

“燃煤发电 CCUS”专题

煤电+CCUS 产业规模化发展政策激励

徐冬,张帅,韩涛,郑旭帆,常林,冯白阳,冯蕾

(国家能源集团 新能源技术研究院有限公司,北京 102209)

摘要:碳捕集、利用与封存(CCUS)是实现碳中和目标的重要战略选择。我国能源和电力结构以煤为主,煤电+CCUS 技术是实现电力系统深度脱碳、电力灵活稳定供应的重要保障。当前,我国 CCUS 产业发展存在壁垒高、成本高、政策法规体系建设不健全等问题,缺少鼓励性政策、金融融资渠道困难等限制了煤电 CCUS 技术的大规模发展。围绕煤电产业低碳转型背景下面临的机遇和挑战,全面分析美国、欧盟、英国、加拿大、澳大利亚等国家和地区 CCUS 领域政策法规及成功案例,概括各国出台的科技政策对 CCUS 科技示范及工程项目的资助方案,总结发达国家 CCUS 政策体系构建方面的成功经验及对我国的启示,制定多项激励政策共发力,采取灵活兜底的价格机制,多举措拓宽投融资渠道,探索恰当合理的商业模式,分析我国 CCUS 政策体系现状及需求,研究不同激励政策对煤电 CCUS 改造的影响,从 CCUS 定位、政策激励、标准规范、审批监管等角度提出煤电 CCUS 发展的政策建议,为推进 CCUS 产业发展,实现煤电碳中和目标提供参考。

关键词:煤电;碳捕集利用与封存;碳中和;规模化发展;政策激励

中图分类号:TK01;TM61 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2023)04-0013-08

Policy incentives for the large-scale development of coal power+CCUS industry

XU Dong, ZHANG Shuai, HAN Tao, ZHENG Xufan, CHANG Lin, FENG Baiyang, FENG Lei

(New Energy Technology Research Institute, CHN Energy, Beijing 102209, China)

Abstract: Carbon capture, utilization and storage (CCUS) is an important strategic choice to achieve the goal of carbon neutrality. China's energy and power structure is dominated by coal. The coal power+CCUS technology is an important guarantee to achieve deep decarbonization of the power system and flexible and stable power supply. At present, the development of China's CCUS industry has many problems, such as high barriers, high costs, imperfect policies and regulations, lack of incentive policies, and difficulties in financial financing channels, which limit the large-scale development of coal power CCUS technology. Focusing on the opportunities and challenges faced by the low carbon transformation of the coal power industry, the policies, regulations and successful cases in the field of CCUS in the United States, the European Union, the United Kingdom and other countries and regions were comprehensively analyzed, the successful experience in the construction of the CCUS policy system in developed countries and its enlightenment to China was summarized, the current situation and needs of China's CCUS policy system were analyzed, the impact of different incentive policies on the transformation of coal-fired power CCUS was studied, and policy recommendations were proposed for the development of coal-fired power CCUS from the perspectives of CCUS positioning, policy incentives, standard specifications, publicity and guidance, etc. It can provide reference for promoting the development of CCUS industry and achieving the goal of carbon neutrality of coal power.

Key words: coal power; CCUS; carbon neutrality; large-scale development; policy incentives

收稿日期:2022-11-11;责任编辑:张鑫 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.RM22111101

基金项目:中国科协青年人才托举工程资助项目(2021QNRC001);国家能源集团 2022 年“揭榜挂帅”政研课题资助项目;国家能源集团 2022 年度科技创新资助项目(GJNY-22-99);国家能源集团 2021 年度十大重点科技攻关资助项目(GJNY-21-51);厂控科技创新资助项目(10038803EB210021)

作者简介:徐冬(1982—),男,辽宁盘锦人,高级工程师,博士。E-mail:dong.xu@chnenergy.com.cn

引用格式:徐冬,张帅,韩涛,等.煤电+CCUS 产业规模化发展政策激励[J].洁净煤技术,2023,29(4):13-20.

XU Dong, ZHANG Shuai, HAN Tao, et al. Policy incentives for the large-scale development of coal power+CCUS industry

[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(4): 13-20.



移动阅读

0 引言

过去 30 a 我国 CO₂ 排放总量快速增长,2005 年以来一直居世界首位,碳减排压力巨大,“碳达峰、碳中和”为我国能源行业绿色低碳发展指明了方向和路径^[1]。我国富煤贫油少气的资源禀赋决定了煤炭是生产与消费的基础性能源,而煤电以其成本低廉、供应稳定及可控性良好等优势长期占据我国电力装机的主导地位^[2]。根据朱法华等^[3]预测,“十四五”期间煤电规模及发电量仍有较大增长空间,装机容量增长约 2 亿 kW,“十五五”后期,将逐步削减煤电存量,2030—2035 年削减加速,到 2060 年仍需保留 5 亿 kW 左右煤电装机量。构建以新能源为主体的新型电力系统,仍需发挥煤电在电力系统的支撑性和调节性作用,并与清洁能源相互融合、共同发展,保障我国能源电力安全。

