



清华大学

气候变化与可持续发展研究院  
Institute of Climate Change and Sustainable Development  
Tsinghua University



ENERGY FOUNDATION  
能源基金会

# “中美深度脱碳技术创新与政策比较研究”

## 二期项目

## 综合报告

清华大学气候变化与可持续发展研究院  
哈佛大学肯尼迪政府学院全球能源技术创新研究组  
哈佛大学中国能源经济环境项目

2024年5月

# 摘要

本报告是清华大学和哈佛大学联合开展的“中美深度脱碳技术创新与政策”项目第二期综合报告，报告的内容基于 2022-2023 年项目下组织的深度脱碳关键技术主题学术沙龙分享和交流，沙龙的主题包括建筑供暖、可再生能源制氢（绿氢）、碳捕获利用与封存（CCUS）和交通部门减排行业。三个研究团队分别在学术沙龙中分享了这些关键技术在中美两国的最新进展评估，包括当前成本和预期下降速度、以及加快技术的大规模部署所需要的政策。在此基础上，补充了关键技术的全球进展，并进行了简单的中美对比分析和总结。

## 第一期项目的工作基础

该项目开展的第一年，三个研究团队的主要成员联合撰写了一份总结报告，在联合国气候变化框架公约第 26 次缔约方会议（COP26）期间提供给两国国家气候特使，并于此后不久（2022 年 1 月）正式公开发布

（<https://www.belfercenter.org/publication/harvard-tsinghua-joint-statement-carbon-neutrality-pathways-china-and-united-states>）。

项目第一期的联合研究发现，尽管两国情况存在许多细节上的差异，在中美两国的碳中和路径中，最有可能发挥重要作用的低排放和零排放能源技术清单是类似的。关键技术清单包括太阳能和风电发电、智能电网、用于化石能源发电厂的 CCUS、可再生能源电解制氢、电动和氢燃料汽车、以及提高所有部门的终端能源使用效率。

基于这份技术清单，哈佛团队选择在第一年将重点放在：（i）电网扩张和现代化；（ii）CCUS；（iii）电解制氢；及（iv）电力和氢气用于建筑空间供暖和热水。清华团队也同样关注（i）电气化和电网，（ii）燃煤电厂 CCUS，（iii）交通部门，以及（iv）工业和建筑部门的能效提升。在第一年的研究工作结束时，双方同意在第二年更深入地研究建筑供暖、可再生能源制氢气和 CCUS。

## 建筑供暖

中美两国在建筑脱碳领域的主要差别在于中国北方城镇庞大的集中供暖，而美国绝大多数地区的家庭和商业建筑采用的是分散的单独的供暖。因而，在考虑建筑脱碳方案时，美国研究中考虑的技术方案较为简单，面临的主要挑战包括现有建筑节能改造规模大、热泵等清洁供暖技术成本高，以及由建筑部门电气化引发的电力系统脱碳等。

中国北方城镇集中供暖的脱碳方案仍在讨论之中，清华课题组的研究中认为在考虑能源系统热耦合的情况下，热电联产机组供暖是碳中和的前期可行技术。未来仍有必要保留适量的燃煤机组（加装 CCS 设施），对这类机组进行低碳或供热改造。在推广热泵供暖技术时，两国都面临着高成

本的挑战，需要通过技术和政策来推进热泵技术的应用。

## 可再生能源制氢

全球低碳经济转型将会显著改变现有的能源供应、生产和消费格局，氢能将成为大国竞争与合作的重要领域。中美两国清洁氢发展面临的问题基本相似：技术尚未完全成熟、生产高成本、缺乏市场需求、基础设施不足。美国政府的大规模补贴已经显著地拉动了清洁氢的投资和生产，但是仍需更好地引导投资流向绿氢项目。

相比之下，尽管在电解制氢方面已经具备明显的成本优势，中国的氢能政策仍缺乏系统性而且支持措施严重不足。未来中美两国都需要积极创建国内氢能应用市场，重点支持清洁氢在工业领域的示范与应用。对于中国来说，需要在新的全球能源地缘格局和国内长期碳中和、能源系统转型的背景下重新考虑氢能战略，并积极参与国际清洁氢研究合作与标准认证，以保证工业产品的未来竞争力。

## 碳捕获利用与封存（CCUS）

中国、美国和印度是最需要发展和应用 CCS 技术的三个国家。绝大多数的全球和国家层面的模拟结果都表明，到本世纪中叶左右，这三个国家都需要使用 CCUS、常规减排技术和颠覆性减排技术才能够实现净零排放。随着应用场景的拓展，CCUS 技术已经成为化石能源近零排放的唯一技术选择、钢铁和水泥等难减排行业深度脱碳的可行技术方案、未来支撑碳循环利用的主要技术手段。

总的来看，中国的 CCUS 技术和基础设施的发展仍然大幅落后于美国。美国 CCUS 技术已进入商业化应用阶段，中国的捕集技术仍处于示范阶段，CCUS 系统集成优化方面仍仅处于中试阶段，基础设施建设方面也较为滞后。考虑到全球气候治理外部约束、落实国家碳达峰碳中和目标的内部需求、巩固设备制造的成本优势，我国急需推动 CCUS 由战略储备技术快速升级为现实解决方案。

## 跨领域政策问题

中美两国尽管在气候政策制定方面都取得了重大进展，但是在政策落实与实施方面都面临着挑战。美国的政策严重依赖于大规模的投资、税收优惠和补贴政策等激励措施，政策的连续性仍然面临挑战。中国的“1+N”政策依托于“自上而下”的政策落实和执行，需要加强“自下而上”的推动和全社会参与。从时间范围来看，两国气候政策集中于 2030 年之前，长期的气候措施仍不够坚实。未来两国仍需不断完善气候政策体系和加强相关措施，以实现减排、公正和平等、健康、就业、公众参与等多个目标。

## 政策建议

基于第二期的项目合作研究，向两国政府提出以下政策建议：

(1) 考虑未来国际能源地缘格局的变化，建议在碳中和与能源转型长期战略下明确重要脱碳技术如热泵、绿氢、CCUS 的定位、战略和目标。

(2) 加强政策制定，释放清晰和连续的政策信号，积极培育深度脱碳技术的国内市场需求，以带动私营部门投资，努力推动规模经济的实现。

(3) 建议国际社会继续加大科技创新投入与合作，加速推进深度脱碳技术的商业化应用，加速技术的成熟和市场规模的增长，推动技术成本的快速下降。

(4) 能源转型中建议综合考虑不同技术和基础设施的耦合，例如建筑供热领域脱碳的热能和电能耦合解决方案，绿氢制取与终端部门应用的耦合，工业集群与 CCUS 设施耦合。

(5) 新技术的发展带来了新的基础设施需求，建议在政策制定中同步考虑基础设施投资和创新的清洁技术在能源供应和终端使用。考虑基础设施投资的同时，制定政策加强能源供应和最终使用的创新清洁技术。基础设施已成为绿氢、CCUS 和其他技术发展的驱动力和制约因素。

(6) 积极推动气候政策的实施，完善长期措施和气候政策体系，防范转型可能会引发的经济和社会风险。

最后，正如我们在第一期报告中所指出的，为发展中国家筹集更多的能源气候资金至关重要——不仅用于清洁能源技术和基础设施，而且用于适应气候变化——并加强建立技术转让机制和规范。研究表明，到 2030 年，发展中国家需要将气候投资至少增加四到八倍。如果要达到这样的水平，国际社会将需要在融资和技术转让方面共同努力。

## 致谢

---

---

2020年9月，中国气候变化事务特使解振华先生发起了一个以中美深度脱碳路径为重点的三方研究项目。这三个团队分别是：由何建坤教授、李政教授领导的清华大学气候变化与可持续发展研究院团队，由哈佛大学肯尼迪学院 John Holdren 教授领导的全球能源技术创新（GETI）团队、由哈佛大学约翰·A·保尔森工程与应用科学学院 Michael McElroy 教授领导的中美能源、经济和环境项目（HCP）团队。该项目设计为总共运行三期，在项目成立和发展的过程中得到了生态环境部和各方的大力支持，在此表示诚挚的感谢。能源基金会慷慨地为项目研究和学术交流活动提供了长期资助，我们在此深表谢意。

本项目下组织的一系列研讨会得到了来自高校、科研院所和企业的专家们的大力支持。在此特别感谢来自清华大学建筑学院的王宝龙教授、清华大学电机工程与应用电子技术系的林今教授、清华大学环境学院的刘欢教授，中国矿业大学的樊静丽教授、科学技术部 21 世纪议程中心的张贤研究员、国家能源集团新能源研究院碳中和研究中心徐东主任、未来资源研究所的 Alan Krupnick 博士、德克萨斯大学奥斯汀分校的 Andrew Waxman 教授、哈佛大学肯尼迪政府学院的 Nicola De Blasio 博士，感谢这些学者和专家们分享在深度脱碳技术领域的前沿研究和实践。

感谢清华大学的黄宇瑄、谢璨阳和何岳璋同学，感谢来自哈佛大学的 Amanda Sardonis 和 Karin Vander Schaaf 为本项目提供了研究和会务支持。特别感谢清华大学的谢璨阳和哈佛大学 Rachel Mural 精心校对和编辑报告文字。感谢张芳和佟洁琼为项目协调所付出大量时间和努力，感谢毛春柳、李智辉、洪毅和王聪瑜为项目前期工作和顺利开展提供了有力支持。此外，本报告的研究和发布得到了众多同事和同行们的帮助，在此一并致谢。

# 目录

1. 项目背景与研究范围 .....	1
2. 全球深度脱碳技术创新与应用 .....	3
2.1 高度不平衡的全球科技创新格局 .....	3
2.2 进展缓慢的技术应用 .....	5
3. 中美深度脱碳关键技术进展与挑战 .....	6
3.1 建筑供热脱碳技术 .....	6
3.2 可再生能源制氢 .....	10
3.3 碳捕集利用与封存 .....	18
4. 中美两国气候政策进展与初步评估 .....	22
4.1 美国联邦政府层面气候政策进展 .....	22
4.2 中国的“1+N”气候政策体系评估.....	23
4.3 中美政策比较 .....	24
5 结论与建议：中国、美国及全球 .....	25

作者名单

清华-哈佛沙龙嘉宾名单

## 1. 项目背景与研究范围

### (1) 项目背景

2020年9月，中国气候变化事务特使解振华先生发起了一个为期三年的清华大学与哈佛大学合作研究项目，三个团队就“中美深度脱碳技术创新与政策”开展联合研究。这三个团队分别是：由何建坤教授、李政教授领导的清华大学气候变化与可持续发展研究院团队，由哈佛大学肯尼迪学院John Holdren教授领导的全球能源技术创新计划团队，由哈佛大学地球与行星科学、工程与应用系Michael McElroy教授领导的哈佛-中国项目团队。即使是在疫情期间，合作双方仍努力地推动项目正常开展，维系了中美一流高校良好的合作关系，其研究结果也成为中美双方政府的重要参考。

2014年11月，奥巴马总统和习近平主席在北京就气候变化议题发表联合声明，体现了中美在气候问题上以始终如一和合作的方式展现领导力的重要性，这为一年后全球达成《巴黎协定》中前所未有的共识奠定了基础。2021年，中美双方根据两国元首互动精神，在当时几乎各领域存在脱钩风险的情况下，打通气候变化对话渠道，发表了《中美应对气候危机联合声明》。在英国格拉斯哥气候大会期间，中美双方在会议结束前一天达成并发表了《中美关于在21世纪20年代强化气候行动的格拉斯哥联合宣言》，推动大会形成了既体现行动决心和力度、又有可操作性、且更为尊重各方实际国情的成果。尽管两国政府在其他许多问题上存在分歧，但是在许多层面上在气候合作领域长期保持着合作与交流。

中美两国到本世纪中叶前后实现碳中和的路径及其技术组成都具有共同点，凸显了两国在研究分析、技术研发和相关政策方面存在合作价值。2023年中美《关于加强合作应对气候危机的阳光之乡声明》中提到，中美双方重申致力于合作并与其他国家共同努力应对气候危机，决定启动“21世纪20年代强化气候行动工作组”，开展对话与合作，就控制和减少排放的政策、措施和技术进行信息交流、识别和实施合作项目。清华大学和哈佛大学在这个项目上的共同努力，证明了继续开展和加强中美气候合作的价值，所开展的工作也是未来两国合作的重点领域。

### (2) 研究范围

要想在本世纪中叶前后实现两国宣布的碳中和目标，所有可行路径都要求从现在起迅速扩大各种低碳和零碳能源供应技术，以及匹配新的供应和需求所需的能源基础设施的部署规模。此外，所有可行路径都需要新技术和实践，以大幅提高能源终端利用效率和电气化水平。能源供应和终端技术多元化是两国能够实现目标的关键。然而，中美两国目前还无法自信和准确地指出，究竟哪些技术组合最有可能成功实现碳中和目标。

当前最实际有用的工作包括：

- 根据现有知识识别最有可能做出重大贡献的技术；
- 识别和描述这些技术实现减排潜力所面临的障碍；以及
- 识别和推动近期可以实施的法规、政策和协议，以便从现在到 2030 年的十年内以及之后，在技术和研究持续取得进展的基础上，两国能保持本世纪中叶前后实现零排放目标的可能性。

