中国科学院A类战略性先导科技专项

变革性洁净能源关键技术与示范

Transformational Technologies
for Clean Energy and Demonstration

研究发展动态

2021年第3期（总第13期）

中国科学院大连化学物理研究所
中国科学院武汉文献情报中心

目录

2021 年第 3 期(总第 13 期)
2021 年 10 月 25 日出版

专项研发进展 3

介尺度方法在能源战略研究领域的应用取得新进展..... 3

臭氧催化剂成功应用于万吨级工业园区污水厂提标改造项目.... 4

100 万吨钢/年规模的转炉全干法节能新技术的工业示范装置实现长周期稳定运行 4

多端口电能路由器和多类型混合储能变流器示范现场工程样机完成第三方测试 5

雄安新区 4150m 重力热管地热开发示范工程初步建成..... 6

新一代全钒液流电池项目在河南开封开工建设..... 7

国际首套 100MW 先进压缩空气储能示范项目定子吊装成功..... 8

国际首套盐穴先进压缩空气储能国家示范电站正式并网发电.... 9

200kW 高温电解制氢装置启动建设 10

固体氧化物电解池制氢技术签订千瓦级系统研制及应用研究合同 10

10MWth 氦气轮机发电系统启动整机测试 11

100kWe 热声发电机关键组件完成研制 11

兆瓦级质子交换膜水电解制氢系统成功运行..... 12

专项过程管理 13

工程热物理所陈海生研究员获第三届科学探索奖..... 13

专项办人员深入部分任务示范现场进行调研..... 14

熔盐储能与氦气轮机发电子课题完成任务考核指标调整方案专家

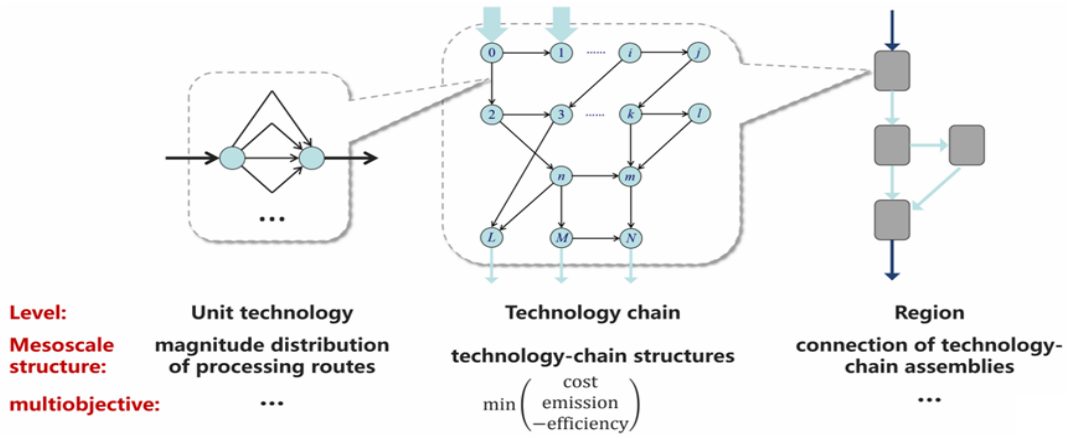
论证 15
国内视点 16
《中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》能源要点 16
国家发改委发布《完善能源消费强度和总量双控制度方案》... 21
李克强主持国家能源委会议 部署能源改革发展工作..... 24
国家发改委《“十四五”循环经济发展规划》能源要点..... 26
复旦：可工业制造高效纤维锂电池实现超 10 万次弯曲折叠.... 28
液相介质退火工艺创造大面积钙钛矿太阳电池效率记录..... 30
自成型沸石分子筛吸附碳捕集获重大突破 32
国际瞭望 34
IEA 发布中国能源体系碳中和路线图..... 34
DOE 发布太阳能未来研究推进零碳电网构建..... 46
英国发布国家氢能战略绘制 2030 氢经济路线图..... 52
欧盟“地平线欧洲”框架计划公布 2021-2022 年能源资助主题. 54
日本 NEDO 资助大规模示范项目打造氢能产业供应链..... 62
新钝化工艺助力倒置结构钙钛矿电池创下 22.9%效率纪录 64
阳极氧化钛催化剂实现 CO_2 高效串联电还原制甲醇 66
Co-N-C 单原子催化剂增强 PEM 燃料电池性能和稳定性 68

专项研发进展

介尺度方法在能源战略研究领域的应用取得新进展

过程工程所黄文来副研究员与上海高研院吕正副研究员合作，采用电力部门的基本模型，以及能源供给（生产和加工、进口、出口）、发电、供热等环节的数据，结合自主开发的求解器和输入、输出界面，开展程序编写，形成了自主软件。

该软件提出了建立单元技术层次、技术链层次、区域及以上层次相互关联的介尺度能源模型的基本路径。通过单元技术层次的多目标优化，可梳理、整合能源技术参数；通过技术链层次的多目标优化，可获得多能融合、能源技术的最佳组合结构；通过区域及以上层次的多目标优化，可描绘重点行业、关键领域及其在具体区域的优化发展路径，为碳达峰、碳中和目标的如期实现提供支持。目前软件编制工作基本完成，后续将扩展到更多部门。



多层次关联的介尺度能源模型

［中国科学院过程工程研究所 黄文来］

臭氧催化剂成功应用于万吨级工业园区污水厂提标改造项目

2021 年 8 月，由大连化物所孙承林团队研发的活性炭基臭氧催化剂成功应用于唐山海港开发区东部污水处理厂，首次在工业园区废水提标改造工程中实现大规模应用，污水日处理量 24000 m^3/d，出水 COD 指标达到执行地表水Ⅳ类标准。

研究团队解决了催化剂使用过程中因吸附有机物饱和而失活和在臭氧系统中粉化流失的问题，可有效处理污水中的难降解有机物。自通水以来，催化剂一直保持高活性，臭氧催化单元 COD 去除率大于 60%，连续运行至今，活性无衰减，全厂出水 COD 稳定在 25 mg/L 左右，优于地表水Ⅳ类标准（COD＜30 mg/L），回用水水质要求达到城市杂用水水质标准（GB/T 189020-2002）中城市绿化用水指标。

[中国科学院大连化学物理研究所　卫皇曌]

100 万吨钢/年规模的转炉全干法节能新技术的工业示范装置实现长周期稳定运行

2021 年 8 月，力学所魏小林团队自主开发的转炉煤气全干法节能新技术在包钢 100 万吨钢/年工业装置上完成了 168 小时稳定运行，烟气处理量 5 万标准立方米/小时。该技术取消了传统的高温煤气喷水或喷雾降温工艺，集成了紧凑高效间歇性热源余热换热技术、高效

除尘与清灰技术、先进可靠防爆技术以及大容量高精度蒸汽蓄热稳流技术等，吨钢增加蒸汽产量达 60 公斤，减少了转炉灰再利用环节（烧结工艺）的水分蒸发带来的能源消耗，转炉煤气显热回收的综合效益实现最大化。

钢铁行业年耗煤 6.2 亿吨，属于高能耗高排放行业，我国 80%以上的钢产量通过转炉冶炼。转炉炼钢过程产生大量具有余热、余能的高温煤气，但由于转炉煤气具有间歇性、波动性、多尘性、爆炸性等特点，严重制约了显热回收技术的发展和节能减排改造方案的升级，是国内亟待发展的新型节能技术。

该技术的成功示范为钢铁行业探索出一条新的“负能炼钢”方向，在碳中和、碳减排的大行业环境下，为我国炼钢转炉煤气全干法显热回收的技术的进步做了有益探索，社会和经济效益显著。

［中国科学院力学研究所　魏小林］

多端口电能路由器和多类型混合储能变流器示范现场工程样机完成第三方测试

多端口电能路由器和多类型混合储能变流器示范现场工程样机完成第三方测试。测试结果表明，多端口电能路由器额定功率达到 1MW，额定工况下效率达到 97.67%；多类型混合储能变流器额定功

率达到 1MW，额定工况下效率超过 97%，达到国际领先水平。

多端口电能路由器能够实现多种电能形式变换和高效调配，大幅度提高电力系统的灵活性和可控性，多类型混合储能变流器能够显著提高储能系统电能利用效率，是未来发展以可再生能源为主的新型电力系统不可或缺的关键技术，也是助力“双碳”目标实现的核心装备。

[中国科学院电工研究所 赵聪]

雄安新区 4150m 重力热管地热开发示范工程初步建成

以干热岩为主体的深部地热资源具有资源量大、分布广等特点，是未来地热能的重要发展方向。

广州能源所先进能源系统研究室创新性提出了单井超长重力热管地热开采技术。该技术很好地解决了热储工程难度大、管道/设备腐蚀结垢、运维成本高等技术难题。2021 年，该团队联合中国地质科学院水文地质环境地质研究所在雄安新区开展示范工程建设。热管长度 4150 m，工质选用较水更适宜的氨工质。目前已经初步完成示范工程建设，试采热结果显示：在地层平均温度为 83℃ 的地热条件下，地面可获得温度最高达 78℃ 的饱和氨蒸汽，持续采热功率预计可达 800 kW。超长重力热管地热系统的性能接近商业应用要求。

[中国科学院广州能源所 蒋方明]

新一代全钒液流电池项目在河南开封开工建设

近日，在洁净能源先导专项支持下由大连化物所技术许可、开封国投公司和开封平煤新型炭材料科技有限公司等联合成立的开封时代新能源科技有限公司投资的新一代全钒液流电池项目在河南开封储能新材料产业园开工建设。

该项目计划分四期建设，总投资预算 30 亿元，计划 2021 年底完成一期 300MW 电堆生产线建设；“十四五”末完成三期建设，实现 1GW 电堆系统及全部配套产业的产能扩展，产值约 200 亿元/年；2035 年实现 3GW 产能，产值约 600 亿元/年。

该项目旨在实现新一代全钒液流电池技术的产业化，为可再生能源为主的新型电力系统提供储能保障，推动开封碳达峰、碳中和工作争创全国试点，加快科技成果转化并释放辐射效应，实现政治效益、经济效益、社会效益等多重效益，为贯彻落实国家双碳重大战略作出新的贡献；该项目还将推动开封市“制造立市”战略落地见效，极大促进开封市工业经济尤其是制造业的发展。

开工建设外景

[中国科学院大连化学物理研究所　刘涛]

国际首套 100MW 先进压缩空气储能示范项目定子吊装成功

9 月 8 日，工程热物理所自主研发的国际首套 100MW 先进压缩空气储能示范项目取得重大进展，系统主要核心设备发电机定子顺利吊装成功。

压缩空气储能具有规模大、成本低、效率高、环境友好等优点，是最具发展潜力的大规模储能技术之一。工程热物理所通过十余年的努力，建立了具有完全自主知识产权的研发体系，并在国际上率先开展了 100MW 级先进压缩空气储能系统研发工作。

发电机是压缩空气储能系统关键核心部件，是储能系统与电网的电力耦合接口，向外输出电能的过程中起到至关重要的作用，定子为发电机的重要组成部分，重量约为 120 吨，功率为 100MW。

该项目将建成国际首套 100MW 先进压缩空气储能示范电站，建设规模为 100MW/400MWh，系统设计效率 70.4%，建设地为河北省张家口市张北县庙滩云计算产业园，投资者为张北巨人能源有限公司（巨人集团），中储国能（北京）技术有限公司提供全套设备。

[中国科学院工程热物理研究所 纪律、赵钢炜]

国际首套盐穴先进压缩空气储能国家示范电站正式并网发电

9 月 23 日，山东肥城盐穴先进压缩空气储能调峰电站取得重大进展，一期 10MW 示范电站顺利通过发电并网验收，并正式并网发电，这标志着国际首个盐穴先进压缩空气储能电站已进入正式商业运行状态。

肥城盐穴压缩空气储能电站技术由工程热物理所研发，该技术具有规模大、成本低、寿命长、环境友好等优点，是最具发展潜力的大规模储能技术之一。该项目利用肥城地下丰富的盐穴资源，在电网负荷低谷时通过压缩机将空气压缩并通入盐穴腔体储存，电网负荷高峰时将高压空气释放驱动膨胀机做功并带动发电机发电，可实现电力系统调峰、调相、旋转备用、应急响应、黑启动等功能。该项目正式并网发电，是我国盐穴压缩空气储能领域的重要里程碑，推动了我国压缩空气储能技术迈向新的台阶，具有划时代意义。

[中国科学院工程热物理研究所 赵钢炜]

200kW 高温电解制氢装置启动建设

上海应物所 200kW 高温电解制氢项目在甘肃省武威市民勤县正式开工建设。200kW 高温电解制氢系统是由上海应用物理研究所自行设计研制的固体氧化物电解制氢装置，通过电解高温水蒸气来提高电解效率制取高纯氢气，可充分利用核能与超高温熔盐储能系统的余热，配合风光电峰谷调节，实现零碳制氢。目前施工图设计已基本完成，部分设备已运抵现场，正在进行基础和辅助工艺施工。

[中国科学院上海应用物理研究所　张焕琦]

固体氧化物电解池制氢技术签订千瓦级系统研制及应用研究合同

上海应物所与中国南方电网广东电网有限责任公司签订“千瓦级固体氧化物电解池制氢系统研制及应用研究”项目合同。该项目计划研制国内首套可逆固体氧化物电池（RSOC）系统，在固体氧化物电解池（SOEC）模式下的输入功率不低于 100kW，在固体氧化物燃料电池（SOFC）模式下的发电功率不低于 35kW。该系统研制完成后将成为国内首套百千瓦级基于 RSOC 技术的高效氢储能装置，相关指标也达到国际领先水平。目前，项目组已完成了系统方案的初步设计，正在加快推进相关工作。

RSOC 技术可以实现清洁的电力生产和高效的能量存储一体化，

并具有成本低、容量大、储能时间长等特点。大容量的 RSOC 系统既能接入电网实现“削峰填谷”，又能与太阳能、风能等间歇性的可再生能源耦合联用，大幅度提升能源利用效率，构建高效、灵活的分布式发电系统或热电联供系统，为国家构建清洁低碳安全高效的能源体系并加快实现“双碳”目标提供科技支撑。

[中国科学院上海应用物理研究所　张焕琦]

10MWth 氦气轮机发电系统启动整机测试

上海高研院与中国核电工程有限公司签署了“四代反应堆先进热电转换装置联合实验室”共建协议，利用中国核电工程有限公司廊坊试验基地，开展 10MWth 氦气轮机发电系统整机性能测试，并在此基础上开展进一步合作。目前，已完成 10MWth 氦气轮机发电系统电气设备方案设计，进入实际招标阶段，完成 10MWth 氦气轮机发电系统热阱系统、充放气系统的工程方案设计。

[中国科学院上海高等研究院　张靖煊]

100kWe 热声发电机关键组件完成研制

100kWe 热声发电机关键组件的加工研制，目前已经完成了换热器、独立气泵、活塞气缸、调相器、内外定子、电机承压壳体等的研制，并对直线电机部分进行了集成测试，性能提升非常明显。下一步

将继续加快 100kWe 热声发电机的整机集成测试。

[中国科学院理化技术研究所　胡剑英]

兆瓦级质子交换膜水电解制氢系统成功运行

9 月 29 日，大连化物所邵志刚团队研制的兆瓦级质子交换膜（PEM）水电解制氢系统，在国网安徽公司氢综合利用站实现满功率运行。经专家现场测试，该系统额定产氢 220Nm^3/h，峰值产氢达到 275Nm^3/h。

PEM 水电解技术具有能耗低、电流密度大、产气压力高、设备占地面积小、抗波动性强等技术优势，是国际上可再生能源绿色制氢技术的重要发展方向。大连化物所自上世纪九十年代开展 PEM 水电解技术的研发，逐步形成了 PEM 水电解制氢自主知识产权体系。近年来，在 PEM 制氢的高通量膜电极、薄层金属双极板、耐压电解槽等方面不断取得技术突破，开发了数代 PEM 制氢电解槽及系统，并通过普通技术许可等方式推进成果转化和应用。

兆瓦级 PEM 水电解制氢系统的成功运行，标志着我所承担的国家电网安徽公司氢综合利用站科技示范项目取得阶段性成果。该兆瓦级制氢系统与正在建设的兆瓦级燃料电池发电系统，为大规模绿色氢能综合利用新模式的示范奠定了技术基础。

