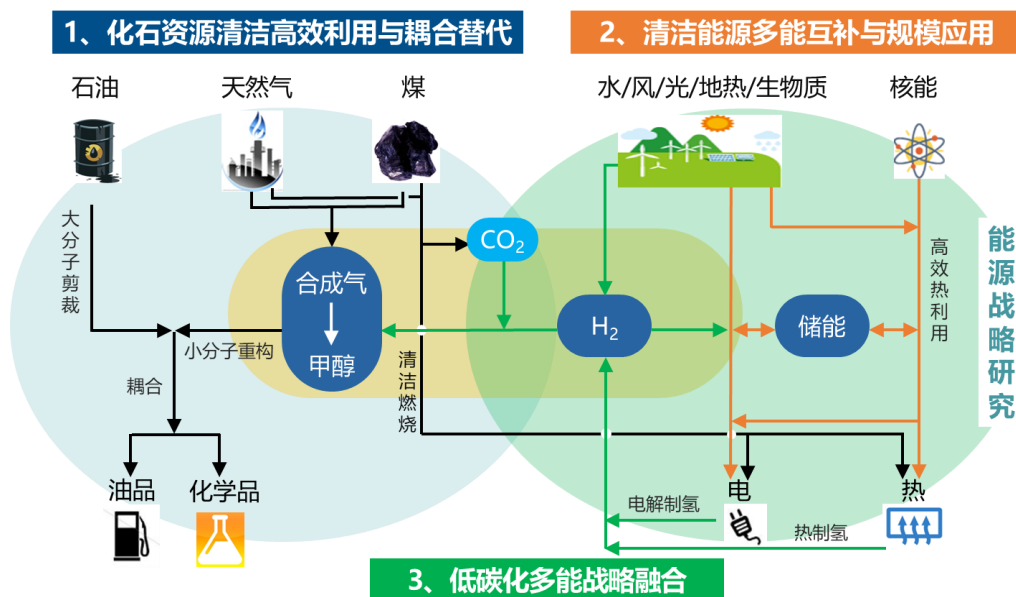




洁净能源科技动态监测快报

2020 年第 05 期（总第 07 期）



本期看点

- 欧盟发布到 2030 年综合能源系统研发路线图
- 美国国家石油委员会提出 CCUS 规模化部署路线图
- IEA：新冠肺炎疫情对全球能源需求造成二战以来最大冲击
- IRENA：基于可再生能源的能源转型将是经济复苏的重要要素
- 美国开发新型六结叠层太阳能电池打破光电转换效率世界纪录

目 录

2020 年第 05 期 (总第 07 期)

◆ 化石资源清洁高效利用

- 美国国家石油委员会提出 CCUS 规模化部署路线图 2
- DOE 资助 1400 万美元支持先进煤化工技术研发 5
- DOE 资助上亿美元支持工业碳源捕集技术研发 6

◆ 清洁能源多能互补

- DOE 资助 2200 万美元推进海洋能源技术研发 7
- DOE 资助 3000 万美元支持核聚变创新研究 7
- 美开发新型六结叠层太阳能电池打破光电转换效率世界纪录 8
- 三星研究院在高性能长寿命全固态电池领域取得重大突破 10

◆ 低碳化多能融合

- 欧盟发布到 2030 年综合能源系统研发路线图 12
- 英国启动新项目推进低碳制氢供应链技术开发 14
- 生物质转化为高价值化学品新工艺展现巨大工业应用潜力 15
- 磷缺陷调控增强催化剂催化分解水产氢性能 16

◆ 能源战略研究

- IEA: 新冠肺炎疫情对全球能源需求造成二战以来最大冲击 18
- IEEJ: 大萧条以来最恶劣全球经济形势下油气需求将大幅下降 25
- IRENA: 基于可再生能源的能源转型是经济复苏重要要素 29

本期概要

欧洲能源转型智能网络技术与创新平台 (ETIPSNET) 发布 2020-2030 年综合能源系统研发路线图, 提出了未来十年拟投入 40 亿欧元开展综合能源系统研究和创新重点领域, 以推进实现欧洲 2050 年构建深度电气化、广泛数字化、完全碳中性的循环经济愿景。路线图共提出了 6 个领域的研发重点、研发进程和预算分配, 包括: (1) 消费者、产消合一者和能源社区; (2) 系统经济性; (3) 数字化; (4) 系统设计和规划; (5) 灵活性技术和系统灵活性; (6) 系统运行。

美国国家石油委员会 (NPC) 发布了受美国能源部委托完成的《迎接双重挑战: 碳捕集、利用和封存规模化部署路线图》报告, 提出了在 25 年内实现大规模部署碳捕集、利用与封存 (CCUS) 技术的发展路线: 报告提出应通过启动 (未来 5-7 年)、扩张 (未来 15 年) 和规模化应用 (未来 25 年) 三个阶段实现 CCUS 在美国的大规模部署, 并建议国会在未来 10 年每年拨款 15 亿美元用作 CCUS 研发经费, 具体资助建议为: (1) 碳捕集研发与示范的公共投入约为 10 亿美元/年; (2) CO₂ 地质封存研发公共投入约 4 亿美元/年, CO₂ 提高采收率技术研发公共投入约 1 亿美元/年; (3) 碳利用技术研发公共投入约 5000 万美元/年, 并在其后 5 年再持续投入 1 亿美元/年支持试点、示范项目和早期部署。路线图还提出了各领域的研发重点, 详见正文。

国际能源署 (IEA) 发布《全球能源回顾 2020: 新冠肺炎危机对全球能源需求和碳排放影响》报告, 总结了 2019 年全球能源供需及碳排放情况, 并基于新冠肺炎疫情对 2020 年一季度全球能源的影响, 分析预测了全年的能源需求和碳排放: 新冠肺炎疫情的蔓延对全球能源系统造成了近 70 年来的最大冲击, 预计 2020 年全球能源需求将下降 6%, 石油需求将下降 9%, 煤炭需求下降 8%, 天然气需求将下降 5%, 但可再生能源需求预计增加约 1%, 全球能源相关碳排放下降近 8%。全球电力需求预计下降 5%, 但电力结构将出现最大幅度的低碳转型, 低碳发电在电力需求占比将激增至 40%。

国际可再生能源署 (IRENA) 发布《可再生能源展望: 能源转型 2050》报告, 展望了实现能源系统脱碳转型的可再生能源发展目标: 到 2050 年全球能源相关碳排放需以每年 3.8% 的速度下降才能使全球平均温升控制在 2°C 以内, 可再生能源在终端能源消费占比应增至 66%, 而能源强度改善速度需提高到每年 3.2%。报告进一步指出, 加速利用可再生能源促进能源转型能够成为全球经济复苏的重要要素, 到 2050 年全球可再生能源就业岗位将增加三倍至 4200 万个, 能源相关工作岗位将达到 1 亿个。

美国国家可再生能源实验室 (NREL) Thomas Moriarty 教授课题组牵头的国际联合研究团队设计制备了新型六结叠层太阳电池, 创造了太阳电池器件光电转换效率最高值: 利用反向单晶外延生长工艺制备基于 III-V 族半导体的六结堆叠光伏器件, 并结合元素掺杂, 有效地改善了器件内阻抑制了相分离, 从而提升了电池性能, 在无聚光器的 1 个标准太阳光辐照下叠层电池获得了 39.2% 的转换效率, 刷新了无聚光类型太阳电池效率的世界纪录; 而在聚光条件下 (143 个太阳光辐照强度), 电池器件更是提升到惊人的 47.1% 高效率, 创造了最高效太阳电池的世界纪录。

化石资源清洁高效利用

美国国家石油委员会提出 CCUS 规模化部署路线图

近期，美国国家石油委员会（NPC）发布了受美国能源部委托完成的《迎接双重挑战：碳捕集、利用和封存规模化部署路线图》报告¹，提出了在 25 年内实现大规模部署碳捕集、利用与封存（CCUS）技术的发展路线。报告指出 CCUS 技术是提供可负担、可靠的能源并同时解决气候变化风险双重挑战的关键技术之一，美国在 CCUS 领域处于全球领先地位，并具有推动 CCUS 广泛部署的强大能力，应通过启动、扩张和规模化应用三个阶段实现 CCUS 在美国的大规模部署。报告提出了未来 25 年 CCUS 大规模部署的路线图，以及未来 10 年的研发资助建议，关键内容如下：

一、CCUS 规模化部署路线图

1、启动阶段：未来 5-7 年

CCUS 累计投资达到 500 亿美元，其中包括 20 亿美元的基础设施投资，就业岗位达到 1 万个，CCUS 规模由当前的 2500 万吨/年增至 6000 万吨/年，捕集、运输和封存的 CO₂ 量相当于美国原油基础设施系统排放量的 10%。

2、扩张阶段：未来 15 年

CCUS 累计投资达到 1750 亿美元，其中包括 90 亿美元的基础设施投资，就业岗位达到 4 万个，CCUS 规模增至 1.5 亿吨/年，捕集、运输和封存的 CO₂ 量相当于美国原油基础设施系统排放量的 25%。

3、规模化应用阶段：未来 25 年

CCUS 累计投资达到 6800 亿美元，其中包括 280 亿美元的基础设施投资，就业岗位达到 23 万个，CCUS 规模增至 5 亿吨/年，捕集、运输和封存的 CO₂ 量相当于美国原油基础设施系统排放量的 75%。

二、研发资助建议

通过持续的技术研发和示范将有可能使 CCUS 技术成本在未来 20 年降低 10%-30%。为此，美国国家石油委员会建议美国能源部促进公私合作，油气行业也应保持甚至加大对 CCUS 的高水平资助以开发新技术；并建议国会在未来 10 年每年拨款 15 亿美元用作 CCUS 研发经费，以促进技术开发和示范。路线图提出了如下的研发资助建议：

1、碳捕集技术

¹ Meeting the Dual Challenge: A Roadmap to At-Scale Deployment of Carbon Capture, Use, and Storage.
<https://dualchallenge.npc.org/>

建议未来 10 年内对碳捕集研究、开发与示范（RD&D）的公共投入约为 10 亿美元/年，具体包括：（1）每年投入约 2.4 亿美元用于碳捕集和先进发电循环系统开发的基础科学和应用研究、实验室规模和小型试点项目，其中联邦投入占 80%；（2）每年投入约 2.4 亿美元用于大规模试点项目；（3）每年投入约 5 亿美元用于支持 CCUS 示范项目。建议的 RD&D 重点包括：

- 改进碳捕集技术以用于燃煤烟气、天然气烟气和工业 CO₂ 排放源；
- 推进开发用于气体分离的溶剂、吸附剂、膜和低温工艺，以及开发新型的具备碳捕集功能的能量循环系统；
- 制定成本和性能基准并进行公开评估；
- 降低碳捕集的总体成本以及资本、运营和维护成本；
- 提升碳捕集系统的运行灵活性以适应加速循环；
- 评估碳捕集技术以确定最具技术性和经济性的选择；
- 探索复合碳捕集系统的应用。

2、碳封存技术

（1）**地质封存**。建议未来 10 年内对 CO₂ 地质封存研究与开发的公共投入约 4 亿美元/年，具体包括：1）1 亿美元用于加速 CCUS 部署的区域计划；2）每年投入 1 亿美元用于地质封存表征（包括海底封存）；3）每年投入 2 亿美元用于收集数据和地质样本的实地项目，以促进长期安全封存的基础和应用科学研究。建议的研发重点包括：

- 提高场址表征和封存方法的效率；
- 通过 CO₂ 羽流固定机理研究及加快速度来增加对孔隙空间的利用；
- 改进耦合模型以优化和预测 CO₂ 流动和输运，以及地质力学和地球化学反应；
- 降低监测成本并开发新的监测技术；
- 量化和管埋诱发地震的风险；
- 研究采用替代砂岩和碳酸盐岩储层实现年储量百万吨级的可行性，包括超镁铁质岩石（玄武岩）和低渗透性岩石（页岩）；
- 进行社会科学研究，以提高利益相关者的参与度，并向大众通报地质构造中碳封存的需求、机会、风险和利益。

（2）**CO₂ 提高采收率技术**。建议未来 10 年内对 CO₂ 提高采收率（EOR）研发公共投入约 1 亿美元/年，用于改进 CO₂ EOR 以促进其有效应用，增强常规残留油区储层中的 CO₂ 封存，并应用于非常规储层以及不可开采的煤炭矿床和玄武岩中。建议重点研究的 CO₂ EOR 技术包括：1）垂直和水平一致性控制，以最大程度地提高驱油效率；2）先进的非常规储层成分建模技术，以更好地预测和增强性能。

3、碳利用技术

由于许多碳利用技术仍处于较低技术水平，路线图建议未来 10 年内对 CO₂ 利用技术的公共投入约 5000 万美元/年，以支持基础科学研究，并建议在其后 5 年再持续投入 1 亿美元/年支持试点、示范项目和早期部署。建议的研发重点包括：

(1) 热化学转化。 继续提高催化材料的选择性、活性和稳定性，包括理论和实验表征。对于已证明在较低温度范围（如 373-573 K）内具有活性、选择性、耐水性的低成本催化剂，应关注催化剂性能的长期稳定性以及防止失活的解决方案。CO₂ 转化技术的其他关键挑战是提高对产物的选择性以及催化剂对副产物（如水和原料中的杂质）的稳定性。此外还需进行更多实验室研究和计算研究，以及中试规模的研究和开发。同时，研究开发更有效、更低成本的方法来使用可再生能源电解水制氢，对于短期内提高 CO₂ 加氢转化的环境和经济可行性也极为重要。

(2) 电化学和光化学转化。 该领域的主要研究包括：开发新型催化剂以提高选择性、活性和稳定性；具有高耐用性和离子电导率的聚合物膜；新型电解池设计和制造。电化学和光化学转化途径面临着相似的挑战，但在光收集、装置设计等方面有所不同。催化剂、膜系统和电解槽的规模扩大，以及高 CO₂ 溶解度的新型电解质开发也是重要的研发领域，后者具有巨大的潜力将 CO₂ 的捕集和转化结合到一个过程中。开发结合电化学和光化学系统以及热化学和生物化学转化途径的复合系统，对于技术的变革发展非常重要。

(3) 碳化与水泥。 研究应关注如下方面：集成反应路径；化学（配体）和生物催化剂（碳酸酐酶）的使用；有价值产品（碳酸盐）和副产物（金属和稀土元素）的创新分离技术等。此外，还应对各种碳化原料进行建模和实验研究，以及对所生产材料的特性和性能进行测试。在较大规模的研发中，应研究用于过程强化的能源和材料集成。

(4) 生物转化。 应开发利用自然阳光的藻类技术以小批量生产高价值保健食品，还可将当前正在商业化的人造光生物光反应器技术用于具备可再生能源电力和高效 LED 光源的系统，以生产营养保健品、蛋白质和化学药品。上述两种途径都应研究光转换效率、选择性以及相关反应器系统，以提高产量和降低成本。气体发酵应关注气相至液相中的有效传质和产物分离，应在实验室规模和试点规模的项目中进行研究。结合不同转化途径的复合系统将是一个重要方向，如通过化学途径将 CO₂ 转化为 C1 化合物更容易，而通过生物学途径将 C1 转化至 C2+ 化合物更容易，因此可考虑综合上述两种途径的复合系统。此外，还应研究将波动性可再生能源整合到生物转化系统中。

（岳芳）

DOE 资助 1400 万美元支持先进煤化工技术研发

4月13日，美国能源部（DOE）宣布在“先进煤化工技术”主题框架下资助1400万美元支持先进煤化工技术研发²，旨在研发高性能低成本的煤基原料化学加工转化技术，以实现煤基原料到高价值材料的高效经济转化。本次资助将聚焦五大技术主题领域，具体内容如下：

