

## “CCUS大规模集成化发展”专题

## 中美 CCUS 技术与政策体系对比

史明威<sup>1</sup>, 高仕康<sup>2</sup>, 吕昊东<sup>1,3</sup>, 马乔<sup>4</sup>, 张贤<sup>1</sup>, 李佳<sup>2</sup>

(1. 中国 21 世纪议程管理中心, 北京 100038; 2. 香港科技大学(广州) 社会枢纽, 广东 广州 511453; 3. 清华大学环境学院, 北京 100084; 4. 山东大学 能源与动力工程学院, 山东 济南 250100)

**摘要:** 碳捕集、利用与封存 (CCUS) 技术是指能够将二氧化碳从能源利用、工业生产等排放源或生物质利用尾气、空气中等不同碳源捕集分离, 并输送到适宜的场地加以利用或封存, 最终实现二氧化碳减排的技术组合, 是各国实现气候目标所不可或缺的重要技术支撑。碳达峰碳中和目标提出后, 中国已初步建立碳达峰碳中和相关政策体系, 积极推进各行业深度技术创新和系统性变革。CCUS 技术既是可以实现化石能源的大规模低碳利用的重要技术选择, 又是推进钢铁、水泥等难减排工业行业深度脱碳的可行技术方案, 更是未来抵消剩余温室气体排放的托底技术手段。为实现中美两国气候目标, 两国最终需要通过 CCUS 技术实现每年数十亿吨的二氧化碳减排量。美国是全球 CCUS 技术的先行者之一, 在政策法规制定、基础设施建设、大规模工程运营方面具有相对优势。为支撑净零排放目标, 美国通过一系列卓有成效的财税激励机制加快了 CCUS 项目大规模部署进展, 相关经验值得借鉴。文章通过比较中美两国在 CCUS 技术领域的潜力需求、政策法规、研发示范等情况, 为我国 CCUS 技术及配套政策环境发展提供参考, 并提出中美在 CCUS 技术领域开展合作的潜在方向。

**关键词:** 碳捕集、利用与封存; 碳中和; CO<sub>2</sub> 减排; 直接空气捕集技术; 生物质耦合碳捕集技术

**中图分类号:** X701 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4772(2024)10-0019-13

## Comparison on the development and policy frameworks of CCUS technology in China and the United States

SHI Mingwei<sup>1</sup>, GAO Shikang<sup>2</sup>, LYU Haodong<sup>1,3</sup>, MA Qiao<sup>4</sup>, ZHANG Xian<sup>1</sup>, LI Jia<sup>2</sup>

(1. The Administrative Center for China's Agenda 21 (ACCA 21), Beijing 100038, China; 2. Society hub, The Hong Kong University of Science and Technology (Guangzhou) Society hub, Guangzhou 511453, China; 3. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 4. School of Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan 250110, China)

**Abstract:** Carbon capture, utilization, and storage (CCUS) refers to a set of technologies that capture carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) from sources like energy production, industrial processes, biomass combustion, and directly from the atmosphere. This CO<sub>2</sub> is then transported to suitable sites where it is either utilized or stored, effectively reducing emissions. CCUS plays a critical role in helping countries achieve their climate goals by enabling significant reductions in CO<sub>2</sub> emissions across various sectors. It is an essential technological support for global climate action. After China's carbon neutrality goal was proposed, the country has established a policy framework relating to the targets. China is actively promoting deep technological innovation and systemic transformation across various industries to meet these climate objectives. CCUS is a major solution for enabling large-scale, low-carbon use of fossil fuels, providing a feasible pathway for deep decarbonization in hard-to-abate industries such as steel and cement. Additionally, it serves as a crucial technology for offsetting residual greenhouse gas emissions in the future, supporting long-term climate goals. To achieve the climate goals of both China and the United States, both countries ultimately need to achieve annual reductions of billions of tons of carbon dioxide through CCUS technology. The

收稿日期: 2024-04-16; 责任编辑: 黄小雨 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.CCUS24041602

作者简介: 史明威 (1995—), 男, 江苏溧阳人, 硕士。E-mail: shimw@acca21.org.cn

通讯作者: 张贤 (1981—), 男, 山东青岛人, 研究员, 博士。E-mail: zhangxian\_ama@163.com

引用格式: 史明威, 高仕康, 吕昊东, 等. 中美 CCUS 技术与政策体系对比 [J]. 洁净煤技术, 2024, 30(10): 19-31.

SHI Mingwei, GAO Shikang, LYU Haodong, et al. Comparison on the development and policy frameworks of CCUS technology in China and the United States [J]. Clean Coal Technology, 2024, 30(10): 19-31.



United States is currently leading global practice in CCUS development, with relative advantages in policy development, infrastructure, and large-scale project operations. To support its net-zero emissions goals, the U.S. has accelerated the large-scale deployment of CCUS projects through effective fiscal and tax incentives. These experiences provide valuable insights for other countries looking to advance CCUS initiatives. By comparing the potential demand, policies, regulations, and R&D demonstrations in the field of CCUS technology between China and the United States, this article provides references for the development of CCUS technology and its supporting policy environment in China, and proposes potential directions for cooperation between China and the United States in the field of CCUS technology.

**Key words:** carbon capture, utilization and storage; carbon neutrality; decarbonization; direct air capture; bioenergy with carbon capture and storage

## 0 引言

气候变化是当前全球面临的重大挑战，碳捕集、利用与封存（CCUS）技术能够帮助实现化石能源大规模清洁利用，还能为难减排工业行业提供切实可行的减排手段，直接空气捕集等碳移除技术更能够帮助直接减少大气中的CO<sub>2</sub>浓度，实现温室气体负排放，因此成为全球应对气候变化技术组合中不可或缺的关键组成部分。

近年来，学界围绕CCUS技术研发示范和相关政策法规已经开展了多项针对性研究。张九天等<sup>[1]</sup>对中国CCUS发展遇到的挑战进行了分析，并提出碳中和目标下CCUS发展重点。张贤等<sup>[2]</sup>对碳中和支撑技术体系进行了研究，并分析了CCUS技术对于中国碳达峰碳中和目标的支撑作用。VICTOR等<sup>[3]</sup>使用MARKAL模型分析了税法第45Q条款对于美国CCUS项目部署的影响。汤道路等<sup>[4]</sup>对美国CCUS相关法规制度进行了汇总研究，认为美国政府通过设定减排目标、利用公共资金支持、发放政府补贴、减税、设立信托基金和开展区域性合作项目的推动CCUS发展；马乔等<sup>[5]</sup>根据供给、需求、环境三类对中国CCUS相关政策进行了系统梳理，认为帮助营造CCUS商业环境的需求类和环境类政策的缺失正在制约中国CCUS技术发展。吴金焱<sup>[6]</sup>从法律法规、管理体系、研发投入、技术与价值链等方面探讨了英国CCUS相关政策发展情况。刘冬梅等<sup>[7]</sup>主要探讨了中国CCUS项目的环境影响评价机制，黄莹等<sup>[8]</sup>则重点关注中国CCUS立法和监管体系。然而，上述研究多数为针对单个国家的梳理分析，鲜有对于不同国家CCUS发展情况的对比。

美国与中国同为碳排放大国，拥有多样化CO<sub>2</sub>排放源和较为完备的基础设施，且都拥有万亿吨级的地质封存资源<sup>[9-10]</sup>，在CCUS发展路径方面具有一定相似性。本研究旨在着重分析中美两国在技术、项目、政策等方面发展部署情况的异同点，首先，从减排需求和行业减排贡献方面对比分析了CCUS技术对于中美两国实现气候目标的作用；其

次，研判了中美两国CCUS技术发展水平和示范项目部署情况及发展趋势，厘清了CCUS相关法律法规和激励机制的侧重点；最后，基于中美CCUS发展进程进一步探讨碳中和目标下中国CCUS技术发展面临的机遇和挑战，以期为中国CCUS技术发展提供建议。研究结论将能够为政策制定者提供碳中和目标下CCUS技术发展策略参考，同时也为中国CCUS未来技术研发部署路径提供科学依据。

## 1 CCUS成为中美两国应对气候变化技术选择

气候变化是全球各国正在面临的巨大挑战。联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）发布的第六次气候变化评估报告（Synthesis Report of the Sixth Assessment Report）指出，由于人为排放的大量温室气体，上个10 a全球表面温度已经较1850—1900年上升了1.1℃左右，2022年大气中的CO<sub>2</sub>平均体积分数为 $(417.9 \pm 0.2) \times 10^{-6}$ ，为工业化前（1750年之前）水平的150%<sup>[11]</sup>，这导致更多极端天气的出现以及对自然环境和人类社区的影响<sup>[12]</sup>。中国政府高度重视应对气候变化，在第七十五届联合国大会期间提出“CO<sub>2</sub>排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和”的宏伟目标。2023年中国碳排放总量约为126亿t<sup>[13]</sup>，且煤炭消费在中国整体能源消费中占比超过50%，实现碳中和目标任重道远<sup>[14-15]</sup>。

碳捕集、利用与封存技术不仅能够实现化石能源大规模低碳利用，同时能够帮助传统难减排工业行业实现CO<sub>2</sub>减排，直接空气捕集（Direct Air Capture, DAC）、生物质耦合碳捕集（Bioenergy with CCS, BECCS）等碳移除技术更能够通过负排放效应抵消非二温室气体所产生的温室效应，对于促进中国的能源结构平稳过渡、推动难减排行业绿色转型和实现碳中和目标“最后一公里”具有重要战略意义<sup>[16]</sup>。据估算，要实现碳中和目标，到2060年中国需要具备每年捕集和封存21.1亿~25.3亿t的CO<sub>2</sub>的能力，其中5亿~8亿t/a的减排

