

基于全生命周期的风电和光伏制氢项目的碳排放及减排效益研究

马丽丽¹, 秦雯雯¹, 王浩然^{2*}, 宣佳栋², 查道顺², 钟诚²,
孙晓琪², 沈先粤², 谢琛琛², 冯天天^{2,3}

(1. 中广核风电有限公司, 北京 100071; 2. 中国地质大学(北京)经济管理学院, 北京 100083;
3. 自然资源部资源环境承载力评价重点实验室, 北京 100083)

摘要: 基于全生命周期理论建立碳排放核算模型, 测算风电制氢和光伏制氢项目单位制氢的碳排放量和减排效益。研究发现, 风电制氢全生命周期碳排放量为 1.43 kg/kg, 光伏制氢全生命周期碳排放量为 6.91 kg/kg, 相较于煤气化制氢等传统制氢工艺具有巨大的减排优势。风电制氢碳排放主要来源于电解槽装置制备过程所用的镍以及钢铁, 光伏制氢碳排放主要来源于光伏组件制备阶段中的石灰、石墨以及钢、镍等材料。

关键词: 可再生能源制氢; 全生命周期评价; 碳减排; 碳排放核算

中图分类号: TH3

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)02-0240-07

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.02.038

Study on carbon emission and reduction benefits of wind power and photovoltaic hydrogen production projects based on life cycle

MA Li-li¹, QIN Wen-wen¹, WANG Hao-ran^{2*}, XUAN Jia-dong², ZHA Dao-shun², ZHONG Cheng²,
SUN Xiao-qi², SHEN Xian-yue², XIE Chen-chen², FENG Tian-tian^{2,3}

(1. CGN Wind Power Co., Ltd., Beijing 100071, China; 2. School of Economy and Management, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 3. Key Laboratory of Carrying Capacity Assessment for Resource and Environment, Ministry of Natural Resources, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the whole life cycle theory, a carbon emission accounting model is established to measure the carbon emissions and emission reduction benefits per unit of hydrogen production in wind power and photovoltaic hydrogen production projects. It is found that the whole life cycle carbon emissions of wind power hydrogen production are 1.43 kgCO₂/kgH₂, and the whole life cycle carbon emissions of photovoltaic hydrogen production are 6.91 kgCO₂/kgH₂, which has a huge emission reduction advantage compared with the traditional hydrogen production process, such as hydrogen production by coal gasification. Carbon emissions from wind power hydrogen production come mainly from nickel and steel used in the preparation of the electrolyzer unit, while carbon emissions from photovoltaic hydrogen production mainly come from lime and graphite as well as steel and nickel used in the preparation of photovoltaic modules.

Key words: hydrogen production from renewable energy; life cycle assessment; carbon emission reduction; carbon emission accounting

在全球能源转型的背景下, 氢能是理想可靠的大规模替代化石能源的能源载体。我国正积极推动构建清洁低碳的能源体系, 并推动氢能产业健康有序发展。2024 年发布的《能源法》提出推动氢能应用加速落地。同年颁布的《加快工业领域清洁低碳氢应用实施方案》, 鼓励各地制定可再生能源电力制氢支持政策, 鼓励可再生能源制氢项目参与电力市场。相关政策的发布为我国氢能产业的发展提供

了政策保障和指导^[1]。

我国氢能产量位于世界前列, 约占全球产量 1/3, 近年来可再生能源制氢实现了快速发展。风电制氢是氢能制备的重要技术路径之一, 基本原理是将风能转化的电能通过电解水装置分解水分子, 从而获得氢气。光伏制氢是指利用太阳能光伏发电系统产生的电能来分解水制取氢气。随着我国能源转型的加快, 目前我国太阳能和风能发电在电力结构

收稿日期: 2025-05-12; 修回日期: 2025-12-16

基金项目: 中广核新能源绿氢及其衍生品 CCER 方法学基准线及多市场耦合模型研究项目(Z083622024061)

作者简介: 马丽丽(1986-), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为“双碳”政策与商业模式, eulater@live.cn; 王浩然(1993-), 女, 博士生, 研究方向为电力行业减排、绿证绿电交易, 通讯联系人, 15732137196@163.com。

