

WHITE PAPER OF HYDROGEN ENERGY AND
FUEL CELL INDUSTRY IN CHINA
2020

中国氢能源及燃料电池产业白皮书
碳中和战略下的低碳清洁供氢体系

中国氢能源及燃料电池产业创新战略联盟◎编著

（节选）

人民日报出版社
北 京

目 录

第一章 低碳清洁氢分类、驱动力及发展趋势	01
一、低碳氢、清洁氢与可再生氢	03
二、脱碳成为全球氢能发展的第一驱动力	05
三、全球氢能产业发展趋势	08
第二章 碳中和情景下我国低碳清洁氢能发展展望	15
一、我国氢气生产与消费统计	17
二、碳中和情景下氢能需求预测	20
三、低碳清洁氢供给结构展望	26
第三章 碳达峰目标下低碳清洁氢制取关键技术	31
一、电解水制氢关键技术	34
二、碳捕集、利用与封存技术（CCUS）	39
三、氢气纯化技术	41
第四章 政策及投融资建议	45
一、完善低碳清洁氢气政策支持体系	47
二、加强低碳清洁氢气市场建设	48
三、提升低碳清洁氢气制备技术自主化水平	48
四、建设多元化多层次综合服务平台	49
五、全方位加强低碳清洁氢能国际合作	49
参考文献	50

第一章

低碳清洁氢分类、驱动力及发展趋势

近年来，在欧盟、日本、韩国、中国等主要经济体的积极推动下，氢能逐渐成为国际议程的新焦点，并获得快速发展。仅 2020 年，就有欧盟、德国、西班牙、加拿大等 11 个国家或区域发布氢能发展战略。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，还有 11 个国家正在制定国家氢能战略。氢能应用场景日渐丰富，交通领域应用规模稳步提升，工业、建筑等领域应用方兴未艾。随着全球应对气候变化行动的深入以及后疫情时代绿色经济复苏的加速，打造低碳清洁氢气供应系统逐步成为全球共识，我国于 2020 年 12 月率先发布《低碳氢、清洁氢与可再生氢标准及评价》。

一、低碳氢、清洁氢与可再生氢

氢气可以采用多种工艺和能源制取，为表述方便，业界经常以颜色进行区分，诸如灰氢、蓝氢、绿氢等。但是，上述分类方法难以对所有制氢工艺进行明确量化的区分，即使针对同一制氢工艺（如电解水制氢）也很难体现为一种颜色。因此，随着各国碳中和目标的提出，基于生命周期温室气体（GHG）排放方法客观量化定义不同制氢方式逐步为业界所认可。

从降低温室气体排放原则出发，低碳清洁氢的系统边界和核算方法也不尽相同。从系统边界看，“出厂点”计算无需考虑储存、运输、装卸和供应等下游排放，以及因燃料泄漏和泄漏造成的燃料损失，可操作性更高；“消费点”计算的系统边界更广，可更准确地估计特定路径的排放量，但管理成本高昂。此外，对于氢气的纯度、压力、状态、碳核算基准等底层基础也不一而同。

欧盟 CertifHy 项目应用时间最长，且探索推出了 GO 绿氢认证。该项目以生命周期碳排放评价方法为基础，对于出厂的氢气产品要求纯度 $\geq 99\%$ ，压力 $\geq 30\text{Bar}$ ，如不符合要求需要将提纯或加压过程的碳排放量计入。碳排放基准值则选取欧洲最有代表性的蒸汽甲烷重整制氢工艺 $91\text{gCO}_2\text{eq/MJH}_2$ ，并结合欧盟可再生能源法令中的 2020 年减排要求进一步明确“绿氢”碳排放强度阈值为 $36.4\text{gCO}_2\text{eq/MJH}_2$ 。由此，氢气被分为非低碳氢和低碳氢。

图表 1 全球范围内主要的氢气量化标准规范^①

组织	政策目标	基准碳排放强度	减排阈值	制氢来源	系统边界
AFHYPAC (法国)	可再生能源发展	无	100% 可再生	所有可再生能源	出厂点
BEIS (英国)	减少二氧化碳排放	待定	待定, 根据终端使用场景给定不同的阈值	无	出厂点
California Low Carbon Fuel Standard	减少空气污染和二氧化碳排放	“从油井到车轮 (Well to Wheel)” 的石油消费排放强度	温室气体降低 30%、氮氧化物排放降低 50%	可再生电解水、生物甲烷催化重整、生物质热解	消费点
CERTIFY (欧盟)	可再生能源发展 / 减少温室气体排放	蒸汽甲烷重整制氢的碳排放强度	碳排放强度降低 60-65%	所有可再生能源	出厂点
低碳氢、清洁氢与可再生氢标准及评价	推动氢能全产业链绿色发展	煤气化制氢的碳排放强度	碳排放强度降低 50-60%	化石能源制氢+CCUS、可再生能源	出厂点

