中国碳捕集、利用与封存技术发展与展望

贾子奕，刘卓，张力小，郝岩*

（北京师范大学环境学院，北京 100875）

【摘　要】 实现“双碳”目标是我国应对气候变化的重大决策，也是我国生态文明建设的重要内容。碳捕集、利用与封存（Carbon Capture，Utilization and Storage，CCUS）技术是实现“双碳”目标的关键性技术，也是我国达成二氧化碳零排放的保障性措施。本文简要介绍了CCUS主要环节的技术流程，概括了我国CCUS技术的发展历程。从技术水平、国家政策、示范项目情况等多个角度，总结了现阶段我国CCUS技术的整体研究与发展水平。并根据我国能源供给模式、工业发展水平等因素，分析并阐明了我国CCUS技术发展的必要性，以及现阶段CCUS技术发展所面临的挑战。最后本文还从行业角度出发，将CCUS技术与油气、建筑、农业、化工多种重点行业结合，提出了具体可行、互促互利的CO_2转化利用模式，为实现CCUS的商业化运行、保证CCUS技术的可持续发展提供了思路。

【关键词】 碳捕集、利用与封存；“双碳”目标；二氧化碳减排

【中图分类号】X321；X701　　【文章编号】1674-6252（2022）06-0081-07

【文献标识码】A　　【DOI】10.16868/j.cnki.1674-6252.2022.06.081

引言

人类活动所引发的温室气体过量排放是导致全球气候变化的决定性因素。作为世界上最大的温室气体排放国家，我国在温室气体减排方面有着巨大的潜力与压力。2020 年 9 月 22 日，国家主席习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上提出：“中国将提高国家自主贡献力度，采取更加有力的政策和措施，二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值，努力争取 2060 年前实现碳中和。”“双碳”目标是我国的重大战略决策，也是落实《巴黎协定》的积极举措，其不仅体现了我国二氧化碳减排的决心，同时也展现出了中国积极参与应对全球气候变化的大国担当。

实现碳中和意味着社会经济活动引起的碳排放与自然碳汇和负碳技术（Negative Emission Technologies，NETs）吸收的二氧化碳等温室气体的总量相等，因此 NETs 是我国实现碳中和的重要关键性技术。现有的 NETs 主要包括传统的二氧化碳捕集、利用与封存，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封存（Direct Air Carbon Capture with Storage，DACCS）等。

CCUS 技术是原有碳捕集和封存（Carbon Capture and Storage，CCS）技术发展的新趋势，被认为是未来减少温室气体排放、解决全球气候变化的重要手段。CCS 是指将 CO_2 从烟气当中分离出来，经富集、压缩后，运输至特定储存地点封存的减排技术。CCS 主要由三个环节构成，即碳的捕获、运输与储存，该技术可以有效地减少火电、化工等工业源的 CO_2 排放量，是实现低碳可持续发展的重要技术。而从经济角度来看，使用 CCS 技术对 CO_2 进行捕集及封存会产生一定的经济损失[1]，若能将封存的 CO_2 作为资源加以利用，则可在提升环境效益的同时兼顾经济效益。CCUS 技术与 CCS 技术相比，增加了碳利用这一环节，将其用于食品加工、工业生产、驱油等领域，可降低减排过程所产生的经济损失。随着对碳捕集技术认识的不断深入，目前在 CCS 的基础上增加“utilization”这一理念已获得了国际上的普遍认同。

1 CCUS 主要技术环节

1.1 二氧化碳捕集技术

CO_2 捕集技术可分离并富集电力、钢铁、水泥等行业生产运行过程中所产生的 CO_2，根据分离过程的不同可分为燃烧后捕集、燃烧前捕集以及富氧燃烧捕集三种方式。CO_2 捕集是 CCUS 系统中能耗与成本产生最高的环节，捕集部分的成本占总成本的三分之二甚至更多，提高捕集效率、降低捕集成本是目前碳捕集技术的主要研发方向[2]。

