



中国21世纪议程管理中心
The Administrative Center for China's Agenda 21



GLOBAL CCS
INSTITUTE



清华大学
Tsinghua University

中国二氧化碳 捕集利用与封存 (CCUS) 年度报告 (2023)



报告召集人

张 贤 中国21世纪议程管理中心
杨晓亮 全球碳捕集与封存研究院
鲁 玺 清华大学

编写作者（按姓氏拼音排序）

陈 健 清华大学
程 军 浙江大学
刁玉杰 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心
樊静丽 中国矿业大学（北京）
高 林 怀柔实验室
高仕康 香港科技大学（广州）
韩 龙 浙江工业大学
姜大霖 国家能源集团
李 超 浙江大学
李 佳 香港科技大学（广州）

报告引用：张贤，杨晓亮，鲁玺 等. 中国二氧化碳捕集利用与封存 (CCUS) 年度报告 (2023) [R].
中国21世纪议程管理中心，全球碳捕集与封存研究院，清华大学. 2023.

编写作者 (按姓氏拼音排序)

李家全	中国地质大学 (北京)	孙丽丽	中海油研究总院
李 凯	中国矿业大学 (北京)	孙楠楠	中国科学院上海高等研究院
李林涛	中海油研究总院	王高峰	中国石油天然气集团
李鹏春	中国科学院南海海洋研究所	王 涛	浙江大学
李 琦	中国科学院武汉岩土力学研究所	王永胜	中国神华煤制油化工有限公司
李向前	首都经济贸易大学	魏 宁	中国科学院武汉岩土力学研究所
李彦尊	中海油研究总院	吴 辉	北京大学
梁 希	伦敦大学学院	吴 怡	全球碳捕集与封存研究院
林千果	上海交通大学	项小娟	中国矿业大学 (北京)
刘兰翠	北京师范大学	胥蕊娜	清华大学
刘练波	中国华能集团	徐 冬	国家能源集团
刘玲娜	北京化工大学	杨 波	清华大学
刘 琦	中国石油大学 (北京)	杨 琳	内蒙古大学
刘 宇	中国科学院科技战略咨询研究院	于 航	中海油研究总院
鲁建荣	中海油研究总院	喻健良	大连理工大学
陆诗建	中国矿业大学	张九天	北京师范大学中国绿色发展协同创新中心
吕昊东	清华大学	张 璐	中节能衡准科技服务 (北京) 有限公司
马 乔	山东大学	朱 磊	北京航空航天大学
毛依帆	中国矿业大学 (北京)		
彭雪婷	中国21世纪议程管理中心		
史明威	中国21世纪议程管理中心		

顾问专家组

组长：

黄 晶	主任，中国21世纪议程管理中心
贺克斌	院士，中国工程院/清华大学
Jarad Daniels	首席执行官，全球碳捕集与封存研究院

成员：

费维扬	院士，中国科学院/清华大学
姜培学	院士，中国科学院/清华大学
金红光	院士，中国科学院/中国科学院工程热物理研究所
高 翔	院士，中国工程院/浙江大学
李 阳	院士，中国工程院/中国石油化工集团
刘 合	院士，中国工程院/中国石油天然气集团
袁士义	院士，中国工程院/中国石油天然气集团
柯 兵	副主任，中国21世纪议程管理中心
陈其针	副主任，中国21世纪议程管理中心
李 政	教授，清华大学
魏一鸣	教授，北京理工大学
彭 勃	教授，中国石油大学（北京）
方梦祥	教授，浙江大学
马劲风	教授，西北大学
魏 伟	研究员，中国科学院上海高等研究院
李小春	研究员，中国科学院武汉岩土力学研究所
翟永平	战略发展部高级顾问，腾讯集团
许世森	科技部主任，华能集团



序

气候变化正在对全球产生持续而深刻的影响。2022年举办的《联合国气候变化框架公约》第二十七次缔约方大会通过了“沙姆沙伊赫实施计划”，重申了《巴黎协定》“将全球平均气温较前工业化时期上升幅度控制在2°C以内”的长期目标，并且再次敦促各国逐步减少未采用捕集与封存措施的煤电。根据联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 第六次气候变化评估第三工作组报告，要实现2°C目标，当前全球CO₂排放预算仅剩约11500亿吨，而2010-2019年间全球CO₂排放量约占这一预算的三分之一。在不可能完全放弃化石能源的条件下，碳捕集利用与封存 (CCUS) 技术作为碳中和技术组合不可或缺的组成部分，是实现《巴黎协定》温控目标的关键技术手段和托底技术保障。

近年来，中国CCUS技术和示范取得长足发展。首个百万吨级CCUS项目——齐鲁石化-胜利油田百万吨级CCUS项目正式注气运行；包钢集团拟建成钢铁行业200万吨CCUS全产业链示范工程，目前一期50万吨示范项目已经开工建设；中海油、广东省发展和改革委员会、壳牌 (中国) 有限公司和埃克森美孚 (中国) 投资有限公司签署

了大亚湾区CCUS集群研究项目谅解备忘录，拟共同建设中国首个海上规模化碳捕集与封存产业集群。尽管国内大部分CCUS技术已达到工业示范水平，但与实现碳中和目标的减排需求和欧美等国家的发展水平相比仍有很大差距。同时，中国CCUS发展还面临市场机制缺失和政策激励不足等挑战，未来仍需加强研发、降低成本、刺激需求，促进技术、市场、政策三大要素深度融合。

围绕国际国内新形势，针对中国CCUS发展面临的新问题、新挑战，《中国二氧化碳捕集利用与封存年度报告 (2023)》对碳达峰碳中和目标下CCUS技术进行了重新定位，系统梳理了中国CCUS技术研发、项目示范、政策部署等方面的进展情况，分析了近中期中国CCUS技术发展可能面临的挑战，并提出有关政策建议。本报告能够为决策者制定应对气候变化相关政策提供有益借鉴，为CCUS领域研究活动的开展提供科学参考，并助力企业设计绿色发展路径和减排方案。



目录

序	v
引言	2
<hr/>	
一、CCUS支撑碳达峰碳中和目标实现	4
1.1 碳达峰碳中和目标下的CCUS技术	5
1.2 CCUS技术体系	6
1.3 CCUS技术减排需求与潜力	8
<hr/>	
二、中国CCUS发展现状	10
2.1 技术发展水平	11
2.2 示范项目情况	13
2.3 相关政策	20
<hr/>	
三、挑战与建议	22
3.1 中国CCUS发展面临的挑战	23
3.2 政策建议与未来展望	24

引言

二氧化碳捕集利用与封存 (CCUS) 技术可以实现化石能源大规模可持续低碳利用，帮助构建低碳工业体系，同时与生物质或空气源结合可具有负排放效应，是中国碳中和技术体系不可或缺的重要组成部分。近年来，随着国际应对气候变化进程的不断推进和技术水平的显著提高，CCUS技术发展的外部条件和内在需求发生了显著改变。

首先，CCUS技术发展需求愈加紧迫。目前，中国面临的国际减排压力和国内减排需求与日俱增。《联合国气候变化框架公约》第27次缔约方大会重申了《巴黎协定》的温控目标，敦促缔约方采取进一步行动减少温室气体排放。中国碳中和目标的提出意味着国内碳减排目标由相对减排量向绝对减排量转变，减排策略由能源双控向碳排放双控过渡。持续趋紧的外部约束和落实国家碳达峰碳中和目标的内部需求推动CCUS由战略储备技术快速升级为现实解决方案，其技术定位、发展方向和未来部署需要进一步研究。

其次，CCUS技术的应用场景正在得到进一步拓展。碳达峰碳中和目标

下，中国经济生产和消费方式正在发生系统性变革。《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》指出，到2060年，绿色低碳循环发展的经济体系和清洁低碳安全高效的能源体系全面建立。要完成这一任务不仅需要化石能源电力系统的近零排放，还需要工业过程的深度减排，以及利用负排放技术来抵消难以削减的剩余温室气体，CCUS技术的应用场景得到进一步明确。

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

最后，CCUS公众认可度进一步提升。随着碳达峰碳中和目标的提出和全球CCUS示范不断发展成熟，公

众对CCUS技术的认知和接受程度显著提升。全球碳捕集与封存研究院（GCCSI）于2022年发布的《全球碳捕集与封存现状2022》报告指出，当前全球共有196个CCUS商业设施，总捕集能力超过2.4亿吨CO₂/年，较2021年新增了61个正在筹备中的CCUS项目。示范项目的成功及风险监测技术水平的提高，促进了公众对CCUS风险的科学认知，有效提高了公众对CCUS技术的接受度。

在密切跟踪国内外CCUS技术发展前沿和实时总结中国示范项目最新情况的基础上，本报告系统分析了碳达峰碳中和目标下中国CCUS技术需求，总结了近年来CCUS技术、项目和政策发展的主要趋势及挑战，并提出了相关建议。



第一章

CCUS支撑碳达峰 碳中和目标实现



1.1 碳达峰碳中和目标下的CCUS技术

在新的应用场景与深度减排需求下，CCUS技术的内涵和外延不断丰富与拓展。捕集源由传统的能源/工业设施，逐步拓展至生物质和空气等中性碳源，由此形成的生物质能碳捕集与封存 (BECCS) 和直接空气捕集 (DAC) 技术已经成为实现气候目标的必要手段和CCUS技术的重要组成部分 (图1-1)。BECCS技术是指将生物质燃烧或转化过程中产生的CO₂进行捕集、利用或封存的过程。DAC技术是指从大气中直接捕集CO₂，并将其利用或封存的过程。

