

趋势观察：

国际碳中和行动关键技术 前沿热点与发展趋势*

气候变化是全球面临的重大挑战之一。根据联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）测算，若实现《巴黎协定》1.5℃控温目标，全球必须在2050年达到二氧化碳净零排放（又称“碳中和”），即每年二氧化碳排放量等于其通过植树等方式减排的抵消量。碳中和是应对全球气候危机的重要手段。目前，全球已有137个国家以政策宣示或立法等不同方式提出碳中和目标，其中大部分国家或区域计划在2050年实现碳中和，如欧盟、美国、英国、加拿大、日本、新西兰、南非等。少部分国家，如德国将碳中和目标提前到2045年。

科技创新是实现碳中和的核心驱动力，推动和依靠绿色技术创新作为共同的战略选择来实现碳中和目标已成为主要发达国家的共识。2020年以来，发达国家通过制定面向碳中和的科技战略与计划，加快布局绿色低碳技术创新。例如：美国发布《清洁能源革命与环境正义计划》《变革性清洁能源解决方案》；英国以《绿色工业革命的十点计划》为基础推出《净零创新组合计划》；日本政府陆续颁布《革新环境技术创新战略》《2050碳中和绿色增长战略》等。主要发

达国家以“减排”和“增汇”为2条主线，聚焦“零碳能源体系构建”“低碳产业转型”和“生态固碳增汇/碳捕获、利用与封存（CCUS）”3个维度。本文系统解读国际碳中和行动的关键技术前沿热点和发展趋势，在此基础上提出对我国碳中和和技术创新战略和计划制定的启示与建议。

1 零碳能源关键技术体系

零碳能源关键技术体系涉及传统化石能源系统低排放转型、新能源大规模使用和广泛部署等。重点包括碳基能源高效催化转化、先进高效低排放燃烧发电等关键减排技术，以及氢、太阳能、风能等新能源利用技术。

1.1 传统能源系统的低碳排放转型是当前的现实紧迫任务

（1）催化过程和工艺革命性创新推进碳基能源高效催化转化。针对化石能源最本质的碳资源清洁高效转化利用问题，前沿热点方向包括：碳基能源催化转化反应途径、催化剂及工艺开发、复杂催化转化系统的集成耦合与匹配，以及转化过程多点源复杂污染

* 本文由中国科学院武汉文献情报中心战略情报中心先进能源科技战略情报研究团队、中国科学院文献情报中心情报研究部生态文明研究团队、中国科学院西北生态环境资源研究院文献情报中心资源生态环境战略情报研究团队、中国科学院成都文献情报中心战略情报部生物与信息情报研究团队联合撰稿，执笔人包括：郭楷模、孙玉玲、裴惠娟、陈伟、滕飞、秦阿宁、李娜娜、曲建升

物控制等。目前，碳基能源高效催化转化已经探索出一些新的路线，部分已实现工程示范。预计未来10—20年煤炭分级分质转化利用技术、二氧化碳催化转化技术将得到优先发展。

(2) 新型热力循环与高效热功转换实现清洁燃烧与高效发电。先进高效低排放燃烧发电技术能够有效减少化石能源作为燃料利用的碳排放，前沿热点方向包括：灵活多源智能发电系统集成与协调控制、超高参数燃煤发电高效热功转换机制、新型工质热力循环与高效热功转换创新技术，以及多污染物协同控制等。未来持续朝着高效、节能、节水和低排放/零排放方向发展。预计到2030年，燃煤发电超低排放等先进技术得到全面推广，将有望使燃煤发电实现近零排放，从而显著降低煤炭全产业链的环境影响。

1.2 新一代能源体系的重构建设是实现碳中和目标的核心工作

以可再生能源、先进核能、氢能、储能技术为代表的碳零排关键技术是实现碳中和的关键抓手，是建设低碳绿色能源体系、实现碳中和目标的核心工作。

(1) 高比例可再生能源系统被广泛认为是引领全球能源向绿色低碳转型的主体。构建高比例可再生能源系统，需要突破可再生能源高效、低成本、规模化开发利用的系列关键科学与技术前沿热点问题，主要包括：先进可再生能源、灵活友好并网、新一代电力系统、多能互补与供需互动等关键核心技术。未来可再生能源利用将朝着多能互补、冷热电联产与综合利用方向发展。可再生能源在能源结构中的比重日益增加，预计到2025年可再生能源将成为世界第一大电力来源，到2050年占到发电量的近90%、能源供应总量的2/3。其中，重点科技研发方向包括：以高效低成本光伏发电、人工光合系统制燃料与化学品为代表的新兴技术；大型风电机组及部件关键技术、基于大数据的风电场设计与运维关键技术、大型风电机组测试关键技术，以及海上风电场设计、建设及开发成套关键

