

## 能源转型背景下电氢耦合项目的经济性研究现状与趋势

朱振涛, 丁雯, 杨梦, 董秋妍, 王家亮, 张家玮

(南京工程学院经济与管理学院, 江苏南京, 211167)

**摘要:** 氢能作为一种清洁高效的二次能源, 以其资源丰富、对环境无污染等优势被视为实现能源转型的重要推力。以2016—2022年WOS数据库中收录的电氢耦合项目经济性研究论文为统计源, 借助COOC和VOSviewer软件分析电氢耦合项目经济性研究领域的研究现状与趋势发现: 研究热点主要集中在可再生能源制氢、氢储能、氢能应用系统的平准化成本分析、系统成本最优方案及考虑绿证的项目经济性等方面。电氢项目经济性研究未来的发展趋势为: (1) 储能/加氢一体站在交通领域应用的经济性研究; (2) 探索开展可再生能源制氢在合成氨、甲醇、煤制油气以及冶金等行业应用的经济性研究; (3) 不同碳减排激励机制对电氢耦合项目经济性的影响研究。

19世纪70年代, 由于石油短缺、油价暴涨以及环境污染等问题出现, 使得氢能开始受到美欧等国家的关注, 多个国家基于《巴黎协定》相继发布全球氢能战略[1]。2019年两会期间, 中国首次将氢能源写进《政府工作报告》, 随着氢燃料电池汽车应用政策的颁布以及国家关于“双碳”目标的制定, 为氢能源产业的发展注入了新的动力; 2021年, 多省相继出台“十四五”氢能产业的发展规划与扶持政策, 从产业规模、企业数量、储氢站、氢燃料电池、绿色制氢技术等多个方面明确了该阶段的目标。2022年, 习近平总书记在党的二十大报告中提出, 要加快实施绿色转型战略, 持续发展绿色低碳产业; 要依托我国的能源禀赋, 遵循“先立后破”的原则, 有计划、分步骤地实施碳减排措施, 大力发展清洁能源, 推进建设新能源体系并在全球气候变化的治理中发挥积极作用[2]。氢能作为一种清洁无污染、来源广泛、灵活高效的二次能源, 以其资源丰富、对环境无污染等优势被视为未来实现能源转型的重要推力, 被称作“21世纪最具备发展潜力的清洁能源”[3]。氢能相较于煤炭、石油、天然气等其他传统化石能源最大的优势在于新型零碳。氢能之所以可以做到新型零碳, 主要得益于P2X技术, 其基本原理是将风电、光伏、核电等可再生能源产生的电通过电解水制氢设备产出氢气, 将制出的氢气转化为多种形式的电制燃料和存储能源(X), 如电制氨、电制甲烷、电制甲醇和电制费托产品等, 并应用于多个场景中[4]。

根据能源利用方式的不同, 目前可再生能源制氢的方式可划分为: 可再生能源的发电制氢与生物质制氢[5]。可再生能源制氢可以有效提高可再生能源消纳水平, 也是中国未来氢能发展的方向。中国在可再生能源方面的发展居于全球领先地位, 风电和光伏装机容量位列世界第一。随着目前中国可再生能源的快速发展, 能源消纳问题将进一步显现出来, 利用氢储能特性, 可实现电能跨季节、长周期、大规模存储, 氢储能具有储能时间长、储存容量大、清洁无污染等特点, 具有技术性方面的优势。然而, 中国氢能的开发、研究仍处于起步阶段, 耗电量高且性价比低。就氢燃料电池而言, 它的问题主要在于需要在高压或者低温下储存运输, 安全性及稳定性较差; 另外, 还受制于成本问题, 研究慢、投资大、成本高、市场小, 是新能源的通病[6]。

目前, 国内外关于电氢耦合方面的研究正在探索如何实现光伏和风电的大规模制氢, 并积极投建了一系列的项目基地, 但国内对于氢的市场需求还没有达到一定规模。可再生能源制氢在成本上与化石能源制氢仍然存在差距, 因此探讨如何降低可再生能源制氢成本对未来五年的发展具有深远的意义[7]。另一方面, 文献计量学方法作为一种新兴的文献研究方法, 已经被成功地应用于管理学、图书情报等多个领域[8], 但在电氢耦合经济性研究领域方面, 采用这种方法的文献尚不多见, 因此应用文献计量学方法探究电氢耦合项目经济性研究的热点和发展状况十分必要。

### 一、研究设计

#### (一) 研究对象

本文以Web of Science数据库收录的文章为统计源。因为国外目前对电氢耦合项目在经济性方面的应用研究并不多, 所以在检索时进行的是主题检索, 在专业检索中以“(TS = (Renewable energy OR Electrohydrogen OR Photovoltaic OR Wind OR So-lar OR Hydropower OR Hydrogen energy storage OR Electric hydrogen energy system) OR AK = (Renew-able energy OR Electrohydrogen OR Photovoltaic OR Wind OR Solar OR Hydropower OR Hydrogen energy storage OR Electric hydrogen energy system) OR TI = (Renewable energy OR Electrohydrogen OR Photovol-taic OR Wind OR Solar OR Hydropower OR Hydrogen energy storage OR Electric hydrogen energy system)) AND (AK = (Hydrogen) OR TI = (Hydrogen) OR TS = (Hydrogen)) AND (TS = (Cost OR Econom OR Profitability OR Investment) OR AK = (Cost OR Econom OR Profitability OR Investment) OR TI = (Cost OR Econom OR Profitability OR Investment))”为检索词, 因2016年之前数据库中鲜有该类文章, 故检索的日期范围设为2016年1月1日—2022年4月1日。按照以下标准进行文献数据筛选和清洗, 纳入研究样本: (1) 仅保留期刊文献; (2) 年份、文章关键词、作者、机构、文献的摘要这些文献基

本要素不能缺失；(3) 同义词批量合并，删除无意义词。在对数据清洗去重后，通过对检索到文献的标题和摘要进行关键词筛选，将标题和摘要中不含电氢、经济、成本等关键词的文献排除，留下与本文研究主题相关性较高的文章，最终共纳入409篇有效文献作为研究对象。

## (二) 研究方法与工具

本文采用文献计量学的方法，借助COOC[9]和VOSviewer软件对文献数据进行统计分析，COOC软件功能应用广泛，兼具关系（共线矩阵）构建、知识图谱、多维关系构建、双聚类、文本分词、研究热点追踪和通用软件的功能[10]；VOSviewer软件有知识图谱和引文分析的功能，经过对数据进行聚类运算，可以绘制要素之间的合作网络关系图谱，恰好弥补了COOC软件无法进行引文分析的功能缺陷[11]。

