DOI 10.15302/J-SSCAE-2022.06.005

我国绿氢供应体系建设思考与建议

杜忠明[1]，郑津洋[2]，戴剑锋[1]，施建峰[2]，花争立[2]，李博[1]，张彤枫[1]，侯孟婧[1]

（1. 电力规划总院有限公司，北京 100120；2. 浙江大学能源工程学院，杭州 310027）

摘要：在碳中和战略目标引领下，能源生产消费方式转向绿色低碳，将推动氢能供应体系逐步以绿氢为基础进行重塑；绿氢将成为新能源供给消纳体系的重要组成部分，因而加强绿氢供应体系建设有助于能源生产消费方式变革。本文在阐述绿氢供应体系建设必要性的基础上，剖析了绿氢供应体系建设面临的挑战，如绿氢资源与需求空间分布不匹配、绿氢生产与消费时间特性不匹配、现有体制机制及标准与绿氢供应体系不匹配；凝练了强化氢储运关键基础问题研究、加快氢储运技术装备攻关、提升氢储运装备安全检测技术水平等重点研究方向，力求以氢储运环节的高质量发展支撑绿氢供应体系建设。研究提出，采用氢电融合发展的系统性思维，统筹构建我国绿氢供应体系；氢储运是连接上游电解水制氢、下游氢消纳应用的关键环节，在调节绿氢供需时空错配、实现绿氢灵活供应方面发挥重要作用。为此建议，注重顶层设计、统筹规划布局，建设基础设施、化解时空错配矛盾，开展试点示范、驱动技术创新，完善体制机制、营造发展环境，以此促进绿氢供应体系高质量建设。

关键词：绿氢；氢能供应体系；氢储运；氢电融合

中图分类号：TK91　　**文献标识码：**A

Construction of Green-Hydrogen Supply System in China: Reflections and Suggestions

Du Zhongming[1], Zheng Jinyang[2], Dai Jianfeng[1], Shi Jianfeng[2], Hua Zhengli[2], Li Bo[1], Zhang Tongfeng[1], Hou Mengjing[1]

(1. China Electric Power Planning & Engineering Institute Co., Ltd., Beijing 100120, China;
2. College of Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Under the guidance of the carbon neutrality goal, energy production and consumption modes of China are shifting to be green and low-carbon, and the hydrogen energy supply system will be reshaped based on green hydrogen. Green hydrogen will become an important component of China's new energy supply and consumption system. Strengthening the construction of a green-hydrogen supply system is conducive to the transformation of China's energy production and consumption modes. This study explored the significant values for constructing the green-hydrogen supply system and analyzed the challenges faced by the construction, including (1) spatial mismatch between green hydrogen supply and demand, (2) temporal mismatch between green hydrogen production and consumption, and (3) mismatch between the green-hydrogen supply system and existing systems, mechanisms, and standards. To support the construction of the green-hydrogen supply system, key research directions include key basic issues of hydrogen storage and transportation, hydrogen storage and transportation technologies and equipment, and safety testing technologies of hydrogen

收稿日期：2022-10-10；**修回日期：**2022-11-16

通讯作者：郑津洋，浙江大学能源工程学院教授，中国工程院院士，研究方向为氢能储运装备与安全；E-mail: jyzh@zju.edu.cn

资助项目：中国工程院咨询项目“我国氢能承压设备风险分析及对策”(2022-XY-32)

本刊网址：www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

storage and transportation equipment, thereby realizing the high-quality development of hydrogen storage and transportation. Moreover, the study proposed the integrated development of hydrogen energy and electrical power to construct the green-hydrogen supply system of China. Hydrogen storage and transportation is a key link that connects water-electrolytic hydrogen production and hydrogen consumption and is crucial for adjusting the spatial and temporal mismatch of green hydrogen supply and demand and for realizing flexible supply of green hydrogen. Therefore, we suggest that China should focus on top-level design and overall planning, improve infrastructures to address the spatial and temporal mismatches, conduct pilot demonstration to drive technological innovation, and improve the systems and mechanisms to optimize the development environment.

Keywords: green hydrogen; hydrogen energy supply system; hydrogen storage and transportation; hydrogen energy and electrical power system integration

一、前言

在碳中和战略目标引领下，能源生产消费体系绿色低碳转型进程加速。氢气具有原料、燃料双重属性，来源丰富、用途广泛 [1~3]。《氢能产业发展中长期规划（2021—2035 年）》明确了氢的能源属性，将氢能确定为用能终端实现绿色低碳转型的重要载体 [4]。工业、交通等终端用能领域在能源消费转型过程中，对氢能的需求将会显著增长。

