

洁净煤地质内涵、现状与未来发展方向

唐跃刚 王绍清 王晓帅 郭鑫 王亚丰 薛李苹 Harold H. Schobert

引用本文:

唐跃刚, 王绍清, 王晓帅, 等. 洁净煤地质内涵、现状与未来发展方向[J]. 煤田地质与勘探, 2025, 53(1): 36–63.

TANG Yuegang, WANG Shaoqing, WANG Xiaoshuai, et al. Connotation, research status, and development directions of clean coal geology in China[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2025, 53(1): 36–63.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.12363/issn.1001-1986.24.10.0621>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

论煤地质学与碳中和

Review on carbon neutralization associated with coal geology

煤田地质与勘探. 2021, 49(1): 1–11 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.01.001>

中国煤系矿产近现代地质研究进展与走向

Advances and trends of modern research on the geology of coal-measure minerals in China

煤田地质与勘探. 2025, 53(1): 1–24 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.24.10.0622>

我国煤层气高效开发关键技术研究进展与发展方向

Research progress and development direction of key technologies for efficient coalbed methane development in China

煤田地质与勘探. 2022, 50(3): 1–14 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.21.12.0736>

煤层气开发中煤粉问题的研究现状及研究思路

Research status and thoughts for coal fines during CBM development

煤田地质与勘探. 2020, 48(6): 116–124 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2020.06.016>

煤矿井下近钻头随钻测量技术研究现状和发展趋势

Research status and development trend of near-bit MWD in underground coal mine

煤田地质与勘探. 2023, 51(9): 10–19 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.23.05.0278>

矿井电法勘探研究现状与发展趋势

Research status and development trend of mine electrical prospecting

煤田地质与勘探. 2023, 51(1): 259–276 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.23.01.0031>



移动阅读

唐跃刚, 王绍清, 王晓帅, 等. 洁净煤地质内涵、现状与未来发展方向[J]. 煤田地质与勘探, 2025, 53(1): 36–63. doi: 10.12363/issn.1001-1986.24.10.0621

TANG Yuegang, WANG Shaoqing, WANG Xiaoshuai, et al. Connotation, research status, and development directions of clean coal geology in China[J]. Coal Geology & Exploration, 2025, 53(1): 36–63. doi: 10.12363/issn.1001-1986.24.10.0621

洁净煤地质内涵、现状与未来发展方向

唐跃刚¹, 王绍清¹, 王晓帅¹, 郭鑫², 王亚丰³, 薛李苹¹, Harold H. Schobert⁴

- (1. 中国矿业大学(北京) 地球科学与测绘工程学院, 煤炭精细勘探与智能开发全国重点实验室, 北京 100083;
2. 煤炭科学研究总院有限公司智能矿山研究院, 北京 100013; 3. 昆明理工大学 环境科学与工程学院,
云南省土壤固碳与污染控制重点实验室, 云南 昆明 650500; 4. The EMS Energy Institute,
The Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania 16802, United States)

摘要: 【目的】勘查与评价低碳、零排放和煤资源利用最大化是 21 世纪煤地质工作的重要内容。

【研究进展】根据煤、煤地质学研究内容及洁净煤技术国内外发展趋势, 定义了广义和狭义洁净煤地质学, 其中, 煤加工利用中提效减排的地质地球化学问题是狭义煤地质学研究内容, 煤炭勘探开发利用以及生态修复等全煤炭生命周期提效减排是广义洁净煤地质学研究内容。概述了煤中有益成分和有害成分的组成与分布, 梳理了影响洁净煤技术的地质因素, 主要与成煤作用过程中内生、外生地质作用相关, 涉及构造、变质、火山喷发、岩浆侵入, 风水搬运沉积, 氧化还原, 地下水等。详细综述了煤炭资源洁净评价、洁净加工、转化与利用等研究现状, 回顾了中国洁净煤地质学的研究进展, 归纳为萌芽—探索—成熟—确立—拓展等 5 个阶段。【问题与展望】提出了成煤作用、有机无机、矿物质和洁净评价等所存在的科学与技术问题; 指出, 未来化学、物理学、生物学及大数据人工智能等方面的发展为洁净煤地质学及其大型工程带来拓展机遇; 未来十年, 洁净煤时空分布、绿色智能煤气等伴生矿产分质共采、洁净煤气化、煤基新材料、地下煤化工、生态修复等是重要研发方向, 建议持续关注相关创新研究成果。

关键词: 洁净煤地质学; 影响因素; 加工利用; 环境; 研究现状; 发展方向; 中国

中图分类号: P618.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1986(2025)01-0036-28

Connotation, research status, and development directions of clean coal geology in China

TANG Yuegang¹, WANG Shaoqing¹, WANG Xiaoshuai¹, GUO Xin², WANG Yafeng³,
XUE Liping¹, Harold H. Schobert⁴

- (1. State Key Laboratory for Fine Exploration and Intelligent Development of Coal Resources, College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 2. Intelligent Mine Research Institute, Chinese Institute of Coal Science, Beijing 100013, China; 3. Yunnan Provincial Key Laboratory of Soil Carbon Sequestration and Pollution Control, Faculty of Environmental Science & Engineering, Kunming 650500, China; 4. The EMS Energy Institute, The Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania 16802, United States)

Abstract: [Objective] The exploration and assessment of low-carbon, zero-emission, and maximized utilization of coal resources, emerge as a focus of coal geology in the 21st century. [Research Advances] Based on the research content of coals and coal geology, along with the domestic and international development trends of clean coal technology (CCT), this study defines clean coal geology in the broad and narrow sense. Clean coal geology in the narrow sense focuses on the geological and geochemical issues related to efficiency enhancement and emission reduction in coal processing and utilization. In contrast, clean coal geology in the broad sense emphasizes efficiency enhancement and emission reduction throughout the coal life cycle, involving the exploration, exploitation, and utilization of coals, as well as relevant

收稿日期: 2024-10-10; 接收日期: 2025-01-10

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(42030807); 国家自然科学基金项目(41872175); 国家重点基础研究发展计划项目(973 计划)(2012CB214901, 2014CB238905)

第一作者: 唐跃刚, 1958 年生, 男, 重庆人, 博士, 教授, 博士生导师。E-mail: tyg@vip.163.com

© Editorial Office of Coal Geology & Exploration. OA under CC BY-NC-ND

ecological restoration. This study summarizes the compositions and distributions of beneficial and harmful components in coals and analyzes the geologic factors affecting CCT, which are primarily associated with endogenetic and exogenetic geological processes during coal formation and involve tectonics, metamorphism, volcanic eruption, magmatic intrusion, aeolian-fluvial transport and deposition, redox reactions, and groundwater. Furthermore, this study provides a comprehensive overview of the current status of research on the clean assessment, clean processing, conversion, and utilization of coal resources. Additionally, this study reviews the advances in research on China's clean coal geology, categorizing them into five stages: germination, exploration, maturity, establishment, and expansion. [Issues and Prospects] This study proposes some scientific and technical problems concerning coal formation, organic/inorganic elements, minerals, and clean assessment, positing that future advancements in chemistry, physics, biology, and big data/artificial intelligence (AI) will bring opportunities for the further development of clean coal geology and its applications in large-scale engineering. In the next decade, important research and development directions will include the spatiotemporal distribution of clean coals; the green, intelligent, quality-based combined production of paragenetic and associated minerals like coal gas; clean coal gasification; coal-based novel materials; underground coal-to-chemicals, and ecological restoration. It is advisable to continuously pay attention to the innovative research achievements in these aspects.

Keywords: clean coal geology; influence factor; processing conversion and utilization; environment; research status; development direction; China

清洁低碳、安全高效是能源体系现代化的总体要求,是当今国家规划能源工作的重点^[1-3]。中国能源资源“富煤、贫油、少气”的特点决定了煤炭的重要地位短期内不会改变。目前,中国是世界上煤炭最大生产和消费国,2023 年分别占世界煤炭生产和消费的 51.6% 和 56%^[4]。中国煤炭 2023 年生产 47.1 亿 t,煤炭消费占一次能源消费结构的 55.3%^[5]。煤炭大量利用在推动我国国民经济发展的同时,也造成严重的环境污染。煤源污染和生态文明之间的矛盾,是未来中国洁净煤工艺发展的主要推动力。中国近 5 a^[6]、10 a^[7] 后煤炭发展规划提出,中国必须加快培育和发展具有核心自主知识产权的煤炭清洁高效开发利用技术和产业,赢得发展主动权。“清洁-低碳-高效-安全”煤炭利用^[8]的核心在于整体推进煤炭在全行业、全产业链的清洁利用。

1 煤与洁净煤地质

煤(coal)为黑色或褐色层状固体可燃有机沉积岩,地史时期沼泽中植物遗体在覆水缺氧或少氧的环境下,经生物化学作用被部分分解、埋藏后,在温度、压力的条件下,经地质作用(煤化作用)转变而成,含有一定量的矿物质,相应的灰分产率不超过 50%(干基质量分数)^[9-17]。煤是一种组成和结构极为复杂且极不均匀的地质体^[14-17]。

洁净煤(clean coal)最初是 20 世纪 80 年代初期美国和加拿大在解决两国边境酸雨问题谈判的特使德鲁·刘易斯(美国)和威廉姆·戴维斯(加拿大)所提出的概念^[18-19]。洁净煤技术(clean coal technology, CCT)一词起源于美国,是针对燃煤对环境造成的污染提出的技术对策,旨在减少污染排放与提高利用效率的煤炭加工、燃烧、转化以及污染控制等高新技术的总称^[18-22]。就全球意义来讲,不同国家与地区,洁净煤工艺包含不同

的内容,如氮、硫、碳捕获。20 世纪 90 年代初,美国 D. C. Peters^[23] 就注意到煤利用对环境地质的影响,尤其关注顶板垮落、构造对采煤的影响、塌陷、复垦以及副产品等问题。近年来,由于经济刺激与碳税,碳捕集、利用与封存(carbon capture, utilization and storage, CCUS)促进了洁净煤工艺的发展^[24]。唐书恒等^[25] 提出,洁净煤是在加工利用过程中不会对环境构成潜在污染或污染程度极低的煤。而笔者认为洁净煤是指经过洁净煤技术(即减少污染与提高利用效率的技术)处理后的清洁高效的煤。

煤地质学,是以地质理论为基础,研究煤、煤层、含煤岩系、煤盆地以及与煤共生的其他矿产(油页岩、煤成气等)的物质成分、成因、性质及其分布规律的学科,也称煤田地质学,是地质学中形成较早的分支学科。煤地质学与大地构造学、构造地质学、沉积学、矿床学、地球物理探矿和石油地质学等密切相关^[26]。煤地质学与煤田地质学是同义词^[9,27-29]。秦勇^[30] 梳理了煤田地质学科群,从资源勘查与开发保障 2 个角度,对煤田地质学科加以重新审视,提出的煤田地质学科重新定位的框架结构突出了“维持充足的资源”和“减轻地质灾害”两大主题。曹代勇等^[31] 在分析“煤田地质学”“煤地质学”等概念的基础上又提出了煤炭地质学的定义,即煤炭地质学是运用地质学理论和方法,研究煤炭资源(煤、煤层气及其他共伴生矿产)的成因、性质、赋存规律、开发、利用及其环境效应的一门综合性学科。拓展了煤地质学的内涵与外延,其英文还是 Coal Geology^[32]。

洁净煤地质学首先出现在 21 世纪初^[25],它是由煤田地质学与环境科学、化学、生物学和洁净煤工艺学等学科相互渗透而形成的一个全新领域,是在对环境因素深入认知的基础上,研究煤炭的可利用性、煤中化学元

素和微量物质在人类赖以生存的周围环境中的含量水平、分布规律、赋存状态和迁移特征过程及其与人类健康关系的学科,具有高度的综合性和交叉的特点^[33]。随后,笔者开展了研究现状的调研,在煤、煤地质学、煤田地质学、煤炭地质学等定义的基础上,充实内涵、拓展外延,综合洁净煤地质学国内外发展趋势,重新对其进行定义如下。

狭义洁净煤地质学:以煤地质学(煤岩学、煤化学、煤地球化学等)为基础,以环境学为导向,结合洁净煤技术,研究煤及其共生伴生矿产的加工、转化和利用过程中的高效与减污特性、成因及时空分布演变的学科。是对煤中有益部分最大化、有害部分最小化程度做出预测评价,指出不同煤炭资源清洁、高效、综合利用途径的学科;是对煤在各种加工利用过程中的地质地球化学污染做出预测评价,指出不同煤炭资源清洁、高效、综合利用的途径,为煤炭资源分质分级利用提供科学依据。

广义洁净煤地质学:运用煤岩学、煤化学、地质学、采煤学、煤工艺学和环境学等理论和方法,研究洁净煤资源(煤、煤层气及其他共生伴生矿产)的成因、性质、赋存规律的学科,是研究煤的勘探-开采-加工-转化-利用-生态修复-产品再循环等全部过程的煤资源成因、空间分布等地质地球化学问题的学科。其内容包括资源洁净评价和勘查、开采地质保障、洁净煤加工、洁净煤转化、洁净煤利用及其环境保护、共生资源利用、循环经济地质、生态修复与地质灾害安全防护等。它是煤资源与勘查洁净评价学、绿色开采地质学、洁净煤地下水文地质学、加工洁净煤地质学(选煤洁净地质)、煤转化洁净地质学、煤利用洁净地质学、生态环境修复等学科群。

煤炭的大量利用,带来两个问题:一个是效率问题,一个是环境问题,洁净煤工艺的实质是提效减排。狭义洁净煤地质学研究煤加工利用中提效减排的地质地球化学问题,广义洁净煤地质学是研究煤炭勘探开发利用以及生态修复等全煤炭生命周期的提效减排。综上所述,洁净煤地质核心是评价煤中有益有害成分的赋存分布,探讨其地质影响因素,为最大化地有效利用有益物质(增加附加值)和最小化排放有害物质的技术与工程提供科学依据。

2 煤的物质组成

研究煤的物质成分,主要包括煤岩学、煤化学和煤地球化学等 3 个学科。即从 3 个方面来研究煤的组成:岩相组成、化学组成和元素组成。岩相组成为显微组分和矿物质。化学组成为无机成分(水分、其他无机元素)和有机成分(C、H、O、N、S),元素组成为常

量元素和微量元素。

从煤岩学角度来看,煤为高等植物和低等植物经成煤作用而成的腐植煤和腐泥煤,宏观上腐植煤由镜煤、亮煤、暗煤和丝炭组成;微观上,煤是由镜质体、类脂体、惰质体等显微组分和矿物质组成^[13,34-49]。显微组分是指煤在显微镜下能够区别和辨识的最基本的成分,是显微镜下能观察到的煤中成煤原始植物残体转变而成的有机成分^[13]。高煤阶煤显微组分分类命名最早由秦勇提出^[40]。煤中的矿物是指在显微镜下可观察到的煤中无机成分,主要以黏土类、硫化物类、碳酸盐岩类、氧化物类、硫酸盐岩类及磷酸盐岩类等矿物为主^[13,34-39,49]。煤及低温灰中检测出的矿物有 200 多种^[14]。煤以腐植煤为主,镜质体体积分数多在 50%~80%,不属于这样的煤,多为特殊煤。我国中生代煤不乏富惰质体的煤^[35],富类脂体的煤为残植煤。煤中最常见的矿物是黏土、石英、方解石、菱铁矿和硫铁矿等。按煤化程度,煤分为低阶褐煤 brown coal(木质褐煤 lignite、亚烟煤 subbituminous coal)、中阶烟煤 bituminous coal 和高阶无烟煤 anthracite^[11,50]。

对于复杂的煤来讲,煤化学从煤的工业分析(proximate analysis of coal)、元素分析(ultimate analysis)、化学结构分析和工艺分析等几个方面研究煤的组成、性质与分类^[51-52]。煤化学的实际运用衍生出了煤质学,即依据煤质参数,评价煤炭质量的学科^[53-57]。煤的大工业分析可获得煤的水分、灰分、挥发分、固定碳、硫分和发热量等指标数据,并分级^[58-60]。煤的元素分析最著名的是氢碳和氧碳原子比的范式图^[61-62]。煤结构的研究是煤化学研究热点,已提出了 130 多种煤的化学结构模型^[63-65]。典型煤结构模型的发展轨迹是“两相结构、缔合结构、复合结构、镶嵌结构”^[64-70]。煤工艺学探讨煤加工(如煤可选性)、热值与热解(气化、液化、焦化等)以及燃烧特性,提出中间相、黏结和结焦机理,最终运用反映煤化程度和黏结结焦参数对煤进行分类^[10-11,50,71]并加以利用。

从煤地球化学角度来看,煤是植物转变来的,C、H、O、N 和 S 等元素构成了煤有机成分的 99% 以上,其他无机元素在煤中以少量或微量存在。煤地球化学分为煤有机地球化学和煤无机地球化学。煤无机地球化学可分为常量(少量)和微量地球化学。

煤有机地球化学是研究煤中与碳直接结合的元素、化合物及其衍生物的组成、成因、迁移与转化的学科^[72]。集中研究煤中气体(煤层气)、液体(煤成油、生物标志化合物等)、固体(大分子结构)。作为有机地质体(沉积有机质),煤有机质包括煤层气、煤成油(很少)、可溶组分(氯仿沥青)和不溶组分(III 型干酪根^[73-74])。可溶组分的研究重点在于甄别出各种生物标志化合物^[75],不

溶组分研究则主要探索大分子结构和石墨烯结构^[72]。

煤无机地球化学是研究无机元素在成煤作用过程中的分布、分配、集中、分散、共生组合与迁移规律及演化的科学。煤中矿物质代表不含有机碳、有机氢、有机氧、有机氮或有机硫的干燥(无水)煤的所有组分。该定义明确煤中的矿物质应该包括4部分: 矿物颗粒、类矿物、溶解在孔隙水中的可溶性盐类和其他无机质以及分布在有机质大分子中的无机元素^[76-77]。一般来说, 煤中元素除常量元素以外, 含量低于1 000 $\mu\text{g/g}$ (0.1%)的统称为微量元素。目前, 国内外学者对煤中微量元素已有很多研究, 有关中国煤中微量元素的研究有孙景信^[78]、陈冰如^[79-80]、任德贻^[81-83]、王运泉^[84]、白向飞^[85]、唐修义^[86]、Dai Shifeng^[15,17,87-88]等, 国外研究煤中微量元素的有捷克 V. Bouška^[89]、美国 H. J. Gluskoter^[90]、R. B. Finkelman^[14,91-92]、澳大利亚 D. J. Swaine^[93-95]、C. R. Ward^[76-77]、俄罗斯 M. P. Ketris^[96]等。Dai Shifeng等^[87]研究分析出中国煤中微量元素背景值, 并建立评价煤中微量元素富集系数计算公式^[97]。

3 煤中有益成分

煤不仅是重要的能源, 而且是冶金、化工的重要原料。煤利用主要用其有机质。现有煤理论主要是煤有机质理论, 无论是煤分类^[10-11,22,57], 还是煤工艺性, 都依据煤有机质性质。煤中水、灰分(矿物质)和硫氮等杂质的研究是近数十年的研究热点, 但煤中矿物质, 也有潜在的稀有矿产资源。

不同煤阶不同煤种, 煤的用途不一。褐煤适合于液化, 烟煤炼焦性能最好, 焦煤热值最高, 高阶烟煤和无烟煤适合于高炉喷吹和制备碳材料^[22,57,64]。镜质体、类脂体是煤工艺的活性组分, 惰质体和矿物是惰性组分^[13,35,57]。煤中 C、H、O、N、S 等5个有机元素, 后3个是杂原子, C、H 是主要利用对象。煤中 C 元素质量分数大于60%, H 的热值比 C 高, C 和 H 供给人类煤气、煤焦油和液化油、焦炭和燃烧热, 乃至化工产品, 一座现代化煤化工工厂, 由煤炼焦衍生出的产品包括焦炭、煤气、煤焦油、甲醇、合成氨、氢气、粗苯、复合肥、硫酸铵、负极材料等, 可达几十种。地质时期煤中 C 和 H 留给人类大量的煤层气、煤成气和少量的煤成油以及煤型天然气水合物^[98-103]。全国煤炭资源潜力评价探讨了中国宏观煤岩与显微组分的地质时空分布, 出版了1:250万的中国煤类分布图^[56,104]。此外, 笔者^[105]还对中国煤岩与煤质学的研究现状与未来发展方向进行了煤有机组成及其性质的探讨。煤有机质可在宏观、微观(显微镜)、超微观(电镜、大分子结构)等不同尺度下表征^[72]。煤主要由腐植煤组成, 且以镜质体为主。