## 二、文献数据统计与分析

### (一) 发文量分析

将数据进行清洗整理后，本文提取“年份”关键字段并对各个年份进行频次统计，绘制出电氢耦合项目经济性方面相关文献的发文量趋势图，如图1所示，2016—2018年期刊发文量较为稳定（在37~40篇之间小幅波动），此后呈现持续增长的趋势。这说明学者越来越关注电氢耦合经济性方面的研究。

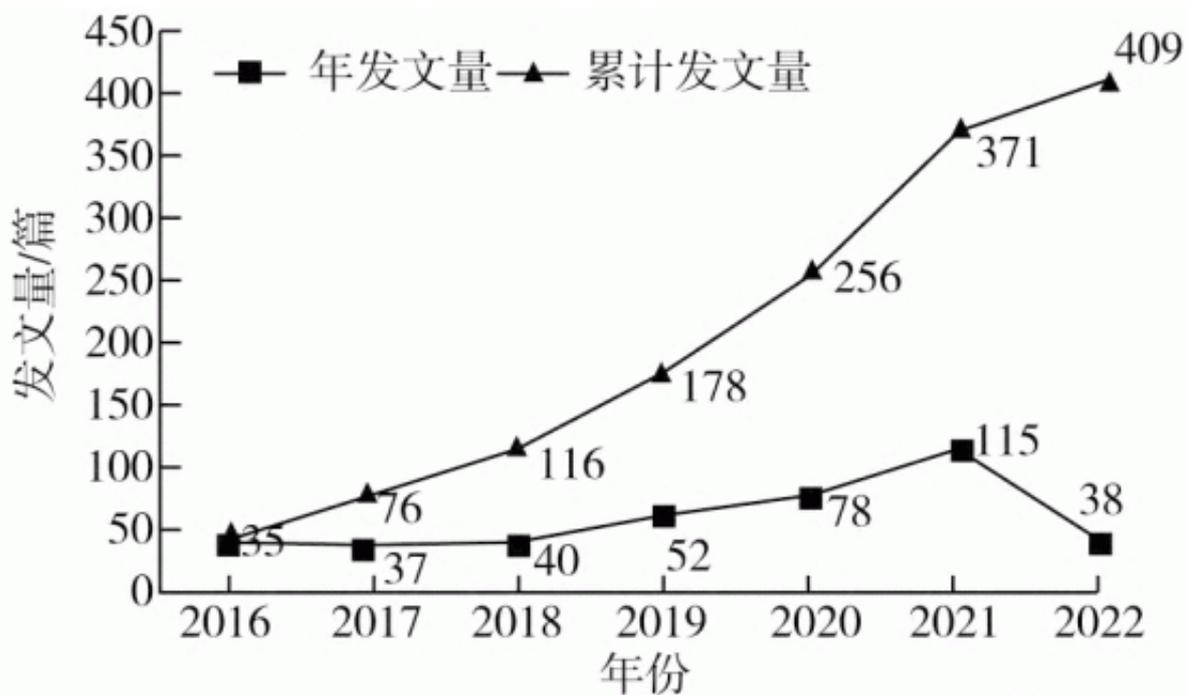


图1 2016—2022年WOS英文期刊年度发文量及累计发文量

### (二) 研究作者及机构分析

2016—2022年，在WOS样本数据集中共有1326人次在论文上署名，平均每篇论文有共同作者3.24人。其中有19篇是唯一作者，约占样本期刊总数的4.65%；390篇为两人及以上作者完成，约占样本期刊总数的95.35%，说明电氢耦合经济性方面的研究多以团队合作的方式进行。

表1 WOS 样本数据中高产作者统计表

序号	作者	国籍	被引数	发文量	占比/%
1	Dincer I	加拿大	481	18	4.401
2	Mostafaiepour A	泰国	332	12	2.934
3	Rezaei M	伊朗	132	8	1.956
4	Rosen M	加拿大	278	8	1.956
5	Jahangiri M	伊朗	136	6	1.467
6	Ozturk M	土耳其	70	5	1.222
7	Ahmadi M	伊朗	153	4	0.978
8	Aimutairik	伊朗	29	4	0.978
9	Dehshiri S	伊朗	29	4	0.978
10	Dufour J	西班牙	83	4	0.978

表1主要列出了2016—2022年关于电氢耦合项目经济性方面文献发文量占据前10的学者，其中发文量最高的是加拿大的Dincer（19篇），其次为泰国的Mostafaiepour、伊朗的Rezaei等，其中Mostafaiepour与Rezaei合作发表过多篇论文，在 高分子材料、生物领域、可再生能源领域都颇有建树[12]，Dincer的研究主要在能源燃料方面，在国际氢能杂志上发表期刊文章12篇[13]。图2借助VOSviewer软件绘制出WOS样本数据中高产作者的合作网络图，从图中可以看出Mostafaiepour（泰国）、Rezaei（伊朗）、Ahmadi（伊朗）、Aimutairik（伊朗）之间的关系密切，多以团队的形式进行合作发表文章。

