

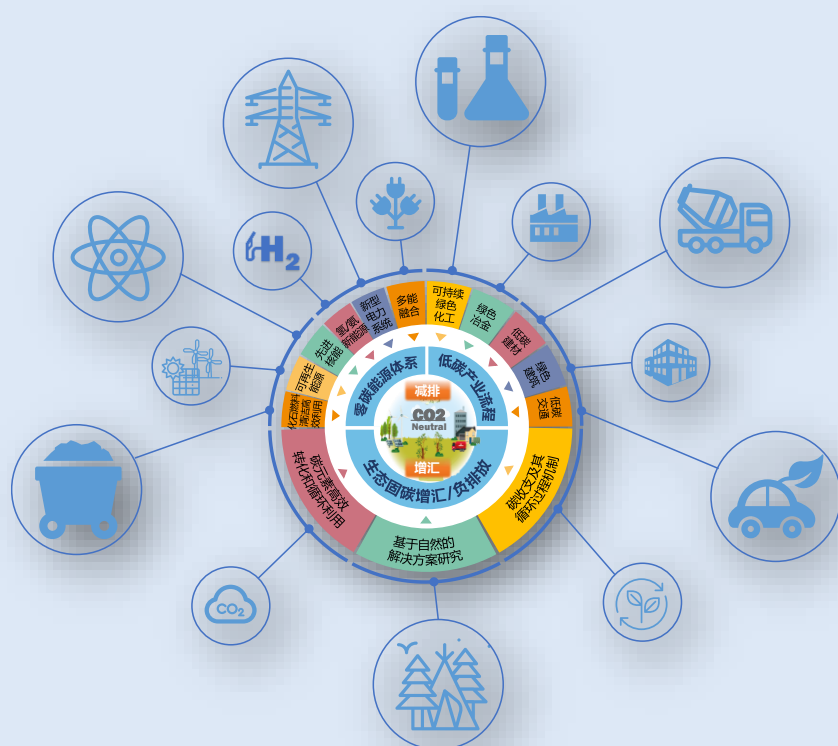
“变革性洁净能源关键技术与示范” A 类先导专项

“面向国家能源结构变革战略研究” 课题



# 洁净能源重大信息专报

2021 年第 05 期 (总第 11 期)



## 碳中和重要科技问题研判及启示建议

碳中和需要开展能源、资源、生态、大气、海洋、工程、管理等诸多学科的综合研究，带动前沿技术、颠覆性技术的多轮迭代、接续发展。本期专报针对实现碳中和所需的“减排”和“增汇”两条根本路径，围绕“构建零碳能源体系”、“再造低碳产业流程”、“生态固碳增汇/负排放”三大布局方向，梳理出 14 个重要科技问题，归纳提出了面向近中远期不同发展阶段的超过 70 项关键技术突破需求。同时对我国提升支撑碳中和的高水平科技自立自强能力提出了布局建议，供决策参考。

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

# 目 录

2021年第05期 (总第11期)

## ◆ 摘 要

## ◆ 一、国际碳中和科技布局分析

- (一) 零碳能源体系构建是各国碳中和战略布局核心..... 4
- (二) 多国推动产业低碳转型重点发展循环经济模式..... 5
- (三) 各国保护增强生态固碳能力提高气候治理水平..... 6

## ◆ 二、碳中和关键技术体系框架

- (一) 源头零碳，构建非化石能源为主体的零碳能源体系..... 8
- (二) 过程减碳，推动高耗能高排放产业流程低碳再造..... 10
- (三) 末端固碳，提高生态系统增汇能力与部署负排放技术..... 11

## ◆ 三、我国碳中和科技行动建议

- (一) 发挥新型举国体制优势，强化碳中和科技创新支撑体系..... 13
- (二) 重点推动能源革命，建立以新能源为主体的零碳能源结构..... 13
- (三) 加快构建低碳产业，打造变革性绿色生产过程技术体系..... 14
- (四) 持续推进生态建设固碳增汇，前瞻部署负排放技术研发示范... 14
- (五) 促进集成耦合与协同优化，加强碳中和系统性解决方案部署... 15