这是我们联合项目的目标，其中包括探索对各自发展道路的哪些见解能够对对方有所帮助。最后，我们致力于将我们的中期和最终研究结果直接通报给各国的气候决策者和《联合国气候变化框架公约》缔约方大会。

### (3) 研究进展

在项目开展的第一年，清华大学研究团队专注于中国 2060 年前实现碳中和的脱碳路径研究，而两个哈佛团队则致力于美国实现碳中和的关键技术和政策研究。联合研究发现，尽管两国情况存在许多细节上的差异，在中国碳中和路径中，最有可能发挥重要作用的低排放和零排放能源技术和美国是高度相似的。

中国案例的关键技术清单也包括太阳能和风能发电、智能电网、用于化石能源发电厂和工业的 CCUS、可再生能源电解制氢、电动和氢燃料汽车、以及提高所有部门的终端能源使用效率。新一代核电技术、生物燃料、储能和水电也可能需要做出重要贡献。此外，在充分利用当前经济性较好的减排措施之外，还需要改进非二氧化碳温室气体的减排技术，并大幅增加农业和森林碳汇以抵消难减排部门的剩余排放量<sup>1</sup>。

基于以上研究发现，哈佛大学与清华大学团队共同撰写了“中美碳中和路径研究联合报告”，在哈佛大学肯尼迪政府学院贝尔弗科学与国际事务中心网站上公开发布<sup>2</sup>。除了这份报告之外，中美能源、经济和环境项目（HCP）团队还补充了三份“非专家研究简报”，内容涉及更精细的技术主题，加强了媒体对哈佛-清华合作的报道。清华大学研究团队开展的中国 2060 年前实现碳中和的脱碳路径研究，也为后续开展的旗舰课题“碳中和背景下中国 2035 年及中长期低碳发展战略研究”打下了坚实的基础。

在项目开展的第二期，哈佛大学肯尼迪政府学院的全球能源技术创新团队专注于三项关键技术：建筑部门供热脱碳、绿氢、二氧化碳捕集利用与存储技术（CCUS）的研究。同时，哈佛-中国项目团

<sup>1</sup> He J, Zhang X, Li Z, et al. Comprehensive Report on China's Long-Term Low-Carbon Development Strategies and Pathways[J]. Chinese Journal of Population Resources and Environment. 2020, 18(4): 263–295. DOI:10.1016/j.cjpre.2021.04.004.

<sup>2</sup> Harvard-Tsinghua Joint Statement on Carbon-Neutrality Pathways for China and the United States. Harvard Kennedy School Belfer Center. January 2022. <https://www.belfercenter.org/publication/harvard-tsinghua-joint-statement-carbon-neutrality-pathways-china-and-united-states>

队在德克萨斯州（美国德克萨斯州拥有丰富的可再生能源资源和广泛的现有氢基础设施）对绿氢技术的潜力进行了深入的案例研究，并主持了一场关于交通部门难减排行业脱碳的补充研讨会<sup>3</sup>。

清华大学团队重点关注实现碳中和的关键技术潜力和障碍，共设计了涵盖五个子课题的研究框架。这五个子课题分别是：建筑部门供热和制冷脱碳、氢能在交通领域的应用潜力、CCUS 技术、零碳电力系统的电网成本与风险、“碳中和”背景下我国气候政策评估和优化分析。清华大学团队在迪拜举行的第 28 届联合国气候大会上，清华大学团队公开发布了各个子课题的政策摘要报告和综合课题研究成果，并邀请了来自美国、英国、印度等国的学者就“深度脱碳技术与国际合作”开展深入讨论。

本报告是项目第二期综合课题报告，基本内容基于第二期项目中清华大学与哈佛大学组织的关键技术的学术沙龙交流和分享。为了提供整体视角和更深入的见解，补充了全球进展，进行了中美对比分析。本报告共分为五章，第一章提供了项目背景和进展简介，第二章介绍了全球深度脱碳技术创新与应用的总貌，第三章对比了中美两国在建筑供热脱碳、可再生能源制氢、CCUS 技术领域的研究进展，第四章对比了中美两国的气候政策，第五章是结论及建议。

## 2. 全球深度脱碳技术创新与应用

碳中和经济具有资金和技术密集型的特点，实现碳中和将依赖于已有的常规技术和突破性技术。国际能源署（IEA）的报告指出，到 2050 年全球深度减排所需的技术，目前还有一半仍处于研发和示范阶段，需要在近十年做出积极部署<sup>4</sup>。科技创新成为低碳转型的支撑要素，并缔造一个国家未来经济和产业的核心竞争力。一方面全球大国间科技创新竞争日趋激烈，另一方面绿色低碳成为发展中国家赶超的额外约束条件。这种不平衡的国际格局逐渐扩大。

### 2.1 高度不平衡的全球科技创新格局

少数经济体主导着全球低碳能源技术研发与部署，主要经济体低碳研发投入竞争日趋激烈。2016 年以来，全球低碳能源技术研发与示范公共预算总体呈快速增长趋势，年均增长率达到 7.6%（见下图）。与此同时，少数经济体主导着全球低碳能源技术研发与部署，2021 年，北美、欧洲、日本、韩国、澳大利亚、新西兰、中国合计占全球低碳能源技术研发公共预算的比重高达 97.5%。此外，欧洲、北美和中国合计占比高达 85.8%。中国已经超越日本成为第二大政府研发投入国，而印度超越法国、德国和日本成为第三大政府研发投入国。在清洁能源方面，中美两国的政府研发投入处于焦灼竞争状态，根据清洁能源定义范畴的不同，中美都可能是世界上最大的清洁能源投资国

<sup>3</sup> See <https://chinaproject.harvard.edu/news/hcp-research-briefs-non-specialists>

<sup>4</sup> IEA, 2021. Net zero by 2050: a roadmap for the global energy sector.

家<sup>5</sup>。

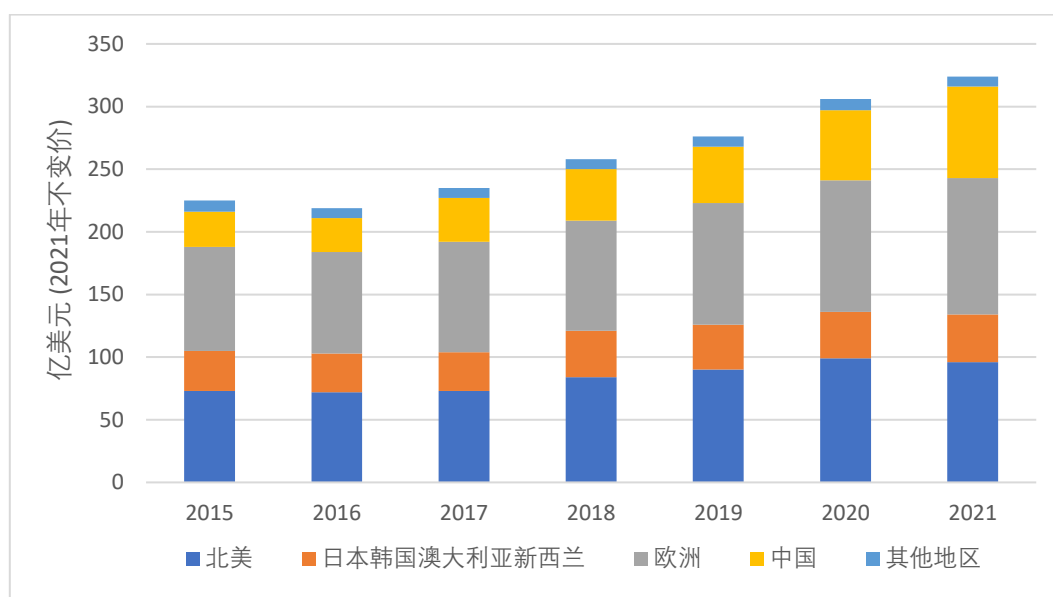


图 2-1 全球低碳技术研发示范领域公共预算构成 (2015-2021)

来源: Energy Technology RD&D Budgets (IEA, 2023 edition), ICCSD 绘图

低碳科技创新的产出也呈现出高度不平衡的国际发展格局。根据世界知识产权组织公布的数据,日本、美国、德国、中国和韩国五个大国占 2005-2015 年绿色能源专利族申请的 90%以上,紧随其后的国家包括法国、荷兰和英国<sup>6</sup>。相比之下,印度、巴西和南非各占不到 1%,非洲大部分国家更是几乎没有专利申请<sup>7</sup>。自 2012 年以来,全球低碳技术专利逐渐从供能技术转向终端应用技术和使能技术(氢能、交叉技术等),以及信息和通信技术、人工智能等通用技术<sup>8</sup>。

在国际标准制定方面,大约 78%的已公布标准来自于三个国际机构,即国际标准组织(ISO)、国际电工委员会(IEC)和汽车工程师协会(SAE);其余标准大部分来自于欧洲标准化委员会(CEN)和美国机械工程师协会(ASME)。

此外,全球创新空间的分布集聚于少数经济体。在全球的 120 个创新空间集聚区域中,有 98 个位于欧洲,德国的慕尼黑、鲁尔区、法国巴黎是三个较大的创新空间集聚区域。美国仍然是前沿技术和传统能源技术的网络中心,在电解制氢技术领域与其他 21 个国家建立了合作研发的联系。在东亚地区,中国、日本、韩国形成了电池、氢能、通信技术等领域的创新空间集聚。目前中国已超过美国和欧洲,与日本持平,成为绿色专利领域世界第二大专利拥有国、第一大论文发表国,尤

<sup>5</sup> Zhang F, Gallagher K S, Myslikova Z, et al. From fossil to low carbon: The evolution of global public energy innovation[M/OL]//Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change. (2021). DOI:10.1002/wcc.734.

<sup>6</sup> Rivera León, L., Bergquist, K., Wunsch-Vincent, S. A., Xu, N., & Fushim, K. 2023. Measuring Innovation in Energy Technologies: Green Patents As Captured by WIPO's IPC Green Inventory. SSRN Electronic Journal. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4429912>

<sup>7</sup> World Intellectual Property Organization (WIPO). 2023. World Intellectual Property Indicators 2023. <https://doi.org/10.34667/TIND.48541>

<sup>8</sup> European Patent Office (EPO) & International Energy Agency (IEA). 2021. Patents and the energy transition. Paris. <https://www.iea.org/reports/innovation-in-batteries-and-electricity-storage>

其是在信息通信技术领域和绿色交通领域<sup>9</sup>。总的来看，高度不平衡的全球创新格局也是技术的全球扩散与转移面临的重要挑战。

## 2.2 进展缓慢的技术应用

分部门来看，由于技术特性和成熟度不同，一些部门将比其它部门更早脱碳。电力部门将通过发展清洁电力率先脱碳，然后通过电气化帮助其它陆路交通部门（公路和铁路）、建筑、工业部门部分脱碳。尽管工业部门的难减排行业脱碳已经存在多种技术方案，但由于技术成熟度不足、成本较高还未实现大规模应用。难减排部门如农业、航空、航海将很大程度上依赖于技术突破与消费行为的改变。

新一轮科技革命和产业变革下，尽管技术迭代速度已经明显加快，但是仍然远不能满足净零路径所要求的速度与规模，全球实现净零目标仍然面临严峻挑战。根据 IEA 的全球能源转型盘点，当前只有极少数技术如光伏发电、电动汽车和照明的发展速度与净零情景是一致的；超过一半的技术需要更多的政策支持和加快发展速度；有超过三分之一的技术的发展缓慢，严重滞后于净零情景所要求的速度与规模<sup>10</sup>。分领域来看，工业、甲烷减排、重型和长途交通领域，以及与基础设施相关的集中供暖、CCS 的发展都严重滞后于净零情景路径（见下图）。未来国际社会需要继续加大科技创新投入与合作，扩大低碳技术的应用规模，迅速降低技术成本，从而推动全球清洁低碳转型。

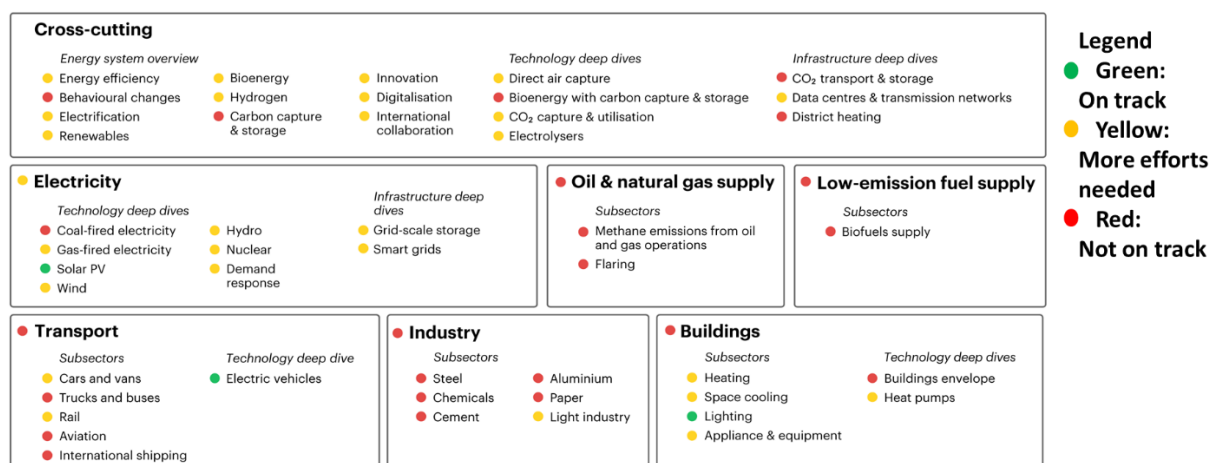


图 2-2 净零情景路径下的技术图景与进展评估

来源: IEA, 2023. Tracking Clean Energy Progress 2023.