1、煤基原料及其衍生品转化为建筑材料的技术

开发以民用煤或相关的副产品（煤粉、煤沥青、煤焦等）作为生产原料，将其高效转化为建筑材料（如屋面瓦、隔热材料、瓷砖等）的新型煤加工转化技术，并进行验证和推广应用。

2、煤基原料转化为基础设施组件材料的技术

开发以煤为原料，将其高效转化为各类基础设施组件材料（如下水道和隧道的组件、废水或固体废物处理设施组件、道路和桥梁组件等）的新型煤加工转化技术，并进行验证和推广应用。

3、煤转化为高价值碳基材料技术

开发以煤为原料，将其高效转化为具备特殊物理、化学特性（如高导电性、高机械柔韧性）的高价值固体碳基材料（如导电油墨、增强型纺织品、电池电极、超级电容器材料等）的新型煤加工转化技术。

4、煤转化碳泡沫技术

开发将民用煤或相关的副产品（煤粉、煤沥青、煤焦等）高效转化为各类高价值碳基泡沫材料，由于该类材料具备密度小、高机械柔韧性、良好的导电导热性等优点，可广泛应用航天飞行器热管理、热防护领域。

5、碳基建筑材料设计开发

开发利用具备机械、热、电等优异特性的新型碳基建筑材料来建造碳基建筑原型技术，并评估材料集成到整体建筑中是否仍保持良好的物理、化学特性，验证技术的可行性。

（廖明月 郭楷模）

² U.S. Department of Energy Announces Up to \$14M for Advanced Coal Processing Technologies.
<https://www.energy.gov/fe/articles/us-department-energy-announces-14m-advanced-coal-processing-technologies>

DOE 资助上亿美元支持工业碳源捕集技术研发

4月24日，美国能源部（DOE）宣布资助1.31亿美元支持先进碳捕集、利用和封存技术研发³，旨在研发高性能低成本的工业碳源捕集技术，即高效捕集碳密集型企业（如燃煤电厂、煤化工企业）排放的CO₂，以减少温室气体排放并收集有用的副产品。本次资助将聚焦两大技术主题领域，包括“工业烟气中CO₂捕集技术的初步工程设计”和“燃烧后CO₂捕集技术的工业规模示范”，具体内容如下：

1、工业烟气中CO₂捕集技术的工程设计

重点关注年度CO₂排放量超过10万吨的炼油厂、化工厂（合成氨、氢和石化）、建材生产（水泥和石灰）、钢铁冶炼等碳密集型工业，对这些工业生产设施配备碳捕集系统开展工程设计，捕集系统必须包括CO₂分离、除水和CO₂压缩工艺装置，以经济有效地捕集烟气中CO₂气体，减少排放。

2、燃烧后CO₂捕集技术的工业规模示范

在燃煤和天然气联合循环（NGCC）发电厂部署相关的燃烧后CO₂捕集设施，以开展工业规模示范，其中燃煤电厂需要达到日均CO₂捕集量10-100吨目标，天然气联合循环（NGCC）发电厂需要实现日均CO₂捕集量5-45吨目标，且两者都需要达到捕集成本30美元/吨的目标。

（郭楷模）

³ U.S. Department of Energy Announces \$131 Million for CCUS Technologies. <https://www.energy.gov/articles/us-department-energy-announces-131-million-ccus-technologies>

清洁能源多能互补

DOE 资助 2200 万美元推进海洋能源技术研发

3月31日，美国能源部（DOE）宣布在“海洋能源基础研究和测试基础设施建设”计划框架下资助 2200 万美元，支持联邦政府、大学和企业联合开展海洋能源开发利用技术的研究⁴，以推进海洋能源科学的进步和加速新技术的商业化进程。本次资助聚焦四大主题领域，具体内容如表 1 所示。

表 1 海洋能源基础研究和测试基础设施建设计划本次资助项目具体内容

主题	研究内容	资助金额/ 万美元
海洋能源基础研究	开展海洋能资源表征技术、数值模拟技术研究；优化海洋能源设施的安 装、运营和维护流程，降低成本；海洋能源设施的组件材料和架构优化	1050
大西洋海洋能源中心建设	建立大西洋海洋能源中心作为东海岸的协调机构，为该地区的海洋能发展制定科学战略，支持海洋能源的商业化开发；开展与海洋能源相关的研究与开发活动；为开发人员提供专业实验室和测试设施	500
研究网络协调组织	建立研究网络协调组织以更好地协调公共研究机构、大学和私营企业协调开展海洋能技术研究，促进不同研究机构之间的更大互动，避免重复研究，优化布局，提升效率	150
海洋能源测试设施	开发新型的移动式海上能源测试平台，以满足不同水域不同深度海洋环境下开展相关技术测试验证的需求，以加快新技术的商业化进程	500

（郭楷模）

DOE 资助 3000 万美元支持核聚变创新研究

3月4日，美国能源部（DOE）宣布投入 3000 万美元支持核聚变创新研究⁵，旨在利用新的变革性方法应对核聚变向应用发展过程中的挑战。本次资助重点关注两大技术领域：人工智能和机器学习技术用于聚变能科学；核聚变基础理论和仿真。具体资助内容如下：

⁴ Energy Department Announces up to \$22 Million for Marine Energy Foundational R&D and Testing Infrastructure Upgrades. <https://www.energy.gov/eere/articles/energy-department-announces-22-million-marine-energy-foundational-rd-and-testing>

⁵ U.S. Department of Energy Selects Technology Project to Receive \$1.5M for Near-Zero Water Consumption at Power Plants. <https://www.energy.gov/fe/articles/us-department-energy-selects-technology-project-receive-15m-near-zero-water-consumption>

一、人工智能和机器学习技术用于聚变能科学

该领域将投入 1700 万美元，研究人工智能（AI）和机器学习（ML）方法，用于关键等离子体现象预测、设备运行管理以及通过数据科学加速科学发现等。研究人员需要在 DOE 科学办公室科学用户设施上开发和部署 AI/ML 工具以推进在聚变能研究领域的应用，重点关注对关键等离子体现象和发电装置状态的预测，通过 AI/ML 优化等离子体和增强等离子体主动控制，以及使用数据科学加速聚变科学发现。相关工具包括 AI/ML 增强诊断技术，从实验和仿真数据中提取模型，以及可应对现有和计划建立的聚变能设施（如 ITER）模拟和实验中大量和高速生成数据的极端算法。

二、核聚变基础理论和仿真

该领域将投入 1300 万美元以提高对可控磁约束等离子体行为的基本物理过程的科学认知。主要关注如下主题：（1）宏观稳定性，该领域关注磁约束等离子体的宏观（设备级）平衡和稳定性，包括对等离子体破坏和其他瞬态事件等有害或性能受限的不稳定性预测、避免、控制和缓解；（2）约束和传输，该领域的重点是对碰撞和湍流物理过程的理解、预测和控制，也将考虑使用第一性原理或先进降阶模型研究基于理论的预测输运模型；（3）边界层物理，该领域关注在磁约束等离子体的边缘区域中占主导地位的物理过程，该区域定义为从最后一个封闭磁通面内的台基顶部到材料壁（包括刮削层）的区域；（4）等离子体加热和非感应电流驱动，该领域重点关注射频波相互作用的物理机制以及用于加热和驱动磁约束等离子体中的非感应电流的其他外部机制，包括发射结构与周围等离子体的相互作用；（5）高能粒子，该领域重点研究背景等离子体、不稳定性和高能粒子（包括聚变反应生成的 α 粒子）之间的非线性相互作用和耦合，以及这种相互作用对高能粒子约束和整体等离子体性能的影响。

（岳芳）

美开发新型六结叠层太阳能电池打破光电转换效率世界纪录

由于半导体固有的带隙特点，单结半导体太阳能电池的光电转换效率存在理论极限，即肖克利-奎伊瑟效率极限（S-Q 极限，约 31%）。而将不同带隙（光谱响应范围不同）的电池进行串联构建叠层太阳能电池被认为是电池效率突破 S-Q 效率极限值强有力的技术路径。美国国家可再生能源实验室（NREL）Thomas Moriarty 教授课题组牵头的国际联合研究团队设计制备了基于 III-V 族异质结半导体的六结叠层太阳能电池，通过对制备工艺和结构的优化，有效克服了不同晶体晶格错配问题，减少了内阻，抑制了相分离，使得电池器件性能显著提升，在聚光条件下器件获得了高达 47.1% 的认证效率（之前效率纪录是 46.4%），创造了人类有史以来太阳能电池器件

光电转换效率最高值，即使在无聚光条件下整个器件依旧可以获得近 40% 转换效率（39.2%），也是目前无聚光太阳能电池器件的最高记录。

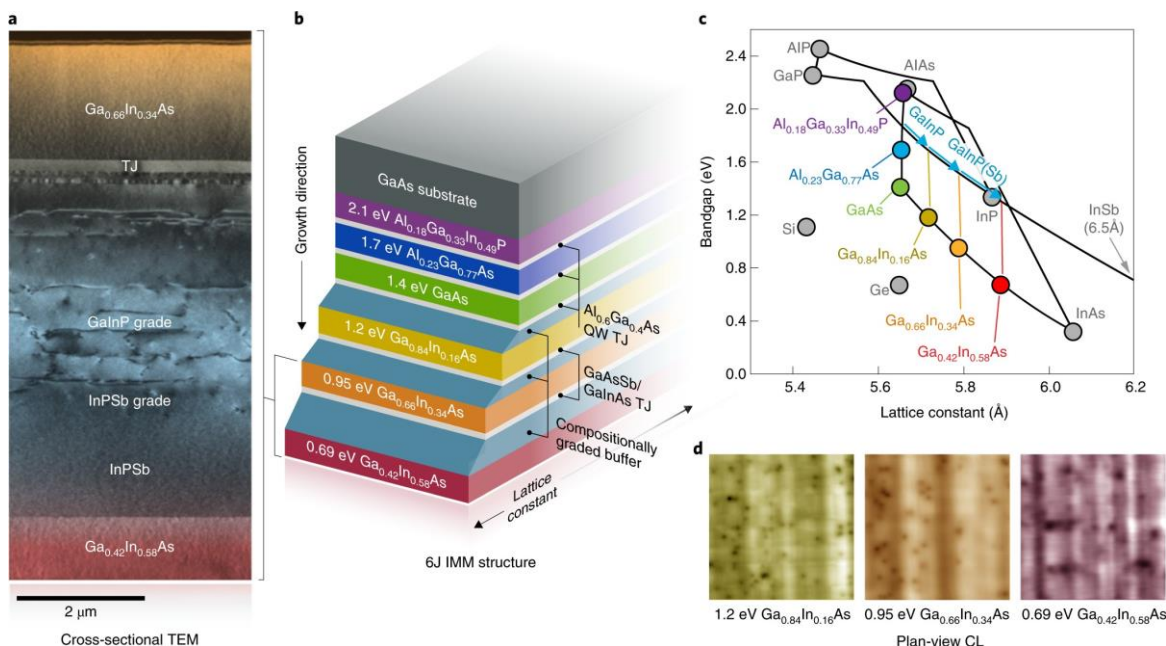


图 1 基于 III-V 族异质结半导体六结叠层太阳能电池结构

相关研究表明，含有聚光器的基于 III-V 半导体异质结叠层太阳能电池理论效率可突破 60%，达到 62%；但由于不同半导体合金之间晶格错配，导致不同半导体合金之间的载流子传输的能垒较大（电阻较大）抑制光生电流，此外合金存在相分离问题，上述问题影响了该类电池性能。为此，NREL 研究人员以砷化镓（GaAs）为衬底利用单晶外延反向生长方法，连续生长了 6 层不同带隙结构（分别为 2.1、1.7、1.4、1.2、0.95 和 0.69 eV，负责吸收不同波段的太阳光）的 III-V 半导体，且在每层半导体之间都进行了表面钝化处理，形成六结叠层电池。这种反向制备加上钝化处理可以有效地减少不同晶格常数的半导体之间的界面传输电阻，从而最小化界面的载流子复合。而为了有效地抑制半导体的相分离，研究人员对相关的半导体层进行了元素掺杂。通过透射电镜表征显示，半导体层晶格位错局域在本身的半导体层没有扩散到相邻的其他半导体层，这有助于减少内阻。随后在无聚光器的 1 个标准模拟太阳光下进行光电性能测试，获得了高达 39.2% 的认证转换效率，是无聚光光伏器件的效率最高值；而当加上聚光器后（相当于 143 个标准太阳光辐照强度），器件的性能显著提升，效率增加到了惊人的 47.1%，是迄今为止所有光伏器件性能的最高值，且通过了机构认证。研究人员指出，通过后续的材料和工艺优化完全可以突破 50%。

该项研究利用反向单晶外延生长工艺制备基于 III-V 族半导体的六结堆叠光伏器件，并结合元素的掺杂，有效地改善了器件内阻抑制了相分离，从而提升了电池性能，在无聚光器的 1 个标准太阳光辐照下叠层电池获得了 39.2% 的转换效率，刷

新了无聚光类型太阳电池效率的世界纪录；而在聚光条件下（143 个太阳光辐照强度），电池器件更是提升到 47.1% 的高效率，创造了最高效太阳电池的世界纪录。相关研究成果发表在《*Nature Energy*》⁶。

（郭楷模）

三星研究院在高性能长寿命全固态电池领域取得重大突破

以金属锂作负极的全固态锂金属电池在理论能量密度和安全性上都远优于传统锂离子电池。然而，锂负极不受控的枝晶生长以及低库伦效率严重制约了锂负极全固态锂金属电池的实用化发展。因此开发高性能负极材料成为了全固态电池研究领域热点。

三星高等研究院 In Taek Han 研究员带领的研究团队联合日本三星研究院设计开发了一种独特的银-碳（Ag-C）复合负极，替代锂（Li）金属负极，结合硫银锗矿（Argyrodite）型固态电解质制备了软包的全固态电池，获得了高达 942 Wh/kg 能量密度，且能够保持稳定循环超过 1000 余次，在电动汽车等高比能储能应用领域具备广阔应用前景。相关研究已经表明，相比传统石榴石型固态电解质，Argyrodite 型固态电解质具备更加优异的离子导电性、柔软特质、机械性能。因此研究人员通过机械加压方法制备了 Argyrodite 型固态电解质（ $\text{Li}_6\text{PS}_5\text{Cl}$ ），导电率测试显示，其室温离子导电率超过 1 mS/cm，表现出优异的离子导电性。随后利用湿化学法在不锈钢集流体上制备了 Ag-C 复合负极并对其对金属 Li 的沉积-剥离过程影响进行了研究，充电后扫描电镜测试发现，在无 Ag-C 复合电极的不锈钢集流体上明显观察到了 Li 不均匀沉积和枝晶形成，相反在含有 Ag-C 电极不锈钢集流体上则观察到了 Li 的均匀沉积，主要原因是 Ag 改善了导电性降低了 Li 成核能垒促进了 Li 的均匀成核。放电后，含有 Ag-C 电极不锈钢集流体锂沉积全部分解，这表明了 Ag-C 电极有效调节金属锂的沉积-剥离过程，避免枝晶形成，有助于电池寿命的延长。接着以 Argyrodite 型固态电解质作为电解质，以比容量超过 210 mAh/g、面积容量高于 6.8 mAh/cm² 的高镍层状过渡金属氧化物（ $\text{LiNi}_{0.9}\text{Co}_{0.05}\text{Mn}_{0.05}\text{O}_2$, NCM955）作为正极、Ag-C 复合材料作为负极组装成双层堆叠式软包电池，并利用等温静压技术来改善固态电解质与正负极之间的界面接触。此外，为了避免正极材料在高压下的界面副反应，研究人员在 NCM955 正极表面包覆了一层厚度为 5 nm 的氧化锂-氧化锆（ $\text{Li}_2\text{O-ZrO}_2$ ）复合物涂层。在 0.5C 电流密度下进行充放电循环测试，结果显示电池放电比容量高达 5870 mAh，能量密度 942 Wh/kg，平均库伦效率高达 99.8%，且能够保持稳定循环超过 1000 次，表现了优异的电化学稳定性。研究人员还测试各种不同高温下电池稳定性，结果显示电池表现出良好耐高温特性，且该电池体积仅为同样容量传统锂离子

