

世界主要经济体氢能发展战略 剖析与启示*

王超** 孙福全 许晔 丁明磊 黄宁

(中国科学技术发展战略研究院前沿科学与先进技术发展研究所,北京 100038)

摘要:氢能产业独特的行业耦合属性使其成为全球碳中和进程中能源转型的重要基石,是工业、交通运输业等高碳排、难脱碳行业减排的重要技术路径。在应对全球气候变化背景下,世界主要经济体纷纷发布氢能产业中长期发展战略。本文聚焦美国、欧盟、德国、日本和韩国新近发布的氢能产业中长期发展战略,开展对比剖析,相关结论包括:提高制氢产能是氢能战略发展的主线,但各国制氢路径存在差异;氢能产业发展路径具有明确的阶段性特征,各国发展方向各有侧重;科技创新覆盖氢能全产业链;跨领域合作推动氢能战略实施;全球氢能产业国际贸易合作加速发展。在此基础上,结合我国氢能产业发展现状,为我国氢能产业发展提出了五点建议:深化推进我国氢能科技战略实施;系统部署氢能全产业链科技攻关及推广应用;持续拓宽氢能产业发展视野;系统推进以氢能为基础的能源系统整合战略;密切关注氢能国际金融贸易进展。

关键词:氢能;发展战略;科技政策;碳中和

DOI:10.16507/j.issn.1006-6055.2022.04.005

Analysis and Enlightenment of Hydrogen Development Strategy of World's Major Economies*

WANG Chao** SUN Fuquan XU Ye DING Minglei HUANG Ning

(Institute of Frontier Science and Emerging Technology, Chinese Academy of Science and
Technology for Development, Beijing 100038, China)

Abstract: The hydrogen industry has unique industry coupling attributes, making it an important cornerstone of energy transformation in the process of global carbon neutrality, and an important technical path for reducing emissions in industries with high carbon emissions and difficult to decarbonize such as industry and transportation. In the context of addressing global climate change, the world's major economies have released mid- and long-term development strategies for the hydrogen industry. This paper focuses on the comparative analysis of the mid- and long-term development strategies of the hydrogen industry recently released by the United States, the European Union, Germany, Japan and South Korea. The relevant conclusions include: improving hydrogen production capacity has become the main line of hydrogen development in various countries, but there are differences in hydrogen production paths; the development path of hydrogen industry in various countries has clear stage characteristics, and each country has its own development direction; technological innovation covers the entire hydrogen industry chain; cross-field cooperation promotes the implementation of hydrogen strategy; hydrogen international trade cooperation accelerates development. On this basis, combined with the development

* 中国博士后科学基金“中国页岩气产业科技自立自强的创新驱动机制研究”(2021M693105)

** E-mail: wangc@casted.org.cn

status of China's hydrogen industry, five suggestions are put forward for the development of China's hydrogen industry: deepening the implementation of China's hydrogen technology strategy; systematically deploying technology research and promotion and application in the entire hydrogen industry chain; continuing to expand hydrogen industry development vision; systematically promoting the hydrogen system integration strategy; paying close attention to the progress of hydrogen international financial trade.

Keywords: Hydrogen; Development Strategy; Science and Technology Policy; Carbon Neutrality

在应对全球气候变化的国际背景下,全球能源系统加速向低碳化转型。氢能作为一种来源广泛、清洁无碳、灵活高效、应用场景丰富的二次能源,是推动传统化石能源清洁高效利用和支撑可再生能源大规模发展的理想互联媒介,是实现交通运输、工业和建筑业等领域大规模深度脱碳的最佳选择。为此,氢能产业受到世界主要国家(地区)高度关注。

在全球碳中和及疫情之后经济低迷的关键节点,氢能产业已成为世界多个主要国家/地区应对全球气候变化和疫情后经济复苏的重要发展领域。截至 2020 年底,占全球 GDP 总量 52% 的 27 个国家中,16 个已制定全面的国家氢能战略,11 个国家正在制定国家氢能战略^[1]。其中,美国、

