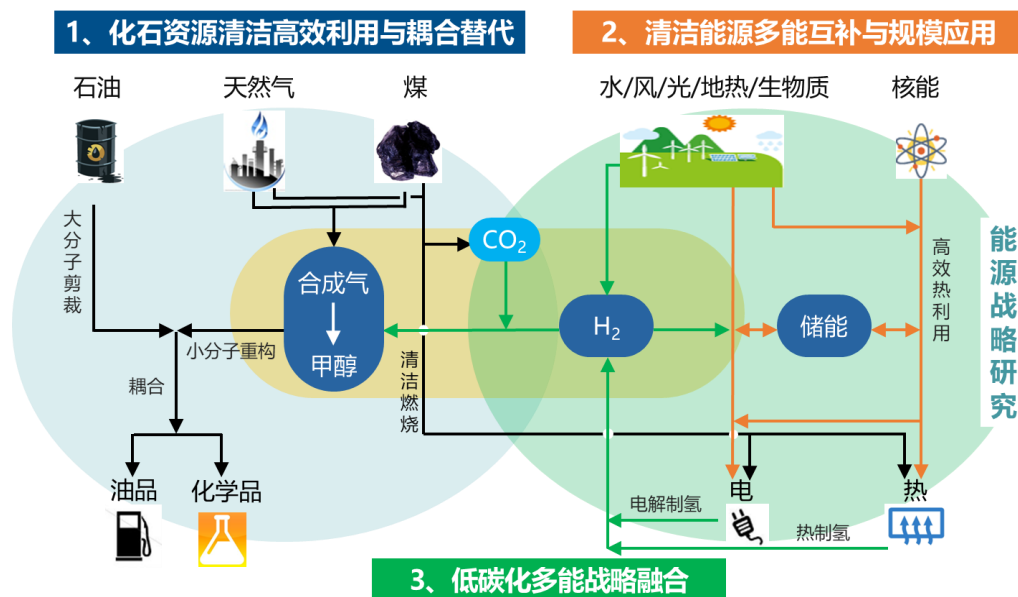




洁净能源科技动态监测快报

2022 年第 01 期（总第 27 期）



本期看点

- 英国发布核聚变发展战略
- 澳大利亚公布生物能源路线图
- 美国能源部资助上亿美元支持变革性能源技术研发和部署
- IEA 发布《可再生能源 2021》报告预测未来五年发展趋势
- IEA-OES 发布《海洋热能转化白皮书》
- 世界经济论坛发布《利用人工智能加速能源转型白皮书》

目 录

2022 年第 01 期 (总第 27 期)

◆ 化石资源清洁高效利用

- 美国能源部宣布资助 3500 万美元开发甲烷减排技术..... 2
- 德加企业合作开发基于固体吸附剂的碳捕集项目 3
- Au-ZnO/TiO₂ 光催化剂助力甲烷高效高选择性制乙烷..... 3

◆ 清洁能源多能互补

- 英国发布核聚变发展战略 5
- 澳大利亚公布生物能源路线图 6
- 美国能源部资助上亿美元支持变革性能源技术研发和部署 8
- 日产汽车将在未来五年投资 2 万亿日元推动汽车电气化..... 9
- 澳大利亚将于 2022 年启动建设南半球最大的风电场..... 10
- 2D 钙钛矿钝化助力太阳电池实现上千小时稳定性运行..... 10

◆ 低碳化多能融合

- 日本 NEDO 资助下一代氢动力飞机技术开发..... 12
- 高性能双钙钛矿电催化剂显著提升固体氧化物电池性能..... 12
- 碳纳米点一体化光催化高效制氢..... 14
- CO₂ 电化学还原直接连续制备高纯高浓度液体燃料策略 15

◆ 能源战略研究

- IEA 发布《可再生能源 2021》报告预测未来五年发展趋势 17
- IEA-OES 发布《海洋热能转化白皮书》 27
- 世界经济论坛发布《利用人工智能加速能源转型白皮书》 29

本期概要

英国商业、能源和工业战略部 (BEIS) 发布《迈向聚变能源时代：英国聚变战略》，系统阐述英国从核聚变科学超级大国向核聚变工业超级大国转变的战略。该战略总体目标包括两大主题：(1) 在英国建立一个核聚变示范电站接入电网，验证聚变技术的商业可行性；(2) 建立世界领先的英国聚变产业，并在未来实现核聚变技术出口。英国核聚变战略目标将通过英国原子能管理局 (UKAEA) 实施，以确保在国际合作、科技、商业三个方面的全球领导力。

澳大利亚可再生能源署 (ARENA) 公布了《生物能源路线图》，提出 2030 年、2050 年生物能源发展目标。预计未来 10 年生物能源产业能够为澳大利亚年度 GDP 额外增加 100 亿美元，创造 26 200 个新的就业岗位，减少近 9% 的碳排放。主要指导原则包括：(1) 专注于难减排市场以弥补经济可行性差距；(2) 优化生物能源和替代低排放技术的作用；(3) 最大限度保护社区利益；(4) 加强发挥产业界、州政府和联邦政府的通力合作；(5) 公共和私营投资部门需明确投资目标。

美国能源部先进能源研究计划署 (ARPA-E) 宣布在“有应用潜力的领先能源技术种子孵化” (SCALEUP) 主题研发计划框架下资助 1 亿美元，旨在强化研究机构和企业合作，支持具有潜在颠覆性影响的变革性能源技术研发，并协助相关研发机构将取得实验室进展、具有应用潜力的技术加速推向商业化：本次资助研究项目涵盖了电网、交通运输、建筑能效、基于化石能源/核能的能源/电力生产、可再生能源电力、生物能源和其他能源技术等 7 大主题。

国际能源署 (IEA) 发布《可再生能源 2021：至 2026 年分析与预测》报告，预测到 2026 年可再生能源技术在电力、交通运输和供热领域中的部署情况和面临的主要挑战。报告指出：到 2026 年，全球可再生能源发电装机容量将较 2020 年增加 60% 以上，达到 1800 吉瓦以上；到 2026 年可再生能源发电将占全球新增电力容量的 95% 以上，其中太阳能光伏发电贡献超过一半；中国依然是全球新增可再生能源发电装机容量的领导者；中国、印度、美国和欧洲四大市场将占全球可再生能源装机容量的 80% 以上。

国际能源署海洋能源系统组织 (IEA-OES) 发布《海洋热能转化白皮书》，系统描述了全球探索热能资源转化 (OTEC) 技术发展现状、海洋热能转化电站项目的进展和发展面临的主要障碍。未来需解决以下四大障碍实现 OTEC 技术的长期发展：(1) 进行材料创新实现 100 MW 级大容量 OTEC 电站开发；(2) 优化 OTEC 船舶装置实现更高的投资回报率；(3) 扩大公众宣传和教育提高公众、政府和投资人群对 OTEC 技术的认知；(4) 长期考察 OTEC 电站对周围环境与生态影响。

世界经济论坛与彭博新能源财经 (BloombergNEF)、德国能源署 (DENA) 联合发布了《利用人工智能 (AI) 加速能源转型白皮书》，提出数字技术，特别是人工智能对加速推动全球能源转型具有重要潜力：白皮书深度分析了利用 AI 技术的必要性，确定了能源转型中最有前景的四个 AI 应用场景包括：可再生能源发电和需求预测、电网运行和优化、能源需求管理、材料开发和创新。白皮书最后对能源相关企业和政策制定者提出了建议和展望。

化石资源清洁高效利用

美国能源部宣布资助 3500 万美元开发甲烷减排技术

12 月 2 日，美国能源部（DOE）宣布资助 3500 万美元开发甲烷减排技术，以减少石油、天然气和煤炭行业甲烷排放¹。甲烷作为仅次于二氧化碳排放量第二大的温室气体，其破坏程度却是二氧化碳的 25 倍，因此，通过创新技术实现具有经济效益的甲烷减排将有利于减缓气候变化。具体内容如下：

1、开发新型燃气发动机

(1) 科罗拉多州立大学开发燃气发动机的涡轮增压器，减少甲烷排放并提高燃料效率。资助金额 150 万美元。

(2) INNIO 瓦克夏燃气发动机公司开发摩擦焊接活塞的新生产线。这种新型活塞增加了甲烷在发动机燃烧区停留的时间，有助于甲烷的完全燃烧。资助金额约 223 万美元。

(3) MAHLE Powertrain 公司开发一套催化系统，对燃气发动机废气中的甲烷进行催化氧化。资助金额约 326 万美元。

(4) 马凯特大学开发混合气体驱动发动机燃烧技术，该技术将支撑稀薄燃烧（混合气中的汽油含量低）发动机的设计。资助金额约 397 万美元。

(5) 得克萨斯农工大学利用等离子体开发先进的发动机控制技术来减少甲烷排放。资助金额约 282 万美元。

2、开发新型点火燃烧装置

(1) 先进冷却技术有限公司进行燃烧室设计，以确保 99.5% 的甲烷实现完全燃烧气化。这种燃烧室将由碳化硅经 3D 打印工艺制成，可以承受超过 2500 华氏度的高温。资助金额 330 万美元。

(2) Cimarron 能源公司开发一种先进的混合气体点火与控制装置，以确保 99.5% 的甲烷实现完全燃烧气化。资助金额 100 万美元。

(3) 密歇根大学使用增材制造技术和机器学习技术开发先进的燃烧器，以实现坚固耐用，并在强风和低负载条件实现甲烷完全燃烧。资助金额约 288 万美元。

(4) 明尼苏达大学使用等离子体辅助燃烧技术来提高甲烷燃烧效率。资助金额约 214 万美元。

3、开发煤矿中开采过程中甲烷减排新技术

¹ DOE Awards \$35 Million for Technologies to Reduce Methane Emissions. <https://www.energy.gov/articles/doe-awards-35-million-technologies-reduce-methane-emissions>

(1) Johnson Matthey 公司开发一种利用贵金属催化剂在煤矿通风系统中燃烧稀释甲烷的新技术，实现甲烷减排。资助金额约 435 万美元。

(2) 麻省理工学院开发一种低成本的铜基催化剂，实现甲烷减排。资助金额约 202 万美元。

(3) Precision Combustion 公司构建一个创新的模块化系统，在同一装置中实现甲烷减排和热负荷管理。资助金额约 372 万美元。

(汤匀)

德加企业合作开发基于固体吸附剂的碳捕集项目

11 月 22 日，德国 Technip Energies 公司与加拿大 Svante 公司签署谅解备忘录，以进一步开发基于固体吸附剂的碳捕集技术，并提供综合解决方案²。该合作将在全球使用 Technip Energies 蒸汽甲烷重整器 (SMR) 技术的蓝氢工厂进行。碳捕集设施将使用 Svante 基于固体吸附剂的碳捕集技术，直接从工业燃烧后烟气中捕集 CO₂。这一技术通过使用“固体吸附过滤器”的专用纳米碳捕集材料，能够在不到 60 秒时间内捕集 CO₂ 并将其浓缩和释放，以用于安全存储或工业用途。

(袁洁)

Au-ZnO/TiO₂ 光催化剂助力甲烷高效高选择性制乙烷

将甲烷选择性直接转化为附加值较高的高链烃或液体含氧化合物是化学工业减少对原油依赖的一种理想途径。然而由于甲烷分子结构中 C-H 键较为稳定，需要高温来活化，限制了其在工业应用中的快速部署，因此亟需开发常温下高活性和选择性的催化剂。

日本北海道大学叶金花教授团队开发了一种金纳米颗粒负载于 ZnO/TiO₂ 杂化物的光催化剂 (Au-ZnO/TiO₂)，其在流动反应器中可以高效率和高选择性地将甲烷 (CH₄) 光氧化为乙烷 (C₂H₆)。相关研究表明，传统由 CH₄ 热催化氧化偶联 (OCM) 到 C₂ 烃通常需要高温 (>600 °C) 来活化甲烷的 C-H 键，由于非 OCM 的热力学限制，C₂H₆ 产率有限。光催化是一种在室温激活甲烷 C-H 键的有效途径，能在非氧化性条件下光催化将甲烷转化为 C₂H₆，且光催化 OCM 不受热力学的限制，具有获得高 C₂H₆ 产率的潜力。在各种用于光催化甲烷氧化的半导体材料中，TiO₂ 和 ZnO 已被证明是有效的催化剂，这两种氧化物表现出非常不同的催化行为，其中 TiO₂ 通常表现出更高的甲烷光氧化能力以实现高转化率，而 ZnO 更有利于抑制 CH₄ 的过氧化以保持高选择性。基于此，研究人员以 ZnTi 层状双氢氧化物 (LDHs) 为原料，

² Technip Energies Partners with Svante to Develop Industrial-Scale Carbon Capture Projects in Europe and Middle-East. <https://www.technipenergies.com/media/press-releases/technip-energies-partners-svante-develop-industrial-scale-carbon-capture-projects-europe-and-middle>

