

# 双碳能源动态信息

2023 年 02 期



中国科学院兰州化学物理研究所科研与规划处

2023 年 6 月 28 日

# CONTENTS 目录

## ◆ 深度分析

碳中和目标下中国新能源使命 .....	1
生物乙醇重整制氢技术挑战与产业化发展机遇 .....	7

## ◆ 国际观察

国际重点部门碳减排政策行动与科技态势 .....	13
日美发布能源安全和清洁能源转型合作联合声明 .....	15
日泰企业签署碳中和合作谅解备忘录 .....	16
欧盟发布太阳能燃料和化学品战略研究与创新议程 .....	16
英国牛津大学发布《碳去除状况》报告 .....	17
英国与北海国家签署海上可再生能源合作协议 .....	17

## ◆ 项目资助

欧盟资助 18 亿欧元支持低碳技术创新 .....	18
欧盟创新基金资助 6200 万欧元支持清洁技术创新 .....	18
德澳联合投入 7100 万欧元资助绿氢供应链项目 .....	19
英国资助 3000 万英镑支持生物质制氢技术创新 .....	19
美国能源部投入 4.9 亿美元推进清洁能源基础研究和技术开发 .....	20
美能源部向 33 个碳管理项目资助 1.31 亿美元 .....	21
日本 NEDO 启动多个绿色低碳创新技术项目 .....	21
托普索与 Steeper 能源就废物制生物燃料方案达成合作 .....	22
欧盟创新基金资助可持续甲醇生产设施 9700 万欧元 .....	22

阿联酋石油公司启动全球首个 CO<sub>2</sub> 注入碳酸盐岩项目 ..... 22

## ◆ 研究进展

多功能光电化学系统同步实现太阳能驱动 CO<sub>2</sub> 转化和塑料重整 ..... 23

美科研人员研发出用于聚变能发电的双相金属合金 ..... 23

美日企业合作研发 100% 氨燃料燃气轮机 ..... 24

麻省理工学院研发低能耗 CO<sub>2</sub> 电化学直接空气捕集技术 ..... 24

美科学家开发出迄今为止成本最低的碳捕集系统 ..... 25

阿联酋石油公司启动全球首个 CO<sub>2</sub> 注入碳酸盐岩项目 ..... 25

德水泥集团规划建设东欧第一条全链条 CCUS 项目 ..... 26

## ◆ 政策速览

政策速览 ( 2022 年 3—8 月 ) ..... 27

兰州化物所最新高被引论文列表 ( 2023 年 5 月 11 日更新 ) ..... 32

## 碳中和目标下中国新能源使命<sup>1</sup>

随着工业化时代大门的开启，人类大规模的化石燃料利用和森林砍伐所导致的绿植数目锐减，促使全球大气中 CO<sub>2</sub> 平均浓度达到了近百万年以来的最高水平，以至“热岛效应”“温室效应”对地球生态系统和人类社会发展均构成了严重威胁。2021 年，全球极端高温天气频发，15 个“气候临界点”已被激活 9 个，由自然灾害引起的灾难性事故造成了 2 521 亿美元的损失。2021 年，全球能源燃烧和工业过程产生的 CO<sub>2</sub> 排放量创下历史新高，达到 363 亿吨，能源相关 CO<sub>2</sub> 排放增量超过 20 亿吨，超过 2010 年成为绝对值同比增幅最大的一年。能源作为全球经济发展物质基础，同时也成为全球 CO<sub>2</sub> 减排过程中无法规避的重要领域。

### 1. 碳中和目标下的能源发展要求

碳中和目标符合能源学研究主旨，从资源角度揭示地球系统内化石能源与非化石新能源共生分布关系、碳系能源与氢系能源有序接替转型、能源体系与绿色地球和谐发展的自然变化规律。完成能源消费结构从化石能源为主体向零碳新能源为主体的转型，是实现碳中和目标的首要任务。

#### 1.1 碳中和对能源发展的指导意义

从能源革命的角度来看，碳中和必然会加速世界能源体系向着“低碳化”和“无碳化”的方向转型；与此同时，世界能源消费结构也将从根本上由“四分天下”格局（煤炭、石油、天然气和新能源）转变为“三小一大”格局（以新能源为主）。从科技革命的角度来看，目前世界正处在新一轮科技革命和产业变革进程中，生物工程技术、空间技术、智能化技术和原子能技术等成为主要技术标志，新材料、新能源、生物工程、信息技术等成为主要技术领域。在碳中和目标下，人类社会政治、经济、文化等领域均将受到深远影响和重大变革。

当前，世界各国对能源系统的投入正在逐步由化石能源向可再生能源过渡，根据国际可再生能源机构（IRENA）发布的预测，到 2050 年全球实现净零碳排放，可再生能源将占能源系统总投资的 29%，而化石能源仅占 17%。在碳中和

<sup>1</sup> 邹才能, 陈艳鹏, 熊波, 等. 碳中和目标下中国新能源使命[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(1):48-58. DOI: [10.16418/j.issn.1000-3045.20220831001](https://doi.org/10.16418/j.issn.1000-3045.20220831001).  
Caineng ZOU, Yanpeng CHEN, Bo XIONG, et al. Mission of New Energy under Carbon Neutrality Goal in China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(1):48-58. DOI: [10.16418/j.issn.1000-3045.20220831001](https://doi.org/10.16418/j.issn.1000-3045.20220831001).

目标下，人类能源消费结构必将由“一次能源”占绝对优势向“二次能源”占绝对优势过渡，电能也必将成为能源的主要载体。到 2050 年，我国建筑行业的直接电气化率、交通运输产业电气化率、电动汽车销售量与保有量，以及其他产业电气化水平持续提高，这些都会对人类生活产生根本性改变和深层影响。碳中和将促使能源从资源依赖转向技术依赖，实现人与自然和谐共生，建设人类的绿色宜居地球。预计到 2050 年，碳中和将贡献全球 2.4% 的国内生产总值（GDP）增长。其中，世界范围内与可再生能源有关的就业岗位将会增加 3 倍，高达 4200 万个；与能源有关的工作岗位也将增长到 1 亿个，与目前的就业岗位相比，增幅达 72%。

## 1.2 碳中和的历程

1992 年 5 月，全球首个控制 CO<sub>2</sub> 排放和解决全球气候变暖问题的国际公约——《联合国气候变化框架公约》（*United Nations Framework Convention on Climate Change*，以下简称《公约》）是联合国政府间谈判委员会通过的。1994 年 3 月 21 日，《公约》生效，其目标是人为控制大气中温室气体的浓度，防止气候系统受到温室气体的危害。

1997 年 12 月，《公约》第 3 次缔约方大会通过了第 1 部限制各国温室气体排放的国际法案——《京都议定书》，其目的是限制发达国家的温室气体排放，从而遏制全球气候变暖。

2015 年 12 月，《公约》第 21 次缔约方大会暨第 21 届联合国气候变化大会最终达成《巴黎协定》。为实现《巴黎协定》确定的温控目标，全球温室气体排放要求到 2030 年前削减一半，2050 年前后实现“净零排放”，即“碳中和”。

《全球升温 1.5°C 特别报告》由联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）于 2018 年 10 月发布，该报告厘清了全球升温 1.5°C 可能带来的影响，以及可能采取的减排路径，为可持续发展与努力消除贫困的同时强化全球响应建言献策<sup>②</sup>。

## 1.3 实现碳中和面临的问题和挑战

碳中和应对全球气候变化问题已经成为全球共识，但各个国家在实施过程中必然会面临环境、政治、资源、技术、市场、能源结构等多方面挑战。

（1）环境层面。美国夏威夷的冒纳罗亚太阳天文台（MLSO）作为全世界 CO<sub>2</sub> 浓度连续观测站，2021 年 4 月检测值高达  $421.21 \times 10^{-6}$ ，成为全球有记录以来的极值，且较工业化前水平高出 50%。全球 CO<sub>2</sub> 浓度的持续增加对海洋生态

系统和陆地生态系统的影响是极其复杂的，仍有大量未知有待解决。

(2) 政治层面。截至 2021 年 10 月，全球 137 个国家对实现碳中和的时间作出明确承诺；其中已立法国家只包括德国、日本、丹麦、法国、爱尔兰、西班牙等在内的 18 个国家，占比仅 13%。德国在 2021 年通过了《联邦气候保护法》修订案，不仅将该国碳中和时间提前到 2045 年，还明确了不同行业的减排目标；但在国际地缘冲突和欧洲能源形势等多因素影响下，2022 年 7 月德国联邦议院（下议院）通过了《可再生能源法》修订案——燃煤和燃油发电机组可能重返电力市场，进而推迟了原计划 2035 年前实现 100% 可再生能源发电的目标。

(3) 能源结构层面。在世界能源消费结构中，新能源增长速度虽已超过整体能源增长速度，但全球能源消费结构仍以化石能源为主。但是，煤炭、石油、天然气、新能源“四分天下”格局短时间内难以打破，其中 17% 的新能源占比仍处于较低水平，新能源占比的提升为能源转型带来巨大的挑战。

(4) 资源层面。全球陆地太阳能、风能等新能源分布极不均匀，具有间歇性，同时这些间歇性能源还具有时空互补性差异较大的特点，这给新能源的规模化发展带来了极大的挑战。

(5) 技术层面。以太阳能和风能为代表的新能源发电总体的价格整体仍然高于煤发电，其峰谷稳定性和调峰技术均需要进一步改革、创新。氢燃料电池是长途运输和重工业等领域电气化的最佳选择。碳捕集、利用和封存/碳捕集和封存（CCUS/CCS）技术的推广和普及会受到应用场景和地质条件等情况的约束，加之 CCUS/CCS 技术目前表现出的高成本、高能耗特点，其技术研发仍需加强，成本能耗亟须降低。储能技术无论从规模、成本还是寿命上都不能充分满足应用的需要，其产品安全标准体系也亟待完善。

(6) 市场层面。新能源市场逐渐由起步萌芽期向快速发展期转变，这与新能源的成本连年降低及应用便利程度不断增加密切相关。伴随着新能源新兴产业链的不断完善，全球市场机遇的增加与突破性技术创新的涌现将不断凸显新能源成本优势。

## 2. 碳中和学概念及理论技术框架

### 2.1 碳中和学的提出

全球自然灾害形势复杂，极端气候灾害事件多发，碳中和是应对气候变化的

必然之路和有效措施。碳中和是一项涵盖节能提效、减碳固碳、科技创新、应急储备和政策支撑的重大协同工程。2021年，笔者团队首次提出了“碳中和学”的概念，碳中和学体现碳中和愿景下，建设“绿色地球、宜居家园”的生态文明需求。碳中和学技术框架主要包括碳科学技术和碳经济技术。

## 2.2 碳中和学的概念、内涵

碳中和学是以碳循环为主线，依托五大理论和技术体系支撑，是实现CO<sub>2</sub>利用与“净零排放”的一门学科。理论体系主要包括气候变化理论、碳平衡理论、能源理论、碳中和经济理论和战略理论；技术体系主要包括无碳或减碳关键技术、零碳排关键技术、负碳排关键技术、碳排放评价技术和碳交易。

碳中和学的理论内涵，包含两个“动态平衡”：第1个“动态平衡”是指一定时期内，全球CO<sub>2</sub>排放量与吸收量达到动态平衡；第2个“动态平衡”旨在强调，人类赖以生存的自然环境与人类社会发展之间达到动态平衡。