欧盟、德国、日本和韩国结合自身资源禀赋和产业现状,明确氢能产业在国家能源体系中的定位及在碳中和进程中的角色,制定系统化氢能产业政策,引导氢能产业健康发展。在此背景下,本文针对世界主要国家/地区氢能战略开展对比分析,为我国氢能产业发展提供借鉴。

1 全球氢能产业发展概况

1.1 氢能产业发展战略意义

氢气作为一种多用途能量载体和化学原料,可实现多类型能源(可再生能源、核能、化石能源)融合。氢能产业具有行业耦合属性(图 1),且来源广泛,已成为能源转型重要基石^[2]。其行业耦合属性主要体现在:1)氢作为一种应用广泛的

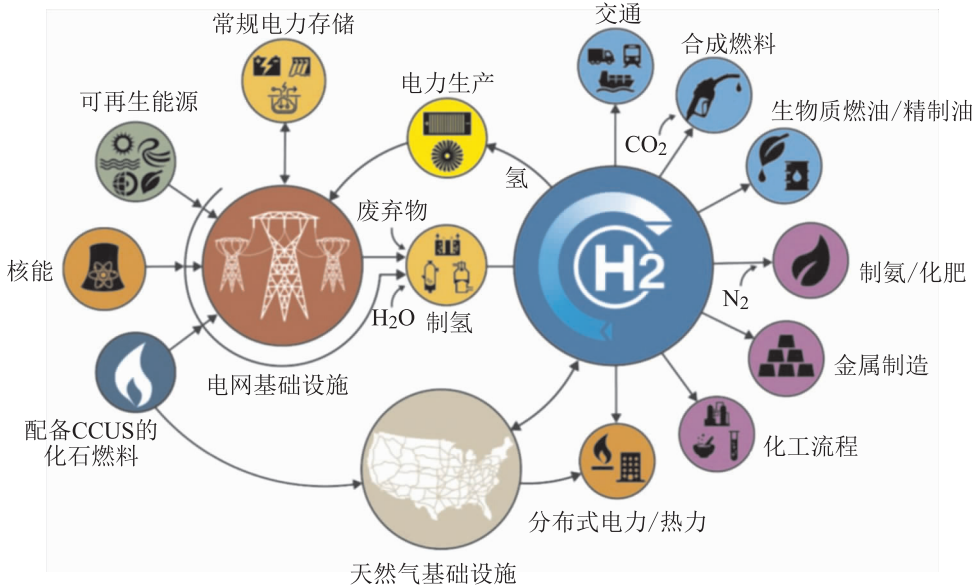


图 1 H₂@Scale 能源系统概念^[2]

Fig. 1 Conceptual H₂@Scale Energy System^[2]

能源形式,应用于燃料电池、合成动力燃料等领域,可为交通、工业提供直接能源动力;2)氢作为能量储存器,可根据供需关系灵活储存可再生能源,解决其时间、空间能源供需平衡问题;3)氢是工业生产和工业脱碳的重要基础原料,一方面用于产品制备,另一方面可同工业生产捕集的二氧化碳结合转化为化学产品。

从产业链角度而言,氢能产业发展将带动氢能产业链上、中、下游的零部件商、原材料商、设备商、制造商和服务商快速发展。氢能产业链涵盖上游氢生产与供应(化工重整、电解水制氢、工业副产等)、中游燃料电池(质子交换膜、铂基催化剂、膜电极等)及下游商业应用(交通运输、工业用能、建筑用能、工业原料)多个领域^[1]。仅下游商业应用,国际氢能委员会就提出了四大行业和 35 个场景^[3]。

