

中国 CCS /CCUS 发展瓶颈与应对策略

刘贵洲¹ 方瑞瑞² 窦立荣³ 甘先翔² 冯连勇²

1. 中国石油国际勘探开发有限公司, 北京 100034;
2. 中国石油大学(北京)经济管理学院, 北京 102249;
3. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

摘要: 碳捕集与封存 (Carbon Capture and Storage, CCS) 或碳捕集、利用与封存 (Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS) 能够与传统能源耦合进行深度减碳, 是碳中和重要的技术选择和推手。由于中国能源结构的煤基特点, 发展 CCS /CCUS 是中国能源转型的必经路径。目前中国 CCS /CCUS 发展处于起步阶段, 存在诸多短板有待补齐: 技术成熟度、集成度低, 顶层设计缺失、宏观规划不足, 市场机制、政策激励与基础设施等商业化基础薄弱, 大型项目商业模式仍不明确, 法律框架与标准化空白, 这些因素共同制约着 CCS /CCUS 的规模化发展。为此建议: 国家层面上要把握能源转型的窗口期, 做好政策规划与顶层设计, 出台系统的政策体系激励产业发展, 健全法律框架和技术标准, 在管道布局上要未雨绸缪, 技术创新要明确重点, 丰富、完善碳交易市场与碳税机制, 合力构筑有助于 CCS /CCUS 快速发展的商业环境。

关键词: CCS; CCUS; 商业化; 应对策略

DOI: 10.3969 /j. issn. 1006-5539. 2024. 05. 002

Bottlenecks and response strategies for the development of CCS /CCUS in China

LIU Guizhou¹, FANG Ruirui², DOU Lirong³, GAN Xianxiang², FENG Lianyong²

1. China National Oil and Gas Exploration and Development Company Ltd., Beijing, 100034, China;
2. School of Economics and Management, China University of Petroleum-Beijing, Beijing, 102249, China;
3. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing, 100083, China

Abstract: CCS /CCUS can be coupled with traditional energy sources for deep carbon emission reduction, and is an important technology choice and driver for carbon neutrality. Due to the coal-based nature of China's energy structure, the development of CCS /CCUS is a necessary path for China's energy transformation. At present, the development of CCS /CCUS in China is in its infancy, and there are many shortcomings that need addressing: low technology maturity and integration, lack of top-level design, insufficient macro planning, weak foundation for commercialization including market mechanism, policy incentives and infrastructure, unclear business models for major projects and gaps in legal framework and standardization—all of which collectively restrict the large-scale development of CCS /CCUS. To this end,

收稿日期: 2024-08-01

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目“基于净能源与碳投入回报的 CO₂ 技术经济评价方法研究”(72274212)

作者简介: 刘贵洲(1969-), 男, 江西九江人, 正高级经济师, 硕士, 主要从事国际能源经济、企业战略和经营管理、碳中和与能源转型研究。E-mail: liuguizhou@cnpcint.com

通信作者: 窦立荣(1965-), 男, 江苏扬州人, 正高级工程师, 博士, 长期从事油气地质理论与勘探实践工作。E-mail: dllirong@petrochina.com.cn

it is suggested that at the national level, there is a need to seize the critical window of opportunity during the energy transformation, carry out comprehensive strategic planning and top-level design, introduce a systematic policy framework to stimulate industrial development, improve the legal framework and technical standards, prepare in advance for CO₂ pipeline layout, clarify the focus of technological innovation, enhance and refine the carbon trading market and carbon tax mechanism, and work together to build a business environment conducive to the rapid development of CCS/CCUS.

Keywords: CCS; CCUS; Commercialization; Response strategies

0 前言

碳捕集与封存 (Carbon Capture and Storage, CCS) 或碳捕集、利用与封存 (Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS) 被公认为是改善碳排放问题的重要技术选择^[1]。CO₂ 捕集技术首先起源于天然气纯度分离^[2]。20 世纪 60 年代, CO₂ 开始用于驱油提高油藏采收率 (Enhanced Oil Recovery, EOR)。中国和美国是 CO₂-EOR 最早的实践者。1963 年, 中国在大庆油田开展了 EOR 试验^[3]。1972 年, 首个商业规模的驱油项目在美国 Scurry Area Canyon Reef Operators (SACROC) 油田落地。CCS 最早于 1977 年由奥地利的 Marchetti C 提出, 他提议将 CO₂ 捕集并注入海洋或地质储层中^[4]。2005 年, 联合国政府间气候变化专门委员会 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 正式提出了 CCS 的定义: 从能源生产、工业过程中分离出 CO₂ 并将其运输到封存地点与大气隔绝的过程^[5]。此后, CCS 得到广泛关注并在多个国家得以推动。中国将 CCS 与能源利用 (Utilization) 环节相结合, 对 CCS 的概念进行了扩展, 提出了 CCUS 的概念^[6]。CCS/CCUS 的 CO₂ 不仅来自人类活动排放, 还可以来自大气^[7]。随着 CO₂ 地质利用、化工利用和生物利用方式的不断拓展, CCUS 的概念逐渐得到业内的广泛认可。目前国际上常将 CCUS 和 CCS 通用。现阶段中国 CCS/CCUS 发展仍处于起步阶段, 技术成熟度、经济性有较大的不确定性, 减排潜力难以被充分释放, 因而有必要从国家视角进行统筹规划, 促进 CCS/CCUS 发展。

