

煤系关键金属矿产研究:中美对比

代世峰

(中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院,北京 100083)

摘 要:关键金属矿产资源对经济发展和国防安全至关重要,从其勘探和开采到分离、提纯和应用全过程,均受到国际社会高度关注,并进入大国间地缘政治较量的核心议题,成为大国地缘政治博弈的重要战场。煤系关键金属矿产是煤地质学、矿床学、冶金学和选矿学等相关领域的研究前沿和热点问题,中国和美国是煤系关键金属研究最重要的 2 支力量。总结了目前中美两国在煤系关键金属成矿理论、勘探、提取和分离等方向的研究现状,对比分析了彼此的优势和短板。近 10 a 来,美国在煤系关键金属矿床的发现和分离提取领域取得了长足进展,而中国在煤系关键金属成矿理论、评价指标和标准建立方面取得了重要进展;前者得益于美国能源部统一部署(明确研发时间节点和核心研发技术)与大量资金投入,后者得益于中国的复杂成煤地质条件,使煤系中关键金属矿床种类多、关键金属的组合形式及空间赋存形式多。地缘政治竞争加剧了对关键金属矿产资源控制权的争夺,因此,实事求是地正确认识中美两国煤系关键金属矿产资源状况、研发现状及各自的优势和短板,对进一步发挥我国优势的关键金属矿产资源在大国地缘政治博弈中的作用,应对我国紧缺关键金属矿产稳定供应的严峻挑战以及减少对外部供应链的依赖具有重要作用。

关键词:煤;煤系;关键金属;中美对比;提取技术;成矿理论

中图分类号:P618.11;P618.2 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2025)01-0506-10

Critical metals in coal and coal-bearing sequences: A comparison between China and the United States

DAI Shifeng

(College of Geoscience and Survey Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Critical metal resources are of paramount importance to economic development and national security. The entire process, i.e., from exploration, mining, separation, purification, to application of critical metals, has attracted significant global attention and has become a core issue in geopolitical competition among major powers around the world. Critical metals hosted in coal and coal-bearing sequences have emerged as a cutting-edge research topic in coal geology, mineralogy, metallurgy, and mineral processing. China and the United States are the two most influential members in this field. This paper firstly summarizes the current research status of both countries in the areas of mineralization theory, exploration, extraction, and separation of coal-based critical metals, and further analyzes their strengths and weaknesses. In the past decade, the United States has made a significant progress in the discovery and separation of critical metals in coal and coal-bearing sequences, due to the unified deployment and substantial funding from the U.S. Department of Energy. China, on the other hand, has made significant advancements in the establishment of mineralization theories, evaluation in-

收稿日期:2024-12-28 策划编辑:韩晋平 责任编辑:宫在芹 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.YG24-1625

基金项目:国家自然科学基金创新研究群体资助项目(42321002);国家重点研发计划资助项目(2021YFC2902000)

作者简介:代世峰(1970—),男,山东日照人,教授,博士生导师。E-mail: dsf@cumt.edu.cn

引用格式:代世峰.煤系关键金属矿产研究:中美对比[J].煤炭学报,2025,50(1):506-515.

DAI Shifeng. Critical metals in coal and coal-bearing sequences: A comparison between China and the United States[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(1): 506-515.



移动阅读

dices and standards of critical metals in coal, thanks to the complex coal-forming geological conditions that led to the co-existence of critical metals in the same basin, as well as diverse combinations and spatial occurrences of these metals. The intensely geopolitical competition has heightened the struggle for control over critical mineral resources. Therefore, a realistic and accurate understanding of the status of critical metals hosted in coal and coal-bearing sequences in China and the United States, as well as their research progress, strengths, and weaknesses, is crucial for further leveraging China's advantages in critical mineral resources in the context of great power geopolitical competition, addressing the severe challenge of ensuring a stable supply of China's scarce critical metals, and reducing the dependence on external supply chains.

Key words: coal; coal-bearing sequences; critical metals; comparison between China and USA; recovery technology; mineralization theory

0 引言

新一轮科技革命和产业变革正加速推进,清洁能源、人工智能、信息技术等战略性新兴产业蓬勃发展;这些产业的快速增长,深刻影响并重塑全球格局,关键金属矿产作为这些产业的物质基础,其重要性日益凸显,也对关键金属矿产资源的勘探和开发提出了前所未有的更高需求^[1]。近年来,地缘政治局势复杂多变,加剧了关键金属矿产产业链、供应链的不稳定性,世界各国对关键金属矿产的争夺日趋激烈。在百年未有之大变局背景下,关键金属矿产资源的勘探、开采、分离、提纯和应用全过程,均受国际社会高度关注,并进入大国间地缘政治较量的核心议题,成为大国地缘政治博弈的重要战场,围绕其获取、控制或合作的竞争将长期存在,并深刻影响国际关系。

煤是一种特殊的沉积有机岩石,在其形成的复杂地质历史过程中(泥炭堆积、压实成岩、变质和后期改造等),当受到特殊地质因素的影响(如火山灰喷发、热液流体侵入和改造、富关键金属蚀源区向泥炭沼泽持续供给),可富集关键金属,在合适条件得以保存并成矿,形成煤系关键金属矿床或煤型关键金属矿床^[2-3],已成为传统关键金属矿产的重要补充,相关研究进展也成为煤地质学学科研究的热点。近年来,该领域多次入选由中国科学院科技战略咨询研究院、中国科学院文献情报中心与科睿唯安向全球发布的“地球科学领域 Top 10 热点前沿”,例如,在 2024 年 11 月发布的《2024 研究前沿》中,煤中关键金属矿产(主要是稀土元素)的研究,再次入选“地球科学领域 Top 10 热点前沿”。因此,煤系关键金属矿产的研发已经成为国家重大需求与前沿科学问题结合的重要命题;同时,该研究也较深层次地涉及采矿学、选矿学、冶金学、燃烧学、数据科学、环境科学与工程等相关领域^[2-3],成为多学科交叉融合并快速发展的契机。

近 10 a 来,煤系关键金属矿产的研究成为煤地质学研究最重要的新生产点之一^[2-4]。世界主要产煤国

家对煤系关键金属矿产的研究均取得了重要进展^[5-10], 中国和美国成为煤系关键金属矿产研究最重要的 2 支力量。笔者总结了目前中美两国在煤系关键金属成矿理论、勘探、分离等方向的研究现状,分析了彼此的优势和短板。煤系关键金属矿产是我国关键矿产资源的重要组成部分,实事求是地正确评估和认识中美两国煤系关键金属矿产资源状况、研发现状及各自的优势和短板,对进一步发挥我国优势关键矿产资源在大国地缘政治博弈中的作用,应对我国紧缺关键金属矿产稳定供应的严峻挑战,以及减少对外部供应链的依赖具有重要作用。