采用煅烧法制备了 ZnO/TiO₂，然后用新鲜的 NaBH₄ 溶液在 ZnO/TiO₂ 上沉积 Au 纳米颗粒，得到 Au-ZnO/TiO₂ 催化剂，将其作为高效的光催化剂，在气流反应器中选择性地将 CH₄ 氧化为 C₂H₆，产率高达 5020 μmol g⁻¹h⁻¹，选择性高达 90%。该产率较目前所有已报道的光催化产率高出一个数量级以上。此外，还生成了少量的 C₃H₈ (225 μmol·g⁻¹h⁻¹) 和 C₂H₄ (20 μmol g⁻¹h⁻¹)，对 C₂-C₃ 烃 (C₂H₆、C₂H₄ 和 C₃H₈) 的选择性接近 95%。研究人员发现，TiO₂ 在 ZnO 表面的修饰导致异质结的形成，不仅增强了电荷分离，而且促进了 O₂ 的吸附和活化，从而提高了光催化活性，并且不会促进 CH₄ 过度氧化为 CO₂，从而保持了对 C₂H₆ 的高选择性。使用 Au 纳米粒子作为助催化剂，不仅促进了电荷分离，而且有利于甲基 (CH₃) 在气相中脱附生成 ·CH₃ 自由基，从而有利于后续 C₂H₆ 的生成和抑制 CH₄ 过氧化为 CO₂。从而实现了高活性、高选择性光催化制 C₂H₆。密度泛函计算表明，Au-ZnO/TiO₂ 杂化材料在光照下容易形成氧空位，降低了吸附能和活化势垒，进一步促进了 O₂ 的解离，从而促进了 CH₄ 的氧化。更重要的是 Au 作为一种独特的助催化剂，可以促进 CH₃ 解吸生成 ·CH₃ 自由基，这是通过 ·CH₃ 自由基偶联生成 C₂H₆ 的关键步骤，并阻止 CH₄ 的氧化，最终提高 C₂H₆ 的产量，抑制 CH₄ 的过氧化。

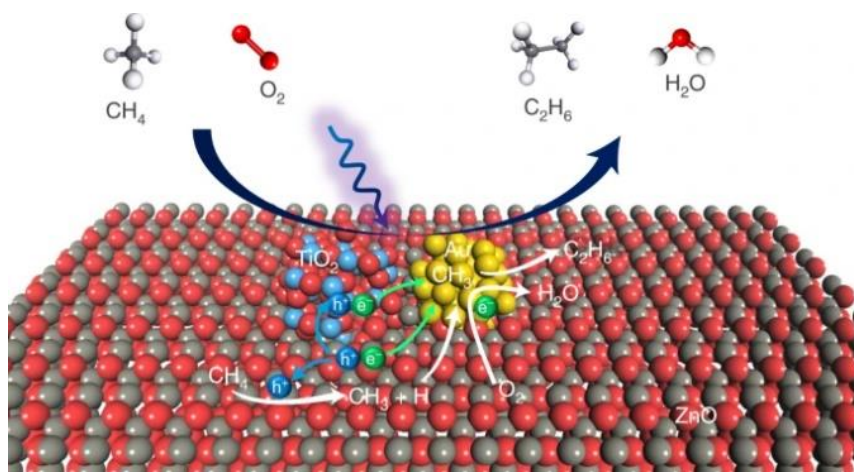


图 1 Au-ZnO/TiO₂ 将甲烷转化为乙烷示意图

该项研究设计开发了 Au-ZnO/TiO₂ 杂化催化剂。可以在光照下高效、高选择性将甲烷氧化为乙烷。ZnO、TiO₂ 和 Au 之间的协同效应可以同时提高光催化能力，从而提高了催化剂的活性和选择性。该项研究避免了传统热催化过程中操作温度高带来的高昂成本，提供一种将甲烷直接转化为乙烷经济上可行的方法。相关研究成果发表在《*Nature Catalysis*》³。

(占威 汤匀)

³ Shuang Song, Hui Song, Luming Li, et al., A selective Au-ZnO/TiO₂ hybrid photocatalyst for oxidative coupling of methane to ethane with dioxygen. *Nature Catalysis*, 2021, DOI: 10.1038/s41929-021-00708-9.

清洁能源多能互补

英国发布核聚变发展战略

10月1日，英国商业、能源和工业战略部（BEIS）发布《迈向聚变能源时代：英国聚变战略》⁴，旨在推进从核聚变科学超级大国向核聚变工业超级大国转变。该战略指出，一方面气候变化是全球所面临的最紧迫和最高技术要求的挑战之一；另一方面全球能源需求仍将不断增长。核聚变是一种低碳、安全、丰富、可持续和近乎无限的能源，可能是终极的清洁能源解决方案。因此，英国应该抓住这一发展机遇，在这一可能改变世界的颠覆性技术商业化和部署方面发挥引领作用。主要内容如下：

一、总体目标

英国核聚变发展战略总体目标包括两大主题：（1）在英国建立一个核聚变示范电站实现并网，验证聚变技术的商业可行性；（2）建立世界领先的英国聚变产业，并在未来实现核聚变技术出口。

二、战略重点

英国核聚变战略目标将通过英国原子能管理局（UKAEA）实施，以确保在国际合作、科技、商业三个方面的全球领导力。

1、国际合作领导力

英国将继续加强全球顶尖人才和设施合作，以实现聚变能源目标，最大限度促进科学和经济融合发展，保持领先的竞争优势。通过国际合作降低英国聚变项目的成本和风险，加速聚变能源的商业化，同时保护英国的知识产权和竞争优势；领导国际聚变标准和法规的制定，确保安全、最大限度地发挥聚变技术的全球潜力，同时为英国创造重要的市场机遇。

具体而言，UKAEA 通过主持“欧共同体联合聚变中心”（Joint European Torus, JET）卡拉姆聚变中心项目，在全球一流核聚变设施方面有着独特经验。其次，英国还积极参与国际热核聚变实验堆（ITER）计划，有力支持英国核聚变供应链和国内项目发展。目前，英国已提出与欧洲原子能共同体（Euratom）建立联系，以成员国形式参与 ITER 计划，为此英国将提供必要的科学支撑，以在欧洲聚变能源发展联合会（EUROfusion）的聚变示范电站建设过程中发挥领导作用。此外，英国还将寻求

⁴ Towards fusion energy: the UK fusion strategy.

<https://www.gov.uk/government/publications/towards-fusion-energy-the-uk-fusion-strategy>

欧洲之外的核聚变国际合作，包括技术和监管方面。

2、科技领导力

自 20 世纪 50 年代以来英国就拥有专门的核聚变研究设施，因此英国核聚变科学和工程一直处于全球领先地位。英国将围绕核聚变商业发电可行性的核心科学问题，加强对研究创新支持力度，吸引、培育和留住全球顶尖的科学家、研究人员和工程师，以在核聚变技术和设施上继续保持全球领先地位。

2021 年，UKAEA 主持的“兆安培球形托卡马克升级版”（MAST-U）设施，通过了最大限度减少聚变燃料热量排放的关键技术测试，早期结果验证了聚变发电的可行性，并将有力促进“球形托卡马克能源生产计划”（STEP）实施。STEP 计划旨在 2040 年前设计、开发和建造一个接入电网的核聚变原型电站，以验证核聚变技术的商业可行性。

此外，UKAEA 还运营着一套研究设施，目的是为核聚变商业化面临的关键挑战开发技术解决方案，并发展整体数字设计能力。作为聚变技术设施（FTT）的一部分，CHIMERA 机器将于 2022 年投入使用。从 2021 年开始，英国、日本将开展为期四年的智能技术合作。材料研究设施（MRF）将有助于分析辐照对材料的影响，2019 年发布的聚变材料研究路线图将重点研究聚变电厂所需材料和技术。UKAEA 的先进氢-3 技术（H3AT）中心将于 2023 年开放，是全球最大的聚变氚研究中心。

3、商业领导力

英国政府已经投资核聚变相关项目、商业设施和基础设施，着力构建具有韧性、国际领先的英国供应链。为此，英国将在本土创建充满活力的聚变技术创新集群，吸引聚变相关外来投资，发展支撑聚变技术的供应链和技能基础，提升英国企业的国际竞争力。英国参与 ITER 和 STEP 计划将有力促进聚变供应链的发展，在此基础上英国启动了聚变基金计划，将卡拉姆聚变中心打造成为全球核聚变创新中心，并培育聚变高质量人才队伍。

（李岚春 郭楷模）

澳大利亚公布生物能源路线图

2021 年 11 月，澳大利亚可再生能源署（ARENA）公布了《生物能源路线图》⁵，设定澳大利亚生物能源发展和能源结构目标，为未来政策和投资决策提供支撑。路线图系统描绘了可持续生物能源产业发展愿景，提出 2030 年、2050 年生物能源发展目标。主要内容如下：

一、生物能源路线图主要原则

发展可持续的生物能源产业，能够为澳大利亚的经济、环境和社会带来多重益

⁵ Australia's Bioenergy Roadmap. <https://arena.gov.au/assets/2021/11/australia-bioenergy-roadmap-report.pdf>

处，预计未来 10 年该产业能够为澳大利亚年度 GDP 额外贡献超过 100 亿澳元，创造 26 200 个新的就业岗位，减少近 9% 的碳排放。产业发展主要指导原则如下：①商业部门：专注于难减排市场，弥补经济可行性的差距；②减排与气候变化方面：优化生物能源和替代低排放技术的作用，以充分发挥澳大利亚的资源潜力；③社区方面：最大限度保护社区利益；④协调合作方面：加强产业界与州政府和联邦政府间的合作，以激发澳大利亚生物能源产业的更大活力，并关注重点增长领域；⑤共同投资方面：公共和私营投资部门需明确投资目标。

二、生物能源发展目标

1、在难以减排的部门创造市场机会，已确定可再生工业供热、航空燃料和可再生燃气网等三个优先部门。2030 年目标：①生物能源的可再生工业供热实现广泛部署，每年可提供 244 皮焦耳热能，约占整个工业供热的 33%；②部署商用可持续航空燃料（SAF）生产工厂，建立产业链，每年最高可生产 1908 兆升 SAF，约占航空燃料的 18%；③天然气管道每年可输送 105 皮焦耳可再生燃气，利用现有管网实现低排放氢气兼容，占比达 23%。

2、作为替代燃料用于交通、电力等领域。2030 年目标：①每年生产 2605 兆升供本土消费的交通用生物燃料，占市场总量的 7%；②每年部署 14 太瓦时的公用事业规模和小规模生物能源发电设施，占市场总量的 8%。

3、资源开发。充分发挥澳大利亚丰富的生物能源潜力，制定可持续发展框架。2030 年目标：①每年生产生物能源 559 皮焦耳；②实现区域生物能源商业部署，并与其他低排放能源技术互补应用。

4、构建生态系统。为确保路线图目标的实现，除专注于市场开发和原料低成本收集外，还需要建立一个支持广泛增长的生态系统。2030 年目标：①加强生物能源产业各利益相关者（如行业组织、开发商和承销商）之间的知识共享，以提高对现有技术解决方案的认识，并为商业模式和定价提供一致的基准；②促进本土行业成熟发展，具备使用全球最佳实践标准的适用技术开发和安装能力；③发展新商业模式，以满足当前和新兴工业对生物能源和生物质衍生品的需求；④就生物能源相对于其他低排放技术具有比较优势的领域，向终端用户和更广泛的社区进行统一清晰的知识宣传。

三、生物能源潜在贡献

目前，澳大利亚生物能源占可再生能源产量的一半以上，占能源消费总量的 3%。但其发展潜力巨大，目标部署情景分析表明，到 21 世纪 50 年代，生物能源占能源消费量的比重将增长至 20%。生物能源将在 4 个主要领域发挥关键作用：

1、**经济效益**。生物能源可以为澳大利亚带来显著的经济增长和就业效益，预计到 2030 年、2050 年年度 GDP 分别增加 100 亿澳元、140 亿澳元，创造就业 26 200、

35 300 个。

2、减排效益。生物能源通过提供可再生电力、热力、燃气和交通燃料等，支持向低排放转型，还可以减少难减排工业和交通部门的排放。相较于 2019 年，2030 年、2050 年将分别实现减排 9%、12% 的目标。

3、液体燃料安全。生物燃料可以减少对石油进口和石油基产品的依赖，并改善澳大利亚的液体燃料安全。相较于 2019 年，2030 年、2050 年其可供燃料消费量分别增加 27 天、63 天。

4、废物回收。废物和残留物的回收利用可减少垃圾填埋废物数量，较 2019 年，预计到 2030 年、2050 年可避免 6%、7% 的废物产生。

（李岚春 郭楷模）

美国能源部资助上亿美元支持变革性能源技术研发和部署

12 月 16 日，美国能源部先进能源研究计划署（ARPA-E）宣布在“有应用潜力的领先能源技术种子孵化”（SCALEUP）主题研发计划框架下资助 1 亿美元⁶，旨在强化研究机构和企业合作，支持具有潜在颠覆性影响的变革性能源技术研发，并协助相关研发机构将取得实验室进展、具有应用潜力的技术加速推向商业化。本次资助研究项目涵盖了电网、交通运输、建筑能效、基于化石能源/核能的能源/电力生产、可再生能源电力、生物能源和其他能源技术等 7 大主题，具体内容如下：

1、电网

针对运行电压大于 69 kV 的交流（AC）和直流（DC）输配电网开发先进的规划和运行技术；开展更先进的电网仿真模拟、算法和控制技术以提升运行效率；开发先进的电网级电化学储能技术和物理储能技术；改善电网弹性以保障高比例可再生能源并网下的运行稳定性。

2、交通运输

开发非生物基的低排放替代燃料；针对液态/气态燃料开发先进高效低排放发动机；开发性能更加优异的下一代电动汽车驱动电机；针对交通开发先进的燃料电池技术；汽车优化设计、先进架构和轻量化汽车材料开发；针对无人驾驶汽车开发先进汽车管理技术和系统；先进的航空动力技术；开发能量密度更大、成本更低的先进储能技术。

3、建筑能效

开发先进技术提升热电联产（CHP）效率；开发新技术提升建筑供热制冷系统运行效率；针对建筑用能开发先进的需求响应/管理技术（如智能电表、智慧能源管

⁶ U.S. Department of Energy Announces \$100 Million to Support Cutting-Edge Clean Energy Technologies.
<https://arpa-e.energy.gov/news-and-media/press-releases/us-department-energy-announces-100-million-support-cutting-edge-clean>