碳中和学的技术内涵，涉及CO<sub>2</sub>的产生、捕集、输送、利用、封存等全过程技术体系，主要有4个方面的表现：①减碳技术，以传统化石能源节能减排技术为主，涵盖化石能源清洁利用、节能提效、资源回收利用等。②零碳技术，以无碳排放为基本特征的清洁能源技术，涵盖水能、风能、生物质能、地热能、潮汐能、太阳能等可再生能源，同时还涵盖核能、新材料能源以及具备设备智能、信息对称、系统扁平、多能协调等特征的“智慧能源”。③负碳技术，捕集、利用、封存、转化CO<sub>2</sub>的技术，以及湿地、冻土、森林、草原、海洋等生态系统固碳技术。④碳经济技术，主要依赖完善的碳税制度、体系化的碳交易市场、公平的复合碳排放权交易体系、调控性的碳财政补贴，以及其他有效的碳产业和碳经济政策等共同构筑。

## 3. 我国新能源发展方向和目标

在碳中和愿景下，能源发展目标将以“新能源”+“智能源”体系为主，其具有智能化、清洁化和高效化能源体系特点。我国产业结构偏重、能源结构偏煤，更要加大新能源的利用，这对于调整我国能源供给方式，促进能源结构转型，最终实现我国能源独立意义重大。

### 3.1 新能源是实现碳中和的主要途径

能源作为推动文明发展的基石，在人类文明发展历程中经历3次大的转型：

第1次转型是从薪柴时代向煤炭时代转型，第2次转型是煤炭时代向油气时代转型，目前全球正在经历第三次能源转型——由化石能源向新能源转型。

伴随着世界能源工业中的化石能源消费结构持续调整，新能源消费占比不断升高。截至2021年，全球能源消费中石油占比31%、天然气占比24%、煤炭占比27%、新能源占比18%，形成了“四分天下”的全新能源格局。新能源的市场竞争力逐步稳定上升，且成本具有逐年缓慢降低的发展趋势。

世界主要经济体均加快以新能源为主的能源结构转型调整，构建绿色、低碳、安全、高效的新型能源供应体系。欧盟能源供给不足，化石能源匮乏，主要靠大力发展新能源，其新能源消费量在全球新能源消费总量中占比达28%，为世界最高。美国作为能源高消费、高产量型的发达国家，化石能源资源充足，能源供需均衡，其能源转型的中长期战略是减少原煤、稳定原油、加快天然气上产、做大新能源，始终致力于加大新能源发展。日本和韩国化石能源资源匮乏，能源对外依存度均高达94%。日本制定了三阶段建设“氢能社会”发展蓝图，韩国则致力打造“氢经济”。

### 3.2 中国以煤炭为主“一大三小”到以新能源为主“三小一大”跨越

中国化石能源较丰富，地下能源禀赋决定了能源消费结构以煤为主，石油、天然气和新能源占比较小。2021年，煤炭在中国一次能源消费中占比达56%，石油消费占比18.5%，天然气消费占比8.9%，新能源消费占比16.6%，形成以煤炭消费为主“一大三小”的能源结构。

在碳中和的目标和愿景下，中国不同能源被赋予了新的战略定位：煤炭不仅具备安全“兜底”的保障责任与任务，更扮演了长远能源战略“储备”的角色；石油的消费水平在中、短期仍会维持稳定增长；天然气凭借低碳、稳定、经济的特点，与新能源具有“共生共荣”的特点；新能源在能源保供和国家能源战略层面具有“接替”作用与“主力”作用。

未来在中国实现碳中和的目标时，新能源将在能源消费中占主导——从目前化石能源占比大于80%，努力争取到2060年形成新能源占比80%以上；我国能源消费结构将由现阶段“一大三小”（“一大”为煤炭，“三小”为石油、天然气、新能源）完成向“三小一大”（“三小”为煤炭、石油、天然气，“一大”为新能源）的跨越。



### 3.3 力争实现以新能源为主体的“能源独立”

当前，全球能源转型处于重大发展机遇期，新能源的蓬勃发展将与传统化石能源转型相互配合、形成合力，是中国“能源独立”时代到来的唯一路线和必由之路。中国已经位于全球能源消费国首位，同时也是世界第一大能源生产国和碳排放国。中国“能源独立”以“洁煤稳油增气、大力发展新能源”为思路，可分“3步走”实现多种能源互补。① 2020-2035年，传统化石能源依然被作为主要能源，与此同时对新能源发展加快提速。② 2035—2050年，实现新能源与煤炭、石油、天然气等传统化石能源协同发展、并重发展。该阶段工作重点是“调结构、建氢能、争自主”。③ 2050年之后，实施“新能源科技革命和颠覆性技术实现”路径。该阶段工作重点是“稳结构、新能源、争独立”，依靠“新能源+智能源”在“能源自主”基础之上，力争实现“能源独立”。

### 3.4 中国新能源地位与使命

当今世界正经历百年未有之大变局。中国政府承诺实现碳中和，新能源在实现碳中和发挥主导作用，将推动中国能源消费格局实现“4个80%”的转变：2021年，我国含碳化石能源消费占比80%以上（占83%）、能源CO<sub>2</sub>排放占比80%以上（占86%）；到2060年，我国非碳新能源占比80%以上、CO<sub>2</sub>排放减少80%以上（从105亿吨下降到20亿吨左右）。碳中和下新能源被赋予新定位，代表了世界能源转型的方向、能源科技创新的前沿、能源强国建设的主力、绿色地球建设的动力。新时代还赋予新能源新的使命，即能源转型的使命、能源安全的使命和能源独立的使命。

## 4. 新能源助力碳中和建设

建设碳中和社会是人类拯救地球、拯救人类文明的壮举；建立碳中和社会秩序，弥补以往对地球造成的破坏，需要每个人、每个企业、每个国家的认同和付出。实现碳中和目标的关键点在于能源结构转型。碳中和目标下，碳基能源向非碳基能源跨越，能源体系将加速向低碳化、零碳化转型，化石能源逐步由主体能源过渡为保障性能源，新能源将逐步成为主体清洁能源。

碳中和战略目标加速了新能源时代的到来。发展新能源是实现碳中和社会、建设绿色宜居地球的关键，当整个人类社会都被纳入碳中和体系，我们将重新获得并长久拥有一个“绿色地球、宜居家园”。

## 生物乙醇重整制氢技术挑战与产业化发展机遇<sup>2</sup>

氢能是一种来源丰富、绿色低碳、应用广泛的二次能源，正逐步成为全球能源转型发展的重要内容之一。我国是世界上最大的制氢国，年制氢产量约 3300 万吨，已初步掌握氢能制备、储运、加氢、燃料电池和系统集成等主要技术和生产工艺，在部分区域已实现燃料电池汽车小规模示范应用。近期，国家发展和改革委员会、国家能源局联合印发《氢能产业发展中长期规划（2021-2035 年）》，计划到 2025 年，“燃料电池车辆保有量约 5 万辆，部署建设一批加氢站”，并明确强调“加强氢能的绿色供应”“重点发展可再生能源制氢，严格控制化石能源制氢”等举措。

现阶段，我国制氢产能约 4100 万吨/年，煤制氢约占 59%、工业副产氢约 24%、天然气制氢约占 16%、电解水制氢约占 1%。目前，氢气仍主要作为一种工业原料应用于化工、冶金等领域，但作为一种能源应用于交通、建筑、供电等领域还很少。由此可见，我国氢能产业体量并不小，只是缺乏由可再生能源制备并能用于能源供应的绿色氢源，这对氢能产业发展至关重要。

生物乙醇不但可以作为燃料部分替代石油，也是制备绿色氢能的理想原料。目前，生物乙醇是世界上应用最广的可再生能源，其在保障国家粮食安全、应对能源危机和保护生态环境等方面发挥着重要作用；美国、欧盟、中国、加拿大 40 多个国家和地区都在积极推动生物乙醇产业的发展。生物乙醇重整制备的富氢气体能够用于燃料电池分布式电站；乙醇能量密度高、挥发性小、毒性低、便于运输和储存，生物乙醇也将适用于加氢站内原位制氢；生物乙醇还可采用现有加油站供应，便于实现燃料电池车车载在线制氢。

在我国《“十四五”生物经济发展规划》《“十四五”现代能源体系规划》《2030 年前碳达峰行动方案》《2022 年能源工作指导意见》等多个政策文件中，加快纤维素等非粮生物燃料乙醇推进与开展低成本可再生能源制氢被多次提及。

### 1. 生物乙醇重整制氢产业现状

#### 1.1 制氢产业现状

<sup>2</sup> 韩雪, 贺泓, 岳国君, 等. 生物乙醇重整制氢技术挑战与产业化发展机遇. 中国科学院院刊, 2023, 38(1): 134-144, doi: 10.16418/j.issn.1000-3045.20220705001.

Han X, He H, Yue G J, et al. Development opportunities and technical challenges of industrialization for hydrogen production from bio-ethanol reforming. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(1): 134-144, doi: 10.16418/j.issn.1000-3045.20220705001. (in Chinese)

目前，世界上 96%的氢来源于煤、天然气等化石燃料，剩余的 4% 主要来源于电解水。制氢工艺可分为三大类（图 1）：化工工艺，包括气化、重整、裂/热解等；光/电工艺，包括光解、电解等；生物工艺，包括微生物发酵等。

（1）化工工艺。煤气化、甲烷重整和甲醇重整是目前较为成熟的制氢工艺，氢气产量大、产氢效率高。水煤气变换（WGS）技术能够将气化、重整产气中的一氧化碳与水反应，进一步转化生成氢气，氢气可通过变压吸附（PSA）、膜分离等技术进行分离提纯，从而满足燃料电池进气要求。

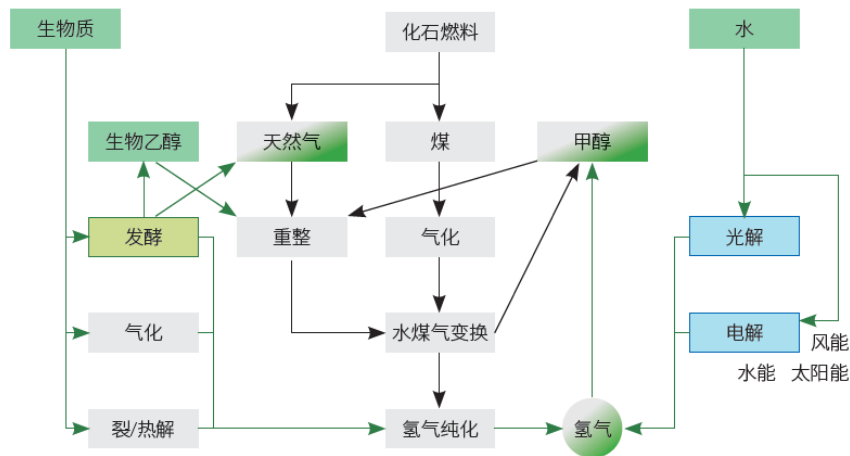


图 1 制氢工艺

（2）光/电工艺。风能、水能、太阳能等可再生能源均可转化为绿色电能，再通过电解工艺制备绿色氢能。太阳能光催化分解水制氢已在光催化剂、光生电荷分离、高效助催化剂等方面取得重要进展。

