

## “双碳”目标下氢能在我国合成氨行业的需求与减碳路径

熊亚林<sup>1,2</sup>, 刘玮<sup>1,2</sup>, 高鹏博<sup>2</sup>, 董斌琦<sup>1</sup>, 赵铭生<sup>2</sup>

(1国华能源投资有限公司; 2北京国氢中联氢能科技研究院有限公司, 北京100007)

摘要：氨(NH<sub>3</sub>)

是现代化工中重要的化工产品之一，在农业和工业等领域均有重要的应用。当前我国合成氨过程中原料氢的生产以化石能源为主，为实现“双碳”目标，有效缓解高碳排放问题，电解水制氢等绿色合成氨技术与氨的清洁利用技术成为重要的突破口。本文对我国合成氨现状以及未来趋势进行研究，并基于长期能源替代规划系统(LEAP)模型，结合经济性驱动，以氢气价格和政策为主要驱动因素，考虑不同原料合成氨的替代，模拟我国合成氨行业2020—2060年的氢需求及碳排放趋势。结果表明，2060年，我国合成氨需求量将达1.2亿吨，氢气需求量达2128万吨，新增需求主要来源于船舶氨燃料、氨发电等新领域，超过合成氨的氢需求量的50%。我国合成氨行业由化石能源向可再生能源转换有着巨大的潜力，随着可再生能源制氢成本的降低，可再生能源制氢合成氨占比将会大幅度上升，超过97%。在碳排放方面，我国合成氨工业将在2030年达峰，峰值为2.2亿吨，2060年合成氨工业碳排放920万吨。为实现碳中和目标，我国应在可再生能源丰富的地区优先开展电解水制氢合成氨示范项目，加大力度开展电解制氢以及温和条件合成氨关键技术及应用，尽早实现低碳合成氨技术大规模应用，在氨应用方面，加大氨燃料发动机和掺氨发电的研究。

2021年9月，我国提出了2030年实现碳达峰，2060年实现碳中和的愿景。为实现双碳目标，氢能与绿氨等清洁能源成为深度脱碳的重要路径[1]。氨(NH<sub>3</sub>)是现代化工中最为重要的化工产品之一，也是最早通过异相催化实现大规模工业化生产的化工产品。氨与人类社会的发展密切相关，在过去的一百年中，氨在农业领域的应用是我国合成氨需求的最主要来源。得益于以氨为原料生产的氮肥的大规模应用，全球粮食产量增长迅速，少部分氨作为原料应用于合成纤维、炸药与塑料等工业领域[2]，但合成氨存在高耗能、高排放等问题。2020年，我国合成氨能源消耗为7198.3万吨标煤，约占全国能源消费总量的1.4%，直接排放的二氧化碳达2.19亿吨，占化工行业排放总量的19.9%，占我国碳排放总量的2.2%[3]。高排放主要是因为我国合成氨过程中原料氢的生产以煤为主。“双碳”目标下，以电解水制氢合成氨为代表的前端清洁替代与碳捕集和封存(CCS)为代表的后端处理等技术将成为合成氨脱碳路径的重要抓手[4-5]。

此外

，通过清

洁低碳氢合成的氨

被认为是理想的清洁能源载体(H含

量为17.8%质量分数)之一，燃烧产物仅为N<sub>2</sub>和H<sub>2</sub>

O。氨逐渐被全球视为从化肥到绿色能源的零碳能源载体，这是由氨的物理化学特性决定的，从体积能量密度来看，液氨体积能量密度(11.5MJ/L)比液氢(8.5MJ/L)高35%。从能耗角度，合成氨的能耗与氢液化的能耗相当。从储运角度，液氨储运更便捷，一方面氨的运输法规健全，可以利用现有的运输基础设施。另一方面氨储运成本更低，氨的沸点为-33.36℃，H<sub>2</sub>

的沸点为-252.9℃，氨更容易液化，同体积液氨比液氢多至少60%的氢，同质量液氨的储罐在成本上是液氢储罐的0.2%~1%，在重量上是液氢罐的1%~10%。液氨的蒸发速度是液氢的1/10。从安全角度，氨燃烧发生火灾和爆炸的可能性极低，且人对氨的气味极其敏感，泄露易察觉。因此国际上提出氨=氢2.0概念，将其视为单一氢能长尾问题的解决方案[6]。全球布局绿氨的国家逐渐增多，氨被认为在重型交通运输和发电等领域具有脱碳应用潜力。致力于打造“氨社会”的日本在2021年制定了2021—2050“日本氨燃料路线图”，在氨应用端，计划到2030年通过燃煤掺氨替代日本煤电厂20%的煤炭供应，随着掺烧氨技术的成熟，这一比例将上升到50%以上，最终目标是建设纯氨发电厂，作为新的低碳电力结构的一部分。在船运方面，日本计划在2025年前完成氨燃料船舶技术研发与示范，2025年后进入推广应用阶段。在氨燃料供应方面，日本目前使用量约100万吨/年，其中约20%进口。日本计划到2030年建立氨供应链，需求量约300万吨/年，到2050年，日本境内氨需求量将增加到3000万吨。氨源计划从北美、中东、澳大利亚等适合的地方建造氨生产厂，在国外完成氨的生产过程，将氨运输至日本并建立国内供应链。2020年底，日本从沙特阿拉伯已经运送了40吨低碳氨用于燃煤掺氨。韩国宣布将2022年作为氢气-氨气发电元年，力求打造全球第一大氢气和氨气发电国。计划至2027年完成将氨作为零碳发电燃料的研究和测试，从2030年开始实现氨燃料发电商业化，将氨占燃料的比例提高到3.6%，以减少其在电力生产中对煤炭和液化天然气的依赖。欧盟、美国和澳大利亚也在氨的新兴应用领域发布了相关的政策。

我国在氨的新兴应用领域也取得了突破性进展，在掺氨发电领域，国家能源集团发布“燃煤锅炉混氨燃烧技术”，标志着我国燃煤锅炉混氨技术迈入世界领先行列。在氨船舶设计建造领域，上海船舶设计研究院完成了18万吨氨燃料

散货船的开发设计，并取得劳氏船级社的原则性批准证书[7]；江南造船与劳氏船级社、瓦锡兰合作，研发设计的氨燃料（NH<sub>3</sub>）动力超大型液化气体运输船（VLGC）获得船级社颁发的原则性认可证书[8]。

但是，我国合成氨行业通过电解水制氢、CCS等技术应用的碳减排路径和清洁氢的需求还不明确，且合成氨的需求研究目前主要集中在传统农业和工业领域，对于重型交通运输领域和发电领域等新兴需求研究甚少。研究氢能在合成氨领域需求与减碳路径，具有重要的现实意义和紧迫性。本文通过LEAP模型结合经济性驱动，进行合成氨行业需求（如图1所示）、氢能需求和氢源供给结构进行预测并对碳减排进行分析。

