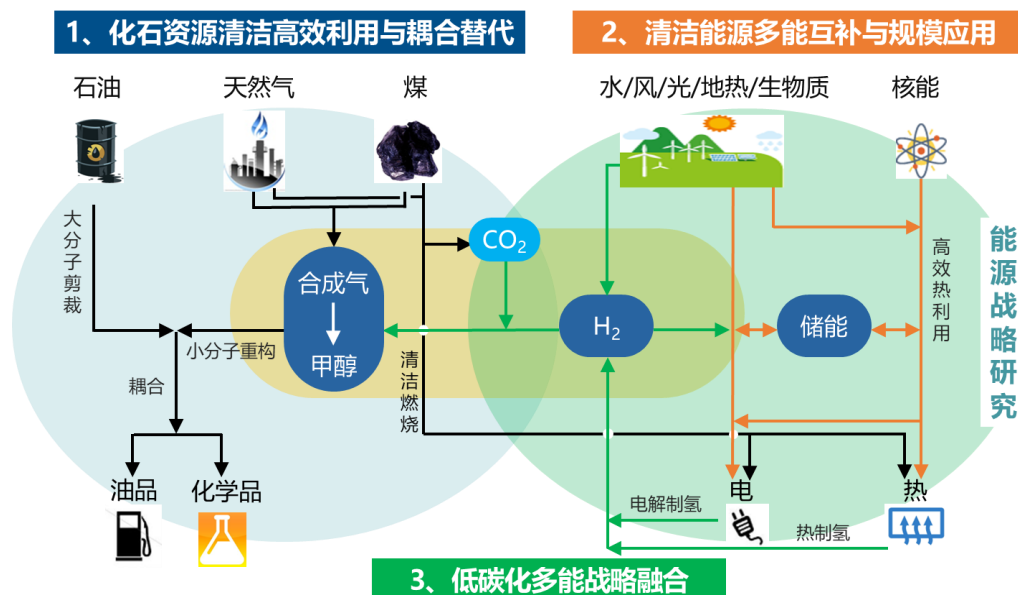




# 洁净能源科技动态监测快报

2021 年第 10 期（总第 24 期）



## 本期看点

- IEA 发布中国能源体系碳中和路线图
- 欧盟-美国联合倡导全球甲烷减排承诺
- DOE 发布太阳能未来研究推进零碳电网构建
- 韩国国会通过《碳中和与绿色增长框架法案》
- 澳大利亚 CSIRO 发布碳利用技术路线图
- 世界氢能理事会与麦肯锡更新氢能洞察报告

# 目 录

2021 年第 10 期 (总第 24 期)

## ◆ 化石资源清洁高效利用

- 欧盟-美国联合倡导全球甲烷减排承诺..... 2
- DOE 资助 3000 万美元支持清洁能源关键材料利用技术研发 ..... 3
- DOE 资助 300 万美元支持电力部门部署碳减排和储能技术 ..... 4
- 美国 NETL 开发含碳原料低成本微波气化技术..... 5

## ◆ 清洁能源多能互补

- DOE 发布太阳能未来研究推进零碳电网构建..... 6
- DOE 资助 6470 万美元开发生物燃料助力航空海运脱碳..... 10
- 英国资助生物质原料选育与生产创新研究 ..... 11
- 钕基催化剂实现高性能氨燃料可逆质子陶瓷燃料电池..... 13

## ◆ 低碳化多能融合

- 韩国国会通过《碳中和与绿色增长框架法案》 ..... 15
- 澳大利亚 CSIRO 发布碳利用技术路线图 ..... 16
- 英国资助 2.2 亿英镑促进碳密集型行业清洁低碳转型 ..... 19
- 英国投入 9170 万英镑支持开发低碳汽车技术..... 19
- DOE 资助 2700 万美元研发储能电池技术..... 20
- 美国建成全球首艘 100% 氢燃料电池动力商用船舶 ..... 21
- 可工业化制造高效纤维锂电池实现超 10 万次弯曲折叠..... 21

## ◆ 能源战略研究

- IEA 发布中国能源体系碳中和路线图 ..... 23
- 世界氢能理事会与麦肯锡更新氢能洞察报告 ..... 31

## 本期概要

国际能源署（IEA）发布《中国能源体系碳中和路线图》报告，系统探讨了中国能源体系实现碳中和的路径。报告要点包括：中国在2030年之前实现碳达峰是可行的，有赖于三个关键领域的进展：提高能效、发展可再生能源和减少煤炭使用。实现碳中和要求中国能源体系快速而深度转型，每个行业部门都有可行的路径来实现深度减排，以可再生能源为主导的电力部门为中国的清洁能源转型奠定了基础，氢及氢基燃料、生物燃料等低碳燃料不可或缺，中国能源转型需要电气化、CCUS、低碳氢及氢基燃料、可持续生物能源四个跨部门技术领域的深度创新，应妥善利用中国创新体系，以激励广泛的低碳能源技术进步。

欧盟委员会与美国联合提出全球甲烷承诺倡议，以减少全球甲烷排放量，该行动将于11月第26届联合国气候变化大会（COP26）上正式启动。甲烷作为全球第二大温室气体，加快推进甲烷减排是对CO<sub>2</sub>和其他温室气体减排行动的补充，对短时间内减缓全球变暖并实现将气候变暖限制在1.5°C目标具有重要战略意义，承诺具体目标为：到2030年，全球甲烷排放量较2020年至少减少30%，特别关注高排放产业，并开发甲烷排放量实时监测工具，精确量化甲烷减排量。

美国能源部（DOE）发布《太阳能未来研究》报告，详细阐述了太阳能在脱碳方面发挥的重要作用，研究表明：未来需大规模部署太阳能发电装置，到2025年，美国太阳能发电年均装机容量将达到30吉瓦/年；到2030年，年均装机容量将达到60吉瓦/年；到2035年太阳能发电量将提供全美40%的电力，以推进电力系统深度脱碳。此外，将太阳能与储能技术集成将使电力系统具有更大的灵活性和弹性，创造更多的就业机会。

韩国国会通过《碳中和与绿色增长框架法案》，自此韩国成为全球第14个将2050年碳中和愿景及实施体系纳入法律的国家：法案提出到2030年排放量较2018年下降35%或更多的目标，并规定实施2050年碳中和愿景的程序，成立碳中和委员会并设计碳中和实施框架。该法案还包括对气候变化的评估、气候应对基金和能源公正过渡等各种政策的制定。

澳大利亚联邦科学与工业研究组织（CSIRO）发布《二氧化碳利用路线图》，指出通过开发新兴碳捕集和利用（CCU）技术，支持澳大利亚产业发展和碳减排：该路线图提出了可产生重大影响的4项CCU技术：二氧化碳（CO<sub>2</sub>）的直接利用；CO<sub>2</sub>矿物碳化；CO<sub>2</sub>转化为化学品和燃料；CO<sub>2</sub>的生物转化。针对上述领域，提出了到2040年扩大CCU规模的分阶段部署优先事项，以及需要长期投入的潜在应用技术。

世界氢能理事会与麦肯锡公司更新了今年2月发布的《氢能洞察2021：氢能投资、部署和成本竞争力展望》报告，总结了近半年全球氢能市场部署情况，具体包括：氢能作为能源转型的关键支柱正加快部署，氢能投资正加快速度；到2030年全球清洁氢产能将超过1000万吨/年；供需中心之间已经开始形成贸易流，以氨、液体有机氢载体（LOHC）和液氢为主要形式；终端应用投资主要集中在工业原料和交通运输；中国已宣布超过50个大型氢能项目，承诺或宣布投资总额超过1800亿美元；可再生能源制氢将在中国氢气产能增长中发挥重要作用；中国需将可再生能源资源丰富地区（西部）与氢气高需求地区（沿海）连接起来；中国大多数清洁制氢项目用于交通运输。

# 化石资源清洁高效利用

## 欧盟-美国联合倡导全球甲烷减排承诺

9月18日，欧盟委员会与美国联合提出全球甲烷承诺倡议，以减少全球甲烷排放量，该行动将于11月第26届联合国气候变化大会（COP26）上正式启动<sup>1</sup>。甲烷作为全球第二大温室气体，加快推进甲烷减排是对CO<sub>2</sub>和其他温室气体减排行动的补充，对短时间内减缓全球变暖并实现将气候变暖限制在1.5°C目标具有重要战略意义。

**全球甲烷承诺倡议目标：到2030年，全球甲烷排放量较2020年至少减少30%，特别关注高排放产业，并开发甲烷排放量实时监测工具，精确量化甲烷减排量。**履行这一承诺将在2050年前使全球气候升温幅度至少降低0.2°C。当前，世界各国甲烷排放量和减排潜力差异悬殊，需加强国际合作，共同实现全球减排目标。

甲烷主要排放源包括石油、天然气、煤炭、农业和垃圾填埋场等。到2030年，能源部门实现甲烷减排潜力最大。实现甲烷减排将改善全球公共卫生和农业生产环境。根据气候和清洁空气联盟（CCAC）和联合国环境规划署对全球甲烷评估结果显示，到2030年实现甲烷减排承诺，将部分减缓甲烷造成的地球臭氧层破坏，每年将防止超过20多万例过早死亡、减少至少10万例与哮喘有关的急诊病例，以及每年防止2000多万吨农作物损失。

目前，欧盟和八个国家（包括阿根廷、加纳、印度尼西亚、伊拉克、意大利、墨西哥、英国和美国）已经表示支持全球甲烷承诺倡议，这些地区占全球甲烷排放量的五分之一以上，占全球经济产量近一半比例。

**编者注：**近三十年，欧盟一直在积极采取行动减少甲烷排放。欧盟于2020年10月通过了一项战略，目标是到2030年温室气体排放量较目前至少减少55%。当前，欧盟委员会将提出立法，以测量和核实甲烷排放量，限制甲烷排放和化石燃料燃烧，并对甲烷泄露的监测和修复提出要求。此外，欧盟委员会还将促进各成员国加快研发甲烷减排新兴技术并广泛部署，促进利用农业废物和残留物生产生物甲烷。

美国也正在寻求降低甲烷排放量。美国国家环境保护局（EPA）正在制定新的规定以减少石油和天然气行业的甲烷排放。与此同时，EPA已采取措施，对垃圾填埋场实施更严格的污染物排放标准；美国交通部的管道危险物质安全管理署也在采取措施，减少管道和相关设施中甲烷泄露；美国农业部也在努力推广气候智能型建设，

<sup>1</sup> Joint EU-US Press Release on the Global Methane Pledge.  
[https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP\\_21\\_4785](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_21_4785)

通过鼓励部署改进的粪便管理系统、厌氧消化器、新型畜牧饲料、堆肥和其他措施，减少农业部门甲烷排放。此外，美国国会一项提案中倡议废除或修复废弃的石油、天然气、煤矿和矿井，这将显著减少甲烷排放。

(汤匀)

## DOE 资助 3000 万美元支持清洁能源关键材料利用技术研发

9月2日，美国能源部（DOE）宣布3年内向13个科研机构共资助3000万美元，开发对清洁能源至关重要的关键材料新技术，以确保供应链安全<sup>2</sup>。该项资助计划旨在增加稀土和铂族元素供应多样化，开发替代材料，并探究和优化对清洁能源和高科技至关重要的稀土和铂族元素循环再利用过程。关键材料主要包括用于电动汽车动力电池的钴、用于风机和电子产品的钛，以及用于排放控制和燃料生产技术的铂族材料。具体内容如下：

### 1、开发稀土和铂族元素的替代品，增加供应多样化

该领域主要包括6个资助项目：①利用金属封装策略优化和减少铂族元素在多相催化中的使用，主要由斯坦福大学 Cargnello Matteo 课题组牵头；②在稀土替代材料合成过程中，探究多种改性剂驱动稀土元素定向选择合成研究，主要由科罗拉多矿业大学 Jensen Mark 课题组牵头；③在非临界条件下，开发稀土磁性材料生产工艺过程的高稳定催化剂，主要由美国东北大学 Lewis Laura 课题组牵头；④利用原位表征与预测模型探究稀土元素在固态离子通道中选择性输运路径，主要由芝加哥大学 Liu Chong 课题组牵头；⑤通过综合实验、计算和热力学建模方法探究铂族元素矿化的分子运动过程，主要由伊利诺伊大学 Lundstrom Craig 课题组牵头；⑥通过对替代材料结构进行非均匀性设计以控制材料功能特性，主要由西北太平洋国家实验室 Sushko Peter 课题组牵头。

### 2、研究稀土和铂族元素的循环再利用方法

该领域主要包括7个资助项目：①探究地壳风化过程中稀土和铂族元素在地壳中迁移富集的地球化学机制，主要由华盛顿大学 Catalano Jeffrey 课题组牵头；②探究高温高压超临界条件下，地质流体中稀土元素分子络合过程，主要由新墨西哥矿业技术学院 Gysi Alexander 课题组牵头；③进行近红外条件下地球中富集的金属-有机配合物模拟计算，主要由北达科他州立大学 Kilina Svetlana 课题组牵头；④研究稀土元素分离技术，主要由艾姆斯国家实验室 Prozorov Tanya 课题组牵头；⑤探究铂族元素的利用价值，主要由佛罗里达州立大学 Schurko Robert 课题组牵头；⑥探究液-液萃取反应中稀土元素相变和中尺度聚合现象机理，主要由阿贡国家实验室

<sup>2</sup> DOE Awards \$30M to Secure Domestic Supply Chain of Critical Materials. <https://www.energy.gov/articles/doe-awards-30m-secure-domestic-supply-chain-critical-materials>

Servis Michael 课题组牵头；⑦利用多肽表面活性剂在空气-水界面上回收镧系元素的技术开发，主要由宾夕法尼亚大学 Stebe Kathleen 课题组牵头。

(汤匀)

## DOE 资助 300 万美元支持电力部门部署碳减排和储能技术

9 月 17 日，美国能源部化石能源和碳管理办公室（FECM）宣布向 4 个项目共资助 300 万美元支持电力部门碳减排，并推进发电设施+储能技术一体化建设<sup>3</sup>。具体内容如下：

**1、由美国能源部-美国公共事业管理机构主管协会（DOE-NARUC）共同构建煤炭现代化和碳减排伙伴关系，利用专业知识和可信赖的国家伙伴关系，促进碳捕集、利用与封存（CCUS）等先进技术开发（DOE 五年内每年资助金额：20 万美元；五年总计资助金额：100 万美元）**