鉴于氢能产业独特的行业耦合属性及全产业链特征,多个国家(地区)将氢能产业作为能源结构转型重要基石及经济复苏的重要支柱。在 2020 年,美国提出确保拥有丰富、安全、经济的氢能供应,以维持整个 21 世纪及以后的国家繁荣^[2];欧盟明确将建立以可再生氢能和可再生电力为核心的零碳排能源系统^[4];德国将氢能确立为碳中和能源转型的替代能源^[5]。此外,日本作为世界上第一个提出氢能发展战略的国家,于 2019 年再次发布《氢能和燃料电池技术发展战略》^[6];韩国计划 2040 年建成全球规模最大的氢燃料电池汽车市场^[7]。

1.2 发展现状

全球氢气需求量持续增长。国际能源署(International Energy Agency, IEA) 2019 年发布《氢的未来》,报告揭示:1975—2018 年,全球氢需求量已增长三倍以上(图 2)。

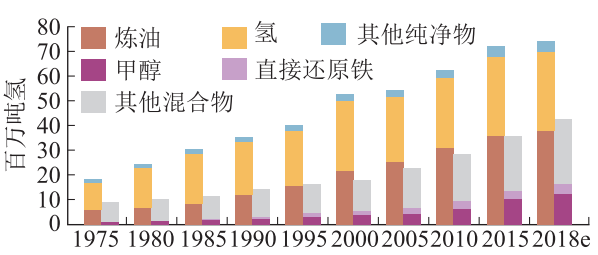


图 2 1975—2018 年全球氢需求量统计图^[8]

Fig. 2 Global Annual Demand for Hydrogen (1975-2018)^[8]

通过可再生能源制取的氢气即为绿氢,绿氢制备迫在眉睫。2018 年全球氢产量为 1.4 亿吨,且呈持续上升趋势,制造原料主要是化石燃料。2018 年全球氢产量的 48% 和 18% 分别来自于天然气和煤炭,制氢产生的 CO₂ 年排放量相当于英国和印度尼西亚两国年碳排放量总和(约 8.3 亿吨)^[8]。

1.3 未来走向

碳中和进程正在推动清洁电力成为一次能源主体,加速全社会能源结构电气化率提升。预计到 2050 年碳中和节点,欧盟、法国、日本电力系统依次扩增 50%^[9]、55%^[10] 和 30% ~ 50%^[11]。相对于光伏、风电等可再生能源发电的波动性特征,氢能作为高效能源载体,可替代抽水蓄能水电站和电网升级,实现可再生能源平稳供电,并成为无法利用电气化脱碳产业进行碳减排的重要选项。

IEA 预计 2030 年全球将拥有 600 万辆氢燃料电池汽车,全球氢气管道总长度超过 2 万公里^[12]。国际氢能委员会(Hydrogen Council)预测,到 2050 年,氢能将占全球能源消费总量的 18% ~ 24%;创造 3000 万个工作岗位和 2.5 万亿美元产值,减少二氧化碳排放 60 亿吨;在美国、欧盟、加拿大和中国的能源消费占比将分别达到 14%、13% ~ 14%、30% 和 20%^[13]。欧盟^[4]、德

国^[5]和韩国^[7]正积极推动氢能在重载运输业中的应用^[4],日本^[6]和韩国^[7]正持续推进氢燃料汽车产业发展,美国正加大氢能在工业和能源系统构建方面的应用^[2]。

1.4 面临挑战

1) **关键领域技术成本。**在碳中和背景下,氢气制备从化石资源向可再生资源转型将是必经之路。氢气制备来源广泛,灰氢指通过化石燃料制取的氢气,蓝氢指在灰氢制备基础上添加碳捕获存储技术获取的氢气。现阶段绿氢制备成本显著高于灰氢。2020 年,欧盟灰氢、蓝氢和绿氢的成本依次为 1.5、2、2.5 ~ 5.5 欧元/千克左右^[4]。

2) **安全可持续利用。**氢气具有燃点低、爆炸区间范围宽、扩散系数大和可脆化金属材料等特点,长期以来被作为危化品管理。在储运、利用方面亟需加强安全领域标准化制定和相关研究,例如:氢气在不同受限空间中的泄漏扩散规律、“氢腐蚀”和“氢脆”而引发的安全问题^[15]。

