

文章编号: 1004-4051(2025)02-0139-10

DOI: 10.12075/j.issn.1004-4051.20250065

基于知识图谱的铁矿石安全风险研究进展与未来方向

郑佳莹¹, 王永志^{1,2}, 代涛³, 董宇浩²

(1. 吉林大学地球探测科学与技术学院, 吉林 长春 130061; 2. 吉林大学综合信息矿产预测研究所, 吉林 长春 130061; 3. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

摘要: 铁矿石是钢铁生产的基础原料, 对社会的持续发展意义重大。我国铁矿石储量虽然可观, 但矿石品位较低, 贫矿多而富矿少。随着经济的发展和开采技术的进步, 我国铁矿石开采量逐渐增加, 但我国对铁矿石的进口依赖度仍然较高。此外, 矿山开采过程中引发了诸多安全问题与环境问题, 这使得铁矿石资源的供应安全面临严峻挑战。为了全面系统地研究铁矿石安全风险领域的研究现状、热点与前沿等, 本文收集了 2024 年 10 月前中国知网 (CNKI) 数据库的中文文献 602 篇与 Web of Science (WoS) 数据库的英文文献 626 篇, 采用知识图谱对合作者、研究国家与机构、关键词聚类及时空分布等进行可视化分析。研究结果表明, 铁矿石安全风险相关领域的全球发文量持续增加, 中国在研究成果上占据优势, 但与国外机构的合作相对较少。铁矿石开发和综合利用一直是研究重点。近年研究热点集中于铁矿开采过程中的安全风险评估、环境污染治理、资源综合利用和国家资源安全等。这些热点反映了该领域对铁矿石开发过程中安全、环境与资源合理利用的高度重视。研究前沿围绕智能化、绿色化和可持续发展, 包括智能化矿山安全管理、绿色矿山开发和矿区环境修复、低碳可持续发展等。未来研究应着重于标准体系、智能化技术等对铁矿石安全风险研究中的深度应用, 实现对铁矿安全风险的实时监测、精准预测和智能决策。

关键词: 铁矿石; 资源安全; 安全风险; 综合利用; 知识图谱

中图分类号: TD-9 文献标识码: A

Research progress and future direction for iron ore security risk based on knowledge graph

ZHENG Jiaying¹, WANG Yongzhi^{1,2}, DAI Tao³, DONG Yuhao²

(1. College of Geoexploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130061, China;

2. Institute of Integrated Information for Mineral Resources Prediction, Jilin University, Changchun 130061, China;

3. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: Iron ore plays a critical role in society's sustainable development as a fundamental material. Although China possesses substantial iron ore reserves, it faces significant challenges, including low ore grades, a predominance of low-quality ores, and a scarcity of high-quality ores. With the development of the economy and the progress of mining technology, the extraction volume of iron ore in China has

收稿日期: 2025-01-10 责任编辑: 聂虹

基金项目: 国家重点研发计划项目课题“全球战略性矿产大数据平台和预警与决策支持技术”资助(编号: 2021YFC2901801)

第一作者简介: 郑佳莹(2004—), 女, 主要从事地学时空大数据智能分析研究, E-mail: zhengjy2422@jlu.edu.cn。

通讯作者简介: 王永志(1974—), 男, 博士, 教授, 主要从事地球科学大数据分析、矿产资源智能预测等理论与应用研究, E-mail: wangyongzhi@jlu.edu.cn。

引用格式: 郑佳莹, 王永志, 代涛, 等. 基于知识图谱的铁矿石安全风险研究进展与未来方向[J]. 中国矿业, 2025, 34(2): 139-148.

ZHENG Jiaying, WANG Yongzhi, DAI Tao, et al. Research progress and future direction for iron ore security risk based on knowledge graph[J]. China Mining Magazine, 2025, 34(2): 139-148.

gradually increased. However, China's dependence on iron ore imports remains relatively high. Moreover, the mining process has also triggered a number of safety and environmental issues, which poses a serious challenge to the supply security of iron ore resources. In this context, 602 Chinese and 626 English papers from the core journals of the China Knowledge Network(CNKI) and Web of Science(WoS) databases are collected to analyze the research status, hotspots, and frontiers in the field of iron ore safety risks up to 2024. Knowledge graph is employed to examine collaborators, research countries and institutions, keyword clustering, and spatial and temporal distribution. The results reveal a continuous global increase in publications on iron ore safety risks, with China leading in research achievements. However, international collaboration between other countries and China remains limited. The development and comprehensive utilization of iron ore have always been a research focus. In recent years, research hotspots have been concentrated on safety risk assessment during the mining process, environmental pollution control, comprehensive utilization of resources, and national resource security. These trends reflect the field's prioritization of safety, environmental protection, and the rational use of resources in iron ore development. The research frontiers emphasize intelligent, green, and sustainable development, including intelligent mine safety management systems, green mine development, mine environmental restoration, and low-carbon sustainable practices. Future research should prioritize establishing assessment methodologies and standard systems tailored to the geological conditions, mining techniques, and environmental factors of specific mines. Additionally, integrating intelligent technologies into safety risk assessments should be deepened to enable real-time monitoring, precise prediction, and intelligent decision-making for iron ore safety risks.

Keywords: iron ore; resource security; safety risk; comprehensive utilization; knowledge graph

0 引言

铁矿石作为钢铁生产的基础原料,对社会的持续发展至关重要。中国已探明的铁矿石储量达853亿t,居世界第四位。随着中国经济的快速发展,对铁矿石的需求不断增加,但国内矿石品位低、贫矿多富矿少、共伴生组分复杂、小型矿床多而大型矿床少等问题导致铁矿石大量依赖进口^[1-3]。2023年,铁矿石进口量达到11.8亿t。此外,全球竞争和国家间经济利益的博弈导致矿产资源进口不稳定性增加,铁矿石进口易受波及,我国铁矿石供应安全面临巨大挑战^[4-6]。为解决铁矿石资源供应问题,国家需加大铁矿开发力度,同时也必须兼顾矿山安全、环境污染(重金属、粉尘、水资源等)等问题。

目前,多数研究主要利用模糊综合分析法^[7]、层次分析法和熵权法^[8]等分析铁矿石资源安全风险^[9-10];研究铁矿采空区地表整体或局部塌陷的机制与变形规律,以保证铁矿石生产安全^[11]。在铁矿时空大数据勘查分析^[12]、基于机器学习的铁多金属矿精细成矿预测^[13]、铁矿资源潜力地质建模^[14]、构建大算力的数据平台^[15]、基于深度学习的矿产资源及能源利用智能分析与质量监控^[16-17],以及铁矿石开发利用过程中引起的环境污染问题及应对措施等方面,已取得较好进展^[18]。