煤炭发电过程中产生大量 CO₂,排放量超过我国 CO₂ 排放总量的 1/3,已成为我国最大的 CO₂ 排放源和重点减碳对象^[4]。在当前先进高效煤电技术较难大规模部署背景下,单纯依靠节能减排、能效提升等减碳途径无法有效实现煤电行业“碳达峰、碳中和”目标,CCUS 技术成为煤电深度减碳的重要手段^[5]。据国际能源署(IEA)估计^[6],如切实履行《巴黎协定》的相关减排要求,在可持续发展情景下,2030 年我国电力部门 CCUS 捕集规模约为 1.9 亿 t/a,2050 年 CO₂ 捕集量增长至约 7.7 亿 t/a,到 2070 年将超过 12 亿 t/a。另外,IEA 指出^[7]在能源行业 2060 年达到碳中和及 2100 年的温度上升限制

在 1.75 °C 的背景下,我国需在 2045 年前全部关闭未升级的燃煤电站(如未进行 CCUS 改造)。因此,CCUS 技术在煤电行业将发挥越来越重要的作用,其大规模部署可避免我国大量煤电基础设施建设成本的搁浅,形成一段合理的缓冲期,同时配备 CCUS 的发电厂在满足电力系统灵活性方面将长期发挥作用,以保障电力系统运行稳定,此外,CCUS 技术还可实现煤电行业 CO₂ 净零或负排放,为其他行业/领域减碳提供重要支撑。

目前我国煤电 CCUS 工程由建设数量到示范规模均有较大提升,已具备大规模部署的工程能力,但现有政策促进 CCUS 大规模示范的能力有限,产业发展仍存在高壁垒、高成本、政策法规体系不健全等问题,如何从政策层面激励推进煤电 CCUS 产业发展、实现煤电碳中和目标是当前需要重点考虑的问题。

1 我国煤电 CCUS 发展现状

截至 2020 年 7 月,我国已投运或在建的 CCUS 示范项目共 49 个,总捕集能力为 300 万 t/a,多以电力、石油、煤化工行业小规模捕集和驱油示范为主^[8]。煤电方面,我国建成、在建和拟建的 CCUS 示范工程主要有 12 个^[9-15]见表 1,覆盖燃烧前、燃烧后和富氧燃烧碳捕集技术。其中,国家能源集团锦界电厂 15 万 t/a 碳捕集示范工程和泰州电厂 50 万 t/a 碳捕集示范工程分别为我国建成和在建的最大煤电 CCUS 项目,泰州 CCUS 项目 2023 年上半年投运;华能集团将要建设的国内规模最大的 150 万 t/a CCUS 示范工程,计划 2023 年 12 月投运。

表 1 我国煤电 CCUS 项目示范工程

Table 1 China coal power CCUS project demonstration project

捕集类型	单位	规模/(万 t·a ⁻¹)	捕集技术	利用方式	投运年份
燃烧后	华能高碑店电厂	0.3	化学吸收	食品级	2008 年
	华能上海石洞口电厂	12.0	化学吸收	工业级、食品级	2009 年
	中石化胜利电厂	4.0	化学吸收	驱油	2010 年
	中电投重庆双槐电厂	1.0	化学吸收	焊接保护和发电机氢冷置换	2010 年
	国能北塘电厂	2.0	化学吸收	食品级	2012 年
	华润海丰电厂	2.0	化学吸收	地质封存	2019 年
	华电句容电厂	1.0	化学吸收	干冰	2021 年
	国能锦界电厂	15.0	化学吸收	驱油、工业级	2021 年
	国能泰州电厂	50.0	化学吸收	驱油、工业级、食品级	2023 年
	华能甘肃陇东基地	150.0	化学吸收	驱油、封存	2023 年
燃烧前	华能天津电厂	10.0	化学吸收	驱油	2015 年
富氧燃烧	华中科技大学	10.0	富氧燃烧	工业级	2014 年

2 国外 CCUS 政策现状及启示

2.1 国外 CCUS 政策现状

目前全球大部分 CCUS 项目盈利能力有限,若要形成市场化和商业化运作产业,必须吸引足够多投资,需政府部门出台更多鼓励政策,保证产业稳定发展。

美国近年来持续出台针对 CCUS 发展的支持政策。2008 年实施的 45Q 法案^[16]规定了 CO₂地质封存税收抵免,且政策有效期持续延长,2018 年进行了修订,2021 年发布 45Q 条款最终法规,2022 年通过的《降低通货膨胀法》进一步更新了 45Q 税收抵免法案,加大 CCUS 技术激励力度,使投资企业能够保证 CCUS 项目现金流的长期稳定,降低项目财务风险。自 2017 年以来,先后投入超过 3 亿美元支持 CCUS 技术研发和工程示范,加速 CCUS 技术商业化进程。

