

供应链视角下我国氢能产业创新布局与对策研究

魏凤^{1,2}, 窦路遥¹, 王贵宾³, 郑启斌², 杨春和^{3*}

(1. 中国科学院武汉文献情报中心, 武汉 430071; 2. 中国科学院大学经济与管理学院, 北京 100190;
3. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉 430071)

摘要: 在碳中和背景下, 氢能成为各国政府积极推动的清洁能源革命战略的核心组分, 分析氢能产业的实践布局与供应链流程, 对于我国氢能的产业化、商业化与创新化发展具有重要的现实价值。基于供应链研究方法, 本文旨在系统解构当前国际氢能产业的阶段性布局及供应链发展趋势; 通过梳理氢能产业上、中、下游的供应链发展突破点, 详细剖析氢能产业供应链的布局与现状, 并提出对应的优化路径和对策建议。研究表明, 氢能产业供应链的发展倾向呈现出“发展→完善→拓展”的实际诉求, 路径优化表现为“技术协调→基础布局→路径拓展”的客观递进。建议构建以“制-储-运”为核心的长江氢能走廊基础设施体系, 建设涵盖“制、运、输、配”的国家氢能枢纽中心, 优化我国氢能供应链体系和氢能产业创新, 加强绿色氢能生产的科技创新, 并积极融入全球氢能产业创新前沿。

关键词: 碳中和; 供应链方法; 氢能战略; 氢能产业布局

中图分类号: V221 **文献标识码:** A

Innovation Layout and Countermeasures of China's Hydrogen Energy Industry: A Supply Chain Perspective

Wei Feng^{1,2}, Dou Luyao¹, Wang Guibin³, Zheng Qibin², Yang Chunhe^{3*}

(1. National Science Library (Wuhan), Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. School of Economics and Management, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: In the context of carbon neutrality, hydrogen energy has become a cornerstone of the clean energy transition actively promoted by governments worldwide. Analyzing the industrial deployment and supply chain dynamics of the hydrogen energy sector holds substantial values for advancing its industrialization, commercialization, and innovation in China. Drawing on supply chain research methodologies, this study systematically deconstructs the phased development and evolving trends of the global hydrogen energy industry. By identifying key breakthroughs across the upstream, midstream, and downstream segments of the hydrogen supply chain, the study comprehensively analyzes the current structure and operational landscape of the hydrogen supply chain while proposing targeted optimization strategies and policy recommendations. The findings indicate that the development trajectory of the hydrogen energy supply chain follows a progressive pattern of “development→optimization→expansion,” with its evolution driven by a sequential pathway of “technological integration→infrastructure development→market expansion.” To

收稿日期: 2024-12-30; **修回日期:** 2025-02-24

通讯作者: *杨春和, 中国科学院武汉岩土力学研究所研究员, 中国工程院院士, 研究方向为储能工程与应用; E-mail: chyang@whrsm.ac.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“武汉市氢能产业链科技挑战与协同发展研究”(HB2024B10)

本刊网址: sscae.engineering.org.cn

accelerate China's hydrogen energy transition, this study recommends establishing a Yangtze River Hydrogen Energy Corridor infrastructure system centered on production, storage, and transportation; developing national hydrogen energy hubs that encompass production, transportation, distribution, and supply; optimizing the hydrogen supply chain and fostering industrial innovation; strengthening technological advancements in green hydrogen production; and actively participating in global hydrogen energy innovation.

Keywords: carbon neutrality; supply chain approach; hydrogen energy strategy; hydrogen energy industry layout

一、前言

氢能作为一种清洁、高效、可再生的能源，被视为未来能源体系变革的核心要素。在碳中和战略背景下，氢能产业的创新发展对推动能源结构低碳转型具有关键作用，已成为世界各国能源战略布局的焦点^[1]。根据国际能源署（IEA）统计，截至2024年9月，已有超过50个国家和地区发布氢能战略，全球清洁氢能项目的投资额也达到了750亿美元，到2050年全球氢能需求量将达到 5.2×10^8 t/a，占全球终端能源使用总量的13%。为此，各国依托差异化技术路线与产业禀赋，形成了以“制-储-运-用”全产业链创新为轴心的系统性布局^[2]。美国启动“氢能地球计划”重点攻关低成本制氢与燃料电池技术；德国依托“H2Giga”等专项布局电解槽与液态储氢体系；日本在“绿色增长战略”框架下发展液氢储运技术；我国则通过《“十四五”能源领域科技创新规划》推动碱性电解槽与燃料电池关键技术的突破。

在供应链环节，氢能发展面临上游制氢成本极化、中游储运技术路线割裂、下游应用场景失衡等结构性挑战^[3-5]。学术界对此展开深度解构，研究范式呈现三大演进方向。在政策分析维度，研究者们试图揭示政策焦点从研发补贴向市场机制设计的转变规律^[6-8]；在技术经济维度，研究重点转向全生命周期成本分析^[9]；在地缘政治维度，学界开始关注氢能标准话语权争夺^[10]等。这些研究共识表明，氢能发展已超越单纯的技术竞争，演变为涵盖产业政策、金融工具、标准体系的系统性创新活动^[11-13]，亟需对供应链各环节技术特性进行系统解构及基于“成本-技术-政策”协同框架的链式分析。

鉴于此，本文从供应链全流程的角度出发，深入探讨国际氢能供应链的三大关键环节：氢气制取（供应链上游）、氢气储运（供应链中游）和氢气应用（供应链下游），旨在系统揭示国际氢能产业阶段性布局和供应链倾向的内在逻辑。一方

面，聚焦于氢能发展与碳中和的实际关联，探讨国际端在推动氢能产业发展中的政策导向、资金投入和阶段性发展目标；另一方面，从供应链倾向层面，细化产业链的技术关键节点、核心装备及技术优化路径，强调政策与技术之间的协调性和互补性。进一步地，通过对国际氢能产业细分领域的深入分析，揭示各环节在技术演进、产业链协同及应用落地中的突破点；据此探讨如何推动国内氢能供应链的全链条优化和布局调整，并提出对策建议，帮助优化国内氢能产业的战略布局和技术路径，以期推动国内外氢能产业的协同发展和跨国合作。

