

研究热点

基于 CiteSpace 文献计量法的露天矿智能开采规划研究热点的可视化图谱分析

Visualization Analysis of Research Hotspots on Intelligent Open-pit Mining Planning Based on CiteSpace Bibliometric Method

吴昊¹, 徐晨旭¹, 吴晓毅¹, 赵继伟², 李昱儒², 刘晨¹

(1. 中国水利水电第十一工程局有限公司, 河南 郑州 450000; 2. 华北水利水电大学, 河南 郑州 450000)

摘要:为明确露天矿智能开采规划领域的研究热点与发展脉络,本文以中国知网(CNKI)数据库中2010—2024年露天矿智能开采相关文献为数据来源,运用CiteSpace 6.3.1(64 bit)软件进行知识图谱可视化分析。通过关键词共现、突现及聚类等图谱分析,梳理该领域研究热点与核心主题。结果显示,露天矿智能开采规划研究高频关键词集中在“露天矿”“无人机”“卡车调度”“无人驾驶”“边坡监测”等方面,形成以智能开采技术应用、生产调度优化、安全监测管控为核心的研究集群;关键词突现图谱表明,“智能矿山”、“无人驾驶”、“大数据”等为近年研究前沿,反映领域向智能化、数字化转型的趋势;聚类分析进一步揭示,数值模拟、境界优化、智能装备等子领域已形成稳定研究方向,且各方向呈现技术融合特征。研究可为露天矿智能开采规划领域的学术研究与工程实践提供参考。

关键词:露天矿; 智能开采规划; CiteSpace; 知识图谱; 文献计量法

中图分类号: TD824

文献标志码: A

文章编号: 1672-609X(2025)05-0093-10

Abstract: To clarify the research hotspots and development trends in the field of intelligent open-pit mining planning, this paper takes the relevant literature on intelligent open-pit mining from 2010 to 2024 in the China National Knowledge Infrastructure (CNKI) database as the data source and uses CiteSpace 6.3.1 (64 bit) software for knowledge mapping visualization analysis. Through the analysis of keyword co-occurrence, emergence, and clustering, the research hotspots and core themes in this field are sorted out. The results show that the high-frequency keywords in the research on intelligent open-pit mining planning are mainly concentrated in “open-pit mine”, “drone”, “truck dispatching”, “driverless”, “slope monitoring”, etc., forming research clusters centered on the application of intelligent mining technology, production scheduling optimization, and safety monitoring and control. The keyword emergence map indicates that “intelligent mine”, “driverless”, “big data”, etc. are the research frontiers in recent years, reflecting the trend of the field towards intelligence and digitalization. Cluster analysis further reveals that subfields such as numerical simulation, boundary optimization, and intelligent equipment have formed stable research directions, and each direction shows the characteristics of technology integration. The research can provide references for academic research and engineering practice in the field of intelligent open-pit mining planning.

Key words: open-pit mine; intelligent mining planning; CiteSpace; knowledge map; bibliometric analysis

1 前言

露天矿开采作为矿产资源获取的核心方式之一,其效率、安全与可持续性直接影响矿山行业发展。随着人工智能、大数据、数字孪生等技术的突

破,“智能开采”已成为矿山行业转型升级的核心方向,而“智能开采规划”作为开采全流程的前置环节,承担着资源高效利用、开采方案优化、风险提前管控的关键作用,是实现露天矿“少人化、无人化、绿色化”的核心支撑^[1-3]。

[作者简介] 吴昊,男,高级工程师,主要从事土木工程领域的研究工作

[基金项目] 2024年度中国电建绿色砂石产业技术研究中心定向委托计划(项目编号:DJ-PTZX-2024-05)

[引用格式] 吴昊,徐晨旭,吴晓毅,等.基于CiteSpace文献计量法的露天矿智能开采规划研究热点的可视化图谱分析[J].中国矿山工程,2025,54(5):93-102.