理系统)；研发环境友好的高能效照明技术；优化建筑设计以提升建筑能效。

4、基于化石能源/核能的能源/电力生产

开发先进的联合循环发电技术(如燃料电池和涡轮机联合发电设施)实现多种能源联合发电；改进现有的发电机/涡轮机燃料燃烧效率；开发先进耐高温、耐辐照核裂变材料，提升核电站的运行效能；开发先进核聚变材料增强聚变效率；开发先进的碳捕集、利用和封存技术(CCUS)应用于发电设施；探索改善发电厂的规划和运行效率的新技术；开发存储、传输和监测气体燃料的先进技术(如管道传感器)；液体/气体燃料转化为高价值化学品技术。

5、可再生能源电力

优化风机、叶片设计，以及开发轻量化材料实现风能更加高效采集应用；开发更先进的电机、磁性材料和电力电子等实现风能到电力高效转化；开发先进的地热技术(如高效热泵、高灵敏度地震监测、资源探测等技术)；开发先进的流体动力能源(如海洋能、水能、潮汐能等)转换技术；开发更高效率的光伏/聚光热发电技术；开发非光伏/聚光热发电的太阳能转化利用技术(如太阳能热利用、太阳能制燃料技术等)。

6、生物能源

开发新技术提升生物质产量、减少水利用量和成本；开发新催化转化技术实现一步/两步法生物质到燃料的高效转化；构建完善的生物能源产业供应链；生物基高价值化学品转化技术；微生物燃料电池技术。

7、其他能源技术

开发低成本高效淡水制取技术；开发先进制造业技术以提升制造业能效；开发提升家用电器和各类电子消费品(如电视机、电冰箱、电脑、手机等)能效的技术；开发提升数据中心、大型计算机设施能效技术；开发提升工业过程能效减少碳排放的新技术；开发高效热利用技术(如斯特林发动机、废热转化利用、热交换器等)；针对能源应用领域开发先进的半导体技术(如光伏半导体)；开发用于发电设施的耐高温材料。

(王珍 严烙意 郭楷模 汤匀)

日产汽车将在未来五年投资 2 万亿日元推动汽车电气化

11 月 29 日，日产汽车宣布将在未来五年内投资 2 万亿日元加速汽车电气化进程⁷。在电池创新研发方面，将引入无钴技术，到 2028 年实现电池制造成本降低 65% 的目标，并在 2028 年推出具有自主知识产权的全固态电池电动汽车。在构建全球电

⁷ Nissan Unveils Ambition 2030 Vision to Empower Mobility and Beyond.

<https://global.nissannews.com/en/releases/release-0f1f4ed24f506b7f8039127912028dad-nissan-ambition-2030-vision-to-empower-mobility-beyond>

池供应链方面，到 2026 年将其全球电池产能增加到 52 吉瓦时，到 2030 年增加到 130 吉瓦时。在可持续发展方面，与 4R Energy 公司合作开发电池回收再利用技术，到 2026 年投资 200 亿日元用于充电桩建设。

(汤匀)

澳大利亚将于 2022 年启动建设南半球最大的风电场

12 月 31 日，澳大利亚宣布投资 20 亿澳元于 2022 年在维多利亚州启动建设南半球最大的 Golden Plains 风电场⁸，该风电场计划最多安装 228 台风力涡轮机，装机规模将达到 800-1000 兆瓦，每年生产 3500 吉瓦时电力以满足超过 76 万户家庭日常用电。Golden Plains 风电场占地 167 平方公里以上，建成后每年将减少约 480 万吨碳排放。根据最新规划，该项目风力涡轮机最大高度将限制在 230 米内，涡轮转子的直径从原计划的 150 米增加到 165 米。

(汤匀)

2D 钙钛矿钝化助力太阳能电池实现上千小时稳定性运行

相关研究表明二维（2D）钙钛矿比三维（3D）钙钛矿具备更好的稳定性，因此被广泛用做界面修饰层以钝化 3D 钙钛矿薄膜，减少薄膜缺陷，改善性能和稳定性。但 2D 钙钛矿的载流子传输性能不如 3D 结构，这在一定程度上抑制了其改善作用，因此如何有效改善 2D 钙钛矿载流子传输性能，以最大化其钝化效果、进一步提升钙钛矿电池性能和稳定性成为了研究热点。

美国国家可再生能源实验室 Kai Zhu 教授课题组牵头的联合研究团队利用分子工程设计了以二价铵作为间隔阳离子的 Dion-Jacobson(DJ)相 2D 钙钛矿薄膜，充当钝化层来修饰 3D 钙钛矿薄膜，实现了对钙钛矿薄膜缺陷有效钝化，抑制了非辐射的复合损失，同时由于 DJ 相 2D 钙钛矿具备弱氢键使得空穴传输得到了显著改善，进而显著增强了电池性能和稳定性，最优电池性能接近 25%，且可以稳定运行 1000 小时，为钙钛矿大面积规模化制备积累了关键技术基础。

目前广泛报道的 2D 钙钛矿主要是 Ruddlesden-Popper (RP) 相结构，但该类薄膜具备了很强的层间氢键作用，使得载流子传输受到抑制。为此，研究人员通过分子工程设计制备出以二价铵作为间隔阳离子的 DJ 相 2D 钙钛矿，其层间的氢键作用显著弱化，有助于促进载流子传输。为了对比，研究人员同时制备了 RP 相 2D 钙钛矿并开展了电化学性能测试，结果显示 DJ 相的外平面载流子传输效率比 3D 相高了 4-5 个数量级。而基于 DJ 相的 2D 钙钛矿薄膜电池器件效率可达 4.9%，这是目前文

⁸ Construction of Largest Wind Farm in Southern Hemisphere to Begin in 2022. <https://www.world-energy.org/article/22116.html>

献报道的 2D 钙钛矿电池性能最高值。随后研究人员以上述 DJ 相 2D 钙钛矿薄膜作为界面修饰层用于钝化 3D 钙钛矿，一系列的微观结构表征显示 2D 钙钛矿薄膜钝化后，钙钛矿薄膜的缺陷态密度显著减少，且空穴传输能垒显著下降（意味空穴传输效率提升），主要是因为化学键的相互作用使得覆盖 2D 钙钛矿不对称有机分子在 3D 钙钛矿薄膜表面出现了择优取向。进一步，研究人员以上述 2D/3D 钙钛矿薄膜作为活性层制备电池器件并测试电化学性能，实验发现电池性能从无 2D 钝化的 22% 显著提升到了 24.7%；更为关键的是长程稳定性研究显示，无封装的电池在一个模拟标准太阳光、40°C 氮气氛围下连续工作 1000 小时后仅仅衰减了 10%，相比之下无 2D 钝化电池器件性能出了大幅衰退，下降了近 50%。表明了 DJ 相 2D 钙钛矿不仅可以增强电池性能，还有助于提升电池的长程稳定性。

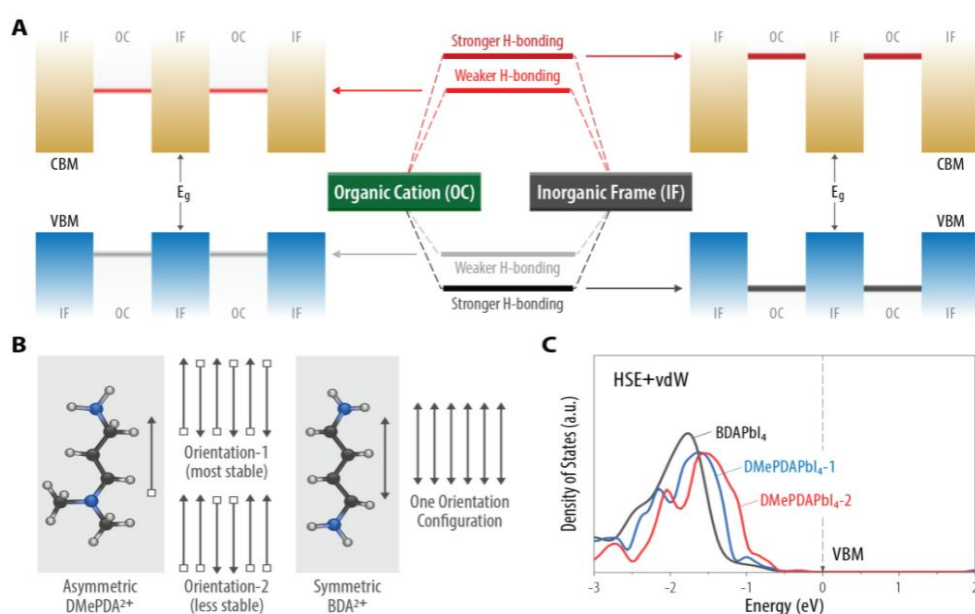


图 1 含有层间强氢键和弱氢键的钙钛矿分子结构示意图

该项研究精心设计制备了一种具备层间弱氢键的 DJ 相 2D 钙钛矿并用于钝化 3D 钙钛矿，减少薄膜缺陷，增强了空穴传输，进而增强了电池性能和长程稳定性，电池器件转换效率从无钝化 22% 大幅增加到了 24.7%，且在无封装情况可以高效稳定运行 1000 小时，表现出了优异的长程稳定性，为制备高效长寿命的钙钛矿电池提供了新思路和技术路线。相关研究成果发表在《Science》⁹。

(王珍 郭楷模)

⁹ FEI ZHANG, SO YEON PARK, CANGLANG YAO, et al. Metastable Dion-Jacobson 2D structure enables efficient and stable perovskite solar cells. *Science*, 2021, DOI: 10.1126/science.abj2637

低碳化多能融合

日本 NEDO 资助下一代氢动力飞机技术开发

11月5日，日本新能源产业技术综合开发机构（NEDO）宣布将通过“绿色创新基金”投入210.8亿日元启动“下一代飞机研制”项目¹⁰，推进开发氢动力飞机的核心技术以及相应的主要结构部件。该项目的实施期为2021-2030年，资助详情如下：

1、氢动力飞机核心技术开发

(1) **开发氢动力飞机燃烧器及其系统技术。**该课题将示范氢动力飞机发动机系统，包括汽化器、燃料控制系统等辅助设备，还将开发满足未来排放要求的低NO_x氢燃烧器。

(2) **研制液氢燃料储罐。**该课题将研发液氢储罐的薄型隔热结构、燃料供应装置结构、罐体支撑结构、温度/压力控制系统，以减轻储罐重量。

(3) **氢动力飞机结构检验。**该课题将开发氢动力飞机的技术参考样机，并通过风洞进行可行性测试，该样机的续航性能为2000-3000公里。

2、开发氢动力飞机的复杂形状并显著减轻主要结构部件重量

(1) **新型轻量化飞机主要结构部件开发。**该课题将进行飞机主要复合材料结构部件的减重、提高生产效率及复杂形状研究，通过一体化成型技术和优化应变设计减轻机身重量，并研究大尺寸范围的机身制造工艺。通过大型结构的焊接技术、三维复合弯曲结构成型技术、优化外板和波纹板芯厚度的高精度制造技术，使用热塑性复合材料生产大型一体成型的副翼，将金属结构副翼重量减轻30%以上。

（岳芳）

高性能双钙钛矿电催化剂显著提升固体氧化物电池性能

固体氧化物电池（SOC）是能源清洁高效转化和CO₂利用的理想发展方向。传统的镍基金属陶瓷因其优异的电催化活性、热稳定性、化学稳定性和成本效益，被广泛用于SOC多孔材料的制作过程中。然而，燃料电极中不可避免地会发生镍的氧化还原和碳沉积，从而降低其电化学性能和长期稳定性。因此亟需开发高稳定性的SOC催化剂。

深圳大学符显珠教授研究团队设计构造出一种新型双钙钛矿材料，得益于丰富

¹⁰ グリーンイノベーション基金事業で、次世代航空機に関する研究開発事業に着手。
https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101488.html

的氧空位和氧离子迁移，极大促进了分析物与活性过渡金属的充分接触，从而加速催化反应过程，显著提升 SOC 性能，展现出较大的应用潜力。相关研究表明，钙钛矿氧化物(ABO)由于具有优异的离子和电子导电性以及良好的电学性能和稳定性，可广泛应用于 SOC。其中， $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ (SFM)双钙钛矿由于具有优异的导电性和抗积碳性能，具有潜在的应用前景。然而，目前其相对较差的催化活性阻碍了它们的实际应用，这主要是因为 O 空位含量低的钙钛矿氧化物的 AO 阻止了分析物与非常活跃的 B 中心之间的完全接触。因此，为了有效设计 SOC 基催化剂，迫切需要新的方法来克服这一问题。以往研究表明，元素掺杂（如 Fe）可以明显提高 SFM 基体的反应动力学。为此，研究人员通过用 Fe 离子部分取代 Mo 的研究策略，开发出 $\text{Sr}_2\text{Fe}_{1+x}\text{Mo}_{1-x}\text{O}_{6-\delta}$ 双钙钛矿结构催化剂，研究其电子结构，并深入分析了这种取代对晶体、物理、化学和电化学性质的影响。研究人员评估了合成的钙钛矿催化剂相对于 H_2 氧化和 CO_2 还原反应的催化性能。此外，通过 X 射线吸收精细结构谱(XAFS)和密度泛函理论的 Hubbard 关联 (DFT+U) 计算，深入了解这些材料的电化学性能随电子构型的变化规律。结果表明，随着 $\text{Sr}_2\text{Fe}_{1+x}\text{Mo}_{1-x}\text{O}_{6-\delta}$ 中铁含量的增加，其氧化态增加，金属-氧杂化增强，体相 O 的 p 能级带能量向费米能级移动。这些电子和结构的变化降低了 O 空位的形成和迁移能，从而促进了更多氧空位缺陷的形成和氧离子迁移，促进了分析物与活性 B 位过渡金属的充分接触，显著加快了 H_2 氧化和 CO_2 还原的电催化反应动力学。因此，采用优化的 $\text{Sr}_2\text{Fe}_{1.5}\text{Mo}_{0.5}\text{O}_{6-\delta}$ (SF1.5M) 电极在 800°C 运行的 SOC, H_2 为燃料时功率密度为 1.24 W cm^{-2} , 1.5 V 时 CO_2 电解电流密度为 1.5 A cm^{-2} , 可与目前最先进的镍基催化剂相媲美。