二、氢能产业供应链发展的关键点

通过对国内氢能产业的全面调研和深入分析，本研究综合提出了全球碳中和战略框架下的氢能产业布局框架（见图1）。进一步通过氢能产业链的阶段性分析，揭示国际氢能产业布局与供应链的上、中、下游突破的逻辑关系（见图2）。

（一）氢气制取的上游构建

氢气生产供应链的构建是氢能发展的前提和基础，其核心在于原料来源多元化、生产路径低碳化、生产工艺高效化^[14]。在传统制氢路径中，基于化石能源的热化学转换工艺仍占据重要地位。近年来，通过催化材料的优化和工艺流程的精细化调控，该技术在提升氢气产率的同时，有效降低了能源消耗和环境影响。在清洁制氢领域，电解水制氢作为未来低碳能源的重要突破口，其产业链的完善依赖于核心材料创新与系统集成优化^[15]。高性能催化剂和高稳定性电解膜的研发，推动了电解效率的提升，而模块化电解槽的应用则增强了制氢系统的适配性，使其与风能、太阳能等可再生能源高效耦合，助力氢能在未来能源体系中的深度嵌入^[16]。此外，先进气化技术及新型热解工艺的应用，进一步

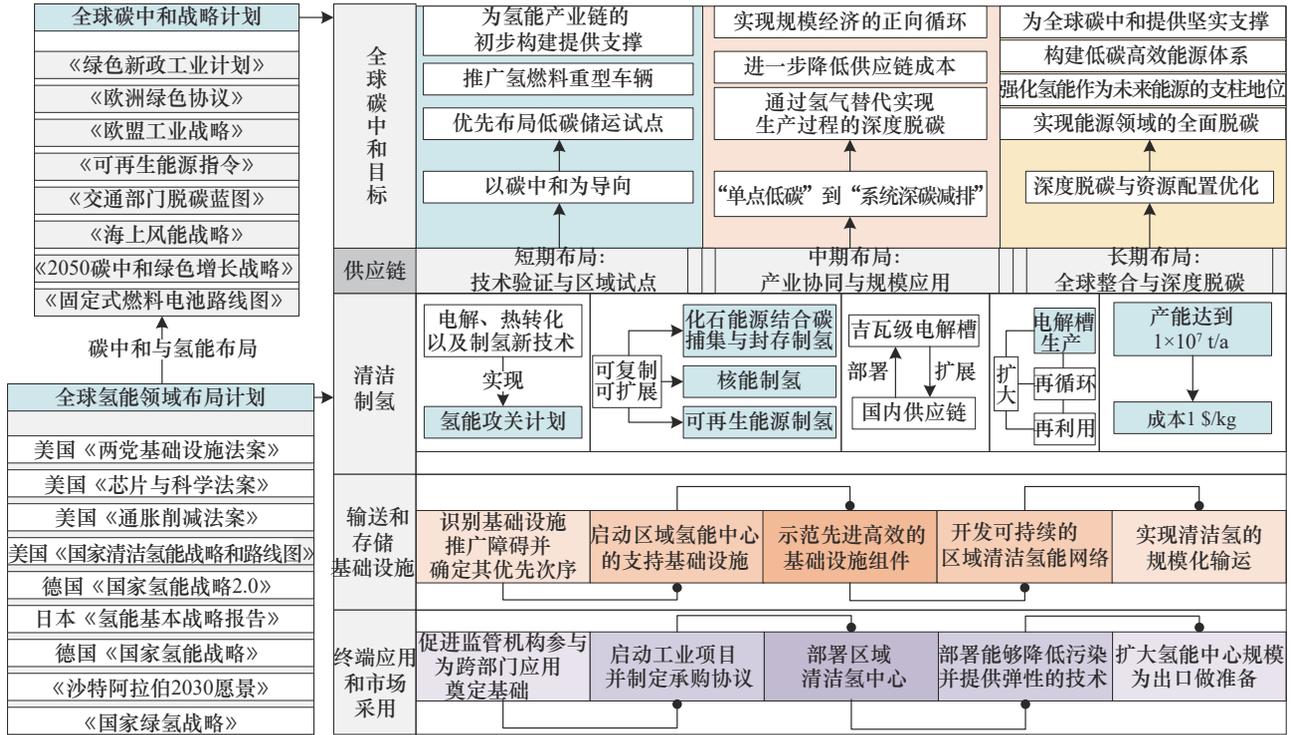


图1 国际碳中和目标与氢能布局

提升氢气生产体系的灵活性和适应性^[17]。通过精准控制反应过程和高效分离副产物，不仅优化氢气收率，同时也降低碳排放强度。整体来看，氢气生产供应链正向高效化、低碳化、智能化方向加速升级。

(二) 氢气储运的中游完善

氢气输送与储存环节构成氢能供应链的中枢，其供应链优化的关键在于提升储氢密度、降低运输成本及构建高效分销体系。在储存技术上，吸附剂的研究聚焦于材料性能的多样化与优化，有机金属框架材料（MOFs）、石墨烯衍生材料等的应用，不仅能提升吸附效率，还能加速解吸过程的动态响应能力^[18]。在输运网络方面，全球多个国家已启动氢气掺混天然气管网、纯氢管道等基础设施建设计划，以降低输氢成本，提高供应链效率^[19]。通过压缩、液化及液氢输送技术的集成应用，从气态储运到液态分销形成了完整的全链条网络^[20]。此外，地质储氢（如盐穴储氢）技术的发展，为大规模氢气储存提供了可行方案，助力氢能在电力系统中的长周期调节应用，为氢气的规模化应用奠定了坚实基础^[21]。

