



双碳情报动态

2024 年第 **01** 期 (总第 030 期)

本期聚焦

- ◆ WIPO 聚焦气候变化技术发布新版绿色技术手册
- ◆ 全球清洁氢项目部署及制备技术研究进展分析
- ◆ 全球天然氢勘探开发利用进展分析
- ◆ 欧洲碳捕集与封存产业进展

中国科学院发展规划局
中国科学院文献情报中心

本期聚焦

WIPO 聚焦气候变化技术发布新版绿色技术手册1

绿色技术的发展对降低碳排放、提高能源效率、促进可持续发展等方面具有至关重要的作用。自 2020 年以来，世界知识产权组织 (WIPO) 发布了多个涉及绿色技术的相关报告，本文主要对气候变化减缓技术进行了梳理和分析，以期为我国绿色技术的相关研究和部署提供参考。

全球清洁氢项目部署及制备技术研究进展分析7

随着全球碳中和目标的提出，美国、欧盟、德国和日本先后制定或更新氢战略，将氢作为深度脱碳的战略选择，提出雄心勃勃的氢经济目标，推动了全球清洁氢项目部署。本文梳理了近期全球清洁氢项目的最新进展，并从影响氢项目部署的政策和技术角度出发分析了主要经济体氢能战略举措以及清洁氢制备关键技术的研发动向。

全球天然氢勘探开发利用进展分析16

近年来，天然氢作为一种新的清洁氢气来源逐渐受到关注。天然氢又被称为“地质氢”、“金氢”或“白氢”，是地下地质作用产生的可再生氢气，其生产成本低，储量巨大。自天然氢在非洲马里被成功开发以来，美、加、澳等国纷纷加强对天然氢的勘探和开发利用。2023 年，天然氢首次被国际能源署 (IEA) 写入氢能年度旗舰报告《全球氢能回顾》，并入选 *Science* 杂志年度十大突破。本文系统梳理总结了全球天然氢勘探开发进展，供决策参考。

欧洲碳捕集与封存产业进展22

基于全球碳捕集与封存研究院发布的《欧洲碳捕集与封存区域概述》报告，本文整理了 2023 年以来欧盟及欧洲各国实施的 CCS 相关政策、部分 CCS 项目建设情况、重要的双边 CCS 政策和战略对话等，展示了 2023 年以来欧洲 CCS 产业动向。

重要动态

美国能源部投入 5900 万美元支持清洁氢能技术研发.....	29
地球静止卫星具有较大潜力实现大型甲烷点源连续监测.....	29
英国投入 3800 万英镑资金升级英国电池工业化中心.....	30
世界最大核聚变实验装置点火运行.....	30
日本 NEDO 支持氢直接还原铁技术开发.....	30
<i>Science</i> 预测 2024 年值得关注的研究事件.....	31
美国能源部发布适应零下低温天气的下一代热泵产品原型.....	32
美国能源部投入 3000 万美元开发核聚变第一壁材料.....	32

更多信息详见：

- ◆ “双碳情报” 微信公众号
- ◆ 碳达峰碳中和情报支持平台
<http://scieye.llas.ac.cn/carbon>



WIPO 聚焦气候变化技术发布新版绿色技术手册

在实现双碳目标的过程中，技术创新是非常关键的一环。绿色技术的发展对降低碳排放、提高能源效率、促进可持续发展等方面具有至关重要的作用。自 2020 年以来，世界知识产权组织（WIPO）发布了多个涉及绿色技术的相关报告，本文主要对气候变化减缓技术进行了梳理和分析，以期为我国绿色技术的相关研究和部署提供参考。

一、WIPO 发布系列绿色技术相关报告

2022 年 11 月 10 日，WIPO 与多个机构联合发布首版旗舰报告《绿色技术手册——气候变化适应技术》（Green Technology Book 2022——Solutions for Climate Change Adaptation）¹，报告涵盖了气候变化适应技术，重点关注应对气候影响特别紧迫的 3 个领域（农业和林业、水域和沿海地区以及城市），旨在降低面对气候影响的脆弱程度并提高抵御气候影响的能力，确保创新、技术和知识产权处于应对气候变化的最前沿。

2023 年 12 月，WIPO 发布了 2023 年《绿色技术手册——气候变化减缓的解决方案》（Green Technology Book——Solutions for Climate Change Mitigation）²，介绍了减少温室气体排放的技术及这些技术的运作系统，旨在更广泛地讨论绿色创新技术在减缓气候变化、实现双碳目标中的关键作用。

二、气候变化减缓技术

1、加快绿色技术创新、优先规模化经过验证的技术

为实现 2050 年净零排放目标，人们仍需要大量且快速的技术创

¹ WIPO. WIPO Launches New Flagship Report “Green Technology Book”; First Edition Focuses on Climate-Change Adaptation. https://www.wipo.int/pressroom/zh/articles/2022/article_0012.html

² WIPO. Green Technology Book: Solutions for Climate Change Mitigation. <https://tind.wipo.int/record/48717>

新。创新需要时间才能成长为市场化的解决方案，在应对气候危机的紧迫时间背景下，仅仅依靠或等待新兴技术和突破性技术进入市场（例如，据预测，碳捕获和封存技术在 10 年内不会有显著的扩大），这可能导致错失资助和推广现有解决方案的机会。人们需要优先扩大经过验证的现有技术的规模，大力投资现有的各种解决方案，创造性调整现有解决方案，以应对不同地区和行业的独特挑战，从而促进其广泛应用。

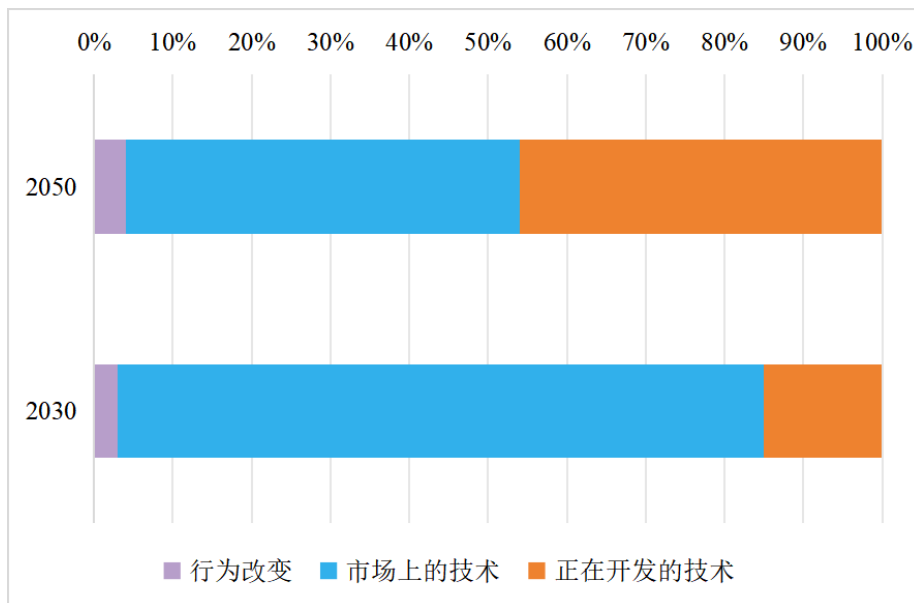


图 1 预期 2030 年和 2050 年净零路径的年度二氧化碳减排量

2、减缓气候变化需要循环思维

当前，某些气候技术可能会在次优解决方案中产生锁定效应，例如，一种不会消耗臭氧层但会导致气候变化的制冷剂进入市场。循环方法具有巨大的减缓气候变化的潜力，在欧盟，到 2050 年，循环方法可以将材料生产中的 CO₂ 排放量减少 56%。人们应将循环方法作为脱碳的核心，以降低过度依赖突破性技术的风险。

3、需求侧评估值得更多关注

报告呼吁应对气候变化减缓技术的需求进行更广泛的评估，同时考虑需求侧和供应侧措施：①技术能够支持需求侧措施。如通过更好的建筑设计和运行，减少对高能耗供暖和制冷技术的需求；②技术（特别是数字技术）可促进实现城市基础设施的智能规划；③技术和创新

在开发新型材料、推进再利用和回收方法以及避免食品供应链中的浪费方面也发挥着重要作用；④植物和真菌衍生产品可以在食品加工中替代动物蛋白，从而减少对排放甲烷的牲畜的需求。

4、逐步淘汰化石燃料才能发挥关键气候技术脱碳的潜力

对化石燃料的依赖降低了许多气候技术的效率。电弧炉、电动汽车、氢气和热泵都被认为是各行业脱碳的必要条件，但是，这些技术减缓气候变化的潜力取决于为它们供电电网能否提供可再生能源。

5、支持快速发展的城市，避免碳锁定

在全球范围内，气候技术领域主要由少数几个拥有强大创新体系的国家主导，发展中国家开发和获得新技术的机会较少，通过协同创新和技术转让可以使发展中国家更容易获得创新解决方案。对于快速发展的城市，谨慎选择技术至关重要，要避免对次优气候技术的依赖。此外，快速发展的城市在推广现有解决方案方面具有巨大潜力。据国际金融公司估计，到2030年，新兴市场城市的气候投资额将达到29.4万亿美元，涉及6个主要领域：废物处理、气候智能型水（Climate-smart Water）、可再生能源、电动汽车、公共交通和绿色建筑（Green Buildings）。

6、钢铁和水泥领域需要重点关注和技术创新

钢铁和水泥等被视为难以实现碳减排的工业领域，尤其需要进一步创新研发，最需要的是能够实现电气化、逐步淘汰化石燃料和改变生产过程的创新技术。但是，目前大多数低排放钢铁的专利申请都集中在铁矿石的加工和运输上，而不是碳密集度较高的炼钢阶段，并且，目前规划的低碳钢铁和水泥产能与所需的减排量不一致。

7、农业和土地利用具有巨大的减排潜力

最大的减缓气候变化效应可能来自农业实践的改变：改变耕种土地和饲养牲畜的方式、避免砍伐森林和改变消费者行为。这些改变可以防止土壤的大规模碳排放、降低牲畜甲烷排放量、提高生产力等。目前已有技术可以支持上述的改变：①卫星图像可以为监测作物和预

测产量提供数据；②饲料添加剂可以降低牲畜的甲烷排放量；③除草机器人和喷洒无人机可以帮助改善土壤管理；④先进的数据驱动农业技术可以提高生产率，减少化学品的使用。更先进的技术尚未成为主流，除非该技术风险小且经济合理，否则小型农户可能会对新技术望尘莫及。要实现支持减缓气候变化的新农业革命，消费者需求、政策和资金的支持都是必不可少的。

