

碳捕集利用与封存标准研究进展与体系构建思考

龙 妍^{1,2}, 李小姗^{1,2}, 丁 晴³, 熊 卓^{1,2}, 徐祖伟^{1,2}, 赵永椿^{1,2}

(1. 华中科技大学 能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 华中科技大学 煤燃烧与低碳利用全国重点实验室, 湖北 武汉 430074;
3. 中国标准化研究院 资源环境研究分院, 北京 100191)

摘要: 碳捕集利用与封存 (CCUS) 技术是化石能源低碳零碳甚至负碳利用、工业深度脱碳的主要技术手段, 对我国能源安全和工业体系绿色低碳转型发展意义重大。国家出台《国家标准化发展纲要》《建立健全碳达峰碳中和标准计量体系实施方案》, 要求研究制定 CCUS 标准, 加快构建推动高质量发展的标准体系, 以助力 CCUS 等关键技术标准与科技研发、示范推广协同推进。围绕 CCUS 科技创新与产业发展目前面临的新机遇和挑战, 系统梳理国内外 CCUS 标准现状, 完善标准体系以支撑 CCUS 科技创新和产业发展迫在眉睫。然而, CCUS 标准体系的缺失导致 CCUS 项目边界不清、产业发展不规范, 科技创新链条受阻, 配套政策缺乏规范指引。综合考虑 CCUS 行业特性、技术门类及功能序列, 初步构建了 CCUS 标准体系框架。针对当下 CCUS 发展亟需解决的问题, 提出面临的主要挑战和应对措施, 并围绕亟需建设的 4 个重点方面展开讨论。结合已有科研基础, 提出将标准体系布局、CCUS 技术标准、CCUS 量化标准和 CCUS 管理标准等作为重点方向, 推动我国 CCUS 标准化工作。

关键词: CCUS 技术; 标准体系; 碳捕集; 碳利用; 碳封存

中图分类号: TQ53; TK114 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-6772(2025)03-0017-12

Research progress and system construction of Carbon Capture Utilization and Storage standard

LONG Yan^{1,2}, LI Xiaoshan^{1,2}, DING Qing³, XIONG Zhuo^{1,2}, XU Zuwei^{1,2}, ZHAO Yongchun^{1,2}

(1. School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. State key Laboratory of Coal Combustion and Low Carbon Utilization, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 3. Branch of Resource and Environment, China National Institute of Standardization, Beijing 100191, China)

Abstract: Carbon Capture Utilization and Storage (CCUS) technology is a support technology for low carbon zero carbon or even negative carbon utilization of fossil energy and deep decarbonization of industry, which is of great significance to China's energy security and green low-carbon transformation development of industrial system. The state has issued policies such as the Outline of National Standardization Development and the Implementation Plan for Establishing and Improving a Standard Measurement System for Carbon Peaking Carbon Neutrality, requiring the study and formulation of carbon capture, utilization and storage standards, accelerating the construction of a standard system to promote high-quality development, and helping CCUS and other key technical standards to advance in coordination with scientific and technological research and development, demonstration and promotion. Focusing on the new opportunities and challenges facing CCUS technological innovation and industrial development, this paper systematically reviews the current status of CCUS standards at home and abroad. The current standards are urgent to support CCUS technological innovation and industrial development, but the lack of CCUS standard system makes the boundaries of CCUS projects unclear, the industrial development is not standardized, and the CCUS scientific and technological innovation chain is blocked. The supporting policies of CCUS lack normative guidance. Based on the comprehensive consideration of CCUS industry characteristics, CCUS technical categories and function sequence, the framework of CCUS technical standard system is initially constructed. In view of the current problems that need to be solved in the development of CCUS, the main challenges and countermeasures are put forward and the four key aspects that need to be

收稿日期: 2024-12-09; 策划编辑: 常明然; 责任编辑: 黄小雨 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.24120901

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFF0601000)

作者简介: 龙 妍(1975—), 贵州都匀人, 教授。E-mail: ly_hust@hust.edu.cn

通讯作者: 赵永椿(1982—), 湖北荆州人, 教授。E-mail: yczhao@hust.edu.cn

引用格式: 龙妍, 李小姗, 丁晴, 等. 碳捕集利用与封存标准研究进展与体系构建思考 [J]. 洁净煤技术, 2025, 31(3): 17-28.

LONG Yan, LI Xiaoshan, DING Qing, et al. Research progress and system construction of Carbon Capture Utilization and Storage standard [J]. Clean Coal Technology, 2025, 31(3): 17-28.



constructed are discussed. Based on the existing scientific research foundation, it is proposed that the standard system layout, CCUS technical standard, CCUS quantitative standard and CCUS management standard will be the key construction direction, in order to provide reference for China's CCUS standardization.

Key words: CCUS; Standard system; Carbon capture; Carbon utilization; Carbon storage

0 引言

“双碳”目标是我国重大战略决策,以碳捕集利用与封存(CCUS)技术为代表的碳清除技术受到广泛关注,被普遍认为具有重大意义和巨大潜力,是快速减少温室气体排放并有效实现全球碳中和的关键支柱技术^[1]。CCUS技术不仅可以实现化石能源利用近零排放,促进钢铁、水泥等难减排行业的深度减排,而且在碳排放约束条件下增加电力系统灵活性、减少其波动性、保障电力供应的安全和稳定、抵消难以减排的二氧化碳等温室气体排放方面具有重要意义^[2-3]。

《联合国气候变化框架公约》第二十八次缔约方大会(COP28)全球盘点报告指出,与2019年的水平相比,到2030年全球温室气体排放量需要减少43%,才能将全球温升控制在1.5℃内^[4]。根据全球气候行动评估结果,各方被敦促通过切实举措力争到2030年在全球范围内实现可再生能源发电能力增加2倍、能源效率提高1倍的目标,逐步减少未加装减排设施的煤电,加快CCUS等碳减排和碳清除技术的商业化应用进程。由此可见,CCUS技术作为碳中和解决方案中必不可少的关键部分,是实现《巴黎协定》1.5℃温控目标的重要技术手段和兜底技术保障。

我国高度重视CCUS技术和产业的发展,国务院、国家发展改革委、生态环境部等中央十余个部门将CCUS纳入政策。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》明确要将CCUS技术作为重大示范项目进行引导并支持。国家能源局2024年6月发布的《煤电低碳化改造建设行动方案(2024—2027)》,再次提出要采用CCUS技术作为三大主要低碳改造和建设方式之一,统筹推进存量煤电机组低碳化改造和新建煤电机组低碳化建设。

标准是构成国家核心竞争力的基本要素,是规范经济和社会发展的依据。为推动CCUS技术的发展,《国家标准化发展纲要》强调研究制定碳捕集利用与封存标准,加快构建推动高质量发展的标准体系。《建立健全碳达峰碳中和标准计量体系实施方案》也提出CCUS等关键技术标准与科技研发、示范推广协同推进。因此,面向国家对

CCUS技术和产业发展的重大需求,加快完善碳捕集利用与封存技术标准体系建设,推动CCUS技术的发展与应用,是助力“双碳”目标实现的重要举措。本文结合当前CCUS产业发展所面临的战略形势,系统梳理国内外CCUS标准制定现状,初步构建CCUS标准体系,对CCUS标准化工作提出思考和建议。

