

# 中国碳捕集利用与封存技术应用现状及展望

李阳<sup>1</sup>, 王锐<sup>2\*</sup>, 赵清民<sup>2</sup>, 方欣<sup>2</sup>

1 中国石油化工股份有限公司, 北京 100728

2 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 102206

\* 通信作者, wangrui2009.syky@sinopec.com

收稿日期: 2023-07-12

中国工程院重点战略研究与咨询项目“CCUS技术及产业体系战略研究”资助

**摘要** 碳捕集利用与封存(CCUS)是实现“双碳”目标的关键技术路径。本文系统梳理了CCUS的发展历程、发展趋势,探讨了双碳目标下CCUS的内涵,分析了我国CCUS产业化发展面临的挑战及发展策略。我国已形成CCUS全流程技术体系,建成了首个百万吨级齐鲁石化-胜利油田二氧化碳捕集输送驱油封存全流程示范工程,CCUS进入规模化应用阶段。CCUS具有较长的创新链和产业链,其产业发展要加强全技术链创新,特别是低浓度排放源捕集技术和利用关键技术研发,加快源汇优化的驱油封存中心建设,推进CCUS与传统产业、新兴产业融合,构建低碳、零碳产业链,形成配套CCUS方法学。

**关键词** 双碳目标; CCUS; 示范工程; 驱油封存中心; CCUS方法学

## Status and prospects for CO<sub>2</sub> capture, utilization and storage technology in China

LI Yang<sup>1</sup>, WANG Rui<sup>2</sup>, ZHAO Qingmin<sup>2</sup>, FANG Xin<sup>2</sup>

1 China Petrochemical Corporation, Beijing 100728, China

2 SINOPEC Petroleum Exploration & Production Research Institute, Beijing 102206, China

**Abstract** Carbon capture, utilization, and storage (CCUS) is a key technological path to achieve the "carbon peaking and carbon neutrality" goals. This article reviews the development history and trends of CCUS, discusses the connotation of CCUS, and analyzes the challenges and development strategies of CCUS industrialization development in China. The full process technology is in place. The first million tonne Qilu Petrochemical-Shengli Oil Field full process demonstration project of carbon capture, transportation, oil displacement and storage was built, and CCUS has entered the stage of large-scale application. CCUS has a long innovation and industrial chain, and its industrial development needs to strengthen the innovation of all the entire technology chain, especially low concentration emission source capture technology and utilization technology, accelerate the construction of oil displacement and storage centers for source sink optimization, promote the integration of CCUS with traditional and emerging industries, build a low-carbon and zero carbon industrial chain, and establish CCUS methodology.

**Keywords** carbon peaking and carbon neutrality goals; CCUS; demonstration project; oil displacement and storage center; CCUS methodology

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2023.04.030

引用格式: 李阳, 王锐, 赵清民, 方欣. 中国碳捕集利用与封存技术应用现状及展望. 石油科学通报, 2023, 04: 391-397

LI Yang, WANG Rui, ZHAO Qingmin, FANG Xin. Status and prospects for CO<sub>2</sub> capture, utilization and storage technology in China. Petroleum Science Bulletin, 2023, 04: 391-397. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2023.04.030

## 0 引言

二氧化碳捕集利用与封存(CCUS)是指将CO<sub>2</sub>从能源利用、工业过程等排放源或大气中捕集分离,并输送到适宜的场地加以利用或封存,以实现CO<sub>2</sub>长期封存或转化利用的过程,是实现CO<sub>2</sub>减排的有效技术手段,也是我国实现“双碳”目标的关键技术路径。CCUS技术和产业链发展涉及煤炭、石油、天然气、新能源等能源生产领域,以及电力、化工、钢铁、水泥、建筑、交通等多个行业,与社会、经济、政治等各个方面息息相关。CCUS与化石能源深度耦合,能够实现碳基能源有效脱碳,保障以传统化石能源为基础的工业产业可持续发展;CCUS与可再生能源、氢能、生物质能等新能源耦合,能够构建多能互补新模式,实现零碳、负碳能源供给体系变革,保障新型能源体系稳定运行;CCUS与化工、钢铁、水泥等工业产业深度融合,能够有效推动传统产业的提质升级,催生低碳、零碳、负碳新产业和新业态,促进生产力的发展,对经济社会发展和“双碳目标”的协同推进具有重要意义。