中比重不断提升,且供应保障能力持续增强,通过风光发电制氢消纳弃风弃光资源从而缓解了新能源消纳的问题^[2]。

风电和光伏制氢虽然较为清洁环保,但从全生命周期角度考虑仍会涉及能量的消耗与转换以及碳排放^[3]。虽然目前已有文献从制氢工艺的技术以及经济效益进行了分析^[4-5],但对于从全生命周期的风电和光伏制氢项目的碳排放及减排效益的分析还相对较少。需要深化全生命周期视角下的风电与光伏制氢项目碳排放及减排效益研究。因此,在此基础上本文中的主要创新点为:①在研究背景和内容方面,对风电和光伏制氢的碳排放及减排效益进行研究,研究成果可为我国制氢工艺发展变革以及为相关部门制定制氢产业发展规划提供决策依据。②在研究模型和方法方面,本文中测算了风电和光伏制氢项目“从摇篮到大门”的全生命周期的碳排放结果和碳减排潜力。

1 文献综述

1.1 可再生能源制氢经济环境效益的研究

随着全球对清洁能源需求的增加以及“双碳”目标的推进,国内外学者围绕太阳能、风能、水能等可再生能源制氢的制作成本和碳减排效益等方面开展了广泛研究。Kim等^[6](2024)研究对比了制氢过程中的二氧化碳排放和减排效果,表明绿色氢气的二氧化碳总排放量受到可再生能源类型的影响。关于太阳能风能制氢方面,Alharthi^[7](2024)研究了太阳能和风能发电和制氢,证明了在经济上绿氢能有效降低成本。Ma等^[8](2024)研究开发了风光发电制氢系统优化运行模型,并证明其能有效降低碳排放强度。杨福胜等^[9](2025)分析了多种氢气生产技术,表明风能、太阳能等可再生能源电解水制氢具有更低的碳足迹和能耗。宋东新等^[10](2023)研究对比了不同制氢方法,发现电解水制氢和光伏制氢也已得到大力发展。杨胜等^[11](2025)研究了风光出力不确定性对制氢系统的影响,表明通过多时间尺度优化运行策略可提升制氢系统的经济效益。这些研究表明可再生能源制氢在技术创新和应用拓展方面前景广阔,有望为实现“双碳”目标提供重要支撑。

1.2 化石能源制氢与可再生能源制氢的对比分析研究

为实现“双碳”目标,国内外学者围绕化石能源制氢和天然气制氢的清洁转型及灰氢、蓝氢和绿氢

的对比展开了研究。刘淑琴等^[12](2023)对比研究发现了深部煤炭地下制氢的成本远低于地面煤制氢和天然气制氢。俞和胜等^[13](2023)提出了基于化石燃料的清洁转型的技术路线,证明该路线能实现脱碳制氢和提升能源系统的综合效益。郑玉华等^[14](2022)运用能源投入回报率比较化石能源和可再生能源制氢,发现可再生能源制氢更有利于可持续发展。罗进成等^[15](2024)研究认为结合化石能源与新能源的制氢模型可能是未来规模化制氢的可行方向。Mio等^[16](2024)基于多种指标表明绿氢的可持续性优势更为明显。Huang等^[17](2023)发现随着碳捕集、利用与封存(CCUS)技术的发展,灰氢转化为绿氢是更具经济性和可持续性的选择。现有研究显示,尽管传统化石能源制氢有技术和成本优势,但因CCUS技术进步与绿电应用,绿氢将成为未来具竞争力的制氢方式之一。

当前制氢路径技术经济性研究中,碳排放核算多采用简化模型,未全面覆盖各环节温室气体。本文中构建全生命周期碳排放核算模型,涵盖制氢设备生产、建设运行维护全过程,量化分析风电和光伏制氢单位减排效益,为路径选择和政策制定提供参考。

2 我国绿氢发展现状及研究框架

在氢能政策扶持和制氢技术发展的背景下,我国氢能产业快速发展。在氢气产量方面,我国氢气产量有了大规模增加。在制氢技术方面,我国以化石能源制氢为主,表1反映了我国2019—2024年氢气总产量和不同制氢技术占比^[16]。虽然目前绿氢产量占比较低,但绿氢因零碳排放的特性,被视为未来氢能产业的关键发展方向,有较大的发展潜力。政策方面,我国明确提出要推动清洁化、低碳化、低成本化制氢^[18]。绿氢项目应用方面,截至2024年