量需要由 DAC 和 BECCS 等碳移除技术提供<sup>[9]</sup>。近年来,CCUS 技术在中国得到迅速发展,“开展 CCUS 重大项目示范”被纳入国家“十四五”规划纲要,首个百万吨级 CCUS 示范工程已建成投运。

美国是 CCUS 技术领域的先行者,早在 20 世纪 70 年代就已经建成了世界首个利用 CO<sub>2</sub> 进行强化开采原油的商业设施。目前,美国已开展数个百万吨级 CCUS 示范部署,CO<sub>2</sub> 年捕集总量居世界首位,并且推出了多项适用于 CCUS 项目的政策法规和激励机制。碳达峰碳中和目标提出后,中国政府更加重视 CCUS 相关技术的研发应用,首次将其纳入“五年规划”,并在中共中央 国务院发布的多项政策文件中被提及。中国 CCUS 相关技术研发和项目示范进展迅速,部分技术已经领先国际水平,首个百万吨级项目已建成投产。然而,当前阶段中国国内已建成投运的 CCUS 示范项目每年可捕集约 400 万 t 的 CO<sub>2</sub>, 与实现碳中和目标所需相差较远。此外,CCUS 相关技术的高能耗、高成本问题,以及相关激励政策和商业模式的缺失,都在制约中国 CCUS 技术的发展。中美两国在第 26 届联合国气候变化大会期间发布了《中美关于在 21 世纪 20 年代强化气候行动的格拉斯哥联合宣言》,表示双方将在 CCUS 及清洁能源使用、减少甲烷排放等方面开展行动与合作,CCUS 已经成为中美两国在应对气候变化领域的重要关切<sup>[17]</sup>。当前美国已经通过一系列政策机制、经济激励措施和立法行动,为支持 CCUS 技术发展提供了坚实的政策框架和激励手段,其先进经验值得借鉴。

## 2 中美 CCUS 技术发展现状

### 2.1 美国 CCUS 技术成熟度现状

通过梳理《脱碳技术评估报告》《中国碳捕集利用与封存技术评估报告》等报告<sup>[16,18]</sup>,并参考中美两国已投运 CCUS 示范项目情况,本文梳理了中美两国在 CO<sub>2</sub> 捕集、利用、运输和封存等环节各项技术的成熟度(图 1)。技术成熟度(Technology Readiness Level,TRL)评价标准使用美国政府问责办公室(U.S. Government Accountability Office,GAO)发布于 2020 年的《技术成熟度指南》中的方法,并结合《中国碳捕集利用与封存技术评估报告》中的技术发展阶段综合考虑<sup>[16,19]</sup>。

在捕集技术环节,现阶段较为常用的吸收/吸附法在美国已经达到商业应用阶段(TRL9),美国有多个百万吨级商业 CCUS 设施采用燃烧前/燃烧后溶液吸收法捕集 CO<sub>2</sub><sup>[18]</sup>(图 1)。对于设施相对精简的膜分离技术,美国处于中试及以上阶段(TRL6),

相关技术也较为成熟。常压富氧燃烧技术在美国已经得到中试验证(TRL7),增压富氧燃烧技术尚处于基础研究阶段(TRL4);化学链燃烧技术在美国已有中试项目开展(TRL6)。在碳移除技术方面,DAC 技术在美国已经接近工业示范阶段(TRL7)。1PointFive 正在美国西南部的二叠纪盆地建设 50 万 t 级直接空气捕集设施,预计 2025 年建成投运<sup>[20]</sup>。在运输方面,美国已经建成投运了超过 8 000 km 的 CO<sub>2</sub> 运输管网,管道运输已经得到商业应用<sup>[21]</sup>。在 CO<sub>2</sub> 注入和封存环节,美国拥有长期经验,已经开展了多个百万吨级 CO<sub>2</sub> 强化采油和封存的商业设施,并有数个捕集、运输和注入全流程的大型工业集群在规划当中<sup>[20]</sup>。

### 2.2 美国 CCUS 项目运行现状

美国的 CCUS 项目信息来自《应对双重挑战:美国 CCUS 规模化部署路线图》《全球碳捕集与封存现状 2023》、CO<sub>2</sub>RE 全球 CCUS 项目数据库<sup>[20,22-23]</sup>。报告中共收录来自美国的 83 个投运中、建设中或规划中的 CCUS 项目,排除 2 个已停运项目剩余 81 个项目。其中已投运和间歇运行项目共 13 个,具备总捕集 CO<sub>2</sub> 能力约 2 392 万 t/a。已投运项目中规模最大的是 Century Plant 天然气处理设施,每年从天然气处理过程中捕集 840 万 t CO<sub>2</sub>,并通过 100 英里(约 160 km)的管道将 CO<sub>2</sub> 运输到位于得克萨斯州丹佛城的 CO<sub>2</sub> 分配中心用于后续的强化采油作业。在已投运项目中,CO<sub>2</sub> 捕集规模在 100 万 t/a 及以上的有 5 个,在 50 万~99 万 t/a 的有 2 个,其余 6 个项目的捕集规模在 10 万~49 万 t/a(图 2)。与中国相比,美国当前在运 CCUS 项目规模普遍较大(图 3)。

从项目的 CO<sub>2</sub> 来源看,4 个项目的 CO<sub>2</sub> 来自油气行业(天然气处理)的中低浓度伴生气。1972 年建成投运的 Terrell 天然气处理设施是世界首个捕集和利用 CO<sub>2</sub> 强化开采原油的商业项目,运行至今每年从天然气提纯过程中分离和捕集约 50 万 t CO<sub>2</sub>,并通过 220 英里(约 354 km)的管道运输到连接多个油田的管网系统用于强化采油<sup>[24]</sup>。其余 9 个项目都来自化工行业(4 个乙醇生产线,3 个化肥生产线,1 个制氢和 1 个合成燃料气生产线)的中高浓度排放源。位于北达科他州的 Great Plains 合成燃料工厂每年从煤气化过程中捕集 300 万 t CO<sub>2</sub>,并通过 205 英里(约 329 km)管道跨境运输到加拿大的萨斯喀彻温省用于强化采油。

从 CO<sub>2</sub> 的流向看(图 4),除伊利诺伊州工业集群和 Red Trail Energy 乙醇厂两个项目将捕集的 CO<sub>2</sub> 进行专门地质封存以外,其余 11 个已投运项目

CCUS技术		国家	概念阶段		基础研究			中试	工业示范		商业应用	TRL
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	
CO <sub>2</sub> 捕集技术	燃烧前-溶液吸收法	中国	[Progress bar]									8
		美国	[Progress bar]									9
	燃烧前-固体吸附法	中国	[Progress bar]									8
		美国	[Progress bar]									7
	燃烧后-溶液吸收法	中国	[Progress bar]									9
		美国	[Progress bar]									9
	燃烧后-固体吸附法	中国	[Progress bar]									8
		美国	[Progress bar]									9
	低温分馏法	中国	[Progress bar]									7
		美国	[Progress bar]									
	膜分离法	中国	[Progress bar]									7
		美国	[Progress bar]									
富氧燃烧-常压	中国	[Progress bar]									7	
	美国	[Progress bar]									7	
富氧燃烧-增压	中国	[Progress bar]									4	
	美国	[Progress bar]									4	
化学链燃烧技术	中国	[Progress bar]									6	
	美国	[Progress bar]									6	
直接空气捕集	中国	[Progress bar]									4	
	美国	[Progress bar]									7	
CO <sub>2</sub> 运输技术	罐车运输	中国	[Progress bar]									9
		美国	[Progress bar]									9
	船舶运输	中国	[Progress bar]									9
美国		[Progress bar]									9	
管道运输	中国	[Progress bar]									7	
	美国	[Progress bar]									9	
其他	CO <sub>2</sub> 合成矿物骨料	中国	[Progress bar]									8
		美国	[Progress bar]									9
	CO <sub>2</sub> 强化建材	中国	[Progress bar]									8
		美国	[Progress bar]									8
	CO <sub>2</sub> 加氢合成燃料 (例如甲烷、柴油、汽油、航空燃料)	中国	[Progress bar]									6
		美国	[Progress bar]									8
	CO <sub>2</sub> 加氢合成化学品 (例如甲醇、乙醇、甲酸)	中国	[Progress bar]									6
		美国	[Progress bar]									8
	电化学 (一氧化碳、合成气、甲醇、甲酸)	中国	[Progress bar]									6
		美国	[Progress bar]									7
	CO <sub>2</sub> 合成聚合物 (聚碳酸酯、聚醚多元醇)	中国	[Progress bar]									6
		美国	[Progress bar]									9
	生物利用 (光合微生物 (例如藻类) 可以制造生物燃料、动物饲料、保健品)	中国	[Progress bar]									8
		美国	[Progress bar]									8
CO <sub>2</sub> 强化采油	中国	[Progress bar]									8	
	美国	[Progress bar]									9	
陆上-枯竭油气田封存	中国	[Progress bar]									8	
	美国	[Progress bar]									9	
陆上-咸水层封存	中国	[Progress bar]									8	
	美国	[Progress bar]									9	
离岸-咸水层封存	中国	[Progress bar]									7	
	美国	[Progress bar]									5	