数据来源: 英国伦敦大学可持续资源研究所, 中国氢能联盟研究院

其中, 满足低碳氢的碳排放阈值的氢气同时满足制备能源为可再生能源, 则该氢气可定义为“绿氢”。2020 年 12 月, 中国氢能联盟提出的团体标准《低碳氢、清洁氢与可再生氢标准及认定》正式发布。这是全球首次从正式标准角度对氢的碳排放进行量化。该标准运用生命周期评价方法建立了低碳氢、清洁氢和可再生氢的量化标准及评价体系, 从源头出发推动氢能全产业链绿色发展。标准指出, 在单位氢气碳排放量方面, 低碳氢的阈值为 $14.51\text{kgCO}_2\text{e/kgH}_2$, 清洁氢和可再生氢的阈值为 $4.9\text{kgCO}_2\text{e/kgH}_2$, 可再生氢同时要求制氢能源为可再生能源。

图表 2 中国低碳氢、清洁氢及可再生氢标准

项目名称	指标		
	低碳氢	清洁氢	可再生氢
单位氢气碳排放量 ($\text{kgCO}_2\text{e/kgH}_2$) $\leq$	14.51	4.9	4.9
制氢所消耗的能源必须为可再生能源 ^②	否	否	是

数据来源: 中国氢能联盟研究院

① 英国伦敦大学可持续资源研究所《绿氢表征倡议: 定义、标准、源头认证和挑战》

② 可再生能源是指风能、太阳能、水能、生物质能、地热能、海洋能等非化石能源。低碳氢、清洁氢与可再生氢应依据 GB/T 24040 和 GB/T 24044 的生命周期评价方法学框架、总体要求结合《低碳氢、清洁氢和可再生氢标准及评价》进行分析和认定。

简单来讲,可再生氢与清洁氢与通俗意义上的“绿氢”大体相当,低碳氢与“蓝氢”大体相当。以电解水制氢为例,如果电力来源是可再生能源则为可再生氢,如果要达到清洁氢的标准则需要单位电力的碳排放不高于 87.5 克 CO₂e/ 千瓦时,如果要达到低碳氢的标准则需要单位电力的碳排放不高于 259 克 CO₂e/ 千瓦时。因此,从温室气体排放角度对氢进行量化分类,一方面有助于还原氢作为低碳甚至零碳能源的属性,另一方面有助于打通碳市场和氢市场,引导高碳排放制氢工艺向绿色制氢工艺转变。

二、脱碳成为全球氢能发展的第一驱动力

2020 年是全球氢能发展加速之年。本轮氢能发展浪潮的三个重要驱动力是能源转型、经济增长和脱碳发展,分别对应能源、经济和社会三大维度。2019 年底,在西班牙举行的联合国气候变化框架公约缔约方大会(COP25)上,77 个国家承诺 2050 年实现净零碳排放。2020 年中国国家主席习近平在第 75 届联合国大会期间提出,中国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。应对气候变化的脱碳愿景逐步成为全球氢能大规模部署的最重要驱动力,低碳清洁氢则是实现碳中和路径的重要抓手。与此同时,氢能与燃料电池产业技术的逐步成熟与可再生能源发电成本的降低,则为氢能产业的规模化部署提供了有力支撑。

专栏 1. 碳达峰、碳中和愿景及行动

碳达峰是指在某一个时点,二氧化碳的排放不再增长达到峰值,之后逐步回落。

碳中和是指企业、团体或个人测算在一定时间内直接或间接产生的温室气体排放总量,通过植树造林、节能减排等形式,以抵消自身产生的二氧化碳排放量,实现二氧化碳“零排放”。

截至 2020 年底,全球共有 44 个国家和经济体正式宣布了碳中和目标。其中,2 个国家已经实现碳中和目标、英国等 6 个国家已立法,欧盟等 6 个国家和地区正在履行立法程序,11 个国家和地区写入政策文件,19 个国家和地区已正式提出碳中和目标。预计到 2021 年,占全球二氧化碳排放量 65% 以上、占全球经济总量 70% 以上的国家将对碳中和做出承诺^①。

