碳捕集、利用与封存国际研发态势 及应用比较研究

秦阿宁1, 孙玉玲1,2

(1. 中国科学院文献情报中心, 北京 100190;

2. 中国科学院大学图书情报与档案管理系, 北京 100190)

摘 要:碳捕集、利用和封存(CCUS)技术作为应对气候变化和实现碳中和的一项重要技术选择,已在全球主要国家和国际组织范围内达成共识。梳理和对比分析了主要国家 CCUS 技术研发部署、基于专利的竞争态势以及 CCUS 全流程商业项目。研究结果表明,美国、英国和日本通过制定多项顶层战略规划以明确 CCUS 技术发展愿景和目标,而中国在 CCUS 技术领域的顶层统筹规划和系统部署方面有待进一步加强。全球 CCUS 技术专利申请数量呈现不断增长趋势,在碳中和目标驱动下,预计未来将会迎来新一轮增长。中国、美国和日本是全球 CCUS 技术专利的主要来源国, CCUS 技术专利布局以碳捕集和 CO₂ 转化利用为主。CCUS 全流程商业项目应用行业范围不断扩大,美国、英国等主要国家在项目数量、捕集能力和应用行业范围等方面领先全球。最后提出中国面向碳中和目标发展CCUS 技术的建议。

关键词:碳捕集、利用与封存;研发态势;文献计量; CCUS 全流程商业项目

中图分类号: G321 文献标识码: A DOI: 10.3772/j.issn.1009-8623.2023.04.010

碳捕集、利用与封存(CCUS)技术作为实现碳中和目标技术组合的重要组成部分,不仅是化石能源低碳利用的技术选择,而且是钢铁、水泥等难减排行业深度脱碳的可行技术方案,同时 CCUS 技术与新能源耦合的负排放技术是实现碳中和目标的重要技术保障^[1]。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)、国际能源署(IEA)、国际可再生能源机构(IRENA)等国际机构的研究报告均指出 CCUS 技术是未来应对气候变化、实现《巴黎协定》目标以及碳中和的重要减排技术^[2-4]。国际能源署在可持续发展愿景中提出,到 2070 年全球实现净零碳排放,CCUS 技术将至少贡献全球碳减排量的 15%,达到碳

减排 104亿 t/a。若将净零时间从 2070 年提前至 2050 年则将需要增加近 50% 的 CCUS 部署 ^[5]。 2020 年以来,美国、英国和日本等发达国家大幅增加在 CCUS 领域的研发投资,加速推动 CCUS 技术突破和低成本部署。本文通过梳理和分析全球主要国家 CCUS 研发部署、竞争态势以及 CCUS 全流程商业化项目,提出中国面向碳中和目标发展 CCUS 技术的建议。

1 主要国家CCUS技术研发战略比较分析

1.1 美国制订全面的 CCUS 技术研发计划,重视 CCUS 关键技术的前沿性研究和低成本商业化部署 美国较为重视 CCUS 技术发展,不断提高 CCUS

第一作者简介:秦阿宁(1986—),女,硕士,助理研究员,主要研究方向为生态文明与绿色低碳科技战略情报研究。

通信作者简介:孙玉玲(1979—),女,硕士,副研究员,主要研究方向为生态文明与绿色低碳科技战略情报研究。电子邮箱: sunyl@ mail.las.ac.cn

项目来源:中国科学院发展规划局文献情报能力建设专项"'双碳'科技战略与政策情报研究"(E1290428);中国科学院发展规划局文献情报能力建设专项"低碳科技战略情报决策信息产品建设"(E2290437)。

收稿日期: 2023-02-19

研发资助并优化研究布局,推动前沿技术突破和 大规模低成本商业部署。2020年12月,美国发布 《2020年能源法案》,提出大幅提高 CCUS 技术的 研发投入,将在2021—2025年授权美国能源部和环 保署 60 多亿美元用于 CCUS 技术的研究、开发和示 范^[6]。2021年,美国能源部更新多年期 CCUS 技术 研发计划,将碳捕集计划修改为点源碳捕集(PSC), 加强对天然气和工业设施等点源碳捕集技术的研 发。增加碳去除(CDR)计划并正式部署"负碳攻 关计划"^[7],目标是从大气中去除数十亿 t CO₂,并 将碳捕集和封存的成本降至100美元/t以下。2022年 9月,美国能源部发布《工业脱碳路线图》,其中 将 CCUS 技术作为美国实现工业脱碳的 4 个关键路 径之一,提出 CCUS 技术研发的重点包括:①燃烧 后碳的化学吸收;②开发先进碳捕集材料以提高效 率并降低碳捕集成本; ③开发利用捕集的 CO, 制造 新材料的工艺[8]。