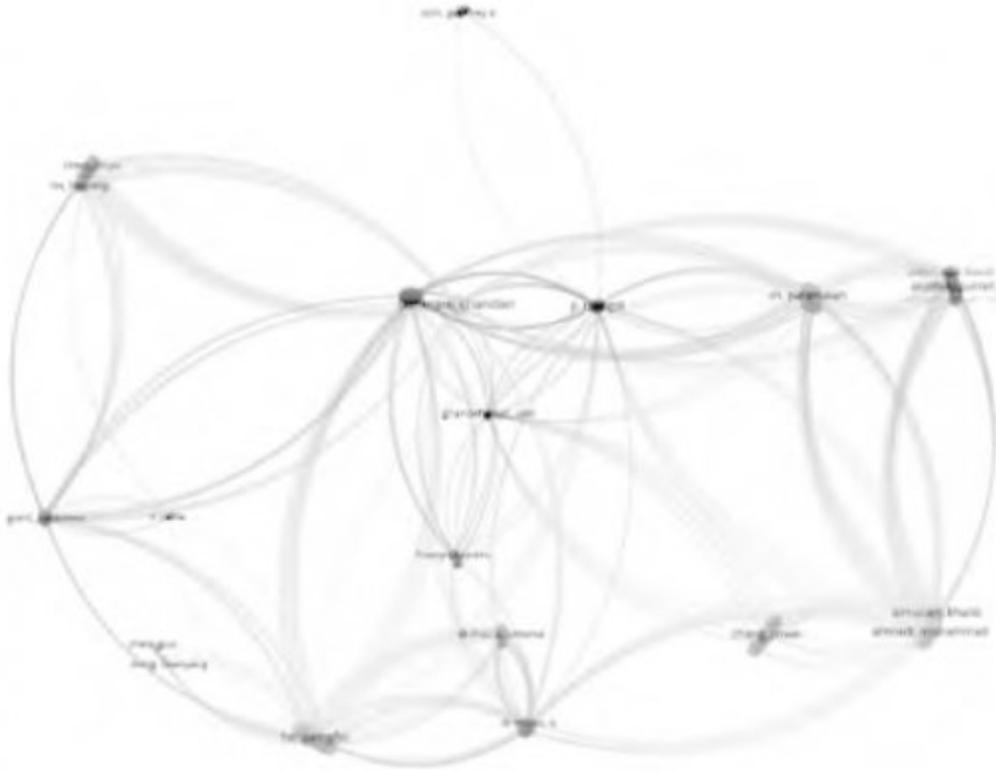


图 2 WOS 样本数据中高产作者的合作网络

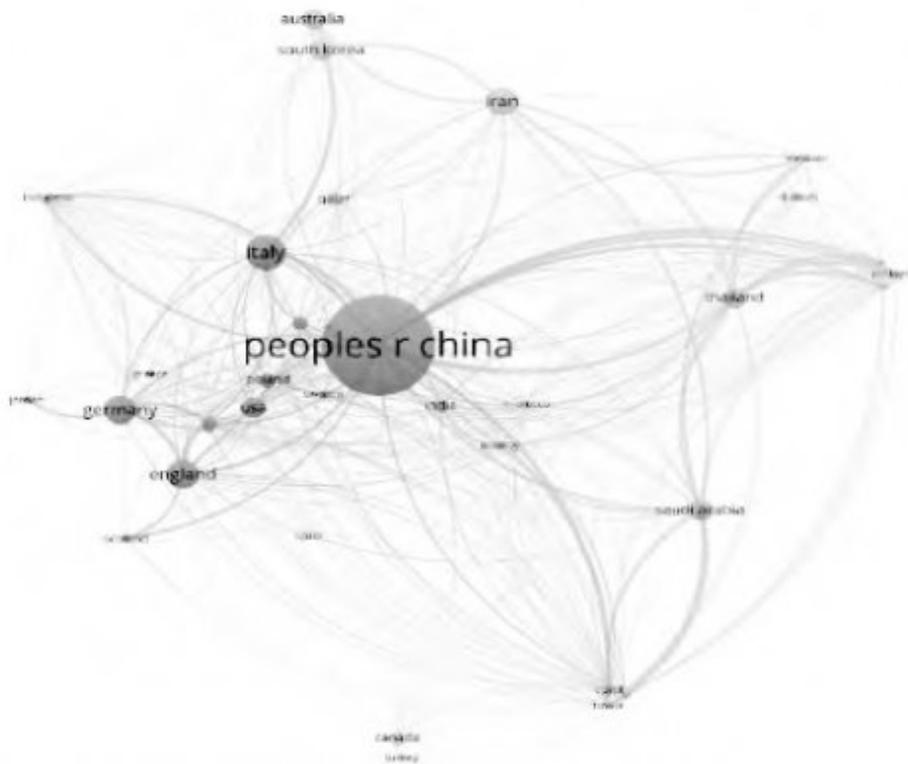


图 3 WOS 样本文献的国家合作网络图

文献发文量居于前10位的研究机构中有3家来自伊朗,其他分别来自加拿大、意大利、印度、中国等。由于伊朗的化石能源较丰富,传统化石能源用于发电将会造成大量二氧化碳的排放,迫切需要发展清洁能源来实现低碳目标,因此在能源燃料方面的研究较多[14];从英文发文量来看,加拿大的安大略理工大学发表电氢经济性方面的文献数量最多,达20篇,其次为伊朗的亚兹德大学、伊斯兰阿扎德大学、德黑兰大学,分别居于二、三、四位。中国的华北电力大学以8篇的文献发文量居于第八。图3是通过VOSviewer软件绘制的WOS样本文献的国家合作网络图,经过算法聚类,图中的每种颜色代表研究的每种聚类集群,颜色相同表示主体间的联系更密切,节点的大小代表发表文献的数量,线条的粗细代表合作程度[15]。从图3可以看出,发文量前3的国家分别为中国、意大利、德国,其中中国发文数量最多,高达77篇。此外,中国与伊朗、美国、德国、英国、韩国等多个国家在电氢耦合经济性方面都有着密切合作。

### (三) 文章被引频次分析

WOS样本数据中,被引用次数最高的10篇文献中综述性文章有6篇,原创性文章有4篇。综述性文章中被引频次最高的文献是来自阿肯色理工大学Hosseini(2016)的Hydrogen production from re-newable and sustainable energy resources: Promising green energy carrier for clean development,被引频次高达858次,这篇文献概述了可再生能源的最新制氢技术,通过对比风电制氢、生物制氢与传统化石燃料制氢的成本价格,发现生物制氢的成本为3.8\$/kg,由于其无需高成本的干燥过程,焦油和焦炭的形成也相对较少,因此最具成本效益[16];原创性文章中被引频次最高的文献是Shaner(2016)的A comparative technoeconomic analysis of renewable hydrogen production using solar energy,这篇文章分别对光电化学(PEC)制氢和光伏电解制氢(PV-E)进行了技术经济性比较分析,研究表明,两者的平准化成本分别为11.4\$/kg、12.1\$/kg,光电化学制氢技术成本更具有竞争力[17]。在这10篇被引用频次最高的文献中,位居第一位与第三位的文献来自美国,说明美国研究人员在电氢项目的经济性研究领域具有强大的影响力;位居第二位、第四位、第五位、第六位的文献分别来自南非、韩国、德国、奥地利;位居第七位、第八位、第九位、第十位的文献分别来自美国、伊朗、中国、沙特阿拉伯,说明全球多个国家都重视氢能源经济性方面的研究,以此响应全球低碳经济的号召。

