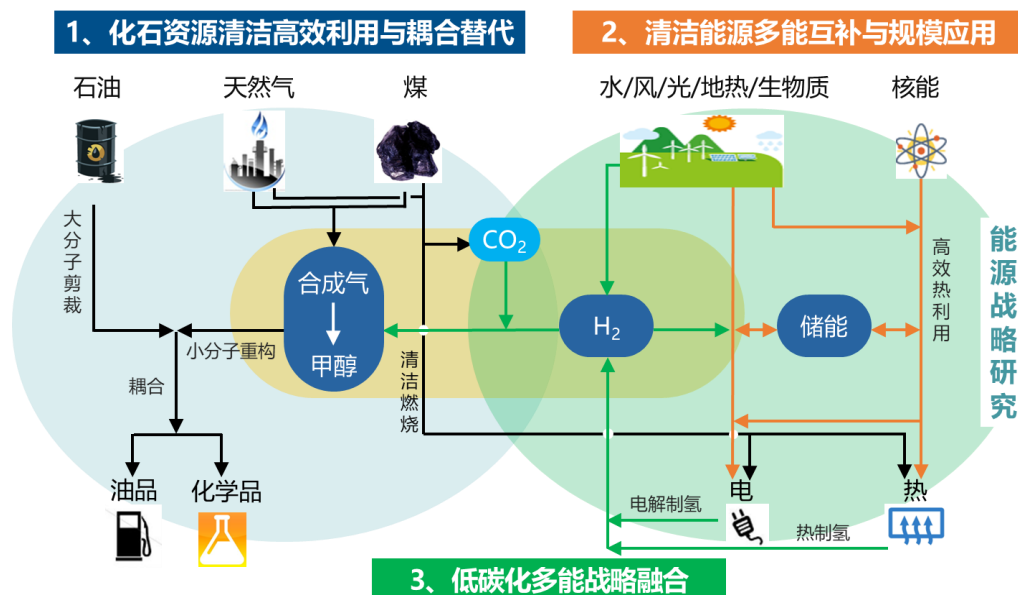




# 洁净能源科技动态监测快报

2021 年第 12 期（总第 26 期）



## 本期看点

- COP26: 美俄印韩宣布国家碳中和中长期战略和目标
- 日本内阁批准第六期能源基本计划
- 美国能源部宣布启动负碳攻关计划
- 美国能源部发布碳中和氢能技术基础科学问题报告
- IEA 发布清洁能源技术评估报告
- IEA 发布能源技术研发与示范公共经费投入分析报告

# 目 录

2021 年第 12 期 (总第 26 期)

## ◆ 化石资源清洁高效利用

COP26: 美俄印韩宣布国家碳中和中长期战略和目标 .....	2
日本内阁批准第六期能源基本计划 .....	3
美国能源部宣布启动负碳攻关计划 .....	7
NETL 开发 CO <sub>2</sub> -SCREEN 工具包估算地质碳封存能力 .....	7

## ◆ 清洁能源多能互补

美国发布 2050 净零排放长期战略 .....	8
美国能源部资助近 2 亿美元支持汽车和卡车电气化 .....	12
英国投入 1.6 亿英镑支持发展浮动式海上风电 .....	13
澳大利亚最大的可再生能源微电网多能互补系统实现并网 .....	14
直接空气碳捕集+太阳能热化学反应实现清洁燃料全过程合成 .....	14
新钝化工艺助力 26 cm <sup>2</sup> 大面积钙钛矿电池效率创造新纪录 .....	16

## ◆ 低碳化多能融合

美国能源部发布碳中和氢能技术基础科学问题报告 .....	18
日本 NEDO 投入 320 亿日元资助先进氢/氨动力船舶技术 .....	19
欧盟资助 11 亿欧元支持能源密集型行业创新脱碳项目 .....	20
英力士计划投资 23 亿美元助力欧洲绿色制氢 .....	21
双功能氧电催化剂助力高性能固定气体组合式再生燃料电池 .....	21
高度耐用双 Co 原子位点催化剂助力 CO <sub>2</sub> 光还原制甲烷 .....	23

## ◆ 能源战略研究

IEA 发布清洁能源技术评估报告 .....	25
IEA 发布能源技术研发与示范公共经费投入分析报告 .....	36

联系邮箱: [energy@whlib.ac.cn](mailto:energy@whlib.ac.cn)

出版日期: 2021 年 12 月 1 日

## 本期概要

美俄印韩等国在《联合国气候变化框架公约》第 26 次缔约方大会 (COP26) 期间均宣布了国家碳中和中长期战略和碳中和目标, 主要包括: (1) 美国发布面向国内和国外应对气候变化战略:《迈向 2050 年净零排放长期战略》、《适应和恢复总统应急计划 (PREPARE)》; (2) 俄罗斯发布《到 2050 年实现温室气体低排放社会经济发展战略》, 宣布 2060 年实现碳中和; (3) 印度承诺到 2070 年实现碳中和; (4) 韩国通过 2050 碳中和方案和 2030 年减排目标。

日本内阁公布第六期能源基本计划决定, 制定了到 2030 年温室气体排放量较 2013 年减少 46% 并努力争取减排 50%, 到 2050 年实现碳中和目标的能源政策实施路径。计划指出: 在全球脱碳进程中, 日本应加快脱碳技术创新, 引领国际规则制定, 提高国际竞争力。此外, 还需克服日本能源供应结构面临的挑战, 在保证安全的前提下, 努力确保能源供应安全稳定, 实现能源经济效益最大化。

美国能源部 (DOE) 宣布启动“负碳攻关计划”, 通过研发使 CO<sub>2</sub> 移除 (CDR) 技术更具成本效益和可扩展性, 实现到 2050 年从大气中去除 10 亿吨级 CO<sub>2</sub>, 并且捕集和封存成本低于 100 美元/吨。计划主要推进四大攻关领域: (1) 实现用于捕集和封存的 CDR 技术成本低于 100 美元/吨净 CO<sub>2</sub> 当量; (2) 对生命周期内碳排放进行可靠核算分析, 将运行和构建 CDR 技术时产生的碳排放考虑在内; (3) 开发具有高质量、耐用性和经济效益的封存技术, 实现碳负监测、报告、验证至少 100 年不发生碳泄漏; (4) 实现 10 亿吨级碳去除目标。

美国能源部发布《碳中和氢能技术的基础科学》报告, 提出了绿氢基础科学研究四个优先研究方向, 包括: (1) 发现和控制材料和化学过程以彻底革新电解制氢系统; (2) 操控氢的相互作用机制以充分发挥氢燃料潜力; (3) 阐明能源效率和原子效率相关的复杂界面结构、演化和化学问题; (4) 认识并缓解性能退化过程以提高氢能系统的耐用性。

国际能源署 (IEA) 发布最新版《清洁能源技术评估》报告, 对全球清洁能源转型至关重要的 6 大行业 46 类技术进行全面评估, 结果表明: 只有交通运输行业中的电动汽车技术和建筑行业中的照明技术处于 IEA 2050 净零排放情景发展路径上, 2020 年全球电动汽车销量增加 40%, LED 灯具占全球照明市场的 50% 以上。有 18 类技术需要加快发展, 另有 26 类技术还没有步入 2050 净零排放情景的正确轨道。在各种能源终端应用中, 电力系统快速脱碳是实现能源清洁转型首要因素, 因为电力占与能源相关碳排放量的 40%, 并越来越多应用于促进经济发展关键部门。

国际能源署 (IEA) 发布最新《能源研发与示范经费投入分析》报告, 对 IEA 成员国能源技术研发与示范 (RD&D) 公共经费投入情况进行了分析。具体内容如下: (1) 2020 年 IEA 成员国政府能源技术 RD&D 公共投入总额达到 231 亿美元; IEA 成员国能源技术 RD&D 公共投入领域日益多样化; (3) 低碳能源技术成为能源技术 RD&D 公共投入的主要领域; (4) 全球能源技术 RD&D 公共投入整体增长明显。

# 化石资源清洁高效利用

## COP26：美俄印韩宣布国家碳中和中长期战略和目标

11月1-13日，《联合国气候变化框架公约》第26次缔约方大会（COP26）在英国格拉斯哥举行。在此期间，多国均宣布了应对气候变化的中长期战略，实现碳中和目标。具体内容如下：

### 一、美国发布面向国内和国外应对气候变化战略

11月1日，美国在COP26大会期间发布了面向国内和国外两项应对气候变化战略：（1）《迈向2050年净零排放长期战略》<sup>1</sup>，系统阐述了美国实现2050净零排放目标的多种可行路径，涉及五大关键转型，包括：①电力系统脱碳化，加速向清洁电力转型；②终端用能电气化，推动航空、海运和工业过程等清洁燃料替代；③节能和提升能效；④减少甲烷和其他非CO<sub>2</sub>温室气体排放，优先支持除现有技术外的深度减排技术创新；⑤实施大规模土壤碳汇和工程脱碳策略。（2）《适应和恢复总统应急计划（PREPARE）》<sup>2</sup>，提出在2024财政年前每年提供30亿美元融资，支持发展中国家气候适应管理。该计划由三个主要部分组成：①知识工具，加深对全球气候风险、脆弱性和适应解决方案的理解，支持气候信息、决策和预警系统创新；②规划计划，帮助处于困境国家制定规划、实施和资助适应计划、提高气候评估能力；③引导金融和民间资本，为双边和多边气候适应基金提供资金支持。

### 二、俄罗斯宣布2060年实现碳中和

11月1日，俄罗斯总理批准《到2050年实现温室气体低排放社会经济发展战略》<sup>3</sup>，以实现到2050年俄罗斯温室气体排放量较2019年减少60%，并在2060年实现碳中和。该战略提出提高森林等生态系统固碳能力是实现能源转型的基础，到2050年该国森林固碳能力将从6.65亿吨/年提高到12亿吨/年。此外，将提高可再生能源消费比例、建立碳配额制度、推进电动汽车部署、化工业更多使用氢能作为燃料、在燃煤电厂中实施碳捕集技术，以减少碳足迹。

### 三、印度承诺到2070年实现碳中和

11月1日，印度总理莫迪在COP26大会上表示，印度将在2070年实现碳中和<sup>4</sup>，最新气候承诺包括以下五点：①到2030年，可再生能源将满足印度50%的能源

<sup>1</sup> Pathways to Net-Zero Greenhouse Gas Emissions by 2050. <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2021/10/US-Long-Term-Strategy.pdf>

<sup>2</sup> President's Emergency Plan for Adaptation And Resilience. <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2021/10/Full-PREPARE-Plan.pdf>

<sup>3</sup> Правительство утвердило Стратегию социально-экономического развития России с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года. <http://government.ru/news/43708/>

<sup>4</sup> India's 5 Climate Commitments: PM Modi Makes 5 Commitments on Climate Action at COP26; India to be Carbon

需求；②到 2030 年，将非化石燃料发电装机容量提升至 500 吉瓦；③到 2030 年，碳排放量预计将减少 10 亿吨；④到 2030 年，碳强度降低 45% 以上；⑤到 2070 年，实现碳中和。

#### 四、韩国通过 2050 碳中和方案和 2030 年减排目标

10 月 27 日，韩国国会审议并通过“2050 碳中和方案”和“2030 年国家减排目标”，即 2050 年实现零碳排放，2030 年比 2018 年减排 40%，并将根据中长期计划来推进<sup>5</sup>。要点如下：①2050 年实现碳中和 AB 方案，并为能源转型、工业、建筑和交通等主要部门制定政策。A 方案包括全面停止火力发电等最大限度减少排放，B 方案保留液化天然气发电，积极利用碳捕集、利用与封存（CCUS）等温室气体去除技术。②2030 年减排具体目标：将煤炭发电比重相较 2018 年减少一半左右，大幅扩大可再生能源占比，减排 44.4%；工业部门通过钢铁冶炼电气化、石油化工利用生物燃料等减排 14.5%；建筑部门通过启用节能建筑和高效分配装置等减排 32.8%；交通部门减排 37.8%；农畜水产部门减排 27.2%；废弃物部门减排 46.8%。此外，韩国还计划到 2030 年捕集 2670 万吨温室气体，通过各部门的减排方案和捕集源的运用等，将温室气体排放量由 2018 年的 7.276 亿吨减少至 2030 年的 4.366 亿吨。

（汤匀 李姝影 张娴 秦冰雪 李岚春 郭楷模）

## 日本内阁批准第六期能源基本计划

10 月 22 日，日本内阁公布第六期能源基本计划决定<sup>6</sup>，制定了到 2030 年温室气体排放量较 2013 年减少 46% 并努力争取减排 50%，到 2050 年实现碳中和目标的能源政策实施路径。计划指出，在全球脱碳进程中，日本应加快脱碳技术创新，引领国际规则制定，提高国际竞争力。此外，还需克服日本能源供应结构面临的挑战，在保证安全的前提下，努力确保能源供应安全稳定，实现能源经济效益最大化。具体内容如下：

### 1、东京电力公司福岛第一核电站事故后的十年进展

在经历了东京电力福岛第一核电站事故后，政府应该把核电安全放在首位，在扩大可再生能源的同时，尽量减少对核电的依赖。针对横滨地区的自主产业发展，通过实施“福岛创新海岸线”计划，持续推进企业重建和新产业的开发。在促进灾民回归的同时，注重通过增加游客吸引地区以外的人口消费。政府将进一步引进和扩展可再生能源和氢能这两大支柱，加快推进氢能实施应用。

Neutral by 2070. <https://www.republicworld.com/world-news/global-event-news/pm-modi-makes-5-commitments-on-climate-action-at-cop26-india-to-be-carbon-neutral-by-2070.html>

<sup>5</sup> ‘2050 탄소중립 시나리오’, ‘2030 40% 감축안’ 국무회의 의결.

<https://www.gov.kr/portal/gvrnPolicy/view/H211000000843191?policyType=G00301&srchTxt=%ED%83%84%EC%86%8C%EC%A4%91%EB%A6%BD>

<sup>6</sup> 第 6 次エネルギー基本計画が閣議決定されました.

[https://www.enecho.meti.go.jp/en/category/others/basic\\_plan/pdf/6th\\_outline.pdf](https://www.enecho.meti.go.jp/en/category/others/basic_plan/pdf/6th_outline.pdf)

## 2、到 2050 年实现碳中和所面临的挑战和应对措施

当前与能源相关的碳排放占日本碳排放总量的 80%以上,为实现 2050 碳中和目标,能源部门的碳减排至关重要。其中电力行业通过使用清洁电力将稳步实现脱碳,包括通过氢/氨发电和基于碳捕集、利用和封存 (CCUS) 技术创新火力发电模式,实现传统化石燃料发电的清洁脱碳。非电力部门将逐步实现电气化,而在电气化不可行的部门(如高温、高压需求)将通过使用氢能、合成甲烷和合成燃料进行脱碳。特别是在工业领域,氢还原炼铁和人工光合作用等创新技术对其脱碳进程至关重要。政府将通过设立“绿色创新基金”等,努力实现脱碳技术创新,提高日本产业竞争力。为实现 2050 碳中和目标,未来在保证能源供应安全的前提下,还将最大限度地引进可再生能源;推动氢能和 CCUS 技术的广泛示范;在保证安全、公信力的前提下,继续使用必要的核能发电技术。

## 3、面向 2030 年行动政策

(1)针对需求侧,到 2030 年能源效率将显著提高以抵消日益增长的能源消费,能效目标将从第五期能源计划设定的 5030 万千升增长到本次计划设定的 6200 万千升(2019 年能效为 1655 万千升);此外终端能源消费目标(不包括能源转换)将从第五期计划设定的 3.77 亿千升降低到本次计划设定的 3.5 亿千升(2019 年终端能耗为 3.5 亿千升)。

①将进一步提高能源效率,在工业领域将评估产品基准能耗指标,督促经营者提高能效,并在新的“能效技术战略”框架下推动节能技术的开发和引进;在建筑行业,要求满足《建筑能耗性能改善法案》的能效标准,提高设备和建筑材料能耗标准;在交通运输领域,推广电动汽车应用和基础设施建设,加强电动汽车相关技术(如电池)创新和供应链安全,推进人工智能等数字化技术应用,实现货物运输整体高效节能。②建立新的能源系统,鼓励需求侧能源转型,在新的能源系统中,将研究整体能源结构合理性,提升非化石能源占比;建立新的评估激励措施,对提高非化石能源使用率或优化能源需求以应对能源供应波动性的经营者进行评估奖励。③推进电池等分布式能源有效利用;完善微电网等基础设施建设,以促进能源高效利用;提高本地生产、本地消费活力以扩大内需。

(2)针对可再生能源,到 2030 年可再生能源发电占比目标将从第五期计划设定的 22%-24%提高到本次设定的 36%-38%(2019 年可再生能源发电占比为 18%),其中太阳能发电占比目标将从第五次计划设定的 7%提高到 14%-16%(2019 年占比为 6.7%);风力发电占比目标将从 1.7%提高到 5%(2019 年占比为 0.7%);水电占比目标将从 8.8%-9.2%提高到 11%(2019 年水电占比为 7.8%);生物质发电占比目标将从 3.7%-4.6%提高到 5%(2019 年生物质发电占比为 2.6%)。

①确保选址最优化，同时促进当地经济共同发展，扩大太阳能光伏和风能发电规模；并通过技术创新，利用海域进行可再生能源发电。②加强安全规范，稳步落实太阳能光伏技术标准，加强可再生能源发电设施日常巡检。③降低发电成本，有效整合市场规模，通过投标制度、中长期目标价格，在政府调控下，促进可再生能源供应商按照一定的市场价格合理售电，并整合可再生能源市场，实现经济效益最大化。④促进科技创新，部署安装屋顶式先进太阳能光伏设施；加快海上风力发电技术创新；开发超临界地热深井技术。

**(3)针对核能,到 2030 年核电占比目标与之前几乎不变,均占发电总量的 20%-22% (2019 年核能发电占比为 6%)。**

①在保持公众对核电信任、确保核电安全的前提下，促进核电稳定发展；推进建造临时储存核废料设施，减少放射性废料危害；通过公私合作实现核燃料循环利用，进一步推广铀钚混合氧化物（MOX）核燃料的应用。②与当地社区建立信任关系，并为当地产业的多元化发展提供支持。③促进技术研发，通过国际合作开发小型模块化反应堆技术；建立高温气冷堆制氢相关组件技术；通过国际合作开展核聚变技术研发。