2020 年以来,美国能源部在 CCUS 技术研发与示范方面的投资已超过 67 亿美元^[9],从目前公布的资助项目来看,资助方向主要包括:①天然气发电和工业部门变革性点源碳捕集技术研发,例如,低温碳捕集等实验室和工业规模测试,碳捕集率和 CO₂ 纯度均需超过 95%;②直接空气捕集(DAC)技术等碳去除技术、碳转化利用方法以及先进的捕集 – 利用一体化系统研究;③藻类生物质CO₂ 利用技术研发;④碳捕集基础科学前沿研究等。

1.2 英国政府加强 CCUS 技术研究和部署顶层设计, 通过产学研深度合作推动以碳运输和存储基础 设施共享为特色的 CCUS 产业集群建设

2020年,英国在《绿色工业革命 10 点计划》中将先进的 CCUS 技术、直接空气捕集技术和温室气体去除(GGR)技术列为实现绿色工业的革命性技术,提出到 2030年投资 10 亿英镑与工业界合作建设 4个 CCUS 产业集群 [10]。2021年,英国在《净零研究与创新框架》中确定了 CCUS 技术和 GGR技术在未来 5~10年的关键优先领域,①碳捕集领域:推进高效低成本的点源碳捕集技术研发,如新型溶剂和吸附工艺、低成本的空气分离新技术、钙循环等;开展燃气发电厂生物质能耦合碳捕集和封存(BECCS)项目示范;②碳运输和封存领域:研发高效低成本的碳运输和封存的共享基础设施和

海上碳封存技术; ③直接空气捕集技术和封存技术 以及其他低能耗 GGR 技术的研发与示范 [11]。

2020年以来,英国陆续投资约3亿英镑用于 CCUS 技术和 GGR 技术研发 [12-14]。重点资助方向包括:①1亿英镑用于 GGR 技术的创新研究;②1.7亿英镑支持天然气发电厂、工业 CCUS 技术研发部署和绿氢燃料转换;③2000万英镑支持下一代 CCUS 技术研发。主要资助机构为英国研究与创新署(UKRI)以及国家净零创新组合基金。为推动产学研深度合作,英国能源部组织政府、工业界和学术界专家成立 CCUS 委员会、CCUS 咨询小组,向政府提供 CCUS 商业模式发展建议并监督项目进展。

1.3 日本积极打造具有竞争力的碳循环产业

日本致力于发展碳循环利用技术,并于2019年发布了《碳循环利用技术路线图》,设定了碳循环利用技术的发展路径,以加快CCUS技术战略部署,2021年,日本对该路线图进行了修订以促进其进一步发展^[15]。2020年,日本发布《2050年实现碳中和的绿色增长战略》,将CCUS技术与氢能、可再生能源、储能、核能等并列为日本实现碳中和目标的关键技术,同时提出研发CO₂转化利用以及高效低成本分离和捕集技术,打造具有竞争力的碳循环产业,并明确了未来10年、30年CO₂转化利用制造燃料、化学品、混凝土以及碳捕集技术的成本目标^[16]。2022年10月,日本经济产业省制订利用生物制造技术促进CO₂为原料的碳循环利用计划,以推动日本碳循环产业发展。

自 2020 年以来,日本新能源产业技术综合开发机构(NEDO)陆续提供超 3 129 亿日元支持 CCUS技术研发与示范 [17-30]。研究重点是低能耗碳捕集创新性材料(胺吸收剂、物理吸附剂和分离膜等)、费托合成(FT 合成)法制备燃料、高转化效率的光催化剂、CO₂生物转化利用和 CO₂船舶运输技术等。

1.4 中国正积极有序推进 CCUS 技术研发、示范 和产业化应用

中国已在多项政策文件中提出要有序推进 CCUS技术研发、示范和产业化应用。2021年以来, 中国发布了《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》《工业领域碳达峰实施方案》《科技支 撑碳达峰碳中和实施方案(2022—2030年)》等

文件,均明确提出要开展低成本 CCUS 技术创新以 及推进规模化示范和产业化应用[31-34]。国家重点研 发计划、国家自然科学基金委等均对 CCUS 技术进 行了相关项目资助。2020年以来,国家重点研发 计划已在"变革性技术关键科学问题""高端功能 与智能材料""绿色生物制造""催化科学""绿 色生物制造"等重点专项中布局了 CCUS 技术项 目,研究重点是 CO。转化利用、碳捕集和地质封 存。2022年科技部发布《关于国家重点研发计划 "碳中和关键技术研究与示范"等2个重点专项 2022年度项目申报指南征求意见的通知》,其中 针对 CCUS 技术拟支持多个项目,包括点源高效捕 集、高值化利用、地质封存风险监测、评价与控制 和光/电催化前沿新材料与新技术等。并提出了技 术考核指标,如碳捕集率大于90%、CO,利用率大 于90%和捕集-转化示范装置研发等。

