



双碳能源动态信息

2023 年 01 期



中国科学院兰州化学物理研究所科研与规划处

2023 年 3 月 29 日

CONTENTS 目录

◆ 深度分析

“双碳”背景下我国重点领域的减排措施及建议.....	1
新形势下我国能源高质量发展与能源安全	3

◆ 国际观察

欧盟达成重大碳市场改革及碳边境调节机制临时协议	8
欧盟理事会通过削减甲烷排放新规则	8
英国与北海国家签署海上可再生能源合作协议.....	9
欧盟达成临时绿色协议引入电池可持续循环利用新规则	9
欧洲能源研究联盟提出碳去除技术研发挑战	9
德国联邦内阁通过《二氧化碳封存法》评估报告	10

◆ 项目资助

欧盟投入 53.1 亿欧元支持能源转型和促进区域绿色供热	11
韩国 2023 年重点投资 CCUS、碳排放产业转型技术创新	11
美国能源部资助 7.67 亿美元支持清洁氢能和地热能技术	12
英国投入 1.52 亿英镑支持核能和氢能技术创新	12
印度批准 24 亿美元用于绿色氢能开发.....	13
美国投资 37 亿美元支持二氧化碳去除技术商业化	13
英国拨款 2500 万英镑发展废气转化为可持续航空燃料技术	14
安赛乐米塔尔启动欧洲首个旗舰碳捕集和利用项目	14

◆ 研究进展

美科学家实现光催化水分解太阳能制氢效率超过 9%	15
俄罗斯利用新的电解技术实现核能制氢.....	15
中美科学家研究利用 CO ₂ 制备羧化吡啶.....	15
美科学家开发碳转化制乙烯集成系统	16
In _{2.77} S ₄ /多孔有机聚合物光催化剂促进 CO ₂ 高效转化制乙烯	16
利用太阳能实现塑料垃圾和温室气体资源化利用	17
MOF 助力合成氨工艺绿色化	17
发光二极管驱动下过渡金属光催化剂高效分解氨制氢	18
3D 打印单原子催化剂.....	18

◆ 两会专题

国务院机构改革助力能源高质量发展	19
“碳”寻绿色发展新动能：CCUS 如何破局？	20

“双碳”背景下我国重点领域的减排措施及建议¹

“双碳”背景下我国重点领域的减排措施及建议国家主席习近平在多次国内外重要会议上强调实现“双碳”目标，党的二十大报告提出“积极稳妥推进碳达峰碳中和”。截至 2022 年底，我国陆续印发与“双碳”相关的国家战略与政策，各领域重点工作有序推进，“双碳”工作取得良好开局。本文旨在对能源、工业、交通、建筑、农业和全民行动等重点领域减排措施进行梳理和针对性分析，在此基础上为推进我国“双碳”战略进程提供参考。

1 我国“双碳”战略政策体系

我国“双碳”战略形成了“1+N”政策体系格局。2021 年 9 月 22 日发布的《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》作为“1”，2021 年 10 月 24 日发布的《国务院关于印发 2030 年前碳达峰行动方案的通知》明确了十大行动，这两份文件在“1+N”政策体系中发挥统领作用，是贯穿“双碳”阶段的顶层设计。“N”是指包括能源、工业、交通、建筑、农业、全民行动等重点领域碳达峰实施方案及科技支撑等保障方案。

2 我国重点领域减排措施

2.1 能源领域

(1) 加快推动能源绿色低碳转型。扩大可再生能源发电比例，研发启用先进能源技术。推动能源清洁低碳安全高效利用，建设清洁能源基地。

(2) 利用各地资源禀赋，调整优化产业结构。建材重要生产地，调整优化产业结构和能源结构，降低碳排放强度。沿海资源丰富地区，推动传统产业生态化绿色化改造。

(3) 优化电源结构，有序推动电力系统清洁能源替代。多省区碳达峰方案提出推进智能电网建设，拓展电力跨区输送通道；加快配电网智能化升级改造，构建坚强智能电网。

(4) 积极发展非化石能源，控制能源消费。国资委将指导中央企业严格控制化石能源消费。各省区因地制宜地开发水电，加快发展风电、光伏发电，积极有序发展核电。

¹ 双碳情报动态，2023（01），中国科学院发展规划局，中国科学院文献情报中心。

2.2 工业领域

(1) 工业能源节约与能效提升。实施能源消费强度和总量双控制度，组织实施节能重点工程，加强先进节能技术推广，强化节能法规标准约束。

(2) 产业结构绿色转型。持续严格控制高耗能、高排放项目盲目扩张。严格执行钢铁、铁合金、焦化等 13 个行业准入条件，建立完善的制度和监管体系。

(3) 发展绿色低碳产业。关注能源资源消耗低、环境污染少、附加值高、市场需求旺盛的产业；加快发展新能源、新材料等战略性新兴产业，推动新兴技术与绿色低碳产业深度融合。

(4) 重点区域与重点行业减排。强化钢铁、建材、化工、有色等重点行业能源消费及碳排放目标管理，推行绿色制造，推进工业绿色化改造。

2.3 交通领域

优化交通运输结构；加大绿色低碳新技术和装备研发，鼓励支持科研机构、高等学校和企业事业单位开展低碳交通技术和装备研发，培育和建设创新基地与平台，加强创新成果转化应用；推广低碳型交通工具，发展新能源和清洁能源运输工具，加强绿色基础设施建设，比如广东茂名已落地国内首个可持续航空燃料产业基地；倡导低碳出行。

2.4 建筑领域

建立全新的低碳环境价值观和系统设计新理念，形成以低碳建材为主的建筑新格局，减少高碳建材的使用，鼓励使用低碳建材；改变生产方式，创新建造方式，推动建筑企业向全产业链模式转型，形成一体化全产业链工作模式，加快技术迭代和创新应用；通过智能化实现节能降耗；公共建筑管理有助于推动建筑领域碳达峰工作；加强清洁低碳和可再生能源利用。

3 存在问题及建议

3.1 存在问题

结构调整面临困难；电力行业脱碳面临挑战；技术创新支撑不够，我国碳捕集、利用与封存 (CCUS) 技术链条发展应用水平不一致，低碳技术等尚不成熟。关键“卡脖子”技术自主创新不足、集成难，清洁能源运输优化、存储等技术上有待实现突破；金融财政体系不配套。

3.2 建议

(1) 优化能源结构与统筹产业结构并行。推进源头防治，强化多污染物协同控制和区域协同治理，推动环境友好型产业生态。打造清洁能源低碳体系，加大清洁能源应用示范，形成绿色低碳生产方式。