由于特殊的成分、特殊的成因和特殊的工艺性质, 构成了特殊煤。市场供需关系决定了煤的短缺与稀缺, 中国煤炭标准委员会制定了特殊煤与稀缺煤划分标准^[106], 颁布了特殊煤稀缺煤的政策^[107], 中国煤炭地质总局承担了“特殊煤稀缺煤资源调查”项目^[108], 开展特殊煤研究^[109-112], 系统地研究了中国特殊煤的组成、成因、工艺性质及其分布^[113-118]。煤化作用的实质是芳构化^[26,35,40], 其终极演化是石墨化^[119]。学者们提出了煤系石墨的划分体系^[120-121], 并对湖南鲁塘石墨的工艺性质开展了研究^[122]。随着增加煤附加值、碳达峰碳中和(“双碳”)目标的提出以及煤分级分质利用的开展, 煤基石墨烯的研究也成为煤利用热点^[123-126]。B. K. Saikia等^[127]指出煤中具有随机取向的涡轮静态结构的薄片堆叠就是石墨烯, 在分子水平上探讨了煤中石墨烯层与脂肪族碳丰度的关系, 指出煤中石墨烯微晶即是多环芳烃组成的芳香片层结构。不同显微组分石墨烯含量依次为: 高阶镜质体>惰质体>低、中阶镜质体>树皮体>角质体^[128]。

煤中有益微量元素, 不是指对人体或对环境有益, 而是指异常富集, 含量达到可提取利用工业品位的元素。即煤中有益微量元素是指具有经济价值的微量元素, 与煤共伴生且经济可采。V. V. Seredin 和 Dai Shifeng^[129]提出了评价煤灰中稀土元素是否具有利用价值的标准, 之后 Dai Shifeng 与 R. B. Finkelman 又对此评价方法做了改进, 并就“煤炭很有希望作为关键元素的来源”这一主题进行了进展综述和未来展望, 明确指出煤能够作为战略性元素如 Ge、Ga、U、V、Se、Y、Sc、Nb、Au、Ag、Re、稀土元素(REE)及碱金属如 Al 和 Mg 的重要来源。煤炭开采和利用中产生出这些元素, 增加了煤炭的诸多好处, 在中国、美国、俄罗斯、印度等煤炭主要消费国家, 煤炭成为经济和环境关注度很高的能源^[130-131]。近期, 国家重点研发计划、国家自然科学基金创新研究群体项目的主要研究内容是煤中的战略性关键金属矿产^[88,132-135], 项目研究成果包括其富集类型、分布与挑战, 这为国家制定 Ge 等稀有金属保护的出口政策提供了科学依据。Jiu Bo等^[136]研究了 Ga、Li 及 REE 等稀有金属的赋存状态, 这些元素与煤中胶质结构体和充填于胶质碎屑体的黏土有关。专著 *Inorganic Geochemistry of Coal* 专门陈述了 U、Ge、REY、Ga 和 Al 等关键元素^[17]。

4 煤中有害成分

无论煤中无机质, 还是有机质, 都有有益成分和有害成分。本文对煤中有害成分厘定如下: 其一, 环境层面上的有害性, 即对人类健康和环境构成直接或间接危害的系列有机质、矿物质或元素(S、As、Pb、Hg 等), 如

黄铁矿、纳米级石英等。其二,煤工业意义上的有害性,主要涉及易结渣的系列矿物和元素(包括 Na、K、Ca、Mg、Fe、Si、Al 等),如高岭石、黄铁矿、方解石、石膏等;如元素 P,是有益于人体健康促进新陈代谢的元素,但煤中磷含量高,煤炼焦所出焦炭质量差,进而影响冶炼产品(钢铁)的性能。煤中有害成分具有双重含义,即指环境健康方面的有害性,又指工业有害性。煤中有害物质包括无机物质和有机物质两大类。煤中有害无机物质包括矿物质、有害微量元素、无机硫等;煤中有害有机物质包括:有机硫、苯类、酚类、多环芳烃等。下面分 3 方面综述煤中有害成分。

1) 煤的灰分和硫分

煤是由矿物质和显微组分组成的可燃沉积有机矿产。煤本身没有灰分,灰分是煤在特定条件下完全燃烧后形成的残渣,残渣量与测定条件有关,常用灰分产率表征。煤的灰分与煤中矿物质含量有关^[76-77,90],中国煤以中灰煤和低灰煤为主^[137],高灰煤储量最少,呈“北低南高”趋势^[138]。有关中国煤灰分布特征研究,最早有李文华^[139]、李河名^[39]、袁三畏^[54],研究表明中国商品煤的灰分以低灰(10%~20%)和中灰(20%~30%)煤为主。近期全国煤炭资源潜力评价研究表明,煤灰分的储量加权平均最低的是早中侏罗世煤,最高的是古近纪煤,离陆源区近的煤灰分高,海相煤多高硫低灰^[56,104]。

煤中硫是煤中主要有害元素之一,以单质硫、有机硫和无机硫(硫化物硫和硫酸盐硫)3 种形态赋存于煤中。煤中有机硫和黄铁矿硫是可燃部分,燃烧生产有害气体二氧化硫。20 世纪初,美国学者 D. White 等^[140]开创了煤中硫的研究。D. J. Casagrande^[141-143]、Z. S. Altschuler^[144]、W. H. Calkins^[145]、J. S. Sinninghe-Damsté^[146]、R. A. Gayer^[147] 等论述煤中各种硫的起源、化学形式等科学问题,揭示了煤中黄铁矿的成因取决于硫酸盐还原菌、铁、硫和有机质 4 者的共存关系。中国煤中硫的研究者有陈鹏^[148]、李文华^[149]、Ren Deyi^[150-151]、周春光^[152-153]、刘大锰^[154]、周诚林^[155]、Zhou Chenglin^[156]、Dai Shifeng^[157]、唐跃刚^[158-159]、罗隽飞^[160]、胡军^[161]、高连芬^[162]、汤达祯^[163]、Zhao Qiaojing^[164-165] 等,研究得出中国高硫煤主要分布于晚古生代的北方太原组和南方龙潭组等含煤地层。总体上,中国矿业大学(北京)、中煤科工西安研究院(集团)等单位学者对煤中硫的赋存规律、成因、伴生元素及微生物作用、脱硫可行性等方面的研究取得了丰富的成果^[25]。

从煤中硫的资源储量加权平均值的统计结果得出我国煤中硫含量变化范围大,时代分布上晚二叠世煤中硫分含量最高,其次是南方早石炭世煤和北方晚石炭世煤,而早、中侏罗世煤硫含量最低,空间分布上华南赋

煤区煤中硫分含量最高,西北赋煤区煤中硫分最低,从西北向东南方向煤中硫分呈逐渐升高再降低的趋势^[159]。对煤中硫的研究可分为两大类:有机硫和无机硫。国内对煤中无机硫的研究比有机硫早。无机硫的研究主要包括:黄铁矿硫的研究^[153-154,166-167]。有机硫的研究包括有机硫结构、赋存状态、地质成因和分布等^[158,161,164-165,168-169],魏强等^[168]简述了煤中有机硫结构的基本概念并论述了煤中有机硫结构研究的进展。

2) 有害(微量)元素

地壳中可供统计的元素共有 92 种^[170],在煤、煤样品、燃煤产物和煤层气样品中可检测到 84 种元素^[82,86]。其中有毒、有放射性、致癌或对环境存在潜在危害的元素称为有害微量元素^[81-82,171-174]。国际上不同学者和不同机构对煤中有害微量元素的划分和界定有所不同^[174-179],例如, R. B. Finkelman 等^[174-175]讨论了煤中对环境敏感的微量元素: As、Cd、Cr、Hg、Se、B、Cl、F、Mn、Mo、Ni、Pb、Be、Cu、P、Th、U、V、Zn、Ba、Co、Sb、Sn、Tl、Ag。其中,有害元素有 Tl、Be、Cd、Hg、Pb;致癌元素有 Be、Cd、Cr、Ni、Pb、As。赵峰华等^[176]将煤中有害微量元素界定为 22 种:包括 As、Cr、F、Cd、Se、Sb、Co、Mn、Pb、Hg、Ni、Ti、Th、Cu、Zn、Mo、Cl、Be、Ba、Ag、U、V。其中, V 是我国地面水标准严格限制的元素; Ti 的含量虽然小,但具有毒性;因此, Ba、Ag、V、Ti 应列入。D. J. Swaine^[93]依据环境敏感程度将微量元素分为 3 类: I 包括 As、Cd、Cr、Hg、Pb、Se; II 包括 B、Cl、F、Mn、Mo、Ni、Be、Cu、P、Th、U、V、Zn; III 包括 Ba、Co、I、Ra、Sb、Sn、Tl。综合分析国内外学者的研究,从生理学角度,应该关注的煤中有害元素包括: P、S、Cl、Na、Mg、K、Ca、F、Si、V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、Se、Mo、I、W、As、Cd、Hg、Pb、Rn 等 25 种^[178]。

燃煤过程煤灰熔融结渣与常量元素(矿物种类)的组成和比例有较大关系。早在多年前就有学者指出,铁的化合物是煤灰负面结渣行为的主要原因之一^[179]。煤灰中碱性元素氧化物,包括 Fe、Ca、Mg、Na、K 等,特别是 Na 的氧化物,通常会降低煤灰熔点,易引起玷污结渣;酸性灰成分,包括 SiO₂、Al₂O₃、TiO₂ 等,会使得煤灰熔点升高^[180-182]。煤灰中酸、碱灰成分比例相当时,倾向形成低温共熔体,进而引起结渣。学界一般认为,含亲石元素尤其是碱金属或碱土金属元素的矿物多为倾向于结渣的矿物,如含 Na、Mg、K、Ca、Fe 等元素的矿物^[183-186],相对应的矿物有黏土类矿物、黄铁矿、菱铁矿、方解石、白云石、石膏、长石类矿物等^[187]。

杨淑婷^[138]利用前人已有的数据,对中国煤中微量元素在各个省份分布特征进行了研究。国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目“煤中有害元素分布富集

机理及环境污染防治”(2014—2018 年), 重点研究煤中 Hg、As、F、Be 和 U 这 5 种有害元素。国家自然科学基金重点项目“煤中有害矿物质的富集分异特性及其热迁变影响机制”研究煤中工业结渣和环境敏感元素及其矿物。煤中有害元素的赋存状态大多以无机矿物质形式存在, 脱除有害矿物, 也就脱除了有害元素。煤中不同化学形态的元素具有不同的物理特性、化学特性、生物特性和环境迁移能力, 认识有害元素在煤炭利用过程中的形态及其迁移富集规律, 对控制结渣及有害矿物质排放、准确评估其对人类健康和环境的危害等具有重要意义。

有益和有害是相对的, 很多有害元素如 U、Se、Mo 等, 达到一定程度就是“有益”的, 例如从石煤中提炼 V、U、Se、Mo 等。但是, 当这些元素富集水平尚达不到开发利用程度时则是有害的, 例如当煤中 U 在十至几十个 $\mu\text{g/g}$ 时是具有放射性的, 尚未达到开发利用的程度。

3) 煤中有害有机质

煤中多环芳烃(PAHs)、苯芘、呋喃类与氯代烃类(多氯联苯类)、二噁英等有机物是有毒化合物, 其分布广且难降解, 并具有生物积累性和“三致”(致癌、致畸、致突变)的慢性作用。此外煤中硫、氮、氧等杂原子有机物是有害有机质。煤中多环芳烃的变化涉及沉积环境和化学类型^[188-189]等因素。J. P. Mathews 等^[190]利用高分辨透射电镜、激光解吸离子化质谱等研究煤中

分子量分布与有序化排列及多环芳烃。

煤层气又称煤层瓦斯, 是一种形成于煤层又储集于煤层中的非常规天然气, 属于强温室气体, 温室效应是 CO_2 的 21 倍^[191]。 CO_2 也是引起温室效应的主要气体, 如何减少煤炭利用过程中 CO_2 的排放和增加 CO_2 的有效利用是国内外学者研究的重点。在众多 CO_2 解决方案中, CO_2 捕获和封存一直是研究热点^[192-194]。

工业意义上, 热值低、水分高、灰分高、硫高的煤称为低品质煤。煤气化、液化过程中, C 的质量平衡必须考虑 C 尽可能多地进入气体和液体中, 残渣 C 越多, 越不利; 炼焦过程中, 希望煤产生更多的各向异性焦炭(coke), 更少地生产出各向同性无定型碳(char), 这些对于煤转化与利用中考虑“双碳”具有重要的科学与现实意义。

5 洁净煤地质影响因素

煤的洁净特性, 无论有机还是无机, 都与成煤作用过程中地质条件有关。成煤作用可划分聚煤作用和赋煤作用两大阶段, 他们与内生、外生地质作用^[195]莫不相关。内生地质作用涉及构造、变质、火山喷发、岩浆及热液等作用, 外生地质作用包括风、水搬运沉积, 氧化还原, 海水、孔隙水、地下水等作用。具体还可细分为原生(植物)和次生(同生、成岩、后生、表生)成因^[77,154]。综合前人研究成果, 成煤过程经历的各种地质作用如图 1 所示。

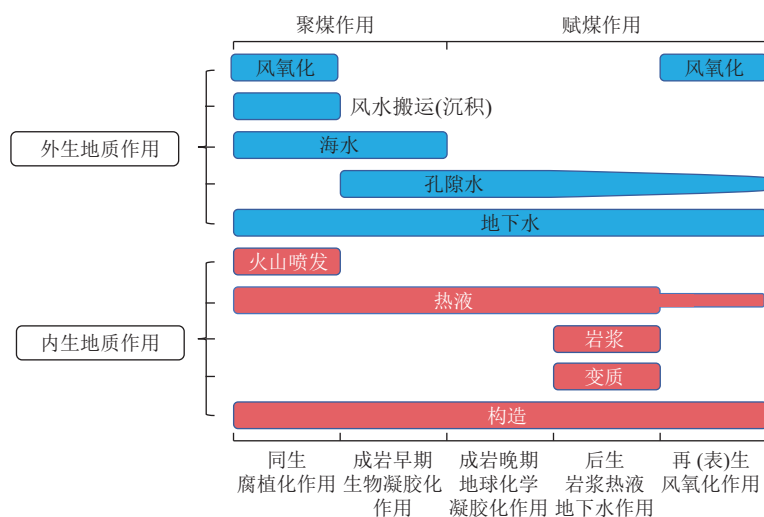


图 1 成煤过程中各种地质作用的关系

Fig.1 Relationships among various geological processes during coal formation

煤中有机质质量在聚煤作用(原生、同生、早期成岩)时期主要取决于植物群落的分解与聚合、氧化还原作用, 在赋煤作用(后期成岩、后生、表生)时期主要经历煤化作用(成岩、变质)乃至石墨化、天然焦化、风氧化作用。煤中无机质/矿物质在各个阶段表现最为显著,

是反映成煤地质条件的最佳研究对象。聚煤期, 有陆源、海相、海底喷发、热液、火山等类型; 赋煤期, 有地下水、构造、深大断裂热液、岩浆热液、岩浆、风氧化等类型。众所周知, 聚煤期成煤植物是影响煤中有机质质量的第一因素, 赋煤期煤化作用是影响其质量的第二因素^[26]。

20 世纪 90 年代,赵师庆等^[196-197]强调聚煤期煤的还原程度是影响煤中有机质质量的第三因素。在考虑有机和无机质的同时,矿物质是影响煤质的重要因素。赋煤期表生作用造成煤的风氧化^[26]。任德贻等^[81-82]提出煤中微量元素的 5、6 个成因类型,Dai Shifeng 等^[157]提出第 7 种成因类型——海底喷发,总结出宇宙、陆源碎屑、火山碎屑、热液、外部流体渗滤以及叠加复合 6 种类型^[198]。

聚煤期外生地质,煤中有机质洁净特性取决于成煤植物、还原程度,无机质洁净特性取决于海陆的矿物质和硫;内生地质使成煤作用加强,热液、火山、海底岩浆热液使煤中矿物质和有机硫增多。煤中锗多形成于亚烟煤(年老褐煤)阶段。赋煤期,外生地质使煤风氧化,有机质风氧化与自燃、地下水使煤中卤素元素增多,表生矿物增加;内生地质作用,加速煤化作用,形成研究热变质、接触变质、热水热液变质、构造动力变质煤、天然焦,产生热液矿物等。煤中矿物质成因与富集受多因素地质作用控制^[82,199]。陆源碎屑物质、沉积环境、成煤植物、岩浆热液活动、地下水活动、风化作用等都可以影响煤中矿物质,这些因素概括起来主要分为原始物质组成和后期构造-热演化过程。学者们从地质角度总结了控制煤中矿物质的地质因素类型:源岩控制型、沉积控制型、岩浆热液控制型、构造控制型、地下水控制型、火山灰沉降富集型和海底喷流型^[200-202]。近期国内学者也总结了富油煤和炼焦煤煤质的地质控制因素^[203-204]。Dai Shifeng 等^[17]系统地总结了煤中元素的沉积源、海水源、火山灰源、孔隙水源、热液源、地下水源和有机质源 7 种富集机理,指明灰分质量分数小于 3% 的煤,其微量元素的富集与区域性植物富集和菌类等生物有关。

图 1 展示了成煤作用各种地质条件对煤物质组成有不同程度的影响。原生高低等植物和菌类不同,造成腐植煤腐泥煤的煤质不同,某些微量元素高于全球煤的丰度。成煤作用的次生条件是影响煤物质组成尤其是无机组成的重要因素。同生阶段,有表生的陆源搬运沉积作用、氧化还原作用,海水、地下水造成低位沼泽泥炭,火山灰、热液与海水复合影响煤,构造是均衡、过度、欠补偿形成厚煤层的主要因素,或煤层分叉尖灭的原因。成岩期,孔隙水、地下水、热液等形成结核、充填型矿物质以及亲硫亲铁矿物质。后生阶段,孔隙水作用逐渐降低,非矿物无机质逐渐变为矿物,地下水、热液形成脉状、薄膜状矿物,岩浆及其热液促使煤变质,构造使煤局部形成动力变质煤。剧烈的构造活动,可造成煤再次抬升近地表,进入表生环境,风氧化作用加强,形成氧化煤、风化煤和褐铁矿、赤铁矿等矿物,孔隙水作用、

热液作用也可出现。总之,矿物质成分和赋存形态能较好地反映各地质条件。

6 洁净煤地质研究内容

洁净煤地质的研究内容包括:煤炭资源洁净评价、绿色智能开采与地质保障、煤炭资源洁净加工(煤炭洗选)、煤炭资源洁净转化(炼焦、气化、液化)、煤炭资源洁净利用和煤炭资源利用后的生态修复与资源再循环 6 个方面,每一环节都有煤源污染预防与治理,如图 2 所示。

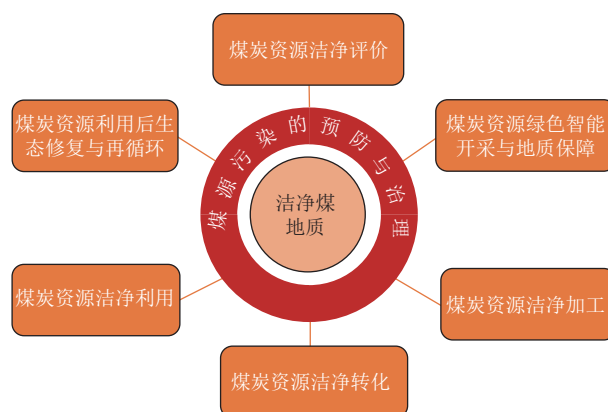


图 2 洁净煤地质研究框架

Fig.2 Research framework of clean coal geology

煤炭资源洁净评价主要是依据煤炭勘查地质报告等相关资料对煤炭资源开展质量好坏、洁净潜势等评估,并对不同质量、不同洁净潜势的煤炭资源进行区域划分和圈定,为不同煤炭资源开发提供一定的基础地质依据。影响煤炭开采的地质因素有很多,影响较明显的有:煤层厚度及其变化、顶底板岩层组合及其空间分布、构造(断层、褶皱等)、矿井水文地质及瓦斯地质、煤层中的地质异常体、地温、地压等,查清这些地质因素对不同矿井煤炭开采的影响程度,为煤炭生产提供可靠的地质依据,是地质保障系统的主要研究内容^[205-206]。煤炭资源洗选加工(洗选、配煤等)方面主要是对煤中有害物质如黄铁矿、有害微量元素等在洗选过程中脱除规律进行研究,为优化煤炭加工工艺和提高有害物质脱除与降低程度提供可靠的依据。煤炭资源洁净转化方面的研究主要是对炼焦、气化、液化等工艺过程中煤中有害物质的迁移转变、排放规律等进行研究。煤炭资源综合利用主要是对煤炭资源进行分质分级利用,以提升煤炭资源利用率,降低煤炭资源消耗,获得更高的利用价值。煤炭开采利用后,需注意的是复垦、植树、煤矸石和煤灰再利用。煤源污染预防控制,主要是对煤炭开采、运输、利用等与煤相关系列过程造成的环境污染(煤的自燃、地表沉降、粉尘、酸雨等)进行评估及预

防。潘树仁等^[207]构建了煤炭资源全生命周期的地质保障技术体系,为洁净煤地质学提供了实践途径。

狭义的煤洁净地质研究主要包括煤的灰分、硫分、挥发分、氢含量及发热量、黏结性、结焦性等热工艺性质,煤炭资源洁净潜势及不同洁净潜势煤炭资源的地质赋存、空间分布规律,煤中有害物质(灰分、硫及其他有害元素等)的富集程度、成因、原生赋存状态、迁移机理、分布规律、脱除等物理化学性质及其对环境 and 人类影响,煤中有益元素的评价及开发利用等。