图4统计了2016—2022年前10名高频次被引用文献的每年被引用量。

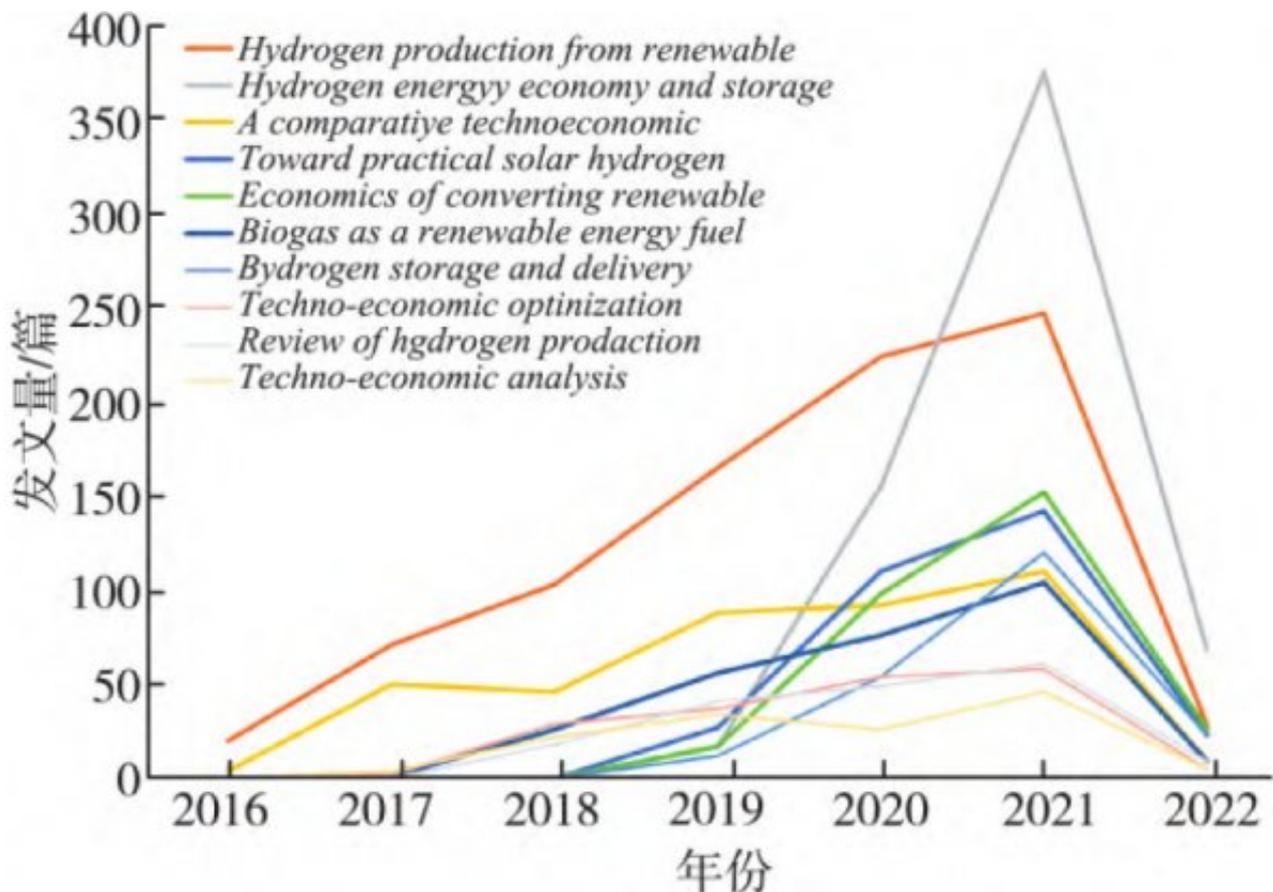


图4 2016—2022年高频次被引文献每年的被引用量

Hosseini(2016)的 Hydrogen production from re-newable and sustainable energy resources: Promising green energy carrier for clean development作为被引用量最高的文献,在2016—2022年有较大的波动,引用量持续增长。2021年被引用量达到最大值,为247篇。整体来看,文献都呈现出持续增长的态势,且在2021年达到最高被引用量,说明近几年来学者们越来越注重在电氢经济性领域的研究,研究内容也更加广泛。其中,位于第二位的是Abe(2019)的论文Hydrogen energy, economy and storage: Re-view and recommendation,在2021年的被引用频次超过位于第一位的论文,高达375篇。这篇文献概述了氢气作为未来理想的可持续能源载体,最大的障碍是氢储存,并综述了近年该领域研究人员取得的关于氢吸附动力学和热力学性质的最具前景的新成就,最后给出建议[18]。

#### (四) 期刊分析

2016—2022年,WOS样本数据中国外共有81种期刊发表了电氢耦合经济性方面的文献,发文量前10位的期刊共发表了282篇,占据文献总数的68.95%,其中,发文量最高的是 International Journal of Hydrogen Energy,高达127篇,占据搜集到的全部文献数量的31.051%,其次分别为Energy Conversion and Management,占7.090%; Energy,占5.868%; Energies,占5.379%。从前10位期刊的面向领域来看,主要集中在氢能、能源和清洁生产等领域。具体排名如表2所示。

表2 WOS样本数据中发文量前10位的期刊分布

序号	英文期刊名称	发文量	占比/%	影响因子
1	<i>International Journal of Hydrogen Energy</i>	127	31.051	5.816
2	<i>Energy Conversion and Management</i>	29	7.090	9.709
3	<i>Energy</i>	24	5.868	7.147
4	<i>Energies</i>	22	5.379	3.004
5	<i>Applied Energy</i>	21	5.134	9.746
6	<i>Journal of Cleaner Production</i>	14	3.423	9.297
7	<i>Renewable &amp; Sustainable Energy Reviews</i>	14	3.423	14.982
8	<i>Renewable Energy</i>	12	2.934	8.001
9	<i>Journal of Energy Storage</i>	11	2.689	6.517
10	<i>International Journal of Energy Research</i>	8	1.956	5.164

在影响因子方面,发文量前十位的期刊中2021年影响因子最高的是 Renewable & Sustainable Energy Reviews,为14.982,其次是Applied Energy,为9.746; Energy Conversion and Management为9.709; Journal of Cleaner Production为9.297。影响因子较高的前4位的期刊所涉及的领域分别为氢能源、能量管理、能源、可再生能源,这在一定程度上说明电氢耦合项目经济性领域的研究主要集中在可再生能源和能源管理领域。

### 三、研究现状与趋势

#### (一) 高频关键词分析

为了更深入地分析电氢耦合项目经济性领域的关键词和发展趋势,本文采用高频关键词分析法,考察电氢耦合经济性领域的研究热点[19]。排在前10的关键词有可再生能源(Renewable Energy)、太阳能(Solar Energy)、氢储能(Hydrogen Storage)、风能(Wind Energy)、燃料电池(Fuel-Cell)、绿氢(Green Hydrogen)、经济性分析(Economic Analysis)、制氢(Hydrogen Production)、平准化成本(Levelized Cost of Hydrogen, LCOH),反映国外电氢耦合项目经济性研究的热点包括3个方面:可再生能源制氢、氢储能和氢能应用(如燃料电池)的经济性分析。在可再生能源制氢的经济性研究方面,表3展示了太阳能和风电制氢经济性研究中被引频次高于100次的文献,共有9篇。