3) **基础配套设施建设。**基础设施发展缓慢阻碍了氢能的商业应用。以交通运输业为例,加氢站网络是燃料电池广泛应用的先决条件,现阶段相关基础设施滞后已成为阻碍氢燃料电动汽车广泛应用的重要制约因素之一。

4) **全产业链系统部署。**氢能产业涉及范围广,涵盖上游氢制备、中游氢储运和下游氢利用。氢能产业发展需从产业链角度系统化部署,结合氢能利用场景的差异性,明确氢气供给和使用方式,形成规模化产业,降低推广成本。

2 世界主要经济体氢能发展战略对比

世界主要经济体都将提升氢制备产能作为

战略发展主线,关注可再生能源制氢。鉴于氢产业的长链属性,这些经济体的科技创新布局大都呈现全产业链特征,涵盖氢制备、氢储运和氢利用。此外,氢作为一种无碳化学能源载体,是脱碳难度大、脱碳成本高的行业实现碳减排的主要手段,应用主要集中在运输业、工业和能源供给领域。跨领域合作和国际贸易合作将加速全球氢能产业发展。

2.1 提高制氢产能成为各国氢能战略发展主线,但制氢路径存在差异

提高制氢产能是各国氢能战略发展主线:通过技术创新提高制氢产能,扩大氢气市场需求。美国计划至 2030 年建立全球领先、安全、独立的国内氢产业供应链,至 2050 年国内氢需求量达 2200 万 ~ 4100 万吨/年(2020 年产量约 1000 万吨)^[2]。欧盟计划至 2030 年完成 2 × 40 GW 可再生氢能电解槽装置,实现绿氢产量 1000 万吨/年,至 2050 年氢能在欧盟能源结构占比达到 13% ~ 14%(2019 年为 2%)^[4]。德国预计至 2030 年国内氢能需求量达 90T ~ 110 TW · h(2020 年需求量为 55 TW · h),在工业(化工、钢铁)行业迎来氢能需求的第一波增长^[5]。

不同国家/地区制氢路径存在差异。欧盟、德国和日本都将可再生能源制氢(绿氢)作为未来发展方向,通过大规模电解槽技术攻关、天然气网-电网业务模式创新、能源市场定价改革等措施,大力推进可再生能源制氢产业发展。同上述国家不同,美国提出氢制备不局限于可再生能源,强调充分利用国内各种资源(化石燃料、生物质/废物资源、可再生资源、核能)来实现可持续、大规模、经济、安全的国内氢气供应。

2.2 氢能产业发展路径具有明确的阶段性特征,发展方向各有侧重

世界各国氢能战略的实施路径可划分为市

场创造、技术示范和规模应用三个阶段。市场创造阶段以扩大制氢能力和氢能市场占比为目标,大力发展大型电解槽装置研发和应用,同步推进风能和太阳能产业发展,为绿氢制备奠定技术和资源基础;技术示范阶段以实现可再生能源大规模制氢为目标,发挥绿氢在保障电力系统稳定性中的重要作用;规模应用阶段以实现绿氢大规模应用为目标,覆盖航空、航运、工业、建筑等难脱碳、碳密集部门。

世界各国氢能产业发展方向各有侧重。欧盟和德国采用渐进发展方式,逐步由灰氢向绿氢过渡。短期聚焦于基础设施建设,推进混合输氢管网运营和大规模电解槽部署^[4,5]。美国战略布局呈现多元化特征,包括市场创造阶段的多来源制氢以及规模应用阶段的全领域覆盖(运输、工业、发电和混合能源系统)^[2]。韩国聚焦于氢燃料汽车普及。2018 年韩国氢燃料汽车市场保有量 889 辆,加氢站 14 座,韩国政府计划至 2040 年形成 620 万辆氢燃料汽车市场规模,建造 1200 座加氢站^[7]。