**(4) 针对火力发电,到 2030 年传统化石能源发电占比目标将显著下降,其中天然气发电占比目标将从第五期计划设定的 27%降低到本次设定的 20% (2019 年天然气发电占比为 37%)；燃煤发电占比目标将从 26%降低到 19% (2019 年燃煤发电占比为 32%)；石油发电占比目标将从 3%降低到 2% (2019 年石油发电占比为 7%)。**

①为维持电力供应稳定性，在电力结构中将保留液化天然气、煤炭和石油发电技术。②在推广新一代高效火力发电的同时，将逐步淘汰低效火力发电，推广与脱碳燃料（氨/氢等）共燃以及使用 CCUS 技术等减排措施，实现火力发电脱碳转型。③到 2021 年底，结束对国际火力发电项目的直接支持，转而通过出口融资、投资以及金融和贸易等方式间接支持国际火力发电技术。

**(5)针对电力系统改革,到 2030 年能源自给率目标将从第五期计划设定的 25%提高到本次设定的 30%，以强化日本能源安全保障。**

①在电力供应能力下降导致能源安全面临风险的背景下，需提供具有长期可预测性、具有经济效益的投资新方法，使得电力系统脱碳与电力稳定供应相适应。②面向可再生能源占比的不断扩大，努力提高电力系统灵活性，促进电力系统稳步脱碳，通过降低成本实现储能电池和电解槽广泛应用，在电力商业法案中明确储能电池在电网中的定位。③在灾害面前，确保能源跨区域传输通畅，并强化网络安全，确保电力系统安全运营。

(6) 针对氢能和氨能，到 2030 年氢/氨发电占比将实现突破，将从第五期计划设定的 0% 提高到本次设定的 1%（2019 年氢/氨发电还未部署应用），以实现清洁能源多元化。

①构建长期稳定的国外廉价氢能供应链，利用国内资源建立氢气生产基地，以提供高性价比的氢/氨燃料。到 2030 年实现制氢成本从目前的 100 日元/Nm<sup>3</sup> 降至 30 日元/Nm<sup>3</sup>，到 2050 年降至 20 日元/Nm<sup>3</sup>；氢气供应量到 2030 年实现 300 万吨/年，到 2050 年实现 2000 万吨/年。②扩大氢能在能源终端消费领域的应用范围。在发电领域，推进 30% 氢/天然气共燃发电技术和 20% 氨/煤炭共燃发电技术应用，并推广共燃/单一燃料燃烧示范；在交通运输领域，将战略性建设加氢站，以进一步辅助燃料电池汽车和燃料电池卡车的部署；在工业领域，开发氢还原炼铁技术、大型高性能氢锅炉等生产工艺设备的研制；在建筑领域，推广包括纯氢燃料电池在内的固定式燃料电池应用部署，并进一步降低制造成本。

(7) 针对资源和燃料供应，到 2030 年电力总成本有望将进一步降低，将从第五期计划设定的 9.2-9.5 万亿日元降低到本次设定的 8.6-8.8 万亿日元（基于 IEA《世界能源展望 2020》既定政策情景估算）。度电成本将从第五次能源计划中设定的 9.4-9.7 日元/千瓦时提升到本次计划设定的 9.9-10.2 日元/千瓦时（该成本包含输电过程中电量损耗，受电厂运营状况、燃料价格、电力需求影响较大，该估算结果有一定偏差）

①确保在碳中和转型中所需资源和燃料的稳定供应。实行“综合资源外交”政策，积极与资源丰富的国家开展外交合作，整合推动建立氢/氨燃料供应链。②提高独立开发石油和天然气能力，到 2030 年独立开发的石油天然气比例将从 2019 年的 34.7% 增加到 50% 以上，到 2040 年将超过 60% 以上，同时解决包括甲烷水合物在内的国内资源开发问题。③在矿产资源方面，支持金融界对稀有金属的投资，确保海外供应链安全稳定，促进金属回收利用；此外将促进国内海洋矿物资源的开发，例如海底多金属硫化物和富含稀土的钒泥等自然资源。④加强燃料供应系统的复原力，以应对紧急情况。在灾难等紧急情况确保能源供应，将维持石油和液化天然气储能功能；通过精炼厂企业间合作，提高精炼厂生产效率；推进需求侧向天然气转移，通过甲烷化等方式实现天然气脱碳。

**编者注：**《能源基本计划》是日本中长期能源政策指导方针，每隔 3 年修订一次，首期于 2003 年出台，此后分别在 2007 年（第二期）、2010 年（第三期）、2014 年（第四期）和 2018 年（第五期）进行修订更新。本次第六期计划在第五期基础上进行修订的，是一份面向 2030 和实现 2050 碳中和目标的日本能源中长期发展规划的政策指南和行动纲领。

（汤匀）



## 美国能源部宣布启动负碳攻关计划

11月5日，美国能源部（DOE）宣布启动“负碳攻关计划”（Carbon Negative Earthshots）<sup>7</sup>，通过研发使CO<sub>2</sub>移除（CDR）技术更具成本效益和可扩展性，实现到2050年从大气中去除数十亿吨CO<sub>2</sub>，并且捕集和封存成本低于100美元/吨。“负碳攻关计划”是美国能源部出台的第三个攻关计划<sup>8</sup>，将负碳技术与氢能、电池储能、可再生能源和化石能源脱碳相结合，加快推进2050净零排放目标的实现。

CDR是一种包含多种减排措施的方法，直接从大气中捕获CO<sub>2</sub>，并进行地质封存、生物固碳、海洋固碳或转化为增值产品以实现CO<sub>2</sub>负排放。实现2050净零排放目标，需要到本世纪中叶部署十亿吨级的固碳容量，相当于美国2.5亿辆汽车的年度碳排放量。

“负碳攻关计划”主要推进四方面工作：①实现用于捕集和封存的CDR技术成本低于100美元/吨净CO<sub>2</sub>当量；②对生命周期内碳排放进行可靠核算分析，将运行和构建CDR技术时产生的碳排放考虑在内；③开发具有高质量、耐用性和经济效益的封存技术，实现负碳监测、报告、验证至少100年不发生碳泄漏；④实现十亿吨级碳去除目标。

（汤匀）

## NETL 开发 CO<sub>2</sub>-SCREEN 工具包估算地质碳封存能力

10月25日，美国能源部国家能源技术实验室（NETL）宣布成功开发CO<sub>2</sub>-SCREEN工具包，可以为各种地质构造提供可靠和准确的CO<sub>2</sub>封存能力估算<sup>9</sup>。在CCS项目的初始筛选阶段，工具包可实现地下CO<sub>2</sub>封存场地参数的快速可靠估计。项目进入商业规模后，工具包可以改进估算并减少不确定性，便于了解封存地点随时间推移的潜在环境风险。工具包还提供了计算CO<sub>2</sub>封存潜力的一致性方法，允许直接比较各机构/组织的CO<sub>2</sub>封存潜力估算值。

（李娜娜）

<sup>7</sup> Secretary Granholm Launches Carbon Negative Earthshots to Remove Gigatons of Carbon Pollution from the Air by 2050. <https://www.energy.gov/articles/secretary-granholm-launches-carbon-negative-earthshots-remove-gigatons-carbon-pollution>

<sup>8</sup> 注：第一个是2021年6月7日启动的“氢能攻关计划”；第二个是2021年7月14日启动的“长时储能攻关计划”。

<sup>9</sup> Helping to Ensure Successful Geologic Carbon Storage with CO<sub>2</sub>-Screen. <https://netl.doe.gov/node/11247>

# 清洁能源多能互补

## 美国发布 2050 净零排放长期战略

11月1日，美国发布雄心勃勃的《迈向2050年净零排放长期战略》<sup>10</sup>，目标在未来30年内，通过清洁电力投资、交通和建筑电气化、工业转型、减少甲烷和其他非CO<sub>2</sub>温室气体排放，使美国走在温控1.5°C路径正确道路上，支撑构建更可持续、更具韧性和更公平的发展愿景。该战略基于国家自主贡献2030年目标，系统阐述了美国实现2050净零排放的中长期目标和技术路径。主要内容如下：

### 一、美国2050年实现净零排放的综合气候战略

为了实现《巴黎协定》温控1.5°C目标，美国需要在不晚于2050年实现整个社会经济系统的净零排放。该战略作为美国提升全球气候行动与雄心目标的一部分，提出短、中、长期不同时间段目标，包括：1) 2030年国家自主贡献较2005年减少50%-52%，涵盖所有行业 and 所有温室气体；2) 到2035年实现100%零碳电力的目标；3) 不迟于2050年实现整个社会经济系统的净零排放，包括国际航空、海运等。

### 二、2030年前关键十年

要实现净零排放目标，需要在未来十年内采取变革性行动，广泛迅速部署低碳技术和投资基础设施支持向清洁能源经济转型，并在近期取得里程碑式成绩。其行动涉及电力、交通、建筑、工业和农林等五个部门：

**1、电力部门。**电力部门是美国第二大排放源，减排投资可获得快速且较高的收益。随着近年来太阳能、陆上风能、海上风能和电池等关键技术成本快速下降，以及政策的支持和清洁电力需求的增加，这些因素加速了清洁电力转型步伐。未来美国将继续制定减少发电厂污染的激励措施和标准，进一步加大清洁能源的发展力度；投资电力系统灵活性技术，如输配电、能源效率、储能、智能建筑和无排放燃烧等技术；部署碳捕集、封存（CCS）和核能技术。加大对零碳电力软硬件技术研发与示范的投资力度，支持向零排放、可负担的弹性电力系统转型。

**2、交通部门。**化石燃料汽车已成为美国最大排放源，因此电气化和低碳或零碳生物燃料、氢燃料替代尤为关键。未来将降低车辆成本，制定轻型、中型和重型车辆的燃料经济性和排放标准，激励零排放车辆和清洁燃料发展；投资新的充电基础设施，扩大生物精炼厂规模；持续研发创新以降低氢能成本；投资清洁交通基础设施。

<sup>10</sup> Pathways to Net-Zero Greenhouse Gas Emissions by 2050. <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2021/10/US-Long-Term-Strategy.pdf>

**3、建筑部门。**未来十年首要任务是提高建筑物及其能源消费系统的能源效率，加大研究和示范高能效、电气化建筑的解决方案。

**4、工业部门。**工业部门温室气体排放方式繁多，其脱碳路径包括能效改善、工业电气化、低碳燃料、工业 CCS 部署等。到 2035 年实现清洁电力需要使当前以化石燃料为主的某些工业流程实现零碳电气化成为可能。近期内中低温过程热是工业电气化的候选方案，通过增加使用工业热泵、电锅炉或电磁加热工艺。同时，需要更多的技术和工艺创新解决其他工业排放问题，包括钢铁、石化和水泥生产的高温热和过程排放。美国将扩大对零碳工业技术创新相关研究、开发、示范、商业化和部署的支持，如采用绿氢为工业设施提供动力。此外，还需要非 CO<sub>2</sub> 温室气体监测和控制技术，包括甲烷、含氟气体、黑碳和其他气候污染物。

**5、农林部门。**广阔的土地为减少排放和碳封存提供机会，主要措施包括加大对森林保护和森林管理的投资、加强气候智能型农业实践、发展基于自然的海洋固碳等，确保在 2050 年前最大限度地发挥土地和海洋的固碳潜力。

### 三、迈向 2050 年净零排放途径

美国实现 2050 净零排放目标有多种可行路径，均涉及五大关键转型，包括：（1）电力系统脱碳化，加速向清洁电力转型；（2）终端用能电气化，推动航空、海运和工业过程等清洁燃料替代；（3）节能和提升能效；（4）减少甲烷和其他非 CO<sub>2</sub> 温室气体排放，优先支持除现有技术外的深度减排技术创新；（5）实施大规模土壤碳汇和工程脱碳策略。

根据情景预测分析，实现净零排放可能存在以下几种潜在路径：一是在没有额外政策措施的情况下，排放将在很大程度上保持平稳，实现净零排放需要超常规行动；二是较 2005 年每年减少 65 亿吨，其中约 45 亿吨可能来自能源系统转型；三是其他非 CO<sub>2</sub> 温室气体排放是整个减排战略的必要组成部分，到 2050 年总共将减少约 5 亿吨，包括农业、废物和化石燃料的甲烷排放、制冷剂氢氟碳化物以及工农业的 N<sub>2</sub>O 等；四是从大气中清除 CO<sub>2</sub> 是达到净零排放的重要环节，主要通过基于自然固碳和空气直接捕集与封存（DACCS）。

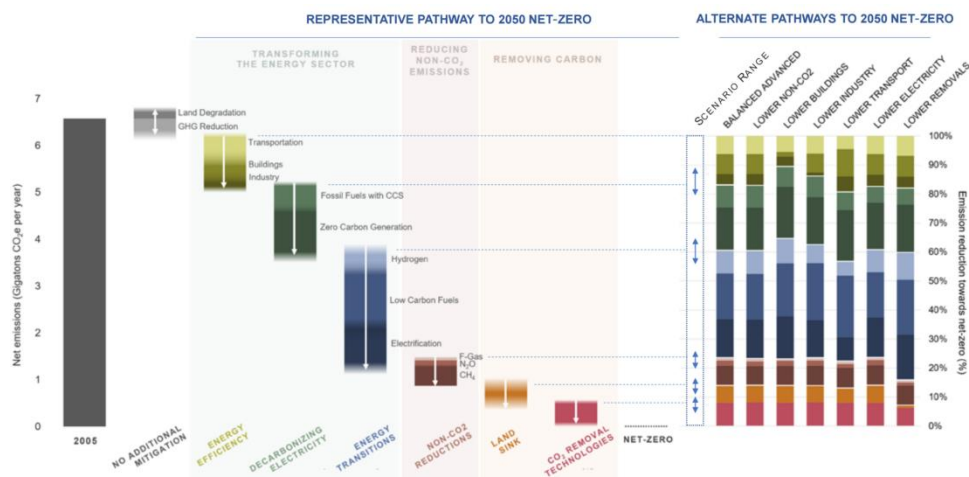


图 1 美国 2050 年实现净零排放目标的减排途径

#### 四、迈向 2050 年的能源系统转型

能源系统对于 2050 年实现净零排放至关重要，且取决于未来 30 年的技术和政策发展。

**1、电力部门。**电力部门温室气体排放量占美国排放总量的 1/4。随着发电和储能成本的持续降低，预计电力部门排放量将迅速减少，这需要新的激励措施和市场化改革等政策，确保电力需求增长的同时排放量持续降低。其中，到 2050 年太阳能和风能发电规模将继续扩大，现有的核电仍会运行，并可能在本世纪三、四十年代出现增长；化石燃料发电（未配有 CCS 技术）减少，现有电厂开始安装碳捕集装置；到 2050 年，清洁电力为其他领域经济活动提供零碳电力。为满足各个领域的电力需求增长，清洁能源发电投资必须持续到本世纪中叶，并持续部署新的高水平技术，如增大零碳电力装机容量、先进输配电和电网基础设施、高峰负荷调节、先进核电等，特别是长时储能解决方案至关重要。

**2、交通部门。**交通部门是美国最大的排放源，占比达 29%。为实现 2050 年净零目标，必须确保本世纪 30 年代初，零排放车辆销售占主导地位。为此，美国将继续增加交通领域的电力和低碳燃料替代，并在 2050 年实现美国交通部门全面的电气化和燃料替代。美国交通长期战略的核心就是扩大新的交通技术应用，包括在轻型、中型和重型汽车中迅速推广零排放车辆。同时，零排放汽车的部署也存在诸多挑战，如电池技术、燃料和充电技术设施成本、航空部门短期内难以实现电气化等。这就需加速低碳燃料的研发与部署，如绿氢、可持续生物燃料，助力航空、海运、中型和重型卡车等脱碳。

**3、建筑部门。**住宅和商业建筑排放量占美国能源系统排放量的 1/3 以上，其中大约 2/3 的建筑排放来自电力，其他来自直接燃烧供热、烹饪等。减少建筑排放的关键在于终端部门的电能替代，电力在终端能源需求的份额将由 2020 年的 50% 增加至 2050 年的 90% 甚至更高。同时，建筑部门的能源需求将在 2030 年减少 9%，2050 年

减少 30%。

**4、工业部门。**工业部门的温室气体排放量占全社会排放量的约 23%，占能源系统排放总量的 30%。能源密集型、高排放型产业，如采矿、钢铁、水泥和化工，排放量达到工业部门的一半。尽管工业过程有许多难以脱碳的因素，但先进非碳燃料技术、能效和电气化领域的投资可以在 2050 年将工业部门碳排放减少 69%-95%。为加快工业部门脱碳，其关键技术包括能源效率、材料效率、电气化、低碳燃料和原料、CCS、余热回收等。

### **五、减少迈向 2050 年的非碳温室气体排放**

非 CO<sub>2</sub> 温室气体是强热气体，许多气体的近期气候影响比 CO<sub>2</sub> 更大，在美国对全球变暖的贡献中占比达 20%。美国的非 CO<sub>2</sub> 温室气体主要由甲烷（CH<sub>4</sub>）、一氧化二氮（N<sub>2</sub>O）、含氟气体组成，其减排面临一些挑战，例如某些领域的减排战略缺乏，非 CO<sub>2</sub> 温室气体减排认识不足。特别是减排技术尚处于发展早期，若以现有缓解技术，到 2050 年非 CO<sub>2</sub> 温室气体排放总量将持平。因此，要实现非 CO<sub>2</sub> 温室气体更大幅度的长期减排，需重大技术进步和新的有效减排后备方案，技术潜力包括农业部门粪便厌氧消化技术和油气部门泄漏检测与缓解技术。

### **六、2050 年以后的脱碳**

净零排放目标必须实现脱碳。能效、电气化、零碳电力以及非 CO<sub>2</sub> 温室气体减排是美国经济去碳化的重要杠杆，也是 2050 年净零排放目标的战略重点。但仍有一些部门难以在 2050 年前实现完全脱碳，因此从大气中去除 CO<sub>2</sub> 对净零排放目标实现至关重要，这就意味着陆地固碳、先进碳移除（CDR）技术将发挥重要作用。