2 主要国家CCUS技术专利产出对比分析

本文以 IncoPat 专利数据库作为检索来源数据库为数据来源,利用关键词和专利分类号进行组合检索^①,并选用发明专利文本作为研究对象,通过简单同族合并、数据清洗,得出 1950—2020 年全球 CCUS 技术专利的申请数量为 30 729 项(检索日期为 2022 年 3 月)。

2.1 CCUS 技术专利申请趋势

全球 CCUS 技术专利申请整体呈现增长趋势,特别是 2005 年以后 CCUS 技术专利申请数量迅速增长。2003 年联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)大会上,碳捕集与封存在气候变化减缓中的重要性受到一致肯定,并于 2005 年发布《碳捕集与封存》特别报告 [35],有力推动了该领域技术研发和专利产出,全球专利申请数量从 2005 年484 项增加到 2018 年 1 755 项。2013—2015 年,专利申请数量的趋势出现短暂下降。2015 年《巴黎协定》签署后,CCUS 专利申请数量再次增长。由于专利授权公开需要一定的审查周期,因此 2020年及之后的专利数量不能完全反映实际专利申请情况,仅供参考(见图 1)。

2.2 CCUS 技术专利申请国家分布

中国、美国和日本是全球 CCUS 技术专利主要来源国(见表1), CCUS 技术的产业链主要包括碳捕集、碳运输、碳地质利用与封存,以及碳转化利用。中国在碳捕集、碳地质利用与封存、碳转化利用领域的专利申请数量均领先于全球其他主要国家,但从高价值专利(合享价值度≥9^②)申请数量上看,美国在上述3个领域均居全球首位,其中碳捕集领域的高价值专利申请数量约为中国的两倍。在碳运输领域,专利申请数量排名前三位的国

① 碳捕集技术检索式: TIAB=((carbon-dioxide OR "carbon dioxide" OR CO2 OR 二氧化碳 OR "carbon* gas dioxide*") AND (capture* OR separat* OR absorb* OR seiz* OR extract* OR 捕获 OR 捕集 OR 捕捉)), 并将结果限定在 B01D11、B01D19、B01D47、B01D53、 B01D61、B01D63 等 IPC 分类号中。碳运输技术: TIAB=((carbon-dioxide OR "carbon dioxide" OR CO2 OR 二氧化碳 OR "carbon* gas dioxide*") AND (Deliver* OR Transport* OR 运输 OR 运送 OR 输运 OR pipe OR 输送)) AND IPC=(B63B35 OR B65G OR B67D OR F17); 碳地质利用与封存: TIAB= ((carbondioxide OR "carbon dioxide" OR CO2 OR 二氧化碳 OR "carbon* gas dioxide*") AND (stor* OR sequester* OR inject* OR 封存 OR 固定 or 储存 "enhanced oil" OR "enhanced coal-bed methane" OR "enhanced geothermal "OR "enhanced natural gas "OR "enhanced shale gas "OR "enhanced saline "OR (uranium AND leach*) OR 驱油 OR 石油 OR 煤层气 OR 天然气 or 页岩气 or 咸水)) AND IPC= (E21); 碳转化利用: TIAB= ((carbon-dioxide OR "carbon dioxide" OR CO2 OR 二氧化碳) (1N) (convert* OR transform* OR 转化 OR 转换) (1N)(into OR to)) OR TIAB=(((utilize* OR used OR used OR using OR usage OR 利用)(1W)(carbon-dioxide OR "carbon dioxide" OR CO2 OR 二氧化碳)) AND (synthes* OR produc* OR prepar* OR 合成 OR 生产 OR 制备 OR 制造))) OR TIAB =(CO2 OR "carbon dioxide" OR 二氧化碳) AND ("mineral carbonation" OR "liquid fuel" OR microalgae OR biofuel OR methanol OR "formic acid*" OR "acetic acid" OR methane OR hydrocarbon OR carbonate OR polyol OR $polyurethane\ OR\ isocyanate\ OR\ formalde hyde\ OR\ ethanol\ OR\ biodiesel\ OR\ \ "malic\ acid"\ \ OR\ starch\ OR\ fertilizer\ OR\ \ "feedstuff"$ OR 液体燃料 OR 甲醇 OR 烯烃 OR 有机碳酸酯 OR 聚氨酯 OR 异氰酸酯 OR 钢渣矿化 OR 磷石膏矿化 OR 混凝土养护 OR 苹果酸 OR 微藻) AND (electrochemical OR thermo-chemical OR thermochem* OR hydrogenation OR conver* OR conver* OR transform* OR synthe* OR chemoenzymatic OR "photocatalytic conversion" OR biocatalytic),并将其限定在 B01J、C01B、C04B、C05C9、C07 等 IPC 分类号中。 CPC 检索: CPC=(Y02C10/00 OR Y02C10/02 OR Y02C10/04 OR Y02C10/06 OR Y02C10/08 OR Y02C10/10 OR Y02C10/12 OR Y02C10/14 OR Y02C20/40).