表1 2019—2024年我国氢气总产量和不同制氢技术产量占比

年份	氢能 总产量/ 万 t	煤制氢/ %	工业 副产氢/ %	天然气 制氢/ %	电解水 制氢 占比/%	其他 制氢 技术/%
2019	2000	63.5	21.2	13.8	1.5	0.0
2020	3342	62.0	18.0	19.0	1.0	0.0
2021	3300	63.6	21.2	13.8	1.0	0.4
2022	3781	62.0	19.0	18.1	0.9	0.0
2023	3500	57.7	18.5	22.4	0.6	0.8
2024	3650	56.7	21.1	20.8	0.9	0.5

11 月,我国已累计规划建设绿氢项目超 400 个,对应电解槽需求达到 72 GW^[18]。在应用领域方面,除了传统的化工领域外,绿氢还在交通、储能、分布式发电、建筑等领域展现出巨大的应用潜力。

3 风电和光伏全生命周期模型构建

3.1 边界界定和路线描述

风电制氢与光伏制氢的系统边界均采用“从摇篮到大门”的原则。在风电制氢中,本研究以技术较成熟的陆上风电制氢为例,并选用当前应用较为广泛的碱性水电解制氢系统作为核心设备,其全生命周期包括陆上风机部件制造、陆上风电场建设、碱性水电解制氢系统建造以及碱性水电解系统运行和

维护 4 个阶段,各阶段均因原材料生产、设备制造及能源使用而产生碳排放。风机制造与风电场建设过程中需大量原材料投入,电解系统建造阶段则涉及电极、隔膜以及 30%~40% KOH 溶液等材料与能源的生产排放;运行维护阶段主要考虑例行维护及制氢过程中的能源消耗排放。光伏制氢同样在离网情景下考察所有相关原材料、能源、公用设施(电、蒸气、水)的获取及产品制造排放,并纳入固定资产(光伏阵列、电解槽、储氢罐、转换器、压缩机等)的建造影响,其过程涵盖设备建造、光伏发电和电解水制氢 3 个环节,其中光伏发电涉及冶金级多晶硅到多晶硅组件的完整工艺链。两者的系统边界如图 1 所示。

