



移动扫码阅读

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 Environmental Protection, 2024, 38(3): 135-144.

## 面向碳中和的 CCUS 政策研究

姚星<sup>1</sup>, 温心<sup>1</sup>, 吴佳豪<sup>1</sup>, 朱磊<sup>1,\*</sup>, 刘宇<sup>2,3</sup>, 黄艳<sup>4</sup>, 孙淑欣<sup>4</sup>

(1. 北京航空航天大学 经济管理学院, 北京 100191; 2. 北京大学 城市与环境学院, 北京 100871;  
3. 北京大学 碳中和研究院, 北京 100871; 4. 国能锦界能源有限责任公司, 陕西 神木 719319)

**摘要:** 中国“双碳”战略目标的提出使得碳捕集、利用与封存 (Carbon Capture, Utilization, and Storage, CCUS) 技术成为实现化石能源低碳化利用的关键方法, 也是支撑碳中和目标的重要手段。在当前由工业示范阶段向商业应用阶段发展的关键时期, 技术创新、项目运营、市场发展和政策制定之间存在割裂问题, 限制了 CCUS 技术规模化部署和产业化发展。因此, 建立包括规范性支撑体系和各种政策工具在内的政策体系对于 CCUS 的发展至关重要。围绕当前碳达峰、碳中和面临的新形势, 梳理了 CCUS 领域政策机制研究的最新成果, 讨论了美国、英国、澳大利亚、欧盟等主要国家和地区在促进 CCUS 发展方面所采用的不同类型的政策工具, 并分析了宏观支持政策、行政命令政策、资金激励政策和市场机制政策之间的协同作用效果。最后, 结合 CCUS 发展面临的机遇与挑战, 提出了关于中国 CCUS 产业化发展的激励政策设计建议。研究结果可为应对气候变化和“双碳”目标的相关政策制定者和科研工作者提供有益的启发和参考。

**关键词:** 碳捕集、利用与封存; 政策法规; 政策建议; 产业化发展; 机遇与挑战

中图分类号: X32

文献标识码: A

文章编号: 2097-4183(2024)03-0135-10

### CCUS policy research for carbon neutrality

YAO Xing<sup>1</sup>, WEN Xin<sup>1</sup>, WU Jiahao<sup>1</sup>, ZHU Lei<sup>1,\*</sup>, LIU Yu<sup>2,3</sup>, HUANG Yan<sup>4</sup>, SUN Shuxin<sup>4</sup>

(1. School of Economics and Management, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;

3. Institute of Carbon Neutrality, Peking University, Beijing 100871, China;

4. China Energy Jinjie Power Generation Co., Ltd., Shenmu 719319, China)

**Abstract:** The introduction of China's "Dual Carbon" strategic goals has positioned Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) technology as the sole option for realizing the low-carbon utilization of fossil energy and as a crucial means to support the carbon neutrality objective. However, during the critical period transitioning from the industrial demonstration to the commercial application phase, a disconnect exists between technology innovation, project operation, market development, and policy formulation. The disconnect limits the large-scale deployment and industrial development of CCUS technology. Therefore, it is vital to establish a policy system that includes both a normative support system and various policy tools for CCUS development. This paper reviews the latest achievements in policy mechanism research in the field of CCUS, considering the new situation faced by carbon peaking and carbon neutrality. It discusses the different types of policy tools adopted by major countries and regions, such as the United States, the United Kingdom, Australia, and the European Union, to promote CCUS development. Additionally, it analyzes the synergistic effects between macro-support policies, adminis-

收稿日期: 2024-01-11

修回日期: 2024-03-04

DOI: 10.20078/j.eep.20240314

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (72122002, 72342002, 72243011, 72204020); 中国石油化工股份有限公司课题项目 (322005)

作者简介: 姚星 (1993—), 男, 浙江湖州人, 助理教授, 主要研究方向为能源经济与管理, 能源系统建模。E-mail: yaoxing@buaa.edu.cn

通讯作者: 朱磊 (1983—), 男, 安徽合肥人, 教授, 主要研究方向为能源技术的评价方法与决策优化。E-mail: leizhu@buaa.edu.cn

trative order policies, financial incentive policies, and market mechanism policies. Finally, taking into account the opportunities and challenges faced by the development of CCUS, this paper proposes suggestions for designing incentive policies to facilitate the industrial development of China's CCUS industry. The research results of this paper provide valuable insights and references for policymakers and researchers dealing with climate change and the "Dual Carbon" goals.

**Keywords:** Carbon capture, utilization, and storage; Policy and regulation; Policy recommendations; Industrial development; Opportunities and challenges

## 0 引言

碳捕集利用与封存 (Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS) 是指从排放源或大气中分离出 CO<sub>2</sub>, 并将其输送到适当的地点进行利用或封存以实现 CO<sub>2</sub> 减排的过程<sup>[1]</sup>, 包括捕集、运输、利用及封存多个环节, 可广泛应用于煤电、石油化工、钢铁、水泥等行业的脱碳。据国际能源署 (IEA) 估计, 到 2060 年, CCUS 将为中国 CO<sub>2</sub> 减排贡献 8%, 且贡献量随着时间的推移而不断增加<sup>[2]</sup>。自我国提出碳中和目标以来, CCUS 技术的战略定位得到了进一步提升。近年来, 政府陆续出台了多项政策用于支持 CCUS 的大规模发展。例如, “十四五”规划 (2021—2025) 中首次提及了大规模 CCUS 示范项目的发展<sup>[3]</sup>; 发改委、科技部发布指导文件, 将 CCUS 纳入“1+N 政策体系”, 使其成为实现碳中和路径的重要技术<sup>[4-5]</sup>。

截至 2022 年底, 国内已投运和规划建设中的 CCUS 示范项目达数百个, 具备的 CO<sub>2</sub> 捕集能力超过 430 万 t/a, 涵盖电力、油气、化工、水泥、钢铁等多个行业。其中电力行业示范项目超过 20 个, 水泥、钢铁等难减排行业的 CCUS 示范项目也明显增多<sup>[6]</sup>。然而, 这与 2060 年碳中和目标 23.5 亿 t 的捕集需求仍有较大差距, 仅达到了 2.3% ~ 4.3%<sup>[7]</sup>。因此, 作为实现碳中和目标的托底技术保障, CCUS 的部署还需要进一步加快。