6.1 煤炭资源洁净评价

煤炭质量等级指的是原煤的质量分级,是以原煤中灰分、硫分有害元素的含量为划分依据的。煤炭洁净等级,是对煤炭经过洗选加工被洁净的潜力等级划分,反映的是煤的可洗选性,简言之,就是煤的灰分、硫分及有害元素在洗选前后含量的变化程度。对煤炭资源的洁净程度进行等级评价及等级区域的划分,是洁净煤地质的主要研究内容之一^[25]。目前,国内煤炭质量或洁净等级评价有几种不同的方案。

第3次煤田预测对我国煤炭资源的灰分、硫分分级统计^[137],并按灰分、硫分、发热量、可选性等参数提出优质煤概念^[54]。李小彦^[208]在研究西部煤炭资源时,对优质煤的概念进行了重新厘定和分类,并开展了鄂尔多斯盆地优质煤资源的划分与评价。袁三畏^[54]根据煤类、灰分、硫分、发热量、可选性5项指标,将煤炭划分为优等质量煤、中等质量煤、低等质量煤3个等级。秦云虎等^[209]提出优质环保型煤炭资源类型。秦勇^[210]、唐书恒等^[25]针对煤炭资源洁净潜势评价相关资料较为齐全的地区,将煤炭资源的洁净等级划分为:洁净煤、较洁净煤、较不洁净煤、不洁净煤4个等级,并对鄂尔多斯盆地北缘-晋北地区和黔西-滇东地区的煤炭资源做了评价;Tang Yuegang^[211]依据煤炭的地质特点,划分煤炭质量等级:稀缺特好煤、特好煤、优质煤、中质煤、低质煤、劣质煤6个等级,并应用于山西和内蒙古煤炭资源评价中。王文峰等^[212-213]提出煤中有害元素潜在污染综合指数概念,并据此划分出洁净煤、次洁净煤、较不洁净煤、不洁净煤4个等级;杨淑婷等^[214]总结前人洁净煤等级划分方案,并根据最新的国家标准和煤炭行业标准,将煤的洁净等级划分为特好洁净煤、好洁净煤、较好洁净煤、中等洁净煤、较差洁净煤、差洁净煤6个等级。虽然煤炭资源质量或洁净等级划分方案不同,但各学者采用的等级评价指标是类似的,不同学者选取的指标可划分为3类:硫分、灰分和煤中有害微量元素。由于煤炭数据资料不全面,大范围煤炭资源的洁净等级评价多采用硫分和灰分2个指标。煤炭资源的分布规律主要是研究不同质量或洁净潜势的煤炭

资源在空间上的分布特征,如杨舒婷^[138]对不同质量等级煤炭资源分布规律进行了研究。Tang Yuegang^[215]对比煤炭洗选前后特征,针对煤炭洁净潜势即煤炭的可洁净程度,提出了洁净度(cleanability)的概念,并给出洁净度计算公式,根据洁净度数值将煤炭资源洁净潜势划分为5级。Wang Xiaoshuai等^[216]对山西安平、西庄、义唐等详查区不同洁净度煤炭资源的分布规律进行了研究。随后,陆续有省、矿区开展了煤的洁净地质评价^[217-220],包括中国绿色煤炭资源概念及内涵^[221]、煤炭绿色勘查理论与关键技术等^[222-223]。特别值得关注的是,秦勇^[224-225]和Liu Shuqin^[226]等开展的地下气化煤炭资源评价和王双明等^[227-228]进行的富油煤资源评价,丰富了广义洁净煤的地质内涵与发展方向。

6.2 绿色煤炭智能开采与地质保障

煤炭安全高效开采地质保障技术是进入21世纪以来新提出的煤炭安全高效开采的关键技术之一,主要包括:煤厚变化预测、围岩稳定性预测、构造地质条件预测、水文地质条件预测、地面高分辨率探测、钻探等技术^[205-206]。高产高效矿井地质保障系统是根据高产高效矿井机械化、集中化程度较高的特点,以地质质量化为先导,以物探、钻探等综合技术为手段,并依托先进的计算机技术实现地质工作的动态管理,要为矿井设计、采区布置、生产准备、采面布置到回采等各个方面和阶段提供可靠的地质保障^[205-206]。煤炭开采过程,要综合考虑地质因素(结构和安全),依据基础地质资料制定合理的开采计划,以实现煤炭的高效、安全开采^[229-230]。煤炭绿色开采技术是由钱鸣高院士于2003年提出的,旨在煤炭开采过程中,降低其对环境破坏及资源浪费,同时提高煤炭企业的经济效益、开采与环境相协调的煤炭开采技术,最终实现“高效率、低排放”的效果^[231]。随着煤炭资源的持续高强度开采,浅部煤炭资源枯竭,煤炭开采深度逐渐增加,煤炭开采地质保障的研究也逐渐向深部煤炭资源展开^[232-233]。

随着煤炭勘查技术的发展,中国建立了具有自身特色的“中国煤炭地质综合勘查理论与技术新体系”,并提出了“绿色煤炭资源”的新理念,为保障国家能源安全提供了地质技术支撑。新的煤炭地质勘查技术主要涉及6大方面:绿色煤炭资源勘查与绿色开发的地质保障技术、煤和煤系气等共伴生矿产资源协同勘查与开发地质保障技术、“地质”服务生态文明建设地质保障技术、关闭矿井和采煤沉陷区综合治理与利用技术、“一带一路”地区能源与矿产地质保障技术及全面推进“互联网+”行动等^[234]。彭苏萍院士也对深部煤炭资源开发与地质评价的研究进行了归纳与展望,提出了深部煤炭资源开发亟需解决的4个关键科学问题,这也说明

了基础地质研究对煤炭安全高效开采的必要性和重要性^[206]。此外,掌握煤矿高精度高效安全开采地质探测方法、煤矿瓦斯井上下联合抽采方法、煤矿高矿化度矿井水处理方法等技术,是解决智能开采地质保障的关键。

煤炭开采过程中产生的粉尘关系到矿井环境与矿工的职业安全健康。煤是由有机大分子和矿物质组成的复杂结构物质,不同组分在煤岩受力破碎过程中表现出不同性质^[235-236]。煤的机械截割可认为是使煤岩由大到小的过程,受多因素影响,采掘过程可产生大的煤岩块体,也可产生微纳米级粉尘,并且两尺度级间颗粒粒径连续存在。鉴于煤岩体属天然地质体,除煤中存在的由 C、H、O、N、S 等组成的有机组分外,还赋存地壳中几乎所有微量元素及沉积多种类型矿物^[14,17,92],碳质/矿质/金属微纳米颗粒物可能同时存在。因此,除广泛研究采掘过程中粉尘物理特征(粒径、形貌、空气动力学特性)^[237],还有必要考虑其矿物学、地球化学特征。研究^[238-239]表明,尘肺病与呼吸性粉尘中细-超细颗粒物有关,且细-超细颗粒物具有不同于粗颗粒物的生物环境效应。虽然,随着 2012 年我国发布新修订 GB 3095—2012《环境空气质量标准》,有学者^[240-241]已开始关注煤矿井下可入肺颗粒物(PM_{2.5}),但依然局限于研究细颗粒物的浓度与粒径分布对煤矿工尘肺病影响。近些年,粉尘诱发尘肺病机理研究不断深入,国内外学者逐渐关注呼吸性粉尘中粒度更细颗粒物,并且聚焦其生物地球化学特征^[241-246]。美国宾夕法尼亚州立大学 Liu Ting 等^[241]开展了粉尘对矿工职业健康影响研究,包括呼吸性粉尘中微-纳米颗粒物表面形态、纳米级粉尘表面持久自由基特性;中国地质大学(武汉)庄新国团队^[242-243]研究了矿井沉积粉尘的矿物学和地球化学特征,分析了其中呼吸性组分氧化潜势;西班牙环境评估与水资源研究所 P. Trechera 等^[244-245]研究了我国矿井及露天矿环境中可吸入粉尘的地球化学和氧化潜势,并对煤尘排放进行了评价;印度采矿与燃料中央研究所 P. Gopinathan 等^[246]研究了印度主要煤田煤尘矿物学和地球化学特征,对可吸入粉尘及更细组分颗粒进行了危害评估。可见,粉尘尤其呼吸性粉尘受地质体地球化学控制特性正在成为进一步研究粉尘防治和应对粉尘职业健康安全的关注点。

围绕国家“十四五”煤炭科技发展目标:煤炭安全绿色智能开采和清洁高效低碳利用^[247],煤炭行业院士与专家们为煤炭绿色智能开采、采煤工人健康与安全保障、煤炭资源勘查与地质保障、复杂地质条件煤层智能综采等关键工程技术提供了具体的理论与实践途径^[248-253],为煤炭资源智能开采地质保障提供了明确发

展方向。

6.3 煤炭资源洁净加工地质研究

煤炭加工是从源头上提高商品煤质量、提高煤炭利用率、节约运力的技术措施,是洁净煤技术的源头。一般物理选煤可除去煤中的 70% 的灰分和约 60% 的黄铁矿硫。然而,我国选煤还存在入洗率较低,原煤洗选结构不合理,动力煤入选率极低、炼焦煤入选高,选煤工艺落后,伴生矿产回收低等不足。选煤的洁净地质研究包括煤中矿物质(灰分)、硫分及有害元素等有害物质的组成、成因、原生赋存状态、迁移机理、分布规律、脱除等物理化学性质以及对环境和人类影响。中国最早的研究始于 20 世纪 80 年代,中国矿业大学(北京)任德贻教授等开展了重庆南桐、松藻煤矿区煤中硫的赋存与可选性研究,90 年代唐跃刚、代世峰等进行了内蒙古乌达矿区煤中硫与矿物质的赋存与脱除研究^[55]。21 世纪初,中国煤炭地质总局组织第一勘探局、中国矿业大学、江苏煤田地质研究所等单位,开展了中国洁净煤地质研究^[25]。中国矿业大学王文峰教授开展了系列的煤中有害元素赋存分布研究,提出有害元素潜在污染综合指数^[212-213]。煤炭洗选的重点是将煤中杂质脱除^[254-255]。煤中矿物解离的难易程度决定着煤炭洗选效果的好坏,即煤的可选性与洗选效果有直接联系^[256-257]。煤的岩相组成及煤中矿物的数量、成因、种类、赋存形态和嵌布特征,都会影响煤中矿物的脱除效率,其中,矿物赋存形态和嵌布特征的影响尤为突出^[258]。嵌布特征是从选煤工艺的角度来讨论矿物的粒度大小及其分布特点,不同嵌布类型也都影响煤炭洗选过程中矿物的含量和组合^[259-260]。煤中矿物不单单是和煤基质存在嵌布关系,矿物之间普遍存在嵌布共生关系,其连生界面变化多端,将矿物之间的联系分为毗连嵌布型、脉状嵌布型、包裹嵌布型、皮壳嵌布型 4 种类型^[261]。在微米尺度分析具有良好晶型的黄铁矿的嵌布类型,以探讨难选煤中主要矿物在分选过程中的迁移机理问题^[262]。根据连生体的相对体积大小、接触面的形态特征及其空间关系,可对煤中黄铁矿的嵌布特征进行分类,确定黄铁矿与煤的镶嵌关系^[263],内蒙古乌达矿区煤中黄铁矿就存在 7 类嵌布类型^[261]。矿物嵌布粒度小,在煤基质中分布不均匀,与有机质结合紧密;超极细粒-不均匀嵌布矿物,粒度极其细小,一般检测手段无法研究^[264-267]。运用矿物嵌布类型,在山西难选煤开展了煤可选性的地质地球化学控制研究^[268-270],在工业化煤炭清洁发展中提高洗选后矿物的脱除效率,进而降低煤炭利用过程中矿物的排放污染问题,具有非常重要的实际意义。

6.4 煤转化洁净地质研究

煤炭主要有 3 种转化方式:气化、液化、焦化。运

用煤岩学方法,可研究煤加工利用产物,如热解焦炭、气化炭、燃烧残碳的显微镜下组织特征^[271-277]。煤液化的煤岩学与残渣岩石学分类已在20世纪80年代提出^[278-279],镜塑体、新生球、各向异性中间相等显微组分特征反映煤液化质量^[280]。夏筱红等^[281]综述了煤岩显微组分液化反应性的研究进展。C. D. A. Coin^[282]于1987年提出了煤焦显微结构(microstructure)和显微组织(microtexture)定义,目前已经被用来表征煤焦或者天然焦的形貌特征^[119]。研究表明^[283],显微组分受热后的光学各向异性特征与煤芳香结构的定向排列有关,但不同干涉色代表的显微镜下碳的微观形貌与透射电镜下分子对应关系如何,还有待研究。气化炭被认为是气化残渣中残余有机质,生成过程与燃煤灰中未燃碳相似^[284-285],但气化过程中,煤中的显微组分首先发生热解脱挥发分形成炭,进而发生炭的气化反应,而燃烧残碳形成于脱挥发分的炭进行富氧燃烧反应。尽管可以通过烧失量确定煤加工利用产物中碳的含量^[285],但煤岩学方法可分辨碳组织的显微组分来源^[274,277-278,285-286],对分级分质利用煤的显微组分意义重大。

煤炭气化是现代煤化工的主要领域,20世纪80年代以来,煤气化过程中洁净控制成为一个新的研究领域。有关煤中微量元素在气化过程中的迁移转化、富集规律,副产品中微量元素的淋滤特征、健康环境效应及微量元素的亲和性等^[272,275,287-290]方面的研究已成为当前洁净煤地质热点。研究发现^[287],8种微量元素在气化残渣中表现出不同程度富集,但均不超土壤环境质量标准限值。气流床气化煤中,微量元素具有不同的迁移特性,不同变质程度煤在相同的快速升温热解条件下,Se、Hg、Be、U迁移规律有一定的共性,但也有相当的元素表现出不同的行为特点^[288]。研究发现^[287,291],宁东煤气化残渣为不具有浸出毒性的固体废物,但在部分情况下,Be、Mo、Ba的溶出浓度超出了中国Ⅱ类地下水质量标准, Sb和Tl的溶出浓度超出了美国Ⅰ类饮用水中最大污染物水平的限值。基于微量元素,尤其稀土元素地球化学特征可知,气流床气化残渣可被视为具有开发前景的稀土元素原料,稀土元素可赋存于碳酸盐、Fe-Mn氧化物和铝硅酸盐中^[291-292]。在气化过程中,不同的煤和灰分颗粒中的矿物质可能会熔化,在冷却时部分结晶形成一系列新的物相(如莫来石、钙长石、方英石、透辉石和磁铁矿)及无定形或玻璃质组分^[293-297]。煤中矿物质是煤灰的主要来源,而煤灰是影响煤炭燃烧和气化运行系统的一个主要问题,会导致效率降低、计划外停机、设备故障及高选煤成本等^[298]。在煤炭加热利用过程中,矿物质会引起锅炉的结垢、结渣、结块、腐蚀和侵蚀^[299]。IGCC(integrated gasification combined cycle)的示范工

程表明,灰沉积是气化炉运行的主要障碍^[300],结垢现象会降低设备的热效率并偶尔会导致设备运行中断^[301]。造成这种现象的主要原因是,在气化/燃烧过程中出现了较高含量的碱土金属和碱金属(alkali and alkaline earth metals, AAEMs)^[302-303]。就燃烧和气化系统中燃料的炉边性能而言,最重要的燃料成分包括AAEMs和Fe,当与硅酸盐结合时,它们会产生壁渣和高温对流通道的结垢问题^[304]。煤中有毒有害微量元素在煤炭运移、加工和利用过程中会迁移释放到空气、土壤和地下水中,对环境和人类健康造成不良影响。煤炭气化是煤炭清洁、高效利用的重要途径,相对于煤炭燃烧,更容易有效去除煤中有害微量元素^[305-306]。调查煤气化产物中矿物赋存状态和潜在有害微量元素分配特征,分析煤气化产物的潜在环境健康影响,对煤气化过程中污染防控具有重要的理论指导意义,对环境保护具有重要的现实意义。

煤炭炼焦过程几乎所有的矿物质和60%~70%的硫元素残留在焦炭中,煤中矿物质及微量元素在焦化过程中的迁移转化集中表现在亲石元素及其矿物的结渣、熔融、聚集等,石英为惰性矿物,最后变为方石英、莫来石等。黄铁矿先转变为磁黄铁矿,然后转变为赤铁矿^[306-308]。

煤炭液化过程中有害微量元素迁移分布研究较少^[309-312],主要有煤中有害元素在液化中的迁移转化^[313],直接液化煤内在矿物的转化与作用^[313]等。新疆准东高碱煤直接液化的研究表明,氢气氛围下含钠矿物质反应程度高于氮气氛围,含钙矿物质的反应性高于含钠矿物质^[314-315]。

地下煤炭气化^[225]和地下富油煤热裂解油^[227]等地下煤转化工程已在我国试验成功:陕西榆林神木大保当井田开展的富油煤地下原位热解开采先导性试验,于2023年9月成功提取了原位热解煤焦油;贵州、新疆等地深部煤炭地下气化试验都已点火成功并持续稳定燃烧。煤炭地下液化、地下氢化、地下发电、地下碳减排(CO₂封存)都在设计中^[316-317],可以大胆设想,未来是否可实现煤的地下碳基材料生产,洁净煤地质还有许多复杂的科学与工程问题需要解决。

6.5 煤炭资源洁净利用

煤燃烧是煤最直接利用。研究发现,煤焦的着火温度与煤种关系极大,但未找到它们之间的直接定量关系^[318]。煤中矿物质种类繁多,转化迅速,因此,研究其热反应性非常困难^[319]。煤炭燃烧,矿物的热转化主要涉及蒸发、破裂、团聚及融合等过程,不同矿物产生不同的变化,最终分布于炉渣、底灰、飞灰和燃烧废气悬浮微颗粒,主要形成炉渣和底灰^[320-321]。煤炭燃烧过程中,矿物质所体现的性质与其经历的温度、压力、气氛等密切相关。

微量元素在燃烧过程中的转化行为及其在气相和固相产物中的分布不仅取决于其本身挥发性,还受温度、压力、气氛、反应时间、灰类型等多种因素影响^[34,322-323],微量元素的排放规律在不同煤样中表现出明显差异^[324-325],很难总结出一条普适的基本规律。依照挥发性可将煤燃烧和气化过程微量元素划分为 3 类^[326-327]。西北尤其是新疆中生代煤含有很高的碱金属元素,煤热反应性和结渣性迥异,是煤燃烧研究的一个难点^[328-329]。

煤除了燃烧外,还可转化成气、液、固体焦炭再用作燃料、化工产品等用途。在以煤为主的能源生产和消费结构的前提下,煤炭的高效洁净转化利用是我国解决资源和环境问题的必然选择,并且煤炭资源清洁高效综合利用将形成新兴产业^[330]。实现煤炭清洁综合高效利用是洁净煤地质和洁净煤技术研究的最终目的。煤炭清洁综合高效利用,不仅包括洁净煤技术的开发应用,还包括不同煤种采用不同利用途径,低品质煤的提质利用,煤炭开采、利用等过程产生的废弃物如煤矸石、煤灰的利用,煤系共伴生矿产开发利用等。合理利用原煤在开采、洗选、使用过程中产生的大量矸石、中煤、煤泥和煤灰,可实现煤炭经济的可持续发展^[331]。福建省煤炭资源的综合利用、低阶煤的综合利用及其技术经济性,都有了深入的分析研究^[332-333]。王绍清等^[110]对中国典型特殊煤种特性及利用进行了研究,并得出太西煤、小发路煤及树皮煤适用于不同用途。

6.6 生态修复与再循环

煤矿土地复垦、采煤沉陷综合治理、露天排土场和采坑的生态修复、废弃煤矿山资源综合利用和环境治理等是煤矿关闭不可回避的问题^[228]。近年来,煤矿区生态修复已成为众多学者的研究热点之一^[334-339]。

煤矿生态修复是保障矿山开采的同时又保护生态环境的技术措施,是一系列对区域生态与环境破坏的治理技术群^[340-343],主要包括矿山地质环境治理、土地复垦、生态系统功能恢复。北方黄河地区还要考虑风沙、地表水、地下水等治理问题^[344]。应因地制宜,自然修复与人工修复相结合,采用物理、化学、生物和工程等措施,将受损的生态环境恢复到期望生态功能状态。

煤矸石是我国数量最大的固废之一,堆存量已超过 50 亿 t,发展绿色环保的煤矸石综合处理、利用技术和产品,是解决煤矸石综合利用的主要途径。煤矸石的资源化利用,目前主要有煤矸石发电、生产建筑材料,煤矸石制品用作化工原料、矸石中洗选伴生矿物、矸石筑路、煤矸石回填露天矿等^[345-348],主要为低值利用。研究煤灰的利用,主要包括煤灰本身的利用^[349],从煤灰中提取有价值物质^[350]及利用高新技术方法研究煤灰成分^[351]等。美国每年都要召开世界煤灰会议,探讨煤