⁶ Geisz, J.F, France, R.M, Schulte, K.L, et al. Six-junction III-V solar cells with 47.1% conversion efficiency under 143 Suns concentration. *Nature Energy*, 2019, DOI: 10.1038/s41560-020-0598-5

子电池一半。

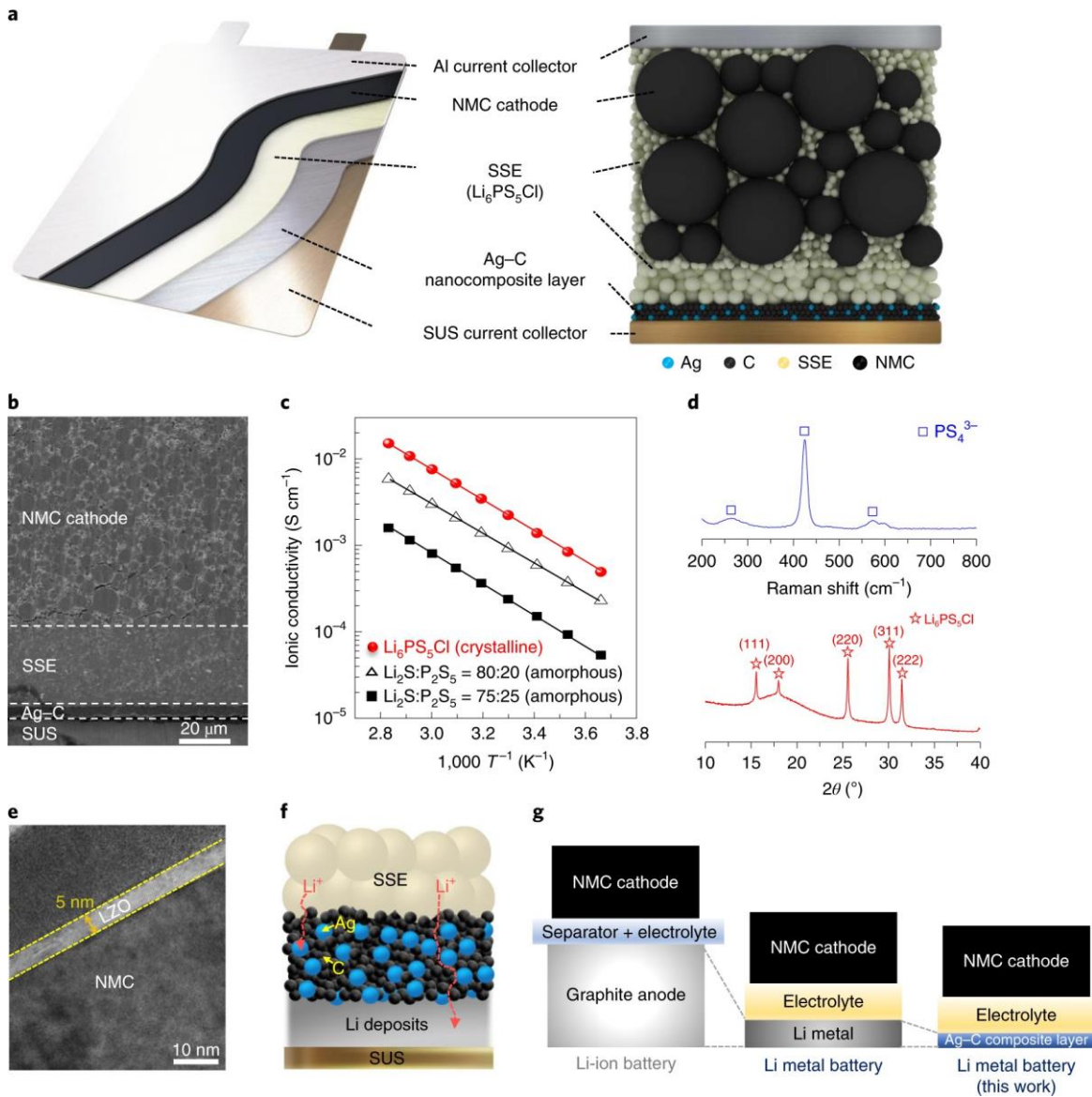


图 1 基于独特银-碳复合负极的全固态电池

该项研究精心设计和制备了独特银-碳复合负极，替代锂金属负极，结合硫银锗矿型固态电解质制备了全固态电池，获得了高达 942 Wh/kg 能量密度和 99.8% 平均库伦效率；此外银-碳电极有效调节金属锂的沉积-剥离过程，避免枝晶形成，显著提升了电池寿命，稳定循环超过 1000 余次，推动固态电池技术向商业化迈出关键一步。相关研究成果发表在《Nature Energy》⁷。

(郭楷模)

⁷ Yong-Gun Lee, Satoshi Fujiki, Changhoon Jung, et al. High-energy long-cycling all-solid-state lithium metal batteries enabled by silver-carbon composite anodes, *Nature Energy*, 2020, DOI: 10.1038/s41560-020-0575-z

低碳化多能融合

欧盟发布到 2030 年综合能源系统研发路线图

2 月 27 日，欧洲能源转型智能网络技术与创新平台（ETIP SNET）发布 2020-2030 年综合能源系统研发路线图⁸，提出了未来十年拟投入 40 亿欧元开展综合能源系统研究和创新优先活动，以推进实现欧洲 2050 年构建深度电气化、广泛数字化、完全碳中性的循环经济愿景。此次路线图共提出了 6 个研究领域的研发重点、研发进程和预算分配，包括：消费者、产消合一者和能源社区；系统经济性；数字化；系统设计和规划；灵活性技术和系统灵活性；系统运行。具体内容如下：

一、路线图目标

通过路线图的实施，到 2030 年欧洲综合能源系统将具备 12 个方面的功能，即：

①系统运营商之间的合作；②终端用能部门的融合；③能源系统以本地优化方式运行，通过智能、分布式优化控制平衡本地能源需求（以消费者为核心）；④泛欧批发市场；⑤整合本地市场（使居民参与）；⑥集成数字化服务（包括数据隐私、网络安全）；⑦升级电网，集成组件和系统；⑧能源系统业务（包括商业模式和监管）；⑨电力和能源系统的仿真工具；⑩在发电、需求、能源转换和存储技术中集成灵活性；⑪通过集成灵活性为建筑和工业部门提供高效的供热和制冷；⑫通过集成灵活性为交通运输提供高效的碳中和液体燃料和电力。

二、重点研究领域

1、消费者、产消合一者和能源社区

该领域旨在解决能源消费者和产消合一者（Prosumer）（个人、社区，商业用户，行业）与能源系统之间的复杂关系。重点关注的子技术领域包括：①能源基础设施的社会接纳和环境可持续性；②消费者行为（包括能源社区）；③消费者和产消合一者设备控制。

该领域将投入约 4000 万欧元用于技术研究，2.8 亿欧元用于示范，希望实现如下技术的突破：点对点交易；自底向上聚合；灵活发电和负荷管理的运营市场平台，可优化电动汽车等负荷；组织变革（如能源互助、点对点交换、合作社的新职能）。

2、系统经济性

该研究领域涉及与能源系统相关的商业模式、市场设计、管理和运营，涉及不同地理尺度的能源市场设计，适用于能源价值链的不同产品和服务的商业模式，以及由欧盟和国家法令、政策和法规、电网规则、终端用能行业规则构成的市场管理。

⁸ ETIP SNET R&I Roadmap 2020-2030. https://www.etip-snet.eu/wp-content/uploads/2020/02/ETIP-SNET-RI-Roadmap-2020-2030_WEB.pdf

重点关注的子技术领域包括：①商业模式；②市场设计；③市场监管和税收。

该领域将投入约 1.2 亿欧元用于技术研究，6 亿欧元用于示范，希望实现如下技术的突破：辅助服务市场；灵活性技术的利用；开发结合各种能源载体的（本地）市场；对示范项目/区域灵活性的示范；将资本支出（CAPEX）转化为运营支出（OPEX），以降低总体成本；分布式能源资源的新型补偿方案。

3、数字化

该领域旨在解决数字技术在能源系统的集成。将解决与能源系统运行相关的问题，即用于能源系统运行和控制的数字基础架构，并开发用于数据通信、交换和分析的工具和网络。此外，该领域还将考虑能够促进市场和用户参与的数字应用程序。重点关注的子技术领域包括：①协议、标准化和互操作性；②数据通信；③数据和信息管理；④网络安全与隐私；⑤端到端架构。

该领域将投入约 1.2 亿欧元用于技术研究，4.8 亿欧元用于示范，希望实现如下技术的突破：端到端架构；网络安全和物联网（IoT）；网络安全的点对点概念（如区块链）；实现现场设备传感器、数据、服务、能源消费者和产消合一者之间的可互操作、尊重隐私的连接，以逐步扩展分布式多方控制系统。

4、系统设计和规划

该领域旨在解决综合能源系统的设计和规划问题，以更好地融合多种能流。将从多个角度考虑规划和分析综合能源系统的必要方法和工具，设置基于可靠且透明的假设、参数和关系的场景，采用综合且全面的规划工具，规划设计所有能流相互作用且相互促进的能源系统。这一整体能源系统架构有助于建立智能电力系统可靠、经济和环境友好运行所必需的所有过程，包括创新的资产和生命周期管理，相关技术以及资产维护。重点关注的子技术领域包括：①综合能源系统架构；②长期规划（系统开发）；③资产管理与维护；④系统稳定性分析。

该领域将投入约 1.6 亿欧元用于技术研究，7.2 亿欧元用于示范，希望实现如下技术的突破：储能；区域综合能源系统；分布式能源系统的连接、监测和控制技术的大规模部署；综合智能电网系统；整合所有能源载体的新拓扑和设备；新的系统规划程序，包含分布式能源系统和电网灵活性技术；分布式能源系统预测的大规模部署；现代控制中心；数据管理；人机交互；培训；建模；无人机；增强现实/虚拟现实；可穿戴设备；微元网（Web of Cells）架构。

5、灵活性技术和系统灵活性

该领域旨在开发解决方案和工具，以确保有足够的灵活性来应对融合程度不断加深的综合能源系统的所有不确定性和可变性。该研究领域所解决的灵活性问题涵盖了整个能源系统，并跨越不同能流。重点关注的子技术领域包括：①需求灵活性；②发电灵活性；③储能灵活性及能量转换灵活性；④网络灵活性；⑤交通灵活性。

该领域将投入约 1.6 亿欧元用于技术研究，4.8 亿欧元用于示范，希望实现如下技术的突破：灵活性资源；包括电动汽车在内的储能资源；输电网运营商-配电网运营商-消费者市场就位；灵活性标准；通过技术和预测工具相结合提升波动性可再生能源资源的灵活性；住宅寻求响应；实现电动汽车智能充电及“车辆到电网”(V2G)；岛屿能源系统灵活性；基于无碳和碳中性燃料的火电厂灵活性；可再生能源和脱碳气体集成的灵活性；热电联产的灵活运行；通过部门融合实现系统灵活性。

6、系统运行

该领域涉及用于开发整体控制架构的工具和系统，例如从分级系统控制到协调协作概念，以及开发输配电系统的直接或间接控制解决方案，以确保综合能源系统在波动性、约束和不确定性不断增加情况下的最佳运行。该领域将利用先进监测、控制和保护技术，以及先进预测技术，利用所有工具和设备来实现系统可观察性。重点关注的子技术领域包括：①状态评估和监控；②短期控制；③中长期控制；④预防性控制/恢复；⑤控制中心技术。

该领域将投入约 1.2 亿欧元用于技术研究，7.2 亿欧元用于示范，希望获得如下技术的突破：更高水平的自动化；更复杂的功能；集成系统的操作工具；新的运行规划程序；大规模可再生能源资源预测；现代控制中心；数据管理；人工智能；大型直流-交流电网；微元网（Web of Cells）。

（岳芳）

英国启动新项目推进低碳制氢供应链技术开发

4 月 23 日，英国商业、能源和产业战略部（BEIS）宣布资助 3300 万英镑支持低碳制氢供应链技术开发⁹，旨在研发高性能低成本的低碳制氢技术并开展相关示范，以降低制氢成本，加速英国低碳制氢技术的部署和应用。本次资助聚焦五大主题领域，具体内容如下：

1、海上风电制氢

在深海区域建造一个风电制氢设施原型，该设施原型由大型浮动式风力涡轮机（10 MW）、水处理单元和产氢电解槽组成，能够以海水为原料利用风电进行电解制氢，并通过管道输运到陆地。

2、低碳产氢示范工厂

通过采用集成 Johnson Matthey 公司低碳制氢技术的碳捕集设施，Progressive Energy、Essar、Johnson Matthey 和 SNC-Lavalin 四家公司联合建造一座低碳制氢示范工厂，每小时产氢量达到 10 万标立方，以验证技术规模化应用潜力。

3、基于聚合物电解质膜电解槽绿色产氢装置

⁹ Low Carbon Hydrogen Supply Competition. <https://www.gov.uk/government/publications/hydrogen-supply-competition>

基于 ITM Power 公司吉瓦级别的聚合物电解质膜电解槽，开发一个低成本、零排放的风电制氢示范装置，为炼油厂提供清洁的氢气资源。

4、开发和评估先进的天然气重整制氢新系统

开发和评估先进的天然气重整制氢新系统，为利用英国北海天然气生产氢气提供一种节能且具有成本效益的新方法，同时新系统能够有效地捕集并封存制备过程产生的 CO₂ 排放气体以防止气候变化。

5、开发吸附强化蒸汽重整 (SESR) 制氢装置

依托天然气技术研究所 (GTI) 发明的基于新技术的 SESR 工艺，设计开发中试规模低碳氢气制备的示范装置并进行示范生产，评估新工艺的技术经济性。

(郭楷模)

生物质转化为高价值化学品新工艺展现巨大工业应用潜力

将生物质转化为燃料和高价值化学品，既有利于解决生物质废弃物污染问题，又具备了良好的经济价值，是化工和能源产业未来发展的重点方向。但目前直接使用木质素生物质实现高产量高经济效益的转化案例几乎没有，因此如何解决上述问题是生物质精炼实现规模化生产的关键所在。

由比利时鲁汶大学 Bert F. Sels 教授课题组牵头的联合研究团队开发了一种经济高效的综合生物精炼工艺，能够将木质素高效转化为高价值化学品，整体转化率高达 78 wt% (基于投放的原料质量计算)，且技术经济性评估和投资回报周期分析表明整套精炼工艺有极高的经济技术可行性和可持续性，具备了大规模工业化应用潜力。当前直接以木质素为原料进行转化主要产物为酚、芳烃及其低聚物的混合物，需要经历昂贵且高能耗的分离操作才能获得最终产品。而酚类单体在苯环的不同位置上都含有甲氧基和其他通用取代基，而它们的化学键解离能相似，如何在破坏苯环情况下除去这些官能团是主要问题所在。为了解决上述问题，研究人员设计了一种三步骤的综合精炼工艺，即通过逐步反应实现木质素到产物高效转化。第一步，研究人员以钌金属/碳 (Ru/C) 复合物为催化剂，以硬木为原料，在通入氢气条件下进行还原催化分馏反应 (RCF)，以 50% 产率 (接近理论产率) 获得了含有酚类单体的木质素油和碳水化合物纸浆产物。随后在木质素油中加入六倍质量 (相比木质素油) 的正己烷进行萃取，获得了木质素单体和低聚物。接着设计了“漏斗式”催化转化工艺，对木质素单体进行转化：首先以低成本的非贵金属镍/二氧化硅 (Ni/SiO₂) 复合物为催化剂，对木质素单体进行了无溶剂和无硫的连续催化气相加氢处理，实现了甲氧基的去除，获得了正丙基苯酚和乙基苯酚 (选择性在 75%-85% 之间)。而甲氧基裂解反应主要副产物是水和甲烷，没有形成一氧化碳或二氧化碳。水的产生有利于在下一步脱烷基步骤中让催化剂保持良好的催化活性，而甲烷可以作为燃料