（3）生物工艺。生物质制氢包括生物质发酵、生物质气化、生物油热解、生物质衍生烷烃或醇水蒸气重整等多种形式，制氢过程中释放的二氧化碳能够与形成时吸收的相抵消，属于“碳中和”制氢方法。

### 1.2 生物乙醇产业现状

2020 年，我国生物乙醇总产量已超过 800 万吨，其中燃料乙醇已取代食用乙醇，成为最大的下游应用领域，产量达 290.5 万吨。我国燃料乙醇行业是为解决库存陈化粮而生。多年以来，淀粉质原料的供给始终是制约燃料乙醇产业发展的重要因素。近期，国投生物科技投资有限公司已形成国际领先的具有自主知识产权的成套技术，于黑龙江省海伦市建成每年 3 万吨产量的纤维素乙醇工业示范装置；至 2022 年 5 月底，已打通预处理至酶解发酵流程，得到乙醇产品，进入

优化调试阶段。未来，随着纤维素乙醇工业示范装置的成功运行与碳减排政策的落地深化，纤维素乙醇市场将提速发展。

### 1.3 氢燃料电池车产业现状

燃料电池车（FCVs）已成为我国新能源汽车的重要组成，预计 2030-2035 年达到 100 万辆。国内外燃料电池车开发和示范应用的首选是质子交换膜燃料电池（PEMFC），其具有功率密度高、重量轻、体积小、启动快、耐用性好等优点。目前，日本丰田汽车公司、日本本田汽车公司、韩国现代汽车公司等开发的燃料电池乘用车性能已基本达到传统燃油车水平，进入了产业化阶段；我国企业生产的质子交换膜、催化剂、空压机、氢气循环泵等关键材料和部件较国际先进水平尚存差距，示范应用的主要为商用物流车和大中型客车。

与 FCVs 相关的储氢模式主要有 3 种。①高压储氢。②液氢模式。③固态储氢。因为氢气爆炸极限较宽，储运也存在一定的安全隐患，供给还需要配套建设加氢站，所以人们意识到 FCVs 理想的用氢模式可能是车载液体燃料在线制氢。

### 1.4 生物乙醇重整制氢与现有产业的链接

生物乙醇重整制氢与现有产业的链接模式：玉米秸秆等农林废弃物收集、破碎、打包后运输至工厂，经过预处理、酶解发酵、精馏提纯等工序生产出生物乙醇。生物乙醇、水和空气作为原料进行汽化、预热后，在催化剂的作用下发生重整反应，制取富氢气体。然后，可采用 WGS 技术将重整反应气体中的一氧化碳和水进一步反应转化为氢气；若重整催化剂的一氧化碳抑制能力较强，也可以直接采用 PSA 或钯膜提纯氢气；氢气分离后剩余的滞留侧气体中的含能分子，通过催化或非催化氧化转化为水和二氧化碳，回收的能量可以用于液体原料汽化或反应供热；高浓度的二氧化碳可采用碳捕获与封存（CCS）或碳捕获、利用与封存（CCUS）技术捕集、利用。纯氢气可在线应用于 FCVs、储存于低压储氢装置、用于低压 FCVs；低压氢气采用压缩装置充入高压储氢罐，在为 FCVs 充氢的过程中需采用冷却装置确保氢气储罐不超温。

## 2. 生物乙醇重整制氢技术特点

### 2.1 生物乙醇重整制氢反应

典型的生物乙醇重整制氢工艺可以分为：水蒸气重整（SR），部分氧化重整（POX）和自热重整（ATR）。相比于甲醇，乙醇作为  $C_{2+}$  醇，能量密度更高、

毒性和腐蚀性更低，但碳碳键的活化能比碳氢键和碳氧键高，造成生物乙醇重整制氢的有机副产物更多、积碳更严重，对催化剂稳定性的要求更高。

生物乙醇重整与现有成熟的化工制氢工艺存在相似的“卡脖子”问题。生物乙醇重整制氢技术产业化过程中，亟须开发高品质的催化剂及配套设备。

## 2.2 生物乙醇重整制氢催化剂

生物乙醇重整制氢相关催化剂种类繁多，铑、钌、金、钨、铂、铱等贵金属和铜、镍、钴等非贵金属均可以作为活性组分。铑基催化剂因具有良好的活性和稳定性曾被认为是产业化应用的首选，但近几年铑价格暴涨几十倍，急需开发新型廉价催化剂。众多载体中，钨基稀土复合氧化物通常能够使催化剂获得良好的生物乙醇重整制氢性能。除催化剂自身性质外，反应条件和原料品质也影响生物乙醇重整制氢效果。

## 2.3 生物乙醇重整制氢反应器

目前，重整反应器主要有三大类。①管式反应器。②微通道反应器。③膜反应器。

## 2.4 生物乙醇重整制氢技术在线应用

生物乙醇重整制氢技术在线应用时，能够利用 FCVs 的蓄电池启动电源和空气供应系统，其工作原理可以描述为：①开车时，启动电源加热重整制氢装置、预热原料；②乙醇、水、空气在重整制氢催化剂作用下转化为富氢气体，同时大部分氢气透过钨膜形成纯氢，供应燃料电池，驱动 FCVs；③滞留侧气体中的含能分子发生催化氧化反应释放热量；④燃料电池适时为启动电源充电，排水回用为制氢原料。催化剂存在时，乙醇在 200℃ 以下即可转化为乙醛和氢气，发生催化氧化反应释放热量，使生物乙醇重整制氢装置具有实现快速启动的潜力。

# 3. 生物乙醇重整制氢产业化发展机遇

## 3.1 生物乙醇重整型加氢站的竞争力

由于乙醇含有碳碳键，生物乙醇重整的能量效率低于甲烷重整和甲醇重整，但与其他制氢工艺相比优势明显（图 2a）。生物乙醇重整制氢的碳排放量明显较低，采用 CCS 技术后可以成为一种“碳富集”的制氢方法（图 2b）。FCVs 的用氢成本包括制氢原料成本、分配制造费用、储氢费用、运输费用、销售利润率、碳税等。制氢成本主要包括制氢原料成本和分配制造费用（图 2c），生物乙醇重

重整制氢较电解水有一定的价格优势，但与传统制氢工艺相比缺乏价格竞争力。但在考虑储氢费用和运输费用后，加氢站内生物乙醇重整制氢和电解水制氢，与传统化石燃料制氢相比，又具备了一定的价格竞争力（图 2d）。

### 3.2 生物乙醇重整型燃料电池车的竞争力

燃料电池系统成本将持续下降，预计 2025 年可降至 443 元/kW，2030 年降至 316 元/kW，远期到 2050 年降至 148 元/kW；全功率 FCVs 的制造成本将长期高于纯电动车，预计 2050 年价格差距可缩小到合理范围。我国 FCVs 很多关键技术指标已与国际先进水平持平，但仍需提高产品批次的一致性和寿命、降低生产成本。就我国现行电价而言，电动车的用能经济性优势明显，当氢气价格 2025 年下降到 40 元/kg 后，储氢 FCVs 的用能经济性相比于燃油车将具有竞争力。生物乙醇重整 FCVs 有望在短期内具有用能经济性竞争力，且因无须建设加氢站、充电站/桩等配套设施，可在产业化过程中快速推广应用。

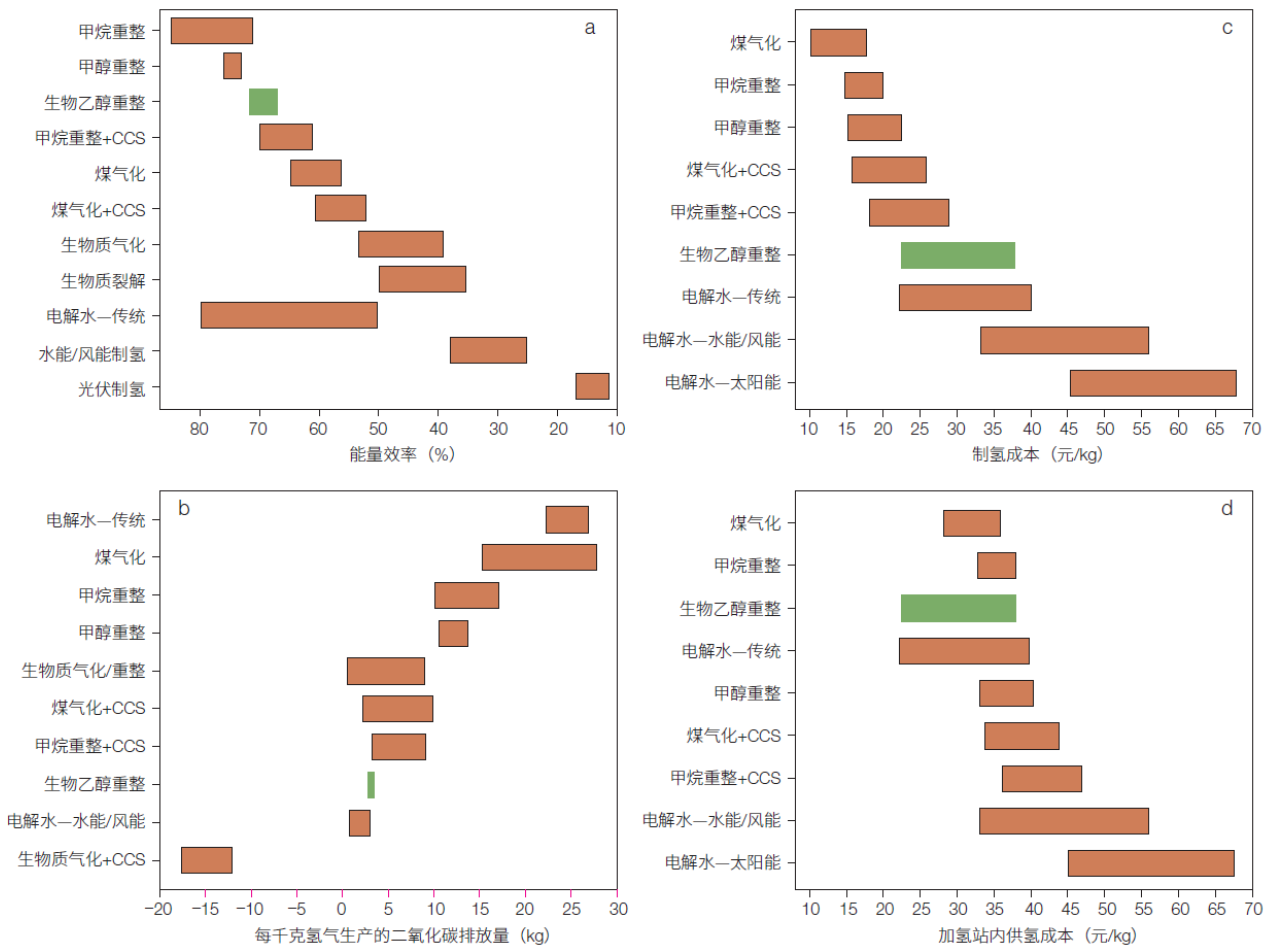


图 2 典型制氢工艺技术在能量效率 (a) 二氧化碳排放量 (b) 制氢成本 (美元、欧元数据按 2021 年平均汇率折算) (c) 加氢站内供氢成本 (d) 方面的经济性比较。