## 1 CCUS 发展历程及其贡献

CCUS是由CCS发展而来,为了应对气候变化,1977年CCS的理念首次被提出,即将CO<sub>2</sub>捕集,防止排入大气中。上世纪90年代,麻省理工学院发起成立碳捕集与封存技术计划倡议。1996年挪威政府实施了全球首个CCS项目-Sleipner咸水层封存项目。进入21世纪,CCS日渐受到国际社会重视<sup>[1]</sup>。2001年联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)开展CCS专题报告研究。2005年,IPCC正式给出了CCS定义,是指将CO<sub>2</sub>从工业或相关能源产业的排放源中分离处理,输送并封存在地质构造中,长期与大气隔绝的过程<sup>[2]</sup>。为了推动减碳技术和产业发展,2010年国家科技部提出加强以“U”为中心的技术研发,通过利用减排增汇,CCUS的理念目前已被国际社会广泛接受。2020年以后,随着全球主要经济体应对气候变化行动和碳中和目标的提出,CCUS步入快速发展轨道,CCUS新技术、新理念不断涌现,CCUS技术的内涵进一步拓展,一是更加注重全生命周期的碳固定和封存;二是注重碳的资源化利用,以用减排;三是不仅包含人为排放的CO<sub>2</sub>,也包括大气中的CO<sub>2</sub>捕集利用与封存。目前,CCUS发展成为一个新的理论和技术体系,需要新的理论和技术支撑。

国际机构对CCUS碳减排贡献进行了评估。IPCC在《IPCC全球升温1.5℃特别报告》中指出,2030年CCUS的减排量为1亿~4亿t/a,2050年CCUS的减排量为30亿~68亿t/a<sup>[3]</sup>。国际能源署(IEA)2050年全球能源系统净零排放情景预测,2050年全球碳捕集量为76亿t/a,可持续发展情景预测,2070年全球实现净零排放,CCUS是第四大贡献技术,累积减排贡献达到15%<sup>[4]</sup>。国际可再生能源机构(IRENA)深度脱碳情境预测,2050年CCUS贡献约6%的年减排量,减排量为27.9亿t/a<sup>[5]</sup>。2023年,伍德麦肯兹公司发布预测报告指出,CCUS技术将至少贡献全球碳减排量的15%。我国学者对中国净零排放情景下CCUS减排贡献也进行了评价,2060年碳中和情景,CCUS年减排量约10.41亿t,累积减排贡献为14.6%<sup>[6]</sup>。上述评估结果表明,CCUS已成为国际公认的减碳途径之一<sup>[7]</sup>。

我国实现“双碳”目标时间紧,碳减排强度大,CCUS对我国“双碳”目标实现更为重要。我国能源结构以化石能源为主,2022年化石能源在一次能源消费中占比82.5%,能源相关碳排放量大,同时我国是一个发展中国家,排放量在近期仍将增加;我国制造业占GDP比重较高,单位GDP能耗强度和碳排放强度高,因此,必须采用组合技术体系保障“双碳”目标实现。CCUS可助力化石能源清洁化利用,使化石能源与新能源实现竞合关系;可推动电力、钢铁、水泥等行业的绿色低碳转型,成为我国实现“双碳”目标的重要技术支撑,也是必然选择。

## 2 国内外 CCUS 发展趋势

随着全球碳减排行动的推进,主要国家和经济体纷纷加快CCUS技术和产业研究,推动CCUS技术和工程示范快速发展,并出台了多项支持政策<sup>[8-26]</sup>。