已有研究证明, 激励政策可以有效促进 CCUS 的项目部署。LIPPONEN 等<sup>[8]</sup>研究了政策发布与项目数量的关系, 发现 CCUS 激励政策的发布对应了 CCUS 项目增加的关键节点; 美国能源部的研究报告显示, 2021—2022 年出台的《通胀削减法案》和《两党基础设施建设法案》将共同为美国电力部门的深度脱碳起到重要推动作用, 促进化石能源机组进行大规模 CCS 改造, 预计到 2030 年, 这两项法案促使进行 CCS 改造的机组规模将达到 5~55 GW<sup>[9]</sup>; 英国政府发布了 CCUS 投资者

路线图, 阐述了其 2021—2035 年的 CCUS 部署计划, 增加了未来几年 CCUS 新建项目数量<sup>[10]</sup>。此外, THIELGES 等<sup>[11]</sup>比较了美国和欧盟当前 CCUS 的政策组合, 重点关注了两地区的政策策略差异; 何璇等<sup>[12]</sup>总结了国外 CCS 技术各环节的主要法规及目前主要的投融资机制和政策; JIANG 等<sup>[13]</sup>分析了国内现有的国家和省级层面的 CCUS 监管框架。

为了更全面地分析 CCUS 的政策激励, 本文在梳理美国、英国、澳大利亚、欧盟等国家和地区 CCUS 政策部署的基础上, 讨论了不同政策机制之间的协同效果, 识别了中国在政策部署方面的差距与不足, 从中国的 CCUS 发展现状出发, 结合当前发展面临的机遇与挑战, 为中国未来 CCUS 政策发展提供相应的政策建议。

## 1 CCUS 政策体系及国际经验

DAHL 等<sup>[14]</sup>指出, 促进 CCUS 发展的政策框架应具备 4 个主要特征: 支持项目扩大规模部署的能力、适当的经济激励、短期和长期的投资规划以及对技术迭代的持续支持。从政策部署经验来看, CCUS 政策体系可分为规范性支撑体系和政策工具 2 类。规范性支撑体系包括减排核算方法论与相应的行业标准, 二者为 CCUS 技术和项目发展提供保障, 同时为后续政策工具的施行打下基础。政策工具包括宏观支持政策、行政命令政策、资金激励政策以及市场机制政策, 涵盖了 CCUS 的技术、项目、市场等多方面。从政策部署路径来看, 各国从制订减排目标出发, 通过行业标准的设定将 CCUS 纳入统一的监管框架, 确保其技术的安全性和有效性。在此基础上, 通过税收、补贴激励政策提供资金支持, 促进市场的建立与发展, 推动技术的进步与革新, 加快项目规模的扩大与集群化开展, 其作用关系如图 1 所示。

### 1.1 规范性支撑体系

#### 1.1.1 减排核算方法论

监测、报告和核查 (Monitoring, Reporting and

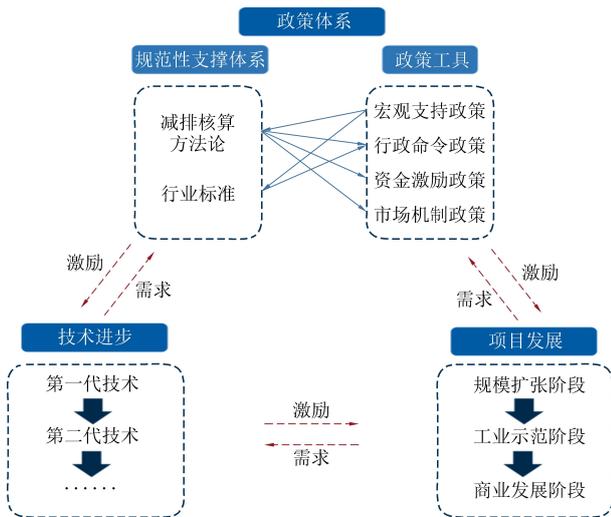


图1 CCUS政策体系、技术进步与项目发展间的作用关系

Fig. 1 Relationship between the CCUS policy systems, technological advancement, and project development

Verification, MRV)体系是指碳排放的量化与数据质量保证的过程,包括监测、报告与核查3个过程。此概念最早在2007年12月《联合国气候变化框架公约》第13次缔约方大会上提出<sup>[15]</sup>,是提高温室气体排放数据质量的基本要素,也是碳交易机制建设运营、配额分配的重要支撑<sup>[16]</sup>。其中,CCUS减排核算方法论通过为CCUS项目提供准确的减排数据,可以为项目融资提供支持,更为未来CCUS纳入国家核证自愿减排(China Certified Emission Reduction, CCER)体系提供前提条件<sup>[17-18]</sup>。

目前CCUS减排核算方法研究领域仅有一些指导性和框架式的规范或方法指南<sup>[17]</sup>。IPCC《2006年国家温室气体清单指南》提出了CCUS实施过程中的碳排放核算方法指南,但受泄漏监测技术限制,仅提供了CO<sub>2</sub>质量控制方法学,未提供减排量的计算方法<sup>[19]</sup>;加拿大的Quest项目是首次进行减排核算的CCUS项目,Blue Source Canada ULC在2010年发布的《Quest碳捕集与封存项目》报告中详细介绍了Quest项目在CCUS全流程中的碳排放核算边界及其核算结果<sup>[20]</sup>;CO<sub>2</sub>捕集、运输和封存技术委员会(ISO/TC 265)通过生命周期评估法估算了从项目评估、建设和运营到竣工和关闭后活动的减排,制定了全流程量化与核查标准<sup>[21]</sup>。

### 1.1.2 行业标准

行业标准是指在某个行业领域内,为了保证产品质量、安全、环保等方面的要求,由相关部门或单位制定的标准。CCUS行业标准主要分为安

全标准、环境标准、运行设计标准、监测和事故处理标准、管理和责任标准等。各国在捕集、运输、利用和封存的不同环节以及全流程环节均设置了相关标准。欧盟在《Directive 85/337/EE》中规定了CO<sub>2</sub>捕集的安全标准<sup>[22]</sup>;挪威的《CO<sub>2</sub>管道设计与运行实践推荐》为CO<sub>2</sub>管道运输的各个环节制定了相应的标准<sup>[23]</sup>;加拿大标准协会(Canadian Standards Association, CSA)在Z-741标准中提出了CO<sub>2</sub>地质封存标准,其中包含了深层盐水地层的CO<sub>2</sub>地质封存标准<sup>[24]</sup>。

