

王双明,孙强,吕超,等. 人工智能赋能煤炭减损开采地质保障[J]. 西安科技大学学报,2026,46(2):231-242.
WANG Shuangming, SUN Qiang, LYU Chao, et al. Artificial intelligence-enabled geological guarantee for loss-reduction coal mining [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2026, 46(2): 231-242.

人工智能赋能煤炭减损开采地质保障

王双明^{1,2}, 孙强^{1,2}, 吕超³, 吕文玉³, 潘俊康^{1,2}, 耿济世^{1,2}, 牛超^{1,2}

- 西安科技大学 陕西省煤炭绿色开发地质保障重点实验室, 陕西 西安 710054;
- 西安科技大学 地质与环境学院, 陕西 西安 710054;
- 西安科技大学 能源与矿业工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 煤炭资源是保障国家能源安全的压舱石。西部生态脆弱区的煤炭资源已经成为我国能源开发的主战场,如何在大规模、高强度煤炭开采的同时,切实保护好区域脆弱生态,成为当前减损地质保障面临的重大挑战。当前,人工智能技术的快速发展为协调煤炭资源安全、绿色开采与区域脆弱生态环境保护间的矛盾提供了全新契机。聚焦人工智能赋能煤炭减损开采的目标,系统阐释其地质保障的内涵和实施路径,基于多源数据融合、深度学习、数字孪生等人工智能技术,进行多源地质数据智能解释与自动三维地质建模,实现对全生命周期(采前、采中、采后)地质条件及损害模式的精准识别和预测,构建煤炭开采扰动区多参量演化的地质大数据与智能解译平台,提出减损地质保障工程的优化决策;通过建立“地质-开采-生态”知识图谱,提出规划从采前地质条件评价到采后地质条件再利用的整体思路,结合深度学习方法预测煤矿开采易损区及损害路径,优化开发工艺参数和修复方案,基于数据大模型实现减损开采地质保障全周期智能决策和工程服务。人工智能赋能减损开采地质保障,可助力我国煤炭开采透明、数字化和智能化,促进煤炭工业转型升级。

关键词: 煤炭减损开采;地质保障;人工智能;知识图谱;全周期服务

中图分类号:TD 12

文献标志码:A

文章编号:1672-9315(2026)02-0231-12

DOI:10.13800/j.cnki.xakjdx.2026.0201

Artificial intelligence-enabled geological guarantee for loss-reduction coal mining

WANG Shuangming^{1,2}, SUN Qiang^{1,2}, LYU Chao³, LYU Wenyu³,
PAN Junkang^{1,2}, GENG Jishi^{1,2}, NIU Chao^{1,2}

- Shaanxi Provincial Key Laboratory of Geological Support for Coal Green Exploitation, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;
- College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;
- College of Energy and Mining Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: Coal resources are the cornerstone of national energy security, with those in the ecologically fragile regions of western China emerging as the primary battlefield for China's energy development. How to effectively protect the fragile regional ecology while conducting large-scale and high-intensity

收稿日期:2026-01-05

基金项目:国家自然科学基金项目(42330808,42502170);陕西省博士后科研资助项目(2024BSHSDZZ192)

通信作者:王双明,男,陕西岐山人,中国工程院院士, E-mail: sxmtwsm@163.com

coal mining has become a major challenge for current geological guarantee work to reduce losses. At present, the rapid development of artificial intelligence(AI) provides a brand-new opportunity to reconcile the contradictions among the safe, green mining of coal resources and the protection of the fragile regional ecological environment. Focusing on the goal of AI-enabled coal mining with minimized loss, this paper systematically elucidates the connotation and implementation pathways of its geological guarantee. By leveraging artificial intelligence technologies including multi-source data fusion, deep learning, and digital twins, intelligent interpretation of multi-source geological data and automated three-dimensional geological modeling are conducted, thereby achieving precise identification and prediction of geological conditions and damage patterns across the entire lifecycle(pre-mining, during-mining, post-mining). Geological big-data and intelligent interpretation platforms are constructed for the multi-parameter evolution in coal mining disturbance areas and optimized decisions for loss-reducing geological guarantee projects are also put forward. An overall framework covering geological condition evaluation before mining and subsequent geological condition reuse is proposed, with a knowledge graph of “geology-mining-ecology” established as the theoretical foundation. Vulnerable zones and damage paths in coal mining are predicted via deep learning methods, and corresponding adjustments are made to optimize development process parameters and restoration schemes. Full-cycle intelligent decision-making and engineering services for loss-reducing mining geological support are thus realized through the deployment of a big-data model. Geological guarantee for loss-reducing mining is empowered by artificial intelligence. In this way, the transparency, digitalization and intellectualization of coal mining in China can be facilitated, and the transformation and upgrading of the coal industry can be promoted.

Key words: coal mining with reduced damage; geological guarantee; artificial intelligence; knowledge graph; full-cycle service

0 引言

受我国“缺油、少气、相对富煤”的资源禀赋条件约束,煤炭在能源体系中的主导地位在短期内难以改变^[1-3]。然而,西部煤矿区生态环境脆弱性显著制约了煤炭资源的高效与绿色开发,同时采矿活动引发的地质环境扰动也对矿区生态要素产生了深远影响,煤炭资源开采过程中顶板垮落、围岩失稳、突水灾害、地下水污染等不确定风险因素愈发显著^[4-9],致使煤矿灾害呈现多灾种耦合、链式演化的特征,传统地质保障模式正面临严峻挑战。依赖离散勘察与人工经验的传统方法,难以实现对隐蔽致灾体的精准探查,对采动损害演化缺乏动态预判能力,导致灾害预警滞后、资源回收率低、生态修复粗放等问题日益凸显,已成为制约煤炭工业行业高质量发展的主要瓶颈。在此背景下,实现煤炭资源的安全、高效、绿色与智能化转型,已成为新时期推动煤炭行业高质量发展的核心路径与重要标志^[10]。

煤矿智能化是推动煤炭工业高质量发展的重

要引擎,加强其建设已成为行业普遍共识。近年来,研究者聚焦煤矿生产中地质信息的动态性、多源性需求,转向人工智能方法以突破传统数学分析方法局限^[11-13]。例如,依托钻孔、测井、地震勘探及巷道揭露多源地质工程数据,构建涵盖煤层厚度、岩性参数(孔隙度、强度等)、构造特征(断层、褶皱等)等方面的多维矿井地质信息数据库^[14-15],通过AI算法挖掘数据间非线性关联,为透明矿井建设中地质模型的实时更新与智能决策提供了关键技术支撑^[16-19]。

尽管我国煤炭开发地质保障技术已取得显著进展,但依托人工智能技术构建煤炭减损开采全周期地质保障智能决策和工程服务体系,已成为推动煤炭工业可持续发展、解决国家重大能源安全需求的必然趋势,急需发展人工智能驱动下煤炭减损开采地质保障理论与技术体系。基于此,聚焦人工智能赋能煤炭减损开采的目标,系统阐释其地质保障的科学内涵,梳理人工智能在煤炭开采中的研究趋势,提出人工智能赋能煤炭开采典型实施路径,可为煤炭透明化、数字化与智能化