近年来,国内学者在露天矿智能开采规划领域开展了大量研究,如基于数字孪生的开采境界动态规划、开采参数智能优化算法设计、多目标协同规划模型构建等,但现有研究多聚焦单一技术或局部环节,缺乏对领域整体发展脉络的系统梳理。文献计量学与可视化技术的结合,为揭示研究热点与演化规律提供了有效工具——CiteSpace 作为主流知识图谱工具,已被广泛应用于矿业领域的热点分析(如露天矿爆破技术、煤矿智能化等),但在露天矿智能开采规划领域尚未有系统的文献计量研究。

基于此,本研究以 2010—2024 年 CNKI 文献为样本,通过 CiteSpace 可视化分析,梳理露天矿智能开采规划的研究现状、热点主题及未来趋势,为该领域的技术创新与工程应用提供理论参考。

2 研究过程及方法

2.1 数据来源

以 CNKI 为数据源,采用高级检索模式:主题 = “露天矿”并含“智能开采”或“智能规划”,时间范围 = 2010 年 1 月 1 日—2024 年 12 月 31 日,来源类别 = “期刊”,篇名摘需含“规划”或“设计”(排除非规划类文献)。初步检索获得文献 1945 篇,经人工筛选(去除新闻报道、会议通知等非研究性文献,剔除重复及主题不相关文献),最终保留有效文献 1 608 篇,作为研究样本^[4-7]。

2.2 研究方法

采用文献计量法与可视化分析相结合的方式,核心工具为 CiteSpace 6.3.1(64 bit)。设置参数如下:时间切片(Time Slicing) = 2010—2024 年,时间间隔(Years Per Slice) = 1 年;节点类型(Node Types)分别选择“Keyword”(关键词)、“Author”(作者)、“Institution”(机构);修剪策略(Pruning)勾选“Pathfinder”与“Pruning slices networks”,以简化图谱并突出核心关联;聚类算法采用 LLR(Log-Likelihood Ratio),用于提取聚类标签。通过关键词共现分析识别研究热点,聚类分析划分研究主题,突现分析(Burst Detection)捕捉前沿趋势,时间线分析呈现演化过程。

2.3 图谱解析标准

CiteSpace 图谱中,节点大小反映关键词(或作者、机构)出现频次,频次越高则节点越核心;连线强度反映关联紧密程度;中介中心性(Betweenness Centrality, BC) > 0.1 的节点为关键节点,代表该要

素在领域内具有重要连接作用。聚类结果以模块化指数(Q 值)和平均轮廓值(S 值)评价:Q > 0.3 表示聚类结构显著,S > 0.7 表示聚类结果可信。

3 研究结果分析

3.1 发文数量及时间分布

2010—2024 年露天矿智能开采规划领域发文量整体呈现“波动上升→峰值突破→震荡回落”的动态演进,具体如图 1 所示,各阶段特征与行业技术发展深度关联,可分为三个阶段。

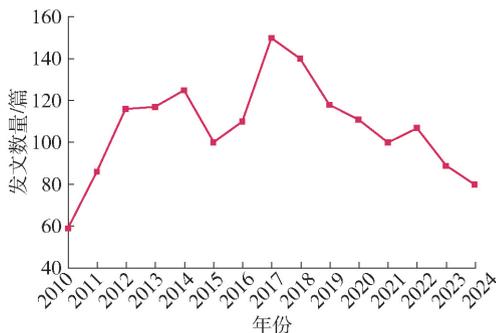


图 1 发文量

1) 起步探索与稳步增长期(2010—2016 年)

数据表现:发文量从 2010 年 59 篇逐步攀升,2014 年达 125 篇小高峰,2015 年短暂回落至 100 篇后,2016 年回升至 110 篇。

阶段特征:对应行业“智能化萌芽”阶段,伴随矿山数字化改造需求,研究聚焦基础技术适配(如三维建模、参数计算系统),发文量随概念普及、初步技术应用缓慢增长,2014 年因早期技术试点成果集中输出出现小高峰,2015 年受技术瓶颈(单纯数字化改造难突破)短暂回调。

2) 技术突破与爆发增长期(2017—2018 年)