虽然铁矿石安全风险研究得到了重视,但多数研究重点关注铁矿石安全风险的某一方面(如资源安全风险评估、生产安全分析或环境污染治理等),

特别是国内外研究机构、学者等随着时间推移,对铁矿石安全风险研究的关注点、采用技术、合作情况、热点、发展趋势等不断演化,难以对铁矿石安全风险进行系统化考量。若综合考虑以上因素并全面深入研究,将有利于从宏观到微观的多层次视角把握中长期和短期的铁矿石安全风险变化,对保障我国铁矿石资源安全供应、国家未来发展规划、决策布局等产生重要作用。铁矿石安全风险研究涉及多个不同学科,全球参与研究的机构/团队多、方向差异较大,研究主题覆盖产业链长、范围广,短期内难以阅读全部相关文献并理解所有内容。知识图谱是一种专门分析多种信息之间关联性的有效工具^[19],其直观可视化形式的展示、分析与推理等能力可破解以上困难与挑战。知识图谱是一种实体-关系-实体的三元组,其通过重点分析、挖掘实体与实体间关系,直观可视地展现领域知识的发展进程和研究热点^[20]。发挥大数据^[21-22]、知识图谱等在跨领域知识演化等方面优势,知识图谱可视分析工具可适用于铁矿资源、生产、安全^[23]、产业融合等方面研究^[24-25]。

为了研究铁矿石安全风险领域的研究现状与未来发展方向,以CNKI数据库和WoS数据库中与此领域密切相关的代表性文献作为数据源,采用CiteSpace作为知识图谱可视化定量分析工具,分析国内外研究机构/团体、学者等在铁矿石安全风险方面的研究现状及合作关系等,把握全球铁矿石安全风

险领域的发展状况,填补了该领域缺乏系统性梳理的空白。经综合性对比分析,识别出该领域的当前关注热点及未来研究方向,为提升铁矿石在资源、开采、环境及未来研究投入等方面提供定量化的科学依据。

1 数据处理

1.1 数据来源

以主题搜索 CNKI 数据库和 WoS 数据库中 1990 年至 2024 年 10 月发表的文献为数据源。中文关键词为“铁矿资源安全、铁矿石安全风险、铁矿开发利用、铁矿资源安全、铁矿资源产业、铁矿生产”,英文关键词为“iron ore safety risk, iron ore development and utilization, iron ore resource safety, iron ore resource industry, iron ore production”;中文搜索领域聚焦“矿产资源、矿业工程、安全评价、生态环境、安全科学与灾害防治、工业经济”,英文搜索领域聚焦“mineral resources, mining engineering, safety assessment, ecological environment, safety science and disaster prevention, industrial economy”。经收集并预处理后用于铁矿石安全风险研究的代表性学术文献包括 CNKI 数据库的 602 篇文献(含 SCI、EI、北大核心期刊、WJCI、CSCD)和 WoS 数据库(核心合集)的 626 篇文献。

1.2 数据处理

将 CNKI 数据库和 WoS 数据库中检索的文献以文本和参考文献格式存储,以年作为一个单独的时间切片。选择国家(Country)、作者(Author)、机构(Institution)和关键词(Keywords)等作为节点类型进行可视化分析,分别构建各类知识图谱,研究重要节点及定量关系,挖掘并反映更深层次的信息。

2 结果分析

2.1 发文量分析

CNKI 数据库与 WoS 数据库中关于铁矿石安全风险领域文章数量随时间的变化趋势,可体现该研

究领域国内外发展进程(图 1)。WoS 发文数据始于 1999 年,而 CNKI 数据始于 1992 年。1992—2010 年,国内该领域发展迅速且整体呈上升趋势,CNKI 的年发文量均不低于 10 篇且在 2010 年达到 38 篇的峰值。但在同一时段内,WoS 年发文量一直低于 10 篇。2010—2017 年间,CNKI 年发文量急剧减少。2017 年,CNKI 年发文量降至 10 篇,而此时 WoS 年发文量达到 16 篇,首次超过 CNKI。此后七年,WoS 年发文量迅速增长并于 2024 年达到 59 篇,反映该领域在国际上越来越受重视。CNKI 年发文量持续减少并于 2024 年降至 9 篇,与 2010 年峰值 38 篇相比,表明国内在该领域的研究动力可能有所减弱。

虽然中国在铁矿石安全风险领域的研究一度处于领先地位,但近年来国际科研社区在该领域的活跃度和发文量已超过中国。这一现象不仅突显了铁矿石安全风险议题在全球范围内受到持续关注,也反映了国际科研合作在应对国际问题中扮演着重要的角色。研究热点由国内向国际转变可能源于在世界经济高速发展中,全球对铁矿石安全重要性认识的提高,以及国际科研合作在解决全球性问题中发挥关键作用。同时,提示中国学者应加强国际合作,提升研究质量和创新能力,以维持在该领域的国际竞争力和影响力。

2.2 研究现状分析

2.2.1 国家合作分析

图 2 为国家及地区发文量及合作网络图谱。图 2 中合作网络揭示了全球不同国家及地区在铁矿石安全领域研究合作情况(由深至浅的颜色变化体现了研究活动从近到远的时序)。中国与日本、印度、巴西、美国、英国和加拿大等多个国家建立了合作关系,构成了以中国为核心的研究网络。中国发文量达到 236 篇,明显高于居第二位的印度(56 篇)和第