灰综合利用问题。

煤系共伴生矿产是指在含煤地层中与煤在成因上共生或不具成因联系而伴生并共同出现的其他矿产,共生矿产具有独立开采价值,伴生矿产要和另一种矿种(煤)同时进行开采。依据其物质成分、物理性能及加工利用方向可分为固态共伴生矿产、液态共伴生矿产、气态共伴生矿产^[352]。中国煤系共伴生矿产资源种类繁多、数量丰富^[353-354]。研究煤系共伴生矿产对煤炭综合利用意义深远。煤层气及煤成气的勘探开发理论的研究^[355-358]已为我国天然气开发提供了科学依据。煤气共采是“双碳”“双控”和“低碳-清洁-高效-安全”利用煤的途径^[359-360]。煤系非金属矿产黏土的开发应用^[361],是煤炭开发利用资源再循环的重要组成部分。煤炭是关键金属(例如铀、锆、稀土元素和钇、镓、铝等)很有前景的来源^[111],研究煤中有益微量元素,如煤型稀有金属矿床,开发利用煤型稀有金属矿床也是煤炭综合利用的重要组成部分^[362],研究内容主要涉及分布特征、富集成因、成矿模式、加工提取等。

6.7 煤源污染防控

煤炭的污染,分第一环境空间的自然(地质)污染,主要包括煤中有害物质淋滤和原地释放温室气体;第二环境空间的人为污染,如开采、加工、转化、燃烧。对环境 and 人类健康的影响根据不同过程可分为 4 类^[165]:地下煤层的环境影响;煤炭开采的环境影响,主要包括视觉污染、地面沉降、地表和地下水质量的退化、良田荒芜、生态恶化等;煤的搬运、加工与转化的环境影响,主要包括灰尘、自燃、淋滤、矸石、洗煤污水等;煤燃烧的环境影响,主要包括热污染、酸雨、灰尘颗粒、温室效应、微量元素释放等。降低煤源污染是洁净煤地质学的主要目标之一。煤源污染防控不是只针对某一种污染或某一过程造成的污染进行防控,而是应该综合采用多种方法,对煤源污染进行综合防控治理。

中国和世界医学地质学会高度关注贵州兴仁的燃煤 As 中毒、织金的燃煤 F 中毒,湖北恩施的燃煤 Se 中毒^[363-364],云南宣威也出现了燃煤肺癌病例^[365]。刘桂建等^[366]揭示了煤中 As、F、Se 这 3 种元素的燃烧行为及其与人类健康的关系。燃煤污染防控主要有 3 大类:一是燃烧前,对煤炭洗选加工,脱除煤中有害物质;二是燃烧过程中,改善工艺条件,使煤炭充分燃烧;三是燃烧后,对烟尘过滤处理,降低污染排放^[20]。

综合采用“煤炭绿色开采技术”可最大限度地降低煤炭开采过程对环境产生的污染,煤炭绿色开采主要包括:“保水开采”技术,离层注浆、充填与条带开采技术,“煤与瓦斯共采”技术,煤层巷道支护与矸石减排技术及地下气化技术等^[231,367]。洁净煤技术是对煤炭加工

利用造成污染进行防控的有效手段之一^[368-369]。简言之,大力发展和推广洁净煤技术是对煤源污染进行有效防控的重要方法之一。

7 中国洁净煤地质研究的发展

萌芽阶段:20 世纪 80 年代,中国最早的选煤地质系统研究主要有,中国矿业大学(北京)任德貽等学者对重庆南桐、松藻煤矿区煤中硫的研究^[370-371],中国科学院非煤学者开始关注煤中微量元素^[78-80],周义平^[201]研究了煤中 As 的分布与控制因素,唐跃刚^[280]开展了褐煤煤岩与液化关系的研究。

探索阶段:20 世纪 90 年代,相关洁净煤地质学界,出版了一系列煤质专著^[35,37-40,53-55,98-99,137,196,199],在国内外期刊上发表了诸多科技论文^[81,83-84,148-154,166-167,171-173,176,197],论述了煤中硫、灰分、微量元素以及煤成烃(油)、煤岩、显微组分、矿物等赋存分布规律。贵州贵定等地、四川、重庆等地晚二叠世煤中硫的赋存规律^[167,372],内蒙古乌达矿区煤中硫与矿物质的赋存与脱除研究^[55,261,373],山东兖州煤中微量元素研究^[199](煤中硫、灰分、微量元素

等在选煤与煤燃烧中的脱除)等,这些成果显示出中国洁净煤地质正处于探索阶段。

成熟阶段:21 世纪初,中国矿业大学(北京)主持完成的“煤的洁净利用地质技术”项目,获 2002 年中华人民共和国教育部颁发的高校科技进步奖一等奖;中国煤炭地质总局“十五”重点科技项目“中国洁净煤地质研究”^[25]开展了全国煤中灰分、硫分和有害微量元素的大调查,研究成果获得煤炭行业科技进步二等奖,并出版专著^[25,208];中国矿业大学提出了洁净污染指数及洁净潜势^[212-213];安徽理工大学和中国矿业大学(北京)系统总结了煤中各微量元素的成因与分布,出版了专著^[82,86]。这一时期,学界特别关注煤中有害元素与人类健康问题^[363-366]。以煤中微量元素、煤成油、煤层气等为研究主题的多篇博士论文荣获全国百篇优秀博士论文^[374-375](表 1)。国际有机岩石学学会(TSOP)年会第一次在中国矿业大学(北京)召开。据此,21 世纪前十年,洁净煤地质相关的项目、奖项、论著等标志着中国洁净煤地质学进入成熟阶段。

表 1 煤田地质与勘探领域全国百篇优秀博士论文
Table 1 National top 100 excellent doctoral dissertations on coalfield geology and exploration

作者	论文标题	指导教师	毕业院校	发表时间	荣获时间
赵峰华	煤中有害微量元素分布赋存机制及燃煤产物淋滤实验研究	任德貽	中国矿业大学(北京)	1997	2000
孟召平	煤层顶板沉积岩体结构及其对顶板稳定性的影响	任德貽, 彭苏萍	中国矿业大学(北京)	1999	2002
代世峰	煤中伴生元素的地质地球化学学习性与富集模式	任德貽	中国矿业大学(北京)	2002	2004
陈建平	中国西北地区侏罗纪煤成油地球化学	韩德馨	中国矿业大学(北京)	2003	2006
王文峰	煤中有害元素溶出分配规律及其地球化学控制	秦 勇	中国矿业大学	2005	2010
姚艳斌	煤层气储层精细定量表征与综合评价模型	刘大锰	中国地质大学(北京)	2008	2011

确立阶段:进入 21 世纪第 2 个十年,代世峰教授确立了中国煤中(微量)元素的背景值^[87],出版了煤中矿物质和微量元素的英文专著,新一轮全国煤炭资源潜力评价工作完成^[56,104],总结了全国煤中硫的分布特征^[159],提出洁净度概念^[215],出版洁净过程有害元素分配规律的论著^[213],洁净煤等级评价全面用于煤炭资源潜力评价^[138,214-220],特殊与稀缺煤资源调查成为洁净煤地质研究热点^[108,110-112],“中国特殊和稀缺煤炭资源研究”项目荣获中国地质学会 2014 年十大地质科技进展,中国特色树皮煤研究已被世界所关注^[113-117]。与此同时,代世峰教授开始着手煤型稀有金属的评价研究^[129-133];煤层气的勘探开发如火如荼^[100-102,355-358];绿色开采地质保障从提出进入落实进程^[229-235];生态修复的理论与实践已基本搭建完成^[334-342]。2012 年,国际煤与有机岩石学会(ICCP)和国际有机岩石学会(TSOP)联合,第一次在北京召开,2018 年 TSOP 会议又在中国矿业大学(北京)

召开,会后到内蒙古乌兰图嘎的富 Ge 煤考察稀有金属赋存分布与开发状况,在国内外兴起了煤中稀有金属 Ge 等元素和高有害元素 Hg、As 等的研究热潮。2016 年中国地质学会中国洁净煤地质专业委员会的成立,Wang Xiaoshuai^[33]、Tang Yuegang^[105,270] 向国际介绍了中国的洁净煤地质,中国洁净煤地质学已正式确立。2019 年中国洁净煤地质专业委员会更名为绿色煤炭勘查开发专业委员会。

拓展阶段:2020 年以后,国家力推煤中关键金属研究^[90,134-136,198,291,292],煤基石墨烯^[120]和煤系石墨^[126,128]研究已成为热点,对煤中有机硫的认识已上升到芳构化层面^[164-165,169],地下气化^[222-224]和富油煤地下热裂解油^[203,225-226]是近期洁净煤地质研究亮点,未来正向地下化工^[316-317]方向发展。洁净煤地质已拓展到绿色勘探、开发、利用及煤矿复垦与生态修复等煤炭全生命周期的地质^[207,227-228]地球化学研究中,洁净煤地质由狭义洁

净煤地质进入广义的洁净煤地质学。尽管美国最早开展洁净煤技术研究,20 世纪 90 代,美国收集了 36 篇有关地质与煤资源利用方面的论文整理出书^[23],但并没有作为 1 个学科正式命名洁净煤地质。我国作为系统研究并命名地^[25,33],开展的洁净煤勘查^[56,104,138]、洁净煤开采、洁净煤加工转化与利用^[258,288-290]、地下气化地下热裂解油^[224-225,227]和洁净矿山修复与再利用等研究,为我国低碳智能煤炭开采与高效清洁煤利用提供了理论基础与技术支持。

综上所述,中国洁净煤地质学的发展可概括为:萌芽阶段(1980—1990 年)、探索阶段(1990—2000 年)、成熟阶段(2000—2010 年)、确立阶段(2010—2020 年)及拓展阶段(2020 年至今)。

8 存在的问题与发展方向

中国的能源禀赋决定了未来短期内中国以煤炭为主地位不能根本改变,高效清洁开发利用煤炭是中国能源发展的主题。在煤炭勘查、开发、加工、转化与利用以及生态修复等煤炭生命周期全过程中,还存在如下的科学、技术和工程等问题。

1) 成煤作用问题

煤化作用、芳构化作用和石墨化作用之间的实质与关系?它们在成煤作用如何演变?边界及参数如何确定?烟煤具有黏结性(中间相),煤化作用增加至无烟煤,中间相各向异性为何消失?光学各向异性在隧道扫描电镜和透射电镜下的对应分子关系是什么?这些科学问题直接影响后期煤分质分级利用和提高煤附加值等技术工艺。

2) 矿物质问题

煤中固体无定形矿物质在煤化作用和热工艺过程中的演变及其成分厘定?煤中有害物质的迁移、转化及分布与脱除机理?难洁净煤中有害矿物质富集的内生、表生等多重耦合地质作用造成热工艺复杂性与多重性,如何针对煤有机质和矿物质热变开展不可逆过程热力学研究,揭示其复杂过程和耗散结构?煤中的矿物是由不同元素(化合物)组成的,对于某一种纯净物,如 FeS_2 ,在燃烧过程中,其发生反应和转变的温度点是固定且相互一致的。但是放到煤中,不同类型的黄铁矿,燃烧氧化过程,其发生转变的温度点和发生的具体反应存在差异?云南和内蒙古低阶煤中的腐殖酸质量分数在 16% 以上,其他地区低阶煤都在 10% 以下,内蒙古乌兰图嘎和云南临沧富锗煤中的 Ge 是否与腐殖酸有关?

3) 有机质问题

煤中不同显微组分在煤燃烧中的热反应性如何?煤有机演化过程中碳量子点的形成与演化规律?如何

评价煤有机质高效利用?是考量煤有机热值,还是考量其化工材料价值,还是考虑其经济价值?不同配比煤的黏结指数、镜惰比等结焦性参数一致或接近,却表现出明显不同的结焦性能,其原因是什么?其科学性、技术性和经济性,需分阶段考虑。

4) 有机与无机问题

何为有机元素,有机与无机元素结合状态如何?全球碳循环与成煤作用和加工转化利用的关系?煤的热反应性和结渣性与煤种有关,如何系统地对不同煤种、不同成因类型煤中不同富集类型矿物质的热迁移转化开展深刻地探索并对其规律进行科学研究,从而预测矿物质热工艺行为?

5) 洁净问题

如何利用洁净煤技术群探讨煤中有害物质的赋存、物理及化学特性、迁移转化的洁净度?如何构建由指标筛选、权重测算、评价方法、等级划分构成的完整的洁净性评价体系?技术上,综合质量平衡分析与计算还很薄弱,没有一个反映煤加工转化与利用全周期的综合洁净度指标。同时,对洁净煤技术的提效,主要是定性分析,还没有反映洁净煤技术提效的定量公式及提效度表达式。

6) 煤粉尘问题

尘源呼吸性粉尘受煤岩地质体地球化学特性控制,如何以洁净煤地质思想指导粉尘防治技术装备和应对粉尘职业健康的安全技术及工程应受到关注。地球科学家可为理解影响煤尘毒性潜力的成分因素做出巨大贡献。

7) 地下工程问题

煤炭地下转化工程的复杂性与不确定性。煤炭地下气化、地下富油煤热裂解油等地下煤转化工程虽已取得一定试验成功,但在实际大规模工程应用方面仍面临诸多挑战。如何精确控制地下煤炭气化过程中煤的热化学反应?是否影响后续的能源利用和环境排放?地下富油煤热解油工程中,油的品质和产量受煤地质条件、工艺参数等多种因素影响,如何在复杂地质环境下实现稳定高效的热裂解提取?这还需要进一步探究和工程实践解决。煤源污染防控涉及煤炭开采、加工、转化、燃烧等多个环节,如何结合煤中矿物质和微量元素赋存特征,探索井下分选等绿色开采技术和工程应用可行性?

生物学、化学、物理学、人工智能是未来科学发展的主要领域,这也给中国洁净煤地质学的发展带来了机遇与挑战。近期煤炭的发展方向是煤炭智能开采和高效清洁利用,洁净煤地质主要在以下 3 方面是新的生长点:

1) 生物学与化学的发展

生物学发展可为煤炭成因研究及煤中有机质利用研究带来新的视角和新的方法。化学发展, 可为煤洁净转化出新的碳材料。

2) 物理学的发展

在介观、超微观层面, 先进的仪器设备对煤炭本身结构的研究提供新的手段, 可更精细地揭示煤的复杂结构、煤中有害物质的赋存等, 为评价煤炭资源洁净特性提供基础资料。另一方面, 对深部高分辨探测复杂的洁净煤地质条件的大型设备, 势必构建多目标地下采集煤、气、油及 CO₂ 封存大型工程, 构建地下煤化工工厂及其煤基复合材料基地。

3) 人工智能的发展

大数据发展, 使中国煤炭资源洁净特性数据化、系统化后, 可运用人工智能将其在时间和空间上展布, 为煤炭资源开发利用提供煤炭洁净特性的基础数据。

未来十年, 洁净煤地质研究将在洁净煤时空分布, 绿色智能煤气等共伴生矿产分质开采, 洁净煤气化, 煤基新材料, 地下煤化工, 生态修复及新能源等基础研究与技术开发工程领域涌现出更多新的成果。

9 结语

我国能源资源禀赋决定了煤炭在一定时期内, 仍然起到兜底保障作用, 但是“双碳”背景下, 煤炭的清洁高效利用势在必行。洁净煤地质学, 其狭义的研究内容主要是煤加工利用中提效减排的地质地球化学问题, 广义洁净煤地质学是研究煤炭勘探开发利用以及生态修复等全煤炭生命周期提效减排。洁净煤地质研究的落脚点是最大化地高效利用有益物质(增加附加值)和最小化排放有害物质, 主要研究内容包括: 煤炭资源洁净评价、绿色智能开采与地质保障、煤炭资源洁净加工(煤炭洗选)、煤炭资源洁净转化(炼焦、气化、液化)、煤炭资源洁净利用和煤炭资源利用后的生态修复与资源再循环 6 个方面。

在煤炭勘查、开发、加工、转化与利用以及生态修复等煤炭生命周期, 成煤作用、矿物质、洁净度与评价体系、煤粉尘防控、地下工程一体化等科学、技术和工程问题亟需深入攻关研究。未来十年, 洁净煤时空分布、绿色智能煤气等共伴生矿产分质共采、洁净煤气化、煤基新材料、地下煤化工、生态修复等是重要研发方向。

致谢: 本论文工作得到国家自然科学基金(42030807、41872175、41572146)、国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2012CB214901, 2014CB238905)、全国煤炭资源潜力评价(1212011121043)、特殊与稀缺煤炭资源调查(1212011085511)和绿色煤炭矿山(201211003)等项目资助。感谢中国矿业大学(北京)代世峰教授、

中国煤炭地质总局程爱国教授级高级工程师和中国矿业大学胡振琪教授等对本文的完善提出的宝贵意见和建议!

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References)

- [1] 国家发展和改革委员会. 关于加强煤炭清洁高效利用的意见(发改运行〔2024〕1345 号)[EB/OL]. (2024-09-11) [2024-10-07]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202410/content_6978315.htm.
- [2] 中国政府网. “十四五”现代能源体系这样建[EB/OL]. (2022-03-24) [2024-10-11]. https://www.gov.cn/zhengce/2022-03/24/content_5680965.htm.
- [3] 王双明, 申艳军, 宋世杰, 等. “双碳”目标下煤炭能源地位变化与绿色低碳开发[J]. 煤炭学报, 2023, 48(7): 2599–2612. WANG Shuangming, SHEN Yanjun, SONG Shijie, et al. Change of coal energy status and green and low-carbon development under the “dual carbon” goal[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(7): 2599–2612.
- [4] BP. 2024/73rd edition statistical review of world energy[R]. London: Energy Institute, 2024.
- [5] 中华人民共和国自然资源部. 中国矿产资源报告[R]. 北京: 地质出版社, 2024.
- [6] 谢克昌. 煤炭角色再认识[EB/OL]. (2015-02-27) [2024-10-11]. http://www.360doc.com/content/15/0227/02/19907507_451105003.shtml.
- [7] 孙旭东, 张博, 彭苏萍. 我国洁净煤技术 2035 发展趋势与战略对策研究[J]. 中国工程科学, 2020, 22(3): 132–140. SUN Xudong, ZHANG Bo, PENG Suping. Development trend and strategic countermeasures of clean coal technology in China toward 2035[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(3): 132–140.
- [8] 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.
- [9] 中国大百科全书总编辑委员会. 中国大百科全书: 地质学[M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 1993.
- [10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 中国煤炭分类: GB/T 5751—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [11] International Organization for standardization. Classification of coals: ISO 11760: 2018[S]. 2nd ed Switzerland: 2018.
- [12] ALPERN B, LEMOS DE SOUSA M J. Documented international enquiry on solid sedimentary fossil fuels; coal: Definitions, classifications, reserves-resources, and energy potential[J]. International Journal of Coal Geology, 2002, 50(1/2/3/4): 3–41.
- [13] TAYLOR G H, TEICHMULLER M, DAVIS A, et al. Organic petrology[M]. Berlin: Gebrüder Borntraeger Press, 1998.