### 1.2 政策工具

根据各国的政策应用情况,可将CCUS的政策工具归纳为宏观支持政策、行政命令政策、资金激励政策以及市场机制政策4类。宏观支持政策主要体现为各国设定的不同阶段减排目标、技术革新和项目发展规划,该政策为其余政策工具的部署和应用提供了目标性的参考;行政命令政策是指各行业设置的排放上限和系列立法监管政策,为技术与项目应用安全以及风险管控提供保障;资金激励政策是指政府为CCUS项目提供的税收和补贴政策,该政策旨在为CCUS项目发展前期提供资金支持;市场机制政策是指在碳市场、电力市场和CO<sub>2</sub>产品市场等纳入CCUS的政策,为CCUS从示范阶段走向商业化阶段提供创收机会。政策工具间的协同机制如图2所示。各政策工具的发展程度和作用阶段皆有不同,各种工具的协同使用将促进CCUS的商业化发展与产业化部署。

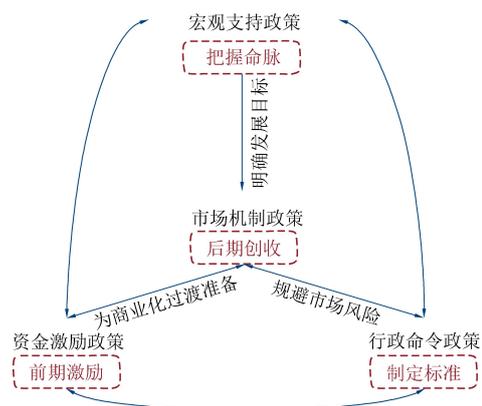


图2 CCUS政策工具协同机制

Fig. 2 Coordination mechanism of CCUS policy tools

#### 1.2.1 宏观支持政策

目前,世界上应用和部署CCUS的主要国家和地区均发布了CCUS发展路线图,并在路线图中对未来减排需求、资金激励和政策扶持进行了梳理和规划。美国将CCUS的发展路线归纳为3

个部署阶段(激活、扩展和大规模部署),并详细说明了每个阶段的发展机会<sup>[25]</sup>;欧盟在路线图中说明了不同技术在实现 2050 年气候中性目标中的关键作用,并确定了在 10 年内实现 CCS 和 CCU 大规模部署所需的组成部分<sup>[26]</sup>;日本经济产业部门(Ministry of Economy, Trade and Industry, METI)为 CCUS 设置中长期规划,2030 年 CO<sub>2</sub> 储存能力目标是达到 600 万~1 200 万 t,到 2050 年达到 1.2 亿~2.4 亿 t<sup>[27]</sup>;英国在《英国碳捕集、利用和封存部署路径》对 CCUS 发展进行整体部署后,又在《CCUS 净零投资路线图》和《CCUS 供应链干预战略》中对 CCUS 投资和供应链发展提供战略规划<sup>[28-30]</sup>。

### 1.2.2 行政命令政策

#### (1) 减排约束政策

强制性减排约束政策是促进 CCUS 发展的有效政策手段。为行业设定排放上限与减排标准,有助于促进 CCUS 技术的推进并增加 CCUS 在难减排部门的应用场景。欧盟发布《工业污染物排放指令》,在其中设置了交通运输、大型燃烧工厂、固定工业排放源等领域 CO<sub>2</sub> 等温室气体的排放标准<sup>[31]</sup>;美国多次建议设定新建电厂碳排放限额,2013 年 3 月美国国家环境保护局(EPA)提出新建电厂的碳排放不超过 454 g CO<sub>2</sub>/(kW·h),2013 年 9 月再次提出新建燃煤电厂和小型燃气电厂碳排放不超过 454 g CO<sub>2</sub>/(kW·h),大型燃气机组不超过 499 g CO<sub>2</sub>/(kW·h)<sup>[32]</sup>;加拿大增加燃煤电厂性能标准,在 2015 年要求燃煤电厂和天然气联合循环(Natural Gas Combined Cycle, NGCC)电厂排放水平一致,低于 420 g CO<sub>2</sub>/(kW·h)<sup>[33]</sup>。

#### (2) 立法监管政策

CCUS 监管框架的建立有助于为安全作业提供指导方针和标准,确保跨项目一致性,并提高投资者信心。CCUS 的监管框架涉及搭建 CCUS 法律监管体系、许可制度与项目监管内容和程序、权利冲突处理原则以及最后的全流程环境风险管控问题 4 个方面<sup>[34]</sup>。因不同的法律制度与立法特点,不同国家的 CCUS 立法监管框架各有侧重。欧盟在《Directive 2009/31/EC》法案中使用系列立法和 CCS 封存专项指令的形式进行监管<sup>[35]</sup>,并在《Directive (EU) 2018/2001》法案中对 CCU 技术进行了监管<sup>[36]</sup>;英国在 2008 年《能源法》中建立了 CO<sub>2</sub> 储存监管制度<sup>[37]</sup>,引入了海上 CCUS 的许可要求,并在《2011 年 CO<sub>2</sub> 储存条例》中将许可制

度扩展到陆上和邻近的内陆水域<sup>[38]</sup>;澳大利亚突出地方的监管自治,在联邦和州级都制定了具体条例。联邦根据《2006 年海上石油和温室气体储存法》对州管辖范围以外的海上地区的 CCS 进行监管。该法案包括获得 CCS 活动许可和执照的要求,并建立了一个全面的法定制度,用于 CCS 地点的环境恢复和安全<sup>[39]</sup>。在州级,维多利亚州和昆士兰州均推出了全面的州立法来规范 CCS 的监管<sup>[40]</sup>。美国虽然没有设定专门针对 CCUS 的联邦环境法律,但现有的各种联邦环境法律适用于 CCUS 项目<sup>[41]</sup>。

尽管各国家和地区在具体法律监管上各有不同,在 CCUS 监管的关键问题上表现出了较强的一致性,各国家和地区在监管立法的路径选择、权利冲突的处理原则、以许可制为核心、以信息公开为保障的程序设定和关闭后的责任制度对我国 CCUS 立法监管体系政策有较大的借鉴意义<sup>[34]</sup>。

### 1.2.3 资金激励政策

#### (1) 税收政策

碳税和税收抵免激励政策是 CCUS 技术与项目发展的关键部分。碳税政策的施行可以通过向化石燃料生产者、使用者征收碳税来减少 CO<sub>2</sub> 排放,为 CCUS 项目的推行提供机遇。在碳税政策的刺激下,挪威运行了世界上首个利用深部咸水层作为 CO<sub>2</sub> 地质封存场地的项目 Sleipner。

