

面向双碳目标的绿色低碳科技创新需求与政策选择

苏利阳¹, 许金华^{*1,2}, 王晓明¹

(1. 中国科学院科技战略咨询研究院, 北京 100190; 2. 中国科学院大学公共政策与管理学院, 北京 100049)

【摘要】实现碳达峰碳中和是一场经济社会的系统性变革, 其中绿色低碳技术创新及其驱动的产业革命至关重要。本文展望了我国重点领域绿色低碳技术创新需求, 综合研判了我国绿色低碳技术在技术成熟度和商业可行性等方面的挑战, 分析了绿色低碳技术的全球竞争态势, 最后从创新战略引领、关键技术攻关、科技成果转化和创新政策支持四方面提出加快推进绿色低碳先进技术发展的对策建议。

【关键词】绿色低碳技术; 科技创新; 碳达峰碳中和; 政策支持

中图分类号: X21 文献标识码: A 文章编号: 1673-288X(2024)03-0034-06 DOI: 10.19758/j.cnki.issn1673-288x.202403034

绿色低碳先进技术可以理解为以减碳降碳为首要导向, 技术上具有先进性、引领性、新兴性特征的技术。绿色低碳先进技术的识别、研发及规模化产业应用对实现经济社会的全面绿色转型、迈向碳达峰碳中和至关重要。根据国际能源署的研究, 在承诺目标情景中, 中国电力部门将在 2050 年前实现二氧化碳净零排放, 与 2020 年相比, 工业二氧化碳排放量要在 2026 年下降近 95%, 长途交通运输方式的碳排放下降 60%, 建筑碳排放下降 95% 以上^[1]。然而, 现有的技术选项、管理和政策措施不足以支撑这些宏伟目标的实现, “技术为王”将在碳达峰碳中和进程中得到充分体现^[2]。

1 绿色低碳先进技术创新需求

当前我国二氧化碳排放量已超过 100 亿吨, 位居全球第一, 其中电力、工业、交通和建筑部门是主要的碳排放来源^[1]。各部门需要结合自身排放结构和发展需求, 探索绿色低碳先进技术, 并在经济性、减排量、安全性等方面取得平衡。

电力部门脱碳化是实现 2060 碳中和目标的关键所在, 这是因为电力部门自身碳排放量大, 同时电力能够为其他领域脱碳提供支撑。实现电力部门脱碳的难点是在高比例非化石能源占比下很难实现电网系统的低成本、高可靠和灵活性。从未来趋势看, 随着高空、深远海、大功率风电技术, 以及高效低成本光伏发电技术的突破, 风光将逐步成为重要的供电能源来源。但能够弥补风光资源波动性大的低成本、高安全、适应性强的储能技术, 仍有待进一步突破。在火电作为不可或缺的稳定性、调节性电源情况下, 碳捕集、利用与封存技术 (CCUS) 也是实现碳中和所必须的技术。在大电网主导下, 分布式微电网、虚拟电厂、车网互动等技术也将在新型电力系统中发挥重要作用。

工业部门既有能源消费碳排放, 也有生产过程碳排放, 是实现碳中和目标的难点领域。在我国实行制造业立国的前提下, 实现工业部门脱碳很难通过减少工业产品需求量的方式, 必须依靠电力和氢能替代、工业原料替代、工艺革新与 CCUS 技术。从各项技术的贡献看, 未

作者简介: 苏利阳, 副研究员, 研究领域为生态文明建设与绿色发展、碳达峰、碳中和、公共政策过程等。

通讯作者: 许金华, 副研究员, 研究领域为能源效率与碳减排、能源电力系统低碳转型、数字经济产业政策。

来节能技术的潜力相对下降,节材技术、工业原料替代、工艺革新与 CCUS 技术将逐步成为工业部门碳中和的主要贡献技术^[3]。例如,钢铁领域减排在短期内可采取能效提升等技术,但潜力仍有限,要实现深度脱碳需要突破低成本短流程炼钢、氢基直接还原等技术。