[中国科学院大连化学物理研究所 袁秀忠]

专项过程管理

工程热物理所陈海生研究员获第三届科学探索奖

9 月 13 日，第三届“科学探索奖”获奖名单正式揭晓，50 位青年精英科学家上榜，工程热物理所陈海生研究员荣获该奖励。

“科学探索奖”是由腾讯基金会出资支持、科学家主导的公益性奖项，是目前国内金额最高的青年科技人才资助计划之一。“科学探索奖”面向基础科学和前沿技术领域，奖励在中国内地及港澳地区全职工作的、45 周岁及以下的青年科技工作者，奖项每年遴选不超过 50 位获奖人。在今年奖项的提名、推荐、评审过程中，有超过 800 位各国院士及 20 多所著名高校校长参与其中。仅在提名推荐阶段，就有 20 多位诺贝尔奖、图灵奖、菲尔兹奖等国际大奖得主参与。

陈海生研究员自 2005 年率先开展压缩空气储能技术研发，原创性地提出了先进压缩空气储能技术新原理。17 年来，陈海生研究员专注于压缩空气储能技术研究，主持了国家杰青、国家 863、中国科学院战略性先导专项等项目 30 余项，建立了集基础理论、关键技术和系统集成为一体的研发体系，建成了我国物理储能领域首个国家级研发中心，带领团队取得了一系列具有国际水平的原创性成果，先后建成国际首套 1.5MW 和 10MW 先进压缩空气储能国家示范项目，攻克了 100MW 先进压缩空气储能关键技术。

[中国科学院工程热物理研究所　赵钢炜]

专项办人员深入部分任务示范现场进行调研

为了更好地掌握任务示范推进情况，确保专项总任务目标的顺利实施，根据专项总体工作安排，洁净能源先导专项总体组办公室人员于 2021 年 7 月-9 月参加了 3 个任务的现场调研。

- 7 月 26 日-28 日 内蒙古鄂尔多斯大路工业园区调研煤炭清洁高效分级转化利用技术及工业示范
- 9 月 22 日 河北省张家口调研黄帝城小镇 100%可再生能源示范
- 10 月 13 日 吉林禾木之家科技发展有限公司调研生物质乙醇联产热电高效综合利用技术及工业示范

通过调研，了解到由于受市场经济、企业资金、双碳政策的影响，部分任务进度有所滞后，监理组以及专项办人员从技术角度和管理角度给出一些合理的建议，团队人员也表态积极的寻找解决办法。专项监理部及监理组专家、项目负责人、项目承担单位科研管理骨干等参加了相关调研。

[洁净能源先导专项总体组办公室 赵晓红]

熔盐储能与氦气轮机发电子课题完成任务考核指标调整方案专家论证

7 月 3 日，核能非电综合利用项目组织专家对超高温熔盐蓄热储能子课题和氦气轮机发电系统关键技术研究子课题提出的考核指标调整方案进行论证。来自上海应物所、工程热物理所、上海高研院和专项监理组的专家对子课题提出的方案合理性和可行性进行论证，认为子课题所采用的超高温熔盐蓄热储能技术难度大，国内外没有成熟产品，主要设备均为自研首台套，经济性不佳；自研的高温氦气轮机为国内首台套，热电转换效率还有提升空间，示范经济性较差。目前在示范投入方面遇到困难，应对项目方案进行优化调整。项目和课题组同时表示，会根据专家意见继续优化方案，会同示范项目投资商加快推进项目落地。

[中国科学院上海应用物理研究所 张焕琦]

国内视点

《中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》能源要点

9 月 22 日，中共中央 国务院正式发布《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》（以下简称“意见”），明确了我国做好碳达峰、碳中和工作的重要意见。文件强调“以能源绿色低碳发展为关键”，并提出“全国统筹、节约优先、双轮驱动、内外畅通、防范风险”的工作原则，要求加快构建清洁低碳安全高效能源体系。

“意见”提出了我国碳达峰、碳中和工作的分阶段主要目标：

到 2025 年，绿色低碳循环发展的经济体系初步形成，重点行业能源利用效率大幅提升。单位国内生产总值能耗比 2020 年下降 13.5%；单位国内生产总值二氧化碳排放比 2020 年下降 18%；非化石能源消费比重达到 20%左右；森林覆盖率达到 24.1%，森林蓄积量达到 180 亿立方米，为实现碳达峰、碳中和奠定坚实基础。

到 2030 年，经济社会发展全面绿色转型取得显著成效，重点耗能行业能源利用效率达到国际先进水平。单位国内生产总值能耗大幅下降；单位国内生产总值二氧化碳排放比 2005 年下降 65%以上；非化石能源消费比重达到 25%左右，风电、太阳能发电总装机客量达到 12 亿千瓦以上；森林覆盖率达到 25%左右，森林蓄积量达到 190 亿立方米，二氧化碳排放量达到峰值并实现稳中有降。

到 2060 年，绿色低碳循环发展的经济体系和清洁低碳安全高效的能源体系全面建立，能源利用效率达到国际先进水平，非化石能源消费比重达到 80%以上，碳中和目标顺利实现，生态文明建设取得丰硕成果，开创人与自然和谐共生新境界。

“意见”提出深度调整产业结构、加快构建清洁低碳安全高效能源体系、加快推进低碳交通运输体系建设、提升城乡建设绿色低碳发展质量、加强绿色低碳重大科技攻关和推广应用等多方面举措，能源及其在化工、交通、建筑等行业的使用相关内容如下：

四、深度调整产业结构

“推动产业结构优化升级”方面，提出制定能源、钢铁、有色金属、石化化工、建材、交通、建筑等行业和领域碳达峰实施方案。

“坚决遏制高耗能高排放项目盲目发展”方面，提出出台煤电、石化、煤化工等产能控制政策；未纳入国家有关领域产业规划的，一律不得新建改扩建炼油和新建乙烯、对二甲苯、煤制烯烃项目；合理控制煤制油气产能规模。

“大力发展绿色低碳产业”方面，提出加快发展新一代信息技术、生物技术、新能源、新材料、高端装备、新能源汽车、绿色环保以及航空航天、海洋装备等战略性新兴产业；推动互联网、大数据、人工智能、第五代移动通信（5G）等新兴技术与绿色低碳产业深度融合。

五、加快构建清洁低碳安全高效能源体系

该部分专门针对能源领域提出了具体举措，包括：

强化能源消费强度和总量双控。坚持节能优先的能源发展战略，严格控制能耗和二氧化碳排放强度，合理控制能源消费总量，统筹建立二氧化碳排放总量控制制度。做好产业布局、结构调整、节能审查与能耗双拉的衔接，对能耗强度下降目标完成形势严峻的地区实行项目缓批限批、能耗等量或减量替代。强化节能监察和执法，加强能耗及二氧化碳排放控制目标分析预警，严格责任落实和评价考核。加强甲烷等非二氧化碳温室气体管控。

大幅提升能源利用效率。把节能贯穿于经济社会发展全过程和各领域，持续深化工业、建筑、交通运输、公共机构等重点领域节能，提升数据中心、新型通信等信息化基础设施能效水平。健全能源管理

体系，强化重点用能单位节能管理和目标责任。瞄准国际先进水平，加快实施节能降碳改造升级，打造能效“领跑者”。

严格控制化石能源消费。加快煤炭减量步伐，“十四五”时期严控煤炭消费增长，“十五五”时期逐步减少。石油消费“十五五”时期进入峰值平台期。统筹煤电发展和保供调峰，严控煤电装机规模，加快现役煤电机组节能升级和灵活性改造。逐步减少直至禁止煤炭散烧。加快推进页岩气、煤层气、致密油气等非常规油气资源规模化开发。强化风险管控，确保能源安全稳定供应和平稳过渡。

积极发展非化石能源。实施可再生能源替代行动，大力发展风能、太阳能、生物质能、海洋能、地热能等，不断提高非化石能源消费比重。坚持集中式与分布式并举，优先推动风能、太阳能就地就近开发利用。因地制宜开发水能。积极安全有序发展核电。合理利用生物质能。加快推进抽水蓄能和新型储能规模化应用。统筹推进氢能“制储输用一全链条发展。构建以新能源为主体的新型电力系统，提高电网对高比例可再生能源的消纳和调控能力。

深化能源体制机制改革。全面推进电力市场化改革，加快培育发展配售电环节独立市场主体，完善中长期市场、现货市场和辅助服务市场衔接机制，扩大市场化交易规模。推进电网体制改革，明确以消纳可再生能源为主的增量配电网、微电网和分布武电源的市场主体地位。加快形成以储能和调峰能力为基础支撑的新增电力装机发展机制。完善电力等能源品种价格市场化形成机制。从有利于节能的角度深化电价改革，理顺输配电价结构，全面放开竞争性环节电价。推进煤炭、油气等市场化改革，加快完善能源统一市场。

六、加快推进低碳交通运输体系建设

“优化交通运输结构”方面，提出持续降低运输能耗和二氧化碳排放强度；加快发展绿色物流，整合运输资源，提高利用效率。

“推广节能低碳型交通工具”方面，提出加快发展新能源和清洁

能源车船，推广智能交通，推进铁路电气化改造，推动加氢站建设，促进船舶靠港使用岸电常态化；加快构建便利高效、适度超前的充换电网络体系。

七、提升城乡建设绿色低碳发展质量

“大力发展节能低碳建筑”方面，提出持续提高新建建筑节能标准，加快推进超低能耗、近零能耗、低碳建筑规模化发展；大力推进城镇既有建筑和市政基础设施节能改造，提升建筑节能低碳水平。

“加快优化建筑用能结构”方面，提出深化可再生能源建筑应用，加快推动建筑用能电气化和低碳化；开展建筑屋顶光伏行动，大幅提高建筑采暖、生活热水、炊事等电气化普及率；在北方城镇加快推进热电联产集中供暖，加快工业余热供暖规模化发展，积极稳妥推进核电余热供暖，因地制宜推进热泵、燃气、生物质能、地热能等清洁低碳供暖。

八、加强绿色低碳重大科技攻关和推广应用

“强化基础研究和前沿技术布局”方面，提出制定科技支撑碳达峰、碳中和行动方案，编制碳中和技术发展路线图；开展低碳零碳负碳和储能新材料、新技术、新装备攻关；推进高效率太阳能电池、可再生能源制氢、可控核聚变、零碳工业流程再造等低碳前沿技术攻关；培育一批节能降碳和新能源技术产品研发国家重点实验室、国家技术创新中心、重大科技创新平台。

“加快先进适用技术研发和推广”方面，提出深入研究支撑风电、太阳能发电大规模友好并网的智能电网技术；加强电化学、压缩空气等新型储能技术攻关、示范和产业化应用；加强氢能生产、储存、应用关键技术研发、示范和规模化应用；推广园区能源梯级利用等节能低碳技术；推进规模化碳捕集利用与封存技术研发、示范和产业化应用。

十、提高对外开放绿色低碳发展水平

“加快建立绿色贸易体系”方面，提出大力发展高质量、高技术、高附加值绿色产品贸易；严格管理高耗能高排放产品出口；积极扩大绿色低碳产品、节能环保服务、环境服务等进口。

“推进绿色“一带一路”建设方面，提出支持共建“一带一路”国家开展清洁能源开发利用；深化与各国在绿色技术、绿色装备、绿色服务、绿色基础设施建设等方面的交流与合作，积极推动我国新能源等绿色低碳技术和产品走出去，让绿色成为共建“一带一路”的底色。

十一、健全法律法规标准和统计监测体系

“健全法律法规”方面，提出全面清理现行法律法规中与碳达峰、碳中和工作不相适应的内容，加强法律法规间的衔接协调；研究制定碳中和专项法律，抓紧修订节约能源法、电力法、煤炭法、可再生能源法、循环经济促进法等，增强相关法律法规的针对性和有效性。

“提升统计监测能力”方面，提出健全电力、钢铁、建筑等行业领域能耗统计监测和计量体系，加强重点用能单位能耗在线监测系统建设。加强二氧化碳排放统计核算能力建设，提升信息化实测水平。

十二、完善政策机制

“完善投资政策”方面，提出严控煤电、钢铁、电解铝、水泥、石化等高碳项目投资，加大对节能环保、新能源、低碳交通运输装备和组织方式、碳捕集利用与封存等项目的支持力度。

“积极发展绿色金融”方面，提出引导银行等金融机构为绿色低碳项目提供长期限、低成本资金；鼓励开发性政策性金融机构按照市场化法治化原则为实现碳达峰、碳中和提供长期稳定融资支持；支持符合条件的企业上市融资和再融资用于绿色低碳项目建设运营，扩大绿色债券规模；研究设立国家低碳转型基金；鼓励社会资本设立绿色低碳产业投资基金；建立健全绿色金融标准体系。

“完善财税价格政策”方面，提出各级财政要加大对绿色低碳产

业发展、技术研发等的支持力度；完善政府绿色采购标准，加大绿色低碳产品采购力度；落实环境保护、节能节水、新能源和清洁能源车船税收优惠；研究碳减排相关税收政策；建立健全促进可再生能源规模化发展的价格机制；完善差别化电价、分时电价和居民阶梯电价政策；严禁对高耗能、高排放、资源型行业实施电价优惠；加快推进供热计量改革和按供热量收费；加快形成具有合理约束力的碳价机制。

“推进市场化机制建设”方面，提出加快建设完善全国碳排放权交易市场；将碳汇交易纳入全国碳排放权交易市场；健全企业、金融机构等碳排放报告和信息披露制度；加快建设全国用能权交易市场；加强电力交易、用能权交易和碳排放权交易的统筹衔接；发展市场化节能方式，推行合同能源管理，推广节能综合服务。

十三、切实加强组织实施

“加强组织领导”方面，提出支持有条件的地方和重点行业、重点企业率先实现碳达峰，组织开展碳达峰、碳中和先行示范，探索有效模式和有益经验。

[中国科学院武汉文献情报中心 岳芳]

国家发改委发布《完善能源消费强度和总量双控制度方案》

9 月 11 日，国家发展改革委印发了《完善能源消费强度和总量双控制度方案》[1]（以下简称《方案》），明确了能耗双控制度的总体安排、工作原则和任务举措，绘制了能耗双控制度发展“路线图”。“十三五”时期，我国建立了能耗双控制度，在全国设定能耗强度降低、能源消费总量目标，并将目标分解到各地区，严格进行考核，取得了明显成效。过去五年全国能耗强度继续大幅下降，能源消费总量增速较“十一五”、“十二五”时期明显回落。与此同时，在能耗双控制度由建立到实施的过程中，也存在着一些不完善的问题。为进一

[1] 国家发展改革委关于印发《完善能源消费强度和总量双控制度方案》的通知. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-09/17/content_5637960.htm

步完善能耗双控制度，《方案》提出了能耗双控的工作原则、到 2035 年的具体目标和重点举措，是当前和今后一个时期指导节能降耗工作、促进高质量发展的重要制度性文件，对确保完成‘十四五’节能约束性指标、推动实现碳达峰碳中和目标任务具有重要意义。《方案》要点如下：

一、总体要求

（一）指导思想。以习近平新时代中国特色社会主义思想为指导，深入贯彻党的十九大和十九届二中、三中、四中、五中全会精神以及中央经济工作会议精神，增强“四个意识”、坚定“四个自信”、做到“两个维护”，认真落实习近平生态文明思想，按照党中央、国务院决策部署，立足新发展阶段，完整、准确、全面贯彻新发展理念，构建新发展格局，推动高质量发展，以能源资源配置更加合理、利用效率大幅提高为导向，以建立科学管理制度为手段，以提升基础能力为支撑，强化和完善能耗双控制度，深化能源生产和消费革命，推进能源总量管理、科学配置、全面节约，推动能源清洁低碳安全高效利用，倒逼产业结构、能源结构调整，助力实现碳达峰、碳中和目标，促进经济社会发展全面绿色转型和生态文明建设实现新进步。

（二）工作原则。坚持能效优先和保障合理用能相结合；坚持普遍性要求和差别化管理相结合；坚持政府调控和市场导向相结合；坚持激励和约束相结合；坚持全国一盘棋统筹谋划调控。