1 美国对煤系关键金属的研发历程、构架与目标

美国对煤系关键金属的关注和研究相对较晚。2023 年 7 月,美国能源部发布了用于评估清洁能源技术供应链安全的关键材料清单(图 1)。该清单中,除氟、磷、碲、铜、锰外,大部分金属可在煤和煤系中高度富集并具有开发应用前景,展现了从煤中开发利用关键材料和关键金属的巨大潜力。2014 年,美国能源国家技术实验室(National Energy Technology Laboratory, NETL)正式启动“煤和煤副产品中稀土元素研究、开发和示范计划”,总体目标是:验证现有的商业或新开发的稀土元素分离技术的技术经济可行性和性能,重点关注稀土元素含量高于 300×10^{-6} 的煤和煤的副产品,通过提取,将稀土元素含量提高到不低于 2% 水平。因为这可生产 90%~99.99% 的高纯度、可销售的单个稀土氧化物^[11]。2014—2024 年,美国对该领域的研究涉及部门多、立项速度快、资金投入力度大;该计划覆盖了 40 余个项目,涉及基础研究、应用基础研究,实验室规模和实验工厂规模的设计、建造和运行,以及工程化规模原型设备研发^[12],参与的研发单位包括大学、商业公司、研究院所、国家实验室等。

“煤和煤副产品中稀土元素研究、开发和示范计划”(2014—2020 年)制定了明确的研究时间节点(图 2)、

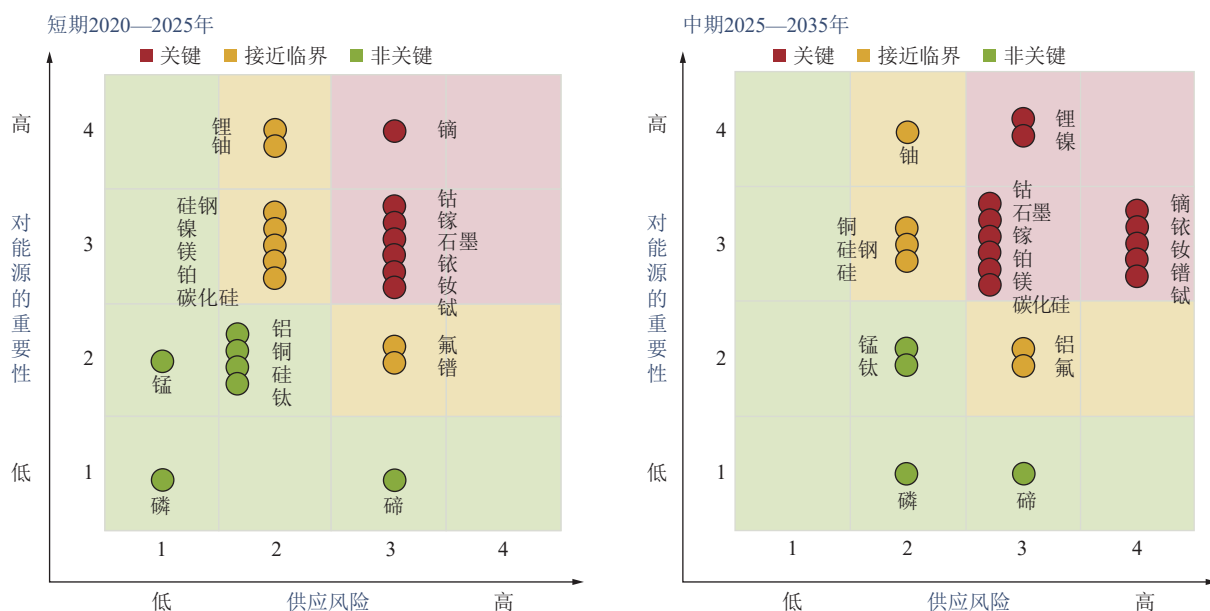
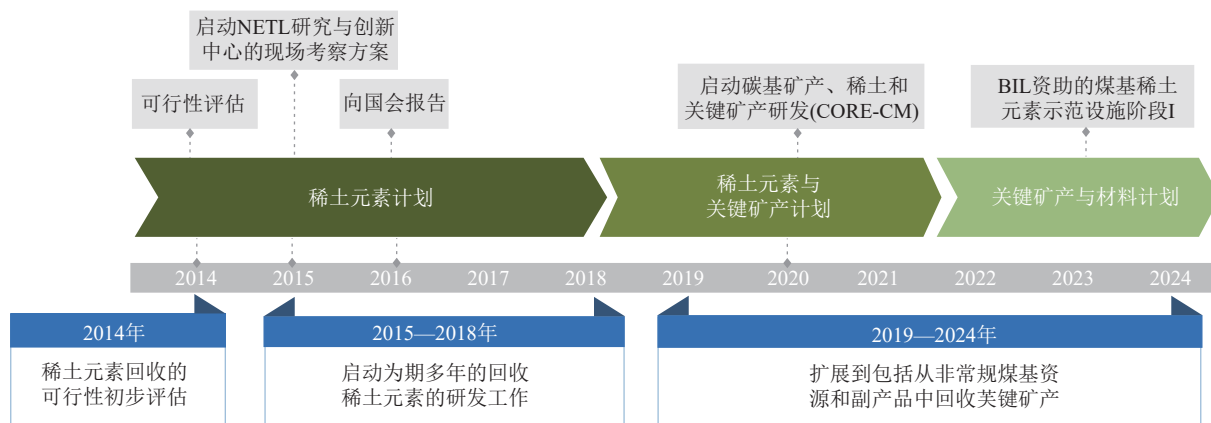


图1 美国能源部(2023)公布的关键材料清单

Fig.1 The 2023 list of critical materials released by U.S. Department of Energy



注：NETL 为美国能源国家技术实验室；BIL 为两党基础设施法案。

图2 美国能源部从煤中提取关键矿产和关键材料的时间线

Fig.2 Timeline of recovery of critical minerals and materials from coal by U.S. Department of Energy

核心技术(图3)和开发流程与框架(图4)。在时间节点上,2014年进行煤中稀土元素提取可行性的初级评估;2015—2018年进行稀土元素提取的研究、开发和示范努力;2019—2024年,扩大从非常规煤基资源和副产品中提取关键矿产。该计划由3个核心技术领域组成:①基础技术(知识产品),包括资源定位、样品采集和特性、技术-经济分析、现场/过程检测器;②分离技术(科技开发):包括商业分离系统-技术转让、转型理念开发;③工艺系统(验证/示范/商业化),包括实验室规模和中试规模预富集产品、高纯产品。该计划的近期目标是(2027—2028年),实现从煤灰中每年提取1 000 t稀土元素的工业化试验;到2035年,实现每年工业化生产10 000 t稀土元素,满足美国10%~20%稀土需求;到2040年,实现年产20 000 t

稀土元素的目标。

需要指出的是,2017年1月,美国能源部向美国国会提交了《煤和煤副产品中稀土元素的报告》,认为从煤和煤副产品中开发稀土元素是可行的,并强调后续工作包括:①继续寻找高含量稀土元素的煤和煤的副产品;②继续研究煤和煤副产品中稀土元素的赋存状态;③设计和开发煤和煤副产品中稀土元素分离技术,为稀土元素下游的加工、提纯打下基础。