从技术发展来看,第一代以化学吸收剂为主的捕集技术能耗和成本进一步降低,国家能源集团锦界电厂15万t/a碳捕集技术再生能耗小于2.4 GJ/t CO<sub>2</sub>。第二代离子液体、相变吸收剂等新型捕集溶剂研发进展顺利,加压富氧燃烧、燃料源头捕集等新一代捕集技术试验成功。从技术成熟度来说,化学溶液吸收技术已进入商业应用阶段,其他多处在工业示范阶段。此外,直接空气捕集CO<sub>2</sub>技术和生物质能碳捕集技术也取得重大进展,美国石油公司 Occidental正在开发全球最大的直接空气捕集设施,预计每年将从空气中捕集100万t CO<sub>2</sub>;英国生物质能发电公司 Drac计划建设全球最大的BECCS项目,年捕集800万t CO<sub>2</sub>。

在输送技术方面, CO<sub>2</sub> 管道输运已完全实现商业化应用, 国外已建成近万公里的 CO<sub>2</sub> 长距离输送管网, 多数以超临界态输送为主。我国二氧化碳输运以低温罐车为主, CO<sub>2</sub> 管道输运尚在起步阶段, 2023 年 6 月中国石化建成 109 km CO<sub>2</sub> 管道, 中国石油、延长石油等企业也正规划建设多条 CO<sub>2</sub> 管道。CO<sub>2</sub> 管道输运是目前国际上大规模长距离碳运输的最经济有效的方式, 据 IEA 预测, 2050 年全球 CO<sub>2</sub> 输送管道总长度将达到 20 万 km。

在地质利用方面, 驱油封存、浸铀采矿技术已进入商业应用阶段, 咸水层封存目前处于示范阶段。CO<sub>2</sub> 驱油封存是目前最为经济可行的埋存方式, 美国驱油封存项目每年注入约 6000 万 t CO<sub>2</sub>, 其中约 30% 来自工业气源。随着技术发展, CO<sub>2</sub> 地质利用领域不断拓展, 天然气藏、常规油藏、残余带油藏、致密油气藏、页岩油气藏、水合物及地热资源等都成为 CO<sub>2</sub> 应用的新领域。在 CO<sub>2</sub> 资源化利用方面, CO<sub>2</sub> 制备化学产品和化学材料、利用光合作用合成甲醇燃料、CO<sub>2</sub> 合成人工淀粉等各种资源转化技术均取得了一定的进展, 其中 CO<sub>2</sub> 制备化学品和矿化利用技术发展相对较快, 多数已开展工业示范, 但转化效率和能耗较高。

从全球示范工程建设来看, 截至 2022 年 9 月, 全球捕集能力 10 万 t/a 以上的 CCUS 项目达到 196 个, 比 2021 年增长 44%, 捕集能力达到 2.44 亿 t/a, 较 2021 年增长 63.4% [27]。目前全球新规划或建设的项目规模大都在 300 万 t/a 以上, 500 万~1000 万 t/a 的集群化项目快速增加, 处于规划或建设中的 CCUS 集群项目共有 24 个, 主要分布于北美、欧洲和亚太地区。典型的 CCUS 集群有美国墨西哥湾休斯顿 Ship Channel CCUS 产业集群、荷兰鹿特丹 Aramis CCS 产业集群、挪威 Longship CCS 产业集群等, 具体见表 1。

表 1 国外典型 CCUS 集群项目

Table 1 Typical CCUS cluster projects

项目	位置	规模/(10 <sup>4</sup> t/a)
Ship Channel	美国	1 × 10 <sup>4</sup>
Summit Carbon Solution	美国	1000
Aramis	荷兰	2000
Porthos	荷兰	250
Longship	挪威	150~500
Acorn	英国	500~1000
大亚湾	中国	300~1000
华东	中国	1000

近期, 中国也启动 CCUS 集群项目建设, 项目规模从 400 万 t/a 增加至 2000 万 t/a (含在建、计划项目), 中国海油联合埃克森美孚、壳牌等在大亚湾开展海上千万吨级 CCUS 集群项目, 中国石化联合壳牌、宝武、巴斯夫在中国华东地区开展开放式千万吨级 CCUS 集群项目。以 CCUS 枢纽为中心, 多方参与构建 CCUS 产业集群, 形成风险共担、利益共享的 CCUS 发展新模式, 是未来 CCUS 产业化发展的主流方向 [9-12, 26-27]。