图1 中美CCUS相关技术(部分)成熟度对比

Fig. 1 Comparison of (partial) maturity of CCUS-related technologies between China and the United States

均利用CO<sub>2</sub>进行强化采油。怀俄明州的Shute Creek Gas天然气处理厂项目每年从天然气提纯过程中捕集700万t CO<sub>2</sub>，并通过142英里(约228 km)的管道输送到临近油田用于强化采油。位于伊利诺伊州的ADM农产品加工和生物燃料综合设施每年从

乙醇发酵过程中捕集11万t CO<sub>2</sub>，并注入附近的Mount Simon砂岩储层中进行专门地质封存。Red Trail Energy乙醇工厂每年从发酵过程中捕集约18万t CO<sub>2</sub>，并注入附近的Broom Creek砂岩储层中进行专门地质封存。

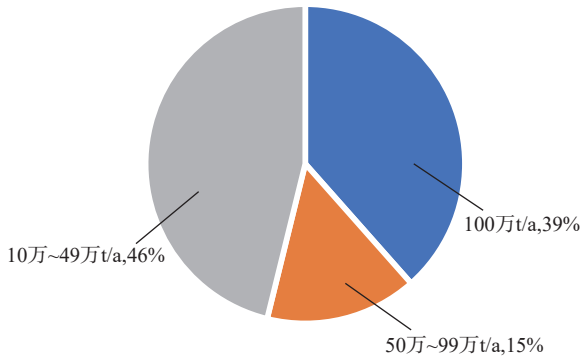
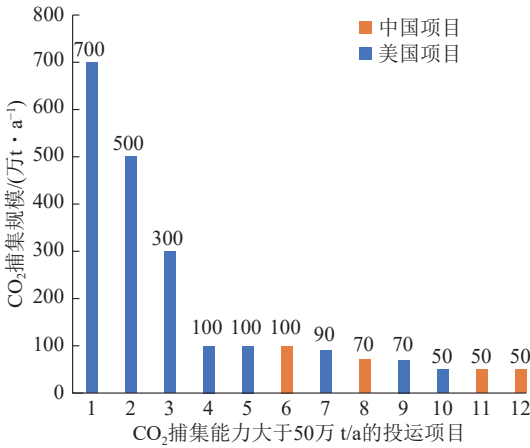


图 2 美国已投运项目规模

Fig. 2 Scale of operational projects in the United States



注: 1—Shute Creek Gas Processing Plant; 2—century Plant; 3—Century Plant; 4—air Products Steam Methane Reformer; 5—illinois Industrial Carbon Capture And Storage; 6—齐鲁石化-胜利油田 CO<sub>2</sub> 捕集利用与封存全流程项目; 7—Coffeyville Gasification Plant; 8—心连心碳捕集项目; 9—enid Fertilizer; 10—terrell Natural Gas Processing Plant; 11—国家能源集团泰州电厂 50 万 t/a CCUS 项目; 12—中石油吉林油田吉林石化合作 CCUS 项目

图 3 中美部分已投运项目规模对比

Fig. 3 A Comparison of selected operational project scales between China and the United States

当前阶段美国正在建设和规划中的 CCUS 项目呈现全流程、开放式、集群化趋势。正在建设和规划中的项目共 65 个, 预计 2030 年全部建成后能够提供超过 5 000 万 t 的 CO<sub>2</sub> 捕集量。项目捕集源来看仍以甲醇、乙醇、肥料生产等化工行业设施为主 (超过 40 个), 电力行业的燃煤/燃气烟气等低浓度排放源 CCUS 设施也有所增加 (14 个), 另有 2 个规划中的 DAC 项目。有 3 个规划和建设中的 CCUS 集群, 分别是路易斯安那 CCUS 集群 (Liberty Louisiana)、得克萨斯 CCUS 集群 (Bayou Bend CCS)、中西部 CCUS 网络 (Summit CCS Network)。Bayou Bend CCS 集群和 Liberty Louisiana 集群都选择设立在排放源集中的工业区, 短期内旨在面向该地区的各类排放源提供大规模

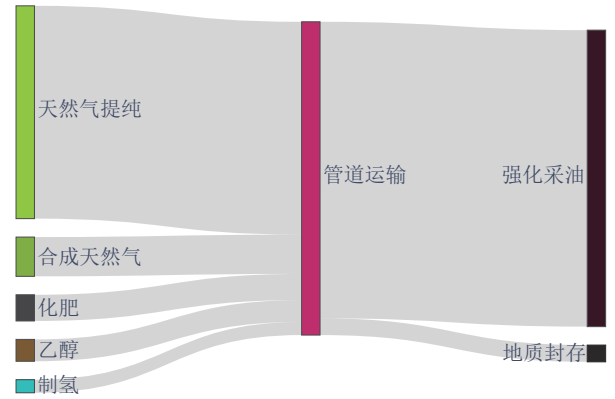


图 4 美国已投运 CCUS 项目碳流图

Fig. 4 Carbon flow diagram of operational CCUS projects in the United States

CO<sub>2</sub> 运输和陆上/海底封存服务, 并在长期运营过程中对临近的其他排放源提供开放式服务。Summit 正在美国中西部地区规划大型 CCUS 网络项目, 计划通过管道将中西部地区数个州的超过 30 个生物质乙醇工厂连接起来, 并将上述工业源捕集的 CO<sub>2</sub> 统一运输到北达科他州的封存点进行长期封存。此外, California Resources Corporation 正在规划一系列 CO<sub>2</sub> 封存设施 (Carbon Terravault 项目), 并最终实现超过 10 亿 t 的 CO<sub>2</sub> 封存。Carbon Terravault 的一期项目已经确定了位于加利福尼亚州的两个封存点, 计划在 2025 年前投入使用, 预计每年封存 100 万 t CO<sub>2</sub>。

### 2.3 中国 CCUS 技术成熟度现状

在捕集技术方面, 中国与美国发展水平基本相当, 吸收/吸附法已经得到成熟应用 (TRL7~TRL9) (图 1)。中国首个百万吨级 CCUS 项目: 齐鲁石化-胜利油田 CO<sub>2</sub> 捕集利用与封存全流程项目也采用燃烧后溶液吸收法捕集石化企业排放的 CO<sub>2</sub>。低温分馏和膜分离等技术在中国业已开展了 10 万 t 级工业示范 (TRL7), 成本下降潜力更大的增压富氧燃烧和化学链燃烧技术尚处于基础研究阶段 (TRL4~TRL6)。在碳移除技术方面, DAC 技术在中国尚处于基础研究阶段 (TRL4), 浙江大学和上海交通大学正在开展高性能吸收材料相关研究<sup>[5]</sup>。在运输方面, 目前中国运行中的 CCUS 项目大多采用罐车运输方式 (TRL9), 目前仅有总长约为 200 km 的 CO<sub>2</sub> 运输管网 (TRL7)<sup>[25]</sup>。中石化集团齐鲁石化-胜利油田项目建成投产了国内最长的陆上 CO<sub>2</sub> 运输管道, 全长 109 km, 设计最大 CO<sub>2</sub> 输量 170 万 t/a<sup>[9]</sup>。中国在部分 CO<sub>2</sub> 利用技术方面具有领先优势, 如 CO<sub>2</sub> 矿化利用、CO<sub>2</sub> 合成化学品、CO<sub>2</sub> 微藻利用等, 中国国内已经建成多个商业化示范项目<sup>[19]</sup>。

## 2.4 中国 CCUS 运营现状

中国的 CCUS 项目信息通过问卷调查和专家访谈方式收集。通过实地专访国内开展 CCUS 项目的 49 所高校、科研院所和企业的项目负责人、技术顾问和专家等,统计了 69 个投运、建设或规划中的二氧化碳捕集工程项目(包括项目所在地、CO<sub>2</sub> 来源、捕集量、捕集成本、能耗、运输方式、利用方式等信息)。经过筛选和去重,最终形成了包含 60 个规划中、建设中或投运中的 CCUS 项目信息的数据库。

其中已投运和间歇运行项目共 34 个,具备 CO<sub>2</sub> 总捕集能力约 583.2 万 t/a。已投运项目中规模最大的是齐鲁石化-胜利油田 CO<sub>2</sub> 捕集利用与封存全流程项目,该项目设计年捕集能力为 100 万 t CO<sub>2</sub>, 预计项目周期内将累计注入 1 000 万 t CO<sub>2</sub>, 通过罐车和管道运输方式送往胜利油田进行驱油封存,实现了二氧化碳捕集、驱油与封存一体化应用强化采油。截至 2023 年底,胜利油田已累计封存二氧化碳 60 万 t, 增油 5 万 t<sup>[26]</sup>。在已投运项目中,CO<sub>2</sub> 捕集规模在 50 万 t/a 及以上的有 4 个,规模在 10 万~49 万 t/a 的有 9 个,规模在 1 万~9 万 t/a 的有 14 个,规模 1 万 t/a 以下的有 6 个(图 5)。