氢气制取技术路线主要有 4 种：基于煤炭、天然气的化石能源制氢；基于焦炉煤气、氯碱尾气等工业副产气分离提纯制氢；基于新能源、可再生能源的电解水制氢；新型制氢技术，如太阳能光解水制氢、热化学循环分解水制氢等。利用可再生能源生产的绿氢可规模性地替代化石能源制氢，将有效降低能源生产消费伴生的碳排放 [5~7]。近年来，能源行业积极探索绿氢应用，包括新能源电解水制氢、制氢 / 加氢一体站、燃料电池热电联供综合能源系统等在内的氢能示范工程项目正在实施 [8~12]；新型高效电解催化剂、燃料电池热电联供系统优化等成为技术研究热点 [13~16]。也要注意到，现有的绿氢大规模推广应用研究多着眼于氢气制取、氢能利用等单一环节 [12,17]，忽略了系统化绿氢供应体系建设短板对绿氢替代的掣肘。

本文从绿氢供应体系建设的角度出发，阐述发展必要性，剖析面临的挑战；在辨识氢储运环节重点研究方向的基础上提出针对性发展建议，以期为推进绿氢供应体系建设提供技术参照和管理启示。值得说明的是，在绿氢作为新生力量加入能源行业的发展初期，有必要统筹规划氢能生产供应体系，促进绿氢加快融入新型能源体系，支撑国家构建新发展格局。

二、绿氢供应体系建设的发展态势与价值

（一）氢能供应体系将逐步以绿氢为基础进行重塑

2020 年，我国氢气产能约为 4.1×10^7 t，产量约为 3.342×10^7 t [18]，其中化石能源制氢占比为 78%，工业副产氢占比为 21%，而绿氢在氢能供应结构中占比可以忽略（电解水制氢占比仅为 1%）。在消费侧，氢气主要作为原料用于化工（如合成甲醇、合成氨）、炼油等工业领域（见图 1）。

着眼中长期，预计 2060 年我国氢气需求量超过 1×10^8 t，氢能占终端能源消费的比重约为 20% [18]，主要作为原料、燃料应用于工业和交通领域（分别占需求总量的 60%、30%，见图 1）。在碳中和情景下，若基于目前以化石能源制氢为主体的氢能供应体系，氢气生产的碳排放量预计为 1×10^9 t/a，远高于碳汇所能中和的碳排放量。因此，在推动实现碳中和目标的过程中，氢能供应体系需逐步以绿氢为基础进行重塑，辅以加装碳捕集装置的化石能源制氢方式，才能改变氢能生产侧的高碳格局 [19]。预计在碳中和情景下，氢能生产侧的绿氢产量为 1×10^8 t/a，在全部氢能中的占比超过 80% [18]。绿氢生产总量和占比均逐步提升，在推动氢能供应体系变革的同时，为氢能在能源电力转型中发挥更大价值创造了条件 [20~22]。

（二）绿氢将是新能源供给消纳体系的重要组成部分

根据我国当前的风能、太阳能资源禀赋进行测算，风电、光伏发电的技术可开发规模超过 1.3×10^{10} kW。综合考虑氢能供应体系低碳化、技术成熟度、与现代能源体系契合度等因素可以认为，采用风电、光伏发电等新能源的电力进行电解水制氢，是最有可能规模化发展的绿氢制备途径，将逐步成为氢能供应的主要来源 [23~28]。