数据表现:2017 年发文量飙升至 150 篇(创阶段峰值),2018 年维持 140 篇高位。

阶段特征:人工智能、大数据技术成熟渗透至矿山领域,“智能优化”研究爆发(如算法驱动开采方案迭代、爆破参数智能决策),技术融合创新成果集中释放,叠加行业对“智能化转型”预期升温,推动发文量短时间内突破增长,形成领域研究热度顶点^[8-12]。

3) 理性调整与多元深化期(2019—2024 年)

数据表现:2019—2021 年发文量震荡回落(2019 年 118 篇→2021 年 100 篇),2022 年短暂回升至 107 篇后,2023—2024 年持续降至 89 篇、80 篇。

阶段特征:前期技术融合成果进入“落地验证”阶段,行业发现单纯“智能优化”需结合实际场景(如生态约束、成本控制),研究转向“精准+协同”(数字孪生赋能全流程规划、绿色开采协同设计)。因研究从“技术创新”转向“价值落地”,短期发文量随方向调整震荡回落,但内涵更贴近行业可持续需求,2022年因部分协同技术试点成果输出短暂回升,后期随研究深化进入理性沉淀期。

3.2 支学科与期刊分布

1) 学科分布

领域研究呈现多学科交叉特征,核心学科包括:

(1) 矿业工程(占比 58.6%):为基础学科,聚焦开采规划的工程实践与技术落地,如露天矿采场布置、开采顺序优化等。

(2) 自动化技术(占比 19.3%):支撑智能化技术应用,研究方向包括智能感知、自动决策系统设计等。

(3) 计算机软件及计算机应用(占比 12.5%):聚焦数据处理与模型构建,如数字孪生平台开发、多源数据融合算法等。

(4) 环境科学与资源利用(占比 5.8%):近年关注度提升,主要研究绿色开采与智能规划的协同机制。

2) 发文期刊分布

文献主要刊载于矿业工程及智能化领域期刊(表1),其中《矿业研究与开发》《金属矿山》《爆破》为核心载体,合计发文占比 32.7%。这些期刊兼具理论性与工程性,反映了领域“技术研发-工程应用”的双导向特征。

表1 矿业工程及智能化领域期刊

期刊名称	发文量/篇	占比/%	核心研究方向
《矿业研究与开发》	92	10.3	智能开采规划模型 与工程应用
《金属矿山》	87	9.8	数字孪生与开采 参数优化
《爆破》	76	8.6	智能爆破规划与 效果评价
《中国矿业》	68	7.6	资源高效利用与 规划决策
《工矿自动化》	59	6.6	智能感知与自动 规划系统

3.3 作者及研究机构合作网络分析

1) 作者合作网络分析

借助 CiteSpace 软件(6.3.1 版),以作者为节点

类型、1 年为时间切片、2019—2024 年为时间跨度,得到如图 2 所示的关于露天矿智能开采规划领域作者合作关系网络图。从合作网络结构、核心作者群体、合作模式特征三方面分析。

(1) 合作网络结构:呈现“多核心-辐射型”分布

图谱中多个颜色各异的作者聚类圈相互交织,节点大小与发文量、影响力关联(如张洪、刘光伟等大节点)。整体网络密度(Density)为 0.0259,说明领域作者合作存在一定关联,但未形成高度密集的协作网络,处于“分散化协同、核心组引领”阶段——大节点作者如张洪、刘光伟等,通过与周边作者合作,辐射带动小范围研究团队,不同聚类圈间既有独立研究也有跨圈协作,体现领域研究既聚焦核心团队深耕,也存在跨团队交流探索。

(2) 核心作者群体:聚焦多维度研究力量

从节点规模与位置看,张洪、刘光伟、白润才等作者处于聚类中心,是领域核心研究力量。张洪团队可能围绕智能开采规划体系构建、技术集成展开研究;刘光伟、白润才团队或聚焦算法应用(如遗传算法、数字孪生)与开采场景适配。此外,韩流、王博等作者形成次级核心,覆盖智能优化、绿色协同等细分方向,核心作者群体通过跨团队合作(如不同颜色聚类圈交叉),推动“智能技术融合-场景应用-可持续协同”多维度研究,支撑领域从技术探索到实践落地的发展。