与此同时，CCUS技术正在被重新定位。2019年，《中国碳捕集利用与封存技术发展路线图 (2019版)》将CCUS技术定位为“可实现化石能源大规模低碳利用的战略储备技术”。如今随着应用场景的拓展，CCUS技术已经成为中国碳中和技术体系的重要组成部分，是化石能源近零排放的唯一技术选择、钢铁水泥等难减排行业深度脱碳的可行技术方案、未来支撑碳循环利用的主要技术手段。同时，BECCS和DAC等负排放技术还可以移除已经存在于大气中的温室气体 (也称为碳移除技术)，为未来实现碳中和目标提供托底技术保障 (图1-2)。

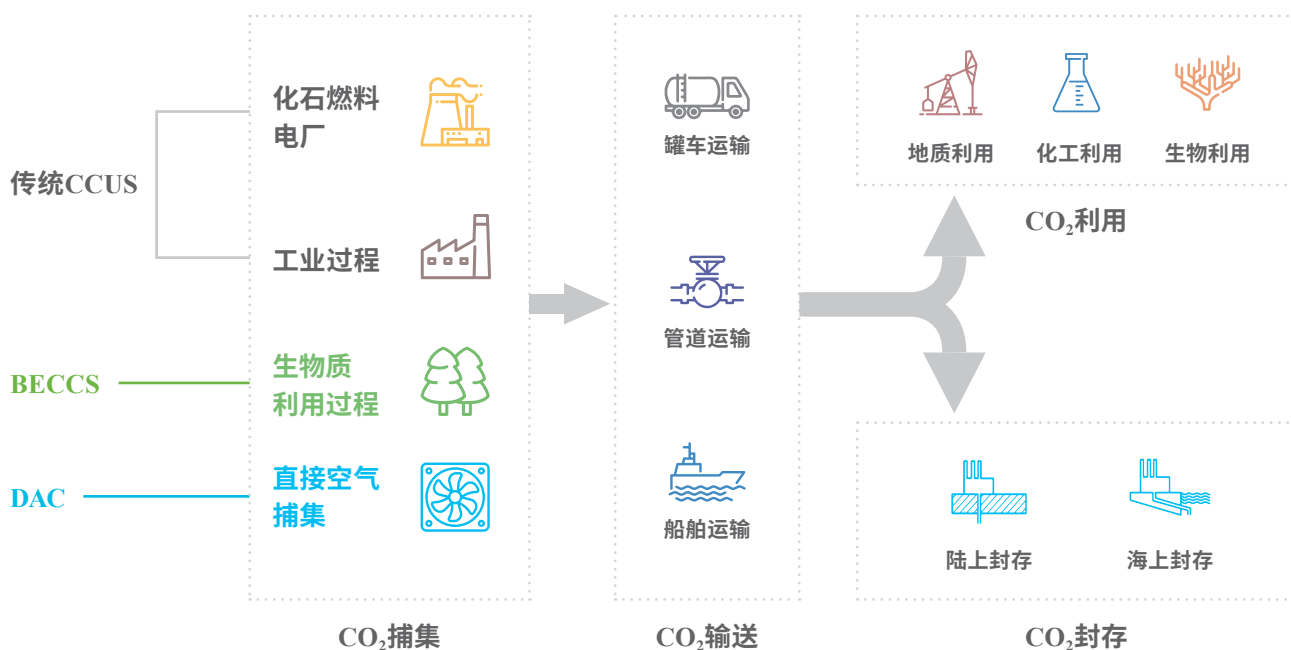


图1-1: 碳中和目标下的CCUS技术定义

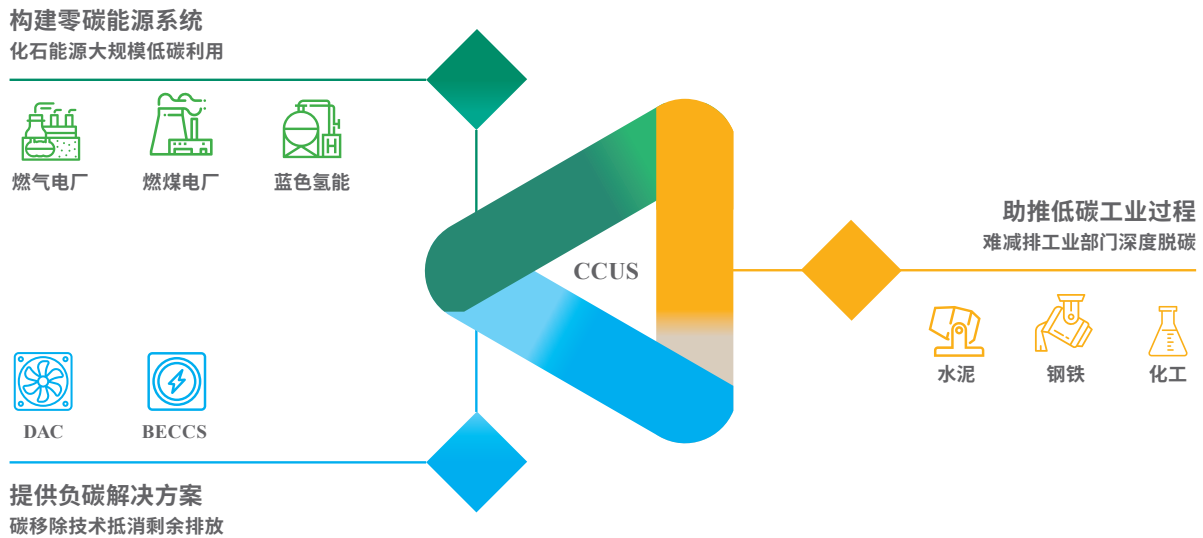


图1-2：碳中和目标下的CCUS技术定位

1.2 CCUS技术体系

CCUS技术体系涵盖CO₂捕集技术、运输技术、利用技术以及地质封存技术（图1-3）。随着技术推陈出新，这一技术体系正在逐步完善和丰富。

CO₂捕集技术正在由第一代向第二代过渡，第三代技术也开始崭露头角。第一代捕集技术是指现阶段已完成工程示范并投入商业运行的技术，如传统的燃烧后化学吸收技术、燃烧前物理吸收技术等。第二代捕集技术是指能够在2025年进行商业部署的捕集技术，如基于新型吸收剂的化学吸收技术、化学吸附技术等。第三代捕集技术又称变革性技术，是指能

够在2035年开始投入商业运行的技术，如化学链燃烧技术等。

CO₂运输技术正由传统的罐车和船舶运输向陆上管道和海底管道运输发展。中国CO₂输送管道在输量、管径、距离等方面呈现规模化趋势，管输规模突破百万吨，管输压力迈入超临界范围，管输经济优势日渐明显。

CO₂利用技术正在由较早的CO₂地质利用实现能源资源增采，如CO₂强化石油开采（CO₂-EOR）、强化煤层气开采（CO₂-ECBM）等，向CO₂化工利用和生物利用拓展，逐步实现高附加值化学品合成、生物产品转化等绿色碳源利用方式。

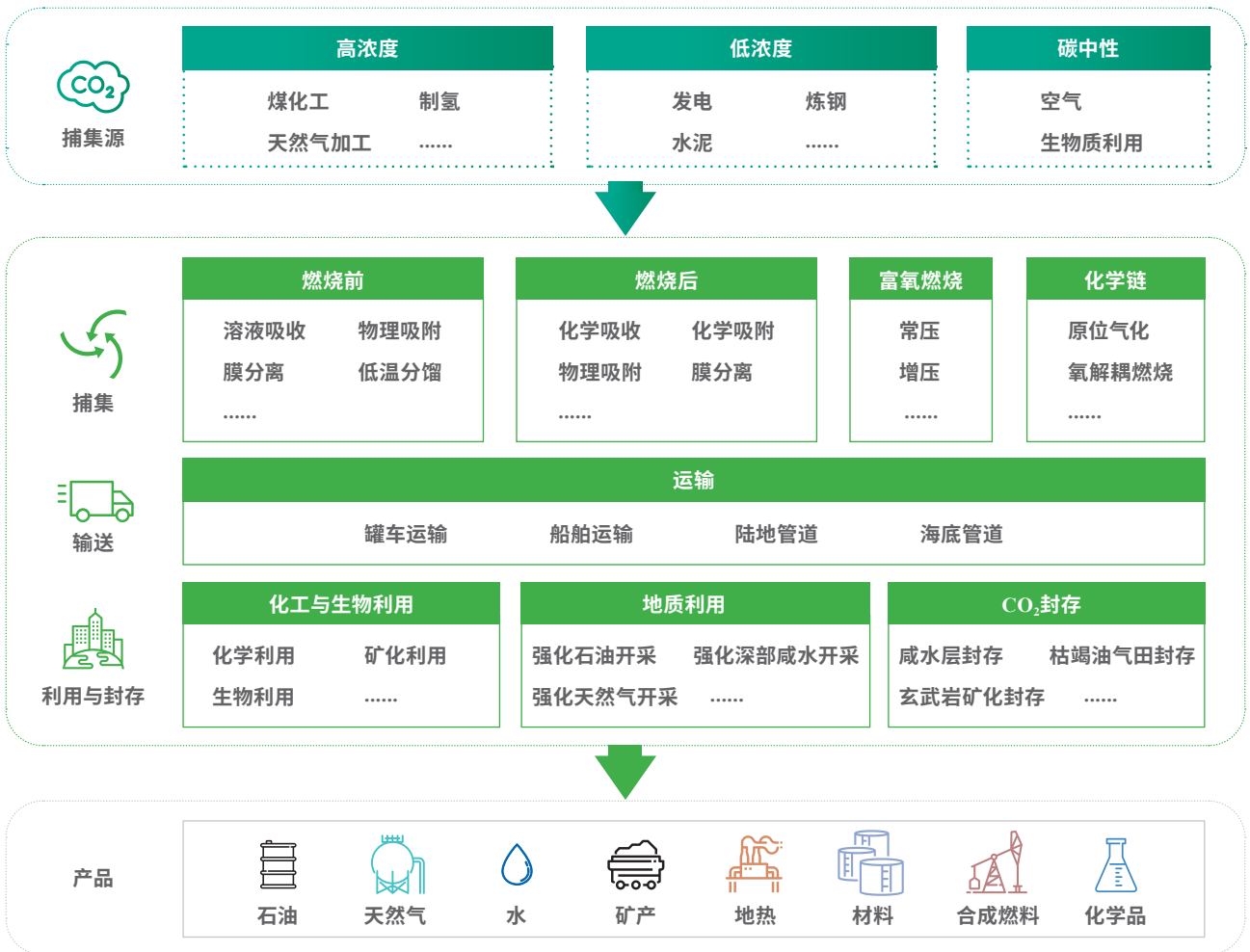


图1-3: CCUS技术体系

CO₂封存技术按照地质封存体的不同,可分为陆上咸水层封存、海上咸水层封存、枯竭油气田封存等。近年来,中国部分企业开始探索离岸封存的可行性,为未来沿海地区CO₂大规模封存探路。

