

煤炭清洁利用技术及环境影响评估综述

梁佳怡

中煤科工集团北京华宇工程有限公司, 北京

收稿日期: 2025年4月14日; 录用日期: 2025年5月18日; 发布日期: 2025年7月7日

摘要

煤炭作为我国主要能源之一, 其传统利用方式带来了显著的环境污染与碳排放问题。为实现“双碳”目标, 煤炭清洁利用技术受到广泛关注。本研究系统综述了超低排放燃煤发电、煤炭气化与液化、洗选提质、碳捕集与封存(CCUS)等核心技术, 利用环境影响评估(EIA)方法, 考虑了大气污染、水资源消耗、固废处理及碳排放等影响因素, 分析了环境效益。研究表明, 煤炭清洁技术在提升能效、降低污染方面成效显著, 若加强与可再生能源的融合, 将推动绿色转型与政策协同发展。

关键词

煤炭清洁利用, 超低排放, 污染控制, 碳减排, 环境影响评估(EIA), 低碳发展, 可再生能源协同

Overview of Coal Clean Utilization Technologies and Environmental Impact Assessment

Jiayi Liang

Beijing Huayu Engineering Co., Ltd. of China Coal Science and Engineering Group, Beijing

Received: Apr. 14th, 2025; accepted: May 18th, 2025; published: Jul. 7th, 2025

Abstract

As one of the major energy sources in China, the traditional use of coal has brought about significant environmental pollution and carbon emission problems. In order to achieve the goal of “double carbon”, coal clean utilization technologies have received wide attention. This paper systematically reviews the core technologies of ultra-low emission coal-fired power generation, coal gasification and liquefaction, washing and quality improvement, and carbon capture and storage (CCUS), and analyzes their environmental benefits in terms of air pollution, water resource consumption, solid waste

treatment, and carbon emissions in conjunction with the environmental impact assessment (EIA) methodology. The study shows that coal clean technology is effective in improving energy efficiency and reducing pollution. In the future, the integration with renewable energy should be strengthened to promote green transformation and policy synergy.

Keywords

Coal Clean Utilization, Ultra-Low Emissions, Pollution Control, Carbon Emission Reduction, Environmental Impact Assessment (EIA), Low Carbon Development, Renewable Energy Synergy

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

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

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



Open Access

1. 引言

煤炭是我国的主体能源，起着压舱石的作用，煤炭资源关系着我国能源安全[1]。然而，煤炭资源开发利用过程中造成了严重的环境问题，包括大气污染、水污染、碳排放等。随着“双碳”目标的提出和环保政策趋严，煤炭清洁高效利用成为能源领域的重要发展方向[2]。我国在超低排放燃煤发电、煤炭气化与液化等技术方面取得了积极进展，与此同时，稳步推进碳捕集、利用与封存(CCUS)等示范工程。煤炭清洁利用技术不仅能有效控制污染物排放、提升能源利用效率，还可通过环境影响评估(EIA)量化其环境效益，为政策制定与技术优化提供依据。此外，与风电、光伏等可再生能源的协同发展，有助于构建绿色、高效、低碳的能源系统。因此，研究并推广先进的煤炭清洁利用技术，对于实现我国能源安全、绿色转型和可持续发展具有重要意义[2]。

煤炭清洁利用技术在全球范围内持续推进，美国、德国、日本等国家在高效燃煤发电、煤气化与液化、碳捕集与封存(CCUS)等领域取得了显著成果。主要体现在以下方面：美国利用超临界燃煤发电技术，提升了能源效率并减少了污染物排放；德国依托煤气化技术促进了煤化工清洁发展；日本则通过 CCS 示范项目积极探索煤炭低碳利用路径[3]。而且，我国作为世界最大煤炭消费国，在超低排放技术、煤制油和煤制天然气等方面已达到国际先进水平，CCUS 也已进入示范阶段[4]。然而，从全球范围来看，煤炭清洁利用仍面临技术成本高、规模化推广难、环境评估体系不完善等问题，尤其是 CCUS 等关键技术在经济性与可持续性仍有待提升。当前，煤炭清洁利用正加速向高效、低碳、智能化方向发展，未来亟需突破技术瓶颈、推动系统集成与数字化应用，以实现“双碳”目标下能源安全与环境保护的协同[3] [5]。