<sup>9</sup> ELSEVIER'S ANALYTICAL SERVICES. Pathways to Net Zero: The Impact of Clean Energy Research[R/OL]. (2021). [https://www.elsevier.com/\\_data/assets/pdf\\_file/0006/1214979/net-zero-2021.pdf](https://www.elsevier.com/_data/assets/pdf_file/0006/1214979/net-zero-2021.pdf).

<sup>10</sup> IEA, 2023. Tracking Clean Energy Progress 2023. Paris. <https://www.iea.org/reports/tracking-clean-energy-progress-2023#overview>

### 3. 中美深度脱碳关键技术进展与挑战

#### 3.1 建筑供热脱碳技术

2022 年供暖和热水用能占全球建筑能源消耗的近一半，直接排放为 24 亿吨 CO<sub>2</sub>，间接排放为 17 亿吨 CO<sub>2</sub>。全球范围内，60%的供热能源仍然依赖化石燃料，大约 40%的家庭在一年中的部分时间需要空间供暖，供暖也是家庭能源支出的主要组成部分。在 IEA 的 2050 年净零排放情景中，到 2030 年，需要通过提高建筑围护结构效率、改变燃料和技术以及电力部门脱碳的综合效应将建筑供热相关排放量减少一半，这也意味着需要将全球供热的平均能源强度年均降低约 4%，比过去十年平均水平提高一倍<sup>11</sup>。

供热领域很难实现脱碳，这一领域热量生产和使用方式多种多样且高度分散，其低碳转型需要对新技术和基础设施进行投资和更新，以及对数亿家庭的供热设施进行改造。热能脱碳的最基本途径是通过提高能源效率、提高隔热性能以及废热回收利用来减少热能的使用。其他解决方案包括更高效地利用热能，采用特定的零碳或低碳供热技术，以及采用新技术储存热能和输送热能。各国部署的关键技术包括热泵、电暖器、可再生热能和氢能等。

在集中供热领域，由于所需热源规模很大则面临着更大的挑战。一种方法是继续使用化石燃料，但是通过 CCUS 来消除部分 CO<sub>2</sub> 排放。另一种方法是考虑替代燃料，常见的替代技术包括低碳电力、生物质、替代热源等。此外，在未来的热能储存、运输和分配领域，新技术也在不断的涌现，新型热能供应链和商业模式正在形成<sup>12</sup>。

在家庭供暖领域，燃气锅炉继续主导着全球多个市场，但是高效和低碳的供暖技术正在兴起。目前有 30 多个国家出台了热泵的补贴措施，2021 年热泵销量已经占到全球供暖市场份额的 10%，2022 年占比 11%。根据国际能源署的净零排放情景，到 2030 年，全球热泵存量将增加近两倍，至少满足全球供暖需求的 20%。因此，要实现这一目标，需要进一步的政策支持和技术创新<sup>13</sup>。

#### (1) 美国建筑供暖脱碳

建筑部门化石燃料直接能源使用排放占美国全部温室气体排放的 13%。全国大约有 1.1 亿户家庭采用分散式供暖系统供热。从使用的燃料来看，天然气占比大约为 50%，电力占比约为三分之一，其余燃料如石油、丙烷、木柴、煤油占比较小。不同地区间供热能源差异较大，南部地区供热由电力主导，电力占比可达到三分之二。中西部地区供热则由天然气主导，天然气占比高达四分之三。西部和东北部的供热能源中，天然气占比都超过一半。在东南部，热泵已经成为常见的供暖方式。

<sup>11</sup> IEA, 2023. Energy system/ Buildings/Heating. <https://www.iea.org/energy-system/buildings/heating>

<sup>12</sup> The Royal Society, 2021. Low-carbon heating and cooling: what science and technology can do to tackle the world's largest source of carbon emissions. <https://royalsociety.org/climate-science-solution>

<sup>13</sup> IEA. 2023. Tracking Clean Energy Progress 2023. Paris. <https://www.iea.org/reports/tracking-clean-energy-progress-2023#overview>

2015 年大约有 10%的美国家庭使用空气源热泵供暖，2020 年这一比例已经增长至 13%<sup>14</sup>。

拜登政府执政以来，先后出台的《两党基础设施法案》、《通胀削减法案》为清洁能源的研发、制造和基础设施建设提供了大量的支持。降低美国家庭的能源成本是《通胀削减法案》的重要目标之一，其预算中提供了 90 亿美元的税收返还用于支持家庭电气化及节能改造，还提供了 10 亿美元的预算用于提高经济适用房的能源效率。此外，还为消费者提供税收抵免用于支持家庭电气化、节能改造、清洁车辆购买。根据美国能源部的估算，这些措施可以降低每户家庭 5%至 40%的节能改造和电气化投资<sup>15</sup>。

热泵作为电气化设备，是供暖领域净零排放的重要技术。与燃气锅炉相比，使用热泵供暖可以降低 50%的温室气体排放。热泵的主要优点是高效率，与运行泵所需的电量相比，可以热量的形式产生更多的能量。随着外界温度降低，供暖系统的效率也会随之降低。热泵的优点包括它的性能系数是比较高的，但是也需要注意到其性能系数取决于不同的要素，包括热泵的泵模型，还有热产出的温度，以及室外的温度。因为当室外温度降低的时候热泵的性能也会降低，如果天气非常寒冷，使用热泵室内供暖就比较困难。

普林斯顿大学关于美国净零路径的研究指出，到 2050 年，美国用于供热和烹饪的天然气几乎将完全被电力所替代，在供暖方面，空气源热泵成为主导性技术。由于热泵的效率和环境温度有关，因此南方地区的热泵渗透率高于北方，在佛罗里达的渗透率将达到 83%，在威斯康星州和明尼苏达州的渗透率将达到 76%<sup>16</sup>。哈佛团队对这一研究提出了质疑，认为实际上要实现这样高的热泵渗透率是比较困难的。目前热泵面临的主要挑战是较高的成本，对于冬季寒冷的美国北部地区，从天然气到热泵的供热方式转变会带来家庭能源成本的大幅上升。此外，美国相对高的电价也导致热泵的运营成本很高。

哈佛团队对全美国供暖的研究表明，使用热泵替代天然气供暖会带来采暖成本的大幅上升（未考虑资本成本）。基本上全美所有州的采暖成本都有所上升，北方寒冷地区采暖成本普遍上升 1.5-2 倍。但是考虑到施加碳税后，美国南部地区采用热泵供暖将具有经济可行性。但对于北部地区来说，必须进一步提高碳价，才能形成进一步市场激励<sup>17</sup>。

美国未来供暖系统脱碳的可能技术途径包括：

- 采用替代能源，如氢能或生物质能，但是并不具有成本和规模优势。

<sup>14</sup> U.S. Energy Information Administration. 2023. Highlights for space heating in U.S. homes by state, 2020. <https://www.eia.gov/consumption/residential/data/2020/state/pdf/State%20Space%20Heating.pdf>

<sup>15</sup> FACT SHEET: One Year In, President Biden's Inflation Reduction Act is Driving Historic Climate Action and Investing in America to Create Good Paying Jobs and Reduce Costs. White House. August 16, 2023. <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2023/08/16/fact-sheet-one-year-in-president-bidens-inflation-reduction-act-is-driving-historic-climate-action-and-investing-in-america-to-create-good-paying-jobs-and-reduce-costs/>

<sup>16</sup> Larson Eric, Chris Greig, Jesse Jenkins, Erin Mayfield, Andrew Pascale, Chuan Zhang, Joshua Drossman, et al. 2021. "Net-Zero America: Potential Pathways, Infrastructure, and Impacts." <https://netzeroamerica.princeton.edu>.

<sup>17</sup> Daniel Schrag. 2022. Challenges to electrification of heating in the Northern U.S. Harvard-Tsinghua Workshop on Heating and Cooling Buildings in a low-carbon world. May 24, 2022.（即将发表）

- 地源热泵替代空气源热泵，能够提升热泵性能系数。但是安装地源热泵所需资本投入极高，目前地源热泵销售价格大概是 2 万美元/户，较为昂贵，回报周期长。

- 储热（最可行的方案）：在电力价格低时存储热能，价格高时释放。例如在中午储存太阳能的电力，并在傍晚放电，但是这一方案需要电力市场具备实时价格。目前低品位储热技术尚不成熟，需要研发能够吸收低品位热能的材料。

### 案例：马萨诸塞州的建筑低碳化研究

马萨诸塞州提出 2030 年要减少 50% 的温室气体排放、2050 年实现净零排放的目标。当前该州电力行业的清洁能源发电占比已经达到 48.2%，已经接近占比 50% 的目标<sup>18</sup>，建筑领域排放主要来自天然气、丙烷等供热燃料排放。在建筑供暖脱碳方面，首先需要提高建筑的密闭性，很多老旧建筑需要进行改造才能加装有效的绝热层。在未来的 20-30 年中，在马萨诸塞州及东北部可能只有 20-30% 的新建建筑，因此，大部分投资是对现有建筑的改造投入。此外，需要考虑转换建筑供热方式，使用空气源热泵、地热（较昂贵）等技术。最后需要对电网进行深度脱碳。对建筑脱碳的分析表明，到 2050 年可能要 60%-70% 的家庭只使用空气源热泵来进行供热。要实现该州 2050 年的目标，减排曲线将是非常陡峭的，而且可能很昂贵。

## （2）中国建筑供暖脱碳

据清华大学建筑节能中心测算，2021 年中国建筑运行碳排放总量为 22 亿吨，直接碳排放 5.1 亿吨 CO<sub>2</sub>（23%），电力相关间接碳排放为 12.4 亿吨 CO<sub>2</sub>（57%），热力相关间接碳排放为 4.3 亿吨 CO<sub>2</sub>（20%）<sup>19</sup>。近年来北方地区集中供暖面积和供暖热需求持续增长，但是单位面积的供热能耗和碳排放持续在下降。

北方 15 省的城镇供热能源仍然以煤为主，其次是天然气和电力。具体来看，煤炭占供热能耗的 58%，天然气占 14%，生物质能占 15%，电能占 8%，地热、工业余热和其他可再生能源占 5%，热电联产和燃煤锅炉是最常见的热源提供方式。南方气候过渡带以及部分高寒山区也有一定的供热需求，采暖方式主要以分散式电采暖为主，常见的采暖工具为家用式空调、小型电暖器。此外，中国拥有着全球规模最大的集中供暖环网，2020 年热网管道长度为 42.6 万公里<sup>20</sup>。

中国的供暖商品化计量收费开始于 2006 年。国家能源局于 2007 年发布的《能源发展“十一五”规划》指出从分布式锅炉转变为集中供暖，以及新建热电联产节能标准。2013 年发布的《能源发展“十二五”规划》要求发展天然气热电联产、热力网建设等。2017 年发布的《能源发展“十三五”

<sup>18</sup> State of Massachusetts. 2023. “Massachusetts Climate Report Card – Power Decarbonization.”

<https://www.mass.gov/info-details/massachusetts-climate-report-card-power-decarbonization>

<sup>19</sup> 清华大学建筑节能研究中心，中国建筑节能年度发展研究报告 2023（城市能源系统专题）。北京：中国建筑工业出版社，2023。

<sup>20</sup> 周宏春主编，中国清洁供热产业发展报告 2022。北京：中国经济出版社，2022。

规划》提出推广热电冷三联供和生物质热电联产、地热能供暖、低品位余热供暖等。“十二五”以来，推进北方地区清洁取暖工作成为政策重点，中国出台了一系列关于推进清洁供暖和污染治理的政策。从热源情况来看，我国北方地区清洁供热的热源基本形成了以超低排放<sup>21</sup>燃煤热电联产为主、天然气为辅、其他热源补充的格局。

### 中国东北地区热电联供低碳转型的研究

2019年中国72%的电力来自于热力发电，65%的热量来自集中的热电联产。冬季北方尤其是东北地区的供暖季达到六个月，该地区同时承担供电和供热任务的燃煤热电联产机组占煤电机组总量的70%左右<sup>22</sup>。中国政府制定的《2022年中国北方清洁取暖计划》中，也鼓励将现有的纯火电机组改造为热电联产机组。因此，对中国电力系统转型的研究，尤其是北方地区燃煤发电机组的转型，必须要同时考虑供电和供热。

与其他供暖方式相比，燃煤热电联产机组有巨大的优势。该类机组的供暖成本较低，仅为燃煤锅炉供暖成本的82%、电力供暖成本的21%和天然气供暖成本的35%<sup>23</sup>。此外，热电联产机组可控性好，热力和电力耦合供应也能极大提升效率。在能源系统中以热电联产的形式同时供应热量和电力，可以设置热量和电力存储用于整个系统的缓冲，应对接入间歇性可再生能源电源对系统稳定性带来的冲击，其挑战在于将会增加系统和技术的复杂度。

清华大学的模拟结果表明，风电在中国东北地区能源转型中能够发挥核心作用，并且强调了能源系统低碳减排规划时综合考虑供电和供热系统的必要性。热电联产机组供暖是未来实现清洁供暖的关键技术，应作为实现碳中和的前期的优先考虑技术选项。对燃煤机组采取不同的处理方式可能会导致中国东北地区能源转型成本的巨大差异。允许对燃煤基础设施进行改造可以将总转型成本降低约16%，而允许新建燃煤基础设施可以使总转型成本下降约20%。因此，虽然东北地区的电热耦合系统需要在30年内实现碳中和，但仍有必要新建适量的燃煤机组，并对部分机组进行低碳或供热改造，这可以节省巨大的潜在低碳转型成本。当然，现有和新建燃煤电厂的均需要加装CCS设施，以保持与减少温室气体排放和促进可持续能源的目标相一致。通过全面且综合的能源系统规划，东北地区可持续和低碳的能源系统在未来是很有可能实现的。

### 热泵在中国建筑脱碳中的作用

中国是全球最大的热泵市场、制造和出口国，2022年生产了全球约40%的热泵，国内市场销售了一百万台热泵。在中国北方，集中供热仍然是城市中最常见的供暖解决方案；在冬季较为温和的

<sup>21</sup> 注：超低排放是指火电厂燃煤锅炉在发电运行、末端治理等过程中，采用多种污染物高效协同脱除集成系统技术，使其大气污染物排放浓度基本符合燃气机组排放限值，即烟尘、二氧化硫、氮氧化物排放浓度（基准含氧量6%）分别不超过10 mg/m<sup>3</sup>、35 mg/m<sup>3</sup>、50 mg/m<sup>3</sup>（国家环保标准 HJ 2053-2018）。

<sup>22</sup> Zheng, W., Zhang, Y., Xia, J., Jiang Y. "Cleaner heating in Northern China: potentials and regional balances." *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 160, September 2020, p.104897. doi: 10.1016/j.resconrec.2020.104897.