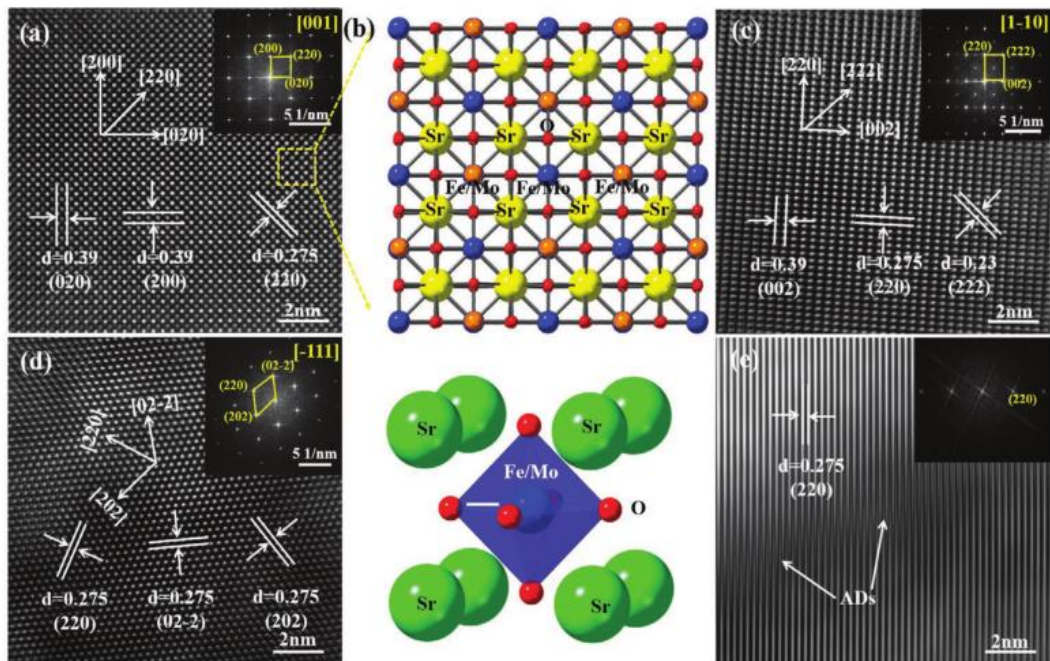


图 1 $\text{Sr}_2\text{Fe}_{1.5}\text{Mo}_{0.5}\text{O}_{6-\delta}$ 的透射电镜图和结构示意图

该项研究设计开发了全新的双钙钛矿材料，受益于用 Fe 部分置换 Mo，促进了更多氧空位缺陷的形成和氧离子迁移，促进了分析物与活性 B 位过渡金属的充分接触，从而显著提升了 SOC 的性能，这一发现不仅为增加 Fe 掺杂提高 $\text{Sr}_2\text{Fe}_{1+x}\text{Mo}_{1-x}\text{O}_{6-\delta}$ 系列反应动力学提供了新的认识，也为设计新的高性能 SOC 催化剂提供了普遍指导。相关研究成果发表在《*Advanced Energy Materials*》¹¹。

（占威 汤匀）

碳纳米点一体化光催化高效制氢

氢能在缓解能源危机和气候变化方面具有重要作用，析氢反应（HER）是氢能产业的重要环节之一，碳纳米点（CNDs）是集成到光催化析氢反应（HER）方案实现高效制氢的一种新策略，但在 HER 光催化方面，CNDs 主要作为光敏剂，与镍/钴配合物、氧化还原酶或二氧化钛纳米管结合作为催化剂，碳纳米管几乎不具有催化活性。CNDs 与铂基或金属氧化物基催化剂一起用作助催化剂。虽然少数报道表明，在没有助催化剂的情况下，碳纳米管也是催化活性物种，然而，它在这些体系中的活性非常低。因此，迫切需要开发具有高活性的 CNDs 催化剂构建高效 HER 催化平台。

德国埃尔兰根纽伦堡大学 Dirk M.Guldi 教授团队开发了一种具有光电催化活性 CNDs 的合成方法，所制备的 CNDs 光催化剂的一个主要特点是同时具有光吸收剂和催化剂的双重功能，CNDs 光催化剂不仅可以吸收光，而且通过光催化和电催化从水和海水中制取氢气，不需任何外部光敏剂或助催化剂。首先研究人员开发了一种制备光电催化活性碳纳米管的方案，在加压下采用微波辐射从柠檬酸和尿素的水溶液中制备 pCNDs，通过光氧化的方式对 pCNDs 进行修饰，得到 oCND-1 和 oCND-2。柠檬酸和尿素制备的碳纳米管结构和 pCND 一样，包括两个分子生色团：4-羟基-1 吡咯-[3,4]吡啶-[1,3,6]尿酸（HPPT）和柠檬酸（CZA）。前者主要是在无溶剂制备条件下生成的，而后者在涉及水介质的合成过程中占主导地位。结果显示，pCND、oCND-1 和 oCND-2 在 pH 为 7、电位为 $-0.41\text{ V}(\text{vs NHE})$ 的条件下，不需要任何光敏剂或助催化剂，具有较好的光催化活性。且三乙醇胺（TEOA）或乙二胺四乙酸（EDTA）作为牺牲电子供体的情况下，oCND-2 是最具活性的光催化剂。HER 实验结果显示，在 75 mW cm^{-2} 氙灯照射 1 h 后，添加 CND 催化剂利用水和海水的产氢效率分别为 $15.15\text{ mmol}(\text{H}_2)\text{ g}^{-1}\text{ h}^{-1}$ 和 $19.70\text{ mmol}(\text{H}_2)\text{ g}^{-1}\text{ h}^{-1}$ 。在相同条件下较其它碳纳米管材料催化产量高出 3 个数量级，是目前报道最高纪录的五倍。此外，研究人员基于大量稳态和时间分辨光谱表征以及显微镜技术的全面物理化学研究，全面探究了该反应机理：CND 材料的光氧化集中在 CZA 分子荧光团上，它们存在于 CND

¹¹ Xiuan Xi, Jianwen Liu, Wenzhi Luo, et al., Unraveling the Enhanced Kinetics of $\text{Sr}_2\text{Fe}_{1+x}\text{Mo}_{1-x}\text{O}_{6-\delta}$ Electrocatalysts for High-Performance Solid Oxide Cells. *Advanced Energy Materials*, 2021, DOI: 10.1002/aenm.202102845.

中，与 CND 粒子有强烈的相互作用。光催化机理的一个关键步骤是双分子电子从牺牲电子给体的转移。光氧化的 CZA 荧光团在光氧化时也增加了双分子电子转移速率，这表明其光氧化产物在提高 CND 材料的光催化 HER 活性方面起着关键作用。

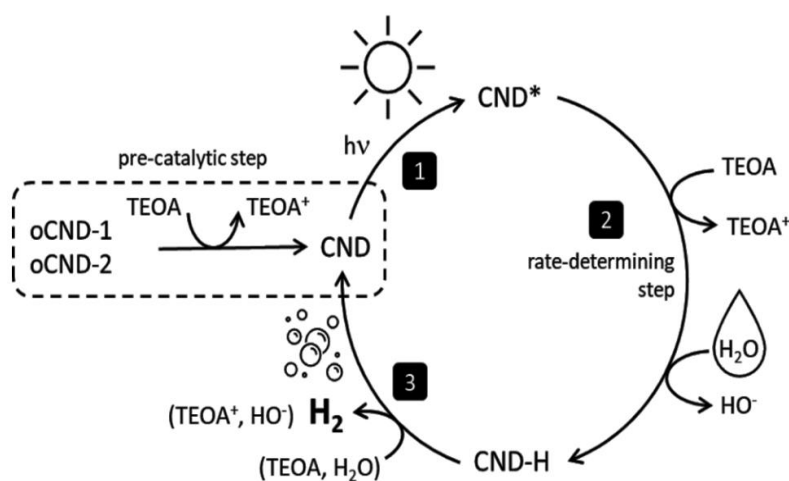


图 1 光氧化碳纳米管材料的 HER 活性的催化循环

该项研究设计开发了具有光电催化活性的 CNDs，受益于光氧化法对 CND 进行后合成修饰，提高 CND 材料光催化 HER 活性的简便方法，在氙灯下获得了新的 HER 催化产量记录，为实现清洁高效制氢提供有力的技术支撑。相关研究成果发表在《*Journal of the American Chemical Society*》¹²。

(占威 汤匀)

CO₂ 电化学还原直接连续制备高纯高浓度液体燃料策略

由电化学二氧化碳还原反应 (CO₂RR) 产生的液体燃料因其高能量密度、易于储存和传输而备受关注。然而，目前传统 CO₂ 电解槽和 CO₂RR 催化剂生成的液体燃料通常是低浓度且混合着杂质，虽然可再生电力价格的下降可以大大降低液体燃料的生产成本，但下游的净化过程将增加额外的生产成本，这将极大地阻碍其大规模应用的经济可行性。因此，急需在反应器工程优化和催化剂改进方面做出努力，实现从 CO₂RR 电解槽直接连续生产高纯高浓度液体燃料。

美国莱斯大学汪湔田教授团队使用先前报道的技术经济分析模型，指出了下游分离纯化和浓缩相关的额外成本将极大地降低液体产品的经济可行性，表明了直接从 CO₂ 电解槽获得高纯度、高浓度液体燃料的必要性。此外，通过简要回顾催化反应器设计在解决杂质和低浓度挑战方面的最新进展，提出了不同的策略作为未来潜在的研究方向，以进一步提高产品的选择性、活性、纯度和浓度，使其在未来实现大规模应用。相关研究表明，当前使用电化学 CO₂RR 来生产化学品和燃料比传统的

¹² Bikash Jana, Yana Reva, Tobias Scharl, et al., Carbon Nanodots for All-in-One Photocatalytic Hydrogen Generation. *Journal of the American Chemical Society*, 2021, DOI: 10.1021/jacs.1c07049.

化学工程合成方法有更多优势,但仍然面临着巨大的挑战。在传统的 CO₂ 电解槽中,所获得的液体燃料与杂质离子混合在一起,阻碍了燃料的直接使用。因此,必须实施额外的下游净化工艺,如反渗透或电渗析,将液体燃料与离子分离,这将极大地增加 CO₂RR 生产液体燃料的总成本。此外,这些由 CO₂RR 生产的液体燃料通常在电解液中被严重稀释,即使在除盐之后也无法适应现有的全球化学品供应链。为了从 CO₂ 还原获得高纯度、高浓度的液体燃料,开发高活性、高选择性的 CO₂RR 催化剂是前提条件。不同催化剂的使用会生成不一样的液体燃料,每一种液体燃料都是通过不同的反应中间体/反应途径形成的,因此需要适当设计催化活性位点,并提供不同的性能指标。因此,对每种目标液体燃料催化剂设计的挑战是完全不同的。为了进行一致的比较,研究人员使用了同一研究报告中的蒸馏成本模型作为技术经济分析模型,用于所有液体燃料产品。由于产品净化过程的巨大成本贡献,所有高纯度和高浓度液体产品的最终成本都高于当前的市场价格,使得这种 CO₂RR 液体燃料路线在经济上尚不可行。这表明,不仅迫切需要改进催化剂,而且迫切需要新型催化反应器,以实现直接生产高纯度和高浓度液体燃料而无需高成本的下游净化过程。为解决液体燃料杂质的问题,需要将传统液体电解质在 CO₂ 电解槽中执行离子传导和液体产物收集这两个主要步骤。具体策略是在阴极和阳极之间用一层薄薄的多孔固体电解质(PSE)取代液体电解质。浓缩最终产品的一种简单方法是直接降低通过固体电解质层的去离子水流速,同时保持 CO₂ 反应速率。

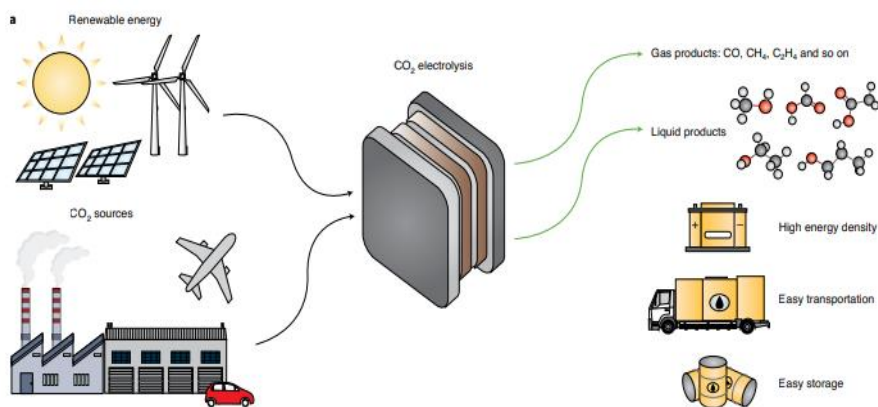


图 1 通过电化学 CO₂RR 实现可持续化学品生产的示意图

该项研究对液体燃料 CO₂ 减排的技术经济分析提供了一个重要信息,即传统电解槽中的电解质混合物和低浓度问题,这是 CO₂RR 领域商业化过程中的最大障碍之一。研究提出了反应器工程和催化剂改进方面的不同策略,以实现从 CO₂RR 电解槽直接连续生产高纯度、高浓度液体燃料,使这种电化学路线在未来与传统化工行业相比更具竞争力,也将极大促进电合成其他领域的发展,以实现纯液体产品的直接生成。相关研究成果发表在《*Nature Catalysis*》¹³。(占威 汤匀)

¹³ Peng Zhu, Haotian Wang, High-purity and high-concentration liquid fuels through CO₂ electroreduction. *Nature*

能源战略研究

IEA 发布《可再生能源 2021》报告预测未来五年发展趋势

12月1日，国际能源署（IEA）发布《可再生能源 2021：至 2026 年分析与预测》报告¹⁴，预测到 2026 年可再生能源技术在电力、交通运输和供热领域中的部署情况和面临的主要挑战。报告指出，到 2026 年全球可再生能源发电装机容量将较 2020 年增加 60% 以上，达到 1800 吉瓦以上，相当于目前全球化石燃料和核能的装机容量之和；此外，到 2026 年可再生能源发电将占全球新增电力容量的 95% 以上，其中太阳能光伏发电将贡献一半以上。中国依然是全球新增可再生能源发电装机容量的领导者，中国、印度、美国和欧洲四大市场将占全球可再生能源装机容量的 80% 以上。具体内容如下：

一、可再生能源发电领域

1、未来五年可再生能源发电装机容量将快速增长，但按照这一增长趋势仍无法实现 2050 年净零排放目标

在主要案例情景中¹⁵，预计未来五年全球可再生电力年均新增装机容量约为 305 吉瓦，较过去五年增长近 60%。尽管如此，可再生能源发展仍面临一系列政策不确定性和实施过程中的挑战，如当前大宗商品价格的上涨给投资成本带来了上行压力，而一些市场原材料供应和电价的上涨在短期内给风能和太阳能制造商带来了额外的挑战。在加速案例情景中¹⁶，预计未来五年全球可再生电力年均新增装机容量将较主要案例情景增加四分之一，达到 380 吉瓦以上。然而加速案例情景与 2050 净零排放情景之间仍存在较大的碳排放差距，在 2050 净零排放情景中，未来五年全球可再生电力年均新增装机容量需较加速案例情景增加 80% 以上，这意味着政府需要进一步提高目标，以实现 2050 净零排放目标。

Catalysis, 2021, DOI: 10.1038/s41929-021-00694-y.

