

上海城市碳中和与氢能应用场景研究

黄宣旭^{1,✉}, 沈威¹, 丁光宏²

(1. 盈德气体上海有限公司, 上海 200137; 2. 复旦大学力学与工程科学系, 上海 200433)

摘要: [目的] 我国的“双碳”战略为氢能的发展确定了方向。文章以上海为例, 研究区域中心城市在碳中和目标下, 通过能源替代实现城市减排进程及能源消费结构预测。绿色氢能与天然气、电力等低碳能源存在相互补充的关系, 测算氢能的规模对城市氢能规划有着重要的意义, 并以此对氢能发展提出前瞻性的预测和顶层设计建议。[方法] 通过建立城市碳中和预测模型, 对城市碳排放总量模拟分析, 基于碳排放现状预测至2060年碳排放总量。根据能源替代减排公式, 碳减排约束条件下的能源消费模型, 预测氢能、电力、天然气等能源需求。通过氢能应用场景和供应来源调研, 分析城市氢能的需求结构与供应构成。[结果] 研究表明: 上海预计2028年碳达峰, 直接排放量峰值为2.09亿t, 而后进入总量减排进程; 2040年减排量达到峰值直至2060年实现碳中和。绿色氢能作为零碳能源, 2030年逐步进入能源消费结构, 2040年氢能需求总量约为300万t, 约占总能源消费的11%; 到2060年氢能需求总量约为835万t, 达到总能源消费的21%。[结论] 可由此构建合理的氢能供应与消费结构, 建设氢能高速公路, 通过氢能战略顶层设计, 建设完善的安全结构、金融结构、生产结构、知识结构, 掌握氢能定价权的区域氢能中心。

关键词: 碳减排; 氢能; 战略; 氢管网; 顶层设计; 氢能应用场景

中图分类号: TK91; F426

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)03-0011-12

开放科学(资源服务)二维码:



Research on Urban Carbon Neutrality and Hydrogen Energy Application Scenarios in Shanghai

HUANG Xuanxu^{1,✉}, SHEN Wei¹, DING Guanghong²

(1. Yingde Gas (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 200135, China;

2. Department of Mechanics and Applied Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: [Introduction] China's "carbon peak and neutrality" strategy has determined the direction for the development of hydrogen energy. This paper takes Shanghai as an example to study the process of urban emission reduction through energy substitution and the prediction of energy consumption structure in regional central cities under the goal of carbon neutrality. Green hydrogen energy and low-carbon energy sources (such as natural gas and electricity) are complementary to each other. Measuring the scale of hydrogen energy is of great significance to urban hydrogen energy planning, and thus forward-looking prediction and top-level design suggestions are put forward for hydrogen energy development. [Method] By establishing a prediction model of urban carbon neutrality, the total urban carbon emissions were simulated and analyzed, and the total carbon emissions by 2060 were predicted based on the current carbon emissions. According to the energy substitution emission reduction formula and the energy consumption model under the carbon emission reduction constraints, the demand for hydrogen energy, electricity, natural gas and other key energy sources was predicted. Through the investigation of hydrogen energy application scenarios and supply sources, the demand structure and supply composition of urban hydrogen energy were analyzed. [Result] The study shows that Shanghai is expected to peak its carbon dioxide emissions by 2028, with direct emissions peaking at 209 million tons, and then enter the process of total emission reduction. The emission reduction will peak by 2040, and carbon neutrality will be achieved by 2060. Green hydrogen energy, as a zero-carbon energy, will gradually enter the energy consumption structure by 2030. In 2040, the total demand for hydrogen energy will be about 3 million tons, accounting for about

收稿日期: 2023-04-05 修回日期: 2023-04-20

基金项目: 上海市2021年度软科学研究计划定向委托项目“上海氢能技术产业应用场景战略研究”(21692113300)

11% of the total energy consumption. By 2060, the total demand for hydrogen energy will be about 8.35 million tons, reaching 21% of the total energy consumption. [Conclusion] Therefore, a reasonable hydrogen energy supply and consumption structure can be built, a hydrogen energy expressway can be constructed, and a regional hydrogen energy center with perfect safety structure, financial structure, production structure and knowledge structure and mastering the pricing power of hydrogen energy can be established through the top-level design of hydrogen energy strategy.

Key words: carbon emission reduction; hydrogen energy; strategy; hydrogen pipeline network; top-level design; energy application scenarios

2095-8676 © 2023 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

作为长三角城市群的中心城市,上海拥有完善的工业体系。2019年上海市的直接碳排放量(不含输入电力的间接排放量)约为1.95亿t,年人均直接碳排放7.8t,排放量明显高于国外的超大型城市如东京(5.7t)、伦敦(6.1t)、纽约(6.4t)等2005年的排放量。

碳中和战略为我国的能源发展提出了清晰的路线,即以低碳可再生能源为主的非化石能源将占据能源消费的绝对主导地位。《氢能产业发展中长期规划(2021—2035年)》明确氢能是一种来源丰富、绿色低碳、应用广泛的二次能源,正逐步成为全球能源转型发展的重要载体之一。但受制于能源产业的不确定性,未来的区域发展中,氢能的需求和供应问题,是城市能源规划的难题。

绿色氢能的发展,最本质的动因是全社会的深度脱碳。文章以上海市为例,根据中国碳核算数据库(China Emission Accounts and Datasets, CEADs)的历史碳排放统计数据,分析城市碳排放的构成与替代模式,从双碳视角分析长期的能源需求中绿色氢能在中心城市碳中和的作用和需求预测,并由此展开讨论氢能供应和城市氢能的顶层设计。