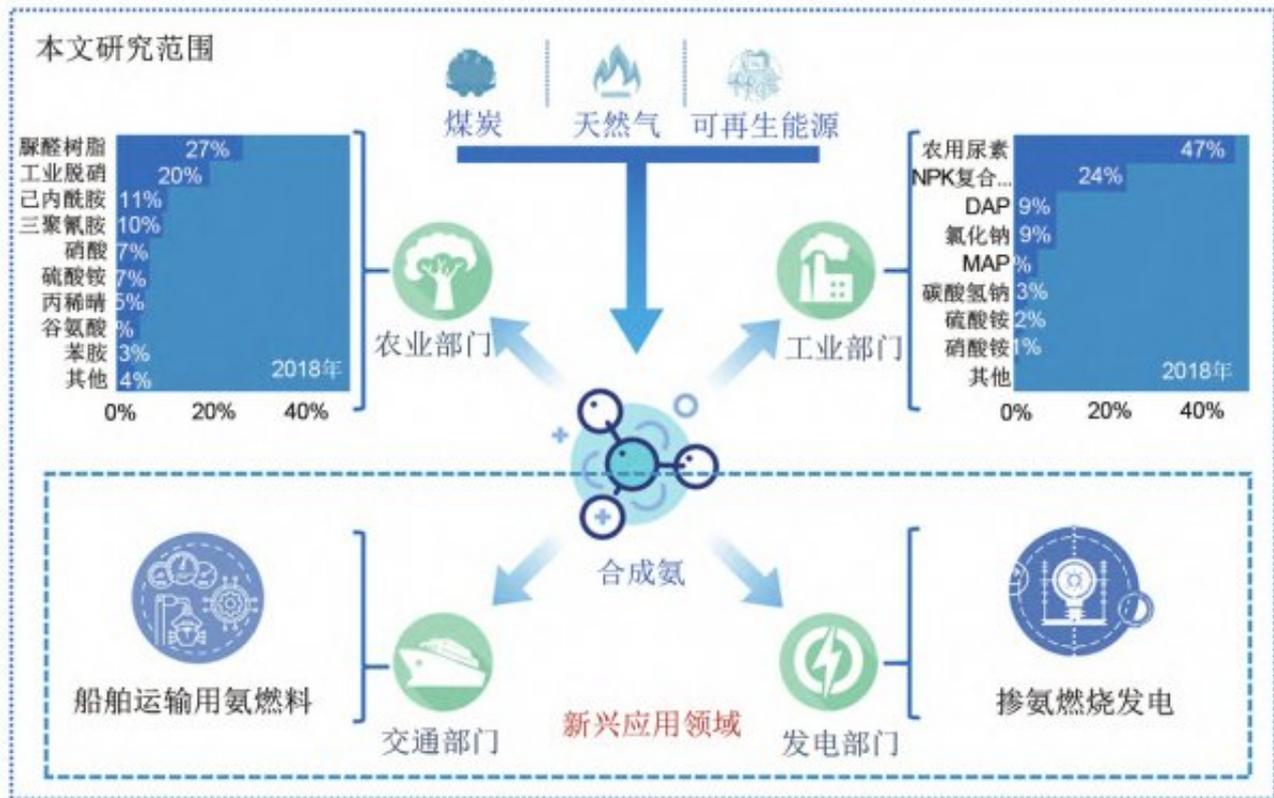


图1 合成氨产业链

Fig. 1 The synthetic ammonia industry chain

1我国合成氨行业发展现状

1.1我国合成氨产业现状

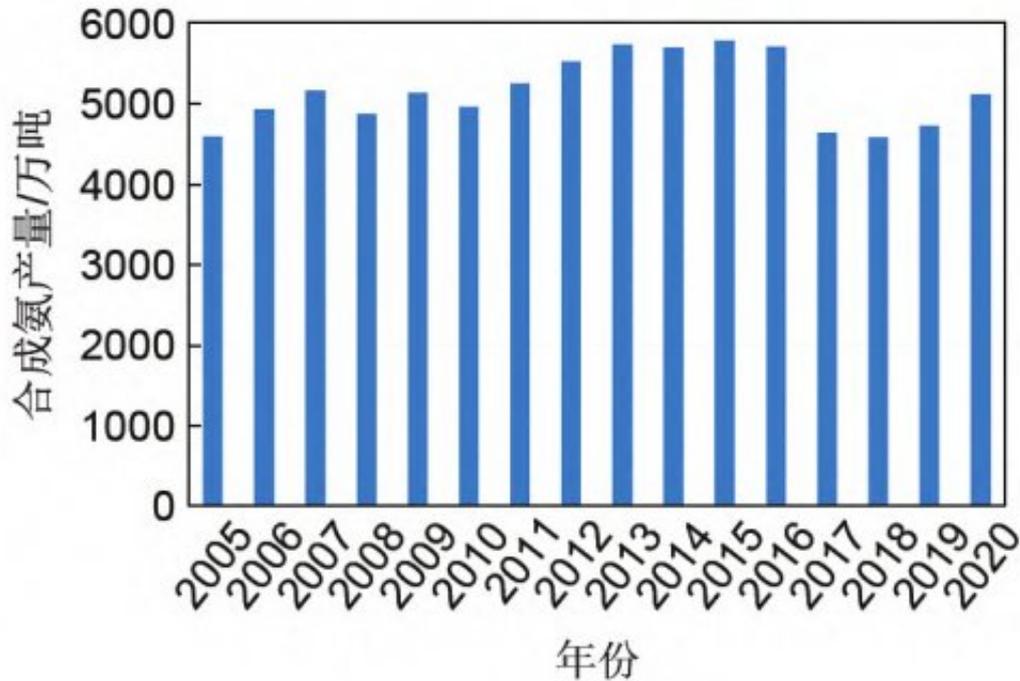


图2 2005—2020年合成氨产量

## Fig. 2 Synthetic ammonia output from 2005 to 2020

我国是最大的氨生产国，产量占全球产量的30%。根据国家统计局统计，我国2005—2020年合成氨产量如图2所示，自2005年以来，我国合成氨产量逐年攀升，至2015年达到峰值5791万吨。十三五以来，工业和信息化部要求重点行业淘汰落后以及过剩产能，其中合成氨行业不得少于1000万吨，近5年以来，我国合成氨伴随着环保限产以及落后产能的淘汰，产量逐年减少，于2018年达到最低位4587万吨。

从下游消费结构来看，呈现“减肥增化”的趋势，氨用于化肥生产的氨从2010年90%的占比下降至目前总量的70%[9]。随着我国人口增长放缓、渐趋稳定并缓慢下降，目前中国的单位耕地面积化肥使用量已经处于高位，国内化肥消费量将逐渐呈平缓下降趋势。剩余30%的氨应用于一系列工业生产中，氨是重要的化工产品与原料，是常用的无机溶剂、制冷剂、烟气与尾气脱硝的重要助剂，也是硝酸、固体铵盐、尿素、丙烯腈、橡胶和化学纤维等化工产品的主要原料。但合成氨将在一些新兴领域发挥重要作用，氨可以替代目前大部分化石燃料的应用场景，尤其是在船舶燃料和燃煤电厂掺氨发电中，将成为合成氨新增需求的新动能。

从产能分布来看，目前我国合成氨产能区域主要分布在山东、山西、河南、内蒙古、新疆、江苏等资源条件较好的地区，这些地区合成氨产能约占总量的2/3左右。今后氮肥等产业布局将进一步向原料资源地集中，实现就近转化，减少污染和损失，随着绿氢产业的布局，也将呈现向西部等可再生能源丰富地区转移的趋势。

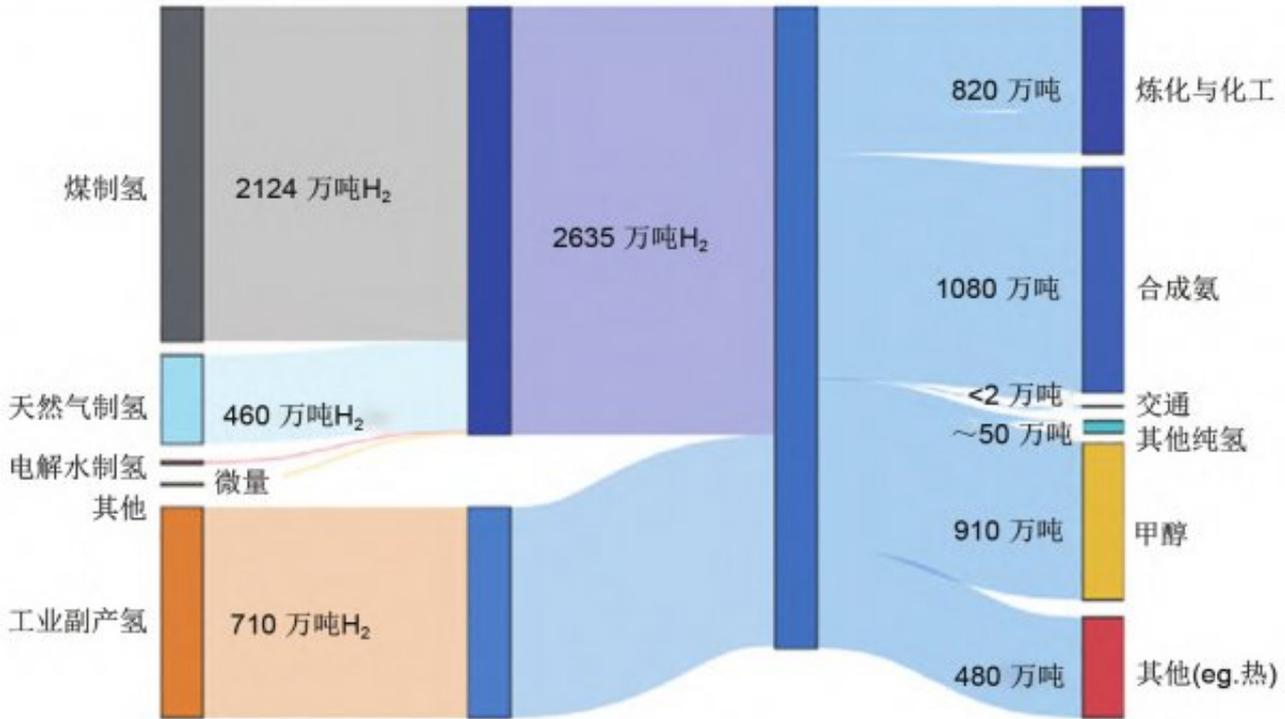


图3 中国氢气生产与消费<sup>[9]</sup>

Fig. 3 Hydrogen production and consumption in China<sup>[9]</sup>

从合成氨氢源来看，根据中国氢能联盟统计，合成氨对氢气需求量是最大的氢气终端消费领域，如图3所示。2019年合成氨产量5760万吨，生产合成氨的中间原料氢气消费量为1080万吨，占氢气需求总量比例高达32.3%<sup>[1,10]</sup>。从氢源结构来看，81%的氢气来源于煤气化工艺，天然气重整制氢占比16.6%，剩余2.4%的氢气来源于焦炭副产氢与兰炭副产氢，如图4所示。