提供加热、冷却和电力等所需的能量。第二步以多级孔 ZSM-5 沸石分子筛为催化剂对上一步的产物进行脱烷基处理，获得了苯酚和丙烯，两种产物合并产率为 82%。按照最初的投料质量计算（最开始反应算起），苯酚产率为 20 wt%，丙烯产率为 9 wt%。此外研究人员还将低聚物用于制造高质量印刷油墨，通过糖化发酵过程将 RCF 步骤中产生的碳水化合物纸浆转化为乙醇，实现了木质素全面利用。更为关键的是，技术经济分析表明对于年产 100 吨生物酚的工厂，预期内部收益率为 23.33%，使用寿命为 20 年的工厂投资回收期约为 4 年；生命周期评估表明，与化石的同类产品相比，苯酚和丙烯的碳足迹要低得多，因此综合各方面因素，该新工艺具备了实际规模化应用的潜力。

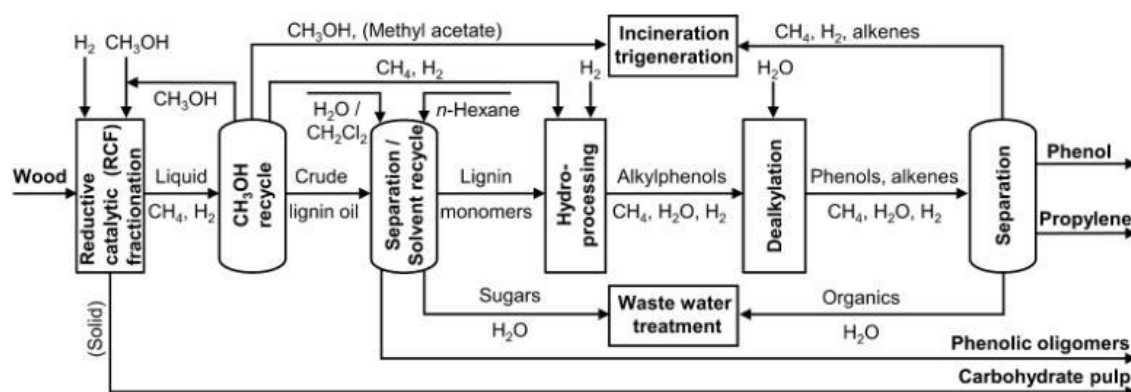


图 1 综合生物精炼工艺化学过程流程图

该项研究设计制备了一种新型综合性生物精炼工艺，基于低成本的非贵金属催化剂将木质素全面高效转化为高价值化学品，不留残渣；且技术经济分析和生命周期评估都表明新工艺具有极高的经济可行性、技术可行性以及可持续性，具备了巨大的工业应用潜力。相关研究成果发表在《*Science*》¹⁰。

(郭楷模)

磷缺陷调控增强催化剂催化分解水产氢性能

氢气是一种清洁、对环境无污染、燃烧零排放的新能源，而利用可再生能源电解水制氢被认为是大规模制氢的理想方法。然而，传统高性能的电解水产氢催化剂主要是基于贵金属材料（如 Pt/C），具有资源稀少、价格昂贵等缺点，不利于氢能的规模化应用，开发高性能的非贵金属催化剂成为了当前研究前沿。但目前的非贵金属催化剂性能不如贵金属，为了提升其性能需要对其进行改进，而缺陷调控被认为是一种行之有效的方法。

¹⁰ Jingjing Duan, Sheng Chen, César A. Ortiz-Ledón, et al. A sustainable wood biorefinery for low-carbon footprint chemicals production. *Science*, 2020, 367, 1385-1390.

由澳大利亚阿德莱德大学 Shi-Zhang Qiao 教授课题组牵头的国际联合研究团队设计制备了一种低成本磷化镍电催化剂，通过对催化剂磷缺陷的调控，显著改善了催化剂的性能，将催化产氢的性能提升了近两个数量级。研究人员将商业化的泡沫镍与磷源($\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$)进行低温退火处理，考虑到磷源会分解产生磷化氢(PH_3)气体，通过调控磷源的比例，可以有效改变气氛的压力，从而调控磷元素的比例，通过上述策略研究人员制备了正常化学比例的磷化镍(Ni_{12}P_5)和 P 缺陷的 v- Ni_{12}P_5 材料。通过 X 射线衍射表征显示，两种材料晶型结构不同，扫描电镜表征进一步发现两种材料的微观形貌也不同，无缺陷的 Ni_{12}P_5 呈现纳米杆形貌，而 P 缺陷的 v- Ni_{12}P_5 是纳米线和纳米片混合的组成。通过 X 射线光电子谱表征显示，无缺陷的 Ni_{12}P_5 材料 P 元素原子比例为 36.3%，而 v- Ni_{12}P_5 的这一数值仅为 28.8%，表明了后者存在 P 元素缺陷。通过进一步分析化学键组成，发现 v- Ni_{12}P_5 在 Ni 和 P 原子周边有更多的电子聚集。随后在 1 摩尔的氢氧化钠电解液中进行电催化性能测试，实验结果显示，含有 P 缺陷的 v-

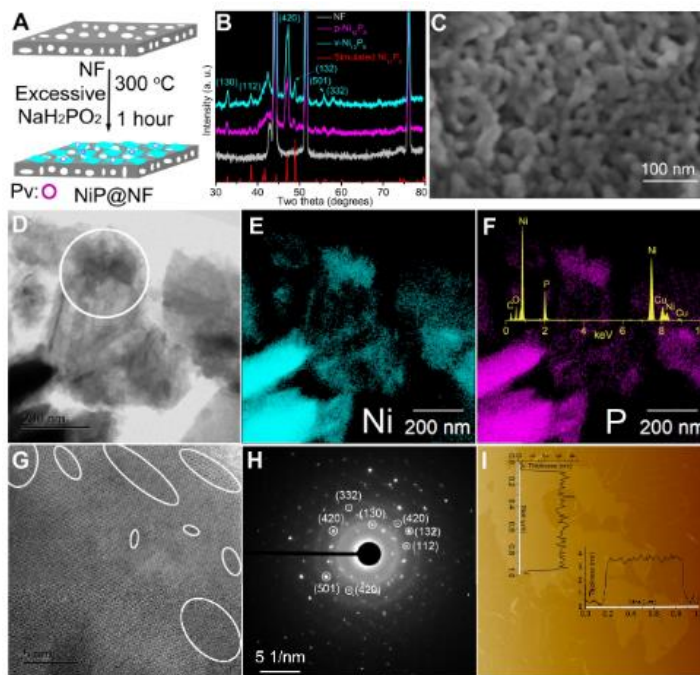


图 1 低成本磷化镍电催化剂合成与表征

Ni_{12}P_5 达到 10 mA/cm^2 催化电流仅需 27.7 mV 过电位，塔菲尔 (Tafel) 斜率为 30.88 mV/dec ，远远小于无缺陷的 Ni_{12}P_5 (120.1 mV , 83.60 mV/dec)，和传统的商业化贵金属 Pt/C 催化剂性能相当 (32.7 mV , 30.90 mV/dec)。此外，缺陷的存在使得催化剂的产氢转换频率 (TOF) 由 26.3 提高到了 812.1。同时，催化电极展现了非常优异的稳定性，在强碱电解液中可以连续稳定工作 504 小时以上。DFT 理论计算表明，磷缺陷可以减弱 Ni 3d 轨道和 P2p 轨道的耦合，从而使缺陷附近的 Ni 和 P 原子的电子密度得到增加，有利于促进氢气中间产物 H^* 自由基形成 H_2 之后的脱附反应动力学，从而增强产氢性能。

该项研究设计制备了一种新型低成本非贵金属催化剂，磷缺陷的存在使 Ni 和 P 原子周围电子密度增加，促进了中期产物 H^* 的产生和吸附，实现了碱性环境下高效催化分解水产氢，为开发高性能低成本非贵金属分解水产氢催化剂提供了新思路。相关研究成果发表在《*Angewandte Chemie International Edition*》¹¹。（郭楷模）

¹¹ Jingjing Duan, Sheng Chen, César A. Ortíz - Ledón, et al. Phosphorus Vacancies that Boost Electrocatalytic Hydrogen Evolution by Two Orders of Magnitude. *Angewandte Chemie International Edition*, 2020, DOI:

能源战略研究

IEA：新冠肺炎疫情对全球能源需求造成二战以来最大冲击

4月30日，国际能源署（IEA）发布《全球能源回顾 2020：新冠肺炎危机对全球能源需求和碳排放影响》报告¹²，总结了2019年全球能源供需及碳排放情况，并基于新冠肺炎疫情对2020年一季度全球能源的影响，分析预测了全年的能源需求和碳排放。报告指出，新冠肺炎疫情的蔓延对全球能源系统造成了近70年来的最大冲击，预计2020年全球能源需求将下降6%，同时导致全球能源相关碳排放下降近8%。全球电力结构将出现最大幅度的低碳转型，低碳发电在电力需求占比将激增至40%。报告要点如下：

一、截止4月中旬，受强制封控措施影响的人口在全球一次能源消费占比超过50%

新冠肺炎疫情已经成为全球卫生危机，截至4月28日已有300万例确诊病例，并有20万多人死亡。世界各国为降低病毒传播速度而采取的封控措施，使得到4月中旬全球已有占全球能源消费50%以上的人口受到影响，而在3月中旬仅为5%（图1）。4月份处于完全封控状态的国家每周能源需求平均下降25%，处于部分封控状态的国家平均下降18%。

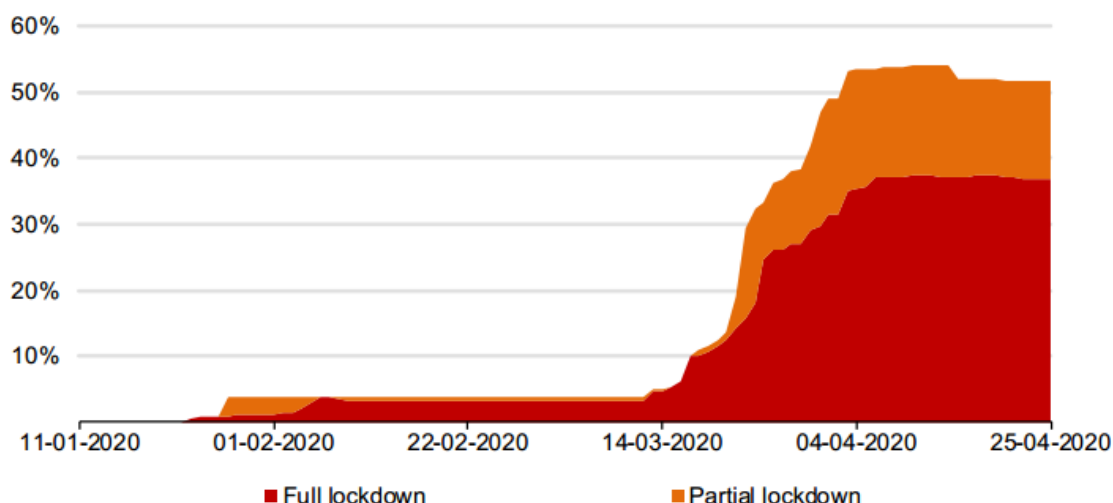


图1 受强制封控措施影响的人口在全球能源消费中占比（单位：%）

二、一季度全球能源需求下降3.8%，煤炭降幅最大

由于全球经济活动和流动性的急剧减少，2020年一季度全球能源需求下降1.5亿吨油当量，同比下降3.8%，逆转了2019年的增长势头。全球经济活动的下降对

10.1002/anie.201914967

¹² Global Energy Review 2020. <https://webstore.iea.org/download/direct/2995>

某些能源品种的需求影响远大于其他能源，具体表现为：

1、煤炭需求受冲击最大，同比下降近 8%。这一显著下降主要是由于电力需求下降所致，电力部门占到煤炭消费的 2/3，一季度全球燃煤发电下降了约 10%。中国作为以煤炭为基础能源的经济体，煤炭消费量占全球一半以上，其在第一季度煤炭消费下降了 8%。此外，一些国家/地区廉价的天然气和可再生能源的持续增长给煤炭带来了挑战，加上暖冬天气限制了煤炭的使用以及疫情导致企业停工使得用电需求降低，美国一季度煤炭消费量下降 30%，煤炭在其电力结构中占比首次降至 20% 以下，欧盟一季度煤炭需求也下降 20% 以上。

2、石油需求也受到严重打击，同比下降近 5%。石油需求下降主要是交通运输业活动以前所未有的规模下降所致，其占全球石油需求的近 60%。截止一季度末，全球公路运输活动几乎降至 2019 年水平的一半，一些地区航空旅行几乎完全停止，欧洲部分国家降低 90% 以上，导致全球航空运输活动降低 60%。由于交通需求下降，仅在 3 月份全球石油需求就以 1080 万桶/日的创纪录速度下降。

3、主要天然气市场的需求小幅下降，供需不平衡导致天然气库存大增。由于北半球气候较往年温和，全球主要天然气市场的消费量在疫情爆发前的 2020 年初期就已经下降，一季度欧洲天然气需求量同比下降 2.6%，美国由于住宅和商业需求急剧下降导致其天然气需求同比下降 4.5%。亚洲成熟天然气市场需求也有所降低，日本液化天然气(LNG)一季度进口量下降 3%，1-2 月韩国国内天然气销售量下降 2.5%，而中国天然气需求则基本持平。天然气供应并未因消费下降而调整，导致天然气库存大幅增加。截至 3 月底美国天然气地下储气库存储量比 2019 年上升了 77%，比近 5 年平均水平高出 17%；欧洲则增长了 40%，比近五年平均水平高出 80%。

4、防控措施导致电力需求显著下降，进而影响电力结构。尽管防控措施在大多数国家实施了不到一个月，一季度全球电力需求已下降了 2.5%。中国率先采取防控措施，一季度电力需求降幅（-6.5%）全球最大，其他地区受到的影响较为有限，欧洲、日本、韩国和美国的一季度电力需求下降 2.5% 至 4.5%，其他影响因素还包括 1-2 月的气候偏暖。全面封控措施已使法国、印度、意大利、西班牙、英国和美国西北部地区的每日电力需求减少了至少 15%，实施严格控制措施的经济体和服务产业占较大比例的经济体受到的影响最大，意大利的电力需求降低 25% 以上（图 2）。由于一季度风力发电和光伏发电大幅增长，可再生能源发电量增长 3%，而电力需求总量减少提高了可再生能源在电力供应中的比例。所有实施封控措施地区的电力供应在一季度都明显向低碳结构转变，中国的燃煤发电量减少量最大（约 100 TWh），导致全球火力发电量下降。