(3) 合作模式特征:“团队内深耕+跨团队互补”

同一聚类圈内(如张洪、刘光伟所在深红色聚类),作者名称高度集中,体现团队内紧密协作,围绕露天矿智能开采规划的共性技术(如三维建模、智能算法嵌入)开展持续研究,形成技术沉淀;不同聚类圈间(如紫色韩流团队与绿色胥孝川团队),通过节点连接实现跨团队互补,将智能优化算法与生态协同规划等方向结合,拓展研究边界。这种模式既保障核心技术的深度突破,又通过跨领域协作,推动“智能+绿色+精益”等复合研究方向发展,适配露天矿智能开采规划“技术集成+多元目标”的需求^[13-15]。

2) 研究机构合作网络分析

借助 CiteSpace 软件(6.3.1 版),以作者为节点类型、1 年为时间切片、2019—2024 年为时间跨度,得到如图 3 所示的关于露天矿智能开采规划领域研究机构合作关系网络图。

中煤科工集团沈阳设计研究院有限公司、中国

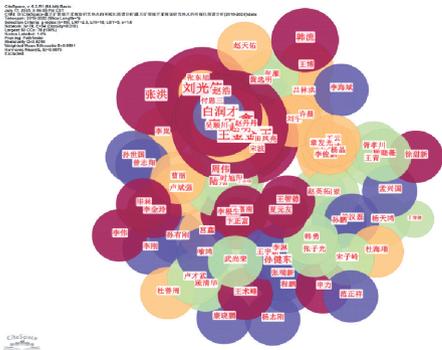


图2 作者合作共现知识图谱

矿业大学(北京)能源与矿业学院、中煤平朔集团有限公司等机构节点显著,表明其在露天矿智能开采规划研究中成果产出多、学术影响力大,是领域内研究的核心力量,长期聚焦相关技术、规划模式等探索^[16-20]。

部分机构间存在合作关联,如中国矿业大学不同学院、中煤系企业与科研院所等有连接,体现出高校-企业协同,利于理论与实践结合。但整体网络密度低,多数机构孤立,说明合作范围和深度有限,跨区域、跨系统大规模协同不足。

涵盖科研院所(中煤科工集团沈阳设计研究院有限公司)、高校(中国矿业大学等)、企业(中煤平朔集团有限公司等),反映出领域研究需多方参与,高校提供理论支撑,科研院所专注技术研发,企业侧重工程应用,不过目前多元主体协同效应未充分释放。



图3 机构合作共现知识图谱

3.4 关键词热点及聚类分析

1) 关键词共现分析

利用 CiteSpace 软件对 2010—2024 年露天矿智能开采规划研究领域文献数据生成关键词共现图谱,具体如图 4 所示,分析如下:

“露天矿”为核心节点,围绕其衍生出“开采技

术”“数值模拟”“绿色开采”等关键词,体现领域以露天矿开采为基础,聚焦技术、模拟、生态等方向研究,智能开采规划需融合多维度技术与理念。

“开采技术”与“端帮开采”“陡帮开采”“无人驾驶”等关联,显示智能开采技术体系构建,从传统开采向智能化、精细化工艺拓展;“数值模拟”与“边坡稳定性”“地质灾害”等交织,说明模拟技术在安全规划、灾害防控中关键作用,为智能决策提供支撑。

“绿色开采”“生态环境”“经济效益”等关键词凸显,反映研究兼顾生态与经济,智能开采规划需平衡多目标;“创新”“优化开采”体现技术迭代与工艺改进需求,驱动领域向高效、智能、可持续发展。