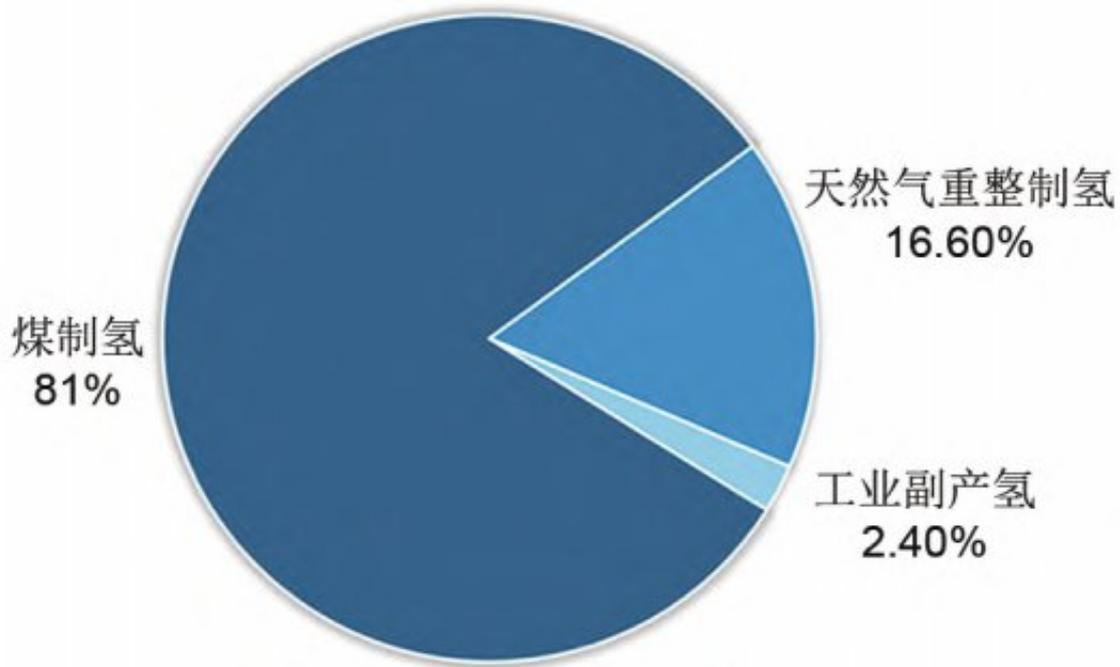


图4 合成氨行业氢源结构

Fig. 4 Hydrogen source structure of the synthetic ammonia industry

#### 1.2 技术现状

##### 1.2.1 合成氨技术

目前，Haber-Bosch法仍是全球唯一具有工业级规模的合成氨技术，该法主要包含造气、净化、压缩合成三个主要步骤。一是造气，即以天然气、煤为原料，制备含有氢气、氮气、一氧化碳的粗原料气；二是净化，造气过程中制得的粗气含有一氧化碳、二氧化碳等杂质，这些杂质不能腐蚀管道设备，而且能使催化剂中毒，因此在氢氮原料气送往合成塔之前必须进行净化处理，除去各种杂质，获得纯净的氢氮混合气；三是压缩与合成，这主要是Haber-Bosch工艺，将纯净的氢氮混合原料气压缩到高压，在催化剂及高温条件下合成氨[11-12]。可再生电力合成氨技术以清洁能源电解水生成的氢气取代传统工艺中的化石能源（煤、天然气），与从空分系统中得到的氮气反应生成氨[13-14]。以天然气、煤炭和电解水制氢为原料的典型合成氨装置流程如图5、图6和图7[15]。

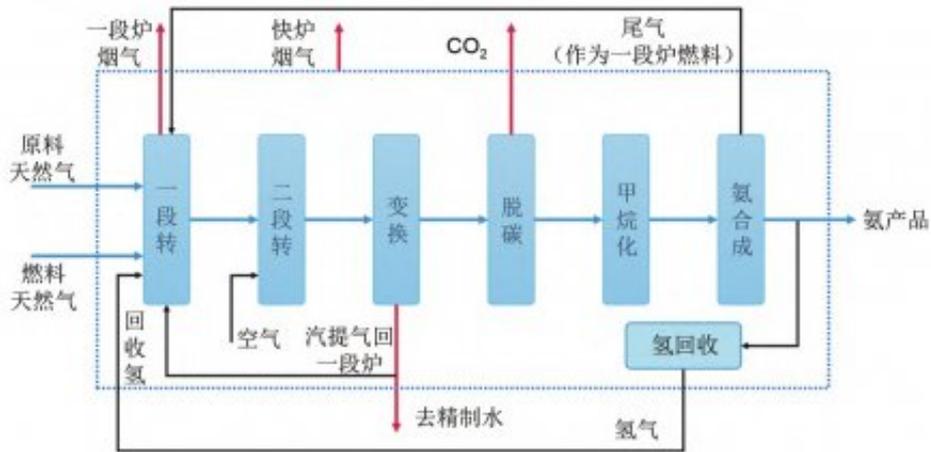


图5 以天然气为原料的典型合成氨装置流程

Fig. 5 Flowchart of a typical ammonia plant with natural gas as raw material

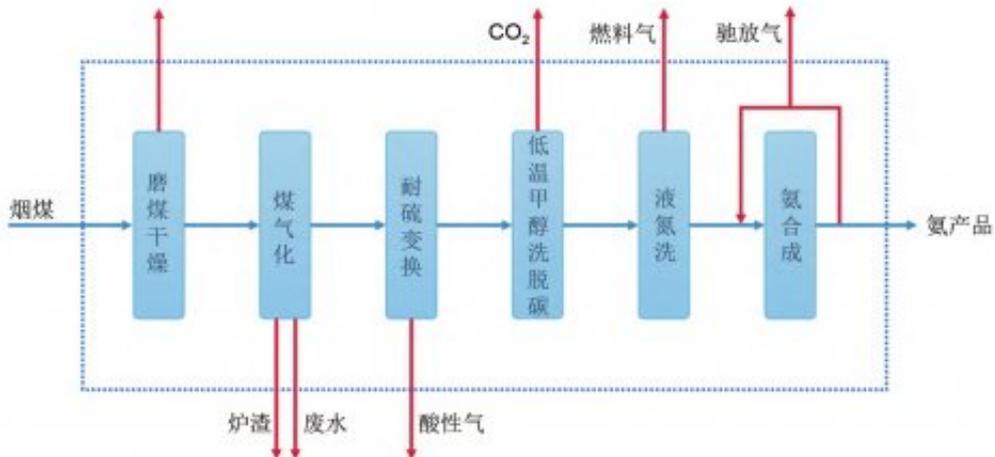


图6 烟煤为原料的典型合成氨装置流程

Fig. 6 Process flow showing a typical ammonia synthesis unit with bituminous coal as raw material

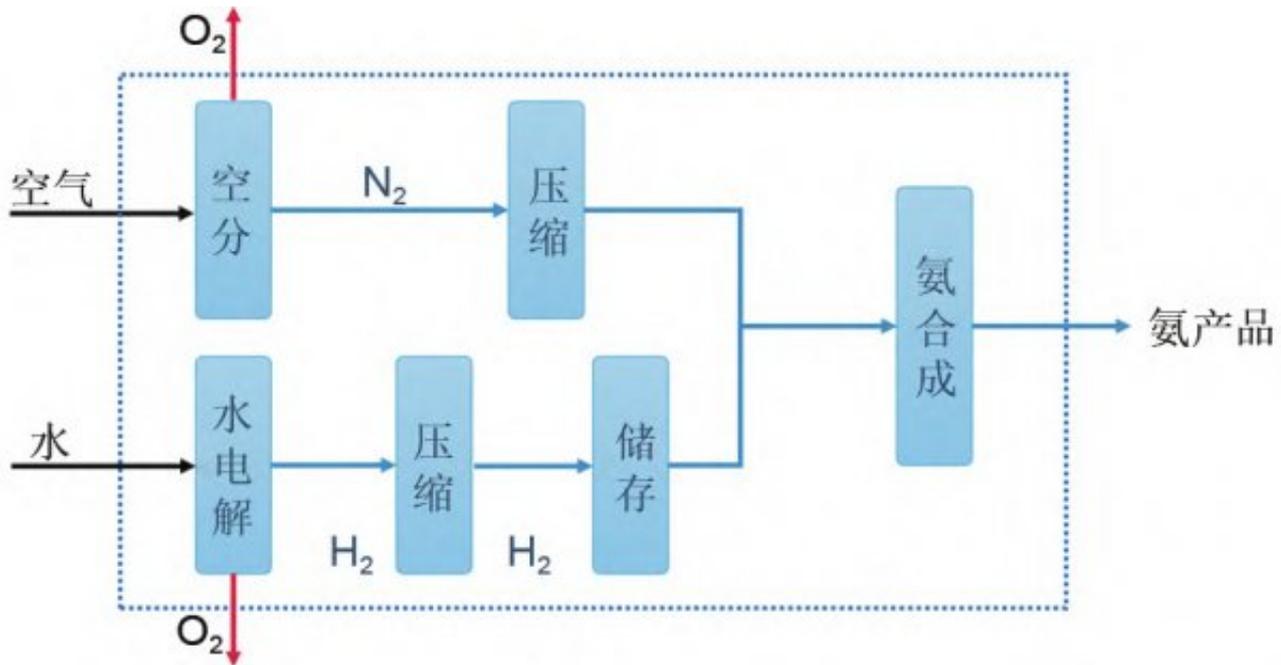


图7 电解水制绿氨的技术工艺路线图

Fig. 7 Technical process route for producing green ammonia from electrolytic water