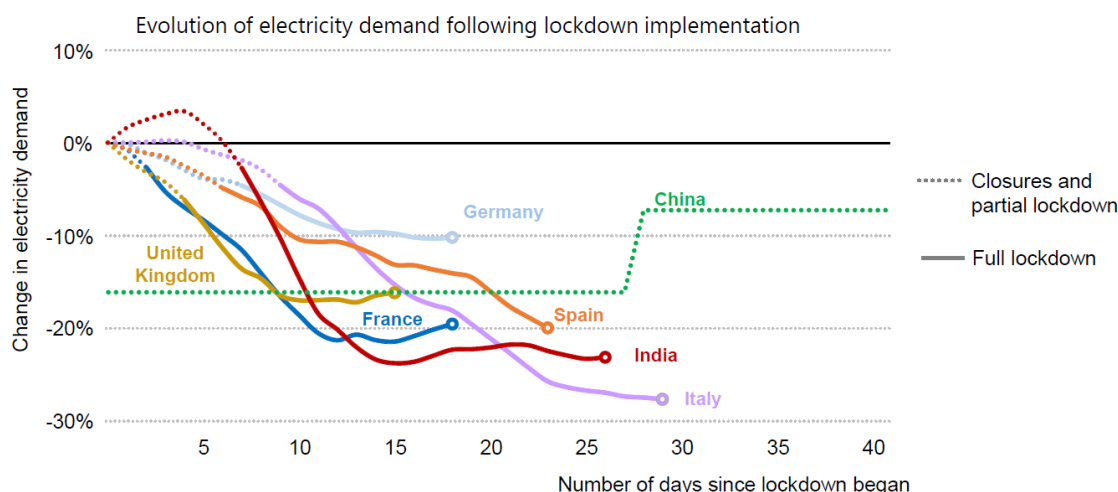


图2 各国实施封控措施对电力需求的影响（单位：%）

5、可再生能源是一季度唯一需求增长的电力来源。可再生能源发电基本未受疫情影响，一季度全球可再生能源发电量增长近3%，而其他用能部门的需求有所下降，导致可再生能源总需求增长约1.5%。可再生能源电力需求增长的主要原因是去年新建的超过100 GW 光伏项目和约60 GW 风能项目提振了产出，再加上成本较低或政策支持导致可再生能源通常比其他电力资源优先调度。另外，一季度可再生能源在全球发电量占比从去年同期的26%提升至28%。生物燃料直接受到道路运输燃料需求下降的影响，巴西、欧盟和美国的乙醇和生物柴油厂商已经降低了产量。

6、全球核能发电量同比下降约3%。核能发电量下降的主要原因是电力需求下降和一些核电设施按计划关闭。欧盟下降幅度最大，法国核能发电量下降了11 TWh (-10%)，德国下降了3 TWh (-17%)。美国由于气候温和及电力需求下降，一季度核能发电量下降了4 TWh (-2%)。中国是少数几个核电增长的地区之一，一季度发电量增长了1%，主要原因是2019年6月建成投产了两座大型核反应堆。

三、预计2020年全球能源需求将下降6%，除可再生能源外其他能源需求都将下降

尽管许多国家采取了宏观经济刺激政策，但从最严重的经济衰退中复苏是一个渐进的过程，而且还将伴随大量经济活动的永久性损失，预计2020年全球能源需求将降低6%，为70年来的最大下降（图3）。新冠疫情对2020年全球能源需求影响将是2008年金融危机影响的7倍以上，所有能源品种需求都将受到影响（图4）。

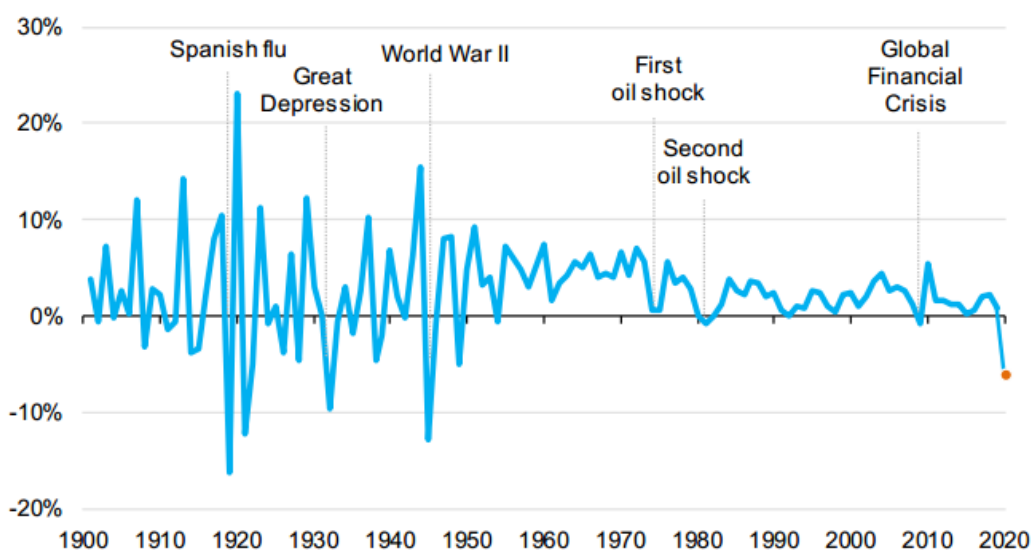


图 3 1900 至 2020 年重要历史事件对全球能源需求的影响（单位：%）

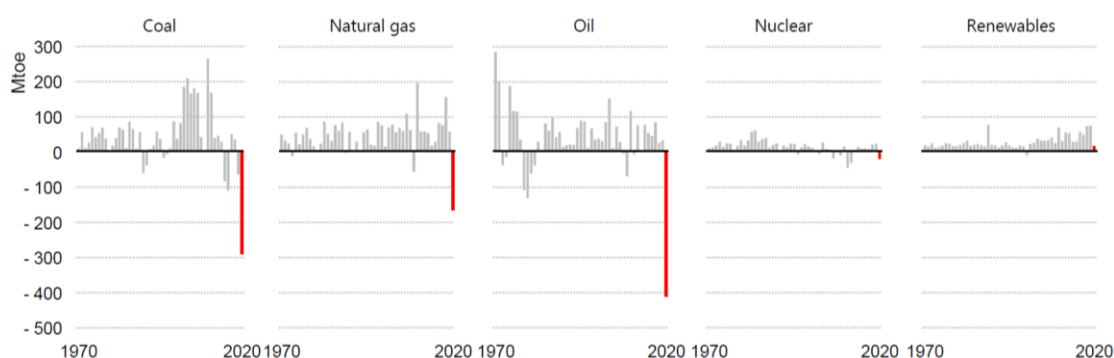


图 4 1970-2020 年全球各能源品种需求同比变化（单位：百万吨油当量）

1、石油需求将下降 9%，石油消费水平将回到 2012 年。预计 2020 年全球石油需求同比减少 930 万桶/日。封控措施对 187 个国家/地区的影响几乎使全球流通陷入停滞，预计 4 月份石油需求同比减少 2900 万桶/日，降至 1995 年的水平。第二季度需求量预计将比 2019 年减少 2310 万桶/日。随着下半年经济逐渐复苏，全球石油需求将有所提升，但石油需求不会达到危机前的水平，12 月的需求将比去年同期水平下降 270 万桶/日（图 5）。疫情对经济影响波及到汽车行业，汽车销量下降将影响到 2020 年余下时间的汽油需求，预计全年汽油需求将下降 290 万桶/日，降幅为 11%。柴油需求中较大部分用于卡车和船舶运输以及制造业，因此其受到的影响相对较少，预计全年柴油需求将下降 200 万桶/日（降幅 7%）。封控措施对航空业影响较大，预计下半年航空燃油和煤油的需求将比 2019 年减少 20%，全年需求将下降 210 万桶/日，降幅达到 26%。石油需求前景在很大程度上取决于疫情持续时间以及重启经济活动的力度，如果缩短封控期并在 2020 年下半年实现经济强势反弹，可能将全年石油需求降幅缩小 650 万桶/日。另一方面，如果 2020 年下半年出现第二波疫情，石油需求降幅可能会增大。

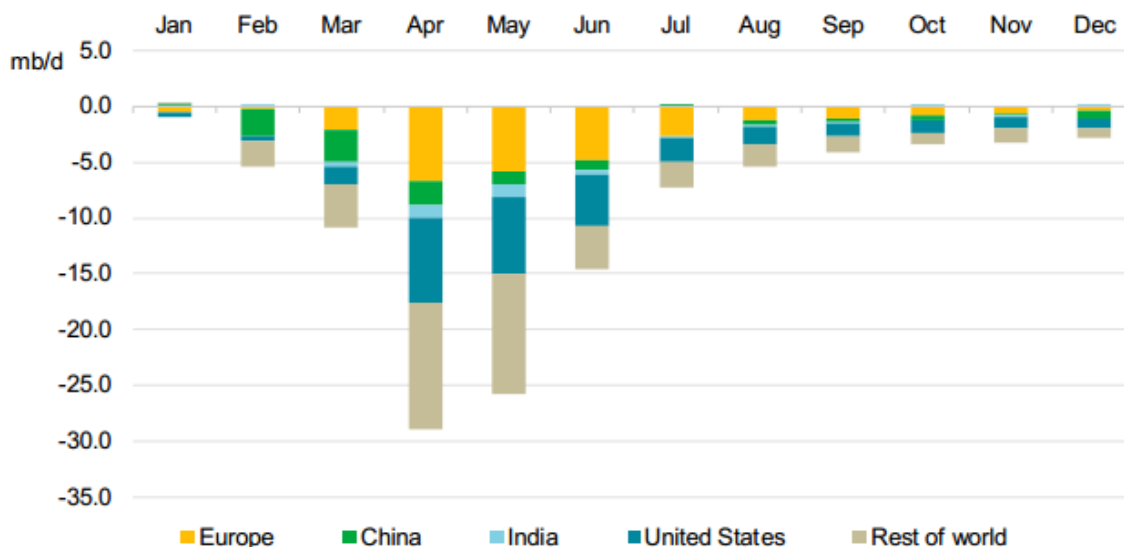


图 5 2020 年每月度石油需求同比变化（单位：百万桶/日）

2、电力需求下降将导致全年煤炭需求下降 8%，几乎所有地区的煤炭消费量都将下降。主要煤炭消费国的经济影响程度和恢复速度，将决定 2020 年全球煤炭消费量的下降幅度。尽管 2 月以来煤炭需求开始逐步恢复，但低成本水电、风能、太阳能和核能的冲击将使燃煤发电量降低，预计 2020 年中国煤炭需求将下降 5%左右。由于经济增长和电力生产正在显著放缓，印度煤炭需求降幅更大。即使在近年来增长最快的东南亚地区，煤炭发电也因电力需求下降而受到限制。发达经济体的煤炭需求将大幅下降，美国、欧盟、韩国和日本将分别下降 25%、20%、5%和 10%。如果中国和其他煤炭消费大国能够更快地从危机中复苏，全球煤炭使用量的降幅可能缩减一半。

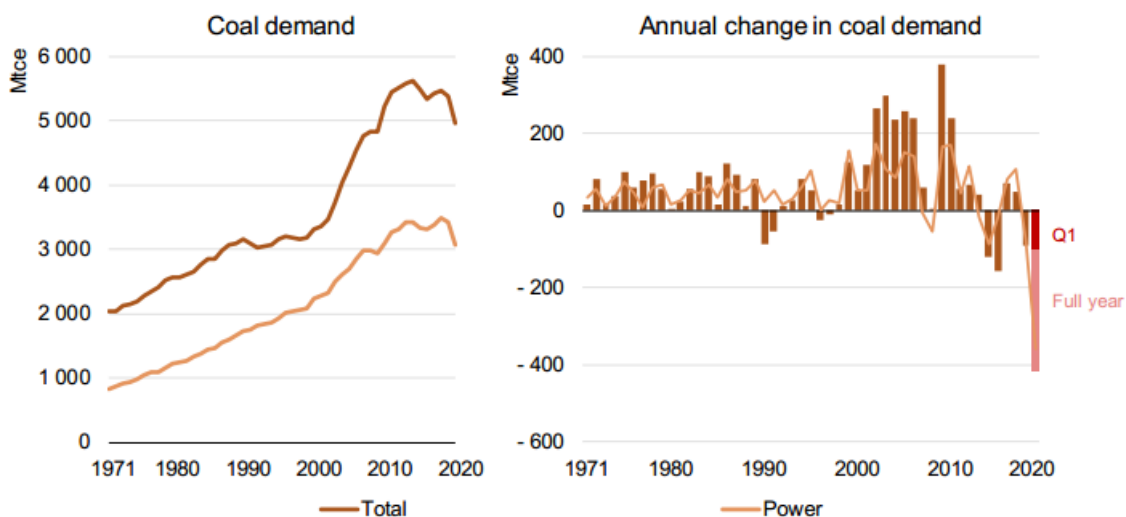


图 6 1971-2020 年全球煤炭需求总量及动力煤需求量（左图：需求量；右图：年度变化；单位：百万吨煤当量）

3、由于电力和工业部门需求下降，全年天然气需求降幅可能大于一季度。预计

2020 年全球天然气需求将下降 5%，是自 2009 年天然气消费下降 2% 以来的首次下降。预计所有部门的需求都将下降，但降幅最大的是电力部门，其天然气需求将下降 7%，占全球天然气需求下降量的 60%，尤其是在天然气发电占火力发电主导地位的欧洲和以天然气发电为主要电力来源的中东、北非等地区。工业部门天然气需求将下降 5%，占总需求下降量的 25%，除受到工业活动减少的影响，其需求还将受工业成品消费放缓的影响。能源行业自身的天然气需求量将下降 4%，占总需求下降量的 10%。如果欧洲和北美地区能够快速复工，全球天然气需求降幅将缩减至 2.7%。

4、全年电力需求预计下降 5%，低碳发电在电力需求占比将激增至 40%。与 2009 年金融危机不同，全球各地区电力需求都将受到疫情影响。由于遭受重创的服务业在欧洲经济中发挥核心作用，欧洲电力需求将受到最大的冲击，预计下降 8.2%。美国服务业占其电力需求的 40%，预计全年将下降 4.8%。疫情对工业影响相对较小，中国工业用电占 2019 年电力需求的 60%，预计 2020 年电力需求下降 3%。如果经济能够更快复苏，则 2020 年全球电力需求将下降 2%，如果发达国家出现第二波疫情，则将使降幅增大。预计 2020 年低碳发电在电力需求占比将激增至 40%，达到历史最高水平（图 7）。风能和光伏发电占比将达 9%，是 2015 年的两倍。燃煤发电将最大幅度压缩（-10%），天然气发电也将受到沉重打击，今年的降幅约为 7%，是有记录以来的最大降幅。如果经济复苏速度加快，煤炭和天然气发电量降幅将缩减一半，可再生能源发电将更快增长，核能发电将回升至 2019 年水平。如果经济复苏速度放缓，则将给煤电、天然气发电和核电带来更多下行压力，电力结构会更大程度地转向可再生能源。