### 3.3 我国生物乙醇重整制氢产业化发展机遇

生物乙醇重整制氢属于新能源领域的新赛道，国内外相关设备基本处于研发阶段，尚未形成产业化能力。近期，随着国际能源局势紧张，美国和巴西两大生物乙醇生产国的生物乙醇重整制氢产业化发展明显提速。我国作为世界第三大生物乙醇生产国，如果能够在短期内完成“首台套”设备的示范应用，将夺得先机。

我国化工制氢工艺经过几十年的发展，已高度成熟和国产化，生物乙醇重整制氢的其余相关技术和设备的国内供应商繁多，仅需根据实际需要选型。目前，加氢站和分布式电站的甲醇重整制氢大多采用撬装设备，生物乙醇重整制氢可以借鉴其成功经验，采用撬装设备便捷地融入现有氢能产业集群。

然而，若想实现 FCVs 车载在线制氢，必须从头研发与高品质催化剂性能相匹配的新型钌膜反应器与集成化的换热和尾气处理部件。目前，国际上钌膜反应器大多处于实验室开发样机阶段，而国内大多处于理论研究阶段。车载在线制氢设备还需要与现有 FCVs 能量系统进行耦合和系统性优化，预计在 2030-2035 年有望与现有 FCVs 产业链融合，共同实现百万辆应用的产业化目标。

## 4. 结论

近年来，氢能和燃料电池产业得到了国家、政府和公众的广泛关注，若不能保证氢气的来源是绿色的，则会严重违背发展氢能的初衷。我国燃料电池车的产业链日趋完善，产业化进程加速，急需夯实氢能绿色供应。生物乙醇重整制氢是一种高度契合“碳中和”理念的“绿氢”制备技术，其产业化的核心工作为高效重整制氢催化剂及其配套反应器的开发，其余技术和设备可与现有化工制氢工艺通用。生物乙醇可通过现有加油站供应，使在线制氢生物乙醇重整 FCVs 与燃油车长期并存。如果纤维素乙醇的价格能够在政策补贴和技术发展的双重作用下进一步下降，生物乙醇制氢将在短期内具有价格竞争力。因此，生物乙醇重整制氢技术虽然属于新能源领域的新赛道，但其有望快速实现产业化，融入我国现有能源体系，助力能源结构转型升级。

### 国际重点部门碳减排政策行动与科技态势<sup>3</sup>

碳中和目标提出以来，工业、建筑和交通领域作为难以脱碳的重点部门受到主要经济体高度重视。本文梳理 2022 年以来主要经济体在工业、建筑和交通领域碳减排政策行动，分析科技布局态势与重大科技进展，为决策部门提供参考。

#### 1、主要经济体重点部门碳减排政策行动

##### 1.1 加强重点部门脱碳路线顶层设计，明确脱碳路径和关键技术清单

美国陆续发布《工业脱碳路线图》和《交通脱碳蓝图》，确定工业和交通领域脱碳路径以及分阶段的研究、开发和示范议程；欧盟委员会针对欧洲研究区（ERA）能源密集型行业发布低碳技术、循环技术和商业模式路线图；韩国发布《碳中和绿色增长促进战略》和《技术创新战略》，以构建碳中和研发全周期体系为重点，确定百项碳中和核心技术。法国公布《2030 年工业脱碳战略》和《钢铁计划》。主要经济体关注的重点部门脱碳关键技术包括：近中期以提高能源和资源效率、推进工业用能电气化、扩大利用循环技术、低碳与无碳供热和更节能的工艺为主，长期将发展绿氢应用、可替代原料、颠覆性工艺技术和碳捕集、利用与封存（CCUS）等。

##### 1.2 加大低碳产业和技术投资力度加速绿色转型

主要经济体持续加大低碳和零碳产业投资，旨在未来几年引领零碳经济的发展。美国发布史上规模最大的气候法案——《通胀削减法案》，未来 10 年将在气候和清洁能源领域通过税收优惠、赠款和贷款担保的组合方式投资逾 3900 亿美元，重点支持清洁电力和输电、清洁交通以及 CCS 和清洁氢等前沿技术的研发和商业化。欧盟出台《绿色新政工业计划》，提出针对净零工业技术和产品（电池、风能、热泵、太阳能、电解槽、CCS 技术等）、关键材料、电力建立可持续和简化的监管和投资环境，扩大可再生技术资助范围。欧盟在 REPowerEU 计划中提出到 2030 年将投资 970 亿欧元用于工业和建筑脱碳。法国将投资 56 亿欧元支持工业脱碳。

##### 1.3 部署重大科技计划或项目，提升低碳产业技术竞争力

美国在工业、建筑和交通脱碳领域部署了多类型科技项目。在工业领域，“工

<sup>3</sup> 双碳情报动态，2023（02），中国科学院发展规划局，中国科学院文献情报中心。



业能效和脱碳”项目资助具有中试或产业化前景的工业脱碳技术、“工业供热攻关计划”资助从基础研究到应用技术开发和演示的研究领域，包括清洁燃料、工业电气化、低热或无热工艺等。欧盟依托“地平线欧洲”、“创新基金”支持工业 CCUS、车用电池等基础研究与创新以及钢铁、化工等能源密集行业低碳技术和工艺的应用与示范，例如氢冶金、CO<sub>2</sub>转化制化学品和可持续航空燃料、化学回收塑料炼油等。日本“绿色创新基金”重点资助氢还原炼铁、绿氨电解合成及高比例混烧、专烧工艺、氢燃烧、CO<sub>2</sub>资源化利用技术等。

## 2、重点部门碳减排关键技术发展态势

### 2.1 工业低碳变革性技术加速应用和示范

无碳氢基流化床直接还原炼铁工艺示范取得实质性进展。英国普锐特冶金与韩国浦项制铁、鞍钢集团与中科院过程所分别开展了工艺合作研发，鞍钢集团将于 2023 年投产万吨级绿氢零碳流化床氢气炼铁工程示范。低温电化学还原炼铁技术有望进入试验阶段，美国 ElectraSteel 公司开发氧解耦电解（ODE）工艺将含量低至 35%的低品位矿石在 60 °C 下提炼成纯铁，拟于 2023 年完成试点工厂建设。

先进电化学工艺、负碳发酵工艺助力化工产品生产零碳化或负碳化。澳大利亚莫纳什大学研究人员实现锂介导电化学合成氨近 100% 法拉第效率。日本东丽公司成功开发以生物质为原料合成 100% 生物基己二酸的方法并拟开展规模化试验。美国西北大学研究人员基于 LanzaTech 公司技术利用工程细菌将工业废气转化为丙酮和异丙醇，与传统工艺相比可以减少 160% 的温室气体排放，目前该工艺已扩大到工业中试规模。高转化率、高选择性的 CO<sub>2</sub> 电化学、光/光电化学、生物转化研究取得快速进展。中国科学技术大学、电子科技大学联合独创一种 CO<sub>2</sub> 转化新路径，通过电催化与生物合成相结合，成功实现 CO<sub>2</sub> 转化制葡萄糖和脂肪酸。日本东京工业大学研究人员开发了一种基于含铅硫（Pb-S）键的新型 CO<sub>2</sub> 还原光催化剂 KGF-9 配位聚合物，在 400 nm（纳米）的可见光照射下，将 CO<sub>2</sub> 还原为甲酸盐的选择性超过 99%。

### 2.2 碳捕集技术经济性持续提升，CCS 商业项目数量创新高

根据全球碳捕集与封存研究院数据，截止 2022 年 9 月，全球商业 CCS 项目数量再创新高，达到 196 个，比上年增加 61 个，捕集能力将达到每年 2.44 亿吨

CO<sub>2</sub>，比 2021 年增涨 44%。低成本、低能耗和高捕集率的碳捕集技术研发取得新进展。美国斯坦福大学和麻省理工学院的研究团队开发出一种新型烃梯形聚合物气体分离膜，可使化学分离的工业过程能耗降低 90%。日本东京都立大学牵头的研究团队开发出了一种“液-固相分离系统”直接空气捕集新技术，能以 99% 的效率直接从大气中清除 CO<sub>2</sub>。

### 2.3 负碳水泥/混凝土技术引领绿色低碳建筑材料新方向

基于生物基原料和工业固废，利用创新化学技术，生产负碳水泥/混凝土、研发高性能负碳隔热材料和可再生负碳粘合剂等是建筑材料的未来发展趋势。美国伍斯特理工学院研发了一种具有自愈能力的负排放酶促混凝土材料（ECM），实验发现该材料具有与传统砂浆相媲美的抗压强度。日本鹿岛建设株式会社等机构开发出将 CO<sub>2</sub> 固定在混凝土中，利用该技术生产的负碳混凝土模板，与普通高强度模板相比，每立方米可固定 62 千克 CO<sub>2</sub>，实现负排放。该建筑模板已成功应用在日下川新泄洪道隧道工程中。

### 2.4 零排放车用动力电池技术取得新突破

日本艾迪科公司研发的新型锂硫电池已经测验成功，其能量密度可达到 500 Wh/Kg（瓦时/千克）以上，是常规锂电池能量密度的 2 倍。法国国家科学研究中心开发出一种不含铂族金属的新型催化剂，在 80°C 条件下，可使氢氧化物交换膜燃料电池的峰值功率密度达到 450 瓦/平方厘米（当前研究报道最高为 350 瓦/平方厘米）。美国洛斯阿拉莫斯国家实验室通过采用复合聚合物电解质，研发出新型燃料电池，能在 160 °C 温度下实现每平方厘米近 800 毫瓦的额定功率密度，比磷酸基燃料电池高 60%，有望解决交通工具中重型燃料电池长期存在的过热问题。

## 日美发布能源安全和清洁能源转型合作联合声明

2023 年 1 月 9 日，日本经济产业省（METI）与美国能源部（DOE）就能源安全和清洁能源转型合作发布联合声明，主要内容如下：①支持对美国的上游投资，以加强能源安全；②开发和建设下一代先进核反应堆，最大限度地利用现有反应堆，建立强大的核部件和燃料供应链，包括铀燃料；③加强清洁氢和氨政策，

进一步扩大美日企业之间的合作；④推进日美清洁能源和能源安全倡议（CEESI）；⑤2023年日本担任七国集团主席国期间进一步合作。

## 日泰企业签署碳中和合作谅解备忘录

2023年1月12—13日，日本经济产业省与泰国能源部召开第五次日泰能源政策对话，并就CCUS、电动汽车和电池、氢和氨、可再生能源和节能、液化天然气和天然气等领域交换了意见，共同努力实现亚洲零排放共同体（AZEC）倡议。双方签署了4份日泰企业碳中和合作谅解备忘录，包括：①合作研究企业脱碳路线图和氨混烧；②合作研究燃煤热电厂引入氨混烧技术及应用；③研讨燃煤热电厂中CO<sub>2</sub>分离回收与利用技术、经济性评价与CO<sub>2</sub>减排计划等；④合作引入泰国及东南亚周边国家水泥废气CO<sub>2</sub>分离回收技术。