2.3 科技创新覆盖氢能全产业链

科技创新是推动氢能产业发展的核心动力,世界主要国家/地区将科技创新布局于氢制备、氢储运和氢利用全产业链。

1) 在氢制备方面,可靠、经济和可持续的氢气制备是产业发展基础,可再生能源制氢已成为主流发展方向。欧盟明确其首要任务是扩大绿氢产能,将大型电解槽作为研发重点^[4]。此外,欧盟和德国关注海上风电同氢能产业融合,认为海上风电的跨越式发展(由 2019 年的 12 GW 增至 2050 年 300 ~ 450 GW^[11])将解决绿氢制备的能源需求和价格成本问题。

2) 在氢储运方面,管网运输将成为未来主流

运输形式。日本聚焦于氢运输船舶领域,目标在全球范围率先实现商用,并出口相关设备和关键技术^[11];欧盟和德国推进供电、供热和天然气基础设施交叉融合,开展氢气专输管网建设和天然气-氢气混输管网改造^[4,5];美国创新性提出化学氢载体方式,即通过氢与液体或固体材料的化学结合,实现低压和常温下的大规模氢气运输^[1]。

3) 在氢利用方面,未来将集中在运输业、工业和能源供给领域。

(1) 运输业领域:美国、欧盟和德国侧重于重载运输业,积极推动氢燃料电池和氢能衍生合成燃料在航空、航海领域应用。例如,美国通过对涡轮机、回流发动机的氢燃烧和燃料电池的电化学过程研究,提升氢能转换效率^[1]。韩国和日本聚焦于氢燃料汽车的市场化推广。韩国计划 2040 年氢燃料汽车市场规模达 620 万台(内销 290 万台,出口 330 万台)^[7]。日本计划到 2030 年国内氢燃料汽车达 80 万台,部署加氢站 900 个^[6]。

(2) 工业领域:使用绿氢来减少和取代炼油、制氢,以及甲醇、钢铁和水泥生产所需的灰氢或煤炭使用量。以占全球温室气体排放 7% ~ 9% 的钢铁为例,日本预计 2050 年全球氢还原炼铁产量为 5 亿吨/年,计划通过“领跑者”制度促进氢还原炼铁技术发展,确立该技术的世界领先地位。

(3) 能源供给领域:以氢能为基础的混合能源系统将成为未来重要的能源供给方式之一。美国提出了三类集成模式,即电网-可再生能源混合系统、化石-能源混合系统和核混合系统,并认为通过氢与混合能源系统的集成,可在中长期/季节性储能、电网平稳服务、建筑/工业用能及化工品制备等方面发挥独特优势。

2.4 跨领域合作推动氢能战略实施

氢能产业涉及多个行业,涵盖多个领域,是

推动传统能源清洁高效利用和支撑可再生能源大规模发展的理想互联媒介,也是碳密集行业大规模深度脱碳的最佳选择,具有跨领域发展特征。为此,各国氢能战略普遍强调政策保障和组织管理等方面的跨领域合作。

在政策保障方面,各国政府注重制定统一的标准、规范,确保产品质量及技术的一致性和互通性,以支撑氢技术在多部门、多领域推广应用。欧盟致力于构建氢能领域术语和欧盟标准,并通过《可持续及智能交通战略》^[16]《可再生能源指令》^[17]等政策法规,促进氢及其衍生品在交通运输等终端领域的使用。

在组织管理方面,美国《氢能项目计划》充分调动多个能源部门协同推动氢能产业发展,涵盖美国能源部的能源效率和可再生能源、化石能源、核能、电力和科学多个部门,并与高级能源研究计划署协作。部门间有明确的工作分工,其中化石能源和核能部门侧重于使用化石燃料或核能进行大规模氢气制备,能源效率和可再生能源部门关注氢气在交通业、建筑业和工业领域的终端应用。