**1、陆地固碳。**美国拥有着世界 8% 的森林（3.1 亿公顷）和 8% 的耕地（4 亿公顷）面积，为未来 30 年以及整个经济脱碳化提供重要支撑。实现重大陆地固碳效益需要在近期和未来几十年采取有针对性的、以科学为基础的解决方案，如加大基于自然的解决方案公私投资、碳汇激励政策以及生物质联合碳捕集与封存（BECCS）技术等。

**2、工程技术脱碳。**未来几十年，可以通过部署先进碳移除技术支持净零排放目标实现，潜在技术包括生物质碳脱除和封存、直接空气捕集和封存、碳矿化、海洋固碳等。目前这些潜在技术仍处于发展早期，成本较高，且环境影响并不清晰，因此需要一个实质性的综合研究、开发和示范战略。

### **七、迈向 2050 年气候行动益处**

减少温室气体排放会刺激美国经济现代化投资，解决环境污染分布不均衡和气候脆弱性问题，改善所有社区的公众健康，并加强气候安全。

气候行动已经开始。在全球范围内，零排放汽车销售份额预计将由现在的 2% 上升到 2030 年的近 30%，美国将达到 50%。美国在孵化新的创新者和企业方面处于有

利地位，拥有训练有素的劳动力和机构，使信息技术、生物技术、制药和其他行业处于全球领先地位。此外，独特的自然资源禀赋使美国的地理区域非常适合成为各种零碳活动的中心。因此，美国可以在 21 世纪的清洁技术（电池、电动汽车和热泵等关键技术）和就业方面处于领先地位，并在培育新的创新型企业方面处于有利地位。

（李岚春 郭楷模）

## 美国能源部资助近 2 亿美元支持汽车和卡车电气化

11 月 1 日，美国能源部（DOE）宣布向 25 个项目资助 1.99 亿美元，以支持汽车和卡车电气化，改善美国电动汽车充电基础设施，减少交通运输领域碳排放<sup>11</sup>。目前交通运输行业碳排放量占美国碳排放总量的 29%，为实现拜登政府提出的到 2030 年零排放汽车占美国所有汽车销量的一半，需加快推进交通运输行业清洁低碳转型。具体内容如下：

### 1、进行中、重型电动卡车和货运系统开发，实现高效和净零排放

（1）由帕卡汽车公司开发 18 辆 8 级<sup>12</sup>纯电动和燃料电池卡车，配备先进的电池系统，并开发和示范一个兆瓦级的充电站。资助金额约 3297 万美元。

（2）由沃尔沃北美公司开发一种续航里程 400 英里的 8 级电动牵引拖车，拥有先进的空气动力学、电动装置、电动汽车优化的轮胎、自动巡航系统，并开发和示范一个兆瓦级的充电站。资助金额约 1807 万美元。

（3）由戴姆勒卡车北美公司开发和示范 2 辆 2-8 级燃料电池卡车，其续航里程为 600 英里，寿命为 25 000 小时。资助金额约 2579 万美元。

（4）由福特公司开发 5 辆 6 级氢燃料电池卡车，其目标成本、有效载荷、续航时间和加燃料时间相当于传统的汽油卡车。资助金额约 2495 万美元。

（5）由通用汽车开发 4 辆氢燃料电池和 4 辆纯电动 4-6 级卡车，并重点开发通过电解和清洁电力实现快速制氢的方法。资助金额约 2606 万美元。

### 2、开发减少道路和非道路车辆排放的解决方案，并加速扩大电动汽车基础设施部署

（1）与社区合作推进电动汽车充电桩部署项目：①由波特兰 Forth 公司构建可负担的移动平台（AMP）系统，资助金额约 502 万美元；②由堪萨斯城市能源中心研究具有经济效益的电动汽车市场刺激方案，资助金额约 522 万美元；③由明尼阿波里斯市阳光社区电力发展公司构建中西部地区部落间电动汽车充电网络，资助金

<sup>11</sup> DOE Announces Nearly \$200 Million to Reduce Emissions From Cars and Trucks.

<https://www.energy.gov/articles/doe-announces-nearly-200-million-reduce-emissions-cars-and-trucks>

<sup>12</sup> 注：北美卡车分级标准：1-3 级属于轻型卡车；4-6 级属于中型卡车；7-8 级属于重型卡车。

额约 667 万美元；④由库克维尔镇田纳西科技大学进行乡村重建，构建电动汽车生态系统，促进绿色经济生活转型，资助金额约 401 万美元。

(2) 电动汽车工作场所充电项目：①由帕萨迪纳市 CALSTART 公司开发全国工作场所充电系统，资助金额约 400 万美元；②由图拉丁 Columbia-Willamette 清洁城市联盟进行工作场所电气化部署研究，以实现充电公平性，资助金额约为 397 万美元；③由波特兰 Forth 公司进行电气化领导者项目，资助金额约为 400 万美元。

(3) 降低直流快速充电桩成本项目：①由奥本山 BorgWarner 公司进行设计和技术创新，最大限度提高直流快充桩单位成本的经济效益，资助金额约为 409 亿美元；②由梅诺莫尼福尔斯 Eaton 集团进行固态技术模块化开发，以降低直流快速充电桩成本和占地面积，资助金额约为 491 万美元；③由北卡罗来纳州立大学进行超低成本、全模块化电源转换器的开发，资助金额约为 386 万美元。

(4) 越野车效率转化研究项目：①由绍斯菲尔德 Eaton 集团进行越野车温室气体和标准污染物减排研究，资助金额约为 238 万美元；②由密尔沃基马凯特大学进行汽油/乙醇混合燃料控制系统的开发，资助金额约为 250 万美元。

(5) 电气化工程车辆研发和示范项目：①由 John Deere 公司进行铰接式农用卸车电气化技术研究，资助金额约为 276 万美元；②由明尼苏达大学进行装载卡车电气化、液压辅助技术开发，资助金额约为 237 万美元。

(6) 天然气发动机技术开发项目：①由哥伦布 Cummins 公司开发 Cummins 高效低排放重型 10L 天然气发动机技术开发，资助金额约为 400 万美元；②由明尼苏达大学进行等离子体辅助点火系统开发，资助金额约为 165 万美元。

(7) 二甲醚和丙烷发动机技术开发项目：①由威斯康星大学麦迪逊分校开发丙烷二甲醚共混物的点火燃烧高效混合控制系统，资助金额约为 237 万美元；②由 Darrien WM 国际工程公司进行轻型发动机混合燃料高压快速直接喷射系统开发，资助金额约为 199 万美元。

(8) 集成混合动力系统对置活塞二冲程技术开发项目：①由圣地亚哥 Achates 公司进行对置活塞二冲程混合动力商用车系统开发，资助金额约为 500 万美元。

(9) 天然气汽车技术概念验证项目：①由安克拉治 ASRC 环境咨询公司承担天然气先导实验项目，资助金额约为 106 万美元。

(汤匀)

## 英国投入 1.6 亿英镑支持发展浮动式海上风电

10 月 30 日，英国首相宣布英国政府将投资 1.6 亿英镑，建设新的大型浮动式海上风电港口和工厂，助力到 2030 年浮动式海上风电装机 1 吉瓦的目标<sup>13</sup>。此次资助

<sup>13</sup> Scotland and Wales could be Home to New Floating Offshore Wind Ports Thanks to £160m UK Government Funding. <https://www.gov.uk/government/news/scotland-and-wales-could-be-home-to-new-floating-offshore-wind->

将用于开发港口基础设施，实现浮动式风力涡轮机规模化生产，并安装在苏格兰和威尔士海岸附近的深水区，将促进苏格兰发展为海上风能技术中心，威尔士转型为海上风电产业集群。

（岳芳）

## 澳大利亚最大的可再生能源微电网多能互补系统实现并网

11月4日，由全球能源生产商EDL建造运营的56MW可再生能源微电网多能互补系统正式并网，将为两座矿山用能提供50%-85%的可再生能源<sup>14</sup>。它是目前澳大利亚最大的可再生能源微电网多能互补系统，也是该国第一个主要用风力发电为矿山供电的微电网，主要采用以下装置：①5台风力涡轮机，每个涡轮机的转子直径为140米，装机容量为18MW；②10710块太阳能电池板，装机容量为4MW；③一个装机容量13MW的电池储能系统；④一个21MW燃气/柴油离网热气机动力装置；⑤先进的微电网控制系统。作为推进可再生能源计划的一部分，澳大利亚可再生能源署为该项目提供了1350万美元的资助。

（汤匀）

## 直接空气碳捕集+太阳能热化学反应实现清洁燃料全过程合成

航运和航空碳排放量占能源相关碳排放总量的8%左右，目前交通电气化转型面临着动力电池不足以支撑长途运输（特别是航空领域）的挑战。为此，研究人员提出利用聚光太阳辐射作为高温热源利用水（H<sub>2</sub>O）和二氧化碳（CO<sub>2</sub>）合成燃料的解决方案，但在现实条件下从空气中捕集CO<sub>2</sub>和H<sub>2</sub>O，并将其转化成清洁燃料的全工艺生产过程还未见报道。

瑞士苏黎世联邦理工学院Aldo Steinfeld教授带领的研究团队利用直接空气捕集装置、太阳能热化学氧化还原装置和气-液合成装置，将空气中的H<sub>2</sub>O和CO<sub>2</sub>转化成氢和一氧化碳的合成气，然后加工成煤油、甲醇或其他碳氢化合物，且该过程在日常条件下能够实现，这项研究或为生产清洁的碳氢燃料提供一条有效途径。

相关研究表明，在许多可能的方法中，使用太阳热辐射作为高温过程热源将为热化学过程提供一种潜在的高生产率和高效率的反应路径，并且如果所需碳源（如CO<sub>2</sub>）直接从大气中获得，则可以提供真正的零排放清洁燃料。如果能从空气中共同提取H<sub>2</sub>O，则整个燃料生产链有望在阳光照射强烈且水资源有限的沙漠地区进行。为此，研究人员开发了一种安装在实验室屋顶的太阳能燃料系统，该系统由三个关键单元组成：一个是直接空气捕集装置（DAC），能从空气中提取CO<sub>2</sub>和H<sub>2</sub>O；一

---

ports-thanks-to-160m-uk-government-funding

<sup>14</sup> Australia's Largest Hybrid Renewable Microgrid Officially Opened. <https://www.world-energy.org/article/20956.html>



个是太阳能热化学氧化还原装置，能利用太阳热能将  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$  转化为合成气；最后一个气转液装置（GTL），能将合成气转化为液态烃或甲醇。通过吸附-脱附过程直接从环境空气中过滤出  $\text{CO}_2$ ，吸附过程在常温常压下进行，每次循环 180 分钟；解吸过程在  $95^\circ\text{C}$  和  $0.1\text{-}0.3\text{ Pa}$  条件下进行，每次循环 43 分钟。该装置每小时可处理 2000 立方米的气流，每天 5.5 次循环，产生大约 8 千克/天的  $\text{CO}_2$ ，测量的纯度为 98%（其余为空气）和 20-40 千克/天的  $\text{H}_2\text{O}$ （取决于空气相对湿度），污染物低于 0.2 ppm 的检测限值。废气在吸附过程中离开装置， $\text{CO}_2$  捕获率约 40%-70%。在解吸过程中，离开 DAC 单元捕获的  $\text{CO}_2$  气流在常压下被收集在气球型缓冲器中，随后在最大 12 Pa 压力下被压缩，并存储在 750 L 钢质缓冲罐中。水从解吸流中冷凝出来，储存在塑料缓冲罐中。具体而言，太阳能热化学氧化还原装置通过太阳热辐射驱动还原-氧化（氧化-还原）循环，通过  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$  的热化学分解产生一氧化碳和氢气。研究人员使用具有反应动力学迅速、晶体稳定性好和丰度高等特征的非化学计量氧化铈（ $\text{CeO}_{2-x}$ ）作为氧化还原体系。太阳能氧化还原装置中的循环包括两个步骤：在第一吸热步骤中， $\text{CeO}_{2-x}$  热还原生成氧气，在第二放热步骤中，还原的  $\text{CeO}_{2-x}$  被二氧化碳/水分子重新氧化，分别生成一氧化碳或氢气。燃料（氢气、一氧化碳）和氧气分别在单独步骤中生成，从而避免形成爆炸性混合物，研究人员采用温度和压力波动来实现  $\text{CeO}_{2-x}$  的氧交换能力最大化，从而提高每次循环的燃料产量。设备每天运行 7 小时，将产生 96.2 L 的合成气，合成气的组成为 59.5% $\text{H}_2$ 、4.6% $\text{CO}$ 、17.5% $\text{CO}_2$  和 18.4% $\text{Ar}$ ；然后在 GTL 装置中进一步转化为甲醇。GTL 装置测得的单程摩尔转化率为 27%，生产的甲醇纯度为 65%，其余为水，剩余的未转化合成气将通过 GTL 装置进行多次循环。然而，由于氩气浓度随着每一次循环的增加而增加，循环的合成气在连续 6 次循环后将被舍弃，最终总摩尔转化率为 85%。设备一天运行 7 小时，产生的纯甲醇量为 32 mL。此外，研究团队评估了为满足全球范围内的航空喷气燃料消耗量（2019 年为 4140 亿升），该燃料系统所需的占地面积：即所有太阳能燃料生产厂的总土地足迹大概在 4.5 万平方公里，相当于撒哈拉沙漠面积的 0.5% 左右。

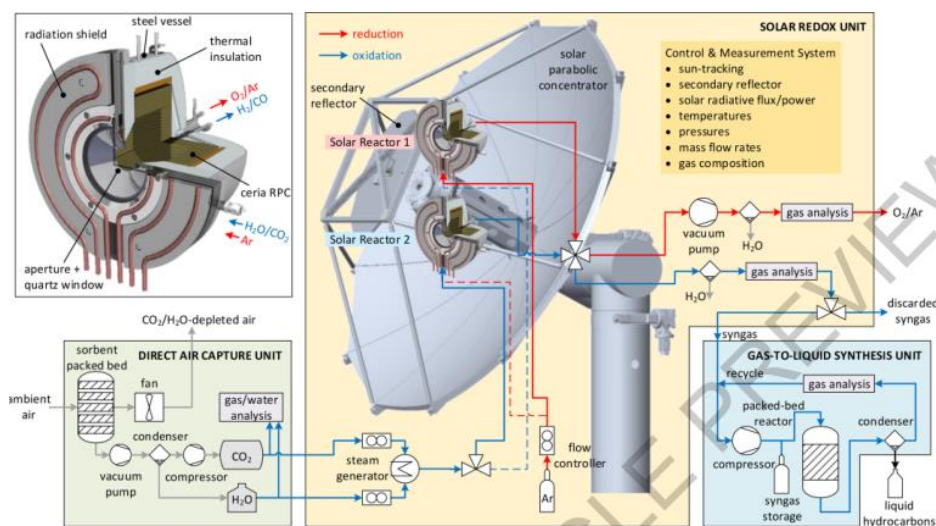


图 1 太阳能燃料系统工作原理图

该项研究实现了从环境空气中捕集  $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{CO}_2$  到运输燃料的全过程合成，并在自建的微型太阳能燃料工厂中得到应用。研究人员表示，该过程对利用阳光和空气生产清洁的碳氢燃料是一个重要里程碑，在适当的政策支持下，未来将向工业化应用，实现航空部门长期脱碳目标。相关研究成果发表在《Nature》<sup>15</sup>。

(占威 汤匀)

## 新钝化工艺助力 $26 \text{ cm}^2$ 大面积钙钛矿电池效率创造新纪录

小面积的钙钛矿太阳电池转换效率已经逼近单晶硅电池，但大面积器件的性能和稳定性还存在显著差距，主要原因是多晶钙钛矿薄膜在其晶界和表面存在大量的缺陷，形成了电子捕获中心导致了非辐射的复合损失抑制了电池性能，因此如何有效解决上述问题进一步提升钙钛矿电池性能成为了研究热点。

由瑞士洛桑联邦理工学院 Mohammad Khaja Nazeeruddin 教授课题组牵头的国际联合研究团队利用分子工程设计了苯二乙铵碘化物 ( $\text{PDEAI}_2$ ) 的不同异构体化合物作为添加剂引入钙钛矿薄膜中，实现了对钙钛矿薄膜缺陷的有效钝化，抑制了非辐射的复合损失，进而增强了电池性能，小面积 ( $0.1 \text{ cm}^2$ ) 电池效率达到了 23.92%，而大面积器件 ( $26 \text{ cm}^2$ ) 仍有高达 21.4% 的转换效率，是该面积尺度的效率最高值（此前结果是  $25 \text{ cm}^2$ , 15%），为钙钛矿大面积规模化制备积累了关键技术基础。相关研究表明了有机卤化盐钝化被认为是制备高效、稳定的钙钛矿光伏器件的有效策略。但该处理方法会在三维 (3D) 钙钛矿表面形成一个额外的二维 (2D) 钙钛矿层，尤其是在较高的温度下。而 2D 钙钛矿层通常具有固有的面内取向和较高的激子束缚能，从而抑制电荷传输，并降低缺陷钝化的效果。为此，研究人员通过分子工程设计制备有机卤盐  $\text{PDEAI}_2$  邻位、间位和对位结构异构体（不同异构体空间位阻

<sup>15</sup> Remo Schäppi, David Rutz, Fabian Dähler, et al., Drop-in Fuels from Sunlight and Air. *Nature*, 2021, DOI: 10.1038/s41586-021-04174-y