科技政策方面,美国主要加大对 CCUS 科技示范及工程项目的资助。2022 年美国能源部(DOE)发布 3 项资助,共计投入超过 70 亿美元以支持建设 CO₂捕集、运输和封存基础设施。9 月 23 日,DOE 宣布投资 49 亿美元,支持 3 个项目推动碳捕集系统及碳运输和封存基础设施的示范和部署,具体包括:① 碳储存验证和测试项目(22.5 亿美元),旨在开发大型商业碳储存项目;② 碳捕集示范项目计划(25.4 亿美元),旨在开发 6 个综合碳捕集、运输和储存示范项目;③ CO₂运输工程和设计项目(1 亿美元),设计区域 CO₂管道网络以安全运输捕获的 CO₂。10 月 6 日,DOE 启动 21 亿美元的“CO₂运输基础设施融资和创新计划”(CIFIA),将为美国大容量共享 CO₂运输项目提供资金至 2026 年。具体包括:① 支持包括管道、铁路运输、船舶和驳船及地面运输的共享基础设施项目,将人为碳源与其储存或利用端点连接;② 助力行业克服获得建设共享基础设施项目所需前期资本的挑战;③ 助力形成相互关联的碳管理生态系统,实现碳管理技术的商业部署。

欧洲 CCUS 项目发展主要依靠欧盟碳交易机制(EU-ETS)^[17]。通过引入排放交易系统对温室气体排放进行定价,使 CCUS 在减缓气候变化技术中具有竞争力,自 2015 年起,欧盟着手探讨面向 2021—2030 年的 EU-ETS 第 4 阶段的规划方案。其中,第 4 阶段的 EU-ETS 明确提出通过碳拍卖收入所得,设立专项资金加大对 CCUS 的财政支持力度,即欧盟的创新基金,其他欧盟相关基金也在同步支持 CCUS 相关设施建设、科研活动等。

欧盟 CCS 相关科技政策多与能源、气候变化政

策联系。《2030 年气候与能源政策框架》指出 CCS 是欧盟能源和碳密集行业大幅减排的关键技术,要加大 CCS 研发力度和商业示范;《2050 长期战略》将 CCS 作为实现碳中和目标的七大战略技术领域之一;欧盟委员会在《欧洲绿色协议》中提出将 CCS 纳入向气候中立过渡所需的技术,将其视为关键工业部门脱碳的优先领域之一。2021 年通过的《欧洲气候法》将气候中立的政治承诺转变为法律义务,预计未来将继续加大 CCS 相关政策支持。欧盟多个研发资助计划支持 CCUS 的研发和部署。地平线欧洲计划将在 2021 年和 2022 年分别提供 3 200 万和 5 800 万欧元资金资助 CCUS 技术研发。

英国 CCUS 激励政策主要体现在电力系统低碳补贴电价、政府明确碳减排意志和碳价格信号、出台严格限制煤炭(煤电)行业发展的标准等方面,为商业规模的 CCUS 提供资金支持。如英国的 CfD (Contracts for Differences) 价格保证机制^[18]及碳交易底价保证机制,对因使用 CCUS 技术造成成本增加的发电商进行价格保护,对无法满足 CCUS 项目运行成本最低价的项目通过增加税收弥补差额。

英国科技政策主要体现在加强对 CCUS 的商业投资。2022 年 4 月,英国政府发布了《CCUS 投资路线图》,清晰展现了英国政府和行业对 CCUS 发展的承诺及路径,英国政府不仅对 CCUS 技术有着清晰的规划时间表、多元化的投资策略,更为 CCUS 的发展明确了商业模型,英国还设立了总金额达 10 亿英镑的“碳捕集与封存基础设施基金”,计划到 2030 年建成 4 个 CCUS 中心。

加拿大提出采用新税收抵免计划方式促进 CCUS 项目发展^[19],在 2022 年预算中概述了税收抵免的金额和实施情况。加拿大阿尔伯塔省对碳抵消机制改革,允许非 EOR 的 CCS 项目每减排 CO₂ 1 t,可取得多于 1 t 的 CO₂减排量。

加拿大科技政策通过投资税收抵免大力支持 CCUS 技术的开发和应用。2022—2030 年,直接空气捕获项目的税收抵免率为 60%,其他碳捕获项目的税收抵免率为 50%,二氧化碳运输、储存和使用的税收抵免率为 37.5%;2031—2040 年,税收抵免率分别降至 30%、25%和 18.75%。从 2022 年 1 月 1 日开始,企业在采购和安装用于新二氧化碳捕获项目的设备产生相关费用时,可申请税收抵免。

其他国家中,澳大利亚设立“减排基金”支持 CCUS 发展,日本建立了 CCUS 项目联合信贷机制,并期望通过“碳循环利用”计划实现 CO₂资源化利用,马来西亚和印尼正在制定 CCS 相关法律和监管