减损开采提供理论支撑。

1 人工智能在煤炭开采中研究趋势

近年来,煤炭行业的智能化转型日益受到重视。其核心路径是通过机器人替代人工,从根本上规避高危环境下的作业风险;同时,依托机器学习等算法对煤炭开采过程进行精准预测与智能决策,从而构建起更主动、更完善的安全保障体系。综合考虑人工智能在煤炭开采领域的研究现状,通过以人工智能(Artificial Intelligence)与煤矿(Coal Mine)为重点关键词在中国知网(CNKI)进行检索。检索中剔除会议论文、报纸、专利、硕博论文等类型,再根据摘要及具体内容确定文献。检索得到有效文献共969篇,运用CiteSpace文献分析工具进行可视化分析,归纳总结人工智能再煤炭开采领域的发展现状、研究热点和未来趋势。

1.1 年发文量分析

如图1所示,人工智能在煤炭开采领域发表相关文献呈现上升趋势,2015年之前年发表论文量基本保持在0~30篇,2015年后年发文量整体呈现快速上升趋势,2025年发文数较2020年已翻10倍,体现出人工智能在煤炭领域关注度不断提升,研究人员日益增多,目前正处于研究热点阶段。

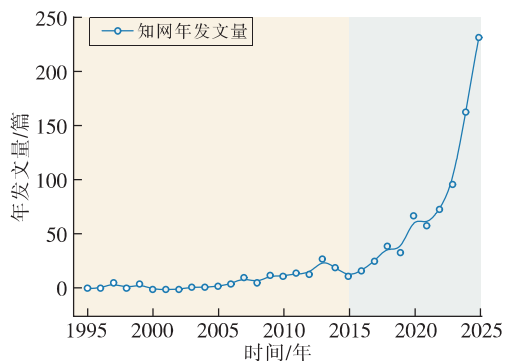


图1 人工智能在煤炭开采领域年发文量
Fig.1 Annual publication volume in the field of artificial intelligence in coal mining

1.2 研究热点分析

1.2.1 关键词共现分析图谱

通过构建关键词共现图谱如图2所示,每个节点代表对应关键词的若干文献,节点尺寸反映关键词出现频率,尺寸越大,主题相关性越强,节点间连线则代表关键词间共现关系^[20]。经CiteSpace处理后关键词频率及中心性统计见表1。

由图2可知,关键词“煤矿”“人工智能”“机器

人”“智能矿山”“智能化”高频出现。“煤矿”作为煤炭行业的核心产业对象,是研究的基础和载体,“人工智能”作为关键技术驱动力结合,是当前的热点主题,“机器人”在危险环境作业、设备巡查方面具有代替人工的巨大潜力,是实现智能化开采的重要手段,“智能化”和“智能矿山”则在一定程度上体现了煤炭行业未来的发展方向和手段,致力于打造高效、安全、智能的矿山开采模式。

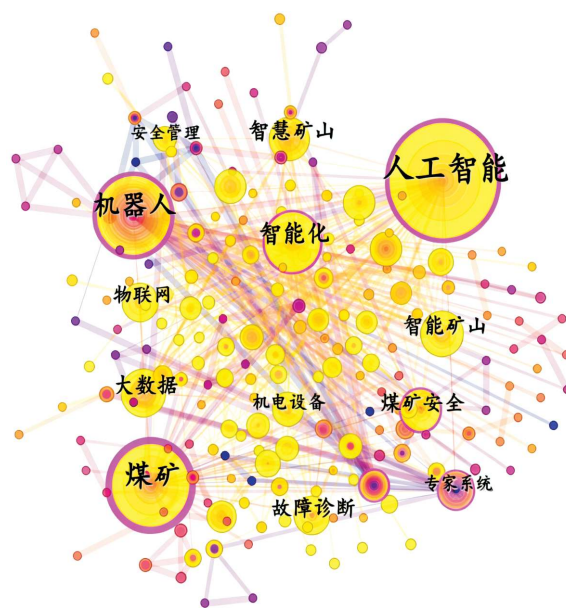


图2 关键词共现图谱

Fig.2 Keyword co-occurrence map

另一方面,由表1可知,从中心性角度分析,“煤矿”中心性较高,表明其在整个研究领域处于关键地位,是众多研究的核心出发点。“人工智能”也较为突出,体现出其在推动煤炭开采技术变革中起着重要的桥梁和纽带作用,以“人工智能”为中心,连接着不同的研究方向和应用场景。“机器人”和“专家系统”虽然频数较低,但是中心性也较为突出,可以成为人工智能在煤炭开采领域的有效切入点。

1.2.2 关键词聚类图谱

在完成关键词共现分析后,依据聚类分析技术绘制出关键词聚类图谱,进而对知识单元进行系统分类,并从中提取出核心标签主题词,以此揭示相关领域的研究前沿^[21]。如图3所示,共识别出7个主要聚类,节点颜色由黄到红为关键词热点热度,红色越深则代表其为主要研究热点,聚类所含关键词数量越多,表示该方向为主流研究方向。

由图3可知,人工智能(#0)的研究目前得到

了重点关注,其聚类单元间的联系丰富多样。其中,人工智能与煤矿安全研究关联密切,体现出人工智能目前是煤炭开采行业主流研究方向,两者的深度融合研究备受关注。煤矿(#2)与机器人(#1)、智能化(#3)、专家系统(#6)、等聚类单元热度高,体现了人工智能技术在煤矿开采中具有广阔的应用前景。

表1 关键词频率及中心性

Table 1 Frequency and centrality of keywords

序号	关键词	中心性	频数	序号	关键词	中心性	频数
1	煤矿	0.46	112	12	数据库	0.04	3
2	人工智能	0.42	153	13	煤矿安全	0.03	16
3	机器人	0.25	75	14	发展趋势	0.03	13
4	专家系统	0.16	20	15	安全管理	0.03	10
5	智能化	0.12	39	16	决策系统	0.03	6
6	智慧矿山	0.09	30	17	物联网	0.02	11
7	智能矿山	0.09	22	18	应用	0.02	10
8	知识库	0.06	3	19	智能控制	0.02	6
9	故障诊断	0.05	24	20	应急救援	0.02	4
10	学习	0.05	4	21	巷道支护	0.02	3
11	大数据	0.04	28	22	预测	0.02	2