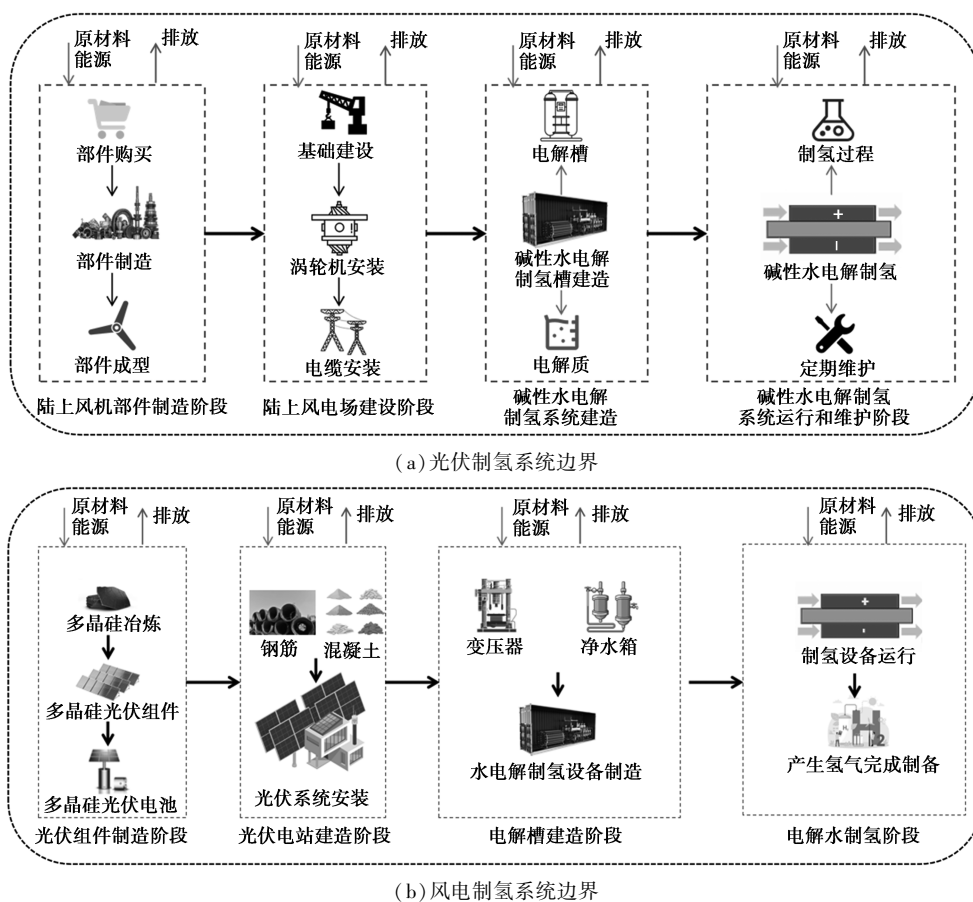


图 1 制氢系统边界图

3.2 清单核算

3.2.1 风电清单

本研究的风电场数据采用的是位于中国内蒙古的赤峰风电场的风机数据。该风电场年并网发电量为 440 GWh,年并网时间为 2 222 h。表 2 为制备 1 kg 氢气所需的风电制氢生命周期数据清单,数据根据现实案例、参考文献以及中国产品全生命周期温室气体排放库、天工生命周期数据平台、Simapro

数据库等来源获得^[19-21]。

3.2.2 光伏清单

本研究的光伏电站数据采用的是中国青海可再生氢生产系统,选择的功能单位是 1 kg 氢气,制备环境为完全离网。制备 1 kg 氢气所需各环节清单如表 3 所示,根据现实案例、参考文献以及中国产品全生命周期温室气体排放库、天工生命周期数据平台、Simapro 数据库等来源获得^[22]。

表2 风电制氢各环节数据清单

阶段	数据清单			
陆上风机部件制造阶段	水泥 3.42×10^{-3} kg	铜 4.6×10^{-5} kg	玻璃纤维 1.06×10^{-4} kg	钨铁硼 6×10^{-6} kg
	钢 9.99×10^{-4} kg			
陆上风电场建设阶段	铝 2.09×10^{-4} kg	铸铁 1.6×10^{-4} kg	水泥 3.67×10^{-2} kg	钢 1.37×10^{-2} kg
碱性水电解制氢系统建造阶段	丙烯腈-丁二烯-苯乙烯 1.07×10^{-4} kg	铝 6.02×10^{-4} kg	铜 2.68×10^{-3} kg	石墨 5.76×10^{-4} kg
	镍 2.01×10^{-2} kg	氢氧化钾 1.46×10^{-2} kg	钢 1.84×10^{-1} kg	氧化铅 1.2×10^{-3} kg
	电力 4.951×10^1 kWh			
碱性水电解制氢系统运行和维护阶段	电力 5.75×10^1 kWh	水 1×10^{-2} m ³		

表3 光伏制氢各环节数据清单

阶段	数据清单				
光伏组件制造阶段	冶金级硅	木炭 1.7×10^{-3} kg	石墨 1×10^{-3} kg	石油 5×10^{-3} kg	
	太阳能级硅	氢氧化钠 3.5×10^{-3} kg	石灰 5.8×10^{-3} kg	石墨 5.4×10^{-5} kg	
	多晶硅晶片	氢氧化钠 3.8×10^{-5} kg	醋酸 5.6×10^{-4} kg	丙烯酸 2.8×10^{-5} kg	黄铜 7.45×10^{-5} kg
		钢 2.8×10^{-5} kg	镍 1×10^{-5} kg		
太阳能电池	硝酸 2.4×10^{-4} kg	氨 3.3×10^{-4} kg	铝 5.4×10^{-4} kg	钢 1.56×10^{-7} kg	
	聚苯乙烯 4.0722×10^{-6} kg				
光伏组件	甲醇 2.1556×10^{-5} kg	铝 1.374×10^{-2} kg	铜 1.35×10^{-3} kg	铁 7.768×10^{-2} kg	
	混凝土 2×10^{-5} m ³	聚丙烯 9×10^{-4} kg	镀锌层 3.12×10^{-2} m ³	聚乙烯 9×10^{-4} kg	
光伏电站建造阶段	聚苯乙烯 4.54×10^{-3} kg				
	聚乙烯 4.64×10^{-1} kg	钢筋生产 2.323×10^{-1} kg	钢板轧制 2.323×10^{-1} kg		
电解槽建设阶段	冷却水 8.81×10^{-2} kg	氢氧化钾 3.7×10^{-3} kg			