2.5 全球氢能产业国际贸易合作加速发展

欧盟预计 2050 年清洁氢能占全球能源需求 24%,年贸易额达 6400 亿欧元,计划构建以欧元为基准计价的氢气交易体系,2030 年建成欧盟氢能市场^[4]。加拿大和日本也积极推进区域性的氢能国际贸易。未来,氢及其衍生产品的国际贸易将成为一个意义重大的工业和地缘政治因素。

各国高度重视氢能产业链国际化布局,积极推进伙伴级能源共同体建设。欧盟加强与邻国(特别是乌克兰)清洁氢能合作,计划 2030 年在欧洲东部和南部地区部署 40 GW 电解槽装置^[4]。同时,加大同非洲联盟开展绿氢制备合作,借助

非洲丰富的可再生资源,实现向欧盟稳定、持续的清洁氢能和可再生电力出口^[4]。德国通过绘制全球氢能潜力分布图,明确未来主要氢气供应国和技术出口国,并实施“技术换进口”的国际合作模式^[5]。

3 我国氢能产业发展现状

3.1 政策标准体系

我国正逐步加强氢能产业发展支持力度。2016 年国家发改委、国家能源局将氢能与燃料电池技术创新作为重点任务^[18];2020 年 4 月国家能源局将氢能列为能源范畴^[14];2022 年 3 月国家发改委、国家能源局联合印发《氢能产业发展中长期规划(2021—2035)》^[19],明确了我国氢能产业发展的总体要求、发展目标和关键举措。

地方政府积极发展氢能产业,纷纷设立加氢站建设目标,并从产业产值、氢燃料电池汽车推广、固定式发电应用和企业培育等方面提出了发展目标和行动方案。

3.2 产业发展现状

近年来,我国氢能产业取得长足发展。氢制备方面,我国以煤制氢为主,占年产量的 62%^[14]。2020 年我国氢气产能约 4100 万吨/年,产量约 3342 万吨^[1]。氢储存方面,20 MPa 钢质氢瓶已得到广泛工业应用,并与 45MPa 钢质氢瓶和 98 MPa 钢带缠绕式压力容器组合应用于加氢站中,70MPa 碳纤维缠绕 III 型瓶少量应用于燃料电池乘用车中^[15]。氢输运方面,2019 年我国仅有 100 km 专用输氢管道,20 MPa 高压长管拖车是近距离输运的主要方式^[15]。基础设施建设方面,35 MPa 加氢站技术已趋于成熟,加氢站的设计、建设以及三大关键设备(45 MPa 大容积储氢罐、35 MPa 加氢机和 45 MPa 隔膜式压缩机)均已实

现国产化^[14]。我国 2020 年新建成加氢站数量 61 座,累计建成 128 座,同比增长 91%,新增数量连续两年位列全球第一^[1]。燃料电池方面,我国主要集中在发展质子交换膜和固体氧化物两个领域,已初步掌握燃料电池电堆与关键材料、动力系统与核心部件等关键技术,但工程化、产业化水平落后于日本、韩国等国家。

4 启示与建议

1)系统部署氢能全产业链科技攻关及推广应用。氢能先发国家的研发布局均具有全产业链特征。我国在推进氢能产业科技战略实施时,既要全局部署,关注全产业链关键技术研发,同时也要聚焦我国优势领域深度研发(例如,借助我国光伏、风能产业优势,积极开展可再生氢制备关键技术研发),确保核心技术的国际引领地位,积极推进相关国际标准、法规制定,提升氢能领域国际话语权。

2)持续拓宽氢能产业发展视野。氢能产业链全球化是未来发展趋势,我国应借鉴德国经验,优先开展“氢能潜力分布图”评价分析,识别可开展技术合作的国家及邻国氢气供需潜力,明确国内外氢能技术发展优势,帮助国家层面细化氢能全产业链区域化布局,国际层面开展关键技术联合攻关和氢能国际贸易合作。

3)系统推进以氢能为基础的能源系统整合战略。氢能具有能源领域行业耦合属性,我国应从能源系统整合角度出发,关注氢能产业同其他能源产业的耦合关系和联动属性。以氢能作为能源转型催化剂,加速同可再生能源及核能等清洁能源协同发展,系统规划氢能产业布局及能源系统整合。