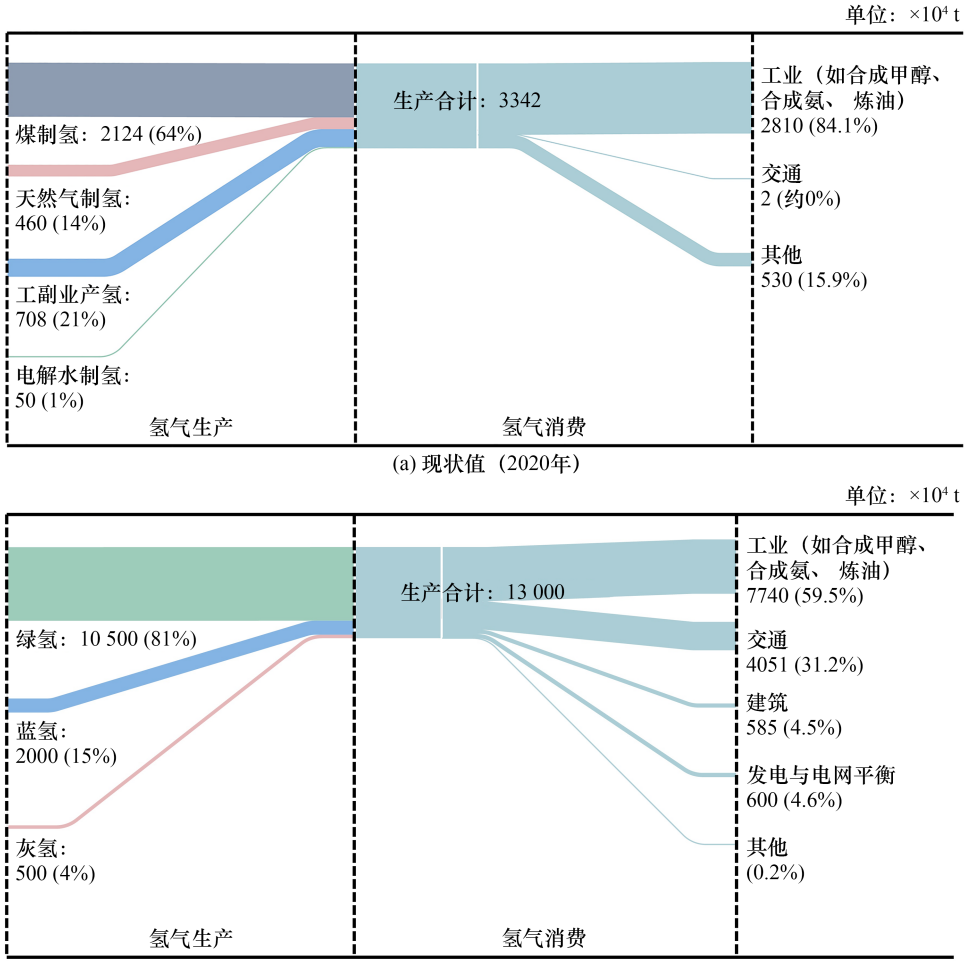

图1 我国氢气生产与消费的现状及预测值

以2060年绿氢需求量计算，新能源发电装机容量、发电量分别超过2×10^9 kW、5×10^{12} kW·h，在总发电装机容量、发电量中的占比分别超过25%、20%。而根据中国电力企业联合会的统计数据，有色金属冶炼是我国目前用电量占比最高的行业，2021年占全社会用电量的比重仅为8.4%。因此，在碳中和情景下，绿电制氢很可能超越金属冶炼等高耗能工业，成为新型电力系统中最大的单一用电负荷。

在中长期开展大规模绿电制氢，将绿氢作为新能源电力的重要转换形式，推动氢电融合并实现绿电和绿氢的灵活高效转化，主要有三方面价值。① 发挥氢能连接新能源、终端用能的耦合作用，将新能源电力转化为物质形态，丰富新能源消纳途径；促进更高比例的新能源应用，满足下游大规模用氢需求，减少交通等领域对油气的需求，降低油气对外依存度。② 发挥氢能长时储能优势 [29,30]，解决新能源出力和负荷需求存在的长周期、季节性电量不匹配问题；通过氢能发电为电网提供容量支撑，提升新型电力系统的韧性，改善绿色电力安全可靠供应水平。③ 绿电制氢过程中产生的绿氧，可满足冶金、化工、机械制造等行业的用氧需求。

三、我国绿氢供应体系建设面临的挑战分析

（一）绿氢资源与需求的空间分布不匹配

整体来看，用于制备绿氢的新能源资源、绿氢消费需求呈现逆向分布的基本特征。在绿氢生产侧，大型风光电基地集中在西北和北部地区的内蒙古、甘肃、青海、新疆、陕西等省份，海上风电基地主要分布在东南沿海地区。在绿氢消费侧，关于化工用氢分布，现代煤化工基地规划布局呈现近煤炭资源的区位特征，以西北能源“金三角”地区为

核心、新疆和山西等省份为补充 [31]；石油化工规划布局以七大石化产业基地建设为重点，全部位于在东部沿海地区 [32]。根据各省份“十四五”氢能产业发展规划，交通领域氢能应用布局以北京、上海、广东、河南、河北五大燃料电池汽车示范应用城市群（以及“以点带面”拓展形成的产业区域）为主，同样集中在中东部地区。

以氢电融合的形式，统筹规模化输电和输氢网络布局，是破解新能源资源、用氢负荷需求空间错配的关键举措。考虑终端用氢形式，在局部输氢基础设施建设的基础上，与特高压输电结合，共同构建氢电供应网络体系；积极利用西北地区的风光资源，发挥大电源、大电网优势，推动绿氢供需在空间上的绿色集约、互联互通。

面向“十四五”时期及中长期，西北地区大型风光电基地的新能源将主要通过特高压输电实现远距离外送中东部地区消纳；全国大电源、大电网结构将进一步优化和补强，制氢所需电量可部分采用输电方式传输至中东部地区的负荷中心，实现就地制氢、就地消纳。此外，西北地区水资源相对匮乏，大型风光电基地集中的内蒙古、甘肃、青海、新疆、陕西等省份的水资源总量不到全国的10%，采用大规模输电方式不会因集中式制氢而加重当地的缺水问题。需要指出的是，截至2021年已投运的32个特高压工程，跨省跨区年输送电量约为2.4×10^{12} kW·h；若碳中和情景下制氢所需的5×10^{12} kW·h电量全部采用输电方式传输，则特高压输电线路需成倍增加；鉴于当前特高压工程站址、线路走廊趋于紧张的现状，采用大规模输电方式需结合特高压网架规划及线路的外送能力实施。

当受端是规模化稳定用氢需求，而送端具备大规模绿电制氢的新能源资源及水资源等条件时，可在异地制取绿氢后通过“点对点”、规模化纯氢或掺氢运输到下游用氢环节。纯氢输送适合大规模稳定用氢、对氢气纯度要求较高的工业用户，纯氢输送管道本身具备一定的储氢功能，但当前的纯氢输送成本相对较高。天然气掺氢利用经适当改造的已有天然气管道输送，结合中长期天然气管网规划布局实施，更适合下游可直接采用掺氢天然气的用户。