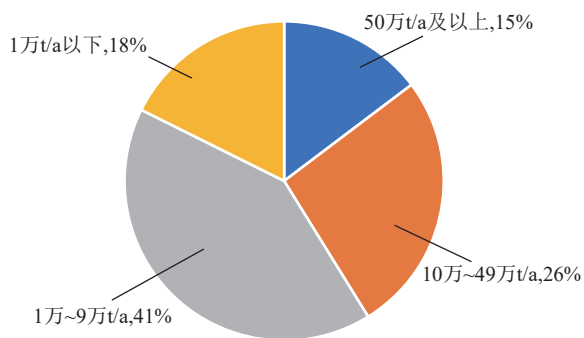


图 5 中国已投运项目规模

Fig. 5 Scale of operational projects in China

从项目的 CO<sub>2</sub> 来源来看(图 6), 11 个项目来自电力行业的燃煤/燃气锅炉(10 个燃煤电厂, 1 个燃气电厂)等低浓度排放源。2023 年 6 月, 国家能源集团泰州电厂 CCUS 项目正式投运, 成为当前阶段中国最大的燃煤电厂 CCUS 项目, 每年捕集 50 万 t CO<sub>2</sub> 用于强化采油和制备化学品等。16 个项目来自化工行业的工业尾气、过程气等(7 个煤化工工厂, 6 个石油化工厂, 2 个其他)中高浓度排放源。除胜利油田项目以外, 河南心连心深冷能源股份有限公司每年从化肥生产线捕集 70 万 t CO<sub>2</sub> 用于制备化学品和食品等。3 个项目来自水泥建材行业窑尾烟气和燃料气等(2 个水泥厂, 1 条玻璃生产线)低浓度排放源, 海螺集团白马山水泥厂建成投

运了中国首个水泥行业碳捕集项目, 每年从水泥窑尾烟气中捕集 5 万 t CO<sub>2</sub>。1 个项目的 CO<sub>2</sub> 来自钢铁行业的混合气。2022 年, 河钢集团在河北省张家口市建成投运了张氢能源开发和利用工程示范项目, 每年从用于富氢冶金的混合气中捕集 6 万 t CO<sub>2</sub>。3 个项目 CO<sub>2</sub> 来自油气田开采过程中产生的伴生气。

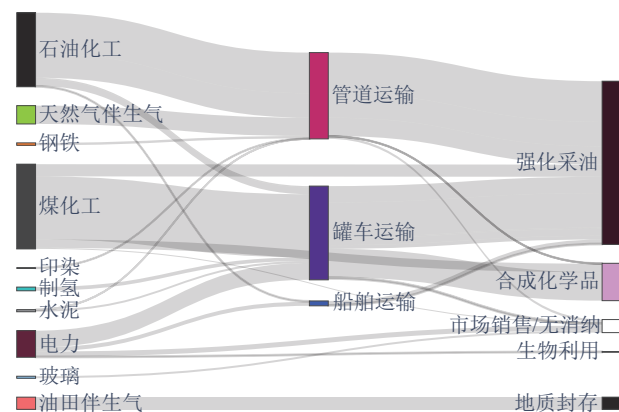


图 6 中国已投运 CCUS 项目碳流图

Fig. 6 Carbon flow diagram of CCUS projects in operation in China

从 CO<sub>2</sub> 的去向来看, 有 16 个项目将捕集的 CO<sub>2</sub> 用于强化采油。其中两个项目将捕集的部分或全部 CO<sub>2</sub> 进行永久封存: 延长石油榆林煤化公司每年从化工混合气中捕集 30 万 t CO<sub>2</sub>, 并运送到延长石油下属油田进行驱油和地质封存。中国首个 CO<sub>2</sub> 海底封存项目——中海油恩平 15-1 平台二氧化碳回注井每年从油田伴生气中捕集 30 万 t CO<sub>2</sub>, 并回注到海底地层中实现 CO<sub>2</sub> 封存。6 个项目选择将捕集的 CO<sub>2</sub> 用于合成醋酸、小苏打、碳酸氢铵、可降解塑料等高附加值化学品作为工业用途或再出售。华润电力公司海丰电厂每年从燃煤机组中捕集 2 万 t CO<sub>2</sub>, 并将其中部分 CO<sub>2</sub> 进行生物利用, 用于养殖微藻并制取藻粉等产品出售。2 个项目选择将捕集的 CO<sub>2</sub> 直接用于厂区内部的工业用途, 如用作焊接保护气等。5 个项目选择将捕集的 CO<sub>2</sub> 提纯到工业级或食品级, 或制取干冰用于直接市场销售。还有 5 个项目对于捕集的 CO<sub>2</sub> 没有明确的消纳途径。

当前阶段中国正在建设和规划中的 CCUS 项目呈现大规模、集群化趋势。建设和规划中的 CCUS 项目共 29 个, 预计 2030 年全部建成后将能够提供超过 700 万 t 的 CO<sub>2</sub> 捕集量。在建设施中有 9 个预期最终能够实现每年捕集超过 100 万 t CO<sub>2</sub>, 其中规模最大的是宁夏 300 万 t/a CCUS 示范项目。规划中的项目捕集源仍以电力行业(5 个)、化工行业(10 个)等为主, 更多钢铁行业(4 个)、水

泥行业(3个)等难减排行业的排放源开始规划 CCUS 设施。此外,有 4 个直接空气捕集示范项目正在规划建设当中,其中捕集规模最大的为百吨级。中国有 3 个规划中的 CCUS 集群,分别是新疆准噶尔 CCUS 集群、大亚湾区 CCUS 集群、华东开放式 CCUS 集群。新疆准噶尔 CCUS 集群由中石油规划建设,利用准噶尔盆地的 CO<sub>2</sub> 封存资源,为周边的能源、化工、建材等行业的排放源提供 CO<sub>2</sub> 捕集与封存解决方案。预期到 2025 年能够实现每年捕集和封存 150 万 t CO<sub>2</sub>,并最终在 2030 年前实现 300 万 t/a 的 CO<sub>2</sub> 捕集和封存能力。大亚湾区 CCUS 集群、华东开放式 CCUS 集群目前处于可行性研究阶段。

### 3 中美 CCUS 政策环境

本文梳理了中美两国共计 113 条 CCUS 相关政策条款、政府机构报告、政府支持项目等文件,其中美国 40 条,中国 76 条。本文将统计的政策条目划分为战略规划、技术研发、商业化、激励机制、法规标准和能力建设 6 类。战略规划指由政府机构牵头编制和公开发布的技术路线图、技术目标等;技术研发指由政府利用公共资金直接支持技术研发和示范;商业化指由政府机构直接采购相关技术或支持技术的产业部署;激励机制指通过财税方式为应用技术的第三方提供资金支持或优惠政策;法规标准指技术相关的行业规范、法律规定、参数标准、核算体系等;能力建设指由政府牵头编制发布的行业报告和说明文件,以及由政府牵头举办的人员培训和公众宣传等活动。

#### 3.1 美国 CCUS 政策环境

据不完全统计,美国政府发布的 CCUS 相关政策文件、规划、报告等共 60 余条。美国的相关政策较早关注到 CCUS 相关技术的扶植和管理,在 1980 年即制定了第一条适用于地下注入 CO<sub>2</sub> 的政策《地下注入控制方案》<sup>[27]</sup>。2021 年拜登政府领导下的美国重回《巴黎协定》,并提出 2050 年实现净零排放的目标,此后包含 CCUS 和 CDR 的相关政策条目进一步增加。美国发布的相关政策重点关注 CCUS 技术的商业化部署,包括直接拨付资金支持技术研发、鼓励 CCUS 商业化项目可行性研究、促进区域 CCUS 合作项目开展等。

##### 3.1.1 CCUS 在净零排放目标下的定位

美国政府将 CCUS 技术作为保障能源安全和减缓气候变化的手段之一,对 CCUS 技术的认知呈现“减碳-零碳-负碳-碳管理”的发展趋势。世界资源研究所于 2008 年发布的《碳捕集与封存技术指

南》中将 CCUS 技术与提高能源效率和可再生能源比例并列列为维持大气中二氧化碳浓度的技术手段<sup>[19]</sup>。

“巴黎协定”签署后,《美国本世纪中叶深度脱碳战略》《应对双重挑战:CCUS 规模化部署路线图》等文件认为 CCUS 技术是解决日益增长的能源需求与减缓温室气体排放之间矛盾的重要抓手之一<sup>[22, 28]</sup>。2021 年 11 月,美国政府正式提出在 2050 年前实现净零排放的目标。《美国的中长期战略:2050 净零排放路线图》《脱碳技术评估报告》等文件认为 CCUS 技术是“可用于减缓、停止甚至逆转大气中二氧化碳上升水平的技术手段之一”。此后,DAC 等负排放技术开始受到更多关注<sup>[18, 29]</sup>。美国能源部发布了“负碳技术攻关计划(Carbon Negative Shot)”,作为其 8 个“能源地球攻关计划(Energy Earthshots Initiative)”之一,旨在 10 a 内大幅扩大碳移除技术的部署规模,并提出“每吨 CO<sub>2</sub> 的移除与封存成本降低至 100 美元以下”的明确目标<sup>[30]</sup>。《美国碳捕集与封存技术评估报告》《商业化路线图:碳管理》等文件均强调了 DAC 等负排放技术和 CO<sub>2</sub> 利用转化技术的重要性,提出到 2050 年需要通过 CCUS 和 CDR 技术每年捕集和封存 4 亿~18 亿 t CO<sub>2</sub><sup>[10, 21]</sup>。2023 年 4 月,美国总统拜登提出并邀请各国参与“碳管理挑战(Carbon Management Challenge)”倡议,提出在 2030 年前通过国际合作实现全球捕集和封存 120 亿 t CO<sub>2</sub>,目前巴西和瑞士两国已经宣布加入该倡议<sup>[31]</sup>,计划在第二十八届联合国气候变化大会期间继续邀请更多国家加入这项倡议。