除上述CCUS技术环节外,CCUS框架内的技术耦合集成形成了若干新兴的技术概念,如CO₂捕集-转化一体化、CO₂捕集-矿化一体化等。这些技术能够在不同尺度实现能量集约利用,进而降低CCUS技术的减排成本。

1.3 CCUS技术减排需求与潜力

(1) 各行业CCUS减排需求

综合分析CCUS技术在全行业的应用及其未来减排需求,预测碳达峰碳中和目标下中国CCUS减排需求为:2025年约为2400万吨/年(1400~3100万吨/年),2030年将增长到近1亿吨/年(0.58~1.47亿吨/年),2040年预计达到10亿吨/年左右(8.85~11.96亿吨/年),2050年将超过20亿吨/年(18.7~22.45亿吨/年),2060年约为23.5亿吨/年(21.1~25.3亿吨/年)

(图1-4)。分行业看,考虑到中国目前的发电装机容量和能源安全的硬约束,火电行业将是CCUS的应用重点,预计2060年可通过CCUS实现约10亿吨/年的CO₂减排量;钢铁、水泥、化工等行业在提高生产效率和达到生产峰值后将仍有部分CO₂需要通过CCUS实现减排;到碳中和前夕,国内仍将有一部分温室气体排放无法通过常规技术手段完成减排,BECCS、DAC技术预计将贡献5~8亿吨/年的CO₂移除量。

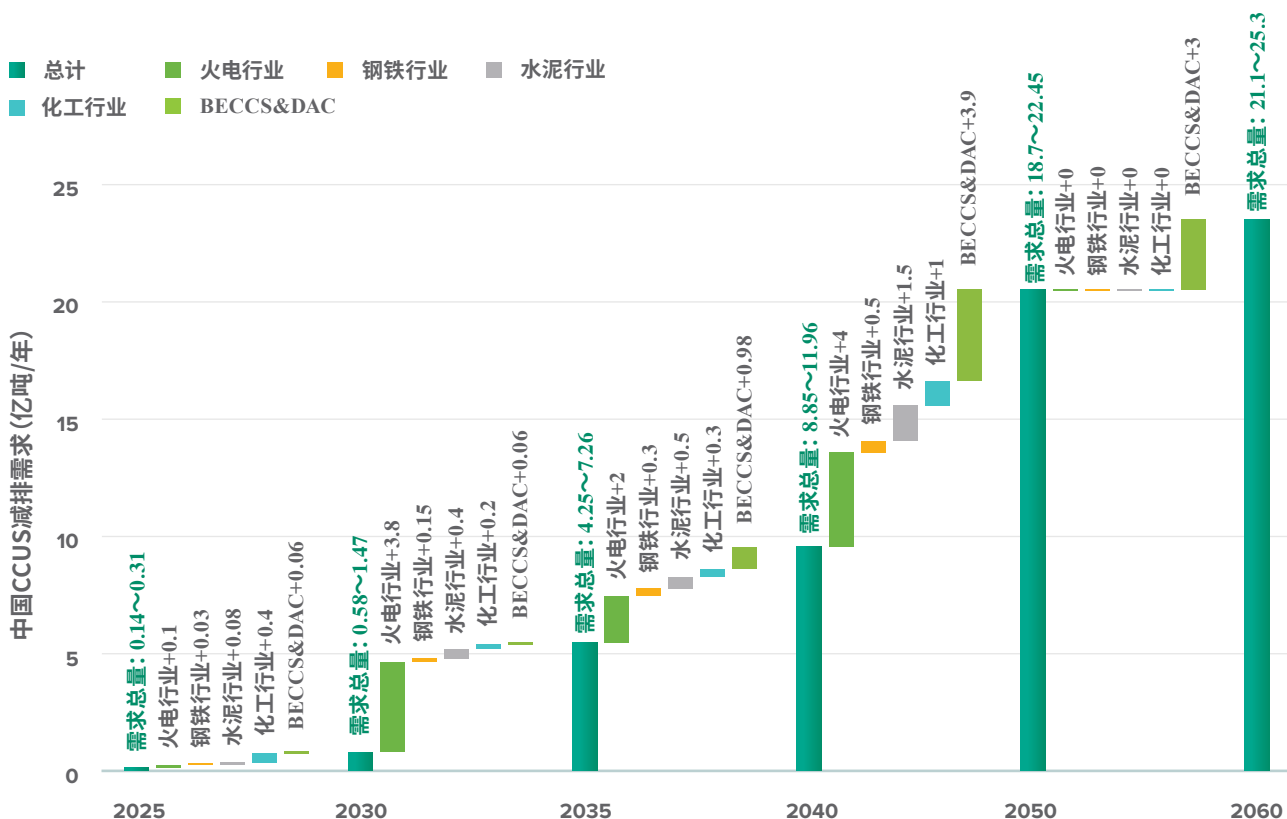


图1-4: 中国各行业CCUS减排需求

(2) 源汇匹配潜力

中国理论CO₂地质封存容量约为1.21~4.13万亿吨,主要包括咸水层、油气田等地质构造(图1-5)。中国油田主要集中于松辽盆地、渤海湾盆地、鄂尔多斯盆地和准噶尔盆地,已探明油田可封存约200亿吨CO₂,其中适宜封存的油藏容量约50亿吨CO₂。中国气藏主要分布于鄂尔多斯盆地、四川盆地、渤海湾盆地和塔里木盆地,中国已探明气藏最终可封存约150亿吨CO₂。深部咸水层的封存容量为0.16~2.42万亿吨,塔里木盆地、鄂尔多斯盆地、松辽盆地、渤海湾盆地、珠江口盆地等大中型沉积盆地,封存容量较大,封存条件相对较好。

从源汇分布情况看,中国新疆、陕西、内蒙古等西北地区化石能源资源丰富,与塔里木盆地、鄂尔多斯盆地等陆上封存地匹配度较高。东北、华北和川渝地区碳源与渤海湾盆地、松辽盆地、四川盆地和苏北盆地等大中型沉积盆地空间匹配相对较好。华东大部分地区和华南地区能源消费密集,CO₂大量集中排放,陆上适合封存的盆地少、封存容量小,且受人口密集分布等影响,封存选址较为困难;近海盆地具有分布广、封存容量大、安全与稳定性高等优势,可根据源汇匹配情况考虑实施海上地质封存的可行性。

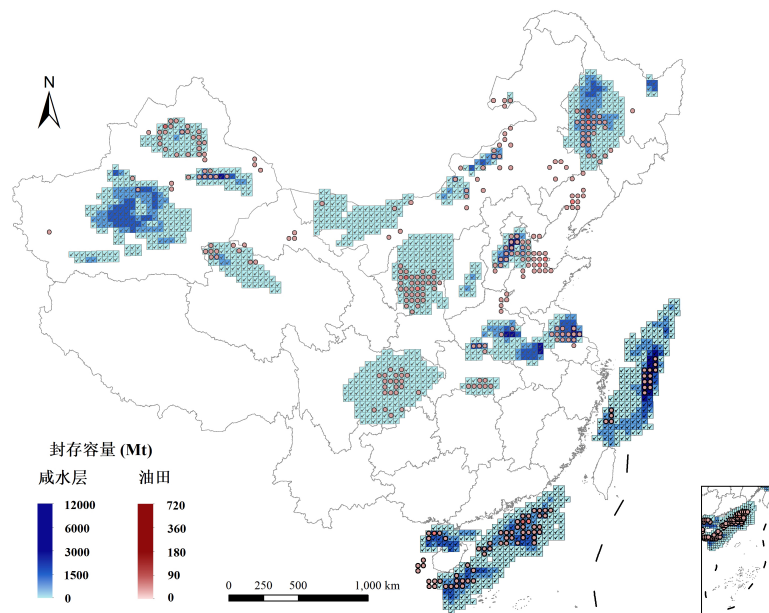


图1-5: 中国理论地质封存容量

第二章

中国CCUS 发展现状



2.1 中国CCUS技术发展水平

近年来,中国CCUS各环节技术取得显著进展,具备了CO₂大规模捕集、管道输送、利用与封存系统设计能力和近期实现规模化应用的基础(图2-1)。但是,各环节技术发展并不均衡,与规模化商业应用仍存在不同程度的差距。

CO₂捕集技术发展存在明显代际差异。第一代捕集技术中,燃烧前物理吸收技术发展比较成熟,已经处于商业应用阶段,与国际先进水平同步;燃烧后化学吸收技术在国际上已经处于商业应用阶段,中国还处于工业示范阶段。第二代和第三代捕集技术发展相对滞后,增压富氧燃烧和化学链燃烧技术在国内外均处于中试及以下阶段。同时,中国在BECCS和DAC等负排放技术领域积极开展了有益探索。其中,浙江大学和上海交通大学在DAC领域高性能吸附剂、吸收材料制备等关键技术研发方面取得了一定成果。