<sup>23</sup> 许磊, 黎家麟. 几种常用的供热方式供热成本分析[J]. 供热制冷, 2019, 2:23-24.

南方地区，空气源热泵是空间供暖的常见解决方案<sup>24</sup>。2020年中国的热泵累计安装量为584万台，约占全球的三分之一。在建筑供暖中，热泵用于空间供暖的比例小于10%，燃煤锅炉和燃气锅炉供暖的比例约为40%，火电厂热电联产供暖占比约为50%。此外，热泵用于热水器的比例小于2%。根据清华大学建筑节能中心的研究，热泵用于建筑热水和供暖仍有很大的潜力。如果快速提高热泵的渗透率，到2060年能减排约7.95亿吨CO<sub>2</sub>e，占建筑整体供热排放的67%<sup>25</sup>。

可以提升热泵性能的方向包括：1）提升热泵的能源效率；2）找到氟化物制冷剂的替代产品；3）加强热泵与电网间的互动作用提供需求侧响应；4）使用更多可持续的可再生能源。对于空气源热泵技术，可以采用高效压缩机（如涡旋式压缩机）、除霜技术、非共沸制冷剂新循环技术。对于混合源热泵，可以考虑将空气源、地热源、太阳能结合，以提升性能。当前地源热泵性能系数相比普通热泵能够提升50%，管道铺设的深度达到2000-3000米，但是由于成本较高，可以应用于区域集中供热或社区供热中<sup>26</sup>。此外，热泵的制冷效率还可以进一步提升。中国的建筑排放量占比非常高，热泵有巨大的减排潜力，未来需要通过技术和政策来推进热泵技术的应用。

中美两国在建筑脱碳领域的主要差别在于中国北方城镇庞大的集中供暖，而美国绝大多数地区采用的是单独的建筑供暖。因而，在考虑建筑脱碳方案时，美国研究中考虑的技术方案较为直接，面临的主要挑战包括现有建筑节能改造规模大、热泵等清洁供暖技术成本高，以及电力系统脱碳。从政策来看，《通胀削减法案》为提供了大规模的补贴，可以减少5-30%的建筑节能改造与电气化的成本。中国北方城镇集中供暖的脱碳方案仍在讨论之中，严寒的东北地区的供暖脱碳方案尤为困难。清华课题组的研究中认为热电联产机组供暖是未来实现清洁供暖最经济技术可行技术。虽然东北地区的电热耦合系统需要在30年内实现碳中和，但仍有必要保留部分热电联产煤电机组用于供热，这可以节省巨大的潜在低碳转型成本。在推广热泵供暖技术时，两国都面临着高成本的挑战，需要通过技术和政策来推进热泵技术的应用。

### 3.2 可再生能源制氢

自从日本政府于2017年发布全球第一个国家级氢能战略以来，截至2023年7月，发布氢能战略的国家数量已经超过40个。碳中和时代对氢能的生产和应用均提出了新的要求。随着全球层面上碳中和的技术路径逐渐清晰，清洁氢被定义为与电气化互为补充的脱碳途径，是重要的脱碳能源和原料。当前氢能生产的技术路径更加清晰，中短期内集中于清洁氢和低碳氢（下文统一使用“清洁氢”），长期聚焦于可再生能源制氢（绿氢）。氢能的应用场景逐渐缩小，聚焦到无法电气化的难减排领域，例如工业高温热能、碳基燃料和材料替代、零排放航空和航运、跨季节储能等。对

<sup>24</sup> IEA (2023), Global heat pump sales continue double-digit growth, IEA, Paris.

<https://www.iea.org/commentaries/global-heat-pump-sales-continue-double-digit-growth>, License: CC BY 4.0

<sup>25</sup> 清华大学建筑节能研究中心，中国建筑节能年度发展研究报告2021。北京：中国建筑工业出版社，2021.

<sup>26</sup> 参考文献同上。

于氢能的储运，则与各国的基础设施紧密相关，例如欧洲已经明确管道运输，而中国的储运模式还在讨论和探索之中。

氢能在全球碳中和进程中将发挥重要的减排作用，当前清洁氢产量和未来需求之间仍然存在着巨大的差距。尽管对未来氢的供需预测比较乐观，但 2022 年全球清洁氢总产量仍不到 100 万吨<sup>27</sup>。对于中国 2060 年氢能消费量的预测，范围则从 9000 万吨-1.3 亿吨<sup>28</sup>。对于美国的预测认为，2050 年清洁氢能将使美国全经济排放比 2005 年减少 10%<sup>29</sup>。

当前的氢能生产仍以化石能源制氢为主，消费集中于工业领域的传统应用，基础设施建设加快。2022 年全球氢气产量约为 9500 万吨，氢气生产仍然主要来自于化石燃料制氢（见下图）。清洁氢产量占总产量的比例不到 1%，还有约 14.8%的氢气来自石化行业的副产氢，其余 84.3%的产量均来自于化石能源制氢，其中天然气制氢占比 70%，煤炭制氢约占 30%。

从需求侧来看，2022 年全球氢气需求比 2021 年增长近 3%，当前氢气需求仍然集中在工业领域的传统应用，例如炼油、合成氨、甲醇、钢铁行业，在新应用场景中的需求占比不到 0.1%，而且集中在公路运输<sup>30</sup>。从氢气的生产、储运基础设施来看，至 2022 年底全球电解槽装机容量约为 700MW，在运加氢站约为 1070 座，全球约有超过 4600 公里的氢气管道在运行。在氢气存储方面，盐穴储氢已经在美国和英国有工业规模的应用。

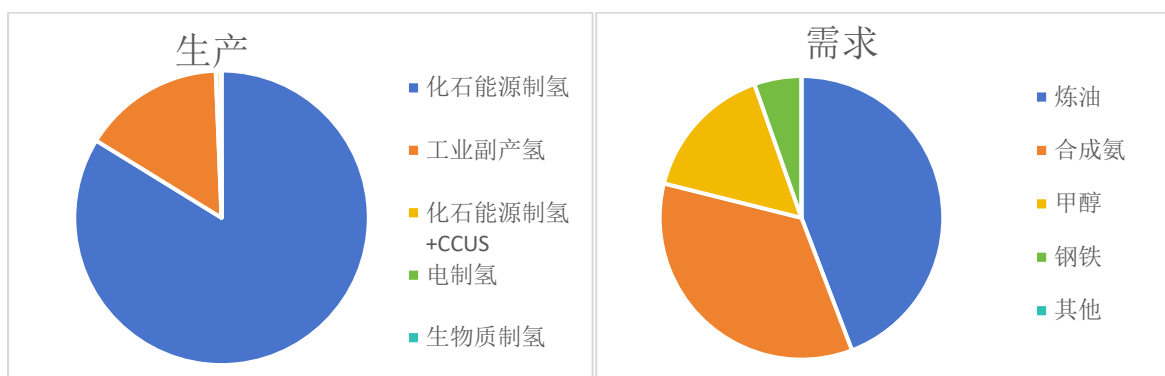


图 3-1 全球氢能生产与需求（2022）

来源：IEA, 2023.

在新增投资项目中清洁氢已经占据绝对主导地位。从 2022 年 5 月至 2023 年 1 月，已宣布的氢能投资项目达到 1046 个，投资额增长了 35%，从 2400 亿美元增加到 3200 亿美元，。大约一半的新项目专注于氢能的大规模工业应用；约有 20%与交通运输有关。GW 级的氢能生产项目有 112 个，

<sup>27</sup> IEA, 2023. Global Hydrogen Review 2023. IEA, Paris.

<https://iea.blob.core.windows.net/assets/ecdfc3bb-d212-4a4c-9ff7-6ce5b1e19cef/GlobalHydrogenReview2023.pdf>

<sup>28</sup> China Hydrogen Association. 2021. Report on hydrogen and fuel cell development in China (2021).

<sup>29</sup> U.S. National Clean Hydrogen Strategy and Roadmap, 2023.

<sup>30</sup> IEA, 2023. Hydrogen, <https://www.iea.org/energy-system/low-emission-fuels/hydrogen>

其中 91 个项目为可再生能源制氢，21 个为低碳氢项目<sup>31</sup>。需要指出的是，当前已宣布的投资规模和净零情景的需求仍存在较大差距。净零情景中，到 2030 年氢能需求将达到 1.5 亿吨以上，其中约 30% 的需求来自新的应用场景。清洁氢的产量占比总计需超过 50%，这又需大量部署新的可再生能源制氢产能<sup>32</sup>。

### （1）未来全球氢能生产与供应格局

全球低碳经济转型将会显著改变现有的能源供应、生产和消费格局。哈佛大学对氢能的地缘政治格局开展了持续的研究，认为氢能的地缘政治和市场动向将更加类似于天然气市场，绿氢的地缘政治版图将由电解制氢的影响因素决定：（1）可再生能源资源禀赋；（2）淡水资源禀赋；（3）基础设施建设潜力。研究表明，美国、加拿大和澳大利亚将成为全球氢能出口冠军，因为这些国家具备最好的可再生能源、水资源和基础设施建设条件。中国虽然有丰富的可再生能源，但受到水资源分布不均衡的限制，难以大量出口。美国很有可能在全球绿氢能产业价值链中成为出口冠军和领航者，前提条件是需要重点布局发展绿氢产业链所需的氨、乙醇和绿色钢铁制造，并克服所面临成本和基础设施普及度方面的挑战<sup>33</sup>。

在综合考虑绿氢生产和工业部门应用后，地缘政治格局又有所不同。哈佛大学采用三个标准即资源禀赋、现有工业生产规模和水平、经济相关性，预测各国在未来绿氢的工业领域中可能发挥的作用。分析表明，绿氢生产和工业应用中的领导者地位在全球范围内分布不均。随着全球清洁氢能生产和工业领域应用的发展，将产生领跑者、产业升级国、绿氢出口国和进口国、局外人。美国和中国在绿氢生产和工业应用方面都可能处于领先地位，通过整合生产和工业应用的价值链，成为未来绿氢经济的领跑者，并在氨、甲醇和钢铁生产等工业应用中处于领先地位。其他资源丰富的国家，如墨西哥和泰国，可以沿着价值链进行升级，并与依赖进口的工业强国争夺就业和市场份额<sup>34</sup>。

<sup>31</sup> Hydrogen Council, McKinsey & Company. Hydrogen Insights 2023. <https://hydrogencouncil.com/zh/hydrogen-insights-2023/>

<sup>32</sup> IEA, 2023. Hydrogen, <https://www.iea.org/energy-system/low-emission-fuels/hydrogen>

<sup>33</sup> De Blasio, Nicola, Fridolin Pflugmann, Henry Lee, Charles Hua, Alejandro Nuñez-Jimenez and Phoebe Fallon. "Mission Hydrogen: Accelerating the Transition to a Low Carbon Economy." Edited by Nicola De Blasio. Belfer Center for Science and International Affairs, Harvard Kennedy School, October 29, 2021.