##### 3.1.2 CCUS 技术研发公共资金支持情况

美国政府通过直接拨款方式支持国内的 CCUS 技术研发、项目开发、设施建设、商业项目激励等。美国能源部(DOE)长期以来一直支持 CCUS 技术的研发工作,截至目前已经投入超过 180 亿美元的专项拨款。从 2010 财年到 2022 财年,国会共为 FECM 提供了总计 92 亿美元,其中 27 亿美元用于 CCS 相关预算项目。此外,国会还在 2009 年的《美国复苏与再投资法案(ARRA)》中为 CCS 提供了另外 34 亿美元的额外拨款。在《基础设施投资和就业法案(IIJA)》中,国会在 2022 财年至 2026 财年为 CCUS 技术提供了 85 亿美元的额外拨款,其中部分资金专门用于建设新的商业碳捕集和碳封存设施。此外,IIJA 还提供了 36 亿美元的额外资金用于支持建立四个区域性 DAC 中心<sup>[21]</sup>。

##### 3.1.3 鼓励、引导和推动 CCUS 商业化项目落地

美国政府高度重视 CCUS 项目的商业化部署,组织系列倡议行动为 CCUS 商业项目提供前期战略

研究,并利用公共资金直接支持企业开展CCUS商业项目。为推动商业化CCUS设施在全美的部署,过去20a,美国能源部在全美发起了多个区域合作的CCUS倡议行动。美国能源部于2003年发起由7个“区域性碳封存伙伴计划”(RCSPs)组成的工作网络,旨在研究设计适宜美国不同地区二氧化碳封存的技术、基础设施和法规标准<sup>[32]</sup>。后续DOE又启动了“安全碳封存设施计划(CarbonSAFE)”和“CCUS区域行动计划(Regional Initiative to Accelerate CCUS Deployment)”,基于前序计划为大规模全流程CCUS项目开展可行性调研、需求分析、信息共享、技术转移等活动,为美国在2030年前部署商业规模(CO<sub>2</sub>捕集规模大于5000万t/a)CCUS设施提供参考<sup>[33-34]</sup>。除开展区域性合作倡议外,美国政府还通过公共资金支持来鼓励绿色技术创新和商业化部署。2021年,基础设施投资与就业法案(IIIA)提供了80亿美元用于建立地区绿色氢能中心,包括一个CCUS技术耦合制氢中心。2023年,美国能源部(DOE)宣布向53家小型企业授予总额超过6800万美元用于支持清洁能源相关技术,其中包括CCUS项目<sup>[35]</sup>。为支持净零排放目标实现,DOE于2021年发布了“能源地球攻关计划(Energy Earthshots)”,提出“在10年内将每吨CO<sub>2</sub>的净减排成本降低到100美元以下”的目标。

除上述活动外,美国政府通过总结CCUS项目建设和管理经验,持续编制相关行业报告,为企业提供参考。DOE自2011年起开始编制《最佳实践系列手册》,旨在总结和共享过往开展碳捕集与封存项目的经验和方法,为CCUS基础设施建设和商业项目开展提供参考<sup>[36]</sup>。截至目前DOE已经编制和发布了7个最佳实践手册,涵盖CO<sub>2</sub>封存地选址、勘察、监测、建模、风险评估、现场操作以及公众宣传等方面信息。根据《利用创新技术减排法案》的指示,美国环境质量委员会(CEQ)于2022年发布了《CCUS指南》,总结了在联邦层面开展CCUS和碳移除项目审批、环境影响评价、公众意见咨询等工作的方法,以优化美国联邦机构中与CCUS项目相关的工作流程<sup>[37]</sup>。

#### 3.1.4 激励和约束手段

美国政府通过提供税收抵免(税法45Q条款)的方式鼓励CCUS商业项目的开展,同时部分州政府提供的碳信用和政府采购机会也为CCUS商业项目提供了激励<sup>[38]</sup>。2008年颁布的美国税法第45Q条款为CCUS项目提供10美元/tCO<sub>2</sub>(强化采油)和20美元/tCO<sub>2</sub>(封存)的税收抵免。经过多次上

调,当前45Q条款为CCUS项目捕集的二氧化碳提供85美元/t(封存)和60美元/t(强化采油)的税收抵免;对于直接空气捕集(DAC)项目,45Q提供180美元/t(封存)和130美元/t(利用)的税收抵免。美国加利福尼亚州通过实行低碳燃料标准计划(LCFS)建立绿色燃料信用市场,要求区域内的燃料经销商减少其所生产燃料的碳排放强度,使得利用CCUS和碳移除技术生产低碳燃料能够赚取碳信用并产生经济效益。加利福尼亚州低碳燃料标准市场中的信用价格近年来CO<sub>2</sub>大约在60~200美元/t<sup>[10]</sup>。此外,美国能源部于2023年7月宣布提供1亿美元用于各州政府和公共机构采购“利用捕集的CO<sub>2</sub>生产的产品”,这也为CO<sub>2</sub>捕集和利用释放积极信号<sup>[39]</sup>。

美国政府通过发布标准、规定和管理办法等文件对CCUS项目建设运营过程中可能涉及的CO<sub>2</sub>所有权归属、CO<sub>2</sub>运输、注入和封存等问题进行解释和约束。美国交通部(DOT)下属管道和危险品安全管理局(PHMSA)长期监管CO<sub>2</sub>运输管道的建设、运营和维护,并负责制定和更新有关标准<sup>[40]</sup>。二氧化碳运输管道主要作为私人承运商运营,管道中的二氧化碳归其所有,直至最终交付给第三方。二氧化碳输送基础设施的许可通常由各州政府处理。对于穿越联邦土地的管道,运营商须向联邦有关机构申请通行权,并允许第三方有偿使用该管道基础设施。地下空间权利通常与地表权利归属相同,当孔隙空间或矿权归政府所有时,可以通过租赁等方式获得访问权限。在联邦层面,开展CO<sub>2</sub>注入和封存活动须按照环境保护局(EPA)地下注入控制计划(UIC)申请许可,UIC为注入井的井筒建设、运行与维护、监测与测试、报告与记录、场地关闭、财务责任以及注入后的持续监测和维护责任等作出了规定。UIC将注入井分为6类,涉及CCUS项目的主要有UIC计划下的第2类井(强化油气开采)和第6类井(CO<sub>2</sub>长期封存),地下注入井的运营商同时须遵循其所在州政府所制定的许可要求和标准<sup>[21]</sup>。UIC网站为运营商提供了一系列说明文件,帮助厘清注入井的申报、注入、监测和关停等系列流程<sup>[27]</sup>。2021年的《基础设施投资与就业法案》提供了2500万美元和5000万美元给EPA和各州政府,用于优化第六类注入井许可的审批流程<sup>[41]</sup>。此外,为鼓励CO<sub>2</sub>海底封存,联邦政府于2021年对《外大陆架土地法案》进行修订,补充了在联邦海域开展CO<sub>2</sub>海底封存的有关规定和审批机制。

#### 3.2 中国CCUS政策环境

据不完全统计,中共中央国务院共发布过



70 余条涉及 CCUS 的有关政策条目。中华人民共和国国务院于 2006 年发布的《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020 年)》中首次提出“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”<sup>[42]</sup>。2020 年,中国国家主席习近平提出了碳达峰碳中和目标。此后,五年规划中首次提及了“开展 CCUS 等重大项目示范”,《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》《2030 年前碳达峰行动方案》等纲领性文件也将推动 CCUS 研发部署纳入其中,CCUS 技术受到官方政策文件越来越多的关注<sup>[43-44]</sup>。中国 CCUS 相关政策在激励机制和法律法规方面存在明显缺失,以鼓励 CCUS 研发部署和开展碳中和目标下 CCUS 战略定位和发展路径研究为主,CCUS 相关技术研发主要以国家科技计划的形式推动。

### 3.2.1 碳中和目标下 CCUS 技术地位演变

碳中和目标提出后,中国政府对于 CCUS 技术在碳中和技术组合中的总体定位由“化石能源大规模低碳利用的战略储备技术”逐渐转变为“实现碳中和目标技术组合的重要构成部分”。《中国 CCUS 技术发展路线图(2011 版)》《中国 CCUS 技术发展路线图(2019 版)》等文件将 CCUS 技术定位为“未来中国减少二氧化碳排放和保障能源安全的重要战略技术选择”<sup>[45-46]</sup>。碳中和目标提出后,2021 年发布的《中国 CCUS 技术评估报告》将 CCUS 技术定位为“我国实现碳中和目标技术组合不可或缺的重要构成部分”<sup>[19]</sup>。同年,《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》中提出“实施重大节能低碳技术产业化示范工程,开展近零能耗建筑、近零碳排放、碳捕集利用与封存(CCUS)等重大项目示范”,这是 CCUS 技术首次在国家五年规划中被提及<sup>[47]</sup>。此后,《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》《2030 年前碳达峰行动方案》等碳达峰碳中和纲领性文件也强调了推动 CCUS 技术研发示范和规模化应用。

### 3.2.2 CCUS 技术研发

中国政府主要通过国家科技计划支持 CCUS 相关技术的研发和示范,并通过国务院出台鼓励性政策文件促进 CCUS 技术研发示范。根据黄晶等的统计,2003 年国家自然科学基金资助了二氧化碳驱替煤层气的相关基础研究,成为第一个由国家科技计划资助的 CCUS 相关研究。截至 2020 年,国家重点基础研究发展计划(“973”计划)、国家高技术研究发展计划(“863”计划)、国家重大科技专项、