8、国际气候融资与合作

气候变化的成本正在上升。到 2030 年，为避免全球范围内气候变化最严重后果所需的成本约为 4 万亿美元/年。发展中国家要想获得采用气候技术的平等机会，开展国际合作至关重要。超过 70% 的全球气候融资仍以贷款而非政府资助的形式支付，这加重了各国的债务负担。另外，气候融资需要与其他相关资金流动相联系，其中，最值得关注的是全球化石燃料资金和发展中国家每年偿还的债务。世界银行最近宣布向遭受气候灾害的发展中国家提出暂停偿还新贷款的建议。此外，新一轮的“债务换气候”浪潮使各国有可能用债务偿还换取对气候项目的投资。同时，政府在开发和部署气候变化减缓技术方面发挥着重要的作用，缺乏数据和风险意识是技术转让、吸收效率和财务可行性的主要障碍，政府应建立能够降低气候技术部署风险的机制和支持机构。

三、创新和知识产权对推广低排放技术的作用

1、加强国家创新体系建设

经合组织国家（OECD）通常拥有最高效的国家创新体系，而加强创新生态系统需要在政策的支持下采取系统性措施。政府间气候变化专门委员会（IPCC）强调了针对创新系统的政策在克服与低排放技术相关的分配、环境和社会障碍的重要性，并指出：应对全球气候挑战的监管框架必须更多地考虑技术和创新的重要作用，保障知识产权和所有权。

2、技术适应和内生技术

大多数气候技术专利都是在发达国家的知识产权局申请的。发展中国家较弱的创新体系导致专利数量较少，专利数据库也因此缺失。为了解决发展中国家所需的技术与可获得的技术之间不对等的问题，可以通过多种方式推广更适合当地的气候技术：①使转让的技术适应当地情况；②共同开发创新；③支持和认可当地发明的内生技术。

3、气候变化减缓技术专利趋势

过去 10 年，发明都集中在主要国家和少数研发投资者手中，仅 5 个国家（中国、德国、日本、韩国和美国）就占了高价值气候变化减缓技术专利申请的近 76%，其中，中国的专利申请数量占主导地位。技术创新呈现出越来越集中的趋势，这需要在国家层面进行更多技术的转移转化。

专利活动可以反映技术发展的质量与效率，洞察创新能力的演变。1995—2011 年，气候变化减缓技术的发明增长了 5 倍；2014—2017 年，专利申请趋势明显放缓，原因可能在于：化石燃料价格下降、碳价格低廉以及某些技术的成熟。在低碳能源技术领域，专利申请在 2017 年之后的 3 年中有所增长，这主要是受到燃料转换、能源效率以及氢燃料电池等交叉技术的推动。

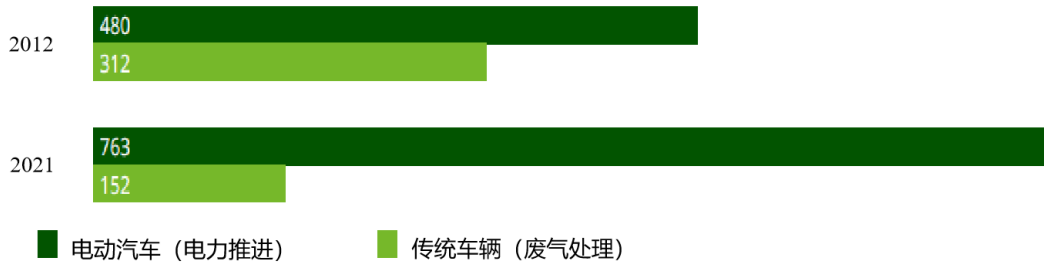


来源：IEA, 2019b.

图 2 全球各领域气候变化减缓技术专利申请情况（1990—2015）

在**燃料电池领域**，目前燃料电池技术具有很高的成熟度¹。氢燃料电池作为柴油混合动力的替代，可用于实现铁路脱碳。同时，氢燃料电池汽车技术的活跃度很高，重型汽车和公共汽车是氢燃料电池的潜在市场。此外，氢燃料电池有望成为航空业实现气候目标的可行解决方案，预计在未来 20 年内，氢能将是帮助航空业实现零碳的关键能源载体。

在**电动汽车领域**，电动汽车专利活动与化石燃料价格之间存在明显的相关性。2014 年油价暴跌后，欧洲的电动汽车专利申请量有所下降。随后，2017—2021 年，电动汽车和混合动力汽车技术专利显著增加，而与传统化石燃料发动机相关的创新显著下降。



来源：EPO, 2022a.

图 3 欧洲专利局 2012 年和 2021 年电动汽车和传统车辆相关技术的专利申请

在**数字技术领域**，数字技术在应对气候变化领域发挥日益重要的作用，其在气候变化减缓技术中的渗透率极高，约 60% 气候相关的商标都与信息和通信技术（ICT）有关。在能源和建筑领域，约 40% 减缓气候变化的技术被视为数字化创新。

双碳目标的实现是一个宏大的系统工程，需要全球的智慧与力量，而绿色技术的创新与应用，无疑是推动这一伟大工程的强大引擎。中国是全球绿色技术创新的主要国家，需要继续加强国家创新体系建设，加快绿色新技术的创新，逐步淘汰化石燃料，重视钢铁和水泥领域的技术创新，利用先进技术充分发挥农业实践的减排潜力。同时，国际间的合作与交流也不可或缺，只有携手共进，才能共享技术成果，让绿色技术更快、更广地造福人类。

（董金凤 李姝影）

¹ WIPO. Hydrogen Fuel Cells in Transportation. <https://www.wipo.int/edocs/pubdocs/en/wipo-pub-1076-en-patent-landscape-report-hydrogen-fuel-cells-in-transportation.pdf>

全球清洁氢项目部署及制备技术研究进展分析

随着全球碳中和目标的提出，美国、欧盟、德国和日本先后制定或更新氢战略，将氢作为深度脱碳的战略选择，提出雄心勃勃的氢经济目标，推动了全球清洁氢¹项目部署。2023年12月，法国发布更新版《国家氢能战略》草案²，提出建设吉瓦级制氢工厂，加速绿氢部署，提升法国在氢价值链的领导者地位。英国发布《氢生产交付路线图》³和《氢运输和存储网络发展路径》⁴，通过多举措支持电解制氢项目和氢储运基础设施网络建设。刚刚闭幕的 COP28 推出了一系列有利于促进氢跨境贸易的旗舰举措⁵，包括氢及氢衍生物认证计划政府间互认意向声明、为基于全生命周期分析的不同来源氢温室气体排放提供全球基准（ISO 方法论）、氢及衍生品跨境贸易走廊的公私声明等，旨在释放氢及其衍生物跨境价值链的社会经济效益。本文梳理了近期全球清洁氢项目的最新进展，并从影响氢项目部署的政策和技术角度出发分析了主要经济体氢能战略举措以及清洁氢制备关键技术的研发动向。

一、全球清洁氢项目总体概况

根据《2023 全球氢能洞察》⁶，截至 2023 年 10 月，全球已宣布清洁氢能项目达 1418 个，较 2023 年 1 月的统计数量增长了 35%。其中，1011 个项目计划到 2030 年全部或部分投产。从项目实施情况看，处于公告阶段、可行性研究阶段、前端工程设计阶段、在建和运营阶段的项目比例分别为 30%、22%、13%和 35%。在建或者运营阶段的项

¹ 清洁氢、低碳氢消耗能源均为可再生能源、核能和化石能源结合 CCUS 技术等，绿氢消耗能源为可再生能源。目前一些国家和地区对上述不同来源氢制定了碳排放基准值，但全球对不同来源氢碳排放值没有达成统一标准。

² Ministère de la transition écologique. Stratégie nationale pour le développement de l'hydrogène décarboné en France. https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/SNH2_VF.pdf

³ Department for Energy Security and Net Zero. Hydrogen Production Delivery Roadmap. <https://www.gov.uk/government/publications/hydrogen-production-delivery-roadmap>

⁴ Department for Energy Security and Net Zero. Hydrogen Transport and Storage Networks Pathway. <https://www.gov.uk/government/publications/hydrogen-transport-and-storage-networks-pathway>

⁵ Hydrogen Council. COP28 Presidency Marks the Launch of Flagship Initiatives to Unlock the Climate and Socio-economic Benefits of Hydrogen. <https://hydrogencouncil.com/zh/cop28-presidency-marks-the-launch-of-flagship-initiatives-to-unlock-the-climate-and-socio-economic-benefits-of-hydrogen/>

⁶ Hydrogen Council. Hydrogen Insights 2023. <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2023/12/Hydrogen-Insights-Dec-2023-Update.pdf>

目比例首次超过公告阶段。根据已宣布产能，到 2030 年全球低碳氢和可再生氢产能每年将由当前的 86 万吨提升到 4500 万吨，其中，可再生氢产能占比将超过 70%。但从政策部署情况来看，约 50%的产能项目仍处于规划阶段，7%仅为承诺目标，产能规模扩大将面临重大挑战。

已宣布清洁氢项目在产能扩张、生产能力提升和应用领域均显示出持续的增长趋势。从氢供应看，在运营项目中清洁氢产能已由每年 80 万吨提高到 86 万吨。其中，约 18%为可再生氢，到 2030 年，这一比例将上升至 45%。欧洲将成为清洁氢产能最大地区，与美洲和大洋洲的总产能在全球中的占比将达到 80%以上。从规模看，全球电解槽装机容量已达到 11 吉瓦，较 2023 年 1 月增长达到 33%。其中，大部分来自中国（约占 55%），其次是中东（约 15%）、欧洲（约 15%）和北美（约 5%）。两个全球最大规模的在运营电解制氢项目（260 兆瓦¹和 150 兆瓦²）均位于中国。燃料电池的累计容量由 12 吉瓦增加为 15 吉瓦，中国、韩国和日本为主要供应市场。从终端应用看，通过最终投资的氢终端应用项目金额已超过 75 亿美元，主要分布在工业、交通和电力等部门中，其中交通部门占比 60%。从国家投资金额看，欧洲的氢终端应用投资高达 45 亿美元，位居全球投资金额首位，主要聚焦绿氢在工业原料（如炼油工艺）中的应用。韩国和中国分别在氢动力轻型汽车市场、氢燃料电池卡车和公共客车市场处于领先地位。北美侧重低碳氢在氨生产和炼油工艺中的应用。

根据国际能源署（IEA）统计，截止 2023 年 7 月，全球已运行和在建的电解制氢项目有 466 项³。在这些项目中，电解槽装机容量不低于 500 兆瓦的项目有 10 项（见表 1），电解槽类型以碱性电解槽和质子交换膜为主。