不同，形成不同能垒带来不同的钝化效果）。随后将不同异构体引入到钙钛矿薄膜中并制备了钙钛矿电池器件，为了对比研究还制备了无异构体修饰的钙钛矿电池器件作为参照。电化学性能测试显示，无异构体修饰的电池器件（小面积， $0.1\text{ cm}^2$ ）效率为 20.88%，而含有异构体电池器件效率均得到增强，其中邻位异构体修饰的电池器件转换效率最佳，达到了 23.92%。通过光致发光谱(PL)、超紫外光电子谱(UPS)等一系列微观表征和理论计算研究，揭示异构体修饰后电池性能增强的潜在工作机制。结果显示，在三种异构体中，PDEAl<sub>2</sub> 邻位异构体空间位阻最大，其对应的面内取向的 2D 钙钛矿的形成能垒最高，从而能够阻止体积庞大的有机阳离子进入钙钛矿晶格，实现对深层能级和浅层能级缺陷有效钝化，减少了缺陷态密度抑制了非辐射的复合损失，进而增强了电池性能。随后研究人员利用相同工艺制备了  $26\text{ cm}^2$  的大面积电池器件（邻位异构体修饰），获得了高达 21.4% 的转换效率，是目前文献报道的该面积尺度钙钛矿电池器件效率的最高值，创造了新的纪录。进一步，研究人员对器件的长程稳定性开展研究，在 40-50% 湿度环境、一个标准的模拟太阳能辐照下连续运行 1000 小时后，无异构体修饰电池器件效率大幅下降了 42%，而邻位异构体修饰电池器件仍可维持 85% 的初始效率，表现出优异的长程稳定性。

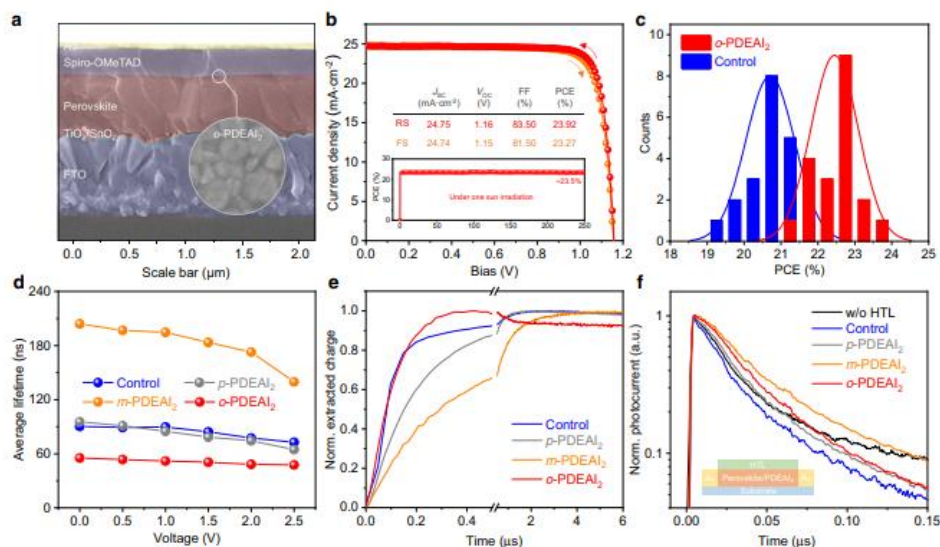


图 1 含有邻位 PDEAl<sub>2</sub> 异构体添加剂的钙钛矿薄膜电池器件结构示意图和电化学性能表征

该项研究精心设计制备了一种有机卤盐异构体并用于对钙钛矿薄膜进行修饰，实现了对钙钛矿薄膜缺陷的有效钝化，抑制了非辐射复合损失，增强了电池性能和长程稳定性， $0.1\text{ cm}^2$  小面积电池器件转换效率达到了 23.92%， $26\text{ cm}^2$  大面积器件创造了新的效率纪录达到了 21.4%（此前类似尺度纪录为  $25\text{ cm}^2$ ，15%），推进了钙钛矿太阳电池大面积制备工艺的进步，为其规模化生产应用积累关键技术。相关研究成果发表在《Nature Communications》<sup>16</sup>。（王珍 郭楷模）

<sup>16</sup> Cheng Liu, Yi Yang, Kasparas Rakstys, et al. Tuning structural isomers of phenylenediammonium to afford efficient and stable perovskite solar cells and modules. *Nature Communications*, 2021, DOI: 10.1038/s41467-021-26754-2

# 低碳化多能融合

## 美国能源部发布碳中和氢能技术基础科学问题报告

近期，美国能源部发布《碳中和氢能技术的基础科学》报告<sup>17</sup>，探讨了零碳氢能生产、存储和利用等领域的科学问题和技术障碍。该报告提出了绿氢基础科学研究四个优先研究方向，包括：发现和控制材料和化学过程以彻底革新电解制氢系统；操控氢的相互作用机制以充分发挥氢燃料潜力；阐明能源效率和原子效率相关的复杂界面结构、演化和化学问题；认识并缓解性能退化过程以提高氢能系统的耐用性。

### 1、发现和控制材料和化学过程以彻底革新电解制氢系统

**关键科学问题：**如何进行多组件的协同设计，以实现稳定、高效的零碳电解水制氢？

电解需要多种组分在特定条件下的协同作用，以实现高活性和对水中杂质的耐受性。要取得重大进展，关键是要详细了解材料组分、系统和反应环境如何共同生产氢气。理解多尺度的时间和空间现象，对于针对不同运行环境进行经济高效、稳定的组件（如催化剂、膜和电极层）定向协同设计至关重要。为了实现这些目标，需要开发原位和/或工况条件下动态表征（operando）技术以及计算和/或数据科学工具，以了解工况条件下系统不断变化的复杂情况。

### 2、操控氢的相互作用机制以充分发挥氢作为燃料的潜力

**关键科学问题：**控制和选择性调控氢与其他分子和材料的相互作用需要哪些基本见解？

成功实现零碳氢能技术需要控制氢与其他分子和材料相互作用的能量和机理。需控制的能量范围从氢的弱相互作用到氢分子中的强键。实现调节氢相互作用以获得比物理吸附强但比化学吸附弱的特定结合能，将促进氢技术的变革性进展。掌握这种调控将需要能够针对氢存储和利用过程，准确表征分子种类和受限环境中表面和界面的氢相互作用和动力学，并将这些数据整合到预测模型中。

### 3、阐明能源效率和原子效率相关的复杂界面结构、演化和化学问题

**关键科学问题：**如何在多个空间和时间尺度上定制相互作用、不断演化的界面，以实现节能、选择性工艺过程，最终实现零碳氢能技术？

多组分、多相界面的复杂性加上氢能系统固有的反应性带来了许多挑战，实现可持续过程需要原子间的高效化学反应，不会浪费材料或产生不必要的副产品。表

<sup>17</sup> Foundational Science for Carbon-Neutral Hydrogen Technologies. [https://science.osti.gov/-/media/bes/pdf/reports/2021/Hydrogen\\_Roundtable\\_Brochure.pdf](https://science.osti.gov/-/media/bes/pdf/reports/2021/Hydrogen_Roundtable_Brochure.pdf)

征、理解和控制多相复杂界面的时空特性和动力学是推进零碳氢能技术的关键。这一重大挑战需要开发集成的、预测性方法，涉及多种技术的耦合和并行应用，包括先进合成，异位、原位和工况条件下动态表征，量子到连续尺度的理论认知和建模，数据科学和机器学习，性能量测，以及耦合这些方法的多模态平台等。

#### 4、认识并缓解性能退化过程以提高氢能系统的耐用性

**关键科学问题：**如何识别和理解氢能系统性能退化的复杂机理，以获得能够预测设计更耐用系统的基础知识？

认识和缓解性能退化是氢能技术的一项艰巨挑战。由于系统在复杂条件下长期运行，加大了分子或原子尺度上多种降解现象机械论认知的难度。准确认识管控稳定性的结构-功能关系至关重要，包括在界面处开展工况条件下的动态过程表征，这将有助于制定新的设计原则以及开发能够显著延长寿命的更坚固、稳定的材料，尤其是当合成和性能与预测性建模相耦合时更是如此。

（岳芳）

## 日本 NEDO 投入 320 亿日元资助先进氢/氨动力船舶技术

10 月 26 日，为实现下一代零排放船舶的普及应用，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 320 亿日元启动“下一代船舶开发”项目，推进以氢、氨等为燃料的先进船舶动力技术<sup>18</sup>。项目实施周期为 2021-2030 年，详情如下：

### 1、氢燃料船舶开发

该主题将支持 1 个课题“船用氢燃料发动机、储氢装置和氢燃料供应系统开发”，将由川崎重工业株式会社、洋马动力技术有限公司和日本发动机公司并行开发不同功率输出和应用范围的船用氢燃料发动机，并进行示范运行以验证其功能和可靠性。另外，还将开发船用储氢装置和氢燃料供应系统，并应用于中高速四冲程发动机和低速二冲程发动机的示范运行。

### 2、氨燃料船舶开发

该主题将支持两个课题：

**（1）氨燃料发动机船舶研发**，主要包括：①氨燃料拖船（近海船舶）的开发和运行，将研制国产四冲程发动机，设计兼顾安全性和实用性的船舶，制定氨燃料船舶的运维方法，争取在 2024 年建成；②氨燃料动力运输船（远洋船）的开发和运行，将研制国产二冲程主发动机和四冲程辅助发动机，建立船上氨燃料毒性安全系统，制定氨燃料船舶的运维方法，争取 2026 年建成。

**（2）氨燃料船舶开发与运行综合项目**，该课题将进行氨燃料船舶开发、运营、

<sup>18</sup> グリーンイノベーション基金事業、「次世代船舶の開発」に着手。  
[https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5\\_101487.html](https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101487.html)

燃料生产、燃料供应基地开发的综合实施，以支持日本实现氨燃料船舶的社会运营。

### 3、减少液化天然气（LNG）燃料船舶的甲烷泄漏

该主题将支持 1 个课题“通过改进催化剂和发动机以减少 LNG 燃料船舶的甲烷泄漏”，开发在实际发动机运行条件下能够大幅减少甲烷泄漏的催化剂，基于催化剂和发动机设计开发新型发动机系统，并将其应用于实际船舶中。

（岳芳）

## 欧盟资助 11 亿欧元支持能源密集型行业创新脱碳项目

11 月 16 日，欧盟宣布在“创新基金”资助框架下向欧洲多国的 7 个大规模创新项目投入 11 亿欧元，支持将能源密集型行业脱碳的突破性技术推向市场<sup>19</sup>。此次资助涉及氢能、碳捕集利用与封存（CCUS）、可再生能源等技术，涵盖化工、钢铁、水泥、炼油厂、电力和热力等行业，具体包括：

### 1、碳密集型行业脱碳项目

（1）瑞典 **HYBRIT** 项目。该项目将使用氢直接还原炼钢技术取代煤基高炉炼钢，示范氢基炼钢的完整价值链，包括新建 500 兆瓦的电解制氢装置，以及建造一座氢还原炼钢电炉替代原有高炉。预计每年将生产约 120 万吨粗钢，占瑞典总产量的 25%，投运 10 年将减少 1430 万吨 CO<sub>2</sub>。

（2）芬兰 **SHARC** 项目。该项目将示范两种在炼油厂生产低碳氢的方法，即通过电解制绿氢（50 兆瓦规模）和通过化石燃料结合 CCS 制蓝氢，同时将捕集的 CO<sub>2</sub> 永久封存在北海。预计投运 10 年将减少超过 400 万吨碳排放。

（3）法国 **K6** 项目。该项目将在现有水泥厂最大限度地利用生物基及其他替代燃料，以及利用已脱碳的原材料，大幅减少碳排放。通过将新型工业规模富氧煅烧水泥窑与碳捕集相结合，取代现有湿法窑，可捕集超过 90% 的碳排放，并通过火车和轮船运输至北海封存地，或用于生产混凝土产品。

（4）比利时 **Kairos-at-C** 项目。该项目将开发完整的 CCS 价值链，投运 10 年可减排 1420 万吨，具体包括：①部署大型碳捕集和净化设施，可处理来自 5 个不同碳源（2 个制氢装置、2 个环氧乙烷装置和 1 个氨装置）的排放；②并入 Antwerp@C 项目设施，该项目正开发一种多模式运输基础设施，将 CO<sub>2</sub> 运输至北海周围的多个永久封存库，并部署先进的节能液化技术；③设计和建造先进的液态 CO<sub>2</sub> 储罐，用于将 CO<sub>2</sub> 运输至封存地。

### 2、可再生能源项目

（1）意大利 **TANGO** 项目。该项目将开发一个工业规模试产线，生产新型双异质结太阳能电池，将产量从 200 兆瓦/年扩大至 3 吉瓦/年。该项目将串联结构应用于双

<sup>19</sup> EU invests over €1 billion in innovative projects to decarbonise the economy.  
[https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip\\_21\\_6042](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_21_6042)

异质结太阳电池，以克服硅基材料的带隙限制。

(2) 西班牙 ECOPLANTA 项目。该项目将使用城市固废替代化石燃料，在西班牙塔拉戈纳港附近的石化综合设施中生产甲醇（年产量 23.7 万吨），以减少城市固废中 70% 的 CO<sub>2</sub>。

(2) 瑞典 BECCS@STHLM 项目。该项目将在现有生物质热电联产发电厂建造一个 CCS 设施，将碳捕集过程与热回收相结合以提高效率，投运 10 年将避免 780 万吨 CO<sub>2</sub> 排放。

(岳芳)

## 英力士计划投资 23 亿美元助力欧洲绿色制氢

10 月 18 日，欧洲最大的氢气生产商英力士（INEOS）表示，将投资 23 亿美元建设绿色电解制氢工厂，在欧洲各地生产零碳绿氢<sup>20</sup>。未来 10 年，将在挪威、德国和比利时建造首批工厂，其他工厂计划在英国和法国建造。落户挪威的装置将是一个 20 兆瓦电解槽，建成后预计每年至少可减排 2.2 万吨 CO<sub>2</sub>。将在德国建造的是位于科隆的 100 兆瓦电解槽，建成后预计每年至少可减排 12 万吨 CO<sub>2</sub>。

(李娜娜)

## 双功能氧电催化剂助力高性能固定气体组合式再生燃料电池

固定气体组合式再生燃料电池（FG-URFC）具有气体管理简单、高效的优点而受到研究人员广泛关注。然而其性能往往受到析氧反应（OER）和氧还原反应（ORR）催化活性的限制。因此亟需开发性能良好的双功能氧电催化剂以满足较高的 OER 和 ORR 催化活性。

圣路易斯华盛顿大学 Vijay K. Ramani 教授团队成功构建了一种高性能双功能氧电催化剂，该方法是在钨酸铅焦绿石（Pb<sub>2</sub>Ru<sub>2</sub>O<sub>7-x</sub>）上沉积 Pt 原子，合成了一种 Pt-Pb<sub>2</sub>Ru<sub>2</sub>O<sub>7-x</sub> 电催化剂，其具有较低的比表面积和高度对称的氧还原和析氧活性，为开发 FG-URFC 提供了一条新的途径。相关研究表明，一种高活性、高稳定性、低双官能度指数（BI）的双功能氧电催化剂有助于实现 URFC 的高性能和高往返效率（RTE）。理想的双功能氧电催化剂应该使 OER 和 ORR 起始电位趋近于 1.23 V（vs RHE）的平衡电位，且具有较低的 BI（BI=10 mA/cm<sup>2</sup><sub>geo</sub> 时 OER 电位与 -3.0 mA/cm<sup>2</sup><sub>geo</sub> 时 ORR 电位之差）。然而，基准 OER（RuO<sub>2</sub> 和 IrO<sub>2</sub>）和 ORR（Pt）电催化剂的 BI 均在 1.0 V 以上，因此它们不适合单独用于 URFC 制备。因此，将其与其他电催化剂一起使用，如使用碱性 OER 活性和 OER/ORR 稳定的电催化剂作为 Pt 的载体是一种有效

<sup>20</sup> INEOS Announces over €2 Billion Investment in Green Hydrogen Production. <https://www.ineos.com/news/ineos-group/ineos-announces-over-2-billion-investment-in-green-hydrogen-production/>

的研究策略。研究人员合成的  $\text{Pt-Pb}_2\text{Ru}_2\text{O}_{7-x}$  电催化剂表现出比基准 OER ( $\text{IrO}_2$ ,  $\eta_{@10\text{mAcm}^{-2}}=0.35\pm 0.02\text{ V}$ ) 和 ORR ( $\text{Pt/C}$ ,  $\eta_{@-3\text{mAcm}^{-2}}=-0.33\pm 0.02\text{ V}$ ) 更高的 OER ( $\eta_{@10\text{mAcm}^{-2}}=0.25\pm 0.01\text{ V}$ ) 和 ORR ( $\eta_{@-3\text{mAcm}^{-2}}=-0.31\pm 0.02\text{ V}$ ) 活性。 $\text{Pt-Pb}_2\text{Ru}_2\text{O}_{7-x}$  具有  $0.56\text{ V}$  的较低双功能指数, 具有比  $\text{Pt}$  ( $>1.0\text{ V}$ ) 和  $\text{Pb}_2\text{Ru}_2\text{O}_{7-x}$  ( $0.69\text{ V}$ ) 具有更对称的 OER-ORR 活性, 更适用于阴离子交换膜燃料电池或金属-空气电池应用。X 射线光电子能谱 (XPS) 表征结果证实,  $\text{Pt-Pb}_2\text{Ru}_2\text{O}_{7-x}$  中  $\text{Ru}^{5+}$  含量高于  $\text{Ru}^{4+}$ , 从而产生了较高的 OER 活性。而  $\text{Pt-Pb}_2\text{Ru}_2\text{O}_{7-x}$  型催化剂的高 ORR 活性归因于  $\text{Pt}$  在  $\text{Pb}_2\text{Ru}_2\text{O}_{7-x}$  型载体上具有高度分散特征。用  $\text{Pt-Pb}_2\text{Ru}_2\text{O}_{7-x}$  和  $\text{Pt/C}$  分别作为双功能氧电催化剂和双功能氢电催化剂进行 FG-URFC 测试, 在电解槽和燃料电池模式下, 在  $1.8\text{ V}$  和  $0.9\text{ V}$  电压下, FG-URFC 的电流密度分别为  $715\pm 11\text{ A/g}_{\text{cat}}^{-1}$  和  $56\pm 2\text{ A/g}_{\text{cat}}^{-1}$ 。在  $0.1\text{ A/cm}^{-2}$  时, FG-URFC 显示出较高的往返效率 ( $75\%$ ), 标志着  $\text{Pt-Pb}_2\text{Ru}_2\text{O}_{7-x}$  作为 OER/ORR 双功能电催化剂在未来能源和燃料生产应用中具有较好的实用性。此外,  $\text{Pt-Pb}_2\text{Ru}_2\text{O}_{7-x}$  的 OER 和 ORR 活性在  $2\text{ h}$  的 ORR 测试后, 性能没有变化, 表明其在碱性 ORR 条件下具有长期稳定性。

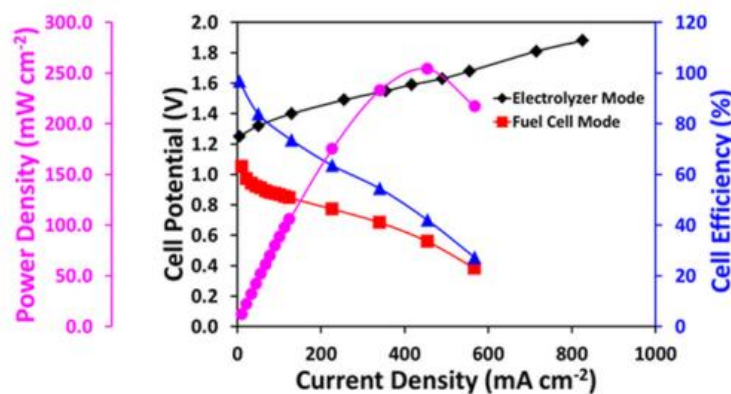


图 1 FG-URFC 的性能 (工作电极和参比电极)

该项研究在  $\text{Pb}_2\text{Ru}_2\text{O}_{7-x}$  上沉积了  $\text{Pt}$ , 其 BI 值为  $0.56\text{ V}$ , 具有更对称的 OER-ORR 活性分布, 可用于碱性 URFC 的制备。低双官能度指数  $\text{Pt-Pb}_2\text{Ru}_2\text{O}_{7-x}$  作为 OER/ORR 双功能电催化剂显著提高了碱性 FG-URFC 的活性, 为开发和生产的 FG-URFC 提供了一条新的途径。相关研究成果发表在《*Proceedings of the National Academy of Sciences*》<sup>21</sup>。

(占威 汤匀)

<sup>21</sup> Pralay Gayena, Sulay Saha, Xinquan Liu, et al., High-performance AEM unitized regenerative fuel cell using Pt-pyrochlore as bifunctional oxygen electrocatalyst. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2021, DOI: 10.1073/pnas.2107205118.