（二）绿氢生产与消费的时间特性不匹配

新能源资源波动性对制氢波动性的传导、下游连续稳定用氢需求，二者存在时间错配问题。不同种类制氢设备的技术特点有差别，如碱性电解水制氢装置的负载上限可达120%，质子交换膜电解水制氢装置的负载区间为20%~150% [33]。在上游制氢端，制氢设备为了适应新能源发电的间歇性和波动性，仅从绿氢生产侧出发难以保证规模化、连续稳定的氢能供应。在下游用氢端，化工、交通等重点领域在中长期逐步实现绿氢替代后，应用场景需要氢能的连续稳定供应。例如，对于煤化工领域3×10^{5} t/a合成氨项目，设计年运行时间一般在7000 h以上，从运行安全、设备寿命、经济性出发，需要氢能供应满足不间断生产的要求；在交通领域，重点城市群的燃料电池汽车规模化发展后，同样需要依托加氢站建设可靠的供氢网络，保证氢气的连续稳定供应。此外，随着氢能在发电、供暖等领域的推广应用，氢气需求将受到季节用能峰谷特性的影响。

为了调节绿氢供需的时间错配，需统筹规划储氢基础设施，将之作为连接上游新能源波动性发电制氢、下游连续稳定用氢需求之间的缓冲器；在新能源发电的高峰时段，用余电制氢以充分发挥氢能的长时储能优势，实现上游制氢、下游用氢的解耦 [30]。值得指出的是，相比于电储能，氢储能可将上游新能源资源转化为氢能进行存储，释能阶段输出的二次能源品种更为灵活，更有利于支撑终端用能的多元化稳定用氢：直接对下游的化工和交通用户进行规模化、连续稳定供氢，或与电储能一样将氢能再转化为电能输出，甚至基于氢能供热或热电联产来满足下游用户供暖需求；将弃风弃光转化为氢能并进行跨季节存储，在降低制氢成本的同时，增强新能源供给适应下游用能需求季节性波动的能力 [34]。

（三）现有体制机制及标准与绿氢供应体系不匹配

现阶段的氢能供应以化石能源制氢为主，将氢气作为原料就地应用于化工、炼油行业，氢气按易燃易爆危险化学品进行管控。虽然《氢能产业发展中长期规划（2021—2035年）》明确了氢能在能源体系中的定位 [4]，但将氢气作为能源产品，针对可再生能源电解水制氢、规模化氢储运等的产业垂直管理与安全监管体系有待建设，产业规划、安全管理等方面的主管机构没有明确归口，跨部门协调、跨领域协作机制亟待完善。随着绿氢供应

全产业链、各环节逐步从试点示范转入推广应用，有关体制机制与产业发展实际不匹配的短板逐步显现。

现行的氢能标准体系主要针对燃料电池和交通领域应用，绿氢供应相关的标准规范制定滞后于行业发展，缺乏工程数据和实践案例支撑，不协调、不配套的现象较为突出。目前，在绿氢供应中的制氢、氢储运等环节，统一的技术导则、行业约束标准缺失，而不同企业的电解水制氢、电氢系统集成、管道输氢等项目差异性较大（如设计技术水平、性能指标、项目验收、运行维护、服务条款），对比基准不统一等问题严重，制约了行业的规范化发展。需要说明的是，绿氢供应体系涉及电能和氢能的接口与耦合，不同于现有标准体系中按照产业链条进行划分的模式；需基于氢气的能源属性，系统研究氢电融合相关的标准体系框架，以此保障绿氢供应体系建设需求，切实发挥标准对产业发展的引领作用。

四、以氢储运环节的高质量发展支撑绿氢供应体系建设

绿氢供应体系建设面临的主要技术挑战包括：规模化、高效率电解水制氢技术，氢电耦合智能调控技术，高安全性、低成本、大规模的氢储运技术。电解水制氢技术在我国发展时间较长，产业界关注度高，国产碱性电解槽单机制氢量超过 1000 m^3/h 并实现出口，未来研究围绕提高电流密度、降低直流电耗以增强制氢能力等方面展开；电解槽优化与氢电融合智能调控策略的联合攻关，也是领域技术的研究重点。

氢储运承担着连接上游电解水制氢、下游消纳用氢的关键角色，是调节绿氢供需时空错配、提升绿氢灵活供应水平的重要保障；相应发展事关氢储运环节安全、储运成本降低，成为提升绿氢供应产业竞争力的核心环节。大规模氢储运技术研究在我国起步较晚，技术储备、示范应用较为薄弱，运行数据和经验积累偏少，规范标准体系不健全；虽然我国氢气产量居世界首位，但氢气用户集中在石油、化工等传统领域，氢气生产和消耗在区位上通常相邻，不涉及大规模、长距离输送问题。因此，氢储运是我国氢产业链发展的短板和弱项，成为氢电融合发展的技术难点 [35]；加快氢储运关键技术装备的研制和产业化，促进绿氢应用成本降低并推动绿氢产业化应用，以此支撑绿氢供应体系建设。

