

煤质快速检测技术发展趋势的文献计量学分析及综述

康永飞¹, 武增礼², 张 博², 杨金祥², 张 浩²

¹国能包头能源有限责任公司煤炭洗选中心, 内蒙古 鄂尔多斯

²煤炭科学技术研究院有限公司, 北京

收稿日期: 2025年7月77日; 录用日期: 2025年8月23日; 发布日期: 2025年10月13日

摘 要

煤炭作为我国消费量最大的能源资源, 开展全面、准确地煤质检测, 有利于实现煤炭的高效、清洁利用。对近十年间Web of Science (WOS)核心合集和中国知网(CNKI)核心库中有关煤质检测的文献进行筛选整理, 共获得211篇英文文献和49篇中文文献, 并采用CiteSpace对这些文献进行可视化分析, 同时检索并分析了相关领域的专利。结果显示, 近几年全球范围内煤质检测相关研究的发表量迅速增加, 尤其在2023年, 表明该领域逐渐受到重视。结合现有资料, 介绍了国内外煤质检测技术的研究现状和应用情况, 重点介绍了近年来较为成熟的光谱类检测技术, 并对未来的研究方向提出了可行性建议。

关键词

煤炭, 检测技术, CiteSpace

Bibliometric Analysis and Review of Development Trends in Rapid Coal Quality Detection Technology

Yongfei Kang¹, Zengli Wu², Bo Zhang², Jinxiang Yang², Hao Zhang²

¹Coal Preparation Center of China Energy Baotou Energy Co., Ltd., Ordos Inner Mongolia

²Test Branch of China Coal Research Institute, Beijing

Received: July 22, 2025; accepted: August 23, 2025; published: October 13, 2025

Abstract

As the most consumed energy resource in China, conducting comprehensive and accurate coal

文章引用: 康永飞, 武增礼, 张博, 杨金祥, 张浩. 煤质快速检测技术发展趋势的文献计量学分析及综述[J]. 矿山工程, 2025, 13(6): 1175-1185. DOI: 10.12677/me.2025.136132

quality detection is crucial for achieving efficient and clean utilization of coal. This study screened and organized literature related to coal quality detection from the Web of Science (WOS) Core Collection and the China National Knowledge Infrastructure (CNKI) core database over the past decade, obtaining a total of 211 English articles and 49 Chinese articles. CiteSpace was used to perform a visual analysis of these publications, and patents in related fields were also searched and analyzed. The results indicate that the volume of publications on coal quality detection research has increased rapidly worldwide in recent years, particularly in 2023, demonstrating growing attention to this field. Based on existing data, the research status and application of coal quality detection technologies both domestically and internationally are introduced, with a specific focus on the relatively mature spectroscopic detection technologies developed in recent years. Feasible suggestions for future research directions are also proposed.

Keywords

Coal, Detection Technology, CiteSpace

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

煤质指的是 12 个煤炭质量的基本指标, 包括水分、灰分、挥发分、固定碳含量、全硫、发热量、胶质层最大厚度、粘结指数、灰熔点、哈氏可磨指数、吉氏流动度和坩埚膨胀序数[1]。煤质检测可以迅速掌握煤炭的基本物理化学特性, 在工业生产中, 主要的检测项目包括水分、挥发分、固定碳和灰分[2]。快速有效的煤质检测技术有利于更高效, 清洁地利用煤炭资源, 开发更高效的煤质检测方法已经成为近年来的研究热点。CiteSpace 是一款用于科学文献的计量和可视化分析的软件, 其生成的图谱以图形的方式展示各种分析结果, 能够让用户快速理解复杂的文献关系。

针对现有的国内外煤质检测文献进行统计整理, 利用 CiteSpace 从发文量、国家和机构等方面分析了煤质检测领域国内外的研究进展和可视化分析。文章介绍了煤质检测的现状以及检测方法, 并探讨未来煤质检测设备的研究方向。

2. 文献计量学分析

利用 CiteSpace 软件对 Web of Science (WOS) 和 CNKI 的检索数据进行可视化分析, 并对发文量、发文时间、专利数量等指标进行统计。针对外文数据, 通过主题检索获取 WOS 数据库中该领域的主要研究成果, 检索词为“TS = (Coal quality) AND TS = (detection)”。根据相关度从原始记录中筛选热门文献和高引用文献作, 最终获得 211 篇核心文献。针对中文数据, 在 CNKI 高级检索中以“煤质”和“检测”为主题词进行检索, 与 WOS 数据处理方法一致, 根据相关度排除部分无效文献, 最终筛选 49 篇相关文献。

2.1. 发文数量趋势分析

对 2014~2024 年间 WOS 核心数据库和 CNKI 中文核心中所有关于“煤质检测”的文献进行统计(见图 1)。从图中可见, 十年间相关文献发文数量总体呈上升趋势, 2017 年和 2020 年发文量略有下降, 但 2023 年迅速上升至最高点, 2024 年又略微回落。这一趋势与全球能源结构转型背景密切相关, 2017 年和 2020 年的短暂下降可能受全球能源市场波动及疫情对科研活动的影响; 而 2023 年的峰值则反映了“双