^① UN Secretary General Antonio Guterres in his State of the Planet speech, Dec 2020 <https://www.un.org/sg/en/content/sg/speeches/2020-12-02/address-columbia-university-the-state-of-the-planet>

第二章

碳中和情景下我国低碳清洁氢能发展展望

实现碳中和是一场广泛而深刻的经济社会系统性变革。为实现 2060 年碳中和目标，我国氢气的年需求量将从目前的 3,342 万吨增加至 1.3 亿吨左右，在终端能源体系中占比达到 20%。随着深度脱碳的需求增加和低碳清洁氢经济性的提升，氢能在工业、交通、建筑与发电等领域逐步渗透，氢能供给结构从化石能源为主的非低碳氢逐步过渡到以可再生能源为主的清洁氢，并将提供 80% 氢能需求，电解槽装机有望达到 500GW，仅可再生能源制氢减排量便有望达到 16 亿吨 / 年。此外，采用 CCUS 技术的低碳氢碳减排量近 2 亿吨 / 年。2060 年，低碳清洁氢供氢体系 CO₂ 减排量约 18 亿吨 / 年，约占当前我国能源活动二氧化碳总排放量的 19%。

一、我国氢气生产与消费统计

当前，我国氢气生产主要在化工和钢铁等领域，具体分布在石化、化工、焦化等行业。氢气多作为原料用于生产甲醇、合成氨等化工产品，少量作为工业燃料使用。

根据中国氢能联盟与石油和化学规划院的统计，当前我国氢气产能约 4,100 万吨 / 年，产量约 3,342 万吨。其中，氢气纯度达到 $\geq 99\%$ 的工业氢气质量标准的产量约为 1,270 万吨 / 年。

专栏 2. 调查统计方法简介

本次氢气资源调查与统计研究主要针对石化、化工和焦化行业，包括炼油、石化、合成氨（氮肥）、甲醇、现代煤化工（煤制油、煤制天然气、煤制烯烃、煤制乙二醇）、氯碱的中间氢气原料，以及焦化和兰炭（兰焦）行业的副产氢气，合计占全行业总产能的 95% 以上。同时，研究了己内酰胺和双氧水等涉氢产能。此外，根据我国电解槽装备销量，对水电解制氢产能也进行了估计。



基于全行业生产企业负荷情况的统计和对全行业生产工艺的掌握，我国 2019 年氢气资源生产与消费采用“统计+分析”方法。

1) 以具体项目为单位，分别统计涉氢企业主体产品产能情况，例如合成氨企业统计其合成氨产能，甲醇企业统计其甲醇产能等；

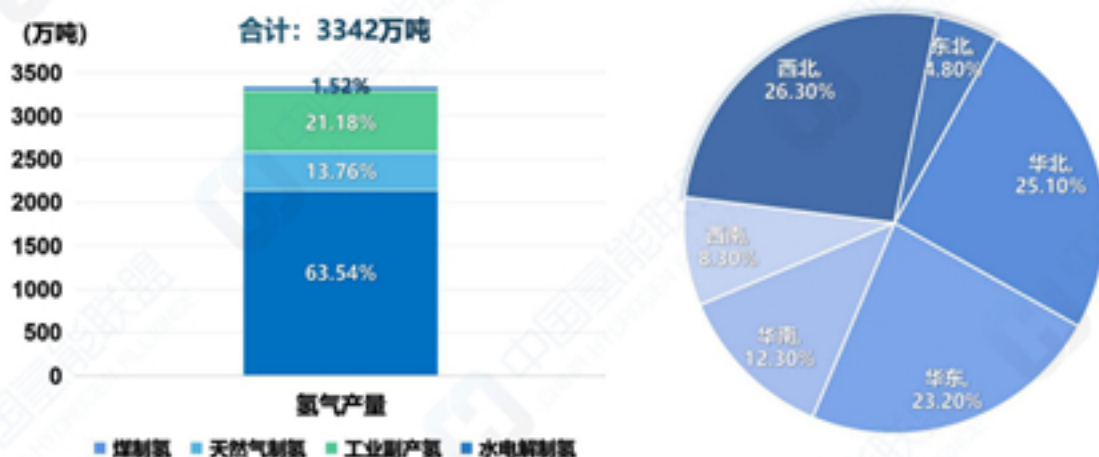
2) 根据全行业生产技术工艺和负荷水平，按用氢平均值进行含氢合成气的产量折算；

3) 按照初始原料路线（煤、天然气、甲醇、焦化副产、兰炭副产、烧碱副产、丙烷脱氢或乙烷裂解副产、电解水）、用途（制合成氨、甲醇、合成油、合成天然气、乙二醇、炼厂氢能）、区域分布（华北、东北、华东、中南、西南、西北）进行分类统计汇总。