资助项目：国家自然科学基金项目“城市家庭食物、能源、水消费驱动因素解析与模拟”（52170175）。

作者简介：贾子奕（1998—），女，硕士研究生，研究方向为能源环境与温室气体减排技术，E-mail：jiaziyi0521@163.com。

*** 责任作者：**郝岩（1978—），男，副教授，博士生导师，研究方向为生态环境系统工程，E-mail：haoyan@bnu.edu.cn。

由于燃烧后捕集技术流程相对简单、发展相对成熟，因此应用最为广泛，可适用于大部分燃煤电厂、钢铁厂、水泥厂等老旧工厂的低碳改造。目前，国内已建成数十套万吨级燃烧后碳捕集装置，国家能源集团国华锦界电厂 15 万 t/a CO_2 捕集与封存全流程示范项目是目前国内已运行的燃煤电厂燃烧后捕集与封存项目中规模最大的。该项目于 2019 年 11 月开工建设，2021 年 1 月完工，运行后生产出纯度 99.5% 的工业级液态 CO_2 产品，成功实现了燃煤电厂烟气中 CO_2 的大规模捕集。

燃烧前捕集技术相对复杂，主要适用于整体煤气化联合循环发电系统（Integrated Gasification Combined Cycle，IGCC）以及部分化工过程。由于燃烧前捕集技术的系统小、能耗低、捕集效率高，近年来备受关注，发展迅速 [3]。IGCC 是较为典型的可以进行燃烧前捕集的系统，其工艺流程主要包括变换系统、脱碳系统与脱硫系统 [4]。目前，我国有两套 IGCC 设施，华能集团天津绿色煤电 IGCC 煤气化发电是中国第一座自主设计建造的 IGCC 电厂，带有 CO_2 捕集的 400MW 示范工程于 2016 年建成，捕集能力为 10 万 t/a。连云港清洁能源动力系统研究设施投运于 2011 年，采用 400MW 先进 IGCC 超清洁发电，并已建设完成了 3 万 t/a 的 CO_2 捕集示范项目。

富氧燃烧技术是指将煤粉与锅炉内高浓度的 O_2 与 CO_2 混合气体燃烧，又称空气分离 / 烟气再循环燃烧技术 [5]。通过不断地循环与富集，烟气中 CO_2 浓度不断升高 [6]，高浓度的 CO_2 更易进行压缩与分离处理。该方法具有成本低、易规模化等优点，但投资和运行成本较高。自 1995 年开始，华中科技大学就进行了富氧燃烧的实验室微型实验，按照其发展规划和放大路线（0.3MW → 3MW → 35MW → 200MW → 600MW），现阶段已经完成了 200MW 煤粉富氧燃烧大型示范可行性研究，开展了 35MW 超临界富氧燃烧系统的集成优化分析，同时建成了 10 万 t/a CO_2 捕集装置。

1.2 二氧化碳运输

CO_2 运输是指将捕集的 CO_2 运送到利用或封存地的过程，有管道、船舶和罐车等方式，在大规模运输过程中，流体态的 CO_2 更便于运输 [7]。表 1 对比了 CO_2 输送方式的优缺点，其中 CO_2 陆地管道输送是目前最具应用潜力和经济性的运输方式，且随着管道运输容量的增加，运输成本逐渐下降 [8]，现阶段国际上已有大量 CO_2 管道输送的工程实践。

目前，我国的 CO_2 陆路车载运输和内陆船舶运输技术已成熟，可达到商业化应用阶段，主要应用于规模 10 万 t/a 以下的 CO_2 输送。陆地管道运输尚处于中试阶段，现阶段已完成 100 万 t/a 输送能力管道的初步设计。由于海底管道运输成本高，且海上封存场地较少，该技术尚处于研究阶段。

1.3 二氧化碳利用与封存

CO_2 的利用与封存可大致分为地质利用与封存、化工利用、生物利用等，是 CCUS 流程中的重要环节，是消纳 CO_2 的关键步骤。

CO_2 地质利用与封存是将 CO_2 注入地下，强化能源开采过程，并将 CO_2 储存于地质结构中，实现与大气长期隔绝的一种技术。目前，常用的有二氧化碳提高石油采收率（CO_2 Enhance Oil Recovery，CO_2–EOR）、二氧化碳驱替煤层气（CO_2 Enhance Coalbed Methane Recovery，CO_2–ECBM）、二氧化碳咸水封存（CO_2 Saline Aquifer Storage）技术等。该技术使用时要充分考虑场地的适应性与安全性，并根据源汇匹配的原则，对 CCUS 项目成本进行全流程分析，通过成本优化得到较优的源汇组合序列，以寻找成本最优的