表3 太阳能和风电制氢经济性研究中被引频次高于100的文献总结

作者	制氢方式	研究方法	结论	被引频次
Hosseini (2016) <sup>[24]</sup>	生物制氢和风电制氢	对比两种制氢方式的成本	生物制氢成本为 3.8 \$/kg; 风电制氢成本为 6.64 \$/kg	879
Shaner (2016) <sup>[20]</sup>	光电化学制氢(PEC)和光伏电解制氢(PV-E)	对比两种制氢方式的成本	PEC 制氢成本在 9.2 ~ 11.4 \$/kg; PV-E 制氢成本在 6.1 ~ 12.1 \$/kg	410
Kim (2019) <sup>[23]</sup>	光电化学和水裂解制氢	对比 3 种制氢方式(PC、PEC、PV-E)的成本	PC 制氢成本在 8.5 ~ 10.3 \$/kg; PEC 制氢成本在 10.1 ~ 12.4 \$/kg; PV-E 制氢成本在 5.8 ~ 13.4 \$/kg	319
Sharafi (2017) <sup>[24]</sup>	太阳能和风能制氢	利用 Homer 软件对比不同地区的制氢成本	光伏制氢成本最低, 为 39.5 \$/kg	142
El-Eman (2019) <sup>[24]</sup>	风电制氢、光伏制氢、生物质制氢、核能制氢	对比可再生能源制氢的成本	制氢成本最低的为生物质制氢 2.78 \$/kg; 风电制氢和光伏制氢的成本分别为 4.67 \$/kg、8.98 \$/kg	134
Mohsin (2018) <sup>[25]</sup>	风能制氢	对比不同地区的制氢成本	制氢成本在 5.3 ~ 5.8 \$/kg	114
Maleki (2016) <sup>[26]</sup>	风电制氢和光伏制氢	基于人工蜂群优化的元启发式算法对风电制氢和光伏制氢进行技术评估	风电制氢成本在 4 ~ 5 \$/kg; 光伏制氢成本在 7 ~ 8 \$/kg	109
Singh (2017) <sup>[24]</sup>	光伏制氢	利用 Homer 软件计算混合可再生能源系统成本和最优性能	光伏制氢成本为 5.62 \$/kg	107
Olateju (2016) <sup>[28]</sup>	风能制氢	研究加拿大地区的制氢成本	制氢成本在 3.37 ~ 9.00 \$/kg	101

研究涉及可再生能源制氢的方式包括了生物质制氢、风电制氢、太阳能制氢(光电化学、光伏电解等)以及核能制氢中的一种或多种制氢方式结合,以提高电氢耦合的经济性;在研究方法方面,多以制氢的平准化成本(LCOH)为衡量指标,并对比不同地区或不同制氢方式的平准化成本。

表4 氢储能相关的经济性研究中被引频次高于50的文献总结

作者	研究问题	研究方法	结论	被引频次
Michalski (2017) <sup>[24]</sup>	对比电解储氢和盐穴储氢经济性	采用 LCOH 估算碱性电解和 PEM 电解制氢成本	电解储氢成本为 5.3 \$/kg; PEM 盐穴储氢成本为 5.04 \$/kg	92
Khosravi (2018) <sup>[24]</sup>	分析可再生能源和储氢系统的经济性	用全生命周期成本估算混合能源储氢系统的成本	储氢罐成本为 500 \$/kg; 燃料电池成本为 2 000 \$/kg	68
Eypasch (2017) <sup>[24]</sup>	评估固定式电力储能系统的技术经济性和可行性	建立液态有机氢系统模型计算储氢系统的成本	系统电解的最优成本为 103.7 \$/kW·h	61
Gorre (2020) <sup>[24]</sup>	将“电转气”途径中的氢气分离存储, 估算其成本效益	基于蒙特卡洛模拟工具, 估算压缩氢气容量成本	压缩氢气容量成本为 20 - 100 €/m <sup>3</sup>	59
Le (2017) <sup>[24]</sup>	分析大规模利用地下岩洞存储氢气的经济可行性	分析地下储氢的经济性成本	一般情况下的平准化成本为 4.4 - 6.5 \$/kg	58
Hou (2017) <sup>[24]</sup>	研究丹麦海上风电耦合储氢系统的经济性	用 NPV 估算储氢装置的投资回收期 and 储氢成本	储氢设备成本为 14.38 €/MW·h	56
Zhao (2016) <sup>[24]</sup>	分析将氢能应用于加氢站与存储时的平准化成本	通过 LCOH 分析储氢的经济成本	在奥克尼群岛, 氢气的平准化成本为 13.55 \$/kg	53
Hugo (2020) <sup>[24]</sup>	对标称功率为 500 kW 的 HBFb 存储系统进行全面的技术经济分析	基于氢溴液流电池 (HBFb) 的技术经济分析	一般成本为 0.074 \$/kW·h, 可与化石发电厂竞争; 未来可能降至 0.034 \$/kW·h	52

在氢储能的经济性研究方面, 表4列出被引频次高于50的文献, 共8篇。在现有的研究中有多种储存氢气的方法, 包括盐穴储存氢气、地下岩洞存储、海上风电耦合存储系统等, 在研究方法上多采用平准化成本、全生命周期成本、净现值分析和Homer软件仿真模型模拟的方法估算氢气成本和氢储能的可行性。

表5 氢能应用相关的经济性研究中被引频次高于50的文献总结

作者	研究问题	研究方法	结论	被引频次
Bansal (2020) <sup>[25]</sup>	对比风电制氢的氢能/电能/一站式充电站模式的经济性	HOMER 软件和 HDRSAM 模型模拟分析应用场景	最佳解决方案为与电网相连的一站式充电站, 其系统成本为 452 148 \$, 总成本为 2 833 465 \$	88
Fabian (2018) <sup>[24]</sup>	共享燃料汽车规模和制氢成本的关系及燃料电池汽车的盈利能力	通过 LCOH 衡量不同车辆规模下的制氢成本	氢气成本随着车队规模的增大而降低, 每扩大 100 辆车辆规模时, 氢成本下降 15 €/kg	83
Guowei (2017) <sup>[24]</sup>	分析风电制氢和氢燃料电池汽车系统的制氢经济性	基于 HOMER 软件分析系统的年度收入和利润	以吉林的某风电场为案例, 结果显示系统的最低净现值为 127 673 994.09 \$	74
Razyq (2019) <sup>[24]</sup>	将氢能用于氢燃料电池汽车的技术经济可行性分析	基于 Aspen HYSYS 软件的模拟分析	集中式氢能分解制氢, 在经济上具有可行性, 其投资回收期为 8 年、内部收益率为 12%、净现值为 56 000 000 \$	61
Gökçek (2018) <sup>[24]</sup>	对土耳其地区的风光混合动力加氢站的经济技术分析	基于 Homer 软件对制氢成本的分析	在不同的系统配置下, 制氢成本为 7.526 ~ 7.866 \$/kg	58