1 发展 CCS/CCUS 是碳中和有效且必经的路径

1.1 实现减排目标

CCS/CCUS 是达到净零目标的关键技术, 它既能在关键部门直接减少排放, 又能取得负碳排放的效果。直接空气碳捕集与封存 (Direct Air Carbon Capture and Storage, DACCS) 通过使用风扇和过滤器提取、压缩空气中的 CO₂ 后再进行封存或利用。生物质能源碳捕集与封存 (Bio-Energy with Carbon Capture and Storage, BECCS) 是指捕集生物质燃烧、转化排放的 CO₂ 进行封

存或利用。DACCS 和 BECCS 可以直接去除已存在于大气中的 CO₂, 为碳中和前夕无法进行减排的场景提供最后的技术保障。IPCC 在《全球升温 1.5 °C 特别报告》中指出, 2030 年全球要通过 CCS/CCUS 减排约 $1 \times 10^8 \sim 4 \times 10^8$ t CO₂/a, 2050 年预计达到 $30 \times 10^8 \sim 68 \times 10^8$ t CO₂/a^[8]。国际能源署 (International Energy Agency, IEA) 在《全球能源部门 2050 年净零排放路线图》中预测, 全球 CCS/CCUS 减排潜力在 2030 年预计达到 16×10^8 t CO₂/a, 2035 年约 40×10^8 t CO₂/a, 2050 年将达到 76×10^8 t CO₂/a, 届时约 50% 的化石燃料将与 CCS/CCUS 结合使用, 从化石燃料中捕获的约 35×10^8 t CO₂/a^[9]。据《中国二氧化碳捕集利用与封存 (CCUS) 年度报告 (2023)》, 中国 2060 年通过 CCUS 可以实现约 10×10^8 t CO₂/a 的减排量^[10]。

1.2 驱油能手

CCUS-EOR 可以在深度减碳的同时提高石油产量, 带来直接经济效益。根据 CO₂ 与原油的接触过程 (主要取决于地层压力) 分为混相技术和非混相技术, 其中混相技术提高采收率效果较好, 一般在 7% 及以上, 非混相技术一般在 5% 左右。据中国国家重点基础研究发展计划 (即 973 计划) “温室气体提高采收率的资源化利用及地下埋存” 项目分析, 中国约有 130×10^8 t 石油地质储量适合开展 EOR, 可将采收率提高 15%, 相当于增加石油可采储量 19.5×10^8 t, 同时可封存 $47 \times 10^8 \sim 55 \times 10^8$ t CO₂^[11]。此外, 由于该技术也适合于致密页岩油藏开采, 因此可以促进页岩气的开发。

1.3 绿色转型推手

CCS/CCUS 可以支持电力行业的低碳转型。通过在燃煤和燃气电厂安装 CCS/CCUS 设备, 可以显著减少传统化石燃料电厂的碳排放, 保留现有发电资产的价值, 增强电力系统整体的运行稳定性。CCS/CCUS 配合传统能源制氢可以将“灰氢”转变为“蓝氢”^[12], 短期内可以作为低碳能源载体稳定氢气供应链、推动氢能产业的发展。中长期来看, 即使将来“绿氢”具备经济性、成为制氢主力, “蓝氢”也可作为有效补充^[13]。CCS/CCUS 耦合制氢还可以通过开发新型储能形式助力于可再生电力

的调峰调频。

1.4 提升话语权

CCS 已被正式纳入《巴黎协定》的实施框架,成为全球气候治理的关键策略之一。各国在国家自主贡献(Nationally Determined Contributions, NDCs)中均提及并承诺发展 CCS,体现了国际社会对 CCS 的广泛认可与共同追求。对于中国而言,积极推进 CCS/CCUS 的研发与应用有助于在能源领域争取更多的国际话语权。同时,CCS/CCUS 处于领先地位有望使中国在国际碳产品出口规则制定中发挥主导作用。据彭博新能源财经报道,到 2035 年,美国将有能力捕集与封存多达 $1.64 \times 10^8 \text{ tCO}_2^{[14]}$ 。美国正在不断扩大其在全球 CCS/CCUS 领域的领先优势。