交通部门的脱碳难度极高,主要是移动源的动力转化技术障碍大。分应用场景看,私家车、城市内物流车可采取纯电动车技术来解决,但重卡则需依赖固态电池、换电模式或氢燃料电池的突破;铁路运输以提升电气化水平为主,同时发展磁悬浮高速列车;水运中的内河航运可用蓄电池,远洋航运则需要突破绿氢/绿氨、先进生物燃料和合成燃料;航空交通低碳化技术主要以生物质燃料、氢能、电力技术为主线。预计航空与远洋航海的减排技术突破难度较大,需要颠覆性创新。

建筑部门的碳排放以间接排放为主,直接碳排放较少,各个排放环节都存在相对成熟的零碳解决方案,但难点在于成本控制和相对分散的利益主体。城市建筑用能,包括取暖/制冷和家庭炊事等,均应转向绿电和地热为主;农村的家庭用能则可采用屋顶光伏+浅层地热+生活沼气+太阳能集热器+外来绿电的综合互补方式^[2]。

非二氧化碳气体的管控与减排相关技术还较为薄弱,亟需科技相关部署与支撑。例如,农业中的畜牧养殖业以及种植业是甲烷(CH_4)、氧化亚氮(N_2O)的主要排放源,而这二者的温室效应能力是同当量二氧化碳的数十倍至数百倍,但要减少农业甲烷排放还面临很大挑战。

2 当前绿色低碳先进技术发展存在的问题

2.1 部分绿色低碳技术已处在商业应用阶段,绝大部分绿色低碳先进技术仍不成熟

尽管风光发电技术已到平价上网的程度,新能源汽车和中短时储能技术趋于成熟,回收循环利用技术的商业化应用比例也较高,碳汇技术基本成熟,但仍远远无法支撑起经济社会

的全面绿色转型。根据国际能源机构(IEA)预测,到2060年我国实现碳中和约40%的二氧化碳减排量来自今天仍处于原型或示范阶段的技术^[1]。

高比例可再生电网的支撑技术仍不成熟,氢能在制储运等方面面临重大技术挑战。储能技术中锂离子电池、液流电池、压缩空气储能等已基本成熟,但仍需降本增效且应用场景有限,同时相变储热、新体系液流电池、重力储能、固态电池等仍需突破材料、单体、模块的关键技术,以实现从实验室技术到集成示范的转变。制氢领域,已具备商业化能力的碱性电解水技术难以实现离网制氢;质子交换膜(PEM)虽然可离网制氢,但关键零部件和贵金属应用存在短板;固体氧化物电解技术(SOEC)、碱性阴离子交换膜(AEM)电解水技术则正在早期开发阶段。氢储运技术以高压气态储氢+长管拖车运输是当前储运氢气主流路线,但只适合于短距离运输,适合长途运输场景下的管道输送技术仍有待突破。

工业和交通领域的脱碳技术突破仍困难重重。绿电、绿氢等替代煤、油、气,理论上难度不高,但工艺和设备的再造重建绝非易事。在工业领域,短流程炼钢技术面临成本和废钢可获得性问题,氢基钢铁冶炼技术有待突破,多数处于研发示范阶段;化工与可再生能源耦合需以氢气为平台,受到电解水制氢成本偏高的制约,而化工短流程技术面临催化剂和工程放大等技术问题;水泥领域的低碳技术减排潜力有限,而无碳技术仍有待研发。在交通领域,重卡、航空、水运交通领域在短期内难以形成以电力为核心的能源消费体系。纯电动重卡和氢燃料电池重卡均处在示范应用的初期,且成本明显高于传统燃油重卡;水运交通中,甲醇动力船舶目前已有少量的商业化应用,但绿色甲醇的供应和价格方面存在较大的不确定性;其他氢、氨、电动等新能源海运船舶总体处于研发阶段;可持续航空燃料已经实现了小型规模化的生产,但成本远高于传统航空煤油(约是传统航空煤