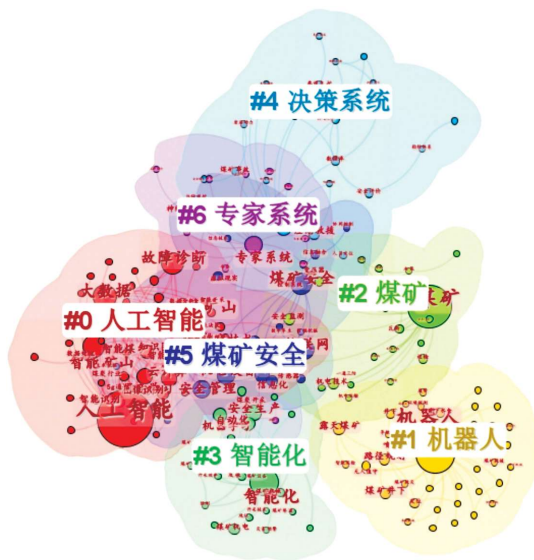


图3 关键词聚类图谱

Fig. 3 Keyword clustering map

2 人工智能赋能煤炭减损开采的地质保障科学内涵

煤炭资源的大规模开采会打破原地层应力平衡,改变地质结构与生态地质条件,诱发煤矿水害、冲击地压、煤与瓦斯突出等地质灾害,制约煤炭工业的可持续发展。借助人工智能技术,可构

建煤炭开发智能地质保障体系与决策平台,为实现煤炭资源安全、清洁、高效开采的关键途径提供地质保障与决策支持。

人工智能赋能煤炭减损开采的地质保障科学内涵在于将人工智能技术与矿井地质工作深度融合,贯穿于煤炭资源勘探、开发至采后利用的全生命周期,旨在从海量、多元、复杂的地质信息中,智能挖掘出最优化的安全生产与绿色开采路径,从而为煤炭资源的安全、智能、绿色开采提供可靠的地质决策支撑与安全保障。该体系由采前地质数据融合分析评价,采中地质条件演化与采动损害智能识别与预警,采后地质环境与生态损伤的智能评价、修复与利用,全生命周期煤炭开采系统智能决策平台4个部分构成。通过多源数据融合与数字孪生等技术,实现对煤炭开采区地质条件动态演化的精准认知、扰动区地质结构的协同保护、灾害的智能预测预警及修复功能的优化决策,系统构建覆盖“勘探-设计-开采-修复”全生命周期的矿山智能决策平台,并依托数据大模型实现减损开采地质保障全周期智能决策和工程服务,系统性提升矿山整体运营的安全、效率和效益水平,为煤炭资源安全、清洁、高效开发提供全周期地质赋能。

3 人工智能赋能煤炭减损开采的地质保障实施路径

3.1 采前地质数据融合分析评价

3.1.1 煤层识别技术

煤层的精准识别与空间定位是煤炭资源开采作业中的关键技术环节,其技术实施效果直接关联开采效率的提升与生产成本的控制。传统技术路径下,煤层识别与定位工作多依赖人工对地质资料的解读与经验分析,普遍存在作业效率偏低、定位精度不足等局限。相比之下,通过人工智能算法进行煤层识别与定位,可以自动化提取与分析煤层地质特征参数,实现对煤层空间位置的快速精准判定,为开采工程的科学开展提供可靠的地质数据支撑^[22-24]。

在煤层识别中采用人工智能方法,可基于机器学习、深度学习与神经网络等智能算法,如决策树、随机森林、支持向量机等经典机器学习算法、卷积神经网络、生成对抗网络等深度学习算法,如图4所示,对已有煤层地质信息进行的分类与提

取,可进行训练与建模,根据需求对煤层进行识别与归类,也可通过调整特征值等因素提高准确率。同时,通过进一步融合矿区周边地质环境基础数据与传感器实时监测数据,实现对目标煤层赋存状态的前瞻性预测与空间精准定位,可在一定程度上预测煤层的位置和厚度,对煤层的识别开采工作具有一定的参考意义。

3.1.2 煤质分析与预测技术

传统煤质检测方法以人工取样与实验室化验为核心手段,受限于操作流程的繁琐性,普遍存在分析周期长、检测结果反馈不及时等瓶颈,难以满足煤炭洗选加工过程中实时调控的技术需求。相

比之下,人工智能依托机器学习算法的强大数据处理能力,可对煤炭的物理化学特性进行高效且高精度的分析,为煤炭资源开发利用全流程提供坚实的数据支撑。如图 5 所示,以支持向量机(SVM)为核心构建的煤质预测模型为例,该模型通过深度挖掘煤炭近红外光谱数据中隐含的特征信息,能够快速完成对煤炭灰分、硫分等关键质量指标的定量预测,相较于传统检测方法,其预测精度得到了显著性提升。若将该模型与在线煤质分析设备有机融合,可进一步实现煤炭关键质量指标参数的实时监测与动态预测,为煤炭洗选工艺参数的自适应调整提供可靠的科学依据。

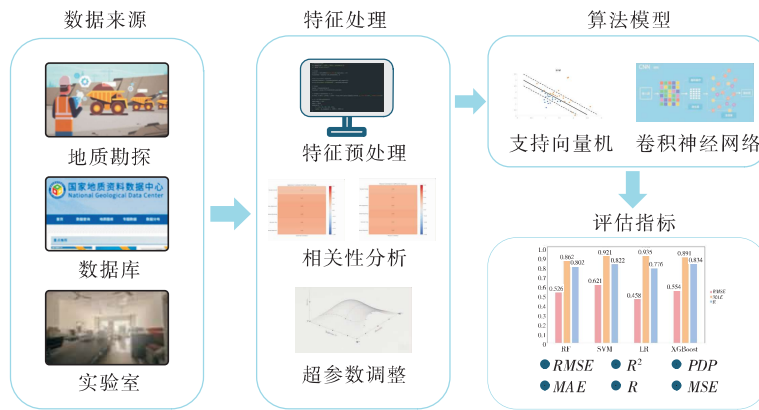


图 4 煤层识别预测示意图

Fig. 4 Schematic diagram of coal seam identification and prediction

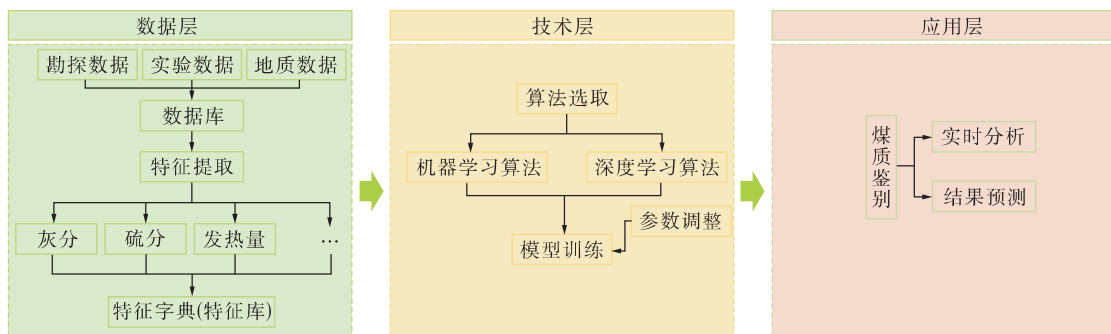


图 5 煤质预测模型技术流程

Fig. 5 Technical process of coal quality prediction model

3.1.3 地质勘探与三维建模

地质勘探旨在整合卫星遥感、地球物理探测、地球化学探测、钻探等精准手段系统采集高保真地质信息,依托人工智能算法能够建立高分辨率、多层次、多尺度的地质数字化模型体系,从而完成对地质构造、巷道工程及生态环境参数的精细化刻画与动态量化表征,为煤炭开发地质条件演化