1.5 朝阳产业

CCS/CCUS 凭借其显著的经济、社会与产业化价值,正迅速崛起为应对气候变化和推动可持续发展的重要力量。CCS/CCUS 正在构建一个涵盖 CO_2 捕集、运输、驱油及埋存的全产业链和集群,展现出巨大的经济、社会效益和广阔的商业前景。中国 2060 年实现碳中和,通过 CCS/CCUS 可埋藏 $10 \times 10^8 \text{ tCO}_2^{[10]}$,这是一个巨量的产业增长空间,预计经济规模有望达到万亿元级。

2 CCS/CCUS 大规模商业化的瓶颈

2.1 技术成熟度、集成度低

CCS/CCUS 因技术类型多、应用复杂,各环节发展程度并不均衡,其技术集成包括链条集成以及与化工、水泥、钢铁等行业的系统集成两个层面。捕集技术按先进程度可以分为第一、二、三代技术:第一代技术是基于化石燃料的捕集技术,主要包括燃烧前物理吸收技术、燃烧后化学吸收技术等;第二代技术采用更加先进的吸收剂和系统设计,如新型化学吸收/吸附技术、增压富氧燃烧技术等;第三代技术又称变革性技术,如化学链燃烧技术。国内外第一代技术发展最为成熟,第二代和第三代技术发展相对滞后^[10],在 BECCS 和 DACCS 等前沿技术上也开展了有益探索。中国 CCS/CCUS 发展与国际水平基本同步,在 CO_2 压缩、管道输送和注入技术方面与国际先进水平的差距在不断缩小,并具有提升空间。中国在复杂工况下的压缩技术、超临界 CO_2 管道输送技术等方面较为薄弱^[15],海底管道和大规模海上船舶运输工程实践尚未开展。EOR 面临着防腐技术成本高、扩大波及体积技术尚不成熟等挑战。此外,地质封存过程中的全套监测技术仍需进一步完善,管道优化、集成枢纽等应用研究亟需展开。

2.2 顶层设计缺失、宏观规划不足

近年来,全球主要国家在 CCS/CCUS 的部署上取得

了长足发展。美国已形成了相对健全的宏观政策体系,先后通过了《国内税收法典》(其中第 45Q 条为 CO_2 封存税收抵免政策)《通胀削减法案》《碳捕集和利用平价法案》《基础设施投资和就业法案》等文件支撑 CCS/CCUS 产业发展。中国先后也出台了一系列文件,《关于推动碳捕集、利用和封存试验示范的通知》(2013 年)推动了 CCUS 的研发、示范、项目实施,《绿色债券支持项目目录》(2020 年)将 CCUS 项目纳入绿色债券的支持范围,《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》(2021 年)明确将 CCUS 纳入国家碳中和目标的技术路径,《2030 年前碳达峰行动方案》(2021 年)推动了 CCUS 的快速部署,《科技支撑碳达峰碳中和实施方案(2022—2030 年)》(2022 年)为未来的 CCUS 大规模应用奠定了技术基础,《碳排放权交易管理暂行条例》(2024 年)为 CCS/CCUS 融入碳市场、获取经济收益提供了一定支撑。科技部也通过各类研究计划推进 CCS/CCUS 的研发与成果转化^[16-17]。然而,上述文件大多是在清洁能源、节能减排等领域提及 CCS/CCUS,主要聚焦方向引领、引导推进 CCS/CCUS 的规模化与产业化^[18]。总体上,中国的宏观指导尚未明确 CCS/CCUS 的优先领域、技术发展规划、统筹协调机制,且缺乏可操作性强的工具型政策,直接政策支持仅体现在拓宽融资渠道上,处于征求意见阶段的《温室气体自愿减排暂行管理办法(试行)》(2023 年)也未纳入 CCS/CCUS 相关内容,CCS/CCUS 与市场的衔接存在空隙^[19]。

2.3 市场机制、政策激励与基础设施薄弱

市场机制政策是指在碳市场、电力市场和 CO_2 产品市场等方面纳入 CCS/CCUS 的政策。目前,中国碳市场行业类别较少(仅电力行业),覆盖范围有待进一步扩大。未来随着水泥、钢铁等行业梯次纳入,交易主体增多,这一现象将得到逐步改善^[20]。碳价水平的高低会直接影响技术的经济性。截至 2023 年 12 月底,全国碳市场综合价格收盘价为 79.42 元/t^[21],仍处于较低水平阶段,尚不足以推动 CCS/CCUS 的广泛应用。CCS/CCUS 目前未被中国纳入国家自愿减排机制(China Certified Emission Reduction, CCER),中国已重启 CCER,发布的 200 多个 CCER 方法学中关于 CCS/CCUS 的方法学仍属空白^[22]。中国还未出台直接的补贴、税收优惠等财政激励政策补贴各个环节的参与主体。国家层面的激励政策仅体现在研发环节的奖励和试点示范项目的融资、贷款上。地区性的激励政策目前仅北京、深圳按照高精尖产业给予了一定资助。CCS/CCUS 项目的大规模商业化应用要连通煤化工、电力等行业,需要完善配套设施,如管网系统、大型轮船。目前,中国仅胜利油田、吉林油田建成了 CO_2 管道进行运输示范;齐鲁石化—胜利油田百万吨级