(2) 加速电力行业脱碳。推进电力能源清洁化和高效化发展，通过以核能、CCUS 为辅的多种技术组合发电，保证电力行业先于整体经济脱碳。

(3) 加强技术创新。支持 CCUS、等离激元人工光合等关键技术研发，大力发展电化学储能等新型储能技术，推进新型清洁能源回收循环再利用技术突破。加快大数据、区块链、人工智能等前沿技术的绿色科技应用。

(4) 建立健全绿色金融体系。

新形势下我国能源高质量发展与能源安全²

能源安全是国家安全与稳定发展的基石，能源高质量发展是国家经济长期增长的基本保障。文章分析俄乌冲突、美国能源统治和我国能源消费增长刚性需求等复杂国内外形势影响，以及我国能源转型发展的不确定性，总结其对我国能源发展和能源安全的战略要求；立足我国能源结构和资源禀赋，建立以化石能源为基础的自主可控、安全可靠的综合能源保障体系，发展多渠道能源开发和能源储备，制定支撑能源转型低碳发展的战略思路和技术路线；提出建立现代能源与矿业治理体系平台及拓扑图和构成：5G 能源专网、能源与矿业大数据人工智能处理平台、区块链能源与矿业产业协作监管平台、省级和国家级监管中心，推进建立能源产业全方位安全观与现代能源矿业治理体系，为我国能源高质量发展和能源安全提供保障。

1 我国能源高质量发展和能源安全面临新形势、新要求

1.1 国内外环境错综复杂，对保障国家能源安全提出新的更高要求

俄乌冲突长期化、复杂化，对全球能源体系影响深远。煤、油、气供需错位，价格飙升。全球能源贸易流向改变。欧洲油气进口转向美国，俄罗斯向中国、印度扩大能源出口，1-8 月俄罗斯原油出口至中国同比增长 47% 至 2790 万吨，煤炭增长 25% 至 3500 万吨。西方国家制裁加大了俄罗斯能源产量不确定性，国际能源供给缺口短期难以弥补。欧盟能源供应结构多元化（图 1），但俄罗斯是欧

² 王国法等，中国科学院院刊，2023，38(1)：23-37，doi: 10.16418/j.issn.1000-3045.20221028001。

盟最大的能源供应国(图 2),俄罗斯能源供应不确定将严重影响欧盟的源供给。

西方国家能源绿色低碳转型面临多重挑战。2021 年,欧盟是俄罗斯主要能源出口国,天然气、煤炭和原油占比分别高达 45%、46%和 27%;其与俄罗斯的冲突导致欧洲出现严重能源危机,欧洲国家不得不重启煤电,而欧洲计划的能源转型将面临生存与发展的悖论。

美国能源牟利与欧洲能源短缺,警示能源安全的极端重要性。美国从危机中频频获利,谋求能源统治。美欧达成协议,2022 年美国对欧洲的天然气出口将增加 2/3,并将在 2027 年前助欧洲摆脱对俄能源依赖;美国成功抢夺欧洲能源市场,并将能源安全与地缘政治绑定。欧洲天然气期货结算价格不断飙升,意味着脱离俄罗斯能源供应将大幅提高欧洲各国能源代价。欧洲油气安全面临进口来源与进口代价两难。

我国要求高质量保障实体经济对能源消费增长的刚性需求。多地电力供应短时紧张,一定程度影响经济运行。2021 年 1 月-9 月,我国发电需求短时快速增加、新能源出力有限、煤价高位多因素叠加,7 月-9 月煤炭缺口达 3900 多万吨。新能源尚不能成为“去煤化”后的能源主体。新能源装机容量大幅增长,较 2015 年实现翻番(2021 年 10 月底达 10.02 亿千瓦),但其对气候敏感性提高,对调峰需求、基础能源的安全保障要求更高。

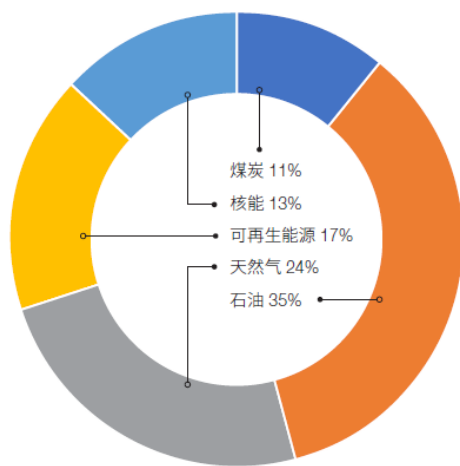


图 1. 2021 年欧盟能源需求结构

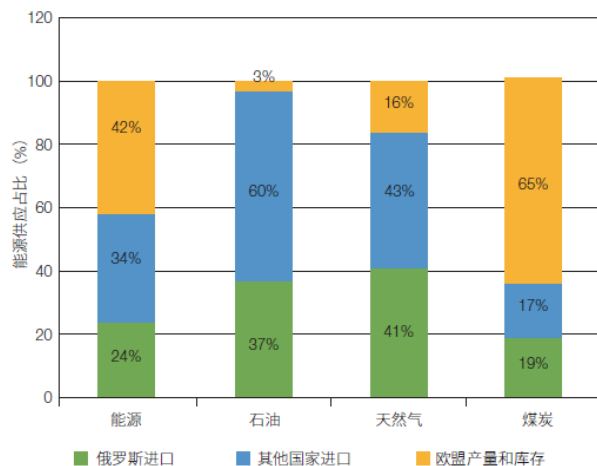


图 2. 2021 年欧盟能源供应结构

1.2 我国能源转型发展的不确定性增加

能源的刚性需求与油气进口保供风险叠加。经济中高速发展带来能源需求持续增长。油气进口保供面临多重挑战。国际能源价格暴涨,进口成本大增。我国

油气进口来源地主要集中在地缘政治不稳定地区，海上运输通道必经霍尔木兹海峡和马六甲海峡。在大国博弈背景下，我国获取境外油气资源的外部环境可能恶化，海上通道存在被封锁风险，将对我国经济社会发展造成不可估量的影响。

新能源发展与技术经济局限性。新能源电力装机能力快速增加，受多种因素影响，尚难成为“去煤化”后的能源主体。可再生能源电力供应面临挑战，光伏、风力、水力发电受气候因素影响较大，在大规模储能技术尚未获得有效突破的前提下，难以实现稳定可靠供给。新能源大规模接入，对电网形成较大冲击，使得电网需要为风、光发电系统建设相应的旋转备用和无功补偿以解决调峰调频及对电压进行有效的控制和调整。