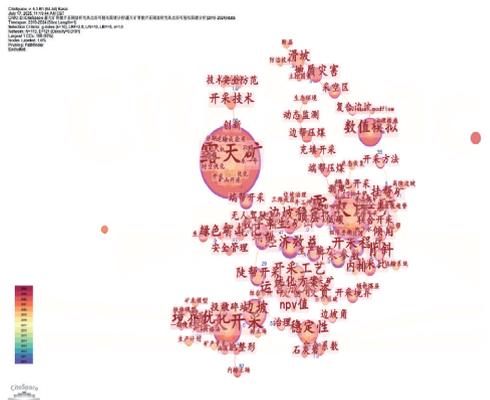


图4 关键词共现知识图谱

2) 关键词聚类分析

通过 CiteSpace 对关键词进行共现和聚类分析,可以快速地定位露天矿智能开采研究热点信息。不同的知识图谱对应的参数也有所不同,因此对 CiteSpace 软件中部分参数进行调整#Years Per Slice (时间切片)为 1,“Node Types”一栏选择“Keyword”(关键词),“Pruning”一栏勾选“Pathfinder”(寻径网络算法)和“Pruning slices networks”(每个网络),其余参数不变。得到如图 5 所示的关键词聚类图谱。

通过 LLR 算法得到 9 个聚类标签($Q=0.8259$, $S=0.9591$,聚类结果可信),具体见表 2。

图谱呈现#0 露天煤矿、#1 露天矿、#2 数值模拟等多个聚类,覆盖露天矿开采对象、技术手段(数值模拟、智能化)、规划要素(境界优化、开采程序)、安全与效益(稳定性、经济效益)等维度,全面勾勒领域研究范畴。聚类间存在关联,如#5 智能化与#4 经济效益、#6 开采程序相连,体现智能技术对效益提

表2 矿关键词聚类

聚类 ID	聚类标签	Size	时间	LLR 算法所呈现的每个聚类的 5 个关键词
0	露天煤矿	17	2020	露天煤矿;露天矿;绿色开采;扇形过渡;安全生产
1	露天矿	16	2020	露天矿;露天煤矿;露天开采;境界优化;无人机
2	数值模拟	13	2019	数值模拟;采空区;挂帮矿;滑坡;开采方法
3	境界优化	13	2020	境界优化;露天开采;露天矿;采排复一体化
4	经济效益	10	2019	经济效益;陡帮开采;边坡稳定;端帮;组合台阶
5	智能化	8	2021	智能化;绿色矿山;大数据;数字孪生;安全管理
6	开采程序	8	2019	开采程序;背斜;内排;高程;搭配开采
7	稳定性	8	2019	稳定性;边坡;安全系数;治理;石灰岩
8	设备投资	7	2019	设备投资;运营成本;开采工艺;露天采矿;优化方案
9	动态监测	6	2021	动态监测;护坡;遥感;边帮压煤;露天矿开采

升、流程优化的作用;#2 数值模拟与#0 露天煤矿、#7 稳定性关联,说明模拟技术在开采安全规划中的应用,反映出领域研究多主题交叉、协同的逻辑。“智能化”“数值模拟”等聚类突出,显示智能技术融合、模拟分析优化是研究趋势;“稳定性”“经济效益”聚类体现安全与效益平衡是规划核心,后续可深化多聚类协同研究,推动露天矿智能开采规划理论与实践发展。