CCUS 项目配套建成的百万吨级超临界 CO₂ 输送管道已于 2023 年 7 月投运,管道长度 109 km;吉林油田原投运的管道较短,规划的吉林石化—吉林油田 399 km 的 CO₂ 输送管道预计于 2024 年底建成。然而,中短期内中国仍难以形成跨区域、大规模、社会化的 CO₂ 管道网络。

2.4 商业模式仍不明确,远未形成

不同发展阶段适用于不同的商业模式,明确商业模式^[23]和利润分配机制可进一步推动 CCS/CCUS 规模化发展。CCS/CCUS 商业模式主要有国有企业经营模式、联合经营模式、独立运输商模式、运营商模式等^[1],既可以由单一主体全部投资运营,也可以成立项目公司由多家单位共同出资或共同运营。目前,中国试点示范项目的投资主要来自重点国有企业,主要为油气公司、电力公司等,社会资本、国外资本的参与非常有限,CCS/CCUS 商业模式(尤其是大型项目)仍不明确、远未形成。

2.5 法律框架与标准化空白

目前,中国的 CCS/CCUS 政策法规仍处于摸索阶段,与欧美相比仍有差距。例如,在现有法规体系内,各环节中 CO₂ 归属、管道运输的归责和项目停运以后的检测责任等都尚未明确,这增加了实际操作中的不确定性与法律风险。此外,中国也尚未制定 CCS/CCUS 相关的减排核算方法,给企业减排量的认证造成了困难,影响了减排效果的权威性与透明度。CCS/CCUS 项目审批为“个案专办”状态,行业内审批流程不太一致^[24]。

3 全球进展与经验教训

各国依据自身资源禀赋、政策环境及经济状况,展现了不同的进展路径与优势。美国、英国、加拿大等国已经积累了一定的实践经验。据 IEA 公布的全球 CCS/CCUS 项目数据,截至 2024 年 2 月,全球 CCS/CCUS 项目共计 844 个,其中美国 293 项,遥遥领先于英国(92 项)、加拿大(74 项)、澳大利亚(36 项)等,中国位居第六(30 项)。2024 年全球 CCS/CCUS 项目国家分布情况见图 1,整体上呈现“一大一小”局面。

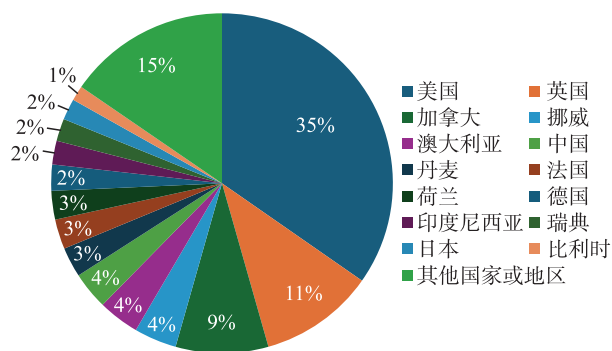


图 1 2024 年全球 CCS/CCUS 项目国家分布情况图

Fig. 1 Distribution of CCS/CCUS projects by country in 2024

数据来源:IEA。

3.1 美国

世界首个利用 CO₂ 进行强化油气开采的商业设施位于美国得克萨斯州。根据 IEA 数据,2024 年美国 293 个 CCS/CCUS 项目中,计划建设项目 260 个;在建项目 9 个;已暂停的项目 5 个;正在运行的项目 19 个,其中捕集规模达到 100×10^4 t 以上的 4 个, $50 \times 10^4 \sim 99 \times 10^4$ t 的 5 个, 50×10^4 t 以下的 10 个。所有项目的类型构成见图 2。