“去煤化”带来经济高风险。盲目“去煤化”将制约新能源发展。越是大力发展新能源，可靠的调峰电源在电力系统中的作用就越大。目前，全国具有灵活调节能力的电源不足 20%，难以适应新能源大规模发展和系统调节需求。对煤电进行灵活性改造可有效支撑风电、光伏等波动性电源大规模接入并网，助力构建新型电力系统，突破灵活性电源之殇。从发达国家的能源发展实践看，在碳达峰后主要依靠天然气发电的灵活性，来解决新能源的不稳定性、间歇性。我国天然气对外依存度高达 45%，不具备大力发展天然气发电保障能源供应的条件。基于我国能源资源禀赋和系统成本，煤电依旧是最经济可行、安全可靠的电力系统保障能源。

美国和西方集团设计的“低碳陷阱”。美国和西方国家的低碳目标具有双重标准。美国、欧盟、日本、俄罗斯、印度等世界主要经济体能源消费仍以化石为主，占比高达 80%。西方国家碳达峰是自然达峰，碳达峰和能源达峰、工业化进程的完成处在同一时期；发展中国家实现工业化和经济增长需要突破碳排放的约束。发达国家用“低碳”遏制发展中国家发展，针对中国意图十分明显——企图用碳税等设计打压中国和新兴经济体的制造成本优势。美国、加拿大、韩国等国的人均碳排放基本是中国的 2 倍，当前仍进行奢侈性碳排放。美国能源转型是以油气替代煤炭为主体能源，可再生能源主要是对增量的替代，而发展中国家已经开始进行发展性碳排放。

碳排放对气候变化的影响仍需商榷。气候变化预测非常复杂，受资助研究者开发的全球气候模拟预测模型不能解释过去更不能预测未来气温变化。二氧化碳

对气候的影响是科学假说并不是科学结论。

1.3 我国能源发展战略要求

全面准确理解“双碳”目标。能源安全位列六大安全之前列，是国家安全的基石；能源安全是能源转型的前提条件。立足我国能源资源禀赋，尊重能源发展规律，先立后破是实施“双碳”目标的基本原则。煤炭作为可以清洁高效利用的最经济安全的能源和原材料，在下一个百年内仍将扮演重要角色。

明确能源高质量发展与能源安全战略要求。坚持化石能源清洁化和新型能源低碳化发展方向，建设自主可控、安全可靠能源保障体系，推动我国能源高质量发展，保障能源安全。支持煤炭智能化开发和清洁高效利用；石油增储上产，提高采收率；大力发展天然气，增加储备；建设智能电网，发展大功率电池和储能技术；积极筹划、稳步推进氢能发展；提高核能安全利用；积极发展可再生能源，解决弃风、弃光、弃水等问题。

2 强化以化石能源为基础的自主可控综合能源保障体系

2.1 建设安全可靠、自主可控的综合能源系统

优化煤、油、气、非化石等各种能源的组合比例，因地制宜、统筹开发，建立传统能源与非化石能源协同开发和煤电油气热等一体化供应的综合能源系统，实现能源综合梯级利用，满足多种用能需求。

以 5-10 年内显著提升我国可再生能源水平为目标，制定多能协同、绿色低碳发展技术路线：① 开展多能互补、协同高效的综合能源系统耦合关键技术研发；② 夯实基础理论研究；③ 开展煤炭煤电与新能源协同发展关键技术的研发及示范工程；④ 开展煤、油、气、新能源耦合发展关键技术研发及示范工程。充分发挥煤炭对综合能源系统的支撑调节和兜底保障作用，增强油气供应能力、战略储备和调节能力，推动煤电向基础保障性和系统调节性电源并重转型。

2.2 发展多渠道能源开发和储备

推动煤炭煤电与可再生能源优化组合。煤电与可再生能源优化组合保障供电稳定。研发多项煤电和可再生能源技术。发展煤矿地下水库电力调峰技术、煤与太阳能光热耦合发电技术、煤与风能耦合发电技术、煤与地热能耦合发电/供热技术、可再生能源制氢与煤清洁转化耦合技术等多能耦合开发技术，推动可再生能源与煤化工深度耦合，开展源头减碳、过程减碳、产品固碳技术研发。

加强煤炭智能绿色开发与柔性供给体系建设，加强油气稳增保进与战略储备。将新一代信息技术与煤炭资源、开发、运输、进口和储备等产业链深度融合，建立以智能化煤矿建设为核心、以数字化为基础的煤炭智能绿色开采与柔性供给体系。

增强煤制油气战略替代能力建设。攻关煤炭清洁转化关键核心技术，提升煤直接替代油气的可靠保障能力。开展深部原位油气热电转化技术攻关，实现煤炭气化技术超大型化，煤炭液化技术大型化和产品多样化，以及煤制清洁燃气关键技术自主化。推动煤转化制化学品大规模发展，加快开发合成气一步法直接制芳烃技术，形成煤制高端精细化学品技术。开展油、气、化多联产的千万吨级煤炭分质利用工业化示范，为煤炭清洁转化大规模替代油气提供技术支撑。

发展煤综合接续替代油气技术，保护煤制油气利润，拓宽替代路径。优化发展煤制氢技术，加快发展氢能储运、氢燃料电池、“煤制氢+碳捕获、利用与封存”技术，强化氢能汽车续航能力。推动煤与可再生能源耦合制氢技术取得重要进展，实现可再生能源制氢与现有煤转化主要工艺路线煤制气、煤制油、煤制甲醇的工艺耦合。为煤制油气企业配套优惠价格煤炭资源，将煤炭适当让利给煤制油气企业。

3 构建能源产业全方位安全观与现代能源矿业治理体系

建立能源产业全方位安全观。建立并实施双重预防和安全管控体系，有效控制生产安全风险，形成正确的风险可控的安全生产观。

建设现代能源与矿业治理体系；形成现代能源与矿业治理体系平台；构建能源与矿业大数据人工智能处理平台；建设区块链能源与矿业产业协作监管平台；建设涵盖能源与矿业生产交易各环节的省级管控平台、国家级监管中心；建立国家级能源交易平台。