税收抵免政策将为 CCUS 项目获得碳税减免或退税,大大缓解了项目初期的资金压力。美国的 45Q 税收抵免政策被认为是促进 CCUS 发展最有效的政策。《2008 能源改进和扩展法案》中确立的 48A 和 45Q 投资税收抵免政策极大促进了 CCUS 的市场开发,并在 2018、2022 连续两年上调补贴金额,放宽补贴项目要求,极大促进了美国 CCUS 的项目发展<sup>[42-43]</sup>。加拿大的 2023 年秋季经济报表实施法(Bill C-59)拟议修订当前加拿大的税法,以实施 CCUS 税收抵免政策,并计划通过投资税收抵免的方式涵盖 2022 年至 2030 年间捕集项目资本成本的 50%,对直接空气捕集项目的税收抵免率达到 60%<sup>[44]</sup>。英国的气候变化税政策也规定了实施 CCUS 项目的企业可获得 80% 的税收抵免<sup>[45]</sup>。

#### (2) 补贴政策

各国针对 CCUS 的补贴政策主要以专项基金补贴为主,通过设立专属 CCUS 基金或将 CCUS 纳

入清洁技术体系使 CCUS 项目和技术得到补贴。依照国情,各国在补贴政策方面各有侧重。

欧盟和英国侧重对项目层面的补贴。欧盟通过鼓励跨境 CCUS 项目完成共同利益项目 (Projects of Common Interest, PCIs) 的认定,使其更容易获得各项基金的资助<sup>[46]</sup>。英国侧重于资助工业集群和大型项目。碳捕集与封存基础设施基金 (Carbon Capture and Storage Infrastructure Fund, CCCIF) 旨在通过 10 亿美元对 4 个工业集群进行资助,使其到 2030 年的捕获能力至少达到 1 000 万 t/a<sup>[47]</sup>。

美国和加拿大均侧重于对新兴技术的补贴。美国重视对直接空气捕集技术研发的资助。《两党基础设施法案》和《通胀削减法案》预计为区域直接空气捕集项目提供 35 亿美元资金,以帮助其加快部署和应用<sup>[48-49]</sup>。加拿大侧重于为促进其商业化发展的技术提供支持。加拿大政府在 2020 年 11 月宣布了一项为期 10 年、总额为 15 亿加元 (约合人民币 78 亿元) 的低碳和零排放燃料基金,用于支持 CCUS 等清洁能源技术的发展,还建立了总额为 18 亿加元 (约合 14.4 亿美元) 的战略创新基金 (Strategic Innovation Fund, SIF),以支持各种战略领域的创新项目,其中包括 CCUS 技术<sup>[50]</sup>。

#### 1.2.4 市场机制政策

排放交易体系的目的是为排放定价,从而以一种具有成本效益的方式激励减排。碳市场机制能够为 CCUS 产业的碳减排量提供价值,而电力、石油等能源市场机制则能够为 CCUS 产业的电力供应及生产产品提供价值。配额分配是市场机制成功的关键<sup>[51]</sup>,碳定价机制如图 3 所示。

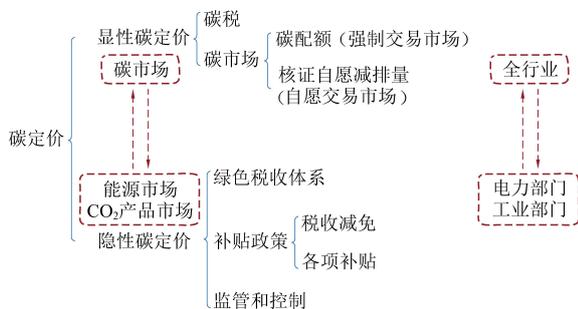


图 3 碳定价机制示意图

Fig. 3 Carbon pricing mechanism diagram

2022 年 11 月 30 日,欧盟委员会通过了一项提案 (COM/2022/672),旨在建立一个欧盟范围内的自愿框架,以认证碳清除技术。其中包括创新的工业碳去除技术,如生物质能碳捕集与封存 (Bioenergy with Carbon Capture and Storage,

BECCS) 和直接空气碳捕集与储存 (Direct Air Carbon Capture and Sequestration, DACCS)<sup>[52]</sup>。澳大利亚的清洁能源监管机构 (The Clean Energy Regulator) 通过拍卖或直接的方式向具有永久存储能力的新注册捕集项目颁发澳大利亚碳信用单位 (Australian Carbon Credit Units, ACCUs),期限为 25 年。澳大利亚碳信用单位可出售给政府或在二级市场上出售。英国和荷兰推出的合同差价机制 (Contract of Difference, CfD) 可以为 CCUS 项目提供一个预先确定的碳价格,从而降低投资风险和融资成本<sup>[53]</sup>;加拿大的技术、创新和减排基金 (Technology, Innovation and Emissions Reduction Fund) 为特定的 CCUS 项目提供了赠款,并催生了一个减排信用体系,其中包括碳捕集和封存信用以及对碳捕集认证的抵消<sup>[54]</sup>。除此之外,欧盟的碳边界调整机制 (Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM) 将从 2023 年 10 月起逐步过渡实施,并从 2026 年起全面生效。该政策为进入欧盟的碳密集型商品设定了碳价格,以便在免费排放交易体系配额逐步取消之际,为欧盟的生产商创造一个公平的竞争环境,预计可以激励除欧盟外其他国家和地区的 CCUS 应用<sup>[55]</sup>。

## 2 我国 CCUS 发展面临的问题

尽管我国 CCUS 已经有了较大的发展,但当前仍面临资金支持不充分、源汇匹配困难、跨部门合作机制不明确、政策法规不完善等多方面的挑战。

### 2.1 标准体系及激励机制不完善

目前我国的 CCUS 政策法规建立仍处于起步阶段,较世界上 CCUS 政策部署完备的国家和地区仍有较大差距。在规范性支撑体系方面,我国未出台相应的 CCUS 减排核算方法,这为后续企业 CCUS 减排量的认证带来阻碍。同时在行业标准上,仅提出了环境风险评估和 CO<sub>2</sub> 管道输送方面的标准。项目和全流程技术标准的缺失将不利于后续监管框架的建立,规范性支撑体系的缺位将阻碍政策工具的部署和实施。