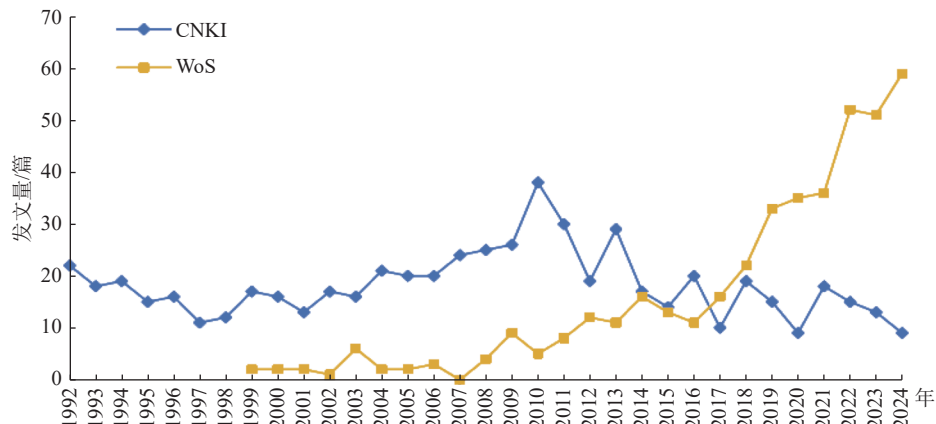


图 1 WoS 和 CNKI 发文量变化

Fig. 1 Tendency of WoS and CNKI publication numbers

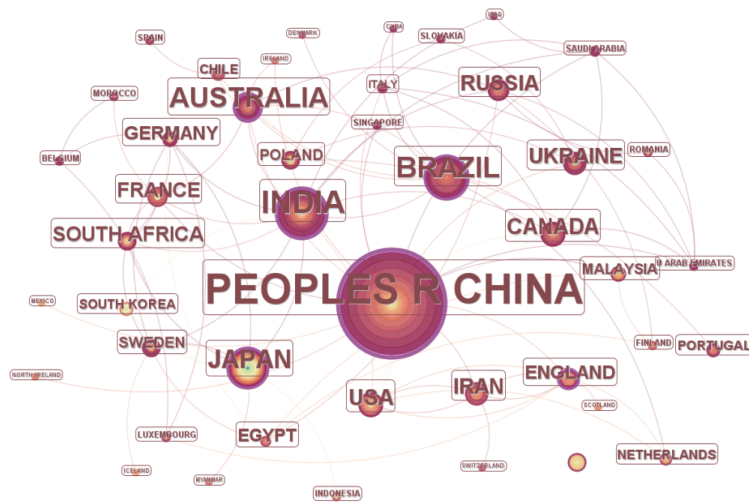


图 2 国家及地区发文量及合作网络图谱

Fig. 2 Publication number and collaboration network of nation and region

三位的巴西(38篇)。尽管日本、韩国等国家在铁矿石安全风险研究领域起步较早(较大绿色区域和黄色区域),但远不及中国的研究成果和合作网络的扩张,而且日本近期在该领域的研究活动和合作较为有限。近年中国在该领域处于领导地位的核心原因是中国铁矿石消费强劲、产业链完备、国家重视且资源安全意识强,同时,巴西、印度等是中国铁矿石的重要资源供应国,故与我国在铁矿石安全风险研究的国际合作较多。随着中国经济的迅速发展和日本经济的疲软,对铁矿石需求的变化导致相关领域研究重心演变并体现出当前特征。

2.2.2 发文机构分析

1) 国际发文机构分析。分析发文机构有助于理解铁矿石安全风险领域不同机构的研究重点,为交流合作提供指导^[26]。图 3 为 WoS 研究机构合作的网络图谱,揭示了东北大学、北京科技大学、中南大学,

以及国际机构,如 Indian Institute of Technology System (IIT System) 和 Council of Scientific & Industrial Research (CSIR)-India 等在此领域的主导地位。WoS 发文量第一位是 Northeastern University-China(49 篇),其次是 University of Science & Technology Beijing(24 篇)、Central South University(20 篇),后面的 7 位依次是 Indian Institute of Technology System(IIT System)(18 篇)、Council of Scientific & Industrial Research(CSIR)-India(15 篇)、China University of Geosciences(13 篇)、Ministry of Education & Science of Ukraine(12 篇)、Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation(10 篇)、Indian Institute of Technology(Indian School of Mines) Dhanbad(10 篇)、Chinese Academy of Sciences(10 篇)。

图 3 为 WoS 研究机构合作网络图谱。由图 3 可知,三个明显的聚簇:左侧由 Indian Institute of Technology System(IIT System)领衔的国外合作研究

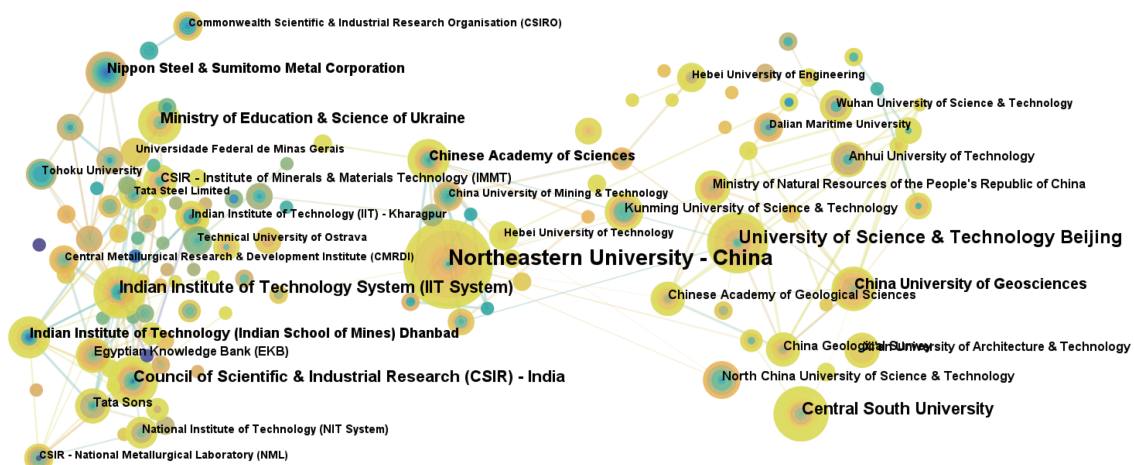


图 3 WoS 研究机构合作网络图谱

Fig. 3 Collaboration network of WoS research institutions

机构; 右侧集中了以北京科技大学和中国地质大学为核心的国内合作研究机构。东北大学等研究机构位于国际合作的核心位置且与国内外研究机构均有合作, 其他国内单位与国际其他组织联系较少。此分布清晰地揭示了国内多数研究机构在铁矿石安全风险研究领域的国际合作不强, 仅有东北大学、中国科学院等少数机构活跃于国际平台。与此同时, 国外研究机构体现出较高的跨国合作活跃度。产生此

现象的原因可能是中国科研机构研究受国家政策及布局影响较大。建议促进国际学术交流与合作, 以实现全球铁矿石安全风险知识共享和合作研究。

2) 国内发文机构分析。图 4 展示了 CNKI 研究机构合作网络图谱(由蓝色渐变至红色反映发表时间由远到近)。早期该领域机构间连线较少, 多为独立发文、互相联系较松散; 近几年机构间连线增多且复杂化, 显示机构间的相互合作更紧密。