从生产原料看，主要包括煤炭、天然气等化石能源以及工业副产气。其中，煤制氢产量最大，达到 2,124 万吨，占比 63.54%；其次为工业副产氢和天然气制氢，产量分别为 708 万吨和 460 万吨，电解水制氢产量约 50 万吨。

从区域分布看，我国氢气产能主要集中在西北、华北和华东地区，合计占比 75%。其中，西北地区产能为 1,067 万吨/年，华北地区产能为 1,021 万吨/年，华东地区产能为 940 万吨/年，华南地区产能为 499 万吨/年，西南地区 and 东北地区产能分别为 335 万吨/年和 195 万吨/年，占比分别为 8.3% 和 4.8%。

图表 11 2019 年中国氢气生产结构与产能分布



数据来源：中国氢能联盟研究院

第三章

碳达峰目标下低碳清洁氢制取关键技术

随着发展低碳清洁氢已成为全球共识，各国制氢技术路线均立足本地氢源潜力和未來氢能产业需求，呈现低碳氢、清洁氢到可再生氢的梯次发展趋势，并重点围绕可再生能源电解水制氢技术、化石能源制氢+CCUS 技术进行项目示范和产业布局。此外，针对燃料电池汽车终端应用场景，开展氢气纯化与氢气品质研究工作，确保氢气高品质供应。

化石能源制氢+CCUS 技术方面，国外针对 CCUS 技术进行了能耗优化提升和新工艺的开发，并在碳利用与封存方面开展了广泛项目示范，积累了百万吨级捕集利用封存经验，部分技术已经具备商业化应用潜力。但我国在 CCUS 技术集成、海底封存和工业应用与国际先进水平差距较大，且 CCUS 大规模示范项目数量和整体规模均远低于发达国家。

氢气纯化技术方面，美国与日本立足本国能源结构和技术优势，分别聚焦小型天然气重整制氢场景与氨分解重整制氢、有机液体解析氢气场景，开展燃料电池车用氢气纯化技术研究，包括高效小型变压吸附技术、有机膜分离、无机膜分离和金属钯膜分离技术。我国的氢气来源广泛，尤其是副产气杂质种类多且含量分布宽，单一纯化技术路线难以满足实际需求。尤其在燃料电池车用氢气纯化领域，我国起步较晚，缺乏系统性研究。

结合我国能源结构以及氢能市场所处的发展阶段，低碳清洁氢气制取领域近中期应着重开发低成本可再生能源电解水制氢技术与质子交换膜燃料电池汽车用氢气纯化技术攻关与示范，辅之以 CCUS 技术研究，并结合工业脱碳技术发展逐步拓展应用场景。

图表 23 我国低碳清洁氢技术路线图



数据来源：中国氢能联盟研究院

一、电解水制氢关键技术

电解水制氢技术主要有碱性水电解槽（ALK）、质子交换膜水电解槽（PEM）和固体氧化物水电解槽（SOEC）三种。就我国而言，ALK制氢技术成熟，市场份额高，但是在制氢效率等重要技术指标上仍与国外存在一定差距。PEM制氢技术刚刚起步，性能尤其是寿命尚缺乏市场验证，整体上落后于欧美。在可再生能源制氢项目方面，缺少系统性大规模示范以及电氢融合技术研究。

专栏 4. 电解水制氢技术发展趋势

美国、欧洲和日韩均将电解水制氢技术视为未来的主流发展方向，聚焦ALK技术规模化和PEM技术产业化。重点围绕“提高电解效率”、“耐久性”和“设备

第四章

政策及投融资建议

氢能是我国现代能源体系的重要组成部分。建设低碳清洁氢能供应体系是落实“四个革命、一个合作”能源安全新战略，建设美丽中国的重要抓手，更是应对世界百年未有之大变局的重要战略高地。面对气候变化、环境风险挑战、能源资源约束等日益严峻的全球问题，中国树立人类命运共同体理念，促进经济社会发展全面绿色转型，在努力推动本国能源清洁低碳发展的同时，积极参与全球能源治理，与各国一道寻求加快推进全球能源可持续发展新道路。习近平主席在第七十五届联合国大会一般性辩论上宣布，中国将提高国家自主贡献力度，采取更加有力的政策和措施，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。中国氢能进入绿色发展新阶段。