表 1 二氧化碳运输方式比较

运输方式		运输规模（万 t/a）	优点	缺点	技术成熟度
管道运输	陆地	＞ 100	连续性强，运输量大，运行成本低；安全性高，CO_2 泄漏量小，环境污染较小	灵活性差，只能用于固定地点之间的运输；初始投资较大	中试阶段
	海上	—			研究阶段
罐车运输	公路	＜ 10	运输灵活，不受地点限制；前期投资较小；适应性强，灵活性高	单位运输成本高，不适用于大规模 CCUS 设施；CO_2 泄漏量大，环境污染较大	商业应用
	铁路	10 ～ 100	相比于公路运输成本较低，运输距离较长	受铁路设施建设影响，运输成本高于管道运输	商业应用
内陆船舶运输		＜ 10	运输灵活，适用于河网分布密集的封存点	受地理位置限制，大规模运输时经济性差	商业应用

封存场地[9,10]。

CO_2 化工利用主要就是以 CO_2 为化工原料，将 CO_2 和共反应物转化成目标产物的一种技术方法。CO_2 转化成的产品可大致分为通过还原作用生成 C–H 键构成的燃料产品，以及通过羧化作用生成 C–O、C–C、C–N 键构成的化工原料[11]。按照产品类型进行分类，可分为合成能源化学品、高附加值化学品及材料三大类。该方法可实现 CO_2 的资源化利用，并进一步推动传统产业的转型升级。

CO_2 生物利用就是将 CO_2 用于生物质合成，通过生物转化的方式实现 CO_2 的资源化利用。生物利用技术的产品包括食品饲料、生物肥料、化学品、生物燃料和气肥等，其附加值较高，经济效益较好。目前我国大多数的生物利用技术都处于研发或小规模示范阶段，主要集中于微藻固定和气肥利用两方面，现已开展 20t/a 微藻固定煤化工烟气项目[12]。

2 我国 CCUS 技术发展现状

我国的 CCUS 研究起步较晚，但近年来在国家政策支持及政府与企业的共同努力下，CCUS 技术不断发展，试验示范工程的建设正在稳步推进。

2.1 CCUS 技术研发与示范的引导及政策支持

在 2006 年国务院发布的《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020 年）》中，我国首次提出开发高效、清洁和二氧化碳近零排放的化石能源开发利用技术。2007 年发布的《中国应对气候变化科技专项行动》将“二氧化碳捕集、利用与封存技术”列为重点支持、集中攻关和示范的重点技术领域。此后，国务院、科技部等多个部委发布相关政策文件（表 2），系统地评估了我国 CCUS 技术发展现状与潜力，以及 CCUS 技术发展所面临的问题与挑战，提出 CCUS 技术的发展目标。

科技部通过实施 973 计划、863 计划、科技支撑计划和国家重点研发计划等，促进CCUS技术的研发，建立了“燃煤烟气 CCUS 关键技术”“实现氧燃烧富集 CO_2 的新理念与新方法”“CO_2 地质封存关键技术”等 CCUS 全流程关键技术的研发与创新项目，开展了 CCUS 全流程先导性实验项目。通过项目推动技术进步与技术创新，不断扩大规模、降低成本，注重成果转化，持续推动 CCUS 技术在中国的发展。并在推进国内 CCUS 产业发展的同时，积极参与国际合作与技术交流，我国先后与国际能源署（IEA）、碳收集领导人论坛（CSLF）、全球碳捕集与封存研究院（GCCSI）等多个国际组织开展了广泛合作，积极参与国际标准的制定，并与欧盟、美国、澳大利亚等国家和地区开展了多层次的双、多边科技合作，总结先进经验，吸取经验教训。

2.2 中国 CCUS 示范项目基本情况

我国现有处于不同实施阶段的 CCUS 项目约 40 个，涉及电厂、水泥厂等多种捕集源，多以小规模驱油捕集的示范项目为主[12]。全球碳捕集与封存研究院 2020 年的报告显示，目前世界大型商业碳捕集与封存项目（工业碳源捕集能力≥40 万 t/a；发电站碳源捕集能力≥80 万 t/a）有 65 个，其中 26 个正在运行[13]；中石化中原油田 CCS 项目与中石油吉林油田 CO_2–EOR 项目是其中 2 个正在运行的大型 CCUS 项目。近几年我国 CCUS 示范工程快速发展，已实现 15 万 t 级火电 CCUS 示范工程的运行，目前正在建设 50 万 t/a 泰州电厂 CCUS 项目，2022 年 8 月中国首个百万吨级“齐鲁石化—胜利油田”CCUS 项目正式注气运行。由此可见，我国捕集源与封存类型多样化，且已具备建造大规模 CCUS 设施的能力。