<sup>34</sup> Eicke, Laima and Nicola De Blasio. "The Future of Green Hydrogen Value Chains: Geopolitical and Market Implications in the Industrial Sector." Belfer Center for Science and International Affairs, Harvard Kennedy School, October 5, 2022. <https://nrs.harvard.edu/URN-3:HUL.INSTREPOS:37373343>

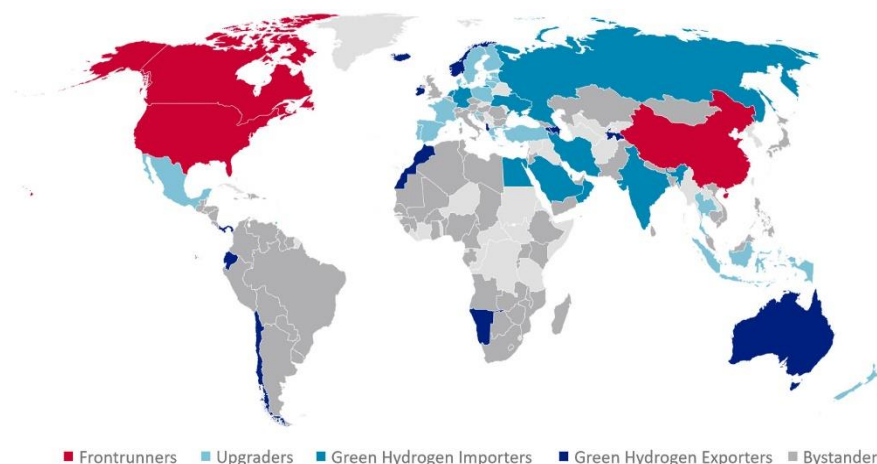


图 3-2 考虑制取和工业应用后的全球绿氢地缘和市场格局

注：绿氢的工业应用考虑了合成氨、甲醇和炼钢三个行业。

来源：Laima Eicke, Nicola De Blasio. Green hydrogen value chains in the industrial sector—Geopolitical and market implications, *Energy Research & Social Science*, Volume 93, 2022, 102847, <https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102847>.

## (2) 美国氢能发展与政策

北美（美国和加拿大）是全球第二大氢能市场，当前美国产量占全球的 10% 左右，均为通过天然气甲醇蒸汽重整生产的灰氢，主要用于传统的合成氨和甲醇生产（35%）、炼油（55%）和冶金（2%）等行业。在应用侧，新的应用场景正在出现，包括已经有超过 5 万辆燃料电池叉车、近 50 个开放式零售加氢站、80 多辆燃料电池公交车、超过 1.5 万辆燃料电池汽车、以及用于固定和备用的电源的超过 500MW 的燃料电池<sup>35</sup>。

早在 2002 年，美国就发布过氢能路线图，并且在技术研发方面领先全球。然而在 2011-2020 年的 10 年间，美国的专利申请数量逐渐落后于欧洲和日本。2020 年，能源部发布《氢能发展规划》，从总体层面提出了未来 10 年氢能研发示范的战略框架。在相关政策以及《基础设施投资和就业法案》、《通胀削减法案》等顶层政策支持下，美国已经成为氢能投资的热土，宣布的氢能投资项目超过其他国家。

2023 年美国能源部发布了《国家清洁氢能战略和路线图》，将氢能定义为多元化的能量载体和化学原料，重点是加速清洁氢的商业化，战略布局扩展至发展氢能全供应链，培育新的产业和创造就业机会。该战略中明确提出支持对象为清洁氢，并提出了一个较为严格的制氢碳强度标准( carbon intensity  $\leq 2$  kgCO<sub>2</sub>e/kgH<sub>2</sub>, on site)，以及至 2026 年实现制氢成本\$2/kgH<sub>2</sub>的成本目标。清洁氢的应用受市场变化、替代技术方案、政策支持和成本影响若实施顺利，预计清洁氢能使用美国全经

<sup>35</sup> U.S. National Clean Hydrogen Strategy and Roadmap, 2023. <https://www.hydrogen.energy.gov/docs/hydrogenprogramlibraries/pdfs/us-national-clean-hydrogen-strategy-roadmap.pdf>

济排放比 2005 年减少 10%<sup>36</sup>。

此外,《国家清洁氢能战略和路线图》是 2022 年颁布的《基础设施投资和就业法案》的一部分,重在提供关于氢能发展的供应和需求、碳排放、工作机会、基础设施、政策、投资等的分析。《基础设施投资和就业法案》侧重于支持研发和示范,清洁氢生产标准制定、建立七个区域性清洁氢中心(70 亿美元)、支持电解技术研发与示范(10 亿美元)、以及支持制造和回收研发与示范(5 亿美元)。《通胀削减法案》中,则重点支持规模制造和应用,包括工业项目示范、港口基础设施脱碳(22.5 亿美元)、清洁重卡制造(10 亿美元),并且为基础设施建设、CCUS 技术、清洁氢生产、航空燃料生产等提供税收抵免。总的来看,目前的政策支持领域包括了针对清洁制造的研发投入、生产侧激励如税收抵免,消费侧激励如政府绿色采购、基础设施建设等。

当前美国氢能发展面临的挑战主要有:研发投入资金的有效利用,需要产业界和企业提出项目和吸引资本流入,管道的基础设施建设面临来自公众的阻力,电网的清洁能源占比也需要提升。此外,一些氢能支持政策非常复杂,例如申请和招标程序设置了很多障碍,使其面临政策落实和实施的挑战。对于美国来讲,短期内容易实现的目标主要是氢能炼钢和合成氨,此外海洋运输行业也在使用绿氢。

### (3) 中国氢能发展与政策

中国是全球第一大氢气生产和消费国,2021 年氢气产量约 3300 万吨。此外,中国还是电解水制氢设备、氢燃料电池商用车最大的应用市场。当前氢气生产仍以化石能源制氢为主,煤制氢、油制氢、天然气制氢合计占比超过 70%,工业副产氢占比约为 28%,化石能源加装 CCUS 技术已有项目投入示范论证。消费侧来看,氢气主要作为原料用于炼油(25%)、甲醇(27%)、合成氨(32%)等产业,较少作为燃料使用<sup>37</sup>。当前清洁氢产业发展也在提速,新增项目主要集中在交通和工业领域。

清洁氢供应和终端应用尚不具备成本竞争力,特别是可再生能源制氢技术经济性尚需加快提升。当前绿氢成本(特别是光伏制氢)仍远高于灰氢,平准化制氢成本可以达到 60 元人民币/kgH<sub>2</sub>,是目前煤制氢成本的大概 2-3 倍<sup>38</sup>。不同氢气供应路径对应的制氢装置、储氢设施和氢气区域流动等能源供应系统特征明显不同,蓝氢路径下,制氢设施更为集中,储氢容量更大。从技术路线来看,若以初期大规模发展蓝氢逐步向绿氢过渡,未来可能面临基础设施衔接不匹配,进而出现资产搁置和氢气供应不稳定的风险。因此,氢能产业起步应坚持绿色低碳路线,围绕可再生能源制氢开展布局。

<sup>36</sup> U.S. National Clean Hydrogen Strategy and Roadmap, 2023.

<https://www.hydrogen.energy.gov/docs/hydrogenprogramlibraries/pdfs/us-national-clean-hydrogen-strategy-roadmap.pdf>

<sup>37</sup> 中国氢能与燃料电池产业创新战略联盟.2021.《2020 中国氢能与燃料电池产业发展报告》--碳中和战略下的低碳清洁供氢体系。北京:人民日报出版社。

<sup>38</sup> 王彦哲,周胜,周湘文,欧训民.2021.中国不同制氢方式的成本分析.中国能源.2021 年第 5 期: 29-37.

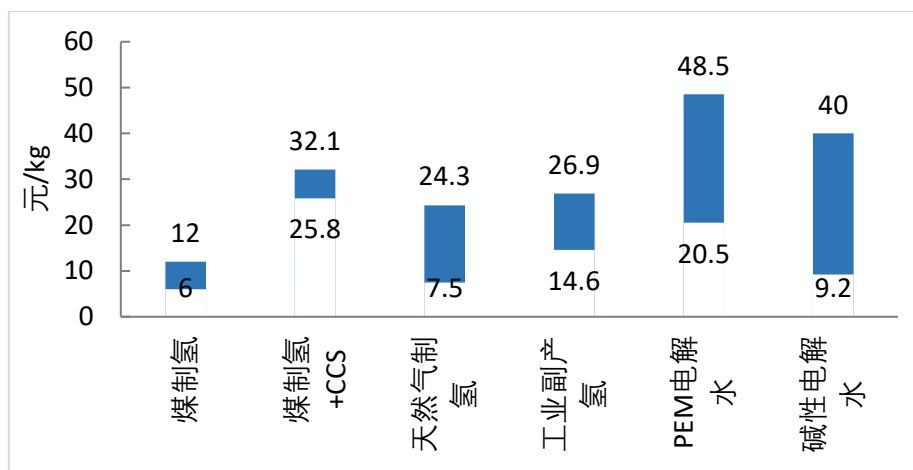


图 3-3 中国不同方式制氢成本

说明：数据来自 EV 100 和中国氢能联合会；液化气价格：1~5 yuan/Nm<sup>3</sup>；电价：0.1~0.6 yuan/kWh；煤炭价格：200~1000 yuan/t

当前中国国内的氢能运输方式主要包括高压气态拖车、液氢槽车、氢气管道三种方式。氢能运输以高压气态储运为主，普遍采用 20MPa 气态高压储氢与集束管车运输方式，适合短距离运输，目前正在研发 30MPa 以上气态储运。液氢槽车已投入示范应用，较为适合 200km 以上长距离运输，仍然受制于高成本（见图 3-4）。目前已经开始探索天然气管道掺氢运输，但是输氢管道建设仍然面临投资高、应用场景不足的挑战。当前中国的氢气管道长度约为欧洲和美国的三分之一，更多依赖于高压气态拖车实现短途氢能配送，未来大规模跨区域氢能输配需要更多建设氢气管道以降低成本。

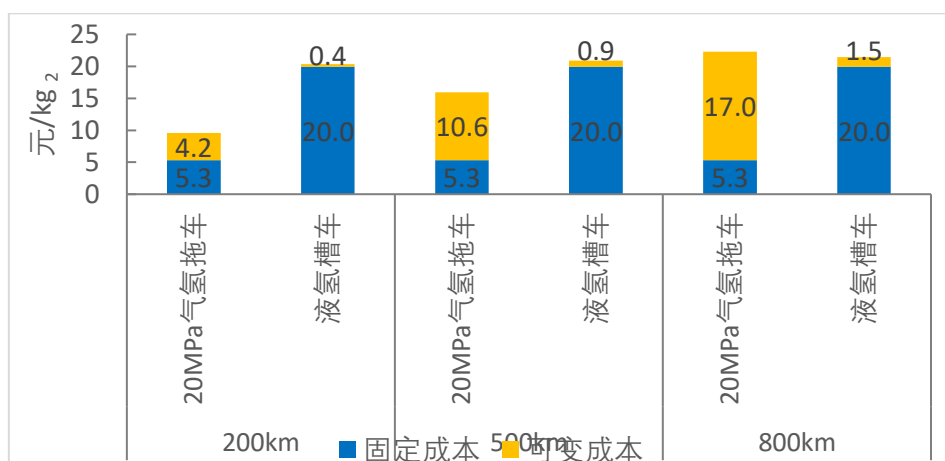


图 3-4 中国不同氢能储运方式成本

说明：（1）数据来自清华大学、中国汽车技术研究中心(CATARC), 2021.

（2）固定成本包含折旧、人员费用、车辆保险费、液化过程费；可变成本与运输距离相关性大，包含车辆保养费、过路费、油费等。

从应用领域来看，工业部门是绿氢的潜在重点应用领域，在高碳排放的工业过程中绿氢已经被

广泛认为是无悔技术选择。2020年，中国主要工业行业（钢铁、水泥、石油化工、工业加热、工业锅炉和建材）的碳排放约占全年总排放量的一半。根据中国氢能联盟的预测，到2060年中国60%的氢气需求将来自工业，31%来自交通运输<sup>39</sup>。化工行业以绿氢替代灰氢，可大幅降低行业碳排放，目前已经有多个技术示范项目，短期内绿氢化工仍然面临经济性和氢能供应的挑战。氢气炼钢主要的方案设计有两种，部分使用氢气和完全使用氢气，目前中国的示范项目多采用富氢气体直接还原路线（部分使用氢气）。

交通是氢能未来潜在大规模应用的重要领域，氢燃料电池车是核心技术路线。氢燃料电池汽车主要应用中重型车辆和长途道路交通领域，用于替代柴油重卡和客车，以氢-电两种能源互为补充，实现道路交通深度脱碳。预计到2030年氢能重卡的总体应用成本（含氢能、车辆、维护成本）将与传统柴油重卡基本平价。氢燃料电池船舶有望在内河湖泊和近海航运领域发挥减排作用，用于内河货运、固定线路轮渡、近海船只、游轮等。基于燃料电池技术的氢能轨道车辆、飞机、无人机等领域开始试验性应用，但仍处于早期探索期。在发电和储能领域，氢燃料电池储能发电处于示范应用阶段，规模多在兆瓦级以下；掺氢燃烧发电技术开始进行项目验证。

全球来看，中国属于氢能发展布局较晚的国家。2014年发布的《能源科技创新战略》中，首次将“氢能与燃料电池”作为能源科技创新战略方向；2019年中央政府首次将发展氢能写入《政府工作报告》。2022年出台的《氢能产业中长期规划（2021-2035年）》中，指出氢能是未来国家能源体系的组成部分、用能终端实现绿色低碳转型的重要载体、战略性新兴产业和未来产业的重点方向，重点支持绿氢和工业副产氢制取。提出的氢能产业发展的目标为：到2025年，基本掌握核心技术和制造工艺，燃料电池车辆保有量约5万辆，可再生能源制氢量达到10-20万吨/年，实现二氧化碳减排100-200万吨/年。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，2035年可再生能源制氢在终端能源消费中的比重明显提升<sup>40</sup>。