碳”目标下煤炭清洁利用需求的激增,以及智能化检测技术突破带来的研究热潮。总体来看,煤质检测领域的研究热度持续攀升,说明全球范围对该领域的关注度在不断提高。

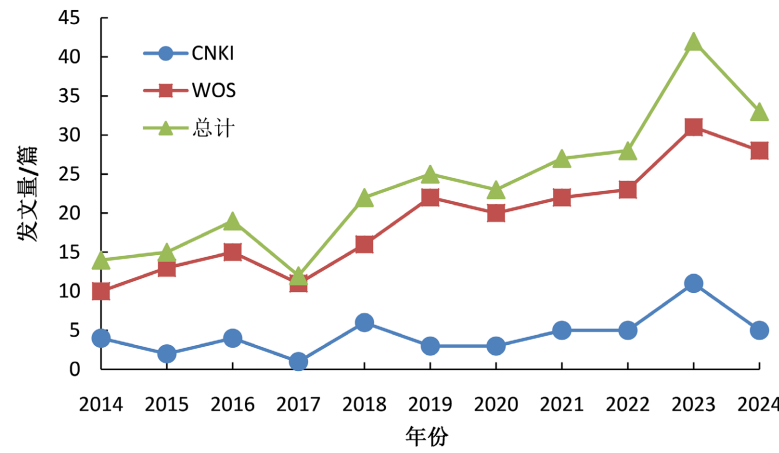


Figure 1. Number of publications on “coal quality detection” in WOS and CNKI in the past decade
图 1. 近十年 WOS 和 CNKI 以“煤质检测”为主题的发文数量

2.2. 国家与机构分析

据 WOS 数据库统计,2014~2024 年间,煤炭质量快速检测领域的文献来自 41 个国家和地区(见图 2)。中国共发表相关文献 114 篇,占总数的 54.03%,在该领域处于领先地位,表明我国对煤炭质量检测高度重视,并在近年来投入大量研究力量,这一数据与我国作为煤炭消费大国的地位高度匹配,国内煤炭消费量占能源消费总量比重为 53.2%,煤炭清洁利用的迫切需求推动了煤质检测技术的研究投入。其他国家中,美国发文 23 篇,位居第二;德国、印度和西班牙分别为 16 篇、11 篇和 10 篇,在煤质检测方法研究方面也具有一定影响力。

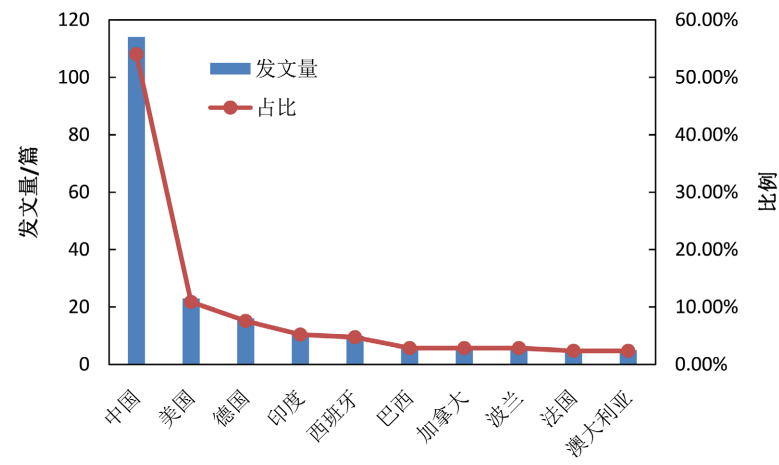


Figure 2. Top 10 countries with publications on “coal quality detection” in the past decade
图 2. 近十年以“煤质检测”为主题的发文量前十国家

全球共有 200 多个研究机构在煤质快速检测领域发表学术成果。发文量排名前十的机构中包括 5 所高校,其中中国矿业大学以 17 篇居首,显示其在该领域具有较高的研究水平和影响力。中国科学院以 11 篇位居第二,其他发文较多的机构包括安徽科技大学、山西大学等(见表 1)。这一分布体现了我国高校牵

头基础研究的科研体系特点，中国矿业大学、安徽科技大学等高校依托煤炭资源型地区产业需求，形成了稳定的研究方向。

Table 1. Top 10 research institutions in the field of rapid coal quality detection in WOS database in the past decade
表 1. WOS 数据库近 10 年来煤质快检领域前十名研究机构

机构	发文量/篇
中国矿业大学	17
中国科学院	11
安徽科技大学	6
山西大学	5
亥姆霍兹联合会	4
地球环境研究所	4
印度理工学院系统(IIT System)	4
联邦科学与工业研究组织(CSIRO)	4
西班牙国家研究委员会(CSIC)	4
量子光学与量子光学器件国家重点实验室	3

2.3. 关键词分析

对 WOS 和 CNKI 数据库中的高频关键词进行筛选分析发现，在 WOS 数据库中，关键词如 air quality (12)、air pollution (8)、polycyclic aromatic hydrocarbons (7)、chemical composition (6)、heavy metals (6)、laser-induced breakdown spectroscopy (5)、trace elements (4)、machine learning (3)、optical property (2)、potassium (2)出现频次较高。多数关键词与环境污染相关，说明煤质检测研究多以减少排放、降低污染为目标。这与全球气候变化治理的大背景直接相关。