## 高度耐用双 Co 原子位点催化剂助力 CO<sub>2</sub> 光还原制甲烷

CO<sub>2</sub> 还原技术对于减少大气中 CO<sub>2</sub> 含量和解决能源短缺问题具有重要意义。其中，光催化还原 CO<sub>2</sub> 被认为是一种环境友好的 CO<sub>2</sub> 捕集利用方法。因此，开发具有高效选择性和电荷分离功能的光催化剂成为 CO<sub>2</sub> 转化领域的研究热点。

韩国延世大学 Tae Kyu Kim 教授带领的研究团队开发了一种具有 Co<sub>2</sub>-N 配位结构的新型催化剂，得益于独特的双原子结构，具有良好的催化活性和选择性，并成功用于光催化 CO<sub>2</sub> 还原。相关研究表明，单原子中心催化剂 (SACs) 由于其在 CO<sub>2</sub> 还原方面的优越性受到极大的关注。然而，由于 CO<sub>2</sub> 分子在 SACs 中心只有较低吸附能力，使得传统的 SACs 系统主要生成一氧化碳 (CO) 而不是烃。双原子中心催化剂 (DACs) 由于其相邻金属原子之间的协同效应，可以在保持单原子中心催化剂几乎 100% 的原子效率和良好的烃选择性等优势的同时，提高其催化活性，已成为多相催化研究新的前沿方向。因此，开发具有较强光响应能力的 DACs 复合半导体有助于提高 CO<sub>2</sub> 的光还原活性，而设计 DACs 则是调整产物选择性的途径之一。为此，研究人员通过三聚氰胺-三聚氰酸前体的超分子前驱体制备了 CoDAC-x。测试表明，纯净的 CoSAC-0 仅表现出较低的 CO 生成率。随着共负载量的增加，CO、甲烷 (CH<sub>4</sub>) 产率呈平缓抛物线变化趋势。相比较而言，CoSAC-0 和 CoSAC-0.9 没有 CH<sub>4</sub> 生成；CoDAC-2.4 表现出最高的 CO 选择性；x 值从 2.4 提高到 7.6 期间，CoDAC-3.5 的 CH<sub>4</sub> 产率最高。在这些光催化剂中，CoDAC-3.5 具有最高的 CH<sub>4</sub> 生成速率和 65.0% 的 CH<sub>4</sub> 析出选择性。当 Co 原子在复合材料中的用量大于 3.5% 时，在 CoDAC 以外的催化剂骨架中出现 Co 团簇，从而失去 DACs 催化剂的优势。钴基产物的光催化还原随 x 值的增加而变化的趋势可以归因于面间三-3S-三嗪骨架中活性中心的变化，从而影响其表面特征、CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 吸附行为和电荷产生/分离过程。CoDAC-3.5 表面的 CO\* 中间体容易被快速质子化生成 CHO\*，从而为光驱动 CO<sub>2</sub> 还原提供了良好的 CH<sub>4</sub> 选择性。此外，研究人员还探究了钒酸铋纳米片 (BV-NS<sub>s</sub>) 修饰对 CoDAC-3.5 光活性的影响。纯 BV-NS<sub>s</sub> 没有光活性，但 BV/CoDAC 的 CO/CH<sub>4</sub> 产率随 BV 负载量的增加而显著提高。其中，30% BV/CoDAC 纳米复合材料的 CO/CH<sub>4</sub> 析出活性 (分别为 12.7/19.5 μmol·g<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup>) 是纯 CoDAC-3.5 的 2.57 倍，总消耗电子数 (TCEN=181.4 μmol·g<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup>) 和表观量子效率 (AQY=5.23%) 均高于文献报道的光催化剂。此外，所有 BV/CoDAC 复合材料的 CH<sub>4</sub> 产率均远高于 CO 的产率，表明在 BV-NS<sub>s</sub> 改性过程中可以保持 CoDAC 的选择性。这表明，适当的 BV-NS<sub>s</sub> 修饰可以提高 CoDAC 的光还原活性。机理分析表明 BV-NS<sub>s</sub> 可以通过 N-O-V 桥键与 CoDAC 紧密结合，有利于在界面形成内建电场。这有效地促进了 BV-NS<sub>s</sub> 的光生电子转移到 CoDAC 上，进而转移到 CO<sub>2</sub>RR 中的完全分散的 CO<sub>2</sub> 原子催化中心。因此，实现了两步激发和级联电荷转移途径的高效催化机制，从而提高了该光系统的 CO<sub>2</sub>RR 活性。

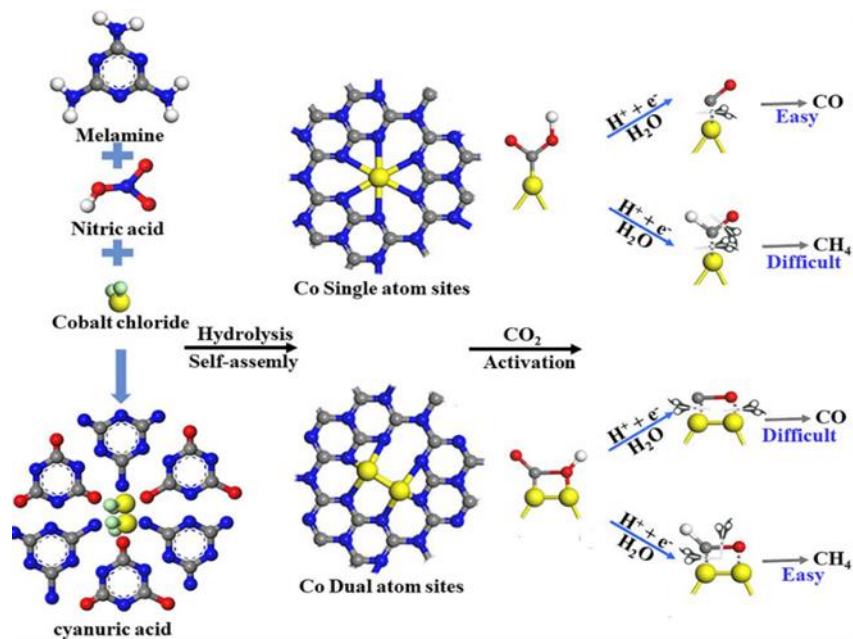


图 1 CoSAC 和 CoDAC 催化剂制备示意图

该项研究首次合成了具有 Co<sub>2</sub>-N 配位结构的钴基原子中心催化剂，并将其用于光驱动 CO<sub>2</sub> 还原，结果表明，当 Co 原子加入量大于 2.4% 时，Co 基原子中心催化剂可以转变为具有 Co<sub>2</sub>-N 配位结构的 CoDAC，得到的 CoDAC-3.5 表现出最佳的 CO<sub>2</sub>RR 性能和较好的 CH<sub>4</sub> 选择性，远远超过无 Co 催化剂和 CoSACs。用 BV-NS<sub>s</sub> 原位修饰 CoDAC-3.5 后，得到的 BV/CoDAC 纳米复合材料的光催化性能显著提高。该项研究对于开发基于金属的原子中心催化剂指明了方向，不仅可以用于高效的 CO<sub>2</sub>RR 反应，还可以用于其他太阳能转换应用。相关研究成果发表在《*Angewandte Chemie International Edition*》<sup>22</sup>。

(占威 汤匀)

<sup>22</sup> Jinming Wang, Eunhyo Kim, Dharani Praveen Kumar, et al., Highly durable and fully dispersed Co diatomic site catalysts for CO<sub>2</sub> photoreduction to CH<sub>4</sub>. *Angewandte Chemie International Edition*, 2021, DOI: 10.1002/anie.202113044.

# 能源战略研究

## IEA 发布清洁能源技术评估报告

11月4日，国际能源署（IEA）发布最新版《清洁能源技术评估》<sup>23</sup>报告，对全球清洁能源转型至关重要的6大行业46类技术进行全面评估，结果表明只有交通运输行业中的电动汽车技术和建筑行业中的照明技术处于IEA 2050净零排放情景发展路径上，2020年全球电动汽车销量增加40%，LED灯具占全球照明市场的50%以上。有18类技术需要加快发展，另有26类技术还没有步入2050净零排放情景的正确轨道。在各种能源终端应用中，电力系统快速脱碳是实现能源清洁转型首要因素，因为电力占与能源相关碳排放量的40%，并越来越多应用于促进经济发展关键部门。报告要点如下：

### 一、电力行业

#### 1、电力行业净零排放对实现全球气候目标至关重要，2020年电力行业碳排放占有与能源相关碳排放量的40%

电力行业净零排放对全球清洁能源转型至关重要，因为电力占与能源相关的CO<sub>2</sub>排放总量的40%，并且电力越来越多地应用于满足促进经济发展关键部门的能源需求。目前电力行业碳减排速度并没有达到2050净零排放情景所设定的标准，该情景要求电力行业的碳排放量到2030年年均下降7.6%，到2040年实现完全脱碳（图1）。

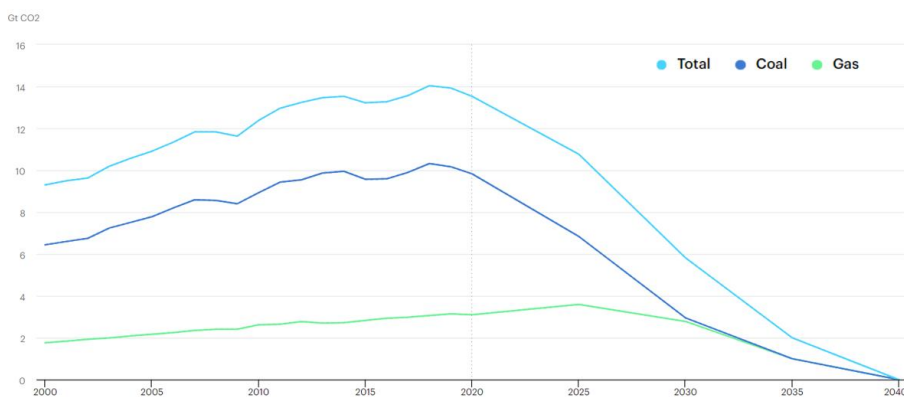


图1 净零排放情景中2000-2040年电力行业CO<sub>2</sub>排放量变化趋势（单位：十亿吨CO<sub>2</sub>）

2020年受疫情影响，电力行业碳排放量减少了3.3%，全球电力需求减少了1%，但低碳发电增长了3.9%。2020年全球发电量减少4.5%，其中天然气发电量减少1.6%，但煤炭仍是电力生产最主要的能源来源。此外，电力行业是2020年与能源相关的碳

<sup>23</sup> Tracking Clean Energy Progress. <https://www.iea.org/topics/tracking-clean-energy-progress>

排放主要来源（占 40%）。因此，电力行业的减排对气候变化和 2050 净零排放情景模拟结果的实现至关重要。

## 2、2020 年全球电力行业碳强度下降 2.8%

全球电力行业碳强度在 2019 年下降 2% 之后，2020 年进一步下降 2.8%，为 458 gCO<sub>2</sub>/kWh。这主要受全球电力需求下降和可再生能源发电占比创纪录增加推动。由于封控措施限制了商业和工业活动，2020 年上半年电力需求下降最为明显。然而一些新兴市场和发展中经济体在年底前电力需求强劲增长，发达经济体在 2020 年下半年开始复苏，但仍低于 2019 年同期水平。

2020 年风力发电（+11%）和太阳能光伏发电（+23%）的增长推动了可再生能源发电份额增加，与此同时，伴随着全球电力需求下降，2020 年化石燃料电厂和核电站发展面临挑战，来自非可再生能源发电量下降了 3% 以上。然而，要达到 2050 净零排放目标，电力行业平均碳排放强度必须以年均 10% 的速度下降，到 2030 年达到 140 gCO<sub>2</sub>/kWh，约为当前碳强度的 30%。随着 2021 年电力需求的增长，经济活动的反弹和主要新兴经济体的快速发展，实现这一减排强度需要对发电技术组合进行重大改变。

## 3、在 2050 净零排放情景中，到 2030 年低碳发电将占发电总量的 70% 以上，而 2020 年这一比例仅为 38%，可再生能源发电技术投资强劲

电力行业清洁转型的一个重要指标是低碳技术（可再生能源、核能、碳捕集和封存）所占份额。到 2020 年，38% 的发电量来自低碳技术，较 2019 年增长了 1% 以上。然而要满足 2050 净零排放目标，电力行业需要进行深度清洁转型，以实现到 2030 年超过 70% 的发电量来自低碳技术。在所有情景中，到 2025 年太阳能光伏装机容量将处于领先地位，到 2030 年风力发电装机规模将仅次于太阳能光伏。此外，到 2030 年燃煤发电所占份额将急剧下降至 9%，目前约 10% 的燃煤电厂利用了碳捕集、利用和封存（CCUS）技术。由于天然气的 CO<sub>2</sub> 排放量降低，到 2050 年天然气发电仍将是净零排放情景下发电组合技术之一。

虽然疫情造成全球经济衰退，但 2020 年可再生能源投资依然强劲。2020 年可再生能源在电力行业总支出（包括网络基础设施）占比超过 45%，随着经济复苏，预计 2021 年可再生能源投资将进一步增加。2020 年，化石燃料发电投资下降了 10% 以上，但不同地区差异明显。2020 年核电投资增加了 5%，2021 年在明确核电继续发展的国家（例如中国、印度和俄罗斯）其投资将进一步增加。而对电网的投资在 2020 年连续四年下降后，到 2021 年将大幅增加，这主要是由于中国和欧洲正在实施电网现代化建设。

## 4、电力行业未来发展建议

**确保长期目标和政策稳定。**对于低碳电力技术，确保投资者信心和持续的政策

支持至关重要。与此同时，政策需要适应不断变化的市场环境，以实现更强的成本竞争力，包括：更好地将波动性可再生能源集成到电力系统中；支持电网现代化建设；推进储能系统建设，实现电网灵活调度。

**支持波动性可再生能源技术，改进电力市场结构。**可再生能源尤其是太阳能光伏和风能正迅速改变全球电力系统构成。虽然可再生能源的成本竞争力日益增强，但仍需要改进电力市场结构和实施相应支持政策，以保障新的可再生能源大规模投资部署，并构建具有灵活调度能力和具有成本效益的高比例可再生能源电力系统。

**制定碳税和构建相应的电力市场保障机制。**征收碳税和监控工厂碳排放有助于煤转气的实施，并为今后应用 CCUS 技术提供重要的投资信号。此外，需要构建额外的电力市场机制，承认天然气发电作为燃煤发电低碳替代品的潜在优势，以便有更充分的过渡期更好地整合波动性可再生能源。由于 CCUS 技术仍处于商业化的早期阶段，因此需要采取如税收抵免和财政拨款等有针对性的政策措施来引导资本投入。

## 二、燃料供应行业

### 1、随着政府和企业制定减排目标，油气行业减排效果越来越受到关注

目前，石油和天然气满足了全球一半以上的能源需求。在 2050 净零排放情景下，到 2030 年石油和天然气需求将下降约 15%，但来自石油和天然气供应侧的碳排放量需下降约 55%（图 2）。因此，限制整个石油和天然气供应链的甲烷排放和消除所有非必须油气空燃是推动该行业碳减排的两个核心要素。目前已有多种成熟的技术手段能及时监测甲烷排放，如使用卫星监控。除了甲烷排放和化石燃料发电之外，工业制造和炼油过程中的碳排放同样重要，因为它们属于石油和天然气供应链中能源密集型的一部分。为了在整个油气价值链上实现进一步碳减排，需要实现上游产业和运输业务电气化，使用电网或分布式低碳能源种类，并应用尽可能多的提高能效的技术手段。