框架^[20]。

2.2 国外 CCUS 政策对我国的启示

当前国外政府部门针对 CCUS 项目的政策激励方式相对成熟,促进了 CCUS 技术发展,对我国发展 CCUS 产业具有借鉴意义。

1) 制定多项激励政策共发力。如美国政府出台并不断优化的 45Q 税收减免政策,极大推动了 CCUS 项目在美国的布局。根据国际能源署评估,45Q 政策将帮助美国在电力部门实现 2/3 以上的碳减排。但仅依靠 45Q 政策远不够,还需更多激励措施推动 CCUS 项目大规模部署。如美国相关议员提出的《增长的可再生能源和效率(绿色)法案》允许碳捕集项目开发商获得 45Q 政策税收抵免金额的 85%,并要求退还任何由此导致的多缴税款,《2020 年二氧化碳利用和封存法案》与《收回法案》允许 CCUS 项目开发商收到 90% 的税收抵免付款金额。

2) 采取灵活兜底的价格机制。如英国的 CfD 价格保证机制和碳交易底价保证机制,能够降低 CCUS 项目投资企业的风险;欧盟实施的外部动态交易机制——排放交易计划(EU-ETS),通过碳市场二氧化碳排放权(EUA)的交易,提升 CCUS 的市场竞争力;加拿大阿尔伯塔省采取的碳抵消机制,通过 CCS 项目的 CO₂ 减排量获得对应的 CO₂ 排放额。

3) 多举措拓宽投融资渠道。我国 CCUS 技术投资主要来自政府资金支持,主要用于技术研发,国外投资则用于技术研发和投资建设,且除政府支持资金外的资金占比最高可达 50%,资金来源和筹措方式多样化,主要包括政府专项资金、政府募集资金、政府背书进行贷款、大型气候基金、投资机构投资、碳税资金支持等。

4) 探索恰当合理的商业模式。大型 CCUS 项目具有跨行业、跨地域和跨部门属性,涉及“国家-地方-企业”多方关系,需探索资源配置合理、项目效益最大的商业运营模式。国外如美国 Val Verde Natural Gas Plants 项目和 Coffeyville Gasification Plant 项目、加拿大的 Quest 项、沙特阿拉伯的 Uthmaniyah CO₂ EOR 全流程示范项目等,既存在一家单位全部投资运营,也存在多家单位共同出资或共同运营的项目^[21]。

3 我国 CCUS 政策现状及煤电 CCUS 规模化发展需求分析

3.1 我国 CCUS 政策现状

我国政府高度重视应对气候变化工作,出台一系列 CCUS 相关政策规划,有序推进 CCUS 技术研

发和示范。2006 年以来,国务院、国家相关部委制定并发布了 30 余项政策和发展规划,图 1 反映了“十一五”到“十四五”每年发布的政策数量及累计数量。CCUS 概念首次在 2006 年北京香山科学会议学术讨论会上提出,随后从“十一五”开始,世界各国开始普遍关注气候变化问题,CCUS 进入公众视野,2006 年 2 月国务院出台的《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020 年)》是第 1 个与 CCUS 高度相关的政策,提出开发高效、清洁和二氧化碳近零排放的化石能源开发利用技术,2007 年 6 月出台的《中国应对气候变化科技专项行动》开始布局 CCUS 技术的研发及试点应用。

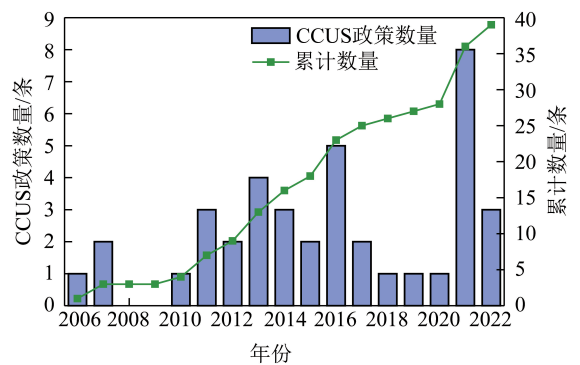


图 1 我国 CCUS 相关政策数量

Fig.1 Number of CCUS related policies in China

“十二五”期间,CCUS 技术全球升温,我国对 CCUS 技术也更加重视,政策围绕 CCUS 整体战略规划不断完善,支撑了 CCUS 的初步布局和项目试点的落实,2011 年 7 月出台的《国家“十二五”科学和技术发展规划》是“十二五”时期第 1 个与 CCUS 相关的规划,提出重点探索和开发 CCUS 技术,后续的《“十二五”控制温室气体排放工作方案》《中国的能源政策(2012)》白皮书》《“十二五”国家碳捕集利用与封存科技发展专项规划》《关于推动碳捕集、利用和封存试验示范的通知》《2014—2015 年节能减排低碳发展行动方案》《国家应对气候变化规划(2014—2020)》等均提出加大二氧化碳捕集、利用和封存技术研究和示范工程建设。