- [14] FINKELMAN R B, DAI Shifeng, FRENCH D. The importance of minerals in coal as the hosts of chemical elements: A review[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2019, 212: 103251.
- [15] DAI Shifeng, HOWER J C, FINKELMAN R B, et al. Organic associations of non-mineral elements in coal: A review[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2020, 218: 103347.
- [16] DAI Shifeng, BECHTEL A, EBLE C F, et al. Recognition of peat depositional environments in coal: A review[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2020, 219: 103383.
- [17] DAI Shifeng, FINKELMAN R B, HOWER J C, et al. Inorganic geochemistry of coal[M]. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 2023.
- [18] ABELSON P H. Technologies for clean use of coal[J]. *Science*, 1985, 229(4716): 819.
- [19] ABELSON P H. Clean coal technology[J]. *Science*, 1990, 250(4986): 1317.
- [20] 郑楚光. 洁净煤技术[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1996.
- [21] 吴占松, 马润田, 赵满成, 等. 煤炭清洁有效利用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [22] 徐振刚, 曲思建. 中国洁净煤技术[M]. 北京: 应急管理出版社, 2012.
- [23] PETERS D C. Geology in coal resource utilization[M]. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1991.
- [24] MELIKOGLU M. Clean coal technologies: A global to local review for Turkey[J]. *Energy Strategy Reviews*, 2018, 22: 313–319.
- [25] 唐书恒, 秦勇, 姜尧发, 等. 中国洁净煤地质研究[M]. 北京: 地质出版社, 2006.
- [26] 杨起, 韩德馨. 中国煤田地质学[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1979.
- [27] 黄宗理, 张良弼. 地球科学大辞典: 基础学科卷[M]. 北京: 地质出版社, 2006.
- [28] 杨锡禄, 周国铨. 中国煤炭工业百科全书: 地质·测量卷[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1996.
- [29] THOMAS L. Coal geology, 3rd edition[M]. New Jersey: Wiley-Blackwell, 2020.
- [30] 秦勇. 世纪之交的煤田地质学科与创新性人才培养[J]. 中国地质教育, 1999(2): 18–21.
- QIN Yong. Coalfield geology and innovative talent cultivation at the turn of the century[J]. *Chinese Geological Education*, 1999(2): 18–21.
- [31] 曹代勇, 王佟, 王丹, 等. 煤炭地质学: 涵义与发展趋势[J]. 煤炭学报, 2010, 35(5): 765–769.
- CAO Daiyong, WANG Tong, WANG Dan, et al. Coal geology: Its meaning and development trend[J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(5): 765–769.
- [32] XU Shuishi, CHENG Aiguo, CAO Daiyong. The status quo and outlook of Chinese coal geology and exploration technologies[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2010, 82(3): 697–708.
- [33] WANG Xiaoshuai, TANG Yuegang, WANG Shaoqing, et al. Clean coal geology in China: Research advance and its future[J]. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2020, 7(2): 299–310.
- [34] SUÁREZ-RUIZ I, CRELLING J C. Applied coal petrology[M]. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 2008.
- [35] 韩德馨. 中国煤岩学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1996.
- [36] 斯塔赫. E, 等. 斯塔赫煤岩学教程[M]. 杨起, 等, 译. 北京: 煤炭工业出版社, 1990.
- [37] 杨永宽. 中国煤岩学图鉴[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1996.
- [38] 陈佩元, 孙达三, 丁丕训, 等. 中国煤岩图鉴[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1996.
- [39] 李河名, 费淑英. 中国煤的煤岩煤质特征及变质规律[M]. 北京: 地质出版社, 1996.
- [40] 秦勇. 中国高煤级煤的显微岩石学特征及结构演化[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1994.
- [41] International Committee for Coal and Organic Petrology (ICCP). The new vitrinite classification (ICCP system 1994)[J]. *Fuel*, 1998, 77(5): 349–358.
- [42] International Committee for Coal and Organic Petrology (ICCP). The new inertinite classification (ICCP system 1994)[J]. *Fuel*, 2001, 80(4): 459–471.
- [43] SÝKOROVÁ I, PICKEL W, CHRISTANIS K, et al. Classification of huminite (ICCP system 1994)[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2005, 62(1/2): 85–106.
- [44] PICKEL W, KUS J, FLORES D, et al. Classification of liptinite (ICCP system 1994)[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2017, 169: 40–61.
- [45] 代世峰, 唐跃刚, 姜尧发, 等. 煤的显微组分定义与分类(ICCP system 1994) 解析 I: 镜质体[J]. 煤炭学报, 2021, 46(6): 1821–1832.
- DAI Shifeng, TANG Yuegang, JIANG Yaofa, et al. An in-depth interpretation of definition and classification of macerals in coal (ICCP system 1994) for Chinese researchers, I: Vitrinite[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(6): 1821–1832.
- [46] 代世峰, 王绍清, 唐跃刚, 等. 煤的显微组分定义与分类(ICCP system 1994) 解析 II: 惰质体[J]. 煤炭学报, 2021, 46(7): 2212–2226.
- DAI Shifeng, WANG Shaoqing, TANG Yuegang, et al. An in-depth interpretation of definition and classification of macerals in coal (ICCP system 1994) for Chinese researchers, II: Inertinite[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(7): 2212–2226.
- [47] 代世峰, 刘晶晶, 唐跃刚, 等. 煤的显微组分定义与分类(ICCP system 1994) 解析 III: 腐植体[J]. 煤炭学报, 2021, 46(8): 2623–2636.
- DAI Shifeng, LIU Jingjing, TANG Yuegang, et al. An in-depth interpretation of definition and classification of macerals in coal (ICCP system 1994) for Chinese researchers, III: Huminite[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(8): 2623–2636.
- [48] 代世峰, 赵蕾, 唐跃刚, 等. 煤的显微组分定义与分类(ICCP system 1994) 解析 IV: 类脂体[J]. 煤炭学报, 2021, 46(9): 2965–2983.
- DAI Shifeng, ZHAO Lei, TANG Yuegang, et al. An in-depth interpretation of definition and classification of macerals in coal (ICCP system 1994) for Chinese researchers, IV: Liptinite[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(9): 2965–2983.

- [49] DAI Shifeng, WANG Xibo, ZHAO Lei. Mineral matter and trace elements in coal[M]. Basel: MDPI, 2017.
- [50] ASTM International. ASTM D388-19. Standard classification of coals by rank[S]. West Conshohocken: Annual Book of ASTM Standards, 2019.
- [51] 张双全. 煤化学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2004.
- [52] 张香兰, 张军. 煤化学[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2012.
- [53] 白浚仁. 煤质学[M]. 北京: 地质出版社, 1989.
- [54] 袁三畏. 中国煤质论评[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1999.
- [55] 唐跃刚, 代世峰, 唐真. 乌达矿区煤质特性与动态评价研究[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1999.
- [56] 唐跃刚, 王绍清, 杨淑婷, 等. 中国煤质分布规律: 全国煤炭资源潜力评价分报告之四[R]. 河北: 中国煤炭地质总局第一勘探局, 2013.
- [57] 陈鹏. 中国煤炭性质、分类和利用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [58] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 煤炭质量分级 第1部分: 灰分: GB/T 15224.1—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [59] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 煤炭质量分级 第2部分: 硫分: GB/T 15224.2—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [60] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 煤炭质量分级 第3部分: 发热量: GB/T 15224.3—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [61] KREVELEN D W V. Graphical-statistical method for the study of structure and reaction processes of coal[J]. *Fuel*, 1950, 29: 269–284.
- [62] KREVELEN D W V. Coal: Typology, physics, chemistry, constitution[M]. New York: Elsevier Science Publishers Company, 1993.
- [63] MATHEWS J P, CHAFFEE A L. The molecular representations of coal: A review[J]. *Fuel*, 2012, 96: 1–14.
- [64] 谢克昌. 煤的结构与反应性[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [65] 刘振宇. 煤化学的前沿与挑战: 结构与反应[J]. *中国科学: 化学*, 2014, 44(9): 1431–1439.
- LIU Zhenyu. Advancement in coal chemistry: Structure and reactivity[J]. *Scientia Sinica(Chimica)*, 2014, 44(9): 1431–1439.
- [66] SHINN J H. From coal to single-stage and two-stage products: A reactive model of coal structure[J]. *Fuel*, 1984, 63(9): 1187–1196.
- [67] GIVEN P H, MARZEC A, BARTON W A, et al. The concept of a mobile or molecular phase within the macromolecular network of coals: A debate[J]. *Fuel*, 1986, 65(2): 155–163.
- [68] 秦匡宗, 郭绍辉, 李术元. 煤结构的新概念与煤成油机理的再认识[J]. *科学通报*, 1998, 43(18): 1912–1918.
- QIN Kuangzong, GUO Shaohui, LI Shuyuan. New concepts of coal structure and rethinking of the mechanism of coal-to-oil[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1998, 43(18): 1912–1918.
- [69] 秦志宏. 煤有机质溶出行为与煤嵌布结构模型[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2008.
- [70] 秦志宏. 煤嵌布结构模型理论[J]. *中国矿业大学学报*, 2017, 46(5): 939–958.
- QIN Zhihong. Theory of coal embedded structure model[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2017, 46(5): 939–958.
- [71] A. M. 久利马里耶夫, R. C. 戈洛温, C. R. 加加林. 煤结构: 化学指数分类与应用[M]. 聂书岭, 马风云, 译. 北京: 化学工业出版社, 2013.
- [72] 唐跃刚, 王绍清, 郭鑫, 等. 煤有机地球化学研究进展与展望[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2021, 40(3): 574–596.
- TANG Yuegang, WANG Shaoqing, GUO Xin, et al. Researches on the organic geochemistry of coal: Progresses and prospects[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2021, 40(3): 574–596.
- [73] TISSOT B P, WELTE D H. Kerogen: Composition and classification[M]. Berlin: Springer Press, 1978.
- [74] 蒂索 B P, 威尔特 D H. 石油形成与分布[M]. 徐永元, 徐濂, 郝石生, 等, 译. 北京: 石油工业出版社, 1989.
- [75] NAAFS B D A, INGLIS G N, BLEWETT J, et al. The potential of biomarker proxies to trace climate, vegetation, and biogeochemical processes in peat: A review[J]. *Global and Planetary Change*, 2019, 179: 57–79.
- [76] WARD C R. Analysis and significance of mineral matter in coal seams[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2002, 50(1–4): 135–168.
- [77] WARD C R. Analysis, origin and significance of mineral matter in coal: An updated review[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2016, 165: 1–27.
- [78] 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): 1287–1294.
- SUN Jingxin, JERVIS R E. Distribution characteristics of trace elements in coal during combustion[J]. *Scientia Sinica (Series A)*, 1986(12): 1287–1294.
- [79] 陈冰如, 杨绍晋, 钱琴芳, 等. 中国煤矿样中砷、硒、铬、铀、钍元素的含量分布[J]. *环境科学*, 1989, 10(6): 23–26.
- CHEN Bingru, YANG Shaojin, QIAN Qinfang, et al. Content distribution of As, Se, Cr, U and Th elements in Chinese coal samples[J]. *Environmental Science*, 1989, 10(6): 23–26.
- [80] 陈冰如, 钱琴芳, 杨亦男, 等. 我国一〇七个煤矿样中微量元素的浓度分布[J]. *科学通报*, 1985(1): 27–29.
- CHEN Bingru, QIAN Qinfang, YANG Yinan, et al. Concentration distribution of trace elements in 107 coal mine samples from China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1985(1): 27–29.
- [81] 任德贻, 赵峰华, 张军营, 等. 煤中有害微量元素富集的成因类型初探[J]. *地学前缘*, 1999, 6(增刊 1): 17–22.
- REN Deyi, ZHAO Fenghua, ZHANG Junying, et al. A preliminary study on genetic type of enrichment for hazardous minor and trace elements in coal[J]. *Earth Science Frontiers*, 1999, 6(Sup.1): 17–22.
- [82] 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.
- [83] REN Deyi, ZHAO Fenghua, WANG Yunquan, et al. Distributions of minor and trace elements in Chinese coals[J]. *International Journal of Coal Geology*, 1999, 40(2/3): 109–118.
- [84] 王运泉, 任德贻. 煤中微量元素研究的进展[J]. *煤田地质与勘探*, 1994, 22(4): 16–20.
- WANG Yunquan, REN Deyi. Progress in the study of trace ele-

- ments in coal[J]. *Coal Geology & Exploration*, 1994, 22(4): 16–20.
- [85] 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. The distributions, modes of occurrence and volatility of trace elements in coals of China[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2003.
- [86] 唐修义, 黄文辉. 中国煤中微量元素[M]. 北京: 商务印书馆, 2004.
- [87] DAI Shifeng, REN Deyi, CHOU Chen-Lin, 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.
- [88] DAI Shifeng, FINKELMAN R B, FRENCH D, et al. Modes of occurrence of elements in coal: A critical evaluation[J]. *Earth-Science Reviews*, 2021, 222: 103815.
- [89] BOUŠKA V. Geochemistry of coal. Coal science and technology I[M]. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1981.
- [90] GLUSKOTER H J. Mineral matter and trace elements in coal[M]//BABU S P. Trace Elements in Fuel. Washington: American Chemical Society, 1975: 1–22.
- [91] FINKELMAN R B. Trace and minor elements in coal[M]//ENGEL M H, MACKO S A. Organic geochemistry. New York: Plenum Press, 1993: 593–607.
- [92] FINKELMAN R B, PALMER C A, WANG Peipei. Quantification of the modes of occurrence of 42 elements in coal[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2018, 185: 138–160.
- [93] SWAINE D J. Why trace elements are important[J]. *Fuel Processing Technology*, 2000, 65/66: 21–33.
- [94] SWAINE D J, GOODARZI F. Environmental aspects of trace elements in coal[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1995.
- [95] SWAINE D J. Trace elements in coal[M]. Sydney: Butterworth Publishers, 1990.
- [96] KETRIS M P, YUDOVICH Y E. Estimations of Clarkes for Carbonaceous biolithes: World averages for trace element contents in black shales and coals[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2009, 78(2): 135–148.
- [97] DAI Shifeng, WANG Peipei, WARD C R, et al. Elemental and mineralogical anomalies in the coal-hosted Ge ore deposit of Lincang, Yunnan, southwestern China: Key role of N_2 - CO_2 -mixed hydrothermal solutions[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2015, 152: 19–46.
- [98] 傅家谟, 刘德汉, 盛国英. 煤成烃地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1990.
- [99] 黄第藩, 华阿新, 王铁冠, 等. 煤成油地球化学新进展[M]. 北京: 石油工业出版社, 1992.
- [100] 秦勇, 袁亮, 胡千庭, 等. 我国煤层气勘探与开发技术现状及发展方向[J]. *煤炭科学技术*, 2012, 40(10): 1–6.
- QIN Yong, YUAN Liang, HU Qianting, et al. Status and development orientation of coal bed methane exploration and development technology in China[J]. *Coal Science and Technology*, 2012, 40(10): 1–6.
- [101] 秦勇, 申建, 史锐. 中国煤系气大产业建设战略价值与战略选择[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(1): 371–387.
- QIN Yong, SHEN Jian, SHI Rui. Strategic value and choice on construction of large CMG industry in China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(1): 371–387.
- [102] 秦勇. 煤系气地质调查若干问题思考与探讨[J]. *中国地质*, 2023, 50(5): 1355–1374.
- QIN Yong. Thinking and discussion for some problems of geological survey of coal measures gas[J]. *Geology in China*, 2023, 50(5): 1355–1374.
- [103] 曹代勇, 刘天绩, 王丹, 等. 青海木里地区天然气水合物形成条件分析[J]. *中国煤炭地质*, 2009, 21(9): 3–6.
- CAO Daiyong, LIU Tianji, WANG Dan, et al. Analysis of formation conditions of natural gas hydrate in Muli Coalfield, Qinghai Province[J]. *Coal Geology of China*, 2009, 21(9): 3–6.
- [104] 中国煤炭地质总局. 中国煤炭资源赋存规律与资源评价[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [105] TANG Yuegang, LI Ruiqing, WANG Shaoqing. Research progress and prospects of coal petrology and coal quality in China[J]. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2020, 7(2): 273–287.
- [106] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 稀缺、特殊煤炭资源的划分与利用: GB/T 26128—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [107] 国家发展改革委. 特殊和稀缺煤炭开发利用管理暂行规定[J]. *中国煤炭*, 2012, 38(12): 68.
- National Development and Reform Commission. Interim regulations on the development and utilization of special and scarce coal types[J]. *China Coal*, 2012, 38(12): 68.
- [108] 李正越, 唐跃刚, 乔军伟, 等. 特殊和稀缺煤炭资源调查报告[R]. 北京: 中国煤炭地质总局, 2014.
- [109] 曾勇. 中国西部地区特殊煤种及其综合开发与利用[J]. *煤炭学报*, 2001, 26(4): 337–340.
- ZENG Yong. Special coal types in western China and their exploitation and utilization[J]. *Journal of China Coal Society*, 2001, 26(4): 337–340.
- [110] 王绍清, 唐跃刚, 李正越, 等. 我国典型特殊煤种特性及利用研究[J]. *洁净煤技术*, 2015, 21(1): 32–36.
- WANG Shaoqing, TANG Yuegang, LI Zhengyue, et al. Properties and utilization of typical coal types in China[J]. *Clean Coal Technology*, 2015, 21(1): 32–36.
- [111] 宁树正, 张宁, 吴国强, 等. 我国特殊煤种研究进展[J]. *中国煤炭地质*, 2019, 31(6): 1–4.
- NING Shuzheng, ZHANG Ning, WU Guoqiang, et al. Advances in special coal species research in China[J]. *Coal Geology of China*, 2019, 31(6): 1–4.
- [112] 乔军伟, 宁树正, 秦云虎, 等. 特殊用煤研究进展及工作前景[J]. *煤田地质与勘探*, 2019, 47(1): 49–55.
- QIAO Junwei, NING Shuzheng, QIN Yunhu, et al. The research progress and work prospect of special purpose coal[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2019, 47(1): 49–55.
- [113] 唐跃刚, 郭亚楠, 王绍清. 中国特殊煤种: 树皮煤的研究进展[J]. *中国科学基金*, 2011, 25(3): 154–163.
- TANG Yuegang, GUO Ya'nan, WANG Shaoqing. The Chinese

- typical coal type—bark coal: A review[J]. *Science Foundation in China*, 2011, 25(3): 154–163.
- [114] WANG Shaoqing, TANG Yuegang, SCHOBERT H H, et al. FTIR and ^{13}C -NMR investigation of coal component of Late Permian coals from southern China[J]. *Energy & Fuels*, 2011, 25(12): 5677–5672.
- [115] WANG Shaoqing, TANG Yuegang, SCHOBERT H H, et al. FTIR and simultaneous TG/MS/FTIR study of Late Permian coals from southern China[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2013, 100: 75–80.
- [116] 周国庆, 姜尧发, 颜跃进, 等. 江西乐平树皮煤的显微煤岩类型研究[J]. *中国煤炭地质*, 2019, 31(7): 7–11.
ZHOU Guoqing, JIANG Yaofa, YAN Yuejin, et al. Study on bark coal microlithotype in Leping, Jiangxi[J]. *Coal Geology of China*, 2019, 31(7): 7–11.
- [117] MASTALERZ M, HOWER J C, CHEN Yanyan. Microanalysis of barkinite from Chinese coals of high volatile bituminous rank[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2015, 141/142: 103–108.
- [118] 王绍清, 唐跃刚, SCHOBERT H H. 树皮煤的性质及转化[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [119] KWIECINSKA B, PETERSEN H I. Graphite, semi-graphite, natural coke, and natural char classification (ICCP system)[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2004, 57(2): 99–116.
- [120] 曹代勇, 魏迎春, 李阳, 等. 煤系石墨鉴别指标厘定及分类分级体系构建[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(6): 1833–1846.
CAO Daiyong, WEI Yingchun, LI Yang, et al. Determination of identification index and construction of classification and classification system of coal measures graphite[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(6): 1833–1846.
- [121] 曹代勇, 张鹤, 董业绩, 等. 煤系石墨矿产地质研究现状与重点方向[J]. *地学前缘*, 2017, 24(5): 317–327.
CAO Daiyong, ZHANG He, DONG Yeji, et al. Research status and key orientation of coal-based graphite mineral geology[J]. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24(5): 317–327.
- [122] 刘钦甫, 袁亮, 李阔, 等. 不同变质程度煤系石墨结构特征[J]. *地球科学*, 2018, 43(5): 1663–1669.
LIU Qinfu, YUAN Liang, LI Kuo, et al. Structure characteristics of different metamorphic grade coal-based graphites[J]. *Earth Science*, 2018, 43(5): 1663–1669.
- [123] 潘生杰, 陈建玉, 范飞, 等. 低阶煤分质利用转化路线的现状分析及展望[J]. *洁净煤技术*, 2017, 23(5): 7–12.
PAN Shengjie, CHEN Jianyu, FAN Fei, et al. Present situation analysis and prospect of low rank coal quality-based utilization conversion route[J]. *Clean Coal Technology*, 2017, 23(5): 7–12.
- [124] 张亚婷, 周安宇, 张晓欠, 等. 以太西无烟煤为前驱体制备煤基石墨烯的研究[J]. *煤炭转化*, 2013, 36(4): 57–61.
ZHANG Yating, ZHOU Anning, ZHANG Xiaoqian, et al. Preparation of the graphene from Taixi anthracite[J]. *Coal Conversion*, 2013, 36(4): 57–61.
- [125] HUAN Xuan, TANG Yuegang, XU Jingjie, et al. Structural characterization of graphenic material prepared from anthracites of different characteristics: A comparative analysis[J]. *Fuel Processing Technology*, 2019, 183: 8–18.
- [126] 唐跃刚, 徐靖杰, 郇璇, 等. 云南小发路无烟煤基石墨烯制备与谱学表征[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(2): 740–748.
TANG Yuegang, XU Jingjie, HUAN Xuan, et al. Preparation and spectroscopic characterization of coal-based graphene from anthracite in Xiaofalu, Yunnan, China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(2): 740–748.
- [127] SAIKIA B K, BORUAH R K, GOGOI P K. A X-ray diffraction analysis on graphene layers of Assam coal[J]. *Journal of Chemical Sciences*, 2009, 121(1): 103–106.
- [128] MA Pengliang, TANG Yuegang, LI Ruiqing, et al. Preparation and characteristic analysis of graphene based on coal macerals of different rank[J]. *Fuel*, 2024, 357: 130004.
- [129] SEREDIN V V, DAI Shifeng. Coal deposits as potential alternative sources for lanthanides and yttrium[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2012, 94(5): 67–93.
- [130] 代世峰, 任德貽, 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.
- [131] DAI Shifeng, 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.
- [132] DAI Shifeng, YAN Xiaoyun, WARD C R, et al. Valuable elements in Chinese coals: A review[J]. *International Geology Review*, 2018, 60(5/6): 590–620.
- [133] 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.
- [134] 代世峰, 刘池洋, 赵蕾, 等. 煤系中战略性金属矿产资源: 意义和挑战[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(5): 1743–1749.
DAI Shifeng, LIU Chiyang, ZHAO Lei, et al. Strategic metal resources in coal-bearing strata: Significance and challenges[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(5): 1743–1749.
- [135] DAI Shifeng, ARBUZOV S I, CHEKRYZHOV I Y, et al. Metaliferous coals of Cretaceous Age: A review[J]. *Minerals*, 2022, 12(9): 1154.
- [136] JIU Bo, HUANG Wenhui, SPIRO B, et al. Distribution of Li, Ga, Nb, and REEs in coal as determined by LA-ICP-MS imaging: A case study from Jungar Coalfield, Ordos Basin, China[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2023, 267: 104184.
- [137] 毛节华, 许惠龙. 中国煤炭资源预测与评价[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [138] 杨舒婷. 中国煤炭资源洁净势评价研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2015.
YANG Shuting. Cleaness potential evaluation study on china coal resource[D]. Beijing: China University of Mining & Technology (Beijing), 2015.
- [139] 李文华, 翟炯. 中国煤中灰分的分布[J]. *煤炭加工与综合利用*, 1992(4): 7–10.

