]. Xinjiang Iron and Steel,2024(1):104-106.

[7] 陈杉.基于多源数据融合的非煤矿山水害智能监测系统设计与应用研究[C]//中国职业安全健康协会.2023年度中国职业安全健康协会科技大会暨安全科学与安全工程国际会议摘要集.武汉:中国地质大学,2023:12.
Chen Shan. Design and application of non-coal mine water disaster intelligentmonitoring system based on multi-source data fusion[C]//China Occupational Safety and Health Association. Abstracts of the 2023 China Occupational Safety and Health Association Science and Technology Conference and International Conference on Safety Science and Safety Engineering. Wuhan: China University of Geosciences,2023:12.

[8] 吴雪枫.基于“一张图”的泰州市矿产地质信息整合和管理平台研究[D].南京:南京师范大学,2020.
Wu Xuefeng. Research on Taizhou mineral geological information integration and management platform based on the “One Map”[D]. Nanjing:Nanjing Normal University,2020.

[9] 阮洪新,李何,王静文,等.以综合信息管控平台打造智能化矿山“一张图”[J].智能矿山,2023,4(8):73-77.
Ruan Hongxin, Li He, Wang Jingwen, et al. Building “One Map” of intelligent mine with comprehensive information management and control platform[J]. Journal of Intelligent Mine,2023,4(8):73-77.

[10] 李鹏,孙万有.“新版”安全风险四色图的绘制与应用[J].劳动保护,2023(11):60-61.
Li Peng, Sun Wanyou. Drawing and application of “new version” four-color map of security risks [J]. Labour Protection,2023(11):60-61.

[11] 雷咸锐,薛跃强,薛黎明,等.基于云模型的煤矿安全风险四色图动态管控系统研究[J].中国矿业,2024,33(3):76-83.
Lei Xianrui, Xue Yueqiang, Xue Liming, et al. Coal mine safety risk four-color map dynamic management and control system based on cloud model[J]. China Mining Magazine, 2024,33(3):76-83.

[12] 肖自为,马源,李金林,等.基于过程预警模型的矿山边坡监测系统研究与应用[J].地质灾害与环境保护,2024,35(4):91-98.
Xiao Ziwei, Ma Yuan, Li Jinlin, et al. Research and application of mine slope monitoring systembased on process warning model [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation,2024,35(4):91-98.

[13] 程宝军,陈跃朋,张天山.基于GIS一张图与三维空间数据智能化矿山管控系统应用[J].山东煤炭科技,2022,40(5):1-3.
Cheng Baojun, Chen Yuepeng, Zhang Tianshan. Application of intelligent mine management and control system based on GIS one map and three-dimensional spatial data [J]. Shandong Coal Science and Technology,2022,40(5):1-3.

[14] 陈斌锋,许石柱.浅析基于EGIS的森林火灾隐患排查系统构建[J].南方农业,2020,14(15):88-89+93.
Chen Binfeng, Xu Shizhu. Analyses the hidden perils in forest fire system based on EGIS build[J]. South China Agriculture,2020,14(15):88-89+93.

[15] Stalin L J, Gnanaprakasam P C R. Application of unmanned aerial vehicle for mapping and modeling of Indian mines[J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2020, 48 (6):841-852.

[16] 张丹,马红梅.非煤矿山双重预防体系数字化平台研究与应用[J].有色金属工程,2020,10(8):119-123.
Zhang Dan, Ma Hongmei. Research and application of dual prevention system digital platform for non-coal mine[J]. Nonferrous Metals,2020,10(8):119-123.

[17] 王佳斌,李国清,强兴邦,等.基于双重预防体系的矿山安全风险智能分析系统[J].金属矿山,2024(1):99-108.
Wang Jiabin, Li Guoqing, Qiang Xingbang, et al. Intelligent analysis system of mine safety risk based on dual prevention system[J]. Metal Mine,2024(1):99-108.

[18] 董连委.浅谈矿山企业“双重预防体系”建设中问题及对策建议[J].世界有色金属,2021(7):172-173.
Dong Lianwei. Discussion on the problems and countermeasures in the construction of “dual prevention system” in mining enterprises [J]. World Nonferrous Metals,2021(7):172-173.

[19] 仲文君.试析矿用电子信息技术在矿山安全生产中的应用[J].世界有色金属,2024(2):52-54.
Zhong Wenjun. Application of mining electronic information technology in mine safety production[J]. World Nonferrous Metals,2024(2):52-54.

[20] 秦绍鑫,李莹.地理信息系统在政府应急管理中的创新应用研究:以Z市D区应急指挥中心为例[J].中国应急管理科学,2023(1):59-69.
Qin Shaoxin, Li Ying. Research on the innovative application of geographic information system in government emergency management:take the example of the emergency command centre in district D of city Z[J]. Journal of China Emergency Management Science,2023(1):59-69.