② 合享价值度是 IncoPat 专利数据库依赖合享智慧公司自主研发的专利价值度评估模型来对专利评分的。该模型选取了业内常用的专利价值评估指标,从技术稳定性、技术先进性和保护范围 3 个维度综合衡量专利的价值,最高分为 10 分。

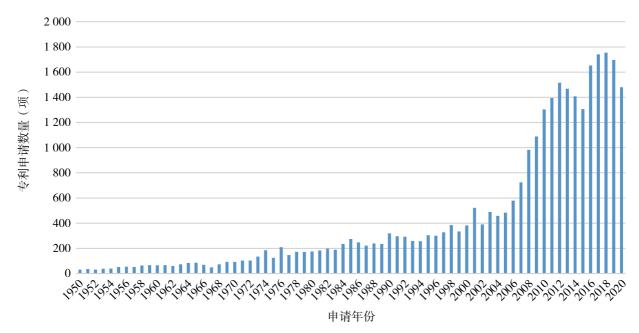


图 1 1950—2020 年 CCUS 技术专利年度申请趋势

表 1 1950—2020 年 CCUS 技术 4 个子领域专利申请数量排名前 10 位的国家

	碳捕集		碳运输			碳地质利用与封存			碳转化利用		
申请人国别	专利数量 (项)	专利价值度 ≥9 专利数量 (项)	申请人国别	专利数量 (项)	专利价值度 ≥9 专利数量 (项)	申请人国别	专利数量 (项)	专利价值度 ≥9 专利数量 (项)	申请人国别	专利数量	专利价值度 ≥9 专利数量 (项)
中国	5 245	1 236	美国	145	72	中国	956	282	中国	2 913	754
美国	4 611	2 540	日本	102	16	美国	810	444	美国	1 599	811
日本	4 083	1 038	中国	86	16	加拿大	115	55	日本	1 187	262
韩国	1 469	593	韩国	57	17	俄罗斯	90	9	德国	636	157
德国	1 368	367	德国	52	6	法国	57	22	韩国	425	150
法国	784	349	英国	39	2	德国	42	10	英国	417	85
英国	590	120	法国	35	5	日本	37	14	荷兰	188	57
荷兰	338	111	瑞典	8	0	荷兰	31	15	法国	179	71
加拿大	316	157	加拿大	7	4	挪威	30	15	俄罗斯	131	10
瑞士	299	122	挪威	7	2	英国	26	5	丹麦	118	57

家依次为美国、日本和中国,美国在该领域的专利 申请总数和高价值专利数量方面均居全球首位。

2.3 CCUS 技术专利申请构成

CCUS 技术专利申请主要以碳捕集为主,其次 是碳转化利用和碳地质利用与封存,碳运输领域专 利申请数量较少(见图 2)。碳捕集专利申请数量占 CCUS 技术专利申请总数的 66%,技术方向主要集中在吸收法、吸附法、膜分离法和捕集系统与设备等,2018 年以来 DAC 技术受到较多关注;碳运输领域专利申请数量较少,仅占 CCUS 技术专利申