及灾害防控提供专业化地质信息支撑^[25]。近年来,人工智能技术在地球物理数据处理中取得多方面突破,包括地震图像智能分割、地质结构自动识别、断层自动识别与解释等任务,这些进展不仅提升了地质数据解译的精准度与高效性,更加快了地球物理领域完成向智能化的跨越式发展转型(图 6)^[26-28]。

借助机器学习算法的集成化应用,可达成煤矿资源模型的自动化迭代更新与动态校准,进而实现矿体空间展布形态、品位分异特征及内部构造规律的精准刻画,该方法在资源量估算中可将结果偏差稳定控制在5%范围内,能够为煤矿投资评估与生产方案制定提供高置信度的数据支持。机器学习技术的引入有效拓宽了三维地质建模的数据覆盖维度,改善了因样本不足而引发的模型精度受限难题。另一方面,在建模算法体系中,隐式建模技术对复杂地质结构表现出良好适应性,能够有效表达连续地质界面,减少了人工交互调整的局限性,促进了地质体建模流程向自主化方向演进。

3.2 采中地质条件演化与采动损害智能识别与预警

如图7所示,煤矿开采活动会显著改变开采区域的地质与环境条件,尤其在西北生态脆弱区表现明显,具体涵盖煤层顶板结构及裂隙发育、地下水流失、地表生态环境恶化等方面,这些变化进一步干扰开采扰动区的物质循环、能量转换、信息传递及生态服务功能,致使地质体在多元结构、演化规律、运行机理等层面发生系统性连锁响应^[29-33]。因此,系统揭示煤系地层的地质构造、水文地质特征、岩性组合及地应力等地质条件的综合属性,是剖析煤炭开采地质体响应及采动损害演化过程的基础^[34-37]。