3 CCUS 技术发展的必要性

在不断向“净零排放”目标努力的过程中，CCUS 技术发挥了不可或缺的作用。IEA 的报告显示，在未来的五十年内通过使用 CCUS 技术改造现有的发电厂和工厂，可减排 6000 亿 t CO_2，相当于目前年排放量的 17 倍[14]。该技术的大规模应用不仅可以大幅度降低能源系统的碳排放，还能帮助难减排行业实现深度脱碳。据预测，到 2060 年我国仍有 14 亿 t 左右 CO_2 排放需要通过 CCUS 技术进行消解。

3.1 解决能源系统碳排放问题

从能源系统的角度来看，我国能源消耗总量大，排入大气中的 CO_2 有 80% 来自煤炭的燃烧[15]。能源生产消费格局具有“一次能源以煤炭为主，二次能源以煤电为主”的特征，并且在短期内以煤炭为主的能源结构不会发生改变。

燃煤电厂是目前我国电力供应的主力，也承担着保障电力系统安全的重要角色。《中国能源大数据报告（2021）》显示，2020 年我国发电量为 77 790.6 亿 kW·h，同比增长 3.7%，其中火电发电量占比 68.5%。长期以来我国电力装机容量和发电量均居世界第一[9]，CO_2 总排放量的三分之一均来自电力行业[16]。与此同时，我国部分现役机组为近些年投入使

表 2 我国 CCUS 政策文件汇总

发布时间	发布机构	CCUS 相关政策文件	主要内容
2006 年	国务院	《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020 年）》	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
2007 年	科技部	《中国应对气候变化国家方案》	提出了 2010 年中国应对气候变化的具体目标、基本原则、重点领域及其政策措施，明确提出要大力开发 CCUS 技术
2011 年	国务院	《“十二五”控制温室气体排放工作方案》	在火电、煤化工、水泥、钢铁等行业中开展碳捕集试验项目，建设一体化示范工程，并在人才建设、资金保障和政策支持等方面做出安排
	科技部	《国家“十二五”科学和技术发展规划》	加强气候变化科学研究和技术集成，全面提高应对能力，发展包括二氧化碳捕集在内的先进能源技术
2012 年	国务院	《中国的能源政策（2012）》白皮书	大力推动化石能源清洁发展，坚持低碳、清洁、高效原则，大力发展绿色火电，鼓励建设 IGCC 发电、CCUS 等技术的试验示范项目
	国家发展和改革委	《煤炭工业发展“十二五”规划》	稳步推进煤炭深加工示范项目建设，提高能源转化效率、降低水耗和煤耗、降低生产成本，增强竞争力。支持开展 CCUS 技术研究和示范
2013 年	国务院	《关于加快发展节能环保产业的意见》	加强技术创新，提高节能环保产业市场竞争力，瞄准未来技术发展制高点，提前部署 CCUS 技术装备
	环境保护部	《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》	落实国务院《“十二五”控制温室气体排放工作方案》，降低和控制 CCUS 全过程可能出现的各类环境影响与风险
2015 年	国务院	《强化应对气候变化行动——中国国家自主贡献》	加强气候变化影响、风险机理与评估方法研究。加强 CCUS 等低碳技术的研发和产业化示范，推广利用 CO_2 驱油、驱替煤层气技术
2016 年	国家发展和改革委	《能源技术革命创新行动计划（2016—2030 年）》	提出了 CCUS 技术创新的战略方向、创新目标和创新行动
2019 年	科技部	《中国碳捕集利用与封存技术发展路线图（2019）》	全面评估中国 CCUS 技术发展现状和潜力以及面临的问题与挑战，提出技术研发示范和产业集群的发展目标
2021 年	国务院	《2030 年前碳达峰行动方案》《中国应对气候变化的政策与行动》白皮书	成立 CCUS 创业技术创新战略联盟、专委会等专门机构，持续推动领域技术进步与成果转化。建设全流程、集成化、规模化 CCUS 示范项目，积极参与国际科研合作和技术交流，推广低成本 CCUS 技术创新
	生态环境部	《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》	全面概述中国 CCUS 技术的发展及研发示范情况，依据目前发展现状，提出相关目标
2022 年	生态环境部等 7 部门	《减污降碳协同增效实施方案》	鼓励重点行业企业探索采用多污染物和温室气体协同控制技术工艺，开展协同创新，推动 CCUS 技术在工业领域的应用
	教育部	《加强碳达峰碳中和高等教育人才培养体系建设工作方案》	加快 CCUS 人才培养，针对该技术未来产业的发展需求，推动高校开设相关学科专业，为未来技术攻坚和产业提质扩能储备人才力量