4 碳排放核算模型构建

4.1 风电及光伏制氢碳排放核算模型

对风电/光伏制氢项目全生命周期每个阶段碳排放量进行量化,并采用每个阶段所用材料与每项材料对应的温室气体排放乘积折算至二氧化碳当量,以此对碳排放进行量化,并将各阶段的碳排放量汇总,见公式(1):

$$C_i = \sum_{y=1}^4 E_{iy} \quad (i = 1 \text{ 或 } 2)$$

$$E_{iy} = \sum_{k=1}^n q_{iyk} g_{iyk}$$

$$i = \begin{cases} 1 & \text{表示光伏制氢} \\ 2 & \text{表示风电制氢} \end{cases} \quad (1)$$

$$i = 1, y = \begin{cases} 1 & \text{表示光伏组件制造阶段} \\ 2 & \text{表示光伏电站建设阶段} \\ 3 & \text{表示光伏碱性水电解制氢系统建造阶段} \\ 4 & \text{表示光伏电解水制氢系统运行维护阶段} \end{cases}$$

$$i = 2, y = \begin{cases} 1 & \text{表示风电组件制造阶段} \\ 2 & \text{表示风电电站建设阶段} \\ 3 & \text{表示风电碱性水电解制氢系统建造阶段} \\ 4 & \text{表示风电电解水制氢系统运行维护阶段} \end{cases}$$

式中, C_i 为光伏/风电制氢的全生命周期碳排放量; E_{iy} 为该阶段的碳排放量,其中 n 是该阶段所用能源或材料的种类总数; q_{iyk} 为该阶段的第 k 种能源或材料的总耗用量; g_{iyk} 为该阶段的第 k 种能源或材料的二氧化碳排放因子。

4.2 减排效益核算模型

将风电制氢、光伏制氢与煤制氢、天然气制氢、工业副产气制氢等方法进行 LCA 对比,得出风电制氢、光伏制氢的单位减排效益:

$$E_x = E_{up} - E_{np} \quad (2)$$

式中, E_x 为风电制氢的单位减排效益; E_{up} 为风电制氢的单位碳排放量; E_{np} 为第 n 种制氢方式的单位碳排放量。

$$E_y = E_{vp} - E_{np} \quad (3)$$

式中, E_y 为光伏制氢的单位减排效益; E_{vp} 为光伏制氢的单位碳排放量。

5 结果与讨论

5.1 风电全生命周期碳排放结果分析

本研究采用 Simapro 软件对上述构建的碳排放模型进行仿真模拟, 得出风电和光伏制氢的单位碳排放情况。如表 4 所示, 生产 1 kg 氢气, 在陆上风机部件制造阶段的碳排放为 6.92×10^{-3} kg CO₂, 陆上风电场建设阶段的碳排放为 6.70×10^{-2} kg CO₂, 碱性水电解制氢系统建造阶段碳排放为 1.148 kg CO₂, 碱性水电解制氢系统运行和维护阶段碳排放为 2.08×10^{-1} kg CO₂。整体来看碱性水电解制氢系统建造阶段的碳排放量最多, 陆上风电场建设阶段次之, 碱性水电解制氢系统运行和维护阶段的碳排放最少, 风电制氢全生命周期碳排放量为 1.43 kg/kg。生产 1 kg 氢气, 在光伏系统安装阶段的碳排放为 1.031 kg CO₂, 光伏组件制造阶段碳排放为 4.566 kg CO₂, 电解槽制造阶段的碳排放为 1.314 kg CO₂, 电解水制氢阶段的碳排放为 5.186×10^{-4} kg CO₂。整体来看光伏组件制造阶段产生的碳排放量最多, 其次是电解槽制造阶段和光伏系统安装阶段, 电解水制氢阶段的碳排放最少, 光伏制氢全生命周期碳排放量为 6.91 kg/kg。

表 4 风电和光伏制氢项目全生命周期碳排放

项目	阶段	阶段总碳排放量/ (kg·kg ⁻¹)
风电制氢项目	陆上风机部件制造阶段	0.007
	陆上风电场建造阶段	0.067
	碱性水电解制氢系统建造阶段	1.148
	碱性水电解制氢系统运行和维护阶段	0.208
光伏制氢项目	光伏组件制造阶段	4.566
	光伏系统安装阶段	1.031
	电解槽制造阶段	1.314
	电解水制氢阶段	0.0005186

5.2 减排潜力分析

以《中国氢能产业发展蓝皮书(2023)》、《国际氢能技术与产业发展研究报告 2023》等不同制氢工艺的占比、全生命周期碳排放量以及 2022 年和 2030 年氢气产量等数据为基础^[3], 并结合本研究中