2021年10月,美国国家煤炭委员会(NCC)发布《正向碳-煤炭增值产品的先进市场》报告,列出了从煤炭废弃物中回收关键金属的优势,主要有:①与传统稀土/伴生矿产开采方法相比,成本优势明显,开采和运输成本可忽略不计;同时,所需能量和费用更低,这些因素极大降低了关键金属稀土元素的提取和分

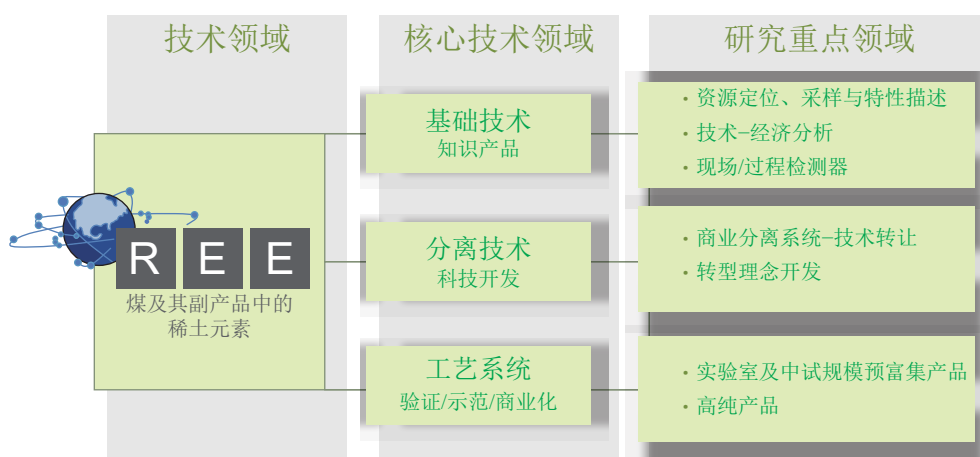
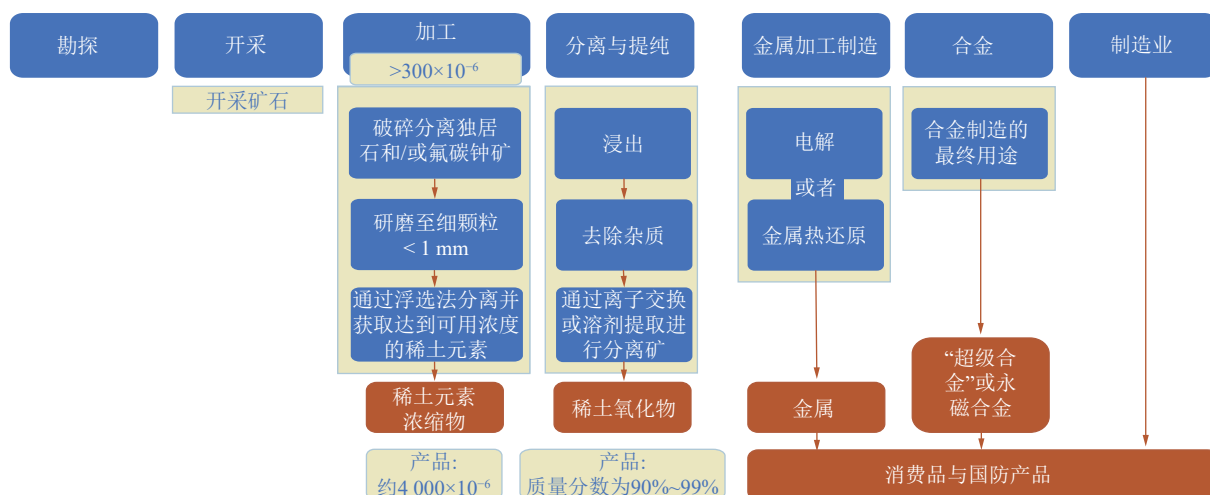


图 3 美国能源部从煤基材料中提取关键矿产和关键材料计划框架

Fig.3 Program structure of critical minerals and materials from coal-based sources of U.S. Department of Energy

图 4 美国能源部从煤基材料中开发关键金属的技术框架^[13]Fig.4 Technology structure of recovery of critical minerals from coal-based sources by U.S. Department of Energy^[13]

离成本。② 稀土分离厂可选址于储备地附近, 无需长途运输, 进一步降低成本。③ 从废弃碳材料中回收稀土元素有助于缓解与煤炭废弃物堆放相关的环境问题。

值得提出的是, 由美国能源部主导的对煤系稀土元素的研究和开发过程中, 发现其他关键金属和关键材料也可从煤中提取和利用。因此, 2020 年, 美国能源部把原计划名称扩充为“关键矿产和材料计划”, 要求从煤中生产稀土和其他关键矿产; 2021 年, 美国能源部另启动“化石能源碳管理”计划, 研发煤中所有具有潜在价值的产品(稀土和其他关键矿产等); 同年, 美国能源部“化石能源和碳管理”办公室投入 5 800 万美元进行美国境内有传统采矿和化石燃料生产地区的煤系关键矿产研发; 2022 年 2 月, 美国白宫网站发布事实清单(Fact Sheet), 宣称确保美国关键矿产供应链; 美国能源部部长格林霍姆宣布“史无前例地计划投入 1.4 亿美元从煤中回收关键金属”。2024 年 2 月,

“拜登-哈里斯政府”宣布投入 1 700 万美元, 继续加强从煤中回收关键矿产和和关键材料研究。2024 年 9 月, 美国能源部宣布 1 950 万美元用于国内关键矿产和关键材料安全供应链的开发, 主要用于支持从煤炭副产品非常规资源中回收关键矿产和关键材料。正如美国能源部宣称的, 这些项目主要帮助恢复美国在关键矿产和材料的提取、分离和精炼方面的领导者地位, 减少对国外供应链的依赖。

除美国能源部外, 2021—2022 年, 美国国防部(United States Department of Defense, DOD)资助美国物理科学公司一项为期 30 个月的“煤灰中的关键矿产”原型中试项目, 旨在从煤灰中回收稀土元素和其他关键矿物, 该计划源于美国国家能源技术实验室与美国物理科学公司共同发起的煤中关键金属项目, 国防部对该技术的支持是美国在煤系关键金属开发的重要一步。

截至 2024 年底, 美国众多研发机构、商业公司

和 11 所高等院校参与了煤系关键矿产和煤系关键材料的研发工作中。

通过以上计划和投资,美国能源部宣称:“将建成美国第一个大规模的设施,将化石能源废弃物转换成高技术的稀有材料”。2023 年,美国能源国家技术实验室在《关键矿产和材料计划》中称:“通过利用工程规模的原型机、示范项目和商用设施加快这些煤中关键矿产的生产,以及岸内零部件制造的回归,我们将不仅能够实现自给自足,还能在众多关键清洁能源和国防产品线及其供应链市场中实现‘美国制造’标准”。