1 文献综述

碳中和对城市长期能源消费的影响是根本性的,也直接推动了氢能和绿电对含碳能源的替代,为研究能源替代的问题,检索了中心城市碳减排趋势预测模型研究的相关文献。

张哲等^[1]利用STIRPAT可拓展的随机性的环境影响评估模型,探究上海市未来发展总体形势,分析其现有政策下和更低碳政策下碳排放的达峰情况。

研究认为,在基准情景下,基准情景和超低碳情景下,上海市均会在2025年之前达峰,碳排放峰值不超过2亿t,之后均开始有大幅度下降。郑长德等^[2]运用空间计量模型方法,发现我国碳排放量在地区上存在集聚效应。经济增长和碳排放量呈正线性相关。但研究表明,通过经济学模型推导碳减排长期趋势发现,区域碳排放是没有峰值的。这显然与我国的碳达峰、碳中和目标并不相符。Fodha等^[3]运用协整分析方法,以突尼斯1961—2004年长面板数据为基础,发现经济增长与二氧化硫之间呈倒U形关系,但是与二氧化碳之间的关系是单调递增的。究其原因,是在预测模型中,没有设定碳减排是长期趋势是边际成本递增的。Yue等^[4]在研究爱尔兰TIMES能源系统模型中得出边际减排成本曲线(Marginal Abatement Cost Curve, MACC)表明,实现更高目标的减排边际成本是非线性的,在临界点上边际减排成本会显著增加。随着减排深度和减排时间延续,由此带来边际减排量递减。文献[5]提出了纽约的气候应对目标,纽约2005年的直接排放是5820万t,2009年降低为5080万t,2050年达到碳中和。文献[5]认为碳减排的过程是以2035年作为碳减排峰值年的不同减排峰值下的动态过程,通过分析2050年之前纽约的减排过程,提出了在边际成本递增预测下,城市碳减排尽早开始的意愿和快速逼近的策略。魏楚^[6]研究发现我国城市在投入、排放以及减排边际成本上存在巨大的差异性。首先在各种投入要素上,均呈现了东部城市>中部城市>西部城市的特征,在产出和污染排放上,也同样呈现出显著的东、中、西递减的趋势。减排成本最高(上海)与最低城市(张家界)的边际减排成本比值高达70:1。对上海等中心城市而言,从外地输入低碳能源比如低碳电力、天然气、绿氢等替代减排的成本,

远低于本地减排的边际成本增加。刘竹^[7]研究建立了一个全球碳排放的近实时定量方法,实时碳排放系统构成了一套基于行业活动数据的碳排放核算方法,为更好地理解全球气候变化提供更加准确及时的数据支持。上海市于2022年6月发布《上海市氢能产业发展中长期规划(2022—2035年)》^[8],规划指出到2035年上海将基本建成国际一流的氢能科技创新高地、产业发展高地、多元示范应用高地。孙旭东等^[9]认为我国城市氢能规划呈梯队特征,短期目标较明确,远期发展雄心不足。此外,史倩等^[10]提出了绿氢在传统炼化企业的应用;高啸天等^[11]提出核电调峰制氢并分析了其用于产业的可能性;黄宣旭等^[12]在对氢能规模化应用经济性问题进行研究,其提出的城市氢能门站管网供应体系,将是未来氢能发展的趋势;姚若军等^[13]对氢能产业链作了详细的分析,并认为作为战略能源,氢能的开发利用有助于促进我国能源与产业的绿色转型,但仍然面临诸多问题,需要合理布局。

上述文献为文章的研究提供了思路和借鉴。

2 碳减排约束的能源消费预测模型

由文献分析中可知,中心城市碳达峰碳中和目标并最终实现净零碳的过程,是碳减排的低碳能源渐进替代过程。上海碳中和四十年的跨度,本质上是减排边际成本递增的过程。成本递增是外部目标约束下的逆经济行动,会导致社会总成本的增加。因此,文章以碳中和这个外部驱动目标约束,从能源消费需求总量出发,分析碳中和的驱动力和减排替代的模型,构建从碳达峰到碳中和不同阶段对天然气、电力、氢能预测模型。

1) 能源消费需求总量公式:

持续的能源消费增长为城市提供长周期发展,保障城市产业发展和居民消费所需,因而能源的消费与城市发展程序相关,采用以下公式:

$$C_{E,t} = C_{E,0} \times \prod_0^t (1 + \gamma_i)^i \quad (1)$$

式中:

$C_{E,t}$ ——能源消费总量(GJ);

$C_{E,0}$ ——能源消费初始量(GJ);

γ_i ——第*i*年的增长率;

t ——与碳减排基准年份2020的差值。

2) 碳排放公式:

$$E_{GHG,t} = C_{E,t} \times \kappa_{EF,t} \times \eta_{GWP} \quad (2)$$

式中:

$E_{GHG,t}$ ——上海市的碳排放总量(t);

$\kappa_{EF,t}$ ——碳排放强度(t/GJ);

η_{GWP} ——全球变暖潜能(Global Warming Potential, GWP)值。

能源排放强度的持续降低,是碳中和的基本路径。但碳中和是社会治理驱动的能量变革,是启动、发展、成熟、巩固的治理过程。因此,可以理解为具有强烈的人为因素,减排边际成本随着技术的发展呈现由低到高,减排意愿随着政府和社会的持续压力呈现由低到高的情况,当年的排放强度满足正态分布。

据此模拟长周期的城市碳中和过程碳排放的公式如下:

$$\kappa_{EF,t} = \kappa_{EF,0} \times [1 - F(t)] \quad (3)$$

式中:

$\kappa_{EF,0}$ ——减排预测起始年2020年的碳减排强度(t/GJ);

$F(t)$ ——排放强度对控排时间的正态分布函数。

3) CCUS(Carbon Capture, Utilization and Storage, 碳捕集、封存及再利用)与碳汇对减排量的影响,是绝对减排量。

$$E_{r,t} = \sum_i E_{r,t,i} \quad (4)$$

式中:

$E_{r,t}$ ——碳捕集与封存(Carbon Capture and Storage, CCS)及碳汇等减排总量(t);

$\sum_i E_{r,t,i}$ ——当年碳捕集与封存及碳汇等减排量(t)。

4) 碳中和战略驱动下长期碳排放预测模型如下:

$$E_{GHG,t} = E_{GHG,0} \times [1 - F(t)] - \sum_i E_{r,t,i} \quad (5)$$

式中:

$E_{GHG,0}$ ——减排预测起始年2020年上海市的碳排放总量(t)。

5) 以减排为目标的能源替代

城市能源逐步从煤炭、石油等高含碳能源,转向天然气、一次电力、氢能等低碳能源的过程,就是实现碳中和的减排过程。在有氢能参与的场景下,为

保留核心工业体系条件下,实现碳中和提供了可能性。氢能发展所需的基础设施,包括氢管道、氢站、氢设施等需要从零开始规划建设,与现有的能源设施通用性较差。因此,氢能的替代是基础设施规划建设与应用场景结合的过程,城市的能源先进入电气化、天然气化的进程,再由氢能替代天然气,而实现氢电结合的“再电气化”过程,如图 1 所示。

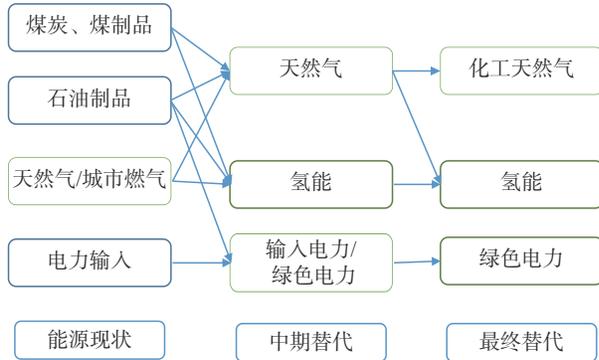


图 1 能源替代关系示意图

Fig. 1 Schematic diagram of energy substitution relationship

6) 能源与氢能消费估算模型

由上海 2021—2060 年的能源需求总量预测,利用各种能源之间的碳中和替代关系,分析未来 40 年的碳减排和氢能需求关系。碳排放总量是和能源消费总量和能源排放因子相关的,在能源结构不变的情况下,城市预期排放总量由能源消费总量确定,如公式(2)所示。