从关键词时间线分布图(见图 3)来看，2014~2015 年关键词集中于 chemical composition、air pollution、ash content 等，反映当时研究聚焦于煤质基本属性与燃烧污染的初步分析。2020 年前后关键词包括 risk assessment、polycyclic aromatic hydrocarbons、machine learning、laser-induced breakdown spectroscopy、digital twin 等，研究方向转向环境行为与健康风险评估，检测技术向高精度光谱分析与智能建模演进，这与全球环保政策趋严及人工智能技术的普及密切相关。2024 年关键词以 PM2.5、anthropogenic inputs、optimization 为主，表明当前研究重点已从宏观污染转向精细化源解析，并在技术层面深化了对机器学习与数字孪生的应用。

在 CNKI 数据库中，关键词如激光诱导击穿光谱(10)、在线检测(7)、煤质检测(5)、煤质分析(4)、智能化(2)、近红外光谱(2)、一体化(1)出现频次较高。由此可见，国内研究更侧重于实际应用，多次提及激光诱导击穿光谱，表明该技术是当前较为成熟的煤质检测方法之一。

关键词时间线分布图(见图 4)显示，2014~2016 年相关研究较少，关键词集中于灰分、实时检测、自动化，反映该阶段主要聚焦于煤质检测的基础分析方法与早期自动化系统的构建。2020~2024 年研究重

点转向激光诱导击穿光谱、煤质在线检测、工业机器人、智能分选、碳排放和全元素在线分析等方向，这与国内“智慧矿山”建设、煤炭洗选智能化转型的政策导向高度契合。激光诱导击穿光谱成为核心关键词，并与快速煤质分析紧密相关，标志着煤质检测已逐步从实验室走向工业应用，同时推动检测技术向自动化与智能化升级。

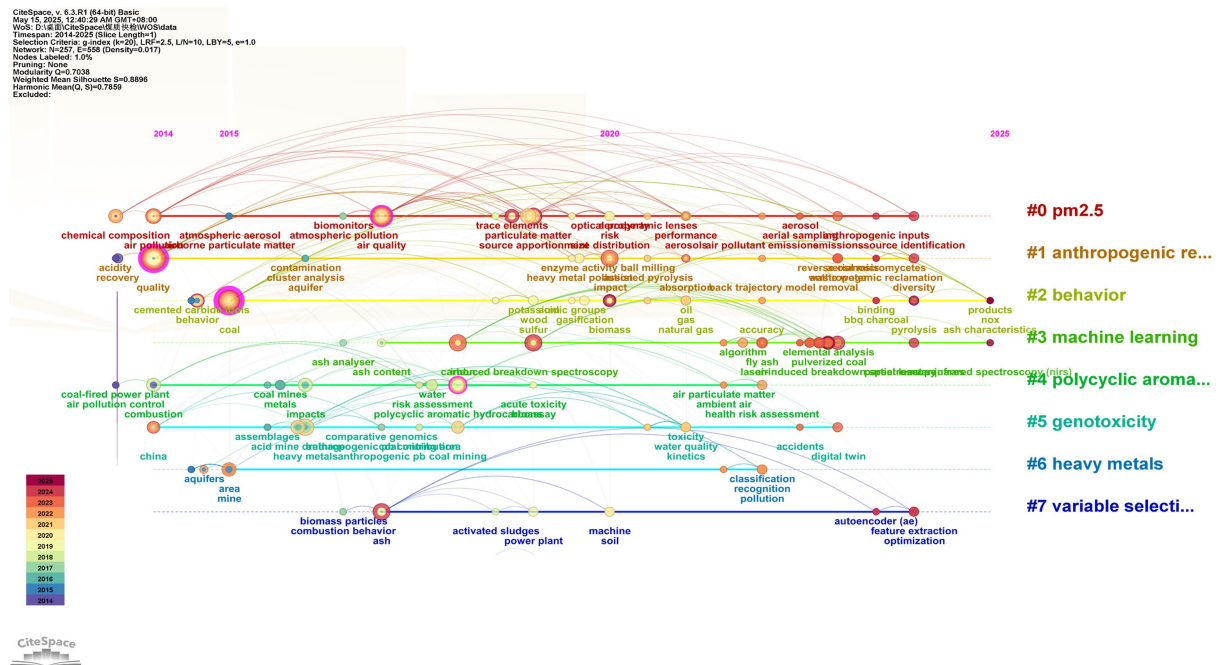


Figure 3. Temporal distribution of keywords in the field of coal quality detection in WOS in the past decade
图 3. 近十年 WOS 煤质检测领域关键词时间分布