2024 年,作为拜登总统“投资美国”议程的一部分,以最终实现从非传统资源中商业化生产稀土元素为目标,美国能源部宣布拨款超过 1 700 万美元用于另外 3 个项目的研发,以支持设计和建设从煤基资源中生产稀土元素和其他关键矿产的设施^[14]。同年正执行的 3 个“前端工程设计 (Front End Engineering Design, FEED)”项目聚焦于中试规模和/或示范规模设施提取、分离和生产稀土元素和其他关键矿产的潜力,其目标是建立和定义项目范围、时间表和成本的技术要求,并降低未来稀土元素生产设施建设和运营期间的风险^[10]。

美国能源部后续项目包括碳基矿产 (Carbon Ore)、稀土和关键矿产 (CORE-CM) 计划 (美国能源部, 2023 年): 第 1 阶段从 2021—2023 年 (无成本延期至 2024 年), 涉及 13 个区域联盟。第 2 阶段 (待定), 更强调提取工艺的开发, 将区域联盟合并至 8 个。拉马克资源公司 (Ramaco Resources Inc.) 计划在怀俄明州谢里丹附近的布鲁克矿山稀土元素项目开发一个 6 500 hm² 的煤矿, 该区煤中稀土元素的平均含量为 600 × 10⁻⁶ (灰基), 值得提出的是, 与传统稀土矿床不同, 该煤系稀土矿床的放射性元素可以忽略不计, 因此该矿床的开发对环境的破坏相对较小。美国能源部在 2024 年的持续投资还包括: 伊利诺伊大学正建立的一条完全整合的垂直供应链, 用于从煤基资源生产关键矿产; 宾夕法尼亚州四维科技公司 (Tetra Tech Inc.) 正从煤层底板黏土中回收稀土元素和其他关键矿产, 同时将黏土加工成可销售等级; 佐治亚州威纳水务服务公司 (Winner Water Services Inc.) 正从煤灰 (用于混凝土市场) 中提取稀土元素^[15-16]。

2 美国对煤系关键金属研发的进展

2.1 煤中元素分析测试数据的积累

美国最早建立的煤中元素数据库被称为 COAQUAL database, 是美国地质调查局地球化学数据库 (geoCHEMical Data Base, 简称 USCHEM) 的组

成部分, 也是美国煤中关键金属的最主要数据库, 所积累的样品数多达 7 000~8 000 个, 分析了包括关键金属在内的 79 种元素, 其数据库信息量大, 测试方法较统一规范^[17]。该数据库创建于 20 世纪 70 年代中期, 在 1994 年首次发布 1.3 版本^[18-19], 其第 2 个版本发布于 1997 年^[20]。COAQUAL database 是美国煤质和煤中元素数据最全且最权威的数据库^[21]。该数据库 3.0 版本发布于 2015 年, 含 7 657 个未风化的全层煤样品^[22], 共 136 个参数, 包含但不局限于煤的工业分析、常量和微量元素数据。该数据库可通过以下网址 <https://ncrdspublic.er.usgs.gov/coalqual/> 进行访问。LIN 等^[23-24]根据该数据库, 系统评估了美国煤中稀土元素和其他关键金属的资源潜力。由于该数据库建立时间较早, 初期阶段并未关注关键金属, 而更多关注煤中有害元素的赋存分布, 故未包含煤层顶底板或煤系中其他岩石的数据。从 2014 年起, 在美国能源部的主导下, 又积累了大量包括稀土元素在内的煤中关键金属元素数据, 用于煤中关键金属开发利用的可行性评估。

2.2 煤系关键金属富集矿化和矿床的发现

2018 年, 美国能源部国家技术实验室在 *International Journal of Coal Geology* 发表了部分研究报告^[23-24], 指出: “在所研究的美国煤样品中, 有 9%~13% 的样品具有开发利用潜力或非常高的潜力; 美国的煤炭非常有希望成为稀土元素的来源, 从中提取稀土元素可满足美国本土经济发展的需要”。伴随美国能源部主导的资金投入和研发工作, 煤系关键金属富集矿化和矿床的寻找发现方面取得了重大进展。

在寻找高含量稀土元素的煤炭资源方面, 美国能源国家技术实验室认为超过 1 000 万 t 的稀土元素可从美国 9 个州 (WY、CO、UT、NM、AZ、PA、WV、KY 和 VA) 的煤中回收利用; 同时, 还对现有燃煤电厂粉煤灰中稀土元素的分布和提取利用进行评估, 如 HUANG 等^[25]从美国 7 个州 (UT、WY、IO、WI、ND、CO 和 MI) 的 19 个电厂采集粉煤灰, 其原料源煤均来自怀俄明州保德河盆地 (Powder River Basin), 这些粉煤灰中稀土元素具有开发前景, 稀土元素的评估量为 7.4 万~10.6 万 t。

2023 年 5 月, 美国能源部和拉马科资源公司在怀俄明州布鲁克煤矿发现美国最大的稀土矿床 (煤系稀土矿床), 根据美国国家能源技术实验室等单位对钻孔样品的分析, 该矿床含高含量的中、重稀土, 且主要赋存于煤层的顶板和底板; 该矿床总储量为 6.6 万~79.5 万 t, 其中用于制作磁性材料的高价值稀土元素约占 28%, 为 18.1 万~6 万 t^[26]; 该矿床总价值估算

为370亿美元,是自1952年来在美国发现的首个稀土矿床;该矿床开发始于2023年第四季度,可满足美国几十年的稀土元素需求量^[27];同时,该矿床中还高度富集镓和锗。

2.3 煤系关键金属的提取

在提取技术方面,美国能源部将2010年代立项的9个主要项目缩减为第2阶段的4个项目,提取技术重点为将稀土元素含量提高到不低于2%的水平。第2阶段4个项目包括褐煤项目(北达科他大学)、美国东部烟煤项目(肯塔基大学、联盟资源合作伙伴、黑鹰煤炭公司、犹他大学)、酸性矿井水项目(西弗吉尼亚大学)和粉煤灰项目(肯塔基大学、美国物理科学公司、威纳水务服务公司)。粉煤灰项目涉及从肯塔基州两种粉煤灰中开展稀土元素的中试回收,然后在阿拉巴马州的发电厂进行中试示范;目前,威纳水务服务公司正在佐治亚州的一家发电厂进行关键金属的商业开发。自第2阶段项目结束以来,其他3个项目也在向煤系关键金属商业化方向推进^[10,17]。

美国一些高校和研究单位进行了稀土和其他关键金属矿产提取的研发,并取得重要进展。2018年7月,美国物理科学公司利用微型试验设备从东肯塔基燃煤产物中生产了纯度为15%的中稀土元素。基于该微型设备原理,在2019年11月建成实验工厂。2018年,肯塔基大学利用模块化实验设备,从阿巴拉契亚和伊利诺伊的煤矸石中提取了纯度为80%~90%的中稀土元素,其中Nd和Y占45%;2020年,他们生产出纯度为98%的中稀土元素和其他关键矿产。自2018年7月开始,北弗吉尼亚大学利用实验室和小型中试稀土元素提取装置从阿巴拉契亚煤盆地的酸性矿井水和煤渣中进行稀土元素预富集;2019年,他们生产出纯度为80%的中稀土;2020年,成功地从酸性矿井水中生产出纯度为98%的中稀土和其他关键矿产。2019年,北达科他大学设计了“一步选择性酸浸法”从褐煤中生产纯度为65%中稀土元素的设备;2021年,设计完成中试厂。与从粉煤灰中提取关键金属不同,从褐煤中提取稀土元素的优点是褐煤具有反应动力快速,多孔特征而无需破碎,其孔隙结构为弱酸/稀土元素的迁移提供通道;而缺点是需要处理大量提取稀土元素后残余褐煤原料,褐煤的高含水量也是不利因素^[28]。