在政策工具方面,我国缺少全面的宏观支持政策、健全的行政命令政策、针对性的资金激励政策以及市场机制政策。具体而言,在宏观支持政策上,虽然已提出《中国碳捕集利用与封存技术发展路线图》并规划了技术研发示范和产业集群的发展目标,但缺少聚焦 CCUS 融资与项目发展等方面的应对战略;在行政命令政策上,仅在《建设

项目环境影响评价分类管理名录(2021年版)》中提出 CCUS 项目环评分类管理要求,缺少重点行业的碳排放限额标准和完善的项目监管框架;在资金激励政策上,未出台专属 CCUS 的税收减免政策和补贴政策,仅将 CCUS 项目纳入《环境保护、节能节水项目企业所得税优惠目录》,使企业享受所得税减免,纳入 CCUS 的碳减排支持工具的应用效果仍属于探索阶段;在市场机制政策上,目前未将 CCUS 纳入我国自愿减排机制,需要在完善减排核算方法和交易机制的基础上有序推动。作为一项政策驱动的技术,CCUS 未来的发展离不开政策的大力支持,因此完善政策法规是 CCUS 行业发展的必经之路。

## 2.2 关键技术亟待突破

目前我国 CCUS 的多环节关键技术已实现了长足进展,但距离国际先进水平仍有一定差距。具体而言,在捕集技术方面,低浓度排放源捕集技术较高的能耗和成本制约着其规模化应用,也阻碍了其在钢铁、水泥等难减排行业的推广;在运输技术方面,罐车和船舶运输方式成本高、运量小,但大规模陆地输送管道及管网设计仍处于准备阶段,缺乏应用经验;在利用技术方面,化工和生物利用转化能耗高、效率低,强化采油则需要进一步提高效率、效益以及规模;在封存技术方面,地下空间利用、安全性及成本过高是核心问题,目前尚缺乏安全评估、监控技术以及一套完整的量化核查和评价体系;在全链条技术方面,需要针对不同的应用场景开发创新的技术体系和技术模式,尤其是构建大规模 CO<sub>2</sub>捕集和利用体系<sup>[59]</sup>。

## 2.3 技术成本较高

虽然与国外相比,国内具有一定成本优势,但当前 CCUS 技术示范成本仍然偏高,与其他技术竞争时优势并不明显,阻碍其进一步推广与应用。具体而言,煤化工和石油化工领域的一体化驱油示范项目捕集成本相对最低,可达到 120 元/t CO<sub>2</sub>,电力、水泥行业是国内捕集成本较高的行业,捕集成本为 200~600 元/t CO<sub>2</sub>和 180~730 元/t CO<sub>2</sub><sup>[6]</sup>。与此同时,由于项目的复杂性,大型 CCUS 试点项目的研究成本远高于其他基础设施项目。项目初期的地质考察、前期购买设备的固定资产投资均使项目前期投资过高,而较高的运营成本也是 CCUS 发展的阻碍。以煤电行业为例,加装 CCUS 不仅使燃煤电厂的能耗增加 25%,发电效率降低 20%~30%,更会使基本建设成本增

加 25%~90%,运营支出将增加 5%~12%,平准化度电成本提高 0.1~0.3 元/(kW·h)<sup>[6,57]</sup>。

## 2.4 资金支持不充分

目前中国的 CCUS 资金支持不充分体现在总额不足与融资渠道少两个方面。IEA 报告指出,若要实现 1.5 °C 温控目标,到 2030 和 2050 年全球分别需要 180 亿和 1 070 亿美元投资,我国也需亿美元级别的投资规模<sup>[56]</sup>,而目前的投资规模与目标尚有一定差距。在融资渠道方面,主要可分为 2 类:一类是由国家政府科研基金支持的重点项目,另一类是由国有企业投资作为主体的项目<sup>[58]</sup>。目前我国 CCUS 的项目资金主要来源于国家科技计划、中央企业自筹资金,并辅以国际合作项目的资金,资金来源渠道较少。由于缺乏资金支持,加上项目产业链长和低油价的市场环境,导致项目投资风险较高,民间和私有资金不愿进入。同时 CCUS 在我国碳市场中的角色也没有得到较好的界定,使得碳市场无法为 CCUS 项目提供额外收益。所有因素相加,使得当前投资难以满足 CCUS 的发展。

## 2.5 跨省与跨部门合作存在一定壁垒

从捕集到封存的全产业链长,涉及的利益相关方将加大 CCUS 的项目部署面临的风险。其中跨省运输与跨部门合作问题是待解决的重要问题。在跨省运输方面,各省的不同运输设施与标准加大了审批与合作方面的困难,而跨省运输的困难则加大了 CCUS 的跨部门合作问题。CO<sub>2</sub>的捕集和压缩通常由单一的实体或合资企业承担,运输和封存业务则可以由不同的实体经营,而整个产业链中的任何一个环节出现问题都将通过连锁反应影响整个项目。鉴于产业链各个环节衔接的潜在脆弱性以及不同项目利益相关者的不同业务情况,风险的合理分配以及为整个产业链提供足够的保障,对于 CCUS 全产业链项目的成功至关重要。

## 2.6 全流程安全风险难以控制

尽管 CCUS 技术对于减少温室气体排放具有重要作用,也引发了一系列安全性问题,主要集中于运输和封存环节的泄漏,亟待通过相应立法进行进一步保障。CO<sub>2</sub>封存于地下岩层将破坏地层稳定性,导致地下水污染、地面沉降、土壤酸化、地层矿物质溶解等问题,泄漏问题也进一步影响了封存的有效性。在运输过程中,发生事故或管道破裂时高浓度 CO<sub>2</sub>泄漏可能对人体健康和安

成严重威胁<sup>[60]</sup>。因此,应立法明确 CCUS 必须遵守旨在保护人类健康和确保生态安全的规范,以避免泄漏风险和其他事故。目前,尽管生态环境保护部已经发布了一些指导方针和标准,但我国的 CCUS 环境影响评价法律仍在制定中,与商业化所需的环境影响评价还有一定差距,亟须进一步解决。

## 2.7 源汇匹配困难

我国自然资源的空间分布差异也阻碍了 CCUS 的项目部署与未来发展。CCUS 源汇匹配主要考虑排放源和封存场地的地理位置关系和环境适宜性。目前我国的大规模排放源主要位于东部沿海地区,化石能源资源主要分布在中西部,而适合封存的盆地主要分布在东北和西北地区<sup>[6]</sup>。分布空间差异造成的源汇不匹配问题极大限制了我国的潜在 CO<sub>2</sub>封存容量。