## 摘要

碳达峰碳中和是党中央经过深思熟虑作出的重大战略决策，事关中华民族永续发展和构建人类命运共同体。这一重大战略涵盖了电力、化工、钢铁、水泥、交通、建筑等多个行业，与国家能源结构和产业结构息息相关。实现人为碳源排放和人为碳汇清除相互抵消，需要开展能源、资源、生态、大气、海洋、工程、管理等诸多学科的综合研究，带动前沿技术、颠覆性技术的多轮迭代、接续发展。

本期专报通过综合分析国际碳中和战略行动布局以及碳中和的科技内涵，针对实现碳中和所需的“减排”和“增汇”两条根本路径，围绕“构建零碳能源体系”、“再造低碳产业流程”、“生态固碳增汇/负排放”三大布局方向，梳理出14个重要科技问题，并归纳提出了面向近中远期不同发展阶段的超过70项关键技术突破需求，形成全面支撑碳中和愿景的核心技术体系框架（图1）。需要说明的是，这里提出的技术尺度是方向性的大类技术，并不是具体而微的单项技术，旨在描绘碳中和宏大的技术图景一角，激发后续研究不断完善。

专报最后针对我国提升支撑碳中和的高水平科技自立自强能力，围绕能源生产与消费革命、工业过程与重点/难减排领域低碳转型、生态固碳增汇等三个方向的近中远期布局提出了对策建议，供决策参考。



注：每类技术后附括号内的近中远是指预计实现技术成熟大规模应用的时期。

图 1 实现碳中和的根本路径-布局方向-科技问题-关键技术框架

## 一、国际碳中和科技布局分析

通过梳理发达国家和地区碳中和战略布局的重点技术清单（表1），可以看出以下三个共性特点：（1）构建零碳能源体系是各国战略布局的核心。重点是大力发展可再生能源，逐步减少煤炭等化石燃料使用，推动能源终端消费电气化。（2）促进产业低碳转型是各国建立绿色经济的着力点。大力推动高能耗、高排放工业部门低碳和零碳转型，重点发展循环经济模式，建立低碳产业示范集群，加速建筑节能改造和绿色转型，推进交通电气化、绿色化。（3）保护并增强陆地和海洋生态系统固碳能力是各国提高气候治理水平的重要途径。重点布局增强农、林、渔及海洋自然碳汇，并构建多元负排放技术体系。

与此同时，实现碳中和目标是一项艰巨挑战，要求各国清洁能源技术创新发生质的飞跃。根据国际能源署的统计，全球电气化、氢能、生物能源以及CCUS等关键技术领域的创新投入仅为成熟低碳发电技术和能效技术公共研发资金的三分之一，并且到2050年几乎一半的减排量将来自目前还处于示范或原型开发阶段的技术<sup>1</sup>。这也显示出当前各国的研究部署与实现碳中和目标还存在巨大的差距，必须通过加强跨领域综合交叉研究来聚焦碳中和相关的重大科学问题，引导技术突破形成全面支撑碳中和愿景的核心技术体系，推动生态文明建设和全球可持续发展。

<sup>1</sup> International Energy Agency. Net Zero by 2050 A Roadmap for the Global Energy Sector. <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>[2021-05-18]

表 1 主要国家和地区碳中和战略布局重点技术

国家/地区	重点技术
美国	小型模块化反应堆、核聚变、绿氢、CCUS、电池储能、下一代低碳建筑、可再生能源、先进核能、可持续航空燃料、生物燃料、电动汽车、气候智能型农业等
欧盟	可再生能源、氢能、综合能源系统、智能电网、储能、CCUS、工业脱碳和数字化转型、绿色建筑、可持续和智能交通、精准农业、有机农业生态系统、生物经济、合成低碳燃料等
德国	绿氢、储能、电动汽车、智能电网、交通网络电气化、生物燃料、燃料电池、低排放工业生产技术、气候与环境友好型建筑、数字化能源系统、热电联产现代化、生态农业等
法国	可再生能源、核能、绿氢、能源网络、生态城市、工业脱碳、CCUS、绿色交通基础设施、电动汽车、生物基产品和可持续燃料、可持续农业系统等
英国	储能、氢能、海上风电、先进核能、电动汽车、交通网络电气化、零排放飞机、可持续交通燃料、清洁航运、绿色建筑、工业燃料转型、生物能源、直接空气碳捕集和先进 CCUS、环境保护、能源领域人工智能等
日本	可再生能源、氢能与氨燃料、供热脱碳、先进核能、核聚变、电动汽车、储能、零排放船舶、智慧农林渔业、低碳半导体、航空电气化、碳资源化利用、净零排放建筑、资源回收再利用等
韩国	可再生能源、零能耗建筑、智能电网、电动汽车、氢能与燃料电池、资源回收再利用、氢还原炼铁、低碳燃料、智慧工厂、低碳半导体、生物能源、CCUS、智慧能源管理系统、智慧农业渔业、碳汇等