在氢能应用的经济性方面, 表5列出了被引频次高于50的文献, 共5篇。在现有研究中, 氢能应用主要集中在氢燃料电池汽车和加氢站方面, 构建储氢/加氢一体站; 在研究方法上, 多是采用平准化制氢成本、氢能技术和经济仿真软件模拟的方法估算氢能应用系统的成本和氢能应用的可行性以及最佳解决方案。

## (二) 研究热点分析

表6 2016—2022年WOS样本数据研究热点时序表

2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
可再生能源	氢生产	氢生产	燃料电池	氢生产	可再生能源	可再生能源
优化	可再生能源	可再生能源	氢储存	可再生能源	氢生产	氢的平准化成本
烟	Homer	氢生产	可再生能源	太阳能	电解	电解
太阳能	氢储存	烟	风能	氢储存	燃料电池	氢生产
生物质	燃料电池	加氢站	可再生氢气	电转气	能源储存	绿氢

词频统计是对每年的研究热点以及关键词进行计数。从首次出现开始，出现时间越早，频次就越高，因此最近几年出现的关键词很难占上风[42]，由表6可以看出，WOS样本数据2016—2022年前5个高频关键词的演变，关于电氢耦合项目经济性的研究热点主要是围绕可再生能源制氢、氢储能、氢燃料电池方面的平准化成本分析和技术分析，但根据时间节点的不同具有阶段差异性，2016—2018年以生物质、Homer、加氢站为研究热点；2019—2022年以电转气、绿氢、电解为研究热点。

### 1.2016—2018年：以生物质制氢、加氢站为研究热点

这一时段以生物质制氢、加氢站的技术经济分析为研究热点。Takatsu等提出一种新型氢基混合可再生能源系统，利用太阳能电解和生物质原料汽化两种方法生产氢燃料，基于集成仿真优化模型对系统进行技术经济评估，结果表明，系统的平准化成本估计分别为55.92日元/kW·h和56.47日元/kW·h，具有一定的可行性[43]。Micena等提出了一种由光伏电站驱动加氢站设计并对其进行了可行性分析，结果表明，大型加氢站的氢气成本约为8.96\$/kg[44]。

### 2.2019—2022年：以电解制氢和绿氢为研究热点

这一时段水电解制氢技术已经进入商业应用阶段，用绿氢替代灰氢的技术经济性分析成为研究热点。Pan等详细评估了由光伏和电网制氢系统(PGHS)生产电解氢的平准化成本，该评估考虑了中国太阳能辐射方面的省级差异和各个省份的氢气平准化成本，发现各个省份的电解氢平准化成本从每千克31.5日元到每千克46.8日元不等，只有当国家使用分时电价和补贴光伏发电时，才可以提高电氢生产成本和二氧化碳排放量方面的优势[45]。“绿氢”是以风能、太阳能、水力等绿色能源为原料所产生的绿电制氢，是2021年新的研究热点词汇。Lah-naoui等提出了以绿色氢气代替传统化石燃料使运输部门实行脱碳，并对绿氢的运储成本进行平准化成本分析，结果表明，使用液态有机氢代替压缩气体可以最大限度地降低运输和储存成本[46]。

### 3.2022年以后：以绿证为未来新型研究热点

欧洲国家在21世纪初开始推行可再生能源配额制和绿色交易机制，中国在2016年首次提出建立可再生能源电力绿色证书交易机制，使绿证成为2022年后的新型研究热点词汇[47]。英国从2002年实行配额制开始，可再生能源发电量比例已从不足2%提高到43%；韩国从2012年实行配额制以来，成为全球第八的光伏市场[48]。Yu等考虑到绿色证书对碳排放交易市场的影响，建立了基于系统动力学理论和情景设计法的仿真模型。结果表明，实施绿色交易机制和碳排放交易机制有助于控制电力行业的碳排放，促进中国双碳目标的实现[49]。

## 四、结语

### (一) 主要结论

能源行业实现“双碳”目标的前提是实现从以化石能源为主体的传统能源体系转型为以可再生能源为主的新能源体系。通过电氢耦合项目利用绿氢的能质两用特性，帮助能源、交通、化工、冶金等行业降碳，这是实现“双碳”目标的重要路径。研究发现：

#### 1.研究特征

2016—2022年，关于电氢耦合经济性方面的期刊发文量持续增长，截止到2021年11月，期刊的发文量突破百位。WOS样本数据中，加拿大的Dincer发文量最高，为18篇，占比4.401%，文献被引用量也最高，达到481次；从机构发文量来看，加拿大的安大略理工大学发表电氢经济性方面的文献数量最多，达到20篇，占比4.890%；在中国的机构中，以华北电力大学的发文量最高，且大多都以团队的形式；发文量最高的期刊是International Journal of Hydrogen Energy，发文量高达127篇，占搜集到的全部文献数量的31.051%，其次分别为Energy Conversion and Management，发文

29篇，占7.090%；Energy发文24篇，占5.868%；Energies发文22篇，占5.379%，这些期刊在氢能领域的研究具有多元化，对该领域的研究具有很高的参考价值。

## 2. 研究热点与发展趋势

截止到2022年，关于电氢耦合经济性方面的研究热点主要集中在可再生能源制氢、氢储能、氢能应用系统方面的成本分析和最优解决方案分析。在制氢方式上，生物质制氢、太阳能和风电电解制氢、绿氢混合系统的经济性分析成为近几年来新的研究热点；在研究制氢项目经济性中大多数以平准化制氢成本（LCOH）作为衡量指标，以及采用Homer等软件仿真模型模拟分析的方法估算其可行性。

总体的发展趋势是以电氢研究为核心减少二氧化碳气体的排放，在经济性效益评估中以电氢项目制氢成本和投资收益为关键。国内氢能的一些领域的应用还存在一系列的问题和发展的障碍，缺乏对氢能作为储能介质和不同能源行业耦合的认识[50]。氢能产业发展在氢能源转型的趋势下，应当合理确定氢能在未来能源系统发展中的地位，布局基于分布式可再生能源或电网低谷负荷的储能/加氢一体站，并利用站内制氢运输成本低的优势推动氢能分布式生产和就近利用，因此，储能/加氢一体站在交通领域应用的经济性研究将成为下一个发展趋势。