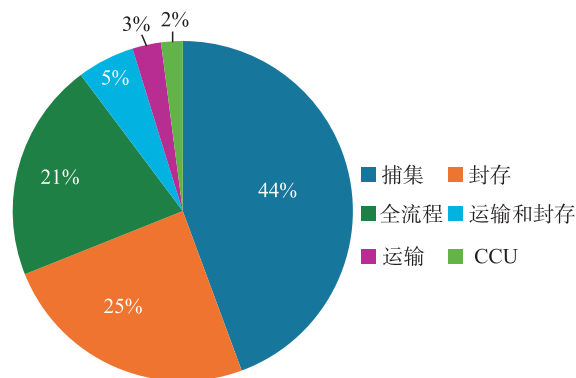


图 2 2024 年美国 CCS/CCUS 项目类型构成图

Fig. 2 Composition of CCS/CCUS project types

in the United States in 2024

数据来源:IEA。

美国 CCS/CCUS 快速发展主要得益于政策激励,主要包括对 CCS/CCUS 研究进行直接拨款、颁布相关法案、实施加州低碳燃料标准降低运输燃料电池的碳强度、引入碳信用等。其中美国《国内税收法典》中第 45Q 条的税收抵免政策激励作用最大,该法典通过对捕集、封存、提高采收率的 CO₂ 按照吨数分别给予税收抵免,并不断提高补贴力度,大大促进 CCS/CCUS 项目规模化与商业化发展。美国自 2011 年以来,每年能源部化石能源办公室均大力投资 CCS/CCUS 研发与创新(2 亿美元/a),2020 年 12 月出台的《2020 能源法案》提出要大幅提高对 CCUS 研发支持力度,2021 年美国通过《基础设施投资和就业法案》核拨 50 亿美元用于 CO₂ 运输、储存基础设施和场地的建设。2024 年 4 月,美国能源部宣布为 CCS/CCUS 项目提供补贴 1.31 亿美元,以支持先进碳管理技术的商业化和应用。美国已经建成了 7 200 km 以上的 CO₂ 管道并形成了基于“共享管道”理念的 CO₂ 管道运输、运营商业模式。同一地区的不同企业,CO₂ 管道可以互相连通成网并且彼此进行代输^[25]。美国综合项目数量、规模以及技术发展水平等目前均处于世界 CCS/CCUS 领先水平。

3.2 英国

2017 年,英国商业、能源和产业战略部发布了《清洁增长战略》,旨在精准加大对低碳创新的投资,降低 CCS/CCUS 技术成本,为大规模部署 CCS/CCUS 提供条件。

2018 年 7 月英国发布《清洁增长战略:实现清洁增长的路径》,明确了长期支持 CCS /CCUS 的必要性。2021 年英国发布《净零排放战略》,提出要为碳捕集和氢能产业提供 1.4 亿英镑发展资金。目前,英国已在苏格兰、蒂斯德、约克郡和亨伯、西北和南威尔士等主要工业区推进了 CCS /CCUS 提案,将为 CCS /CCUS 实现净零排放所需的规模部署奠定基础。

3.3 加拿大

加拿大在萨斯喀彻温省和阿尔伯塔省积极推进了多个 CCS /CCUS 项目。其中,2014 年投入运营的 Boundary Dam 项目采用全链条模式,是全球首个百万吨大规模煤电碳捕集项目,在技术、商业模式以及政策激励上都具有巨大的示范效应。2016 年,加拿大政府在《气候行动计划》中正式提出了联邦层面的碳定价机制,允许企业通过交易碳信用来达成排放目标。加拿大注重多元化的融资渠道和政策支持,通过实施多项政策法规、制定相关财政政策等措施,以推动 CCS /CCUS 的发展。Quest 项目是其中的成功案例之一,该项目得到了阿尔伯塔省政府 7.45 亿加元和联邦政府 1.2 亿加元的资金支持,规模达到百万吨级。同时,加拿大的绿色基金为 CCS /CCUS 项目提供了广泛的资金支持。2022 年 2 月,加拿大环境与气候变化部门推出基于产出的定价系统收益基金(Output-Based Pricing System Proceeds Fund),旨在利用从曼尼托巴、新不伦瑞克、安大略及萨斯喀彻温等省份重工业碳定价体系中获得收入,为这些地区的低碳技术项目提供资金支持,总额度约 2.1 亿加元。

3.4 澳大利亚

澳大利亚在 CCS /CCUS 领域的进展离不开政府、企业等多方紧密合作,其中企业参与和推动技术创新的积极性发挥了重要作用。例如,Santos 公司宣布将在 2040 年实现碳中和目标,代表性项目为 Bayu-Undan CCS 项目,该项目预计在 2024 年完成,并将成为澳大利亚最大的碳捕集与封存项目之一,CO₂ 封存能力可望超过 $1\,000 \times 10^4$ t/a。同时政府支持成立全球碳捕集与储存研究所(Global Carbon Capture and Storage Institute, GCCSI),对于促进国际合作,整合全球的技术、经验和资源,以加快 CCS /CCUS 的创新和部署具有重要意义。随着澳大利亚 CCS /CCUS 的不断发展,煤炭利用受碳排放约束被减弱,将进一步巩固澳大利亚在全球能源和环保领域的领先地位。