国家重点研发计划、科技部国际合作项目及国家自然科学基金委员会等都为 CCUS 相关技术的研发示范提供了资金支持<sup>[24]</sup>。除国家科技计划外,国务院出台了系列政策文件鼓励 CCUS 相关技术研发示范。如《工业领域碳达峰实施方案》《“十四五”生态环境领域科技创新专项规划》《高耗能行业重点领域节能降碳改造升级实施指南(2022 年版)》等<sup>[48-50]</sup>。但上述政策文件内容以鼓励对 CCUS 各环节技术研发示范为主,并未提及公共资金投入。

### 3.2.3 鼓励 CCUS 投融资

中国政府主要通过将 CCUS 技术纳入技术推广目录的方式支持技术的商业化推广部署。由国家发展改革委和生态环境部发布的《国家重点推广的低碳技术目录》旨在加快低碳技术的推广应用,促进中国应对气候变化目标实现,其第一批、第二批和第四批目录都收录了 CCUS 相关技术<sup>[51]</sup>。由国家发展改革委发布的《战略性新兴产业重点产品和服务指导目录》《产业结构调整指导目录》《绿色技术推广目录》等都将 CCUS 列为推动社会经济发展全面绿色转型的关键技术之一<sup>[52-54]</sup>。此外,“双碳”目标提出后,《绿色债券支持项目目录》《气候投融资试点方案》等文件也开始收录 CCUS 示范项目,从气候投融资角度支持 CCUS 项目的建设和运营<sup>[55-56]</sup>。生态环境部发布的《环境保护、节能节水项目企业所得税优惠目录(2021 年版)》收录了“CO<sub>2</sub> 封存量不低于 10 万 t/a 的 CCUS 项目”,符合条件的经营企业可免缴项目运营前 3 a 的所得税,同时第 4 年至第 6 年的项目所得税减半<sup>[57]</sup>。

部分地方政府和机构也出台了针对 CCUS 项目的激励手段,如中国建设银行兰溪支行为浙能兰溪 CO<sub>2</sub> 捕集与矿化利用集成示范项目提供了超过 800 万元专项贷款,山东分行也为齐鲁石化-胜利油田 CO<sub>2</sub> 捕集利用与封存全流程项目提供了绿色贷款。此外,全国碳排放权交易市场也为企业开展 CCUS 项目释放了积极信号。然而,现阶段碳市场仅纳入了国内部分发电企业,且 CCUS 项目减排量并未被纳入碳排放交易体系,将 CCUS 项目与碳交易市场相结合的方法学仍有待研究。

### 3.2.4 CCUS 法规标准体系逐步完善

在中国,CCUS 项目常作为一般工程项目开展,当前阶段具有针对性的法规标准较少。2016 年发布的《二氧化碳捕集、利用与封存环境风险评估技术指南》对 CCUS 项目的环境风险评估工作的一般性的原则、内容以及框架性程序进行了规定,为后续 CCUS 项目环境风险评估工作开展提供了参考<sup>[58]</sup>。2018 年发布的《烟气二氧化碳捕集纯化工程

设计标准》对新建、扩建或改建的烟气二氧化碳捕集纯化工程提供了设计标准。然而,适用于常规工程项目的法规标准难以完全覆盖 CCUS 项目的需求。国内现有的法规框架对于 CCUS 项目不同环节的 CO<sub>2</sub> 归属、CO<sub>2</sub> 运输管道的设计标准、地下空间归属权、项目关停后的长期监测责任等都未能提供明确参考。

中国政府通过开展战略研究,厘清碳中和目标下 CCUS 技术作用与发展路径,促进完善国内 CCUS 相关法规标准。在战略研究方面,科技部先后发布了《中国二氧化碳利用技术评估报告》《中国碳捕集利用与封存技术评估报告》《中国耦合 CCUS 制氢机遇》《中国碳捕集利用与封存年度报告(2023)》等一系列报告,梳理国内 CCUS 技术研发、项目示范、政策部署、行业应用等发展情况,并规划碳中和目标下 CCUS 技术发展路径<sup>[9-16]</sup>。针对 CCUS 发展环境的塑造,中共中央 国务院印发的《国家标准化发展纲要》中提出“研究制定生态

碳汇、碳捕集利用与封存标准”<sup>[59]</sup>;发改委联合生态环境部和国家统计局印发的《关于加快建立统一规范的碳排放统计核算体系实施方案》中提出“推动对碳捕集封存与利用、碳汇等领域的核算研究,进一步夯实方法学基础”<sup>[60]</sup>;发改委等九部门联合印发的《建立健全碳达峰碳中和标准计量体系实施方案》中提出“加快制定碳捕集利用与封存相关的术语、监测、分类评估等基础标准。制定工业分离、化石燃料燃烧前捕集、燃烧后捕集、富氧燃烧捕集等碳捕集技术标准,碳运输技术标准,地质封存、海洋封存、碳酸盐矿石封存等碳封存技术标准。开展地质利用、化工利用、生物利用等碳应用技术标准研制”<sup>[61]</sup>。

当前阶段,中国已经开展了多行业全技术链条的 CCUS 实践,但从示范项目规模、基础设施建设、财税激励手段、政策环境营造等方面来看,仍需开展大量工作。中美 CCUS 情况量化对比详见表 1。

表 1 中美 CCUS 情况量化对比表<sup>[9, 20-21, 25, 38-39, 55, 62-64]</sup>

Table 1 Quantitative comparison table of CCUS in China and the United States<sup>[9, 20-21, 25, 38-39, 55, 62-64]</sup>

国别	规模化项目数 (已投运)	规模化项目数 (规划建设中)	跨行业合作项目数 (已投运)	碳捕集规模 (以 CO <sub>2</sub> 计) / (万 t · a <sup>-1</sup> )	CO <sub>2</sub> 运输管道总长度 / km	2022年绿色贷款 额度 / 十亿美元	2022年碳补贴额度 (以 CO <sub>2</sub> 计) / (美元 · t <sup>-1</sup> )	2022年碳市场 交易量 / (百万吨 CO <sub>2</sub> )	2022年碳市场 交易额 / (百万欧元)	务实支持 政策数量
美国	8	25	7	2 392	超过 8 000	64.4	固定源捕集: 60 (CO <sub>2</sub> 利用)、 80 (CO <sub>2</sub> 封存); 直接空气捕集: 130 (CO <sub>2</sub> 利用)、 180 (CO <sub>2</sub> 封存)	2 505	62 677	3
中国	4	8	4	583.2	接近 300	85.4	0	85	504	1

注:规模化项目系指捕集能力大于 50 万 t/a 的项目;务实支持政策系指能为 CCUS/CCS 项目提供绿色贷款/无息贷款/碳补贴/退税/税收减免等务实支持的政策法规。

## 4 结论与建议

### 4.1 结论

1) CCUS 在中美两国实现气候目标进程中将发挥重要作用,与美国相比,中国实现碳中和目标时间紧、任务重。为帮助实现气候目标,除提升可再生能源比例、提高能源效率、燃料/原料替代等手段外,中美两国都需要在未来通过 CCUS 技术实现每年数十亿吨的 CO<sub>2</sub> 捕集和封存量,两国已探明的地质封存资源能够满足这一需求。美国的温室气体排放量已经于 2007 年达峰,而中国在 2030 年实现碳达峰后仅有 30 a 的时间窗口实现碳中和,在更高的

峰值基础上面临更短的减排窗口。

2) 当前阶段美国 CCUS 示范工程呈现大规模、集群化、封存量等特点,中国的项目示范则呈现全流程、行业分布广、利用方式多样的特征。与美国相比,中国具有行业丰富、产业链条长的优势,已投运的 CCUS 示范工程广泛分布在能源、工业等部门,涵盖多种浓度排放源,为不同种类的 CO<sub>2</sub> 捕集和利用技术示范提供条件。然而,现阶段中国已投运和建设中的 CCUS 示范工程的捕集规模普遍较小,在运项目中仅一个超过百万吨级,且普遍缺乏管网等基础设施支持。捕集的 CO<sub>2</sub> 存在难以消纳的问题,各类利用项目(除驱油利用外)的

CO<sub>2</sub> 利用量在百吨至几万吨不等,难以支撑每年数百万吨的捕集量,且目前仅一个示范工程开展了 CO<sub>2</sub> 专门地质封存。

3) 美国政府侧重于通过公共资金投入、财税激励机制、法规环境营造、能力建设活动等手段促进商业 CCUS 项目的部署,现阶段中国缺乏适合商业 CCUS 项目部署运营的政策环境。美国政府为商业 CCUS 项目直接提供资金支持,通过组织区域合作项目探查 CO<sub>2</sub> 封存资源,开展源汇匹配研究,厘清商业 CCUS 项目瓶颈,通过税法第 45Q 条款为商业 CCUS 项目运营提供激励,通过法规标准引导 CO<sub>2</sub> 运输、注入和封存活动。中国政府当前阶段侧重于关注 CCUS 技术的研发示范,尚未在国家层面开展系统性的区域封存资源和源汇匹配等的战略研究,同时缺乏适用于商业 CCUS 项目建设运营的法规标准和激励机制,适合中国国情的商业 CCUS 项目运营模式尚未形成。