¹ 我国首个万吨级光伏绿氢示范项目投产. <https://www.cenews.com.cn/news.html?aid=1065766>

² 全球最大电解水制绿氢项目在宁夏投产. <http://news.cnpc.com.cn/system/2021/04/25/030031051.shtml>

³ IEA. Global Hydrogen Review 2023. <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023>

表 1 电解槽装机容量超过 500 兆瓦的在建电解制氢项目

序号	项目名称	国家	运行时间	电解槽技术类型	电力来源	装机容量 MW	年产氢量 kt/y	应用场景
1	HYBRIT demo	瑞典	2025	碱性电解槽	电网	500	84.70	氢冶金
2	NEOM Green Hydrogen Project	沙特	2026	碱性电解槽	可再生能源	2000	338.97	-
3	H2 Green Steel (H2GS)	瑞典	2025	碱性电解槽	可再生能源	800	135.59	氢冶金
4	Gigastack-Hornsea 2, phase II	英国	2030	质子交换膜电解槽	海上风电	900	134.94	-
5	Sinopec - Zhangzhou	中国	2027	碱性电解槽	海上风电	1049.43	181.82	-
6	Ben Tre project, phase 1	越南	2024	碱性电解槽	-	528.02	89.49	合成甲醇
7	Hydrogen Energy Metallurgical Chemical Demonstration Zone, 2	中国	2025	碱性电解槽	陆上风电	1013.37	175.57	合成甲醇
8	Kunming Engineering Corporation - Fengzhen (Ulanbaq)	中国	-	质子交换膜电解槽	陆上风电	666.97	100	-
9	Songyuan hydrogen energy industrial park - Ammonia & Methanol	中国	2025	碱性电解槽	陆上风电	640	110.88	氨生产、合成甲醇
10	Topsoe Power-to-X	丹麦	2025	固体氧化物电解槽	可再生能源	500	125	-

上述项目中，中国拥有的项目（4 项）占比超过 40%。由中国华鲁集团和水木明拓集团以及国际氢能源中心合作建设的“Hydrogen Energy Metallurgical Chemical Demonstration Zone, 2”¹，是世界上第一个绿色制氢及在冶金化工领域应用的综合示范项目；中石化新疆库

¹ IHEC's Green Hydrogen Project Marks Milestone in Clean Energy Transition. <https://www.world-energy.org/article/32196.html>

车绿氢示范项目是当前全球最大的光伏制氢项目，已于 2023 年 6 月顺利产氢，制氢规模达到每年 2 万吨，标志着我国万吨级绿氢炼化项目首次实现全产业链贯通¹。沙特阿拉伯的“NEOM Green Hydrogen Project”设定装机容量达 2000 兆瓦，将于 2026 年运行，届时将成为全球最大的绿氢工厂²；丹麦托普索公司正在建设世界上最大的固体氧化物电解槽制氢工厂，2025 年投入运营后，装机容量可达 500 兆瓦并可扩展至 5000 兆瓦³。法国 Genvia 高温电解槽吉瓦级制氢工厂将从 2028 年运行⁴。

二、主要经济体发展氢项目的战略举措

主要经济体强化氢在深度脱碳中的战略性地位及高影响力用途，并继续扩大绿氢产业规模和降低制氢成本。2023 年 6 月，美国《国家清洁氢能战略和路线图》⁵提出，到 2030 年将清洁氢产能从当前几乎为零增至 1000 万吨/年，制氢成本降低 80%至 1 美元/千克⁶。该路线图从应用视角出发将清洁氢发展分为 3 个阶段，首先在难脱碳行业（如炼油、制氨、公交）使用氢能；其次扩展到渡轮、化工、钢铁、储能、发电和航空领域；最后在市场竞争力增强时，应用于备用电源、甲醇生产和天然气网络等。欧盟在 2022 年的“Repower EU”计划中提出，到 2030 年，实现可再生制氢产量 1000 万吨和进口 1000 万吨的目标，制氢成本低于 1.8 欧元/千克（约 1.97 美元/千克）。2023 年 10 月，欧盟通过《可再生能源指令（修订版）》⁷和《ReFuelEU 航空

¹ 我国首个万吨级光伏绿氢示范项目投产. <https://www.cenews.com.cn/news.html?aid=1065766>

² NEOM. Green Hydrogen Company Completes Financial Close at a Total Investment Value of usd 8.4 Billion In The World's Largest Carbon-Free Green Hydrogen Plant. <https://www.neom.com/en-us/newsroom/neom-green-hydrogen-investment>

³ 托普索将建造世界最大的电解槽生产设施.

<https://blog.topsoe.com/zh/%E6%89%98%E6%99%AE%E7%B4%A2%E5%B0%86%E5%BB%BA%E9%80%A0%E4%B8%96%E7%95%8C%E6%9C%80%E5%A4%A7%E7%9A%84%E7%94%B5%E8%A7%A3%E6%A7%BD%E7%94%9F%E4%BA%A7%E8%AE%BE%E6%96%BD>

⁴ Ministère de la transition écologique. Stratégie nationale pour le développement de l'hydrogène décarboné en france. https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/SNH2_VF.pdf

⁵ U.S. National Clean Hydrogen Strategy and Roadmap. https://www.hydrogen.energy.gov/clean-hydrogen-strategy-roadmap.html?utm_medium=print&utm_source=hydrogen-doe&utm_campaign=strategy

⁶ U.S. Hydrogen Shot. <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-shot>

⁷ European Union. Directive (Eu) 2023/2413 of The European Parliament and of The Council. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32023L2413&qid=1699364355105>

法规》两项法案¹，法案规定到 2030 年 42%的工业用氢和 1.2%的航空燃料必须来自绿氢。2023 年底欧盟清洁能源技术观察站指出²，氢终端应用中约 50.5%作为炼油的化学原料，约 29.5%用于氨生产，约 7.3%用于其他化学合成，用于运输的氢能仅为 0.001%。法国在 2023 年 12 月更新版《国家氢能战略》（草案）中提出，到 2030 年低碳电解制氢产能达到 6.5 吉瓦，重点应用领域聚焦于交通部门和难以脱碳和电气化的重工业部门（如钢铁、水泥和化肥等）。日本在 2023 年 6 月修订的《氢能基本战略》³中提出，制定 2040 年氢供应量达到 1200 万吨/年的目标，2030 和 2050 年制氢成本分别下降到 30 日元/立方米（约 2.34 美元/千克）和 20 日元/立方米（约 1.56 美元/千克），以实现氢能社会由技术发展阶段过渡到商业化阶段。日本着重于国内外氢能市场的产业化，重点关注低碳氢/氨燃烧发电技术、燃料电池技术，以及在钢铁、化工、氢燃料船舶等领域的氢气直接使用以及氢基化合物使用技术。

政府通过建设区域氢能中心和开拓国际氢供应渠道等措施构建本国大规模氢供应链。美国通过 2021 年签署的《基础设施投资和就业法案》共计投入 80 亿美元用于区域氢能中心建设，支持美国制造业和巩固美国国内供应链。日本在 2023 年新《氢能基本战略》提出未来 10 年建设 3 个大型氢中心、5 个中型氢中心，在港口地区发展氢能枢纽；通过推动国际氢贸易以建立国际氢供应链。欧盟通过 2022 年“Repower EU”能源计划建设区域氢合作网络，推动跨境氢能基础设施部署，并支持在地中海、北海地区和乌克兰建立 3 个氢进口走廊。德国在 2023 年新《国家氢能战略》中提出，将构建本国-欧盟-欧盟外国家 3 层氢网络，确保氢能长距离规模化输送；并推出绿氢氢能地图

¹ European Union. Regulation (Eu) 2023/2405 of The European Parliament and of The Council. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32023R2405&qid=1704633322981>

² EU Science Hub. Water Electrolysis and Hydrogen: Growing Deployment Prospects in Europe and Beyond. https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news-and-updates/water-electrolysis-and-hydrogen-growing-deployment-prospects-europe-and-beyond-2023-11-24_en

³ 再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議. 水素基本戦略（案）.

https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/suiso_seisaku/pdf/20230606_1.pdf

项目，逐步开展与非洲国家的绿氢贸易。法国在 2023 年底公布的新《国家氢能战略》草案计划优先在工业中心的大型消费区（如滨海福斯、敦刻尔克和勒阿弗尔塞纳河口的低碳工业区）部署氢能项目，其次考虑中等城镇或小型工业平台周围的半集中和分散中心¹。

政府对氢项目投资和研发支持力度持续增强。美国通过 2021 年和 2022 年先后签署的《基础设施投资和就业法案》和《通胀削减法案》，大规模提供资金支持氢能基建和研发示范活动，到 2030 年将投入数百亿美元，美国政府两项法案将在氢能公共支出中保持全球领先地位。欧盟在 2022 年 5 月和 7 月相继宣布投入 2 亿欧元（约 2.12 亿美元）用于“Repower EU”计划中的氢研究和 54 亿欧元（约 57 亿美元）支持氢能技术价值链研发创新和首次工业部署²。2023 年 1 月，欧盟清洁氢合作伙伴关系启动 1.95 亿欧元（约 2.06 亿美元）的氢能尖端技术研发³。2023 年 12 月，欧盟创新基金将向托普索公司拨款 9400 万欧元（9930 万美元），用于在丹麦海宁建立首个固态氧化物电解槽生产工厂，该项目的总投资额高达 2.69 亿欧元（2.84 亿美元）。同月，英国能源安全和净零排放部通过“制氢商业模式/净零氢基金”联合资助电解制氢项目，资助项目规模将超过 1 吉瓦⁴，并继续推进到 2030 年实现至少 5 吉瓦的目标。澳大利亚可再生能源署（ARENA）于 2023 年 5 月宣布投入 20 亿澳元（13.4 亿美元）启动“氢能领先计划”⁵，支持 2~3 个旗舰项目实现到 2030 年 1 吉瓦的电解槽装机容量。5 月 26 日，ARENA 又向 Stanwell 公司大规模可再生能源制氢项目的前端工程设计⁶，提供 2000 万澳元（1344 万美元）的资助，在项目开

¹ Ministère de la transition écologique. Stratégie nationale pour le développement de l'hydrogène décarboné en france. https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/SNH2_VF.pdf

² Europäische Kommission. IPCEI: EU-Kommission gibt grünes Licht zur Förderung von Wasserstofftechnologie – auch in Deutschland. https://germany.representation.ec.europa.eu/news/ipcei-eu-kommission-gibt-grunes-licht-zur-forderung-von-wasserstofftechnologie-auch-deutschland-2022-07-15_de