“十三五”期间,我国 CCUS 政策类型向多样化发展,政策内容更加具体并具有可操作性和可执行性,既包括了《“十三五”国家科技创新规划》《“十三五”控制温室气体排放工作方案》《“十三五”应对气候变化科技创新专项规划》等对 CCUS 产业发展的定位与布局,也包括环境风险评估方面的《二氧化碳捕集、利用与封存环境风险评估技术指南(试行)》、技术标准建设方面的《烟气二氧化碳捕集纯

化工程设计标准》、投融资支持方面的《关于促进应对气候变化投融资的指导意见》等,全面引领了 CCUS 技术的规范化发展。

“十四五”期间,在“碳达峰、碳中和”目标下,我国加快了绿色低碳转型步伐,CCUS 产业受到更多关注,CCUS 相关政策推动 CCUS 向大规模、全流程方向发展^[18]。2021 年,我国首次将 CCUS 重大项目示范纳入国家“十四五”规划方案,大大增强行业信心。同年发布的《中共中央国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》将 CCUS 确定为实现双碳目标的重要手段,并提出“推进规模化碳捕集利用与封存技术研发、示范和产业化应用”。在生态环境部等部门开展的气候投融资工作中,CCUS 被列为气候投融资的重要方向,中国人民银行推出的减排工具也为 CCUS 提供了资金支持。国家能源局发布的《“十四五”现代能源体系规划》也明确提出要针对包括 CCUS 在内的多项前沿领域,启动一系列具有前瞻性、战略性的国家重大科技示范项目。

3.2 我国煤电 CCUS 规模化发展的政策需求分析

当前我国在技术层面已具备大规模捕集利用与封存 CO₂ 的工程能力,但现有 CCUS 相关政策促进 CCUS 示范的能力有限,缺少鼓励性政策,金融融资渠道困难,限制了煤电 CCUS 技术大规模发展,具体体现在^[22]:

1) CCUS 战略发展定位不清晰。我国缺少 CCUS 顶层设计和国家层面的发展战略,CCUS 未被纳入国家重大低碳技术范畴,只有少数政策文件提及 CCUS 的发展,但大多数文件侧重于引导和鼓励,对于技术发展路径和中长期发展规划不明晰,也未明确 CCUS 技术的发展重点和关键环节。

2) 缺乏价格激励或产品补贴机制。我国尚未建立针对 CCUS 的具体财税支持和激励机制,虽已建立碳排放交易体系,并启动了碳市场,但目前国家排放交易体系不包括 CCUS 技术,且平均 CO₂ 交易价格远低于欧盟,在碳排放价格和碳信用额度方面均难以有效激励 CCUS 项目落地。

3) CCUS 法律法规、标准体系不健全。环境保护法、污染防治法、环境影响评价法等立法缺失,项目安全和环境风险监管不够,未建立项目审批和许可制度,也未明确项目申请门槛;尚未制定 CCUS 项目发展准入、建设、运营、终止等环节的法律法规,项目建设的可行性研究、施工、运行、调试、验收、评价等各阶段的技术标准还不健全。

4) 缺乏衡量净额和配额过程的统一方法。由

于对 CCUS 项目边界、碳排放因素、泄漏和可持续发展问题缺乏普遍可接受的准确描述,CCUS 在碳市场和碳监管系统中缺乏统一的、得到广泛认可的监测、报告和核查(MRV)方法,无法准确核算 CCUS 技术的减排贡献。

5) CCUS 全产业链技术研发体系还不成熟。虽然我国 CCUS 全流程各类技术路线都分别开展了试验示范项目,但整体仍处于研发与示范早期阶段,技术研发多聚焦于单一技术环节,且技术发展水平还不足以支撑我国 CCUS 集成耦合与优化技术研究,制约了大规模、全流程、可复制的 CCUS 集成示范项目的开展。

6) 跨区域跨部门跨行业协调机制尚未建立。CCUS 项目从立项、审批、执行到后期评价,涉及多个地方和多个部门,且 CCUS 包括 CO₂ 捕集、利用、封存多个环节,涉及电力、交通运输、石油石化等多个行业,目前在地方、部门和行业间均缺乏针对 CCUS 产业的有效协调机制。

基于上述对 CCUS 政策方面的分析,煤电 CCUS 大规模部署亟待政策、法规、财税、金融、标准、监管等一系列方面进行补充完善,以推动 CCUS 技术商业化发展。