油的2~3倍)。

在末端固碳方面,CCUS与负排放技术目前基本没有商业应用。在碳捕集方面,部分技术已处于商业示范或规模化应用阶段,技术成熟度较高,但捕集成本和能耗始终偏高。在运输方面,罐车运输和船舶运输技术已达到商业应用阶段,我国70%以上均采用罐车输送,中石化华东油气田和丽水36-1气田的部分CO₂通过船舶运输;管道运输技术在我国尚处于中试阶段,仅建成管道累计长度70km;海底管道输送CO₂的技术缺乏经验,在国内尚处于研究阶段。在二氧化碳利用方面,少数技术如强化采油和浸采采矿技术发展较快,已进入商业化应用阶段,我国70%以上的CCUS项目捕集后的CO₂都进行了利用,其中60%以上均为地质利用。其余大部分技术仍属于研发或工业示范阶段,距离规模化落地仍有一定距离,如二氧化碳人工合成淀粉具有巨大的应用潜力,但该技术距离大规模工业化还有很长一段时间。直接空气捕集(DAC)技术无地域限制,可将捕集点与封存点置于一处,但仍有待进一步研发突破。

2.2 与国外技术相比仍有差距,国产化替代仍有待加速,一些领先技术的根基不稳

近年来,我国在绿色科技创新自强自立方面取得重要突破,但与国外相比仍有差距,卡脖子技术的国产化替代仍有待加速。

国外的部分颠覆性绿色低碳技术进展较快,我国差距较大。根据中国科学技术发展战略研究院最新技术预测报告,我国目前有19.7%的绿色低碳技术达到国际领先水平,54.4%的技术与国际平均水平持平,25.9%的技术仍落后于国际平均水平^[4]。具体而言,我国PEM、SOE、AEM等制氢技术,以及储运氢技术与国外有较大的差距,如截至2022年末全球氢气管道总长超过5000km,我国已投用输氢管道总长约100km;美国已建成最高输氢压力10.3MPa的管道,而我国仍以5MPa的中低压管道为主^[5]。国外正在积极推动CCUS技术大规模应用,但我国化学吸收法、化学吸附法、膜

分离法与国外有一定差距,同时全球正在运行的DAC工厂均位于国外;国内CO₂管道运输明显落后西方,北美已建成超过8000km的管网,但我国仅建成管道累计长度70km。

关键零部件、专用软件、核心材料等仍大量依赖国外。我国光伏产业规模、产业链完整性领先全球,但部分原材料和高端核心装备组件仍依赖进口,半导体用溅射靶材等关键材料领域目前多由国外市场主导。风电领域,2021年我国风电主轴轴承国产化率约33%^[6],低功率机型虽已基本实现进口替代,但大功率机型主轴轴承市场仍由斯凯孚(SKF)、舍弗勒等外资厂商主导。我国已在重型燃气轮机国产化方面迈出重要一步,但仍需加快产业化进度;燃煤工业锅炉装备总体水平差,运行效率低,比国际先进水平低20%^[7]。

部分领域技术迭代速度快,我国优势领域的根基不稳。光伏作为技术迭代最为频繁的行业之一,在受益于新技术带来效益的同时也面临着新技术迭代带来的风险。光伏技术路线已经进入了多选阶段,光伏企业对技术路线的选择将直接影响后续的市场竞争力。现阶段,我国在部分类型晶硅电池领域处于国际领跑或并跑水平,在更高效的新型电池领域则处于并跑或跟跑水平。动力电池领域同样面临着固态电池跨越式发展带来的产业根基和优势不稳挑战。

2.3 绿色低碳技术发展和产业转化面临体制、政策、标准、能力、资金等系统障碍

绿色低碳先进技术具有很强的公共属性和外部性特征,技术创新与应用的私人经济回报远低于社会效益,因此政策支持至关重要,但目前看,体制机制尚未完全理顺,顶层设计尚未出台,政策支持不完善,科技与产业两张皮现象普遍,对绿色低碳技术发展形成重大制约。