3.5 欧盟

除了上述国家外,欧盟也对 CCS /CCUS 给予了诸多政策支持。欧盟 2009 年制定了《二氧化碳地质储存指令》,2019 年在其发布的《欧洲绿色协议》中将 CCS /CCUS 纳入其减排战略,2021 年修订《跨欧洲网络

能源条例》提出要整合 CO₂ 管道网络,2023 年正式通过《净零工业法案》提出到 2030 年存储 $5\,000 \times 10^4$ t CO₂ /a 的目标,修订欧盟碳排放交易机制(European Union Emissions Trading System, EU ETS),将海运纳入该机制并将所有涉及 CO₂ 排放的运输方式纳入 EU ETS 范围。同时,“创新基金”“现代化基金”“连通欧洲设施基金”“地平线欧洲”项目等在资助 CCS /CCUS 的开发方面取得了显著进展。

4 中国推动 CCS /CCUS 大规模商业化的路径

4.1 国家规划与顶层设计

加强国家层面的宏观规划与顶层设计是 CCS /CCUS 产业化的关键。中国可以采取“顶层设计—市场推动—技术革新—集群示范”的实施路径^[26]。明确 CCS /CCUS 定位,规划分阶段、多层面的实施路径,明确技术方向和研发重点,加速推进政策框架制定的进程,形成针对性明确、适应性强的政策指导。考虑到区域经济差异、能源结构特征、区域地质地质条件、CO₂ 埋存产业特性等,还需要明确牵头部门,建立跨部门协调机制,有效组织力量、统筹资源,避免职责混淆、重复建设和资源浪费,有规划地在重点区域推进不同规模、多模式(不同产业组合)的 CCS /CCUS 示范工程,确保地区、行业与国家的气候目标和发展策略相一致。

4.2 政策激励和约束

CCS /CCUS 投入大、成本高、周期长,目前中国政策激励和约束机制缺位,碳市场处于起步阶段,碳价低,导致 CCS /CCUS 商业化基础薄弱。在 CCS /CCUS 发展的前期阶段,政策激励有利于显著降低 CCS /CCUS 参与方的初始投资和运营成本,提高项目的经济可行性和吸引力。未来应抓紧制定适合中国国情的税收优惠、资金补贴和投资奖励等激励政策,扩大激励范围,加大激励力度,针对捕集企业、管道建设企业、封存企业各个环节的个性化诉求分别给予差异化政策。构建起有利于 CCS /CCUS 实施和推广的软环境,促进产业体系形成良性循环,加速产业发展。

4.3 统一的法律框架和技术标准

统一的法律框架和技术标准是确保 CCS /CCUS 项目规范运作、可持续发展的基础保障。目前中国针对 CCS /CCUS 尚未发布具有针对性的详细规制,政府监管碎片化。未来应逐步健全 CCS /CCUS 专门的法律法规及相关技术标准,涵盖市场准入许可、建设运营规则、能源消耗、安全要求及责任、监管等内容,确保 CCS /CCUS 项目实施的规范性和市场秩序的正常运行,同时考虑适用于出口跨境的国际法律框架。目前中国 CCS /CCUS 相关技术标准较少且未覆盖全流程,已发布的技术指南

仅有《二氧化碳捕集、利用与封存环境风险评估技术指南(试行)》;技术标准仅有 SH/T 3202—2018《二氧化碳运输管道设计标准》和 GB/T 51316—2018《烟气二氧化碳捕集纯化工程设计标准》。需要建立科学合理的标准体系,确保技术全链条各环节的安全性、集成度和可靠性。

4.4 商业模式

中国 CCS/CCUS 投资主体相对单一。创新的商业模式是实现 CCS/CCUS 项目商业可行性的关键。多元化的融资方式、合理的收益分配和成本分担机制可以增强各方参与的积极性。未来中国需要鼓励企业积极探索,摸索出一套适合中国国情的商业模式和风险分担机制来引导社会资金参与 CCS/CCUS 项目的投资,保障投资者相对稳定、可接受的回报,形成投资和规模不断增加、成本逐渐降低的良性循环,形成碳循环与利用一体化的产业模式和商业化生态系统,最终带动技术的不断迭代更新。

4.5 管道布局与技术创新

基础设施建设(尤其是长距离管道运输)是提升 CO₂ 输送能力、降低 CCS/CCUS 成本的关键环节。国外经验表明,管道输送是大规模开展 CCUS-EOR 不可或缺的 CO₂ 运输方式。与美国相比,中国的 CCS/CCUS 基础设施建设较滞后,CO₂ 管道建设处于商业化的起步阶段,大规模管网的建立更需假以时日。未来需要制定出系统性和长远性的 CCS/CCUS 管道基础设施规划,特别是大流量长距离的管输网络规划。技术创新上,关键技术仍待进一步研究,需要集中力量开展技术攻关,如大规模、大压缩比、特高出口压力等极端参数下 CO₂ 的压缩和液化技术,超临界输送技术,大规模海上运输及海底封存技术等。