4)密切关注氢能国际金融贸易进展。全球

氢能需求持续增长将进一步带动氢能国际贸易。我国应注重研判氢能产业的金融贸易属性和地缘政治属性。通过扩大氢能国际市场份额、掌握核心关键技术、制定国际标准法规,构建亚洲氢能市场等措施,推动我国氢能国际贸易发展。

参考文献

[1]中国氢能源及燃料电池产业创新战略联盟. 中国氢能源及燃料电池发展报告-碳中和战略下的低碳清洁供氢体系[M]. 北京:人民日报出版社,2021.

[2]U. S. Department of Energy. Hydrogen Program Plan [R]. Washington DC: U. S. Department of Energy,2020.

[3]Hydrogen Council. Path to Hydrogen Competitiveness - A Cost Perspective [R]. Brussels:Hydrogen Council,2020.

[4]European Commission. A Hydrogen Strategy for a Climate-neutral Europe [R]. Brussels: European Commission,2020.

[5]德国联邦经济和能源部公共宣传处. 国家氢能战略[R]. 柏林:德国联邦经济和能源部,2020.

[6]Japan Ministry of Economy, Trade and Industry. Strategy for Developing Hydrogen and Fuel-Cell Technologies [R]. Tokyo: Japan Ministry of Economy, Trade and Industry,2019.

[7]Korea Ministry of Trade, Industry and Energy. Hydrogen Economy Roadmap of Korea[R]. Seoul: Korea Ministry of Trade, Industry and Energy,2020

[8]IEA. The Future of Hydrogen: Seizing Today's Opportunities[R]. Pairs:IEA,2019.

[9]European Commission. Powering a Climate-neutral Economy: An EU Strategy for Energy System Integration [R]. Brussels: European Commission, 2020.

[10]France Ministry for the Ecological and Solidary Transition. National Low Carbon Strategy: the

Ecological and Inclusive Transition towards Carbon Neutrality[R]. Paris:France Ministry for the Ecological and Solidary Transition,2020.

[11]Japan Ministry of Economy,Trade and Industry. Japan’s Green Growth Strategy through Achieving Carbon Neutrality in 2050 [R]. Tokyo: Japan Ministry of Economy,Trade and Industry,2021.

[12]IEA. Hydrogen-Tracking Progress [R]. Paris: IEA,2021.

[13]Hydrogen Council. Hydrogen Insights - A Perspective on Hydrogen Investment, Market Development and Cost Competitiveness [R]. Brussels:Hydrogen Council,2021.

[14]中国电动汽车百人会. 中国氢能产业发展报告 2020[R]. 北京:中国电动汽车百人会,2020.

[15]中国氢能联盟. 中国氢能源及燃料电池产业白皮书(2019 版)[R]. 北京:中国氢能联盟, 2019.

[16]European Commission. Sustainable and Smart mobility Strategy [R]. Brussels: European Commission,2020.

[17]European Commission. Renewable Energy Directive (2nd) [R]. Brussels: European Commission,2021.

[18]国家发改委,国家能源局.《能源技术革命创新行动计划(2016-2030 年)》[R]. 北京:国家发
改委,国家能源局,2016.

[19]国家发改委,国家能源局.《氢能产业发展中长期规划(2021-2035 年)》[R]. 北京:国家发
改委,国家能源局,2022.

作者贡献说明

王 超:收集整理资料、设计文章框架、撰写文章初稿;
孙福全:指导文章框架设计;
许 晔:修改文章;
丁明磊:修改文章;
黄 宁:收集整理资料、数据分析。

作者简介



王 超: 博后, 副研究员;
主持和参与科学技术部、
国家自然科学基金委员
会、中国科学技术发展战
略研究院等单位研究课题
9 项; 主要研究方向: 科技
政策、气候变化政策、能源
领域前沿技术。