（一）强化氢储运关键基础问题研究

氢气的质量能量密度高（约 120 MJ/kg），但标况下的体积能量密度低（约 10.8 MJ/m^3），降低温度、提高压力是实现氢能高效储运的主要方式。氢储运分为高压气氢、深冷液氢、固态储氢、有机液体储氢、液氨、甲醇等形式 [36,37]。

长期在深冷、高压、临氢条件下运行的氢储运装备，其服役性能、损伤及劣化规律相比与常规气体储存装备差异明显 [38~40]。揭示材料在深冷、高压、临氢条件下的性能演化规律与损伤机理，调控服役环境下材料性能，提出创新性的氢储运装备设计理念与方法，是开发高性能低成本抗氢材料、保障氢储运装备长寿命及安全可靠服役的重要基础。① 提升氢储运装备材料在极端服役条件下（如−253 ℃液氢、30 MPa 以上高压氢气）的基础性能测试与评价能力，支持氢储运装备相关的新材料开发、零部件测试与产品认证。② 对于金属储氢容器与输氢管道，探明氢侵入金属内部的机制及其对材料氢损伤行为的影响规律；对于复合材料轻量化储氢容器与柔性输氢管道，研究氢气环境下聚乙烯、尼龙、橡胶等非金属材料微观组织及力学性能演化机制，探明材料、应力与高压氢耦合作用下非金属材料的氢鼓包、溶胀等损伤规律及调控方法，为氢储运装备选材、设计、制造、维护提供依据。

（二）加快氢储运技术装备攻关

氢气的规模化储存主要有高压气态储氢、深冷液态储氢，规模化的输运方式主要是长管拖车输氢、管道输氢、将氢转化为氨再进行输送。在高压气态储氢装备方向，实现了固定式储氢高压容器的自主可控，独创的钢带错绕式全多层储氢高压容器技术水平领先；着眼氢能输送规模的快速增长，研制地下储氢库等超大型储氢装备，开发高性能、低成本的抗氢材料，以有效降低装备成本并提高应用经济性。在深冷液态储氢装备领域，形成了吨级 / 天的氢液化能力，氢液化、储存、转运的产业链；但大规模、高效率的氢液化装备与技术仍是薄弱环节，

液氢泵、加注枪、密封件等核心零部件与材料技术面临“卡脖子”风险，需加快研制并扩大应用规模。

在氢气规模化输运装备方向，国产长管拖车输氢已具规模，在短距离、500 kg级氢气输运方面发挥了积极作用；但输运效率较低、能耗大，需尽快攻克30 MPa以上轻量化长管拖车输氢技术。管道输氢是实现氢气大规模、长距离、安全经济输运的主要方式。在高压力、大直径、长距离的金属输氢管道方向，国产钢管在管材与氢气（或掺氢天然气）相容性、高强度抗氢性能等方面存在短板；具备耐氢性能的压力表、安全阀、大流量压缩机等关键零部件未能实现国产化，部件的可靠性、使用寿命、密封性亟需提升。而在中低压的非金属输氢管道方面，国内外均处于起步阶段；国内企业拥有柔性非金属管道知识产权，需加快推进柔性输氢管道方面的标准制定、设计制造、应用示范。

（三）提升氢储运装备安全检测技术水平

氢储运装备在制造和服役过程中不可避免地存在缺陷或产生损伤，可能在载荷与环境共同作用下失效。氢气易泄漏、高压密封难，侵入传感材料后导致检测信号漂移，加大高压氢环境下检测传感的难度。国产氢储运装备的质量和技术水平不适应氢能产业快速发展的需要，需攻克超高压、极低温氢能装备安全检测评价技术，建立检验检测、技术实证等平台；发展氢储运装备的缺陷分类方法，分析在高压、深冷、临氢环境下的缺陷演化规律，探明缺陷演化对装备服役性能及失效的影响机制。

开发氢储运装备的在线检测与监测技术，对氢储运装备制造、服役过程中的典型缺陷和损伤进行检测与识别，针对结构健康状态进行诊断评估。改进大容量复合材料高压储氢容器制造缺陷的无损检测、低温绝热液氢储氢容器的绝热性能丧失与氢气泄漏快速监测、输氢管道泄漏检测及监测、缺陷在线检测、结构健康状态诊断等技术，完善氢储运装备安全检测、监测技术等标准。运用信息技术和设备参数实时监测数据，增强设备运行状态分析能力。开发氢能装备和应用终端的风险状态评价与预警工具，形成氢能装备的性能检测、试验方法、标准规范、基础设施，发展“材料+部件+装备+系统”的全链条检测与评估体系。

五、有关绿氢供应体系建设的发展建议

以绿氢为基础重塑氢能供应体系，不是单一考虑加快发展上游的新能源电解水制氢并逐步替代化石能源制氢，而是统筹绿氢上/下游规模化供需和储运网络布局，以系统性思维推动氢电融合发展、调节绿氢供需时空错配。