碳市场、碳税、碳金融等碳定价机制迅速发展。欧盟碳市场碳价从 50 美元/t 增长至 90 美元/t, 北欧四国碳税价格更高至 70~140 美元/t。近期, 欧盟碳边界调节机制法案 (CBAM) 立法通过, 针对碳排放水平较高的进口产品征收相应的费用或配额, 这将极大促进区域 CCUS 技术发展。美国联邦政府 2008 年出台 45Q 法案, 近期通货膨胀抑制法案强化了 45Q 补贴力度 (见表 2), 使得美国 CCUS 项目基本都具有经济性。美国也制定了碳边境调节机制法案《清洁竞争法 (Clean Competition Act), 简称 CCA》, 对进口商品征收二氧化碳排放费用, 并将收入提供给发展中国家。总体来看, 欧美发达国家正积极推进碳关税。我国陆续出台了系列双碳政策, 大力推进 CCUS 技术研发与示范, 构建 CCUS 产业链。截至 2023 年 5 月, 我国 CCUS 相关政策文件共有 76 项, 涉及规划、意见、通知、标准、路线图等方面。随着碳达峰碳中和“1+N”政策体系的建立, CCUS 政策工具类型逐步丰富, 行业应用逐步拓展, CCUS 政策体系初具雏形 [28-31]。

### 3 我国 CCUS 技术及工程示范进展

我国 CCUS 技术快速发展, 形成了碳捕集、利用与封存全流程技术体系。已形成不同浓度排放源的 CO<sub>2</sub> 捕集技术, 在煤电、石化、水泥及钢铁等行业开



表 2 美国通货膨胀抑制法案税收抵免额度  
Table 2 US inflation reduction act tax credits

CCUS	45Q/(美元/t)	通货膨胀抑制法案	
		固定源/(美元/t)	空气捕集/(美元/t)
地质封存	50	85	180
二氧化碳驱油	35	60	130
其他利用方式	35	60	130

展了大量示范应用；中石油、中石化、中海油和延长油田在多种类型油藏开展了CO<sub>2</sub>驱矿场试验，取得了好的效果，形成了二氧化碳驱油与封存配套技术体系，并建立了封存安全性评价、监测及全生命周期评价技术；化学转化及生物利用技术快速发展，部分CO<sub>2</sub>合成液体燃料、化工材料技术及CO<sub>2</sub>矿化转化技术已经实现示范应用。整体来看，我国CCUS进入规模化应用阶段(图1)。

在工程示范方面，截至2022年底，我国CCUS项目(含规划)近100个，已投运项目的二氧化碳捕集能力约400万t/a，CO<sub>2</sub>注入封存能力200万t/a。已投运项目以工业示范和小型试验为主，规模普遍偏小，多在10×10<sup>4</sup>t/a以下，但正在建设或规划的项目规模逐渐增大，其中中国石化已建成我国首个百万吨级捕集、输送、驱油、封存全流程示范工程，项目覆盖石油地质储量2562万t，预计注入约1000万t CO<sub>2</sub>，提高采收率11.6%。中国石化于2021年7月5日启动建设齐鲁石化-胜利油田CCUS示范项目，2022年8月，示范项目投产运行。

齐鲁石化-胜利油田CCUS示范工程形成了全链条技术体系。在碳捕集环节，建成100万t/a化工尾气二氧化碳回收利用装置，通过低温精馏技术回收煤气化装置尾气中的高浓度二氧化碳，开发余热回收、余

压回收等技术，提升能量利用效率，降低捕集能耗10%。在输送环节，建成超临界CO<sub>2</sub>长距离输送管道，管道全长109 km，最大输气量170万t/a，管道设计压力12 MPa，形成超临界压力密相输送技术。在二氧化碳驱油与封存环节，形成高压混相驱油技术、全过程CO<sub>2</sub>驱前缘数值模拟及动态调控技术，提高全程混相程度，扩大波及系数，实现增油和封存最大化；形成多种产出气回收利用技术，产出气全部回注地层，实现CO<sub>2</sub>的循环利用和全生命周期碳封存。在监测环节，形成地质、工程安全性评价技术，实现断层、储层、盖层、井筒及地面工程安全性评价；建立了空地三介质一体化监测体系，实现对地下断层盖层的应变、井筒完整性、土壤、大气、地下水、地面变形、植被等环境介质实时动态监测。