传统Haber-Bosch合成氨由于受到热力学限制，转化率仅有10%~15%。随着近年来化石燃料的大量消耗、环境恶化日益加剧，亟需找到一种绿色环保的合成氨工艺替代路线，电解水制氢合成氨工艺将是未来发展的趋势[6]。我国科技部国家重点研发计划从两方面开展，一是氢源绿色化替代，二是合成工艺低温低压化。电化学合成氨可以在低温常压状态下进行，反应过程清洁环保，比Haber-Bosch工艺减少约20%的能耗，并且不受热力学限制。2021年度“氢能技术”专项支持了“电解制氢—低温低压合成氨关键技术及应用”和“十万吨级可再生能源电解水制氢合成氨示范工程”，开展电解制氢以及温和条件合成氨关键技术及应用，突破近常压氢气和氮气合成氨新技术，探索可再生能源与低温低压合成氨互补融合新路径。

### 1.2.2 氨利用：船用氨燃料研究

随着国际海事组织（IMO）的有害物质排放法规的实施和国家及地方政策的持续引导和推动，船舶行业的大气污染治理与应对气候变化迎来契机，使用低碳/零碳燃料为动力的船舶进入快速发展期，航运减碳技术市场前景十分广阔。由于氨的零碳属性，在用作内燃机燃料时不会产生碳排放，此外氨的体积能量密度比氢气高，可以提高船体空间利用率，从而使得氨燃料在船上存储具有经济可行性。根据能源转型委员会（ETC）估计，从长远来看氨是远洋船舶的“最终燃料”，用作船运燃料的氨的总量相当于常规农业和工业用途的一半以上。为了满足国际航运船队的需求，需要6.5亿吨以上的氨，相当于6500TWh的可再生能源发电量[16]。因此以合理的成本使用电解法生产绿氨是目前主要的研究方向，我国虽然完成了氨燃料散货船的开发设计，但是关于氨燃料发动机的技术相对落后，在今后可以加大研发支持力度。温特图尔发动机有限公司（WinGD）、德国曼集团（MAN）等全球领先的船用动力总成供应商均开始部署氨燃料低速机的研发工作，预计2024年将投入市场，引领能源和船海工业向零碳解决方案转型。

### 1.2.3 氨利用：燃煤掺氨发电研究

我国煤电装机规模大、服役时间短、碳排放量大、转型难度大，化解煤电结构性风险迫在眉睫。我国燃煤发电产生的二氧化碳排放量占我国总二氧化碳排放量的34%左右，减少燃煤发电的二氧化碳排放是我国顺利实现碳达峰碳中和目标的关键，即便掺混少量氨替代煤炭也能减少极为可观的碳排放量，不少科研团队开展了氨与煤粉在锅炉中的混燃研究。然而，目前对于氨在不同工况下的燃烧特性，如点火延迟时间、火焰速度与结构、燃烧极限、NO<sub>x</sub>生成特性等关键参数尚未完善，对于氨燃烧的反应动力学机理也仍处于不断验证改进阶段，掺氨发电技术在燃煤发电厂的商业化进程中仍面临挑战[17]。全球范围内将氨作为锅炉低碳燃料的研究仍处于起步阶段，且皆集中在实验室或中试的小尺

度研究，还未能在工业尺度条件下验证将氨作为低碳燃料大规模使用的可行性。国家能源集团以35%掺烧比例在40兆瓦燃煤锅炉上实现了混氨燃烧工业应用，开发了可灵活调节的混氨低氮煤粉燃烧器，并配备多变量可调的氨供应系统，完成了对氨煤混燃技术的整体性研究，为更高等级燃煤锅炉混氨燃烧系统的工业应用提供了基础数据和技术方案，标志着我国燃煤锅炉混氨技术迈入世界领先行列。

### 1.3 氨的供应与贸易

氨是一种定价透明的全球大宗商品，整个生产、运输、交易市场存在已久并且成熟，其市场遍布世界各地，全球出口量约占总产量的10%<sup>[18]</sup>。天然气丰富的地区如俄罗斯、特立尼达和多巴哥是主要的出口国家和地区，通过氨及其衍生物贸易出口实现经济增长。

相比于氢，氨作为贸易成熟的化工品，拥有从工厂制备、储存、运输和使用等完整的商业供应链体系。氨的专用港口、管道和储存设施等重要的基础设施对氨贸易至关重要。全球减碳的大背景下，国际社会对商品的低碳要求越来越高，可再生氢生产的绿氨成为未来氨贸易的发展要求和趋势。我国拥有巨大的生产清洁氨燃料所需的可再生电力优势，在满足国内氨的应用需求的同时，借助国内成熟的供应链体系，依托周边日韩氨需求量大的市场，在未来开展绿氨国际贸易具有巨大的潜力。

### 2 分析模型原理

本研究选用情景分析模型，具体采用基于长期能源替代规划系统LEAP模型（long-range energy alternatives planning system）工具，它包括能源供应、能源加工转换、终端能源需求等环节；该模型主要可用于国家和城市中长期能源环境规划，分析预测不同驱动因素下全社会中长期能源供应与需求，并计算能源在流通和消费过程中的常规大气污染物及温室气体排放量<sup>[19]</sup>。

模型将终端能源消费划分为工业、交通等部门，模型的运行需要大量的统计数据以及预测性数据的输入。这些数据主要来源于中国统计年鉴、中国能源统计年鉴数据、国内外主要行业研究机构和领先国家相关预测。根据氨的下游应用场景不同，LEAP模型将基于经济性与碳减排效应，对传统的农业部门与工业部门氨需求和新领域交通部门和发电部门氨需求进行分析。分析思路如图8所示。

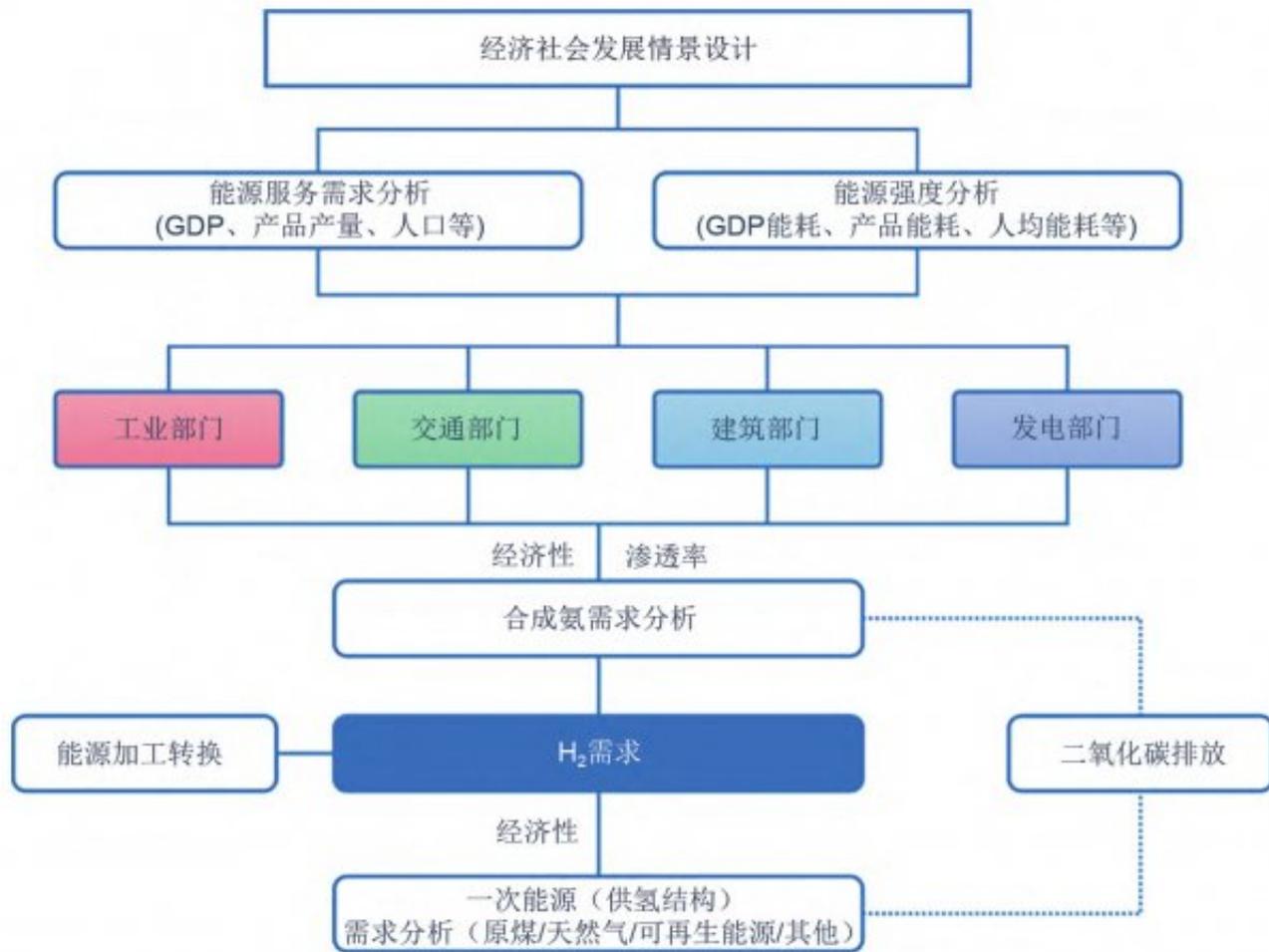


图8 分析方法基本原理

Fig. 8 Basic principles of the analytical methods

其中，不同制氢技术路线合成氨产生的碳排放可根据使用的能源与碳排放系数得到。其计算公式为：

$$F_T = \sum E_{T,k} \times F_{CO_2,k}$$

$F_T$ 为合成氨领域 $CO_2$ 排放量，单位：吨； $E_{T,k}$ 为合成氨领域消耗的第 $k$ 种能源量，单位：吨(标煤)； $F_{CO_2,k}$ 为第 $k$ 种能源的 $CO_2$ 排放因子，单位：吨( $CO_2$ )/吨(标煤)。