### （一） 零碳能源体系构建是各国碳中和战略布局的核心，重点是大力发展可再生能源，逐步减少煤炭等化石燃料使用，推动能源终端消费电气化

美国“清洁能源革命计划”<sup>2</sup>提出加快电力脱碳进程，到 2035 年实现电力领域净零排放，并在 2022 财年美国能源部预算纲要中把电力部门脱碳作为优先事项之一。欧盟修订的《可再生能源指令》<sup>3</sup>将 2030 年可再生能源占欧盟能源供应的目标提高到 40%，并将制定《能源基础设施法规框架》，促进智能电网、氢网络、CCUS、储能等创新技术和基础设施的部署。德国“2030

<sup>2</sup> The Biden Plan for A Clean Energy Revolution and Environmental Justice . <https://joebiden.com/climate-plan/>

<sup>3</sup> Amendment to the Renewable Energy Directive to implement the ambition of the new 2030 climate target. [https://ec.europa.eu/info/files/amendment-renewable-energy-directive-implement-ambition-new-2030-climate-target\\_en](https://ec.europa.eu/info/files/amendment-renewable-energy-directive-implement-ambition-new-2030-climate-target_en)

气候保护行动计划”<sup>4</sup>提出，2038年淘汰煤炭，增加可再生能源发电系统建设，将风能和太阳能等发电比例提高至65%。法国《能源与气候法案》<sup>5</sup>确定了逐步淘汰化石燃料，发展可再生能源的原则，到2035年建立核电与可再生能源并重的混合电力系统。日本《绿色增长战略》<sup>6</sup>提出电力行业脱碳化是实现碳中和的大前提，要最大限度部署可再生能源和采用氢能，推动电力部门深度脱碳，到2050年可再生能源发电量占比达50%-60%。

## （二） 多个国家和地区均积极推动产业低碳转型步伐，重点发展循环经济模式，建立低碳产业示范集群，加速建筑节能改造和绿色转型，推进交通电气化、绿色化

欧盟2020年相继发布《欧洲新工业战略》<sup>7</sup>“循环经济行动计划”<sup>8</sup>等，提出能源密集型产业脱碳计划，制定了14个工业生态系统创新路线图，推动建筑绿色转型，发展可持续和智能交通，实现清洁循环经济模式。英国“绿色工业革命十点计划”<sup>9</sup>计划投入120亿英镑资金推动电力、交通、建筑和工业领域低碳创新技术、系统和流程的商业化，并出台《工业战略大挑战》<sup>10</sup>提出到2030年建立4个低碳产业集群、到2040年建立全球第一个零碳工业区，2021年推出10亿英镑净零创新投

<sup>4</sup> Klimaschutzprogramm 2030. <https://www.bmu.de/publikation/klimaschutzprogramm-2030/>

<sup>5</sup> LOI n° 2019-1147 du 8 novembre 2019 relative à l'énergie et au climat (1).

<https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000039355955&dateTexte=20200216>

<sup>6</sup> 2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略. <https://www.meti.go.jp/press/2020/12/20201225012/0201225012-2.pdf>

<sup>7</sup> A New Industrial Strategy for Europe.

[https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/communication-eu-industrial-strategy-march-2020\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/communication-eu-industrial-strategy-march-2020_en.pdf)

<sup>8</sup> EU Circular Economy Action Plan. <https://ec.europa.eu/environment/circular-economy/>

[https://ec.europa.eu/environment/circular-economy/pdf/new\\_circular\\_economy\\_action\\_plan.pdf](https://ec.europa.eu/environment/circular-economy/pdf/new_circular_economy_action_plan.pdf)

<sup>9</sup> The ten point plan for a green industrial revolution.