因此，论文采用文献综述、生命周期分析(LCA)、环境影响评估(EIA)、案例分析与比较分析等方法[6]，理清国内外煤炭清洁利用技术的发展现状，聚焦超低排放燃煤发电、煤炭气化与液化、煤炭深加工及碳捕集与封存(CCUS)等关键技术，构建系统评估方法，评估这些技术在污染物控制、碳减排及资源利用等方面的环境效益；研究成果能为煤炭绿色低碳转型发展提供理论支持与实践依据。

2. 不同煤炭清洁利用技术分析

2.1. 超低排放燃煤发电技术

超低排放燃煤发电技术是当前煤炭清洁利用的重要方向，旨在大幅降低二氧化硫(SO₂)、氮氧化物(NO_x)和颗粒物(PM)等大气污染物的排放，使其达到或优于天然气发电的排放水平[2]，具体指标及要求见表 1 [3]。该技术主要依赖于高效脱硫脱硝除尘系统，如湿法烟气脱硫(WFGD)、选择性催化还原(SCR)脱

硝及高效静电除尘或袋式除尘等。

近年来,我国大规模推进超低排放改造,燃煤电厂排放的污染物已接近清洁能源标准,大幅减少了燃煤发电的环境影响。同时,燃煤电厂采用超临界机组、循环流化床锅炉等高效燃烧技术[6],提高发电效率并降低单位煤耗,从而减少二氧化碳(CO₂)排放。未来,超低排放技术将进一步优化,提高污染物控制效果,并与碳捕集、利用与封存(CCUS)技术结合,实现更深度的碳减排目标。

Table 1. Comparison of emission limits for different types of power plants (unit: mg/m³) [3]

表 1. 不同类型电厂排放限值对比(单位: mg/m³) [3]

项目	天然气电厂	普通燃煤电厂	超低排放燃煤电厂
SO ₂	≤35	200~500	≤35
NO _x	≤50	100~300	≤50
PM	≤10	50~100	≤10

2.2. 煤炭气化与液化技术

煤炭气化与液化技术是煤炭深加工的重要方式,可将煤炭转化为清洁燃料或化工产品,提高煤炭资源的附加值,并减少污染物排放。煤炭气化主要是通过高温高压反应,将煤转化为合成气(H₂和CO),可用于制氢、合成天然气、甲醇等。常见的煤气化技术包括固定床、流化床和熔融床气化,其中,煤气化联合循环发电(IGCC)因能效高、污染物排放低,被认为是未来燃煤发电的重要发展方向。

煤炭液化则分为直接液化(DCL)和间接液化(ICL)。直接液化通过催化加氢将煤转化为液态燃料,间接液化则先将煤气化,再经费托合成(FTS)生成液态烃类。液化煤可替代石油用于交通燃料,并降低对原油进口的依赖[7],典型的典型煤气化/液化技术参数对比参见表 2 [8]。目前,煤制油、煤制天然气技术已在中国实现商业化,但仍面临高能耗和高成本挑战,未来发展重点在于提高转化效率、降低碳足迹,并与可再生能源制氢结合,以减少碳排放。

Table 2. Comparison of typical coal gasification/liquefaction technical parameters [8]

表 2. 典型煤气化/液化技术参数对比[8]

技术类型	热效率(%)	CO ₂ 排放强度(kg/GJ)	主要产品
固定床气化	35~40	90~110	合成气、甲醇
IGCC 联合循环	45~50	60~80	电力
直接液化(DCL)	45~55	100~120	煤制油
间接液化(ICL)	40~50	85~100	F-T 液体燃料