(三) 氢气使用的下游拓展

氢能终端应用供应链正向跨行业融合、规模化布局、系统化发展方向加速推进，涵盖交通、工业、建筑能源及电力储能四大领域^[22]。在交通领域，氢燃料电池汽车供应链已形成“制氢-储氢-运氢-加氢站-整车制造”的闭环体系，重点在于燃料电池核心部件（电堆、催化剂、膜电极）、高压储氢系统及加氢基础设施的优化，以提升经济性和产业化水平^[23]。在工业领域，氢气作为低碳还原剂，在绿氢炼钢、化工原料合成（绿色甲醇、绿色氨）、高温燃料替代（玻璃、陶瓷、水泥行业）等现有工业流程进行高效耦合^[24]。在建筑能源领域，氢能供应链的拓展主要体现在氢基微网、氢燃料电池供热发电、零碳建筑等新型能源系统的构建，通过分布式氢能供能模式，推动建筑部门的碳中和进程。在电力储能与调峰领域，氢能正成为长周期、大规模储能的核心技术路径，通过“电解水制氢-储氢-燃料电池回电”的方式，与可再生能源深度融合，提高电网灵活性和能源安全性^[25]。随着氢能终端应用供应链的不断完善，氢能产业将进一步向高附加值、多领域融合的方向发展，加速其在全球能源体系中的渗透。



图2 国际氢能布局与供应链的上、中、下游突破

三、国际氢能产业供应链布局

国际氢能产业供应链已形成多极化发展格局，呈现出“政府引导、市场主导、技术驱动”的典型特征。美国依托《通胀削减法案》构建覆盖制氢—储运—应用的完整税收激励体系；欧盟通过“碳边境调节机制”推动绿氢标准国际化，并联合挪威、北非打造跨国氢能走廊；日韩企业联盟则聚焦液氢储运技术商业化，构建亚太氢能贸易网络。跨国能源巨头（如英国石油公司、法国道达尔能源公司）正通过垂直整合模式，在可再生能源富集区建设绿

氢项目，而技术领军企业（如普拉格能源公司、西门子能源公司）则致力于电解槽与燃料电池的全球化产能部署。

（一）上游：氢气制取

作为氢能产业链的源头环节，制氢技术的选择与创新直接决定全链条的经济性与可持续性。当前全球制氢技术体系呈现“传统工艺优化”与“新兴路线突破”双轨并进格局。在主流工业化生产路径中，天然气重整仍占据主导地位，2023年全球约48%的氢气产出来自该工艺，其技术演进聚焦于与

可再生能源的耦合创新，德国林德集团作为该领域的技术先锋，在重整反应器和催化剂的研发方面处于领先地位，并在优化整体生产流程、提高氢气产率和降低碳排放等方面做出了显著贡献^[26]；煤气化制氢则以约18%的全球占比位居第二，其技术突破集中在碳捕集、利用与封存技术领域^[27]。在低碳制氢技术领域，电解水制氢呈现多元化发展态势：碱性电解、质子交换膜电解、固体氧化物电解正与可再生能源形成深度关联，为绿氢规模化生产提供关键技术支撑。新兴制氢技术路线展现出一定的创新潜力，光催化制氢、生物质气化制氢、核能制氢、含有还原铂族金属的新型催化剂和电催化剂等技术也进入工程验证阶段。在制氢装备的制造领域，以天然气重整为例，丹麦托普索公司在重整反应器、镍基催化剂及换热器等核心设备的制造上具有显著的技术优势。

（二）中游：氢气储运

氢能中游储运体系是连接制氢端与应用端的纽带，其技术突破直接决定了氢能的产业化进程。由于氢气具有密度低、易扩散、储运能耗高等物理特性，构建安全高效的全场景储运解决方案成为行业的攻关重点。

在高压气体储运方面，技术突破点主要集中在轻质高强度气瓶设计和气瓶安全技术^[28]方面，美国空气化工产品公司是这一领域的主要制造商。低温液态储运方面的低温储存与泵技术、液氢运输技术等也占据重要位置。新型储氢材料的技术布局主要涵盖金属氢化物（如镁基、钠基氢化物）、化学氢化物（如氨基硼烷）和碳基材料（如碳纳米管、石墨烯）^[29]。在氢气的加氢设备和分布式加氢系统方面，部分企业不仅推动加氢站建设，还积极促进氢燃料电池汽车的应用，推动氢能交通领域的实际应用。分布式加氢系统结合风能、太阳能等可再生能源，推动氢气的分布式生产与供应，提升能源的稳定性和自给率^[30,31]。美国普拉格能源公司、金德摩根公司和特斯拉公司在该领域的合作将进一步整合在氢能技术方面的优势。此外，美国鼓励在氢利用量达到一定规模的地区建设输送管道。

（三）下游：氢气使用

氢气在能源、电力、化工、冶金、交通等工业

领域中作为重要用能或动力来源发挥作用。在发电领域，美国、日本等开始示范天然气30%掺氢发电项目；在石油精炼过程中，氢气主要用于脱硫和深度加工，通过提高石油产品的质量，满足日益严格的环保标准。2023年，美国石油精炼行业对氢气的需求占比已达到约30%^[32]，显示出氢气在提升传统石油化工工艺中不可或缺的地位。氢气在钢铁行业中的应用也逐渐受到高度重视，与传统的碳基冶炼工艺相比，氢气还原工艺能够显著减少生产过程中的碳排放。在此背景下，美国钢铁协会预测，氢气将在2030年前成为钢铁行业实现50%碳减排目标的关键因素^[33]。交通领域的电池材料开发已逐步将氢气纳入能源转化的核心环节。碱性燃料电池利用氢氧化学反应产生电能，用于特定的高效能量转换需求场景。相比之下，质子交换膜燃料电池因其启动速度快、比功率高而在多种交通工具中得到应用。固体氧化物燃料电池通过高温（600~1000℃）下的高效能量转换，适用于需要稳定、高效电力输出的工业和高端应用。熔融碳酸盐燃料电池在650℃左右的操作温度下更能满足大型能源系统的需求。分布式发电与储能系统为氢气应用提供新的发展空间。天然气热电联产系统、太阳能热电联产系统、生物质热电联产系统等多元化技术路径，进一步优化了能源的转化与分配。