（1）利用碳捕集、利用与封存（CCUS）技术和其他先进的控污减排技术，减少以化石燃料为基础的能源生产过程中碳排放对环境的破坏。

（2）利用现有煤炭和化石燃料生产和运输基础设施，探索煤炭燃烧废弃物和副产品再利用途径，以强化能源安全、保持经济增长、减缓气候变化，促使能源向低碳经济公平过渡。

（3）在当前气候危机背景下，研究煤炭和其他化石资源的作用，以加强能源安全和弹性、促进经济增长和可持续性、实现煤炭社区的环境正义和能源公平分配。

**2、由美国国家州立能源官员协会（NASEO）利用其在能源政策和规划方面的专业知识，开展各种先进技术战略研究（DOE 五年内每年资助金额：20 万美元；五年总计资助金额：100 万美元）**

（1）进行最大限度地减少化石能源对气候和相关环境影响的研究。

（2）在工业部门向清洁能源转型过程中探究其对各州和地方社区的潜在影响。

（3）进行碳减排最新技术战略研究，如 CCUS 技术。

（4）进行其他清洁能源开发战略研究（如氢能的开发和利用），研究煤炭及其副产物在关键矿物供应方面的潜在利用价值（如用于生产智能手机和电脑显示器等产品中所需的关键矿物），研究构建清洁能源体系所需的先进技术（如风车和太阳能电池板等）。

**3、全国农村电力合作社协会（NRECA）将向电力合作社提供教育机会、开设培训班，以将新的储能与发电技术推广运用（DOE 五年内每年资助金额：10 万美元；承担机构五年内每年匹配金额：2.5 万美元；五年总计资助金额：62.5 万美元）**

<sup>3</sup> DOE Awards Up to \$3 Million for Engagement with Electric Utilities to Support Carbon Management and Energy Storage Technologies. <https://www.energy.gov/fe/articles/doe-awards-3-million-engagement-electric-utilities-support-carbon-management-and-energy>

(1) 在 DOE 已进行的储能一体化研究基础上，指导和支持构建新的储能一体化试点项目。

(2) NRECA 将向规模较小的公用事业电力企业开展培训，以提高相关从业人员专业知识。

**4、美国公共电力协会 (APPA) 将召集市政公用事业部门，对储能+发电厂一体化建设进行讨论和评估，确定储能+发电厂一体化建设面临的主要障碍，并与 DOE 和其他利益相关方合作，以消除这些障碍 (DOE 五年内每年资助金额：10 万美元；承担机构五年内每年匹配金额：2.5 万美元；五年总计资助金额：62.5 万美元)**

(1) 将为公共电力企业开放教育资源、提供出版物和相关技术工具，增强相关从业人员探索和实施储能项目的能力，确保地区电网稳定。

(汤匀)

## 美国 NETL 开发含碳原料低成本微波气化技术

9 月 13 日，美国能源部国家能源技术实验室 (NETL) 发布在线文章<sup>4</sup>，宣布其研究人员正利用微波技术开发含碳原料低成本制富氢合成气技术，在降低能耗的同时实现更高产率和选择性。

传统含碳原料制氢通过气化炉在高温条件下将含碳矿石、生物质等原料转化为气体，其能耗、成本较高。通过微波技术可将反应物快速加热到目标温度，反应时间较短，富氢合成气的产率更高。研究人员在微波反应器中测试了 3 种煤（次烟煤、褐煤、烟煤）的气化反应，实验结果表明，对于所有煤种，微波气化产生的合成气明显多于传统气化，还可将反应温度降低 250℃，并实现更高转化率。NETL 在其最先进的反应分析和化学转化设施 ReACT 中设计并建造了两个微波反应器系统，另外设计采购了一个高压微波反应器，并已于 2021 年初开始实验运行。

NETL 已将微波技术确立为重点研究方向，将其视为化学过程和制造科学的下一代前沿技术之一。NETL 的研究人员正对微波反应化学进行基础科学研究，以深入了解这项突破性技术，并对其进行商业应用的预测建模，提高工业过程能效和选择性。目前，模块化微波气化反应器（3-30 兆瓦）仍比传统气化反应器昂贵，因此需进行经济分析，确定潜在的成本效益。例如，微波气化能够提高产品收率，副产品较少，可降低气化后的气体分离过程成本。NETL 将利用微波气化技术将煤粉及其废物转化为合成气，解决废煤存储和处置相关的重大环境问题。

(岳芳)

<sup>4</sup> NETL DEVELOPING MICROWAVE TECHNOLOGY TO PRODUCE LOW-COST HYDROGEN.  
<https://www.netl.doe.gov/node/11175>

# 清洁能源多能互补

## DOE 发布太阳能未来研究推进零碳电网构建

9月8日，美国能源部（DOE）发布《太阳能未来研究》报告<sup>5</sup>，详细阐述了太阳能在脱碳方面发挥的重要作用。研究表明，未来需大规模部署太阳能发电装置，到2025年，美国太阳能发电年均装机容量将达到30吉瓦/年；到2030年，年均装机容量将达到60吉瓦/年；到2035年太阳能发电量将提供全国40%的电力，以推进电网深度脱碳。此外，将太阳能与储能技术集成将促使电力系统具有更大的灵活性和弹性，创造更多的就业机会。具体内容如下：

### 一、当前美国能源系统碳排放主要来自建筑、交通和工业部门化石燃料燃烧

根据2020年数据显示，美国目前大部分碳排放主要来自化石燃料燃烧，为建筑（占能源系统碳排放的36%）、交通（占能源系统碳排放的36%）和工业（占能源系统碳排放的29%）部门各终端应用提供动力。化石燃料发电每年将排放14.5亿吨CO<sub>2</sub>，约占美国能源系统碳排放总量的32%。随着终端应用不断电气化，尤其是在交通和工业领域，电力对能源系统脱碳具有关键作用。因此，在未来转型中，将电力系统脱碳与电气化相结合，使得诸如太阳能等零碳电力资源对现有电力系统实现脱碳目标具有重要支撑作用。

### 二、构建快速脱碳电力系统需推进太阳能、风能、储能和电力基础设施建设，加快推进终端应用电气化

2020年美国太阳能发电装机容量约为80吉瓦，占美国电力需求的3%；按照“标准脱碳”（Decarb）情景预测<sup>6</sup>，到2035年预计太阳能发电累计装机容量将达到760-1000吉瓦，满足美国电力需求的37%-42%；到2050年预计太阳能发电累计装机容量将达到1050-1570吉瓦，满足美国电力需求的44%-45%。其中80%-90%的太阳能装机容量将由公共事业规模太阳能发电贡献，其余由分布式太阳能发电贡献。按照“脱碳电气化”（Decarb+E）情景预测<sup>7</sup>，2035年电力需求较2020年增长约30%，其中太阳能发电将满足美国电力需求的37%，剩余部分由其他零碳资源提供，包括风能（36%）、核能（11%-13%）、水力发电（5%-6%）、生物能源和地热（1%）；

<sup>5</sup> DOE Releases Solar Futures Study Providing the Blueprint for a Zero-Carbon Grid.

<https://www.energy.gov/articles/doe-releases-solar-futures-study-providing-blueprint-zero-carbon-grid>

<sup>6</sup> 标准脱碳情景预测利用太阳能（光伏和光热）、其他可再生能源（生物能源、地热、水力发电、陆上和海上风力发电）以及储能（电池和抽水蓄能）技术，使到2035年CO<sub>2</sub>排放量比2005年水平减少95%，到2050年实现净零排放。

<sup>7</sup> 与标准脱碳情景相比，这一情景增加了大规模的建筑和交通运输电气化，使得到2035年和2050年电网碳排放量较2005年水平减少约105%和155%。该情景中电力需求显著增加，电力系统对于美国能源系统脱碳具有更大作用。



到 2050 年，所有电力均由零碳能源提供，其中太阳能和风能占比最大，分别为 45% 和 44%。在 Decarb 和 Decarb+E 情景下，到 2050 年美国能源系统碳排放总量较 2005 年分别减少 40% 和 62%，通过进一步电气化、能源效率、脱碳燃料、包括太阳能工业热利用（SHIP）在内的可再生热生产以及碳捕集与封存等策略，实现能源系统净零排放（如图 1 所示）。在所有情景中，清洁发电、存储和传输、运营和维护以及其他方面的资本投资都将产生成本，此外技术成本、排放政策、电气化和需求侧灵活性都对电力系统的平均成本和边际成本产生影响。在 Decarb+E 情景中，需求侧灵活性抵消了更高电气化导致的平均成本增加，因此到 2035 年该情景下电力平均成本略低于 Decarb 情景。因此，太阳能和其他清洁技术的进步和灵活需求的结合，将促使电力系统碳排放大幅减少（约 95%），而边际成本几乎不增加。

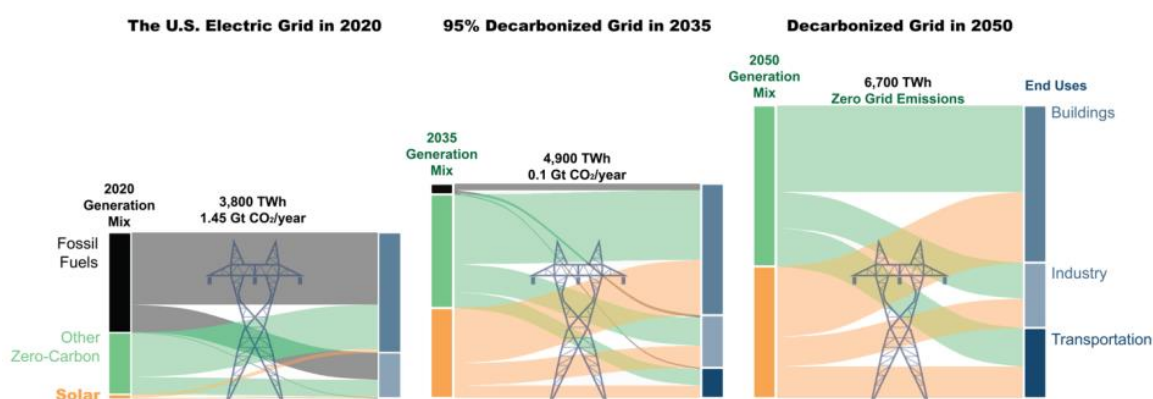


图 1 Decarb+E 情景下 2020 年、2035 年和 2050 年电力系统能源消耗占比变化

### 三、构建电力系统灵活脱碳需要开发先进电力电子转换装置以及将储能技术和清洁发电组合将结合

目前，太阳能技术广泛部署面临的巨大挑战是太阳能和风能这两种主要电源是不稳定的，基于波动性可再生能源本身性质，并不能在任何时候、在任何位点上产生满足需求的电力。此外，波动性可再生能源需通过逆变器转换装置将直流电转换为电网所需的交流电，长远来看，基于逆变器新型发电装置的需求将大于对传统发电机的需求。在一个主要基于逆变装置的电力系统中，保持电力资源充分利用、可靠性和弹性需要多样化的零碳发电组合、其他配套装置（如储能装置）和技术改进（如先进的逆变器）的共同支撑。此外，与储能技术相结合的小型太阳能装置，可在电力中断期为建筑或微电网持续供电，以增强电网弹性。

### 四、发展太阳能产业将促进能源体系收益与成本公平分配

以化石燃料为基础的电力系统为现代社会带来了诸多好处，但也产生了巨大的社会成本，包括公共健康损害、环境破坏和气候变化等。现有能源系统的收益和成本并没有得到公平的分摊，社会阶层较低的社区（如低收入社区、有色社区、面临短期气候变化风险的社区）承担了现有能源体系中不成比例的大部分成本，而享受到较少的收益，并在很大程度上被排除在现代化能源体系规划之外。与所有能源一

样，太阳能在各个国家、各地区范围内产生的社会效益远远超过其社会成本。然而，这些收益与成本的分配不一定是公平的。研究表明，通过各种干预措施（财政、社区参与、选址、政策、监管和弹性措施）将有助于解决屋顶光伏发电采用的公平性。此外，电力系统清洁转型将产生数十万个取代化石燃料行业的工作岗位，其中快速增长的太阳能相关行业将吸收大量化石燃料失业工人。

### **五、推进太阳能+储能一体化建设，将加快电力系统脱碳进程**

储能技术是实现深度脱碳和高比例太阳能装机的关键。在 Decarb+E 情景中，到 2050 年太阳能和储能累计装机容量大致相等。目前，太阳能集成储能方式大部分是短时储能（几小时内进行能量转换），但从 2035 年到 2050 年将推进长时储能应用示范。利用太阳能+储能可以将电力调度相对不灵活的光伏电站转变为具有与化石燃料发电装置相当的调度能力。在太阳能未来愿景中，储能技术将经历三个发展阶段：第一阶段（到 2030 年），储能装机容量年增长率约为 5 吉瓦/年，储能装置部署规模具有一定限制，反映出太阳能累计装机容量较低时，对储能装置的需求也相对较小。第二阶段（2030 年到 2040 年），储能装置将加速部署，这是由于太阳能和储能之间日益增长的协同作用，以及储能成本的下降和传统发电厂退役，该阶段储能方式仍以短时储能为主。第三阶段（从 2040 年开始），长时储能将变得越来越重要，该阶段储能方式将以长时储能为主。

### **六、推进太阳能和储能先进技术研发，降低太阳能光伏发电成本，促进太阳能市场快速扩张**

在过去十年中，受技术、经济和地缘政治综合影响，太阳能光伏成本急剧下降。DOE 考虑到能源存储、额外电力传输等基础设施成本，对太阳能光伏发电成本制定了一个新的目标。该目标要求持续降低太阳能光伏发电成本以及提高性能，实现到 2030 年太阳能光伏平准化度电成本（LCOE）由 2020 年的 46 美元/兆瓦时降至 20 美元/兆瓦时。新的太阳能电池技术将有效提高转换效率，同时更有效地利用少量的昂贵材料。制造业的进步将较过去更快的将新兴想法从实验室推向市场。新型太阳能技术集成了多种类型的太阳能电池（如晶体硅和钙钛矿），将有效提高能效并降低光伏系统中所有相关部件的成本，但与其他主要太阳能市场相比，美国的软性成本（包括安装人工、客户获取和许可成本）依然较高。太阳能技术的低成本本身并不能直接推动太阳能快速部署进程，太阳能市场的快速扩张还需大幅降低太阳能制造成本，建立更多的太阳能工厂。此外，储能技术还需进一步提升，包括开发热储能和电池储能系统相关技术。