2.3. 煤炭洗选与提质技术

煤炭洗选与提质技术旨在提高煤炭质量,减少燃烧过程中的污染物排放,提高煤炭的清洁利用水平。煤炭洗选主要通过重介质选煤、浮选、跳汰等方法去除煤中的硫、灰分和杂质,降低燃烧产生的二氧化硫(SO₂)及颗粒物(PM)排放。高效洗选可提高煤炭的热值,使燃煤更清洁高效,煤炭洗选前后的主要成分含量及热值变化见表 3 [9]。

此外,煤炭提质技术包括煤泥深度脱水、低阶煤干燥升级及型煤加工等。低阶煤因含水量高、易自燃,提质处理后可提高其燃烧效率,降低运输和储存损耗[9]。近年来,煤炭清洁化处理与智能分选技术的发展,使煤炭洗选更加精准高效,提高了资源利用率,并减少了煤炭使用对环境的影响。未来,煤炭

洗选与提质技术将进一步与智能制造、节能环保技术结合，提高选煤效率，并减少洗选过程中的能源消耗和废水排放。

Table 3. Comparison table of changes in coal quality before and after washing [9]

表 3. 洗选前后煤质变化对比表[9]

项目	原煤	洗选后煤	改变幅度
灰分(%)	25	10	↓60%
含硫量(%)	2.5	1.0	↓60%
热值(kcal/kg)	4200	5800	↑38%

2.4. 碳捕集、利用与封存(CCUS)技术

CCUS 技术是控制煤炭利用过程中二氧化碳(CO₂)排放的重要手段，包括碳捕集(CO₂ 分离提纯)、碳利用(CO₂ 转化为化学品、燃料或工业原料)和碳封存(CO₂ 地下封存)。目前，燃烧后捕集(Post-Combustion Capture)、燃烧前捕集(Pre-Combustion Capture)和富氧燃烧捕集(Oxy-Fuel Combustion)是主要的 CO₂ 捕集方式[5]，其中，化学吸收法(MEA 溶剂)是商业应用最广泛的捕集技术。

在当前“双碳”战略背景下，碳捕集、利用与封存(CCUS)技术正逐步迈向工程化与产业化阶段。表 4 展示了中、美、加三国主流 CCUS 项目的技术参数对比，包括绿润项目(中国)、Petra Nova 项目(美国)与 SaskPower 项目(加拿大)。这些项目捕集量在 100~140 万吨/年不等，主要采用燃烧后捕集(如 MEA 吸收)或富氧燃烧技术，捕集后的 CO₂ 分别用于地质封存或提高采油率(EOR)，其中美国与加拿大项目已实现商业运营，中国项目则处于示范阶段[10]，见表 4。通过对比可以看出，先进国家在 CCUS 商业化路径和技术成熟度方面积累了较多经验。

CO₂ 利用可用于提高油气采收率(EOR/EGR)、制备合成燃料、矿化固碳等。封存方面，CO₂ 可通过地质封存技术储存于枯竭油气田、深层盐水层或煤层，提高资源开采效率的同时，减少碳排放[5] [10]。目前，CCUS 仍面临经济成本高、能耗较大等问题，未来需通过技术创新降低捕集成本，提高 CO₂ 资源化利用效率，并与可再生能源、电解水制氢结合，推动 CCUS 技术的规模化应用。

Table 4. Comparison of mainstream CCUS projects and technical parameters [10]

表 4. 主流 CCUS 项目与技术参数对比[10]

项目/国家	捕集量(万吨/年)	捕集方式	主要用途	商业化状态
绿润项目(中国)	100	燃烧后捕集(MEA)	地质封存	示范阶段
Petra Nova (美国)	140	燃烧后捕集	EOR	商业运营
SaskPower (加拿大)	110	富氧燃烧捕集	地质封存	商业运营

3. 煤炭清洁利用典型案例分析与环境影响评估

随着煤炭清洁利用技术的不断发展与应用，其在实际项目中的落地效果逐渐显现。为了全面理解各类技术在不同环境与工况下的表现及其环境影响，需结合具体案例开展深入分析。环境影响评估(EIA)作为一项系统化方法，能够全面预测煤炭清洁利用全过程对环境的影响，涵盖大气污染、水资源消耗、固体废弃物处理及碳排放等关键领域。常用的评估手段包括生命周期分析(LCA)、环境经济核算(EEA)以及计算机模拟等[11]，评估指标则涉及污染物排放浓度、能效水平、水耗强度等。通过环境影响评估分析法对典型案例进行剖析，探讨相关技术在实际应用中的效果、面临的挑战以及对环境的综合影响，以进一