实际排放量是初始排放总量减去累计减排量:

$$E_{\text{GHG},t} = E_{\text{GHG},0} - R_{\text{GHG},t} \quad (6)$$

式中:

$R_{\text{GHG},t}$ ——累计减排量(t)。

为达到城市碳中和的目标,需要进行能源结构调整,从而获得相应的减排量:

$$R_{\text{GHG},t} = \sum (R_{\text{H}} + R_{\text{g}} + R_{\text{E}} + R_{\text{i}}) \quad (7)$$

式中:

R_{H} ——氢能替代减排量(t);

R_{g} ——天然气替代减排量(天然气替代煤炭、石油)(t);

R_{E} ——电力替代成品油减排量(t);

R_{i} ——碳封存量(t)。

7) 能源消费总量限制

根据能源的排放量计算的能源消费结构,折算

为热值后的总量应满足能源消费的当年预测值,作为预测模型的限定条件:

$$C_{\text{E},t} = \sum (C_{\text{H},t} + C_{\text{g},t} + C_{\text{E},t} + C_{\text{C},t} + C_{\text{O},t}) \quad (8)$$

式中:

$C_{\text{H},t}$ ——氢能消费量(GJ);

$C_{\text{g},t}$ ——天然气消费量(GJ);

$C_{\text{E},t}$ ——电力消费量(GJ);

$C_{\text{C},t}$ ——煤炭消费量(GJ);

$C_{\text{O},t}$ ——油品消费量(GJ)。

8) 氢能消费量

氢能的消费量 $C_{\text{H},t}$ 可以通过以下公式获得:

$$C_{\text{H},t} = \frac{R_{\text{H}}}{k_{\text{EF},\text{H}}} \quad (9)$$

$$C_{\text{H},t} = \frac{E_{\text{GHG},0} \times \prod_0^t (1 + \gamma_i)^t - E_{\text{GHG},t} - (R_{\text{E}} + R_{\text{g}} + R_{\text{i}})}{k_{\text{EF},\text{H}}} \quad (10)$$

式中:

$k_{\text{EF},\text{H}}$ ——氢气替代减排强度(t/GJ)。

3 上海的长期能源消费与碳排放预测

3.1 上海市能源消费现状与预测

根据上海市“十四五”规划,到 2025 年,上海市能源消费总量控制在 1.35 亿 t 标准煤以内,年均增速在 1.3%,此后的能源消费年增长率逐步下降。据此估计,上海的能源需求总体先增后稳,到 2050 年以后,能源总量稳定在 1.55 亿 ~ 1.75 亿 t 标准煤。上海的能源需求的预测如表 1 所示。

表 1 上海能源消费总量预测

Tab. 1 Prediction of total energy consumption in Shanghai

年份	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055	2060
能源消费增长率/%	1.90	1.50	1.00	0.75	0.50	0.25	0.00	0.00	0.00
能源总量/MTce	126.6	135	143.8	152.2	158.5	161.7	162.7	162.9	162.9

注: 1MTce 为 1 百万吨标准煤。

3.2 上海城市碳排放现状与构成

根据 CEADs 公布的数据,2019 年上海市的直接排放量为 1.93 亿 t,间接排放 0.757 亿 t,合计排放 2.686 亿 t,约占全国碳排放总量的 2.7%,是全国人均排放的 140%。依据排放行业区分,上海各分类排放统计如表 2 所示。

表 2 2019 年上海市二氧化碳排放量统计

Tab. 2 Statistics of CO₂ emissions in Shanghai in 2019

排放分类	直接排放/亿t	间接排放/亿t	合计/亿t
化工原料及化工产品	2.91	7.87	10.78
有色金属冶炼和压制	4.45	0.45	4.90
批发、零售贸易和餐饮服务	5.29	7.47	12.76
普通机械	5.33	4.23	9.56
石油加工和炼焦	6.54	4.60	11.14
城市能源	8.70	20.54	29.24
黑色金属的冶炼和压制	22.98	13.53	36.52
运输、仓储、邮电服务	51.85	4.85	56.70
电力、蒸汽和热水的生产	62.83	-53.45	9.38
其他	22.03	65.60	87.64
合计	192.91	75.71	268.62

注: 1)直接排放为化石燃料燃烧和工业过程排放量,间接排放为电力、蒸汽热水等热力排放折算成CO₂排放量; 2)数据来源为CEADs中国碳核算数据库网站。

在行业分布中,直接碳排放前 3 位的,分别是电力、交通和钢铁冶金,将是上海碳减排的重点行业和能源替代的主要需求方,如图 2 所示。

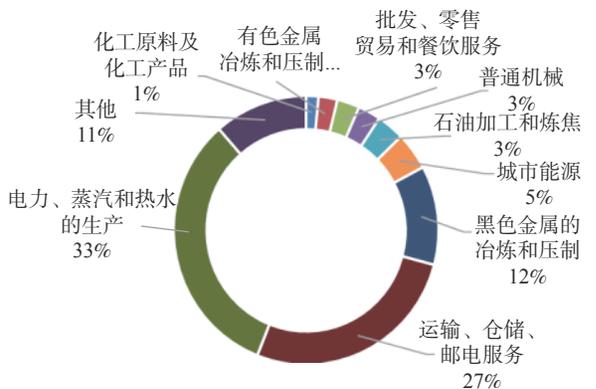


图 2 2019 年上海市二氧化碳直接排放量分行业比例图

Fig. 2 Proportion of direct CO₂ emissions in Shanghai by industry in 2019

3.3 碳达峰碳中和的预测

1)城市碳减排目标

根据《上海市城市总体规划 2017—2035》^[14] 确定的碳减排目标,全市碳排放总量与人均碳排放量预计于 2025 年前达到峰值,至 2035 年,控制碳排放总量较峰值减少 5% 左右,万元地区生产总值能耗控制在 0.22 t 标准煤以下。2021 年 7 月,上海市发布《上海市 2021 年节能减排和应对气候变化重点工作安排》,宣布到 2025 年,上海市碳排放总量要力争

达峰。到 2030 年非化石能源占能源消费总量比重力争达到 25%,单位生产总值二氧化碳排放比 2005 年下降 70%,确保 2030 年前实现碳达峰。文章以此为限制条件,预测 2060 年之前的上海碳减排总量。