（三）总体目标。到 2025 年，能耗双控制度更加健全，能源资源配置更加合理、利用效率大幅提高。到 2030 年，能耗双控制度进一步完善，能耗强度继续大幅下降，能源消费总量得到合理控制，能源结构更加优化。到 2035 年，能源资源优化配置、全面节约制度更加成熟和定型，有力支撑碳排放达峰后稳中有降目标实现。

二、完善指标设置及分解落实机制

（四）合理设置国家和地方能耗双控指标。能耗强度降低作为约

束性指标。对各省（自治区、直辖市）能耗强度降低实行基本目标和激励目标双目标管理。

（五）优化能耗双控指标分解落实。以能源产出率为重要依据，合理确定各省（自治区、直辖市）能耗强度降低和能源消费总量目标。

三、增强能源消费总量管理弹性

（六）对国家重大项目实行能耗统筹。由党中央、国务院批准建设的重大项目，按规定在能耗双控考核中对项目能耗量实行减免。

（七）坚决管控高耗能高排放项目。各省（自治区、直辖市）要建立高耗能高排放项目清单，国家发改委会同有关部门加强窗口指导。

（八）鼓励地方增加可再生能源消费。对超额完成激励性可再生能源电力消纳责任权重的地区，超出最低可再生能源电力消纳责任权重的消纳量不纳入能源消费总量考核。

（九）鼓励地方超额完成能耗强度降低目标。对能耗强度降低达到国家下达激励目标的省（自治区、直辖市），其能源消费总量在五年规划当期能耗双控考核中免予考核。

（十）推行用能指标市场化交易。建设全国用能权交易市场，建立能源消费总量指标跨地区交易机制。

四、健全能耗双控管理制度

（十一）推动地方实行用能预算管理。各省（自治区、直辖市）建立用能预算管理体系，探索开展能耗产出效益评价，推动能源要素向高质量发展领域倾斜，加快产业结构、能源结构调整优化。

（十二）严格实施节能审查制度。从源头严控新上项目能效水平，未达到能耗强度降低基本目标进度要求的地区，在节能审查等环节对高耗能项目缓批限批。

（十三）完善能耗双控考核制度。增加能耗强度降低指标考核权重，合理设置能源消费总量指标考核权重。强化考核结果运用，对考核结果为超额完成的地区通报表扬并给予一定奖励，对未完成能耗强

度降低基本目标的地区通报批评并限期整改，对进度严重滞后、工作不力的地区按规定实行问责。

五、组织实施

（十四）加强组织领导。省级人民政府对本行政区域的能耗双控工作负总责，国家发改委会同有关部门建立能耗双控工作协调推进机制，加强产业规划、重大项目布局与能耗双控政策的协调。

（十五）加强预警调控。定期调度各省（自治区、直辖市）能耗量较大的项目建设投产情况，发布能耗双控目标完成情况晴雨表，对高预警等级地区实施窗口指导。

（十六）完善经济政策。落实促进节能的价格、财政、税收等政策，健全绿色金融体系，积极推广综合能源服务、合同能源管理等市场化机制。

（十七）夯实基础建设。加强能源计量和统计能力建设，进一步完善节能法律法规，健全节能标准体系，强化监督检查，加强节能监察能力建设，加大培训力度。

[中国科学院武汉文献情报中心 岳芳 根据《方案》和人民日报海外版新闻编辑]

李克强主持国家能源委会议 部署能源改革发展工作

10 月 9 日，中共中央政治局常委、国务院总理、国家能源委员会主任李克强主持召开国家能源委员会会议，部署能源改革发展工作，审议“十四五”现代能源体系规划、能源碳达峰实施方案、完善能源绿色低碳转型体制机制和政策措施的意见等。中共中央政治局常委、国务院副总理、国家能源委员会副主任韩正出席。

会上，发展改革委、能源局作了汇报。李克强说，能源是关系经济社会发展全局的大事。“十三五”时期，在以习近平同志为核心的党中央坚强领导下，各方面共同努力，我国能源发展、结构优化、高效清洁利用等取得明显成效。当前，国际环境和全球能源格局、体系

发生深刻变革，我国能源发展和安全保障面临新挑战。要坚持以习近平新时代中国特色社会主义思想为指导，落实党中央、国务院部署，按照立足新发展阶段、贯彻新发展理念、构建新发展格局、推动高质量发展的要求，从国情实际出发，处理好发展和减排、当前和长远的关系，统筹稳增长和调结构，深化能源领域市场化改革，推动能源绿色低碳转型，提升能源安全保障能力，为现代化建设提供坚实支撑。

李克强从能源安全、推进“双碳”目标、科技创新三方面提出了能源改革发展工作的重点，包括：

1、以保障安全为前提构建现代能源体系。现阶段工业化城镇化深入推进，能源需求不可避免继续增长，供给短缺是最大的能源不安全，必须以保障安全为前提构建现代能源体系，着力提高能源自主供给能力。要针对以煤为主的能源资源禀赋，优化煤炭产能布局，根据发展需要合理建设先进煤电，继续有序淘汰落后煤电。加大国内油气勘探开发，积极发展页岩气、煤层气，多元开展国际油气合作。加强煤气油储备能力建设，推进先进储能技术规模化应用，不断丰富能源安全供应的保险工具。

2、科学有序推进实现“双碳”目标。要结合近期应对电力、煤炭供需矛盾的情况，深入测算论证，研究提出碳达峰分步骤的时间表、路线图。各地各有关方面要坚持先立后破，坚持全国一盘棋，不抢跑。从实际出发，纠正有的地方“一刀切”限电限产或运动式“减碳”，确保北方群众温暖安全过冬，保障产业链供应链稳定和经济持续平稳发展。大力推动煤炭清洁利用，提高清洁能源比重，深入推进重点领域节能减排改造，在全社会倡导节约用能，不断提升绿色发展能力。

3、创新是能源高质量发展的重要动力。要加快能源领域关键核心技术和装备攻关，强化绿色低碳前沿技术研发。提升电网智能化水平，增强消纳新能源和安全运行能力。完善阶梯电价，深化输配电等重点领域改革，更多依靠市场机制促进节能减排降碳，提升能源服务

水平。

[中国科学院武汉文献情报中心 岳芳 根据新华社新闻编辑]

国家发改委《“十四五”循环经济发展规划》能源要点

7 月 1 日，国家发改委出台《“十四五”循环经济发展规划》[2]（以下简称“规划”），提出了到 2025 年基本建立资源循环型产业体系的目标。为实现该目标，规划部署了“十四五”时期循环经济领域的三大重点任务、五大重点工程和六大重点行动，能源相关内容如下：

一、重点任务方面

（一）构建资源循环型产业体系，提高资源利用效率。

推进园区循环化发展。推动企业循环式生产、产业循环式组合，促进废物综合利用、能量梯级利用、水资源循环使用，推进工业余压余热、废水废气废液的资源化利用，实现绿色低碳循环发展，积极推广集中供气供热。鼓励园区推进绿色工厂建设，实现厂房集约化、原料无害化、生产洁净化、废物资源化、能源低碳化、建材绿色化。制定园区循环化发展指南，推广钢铁、有色、冶金、石化、装备制造、轻工业等重点行业循环经济发展典型模式。鼓励创建国家生态工业示范园区。

加强资源综合利用。加强对低品位矿、共伴生矿、难选冶矿、尾矿等的综合利用，推进有价组分高效提取利用。进一步拓宽粉煤灰、煤矸石、冶金渣、工业副产石膏、建筑垃圾等大宗固废综合利用渠道，扩大在生态修复、绿色开采、绿色建材、交通工程等领域的利用规模。

推进城市废弃物协同处置。推进厨余垃圾、园林废弃物、污水厂污泥等低值有机废物的统筹协同处置。

（二）构建废旧物资循环利用体系，建设资源循环型社会

提升再生资源加工利用水平。实施废钢铁、废有色金属、废塑料、

[2] 国家发展改革委关于印发“十四五”循环经济发展规划的通知. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202107/t20210707_1285527.html?code=&state=123

废纸、废旧轮胎、废旧手机、废旧动力电池等再生资源回收利用行业规范管理，提升行业规范化水平，促进资源向优势企业集聚。加强废弃电器电子产品、报废机动车、报废船舶、废铅蓄电池等拆解利用企业规范管理和环境监管，加大对违法违规企业整治力度，营造公平的市场竞争环境。

（三）深化农业循环经济发展，建立循环型农业生产方式

加强农林废弃物资源化利用。推动农作物秸秆、畜禽粪污、林业废弃物、农产品加工副产物等农林废弃物高效利用。因地制宜鼓励利用次小薪材、林业三剩物（采伐剩余物、造材剩余物、加工剩余物）进行复合板材生产、食用菌栽培和能源化利用，推进农产品加工副产物的资源化利用。

推行循环型农业发展模式。推进农村生物质能开发利用，发挥清洁能源供应和农村生态环境治理综合效益。构建林业循环经济产业链，推广林上、林间、林下立体开发产业模式。推进种植、养殖、农产品加工、生物质能、旅游康养等循环链接，鼓励一二三产融合发展。

二、重点工程与行动方面

城市废旧物资循环利用体系建设工程。以直辖市、省会城市、计划单列市及人口较多的城市为重点，选择约 60 个城市开展废旧物资循环利用体系建设。统筹规划建设再生资源加工利用基地，推进废钢铁、废有色金属、报废机动车、退役光伏组件和风电机组叶片、废旧家电、废旧电池、废旧轮胎、废旧木制品、废旧纺织品、废塑料、废纸、废玻璃、厨余垃圾等城市废弃物分类利用和集中处置，引导再生资源加工利用项目集聚发展。鼓励京津冀、长三角、珠三角、成渝等重点城市群建设区域性再生资源加工利用基地。

园区循环化发展工程。制定各地区循环化发展园区清单，按照“一园一策”原则逐个制定循环化改造方案。组织园区企业实施清洁生产改造。积极利用余热余压资源，推行热电联产、分布式能源及光伏储

能一体化系统应用，推动能源梯级利用。具备条件的省级以上园区2025年底前全部实施循环化改造。

大宗固废综合利用示范工程。聚焦粉煤灰、煤矸石、冶金渣、工业副产石膏、尾矿、共伴生矿、农作物秸秆、林业三剩物等重点品种，推广大宗固废综合利用先进技术、装备，实施具有示范作用的重点项目，大力推广使用资源综合利用产品，建设50个大宗固废综合利用基地和50个工业资源综合利用基地。

废旧动力电池循环利用行动。加强新能源汽车动力电池溯源管理平台建设，完善新能源汽车动力电池回收利用溯源管理体系。推动新能源汽车生产企业和废旧动力电池梯次利用企业通过自建、共建、授权等方式，建设规范化回收服务网点。推进动力电池规范化梯次利用，提高余能检测、残值评估、重组利用、安全管理等技术水平。加强废旧动力电池再生利用与梯次利用成套化先进技术装备推广应用。完善动力电池回收利用标准体系。培育废旧动力电池综合利用骨干企业，促进废旧动力电池循环利用产业发展。

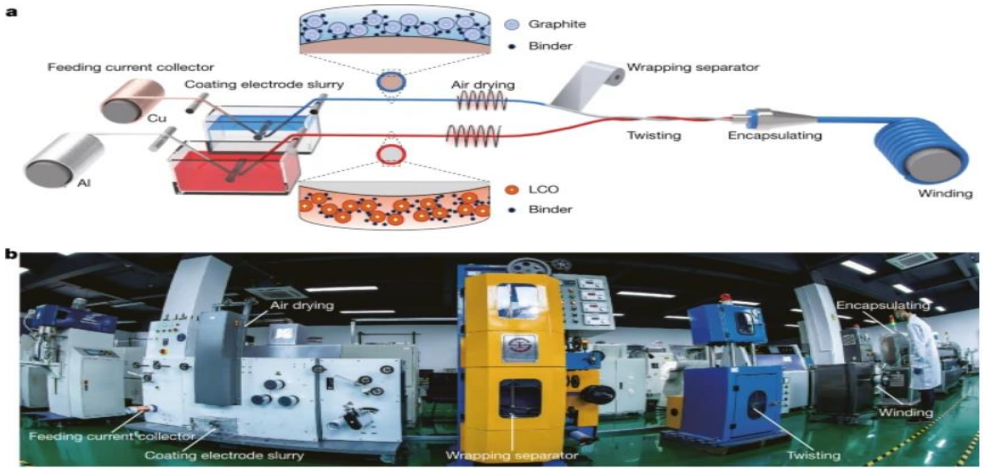
[中国科学院武汉文献情报中心 岳芳]

复旦：可工业制造高效纤维锂电池实现超10万次弯曲折叠

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

上海复旦大学彭慧胜教授课题组牵头的联合研究团队设计制备了可以利用成熟商业化制造工艺制备的钴酸锂/石墨纤维锂离子电池，长度达到了米级，获得了85.69 Wh/kg的能量密度，500余次循环后

仍可保持 90%以上的初始容量，且经过 10 万次弯曲后依旧可以保持超过 80%的初始容量，展现出了良好的长程稳定性、机械柔韧性和商业应用潜力。研究人员将锂钴氧化合物（LCO）涂覆在商用铝纤维上作为正极，将石墨涂覆在铜纤维上作为负极，随后与商业隔膜组装成完整的柔性纤维锂电池。为了对比研究，研究人员同时制造了不同长度（0.1 m、0.2 m、0.5 m 和 1 m）的纤维锂离子电池，并测量了其电化学性能。电化学阻抗谱测试结果显示，电池的内阻和纤维长度具有双曲余切函数关系，随着长度的增加，内阻首先下降，然后趋于平稳。电池比容量密度测试显示，电池在长度为 1 m 的时候达到最佳，获得了 85.69 Wh/kg 放电比容量，比传统实验室工艺制备的纤维锂电池能量密度高出 2 个数量级。由于单个纤维的能量密度还不足以为大型电子设备供电，研究人员利用工业化生产工艺制备了以上述纤维锂电池为单元的大面积织物（100 根纤维电池构成），使得纤维锂离子电池纺织品具有足够的能量来为大型电子设备供电。在 0.1C 倍率下获得了超过 160 mAh/g 的比能量，且 500 余次循环后电池仍可保持 90.5%初始比容量，库伦效率接近 100%（99.8%），表现了良好的长程稳定性。作为纤维电池，一个关键的性能指标是抗弯曲拉伸能力，研究人员以 1 cm 的曲率半径对纤维织物电池进行了高达 10 万次的弯曲，结果显示电池经过上述弯曲实验后仍然保持了 80%以上的初始比容量，表现出强劲的机械柔韧性，具备作为柔性可穿戴电子设备电源的良好潜能。进一步的技术经济性分析可知，该纤维电池每米成本不到 0.05 美元，具有较强的经济竞争力。



纤维锂电池连续制备过程

该项研究设计了一种纤维锂电池，并利用工业化生产工艺制备了纤维锂电池纺织品，在 0.1C 倍率下获得了超过 160 mAh/g 的比能量，500 余次充放电循环后电池仍可保持 90.5%初始比容量，更为关键的是，经过高达 10 万次弯曲后仍然保持了 80%以上的初始比容量，且单位长度的成本不到 0.05 美元，表现出了优异的长程稳定性、机械柔韧性和良好的商业应用潜力，为设计开发高性能长寿命低成本柔性电池指明了新路径。相关研究成果发表在《Nature》[3]。

[中国科学院武汉文献情报中心 郭楷模]