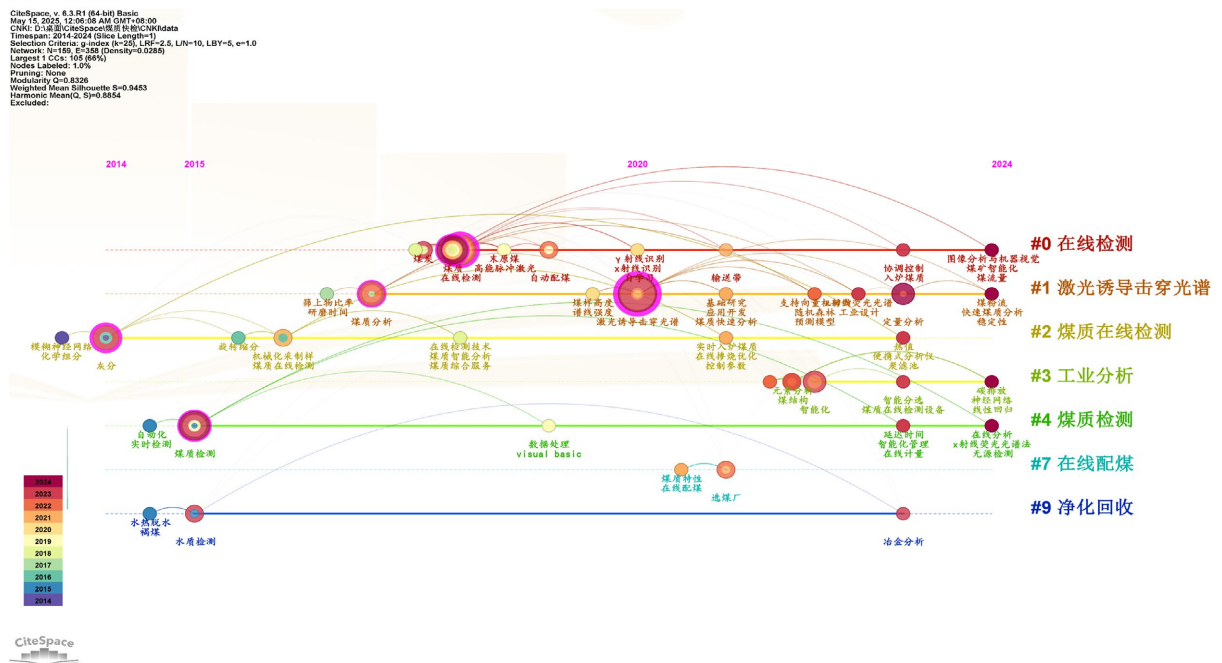


Figure 4. Temporal distribution of keywords in the field of coal quality detection in CNKI in the past decade
图 4. 近十年 CNKI 煤质检测领域关键词时间分布

2.4. 专利分析

在专利数据库中以“煤质”和“检测”为检索词，共检索到 294 件相关专利，最早的申请时间为 2001 年，申请人为南京瞬发科技应用研究所。其中，中国专利数量为 290 件，表明全球在煤质快速检测工艺方面的研究起步较晚，而我国在该领域的研究处于前沿。对 2014 年至 2024 年间的专利数量进行分析(见图 5)，结果显示该时期内专利数量总体波动较大，但整体呈上升趋势。2017 年和 2019 年略有下降，2020 至 2023 年间专利数量快速增长，2023 年达到峰值，2024 年虽有所回落，但仍高于 2022 年。这一趋势与文献发文量形成呼应，2020 年后的快速增长印证了光谱检测技术成熟度提升后，工业应用需求的集中释放。

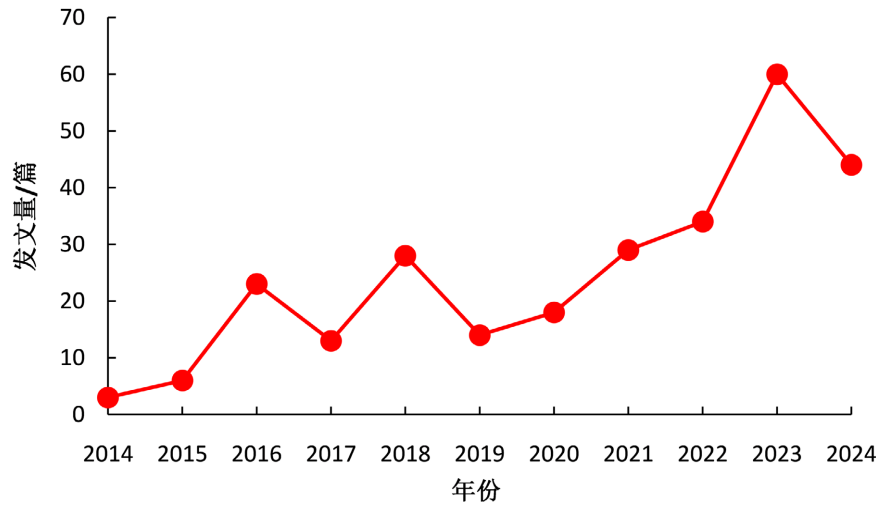


Figure 5. Number of patents on “coal quality detection” from 2014 to 2024
图 5. 2014~2024 年“煤质检测”为主题的专利数量

对十年间的专利申请机构进行统计(见表 2)，申请数量前十的机构中仅有一所高校——华中科技大学，申请量为 12 件，排名第二，其余均为企业。其中，山东华唐环保科技有限公司以 16 件居首，华能武汉发电有限责任公司和国能南京煤炭质量监督检验有限公司分列第二和第四。结合前文发文机构的分析可见，论文发表以高校为主，专利申请则以企业为主，说明高校研究侧重理论探索，而企业更注重技术的实际应用。

Table 2. Top 10 institutions with patents in the field of coal quality detection in the past decade
表 2. 近 10 年煤质检测领域专利数前十机构

机构	发文量/篇
山东华唐环保科技有限公司	16
华中科技大学	12
华能武汉发电有限责任公司	9
国能南京煤炭质量监督检验有限公司	9
长沙开元仪器股份有限公司	7
力鸿智信(北京)科技有限公司	7
济南星丰机电科技有限公司	7