四、我国氢能产业供应链发展现状及优化路径

（一）我国氢能产业供应链的发展现状

从供应链视角来看，我国氢能产业链涵盖制氢、储运和应用等关键环节，并通过产业链各环节的协同作用，推动氢能的规模化应用。我国氢能供应链基本情况如表1所示^[34]。

1. 制氢环节：多元化路径推进，清洁化转型加速

在我国上游制氢环节，化石能源制氢仍占主导地位，煤制氢和天然气制氢，合计占比接近80%。随着“双碳”目标的推动，电解水制氢已进入快速发展阶段，碱性电解槽的产能已超过8GW，成本逐步下降。然而，绿氢占比仍不足1%，蓝氢的示范项目碳捕集率虽已超90%，但成本高于传统灰氢的30%~50%，规模化应用尚未全面展开。电解水

表1 国内氢能产业供应链基本情况

供应链环节	领域	主要企业 / 技术
上游制氢	制氢方法	煤制氢（占比最大64%），工业副产制氢（21%），电解水制氢，风电、水电、光伏发电制氢
	主要企业	中船（邯郸）派瑞氢能科技有限公司、无锡隆基氢能科技有限公司、山东赛克赛斯氢能有限公司、河南青骊骥环保科技有限公司、苏州青骊骥科技（集团）有限公司、宁夏宝丰能源集团股份有限公司、北京首钢气体有限公司、中国华能集团有限公司、中节能风力发电股份有限公司等
	制氢设备企业	林德集团（Linde）、中国船舶重工集团公司第七一八研究所、天津市大陆制氢设备有限公司、北京氢璞创能科技有限公司、苏州竞立制氢设备有限公司等
中游储运	储氢技术	高压气体储氢、低温液体储氢（航天领域）、化学吸附储氢 固态储氢技术（目前处于实验室阶段）
	运输技术	天然气+氢技术路线：当前技术能在天然气中加入20%的氢气
下游应用	加氢站	加氢站建设：上海舜华新能源系统有限公司、上海氢枫能源技术有限公司、中国神华能源股份有限公司、中国石油化工集团有限公司、安徽明天氢能科技股份有限公司、江苏富瑞特种装备股份有限公司等 加氢设备：北京海德利森科技有限公司、福建雪人股份有限公司、厚普清洁能源（集团）股份有限公司、上海汉钟精机股份有限公司等
	储氢罐（瓶）生产	本田技研工业株式会社、中集安瑞科控股有限公司、中材科技股份有限公司、北京京城机电股份有限公司等
	压缩机生产	北京天高隔膜压缩机有限公司等
	燃料电池应用及配件及应用	燃料电池系统：北京碧空氢能科技股份有限公司、北京亿华通科技股份有限公司、福建雪人股份有限公司、上海重塑能源科技有限公司、广东国鸿氢能科技有限公司、北京氢璞创能科技有限公司、武汉众宇动力系统科技有限公司等 质子交换膜：深圳市雄韬电源科技股份有限公司、上海同济科技实业股份有限公司、东岳集团有限公司、武汉理工新能源有限公司等
	催化剂行业	贵研铂业股份有限公司、宇辰新能源材料科技无锡有限公司、苏州擎动动力科技有限公司、内蒙古包钢稀土（集团）高科技股份有限公司等
电堆行业	中山大洋电机股份有限公司、上海神力科技有限公司、北京氢璞创能科技有限公司、弗尔赛能源科技股份有限公司、潮州三环（集团）股份有限公司等	
双极板行业	上海神力科技有限公司、内蒙古鑫能矿业有限公司、淄博联强炭素材料有限公司、江阴沪江消防设备厂有限公司、上海喜丽碳素有限公司、上海弘枫石墨制品有限公司等	
膜电极行业	浙江世纪富源科技有限公司、武汉理工氢电科技有限公司、新源动力股份有限公司、上海河森电气有限公司、苏州擎动动力科技有限公司等	

制氢和风光制氢项目在我国的推进已呈现出积极态势。在西北地区，风光制氢的单项年制氢量已达到20 000 t；质子交换膜电解槽国产化率突破60%，但成本仍较高，制氢成本和技术上的进一步突破尚需时间。

2. 储运环节：技术路线分层推进，基础设施逐步完善

在氢能中游储运环节，我国氢气储运技术正在分层推进。目前，高压气态储运是最为常见的技术

路线，其中20 MPa管束车的单车载氢量达到400 kg，IV型瓶的国产化率突破50%。此外，液态储运在民用领域已有一定进展，海南文昌的液氢工厂单线日产能达10 t，运输成本较气态储运降低40%。在固态储运方面，镁基和稀土储氢材料正在加快研发。在氢气管道输送方面，现有掺氢天然气试点的氢气比例为10%~20%。虽然氢气管道的建设有所推进，但要实现大规模的氢气长输管网和区域协同配送，仍需进一步完善和扩大基础设施建设。

3. 应用环节：多领域渗透提速，局部场景商业化落地

在下游应用环节，我国氢能的应用领域正逐步扩展。截至2023年，我国燃料电池汽车的保有量约为 1.5×10^4 辆，重卡占比超过60%。目前燃料电池系统的额定功率已提升至200 kW，成本也在不断降低。在加氢网络方面，我国已经建设了超过350座加氢站，其中长江三角洲和珠江三角洲地区的布局最为密集，中西部地区的覆盖率不足10%。此外，湛江钢铁有限公司的氢基竖炉项目也已具体实施，玻璃生产中的氢能替代试点碳排放已降低20%，但氢冶金、玻璃生产等新兴应用尚未规模化。在能源与储能领域，宁夏、河北等地已启动了百兆瓦级的“风光制氢-储氢-燃料电池发电”一体化项目，储能时长已突破3天，度电成本约为1.2~1.5元，盈利模式需进一步探索创新。在氢电耦合方面，当掺氢比例为20%左右时，“绿电-绿氢-燃机发电”效率约为42%，需要进一步突破燃烧稳定性、改造成本等方面的挑战。