2)直接碳排放量预测

根据以上控制要素,对减排量模型公式(1)进行参数优化后得到上海市碳减排曲线见图 3。基准场景,预计 2028 年上海的直接排放量达峰,峰值为 2.09 亿 t,2035 年直接排放量下降为 1.82 亿 t,而后进入快速减排期,到 2040 年减排量最大,直至 2060 年实现碳中和。

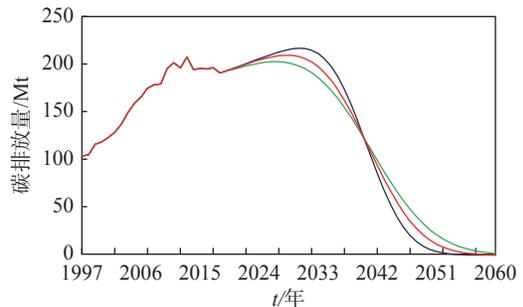


图 3 上海碳排放基准/乐观/悲观场景下的总量预测图

Fig. 3 Prediction of total carbon emissions in Shanghai under benchmark/optimistic/pessimistic scenario

3.4 城市碳减排策略

文献 [1] 认为在对上海市碳排放各影响因素中,城市化率对其影响最大,其次是人均 GDP 水平。这表明上海应延续当前的提高能源效率、实现城市电气化、发展绿色电力等减碳措施。而同时由于上海的电力输入的间接排放是随着电网的排放因子下降,假设到 2035 年上海的电网排放因子达到日本 2020 年的 0.47 kg/kWh,间接排放将降低至 4500 万 t 左右。

由此可得出结论,上海如果仍延续现有的减排措施和依靠外电网的绿色能源输入的电网减排,到 2035 年总排放为 2.2 亿 t,人均年排放降低到 8.2 t,距离碳中和的目标还有相当大的距离。上海在减碳路径上,需要有更加超前的规划,特别是对一次能源的减排替代需要更为主动。仅通过电气化,实现电力替代的同时,还需要利用零碳的绿氢替代,通过氢电混合的氢能应用,才能实现 2035 年以后快速碳减排、实现碳中和的目标。

3.5 上海市分能源类型的排放结构

碳减排的策略是低碳能源对高碳能源的替代,而最终实现净零碳的路径是用低碳能源以收益高于碳减排边际成本的方式逐步完成替代的过程。

由上述可知,上海的碳排放主要来源于煤炭、石油、天然气等含碳燃料和电网输入的电力,根据 CEADs 的统计数据,2019 年上海分能源构成碳排放的数据和能源替代策略如表 3 所示。

表 3 2019 年上海分能源碳排放量统计与减排策略

Tab. 3 Statistics of carbon emissions and emission reduction strategies by energy source in Shanghai in 2019

2019年	分能源综合 排放量/Mt	含碳量/ [t·(TJ) ⁻¹]	初步减碳策略	深度减碳策略
煤炭	55.48	26.37	绿电替代	绿氢发电
焦炭	17.88	29.50	—	氢冶金
焦炉煤气	2.73	—	CCS	—
其他气体	13.66	—	—	绿氢替代
汽油	14.45	18.90	电气化	氢燃料电池
航空煤油	22.87	19.50	—	液氢航空
柴油	13.90	20.20	电气化	氢燃料电池
船舶重油	20.86	21.10	天然气替代	氢燃料
液化石油气	2.60	17.20	天然气替代	氢燃烧
炼厂气	5.20	18.20	—	绿氢替代
天然气	19.70	15.30	—	绿氢替代
其他	3.58	—	—	—
直接排放	192.91	—	—	—
输入电力	75.70	—	绿电替代	绿氢发电
合计	268.61	—	—	—

3.6 上海城市碳排放主要的减排策略

具体碳减排策略主要包括以下内容:

1) 节能: 控制能源消费量增长, 2030 年能源消费年增长 1.5%, 随后能效提升带来能源消费量的增长率逐年下降。

2) 减煤(减焦): 燃煤直接排放 5500 万 t, 控制煤炭包括发电用煤炭和煤化工原料用煤, 控制高炉焦炭的使用。

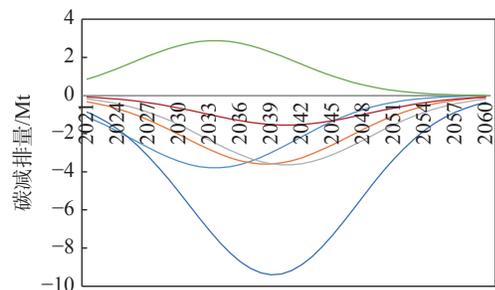
3) 交通电气化: 交通能源排放 5670 万 t, 2030 年停售燃油车, 通过电力替代燃油, 氢能替代燃油, 液氢未来替代航空煤油等策略, 实现减油脱碳。

4) 城市天然气化: 城市直接燃料排放 2970 万 t, 替代液化石油气等燃料, 是当前城市民用能源的主要构成, 但由于天然气仍有 15.3 t/TJ 的含碳量, 在深

度减碳的后期将逐步被绿电和绿氢替代。

5) 绿电电力替代: 2019 年上海电力间接排放 7570 万 t, 预期将通过开发和输入可再生能源, 电网排放因子下降预计上海的电网排放因子从 0.78 kg/kWh 下降到 2035 年的 0.35 kg/kWh, 主要依赖全国电网的绿色电力减碳, 以及上海开发海上风电、屋顶光伏等一次电力。

因此, 根据公式(5)和公式(7)及各能源之间的减排替代关系, 建立减碳、减油、减燃气、天然气替代、绿氢替代、绿电替代(输入零碳电力), 得到各类含碳能源的减排量如图 4 所示。



注: — 减煤; — 减油; — 减燃气; — 天然气替代;
— 新增零碳能源输入; — 合计。

图 4 分能源类型的减排进程分析

Fig. 4 Analysis of emission reduction process by energy type

其中天然气作为过渡能源和最终的化工用含碳能源, 天然气的使用在碳达峰后仍通过替代部分的高碳能源(煤炭、石油制品等), 起到绝对减排的作用。但随着减排压力的逐步上升, 在 2040 年以后, 将被更多的氢能所替代。

3.7 上海能源结构预测

根据公式(8)和能源消费总量的约束, 计算得到能源消费需求预测如图 5 所示。

煤炭、石油等高含碳能源, 随着减排进程而逐步退出上海市的能源消费结构, 天然气先增后减, 最终作为化工原料的能源消耗占据约 9% 的能源消费总量。2030 年碳达峰后, 绿氢作为零碳能源, 逐步进入能源消费结构, 并最终占据总能源消费量的 21%。而持续增加的绿色电力, 作为能源替代的主体, 最终达到 69%, 如图 6 所示。