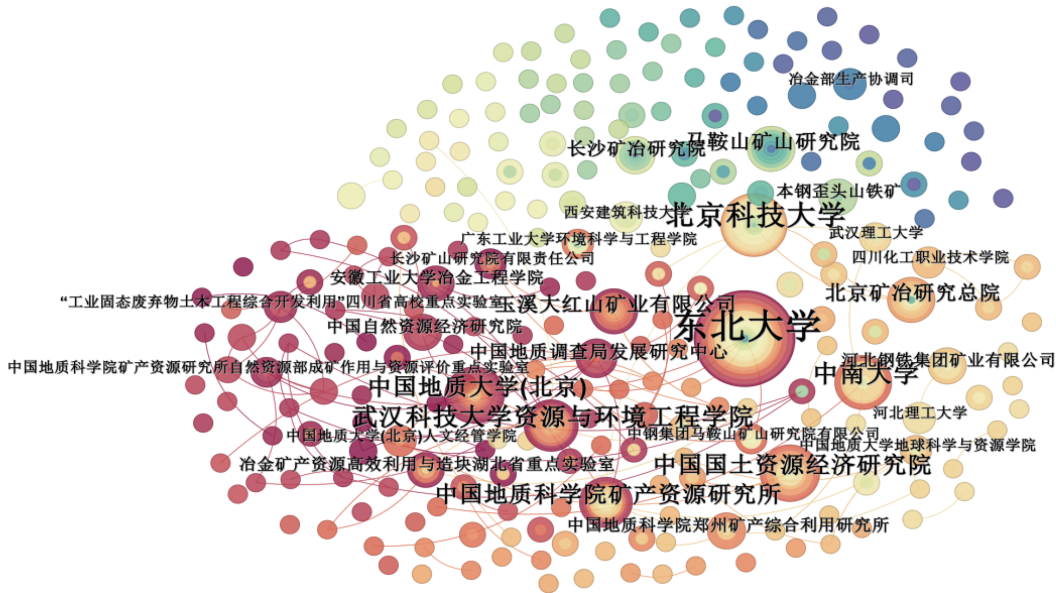


图 4 CNKI 研究机构合作网络图谱

Fig. 4 Collaboration network of CNKI research institutions

CNKI 发文量前十位的研究机构中, 东北大学以 36 篇的发文量占据榜首, 是国内该领域研究的重要核心机构, 体现其在该领域的重要贡献和显著影响力。研究成果涵盖了难选铁矿石的清洁高效利用技术^[27]、露天采矿区的安全处理和采矿设计优化^[28-29]、磁化焙烧试验研究等多个关键领域^[30], 彰显研究的深度和广度。北京科技大学以 20 篇的发文量居第二位, 但其发文时间较早, 节点颜色以绿色和黄色为主, 表明近年来其在此领域的研究有所减少。中国地质大学(北京)、武汉科技大学、中南大学紧随其后, 发文量均超过 10 篇(16 篇、15 篇、14 篇), 中国国土资源经济研究院(9 篇)、中国地质科学院矿产资源研究所(8 篇)、北京矿冶研究总院(7 篇)、马鞍山矿山研究院(6 篇)、玉溪大红山矿业有限公司(6 篇)均低于 10 篇, 但这些单位在该领域研究活动积极, 体现了产业界对于铁矿石安全风险的重视。

2.3 合作关系分析

图 5 和图 6 分别展示了基于 CNKI 和 WoS 作者合作网络图谱(由绿色渐变至红色体现 1992 年至今

的发文时间线)。孙永升、李艳军、吴修洁和先元华等学者为国内铁矿石安全风险领域的新兴力量, 以丰富的发文量和时效性在该领域崭露头角。图 5 体现了近年来国内已形成了主要的合作团体, 团体规模不大但内部相互合作紧密, 不同团体间合作不明显, 体现了国内多个研究团队之间合作交流较少。图 6 显示了国际活跃团体与国内团体的重叠程度较高, 体现了中国铁矿石安全风险研究领域在国际上居于重要地位。但中国与其他国家间的国际合作不显著, 主要合作仍集中在团体内部。该现象可能是由于国内外研究团队在研究目标、侧重点等方面存在差异, 特别是近年少数发达国家政策变动频繁, 极大影响国际团队间交流与合作的信心。

2.4 研究热点及研究前沿

网络分析中的节点中心性是衡量其重要性的关键指标之一^[31]。CNKI 数据库有 619 个关键词节点和 849 条连接线, WoS 数据库包括 529 个关键词节点和 1 580 条连接线。图 7 和图 8 通过共现词图谱直观揭示了铁矿石安全风险研究, 主要包括铁矿开发利用、