¹⁴ Renewables 2021 Analysis and forecasts to 2026. <https://www.iea.org/reports/renewables-2021>

¹⁵ 主要案例情景：与既定政策情景类似。

¹⁶ 加速案例情景：大宗商品价格将稳定回落到 2015-2019 年水平，私营部门将实现更具经济效益的融资过程。

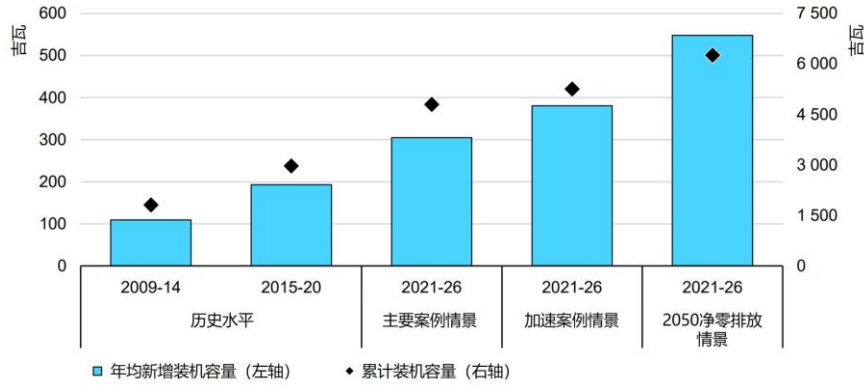


图1 不同情景中可再生能源电力年均新增装机容量与累计装机容量预测

2、全球各地可再生电力部署规模持续扩大不断刷新情景预测上限

在主要案例情景中，全球到2026年可再生电力装机容量将突破1800吉瓦，占全球新增装机量的95%以上。中国依然是全球新增可再生电力装机容量的领导者，占全球增量的43%，其次是欧洲、美国和印度。上述四个地区占全球可再生电力装机规模的80%以上。在中国，到2030年超过40%的发电量将来自于非化石能源，并于同年实现1200吉瓦的风能和太阳能发电装机目标；在欧洲，将在经济复苏计划下提供8000亿欧元用于发展可再生能源，以实现到2030年减排55%的目标；在美国，风能和太阳能光伏的税收抵免仍将延续；在印度，政府宣布到2030年实现500吉瓦的可再生电力装机目标，并出台了额外的政策刺激分布式光伏产业的发展。

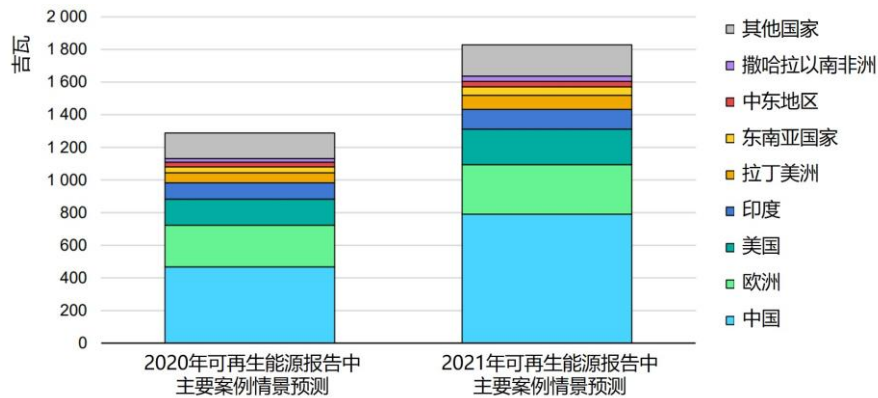


图2 2020和2021年报告主要案例情景对未来五年不同国家/地区可再生电力装机容量预测

3、太阳能光伏产业推动可再生电力创纪录发展

在太阳能光伏发电的推动下，2021年全球新增可再生电力装机规模近290吉瓦，较2020年创纪录水平上仍增加3%。在主要案例情景中，未来五年年均新增可再生电力装机容量将达到305吉瓦，较过去五年增加58%。尽管大宗商品价格的上涨将影响太阳能光伏产业的投资成本，但预计2021年太阳能光伏发电装机容量将同比增长17%，达到近160吉瓦；到2026年新增光伏发电装机规模将达到200吉瓦。未来五年，公共事业规模的项目将继续贡献全球太阳能光伏增量的60%以上。在加速案例情景中，全球太阳能光伏装机容量到2026年将增至近260吉瓦。中国、欧洲、美

国和印度等主要市场的增长空间最大，撒哈拉以南非洲和中东等新兴市场也具有较大的增长潜力。

4、未来五年，除海上风电新增装机规模快速扩张之外，陆上风电、水电、生物能源发电、地热能发电和聚光太阳能热发电发展将放缓

2020 年全球新增陆上风电装机规模达到 108 吉瓦，这主要受中国推动，但随着中国陆上风电补贴取消，预计未来五年全球陆上风电年新增装机规模将下降到 75 吉瓦。尽管如此，这仍比过去五年年均新增装机规模高出近 25%。中国、欧洲和美国合计占未来五年陆上风电新增装机规模的 80%。在加速案例情景中，到 2026 年陆上风电年度新增装机规模将达到 110 吉瓦，略高于 2020 年创纪录水平。预计 2021 年海上风电市场将加速增长，新增装机规模将达到 11 吉瓦，几乎是过去的 2 倍。尽管中国受补贴取消新增装机规模增长将放缓，但由于英国、德国、比利时、丹麦和荷兰之外的新市场快速扩张，到 2026 年全球海上风电新增装机规模将达到 21 吉瓦，累计装机规模将达到 120 吉瓦。在主要案例情景中，海上风电装机规模在年度风电新增装机规模中占比将达到 20% 以上。然而随着英国和欧盟海上风电和陆上电网的快速部署、中国风电成本的快速下降和强有力的政策出台、美国大型电网早期部署，在加速案例情景中，到 2026 年全球海上风电累计装机规模将增加至 134 吉瓦。

与过去五年快速扩张相比，水电、生物能源、地热能和聚光太阳能热发电等波动性可再生能源在未来五年增长将放缓约 5%。这主要是与风能和太阳能光伏相比，投资和发电成本相对较高，缺乏政策支持以及对波动性可再生能源灵活性的认可有限，阻碍了其更快的发展。对于水电，在主要案例情景中，中国、印度和土耳其三大市场将共同推动未来五年全球新增装机 153 吉瓦。对于生物能源发电，中国将贡献全球 60% 的新增装机规模，而中国之外的地区受到供应链挑战、缺乏政策支持和相对较高的发电成本将导致生物能源发电进展缓慢；对于地热能，尽管发展潜力巨大，但未来五年地热能发电的新增装机规模预计不到 5 吉瓦；对于太阳能热发电，未来五年新增装机规模将不到 3 吉瓦。

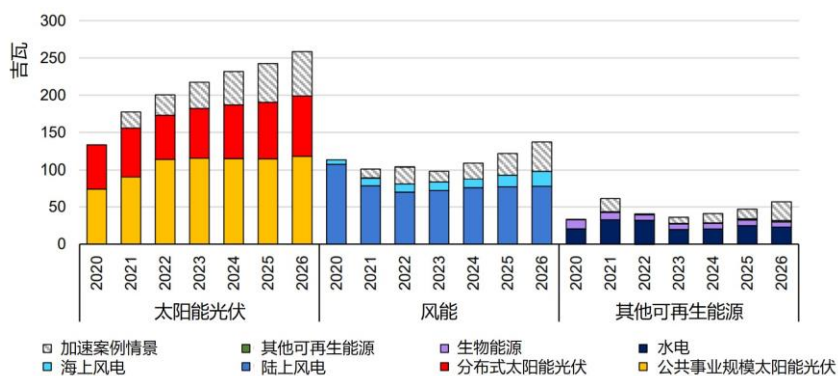


图 3 至 2026 年主要案例情景和加速案例情景中太阳能光伏、风能和其他可再生能源年度新增装机规模预测

5、2021 年主要市场低风力环境和干旱条件阻碍了其可再生能源发电规模的快速增长

预计 2021 年可再生能源发电量将同比增加 6%，达到 7900 太瓦时以上，略高于过去五年年均增长率。而 2021 年可再生电力累计装机规模增速更为显著，这种发展差距主要是由于风力发电和水电关键市场的不利环境导致，如果没有这些不利环境影响，2021 年可再生能源发电量将同比增加近 9%。巴西、美国、中国和土耳其的严重干旱条件限制了全球水力发电总量，2021 年全球水力发电量将与 2020 年持平。而对于风力发电，预计 2021 年全球风力发电量将增加 14%，达到近 220 太瓦时，受恶劣气候环境影响，欧盟风力发电量将下降 3%，这是三十多年来欧盟风电首次下降；但巴西、中国、印度和美国风电产能的强劲增加弥补了其他主要市场风电产能增长放缓的影响。在主要案例情景中，可再生能源发电量将在未来五年增长近 52%，到 2026 年将达到 11 300 太瓦时以上。预计到 2026 年可再生能源发电量将占全球发电总量的近 37%，成为最大的发电来源。虽然水电仍然是可再生能源发电总量的最大来源，但其在全球发电总量中的份额略有下降至 15.6%。与此同时，波动性可再生能源（太阳能光伏和风能）发电量将占全球发电总量的近 18%，超过水电。在所有可再生能源中，未来五年海上风力发电量将增长最快，涨幅将达到 240%，到 2026 年将占发电总量的 1.5%。

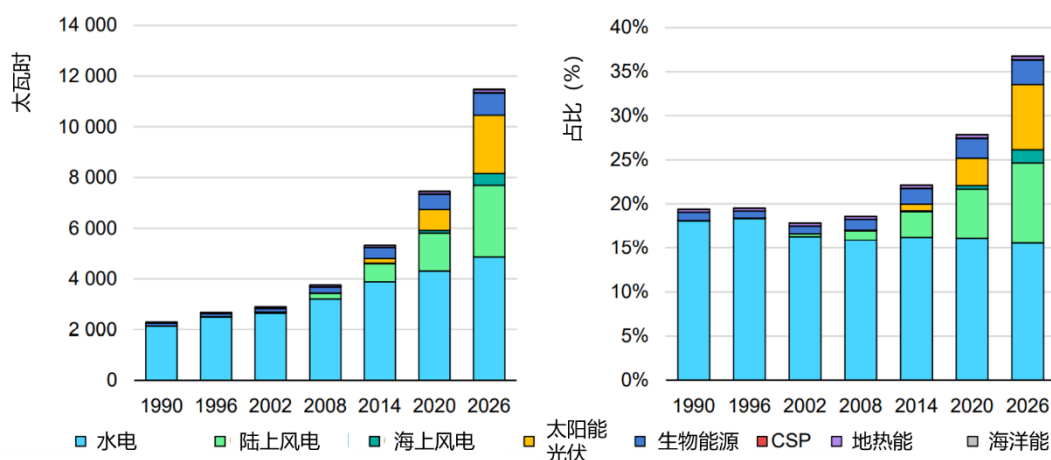


图 4 至 2026 年不同可再生能源技术发电量及占比预测

二、生物燃料领域

1、尽管生产成本高昂，但未来五年全球生物燃料需求仍将增长

未来五年，全球生物燃料需求将增长 410 亿升，涨幅达到 28%，恢复到疫情前水平，占全球燃料需求增量的五分之一。政府政策支持是生物燃料可持续发展的主要驱动力，此外还包括如整体交通燃料需求、成本和具体政策设计都将影响生物燃料需求的快速增长。生产成本上涨正在减缓生物燃料需求的增长，例如巴西、阿根廷、哥伦比亚和印度尼西亚正在通过暂时减少或推迟生物燃料项目来管理不断攀升