用 [17]，为避免火电资产提前停止使用所带来的资源浪费，火电与 CCUS 技术结合是具有竞争力的重要技术手段，是我国电力系统实现快速减排的首选方向。

根据电力行业发展规划，未来我国电力结构中可再生能源的占比会显著增加，风能、太阳能等非化石电力将成为主要的来源。但考虑到当前电力系统更具有灵活性与稳定性，未来能源系统中仍会保留部分煤电、气电等化石能源，CCUS 是其达到净零排放的必要技术。

3.2 针对难减行业进行碳减排

从行业上看，化工、钢铁和水泥三大重工业占工业能源使用量的一半以上，占工业直接 CO_2 排放量的 70% 左右 [14]。其中，钢铁行业大约产生了全球 7% 的 CO_2 排放量，水泥制造过程中排放的 CO_2 占全球固定源 CO_2 排放总量的 5%[18]。工业源 CO_2 的排放往往伴随着产品的生产过程，例如水泥生产中 65% 的碳排放都在石灰石转化为生石灰的过程中 [13]。这些工业过程伴随有 CO_2 排放的化学反应，却是产品制造中不可或缺的一部分。因此，钢铁、水泥等难减行业依靠能源替代等方法无法实现完全脱碳，需要 CCUS 技术进行末端处理加以去除。

我国钢铁产能巨大，2020 年我国粗钢产量 10.5 亿 t，占全世界总产量的 56%，排放 CO_2 约 19 亿 t，

是我国仅次于电力的第二大碳排放行业。我国的水泥产能、品种和消费量也高居世界首位，2020 年水泥年产量达到 23.77 亿 t，占世界年总产量的 60% 左右。根据我国的各行业 CCUS 碳减排需求潜力的预测，到 2060 年我国钢铁行业、水泥行业依靠 CCUS 技术减排的需求量，可分别达到 0.9 亿～1.1 亿 t/a 和 1.9 亿～2.1 亿 t/a[12]。使用 CCUS 对难减排行业进行深度脱碳，是我国实现“双碳”目标的重要技术方案。

4 CCUS 技术应用推广面临的挑战

4.1 经济成本

高经济成本是制约 CCUS 发展的主要因素，在我国 CCUS 全流程成本可达到 300～400 元 /t CO_2[12]，远远高于我国碳市场的交易均价 40～60 元 /t。对企业来说，在投资改进后只有环境效益的提升而无法获得相应的经济收益，这与其运行发展所追求的经济利益相违背，严重影响了企业开展 CCUS 应用项目的积极性。

技术进步是降低 CCUS 成本的关键 [19]，CCUS 技术成本主要集中于捕集环节，约占总成本的 70%～80%。目前我国的第一代捕集技术已经基本成熟，第二代捕集技术还处于研究当中，其在能耗与成本方面与一代相比可降低 30% 以上 [20]，能大幅度提升 CCUS 的技术经济性。现阶段应平稳推进捕集技术向二代捕集技术的过度，以更低的成本推进 CCUS 技术的经济可持续发展。

4.2 环境影响与环境风险

CCUS 所带来的环境影响与环境风险主要包括两个方面：一方面是 CCUS 工艺过程中产生的，如在捕集过程中吸收剂的逃逸、运输或封存过程中 CO_2 的泄漏等，会对周边环境产生影响。另外虽然 CO_2 是无毒的，但如果高浓度暴露在环境中对人体也具有危害性。特别是在复杂地形储存 CO_2 时，CO_2 浓度、地下水成分、接触时间等因素都会影响存储的稳定性，使其存在一定的环境风险 [21]。另一方面，CCUS 的环境效益为温室气体的减排，但在该过程中还需投入额外的能源、化学品和基础设施等，带来新的污染物排放 [22,23]。例如，吸收剂降解产生的固体废物、额外增加的能耗所带来的排放 [24,25] 等等，使得该技术的环境影响产生不确定性。