欧盟达成重大碳市场改革及碳边境调节机制临时协议³

2022年12月18日,欧洲议会和欧盟各国政府达成排放交易体系(EU ETS)改革临时协议,该协议是欧盟“Fit for 55”一揽子气候与能源立法政策提案的重要组成部分,旨在加速减排并扩大对气候友好型技术的投资,提高欧洲工业创新水平和竞争力。改革后的目标是到2030年ETS部门的排放量比2005年减少62%(此前提出的目标是43%)。本次改革达成了三项重要协议:①继续扩大ETS交易部门范围。ETS将首次扩展到海运部门,欧盟还将继续评估将垃圾焚烧行业纳入ETS的可能性。②明确欧盟碳边境调节机制(CBAM)过渡期和年度免费配额消减计划。2023年10月—2025年12月为过渡期,过渡期只报告,不征税;2026年开始启动CBAM,同时逐步削减欧盟企业的免费排放配额,到2034年全部取消。此前上一周欧盟就CBAM征税产品和纳入计算的排放范围达成一致,产品范围主要包括钢铁、水泥、铝、化肥,电力和氢等,目前仅直接碳排放被纳入CBAM。③完善绿色转型融资,提高绿色低碳技术投资并保护弱势群体。2026年开始设立社会气候基金以资助气候转型中的弱势群体,该基金将主要来自于ETS II 资金,预计最高可达650亿欧元(折合689亿美元)。

欧盟理事会通过削减甲烷排放新规则³

2022年12月19日,欧盟理事会就跟踪和减少各国能源部门甲烷排放的提案达成一致。该提案对石油、天然气和煤炭行业提出了新的要求:①石油和天然气行业:运营商必须测量甲烷排放并编制排放报告,并由独立的认可验证机构进行检查;无特殊情况(建造、维修、退役、测试等)禁止甲烷排放和燃除等。②煤炭行业:成员国必须持续测量和报告运营中的地下矿井和露天矿的甲烷排放,并对50年前退役的煤矿进行盘点并测量其排放量;自2025年1月1日起禁止甲烷燃除,自2027年1月1日起,每千吨煤炭排放超过5吨甲烷的煤矿将禁止通风排放,自2031年1月1日起,每千吨煤炭排放超过3吨甲烷的煤矿将禁止通风排放,自2030年1月1日起,将禁止关闭和废弃矿山的通风排放和燃除。理事会还将与议会进行谈判,以就最终文本达成一致。

³ 双碳情报动态,2023年01期,中国科学院发展规划局,中国科学院文献情报中心。

英国与北海国家签署海上可再生能源合作协议

2022 年 12 月 18 日，英国商业、能源与工业战略部（BEIS）宣布英国与欧盟和北海能源合作组织（NSEC）签订一项海上可再生能源合作协议，英国将与欧盟以及北海国家（包括比利时、丹麦、法国、德国、爱尔兰、卢森堡、荷兰、瑞典、挪威等）合作开发海上可再生能源和电网基础设施，包括：①复合能源项目和联合项目；②海上空间规划；③支持框架和财务；④陆上和海上电网规划的最佳实践；⑤共享新技术信息；⑥交流有关规则、条例和技术标准的最佳做法。

欧盟达成临时绿色协议引入电池可持续循环利用新规则

2022 年 12 月 9 日，欧盟委员会与欧洲议会、欧盟理事会达成临时绿色协议，促进欧盟市场上的电池更可持续、循环和安全。关于电池的生产、回收和再利用的新规则包括：①从 2024 年起，将逐步引入关于碳足迹、回收成分、性能及耐用性的可持续性要求。②要求所有收集的电池都必须实现高水平的回收，特别是铜、钴、锂、镍和铅等有价值的材料。支持欧洲清洁能源转型和摆脱燃料进口。③便携式电池的回收目标是 2027 年 63%，2030 年 73%；轻型交通工具电池的回收目标是 2028 年 51%，2031 年 61%；锂材料回收目标是到 2027 年达 50%，到 2031 年达 80%。

欧洲能源研究联盟提出碳去除技术研发挑战

2022 年 12 月 21 日，欧洲能源研究联盟（EERA）发布《可持续碳循环：挑战与机遇》政策简报，提出了推进碳去除技术发展的研发需求，包括：①直接空气碳捕集与封存（DACCS），该技术的最大挑战是对能源需求过大的问题，必须解决其对能源系统的影响；②生物能源碳捕集与封存（BECCS），未来研发领域包括先进生物质气化制氢、低能耗碳捕集技术、基于金属有机骨架的固体吸附碳捕集、进一步研究 BECCS 与土地使用之间的关系；③数据收集和管理，重点关注的领域包括将废物转化为能源和混燃原料的生物碳含量的核算和验证，CO₂ 封存的持久性和风险评估，跨越 BECCS 价值链和多方利益相关者的碳去除分配量化研究；④基础设施建设，包括 CCS 基础设施选址、碳捕集水耗研究、碳排放源的互连设施；⑤捕集 CO₂ 的转化利用，重点方向包括 CO₂ 转化为化学品、

材料和食品，CO₂ 转化为能源载体和燃料的创新技术。

德国联邦内阁通过《二氧化碳封存法》评估报告

2022 年 12 月 21 日，德国联邦内阁通过《二氧化碳封存法》评估报告。该报告介绍碳捕集技术的发展现状及对环境和经济的影响，总结评估德国未来碳捕集封存技术。在该报告的基础上，联邦政府将在 2023 年制定碳管理战略，提出发展碳捕集封存技术的十个核心行动。主要包括：①将碳管理战略纳入实现碳中和目标的总体框架，并与工业战略、生物质战略和长期低排放发展战略等协同推进；②确定碳捕集封存技术的应用领域，并调整相应法规；③制定透明的监测、报告和核查制度，支持欧盟 CO₂ 排放认证立法的设计和和实施；④通过激励政策和补贴等方式创新碳捕集利用技术的商业模式；⑤支持 CO₂ 封存相关的基础设施建设；⑥推动碳捕集封存技术跨境和跨区域的产业集群发展；⑦评估碳封存技术的碳足迹，将其作为碳循环的一部分；⑧加强碳捕集封存技术的欧洲和国际合作；⑨加强相关利益者和公众的参与度；⑩制定国家循环经济战略，实现与碳管理战略的协同推进。

欧盟投入 53.1 亿欧元支持能源转型和促进区域绿色供热

2022 年 12 月，欧盟宣布两项资助，共计投入 53.1 亿欧元支持 8 个成员国能源清洁转型和促进区域绿色供热技术，详情如下：

12 月 21 日，欧盟宣布提供 41.1 亿欧元（约合 43.6 亿美元）以支持 8 个成员国的 61 个项目，这些项目集中在可再生能源发电、能源网络现代化和能源部门、工业、建筑和交通领域的能源效率，以及用低碳强度燃料取代煤炭发电，该投资将有助于能源系统现代化，减少温室气体排放，并提高能源效率。已获资助的提案包括：利用可再生能源发电和电池储能以支持克罗地亚电网运行；爱沙尼亚的低排放节能公共交通；立陶宛公共建筑改造、提高能源效率和发展可再生氢生产能力。12 月 16 日，欧盟批准了一项 12 亿欧元（约合 12.7 亿美元）的计划，以促进捷克基于可再生能源的绿色和更高效的区域供暖。该计划将支持：①安装基于可再生能源或高效热电联产的新热电机组，以取代现有设备；②对现有热电机组进行现代化改造，以生物质代替煤炭运行。受资助的项目须实现 CO₂ 排放量减少 15% 和主要可再生能源消耗减少 10% 的目标。天然气高效热电联产项目将需要实现向可再生和低碳气体的转换，或实施碳捕集、利用与封存技术。