步验证前述技术路径的可行性与环境效益，为煤炭清洁利用的绿色转型提供有力支撑。

3.1. 超低排放燃煤发电：浙江华能玉环电厂

浙江华能玉环电厂是国内最早采用超超临界燃煤发电技术并实现超低排放的典型范例。该电厂采用烟气脱硫(FGD)、脱硝(SCR)和电除尘(ESP)等先进技术，将 SO_2 、 NO_x 和颗粒物的排放浓度分别控制在 35、50 和 5 毫克/立方米以下，优于天然气发电标准。环境影响评估数据显示，该厂在大气污染物减排方面效果显著，较传统燃煤电厂减少 SO_2 排放 92%、 NO_x 减少 85%、颗粒物减少 96% [12]。在水资源方面，电厂采用空冷冷却系统，将单位电量水耗降至 1.7 升/千瓦时，较传统系统节水约 32%。同时，粉煤灰综合利用率达 75% 以上，用于水泥掺合料和建筑材料生产，显著减少了固废堆存量，提升了资源利用效率。

3.2. 煤炭气化与液化：神华宁煤煤制油项目

神华宁煤集团的煤制油项目为全球最大规模的煤炭液化示范工程，采用直接与间接液化相结合技术，每年可生产 400 万吨油品。通过全过程污染控制系统，实现 SO_2 和 NO_x 排放浓度分别控制在 30 与 45 毫克/立方米以下，颗粒物排放低于 5 毫克/立方米[13]，全面达成超低排放标准。在水资源方面，项目引入循环水利用系统，回用率达 85%，每年节约水资源约 1800 万吨。固废处理方面，煤渣和粉煤灰资源化利用率超过 70%，广泛应用于道路材料和建材行业。碳排放方面，项目配套 CCUS 装置，年捕集 CO_2 约 80 万吨，用于邻近油田驱油，显著提升了碳减排水平并实现了资源协同利用。

3.3. 碳捕集与封存(CCUS)：鄂尔多斯 CCUS 示范项目

中国石化鄂尔多斯 CCUS 示范项目采用烟气预处理、压缩与注入一体化技术，每年可捕集并封存 40 万吨 CO_2 [14]。该项目的大气影响评估表明，项目对周边空气质量无明显不良影响，且大幅减少 CO_2 排放强度。项目还充分利用采空区进行封存，有效避免地表水与地下水污染风险。此外，捕集的 CO_2 被用于提高石油采收率(EOR)，实现经济效益与减排效益双赢。根据环境经济核算，该项目碳减排成本低于 300 元/吨 CO_2 ，为 CCUS 商业化推广提供了数据支撑[15]。

3.4. 煤炭清洁利用与可再生能源协同发展：大同“零碳”智慧能源示范园区

大同“零碳”智慧能源示范园区作为煤炭清洁利用与可再生能源协同发展的成功典范，展现了通过多能互补、优化能源结构的先进理念和技术。园区将燃煤电厂、光伏发电、风力发电、储能系统及智能调度系统等多种能源形式有机结合，通过系统协同运行，降低了碳排放，提升了能源利用效率，同时减轻了环境压力[16]。园区的建设不仅提升了煤炭清洁利用的整体水平，也为未来能源转型提供了实践指导。

1) 环境效益分析：降低污染、优化资源利用

园区的环境影响评估结果显示，煤炭与可再生能源的协同运行显著减少了二氧化碳及大气污染物的排放。具体来看，园区年发电总量中清洁能源占比超过 60%，这一比例的提高有力地推动了煤炭清洁利用技术的普及，并促进了低碳能源结构的构建。通过与超超临界清洁煤电的协同作用，园区每年减少二氧化碳排放量超过 50 万吨，相较传统燃煤电厂系统， SO_2 、 NO_x 和 PM 的排放减少了约 85% [17]。这不仅有效减少了温室气体排放，还大幅减轻了对空气质量的负面影响。