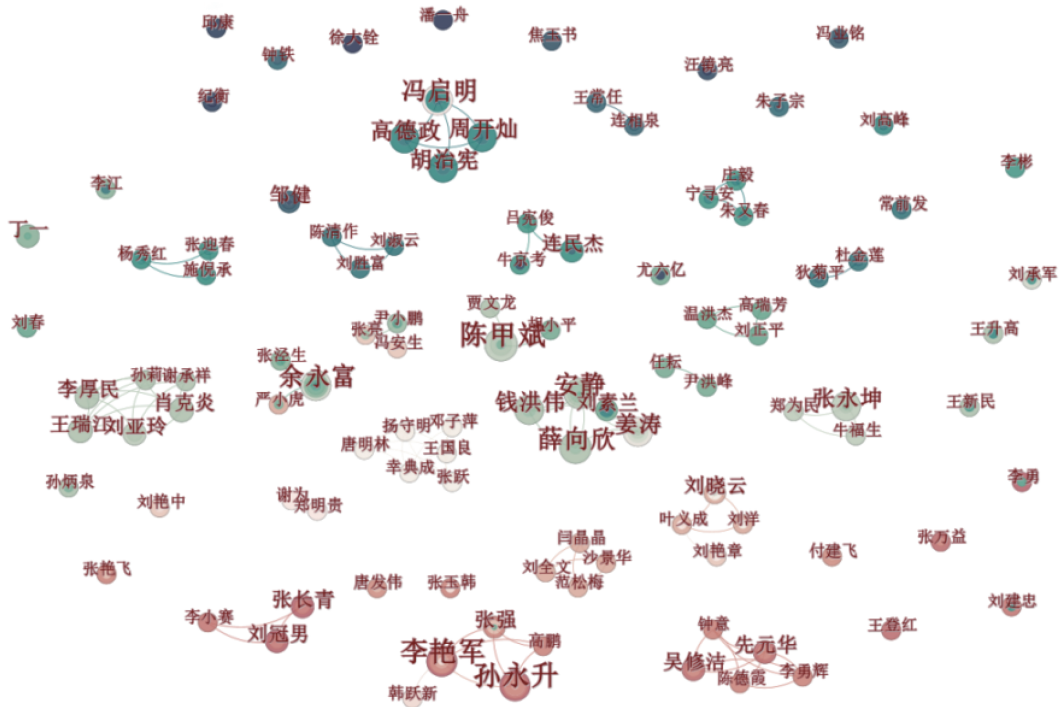


图 5 CNKI 作者合作关系网络图谱

Fig. 5 Co-authorship network between authors of CNKI

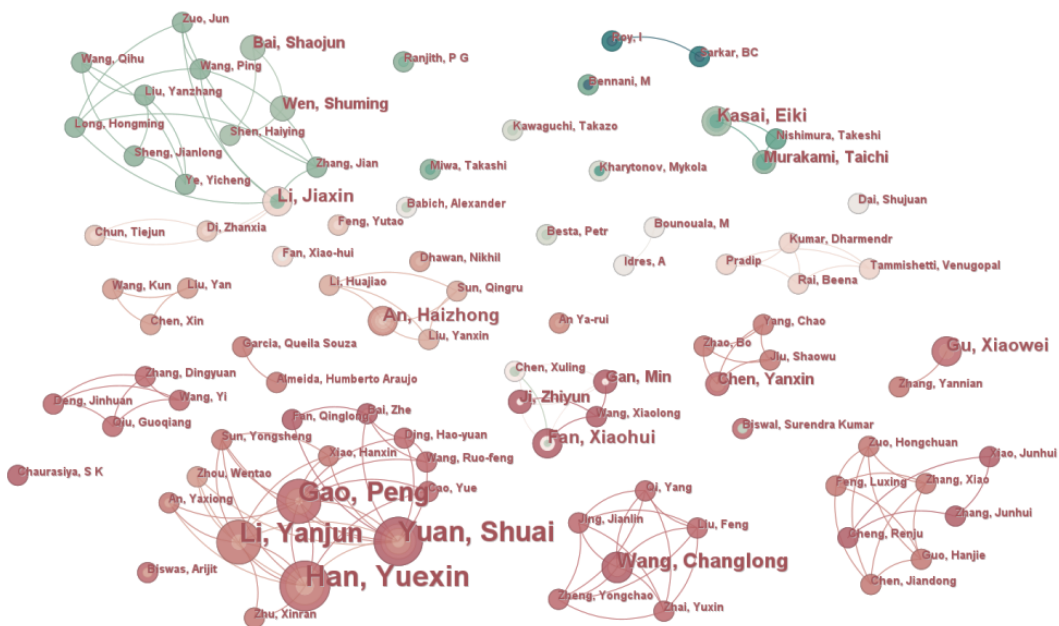


图 6 WoS 作者合作关系网络图谱

Fig. 6 Co-authorship network between authors of WoS

环境污染、市场价格、供需形式等领域。

“铁矿”“综合利用”“开发利用”“铁矿石”等关键词凸显出研究铁矿石资源开发和利用的重要性。例如原铁矿选矿过程中产生的铁尾矿砂和尾矿石可代替天然砂和碎石，作为粗细集料用于配制 C₇₀ 以下的泵送混凝土^[32]；通过添加适量的氧化钙和氧化镁，可将铁尾矿用于生产微晶玻璃板材^[33]。关注难选铁

矿石(如硼铁矿、硫铁矿、菱铁矿和褐铁矿等)、尾矿和回收率等强调了铁矿资源高效利用和循环经济的重要性。在铁矿石加工的技术环节中，“烧结”“次选”“浮选”和“弱磁选”等关键词揭示了选矿过程中关键技术进步可提高资源利用率^[34-35]，提升精铁产品质量和市场竞争能力^[36]，促进我国铁矿石资源的开发利用朝着更高效、更环保的方向发展。

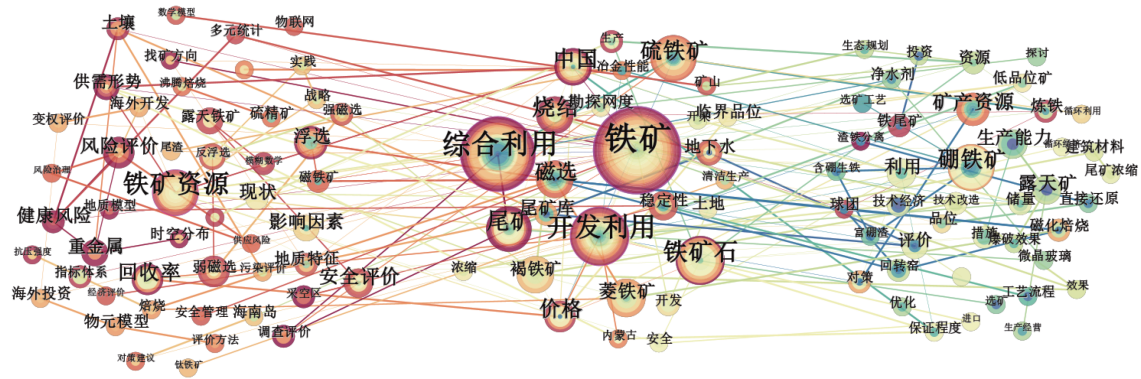


图 7 CNKI 关键词共现图谱

Fig. 7 Co-occurrence network of CNKI keywords

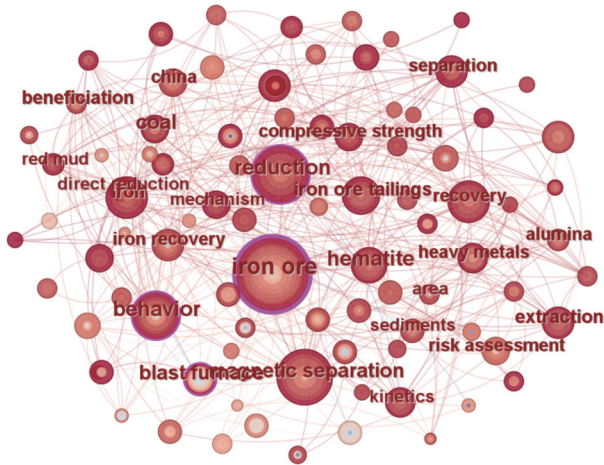


图 8 WoS 关键词共现图谱

Fig. 8 Co-occurrence network of WoS keywords

“价格”和“生产能力”等关键词反映了市场对铁矿石行业的影响。鉴于中国铁矿石资源对外依存度高,加之国内铁矿资源禀赋的局限性,全球铁矿石市场的波动对中国铁矿石资源供应安全具有显著影响^[37]。此影响可能会通过价格波动、供应稳定性,以及国内钢铁产业的原材料成本等多渠道传导,从而对中国铁矿石资源的可持续供应和钢铁产业的

健康发展构成挑战。在环境和安全方面,“风险评价”“安全评价”和“稳定性”的出现表明铁矿石开采和利用中潜在风险和管理受到重视,揭示了铁矿石安全风险研究具多维度特性。早期研究主要集中在铁矿的开采与开发,特别是“选矿”“储量”“铁矿开采的化工流程与优化”等方面。近年逐渐向铁矿开发利用所带来的环境问题和资源安全问题演变,反映出我国工业发展与坚持可持续发展国策相契合。

铁矿石安全风险领域的关键词,紧贴综合利用、市场、安全和环境四个方面,并且与铁矿石综合开发利用的难点痛点、我国经济发展和铁矿石产量之间的矛盾、国际铁矿石市场与价格、矿区安全和环境安全息息相关。主要体现出铁矿石作为重要国家战略资源,研究机构对可利用铁矿石总量的高度重视,以及推动重工业与国家绿色可持续发展理念相适应。