在CO₂输送方面,公路罐车和内河船舶运输技术均已开展商业化应用。罐车和内河船舶运输主要应用于规模10万吨/年以下的CO₂输送。中国已投运的CCUS示范项目多数规模较小,大多采用罐车运输。CO₂船运属于液化气体船舶运输技术,中国已具备这类船舶的制造能力,华东油气田和丽水气田的部分CO₂通过船

运输。CO₂管道运输的潜力最大,中国已经陆续开展了一些工程实践,中石化集团齐鲁石化-胜利油田项目已经建成百万吨级陆上CO₂运输管道,全长109公里,设计最大输量170万吨CO₂/年。海底管道输送成本比陆上管道高40%~70%,在中国尚处于基础研究阶段。

中国CO₂化学和生物利用技术与国际发展水平基本同步,整体上处于工业示范阶段。在制备高附加值化学品方面,CO₂重整制备合成气和甲醇技术较为领先。中国科学院大连化学物理研究所和中国中煤能源集团有限公司在内蒙古鄂尔多斯立项开展10万吨/年CO₂加氢制甲醇工业化项目。CO₂合成化学材料技术已实现工业示范,如合成有机碳酸酯、可降解聚合物和氰酸酯/聚氨酯,以及制备聚碳酸酯/聚酯材料等。在CO₂矿化利用方面,钢渣和磷石膏矿化利用技术已接近商业应用水平。包钢集团开展了碳化法钢渣综合利用产业化项目,利用CO₂与钢渣生产高纯碳酸钙,每年可利用钢渣10万吨,成为全球首套固废与CO₂矿化综合利用项目。

在CO₂地质利用方面,中国CO₂-EOR和CO₂地浸采铀技术发展水平较高,已接近或达到商业应用水平;强化深部咸水开采技术已完成先导性试验研究,与国外发展水平相当;强化天然气、页岩气开采,

置换水合物等技术与国际先进水平仍存在一定差距，目前尚处于基础研究阶段。在封存方面，继国家能源投资集团鄂尔多斯示范项目之后，中国海油在恩平15-1海上石油生产平台建设完成了中国首个海上CO₂封存示范工程项目，预计高峰期每年可封存30万吨CO₂。

在CCUS系统集成优化方面，国内技术发展仍与国际水平存在明显差距。国外CCUS集成优化技术已普遍进入商业化应用阶段，而国内大规模全链条示范经验不足，特别是在管网优化和集群枢纽方面，相关技术目前仅达到中试阶段。

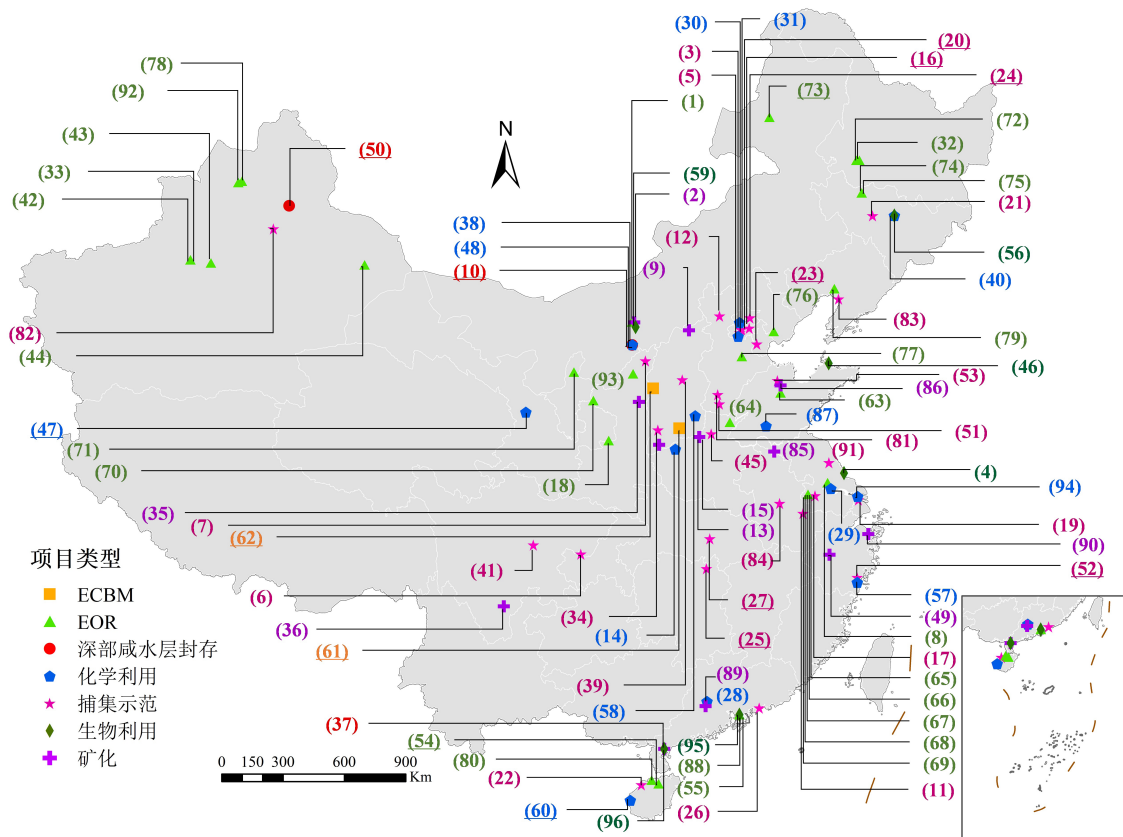
2.2 示范项目情况

近年来，中国CCUS示范工程建设发展迅速，数量和规模均有显著增加，更多行业和领域开展CCUS技术应用，推动能耗成本持续下降。

一是示范项目数量和规模迅速增加。

据不完全统计，截至2022年底，中国已投运和规划建设中的CCUS示范项目已接近百个（图2-2），其中已投运项目超过半数，具备CO₂捕集能力约400万吨/年，注入能力约200万吨/年，分别较2021年提升33%和65%左右。

碳中和目标提出以来，中国已投运和规划建设中的CCUS示范项目规模明显扩大（图2-3）。10万吨级及以上项目超过40个，其中50万吨级及以上项目超过10个，多个百万吨级以上项目正在规划中。2022年8月，中国首个百万吨级CCUS项目—齐鲁石化-胜利油田项目正式建成投产。华能集团正在建设煤电百万吨级CCUS全流程示范工程，预计建成后，每年可捕集并封存CO₂超过150万吨。中石油集团正在建设包括大庆油田140万吨/年和吉林油田100万吨/年示范工程在内的多个CCUS示范项目，其与油气行业气候倡议组织（OGCI）共同策划的新疆CCUS产业集群也在积极筹备中，预计2030年驱油利用与封存规模可达千万吨。陕西延长石油集团规划建设500万吨/年CCUS项目。广东省发展改革委、中国海油、壳牌集团和埃克森美孚于2022年6月共同签署大亚湾区CCUS集群项目谅解备忘录，预计年捕集和封存CO₂规模将达到千万吨级以上。2022年11月，中国石化与壳牌、中国宝武、巴斯夫签署合作备忘录，将在华东地区共同启动中国首个开放式千万吨级CCUS项目。该项目将收集来自长江沿线工业企业的CO₂，通过槽船集中运输至CO₂接收站，再通过管线输送至陆上或海上封存点，为临近工业企业提供第三方一体化CO₂减排方案。



注：具体项目名称参考附表1

图2-2：中国CCUS示范项目分布

二是中国CCUS示范项目行业覆盖面扩大，主要工业行业均已开展相关示范。

目前中国CCUS示范项目的CO₂捕集源涵盖电力、油气、化工、水泥、钢铁

等多个行业（图2-4）。其中，电力行业示范项目超过20个。继锦界电厂15万吨/年燃烧后CO₂捕集示范项目后，国家能源集团建成并投运了泰州电厂CCUS项目，每年可捕集50万吨CO₂，成为目前亚