针对 CCUS 环境影响与风险的不确定性，应充分理解该过程的作用机理，提升技术的可行性与风险评价的有效性；针对 CCUS 进行全过程的环境监测、风险防控，建立标准体系和监管框架，以促进 CCUS 的大规模应用。

4.3 市场与政策

CCUS 高成本的特点使企业不愿意开展相关的技术改造，目前国内大多数的示范项目都是通过高比例的政府支持资金实施的。我国缺少相应的政策奖励机制以及碳税资金支持，碳市场也处于起步阶段，导致 CCUS 商业化基础薄弱。

另外，我国尚未建立 CCUS 专项法律法规和标准体系，企业参与 CCUS 项目具有一定的风险性。CCUS 是一个集成性技术，项目的实施需要多个部门的参与，涉及能源生产及消费的各个环节。如何明确责任、协调利益，直接影响到 CCUS 的发展及企业响应的积极性。目前很少有跨行业、多部门联合的 CCUS 运营案例，未来仍需要建立完备的法律和政策框架体系，以保证 CCUS 项目的有效运行。

5 CCUS 技术与重点行业结合的应用展望

只有将捕集的 CO_2 真正的封存或利用，才能最终实现碳减排。如何合理地处理捕集到的高浓度 CO_2，在控制风险的同时充分考虑其经济价值，是发展 CCUS 技术的关键问题。要解决这个问题，首先应找到技术—经济平衡点，实现成本抵消，保证 CCUS 技术的可持续发展。之后需进一步找到具有更高经济效益的应用模式，使 CCUS 能够产生额外的经济效益，减少政府补贴力度，实现政策扶持下的商业化运行模式。

5.1 油气行业 CO_2 地质利用技术

利用 CO_2 进行油气开采是现阶段应用最为广泛的 CO_2 利用技术。该技术具有较大的固碳潜力，可以在封存 CO_2 的同时提高能源开采效率，并产生一定的经济效益以降低 CCUS 的技术成本。特别是 CO_2 –EOR 技术，目前已广泛应用于美国、加拿大和部分欧洲国家。我国早期的 CCUS 示范项目亦优先采用高浓度排放源与 CO_2–EOR 相结合的方式，现已有部分应用案例。并且我国的 CO_2–EOR 封存潜力较大，可达 48 亿～101 亿 t[16]，主要集中于渤海湾盆地、松辽盆地等地区。在国家政策的扶持下，现已开展大量 CO_2 地质封存技术的相关研究工作，并已具备实际应用的能力。但仍需要进一步完善风险预测、监控及控制等技术，在最大程度上减少 CO_2 地质利用及封存所带来的

风险。

5.2 建筑行业 CO_2 矿化技术

CO_2 矿化是指用天然矿物的碱土金属离子（Ca^{2+}/Mg^{2+}），将 CO_2 转化为稳定的无机碳酸盐。矿化产物的稳定性好，可作为建筑行业的水泥基材料，用于建筑养护混凝土、强化再生骨料等，从而将气态的 CO_2 固定以达到封存的目的 [26]。矿化处理可一定程度上缩短反应时间、减少水泥用量，经过处理的材料性能更好，耐久性更强 [27]。与其他封存技术相比，该技术可避免 CO_2 封存过程的泄漏风险，安全性较高，且其固碳潜力巨大，应用前景广泛。

5.3 富碳农业 CO_2 气肥技术

气肥利用技术是将捕集提纯的 CO_2 作为气肥注入温室，调节人工密闭环境的条件，使作物的光合作用效率最高，进而形成一种富碳农业的生产模式。该技术可以有效减少 CO_2 排放，并且在一定程度上减少化肥的使用，提高农作物的质量与产量。根据目前的研究成果，将碳捕集技术用于农业在技术上是可行的 [28]，但因涉及工业、农业等多个领域，需要国家产业政策相配合，进一步探索运营模式。碳捕集技术与农业的结合，可由农业来承担部分碳减排任务，是资源化利用 CO_2 有效方法，也是促进我国工农业协同可持续发展的创新之路。