(二) 氢能产业布局优化路径

氢能产业布局优化是实现能源转型和可持续发

展的关键策略，其核心在于结合技术路径、资源禀赋与市场需求，构建具有竞争力和可持续性的全产业链体系。在上游生产环节，技术路线的选择直接关系到能源利用效率、碳排放强度及整体产业链的协同效益，成为产业布局优化的重要出发点。在中游环节，氢气储运体系的完善是连接上游制氢与下游应用的关键纽带，其技术创新与基础设施建设直接影响氢能供应链的可靠性和经济性。在下游应用方面，氢能的商业化拓展和生态体系构建是实现其经济价值的最终目标。氢能产业布局优化路径如图3所示。

1. 上游生产的技术协调优化

上游生产的技术协调优化是推动氢能产业升级与布局调整的关键环节。现阶段以可再生能源为基础的电解水制氢技术在绿色氢能发展中扮演着核心角色。通过布局风能、太阳能等新能源基地，并构建“源网荷储”协同体系，电解水制氢不仅能够实现可再生能源的高效利用，还能有效缓解区域内清洁能源的消纳难题，助力能源系统的整体优化^[35]。随着技术的不断革新和生产规模的扩大，电解水制氢成本逐步下降；在“绿氢”发展目标的驱动下，相关技术与产业链加速整合，为氢能上游产业的可

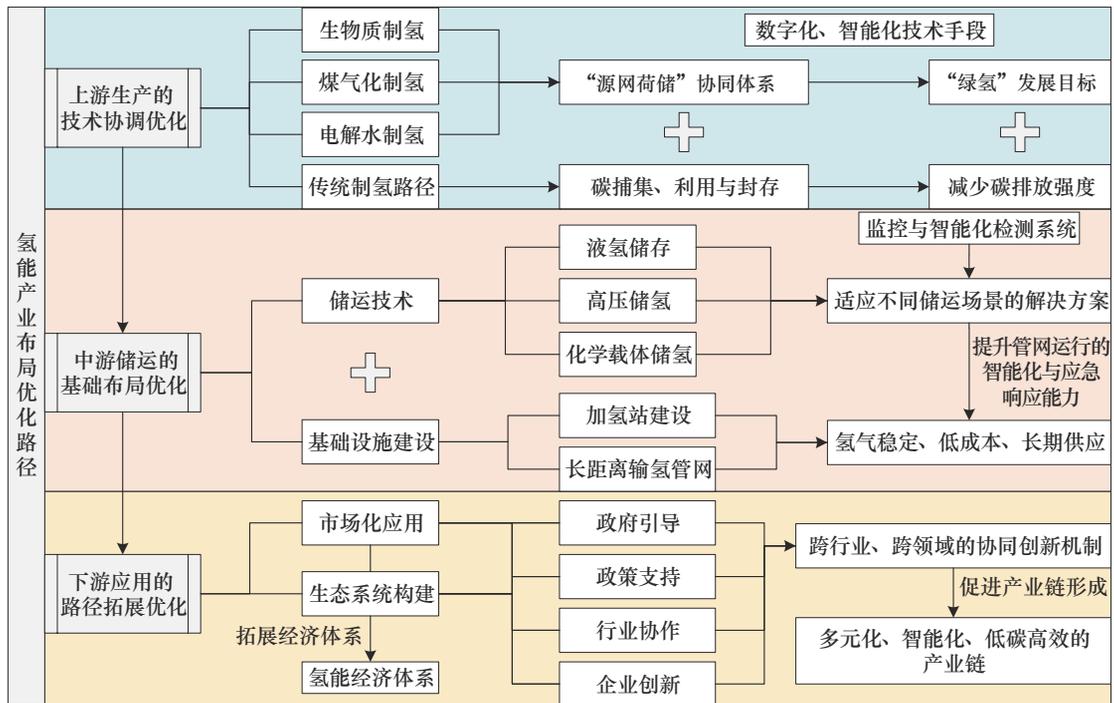


图3 氢能产业布局优化路径

持续发展提供了有力支撑。

相比之下,传统制氢路径如煤气化制氢和天然气重整制氢,凭借其成熟的工艺和较低的生产成本,仍占据重要市场份额。通过引入碳捕集、利用与封存技术,可显著减少碳排放强度,为传统制氢工艺向低碳化和可持续化转型提供了现实路径^[36]。通过优化高温反应工艺、提升热能利用效率以及改进尾气处理流程,传统制氢技术在提升能源效率和环保性能方面仍具有一定潜力。

在技术路径多样化的背景下,未来上游制氢技术的优化将更注重综合性和系统性。一方面通过整合电解水制氢、煤气化制氢与生物质制氢等多种技术路径,形成更具适应性的区域能源供应体系;另一方面结合数字化、智能化技术手段进行全过程优化,进一步提升制氢效率,为氢能产业的高质量发展提供强劲动能。

2. 中游储运的基础布局优化

在氢能产业的优化布局中,中游储运体系的建设是产业链中的衔接纽带。为实现产业的高效协同与可持续发展,必须对储运技术、基础设施建设进行深度优化,以确保氢能从生产端到应用端的流动具有高效性、经济性与长期可行性。优化储氢体系的首要任务是通过技术迭代与融合,推动高压储氢与液氢储存技术的协同应用,形成适应不同运输与储存场景的综合解决方案^[37]。此外,在提高储氢效率与降低氢气释放成本方面,化学载体储氢的技术创新也需要进一步加强。

储运基础设施的建设是推动氢能产业化的重要基础。氢能的供应链稳定性与经济性离不开加氢站网络与长距离输氢管网的科学布局^[38]。在加氢站建设方面,突破传统布局模式,以需求为导向,基于大数据与智能化管理,实施区域协同优化,确保覆盖范围广泛且高效的供氢服务。长距离输氢管网的规划应结合国家能源战略,采用分步推进与技术升级并行的策略,通过建设模块化的输氢管网系统,实现跨区域、跨行业的氢能输送能力提升。输氢管网应结合先进的监控与智能化检测系统,提升管网运行的智能化与应急响应能力,确保氢气的稳定、低成本、长期供应。