### **七、太阳能将助力建筑、交通和工业等终端用能部门实现脱碳目标**

太阳能在建筑、交通和工业等各终端用能部门的短期和长期应用将促进能源终端应用电气化实现脱碳目标。太阳能对建筑行业脱碳最直接且具有长期影响，在

Decarb+E 情景中，到 2050 年太阳能发电量将支撑所有建筑终端电力需求的 30%。在交通部门，目前几乎完全依赖化石燃料供能，但随着轻型乘用车和一些中型和重型车辆电气化转型，将促使交通部门电力需求增加。因此，太阳能在交通领域脱碳作用将随着时间的推移而增加。在 Decarb+E 情景中，到 2050 年太阳能发电量将支撑交通运输终端电力需求的 14%。目前，太阳能电力在工业部门长期作用不太明确，主要是因为能源密集型工业过程脱碳的可能途径多样化。但对于工业部门脱碳可以利用太阳能热电厂产生热能取代传统化石燃料供热，研究表明，太阳能热可以满足大约 25% 的工业供热需求。因此，如图 2 所示，在建筑、交通和工业部门，太阳能作为零碳燃料将长期发挥作用，以实现终端应用脱碳目标。

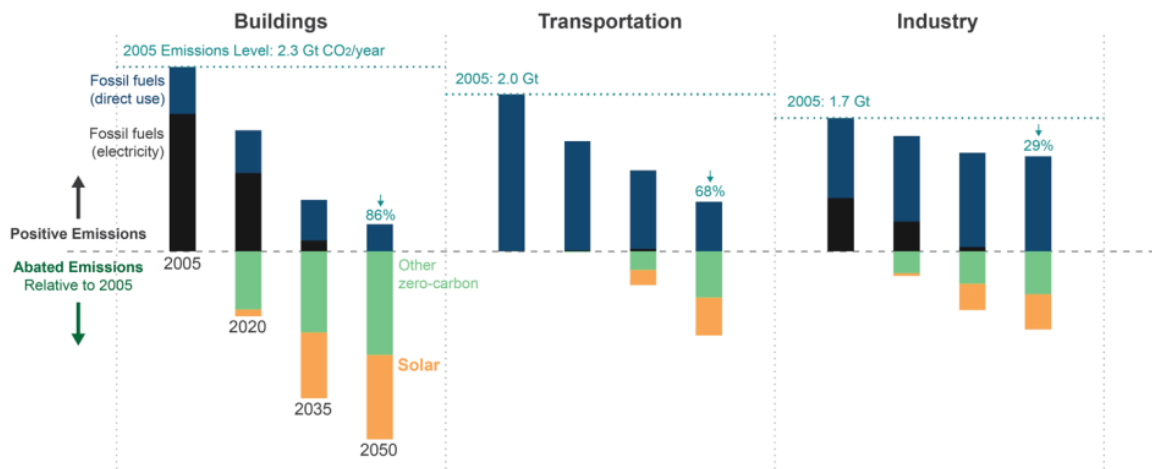


图 2 在 Decarb+E 情景中建筑、交通和工业部门碳减排情况对比

#### 八、充分保障太阳能供应链、实行循环利用经济模式、创造更多就业机会，以实现太阳能未来脱碳方案目标

太阳能未来方案与太阳能技术整个生命周期中材料的使用、太阳能供应链以及土地和水资源使用的相关挑战和机遇息息相关，所有这些因素都将影响环境和能源分配的公平性。基于对美国 and 全球太阳能技术制造相关潜在材料需求的分析表明，当材料实现回收和再利用时，材料供应将不会限制太阳能应用的扩张。未来最大限度利用可回收材料，将对能源和材料安全、社会和环境的影响、国内劳动力和制造业方面产生巨大效益，未来急需在技术上取得突破，并适应目前美国资源回收和循环经济趋势。为构建一个多样化、不过度依赖任何单一供应渠道的弹性光伏供应链，美国光伏制造业将通过提高自身自动化程度、利用国内制造特定组件的固有优势以及先进制造技术和自动化产品以提高其国际竞争地位。此外，太阳能发展面临的土地可用性同样也不是太阳能未来愿景的障碍，这是因为到 2050 年，太阳能扩张所需的土地面积只占美国地表面积的 0.5%，可以通过使用尚存的 10% 左右的储备用地得以满足，从而避免高价值土地的征用。与化石燃料和核能发电相比，太阳能和其他部分清洁能源发电技术对水需求量较少，在太阳能未来脱碳方案中，电力部门耗水

量将减少约 90%。最后，在劳动力方面，目前太阳能行业在美国已创造了 23 万个工作岗位，预计到 2035 年该行业将创造 50-150 万个工作岗位。此外，基于对现有清洁能源行业的研究表明，这些工作的工资往往高于社会平均工资，并且所需的教育门槛更低。

### 九、推动政策和市场长期支持，以加快实现太阳能未来脱碳方案

在既定政策情景中，到 2050 年电力行业将继续每年排放 9.3 亿吨 CO<sub>2</sub>，因此除了上述 7 项措施（前文 2-8）之外，实现太阳能未来愿景还需持续的政策和市场支持。由于政策采取的脱碳措施相较于仅凭市场自身调节对实现脱碳目标更为关键。越来越多的州政府和公共事业单位承诺到 2050 年之前实现电力系统脱碳。鉴于电力系统脱碳的边际成本随着接近 100% 脱碳而增加，实现这一目标将需要坚定且长期的政治支持。政策支持包括通过研发投资，推动太阳能基础设施的快速部署以及发电成本的降低，加速技术创新，并确保清洁能源转型过程中收益公平分配。

（汤匀）

## DOE 资助 6470 万美元开发生物燃料助力航空海运脱碳

9 月 9 日，美国能源部（DOE）宣布向 5 个领域 22 个项目共资助 6470 万美元用于生物燃料创新研发，助力飞机和船舶等重型运输部门脱碳<sup>8</sup>。该项目计划利用农作物废弃物、食物残渣和藻类等有机材料催化转化生产生物燃料，作为一种低碳燃料取代目前重型运输部门所使用的石油燃料，将加速美国到 2050 年实现净零排放目标。具体内容如下：

### 领域一：生物技术开发和推广

该领域共投入 3300 万美元支持 11 个项目，包括：①由 Alder 能源公司承担，开发利用再生农作物生产无碳可持续航空燃料技术；②由美国燃气技术研究院承担，开发利用二氧化碳或沼气生产生物燃料的新型装置；③由美国燃气技术研究院承担，进行气化炉（R-GAS）生物燃料先进气化项目示范；④由全球 Algae 创新公司承担，研发藻类栽培过程直接空气碳捕集技术；⑤由 Lanza 科技公司承担，研发利用二氧化碳低成本生产可持续航空燃料技术；⑥由 MicroBio 工程公司承担，研发利用废水生产清洁水、可持续航空燃料和可再生柴油技术；⑦由德州农工大学农业生命研究院承担，开发生物可降解塑料产品，研发具有经济效益的可再生航空燃料技术；⑧由马里兰大学帕克分校承担，研发生物燃料液化和萃取的近临界流体处理技术；⑨由 D3Max 公司承担，利用国家可再生能源实验室（NREL）的生物脱酰技术和精炼技术，研发玉米秸秆生产可持续航空燃料技术；⑩由 SkyNRG 美洲公司承担，进行垃圾填埋场废气转化为超低碳强度可持续航空燃料项目示范；⑪由 T2C 能源公司承

<sup>8</sup> DOE Announces Nearly \$65 Million for Biofuels Research to Reduce Airplane and Ship Emissions.  
<https://www.energy.gov/articles/doe-announces-nearly-65-million-biofuels-research-reduce-airplane-and-ship-emissions>

担，进行沼气转化为可再生燃料项目示范及推广。

#### **领域二：开发具有经济效益和高产量的纤维素清洁糖化技术**

该领域共投入 560 万美元支持 2 个项目，包括：①由 AVAPCO 公司承担，开发糖为原材料制备生物燃料的糖化技术；②由国家可再生能源实验室承担，研发玉米秸秆纤维原料低成本、高转化效率的脱酰、精炼制备生物燃料技术。

#### **领域三：研发生物质转化与分离技术**

该领域共投入约 1240 万美元支持 4 个项目，包括：①由 Quasar 能源集团承担，研发高固相原位回收技术以及下一代生物质厌氧消化技术；②由阿彻丹尼尔史密斯公司承担，研发利用膜萃取技术进行生物丁醇连续发酵反应；③由 Lignolix 公司承担，研发木质素的液相色谱法定量表征技术；④由 RAPID 制造研究所承担，进行有机酸分离生物处理技术的物理性质数据和模型构建。

#### **领域四：木质建筑先进节能供热技术**

该领域共投入约 410 万美元支持 2 个项目，包括：①由俄勒冈州立大学承担，开发带有自动控制的空气强制燃烧系统，以减少木质建筑加热装置的碳排放；②由阿拉巴马大学承担，在整个供热周期内，进行清洁燃烧技术研发，并开发高效和全自动木质建筑加热装置。

#### **领域五：进行可再生天然气研发和示范**

该领域共投入 960 万美元支持 3 个项目，包括：①由弗吉尼亚大学承担，利用先进的镍基催化剂，研发将沼气转化为可再生天然气的低温 CO<sub>2</sub> 甲烷化技术；②由华盛顿大学承担，研发在厌氧消化池中通过 CO<sub>2</sub> 原位转化生物甲烷技术；③由 Summit 公共事业公司承担，开发可再生发电制沼气（PtG）技术，以及对生物甲烷化技术进行可行性分析和市场论证。

（汤匀）

## **英国资助生物质原料选育与生产创新研究**

8 月 25 日，英国商业、能源和工业战略部（BEIS）宣布向 8 个领域共 24 个生物质原料创新项目提供 400 万英镑资助，以支持可持续生物质原料的培育、种植优化和生产创新研究，加速清洁能源技术创新和商业化应用<sup>9</sup>。具体项目如下：

### **1、开发藻类机械化种植、生长条件优化和生物量提高方法**

该领域主要资助 5 个项目：①优化英国近海海洋藻类生物质生产工艺，主要由 SeaGrown 承担；②利用啤酒厂和乳品工业过程中的废水，将其与细菌和微藻共培养以提高英国的微藻生物量，主要由 Green Fuels Research 承担；③利用威士忌生产过程中的副产物提高微藻生物量并减少碳排放，主要由 Phycofoods 公司承担；④利用

<sup>9</sup> Biomass Feedstocks Innovation Programme: successful projects. <https://www.gov.uk/government/publications/apply-for-the-biomass-feedstocks-innovation-programme/biomass-feedstocks-innovation-programme-successful-projects>

二氧化碳封存技术综合生产微藻类生物质，主要由 SEaB Power 公司承担；⑤从废弃的地热矿区提取矿井水，并利用这些热量为提高微藻生物量提供最佳的生长条件，主要由 Impact Laboratories 承担。

## **2、开发芒草品种选育、种植工艺优化、精准农业系统应用的新方法**

该领域主要资助 4 个项目：①利用基因组选择加速英国高产、有弹性的芒草品种选育工艺，主要由阿伯里斯特威斯大学承担；②开发新的流动造粒技术，优化芒草品种，主要由 White Horse Energy 承担；③利用现代化农业系统（如无人机、变量作业车辆、传感器和通信系统）实现恶劣环境下芒草种植，主要由格拉斯哥大学电力与能源研究部承担；④通过种植机械化和利用大数据提升芒草种植效率，实现净零排放目标，主要由 Terravesta Farms 公司承担。

## **3、开发大麻繁育种植、收获与利用新方法**

该领域主要资助 1 个项目：①2020-2030 年间加速推进工业大麻的繁育、种植、收获和利用，主要由约克大学承担。

## **4、开发短轮伐期柳树育种、种植与收获新方法**

该领域主要资助 4 个项目：①加速推进柳树育种和新品种的种植，主要由 Rothamsted Research 承担；②通过增加短轮伐期柳树供应链潜力，提升作物种植和收获周期，主要由 Rickerby Estates 承担；③开发无土栽培技术，主要由萨里大学环境与可持续发展中心承担；④通过研发新型收割机、拖拉机和挂机等标准机械收割和种植装置，提高生物原料产量，主要由 ECCL 2020 公司承担。

## **5、开发蕨类、沼地作物、树篱等半野生作物利用新方法**

该领域主要资助 3 个项目：①利用无人机、GPS 等辅助技术进行野外环境作物收获，主要由 Hennock International 承担；②提高现有沼泽地生物量收获和商业化产品生产，主要由 Teesdale 环境咨询公司承担；③开发新型树篱剪切机，实现树篱统一切割备用，主要由 J George 公司承担。

## **6、提高林业生物质资源潜力**

该领域主要资助 3 个项目：①开展低产林业资源整合一体化建设路径研究，主要由 Mostex 国际解决方案公司承担；②开发一种可生物降解的生物树木遮蔽物，以提高种植可持续性，主要由 NMC2 公司承担；③利用地理空间数据技术，确定林业生物质生产最佳种植地点，主要由 Forest Creation Partners 承担。

## **7、进行作物无性繁殖以扩大能源作物生产**

该领域主要资助 1 个项目：①推广无性繁殖技术，评估各种不同作物和品种生产和利用价值，为种植者提供更广泛的作物选择，主要由新能源农场承担。

## **8、构建多地联动示范平台**

该领域主要资助 3 个项目：①设计开发一个全英国范围内、多地点的生物质原

料生产创新示范平台，解决目前英国国内生物质大规模供应障碍，主要由英国生态与水文研究中心承担；②评估和比较与第二代能源作物<sup>10</sup>有关的创新项目，主要由 NIAB 公司承担；③开发新型工具和资源以确保英国生物质原料项目能够快速实施部署，主要由 Reheat 公司承担。

(汤匀)

## 钌基催化剂实现高性能氨燃料可逆质子陶瓷燃料电池

质子陶瓷燃料电池 (PCFC) 比其他类型固体氧化物燃料电池具有更低的工作温度，近年来越来越受到关注。当进行逆向运行时，大多数 PCFC 也可用作质子陶瓷电解槽来产生氢气。研究表明，在可逆运行时，当电流密度达到 2000 mA/cm<sup>2</sup>、运行温度在 500-600°C，法拉第效率可接近 100%。相比于氢，氨在常温下具有更高体积能量密度，且储运更为方便。PCFC 相对较低的运行温度使其可使用氨作为燃料，因此可充分发挥两者的优势。