3 中国对煤系关键金属研发的进展

3.1 煤系关键金属研究资助的基本情况

中国是世界上最早研究煤系关键金属的国家之一,也是开发利用煤中锗最成功的国家。近20a来,

中国学者在煤系关键金属矿床的发现和成矿理论方面也取得了重要进展。

2019年,国家自然科学基金委员会立项“战略性关键金属超常富集成矿动力学重大研究计划”,其中煤系金属矿产的重点项目和培育项目各获批1项。2021年,中国21世纪议程管理中心实施了“战略性矿产资源开发利用”重点专项,煤系金属矿产研究获批3项重点研发计划,分别对煤系战略性金属矿产的分布规律和勘探、开采、分离提取3个专题进行研究。2024年,国家自然科学基金委员会立项“关键金属冶金的基础科学重大研究计划”,也立项对煤中关键金属进行重点支持。

此外,近年来国家自然科学基金委员会在创新研究群体、重点项目、国际合作重点项目、联合基金重点项目、面上基金和青年基金等多层次立项支持煤系关键金属矿产的研究。尽管如此,在资金投入、参与单位数量、战略性金属分离提取技术进步等方面,与美国相比,还有相当大的差距。

3.2 煤系关键金属数据的积累

近40a来,中国相关科研院所和高等院校开展了大量的煤中微量元素的研究。同美国一样,2000年以前,更多关注于煤中有害元素^[29-30]。煤炭科学研究总院北京煤化学研究所于20世纪80—90年代,在全国范围内120个矿务局、441煤矿中对956个煤层煤样和62个生产煤样进行了微量元素的抽样调查,测试了31种微量元素的含量^[31]。DAI等^[32]在任德贻等^[17]的工作基础上,发表了中国煤中包括关键金属在内的微量元素的含量均值,不同元素的样品数量差别大,从85个(In)到3386个(As),大多在1000~1400个。总体而言,中国学者研究的样品相对美国少,采用的测试方法不统一,数据分散于不同科研院所和高等院校及不同研究者,未实现数据共享,无官方相对统一的数据库。

3.3 煤中关键金属评价指标和体系的建立

美国能源部推荐煤中稀土元素总含量 300×10^{-6} 作为开发利用的评价指标,但该指标没有考虑灰分产率和高价值稀土元素在总稀土元素中的占比,因此,该指标未得到广泛应用。美国能源国家技术实验室的LIN等^[24]在评价美国煤中稀土元素的利用价值时,采用SEREDIN和DAI^[33]及DAI等^[34]所提出的评价标准,即稀土元素总量(灰基1000ppm)和高价值稀土元素的占比(即前景系数)。HOWER等^[35]发文对美国能源部推荐的煤中稀土元素评价指标作出评价:“正如DAI等^[36]所指出,关键元素的潜力应当基于灰基而不是全煤基……,因此,能源国家技术实验室提

出基于全煤基的 300×10^{-6} 的目标,应当重新考虑……”。

中国和俄罗斯学者确立了煤中稀土元素富集类型及评价方法,包括轻、中、重富集类型,稀土元素开发利用的评价指标(稀土元素总量和前景系数)^[33]。以中国学者为主导建立了煤中包括关键金属在内的元素富集程度评价方法(即富集系数)及分级体系^[37]。以中国学者为主导建立了 18 种(类)关键金属的成矿品位^[38]。这些以中国学者为主导提出的评价方法、参数和标准被国内外学者广泛接受并采用。

3.4 煤系关键金属矿床的发现

中国在煤系关键金属矿床的发现方面得益于复杂成煤地质条件形成的煤炭资源地域特色。中国最早发现并开发利用煤中锆,也是世界上从煤中商业化提取锆最成功的国家。世界上正在商业化开发利用的 3 个煤型锆矿床中,内蒙古乌兰图嘎和云南临沧 2 个锆矿床位于中国^[39]。这 2 个锆矿床为我国成为锆矿产的优势国家,以及在大国地缘政治博弈中发挥矿产资源优势贡献了重要力量。

2006 年,中国学者在内蒙古准格尔盆地中发现超大型镓-铝-锂矿床^[36,40-42],是我国开发和利用煤中关键金属矿床的另一个重要事件。俄罗斯科学家对该矿床发现的评价是^[43]：“历史上有 2 个重要事件,不仅对煤和金属工业具有重要意义,而且对经济发展具有重要作用,第 1 个是从煤中生产铀,第 2 个是从煤中提取锆。现在的第 3 个事件是中国煤地质学家在过去 10 a 的重要发现——镓铝矿床”;“从内蒙古煤中提取有益金属元素,不仅对中国,而且对其他国家有潜在重大价值”“煤中铝和镓矿床的发现,使煤中有益金属元素的提炼和传统或替代能源选择向前迈进了重要一步”。美国 HOWER 等^[35]也对该矿床的发现进行了评述。随后,中国学者在准格尔老三沟外围勘查区煤中也发现了铝-镓-锂-铈(钽)-钆(钪)高度矿化的现象,其中 6 号煤中铝、锂、镓、钆以及局部层位铈和钽达工业利用品位,具重要成矿潜力和开发利用价值^[44];该发现进一步表明内蒙古准格尔巨大的资源潜力需深度开发和利用,以避免现在粗放式利用的浪费。

2010 年,中国学者在云南东部上二叠统煤系地层中发现了超大型铈-钆-稀土-镓多金属超常矿化现象^[45],这些关键金属的含量均达成矿品位;这些高度富集的关键金属来源于峨眉山地幔柱消亡阶段喷发的碱性火山灰,并经历热液蚀变作用^[46-48],建立了以自然伽马测井曲线和元素含量关联的地球物理-地球化学指标,应用于从煤系中寻找与碱性火山灰有关的

战略性金属矿床。该矿床是受煤层中碱性火山灰蚀变黏土岩夹矸(Tonstein)的矿物岩石地球化学组成、自然伽马测井曲线异常、空间延展规律等启发而发现的,因此,HOWER 等^[35]对该矿床的发现评价为“这是第 1 个成功地将 Tonstein 基础理论应用到稀有金属矿床发现的实例”。

除内蒙古准格尔煤中高度富集锂外,近年来中国学者在广西上林贤安煤田^[49-50]、四川盆地渝东南煤田草堂煤矿^[51]和大坪煤矿^[52]、沁水盆地晋城矿区^[53-54]均发现了锂的高度矿化,此外,宁武煤田^[55-57]、沁水盆地长治矿区^[58]等部分煤层中锂高度矿化,锂的载体主要是锂绿泥石和高岭石等黏土矿物,这些地区煤系锂资源具有重要开发前景。