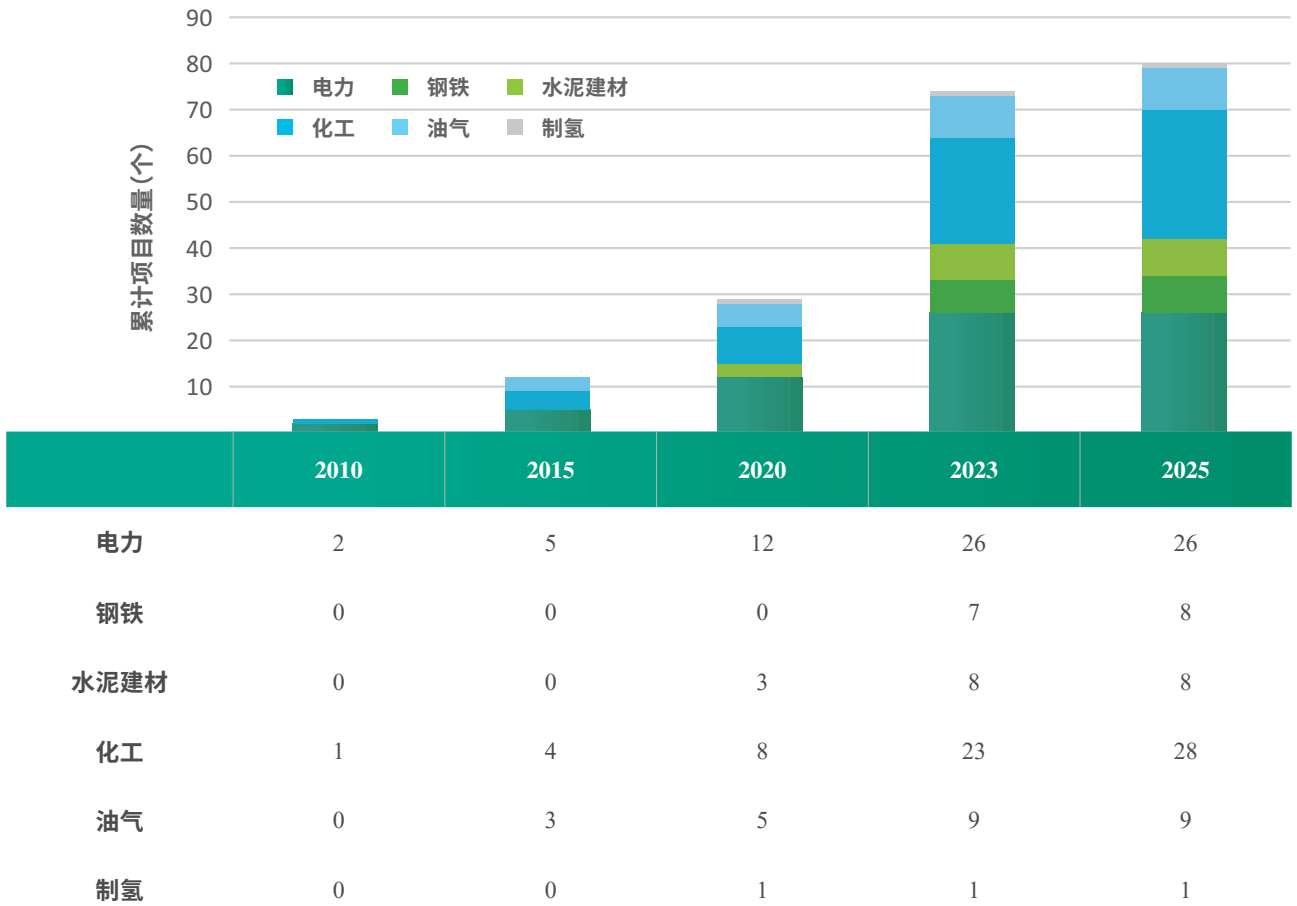


图2-4: 中国CCUS示范项目捕集源分布

此外，超过40个规划和投运中的示范项目来自油气、煤化工、石油化工、乙醇制备和化肥生产等行业。

目前中国CCUS示范项目的CO₂利用方式以地质利用为主，但化学与生物利用项目也在逐年增加（图2-5）。超过30个项目进行CO₂-EOR，少数项目进

行强化开采煤层气，仅有个别项目最终将收集到的CO₂进行地质封存。腾讯集团宣布将于2030年前实现碳中和，当前正在与冰岛公司Carbfix合作规划建设CO₂地下玄武岩快速矿化封存示范项目。在CO₂化工利用方面，多数项目采用CO₂矿化利用的方式制备和养护混凝土砌块等建筑材料，其余项目

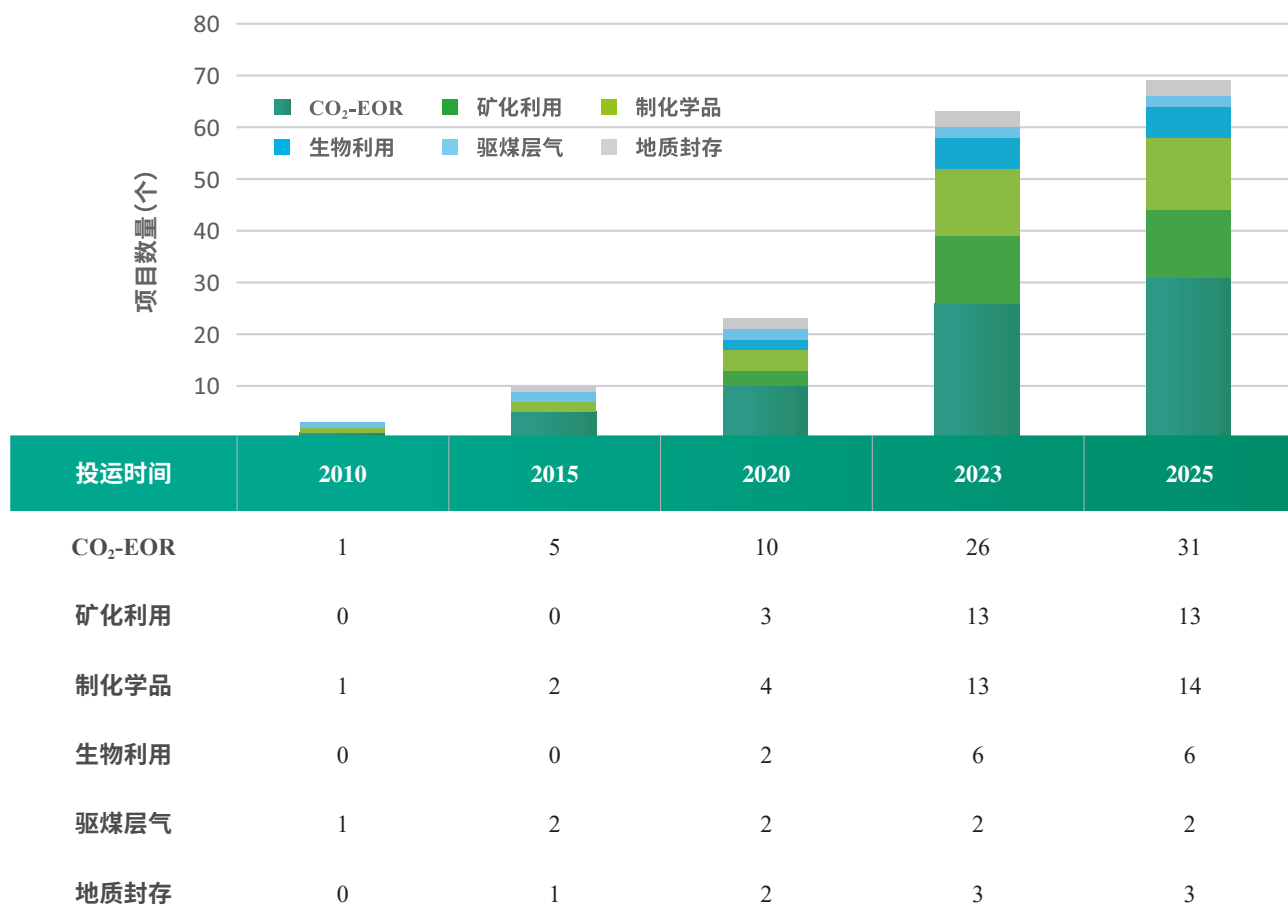


图2-5: 中国CCUS利用与封存示范项目分布

利用CO₂制备高价值化学品。2022年1月,浙江大学与华润集团合作在华润电力(海丰)有限公司建成国内首个立柱式微藻光合反应器减排转化利用燃煤电厂烟气CO₂的工程示范。2022年底,国家能源集团国电大同电厂牵头的国内首套CO₂化学矿化捕集利用示范项

目通过168小时试运行,连续产出成品碳酸钙浆液。国内CO₂生物利用方式主要为CO₂微藻养殖并制备高附加值产品。浙江大学与广东能源集团合作在广东粤电湛江生物质发电有限公司建成国内首个生物质电厂原始烟气微藻固碳工程示范。