中国科学院宁波材料技术与工程研究所朱良柱研究员和美国科罗拉多矿业学院 Ryan O'Hayre 教授、Neil P. Sullivan 教授联合研究团队将新型电化学合成氨的钌基催化剂与 PCFC 相结合，在 650°C 运行温度下制备的氨燃料可逆 PCFC 峰值功率密度达到 877 mW/cm<sup>2</sup>，450-650°C 范围内性能达到同类型氢燃料 PCFC 的 93%-98%。研究人员制备了超高密度 (~100%) 和超薄 (4 微米) 的质子陶瓷电解质层 BaCe<sub>0.7</sub>Zr<sub>0.1</sub>Y<sub>0.1</sub>Yb<sub>0.1</sub>Ni<sub>0.04</sub>O<sub>3-δ</sub> (BCZYYbN)，基于该电解质制造了阳极支撑的可逆 PCFC。同时，利用近期开发的新型钌基催化剂 Ru-(BaO)<sub>2</sub>(CaO)(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) (Ru-B2CA) 进行氨合成/裂解过程。在与 PCFC 结合时，为了促进质量传输并尽量降低氨合成/裂解反应器中的压力变化，研究人员将 Ru-B2CA 与绝缘纤维混合，制成组分均匀分布的催化剂粉末，Ru-B2CA 核壳结构具有薄且均匀的 Ru 涂层，有效增加了 Ru 金属的表面活性位点，提升了催化活性。在发电模式下，氨燃料被催化裂解为氢气 (H<sub>2</sub>) 和氮气 (N<sub>2</sub>)，H<sub>2</sub> 被电化学氧化产生电力；在储能模式下，水电解生成 H<sub>2</sub>，进而电化学合成氨。与此前大多数氨燃料 PCFC 研究不同，研究人员采用了分离式反应器设计，将发电/水电解制氢和氨裂解/合成氨分开，确保在 600°C 下高效水解制氢，而在 400-500°C 下最大化合成氨生成速率。同时，该设计还简化了系统结构和制造流程，避免将非导电的钌基催化剂 Ru-B2CA 直接集成至可逆 PCFC 电极导致的高成本和性能损失。得益于上述设计，发电模式下使用 H<sub>2</sub> 燃料和氨燃料在 650°C 下的峰值功率密度分别达到 944 mW/cm<sup>2</sup> 和 877 mW/cm<sup>2</sup>，且在 600°C 下相对稳定运行长达 1250 小时。另外，Ru-B2CA 催化剂的加入显著改善了电池的降解。在储能模式下，研究人员在 75% 蒸汽浓度测量了 500-1000 mA/cm<sup>2</sup> 下的制氢法拉第效率，其结果接近

<sup>10</sup> 第一代能源作物主要包括小麦、甘蔗、大豆、油菜等人们普遍使用的粮食、经济作物；第二代能源作物主要包括多年生草本和快速生长树种等光合效率高、年产生物量大的植物。

100%。在常压下，氨生成速率超过  $1.2 \times 10^{-8} \text{ mol/cm}^2/\text{s}$ ；在 12.5 个大气压下，氨生成速率超过  $2.1 \times 10^{-6} \text{ mol/cm}^2/\text{s}$ 。

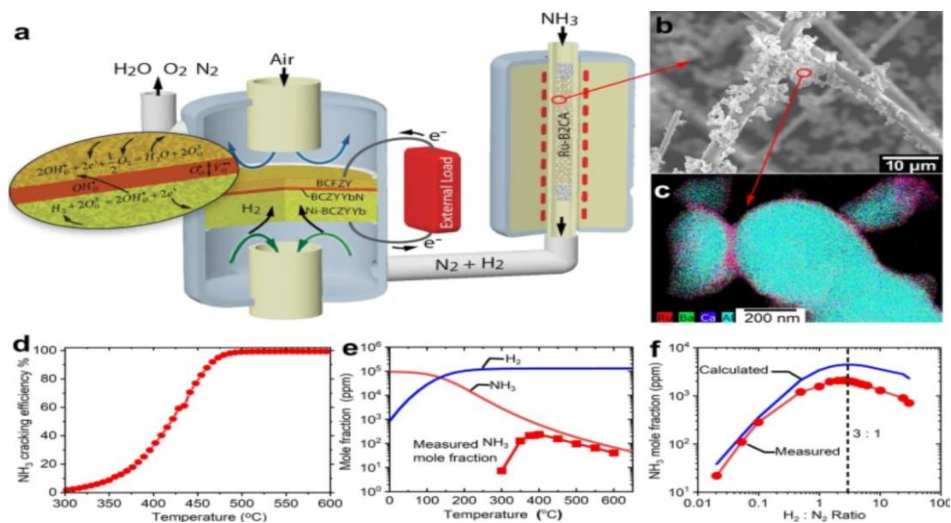


图 1 分离式氨发电及制氨反应器设计和 Ru-B2CA 催化剂性能表征

该项研究利用新型钌基催化剂 Ru-B2CA 作为氨合成/裂解催化剂制备了可逆的氨燃料 PCFC。在  $650^\circ\text{C}$  的运行温度下，最大发电功率达到  $877 \text{ mW/cm}^2$ ，表现出该温度下最佳氨燃料 PCFC 运行性能；在逆向运行模式下具有卓越的蒸汽电解性能，法拉第效率接近 100%，且在环境压力下具有高氨产率。该项研究为开发高效、稳定的氨燃料可逆 PCFC，推进氢能的大规模应用提供了有前景的技术方向。研究成果发表在《*Communications Chemistry*》<sup>11</sup>。

(岳芳)

<sup>11</sup> Liangzhu Zhu, Chris Cadigan, Chuanchen Duan. et al. Ammonia-fed reversible protonic ceramic fuel cells with Ru-based catalyst. *Communications Chemistry*, 2021. DOI: 10.1038/s42004-021-00559-2



# 低碳化多能融合

## 韩国国会通过《碳中和与绿色增长框架法案》

8月31日，韩国国会通过《碳中和与绿色增长框架法案》，自此韩国成为全球第14个将2050年碳中和愿景及实施体系纳入法律的国家<sup>12</sup>。法案提出到2030年排放量较2018年下降35%或更多的目标，并规定实施2050年碳中和愿景的程序，成立碳中和委员会并设计碳中和实施框架。该法案还包括对气候变化的评估、气候应对基金和能源公正过渡等各种政策的制定。具体内容如下：

**1、法案明确规定，2050年实现碳中和是韩国的国家愿景**，并在法律上规定了实现这一愿景所需的程序。这些程序主要涉及国家战略、中长期温室气体减排目标、框架计划以及审查执行情况等各种细节的制定。

**2、法案规定了实现2050年碳中和愿景的中期目标，即到2030年温室气体排放量在2018年的基础上减少35%或更多。**

**3、法案实行参与式治理，鼓励青年、工人和当地居民等广泛社会成员参与**，而以前减排措施实施范围仅限于相关专家和企业。2020年5月成立的2050碳中和委员会被赋予具有法律地位的机构。

**4、法案采用气候影响评估模型**，评估国家重大计划和实施项目对气候的影响；引入气候响应预算，在起草国家预算时设定减排目标；**设立新的气候应对基金**，以支持工业部门清洁低碳转型。

**5、法案包括了实现能源公正过渡所需的政策措施**，旨在保护在能源清洁转型过程中受影响的地区和公民。在特殊地区设立支援中心，以保护目前从事煤炭、内燃机汽车等产业的劳动者改善其未来生活环境。

**6、法案建议从中央集权制过渡为地区分权制**，将中央和地方计划以及地方委员会共同列为执行机构的组成部门；发展中央和地方政府之间的互动和协作体系，以便今后信息交流和反馈；建立碳中和城市联盟等地方政府合作机制。

（汤匀）

<sup>12</sup> Korea's National Assembly. Framework Act on Carbon Neutrality and Green Growth. <https://eng.me.go.kr/eng/web/board/read.do?jsessionid=iF8-s6e3-DGf9uWSEZvOk3xP.mehome1?menuId=461&boardMasterId=522&boardId=1473610>

## 澳大利亚 CSIRO 发布碳利用技术路线图

8月13日，澳大利亚联邦科学与工业研究组织（CSIRO）发布《二氧化碳利用路线图》<sup>13</sup>，指出通过开发新兴碳捕集和利用（CCU）技术，支持澳大利亚产业发展和碳减排。该路线图提出了可产生重大影响的4项CCU技术：二氧化碳（CO<sub>2</sub>）的直接利用；CO<sub>2</sub>矿物碳化；CO<sub>2</sub>转化为化学品和燃料；CO<sub>2</sub>的生物转化。针对上述领域，提出了到2040年扩大CCU规模的分阶段部署优先事项，以及需要长期投入的潜在应用技术。详情如下：

### 一、CO<sub>2</sub>的直接利用

#### 1、扩大规模的优先事项

**（1）立即行动（2020-2025年）：**①探索碳排放点源的长期供应模式；②确定农业温室集成点源碳捕集的候选场址；③示范在承购商现场捕集供应CO<sub>2</sub>。

**（2）短中期（2025-2030年）：**①探索中压CO<sub>2</sub>的长期供应模式；②示范集成农业温室和点源碳捕集以供应CO<sub>2</sub>和热量的方式；③将新技术捕集的CO<sub>2</sub>与现有来源混合。

**（3）长期（2030-2040年）：**①为小型用户（如酒吧和餐馆）供应商业化碳捕集产品；②小型温室的CO<sub>2</sub>供应示范；③CO<sub>2</sub>点源碳捕集的商业规模集成。

#### 2、研发及部署重点

**小型模块化碳捕集、直接空气碳捕集（DAC）和净化工厂：**①开发模块化或小型碳捕集技术，用于中小型排放源的减排，并可将捕集的CO<sub>2</sub>出售至现有市场；②开发与最终用户（例如CCU中心）位于同一地点的小型DAC系统，以降低CO<sub>2</sub>运输成本；③开发模块化CO<sub>2</sub>净化技术。

### 二、CO<sub>2</sub>矿物碳化

#### 1、扩大规模的优先事项

**（1）立即行动（2020-2025年）：**①示范CO<sub>2</sub>小规模矿物碳化技术；②确定CO<sub>2</sub>矿物碳化用户群；③示范用于低风险无筋混凝土的CO<sub>2</sub>固化和衍生骨料；④将CO<sub>2</sub>衍生骨料整合到一个或多个混凝土工厂的混凝土混合物中；⑤确定与CO<sub>2</sub>来源和矿产位置相匹配的基础设施要求。

**（2）短中期（2025-2030年）：**①探索中压CO<sub>2</sub>的长期供应模式；②示范集成农业温室和点源碳捕集以供应CO<sub>2</sub>和热量的方式；③将新技术捕集的CO<sub>2</sub>与现有来源混合；④为碳排放源和最终用户确定CO<sub>2</sub>矿物碳化商业产品；⑤示范用于中风险结构混凝土（如住房）的CO<sub>2</sub>固化和衍生骨料。

**（3）长期（2030-2040年）：**①实现CO<sub>2</sub>制碳酸盐产品的更大规模应用；②制

<sup>13</sup> CO<sub>2</sub> Utilisation Roadmap. <https://www.csiro.au/en/work-with-us/services/consultancy-strategic-advice-services/CSIRO-futures/Futures-reports/CO2-Utilisation-Roadmap>

定各类 CO<sub>2</sub> 矿物碳化硅酸盐骨料和混凝土的行业标准。

## 2、CO<sub>2</sub> 矿物碳化产品及其应用领域

①**碳酸镁**：用于水泥/混凝土添加剂、防火建筑材料、食品加工、化妆品、绝缘材料、肥料、增白剂；②**碳酸钙**：用于钢铁制造、沥青添加剂、稳定土壤、生产粘结砖块的砂浆、化学品（造纸、油漆涂料）、废物处理、食品和营养剂（牙膏、膳食补充剂、动物饲料）；③**二氧化硅（作为副产品）**：水泥/混凝土添加剂、玻璃生产、水过滤、陶瓷生产、油漆和涂料、肥料、轮胎。

## 三、CO<sub>2</sub> 转化为化学品和燃料

### 1、扩大规模的优先事项

**（1）立即行动（2020-2025 年）**：①示范利用化石燃料和可再生能源来源氢气的甲烷生产设施；②进行电力合成燃料设施选址的可行性研究；③进行甲醇制烯烃（MTO）合成工厂的可行性研究；④扩大 CO<sub>2</sub> 合成烯烃需求；⑤示范分布式合成天然气工厂。

**（2）短中期（2025-2030 年）**：①在工业中心建立 CO<sub>2</sub> 合成甲醇规模化设施；②扩大 CO<sub>2</sub> 合成甲醇需求；③示范将电力合成燃料加入化石燃料供应链；④示范 MTO 合成工厂；⑤示范将基于 CO<sub>2</sub> 的聚合物原料集成到现有聚合物生产工厂中；⑥建造合成天然气工厂并加入现有供应。

**（3）长期（2030-2040 年）**：①实现最佳规模的 CO<sub>2</sub> 合成甲醇设施运行；②确保满足大型合成甲醇用户需求；③探索合成甲醇出口潜力；④建立用于机场的电力合成燃料最佳规模设施；⑤建立 MTO 最佳规模设施；⑥探索合成烯烃的出口潜力；⑦建立合成天然气工厂的最佳案例。

### 2、研发及部署重点

**（1）技术改进、集成和优化**。①继续研究用于合成过程的新材料和催化剂，以进一步降低成本并减少原料投入和能耗。②开发可能降低成本的新工艺，包括新的直接合成路线。③直接合成更长的烃链，以促进成本降低并提高 CO<sub>2</sub> 转化为燃料的整体效率。

**（2）能效评估**。用于化学品和燃料的 CCU 技术将需要转化大量 CO<sub>2</sub> 和氢气，并进一步加工以最终实现低排放产品。需更好地评估各工艺步骤以及整个价值链的能耗和效率，以确保资源的最适当分配。

**（3）开发适用于燃料和化学品合成的新兴点排放源**。随着新工业工艺的发展，有可能产生适合转化为化学品和燃料的新烟气混合物。例如，以氢气替代煤炭的绿色炼钢工艺产生的烟气可能适用于甲醇生产。需进一步研究新工业系统如何与 CCU 集成，以降低生产成本和减少排放。

**（4）开发突破性新兴技术**。开发新兴合成路线和系统设计，以显著节省能耗和

成本。主要技术路线包括：①CO<sub>2</sub>直接加氢制甲醇，当前技术成熟度（TRL）为6-7级；②CO<sub>2</sub>光催化制甲醇，当前TRL为2-4级；③CO<sub>2</sub>固体氧化物电解制甲醇，当前TRL为1级；④固体氧化物电解制氢及合成甲醇集成系统，当前TRL为5-6级；⑤固体氧化物电解制氢及费托工艺制合成气耦合系统，当前TRL为7级；⑥CO<sub>2</sub>光电化学制合成气，当前TRL为2-3级；⑦吸收剂捕集CO<sub>2</sub>和电解制合成气一体化系统，当前TRL为2-3级；⑧太阳能热化学制燃料，当前TRL为4级；⑨CO<sub>2</sub>直接合成乙烯，当前TRL为2-3级。