³ Clean Hydrogen Partnership. Call for Proposals 2023 – Closed. https://www.clean-hydrogen.europa.eu/call-proposals-2023-closed_en

⁴ Department for Energy Security and Net Zero. Hydrogen Production Delivery Roadmap. <https://www.gov.uk/government/publications/hydrogen-production-delivery-roadmap>

⁵ Australian Renewable Energy Agency. \$2 billion for Scaling up Green Hydrogen Production in Australia. <https://arena.gov.au/news/2-billion-for-scaling-up-green-hydrogen-production-in-australia/>

⁶ Australian Renewable Energy Agency. Stanwell and International Consortium Progress Large-scale Renewable Hydrogen Project in Gladstone. <https://arena.gov.au/news/stanwell-and-international-consortium-progress-large->

发阶段预计将投入 1.17 亿澳元（7900 万美元）。

三、清洁氢制备关键技术研发进展

清洁氢制备的技术经济性是影响氢应用的关键因素。其中，电解水制氢和光分解水制氢一直是清洁氢制备的研究热点。电解水制氢涉及碱性（ALK）电解制氢、质子交换膜（PEM）电解制氢、固体氧化物（SOEC）电解制氢及阴离子交换膜（AEM）电解制氢等方法；光分解水制氢技术，包括光催化法、光热分解法和光电化学法等。本文重点分析近期上述制氢技术研究取得的重要进展。

全球淡水资源的稀缺使得利用海水进行 ALK 电解制氢成为研究前沿。这项技术面临的主要挑战是海水复杂化学性质导致的阳极析氧反应中催化剂性能下降。因此，开发高效、稳定的电极电催化剂成为关键。2023 年 10 月，香港理工大学的傅强等人介绍了一种能够增强金属磷三晶化物催化活性的边缘优化策略。通过利用碱性阴极析氢反应中的表面重建现象，将掺杂剂（Ru）稳定在原为形成的无定形层中，从而增强了中间体的吸附能力，以达到 $10\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的电流密度和 $1180\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的高交换电流密度，可与商业 Pt/C 催化剂相媲美。这一发现证实了在电催化剂设计中利用非晶化表面的优势，为电化学应用中高效催化剂的设计提供了新的选择¹。2023 年 11 月，英国提赛德大学的 Zafar Khan Ghouri 团队发表研究，介绍了一种新型 Pd 掺杂 Co 颗粒，封装在石墨碳壳电极中，作为高活性析氧反应（OER）电催化剂。研究结果显示，这种新型催化剂在催化活性、活性位点增强、内阻降低、电荷转移加速以及 OER 动力学方面表现出色，并具有更好的活性和耐久性²。2023 年 12 月，西北工业大学的徐新武团队介绍了一种新的耐腐蚀电催化剂。该催化剂是通过在钛纤维基材上覆盖一层还原氧化石墨烯（rGO）纳米片，然后直接生成钴磷化合物（CoP），

scale-renewable-hydrogen-project-in-gladstone/

¹ *Nature Communications*. Unraveling and Leveraging in Situ Surface Amorphization for Enhanced Hydrogen Evolution Reaction in Alkaline Media. <https://www.nature.com/articles/s41467-023-42221-6>

² *Scientific Reports*. Nanoengineered, Pd-doped Co@C Nanoparticles as an Effective Electrocatalyst for OER in Alkaline Seawater Electrolysis. <https://www.nature.com/articles/s41598-023-46292-9>

用于海水分解。实验表明，该 CoPGT 催化剂在 $10\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的电流密度下只需很小的过电位，且在碱性环境中长期稳定，对盐浓度增加有良好的耐受性，展现出优异的耐腐蚀性和低溶解度（低至 0.04%）¹。

减少对铱金属催化剂的依赖性，并克服其替代品在酸性 OER 中稳定性不足和催化活性低的问题，是 PEM 电解制氢面临的关键科学问题之一。2023 年 7 月，美国劳伦斯伯克利国家实验室的科研人员提出了一种高性能、耐用且超低负载的无离子聚物多孔传输电极。该电极消除了阳极室中对离聚物的需求，便于铱的节约和回收，同时在低负荷 ($<0.1\text{mg}_{\text{Ir}}\cdot\text{cm}^{-2}$) 下具有出色的活性和耐久性²。2024 年 1 月，湖南师范大学研究团队开发了一种高效的低铱电催化剂。采用阳离子交换和快速退火-冷却方法，在耐酸的氧化锰 (MnO_2) 表面制备了铱原子，形成特殊的拉伸应变结构。这种结构提高了铱和氧之间的共价键强度，增强了反应过程中的去质子化能力。在 OER 三电极系统测试中，该催化剂分别在 $200\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ 和 $500\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的电流密度下表现出 100 小时和 200 小时的稳定性，展示了其在 PEM 电解制氢应用中的潜力³。二氧化钨被认为是最有前景的铱基催化剂的替代品。2023 年 12 月，阿卜杜拉国王科技大学研究团队揭示了二氧化钨在酸性 OER 过程中失活的机理，并设计了一种氧阴离子保护策略。所制备的 $\text{Ba}_{0.3}(\text{SO}_4)_\delta\text{W}_{0.2}\text{Ru}_{0.5}\text{O}_{2-\delta}$ 催化剂在质子交换膜电解槽中运行时，在 0.5 摩尔/升硫酸 (H_2SO_4) 下，以 $500\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的电导率下可稳定运行 300 小时，实现了持续稳定析氧，为设计稳定、活性的酸性条件下质子交换膜电解槽阳极催化剂开辟了一条新途径⁴。

耐久性是 SOEC 电解制氢技术面临的首要问题。2023 年 8 月，美国爱达荷州国家实验室科研团队发现，使用掺杂材料，如锰 (Mn)、钇

¹ *Nature Communications*. Corrosion-resistant Cobalt Phosphide Electrocatalysts for Salinity Tolerance Hydrogen Evolution. <https://www.nature.com/articles/s41467-023-43459-w>

² *Nature Communications*. Ionomer-free and Recyclable Porous-transport Electrode for High-performing Proton-exchange-membrane Water Electrolysis. <https://www.nature.com/articles/s41467-023-40375-x>

³ *Nature Communications*. Tensile Straining of Iridium Sites in Manganese Oxides for Proton-exchange Membrane Water Electrolyzers. <https://www.nature.com/articles/s41467-023-44483-6>

⁴ *Nature Communications*. Stabilizing Ruthenium Dioxide with Cation-anchored Sulfate for Durable Oxygen Evolution in Proton-exchange Membrane Water Electrolyzers. <https://www.nature.com/articles/s41467-023-43977-7>

(Nd)、铁(Fe)和铬(Cr)是提高SOEC稳定性和电化学催化活性的关键¹。2023年11月,美国麻省理工学院的研究表明,通过调整阴极电位,可以提高多孔电极(由 $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_3$ 的钙钛矿材料与 $\text{Sm}_{0.2}\text{Ce}_{0.8}\text{O}_{1.9}$ 混合制成)在氧还原反应中的稳定性和电化学活性。这是由于在特定条件下,电极材料表面会形成一种新的相(Ruddlesden-Popper相),这有助于防止掺杂剂迁移并在表面生成促进催化反应的钴颗粒²。

AEM电解制氢技术具备低成本和高效率的双重优势。然而,AEM的化学性质和稳定性问题将影响制氢设备的使用寿命,其传导性对制氢性能也有重要影响。因此,最新的研究聚焦于**AEM电解装置的耐久性问题**。2023年6月,清华大学的康昕团队开发了一种新型的RuMoNi电催化剂,具备优异的耐腐蚀性及稳定性。在强腐蚀性海水的测试环境中,该催化剂能够在 $500\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的高电流密度下稳定工作超过3000小时,并且在 1.72V 和 $1000\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的电流密度下实现了77.9%的能量转换效率³。中国科技大学吴亮研究团队成功制备了一种基于超微孔结构的阴离子交换膜。在 1.8V 、 90°C 的条件下,以 $5.4\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的电流密度进行电解水,膜的耐久性超过了3000小时⁴。

光催化制氢的核心挑战在于提高光催化活性和制氢效率。2023年10月,美国内华达大学的Naim Ferdous团队展示了GeC和AlN层构成的新型二维范德瓦尔斯异质双层膜在光催化水分解制氢方面的潜力。该GeC/AlN异质结具有 2.05eV 的带隙,能有效激发水的光催化氧化还原反应,产生氢气和氧气。其II型能带结构有助于光生电子和空穴的有效分离,从而显著提高光催化活性⁵。2024年1月,英国牛津大学Edman Tsang团队与华东理工大学吴新平团队合作,开发

¹ *NPJ Computational Materials*. Enhancing the Faradaic Efficiency of Solid Oxide Electrolysis Cells: Progress and Perspective. <https://www.nature.com/articles/s41524-023-01044-1>

² *Nature communications*. Improvement of Oxygen Reduction Activity and Stability on a Perovskite Oxide Surface by Electrochemical Potential. <https://www.nature.com/articles/s41467-023-42462-5>

³ *Nature Communications*. A Corrosion-resistant RuMoNi Catalyst for Efficient and Long-lasting Seawater Oxidation and Anion Exchange Membrane Electrolyzer. <https://www.nature.com/articles/s41467-023-39386-5>

⁴ *Nature Communications*. Upscaled Production of an Ultramicroporous Anion-exchange Membrane Enables Long-term Operation in Electrochemical Energy Devices. <https://www.nature.com/articles/s41467-023-38350-7>

⁵ *Scientific Reports*. Intriguing Type-II g-GeC/AlN Bilayer Heterostructure for Photocatalytic Water Decomposition and Hydrogen Production. <https://www.nature.com/articles/s41598-023-45744-6>

出一种热辅助光催化分解水制氢的新策略，实现高达 15.9% 的能量转化效率，超过了目前已报道的同类体系¹。

实现成本低、可扩展性强的高效光吸收器，同时确保高效的太阳能转化率和长期耐用性，是光电化学制氢技术面临的一项主要挑战。2023 年 6 月，美国莱斯大学的 Austin M. K. Fehr 团队设计了一种导电粘合剂阻隔层，能将超过 99% 的太阳能转换为化学能，显著提升太阳能制氢（STH）效率。该研究展示了两种基于卤化物钙钛矿的电池架构：一种实现了 13.4% 的 STH 效率，持续运行 16.3 小时；另一种单片堆叠硅钙钛矿串联结构，达到了 20.8% 的峰值 STH 效率，并连续运行了 102 小时²。