风电制氢和光伏制氢碳足迹结果为基础, 测算 2022 年和 2030 年各制氢工艺路线产生的氢气量和碳排放量, 如表 5 所示。从全生命周期碳排放的角度考虑, 风电制氢是最节能减排的制氢路线, 每生产 1 kg 氢气, CO₂ 排放量约为 1.43 kg, 其次是工业副产气制氢^[23] 和光伏制氢, 每生产 1 kg 氢气的 CO₂ 排放量分别约为 3.39 kg^[20] 和 6.91 kg。煤制氢和天然气制氢的碳排放较高, 每生产 1 kg 氢气分别会产生约 26.1 kg 和 18.9 kg 的 CO₂ 排放量^[23]。

表 5 2022 年和 2030 年不同制氢工艺路线产生的

氢气量和碳排放量			万 t
参数名称	年份	制氢工艺路线	参数值
不同制氢工艺路线 产生的氢气量	2022	煤制氢	2344
		天然气制氢	718
		工业副产气制氢	681
	2030	风电制氢	19
		光伏制氢	19
		煤制氢	2304
不同制氢工艺路线 产生的碳排放量	2022	天然气制氢	720
		工业副产气制氢	672
		风电制氢	552
	2030	光伏制氢	552
		煤制氢	61184
		天然气制氢	13578
2030	工业副产气制氢	2307	
	风电制氢	27	
	光伏制氢	131	
2030	煤制氢	60134	
	天然气制氢	13608	
	工业副产气制氢	2278	
2030	风电制氢	789	
	光伏制氢	3814	

在未来风电制氢和光伏制氢占比之和达到 23% 的情况下, 风电制氢和光伏制氢将取代一部分传统煤制氢以及天然气制氢的工艺, 2022 年我国氢气产量已达到 3 781 万 t, 并将在 2030 年达到 4 800 万 t 左右。对当前主流制氢方式及其产量进行分析计算可以得到, 我国单位制氢碳排放系数将从 2022 年的 20.42 kg/kg 下降至 2030 年的 16.80 kg/kg, 具有较高的减排潜力。

5.3 讨论

目前国内外已有相关研究采用生命周期评价技术对不同制氢方式所产生的全生命周期碳排放进行核算,相关研究主要涉及煤制氢、天然气制氢以及电解水制氢等方式^[24],具体计算结果如表6所示。根据相关参考文献,从整体看,煤制氢产生的全生命周期碳排放范围为20.0~26.1 kg/kg,天然气制氢的全生命周期碳排放范围为13.0~18.9 kg/kg,光伏制氢的全生命周期碳排放范围为2.04~9.37 kg/kg,风电制氢的全生命周期碳排放范围0.45~0.94 kg/kg。

表6 不同制氢方式对应的碳排放

制氢方式	碳排放/(kg·kg ⁻¹)
煤制氢 ^[3,9,25-27]	20~26.1
天然气制氢 ^[3,9,25-27]	13~18.9
光伏制氢 ^[3,9,25-27]	2.04~9.37
风电制氢 ^[3,9,25-27]	0.45~0.94

根据相关文献的计算结果,在全生命周期过程中,煤气制氢和天然气制氢的碳排放最高。光伏制氢和风电制氢在全生命周期视角下在电站的建设与维护以及氢气储运等环节存在一定的碳排放,但整体碳排放水平较低,具有较为突出的节能减排潜力。

与已有研究文献对比,本文中计算的光伏制氢全生命周期碳排放量为6.91 kg/kg,与已有文献计算结果范围较为一致;本文中计算的风电制氢全生命周期碳排放量为1.43 kg/kg,结果高于文献,这主要是由于计算结果会因核算方法、核算边界以及参数使用的不同而有所差别。但从整体看,光伏制氢和风电制氢在全生命周期视角下虽然在电站的建设与维护以及电解槽建设等环节存在一定的碳排放,但整体碳排放水平较低,具有较为突出的节能减排潜力。

6 结论

本研究利用全生命周期对风电制氢和光伏制氢2种制氢方式的碳排放进行核算,基于上述结果得出本研究的主要结论。

(1) 绿电制氢碳排放核心特征为,风电制氢每千克氢气全生命周期总碳排放1.43 kg CO₂,主要来源为碱性电解槽建造1.148 kg CO₂,其次为系统运行维护0.208 kg CO₂;光伏制氢对应排放量为6.91 kg CO₂,主要来源为光伏组件制造4.566 kg CO₂,其