韩国 2023 年重点投资 CCUS、碳排放产业转型技术创新

2023 年 1 月 4 日，韩国政府宣布 2023 年研发（R&D）预算将重点支持国家战略技术，包括半导体和显示器、二次电池、先进移动、新一代核电等具有较大经济影响的创新引领技术。韩国在碳中和领域将重点投资与利用 CCUS 技术、碳排放产业转型等实现 2050 年碳中和的技术创新。韩国将新推进系统灵活资源服务化技术开发（42 亿韩元，约 337 万美元）、碳中和产业核心技术开发（410 亿韩元，约 3290 万美元）、直接空气碳捕集核心技术开发（59 亿韩元，约 473 万美元）、以数字为基础的气候变化预测及损失最小化技术开发（70 亿韩元，约 562 万美元）等。

美国能源部资助 7.67 亿美元支持清洁氢能和地热能技术⁴

2022 年 12 月，美国能源部（DOE）启动多项清洁能源资助项目发展清洁氢能和地热能技术，详情如下：

1、清洁氢能

12 月 16 日，DOE 宣布根据《两党基础设施法案》拨款，投入 7.5 亿美元加速清洁氢能技术开发，特别是电解槽和燃料电池技术，降低氢能技术成本，最终推进到 2026 年实现电解槽制氢成本降至每千克 2 美元以下的目标。具体如下：①低成本、高通量电解槽制造技术；②电解槽组件和供应链开发；③先进的电解槽技术及组件开发技术；④燃料电池膜电极、堆栈制造与自动化技术；⑤燃料电池供应链建设；⑥燃料电池循环和再利用技术。

12 月 23 日，美国能源效率和可再生能源办公室（EERE）发布了一份项目招标意向通知，将支持低成本的氢和燃料电池技术的研究、开发和示范。资助意向主题包括：①寻求新型氢载体和/或氢载体加氢/脱氢催化剂的研发应用；②开发液态氢储存容器和所需的平衡设备硬件；③寻求开发液氮传输和车辆加油技术和方法的应用；④与 DOE 的百万英里燃料电池卡车联盟合作开发膜电机组件。

2、地热能

12 月 14 日，DOE 宣布为两个项目提供超 1500 万美元，实现地热钻探成本的降低。此外，DOE 设定到 2050 年至少为 4000 万美国家庭提供可再生地热发电的目标。

英国投入 1.52 亿英镑支持核能和氢能技术创新⁵

近期，英国商业、能源与工业战略部（BEIS）宣布 2 项资助，投入 1.52 亿英镑资助核能和氢能技术创新。详情如下：

1、核能技术

2022 年 12 月 13 日，BEIS 宣布投入 7700 万英镑支持核燃料生产及下一代先进核反应堆开发，包括：① 6000 万英镑支持高温气冷堆（HTGR）下一阶段

⁴ 洁净能源科技动态检测快报，2023（01），中国科学院洁净能源创新研究院，中国科学院武汉文献情报中心。

⁵ 洁净能源科技动态检测快报，2023（01），中国科学院洁净能源创新研究院，中国科学院武汉文献情报中心。

研究，计划 2030 年代初启动运行；② 400 万英镑支持先进模块化反应堆知识获取和共享；③ 1300 万英镑支持核燃料制造商提升再加工铀和新开采铀转化为新燃料的能力。2023 年 1 月 2 日，BEIS 宣布设立 7500 万英镑的“核燃料基金”(NFF)，支持英国的核燃料生产以替代俄罗斯核燃料，当日宣布 5000 万英镑招标，包括如下技术主题：①轻水堆燃料制造；②高含量低浓缩铀（HALEU）供应链；③先进模块化反应堆燃料制造；④可在近期增强英国前端燃料循环能力的市场化项目。

2、氢能技术

2022 年 12 月 13 日，BEIS 宣布投入 2500 万英镑支持生物质和废弃物清洁制氢技术开发，包括：①原料预处理技术，开发低成本和节能的生物质和废物原料预处理技术，用于先进气化工艺；②先进气化组件开发，目的提高合成气质量，优化制氢过程；③新型生物质制氢技术，开发可与碳捕集技术结合的新型生物质制氢技术。

印度批准 24 亿美元用于绿色氢能开发

2023 年 1 月 4 日，印度政府已批准国家绿色氢能激励计划，初始投资金额为 1974 亿卢比（折合 24.2 亿美元），其中包括用于绿色氢转型战略干预计划（SIGHT）的 174 亿卢比（折合 21.4 亿美元），用于试点项目的 146.6 亿卢比（折合 1.8 亿美元），用于研发的 40 亿卢比（折合 4899 万美元），以及用于其他任务部分的 38.8 亿卢比（折合 4752 万美元）。印度新能源和可再生能源部（MNRE）将为该计划各个项目的实施制定计划指南。该项计划的目标是到 2030 年建立起每年至少开发 500 万公吨绿色氢气的生产能力，增加约 125 吉瓦的可再生能源产能，吸引更多私人投资，减少化石燃料进口，并将每年的温室气体排放量减少 5000 万吨。

美国投资 37 亿美元支持二氧化碳去除技术商业化

2022 年 12 月 13 日，美国政府通过能源部（DOE）宣布启动四项新计划，将从《两党基础设施法》拨款 37 亿美元，旨在建立一个商业上可行、公正和负责的二氧化碳去除行业。具体包括：①DOE 化石能源和碳管理办公室（FECM）

设立总额 1.15 亿美元的直接空气捕集奖，以促进直接空气捕集的多样化方法。其中的 1500 万美元用于孵化和加速突破性直接空气捕集技术的研发，1 亿美元用于直接空气捕集的设施；②DOE 清洁能源示范办公室（OCED）与 FECM 合作投资 35 亿美元开发四个国内区域直接空气捕集中心，每个中心都将展示一种直接空气捕集技术或商业规模的技术套件，其中 12 亿美元将用于概念化、设计、规划、建造和运营直接空气捕集中心；③FECM 设立碳利用采购补助金，支持减少碳排放的技术商业化，同时采购和使用从捕集的碳排放中开发的商业或工业产品；④技术转型办公室（OTT）将与 FECM 合作设立两党基础设施法技术商业化基金（TCF），推进监测、报告和验证的进程。OTT 预计将向美国能源部国家实验室、工厂和站点的项目提供 1500 万美元，以支持新兴二氧化碳去除领域的各种行业合作伙伴关系。