续表

力源智信(苏州)科技有限公司	6
南京南环自动化技术有限公司	6
国电环境保护研究院有限公司	5

3. 煤炭检测技术现状

煤质检测通过分析煤炭性质与成分以评估其质量特性，为优化工业生产流程提供依据。在电力、化工、冶金等行业中，该检测可为煤炭合理利用提供支撑，助力提升能源利用效率并减少环境污染。通过测定煤中硫、氮等有害元素，能为煤炭清洁利用与污染控制提供技术支持，推动煤炭工业可持续发展[3] [4]。近几十年来，光谱学技术在煤质检测领域关注度逐渐提升，如 X 射线、拉曼、近红外及激光诱导击穿光谱分析法等[5]。其中，近红外与激光诱导击穿光谱分析法已发展为近年成熟的煤质检测技术[6] [7]。

3.1. X 射线检测法

基于 X 射线的实时煤质在线检测技术主要包括多能 X 射线吸收法(XAS)和 X 射线荧光法(XRF) [8]。多能 X 射线吸收法是通过被电场加速的电子轰击金属靶产生人工射线[9]。不同能量区间的射线在与煤中元素相互作用时具有不同的作用截面：低能射线对 Si、Al、Ca、Fe 等元素较为敏感，中能射线对 Ca、Fe 等元素更敏感，高能射线对密度变化敏感但对元素含量变化不敏感[10]。通过探测器测量被煤样衰减后的射线能谱，分析三种能量区间的射线强度变化，并利用射线衰减规律建立方程组求解，可推算出 C 与 Si、Al、Ca、Fe、S 之间的含量比例，从而得出煤的灰分、硫分及发热量。该方法可实现煤炭灰分和硫分的同步检测，所用射线能量较低，放射源许可相对容易获取或可豁免[11]。但为保证测量精度，通常要求煤粒粒径小于 13 mm，煤流厚度大于 3 cm，宽度超过 10 cm [12]。X 射线荧光法是借助 X 射线管发射的入射射线对样品产生激发作用，当不同元素被激发时，会辐射出具有特定能量或波长的二次 X 射线。通过对这些特征 X 射线的能量值及强度进行测定，能够明确样品中所含元素的种类与含量[13]。当应用该方法时，Al、Si 元素的激发效率相对较低，且其特征 X 射线能量较弱，不仅容易受到空气环境的干扰，同时对样品的煤层厚度有较高要求[14]。因此，需对样品进行预处理，将其粒度控制在 0.2 毫米以下，并配备专门的制样系统以保证检测效果。相关国内标准，如 GB/T 30732-2014《煤的工业分析方法仪器法》对利用 X 射线原理测定灰分、挥发分等提供了方法依据。从专利数据来看，X 射线检测法相关专利数量较少，与其对样品预处理要求较高、工业适应性有限的特点相关。

3.2. 拉曼光谱法

拉曼光谱法是一种基于拉曼散射效应的分子振动光谱技术，是近年来发展迅速的快速无损碳材料结构检测方法。其原理是利用特定波长的激光照射样品，光子与样品分子相互作用，引起分子极化率的周期性变化，从而产生与分子振动或转动相关的拉曼散射光。当散射光频率相对于入射光发生变化(即产生拉曼位移)时，通过测量其频率变化和强度分布可获得拉曼光谱，进而获取分子结构、化学组成和物理状态等信息。拉曼光谱法可用于分析煤中各类官能团，如甲基、亚甲基、芳香环等的存在及其相对含量。通过分析光谱中特定峰的变化(如芳香环的呼吸振动模式)，可评估煤炭的变质程度；此外，还能检测煤中的吸附水和结合水，对煤炭的储运和利用具有重要意义[15] [16]。

该方法优点包括测量速度快、样品制备简便、对官能团和化学键识别能力强。其主要缺点是易受荧光干扰，尤其在样品含有荧光物质时较为明显；此外，拉曼散射信号本身较弱，对检测仪器的灵敏度要

求较高[17]。目前，拉曼光谱法在煤质检测中的应用更多处于实验室研究阶段。这与 WOS 和 CNKI 关键词中其出现频次较低的特征一致，相关标准，如《ASTME1840》主要侧重于方法本身，针对煤炭的专门标准化工作相对较少。其标准化应用是未来需要关注的方向。

3.3. 近红外光谱法

近红外光谱法是 20 世纪末兴起的高效快速分析技术。近红外光(波长 780~2526 nm)的吸收谱带主要对应含氢官能团(如 C-H、O-H、N-H、S-H)基频振动的倍频和组合频吸收，不同原子在该波段具有特征吸收峰并遵循朗伯 - 比尔定律，可通过吸光度与原子浓度关系计算元素含量[18]。在煤质在线检测中，该技术通过样品光谱指纹识别物理化学性质，可分析煤炭水分、灰分、挥发分、固定碳等参数。通过构建光谱与煤质参数的定量校正模型，能快速精准预测煤质成分；利用不同煤种的特征光谱差异，可实现煤种快速识别与分类[19][20]。通常采用主成分分析、偏最小二乘回归等方法建立煤样光谱数据与煤质参数的关联模型(原理如图 6 所示)。作为近年成熟的检测技术，其具备成本低、精度高、响应快等显著优势，这也解释了为何 CNKI 关键词中“近红外光谱”高频出现，且相关企业专利数量稳步增长。近红外光谱法在煤炭快速检测中的应用已相对成熟，并形成了相关标准。国内标准，如 GB/T 30733-2014《煤中碳氢氮的测定 仪器法》、GB/T 25214-2010《煤中全硫测定 红外光谱法》等涵盖了近红外技术的应用。行业标准 MT/T 1086-2008《煤的工业分析 近红外光谱法》则专门规范了该方法在煤质工业分析中的应用，标准的完善进一步推动了其工业应用进程。