我国即将开启全面建设社会主义现代化国家的新征程。为推动碳中和战略下的低碳清洁氢气供应体系建设，中国氢能联盟建议如下：

一、完善低碳清洁氢气政策支持体系

随着低碳清洁氢能技术的日益普及和成本降低，氢能支持政策需求也随之呈现阶段性变化，需要明确优先顺序。

“十三五”至今，全球氢能都处于导入期，低碳清洁氢更是刚刚起步，处于技术准备期。此阶段预计将延伸到“十四五”中期，最大的障碍是经济性。政策的首要需求是通过中长期的国家氢能战略规划鼓励电解槽和CCUS等低碳清洁制氢技术应用，并以财政政策、专项基金方式直接推动低碳清洁氢气发展。国务院印发《新能源汽车产业发展规划（2021-2035年）》和五部门《关于推动燃料电池汽车示范应用的通知》均明确指出鼓励发展绿氢，但需要进一步支持有条件的地区通过发展低碳清洁氢气制取项目率先达峰，探索“制氢电价”“加氢站强制低碳清洁氢气使用比例”等需求刺激政策，完善风险保障政策引导社会资本进入。“十四五”中期到2030年，低碳清洁制氢项目方兴未艾，市场加速渗透，经济性得到解决，在部分应用场景将与电力或传统能源解决方案相竞争。此阶段的政策需求重在梳理各领域对于低碳清洁氢气发展的制约条款，充分鼓励各类市



市场主体扩大技术研发和项目规模，如探索“碳税”等补充政策，制定国际标准和规范；加速基础设施建设，实现集群式发展，保障低碳清洁氢能的可持续发展。2030 年以后，低碳清洁制氢技术逐步成熟并实现平价，市场规模快速增长，在各终端应用更具竞争力。此阶段不再需要直接的政策支持，应综合评估低碳清洁氢能对碳中和以及相关行业的影响，确保资金高效流动，并提升绿色产品的价值认知。

二、加强低碳清洁氢气市场建设

大力推动低碳清洁氢气市场基础能力建设，做好不同种类氢气标准、计量、检测和认证体系，逐步构建统一开放、竞争有序的低碳清洁氢能市场体系，着力清除各类政策壁垒，提升绿色发展的可持续性。支持各类市场主体依法平等进入，形成多元市场主体共同参与的格局，引导企业根据氢燃料供给、消费需求合理布局加氢基础设施。支持利用现有场地和设施，开展油、气、氢、电综合供给服务。构建绿色金融正向激励体系，发展可再生能源制氢及低碳清洁氢气应用项目。

搭建低碳清洁氢气交易平台，促进供需互动。推动低碳清洁氢气市场与传统电、热、气市场的互联互通，建设中长期交易、现货交易等氢气交易和辅助服务交易相结合的低碳清洁氢气市场；积极推进全国统一氢能市场和全国碳排放权交易市场建设，使零排放技术到市场的补偿和奖励，增强技术应用企业发展的内生动力。

三、提升低碳清洁氢气制备技术自主化水平

设立面向碳达峰碳中和情景的氢能源与燃料电池国家重大专项，扎实开展核心材料和过程机理等基础研究，重点开展低能耗长寿命可再生能源电解水制氢，低成本安全可靠碳捕捉与封存和高回收率氢气纯化等关键技术示范，探索高效率长寿命可再生能源直接制氢等前沿技术研究。

借助 2022 年冬季奥运会、燃料电池汽车示范应用等重大工程提升低碳清洁氢能技术装备水平，因地制宜开展化石能源制氢+CCUS 及可再生能源制氢技术应用，加快推进先进适用储氢材料产业化，突破 50MPa 及以上运输用高压氢瓶关键技术；探索天然气管道掺氢、制氢加氢一体站以及氢载体等多种形式输运技术示范应用。在国家能源局《氢能产业发展及其技术装备创新支撑研究》的基础上，制定面向 2035 年氢能全周期技术创新路线图，分阶段技术指标目标与重要任务。加大低碳清洁氢能产业科技创新投入，加强氢能学科及装备专业人才培养，提升各类主体创新能力。