英国拨款 2500 万英镑发展废气转化为可持续航空燃料技术

2022 年 12 月 22 日，世界上第一个将废气转化为可持续航空燃料（SAF）的商业规模工厂计划又向前迈进了一步。LanzaTech 英国公司已从英国交通部的先进燃料基金竞赛中获得 2500 万英镑（约合 3007 万美元）的拨款，资助发展 DRAGON 设施项目，将把废气转化为合成煤油，用于制造 SAF。拟建的工厂将位于南威尔士的塔尔伯特港，预计每年生产 1.02 亿升 ATJ 合成石蜡煤油，与煤油掺混制成 SAF，占英国年度航空燃料需求的 1%。

安赛乐米塔尔启动欧洲首个旗舰碳捕集和利用项目

2022 年 12 月 8 日，安赛乐米塔尔（简称“安米”）在比利时根特钢铁厂启动旗舰碳捕集和利用项目“Steelanol”，该项目耗资 2 亿欧元（折合美元 2.1 亿）是欧洲钢铁行业的首个此类项目。安米将利用其项目合作伙伴 LanzaTech 开发的碳回收技术，即在 CCU 工厂使用生物催化剂将炼钢过程中和废生物质中的富碳废气转化为先进的乙醇，然后可以将其用作生产包括运输燃料、油漆、塑料、服装甚至化妆品香水在内的各种化工产品的基础材料，支持化工行业的脱碳工作。该项目将使该工厂每年的碳排放量减少 11 万余吨。

美科学家实现光催化水分解太阳能制氢效率超过 9%

1 月 4 日，美国密歇根大学科学家提出一种新型太阳能制氢技术，实现高达 9.2% 的光催化分解中的制氢效率 (STH)。研究人员通过水、聚光太阳能和氮化铟镓光催化剂，模仿自然光合作用的关键步骤，在最佳反应温度 (约 70°C) 下促进正向氢氧析出和抑制反向氢氧复合的协同效应，实现效率提升。在光照和温度不可靠的室外试验中，STH 效率为 6.1%，相比同类太阳能水分解实验效率高近 10 倍，代表了该技术的重大飞跃。

来源: *Nature. Solar-to-Hydrogen Efficiency of More Than 9% in Photocatalytic Water Splitting.*

俄罗斯利用新的电解技术实现核能制氢

2022 年 12 月 26 日，俄罗斯原子能公司 (Rosatom) 宣布在科拉核电站设置的新型电解装置进行了氢气的生产，产生氢气的纯度为 99.999%。该新型电解装置采用质子交换膜生产氢气，相较老式的碱性电解器，新电解装置对环境更加友好。新型电解装置为一个现成的集装箱打包的动力装置，在生产现场只需要一个混凝土平台即可展开运行。该新型电解装置利用去离子系统来确保装置的可靠性和安全性。装置内的特殊的膜只允许质子和电子通过，两者再次结合形成氢气，而氧气则从系统中清除。装置的运行由氢气传感器控制，如果超过了既定的参数，传感器就会发出指示。该装置同时设置有监测灭火和通风系统。

中美科学家研究利用 CO₂ 制备羧化吡啶

2023 年 1 月 5 日，中国四川大学和康奈尔大学科学家研究发现改进电化学反应器可决定 N-杂芳烃羧化的位点选择性。研究人员通过从分割式电化学电池 (divided electrochemical cell) 切换到未分割式电池 (undivided electrochemical cell)，发现 CO₂ 将选择性地附着在吡啶环的不同位置上，从而产生两种不同的产品，即分割式电化学电池会导致 C5 羧基化，而未分割式电池会促进 C4 羧基化。通过该方法可使 CO₂ 转化的范围被扩大到广泛的 N-杂环芳烃，包括双吡啶和三联吡啶、嘧啶、吡嗪和喹诺酮等对药物开发至关重要的有机分子。

来源: *Nature. Electrochemical Reactor Dictates Site Selectivity in N-heteroarene Carboxylations*

美科学家开发碳转化制乙烯集成系统

2022年12月12日,美国伊利诺伊大学芝加哥分校(UIC)研究人员首次研制出可以从烟气中捕集CO₂并将其转化为乙烯的集成系统。该集成系统包括两部分:①CO₂捕集系统,研究人员开发了迁移辅助湿度梯度(migration-assisted moisture-gradient, MAMG)CO₂捕集过程,其中气态CO₂在有机液体中以HCO₃⁻形式捕集,在电场作用下通过阴离子交换膜运输到水溶液中,并通过HCO₃⁻、CO_{2(aq)}和CO₃²⁻之间的平衡,在富含水的环境中转化为CO₂水溶液;②CO₂还原系统,使用了水相液流电化学电池在Cu催化剂的作用下将CO₂转化为CO、CH₄和C₂H₄等。基于pH驱动,将上述两个系统实现高效集成。在600毫安电流下运行MAMG CO₂捕集系统和在200毫安/平方厘米电流密度下运行CO₂还原系统的条件下,C₂H₄法拉第效率达到40%,CO₂电化学还原的法拉第效率大于57%。

来源: *Energy & Environmental Science. Fully-integrated Electrochemical System that Captures CO₂ from Flue Gas to Produce Value-added Chemicals at Ambient Conditions.*

In_{2.77}S₄/多孔有机聚合物光催化剂促进CO₂高效转化制乙烯

2022年12月8日,印度化学技术研究所和贾瓦哈拉尔·尼赫鲁高级科学研究中心研究人员利用FeCl₃作为催化剂,通过傅列德尔—克拉夫茨烷基化反应开发了咪唑基多孔有机聚合物(POP),并进一步通过溶剂热合成了一种POP嵌入In_{2.77}S₄的光催化剂。这种多孔光复合材料的表面反应位点由四配位In²⁺和六配位In³⁺建立,在CO₂-C₂H₄的转化中具有至关重要的作用,同时POP和In_{2.77}S₄的协同效应机制进一步增强了光还原CO₂的性能。该催化剂的C₂H₄选择性高达98.9%,且获得了光催化领域最高的C₂H₄生成速率,为可见光照射下实现CO₂向多碳产物的转化提供了新的范例。