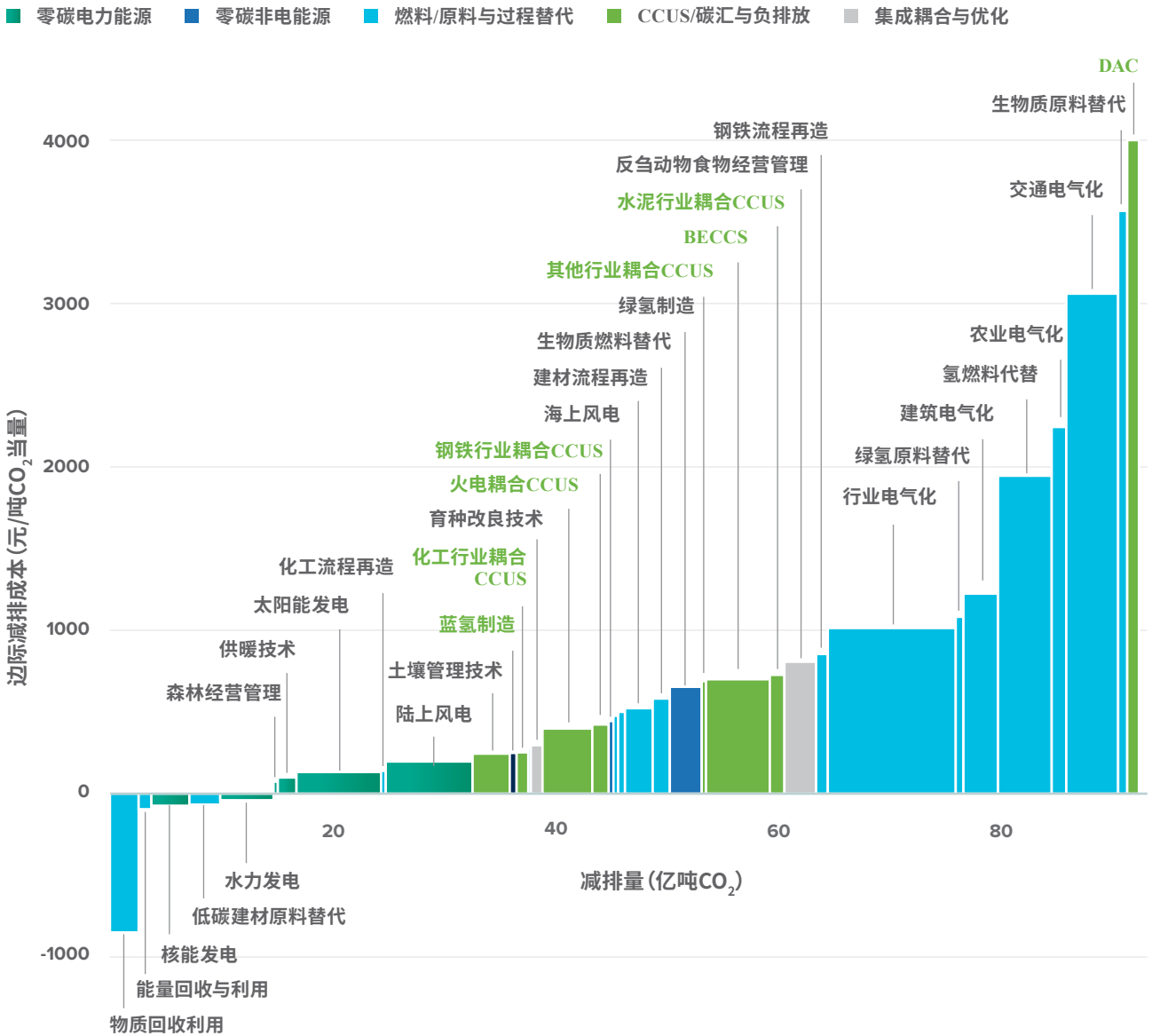


图2-7: CCUS与主要低碳技术边际减排成本对比

2.3 相关政策

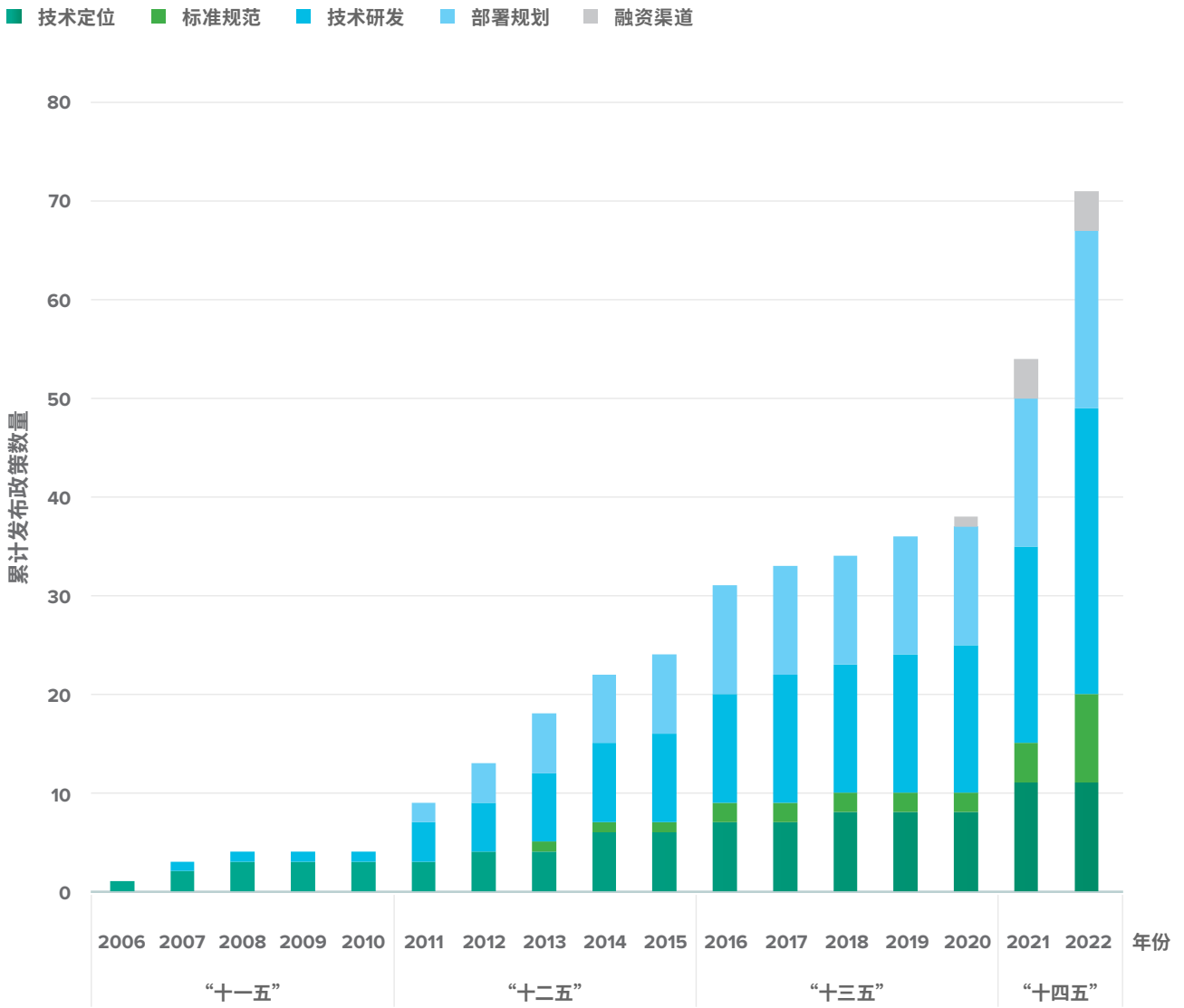
随着碳达峰碳中和“1+N”政策体系的建立，CCUS政策体系也初具雏形。据不完全统计，截至2022年底，中共中央和国务院已发布70余项CCUS相关的政策文件，涉及规划、标准、路线图、技术目录等（图2-8）。2021年，CCUS技术被首次写入中国经济社会发展纲领性文件《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》。随后，《中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》《2030年前碳达峰行动方案》，以及各部委和地方政府出台的碳达峰碳中和相关政策文件，均对CCUS技术研发、标准和融资等方面做出了积极部署。

一是政策工具类型愈加丰富。多数政策重点支持CCUS技术研发与示范，与此同时涉及技术标准、投融资方面的政策条款逐渐增多。《气候投融资试点方案》《绿色债券支持项目目录（2021年版）》等投融资政策均包含了CCUS相关

技术；《国家标准化发展纲要》《科技支撑碳达峰碳中和实施方案》《关于加快建立统一规范的碳排放统计核算体系实施方案》均提出完善和推动CCUS技术标准体系和相关研究工作。

二是CCUS技术行业应用受到更多重视，逐步从电力、油气等行业扩展至难减排工业行业，引起更广泛的政策重视与实践应用。《高耗能行业重点领域节能降碳改造升级实施指南（2022年版）》《工业领域碳达峰实施方案》《减污降碳协同增效实施方案》等均对钢铁、水泥等难减排工业行业提出了CCUS技术应用目标。

三是地方政府加强对CCUS技术发展支持，省级碳达峰碳中和政策文件强化CCUS技术部署。截至2022年底，已有十余个省、直辖市、自治区发布了碳达峰碳中和相关意见或工作方案，结合区域特点从不同角度对CCUS技术研发与推广进行了部署。



注:相关政策参考附表2

图2-8：中共中央和国务院发布的CCUS相关政策数量

第三章

挑战与建议



3.1 中国CCUS发展面临的挑战

碳达峰碳中和目标对中国CCUS技术发展提出了新的要求。尽管中国CCUS技术发展迅速，但当前阶段仍旧面临应用成本高昂、有效商业模式欠缺、激励和监管措施不足、源汇匹配困难等多方面挑战，距离大规模商业化运行仍有一段距离。

一是技术成本高。

CCUS技术减排成本相对较高，与其他技术竞争优势不明显，经济社会尚未做好大宗商品价格上浮的准备，制约CCUS技术推广应用。加装和运行CCUS的高成本对电力、钢铁、水泥等行业造成较大压力。以煤电行业为例，加装CCUS设施的燃煤电厂发电效率会降低20~30%，发电成本升高约60%。

二是技术需求紧迫。

CCUS技术的发展在时间上面临技术锁定风险。现役燃煤电厂、水泥厂、钢铁厂等高排放行业设备服役时间较短，强制退役将引起大量资产搁浅，金额可达3.1~7.2万亿元。为避免巨额资产搁浅和保证足够的资本回收时间，2030年后大量电力与工业基础设施的CCUS技术改造需求将迅速增加。为避免技术锁定，需加快技术研发和迭代升级，保

证成本能耗较低的新一代CO₂捕集技术能够在窗口期广泛部署应用，发挥减排效益。

三是商业模式欠缺。

与国际上拥有丰富CCUS应用经验的国家和地区相比，中国的相关政策还有待完善，商业模式还有待开发。国际经验表明，政府通过金融补贴、专项财税、强制性约束、碳定价机制等手段支持CCUS，能提高企业积极性，推动技术商业化。同时，国家出台相应监管措施，可以明确CCUS项目开发过程中的权、责、利划分，提高企业长期运营的积极性，打消公众对CCUS项目安全性和环境影响的顾虑。

四是源汇匹配不佳。

中国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。在没有全国性管网系统支撑的情况下，这种分布空间差异造成的源汇不匹配问题，极大限制了中国潜在CO₂封存容量的实际利用。而全国性管网系统的构建又面临政策、管理、经济性等多方面约束，从国家层面统筹推进将有利于破解源汇匹配不佳的难题。

3.2 政策建议与未来展望

为发挥CCUS技术在中国实现碳达峰碳中和目标中的关键作用，应进一步从碳中和技术体系构建、重点技术研发攻关、法规标准体系完善、针对性激励机制、国际合作共享等方面统筹考虑。

一是将CCUS作为碳中和技术体系的重要组成部分，纳入国家实现碳达峰碳中和目标路线图、施工图。

CCUS技术发展需要立足中国能源结构和化石能源资源禀赋基本国情，加强统筹规划布局。明确中国实现碳中和目标不同阶段的CCUS技术战略定位，将其纳入国家实现碳中和目标重大战略中进行统筹考虑。尽快组织研究制订CCUS中长期发展规划和科技发展专项规划，明确国家牵头部门，强化部门分工和协同。结合碳中和目标下的具体应用场景，开展精细化的CCUS技术潜力和发展趋势评估。