图 9 展示了随时间推进的关键词演进历程。铁矿石安全风险领域关键词可归为铁矿资源、硫铁矿、重金属、铁矿石、磁选 5 个主要聚类。随时间推移,研究焦点逐渐由铁矿石综合开发利用扩展到铁矿的水污染、重金属污染治理、低碳环保措施、开采智能控制技术等新领域。例如利用碳铁复合炉料(ICA)

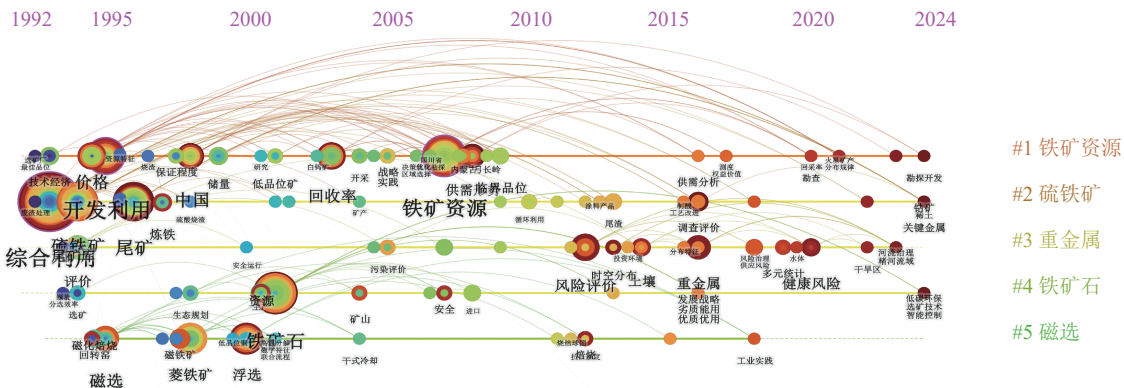


图 9 CNKI 关键词演进图谱

Fig. 9 Co-occurrence network evolution of CNKI keywords

降低高炉炼铁过程中的碳消耗和 CO₂ 排放^[38]、矿山信息化实现地质、测量、采矿自动化等^[39]。

图 10 与图 11 分别展示了 CNKI 和 WoS 关键词突现图谱。结合图 9 中节点的动态演变,能更为直观地洞察此研究领域的研究前沿。相关术语出现频次在短期内急增是识别研究热点的主要标志,它表现为一组迅速崛起的概念及潜在的研究课题^[40]。目前,铁矿安全风险领域研究热点集中在风险评估、重金属污染、采空区安全、铁矿开发及其导致的健康风险、铁矿开采后的环境恢复等方面。

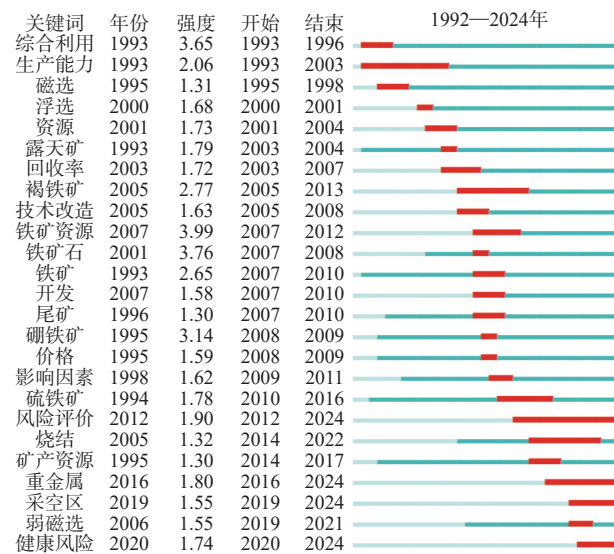


图 10 CNKI 关键词突现图谱

Fig. 10 Emergence map of CNKI keywords

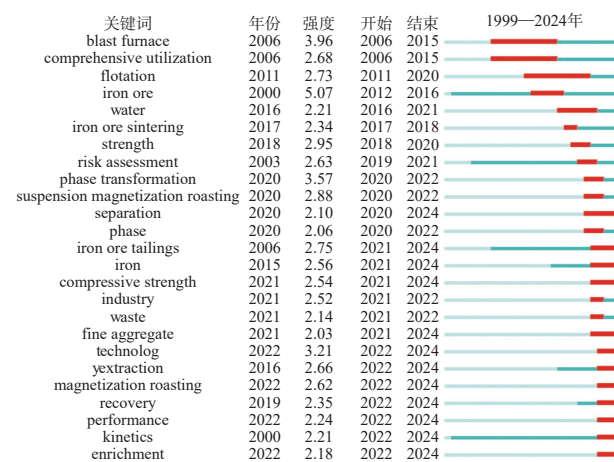


图 11 WoS 关键词突现图谱

Fig. 11 Emergence map of WoS keywords

3 结论

本文分析了 CNKI 和 WoS 数据库中关于铁矿安全风险领域的文献,借助 CiteSpace 作为重要分析工具,以知识图谱形式可视化展示与分析,总结了该领域国内外研究现状、研究热点与前沿方向等。

1)全球范围内铁矿石安全风险受到广泛关注,研究成果持续增加。中国在该领域研究产出居世界前列,国外研究机构在跨国合作研究上更活跃,这提示我国学者应积极拓展国际合作,提升我国在该领域的国际影响力。

2)铁矿石安全风险研究热点主要集中在风险评估、环境保护和资源利用等多个关键方面。着重关注铁矿石开采的风险评估和采空区地质灾害治理等,聚焦水污染、重金属污染等环境污染防治问题,致力于矿产资源高效利用等研究(如尾矿综合利用等)。

3)研究前沿主要围绕智能化、绿色化和可持续发展。利用现代信息技术提升矿山安全智能化管理效率与服务精准度;矿山开采与生态环境保护并重,铁矿行业应逐步向低碳、可持续方向转型。

4)未来研究应着重构建普适性的方法和标准体系,综合考虑铁矿全产业链的开发利用等,基于大数据、人工智能等技术推进铁矿安全风险在实时监测、精准预测、智能决策、高效开发与绿色发展等方面的深入研究。

参考文献 (References):