1 CCUS发展现状及趋势

1.1 CCUS全球发展态势迅猛,各国争相抢占科技高地

国际能源署预测,到2050年CCUS相关领域投资总额将达百万亿元,有望形成战略新兴产业。截至2023年7月31日,全球在开发和在建的碳捕集与封存(CCS)项目总CO₂捕集能力为3.61亿t/a,比2022年增长了近50%^[5]。CCUS技术的迅猛发展得益于各国在政策、金融、法律和监管环境方面对CCUS的系统支持。美国2008年成立了国家碳捕集中心,投入大量资金用于CCUS技术研发和规模化应用,并通过45Q投资税收抵免政策等方式积极部署CCUS。欧盟2009年颁布了世界上第一部关于CO₂地质封存的法规,2011年组建了碳捕集封存设施网络,通过创新基金支持CCUS项目发展。虽然世界各国都在积极推进CCUS技术研发,但距离CCUS大规模工业应用还存在一定差距。

1.2 中国高度重视CCUS技术研发,积极布局产业发展

作为我国可以大规模推广应用的一项减排技术,CCUS是保障我国实现“双碳”目标的一项重要手段。当前,我国通过构建CCUS技术攻关、工程示范、产业推广三阶递进模式,已初步形成政策引导、市场驱动、全产业链协同创新的工作格局,实现多技术路线并行迭代示范、全链条项目集群梯度推进的有序部署,为发展中国家构建自主可控的碳移除技术范式提供了中国方案。在CCUS示范方面,华中科技大学于2015年建成35MW富氧燃烧工业示范装置,是目前国内规模最大的富氧燃烧燃煤碳捕集示范系统^[6-9]。2022年,我国首个百万吨级CCUS项目——齐鲁石化-胜利油田项目正式投产运行,这是目前国内最大的CCUS全产业链示范基地和标杆工程,对我国推进CCUS规模化发展具有重大示范效应。国家能源集团于2023年建成并投运

了泰州电厂 CCUS 项目, 每年可捕集 50 万 t CO₂, 成为目前亚洲最大的煤电厂 CCUS 项目^[10]。目前华能陇东能源基地正在建设煤电百万吨级 CCUS 全流程示范工程, 每年预期可捕集并封存 CO₂ 超过 150 万 t, 该工程建成后将成为世界规模最大的燃煤电厂碳捕集示范工程^[11]。

随着 CCUS 技术的进步和示范项目的推进, 低成本、低能耗的新一代捕集技术呈现快速发展态势, 正由中试逐渐向工业示范过渡, CCUS 技术新思路不断涌现并得到验证^[12-16]。CCUS 示范项目正逐步从单一环节的技术应用过渡到全流程多环节的综合性集成应用, 示范规模持续扩大、应用场景明显增多^[17]。随着 CO₂ 利用技术种类的增加, CO₂ 工业应用逐渐形成产业新业态^[18-20], CCUS 技术与社会经济发展的联系越来越紧密。

中国 CCUS 示范工程建设进入规模化布局新阶段, 覆盖领域与项目集群同步扩展, 更多行业和领域开展 CCUS 技术应用, 推动能耗成本持续下降。

据《中国 CCUS 年度报告(2023)》统计^[21], 截至 2022 年底, 中国已投运和规划建设中的 CCUS 示范项目接近百个, 其中已投运项目超过半数, 具备 CO₂ 捕集能力约 400 万 t/a、注入能力约 200 万 t/a, 分别较 2021 年提升约 33%、65%。

1.3 标准引领 CCUS 科技创新, 推动 CCUS 产业蓬勃发展

为推动全球 CCS/CCUS 标准化布局, 国际标准化组织(ISO)于 2011 年 11 月正式成立了碳捕集、运输与地质封存技术委员会(ISO/TC 265), 主要从事二氧化碳捕集、运输和地质储存(CCS)领域的设计、建设、运营、环境规划和管理、风险管理、量化、监测和验证, 以及相关活动的标准化工作。据不完全统计, 截至 2024 年 12 月已有 CCUS 相关 ISO 国际标准、我国国家标准、行业标准、地方标准及团体标准共计 110 项, 标准状态统计见表 1。ISO 国际标准和我国国家标准分门类统计情况见表 2、表 3。各类标准详细列表见表 4~表 8。

表 1 标准状态统计

Table 1 Standard status statistics

| 标准类别 | 国际标准 | 国家标准 | 行业标准 | 地方标准 | 团体标准 | 合计 |
|------|------|------|------|------|------|-----|
| 已颁 | 14 | 7 | 25 | 5 | 36 | 87 |
| 计划 | 6 | 16 | 0 | 1 | 0 | 23 |
| 合计 | 20 | 23 | 25 | 6 | 36 | 110 |

表 2 ISO 国际标准分门类统计

Table 2 ISO standards status statistics table in various professional categories

| 标准类别 | 基础通用 | 碳捕集 | 碳运输 | 碳利用 | 碳封存 | 交叉问题 | 量化与验证 | 合计 |
|------|------|-----|-----|-----|-----|------|-------|----|
| 已颁 | 1 | 4 | 2 | 2 | 2 | 3 | 1 | 15 |
| 计划 | 1 | 2 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 5 |
| 合计 | 2 | 6 | 2 | 3 | 3 | 3 | 1 | 20 |

表 3 我国国家标准分门类统计

Table 3 National standards status statistics table in various professional categories

| 标准类别 | 基础通用 | 碳捕集 | 碳运输 | 碳利用 | 碳封存 | 其他 | 合计 |
|------|------|-----|-----|-----|-----|----|----|
| 已颁 | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 | 0 | 7 |
| 计划 | 2 | 6 | 0 | 1 | 6 | 1 | 16 |
| 合计 | 4 | 7 | 1 | 3 | 7 | 1 | 23 |

2 标准支撑 CCUS 科技创新和产业发展存在的问题

CCUS 标准化工作是推动 CCUS 技术和产业发

展的基石, CCUS 标准体系的构建是动态描绘 CCUS 发展蓝图、系统规划 CCUS 标准研制、全面指导 CCUS 标准实施计划的关键环节。总体来看, 虽然近年来 CCUS 标准的数量呈现快速增长的趋