由此, 可以将上海的能源按脱碳替代来源分为两个阶段: 2035 年之前天然气替代减排阶段(天然气阶段), 2035 年之后的氢能与电力替代减排阶段(绿电绿氢阶段)。

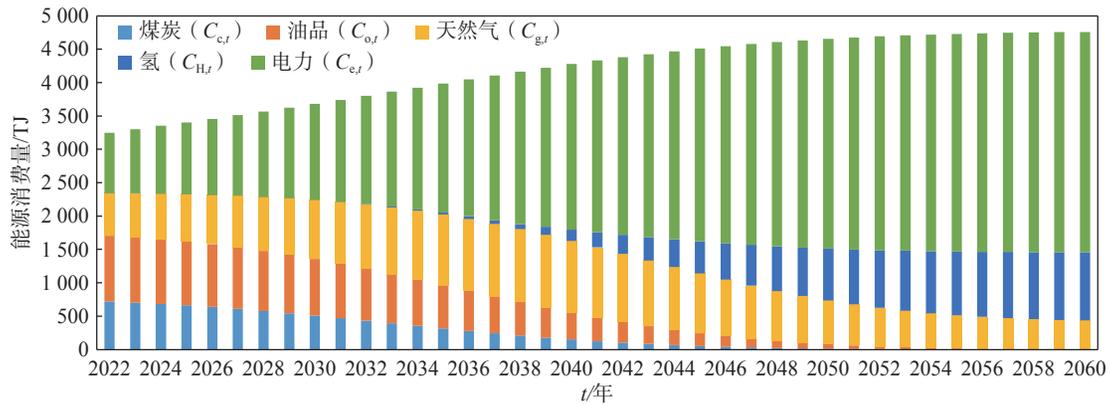


图5 上海能源消费总量与分能源类型消费量趋势预测

Fig. 5 Prediction of total energy consumption and consumption trend by energy type in Shanghai

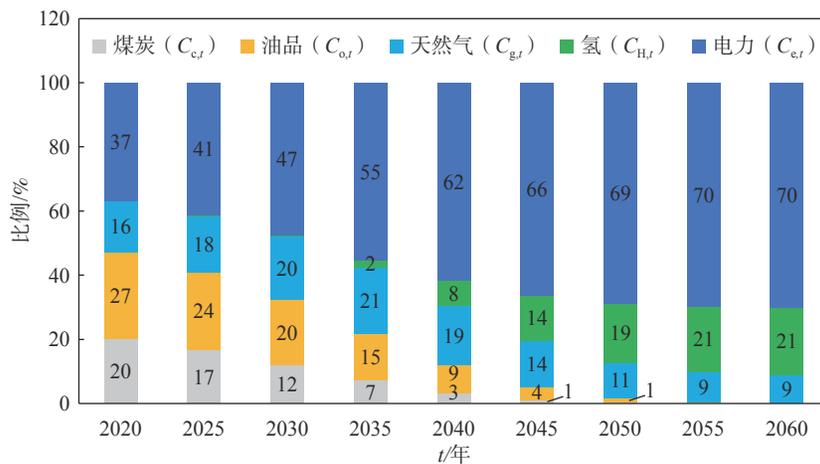


图6 上海能源消费结构预测

Fig. 6 Prediction of energy consumption structure in Shanghai

4 上海的氢能战略应用场景

4.1 长三角一体化的氢能市场

2019年,中国汽车工程学会发布的《长三角氢走廊建设发展规划》,提出了长三角氢走廊的发展概念。氢能走廊是长三角未来大规模氢能市场的起点,长三角一体化氢能市场将集合绿氢的制储运、应用场景和市场建设,最终为获得市场定价,稳定我国战略能源基石提供市场基础。因此,长三角一体化氢能市场,不仅仅是交通氢能领域的一体化,更重要的是氢能市场一体化。

结合上海市发布的《上海市氢能产业发展中长期规划(2022—2035年)》^[8]《上海市车用加氢站布局规划》^[15]等氢能规划,规划展示了上海在氢能应用和长三角一体化氢能市场的引领地位。上海的氢能应用将是一个逐步发展升级的过程,采用了“点-线-面”

的规划思路,如图7所示。规划显示全市存在较多潜在的快速发展区域,但各地区之间加氢站建设需求差异显著。

通过对氢能应用场景的调研和分析,上海的氢能的中远期规划应用场景,大致可以划分为以下几个部分:

- 1) 钢铁产业(宝钢)。
- 2) 化工产业(漕泾化工园区、高桥化工园区)。
- 3) 交通能源(氢能重卡、通勤交通、城市物流),绕城高速, G2/G15/G50/60/S1 等。
- 4) 船舶氢能(黄浦江、长江、沿海航线、外高桥码头、洋山港区)。
- 5) 建筑分布式用能(冷热电联产)。
- 6) 氢能发电(燃氢、燃氢燃气轮机)。
- 7) 数据中心供电(燃料电池供电)。

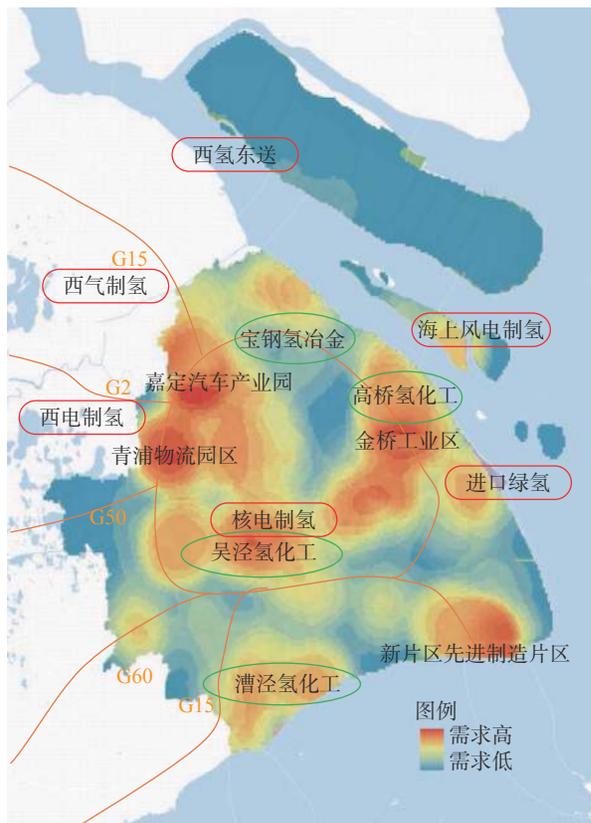


图 7 上海氢能点线面结合发展示意图

Fig. 7 Schematic diagram of point-line-plane development of hydrogen energy in Shanghai