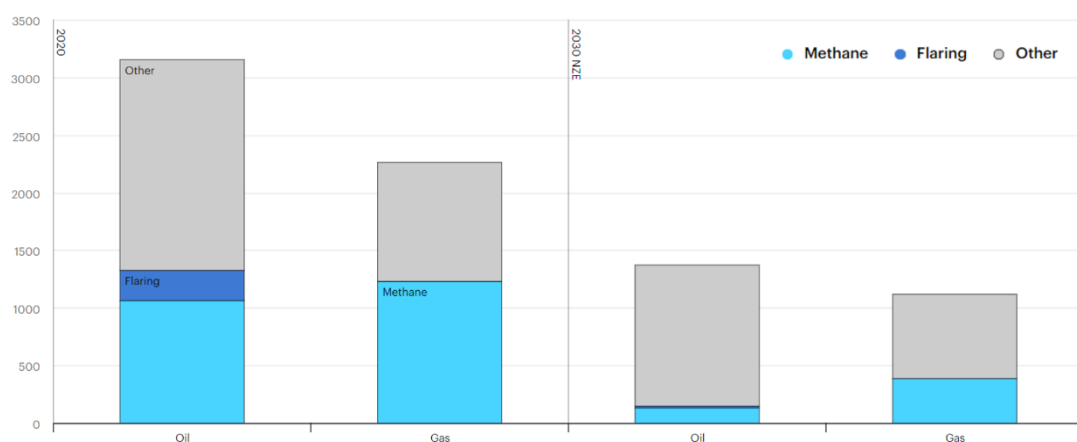


图 2 2020-2030 年净零排放情景中油气供应链的温室气体排放量（单位：百万吨 CO<sub>2</sub>）

### 2、通过政策和法律规章制度减少燃料供应侧的碳排放

政策应鼓励运营商在项目规划和开发的早期阶段最大限度地降低碳排放，同时鼓励对现有基础设施进行维护和减排改造。石油和天然气主要生产国的国家自主贡献中需加入减少甲烷排放的承诺。为此，政府和产业界应加快行动，制定基准目标，以防止甲烷排放和油气空燃过程中的温室气体排放。此外，应禁止非必须的油气燃料空燃和甲烷排放，政府和相关机构应明确生产使用的气体并确保这些气体的所有权责任。与此同时，法律规范需解决甲烷排放和油气空燃过程中的温室气体排放问题，因为抑制油气空燃过程中的温室气体排放可能会导致甲烷直接排放在大气中。

### **3、促进行业合作，开展相应的减排行动**

在实施减排行动时，需注意以下几点：①确保温室气体排放监控被视为战略行动优先事项和日常工作的基本要素；②制定统一的监测排放标准，并定期公布减排目标进展情况；③将减排作为井储层和工厂日常维护的一部分，进行日常跟踪和优先处理事项；④建立伙伴关系扩大减排标准实施范围，以涵盖合资企业 and 非经营性资产等股权运营方式的各种企业；⑤支持包括油田服务在内的所有石油和天然气子部门的清洁创新技术，以实现整个供应链的减排；⑥向清洁低碳发电模式转变；⑦建立第三方核查机制对数据和报告进行核查；⑧利用所有工业界和学术界的人才和创新技术，开发新的检测和减排方法，特别是利用数字技术。

### **4、利用金融和投资杠杆实现减排目标**

对于许多上市公司来说，投资者可以通过气候相关股东决议和董事会影响行业决策。具体包括：①私人资金的投入有助于降低石油和天然气供应过程中所需的减排技术资金。可利用过渡债券或避免碳排放货币的方法筹集实施减排措施所需的资金；②清晰和可对比的行业报告有助于制定减排目标，并直接为石油和天然气部门的减排技术提供资金。

## **三、工业行业**

### **1、2010-2019 年工业行业能耗平均每年增长 1%**

过去二十年，工业产品需求大幅增长，能耗和碳排放量也随之增加。2020 年，工业行业占全球终端能耗的 38%（156 艾焦）。过去十年，工业行业能源消耗增长主要由于能源密集型产业（即化工、钢铁、水泥、造纸和铝材）产能增加导致，而世界人口增长和社会经济发展又加速工业能耗进一步增长。2010-2020 年工业能耗增长率最高的国家是印度和东盟地区（年增长率达到 2.5% 以上）。与此同时，欧洲和美国的工业能源消耗量略有下降。从 2010 年开始，工业行业能源结构基本保持不变。尽管 2010-2020 年间，太阳能和地热能终端用能增长最快（增加一倍多），但在 2020 年工业行业终端用能中太阳能和地热能使用量占比不足 0.05%。化石能源在工业行业能源结构中的份额从 73% 降至 68%，但用电量从 18% 上升至 22%，这主要是因为非能源密集型行业用电量的增加。在净零排放情景下，到 2030 年尽管工业生产规模

将进一步扩大，但能源消耗增长率需限制在每年增长 0.9% 左右（图 3）。

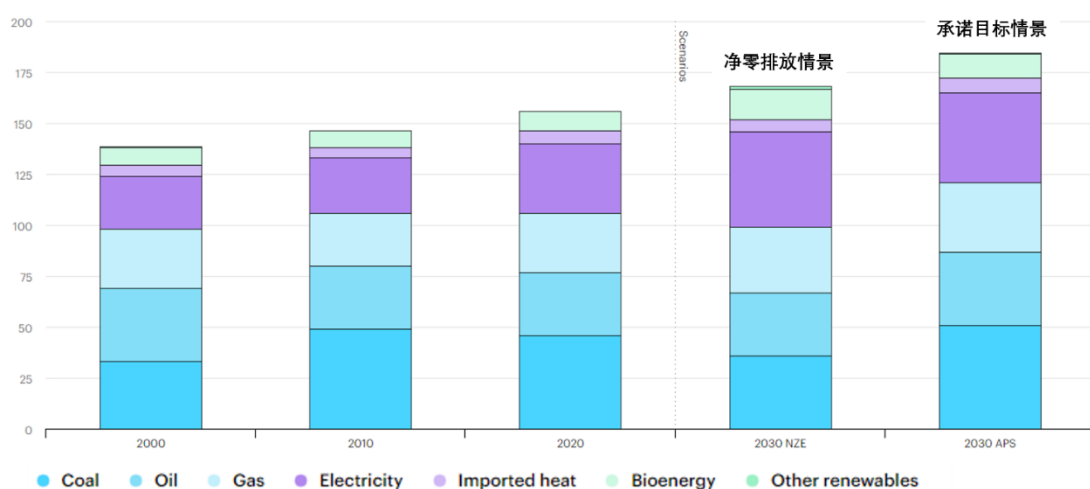


图 3 2000-2030 年净零排放情景和承诺目标情景中工业行业各燃料种类消耗情况  
(单位: 艾焦耳)

## 2、虽然全球工业行业能源生产率有所提高，但要实现 2050 净零排放目标还需加快进度

自 2000 年以来，大多数地区工业行业能源生产率(单位能源用量的工业增加值)有所上升。生产率的提高主要来自先进技术应用、高效设备运营，以及从能源密集型行业(例如钢铁和水泥)向高附加值行业(例如汽车制造、食品和饮料、纺织业)转变。能源生产率与能源效率密切相关。2020 年工业行业年度能效投资总共不到 400 亿美元，较 2019 年下降 1%，这主要是由于 2020 年全球工业活动下降，用于节能设备的支出有限。中国是少数工业增加值增长的经济体之一，中国在全球能源效率投资中所占份额从 2018 年的 37% 上升至 2020 年的 40% 以上，而包括美国和欧洲在内的其他发达经济体的能效支出则有所下降。继中国之后，印度和东南亚在工业能效方面的投资显著增长，到 2020 年分别占全球能效总支出的 9% 和 8%。

## 3、工业行业可再生能源供热的进展远远落后于 2050 净零排放情景设定的目标

2011-2020 年间，全球工业行业可再生能源供热消耗速率每年仅增加 2%，到 2020 年可再生能源只满足了 11% 的工业热需求，仅比十年前高 1.8%。这一增长速率远低于实现净零排放到 2030 年可再生能源供热需年均增长 7% 的目标。到 2020 年，可再生能源供应工业热大部分来自生物质能(占比为 86%)，相当于工业热需求的 9.4%。虽然生物质能在造纸生产中占较大份额(30%)，但在水泥生产(3%) 中占比较小，而在其他能源密集型行业的使用量同样十分有限。此外，在人口密集型地区，与生物质燃烧有关的细颗粒物排放将会引起健康问题。按照 2050 净零排放情景，2020-2030 年间用于工业供热的可再生电力将增长 4 倍。然而，尽管技术进步促使电热泵成为提供低温加热的一种有效且具有成本竞争力的选择，但缺乏强有力的政策支持将导致电力高温供热因成本过高而受到限制。

#### 4、即使受到疫情影响，2020 年全球多种高能耗原材料需求依然强劲

过去十年，几种原材料需求一度趋于平稳，如 2011-2016 年的钢铁需求、2015-2018 年的水泥需求。尽管疫情导致全球经济低迷，但 2020 年水泥产量增长尤为强劲(+2%)。尤其在中国，经济复苏刺激大规模基础设施建设，原材料需求保持强劲增长。尽管中国原材料需求预计到 2025 年达到饱和并趋于平稳，但其他新兴经济体的强劲增长可能会继续推高全球原材料需求。通过制定更严格的材料利用率标准，将有助于减缓材料需求的快速增长导致的碳排放增加。

#### 5、到 2050 年实现净零排放目标需要持续、更雄心勃勃的政策支持

欧盟自 2005 年建立了一个涵盖工业行业的排放交易体系(ETS)。由于担心 ETS 对工业竞争力的影响，欧盟一直在发展碳边境调节机制，从 2023 年开始将要求钢铁、水泥、化肥、铝材和电力等行业的生产商报告其产品潜在排放物，从 2026 年开始将需要为这些排放物缴纳一定比例的排放税，除非生产商已在原产国支付了等值的碳税。在中国，ETS 于 2021 年 2 月开始实施，目前只涵盖电力行业，预计到 2022 年将增加几个工业行业子领域。在国际层面上，一些国家于 2021 年 6 月共同发起了《工业深度脱碳倡议》，重点是刺激低碳工业材料的需求。该倡议由联合国工业发展组织和清洁能源部长级会议牵头，最初将侧重于钢铁和水泥行业深度脱碳，随后可能扩大到其他高能耗行业。尽管目前全球范围内实施了多项政策，但工业行业碳排放量仍在持续上升。各国需采取雄心勃勃的全面政策措施，促使工业行业碳排放量满足 2050 净零排放设定的目标。

#### 6、加快推进工业行业低排放技术创新研发

工业行业发展低碳技术主要有两种途径：一是通过可再生电力、生物质能或其他清洁替代原材料直接避免碳排放；二是通过能源减排技术，如将化石燃料与 CCUS 技术集成。为工业副产品寻找增值途径是低碳高效创新的另一个发展方向。世界各地正在进行一些关键的创新行动，包括：①到 2030 年，欧盟创新基金将提供 100 亿欧元，用于支持能源密集型行业、CCUS、可再生能源和储能等低碳技术研发和大规模示范；②实施“创新使命”全球倡议，由 23 个国家和欧盟委员会为加快全球清洁能源创新而发起；③在钢铁领域发起了 HYBRIT 项目：2020 年夏季在瑞典建设一个利用氢能直接还原铁的示范工厂，另一个工业规模的无化石燃料钢铁厂最早将在 2026 年投产；④将 CCUS 技术应用于水泥制造行业，如 2019 年 Dalmia 水泥制造商宣布其将在印度 Tamil Nadu 工厂进行大规模的化学吸收碳捕集示范；⑤化工生产方面，多家公司正在开发利用太阳能和风能生产氨，并计划到 2030 年扩大工业生产规模；⑥在铝材制造行业，惰性阳极近年来在商业化方面取得了一定的进展，惰性阳极不同于传统碳阳极，在铝冶炼过程中不会降解，因此不会释放 CO<sub>2</sub>。虽然近年来工业行业开展了不少低碳技术创新研发，但仍需加快行动，以开发和部署工业中长



期碳减排技术。

## 7、工业行业未来发展建议

**加快高能效技术部署、实现材料回收利用，提高材料生产效率。**推进高能效技术部署，并逐步向净零排放转型。在钢铁、造纸等行业推动废热/气体回收和热电联产技术应用。构建能源管理系统，制定工厂级的行动计划并分享成功案例，以促进设备高效利用，提高能源效率。提倡产品回收利用，政府和工业界需共同努力，改善回收产品的收集渠道，制定回收要求规范、废弃物处理办法和扩大生产者责任。充分考虑产品生命周期碳排放，减少制造和施工过程中的浪费，发展以共享和循环经济为基础的商业模式，提高价值链各阶段的材料生产效率。

**加快低碳技术创新应用。**由于多种原因（仅靠提高能效和燃料替换无法降低工业过程中化学反应产生的碳排放；许多工业过程所需的高温条件很难实现由低碳电力和其他清洁燃料供给），对当前工业流程进行脱碳是具有挑战性的。因此，未来十年对开发和降低工艺排放的创新技术显得尤为迫切。需要政府和金融投资者加大对技术研发的支持力度，特别是推进已显示出具有减排潜力的新兴技术大规模示范和部署。此外，还必须开始规划和进行基础设施建设，以便最终部署创新技术，如CCUS管道网络以进行CO<sub>2</sub>运输和封存。

**采取强制性CO<sub>2</sub>减排政策，并加强国际合作。**政府可以通过采取强制性CO<sub>2</sub>减排政策，例如逐步提高碳价格或可交易的行业绩效标准，要求在整个价值链中降低每种关键材料生产的平均CO<sub>2</sub>强度。在短期内（5年内），以较宽松的标准释放一个早期市场信号，使工业行业能够在较为严格标准颁布前，有时间做好转型准备。理想情况下，强制性政策将在全球范围内实施，以确保一个公平的全球竞争环境。各国政府可以通过参加多边论坛促进低碳技术转让，以及鼓励其他国家采取强制性CO<sub>2</sub>减排政策以扩大全球影响力。

**提高数据收集能力。**改善能源绩效和工业CO<sub>2</sub>排放统计数据的收集、透明度将有助于研究、监管和检测工业制造流程中的碳排放变化。工业界和政府共同参与协调对提升数据收集能力具有重要影响。政府还需明确更多数据共享途径，同时避免行业面临违反竞争法的风险。

## 四、交通运输行业

### 1、随着后疫情时代经济复苏，运输活动将显著增加

过去二十年，航运和海运碳排放量一直持续上升，公路运输碳排放量也在上升，目前公路部门占交通运输总排放量的75%左右。在后疫情时代，尽管交通运输各子领域在以不同的速度复苏，但2020年汽车销售量已经反弹。预计公路运输活动将在2021年年底恢复到疫情前水平，2021年碳排放量有望比2019年下降5%。尽管全球航空客运量要到2023年（最早）才能恢复到疫情前水平，但航空货运量在2021年

5月已经较疫情前增加10%。此外，全球海运贸易预计2021年较2020年增加0.5%。随着交通运输活动的持续增长，将需要制定具有针对性的政策来遏制不断上升的碳排放。在净零排放情景下，到2030年两轮车、三轮车和轻型汽车使用化石燃料产生的碳排放量平均每年将分别减少2%和5%；重型卡车、航运和海运在2020-2030年间的碳排放量平均每年将减少0.5%（图4）。

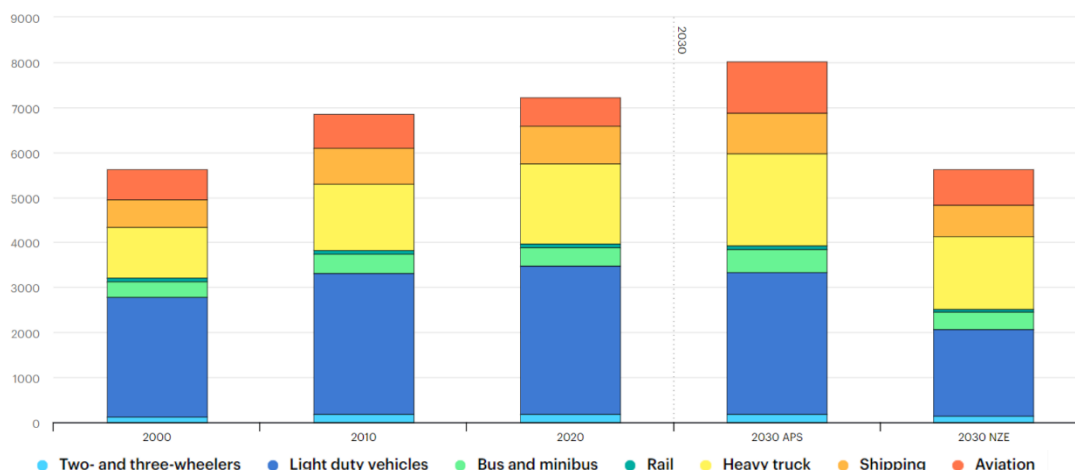


图4 2000-2030年净零排放情景和承诺目标情景中交通运输行业各子领域碳排放量（单位：百万吨CO<sub>2</sub>）

## 2、提高能源效率和加速电气化是短期内遏制交通运输碳排放的关键行动

2020年，全球电动汽车投运数量已达到1000万辆（占全球汽车总份额的1%），电动卡车保有量超过3万辆，电动公交投运量也呈现上升趋势。但与此同时，购买SUV和更大型车辆的趋势抵消了全球轻型电动汽车的减排贡献。尽管商用客机的碳排放强度在过去60年里下降了70%以上，但提升飞机运行效率方面进展缓慢。同样，尽管全球海运能效有所提高，但其提高的速率仍达不到2050净零排放情景设定的目标。为实现2050净零排放目标，需确保到2035年停止销售新的内燃机汽车，并且到2030年电动汽车销量涨幅超过20%。此外，重型卡车的燃油经济性必须不断提高，到2030年，电动和燃料电池类型的重型卡车将占重型卡车总销量的30%。在短期内，加速航运和海运的各种能效改进技术应用对降低这些难以减排子领域的碳强度尤其重要。

## 3、交通运输行业脱碳将依赖于行为模式的转变

疫情爆发之后，全球公共交通需求下降了50%-90%，铁路交通运输需求下降80%。相比之下，疫情引发了公众向步行、骑行等绿色出行方式的改变。这一趋势持续的时间尚不清楚，但可以肯定的是，这一趋势符合净零排放情景模式：从私人汽车旅行到使用公共交通工具出行；从航空出行改为铁路出行。在净零排放情景中，20%-50%的私家车出行方式将改为公交车出行，另外的出行将被自行车、步行和其他公共交通工具取代。到2035年，这将促使汽车碳排放量减少3.2亿吨。目前应对疫情，