表 4 ISO 国际标准

Table 4 ISO international standards

| 序号 | 专业门类 | 标准编号 | 标准名称 | 状态 |
|----|-------|--------------------|---|----|
| 1 | 基础通用 | ISO 27917:2017 | Carbon dioxide capture, transportation and geological storage - Vocabulary - Cross cutting terms | 现行 |
| 2 | | ISO/AWI 27917 | Carbon dioxide capture, transportation and geological storage - Vocabulary - Cross cutting terms | 计划 |
| 3 | 碳捕集 | ISO/TR 27912:2016 | Carbon dioxide capture - Carbon dioxide capture systems, technologies and processes | 现行 |
| 4 | | ISO 27919-1:2018 | Carbon dioxide capture - Part 1: Performance evaluation methods for post-combustion CO ₂ capture integrated with a power plant | 现行 |
| 5 | | ISO 27919-2:2021 | Carbon dioxide capture — Part 2: Evaluation procedure to assure and maintain stable performance of post-combustion CO ₂ capture plant integrated with a power plant | 现行 |
| 6 | | ISO/TR 27922:2021 | Carbon dioxide capture — Overview of carbon dioxide capture technologies in the cement industry | 现行 |
| 7 | | ISO/DIS 27927 | Carbon dioxide capture, transportation and geological storage - Key performance parameters and characterization methods of absorption liquids for post-combustion CO ₂ capture | 计划 |
| 8 | | ISO/DIS 27928 | Carbon dioxide capture, transportation and geological storage - Performance evaluation methods for CO ₂ capture plants connected with CO ₂ intensive plants | 计划 |
| 9 | 碳运输 | ISO 27913:2024 | ISO 27913:2016 Carbon dioxide capture, transportation and geological storage - Pipeline transportation systems | 现行 |
| 10 | | ISO/ TR 27929:2024 | Transportation of CO ₂ by ship | 现行 |
| 11 | 碳利用 | ISO 27916:2019 | Carbon dioxide capture, transportation and geological storage - Carbon dioxide storage using enhanced oil recovery (CO ₂ -EOR) | 现行 |
| 12 | | ISO/AWI 27916 | Carbon dioxide capture, transportation and geological storage - Carbon dioxide storage using enhanced oil recovery (CO ₂ -EOR) | 计划 |
| 13 | | ISO/TR 27926:2024 | Carbon dioxide enhanced oil recovery (CO ₂ -EOR) - Transitioning from EOR to storage | 现行 |
| 14 | 碳封存 | ISO 27914:2017 | Carbon dioxide capture, transportation and geological storage - Geological storage | 现行 |
| 15 | | ISO/TR 27923:2022 | Carbon dioxide capture, transportation and geological storage - Injection operations, infrastructure and monitoring | 现行 |
| 16 | | ISO/ DIS 27914 | Carbon dioxide capture, transportation and geological storage - Geological storage | 计划 |
| 17 | | ISO/TR 27918:2018 | Lifecycle risk management for integrated CCS projects | 现行 |
| 18 | 交叉问题 | ISO/TR 27921:2020 | Carbon dioxide capture, transportation, and geological storage - Cross Cutting Issues - CO ₂ stream composition | 现行 |
| 19 | | ISO/TR 27925:2023 | Carbon dioxide capture, transportation and geological storage - Cross cutting issues - Flow assurance | 现行 |
| 20 | 量化与验证 | ISO/TR 27915:2017 | Carbon dioxide capture, transportation and geological storage - Quantification and verification | 现行 |

势，但现有标准依然难以支撑我国 CCUS 科技创新和产业发展。

2.1 CCUS 标准体系不完善，CCUS 产业发展难以协同

CCUS 产业链条较长，涵盖捕集、运输、利用与封存等多个环节，由于各环节对二氧化碳的技术参数和质量要求存在差异，导致整体协同难度较

大。此外，CCUS 全产业链涉及电力、钢铁、水泥、油气、化工、运输等多个行业^[22-24]，各行业在接口规范、安全要求等方面也不一致，因此需要通过适用、统一的标准来实现 CCUS 各环节及不同行业间的无缝衔接。标准体系不完善，会导致环节间上下游衔接不畅及不同行业间的标准冲突，从而影响 CCUS 项目的整体集成，阻碍 CCUS 产业链的协

表 5 国家标准 (中国)
Table 5 National standards in China

| 序号 | 专业门类 | 标准编号 | 标准名称 | 状态 |
|----|----------|-----------------|---|----|
| 1 | | 20232510-T-469 | 二氧化碳捕集、运输和地质封存—词汇—共性术语 | 计划 |
| 2 | 基础通用 | GB/T 31705—2015 | 气相色谱法本底大气二氧化碳和甲烷浓度在线观测方法 | 现行 |
| 3 | | 20232499-T-424 | 进入二氧化碳管道的介质质量要求 | 计划 |
| 4 | | GB/T 31709—2015 | 气相色谱法本底大气二氧化碳和甲烷浓度在线观测数据处理方法 | 现行 |
| 5 | | 20220811-T-524 | 火力发电厂烟气二氧化碳捕集系统能耗测定技术规范 | 计划 |
| 6 | | 20232496-T-424 | 二氧化碳捕集 燃烧后二氧化碳捕集系统通用要求 | 计划 |
| 7 | | 20232497-T-469 | 二氧化碳捕集 第1部分:电厂燃烧后CO ₂ 捕集性能评估方法 | 计划 |
| 8 | 碳捕集 | 20232492-T-424 | 二氧化碳捕集 第2部分:电厂燃烧后CO ₂ 捕集确保和维持稳定性能的评估程序 | 计划 |
| 9 | | 20232493-T-424 | 烟气二氧化碳捕集压缩装置运行与管理规范 | 计划 |
| 10 | | 20240753-T-605 | 冶金石灰窑中二氧化碳回收处置技术规范 | 计划 |
| 11 | | GB/T 51316—2018 | 烟气二氧化碳捕集纯化工程设计标准 | 现行 |
| 12 | 碳运输 | GB/T 42797—2023 | 二氧化碳捕集、输送和地质封存 管道输送系统 | 现行 |
| 13 | | GB/T 34250—2017 | 二氧化碳制甲醇安全技术规程 | 现行 |
| 14 | 碳利用 | GB/T 34236—2017 | 二氧化碳制甲醇技术导则 | 现行 |
| 15 | | 20232500-T-469 | 二氧化碳捕集、运输和地质封存—二氧化碳用于提高原油采收率 | 计划 |
| 16 | | 20220864-T-334 | 二氧化碳地质封存场地评价指标体系 | 计划 |
| 17 | | 20232501-T-469 | 二氧化碳捕集、运输和地质封存—地质封存 | 计划 |
| 18 | | 20231944-T-334 | 咸水层二氧化碳地质封存潜力分类 | 计划 |
| 19 | 碳封存 | 20232498-T-424 | 火电厂碳封存CO ₂ 检测方法 | 计划 |
| 20 | | GB/T 40543—2021 | 石油天然气工业高含CO ₂ 环境用套管、油管及井下工具的材料选择 | 现行 |
| 21 | | 20232494-T-424 | 海上CO ₂ 咸水层场地封存量评价 | 计划 |
| 22 | | 20232495-T-424 | 海上CO ₂ 咸水层封存场地适宜性评价方法 | 计划 |
| 23 | 量化、核查与监测 | 20220841-T-469 | 碳捕集、利用与封存 (CCUS) 项目温室气体减排量化和核查技术规范 | 计划 |

同运行和发展。

2.2 CCUS 关键标准缺失, CCUS 科技创新受到阻碍

CCUS 技术概念、术语等基础通用标准缺乏统一规范, 存在认识混淆, 不利于技术交流与合作。例如, CCUS 项目边界不清晰, 导致一些项目将不具有碳利用和碳封存效益的内容纳入, 影响产业发展的规范性。另外, 以碳捕集为例, 国内燃烧后捕集、富氧燃烧技术发展较为成熟, 已开展大规模工业示范, 但缺乏规范化的关键技术标准支撑, 进一步商业化落地困难。对于极具潜力的低能耗、低成本变革性捕集技术, 如化学链燃烧技术等, 仍处于技术放大与中试阶段, 缺乏能耗、能效、安全等引导性标准支撑, 技术创新驱动力不足, 研发投入有限, 技术发展较为滞后。