（滕飞 李岚春）

全球天然氢勘探开发利用进展分析

氢是一种清洁、高效、零碳的能源载体，作为连接气、电、热等不同能源形式的桥梁，将在未来能源体系中发挥重要作用，尤其是用于难以通过电力脱碳的行业。2022 年全球氢气产量达到 9500 万吨/年，低碳氢仅占 0.7%³，无法满足能源系统向清洁转型的需求。尽管全球低碳制氢项目正呈现井喷式增长，即使所有已宣布项目均能成功建设，到 2030 年全球低碳氢产能也仅达到 4500 万吨/年⁴，仍存在大量缺口。近年来，天然氢作为一种新的清洁氢气来源逐渐受到关注。天然氢又被称为“地质氢”、“金氢”或“白氢”，是地下地质作用产生的可再生氢气，其生产成本低，储量巨大。自天然氢在非洲马里被成功开发以来，美、加、澳等国纷纷加强对天然氢的勘探和开发利用。2023 年，天然氢首次被国际能源署（IEA）写入氢能年度旗舰报告《全球氢能回顾》，并入选 *Science* 杂志年度十大突破⁵。本文系统

¹ *Nature Catalysis*. Electrolyte-assisted Polarization Leading to Enhanced Charge Separation and Solar-to-hydrogen Conversion Efficiency of Seawater Splitting. <https://www.nature.com/articles/s41929-023-01069-1>

² *Nature Communications*. Integrated Halide Perovskite Photoelectrochemical Cells with Solar-driven Water-splitting Efficiency of 20.8%. <https://www.nature.com/articles/s41467-023-39290-y>

³ Global Hydrogen Review 2023. <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023>

⁴ Hydrogen Insights 2023. <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2023/12/Hydrogen-Insights-Dec-2023-Update.pdf>

⁵ 2023 Breakthrough of the Year. https://www.science.org/content/article/breakthrough-of-the-year-2023#section_runnersup02

梳理总结了全球天然氢勘探开发进展，供决策参考。

一、天然氢的成因及资源潜力

天然氢一直长期被忽视。由于自然界中的游离氢极为少见，传统观念认为，氢气难以在地下存在，或是储量过少而不具备勘探价值，气体采样和检测往往缺乏对氢气的检测。现代油气开采通常在富含有机物的沉积岩中作业，这些岩层中的氢含量稀缺，因此也很少检测到氢气。原苏联研究人员认为天然氢是油气的主要成因机制，在多地开展检测，发现了大量高含量天然氢的存在。目前，世界各地已记录了数百起天然氢泄漏现象。研究显示，美国东海岸卡罗莱纳湾的圆形凹陷可能是地质氢从深处迁移到地表的流动路径表现¹，澳大利亚西部北珀斯盆地的“仙女圈”地貌可能是天然氢泄漏抑制了地面植被生长导致²。2012年，加拿大 Hydroma 公司对西非地区马里 Bourakébougou 村的一口因失火而封闭的干井进行了检测，发现其中氢气含量高达 98%。该公司基于该井建设了全球首个天然氢发电商业电站，引起了人们的广泛关注。尤其是 2018 年针对马里天然氢井开发的研究在 *International Journal of Hydrogen Energy* 杂志发表³以来，天然氢相关研究论文数量大幅增加，对于天然氢的成因、分布环境、资源潜力等均进行了研究。

对于天然氢的形成机制尚未有定论，当前研究提出的机制有多种（如图 4⁴），其中有 3 种被认为是主要成因：①**水的辐解**，岩石中的微量放射性元素辐射使水分解产生氢气，该过程极为缓慢，在一些古老的岩石中最有可能发生；②**蛇纹石化**，在高温高压下，水与富铁岩石反应产生氢气，这种快速且可再生的反应称为蛇纹石化，可能是地质氢最主要的成因；③**地球深部脱气**，指地核或地幔存储的氢气沿着

¹ *Progress in Earth and Planetary Science*. Evidence for Natural Molecular Hydrogen Seepage Associated with Carolina Bays (Surficial, Ovoid Depressions on the Atlantic Coastal Plain, Province of the USA). <https://progearthplanetesci.springeropen.com/articles/10.1186/s40645-015-0062-5>

² *International Journal of Hydrogen Energy*. Natural Hydrogen Seeps Identified in the North Perth Basin, Western Australia. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319921026045?via%3Dihub>

³ *International Journal of Hydrogen Energy*. Discovery of a Large Accumulation of Natural Hydrogen in Bourakébougou (Mali). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319918327861>

⁴ *Science*. Hidden Hydrogen: Does Earth Hold Vast Stores of a Renewable, Carbon-free Fuel? <https://www.science.org/content/article/hidden-hydrogen-earth-may-hold-vast-stores-renewable-carbon-free-fuel>

板块边界和断层上升流出，由于勘探技术的限制，目前还无法直接观测到地球深部中氢的存在，因此该说法还存在争议。

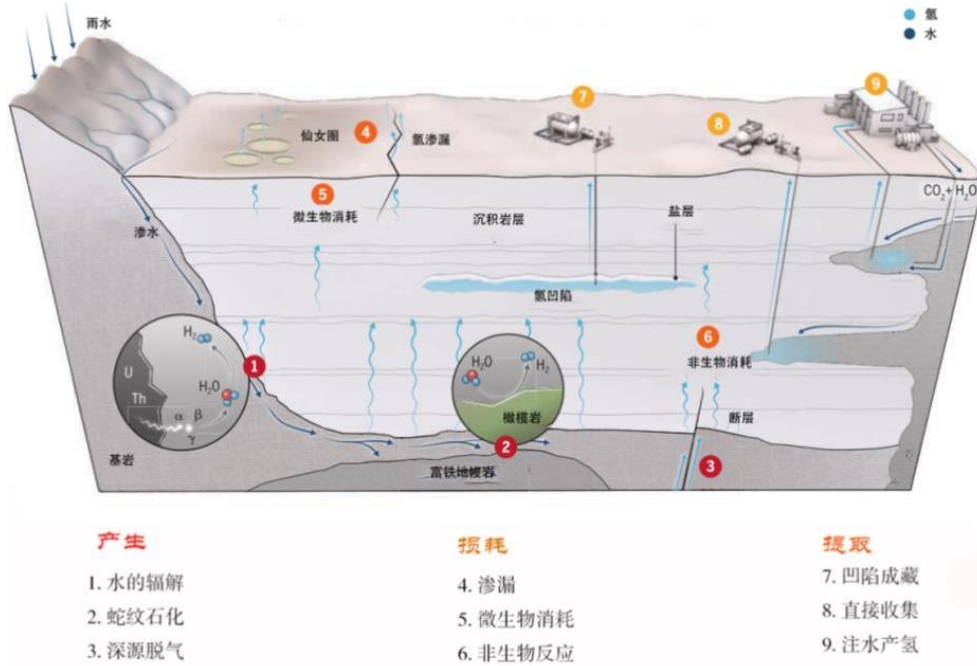


图 4 天然氢的生成机制

全球已发现的天然氢在分布上相对广泛，其中体积分数大于 10% 的高含量氢主要发育于蛇绿岩带、裂谷和前寒武系富铁地层这 3 种地质环境中¹。蛇绿岩带位于汇聚板块边缘，主要由火山岩和沉积岩组成，其相关天然氢都具有较高含量显示。阿曼是发现蛇绿岩带天然氢最多的国家，多数样品氢体积分数超过 60%，最高达到 99%；土耳其、菲律宾、美国等国也有发现。裂谷天然氢主要发现于洋中脊区域，大西洋中脊彩虹热液田（Rainbow hydrothermal field）中的氢气体积分数可超过 40%，目前对该环境的天然氢检测较少，仅在美国爱荷华州西北地区有所发现。许多已发现的天然氢都与前寒武系富铁地层有关，在基底、岩石包裹体、沉积岩中均检测到高含量天然氢，是全球天然氢的重要产层。

在资源潜力方面，自 20 世纪 80 年代起，相继有学者对自然界中的天然氢生成量进行估算，估算值呈数量级增加。结合地球形成以来的巨大氢消耗和产生量，地下存在大型氢气储层与氢源的可能性很高。

¹ 窦立荣, 刘化清, 李博等. 全球天然氢气勘探开发利用进展及中国的勘探前景[J/OL]. 岩性油气藏, 1-14.

美国地质调查局（USGS）基于石油行业的简单模型，开发了一个全球地质氢资源预测评估模型，该模型考虑了非渗透岩石圈闭、微生物破坏影响，以及基于石油行业经验的假设（即只有 10%的天然氢储量能够被经济地开采），显示天然氢资源潜力在万亿吨量级¹。其中大部分资源可能过于分散，无法被经济地开采，但只要有 2%或 3%的天然氢能够被开采，就可满足数百年的需求（以 5 亿吨/年计）²。目前，USGS 正致力于绘制全球首个天然氢资源分布图。

二、全球天然氢勘探开发现状

实现碳中和目标要求氢能的利用要基于清洁制氢，但当前可再生能源生产的“绿氢”成本约为 5 美元/千克，是主流“灰氢”（即化石燃料来源如甲烷蒸汽重整制氢）成本的 2 倍多。美国能源部（DOE）推出“氢能攻关计划”，提出了全球最具雄心的绿氢降本目标——到 2030 年降至 1 美元/千克。天然氢的生产成本可比上述成本更低，得益于深度较浅和具有较高氢气纯度，马里的天然氢生产成本可能低至 0.5 美元/千克。2021 年的全球首届天然氢大会 H-Nat 上，与会专家表示天然氢的成本在 0.5~1 美元/千克³。

天然氢的成功开发促使许多国家开展布局。美国石油地质学家协会在 2021 年成立了首个天然氢委员会。美国地质调查局（USGS）与美国科罗拉多矿业学院在 2023 年 9 月启动了一个联合工业项目，合作单位包括英国石油公司（BP）、雪佛龙等大型石油公司，旨在研究地质氢的资源潜力并开发勘探技术，确定地质氢的储藏地⁴。美国能源部先进能源研究计划署（ARPA-E）也在 9 月宣布投入 2000 万美元启动“地质氢”计划⁵，将通过变革性技术开发和示范，以最低经济成本和

¹ The Potential for Geologic Hydrogen for Next Generation Energy. <https://www.usgs.gov/news/featured-story/potential-geologic-hydrogen-next-generation-energy>

² Understand the Potential for Geological Hydrogen Resources. https://www.hydrogen.energy.gov/docs/hydrogenprogramlibraries/pdfs/review23/arpa005_ellis_2023_o-pdf.pdf?Status=Master