5.4 CO_2 化工利用与高附加值化学品生产

碳是重要的化工生产元素，CCUS 中捕集的碳是重要的绿碳原料。CO_2 驱油、矿化等方式虽然可消纳大量的 CO_2，但其产品经济价值不高，无法完全抵消前期的经济成本，因此高附加值的化工利用可推动 CCUS 全流程的商业化运行。现在已有关于 CO_2 制备纳米材料、塑料，光催化制备高附加值碳氢化合物 [29] 等利用 CO_2 制备高附加值化学品的相关研究，但大部分还处在基础研究阶段，未进行大规模的应用示范。CO_2 化工利用制备高附加值化学品，是 CCUS 经济可持续化的重要推动力，也是实现 CCUS 项目产生经济收益的重要途径。未来需进一步推动该领域的研究，扩展 CO_2 的利用途径，使用固碳潜力较大的方式消纳捕集到的大部分 CO_2，另外小部分则用于创造一定的经济价值，并在平衡经济成本后产生一定的收益。

6 总结与展望

CCUS 技术是 CO_2 减排的重要措施，我国正在积极地推动其发展。CCUS 技术是集捕集、运输、利用与封存等各项技术于一体的全流程技术，从技术水平上来看，我国 CCUS 各环节技术进展良好，部分技术已达到商业化水平，但是技术间发展不平衡，仍需要提高整体技术成熟度，使各环节平衡、有序地共同发展。此外，还需进一步开发低成本、低能耗的 CCUS 技术，提高技术的经济可持续性。从我国实际运行的示范项目来看，目前 CO_2 的捕集能力多在万吨级到十万吨级，缺乏技术可复制的大型示范项目。同时项目多以政府补贴为主，应寻找更合理的 CCUS 商业化运行模式，推进大规模、全流程的 CCUS 示范项目的建设。

在政府层面，应颁布有利于 CCUS 发展的激励政策，推进碳市场的建设与发展，以市场带动技术的发展。激励企业参与 CCUS 的发展规划，通过技术宣传增强社会的认知和接受度，促进CCUS的大规模应用。目前，我国进入了以减污降碳、协同增效为重点的生态文明建设时期，CCUS 将作为推动产业结构、能源结构调整的有力工具，与多种技术手段结合以实现双碳目标，为应对全球气候变化贡献中国力量。

参考文献

[1] 米剑锋，马晓芳 . 中国 CCUS 技术发展趋势分析 [J]. 中国电机工程学报，2019, 39(9): 2537-2543.

[2] 段玉燕，罗海中，林海周，等 . 浅谈国内外CCUS示范项目经验 [J]. 山东化工，2018, 47(20): 173-174, 178-178.

[3] 任永强，车得福，许世森，等 . 国内外 IGCC 技术典型分析 [J]. 中国电力，2019, 52(2): 7-13, 184-184.

[4] 樊强，许世森，刘沅，等 . 基于 IGCC 的燃烧前 CO_2 捕集技术应用与示范 [J]. 中国电力，2017, 50(5): 163-167, 184-184.

[5] 刘建华 . 国内燃煤锅炉富氧燃烧技术进展 [J]. 热力发电，2020, 49(7): 48-54.

[6] INSTITUTE G C. CO_2 Capture Technologies: Oxy Combustion with CO_2 Capture[EB/OL]. [2022-08-18]. https://www.globalccsinstitute.com/resources/publications-reports-research/CO_2-capture-technologies-oxy-combustion-with-CO_2-capture/.

[7] 陈霖 . 中石化二氧化碳管道输送技术及实践 [J]. 石油工程建设，2016, 42(4): 7-10.

[8] 徐冬，刘建国，王立敏，等 . CCUS 中 CO_2 运输环节的技术及经济性分析 [J]. 国际石油经济，2021, 29(6): 8-16.

[9] 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(4): 1258-1265.

[10] LI X C, WEI N, JIAO Z S, et al. Cost curve of large-scale deployment of CO_2-enhanced water recovery technology in modern coal chemical industries in China[J]. International journal of greenhouse gas control, 2019, 81: 66-82.