此外，园区在水资源管理上也取得了显著成效。采用模块化循环水系统后，单位发电水耗降低至 1.6 升/千瓦时，比传统发电系统节水约 36%。年节水量超过 500 万吨，为水资源短缺地区提供了宝贵的参考[18]。通过先进的水资源管理技术，园区减少了水体污染的风险，也降低了水资源的消耗，符合“绿色、低碳、可持续”发展理念。

2) 资源化利用与经济效益：固废资源化与能源协同发展

园区在固废处理方面采用了资源化利用模式。煤灰、煤渣及脱硫石膏的综合利用率达到 95%。这些废弃物被转化为新型建材和工业副产品，减少了固废的堆存问题，同时提升了资源的循环利用，避免了大量废弃物进入填埋场或污染环境。通过这一资源化利用过程，园区不仅降低了废弃物对环境的负担，也为其他地区提供了可借鉴的固废处理模式，推动了煤炭清洁利用的绿色经济发展。

从经济角度来看，煤炭清洁利用与可再生能源的协同作用不仅提高了能源的生产效率，还降低了运行成本。园区通过风电、光伏等可再生能源的辅助，减少了对煤炭资源的依赖，提高了能源供应的稳定性和可靠性。此外，智能调度系统的应用使得园区能够根据能源需求、天气变化及市场条件灵活调配各类能源的生产和供应，从而降低了能源系统的运行风险和成本。能源优化和技术集成的结合不仅为园区带来了经济效益，还为煤炭行业的绿色转型探索了可行路径。

3) 技术路径与创新模式：多能互补与智能调度的深度融合

大同园区的成功不仅仅体现在其清洁煤技术的应用上，更在于其将多种能源形式进行了深度融合，形成了一个高度灵活、高效的能源供应体系。在这一体系中，风电和光伏的波动性被储能系统有效缓解，而清洁煤的稳定输出则确保了能源的基本供应，确保了电力系统的稳定性与经济性。智能调度系统作为园区核心技术之一，通过实时数据采集和分析，调控能源的发电、储存和消耗，优化了各类能源之间的协调工作，提升了整体能源效率[19]。

这一技术路径展现了煤炭与可再生能源的协同潜力，也为未来其他地区、其他国家的能源系统优化提供了重要的参考。技术的融合不仅在能源生产方面取得了显著成果，更为提高能源系统的柔性、提高能源供应的可持续性作出了贡献。这种协同效应表明，在确保能源稳定供应的同时，通过技术创新和系统优化，可以在低碳、高效的方向上实现突破。

4) 政策与市场机制：推动清洁煤与可再生能源融合

要实现煤炭清洁利用与可再生能源的深度融合，必须依靠完善的政策支持与市场机制。在大同园区的案例中，政策的支持为清洁煤与可再生能源的协同运行提供了保障。政府可以通过一系列政策措施，包括税收优惠、补贴、技术研发资金等[20]，鼓励企业加大清洁能源技术的投资。同时，建议加速碳交易市场的建设，推动绿色金融的发展，通过市场化手段引导资本流向低碳、可持续的能源技术，为企业提供更多的创新空间和资金支持。

此外，国际合作和技术标准的对接也至关重要。通过加强与其他国家的合作，分享技术、资金与经验，可以加速清洁煤与可再生能源技术的全球推广。国际合作不仅能够帮助提升我国在全球能源技术中的竞争力，也能推动全球能源结构的绿色转型，推动气候变化应对措施落实。

为了系统评价煤炭清洁利用技术在不同示范项目中的环境绩效，本文梳理了典型案例的关键环境影响因子及变化趋势(见表 5)，并通过污染物排放变化(见表 6)、生命周期碳减排(见表 7)、水耗与固废资源化指标(见表 8)，综合进行了对比分析。结果显示，各案例均在大气污染物减排、水资源利用效率提升、固体废弃物资源化率增加及碳排放强度降低等方面取得了显著成效，验证了煤炭清洁利用技术路径的环境效益与可行性。