### 3合成氨与氢能需求预测

#### 3.1经济性

对于氨在船舶运输燃料与燃烧发电为代表的交通部门和发电部门的新应用领域的技术渗透率，需基于氨燃料利用技术与传统技术的经济性以及碳减排效益进行综合分析。

船舶运输燃料：传统燃油动力船主动力和辅助动力均采用柴油发动机，燃料为重油。氨燃料动力船，主动力采用氨发动机，辅助动力采用氢燃料电池。根据表1假设的传统燃油动力船舶主辅机参数与亚欧航线设定，计算得到主机、辅机的油耗分别为240t/d和16t/d[20]。由于目前氨动力总成尚未投入市场，由此采用等量热值法换算得到氨动力船舶氨的消耗量为419t/d，折合氨耗为9t/d。经济性分析如图9所示，当重油价格为4000CNY/t时，在考虑传统动力船的碳排放情况下，根据重油的碳排放系数，当碳价为500CNY/t时，可再生氢气价格为18CNY/kg时，合成氨成本为3684CNY/t，这时氨燃料动力船具有成本竞争性。

表 1 传统燃油动力船舶主辅机参数设定<sup>[20]</sup>

Table 1 Parameter settings of the main and auxiliary engines of traditional fuel-powered ships<sup>[20]</sup>

发动机类型	额定功率/kW	油耗/(g/kWh)
主机	51000	166.6
辅机	3000	185

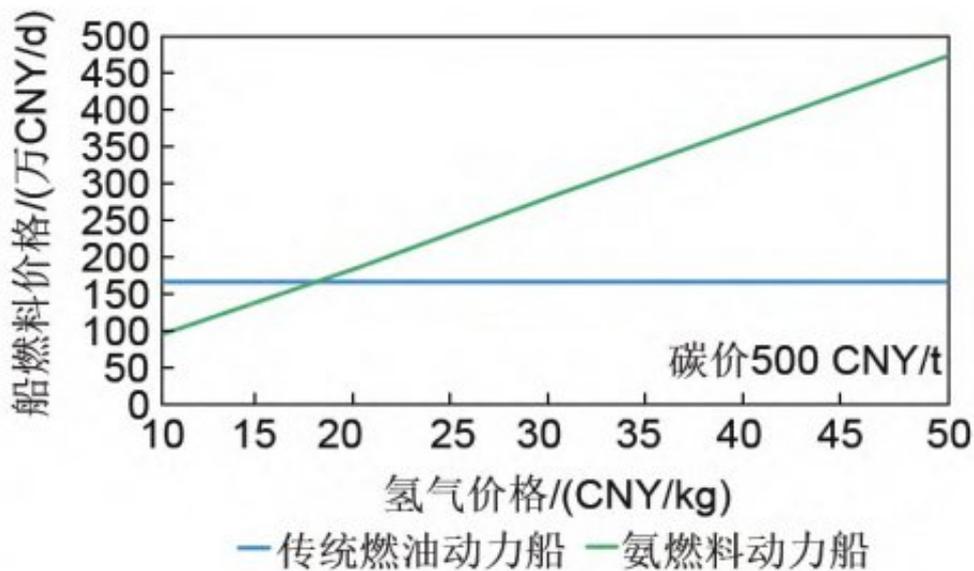


图 9 可再生氢气价格与船舶燃料经济性关系

Fig. 9 The economic relationship between hydrogen prices and ship fuel costs

燃烧发电：本文以火力发电的经济性和掺氨35%的经济性进行对比。为了更好展现经济性对比结果，本文主要考虑不同燃料以及碳价对发电的经济性影响，暂未考虑设备改造以及人工折旧等费用。现役燃煤火力发电厂平均供电煤耗以320g标煤/kWh计算，燃煤掺氨热量比以35%计算，根据氨的燃烧热值与标准煤的排放系数进行经济性计算对比如图10，在考虑两种发电技术产生的碳效益，并根据标准煤的碳排放系数计算各自发电过程中的碳排放，在煤炭价格为1400CNY/t、碳价为500CNY/t时，可再生氢气价格为16CNY/kg左右，合成氨的成本为3275CNY/t，燃煤掺氨发电才具备经济性。

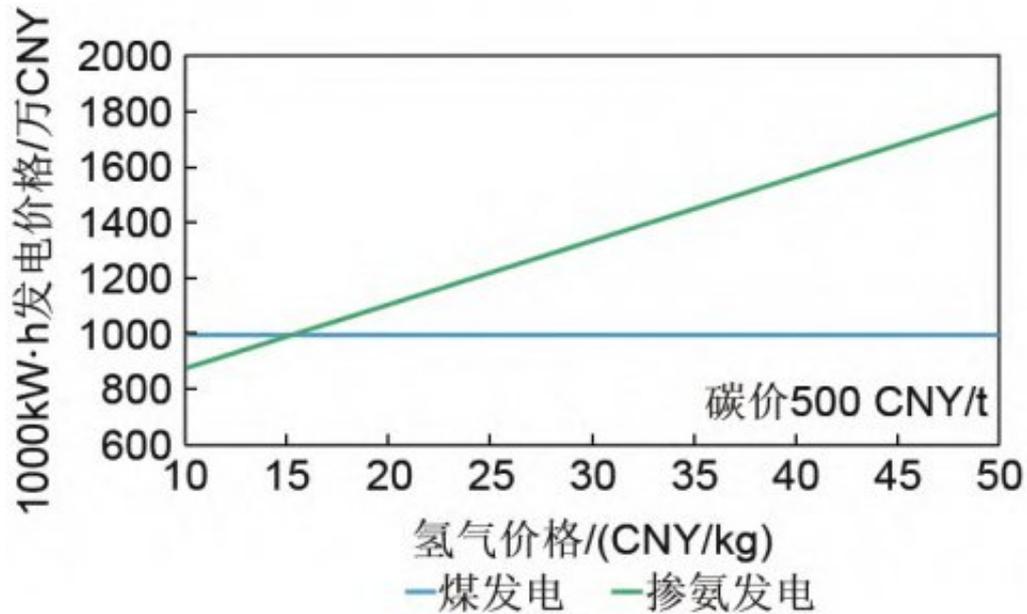


图 10 可再生氢气价格与发电价格经济性关系

Fig. 10 The economic relationship between hydrogen prices and power generation with different fuels

可再生氢：可再生氢的成本决定了绿氢在交通与发电领域的市场渗透率。如图11所示，以2000m<sup>3</sup>/h碱性电解水制氢项目为例，负荷率95%条件下，当前水电、陆上风电、海上风电、光伏的度电平准化成本分别为0.33CNY/kWh、0.41CNY/kWh、0.63CNY/kWh、0.40CNY/kWh，对应的平准化氢气成本分别为22.89CNY/kg氢气、27.65CNY/kg氢气、40.05CNY/kg氢气、26.65CNY/kg氢气。其中度电成本对可再生氢成本的影响敏感性最高，约占总成本的70%~90%[1]。可再生能源装机规模扩大和技术持续进步将推动可再生能源发电成本下降。到2035年后，光伏与风电的新增装机发电成本预计分别降至0.2CNY/kWh和0.3CNY/kWh。到2050年新增光伏和风电发电成本将降至约0.13CNY/kWh和0.25CNY/kWh，风能和太阳能将成为最廉价和最丰富的电力来源[21]。可再生能源电解水制氢成本将低至11.63CNY/kg氢气，不考虑碳税情况下，已明显低于化石能源+碳捕集与封存（CCS）制氢成本[22]。