- LI Wenhua, ZHAI Jiong. Distribution of ash content in Chinese coal[J]. *Coal Processing & Comprehensive Utilization*, 1992(4): 7–10.
- [140] WHITE D. Physiographic conditions attending the formation of coal[M]//WHITE D, THIESSEN R. The origin of coal. Washington: United States. Government Printing Office, 1913, 38: 52–84.
- [141] CASAGRANDE D J, IDOWU G, FRIEDMAN A, et al. H₂S incorporation in coal precursors: Origins of organic sulphur in coal[J]. *Nature*, 1979, 282(5739): 163–175.
- [142] CASAGRANDE D J, NG L. Incorporation of elemental sulphur in coal as organic sulphur[J]. *Nature*, 1979, 282(5739): 598–599.
- [143] CASAGRANDE D J, SIEFERT K. Origins of sulfur in coal: Importance of the Ester Sulfate content of peat[J]. *Science*, 1977, 195(4279): 675–676.
- [144] ALTSCHULER Z S, SCHNEPFE M M, SILBER C C, et al. Sulfur diagenesis in everglades peat and origin of pyrite in coal[J]. *Science*, 1983, 221(4607): 221–227.
- [145] CALKINS W H. The chemical forms of sulfur in coal: A review[J]. *Fuel*, 1994, 73(4): 475–484.
- [146] SINNINGHE-DAMSTÉ J S, WHITE C M, GREEN J B, et al. Organosulfur compounds in sulfur-rich Raša coal[J]. *Energy & Fuels*, 1999, 13(3): 728–738.
- [147] GAYER R A, ROSE M, DEHMER J, et al. Impact of sulphur and trace element geochemistry on the utilization of a marine-influenced coal: Case study from the South Wales Variscan foreland basin[J]. *International Journal of Coal Geology*, 1999, 40(2/3): 151–174.
- [148] 陈鹏. 中国煤中硫的赋存特征及脱硫[J]. *煤炭转化*, 1994, 17(2): 1–9.
- CHEN Peng. Characteristics and distribution of sulfur in Chinese coals and desulfurization[J]. *Coal Conversion*, 1994, 17(2): 1–9.
- [149] 李文华, 翟炯. 中国煤中硫的分布及控制硫污染的对策[J]. *煤炭转化*, 1994, 17(4): 1–10.
- LI Wenhua, ZHAI Jiong. The distribution of sulfur in Chinese coal and the means controlling sulfur pollution[J]. *Coal Conversion*, 1994, 17(4): 1–10.
- [150] REN Deyi, TANG Yuegang, LEI Jiajin. Study on regulations of sulfur occurrence and pyrite magnetism of Late Permian coals in southwestern China[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 1994, 4(2): 64–73.
- [151] REN Deyi, TANG Yuegang, LEI Jiajin, et al. The study on regularities of sulfur occurrence and pyrite magnetism of Late Permian coal in southwest China[C]//30th International Geological Congress (IGC). Beijing: International Geological Congress, 1996: 875–880.
- [152] 周春光, 杨起, 康西栋, 等. 煤中硫研究现状[J]. *煤田地质与勘探*, 1999, 27(1): 16–20.
- ZHOU Chunguang, YANG Qi, KANG Xidong, et al. Development on the study of sulfur in coal[J]. *Coal Geology & Exploration*, 1999, 27(1): 16–20.
- [153] 周春光, 杨起, 康西栋, 等. 华北晚古生代煤中黄铁矿形成世代的硫同位素证据[J]. *中国煤田地质*, 2000, 12(1): 19–22.
- ZHOU Chunguang, YANG Qi, KANG Xidong, et al. Sulfur-isotope evidence of pyrite generation in coal of Late Palaeozoic in northern China[J]. *Coal Geology of China*, 2000, 12(1): 19–22.
- [154] 刘大锰, 杨起, 周春光, 等. 华北晚古生代煤中黄铁矿赋存特征与地质成因研究[J]. *地球化学*, 1999, 28(4): 340–350.
- LIU Dameng, YANG Qi, ZHOU Chunguang, et al. Occurrence and geological genesis of pyrites in Late Paleozoic coals in North China[J]. *Geochimica*, 1999, 28(4): 340–350.
- [155] 周诚林. 煤中硫的地质特征和洁净煤技术的发展[J]. *地学前缘*, 1999, 6(增刊 1): 23–27.
- ZHOU Chenglin. Geologic characteristics of sulfur in coals and development of the clean coal technologies[J]. *Earth Science Frontiers*, 1999, 6(Sup.1): 23–27.
- [156] CHOU Chenlin. Sulfur in coals: A review of geochemistry and origins[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2012, 100: 1–13.
- [157] DAI Shifeng, REN Deyi, ZHOU Yiping, et al. Mineralogy and geochemistry of a superhigh-organic-sulfur coal, Yanshan Coalfield, Yunnan, China: Evidence for a volcanic ash component and influence by submarine exhalation[J]. *Chemical Geology*, 2008, 255(1/2): 182–194.
- [158] 唐跃刚, 张会勇, 彭苏萍, 等. 中国煤中有机硫赋存状态、地质成因的研究[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2002, 21(4): 1–4.
- TANG Yuegang, ZHANG Huiyong, PENG Suping, et al. Study on occurrence mode and geological genesis of organic sulfur in coal in China[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 2002, 21(4): 1–4.
- [159] 唐跃刚, 贺鑫, 程爱国, 等. 中国煤中硫含量分布特征及其沉积控制[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(9): 1977–1988.
- TANG Yuegang, HE Xin, CHENG Aiguo, et al. Occurrence and sedimentary control of sulfur in coals of China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(9): 1977–1988.
- [160] 罗隼飞, 李文华, 姜英, 等. 中国煤中硫的分布特征研究[J]. *煤炭转化*, 2005, 28(3): 14–18.
- LUO Yunfei, LI Wenhua, JIANG Ying, et al. Distribution of sulfur in coals of China[J]. *Coal Conversion*, 2005, 28(3): 14–18.
- [161] 胡军, 郑宝山, 王滨滨, 等. 中国煤中有机硫的分布及其成因[J]. *煤田地质与勘探*, 2005, 33(5): 12–15.
- HU Jun, ZHENG Baoshan, WANG Binbin, et al. Distribution and forming cause of organic sulfur in coals of China[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2005, 33(5): 12–15.
- [162] 高连芬, 刘桂建, CHOU Chen-Lin, 等. 中国煤中硫的地球化学研究[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2005, 24(1): 79–87.
- GAO Lianfen, LIU Guijian, CHOU Chen-Lin, et al. The study of sulfur geochemistry in Chinese coals[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2005, 24(1): 79–87.
- [163] 汤达祯, 杨起, 周春光, 等. 华北晚古生代成煤沼泽微环境与煤中硫的成因关系研究[J]. *中国科学(D 辑: 地球科学)*, 2000, 30(6): 584–591.
- TANG Dazhen, YANG Qi, ZHOU Chunguang, et al. Study on the relationship between the microenvironment of coal-forming swamp in Late Paleozoic north China and the origin of sulfur in coal[J]. *Scientia Sinica(Terrae)*, 2000, 30(6): 584–591.
- [164] ZHAO Qiaojing, QIN Shenjun, ZHAO Cunliang, et al. Origin and geological implications of super high sulfur-containing poly-

- cyclic aromatic compounds in high-sulfur coal[J]. *Gondwana Research*, 2021, 96: 219–231.
- [165] ZHAO Qiaojing, QIN Shenjun, SHEN Wenchao, et al. Significant influence of different sulfur forms on sulfur-containing polycyclic aromatic compound formation in high-sulfur coals[J]. *Fuel*, 2023, 332: 125999.
- [166] 唐跃刚, 任德贻. 煤中黄铁矿的成因研究[J]. 地质论评, 1996, 42(1): 64–70.
- TANG Yuegang, REN Deyi. The genesis of pyrites in coal[J]. *Geological Review*, 1996, 42(1): 64–70.
- [167] 唐跃刚. 四川晚二叠世煤中硫的赋存机制黄铁矿矿物学及其磁性研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 1993.
- TANG Yuegang. Study on sulfur occurring mechanism, pyrite mineralogy and its magnetism of Late Permian coals in Sichuan Province, China[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 1993.
- [168] 魏强, 唐跃刚, 李薇薇, 等. 煤中有机硫结构研究进展[J]. 煤炭学报, 2015, 40(8): 1911–1923.
- WEI Qiang, TANG Yuegang, LI Weiwei, et al. Research advances on organic sulfur structures in coal[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(8): 1911–1923.
- [169] CHEN Cong, TANG Yuegang, GUO Xin. Comparison of structural characteristics of high-organic-sulfur and low-organic-sulfur coal of various ranks based on FTIR and Raman spectroscopy[J]. *Fuel*, 2022, 310: 122362.
- [170] 陈骏, 王鹤年. 地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [171] 赵峰华, 任德贻, 张军营, 等. 煤中有害元素的研究现状及其对环境保护的意义[J]. 煤矿环境保护, 1998, 12(2): 20–23.
- ZHAO Fenghua, REN Deyi, ZHANG Junying, et al. Recent advance of study on hazardous elements in coal and significance for environmental protection[J]. *Coal Mine Environment Protection*, 1998, 12(2): 20–23.
- [172] 冯新斌, 洪冰, 倪建宇, 等. 煤中部分潜在毒害微量元素在表生条件下的化学活动性[J]. 环境科学学报, 1999, 19(4): 433–437.
- FENG Xinbin, HONG Bing, NI Jianyu, et al. Chemical mobility of potentially toxic trace elements in coal at surface conditions[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1999, 19(4): 433–437.
- [173] 冯新斌, 洪业汤, 倪建宇, 等. 煤中潜在毒害元素分布的多元分析及其地球化学意义[J]. 矿物学报, 1999, 19(1): 34–40.
- FENG Xinbin, HONG Yetang, NI Jianyu, et al. Multivariable analysis on the distribution of potentially hazardous elements in coal and its geochemical significance[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 1999, 19(1): 34–40.
- [174] FINKELMAN R B, GROSS P M K. The types of data needed for assessing the environmental and human health impacts of coal[J]. *International Journal of Coal Geology*, 1999, 40(2-3): 91–101.
- [175] FINKELMAN R B. Modes of occurrence of environmentally-sensitive trace elements in coal[M]//SWAINE D J, GOODARZI F. Environmental aspects of trace elements in coal. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1995: 24–50.
- [176] 赵峰华, 任德贻. 燃煤产物中有害元素淋滤实验的研究现状[J]. 煤田地质与勘探, 1998, 26(4): 14–17.
- ZHAO Fenghua, REN Deyi. Study on leaching experiment of hazardous trace elements in coal-fired residues: Review[J]. *Coal Geology & Exploration*, 1998, 26(4): 14–17.
- [177] QUICK W J, IRONS R M A. Trace element partitioning during the firing of washed and untreated power station coals[J]. *Fuel*, 2002, 81(5): 665–672.
- [178] SELINUS O, ALLOWAY B, CENTENO J A, et al. Essentials of medical geology: Impacts of the natural environment on public health[M]. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 2005.
- [179] DE LORENZI O. Combustion engineering: A reference book on fuel burning and steam generation[M]. New York: Combustion Engineering-Superheater Inc, 1951.
- [180] MILLER B G. Clean coal engineering technology[M]. Amsterdam: Butterworth-Heinemann of Elsevier, 2011.
- [181] SINGER J G. Combustion: Fossil power systems[M]. Windsor: Combustion Engineering, 1981.
- [182] VASSILEV S V, KITANO K, TAKEDA S, et al. Influence of mineral and chemical composition of coal ashes on their fusibility[J]. *Fuel Processing Technology*, 1995, 45(1): 27–51.
- [183] BRYERS R W. Fireside slagging, fouling, and high-temperature corrosion of heat-transfer surface due to impurities in steam-raising fuels[J]. *Progress in Energy & Combustion Science*, 1996, 22(1): 29–120.
- [184] YAN Li, GUPTA R P, WALL T F. The implication of mineral coalescence behaviour on ash formation and ash deposition during pulverised coal combustion[J]. *Fuel*, 2001, 80(9): 1333–1340.
- [185] YAN Li, GUPTA R P, WALL T F. A mathematical model of ash formation during pulverized coal combustion[J]. *Fuel*, 2002, 81(3): 337–344.
- [186] RUSSELL N V, WIGLEY F, WILLIAMSON J. The roles of lime and iron oxide on the formation of ash and deposits in PF combustion[J]. *Fuel*, 2002, 81(5): 673–681.
- [187] 代世峰, 任德贻, 唐跃刚. 煤中常量元素的赋存特征与研究意义[J]. 煤田地质与勘探, 2005, 33(2): 1–5.
- DAI Shifeng, REN Deyi, TANG Yuegang. Modes of occurrence of major elements in coal and their study significance[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2005, 33(2): 1–5.
- [188] LAUMANN S, MICIĆ V, KRUGE M A, et al. Variations in concentrations and compositions of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in coals related to the coal rank and origin[J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(10): 2690–2697.
- [189] RIBEIRO J, SILVA T, FILHO J G M, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in burning and non-burning coal waste piles[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 199/200: 105–110.
- [190] MATHEWS J P, SHARMA A. The structural alignment of coal and the analogous case of Argonne Upper Freeport coal[J]. *Fuel*, 2012, 95: 19–24.
- [191] SHINE K P, FUGLESTVEDT J S, HAILEMARIAM K, et al. Alternatives to the global warming potential for comparing climate impacts of emissions of greenhouse gases[J]. *Climatic Change*, 2005, 68(3): 281–302.
- [192] MARTUNUS, HELWANI Z, WIHEEB A D, et al. In situ carbon dioxide capture and fixation from a hot flue gas[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2012, 6: 179–188.

- [193] MAHESHWARI N, KRISHNA P K, THAKUR I S, et al. Biological fixation of carbon dioxide and biodiesel production using microalgae isolated from sewage waste water[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(22): 27319–27329.
- [194] YE Jixu, AN Ni, CHEN Han, et al. Performance and mechanism of carbon dioxide fixation by a newly isolated chemoautotrophic strain *Paracoccus denitrificans* PJ-1[J]. *Chemosphere*, 2020, 252: 126473.
- [195] 汪新文. 地球科学概论[M]. 北京: 地质出版社, 2013.
- [196] 赵师庆. 实用煤岩学[M]. 北京: 地质出版社, 1991.
- [197] 赵师庆, 王飞宇, 董名山. 论“沉煤环境—成煤类型—煤质特征”概略成因模型 I: 环境与煤相[J]. 沉积学报, 1994, 12(1): 32–39.
- ZHAO Shiqing, WANG Feiyu, DONG Mingshan. Discussion on the “sedimentary environment—type of coal-forming—characteristic of coal quality” rough genetic model I: Environment and coal facies[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1994, 12(1): 32–39.
- [198] 代俊峰, 李增华, 许德如, 等. 煤型关键金属矿产研究进展[J]. 大地构造与成矿学, 2021, 45(5): 963–982.
- DAI Junfeng, LI Zenghua, XU Deru, et al. Coal-hosted critical metal deposits: A review[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2021, 45(5): 963–982.
- [199] 刘桂建, 王桂梁, 张威. 煤中微量元素的环境地球化学研究: 以兖州矿区为例[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1999.
- [200] 刘桂建, 彭子成, 杨萍玥, 等. 煤中微量元素富集的主要因素分析[J]. 煤田地质与勘探, 2001, 29(4): 1–4.
- LIU Guijian, PENG Zicheng, YANG Pingyue, et al. Main factors controlling concentration of trace element in coal[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2001, 29(4): 1–4.
- [201] 周义平. 云南某些煤中砷的分布及控制因素[J]. 煤田地质与勘探, 1983(3): 2–8.
- ZHOU Yiping. Distribution and controlling factors of arsenic in certain coals from Yunnan[J]. *Coal Geology & Exploration*, 1983(3): 2–8.
- [202] 代世峰, 任德贻, 周义平, 等. 煤中微量元素和矿物富集的同沉积火山灰与海底喷流复合成因[J]. 科学通报, 2008, 53(24): 3120–3126.
- DAI Shifeng, REN Deyi, ZHOU Yiping, et al. Synergistic genesis of co-depositional volcanic ash and submarine outflow in trace element and mineral enrichment in coal[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(24): 3120–3126.
- [203] 杨甫, 段中会, 马丽, 等. 陕西省富油煤分布及受控地质因素[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(3): 171–181.
- YANG Fu, DUAN Zhonghui, MA Li, et al. Distribution and controlled geological factors of oil-rich coal in Shaanxi Province[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(3): 171–181.
- [204] 王岩, 杨承伟, 曲思建. 地质因素对炼焦煤煤质及成焦特性的影响研究[J]. 煤炭工程, 2022, 54(11): 187–192.
- WANG Yan, YANG Chengwei, QU Sijian. Influence of geological factors on properties of coking coal[J]. *Coal Engineering*, 2022, 54(11): 187–192.
- [205] 彭苏萍, 李恒堂, 程爱国. 煤矿安全高效开采地质保障技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2007.
- [206] 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.
- [207] 潘树仁, 李正越, 魏云迅, 等. 新时代煤炭资源全生命周期地质保障技术体系[J]. 中国煤炭地质, 2020, 32(1): 1–4.
- PAN Shuren, LI Zhengyue, WEI Yunxun, et al. New era coal resources whole service lifecycle geological security technology system[J]. *Coal Geology of China*, 2020, 32(1): 1–4.
- [208] 李小彦. 陕甘宁盆地侏罗纪优质煤资源分类与评价[M]. 北京: 地质出版社, 2008.
- [209] 秦云虎, 秦勇, 李壮福, 等. 中国优质环保型动力煤类型划分及总体构成[J]. 能源技术与管理, 2006, 31(6): 83–85.
- QIN Yunhu, QIN Yong, LI Zhuangfu, et al. Distinction of China environmental protection steam coal and its composition of totality[J]. *Energy Technology and Management*, 2006, 31(6): 83–85.
- [210] 秦勇, 唐书恒, 王文峰, 等. 中国煤炭资源洁净潜力及其分布的地球化学研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2005, 24(增刊 1): 277.
- [211] TANG Yuegang, WANG Haisheng, CHENG Aiguo, et al. The evaluation and distribution to coal quality grade of Shanxi Province, China[C]. The 29th Annual Meeting of the Society for Organic Petrology, 2012: 49–51.
- [212] 王文峰, 秦勇, 傅雪海. 煤中有害元素潜在污染综合指数及洁净等级研究[J]. 自然科学进展, 2005, 15(8): 973–980.
- WANG Wenfeng, QIN Yong, FU Xuehai. Study on the comprehensive index of potential pollution and cleanliness level of harmful elements in coal[J]. *Progress in Natural Science*, 2005, 15(8): 973–980.
- [213] 王文峰, 秦勇. 煤洁净过程中有害元素和矿物的分配规律[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2011.
- [214] 杨淑婷, 唐跃刚, 解锡超, 等. 煤炭资源洁净等级评价研究[J]. 洁净煤技术, 2011, 17(1): 5–8.
- YANG Shuting, TANG Yuegang, XIE Xichao, et al. Research on clean potential assessment of coal resources[J]. *Clean Coal Technology*, 2011, 17(1): 5–8.
- [215] TANG Yuegang, YANG Shuting, WANG Xiaoshuai. A new parameter of cleanability to determine the clean potential of coal resources[J]. *Acta Geologica Sinica(English Edition)*, 2017, 91(6): 2338–2339.
- [216] WANG Xiaoshuai, TANG Yuegang, YANG Chengwei, et al. The cleanability evaluation of No. 3 coal seam in Anping, Yitang and Xizhuang exploration area[C]//Xuzhou: Proceedings of 35th Pittsburgh International Coal Conference(Abstract), 2018.
- [217] 何保, 李振南, 李茂丰, 等. 舒兰街矿区煤层煤质特征及洁净等级划分[J]. 洁净煤技术, 2018, 24(2): 20–25.
- HE Bao, LI Zhennan, LI Maofeng, et al. Characteristics and cleanliness class of coal seam in Shulan Street mining area[J]. *Clean Coal Technology*, 2018, 24(2): 20–25.
- [218] 魏云迅, 李聪聪, 乔军伟, 等. 神府矿区洁净煤划分及绿色开发建议[J]. 中国煤炭, 2019, 45(11): 79–83.
- WEI Yunxun, LI Congcong, QIAO Junwei, et al. Clean coal grading and green development proposal of Shenfu mining area[J]. *China Coal*, 2019, 45(11): 79–83.
- [219] 赵明珍. 河南省主要煤田煤炭资源清洁利用潜势[J]. 煤田地质