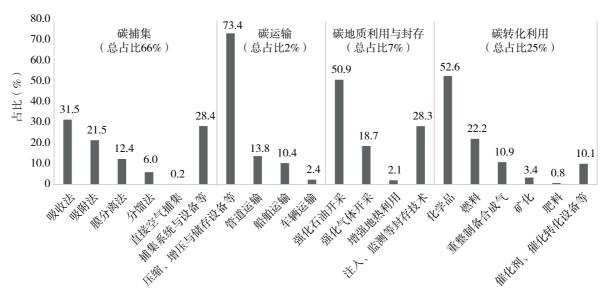


图 2 1950—2020 年 CCUS 技术专利的主要技术构成申请比例

请总数的2%,主要涉及CO₂压缩、增压与储存设备、管道运输和船舶运输等;碳地质利用与封存专利数量占CCUS技术专利申请总数的7%,专利布局重点涉及强化石油开采、强化气体开采、增强地热利用以及封存技术等;碳转化利用是CO₂循环利用的重要环节,专利申请数量占CCUS技术专利申请总数的25%。专利布局重点方向涉及CO₂的化工利用、生物利用和矿化利用,即CO₂转化制化学品、燃料和矿物等,如碳酸酯、合成气、甲醇、微藻生物质燃料和碳酸盐等。

3 主要国家CCUS全流程商业项目对比分析

根据《全球碳捕集与封存现状 2022》报告,截至 2022 年 9 月,全球 CCUS 全流程商业项目共有 196 个(包括运行中、建设中、开发后期、开发早期和暂停运行)。其中 83 个位于美国,数量遥遥领先于其他国家;英国有 27 个,中国有 7 个,日本暂无 CCUS 全流程商业项目 [36]。从美国、英国和中国 CCUS 全流程商业项目应用行业分布来看(见图 3),随着时间的推移,应用行业从最初的天然气、化肥和乙醇生产行业逐渐扩展到 CO₂ 排放量较高的发电、水泥和制氢等多个行业。

从图 3 可以看出,美国和英国的 CCUS 商业化项目具有领先优势,一方面得益于政府的税收、补贴等政策,如美国《国内税收法》第 45Q 条款的 CCUS 税收抵免政策、英国的差价合约(CfD)机制

等[36]。美国于2022年8月发布《通货膨胀削减法 案》,进一步提高第450条款的税收抵免金额,对 于从点源捕集 CO。并封存在咸水层的项目,将税收 抵免从50美元 /t 提高到85美元 /t, 用于提高石油 采收率(EOR)或碳利用项目的税收抵免从35美元 /t 提高到 60 美元 /t, 直接空气捕集 CO, 并封存在咸 水层项目的税收抵免从 50 美元 /t 提高到 180 美元 / t,直接空气捕集 CO,并用于 EOR 和 CO,利用的税 收抵免从 35 美元 /t 提高到 130 美元 /t [37]。另一方面 得益于 CCUS 网络枢纽和集群建设, CCUS 早期开发 项目采用点对点模式,这种模式适合大型封存点与 单个大型排放源(如天然气处理厂)之间距离合理 的情况。和大多数行业一样, CCUS 也会受益于规 模经济, 如提高碳捕集、运输和封存规模可以大幅 降低 CCUS 项目成本。CCUS 网络枢纽和集群通过规 模经济效应大大降低了 CO, 封存的单位成本。同时 这种拥有多家 CCUS 服务客户和供应商的工业系统 也有助于降低项目风险。截至2021年9月,美国和 英国分别建有9个和6个CCUS网络枢纽与集群, 而日本和中国则暂无 CCUS 网络枢纽和集群 [38]。美 国的 CO, 运输管道已超过 8 000 km, 占全球 CO, 运 输管道的85%[39]。近年来美国不断加大基础设施建 设力度, 2022年10月美国发布 "CO, 运输基础设 施融资和创新计划"(CIFIA)^[40],提出将在 2022— 2026年投入21亿美元资金支持CO。运输共享基础 设施建设,旨在推动 CCUS 技术的大规模应用。

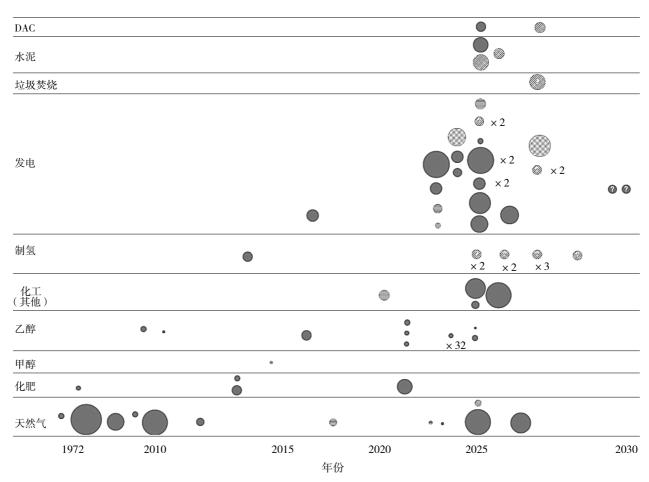


图 3 1972—2022 年美国、英国和中国全流程 CCUS 商业项目应用行业分布 [36]