但该方法也存在一定局限性，如光谱吸收信号较弱，易受样品颜色、颗粒度、表面状态等因素干扰，影响测量精度。此外，模型建立需依赖大量标准煤样及其参考数据，过程复杂；当煤种或煤质发生显著变化时，模型需重新建立或更新，可能降低检测效率[21][22]。

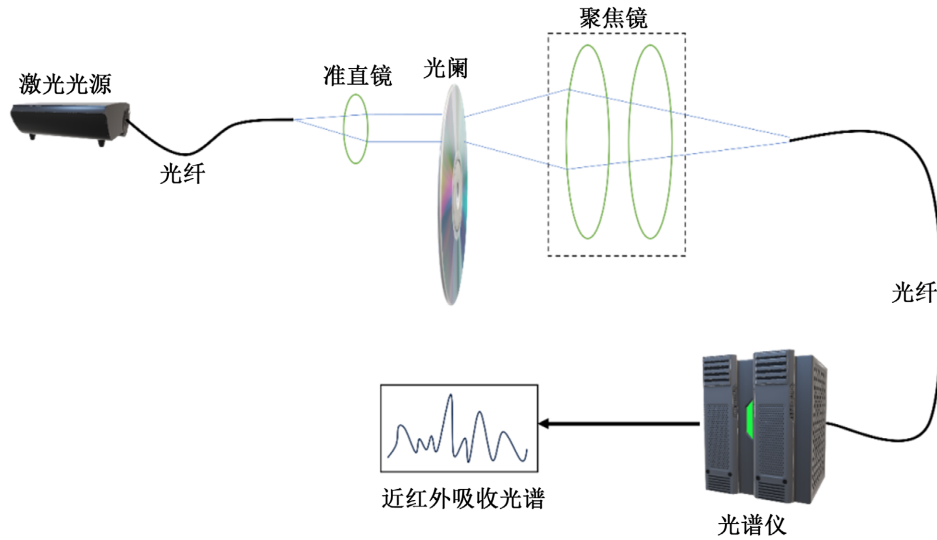


Figure 6. Schematic diagram of near-infrared spectroscopy
图 6. 近红外光谱法原理图

3.4. 激光诱导击穿光谱分析法

激光诱导击穿光谱分析法(LIBS)通过高能激光消融样品产生等离子体，基于探测其辐射辉光光谱实现元素组成分析。脉冲激光聚焦于样品表面，照射区域物质吸收光子能量后迅速加热、气化、解离，形成由自由电子及激发态离子/原子组成的高温等离子体；激光作用终止后，等离子体冷却过程中激发态粒

子向低能级跃迁并释放特征谱线[23]。LIBS 技术可同步检测煤中 Fe、Cu、Al 等金属元素及 C、H、N、S 等非金属元素,实现煤质全元素剖析(原理如图 7 所示)[24]。该方法对煤样物理形态适应性强,固体煤样、煤粉等均可直接检测,无需复杂样品前处理。凭借制样简便、分析速度快、可原位检测、支持远程操作及全元素同步分析等优势,已广泛应用于环境监测[25]、冶金[26]、矿业[27]、食品安全[28]、岩性分析[29]等领域。这与 CNKI 中“激光诱导击穿光谱”成为核心关键词的趋势高度吻合。

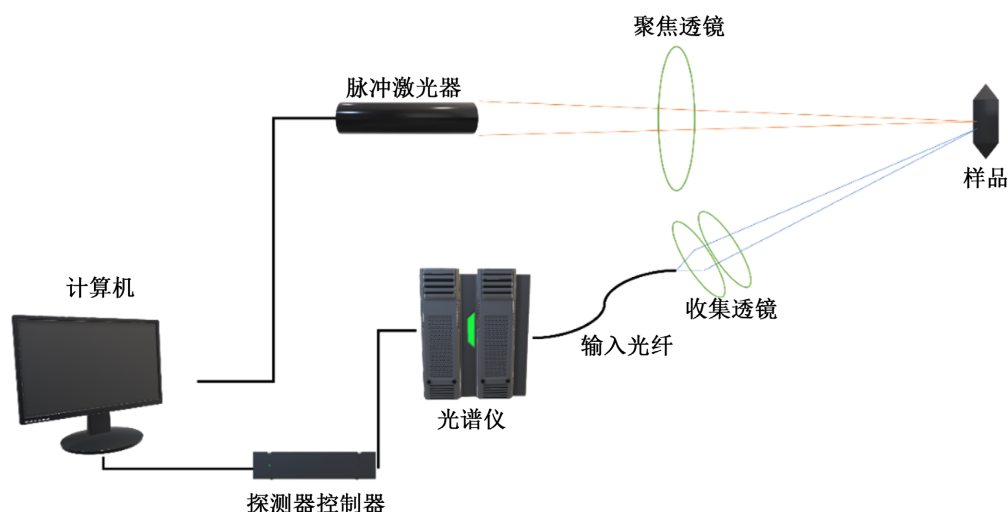


Figure 7. Schematic diagram of laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS)