4 煤电 CCUS 规模化发展政策激励

CCUS 作为煤电深度减碳的重要技术,由于其高成本和高投资风险阻碍了商业化进程。根据相关研究成果,我国燃煤电厂 CCUS 项目改造后其 L_{COE} (平准化度电成本,用于量化计算发电项目成本) 在 -105 ~ 926 元/MWh, 平均为 504 元/MWh, 其中 60% 燃煤电厂其 L_{COE} 在 400 ~ 600 元/MWh^[23], 因此推动煤电 CCUS 发展需依靠较高激励效果的补贴政策。国内外研究学者通过建立煤电 CCUS 源汇匹配模型和 L_{COE} 发电成本模型,并通过 L_{COE} 指标对煤电 CCUS 源汇匹配结果进行成本量化分析,得出不同煤电 CCUS 改造成本,进一步考虑不同政策激励模式(碳市场、电价补贴、发电小时数补贴、45Q 税收抵免等)设置不同情景 CCUS 成本的影响,得到的主要结论如下:

1) 燃煤电厂在当前市场政策条件下无法实现大规模碳减排。虽然碳市场可有效降低煤电 CCUS 改造成本,但我国当前的碳交易价格较低,激励效果有限。只有政府部门对燃煤电厂给予更高的政策激励或价格补贴,才能有效降低燃煤电厂 CCUS 的改造成本。

2) 我国部分燃煤电厂在 CCUS 改造后的 L_{COE} 成

本低于 IEA 测算的光伏、陆上风电、核能和海上风电的 L_{COE} 成本, 尽管 CCUS 捕集装置的投资成本相对较大, 但在有利条件下, 如储存地点运输距离较近和煤炭价格较低, 燃煤电厂 CCUS 改造的 L_{COE} 比其他低碳技术更低, 因此, 给予煤电 CCUS 与清洁电力同等补贴, 煤电 CCUS 将更具有竞争力^[24]。

3) 早期我国燃煤电厂开展的脱硫脱硝改造和超低排放改造通过政府给予的电价补贴实现了大规模快速改造, 如果给予煤电 CCUS 改造类似的电价补贴, 也能有效激励 CCUS 的改造潜力。在没有任何政府补贴的情况下, 煤电 CCUS 改造的平均临界碳价为 72.42 美元/t (以 CO_2 计), 当引入电价补贴 22 美元/MWh (0.015 元/kWh) 时, 平均临界碳价降至 25.00 ~ 50.98 美元/t, CCUS 改造成本大幅下降^[25]。

4) 提供额外的电力配额可以促进 CCUS 项目的投资, 降低投资门槛。随额外电力配额增加, CCUS 投资门槛更低, 但最优投资门槛降低的速率逐渐放缓, 对 CCUS 改造的促进作用减弱^[26]。尤其是百万吨级以上的煤电 CCUS 项目, 即使提供最高的电力配额 (7 000 h/a) 仍会遭受损失^[27]。

5) 引入 45Q 税收抵免高水平激励政策可使煤电 CCUS 改造成本大幅下降。在没有任何补贴政策的基准情景下, 我国煤电 CCUS 改造后的 L_{COE} 中位数和平均值分别为 72 和 73 美元/MWh; 引入美国 45Q 税收抵免政策后, L_{COE} 的中位数和平均值分别降低了 32 和 31 美元/MWh, 使得燃煤电厂可在全寿命周期内持续运营 CCUS 项目^[28-29]。

5 我国煤电 CCUS 规模化发展的政策建议

1) 加强 CCUS 产业顶层设计。从国家层面统筹建立 CCUS 发展战略, 制定 CCUS 技术发展路线图和近、中、远期发展规划, 明确 CCUS 技术的研发方向、重点任务和支撑政策, 加强国家层面的技术指导和宏观调控, 逐步实现 CCUS 由战略储备技术向战略新兴产业转变。

2) 多途径实施激励政策, 包括财政、税收、财政激励 (税收抵免、资金补贴、低息贷款等)、定价和补贴激励 (优惠政策、电价、产品补贴或适合燃煤电厂改造 CCUS 的配额)、开发 CCUS 项目减排证书等, 鼓励煤电企业参与。

3) 重启并打造全国统一的自愿减排 (CCER) 碳市场, 研究 CCUS 减排核算统一的、得到广泛认可的监测、报告和核查方法, 建立 CCUS 全产业链的碳核查方法体系, 推动 CCUS 项目尽快纳入我国自愿减

排机制, 助力煤电行业大规模减碳。

4) 建立项目审批和许可制度, 明确项目申请门槛和资质要求, 强化 CCUS 项目监管环境, 将 CO_2 捕集、利用、封存全流程技术环节统一纳入同一监管平台, 将许可制度贯穿整个项目周期, 使 CCUS 技术规范化发展。

5) 加快构建 CCUS 技术体系和标准体系。明确碳中和目标下 CCUS 技术需求, 针对各个环节开展核心技术攻关, 补齐技术短板和缺项, 实现核心技术专利化、专利技术标准化、标准技术产业化、产业技术价值化。

6) 推进 CCUS 基础设施共建共享。建立跨行业的合作协调沟通机制, 加快 CCUS 管网和集群基础设施建设, 构建 CCUS 国家数据共享服务平台体系, 推进知识、技术等资源的开放共享。