#### 四、CO<sub>2</sub>的生物转化

##### 1、扩大规模的优先事项

(1) 立即行动（2020-2025年）：①进行可行性研究以了解CO<sub>2</sub>生物转化利基产品和大宗产品；②示范用于转化少量CO<sub>2</sub>的生物系统。

(2) 短中期（2025-2030年）：①将示范的生物反应器集成到现有工厂或工业中心。

(3) 长期（2030-2040年）：①针对碳排放源开发商业生物反应器产品；②根据市场需求扩展生物转化产品应用。

##### 2、研发及部署重点

(1) 基因工程和合成生物学。虽然目前TRL较低，但合成生物学可以提高生产效率，并创造出能够生产各种高价值产品的微生物品种。通过基因工程和合成生物学研究，定制更高效的微生物并扩大其高价值产品的生产范围。

(2) 扩大生物系统。许多系统已在实验室环境中得到验证，下一步需进行大规模系统示范。

(3) 开发新兴技术。具有潜力的技术有生物电化学系统，其在电化学和生物混合系统中通过人工光合作用将CO<sub>2</sub>转化为有机小分子。该技术目前处于早期实验室研究水平。

#### 五、需长期投入的碳利用技术

除了接近商业应用的碳利用技术之外，还有许多新兴应用值得进行长期投入，主要包括两类：①利用CO<sub>2</sub>产品替代现有制造业原料，包括替代石化原料制成的碳纤维和炭黑，以及直接开采的石墨；②将CO<sub>2</sub>用于新工艺或目前难以合成的新产品，如生产石墨烯和碳纳米管，以及回收电池金属的新工艺。

具体包括如下方面：①CO<sub>2</sub>制碳纤维，替代当前由石化产品的聚丙烯腈或沥青生产，潜在应用包括航空航天、汽车和可再生能源领域的复合材料，以及碳纤维风力涡轮机叶片；②CO<sub>2</sub>制炭黑，替代当前由石化产品生产，潜在应用包括轮胎、橡胶、塑料，少量用于可再生能源技术；③CO<sub>2</sub>制石墨，替代当前由矿石生产，潜在应用包括电池、燃料电池、风力涡轮机的复合材料；④CO<sub>2</sub>制石墨烯，替代当前由

各种机械和化学方法生产，潜在应用包括增强锂离子电池性能、石墨烯电池或超级电容器、风力涡轮机的复合材料；⑤**CO<sub>2</sub> 制碳纳米管**，替代当前由石墨或含碳气体生产，潜在应用包括太阳电池和储能电池等电气应用，以及用于储氢；⑥**电池回收**，利用 CO<sub>2</sub> 将报废电池中的锂、钴等贵金属转化为碳酸盐，用于进一步回收；⑦**CO<sub>2</sub> 制纳米金刚石**，替代当前由爆轰合成生产，潜在应用包括医学影像和检测、电化学电镀、电子和传感器。

(岳芳)

## 英国资助 2.2 亿英镑促进碳密集型行业清洁低碳转型

9 月 22 日，英国政府宣布将资助 2.2 亿英镑促进污染最严重的碳密集型行业清洁低碳转型<sup>14</sup>，该项措施将支持开发绿色减排创新技术，包括碳捕集和热回收技术的部署，以帮助相关企业降低用能成本，加速工业部门减排，实现 2050 年净零排放目标。

该项资助计划将帮助英格兰、威尔士和北爱尔兰的相关企业（包括制药、钢铁、造纸、食品和饮料行业）简化工业生产流程，提高能源效率，减少碳排放。相关企业将采取一系列广泛的减排措施，包括：①安装更高效节能的锅炉、电机和热泵，以取代其燃气锅炉和蒸汽轮机；②开发工业碳捕集、燃料转换和废热回收再利用技术，实现工业部门减排可持续发展目标。

目前，英国工业部门碳排放量占全国碳排放总量的 16%，到 2035 年工业部门需减少三分之二的碳排放量，才能使英国到 2050 年前实现净零排放目标。作为英国绿色工业革命的一部分，该项措施将对碳密集型行业进行清洁低碳转型发挥至关重要的作用，不仅促进相关企业减少对环境的破坏作用，还将节省用能开支，并提供大量就业岗位。

(汤匀)

## 英国投入 9170 万英镑支持开发低碳汽车技术

8 月 18 日，英国商业、能源和工业战略部(BEIS)宣布通过先进推进中心(APC)合作研发竞赛向 4 个项目资助 9170 万英镑<sup>15</sup>，支持开发创新低碳汽车技术，降低交通行业碳排放。详细信息如下：

**1、牛津 BMW-UK-BEV 项目。**该项目拟资助 2620 万英镑，开发一种与燃油汽车里程相当的电动汽车电池，以消除用户对电动汽车续航能力的担忧。

<sup>14</sup> £220 million to help big-emitting industries become cleaner and greener. <https://www.gov.uk/government/news/220-million-to-help-big-emitting-industries-become-cleaner-and-greener>

<sup>15</sup> £91 million funding for low carbon auto tech including hydrogen engines and ultra-fast charging batteries. <https://www.gov.uk/government/news/91-million-funding-for-low-carbon-auto-tech-including-hydrogen-engines-and-ultra-fast-charging-batteries>

2、伯明翰 **CELERITAS** 项目。该项目拟资助 970 万英镑，为电动和燃料电池混合动力汽车开发可在 12 分钟内快速充电的电池。

3、达灵顿 **BRUNEL** 项目。该项目拟资助 1460 万英镑，开发一种新型零排放氢燃料发动机，助力重型货车脱碳。

4、纳尼顿 **REEcorner** 项目。该项目拟资助 4120 万英镑，重新设计轻型和中型商用电动汽车结构，将转向、制动、悬架和动力系统整合至轮拱内，从而提高车辆自主能力、存储空间和设计灵活性。

(岳芳)

## DOE 资助 2700 万美元研发储能电池技术

9 月 23 日，美国能源部 (DOE) 宣布在“储能大挑战”计划框架下向 4 个液流电池技术研发和部署项目资助 1790 万美元，以扩大液流电池和长时储能系统的制造规模<sup>16</sup>，对实现十年内电网规模储能成本降低 90% 的目标至关重要。此外，DOE 电力储能项目办公室启动了一项 900 万美元的新计划，即“储能促进社会公平”计划<sup>17</sup>，以帮助社区更好利用储能技术，提高能源弹性、降低用能成本。具体内容如下：

### 1、开发液流电池长时储能技术（资助总金额 1790 万美元）

(1) 开发和部署液流电池高效生产工艺。项目资助金额为 419 万美元，由 Largo 清洁能源及其合作伙伴共同承担。

(2) 开发与制造金属电极和双极板卷对卷 (R2R) 技术。项目资助金额为 499 万美元，由 Tread Stone 技术公司及其合作伙伴共同承担。

(3) 开发金属螯合物液流电池系统，提升现有液流电池技术性能和可扩展性，并降低成本。项目资助金额为 414 万美元，由 OTORO 能源公司及其合作伙伴承担。

(4) 开发可扩展、具有成本效益、有机液流电池连续生产工艺，以强化美国国内液流电池制造生态系统建设。项目资助金额为 458 万美元，由 Quino 能源公司及其合作伙伴共同承担。

### 2、储能促进社会公平 (ES4SE) 计划（资助总金额 900 万美元）

该计划由西北太平洋国家实验室 (PNNL) 和桑迪亚国家实验室共同发起，旨在使城市、农村和部落中的社区能够将储能技术作为实现社区繁荣的可行途径。符合条件的社区将获得技术援助，并作为新的储能项目开发和部署的潜在发展地区。

(汤匀)

<sup>16</sup> Department of Energy Invests \$17.9 Million in Long-Duration Energy Storage Technologies.

<https://www.energy.gov/eere/articles/department-energy-invests-179-million-long-duration-energy-storage-technologies>

<sup>17</sup> Energy Storage for Social Equity Initiative. <https://www.pnnl.gov/projects/energy-storage-social-equity-initiative>

## 美国建成全球首艘 100%氢燃料电池动力商用船舶

8月19日，全球首艘100%氢燃料电池动力商用船舶建成，并在美国西海岸为正式运营做准备<sup>18</sup>。该船舶由位于华盛顿州贝灵翰姆的船舶制造商 All American Marine (AAM) 公司制造，将作为美国第一艘氢燃料电池船舶在加州湾区运营，以展示零排放氢燃料电池技术在海上应用的商业化途径。

该船配备了由零排放工厂 (Golden Gate 零排放海运公司) 提供的氢燃料电池组件，该氢燃料电池组件包括 360 千瓦的燃料电池和一个重达 246 千克的储氢罐。此外，该系统还集成了由 XALT 提供的 100 千瓦时锂离子电池和 BAE 系统提供的 2 组 300 千瓦电力推进系统。氢燃料电池动力系统具有与柴油相当的动力、操作灵活性、零碳排放和维护简便的优势。

(汤匀)

## 可工业化制造高效纤维锂电池实现超 10 万次弯曲折叠

可穿戴电子设备的蓬勃发展对柔性电池提出了新的需求，柔性纤维电池便是良好的候选技术之一。然而，迄今为止获得的纤维电池长度只有几厘米，导致整个电池能量密度太低 ( $<1 \text{ Wh/kg}$ )；且如此短的纤维锂离子电池也无法实现实际应用，因为连接它们的附件会损害纤维的能量密度和稳定性。因此，探索制备高能量密度长纤维锂离子电池是本领域研究热点前沿。

上海复旦大学 Huisheng Peng 教授课题组牵头的联合研究团队设计制备了可以利用成熟商业化制造工艺制备的钴酸锂/石墨纤维锂离子电池，长度达到了米级，获得了  $85.69 \text{ Wh/kg}$  的能量密度，500 余次循环后仍可保持 90% 以上的初始容量，且经过 10 万次弯曲后依旧可以保持超过 80% 的初始容量，展现出了良好的长程稳定性、机械柔韧性和商业应用潜力。研究人员将锂钴氧化物 (LCO) 涂覆在商用铝纤维上作为正极，将石墨涂覆在铜纤维上作为负极，随后与商业隔膜组装成完整的柔性纤维锂电池。为了对比研究，研究人员同时制造了不同长度 (0.1 m、0.2 m、0.5 m 和 1 m) 的纤维锂离子电池，并测量了其电化学性能。电化学阻抗谱测试结果显示，电池的内阻和纤维长度具有双曲余切函数关系，随着长度的增加，内阻首先下降，然后趋于平稳。电池比容量密度测试显示，电池在长度为 1 m 的时候达到最佳，获得了  $85.69 \text{ Wh/kg}$  放电比容量，比传统实验室工艺制备的纤维锂电池能量密度高出 2 个数量级。由于单个纤维的能量密度还不足以为大型电子设备供电，研究人员利用工业化生产工艺制备了以上述纤维锂电池为单元的大面积织物 (100 根纤维电池构成)，使得纤维锂离子电池纺织品具有足够的能量来为大型电子设备供电。在 0.1C 倍率下

<sup>18</sup> AAM + SWITCH Maritime Announce the Launch of Sea Change, the World's First Commercial Vessel Powered 100% by Hydrogen Fuel Cells. <https://www.allamericanmarine.com/hydrogen-vessel-launch/>

获得了超过 160 mAh/g 的比能量，且 500 余次循环后电池仍可保持 90.5%初始比容量，库伦效率接近 100% (99.8%)，表现了良好的长程稳定性。作为纤维电池，一个关键的性能指标是抗弯曲拉伸能力，研究人员以 1 cm 的曲率半径对纤维织物电池进行了高达 10 万次的弯曲，结果显示电池经过上述弯曲实验后仍然保持了 80%以上的初始比容量，表现出强劲的机械柔韧性，具备作为柔性可穿戴电子设备电源的良好潜能。进一步的技术经济性分析可知，该纤维电池每米成本不到 0.05 美元，具有较强的经济竞争力。

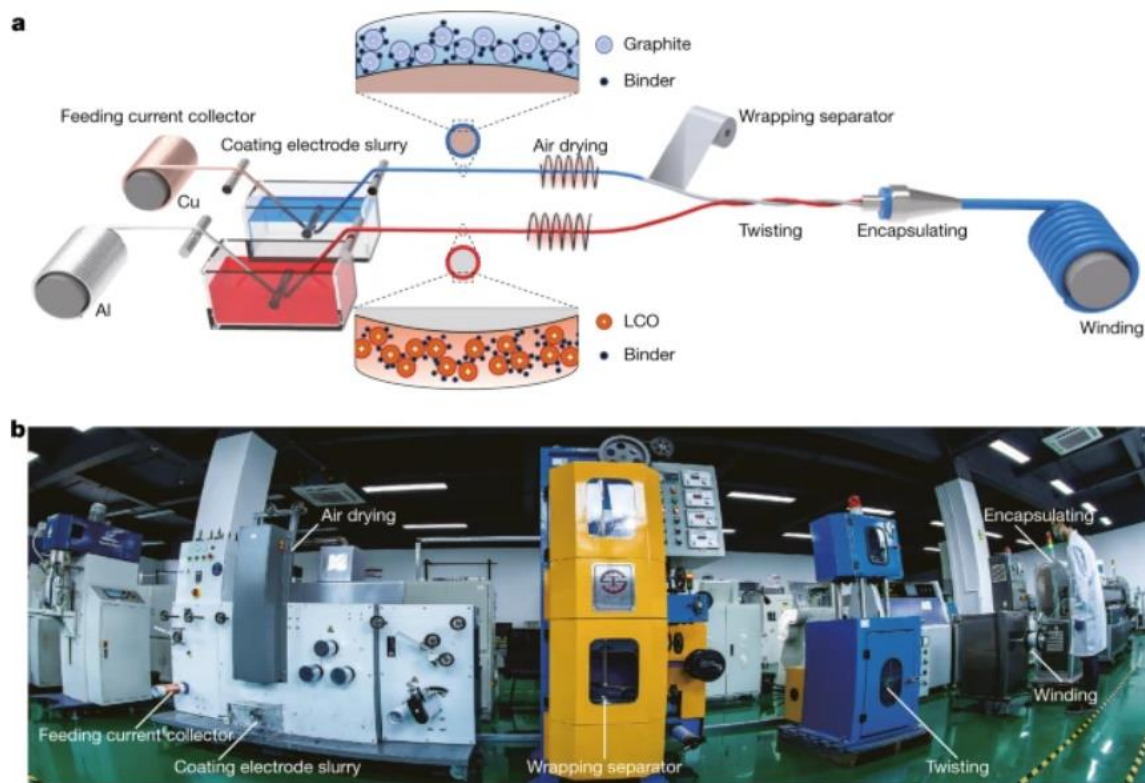


图 1 纤维锂电池连续制备过程

该项研究设计了一种纤维锂电池，并利用工业化生产工艺制备了纤维锂电池纺织品，在 0.1C 倍率下获得了超过 160 mAh/g 的比能量，500 余次充放电循环后电池仍可保持 90.5%初始比容量，更为关键的是，经过高达 10 万次弯曲后仍然保持了 80%以上的初始比容量，且单位长度的成本不到 0.05 美元，表现出了优异的长程稳定性、机械柔韧性和良好的商业应用潜力，为设计开发高性能长寿命低成本柔性电池指明了新路径。相关研究成果发表在《Nature》<sup>19</sup>。