我国二氧化碳排放量居于世界第一，碳排放主要来源于煤炭以及化石燃料的发电，还有交通领域石油、柴油的使用。另一方面是来自于化工产业、炼金合成氨等刚性排放的二氧化碳。要降低排放量，就要使用碳捕获、利用和封存技术。李灿院士指出，利用太阳能等可再生能源生产“绿色”氢能、并将二氧化碳加氢转化为甲醇等液体燃料，形成液态太阳燃料（即液态阳光），将大幅降低二氧化碳排放量。探索如何开展可再生能源制氢在合成氨、甲醇、煤制油气以及炼金等行业的技术应用将成为新的研究趋势。

除了采用平准化成本和Homer软件仿真模型模拟的方法来估算电氢项目的技术可行性外，经济效益评估还可以采取学习曲线模型的方法。学习曲线被广泛应用于估计技术成本随着时间的变化发展，Amy等在分析台湾光伏系统的安装成本时，采用层次化学习曲线模型来描述和预测台湾光伏系统的成本降低趋势，通过量化关键成本因素的影响，使政府、光伏生产商、运营商和用户能够更准确地预测光伏安装成本[51]。该方法也可以扩展到不同的能源技术应用方面，探究学习曲线模型对可再生能源制氢成本发展的影响将成为未来新的研究趋势。

### （二）研究展望

2016—2022年WOS数据库中关于可再生能源制氢经济性研究的发文量增长迅猛，由此可见，目前电氢耦合项目经济性研究正处于蓬勃发展阶段。

在电氢项目的经济性研究方面，现有的国内外研究主要集中在风电、光伏制氢和氢储能的技术经济研究，通过考虑系统的初始投资成本、运维成本、更换成本等来估算平准化制氢成本，忽视了对环境因素和政策因素的考量。2021年正式启动全国碳排放权交易市场后，共2225家发电企业和自备电厂被记入到全国碳排放配额交易管理中，碳交易和碳税机制对氢市场的价格有一定的影响，同时也会改变制氢的成本结构和清洁氢的收益结构，因此，未来在对电氢项目的经济性进行分析时，可以考虑碳税和碳交易机制对制氢系统成本的影响。

在研究方法方面，国内外对于经济性的研究方法主要是采用NPV、IRR估算其投资回收期，借助新能源混合系统仿真软件和建立仿真模型模拟的方法分析项目的可行性，可以进一步探究基于学习曲线模型的方法来分析技术进步对电氢耦合系统成本发展的影响。

## 参考文献：

- [1] 刘玮, 万燕鸣, 王雪颖, 等. 国内外氢能产业合作新模式分析

- 与展望 [J]. 能源科技, 2022, 20(1): 61-67.
- [2] 中国共产党第二十次全国代表大会在京开幕习近平代表第十九届中央委员会向大会作报告 [EB/OL]. (2022-10-16) [2022-10-18]. [http://www.news.cn/politics/leaders/2022-10/16/c\\_1129067252.htm](http://www.news.cn/politics/leaders/2022-10/16/c_1129067252.htm).
- [3] 苗军, 郭卫军. 氢能的生产工艺及经济性分析 [J]. 能源化工, 2020, 41(6): 6-10.
- [4] Shahid Z, Santarelli M, Marocco P, et al. Techno-economic feasibility analysis of Renewable-fed Power-to-Power (P2P) systems for small French islands [J]. Energy Conversion and Management, 2022, 255: 115368.
- [5] Glenk G, Reichelstein S. Economics of converting renewable power to hydrogen [J]. Nature Energy, 2019, 4(3): 216-222.
- [6] Aitzhan N Z, Svetinovic D. Designing Microgrid Energy Markets A Case Study: The Brooklyn Microgrid [J]. Applied Energy, 2018, 15(5): 840-852.
- [7] 罗佐县, 杨国丰. “双碳”目标下我国氢能产业发展路线研判 [J]. 当代石油石化, 2022, 30(1): 1-8+37.
- [8] 邱均平, 段宇锋, 陈敬全, 等. 我国文献计量学发展的回顾与展望 [J]. 科学学研究, 2003, 21(2): 143-148.
- [9] 学术点滴. COOC 一款用于文献计量和知识图谱绘制的新软件 [EB/OL]. (2020-01-12) [2021-03-16]. [https://mp.weixin.qq.com/s/8RoKPLN6b1M5\\_jCk1J8UVg](https://mp.weixin.qq.com/s/8RoKPLN6b1M5_jCk1J8UVg).
- [10] 周超峰. 文献计量常用软件比较研究 [D]. 湖北: 华中师范大学, 2017.
- [11] 韦小玉, 杨力. 碳中和领域中英文研究对比分析——基于 VOSviewer 和 CiteSpace 的图谱呈现 [J]. 淮南师范学院学报, 2022, 24(2): 84-89.
- [12] Almutairi K, Mostafaiepour A, Baghaei N, et al. Techno-economic investigation of using solar energy for heating swimming pools in buildings and producing hydrogen: a case study [J]. Frontiers in Energy Research, 2021, 171(5): 435-460.
- [13] AlZahrani A, Dincer I. Exergoeconomic analysis of hydrogen production using a standalone high-temperature electrolyzer [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(27): 13899-13907.
- [14] Kalbasi R, Jahangiri M, Tahmasebi A. Comprehensive investigation of solar-based hydrogen and electricity production in Iran [J]. International Journal of Photoenergy, 2021, 2021(6): 3467-3492.
- [15] 秦建华, 李娜, 金泰, 等. 基于 Vosviewer 与 Citespace 对电动汽车充电负荷领域的计量分析 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22(10): 4196-4205.
- [16] Hosseini S E, Wahid M A. Hydrogen production from renewable and sustainable energy resources: Promising green energy carrier for clean development [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 57: 850-866.
- [17] Shaner M R, Atwater H A, Lewis N S, et al. A comparative technoeconomic analysis of renewable hydrogen production using solar energy [J]. Energy & Environmental Science, 2016, 9(7): 2354-2371.
- [18] Abe J O, Popoola A P I, Ajenifuja E, et al. Hydrogen energy, economy and storage: review and recommendation [J]. International