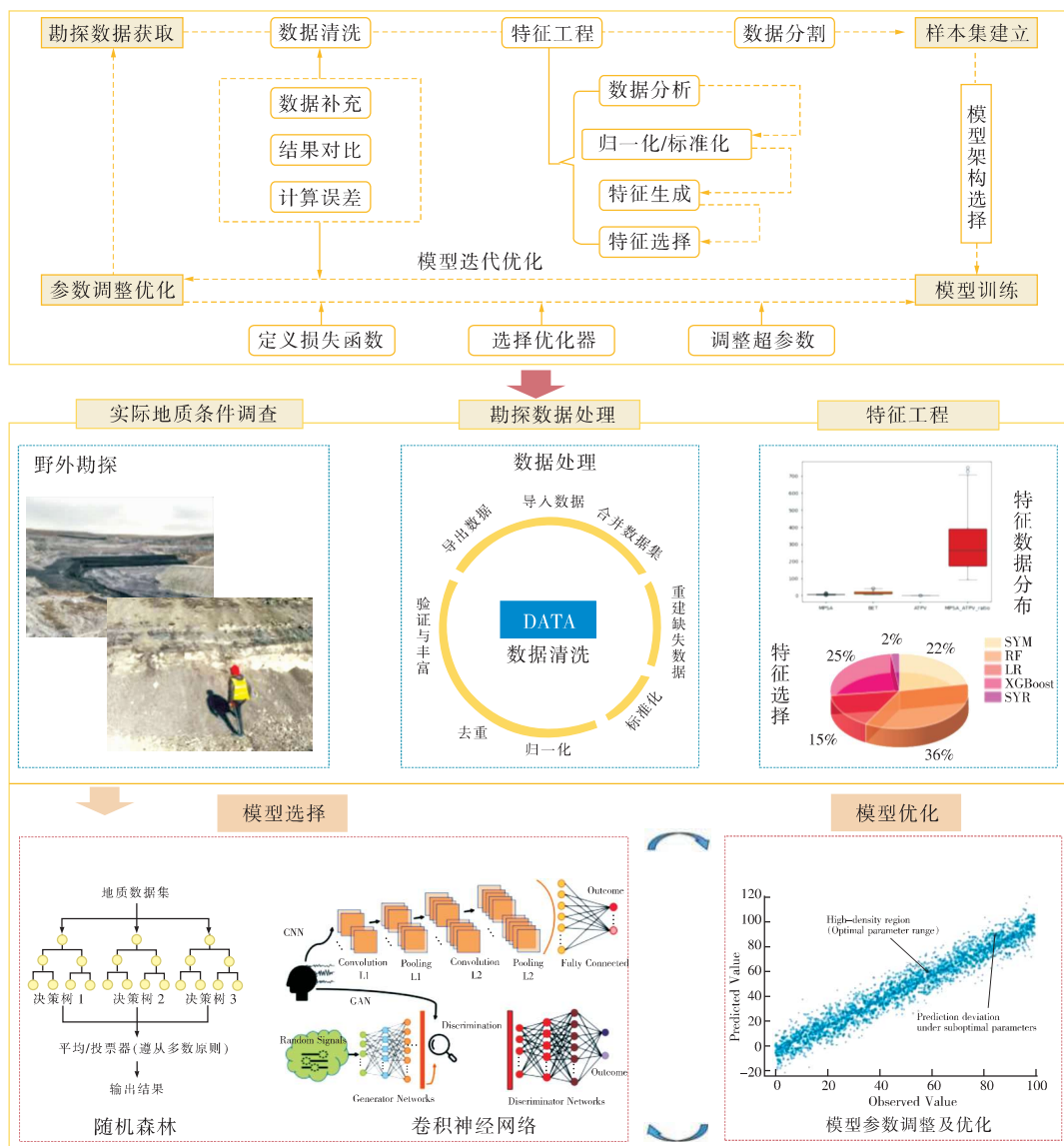


图6 人工智能赋能地质勘探
Fig.6 Artificial intelligence-enabled geological exploration

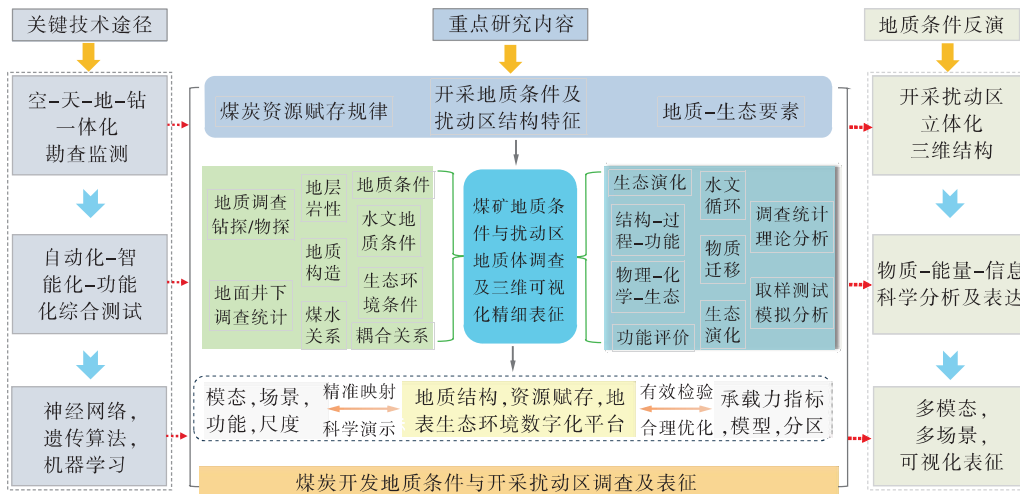


图 7 煤炭开发地质条件演化及可视化表征研究路线

Fig. 7 Research framework for the evolution and visual characterization of geological conditions in coal mining

3.2.1 地质条件演化智能识别与评价

为实现对煤炭开采多源异构数据的高效、精准处理与知识挖掘,需具备强大的计算能力作为支撑。人工智能方法能够集成来自地质勘探、多维度监测、开采模式等多源异构数据,大数据与云计算技术不仅提供高性能计算能力,还可根据数据增长动态调整资源,极大提升了地质数据资源的可利用价值与集约化管理效率,为多源数据的综合处理提供了核心方法支持。同时,结合深度学习、数字孪生等人工智能技术,可实现对资源分布、地质构造与生态环境系统跨尺度、多模态及可视化的综合表征和量化解析。

以“时空信息识别→数据体系构建→动态模型匹配→趋势智能预测”为研究主线(图 8),建立可精准表征煤炭采动扰动区多参量时空演化的大数据平台及其智能解译系统。在此基础上,通过人工智能技术构建融合地质条件采动响应与扰动区功能演化过程的耦合分析模型,实现从动态监测到趋势智能预测的一体化评估。同时,利用人工智能算法挖掘开采扰动区地质结构特征等关键参数,建立基于“时空-属性-关联”的多维参量学习体系,深度解析信息量的低阶与高阶迁移规律,最终构建集成开采扰动区地质条件演化及功能响应的全要素预测模型。

3.2.2 损害智能识别与预警

矿井地质损害特指煤矿井下发生的、与地质条件密切相关的重大灾害,主要包括水害、火灾、瓦斯涌出、煤尘爆炸、顶板冒落及冲击地压等。由于这些灾害的致灾因子潜藏于地质体内,具有隐

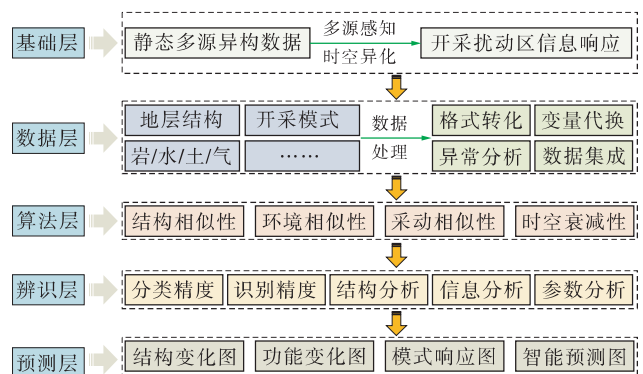


图 8 煤炭开采多源异构数据智能分析

Fig. 8 Framework for intelligent analysis of multi-source heterogeneous data in coal mining

蔽性、突变性和难识别性,因此被界定为矿井隐蔽致灾地质因素^[38]。在新形势下,实现安全开采已成为国家对煤炭资源开发提出的强制性要求。通过智能感知技术与多源信息融合方法,对影响开采安全的多元地质致灾因素进行动态预测与协同预警,是有效防控矿井地质灾害、保障开采活动安全可控的关键技术途径^[39-42]。

以信息自动监测与智能识别技术为核心支撑,通过采用“数据湖+数字孪生”深度融合的技术方法,构建面向煤矿突水、矿井火灾、冲击地压等灾害的人工智能风险量化预警模型,深度融合预警体系与物联网、大数据、人工智能等新一代信息技术,研发煤矿地质灾害智能防控技术,实现矿山全生命周期内地质灾害的动态识别和智能预警(图 9),显著提升矿井安全生产水平,克服传统系统分散、智能化不足与时空分析能力弱等瓶颈。

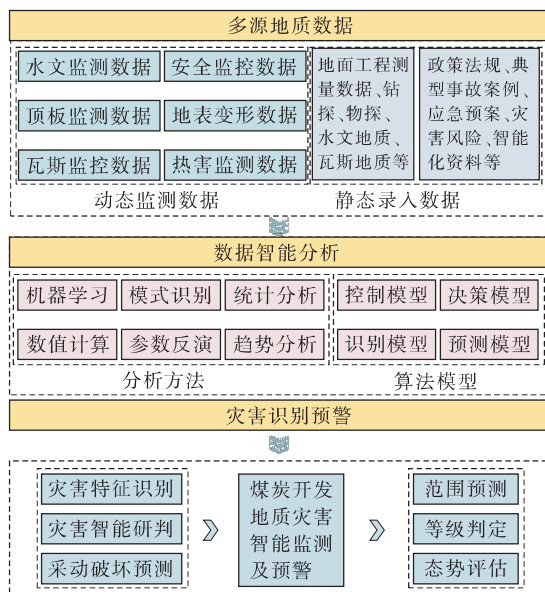


图9 煤炭开采地质灾害智能预警

Fig.9 Intelligent early warning of geological hazards in coal mining

同时,煤矿全生命周期关键过程(采场稳定性、地下水运移等)的数值分析研究是保障生产安全的重要环节,传统方法集成应用 ANSYS、MODFLOW、FLAC3D 等软件,当前人工智能技术驱动下的智能数值模拟已取得重大进展,逐渐形成了物理机制与数据信息深度融合的双驱动范式,能够实现从传统求解到智能模拟的范式跃迁。

3.3 采后地质环境与生态损伤的智能评价、修复与利用

煤炭开采后地质环境与生态损伤智能化评价、修复与利用体系,通过全要素感知、全知识关联、全方案模拟、全过程调控,推动矿区生态修复从粗放向精细、从静态向动态、从工程向生态发展的根本性转变,该体系能为煤炭资源绿色开采与矿区生态协同发展理念提供可评估、可推广和可持续改进的系统性实施路径。