## 欧盟发布太阳能燃料和化学品战略研究与创新议程

2023年1月17日，欧盟太阳能制燃料与化学品研究和创新联盟SUNERGY发布《战略研究与创新议程》，提出了到2030年欧盟在太阳能制燃料和化学品领域的关键技术分阶段发展目标及研发需求。优先发展的技术有：①太阳能两步转化为燃料/化学品，上游工艺包括电力合成燃料（E-fuels）、太阳能热化学制燃料/化学品、光伏驱动的微生物合成方法，下游工艺包括费托合成制燃料、哈伯-博施制氨、生物途径气体发酵、替代原料制液体燃料；②太阳能直接转化为燃料/化学品，包括光（电）化学催化、生物和生物混合方法；③关键使能技术，包括纳米到宏观尺度的能量转化、能源系统、社会学相关研究。目标是到2025年，开发出适应当前基础设施和商业模式的创新技术；通过太阳能直接转化为燃料/化学品，到2030年实现燃料/化学品的直接生产过渡到部分采用分布式生产，并通过发展本地完整价值链促进循环经济；2030年以后，为负排放技术提供强大的科学和技术基础，到2050年，助力建立碳中和循环经济，大规模部署经济高效的负碳技术。

## 英国牛津大学发布《碳去除状况》报告

2023年1月19日，英国牛津大学发布《碳去除状况》报告，从研究论文、专利申请、政府行动举措、公众认知等方面评估了全球碳去除（CDR）状况，报告指出：①自20世纪90年代初以来，对CDR的研究呈指数增长。研究以生物炭、土壤固碳和造林/再造林为主，生物能源与碳捕集和封存（BECCS）、直接空气捕集（DAC）文献相对较少。②全球CDR专利申请量在过去15年有所增加，DAC技术占主导地位。③2010—2022年，全球对CDR技术的公共投资约为41亿美元，主要集中在美国、欧盟、英国等少数几个地区。CDR部署与实现《巴黎协定》温度目标所需的部署之间存在差距。目前各国制定的CDR的可行计划较少，尤其是BECCS、DAC等新方法，迫切需要全面的政策支持以促进CDR发展。④短期内CDR管理和政策制定方面的创新预计将主要体现在国家和超国家层面的行动，如制定强有力的CDR核算规则，建立可测量、可报告、可核实（MRV）框架，加强对陆基生物清除量的报告规则，并为DACCS或强化岩石风化等方法建立额外的指导意见等。

## 英国与北海国家签署海上可再生能源合作协议

2022年12月18日，英国商业、能源与工业战略部（BEIS）宣布英国与欧盟和北海能源合作组织（NSEC）签订一项海上可再生能源合作协议11，英国将与欧盟以及北海国家（包括比利时、丹麦、法国、德国、爱尔兰、卢森堡、荷兰、瑞典、挪威等）合作开发海上可再生能源和电网基础设施，包括：①复合能源项目和联合项目；②海上空间规划；③支持框架和财务；④陆上和海上电网规划的最佳实践；⑤共享新技术信息；⑥交流有关规则、条例和技术标准的最佳做法。

### 欧盟资助 18 亿欧元支持低碳技术创新

2023 年 1 月 19 日，欧盟宣布将从创新基金中拨款 18 亿欧元，投资 16 个大规模创新项目，涵盖绿氢及其衍生物、合成可持续燃料等技术，以实现在未来十年内将 CO<sub>2</sub> 排放量降低 1.25 亿吨。具体资助技术包括：①将碳捕集装置与化工、水泥、石灰生产装置相集成，并将捕集的 CO<sub>2</sub> 输送到沿海枢纽进行地质封存；②创新 CCUS 价值链，建造东欧首个 CCUS 集群；③建造世界首个商业规模即时生物燃料生产设备；④建造世界首个碳矿化封存基地；⑤利用地下水循环，开发地下散热装置；⑥建造 400 兆瓦级电解水制氢装置，利用海上风电生产绿色氢气；⑦研发固体废弃物转化为氢气技术；⑧建造大规模合成可持续航空燃料生产装置；⑨建造装机容量为 450 兆瓦的海上风电场；⑩创新固定式储能技术研发；⑪开发废弃塑料液化处理技术；⑫创新锂离子电池回收技术，实现年回收 5 万吨报废锂电池。

### 欧盟创新基金资助 6200 万欧元支持清洁技术创新

2022 年 12 月 13 日，欧盟宣布通过“创新基金”投入 6200 万欧元支持 17 个小规模清洁技术创新项目 9，以推进能源密集型工业、可再生能源、氢能和储能突破性技术的市场化进程。具体资助项目信息如下：

**1、能源密集型工业**：该领域共计资助 10 个项目，包括炼油和氢能。

①将林业和农业残留物转化为木质纤维素，提取糖分用于生产船舶发动机燃料油；②示范基于光伏和生物质热电联产供电的电解制氢技术，该项目还包括煤制生物质、光伏+储能系统等，以确保氢气在全年内可用；③示范运行 2 兆瓦质子交换膜电解槽以生产卡车用氢燃料，使用经过二次处理的废水为原料，该项目还将为用户提供储氢和加氢服务；④示范集成光伏和余热回收的模块化可扩展的电解制氢系统，该系统将建设在炼油厂旁边，为炼油厂提供绿氢，并实现对余热的二次利用。

**2、可再生能源**：该领域共计资助 5 个项目，包括：①为电动汽车开发高效节能的电池冷却技术，使用激光焊接来组装电池冷却换热器中的铝板，并降低材

料厚度和电池组重量以节能；②在内陆河道示范使用氢燃料电池和锂电池作为动力源的重型驳船；③示范大规模农用光伏顶棚，可用于所有类型的农业机械，并可提高农作物产量。

3、储能：该领域共计资助 1 个项目，示范公用事业规模光伏和储能系统以及工业用户现场的光伏和储能系统，以此为基础示范创新的“能源即服务”商业模式，确保以最经济的方式实现年度用电需求的 100% 覆盖，并探索将更多可再生能源整合到现有电网中。

## 德澳联合投入 7100 万欧元资助绿氢供应链项目

2023 年 1 月 27 日，德国联邦教育和研究部与澳大利亚能源部宣布在“德澳氢能创新和技术孵化器”（HyGATE）联合资助计划框架下，由德国出资 3960 万欧元、澳大利亚出资 5000 万澳元（3200 万欧元）支持 4 个清洁氢能项目，以加速推进共同建立完整的绿氢供应链。项目包括：①建造一个 17.6 兆瓦绿氢生产示范工厂，将集成 21 兆瓦光伏发电设施；②利用新材料开发可扩展电解槽生产绿氢的技术，建立从澳大利亚新南威尔士州到德国的氢气出口价值链；③开发新型毛细管诱导供水电解槽的制造工艺并扩大规模；④在南澳大利亚建造一个利用聚光太阳能热发电和供热的甲醇工厂，年产量达到 7500 吨。

## 英国资助 3000 万英镑支持生物质制氢技术创新

2023 年 1 月 20 日，英国商业、能源和工业战略部（BEIS）宣布投入 3000 万英镑支持具有碳捕集与封存功能的生物能源（BECCS）制氢技术创新 17。具体资助类型如下：

1、原料预处理：研发低成本、节能和高效的原材料预处理技术，具体创新技术包括造粒技术、机械分拣技术、热处理煅烧技术等。

2、先进的气化技术及其组件研发：，重点提高合成气质量，提升生物质制氢效率。具体创新技术包括实时监测技术、物理清除技术、化学清除技术、催化和热去除焦油技术、合成气变压吸附技术、气化炉集成技术等。

3、新型生物质制氢技术：重点开发可与碳捕集相结合的新型生物质制氢技术。具体创新技术包括厌氧发酵制氢技术、光发酵制氢技术、废水处理技术、甲

烷重整制氢技术、热解技术等。

## 美国能源部投入 4.9 亿美元推进清洁能源基础研究和技术开发

2023 年 1 月，美国能源部（DOE）宣布多项资助，共计投入 4.9 亿美元支持清洁能源基础研究和技术开发，详情如下：1 月 19 日，DOE 科学办公室宣布未来 4 年向能源攻关研究中心（EERC）投入 2 亿美元，旨在强化清洁能源技术基础研究以加速“能源攻关计划”（Energy Earthshots）的突破。迄今为止，DOE 已经启动了 6 个技术领域的能源攻关计划，针对各项攻关计划的资助主题包括：① 氢能领域，将资助制氢、氢源及氢排放量化相关基础科学研究；② 长时储能领域，将资助电化学储能、电热储能、基于载体的化学储能、机械储能；③ 负碳技术领域，将资助 CO<sub>2</sub> 生物封存，CO<sub>2</sub> 非生物封存，耦合实验和计算的 CO<sub>2</sub> 碳化及反应性基础动力学研究，测量、监测和验证研究；④ 增强型地热系统（EGS）领域，将资助 EGS 环境中地下本构力学和流体注入响应的实验和计算研究；⑤ 浮动式海上风电领域，将资助浮动式风力涡轮机材料、建模和控制，风电场及周边环境的建模和测量，输电、热电联产和储能；⑥ 工业供热领域，将资助降低工业供热碳足迹，开发热工艺过程的替代技术或减少热量需求，热回收和利用研究。1

1 月 26 日，DOE 宣布将投入 1.25 亿美元支持下一代电池及相关电化学储能技术的基础科学研究。此次资助重点关注 DOE 基础能源科学研讨会《下一代电化学储能基础研究需求》报告中提出的优先研究方向，包括：① 材料和化学的功能调控以实现储能的整体设计；② 跨时空尺度的复杂电子、电化学和物理现象研究；③ 控制和利用在动态界面处形成的复杂相间区域；④ 通过创新的物质组合（电极材料、电解质化学物质等）彻底改变储能性能；⑤ 促进自修复并消除有害化学物质以延长使用寿命并提高安全性。

1 月 26 日，DOE 宣布投入 1.18 亿美元支持 118 个项目，以推进生物质精炼厂的发展，生产低排放可持续燃料，包括：① 9 个综合生物精炼厂预试点项目，涉及海藻基可持续航空燃料、生物质基可持续航空和船用燃料等；② 2 个综合生物质精炼厂试点项目，涉及残留物转化为能源，生物质水热液化与超临界水氧化；③ 2 个综合生物炼油厂示范项目，涉及桉木生物原油制备可持续航空燃料，生物精炼厂的净零排放；④ 4 个第一代玉米乙醇减排项目，涉及生物冶炼厂减排技术、

利用发酵 CO<sub>2</sub> 气体合成乙醇、CO<sub>2</sub> 电催化转化为负碳化学品等。

1 月 27 日，DOE 宣布投入 4700 万美元推进清洁氢能技术的研发和示范，以降低氢能成本并改进技术性能，促进氢能基础设施部署，实现氢能在多个部门的应用。此次资助重点关注 4 个主题领域：① 氢载体开发；② 车载液氢存储系统；③ 液氢输送/加氢组件和系统；④ 中、重型燃料电池卡车的高性能耐用膜电极组件。

## 美能源部向 33 个碳管理项目资助 1.31 亿美元

2023 年 1 月 30 日，美国能源部（DOE）宣布向 33 个碳管理项目资助 1.31 亿美元，推进碳管理技术的大规模部署，从而降低 CO<sub>2</sub> 排放。其中，22 个项目属于“碳管理”资助计划（目标是以低于每吨 100 美元的价格将碳捕集并封存），这些项目将获得 3800 万美元，用以开发工业端捕集碳、直接从空气中捕集碳，以及将捕集的碳在地下储存或转化为有价值的化学品的技术；11 个项目属于“碳安全”第二阶段“储存综合体可行性”资助计划，这些项目将获得 9300 万美元，用于高效和经济地评估陆上和海上商业规模碳封存综合设施的封存站点。通过评估的碳封存站点将被列入能源部碳封存保障设施企业计划（CarbonSAFE），该计划旨在开发能封存 5000 万吨以上 CO<sub>2</sub> 的设施。