2.3 核算和管理标准缺乏, CCUS 配套政策缺乏规范指引

CCUS 的发展需要政策和财政金融的持续支持和大力投入, 与美国 45Q 修正案、加拿大碳税政策、英国差异化上网电价等国外政策相比, 我国的 CCUS 配套政策和财政金融支持需要进一步完善和系统化。当前, 《绿色低碳转型产业指导目录 (2024 年版)》等绿色金融相关政策文件明确支持 CCUS 技术和项目, 但由于 CCUS 项目量化核查覆盖环节不完整, 边界不明确, 方法不具体, 缺乏统一明确的核算标准, 成为 CCUS 项目获得政策和金融支持的重要障碍, 有关支持政策在技术、产业、资源的配置和部署方面不够精准而无法落实, 绿色金融机制难以有效发挥作用。

表6 行业标准(中国)

Table 6 Industry standards in China

| 序号 | 专业门类 | 标准编号 | 标准名称 |
|----|----------------|------------------|--|
| 1 | 碳捕集 | JB/T 12535—2015 | 燃煤烟气碳捕集装置调试规范 |
| 2 | | JB/T 12536—2015 | 燃煤烟气碳捕集装置运行规范 |
| 3 | | JB/T 12909—2016 | 燃煤烟气二氧化碳捕集装备 |
| 4 | | JB/T 12917—2016 | 液态二氧化碳往复泵 |
| 5 | 碳运输 | CB/T 4407—2015 | 液化二氧化碳运输船用储罐 |
| 6 | | SH/T 3202—2018 | 二氧化碳输送管道工程设计标准 |
| 7 | | SY/T 7619—2021 | 二氧化碳环境油管和套管防腐设计规程 |
| 8 | 碳利用 | SY/T 6565—2011 | 油气田注二氧化碳安全规程 |
| 9 | | NB/T 10056—2018 | 低透气性煤层穿层钻孔液态二氧化碳相变致裂工艺技术要求 |
| 10 | | SY/T 7454—2019 | 砂岩油田二氧化碳驱油藏工程方案编制技术规范 |
| 11 | | SY/T 6565—2018 | 石油天然气开发注二氧化碳安全规范 |
| 12 | | YB/T 4891.1—2021 | 钢铁企业二氧化碳利用技术规范 第1部分:用于转炉底吹 |
| 13 | | YB/T 4891.3—2021 | 钢铁企业二氧化碳利用技术规范 第3部分:用于电弧炉炼钢 |
| 14 | | YB/T 4891.2—2021 | 钢铁企业二氧化碳利用技术规范 第2部分:用于转炉顶吹 |
| 15 | | SY/T 7679—2023 | 二氧化碳驱油田集输管道施工技术规范 |
| 16 | | SY/T 7678—2023 | 二氧化碳驱油田站内工艺管道施工技术规范 |
| 17 | | 碳封存 | JB/T 13413—2018 |
| 18 | SY/T 6565—2018 | | 石油天然气开发注二氧化碳安全规范 |
| 19 | SY/T 7440—2019 | | CO ₂ 驱油田注入及采出系统设计规范 |
| 20 | SY/T 7785—2024 | | 二氧化碳地质封存工程环境风险控制要求 |
| 21 | 量化、核查与监测 | HG/T 4487—2012 | 合成氨生产企业二氧化碳(CO ₂)排放量计算方法 |
| 22 | | DL/T 1328—2014 | 燃煤电厂二氧化碳排放统计指标体系 |
| 23 | | HG/T 4820—2015 | 化工企业水网络系统二氧化碳(CO ₂)排放量计算方法 |
| 24 | | SY/T 7297—2016 | 石油天然气开采企业二氧化碳排放计算方法 |
| 25 | | DL/T 2376—2021 | 火电厂烟气二氧化碳排放连续监测技术规范 |

表7 地方标准(中国)

Table 7 Local standards in China

| 序号 | 专业门类 | 标准编号 | 标准名称 | 标准状态 | 备注 |
|----|----------|-------------------|---------------------------------|------|-----|
| 1 | 碳利用 | DB63/T 2 282—2024 | 煤制甲醇二氧化碳尾气生产纯碱技术规程 | 现行 | 青海 |
| 2 | 碳封存 | DB61/T 1 501—2021 | 液态CO ₂ 驱油与封存注入地面操作规程 | 现行 | 陕西 |
| 3 | | DB23/T 3 535—2023 | 秸秆碳化碳封存技术规范 | 现行 | 黑龙江 |
| 4 | | DB61/T 1858—2024 | 二氧化碳驱埋地钢质管道外腐蚀控制技术规范 | 现行 | 陕西 |
| 5 | 量化、核查与监测 | / | 二氧化碳捕集、利用与封存项目碳减排量核算技术规范 | 计划 | 新疆 |
| 6 | | DB37/T 4 548—2022 | 二氧化碳驱油封存项目碳减排量核算技术规范 | 现行 | 山东 |

表 8 团体标准 (中国)

Table 8 Group standards in China

| 序号 | 专业门类 | 标准编号 | 标准名称 |
|----|----------|----------------------|-----------------------------------|
| 1 | 基础通用 | T/CSES 41—2021 | 二氧化碳捕集利用与封存术语 |
| 2 | | T/CIECCPA 011—2022 | 低压低浓度二氧化碳捕集技术工艺包编制规范 |
| 3 | | T/CIECCPA 012—2022 | 燃煤烟气二氧化碳捕集塔 |
| 4 | | T/CIECCPA 013—2022 | 二氧化碳捕集系统用气溶胶捕集装置 |
| 5 | | T/CIECCPA 014—2022 | 钢铁石灰窑烟气二氧化碳捕集装备 |
| 6 | | T/CIECCPA 018—2022 | 烟气二氧化碳捕集工程可行性研究报告编制技术规范 |
| 7 | 碳捕集 | T/CIECCPA 027—2023 | 烟气二氧化碳化学吸收法捕集预处理装置 |
| 8 | | T/CIECCPA 023—2023 | 循环流化床吸附法捕集二氧化碳装置 |
| 9 | | T/SHJNXH 0014—2024 | 火力发电厂烟气二氧化碳捕集系统(化学吸收法)能效评价方法 |
| 10 | | T/CIET 539—2024 | 二氧化碳捕集技术规范 |
| 11 | | T/CIECCPA 042—2024 | 二氧化碳捕集吸收溶液测试方法 |
| 12 | | T/CIECCPA 043—2024 | 工业烟气二氧化碳捕集用换热器 |
| 13 | | T/CIECCPA 041.1—2024 | 二氧化碳捕集成本核算方法 第1部分: 溶剂吸收法 |
| 14 | 碳运输 | T/CSPSTC 104—2022 | 二氧化碳管道站场工艺管道施工及验收规范 |
| 15 | | T/CPCIF 0115—2021 | 工业排放气 二氧化碳回收技术导则 |
| 16 | 碳利用 | T/CIECCPA 054—2023 | 工业固废矿化固定二氧化碳制备轻质碳酸钙工艺与设备 |
| 17 | | T/CITS 131—2024 | 风光氢储氨醇一体化 二氧化碳制绿色甲醇技术导则 |
| 18 | | T/XECP 400—2024 | 注二氧化碳井注入剖面测井作业规程 |
| 19 | | T/CSES 71—2022 | 二氧化碳地质利用与封存项目泄漏风险评价规范 |
| 20 | 碳封存 | T/CIET 571—2024 | 二氧化碳封存技术要求 |
| 21 | | T/GSC 006—2024 | 二氧化碳陆地封存工程选址指南 |
| 22 | | T/CCS 054—2023 | 碳捕集利用与封存示范项目数据管理规范 |
| 23 | | T/CCS 053—2023 | 碳捕集利用与封存全流程工程项目风险评估指南 |
| 24 | 系统和交叉问题 | T/CCS 052—2023 | 碳捕集利用与封存工程项目碳排放源筛选指南 |
| 25 | | T/CCS 055—2023 | 燃煤电厂碳捕集-驱替采油工程项目全流程成本核算指南 |
| 26 | | T/CIECCPA 020—2024 | 二氧化碳捕集、运输与封存工艺技术规范 |
| 27 | | T/TMAC 086—2024 | 火力发电厂 二氧化碳捕集、运输与封存技术要求 |
| 28 | | T/CAS 454—2020 | 火力发电企业二氧化碳排放在线监测技术要求 |
| 29 | | T/ZGTS 003—2021 | 炭素制品制造二氧化碳排放量计算方法 |
| 30 | | T/HBJN 0002.1—2022 | 固定污染源烟气中二氧化碳的监测指南第1部分:钢铁生产企业 |
| 31 | | T/CAEPI 47—2022 | 固定污染源二氧化碳排放连续监测系统技术要求 |
| 32 | 量化、核查与监测 | T/CAEPI 48—2022 | 固定污染源二氧化碳排放连续监测技术规范 |
| 33 | | T/CIECCPA 010—2022 | 固定污染源二氧化碳排放连续监测技术规范 |
| 34 | | T/CNIA 0221—2023 | 铝冶炼企业烟气治理过程二氧化碳排放量计算方法 |
| 35 | | T/CCS 056—2023 | 燃煤电厂掺烧生物质加装碳捕集与封存技术工程项目温室气体排放评估指南 |
| 36 | | T/CSMT HJ003—2024 | 水泥生产企业二氧化碳排放量在线监测计量技术规范 |