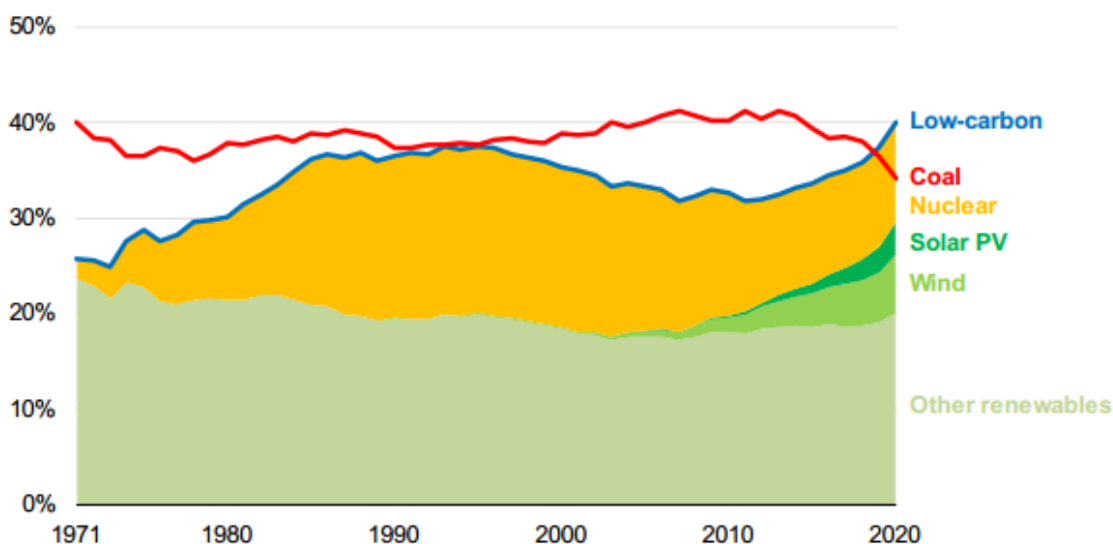


图 7 1971-2020 年煤炭和低碳能源在全球发电量中占比 (单位: %)

5、全年可再生能源需求预计增加约 1%。尽管疫情危机造成供应链和项目建设延误，2020 年全球可再生能源发电量仍将增长近 5%，可再生能源将占全球电力供应约 30%。总体而言，可再生能源的增长比去年更缓慢，但与 2016 年以来的总体放

缓趋势一致。水力发电占全球所有可再生能源发电量的 60%，仍然有最大的不确定性，因其依赖于降雨和温度情况。预计光伏发电量增长最快（图 8），风力发电量的绝对增长量最大。美国、欧洲等运输活动收缩将使得生物燃料消费需求继续承压，全年需求将大幅降低。经济复苏速度对可再生能源发电影响有限，但疫情防控措施将影响可再生了能源项目建设。

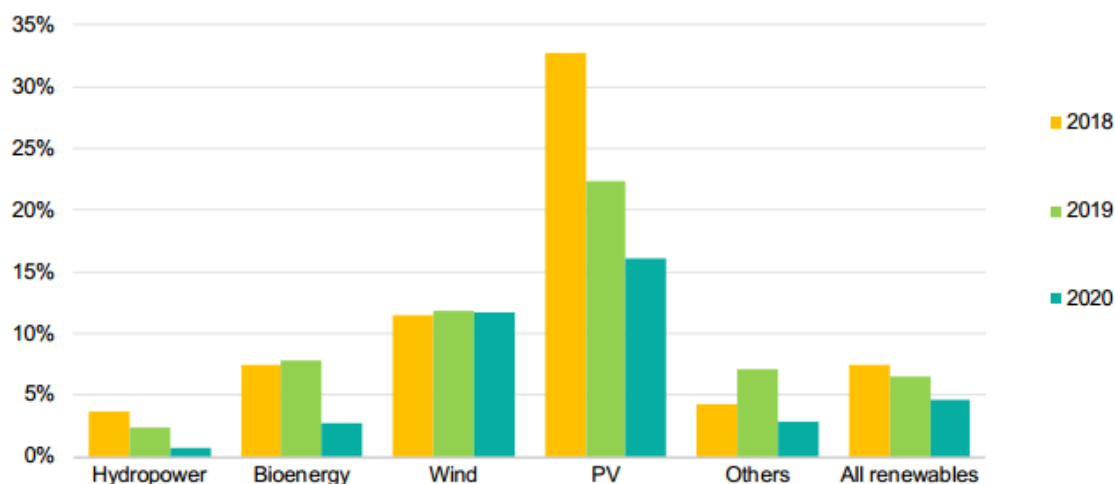


图 8 近三年全球可再生能源发电量增长幅度（单位：%）

6、核能发电量将出现核事故以外的最大降幅。电力需求低迷将持续全年，也将减少对核电的需求，应对疫情的防控措施也减缓了核电站建设，一些项目将延迟到 2021 年完工，预计全年核能发电量将降低约 3%，是除核事故以外的最大降幅。如果经济更快复苏，则将降低 1%以上。重启核电站建设将在 2020 年建成一定数量的核电站，但远低于 2018 年的峰值水平（新增 11 GW）。如果经济复苏速度远低于预期，则将导致电力需求更大降幅，使核能发电量进一步降低 2.5%以上。

四、预计 2020 年能源相关碳排放量将下降 8%，创有史以来最大降幅

第一季度能源需求大幅下降导致全球能源相关碳排放量同比下降 5%以上，煤炭、石油和天然气的排放量分别下降了 8%、4.5%和 2.3%。由于能源密集型燃料的需求降幅最大，碳排放下降幅度大于能源需求的下降幅度。受疫情影响最早和最大区域的碳排放量下降最多，中国、欧盟和美国分别下降 8%、8%和 9%。预计剩余三个季度全球碳排放量将以更快速度下降，全年碳排放量将达 306 亿吨，比 2019 年减少近 8%，是有史以来最大的减排幅度，几乎是二战结束以来历次减排量总和的两倍（图 9）。在近 26 亿吨的碳减排量中，煤炭使用量减少将贡献超过 11 亿吨减排量，其次是石油（10 亿吨）和天然气（4 亿吨）。美国的绝对降幅最大，约为 6 亿吨，中国和欧盟紧随其后。

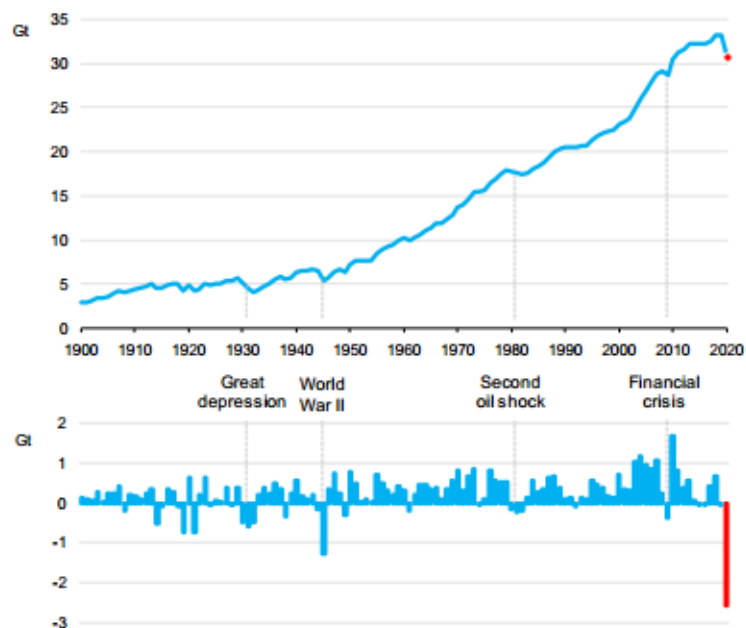


图 9 1900-2020 年受主要历史事件影响的全球能源相关碳排放量及变化（上图：年排放量；下图：年度变化量；单位：十亿吨）

（郑超 岳芳）

IEEJ：大萧条以来最恶劣全球经济形势下油气需求将大幅下降

4月17日，日本能源经济研究所（IEEJ）发布《大萧条以来最恶劣全球经济形势下石油、天然气和LNG的需求》报告¹³，分析预测了2020年全球石油、天然气和液化天然气（LNG）的需求。报告以国际货币基金组织（IMF）4月14日的《世界经济展望》对世界经济的预测（即2020年全球GDP将下降3%）为基准，认为2020年全球石油需求将下降9.3%，天然气需求将下降7.2%。国际石油、天然气和LNG市场将出现持续大规模的供应过剩，并持续对上述能源大宗商品价格构成下行压力。另外，针对疫情持续时间更长的假设也做了相应分析。主要内容如下：

一、分析情景

报告基于IMF对2020年世界经济发展的两种假设情景进行分析，即：

1、参考情景（RS）。假设全球疫情将在2020年下半年结束，经济将在第二季度触底反弹，中国经济在第一季度大幅下滑后，在第二季度出现复苏，IMF预测2020年全球GDP将下降3%。

2、更长期流行情景（LPS）。疫情流行时间比参考情景长50%，全球经济活动在第三季度才会开始复苏。IMF预测2020年全球GDP将下降6%。

二、2020年全球石油需求预测

在参考情景下，预计2020年全球石油需求将下降930万桶/日，同比下降9.3%

¹³ Demand for Oil, Natural Gas, and LNG Facing the Worst Global Economic Conditions since the Great Depression. <https://eneken.ieej.or.jp/data/8916.pdf>

至 9070 万桶/日，与 2012 年水平相当，是自 20 世纪 60 年代以来最大下降幅度。预计石油需求下降主要集中在第二季度，将同比下降 16.0% 至 8330 万桶/日。由于人口流动受到限制，对交通燃料需求大大减少，汽油、柴油和航空燃料的需求下降占石油需求降幅的近 80%。由于国际航班需要一段时间后才能恢复，航空燃料的全年需求将同比下降 26%。从地区来看，汽车拥有率很高的北美和欧洲地区目前处于城市封控状态，其石油需求将大幅下降。中国由于采取措施相对迅速控制了疫情，将比其他地区更早实现经济复苏（2020 年 GDP 将增长 1.2%），因此其石油需求降幅相对较小，但仍将达到近 100 万桶/日。在更长期流行情景下，预计 2020 年全球石油需求将同比下降 1280 万桶/日（降幅 12.8%），至 8720 万桶/日。第二季度石油需求相对最低，且影响将持续更长时间，下半年的需求复苏将会更慢。

即使在参考情景下，第二季度石油需求降幅将达到 1590 万桶/日，使得 4 月 12 日 OPEC+ 组织（欧佩克和参与减产的非欧佩克国家）达成的减产 970 万桶/日的协议显得力度不足，给油价带来了进一步的下行压力。专家预计，联合减产将远超 1000 万桶/日，其中 OPEC+ 将减产 970 万桶/日，其余来自非 OPEC 产油国。然而，即便如此，至少在第二季度供应大量过剩也将不可避免。根据目前供求情况，石油陆上储存设施可能在 5 至 6 月达到其营运阈值，这将继续对油价施加下行压力。如果石油需求下降符合更长期流行情景，石油价格可能会大幅下跌。油价下跌或过低价格水平可能导致国际金融市场动荡，使产油国经济财政紧张，影响其稳定性进而妨碍中长期投资，并引发期货市场进一步下跌，最终导致各种其他严重问题。

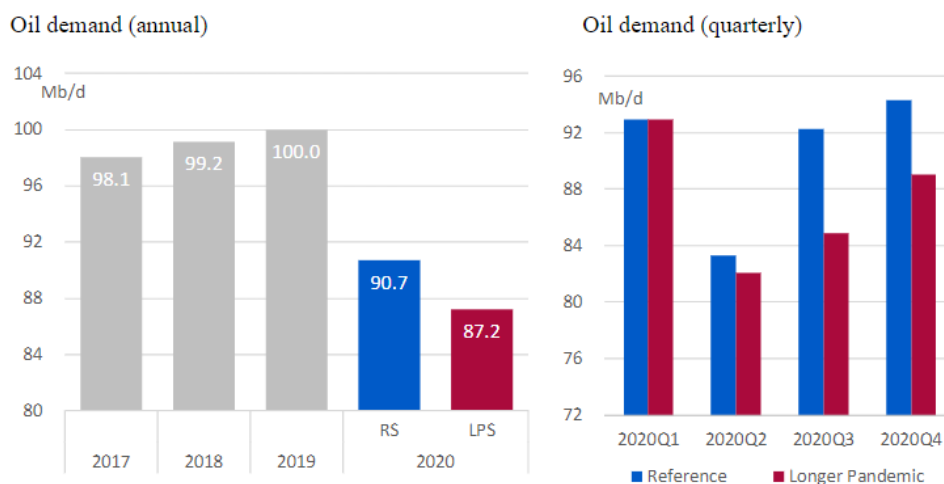


图 1 全球石油需求预测（左图：年度需求；右图：季度需求；单位：百万桶/日）

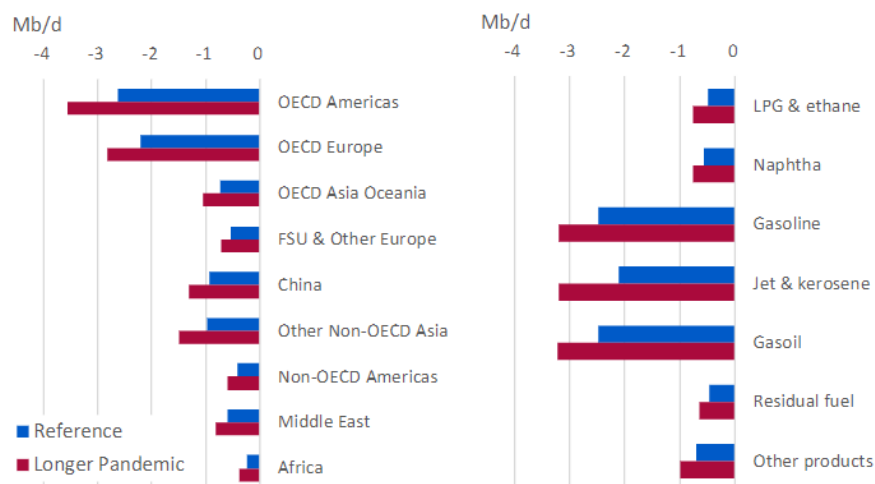


图 2 2020 年全球石油需求同比变化预测 (左图: 分地区; 右图: 分品种; 单位: 百万桶/日)

三、2020 年全球天然气需求预测

1、天然气

在参考情景下，预计 2020 年全球天然气需求将同比下降 7.2%至 3.682 万亿立方米，接近 2017 年需求水平。相比之下，金融危机后的 2009 年全球天然气需求仅下降了 2.0%。天然气需求下降的主要原因是电力需求下降，用于发电的天然气需求降幅占天然气总需求降幅的近一半。第二季度经济活动触底时天然气需求降幅最大，同比下降 13.1%。北美、欧洲和前苏联地区作为主要的天然气消费国，共占全球天然气需求近 60%。受到疫情的严重打击，这三个地区的天然气消费量将急剧下降，降幅共占全球天然气消费量下降的四分之三。在更长期流行情景下，2020 年全球天然气需求预计将同比下降 10.2%至 3.566 万亿立方米。但更长期流行情景下天然气需求将在第三季度达到低谷，与全球经济活动趋势一致。疫情防控措施对天然气的影响小于对石油的影响，宏观经济对天然气市场影响更为重要。

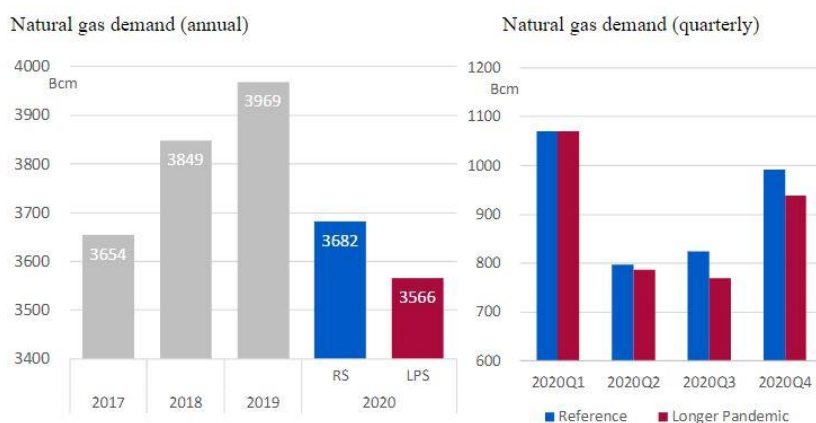


图 3 全球天然气需求预测 (左图: 年度需求; 右图: 季度需求; 单位: 十亿立方米)