的原料成本，预计这些行动将导致 2021 年生物燃料需求减少 3%，即 50 亿升。虽然需求增长放缓，但 2021 年生物燃料需求将从疫情后的大跌恢复到 2019 年水平。但这种恢复是不平衡的。2021 年全球乙醇需求仍较 2019 年水平低 4%，到 2023 年才能完全恢复。但相比之下，2021 年生物柴油和生物喷气燃料的扩张幅度远远超过 2019 年水平，2021 年这些燃料的总需求比 2019 年增长 15%，即 70 亿吨。其中美国生物柴油和中国生物柴油的需求增长是推动该领域需求增长的主要原因。

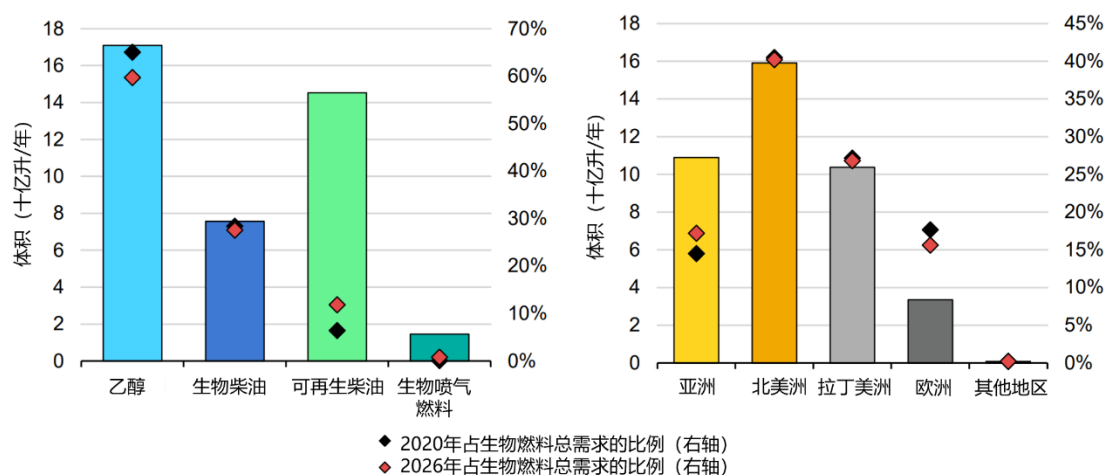


图 5 2021-2026 年不同种类（左）和不同地区（右）生物燃料需求增长预测

2、亚洲生物燃料生产总量将在 2026 年之前超过欧洲，乙醇和生物柴油为代表的生物燃料增长迅速

预计在未来五年内亚洲生物燃料的产量将超过欧洲，这主要归功于强有力的政策支持、不断增长的液体燃料需求和出口扩张驱动。亚洲国家印度尼西亚和马来西亚生物柴油掺混目标和印度的乙醇政策是推动生物燃料产量增长的主要因素。到 2026 年北美生物燃料需求涨幅最大，美国和巴西是全球最大的生物燃料需求和生产中心。

预计未来五年生物柴油需求将增加 2 倍，这主要归功于美国和欧洲的政策支持。然而在绝对需求量上，乙醇的需求增长量仍将超过生物柴油，这主要归功于拉丁美洲和亚洲不断增长的需求所致。

3、美国、欧洲、印度和中国四大主要市场的政策支持将有助于生物燃料需求的持续增长

美国、欧洲、印度和中国政府激励政策将在未来五年内对全球生物燃料前景产生深远影响，在加速案例情景中，全球生物燃料需求量将增加一倍以上，涨幅达到每年近 9%，上述四大主要市场将占这一涨幅的三分之二。其中亚洲将占据最大的上升空间，超越巴西成为全球第二大生物燃料生产市场。生物喷气燃料需求也将大幅增长，到 2026 年将增长近 60 亿升。在美国，可持续航空挑战为航空业设定了一个目标，即到 2030 年使用 110 亿升可持续航空燃料（SAF），为实现这一目标，政府

正在制定与温室气体强度相关的 SAF 税收抵免政策。在欧洲，颁布了包括 ReFuelEU 在内的一揽子计划，制定了到 2025 年 SAF 使用占比将达到 2% 的目标。在中国，政府宣布在 2030 年实现碳达峰，作为承诺的一部分，中国计划大力推广先进液体生物燃料和 SAF 等替代燃料。在印度，政府计划在五年内实现乙醇使用占比达到 11%，成为仅次于美国和巴西的第三大乙醇市场。

4、生物燃料需要更快的应用部署以实现 2050 净零排放目标

要实现 2050 净零排放目标，生物燃料需求量将比主要案例情景中的需求量增加一倍，比加速案例情景中的需求量增加 40% 以上。这主要是减少交通运输过程的碳排放，特别是减少航运和海运过程的碳排放。

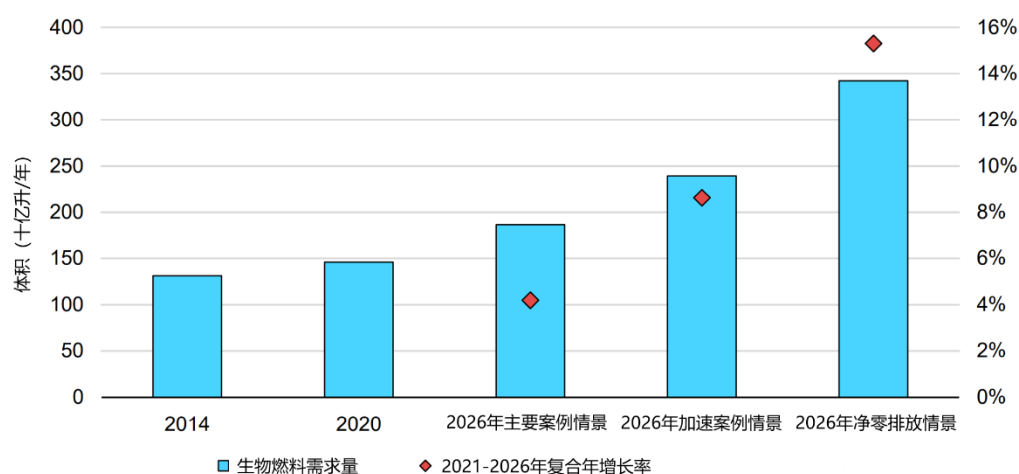


图 6 至 2026 年不同情景预测的生物燃料需求量增长情况

为实现净零排放目标，各国需要在现有政策的基础上，制定更加雄心勃勃的目标。但在制定高标准政策时需要考虑生物燃料生产的可持续性，避免对生物多样性、淡水系统以及粮食价格和供应产生负面影响。主要国家在主要案例情景和加速案例情景的生物燃料市场目标如表 1 所示。

表 1 主要国家在主要案例情景和加速案例情景的生物燃料市场目标

国家/地区	主要案例情景和加速案例情景的生物燃料市场目标
美国	主要案例情景： 与现有政策没有重大更改。在未来五年内，乙醇使用占比仍接近 10%，出口量维持 2020 年水平；生物柴油使用占比接近 3%；生物喷气燃料使用占比达到 0.7%。
	加速案例情景： 在未来五年内，乙醇使用占比将达到 12%，生物柴油使用占比将达到 4%，可再生柴油的使用占比扩大到 7%，生物喷气燃料使用占比将达到 3%。到 2026 年，美国生产的可再生柴油、生物喷气燃料和生物柴油除了完全满足国内需求之外，还需具有一定的出口能力。
巴西	主要案例情景： 巴西将增加乙醇的使用量，到 2026 年实现乙醇使用占比达到 57%，但可再生柴油和生物喷气燃料使用量并没有增长。
	加速案例情景： 到 2026 年巴西乙醇使用占比达到 59%，生物柴油使用占比达到 2%。巴西生产的乙醇、生物柴油、可再生柴油和生物喷气燃料除了完全满足

	国内需求之外，还具有一定的出口能力，但出口量将低于历史水平。
印度	<p>主要案例情景：到 2026 年，印度全国乙醇使用占比将达到 11%，所有燃料乙醇实现国内生产，生物柴油使用占比将达到 0.4%。</p> <p>加速案例情景：印度将在 2025 年前实现乙醇使用占比达到 20%、生物柴油使用占比 5% 的目标，并持续支持国内生产，但允许燃料乙醇进口量小于需求量的 20% 以内。</p>
中国	<p>主要案例情景：乙醇和生物柴油的支持政策无明显变化，乙醇使用占比将保持在 2% 左右，生物柴油使用占比为 1%，乙醇的进口量仍保持在 2021 年水平，生物柴油的出口量保持在 2020 年水平。</p> <p>加速案例情景：中国“十四五”规划中将实现生物燃料使用占比增加到 4%，将生物柴油和可再生柴油的使用占比增加到 3%，并实现国内航空生物燃料使用占比增加到 1%。中国允许从美国和其他国家进口乙醇以满足本国 10% 的乙醇需求，生物柴油和可再生柴油的出口仍将继续。</p>
印度尼西亚	<p>主要案例情景：到 2026 年印度尼西亚生物燃料使用比例将达到 40%，其中大部分来自于生物柴油，可再生柴油使用占比仅占 3%，没有乙醇或生物喷气燃料的生产和使用。所有生物燃料出口量维持在 2020 年水平。</p> <p>加速案例情景：可再生柴油使用占比将再额外提高 5%，由于几乎所有的燃料生产均来自国内，到 2026 年出口量将下降。</p>
欧洲	<p>主要案例情景：欧盟成员国实施 RED II 或更严格的国内目标，非欧盟成员国实施本国国内目标。德国生物柴油和乙醇使用份额保持不变，而可再生柴油的使用占比则增加到 2.5%；法国乙醇使用份额扩大，生物柴油使用水平保持不变，可再生柴油使用占比增加到 2%，到 2025 年生物喷气燃料使用份额将达到 2%；西班牙乙醇和生物柴油的使用水平保持不变，但可再生柴油和生物喷气燃料使用占比将增加到 3% 和 0.5%；芬兰、荷兰和英国的乙醇使用占比均接近 10%；瑞典生物喷气燃料使用占比将增加到 3%；意大利可再生柴油使用占比将增加到 5%。</p> <p>加速案例情景：欧盟设定了 2% 的 SAF 目标，此外还实施了对 RED II 拟议的更改，重点将交通温室气体碳强度减少 13%。此外，欧盟维持并加强了生物燃料的可持续性要求，限制了一些生物燃料的进口，到 2025 年英国将实现 1% 的 SAF 国内生产目标。</p>
其他国家	<p>主要案例情景：加拿大将在 2022 年实施清洁燃料标准；马来西亚将在 2023 年开始实施；泰国到 2026 年前将实现生物燃料使用占比达到 15%，其中生物柴油使用占比将增加到 10%；新加坡可再生柴油和生物喷气燃料生产规模将扩大；阿根廷生物柴油使用占比将维持在 5%，乙醇使用占比将增加到 12%；哥伦比亚到 2022 年乙醇使用占比将恢复到 10%，到 2026 年生物柴油使用占比将维持在 10% 左右。</p> <p>加速案例情景：加拿大同美国一道支持 SAF 目标；马来西亚将工业部门生物柴油使用占比扩大到 20%；阿根廷生物柴油使用占比再提高 10%；哥伦比亚生物柴油使用占比将增加到 13%；泰国到 2026 年将实现 20% 的乙醇使用占比，并允许 10% 的乙醇产量进行出口。</p>

三、可再生能源供热领域

1、全球可再生能源供热进展缓慢

供热是全球最大的能源终端应用，占 2021 年全球终端能耗的近一半，远远高于电力（20%）和交通运输（30%）。工业过程占供热领域能耗量的 51%，建筑物供暖（空调、暖气和烹饪）占 46%，剩余用于农业部门，主要进行农作物温室种植。2020 年全球供热需求下降了 2%，主要是由于疫情导致经济活动减少，但可再生热能消耗量同比增长超过 3.5%。中国贡献了全球超过四分之一的供暖能耗（其中 70% 用于工业部门），而美国、欧盟、俄罗斯合计占全球供暖能耗的 35%。2020 年供热领域相关的 CO₂ 排放量达到 131 亿吨，占碳排放总量的 40%。供暖领域严重依赖化石燃料，2020 年可再生能源在该领域仅占不到四分之一，这一比例在过去三十年几乎保持不变。

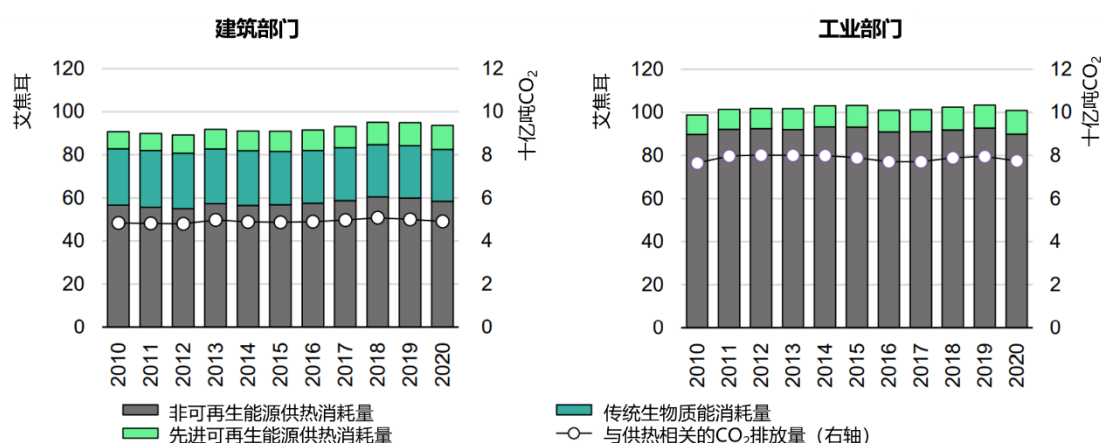


图 7 2010-2020 年建筑部门与工业部门可再生和不可再生供热能耗及相关 CO₂ 排放量

2、到 2026 年需加大可再生能源供热以实现 2050 净零排放目标

预计未来五年内全球供热需求将增加 17 艾焦耳，增长幅度高达 9%，是过去十年的三倍。这几乎都来自工业部门供热需求的不断增长，其中一半的需求增长来自中国 and 印度。未来五年内，传统生物质能需求预计将小幅下降 1.7 艾焦（下降 7%），这主要受中国和印度进行生物质炉灶的升级改造影响导致。全球先进可再生供热消耗量预计将比需求量增长更快，增长 5.4 艾焦耳，涨幅近四分之一。未来五年，建筑部门贡献供热增长的绝大部分。未来五年虽然可再生能源供热占比将从 2020 年的 11% 增长到 2026 年的 13%，但这仍不足以抑制不可再生能源供热导致的碳排放。预计未来五年内，与供热相关的化石燃料燃烧释放的 CO₂ 将增长 5%，相当于 6 亿吨 CO₂。因此，可再生能源供热所占份额必须以 2.5 倍的速度增长，再加上人们外出方式的大规模改变以及建筑和工业部门材料和能源效率的改进，才能实现 2050 净零排放目标。