（一）注重顶层设计，统筹规划布局

绿氢供应体系建设是系统工程，应协同推进产业链上“制、储、输、用”各环节，与新型电力系统建设进程相协调。建议采用氢电融合发展的系统性思维，开展绿氢供应体系顶层设计；统筹全产业链的中长期规划布局，集中式与分布式并举，大规模、长距离储运与就地消纳利用结合，确保整体资源的优化配置。发挥绿氢供应体系在促进大规模、高比例新能源消纳方面的关键作用，增强新型电力系统的长时储能与灵活调节能力，提高整个能源供应体系的鲁棒性。

（二）建设基础设施，化解时空错配矛盾

绿氢供应体系供应侧、需求侧的时空错配矛盾需要化解。建议依据氢电融合理念，统筹各地区、各领域发展规划，稳步推动输电与输氢、制氢与储氢相关的基础设施建设。特高压输电线路、氢储输系统互为补充，消除新能源资源与用氢需求的空间错配，实现可再生能源的充分利用，提高绿氢大规模推广应用的技术及经济可行性。制氢与储氢相互协同，开展绿氢供需的时间错配调节，提升绿氢供应的灵活性和可靠性，为高比例可再生能源接入新型电力系统提供大规模的储能能力支撑。

（三）开展试点示范，驱动技术创新

在绿氢供应体系发展初期，市场机制尚未成熟，需要为新技术创造成长环境、提供产业化机遇。发挥领军企业在产业发展方面的“龙头”作用，以“产学研用”协调发展模式构建行业技术创新体系。从原始技术创新、单项技术攻关及优化升级、领域技术集成创新三方面着手，把握资源禀赋和能源供需特点，因地制宜开展多类场景、不同规模的试点示范，从而引导甚至驱动技术创新成果的应用转化落地。

（四）完善体制机制，营造发展环境

绿氢作为未来新型能源体系中的重要组成部分，相应的管理机制尚不健全，制约绿氢工程项目高效率实施、绿氢供应体系高质量建设。建议论证并修订审批核准、建设运营、安全监管等行业政策，完善跨部门协调模式，探索碳税、差别电价、特别路权等绿氢价格补偿机制；加快构建多层次、全方位的氢能技术标准体系，涵盖国家标准、行业标准、团体标准、企业标准。尽快将氢气按照能源属性管理，匹配氢能规模化发展、多元化应用的实际需要。

参考文献

[1] 凌文, 李全生, 张凯. 我国氢能产业发展战略研究 [J]. 中国工程科学, 2022, 24(3): 80–88.
Ling W, Li Q S, Zhang K. Development strategy of hydrogen energy industry in China [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(3): 80–88.

[2] Zhang X Q. The development trend of and suggestions for China's hydrogen energy industry [J]. Engineering, 2021, 7(6): 719–721.

[3] Michael J B. Thoughts on the prospects of renewable hydrogen engineering [J]. Engineering, 2020, 6(12): 1343–1345.

[4] 国家能源局. 氢能产业发展中长期规划(2021—2035 年) [EB/OL]. (2022-03-23) [2022-08-15]. http://zfxxgk. nea. gov. cn/2022-03/23/c_1310525630.htm.
National Energy Administration. Medium and long term plan for the development of hydrogen energy industry (2021—2035) [EB/OL]. (2022-03-23) [2022-08-15]. http://zfxxgk. nea. gov. cn/2022-03/23/c_1310525630.htm.

[5] 张从容. 碳中和时代绿氢发展前景与挑战 [J]. 石油石化绿色低碳, 2022, 7(1): 6–10.
Zhang C R. Development prospect and challenge of green hydrogen in carbon neutral era [J]. Green Petroleum & Petrochemicals, 2022, 7(1): 6–10.

[6] 管煦. 氢能: 双碳目标下的"终极能源" [J]. 中国工业和信息化, 2022 (5): 18–22.
Guan X. Hydrogen: The "ultimate energy source" under the carbon peaking and carbon neutrality target [J]. China Industry & Information Technology, 2022 (5): 18–22.

[7] 焦红霞, 吴昊. 纳入新型储能 氢电耦合将点亮双碳之路 [N]. 中国改革报, 2021-08-03(05).
Jiao H X, Wu H. Incorporating new energy storage hydrogen-electric coupling will light up the road to dual carbon [N]. China Reform Daily, 2021-08-03(05).

[8] 李惠钰. "氢电耦合"构建现代能源体系 [N]. 中国科学报, 2021-03-22(03).
Li H Y. "Hydrogen-electric coupling" builds a modern energy system [N]. China Science Daily, 2021-03-22(03).

[9] 周倜然. 氢电耦合的跨界猜想 [N]. 中国电力报, 2022-07-21(07).
Zhou T R. Transboundary conjecture of hydrogen-electric coupling [N]. China Electric Power News, 2022-07-21(07).