2、LNG

参考情景下，预计 2020 年全球 LNG 需求将同比下降 2800 万吨 (降幅 7.8%)，

降至 3.25 亿吨。即使在金融危机后的 2009 年，全球 LNG 需求也稳定增长了 6.3%，近年来也出现了接近两位数的增长。亚洲和欧洲的 LNG 主要消费国需求降幅最大，经合组织（OECD）欧洲国家的需求将减少 1300 万吨，OECD 亚洲国家将减少 700 万吨，非 OECD 亚洲国家将减少 470 万吨，总计将减少 2470 万吨，占全球需求损失的 90%。第二季度下降幅度最大，随后下半年将逐步恢复。然而，需求复苏的程度将取决于各国经济复苏的时间点。在更长期流行情景下，全球 LNG 需求预计将进一步减少 1300 万吨至 3.12 亿吨，同比下降 11.5%，低于 2018 年水平。需求下降的主要地区和时间基本上与参考情景相似。

如果 LNG 需求如预测幅度下跌，而目前 LNG 增长迅速，很有可能造成严重的供过于求现象。即使没有新冠肺炎疫情影响，2020 年 LNG 市场预期也将供过于求。如果需求下降到 3.25 亿吨（参考情景）或 3.12 亿吨（更长期流行情景），LNG 供需缺口将达到 5.6-6.9 亿吨，这将对 LNG 现货价格形成巨大下行压力。考虑到长期 LNG 合同价格基本与石油价格挂钩，根据石油市场前景来看，石油价格预计将保持在较低水平或将进一步下降，因此未来长期 LNG 合同价格很有可能大幅下跌，其价格变化随着油价变化具有滞后性。

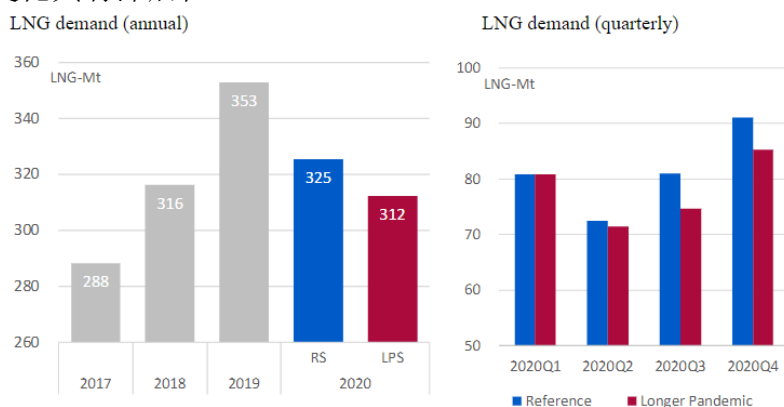


图 4 全球 LNG 需求预测（左图：年度需求；右图：季度需求；单位：百万吨）

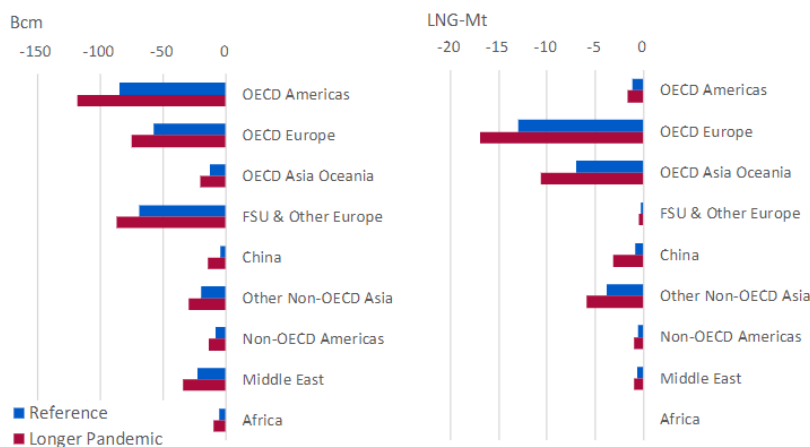


图 5 2020 年全球天然气和 LNG 需求同比变化预测（左图：天然气；右图：LNG）

（汤匀 岳芳）

IRENA：基于可再生能源的能源转型是经济复苏重要要素

4月20日，国际可再生能源署(IRENA)发布《可再生能源展望：能源转型2050》报告¹⁴，展望了实现能源系统脱碳转型的可再生能源发展目标，为低碳、清洁、可持续发展的能源未来提供参考。报告提出，当前为实现气候目标做出的努力仍有较大差距，到2050年全球能源相关碳排放需以每年3.8%的速度下降才能使全球平均温升控制在2°C以内，可再生能源在终端能源消费占比应增至66%，而能源强度改善速度需提高到每年3.2%。报告进一步指出，加速利用可再生能源促进能源转型能够成为全球经济复苏的重要要素，到2050年全球可再生能源就业岗位将增加三倍至4200万个，能源相关工作岗位将达到1亿个。主要内容如下：

一、为实现气候目标的计划与实际行动之间仍有差距

1、各国为碳减排做出的努力仍然存在差距。一些国家追求净零排放，而另一些国家仍未设定政策目标。在《巴黎气候协定》框架下提出的“国家自主贡献”(NDCs)目标不如在最新的能源计划 and 市场发展上有雄心。据IRENA估计，目前的国家自主贡献(NDC)电力目标仅为实现2030年全球气候目标所需可再生能源电力的40%。新冠肺炎疫情引发的健康危机、人道主义危机、社会和经济危机可能会拉大差距抑或加速社会的脱碳进程，会出现哪条发展路线将在很大程度上取决于各国将采取的经济刺激措施，其中最关键挑战将是发展的可持续性、应对能力以及人民健康和福祉改善。通过建设脱碳社会来实现全球气候目标仍然需要加快速度。

2、世界迫切需要清洁、可持续的能源解决方案以加速碳减排步伐。近年来能源发展趋势表明了加速碳减排的必要性。尽管近年来可再生能源在能源结构中的份额、能源强度以及终端用能电气化程度都有所改善，但发展速度难以满足全球气候目标需求。根据当前各国制定的政策承诺及目标(即IRENA的参考情景“已规划能源情景”)，到2050年全球一次能源需求将从目前的600 EJ增长至710 EJ，化石燃料消费量仍与当前持平，因此将无法实现全球碳减排目标。IRENA的“转型能源情景”和“更深度脱碳情景”提供了全球经济长期稳定以及低碳安全发展的基础。根据“转型能源情景”，到2050年全球化石能源消费将下降75%，能源相关碳排放将以年均3.8%的速度下降至约100亿吨，比当前水平降低70%，使全球平均气温上升2°C以内(图1)；而“更深度脱碳情景”则有望到2050年实现净零排放(最迟到2060年前实现)，并使全球温升控制在1.5°C以内。

¹⁴ Global Renewables Outlook: Energy transformation 2050. <https://www.irena.org/publications/2020/Apr/Global-Renewables-Outlook-2020>

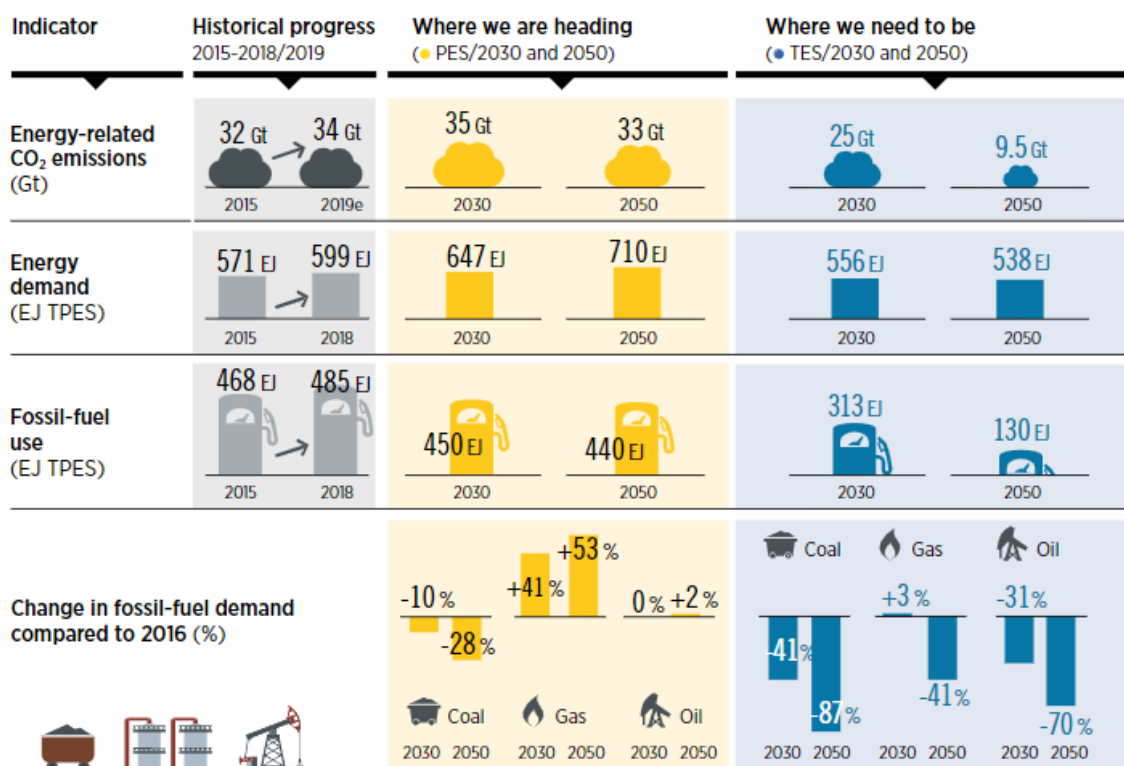


图 1 到 2050 年全球一次能源需求、化石燃料需求以及能源相关碳排放变化

备注：TPES 为一次能源供应总量；PES 为“已规划能源情景”；TES 为“转型能源情景”；Gt 为十亿吨；EJ 为艾焦

二、能源行业已发生可喜变化，可再生能源正主导全球电力增量

1、可再生能源发电增长速度快于总体电力需求。2019 年，可再生能源发电量的增长超过了电力需求的增长，而化石燃料发电量出现下降，这是几十年来在发电总量增加的情况下化石燃料发电量首次出现下降。在许多领域，光伏和风能正日益成为成本最低的电力来源，未来 10 年内大多数可再生能源的成本将具备竞争优势。

2、交通运输的电气化正呈现出加速变革的早期迹象，但建筑和工业部门的可再生能源消费增速较慢。由于太阳能光伏和风能（包括海上风能）的成本快速下降，加上电池、电动汽车等关键技术成本迅速下降，可再生能源制氢也被视为潜在的运输燃料，交通运输部门的转型速度正在加快。但可再生能源在建筑及工业领域的部署仍远远低于实现气候目标所需水平，必须加速提高能效和促进生物燃料发展。

3、到 2050 年，能源相关碳排放平均每年需要下降 3.8%，可再生能源和能效将做出巨大贡献。按照“转型能源情景”，到 2050 年能源相关碳排放将比今天的水平下降 70%，其中一半以上的减排量来自可再生能源（包括发电和终端用能部门），约 1/4 来自能效，加上直接和间接电气化（例如绿色氢能和电动汽车等技术），共可贡献 90% 以上的减排量（图 2）。按照“更深度脱碳情景”，剩余的减排量（其中 2/3 以上来自航空、航运和重工业等具有挑战性的部门），主要依靠增加可再生能源、电气化（直接使用和绿色氢能）、进一步提升能效、采用碳管理以及其他消费习惯

的改变等来完成。在能源领域以外，还需要努力减少非能源使用产生的排放，土地使用、土地利用变化和林业产生的排放以及煤炭、石油和天然气行业中的气体排放。

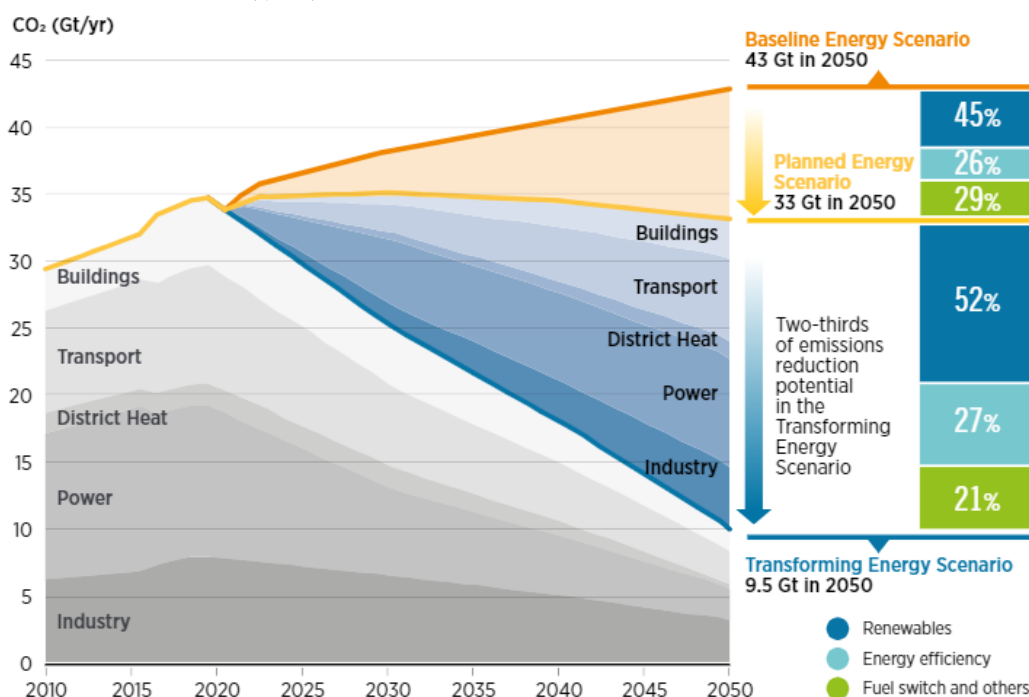


图2 报告各情景到2050年全球能源相关减排情况预测（单位：十亿吨/年）

4、作为降低碳排放的主要解决方案，能效和可再生能源需加速部署。能效和可再生能源是实现全球能源转型的两个关键解决方案。然而，由于能源需求持续增长，2010年以来可再生能源在全球终端能源消费中所占的份额仅在10%左右缓慢增长。2019年能源强度仅增长1.2%，低于过去十年的平均水平（1.8%）。按照“转型能源情景”，可再生能源、能效和电气化将共同贡献90%的能源相关减排量，可再生能源在终端能源消费占比到2030年应增至28%，到2050年需达到66%，而能源强度改善速度需提高到每年3.2%，才能满足全球气候目标（图3）。

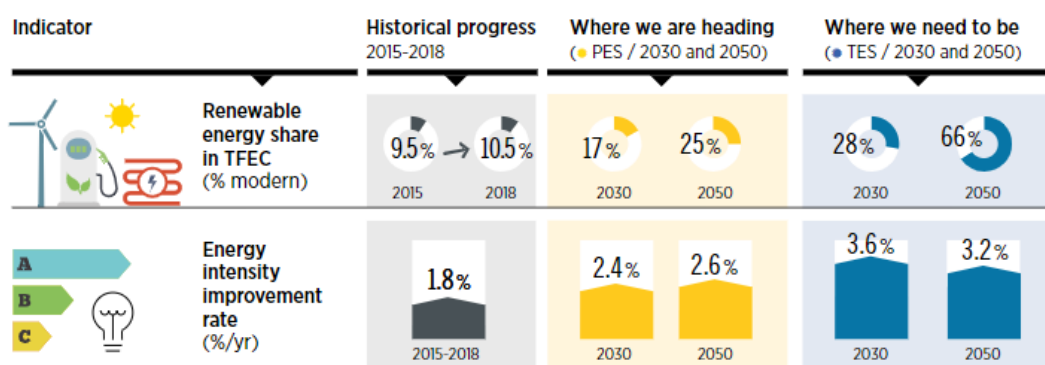


图3 到2050年可再生能源在终端能源消费占比及能源强度提升速度变化

备注：TFEC为终端能源消费总量；PES为“已规划能源情景”；TES为“转型能源情景”