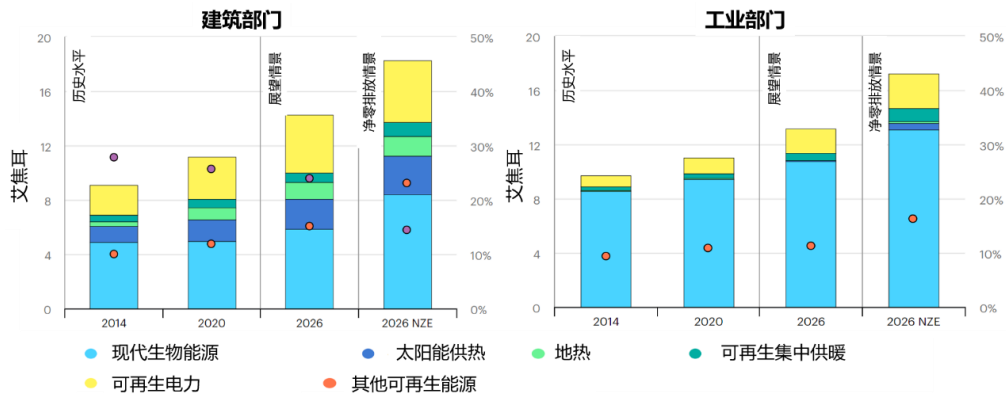


图 8 至 2026 年建筑部门与工业部门可再生能源供热能耗及其在供热需求中的占比预测
注：展望情景指的是截至 2021 年 9 月政策制定的目标

3、未来需针对建筑和工业部门采取及时有效的行动以实现净零排放目标

在 IEA 净零排放情景中，现代可再生能源供热在建筑部门消耗量增长速度是展望情景的 2 倍，而在工业部门几乎达到 3 倍。未来五年，与展望情景相比，净零排放情景中现代生物能源消耗量将额外增加 5.1 艾焦耳，工业部门和建筑部门各贡献 50%。在工业部门这一差距主要来自水泥生产中使用了更多的城市固体废弃物，以及造纸过程中对废弃物的再利用；在建筑部门，将更广泛地推进改进的生物质炉灶替代传统生物能源。此外，在可再生电力方面，通过热泵和直接电气化过程（如用电弧炉）实现更高水平的终端用能电气化。在净零排放情景中，到 2026 年全球建筑物中安装的热泵数量将比展望情景增加 50%，到 2030 年将增加到 6 亿台，主要是颁布化石燃料锅炉使用禁令。到 2030 年热泵将满足建筑物 20% 的能源需求，高于 2019 年 5% 的利用水平。在太阳能供热方面，未来五年在净零排放情景中直接太阳能供热能耗增长速度是展望情景的 2.5 倍以上，相差 1.1 艾焦耳。这一增长主要来自于建筑领域大规模安装太阳能热水器、工业制造过程中太阳能供热的扩张。因此，使用太阳能供热系统的住宅数量将从 2020 年的 2.5 亿户增加到 2030 年的 4 亿户，到 2050 年将增加到 12 亿户。值得注意的是，现有集中供暖系统的脱碳潜力远远超过了目前的预测，到 2026 年可再生能源在全球集中供暖的使用份额将增加 1 倍以上。这意味着可再生能源集中供暖的增长速度需要比展望情景快 6 倍。

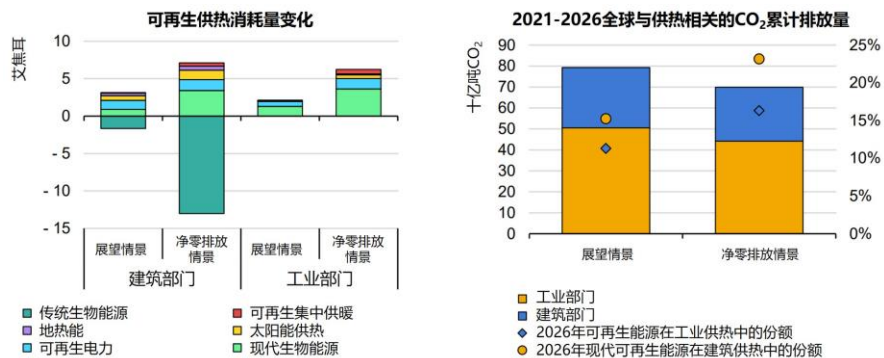


图 9 至 2026 年全球可再生能源供热消耗量变化及供热相关的 CO₂ 累计排放量

长远来看，净零排放情景预测在建筑和工业部门，生物甲烷、可再生能源和氢能等用于供暖的清洁气体应用场景将更为广泛，但目前应用仍受到一定的限制，这些基于可再生能源的能源载体可以通过渐进式掺混入当前燃料中，利用现有的天然气基础设施继续输送，并最终应用于终端设备。除扩大可再生能源供热应用范围外，改变人们出行方式、优化材料和提高能源效率对满足净零排放过程中供热需求至关重要。此外，更高效的烹饪和取暖技术取代传统生物能源应用也是实现净零排放的一个关键要素。

四、可再生能源发展趋势有待观察

1、大宗商品价格的持续上涨可能会对清洁能源转型带来长期影响

全球范围内，不断上涨的大宗商品价格增加了太阳能光伏组件、风力涡轮机和生物燃料生产成本。这将在短期内对设备制造商、项目开发人员和决策者产生影响，太阳能光伏和风力发电设备价格的上涨，扭转了这些行业十多年来成本下降的趋势，可能导致一些正在融资的项目进度推迟，但从最近推进的项目来看，尽管价格不断上涨，但全球对太阳能光伏和风力发电需求依然强劲。虽然大宗商品价格持续上涨的时间仍不确定，但材料成本的上涨对可再生能源行业经济效益的影响将对清洁能源转型产生长远影响。

2、全球经济刺激将促进可再生能源进一步扩张

截至 2021 年 10 月，世界各国政府以退税、贷款、资助等形式调动了近 17 万亿美元的经济刺激投入，经批准的政府清洁能源支出达到 4800 亿美元，其中清洁能源公共支出 450 亿美元，约占 9%，主要包括电力、供热和生物燃料。受低成本碳减排技术的鼓舞，能源效率行业已经获得了 1440 亿美元，这是全球最大的清洁能源支出，其中建筑翻新和工业部门的能源效率投资力度最大，其次是公共交通部门（940 亿美元）、低排放汽车和充电桩建设（790 亿美元）。在低碳电力支出方面，预计太阳能光伏将获得最大资助（240 亿美元），约占近一半份额；核能将获得约 90 亿美元的公共资助，其次是海上风能和陆上风能。尽管对灵活性燃料的需求日益增加，但波动性可再生能源，包括水电、地热和生物能源仅获得 35 亿美元。多国政府认为低碳氢燃料将作为未来难以减排行业的主要燃料，因此，约有 300 亿美元公共支出用于支持氢能发展，其主要用于可再生能源制氢。

3、到 2026 年，绿氢热潮将带来更多的可再生能源产能

2020 年，全球电解槽装机规模约为 0.3 吉瓦，到 2026 年，全球电解槽装机规模将达到近 17 吉瓦，其中一半的电力来源将利用可再生能源。到 2021 年 10 月，全球已宣布计划中的电解槽项目超过 260 吉瓦，预计这将带来额外 475 吉瓦的风能和太阳能光伏发电装机，占目前波动性可再生能源装机总量的三分之一，主要用于绿氢生产。尽管目前多个国家和企业宣布了雄心勃勃的绿氢计划，但该领域的盈利能力

仍面临挑战，这主要是由于在世界大多数地方，可再生能源电解制氢成本仍高于化石燃料制氢，电解槽产能扩张的关键是成本的降低。

4、到 2026 年全球储能市场仍将持续增长

全球已安装的储能装机容量将在未来五年增长 56%，到 2026 年将超过 270 吉瓦，以充分利用和整合波动性可再生能源实现并网发电。公共事业规模的电池储能预计将占全球储能增长的大部分，未来五年装机容量将增加 6 倍。美国税收优惠政策将推动电池储能的扩张，而中国计划在未来五年电池储能装机规模增长 5 倍。未来五年抽水蓄能仍将占据最大份额，将贡献全球 42% 的储能装机增量，到 2026 年累计装机规模将达到 200 吉瓦，是电池储能的 3 倍。未来五年，受中国新能源补贴政策影响，聚光太阳能热发电储能新增装机规模将达到 2.6 吉瓦。

5、五大先决条件推进生物喷气燃料商业化应用

未来五年要实现生物喷气燃料商业化应用需满足以下五大条件：①生物喷气燃料必须被证明是安全且技术可靠的；②燃料成本必须是消费者和航空公司所能接受的；③政府需要实施明确的监管和出台支持性政策，如低碳燃料标准、研发资金、激励措施等；④生物喷气燃料生产商需要提前进行融资、办理许可证、建设必要的基础设施；⑤制造生物喷气燃料的原料必须是可持续的。综合上述五大先决条件，预计到 2026 年，在主要案例情景和加速案例情景中，生物喷气燃料需求将分别达到 20 亿升和 60 亿升，而目前生物喷气燃料的产量约为 1 亿升。虽然目前制备生物喷气燃料的技术是安全可靠的，但主要国家还没有出台相关政策予以支持，未来其发展速率将主要取决于美国、欧洲和中国的政策规划。

（汤匀）

IEA-OES 发布《海洋热能转化白皮书》

10 月 19 日，国际能源署海洋能源系统组织（IEA-OES）发布《海洋热能转化白皮书》¹⁷，系统描述了全球探索热能资源转化技术发展现状、海洋热能转化电站项目的进展和发展面临的主要障碍。主要包括：

1、热能资源转化（OTEC）技术发展现状

OTEC 技术是具有巨大潜力的基础负荷电源，将有效支撑海水淡化、建筑制冷和间接促进藻类生长

热带海洋是一个巨大的太阳能收集器，OTEC 技术可以使海洋热能转化为清洁电力，且可以实现每年 365 天 24 小时不间断供电。保守测算全球 OTEC 技术发电潜力高达 8000 GW，这比目前全球电力装机总量还要多。因此，OTEC 有潜力在能源

¹⁷ IEA-OES released a White Paper on Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) for policymakers and developers. <https://www.ocean-energy-systems.org/news/iea-oes-released-a-white-paper-on-ocean-thermal-energy-conversion-otec-for-policymakers-and-developers.-/>

转型过程和全球脱碳方面作出重大贡献。除了发电，OTEC 动力循环过程还可以用于海水淡化处理。对于许多热带地区而言，淡水是一种稀缺、关键和宝贵的商品。来自 OTEC 电厂的冷却水可用于大规模空调制冷，这可以节约一些地区 90% 的空调耗电量。冷却水也可用于农业温度环境的控制。特别是深海浮式 OTEC 电站，它的发电过程会涉及富含营养的深水抽取，这一过程可能会促进藻类生长，进而吸收大气层中更多的 CO₂ 降低碳浓度。

2、OTEC 电站项目的进展现状

(1) OTEC 电站平台具有占用空间小且经久耐用，已在夏威夷和日本得到验证
不同于风能（陆基或浮式）或太阳能（陆基或浮式），OTEC 电站占地面积要求很小。此外，海上浮式油气生产经验表明，利用先进建造技术能够确保浮式设施获得更长的使用寿命。而且浮式 OTEC 船舶可以在需要时进行干坞（在船坞不进水的情况下对船舶开展维修），减少海水对船体的腐蚀时间，从而延长设施寿命和降低成本。目前在夏威夷和日本相关海域建造了 OTEC 的示范电站，证实了技术可行性。尽管目前规模相对较小，但是通过示范电站可以获取完整运行参数数据，为后续的研究开发和部署提供科学数据参考。

(2) 小岛屿发展中国家 (SIDS) 有潜力发展集成 OTEC 电站的多产品生态系统，但需要政府大力支持

相关研究证实了现有成熟的管道技术，可以实现在岛屿附近海域建造 2.5 MW 的 OTEC 电站系统。多产品生态度假村（包括清洁和绿色能源、淡水、水产养殖、空调等）对小岛屿发展中国家来说具有吸引力，但还需要通过上网电价提供支持，这样系统才能体现出可接受的资本投资回报。此外，目前已有能源企业及投资者热衷于投资 OTEC 电站项目。因此，政府有必要支持鼓励建设示范电站以获取运营 2.5 MW 电厂至少一年或两年以上的性能数据。这种支持可以通过上网电价或其他财政激励措施，例如更低的利率贷款、免费获得沿海土地、使用政府海洋调查船、海军协助安装等有利措施吸引投资。