3 CCUS 标准体系构建

在我国 CCUS 快速发展的阶段, 必须精准定位

CCUS 技术和产业发展中的关键问题, 将 CCUS 中的关键技术、关键环节、关键政策与“标准化”进行有机融合, 加快完善 CCUS 标准体系的建设, 通

过关键标准优化 CCUS 创新路径、降低 CCUS 技术成本、缩短 CCUS 发展周期,积极锻造 CCUS 科技创新和产业发展的竞争优势。

因此,针对 CCUS 科技创新与产业发展目前面临的新机遇和新挑战,结合 CCUS 技术所涉及技术内容的内在特征和具体特点,以及标准体系框架的传承性,构建 CCUS 标准体系,以期为 CCUS 的标准化建设提供参考。

3.1 基本原则

CCUS 标准体系,是将 CCUS 技术相关的标准进行系统收集,并按照其内部联系进行划分,最终形成的合理有机整体。根据不同场景下 CCUS 相关标准的需求,确保标准体系的分类科学、层级清晰、结构合理,能够完整清晰地展现 CCUS 行业发展的实际情况和未来预期规划,在编制过程中遵循科学性原则、全面性原则和应用性原则。

科学性原则。科学性是标准化的基本原则。在 CCUS 标准体系的编制过程中,进行大量的国内外文献查阅工作,多次调研标准化主管部门、企业、技术机构、行业团体、科研机构等,了解各方对 CCUS 标准的需求,以确保标准体系的分类科学、层级清晰、结构合理。同时,由于标准体系的内容取决于 CCUS 技术和产业发展的实际情况,而

CCUS 技术也处在不断拓展和发展中,因此在编制过程中亦充分考虑了体系的可分解性和可拓展性。

全面性原则。全面性是标准体系发挥系统效应的重要保障。CCUS 标准体系通过模块化架构对碳捕集、运输、利用、封存等环节的技术规范进行系统化整合,始终保证标准协同一致、互相配合,构成全面而统一的整体。标准收录范围主要包括 ISO 国际标准、国家标准、行业标准、地方标准等文件,并充分考虑整个标准体系范围和文本数量的全面性。

应用性原则。应用性是标准体系的构建起点和归宿。为满足国民经济建设和 CCUS 标准化工作实际需求,以问题为导向,有目的、有计划地对标准化过程及成果信息进行收集、加工、分析、研究等一系列活动,构建面向应用的 CCUS 标准体系,满足标准化主管部门、企业、技术机构、行业团体、科研机构等多方需求。

3.2 标准体系框架构建

CCUS 技术体系包括二氧化碳捕集、运输、利用及地质封存 4 个方面,如图 1^[21]所示。二氧化碳捕集技术包括传统的燃烧后化学吸收和燃烧前物理吸收等第一代技术,基于新型吸收剂的化学吸收和化学吸附的第二代技术以及化学链燃烧等第 3 代变

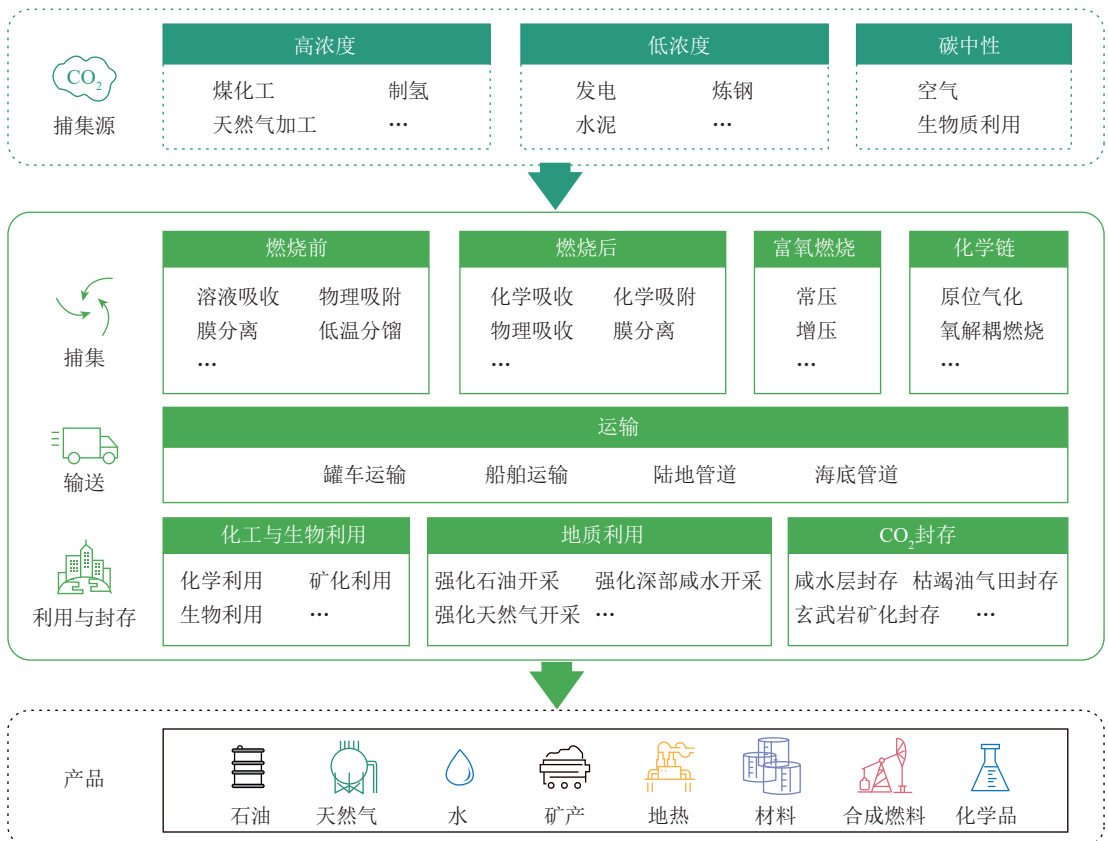


图 1 CCUS 技术体系^[21]