³ Natural Hydrogen: the New Frontier. <https://geoscientist.online/sections/unearthed/natural-hydrogen-the-new-frontier/>

⁴ Geo H2. <https://geophysics.mines.edu/geoh2/>

⁵ Department of Energy. U.S. Department of Energy Announces \$20 Million to Explore Potential of Geologic Hydrogen. <https://arpa-e.energy.gov/news-and-media/press-releases/us-department-energy-announces-20-million->

环境影响从地质层中产氢，重点资助 2 个主题：①通过受激发的矿物学过程生产地质氢，加深对产氢地球化学反应及提高或控制产氢速率的认知；②氢储层管理地下工程，重点关注与地质氢提取相关的技术，包括地下输运方法、地下工程改进、生产和提取过程中的储层监测和/或建模，以及评估氢储层开发风险。

南澳大利亚于 2021 年 2 月将氢气纳入《2000 年石油和地热能法案》的“受管制物质”范围，使天然氢勘探许可得以授权，至今已颁发了 40 多个勘探天然氢矿床的许可证¹。该法案现已修订为《2023 年能源资源法案》，将绿氢生产纳入其中。澳大利亚地球科学局已经完成了对澳大利亚地下盐矿的审查，以确定地下储氢的潜在地点，该项工作还将为天然氢提供勘探信息。

天然氢的勘探开发尚处于早期阶段，以小型公司为主导。根据 IEA 的统计，从事天然氢勘探的公司已经从 2020 年的仅有 3 家，发展到 2023 年中的 40 家。2023 年 4 月，西班牙勘探公司 Helios Aragón 在西班牙北部比利牛斯山脉山麓发现了一个储量超过 100 万吨的天然氢储层，并于 6 月启动了欧洲首个天然氢项目 Monzón，计划在 2024 年开始钻探第一口井，2028 年实现商业化生产²。该公司估计，天然氢的生产成本可以达到 0.75 欧元/公斤。法国能源公司（FDE）与洛林大学、法国国家科学研究中心（CNRS）合作开展 Regalor 研究项目，2023 年 5 月在法国东部的一口钻探井中发现大量天然氢³，地下 1093 米深石炭纪岩层中的流体含有 15%的氢，并估计地下 3000 米处氢气浓度为 98%，预计将是迄今发先的最大天然氢储库之一。美国 Natural Hydrogen Energy 公司于 2019 年在美国内布拉斯加州钻探了全球第一

explore-potential-geologic

¹ Government of South Australia. Natural Hydrogen. <https://www.energymining.sa.gov.au/industry/energy-resources/geology-and-prospectivity/natural-hydrogen>

² Helios Aragón. Monzón Natural Hydrogen Project Launched Helios is Europe's Leading Natural Hydrogen Company. <https://helios-aragon.com/monzon-natural-hydrogen-project-declared-a-project-of-regional-significance-by-government-of-aragon/>

³ FDE. FDE Announces the Discovery of Natural Hydrogen in the Lorraine Mining Basin. <https://www.francaisedelenergie.fr/en/blog/2023/05/15/fde-announces-the-discovery-of-natural-hydrogen-in-the-lorraine-mining-basin/>

口氢气勘探井 Hoarty NE3，并与澳大利亚 HyTerra 公司在 2023 年完成扩展测试，成功钻取了氢气流。美国天然氢初创公司 Koloma 于 7 月获得了比尔·盖茨 Breakthrough Energy Ventures 等投资者的 9100 万美元风险投资，该公司创始人拥有 16 项氢气提取相关专利，包括使用人工智能辅助激光成像和卫星来评估天然氢的存储地¹。澳大利亚 Gold Hydrogen 公司在 2023 年 11 月宣布在位于南澳大利亚约克半岛的拉姆齐 1 号 (Ramsay 1) 探井的 240 米深处发现含量高达 73.3% 的天然氢，并在 1005 米处发现了对于氢从深处来源迁移至浅层区域至关重要的裂隙系统²。该公司迅速宣布了天然氢试点项目计划，随后又在附近第二口勘探井中检测到天然氢³，显示在 201 米处含量很高，表明很可能存在天然氢的富集地。

表 2 部分天然氢开发项目

国家	地点	开发商	进展
澳大利亚	Yorke peninsula	Gold Hydrogen	授予钻井许可证，2023 年 10 月起勘探
澳大利亚	Eyre Peninsula	H2EX	授予许可证
澳大利亚	Amadeus Basin	Santos	钻井评估资源
法国	Lorraine basin	La Française d'Énergie	提交独家采矿勘探许可证申请
马里	Bourakebougou	Hydroma	自 2012 年开始运行示范
西班牙	Pyrenees	Helios Aragon	授予钻井许可证，2024 年起勘探
美国	Arizona	Desert Mountain Energy	提交勘探许可证申请
美国	Kansas	Natural Hydrogen Energy	勘探钻井于 2019 年完成
美国	Nebraska	HyTerra	已完成钻井

来源：IEA. 全球氢能回顾 2023.

三、未来展望

天然氢仍是一个新兴领域，但有潜力成为重要的氢能来源，其具有较低生产成本，在支持能源系统转型方面具有巨大前景。天然氢的

¹ Carbon Credits. Bill Gates Backs Stealth Startup with \$91M for Hydrogen Revolution.

<https://carboncredits.com/bill-gates-backs-startup-91m-for-geologic-hydrogen-revolution/>

² Hydrogeninsight. Gold Hydrogen Unveils Plan to Fast-track World's First Natural H₂ Pilot Plant After Detecting 'Significant Concentrations'. <https://www.hydrogeninsight.com/innovation/gold-hydrogen-unveils-plan-to-fast-track-world-s-first-natural-h2-pilot-plant-after-detecting-significant-concentrations/2-1-1549387>

³ Gold Hydrogen. Very High Concentrations of Hydrogen Found at Ramsay 2. <https://www.goldhydrogen.com.au/asx-releases/very-high-concentrations-of-hydrogen-found-at-ramsay-2/>

勘探开发可以基于油气开发的知识和经验，未来在成因机制、资源勘探和潜力评估、开采利用等方面加大研究力度。首先，天然氢成因较为复杂，现阶段对于地壳中氢的运动和聚集认知有限，仍需进一步补充实验和数据，加大对形成机制及成藏过程研究，为未来长期可持续开发奠定理论基础。其次，天然氢的资源评估仍不准确，需要加强资源勘察和评估，结合地球物理、卫星遥感等技术，进一步明确资源分布，并对已发现的储层进行深入评估，以推进矿区划分和开采。其三，在现有油气开采技术基础上，开展天然氢开采及增产相关研究和测试，进行地质、环境风险评估，以确保安全、高效地开采利用。例如，遵循天然氢的产生机制，通过向反应性地层注入水以刺激发生蛇纹石化生成氢气是具有潜力的方向。这类开采的氢气被称为“橙氢”，其能量消耗高于天然氢，但由于产量高，生产成本仍低于“蓝氢”（即化石燃料结合碳捕集制氢）。进一步地，将不同反应与蛇纹石化相结合可以取得协同增益，如在蛇纹石化过程中将溶解的 CO_2 掺入水中形成固体碳酸盐，可以在产生氢气的同时捕集 CO_2 。此外，还应在岩石再生、地下微生物产氢等方面开展长期研究，以进一步提高天然氢资源的可持续性。

（岳芳）

欧洲碳捕集与封存产业进展

2023 年 11 月 23 日，全球碳捕集与封存研究院发布的《欧洲碳捕集与封存区域概述》报告¹指出，得益于相应政策的支撑和法律法规的完善，目前欧洲共有 119 个商业规模的碳捕集与封存（CCS）设施，比 2022 年增长 61%，CCS 产业发展势头仍在继续。基于上述报告，本文整理了 2023 年以来欧盟及欧洲各国实施的 CCS 相关政策、部分 CCS 项目建设情况、重要的双边 CCS 政策和战略对话等，展示了 2023 年以来欧洲 CCS 产业动向。

¹ Global CCS Institute. CCS in Europe – Regional Overview. <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2023/11/CCS-in-Europe-Regional-Overview-Global-CCS-Institute-pdf.pdf>

一、CCS 政策

1、欧盟政策

鉴于 CCS 技术在减缓气候变化和减少温室气体排放方面的重要性，欧盟委员会 2023 年以来通过了“Fit for 55”一揽子计划、“绿色协议工业计划”、“工业碳管理战略”和“可持续碳循环决议”等立法与监管行动加速 CCS 部署。

(1) Fit for 55。“Fit for 55”一揽子计划包括欧盟排放交易体系（ETS）指令修订和碳边境调节机制（CBAM）正式生效。最新的 ETS 指令表示：①交易体系所涵盖的活动范围不再局限于二氧化碳管道，而是扩展到所有二氧化碳运输方式；②要求欧盟委员会最迟在 2026 年 7 月 31 日提交一份关于如何将永久性碳去除纳入 ETS 的报告。CBAM 是针对欧盟进口商品的碳排放监管机制，规定 CCS/碳捕集与利用（CCU）运营商需要证明相应的储存或利用技术是将二氧化碳永久封存或进行化学转化。

(2) 绿色协议工业计划。这一计划下的《净零工业法案》表示将协助提高欧洲净零技术行业的竞争力，加快发展封存二氧化碳排放的能力，其中，CCS 是法案特别支持的 8 项战略性净零技术之一。法案为欧盟制定到 2030 年二氧化碳储存能力达到 5000 万吨/年的目标，并规定欧盟油气生产商有投资二氧化碳储存项目的义务，还呼吁成员国建立欧洲碳储存地图集以提高地质数据透明度。

(3) 工业碳管理战略。战略主要涉及对碳捕集、利用与封存（CCUS）技术的有效应用和部署。为支持 CCS 战略，欧盟委员会委托进行了两项研究，一个是关于欧盟对二氧化碳运输和储存市场发展的监管，另一个是关于跨欧洲二氧化碳运输网络范围和投资要求的演变。2023 年 6 月，欧盟委员会发布关于“工业碳管理”的公众咨询，最终成果预计在 2024 年第一季度发布，根据这一战略提出的首批法律预计将在 2025 年公布。另外，根据 2019—2023 年欧洲在开发和勘探二氧化碳储存地点取得的进展，相关 CCS 指令还需进一步修改，

修订后的 CCS 指令将为运营商和主管机构提供最佳支撑。

(4) 可持续碳循环决议。决议肯定了碳去除在减排方面的潜力，同时也希望通过森林、农业和技术解决方案来实现 2050 净零目标，并强调直接空气碳捕集 (DAC) 与永久储存项目的结合、基于 CCS 和 CCU 技术的解决方案在未来脱碳中的重要作用。