## 日本 NEDO 启动多个绿色低碳创新技术项目

2023 年 2 月 3 日，日本新能源与产业技术开发机构（NEDO）发布“建立竞争性氢供应链的技术开发项目”征集公告，旨在建立氢气供应链，并通过技术创新以实现降低氢气成本的目标。此外，将根据监管改革实施计划等，制定和简化法规，进行国际标准化所需的研发。包括 4 个方向：① 大规模氢供应链相关的技术开发；② 区域氢供应链相关的技术如低成本制氢设备、压缩机、液化气、管道等；③ 加氢站关键设备设施研发，旨在实现加氢站低成本、长寿命运行；④ 开发作为共同基础设施所必需的技术，以实现氢能社会的建设。该项目最长资助 5 年（2023—2027 年），其中 2023 年度资助 66 亿日元（约 5 千万美元）。

2 月 3 日，NEDO 发布“能源和环境领域创新技术国际联合研发项目”征集公告，旨在利用国内外先进技术产生新的创新能源和环境技术，推进 2040 年后



的技术应用。关注技术领域包括：①智慧社区技术；②生物质利用技术；③有助于实现绿色出行的创新材料和设备。

## **托普索与 Steeper 能源就废物制生物燃料方案达成合作**

2023 年 1 月 26 日，全球化工和催化行业的领导者托普索（Topsoe）和生物质转化技术开发商 Steeper 能源签署了一项生物燃料解决方案全球许可协议。该协议将 Topsoe 在可再生燃料和制氢方面的技术及工程经验与 Steeper 能源专有的 Hydrofaction® 水热液化技术和行业专业知识相结合。通过该协议，托普索能够为客户提供完整的将废物转化为燃料的技术方案，最终产品包括可持续航空燃料、海洋生物燃料和可再生柴油。

## **欧盟创新基金资助可持续甲醇生产设施 9700 万欧元**

2023 年 1 月 26 日，欧盟创新基金资助位于瑞典的可持续甲醇生产设施 Project Air 9700 万欧元开发突破性技术。Project Air 是欧盟 17 个大型清洁低碳技术项目之一，它结合了碳捕集和利用（CCU）工艺，用于转化 CO<sub>2</sub>、残余物、可再生氢气和生物甲烷，将应用于同类首创的大规模可持续甲醇生产。与传统甲醇合成设施相比，该项目预计可使温室气体排放量减少 123%。

## **阿联酋石油公司启动全球首个 CO<sub>2</sub> 注入碳酸盐岩项目**

2023 年 1 月 18 日，阿联酋阿布扎比国家石油公司（ADNOC）宣布启动碳酸盐岩高矿化度水层 CO<sub>2</sub> 注入井开发工作，这是全球首个在碳酸盐岩高矿化度水层中 100% 封存捕集的 CO<sub>2</sub> 的项目。用于封存的高矿化度水层中含有橄榄石，能与气体反应形成固体矿物，保证永久封存。该项目是 ADNOC 投入 150 亿美元的多年期低碳增长战略行动计划的一部分，预计将于 2023 年第二季度开始注入 CO<sub>2</sub>，投入运营后每年可捕集多达 80 万吨 CO<sub>2</sub>。项目旨在实现其运营的去碳化，并支持 ADNOC 到 2030 年将油气业务碳排放强度降低 25% 和到 2050 年实现净零目标的承诺。

### 多功能光电化学系统同步实现太阳能驱动 CO<sub>2</sub> 转化和塑料重整

以太阳能驱动解决 CO<sub>2</sub> 排放和塑料污染问题是一条新型的可持续发展道路，但在一个过程中同时实现 CO<sub>2</sub> 和塑料转化制备增值产品极具挑战性。英国剑桥大学 Erwin Reisner 牵头的研究团队实现了与塑料重整同时进行的光电化学 CO<sub>2</sub> 转化。该研究开发了一种用于 CO<sub>2</sub> 转化的多功能光电化学平台，并且该平台可与塑料的改性相耦合。

研究人员首先利用光吸收剂卤化铅钙钛矿器件 (PVK) 和 CO<sub>2</sub>Rcat 催化剂集成制成光电阴极，然后连接到 Cu<sub>27</sub>Pd<sub>73</sub> 合金阳极以形成组合 Cu<sub>27</sub>Pd<sub>73</sub>||PVK|CO<sub>2</sub>Rcat 的光电化学 (PEC) 系统。PEC 系统不仅是实现太阳能燃料合成范围多样化、提高效率和选择性的重要基石，也是实现可持续商业发展的关键指标。整个 PEC 系统（定义为 Cu<sub>27</sub>Pd<sub>73</sub>||PVK|CO<sub>2</sub>Rcat）具有可调的产品分布，以高选择性和显著的产品生成速率产生 CO、合成气和甲酸盐等产品，并在阳极进行聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 重整，可将 PET 塑料转化为乙醇酸盐 (GA)，法拉第效率大于 90%，为同时转化 CO<sub>2</sub> 和塑料制备增值产品探索出一条可行的道路。相关研究成果发表在《*Nature Synthesis*》<sup>4</sup>。

### 美科研人员研发出用于聚变能发电的双相金属合金

2023 年 1 月 11 日，美国西北太平洋国家实验室、弗吉尼亚理工大学的科研人员报道了一种新研发的用于先进核聚变反应堆的钨重合金。科研人员选择了 90W-7Ni-3Fe 合金并利用热轧技术进行微观结构处理，通过人工模仿软体动物表现出的强度和刚度的组合，产生一种珍珠层结构，能够承受反应堆内部极端恶劣的环境并保持结构完整性。在该结构中，钨重合金由两个不同的相组成，包括由纯钨构成的“硬”相和由镍、铁和钨混合物构成的“韧性”相，研究表明，钨合金的高强度来自两种相之间的出色结合。科研人员表示，如果要将这种合金用于聚变

<sup>4</sup> Bhattacharjee S, Rahaman M, Andrei V, et al. Photoelectrochemical CO<sub>2</sub>-to-fuel conversion with simultaneous plastic reforming. *Nature Synthesis*, 2023, DOI: 10.1038/s44160-022-00196-0.

能发电，有必要对其进一步优化以提高安全性和使用寿命。

## 美日企业合作研发 100%氨燃料燃气轮机

2023年1月18日，美国通用电气（GE）与日本重工企业 IHI 宣布正在合作研发仅以氨为燃料的大型燃气轮机。目前氨燃气轮机的发电成本是煤炭火力发电的 2 倍以上，双方将共同研发重型燃气轮机的氨燃烧技术，绘制一份包含具体技术、工程原型和相关测试的技术路线图，改进现有燃气轮机设备，降低成本并希望后续在亚洲市场推广。

来源：GE. GE and IHI Sign Memorandum of Understanding to Develop Gas Turbines that Can Operate on 100% Ammonia<sup>5</sup>

## 麻省理工学院研发低能耗 CO<sub>2</sub> 电化学直接空气捕集技术

2023年1月19日，麻省理工学院研究人员开发出低能耗的 CO<sub>2</sub> 电化学直接空气捕集方法。从环境空气中捕集碳的传统工艺需要的热量为 230~800 千焦/每摩尔 CO<sub>2</sub>，这占了捕集总成本的大部分。研究人员开发了使用中性红 (neutral red) 作为水溶液中的氧化还原活性材料和烟酰胺作为亲水增溶剂的电化学直接空气捕集系统。研究结果表明，从 15% CO<sub>2</sub> 浓度含量中捕集时，该电化学系统在连续液流电池中的电子利用率为 0.71，最低电能需求是 35 千焦/每摩尔 CO<sub>2</sub>。从环境空气（在氧气含量为 20% 的情况下，CO<sub>2</sub> 浓度为百万分之 410<即 410ppm>）捕集 CO<sub>2</sub> 时，电子利用率为 0.38，最低电能需求是 65 千焦/每摩尔 CO<sub>2</sub>。

来源：Nature Communications. Electrochemical Direct Air Capture of CO<sub>2</sub> Using Neutral Red as Reversible Redox-active Material<sup>6</sup>

---

<sup>5</sup><https://www.ge.com/news/press-releases/ge-and-ihl-sign-memorandum-of-understanding-to-develop-gas-turbines-that-can-operate>

<sup>6</sup>Seo, H., Hatton, T.A. Electrochemical direct air capture of CO<sub>2</sub> using neutral red as reversible redox-active material. *Nat Commun* **14**, 313 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41467-023-35866-w>

## 美科学家开发出迄今为止成本最低的碳捕集系统

2023年1月23日，美国能源部西北太平洋国家实验室（PNNL）的科学家开发出迄今为止成本最低的碳捕集系统。该碳捕集系统体积仅有步入式衣柜大小，系统左侧设有 PNNL 新开发的碳捕集剂 CO<sub>2</sub>BOL，可与 CO<sub>2</sub> 化学结合，并在系统右侧设备中进一步转化为甲醇。CO<sub>2</sub>BOL 溶剂是含有不到 5% 水的“疏水”溶剂，仅含单一组分，粘度低，消除了助溶剂降低粘度的需求。与其他技术相比，该捕集系统将原本独立的碳捕集和转化过程集成在一起，可提高捕集过程的效率和经济竞争力，降低二氧化碳处理成本至每吨 39 美元。

来源：Pacific Northwest. Scientists Unveil Least Costly Carbon Capture System to Date<sup>7</sup>；CO<sub>2</sub>BOL Solvents for Cheaper Carbon Capture and Sequestration, Pre- and Post-combustion<sup>8</sup>

## 阿联酋石油公司启动全球首个 CO<sub>2</sub> 注入碳酸盐岩项目

2023年1月18日，阿联酋阿布扎比国家石油公司（ADNOC）宣布启动碳酸盐岩高矿化度水层 CO<sub>2</sub> 注入井开发工作，这是全球首个在碳酸盐岩高矿化度水层中 100% 封存捕集的 CO<sub>2</sub> 的项目。用于封存的高矿化度水层中含有橄榄石，能与气体反应形成固体矿物，保证永久封存。该项目是 ADNOC 投入 150 亿美元的多年期低碳增长战略行动计划的一部分，预计将于 2023 年第二季度开始注入 CO<sub>2</sub>，投入运营后每年可捕集多达 80 万吨 CO<sub>2</sub>。项目旨在实现其运营的去碳化，并支持 ADNOC 到 2030 年将油气业务碳排放强度降低 25% 和到 2050 年实现净零目标的承诺。

来源：ADNOC. ADNOC Announces World First Fully Sequestered CO<sub>2</sub> Injection Project<sup>9</sup>

<sup>7</sup> <https://www.pnnl.gov/news-media/scientists-unveil-least-costly-carbon-capture-system-date>

<sup>8</sup> <https://www.pnnl.gov/available-technologies/co2bol-solvents-cheaper-carbon-capture-and-sequestration-pre-and-post>