齐鲁石化-胜利油田CCUS示范工程是我国第一个百万吨级CCUS全流程项目，也是石化产业零碳产业链构建示范项目，为石油石化产业上下游一体化协同发展探索了一条有效途径，标志着我国CCUS技术和工程示范进入一个新的阶段。对有效提升我国碳减排能力、搭建“人工碳循环”模式具有重要意义，将有力推动国家“双碳”目标实现。

## 4 我国CCUS面临的挑战及发展方向

### 4.1 我国CCUS面临的挑战

“双碳”目标背景下，加速CCUS产业规模化发展势在必行，但我国CCUS产业发展仍面临诸多挑战。

一是关键技术亟待突破，大规模全链条技术体系尚待形成。低浓度排放源捕集技术能耗和成本较高，驱油封存协同优化技术和咸水层规模化应用配套技术还不成熟，化工利用和生物利用技术转化能耗高、转化效率低，封存安全性评估、监测技术及量化核查评价体系还未建立，直接空气捕集技术、生物质能捕集封存技术、玄武岩快速矿化封存技术等前沿颠覆性技术研发力度不足，基于不同应用场景的全链条技术体系、技术模式有待创新，特别是大规模CO<sub>2</sub>捕集利用

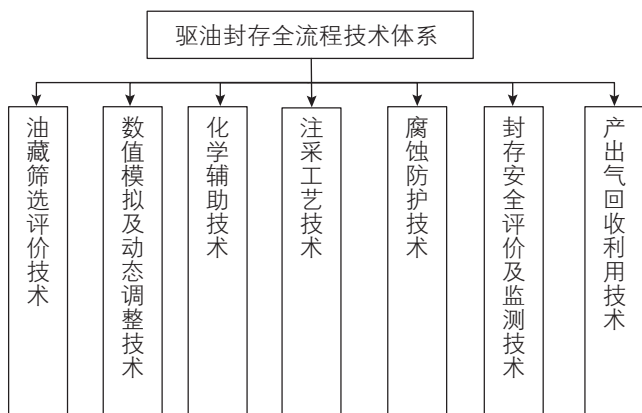


图 1 二氧化碳驱油封存全流程技术体系

Fig. 1 Technical system for CO<sub>2</sub> oil displacement and storage

技术体系。

二是CCUS成本较高，与其他减排技术竞争优势不明显。我国煤电示范项目加装捕集装置后，捕集每吨二氧化碳会增加140~600元的运行成本，而据国际能源署统计，直接空气捕集成本高达800~2300元/t，2022年我国碳市场平均价格仅为55元/t。

三是已建成工程示范规模小(除齐鲁石化-胜利油田示范工程外)，全产业链布局不完善。国内已有CCUS示范项目多为点对点的单一碳排放源中小规模示范，单环节CCUS项目占比达到87%以上，缺乏全流程一体化及面向多种碳排放源的多技术组合的工程示范，制约了CCUS技术迭代升级及产业化发展。

四是政策生态建设不完善。近年来，国家陆续发布了CCUS相关的政策法规文件，约61%为国家科技规划类，将CCUS技术作为前沿储备技术重点资助；27%为双碳相关政策或指导意见。总体来看，这些政策文件主要以引导性为主，支持各大研发机构或企业开展技术研究和工程示范，对企业不具有强制约束力。同时，国家还未出台CCUS补贴激励政策和推动CCUS产业发展的专项政策。2022年我国启动了全国碳交易市场，但CCUS并未纳入交易范围。