[https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/936567/10\\_POINT\\_PLAN\\_BOOKLET.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/936567/10_POINT_PLAN_BOOKLET.pdf)

<sup>10</sup> The Grand Challenge missions.

<https://www.gov.uk/government/publications/industrial-strategy-the-grand-challenges/missions>

资计划<sup>11</sup>，在工业脱碳领域重点发展燃料替代、工业 CCUS、能源效率提升和循环利用技术。法国在“第四个未来投资计划”<sup>12</sup>提出将投入 125 亿欧元以加速工业过程脱碳，在生态和能源转型方面部署了无碳氢能、可持续航空燃料、交通数字化和脱碳、资源回收再利用等技术。日本《绿色增长战略》针对能源、交通、制造业、建筑等 14 个产业提出了到 2050 年实现碳中和的发展目标和重点任务，推进工业、交通、建筑等产业电气化发展，向循环经济转型。韩国《2050 碳中和促进战略》<sup>13</sup>提出了变革钢铁、水泥、石化等能源密集型、碳密集型产业结构，培育新兴低碳产业集群，打造有发展前途的新型低碳产业生态系统，扩大循环经济规模促进工业可持续发展。

### **（三） 各国将保护和增强陆地和海洋生态系统固碳能力作为提高气候治理水平的重要技术途径，重点布局增强农、林、渔及海洋自然碳汇，并推动多元负排放技术体系构建**

美国“清洁能源革命计划”提出加快 CCUS 技术的开发和部署，提高对 CCUS 项目的税收优惠。欧盟在 2020 年发布《2030 年生物多样性战略》<sup>14</sup>提出加强森林生态固碳系统恢复，以及泥炭地、草原、湿地、红树林等生态系统建设，欧盟还将扩大陆地和海洋保护区的范围，正计划拟定新的《森林战略》<sup>15</sup>以提高

<sup>11</sup> <https://www.gov.uk/government/collections/net-zero-innovation-portfolio>

<sup>12</sup> Stratégie d'accélération de la décarbonation de l'industrie. <https://www.ecologie.gouv.fr/strategie-dacceleration-decarbonation-lindustrie>

<sup>13</sup> 2050 Carbon Neutral Strategy of The Republic of Korea: Towards A Sustainable And Green Society. [https://unfccc.int/sites/default/files/resource/LTS1\\_RKorea.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/resource/LTS1_RKorea.pdf)

<sup>14</sup> EU Biodiversity strategy for 2030. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1590574123338&uri=CELEX:52020DC0380>

<sup>15</sup> Forests-new EU strategy.

<https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12674-Forests-new-EU-strategy>



森林质量、数量和恢复力，更新“大西洋行动计划 2.0”<sup>16</sup>以构建可持续、更具弹性和竞争力的“蓝色经济”，并在“2030 碳减排一揽子提案”<sup>17</sup>中提出到 2035 年力争在土地使用、林业和农业部门实现碳中和，包括农业部门的非二氧化碳排放。德国在“2030 气候保护行动计划”中专门制定了土地利用及林业措施，要激活土壤碳汇潜力，制定生态农业碳富集措施，发展草原固碳，保护森林和沼泽地，促进可持续和高效益利用。日本《绿色增长战略》将碳循环单独列为一个产业，提出加快发展碳循环和资源化利用技术，到 2030 年实现 CO<sub>2</sub> 制燃料的价格与传统喷气燃料相当，到 2050 年 CO<sub>2</sub> 制塑料实现与现有的塑料制品价格相同的目标；还要发展发展陆地和海洋的碳封存技术，打造智慧农业、林业和渔业。英国“绿色工业革命十点计划”提出设立 10 亿英镑基础设施基金推进 4 个 CCUS 产业集群建设并发展直接空气碳捕集和先进 CCUS 技术，在东海岸集群部署了 Net Zero Teesside 项目和 Zero Carbon Humber 工业区，建设了欧洲首个生物能源 CCS 负碳发电示范项目，目标到 2027 年每年实现 800 万吨 CO<sub>2</sub> 负排放<sup>18</sup>。