<sup>9</sup> <https://www.adnoc.ae/en/news-and-media/press-releases/2023/adnoc-announces-world-first-fully-sequestered-co2-injection-project>

## 德水泥集团计划建设东欧第一条全链条 CCUS 项目

2023 年 1 月 20 日，德国海德堡水泥集团和合作伙伴 PetroCeltic 公司计划建设东欧第一条全链条 CCUS 项目“ANRAV”，涵盖从 CO<sub>2</sub> 捕集、运输和封存到 CO<sub>2</sub> 再利用的所有步骤。该项目将通过 PetroCeltic 公司开发和运营的管道系统，将海德堡集团子公司保加利亚水泥厂的碳捕集设施连接起来，输送至黑海的海底储存点永久封存。预计最早于 2028 年投入运营，预计可实现每年约 80 万吨 CO<sub>2</sub> 的碳捕集能力。

来源：Heidelberg Materials. EU Backs Heidelberg Materials' Pioneering CCUS Project in Bulgaria<sup>10</sup>

---

<sup>10</sup> <https://www.heidelbergmaterials.com/en/pr-2023-01-20>

### 政策速览（2022年3—8月）

▶ 3月3日，国务院办公厅印发《“十四五”中医药发展规划》。该规划提出，到2025年，中医药健康服务能力明显增强，中医药高质量发展政策和体系进一步完善，中医药振兴发展取得积极成效，在健康中国建设中的独特优势得到充分发挥。具体目标包括：中医药服务体系进一步健全、中医药特色人才建设加快推进、中医药传承创新能力持续增强、中医药产业和健康服务业高质量发展取得积极成效、中医药文化大力弘扬、中医药开放发展积极推进、中医药治理水平进一步提升。

（来源：中国政府网）

▶ 3月3日，国务院办公厅印发《“十四五”中医药发展规划》。该规划提出，到2025年，中医药健康服务能力明显增强，中医药高质量发展政策和体系进一步完善，中医药振兴发展取得积极成效，在健康中国建设中的独特优势得到充分发挥。具体目标包括：中医药服务体系进一步健全、中医药特色人才建设加快推进、中医药传承创新能力持续增强、中医药产业和健康服务业高质量发展取得积极成效、中医药文化大力弘扬、中医药开放发展积极推进、中医药治理水平进一步提升。

（来源：中国政府网）

▶ 3月4日，科学技术部、教育部、工业和信息化部等九部门印发《“十四五”东西部科技合作实施方案》。该方案提出，到2025年，西部地区科技创新能力显著提升，东部地区科技创新外溢效应更加明显，创新链产业链跨区域双向融合更加紧密，科技创新对经济社会高质量发展的引领作用显著增强，有力支撑构建以国内大循环为主体、国内国际双循环相互促进的新发展格局。

（来源：科学技术部）

▶ 3月21日，国家发展和改革委员会、国家能源局印发《“十四五”新型储能发展实施方案》。该方案提出，到2025年，新型储能由商业化初期步入规模化发展阶段，具备大规模商业化应用条件。新型储能技术创新能力显著提高，核心技术装备自主可控水平大幅提升，标准体系基本完善，产业体系日趋完备，市场

环境和商业模式基本成熟。其中，电化学储能技术性能进一步提升，系统成本降低 30% 以上；火电与核电机组抽汽蓄能等依托常规电源的新型储能技术、百兆瓦级压缩空气储能技术实现工程化应用；兆瓦级飞轮储能等机械储能技术逐步成熟；氢储能、热（冷）储能等长时间尺度储能技术取得突破。到 2030 年，新型储能全面市场化发展。新型储能核心技术装备自主可控，技术创新和产业水平稳居全球前列，市场机制、商业模式、标准体系成熟健全，与电力系统各环节深度融合发展，基本满足构建新型电力系统需求，全面支撑能源领域碳达峰目标如期实现。

（来源：国家发展和改革委员会）

► 3 月 22 日，国家发展和改革委员会、国家能源局印发《“十四五”现代能源体系规划》。该规划提出，“十四五”时期现代能源体系建设的主要目标是：到 2025 年，能源保障更加安全有力，能源低碳转型成效显著，能源系统效率大幅提高，创新发展能力显著增强，普遍服务水平持续提升。展望 2035 年，能源高质量发展取得决定性进展，基本建成现代能源体系。能源安全保障能力大幅提升，绿色生产和消费模式广泛形成，非化石能源消费比重在 2030 年达到 25% 的基础上进一步大幅提高，可再生能源发电成为主体电源，新型电力系统建设取得实质性成效，碳排放总量达峰后稳中有降。

（来源：国家发展和改革委员会）

► 3 月 23 日，国家发展和改革委员会、国家能源局印发《氢能产业发展中长期规划（2021—2035 年）》。该规划提出，到 2025 年，形成较为完善的氢能产业发展制度政策环境，产业创新能力显著提高，基本掌握核心技术和制造工艺，初步建立较为完整的供应链和产业体系。氢能示范应用取得明显成效，清洁能源制氢及氢能储运技术取得较大进展，市场竞争力大幅提升，初步建立以工业副产氢和可再生能源制氢就近利用为主的氢能供应体系。燃料电池车辆保有量约 5 万辆，部署建设一批加氢站。可再生能源制氢量达到 10 万—20 万吨/年，成为新增氢能消费的重要组成部分，实现二氧化碳减排 100 万—200 万吨/年。到 2030 年，形成较为完备的氢能产业技术创新体系、清洁能源制氢及供应体系，产业布局合理有序，可再生能源制氢广泛应用，有力支撑碳达峰目标实现。到 2035 年，形成氢能产业体系，构建涵盖交通、储能、工业等领域的多元氢能应用生态。可

再生能源制氢在终端能源消费中的比重明显提升，对能源绿色转型发展起到重要支撑作用。

（来源：国家发展和改革委员会）

▶ 3月28日，国家发展和改革委员会、外交部、生态环境部、商务部印发《关于推进共建“一带一路”绿色发展的意见》。该意见提出，到2025年，共建“一带一路”生态环保与气候变化国际交流合作不断深化，绿色丝绸之路理念得到各方认可，绿色基建、绿色能源、绿色交通、绿色金融等领域务实合作扎实推进，绿色示范项目引领作用更加明显，境外项目环境风险防范能力显著提升，共建“一带一路”绿色发展取得明显成效。到2030年，共建“一带一路”绿色发展理念更加深入人心，绿色发展伙伴关系更加紧密，“走出去”企业绿色发展能力显著增强，境外项目环境风险防控体系更加完善，共建“一带一路”绿色发展格局基本形成。

（来源：国家发展和改革委员会）

▶ 4月2日，国家能源局、科学技术部印发《“十四五”能源领域科技创新规划》。该规划提出，“十四五”时期，能源领域现存的主要短板技术装备基本实现突破。前瞻性、颠覆性能源技术快速兴起，新业态、新模式持续涌现，形成一批能源长板技术新优势。能源科技创新体系进一步健全。能源科技创新有力支撑引领能源产业高质量发展。

（来源：国家能源局）

▶ 5月14日，国务院办公厅转发国家发展和改革委员会、国家能源局《关于促进新时代新能源高质量发展实施方案》，旨在锚定到2030年我国风电、太阳能发电总装机容量达到12亿千瓦以上的目标，加快构建清洁低碳、安全高效的能源体系。该方案指出，近年来，我国以风电、光伏发电为代表的新能源发展成效显著，装机规模稳居全球首位，发电量占比稳步提升，成本快速下降，已基本进入平价无补贴发展的新阶段。同时，新能源开发利用仍存在电力系统对大规模高比例新能源接网和消纳的适应性不足、土地资源约束明显等制约因素。《实施方案》要求，必须坚持以习近平新时代中国特色社会主义思想为指导，完整、准确、全面贯彻新发展理念，统筹发展和安全，坚持先立后破、通盘谋划，更好发挥新能源在能源保供增供方面的作用，助力扎实做好碳达峰、碳中和工作。



(来源：中国政府网)

▶ 6月1日，国家发展和改革委员会、国家能源局、财政部等9部门联合印发《“十四五”可再生能源发展规划》。该规划提出，展望2035年，我国将基本实现社会主义现代化，碳排放达峰后稳中有降，在2030年非化石能源消费占比达到25%左右和风电、太阳能发电总装机容量达到12亿千瓦以上的基础上，上述指标均进一步提高。可再生能源加速替代化石能源，新型电力系统取得实质性成效，可再生能源产业竞争力进一步巩固提升，基本建成清洁低碳、安全高效的能源体系。

(来源：中国政府网)

▶ 8月1日，工业和信息化部、国家发展和改革委员会、生态环境部印发《工业领域碳达峰实施方案》。该实施方案提出，“十四五”期间，产业结构与用能结构优化取得积极进展，能源资源利用效率大幅提升，建成一批绿色工厂和绿色工业园区，研发、示范、推广一批减排效果显著的低碳零碳负碳技术工艺装备产品，筑牢工业领域碳达峰基础。到2025年，规模以上工业单位增加值能耗较2020年下降13.5%，单位工业增加值二氧化碳排放下降幅度大于全社会下降幅度，重点行业二氧化碳排放强度明显下降。“十五五”期间，产业结构布局进一步优化，工业能耗强度、二氧化碳排放强度持续下降，努力达峰削峰，在实现工业领域碳达峰的基础上强化碳中和能力，基本建立以高效、绿色、循环、低碳为重要特征的现代工业体系。确保工业领域二氧化碳排在2030年前达峰。

(来源：工业和信息化部)

▶ 8月8日，《科技部财政部教育部中科院自然科学基金委关于开展减轻青年科研人员负担专项行动的通知》发布。该通知提出，为贯彻落实习近平总书记重要指示精神，落实中央人才工作会议精神和科技体制改革三年攻坚方案任务部署，按照科技政策扎实落地的要求，解决青年科研人员面临的崭露头角机会少、成长通道窄、评价考核频繁、事务性负担重等突出问题，保障青年科研人员将主要精力用于科研工作，充分激发青年创新潜能与活力，现开展减轻青年科研人员负担专项行动（减负行动3.0）。专项行动为期1年，分3个阶段展开。2022年9月底前，广泛部署动员，摸排情况，找准卡点堵点；2022年12月底前，各部门

各地方各单位完成各自层面的措施办法制修订工作；2023年6月底前，各项措施办法全面开展实施，减负行动全面落地见效。

（来源：科学技术部）

► 8月10日，《科技部办公厅财政部办公厅自然科学基金委办公室关于进一步加强统筹国家科技计划项目立项管理工作的通知》发布。该通知提出，为进一步加强宏观统筹，自2023年1月1日起，以下国家科技计划项目在立项过程中要建立联合审查机制，避免重复申报，确保科研人员有充足时间投入研发工作。——国家重点研发计划项目（不含青年科学家项目、科技型中小企业项目、国际合作类项目；限项目负责人和课题负责人）。

——科技创新2030—重大项目（不含青年科学家项目；限项目负责人和课题负责人）。

——国家自然科学基金重大项目（限项目负责人和课题负责人）、基础科学中心项目（限学术带头人和骨干成员）、国家重大科研仪器研制项目（限部门推荐项目的项目负责人和具有高级职称的主要参与者）。