绿色低碳技术发展的管理体制尚未理顺。围绕绿色低碳技术的“研发-中试-推广”等环节,以及“项目-平台-资金”等方面的管理职责,目前分散在多个政府部门。科技研发项目管理职责由中央科技委统筹,科技部、自然科学基金

委、中国科学院、生态环境部等都有相应的职责。在技术推广方面,国家发改委负责组织实施绿色低碳先进技术示范工程,工信部负责资源综合利用等先进适用工艺技术设备目录等,生态环境部负责组织实施重大低碳技术目录,科技部则发布了《国家绿色低碳先进技术成果目录》。同样,围绕绿色低碳技术的分类,生态环境部、国家发改委、国家专利局、国家标准委、科技部等各自有一套分类体系,相互间并不兼容。

绿色低碳技术路线图仍有待进一步完善。当前我国仍处于“双碳”战略发展的初期,顶层设计和路线图仍不明确。尽管发布《科技支撑碳达峰碳中和实施方案(2022—2030年)》,但具体方向仍有待细化。在推动实现碳达峰、碳中和阶段,新的技术将不断出现,统筹现有绿色低碳技术有效减排与未来技术创新发展的思路需要完善。由于绿色低碳技术体系构建思路不明确,导致无法为具体创新路径和设计创新主体提供有效支撑。例如,CO₂加氢制甲醇是一种新型绿色低碳技术,但甲醇长期以来被纳入化工原料管理,作为“危险化学品”,缺乏对甲醇能源属性的共识,甲醇未能列入国家能源战略。

绿色低碳科技创新与产业链之间的脱节问题依然普遍存在。据《2022年高等学校科技统计资料汇编》,全国高校全年专利授权数共308548项,合同形式转让数为16015项,转化率为5.2%,如果将统计口径放宽,我国每年的科技成果转化率约为10%~15%,与发达国家40%左右的水平相比仍有较大差距^[8]。科技创新产学研“散而不强”,重大技术攻关、成果转化、首台(套)依托工程机制、容错以及标准、检测、认证等公共服务机制尚需完善。

3 绿色低碳先进技术的国际竞争态势

目前,欧美等主要发达国家除不断加大绿色低碳技术研发投入外,还积极助推绿色低碳技术创新。

从全球来看,低碳科技创新投入和产出的区域分布高度不均衡,少数经济体主导着全球

低碳能源技术研发与部署。美国、加拿大、欧盟、英国、日本、韩国、澳大利亚、新西兰和中国等国家和地区合计占全球低碳能源技术研发公共支出的97.5%,其余的经济体占比为2.5%。从产出来看,根据国家知识产权局数据,2016—2022年,全球绿色低碳专利布局依次集中在中国、美国、日本、欧盟、韩国,合计占全球总量的76.7%。从技术专利本身变化来看,全球低碳技术专利申请逐渐从供能技术转向终端应用技术、用能技术和通用技术,低碳能源技术成为资本市场投资的新风口^[9]。从技术创新布局看,各经济体普遍将零碳能源技术、产业低碳转型技术、CCUS和交叉技术融合创新作为重点。零碳能源技术主要侧重于氢/氨、可再生能源、先进核电技术,产业低碳转型技术包括交通电气化、工业脱碳化等。CCUS技术方面,英国注重CCUS产业集群建设,并在温室气体去除方面重点关注降低成本并提高溶剂的捕集性能和吸附工艺、钙循环技术、生物质能-碳捕集与封存(BECCS)等创新研究。交叉技术融合创新主要是加强在能源、工业、生态领域利用新一代信息技术的融合创新,包括低碳半导体制造技术、绿色数据中心技术等。

从竞争链条看,大国竞争从研发转向供应链安全和制造业延伸。美国在制造业重返和供应链自主可控战略下,强调通过研发大幅度降低关键清洁能源、氢能等成本,确保这些新技术产品在美国制造,并迅速推动商业化应用。为此,美国发布“变革性清洁能源解决方案”“储能大挑战路线图”“清洁未来法案”等有关清洁能源的政策,并计划投入2万多亿美元,作为用于交通、建筑和清洁能源等重点领域的投资,以加速清洁能源技术创新,支持清洁能源经济转型。欧盟整体目标是“产品领先+本土制造+全球规则制定”,以《欧洲绿色协议》为基础,协调欧盟研发与创新框架计划“地平线欧洲”、欧盟“创新基金”等多个科学计划,支持气候友好技术研发和商业示范,希望利用较大的本土市场规模和领先的技术优势,大规模鼓励技术在本