二、为实现气候目标对能源系统的投入将带来多方面的收益

1、为了确保气候安全，需要扩大对清洁能源技术的投资并转变投资方向。需要将化石燃料投资转向可再生能源和能效，逐步取消化石燃料补贴。到 2050 年，“转型能源情景”中能源系统总投资需要达到 110 万亿美元，约占同期年均 GDP 的 2%。其中，超过 80% 的资金应投资可再生能源、能效、终端用能电气化以及电网和灵活性。如果以年度计算，每年的投资水平应达到约 3.2 万亿美元。相比之下，2014-2018 年期间平均每年的投资约为 1.8 万亿美元，而在“已规划能源情景”下未来将达到 2.9 万亿美元/年。如果希望实现“零碳排放”，到 2050 年对能源系统总投资需要达到 130 万亿美元（见图 4）。

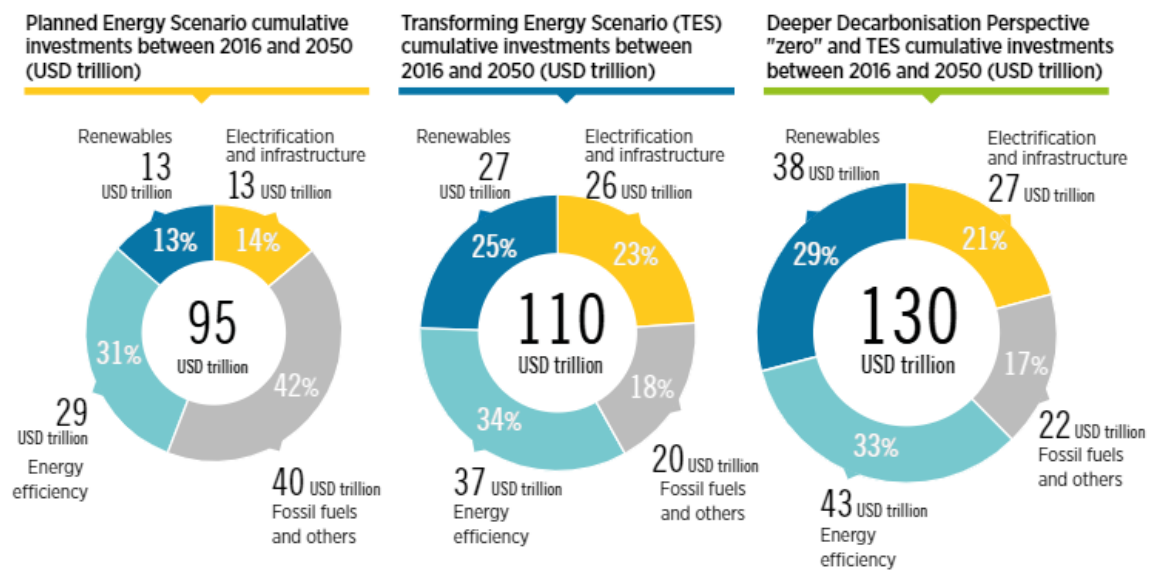


图 4 到 2050 年能源系统总投资情况（单位：万亿美元）

2、加快可再生能源部署和提高能效回报将远大于投入。按照“转型能源情景”，能源转型每花费 1 美元，将获得 3-8 美元的投资回报（图 5）。换言之，到 2050 年“转型能源情景”将增加 19 万亿美元的成本，但通过降低环境和健康损害，将获得 50-142 万亿美元的回报。要实现净零排放，“更深度脱碳情景”将需再增加 16 万亿美元投入，如果实现完全无排放则将增加 26 万亿美元成本，但零碳排放带来的收益将达到 62-169 万亿美元。另一种衡量成本的方法是在此期间减少一吨碳排放的成本。对于“转型能源情景”，该成本为 34 美元/吨，对于“更深度脱碳情景”净零排放，成本为 100 美元/吨，对于“更深度脱碳情景”完全零排放，成本为 156 美元/吨。

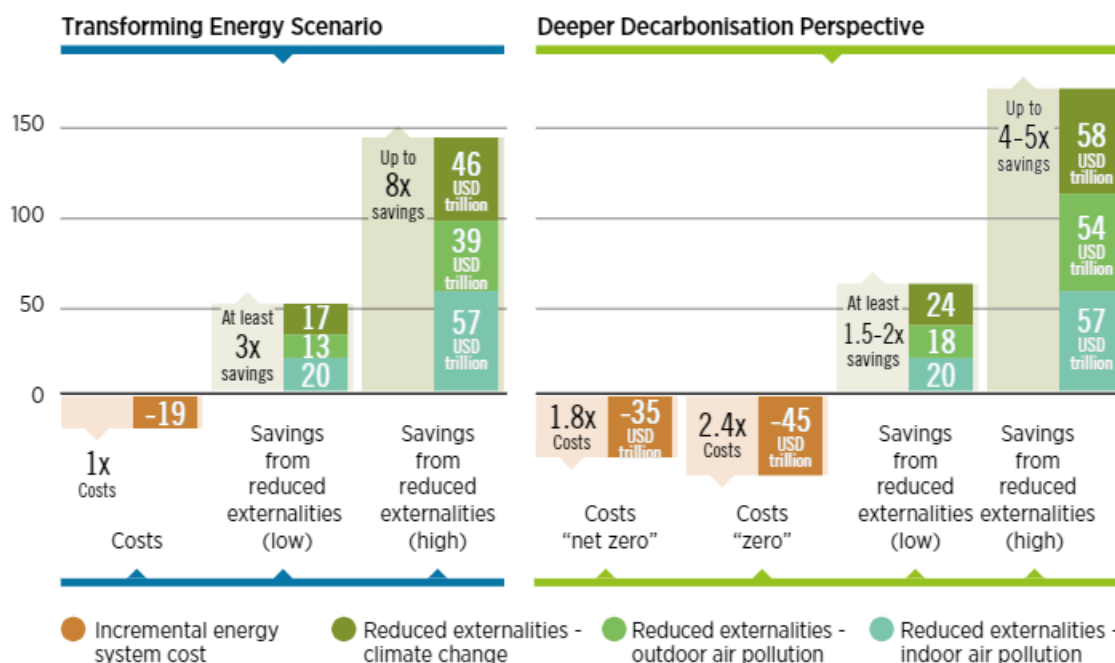


图 5 到 2050 年能源系统脱碳转型的成本及收益（单位：万亿美元）

3、可持续的能源系统转型有望带来全新的社会经济发展模式，提升 GDP 增速并更深入改善民生。到本世纪中叶，GDP 增速将比当前计划提升 2.4%。累计收益将达到 98 万亿美元，远远超出能源系统转型所需的额外投资。能源转型有望带来全新的社会经济发展模式，到 2050 年全球可再生能源就业岗位将增至 4200 万个，是现有岗位的 4 倍，能效相关岗位将达 2100 万个，电网和灵活性相关岗位达到 1450 万个，能源相关工作岗位将达到 1 亿个，比当前就业岗位多 72%。世界各地将感受到环境和健康水平的提升，大众福祉得到广泛改善，福祉指数将提高 13.5%。

三、实现能源系统转型的五大技术途径

1、电气化

(1) 电力将成为未来能源系统的核心能源载体。尽管可再生能源补贴不断减少，全球 GDP 增速不断放缓，但可再生能源发电技术成本下降和新增装机容量正在刷新纪录。在能源转型的情况下，到 2050 年，电力将成为核心的能源载体，在终端能源消费占比从 20% 增长到接近 50%，全球总用电量将增加一倍以上。

(2) 电力在终端能源消费占比增速将增长四倍，从每年增长 0.25 个百分点增至 1 个百分点。在现有计划的基础上，每年还要增加 1000 TWh 的电力需求，用于终端用能的电气化。为满足这一额外的可再生能源电力需求，每年需新建超过 520 GW 的可再生能源发电容量。到 2030 年，可再生能源发电占比需从目前的 26% 上升到 57%，到 2050 年则将上升至 86%。可再生能源成本下降将加速这一增长，2020 年投产的太阳能光伏和风能项目中 4/5 的机组发电成本将低于所有化石燃料发电。

(3) 终端用能部门电气化将推动可再生能源电力需求增长。在交通领域，电动

汽车的数量将从 2019 年的约 800 万辆增至 2050 年的 11 亿辆以上。在供暖领域，热泵效率提升是传统供暖系统的 2-4 倍，到 2050 年，热泵安装数量将增加 10 倍，向此类高效电气化技术的转变也会带来能效的提升。

2、提升电力系统灵活性

(1) 电力系统的灵活性是集成高比例波动性可再生能源电力的关键因素。气候友好型能源系统是分布式、数字化和电气化。目前，一些国家对波动性可再生能源的并网比例超过 30%，这意味着波动性可再生能源的瞬时渗透率可能接近甚至超过电力需求，造成的电力过剩为进一步电气化提供了新的机遇。在“转型能源情景”中，73%的装机容量和超过 60%的发电将来自波动性可再生能源（光伏和风能），而目前这一比例仅为 10%。

(2) 电力系统必须在技术创新、商业模式、市场设计和系统运行等方面实现最大的灵活性。在技术层面上，长期和短期储能对于增加灵活性都很重要，固定式储能（不包括电动汽车）的容量需要从现在的 30 GWh 增加到 2050 年的 9000 GWh。如果将电动汽车用于电网储能计算在内，则将增加 14000 GWh 至 23000 GWh。然而，大部分灵活性仍将通过其它方案来实现，包括电网扩张和运行措施、需求侧灵活性和部门耦合。智能解决方案如电动汽车智能充电可通过利用储能容量和需求侧的灵活性潜力，极大地促进波动性可再生能源并网。到 2050 年，“转型能源情景”下对终端用能电气化、电网和灵活性的投资将达到 26 万亿美元。

3、传统可再生能源

水电、生物能源、光热和地热等可再生能源都有着显著的开发潜力，其在“转型能源情景”中的减排贡献达到 1/4 以上，其中尤其重要的技术是水电和生物能源。

(1) 水电可以为未来的能源系统提供重要的协同作用。在“转型能源情景”下，到 2030 年水电装机容量将需增加 25%，到 2050 年需增加 60%，而抽水蓄能容量则需增加一倍，即未来 30 年共需新增水电装机容量达到 800 GW，相当于 2020 年欧盟电力系统总容量。水力发电和其他可再生能源技术在电力系统运行方面的协同作用包括通过水力发电减轻风能和太阳能发电的短期波动性成本，以及实现资源的季节性互补。多用途水电基础设施还可以提供诸如调节河流流量和减少洪水等功能。增加水电容量包括新建机组、升级现有电厂的涡轮机和系统，以及通过对非发电水坝进行改造。对于新建水电站需考虑当地的环境影响以探讨可行性。还需根据电力系统实际需求对水电机组进行调整，包括更快、更频繁地爬坡，以及评估气候变化对供水和水库蓄水需求的影响等。

(2) 生物能源在终端用能领域将变得越来越重要。目前，生物能源在可再生能源的使用中占很大比例，并将继续成为工业发电和供热以及交通运输的重要燃料来源。在“已规划能源情景”下，到 2050 年现代生物能源（不包括生物燃料的传统用

途)在一次能源供应占比将从目前的 5%增加到 10%。在“转型能源情景”中,生物能源在难以电气化的领域,如航运、航空和工业领域中将发挥重要作用,既可用于供热,又可作为原料,到 2050 年其在一次能源供应中占比将增至 23%。与此同时,占生物能源需求很大一部分的传统生物能源将逐步被淘汰。

4、绿色氢能

(1) **氢能可以为难以直接通电的能源需求提供解决方案。**目前,每年大约生产 120 Mt (14 EJ) 的氢气,几乎所有都来自化石燃料或由化石燃料发电,仅有不到 1% 的“绿色”氢能。绿色制氢技术正取得进展,2020 年全球最大(10 MW)的绿色制氢工厂将在日本投产。绿色制氢主要通过可再生能源电力电解水生产,其成本正在迅速下降。在未来几年内,绿色氢气将在低成本可再生能源电力的地区具备蓝色氢气(由配备碳捕集与封存系统的化石燃料制氢技术生产)的成本竞争力。随着成本的进一步下降,在未来 5-15 年内,许多地区的绿色氢气成本将低于蓝色氢气。某些能源密集型产业未来可能会迁移到可再生能源资源丰富的地区,以开发绿色氢气的应用潜力,如用于炼钢和氨生产。第一家利用绿色氢制氨的工厂预计将于 2020 年投产。

(2) **绿色氢可以进一步加工成碳氢化合物或氨,以减少航运和航空排放。**天然气行业也将氢视为天然气系统低碳化和延长现有基础设施寿命的潜在解决方案。氢的商品属性开发尚处于萌芽阶段,但它可能成为清洁能源的载体,增加对丰富、遥远、成本低廉的可再生能源资源的利用,这一发展可能产生重要的地缘政治影响,并进一步加速对可再生能源发电的需求。到 2050 年,在“转型能源情景”下,每年将生产 160 Mt (19 EJ) 的绿色氢,但这仅能满足当今全球能源需求的 5%,每年还将生产 80 Mt (10 EJ) 蓝色氢。要达到这一产量,必须大幅扩大电解槽规模,从现在起到 2050 年,每年需新增 50-60 GW 的容量。

5、通过创新应对行业挑战

(1) **“更深度脱碳情景”提出在“转型能源情景”基础上进一步脱碳的挑战。**在“转型能源情景”下,到 2050 年电力将满足一半的能源需求,剩下一半中 1/3 由终端用能的可再生能源提供,其余 2/3 由化石燃料提供。进一步减少化石燃料使用的解决方案包括增加可再生能源(生物能源、光热、地热)的直接使用,提高能效,以及深度电气化等。从长远来看,“转型能源情景”下 2050 年剩余碳排放中有 3/4 来自航运、航空和重工业等行业,因此仍需应对此类行业的减排挑战。在这些具有挑战性的行业,生物燃料、合成燃料、新材料和循环经济的技术进步都极为重要。在中国等许多国家和地区,工业是占主导地位的能源消费领域,占终端能源消耗约一半。因此,迫切需要通过创新为钢铁、水泥和石化等关键行业找到工业过程和非能源使用的零碳排放解决方案。此外,创新对于解决航空和海运等难以电气化的运

输方式仍至关重要。

“更深度脱碳情景”提供了零碳排放的实现情景。在“转型能源情景”基础上，可再生能源、绿色氢和基于可再生能源的电气化贡献了剩余减排量的 60%，还有 37% 来自能效和用能行为变化，其余 3% 来自碳捕集、利用与封存（CCUS）和核能。与“已规划情景”相比，若要将能源和工业过程相关的碳排放完全消除，各类技术所做出的贡献将为：可再生能源占 43%、能效占 26%、电动汽车占 12%、绿色氢占 9%、蓝色氢和 CCS 占 7%、用能行为变化占 2%、核能在 1% 以下（电动汽车和用能行为变化也可以被视为能效的一部分，或者电动汽车使用可再生能源电力也可归为可再生能源）。

（李岚春 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