- al journal of hydrogen energy, 2019, 44 (29): 15072 - 15086.
- [19] 韩冰. 建言研究热点与演进脉络可视化分析 [D]. 湖南:湘潭大学, 2021.
- [20] Hosseini S E, Wahid M A. Hydrogen production from renewable and sustainable energy resources: Promising green energy carrier for clean development [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 57: 850 - 866.
- [21] Shaner M R, Atwater H A, Lewis N S, et al. A comparative technoeconomic analysis of renewable hydrogen production using solar energy [J]. Energy & Environmental Science, 2016, 9 (7): 2354 - 2371.
- [22] Kim J H, Hansora D, Sharma P, et al. Toward practical solar hydrogen production—an artificial photosynthetic leaf-to-farm challenge [J]. Chemical Society Reviews, 2019, 48 (7): 1908 - 1971.
- [23] Al-Sharafi A, Suhin A Z, Ayar T, et al. Technoeconomic analysis and optimization of solar and wind energy systems for power generation and hydrogen production in Saudi Arabia [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 69: 33 - 49.
- [24] El-Emam R S, Özcan H. Comprehensive review on the techno-economics of sustainable largescale clean hydrogen production [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 220: 593 - 609.
- [25] Mohsin M, Rasheed A K, Saidur R. Economic viability and production capacity of wind generated renewable hydrogen [J]. International Journal of hydrogen energy, 2018, 43 (5): 2621 - 2630.
- [26] Maleki A, Pourfayaz F, Ahmadi M H. Design of a cost-effective wind/photovoltaic/hydrogen energy system for supplying a desalination unit by a heuristic approach [J]. Solar Energy, 2016, 139: 666 - 675.
- [27] Singh A, Baredar P, Gupta B. Technoeconomic feasibility analysis of hydrogen fuel cell and solar photovoltaic hybrid renewable energy system for academic research building [J]. Energy Conversion and Management, 2017, 145: 398 - 414.
- [28] Olateju B, Kumar A, Secanell M. A technoeconomic assessment of large scale windhydrogen production with energy storage in Western Canada [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41 (21): 8755 - 8776.
- [29] Michalski J, Bnger U, Crotagino F, et al. Hydrogen generation by electrolysis and storage in salt caverns: Potentials, economics and systems aspects with regard to the German energy transition [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42 (19): 13427 - 13443.
- [30] Khosravi A, Koury R N N, Machado L, et al. Energy, exergy and economic analysis of a hybrid renewable energy with hydrogen storage system [J]. Energy, 2018, 148: 1087 - 1102.
- [31] Eypasch M, Schimpe M, Kanwar A, et al. Model-based technoeconomic evaluation of an electricity storage system based on Liquid Organic Hydrogen Carriers [J]. Applied energy, 2017, 185: 320 - 330.
- [32] Gorre J, Ruoss F, Karjunen H, et al. Cost benefits of optimizing hydrogen storage and methanation capacities for Power-to-Gas plants in dynamic operation [J]. Applied Energy, 2020, 257: 113967.
- [33] Le Duigou A, Bader A G, Lanoix J C, et al. Relevance and costs of large scale underground hydrogen storage in France [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42 (36): 22987 - 23003.
- [34] Hou P, Enevoldsen P, Eichman J, et al. Optimizing investments in coupled offshore wind-electrolytic hydrogen storage systems in Denmark [J]. Journal of Power Sources, 2017, 359: 186 - 197.
- [35] Zhao G, Nielsen E R, Troncoso E, et al. Life cycle cost analysis: A case study of hydrogen energy application on the Orkney Islands [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44 (19): 9517 - 9528.
- [36] Hugo Y A, Kout W, Dalessi G, et al. Technoeconomic analysis of a kilo-watt scale hydrogenbromine flow battery system for sustainable energy storage [J]. Processes, 2020, 8 (11): 1492.
- [37] Bansal S, Zong Y, You S, et al. Technical and economic analysis of one-stop charging stations for battery and fuel cell EV with renewable energy sources [J]. Energies, 2020, 13 (11): 2855.
- [38] Fabian G. Carsharing with fuel cell vehicles: Sizing hydrogen refueling stations based on refueling behavior [J]. Applied Energy, 2018, 228: 1540 - 1549.
- [39] Guowei B. Technoeconomic analysis of wind curtailment/hydrogen production/fuel cell vehicle system with high wind penetration in China [J]. Power and Energy Systems, CSEE Journal of, 2017, 3 (1): 44 - 52.
- [40] Razyq N. A technoeconomic analysis of centralised and distributed processes of ammonia dissociation to hydrogen for fuel cell vehicleapplications [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44 (28): 32 - 45.
- [41] Gökçek M, Kale C. Technoeconomic evaluation of a hydrogen refuelling station powered by WindPV hybrid power system: A case study for İzmir-Çe me [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43 (23): 10615 - 10625.
- [42] 魏林雪. 1992—2011年太阳能研究的文献计量分析 [D]. 天津:天津大学, 2012.
- [43] Takatsu N, Farzaneh H. Techno-economic analysis of a novel hydrogen-based hybrid renewable energy system for both grid-tied and off-grid power supply in Japan: The case of Fukushima prefecture [J]. Applied Sciences, 2020, 10 (12): 4061 - 4065.
- [44] Micena R P, Llerena-Pizarro O R, de Souza T M, et al. Solar-powered hydrogen refueling stations: a techno-economic analysis [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45 (3): 2308 - 2318.
- [45] Pan G, Gu W, Hu Q, et al. Cost and low-carbon competitiveness of electrolytic hydrogen in China [J]. Energy & Environmental Science, 2021, 14 (9): 4868 - 4881.
- [46] Lahnaoui A, Wulf C, Dalmazzone D. Optimization of hydrogen cost and transport technology in France and Germany for various production and demand scenarios [J]. Energies, 2021, 14 (3): 744.
- [47] Hui W, Xin-gang Z, Ling-zhi R, et al. An agent-based modeling approach for analyzing the influence of market participants' strategic behavior on green certificate trading [J]. Energy, 2021, 218 (8): 441 - 463.
- [48] 杜国义, 高峰, 罗雯. 碳达峰与碳中和目标下推行绿证机制的问题与思考 [J]. 风能, 2022 (1): 50 - 51.

[49] Yu X, Dong Z, Zhou D, et al. Integration of tradable green certificates trading and carbon emissions trading: How will Chinese power industry do? [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 279: 123485.

[50] 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  
原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/206656.html>

[ ] . 中外能源, 2020, 25 (2) :9 - 15.

[51] Trappey A J C, Trappey C V, Tan H, et al. The determinants of photovoltaic system costs: an evaluation using a hierarchical learning curve model [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 112: 1709 - 1716.