4) 为在中国推动 CCUS 技术研发和部署应用,应开展碳中和技术发展路线图研究,明确 CCUS 技术在碳中和支撑技术体系中的定位和作用,以及从碳达峰到碳中和不同时间节点 CCUS 技术发展的阶段性目标;明确 CCUS 项目建设的主管部门和申报流程,明确 CO<sub>2</sub> 捕集设施、储存设施、运输管道设计建造、CO<sub>2</sub> 注入设施设计建造标准,以及地下空间归属使用权、CO<sub>2</sub> 运输和封存监管责任分配等,帮助形成设计施工流程清晰、权责利分配明确的 CCUS 产业体系;设计适合我国国情的 CO<sub>2</sub> 捕集、利用和封存激励手段,为企业投资 CCUS 项目建设提供稳定预期,研究 CCUS 项目与碳市场结合方法,帮助营造适合 CCUS 产业长期可持续发展的政策环境。

## 4.2 建议

考虑 CCUS 技术在中国实现碳达峰碳中和目标中的关键作用及美国在 CCUS 发展方面的比较优势,本研究对中国“双碳”目标下的 CCUS 相关部署提出以下建议:

1) 构建面向碳中和目标的 CCUS 技术体系,加快推进研发示范和项目部署。明确碳中和目标下 CCUS 技术需求,加强部署低成本、低能耗捕集技术研发,考虑扩大难减排行业的 CCUS 部署规模,超前部署 BECCS、DAC 等负排放技术研发示范。推进 CO<sub>2</sub> 捕集、运输和封存基础设施的规划设计和建设,推动百万吨级以上的大规模全链条集成示范工程部署,开展开放式 CCUS 产业集群的减排效率、源汇匹配、运营模式等研究分析。

2) 制定完善相关制度法规和标准体系,推动能

力建设。制定 CCUS 行业规范、制度法规以及科学合理的建设、运营、监管、终止标准体系。明确在役电厂及工业排放源改造的技术适用性标准,大幅提升新建电厂的碳排放标准,完善输送管道的设计及安全标准,分类制定 CO<sub>2</sub> 利用或封存的品质标准。明确 CO<sub>2</sub> 陆上/海底封存的相关技术标准、审批流程、安全监测标准、责任分配、孔隙空间所有权分配等系列法规。编制和发布 CCUS 项目启动、运营、监管流程手册,为企业开展相关项目提供参考。倡导多主体参与,加强 CCUS 公众宣传和教育规划。通过媒体宣传、公众教育和企业社会责任活动,提高公众对 CCUS 的认识和支持程度,促进社会共识形成。

3) 探索针对 CCUS 项目的激励机制,引导形成各主体有效参与的商业模式。进一步明确碳中和目标下 CO<sub>2</sub> 排放核算方法,开展多行业、多技术种类、多工艺流程的 CCUS 项目全生命周期 CO<sub>2</sub> 减排核算。尽快将 CCUS 项目减排量纳入碳交易市场,使 CCUS 项目可以通过碳市场实现盈利和长期运营。研究设立 CCUS 专项基金,鼓励商业银行为规划中的 CCUS 项目设计和发布绿色贷款,根据 CO<sub>2</sub> 减排量为已投运的 CCUS 项目提供退税、税收减免、补贴等,打通 CCUS 项目低成本投融资渠道,减少企业投资开展 CCUS 项目的前期顾虑。

## 参考文献 (References):

- [1] 张九天,张璐.面向碳中和目标的碳捕集、利用与封存发展初步探讨[J].热力发电,2021,50(1):1-6.  
ZHANG Jiutian, ZHANG Lu. Preliminary discussion on development of carbon capture, utilization and storage for carbon neutralization[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(1): 1-6.
- [2] 张贤,李凯,马乔,等.碳中和目标下 CCUS 技术发展定位与展望[J].中国人口·资源与环境,2021,31(9):29-33.  
ZHANG Xian, LI Kai, MA Qiao, et al. Orientation and prospect of CCUS development under carbon neutrality target[J]. China Population, Resources and Environment, 2021, 31(9): 29-33.
- [3] VICTOR N, NICHOLS C. CCUS deployment under the U. S. 45Q tax credit and adaptation by other North American governments: MARKAL modeling results[J]. Computers & Industrial Engineering, 2022, 169: 108269.
- [4] 汤道路,苏小云.美国“碳捕捉与封存”(CCS)法律制度研究[J].郑州航空工业管理学院学报(社会科学版),2011,30(5):159-162.  
TANG Daolu, SU Xiaoyun. Research on the legal system of carbon capture and storage (CCS) in the United States[J]. Journal of Zhengzhou Institute of Aeronautical Industry Management (Social Science Edition), 2011, 30(5): 159-162.
- [5] MA Q, WANG S, FU Y, et al. China's policy framework for carbon capture, utilization and storage: Review, analysis, and outlook[J]. Frontiers in Energy, 2023, 17(3): 400-411.
- [6] 吴金焱.英国碳捕集与封存的发展及对中国的启示[J].中国煤

- 炭, 2016, 42(6): 130-134.
- WU Jinyan. UK's experience in carbon capture and storage (CCS) development and inspiration to China[J]. *China Coal*, 2016, 42(6): 130-134.
- [7] 刘冬梅, 陈颖, 李瑶. 中国碳捕集、利用与封存项目环境影响评价技术建议[J]. *环境污染与防治*, 2014, 36(4): 106-109.
- LIU Dongmei, CHEN Ying, LI Yao. Study on technical advices of environmental impact assessment for carbon capture, utilization and storage project in China[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2014, 36(4): 106-109.
- [8] 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(04): 348-354.
- HUANG Ying, LIAO Cuiping, ZHAO Daiqing. Research on policy and legislation of carbon capture, utilization, and storage in China[J]. *Climate Change Research*, 2016, 12(04): 348-354.
- [9] 张贤, 杨晓亮, 鲁玺, 等. 中国二氧化碳捕集利用与封存年度报告(2023)[R]. 北京: 21世纪议程管理中心, 2023.
- [10] FAHS R, JACOBSON R, GILBERT A, et al. Pathways to commercial liftoff: Carbon management[R]. US Department of Energy, 2023.
- [11] 中国气象局气候变化中心. 中国温室气体公报 [EB/OL]. (2023-11)[2024-04-08]. <https://www.cma.gov.cn/zfxgk/gknr/qxbg/202312/P020231218348621734404.pdf>.
- [12] PARMESAN C, MORECROFT M D, Trisurat Y. Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability[R]. GIEC, 2022.
- [13] IEA. CO<sub>2</sub> Emissions in 2023[R]. Paris: IEA, 2024: 1-22.
- [14] 张贤, 郭悦悦, 孔慧, 等. 碳中和愿景的科技需求与技术路径[J]. *中国环境管理*, 2021, 13(1): 65-70.
- ZHANG Xian, GUO Caiyue, KONG Hui, et al. Technology demands and approach of carbon neutrality vision[J]. *Chinese Journal of Environmental Management*, 2021, 13(1): 65-70.
- [15] 项目综合报告编写组. 《中国长期低碳发展战略与转型路径研究》综合报告[J]. *中国人口·资源与环境*, 2020, 30(11): 1-25.
- [16] 黄晶. 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.
- [17] 中华人民共和国中央人民政府. 中美关于在 21 世纪 20 年代强化气候行动的格拉斯哥联合宣言 [EB/OL]. (2021-11-10)[2024-04-08]. [https://www.gov.cn/xinwen/2021-11/11/content\\_5650318.htm](https://www.gov.cn/xinwen/2021-11/11/content_5650318.htm).
- [18] KAREN L H, WILLIAM B, et al. Technology assessment decarbonization status, challenges, and policy options for carbon capture, utilization, and storage[R]. United States Government Accountability Office, 2022.
- [19] PERSONS T M, MACKIN M. Technology readiness assessment guide: best practices for evaluating the readiness of technology for use in acquisition programs and projects[R]. US Government Accountability Office Washington United States, 2020: 34-127.
- [20] Global CCS Institute. Global status of CCS 2023 scaling up through 2030[R]. Global CCS Institute, 2023.
- [21] FOLGER P. Carbon capture and sequestration (CCS) in the United States[EB/OL]. (2017-07-28) [2024-03-12]. <https://www.everycrsreport.com/reports/R44902.html?from=singlemessage&isappinstalled=0>.
- [22] DOUG M, RYAN C. Meeting the dual challenge: a roadmap to at-scale deployment of carbon capture, use, and storage[R]. National Petroleum Council, 2019.
- [23] Global CCS Institute. CO<sub>2</sub>RE[EB/OL]. (2018-10) [2024-03-12]. <https://co2re.co/>.
- [24] 黄晶, 马乔, 史明威, 等. 碳中和视角下 CCUS 技术发展进程及对策建议[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.
- [25] Global CCS Institute. Global status of CCS 2022[R]. Global CCS Institute, 2022.
- [26] 大众日报, 2024. 向“新”发力|封碳驱油, 变废为宝!快来看我国首个百万吨级 CCUS 项目 [EB/OL]. (2024-05-11). <https://sghexport.shobserver.com/html/baijiahao/2024/05/11/1319209.html>.
- [27] The United States Environmental Protection Agency. Under-ground Injection Control (UIC) program class vi implementation manual for uic program directors[R]. EPA, 2018.
- [28] HOUSE W. United States mid-century strategy for deep decarbonization[C]//United Nations Framework Convention on Climate Change, Washington, DC. 2016.
- [29] KERRY J, MCCARTHY G. The long-term strategy of the united states, pathways to net-zero greenhouse gas emissions by 2050[R]. Washington, USA: The United States Department of State and the United States Executive Office of the President. 2021: 1-61.
- [30] United States Department of Energy. Carbon Negative Shot[EB/OL]. (2021-11-05)[2024-03-12]. <https://www.energy.gov/fecm/carbon-negative-shot>.
- [31] The White House. FACT SHEET: President Biden to Catalyze Global Climate Action through the Major Economies Forum on Energy and Climate [EB/OL].(2023-04-20)[2024-04-08]. <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2023/04/20/fact-sheet-president-biden-to-catalyze-global-climate-action-through-the-major-economies-forum-on-energy-and-climate/>.
- [32] National Energy Technology Laboratory. Regional Carbon Sequestration Partnership (RCSP)[EB/OL]. (2003)[2024-04-08]. <https://www.netl.doe.gov/carbon-management/carbon-storage/RCSP>.
- [33] National Energy Technology Laboratory. Carbon Storage Assurance Facility Enterprise (CarbonSAFE) initiative[EB/OL]. (2016) [2023-08-06]. <https://netl.doe.gov/carbon-management/carbon-storage/carbonsafe>.
- [34] National Energy Technology Laboratory. Regional Initiative to Accelerate CCUS Deployment[EB/OL]. (2019)[2024-04-08]. <https://netl.doe.gov/carbon-management/carbon-storage/regional-initiative-to-accelerate-ccus-deployment>.
- [35] United States Department of Energy. U. S. Department of Energy Announces \$68 million for small businesses developing technologies to cut emissions and study climate[EB/OL]. (2023-2-22) [2023-07-28]. <https://www.energy.gov/articles/us-department-energy-announces-68-million-small-businesses-developing-technologies-cut>.
- [36] National Energy Technology Laboratory. Best Practices Manuals[EB/OL]. (2011)[2024-04-08]. <https://www.netl.doe.gov/carbon-management/carbon-storage/strategic-program-support/best-practices-manuals>.
- [37] The White House. Council on environmental quality delivers report to congress on steps to advance responsible, orderly, and efficient development of carbon capture, utilization, and sequestration[EB/OL]. (2021-06-30)[2024-04-08]. <https://www.white>