3.3.1 全周期“天-空-地-井”多源异构数据智能感知与融合

构建融合卫星遥感、无人机、物联网及地面调查的立体监测网络,基于人工智能技术对这些多源、多时相、多尺度的异构数据进行自动融合与对齐。例如,利用卷积神经网络对遥感影像进行自动解译,快速识别提取塌陷坑、裂缝、植被、建筑物等要素;通过时空数据融合算法,将低频广域的卫星数据与高频局部的无人机数据结合,生成完整、

精细的时空连续数据集,为后续评价提供基础数据支撑。

3.3.2 大数据知识图谱与深度学习下的损害识别与修复

通过构建“地质-开采-生态”知识图谱,将地层岩性、覆岩破坏规律、水土流失机理、植被演替序列等地质数据转化为结构化的关联网,当输入新增监测数据时,系统可利用深度学习中图神经网络模型或规则推理引擎自动关联相关知识点,精准判定损害区域与范围,深入剖析损害机制以及潜在次生问题演化趋势,进而实现矿区生态损害识别的深度化分析与智能化识别。地质环境与生态损害修复方案的制定是一个涉及生态效益、经济效益、社会效益与工程成本的多目标优化问题,人工智能系统可内嵌多目标优化算法,将多个目标作为优化维度,并结合知识图谱推荐的可行修复技术库,在数字空间中生成具体的虚拟修复方案。

3.3.3 人工智能支持下的关闭矿区剩余资源精细评价及再利用

煤炭开采后智能化评价、修复与利用体系的最终目标是实现关闭矿山空间资源再利用。基于对修复后土地、水体、地质条件及周边社会经济环境的综合数据评价,通过人工智能手段给出科学的关闭矿区再利用规划。例如,结合地形、日照、接入条件等数据,智能优选光伏电站布设区域,并自动进行初步的容量与发电量估算;利用高精度地质模型与地下空间数据,评估废弃井巷改建为压缩空气储能或抽水蓄能电站的可行性与安全性。

3.4 全生命周期煤炭开采系统智能决策平台

集成前述采前、采中、采后3方面核心路径,构建覆盖“勘探-设计-开采-修复”全生命周期的矿山智能决策平台,该平台可划分为基础层、技术层与应用层:基础层负责提供算力和地质数据,涵盖云计算平台、大数据平台、高性能计算模块及通信网络;技术层包含 AI 框架、核心算法库以及时空信息处理引擎;应用层则聚焦透明地质保障、地质条件监测与损害预警等核心业务,系统构建全流程数据治理体系,并依托大模型实现煤炭减损开采地质保障领域智能问答与业务分析等实际场景(图10)。通过调用内嵌 AI 优化算法(如多目标遗传算法、深度强化学习),对仿真结果进行多维度(安全、产量、成本、能耗、回收率)综合评估,开展

开采方案的智能模拟比选、灾害防控的协同调度、资源与能源的全局优化,最终形成“数据采集-智

能分析-决策执行-效果反馈”的闭环智能管控生态,系统性提升矿山整体运营的安全、效率和效益水平。

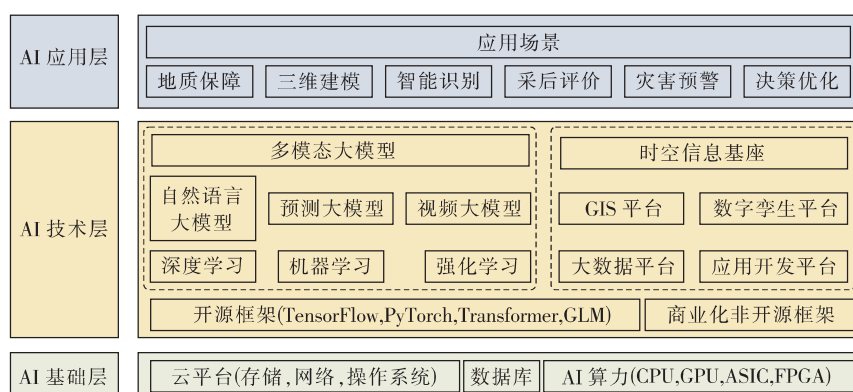


图10 煤炭开采全生命周期智能决策平台框架

Fig. 10 Framework of an intelligent decision-making platform for the whole life cycle of coal mining

4 结论

1) 实现煤炭资源开发的安全、高效、绿色与智能化转型,已成为新时期推动煤炭行业高质量发展的关键路径与重要标志。西部矿区生态环境脆弱性显著制约煤炭资源的高效与绿色开发,采矿活动引发的地质环境扰动将对矿区生态要素产生深远影响,传统地质保障模式正面临严峻挑战。通过梳理人工智能在煤炭开采中的研究趋势,论述人工智能赋能煤炭减损开采地质保障的科学内涵和实施路径,为煤炭开采智能化研究提供了新思路。

2) 人工智能赋能煤炭减损开采的地质保障科学内涵旨在实现对煤炭开采区地质条件动态演化的精准认知、扰动区地质结构的协同保护、损害的智能预测预警及修复功能的优化决策。具体实施路径包括采前地质数据融合分析评价、采中地质条件演化与采动损害智能识别与预警、采后地质环境与生态损伤的智能评价、修复与利用以及全生命周期煤炭开采系统智能决策平台4个部分,为煤炭资源的安全、高效、绿色开发提供全周期地质赋能。

3) 煤炭资源开采前通过人工智能技术自动分析煤层地质特征,快速、准确识别煤层位置,实现地质勘探数据智能解释与自动化三维地质建模,为煤炭开采提供基础地质信息。开采过程中结合深度学习、数字孪生等技术实现对资源分布、地质构造与生态环境系统跨尺度、多模态及可视化的综合表征和量化解析,通过构建“数据湖+数字孪

生”一体化技术架构,实现煤炭开采全生命周期灾害隐患的智能研判与分级预警。开采后通过全要素感知、全知识关联、全方案模拟、全过程调控,实现矿区生态修复从粗放向精细、从静态向动态、从工程向生态发展,系统性提升矿山整体运营的安全、效率和效益水平。

参考文献(References):

- [1] 王双明,孙强,郭晨,等. 新质生产力赋能煤炭地质工作发展[J]. 中国煤炭,2025,51(10):1-16.
WANG Shuangming, SUN Qiang, GUO Chen, et al. The development of coal geology work empowered by new quality productive forces [J]. China Coal, 2025, 51(10):1-16.
- [2] 王双明,师庆民,孙强,等. 富油煤原位热解技术战略价值与科学探索[J]. 煤田地质与勘探,2024,52(7):1-13.
WANG Shuangming, SHI Qingmin, SUN Qiang, et al. Strategic value and scientific exploration of in-situ pyrolysis of tar-rich coals [J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(7):1-13.
- [3] 袁亮. 我国煤炭工业安全科学技术创新与发展[J]. 煤矿安全,2015,46(S1):5-11.
YUAN Liang. Innovation and development of safety science and technology in coal industry of China [J]. Safety in Coal Mines, 2015, 46(S1):5-11.
- [4] 罗香玉,李嘉楠,郎丁. 智慧矿山基本内涵、核心问题与关键技术[J]. 工矿自动化,2019,45(9):61-64.
LUO Xiangyu, LI Jianan, LANG Ding. Basic connotation, core problems and key technologies of wisdom mine [J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(9):61-