(郭楷模)

<sup>19</sup> Jiqing He, Chenhao Lu, Haibo Jiang, et al. Scalable production of high-performing woven lithium-ion fibre batteries. *Nature*, 2021, DOI: 10.1038/s41586-021-03772-0



# 能源战略研究

## IEA 发布中国能源体系碳中和路线图

9月29日，国际能源署（IEA）发布《中国能源体系碳中和路线图》报告，系统探讨了中国能源体系实现碳中和的路径<sup>20</sup>。报告强调，如果没有中国的参与，可能无法将全球温升限制在1.5°C内。报告基于中国“双碳”目标构建了“承诺目标情景”（APS）以及实现更快转型的“加速转型情景”（ATS），研究了能源转型为中国发展带来的技术挑战和机遇。报告指出，中国能够形成清晰的道路来建立一个更可持续、安全和包容的能源未来，有能力在确保能源安全的同时实现碳中和目标。通过加快能源转型，中国可以确保获得重大的经济、创新和就业效益，同时帮助世界更接近实现气候目标。关键内容如下：

### 一、中国已经为世界清洁能源发展做出了贡献，尽管碳排放量仍在上升，但在2030年之前实现碳达峰是可行的

自2005年以来，中国的能源消费翻了一番，但能源强度（能源消费量与国内生产总值<GDP>之比）大幅下降。中国对低碳技术的贡献所带来的成本下降，改变了世界对清洁能源未来的看法。如果全世界要实现气候目标，就需在清洁能源领域取得更大规模的进步，并涉及所有行业部门。排放峰值越早到来，中国按时实现碳中和的机会就越大。中国碳排放的主要来源是电力（48%）、工业（36%）、交通（8%）和建筑（5%）。如果中国实现已公布的“十四五”规划目标，其燃料燃烧产生的碳排放量将在2020年代中期达峰并趋于平稳，然后在2030年前略有下降。

### 二、实现碳中和要求中国能源体系快速而深度转型

#### 1、2030年前实现碳达峰将依赖于三个关键领域的进展：提高能效、发展可再生能源和减少煤炭使用

根据APS情景，到2030年中国一次能源需求将增长18%；到2060年，尽管经济活动增加了一倍多，一次能源需求将下降26%。主要原因是能效大幅提高，以及产业转型从重工业转向能源强度较低的经济活动。低碳能源在一次能源需求占比将从当前的15%增至2060年的74%。太阳能将在2045年左右成为最主要的一次能源来源，到2060年占比将达到1/4左右。化石能源消费将迅速下降，到2060年，煤炭、石油和天然气需求将分别下降80%、60%和45%。到2030年，能效、光伏和风能将为能源部门碳减排做出60%的贡献，而到2060年电气化（13%）、CCUS（8%）、

<sup>20</sup> An Energy Sector Roadmap to Carbon Neutrality in China. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/bcf51d31-b7c6-4183-944f-707d05021356/AnenergysectorroadmaptocarbonneutralityinChina.pdf>

氢能（3%）、行为改变（12%）和生物能源（7%）将在减排上发挥更大作用（图 1）。

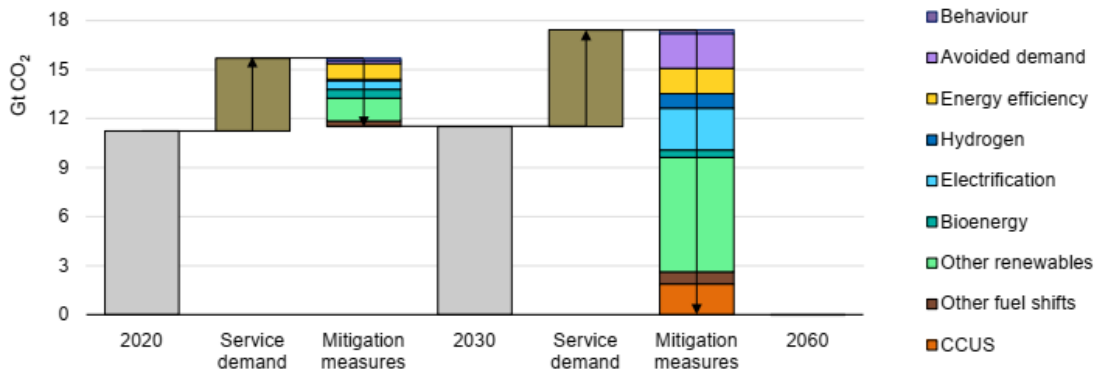


图 1 APS 情景下采用不同措施对中国能源体系碳减排的贡献作用（单位：十亿吨 CO<sub>2</sub>）

## 2、中国完全有能力提供实现碳中和目标所需的投资水平

实现碳中和所需的清洁能源转型将需要持续大量增加能源相关投资。虽然投资总额将大幅攀升，但其在整个经济活动中的比重却会下降。预计到 2030 年，年度投资总额将达到 6400 亿美元，比 2016-2020 年的平均水平高出 10% 以上；到 2060 年将达到近 9000 亿美元。年度能源投资占 GDP 的比重在 2016-2020 年平均为 2.5%，到 2060 年将下降到只有 1.1%。

## 三、中国每个行业部门都有可行的路径来实现深度减排

### 1、以可再生能源为主导的电力部门为中国的清洁能源转型奠定了基础

在 APS 情景下，中国电力部门将在 2055 年前实现净零排放。预计到 2060 年，中国发电量将增加 130%，其在终端能源需求中占比将翻一番达到 50% 以上。可再生能源发电（主要是风能和太阳能光伏）在 2020 年至 2060 年间将增加近 7 倍，届时将占发电总量约 80%。相比之下，煤电的份额将从超过 60% 下降到仅有 5%，而未采用减排技术的燃煤发电将于 2050 年淘汰。到 2060 年，所有地区的可再生能源装机容量至少增加三倍。

### 2、氢及氢基燃料、生物燃料等低碳燃料不可或缺

在某些领域，电力无法经济或便捷地满足能源需求，如长途运输和重工业中的高温过程热和原料供应。因此，实现碳中和目标需要低碳燃料，包括液体生物燃料、沼气、生物甲烷和生物液化石油气、氢和氢基燃料等。目前，低碳燃料仅占中国终端能源需求不到 1%，主要是生物燃料。在 APS 情景下，到 2030 年低碳燃料占比将超过 1%，到 2060 年增至 9%。液体生物燃料在 2060 年将满足 9% 的交通能源需求；低碳氢和氢基燃料在终端能源消费总量中的占比将达到近 10%；低碳气体（生物甲烷和氢气）将占网络供应天然气需求的近 15%。

### 3、提高能效和当今市场化技术只能使工业部门部分实现净零排放，电气化是交通和建筑部门去碳化的关键

在 APS 情景下，到 2060 年中国工业碳排放量将下降近 95%，未采用减排技术

的煤炭使用量将降低 90%，剩余的排放量将被电力和燃料转化行业的负排放所抵消。能效提高和电气化在短期内推动了大部分工业减排，而新兴的创新技术，尤其是水泥、钢铁和化工行业的氢能和 CCUS，将在 2030 年后发挥主导作用。公路运输约 60% 的减排量来自电气化，4% 来自低碳氢。到 2060 年，通过采用电气化、清洁的区域供热和提高能效等措施，建筑部门的直接碳排放量将下降 95% 以上，中国总建筑面积近 100% 可以实现零碳排放。

#### 四、中国能源转型需要四个跨部门技术领域深度创新

中国到 2060 年实现净零排放涉及多个跨部门的关键技术，包括电气化、CCUS、低碳氢及氢基燃料、可持续生物能源。上述四项技术对于实现中国碳中和目标必不可少，都需要进一步创新以将新技术推向市场，并改进现有技术。

##### 1、电气化技术创新

在 APS 情景中，到 2060 年终端用能和低碳燃料生产的电气化将贡献 13% 的碳减排量。其中，45% 来自工业、35% 来自交通、12% 来自建筑，燃料供应电气化的贡献占比不到 10%。

##### (1) 目前大多数对碳中和至关重要的电气化技术都已进入市场，但需进一步创新才能广泛应用，尤其是电池和重工业过程电气化

低碳技术在终端用能部门的应用没有发电领域成熟，电动汽车和热泵等技术已经商用，但还无法与替代性非电力技术完全竞争。其他终端电气化技术发展成熟度更低，特别是在重工业和长途运输方面：电炉炼钢仍处于研究和中试阶段；电动飞机正处于原型开发阶段，远未达到商业可行性。APS 情景中，大约 85% 的碳减排量将来自可再生能源和核能，其中许多技术已经成熟或在市场中稳步增长。许多依赖电力的终端用能技术，例如建筑和工业中的热泵、废钢生产、电动汽车锂离子电池和电炉灶，已经投入市场（图 2）。目前还处于原型阶段的先进高能量密度电池将为 2060 年的道路运输碳减排做出近一半贡献。重工业的直接电气化带来了重要的技术挑战，特别是对于那些具有高温热需求的工艺，该领域的大多数技术还处于原型阶段。

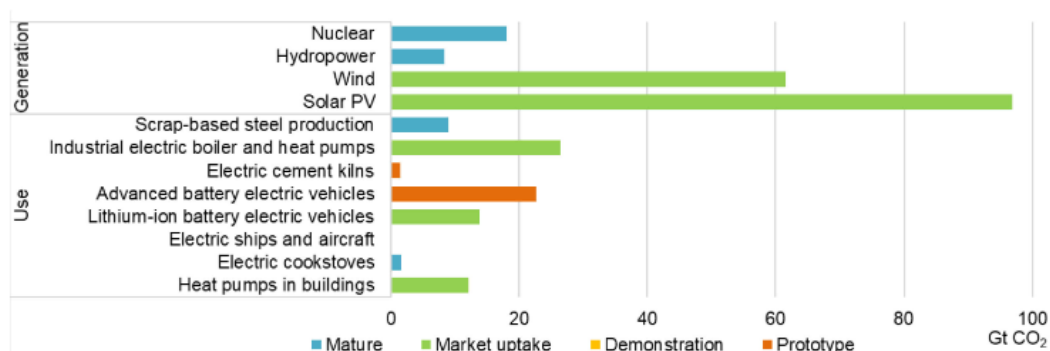


图 2 APS 情景中 2020-2060 年间不同成熟度的电气化技术为中国贡献的累计碳减排量（单位：十亿吨 CO<sub>2</sub>）

## **(2) 发展锂、钴、镍等关键材料供应链以应对未来电气化需求**

APS 情景中,未来 40 年中国电力需求将大幅增长,这要求对电网进行重大扩建和改造,并发展灵活性技术,同时增强与相邻系统的互连。终端用能电气化增加了相关基础设施和设备的金属和矿物需求。铜、锂、钴和铂是能源转型的核心,供应链最脆弱的材料是钴,中国的纯钴需求主要依赖进口。锂可能保持其作为关键材料的地位,物理特性使其难以在高能量密度电池中被替代。铜被用于建筑、车辆制造和电力系统,预计中国的需求将在 2020 年至 2060 年间显著增长。到 2060 年锂离子电池原材料如锂、镍和钴的需求将分别增长 50 倍、44 倍和 22 倍。中国拥有一些关键材料的大量储备以及较强的稀土金属开采和钴、锂、镍加工冶炼能力,根据已计划的项目,中国很可能在中期保持其在关键材料供应方面的全球领先地位,使其成为能源转型所需全球供应链的中心。

## **2、CCUS 技术创新**

由于当前中国能源基础设施构成和煤炭在能源结构的重要地位,CCUS 将在中国实现碳中和过程中发挥重要作用。中国许多现有的发电厂和工业厂房都相对较新,可以通过 CCUS 改造继续运营。CCUS 还提供了形成负排放的方法,即配备碳捕集和封存的生物能源(BECCS)和配备碳封存的直接空气碳捕集(DAC)。APS 情景中,CCUS 将贡献中国到 2060 年累计碳减排量的 8%,占全球累计捕集 CO<sub>2</sub> 近 50%。2020-2030 年的碳捕集量只需小幅增加,就可以实现中国国家自主贡献相关的近期目标。

### **(1) 过去十年中国 CCUS 的重大进展为加快部署奠定了基础,未来将可能引领全球**

目前,中国至少有 21 个 CCUS 试点、示范或商业项目在运行,每年总捕集能力超过 200 万吨,其中许多与提高石油采收率(EOR)有关。未来,CCUS 将越来越多地用于减少现有电力和工业资产的排放,以相对较低的额外成本实现高达 99%的碳捕集率,到 2060 年燃煤电厂和天然气电厂的平均总捕集率将达到 98%左右。电力将成为 CCUS 部署的主要驱动力,到 2060 年将捕集约 13 亿吨,占中国总捕集量的一半;重工业碳捕集量将达 8.2 亿吨,占总捕集量的 32%;约有 5.05 亿吨碳捕集由 BECCS 贡献,带封存的 DAC 则将捕集 1.15 亿吨。到 2060 年,中国在化石燃料发电、化工、水泥以及 DAC 领域部署的 CCUS 占全球相应领域 CCUS 容量的 50%-75%左右,而在钢铁行业的部署占全球 40%左右。CCUS 的国内部署为中国输出高价值知识和能力提供了机会。

### **(2) 当前中国 CCUS 的成熟度因技术类型和应用而异**

虽然大多数 CCUS 技术已在全球范围内得到验证,但缺乏政策和监管支持阻碍了 CCUS 在中国的部署。APS 情景中,2020-2060 年间有约 45%的累计碳减排量来