- 与勘探, 2020, 48(2): 57–63.
- ZHAO Mingzhen. The potential of clean utilization of coal resources in main coalfields of Henan Province[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2020, 48(2): 57–63.
- [220] 田步令, 据惠姣, 王普. 平山湖矿区煤炭洁净等级划分及清洁利用方向[J]. 洁净煤技术, 2024, 30(增刊 1): 65–69.
- TIAN Buling, JU Huijiao, WANG Pu. Clean grade division and clean utilization direction of coal in Pingshanhu mining area[J]. *Clean Coal Technology*, 2024, 30(Sup.1): 65–69.
- [221] 王佟, 张博, 王庆伟, 等. 中国绿色煤炭资源概念和内涵及评价[J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45(1): 1–8.
- WANG Tong, ZHANG Bo, WANG Qingwei, et al. Green coal resources in China: Concept, characteristics and assessment[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2017, 45(1): 1–8.
- [222] 程爱国. 中国煤炭资源保障程度和绿色勘查开发途径[J]. 中国煤炭地质, 2020, 32(1): 5–10.
- CHENG Aiguo. Coal resource security level and green exploration, exploitation approaches in China[J]. *Coal Geology of China*, 2020, 32(1): 5–10.
- [223] 程爱国. 煤炭绿色勘查开发理论与关键技术[J]. 中国煤炭地质, 2020, 32(9): 33–37.
- CHENG Aiguo. Coal and coal measures mineral resources green exploration and exploitation theory and key technologies[J]. *Coal Geology of China*, 2020, 32(9): 33–37.
- [224] 秦勇, 易同生, 汪凌霞, 等. 面向项目风险控制的煤炭地下气化地质条件分析[J]. 煤炭学报, 2023, 48(1): 290–306.
- QIN Yong, YI Tongsheng, WANG Lingxia, et al. Analysis of geological conditions for risk control of UCG project[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(1): 290–306.
- [225] 秦勇, 易同生, 杨磊, 等. 中国煤炭地下气化现场试验探索历程与前景展望[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(7): 17–25.
- QIN Yong, YI Tongsheng, YANG Lei, et al. Underground coal gasification field tests in China: History and prospects[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(7): 17–25.
- [226] LIU Shuqin, ZHANG Shangjun, CHEN Feng, et al. Variation of coal permeability under dehydrating and heating: A case study of Ulanqab lignite for underground coal gasification[J]. *Energy & Fuels*, 2014, 28(11): 6869–6876.
- [227] 王双明, 师庆民, 王生全, 等. 富油煤的油气资源属性与绿色低碳开发[J]. 煤炭学报, 2021, 46(5): 1365–1377.
- WANG Shuangming, SHI Qingmin, WANG Shengquan, et al. Resource property and exploitation concepts with green and low-carbon of tar-rich coal as coal-based oil and gas[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(5): 1365–1377.
- [228] 王双明, 王虹, 任世华, 等. 西部地区富油煤开发利用潜力分析和体系构想[J]. 中国工程科学, 2022, 24(3): 49–57.
- WANG Shuangming, WANG Hong, REN Shihua, et al. Potential analysis and technical conception of exploitation and utilization of tar-rich coal in western China[J]. *Strategic Study of CAE*, 2022, 24(3): 49–57.
- [229] 李廷. 煤炭开采对地质结构及地质安全的影响[J]. 山东工业技术, 2018(14): 95.
- LI Ting. Impact of coal mining on geological structures and geological safety[J]. *Shandong Industrial Technology*, 2018(14): 95.
- [230] 刘斌武. 煤炭开采对地质结构及地质安全的影响分析[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2017, 37(21): 114–115.
- LIU Binwu. Analysis of the impact of coal mining on geological structures and geological safety[J]. *China Petroleum and Chemical Standard and Quality*, 2017, 37(21): 114–115.
- [231] 钱鸣高. 绿色开采的概念与技术体系[J]. 煤炭科技, 2003(4): 1–3.
- QIAN Minggao. Technological system and green mining concept[J]. *Coal Science & Technology Magazine*, 2003(4): 1–3.
- [232] 贾建称, 张妙逢, 吴艳. 深部煤炭资源安全高效开发地质保障系统研究[J]. 煤田地质与勘探, 2012, 40(6): 1–7.
- JIA Jiancheng, ZHANG Miaofeng, WU Yan. The geological guarantee system for exploiting deep coal resources in safety and high efficiency[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2012, 40(6): 1–7.
- [233] 虎维岳. 深部煤炭开采地质安全保障技术现状与研究方向[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(8): 1–5.
- HU Weiyue. Study orientation and present status of geological guarantee technologies to deep mine coal mining[J]. *Coal Science and Technology*, 2013, 41(8): 1–5.
- [234] 赵平. 新时代煤炭地质勘查技术及发展方向思考[J]. 中国煤炭地质, 2018, 30(4): 1–4.
- ZHAO Ping. Pondering on coal geological exploration technology and development orientation in the New era[J]. *Coal Geology of China*, 2018, 30(4): 1–4.
- [235] ZHOU Wendong, WANG Hetang, WANG Deming, et al. The effect of coal proximate compositions on the characteristics of dust generation using a conical pick cutting system[J]. *Powder Technology*, 2019, 355: 573–581.
- [236] 王涛. 非对称荷载下煤岩力学行为与损伤破裂机理研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2023.
- WANG Tao. Study on the mechanical behavior and damage mechanism of coal and rock under asymmetric loading[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2023.
- [237] 王存飞. 大采高综采工作面作业区域粉尘溯源研究[J]. 矿业安全与环保, 2022, 49(2): 29–34.
- WANG Cunfei. Study on dust tracing in working area of fully mechanized mining face with large mining height[J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2022, 49(2): 29–34.
- [238] APOSTOLOVA D, KOSTOVA I, BECHTEL A, et al. PAHs in feed coals and fly ashes from coal-fired thermal power plants in Bulgaria[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2021, 243: 103782.
- [239] LANZERSTORFER C. Fly ash from coal combustion: Dependence of the concentration of various elements on the particle size[J]. *Fuel*, 2018, 228: 263–271.
- [240] 聂百胜, 李祥春, 杨涛, 等. 工作面采煤期间 PM_{2.5} 粉尘的分布规律[J]. 煤炭学报, 2013, 38(1): 33–37.
- NIE Baisheng, LI Xiangchun, YANG Tao, et al. Distribution of PM_{2.5} dust during mining operation in coal workplace[J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(1): 33–37.
- [241] LIU Ting, LIU Shimin. The impacts of coal dust on miners' health: A review[J]. *Environmental Research*, 2020, 190: 109849.

- [242] SHANGGUAN Yunfei, ZHUANG Xinguo, QUEROL X, et al. Mineralogical and geochemical variations from coal to deposited dust and toxicity of size-segregated respirable dust in a blasting mining underground coal mine in Hunan Province, South China[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2021, 248: 103863.
- [243] SHANGGUAN Yunfei, ZHUANG Xinguo, QUEROL X, et al. Physicochemical characteristics and oxidative potential of size-segregated respirable coal mine dust: Implications for potentially hazardous agents and health risk assessment[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2024, 282: 104433.
- [244] TRECHERA P, MORENO T, CORDOBA P, et al. Geochemistry and oxidative potential of the respirable fraction of powdered mined Chinese coals[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 800: 149486.
- [245] TRECHERA P, MORENO T, CORDOBA P, et al. Mineralogy, geochemistry and toxicity of size-segregated respirable deposited dust in underground coal mines[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 399: 122935.
- [246] GOPINATHAN P, SANTOSH M S, KUMAR O P, et al. Mineralogical and geochemical characterization of coal debris from major coal fields in India: Implications on respirable dust hazards[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2024, 184: 1057-1068.
- [247] 刘峰, 曹文君, 张建明, 等. 我国煤炭工业科技创新进展及“十四五”发展方向[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(1): 1-15.
LIU Feng, CAO Wenjun, ZHANG Jianming, et al. Current technological innovation and development direction of the 14th Five-Year Plan period in China coal industry[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(1): 1-15.
- [248] 袁亮, 张平松. 煤炭精准开采地质保障技术的发展现状及展望[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(8): 2277-2284.
YUAN Liang, ZHANG Pingsong. Development status and prospect of geological guarantee technology for precise coal mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(8): 2277-2284.
- [249] 毛善君, 鲁守明, 李存禄, 等. 基于精确大地坐标的煤矿透明化智能综采工作面自适应割煤关键技术研究及系统应用[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(1): 515-526.
MAO Shanjun, LU Shouming, LI Cunlu, et al. Key technologies and system of adaptive coal cutting in transparent intelligent fully mechanized coal mining face based on precisgeodetic coordinates[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(1): 515-526.
- [250] 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 intelligent coal mining[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2021, 49(1): 21-31.
- [251] 贾建称, 贾茜, 桑向阳, 等. 我国煤矿地质保障系统建设 30 年: 回顾与展望[J]. *煤田地质与勘探*, 2023, 51(1): 86-106.
JIA Jiancheng, JIA Qian, SANG Xiangyang, et al. Review and prospect of coal mine geological guarantee system in China during 30 years of construction[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(1): 86-106.
- [252] 王国法, 张建中, 薛国华, 等. 煤矿回采工作面智能地质保障技术进展与思考[J]. *煤田地质与勘探*, 2023, 51(2): 12-26.
WANG Guofa, ZHANG Jianzhong, XUE Guohua, et al. Progress and reflection of intelligent geological guarantee technology in coal mining face[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(2): 12-26.
- [253] 葛世荣, 张晞, 薛光辉, 等. 我国煤矿煤机智能技术与装备发展研究[J]. *中国工程科学*, 2023, 25(5): 146-156.
GE Shirong, ZHANG Xi, XUE Guanghui, et al. Development of intelligent technologies and machinery for coal mining in China's underground coal mines[J]. *Strategic Study of CAE*, 2023, 25(5): 146-156.
- [254] 任世华. 推动煤炭洗选发展, 减少空气污染[J]. *中国能源*, 2017, 39(6): 5-7.
REN Shihua. Promote coal washing development and reduce air pollution[J]. *Energy of China*, 2017, 39(6): 5-7.
- [255] 王文峰, 秦勇, 宋党育. 煤中有害元素的洗选洁净潜势[J]. *燃料化学学报*, 2003, 31(4): 295-299.
WANG Wenfeng, QIN Yong, SONG Dangyu. Cleaning potential of hazardous elements during coal washing[J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2003, 31(4): 295-299.
- [256] 张鹏. 宁夏鸳鸯湖矿区煤的可选性特征[J]. *中国煤炭地质*, 2009, 21(11): 38-40.
ZHANG Peng. Coal washability characteristics in Yuanyanghu mine area[J]. *Coal Geology of China*, 2009, 21(11): 38-40.
- [257] 么秋香, 杜美利, 王水利, 等. 高硫煤中硫的赋存形态及其可选性评价[J]. *煤炭转化*, 2013, 36(1): 24-27.
YAO Qiuxiang, DU Meili, WANG Shuili, et al. Modes of occurrence and washability evaluation of sulfur in high-sulfur coal[J]. *Coal Conversion*, 2013, 36(1): 24-27.
- [258] 杨承伟. 难选煤中矿物质洗选解离的地质地球化学控制研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2021.
YANG Chengwei. Geological and geochemical control of mineral matter in difficult separation coal during washing process[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2021.
- [259] 岳增川, 马力强, 李吉辉, 等. 中煤解离再选研究综述[J]. *矿山机械*, 2014, 42(7): 10-14.
YUE Zengchuan, MA Liqiang, LI Jihui, et al. Overview of study on dissociation and re-separation of middlings[J]. *Mining & Processing Equipment*, 2014, 42(7): 10-14.
- [260] 谢宏, 聂爱国. 贵州西部地区煤中砷的赋存状态及其洗选特性[J]. *煤炭学报*, 2010, 35(1): 117-121.
XIE Hong, NIE Aiguo. The modes of occurrence and washing floatation characteristic of arsenic in coal from western Guizhou[J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(1): 117-121.
- [261] 侯慧敏, 任德貽, 唐跃刚, 等. 乌达矿区煤中黄铁矿的赋存特点及其可选性评价[J]. *洁净煤技术*, 1997, 3(3): 12-15.
HOU Huimin, REN Deyi, TANG Yuegang, et al. The distribution characteristics and its washability evaluation of pyrite in coal in Wuda Coalfield[J]. *Clean Coal Technology*, 1997, 3(3): 12-15.
- [262] 张明旭, 范肖南, 陆向阳, 等. 皖南高硫煤硫的分布特性及可选

- 性的研究[J]. *煤炭科学技术*, 2000, 28(1): 37–40.
- ZHANG Mingxu, FAN Xiaonan, LU Xiangyang, et al. Distribution characteristics and selectivity of sulfur in high-sulfur coal from southern Anhui[J]. *Coal Science and Technology*, 2000, 28(1): 37–40.
- [263] 王瑛. 新汶矿煤中黄铁矿的粒度及嵌布特性[J]. *选煤技术*, 1996(3): 18–21.
- WANG Ying. Particle size and embedding characteristics of pyrite in Xinwen coal[J]. *Coal Preparation Technology*, 1996(3): 18–21.
- [264] 付晓恒, 李萍, 刘虎, 等. 煤的超细粉碎与超净煤的分选[J]. *煤炭学报*, 2005, 30(2): 219–223.
- FU Xiaoheng, LI Ping, LIU Hu, et al. Ultra-fine coal grinding and ultra-clean coal preparation[J]. *Journal of China Coal Society*, 2005, 30(2): 219–223.
- [265] 李安, 李萍, 陈松梅. 炼焦煤深度降灰脱硫的研究[J]. *煤炭学报*, 2007, 32(6): 639–642.
- LI An, LI Ping, CHEN Songmei. Study on the technology of decreasing ash and sulfur in coking coal concentrate by deep-cleaning[J]. *Journal of China Coal Society*, 2007, 32(6): 639–642.
- [266] 张磊, 刘文礼, 马克富, 等. 炼焦中煤再选技术试验研究[J]. *煤炭科学技术*, 2011, 39(3): 125–128.
- ZHANG Lei, LIU Wenli, MA Kefu, et al. Experiment study on reparation technology of coking middlings[J]. *Coal Science and Technology*, 2011, 39(3): 125–128.
- [267] 朱向楠, 何亚群, 谢卫宁, 等. 炼焦中煤矿物学特性及再选试验研究[J]. *煤炭科学技术*, 2013, 41(2): 125–128.
- ZHU Xiangnan, HE Yaqun, XIE Weining, et al. Study on mineralogy features of coking middlings and re-preparation[J]. *Coal Science and Technology*, 2013, 41(2): 125–128.
- [268] TANG Yuegang, YANG Chengwei, FINKELMAN R B, et al. Behavior of minerals and trace elements during cleaning of three coals with moderately high ash yields[J]. *Energy & Fuels*, 2020, 34(2): 2501–2515.
- [269] YANG Chengwei, TANG Yuegang, KANG Hao, et al. Occurrence of Minerals in Coal and Its Geological Controlling Factors-Significance in Evaluation of Coal Washability[J]. *ACS Omega*, 2021, 6(38): 24362–24376.
- [270] TANG Yuegang, WANG Xiaoshuai, SCHOBERT H H, et al. Cleaning potential of selected coals in Shanxi Province, China: Evaluation of geological factors affecting the cleaning potential[J]. *Energy & Fuels*, 2020, 34(2): 1396–1407.
- [271] WAGNER N J, MATJIE R H, SLAGHUIS J H, et al. Characterization of unburned carbon present in coarse gasification ash[J]. *Fuel*, 2008, 87(6): 683–691.
- [272] KRONBAUER M A, IZQUIERDO M, DAI Shifeng, et al. Geochemistry of ultra-fine and nano-compounds in coal gasification ashes: A synoptic view[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 456/457: 95–103.
- [273] BIELOWICZ B. Petrographic characteristics of lignite gasification chars[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2016, 168: 146–161.
- [274] BIELOWICZ B. Petrographic composition of coal from the Janina mine and char obtained as a result of gasification in the CFB gasifier[J]. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi-Mineral Resources Management*, 2019, 35(1): 99–116.
- [275] TANG Yuegang, GUO Xin, XIE Qiang, et al. Petrological characteristics and trace element partitioning of gasification residues from slagging entrained-flow gasifiers in Ningdong, China[J]. *Energy & Fuels*, 2018, 32(3): 3052–3067.
- [276] GUO Xin, TANG Yuegang, EBLE C F, et al. Study on petrographic characteristics of devolatilization char/coke related to coal rank and coal maceral[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2020, 227: 103504.
- [277] HOWER J C, RATHBONE R F, GRAHAM U M. Approaches to the petrographic characterization of fly ash[C]//International Coal Testing Conference. Lexington, KY (United States): 1995.
- [278] International Committee for Coal Petrology (ICCP). Classification of hydrogenation residues[S]. International Handbook Coal Petrography, 3rd suppl. to 2nd ed. Paris: Centre national de la recherche scientifique, 1993.
- [279] NG N. Optical microscopy of carbonaceous solid residues from coal hydrogenation: A classification[J]. *Journal of Microscopy*, 1983, 132(3): 289–296.
- [280] 唐跃刚. 云南省可保等地褐煤煤岩特征及其与液化的关系[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 1986.
- TANG Yuegang. Study on petrological characteristics and their relationships with liquefaction of brown coals from Kebao Mine etc. of Yunnan Province, China[D]. Beijing: China University of Mining and Technology-Beijing, 1986.
- [281] 夏筱红, 秦勇, 凌开成, 等. 煤中显微组分液化反应性研究进展[J]. *煤炭转化*, 2007, 30(1): 73–77.
- XIA Xiaohong, QIN Yong, LING Kaicheng, et al. Advances on study of liquefying activity from coal macerals[J]. *Coal Conversion*, 2007, 30(1): 73–77.
- [282] COIN C D A. Coke microtextural description: Comparison of nomenclature, classification and methods[J]. *Fuel*, 1987, 66(5): 702–705.
- [283] GUO Xin, TANG Yuegang, SCHOBERT H H, et al. Inspired by optical properties of char and coke: Study on differences between them from perspectives of organic elemental contents and carbon nanostructure[J]. *Energy & Fuels*, 2024, 38(5): 3713–3727.
- [284] HOWER J C, GROppo J G, GRAHAM U M, et al. Coal-derived unburned carbons in fly ash: A review[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2017, 179: 11–27.
- [285] LESTER E, ALVAREZ D, BORREGO A G, et al. The procedure used to develop a coal char classification: Commission III combustion working group of the international committee for coal and organic petrology[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2010, 81(4): 333–342.
- [286] SUAREZ-RUIZ I, VALENTIM B, BORREGO A G, et al. Development of a petrographic classification of fly-ash components from coal combustion and co-combustion. (An ICCP classification system, fly-ash working group-commission III.)[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2017, 183: 188–203.
- [287] 王晓帅, 唐跃刚, 桓斌斌, 等. 宁东气化厂煤气化过程中几种微量元素的富集特性[J]. *中国煤炭地质*, 2016, 28(4): 14–18.
- WANG Xiaoshuai, TANG Yuegang, HUAN Binbin, et al. Some