一些城市（米兰、巴黎、巴塞罗那和其他城市）已经重新规划了道路空间，以便增加更为多样化的出行模式，铁路公司提供了更多的夜间车辆替代飞机出行。

#### **4、重要的交通运输技术和低碳燃料仍处于示范和原型阶段**

多种清洁低碳燃料和技术为交通运输行业实现长期脱碳提供了一条有效的途径，但这些方法往往处于发展的早期阶段。在公路运输方面，零排放重型汽车车型选择范围不断扩大，但重型货运卡车高压、高通量氢燃料补给站和充电桩的投运试验还处在概念验证阶段。此外，锂硫电池和锂空电池仍处于研究阶段。因此，要实现中短途电动汽车的发展，就需要在电池研发方面取得突破性进展。同样，以氨基燃料作为动力的船舶发动机还处在原型开发阶段，但氨预计将在跨洋航运中为实现净零排放目标发挥重要作用。为实现净零排放目标，各国政府需要最迟在 2025 年前制定明确的战略行动和研发重点，这些战略行动应以国际合作和多边对话为依据。

#### **5、交通运输行业未来发展建议**

**采取综合协调的政策，并从疫情危机中吸取经验教训。**要使交通运输行业满足净零排放目标，需要采用各部门协调一致的政策手段，促进所有运输模式的脱碳，并扩大基础设施建设。世界各地应做到以下几点：①明确所有交通技术的研发重点；②提高各种交通方法的燃油经济性；③推进零排放汽车的应用；④在整个行业中增加可持续低碳燃料的供应和使用；⑤支持公共交通出行，提倡旅行出行多样化。未来政策措施还应从疫情中吸取经验教训，政府尤其要研究如何支持交通运输行业的就业问题，同时提高抗灾能力。

**使用财政工具助力交通运输行业碳减排，并鼓励向低碳出行模式转变。**财政工具包括：提高大型、重型车辆的税收和/或降低小型、轻型车辆的税收，将有助于燃油经济性的改善；征收拥堵费、停车费、道路通行费等措施，将减少私家车的使用频率，从而鼓励市民转向铁路、公交和其他公共交通方式；在减排难度大的部门，如航运、海运和卡车运输，碳定价或税收计划将提高替代燃料的快速研发应用，这对该领域的脱碳至关重要。

**继续实施和收紧关键监管政策，推动低碳技术和燃料的广泛应用。**2020 年，全球有 56% 的人口居住在城市和城镇。随着城市化发展，城市规划者应利用各种公共交通工具，以推动公民出行模式的转变，实现 2050 净零排放目标。推动高密度居住环境中城市轨道交通网络的发展，实现城市轨道交通高客流量，并与公交网络、骑行和步行相互串联，推动“最后一英里”解决方案的实现。此外，政府可以将更多的停车位分配给低排放汽车，以及根据汽车碳排放量收取不同停车费。

### **五、建筑行业**

#### **1、2020 年建筑行业碳排放量减少，并不表示该行业未来碳排放量将持续下降**

2020 年建筑行业碳排放量下降的主要原因是受疫情和电力脱碳的影响。服务行

业活动减少（由于远程办公、学校关闭以及酒店餐饮业停业）是商业建筑能源需求出现有史以来最大降幅的主要原因。与此同时，可再生能源发电量的增加，加上总电力需求的降低，使得 2020 年建筑行业碳排放量较 2019 年更低。随着经济活动复苏和电力需求反弹，预计 2021 年建筑能耗和碳排放量将双双上升。

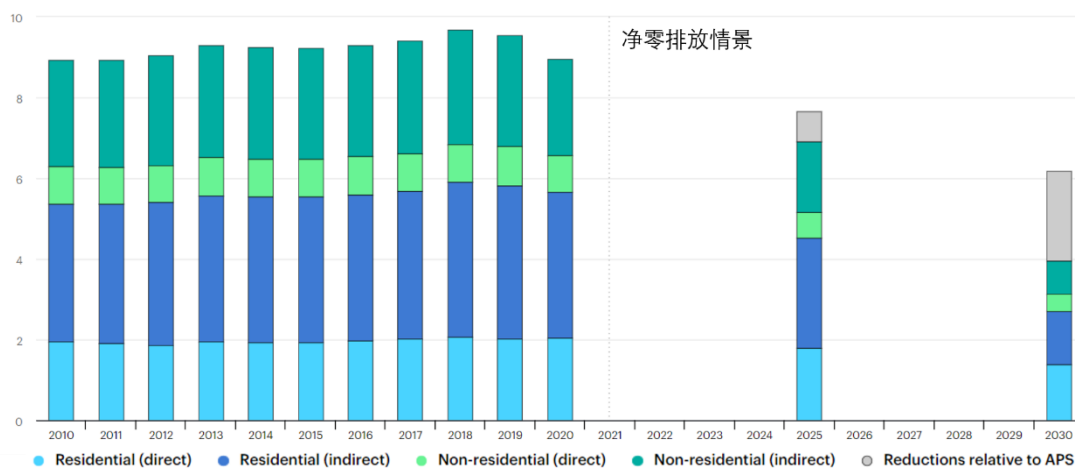


图 5 2010-2030 年净零排放情景下建筑行业碳排放趋势（单位：十亿吨 CO<sub>2</sub>）

## 2、建筑行业能源效率不断提高，但距离实现净零排放目标还很遥远

过去十年全球建筑行业能源需求显著提高，建筑终端能耗从 2010 年的 118 艾焦耳，增长到 2019 年的近 130 艾焦耳，平均年增长率为 1%。建筑行业终端用能中空调、电器和电插座等产品电力需求增长最快，推动了整个建筑行业电力需求的快速增长，2020 年电力占建筑行业能耗的三分之一。自 2010 年以来，化石燃料在建筑行业的需求也在以 0.7% 的年平均增长率增长。目前全球已有 80 个国家制定了建筑节能法规，推动建筑能源强度降低。对于电器采取了更严格的能效标准，促使采用更高效的供暖技术（如热泵），2020 年全球热泵保有总量达到 1.8 亿台，较 2010 年增加 1 亿台。然而要实现 2050 净零排放目标，未来十年建筑行业能源强度需比过去五年下降近 5 倍，这意味着到 2030 年每平方米建筑能耗需较 2020 年减少 45%。此外，2030 年应彻底淘汰使用传统固体生物质能，转向使用沼气、电力和液化石油气等燃料种类，实现能源广泛获取。

## 3、极端天气频繁出现和家用电器增加给控制建筑行业能源需求带来压力

自 2010 年以来，建筑行业能源需求的增长一直快于能效的提高和脱碳进度的发展。在全球范围内使用空调的家庭比例从 2010 年的 27% 上升到 2020 年的 35%。多个国家持续的高温天气都创下了历史记录，推动空调需求大幅增长。事实上，2020 年是有记录以来最热的一年，而 2021 年夏季亚洲各地的平均气温比工业化前的平均气温高出 1.5℃ 以上，还有多个城市气温都打破历史记录，例如墨西哥（2021 年 8 月 3 日的气温为 50.4℃）。

## 4、能源效率持续提高，但与净零排放目标差距较大

在全球范围内，超过 80% 的家用冰箱和空调使用了最低能效标准，较 2010 年增加三分之二，超过 75% 的灯具使用了最低能效标准，较 2010 年增加了 30% 以上。要在 2050 年实现建筑行业净零排放，需要在 2030 年前部署尽可能多的节能技术并制定更严格的最低能效标准。历史经验表明，制定更严格的最低能效标准是有成效的。例如在欧盟，新投产的冰箱最低能效标准比十年前最低能效标准提高 75%，并且产品能效对比标签也在 2021 年进行了调整，以帮助消费者识别能效更高的产品。然而，某些技术的进展仍然缓慢，例如，许多国家的照明政策并没有进行逐步淘汰卤素灯的修订，卤素灯的能效仅比白炽灯高 5% 左右。

## 5、能源效率的投资仍未跟上建筑业的发展

在现有减排措施和一些刺激措施的推动下，2020 年建筑行业能效投资较 2019 年增长了 11%，达到近 1800 亿美元。欧洲投资强劲，填补了世界其他地区的投资缺口。2021 年，全球建筑行业的能效总投资预计将进一步增加。近一半的投资用于建造新的节能建筑，其余投资用于能源相关的改造和节能设备的部署。建筑和交通运输行业的经济复苏是 2021 年全球能效总投资上升的主要驱动因素。尽管最近的能效投资有所增加，但要实现 2050 净零排放目标，需进一步加强投资力度，到 2030 年建筑行业的能效投资需要比过去五年平均水平高出两倍以上，并确保未来十年新建建筑达到最高能效标准。

## 6、建筑行业未来发展建议

**最迟到 2030 年实施涵盖建筑行业全生命周期的零碳建筑排放标准。**考虑到间接碳排放，建筑行业碳足迹非常大。全球约 9% 的碳排放来自于建筑中使用的化石燃料，18% 来自于为建筑提供电力和供热，另外还有 10% 与建筑材料制造有关。因此，建筑行业整个生命周期直接或间接的碳排放量占全球与能源相关碳排放量的 37%，需要对建筑行业全生命周期碳排放进行限制。

**设定明确且有雄心的承诺，以树立长期的市场信号。**各国政府需颁布明确的积极措施，如公平的税收和补贴计划，以及强制性的设备最低能效标准，以鼓励采用清洁能源技术，建立长期的市场信号。2020 年，美国发起的超高效设备和电器发展项目（SEAD）和英国在第 26 届联合国气候变化大会发起的倡议均提出，到 2030 年关键产品的能效需提高一倍，包括通用照明灯具、住宅用空调、冰箱等。产品标准和技术工程规范需要基于科学验证的数据，以符合技术发展趋势，通过严格的生命周期碳核算机制促进可再生能源的使用。

**支持节能措施推进高效设备应用。**政策应鼓励节能产品市场化应用，具体刺激措施包括：①对消费者进行财政刺激，如补贴和返现，以降低高能效产品的购买成本；②对消费者进行税收抵免，购买高能效产品将在个人税收账单中予以一定的减免措施；③对产品能效进行排序，为消费者提供信息，帮助他们选择高能效产品；

④鼓励公私部门实施集体采购计划，鼓励政府部门和私营部门采购高效产品，并对该领域进行投资；⑤颁发技术进步奖，奖励领先的技术创新，以提高产品效率和降低产品制造成本。

**刺激市场融资机制，创新商业模式，加强国际合作。**各国政府通过政策干预，改善市场融资机制，降低清洁能源投资风险，扩大产品市场需求，增加建筑行业投资吸引力，以加速清洁能源转型。此外，各国政府需要持续支持区域和全球合作，实现建筑行业可持续的清洁转型。

## 六、综合能源行业

### 1、综合能源系统是未来所有单一能源技术清洁转型的趋势

虽然太阳能、风能和电动汽车等单一清洁能源技术是实现能源清洁转型的基石，但还需发展综合能源系统，通过提高能源系统灵活性最大限度地发挥其减排作用。到 2050 年，在净零排放情景中波动性可再生能源所占份额将增加（图 6），未来需要联合应用包括发电端、电网、需求响应和储能等技术，在各种市场条件下实现大规模的多能融合。

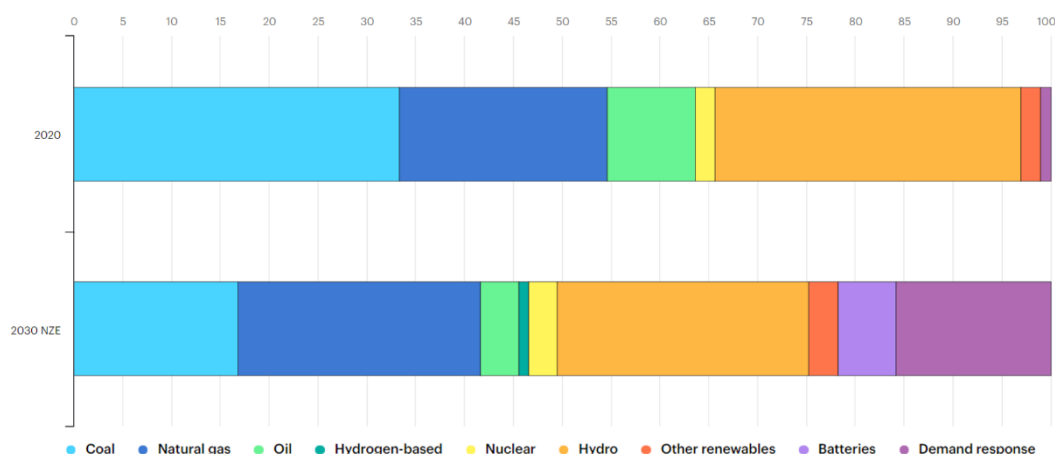


图 6 2020 和净零排放情景下 2030 年灵活电力系统中各种能源占比（单位：%）

（汤匀）

## IEA 发布能源技术研发与示范公共经费投入分析报告

10 月 14 日，国际能源署（IEA）发布最新《能源研发与示范经费投入分析》<sup>24</sup> 报告，对 IEA 成员国能源技术研发与示范（RD&D）公共经费投入情况进行了分析。具体内容如下：

### 1、2020 年 IEA 成员国政府能源技术 RD&D 公共投入总额达到 231 亿美元

2020 年，IEA 成员国能源技术 RD&D 公共投入较 2019 年增加了 6%，达到 231 亿美元（图 1）。这是自 2017 年以来连续第四年增长，尽管低于 2009 年峰值，但较

<sup>24</sup> Energy Technology RD&D Budgets: Overview. <https://www.iea.org/reports/energy-technology-rdd-budgets-overview>

2008 年 RD&D 公共投入增长了 40%。

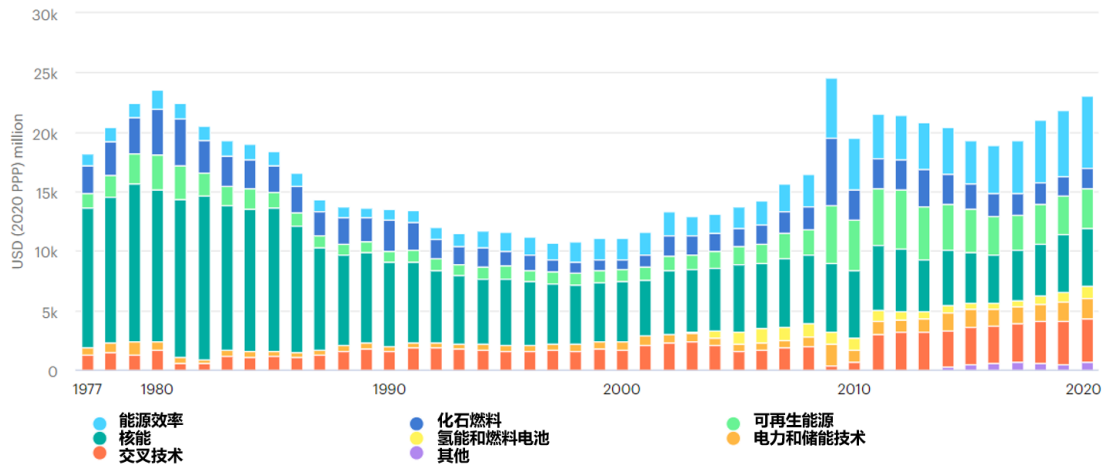


图 1 1977-2020 年 IEA 成员国能源技术 RD&D 公共投入总额（单位：以 2020 年购买力平价计算的百万美元）

从国别来看，美国和日本是 IEA 成员国中能源技术 RD&D 公共投入最多的两个国家，其次是法国、德国、英国、加拿大、韩国、意大利和荷兰（图 2）。IEA 的统计不包括欧盟在其“地平线 2020”框架计划下能源领域的投入（21.49 亿美元），这一投入额大于除了美国、日本和法国之外的所有 IEA 成员国。

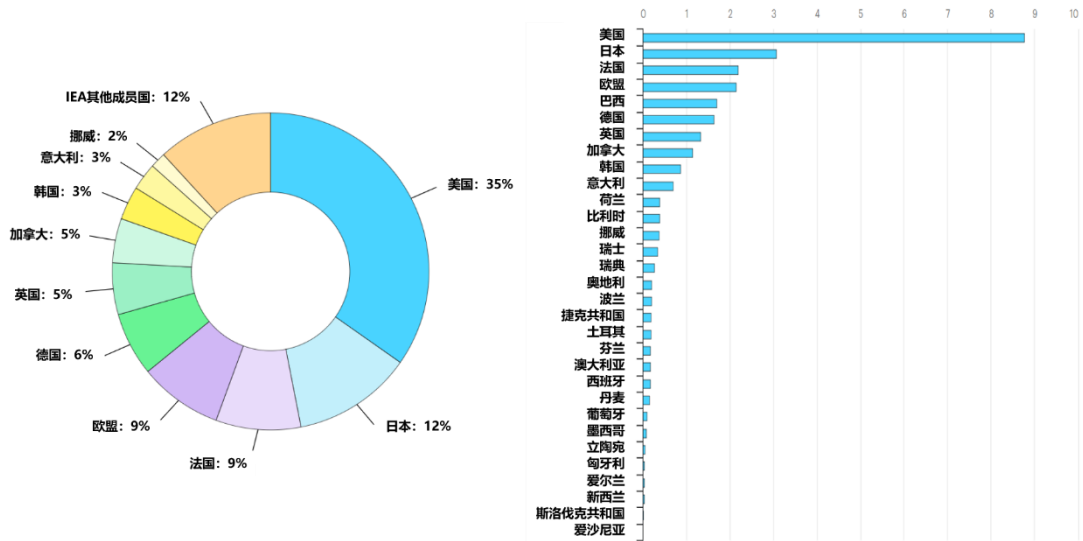


图 2 2020 年 IEA 成员国和欧盟能源技术 RD&D 公共投入额及占比（左图单位：%；右图单位：以 2020 年购买力平价计算的百万美元）

右图注：基于 2020 年 RD&D 公共投入额统计数据的国家有：奥地利，比利时，加拿大，捷克共和国，丹麦，爱沙尼亚，法国，德国，匈牙利，爱尔兰，日本，韩国，墨西哥，荷兰，挪威，波兰，葡萄牙，斯洛伐克共和国，瑞典，瑞士，英国，美国和欧盟；基于 2019 年 RD&D 公共投入额统计数据的国家有：新西兰和西班牙；其余国家统计数据基于 2018 年 RD&D 公共投入额。欧盟 RD&D 公共投入额指的是“地平线 2020”框架下的投入，不是欧盟各成员国投入额的总和。