Table 5. Identification table of case environmental impact factors

表 5. 案例环境影响因子识别表

案例	主要影响因子	影响类别	变化趋势	备注
浙江玉环电厂	SO ₂ 、NO _x 、PM、水耗、固废堆存	大气、水体、土地	显著改善	超低排放 + 空冷系统
神华宁煤项目	SO ₂ 、NO _x 、PM、CO ₂ 、水耗、固废	大气、水体、气候变化	明显改善	超低排放 + 水循环 + CCUS

续表

鄂尔多斯 CCUS	CO ₂ 、地下水影响	气候变化、水体	CO ₂ 减少， 水体无明显影响	地质封存安全性高
大同零碳园区	SO ₂ 、NO _x 、PM、CO ₂ 、 水耗、固废	大气、水体、气候变化	全面改善	多能互补、循环水、资源化

Table 6. Comparison table of changes in case pollutant emissions**表 6.** 案例污染物排放变化对比表

案例	SO ₂ 减排率	NO _x 减排率	PM 减排率	CO ₂ 减排量(万吨/年)
玉环电厂	92%	85%	96%	-
宁煤项目	88%	82%	95%	80
鄂尔多斯 CCUS	-	-	-	40
大同零碳园区	85%	85%	85%	52

注：数据来源于实际案例运行数据，部分 CO₂ 减排量由项目环评资料提取。

Table 7. Comparison table of life cycle carbon emission reduction of cases**表 7.** 案例生命周期碳减排对比表

案例	改造前碳排放强度(kg CO ₂ /kWh)	改造后碳排放强度(kg CO ₂ /kWh)	减排幅度
玉环电厂	0.89	0.75	-15%
宁煤项目	1.05	0.88	-16%
鄂尔多斯 CCUS	/	捕集 40 万吨	-
大同零碳园区	0.92	0.55	-40%

注：碳排放强度参考《中国电力发展年度报告 2023》《IPCC 第六次评估报告(AR6)》标准参数，结合项目改造情况推算得出。

Table 8. Indicator table of water consumption and solid waste utilization in the cases**表 8.** 案例水耗与固废利用率指标表

案例	单位水耗(L/kWh)	改善幅度	固废综合利用率(%)	提升幅度
玉环电厂	1.7	↓32%	75%	↑25%
宁煤项目	1.8(回用率 85%)	↓35%	70%	↑20%
鄂尔多斯 CCUS	-	-	-	-
大同零碳园区	1.6	↓36%	95%	↑30%

注：水耗与固废数据基于项目运行实际数据及回用率统计，遵循环境影响评价(EIA)规范处理。

4. 结论与建议

1) 煤炭清洁利用技术日趋成熟，环境效益显著

随着煤炭清洁利用技术的持续发展，超低排放、煤气化与液化、洗选提质、碳捕集与封存(CCUS)等关键技术在降低 SO₂、NO_x、PM 和 CO₂ 排放方面取得了显著成效，为煤炭的高效低碳利用奠定了坚实基础。因此，建议加大政策支持力度，完善相关技术标准，同时通过财政补贴和税收激励促进技术研发和示范项目，推动煤炭清洁利用技术的广泛应用。

2) 构建多维评估体系，优化清洁技术路径

基于生命周期分析(LCA)和环境影响评估(EIA), 本文建立了一个涵盖大气、水资源、固废与碳排放等领域的综合评估框架。这一框架不仅为煤炭清洁利用技术的评估提供了科学依据, 也为未来的技术优化提供了指导。建议完善市场机制, 推进碳交易和绿色金融, 通过政策引导促进企业基于评估结果优化技术路径和产业布局, 从而提升清洁煤技术的经济效益和应用价值。