二是构建面向碳中和目标的CCUS技术体系，加快推进超前部署技术研发和大规模集成示范。

明确碳中和目标下CCUS技术需求，加快部署各环节低成本、低能耗关键技术研发，加快难减排行业的CCUS技术示范。超前部署前沿和颠覆性CCUS技术验证，以及BECCS、DAC等负排放技术

研发示范，在源汇相对集中区域超前开展CO₂管网基础设施建设。建设规模化CCUS全产业链技术研发平台，形成国家级CCUS技术创新策源地。开展大规模全链条集成示范工程，争取在“十四五”期间建成3~5个百万吨级CCUS全链条示范项目，在2030年前建成千万吨级CCUS产业集群。

三是制定完善相关制度法规和标准体系，推进能力建设。

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。明确和完善在役电厂及工业排放源改造的技术适用性标准、新建电厂的碳排放标准、输送管道的设计及安全标准，以及CO₂利用和封存的技术和工业标准。优化CCUS协同创新平台与人才队伍建设，通过CCUS产业创新联盟、CCUS青年学者计划等平台，推动CCUS技术研发与人才培养。

四是探索CCUS激励机制，引导形成各主体有效参与的商业模式。

开发构建面向CCUS全链条的国家核证自愿减排量 (CCER) 核算方法学和监测方法学，探索将CCUS纳入碳交易市场，引导开展跨行业、跨企业的CCUS技术示范合作，推动CCUS产业集群发展。通过减免采油特殊收益金、对部署CCUS

的电厂优先分配发电量和进行绿色电力认证等适合中国国情的政策性激励手段, 以及设立CCUS专项基金等方式打通CCUS产业低成本投融资渠道, 同时鼓励CCUS各技术环节的利益相关方通力合作, 促进形成适合中国国情的有效商业模式。

五是深化CCUS领域国际合作与交流。

深化中欧、中美、中英、中澳等应对气候变化合作, 带动低碳技术和产业发展。深化CCUS知识共享和技术转移。继续深度参与清洁能源部长级会议、碳收集领导人论坛等多边机制, 与国际能源署等国际机构保持良好合作关系, 分享中国应对气候变化的经验与实践。编制和发布CCUS领域知识产品, 组织CCUS国际论坛和知识技能培训班, 增强中国应对气候变化领域影响力。进一步加强能力建设, 推动国内外高校、科研院所和企业不同层面的CCUS交流合作。

缩略语注解

BECCS	生物质能碳捕集与封存
CCS	二氧化碳捕集与封存
CCUS	二氧化碳捕集利用与封存
CO₂-ECBM	二氧化碳驱替煤层气
CO₂-EOR	二氧化碳强化石油开采
DAC	直接空气捕集
GCCSI	全球碳捕集与封存研究院
COP	联合国气候变化框架公约
UNEP	联合国环境规划署
IEA	国际能源署
GJ	吉焦
km	千米
KWh	千瓦时

参考文献

- Chen S., Liu J., Zhang Q., et al. A critical review on deployment planning and risk analysis of carbon capture, utilization, and storage (CCUS) toward carbon neutrality[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022,167:112537.
- GCCSI. *Global Status of CCS 2022 Report*[R]. Global CCS Institute, 2022. <https://status22.globalccsinstitute.com/>.
- GCCSI. *State of the Art: CCS Technologies 2022*[R]. Global CCS Institute, 2022. <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2022/05/State-of-the-Art-CCS-Technologies-2022.pdf>.
- GCCSI. *The Global Status of CCS Report 2021*[R]. Global CCS Institute, Australia, 2021. <https://www.globalccsinstitute.com/resources/global-status-report/>.
- Hu B., Zhang Y., Li Y., et al. Can bioenergy carbon capture and storage aggravate global water crisis?[J]. *Science of the Total Environment*, 2020,714:136856.
- Huang X D., Chang S Y, Zheng D Q, et al. The role of BECCS in deep decarbonization of China's economy: A computable general equilibrium analysis[J]. *Energy Economics*, 2020.
- Liu M., Zhang Y., Liang X., et al. *Assessing the Cost Reduction Potential of CCUS Cluster Projects in China: A Case Study*[M]. 2022. PREPRINT (Version 1) available at Research Square. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1384358/v1>.
- Ma, Q., Wang, S., Fu, Y. et al. China's policy framework for carbon capture, utilization and storage: Review, analysis, and outlook. [J]*Front. Energy* (2023).
- Miao Y., H., He Z., J., Zhu X., C., et al. Operating Temperatures Affect Direct Air Capture of CO₂ in Polyamine-Loaded Mesoporous Silica[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 426, 131875.
- OGCI. *CCUS in China*[R]. Oil & Gas Climate Initiative. Houston: OGCI, 2021.
- Stenzel F., Greve P., Lucht W., et al. Irrigation of biomass plantations may globally increase water stress more than climate change[J]. *Nature Communications*, 2021,12 (1):1512.
- Tang H., Zhang S., Chen W.. Assessing Representative CCUS Layouts for China's Power Sector toward Carbon Neutrality[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55: 11225-11235.
- Wei N., Li X., Liu S., et al. A strategic framework for commercialization of carbon capture, geological utilization, and storage technology in China[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2021,110:103420.
- Wei N, Jiao Z S, Ellett K, et al. Decarbonizing the Coal-Fired Power Sector in China via Carbon Capture, Geological Utilization, and Storage Technology[J]. *Environmental Science and Technology*, 2021, 55(19):13164-13173.
- Yang L., Lv H D., Jiang D L., et al. Whether CCS technologies will exacerbate the water crisis in China? —A full life-cycle analysis[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020,134:110374.
- Yang L., Wei N., Lv H D., et al. Optimal deployment for carbon capture enables more than half of China's coal-fired power plant to achieve low-carbon transformation[J]. *iScience*, 2022,25 (12):105664.
- Zhang, L., Sun N., Wei, W., et al. Frontiers of CO₂ Capture and Utilization (CCU) towards Carbon Neutrality[j]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2022, 39: 1252–1270.

- Zhang W, Dai C, Luo X, et al. Policy incentives in carbon capture utilization and storage (CCUS) investment based on real options analysis[J]. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2021:1-16.
- 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].生态环境部环境规划院, 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.
- 樊静丽, 李佳, 晏水平, 等. 我国生物质能-碳捕集与封存技术应用潜力分析[J]. *热力发电*, 2020(10).
- 甘满光, 张力为, 李小春, 等. 欧洲CCUS技术发展现状及对我国的启示[J]. *热力发电*.
- 光大证券. 碳中和深度报告 (二): 碳中和与大重构: 供给侧改革、能源革命与产业升级[R].光大证券, 上海, 2021. https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202103011466711324_1.pdf?1614612399000.pdf.
- 韩学义. 电力行业二氧化碳捕集、利用与封存现状与展望 [J]. *中国资源综合利用*, 2020(38): 110-117.
- 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.
- 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 (01):42-47.
- 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(05).
- 清华大学气候变化与可持续发展研究院. 中国长期低碳发展战略与转型路径研究[M]. 北京: 中国环境出版社, 2021.
- 魏宁, 姜大霖, 刘胜男,等. 国家能源集团燃煤电厂CCUS改造的成本竞争力分析[J].*中国电机工程学报*, 2020,40 (04):1258-1265+1416.
- 魏一鸣, 余碧莹, 唐葆君,等. 中国碳达峰碳中和时间表与路线图研究[J].*北京理工大学学报(社会科学版)*, 2022,24 (04):13-26.
- 曾侯琳. 不同商业模式下的国有燃煤电厂碳捕集、利用与封存 (CCUS) 项目投资决策研究[D]. 重庆: 重庆工商大学, 2020.
- 张贤,郭偲悦,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(01): 65-70.
- 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 (09):29-33.
- 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 (06):70-80.
- 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) [M].北京: 科学出版社, 2019.

附表1: 中国CCUS示范项目

序号	项目名称	序号	项目名称
1	包钢集团包头200万吨（一期50万吨）CCUS示范项目	14	河南开祥化工5万吨/年化工合成气分离CO ₂ 制干冰项目
2	包钢环保包头碳化法钢铁渣综合利用项目	15	河南强耐新材料CO ₂ 固废利用项目
3	北京建材研究总院复杂烟气环境下CO ₂ 捕集技术示范项目	16	泓宇环能北京房山水泥厂烟气CO ₂ 捕集项目
4	赐百年盐城微藻固碳项目	17	华电集团句容1万吨/年CO ₂ 捕集工程
5	大唐北京高井热电厂CO ₂ 捕集项目	18	华能正宁电厂150万吨/年CO ₂ 捕集封存项目
6	国电投重庆双槐电厂CO ₂ 捕集示范项目	19	华能上海12万吨/年相变型CO ₂ 捕集工业装置
7	国家能源集团锦界电厂15万吨/年燃烧后CO ₂ 捕集与封存全流程示范项目	20	华能北京热电厂3000吨/年二氧化碳CO ₂ 捕集示范工程
8	国家能源集团泰州电厂50万吨/年CCUS项目	21	华能长春热电厂1000吨/年相变型CO ₂ 捕集工业装置
9	国家能源集团国电大同电厂CO ₂ 化学矿化捕集利用示范项目	22	华能洋浦热电燃气机组2000吨/年CO ₂ 捕集工程
10	国家能源集团鄂尔多斯CO ₂ 咸水层封存项目	23	华能天津IGCC电厂10万吨/年燃烧前CO ₂ 捕集工程
11	海螺集团芜湖白马山水泥厂CO ₂ 捕集与纯化示范项目	24	华能北京密云燃气烟气1000吨/年CO ₂ 捕集示范工程
12	河钢集团张家口氢能源开发和利用工程示范项目	25	华能湖南岳阳低温法CO ₂ 和污染物协同脱除工程
13	河南开祥化工电石渣矿化利用CO ₂ 弛放气项目	26	华润电力海丰碳捕集测试平台