## 3 结论与政策建议

虽然我国 CCUS 发展已取得了一定成就,但距实现碳中和目标的减排量仍有一定差距,亟须从技术、市场、项目和政策方面共同发力。借鉴国际 CCUS 政策发展经验,我国 CCUS 政策可依据“顶层设计—市场推动—技术革新—集群示范”的路径部署,在完善行业标准与核算方法论的基础上推动资金激励与市场机制政策,促进 CCUS 行业发展,相关政策建议如下。

(1) 建立 CCUS 法律框架,制定 CCUS 相关行业的试点政策法规。政府部门的法律法规、行业标准、产业政策和规划设计对 CCUS 的推广和发展具有决定性的宏观指导作用<sup>[61]</sup>。目前我国 CCUS 政策还停留在宏观支持政策层面,还没有专门针对 CCUS 的法律。可参考可再生能源的相关立法,借鉴美国、欧盟、加拿大等国家和地区的部署经验,结合国情考虑排放源工厂、化石燃料企业、交通运输部门、政府机构、第三方和个人等所有参与者的利益分配,优化政策工具选择,形成大规模、全流程 CCUS 示范项目的政策支持体系。

(2) 出台国家、地方与行业标准,完善规范性支撑体系与立法监管框架。考虑将涉及全流程技术各环节的内容纳入一个监管平台。实行全项目周期的许可制度可确保 CCUS 技术的规范化发展。目前我国 CCUS 相关标准不明确,CCUS 的项目审批还处于“个案专办”的状态,且各行业审批流程不一致,该审核方式限制了其规模化发

展<sup>[62]</sup>。在建立监管体系方面,应明确 CCUS 的技术定位,根据不同的监管环节选择不同的法律路径,关注各环节所涉及的权利冲突,重视事前、事中与事后监管相结合,完善 CCUS 项目许可制度与信息公开制度,明确 CCUS 项目关闭后责任主体与程序规则,填补全流程监管空白。

(3) 探索制定适合 CCUS 商业化部署与大规模推广的税收优惠和补贴激励政策,形成增资与降本的良好循环机制。一方面,应加快推进 CCUS 减排核算方法论的完善,加快 CCUS 纳入 CCER 体系的步伐,结合能源市场深度开发 CO<sub>2</sub> 的利用价值。另一方面,针对 CCUS 项目提供专项基金及相关税收优惠和差异化补贴激励政策,从 CCUS 产业链角度出台扶持政策,探索政府管理与市场运作有机结合的 CCUS 商业化投融资模式,协调与整合各项技术流程,统一业界认知,完善营收模式。

(4) 关注关键技术研发,布局基础设施建设,促进产业集群形成,加强技术与产业的链接。在技术方面,目前 CCUS 各环节技术仍面临成本、能耗、效率以及安全性等问题,核心技术仍待进一步研究。建议聚焦支撑大规模捕集的新一代吸收剂、膜分离等技术,推进高转化率、低转化能耗的利用技术攻关,提高封存技术的安全和有效性<sup>[60]</sup>,增加全流程示范工程的规模化程度,实现技术对应用行业的全覆盖。在基础设施方面,管网体系和封存基础设施的共享网络的建设可以促进利益相关方的合作,降低投资的成本和风险。在产业集群方面,强化源汇优化,建设驱油封存中心,有助于形成从捕集到封存利用的全链条产业集群,进而构建相互补充、协同发展的零碳负碳产业链。

本文从我国的 CCUS 技术与政策现状出发,梳理了美国、欧盟、澳大利亚等 CCUS 部署发展位于世界前沿国家的 CCUS 相关政策,分析了我国 CCUS 政策发展可以从中获得的启示。相较于世界上 CCUS 部署较为成熟的国家,我国 CCUS 政策缺少完善的核算方法论和行业标准等准备政策,有效的财税金融和市场机制等激励性政策以及健全的 CCUS 法律体系框架。因此,应加快构建 CCUS 政策体系,突破 CCUS 前沿技术,增加 CCUS 应用场景,促进 CCUS 产学研协同发展。