[10] 韩逸飞. 电网企业瞄准氢电耦合新赛道 [N]. 中国能源报, 2022-04-25(21).
Han Y F. Power grid companies aim at a new track of hydrogen-electricity coupling [N]. China Energy News, 2022-04-25(21).

[11] 杨梓. 氢电耦合快速升温 [N]. 中国能源报, 2022-06-13(10).
Yang Z. Hydrogen-electric coupling heats up rapidly [N]. China Energy News, 2022-06-13(10).

[12] 陈宇, 赵彦旻, 曹吉领, 等. 氢电耦合在高弹性电网中的应用场景及投资收益分析 [J]. 能源工程, 2022, 42(3): 88–92.
Chen Y, Zhao Y M, Cao J L, et al. Application scenario and investment income analysis of hydrogen electric coupling in high elastic power grid [J]. Energy Engineering, 2022, 42(3): 88–92.

[13] Li C L, Wu A Q, Xi C Q, et al. High reversible cycling performance of carbon dioxide electrolysis by flat-tube solid oxide cell [J]. Applied Energy, 2022, 314: 1–12.

[14] Gao C, Lin J J, Zeng J F, et al. Wind-photovoltaic co-generation prediction and energy scheduling of low-carbon complex regional integrated energy system with hydrogen industry chain based on copula-MILP [J]. Applied Energy, 2022, 328: 1–12.

[15] Wu A Q, Li C L, Han B B, et al. Effect of air addition to the air electrode on the stability and efficiency of carbon dioxide electrolysis by solid oxide cells [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(58): 24268–24278.

[16] Yuan J X, Cheng X D, Lei C J, et al. Bimetallic oxyhydroxide as a high-performance water oxidation electrocatalyst under industry-relevant conditions [J]. Engineering, 2021, 7(9): 1306–1312.

[17] 徐飞, 李晓霞, 程丽敏. 氢电综合利用价值及模式分析 [J]. 电器工业, 2022 (7): 73–77.
Xu F, Li X X, Cheng L M. Analysis of the value and mode of comprehensive utilization of hydrogen power [J]. China Electrical Equipment Industry, 2022 (7): 73–77.

[18] 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产业发展报告 [R]. 北京: 人民日报出版社, 2020.
National Alliance of Hydrogen and Fuel Cell. China hydrogen energy and fuel cell industry development report [R]. Beijing: People's Daily Press, 2020.

[19] 张智, 赵苑瑾, 蔡楠. 中国氢能产业技术发展现状及未来展望 [J]. 天然气工业, 2022, 42(5): 156–165.
Zhang Z, Zhao Y J, Cai N. Technological development status and prospect of hydrogen energy industry in China [J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(5): 156–165.

[20] 刘坚. 我国绿氢规模化发展面临的挑战与建议 [J]. 中国电力企业管理, 2022 (16): 53–55.
Liu J. Challenges and suggestions for the large-scale development of green hydrogen in China [J]. China Power Enterprise Management, 2022 (16): 53–55.

[21] 罗佐县, 曹勇. 氢能产业发展前景及其在中国的发展路径研究 [J]. 中外能源, 2020, 25(2): 9–15.
Luo Z X, Cao Y. Development prospect of hydrogen energy industry and its development path in China [J]. Sino-Global Energy, 2020, 25(2): 9–15.

[22] 韩红梅, 杨铮, 王敏, 等. 我国氢气生产和利用现状及展望 [J]. 中国煤炭, 2021, 47(5): 59–63.
Han H M, Yang Z, Wang M, et al. The current situation and pros-

pect of hydrogen production and utilization in China [J]. China Coal, 2021, 47(5): 59–63.

[23] 田倩, 王卓然, 刘涛, 等. 绿氢的本质和意义 [J]. 化工设计通讯, 2022, 48(4): 178–180.
Tian Q, Wang Z R, Liu T, et al. Essence and significance of green hydrogen [J]. Chemical Engineering Design Communications, 2022, 48(4): 178–180.

[24] 徐东, 刘岩, 李志勇, 等. 氢能开发利用经济性研究综述 [J]. 油气与新能源, 2021, 33(2): 50–56.
Xu D, Liu Y, Li Z Y, et al. A cost-efficiency review of hydrogen energy exploitation [J]. Petroleum and New Energy, 2021, 33(2): 50–56.

[25] 李建林, 李光辉, 马速良, 等. 碳中和目标下制氢关键技术进展及发展前景综述 [J]. 热力发电, 2021, 50(6): 1–8.
Li J L, Li G H, Ma S L, et al. Overview of the progress and development prospects of key technologies for hydrogen production under the goal of carbon neutrality [J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(6): 1–8.

[26] 俞红梅, 邵志刚, 侯明, 等. 电解水制氢技术研究进展与发展建议 [J]. 中国工程科学, 2021, 23(2): 146–152.
Yu H M, Shao Z G, Hou M, et al. Hydrogen production by water electrolysis: Progress and suggestions [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(2): 146–152.