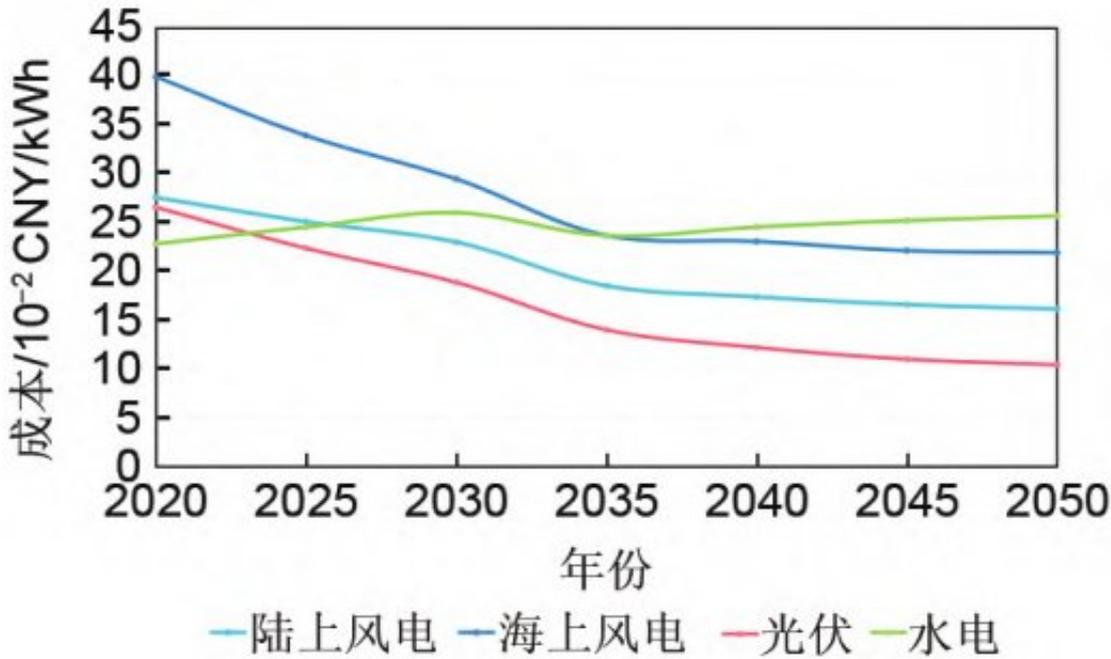


图 11 可再生氢平准化成本

Fig. 11 Levelized costs of renewable hydrogen

综合以上分析，无论是绿氨合成还是船舶燃料、燃煤掺烧等新领域，均需要在氢气价格较低时才能实现经济性。一方面，需要尽快推进可再生能源制氢规模化，建设低碳清洁氢气供应体系，发挥氢自身作为能源互联互通媒介的作用，实现全产业链绿色发展；另一方面，国内碳市场交易机制与碳排放配额价格均难以支撑绿氨产业的发展，需要及时完善体制机制。

### 3.2 合成氨与氢需求量预测

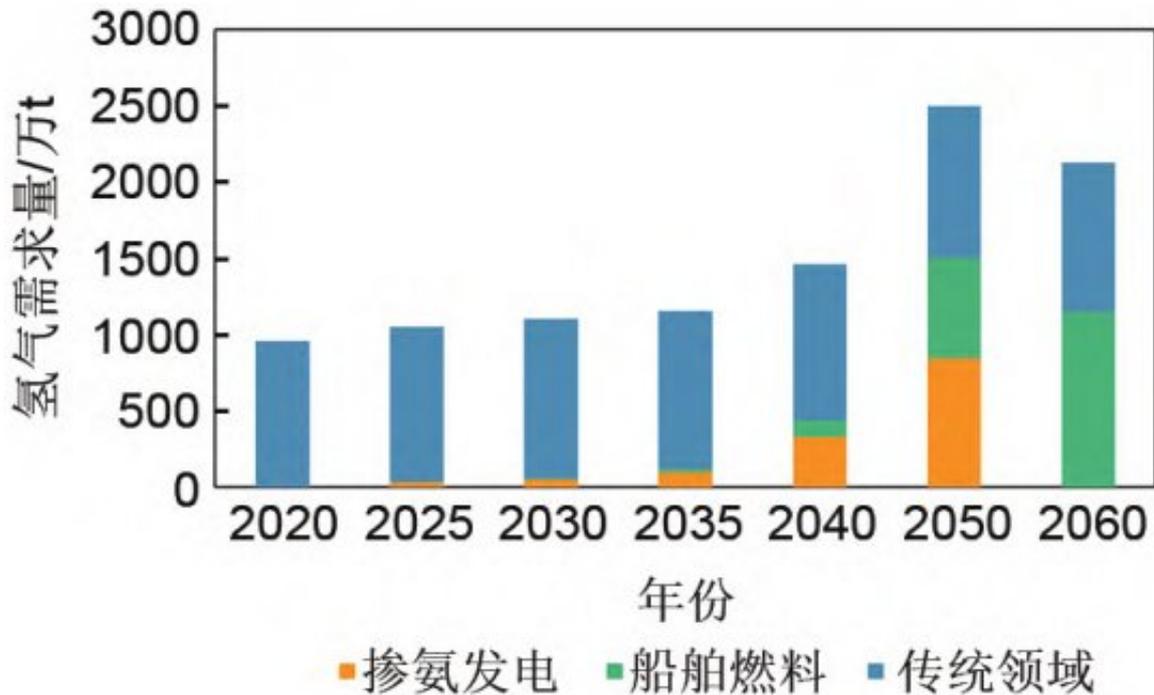
我国合成氨行业氢能需求预测从两方面考虑，一是化肥、化工等原有合成氨市场，二是船用氨燃料与燃掺氨燃烧等新应用领域。

#### 3.2.1 传统合成氨领域

目前，我国合成氨行业步入微量增长阶段。随着肥效提高和有机肥替代，未来合成氨在农业消费量将下降至60%。非农业领域消费量受环保、新材料、专用化学品等工业消费拉动，需求量增长，但传统合成氨需求量整体呈稳中有降趋势，预计2035年平缓下降至5700万吨，氢需求量1040万吨，2060年下降至5500万吨，氢需求量972万吨[1]。

#### 3.2.2 新兴合成氨领域

交通领域，对于氨燃料在船用能源渗透率方面，基于我国加速推行氨燃料船的技术研发的假设下，实施中高强度的能源转型政策，提高燃料船的能源消费清洁化率，前期在优势地区逐步实行试点。结合图9和图11经济性分析的结果，在达到经济性时逐渐加大渗透力度，随着可再生能源度电成本的迅速降低，尤其是光伏发电率先在2035年平准化氢气成本低于15CNY/kg氢气，预计在2035年左右氨动力船舶经济性将与传统燃油动力船持平，同时技术成熟度达到TRL 9，具备规模化推广的条件，氨动力船舶实现1%的渗透率，合成氨的需求量达到117万吨，氢需求量21万吨；此后渗透率快速增加，2040年与2050年氨动力船舶在船舶燃料中渗透率迅速上升至5%和25%，2060年氨在船舶燃料领域需求量渗透率超过40%，合成氨的消耗量近6500万吨，氢需求量1150万吨，如图12所示。发电领域，根据全球能源互联网发展合作组织对我国2020—2060年电力装机预测，2025年我国煤电装机达到峰值11亿千瓦，此后煤电装机逐年下降，至2060年，煤电装机将全部退出我国电源结构[23]。2035年，掺氨发电经济性可与煤电竞争，掺氨比例按国家能源集团示范燃煤锅炉燃烧35%比例混氨燃料，预计氨需求量达到540万吨，氢需求量100万吨。2050年，随着掺氨发电在煤电应用的渗透率逐步提升至30%，氨需求量4700万吨，氢需求量840万吨。



**图 12 2020—2060 年合成氨与氢能需求量预测**  
**Fig. 12 Demands for synthetic ammonia and hydrogen from 2020 to 2060**

整体来看，合成氨行业的氢气总需求量呈现逐年上升后微调回落的趋势，从2019年1080万吨氢气增长到2050年的2500万吨，随后由于煤电的退出导致掺氨发电需求减少，到2060年减少到2128万吨。根据模型预测结果，随着技术进步、可再生氢成本的降低以及碳市场的成熟，主要增量在以氨为燃料的航运和掺氨发电等新兴领域，2060年新兴领域所需要的氢气达到1150万吨，超过合成氨行业氢需求总量的50%。

#### 4合成氨行业氢能供给结构预测

##### 4.1经济性分析

我国目前以化石燃料为原料的合成氨工艺的总成本包含固定投资的折旧成本、运营维护成本和原料能耗成本。为了更好地体现不同原料替代对合成氨经济性的影响，而且不同工艺折旧成本和运营维护成本相差不大，因此主要考虑原料和能耗成本的差异。根据相关文献可知[17,19,24]，经济性分析模型参数如表2，并结合不同工艺所需要的动力电和冷却水等计算不同工艺经济性对比如图13。

表2 经济性分析模型参数

Table 2 Economic analysis model parameters

合成方法	原料	每吨氨所需能源量
煤制合成氨	原料煤	1.3 t
	动力煤	0.5 t
天然气制氨	天然气	850~900 m <sup>3</sup> (本文选取 885 m <sup>3</sup> )
电解水制氢合成氨	氢气	0.178 t