技术等；高品位生物质能转化技术、生物质能清洁制备与高效利用技术、能源植物基因重组育种、生物油精制原理、生物学系统氢能转换原理等。

(2) 先进裂变堆研发及聚变堆实验突破推进核能迈向安全高效可持续发展道路。先进核裂变能前沿热点方向主要集中在开发固有安全特性的第四代反应堆系统、燃料循环利用及废料嬗变堆技术。可控核聚变前沿热点研究方向则主要聚焦等离子体理论研究、耐受强中子辐射和高热负荷材料开发和示范堆概念设计方面等主题研究。预计2030年前后，部分成熟的四代堆（如钠冷快堆）将走向市场，之后逐渐扩大规模。磁约束可控核聚变预计2030年左右完成实验堆的建设和满功率运行，2050年左右示范堆的工程设计及商业堆的预研和评估工作有望开展。

(3) 氢能是未来碳中和社会技术、产业竞争新的制高点。前沿热点方向包括：可再生能源电解制氢等绿色制氢技术，更高效、易运输储氢技术与基础设施网络建设，以及基于氢能的新型复合系统概念研究及验证等。目前，可再生能源电解水制氢尚处于示范阶段，太阳能光解水制氢等前沿技术仍处于实验室开发阶段；预计到2030年可再生能源电解水制氢技术将大规模部署，具备与蓝氢（配备碳捕集的化石燃料制氢）成本相当的竞争力。未来氢能应用逐渐向灵活、高效的多能融合场景发展。

(4) 下一代新型电化学储能技术正处在一个重要突破关口。前沿热点方向包括：开发全固态锂电池、金属-空气电池、新概念化学电池等潜在颠覆性技术；重点开展充放电循环反应机理研究、中间产物认知、界面优化、新概念电池材料体系开发。未来电池储能研究继续向高能量密度、高比功率、快速响应、高安全性、长寿命电池材料发展。预计到2025年前动力电池单体能量密度达400 Wh/kg，2030年达到500 Wh/kg，并加速开发下一代锂离子动力电池和新体系动力电池。最终实现在21世纪中叶前广泛应用长寿命、低成

本、高能量密度、高安全和易回收的新型电化学储能技术。

(5) 多能融合能源系统是各国低碳转型新的战略竞争焦点。前沿热点方向是解决能源的综合互补利用、多能系统规划设计,运行管理、能源系统智慧化等重大科技问题,以及开发多能互补系统变革性技术等。构建多能融合综合能源系统是能源发展大势所趋,攻克能源生产、输配、存储、消费等环节的多能耦合和优化互补核心技术,发展变革性智能化绿色过程技术体系,支撑高碳行业流程再造,解决能源转化和工业生产过程的能耗高排放难题,保障能源利用与生态文明同步协调发展。

2 低碳产业转型关键技术体系

工业、交通等高排放行业绿色低碳转型是实现碳中和目标的重中之重,减排路径包括源头减排、革新技术和工艺流程再造、行业绿色低碳材料开发及末端治理等。技术创新是促进行业以成本效益实现碳减排的关键。

2.1 原料/燃料替代、工艺技术创新和碳捕集与利用是工业过程碳减排的主要技术路径

(1) 可再生电力、生物质能、氢等清洁燃料应用是实现燃料端碳减排的重要途径。前沿热点方向包括:低成本可再生电力、高比例生物燃料替代化石燃料、技术与装备强化、高温工业过程氢燃料应用、低品位余热利用等。目前,在一些行业(如水泥、钢铁)已实现化石燃料的部分替代,预计到2060年清洁燃料替代将使工业部门化石燃料的使用量减少60%—80%。

(2) 工艺技术变革和创新推动工业过程的碳减排。制氢结合CCUS是钢铁行业低碳工艺路径的关键技术组合。前沿热点方向包括:低成本绿氢制备、氢还原炼铁、低成本大规模CCUS技术的工业应用等。全球氢和CCUS技术相结合已探索了多条低碳钢工

艺路线,预计2050年可实现商业化。CCUS技术的工业应用前景广阔,预计到2050年工业行业二氧化碳捕获率将达到90%,碳捕获成本比2020年水平降低40%。

(3) 低碳替代产品研发和碳循环利用是工业碳减排的另一重要方向。在水泥行业,前沿热点方向包括:石灰石的零碳替代品开发、低碳水泥研发等。目前,积极探索工业固废、黏土、火山岩等部分替代石灰石,以非石化基材料完全替代石灰石是未来发展的重要趋势。化工行业中,前沿热点方向包括:可持续的生物或废物基原料高效转化利用技术、绿色氢基大规模氨生产技术、碳循环利用新技术、分子炼油和多产化学品技术等。

2.2 节能提效、可持续性低碳燃料和电动化是交通部门绿色低碳转型的主要技术路径

(1) 节能和能效提升技术是交通部门实现短期脱碳的主要方式,能够有效缓和不断增长的能源需求。交通部门绿色低碳转型的前沿热点方向包括:轻量化技术、发动机技术、机电耦合一体化技术和智能交通技术等。在技术创新的推动下,交通运输工具的平均油耗和废气排放持续下降。提高轻质合金和复合材料等性能、开拓新型工艺技术和智能网联化技术等技术是未来主要的攻关方向。