中国煤系金属矿床(矿化)类型多,组合多样,有锆、锆-铀、镓-铝-锂、铈-钆-镓-稀土、铀、铀-稀土、钒、铀-铈-钒-钼(-稀土)等类型。中国煤系关键金属矿产的分布具明显的地域特色和资源优势,大部分分布于西南地区(云南、贵州、四川南部、重庆、广西)、鄂尔多斯盆地、山西、内蒙古及新疆部分地区(如伊犁、准噶尔)^[59-60],涉及了中国 10 个亿吨级大型煤炭基地(共 14 个),这些煤炭基地影响中国现在和未来的煤炭能源战略格局,在全国乃至全球煤炭资源利用中具有带动和示范作用;同时,这些地区衔接东部较发达地区和西北与西南部欠发达地区,既可提领和推动西部经济发展,又可为促进东部进一步发展提供关键矿产和材料。

然而,与已发现达工业品位的煤系金属矿化的众多类型相比,中国正商业开发的煤系关键金属种类还仅局限于锆、镓、铝和钒。因此,需对煤系锂、稀土、铈-钆-镓-稀土、铀、铀-稀土、铀-铈-钒-钼等矿产,加强分布赋存规律、提取和分离技术的研发。虽然中国在锆、镓和铝的提取技术方面具有优势,但在煤系稀土元素提取技术的研发方面已远落后于美国。尽管中国传统稀土矿产资源相对较丰富,然而 2012 年 6 月中国政府发布《中国的稀土状况与政策》白皮书指出,经半个多世纪的超强度开采,中国稀土资源保有储量及保障年限不断下降,主要矿区资源加速衰减,原有矿山资源大多枯竭;这些传统稀土矿床在开采、选冶、分离过程对生态环境破坏严重;同时,轻稀土矿大多可规模化工业性开采,但钍等放射性元素处理难度较大,离子型稀土矿中稀土元素具分布散、丰度低、规模化工业性开采难度大等问题。此外,美国全力推进煤系中稀土元素和其他关键矿产(如锆和镓)的商业化开发,对我国优势金属矿产资源构成巨大威胁。因此,加快推进煤系关键金属矿产(包括优势矿产资

源稀土元素、锆和镓,以及紧缺矿产资源铌等)的研发,具有重要战略意义。

4 结 论

1) 美国煤系关键金属 (特别是稀土元素) 资源丰富,但关键金属富集成矿类型较单一,在成矿理论和评价方法、标准方面落后于中国。虽然美国以前没有煤系中关键金属工业化的经验,但目前在稀土元素和其他关键金属矿产的提取方面已取得长足进展,正由实验工厂向工业化规模全面推进。同时,其研究对象是多方面全方位的,不仅包括粉煤灰,还包括煤本身、酸性矿井水、煤层顶底板等,并将这些都作为关键金属的提取源。美国从煤系提取关键金属技术的快速发展得益于政府部门 (如能源部和国防部) 统一部署,制定明确的研发时间节点和确定需要研发的核心技术。

2) 中国煤系关键金属矿床类型多、组合多样,煤中锆、镓、钒、铝等早被开发利用,这些关键金属的提取技术处于国际领先水平;中国学者提出的成矿理论和评价方法、标准被国内外学者广泛接受和采用,在此方面具重要的话语权。然而,近 10 a 来,中国学者在煤系关键金属矿床的发现和提取技术方面明显落后于美国,对我国优势矿产资源 (如锆、镓、稀土) 在大国地缘政治博弈中的作用构成巨大威胁;同时,部分煤系关键金属矿产资源尚未得到保护和充分利用 (如镓-铝-锂矿床),将其等同于普通煤层开采被粗放利用,对煤系关键金属矿产资源造成巨大浪费,因此,保护这些煤系关键金属矿产资源刻不容缓。另外,中国学者研究的煤系关键金属矿产的提取对象较单一,主要聚焦于粉煤灰和煤矸石,尚未关注煤本身和酸性矿井水。同时,在煤系关键金属研发方面无权威部门统一部署,不同研发部门各自为政、研究松散,不利于快速有效推进。

3) 中国煤系关键金属矿产的分布赋存具明显的地域特色和资源优势,充分发挥自然资源优势,与科学研究和技术研发形成合力,必将为我国在大国地缘政治博弈中优势关键矿产的作用发挥,应对我国紧缺关键金属矿产稳定供应的严峻挑战,减少对外部供应链的依赖作出重要贡献。

4) 相对于美国,中国对煤系关键金属的研发具有更重要的特殊意义:与美国不同,煤炭是中国能源安全稳定供应的“压舱石”;2023 年,中国原煤产量达 46.6 亿 t,同比增长 2.9%,连续 3 年创历史新高。然而,煤炭的开发利用造成的环境问题是不可回避的重要话题,而煤中关键金属的开发利用,是实现中国战略

性矿产资源增储、将粉煤灰变废为宝、变害为利的有效途径,对实现双碳目标的具有重要作用,也是争取国际话语权的重要科技支撑。

参考文献(References):

- [1] 翟明国, 吴福元, 胡瑞忠, 等. 战略性关键金属矿产资源: 现状与问题[J]. 中国科学基金, 2019, 33(2): 106–111.
ZHAI Mingguo, WU Fuyuan, HU Ruizhong, et al. Critical metal mineral resources: Current research status and scientific issues[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2019, 33(2): 106–111.
- [2] 代世峰, 赵蕾, 魏强, 等. 中国煤系中关键金属资源: 富集类型与分布[J]. 科学通报, 2020, 65(33): 3715–3729.
DAI Shifeng, ZHAO Lei, WEI Qiang, et al. Resources of critical metals in coal-bearing sequences in China: Enrichment types and distribution[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(33): 3715–3729.
- [3] 代世峰, 任德贻, 周义平, 等. 煤型稀有金属矿床: 成因类型、赋存状态和利用评价[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1707–1715.
DAI Shifeng, REN Deyi, ZHOU Yiping, et al. Coal-hosted rare metal deposits: Genetic types, modes of occurrence, and utilization evaluation[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1707–1715.
- [4] DAI S F, FINKELMAN R B, HOWER J C, et al. Inorganic geochemistry of coal [M]. Amsterdam: Elsevier, 2023.
- [5] BLISSETT R S, SMALLEY N, ROWSON N A. An investigation into six coal fly ashes from the United Kingdom and Poland to evaluate rare earth element content[J]. Fuel, 2014, 119: 236–239.
- [6] FIKET Ž, MEDUNIĆ G, FURDEK TURK M, et al. Rare earth elements in superhigh-organic-sulfur Raša coal ash (Croatia)[J]. International Journal of Coal Geology, 2018, 194: 1–10.
- [7] ARBUZOV S I, CHEKRYZHOV I Y, FINKELMAN R B, et al. Comments on the geochemistry of rare-earth elements (La, Ce, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu) with examples from coals of north Asia (Siberia, Russian far East, North China, Mongolia, and Kazakhstan)[J]. International Journal of Coal Geology, 2019, 206: 106–120.
- [8] NECHAEV V P, CHEKRYZHOV I Y, VYSOTSKIY S V, et al. Isotopic signatures of REY mineralization associated with lignite basins in South Primorye, Russian Far East[J]. Ore Geology Reviews, 2018, 103: 68–77.
- [9] TAGGART R K, HOWER J C, DWYER G S, et al. Trends in the rare earth element content of U. S. -based coal combustion fly ashes[J]. Environmental Science & Technology, 2016, 50(11): 5919–5926.
- [10] MILLS S. Rare earth elements—recovery from coal-based materials [M]. Gloucester: International Centre for Sustainable Carbon, 2024.
- [11] NETL. Rare earth elements and critical minerals[EB/OL]. [2024–12–13]. https://netl.doe.gov/sites/default/files/2021-01/Program-141_0.pdf.
- [12] NETL. Critical minerals sustainability program. Project portfolio. Virtual Annual Review Meeting[EB/OL]. [2024–12–13]. <https://www.netl.doe.gov/sites/default/files/2021-05/2020-2021-REE-Portfolio.pdf>.
- [13] MULLEN J. Overview of NETL's critical minerals & materials pro-