注: ●美国 ● 英国 ● 中国 ● 100 万 t/a ● 500 万 t/a ②评估中(圆圈面积表示与碳捕集能力成正比, ×2表示 2 个, 以此类推)。

4 结论与建议

通过对主要国家 CCUS 技术发展战略和研发布局、全球技术专利申请发展态势以及 CCUS 全流程商业项目进行对比分析,得出以下结论: (1)美国、英国和日本十分重视 CCUS 技术领域研发顶层设计,制定多项战略规划以明确技术发展愿景和目标,并通过加大资金投入加快关键技术突破和商业化进程。而中国目前主要在节能减排、清洁能源等相关领域发展 CCUS 技术,顶层统筹规划和系统部署有待进一步加强。(2)美国、英国和日本的CCUS 技术研发布局已由传统 CCUS 技术向更多样化的 CDR 技术、GGR 技术扩展,例如,DAC 技术、BECCS 技术等,并较为重视产学研深度融合模式。而中国在一些前瞻性技术,例如,DAC - 转化一体化研发以及 BECCS 等方向的研发仍有待加强。

(3)全球 CCUS 技术专利申请数量呈现不断增长的趋势,中国、美国和日本是全球 CCUS 技术专利申请的主要来源国。CCUS 技术专利技术布局以碳捕集为主,其次是碳转化利用和碳地质利用与封存;碳输送领域专利申请数量相对较少。(4) CCUS 全流程商业项目应用行业的范围不断扩大,从天然气、化肥、乙醇生产行业逐渐增加到 CO₂ 排放量较高的发电、水泥和制氢等多个行业。

目前,中国CCUS技术整体处于工业示范阶段, 且现有示范项目规模较小,存在能耗高、成本高的 技术瓶颈,以及相关管理制度和激励政策不完善的 问题。需要统筹科技和产业研发资源,加大研发投 资力度,攻克产业关键共性技术难点,降低 CCUS 产业链关键技术成本,为 CCUS 技术的大规模部署 奠定基础。基于上述分析,为中国面向碳中和目标 发展 CCUS 技术提出以下建议:

(1)加强顶层设计,制定面向碳中和目标的 CCUS 技术发展战略和路线图。

全面系统评估中国 2030 年碳达峰以及 2060 年碳中和 CCUS 技术的减排需求,结合生命周期评价等手段,评估不同时间和空间范围内 CCUS 技术发展的经济适用性和碳减排潜力,研究 CCUS 技术大规模产业化部署的市场、财税等政策保障机制,制定适合中国国情的 CCUS 技术发展总体战略和路线图。

- (2)加大 CCUS 技术研发资金投入,构建高水平、多元化的 CCUS 技术体系。
- 一方面,中国应进一步加大财政投入,积极开展 CCUS 关键技术攻关,重点发展颠覆性技术。针对前沿热点方向,例如,新型高效碳捕集系统、新型膜分离、下一代捕集溶剂、高吸附容量与高选择性的吸附材料、大型反应器设计和大规模 CO₂ 管道输送技术等加强基础研究和应用研究,持续开展 CO₂ 制多碳(C₂₊)化学品、混凝土、可持续燃料等高价值转化利用研发,并积极布局负排放技术——DAC 技术和 BECCS 技术的研发。另一方面,构建政产学研合作研究模式,深化政府、企业、高校和研究机构的合作,实现地区、机构和行业之间的联合与协作,推动 CCUS 关键技术突破与示范。
- (3)加快 CCUS 产业集群基础设施建设,推进全链条集成示范及商业化。

结合中国不同地域的自然条件和产业结构,加快碳运输、封存等 CCUS 产业链相关基础设施的建设,优化设施管理模式,建立基础设施合作共享机制以及碳捕集、运输、利用和封存共享网络,形成新的 CCUS 产业集群,提高 CCUS 技术规模效应。可优先选择资源条件良好、源汇匹配的地区,积极有序开展 CCUS 全链条工程示范项目的建设工作。■

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change. Global warming of 1.5 °C[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2018.
- [3] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate

- change 2021: the physical science basis[R].Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [4] International Energy Agency. CCUS in clean energy transitions[EB/OL]. (2020-09-24)[2022-12-08]. https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions.
- [5] IEA. Energy technology perspectives 2020[EB/OL]. (2020-10-13)[2022-12-31]. https://iea.blob.core.windows. net/assets/181b48b4-323f-454d-96fb-0bb1889d96a9/ CCUS in clean energy transitions.pdf.
- [6] America Government. Energy Act of 2020[EB/OL]. (2020-12-27)[2022-12-08]. https://www.congress.gov/bill/116th-congress/house-bill/133/titles.
- [7] U.S. Department of Energy. Secretary Granholm Launches carbon negative earthshots to remove gigatons of carbon pollution from the air by 2050[EB/OL]. (2021-11-05)[2022-12-08]. https://www.energy.gov/articles/secretary-granholm-launches-carbon-negative-earthshots-remove-gigatons-carbon-pollution.
- [8] U.S. Department of Energy. Industrial decarbonization roadmap[EB/OL]. (2022-09-07)[2022-12-08]. https:// www.energy.gov/eere/doe-industrial-decarbonizationroadmap.
- [9] Department of Energy. Budget[EB/OL]. (2022-03-24)[2022-12-08]. https://www.energy.gov/cfo/listings/budget-justification-supporting-documents.
- [10] Department for Business Energy & Industrial Strategy. The ten point plan for a green industrial revolution[EB/OL]. (2020-11-18)[2022-12-08]. https://www.gov.uk/government/publications/the-ten-point-plan-for-a-green-industrial-revolution.
- [11] Department for Business Energy & Industrial Strategy.

 Net zero research innovation framework[EB/OL]. (202110-19)[2022-12-08]. https://www.gov.uk/government/
 publications/net-zero-research-and-innovation-framework.
- [12] Department for Energy Security and Net Zero. Direct air capture and other greenhouse gas Removal technologies competition [EB/OL]. (2022-07-08)[2022-12-31]. https://www.gov.uk/government/publications/direct-air-capture-and-other-greenhouse-gas-removal-technologies-competition.
- [13] UK Research and Innovation. UKRI awards £171m in UK decarbonisation to nine projects [EB/OL]. (2021-03-

- 17)[2022-12-31].https://www.ukri.org/news/ukri-awards-171m-in-uk-decarbonisation-to-nine-projects/.
- [14] Department for Energy Security and Net Zero. Carbon capture, usage and storage (CCUS) innovation 2.0 competition: call 1 (closed to applications) [EB/OL]. (2021-03-17)[2022-12-31]. https://www.gov.uk/government/publications/ccus-innovation-20-competition.
- [15] 経済産業省.「カーボンリサイクル技術ロードマップ」を改訂しました[EB/OL]. (2021-07-26)[2022-12-08]. https://www.meti.go.jp/press/2021/07/20210726007/20210726007.html.
- [16] Ministry of Economy, Trade and Industry. Green growth strategy through achieving carbon neutrality in 2050[EB/ OL]. (2020-12-25)[2022-12-08]. https://www.meti.go.jp/ english/press/2020/1225 001.html.
- [17] 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO). カーボンリサイクルに適した CO2 分離回収・発電技術の研究開発に着手 [EB/OL]. (2020-11-20)[2022-12-31]. https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5 101381.html.
- [18] 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO). カーボンリサイクル技術における実証研究拠点化と技術開発に着手 [EB/OL]. (2020-08-05)[2022-12-31]. https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5 101342.html.
- [19] 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO). カーボンリサイクル技術における基礎・先導研究レベルの技術開発に着手 [EB/OL]. (2020-07-30)[2022-12-31]. https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5 101340.html.
- [20] 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO). CO₂ を原料とする化学品 (パラキシレン) 製造の技術開発に着手 [EB/OL]. (2020-07-14)[2022-12-31]. https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5 101331.html.
- [21] 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO). 炭酸塩やコンクリートへ CO₂ を固定化し、有効利用する技術開発 5 テーマに着手 [EB/OL]. (2020-07-14)[2022-12-31]. https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5 101332.html.
- [22] 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO). CO, 分離回収技術 (固体吸収法)の石