此外，欧盟委员会提出的碳去除认证框架 (CRCF) 和创新基金将生物质能结合碳捕集与封存 (BECCS)、直接空气碳捕集与封存 (DACCS) 推入监管和投资领域，后续需要进一步的政策干预。

2、欧洲各国政策

部分欧洲国家已制定国家层面的 CCS 战略或路线图，如英国、法国、德国、挪威、比利时、丹麦、瑞典、瑞士等，也有通过专门的 CCS 补贴计划提供明确政策支持的国家，如丹麦、荷兰、挪威和英国等。丹麦、荷兰和挪威在制定和实施二氧化碳储存和运输许可证规则方面处于领先地位。

英国政府在发布春季预算时作出新的 CCS 资助承诺，承诺投资 200 亿英镑扩大国内 CCS 项目，旨在到 2030 年每年捕获 2000—3000 万吨二氧化碳。据估计，如果将海上旧油气田的储存量计算在内，英国海洋的二氧化碳储存量可能高达 780 亿吨。

法国发布的 CCUS 战略预计到 2030 年，工业部门的二氧化碳捕集和储存将达到 400~850 万吨/年，整体的战略部署分 2026—2030 年、2028—2033 年和 2033 年以后等三个阶段进行，表示未来将构建二氧化碳运输基础设施监管框架、开展海底和陆地等多样化储存行动、推进二氧化碳转化利用等。

德国正在制定碳管理战略，草案将于 2023 年底发布。此外，德国政府也启动了一项 500 亿欧元的重工业脱碳计划，CCUS 是重要的减排技术之一。2023 年 7 月更新氢能战略后，德国也尝试在化石燃料生产方面使用蓝氢和 CCS。

荷兰通过可再生能源补贴计划 (SDE++) 持续激励早期部署的

CCS 项目以及其他绿色技术，预计到 2030 年将实现 400 万吨的二氧化碳减排。另外，荷兰标准化协会（NEN）还提议成立欧洲 CCS 和碳核算标准委员会。

丹麦致力于在 2030—2032 年成为欧洲 CCS 中心，预计二氧化碳总容量将达到 5200 万吨/年。丹麦气候、能源和公用事业部已向北海地区 3 家企业颁发首批二氧化碳封存许可证。政府还通过补贴计划支持 CCS 技术发展，预计从 2030 年起，丹麦将每年分配 50 亿欧元用于储存约 320 万吨二氧化碳。目前，欧盟委员会已向丹麦批准 11 亿欧元的国家援助计划，主要用于支持 CCS 技术部署和推广。

瑞典借助其“绿色工业飞跃计划”大力促进二氧化碳负排放/BECCS 技术，2023 年的投资总额达到 13.54 亿瑞典克朗（约 1.2 亿欧元）。新建立的国家 CCS 中心在 2023 年启动首次反向拍卖，旨在到 2030 年刺激 200 万吨的负排放。

芬兰一直在探索 CCS 发展路径，其在 2022 年发布的战略表示将加快 CCS 技术和解决方案的开发与使用，并优先考虑将 CCUS 用于废弃物焚烧和碳去除方案。近期的战略报告也建议政府制定二氧化碳使用与清除战略，并引入财政激励措施。

奥地利未来的国家碳管理战略将侧重于两个方面：①建立运输、储存和使用二氧化碳的法律框架；②废除禁止在国内地质储存二氧化碳的现行法律。目前，奥地利已开展二氧化碳捕集和运输基础设施潜力研究。

比利时是 CCS 市场的积极参与者，其长期战略已将 CCS 确定为最有希望的减排工具，政府也已批准第一版二氧化碳运输监管框架，并在储存场所方面加强国际合作。

挪威政府主要利用财政激励措施结合国家援助、国家碳税来支持和鼓励 CCS，预计到 2030 年，每吨二氧化碳的碳税将从目前的 952 挪威克朗（约 80.82 欧）增加到 2000 挪威克朗（约 169.80 欧）。

波兰环保部正考虑修改法律框架，允许近海、陆上以及碳氢化合物矿床储存二氧化碳。

二、CCS 项目及基础设施

北海地区仍然是欧洲二氧化碳封存的首选地点，但保加利亚、克罗地亚、希腊、意大利、丹麦和波兰等国也在积极挖掘碳封存潜力：①保加利亚、克罗地亚和希腊正在欧洲东南部开发 CCS 项目；②意大利已在亚得里亚海颁发了试点封存许可证；③丹麦和波兰正在考虑陆上封存。运输方面，欧洲各国支持二氧化碳运输设施共享，其中，管道仍然是首选的二氧化碳运输方式，同时各国也在尝试海上运输。本小节将着重介绍部分 CCS 项目和运输线路。

(1) Porthos 项目。Porthos 是荷兰首个 CCUS 集群项目，在 2023 年 11 月通过投资决策，将于 2024 年启动建设、2026 年投入运营。项目致力于解决鹿特丹港及其附近工业部门的碳排放问题，计划运行 15 年，预计每年储存 250 万吨二氧化碳，总储存量将超过 2700 万吨。

(2) Aramis 项目。Aramis 是荷兰另一个大型 CCUS 项目，在 2023 年前作出最终投资决定，同样将在 2026 年投入运营。项目将利用鹿特丹港 Maasvlakte 码头附近的北海废弃天然气田，主要解决附近的工业排放，同时利用陆上管道和船舶封存其他地区的二氧化碳。

(3) Steelanol 项目。Steelanol 以钢厂二氧化碳为原料进行转化利用的代表项目。2023 年 6 月，Steelanol 成功将炼钢过程中的富碳废气转化为高级乙醇，目前已开始商业规模的乙醇生产。

(4) Longship 项目。Longship 是由挪威推出的世界上首个开放获取、全价值链 CCS 模式的跨国项目，包括废物转化能源工厂和水泥厂（有望成为全球首个配备碳捕集装置的水泥厂）。项目将于 2024 年投入运营，旨在使用特定设计的船舶将二氧化碳从不同的国家运输到挪威的指定储存地点。

(5) 管道运输路线。①Aramis 项目确定管道路线和着陆位置的方案后，就可以进行前端工程设计，之后进行最终投资决定；②比利时天然气运营商 Fluxys 正在规划二氧化碳运输网络，预备将二氧化碳输送到比利时国内外的国际储存点；③挪威能源巨头 Equinor 和比

利时 Fluxys 公布从比利时到挪威海上二氧化碳储存地点的管道路线计划；④挪威 Equinor 和德国油气生产商 Wintershall Dea 正在合作建设从德国到挪威的二氧化碳运输、注入和储存基础设施；⑤德国天然气管道运营公司 OGE 在德国新建一个长达 1000 公里的陆上管道项目；⑥波兰-欧盟 CCS 互联项目旨在在格但斯克港与其腹地之间建立一个开放的多式联运二氧化碳出口中心。

(6) 海上运输线路。挪威 Northern Lights 项目、荷兰 Aramis 项目、法国 D'Artagnan 项目和 Grand Ouest 项目等均涉及二氧化碳运输船建造，各国各大企业也有涉足通过船舶运输二氧化碳或连接二氧化碳枢纽的项目。

三、双边协议

(1) 丹麦和挪威正在将自己定位为欧洲的二氧化碳储存中心，双方签署双边协议和谅解备忘录，旨在将出口国的二氧化碳储存在北海地区。近期，丹麦与英国也签署了关于能源转型合作的谅解备忘录，其中包括 CCUS。

(2) 比利时和荷兰以谅解备忘录的形式概述了二氧化碳跨国运输和储存的计划。此外，比利时已与挪威达成在挪威大陆架上跨境运输和储存二氧化碳的双边协议。

(3) 挪威和德国将扩大在北海盆地的合作，讨论二氧化碳基础设施和价值链建设。两国建立工作小组以跟进一项评估跨境运输氢气和二氧化碳可行性的研究，还签署了合作碳捕集项目的协议，这些项目已在安特卫普-布鲁日港开发。

(4) 法国和挪威签署合作开发和部署 CCS 的意向书，旨在建立一个共享技术、知识和建议的交流机制，并准备签订二氧化碳跨境运输和储存的双边协议。

(5) 挪威和瑞士将加强在 CCS 和碳去除 (CDR) 领域的合作，包括探讨如何促进 CCS 和 CDR 的跨境市场开发。

四、小结

近年来，欧洲各国不断加强政策制定以及产业扶持，头部能源企业和科技公司也积极进入市场，欧洲 CCS 产业呈现出大规模化的潜力。政策支持方面，欧洲 CCS 相关法律法规、资金激励、税收扶持等政策比较完善；产业发展方面，欧洲各国大力发展 CCS 项目产业链，积极建设工业集群和运输设施，促使 CCS 产业规模化；技术创新方面，欧洲已将 BECCS 和 DACCS 作为未来实现二氧化碳减排的重要手段，研究证实有力的政府支持和制度安排将使得 BECCS 在欧洲具有巨大的发展潜力。

欧盟将通过 2024 年第一季度发布的文件确定 2040 年气候目标，随后提交修订《欧洲气候法案》的立法提案。如果提案与“工业碳管理”同期发布，则 CCS 与 2040 年目标的相关性将比较清晰。若 CCS 被确认为欧盟减排道路上的主要政策，欧盟委员会很可能采取进一步的立法措施。此外，欧盟还未发布的国家能源和气候计划（NECP）更新版本中，已经提到了 CCUS 的重要作用。除欧盟外，欧洲各个国家也在积极部署 CCS，例如英国计划成为全球 CCUS 领域的领导者¹，将从 2024 年起发布关于政府设想在英国实施非管道运输的征询意见书等一系列措施，支持 CCUS 市场过渡到一个商业化和竞争性市场，创建自给自足的 CCUS 行业。

尽管欧洲 CCS 产业具有先发优势，但是 CCS 项目部署成本以及盈利能力一直是产业持续发展面临的挑战，协调各国融资机制以及明确项目场地监管责任也是亟需解决的问题。同时，由于欧洲各国推迟化石燃料淘汰进程，导致 CCS 发展的不确定性加剧。因此，尽管欧洲 CCS 产业发展势头较盛，但仍处于发展初期，未来还有巨大的发展空间和不确定性。

（秦冰雪）

¹ Department for Energy Security and Net Zero. Carbon Capture, Usage and Storage: A Vision to Establish a Competitive Market. <https://www.gov.uk/government/publications/carbon-capture-usage-and-storage-a-vision-to-establish-a-competitive-market>