6 结 语

我国以煤为主的资源禀赋决定了煤电在相当长时期内仍将承担保障我国能源电力安全的重要作用。CCUS 作为实现煤电规模减碳和净零排放必不可少的技术路径, 减排潜力巨大。要形成 CCUS 市场化和商业化运作的战略新兴产业, 除了需吸引足够多的投资外, 还需政府部门出台更多激励政策, 但目前 CCUS 发展仍面临法律上尚未明确 CCUS 定位、缺乏价格激励或产品补贴机制、现有电价形成机制不利于煤电配置 CCUS、缺乏财务机制和可行的商业模式、缺乏衡量净额和配额过程的统一方法、审批和监管体系不完善、公众对 CCUS 接受程度低、知识共享不充分等问题, 借鉴国外在 CCUS 政策方面的先进经验和做法, CCUS 定位、政策激励、监管许可、方法学构建、标准规范、宣传引导等政策方面仍需不断完善和改进, 开展国家总体 CCUS 发展路线图研究和顶层设计, 加快更大规模 CCUS 集成示范项目筛选和技术路线优化论证, 助力我国煤电 CCUS 规模化发展。

参考文献 (References):

- [1] 新华网. 习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话 (全文) [EB/OL]. (2020-09-22) [2022-10-11]. http://www.xinhuanet.com/politics/leaders/2020-09/22/c_1126527652.htm.
 - [2] 全球能源互联网发展合作组织. 中国 2030 年前碳达峰研究报告 [R]. 北京: 全球能源互联网发展合作组织, 2021.
 - [3] 朱法华, 徐静馨, 潘超, 等. 煤电在碳中和目标实现中的机遇与挑战 [J]. 电力科技与环保, 2022, 38(2): 79-86.
- ZHU Fahua, XU Jingxin, PAN Chao, et al. Opportunities and challenges of coal power industry in the achievement of carbon