(2) 发展可持续性低碳燃料和电动化是交通部门实现中长期脱碳的关键。前沿热点方向包括:可再生植物/海洋藻类或其他有机废物制成的生物燃料、氢能及氢基燃料和动力电池技术等。目前,部分低碳燃料在道路交通中处于示范阶段,在航空和航海领域处于起步探索阶段,动力电池技术已跻身世界前列。未来交通能源多元化发展将成为主流,下一代动力电池技术有望在2030—2060年逐步实现商业化。

3 生态固碳增汇/负排放关键技术体系

负碳排放关键技术包括生态固碳增汇、CCUS、直

接空气碳捕集（DAC）和碳循环利用等，这些技术重点解决生产活动中无法通过技术手段减排的碳，是实现碳中和目标技术组合的重要组成部分。

3.1 生态固碳增汇技术是实现碳中和目标的有力技术手段

系统部署生态固碳增汇技术需要攻克一系列前沿热点问题，既需要在采样相对不足的地区开展更多的实地观测，研发和优化可正确刻画碳循环复杂过程的地球系统模型；又需要继续投资于天基卫星观测，建立生态碳储量核算、碳汇能力提升潜力评估等方法，研究生态碳汇的关键影响因素与演化规律，评估生态系统增汇潜力及风险。此外，需要大力发展海洋碳汇技术——海洋储碳周期可达数千年，负排潜力巨大。

3.2 CCUS是应对全球气候变化的关键技术之一

CCUS 规模化部署仍然面临一系列关键技术挑战，前沿热点方向包括：CCUS 与新能源体系的耦合发展、第二代捕集技术、化学链捕集技术、Allam 循环、低成本及低能耗的 CCUS 技术研究等。目前，第一代捕集技术发展渐趋成熟，但成本和能耗偏高；而第二代捕集技术仍处于实验室研发或小试阶段，待技术成熟后，其能耗和成本会比成熟的第一代技术降低 30% 以上，2035 年前后有望大规模推广应用。化学链捕集技术尚处于实验室阶段，还未实现工程示范。生物利用技术总体处于初期发展阶段。涉及 CCUS 过程的新型捕集技术、生物利用技术、CCUS 规模化驱替技术、风险防控能力的研究将是未来发展的重要趋势。

3.3 DAC是减少分布源碳排放的有效技术途径

DAC 能够对数以亿计的交通工具等分布源排放的二氧化碳进行捕集处理，从而有效降低大气中的二氧化碳浓度，前沿热点方向包括：开发新型吸附剂、新型接触器、低成本的高容量 DAC 用再生材料、DAC 系统的低碳电力耦合研究等。全球发展 DAC 的动力

正在不断增长。然而，DAC 在工业领域的发展还处于初级阶段，在实现商用之前还有很长的路要走；预计到 2030 年实现 DAC 技术系统的构建，2040 年实现 DAC 技术实用化。

3.4 碳循环利用是构建碳循环经济不可或缺的关键一环

碳循环利用是实现碳减排的重要途径，也是世界性难题。目前，二氧化碳资源化利用产业化研究中化学转化资源化利用、生物转化资源化利用是当前的研究热点。碳循环利用技术有望到 2030 年实现工业化生产。转化路径和高效催化剂研究、以二氧化碳为原料的高附加值化学品转化、燃料转化技术将是未来研究的主要方向。目前，碳循环利用技术处于初级阶段，预计 2040 年左右碳循环产品将得到广泛使用。

4 结语与启示

（1）**加强顶层设计科学引导研发创新。**加强碳达峰、碳中和战略顶层设计，分析不同行业能源相关碳排放现状和机制，探讨能源相关减排技术潜力。密切跟踪国际绿色科技前沿热点研究，制定支撑碳达峰、碳中和目标的中长期技术发展路线图和行动方案，明确主要目标、重点任务和时间节点。

（2）**强化核心关键技术的科学攻关。**推动新一代可再生能源、绿氢、储能、智慧能源、绿色化工、零能耗建筑、新能源交通、绿色智能社会等前沿技术、颠覆性技术的重点突破。加快推进高效节能低碳技术及 CCUS、生态增汇等技术示范应用，推动新一代数字化技术在清洁能源、节能和能效等领域的融合创新。

（3）**打造贯通创新价值链的创新网络。**探索碳减排、碳零排、碳负排等关键技术的共性科学问题，开展从基础研究、技术创新到产业化的全链条攻关。构建支撑碳中和目标能源技术发展的产学研全链条创新网络，促进创新链与产业链深度融合，促进成果的高

效转化。

（4）构建科学高效的创新平台体系。建立科技创新平台体系是产出高水平成果，培育高层次人才，实现科技创新的重要组织形式和有效手段。因此，为了更好地推动支撑碳中和目标的能源科技创新，需要优化布局面向碳中和重大科技需求的国家科技创新基地

体系，设立相应的国家重点实验室、国家工程研究中心、国家技术创新中心等，建立稳定的支持机制和联合攻关机制。

致谢 感谢中国科学院过程工程研究所张香平、中国石油大学（北京）张奇给予的指导和修正。

■ 责任编辑：文彦杰