目前中央政府已经出台大约50项针对氢能发展的政策，主要包括科技研发、先进技术示范、清洁生产、氢能产业发展、燃料电池汽车示范、标准建设等方面<sup>41</sup>。从资金支持政策来看，燃料电池汽车示范应用城市群可以获得连续四年的支持，目前已经有五个示范城市群入选，测算单个城市群的补贴金额上限约为17亿元。

地方政府是积极发展氢能的主体，截至2022年底，已有21个省及69个市提出相应的氢能发展目标，多个省市推出了相应的氢能补贴政策。有研究分析了来自中国39个城市的122份政策文件，发现城市是向氢燃料过渡中的早期行动者，通过有针对性的政策支持和对所需技术的投资，在促进技术创新和为未来规模转型奠定基础方面发挥了关键作用。然而，城市层面的支持侧重于基础设施建设，只有一半的城市颁布了支持技术创新的政策，应用集中于交通部门。总的来看，城市层

<sup>39</sup> 中国氢能与燃料电池产业创新战略联盟.2021.《2020中国氢能与燃料电池产业发展报告》--碳中和战略下的低碳清洁供氢体系。北京：人民日报出版社。

<sup>40</sup> 国家发展与改革委员会，国家能源局.2022.氢能产业中长期规划（2021-2035）。

<sup>41</sup> 张永伟，张真.(2022). 多元化激励体系驱动氢能产业可持续发展. 中国能源, 2022年第9期。

面的举措需要更好地引导向清洁氢发展<sup>42</sup>。

尽管在电解制氢方面已经具备明显的成本优势，但是中国氢能发展仍然面临着多个挑战。这些挑战包括西部大规模制氢存在水资源约束挑战；风光资源分布与氢能消费中心存在区域错位，需要统筹制氢规模的分布以及储输氢基础设施的布局。当前的政策主要支持清洁氢在交通领域的应用，对于工业领域应用的支持严重不足，现有氢能政策的发展目标和最优技术路线并不一致。。总的来看，对于清洁氢和绿氢发展的政策支持仍严重不足，需要支持和探索新的商业模式与国际合作机制等。

#### 案例：面向化工行业碳中和的电网友好型新能源制氢路径

2020年中国化工行业的碳排放总量约为全国碳排放总量的13.4%左右。氢能在石油炼化、合成氨、合成甲醇和现代煤化工等场景应用中，大部分用于加氢处理、加氢裂化和脱硫等反应过程。绿氢有望在该行业脱碳过程中发挥重要的作用。风光资源的电力供应具有间歇性并不稳定，而化工生产（如反应器等）需要严格的温度和压力条件，“绿色灵活化工电力化”（Green flexible chemical electrification, GFCE）可以解决这一难题。从技术设计来看，通过电网交换可以解决生产与消费之间的不平衡，给化工产业配备先进过程控制设备以响应可再生能源的变动，以及配备更大容量的电解槽和更持久的氢缓冲罐来实现系统更高的灵活性<sup>43</sup>。

在国内大部分区域，GFCE技术比CCS技术在平准化碳减排成本上更有优势，在内蒙古和新疆GFCE甚至出现了负成本。CCS只能分别在电力或者化工领域发挥作用，但是灵活化工产业能够将这电力和化工行业联系起来。如果没有碳定价机制的话，绿氨在一些省份从经济上也是可行的，例如河北省。对于其他一些地区，绿氨则需要碳定价政策的支持。在补贴和碳定价支持政策之下快速投资仍然是非常有必要的<sup>44</sup>。

总的来看，当前中美两国清洁氢发展面临的问题基本相似：技术尚未完全成熟、生产高成本、缺乏市场需求、基础设施不足。因此，两国政策都在针对性地解决这些问题，采取的措施也很相似：支持研发和示范，加速技术商业化；支持规模化生产；创造市场需求和补贴消费；支持基础设施建设；开展国际合作等。美国大规模的补贴已经显著地拉动了清洁氢的投资和生产，但是需要更好地引导投资流向绿氢项目。

相比之下，尽管在电解制氢方面已经具备明显的成本优势，中国的氢能政策仍缺乏系统性而且相关支持严重不足。未来中美两国都需要积极创建国内氢能应用市场，重点支持清洁氢在工业领域的示范与应用。对于中国来说，需要在国际新的能源地缘格局和国内长期碳中和、能源系统转型的

<sup>42</sup> Peng, Y., & Bai, X. (2022). Cities leading hydrogen energy development: the pledges and strategies of 39 Chinese cities. *npj Urban Sustainability*, 2(1), 22. <https://doi.org/10.1038/s42949-022-00067-9>

<sup>43</sup> Li, J.R., Lin J., Wang, J.X., Lu, X., Nielsen, C.P., McElroy, M.B., Song, Y.H., Song, J., Lyu, S.F., Yu, M.K., Wu, S.R., Yu, Z.P. In review (2024). Redesigning Electrification of China's Chemical Industry to Mitigate Carbon and Security Impacts on the Power System. *Nature Energy*.

<sup>44</sup> Qiu Y.W et al. 2023. Research Status of Green Hydrogen-Based Chemical Engineering Technology and Prospect of Key Supporting Technologies for Large-Scale Utilization of New Energies[J/OL]. *Proceedings of the CSEE*: 1-20 (in Chinese). <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.230233>.

背景下重新考虑氢能战略，使氢能发展目标与其长期能源转型和脱碳进程保持一致，积极参与清洁氢研究合作与标准认证，以保证工业产品的国际竞争力。

### 3.3 碳捕集利用与封存

2022 年以来全球 CCS 技术商业化部署取得重大进展。截至 2023 年 7 月 31 日，全球已经宣布的 CCS 项目数量达到 392 个，其中 41 个项目在运营（4900 万吨 CO<sub>2</sub>/年），26 个项目在建，325 个项目处在开发阶段。如果这些项目都能够顺利投产的话，预计 2030 年左右捕集能力将超过 3.6 亿吨 CO<sub>2</sub>/年<sup>45</sup>。分行业来看，乙醇、发电和供热、氢/氨/化肥、天然气处理、水泥为拥有 CCS 设施最多的行业，全球还有六个直接空气捕获项目（DAC）正在筹备中（GCCSI, 2023）<sup>46</sup>。全产业链最为显著的增长发生在 CO<sub>2</sub> 运输和封存基础设施环节。2022 年新宣布的 CO<sub>2</sub> 存储容量达 2.1 亿吨，比 2021 年增加了 1.1 亿吨<sup>47</sup>。CCS 项目集群化和规模化发展迅速，全球有超过 140 个 CCUS 枢纽在建，甚至催生了“CO<sub>2</sub> 运输和封存”这一新行业的出现<sup>48</sup>。

尽管当前全球计划发展 CCUS 技术的国家数目已经增加到 45 个<sup>49</sup>，但在净零排放情景下，当前产能与净零情景下的需求之间仍存在巨大差距。作为全球排放最大的两个经济体，中国和美国也是世界上都需要大规模发展和应用 CCS 技术。根据普林斯顿大学美国净零排放项目的研究，到 2050 年，美国通过 CCUS 实现净零排放所需的二氧化碳捕集规模为每年 9-17 亿吨 CO<sub>2</sub><sup>50</sup>。各机构针对中国碳中和的研究结果表明，到 2060 年中国的 CCUS 技术年碳捕集规模约为 10-25 亿吨 CO<sub>2</sub><sup>51, 52, 53</sup>。在 2023 年 11 月中美两国刚达成的《关于加强合作应对气候危机的阳光之乡声明》中，也宣布两国将各自推进至少五个工业和能源等领域 CCUS 大规模合作项目<sup>54</sup>。

<sup>45</sup> Global CCS Institute (GCCSI), 2023. Global status of CCS 2023: scaling up through 2030.

<sup>46</sup> 参考文献同上。

<sup>47</sup> Fajarday M., Greenfield C., Moore R., 2023. How new business models are boosting momentum on CCUS. IEA Commentary, March 24, 2023. <https://www.iea.org/commentaries/how-new-business-models-are-boosting-momentum-on-ccus>

<sup>48</sup> 参考文献同上。

<sup>49</sup> 参考文献同上。

<sup>50</sup> Larson Eric, Chris Greig, Jesse Jenkins, Erin Mayfield, Andrew Pascale, Chuan Zhang, Joshua Drossman, et al. 2021. “Net-Zero America: Potential Pathways, Infrastructure, and Impacts.” <https://netzeroamerica.princeton.edu>.

<sup>51</sup> 全球能源互联网发展合作组织. 2021 年. 中国 2060 年前碳中和研究报告。

<sup>52</sup> 张希良,黄晓丹,张达等.碳中和目标下的能源经济转型路径与政策研究[J].管理世界,2022,38(01):35-66.DOI:10.19744/j.cnki.11-1235/f.2022.0005.

<sup>53</sup> 张贤、杨晓亮、鲁玺, 中国二氧化碳捕集利用与封存 (CCUS) 年度报告 (2023). 2023. 中国 21 世纪议程管理中心, 全球碳捕集与封存研究院, 清华大学.

<sup>54</sup> U.S. Department of State, 2023. Sunnylands Statement on Enhancing Cooperation to Address the Climate Crisis. <https://www.state.gov/sunnylands-statement-on-enhancing-cooperation-to-address-the-climate-crisis/>

## (1) 美国 CCUS 技术进展与政策

美国的碳存储潜力巨大。据测算，美国的理论 CO<sub>2</sub> 封存潜力在 2.6-22 亿吨 CO<sub>2</sub>（“中等”情景中估计为 8.3 亿吨 CO<sub>2</sub>）<sup>55</sup>。在之前的研究中，哈佛大学肯尼迪学院团队强调了在美国部署 CCUS 的众多长期和短期好处，例如可以提高电力系统的灵活性，将捕获的二氧化碳再用于制造业或工业过程，实现“与生物燃料发电（BECCS）相结合时的负排放”，以及实现基于天然气的低碳氢气生产等<sup>56</sup>。将 CO<sub>2</sub> 注入含油地质构造中封存以提高采收率（Enhanced oil recovery, EOR）仍然是一个关键的应用，因为可以使用石油收入来支付碳捕获和封存的成本<sup>57</sup>。

在最近的研究中，哈佛大学肯尼迪学院的团队发现，“如果政策和相关市场条件合适，有机连接碳捕集站点、运输和储运设施并实现基础设施共享，在未来几十年内，可以实现充足的区域和全国基础设施供应”<sup>58</sup>。为了给输运存储网络基础设施创造扩张的条件，已经通过了几项政策。例如，《通胀削减法案》（IRA）加强了《国内税收法》第 45Q 条中的二氧化碳封存税收抵免——将抵免金额增加了 70%-260%（取决于最终用途），并降低了二氧化碳捕获的信贷资格门槛<sup>59</sup>。表 3-1 概述了《两党预算法案》和《通胀削减法案》下带来的 45Q 税收抵免变化。

3-1 《两党预算法案》和《通胀削减法案》下的 45Q 税收抵免

项目类型		45Q 税收抵免（美元/吨）		
捕集方式	CO <sub>2</sub> 的用途	两党预算法案 (2018)	通胀削减法案 (2022)	税收抵免增加幅 度
工业和电力设施	提高石油采收率 (EOR)	\$35/吨	\$60/吨	+71%
	存储	\$50/吨	\$85/吨	+70%
直接空气捕集 (DAC)	提高石油采收率 (EOR)	\$35/吨	\$130/吨	+271%
	存储	\$50/吨	\$180/吨	+260%

来源: (1) Inflation Reduction Act of 2022 (H.R. 5376), § § 13104,13801; (2) Clara Galeazzi, Grace Lam, John P. Holdren, 2023.

<sup>55</sup> Clara Galeazzi, Grace Lam, John P. Holdren, 2023. Carbon capture, utilization, and storage: CO<sub>2</sub> transport costs and network infrastructure considerations for a net-zero United States. Belfer Center for Science and International Affairs.

<sup>56</sup> 参考文献同上。

<sup>57</sup> USGS, 2023. “Using Petroleum Reservoirs to Store Carbon.”

<https://www.usgs.gov/news/featured-story/using-petroleum-reservoirs-store-carbon>

<sup>58</sup> Clara Galeazzi, Grace Lam, John P. Holdren, 2023. Carbon capture, utilization, and storage: CO<sub>2</sub> transport costs and network infrastructure considerations for a net-zero United States. Belfer Center for Science and International Affairs.