- gram[EB/OL]. [2024-12-13]. <https://www.energy.gov/sites/default/files/2023-04/overview-netl-critical-minerals-materials-program.pdf>.
- [14] BENTHAM J. US Government invests in critical mineral production from coal resources [EB/OL]. [2024-12-13]. <https://www.worldcoal.com/coal/20022024/us-government-invests-in-critical-mineral-production-from-coal-resources/#:~:text=As%20part%20of%20President%20Biden's,materials%20from%20coal%2Dbased%20resources>.
- [15] ONSAT J. US DOE earmarks \$17MM for research into deriving minerals from coal [EB/OL]. [2024-12-13]. https://www.rigzone.com/news/us_doe_earmarks_17mm_for_research_into_deriving_minerals_from_coal-22-feb-2024-175834-article/ Rig Zone, Houston, Texas, USA. 2024.
- [16] HOWER J C. Book review: “Rare earth elements – recovery from coal-based materials” by Stephen [J/OL]. International Journal of Coal Geology, 2025 [2024-12-13]. <https://www.sciencedirect.com/journal/international-journal-of-coal-geology>.
- [17] 任德贻, 赵峰华, 代世峰, 等. 煤的微量元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [18] BRAGG L J, OMAN J K, TEWALT S J, et al. US Geological Survey Coal Quality (COALQUAL) Database; Version 1.3 [R]. The Survey USGS Distribution Branch, US Geological Survey, 1994.
- [19] FINKELMAN R B, OMAN C L, BRAGG L J, et al. The U. S. Geological Survey Coal Quality Data Base (COALQUAL) [R]. Open-File Report No. 94-177, US Geological Survey, 1994.
- [20] BRAGG L, OMAN J, TEWALT S, et al. Coal Quality (Coal Qual) Database; Version . 0 (Open-file report No. 97-134) [R]. US Geological Survey, 1997.
- [21] TOOLE-O’NEIL B, TEWALT S J, FINKELMAN R B, et al. Mercury concentration in coal; Unraveling the puzzle[J]. *Fuel*, 1999, 78(1): 47–54.
- [22] PALMER C A, OMAN C L, PARK A J, et al. The U. S. Geological Survey Coal Quality (COALQUAL) database version . 0 [R]. Data Series, Reston, VA, US Geological Survey, 2015: 57.
- [23] LIN R H, SOONG Y, GRANITE E J. Evaluation of trace elements in U. S. coals using the USGS COALQUAL database version 3.0. Part II: Non-REY critical elements[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2018, 192: 39–50.
- [24] LIN R H, SOONG Y, GRANITE E J. Evaluation of trace elements in U. S. coals using the USGS COALQUAL database version 3.0. Part I: Rare earth elements and yttrium (REY)[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2018, 192: 1–13.
- [25] HUANG Z X, FAN M H, TIAN H J. Rare earth elements of fly ash from Wyoming’s Powder River Basin coal[J]. *Journal of Rare Earths*, 2020, 38(2): 219–226.
- [26] WEIR INTERNATIONAL. Technical report summary. Brook Mine property. Rare earth exploration target. Project No. 6371[EB/OL]. [2024-12-13]. <https://ramacoresources.com/wp-content/uploads/2023/05/Weir-International-Brook-Mine-Assessment-05.0.pdf>.
- [27] ATKINS C. An intelligent, integrated and sustainable approach to coal-derived carbon products, rare earth elements, and critical minerals [R]. Sheridan: Ramaco Research Rodeo, , 2024.
- [28] THEAKER N. Rare earth element extraction and concentration at pilot-scale from North Dakota coal-related feedstocks [EB/OL]. [2024-12-13]. https://netl.doe.gov/sites/default/files/netl-file/22RS-26_Theaker.pdf. Institute for Energy Studies, University of North Dakota, Grand Forks, ND, USA. 2024.
- [29] 孙景信, Jervis R E. 煤中微量元素及其在燃烧过程中的分布特征[J]. *中国科学 (A 辑)*, 1986(12): 1289–1294.
- SUN Jingxin, JERVIS R E. Distribution characteristics of trace elements in coal during combustion process[J]. *Science China (A series)*, 1986(12): 1289–1294.
- [30] 陈冰如, 杨绍晋, 钱琴芳等. 中国煤矿样品中砷、硒、铬、铀、钍元素含量分布[J]. *环境科学*, 1989, 10(6): 23–26.
- CHEN Bingru, YANG Shaojin, QIAN Qinfang et al. , Concentration distribution of As, Se, Cr, U, and Th in coals samples from Chinese coal mines[J]. *Environmental Science*, 1989, 10(6): 23–26.
- [31] 白向飞. 中国煤中微量元素分布赋存特征及其迁移规律试验研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2003.
- BAI Xiangfei. Experimental research of distribution characteristics and migration of trace elements in Chinese coals [D]. Beijing: China Coal Research Institute , 2003.
- [32] DAI S F, REN D Y, CHOU C L, et al. Geochemistry of trace elements in Chinese coals; A review of abundances, genetic types, impacts on human health, and industrial utilization[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2012, 94: 3–21.
- [33] SEREDIN V V, DAI S F. Coal deposits as potential alternative sources for lanthanides and yttrium[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2012, 94: 67–93.
- [34] DAI S F, XIE P P, JIA S H, et al. Enrichment of U-Re-V-Cr-Se and rare earth elements in the Late Permian coals of the Moxinpo Coalfield, Chongqing, China; Genetic implications from geochemical and mineralogical data[J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 80: 1–17.
- [35] HOWER J, GRANITE E, MAYFIELD D, et al. Notes on contributions to the science of rare earth element enrichment in coal and coal combustion byproducts[J]. *Minerals*, 2016, 6(2): 32.
- [36] DAI S F, JIANG Y F, WARD C R, et al. Mineralogical and geochemical compositions of the coal in the Guanbanwusu Mine, Inner Mongolia, China; Further evidence for the existence of an Al (Ga and REE) ore deposit in the Jungar Coalfield[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2012, 98: 10–40.
- [37] DAI S F, SEREDIN V V, WARD C R, et al. Enrichment of U-Se-Mo-Re-V in coals preserved within marine carbonate successions: Geochemical and mineralogical data from the Late Permian Guiding Coalfield, Guizhou, China[J]. *Mineralium Deposita*, 2015, 50(2): 159–186.
- [38] DAI S F, FINKELMAN R B. Coal as a promising source of critical elements: Progress and future prospects[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2018, 186: 155–164.
- [39] DAI S F, SEREDIN V V, WARD C R, et al. Composition and modes of occurrence of minerals and elements in coal combustion products derived from high-Ge coals[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2014, 121: 79–97.
- [40] 代世峰, 任德贻, 李生盛. 内蒙古准格尔超大型镓矿床的发现[J]. *科学通报*, 2006, 51(2): 177–185.