自于目前处于原型或示范阶段的技术（图 3）。因此，需要加快示范和商业规模的项目开发，使这条途径成为可能。

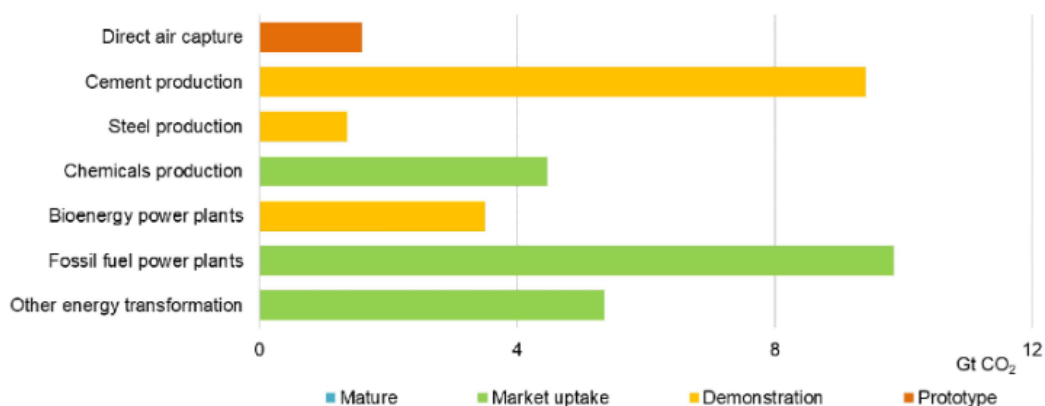


图 3 APS 情景中 2020-2060 年间不同成熟度的 CCUS 技术为中国贡献的累计碳减排量（单位：十亿吨 CO<sub>2</sub>）

**CO<sub>2</sub> 捕集**方面，当前先进且广泛应用的碳捕集技术是化学吸收和物理分离，其他技术如膜分离、化学链循环尚处于原型阶段。在中国，燃烧前碳捕集成本在 36-62 美元/吨，燃烧后碳捕集为 43-65 美元/吨，富氧燃烧为 43-58 美元/吨。

**CO<sub>2</sub> 运输**方面，中国目前超过 2/3 的 CCUS 项目采用卡车运输，成本在 0.13-0.2 美元/吨/公里，驳船运输的内陆运输成本约为 0.04 美元/吨/公里。管道运输适合用于长距离、大规模运输，吉林油田的中石油 CO<sub>2</sub>-EOR 项目是中国为数不多的管道运输 CCUS 项目之一，运输距离超过 53 公里，成本为 0.04 美元/吨/公里。

**CO<sub>2</sub> 利用**方面，目前捕集的 CO<sub>2</sub> 多用于 EOR 和化学品制造，少量用于电子和食品饮料行业。目前正在运营的大型 CCUS 项目中，超过 3/4 的项目用于 EOR。APS 情景中，使用 CO<sub>2</sub> 制造化学原料和运输燃料将发挥重要作用，但尚处于原型阶段，需要加强创新和政策支持以确保在未来十年内实现商业化。CO<sub>2</sub> 用于固化混凝土和制造矿化建筑材料正在大规模应用或示范。

**CO<sub>2</sub> 封存**方面，CO<sub>2</sub> 可以永久封存在陆地和海上的咸水层或枯竭油气藏中，中国还没有专门的商业封存设施。世界其他地区目前有 5 座大型设施正在运行，枯竭油气藏的 CO<sub>2</sub> 封存仅限于试点示范。中国具有极大的碳封存潜力，陆上盆地理论容量超过 3250 亿吨，海上盆地超过 770 亿吨。对现有适合 EOR 地区的咸水层进行表征可能会促进发展专用封存设施，共享 CO<sub>2</sub> 运输基础设施，并鼓励从 EOR 应用过渡到专用封存。使用海上油气勘探和生产过程中收集的数据来表征封存资源有助于加速开发海上封存。中国的碳封存成本，包括场地关闭后 20 年的监测在内，陆上咸水层封存成本为 8.7 美元/吨，海上咸水层为 43.48 美元/吨，枯竭油气田封存成本为人民币 50 元/吨。

**CO<sub>2</sub> 去除**方面，BECCS 比 DAC 更接近大规模商业化，对中国的减排贡献更大，

主要是在 2040 年之后。世界上唯一运营的大型 BECCS 工厂位于美国的伊利诺伊州。鉴于中国广泛使用废物发电和供热，这些工厂可以首先部署 BECCS。目前，世界各地有几家小型 DAC 中试工厂正在运营，DAC 的最佳选址是在可以获得低成本可再生能源/核能以及碳封存资源的地区，中国的四川省和东北松辽盆地具有良好的发展潜力。

### **(3) 实现碳中和目标需建立广泛的碳运输和封存基础设施网络**

短期内，CCUS 活动预计将集中开发靠近大型工业港口和主要产业集群的碳封存资源，当前拥有许多煤化工装置、天然气加工设施和 EOR 项目的地区可作为陆地封存中心。陆上和海上碳封存场地可以从一个或多个来源接收 CO<sub>2</sub>。开发现有工业港口（排放量高）附近的海上封存资源可能是长距离运输 CO<sub>2</sub> 进行陆上封存的首选替代方案。建立从港口到内陆的新管道路线可能需要通过人口稠密地区的路线，因此可能更具挑战性。跨区域的高容量 CO<sub>2</sub> 运输干线可能比同区域的多条小容量管道更具经济效率。APS 情景中，到 2060 年可能需要超过 15000 公里的 CO<sub>2</sub> 运输网络。CO<sub>2</sub> 管道基础设施的发展需要考虑到国家以及大型碳密集型工业和发电厂的区域战略，还应考虑氢能和可再生能源的部署计划。

## **3、氢能技术创新**

APS 情景中，2021-2060 年低碳氢和氢基燃料的使用将累计减排近 160 亿吨 CO<sub>2</sub>，占总减排量 3% 以上，主要来源于工业领域，尤其是化工和钢铁（占氢能贡献碳减排量的 50% 以上），其余是航运中的氢和氨以及航空中的合成煤油（共占 20%），以及公路运输（13%）。到 2030 年，中国氢需求量将增加 20% 至 3100 万吨，到 2060 年将增加三倍以上至 9000 万吨。到 2060 年，几乎所有的氢需求都可以通过低碳技术来满足，其中近 80% 是电解制氢。

### **(1) 氢能相关技术中，90% 的碳减排贡献来自处于原型和示范阶段的技术**

低碳电力电解制氢是一项商业技术，但需要大规模部署才能具备成本竞争力。结合 CCUS 进行天然气重整或煤气化制氢是经过验证的技术，但由于成本原因尚未广泛部署。氢气用于制造氨和甲醇的使用量已经很大，2020 年达到 1700 万吨，但低碳氢作为化学品生产原料和钢铁工业还原剂的使用量目前仍然很少。电解氢在重工业过程中的使用目前处于示范阶段。在化工行业，利用波动性可再生能源生产的氢制氨和甲醇是较为成熟的技术，一些小型预商业化甲醇生产项目已在全球范围内运行，多个大型氨生产示范项目正在建设中。钢铁行业中，铁矿石还原中使用高混合比例（高达 100%）的氢尚处于发展早期阶段，预计要到 2020 年代后期才能大规模示范。

氢的终端应用技术正处于不同发展阶段，交通领域燃料电池汽车已经上市，可用于乘用车、轻型车和公共汽车，而燃料电池卡车还需要进一步发展。用于建筑供

暖发电的氢燃料锅炉和燃料电池也已商用，但面临与热泵等更高效技术的激烈竞争。在电力生产中，燃料电池可用于分布式发电应用，燃气轮机也已具有使用富氢气体的能力。氢基燃料的其他用途也发挥着重要作用，氢作为航运燃料和合成航空燃料仍处于预示范阶段。

氢气的运输和分配技术对于扩大氢能使用至关重要，正处于不同的成熟阶段。输氢管道已经成熟，其更广泛部署尤其是长距离部署，将取决于氢气的更广泛使用和竞争性低碳氢气市场的发展。液氢是短距离运输的成熟技术，但需进行技术改进以减少液化能源需求和最大限度地减少蒸发，并且需要降低成本。加氢站也已经成熟，其他技术如通过船舶长途运输氢气或将氢气混合到天然气网中，仍在作为原型或商业示范项目进行测试，中国在这些领域的活动仍然非常有限。在做出重大贡献的氢能终端应用技术中，只有燃料电池乘用车可以商业化，电解氨和甲醇的生产需要在 2020 年代初期得到广泛验证，以促进从 2020 年代后期开始快速部署。在航运中使用氢和氨以及在航空中使用合成燃料还处于非常早期的发展阶段，需要大力支持创新才能在 2030 年代实现商业化。

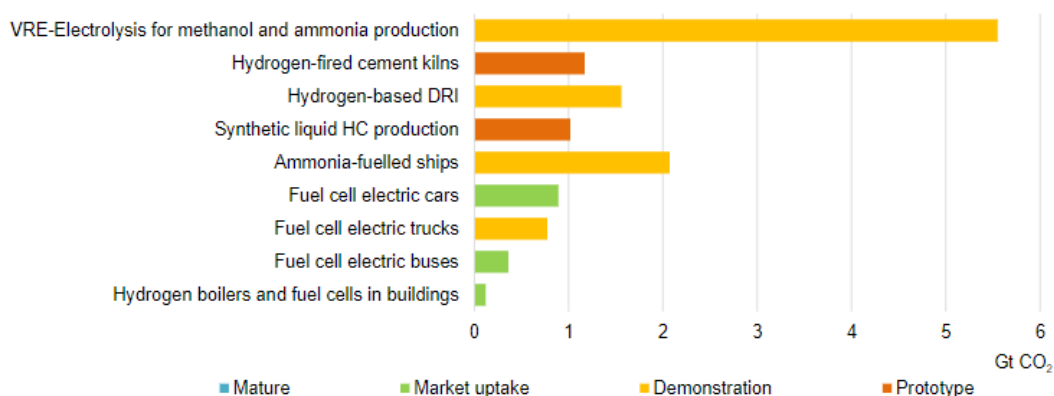


图 4 APS 情景中 2020-2060 年间不同成熟度的氢能技术为中国贡献的累计碳减排量（单位：十亿吨 CO<sub>2</sub>）

## （2）广泛采用氢和氢基燃料作为低排放能源载体，既需要对现有基础设施进行改造，也需要开发新的基础设施

氢能基础设施包括氢气管道、加氢站、大型存储设施和港口码头等。目前，中国只有大约 100 公里的专用氢气管道，都是产业集群私有。确定和发展各地区最合适的基础设施需要仔细规划，但存在一些短期机会，例如使用槽车短距离运输液氢。将氢气混合到现有天然气网中可以作为在发展氢气专用基础设施的同时建立低碳供应的一种方式，但需要制定天然气网络混氢的国际统一安全标准和国家法规。在技术可行的情况下，改造现有的高压输气管道来输送纯氢是中国的另一种选择，这将有助于创建一个国家氢网络来连接需求中心。还需要开发新的专用氢气管道应用于产业集群，以确保管道的高利用率。加氢站是氢基础设施的另一个重要组成部分。中国拥有世界第二大加氢站网络，已有 100 多个加氢站在运营。APS 情景中，到 2030

年和 2060 年将分别达到 2700 座和 27000 座。

#### 4、生物能源技术创新

到 2060 年，生物能源在总能源需求中的占比将增加一倍多，达到 13% 以上，成为中国第三大一次能源。可持续生物能源的使用将贡献碳减排量近 7%。大部分生物能源将用于发电和供热，包括在工业中，其中相当大的一部分结合 CCUS 成为负排放技术。液体生物燃料在交通中的应用也显著增长。

##### (1) 到 2060 年生物能源贡献的累计碳减排量中，近 90% 来自市场化技术

许多生物能源供热和发电技术，例如小型供热和烹饪以及垃圾焚烧发电厂，已经处于市场接纳或商业化阶段，将为 2021-2060 年生物能源累计碳减排量贡献 90%。一些与道路运输和工业供热相关的技术同样处于市场接纳阶段或早期商业化阶段，如玉米乙醇、脂肪酸甲酯生物柴油和加氢处理植物油柴油在中国已经商业化生产。中国在收集用作液体生物燃料原料的废弃食用油方面处于全球领先地位。其他生物能源技术仍处于示范阶段甚至原型阶段，包括使用木质原料（特别是纤维素乙醇）的先进可再生柴油和生物煤油技术、使用费托的生物质气化和酒精制航空煤油技术。可再生柴油在长途运输脱碳方面发挥着最重要的作用，到 2055 年仅重型卡车就占可再生柴油需求的一半以上。与欧洲相比，中国的生物甲烷生产及向国家天然气网的注入仍处于起步阶段。生物煤油对于促进航空脱碳具有重要作用，到 2060 年将占航空燃料需求的 40%，并在 2021-2060 年期间贡献 16 亿吨的累计碳减排量。目前处于示范阶段的另一个关键生物能源领域是用于生产化工原料，目前全球还没有生物质制氨工厂，只有少数生物质制甲醇项目在运营，生物质气化是这一过程的关键技术。

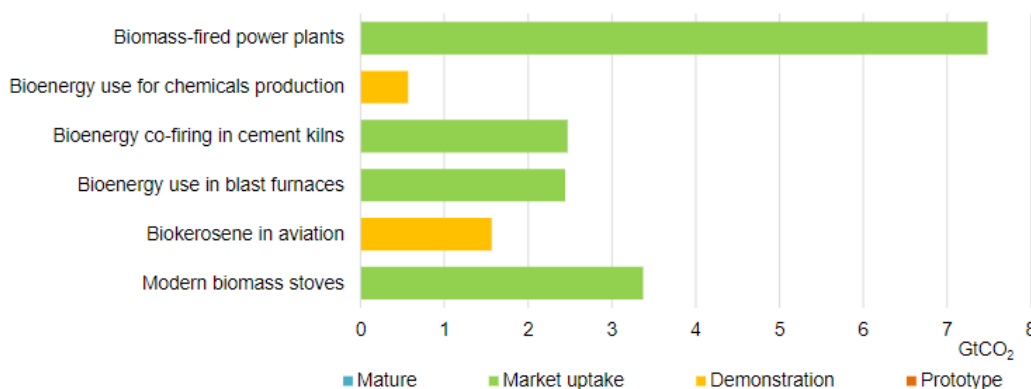


图 5 APS 情景中 2020-2060 年间不同成熟度的生物能源技术为中国贡献的累计碳减排量  
(单位：十亿吨 CO<sub>2</sub>)

##### (2) 各种形式扩展生物能源将需要大量额外的基础设施

就生物燃料而言，将需要许多生物质原料储存设施，尤其是广泛分布的、低密度的作物和林业残留物。此外，还需要用于分类清洁废物和残渣原料的大型设施。对于生物甲烷，需要建造新的分配管线和注入点以混合到天然气中。需要建立基础设施来支持 BECCS 在生物燃料生产和发电中的部署。