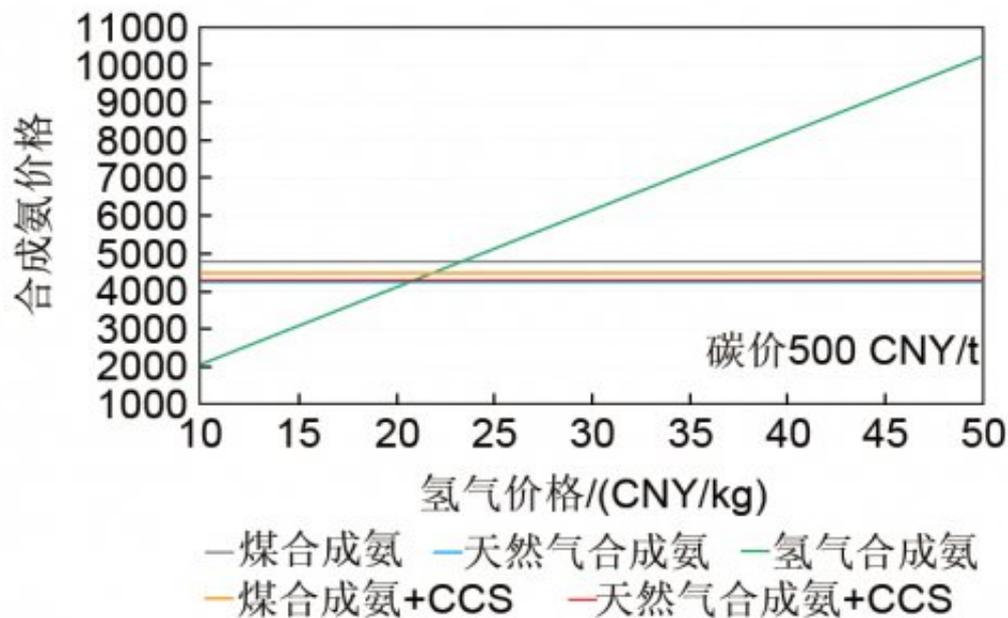


图13 氢气价格与合成氨工艺经济性关系

Fig. 13 Relationship between hydrogen prices and the process economy

传统化石能源合成氨的原料成本按煤炭价格1400CNY/t，天然气价格3.0CNY/m<sup>3</sup>，工业电价为0.56CNY/kWh计。在考虑不同工艺的碳排放情况，以碳价为500CNY/t计算各合成氨工艺的综合成本，如图13所示。基于2030年碳市场成熟，碳价达到500CNY/t的假设条件下，煤合成氨+CCS技术相较于煤合成氨具有经济优势，经济性提高6%；天然气合成氨配备CCS成本几乎不变。当可再生能源制氢价格分别达到23元与21.5元左右时，绿氨与煤制氨、煤制氨+CCS价格持平；当氢气价格进一步下降至21元左右时，可再生能源制氢合成氨价格与天然气制氨持平。根据图11可再生氢平准化成本分析，预计2030年可再生氢将比化石能源合成氨具有竞争力。

#### 4.2合成氨行业氢源供给结构

当前合成氨行业的氢源主要来自于煤气化制氢和天然气重整制氢等非低碳氢，全部应用于传统农业与工业部门。未来，在传统合成氨应用领域，随着可再生能源电解水制氢逐步具有竞争力，同时考虑到可再生氢与CCS技术经济性均在2030年左右显现，而CCS技术为过渡性技术，产业投资热情远低于可再生能源电解水制氢技术，因此本文预测现有

非低碳氨由可再生氢逐步替代。在新兴合成氨应用领域，其产业部署主要受脱碳因素驱动，本文对需求量预测基于可再生氢成本下降发展趋势，因此，船舶运输用氨燃料以及氨发电领域的氢全部来源于可再生氢。2030年后可再生氢部署加快，2035年可再生氢占比20%，2040年可再生氢将在合成氨氢源结构中占主导地位，到2060年可再生氢所占比例将会达到97%以上。如图14所示。

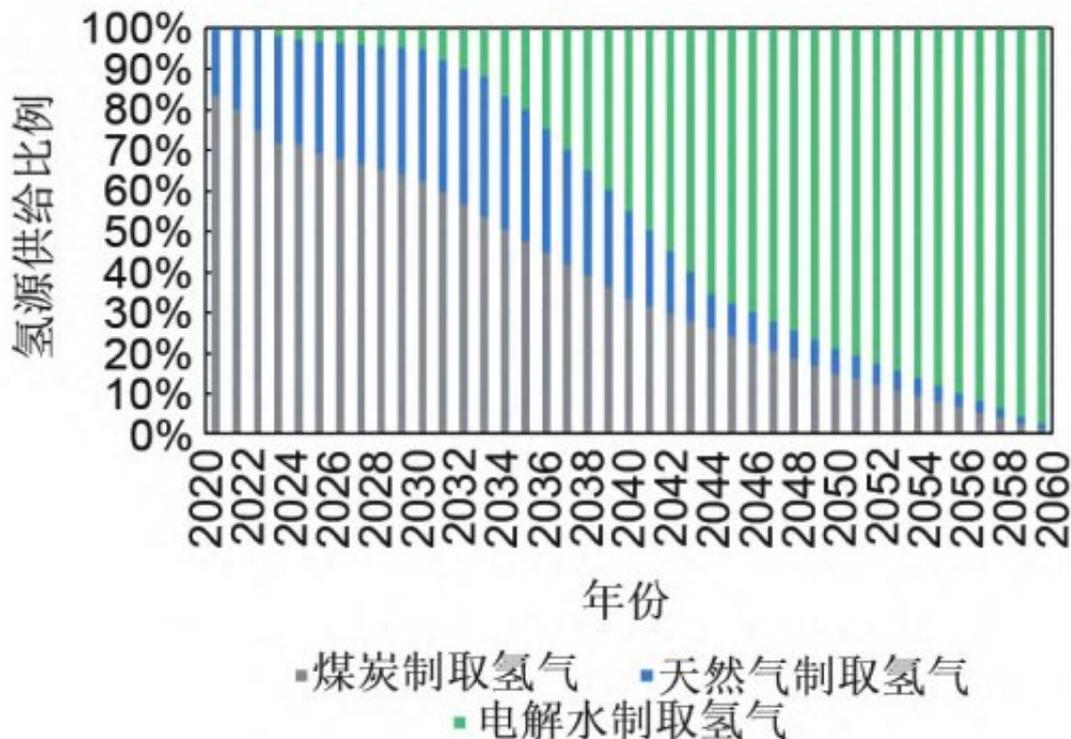


图 14 我国 2020—2060 年合成氨行业氢源供给比例

Fig. 14 The hydrogen source structure of China's synthetic ammonia industry from 2020 to 2060

合成氨行业碳排放量方面，根据氢源供给结构的LEAP模型预测结果得到合成氨行业的碳排放趋势，如图15所示。在可再生能源制氢降本速度加快和电解水装机大规模部署下，预计我国合成氨行业将在2030年左右达峰，碳排放峰值为2.22亿吨二氧化碳。此后碳排放逐年减少，2060年碳排放降至920万吨。

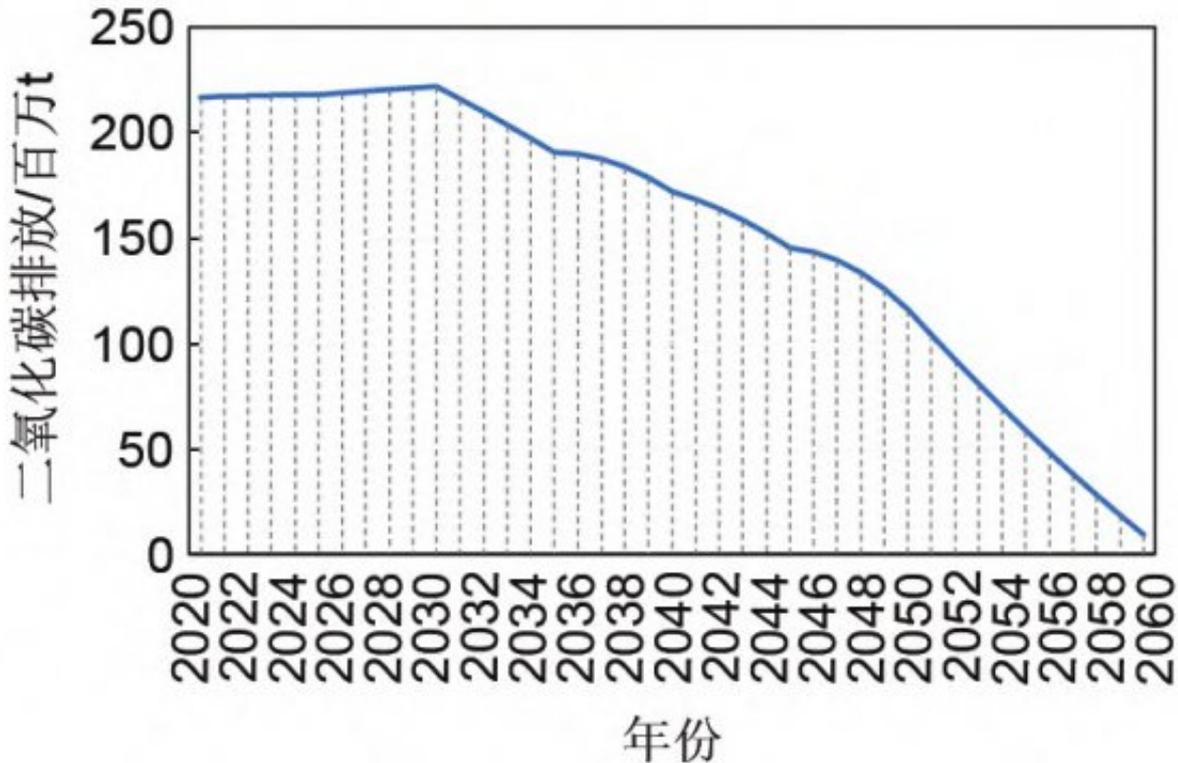


图 15 碳排放趋势预测

Fig. 15 The carbon emission trend forecast

5结论

本文借助LEAP相关模型和方法，实现了基于经济性驱动的中国合成氨领域发展情景分析，在不同氢源结构的渗透率下推行合成氨产业转型进行了模拟研究，得出如下结论：

(1) 绿氨在船舶运输、发电与供热等新终端应用场景尚不具备经济性。但是绿氨制备具备经济性（电价在0.3CNY/kWh内条件下），可以优先推动绿氨的合成。在可再生能源丰富的地区优先开展电解水制氢合成氨示范项目，加大力度开展电解制氢以及温和条件合成氨关键技术及应用，尽早实现低碳合成氨技术大规模应用。