#### 4.2 我国CCUS产业发展方向

CCUS具有较长的技术创新链和产业链，需要从技术研发、封存中心、产业融合和方法学等多个方面协同推进，加速推动产业发展。

##### ① 加强CCUS全技术链研究，突破利用关键技术

碳中和目标下，CCUS需要构建新的理论和技术体系，降低能耗，提高效率。围绕CCUS各环节关键科学问题，开展全创新链的基础研究，特别是突破“C”和“U”的理论和关键技术瓶颈。聚焦捕集动力学和热力学机制问题，研发针对低浓度排放源的新一代吸收剂、膜分离和膜吸收捕集技术，近期

力争捕集再生能耗降至2.0~2.2 GJ/t，捕集成本降至200~250元/t，远期捕集再生能耗降至1.5 GJ/t，捕集成本降至150元/t，支撑大规模捕集。聚焦提高转化效率和降低转化能耗关键问题，推进化学高值转化技术、生化高效固碳技术攻关。加强前沿技术的交叉融合，如捕集转化一体化技术(图2)，通过微观尺度上碳捕集和碳转化的能量耦合，降低CCUS整体能耗；加强化学转化与生物转化融合，实现高品质液体燃料及化学品可持续绿色制造。聚焦二氧化碳地质封存利用地下空间、安全性及成本3个关键问题，开展关键技术攻关，支撑地质封存利用工业化应用。

##### ② 源-汇优化的含油气盆地驱油封存中心建设

我国含油气盆地具有多个油气藏及大量咸水层资源，具有规模利用和封存的潜力，据评价可封存万亿吨CO<sub>2</sub>。同时我国含油气盆地分布范围广，具有良好的源-汇匹配性及油藏驱油和咸水层封存的工程化优势。应围绕含油气盆地，强化源汇优化，加强枢纽建设，建设驱油封存中心，形成捕集-输送-封存利用产业集群。2030年在渤海湾盆地、苏北盆地、松辽盆地、鄂尔多斯盆地、准噶尔盆地等区域，建成3~5个百万吨级CCUS全流程示范项目，注入能力1000万t/a；2050年围绕含油气盆地建成亿吨级CCUS集群枢纽，推动全产业链的快速发展，实现大规模的封存利用。

##### ③ 加强CCUS与产业的深度融合，构建工业零碳/负碳产业链

工业产业直接碳排放约占全国总排放量的39%，加上间接使用的电和热的碳排放，占比高达60%~70%，因此，工业领域的深度减排是实现“双碳”目标的重要领域，需加快构建低碳或零碳产业链。我国具有完整的工业体系，产业间协同减排优势显著，通过CCUS与能源体系及工业过程全流程的深度耦合，形成以全生命周期碳足迹为核心的跨行业、跨环节、

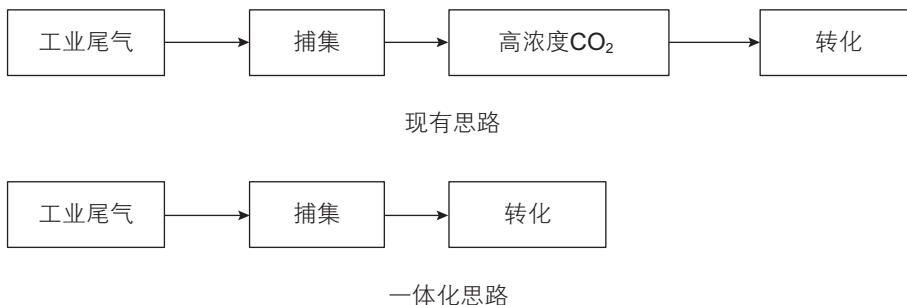


图2 捕集-转化一体化技术

Fig. 2 Integrated capture-conversion technology

跨空间的协同减碳机制,构建新的碳循环利用一体化的产业模式,打造产业集成、相互补充、协同发展的零碳负碳产业链。

#### ④ 开展CCUS方法学研究,形成CCER机制

CCUS技术涉及捕集、运输、利用与封存多个环节,全流程碳排放包括直接排放、间接排放及逸散排放等,同时地质封存的安全性及地质封存量的核实和量化,都给CCUS方法学研究带来挑战。要针对CO<sub>2</sub>捕集利用与封存的场景,开展核算边界、排放源、核算方法等研究,建立不同情景下的碳足迹模型,形成CCUS方法学。将CCUS项目纳入我国自愿减排机制,推动CCUS项目获得碳减排量,提升项目经济性,支撑CCUS项目规模化效益化发展。