(3) 10 MW 浮式 OTEC 技术可行但尚未实现商业化

基于过去 15 年在深水油气浮式生产市场重大技术（包括浮式液化天然气）发展经验表明，目前建造 10 MW 浮式 OTEC 发电站在技术上是完全可行的。但在这个输出功率相对有限的情况下，吸引私营部门单独开展原型项目是有困难的。投资者更愿意看到此类项目有支持性的上网电价补贴等。

3、OTEC 技术发展面临的主要障碍

(1) 进行材料创新实现 100 MW 级大容量 OTEC 电站开发

目前，对于浮式 OTEC 电站扩大到 100 MW 级别或更大规模的主要挑战在于如何实现直径更大的冷水进水管低成本安装的同时，证明其具备良好的耐用性。在实

践中，来自建造和运营 10 MW 浮式 OTEC 电站的经验将允许工程师和材料专家为大型工厂确定合适的设计。基于 10 MW 电站的运行经验，研究人员能够开发出更加精确的模拟系统，从而能够为更大规模电站的设计建造提供数值模拟评估。

(2) 优化 OTEC 船舶装置实现更高的投资回报率

如果投资回报率较佳，那么大型 OTEC 船舶的长期发展潜力是巨大的。如用于海上氢气、氨或甲醇等燃料合成，然后通过专用的穿梭油轮运输出去。现有基础设施（如造船厂以及石油和天然气开采平台）通过适当的改造也可以重新作为浮式 OTEC 设施来使用。船厂和制造商可以针对 OTEC 船舶、涡轮机、泵、海水管道和相关的氨或甲醇（氢）运载穿梭油轮进行优化。

(3) 扩大公众宣传和教育，提高公众、政府和投资人群对 OTEC 技术的认知

相对较高的资本成本阻碍了 OTEC 技术商业化发展，另一个重要的因素是公众、政府和投资人群缺乏对该技术相关知识的了解。考虑到全球能源转型需要大规模减少化石燃料的使用量而大力增加绿色低碳能源的部署规模，这就使得 OTEC 发展潜力更加需要被公众所认识，从而获得更多的民众支持加速该绿色能源技术商业化应用。

(4) 长期考察 OTEC 电站对周围环境与生态影响

如果 OTEC 电站的排放水是在与其周边海洋环境同等温度下排放出来，预计从长期来看其对海洋生态环境的影响可以忽略不计。且目前相关数据显示，现有的 OTEC 小型电站没有显示对海洋生态环境的不利影响，但长期而言究竟会产生何种影响则需要开展更加深入、细致的大量科学研究。

（李桂菊 汤匀）

世界经济论坛发布《利用人工智能加速能源转型白皮书》

近日，世界经济论坛与彭博新能源财经（BloombergNEF）、德国能源署（DENA）联合发布了《利用人工智能（AI）加速能源转型白皮书》，提出数字技术，特别是人工智能对加速推动全球能源转型具有重要潜力¹⁸。白皮书深度分析了利用 AI 技术的必要性，确定了能源转型中最有前景的 AI 应用以及 9 项原则，并对能源相关企业和政策制定者提出了建议和展望。具体内容如下：

一、利用 AI 推进能源转型的必要性

全球能源格局正经历大规模转型，未来几十年将形成更加分散化、数字化、脱碳化的能源格局。为达成《巴黎气候协定》提出的全球温度上升控制在 2°C 目标，进行能源数字化转型意义重大。

1、能源系统快速平稳转型离不开数字化技术

¹⁸ Harnessing Artificial Intelligence to Accelerate the Energy Transition.
https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Meldungen/Harnessing_Artificial_Intelligence/WEF_Harnessing_AI_to_accelerate_the_Energy_Transition_2021.pdf

为实现深度脱碳，需快速向 CO₂ 零排放或较低排放的能源系统转型。全球能源脱碳行动正推动能源系统一体化和电气化发展，这大大增加了电力、交通运输、工业和建筑等部门的联动作用，促使能源与通信网络之间相互依赖。能源供应侧的脱碳行动，进一步促使包括消费者在内的能源系统各终端应用之间相互协调与合作，建立相关监测和控制机制。要实现更灵活的调节机制，数字化技术则成为一个有效的切入点，连通不同终端应用部门，构建一个最可靠、最经济、最清洁的能源系统。随着数字化技术的快速发展，数字技术将在推动能源高效、经济、快速转型上发挥越来越重要的作用。

2、电力脱碳是能源系统脱碳的重要环节

能源系统转型包括可再生能源的快速扩张，供热、工业和交通运输部门的大规模电气化。随着电动汽车的普及，电池储能成本的下降，以及建筑和重工业转型所需的清洁电力，预计到 2050 年，电力在全球能源需求中的占比将增长 60%。随着电力需求的不断扩大，其将成为全球能源供应的首要支柱。

3、能源转型需要大量投资

根据 BNEF《新能源展望 2020》关于能源经济长期情景预测，到 2050 年 56% 的电力装机容量将由太阳能（7.6 太瓦）和风能（4.5 太瓦）提供。这意味着到 2050 年，全球太阳能、风能和电池储能领域需投资 15.1 万亿美元，在电网领域需投资 14 万亿美元。但上述投资仍无法满足全球温升控制在 2°C 以内的目标需求，因此需要加大对能源系统转型的投资力度。根据 BNEF 净零假设，到 2050 年对能源基础设施的投资总额需增加 92 万亿美元至 173 万亿美元才能确保在 2050 年实现净零排放。

4、未来电力系统将高度分散化

向更高比例可再生能源电力系统迈进将推动电力系统两大转变：一是波动性可再生能源电力份额将日益增大；二是电力系统愈加分散化。根据 BNEF 研究成果，到 2050 年，分布式小规模太阳能光伏和电池储能将占全球电力装机容量的 13%，高于目前的 4%；同时发电厂规模将不断缩小，预计将缩小 80% 以上，即从目前的 944 兆瓦（相当于大型天然气发电厂）减少到 2050 年的 158 兆瓦。

5、电力系统管理调控将变得更为复杂

考虑到脱碳目标，从目前的部署趋势推断，未来将有更多的终端设施连接到电网，尤其是配电网，电力将变成多向流动。这也将对电网的稳定性带来挑战，如电力频率不平衡、停电、限电以及严重的容量过剩等，因此亟待开发实时数据、先进分析和自动管理系统实现灵活电力调控。

6、AI 技术将为加速能源转型做出巨大贡献

根据 BNEF 的净零假设，需求侧效率每提高 1%，到 2050 年清洁能源发电投资可减少 1 万亿美元。气候变化可能会降低电网设备的使用寿命，到 2050 年可能导致

全球额外的 1880 亿美元重置成本，而 AI 技术可以通过将变压器保持在最佳运营模式来减缓产生额外的重置成本。基于德国、西班牙和英国等研究数据，电力系统缺乏灵活性将使到 2040 年能源转型成本增加 6%-13%，而 AI 技术可以加快能源转型并有效降低相关成本。

二、AI 技术在能源转型中的应用

AI 技术在支持和加速可靠、更低成本能源转型方面能够发挥巨大的推动作用，其中四个重点领域是能源转型中最有前景的 AI 应用场景，包括：可再生能源发电和需求预测、电网运行和优化、能源需求管理、材料开发和创新。

1、可再生能源发电和需求预测

随着可再生能源发电装机规模的增长，无论是从绝对数量还是在电力供应中所占的份额来看，更好地预测太阳能和风能发电、提高太阳能和风能发电厂的正常运行时间，以及准确预测电力需求将变得至关重要。从电厂选址、设计到电力调度，AI 技术都将发挥作用。将发电量预测更好地与电力需求预测相结合，优化短期和长期系统运行，无论是短期发电计划还是长期电网投资，AI 技术都将发挥巨大潜力。

2、电网运营优化

到本世纪中叶实现净零排放目标，意味着可再生能源发电能力和输电基础设施需要在相对较短的时间内大幅提升。由于建设部署新的输电基础设施交付时间较长，构建新的电力传输网络所需时间可能成为未来电网发展的阻碍因素。而利用 AI 技术优化电网运行，将提高现有输电线路的效率，延长现有设备的使用寿命，将是支持能源转型的关键。此外，在集中式和分布式能源系统中，维持电网稳定和确保供应安全变得更加复杂，AI 技术将有助于保护整个电网系统的稳定供应。

3、能源需求管理

管理和控制能源需求将是能源部门经济高效脱碳的重要手段之一。AI 技术可以提高分布式可再生能源的渗透率，还可用于提高建筑、工厂和数据中心的能源效率。AI 技术可通过大数据中心，实现分布式可再生能源和储能的高效运营，优化电力消费模式，同时在面向消费者和工业设备开放的能源服务市场发挥重要作用。

4、材料开发和创新

开发高性能、低成本的清洁能源生产和存储材料已被认为是能源转型的优先事项。然而，传统方法在探索、开发和部署先进材料的过程往往耗费大量时间和资金。而 AI 技术则能够大幅缩短上述流程和减少资金投入。碳捕集、利用和封存 (CCUS) 技术中开发催化剂往往需要更先进的材料创新。例如，将二氧化碳转化为高价值产品过程高度依赖催化剂，而催化剂制备过程通常使用昂贵或稀缺金属，这不利于上述技术规模化应用。其他潜在的创新领域包括相变储热材料、热电材料、新型太阳能材料、新的电池材料以及提高化学品性能和/或耐久性的新材料。相关研究表明，

太阳能光伏从新材料发现开始到大规模商业应用，通常需要 25-35 年时间，而 AI 技术可以大大缩短这一时间周期。

三、“AI 加速能源转型”9 大原则

报告提出“AI 加速能源转型”9 大原则，旨在释放人工智能潜力以安全和负责任的方式加速能源转型。这些原则可分为三个方面，即符合目的的 AI 设计原则、AI 管理原则以及 AI 赋能原则。如表 1 所示。

表 1 人工智能加速能源转型原则

类型	原则
设计	自动化
	可持续发展
赋能	设计
	数据
	激励
	教育
管理	风险管理
	标准化
	责任义务

(1) 自动化——发电设备和电网自动化设计。AI 将整合电力在交通运输、建造、工业等部门的使用情况，做出实时决策。为充分发挥 AI 优势，电网运营必须向自动化方向发展，新的电力系统设计设备需要提高自动化水平。

(2) 可持续发展——限制 AI 技术碳足迹。AI 可持续发展优势超过其自身碳足迹，但机器学习设备的计算和冷却作业属于电力密集型过程。因此，必须考虑到可持续发展标准，提高能源效率，采用最节能基础设施，建立绿色运行方法工具。

(3) 设计——关注 AI 技术开放的可用性和可理解性。AI 技术必须易于理解和便于个人使用，成为各种作业任务的集成基础。

(4) 数据——建立高质量共享数据平台。利用传感器和通信网络建立现代化的数据基础设施，并形成能源部门的统一数据标准和共享网络。

(5) 激励——创建市场设计和监督框架。AI 应用程序只有在消费市场参与者有明确的价值主张后才能扩大规模，而这需要监督机构建立基础应用框架。

(6) 教育——通过以人为本的 AI 方法增强消费者使用技能的规模，并投资教育以匹配技术和技能进一步发展。

(7) 风险管理——就 AI 风险管理的通用技术和教育方法达成一致。

(8) 标准——实现兼容的软件标准和互操作的接口。当前，针对不同地区和能源系统的不同结构（如电网通信、智能电表、电动汽车充电器等）有许多不同的标准和协议，这导致了其相互之间缺乏互操作性。因此，能源系统相关利益者和市场参与者，包括监管机构、电网运营商和设备制造商均应采用统一标准。

(9) 责任——确保伦理和负责任使用是发展和部署 AI 技术的核心。为了确保健康发展，能源领域的 AI 应用必须遵守经合组织的五个核心原则，即包容性、公平性、透明度、稳健性和问责制。

四、建议和展望

企业和政策制定者必须以负责任的方式在能源部门 AI 的治理和塑造方面发挥积极作用，并创造一个有利的环境以充分释放 AI 技术在能源部门的应用潜力。

能源部门将从 AI 相关技术治理和协作中受益，未来几年，对于鼓励该领域的创新和在整个能源系统中普及新的低碳技术至关重要。

能源企业/公用事业单位应考虑如何利用 AI 技术实现产品和服务利益最大化。随着电网的管理和运行变得越来越复杂，特别是在配电网层面，电网监管机构和运营商重新评估一系列数字技术（如机器学习、量子计算、区块链技术等）潜力，以优化电网的运行方式。

决策者和系统运营商将需要审查现有的市场设计，并创建先进的电力市场，以奖励低碳发电技术。这需要建立一个真正公平的分布式发电竞争环境，并消除监管障碍。由于能源领域的许多 AI 应用与小规模分布式能源有关，因此这些应用需要不受限制进入能源市场和相应的价值链，提高市场灵活性。

区域和国家能源系统建模和基础设施规划中，应考虑发挥 AI 技术对分布式能源系统的支撑作用。到目前为止，能源建模常常忽略配电网，并忽视其作为电网灵活性来源和电网管理的潜力。这些资源的集成和转型，可以在基础设施投资（如电网现代化）或部署新的集中式发电机组方面做出更明智的决策。

各国政府应考虑为能源数据制定更明确的法规，如对能源数据进行保护以及确定使用权，并确保公平公正获取这些数据。如果数据要成为能源转型的商品，那么政府应该制定清晰而简单的设计规则，推动数据迅速收集、存储安全、易于使用和公平分配发展。在设计新法规时，必须考虑到资本的影响，因为这可能会给初创企业和规模较小的企业造成重大的进入壁垒。作为数据公平分配的一部分，政府可以指导或鼓励行业组织、公共实体开展工业数据中央数据库管理和资助。

（李岚春 汤匀）



《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