<sup>59</sup> 参考文献同上。

在 CCUS 政策中，还必须考虑二氧化碳运输的基础设施。至 2018 年，美国共拥有 5,012 英里（8,066 公里）的二氧化碳传输管道，其中大部分用于提高石油采收率（EOR）。这一数字仅占所有非天然气管道的 2% 左右<sup>60</sup>，但迅速增加管道以适应 CCUS 迅速发展仍受制于多个层级的许可要求。例如，涉及联邦、州和私人土地组合的项目，在开始施工之前可能需要多达 30 多次许可审核和批准<sup>61</sup>。为了应对这些挑战，2021 年《基础设施投资和就业法案》（BIL）出台了多项促进 CO<sub>2</sub> 基础设施扩张的条款，例如“CO<sub>2</sub> 基础设施和金融创新法案”<sup>62</sup>。

迄今为止已经采取了多项政策干预措施，但美国的 CCUS 发展仍面临相当大的挑战。尽管目前有补贴和税收抵免政策，但 CCUS 技术在大多数应用中仍然缺乏经济竞争力<sup>63</sup>。提高石油采收率（EOR）应用可以部分抵消 CCUS 项目成本，但低油价仍然威胁到 EOR 的商业可行性<sup>64</sup>。此外，对 CCUS 仍有相当多的反对意见，其论点主要是使用 CCUS 将增加对化石燃料的依赖，并且在 EOR 应用的情况下增加石油产量。这些论点背后的逻辑值得商榷，但它们确实影响公众对 CCUS 的接受度，使政策制定复杂化。

## （2）中国 CCUS 技术进展与政策

中国理论封存容量约为 1.2-4.1 万亿吨，其中松辽盆地（6954 亿吨）、塔里木盆地（5528 亿吨）和渤海湾盆地（4906 亿吨）三大陆上封存区域约占总封存容量的一半<sup>65</sup>。自 2020 年 9 月提出双碳目标以来，中国投运、在建、规划或停运 CCUS 示范项目由 42 个快速增至 100 个，其中近一半项目已经投产，CO<sub>2</sub> 捕集能力超过 400 万吨/年，约为全球当前捕集能力的 8%；CO<sub>2</sub> 注入能力超过 200 万吨/年。目前中国 CCUS 示范项目涵盖电力、油气、化工、水泥、钢铁等多个行业，其中，电力行业示范项目超过 20 个<sup>66</sup>。新疆 CCUS 集群、大亚湾区 CCUS 集群项目、华东地区 CCUS 集群项目等产业集群项目也正在筹备中。

全产业链来看，随着 CCUS 技术的进步和示范项目的推进，低成本、低能耗的新一代捕集技术呈现快速发展态势，正由中试逐渐向工业示范过渡。CCUS 示范项目正逐步从单一环节的技术应用过渡到全流程多环节的综合集成应用，示范规模持续扩大、应用场景明显增多。在 CO<sub>2</sub> 输送方面，

<sup>60</sup> Clara Galeazzi, Grace Lam, John P. Holdren, 2023. Carbon capture, utilization, and storage: CO<sub>2</sub> transport costs and network infrastructure considerations for a net-zero United States. Belfer Center for Science and International Affairs.

<sup>61</sup> 参考文献同上。

<sup>62</sup> 参考文献同上。

<sup>63</sup> Moch, Jonathan M., Xue, William, & John P. Holdren. 2022. Carbon Capture, Utilization, and Storage: Technologies and Costs in the U.S. Context. Belfer Center for Science and International Affairs.

<sup>64</sup> 参考文献同上。

<sup>65</sup> 蔡博峰；李琦；张贤，中国二氧化碳捕集利用与封存（CCUS）年度报告（2021）--中国 CCUS 路径研究. 2021.

<sup>66</sup> 张贤、杨晓亮、鲁玺，中国二氧化碳捕集利用与封存（CCUS）年度报告（2023）. 2023，中国 21 世纪议程管理中心，全球碳捕集与封存研究院，清华大学。

公路罐车和内河船舶运输技术均已开展商业化应用,主要应用于规模 10 万吨/年以下的 CO<sub>2</sub> 输送<sup>67</sup>。在 CO<sub>2</sub> 管道运输已经陆续开展了一些工程实践,海底管道运输尚处在基础研究阶段。在 CCUS 系统集成优化方面,国外 CCUS 集成优化技术已普遍进入商业化应用阶段,而国内大规模全链条示范经验不足,特别是在管网优化和集群枢纽方面,相关技术目前仅达到中试阶段。

二氧化碳利用是我国产业界关注的重点,目前的利用方式包括气驱强化采油技术(EOR)、制干冰、化工产品生产(甲醇、化肥等)等。目前中国 CCUS 示范项目的 CO<sub>2</sub> 利用方式以地质利用为主,但化学与生物利用项目也在逐年增加。当前超过 30 个项目进行 CO<sub>2</sub>-EOR,少数项目进行强化开采煤层气,仅有个别项目最终将收集到的 CO<sub>2</sub> 进行地质封存。

中国若要达到 2060 年碳中和目标,CCUS 减排需求约为每年 10-25 亿吨<sup>68,69,70</sup>。而目前中国现有的捕集能力规模仅相当于碳中和目标下 2060 年需求的约 0.16%-4%。与此同时,中国源汇空间错位问题凸显,华东、华中、华南地区缺少陆上封存地,这些地区将需要依赖近海封存。以上种种原因造成了碳捕集能力与目标需求的巨大差距。

对我国而言,在四大行业中,煤化工的 CCS 应用成本最低。水泥行业因为水泥厂的规模小、分布广泛,考虑源汇匹配后会有更多低成本减排机会。燃煤电厂加装 CCUS 技术改造可以避免燃煤发电部门资产搁浅,促进煤炭公正转型,并显著降低电力系统实现碳中和的成本。预计到 2050 年,CCUS 技术在能源与工业等领域广泛部署,综合成本大幅降低,第二代捕集技术成本比目前降低 50% 以上<sup>71</sup>。从已投运示范项目捕集成本来看,中国具有一定成本优势,并在“干中学”过程中逐年下降。

#### 案例：中国国家能源集团 15 万吨/年煤电 CCS 后捕集技术示范项目

2021 年 6 月,中国能源集团 15 万吨/年燃煤电 CCS 捕集后技术示范项目正式投产,该项目 2018 年作为国家重点研发项目启动。此项目捕集二氧化碳后用于气驱强化采油 EOR 技术、高附加值化学品。其技术绩效参数已达到二氧化碳捕集率>90%、二氧化碳浓度>99%、吸收剂再生能耗<2.4GJ/tCO<sub>2</sub>、电耗<90kWh/tCO<sub>2</sub>的较高性能参数。项目运行成本中,15 万吨 CCUS 试点项目运行成本相比国际类似项目较低,单位建设成本全球最低(40 美元/tCO<sub>2</sub>)。另一个 50 万吨 CCUS 试点项目用于优化吸收剂、材料和设备的选择,总成本已低于 35 美元/tCO<sub>2</sub><sup>72</sup>。

中国政府出台了多种支持 CCUS 技术的措施,包括针对研发示范、税收激励、补贴和能力建设

<sup>67</sup> 张贤、杨晓亮、鲁玺,中国二氧化碳捕集利用与封存(CCUS)年度报告(2023).2023,中国 21 世纪议程管理中心,全球碳捕集与封存研究院,清华大学。

<sup>68</sup> 全球能源互联网发展合作组织.2021 年.中国 2060 年前碳中和研究报告。

<sup>69</sup> 张希良,黄晓丹,张达等.碳中和目标下的能源经济转型路径与政策研究[J].管理世界,2022,38(01):35-66.DOI:10.19744/j.cnki.11-1235/f.2022.0005.

<sup>70</sup> 张贤、杨晓亮、鲁玺,中国二氧化碳捕集利用与封存(CCUS)年度报告(2023).2023.中国 21 世纪议程管理中心,全球碳捕集与封存研究院,清华大学。

<sup>71</sup> Cui, Q., et al., A 150 000 t·a<sup>-1</sup> Post-Combustion Carbon Capture and Storage Demonstration Project for Coal-Fired Power Plants. Engineering, 2022. 14: p. 22-26.

<sup>72</sup> 参考文献同上。

的政策。然而，广泛的政策扩散受到各种因素的阻碍，包括技术成熟度的不同阶段、不同的区域财政状况以及在国家层面调整政策的挑战。

中国的 CCUS 政策主要用于提供指导，仍缺乏对 CCUS 项目的市场准入、建设、运营、监管和终止等方面进行具体规定。CCUS 税收优惠政策分布在环保、节能、节水、资源综合利用等多个领域。这些税收优惠包括增值税、资源税和企业所得税，在某些情况下给予减免。

在区域财政补贴方面，包括深圳、北京在内的部分城市对 CCUS 项目投资提供补助或奖励，最高上限分别为 1000 万元和 3000 万元<sup>73</sup>、<sup>74</sup>。支持 CCUS 的金融政策包括中国人民银行的碳减排支持工具和绿色债券分类目录。

在项目全生命周期管理方面，目前有 13 个政府部门参与项目前期审批和监管流程，管理碎片化。需要明确跨部门合作机制，明确 CCUS 存储项目封井后监管责任。

总体来看，我国的 CCUS 技术和基础设施的发展仍然大幅落后于美国。这体现在捕集技术仍处于示范阶段，CCUS 系统集成优化方面总体仅处于中试阶段，而美国 CCUS 技术已进入商业化应用阶段。随着应用场景的拓展，CCUS 技术已经成为中国碳中和技术体系的重要组成部分，是化石能源近零排放的唯一技术选择、钢铁水泥等难减排行业深度脱碳的可行技术方案、未来支撑碳循环利用的主要技术手段。考虑到全球气候治理外部约束和落实国家碳达峰碳中和目标的内部需求，我国急需推动 CCUS 由战略储备技术快速升级为现实解决方案，其技术定位、发展方向和未来部署都需要进一步研究。

## 4. 中美两国气候政策进展与初步评估

### 4.1 美国联邦政府层面气候政策进展

美国是全球第二大温室气体排放国，其二氧化碳排放于 2007 年达到峰值，之后总体呈下降趋势，2020 年的排放量相对于峰值水平已下降 19.9%，但是 2021 年和 2022 年美国增加化石能源燃烧二氧化碳排放 3.7 亿吨。根据美国环境保护署（EPA）的数据，2022 年美国的温室气体排放量为 63.4 亿吨 CO<sub>2</sub>e（不含 LULUCF），交通、电力和工业部门为主要排放源，排放量各占 28%、25%和 23%，此外建筑（商业与居民住宅）和农业部门的排放量各占 13%和 10%<sup>75</sup>。

美国目前国家自主贡献承诺到 2030 年相比于 2005 年减排 50%，并且到 2050 年实现净零排放。此外，还提出了 2030 年甲烷排放量减少约 30%（相比于 2020 年）和 2035 年实现电力系统脱碳等目标。《长期净零排放战略》中只强调了实现 2030 年自主减排贡献目标，关于远期转型路径则考虑

<sup>73</sup> 深圳市发展和改革委员会.2023 年战略性新兴产业专项资金项目申报指南（第一批）.深圳市发展和改革委员会, 2023.

<sup>74</sup> 北京市经济和信息化局, 北京市财政局. 2022 年北京市高精尖产业发展资金实施指南. 北京市经济和信息化局, 北京市财政局, 2022.

<sup>75</sup> U.S. Environmental Protection Agency. 2023. Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990–2022.

了技术成本、经济增长和其它驱动力的不确定性。

拜登政府在气候相关法案上取得了重大突破，成功于 2021 年和 2022 年推出《基础设施投资和就业法案》和《通货膨胀削减法案》，这两项法案均面向未来十年。《基础设施投资和就业法案》旨在对美国基础设施进行大规模投资和改造，计划在十年内投资 1.2 万亿美元<sup>76</sup>。近年来联邦政府对基础设施项目的最大投资。《通胀削减法案》最初估计耗资 3700 亿美元，但由于其激励措施的反应强于预期，现在预计规模将更大，该法案致力于清洁能源的制造和采用、技术研发以及促进社会公平和可持续发展。此外还通过了《芯片和科学法案》，除了支持半导体的激励措施之外，法案另授权拨款约 2000 亿美元，用于促进美国未来 10 年在人工智能、量子计算等各领域的科研创新。此外，美国国会在 2022 年批准了《基加利修正案》，标志着美国国内将根据修正案的履约要求逐步淘汰氢氟碳化物（HFCs）的生产和消费。对于公正转型，拜登政府提出在“正义 40 倡议”下，利用联邦清洁能源和气候投资 40% 的收益为弱势社区和群体提供补偿。根据哥伦比亚大学“气候再监管追踪数据库”，截至 2023 年 2 月，美国已经正式发布 80 条联邦政府层面的气候政策<sup>77</sup>。

史无前例的投资规模将使美国有机会引领全球脱碳进程。然而，挑战依然存在，特别是在政策一致性方面。由于当前的政策严重依赖于税收抵免，政策的连续性仍然面临挑战，税收抵免政策都有时间期限，历史上也曾经造成可再生能源发展的大起大落<sup>78</sup>。在过去两年中通过的这些法案的实施期限都是未来十年，长期的政策措施和方案仍然缺失。此外，迫切需要加强政策执行，而不是过分依赖补贴<sup>79</sup>。

## 4.2 中国的“1+N”气候政策体系评估

2021 年中国提交的更新国家自主贡献中，提出了二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值，努力争取 2060 年前实现碳中和的目标（以下简称“双碳目标”）。此外，还包括到 2030 年单位国内生产总值二氧化碳排放比 2005 年下降 65% 以上，非化石能源占一次能源消费比重将达到 25% 左右，森林蓄积量将比 2005 年增加 60 亿立方米，风电、太阳能发电总装机容量将达到 12 亿千瓦以上等目标。同期提交的《中国本世纪中叶长期温室气体低排放发展战略》中，进一步提出了 2060 年非化石能源消费比重达到 80% 以上等目标<sup>80</sup>。

<sup>76</sup> White House (2021). Fact Sheet: The Bipartisan Infrastructure Deal [EB/OL]. (2021-06-11) [2022-12-22] <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2021/11/06/fact-sheet-the-bipartisan-infrast-structure-deal/>

<sup>77</sup> Columbia Climate School Sabin Center for Climate Change Law (2023). Climate Reregulation Tracker [EB/OL]. New York: Columbia Law School, 2021. [2022-11-20]. <https://climate.law.columbia.edu/content/climate-reregulation-tracker>

<sup>78</sup> Mecking J., Lipsy P. Y., Finnegan J.J. et al., 2022. Why nations lead or lag in energy transitions. *Science*. Vol 378, Issue 6615, pp. 31-33. DOI: 10.1126/science.adc9973

<sup>79</sup> National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2023. Accelerating Decarbonization in the United States: Technology, Policy, and Societal Dimensions. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/25931>.