3. 下游应用的路径拓展优化

氢能的下游市场化应用与生态系统的构建决定了氢能经济体系在未来能源转型中的重要地位。氢

能在重型运输、长途物流及公共交通领域的应用展现出极大减碳潜力,氢燃料电池技术不仅能提供较长的续航里程,还能显著降低碳排放。通过政策引导如财政补贴、税收减免和绿色认证体系,来有效促进氢能市场的培育,调动市场主体的积极性,促使技术向规模化、低成本方向演进^[39]。

在工业领域,如钢铁冶炼、化学工业等高碳排放产业中,氢能可有效替代传统化石能源,降低碳排放强度,实现工业生产的绿色转型^[40]。优化路径的关键在于推动氢能与工业生产过程的深度融合,不仅要加强氢气生产技术的突破,还要通过与现有能源体系的协同互动,探索适合不同工业部门的低碳方案。在此过程中,企业间通过共享技术、共建基础设施,形成产业合力,以降低成本、提高效率。随着可再生能源的逐步替代,氢能的分布式发电与储能技术将进一步优化能源供给结构,提升能源系统的灵活性与可靠性。

在下游市场化应用的全过程中,通过政府引导、政策支持、行业协作与企业创新,形成跨行业、跨领域的协同创新机制,才能真正推动氢能技术在更多应用场景中的深度融合,进而从氢气的生产、储运到最终消费,构建一条多元化、智能化、低碳高效的产业链^[41]。

五、优化我国氢能产业供应链布局的对策建议

(一) 构建氢能供应链“制-储-运”长江氢能走廊基础设施体系,支撑氢能产业规模化发展

长江中下游的广袤平原不仅是我国水资源最为丰富的地区之一,也是推动氢能产业发展的天然优势区。得天独厚的水源条件为电解水制氢技术的应用提供了坚实基础,显著降低了制氢过程中的能源消耗。同时,长江流域稳定的地质结构与广阔的平原地貌,成为氢能储存与运输设施建设的理想平台。利用这一独特的地理资源,长江氢能走廊有望实现地下大规模储氢技术的突破,有效解决现阶段氢气储存中的技术瓶颈,灵活应对氢气供应的季节性波动和周期性变化,确保氢气在长距离运输过程中的安全与稳定。

作为区域氢能产业链的核心枢纽,长江氢能走廊具备辐射周边九省、覆盖更广区域的战略能力。中部地区不仅拥有丰富的可再生能源资源,还具备

完备的交通与能源基础设施，为氢能生产、储存与运输提供全方位支持。通过深度整合区域内的风能、太阳能、水能等可再生能源资源，长江氢能走廊将构建起涵盖氢能生产、储存与运输的完整供应链体系，将有助于提高氢能产业的规模化发展水平，并提高供应链的稳定性，进而推动氢能技术的商业化应用与产业化进程。

长江氢能走廊的全面建设将成为我国氢能产业技术创新与产业化转型的重要推动力。通过加速基础设施建设、深化技术创新与产业协同，长江氢能走廊将为我国实现碳中和目标、推进绿色低碳经济转型提供坚实的支撑。

（二）支撑国家氢能产业发展管理，建设“制、运、输、配”国家氢能枢纽中心

从战略高度统筹部署氢能产业发展，将其纳入国家能源安全与绿色低碳发展战略的核心框架。建设“制、运、输、配”国家氢能枢纽中心，实现绿色低碳转型的战略部署，提升能源战略自主性并保障能源安全。作为氢能产业链的核心枢纽，氢能中心将集成“制、运、输、配”各环节的先进技术与资源，构建高效、协同、创新的全产业链生态系统。通过有机融合氢能制备、储运与配送等关键环节，氢能中心将打破现有的技术壁垒，推动氢能的规模化应用与产业化发展，促进从实验室成果到市场应用的快速转化。依托国家级枢纽的资源集聚效应，为氢能产业的全国推广提供强有力的技术支持，并在政策保障下促进跨区域的合作与发展，形成协同效应。

此外，应根据氢能产业全生命周期的需求，统筹推进“制、运、输、配”四大环节的协同发展。在氢气制备方面，要突破传统化石能源依赖的瓶颈，强化可再生能源驱动的氢能生产技术的研发与应用。在氢气运输与配送环节，应加速建设长距离氢气运输网络，依托国家能源基础设施，确保氢能高效、低成本输送至各个用能终端，推动氢能产业的持续健康发展。

（三）优化国家氢能供应链体系，提升国际能源与资源配置效率

全球化的氢能供应链是推动氢能产业规模化发展的核心支撑体系。我国应凭借制造能力和技术优

势，主动参与全球氢能生产与流通网络的规划与建设。在氢能制备端，可与中东、非洲和南美等可再生能源资源丰富地区合作，建立大规模可再生制氢生产基地，实现我国氢能的规模化供给。在储运端，推动液氢、氨基载体等先进储运技术的标准化与规模化应用，保障氢能长距离运输的安全与经济性。在供应链管理方面，引入科技创新型数字化工具（如区块链、人工智能）实现生产、运输、存储全流程的数据可视化与精准调度，提高全球能源资源配置效率。此外，我国应在全球氢能产业链中发挥技术主导和规则制定作用，尤其在绿色认证、跨境贸易便利化等领域，推动形成全球化的绿色氢能治理体系。

（四）优化氢能产业创新生态系统，促进技术转移转化

氢能产业的可持续发展不仅依赖技术创新突破，更需在创新生态中实现技术的高效转移转化。应当强化研发机构、企业与政府之间的深度协同，围绕氢能技术链的关键环节（如高性能电解槽、催化剂材料、燃料电池膜电极组件等），推动创新链条的全面融合与加速推进。缩短技术验证与市场应用之间的时间差，确保技术创新能够迅速且精准地响应产业需求。同时，应通过打造开放式产业协同创新平台，整合政府、科研机构、企业及资本等多方资源，促进跨行业、跨领域的深度合作与知识共享，提升技术转化效率。加快产业链的完善优化，形成技术研发、产品开发与市场推广之间的紧密联动。