次为电解槽建造1.314 kg CO₂。风电制氢需推进电场建设清洁化与电解槽减碳技术,光伏制氢需聚焦组件清洁化与电解槽减碳技术。

(3) 全生命周期视角下,风电制氢的碳排放主要来源于电解槽装置制备过程所用的镍以及钢铁,相较于其他同类研究,电解槽制备产生的碳排放量较高。对于光伏制氢,碳排放主要来源于石灰、石墨以及钢、镍等材料的使用,分别对应光伏组件制备阶段中太阳能级硅制备和多晶硅提炼环节,这也与现有同类研究结论相吻合^[24]。

(4) 通过对各类制氢方法的减排潜力分析来看,风电制氢和光伏制氢的未来发展形势较好,到2030年风电制氢和光伏制氢占比均会有一定提升,能够产生较高的减排效益。

(5) 风电制氢全生命周期碳排放远低于光伏制氢,核心原因是当前光伏组件制造流程烦琐、碳排放高;风电制氢技术更成熟低碳,优先发展该技术是实现环境与能源双赢的关键。

本文中对风电以及光伏制氢的全生命周期碳排放进行核算,研究成果可为我国制氢工艺变革及相关部门制定产业规划提供理论依据。未来将拓展研究生物质发电制氢等多类型绿电制氢的减排潜力,并结合能源效率提升更新全生命周期碳足迹及减排效应评估。

参考文献

- [1] 中国政府网.工业和信息化部等三部门关于印发《加快工业领域清洁低碳氢应用实施方案》的通知 工信厅联节函〔2024〕499号[EB/OL].(2024-12-30)[2025-05-10].https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202411/content_6985761.htm.
- [2] 舟丹.我国风光发电制氢潜力快速释放[J].中外能源,2024,29(10):68.
- [3] 郑励行,赵黛青,漆小玲,等.基于全生命周期评价的中国制氢路线能效、碳排放及经济性研究[J].工程热物理学报,2022,43(9):2305-2317.
- [4] 庄富豪,吴军,朱瑞金,等.绿电制氢产业关键技术现状及展望[J/OL].综合智慧能源,1-9[2025-05-13].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1461.TK.20250218.1123.002.html>.
- [5] Zhang J X,Ling B,He Y,et al.Life cycle assessment of three types of hydrogen production methods using solarenergy[J].International Journal of Hydrogen Energy,2022,47(30):14158-14168.
- [6] Kim Y,Min I,Lee J,et al.An analysis of greenhouse gas emissions in electrolysis for certifying clean hydrogen[J].Energies,2024,17(15):3698.
- [7] Alharthi Y Z.An analysis of hybrid renewable Energy-Based hydrogen production and power supply for Off-Grid systems[J].Proces-