<sup>16</sup> Atlantic action plan 2.0: A revamped maritime strategy to foster a sustainable blue economy and the EU Green Deal. [https://ec.europa.eu/maritimeaffairs/press/atlantic-action-plan-20-revamped-maritime-strategy-foster-sustainable-blue-economy-and-eu\\_en](https://ec.europa.eu/maritimeaffairs/press/atlantic-action-plan-20-revamped-maritime-strategy-foster-sustainable-blue-economy-and-eu_en)

<sup>17</sup> European Green Deal: Commission proposes transformation of EU economy and society to meet climate ambitions. [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip\\_21\\_3541](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_21_3541)

<sup>18</sup> Value of Biomass with Carbon Capture and Storage (BECCS) in Power. <https://www.drax.com/wp-content/uploads/2021/04/Drax-Baringa-Report-Summary-2021.pdf>

## 二、碳中和关键技术体系框架

### (一) 源头零碳，构建非化石能源为主体的零碳能源体系

聚焦能源转化存储利用“原理-工艺-过程-系统”四个层次，重点研究碳基能源分子高效洁净利用与转化的物理化学基础、可再生能源高效转化利用新原理和低成本规模化存储新方法、新型电力系统多时空耦合与系统形态演化、先进核裂变与可控核聚变安全高效利用、新能源化学体系构建、能势匹配和多能互补综合利用等重大科技问题，引导以下关键技术突破：

1、能源和工业结构中大规模存量化石能源的清洁高效转化利用是当务之急，近期重点研究 C-H、C-O、C-C 等含能化学键的有效活化、结构再造与能量存储新路线等关键科学问题，发展碳基能源高效催化转化、新型热力循环与高效热功转换系统、多点源污染物一体化控制等清洁低碳技术，中期推进化石能源与新能源的耦合利用，远期化石能源发展重点将由碳燃料向碳材料转变，实现宝贵碳资源高附加值利用。

2、着眼长远零碳能源结构和低碳工业的变革，优先推进构建高比例可再生能源系统替代化石能源，重点研发太阳能高效低成本光电光热转化、深海高空风电高效转化、生物质高效转化与高值利用、海洋能规模化高效利用、分布式多能互补与供需互动、灵活友好并网等关键核心技术，长期以促进高比例可再生能源电力消纳与多能源载体综合利用，大幅增加可再生能源在能源生产和消费中的比重，支撑可再生能源在碳中和时代成为主体能源。

3、发展安全、高效、经济、可持续的先进核能系统，近中期攻克先进核裂变能燃料循环、裂变燃料增殖与嬗变以及核能多用途利用等重大科技问题；瞄准长远持续推进聚变堆实验与示范，攻关磁约束聚变和惯性约束聚变核物理基础科学与关键技术问题，到本世纪中叶实现聚变商用，充分发挥核能战略性能源作用。

4、推动氢和氨等新能源化学体系的建立解决新能源开发与转化过程中的重大科学问题，近期加快发展低碳高效的绿氢/氨制备、储运技术，中长期开发不同场景下基于氢/氨的新型系统概念，以氢/氨作为关键能源载体实现多种能源资源的灵活互补，并通过转化为电/热/气或作为替代原料促进多个难减排工业部门的脱碳。

5、开发超越传统体系的储能新材料与系统，研究电/热/机械能与化学能之间相互转化规律，近期加快推进大规模长寿命物理储能技术应用，中长期发展新型电化学能量储存与转化机制以变革锂离子电池为代表的储能体系，实现长寿命、低成本、高能量密度、高安全和易回收的新型储能技术广泛应用。

6、未来能源体系将发展为多能融合智慧能源系统，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科技问题，并深度融合新一代信息技术形成智慧能源新产业，保障能源利用与生态文明同步协调发展。

## （二） 过程减碳，推动高耗能高排放产业流程低碳再造

聚焦工业原料/燃料替代、过程工艺革新、能量梯级回收和资源循环利用，重点研究绿色冶金过程工程、可持续绿色化工材料与工艺过程、低碳建材与工艺过程、绿色节能与智能建筑设计理论与方法、智能低碳交通系统等重大科技问题，引导以下关键技术突破：

1、近期大力推进钢铁业电气化应用技术、节能增效技术、物质能量回收技术，中长期发展纯氢和合成气等为还原剂的新型低碳钢铁冶炼体系，变革目前碳为还原剂的“高炉-转炉”长流程，构筑“直接还原-电炉”短流程新冶金技术体系，同时在钢铁全产业链深度融合 CO<sub>2</sub> 低成本捕集、合成化学品等减排技术，推进钢化联产融合发展。