（五）加强绿色氢能生产科技创新，促进提质降本增效

科技创新是推动我国绿色氢能产业高质量发展的关键动力，也是突破关键技术瓶颈、降低成本、提升效率的主要途径。应加快构建以企业为主体、“产学研”深度融合的氢能技术创新体系，设立专项研发基金，集中攻关高效电解槽、先进催化材料、智能化制氢装备、新型电解工艺等核心技术，推动从实验室验证到产业化应用的技术转化与迭代。依托我国丰富的可再生能源资源，促进风电、光伏等绿色电力与氢能制备环节的深度耦合，构建“分布式可再生能源—绿氢生产—能源储备”一体

化创新模式,提升氢能制备的稳定性与可持续性。国家应出台差异化政策支持体系,通过绿色电力补贴、技术示范试点、国际合作等多元手段,引导资本与产业界加速布局绿色氢能生产,推动核心技术自主可控,夯实我国在全球氢能产业链中的竞争优势与战略主导权。

(六) 深度参与全球氢能产业创新活动,促进跨国协同与技术集成

在全球能源低碳转型的时代背景下,我国应积极主导全球氢能技术创新合作,推动构建涵盖氢能生产、储运及高效利用的跨行业、跨领域协同创新体系。为此,应深度参与全球氢能技术创新联盟,广泛吸纳国际顶尖能源企业、科研机构及标准制定组织,围绕氢能制备(如电解水制氢、热化学制氢)、高密度储运(如液氢储运、MoFs 吸附储氢)、燃料电池系统集成等关键领域,推动核心技术的深度集成与协同攻关。通过加强共性技术开发、标准对接与知识产权共享,构建贯穿技术研发、试验验证到成果转化的创新闭环,进一步提升我国在全球氢能技术标准制定与产业规范方面的影响力和话语权。同时,应依托联合研发基金,深化重大国际合作项目布局,以开放式创新模式激发全球氢能技术的突破与应用落地,全面推动氢能产业的可持续发展。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: December 30, 2024; **Revised date:** February 24, 2025

Corresponding author: Yang Chunhe is a research fellow from Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, and a member of Chinese Academy of Engineering. His research field is energy storage engineering and application. E-mail: chyang@whrsm.ac.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Research on the Technological Challenges and Coordinated Development of the Hydrogen Energy Industry Chain in Wuhan” (HB2024B10)

参考文献

- [1] Pal A, Kakran S, Kumar A, et al. Powering squarely into the future: A strategic analysis of hydrogen energy in QUAD nations [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 49: 16–41.
- [2] Madadi Avargani V, Zendejboudi S, Cata Saady N M, et al. A comprehensive review on hydrogen production and utilization in North America: Prospects and challenges [J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 269: 115927.
- [3] Tian Z, Lv H, Zhou W, et al. Review on equipment configuration and operation process optimization of hydrogen refueling station [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(5): 3033–3053.
- [4] Hassan Q, Abdulateef A M, Hafedh S A, et al. Renewable energy-to-green hydrogen: A review of main resources routes, processes and evaluation [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(46): 17383–17408.
- [5] Böhm M, Fernández Del Rey A, Pagenkopf J, et al. Review and comparison of worldwide hydrogen activities in the rail sector with special focus on on-board storage and refueling technologies [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(89): 38003–38017.
- [6] Huang Y, Zhou Y, Zhong R H, et al. Hydrogen energy development in China: Potential assessment and policy implications [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 49: 659–669.
- [7] Li Y F, Shi X P, Phoumin H. A strategic roadmap for large-scale green hydrogen demonstration and commercialisation in China: A review and survey analysis [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(58): 24592–24609.
- [8] Bayrakdar Ates E, Calik E. Public awareness of hydrogen energy: A comprehensive evaluation based on statistical approach [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(24): 8756–8767.
- [9] Al-Qahtani A, Parkinson B, Hellgardt K, et al. Uncovering the true cost of hydrogen production routes using life cycle monetisation [J]. *Applied Energy*, 2021, 281: 115958.
- [10] Ma N, Zhao W H, Wang W Z, et al. Large scale of green hydrogen storage: Opportunities and challenges [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 50: 379–396.
- [11] 熊华文, 符冠云. 全球氢能发展的四种典型模式及对我国的启示 [J]. *环境保护*, 2021, 49(1): 52–55.
Xiong H W, Fu G Y. Four typical models of global hydrogen energy industries development and their references for China [J]. *Environmental Protection*, 2021, 49(1): 52–55.
- [12] 张真, 刘倩, 史英哲, 等. 全球绿氢产业财政金融激励政策与启示 [J]. *环境保护*, 2022, 50(14): 66–70.
Zhang Z, Liu Q, Shi Y Z, et al. Progress and insights of global fiscal and financial incentives for green hydrogen industry [J]. *Environmental Protection*, 2022, 50(14): 66–70.
- [13] 孙玉玲, 胡智慧, 秦阿宁, 等. 全球氢能产业发展战略与技术布局分析 [J]. *世界科技研究与发展*, 2020, 42(4): 455–465.
Sun Y L, Hu Z H, Qin A N, et al. Analysis of strategy and technology situation on global hydrogen industry [J]. *World Sci-Tech R & D*, 2020, 42(4): 455–465.
- [14] Jaramillo D E, Jaffe A, Snyder B E R, et al. Metal-organic frameworks as O₂-selective adsorbents for air separations [J]. *Chemical Science*, 2022, 13(35): 10216–10237.
- [15] Niaz S, Manzoor T, Pandith A H. Hydrogen storage: Materials, methods and perspectives [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 50: 457–469.
- [16] Tsiklios C, Hermesmann M, Müller T E. Hydrogen transport in large-scale transmission pipeline networks: Thermodynamic and environmental assessment of repurposed and new pipeline configurations [J]. *Applied Energy*, 2022, 327: 120097.