- ses, 2024, 12(6): 1201.
- [8] Ma B, Zheng J F, Xian Z Y, *et al.* Optimal operation strategy for Wind-Photovoltaic Power-Based hydrogen production systems considering electrolyzer Start-Up characteristics [J]. *Processes*, 2024, 12(8): 1756.
- [9] 杨福胜, 王梓龙. 生命周期视角下氢的制取及其在化工领域的应用 [J]. *西华大学学报: 自然科学版*, 2025, 44(1): 141-154.
- [10] 宋东新, 王世乐, 苗剑, 等. 可再生能源制氢技术经济性探讨及成本分析 [J]. *中外能源*, 2023, 28(11): 24-29.
- [11] 杨胜, 樊艳芳, 侯俊杰, 等. 可再生能源 ALK-PEM 联合制氢系统多时间尺度优化运行策略 [J]. *电力系统保护与控制*, 2025, 53(3): 68-80.
- [12] 刘淑琴, 戚川, 纪雨彤, 等. 煤炭地下气化制氢技术路径 [J]. *洁净煤技术*, 2023, 29(8): 1-10.
- [13] 俞和胜, 祁海鹰, 谭忠超. “双碳”背景下传统化石能源脱碳制氢增值化利用技术 [J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2023, 63(8): 1226-1235.
- [14] 郑玉华, 侯丹丹. 基于不确定性分析的不同制氢方式能源投入回报研究 [J]. *西南大学学报: 自然科学版*, 2022, 44(11): 219-227.
- [15] 罗进成, 李锁华, 商玮珂, 等. 化石资源与新能源融合下的制氢技术发展及展望 [J]. *应用化工*, 2024, 53(11): 2777-2782.
- [16] Mio A, Barbera E, Massi Pavan A, *et al.* Sustainability analysis of hydrogen production processes [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 54: 540-553.
- [17] Huang J, Balcombe P, Feng Z. Technical and economic analysis of different colours of producing hydrogen in China [J]. *Fuel*, 2023, 337: 127227.
- [18] 中国政府网. 国家发展改革委、国家能源局联合印发《氢能产业发展中长期规划(2021—2035年)》 [EB/OL]. (2022-03-24) [2025-05-10]. https://www.gov.cn/xinwen/2022-03/24/content_5680973.htm.
- [19] 中国电力报. 我国累计规划建设绿氢项目超 400 个 [EB/OL]. (2024-11-22) [2025-05-10]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1816407061249059972&wfr=spider&for=pc>.
- [20] Du Y Y, Huang H, Liu H B, *et al.* Life cycle assessment of abandonment of onshore wind power for hydrogen production in China [J]. *Sustainability*, 2024, 16(13): 5772.
- [21] Zhang J X, Wang Z H, He Y, *et al.* Comparison of onshore/offshore wind power hydrogen production through water electrolysis by life cycle assessment [J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2023, 60: 103515.
- [22] Gu Y, Chen Q Q, Wang D F, *et al.* Strategy-based optimization and life cycle environmental impact assessment of a stable photovoltaic power-to-hydrogen system [J]. *Energy Conversion and Management*, 2024, 315: 118747.
- [23] 陈健, 姬存民, 卜令兵. 碳中和背景下工业副产气制氢技术研究与应用 [J]. *化工进展*, 2022, 41(3): 1479-1486.
- [24] Busch P, Kendall A, Lipman T. A systematic review of life cycle greenhouse gas intensity values for hydrogen production pathways [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, 184: 113588.
- [25] 许传博, 王乐凯, 史超凡, 等. 多情景下我国氢能产业中长期供需结构及碳排放模拟研究 [J]. *气候变化研究进展*, 2025, 21(2): 221-235.
- [26] 陈馨. 典型制氢工艺生命周期碳排放对比研究 [J]. *当代石油石化*, 2023, 31(1): 19-25.
- [27] Ozawa A, Kudoh Y. Assessing uncertainties of Life-Cycle CO₂ emissions using hydrogen energy for power generation [J]. *Energies*, 2021, 14(21): 6943. ■
-
- (上接第 239 页)
- [7] 张涛, 段正康, 李晟, 等. 双氧水工作液中蒽醌的降解与再生 [J]. *化学研究与应用*, 2015, 27(10): 1427-1433.
- [8] 邱彬, 柴春玲, 明扬帆, 等. 蒽醌降解物再生剂的研究进展 [J]. *化学推进剂与高分子材料*, 2024, 22(4): 1-6.
- [9] 石乃友, 赵润琪, 黄少玲, 等. 双氧水生产中蒽醌降解物再生催化剂的研究进展 [J]. *化工技术与开发*, 2025, 54(S1): 34-37, 72.
- [10] 刘春雪. 烷基蒽醌溶解度测定及其氢化反应本征动力学研究 [D]. 天津: 天津大学, 2006.
- [11] Liu G Z, Cheng S Y, Wang L, *et al.* Measurement and correlation of solubility of 2-amylanthraquinone in TMB/TOP solutions [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)*, 2004, 55(4): 640-642.
- [12] 山东华鲁恒升化工股份有限公司. 一种工作液及其制备方法和在蒽醌法生产双氧水中的应用; CN 202210359435.X [P]. 2022-07-05.
- [13] 梁海瑞, 王澄, 刘国柱. 氢氧直接合成过氧化氢用催化剂的研究进展 [J]. *化工进展*, 2021, 40(4): 2060-2069.
- [14] 胡长诚. 国外过氧化氢制备工艺研究开发新进展 [J]. *化工进展*, 2003, (1): 29-33.
- [15] Zhang X, Cheng S, Chen C, *et al.* Keto-anthraquinone covalent organic framework for H₂O₂ photosynthesis with oxygen and alkaline water [J]. *Nat Commun*, 2024, 15(1): 2649.
- [16] Wang X Y, Shen W Q, Zhang C, *et al.* A chlorine-resistant self-doped nanocarbon catalyst for boosting hydrogen peroxide synthesis in seawater [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2024, 64(7): e202419049.
- [17] Chen J, Ma Q, Zheng X, *et al.* Kinetically restrained oxygen reduction to hydrogen peroxide with nearly 100% selectivity [J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 2028. ■