来源: *Journal of the American Chemical Society. Engineering the Charge Density on an In_{2.77}S₄/Porous Organic Polymer Hybrid Photocatalyst for CO₂-to-Ethylene Conversion Reaction.*

利用太阳能实现塑料垃圾和温室气体资源化利用

利用太阳能将塑料和温室气体转化为有用和有价值的产品，是向可持续的循环经济过渡的重要一步。英国剑桥大学 Erwin Reisner 教授领导的研究团队开发出新型太阳能“回收”技术，首次实现同时将 CO₂ 和塑料废物转化为 CO、合成气以及乙醇酸盐，有望改变循环经济发展的行业格局。研究人员开发了具有两个独立隔间的集成反应器，使用了基于钙钛矿的光吸收器，并将不同的催化剂集成到光吸收器中。通过改变催化剂，研究人员可以改变最终产品。在常温和常压条件下对反应器的测试表明，最终产品除了乙醇酸外，反应器还可以有效地将 PET 塑料瓶和 CO₂ 转化为不同的碳基燃料，如 CO、合成气或甲酸等。该反应器性能类似于无偏压的双光吸收塔，显示出比光催化悬浮工艺高约 10-100 倍的生产率。

来源：Nature Synthesis (文章标题：Photoelectrochemical CO₂-to-fuel conversion with simultaneous plastic reforming)。

MOF 助力合成氨工艺绿色化

哈伯法 (Haber-Bosch process) 是一种利用氮气、氢气制备氨气的方法，是传统工业合成氨的主要技术，一般需要 20-50 MPa 的高压和 500 °C 的高温。该工艺使用全球 1% 的化石燃料，产生了 1% 的 CO₂ 排放量。美国加州大学伯克利分校在助力氨的生产更加环保方面迈出了一大步：用更绿色的氨来制造更绿色的肥料。研究人员设计并合成出一种金属有机框架材料 (MOF)，其中，铜原子被有机分子环己烷二羧酸酯约束在刚性结构中。在该三维框架中，氨可断开铜-氧键 (Cu-O)，使其转化为一维聚合物；随着氨被释放出，多孔的三维框架会进行自重组。在中等压力和 175°C 温度条件下，结合并释放氨。由于 MOF 不与任何反应物结合，因此可以在较小的温度波动下完成氨的捕获与释放，从而节省能源。在较低温度和压力下运行的工艺过程具有一个关键优势：氨和肥料可以在靠近农场的较小设施中生产，而无需在大型集中化的工厂生产。

来源：Nature (文章标题：A ligand insertion mechanism for cooperative NH₃ capture in metal-organic frameworks)。

发光二极管驱动下过渡金属光催化剂高效分解氨制氢

美国莱斯大学 Yuan Yigao 团队使用廉价且丰富的过渡金属（铜、铁），开发了一种可室温下反应的光驱动催化剂。该催化剂是由铜和铁制成的反应粒子，在光照下，铜-铁催化剂显示出与铜-钌催化剂相似的效率和反应活性，能将氨分子分解成氢气和氮气，且不需要热量补充，具有高效的氨转化效率。在超快脉冲照明下，铜-铁催化剂中的铁活性点光催化分解氨的效率与钌非常相似。当用发光二极管而不是激光照射时，即使反应规模增加近三个数量级，光催化效率仍然相当。等离子体纳米颗粒表面上的热载流子促进活化对于 Fe-N 键和 Ru-N 键一样有效，从而使得活化势垒都大幅度降低，并且在超快脉冲激光照明下具有明显相似的光催化反应性。这一结果表明，利用氨载体和丰度高的过渡金属高效生产氢气的潜力。该研究首次表明发光二极管光催化可以从氨中产生克量级的氢气，这为完全取代等离子体光催化中的贵金属开辟了新的道路。相关研究成果发表在《Science》⁶。

3D 打印单原子催化剂

澳大利亚阿德莱德大学乔世璋教授率领的研究团队利用常见的天然高分子明胶等作为合成前驱体，实现 3D 打印策略与单原子材料相结合，并在单原子材料合成方面具有普适性。研究人员利用硝酸根反应验证了制备得到的电极的电催化性能。与不带单原子的碳基底电极相比，负载有铁原子的电极具有更高的电催化性能。通过改变打印墨水的配方，可调节单原子材料中的元素和原子负载量。同步辐射 X-射线吸收谱和高分辨球差电镜表征显示，这些调节不会影响所得到材料中原子的分散性。

来源: *Nature Synthesis* (文章标题: *A general approach to 3D-printed single-atom catalysts*)。

⁶ Yuan YG, Zhou LN, Robotjazi H, et al. Earth-abundant photocatalyst for H₂ generation from NH₃ with light-emitting diode illumination. *Science*, 2022, DOI: 10.1126/science.abn5636.

国务院机构改革助力能源高质量发展⁷

3月10日，十四届全国人大一次会议表决通过了关于国务院机构改革方案的决定，批准了这个方案。

此次国务院机构改革着眼于科学技术、金融监管等重点领域的机构职责优化和调整。作为国民经济的支柱产业，能源行业的发展离不开科学技术的创新和金融服务的保障。国务院机构改革的大幕已然拉开，能源行业又将迎来怎样的改变？

重新组建科学技术部是本次国务院机构改革的重要内容之一。根据相应的改革方案，重组后的科学技术部将进一步强化在健全新型举国体制等方面的职能。

全国人大代表、中国工程院院士、重庆大学教授潘复生坦言，目前，我国科研领域存在研究工作分散、低水平重复、目标导向不明确等问题，只有利用科技举国体制，才能更好地实现科技自立自强，更好地保障国家安全。潘复生强调，当前，我国一方面需要保证碳达峰碳中和目标如期实现，另一方面要严守国家能源安全的底线。在此背景下，更要正视可再生能源行业在发展中存在的瓶颈，并积极予以突破。“可再生能源发展至今，最大的技术瓶颈在于储能环节，安全、低成本的储能技术是可再生能源实现高质量发展的关键。储能是一门交叉学科，这一领域的技术攻关需要多方协作形成合力。此次科技部重组的过程中‘健全新型举国体制’的要求，相信对于可再生能源领域实现重大技术突破将大有裨益。”不仅惠及可再生能源行业，对于传统化石能源而言也是如此。全国政协委员、中国矿业大学原副校长姜耀东指出，例如，煤炭清洁高效利用技术等重点科研课题都需要更为科学高效的管理。重组科学技术部的改革举措有利于提高政府办事效率，同时也有利于各个部门之间高效协调。