地的商业化应用;同时,制定产品碳排放标准,并通过碳边境调节税和产品标准等影响全球供应链^[10]。

4 加快推动绿色低碳先进技术发展的对策建议

4.1 加强绿色科技创新战略引领

系统谋划绿色低碳发展前瞻性需求,加强绿色低碳前沿技术预见布局,加快编制并发布碳达峰碳中和科技路线图,有效引导全社会科技研发力量投入。统筹协调相关部门以及地方低碳科技创新支撑力量,建立健全碳达峰碳中和科技创新监测评价机制,全方位加强情报收集和分析工作,开展绿色低碳科技情报跟踪评估。充分发挥智库机构的作用,针对清洁低碳能源、储能、国际话语权提升等重要问题,形成系列双碳咨询报告和院士建议等咨询成果。

4.2 加快突破绿色低碳关键技术

突破零碳电力关键技术。研发高效硅基光伏电池、高效稳定钙钛矿电池等技术,突破深远海上风电技术、高空风电技术等。研发具有高安全性的多用途小型模块式反应堆和超高温气冷堆等技术。研发大规模可再生能源并网及电网安全高效运行技术。加快推动压缩空气储能、钠离子电池储能、液流电池储能等的商业化,突破固态锂离子电池储能技术和梯级电站大型储能等新型储能应用技术。研发可再生能源高效低成本制氢技术、大规模物理储氢和化学储氢技术、大规模及长距离管道输氢技术、氢能安全技术等。

突破低碳零碳工业关键技术。研发全废钢电炉流程集成优化技术、富氢或纯氢气体冶炼技术、钢-化一体化联产技术。研发低钙高胶凝性水泥熟料技术、少熟料水泥生产技术等。针对石油化工、煤化工等高碳排放化工生产流程,研发可再生能源规模化制氢技术、原油炼制短流程技术、多能耦合过程技术,研发绿色生物化工技术以及智能化低碳升级改造技术。研发废旧物资高质循环利用、含碳固废高值材料化与

低碳能源化利用、多源废物协同处理与生产生活系统循环链接、重型装备智能再制造等技术。

突破负碳及非二氧化碳温室气体减排技术。聚焦CCUS技术的全生命周期能效提升和成本降低,当前以二氧化碳捕集和利用技术为重点,开展CCUS与工业过程的全流程深度耦合技术研发及示范;着眼长远加大CCUS与清洁能源融合的工程技术研发,开展矿化封存、陆上和海洋地质封存技术研究。加强甲烷、氧化亚氮及含氟气体等非二氧化碳温室气体的监测、回收利用和减量替代技术研发及标准研究。

4.3 促进绿色低碳科技成果转化

开展重点绿色低碳先进技术示范工程、低碳零碳技术应用示范工程,重点推进化石能源高效清洁利用、低碳能源、工业节能减排与资源循环利用、分布式供能、大规模储能、多能融合等技术集成应用,形成一批先进技术和标准引领的综合解决方案。选择我国典型区域,结合其生态环境、能源资源禀赋、产业结构特点,开展技术综合示范,开展管理政策协同创新。以首台套首批次首版次为重点,推动形成一批绿色低碳技术示范工程。

加强科技成果转化服务体系建设。结合国家绿色技术推广目录和国家绿色技术交易中心等网络平台,综合提升低碳零碳技术成果转化能力,推动低碳零碳技术转移转化。完善绿色低碳技术转移转化技术支持和平台服务。全力打造国家绿色低碳技术创新中心、原创技术“策源地”和现代产业链“链长”。