序号	项目名称	序号	项目名称
27	华中科大应城35MW富氧燃烧工业示范	43	中石油塔里木CCUS项目
28	佳利达环保佛山1万吨/年烟气CO ₂ 捕集与固碳示范工程	44	中石油吐哈哈密CCUS示范项目
29	中科金龙泰州CO ₂ 固化利用制备聚碳酸亚丙酯项目	45	心连心CCUS全流程项目
30	金隅集团琉璃河水泥厂CO ₂ 捕集及应用项目	46	海融烟台蓬莱电厂微藻固碳项目
31	金隅集团北京水泥厂CCUS项目	47	新区石化集团兰州液态太阳燃料合成示范项目
32	中石油大庆油田三肇CCUS项目	48	中煤鄂尔多斯液态阳光示范项目
33	通源石油库车百万吨CCUS一体化示范项目选商方案	49	浙能兰溪CO ₂ 捕集与矿化利用集成示范项目
34	清华大学运城高温变压吸附H ₂ /CO ₂ 分离中试示范装置	50	地调局水环中心阜康CCUS全流程项目
35	金恒吕梁钢渣及除尘灰间接矿化利用项目	51	中国煤炭地质总局天津铁厂烟气CO ₂ 捕集项目
36	四川大学西昌CO ₂ 矿化脱硫渣关键技术与万吨级工业试验	52	中海油丽水LS36-1气田CO ₂ 捕集提纯项目
37	腾讯湛江玄武岩CO ₂ 矿化封存示范项目	53	中海油渤中19-6凝析气田I期开发工程
38	天津大学鄂尔多斯CO ₂ 电解制合成气项目	54	中石油南方油田澄迈CCUS项目
39	西南化工研究设计院太原瑞光电厂烟气CO ₂ 捕集项目	55	中海油恩平15-1油田群CO ₂ 封存项目
40	西南化工研究设计院吉林佰诚发酵气CO ₂ 捕集项目	56	中科院长春应用化学研究所吉林CO ₂ 基生物降解塑料项目
41	清华大学成都煤化学链燃烧全流程示范系统	57	中科院长春应用化学研究所瑞安CO ₂ 制多元醇项目
42	中石化塔河炼化制氢弛放气CCUS全流程项目	58	中科院上海高研院CO ₂ 长治工业废气大规模重整转化制合成气关键技术与示范
		59	中科院上海高研院鄂尔多斯CO ₂ 微藻生物肥项目

序号	项目名称	序号	项目名称
60	中科院上海高研院东方千吨级CO ₂ 加氢制甲醇工业试验装置	76	中石油冀东油田CCUS项目
61	中联煤沁水CO ₂ 驱煤层气项目	77	中石油华北油田沧州CCUS项目
62	中澳合作柳林煤层气注气增产项目	78	中石油新疆油田CCUS工业化项目
63	齐鲁石化-胜利油田CO ₂ 捕集利用与封存全流程项目	79	中石油辽河油田盘锦CCUS项目
64	中石化中原油田濮阳CO ₂ -EOR示范工程	80	中石油南方油田临高CCUS项目
65	中石化华东油气田CCUS项目-南化合成氨尾气回收辅助装置 (一期)	81	旭阳集团邢台焦炉烟气CO ₂ 捕集示范项目
66	中石化华东油气田CCUS项目-南化合成氨尾气回收辅助装置 (二期)	82	宝武集团乌鲁木齐欧冶炉冶金煤气CO ₂ 捕集
67	中石化华东油气-南化公司CO ₂ 捕集项目 (三期)	83	鞍钢集团营口绿氢流化床直接还原技术示范项目
68	中石化华东油气-南化公司CO ₂ 捕集项目 (四期)	84	中建材 (合肥) 新能源光伏电池封装材料二期暨CO ₂ 捕集提纯项目
69	中石化金陵石化-江苏油田CO ₂ 捕集项目	85	徐钢集团徐州万吨级CO ₂ 提纯-钢渣矿化综合利用工业试验项目
70	中石油长庆油田姬塬CCUS先导试验项目	86	京博集团邹城万吨级烟气直接矿化示范线
71	中石油长庆油田宁夏CCUS项目	87	中国科学院大连化学物理研究所 1000吨/年CO ₂ 加氢制汽油项目
72	中石油大庆油田大庆石化合作CCUS项目	88	华润电力 (深圳) 有限公司3号机组100万吨/年烟气CO ₂ 捕集工程
73	中石油大庆油田呼伦贝尔CCUS项目	89	华润集团肇庆10万吨/年烟气CO ₂ 捕集与矿化项目
74	中石油吉林油田吉林石化合作CCUS项目	90	宁波钢铁2万吨/年石灰窑尾气CO ₂ 捕集与矿化项目
75	中石油吉林大情字井油田CCUS项目		

序号	项目名称	序号	项目名称
91	清华大学盐城千吨级相变捕集技术示范项目	94	国电投长兴岛电厂10万吨级燃煤燃机CCUS项目
92	中石油新疆油田CCUS先导项目	95	华润集团深圳微藻固碳项目
93	延长石油榆林煤化公司30万吨/年CO ₂ 捕集装置项目	96	广东能源湛江生物质电厂烟气微藻固碳工程示范

附表2： 中共中央和国务院发布的涉及CCUS的相关政策

序号	政策名称	序号	政策名称
1	国家中长期科学和技术发展规划纲要 (2006-2020年)	18	关于加强碳捕集、利用和封存试验示范项目环境保护工作的通知
2	中国应对气候变化国家方案	19	国家重点推广的低碳技术目录 (第一批)
3	中国应对气候变化科技专项行动	20	国家应对气候变化规划 (2014-2020年)
4	中国应对气候变化的政策与行动 (2008)	21	中美气候变化联合声明
5	国土资源“十二五”规划纲要	22	关于促进煤炭安全绿色开发和清洁高效利用的意见
6	国家“十二五”科学和技术发展规划	23	煤炭清洁高效利用行动计划 (2015-2020年)
7	国土资源“十二五”科学和技术发展规划	24	国家重点推广的低碳技术目录 (第二批)
8	中国碳捕集、利用与封存 (CCUS) 技术发展路线图	25	能源技术革命创新行动计划 (2016-2030)
9	国家能源科技“十二五”规划 (2011-2015)	26	二氧化碳捕集、利用与封存环境风险评估技术指南 (试行)
10	“十二五”控制温室气体排放工作方案	27	工业绿色发展规划 (2016-2020年)
11	煤炭工业发展“十二五”规划	28	“十三五”国家科技创新规划
12	“十二五”国家应对气候变化科技发展专项规划	29	“十三五”控制温室气体排放工作方案
13	工业领域应对气候变化行动方案 (2012-2020年)	30	煤炭工业发展“十三五”规划
14	“十二五”国家自主创新能力建设规划	31	能源生产和消费革命战略 (2016-2030)
15	“十二五”国家碳捕集利用与封存科技发展专项规划	32	战略性新兴产业重点产品和服务指导目录 (2016版)
16	国家重大科技基础设施建设中长期规划 (2012-2030)	33	“十三五”应对气候变化科技创新专项规划
17	关于推动碳捕集、利用和封存试验示范的通知	34	烟气二氧化碳捕集纯化工程设计标准

序号	政策名称	序号	政策名称
35	中国碳捕集利用与封存技术发展路线图 (2019版)	53	《气候投融资试点方案》
36	产业结构调整指导目录 (2019 年本)	54	“十四五”现代能源体系规划
37	关于促进应对气候变化投融资的指导意见	55	高耗能行业重点领域节能降碳改造升级实施指南 (2022年版)
38	绿色技术推广目录 (2020年)	56	关于“十四五”推动石化化工行业高质量发展的指导意见
39	关于统筹和加强应对气候变化与生态环境保护相关工作的指导意见	57	加强碳达峰碳中和高等教育人才培养体系建设工作方案
40	关于加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系的指导意见	58	关于加快建立统一规范的碳排放统计核算体系实施方案
41	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	59	减污降碳协同增效实施方案
42	中美应对气候危机联合声明	60	科技支撑碳达峰碳中和实施方案 (2022—2030年)
43	关于加强高耗能、高排放建设项目生态环境源头防控的指导意见	61	贯彻实施《国家标准化发展纲要》行动计划
44	关于请报送二氧化碳捕集利用与封存 (CCUS) 项目有关情况的通知	62	工业领域碳达峰实施方案
45	绿色债券支持项目目录 (2021年版)	63	高等学校碳中和科技创新行动计划
46	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	64	“十四五”生态环境领域科技创新专项规划
47	国家标准化发展纲要	65	能源碳达峰碳中和标准化提升行动计划
48	2030年前碳达峰行动方案	66	建立健全碳达峰碳中和标准计量体系实施方案
49	中国应对气候变化的政策与行动 (2021年10月)	67	绿色低碳发展国民教育体系建设实施方案
50	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	68	全国煤电机组改造升级实施方案
51	“十四五”能源领域科技创新规划	69	“十四五”城镇化与城市发展科技创新专项规划
52	“十四五”工业绿色发展规划	70	国家重点推广的低碳技术目录 (第四批)



热烈庆祝15万吨/年CO₂捕集示范工程顺利通过168小时试运转正式投产

国家能源集团
CHN ENERGY
液态CO₂储罐

国家能源集团
CHN ENERGY
液态CO₂储罐



中国21世纪议程管理中心
The Administrative Center for China's Agenda 21



GLOBAL CCS
INSTITUTE



清华大学
Tsinghua University