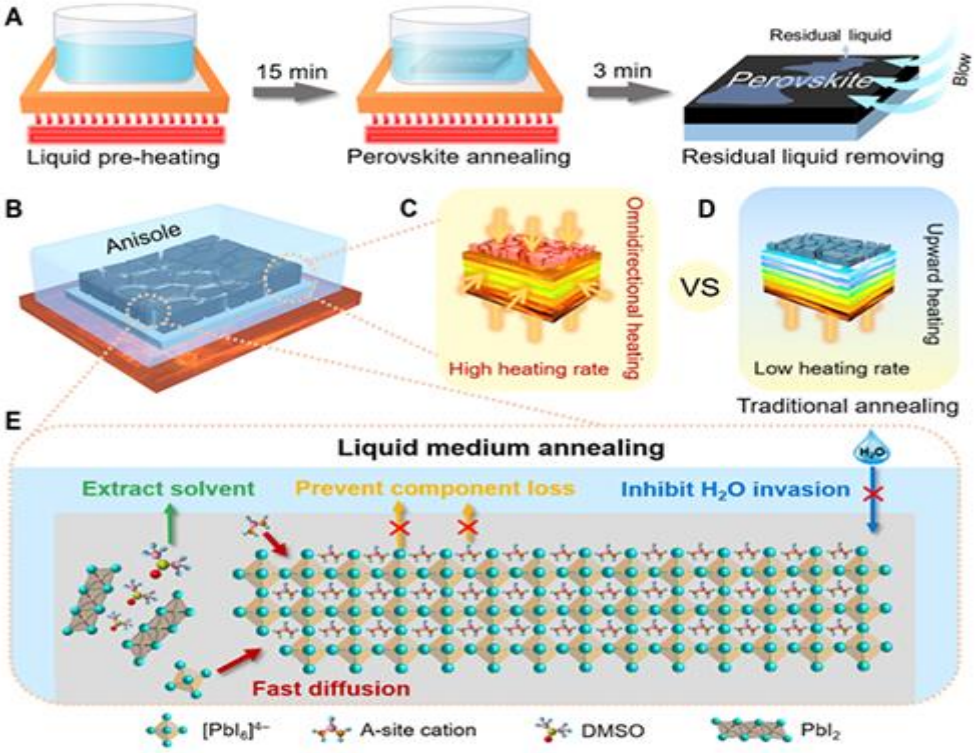
液相介质退火工艺创造大面积钙钛矿太阳电池效率记录

近年来，基于有机-无机杂化钙钛矿光电器件（如太阳能电池、发光二极管、光电探测器等）因其原料成本低廉、加工工艺简单，取得了飞速发展。其中，钙钛矿多晶薄膜通常由溶液法制备，薄膜结晶质量对于器件性能有着至关重要的影响。但薄膜生长过程易受湿度、有机氛围浓度等环境不可控因素影响，同时材料本身在退火条件下反应活性高，因此传统工艺很难制备成分和相态均一的大面积薄膜，且工艺可重复性差，限制了其产业化制备进程。

北京大学周欢萍与北京理工大学陈棋合作研究团队开发了一种

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

简单的“液相介质退火”工艺，大幅提升了大面积钙钛矿薄膜的组分分布均一性，创造了大面积（1cm^2）钙钛矿太阳电池的认证效率记录（22.3%）。通过“液相介质”，为薄膜生长过程构筑了均匀高效的热场传导和适宜稳定的化学环境，保障了高质量、组分分布均一晶体的大面积制备，显著提高了工艺的可重复性。其中，液相介质提供了“自上而下”的独特传热方式，大大缩短薄膜达到退火温度的时间，从而大幅提升组分分布的均一性。同时，液相介质阻隔了钙钛矿与外界环境的接触，有效抑制了水、氧、有机物等干扰钙钛矿结晶，进而提高了晶体质量。此外，液相介质还有效降低了钙钛矿器件制备过程对环境的依赖性。液相介质退火使得钙钛矿薄膜具有更均一的光电性质，大面积与小面积的电池效率差异显著降低，小面积器件（0.08 cm^2）实现了 24.04%的稳态输出效率，认证值为 23.7%。而大面积器件（1 cm^2）实现了 23.15%的稳态输出效率，认证效率为 22.3%，超过目前该面积下所有公开报道的第三方认证效率。



钙钛矿薄膜在液相介质中退火的流程及机理示意图

该研究工作通过液相介质退火工艺制备了高质量、均一的钙钛矿

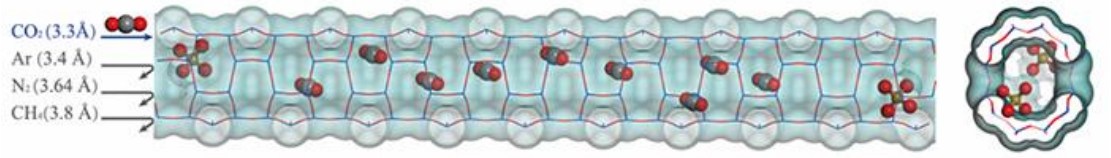
薄膜，达到了 23.7%的小面积钙钛矿电池认证效率和 22.3%的大面积钙钛矿电池认证效率，有望进一步推广至大面积电池模组的制备。该工艺为高质量，组分空间均一钙钛矿薄膜的全天候可重复制备开辟了新的途径，可广泛应用于不同组分（如三维铅基、锡铅混合、二维等）钙钛矿光电器件（如太阳能电池、发光二极管等）的制备。相关研究成果发表在《*Science*》[4]。

[中国科学院武汉文献情报中心 岳芳 根据国家自然科学基金委员会新闻编辑]

自成型沸石分子筛吸附碳捕集获重大突破

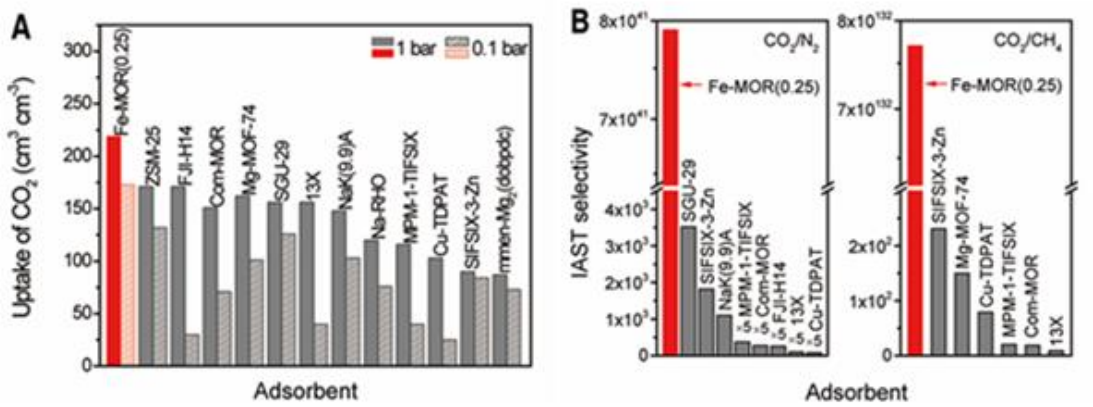
CO_2 排放量逐年增长已经造成了严重的环境与气候问题。碳捕集与利用是降低 CO_2 排放、实现分离回收和综合利用的有效途径，对实现“碳达峰、碳中和”目标具有重要意义。开发低成本、高效的碳捕集技术以降低碳捕集成本是实现规模化应用的巨大挑战。

浙江大学邢华斌团队、南京工业大学王军和新加坡国立大学颜宁合作研究团队通过开发新型水热方法，合成出含杂原子丝光沸石单块材料，可直接作为自成型物理吸附剂，并表现极高的 CO_2 体积吸附容量和分离效率。所得材料对氩气（Ar），氮气（N_2）以及甲烷（CH_4）表现出良好的分子筛分能力，具有优异的抗水汽性能，实现了对燃烧后的废气（CO_2 和 N_2 分离）、沼气以及天然气纯化（CO_2 和 CH_4 分离）等体系中 CO_2 的高效吸附分离，被认为是碳捕集领域的重大突破，开拓了杂原子沸石分子筛在气体吸附分离领域的新应用。



杂原子丝光沸石一维孔道筛分 CO_2、Ar、N_2 和 CH_4 的示意图

[4] Nengxu Li, Xiuxiu Niu, Liang Li, et al. Liquid medium annealing for fabricating durable perovskite solar cells with improved reproducibility, *Science*, 2021, DOI: 10.1126/science.abh3884



气体吸附分离性能

该项研究获得的杂原子丝光沸石单块可以直接作为自成型吸附剂，表现出迄今为止最高的 CO_2 体积吸附容量和分离效率，被认为是碳捕集领域的重大突破，展现出良好的工业应用潜力。相关研究成果发表在《*Science*》[5]。

[中国科学院武汉文献情报中心 岳芳 根据南京工业大学新闻编辑]

[5] Yu Zhou, Jianlin Zhang, Lei Wang, et al. Self-assembled iron-containing mordenite monolith for carbon dioxide sieving. *Science*, 2021, DOI: 10.1126/science.aax5776

国际瞭望

IEA 发布中国能源体系碳中和路线图

9 月 29 日，国际能源署（IEA）发布《中国能源体系碳中和路线图》报告，系统探讨了中国能源体系实现碳中和的路径[6]。报告强调，如果没有中国的参与，可能无法将全球温升限制在 1.5℃内。报告基于中国“双碳”目标构建了“承诺目标情景”（APS）以及实现更快转型的“加速转型情景”（ATS），研究了能源转型为中国发展带来的技术挑战和机遇。报告指出，中国能够形成清晰的道路来建立一个更可持续、安全和包容的能源未来，有能力在确保能源安全的同时实现碳中和目标。通过加快能源转型，中国可以确保获得重大的经济、创新和就业效益，同时帮助世界更接近实现气候目标。关键内容如下：

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

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

二、实现碳中和要求中国能源体系快速而深度转型

1、2030 年前实现碳达峰将依赖于三个关键领域的进展：提高能

[6] An Energy Sector Roadmap to Carbon Neutrality in China. https://iea.blob.core.windows.net/assets/bcf51d31-b7c6-4183-944f-707d05021356/Anenergysectorroadmaptocarbonneutralityin China.pdf

效、发展可再生能源和减少煤炭使用

根据 APS 情景，到 2030 年中国一次能源需求将增长 18%；到 2060 年，尽管经济活动增加了一倍多，一次能源需求将下降 26%。主要原因是能效大幅提高，以及产业转型从重工业转向能源强度较低的经济活动。低碳能源在一次能源需求占比将从当前的 15%增至 2060 年的 74%。太阳能将在 2045 年左右成为最主要的一次能源来源，到 2060 年占比将达到 1/4 左右。化石能源消费将迅速下降，到 2060 年，煤炭、石油和天然气需求将分别下降 80%、60%和 45%。到 2030 年，能效、光伏和风能将为能源部门碳减排做出 60%的贡献，而到 2060 年电气化（13%）、CCUS（8%）、氢能（3%）、行为改变（12%）和生物能源（7%）将在减排上发挥更大作用（图 1）。

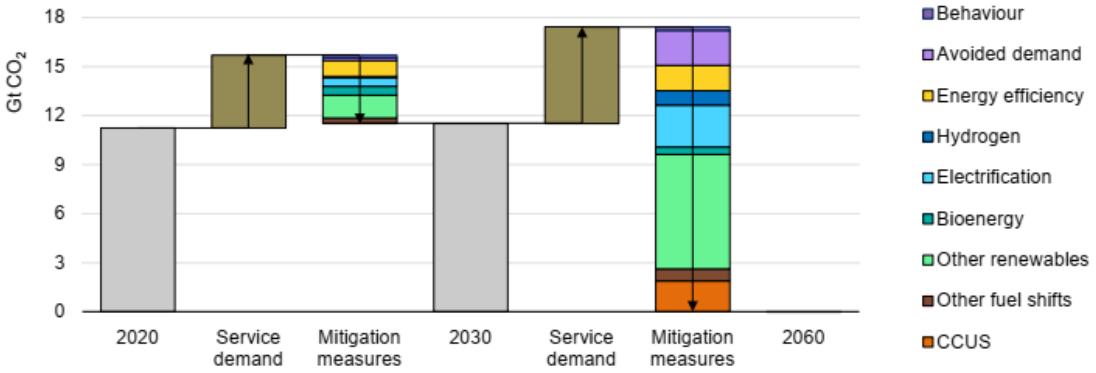


图 1 APS 情景下采用不同措施对中国能源体系碳减排的贡献作用（单位：十亿吨 CO_2）

2、中国完全有能力提供实现碳中和目标所需的投资水平

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

三、中国每个行业部门都有可行的路径来实现深度减排

1、以可再生能源为主导的电力部门为中国的清洁能源转型奠定了基础

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

2、氢及氢基燃料、生物燃料等低碳燃料不可或缺

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

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

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

四、中国能源转型需要四个跨部门技术领域深度创新

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

1、电气化技术创新

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

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

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

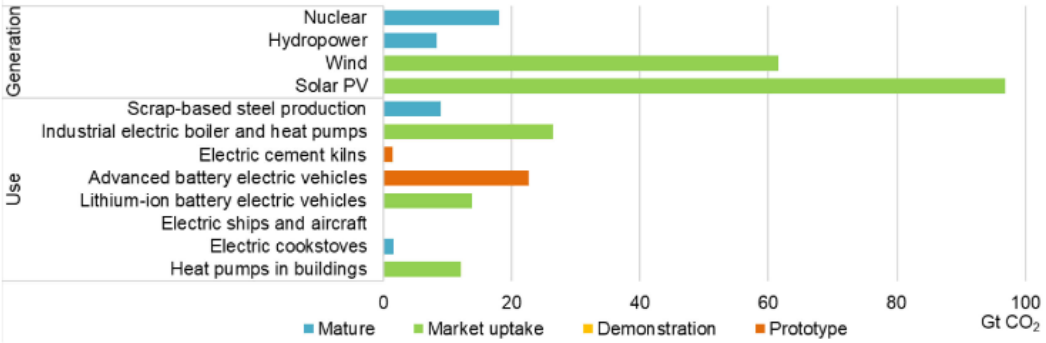


图 2 APS 情景中 2020-2060 年间不同成熟度的电气化技术为中国贡献的累计碳减排量（单位：十亿吨 CO_2）

（2）发展锂、钴、镍等关键材料供应链以应对未来电气化需求

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

2、CCUS 技术创新

由于当前中国能源基础设施构成和煤炭在能源结构的重要地位，CCUS 将在中国实现碳中和过程中发挥重要作用。中国许多现有的发电厂和工业厂房都相对较新，可以通过 CCUS 改造继续运营。CCUS 还提供了形成负排放的方法，即配备碳捕集和封存的生物能源（BECCS）和配备碳封存的直接空气碳捕集（DAC）。APS 情景中，CCUS 将贡献中国到 2060 年累计碳减排量的 8%，占全球累计捕集 CO_2 近 50%。2020-2030 年的碳捕集量只需小幅增加，就可以实现中国国家自主贡献相关的近期目标。

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

目前，中国至少有 21 个 CCUS 试点、示范或商业项目在运行，每年总捕集能力超过 200 万吨，其中许多与提高石油采收率（EOR）有关。未来，CCUS 将越来越多地用于减少现有电力和工业资产的排

放，以相对较低的额外成本实现高达 99%的碳捕集率，到 2060 年燃煤电厂和天然气电厂的平均总捕集率将达到 98%左右。电力将成为 CCUS 部署的主要驱动力，到 2060 年将捕集约 13 亿吨，占中国总捕集量的一半；重工业碳捕集量将达 8.2 亿吨，占总捕集量的 32%；约有 5.05 亿吨碳捕集由 BECCS 贡献，带封存的 DAC 则将捕集 1.15 亿吨。到 2060 年，中国在化石燃料发电、化工、水泥以及 DAC 领域部署的 CCUS 占全球相应领域 CCUS 容量的 50%-75%左右，而在钢铁行业的部署占全球 40%左右。CCUS 的国内部署为中国输出高价值知识和能力提供了机会。

（2）当前中国 CCUS 的成熟度因技术类型和应用而异

虽然大多数 CCUS 技术已在全球范围内得到验证，但缺乏政策和监管支持阻碍了 CCUS 在中国的部署。APS 情景中，2020-2060 年间有约 45%的累计碳减排量来自于目前处于原型或示范阶段的技术（图 3）。因此，需要加快示范和商业规模的项目开发，使这条途径成为可能。