图 7. 激光诱导击穿光谱法原理图

不过光谱信号强度受激光能量稳定性、煤样表面状态等因素影响很大,导致测量重复性较差;同时受基体效应、光谱干扰等因素制约,定量分析需建立复杂校准模型,对模型精度和泛化能力要求较高,构成当前实际应用的主要技术难点[30][31]。激光诱导击穿光谱分析法(LIBS)在煤炭检测领域的标准化工作正处于快速发展阶段。GB/T 38257-2019《激光诱导击穿光谱法》, T/CSEE 0272-2021《激光诱导击穿光谱煤质在线分析方法》, T/SZBX 191-2024《激光诱导击穿光谱(LIBS)煤质在线分析仪》等标准,为激光诱导击穿光谱技术在煤质元素分析中的应用提供了规范指导,标准的密集出台也推动了 2020 年后相关专利数量的快速增长。

4. 结论与展望

对 2014~2024 年 CNKI 和 WOS 核心数据库中煤质检测领域文献的发表数量趋势、国别与机构分布、研究重点方向及专利数量等数据展开多维度分析。结果显示,全球煤质检测相关研究基数虽较小,但近年发文量呈快速增长态势,表明该领域正逐渐受到关注。WOS 数据库发文量逐年上升且增幅显著, CNKI 发文量亦呈增长趋势,但整体数量始终低于 WOS。在 WOS 数据库中,中国发文量占比达 54.03%,远超其他国家,中国矿业大学以十年 17 篇发文成为该领域最高产机构。专利分析表明,中国相关专利数量居首,且申请主体以企业为主,与学术研究以高校为核心的格局形成互补,凸显理论与工程应用的差异化发展路径。

煤质检测研究始于上世纪 90 年代,早期方法多依赖放射源,存在环境与健康风险。近年来,随着煤炭行业智能化转型加速、清洁能源替代压力增大及环保政策趋严,煤质快速检测技术需求愈发迫切,催生了 X 射线、拉曼光谱、近红外光谱及激光诱导击穿光谱等新兴技术。其中,近红外光谱法与激光诱导击穿光谱已发展为成熟检测手段并应用于实际生产,二者虽各有优劣,但均能实现煤质在线实时检测且

适用性较强。不过当前技术仍面临设备成本高、模型构建复杂等瓶颈,开发高效低成本检测方法成为未来研究重点。将传统的检测方法与大数据, AI 等数字技术相结合,集成核心装置、AI 模型与质量管控平台,展现出高效精准的优势,集成化、智能化将成为未来煤质检测设备的重要发展方向。