全国政协委员、中国科学院大连化学物理研究所所长刘中民表示，“清洁低碳、安全高效”新型能源体系的构建是传统化石能源与新型清洁能源此消彼长、互补融合的过程，是一项动态的复杂系统工程，而多能融合关键核心技术的突破是解决上述问题的必然路径。当前形势下，必须从碳达峰碳中和、能源革命和构建新型能源体系的国家目标出发，进一步发挥新型举国体制优势，强化国家战略

⁷ “两会”能源热点信息监测，第10期，2023年3月13日，中国科学院武汉文献情报中心。

科技力量，提升科技攻关体系化能力，以科技创新成果与示范应用促进国家新型能源体系构建。

此外，改革方案对科学技术部的具体管理职责进行了划转。重组后的科学技术部不再参与具体科研项目评审和管理，主要负责指导监督科研管理专业机构的运行管理，加强对科研项目实施情况的督促检查和科研成果的评估问效。“具体管理职责的划转其实是大大减少了科技部的事务性工作。”刘中民表示，重组后，科学技术部可以集中精力做监督、做布局、做设计，以更高的站位去统筹规划全国的科技力量。能源行业长久以来存在各品类发展相互独立的问题，跨系统耦合涉及的事务性工作繁杂多样。相信经历此次机构改革，相关工作的运行管理会更加高效。

全国政协委员、正泰集团董事长南存辉指出，能源行业属于交叉性强、综合性强的实体行业，国家金融监管总局把金融领域的发展与监管统一起来，有利于金融机构提供综合金融服务，更好满足能源企业的金融需求。同时，通过金融监管体制大改革强化金融监管职能，将更加有助于从金融风险防范角度引导、帮助能源企业合法合规经营，护航能源行业稳中有进、稳中向好的高质量发展。

“碳”寻绿色发展新动能：CCUS 如何破局？⁸

加快推进 CCUS（二氧化碳捕集、利用与封存）技术应用和产业化发展，是实现“双碳”目标的现实需要和重要路径。全国政协委员，中国石化党组书记、董事长，中国工程院院士马永生在两会期间提到，近年来，我国 CCUS 技术和项目稳步发展，但相较于庞大的碳排放总量，CCUS 项目规模还比较小，部分关键核心技术与国际先进水平相比存在一定差距，特别是成本很高，限制了大规模商业化应用。

霍尼韦尔特性材料和技术集团副总裁兼亚太区总经理刘茂树表示，依靠与能效提升、终端节能、储能、氢能等多领域多技术共同组合，CCUS 技术可为实现碳中和提供经济可行的解决方案。随着“十四五”能源规划和“双碳”目标的制定与落实，CCUS 技术的发展将迎来新的机遇与前景。

商业化应用需政策支持。全球范围看，当前已有 130 多个国家和地区提出“零

⁸ <http://www.cb.com.cn/index/show/gs10/cv/cv135378772037>

碳”或“碳中和”目标。相对来看，欧美国家对 CCUS 项目的政策支持力度持续加大。2021 年 1 月，美国发布碳捕集与封存税收优惠政策(即 45Q 条款最终法规)，明确私人资本有机会获得抵免资格，极大地鼓励了商业 CCUS 项目实施。2022 年 8 月，美国出台的通胀削减法案(IRA)中，进一步提高了对 CCUS 项目的政策支持力度。

马永生表示，近年来，我国 CCUS 技术和项目稳步发展，但相较于庞大的碳排放总量，CCUS 项目规模还比较小，部分关键核心技术与国际先进水平相比存在一定差距，特别是成本很高，限制了大规模商业化应用。谈到 CCUS 在国内的发展时，刘茂树同样提到了成本问题。“CCUS 技术在中国发展起步较晚，当前对于 CCUS 技术最大的挑战之一在于经济性，另外由于地质限制，有些地区不适合做大规模碳封存。国内一些适合做碳封存的地区(比如西北)相比其他地区工业布局比较少。而南方地区工业布局多、发展快，相对来说更需要推进 CCUS 技术应用。”我国已发布 CCER 方法学 200 多个，但 CCUS 项目有关方法学仍是空白。在既无方法学也无交易机制的情况下，CCUS 项目经济性难以得到保障，实现大规模商业化应用需要加大政策支持力度。为此，马永生建议，将 CCUS 项目尽快纳入我国自愿减排机制。一是重启并打造全国统一的 CCER 市场，让更多碳减排项目参与碳市场，同时完善相关配套机制。二是研究并发布 CCUS 方法学，从国家层面组织开展 CCUS 方法学研究，或对企业开展的方法学研究进行认定并尽快发布，推动 CCUS 项目获得碳减排量。三是参考国际经验出台支持政策，加快完善 CCUS 行业规范、制度法规框架体系以及技术规范，出台 CCUS 量化核证国家标准，并参考国际经验，探索制定面向碳中和目标的 CCUS 税收优惠和补贴激励等支持政策。刘茂树则建议道，鉴于 CCUS 技术目前的较高成本，将该技术纳入清洁能源技术范畴统筹考虑。例如将制氢技术与 CCUS 技术有机结合，在制氢过程中增加碳捕集和封存应用，在扩大氢能产能的同时，促进 CCUS 技术的推广和应用。

记者注意到，近年来，中国石油高度重视 CCUS 产业发展，推进二氧化碳提高原油采收率(CCUS-EOR)技术攻关，创新形成了 CCUS 全产业链技术体系，二氧化碳注入埋存规模保持国内领先水平，CCUS 技术整体达到国际先进水平，形成了以松辽盆地 300 万吨 CCUS 重大示范工程为代表的“四大六小”CCUS 产业

格局,在保障国家能源安全、推动能源绿色低碳发展方面发挥了重要作用。其中,长庆油田组织编写《长庆油田千万吨级 CCUS 中长期发展规划》,总体规划部署年注气千万吨级规模的 CCUS 工程,“十四五”期间,分别在陕、甘、宁三省区建设 3 个百万吨级 CCUS 工业化示范工程。

2022 年 8 月,我国最大的碳捕集利用与封存全产业链示范基地、国内首个百万吨级 CCUS 项目——“齐鲁石化-胜利油田百万吨级 CCUS 项目”正式注气运行,标志着我国 CCUS 产业开始进入技术示范中后段——成熟的商业化运营。该项目每年可减排二氧化碳 100 万吨,相当于植树近 900 万棵。

中国石化方面表示,我国二氧化碳地质封存的潜力巨大,而且具备大规模捕集利用与封存的工程能力。实践证明,发展 CCUS 可以较大幅度提高低品位资源开发利用率,对保障国家能源安全提供支撑。