- neutrality goal [J]. *Electric Power Environmental Protection*, 2022, 38(2):79-86.
- [4] 马双忱,樊帅军,武凯,等. 双碳战略背景下燃煤电厂 CCUS 技术发展:挑战与应对[J]. *洁净煤技术*, 2022, 28(6):1-13.
MA Shuangchen, FAN Shuaijun, WU Kai, et al. CCUS technology development of coal-fired power plant under the background of dual carbon strategy: Challenges and countermeasures [J]. *Clean Coal Technology*, 2022, 28(6):1-13.
- [5] 蔡博峰,李琦,张贤,等. 中国二氧化碳捕集利用与封存 (CCUS) 年度报告 (2021): 中国 CCUS 路径研究 [R]. 北京: 生态环境部环境规划院,中国科学院武汉岩土力学研究所,中国 21 世纪议程管理中心, 2021.
- [6] IEA. *Energy technology perspectives 2020: Special report on clean energy innovation [R/OL]. (2020-11-10) [2022-10-11]. https://www.oecd-ilibrary.org/energy/energy-technology-perspectives-2020_ab43a9a5-en.*
- [7] 伍博超. 政策性金融支持“煤电+CCUS”产业发展研究[J]. *商学研究*, 2021, 28(3):22-30.
WU Bochao. Research on the "coal Power + CCUS" industry development supported by policy-based finance [J]. *Commercial Science Research*, 2021, 28(3):22-30.
- [8] 张贤,李阳,马乔,等. 我国碳捕集利用与封存技术发展研究 [J]. *中国工程科学*, 2021, 23(6):70-80.
ZHANG Xian, LI Yang, MA Qiao, et al. Development of carbon capture, utilization and storage technology in China [J]. *Strategic Study of CAE*, 2021, 23(6):70-80.
- [9] 樊强,许世森,刘沅,等. 基于 IGCC 的燃烧前 CO₂ 捕集技术应用与示范 [J]. *中国电力*, 2017, 50(5):163-167, 184.
FAN Qiang, XU Shisen, LIU Yan, et al. Application and demonstration of IGCC-based pre-combustion CO₂ capture technology [J]. *Electric Power*, 2017, 50(5):163-167, 184.
- [10] 方圆. 落实“双碳”目标化工建设企业大有可为; 陕西国华锦界 15 万 t/a 二氧化碳捕集 (CCS) 示范工程建设纪实 [J]. *石油化工建设*, 2021, 43(5):1-5.
FANG Yuan. There is a bright future for chemical construction enterprises to implement the target of "double carbon": The construction record of Shaanxi Guohua Jinjie 150 000 t/a Carbon Dioxide Capture (CCS) demonstration project [J]. *Petroleum & Chemical Construction*, 2021, 43(5):1-5.
- [11] 孙路长,王争荣,吴冲,等. 燃煤电厂万吨级碳捕集工程设计与运行优化研究 [J]. *综合智慧能源*, 2021, 43(6):69-78.
SUN Luchang, WANG Zhengrong, WU Chong, et al. Research on operation optimization of a 10 000 t/a carbon capture project for coal-fired power plants [J]. *Integrated Intelligent Energy*, 2021, 43(6):69-78.
- [12] 林永明. 中国燃煤电厂 CO₂ 捕集技术开发及应用 [J]. *广西电力*, 2013, 36(3):16-19, 27.
LIN Yongming. Development and application of CO₂ capture technology of coal-fired power plant in China [J]. *Guangxi Electric Power*, 2013, 36(3):16-19, 27.
- [13] 屈紫懿. 燃煤电厂烟气 CO₂ 捕集技术经济性分析 [J]. *重庆电力高等专科学校学报*, 2019, 24(4):31-34.
QU Ziyi. Economy analysis of CO₂ collection technique for flue gas of the coal-fired power plant [J]. *Journal of Chongqing Electric Power College*, 2019, 24(4):31-34.
- [14] 郑秀亮. 把二氧化碳“禁锢”起来 [J]. *环境*, 2019(9):64-66.
ZHENG Xiuliang. Confining carbon dioxide [J]. *Environment*, 2019(9):64-66.
- [15] 郭建军,张泰,李鹏飞,等. 中国煤粉富氧燃烧的工业示范进展及展望 [J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(4):1197-1208, 1526.
GUO Junjun, ZHANG Tai, LI Pengfei, et al. Industrial demonstration progress and trend in pulverized coal oxy-fuel combustion in China [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(4):1197-1208, 1526.
- [16] FAN Jingli, XU Mao, YANG Lin, et al. How can carbon capture utilization and storage be incentivized in China? A perspective based on the 45Q tax credit provisions [J]. *Energy Policy*, 2019, 132:1229-1240.
- [17] 王建芳,苏利阳,谭显春,等. 主要经济体碳中和战略取向、政策举措及启示 [J]. *中国科学院院刊*, 2022, 37(4):479-489.
WANG Jianfang, SU Liyang, TAN Xianchun, et al. Carbon neutrality policy measures in global major economies [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2022, 37(4):479-489.
- [18] 刘海楠,王浩然,甘振宇. 国外经验表明推动 CCUS 发展需四力齐发 [R/OL]. (2021-05-18) [2022-10-11]. <https://huanbao.bjx.com.cn/news/20210518/1153027.shtml>.
- [19] 环球市场播报. 新税收抵免计划将促进加拿大碳捕集发展 [R/OL]. (2022-05-13) [2022-10-11]. <http://www.tanjiayoi.com/article-37739-1.html>.
- [20] 中国能源网. 政策扶持开启接棒模式, CCUS 行业发展前景可期 [R/OL]. (2022-05-06) [2022-10-11]. http://www.cnenergynews.cn/zhuanti/2022/05/06/detail_20220506122995.html.
- [21] 宋亚楠. CCUS 技术的减排作用与应用前景 [J]. *金融纵横*, 2021(9):35-43.
SONG Yanan. Emission reduction effect and application prospect of CCUS technology [J]. *Financial Perspectives Journal*, 2021(9):35-43.
- [22] WEI Ning, LI Xiaochun, LIU Shengnan, et al. A strategic framework for commercialization of carbon capture, geological utilization, and storage technology in China [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2021, 110:103420.
- [23] WEI Ning, JIAO Zunsheng, ELLETT Kevin, et al. Decarbonizing the coal-fired power sector in China via carbon capture, geological utilization, and storage technology [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(19):13164-13173.
- [24] FAN Jingli, WEI Shijie, YANG Lin, et al. Comparison of the LCOE between coal-fired power plants with CCS and main low-carbon generation technologies: Evidence from China [J]. *Energy*, 2019, 176:143-155.
- [25] CHEN Wenhui, LU Xi, LEI Yalin, et al. A comparison of incentive policies for the optimal layout of CCUS clusters in China's coal-fired power plants toward carbon neutrality [J].

- Engineering, 2021, 7(12):1692-1695.
- [26] 聂鹏飞, 高哲远, 王喜平. 不同商业模式下燃煤电厂 CCUS 投资决策研究[J]. 热力发电, 2023, 52(4): 63-71.
NIE Pengfei, GAO Zheyuan, WANG Xiping. Research on CCUS investment decision of coal-fired power plant under different business modes [J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(4): 63-71.
- [27] YANG Lin, XU Mao, FAN Jingli, et al. Financing coal-fired power plant to demonstrate CCS (carbon capture and storage) through an innovative policy incentive in China[J]. Energy Policy, 2021, 158:112562.
- [28] FAN Jingli, LI Zezheng, LI Kai, et al. Modelling plant-level abatement costs and effects of incentive policies for coal-fired power generation retrofitted with CCUS [J]. Energy Policy, 2022, 165:112959.
- [29] FAN Jingli, XU Mao, WEI Shijie, et al. Carbon reduction potential of China's coal-fired power plants based on a CCUS source-sink matching model[J]. Resources, Conservation & Recycling, 2020, 168:105320.