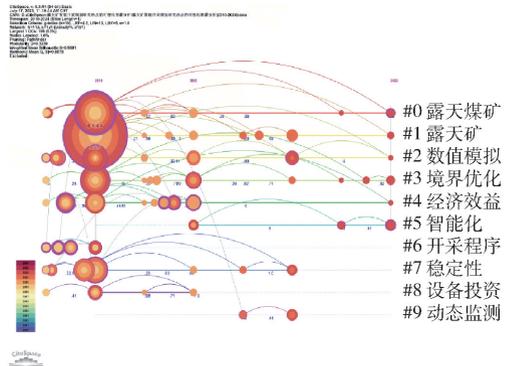


图6 关键词时间线图

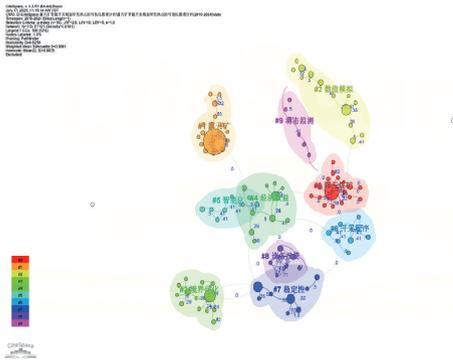


图5 关键词聚类图谱

3.5 关键词演化与突现分析

为了进一步了解每个阶段关键词的演变和突现情况,在 CiteSpace 控制面板中选择 Layout 的 Time-line 得到如图 6 的关键词时间线图。为了进一步了解每个阶段关键词的演变和突现情况,在 CiteSpace 控制面板中选择 Layout 的 Time-line 得到如图 6 所示的关键词时间线图,然后设置 Burstness 中 $\gamma[0,1]$ 为 0.1, Minimum Duration 为 1,得到 106 个突现词,关键词突现图谱如图 7 所示。

关键词突现反映研究热度随时间的变化趋势。2010—2024 年,“陡帮开采”(2020 年,强度 2.51)、

Keywords	Year	Strength	Begin	Begin	2010—2024
陡帮开采	2020	2.51	2020	2020	—
开采技术	2021	2.40	2021	2021	—
露天矿山	2022	2.35	2022	2022	—
滑坡	2020	1.58	2022	2021	—
边坡稳定	2019	1.51	2020	2020	—
地质灾害	2021	1.50	2022	2022	—
优化	2021	1.43	2021	2021	—
内排土场	2022	1.40	2022	2022	—
智能矿山	2022	1.40	2022	2022	—
智能化	2022	1.40	2022	2022	—
运输系统	2019	1.33	2019	2019	—
开采程序	2019	1.33	2019	2019	—
数值模拟	2019	1.28	2022	2022	—
边帮压煤	2021	1.25	2022	2022	—
开采	2020	1.25	2020	2020	—
生产计划	2020	1.25	2020	2020	—
绿色开采	2020	1.25	2020	2020	—
生产能力	2020	1.25	2020	2020	—
无人机	2020	1.25	2020	2020	—
开采工艺	2019	1.12	2020	2020	—

图7 关键词突现图谱

“开采技术”(2021 年,强度 2.4)等为高突现词。早期(2019—2020 年),“运输系统”“开采程序”“边坡稳定”等突现,聚焦基础开采流程与安全保障;中期(2020—2021 年),“陡帮开采”“滑坡”“地质灾害”热度上升,体现对复杂开采条件与灾害防控的关注;

近期(2022年)，“露天矿山”、“智能矿山”、“智能化”成为突现焦点，彰显智能化、绿色化转型趋势，反映行业对高效、智能、安全开采模式的追求。

时间线图谱展示关键词聚类的演进脉络。#0 露天煤矿、#1 露天矿为基础聚类，贯穿研究始终，是领域核心对象；#2 数值模拟、#3 境界优化等聚类，随时间深化，体现技术手段(数值模拟)与规划优化(境界、程序)的持续探索；#5 智能化聚类在后期热度提升，与“智能矿山”等关联，反映智能化技术融合趋势。各聚类按时间线延展，呈现从基础开采研究，到技术优化、安全防控，再向智能化、绿色化协同发展的演进路径，揭示领域研究从单一要素向多维度、系统性规划的转变。