[11] 柴树，王倩，孟丽，等 . CO_2 化学利用的工程化技术探讨 [J]. 现

代化工 , 2018, 38(7): 1-5.
[12] 蔡博峰 , 李琪 , 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 [EB/OL]. [2022-08-18]. http://www.caep.org.cn/sy/dqhj/gh/202107/t20210725_851241.sthml.
[13] GCCSI. Global Status of CCS Report: 2020[EB/OL]. [2022-08-18]. https://globalccsinstitute.com/wp-content/wp-cotent/uploads/2021/09/Global-Status-of-CCS-Report-Jan-2-8-1.pdf.
[14] IEA. CCUS in Clean Energy Transitions[EB/OL]. [2022-08-18]. https://www.iea.org/reports/cuss-in-clean-energy-transttions.
[15] 周伟 , 米红 . 中国碳排放 : 国际比较与减排战略 [J]. 资源科学 , 2010, 32(8): 1570-1577.
[16] 匡建超 , 王众 , 霍志磊 . 中国二氧化碳捕捉与封存 (CCS) 技术早期实施方案构建研究 [J]. 中外能源 , 2012, 17(12): 17-23.
[17] 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(2): 110-117.
[18] BOSOAGA A, MASEK O, OAKEY J E. CO_2 capture technologies for cement industry[J]. Energy procedia, 2009, 1(1): 133-140.
[19] Global CCS Institute. Technology Readiness and Costs of CCS[EB/OL]. [2022-08-18]. https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2022/03/CCE-CCS-Technology-Readiness-and-Costs-22-1.pdf.
[20] 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)[M]. 北京 : 科学出版社 , 2019.
[21] 李向东 , 冯启言 , 刘波 , 等 . 中国 CO_2 地质储存研究现状和应用前景 [J]. 洁净煤技术 , 2009, 15(1): 9-13.
[22] MARX J, SCHREIBER A, ZAPP P, et al. Environmental evaluation of CCS using life cycle assessment-a synthesis report[J]. Energy procedia, 2011, 4: 2448-2456.
[23] KOORNNEEF J, VAN KEULEN T, FAAIJ A, et al. Life cycle assessment of a pulverized coal power plant with post-combustion capture, transport and storage of CO_2[J]. International journal of greenhouse gas control, 2008, 2(4): 448-467.
[24] GIORDANO L, ROIZARD D, FAVRE E. Life cycle assessment of post-combustion CO_2 capture: a comparison between membrane separation and chemical absorption processes[J]. International journal of greenhouse gas control, 2018, 68: 146-163.
[25] YUJIA W, ZHAOFENG X, ZHENG L. Lifecycle analysis of coal-fired power plants with CCS in China[J]. Energy procedia, 2014, 63: 7444-7451.
[26] 李林坤 , 刘琦 , 黄天勇 , 等 . 基于水泥基材料的 CO_2 矿化封存利用技术综述 [J]. 材料导报 , 2022, 36(19): 78-86.
[27] WANG T, HUANG H, HU X T, et al. Accelerated mineral carbonation curing of cement paste for CO_2 sequestration and enhanced properties of blended calcium silicate[J]. Chemical engineering journal, 2017, 323: 320-329.
[28] HOU C L, WU Y S, JIAO Y Z, et al. Integrated direct air capture and CO_2 utilization of gas fertilizer based on moisture swing adsorption[J]. Journal of Zhejiang university-science A, 2017, 18(10): 819-830.
[29] LI N X, WANG B B, SI Y T, et al. Toward high-value hydrocarbon generation by photocatalytic reduction of CO_2 in water vapor[J]. ACS catalysis, 2019, 9(6): 590-5602.

Development and Prospect of Carbon Capture, Utilization and Storage Technology in China

JIA Ziyi, LIU Zhuo, ZHANG Lixiao, HAO Yan*
(School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Achieve carbon peaking and carbon neutrality goals is the major policy decisions to respond to climate change, is also the important content of ecological civilization construction in China. Carbon capture, utilization and storage (CCUS) is a key technology to achieve carbon peaking and carbon neutrality goals, and also a guarantee measure to realize zero CO_2 emission in China. This paper briefly introduces the technical process of the main links of CCUS, sums up the development process of CCUS in China, and gives a summary of the overall research and development level of CCUS technology in China at the present stage from the perspectives of technology level, national policy, and demonstration projects. In addition, according to China's energy supply mode, industrial development level and other factors, this paper analyzes and expounds the necessity and challenges of developing CCUS technology in China. Moreover, this paper combines CCUS technology with key industries, such as oil and gas, construction, agriculture and chemical industry, and proposes a feasible and mutually beneficial CO_2 conversion and utilization model. It provides ideas for realizing the commercial operation of CCUS and ensuring the sustainable development of CCUS technology.
Keywords: CCUS; carbon peaking and carbon neutrality goals; carbon dioxide reduction