(2) 氢能在合成氨领域的需求：随着可再生氢成本的降低、碳市场的成熟与合成氨利用技术等进步，合成氨行业在以氨为燃料的航运和掺氨发电等新兴领域得到释放。2060年合成氨需求量1.2亿吨，氢需求量2128万吨，其中新兴领域所需要的氢气达到1150万吨，超过合成氨行业氢需求总量的50%。

(3) 可再生氢在合成氨领域碳减排贡献：我国合成氨行业能源供给结构由化石能源向可再生能源转换有着巨大的潜力，2030年后可再生氢部署加快，预计我国合成氨领域将在2030年左右达峰，碳排放峰值为221.8百万吨二氧化碳。2035年可再生氢占比20%，2040年可再生氢将在合成氨氢源结构中占主导地位，到2060年可再生氢所占比例将会达到97%以上，碳排放降至920万吨。

(4) 氨燃料船技术是全球公认能实现航运业碳中和的重要技术路径，但我国船用氨燃料发动机技术研发基础薄弱，与欧美等发达国家相比处于跟跑阶段，科研投入不足，建议加大对此方面的国家科技重点专项、重大科技示范工程的支持力度。

## 参考文献

- [1] 刘玮,万燕鸣,熊亚林等. 中国氢能源及燃料电池产业发展报告 2020[M]. 北京: 人民日报出版社, 2021.  
LIU W, WAN Y, XIONG Y, et al. China hydrogen energy and fuel cell industry development report 2020[M]. Beijing: People's Daily Press, 2021.
- [2] 贾亮. 我国合成氨及下游产品工业消费现状与预测[J]. 化学工业, 2012, 30(S1): 38-41.  
JIA L. Consumption situation and prediction of ammonia and its downstream industries in China[J]. Chemical Industry, 2012, 30(S1): 38-41.
- [3] 顾宗勤. 合成氨行业节能降碳改造升级目标与重点[R/OL].[2022-03-20]. <https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/ztl/ghnhyjnjdgzsj/zjgd/202203/P020220302674871779938.pdf>.  
GU Z Q. The goals and key points of energy saving and carbon reduction in the synthesis ammonia industry[R/OL]. [2022-03-20]. <https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/ztl/ghnhyjnjdgzsj/zjgd/202203/P020220302674871779938.pdf>.
- [4] 曹占高, 苏建英, 韦勇. 氮肥行业产能变化情况调查分析[J]. 化肥工业, 2017, 44(2): 23-26, 30.  
CAO Z G, SU J Y, WEI Y. Investigation and analysis of changes in productivity of nitrogenous fertilizer industry[J]. Chemical Fertilizer

- Industry, 2017, 44(2): 23-26, 30.
- [5] 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.
- [6] 关浩然, 朱丽娜, 朱凌岳, 等. 利用不同氢源及氮源电化学合成氨研究进展与挑战[J]. 化工进展, 2022, 41(8): 4098-4110.  
GUAN H R, ZHU L N, ZHU L Y, et al. Progress and challenges of electrochemical synthesis of ammonia from different hydrogen and nitrogen sources[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2022, 41(8): 4098-4110.
- [7] 黄尊礼. SDARI、ABS 和 MAN 共同签订氨燃料支线集装箱船合作开发协议[J]. 船舶设计通讯, 2019(2): 99.  
HUANG Z L. SDARI, ABS and man jointly signed a cooperative development agreement for ammonia fuel feeder container ships[J]. Journal of Ship Design, 2019(2): 99.
- [8] 刘伟, 王琮, 郭妮, 等. 氨燃料在船舶行业应用及标准需求研究[J]. 中国标准化, 2021(18): 39-43.  
LIU W, WANG C, GUO Y, et al. Research on the application of ammonia fuel and standard development requirements in the shipbuilding industry[J]. China Standardization, 2021(18): 39-43.
- [9] 温倩. 合成氨行业发展情况及未来走势分析[J]. 肥料与健康, 2020, 47(2): 6-13.  
WEN Q. Analysis of the development situation and future trend of the synthetic ammonia industry[J]. Fertilizer & Health, 2020, 47(2): 6-13.
- [10] 中国氢能联盟. 中国氢能及燃料电池产业手册[R/OL]. 2019[2022-01-02]. <http://h2cn.org.cn/Uploads/File/2019/07/25/u5d396adeac15e.pdf>.  
China Hydrogen Alliance. China hydrogen and fuel cell industry handbook [R/OL]. 2019[2022-01-02]. <http://h2cn.org.cn/Uploads/File/2019/07/25/u5d396adeac15e.pdf>.
- [11] 任怡静. 我国合成氨行业碳减排潜力研究[D]. 北京:北京化工大学, 2015.  
REN Y J. Research on carbon emission reduction potential of China's synthetic ammonia industry [D] . Beijing: Beijing University of chemical technology, 2015.
- [12] 何发明, 曾庆, 吴剑, 等. 天然气裂解制氢与水电解制氢合成氨工艺特性比较[J]. 化肥设计, 2020, 58(2): 5-9.  
HE F M, ZENG Q, WU J, et al. Comparison of process characteristics in hydrogen production by natural gas cracking and by hydro-electrolysis for ammonia synthesis[J]. Chemical Fertilizer Design, 2020, 58(2): 5-9.
- [13] DIMOPOULOS G G, STEFANATOS I C, KAKALIS N M P. Exergy analysis and optimisation of a marine molten carbonate fuel cell system in simple and combined cycle configuration[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 107: 10-21.

- [14] DENG J, IÑIGUEZ J A, LIU C. Electrocatalytic nitrogen reduction at low temperature[J]. *Joule*, 2018, 2(5):846-856.
- [15] International Maritime Organization. Use of methanol as fuel methanol as marine fuel: Environmental benefits, technology readiness, and economic feasibility[R/OL]. 2016[2020-01-03]. <https://www.unclearn.org/wp-content/uploads/library/5.pdf>.
- [16] YU X W, YE S Y. Recent advances in activity and durability enhancement of Pt/C catalytic cathode in PEMFC: Part II: Degradation mechanism and durability enhancement of carbon supported platinum catalyst[J]. *Journal of Power Sources*, 2007, 172(1): 145-154.
- [17] LEE H, LEE M J. Recent advances in ammonia combustion technology in thermal power generation system for carbon emission reduction[J]. *Energies*, 2021, 14(18): 5604.
- [18] International Energy Agency. Ammonia Technology Roadmap [R/OL]. Paris: IEA, 2021[2022-01-03]. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/6ee41bb9-8e81-4b64-8701-2acc064ff6e4/AmmoniaTechnologyRoadmap.pdf>
- [19] ATES S A. Energy efficiency and CO<sub>2</sub> mitigation potential of the Turkish iron and steel industry using the LEAP (long-range energy alternatives planning) system[J]. *Energy*, 2015, 90: 417-428.
- [20] 汪颖异, 魏梅. 绿色低碳燃料船舶总拥有成本分析[J]. *船舶*, 2021, 32(5): 10-16.  
WANG Y Y, WEI M. Analysis of total cost of ownership for green low carbon ships[J]. *Ship & Boat*, 2021, 32(5): 10-16.
- [21] 国家发改委能源研究所. 中国 2050 年光伏发展展望[R/OL]. 2019 [2021-01-05]. <http://www.gxepa.org.cn/front/article/5235.html>.  
Energy Research Institute of National Development and Reform Commission. Prospects of photovoltaic development in China in 2050[R/OL]. 2019[2021-01-05]. <http://www.gxepa.org.cn/front/article/5235.html>.
- [22] 刘玮, 万燕鸣, 熊亚林, 等. 碳中和目标下电解水制氢关键技术及价格平准化分析[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(11): 2888-2896.  
LIU W, WAN Y M, XIONG Y L, et al. Key technology of water electrolysis and levelized cost of hydrogen analysis under carbon neutral vision[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(11): 2888-2896.
- [23] 全球能源互联网发展合作组织. 中国 2030 年能源电力发展规划研究及 2060 年展望[R/OL]. 2021[2022-01-05]. <https://news.bjx.com.cn/html/20210319/1142777-1.shtml>.  
Global Energy Interconnection Development and Cooperation Organization. Research on China's 2030 energy and power development plan and 2060 outlook[R/OL]. 2021[2022-01-05]. <https://news.bjx.com.cn/html/20210319/1142777-1.shtml>.
- [24] HOCHMAN G, GOLDMAN A, FELDER F, et al. Potential economic feasibility of direct electrochemical nitrogen reduction as a route to ammonia[R]. *ACS Sustainable Chem. Eng.* 2020, 8, 24:8938-8948.

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/210161.html>