- [17] Li H, Cao X W, Liu Y, et al. Safety of hydrogen storage and transportation: An overview on mechanisms, techniques, and challenges [J]. *Energy Reports*, 2022, 8: 6258–6269.
- [18] Abdalla A M, Hossain S, Nisfindy O B, et al. Hydrogen production, storage, transportation and key challenges with applications: A review [J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 165: 602–627.
- [19] Colbertaldo P, Agustin S B, Campanari S, et al. Impact of hydrogen energy storage on California electric power system: Towards 100% renewable electricity [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(19): 9558–9576.
- [20] Aminudin M A, Kamarudin S K, Lim B H, et al. An overview: Current progress on hydrogen fuel cell vehicles [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(11): 4371–4388.
- [21] 李彦斐, 于宏源. 构建中国新能源战略通道安全——基于大国竞合视角 [J]. *国际关系研究*, 2023 (6): 60–80, 154–155.
Li Y F, Yu H Y. Building international strategic corridors of renewable electricity and hydrogen energy for security—In the perspective of great power competition [J]. *Journal of International Relations*, 2023 (6): 60–80, 154–155.
- [22] Evro S, Oni B A, Tomomewo O S. Carbon neutrality and hydrogen energy systems [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 78: 1449–1467.
- [23] Boretti A, Banik B K. Advances in hydrogen production from natural gas reforming [J]. *Advanced Energy and Sustainability Research*, 2021, 2(11): 2100097.
- [24] Midilli A, Kucuk H, Topal M E, et al. A comprehensive review on hydrogen production from coal gasification: Challenges and opportunities [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(50): 25385–25412.
- [25] Zheng J Y, Liu X X, Xu P, et al. Development of high pressure gaseous hydrogen storage technologies [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(1): 1048–1057.
- [26] Mehboob M Y, Hussain R, Younas F, et al. Computation assisted design and prediction of alkali-metal-centered B12N12 nanoclusters for efficient H₂ adsorption: New hydrogen storage materials [J]. *Journal of Cluster Science*, 2023, 34(3): 1237–1247.
- [27] Zhang Z G, Shang M H. Research on hydrogen leakage and diffusion mechanism in hydrogenation station [J]. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): 3363.
- [28] Amini A, Sedaghat M H, Jamshidi S, et al. A comprehensive CFD simulation of an industrial-scale side-fired steam methane reformer to enhance hydrogen production [J]. *Chemical Engineering and Processing—Process Intensification*, 2023, 184: 109269.
- [29] Vezzoni R. How “clean” is the hydrogen economy? Tracing the connections between hydrogen and fossil fuels [J]. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 2024, 50: 100817.
- [30] Lehne J, Yu S, Blahut N, et al. 1.5 °C steel: Decarbonizing the steel sector in Paris compatible pathways [EB/OL]. (2021-10-26)[2024-12-15]. <https://www.e3g.org/publications/1-5c-steel-decarbonising-the-steel-sector-in-paris-compatible-pathways/>.
- [31] 黄冬玲, 刘源, 袁小帅, 等. 基于自然语言处理技术的中国氢能政策数据挖掘研究 [J]. *中国科学院院刊*, 2024, 39(6): 1032–1046.
- Huang D L, Liu Y, Yuan X S, et al. Study on data mining of hydrogen energy policy in China based on natural language processing technology [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2024, 39(6): 1032–1046.
- [32] 李慧敏, 涂淑平. 中国氢燃料电池技术发展现状、挑战及对策 [J]. *现代化工*, 2023, 43(11): 5–9.
Li H M, Tu S P. Challenges and countermeasures of key technologies for hydrogen fuel cells in China [J]. *Modern Chemical Industry*, 2023, 43(11): 5–9.
- [33] 邵远敬, 徐蕾, 刘校平, 等. 中国钢铁生产“碳中和”解决方案探讨 [J]. *中国冶金*, 2022, 32(4): 1–8.
Shao Y J, Xu L, Liu X P, et al. Discussion on solution of “carbon neutrality” in China’s steel production [J]. *China Metallurgy*, 2022, 32(4): 1–8.
- [34] 魏凤, 任小波, 高林, 等. 碳中和目标下美国氢能战略转型及特征分析 [J]. *中国科学院院刊*, 2021, 36(9): 1049–1057.
Wei F, Ren X B, Gao L, et al. Analysis on transformation and characteristics of American hydrogen energy strategy under carbon neutralization goal [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2021, 36(9): 1049–1057.
- [35] Dawood F, Anda M, Shafiullah G M. Hydrogen production for energy: An overview [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(7): 3847–3869.
- [36] 李灿. 绿色氢能在“双碳”战略中的作用 [J]. *科技导报*, 2024, 42(15): 1–2.
Li C. The role of green hydrogen energy in dual carbon strategy [J]. *Science & Technology Review*, 2024, 42(15): 1–2.
- [37] Miao B, Giordano L, Chan S H. Long-distance renewable hydrogen transmission *via* cables and pipelines [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(36): 18699–18718.
- [38] 孟翔宇, 顾阿伦, 曾静, 等. 中国氢能交通产业的现状、挑战与展望 [J]. *科技导报*, 2024, 42(3): 6–26.
Meng X Y, Gu A L, Zeng J, et al. Status quo, challenges, and prospects of China’s hydrogen transportation industry [J]. *Science & Technology Review*, 2024, 42(3): 6–26.
- [39] Gordon J A, Balta-Ozkan N, Ali Nabavi S. Gauging public perceptions of blue and green hydrogen futures: Is the twin-track approach compatible with hydrogen acceptance? [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 49: 75–104.
- [40] 王明华. 国内氢能应用场景分析及发展前景预测 [J]. *石油炼制与化工*, 2023, 54(9): 18–23.
Wang M H. Application scenarios analysis and development prospect prediction of domestic hydrogen energy [J]. *Petroleum Processing and Petrochemicals*, 2023, 54(9): 18–23.
- [41] 倪耀琪, 朱恒恺. “双碳”目标下氢能发展机遇、难点与路径选择 [J]. *现代化工*, 2024, 44(2): 1–8.
Ni Y Q, Zhu H K. Opportunities, difficulty and path choice for hydrogen energy development under “carbon dioxide emission peaking and carbon neutrality” goal [J]. *Modern Chemical Industry*, 2024, 44(2): 1–8.