4 结论与展望

4.1 研究结论

本研究通过 CiteSpace 知识图谱分析，明确露天矿智能开采规划领域的发展特征：

(1) 时间演化上，经历“技术引入—融合—协同”三阶段，智能化程度与绿色导向逐步强化；

(2) 学科交叉上，以矿业工程为基础，自动化、计算机技术为支撑，环境科学近年融合加速；

(3) 研究热点上，聚焦智能规划模型构建、参数智能优化、多源数据融合及绿色协同规划四大方向；

(4) 前沿趋势上，数字孪生、精准规划、绿色协同成为当前及未来核心关注点。

4.2 未来展望

技术集成化：推动数字孪生与物联网、人工智能深度融合，构建“感知—建模—决策—执行”全流程智能规划系统，提升规划实时性与精准度；

决策智能化：强化数据驱动的决策能力，开发适应复杂地质条件的自适应规划算法，解决“模型精度与工程适用性”的矛盾；

应用工程化：加强高校、企业、研究院的跨机构合作，推动智能规划技术从“实验室”走向“矿山现场”，形成可复制的工程方案；

绿色协同化：深化开采规划与生态保护的协同机制，建立“资源回收率—能耗—生态影响”多目标优化模型，助力矿山可持续发展。

[参考文献]

[1] 李猛,李建坡,黄庆享,等.我国固体矿产资源露天开采现状与发展趋势[J].煤炭科学技术,2020,48(5):1-11.

[2] 郭忠林.2019年云南采矿年评[J].云南冶金,2020,

49(2):1-14.

- [3] 陈学习,崔铁军,马云东.基于 CiteSpace 的安全科学领域可视化分析[J].中国安全科学学报,2015,25(3):138-144.
- [4] 李杰,陈超美. CiteSpace: 科技文本挖掘及可视化[M].北京:首都经济贸易大学出版社,2016.
- [5] 胡志刚,王李管,贾明涛,等.金属矿山智能化开采技术现状与发展趋势[J].金属矿山,2019(12):1-10.
- [6] 张达,唐辉明,胡新丽,等.基于 CiteSpace 的滑坡研究知识图谱分析[J].岩土力学,2016,37(10):3053-3062.
- [7] 姜福兴,张申,宋振骥,等.煤矿智能化——煤炭工业高质量发展的核心技术[J].煤炭学报,2019,44(11):3229-3235.
- [8] 王国法,杜毅博,任怀伟,等.煤矿智能化(初级阶段)的科学问题与研究重点[J].煤炭学报,2020,45(2):349-359.
- [9] 李全生,刘长友,杨科,等.基于 CiteSpace 的我国绿色开采研究现状与发展趋势分析[J].中国矿业大学学报,2017,46(5):969-979.
- [10] 刘建功,韩江卫,赵兵朝,等.煤矿智能化开采技术体系与发展趋势[J].煤炭学报,2020,45(2):360-367.
- [11] 赵阳升,康天合,杨栋,等.我国煤矿智能化开采现状与展望[J].煤炭学报,2020,45(2):368-379.
- [12] 周跃进,韩旭跃,赵阳,等.基于 CiteSpace 的露天矿爆破技术知识演化与趋势分析[J].爆破,2024,41(1):210-220.
- [13] 刘辉,张勇,朱真才,等.露天矿智能化开采关键技术研究[J].煤炭科学技术,2020,48(10):1-9.
- [14] 吴立新,朱旺,李绍辉,等.智能化煤矿大数据平台架构[J].煤炭学报,2020,45(2):380-388.
- [15] 郭军,李首滨,王虹,等.煤矿智能化关键技术与发展趋势[J].煤炭科学技术,2020,48(2):1-8.
- [16] 钱鸣高,许家林,缪协兴.煤矿绿色开采技术的研究与实践[J].能源技术与管理,2005(1):1-4.
- [17] 王家臣,杨胜利,赵富强,等.我国露天煤矿开采技术现状与发展趋势[J].煤炭工程,2019,51(12):1-5.
- [18] 李明忠,张铁岗,李崇山,等.煤矿智能化开采关键技术与装备[J].煤炭科学技术,2020,48(2):9-17.
- [19] 吴立新,汪云甲,胡振琪,等.智能矿山与智能矿业学科建设[J].煤炭学报,2020,45(2):399-408.
- [20] 王李管,贾明涛,陈鑫,等.数字矿山关键技术与发展趋势[J].金属矿山,2008(1):1-4.
- [21] 赵鹏大.关于智能地学与智能矿山的思考[J].地学前缘,2020,27(3):1-11.