Fig. 1 CCUS technical system^[21]

革性捕集技术。二氧化碳运输技术包括传统的罐车和船舶运输以及现在的陆上管道和海底管道运输。二氧化碳利用技术包括 CO₂ 的地质利用、化学利用和生物利用。CO₂ 封存技术按照封存介质划分,包括陆相/海相咸水层封存、枯竭油气田封存等。

根据《关于加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系的指导意见》《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》等关于 CCUS 技术研发和产业发展的工作部署,按照《国家标准化发展纲要》《建立健全碳达峰

碳中和标准计量体系实施方案》等 CCUS 标准化相关任务要求,基于 CCUS 技术当前发展面临的战略形势要求,分析技术及产业发展的方向和路径,遵循科学性原则、全面性原则、应用性原则,依照国家、行业对标准体系的建设要求,按照《标准体系构建原则和要求》(GB/T 13016—2018),结合 CCUS 技术所涉及技术内容的内在特征和具体特点,以及标准体系框架的传承性,经论证和比选,将 CCUS 标准体系框架划分为 7 个子体系、13 个方向和 7 个功能序列。标准体系框架结构图如图 2 所示。

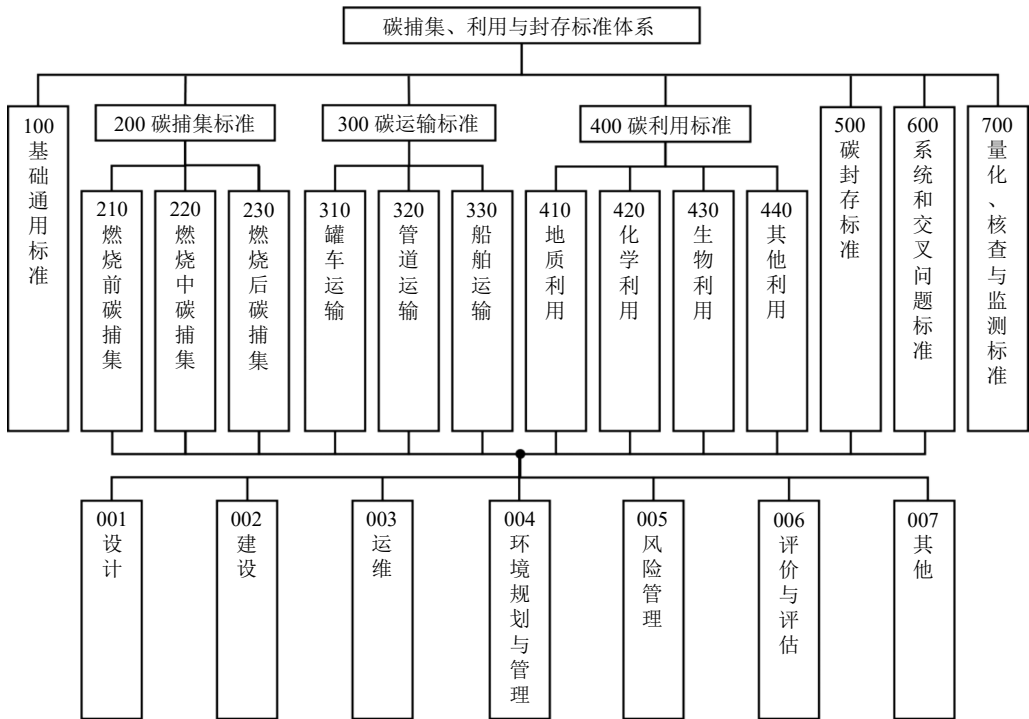


图 2 碳捕集利用与封存 (CCUS) 技术标准体系结构框图

Fig. 2 Carbon capture, Utilization and Storage (CCUS) standard architecture block diagram

3.3 CCUS 各级子体系构建

CCUS 标准体系的 7 个子体系分别为 100 基础通用标准、200 碳捕集标准、300 碳运输标准、400 碳利用标准、500 碳封存标准、600 系统和交叉问题标准和 700 量化、核查与监测标准。

100 基础通用标准,包含 CCUS 标准体系中各个子体系所涉及的术语、分类、标识等通用性标准。

200 碳捕集标准,包含 210 燃烧前碳捕集、220 燃烧中碳捕集、230 燃烧后碳捕集。

300 碳运输标准,包含 310 罐车运输、320 管道运输、330 船舶运输。

400 碳利用标准,包含 410 地质利用、420 化学利用、430 生物利用、440 其他利用。

500 碳封存标准,包含将捕集的 CO₂ 实现地下

(包括海洋和陆地)长期地质封存的过程中涉及的所有标准。

600 系统和交叉问题标准,包含 CCUS 项目及所有相关交叉问题涉及的所有标准。

700 量化、核查与监测标准,包含 CCUS 标准体系中各个专业门类及子门类所涉及的 CO₂ 的量化、核查和监测相关标准。

CCUS 标准体系设置的功能序列是为实现上述专业目标所开展的相关工作,反映了 CCUS 技术所具有的共性特征,包括设计、建设、运行、环境规划与管理、风险管理、评价及其他等 7 个功能序列。标准体系框架结构图中的各子体系及内容说明见表 9~表 13。

依据构建的 CCUS 标准体系,结合 CCUS 技术和产业发展趋势和标准缺失,初步拟定了未来需要

表9 CCUS标准体系子体系

Table 9 CCUS standard system specialty

| 体系编号 | 标准类别 | 标准内容说明 |
|------|------------|---|
| 100 | 基础通用标准 | CCUS标准体系中各个子体系及子门类所涉及的术语、分类、标识等通用性标准 |
| 200 | 碳捕集标准 | 碳捕集相关标准。碳捕集是指将 CO ₂ 从工业生产、能源利用或大气中分离出来的过程。主要包括燃烧前碳捕集, 燃烧中碳捕集, 燃烧后碳捕集 |
| 300 | 碳运输标准 | 碳运输相关标准。碳运输指将捕集的 CO ₂ 运送到可利用或封存场地的过程, 主要包括罐车、管道、船舶运输等方式 |
| 400 | 碳利用标准 | 碳利用相关标准。碳利用是指通过工程技术手段将捕集的 CO ₂ 实现资源化利用的过程。主要包括地质利用、化工利用和生物利用等 |
| 500 | 碳封存标准 | 碳封存相关标准。碳封存是指将 CO ₂ 注入有储盖条件的陆地或海洋地下空间, 实现 CO ₂ 与大气长期隔离的过程 |
| 600 | 系统和交叉问题标准 | CCUS 项目及所有相关交叉问题涉及的所有标准。交叉问题是指 CCUS 项目实施过程中对碳捕集、运输、利用、封存存在影响的其他问题 |
| 700 | 量化、核查与监测标准 | 量化与验证是指 CCUS 项目实际减排量的量化、核算与验证, 为运行中的 CCUS 项目提供过程碳排放核算、量化和证实方法 |