- [1] 王婧,陈甲斌,余韵.我国铁矿安全保障的思考及建议[J].矿业研究与开发,2018,38(11):119-124.
WANG Qiang, CHEN Jiabin, YU Yun. Thinking and suggestion on the security of iron mine in China[J]. Mining Research and Development, 2018, 38(11): 119-124.
- [2] 张泾生.我国铁矿资源开发利用现状及发展趋势[J].钢铁,2007,42(2):1-6.
ZHANG Jingsheng. Status and trend of exploitation and utilization of iron ore resources in China[J]. Iron & Steel, 2007, 42(2): 1-6.
- [3] 郭娟,崔荣国,周起忠,等.2023年中国矿产资源形势回顾与展望[J].中国矿业,2024,33(1):12-19.
GUO Juan, CUI Rongguo, ZHOU Qizhong, et al. Outlook and overview of mineral resources situation of China in 2023[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(1): 12-19.
- [4] 李厚民,王瑞江,肖克炎,等.立足国内保障国家铁矿资源需求的可行性分析[J].地质通报,2010,29(1):1-7.
LI Houmin, WANG Ruijiang, XIAO Keyan, et al. Feasibility analysis of ensuring iron demand mainly by domestic resources[J]. Geological Bulletin of China, 2010, 29(1): 1-7.
- [5] 代涛,高天明,文博杰.元素视角下的中国稀土供需格局及平衡利用策略[J].中国科学院院刊,2022,37(11):1586-1594.
DAI Tao, GAO Tianming, WEN Bojie. China's rare earth supply and demand pattern and balanced utilization strategy from perspective of elements[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(11): 1586-1594.
- [6] 文博杰,代涛,韩中奎,等.中国铜资源在用存量与二次供应潜力[J].地球学报,2023,44(2):325-332.

- WEN Bojie, DAI Tao, HAN Zhongkui, et al. Copper in-use stock and recycling potential in China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2023, 44(2): 325-332.
- [7] 吴丽萍. 模糊综合评价方法及其应用研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2006.
- [8] 刘冲昊, 柳群义. 基于熵权法的中国铁矿石安全评价[J]. *矿产保护与利用*, 2018, 38(5): 86-93.
- LIU Chonghao, LIU Qunyi. Safety evaluation of iron ore in China based on entropy weight method[J]. *Conservation and Utilization of Mineral*, 2018, 38(5): 86-93.
- [9] 吴晗. 中国铁矿石资源供应安全评价[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
- [10] 鲁明娟. 露天铁矿采场安全评价体系研究[D]. 唐山: 河北理工大学, 2010.
- [11] 宋许根, 刘秀敏, 陈从新, 等. 程潮铁矿西区采空区地表塌陷机制与变形规律初探[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(S2): 4262-4273.
- SONG Xugen, LIU Xiumin, CHEN Congxin, et al. Study on the mechanism of surface collapse and ground deformation in western mined area of Chengchao Iron Mine[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(S2): 4262-4273.
- [12] 陈玲, 张微, 周艳, 等. 高分辨率遥感影像在新疆塔什库尔干地区沉积变质型铁矿勘查中的应用[J]. *地质与勘探*, 2012, 48(5): 1039-1048.
- CHEN Ling, ZHANG Wei, ZHOU Yan, et al. Application of high-resolution remote sensing images to searching for sedimentary-metamorphic type iron deposits in the Taxkorgan Area, Xinjiang[J]. *Geology and Exploration*, 2012, 48(5): 1039-1048.
- [13] 张振杰, 成秋明, 杨玠, 等. 机器学习与成矿预测: 以闽西南铁多金属矿预测为例[J]. *地学前缘*, 2021, 28(3): 221-235.
- ZHANG Zhenjie, CHENG Qiuming, YANG Jie, et al. Machine learning for mineral prospectivity: a case study of iron-polymetallic mineral prospectivity in southwestern Fujian[J]. *Earth Science Frontiers*, 2021, 28(3): 221-235.
- [14] 何敬梓, 范正国, 黄旭钊, 等. 红格铁矿三维反演与地质建模[J]. *地质与勘探*, 2015, 51(6): 1049-1058.
- HE Jingzi, FAN Zhengguo, HUANG Xuzhao, et al. Three-dimensional inversion of magnetic data and geological modeling in the Hongge Iron Deposit[J]. *Geology and Exploration*, 2015, 51(6): 1049-1058.
- [15] 赵黎冬, 王德利, 王永志, 等. 基于时空大数据的石油安全智能分析方法研究[J]. *地球物理学进展*, 2023, 38(2): 958-966.
- ZHAO Lidong, WANG Deli, WANG Yongzhi, et al. Research on an intelligent analysis method for oil security using spatio-temporal big data[J]. *Progress in Geophysics*, 2023, 38(2): 958-966.
- [16] 王永志, 包晓栋, 缪谨励, 等. 基于大数据的地质云监控平台建设与应用[J]. *地球物理学进展*, 2018, 33(2): 850-859.
- WANG Yongzhi, BAO Xiaodong, MIAO Jinli, et al. Construction and application of GeoCloud monitoring platform based on big data[J]. *Progress in Geophysics*, 2018, 33(2): 850-859.
- [17] MENG X H, WANG Y Z, WANG J X. Study on Pearl River Delta oil security impact model based on LSTM and multi-indicator integration[C]//2022 2nd International Conference on Big Data, Artificial Intelligence and Risk Management(ICBAR), 2023.
- [18] 刘敬勇, 赵永久. 硫铁矿资源开采用过程中的环境污染问题及控制对策[J]. *中国矿业*, 2007, 16(7): 55-57.
- LIU Jingyong, ZHAO Yongjiu. Environmental pollution and countermeasures in pyrite resources exploration[J]. *China Mining Magazine*, 2007, 16(7): 55-57.
- [19] 陈悦, 陈超美, 刘则渊, 等. CiteSpace 知识图谱的方法论功能[J]. *科学研究*, 2015, 33(2): 242-253.
- CHEN Yue, CHEN Chaomei, LIU Zeyuan, et al. Methodological functions of CiteSpace knowledge mapping[J]. *Science Research*, 2015, 33(2): 242-253.
- [20] HAN F, DENG Y R, LIU Q Y, et al. Construction and application of the knowledge graph method in management of soil pollution in contaminated sites: a case study in South China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 319: 115685.
- [21] 周成虎, 王华, 王成善, 等. 大数据时代的地质知识图谱研究[J]. *中国科学: 地球科学*, 2021, 51(7): 1070-1079.
- ZHOU Chenghu, WANG hua, WANG Chengshan, et al. Geoscience knowledge graph in the big data era[J]. *Science China Earth Sciences*, 2021, 51(7): 1070-1079.
- [22] 王永志, 金樑, 朱月琴, 等. 基于大数据技术的地质文档关键词提取算法研发[J]. *地球物理学进展*, 2018, 33(3): 850-859.
- WANG Yongzhi, JIN Liang, ZHU Yueqin, et al. Development of keyword extraction algorithm for geoscience unstructured document based on big data[J]. *Progress in Geophysics*, 2018, 33(3): 850-859.
- [23] 秦晓楠, 卢小丽, 武春友. 国内生态安全研究知识图谱: 基于 CiteSpace 的计量分析[J]. *生态学报*, 2014, 34(13): 3693-3703.
- QIN Xiaonan, LU Xiaoli, WU Chunyou. The knowledge mapping of domestic ecological security research: bibliometric analysis based on CiteSpace[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(13): 3693-3703.
- [24] 李先跃. 中国文化产业与旅游产业融合研究进展及趋势: 基于 CiteSpace 计量分析[J]. *经济地理*, 2019, 39(12): 212-220, 229.
- LI Xianyue. Research progress and trend of integration of Chinese cultural industry and tourism industry: based on CiteSpace analysis[J]. *Economic Geography*, 2019, 39(12): 212-220, 229.
- [25] 韩增林, 李彬, 张坤领, 等. 基于 CiteSpace 中国海洋经济研究的知识图谱分析[J]. *地理科学*, 2016, 36(5): 643-652.
- HAN Zenglin, LI Bin, ZHANG Kunling, et al. Knowledge structure of China's marine economy research: an analysis based on CiteSpace map[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(5): 643-652.
- [26] 盛强, 郑建明, 刘江山, 等. 基于 CiteSpace 的内表面缺陷检测研究进展与趋势[J]. *光谱学与光谱分析*, 2023, 43(1): 9-15.
- SHENG Qiang, ZHENG Jianming, LIU Jiangshan, et al. Advances and prospects in inner surface defect detection based on CiteSpace[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2023, 43(1): 9-15.
- [27] 韩跃新, 张强, 孙永升, 等. 难选铁矿石矿相转化清洁高效利用技术新进展[J]. *钢铁研究学报*, 2022, 34(12): 1303-1313.
- HAN Yuexin, ZHANG Qiang, SUN Yongsheng, et al. Progress in phase transformation technology for clean and efficient utilization of refractory iron ore[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2022,