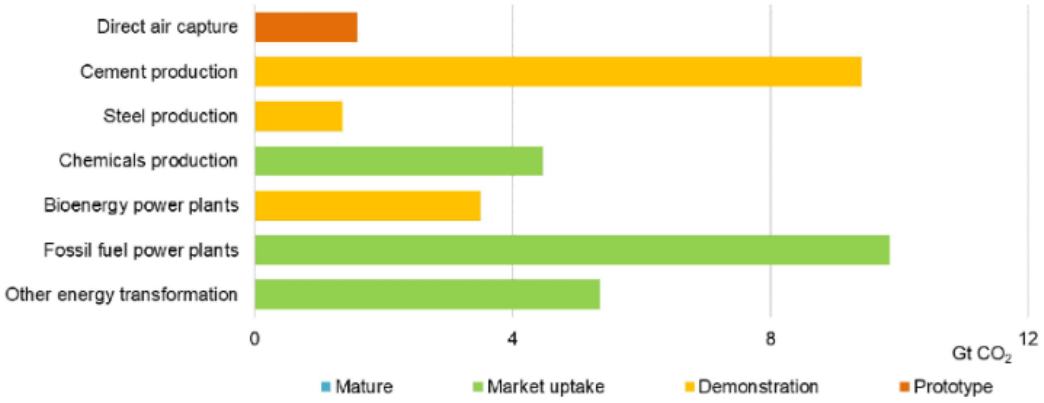


图 3 APS 情景中 2020-2060 年间不同成熟度的 CCUS 技术为中国贡献的累计碳减排量（单位：十亿吨 CO_2）

CO_2 捕集方面，当前先进且广泛应用的碳捕集技术是化学吸收和物理分离，其他技术如膜分离、化学链循环尚处于原型阶段。在中国，燃烧前碳捕集成本在 36-62 美元/吨，燃烧后碳捕集为 43-65 美元/吨，富氧燃烧为 43-58 美元/吨。

CO_2运输方面，中国目前超过 2/3 的 CCUS 项目采用卡车运输，成本在 0.13-0.2 美元/吨/公里，驳船运输的内陆运输成本约为 0.04 美元/吨/公里。管道运输适合用于长距离、大规模运输，吉林油田的中石油 CO_2-EOR 项目是中国为数不多的管道运输 CCUS 项目之一，运输距离超过 53 公里，成本为 0.04 美元/吨/公里。

CO_2利用方面，目前捕集的 CO_2多用于 EOR 和化学品制造，少量用于电子和食品饮料行业。目前正在运营的大型 CCUS 项目中，超过 3/4 的项目用于 EOR。APS 情景中，使用 CO_2制造化学原料和运输燃料将发挥重要作用，但尚处于原型阶段，需要加强创新和政策支持以确保在未来十年内实现商业化。CO_2用于固化混凝土和制造矿化建筑材料正在大规模应用或示范。

CO_2封存方面，CO_2可以永久封存在陆地和海上的咸水层或枯竭油气藏中，中国还没有专门的商业封存设施。世界其他地区目前有 5 座大型设施正在运行，枯竭油气藏的 CO_2封存仅限于试点示范。中国具有极大的碳封存潜力，陆上盆地理论容量超过 3250 亿吨，海上盆地超过 770 亿吨。对现有适合 EOR 地区的咸水层进行表征可能会促进发展专用封存设施，共享 CO_2运输基础设施，并鼓励从 EOR 应用过渡到专用封存。使用海上油气勘探和生产过程中收集的数据来表征封存资源有助于加速开发海上封存。中国的碳封存成本，包括场地关闭后 20 年的监测在内，陆上咸水层封存成本为 8.7 美元/吨，海上咸水层为 43.48 美元/吨，枯竭油气田封存成本为人民币 50 元/吨。

CO_2去除方面，BECCS 比 DAC 更接近大规模商业化，对中国的减排贡献更大，主要是在 2040 年之后。世界上唯一运营的大型 BECCS 工厂位于美国的伊利诺伊州。鉴于中国广泛使用废物发电和供热，这些工厂可以首先部署 BECCS。目前，世界各地有几家小型 DAC 中试工厂正在运营，DAC 的最佳选址是在可以获得低成本可再生能源/核能以及碳封存资源的地区，中国的四川省和东北松辽盆地具有良好的

发展潜力。

（3）实现碳中和目标需建立广泛的碳运输和封存基础设施网络

短期内，CCUS 活动预计将集中开发靠近大型工业港口和主要产业集群的碳封存资源，当前拥有许多煤化工装置、天然气加工设施和 EOR 项目的地区可作为陆地封存中心。陆上和海上碳封存场地可以从一个或多个来源接收 CO_2。开发现有工业港口（排放量高）附近的海上封存资源可能是长距离运输 CO_2 进行陆上封存的首选替代方案。建立从港口到内陆的新管道路线可能需要通过人口稠密地区的路线，因此可能更具挑战性。跨区域的高容量 CO_2 运输干线可能比同区域的多条小容量管道更具经济效率。APS 情景中，到 2060 年可能需要超过 15000 公里的 CO_2 运输网络。CO_2 管道基础设施的发展需要考虑到国家以及大型碳密集型工业和发电厂的区域战略，还应考虑氢能和可再生能源的部署计划。

3、氢能技术创新

APS 情景中，2021-2060 年低碳氢和氢基燃料的使用将累计减排近 160 亿吨 CO_2，占总减排量 3%以上，主要来源于工业领域，尤其是化工和钢铁（占氢能贡献碳减排量的 50%以上），其余是航运中的氢和氨以及航空中的合成煤油（共占 20%），以及公路运输（13%）。到 2030 年，中国氢需求量将增加 20%至 3100 万吨，到 2060 年将增加三倍以上至 9000 万吨。到 2060 年，几乎所有的氢需求都可以通过低碳技术来满足，其中近 80%是电解制氢。

（1）氢能相关技术中，90%的碳减排贡献来自处于原型和示范阶段的技术

低碳电力电解制氢是一项商业技术，但需要大规模部署才能具备成本竞争力。结合 CCUS 进行天然气重整或煤气化制氢是经过验证的技术，但由于成本原因尚未广泛部署。氢气用于制造氨和甲醇的使用量已经很大，2020 年达到 1700 万吨，但低碳氢作为化学品生产原料

和钢铁工业还原剂的使用量目前仍然很少。电解氢在重工业过程中的使用目前处于示范阶段。在化工行业，利用波动性可再生能源生产的氢制氨和甲醇是较为成熟的技术，一些小型预商业化甲醇生产项目已在全球范围内运行，多个大型氨生产示范项目正在建设中。钢铁行业中，铁矿石还原中使用高混合比例（高达 100%）的氢尚处于发展早期阶段，预计要到 2020 年代后期才能大规模示范。

氢的终端应用技术正处于不同发展阶段，交通领域燃料电池汽车已经上市，可用于乘用车、轻型车和公共汽车，而燃料电池卡车还需要进一步发展。用于建筑供暖和发电的氢燃料锅炉和燃料电池也已商用，但面临与热泵等更高效技术的激烈竞争。在电力生产中，燃料电池可用于分布式发电应用，燃气轮机也已具有使用富氢气体的能力。氢基燃料的其他用途也发挥着重要作用，氨作为航运燃料和合成航空燃料仍处于预示范阶段。

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

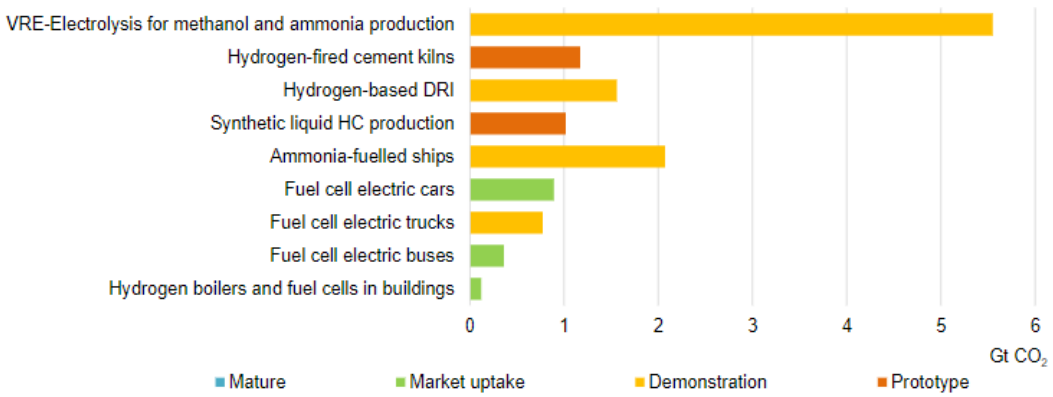


图 4 APS 情景中 2020-2060 年间不同成熟度的氢能技术为中国贡献的累计碳减排量（单位：十亿吨 CO_2）

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

氢能基础设施包括氢气管道、加氢站、大型存储设施和港口码头等。目前，中国只有大约 100 公里的专用氢气管道，都是产业集群私有。确定和发展各地区最合适的基础设施需要仔细规划，但存在一些短期机会，例如使用槽车短距离运输液氢。将氢气混合到现有天然气网中可以作为在发展氢气专用基础设施的同时建立低碳供应的一种方式，但需要制定天然气网络混氢的国际统一安全标准和国家法规。在技术可行的情况下，改造现有的高压输气管道来输送纯氢是中国的另一种选择，这将有助于创建一个国家氢网络来连接需求中心。还需要开发新的专用氢气管道应用于产业集群，以确保管道的高利用率。加氢站是氢基础设施的另一个重要组成部分。中国拥有世界第二大加氢站网络，已有 100 多个加氢站在运营。APS 情景中，到 2030 年和 2060 年将分别达到 2700 座和 27000 座。

4、生物能源技术创新

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

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

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

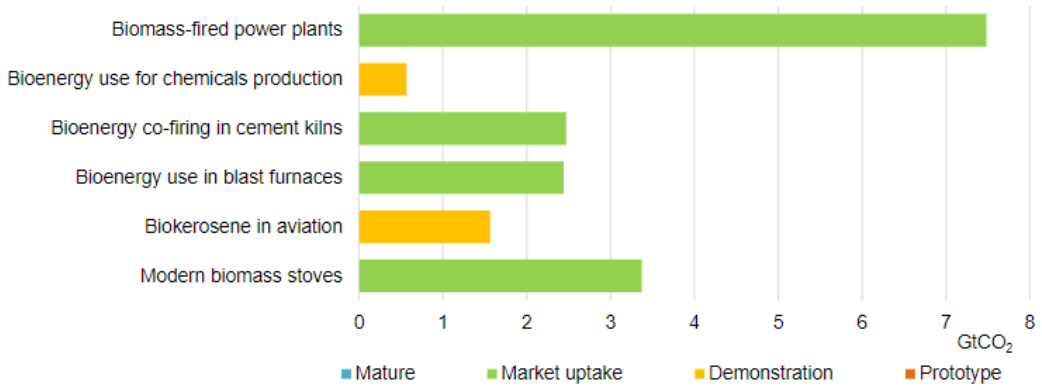


图 5 APS 情景中 2020-2060 年间不同成熟度的生物能源技术为中国贡献的累计碳减排量（单位：十亿吨 CO_2）

（2）各种形式扩展生物能源将需要大量额外的基础设施

就生物燃料而言，将需要许多生物质原料储存设施，尤其是广泛

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

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

中国拥有的技术能力、经济手段和政策经验，可以比 APS 情景更快实现 2030 年的清洁能源转型目标。在“加速转型情景”（ATS）中，政策进程加快将促使电力和工业中的煤炭用量更快下降，现有低碳技术得到更有力的部署和更快的能效提升。到 2030 年，ATS 情景中能源体系的CO_2排放量将比现有水平降低 20 多亿吨，减少了近 20%。投资需求不是一个主要障碍，ATS 情景所需的累计投资与 APS 情景相当。同时，加快实现 2030 目标能够为尚未充分受益于中国经济发展的地区带来更大的繁荣，中国在全球清洁能源技术价值链中将发挥核心作用，并逐渐成为清洁能源创新的领袖。

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

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

[中国科学院武汉文献情报中心 岳芳]

DOE 发布太阳能未来研究推进零碳电网构建

9 月 8 日，美国能源部（DOE）发布《太阳能未来研究》报告[7]，详细阐述了太阳能在脱碳方面发挥的重要作用。研究表明，未来需大规模部署太阳能发电装置，到 2025 年，美国太阳能发电年均装机容量将达到 30 吉瓦/年；到 2030 年，年均装机容量将达到 60 吉瓦/年；到 2035 年太阳能发电量将提供全国 40%的电力，以推进电网深度脱碳。此外，将太阳能与储能技术集成将促使电力系统具有更大的灵活性和弹性，创造更多的就业机会。具体内容如下：

一、当前美国能源系统碳排放主要来自建筑、交通和工业部门化石燃料燃烧

根据 2020 年数据显示，美国目前大部分碳排放主要来自化石燃料燃烧，为建筑（占能源系统碳排放的 36%）、交通（占能源系统碳排放的 36%）和工业（占能源系统碳排放的 29%）部门各终端应用提供动力。化石燃料发电每年将排放 14.5 亿吨 CO_2，约占美国能源系统碳排放总量的 32%。随着终端应用不断电气化，尤其是在交通和工业领域，电力对能源系统脱碳具有关键作用。因此，在未来转型中，将电力系统脱碳与电气化相结合，使得诸如太阳能等零碳电力资源对现有电力系统实现脱碳目标具有重要支撑作用。

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

2020 年美国太阳能发电装机容量约为 80 吉瓦，占美国电力需求的 3%；按照“标准脱碳”（Decarb）情景预测[8]，到 2035 年预计太阳能发电累计装机容量将达到 760-1000 吉瓦，满足美国电力需求的 37%-42%；到 2050 年预计太阳能发电累计装机容量将达到 1050-1570

[7] DOE Releases Solar Futures Study Providing the Blueprint for a Zero-Carbon Grid. https://www.energy.gov/articles/doe-releases-solar-futures-study-providing-blueprint-zero-carbon-grid

[8] 标准脱碳情景预测利用太阳能（光伏和光热）、其他可再生能源（生物能源、地热、水力发电、陆上和海上风力发电）以及储能（电池和抽水蓄能）技术，使到 2035 年 CO_2 排放量比 2005 年水平减少 95%，到 2050 年实现净零排放。

吉瓦，满足美国电力需求的 44%-45%。其中 80%-90%的太阳能装机容量将由公共事业规模太阳能发电贡献，其余由分布式太阳能发电贡献。按照“脱碳电气化”（Decarb+E）情景预测[9]，2035 年电力需求较 2020 年增长约 30%，其中太阳能发电将满足美国电力需求的 37%，剩余部分由其他零碳资源提供，包括风能（36%）、核能（11%-13%）、水力发电（5%-6%）、生物能源和地热（1%）；到 2050 年，所有电力均由零碳能源提供，其中太阳能和风能占比最大，分别为 45%和 44%。在 Decarb 和 Decarb+E 情景下，到 2050 年美国能源系统碳排放总量较 2005 年分别减少 40%和 62%，通过进一步电气化、能源效率、脱碳燃料、包括太阳能工业热利用（SHIP）在内的可再生热生产以及碳捕集与封存等策略，实现能源系统净零排放（如图 1 所示）。在所有情景中，清洁发电、存储和传输、运营和维护以及其他方面的资本投资都将产生成本，此外技术成本、排放政策、电气化和需求侧灵活性都对电力系统的平均成本和边际成本产生影响。在 Decarb+E 情景中，需求侧灵活性抵消了更高电气化导致的平均成本增加，因此到 2035 年该情景下电力平均成本略低于 Decarb 情景。因此，太阳能和其他清洁技术的进步和灵活需求的结合，将促使电力系统碳排放大幅减少（约 95%），而边际成本几乎不增加。