表10 200碳捕集标准子体系

Table 10 System 200 carbon capture specialty subsystem

| 体系编号 | 标准类别 | 标准内容说明 |
|------|--------|---|
| 210 | 燃烧前碳捕集 | 燃烧前碳捕集是指煤经过气化装置生成由 CO 和 H ₂ 组成的合成气, 随后 CO 在变换装置中与蒸汽反应生成 CO ₂ 和 H ₂ , 再通过物理或化学的分离工艺将 CO ₂ 分离, 进一步压缩储存, 富氢燃料进入燃气轮机 |
| 220 | 燃烧中碳捕集 | 燃烧中碳捕集是指在燃料燃烧过程中直接捕集 CO ₂ 的技术, 包含富氧燃烧技术和化学链技术, 其核心是通过高纯度氧气或氧载体替代空气作为助燃剂, 使燃料在富氧环境中燃烧, 生成以 CO ₂ 和水蒸气为主的高浓度烟气, 从而大幅降低后续 CO ₂ 分离与封存的能耗和成本 |
| 230 | 燃烧后碳捕集 | 燃烧后碳捕集是指利用化学或物理方法从燃烧排放的烟气中捕集 CO ₂ |

表11 300碳运输标准子体系

Table 11 System 300 carbon transport specialty subsystem

| 体系编号 | 标准类别 | 标准内容说明 |
|------|------|--|
| 310 | 罐车运输 | 罐车运输用于少量 CO ₂ 短距离运输, 较大的应用潜力在于将 CO ₂ 配送到终端市场 |
| 320 | 管道运输 | 管道运输是大量运输 CO ₂ 最主要的选择, 包括压缩气态、液态、超临界态运输 |
| 330 | 船舶运输 | 船舶运输是长距离运输的一种重要选择, 当前主要应用于液态 CO ₂ 的运输 |

表12 400碳利用标准子体系

Table 12 System 400 carbon utilization specialty subsystem

| 体系编号 | 标准类别 | 标准内容说明 |
|------|------|--|
| 410 | 地质利用 | 地质利用是将 CO ₂ 注入地质构造层, 通过地质封存技术实现强化能源生产和促进资源开采, 如提高油气资源采收率; 开发深层卤水资源提锂、铀矿浸出等战略性矿产资源 |
| 420 | 化学利用 | 化学利用是将 CO ₂ 作为替代碳源来合成为如甲醇、合成气、C ₂ 烃、碳酸二甲酯等有用化学品 |
| 430 | 生物利用 | 生物利用是利用自然界中植物或微生物的自然光合作用过程, 设计构建出全新的人工光合体系与路径, 从而将 CO ₂ 更加高效地转化为合成化学品和农业产品 |
| 440 | 其他利用 | 其他利用是将 CO ₂ 作为产品直接加以利用, 如用于保护气、吹扫气、气体肥料等 |

表 13 功能序列

Table 13 Functional sequence

| 体系编号 | 功能序列 | 包括范围及解释说明 |
|------|---------|-------------------------------|
| 001 | 设计 | 方案设计、初步设计、技术设计、施工图设计等 |
| 002 | 建设 | 土建、设备安装、调试、验收等 |
| 003 | 运行 | 工程调度、运行操作、检修维护、报废等 |
| 004 | 环境规划与管理 | 环境管理、环境规划、环境监测、环境影响评价等 |
| 005 | 风险管理 | 风险识别、风险估测、风险评价、风险控制和风险管理效果评价等 |
| 006 | 评价 | 经济、社会、环境、生态影响评价等 |
| 007 | 其他 | 除了以上各功能序列以外的内容 |

编制的 CCUS 相关标准共计 143 项, 包括碳捕集标准 74 项、碳运输标准 16 项、碳利用标准 16 项、碳封存标准 26 项以及其他标准 11 项。

4 结 论

“双碳”目标对中国 CCUS 技术的创新升级提出了更高标准。虽然中国在该领域进展显著, 但现阶段仍存在若干发展瓶颈: ①技术应用成本偏高且经济效益尚未显现; ②成熟的商业模式尚未形成; ③政策激励与监管机制有待完善; ④碳排放源与封存的地理适配性问题亟待解决。这些现实困境表明, 我国 CCUS 技术与实现全面商业化应用仍存在一定差距。针对 CCUS 科技创新与产业发展目前面临的新机遇和新挑战, 指出目前标准支撑 CCUS 发展存在基础标准缺失, CCUS 项目边界不清、产业发展不规范; 技术标准体系欠缺, 带来科技创新链条的梗阻; 管理标准缺乏, CCUS 配套政策缺乏规范指引的问题。结合 CCUS 技术所涉及技术内容的内在特征和具体特点, 以及标准体系框架的传承性, 构建了 CCUS 标准体系, 为 CCUS 相关标准建设提供参考。提出积极布局 CCUS 标准体系、加快研制 CCUS 关键技术标准、推动 CCUS 量化标准建设、加强 CCUS 管理标准建设作为标准支撑 CCUS 科技创新和产业发展的重点建设方向。

1) 积极布局 CCUS 标准体系, 促进 CCUS 全产业链协同发展。加快成立专门的 CCUS 标准化技术委员会, 支撑多行业 CCUS 应用方案适用性标准的制定, 促进电力、钢铁、水泥等典型行业的 CCUS 技术方案应用与项目实施。加快 CCUS 碳减排方法学开发与试点, 推进 CCUS 量化核查标准制定, 形成规范化的 CCUS 项目量化核查方法, 支撑 CCUS 项目纳入我国自愿减排机制。

2) 加快研制 CCUS 关键技术标准, 协同推动

科技创新。统筹制订 CCUS 技术发展规划, 集中突破核心关键技术瓶颈, 布局重大科技专项同步进行关键技术研发与示范、标准研究与法律法规制定, 在科技项目或示范工程规划的同期进行标准规划布局, 按照“按需部署, 急用优先”的原则, 加快研制成熟碳捕集技术规范、指南、评价等系列标准, 推动成熟 CCUS 技术落地应用。制定 CCUS 基础通用标准以及能耗、能效、安全等引导性标准, 引领低成本、低能耗的变革性 CCUS 技术快速发展。抢占 CCUS 技术高地, 促进我国在 CCUS 技术方面的全面领先。

3) 推动 CCUS 量化标准建设, 服务金融支持政策。建立健全 CCUS 碳减排计量标准体系, 服务国家碳排放核算、碳交易体系的建立和完善。推动建立国际互认的碳计量基准、碳监测及效果评估机制, 健全覆盖技术、标准、产业等要素的金融支持体系, 强化对 CCUS 示范应用、技术改造、设备更新的金融服务供给, 加大对科研院所和企业研发的金融扶持力度。