[27] 殷伊琳. 我国氢能产业发展现状及展望 [J]. 化学工业与工程, 2021, 38(4): 78–83.
Yin Y L. Present situation and prospect of hydrogen energy industry [J]. Chemical Industry and Engineering, 2021, 38(4): 78–83.

[28] 刘玮, 万燕鸣, 熊亚林, 等. “双碳”目标下我国低碳清洁氢能进展与展望 [J]. 储能科学与技术, 2022, 11(2): 635–642.
Liu W, Wan Y M, Xiong Y L, et al. Outlook of low carbon and clean hydrogen in China under the goal of “carbon peak and neutrality” [J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(2): 635–642.

[29] 刘金朋, 侯焘. 氢储能技术及其电力行业应用研究综述及展望 [J]. 电力与能源, 2020, 41(2): 230–233.
Liu J P, Hou T. Review and prospect of hydrogen energy storage technology and its application in power industry [J]. Power & Energy, 2020, 41(2): 230–233.

[30] 许传博, 刘建国. 氢储能在我国新型电力系统中的应用价值、挑战及展望 [J]. 中国工程科学, 2022, 24(3): 89–99.
Xu C B, Liu J G. Hydrogen energy storage in China’s new-type power system: Application value, challenges, and prospects [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(3): 89–99.

[31] 中国石油和化学工业联合会. 现代煤化工“十四五”发展指南 [R]. 北京: 中国石油和化学工业联合会, 2021.
China Petroleum and Chemical Industry Federation. Modern coal chemical industry 14th Five-Year Plan development guide [R]. Beijing: China Petroleum and Chemical Industry Federation, 2021.

[32] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 石化产业规划布局方案 (修订版) [EB/OL]. (2015-05-18) [2022-08-15]. https://www.ndrc. gov. cn/fgsj/tjsj/cyfz/zzyfz/201505/t20150529_1149819. html?code=&state=123.
National Development and Reform Commission. Petrochemical industry planning and layout program(revised version) [EB/OL]. (2015-05-18) [2022-08-15]. https://www. ndrc. gov. cn/fgsj/tjsj/cyfz/zzyfz/201505/t20150529_1149819.html?code=&state=123.

[33] 郭秀盈, 李先明, 许壮, 等. 可再生能源电解制氢成本分析 [J]. 储能科学与技术, 2020, 9(3): 688–695.
Guo X Y, Li X M, Xu Z, et al. Cost analysis of hydrogen production by electrolysis of renewable energy [J]. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9(3): 688–695.

[34] 文凡, 陈彦佐, 车佳辰, 等. “双碳”背景下区域电力–氢能系统协同优化规划 [J]. 全球能源互联网, 2022 (4): 318–330.
Wen F, Chen Y Z, Che J C, et al. Collaborative optimal planning of regional power-hydrogen system towards carbon peak and neutrality [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2022 (4): 318–330.

[35] 李鹏. 氢标领航 安储致远——专访中国工程院院士郑津洋 [J]. 太阳能, 2022 (5): 7–13.
Li P. Hydrogen standard and safe hydrogen storage lead the way: Interview with Zheng Jinyang, academician of Chinese Academy of Engineering [J]. Solar Energy, 2022 (5): 7–13.

[36] 曹军文, 覃祥富, 耿嘎, 等. 氢气储运技术的发展现状与展望 [J]. 石油学报(石油加工), 2021, 37(6): 1461–1478.
Cao J W, Qin X F, Geng G, et al. Current status and prospect of hydrogen storage and transportation technology [J]. Acta Petrolei Sinica(Petroleum Processing Section), 2021, 37(6): 1461–1478.

[37] 丁锳, 唐涛, 王耀萱, 等. 氢储运技术研究进展与发展趋势 [J]. 天然气化工–C1 化学与化工, 2022, 47(2): 35–40.
Ding L, Tang T, Wang Y X, et al. Research progress and development trend of hydrogen storage and transportation technology [J]. Natural Gas Chemical Industry, 2022, 47(2): 35–40.

[38] 郑津洋, 胡军, 韩武林, 等. 中国氢能承压设备风险分析和对策的几点思考 [J]. 压力容器, 2020, 37(6): 39–47.
Zheng J Y, Hu J, Han W L, et al. Risk analysis and some countermeasures of pressure equipment for hydrogen energy in China [J]. Pressure Vessel Technology, 2020, 37(6): 39–47.

[39] 陈林, 董绍华, 李凤, 等. 氢环境下压力容器及管道材料相容性研究进展 [J]. 力学与实践, 2022, 44(3): 503–518.
Chen L, Dong S H, Li Fet al. Some advances in studies of material compatibility of pressure vessels and pipelines in hydrogen atmosphere [J]. Mechanics in Engineering, 2022, 44(3): 503–518.

[40] 杨静, 王晓霖, 李遵照, 等. 氢气长距离管输技术现状与探讨 [J]. 压力容器, 2021, 38(2): 80–86.
Yang J, Wang X L, Li Z Z, et al. Present status and discussion of long-distance pipeline hydrogen transportation technology [J]. Pressure Vessel Technology, 2021, 38(2): 80–86.