4.6 碳交易市场与碳税

碳交易市场是 CCS/CCUS 项目商业化的重要经济调节机制,参与碳交易市场有助于 CCS/CCUS 项目的资金回笼,还能促进企业间的碳排放配额交易,推动整个行业的减排进程。未来需进一步完善碳总量核定、碳定价和配额分配等方面的配套体系,建立适用于不同情景的碳足迹模型,形成系统的 CCS/CCUS 方法学,纳入 CCER 机制,确保能够获得碳减排量并进入全国碳市场。未来如果开征碳税,可以借鉴美国、澳大利亚等国的碳税政策,充分考虑税率的合理性和逐步递增机制,以避免给企业带来过大负担,同时助力长期持续减排。

5 结论

1) CCS/CCUS 大规模商业化面临技术成熟度低,宏观规划不足,市场机制、政策激励与基础设施薄弱,商业

模式仍不明确等瓶颈。

2) 美国、英国、加拿大等国采取了一系列措施推动 CCS/CCUS 发展,这些经验值得借鉴。

3) 中国未来应从加强顶层设计、制定财税政策、完善法律框架和技术标准、创新商业模式、规划建立基础设施等多方面共同着力推动 CCS/CCUS 产业发展。

参考文献:

- [1] 黄晶,陈其针,仲平,等. 中国碳捕集利用与封存技术评估报告[M]. 北京:科学出版社,2021.
HUANG Jing, CHEN Qizhen, ZHONG Ping, et al. Assessment report on carbon capture utilization and storage technologies in China [M]. Beijing: Science Press, 2021.
- [2] 黄晶,马乔,史明威,等. 碳中和视角下 CCUS 技术发展历程及对策建议[J]. 环境影响评价,2022,44(1):42-47.
HUANG Jing, MA Qiao, SHI Mingwei, et al. Process and suggestions of CCUS technology development from the perspective of carbon neutrality [J]. Environmental Impact Assessment, 2022, 44 (1): 42-47.
- [3] HILL L B, LI Xiaochun, WEI Ning. CO₂-EOR in China: A comparative review [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2020, 103: 103173.
- [4] MARCHETTI C. On geoengineering and the CO₂ problem [J]. Climatic Change, 1977, 1: 59-68.
- [5] IPCC. Carbon dioxide capture and storage [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [6] 科技部社会发展科技司,中国21世纪议程管理中心. 中国碳捕集利用与封存技术发展路线图研究[M]. 北京:科学出版社,2011.
Department of Science and Technology for Social Development, Ministry of Science and Technology, China Agenda 21 Management Center. Research on the development roadmap of carbon capture, utilization and storage technology in China [M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [7] 李阳,王锐,赵清民,等. 中国碳捕集利用与封存技术应用现状及展望[J]. 石油科学通报,2023,8(4):391-397.
LI Yang, WANG Rui, ZHAO Qingmin, et al. Status and prospects for CO₂ capture, utilization and storage technology in China [J]. Petroleum Science Bulletin, 2023, 8 (4): 391-397.
- [8] IPCC. An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2018.
- [9] International Energy Agency. Net Zero by 2050: A roadmap for the global energy sector [R]. Paris: IEA, 2023.
- [10] 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. 中国二氧化碳捕集利用与封存(CCUS)年度报告(2023)[EB/OL]. (2023-07-10)[2024-07-31]. <https://www.acca21.org.cn/trs/000100170002/16690.html>.
China Agenda 21 Management Center, Global Institute of Carbon Capture and Storage, Tsinghua University. China carbon dioxide capture, utilization and storage (CCUS) annual report (2023) [EB/OL]. (2023-07-10)[2024-07-31]. <https://www.acca21.org.cn/trs/000100170002/16690.html>.
- [11] 仲蕊. 二氧化碳驱油潜力待挖[N]. 中国能源报, 2022-01-17(13).
ZHONG Rui. The potential of carbon dioxide flooding is to be tapped [N]. China Energy News, 2022-01-17 (13).
- [12] 蒋珊. 绿氢制取成本预测及与灰氢、蓝氢对比[J]. 石油石化绿色低碳, 2022, 7(2): 6-11.
JIANG Shan. Cost prediction: Green hydrogen vs grey/blue hydrogen [J]. Green Petroleum & Petrochemicals, 2022, 7 (2): 6-11.
- [13] 朱妍. 煤制氢如何撕下“高碳”标签[N]. 中国能源报, 2020-07-13(15).
ZHU Yan. How to tear off the label of “high carbon” for coal-to-hydrogen [N]. China Energy News, 2020-07-13 (15).
- [14] CCUS国家地方联合工程研究中心. 美国将扩大在碳捕集利用与封存方面的全球领先地位[EB/OL]. (2024-07-19)[2024-07-31]. <https://ccus.nwu.edu.cn/info/1011/1711.htm>.