由于氢能的特殊安全性要求,氢能应用将集中在城区以外,以交通干线和产业园区为核心的网络结构。由此,氢交通的基础上,叠加了氢冶金、氢化工、氢建筑等面需求,以及未来潜在的氢与氨燃机发电等应用,基本构成氢能应用点线面结合的发展需求。

以氢能高速公路为核心的供应链和点线面结合的氢能应用网络,构成了上海未来氢能的产业骨架。长三角氢能的综合成本优势和供应安全,将推动上海成为全球化的氢能中心。

4.2 氢能需求结构

文献 [16] 预测到 2050 年欧洲的氢能需求将达到总能源需求的 24%, 总量达到 2250 TWh。为分析氢能应用场景,通过对潜在的氢能应用的行业进行调研,上海主要的氢能应用场景包括交通、化工、电力等方面,如表 4 所示。

依据上文的氢能消费模型分析,在碳减排进程中对氢能分场景消费量预测如表 5 和图 8 所示。

表 4 氢能替代场景表

Tab. 4 Hydrogen energy substitution scenarios

替代场景	场景说明
氢能替代建筑能源	居民燃气替代、商业燃气、冷热电联产
氢能替代交通能源	氢能重卡、氢能乘用车、氢能轨道交通
氢能发电	掺氢、掺氨燃机、燃料电池发电
氢能冶金	高炉掺氢、氢气竖炉、有色金属冶炼
氢能化工	氢气化工、精细化工
其他	电子气、特气

表 5 氢能分场景消费量预测

Tab. 5 Prediction of hydrogen energy consumption by scenario

年份	Mt									
	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055	2060	
氢能替代建筑能源	0	0	0.011	0.070	0.383	0.910	1.203	1.317	1.286	
氢能替代交通能源	0	0.006	0.033	0.115	0.486	0.830	1.114	1.300	1.336	
氢能发电	0	0.005	0.041	0.157	0.530	1.043	1.513	1.690	1.614	
氢冶金	0	0.009	0.045	0.192	0.750	1.536	1.856	2.007	1.856	
氢化工	0	0.003	0.052	0.221	0.517	0.661	0.710	0.691	0.639	
其他	0	0	0.011	0.070	0.328	0.560	0.902	1.097	1.624	
氢总量	0	0.023	0.193	0.826	2.993	5.541	7.298	8.103	8.355	

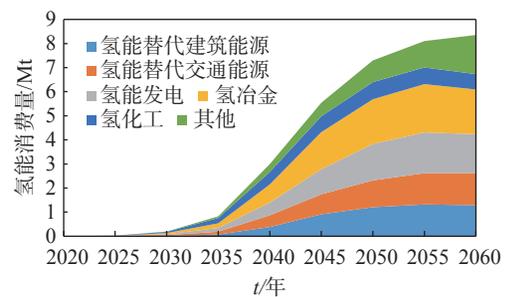


图 8 氢能分场景消费结构图

Fig. 8 Hydrogen energy consumption structure by scenario

到 2060 年绿氢也将是未来上海的主力能源之一,在 2040 年氢能需求总量约为 300 万 t, 约占总能源消费的 11%; 到 2060 年氢能需求总量约为 835 万 t, 达到总能源消费 21%。

4.3 上海绿氢的供应来源分析

上海缺乏一次能源,是能源消费型城市,绝大部分的能源从外部输入,未来的上海的绿氢将是多来源、多形态和多应用方式。为达到以上的零碳氢能的供应量,未来上海将有可能从以下几个方面获得

低碳绿色氢能的供应。

1) 海上风电制氢

上海拥有较为丰富的海上风电资源,近海面积近9000 km²,根据《上海市海上风电规划》:近期(2021—2025年)规划开发3.95 GW;中期(2026—2030年)规划开发4~6 GW;远期(2030—2050年)规划开发20.1~22.1 GW。海上风电由于存在不稳定的特点,需要和氢能或储能配合使用,未来预计海上风电制氢将占远期开发总量50%,未来实际的风电可以增加至30~40 GW,其中15 GW用于制氢,年产氢气量约为90万t。李鹏^[17]等建议利用深度调峰电力容量制氢,王永江等^[18]分析了未来大规模风光制氢的成本和经济性,上海可利用深远海风电、杭州湾风电、东海大桥风电等海上风电制氢和供电联动制氢,实现氢能就近供应和确保绿电的稳定调峰。

2) 西部水电制氢、核电制氢

利用落地绿电直供制氢的方式,为上海提供绿色氢气是另一个稳定的绿氢来源。高啸天等^[11]表明核电制氢有着比电解更高的效率,因此小型化的核电机组直接化学制氢或固体氧化物电解池(Solid Oxide Electrolysis Cell, SOEC)高温水电解制氢,100 MW的小型核电机组,可以提供1.57万t/a的低碳氢气,用于钢铁、能源化工等氢能大规模应用场景,可以获得低价的绿氢。为确保电网的稳定运行,通过电解制氢用于消纳上游的风光等可再生能源,预计可获得55万t/a的氢能供应量。

3) 西氢东送

上海是天然气主干网的东部终点,也是沿海管网的重要节点,西气东输、川气东送、西气二线等主干网接入上海天然气管网。范宏^[19]等提出了30%掺氢比例下的碳交易机制推动混氢天然气能源系统运行的方式。随着西部风光绿氢、水电绿氢等大量的低价绿氢不断开发,通过天然气掺氢和未来改造为氢气为主的输氢管线,西部氢气将成为上海绿氢的主要来源。按30%的掺氢量,西北西南光伏风电绿氢输送上海的总量可以达到54亿m³,折合48万t/a。未来绿氢还可能以液氢、绿氨等方式从西部地区运输到东部,与液氢、绿氨等无碳能源的国际贸易相接轨。供应方式主要有管道输氢、液氢运输、液氨运输等,把我国西部丰富的氢能资源大规模输送到东部。

4) 液氢、绿氨进口

液氢、绿氨等零碳能源的进口,未来将成为中东、澳洲等可再生能源丰富的国家重点替代出口能源,参与绿色能源国际贸易,将有助于我国影响国际绿色能源市场定价。而上海将可借此机会,成为绿色能源的交易市场,进一步稳固我国的能源大国地位。

5) 供应总量平衡

如表6所示,综合以上的供应渠道,预计到2040年将实现200万~300万t/a的绿氢供应量,2060年超过800万t。

表6 上海2040年、2060年氢能供需预测表

Tab. 6 Prediction of hydrogen energy supply and demand in Shanghai by 2040 and 2060