4.4 加强绿色低碳技术创新政策支持

提升绿色低碳技术创新统筹协调能力,充分发挥绿色技术创新部际协调机制作用,进一步加强政策协同合作,解决重大问题。有关部门要持续加大对绿色低碳技术创新工作的支持。

充分发挥国家战略科技力量作用,深入推进跨专业、跨领域的深度协同、融合创新,深化体制机制改革、优化资源配置,建设分可独立作战、聚可合力攻关的双碳全国重点实验室集群。遴选、支持一批低碳科技创新企业,支持科技企

业积极主持参与国家科技计划项目, 加快提升企业低碳技术创新能力。

参考文献:

- [1] IEA. 2021. 中国能源体系碳中和路线图 [EB/OL]. (2021-12-01) [2024-05-26]. <https://www.efchina.org/Reports-zh/report-lceg-20220303-2-zh>.
- [2] 丁仲礼. 碳中和对中国的挑战和机遇[J]. 中国新闻发布(实务版) 2022(01): 16-23.
- [3] 张贤, 郭德悦, 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(1): 65-70.
- [4] 刘仁厚, 杨洋, 丁明磊, 等. “双碳”目标下我国绿色低碳技术体系构建及创新路径研究[J]. 广西社会科学 2022(00-004).
- [5] 武佳雄, 李天帅, 顾真. 氢能行业专题报告: 气态氢气储运技术迭代路线明确, 产业化提速 [EB/OL]. (2023-10-24) [2024-05-26]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1780597068952225901&wfr=spider&for=pc/>.
- [6] 王芳. 主轴轴承国产化还需多久? [J]. 风能 2022(04): 26-32.
- [7] 李立涅, 饶宏, 许爱东, 等. 我国能源技术革命体系战略研究[J]. 中国工程科学 2018, 20(03): 1-8.
- [8] 中华人民共和国教育部科学技术与信息化司. 2022年高等学校科技统计资料汇编[M]. 高等教育出版社, 2023.
- [9] 国家知识产权局. 全球绿色低碳专利统计分析报告(2023) [R]. 北京: 绿色低碳技术专利统计分析项目组, 2023: 3-4.
- [10] 王建芳, 苏利阳, 谭显春, 等. 主要经济体碳中和战略取向、政策举措及启示[J]. 中国科学院院刊 2022, 37(04): 479-489.

Green and low-carbon technological innovation needs and policy option for carbon peaking and carbon neutrality goals

SU Liyang¹, XU Jinhua^{*1,2}, WANG Xiaoming¹

(1. Institutes of Science and Development, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. School of Public Policy and Management, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Achieving the goal of carbon neutrality requires a systemic transformation of the economy and society, where green and low-carbon technological innovation and its corresponding industrial revolution are crucial. This article analyzes the demands for green and low-carbon technological innovation in key sectors and challenges of green and low-carbon technology in terms of technological maturity and commercial viability. It further analyzes the global competitive landscape of green and low-carbon technologies. Finally, the paper puts forward suggestions to accelerate the development of green and low-carbon advanced technologies from innovation strategic leadership, key technology research, technological achievements transformation and policy support.

Keywords: green and low-carbon technology; technological innovation; carbon peak and carbon neutrality; policy support

(责任编辑 安祺)

(上接第 26 页)

中心在环境贸易与投资领域的工作基础, 在碳边境调节机制(CBAM)、绿色金融、生物多样性投融资等重点领域深入开展研究, 广泛加强合作, 高质量完成各项工作, 有效发挥专委会政策决策支持作用, 并积极推动绿色贸易与投资学科建设和发展。

下一步, 专委会将继续坚持以习近平新时代中国特色社会主义思想特别是习近平生态文明思想为指导, 全面贯彻落实党的二十大精神和中央经济工作会议精神, 深入贯彻全国生态环境保护大会精神, 深化重点领域研究, 加强国内外交流合作, 继续发挥好绿色贸易与投资领域决策支持和学术交流平台作用, 为美丽中国建设做出新的贡献。

生态环境部环境与经济政策研究中心供稿