- 64.
- [5] 王国法,庞义辉,任怀伟.智慧矿山技术体系研究与
发展路径[J].金属矿山,2022(5):1-9.
WANG Guofa, PANG Yihui, REN Huaiwei. Research
and development path of smart mine technology system
[J]. Metal Mine, 2022(5):1-9.
- [6] 谢克昌.新型能源体系发展背景下煤炭清洁高效转
化的挑战及途径[J].煤炭学报,2024,49(1):47-56.
XIE Kechang. Develop new energy system and promote
clean and efficient conversion of coal [J]. Journal of
China Coal Society, 2024, 49(1):47-56.
- [7] 王双明,孙强,胡鑫,等.煤炭开采地质体复合损害与
减损保障[J].煤田地质与勘探,2025,53(1):1-11.
WANG Shuangming, SUN Qiang, HU Xin, et al. Coal
mining-induced composite damage to geological bodies
and geological guarantee against damage reduction [J].
Coal Geology & Exploration, 2025, 53(1):1-11.
- [8] 王双明,孙强,耿济世,等.西部矿区采动损害及减损
开采的地质保障技术框架体系[J].煤田地质与勘
探,2024,52(9):1-13.
WANG Shuangming, SUN Qiang, GENG Jishi, et al. Ge-
ological support technology framework system for mining
induced hazards and damage reduction mining of geolog-
ical conditions in western mining area [J]. Coal Geology
& Exploration, 2024, 52(9):1-13.
- [9] 吕超,吕文玉,孙强,等.“双碳”目标下煤矿地下空间
响应式增强型储热充填系统理论与技术探索[J].煤
炭科学技术,2025,53(4):104-113.
LYU Chao, LYU Wenyu, SUN Qiang, et al. Theoretical
and technical concept of cemented backfill material for
flexible enhanced thermal energy storage in coal under-
ground space [J]. Coal Science and Technology, 2025,
53(4):104-113.
- [10] 王国法,巩师鑫,申凯.煤矿智能管控技术体系与高
质量发展对策[J].矿业安全与环保,2023,50(5):
1-8.
WANG Guofa, GONG Shixin, SHEN Kai. Intelligent se-
curity control technology system and high-quality devel-
opment countermeasures for coal mines [J]. Mining
Safety & Environmental Protection, 2023, 50(5):1-8.
- [11] 彭苏萍.我国煤矿安全高效开采地质保障系统研究
现状及展望[J].煤炭学报,2020,45(7):2331-2345.
PENG Suping. Current status and prospects of research
on geological assurance system for coal mine safe and
high efficient mining [J]. Journal of China Coal Society,
2020, 45(7):2331-2345.
- [12] 刘峰,郭林峰,张建明,等.煤炭工业数字智能绿色三
化协同模式与新质生产力建设路径[J].煤炭学报,
2024,49(1):1-15.
LIU Feng, GUO Linfeng, ZHANG Jianming, et al. Syner-
gistic mode of digitalization-intelligentization-greeniation
of the coal industry and it's path of building new coal
productivity [J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49
(1):1-15.
- [13] 董书宁,刘再斌,程建远,等.煤炭智能开采地质保障
技术及展望[J].煤田地质与勘探,2021,49(1):21-
31.
DONG Shuning, LIU Zaibin, CHENG Jianyuan, et al.
Technologies and prospect of geological guarantee for in-
telligent coal mining [J]. Coal Geology & Exploration,
2021, 49(1):21-31.
- [14] 李莎莎.基于人工智能的煤矿多源数据处理与决策
支持系统[J].工矿自动化,2024,50(S2):89-92.
LI Shasha. Multi-source data processing and decision
support system for coal mine based on artificial intelli-
gence [J]. Journal of Mine Automation, 2024, 50(S2):
89-92.
- [15] 戴春雷.我国矿山智能化研究进展及大模型应用前
景[J].工矿自动化,2024,50(S2):1-11,22.
DAI Chunlei. Progress of intelligent mine research and
the prospects for minelarge model applications in China
[J]. Journal of Mine Automation, 2024, 50(S2):1-11,
22.
- [16] 来兴平,万培烽,单鹏飞,等.基于免疫粒子群混合算
法优化BP网络的矿压预测方法[J].西安科技大
学学报,2023,43(1):1-8.
LAI Xingping, WAN Peifeng, SHAN Pengfei, et al. Mine
pressure prediction method based on immune algorithm-
particle swarm optimization BP network [J]. Journal of
Xi'an University of Science and Technology, 2023, 43
(1):1-8.
- [17] 窦林名,王盛川,巩思园,等.冲击矿压风险智能判识
与监测预警云平台[J].煤炭学报,2020,45(6):2248
-2255.
DOU Linming, WANG Shengchuan, GONG Siyuan, et
al. Cloud platform of rock-burst intelligent risk assess-
ment and multi-parameter monitoring and early warning
[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6):2248
-2255.
- [18] 宁小亮.基于多源信息融合的煤与瓦斯突出动态预
警模型[J].矿业安全与环保,2020,47(3):1-5,16.
NING Xiaoliang. Dynamic early warning model of coal
and gas outburst based on multi-source information fu-
sion [J]. Mining Safety & Environmental Protection,
2020, 47(3):1-5,16.
- [19] 乔伟,靳德武,王皓,等.基于云服务的煤矿水害监测