4) 加强 CCUS 管理标准建设, 支撑法规和政策建设。建立政府引导、企业主体、产学研联动的标准化工作机制, 统筹推进 CCUS 管理标准化布局和建设, 促进法规、政策与标准的衔接和协同发展。引导政府部门在法规制定及政策设计过程中, 强化 CCUS 标准在 CCUS 技术研发和产业发展中的支撑功能, 着力构建以 CCUS 标准体系为基础的 CCUS 全产业链协同发展框架, 将其作为实施产业规划、优化行业匹配、强化质量监管的重要决策依据。

参考文献 (References):

- [1] CHEN S Y, LIU J F, ZHANG Q, et al. A critical review on deployment planning and risk analysis of carbon capture, utilization, and storage (CCUS) toward carbon neutrality[J]. *Renewable and*

- Sustainable Energy Reviews*, 2022, 167: 112537.
- [2] 魏一鸣, 康佳宁, 刘兰翠, 等. 实现碳中和目标的 CCUS 产业发展展望 [R]. 北京: 北京理工大学能源与环境政策研究中心, 2024.
- [3] 彭雪婷, 吕昊东, 张贤. IPCC AR6 报告解读: 全球碳捕集利用与封存(CCUS)技术发展评估 [J]. 气候变化研究进展, 2022, 18(5): 580-590.
- PENG Xueting, LYU Haodong, ZHANG Xian. Interpretation of IPCC AR6 report on carbon capture, utilization and storage(CCUS) technology development[J]. *Climate Change Research*, 2022, 18(5): 580-590.
- [4] UNFCCC. Outcome of the first global stocktake (Advance unedited version) [R]. Bonn: UNFCCC, 2023.
- [5] Global CCS Institute. Global status of CCS 2023 report[R]. Melbourne: Global CCS Institute, 2023.
- [6] 郭军军, 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.
- [7] 郑楚光, 赵永椿, 郭欣. 中国富氧燃烧技术研发进展 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(23): 3856-3864.
- ZHENG Chuguang, ZHAO Yongchun, GUO Xin. Research and development of oxy-fuel combustion in China[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(23): 3856-3864.
- [8] ZHENG C G, LIU Z H, XIANG J, et al. Fundamental and technical challenges for a compatible design scheme of oxyfuel combustion technology[J]. *Engineering*, 2015, 1(1): 139-149.
- [9] ZHENG C G, LIU Z H. Oxy-fuel combustion: Fundamentals, theory and practice[M]. .
- [10] 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.
- [11] 顾永正, 王天堃, 黄艳, 等. 燃煤电厂二氧化碳捕集利用与封存技术及工程应用 [J]. 洁净煤技术, 2023, 29(4): 98-108.
- GU Yongzheng, WANG Tiankun, HUANG Yan, et al. Carbon dioxide capture, utilization and storage technology and engineering application for coal-fired power plants[J]. *Clean Coal Technology*, 2023, 29(4): 98-108.
- [12] CHEN X Y, ZOU G S, YUAN Y L, et al. Flame spray pyrolysis synthesized Ni-doped Fe/Ce oxygen carriers for chemical looping dry reforming of methane[J]. *Fuel*, 2023, 343: 127913.
- [13] LI L L, WANG Y N, BU H F, et al. Semi-continuous operation of chemical looping combustion of coal using a low-cost composite oxygen carrier[J]. *Energy & Fuels*, 2022, 36(17): 9450-9459.
- [14] 王小雨, 赵海波. 化学链氧解耦燃煤发电系统过程模拟 [J]. 洁净煤技术, 2024, 30(10): 49-57.
- WANG Xiaoyu, ZHAO Haibo. Process simulation on chemical looping oxygen uncoupling coal-fired power generation system[J]. *Clean Coal Technology*, 2024, 30(10): 49-57.
- [15] 王长清, 谭煜玄, 林明玮, 等. 钙循环捕集 CO₂ 小试和中试台架研究进展 [J]. 洁净煤技术, 2024, 30(8): 170-184.
- WANG Changqing, TAN Yuyao, LIN Mingwei, et al. Review of bench and pilot - scale testing for calcium looping capture of carbon dioxide[J]. *Clean Coal Technology*, 2024, 30(8): 170-184.
- [16] LUO T, LUO C, SHI Z W, et al. Optimization of Sol-gel combustion synthesis for calcium looping CO₂ sorbents, part I: Effects of Sol-gel preparation and combustion conditions[J]. *Separation and Purification Technology*, 2022, 292: 121081.
- [17] 蔡斌, 秦恺承, 杨明煜, 等. 考虑煤电 CCUS 规模化发展的电力转型路径优化 [J/OL]. 洁净煤技术, 1-10. [2025-03-04]. <https://doi.org/10.13226/j.issn.1006-6772.CN23102801>.
- CAI Bin, QIN Kaicheng, YANG Mingyu, et al. Optimization of the power transition pathway considering the large-scale development of coal power with CCUS [J/OL]. *Clean Coal Technology*, 1-10[2025-03-04]. <https://doi.org/10.13226/j.issn.1006-6772.CN23102801>.
- [18] 李文秀. 基于固废电石渣 CO₂ 间接矿化制备轻质碳酸钙机制研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2023.
- LI Wenxiu. Study on preparation mechanism of light calcium carbonate based on indirect mineralization of solid waste carbide slag CO₂[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2023.
- [19] 李双德, 李振荣, 董笑, 等. 化工冶金跨行业耦合二氧化碳循环利用技术 [J]. 洁净煤技术. 2024(30): 171-178.
- LI Shuangde, LI Zhenrong, DONG Xiao, et al. Cross-industry coupling carbon dioxide recycling technology in chemical and metallurgy [J]. *Clean Coal Technology*, 2024(30): 171-178.
- [20] 刘硕, 张志璐, 高志豪, 等. 二氧化碳利用产业发展技术路线研究: 以宁夏为例 [J/OL]. 洁净煤技术, 1-16. [2025-03-04]. <https://doi.org/10.13226/j.issn.1006-6772.CN23090101>.
- LIU Shuo, ZHANG Zhilu, GAO Zhihao, et al. Research on the technological roadmap for the development of carbon utilization industries: A case study of Ningxia [J/OL]. *Clean Coal Technology*, 1-16[2025-03-04]. <https://doi.org/10.13226/j.issn.1006-6772.CN23090101>.
- [21] 张贤, 杨晓亮, 鲁玺, 等. 中国二氧化碳捕集利用与封存(CCUS)年度报告(2023) [R]. 北京: 中国 21 世纪议程管理中心, 全球碳捕集与封存研究院, 清华大学. 2023.
- [22] LARIBI S, DUBOIS L, DUPREZ M E, et al. Simulation of the Sour-Compression Unit (SCU) process for CO₂ purification applied to flue gases coming from oxy-combustion cement industries[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2019, 121: 523-539.
- [23] 胡其会, 李玉星, 张建, 等. “双碳” 战略下中国 CCUS 技术现状及发展建议 [J]. 油气储运, 2022, 41(4): 361-371.
- HU Qihui, LI Yuxing, ZHANG Jian, et al. Current status and development suggestions of CCUS technology in China under the “Double Carbon” strategy[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2022, 41(4): 361-371.
- [24] GOKUL S S, ELDA R A, ANDREA R, et al. Is carbon capture and storage (CCS) really so expensive? an analysis of cascading costs and CO₂ emissions reduction of industrial CCS implementation on the construction of a bridge[J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 57(6): 2595-2601.