- 34(12): 1303-1313.
- [28] 贾三石, 付建飞, 门业凯, 等. 深凹露天铁矿隐伏空区三维激光探测技术方法应用研究[J]. 安全与环境学报, 2019, 19(5): 1581-1586.
- JIA Sanshi, FU Jianfei, MEN Yekai, et al. Three-D laser scanning approach to the concealed goaf under an open-pit iron mine[J]. Journal of Safety and Environment, 2019, 19(5): 1581-1586.
- [29] 李成习, 龚甲桂, 高文凯, 等. 露天矿转地下矿山地质环境问题分析及治理方法研究: 以仓上金矿为例[J]. 中国矿业, 2022, 31(5): 75-80.
- LI Chengxi, GONG Jiagui, GAO Wenkai, et al. Analysis of mine geological environment problems and research on treatment methods of open-pit mines to underground mines: taking Cangshang Gold Mine as an example[J]. China Mining Magazine, 2022, 31(5): 75-80.
- [30] 张强, 孙永升, 韩跃新, 等. 赤铁矿与褐铁矿磁化焙烧试验研究[J]. 金属矿山, 2021(4): 96-100.
- ZHANG Qiang, SUN Yongsheng, HAN Yuexin, et al. Study on magnetization roasting of hematite and limonite[J]. Metal Mine, 2021(4): 96-100.
- [31] 任利强, 郭强, 王海鹏, 等. 基于 CiteSpace 的人工智能文献大数据可视化分析[J]. 计算机系统应用, 2018, 27(6): 18-26.
- REN Liqiang, GUO Qiang, WANG Haipeng, et al. CiteSpace-based visualization analysis of literature big data on artificial intelligence[J]. Computer Systems & Applications, 2018, 27(6): 18-26.
- [32] 蔡基伟, 张少波, 侯桂香, 等. 铁尾矿砂对混凝土工作性和强度的影响[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(7): 104-107.
- CAI Jiwei, ZHANG Shaobo, HOU Guixiang, et al. Effects of ferrous mill tailings as aggregates on workability and strength of concrete[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009, 31(7): 104-107.
- [33] 田英良, 杨丽敏, 常新安, 等. 利用铁矿尾矿研制 CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ 系微晶玻璃[J]. 北京工业大学学报, 2002, 28(3): 369-373.
- TIAN Yingliang, YANG Limin, CHANG Xin'an, et al. Using iron tailing minerals to study nucleated glass of CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2002, 28(3): 369-373.
- [34] 韩跃新, 孙永升, 李艳军, 等. 我国铁矿选矿技术最新进展[J]. 金属矿山, 2015(2): 1-11.
- HAN Yuexin, SUN Yongsheng, LI Yanjun, et al. New development on mineral processing technology of iron ore resources in China[J]. Metal Mine, 2015(2): 1-11.
- [35] 韩跃新, 张小龙, 高鹏, 等. 中国铁矿石选矿技术发展及展望[J]. 金属矿山, 2024(2): 1-24.
- HAN Yuexin, ZHANG Xiaolong, GAO Peng, et al. Development and prospect of iron ore processing technologies in China[J]. Metal Mine, 2024(2): 1-24.
- [36] 李小赛, 张佳文, 王裕先, 等. 滇东北镇雄黑树矿区高硫极贫铁硫磺渣铁资源回收利用[J]. 中国矿业, 2024, 33(11): 28-38.
- LI Xiaosai, ZHANG Jiawen, WANG Yuxian, et al. Multipurpose utilization of iron resources in pyrite cinder with high sulfur and extremely poor iron in Heishu Mining Area, Zhenxiong County, Northeast Yunnan Province[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(11): 28-38.
- [37] 梁靓, 代涛, 王高尚. 基于供需视角的中国矿产资源国际贸易格局分析[J]. 中国矿业, 2017, 26(9): 53-60.
- LIANG Liang, DAI Tao, WANG Gaoshang. Analysis of China's international trade pattern of mineral resources based on the perspective of supply and demand[J]. China Mining Magazine, 2017, 26(9): 53-60.
- [38] 王宏涛, 储满生, 鲍继伟, 等. 碳铁复合低碳炼铁炉料制备与应用研究[J]. 钢铁研究学报, 2019, 31(2): 103-111.
- WANG Hongtao, CHU Mansheng, BAO Jiwei, et al. Research on preparation and application for a new burden of iron-carbon agglomerate for low carbon blast furnace ironmaking[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2019, 31(2): 103-111.
- [39] 周文略, 连民杰. 地下矿山智能生产控制与管理建设体系研究[J]. 金属矿山, 2015(2): 117-121.
- ZHOU Wenlue, LIAN Minjie. Research on the architecture of intelligent production control and management in underground mine[J]. Metal Mine, 2015(2): 117-121.
- [40] 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. The methodology function of CiteSpace mapping knowledge domains[J]. Studies in Science of Science, 2015, 33(2): 242-253.