## 参考文献 (References):

- [1] 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.
- [2] International Energy Agency. An energy sector roadmap to carbon neutrality in China[M]. Paris: OECD Publishing, 2021: 59.
- [3] 中华人民共和国中央人民政府. 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[EB/OL]. (2021-03-13) [2023-11-12]. [https://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content\\_5592681.htm](https://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm).
- [4] 中华人民共和国中央人民政府. 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[EB/OL]. (2021-09-22) [2023-11-12]. [https://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content\\_5644613.htm](https://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content_5644613.htm).
- [5] 中华人民共和国中央人民政府. 2030年前碳达峰行动方案[EB/OL]. (2021-10-24) [2023-11-15]. [https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-10/26/content\\_5644984.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-10/26/content_5644984.htm).
- [6] 陈健, 程军, 刁玉杰, 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, Global CCS Institute, 清华大学, 2023: 10+14+20.
- [7] 孙旭东, 张蕾欣, 张博. 碳中和背景下我国煤炭行业的发展与转型研究[J]. 中国矿业, 2021, 30(2): 1-6.  
SUN Xudong, ZHANG Leixin, ZHANG Bo. Research on the coal industry development and transition in China under the background of carbon neutrality[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(2): 1-6.
- [8] LIPPONEN J, MCCULLOCH S, KEELING S, et al. The politics of large-scale CCS deployment[J]. Energy Procedia, 2017, 114: 7581-7595.
- [9] U.S. Department of Energy. Power-sector transitions: Potential near-term impacts of the inflation reduction act and bipartisan infrastructure law[EB/OL]. (2022-03) [2023-10-08]. <https://www.energy.gov/sites/default/files/2023-03/Power-Sector%20Transitions%20Fact%20Sheet.pdf>.
- [10] UK Government. CCUS Net Zero investor roadmap: Capturing carbon and a global opportunity[EB/OL]. (2023-04-05) [2023-09-08]. <https://www.gov.uk/government/publications/carbon-capture-usage-and-storage-net-zero-investment-roadmap/ccus-net-zero-investment-roadmap-capturing-carbon-and-a-global-opportunity>.
- [11] THIELGES S, OLFE Kräutlein B, REES A, et al. Committed to implementing CCU? A comparison of the policy mix in the US and the EU[J]. Frontiers in Climate, 2022, 4: 943387-943403.
- [12] 何璇, 黄莹, 廖翠萍. 国外CCUS政策法规体系的形成及对我国的启示[J]. 新能源进展, 2014, 2(2): 157-163.  
HE Xuan, HUANG Ying, LIAO Cuiping. Review and analysis of CCS policies in domestic and overseas[J]. Advances in New and Renewable Energy, 2014, 2(2): 157-163.
- [13] JIANG K, ASHWORTH P, ZHANG S Y, et al. China's carbon capture, utilization and storage (CCUS) policy: A critical review[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2020, 119: 109601-109615.
- [14] DAHL C A, SUN C, WANG J. How can CCUS play its need- ed role in climate policy[C]//Mapping the Energy Future - Voyage in Uncharted Territory-, 43rd IAEE International Conference, International Association for Energy Economics, 2022.
- [15] United Nations. Ad Hoc working group on long-term cooperative action under the convention[EB/OL]. (2007-12-14) [2023-11-05]. [https://unfccc.int/files/meetings/cop\\_13/application/pdf/cp\\_bali\\_act\\_p.pdf](https://unfccc.int/files/meetings/cop_13/application/pdf/cp_bali_act_p.pdf).
- [16] 曾雪兰, 黎炜驰, 张武英. 中国试点碳市场MRV体系建设实践及启示[J]. 环境经济研究, 2016, 1(1): 132-140.  
ZENG Xuelan, LI Weichi, ZHANG Wuying. The practice and revelation of monitoring, reporting and verification system construction in the carbon emissions trading pilots in China[J]. Journal of Environmental Economics, 2016, 1(1): 132-140.
- [17] 高炜, 白平, 王鸿, 等. CCUS项目的温室气体排放核算方法学思考[J]. 中国国土资源经济, 2022, 35(4): 12-21.  
GAO Wei, BAI Ping, WANG Hong, et al. Consideration on greenhouse gas emission accounting methodology of CCUS project[J]. Natural Resource Economics of China, 2022, 35(4): 12-21.
- [18] 刘牧心, 梁希, 林千果, 等. 碳中和驱动下CCUS项目衔接碳交易市场的关键问题和对策分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(14): 4731-4739.  
LIU Muxin, LIANG Xi, LIN Qianguo, et al. Key issues and countermeasures of CCUS projects linking carbon emission trading market under the target of carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(14): 4731-4739.
- [19] EGGLESTON H S, BUENDIA L, MIWA K, et al. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[R]. Swiss: IPCC, 2006: 6-21.
- [20] Shell Canada Limited. Quest carbon capture and storage project, Volume 1: Project description, appendix K: Quantifying the GHG reduction benefits from the quest carbon capture and storage (CCUS) project[R]. Canada: Prepared by Blue Source Canada ULC, 2010.
- [21] ISO. Carbon dioxide capture, transportation and geological storage (CCS): Quantification and verification: ISO/DIS 27920[EB/OL]. (2017-08) [2023-10-14]. <https://www.iso.org/standard/65981.html>.
- [22] European Union. Council Directive 85/337/EEC of 27 June 1985 on the assessment of the effects of certain public and private projects on the environment[EB/OL]. (2009-06-25) [2023-10-14]. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A31985L0337>.
- [23] DET Norske Veritas. DNV-RP-J202: Design and operation of CO<sub>2</sub> pipelines[EB/OL]. (2010-04) [2023-10-14]. <https://www.ucl.ac.uk/cclp/pdf/RP-J202.pdf>.
- [24] Canadian Standard Association. CSA Z741:12 (R2022)[EB/OL]. [2023-10-14]. <https://www.csagroup.org/store/product/Z741-12/>.
- [25] NATIONAL PETROLEUM COUNCIL. Meeting the dual challenge: A roadmap to at-scale deployment of carbon capture, use, and storage[EB/OL]. (2019-12-12) [2023-10-27].