	万 t/a					
氢能来源	海上风电	西电制氢	核电制氢	西氢东送	进口液氢	合计
2040年	90	25	55	48	82	300
2060年	200	30	150	250	193	823

4.4 储输一体的氢能高速公路

氢能是新型的战略能源,产业链和供应链复杂,与传统的二次能源类型如电力和成品油相比,无论是生产端、供应链和消费端,都没有已经成型的产业链。这对于氢能企业而言,意味着从定价机制到供应模式和可靠性都存在着巨大的不确定性。氢能的产业链内容庞杂,涉及的产业边界和商业模式都是创新,就迫切需要在氢能产业之间,构建边界和锚点。

从调研的情况看,氢能产业最关键的问题是氢能的供应,包括供应链和供应价格。无论是氢交通,还是氢冶金、氢化工,目前都存在氢从哪里来、如何定价的问题。对需要从商业上获利的企业而言,这两个问题不解决,是无法完成商业模式的构建。这就需要政府从根本上构建一个统一规划的供应链基础设施,这是氢能产业发展的基础,被称为“氢能高速公路”。

文献[20]提出了欧洲氢气骨干网(European Hydrogen Backbone, EHB)的规划,通过对10个欧洲国家(德国、法国、意大利、西班牙、荷兰、比利时、捷克共和国、丹麦、瑞典和瑞士)的分析,在现有天然气管网的基础上,氢能管网从2020年代中期开始逐渐形成,到2035年进一步扩大,到2040年延伸到所有方向,长度接近39700 km。

如前文所述,到2060年上海远期绿氢需求量超

过 800 万 t/a, 折合约 900 亿 m^3/a 。未来上海作为长三角乃至全国氢能干线的核心, 同样需要一个以氢气干线管网为骨干, 以液氢、液氨等无碳液体储氢能源为储备, 以高压氢为调剂, 集储输运为一体的综合氢能供应链。上海拥有发达的城市天然气主干网, 用以接入和输配多来源的城市天然气供应。结合这个管网系统, 研发和发展上海城市氢能高速公路, 是经济可行的绿色氢能储运供应链解决方案。如图 7 所示, 上海的氢能供应网络将充分利用现有的天然气管网和氢能的利用场景, 采用制储用结合、环形管网为干线的城市氢能高速公路系统:

1) 以高压氢能环线管网为基础的上海市氢能管网系统。

2) 液氢、液氨储备与氢气调峰设施, 确保调峰需求。

3) 多点现场制氢补充, 保证氢能应用的连续可靠, 与电网形成稳定的互补调节。

4) 氢能城市门站, 长期稳定的氢能门站供应。

这个供应链体系将为上海的氢能应用提供高效、低成本、安全可靠的绿氢供应, 解决廉价绿氢到用户终端的难题。

5 氢能发展的顶层设计

氢能和传统能源产品一样, 也有生产、运输、存储和加工、分销等环节, 价格构成也是考虑到各个环节对应的成本。在全球通力合作应对气候变化的背景下, 通过能源革命控制温室气体排放逐渐成为可行的方式。未来煤炭、石油、天然气等成熟的现有石化能源将有可能被可再生氢等逐渐替代, 相应以现有石化能源为基础的传统能源贸易体系也将逐渐被氢能等新兴能源贸易逐渐替代, 重构氢能等清洁能源的贸易体系将变得越来越具备可行性。氢能作为未来潜在的大宗贸易商品, 国内外多个国家和地区已经开始打造和建设氢能国际贸易体系。李文琪^[21]建议氢能的发展应参与到东亚区域能源合作中。张灿^[22]等提出对氢能政策要参考能源政策, 推动氢能的能源战略应用。

氢能在全球气候变化的推动下, 在未来 20 年内将成为全球大宗能源商品, 我国将以积极的姿态规划并加入全球氢能源的博弈。因此, 以产业为基础拓展氢金融, 成为全球氢能中心, 进而获得绿氢的全球定价权。而上海拥有全国最好的港口、产业、技

术和金融资源, 有条件构建全球氢能中心。上海大规模的氢能应用, 是基于净零碳城市的发展需求。在此基础上, 上海应以构建未来全球氢能中心, 获得全球定价权为最终目标。如图 9 所示, 上海的氢能顶层设计应从安全结构、生产结构、金融结构和知识结构 4 个方面, 来设计未来的上海氢能产业, 并最终抢夺全球定价权。

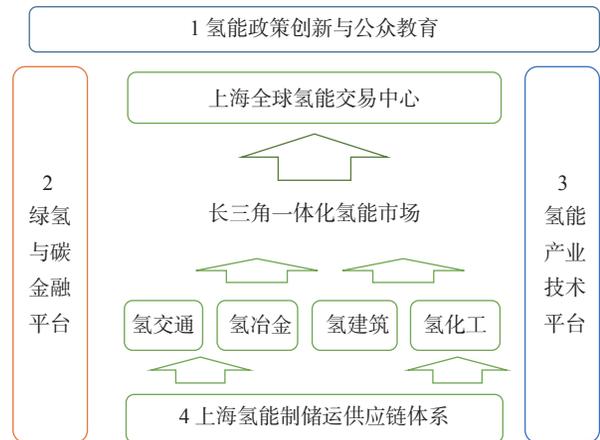


图 9 上海氢能顶层设计结构示意图

Fig. 9 Schematic diagram of top-level design structure of Shanghai hydrogen energy

1) 安全结构: 开放稳定的政治经济环境、持续的氢能政策创新与公众氢能教育。安全结构是成为全球氢能中心的最基本条件。

2) 金融结构: 建立绿氢贸易与碳交易平台, 建设绿氢的现货、期货及其金融衍生品的交易市场, 以争取氢能的全球定价权。

3) 生产结构: 上海氢能制储运供应链体系, 以超前的基础设施规划, 整合长三角乃至中国的氢能应用市场, 依托上海的技术和产业优势、贸易与金融优势, 推动长三角氢能一体化建设。

4) 知识结构: 氢能产业技术平台, 构建中国氢能技术的孵化与发展平台, 快速占领氢能技术的制高点, 解决氢能技术瓶颈和持续创新。

上海要成为全球氢能中心, 领先的技术、产业的辐射、全球金融与贸易平台和开放的政策环境缺一不可。

氢能产业技术平台, 主题是构建中国氢能技术的孵化与发展平台, 快速占领氢能技术的制高点, 解决氢能技术瓶颈和持续创新。由于氢能产业刚刚起步, 氢能的技术在产业链的各环节都存在着需要突破的方向和技术路线。