（来源：科学技术部）

► 8月18日，科学技术部、国家发展和改革委员会、工业和信息化部等九部门印发《科技支撑碳达峰碳中和实施方案（2022—2030年）》。该实施方案提出，到2025年实现重点行业和领域低碳关键核心技术的重大突破，支撑单位国内生产总值（GDP）二氧化碳排放比2020年下降18%，单位GDP能源消耗比2020年下降13.5%；到2030年，进一步研究突破一批碳中和前沿和颠覆性技术，形成一批具有显著影响力的低碳技术解决方案和综合示范工程，有力支撑单位GDP二氧化碳排放比2005年下降65%以上，单位GDP能源消耗持续大幅下降。该实施方案提出10项具体行动：①能源绿色低碳转型科技支撑行动；②低碳与零碳工业流程再造技术突破行动；③城乡建设与交通低碳零碳技术攻关行动；④负碳及非二氧化碳温室气体减排技术能力提升行动；⑤前沿颠覆性低碳技术创新行动；⑥低碳零碳技术示范行动；⑦碳达峰碳中和管理决策支撑行动；⑧碳达峰碳中和创新项目、基地、人才协同增效行动；⑨绿色低碳科技企业培育与服务行动；⑩碳达峰碳中和科技创新国际合作行动。

（来源：科学技术部）

## 兰州化物所最新高被引论文列表 (一作单位, WOS, 2023年5月11日更新)

序号	Authors	Article Title	Source	通讯作者	Times Cited All atabases	Since2013 Usage Count	Publication Year
1	Xu, Jing; Wang, Xiaoyue; Zhang, Xinrui; Zhang, Yaoming; Yang, Zenghui; Li, Song; Tao, Liming; Wang, Qihua; Wang, Tingmei	Room-temperature self-healing supramolecular polyurethanes based on the synergistic strengthening of biomimetic hierarchical hydrogen-bonding interactions and coordination bonds	CHEMICAL ENGINEERING JOURNAL	张新瑞	8	165	2023
2	Liu, Qiao; Zhang, Junyan	Graphene Supported Co-g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> as a Novel Metal-Macrocyclic Electrocatalyst for the Oxygen Reduction Reaction in Fuel Cells	LANGMUIR	张俊彦	359	1143	2013
3	Liu, Qiao; Jin, Jutao; Zhang, Junyan	NiCO <sub>2</sub> S <sub>4</sub> @graphene as a Bifunctional Electrocatalyst for Oxygen Reduction and Evolution Reactions	ACS APPLIED MATERIALS & INTERFACES	张俊彦	603	1482	2013
4	Liu, Yan; Zhu, Yongfeng; Mu, Bin; Wang, Yongsheng; Quan, Zhengjun; Wang, Aiqin	Synthesis, characterization, and swelling behaviors of sodium carboxymethyl cellulose-g-poly(acrylic acid)/semi-coke superabsorbent	POLYMER BULLETIN	王爱勤	9	2	2022
5	Wang, Wenbo; Tian, Guangyan; Zhang, Zhifang; Wang, Aiqin	A simple hydrothermal approach to modify palygorskite for high-efficient adsorption of Methylene blue and Cu(II) ions	CHEMICAL ENGINEERING JOURNAL	王爱勤	181	416	2015
6	Wu, Lei; Li, Lingxiao; Li, Bucheng; Zhang, Junping; Wang, Aiqin	Magnetic, Durable, and Superhydrophobic Polyurethane@Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> @SiO <sub>2</sub> @Fluoropolymer Sponges for Selective Oil Absorption and Oil/Water Separation	ACS APPLIED MATERIALS & INTERFACES	张俊平	350	840	2015

7	Li, Lingxiao; Zhang, Junping	Highly salt-resistant and all-weather solar-driven interfacial evaporators with photothermal and electrothermal effects based on Janus graphene@silicone sponges	NANO ENERGY	张俊平	85	398	2021
8	Du, Xiaorui; Zou, Guojun; Wang, Zhonghao; Wang, Xiaolai	A scalable chemical route to soluble acidified graphitic carbon nitride: an ideal precursor for isolated ultrathin g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> nanosheets	NANOSCALE	邹国军	224	532	2015
9	Liu, Dong-Mei; Chen, Juan; Shi, Yan-Ping	Advances on methods and easy separated support materials for enzymes immobilization	TRAC-TRENDS IN ANALYTICAL CHEMISTRY	陈娟 师彦平	240	672	2018
10	Cai, Meirong; Yu, Qiangliang; Liu, Weimin; Zhou, Feng	Ionic liquid lubricants: when chemistry meets tribology	CHEMICAL SOCIETY REVIEWS	刘维民 周峰	140	294	2020
11	Zhen, Wenlong; Ning, Xiaofeng; Yang, Baojun; Wu, Yuqi; Li, Zhen; Lu, Gongxuan	The enhancement of CdS photocatalytic activity for water splitting via anti-photocorrosion by coating Ni <sub>2</sub> P shell and removing nascent formed oxygen with artificial gill	APPLIED CATALYSIS B-ENVIRONMENTAL	吴玉琪 吕功煊	316	724	2018
12	Li, Zhen; Kong, Chao; Lu, Gongxuan	Visible Photocatalytic Water Splitting and Photocatalytic Two-Electron Oxygen Formation over Cu- and Fe-Doped g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	JOURNAL OF PHYSICAL CHEMISTRY C	吕功煊	237	1014	2016
13	Ning, Xiaofeng; Lu, Gongxuan	Photocorrosion inhibition of CdS-based catalysts for photocatalytic overall water splitting	NANOSCALE	吕功煊	177	624	2020
14	Zhu, Shengyu; Cheng, Jun; Qiao, Zhuhui; Yang, Jun	High temperature solid-lubricating materials: A review	TRIBOLOGY INTERNATIONAL	杨军	184	486	2019
15	Lin, Peng; Ma, Shuanhong; Wang, Xiaolong; Zhou, Feng	Molecularly Engineered Dual-Crosslinked Hydrogel with Ultrahigh Mechanical Strength, Toughness, and Good Self-Recovery	ADVANCED MATERIALS	王晓龙	662	1702	2015

16	Wen, Ping; Gong, Peiwei; Sun, Jinfeng; Wang, Jinqing; Yang, Shengrong	Design and synthesis of Ni-MOF/CNT composites and rGO/carbon nitride composites for an asymmetric supercapacitor with high energy and power density	JOURNAL OF MATERIALS CHEMISTRY A	王金清	376	1637	2015
17	Zhou, Xiaoyan; Zhang, Zhaozhu; Xu, Xianghui; Guo, Fang; Zhu, Xiaotao; Men, Xuehu; Ge, Bo	Robust and Durable Superhydrophobic Cotton Fabrics for Oil/Water Separation	ACS APPLIED MATERIALS & INTERFACES	张招柱	498	712	2013
18	Zhang, Linwen; Long, Ran; Zhang, Yaoming; Duan, Delong; Xiong, Yujie; Zhang, Yajun; Bi, Yingpu	Direct Observation of Dynamic Bond Evolution in Single-Atom Pt/C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> Catalysts	ANGEWANDTE CHEMIE-INTERNATIONAL EDITION	毕迎普	184	874	2020
19	Zhang, Beibei; Wang, Lei; Zhang, Yajun; Ding, Yong; Bi, Yingpu	Ultrathin FeOOH Nanolayers with Abundant Oxygen Vacancies on BiVO <sub>4</sub> Photoanodes for Efficient Water Oxidation	ANGEWANDTE CHEMIE-INTERNATIONAL EDITION	毕迎普	441	1004	2018
20	Sun, Yihan; Guo, Zhiguang	Recent advances of bioinspired functional materials with specific wettability: from nature and beyond nature	NANOSCALE HORIZONS	郭志光	171	1080	2019
21	Liu, Bao; Sun, Yinglun; Liu, Lingyang; Chen, Jiangtao; Yang, Bingjun; Xu, Shan; Yan, Xingbin	Recent advances in understanding Li-CO <sub>2</sub> electrochemistry	ENERGY & ENVIRONMENTAL SCIENCE	许珊 阎兴斌	166	732	2019
22	Bu, Xudong; Su, Lijun; Dou, Qingyun; Lei, Shulai; Yan, Xingbin	A low-cost water-in-salt electrolyte for a 2.3 V high-rate carbon-based supercapacitor	JOURNAL OF MATERIALS CHEMISTRY A	阎兴斌	205	386	2019
23	Peng, Chao; Yan, Xing-bin; Wang, Ru-tao; Lang, Jun-wei; Ou, Yu-jing; Xue, Qun-ji	Promising activated carbons derived from waste tea-leaves and their application in high performance supercapacitors electrodes	ELECTROCHIMICA ACTA	阎兴斌	406	368	2013
24	Chen, Jiangtao; Yang, Bingjun; Hou, Hongjun; Li, Hongxia; Liu, Li; Zhang, Li; Yan, Xingbin	Disordered, Large Interlayer Spacing, and Oxygen-Rich Carbon Nanosheets for Potassium Ion Hybrid Capacitor	ADVANCED ENERGY MATERIALS	阎兴斌	261	446	2019

25	Dou, Qingyun; Lei, Shulai; Wang, Da-Wei; Zhang, Qingnuan; Xiao, Dewei; Guo, Hongwei; Wang, Aiping; Yang, Hui; Li, Yongle; Shi, Siqi; Yan, Xingbin	Safe and high-rate supercapacitors based on an acetonitrile/water in salt hybrid electrolyte	ENERGY & ENVIRONMENTAL SCIENCE	阎兴斌	233	466	2018
26	Liu, Wenwen; Yan, Xingbin; Chen, Jiangtao; Feng, Yaqiang; Xue, Qunji	Novel and high-performance asymmetric micro-supercapacitors based on graphene quantum dots and polyaniline nanofibers	NANOSCALE	阎兴斌	258	682	2013
27	Yang, Lei; Huang, Hanmin	Transition-Metal-Catalyzed Direct Addition of Unactivated C-H Bonds to Polar Unsaturated Bonds	CHEMICAL REVIEWS	黄汉民	621	363	2015
28	Wang, Quanjun; Su, Yijin; Li, Lixin; Huang, Hanmin	Transition-metal catalysed C-N bond activation	CHEMICAL SOCIETY REVIEWS	黄汉民	340	417	2016
29	Wang, Rutao; Lang, Junwei; Zhang, Peng; Lin, Zongyuan; Yan, Xingbin	Fast and Large Lithium Storage in 3D Porous VN Nanowires-Graphene Composite as a Superior Anode Toward High-Performance Hybrid Supercapacitors	ADVANCED FUNCTIONAL MATERIALS	Wang, RT	358	629	2015
30	Liu, Wen-Wen; Feng, Ya-Qiang; Yan, Xing-Bin; Chen, Jiang-Tao; Xue, Qun-Ji	Superior Micro-Supercapacitors Based on Graphene Quantum Dots	ADVANCED FUNCTIONAL MATERIALS	Liu, WW	564	876	2013
31	Fan, Zengjie; Liu, Bin; Wang, Jinqing; Zhang, Songying; Lin, Qianqian; Gong, Peiwei; Ma, Limin; Yang, Shengrong	A Novel Wound Dressing Based on Ag/Graphene Polymer Hydrogel: Effectively Kill Bacteria and Accelerate Wound Healing	ADVANCED FUNCTIONAL MATERIALS	Fan, ZJ	573	1661	2014