● 2023 年 12 月 15 日，美国能源部（DOE）发布资助公告，将投入 5900 万美元加速推进可负担清洁氢能技术的研发、示范和部署，降低清洁氢成本并提高基础设施性能，推动终端利用场景创新，简化和改进技术部署流程¹。此次资助聚焦如下技术主题：①中、重型卡车的加氢部件，将开发先进组件，推进中、重型卡车加注气态或液态氢燃料；②未来标准化加氢站，将开发和示范低成本、标准化和可复制的先进加氢站，以满足商业规模中、重型卡车的加氢需求；③氢燃料电池动力港口设备，将设计、开发和示范氢燃料电池港口设施，如货物装卸设备和船舶停靠供电系统；④氢能部署许可和安全，将确定制氢到终端应用全价值链的选址、许可和安装挑战，提出应对解决方案；⑤氢能技术的公平参与，将支持环境正义，增强社区参与，确保清洁氢的公平部署。

● 2023 年 12 月 19 日，PNAS 刊文指出，地球静止卫星具有较大潜力实现大型甲烷点源连续监测²。美国哈佛大学、西班牙瓦伦西亚理工大学等机构的研究团队根据美国地球静止业务环境卫星（GOES）对大型甲烷点源连续监测的数据进行分析。结果发现，GOES 在两个短波红外光谱波段中以 1~2 公里最低点像素分辨率实现美国大型甲烷点源连续 5~10 分钟监测。通过追踪 2019 年 5 月 12 日墨西哥杜兰戈州 El Encino-La Laguna 天然气管道极端（持续了 3 个小时）甲烷泄漏全过程，发现在这段时间甲烷排放累积总量为 1130~1380 吨，约为 260~550 吨甲烷/时。同时发现 GOES 可监测到石油和天然气等基础设施持续不到 1 小时的其他大型甲烷点源。研究结果表明 GOES 对大型甲烷点源监测具有较大潜力，有望实现连续监测。

¹ Department of Energy. DOE Announces \$59 Million to Advance the National Clean Hydrogen Strategy. <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/articles/doe-announces-59-million-advance-national-clean-hydrogen-strategy>

² PNAS. Geostationary Satellite Observations of Extreme and Transient Methane Emissions from Oil and Gas Infrastructure. <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2310797120>

● 2023 年 12 月 20 日，英国研究与创新署 (UKRI) 宣布投入 3800 万英镑，用于电池工业化中心 (UKBIC) 的设备升级，以支持高新技术开发商和用户开展创新项目研究¹。此次升级将填补 UKBIC 现有批量工业化生产线与公斤级示范生产线之间的差距，计划在 2025 年投运。该笔资金将用于如下升级建设：①增建电极生产线，为电极涂覆、干燥和压延提供新的模块化生产能力，使用户能够在扩大规模的同时，开发更多创新加工方法。②建立灵活的工业化生产空间，将建设 800 平方米生产空间，提供专用的洁净干燥环境，并可根据不同用途进行细分。该实施将允许用户在严格控制的环境条件下开发个性化工艺或组件设备。③引入先进的数字化制造能力，提供数据分析、先进机器学习以及学习和可视化工具，通过不断了解、开发和改进过程，提供实时知识服务，为电池行业智能制造的发展奠定基础。

● 2023 年 12 月 27 日，日本量子科学技术研究所 (QST) 报道称，日本和欧盟共同建设、位于日本茨城县、世界最大的核聚变实验装置 JT-60SA 于 12 月 1 日开始运行²。JT-60SA 项目是日本和欧洲之间的联合项目，是由欧洲聚变能组织 (F4E) 和日本 QST 合作开发的超导托卡马克装置，与国际热核聚变实验堆 (ITER) 项目并行，旨在早期实现聚变能。ITER，又称“人造太阳”计划，在日本、欧洲、俄罗斯、美国、中国、韩国、印度七国的国际合作下，计划通过其建设和运行，验证混合能源在科学和技术上的可行性，ITER 也是一个托卡马克的装置。此前于 10 月 23 日日本 QST 首次宣布生成了托卡马克等离子体，托卡马克是磁场约束高温等离子体的方法之一。JT-60SA 和托卡马克等离子体的成功生成，证明了 JT-60SA 系统在各构成设备的联动下发挥作用，向早期实现混合能源迈出了一大步。

● 2023 年 12 月 28 日，日本新能源产业技术综合开发机构 (NEDO)

¹ UK Government. £38m Funding to Upgrade the UK Battery Industrialisation Centre. <https://www.ukri.org/news/38m-funding-to-upgrade-the-uk-battery-industrialisation-centre/>

² 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構. JT-60SA プラズマ運転開始—フュージョンエネルギー早期実現への大きな一歩. <https://www.qst.go.jp/site/naka/20231226.html>

在“绿色创新基金”框架下发布“钢铁制造过程中的氢气利用”项目补充征集公告，旨在开发氢直接还原铁等钢铁脱碳新技术，助力实现碳中和目标¹。此次征集项目资助期限为 2023—2028 年，重点开发仅使用氢来还原低品位铁矿石的直接还原炼铁技术，使得 CO₂ 排放量降低 50%以上。具体资助主题为：开发用于氢直接还原铁的电熔炉的高效熔炼技术。将通过氢直接还原低品位铁矿石—电熔炉—转炉一体化工艺，替代高炉炼铁工艺，并控制铁中杂质含量达到与高炉工艺相同的水平。另外，将验证把电熔炉中生成的炉渣副产品用于生产水泥原料的技术。

● 2024 年 1 月 3 日，学术期刊 *Science* 预测 2024 年值得关注的十件科学大事，其中有 3 项涉及双碳领域²。①厄尔尼诺现象可能会延长创纪录的高温：未来几个月，东太平洋的厄尔尼诺现象可能会加剧，并可能有助于将全球平均地表温度首次推高到工业化前水平 1.5 °C。厄尔尼诺作为定期出现的一种气候震荡模式，预计将加剧亚马逊和澳大利亚的干旱。②欧盟绿色雄心受到抵制：随着极右翼民族主义政党在 6 月的泛欧选举中获得高支持率，观察人士预计，对欧盟庞大的绿色议程的反对将会加剧。③聚变大型项目面临延误：国际热核聚变堆（ITER）是酝酿了几十年的巨型实验聚变反应堆，预计今年将宣布新的完工日期，将“第一个等离子体”推迟到远远超过 2025 年的长期目标。该设施由国际合作伙伴斥资数百亿美元在法国建造，旨在证明核聚变作为一种无碳能源的可行性，但它一直受到问题的困扰。新冠肺炎大流行减缓了部件的制造，反应堆容器的各个部分形状错误，无法组装在一起，冷却管道被腐蚀，法国核监管机构对其安全性表示怀疑。ITER 总干事 Pietro Barabasch 计划今年公布修改后的时间表，但在 2023 年 10 月的一次核聚变能源会议上表示，“可能不会

¹ 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構。「グリーンイノベーション基金事業 / 製鉄プロセスにおける水素活用」に係る追加公募について. https://www.nedo.go.jp/koubo/EV2_100272.html

² *Science*. Ten Science Stories Poised to Make Headlines in 2024. <https://www.science.org/content/article/ten-science-stories-poised-to-make-headlines-2024>

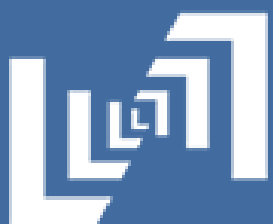
是好消息”，工期可能延期。

● **2024 年 1 月 8 日**，美国能源部（DOE）今天发布了博世、大金、美的和 **Johnson Controls** 四家热泵制造商成功生产的适应零下低温天气的热泵原型¹。该研究是寒冷气候住宅热泵(Residential Cold Climate Heat Pump, CCHP)技术挑战计划的一部分，CCHP 旨在通过支持创新和制造来加速热泵技术的部署。该计划于 2021 年启动，拟开发出用适应寒冷气候的下一代热泵技术。热泵技术与使用天然气或燃油加热器不同，该技术仅使用电力从空气中提取热量来加热和冷却建筑物，与燃气锅炉相比，热泵可以将温室气体排放量减少高达 50%。这种关键的清洁能源技术可以使每个家庭节约至少 500 美元的电力支出，同时减少碳排放。CCHP 的目标是，原型热泵在不使用辅助热的情况下实现 100%的供暖，并在-15 °C时具有更高的效率。

● **2024 年 1 月 11 日**，美国能源部（DOE）宣布投入 3000 万美元开发用于聚变反应的腔室或“壁炉”第一壁材料，以提升聚变发电厂的设计性能²。随着核聚变能源向商业化部署迈进，开发一种性能优异的核聚变第一壁材料是一个重要的科学和工程问题，也是美国商业聚变能源十年愿景的一个重要元素。为此，美国能源部启动“知识驱动创建坚固耐用的第一壁材料”（“Creating Hardened and Durable Fusion First-Wall Incorporated Centralized Knowledge”，简称 CHADWICK）计划旨在支持第一壁材料的开发和生产。该计划将重新定义聚变材料的可用性，对新材料化学成分和制造工艺进行全面、广泛的调研和分析。

¹ Department of Energy. DOE Announces Leading Heat Pump Manufacturers Successfully Develop Next-generation Prototypes to Withstand Subfreezing Weather. <https://www.energy.gov/articles/doe-announces-leading-heat-pump-manufacturers-successfully-develop-next-generation>

² Department of Energy. U.S. Department of Energy Announces \$30 Million to Develop First-Wall Materials and Improve Sustainability and Commercial Viability of Fusion Energy. <https://arpa-e.energy.gov/news-and-media/press-releases/us-department-energy-announces-30-million-develop-first-wall>



双碳情报动态

主 办：中国科学院发展规划局
中国科学院文献情报中心

出 版：“双碳行动情报支撑与战略研究”任务组

编委会主任：翟立新

编委会副主任：刘细文 陶宗宝 曲建升

编委会成员：蔡 睿 蔡翔舟 柴麒敏 陈 方 陈 伟 冯志纲

(姓氏拼音排序) 甘 泉 郭剑锋 江会锋 李 扬 刘晓东 刘艳丽

陆 颖 马廷灿 牛振恒 任 珩 孙玉玲 唐 川

王金平 王小伟 王学昭 王 征 岳 芳 曾静静

张 贤 张 娴 张香平 赵亚娟 赵晏强 郑军卫

朱庆山

主 编：曲建升

副 主 编：甘 泉 刘晓东 王小伟

陈 伟 曾静静 孙玉玲 陈 方

本期责编：曾静静

电子信箱：zengjj@llas.ac.cn

联 系 人：刘燕飞

电子信箱：liuyf@llas.ac.cn