2、近期重点发展低钙熟料水泥、非碳酸盐钙质原料替代技术、节能增效技术，中长期发展过程电气化，应用生物质、氢等清洁替代燃料，以及研发太阳能供热窑炉系统等流程再造、非钙体系胶凝材料等颠覆性技术重构水泥生产工艺，并在水泥行业深度融合 CO<sub>2</sub> 低成本捕集、合成化学品、矿化固定、封存等减排技术。

3、近中期突破石油化工新的分子炼油与分子转化平台技术，针对煤中碳组分高效分离和碳结构精准调变发展“分子炼煤”技术，在分子水平上认识化石资源组成及转化规律实现炼化增效，结合能源结构的变革，实现化工转化以油品为主向高附加值的化学品、材料转型。化工业中长期研究发展绿色碳科学，

重点研究可再生能源/氢与重要化工和化学品生产过程的深度耦合途径，发展全流程可再生能源驱动合成甲醇、氨、烯烃及芳烃等平台化合物，促进高效转化利用非化石资源的可再生碳资源（CO<sub>2</sub>和生物质）。

4、近期发展有色金属短流程制备技术，提高有色冶金业的电气化水平，中期发展生物质、氢燃料替代化石能源，推进有色金属回收与循环利用，远期开发湿法冶金、生物冶金等颠覆性流程再造工艺。

5、近期大幅提升建筑业的电气化水平，推广成熟的建筑节能技术，中期推进零碳供热制冷、低碳燃料、电力供需平衡优化，远期发展需求可调的零碳建筑设计与环境营造技术、建筑智能化技术等。

6、近中期大幅提升交通业的电气化水平，特别是道路和铁路运输，中长期推广氢/氨燃料替代、生物质燃料替代在长距离重型货运、航空、海运等难减排领域的应用，发展基于先进信息技术的智能交通运输系统。

### **（三） 末端固碳，提高生态系统增汇能力与部署负排放技术**

聚焦揭示生态系统碳汇格局、过程机制、演化趋势与潜力评估，重点研究气候变化背景下区域生态系统碳收支及其循环过程机制、基于自然的解决方案、碳元素高效转化和循环利用等重大科技问题，引导以下关键技术突破：

1、系统监测与评估生态系统碳循环过程及其固碳功能。开展碳循环过程多维观测，构建天空地联网综合观测体系和下一

代地球系统模型，认识生态系统碳循环过程及其时空演变机制，量化陆地和海洋生态系统的碳汇容量与固碳速率。揭示生态系统碳汇功能稳定性、增汇效应稳定性和持续性的生态学机制，制定温室气体源-汇清单核算方法，综合评估陆地和海洋生态系统的增汇潜力。

2、推行“基于自然的解决方案”<sup>19</sup>，发挥保护、可持续管理和修复生态系统带来的增汇潜力。从气候与生物多样性协同的角度深入研发和推进相关工作，发展山水林田湖草沙生态一体化保护和修复技术，广泛应用植树造林和可持续森林管理技术，示范农业、草地和湿地增汇技术，中长期加强海洋蓝碳增汇研究，海洋和植被丰富的沿海生态系统如红树林、潮汐沼泽和海草床，将是未来蓝碳研究的重点。

3、发展 CO<sub>2</sub> 捕集、转化和耦合利用相关的负排放技术，近中期重点发展第二代捕集技术，实现 CO<sub>2</sub> 源头低能耗捕集在碳密集型行业的规模应用，中长期实现高效光、电、热、生物转化利用 CO<sub>2</sub> 机理等方面关键突破，开发高效定向转化合成有机含氧化学品、油品新工艺，发展高效光/电解水与 CO<sub>2</sub> 还原耦合的光/电能和化学能循环利用方法，实现碳循环利用。

<sup>19</sup> 基于自然的解决方案（Nature based Solutions, NbS）是指保护、可持续管理和恢复自然的和经改变的生态系统的行动，有效和适应性地应对社会挑战，同时提供人类福祉和生物多样性效益。