## 五、加快实现 2030 年碳减排目标可以减少 2030 年以后的减排负担，其社会经济效应不仅限于应对气候变化

中国拥有的技术能力、经济手段和政策经验，可以比 APS 情景更快实现 2030 年的清洁能源转型目标。在“加速转型情景”（ATS）中，政策进程加快将促使电力和工业中的煤炭用量更快下降，现有低碳技术得到更有力的部署和更快的能效提升。到 2030 年，ATS 情景中能源体系的 CO<sub>2</sub> 排放量将比现有水平降低 20 多亿吨，减少了近 20%。投资需求不是一个主要障碍，ATS 情景所需的累计投资与 APS 情景相当。同时，加快实现 2030 目标能够为尚未充分受益于中国经济发展的地区带来更大的繁荣，中国在全球清洁能源技术价值链中将发挥核心作用，并逐渐成为清洁能源创新的领袖。

## 六、到 2060 年实现碳中和需要大幅加速清洁能源创新，应妥善利用中国创新体系，以激励广泛的低碳能源技术进步

中国正在成为清洁能源创新的世界领袖。自 2015 年以来，中国用于低碳能源的公共研发支出增加了 70%。中国在可再生能源和电动汽车方面的专利申请量占到近 10%。近年来，中国的初创企业吸引了全球超过三分之一的能源早期风险投资。“十四五”规划意在将创新重点转向低碳技术，并制定新的政策措施。中国目前的政策激励措施更适合像 CCUS 和生物炼制这样的大规模技术，而非网络基础设施和面向消费者的产品，但后者才是中国目前的制造优势。除了直接提供研发资金，还可以通过竞争性利基市场、基础设施投资和其他监管措施来激励创新者，以推动技术部署。

（岳芳）

## 世界氢能理事会与麦肯锡更新氢能洞察报告

7 月 15 日，世界氢能理事会（Hydrogen Council）与麦肯锡公司（McKinsey & Company）更新了今年 2 月发布的《氢能洞察 2021：氢能投资、部署和成本竞争力展望》报告，总结了近半年全球氢能市场部署情况<sup>21</sup>。报告强调，随着“双碳”目标的提出，中国已宣布多个氢能项目，成为了潜在的氢能巨头。详情如下：

### 一、全球氢能发展势头

#### 1、在实现气候目标的紧迫形势下，氢能作为能源转型的关键支柱正加快部署

当前，全球各国脱碳承诺日益迫切。美国已重新加入《巴黎气候协定》，并宣布到 2030 年减少 50% 排放，以及 2050 年实现净零排放的目标，意味着占全球 GDP 80% 以上的国家都承诺了净零目标，高于 2021 年初的 50%。欧盟宣布了更严格的 2030 年减排目标，支持将碳价上涨至 55 美元/吨。英国政府已承诺了最雄心勃勃的

<sup>21</sup> HYDROGEN INSIGHTS 2021. <https://hydrogencouncil.com/en/hydrogen-insights-2021/>

气候变化目标（到 2035 年将碳排放相比 1990 年降低 78%）并立法。这些行动再次强调了对清洁技术的需求，并巩固了氢能在应对全球气候变化中的重要地位。

## 2、为响应政府对深度脱碳的承诺，氢能投资正加快速度

自 2 月份氢能洞察报告发布以来，全球已宣布 131 个大型氢能项目，总数已增至 359 个（图 1）。此外，还有许多其他项目处于早期开发阶段，尚未公开宣布，包括大型项目以及研发和示范项目。宣布的投资总额在所有地区都显示出增长势头。由于超过 80% 的新项目位于欧洲，该地区仍然是新兴氢经济的领导者。而其他地区增长较快，已宣布项目增加了 75% 以上。预计到 2030 年相关投资总额将达到 5000 亿美元，其中 30% 可视作“成熟项目”。

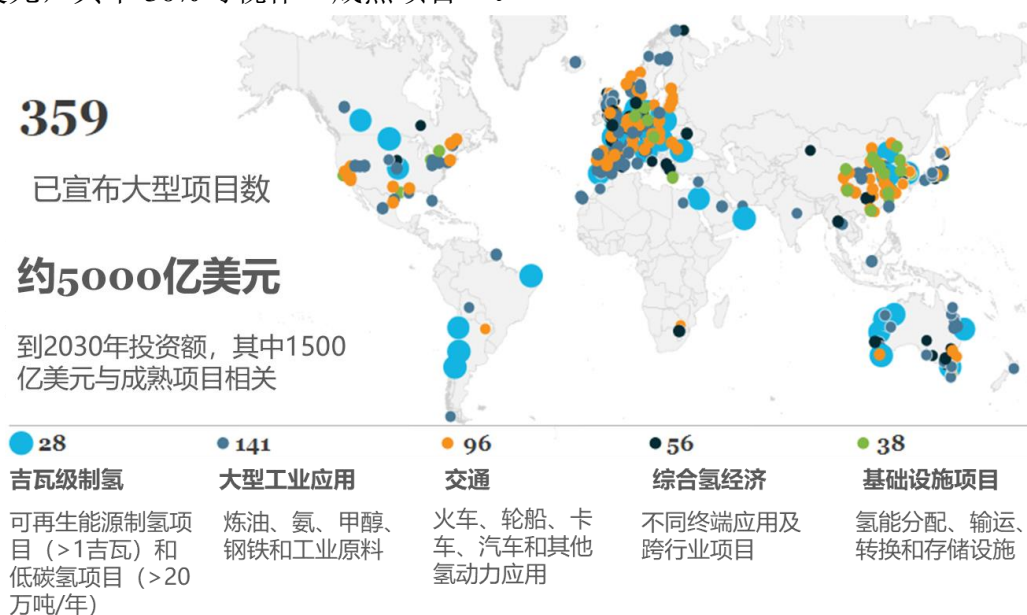


图 1 全球氢能价值链相关项目及投资情况

## 3、到 2030 年全球清洁氢产能将超过 1000 万吨/年

根据目前已宣布的清洁氢项目，到 2030 年全球低碳制氢产能将达到 1100 万吨/年，其中 50% 是成熟项目。这一产能数据比 2020 年 12 月的预测增加 64%，比 2019 年 12 月增加 450% 以上（图 2）。其中，70% 的项目是可再生能源制氢，另外 30% 是化石燃料结合碳捕集与封存（CCS）生产低碳氢。到 2030 年，可再生能源电解制氢规模将达到 70 吉瓦，几乎是 2 月报告中数值的两倍；太阳能和风能将成为制氢的主要电力来源。

## 4、供需中心之间已经开始形成贸易流，以氨、液体有机氢载体（LOHC）和液氢为主要形式

目前，几乎所有的氢气都在产地使用，但这种情况即将改变。预计到 2030 年，大约 30% 的已宣布项目产能将通过船舶或管道运输，最大出口国是澳大利亚、沙特阿拉伯和智利。对于更远距离的船舶运输，需要将氢气转化为其他形式以增加能量密度，氨、LOHC 和液氢是主要载体。然而，几乎一半的项目其运输载体仍未确定。

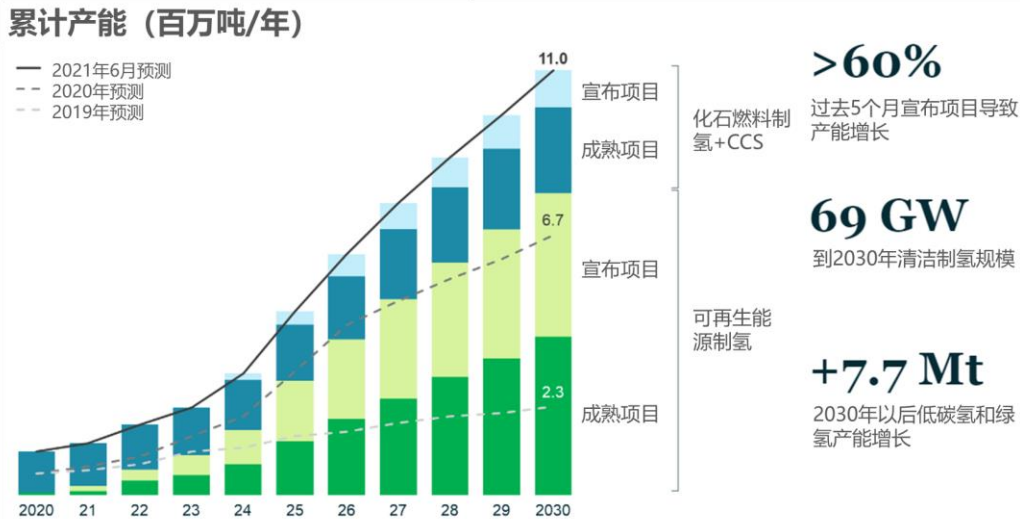


图2 全球已宣布的清洁氢项目到2030年累计产能

## 5、终端应用投资主要集中在工业原料和交通运输

到2030年，氢能终端应用的累计投资总额为400亿美元，加上间接投资和政府承诺则为1300亿美元。纵观各个行业，大部分氢能相关投资用于工业原料（200亿美元），其次是交通运输（160亿美元，包括对合成燃料生产厂、加氢站和大型汽车制造项目的投资）、发电（20亿美元）以及住宅和工业供热（不到10亿美元）。

### 二、中国氢能部署情况

#### 1、中国已宣布超过50个大型氢能项目，承诺或宣布投资总额超过1800亿美元

目前，中国已公开宣布53个氢能项目，其中50%与交通应用相关（图3）。已宣布项目中，中国石化将在未来5年内建设1000个加氢站，以及宁夏地区投产200兆瓦并网光伏制氢工厂。据估计，中国已承诺或宣布氢能总投资额达1800亿美元，主要包括：①已宣布200亿美元的直接投资；②为实现政府目标需要750亿美元的额外投资；③原始设备制造商和供应商将需要850亿美元的间接投资。为支持投资，中国政府已向氢能项目提供了200亿美元的公共资金。在上述总投资中，约170亿美元是成熟项目，其中75%已由燃料电池和燃料电池汽车制造商宣布。

#### 2、可再生能源制氢将在中国氢气产能增长中发挥重要作用

中国存在多种脱碳制氢途径，就成本而言，目前电解制氢已经具备和煤气化+CCS制氢技术相当的竞争力。到2030年，电解将成为所有地区成本最低的低碳制氢技术。多种因素将推动绿氢的使用：①中国可再生能源发电规模将从2020年的500吉瓦增加到2030年的1200吉瓦；②中国致力于发展优质输电网并扩大其储能容量，以确保消纳可再生能源发电所需的灵活性；③电解槽资本支出成本的下降可能导致目前最佳产地的绿氢生产成本低至2.4美元/公斤。预计到2030年，中国电解制氢成本最低可能会降低至1.7美元/公斤。中国向可再生氢的过渡已经开始，大多数已宣布项目均使用可再生能源作为其来源，其产能达到100万吨，或11吉瓦的电

解槽规模。对于煤气化+CCS 制氢，CCS 技术可捕集高达 98%的煤气化碳排放，使其成为可行的清洁替代品。预计到 2030 年，煤气化+CCS 制氢成本将从当前的 2.8 美元/公斤降至 2.5 美元/公斤，意味着煤制氢在最佳地区的生产成本将高于电解制氢。

### 中国已宣布的部分大型氢能项目

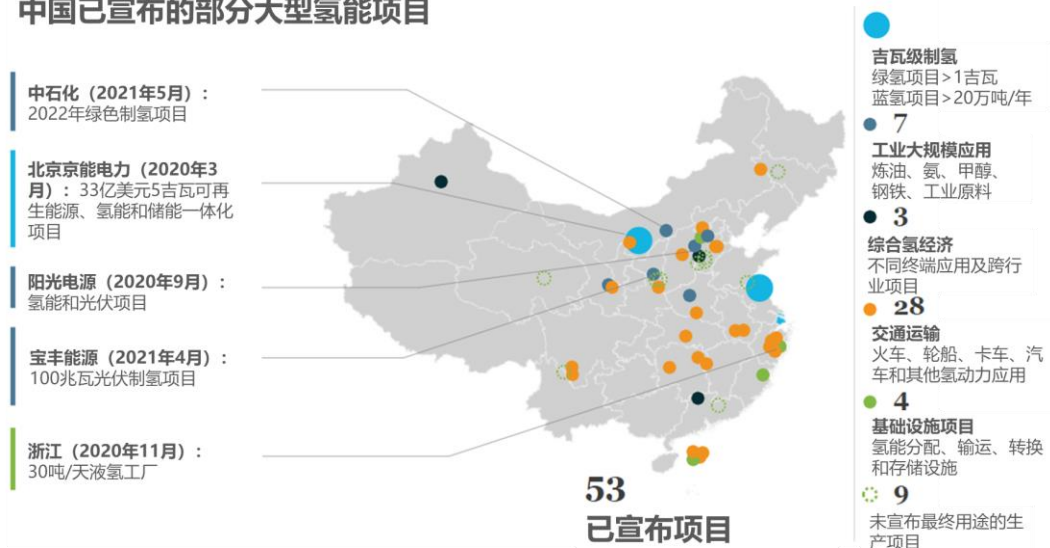


图 3 中国氢能价值链相关项目情况

### 3、中国需将可再生能源资源丰富地区（西部）与氢气高需求地区（沿海）连接起来

中国主要氢能市场，如交通运输和钢铁生产，大部分需求将来自东部沿海地区。然而，可再生氢供应中心则主要位于具有丰富的太阳能和风能资源的西部地区。这意味着供需缺口需要通过两种可能的方案来解决：①将西部的氢气输送到沿海和北方；②从其他国家进口氢气到沿海和北方。虽然澳大利亚、沙特阿拉伯和智利等潜在出口市场的氢气生产成本低于中国西部，但液化和运输成本将导致氢气进口成本比本地生产高 50%。因此，中国很可能自行满足氢气需求。但由于生产成本较高，中国目前在向其他国家出口氢气方面没有竞争力。

### 4、中国大多数清洁制氢项目用于交通运输

虽然许多项目尚未宣布最终用途，但在已知项目中，有 50% 专注于交通应用，反映了中国将氢能作为交通脱碳重要途径的战略。截至目前，大多数中国商用车企业已经在一定程度上进入了燃料电池汽车领域，主要是客车和轻型卡车。这一势头可能会随着氢能的发展而增长，并在不久的将来扩展到其他类型车辆。

(岳芳)



## 《洁净能源科技动态监测快报》

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 郭楷模 岳芳

联系电话：(027) 87199180

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