## 5 结论

(1)CCUS是实现“双碳”目标的关键工业技术,我国已初步具备CCUS技术规模化应用和产业化发展的基础,建成了首个百万吨级齐鲁石化-胜利油田CCUS全流程示范工程。

(2)“双碳”目标背景下,加速CCUS产业规模化发展势在必行。CCUS具有较长的创新链和产业链,要加强CCUS全创新链的理论、技术研究,加快含油气盆地驱油封存中心建设,加强技术与产业的深度融合,构建工业行业零碳/负碳产业链,加强CCUS方法学研究。

## 参考文献

- [1] IEA. 20 Years of carbon capture and storage-accelerating future deployment[R]. Paris: OECD/IEA, 2016.
- [2] IPCC. IPCC Special report on carbon dioxide capture and storage[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [3] IPCC. Global warming of 1.5°C. 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, sustainable development, and efforts to eradicate poverty[R]. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 2018.
- [4] IEA. Energy technology perspectives 2020: Special report on carbon capture utilization and storage-CCUS in clean energy transitions [R]. Paris: IEA, 2020.
- [5] IRENA. Reaching zero with renewables: Eliminating CO<sub>2</sub> emissions from industry and transport in line with the 1.5°C climate goal[R]. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2020.
- [6] 李阳. 碳中和与碳捕集利用封存技术进展[M]. 北京: 中国石化出版社, 2021. [LI Y. Carbon neutrality and carbon capture utilization and storage technology advancement[M]. Beijing: Sinopec Press Co. Ltd., 2021.]
- [7] BP. BP Energy outlook: 2023 edition[R]. London: BP, 2023.
- [8] 袁士义, 马德胜, 李军诗, 等. 二氧化碳捕集、驱油与埋存产业化进展及前景展望[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(4): 828-834. [YUAN S Y, MA D S, LI J S, et al. Progress and prospects of carbon dioxide capture, EOR-utilization and storage industrialization[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(4): 828-834.]
- [9] 蔡博峰, 李琦, 张贤, 等. 中国二氧化碳捕集利用与封存(CCUS)年度报告(2021)-中国CCUS路径研究[R]. 北京: 生态环境部规划院, 中国科学院武汉岩土力学研究所, 中国21世纪议程管理中心, 2021. [CAI B F, LI Q, ZHANG X, et al. China CCUS annual report 2021: China CCUS roadmap[R]. BEIJING: Planning Institute of the Ministry of Ecology and Environment, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, China 21st Century Agenda Management Center, 2021.]
- [10] 蔡博峰, 李琦, 林千果, 等. 中国二氧化碳捕集、利用与封存(CCUS)报告(2019)[R]. 生态环境部规划院气候变化与环境政策研究中心, 2020. [CAI B F, LI Q, LIN Q G, et al. China CCUS annual report 2019[R]. Planning Institute of the Ministry of Ecology and Environment, 2020.]
- [11] 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技术发展路线图(2019版)[R]. 北京: 科学出版社, 2019. [Department of Social Development Science and Technology, Ministry of Science and Technology, China 21st Century Agenda Management Center. China carbon capture utilization and storage technology roadmap: 2019[R]. Beijing: Science Press, 2019.]
- [12] 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 X, LI Y, MA Q, et al. Development of carbon capture, utilization and storage technology in China[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 70-80.]
- [13] MA J F, LI L, WANG H F, et al. Carbon capture and storage: History and the road ahead[J]. Engineering, 2022, 14(7): 33-43.
- [14] Carbon Sequestration Leadership Forum. The carbon sequestration leadership forum (CSLF) technology roadmap 2021[R]. Washington: CSLF Publications, 2021.
- [15] JIANG K, ASHWORTH P. The development of Carbon Capture Utilization and Storage (CCUS) research in China: A bibliometric perspective[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 138(3): 1-16.
- [16] FRANKLIN M, ORR J. Carbon capture, utilization, and storage: An update[J]. SPE Journal, 2018, 23(06): 2444-2455.