- <https://www.energy.gov/sites/default/files/2021-06/2019%20-%20Meeting%20the%20Dual%20Challenge%20Vol%20II%20Appendix%20D.pdf>.
- [26] CCUS Set Plan. CCUS Roadmap to 2030 [EB/OL]. (2021-10) [2023-10-27]. [https://www.ccus-setplan.eu/wp-content/uploads/2021/11/CCUS-SET-Plan\\_CCUS-Roadmap-2030.pdf](https://www.ccus-setplan.eu/wp-content/uploads/2021/11/CCUS-SET-Plan_CCUS-Roadmap-2030.pdf).
- [27] Ministry of Economy, Trade and Industry. CCS long-term roadmap [EB/OL]. (2023-06-08) [2023-10-27]. <https://www.asiaec-col.eccj.or.jp/policynews-202203-3/>.
- [28] UK Government. The UK carbon capture, usage and storage (CCUS) deployment pathway: An action plan [EB/OL]. (2018-11-28) [2023-10-27]. <https://www.gov.uk/government/publications/the-uk-carbon-capture-usage-and-storage-ccus-deployment-pathway-an-action-plan>.
- [29] UK Government. Carbon capture, usage and storage net zero investment roadmap [EB/OL]. (2023-04-05) [2023-10-27]. <https://www.gov.uk/government/publications/carbon-capture-usage-and-storage-net-zero-investment-roadmap>.
- [30] UK Government. Carbon capture, usage and storage (CCUS) supply chains: A roadmap to maximise the UK's potential [EB/OL]. (2021-05-07) [2023-10-27]. <https://www.gov.uk/government/publications/carbon-capture-usage-and-storage-ccus-supply-chains-a-roadmap-to-maximise-the-uks-potential#:~:text=This%20roadmap%20sets%20out%20how,industrialised%20UK%20CCUS%20supply%20chain>.
- [31] European Parliament and of the Council. Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control) (recast) (Text with EEA relevance) [EB/OL]. (2010-12-17) [2023-11-15]. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32010L0075>.
- [32] Environmental Protection Agency. Standards of performance for greenhouse gas emissions from new stationary sources: Electric utility generating units [EB/OL]. (2014-08-01) [2023-11-15]. <https://www.federalregister.gov/documents/2014/01/08/2013-28668/standards-of-performance-for-greenhouse-gas-emissions-from-new-stationary-sources-electric-utility>.
- [33] Government of Canada. Coal-fired electricity generation regulations - overview [EB/OL]. (2013-12-16) [2023-11-15]. <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/climate-change/greenhouse-gas-emissions/regulations/coal-fired-electricity-generation.html>.
- [34] 宋婧, 杨晓亮. 国际 CCUS 法律监管框架对中国的借鉴与启示 [R]. 北京: 世界资源研究所, 2016.
- [35] European Union. Directive 2009/31/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the geological storage of carbon dioxide and amending Council Directive 85/337/EEC, European Parliament and Council Directives 2000/60/EC, 2001/80/EC, 2004/35/EC, 2006/12/EC, 2008/1/EC and Regulation (EC) No 1013/2006 [EB/OL]. (2009-08-23) [2023-11-15]. <https://www.legislation.gov.uk/eudr/2009/31>.
- [36] European Union. Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast) (Text with EEA relevance) Text with EEA relevance [EB/OL]. (2018-12-21) [2023-11-20]. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02018L2001-20181221&qid=1647270042844>.
- [37] Department for Business, Energy & Industrial Strategy. Energy Act 2008 [EB/OL]. (2008-11-26) [2023-11-20]. <https://www.legislation.gov.uk/ukpga/2008/32/contents>.
- [38] Department for Business, Energy & Industrial Strategy. Storage of carbon dioxide (Amendment of the Energy Act 2008 etc.) regulations 2011 [EB/OL]. (2011-07-13) [2023-11-20]. <https://www.legislation.gov.uk/uksi/2011/1483/contents/made>.
- [39] Department of Industry, Science, Energy and Resources. Offshore petroleum and greenhouse gas storage act 2006 [EB/OL]. (2006-07-21) [2023-11-20]. <https://www.legislation.gov.au/Details/C2017C00312>.
- [40] Australian Government. Carbon capture and storage method [EB/OL]. (2022-08-31) [2023-11-20]. <https://www.cleanenergyregulator.gov.au/ERF/Choosing-a-project-type/Opportunities-for-industry/carbon-capture-and-storage-method>.
- [41] EMILY M Gleichert, PHILIP K Lau, DALE D Smith. Carbon capture sequestration, utilization and storage projects and us federal environmental laws [EB/OL]. (2022-04-22) [2023-11-20]. <https://www.mayerbrown.com/en/perspectives-events/publications/2022/04/carbon-capture-sequestration-utilization-and-storage-projects-and-us-federal-environmental-laws>.
- [42] United States Congress. The energy improvement and extension act of 2008 [EB/OL]. (2008-10-03) [2023-12-15]. <https://www.congress.gov/bill/110th-congress/house-bill/6049>.
- [43] Department of Energy. Inflation reduction act of 2022 [EB/OL]. (2022-08-16) [2023-12-15]. <https://www.energy.gov/lpo/inflation-reduction-act-2022>.
- [44] Parliament of Canada. Fall economic statement implementation act, 2023 [EB/OL]. (2023-12-12) [2023-12-15]. <https://www.parl.ca/LegisInfo/en/bill/44-1/c-59>.
- [45] JOHNSTON B, WHITBY R. Draft Bill to help WA's resources industry reduce emissions [EB/OL]. Media Statement from the Government of Western Australia. 2022. <https://www.mediastatements.wa.gov.au/Pages/McGowan/2022/03/Draft-Bill-to-help-WAs-resources-industry-reduce-emissions.aspx>.
- [46] European Commission. Key cross border infrastructure projects [EB/OL]. [2023-12-15]. [https://energy.ec.europa.eu/topics/infrastructure/projects-common-interest/key-cross-border-infrastructure-projects\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/infrastructure/projects-common-interest/key-cross-border-infrastructure-projects_en).
- [47] Government of UK. Carbon capture, usage and storage (CCUS): Business models [EB/OL]. [2023-12-15] <https://www.gov.uk/government/publications/carbon-capture-usage-and->

- storage-ccus-business-models.
- [48] Congress of United States. Inflation reduction act of 2022[EB/OL]. (2021-09-27) [2023-12-17]. <https://www.congress.gov/bill/117th-congress/house-bill/5376>.
- [49] Congress of United States. Infrastructure investment and jobs act[EB/OL]. (2021-04-06) [2023-12-17]. <https://www.congress.gov/bill/117th-congress/house-bill/3684>.
- [50] Government of Canada. Strategic innovation fund[EB/OL]. (2017-07-05) [2023-12-17]. <https://ised-isde.canada.ca/site/strategic-innovation-fund/en>.
- [51] XIONG L, SHEN B, QI S, et al. Assessment of allowance mechanism in China's carbon trading pilots[J]. Energy Procedia, 2015, 75: 2510-2515.
- [52] European Union. Proposal for a regulation of the European Parliament and of the Council establishing a Union certification framework for carbon removals [EB/OL]. (2022-11-30) [2023-12-17]. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2022%3A672%3AFIN&qid=1669907104132>.
- [53] Department for Business, Energy and Industrial Strategy. Industrial carbon capture business models summary [EB/OL]. (2022-12) [2023-12-17]. [https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/1125226/industrial-carbon-capture-business-model-summary-december-2022.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1125226/industrial-carbon-capture-business-model-summary-december-2022.pdf).
- [54] Government of Alberta. Technology innovation and emissions reduction system[EB/OL]. [2023-12-17]. <https://www.alberta.ca/technology-innovation-and-emissions-reduction-system>.
- [55] European Union. Carbon border adjustment mechanism [EB/OL]. (2024-01-03) [2024-01-07]. [https://taxation-customs.ec.europa.eu/carbon-border-adjustment-mechanism\\_en](https://taxation-customs.ec.europa.eu/carbon-border-adjustment-mechanism_en).
- [56] IRENA. World energy transitions outlook 2023: 1.5 °C pathway [R]. German; International Renewable Energy Agency, 2023.
- [57] 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.
- [58] 黄莹, 廖翠萍, 赵黛青. 中国碳捕集、利用与封存立法和监管体系研究[J]. 气候变化研究进展, 2016, 12(4): 348-354.
- HUANG Ying, LIAO Cuiping, ZHAO Daiqing. Research on policy and legislation of carbon capture, utilization, and storage in China [J]. Advances in Climate Change Research, 2016, 12(4): 348-354.
- [59] 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 CO<sub>2</sub> capture, utilization and storage technology in China [J]. Petroleum Science Bulletin, 2023, 8(4): 391-397.
- [60] 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.
- [61] MI J. Research on the development of CCUS full process technology [J]. Journal of Power and Energy Engineering, 2022, 10(12): 34-44.
- [62] 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+9.
- KUANG Dongqin, LI Qi, CHEN Zhengao, 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+9.