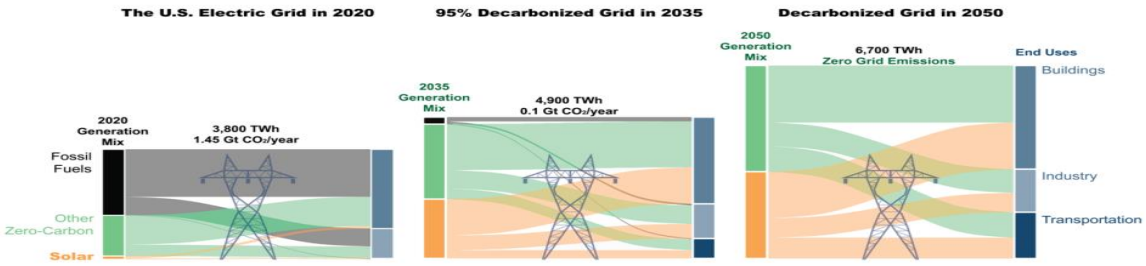


图 1 Decarb+E 情景下 2020 年、2035 年和 2050 年电力系统能源消耗占比变化

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

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

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

四、发展太阳能产业将促进能源体系收益与成本公平分配

以化石燃料为基础的电力系统为现代社会带来了诸多好处，但也产生了巨大的社会成本，包括公共健康损害、环境破坏和气候变化等。现有能源系统的收益和成本并没有得到公平的分摊，社会阶层较低的社区（如低收入社区、有色社区、面临短期气候变化风险的社区）承担了现有能源体系中不成比例的大部分成本，而享受到较少的收益，并在很大程度上被排除在现代化能源体系规划之外。与所有能源一样，太阳能在各个国家、各地区范围内产生的社会效益远远超过其社会成本。然而，这些收益与成本的分配不一定是公平的。研究表明，通过各种干预措施（财政、社区参与、选址、政策、监管和弹性措施）将有助于解决屋顶光伏发电采用的公平性。此外，电力系统清洁转型将产生数十万个取代化石燃料行业的工作岗位，其中快速增长的太阳能相关行业将吸收大量化石燃料失业工人。

五、推进太阳能+储能一体化建设，将加快电力系统脱碳进程

储能技术是实现深度脱碳和高比例太阳能装机的关键。在 Decarb+E 情景中，到 2050 年太阳能和储能累计装机容量大致相等。目前，太阳能集成储能方式大部分是短时储能（几小时内进行能量转

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

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

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

七、太阳能将助力建筑、交通和工业等终端用能部门实现脱碳目

标

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

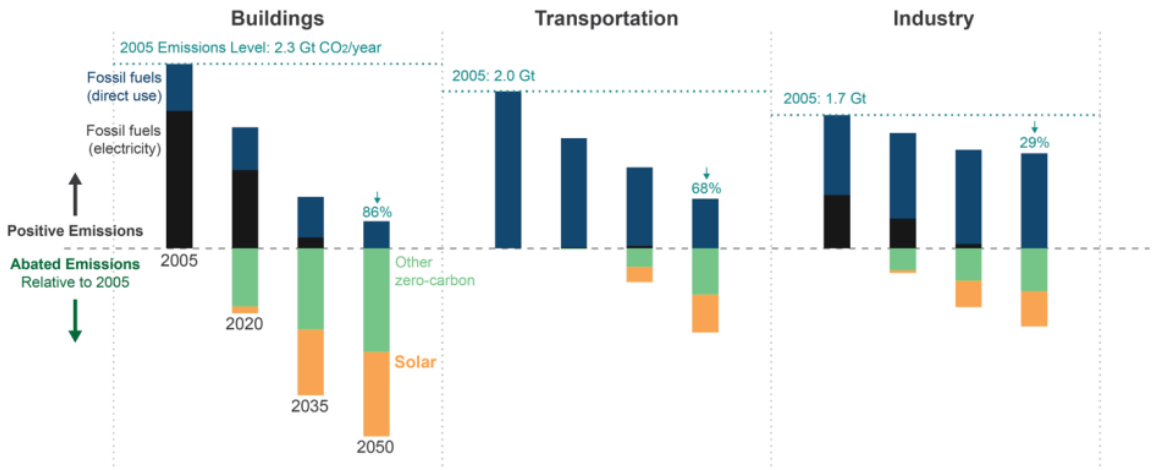


图 2 在 Decarb+E 情景中建筑、交通和工业部门碳减排情况对比

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

太阳能未来方案与太阳能技术整个生命周期中材料的使用、太阳能供应链以及土地和水资源使用的相关挑战和机遇息息相关，所有这些因素都将影响环境和能源分配的公平性。基于对美国和全球太阳能

技术制造相关潜在材料需求的分析表明，当材料实现回收和再利用时，材料供应将不会限制太阳能应用的扩张。未来最大限度利用可回收材料，将对能源和材料安全、社会和环境影响、国内劳动力和制造业方面产生巨大效益，未来急需在技术上取得突破，并适应目前美国资源回收和循环经济趋势。为构建一个多样化、不过度依赖任何单一供应渠道的弹性光伏供应链，美国光伏制造业将通过提高自身自动化程度、利用国内制造特定组件的固有优势以及先进制造技术和自动化产品以提高其国际竞争地位。此外，太阳能发展面临的土地可用性同样也不是太阳能未来愿景的障碍，这是因为到 2050 年，太阳能扩张所需的土地面积只占美国地表面积的 0.5%，可以通过使用尚存的 10%左右的储备用地得以满足，从而避免高价值土地的征用。与化石燃料和核能发电相比，太阳能和其他部分清洁能源发电技术对水需求量较少，在太阳能未来脱碳方案中，电力部门耗水量将减少约 90%。最后，在劳动力方面，目前太阳能行业在美国已创造了 23 万个工作岗位，预计到 2035 年该行业将创造 50-150 万个工作岗位。此外，基于对现有清洁能源行业的研究表明，这些工作的工资往往高于社会平均工资，并且所需的教育门槛更低。

九、推动政策和市场长期支持，以加快实现太阳能未来脱碳方案

在既定政策情景中，到 2050 年电力行业将继续每年排放 9.3 亿吨 CO_2，因此除了上述 7 项措施（前文 2-8）之外，实现太阳能未来愿景还需持续的政策和市场支持。由于政策采取的脱碳措施相较于仅凭市场自身调节对实现脱碳目标更为关键。越来越多的州政府和公共事业单位承诺到 2050 年之前实现电力系统脱碳。鉴于电力系统脱碳的边际成本随着接近 100%脱碳而增加，实现这一目标将需要坚定且长期的政治支持。政策支持包括通过研发投资，推动太阳能基础设施的快速部署以及发电成本的降低，加速技术创新，并确保清洁能源转型过程中收益公平分配。

[中国科学院武汉文献情报中心 汤匀]

英国发布国家氢能战略绘制 2030 氢经济路线图

8 月 17 日，英国商业、能源和工业战略部（BEIS）发布《英国氢能战略》[10]，提出了到 2030 年英国氢经济发展的愿景目标及路线图。该项战略建立在英国“绿色工业革命十点计划”基础上，旨在到 2030 年实现 5 吉瓦的低碳氢生产能力。该战略提出了氢能生产、输配网络及存储、氢能利用等领域的分阶段目标和关键行动。详情如下：

一、愿景目标

到 2025 年，英国实现 1 吉瓦低碳制氢产能；到 2030 年，成为全球氢能领导者，实现 5 吉瓦的低碳制氢能力以推动整个经济脱碳，并制定明确的计划以在未来进一步扩大规模，助力实现第 6 次碳预算（CB6）和净零排放目标，同时促进新的就业和清洁增长。

具体而言，到 2030 年将实现如下成果：通过碳捕集、利用与封存（CCUS）和/或电解制氢实现脱碳氢供应；借鉴早期项目、更成熟的市场和技术创新，推动低碳制氢成本下降；建立面向多类型用户的端到端氢气系统；提高公众和消费者意识，使其接受在能源系统中使用氢能；成为国际氢能市场领先者，吸引大量外来投资；通过氢能为减排目标做出重大贡献；基础设施、技术、监管和市场框架均到位，为 2030 年后的市场扩张奠定基础；总结创新和部署项目经验，为政策制定和完善提供支撑。

根据 BEIS 的估计，到 2030 年实现 5 吉瓦的低碳制氢能力将创造一个繁荣的氢能产业，氢能市场总附加值达到 9 亿英镑，撬动 40 亿英镑的私人投资，创造超过 9000 个工作岗位。在“高氢”情景下，到 2050 年英国氢经济可产生 10 万个工作岗位和 130 亿英镑总附加值。

二、氢经济路线图

1、2020 年代早期（2022-2024 年）：

[10] UK Hydrogen Strategy. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1011283/UK-Hydrogen-Strategy_web.pdf

（1）发展重点：制氢方面，发展小规模电解制氢；氢能网络方面，发展直接管道运输、区域中心、卡车运输（非管道）或现场使用；应用方面，发展氢能交通（公交、重型货车、铁路和航空试验），工业示范，社区供热试验。

（2）关键行动和里程碑： 2022 年早期启动“净零氢能基金”（NZHF），投入 2.4 亿英镑支持部署低碳制氢项目； 2021 年决定第一阶段 CCUS 集群； 2022 年确定最终的低碳氢标准； 2022 年确定氢能商业模式； 2023 年开展社区供热试验； 2022 年第三季度确定将氢气掺混进天然气网络案例的推广价值。

2、2020 年代中期（2025-2027 年）

（1）发展重点：制氢方面，至少在一个地区部署配备 CCUS 的大规模低碳制氢设施，扩大电解制氢规模；氢能网络方面，建立小规模集群的专用管道网络，扩大卡车运输和小规模存储；应用方面，发展工业应用，开展氢能重型货车和轨道交通试验、村庄供热试验以及氢气掺混进天然气网络试验。

（2）关键行动和里程碑： 2025 年低碳制氢产能达到 1 吉瓦；到 2025 年至少建立 2 个 CCUS 集群； 2025 年进行村庄供热试验；2026 年决定氢能供热； 2020 年代中期部署氢能重型货车。

3、2020 年代后期（2028-2030 年）

（1）发展重点：制氢方面，部署多个配备 CCUS 的大型制氢项目和大型电解制氢项目；氢能网络方面，建立大规模集群网络和大规模储氢设施，将氢气网络与天然气网络集成；应用方面，在工业中广泛应用，部署氢能发电并提供灵活性，发展氢能重型货车和航运，开展城镇供热试验。

（2）关键行动和里程碑：到 2030 年低碳制氢产能达到 5 吉瓦；到 2030 年建立 4 个 CCUS 集群；到 2030 年部署氢能试点城市；到 2030 年实现 40 吉瓦海上风电。

4、2030 年代中期以后

（1）发展重点：制氢方面，扩大低碳制氢规模，发展其他制氢技术（如核能制氢、生物质制氢）；氢能网络方面，建立区域或国家氢能网络，将大规模储氢与 CCUS、天然气和电力网络集成；应用方面，氢能全面应用于工业终端用户，建立氢能发电系统，更大规模的氢能航运和航空，推进天然气网络向氢气网络转换。

（2）关键行动和里程碑：实现第 6 次碳预算目标。

[中国科学院武汉文献情报中心 岳芳]

欧盟“地平线欧洲”框架计划公布 2021-2022 年能源资助主题

6 月 16 日，欧盟委员会宣布其“地平线欧洲”（Horizon Europe）研发框架计划第一阶段（2021-2022 年）资助方案正式通过[11]，明确了未来两年的研发目标和具体主题。其中能源相关研发主要由第 2 支柱“全球挑战与欧洲产业竞争力”的第 5 部分“气候、能源和交通”[12]，以及“欧洲原子能共同体（EURATOM）研究和培训计划”[13]资助，相关主题包括：

一、“气候、能源和交通”相关主题

1、气候转型的交叉部门解决方案

（1）竞争性、可持续的欧洲电池价值链。该领域 2021 年和 2022 年预算分别为 1.6 亿欧元和 1.33 亿欧元，拟资助主题包括：原材料可持续加工、精炼和回收；先进高性能第 3b 代（高容量高电压）锂离子电池以支持交通电气化和其他应用；先进高性能第 4a、4b 代（固

[11] Main work programme of Horizon Europe adopted https://eic.ec.europa.eu/news/main-work-programme-horizon-europe-adopted-2021-06-16_en

[12] Horizon Europe Work Programme 2021-2022: 8. Climate, Energy and Mobility. https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/opportunities/docs/2021-2027/horizon/wp-call/2021-2022/wp-8-climate-energy-and-mobility_horizon-2021-2022_en.pdf

[13] Euratom Research and Training Programme Work Programme 2021-2022. https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/opportunities/docs/2021-2027/euratom/wp-call/2021-2022/wp_euratom-2021-2022_en.pdf

态）锂离子电池以支持交通电气化和其他应用；锂离子电池电极及组件大规模、环保的加工技术；开发固态电池制造技术；可持续、安全、高效的回收工艺；支持建立研究创新生态系统，制定具有前瞻性的战略方向，以确保未来的知识、技术和工艺发展处于领先，加速颠覆性技术的探索和采用。

（2）新兴突破性技术和气候解决方案。该领域 2021 年预算为 3500 万欧元，拟资助主题包括：建立碳中和欧洲的新兴技术；甲烷裂解制氢技术；非 CO_2 温室气体去除技术；直接空气碳捕集及转化利用。

（3）公民和利益相关者参与。该领域 2021 年预算为 5550 万欧元，拟资助主题包括：促进欧洲的公正转型；增强气候、能源和交通领域的社会科学和人文研究能力；通过“转型超级实验室”试点项目加速困难环境下的气候转型；促进国家联络机构之间的合作。

（4）社区和城市。该领域 2021 年和 2022 年预算分别为 3700 万欧元和 500 万欧元，拟资助主题包括：共同资助伙伴关系、推动城市向可持续未来转型。

2、可持续、安全和有竞争力的能源供应

（1）全球领先的可再生能源。该领域 2021 年和 2022 年预算分别为 3.35 亿欧元和 3.685 亿欧元，拟资助主题包括：通过波浪能设备示范运行以增加在真实海况下的经验；可再生能源和可再生燃料技术的可持续性和技能培训；促进可再生能源系统市场采纳的措施；新型高效串联光伏技术，可利用资源丰富的材料进行低成本生产；通过非盟-欧盟伙伴关系相关活动开展水、能源、粮食关系研究；下一代可再生能源技术；可再生能源催化转化为碳中和燃料；风力发电大气流动的物理学和空气动力学；在自然和社会环境中推广风能的相关研究；连接光热发电（CSP）的新方法；稳定的高性能钙钛矿光伏；经济高效的微型热电联产（CHP）和复合供热系统；负碳可持续生物燃料生

产；浮动式光伏和海洋能设备的创新基础、浮动结构和连接系统；开发用于低水头和/或小水库和/或盐水的水电设备；针对深水和不同海盆的浮动式风电部署创新；新型晶硅串联、薄膜串联、双面、聚光光伏等替代和创新光伏技术的试产线示范；使用生物残留物和废物的大规模 CHP 技术示范；更可持续的地热能解决方案；作为能源载体和燃料的生物甲烷创新生产技术；利用现有工厂示范经济高效的生物燃料技术；示范创新材料、供应周期、回收技术，以提高风能技术的整体循环利用并减少关键原材料的一次性使用；一体化光伏的先进制造；示范利用高温地热储层为能源系统提供储能；在离网应用中示范用于系统管理和可再生能源存储的创新即插即用解决方案；新型农业光伏系统；潮流能设备的创新转子、叶片和控制系统示范；开发用于分析国际可再生能源价值链协同效应的数字解决方案；非盟-欧盟能源系统建模；创新的可再生能源载体生产，用于利用可再生能源进行供热；开发新技术连接太阳能燃料与其他可再生能源；利用过剩波动性可再生能源电力和能源消费部门的碳排放，开发可再生能源载体；将可再生能源直接整合到化工过程能源需求中；将可再生能源纳入农业和林业部门；先进生物燃料和非生物可再生燃料生产的完整价值链示范；用于 CSP 发电厂和/或聚光太阳热装置安装的新兴组件和/或子系统；扩大可持续生物燃料规模的最佳国际实践；高效循环人工光合作用；集成风电场控制；以高效率为目标的新型薄膜光伏技术；用于工业的低价值生物残留物和废物燃烧气化系统的高效低排放技术；开发非生物来源的藻类和可再生燃料；开发现有水电运维数字解决方案；光伏组件的报废回收。

（2）能源系统、电网及储能。该领域 2021 年和 2022 年预算分别为 1.52 亿欧元和 1.81 亿欧元，拟资助主题包括：开发、验证、示范一个能源数据空间，为欧洲共同的能源数据空间建立基础；通过多项协调合作为具有并网能力的多供应商多终端高压直流（HVDC）实