- [17] 郭雪飞, 孙洋洲, 张敏吉, 等. 油气行业二氧化碳资源化利用技术途径探讨[J]. 国际石油经济, 2022, 30(1): 59–66. [GUO X F, SUN Y Z, ZHANG M J, et al. Discussion on technical approaches of carbon dioxide resource utilization in oil and gas industry[J]. International Petroleum Economics, 2022, 30(1): 59–66.]
- [18] ONYEBUCHI VE, KOLIOS A, HANAK DP, et al. A systematic review of key challenges of CO<sub>2</sub> transport via pipelines[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews. 2018, 81(2): 2563–2583.
- [19] 孙腾民, 刘世奇, 汪涛. 中国二氧化碳地质封存潜力评价研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(11): 10–20. [SUN T M, LIU S Q, WANG T. Research advances on evaluation of CO<sub>2</sub> geological storage potential in China[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(11): 10–20.]
- [20] 何民宇, 刘维燥, 刘清才, 等. CO<sub>2</sub> 矿物封存技术研究进展[J]. 化工进展, 2022, 41(4): 1825–1833. [HE M Y, LIU W Z, LIU Q C. Research progress in CO<sub>2</sub> mineral sequestration technology[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2022, 41(4): 1825–1833.]
- [21] 罗二辉, 胡永乐, 李昭. CO<sub>2</sub> 地质埋存技术与应用[J]. 新疆石油天然气, 2013, 9(3): 14–21. [LUO E H, HU Y L, LI Z. CO<sub>2</sub> Geological Storage Technology and Application[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2013, 9(3): 14–21.]
- [22] 包一翔, 李井峰, 郭强, 等. 二氧化碳用于地质资源开发及同步封存技术综述[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(6): 84–95. [BAO Y X, LI J F, GUO Q, et al. Review on technologies of geological resources exploitation by using carbon dioxide and its synchronous storage[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(6): 84–95.]
- [23] 李阳, 王锐, 赵清民, 等. 含油气盆地咸水层二氧化碳封存潜力评价方法[J]. 石油勘探 与开发, 2023, (50)2: 424–430. [LI Y, WANG R, ZHAO Q M, et al. A CO<sub>2</sub> storage potential evaluation method for saline aquifers in a petroliferous basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(2): 424–430.]
- [24] 王彦, 王晓月, 曹瑞文, 等. 二氧化碳加氢制甲醇反应机理研究进展[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2020, 40(4): 11–20. [WANG Y, WANG X Y, CAO R W, et al. Research progress of reaction Mechanism of carbon dioxide hydrogenation to methanol[J]. Journal of Liaoning Shihua University, 2020, 40(4): 11–20.]
- [25] 张晓春, 刘莹, 董丽, 等. CO<sub>2</sub> 合成重要化学品新技术研究进展[J]. 中国基础科学, 2020, 22(03): 20–24. [ZHANG X C, LIU Y, DONG L, et al. Research progress of new technologies of CO<sub>2</sub> utilization for high value-added chemicals[J]. China Basic Sciences, 2020, 22(03): 20–24.]
- [26] CONINCK H D, BENSON SM. Carbon dioxide capture and storage: Issues and prospects[J]. Annual review of environment and resources. 2014, 39: 243–270.
- [27] GCCSI. Global status of CCS 2022[R]. Melbourne: Global CCS Institute, 2022.
- [28] OGCI. The CCUS hub playbook: A guide for regulators, industrial emitters and hub developers[R]. London, UK, 2022.
- [29] GCCSI. Repositioning CCUS for China's net-zero future[R]. Australia, <https://www.globalccsinstitute.com/resources/publications-reports-research/repositioning-ccus-for-chinas-net-zero-future>, 2022.
- [30] 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.
- [31] IEA. Legal and regulatory frameworks for CCUS: An IEA CCUS handbook[R]. IEA, Paris, <https://www.iea.org/reports/legal-and-regulatory-frameworks-for-ccus>, License: CC BY 4.0, 2022.

(编辑 付娟娟)