- trace elements enrichment features during coal gasification process in Ningdong coal gasification plant[J]. *Coal Geology of China*, 2016, 28(4): 14–18.
- [288] 党钾涛. 气流床煤粉气煤中微量元素的迁移与配分[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2017.
- DANG Jiatao. Migration and partition of trace elements in coal during gasification in entrained-flow gasifier[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2017.
- [289] 郭鑫. 煤热解气化产物的岩石学和地球化学特征研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2020.
- GUO Xin. Study on petrographic and geochemical characteristics of coal pyrolysis and gasification products[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2020.
- [290] 王亚丰. 煤气化产物的矿物学和环境地球化学研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2021.
- WANG Yafeng. Study on mineralogy and environmental geochemistry of coal gasification products[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2021.
- [291] GUO Xin, TANG Yuegang, WANG Yafeng, et al. Potential utilization of coal gasification residues from entrained-flow gasification plants based on rare earth geochemical characteristics[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 280: 124329.
- [292] GUO Xin, TANG Yuegang, WANG Yafeng, et al. Evaluation of carbon forms and elements composition in coal gasification solid residues and their potential utilization from a view of coal geology[J]. *Waste Management*, 2020, 114: 287–298.
- [293] MATJIE R H, LI Zhongsheng, WARD C R, et al. Chemical composition of glass and crystalline phases in coarse coal gasification ash[J]. *Fuel*, 2008, 87(6): 857–869.
- [294] MATJIE R H, FRENCH D, WARD C R, et al. Behaviour of coal mineral matter in sintering and slagging of ash during the gasification process[J]. *Fuel Processing Technology*, 2011, 92(8): 1426–1433.
- [295] HLATSHWAYO T B, MATJIE R H, LI Zhongsheng, et al. Mineralogical characterization of Sasol feed coals and corresponding gasification ash constituents[J]. *Energy & Fuels*, 2009, 23(6): 2867–2873.
- [296] 白进, 李文, LI Chunzhu, 等. 高温下煤中矿物质对气化反应的影响[J]. *燃料化学学报*, 2009, 37(2): 134–138.
- BAI Jin, LI Wen, LI Chunzhu, et al. Influences of mineral matter on high temperature gasification of coal char[J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2009, 37(2): 134–138.
- [297] 吴诗勇, 李莉, 顾菁, 等. 高碳转化率下热解神府煤焦-CO₂ 高温气化反应性[J]. *燃料化学学报*, 2006, 34(4): 399–403.
- WU Shiyong, LI Li, GU Jing, et al. Gasification reactivity of rapid and slow pyrolyzed Shenfu chars with CO₂ at high carbon conversions and elevated temperatures[J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2006, 34(4): 399–403.
- [298] GUPTA R P, WALL T F, BAXTER L. Impact of mineral impurities in solid fuel combustion[M]. New York: Springer US, 1999.
- [299] RAASK E. Mineral impurities in coal combustion, behavior, problems, and remedial measures[M]. Oxfordshire: Taylor & Francis, 1985.
- [300] NAMKUNG H, XU Lihua, KANG T J, et al. Prediction of coal fouling using an alternative index under the gasification condition[J]. *Applied Energy*, 2013, 102: 1246–1255.
- [301] XU Lihua, NAMKUNG H, KWON H B, et al. Determination of fouling characteristics of various coals under gasification condition[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2009, 15(1): 98–102.
- [302] SANDBERG J, FDHILA R B, DAHLQUIST E, et al. Dynamic simulation of fouling in a circulating fluidized biomass-fired boiler[J]. *Applied Energy*, 2011, 88(5): 1813–1824.
- [303] SHAO Yuanyuan, WANG Jinsheng, XU Chunbao, et al. An experimental and modeling study of ash deposition behaviour for co-firing peat with lignite[J]. *Applied Energy*, 2011, 88(8): 2635–2640.
- [304] BENSON S A, SONDRAL E A. Ash-related issues during combustion and gasification[M]//GUPTA R P, WALL T F, BAXTER L. Impact of mineral impurities in solid fuel combustion[M]. New York: Springer US, 2002.
- [305] CLARKE L B, SLOSS D L. Trace elements—emissions from coal combustion and gasification[J]. IEA Coal Research, 1992(4): 11.
- [306] GRIGORE M, SAKUROVS R, FRENCH D, et al. Mineral matter in coals and their reactions during coking[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2008, 76(4): 301–308.
- [307] KERKKONEN O. Influence of ash reactions on feed coke degradation in the blast furnace[J]. *Coke Making International*, 1997, 9: 34–41.
- [308] 侯康. 矿物质对高比例低阶煤配煤炼焦的影响研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
- HOU Kang. The effect of mineral matters on coal blending with high ratio low rank coals for coking[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.
- [309] REDLICH P J, HULSTON C K J, JACKSON W R, et al. Hydrogenation of sub-bituminous and bituminous coals pre-treated with water-soluble nickel-molybdenum or cobalt-molybdenum catalysts[J]. *Fuel*, 1999, 78(1): 83–88.
- [310] 杨筱玉. 煤中微量元素(汞, 砷, 氟和氯)在煤炭加工利用中运移规律的研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2001.
- YANG Huayu. Study of transformation behavior laws of trace elements (Hg, As, F, Cl) during coal processing[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2001.
- [311] BODMAN S D, MCWHINNIE W R, BEGON V, et al. Metal-ion pillared clays as hydrocracking catalysts (II): Effect of contact time on products from coal extracts and petroleum distillation residues[J]. *Fuel*, 2003, 82(18): 2309–2321.
- [312] 夏筱红. 煤中有害元素直接液化迁移行为及其环境效应[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2009.
- XIA Xiaohong. Migration and its environmental effect of deleterious elements in coal during direct liquefaction[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2009.
- [313] LI Wen, BAI Zongqing, BAI Jin, et al. Transformation and roles of inherent mineral matter in direct coal liquefaction: A mini-review[J]. *Fuel*, 2017, 197: 209–216.
- [314] LI Xiao, BAI Zongqing, LI Wen. Chemical transformation of sodium species during direct liquefaction of a sodium-rich Zhundong coal under different atmospheres and CO₂ gasification of

- the direct coal liquefaction residue[J]. *Fuel*, 2018, 213: 144–149.
- [315] LI Xiao, CAO Jingpei, MENG Xianliang, et al. Chemical transformation of inherent sodium and calcium species during direct liquefaction of two typical lignites rich in alkali and alkaline earth metals[J]. *Fuel*, 2017, 210: 227–235.
- [316] 葛世荣, 樊静丽, 刘淑琴, 等. 低碳化现代煤基能源技术体系及开发战略[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(1): 203–223.
- GE Shirong, FAN Jingli, LIU Shuqin, et al. Low carbon modern coal-based energy technology system and development strategy[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(1): 203–223.
- [317] 葛世荣, 刘淑琴, 樊静丽, 等. 低碳化现代煤基能源开发关键技术体系[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(7): 2949–2972.
- GE Shirong, LIU Shuqin, FAN Jingli, et al. Key technologies for low-carbon modern coal-based energy[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(7): 2949–2972.
- [318] 傅维镠. 煤燃烧理论及其宏观通用规律[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [319] 袁权. 化学进展丛书: 能源化学进展[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [320] LIU Yinghui, GUPTA R, SHARMA A, et al. Mineral matter–organic matter association characterization by QEMSCAN and applications in coal utilization[J]. *Fuel*, 2005, 84(10): 1259–1267.
- [321] 李文, 白进. 煤的灰化学[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [322] 冯新斌, 洪业汤. 煤中微量元素的环境地球化学[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 1997, 16(4): 235–238.
- FENG Xinbin, HONG Yetang. Environmental geochemistry of trace elements in coal[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 1997, 16(4): 235–238.
- [323] ZEVENHOVEN R, KILPINEN P. Control of pollutants in flue gases and fuel gases[R]. The Laboratory of Energy Engineering and Environmental Protection; Helsinki University of Technology, Espoo, Finland, 2004.
- [324] CLARKE L B, SLOSS L L. Trace elements–emissions from coal combustion and gasification[M]. London: IEA Coal Research, 1992.
- [325] ZENG Taofang, SAROFIM A F, SENIOR C L. Vaporization of arsenic, selenium and antimony during coal combustion[J]. *Combustion & Flame*, 2001, 126(3): 1714–1724.
- [326] CLARKE L B. The fate of trace elements during coal combustion and gasification: An overview[J]. *Fuel*, 1993, 72(6): 731–736.
- [327] HOWER J C, HENKE K R, DAI Shifeng, et al. Chapter 2–Generation and nature of coal fly ash and bottom ash[M]//Coal Combustion Products (CCP's). Woodhead Publishing, 2017.
- [328] 刘扬, 张成, 王澜, 等. 高碱煤中钠基化合物对灰熔融特性的影响[J]. *燃烧科学与技术*, 2017, 23(3): 268–273.
- LIU Yang, ZHANG Cheng, WANG Lan, et al. Influence of sodium-based compound on ash melting characteristics of high Alkali coal[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2017, 23(3): 268–273.
- [329] 刘欢欢, 杜梅芳, 王要克, 等. 碱金属对煤灰熔融特性的影响机理[J]. *材料科学与工程学报*, 2018, 36(6): 985–992.
- LIU Huanhuan, DU Meifang, WANG Yaoke, et al. Characteristics and mechanism on coal ash fusion[J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2018, 36(6): 985–992.
- [330] 张军, 李桂菊, 陈伟, 等. 煤炭资源清洁高效综合利用将形成新兴产业[J]. *中国科学院院刊*, 2013, 28(5): 625–627.
- ZHANG Jun, LI Guiju, CHEN Wei, et al. Clean and efficient comprehensive utilization of coal resources will form a new industry[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2013, 28(5): 625–627.
- [331] 彭建喜. 大同煤炭综合利用的途径及可持续发展对策[J]. *煤炭科技*, 2003(2): 15–17.
- PENG Jianxi. Approaches for comprehensive utilization of Datong coal and strategies for sustainable development[J]. *Coal Science & Technology Magazine*, 2003(2): 15–17.
- [332] 祝树菇. 对福建省煤炭资源综合利用的探讨[J]. *能源与环境*, 2012(5): 98–99.
- ZHU Shugu. Discussion on comprehensive utilization of coal resources in Fujian Province[J]. *Energy and Environment*, 2012(5): 98–99.
- [333] 张宗飞. 试论低阶煤的综合利用途径及其技术经济分析[J]. *化肥设计*, 2014, 52(1): 1–5.
- ZHANG Zongfei. Try to discuss comprehensively utilizing path of low valence coal and its technical/economic analysis[J]. *Chemical Fertilizer Design*, 2014, 52(1): 1–5.
- [334] 胡振琪, 多玲花, 王晓彤. 采煤沉陷地夹层式充填复垦原理与方法[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(1): 198–206.
- HU Zhenqi, DUO Linghua, WANG Xiaotong. Principle and method of reclaiming subsidence land with inter-layers of filling materials[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(1): 198–206.
- [335] 毕银丽. 丛枝菌根真菌在煤矿区沉陷地生态修复应用研究进展[J]. *菌物学报*, 2017, 36(7): 800–806.
- BI Yinli. Research advance of application of arbuscular mycorrhizal fungi to ecological remediation in subsided land of coal mining areas[J]. *Mycosystema*, 2017, 36(7): 800–806.
- [336] 王滋贯, 赵丹, 王瑞雪. 我国矿区棕地综合治理及再利用[J]. *煤田地质与勘探*, 2017, 45(5): 127–134.
- WANG Ziguan, ZHAO Dan, WANG Ruixue. Sustainable management and reuse of brownfield in China's mining areas[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2017, 45(5): 127–134.
- [337] 杨艳平, 罗福周, 王博俊. 基于朴门设计的煤矿废弃地生态修复规划研究[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(6): 1080–1091.
- YANG Yanping, LUO Fuzhou, WANG Bojun. Research on ecological restoration planning of coal mine wasteland based on permaculture design[J]. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(6): 1080–1091.
- [338] 谭杰. 煤炭矿区生态修复发展现状与问题探讨[J]. *能源环境保护*, 2018, 32(5): 45–47.
- TAN Jie. Discussion on current situations and problems of ecological remediation in coal mining area[J]. *Energy Environmental Protection*, 2018, 32(5): 45–47.
- [339] 陈永春. 淮南大通煤矿资源枯竭矿区生态修复技术研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2018.
- CHEN Yongchun. Study on the ecological restoration technologies of Datong resource exhausted mining area from Huainan Coalfield[D]. Hefei: Anhui University, 2018.

- [340] 胡振琪, 魏忠义, 秦萍. 矿山复垦土壤重构的概念与方法[J]. *土壤*, 2005, 37(1): 8–12.
HU Zhenqi, WEI Zhongyi, QIN Ping. Concept of and methods for soil reconstruction in mined land reclamation[J]. *Soils*, 2005, 37(1): 8–12.
- [341] 胡振琪, 龙精华, 王新静. 论煤矿区生态环境的自修复、自然修复和人工修复[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(8): 1751–1757.
HU Zhenqi, LONG Jinghua, WANG Xinjing. Self-healing, natural restoration and artificial restoration of ecological environment for coal mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(8): 1751–1757.
- [342] 胡振琪. 我国土地复垦与生态修复 30 年: 回顾、反思与展望[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(1): 25–35.
HU Zhenqi. The 30 years' land reclamation and ecological restoration in China: Review, rethinking and prospect[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(1): 25–35.
- [343] 胡振琪. 矿山复垦土壤重构的理论与方法[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(7): 2499–2515.
HU Zhenqi. Theory and method of soil reconstruction of reclaimed mined land[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(7): 2499–2515.
- [344] 彭苏萍, 毕银丽. 黄河流域煤矿区生态环境修复关键技术与战略思考[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(4): 1211–1221.
PENG Suping, BI Yinli. Strategic consideration and core technology about environmental ecological restoration in coal mine areas in the Yellow River Basin of China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(4): 1211–1221.
- [345] 李振, 雪佳, 朱张磊, 等. 煤矸石综合利用研究进展[J]. *矿产保护与利用*, 2021, 41(6): 165–178.
LI Zhen, XUE Jia, ZHU Zhanglei, et al. Research progress on comprehensive utilization of coal gangue[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2021, 41(6): 165–178.
- [346] 徐培杰, 朱毅菲, 曹永丹, 等. 煤矸石资源高值化利用研究进展[J]. *环境工程学报*, 2023, 17(10): 3137–3147.
XU Peijie, ZHU Yifei, CAO Yongdan, et al. Research progress of high-value utilization of coal gangue resources[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2023, 17(10): 3137–3147.
- [347] 范晓平, 刘京, 康哲, 等. 煤矸石综合利用与矿山生态修复的战略思考[J]. *环境卫生工程*, 2023, 31(1): 8–15.
FAN Xiaoping, LIU Jing, KANG Zhe, et al. Strategic thinking of comprehensive utilization of coal gangue and ecological restoration of mines[J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2023, 31(1): 8–15.
- [348] 胡振琪, 赵艳玲, 毛缙. 煤矸石规模化生态利用原理与关键技术[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(2): 978–987.
HU Zhenqi, ZHAO Yanling, MAO Zhen. Principles and key technologies for the large-scale ecological utilization of coal gangue[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(2): 978–987.
- [349] 邵靖邦. 国外煤灰利用现状及发展趋势[J]. *中国煤炭*, 1996(8): 62–68.
SHAO Jingbang. Current status and development trends of coal ash utilization abroad[J]. *China Coal*, 1996(8): 62–68.
- [350] 时文中, 朱国才. 氯化铵氯化-二酰异羟肟酸萃取法从粉煤灰中提取锆的研究[J]. *河南大学学报(自然科学版)*, 2007, 37(2): 147–151.
SHI Wenzhong, ZHU Guocai. Study on extracting germanium from coal ash by chlorination with ammonium chloride and extraction with dihydroxamic acid as extractant[J]. *Journal of Henan University (Natural Science)*, 2007, 37(2): 147–151.
- [351] 艾馨. 电感耦合等离子体原子发射光谱法测定煤灰中主要成分及煤灰成分的应用[J]. *科技展望*, 2017, 27(21): 200.
AI Xin. Application of inductively coupled plasma atomic emission spectrometry in determining the main components of coal ash[J]. *Technology Outlook*, 2017, 27(21): 200.
- [352] 袁国泰, 黄凯芬. 试论煤系共伴生矿产资源的分类及其它[J]. *中国煤炭地质*, 1998, 10(1): 21–23.
YUAN Guotai, HUANG Kaifen. On the classification and others of co-associated mineral resources in coal[J]. *Coal Geology of China*, 1998, 10(1): 21–23.
- [353] 刘建强, 迟乃杰, 从培章, 等. 煤系共伴生矿产定义内涵及分类[J]. *山东国土资源*, 2015, 31(9): 30–34.
LIU Jianqiang, CHI Naijie, CONG Peizhang, et al. Definition connotation and classification of coal associated minerals[J]. *Shandong Land and Resources*, 2015, 31(9): 30–34.
- [354] 张利珍, 吕子虎, 谭秀民, 等. 我国煤系共伴生矿物资源及开发利用现状[J]. *中国矿业*, 2012, 21(11): 59–61.
ZHANG Lizhen, LYU Zihu, TAN Xiumin, et al. Resources survey and exploitation situation of coal-derived minerals in China[J]. *China Mining Magazine*, 2012, 21(11): 59–61.
- [355] 张新民. 中国煤层气地质与资源评价[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [356] 宋岩, 张新民, 柳少波, 等. 中国煤层气地质与开发基础理论[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [357] 秦勇, 傅雪海, 韦重韬, 等. 煤层气成藏动力条件及其控藏效应[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [358] 秦勇, 汤达祯, 刘大锰, 等. 煤储层开发动态地质评价理论与技术进展[J]. *煤炭科学技术*, 2014, 42(1): 80–88.
QIN Yong, TANG Dazhen, LIU Dameng, et al. Geological evaluation theory and technology progress of coal reservoir dynamics during coalbed methane drainage[J]. *Coal Science and Technology*, 2014, 42(1): 80–88.
- [359] 袁亮. 低透气性煤层群无煤柱煤气共采理论与实践[J]. *中国工程科学*, 2009, 11(5): 72–80.
YUAN Liang. Theory and practice of integrated pillarless coal production and methane extraction in multiseams of low permeability[J]. *Strategic Study of CAE*, 2009, 11(5): 72–80.
- [360] 陆小泉. 我国煤炭清洁开发利用现状及发展建议[J]. *煤炭工程*, 2016, 48(3): 8–10.
LU Xiaoquan. Present situation and suggestion for clean coal development and utilization in China[J]. *Coal Engineering*, 2016, 48(3): 8–10.
- [361] 程宏飞, 刘钦甫, 王陆军, 等. 我国高岭土的研究进展[J]. *化工矿产地质*, 2008, 30(2): 125–128.
CHENG Hongfei, LIU Qinfu, WANG Lujun, et al. The research progress of Kaolin in China[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 2008, 30(2): 125–128.
- [362] 朱华雄, 陈寒勇, 章伟, 等. 华北煤中金属矿产的种类和分布特征[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(2): 303–309.

- ZHU Huaxiong, CHEN Hanyong, ZHANG Wei, et al. Metal mineral types and distribution characteristics in coal in northern China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(2): 303–309.
- [363] 唐跃刚, 郑宝山. 医学地质学及其发展前景[J]. *中国科学基金*, 2003, 17(5): 270–272.
- TANG Yuegang, ZHENG Baoshen. Medical geology and its development prospects[J]. *Science Foundation in China*, 2003, 17(5): 270–272.
- [364] DAI Shifeng, LI Weiwei, TANG Yuegang, et al. The sources, pathway, and preventive measures for fluorosis in Zhijin County, Guizhou, China[J]. *Applied Geochemistry*, 2007, 22(5): 1017–1024.
- [365] TIAN Linwei, DAI Shifeng, WANG Jianfang, et al. Nanoquartz in Late Permian C₁ coal and the high incidence of female lung cancer in the Pearl River Origin Area: A retrospective cohort study[J]. *BMC Public Health*, 2008, 8: 398.
- [366] 刘桂建, 郑刘根, 高连芬. 煤中某些有害微量元素与人体健康[J]. *中国非金属矿工业导刊*, 2004(5): 78–80.
- LIU Guijian, ZHENG Liugen, GAO Lianfen. Certain harmful trace elements in coal and human health[J]. *China Non-metallic Minerals Industry*, 2004(5): 78–80.
- [367] 韩志婷, 冯朝朝, 葛万亮, 等. 中国煤炭污染与治理方法[J]. *煤炭技术*, 2010, 29(8): 1–2.
- HAN Zhiting, FENG Chaochao, GE Wanliang, et al. Coal pollution and governance approaches of China[J]. *Coal Technology*, 2010, 29(8): 1–2.
- [368] 尹洪清, 王振华, 路文学. 超洁净煤应用技术研究进展[J]. *煤炭技术*, 2019, 38(6): 182–184.
- YIN Hongqing, WANG Zhenhua, LU Wenxue. Advances in application of ultra-clean coal[J]. *Coal Technology*, 2019, 38(6): 182–184.
- [369] 祝宁. 洁净煤技术发展现状及发展意义[J]. *山西化工*, 2017, 37(3): 61–62.
- ZHU Ning. Development status and development significance of clean coal technology[J]. *Shanxi Chemical Industry*, 2017, 37(3): 61–62.
- [370] 苏现波. 四川中梁山南桐矿区晚二叠世龙潭组煤中的硫[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 1988.
- SU Xianbo. Sulfur in Late Permian Longtan Formation coal from Nantong district area, Zhongliangshan, Sichuan, China[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 1988.
- [371] 陈家良. 四川松藻矿区打通一井田龙潭组煤中的硫[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 1989.
- CHEN Jialiang. Research on sulfur in coals of Longtan Formation from Datong No.1 well field of Songzao mine district of Sichuan, China[D]. Beijing: China University of Mining and Technology-Beijing, 1989.
- [372] 雷加锦. 贵州晚二叠世煤中硫的赋存规律: 兼论高有机硫煤的结构、组成及成因[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 1993.
- LEI Jiajin. Sulfur occurring regular pattern in Late Permian coals in Guizhou: With a discussion on the structure, composition and genesis of high organic sulfur coals[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 1993.
- [373] 代世峰. 乌达矿区煤中硫的赋存规律及其可选性研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 1997.
- DAI Shifeng. Study on the sulfur accumulation law in coal and its selectivity in Uda mining area[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 1997.
- [374] 赵峰华. 煤中有害微量元素分布赋存机制及燃煤产物淋滤实验研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 1997.
- ZHAO Fenghua. Study on the mechanism of distributions and occurrences of hazardous minor and trace elements in coal and leaching experiments of coal combustion residues[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 1997.
- [375] 代世峰. 煤中伴生元素的地质地球化学习性与富集模式[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2002.
- DAI Shifeng. Geogeochemical habits and enrichment patterns of associated elements in coal[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2002.

(责任编辑 范章群)