<sup>80</sup> China's Mid-Century Long-Term Low Greenhouse Gas Emission Development Strategy. <https://unfccc.int/documents/307765>

中央政府层面通过“1+N”政策体系对落实双碳目标做出的系统部署。2021年10月国务院陆续发布《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》<sup>81</sup>（下称《意见》）与《2030年前碳达峰行动方案》<sup>82</sup>（下称《方案》），共同构成贯穿碳达峰、碳中和两个阶段的顶层设计。《意见》作为“1+N”中引领政策，覆盖碳达峰、碳中和两个阶段，明确了2025年、2030年、2060年在构建绿色低碳循环发展经济体系、提升能源利用效率、提高非化石能源消费比重、降低二氧化碳排放水平、提升生态系统碳汇能力等五个方面的阶段性目标，并提出经济社会发展全面绿色转型、深度调整产业结构、加快构建清洁低碳安全高效能源体系等10个方面31项重点任务的部署。《方案》作为碳达峰阶段的引领性文件，聚焦于2030年前的目标和行动，明确了“十四五”和“十五五”两阶段的主要目标，提出能源绿色低碳转型行动、节能降碳增效行动、工业领域碳达峰行动等10项行动44项重点任务。

中国的“1+N”政策体系具有全面系统的特点，顶层设计的各项目标通过部门、重点行业和区域进行分解。在部门层面上，涉及15个领域和具体行业，对循环经济、能源、工业、城乡建设、交通运输、生态碳汇等重点领域进行部署和减排增汇目标分解。在地区和省级层面上，各地方政府也在逐步出台完善本地区内的双碳政策体系，对双碳目标进行落实。行业企业层面，2022年11月国务院国有资产监督管理委员会印发《关于推进中央企业高质量发展做好碳达峰碳中和的指导意见》，组织98家国资委直属的大型中央企业制定实施碳达峰行动方案。此外，各行业协会、重点企业也在积极推进自下而上的政策与行动，推动双碳目标的落实。

### 4.3 中美政策比较

中美两国的气候政策在落实与实施方面都面临着挑战<sup>83</sup>。中国制定了“1+N”气候政策体系，但是在实施过程中，遇到了疫情、地缘冲突、气候创新与合作、能源价格上涨、经济下行等多重因素的影响。目前“1+N”政策仍然依托于“自上而下”的政策落实和执行，缺乏“自下而上”的推动和全社会参与。从时间范围来看，政策集中于2030年前碳达峰，远期实现2060碳中和的政策措施较少，长期的气候措施不够坚实<sup>84</sup>。

美国的政策严重依赖激励措施（如大规模投资、税收优惠和补贴），导致政策的连续性存在高度的不确定性。另一方面，中国的“1+N”一揽子政策依赖于“自上而下”的实施，需要全社会更有力的“自下而上”参与。在时间范围方面，两国的气候政策都致力于在2030年之前进行大规模投资，而长期的气候措施则要求发展创新清洁技术，并加强政策以确保其大规模部署应用。未来，两国必须加强其气候政策体系，加强积极措施，并改进实施，以同时实现多个目标——不仅是温室气体减排，还包括公正和公平、健康、就业和公众参与。

<sup>81</sup> 中共中央，国务院，2021. 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。

<sup>82</sup> 国务院，2021. 2030年前碳达峰行动方案。

<sup>83</sup> Fransen, T., Meckling, J., Stünzi, A. et al. Taking stock of the implementation gap in climate policy. *Nat. Clim. Chang.* 13, 752–755 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01755-9>

<sup>84</sup> J. Burck et al., “Climate Change Performance Index Results” (2023); <https://ccpi.org>.

## 5 结论与建议：中国、美国及全球

当前全球低碳技术创新能力和应用仍高度集聚于少数经济体，低碳和深度脱碳技术的应用距离“保持 1.5 度目标可及”仍有较大差距。全球来看，低碳和脱碳技术研发与应用取得了重大进展，以美国、欧盟、中国、英国、日本为首的经济体一系列相关政策的出台，有力地推动了低碳和脱碳技术的部署和应用。

项目团队在前两年的研究中发现，中美两国的脱碳路径和技术部署都具有高度的相似性，两国可以用对两国都有价值的方式进行合作，最有效地实现各自的减排目标。中美两国良好的实践和经验可以为其他国家提供广泛的参考借鉴。

基于第二期的项目研究，我们提出以下政策建议：

- (1) 考虑未来国际能源地缘格局的变化和国内碳中和与能源转型长期战略，明确重要脱碳技术如热泵、绿氢、CCUS 的定位、战略和目标。
- (2) 加强气候政策制定，释放清晰和连续的政策信号。努力培育深度脱碳技术的国内市场需求，鼓励和带动私营部门投资，推动规模经济的实现。
- (3) 加强科技创新投入的国际合作，加速推进深度脱碳技术的商业化应用，加速技术的成熟和市场规模的增长，通过国家合作增加技术的市场渗透率。
- (4) 能源转型中建议综合考虑不同技术和基础设施的耦合，例如建筑供热领域脱碳的热能和电能耦合解决方案，绿氢制取与终端部门应用的耦合，工业集群与 CCUS 设施耦合。
- (5) 新技术的发展带来了新的基础设施需求，建议在政策制定中同步考虑基础设施投资和创新清洁技术在能源供应和终端使用。考虑基础设施投资的同时，制定政策加强能源供应和最终使用的创新清洁技术。基础设施已成为绿氢、CCUS 和其他技术发展的驱动力和制约因素。
- (6) 积极推动气候政策的实施，完善长期措施和气候政策体系，防范转型可能会引发的经济和社会风险。

最后，正如我们在第一期报告中所指出的，为发展中国家筹集更多的能源气候资金至关重要——不仅用于清洁能源技术和基础设施，而且用于适应气候变化——并加强建立技术转让机制和规范。研究表明，到 2030 年，发展中国家需要将气候投资至少增加四到八倍。如果要达到这样的水平，国际社会将需要在融资和技术转让方面共同努力。

## 作者名单

---

---

### 清华大学

董文娟，清华大学气候变化与可持续发展研究院副研究员

李政，清华大学气候变化与可持续发展研究院院长，清华大学能源与动力工程系教授

刘培，清华大学能源与动力工程系副教授

彭天铎，清华大学气候变化与可持续发展研究院、清华大学国家治理与全球治理研究院副研究员

杜尔顺，清华大学气候变化与可持续发展研究院、清华大学低碳能源实验室副研究员

宋伟泽，清华大学气候变化与可持续发展研究院、清华大学低碳能源实验室助理研究员

张芳，清华大学公共管理学院副教授，哈佛大学肯尼迪学院贝尔弗科学与国际事务中心副研究员

### 哈佛大学

Rachel Mural 哈佛大学肯尼迪政府学院环境与自然资源项目与科学、技术和公共政策项目助理研究员

John Holdren 哈佛大学肯尼迪政府学院教授，科学、技术和公共政策项目联合主任

Henry Lee，哈佛大学肯尼迪政府学院高级讲师，环境与自然资源项目主任

## 清华-哈佛沙龙嘉宾名单

### 哈佛大学

John Holdren 哈佛大学肯尼迪政府学院教授，科学、技术和公共政策项目联合主任

Henry Lee, 哈佛大学肯尼迪政府学院高级讲师，环境与自然资源项目主任

Michael B. McElroy, 哈佛大学保尔森工程与应用科学学院地球与行星科学系教授，哈佛大学-中国能源、经济与环境项目主任

Daniel P Schrag, 哈佛大学保尔森工程与应用科学学院地球与行星科学系教授，肯尼迪政府学院教授，科学、技术和公共政策项目联合主任

Kelly Sims Gallagher, 塔夫茨大学弗莱彻学院院长、教授，哈佛大学肯尼迪政府学院科学、技术和公共政策项目兼职教授

Joseph E. Aldy, 哈佛大学肯尼迪政府学院教授，监管政策项目主任

Nicola De Blasio, 哈佛大学肯尼迪政府学院环境与自然资源项目与科学、技术和公共政策项目高级研究员

Chris Nielsen, 哈佛大学-中国能源、经济与环境项目执行主任

Judy Chang, 哈佛大学肯尼迪政府学院公共政策兼职讲师

Alan Krupnick, 未来资源研究所高级研究员，工业和燃料项目主任

Haiyang Lin, 哈佛大学-中国能源、经济与环境项目博士后研究员

Andrew Waxman, 德克萨斯大学奥斯汀分校 LBJ 公共事务学院助理教授

Jingran Zhang, 哈佛大学-中国能源、经济与环境项目博士后研究员

### 清华大学

李政，清华大学气候变化与可持续发展研究院院长，清华大学能源与动力工程系教授

董文娟，清华大学气候变化与可持续发展研究院副研究员

张芳，清华大学公共管理学院副教授，哈佛大学肯尼迪学院贝尔弗科学与国际事务中心副研究员

刘培，清华大学能源与动力工程系副教授

彭天铎，清华大学气候变化与可持续发展研究院、清华大学国家治理与全球治理研究院副研究员

杜尔顺，清华大学气候变化与可持续发展研究院、清华大学低碳能源实验室副研究员

宋伟泽，清华大学气候变化与可持续发展研究院、清华大学低碳能源实验室助理研究员

杨秀，清华大学气候变化与可持续发展研究院、清华大学国家治理与全球治理研究院副研究员

胡彬，清华大学气候变化与可持续发展研究院、清华大学国家治理与全球治理研究院副研究员

方宇娟，清华大学气候变化与可持续发展研究院、清华大学国家治理与全球治理研究院副研究员

王宝龙，清华大学建筑学院建筑技术科学系副教授

林今，清华大学电机工程与应用电子技术系副教授

张贤，中国 21 世纪议程管理中心研究员

樊静丽，中国矿业大学能源与矿业学院教授

徐冬，国家能源集团新能源技术研究院碳中和研究中心主任

刘欢，清华大学环境学院教授

## 能源基金会

邹骥，首席执行官兼中国区总裁

辛嘉楠，能源基金会总裁办公室主任

彭丽楠，能源基金会总裁办公室协调员

才婧婧，能源基金会总裁办公室主管

## 机构介绍

### 清华大学气候变化与可持续发展研究院

清华大学气候变化与可持续发展研究院成立于 2017 年。气候院致力于打造跨学科研究、人才培养和政策交流协同创新平台，整合国内外优质资源，为应对全球气候变化与可持续发展提供智慧和方案。气候院的工作内容包括战略研究、对话与交流、教育与培训三大板块，已经成功打造“气候变化大讲堂”、“巴黎协定之友”、“世界大学气候变化联盟”等品牌旗舰项目，开展了“中国低碳发展及转型路径”、“气候与环境协同治理”等战略研究，并组织了两期南南合作培训班。经过近七年的成长，目前已经形成了国际品牌影响力、国内外资源整合能力和专业研究实力三大优势，成长为领域内知名智库。了解更多信息，请访问 <https://iccsd.tsinghua.edu.cn/>

### 哈佛大学肯尼迪政府学院贝尔弗科学与国际事务中心科技与公共政策项目

科技与公共政策项目是哈佛大学肯尼迪学院贝尔弗科学与国际事务中心的一项研究、教学和对外拓展项目。全球许多最具挑战性问题的解决方案涉及复杂的科学和技术问题。这些领域内良好的政策制定需要进入科学知识的前沿——不仅仅是了解科学信息，而是建立对科学的潜力和局限性的认识之上，将科学见解与包括经济学和政治学在内的其他相关学科的见解相结合。STPP 使用来自于技术评估、政治学、经济学、管理学和法学的方法来研究科学、技术和政策交叉问题，其目标是通过政策制定促进科技对人类福祉的贡献。全球能源技术创新研究组（GETI）隶属于科学、技术及公共政策研究项目（STPP）。

### 哈佛大学中国能源经济环境项目

哈佛大学中国能源经济环境项目成立于 1993 年，是一个跨学科综合研究项目，总部位于哈佛大学约翰·A·保尔森工程与应用科学学院。项目与中国院校机构合作，对气候变化、空气质量、能源系统和经济发展等全球性挑战展开严谨细致的研究，在同行评审的权威学术期刊发表论文。项目的研究活动从自然科学、应用科学和社会科学的角度为各层面政策的创新和制定提供有效的决策支撑，以应对中国乃至世界其他地区面临的环境问题。

了解更多信息，请访问 <http://chinaproject.harvard.edu/>