IEA 各成员国单位 GDP 能源技术 RD&D 公共投入强度差异明显，2020 年从 0.03 到 1.10 不等（图 3），其中挪威排名最高（1.10），其次是法国（0.70）、比利时（0.63）、加拿大（0.62）和芬兰（0.61）。

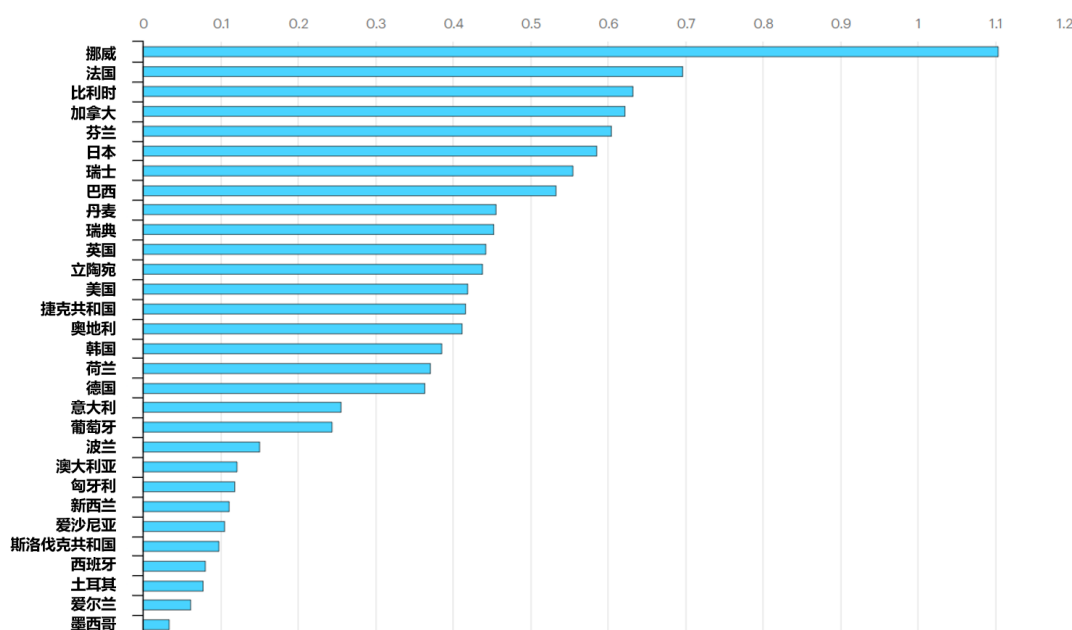


图 3 2020 年按国家划分单位 GDP 能源技术 RD&D 公共投入强度情况（单位：能源技术 RD&D 公共投入额/1000 单位 GDP）

## 2、IEA 成员国能源技术 RD&D 公共投入领域日益多样化

过去 40 年里，IEA 成员国能源技术 RD&D 公共投入领域日益多样化（图 4）。1974 年，核能技术投入占比最高，达到 75%，随后逐年降至 2020 年的 21%。同样，化石燃料投入占比在 20 世纪 80 年代和 90 年代早期达到顶峰，但在 2013 年（13%）之后逐步下滑至 2020 年的 7%。20 世纪 90 年代和 21 世纪头十年，能源效率和可再生能源投入增长显著，从 1990 年的各占 7% 分别增加到 2010 年的 23% 和 21%。自此以后，能源效率投资占比略有增加，达到 26%；而可再生能源投入占比已降至 15%。2012-2018 年间，氢能与燃料电池的投入占比一直保持在 3% 左右，2019-2020 年增长到 4%。



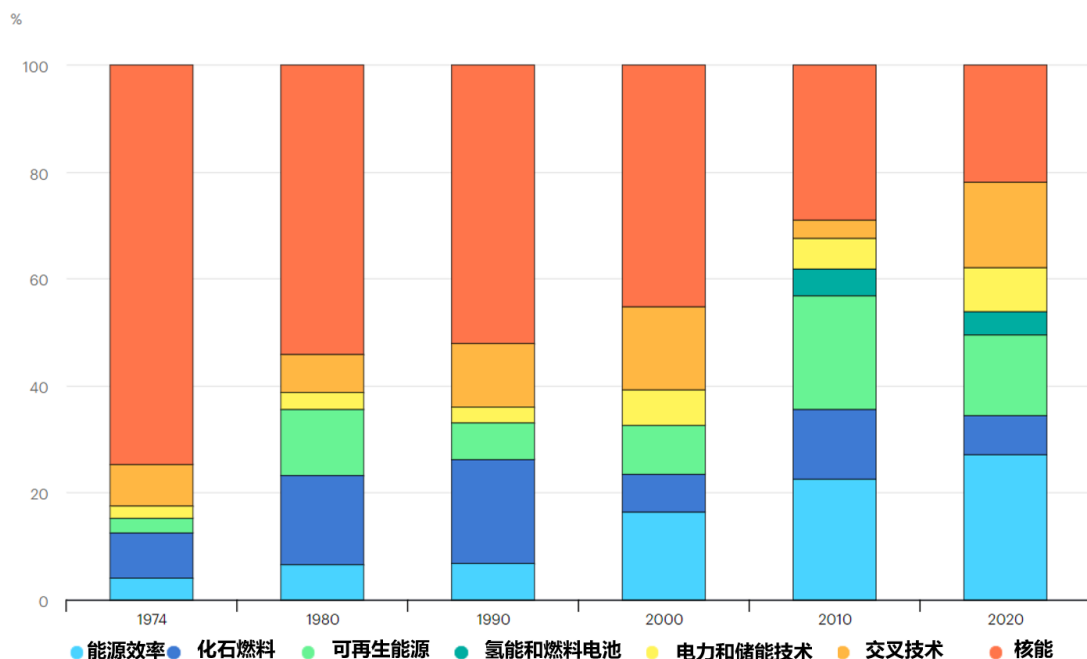


图 4 1974-2020 年 IEA 成员国能源技术 RD&D 公共投入各领域占比（单位：%）

2020 年，核能技术 RD&D 公共投入最高的国家是美国，为 13.85 亿美元。氢能和燃料电池技术 RD&D 公共投入最高的国家仍是日本，为 3.18 亿美元。电力和储能技术 RD&D 公共投入最多的经济体为欧盟，2020 年占到其能源技术 RD&D 投入总额的三分之一，为 4.28 亿美元。而其他技术领域，美国都是 RD&D 公共投入最多的国家。2020 年，除交叉技术领域 RD&D 公共投入同比下降外（-3%），IEA 成员国在所有领域的投入同比都有所增加（图 5）。增幅最高的是氢能和燃料电池技术，达 15%；而 2019 年该技术领域的 RD&D 公共投入同比也呈现增长，涨幅为 25%。

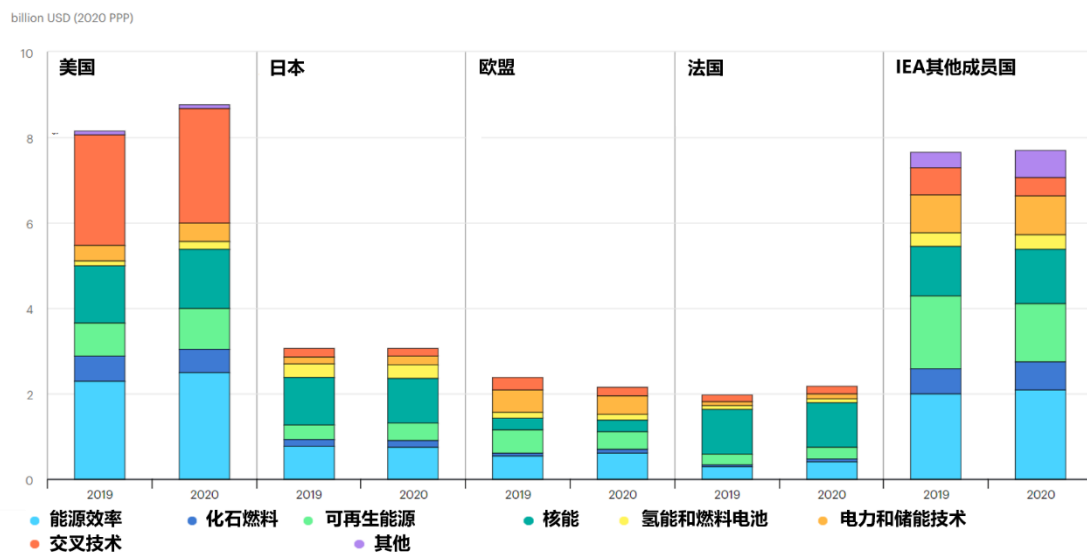


图 5 2019 年和 2020 年 IEA 主要成员国和欧盟能源技术 RD&D 公共投入情况（按领域，单位：以 2020 年购买力平价计算的十亿美元）

### 3、低碳能源技术成为能源技术 RD&D 公共投入的主要领域

2020 年，IEA 成员国低碳能源技术 RD&D 公共投入显著增加，总额达到 222 亿美元，占公共投入总额的 96%，自 2017 年以来连续第四年增长（图 6）。与此同时，非低碳能源技术 RD&D 公共投入自 2013 年以来不断减少，降至 8.83 亿美元。

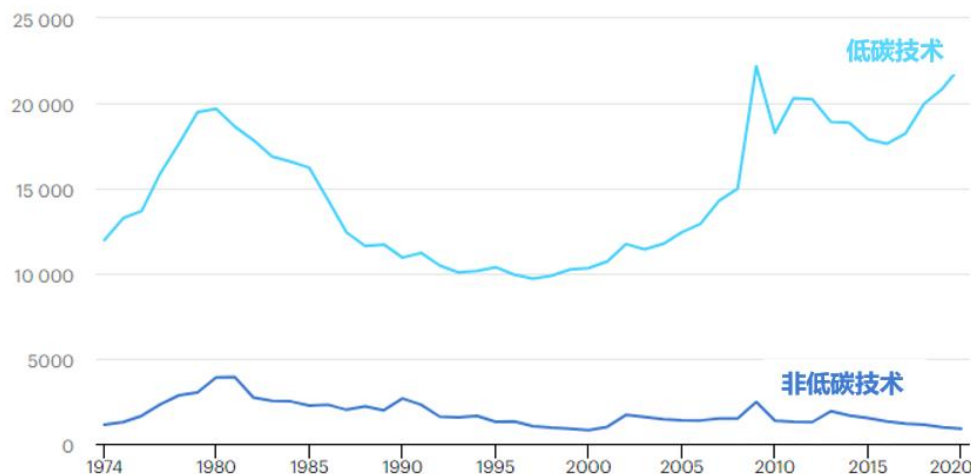


图 6 1974-2020 年 IEA 成员国低碳技术和非低碳技术 RD&D 投入额  
(单位：以 2020 年购买力平价计算的百万美元)

注：低碳技术指的是：能源效率、碳捕集和封存技术（CCS）、可再生能源、核能、氢能和燃料电池、电力和储能技术，以及其他跨领域技术和研究；非低碳技术指的是：煤炭、天然气和其他化石燃料研发。

大多数国家在 2020 年增加了对低碳技术的研发投入，但涨幅低于 2018 年。其中增量最大的是美国，低碳能源技术 RD&D 公共投入增加 6.77 亿美元，同比增长 9%（图 7）。其次是加拿大，增加了 2.42 亿美元，但其增幅最大，同比增长了 31.4%。

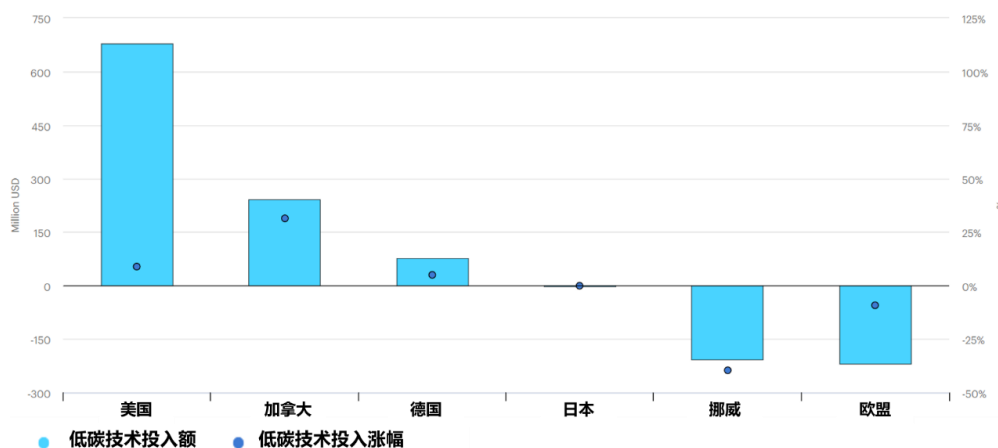


图 7 2020 年 IEA 主要成员国和欧盟低碳技术 RD&D 公共投入变化情况  
(单位：左轴百万美元；右轴%)

### 4、全球能源技术 RD&D 公共投入整体增长明显

2020 年，全球能源技术 RD&D 公共投入总额约 326 亿美元，延续了自 2017 年

以来的增长趋势（图 8）。增长主要受欧洲和美国的推动，而中国能源技术 RD&D 公共投入在经历 2017-2018 年连续两年的强劲增长后保持平稳。

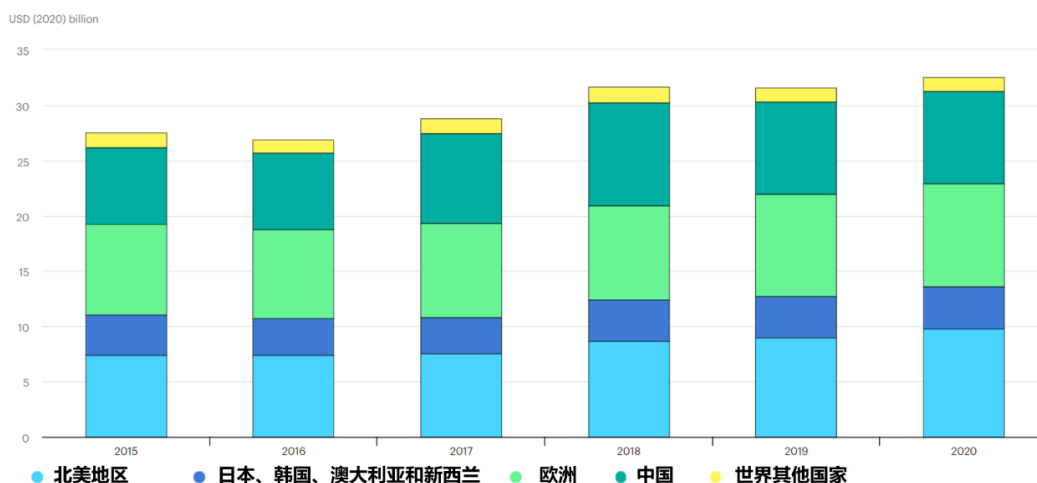


图 8 2015-2020 年全球各国/地区能源 RD&D 公共投入情况（单位：以 2020 年汇率计算的十亿美元）

在“创新使命”（MI）框架下，15 个 IEA 成员国和欧盟以及巴西、中国、印度和印度尼西亚等主要新兴经济体在 2015 年承诺，将在五年内将清洁能源 RD&D 公共投入翻一番。IEA 数据显示，全球低碳能源 RD&D 公共投入经历两年下降后，在 2017 年出现反弹，随后一直呈现上升趋势，在 2020 年达到历史新高，约 270 亿美元（图 9）。这一增长趋势主要是由美国 and 欧洲推动，其次是中国。值得注意的是，低碳能源 RD&D 公共投入增长略快于能源 RD&D 投入的整体增长，年均增速约为 4%。

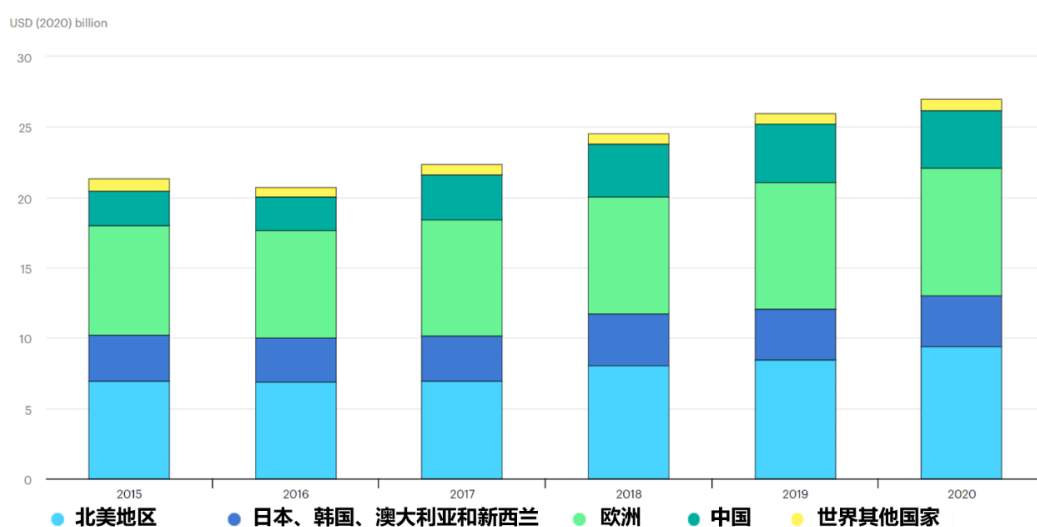


图 9 2015-2020 年全球各国/地区低碳能源技术 RD&D 公共投入情况（单位：以 2020 年汇率计算的十亿美元）

（汤匀 郭楷模）



## 《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)