CCUS National and Local Joint Engineering Research Center. United States to expand global leadership in carbon capture, utilization and storage [EB/OL]. (2024-07-19)[2024-07-31]. <https://ccus.nwu.edu.cn/info/1011/1711.htm>.
- [15] 向勇, 侯力, 杜猛, 等. 中国CCUS-EOR技术研究进展及发展前景[J]. 油气地质与采收率, 2023, 30(2): 1-17.
XIANG Yong, HOU Li, DU Meng, et al. Research progress and development prospect of CCUS-EOR technology in China [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2023, 30 (2): 1-17.
- [16] 贾子奕, 刘卓, 张力小, 等. 中国碳捕集、利用与封存技术发展及展望[J]. 中国环境管理, 2022, 14(6): 81-87.
JIA Ziyi, LIU Zhuo, ZHANG Lixiao, et al. Development and prospect of carbon capture, utilization and storage technology in China [J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2022, 14 (6): 81-87.
- [17] 段玉燕, 罗海中, 林海周, 等. 国内外CCUS相关政策综述[J]. 南方能源建设, 2019, 6(增刊1): 28-31.
DUAN Yuyan, LUO Haizhong, LIN Haizhou, et al. Review of relevant policies on CCUS at home and abroad [J]. Southern Energy Construction, 2019, 6 (Suppl 1): 28-31.
- [18] 赵震宇, 姚舜, 杨朔鹏, 等. “双碳”目标下: 中国CCUS发展现状、存在问题及建议[J]. 环境科学, 2023, 44(2): 1128-1138.
ZHAO Zhenyu, YAO Shun, YANG Shuopeng, et al. Under goals of carbon peaking and carbon neutrality: Status, problems, and suggestions of CCUS in China [J]. Environmental Science, 2023, 44 (2): 1128-1138.
- [19] 翟明洋, 周长波, 张永波, 等. 二氧化碳捕集利用与封存项目纳入碳市场的现状、挑战与对策[J]. 中国环境管理, 2023, 15(6): 87-93.
ZHAI Mingyang, ZHOU Changbo, ZHANG Yongbo, et al. Current status, challenges and countermeasures for carbon dioxide capture, utilization and storage (CCUS) projects linking carbon emission trading market [J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2023, 15 (6): 87-93.
- [20] 王科, 吕晨. 中国碳市场建设成效与展望(2024)[R]. 北京: 北京理工大学能源与环境政策研究中心, 2024.
WANG Ke, LYU Chen. Effectiveness and prospect of China's carbon market construction (2024) [R]. Beijing: Center for Energy and Environmental Policy, Beijing Institute of Technology, 2024.
- [21] 中华人民共和国生态环境部. 全国碳市场发展报告(2024)[R]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2024.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. National carbon market development report 2024 [R]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, 2024.
- [22] 吴莉. 将CCUS项目纳入我国自愿减排机制[N]. 中国能源报, 2023-03-06(3).
WU Li. Inclusion of CCUS projects in China's voluntary emission reduction mechanism [N]. China Energy News, 2023-03-06 (3).
- [23] 宋欣珂, 张九天, 王灿. 碳捕集、利用与封存技术商业模式分析[J]. 中国环境管理, 2022, 14(1): 38-47.
SONG Xinke, ZHANG Jiutian, WANG Can. Analysis of the business model for carbon capture, utilization and storage (CCUS) technologies [J]. China Environmental Management, 2022, 14 (1): 38-47.
- [24] 匡冬琴, 李琦, 陈征澳, 等. 全球CCUS废弃井法规现状及其对中国的启示[J]. 天然气与石油, 2015, 33(4): 37-41.
KUANG Dongqin, LI Qi, CHEN Zheng'ao, et al. Global status of well abandonment regulations related to CCUS projects and its implications to China [J]. Natural Gas and Oil, 2015, 33 (4): 37-41.
- [25] 潘继平. 基于管道运输的中国二氧化碳驱油提高采收率发展现状与前景展望[J]. 国际石油经济, 2023, 31(3): 1-9.
PAN Jiping. Status quo of China's CCUS-EOR with CO₂ pipeline transportation and its prospects [J]. International Petroleum Economics, 2023, 31 (3): 1-9.
- [26] 姚星, 温心, 吴佳豪, 等. 面向碳中和的CCUS政策研究[J]. 能源环境保护, 2024, 38(3): 135-144.
YAO Xing, WEN Xin, WU Jiahao, et al. CCUS policy research for carbon neutrality [J]. Energy and Environmental Protection, 2024, 38 (3): 135-144.