时示范做好准备；建立一个研究能源转型相关互操作性的实践社区；能源部门整合研究，将能源系统整合并组合成经济且灵活的综合能源系统；通过向消费者提供能源消费整合服务，提高能源系统的灵活性；通过针对电网漏洞、故障、风险和隐私的措施提高电网的可靠性和弹性；通过基于 HVDC 的系统和解决方案设计提高电力系统可靠性和弹性；超导系统和 Elpipes 技术[14]的示范；先进电力电子在能源领域的应用示范；加强本地能源生态系统的数字化相关知识；支持消费者在能源市场的行动，引导消费者以产消合一者、社区和其他形式积极参与能源活动；具有并网能力的多供应商多终端 HVDC 实时示范（可支持海上系统）；开发基于分布式储能灵活性服务的互操作解决方案；示范新型储能技术并集成到创新的能源系统和电网架构中；跨部门能源生态系统的可复制解决方案；能源系统建模、优化和规划工具；储热解决方案。

（3）碳捕集、利用与封存（CCUS）。该领域 2021 年和 2022 年预算分别为 3200 万欧元和 5800 万欧元，拟资助主题包括：将 CCUS 集成至枢纽或集群，并开展知识共享活动；通过新技术或改进技术降低碳捕集成本；通过 CCUS 进行工业脱碳。

（4）交叉领域问题。该领域 2021 年和 2022 年预算分别为 6480 万欧元和 3500 万欧元，拟资助主题包括：清洁能源转型伙伴关系相关活动，支持开发能源转型相关使能技术、颠覆性技术和系统创新技术；支持欧洲地质服务相关活动；支持欧盟“战略能源技术规划”（SET-Plan）技术领域以及欧洲技术与创新平台（ETIP）相关活动。

3、高效、可持续和广泛的能源利用

（1）高能效和碳中和的欧洲现存建筑。该领域 2021 年和 2022 年预算分别为 7400 万欧元和 1.22 亿欧元，拟资助主题包括：先进的能效评估和认证；节能建筑深度改造工作流程的产业化；现存建筑能

[14] Elpipes 是基于金属导体的聚合物绝缘地下 HVDC 输电管道。

源性能的先进数据驱动监控；为有性能保证的建筑示范综合技术解决方案；经济高效可持续的多功能和/或预制整体翻新解决方案，集成可再生能源资源并使用再利用和回收材料；加强欧洲的协调和交流，促进对创新技术的采纳以增强建筑的可持续性、质量、循环性和社会包容性，作为对“新欧洲包豪斯”运动的贡献；节能住宅建筑的需求响应；可再生能源密集型正能量住宅；更智能的建筑以实现更好的能源性能。

（2）能源转型中的工业设施。该领域 2021 年和 2022 年预算分别为 3000 万欧元和 1800 万欧元，拟资助主题包括： 90-160℃供热升级系统的全规模示范，利用可再生能源、环境热或工业废热为各种工业过程供热；基于有机朗肯循环的工业废热发电技术； 150-250℃供热升级系统的开发和试点示范，利用可再生能源、环境热或工业废热为各种工业过程供热；开发工业高温储热技术。

4、所有交通方式的清洁、竞争性解决方案

（1）零排放道路交通。该领域 2021 年和 2022 年预算分别为 9400 万欧元和 1.05 亿欧元，拟资助主题包括：开发用于区域中型货运的创新零排放电动汽车；开发电动汽车集成先进电力电子和相关控制设备；开发系统方法，在大规模部署条件下实现优化的智能电动汽车充电和车辆到电网（V2G）的灵活性；零排放交通解决方案和相关电池价值链的生命周期评估和可持续循环设计；电动汽车和燃料电池汽车的模块化多动力总成零排放系统，实现高效经济的运行；开发高效低成本电机，实现循环性并减少对稀有资源的使用；开发新一代全电动城市和城郊快速公交系统；促进道路交通研究创新在欧洲和世界的传播和实施；

（2）航空。该领域 2021 年和 2022 年预算分别为 5400 万欧元和 4500 万欧元，拟资助主题包括：到 2050 年实现碳中和的航空温室气体减排技术；从设计、制造、集成和维护等方面促进下一代数字飞机

转型；开发无声和超低空气污染飞机；开发数字航空技术，用于新航空商业模式和服务，应对新兴全球威胁和行业竞争；支持欧盟政策和计划的欧洲航空政策研究。

（3）实现碳中和、清洁、智能和有竞争力的水上运输。该领域2021年和2022年预算分别为9350万欧元和9600万欧元，拟资助主包括：①实现氨和氢燃料在船舶的安全高效大规模存储和集成；通过热电联产和联合循环解决方案将超高功率燃料电池完全集成到船舶设计中，以提高多种燃料的效率；确定水运可持续燃料部署方案；创新的船载节能解决方案；电动船舶高功率快速充电系统；评估和防止现有及新船舶液化天然气发动机的甲烷泄漏；开发数字孪生模型以确保绿色船舶运行；证明大型清洁船用氨燃料发动机的可行性；开发纯电动和混合动力船舶储电系统并更好地优化电池；创新船用储能系统；探索将可再生能源用于船运，尤其关注使用风能的潜力；通过改造实现现有船舶的更环保运行；通过自主水上货运循环服务实现无缝安全物流；开发造船计算工具。

（4）交通对环境和人类健康的影响。该领域2021年和2022年预算分别为1500万欧元和700万欧元，拟资助主题包括：针对排气管和刹车开发和示范成本合理且适应性强的改造解决方案；评估实际驾驶条件下L类车辆的噪声和颗粒排放；发动机排放的挥发性、半挥发性和二次粒子对空气质量的影响。

（5）交叉领域行动。该领域2021年预算为150万欧元，拟资助主题包括：支持交通领域研究的传播活动。

5、为乘客和货物提供安全、弹性的运输和智能交通服务

（1）互联、合作和自动化交通（CCAM）。该领域2021年和2022年预算分别为7400万欧元和8800万欧元，拟资助主题包括：更强大、可靠的车载感知和决策技术，可应对复杂的环境条件；CCAM系统安全验证的通用方法；通过物理和数字基础设施、连通

性和合作支持实现 CCAM；网络安全和弹性的 CCAM； CCAM 解决方案的社会经济和环境影响分析，以及社会、公民和用户需求评估；更好地协调欧洲大规模示范试点和欧盟范围内的知识库；在欧洲示范人员和货物的集成共享自动化交通解决方案；可靠的乘客保护技术和人机界面解决方案，确保高度自动化车辆的安全； CCAM 解决方案性能评估的人类行为模型；在车队和交通管理系统中集成 CCAM 服务；基于人工智能开发可解释且可靠的 CCAM 概念、技术和模型。

（2）乘客和货物的多模式和可持续运输系统。该领域 2021 年和 2022 年预算分别为 5300 万欧元和 9100 万欧元，拟资助主题包括：更高效、有效的多式联运货运节点，以提高灵活性、服务可见性并降低货运平均成本；新的交付方式和商业/运营模式，确保最后一英里的绿色运行，优化道路运输；气候适应和环境可持续的交通基础设施，重点关注内陆水道；通过运营的连通整合和协调物流网络，以优化货运流并推动物流实现碳中和；城市物流和规划，预测城市货运的产生和需求，包括城市货运的数字化；智能执法，实现弹性、可持续和更高效的运输运营；在未来十年加速部署新的共享交通服务；先进的多式联运网络和交通管理，实现客运和货运的无缝门到门运输；以智能高效方式建造、维护和退役交通基础设施，实现零排放；开发新概念和方法，实现可应对破坏性事件（包括流行病）的弹性和绿色货运和物流网络。

（3）各种运输方式及相互间的安全和弹性。该领域 2021 年和 2022 年预算分别为 4000 万欧元和 3400 万欧元，拟资助主题包括：在未来的交通系统中测试安全的轻型车辆并改进安全的人机交互；非洲中低收入国家道路安全的根本改善；大型客轮的流行病传染控制；航空安全运营控制的自动和人为因素研究；为道路弱势使用者提供预测性安全评估框架和更安全的城市环境；开发更具弹性的飞机，增强生存能力；更安全的航行和应对集装箱船火灾。

二、“EURATOM 研究和培训计划”资助方案

“EURATOM 研究和培训计划”主要关注核能研究和创新，第一阶段（2021-2022 年）资助主题如下：

1、核能研究和培训

（1）核安全。该领域 2021 年和 2022 年预算分别为 3900 万欧元和 1500 万欧元，拟资助主题包括：核电站和研究堆的安全运行；先进和创新的核能系统设计及核燃料的安全性；轻水反应堆乏燃料的多次循环利用；用于核能的先进结构材料；高温反应堆的安全性；未来核裂变和核聚变电厂的许可程序、代码和标准的协调一致；开发聚变和裂变设施的氚管理技术。

（2）乏燃料和放射性废物的管理和退役。该领域 2021 年和 2022 年预算分别为 240 万欧元和 60 万欧元，拟资助主题包括：在废物管理和退役方面协调应用国际监管框架。

（3）核科学和电离辐射应用、辐射防护、应急准备。该领域 2022 年预算为 2400 万欧元，拟资助主题包括：欧洲辐射防护和电离辐射检测研究的伙伴关系；医用放射性核素的安全使用和可靠供应；核技术的跨部门协同和新应用。

（4）欧盟内部核领域的专业知识和能力。该领域 2021 年和 2022 年预算分别为 600 万欧元和 1235 万欧元，拟资助主题包括：欧洲核研究设施；提升欧洲核技术能力；核技术相关社会-经济问题；支持 Euratom 国家联络机构之间的跨国合作；支持可持续核能技术平台以应对电离辐射的跨部门挑战和非电力应用。

2、其他不需要征集提案的行动

除上述主题外，还将在 2021 年和 2022 年分别资助 1.07 亿欧元和 1.08 亿欧元，通过征集提案以外的方式资助活动，如向指定人员和组织提供资助、公共采购、设定奖项、聘请专家等。

[中国科学院武汉文献情报中心 岳芳]

日本 NEDO 资助大规模示范项目打造氢能产业供应链

8 月 26 日，日本新能源产业技术综合开发机构（NEDO）宣布将在“绿色创新基金”资助框架下，启动“大规模氢供应链建设”和“利用可再生能源等电力电解制氢”示范项目[15]，旨在推进构建氢能产业供应链，通过电力转换为其他载体（Power to X）技术促进氢能的普及，助力实现 2050 碳中和目标。日本政府为实现碳中和目标启动了总额达 2 万亿日元的“绿色创新基金”，此次资助项目为其首批资助，详情如下：

1、大规模氢供应链建设项目

该项目将通过建立国际氢能供应链，降低供氢成本，构建氢能大规模利用的供氢模式，主要涉及“国际氢能供应链技术开发及液氢相关设备评估平台建设”和“氢能发电（混氢燃烧、纯氢燃烧）技术开发”两个子领域，共确定资助 8 个课题，包括：

液氢供应链有 2 个课题，资助金额共约 2200 亿日元：

（1）液氢供应链规模化示范。该课题执行期为 2021-2029 年，将通过对现有项目开发的大规模运氢技术进行商业示范，构建液氢商业供应链（单个供应链的供应规模达到数万吨/年），以实现到 2030 年海上运氢的船上交货成本 30 日元/标准立方米。

（2）创新液化技术开发。该课题执行期为 2021-2030 年，将开发提高氢气液化效率的创新技术，以实现到 2050 年氢能供应成本降至 20 日元/标准立方米及以下。

储氢载体甲基环己烷（MCH）供应链有 2 个课题，资助金额共约 630 亿日元：

（3）储氢载体甲基环己烷（MCH）供应链大规模示范。该课题执行期为 2021-2030 年，将开展商业示范项目，构建 MCH 供应链（单

[15] グリーンイノベーション基金事業、第 1 号案件として水素に関する実証研究事業に着手. https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101471.html

个供应链的供应规模达到数万吨/年），利用炼油厂设备进行 MCH 脱氢，以实现到 2030 年供氢成本 30 日元/标准立方米。该项目将通过规范 MCH 品质、包装技术、审批和许可流程等，推进进入国际市场。

（4）直接电解合成 MCH 技术开发。该课题执行期为 2021-2030 年，将开发直接电解合成 MCH 的技术，通过减少中间转化步骤大幅降低成本，以实现到 2050 年氢能供应成本降至 20 日元/标准立方米。

液氢相关设备评估平台建设有 1 个课题，资助金额约 30 亿日元：

（5）开发材料评价平台以支持液氢相关设备的研发。该课题执行期为 2021-2025 年，将开发在低温氢气环境下统一评估材料力学性能的方法，以降低液氢生产、运输、储存、利用等相关设备成本。此外，将与相关公司合作，对金属原材料和焊接构件的力学性能进行评估，建立材料数据库。

氢能发电（混氢燃烧、纯氢燃烧）技术开发有 3 个课题：

（6）大型燃气轮机混氢燃烧（2021-2025 年，资助约 70 亿日元）；（7）中型燃气轮机混氢/纯氢燃烧（2021-2026 年，资助约 100 亿日元）；（8）大型燃气轮机纯氢燃烧（2021-2030 年，资助约 140 亿日元）。通过将现有的混氢/纯氢燃气轮机在实际电厂中示范运行，以验证其燃烧稳定性，同时与各种国际氢供应链示范项目进行密切合作，旨在到 2030 年实现其发电技术的商业化（其中混氢燃烧的掺氢比例达到 30%）。

2、可再生能源电解水制氢

该项目将促进碱性电解槽、聚合物电解质膜（PEM）电解槽等技术的规模化和模块化开发，进一步降低可再生能源电解制氢成本，同时还将进行相关应用技术的实证研究，主要涉及“电解槽规模化技术开发及 Power to X 技术大规模示范”和“电解槽性能评估技术开发”两个子领域，共确立资助 3 个课题，包括：

（1）大型碱性电解槽开发及绿色化学品示范。该课题执行期为

2021-2030 年，资助金额约 540 亿日元。目标是到 2030 年将碱性电解槽成本降至 52000 日元/千瓦，建立利用过剩可再生能源电力制氢的基地，并在国际市场上占据领先地位。该课题将以福岛作为首个候选基地，利用现有项目成果并进行电解槽规模化和模块化技术开发，结合制氨等生产工艺，开发集成控制系统。随后将利用电解槽模块安装 40 兆瓦规模大型电解槽，在进行多模块运行的同时示范合成基础化学品。

（2）大型 PEM 电解槽开发及供热示范。该课题执行期为 2021-2025 年，资助金额约 100 亿日元。目标是到 2030 年将 PEM 电解槽成本降至 65000 日元/千瓦，建立利用过剩可再生能源电力制氢的基地，并在国际市场上占据领先地位。该课题将开发 PEM 电解槽的大型化和模块化、具有优异耐久性和导电性的膜以及提高燃氢锅炉效率相关的技术。此外，将开发 16 兆瓦级电解槽及相关设备的模块化技术，提供成套安装技术，并利用燃氢锅炉进行脱碳供热示范。

（3）电解槽性能评估技术开发。该课题执行期为 2021-2025 年，资助金额约 30 亿日元。将通过实现电解槽性能的统一评估，预测海外市场的增长，明确技术出口发展方向。具体而言，将根据需要与海外机构合作，尤其关注针对欧洲运行环境的验证，包括：①大型电堆（500 千瓦级）的加速老化试验；②高压条件（超过 1 兆帕）下的电堆（500 千瓦级）测试；③建立模拟国外可再生能源发电条件下的大型电解槽（兆瓦级）试验综合评估方法，力争实现国际标准化。

[中国科学院武汉文献情报中心 岳芳]

新钝化工艺助力倒置结构钙钛矿电池创下 22.9%效率纪录

钙钛矿太阳电池的开路电压受到钙钛矿/载流子传输层（CTL）界面处的非辐射复合限制，克服上述界面处的复合损失是增强电池性

能关键。目前研究人员广泛采用的方法是钝化钙钛矿薄膜顶层界面（钙钛矿薄膜和空穴传输层接触界面），而忽略了钙钛矿薄膜的掩埋界面（钙钛矿薄膜和载流子传输层接触界面）。因此开展掩埋界面的钝化处理具有显著的科学价值和意义。