### 三、对我国碳中和科技行动的启示建议

实现碳中和必将带来一场广泛而深刻的经济社会变革，我国需要着重提升支撑碳中和的高水平科技自立自强能力。围绕能源生产与消费革命、工业过程与重点/难减排领域低碳转型、生态固碳增汇等三个方向近中远期布局，提出以下对策建议。

#### **（一） 发挥新型举国体制优势，强化面向碳中和的科技创新支撑体系建设**

强化面向碳中和重大科技需求的国家战略科技力量布局，组建碳中和国家实验室，改组、新建一批高水平国家重点实验室、国家工程研究中心、国家技术创新中心等。有序推进碳中和国家重大科技专项和重点研发计划专项研发布局，从科学研究前沿和经济社会需求中不断凝练重大科学问题和关键核心技术。建立基础科学、应用研究、产业部署和示范有机联动的碳中和科技研发模式，打造自主可控、国际领先的碳中和核心技术体系。

#### **（二） 重点推动能源革命，建立以新能源为主体的零碳能源结构和新型电力系统**

近期对于存量化石能源，支撑煤电由主体电源向电力保障和调峰的基础性电源转变，化石能源转化利用重心由“碳燃料”向“碳材料”转变。中长期优先发展新一代高效低成本可再生能源、安全先进核能系统、新型电化学能源等颠覆性零碳能源技术，大力发展高比例新能源并网消纳、先进电网、多能互补

与供需互动、大规模储能等关键技术构建新型电力系统，发展氢/氨燃料、生物能源、低品位余热利用等零碳燃料技术满足高品位热能、高能量密度燃料等非电用能需求。最终显著提高非化石能源在能源结构中的比重，构建清洁低碳、安全高效的现代能源体系。

### **（三） 加快构建低碳产业，打造变革性智能化绿色生产过程技术体系**

制定化工、水泥、钢铁、有色等高耗能和高排放行业发展的绿色低碳转型中长期发展规划，分阶段细化发展目标和重点任务。近中期重点通过电气化应用、燃料/原料替代、高效节能技术，大幅削减工业过程原料反应和化石能源使用造成的碳排放，中远期发展物质能量循环与再利用技术，包括持续发展原生资源高效加工转化、废弃物资源化技术，加强资源的全生命周期管理与利用，以及在重点/难减排领域利用氢/氨、可再生能源等技术开展颠覆性零碳/低碳工业流程再造，如氢还原炼铁、绿色化工、生物冶金等。

### **（四） 持续推进生态建设提高自然固碳增汇能力，前瞻部署负排放技术研发与示范**

近期完善生态碳储量核算、碳汇能力提升潜力评估等方法体系，持续开展生态保护与修复，中长期加强森林绿碳、海洋蓝碳等固碳增汇技术的研发与推广工作，利用人工干预生物过程和生态工程技术增加土壤、森林、草原、湿地、海洋等碳汇能力，大幅提升生态系统固碳水平。针对抵消难减排领域碳排



放的需求，近中期以 CO<sub>2</sub> 规模化减排和资源化利用为重点，有序推进 CCUS 技术在火电、化工、钢铁等产业的全流程融合示范，加强跨行业、跨领域的技术集成，着眼长远前瞻部署生物能源 CCS、直接空气捕集、矿物碳化、生物炭、地球工程等前沿负排放技术的研发与示范。

### **（五） 促进技术系统集成耦合与产业、区域协同优化，加强碳中和系统性解决方案的部署应用**

加快打造全产业链、跨产业链多能融合智慧系统，促进能源化工互补耦合、钢铁化工联产、可再生能源绿氢与煤化工融合发展，协同解决能源转化和工业生产过程中的高能耗高排放难题。系统评估关键技术跨系统跨区域大规模应用的经济-社会-环境-气候-健康综合影响，统筹推进分区域和分部门的低碳、零碳和负碳技术发展。推动人工智能、数字化等新一代信息技术在能源、工业和生态领域的广泛应用。发展碳中和创新战略与决策支撑系统等管理支撑技术，推进系统性解决方案在碳中和行动中的部署。



## 《洁净能源重大信息专报》

编辑出版：中国科学院武汉文献情报中心

联系地址：武汉市武昌区小洪山西 25 号 (430071)

联系人：陈伟

联系电话：(027) 87199180

电子邮件：[energy@whlib.ac.cn](mailto:energy@whlib.ac.cn)