- DAI Shifeng, REN Deyi, LI Shengsheng. Discovery of Zhungeer super-large gallium deposit in Inner Mongolia[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(2): 177–185.
- [41] DAI S F, REN D Y, CHOU C L, et al. Mineralogy and geochemistry of the No. 6 coal (Pennsylvanian) in the Junger Coalfield, Ordos basin, China[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2006, 66(4): 253–270.
- [42] DAI S F, LI D, CHOU C L, et al. Mineralogy and geochemistry of boehmite-rich coals: New insights from the Haerwusu surface mine, Jungar Coalfield, Inner Mongolia, China[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2008, 74(3-4): 185–202.
- [43] SEREDIN V V. From coal science to metal production and environmental protection: A new story of success Commentary[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2012, 90: 1–3.
- [44] 李晶, 王道华, 张涵, 等. 准格尔煤田老三沟外围勘查区煤系 Al-Ga-Li-Nb(Ta)-Zr(Hf) 共富集成因及资源潜力评价[J]. *地质学报*, 2024, 98(8): 2299–2315.
- LI Jing, WANG Daohua, ZHANG Han, et al. The co-enrichment mechanism and resource potential of Al-Ga-Li-Nb(Ta)-Zr(Hf) in Laosangou coal exploration area, Jungar coalfield[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2024, 98(8): 2299–2315.
- [45] DAI S F, ZHOU Y P, ZHANG M Q, et al. A new type of Nb (Ta)-Zr(Hf)-REE-Ga polymetallic deposit in the Late Permian coal-bearing strata, eastern Yunnan, southwestern China: Possible economic significance and genetic implications[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2010, 83(1): 55–63.
- [46] DAI S F, NECHAEV V P, CHEKRYZHOV I Y, et al. A model for Nb-Zr-REE-Ga enrichment in Lopingian altered alkaline volcanic ashes: Key evidence of H-O isotopes[J]. *Lithos*, 2018, 302: 359–369.
- [47] ZHAO L X, DAI S F, GRAHAM I T, et al. New insights into the lowest Xuanwei formation in eastern Yunnan Province, SW China: Implications for Emeishan large igneous province felsic tuff deposition and the cause of the end-Guadalupian mass extinction[J]. *Lithos*, 2016, 264: 375–391.
- [48] WANG N, DAI S F, NECHAEV V P, et al. Detrital U-Pb zircon geochronology, zircon Lu-Hf and Sr-Nd isotopic signatures of the Lopingian volcanic-ash-derived Nb-Zr-REY-Ga mineralized horizons from eastern Yunnan, SW China[J]. *Lithos*, 2024, 468: 107494.
- [49] 曹泊, 秦云虎, 朱士飞, 等. 广西上林合山组炭质泥岩中锂和稀土元素的成因及富集机制[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(5): 1851–1864.
- CAO Bo, QIN Yunhu, ZHU Shifei, et al. Origin and enrichment mechanism of lithium and rare earth elements in carbonaceous mudstone of Heshan Formation, Shanglin, Guangxi[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(5): 1851–1864.
- [50] 廖家隆, 李宝庆, 张福强, 等. 广西晚二叠世煤系沉积型锂矿研究现状及展望[J]. *中国煤炭地质*, 2022, 34(10): 9–14.
- LIAO Jialong, LI Baoqing, ZHANG Fuqiang, et al. Research status and prospect of sedimentary lithium resources of Late Permian coal measure in Guangxi[J]. *Coal Geology of China*, 2022, 34(10): 9–14.
- [51] ZHOU M X, ZHAO L, WANG X B, et al. Mineralogy and geochemistry of the Late Triassic coal from the Caotang mine, north-eastern Sichuan Basin, China, with emphasis on the enrichment of the critical element lithium[J]. *Ore Geology Reviews*, 2021, 139: 104582.
- [52] ZOU J H, CHEN H Y, ZHAO L, et al. Enrichment of critical elements (Li-Ga-Nb-Ta-REE-Y) in the coals and host rocks from the Daping Mine, Yudongnan Coalfield, SW China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2023, 152: 105245.
- [53] ZHAO L, WARD C R, FRENCH D, et al. Origin of a kaolinite-NH₄-illite-pyrophyllite-chlorite assemblage in a marine-influenced anthracite and associated strata from the Jincheng Coalfield, Qinshui Basin, Northern China[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2018, 185: 61–78.
- [54] ZHAO L, DAI S F, NECHAEV V P, et al. Enrichment origin of critical elements (Li and rare earth elements) and a Mo-U-Se-Re assemblage in Pennsylvanian anthracite from the Jincheng Coalfield, southeastern Qinshui Basin, northern China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2019, 115: 103184.
- [55] SUN B L, GUO Z M, LIU C, et al. Lithium isotopic composition of two high-lithium coals and their fractions with different lithium occurrence modes, Shanxi Province, China[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2023, 277: 104338.
- [56] 孙蓓蕾, 孔艳磊, 王国权, 等. 高锂无烟煤中不同赋存态锂同位素组成趋同特征及其机理[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(5): 1773–1781.
- SUN Beilei, KONG Yanlei, WANG Guoquan, et al. Convergence and its mechanism of lithium isotopic composition with different occurrence states in Li-rich anthracite[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(5): 1773–1781.
- [57] SUN B L, ZENG F G, MOORE T A, et al. Geochemistry of two high-lithium content coal seams, Shanxi Province, China[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2022, 260: 104059.
- [58] WANG X M, WANG X M, PAN Z J, et al. Mineralogical and geochemical characteristics of the Permian coal from the Qinshui Basin, northern China, with emphasis on lithium enrichment[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2019, 214: 103254.
- [59] ZHUANG X G, QUEROL X, ALASTUEY A, et al. Geochemistry and mineralogy of the Cretaceous Wulantuga high-germanium coal deposit in Shengli coal field, Inner Mongolia, Northeastern China[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2006, 66(1-2): 119–136.
- [60] 宁树正. 中国煤中金属元素矿产资源[M]. 北京: 科学出版社, 2019.