3) 政策引导与技术创新协同推动清洁煤发展

政策、技术创新和商业化路径是推动清洁煤技术普及和应用的核心动力。为了加速清洁煤技术的推广, 建议深化国际合作, 积极与全球标准接轨, 并构建多边技术交流平台。这不仅有助于提升我国在清洁煤领域的技术竞争力, 还能增强我国在国际能源领域的影响力, 促进全球绿色能源转型。

4) 清洁煤与可再生能源融合, 构建现代高效能源体系

通过大同“零碳”园区的案例, 本文展示了煤炭清洁利用与风电、光伏、储能系统融合的成功模式, 突出了多能互补的优势。为了进一步推动清洁煤技术的应用, 建议加快技术融合与模式创新, 推动煤炭清洁利用与智能电网、氢能、储能等技术的深度集成, 助力构建高效、低碳的现代能源体系, 促进能源的绿色转型。

参考文献

- [1] 张良, 王来贵, Ren Ting, 等. 强扰煤岩体蠕变过程中跨尺度非连续结构演化研究进展[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(10): 47-59.
- [2] 王小敏, 李明. 煤炭清洁利用中的超低排放技术及其应用成效分析[J]. 环境保护, 2021, 49(12): 65-70.
- [3] 周建斌, 刘新宇. 煤炭清洁利用技术发展现状及趋势分析[J]. 煤炭工程, 2022, 54(4): 15-19.
- [4] 陈庆为. 国外洁净煤精配技术在我国的应用及发展前景[J]. 中国煤炭工业, 2009(2): 47-48.
- [5] 刘兰翠, 曹东, 王金南. 碳捕获与封存技术潜在的环境影响及对策建议[J]. 气候变化研究进展, 2010, 6(4): 290-295.
- [6] 杨子江, 陈慧. 基于 CCUS 的煤炭低碳利用研究进展[J]. 中国能源, 2021, 43(10): 37-42.
- [7] 罗隽飞, 杜铭华, 李文华. 美国未来洁净煤技术研究推广计划概述[J]. 洁净煤技术, 2005, 11(4): 5-10.
- [8] 任海军, 韩晓平. 煤炭气化技术研究进展及其低碳化路径探析[J]. 煤炭转化, 2022, 45(2): 10-16.
- [9] Li, S., Gao, L. and Jin, H.G. (2016) Life Cycle Energy Use and GHG Emission Assessment of Coal-Based SNG and Power Cogeneration Technology in China. *Energy Conversion and Management*, 112, 91-100. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.12.075>
- [10] 国家能源局. 中国能源发展报告 2023 [R]. 北京: 中国电力出版社, 2023.
- [11] 周亮亮. 清洁燃煤发电技术全生命周期评价[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- [12] 中国煤炭工业协会. 煤炭工业绿色发展报告(2022) [R]. 北京: 中国煤炭工业出版社, 2022.
- [13] 国家发展改革委, 国家能源局. 关于加快推动煤炭清洁高效利用的指导意见[Z]. 2021.
- [14] 朱妍, 仲蕊. 中国工程院院士谢克昌: 节能提效才是减碳第一优选[N]. 中国能源报, 2021-05-17(1).
- [15] Gibbins, J. and Chalmers, H. (2006) Carbon Sequestration Carbon Capture and Storage. *Cambridge Energy Forum Sustainable EnerConference*, Cambridge, 1 December 2006, 1-46.
- [16] 龚梦洁, 李惠民, 齐晔. 煤制天然气发电对中国碳排放和区域环境的影响[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(1): 83-89.
- [17] 姜海燕, 高鹏. 煤制油与煤制气项目的环境影响分析及对策研究[J]. 环境与可持续发展, 2020, 45(5): 102-107.
- [18] 黄俊杰, 梁慧. 煤炭清洁利用环境影响评估的生命周期分析研究[J]. 环境科学学报, 2020, 40(11): 4152-4159.
- [19] 陈清如. 发展洁净煤技术推动节能减排[J]. 中国高校科技与产业化, 2008(3): 65-67.
- [20] 中国煤炭网. 煤化工在“碳中和”历程中不可或缺[EB/OL]. 中国科学报. <http://www.ccoalnews.com/news/202108/24/c148257.html>, 2021-08-24.