加拿大多伦多大学 Edward H. Sargent 教授研究团队设计制备了一种含有丰富 NH_2 官能团的钙钛矿薄膜并在此基础上组装成倒置结构钙钛矿电池，由于 H 键能够与金属氧化物载流子传输层中配位不足的 O 键具有强烈的键合作用，使得钙钛矿薄膜的掩埋界面自发形成了两维钙钛矿钝化层，有效地抑制了上述界面处的非辐射载流子复合损失，显著增强了电池的开路电压，获得 22.9%光电转换效率，这是倒置结构钙钛矿太阳电池效率的最高值。传统的钙钛矿界面钝化工艺是在钙钛矿薄膜顶层界面额外旋涂一层薄膜作为钝化层，这种方法形成的钝化层容易在旋涂空穴传输层的时候被破坏，导致钝化效果被削弱。为此研究人员在钙钛矿前驱体中引入一种含有丰富 NH_2 基团有机阳离子，该基团中丰富的 H 键能够强烈键合载流子传输层中配位不足的 O 化学键，这有助于在钙钛矿掩埋层形成择优的结晶取向，有利于载流子传输。为了对比研究，研究人员同时制备了无有机阳离子的钙钛矿前驱体，随后在氧化镍（NiO_x）衬底上通过旋涂法制备出了两种薄膜，扫描电镜表征显示在含有有机阳离子钙钛矿薄膜中出现了择优取向的两维钙钛矿结晶相，有利于载流子传输；且没有出现铅碘溴（$PbI_{2-x}Br_x$）复合物相，相关研究表明这种复合物相会阻碍空穴传输；相反，在无有机阳离子钙钛矿薄膜中没有出现两维钙钛矿结晶相，但却出现了 $PbI_{2-x}Br_x$ 复合物相。上述实验结果表明，有机阳离子引入能够改善钙钛矿结晶。掠入射广角 X 射线散射测试分析结果显示，两维钙钛矿结晶相是存在于钙钛矿薄膜的掩埋界面充当钝化层，这有助于抑制载流子在上述界面处的非辐射复合损失。接着以上述钙钛矿薄膜分别组装出两个倒置结构的钙钛矿电池并进行电化学性能

测试，结果显示基于含有有机阳离子的钙钛矿薄膜电池器件开路电压明显增加，其中采用 NiO_x 衬底的增加了 65 mV，使得电池效率达到了 20.1%，而采用二氧化锡（SnO_2）衬底的开路电压更是大幅增加了 100 mV，相应电池效率突破了 22%达到了 22.9%，这是迄今为止倒置结构钙钛矿太阳电池转换效率的最高值。

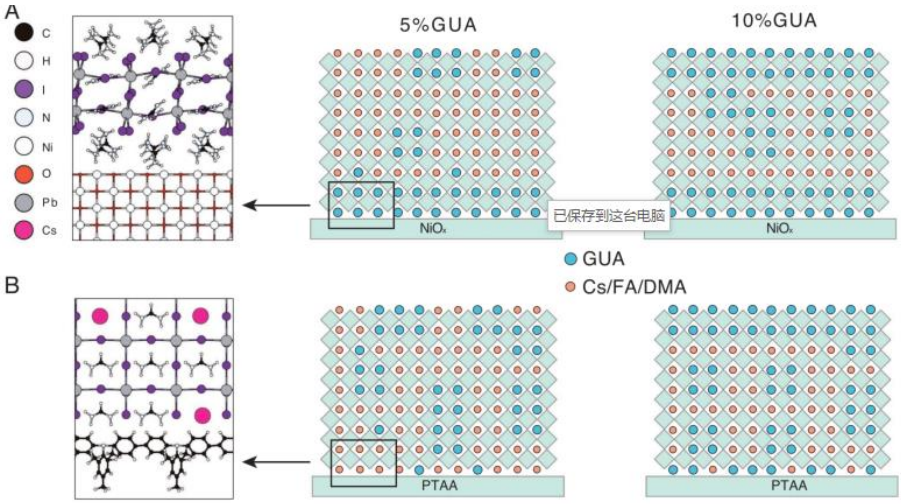


图 1 含有丰富 NH_2 官能团有机阳离子钙钛矿薄膜掩埋面结晶过程的示意图

该项研究通过在钙钛矿前驱体中引入含有丰富 NH_2 官能团的有机阳离子，NH_2 中大量的 H 键能够与金属氧化物载流子传输层中配位不足的 O 化学键键合，促使在钙钛矿的掩埋面形成了择优结晶取向的两维钙钛矿钝化层，有效地减少了钙钛矿薄膜和载流子传输层接触界面的非辐射复合损失，进而增强了电池性能，获得了迄今为止倒置结构钙钛矿太阳电池效率的最高值 22.9%，为开发高性能钙钛矿电池指明了新方向。相关研究成果发表在《*Advanced Materials*》[16]。

[中国科学院武汉文献情报中心 郭楷模]

阳极氧化钛催化剂实现 CO_2 高效串联电还原制甲醇

甲醇（CH_3OH）是一种主要的运输燃料和化工原料，全世界每年产量 9500 万吨。然而，传统甲醇生产工艺会导致大量的二氧化碳排

[16] in Chen, Hao Chen, Yi Hou, et al. Passivation of the Buried Interface via Preferential Crystallization of 2D Perovskite on Metal Oxide Transport Layers. *Advanced Materials*, 2021, DOI: 10.1002/adma.202103394

放。利用可再生能源发电，电还原二氧化碳（CO_2RR）是合成甲醇的一条很有吸引力的路线，然而，该反应仍然缺少高效的电催化剂，亟需开发一种良好活性和高选择性的催化剂。

新加坡国立大学 Boon Siang Yeo 和巴塞罗那大学 Federico Calle-Vallejo 等联合团队，提出了一种将 CO_2 还原为 HCOOH，然后将 HCOOH 还原为 CH_3OH 的策略，得益于阳极氧化钛（Ti_{an}）催化剂的使用，将电化学惰性的 HCOOH 还原为 CH_3OH，提高羧酸的电还原能力，为 CO_2 电还原制甲醇开辟了新的途径，展现出了工业化应用潜力。研究人员采用串联策略，首先将 CO_2 还原为甲酸（HCOOH），然后将后者还原为 CH_3OH；第二步，即甲酸还原（FAR）因为 HCOOH 具有电化学惰性，使得后一步反应极其困难。为此，研究人员对地球上丰富且相对便宜的元素钛进行阳极氧化处理（Ti_{an}），开发了一种包含 Ti^{3+}位点和氧空位的阳极氧化钛催化剂（TOVs）。表征研究表明，Ti_{an} 催化剂是高度无定形的，并且在电催化 FAR 过程中具有 TOVs 位点。研究人员证明 TOVs 位点的数量与 CH_3OH 的产生呈正相关，它不仅提高了 FAR 的 CH_3OH 选择性，同时抑制了竞争的 HER。电化学测试表明 Ti_{an} 对 FAR 还原 CH_3OH 表现出明显的电催化活性，法拉第效率达 12.6%，部分电流密度为-2 mA /cm^2。进一步测试表明 CH_3OH 是通过 CH_2O 的 Cannizzaro 歧化反应形成的，而不是电催化还原。DFT 计算表明，最有利的反应途径是通过 *H_2COOH 中间体的质子化产生 CH_3OH 和*O，填补先前形成的空位。随后氢化为*OH 和 $H_2O_{(l)}$再生 TOV，完成催化循环。

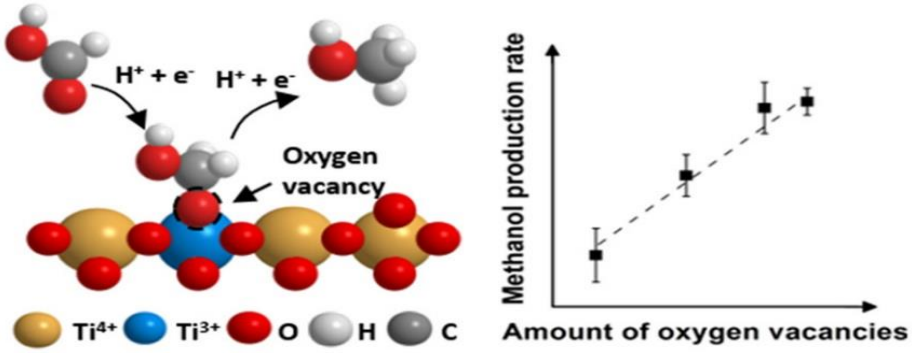


图 1 TOVs 示意图（左）和氧空位与甲醇产率线性图（右）

该项研究设计开发了全新的阳极氧化钛催化剂，受益于含 Ti^{3+}位点和氧空位，将电化学惰性甲酸成功还原成 CH_3OH，从而实现了通过串联电催化还原 CO_2 合成 CH_3OH。该项研究表明，在仅以水为氢源的环境条件下，脂肪族羧酸可以直接电还原为醇。这与传统的使用化学计量试剂（如 $LiAlH_4$）还原羧酸形成对比，后者会产生大量的锂和铝废料。这项工作还提供了将长链脂肪酸转化为有价值的醇（例如正丙醇）的替代途径，为从串联 CO_2 电解合成 CH_3OH 的催化剂高通量自动化设计开辟道路。相关研究成果发表在《*ACS Catalysis*》[17]。

[中国科学院武汉文献情报中心 汤匀]

Co-N-C 单原子催化剂增强 PEM 燃料电池性能和稳定性

质子交换膜（PEM）燃料电池是一种高效、清洁的能量转换装置，其阴极氧还原反应（ORR）依赖于催化剂的高催化活性。然而，目前广泛采用的高性能催化剂大多基于贵金属体系，不利于该电池技术的规模化应用。因此，需要开发低成本高活性 ORR 催化剂。过渡金属、氮共掺杂碳（M-N-C, M=Fe, Co, Mn 等）单原子催化剂被视为是铂族金属催化剂良好的替代品，但其 ORR 反应动力学缓慢，在 PEM 具有氧化性和酸性介质中的催化效率不高，耐久性不佳，上述问题是阻碍该催化剂实现实际应用亟需解决的问题。西北太平洋国家实验室 Yuyan Shao 教授课题组牵头的联合研究团队利用沸石咪唑骨架（ZIF-8），设计开发了一种新型的钴（Co）、氮（N）共掺杂碳（C）单原子催化剂 Co-N-C，具有高比表面积、丰富的微孔结构和高含量 CoNx 原子位点，显著增强了催化剂的 ORR 催化活性，同时 Co 离子在 Fenton 反应中表现出较低活性增强了催化剂稳定性。

相关研究表明，Co-N-C 催化剂表现出低 ORR 活性和高双电子还

[17] Wei Jie Teh, Oriol Piqué, Qi Hang Low, et al. Toward Efficient Tandem Electroreduction of CO_2 to Methanol using Anodized Titanium. *ACS Catalysis*, 2021, 11, 14: 8467–8475

原选择性。同时提高 Co-N-C 催化剂中的 CoNx 催化活性中心密度和控制 Co-N 配位构型，可以大幅度提高其 ORR 催化活性。但传统制备方法容易产生 CoNx 团簇，导致活性降低。为此，研究人员利用模板法，即采用 ZIF-8 来合成 Co-N-C 单原子催化剂前驱体，随后经过热解形成最终催化剂产物。该制备方法利用 ZIF-8 独特的碳氢化合物网络作为 Co 原子之间的保护屏障，从而降低其流动性以避免 Co 的团聚。高温热解之后，ZIF-8 微孔中的 CoNx 部分会直接转化为原子级分散的 CoNx 位点。扫描电镜表征显示，Co-N-C 具有菱形十二面体形状及粗糙表面；扫描透射电子显微镜（STEM）进一步观察到其具有随机定向分布的石墨晶格，以及具有密度较小、孔状形貌的高度无序碳。高角度环形暗场 STEM 表征则显示，该催化剂含有均匀分散的 Co 原子。多孔结构增加了催化剂的比表面积，这有助于增加更多的催化活性位点，进而增强催化剂的活性。随后研究人员测试了上述催化剂的 ORR 性能，在 O_2 饱和的 0.5M H_2SO_4 电解液中，半波电位为 0.82V，0.9 $V_{iR\text{-}free}$ 内阻补偿电压下获得了 0.022 A cm^{-2} 的电流密度，1.0 帕气体压力（H_2/O_2）下燃料电池峰值功率密度达到 0.64 W cm^{-2}，这是非 Fe 的 M-N-C 体系催化剂性能的最优值。随后对催化剂的稳定性进行测试，在 0.6-1.0 V 电压区间进行 10 000 次循环后，电流密度仅衰减了 11%，而在 Fe-N-C 体系则大幅衰减了 47%，表明了 Co-N-C 催化剂具有良好的稳定性。

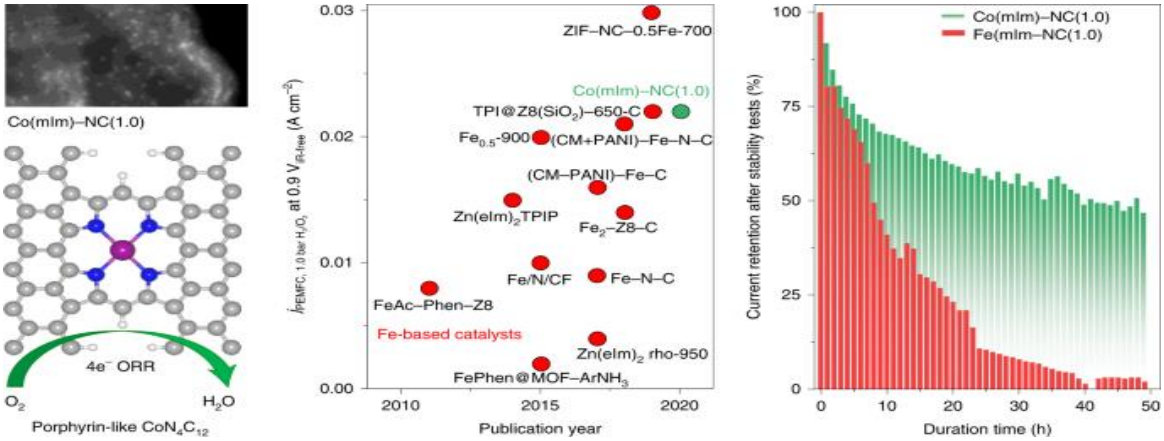


图 1 三维多孔 Co-N-C 复合单原子催化剂及其性能

该项研究利用模板法制备了一种三维多孔 Co-N-C 复合单原子催化剂，独特的三维多孔 C 负载架构增加了暴露的催化活性位点，碳氢化合物网络有效地“隔离”了 Co 原子避免其产生团簇，进而增强了催化剂的 ORR 活性和长程稳定性，为开发高性能低成本的质子交换膜燃料电池催化剂指明了新方向。相关研究成果发表在《*Nature Catalysis*》[18]。

[中国科学院武汉文献情报中心 郭楷模]

[18] Xiaohong Xie, Cheng He, Boyang Li, et al. Performance enhancement and degradation mechanism identification of a single-atom Co–N–C catalyst for proton exchange membrane fuel cells. *Nature Catalysis*, 2020, DOI: 10.1038/s41929-020-00546-1

版权及合理使用声明

《变革性洁净能源关键技术与示范研究发展动态》（简称《洁净能源专项动态》）由中国科学院A类战略性先导科技专项资助、中国科学院大连化学物理研究所和中国科学院武汉文献情报中心合办，洁净能源先导专项管理办公室负责编辑出版。《洁净能源专项动态》反映中国科学院“变革性洁净能源关键技术与示范”A类战略性先导科技专项的研究成果以及国际发展动态。《洁净能源专项动态》遵守国家知识产权法的规定，保护知识产权，保障著作权人的合法利益，并要求参阅人员及研究人员认真遵守中国版权法的有关规定，严禁将《洁净能源专项动态》用于任何商业或其他营利性用途。未经中国科学院大连化学物理研究所同意，用于读者个人学习、研究目的的单篇信息报道稿件的使用，应注明版权信息和信息来源。未经中国科学院大连化学物理研究所允许，院内外各单位不能以任何方式整期转载、链接或发布相关内容。任何单位要链接、整期发布或转载《洁净能源专项动态》内容，应向中国科学院大连化学物理研究所发送正式的需求函，说明其用途，征得同意，并中国科学院大连化学物理研究所签订协议。
欢迎对《洁净能源专项动态》提出意见与建议。

中国科学院大连化学物理研究所

地址：大连市中山路457号
电话：0411-84379960

中国科学院武汉文献情报中心

地址：武汉市武昌区小洪山西25号
电话：027-87199180