- house.gov/ceq/news-updates/2021/06/30/council-on-environmental-quality-delivers-report-to-congress-on-steps-to-advance-responsible-orderly-and-efficient-development-of-carbon-capture-utilization-and-sequestration/.
- [38] Internal Revenue Service. Credit for carbon oxide sequestration[EB/OL]. (2021-01-15)[2024-04-08]. <https://www.federalregister.gov/documents/2021/01/15/2021-00302/credit-for-carbon-oxide-sequestration>.
- [39] United States Department of Energy. Biden-Harris administration announces \$100 million to transform climate pollution into sustainable products[EB/OL]. (2023-07-24)[2024-03-12]. <https://www.energy.gov/articles/biden-harris-administration-announces-100-million-transform-climate-pollution-sustainable>.
- [40] PUAL W P. Carbon Dioxide (CO<sub>2</sub>) pipeline development: federal initiatives[R]. Congressional Research Service, 2023.
- [41] International Energy Agency. Legal and regulatory frameworks for CCUS an IEA CCUS handbook[M]. Paris: OECD Publishing, 2022.
- [42] 中华人民共和国国务院. 国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020 年)[EB/OL]. (2006-02-09)[2024-04-08]. [https://www.gov.cn/gongbao/content/2006/content\\_240244.htm](https://www.gov.cn/gongbao/content/2006/content_240244.htm).
- [43] 中共中央 国务院. 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]. (2021-10-24)[2024-04-08]. [https://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content\\_5644613.htm](https://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content_5644613.htm).
- [44] 中华人民共和国国务院. 2030 年前碳达峰行动方案[EB/OL]. (2021-10-26)[2024-04-08]. [https://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content\\_5644984.htm](https://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm).
- [45] 科学技术部社会发展科技司, 中国 21 世纪议程管理中心. 中国碳捕集、利用与封存(CCUS)技术发展路线图研究[R]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [46] 科学技术部社会发展科技司, 中国世纪议程管理中心. 中国碳捕集利用与封存技术发展路线图: 2019[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [47] 国家发展和改革委员会. 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)[2024-04-08] [https://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content\\_5592681.htm](https://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm).
- [48] 工业和信息化部, 国家发展和改革委员会, 生态环境部. 工业领域碳达峰实施方案[EB/OL]. (2022-07-07)[2024-04-08] [https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-08/01/content\\_5703910.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-08/01/content_5703910.htm).
- [49] 科技部, 生态环境部, 住房和城乡建设部, 等. “十四五”生态环境领域科技创新专项规划[EB/OL]. (2022-09-19)[2024-04-08]. [https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-11/02/content\\_5723769.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-11/02/content_5723769.htm).
- [50] 国家发展和改革委员会, 工业和信息化部, 生态环境部, 等. 高耗能行业重点领域节能降碳改造升级实施指南(2022 版)[EB/OL]. (2022-02-11)[2024-04-08]. [https://www.ndrc.gov.cn/xwtd/tzgg/202202/t20220211\\_1315447.html](https://www.ndrc.gov.cn/xwtd/tzgg/202202/t20220211_1315447.html).
- [51] 生态环境部. 关于印发《国家重点推广的低碳技术目录(第四批)》的通知[R/OL]. (2022-12-21)[2024-04-08]. [https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/202212/t20221221\\_1008424.html](https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/202212/t20221221_1008424.html).
- [52] 国家发展改革委. 国家发展改革委公布《战略性新兴产业重点产品和服务指导目录》2016 版[EB/OL]. (2017-02-04)[2024-04-08]. [https://www.gov.cn/xinwen/2017-02/04/content\\_5165379.htm](https://www.gov.cn/xinwen/2017-02/04/content_5165379.htm).
- [53] 国家发展改革委. 产业结构调整指导目录(2024 年本)[EB/OL]. (2023-12-27)[2024-04-08]. [https://www.gov.cn/zhengce/202401/content\\_6924187.htm](https://www.gov.cn/zhengce/202401/content_6924187.htm).
- [54] 国家发展改革委. 关于印发《绿色技术推广目录(2020 年)》的通知[R/OL]. (2020-12-31)[2024-04-08]. [https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-01/08/content\\_5578253.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-01/08/content_5578253.htm).
- [55] 中国人民银行, 发展改革委, 证监会. 中国人民银行 发展改革委 证监会关于印发《绿色债券支持项目目录(2021 年版)》的通知[R/OL]. (2021-04-02)[2024-04-08]. [https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-04/22/content\\_5601284.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-04/22/content_5601284.htm).
- [56] 生态环境部, 国家发展改革委, 工业和信息化部, 等. 气候投融资试点工作方案[EB/OL]. (2021-12-21)[2024-04-08]. <https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-12/25/5664524/files/10bf58f69f4d40269e07f3b84a47bb78.pdf>.
- [57] 财政部, 国家发展改革委, 生态环境部, 等. 财政部等四部门关于公布《环境保护、节能节水项目企业所得税优惠目录(2021 年版)》以及《资源综合利用企业所得税优惠目录(2021 年版)》的公告[R/OL]. (2021-12-16)[2024-04-08]. <https://henan.chinatax.gov.cn/henanchinatax/zcwj/zcfgk/2021122400120139853/index.html>.
- [58] 生态环境部. 关于发布《二氧化碳捕集、利用与封存环境风险评估技术指南(试行)》的通知[R/OL]. (2016-06-21)[2024-04-08]. [https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgt/201606/t20160624\\_356016.htm](https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgt/201606/t20160624_356016.htm).
- [59] 中共中央 国务院. 中共中央 国务院印发《国家标准化发展纲要》[EB/OL]. (2021-10-10)[2024-04-08]. [https://www.gov.cn/gongbao/content/2021/content\\_5647347.htm](https://www.gov.cn/gongbao/content/2021/content_5647347.htm).
- [60] 发展改革委, 统计局, 生态环境部. 国家发展改革委 国家统计局 生态环境部 印发《关于加快建立统一规范的碳排放统计核算体系实施方案》的通知[R/OL]. (2022-04-22)[2024-04-08]. [https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-08/19/content\\_5706074.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-08/19/content_5706074.htm).
- [61] 市场监管总局. 关于印发建立健全碳达峰碳中和标准计量体系实施方案的通知[R/OL]. (2022-10-18)[2024-04-08]. [https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-11/01/content\\_5723071.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-11/01/content_5723071.htm).
- [62] Statista. Green bonds worldwide[R/OL]. (2023)[2024-04-08]. <https://www.statista.com/study/108882/green-bonds-worldwide/>.
- [63] Refinitiv. Carbon Market Year In Review 2022[R/OL]. (2023-02-06)[2024-04-08]. <https://www.politico.com/f/?id=00000186-c718-d9f3-abef-cf5c8e660000>.
- [64] United States Department of Energy. Carbon dioxide transportation infrastructure finance and innovation program[EB/OL]. (2022)[2024-04-08]. <https://energycommunities.gov/funding-opportunity/carbon-dioxide-transportation-infrastructure-finance-and-innovation-program/#:~:text=CIFIA%20was%20created%20to%20finance%20projects%20that%20build,inter-connected%20carbon%20management%20ecosystem%20in%20the%20United%20States>.