- 大数据智能预警平台构建[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2619-2627.
- QIAO Wei, JIN Dewu, WANG Hao, et al. Development of big data intelligent early warning platform for coal mine water hazard monitoring based on cloud service [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2619-2627.
- [20] 武凤文, 陈明远. 基于 CiteSpace 的国外公共空间活力近十五年研究热点趋势及借鉴研究[J]. 城市发展研究, 2021, 28(8): 6-12.
- WU Fengwen, CHEN Mingyuan. Research hotspots and trends in the vitality of public spaces abroad over the past fifteen years based on CiteSpace and their implications[J]. Urban Development Studies, 2021, 28(8): 6-12.
- [21] 陈悦, 陈超美, 刘则渊, 等. CiteSpace 知识图谱的方法论功能[J]. 科学学研究, 2015, 33(2): 242-253.
- CHEN Yue, CHEN Chaomei, LIU Zeyuan, et al. Methodological functions of CiteSpace knowledge mapping[J]. Studies in Science of Science, 2015, 33(2): 242-253.
- [22] 付翔, 秦一凡, 李浩杰, 等. 新一代智能煤矿人工智能赋能技术研究综述[J]. 工矿自动化, 2023, 49(9): 122-131, 139.
- FU Xiang, QIN Yifan, LI Haojie, et al. Summary of research on artificial intelligence empowerment technology for new generation intelligent coal mine[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(9): 122-131, 139.
- [23] 刘再斌, 刘程, 刘文明, 等. 透明工作面多属性动态建模技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2628-2635.
- LIU Zaibin, LIU Cheng, LIU Wenming, et al. Multi-attribute dynamic modeling technique for transparent working face[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2628-2635.
- [24] 刘万里, 张学亮, 王世博. 采煤工作面煤层三维模型构建及动态修正技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(6): 1973-1983.
- LIU Wanli, ZHANG Xueliang, WANG Shibo. Modeling and dynamic correction technology of 3D coal seam model for coal-mining face[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 1973-1983.
- [25] 李梅, 张鹏鹏, 李元琛. AI 赋能智能矿山: 应用场景及未来展望[J]. 煤炭经济研究, 2025, 45(2): 161-169.
- LI Mei, ZHANG Pengpeng, LI Yuanchen. AI + intelligent mines: Application scenarios and future prospects [J]. Coal Economic Research, 2025, 45(2): 161-169.
- [26] MA L, HAN L, FENG Q. Deep learning for high-resolution seismic imaging[J]. Scientific Reports, 2024, 14: 10319.
- [27] FERNANDES G L, FIGUEIREDO F, HATUSHIKA R S, et al. A systematic review of deep learning for structural geological interpretation [J/OL]. Data Mining and Knowledge Discovery, 2025, 39:3. <https://doi.org/10.1007/s10618-024-01079-y>.
- [28] YU A, DU H W, MA S T, et al. Current state and future directions for deep learning based automatic seismic fault interpretation: A systematic review [J]. Earth-Science Reviews, 2023, 243: 104509.
- [29] 王双明, 孙强, 胡鑫, 等. 煤炭原位开发地质保障[J]. 西安科技大学学报, 2024, 44(1): 1-11.
- WANG Shuangming, SUN Qiang, HU Xin, et al. Geological guarantee for in-situ development of coal[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2024, 44(1): 1-11.
- [30] 王双明, 孙强, 谷超, 等. 煤炭开发推动地学研究发展[J]. 中国煤炭, 2024, 50(1): 2-8.
- WANG Shuangming, SUN Qiang, GU Chao, et al. The development of geoscientific research promoted by coal exploitation[J]. China Coal, 2024, 50(1): 2-8.
- [31] 王双明, 耿济世, 李鹏飞, 等. 煤炭绿色开发地质保障体系的构建[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(1): 33-43.
- WANG Shuangming, GENG Jishi, LI Pengfei, et al. Construction of geological guarantee system for green coal mining[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(1): 33-43.
- [32] 王双明, 孙强, 乔军伟, 等. 论煤炭绿色开采的地质保障[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 8-15.
- WANG Shuangming, SUN Qiang, QIAO Junwei, et al. Geological guarantee of coal green mining[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 8-15.
- [33] 王双明, 孙强, 耿济世, 等. 煤炭开采地球关键带响应及减损开采技术体系[J]. 中国地质, 2025, 52(1): 1-21.
- WANG Shuangming, SUN Qiang, GENG Jishi, et al. Geological support for response and damage reduction in the Earth's critical zone under coal mining[J]. Geology in China, 2025, 52(1): 1-21.
- [34] 王双明, 耿济世, 孙强, 等. 黄河流域中上游地区碳基资源协调开发减损地质保障[J]. 中国矿业大学学报, 2025, 54(6): 1181-1193.
- WANG Shuangming, GENG Jishi, SUN Qiang, et al. Geological support for coordinated exploitation and damage reduction of carbon-based resources in the middle and upper reaches of the Yellow River basin[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025, 54(6): 1181-1193.

- [35] 王双明,李识博,孙强,等.论“碳、水、环”约束下的煤炭减损开采地质保障[J].西安科技大学学报,2025,45(1):1-11.
WANG Shuangming,LI Shibo,SUN Qiang,et al. Geological guarantee for coal damage reduction mining under the restriction of “Carbon-Water-Environment” [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2025,45(1):1-11.
- [36] 王双明,孙强,李识博,等.论煤炭开采多圈层响应与减损保障[J].煤田地质与勘探,2025,53(10):1-11.
WANG Shuangming,SUN Qiang,LI Shibo,et al. Composite damage and loss reduction guarantee of geological bodies in coal mining[J]. Coal Geology & Exploration, 2025,53(10):1-11.
- [37] 王双明,孙强,袁士豪,等.论煤-水-土多资源协调开发[J].西北地质,2024,57(5):1-10.
WANG Shuangming,SUN Qiang,YUAN Shihao,et al. On the coordinated development of coal-water-soil multiple resources[J]. Northwestern Geology,2024,57(5):1-10.
- [38] 夏玉成,王锐,马丽.矿井地质灾害要素与地质灾源体辨识评价[J].中国煤炭地质,2019,31(2):51-55.
XIA Yucheng,WANG Rui,MA Li. Coalmine geological hazard elements and geological disaster source bodies identification assessment [J]. Coal Geology of China, 2019,31(2):51-55.
- [39] 丁震,李浩荡,张庆华.煤矿灾害智能预警架构及关键技术研究[J].工矿自动化,2023,49(4):15-22.
DING Zhen,LI Haodang,ZHANG Qinghua. Research on intelligent hazard early warning architecture and key technologies for coal mine[J]. Journal of Mine Automation,2023,49(4):15-22.
- [40] 张冬,王子伟,李强,等.近直立特厚煤层群综放开采灾害智能预警技术研究[J].能源与环保,2025,47(8):22-29.
ZHANG Dong,WANG Ziwei,LI Qiang,et al. Research on intelligent early warning technology of fully-mechanized caving mining disaster in near vertical extra-thick coal seam group [J]. China Energy and Environmental Protection,2025,47(8):22-29.
- [41] 杨希培,高家奎,贺福权.五虎山煤矿灾害智能监测预警平台研发及应用[J].山东煤炭科技,2025,43(1):144-147,152.
YANG Xipei,GAO Jiakui,HE Fuquan. Research and development and application of disaster intelligent monitoring and early warning platform in Wuhushan Coal Mine [J]. Shandong Coal Science and Technology, 2025,43(1):144-147,152.
- [42] 毛善君,刘孝孔,雷小锋,等.智能矿井安全生产大数据集成分析平台及其应用[J].煤炭科学技术,2018,46(12):169-176.
MAO Shanjun,LIU Xiaokong,LEI Xiaofeng,et al. Research and application on big data integration analysis platform for intelligent mine safety production[J]. Coal Science and Technology,2018,46(12):169-176.

(责任编辑:刘洁)