参考文献

- [1] Badani-Prado, M.A. (2016) Coal Quality Management Model for Dome Storage (DS-CQMM). *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, **116**, 699-708. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2016/v116n7a12>
- [2] Sun, R., Liu, G., Zheng, L. and Chou, C. (2010) Characteristics of Coal Quality and Their Relationship with Coal-Forming Environment: A Case Study from the Zhuji Exploration Area, Huainan Coalfield, Anhui, China. *Energy*, **35**, 423-435. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.10.009>
- [3] Mizin, V.G., Zinov'eva, L.A. and Klyukin, S.N. (2009) Assessing the Metallurgical Coke Produced at OAO NLMK. *Coke and Chemistry*, **52**, 412-417. <https://doi.org/10.3103/s1068364x09090087>
- [4] Malyi, E.I. (2014) Modification of Poorly Clinkering Coal for Use in Coking. *Coke and Chemistry*, **57**, 87-90. <https://doi.org/10.3103/s1068364x14030028>
- [5] 王洪磊, 郭鑫, 张亦凡, 等. 煤质煤量全面在线检测技术发展现状及应用进展[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(2): 219-237.
- [6] rai, D., Rai, A.K., Rai, A.K., Singh, D.B. and Yadav, A.K. (2025) Libs-a Promising Technique for Control of Food Quality. *Journal of Optics*. <https://doi.org/10.1007/s12596-024-02436-2>
- [7] Stark, E., Luchter, K. and Margoshes, M. (1986) Near-Infrared Analysis (NIRA): A Technology for Quantitative and Qualitative Analysis. *Applied Spectroscopy Reviews*, **22**, 335-399. <https://doi.org/10.1080/05704928608060440>
- [8] Chen, Z.H., Li, J.Q. and Zhao, Z.L. (2019) Establishment and Application of Testing Method for Fluorescence Based Soft X-Ray Absorption Spectrum. *Acta Optica Sinica*, **39**, Article ID: 0330002.
- [9] Grünert, W. and Klementiev, K. (2020) X-Ray Absorption Spectroscopy Principles and Practical Use in Materials Analysis. *Physical Sciences Reviews*, **5**, Article ID: 20170181. <https://doi.org/10.1515/psr-2017-0181>
- [10] Fantin, A., Lepore, G.O., Widom, M., Kasatnikov, S. and Manzoni, A.M. (2023) How Atomic Bonding Plays the Hardness Behavior in the Al-Co-Cr-Cu-Fe-Ni High Entropy Family. *Small Science*, **4**, Article ID: 2300225. <https://doi.org/10.1002/smssc.202300225>
- [11] Vinson, J. (2012) Bethe-Salpeter Equation Approach for Calculations of X-Ray Spectra. University of Washington Press.
- [12] 赵忠辉, 方全国. 煤质在线检测技术现状及发展趋势分析[J]. 煤质技术, 2017(4): 18-21.
- [13] Silveira, P. and Falcade, T. (2022) Applications of Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Technique in Metallic Cultural Heritage Studies. *Journal of Cultural Heritage*, **57**, 243-255. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2022.09.008>
- [14] West, M., Ellis, A.T., Potts, P.J., Strel, C., Vanhoof, C. and Wobrauschek, P. (2015) 2015 Atomic Spectrometry Update—A Review of Advances in X-Ray Fluorescence Spectrometry and Their Applications. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, **30**, 1839-1889. <https://doi.org/10.1039/c5ja90033f>
- [15] Cialla-May, D., Schmitt, M. and Popp, J. (2019) Theoretical Principles of Raman Spectroscopy. *Physical Sciences Reviews*, **4**, Article ID: 20170040. <https://doi.org/10.1515/psr-2017-0040>
- [16] Kumar, N., Mignuzzi, S., Su, W. and Roy, D. (2015) Tip-Enhanced Raman Spectroscopy: Principles and Applications. *EPJ Techniques and Instrumentation*, **2**, Article No. 9. <https://doi.org/10.1140/epjti/s40485-015-0019-5>
- [17] 黎国梁, 宋光均, 姚志湘, 等. 拉曼光谱仪在过程监测中的应用[J]. 广东化工, 2008(5): 106-109, 126.
- [18] Cascant, M.M., Rubio, S., Gallelo, G., Pastor, A., Garrigues, S. and Guardia, M.D.L. (2017) Burned Bones Forensic Investigations Employing near Infrared Spectroscopy. *Vibrational Spectroscopy*, **90**, 21-30. <https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2017.02.005>
- [19] Lee, S.Y., Cho, W.B. and Kim, H.J. (2017) Thermal Residues Analysis of Plastics by FT-Near Infrared Spectroscopy. *Analytical Science and Technology*, **30**, 234-239.
- [20] Kim, D.W., Lee, J.M., Kim, J.S., et al. (2007) The Technology for Online Measurement of Coal Properties by Using Near-Infrared. *Korean Chemical Engineering Research*, **45**, 596-603.
- [21] He, C., Yang, Z., Huang, G., Chen, L. and Han, L. (2011) A Feasibility Study on Using near Infrared Spectroscopy to Classify Straw-Coal Blends. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, **19**, 277-284. <https://doi.org/10.1255/jnirs.934>
- [22] Yao, S.C., Guo, S.J. and Yang, Y. (2023) Research and Application of Flue Gas Ammonia Slip Detection Based on Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (Invited). *Acta Photonica Sinica*, **52**, Article ID: 0352101.

-
- [23] Palleschi, V. (2020) Laser-Induced Breakdown Spectroscopy: Principles of the Technique and Future Trends. *ChemTexts*, **6**, Article No. 18. <https://doi.org/10.1007/s40828-020-00114-x>
- [24] Sneddon, J. and Lee, Y. (1999) Novel and Recent Applications of Elemental Determination by Laser-Induced Breakdown Spectrometry. *Analytical Letters*, **32**, 2143-2162. <https://doi.org/10.1080/00032719908542960>
- [25] Zhou, R., Liu, K., Tang, Z., Gao, P., Yan, J. and Li, X. (2021) High-Sensitivity Determination of Available Cobalt in Soil Using Laser-Induced Breakdown Spectroscopy Assisted with Laser-Induced Fluorescence. *Applied Optics*, **60**, 9062-9066. <https://doi.org/10.1364/ao.433538>
- [26] Guo, Q.J., Yu, H.B., Xin, Y., *et al.* (2010) Experimental Study on High Alloy Steel Sample by Laser-Induced Breakdown Spectroscopy. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, **30**, 783-787.
- [27] Senesi, G.S. (2025) Handheld Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (hLIBS) Applied to *On-Site* Mine Waste Analysis/Evaluation in View of Its Recycling/Reuse. *Chemosensors*, **13**, 41.
- [28] 蒋楠, 李静文, 韩骧, 等. 基于激光诱导击穿光谱技术的马铃薯中龙葵素及营养元素的检测[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(9): 470-475.
- [29] Chen, J., Pisonero, J., Chen, S., Wang, X., Fan, Q. and Duan, Y. (2020) Convolutional Neural Network as a Novel Classification Approach for Laser-Induced Breakdown Spectroscopy Applications in Lithological Recognition. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, **166**, Article ID: 105801. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2020.105801>
- [30] Wang, J.G., Li, X.Z., Li, H.H., *et al.* (2018) Influence of Background Deduction and Intensity Correction on Spectral Parameters of Laser Induced Plasma. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, **38**, 276-280.
- [31] 解强. 关于煤质检验技术的发展思考[J]. 煤质技术, 2020, 35(6): 6-12, 17.