- 炭燃焼排ガスへの適用性研究に着手 [EB/OL]. (2020-07-13)[2022-12-31]. https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5 101330.html.
- [23] 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO). セメント工場の CO₂ を再資源化(カーボンリサイクル) する技術開発に着手 [EB/OL]. (2020-06-18)[2022-12-31]. https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5 101319.html.
- [24] 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO). CO₂ からの液体合成燃料一貫製造プロセス技術の研究開発に着手 [EB/OL]. (2021-02-22)[2022-12-31]. https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5 101410.html.
- [25] 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO). 船舶による CO₂ 大量輸送技術確立のための研究開発および実証事業を開始 [EB/OL]. (2021-06-22)[2022-12-31]. https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5 101445.html.
- [26] 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO). O₂ の化学品や燃料、鉱物への有効利用に向け 6 テーマを新たに採択 [EB/OL]. (2021-10-15)[2022-12-31]. https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5 101486.html.
- [27] 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO). グリーンイノベーション基金事業で、コンクリートやセメント分野のカーボンリサイクル技術の開発に着手 [EB/OL]. (2022-01-28)[2022-12-31]. https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101510.html.
- [28] 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO). グリーンイノベーション基金事業で、CO₂ からプラスチック原料を製造する技術開発に着手 [EB/OL]. (2021-02-18)[2022-12-31]. https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5 101517.html.
- [29] 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO). グリーンイノベーション基金事業で、CO₂ などの燃料化と利用を推進 [EB/OL]. (2021-04-19)[2022-12-31]. https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101536.html.
- [30] 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO). カーボンリサイクル実証研究拠点、基礎研究エリアで研究開発に着手 [EB/OL]. (2021-04-07)[2022-12-31].

- [31] 中华人民共和国中央人民政府. 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]. (2021-09-22)[2022-12-08]. http://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content_5644613.htm.
- [32] 中华人民共和国中央人民政府. 国务院关于印发 2030 年 前碳达峰行动方案的通知 [EB/OL]. (2021-10-24)[2022-12-08]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content 5644984.htm.
- [33] 中华人民共和国中央人民政府. 工业和信息化部 国家 发展改革委 生态环境部关于印发工业领域碳达峰实施 方案的通知 [EB/OL]. (2022-07-07)[2022-12-08]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-08/01/content 5703910.htm.
- [34] 中华人民共和国中央人民政府. 科技部等九部门关于印发《科技支撑碳达峰碳中和实施方案 (2022—2030 年)》的 通 知 [EB/OL]. (2022-06-24)[2022-12-08]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-08/18/content 5705865.htm.
- [35] Intergovernmental Panel on Climate Change. Carbon dioxide capture and storage[EB/OL]. [2022-12-08].https://www.ipcc.ch/report/carbon-dioxide-capture-and-storage/.

- [36] Global CCS Institute. Global status of CCS 2022[EB/OL]. (2022-10-18)[2022-12-08]. https://status22.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2022/12/Global-Status-of-CCS-2022_Download_1222.pdf.
- [37] The White House. Inflation reduction act of 2022[EB/OL]. (2022-08-16)[2023-02-16]. https://www.whitehouse.gov/cleanenergy/inflation-reduction-act-guidebook/.
- [38] Global CCS Institute. The global status of CCS 2021 [EB/OL]. (2021-10-13)[2022-12-08]. https://www.globalccsinstitute.com/resources/global-status-report/.
- [39] Global CCS Institute. Technology readiness and costs of CCS[EB/OL]. (2021-03-29)[2022-12-12]. https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2022/03/CCE-CCS-Technology-Readiness-and-Costs-22-1.pdf.
- [40] U.S. Department of Energy. Carbon dioxide transportation infrastructure finance and innovation (CIFIA) program [EB/OL]. (2022-10-06)[2023-02-16]. https://www.energy. gov/articles/biden-harris-administration-announces-2billion-bipartisan-infrastructure-law-finance.

Comparative Study of International R&D Trend and Application of Carbon Capture, Utilization and Storage

QIN Aning¹, SUN Yuling^{1, 2}

- (1. National Science Library, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190;
- Department of Library Information and Archives Management, University of Chinese Academy of Sciences,
 Beijing 100190)

Abstract: Carbon capture, utilization and storage (CCUS), as an important technology option to address climate change and achieve carbon neutrality, has reached a global consensus among major countries in the world and international organizations. This paper reviews and analyzes the R&D deployment, patent-based competition trend, commercial full-chain CCUS projects in major countries. The research results show that: (a) The United States, the United Kingdom and Japan have formulated multiple top-level strategic plans to clarify the vision and objectives of CCUS technology development, while the top-level overall planning and system deployment in the field of CCUS technology need to be further strengthened in China. (b) The number of global CCUS technology patent applications shows a growing trend, and is expected to usher in a new round of growth in the future under the background of carbon neutrality target. (c) China, the United States and Japan are the main source countries of global CCUS technology patents. CO₂ capture and CO₂ utilization technologies are the main patent application. (d) The range of application industries for commercial full-chain CCUS projects is expanding, and the United States and the United Kingdom lead the world in the number of projects, capture capacity and application industries. Finally, some suggestions are put forward for the development of CCUS technology at the background of carbon neutrality target in China.

Keywords: carbon capture, utilization and storage; R&D trend; bibliometric; commercial full-chain CCUS project