6 结论

以上海为例,区域中心城市的碳中和是一个持续的外部推动的低碳、零碳能源替代过程,并最终由绿氢绿电实现净零碳的能源结构替代,替代边际成本递增,并由全社会承担。

通过建立碳减排模型,以城市碳排放的现状和碳中和目标为约束条件,文章构建了实现净零碳排放的目标约束下的碳排放预测,对上海2020年到2060年实现碳中和的减排进程进行了预测。然后利用碳减排替代关系(电气化替代、氢能替代),分解并通过碳减排因子计算氢能需求,预测到2040年、2060年两个关键时间点的氢能需求量和需求曲线。由此得出,上海在2035年之前是天然气减排阶段、2035年之后是电力和绿氢减排阶段,到2040年预计绿氢的需求总量为200万t,占上海能源需求总量的8%;2060年达到820万t,占能源需求总量的22%。

针对上海的能源供应特点,提出了西氢东送、西电制氢、海上风电制氢、分散制氢、核电制氢、进口液氢、液氨等来源的多元化绿氢供应,构成上海氢能源的主体。以上海为中心构建的长三角一体化的区域氢能市场模式,并进一步辐射形成结合氢能生产、储运、消费和市场结合的多元化氢能中心,为达到碳中和过程边际成本最优化,上海应尽早开展氢能的产业需求规划,建设氢能管网等基础设施,有序替代高碳能源的使用。为保证未来氢能的快速发展,实现多元化的绿氢供应和多产业的氢能需求有效匹配,文章提出了“氢能高速公路”概念,开展城市氢能管网的规划建设。

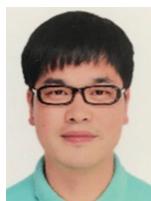
文章认为,为建设全球化的氢能中心城市,还需要从安全结构、生产结构、金融结构和知识结构4个方面开展上海氢能发展的顶层设计。适应中国可持续发展的目标,获取氢能的全球定价权,保障氢能发展的战略安全,是氢能顶层设计的目标。

参考文献:

- [1] 张哲,任怡萌,董会娟.城市碳排放达峰和低碳发展研究:以上海市为例[J].*环境工程*,2020,38(11):12-18. DOI: 10.13205/j.hjgc.202011003.
ZHANG Z, REN Y M, DONG H J. Research on carbon emissions peaking and low-carbon development of cities: a case of Shanghai [J]. *Environmental engineering*, 2020, 38(11): 12-18. DOI: 10.13205/j.hjgc.202011003.
- [2] 郑长德,刘帅.基于空间计量经济学的碳排放与经济增长分析[J].*中国人口·资源与环境*,2011,21(5):80-86. DOI: 10.3969/j.issn.1002-2104.2011.05.014.
- [3] FODHA M, ZAGHDOUD O. Economic growth and pollutant emissions in Tunisia: an empirical analysis of the environmental Kuznets curve [J]. *Energy policy*, 2010, 38(2): 1150-1156. DOI: 10.1016/j.enpol.2009.11.002.
- [4] YUE X F, DEANE J P, O'GALLACHOIR B, et al. Identifying decarbonisation opportunities using marginal abatement cost curves and energy system scenario ensembles [J]. *Applied energy*, 2020, 276: 115456. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.115456.
- [5] Mayor's Office of Sustainability, NYC. OneNYC 2050: building a strong and fair city [EB/OL]. (2022-06-17) [2023-04-05] <https://onenyc.cityofnewyork.us>.
- [6] 魏楚.中国城市CO₂边际减排成本及其影响因素[J].*世界经济*,2014,37(7):115-141. DOI: 10.19985/j.cnki.cassjwe.2014.07.007.
WEI C. Marginal CO₂ emission reduction costs and influencing factors in Chinese cities [J]. *The journal of world economy*, 2014, 37(7): 115-141. DOI: 10.19985/j.cnki.cassjwe.2014.07.007.
- [7] 刘竹.全球碳排放的实时定量方法[J].*科学通报*,2023,68(7):830-840. DOI: 10.1360/TB-2022-0494.
LIU Z. Near-real-time methodology for assessing global carbon emissions [J]. *Chinese science bulletin*, 2023, 68(7): 830-840. DOI: 10.1360/TB-2022-0494.
- [8] 上海市发展和改革委员会.上海市氢能产业发展中长期规划(2022—2035年)[EB/OL].(2022-06-20)[2023-04-05].https://fgw.sh.gov.cn/fgw_gjscopy/20220617/f380fb95c7c54778a0ef1c4a4e67d0ea.html.
Shanghai Municipal Development & Reform Commission. Medium and long term plan for the development of hydrogen energy industry in Shanghai (2022-2035) [EB/OL]. (2022-06-20) [2023-04-05]. https://fgw.sh.gov.cn/fgw_gjscopy/20220617/f380fb95c7c54778a0ef1c4a4e67d0ea.html.
- [9] 孙旭东,赵玉莹,李诗睿,等.我国地方性氢能发展政策的文本量化分析[J/OL].*化工进展*:1-12(2022-11-30)[2023-04-05].<https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2022-1580>.
SUN X D, ZHAO Y Y, LI S R, et al. Textual quantitative analysis on China's local hydrogen energy development policies [J/OL]. *Chemical industry and engineering progress*: 1-12 (2022-11-30) [2023-04-05]. <https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2022-1580>.
- [10] 史倩,过良,张永亮.新能源制氢在传统炼化企业的应用[J].*南方能源建设*,2022,9(4):32-39. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.004.
SHI Q, GUO L, ZHANG Y L. Application of water-electrolytic hydrogen production technology in traditional refinery and chemical enterprise [J]. *Southern energy construction*, 2022, 9(4): 32-39. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.004.
- [11] 高啸天,郑可昕,蔡春荣,等.氢储能用于核电调峰经济性研究[J].*南方能源建设*,2021,8(4):1-8. DOI: 10.16516/j.gedi.

- issn2095-8676.2021.04.001.
GAO X T, ZHENG K X, CAI C R, et al. Research on economy of hydrogen energy storage for nuclear power peak shaving [J]. *Southern energy construction*, 2021, 8(4): 1-8. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.04.001.
- [12] 黄宣旭, 练继建, 沈威, 等. 中国规模化氢能供应链的经济性分析 [J]. *南方能源建设*, 2020, 7(2): 1-13. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.02.001.
HUANG X X, LIAN J J, SHEN W, et al. Economic analysis of China's large-scale hydrogen energy supply chain [J]. *Southern energy construction*, 2020, 7(2): 1-13. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.02.001.
- [13] 姚若军, 高啸天. 氢能产业链及氢能发电利用技术现状及展望 [J]. *南方能源建设*, 2021, 8(4): 9-15. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.04.002.
YAO R J, GAO X T. Current situation and prospect of hydrogen energy industry chain and hydrogen power generation utilization technology [J]. *Southern energy construction*, 2021, 8(4): 9-15. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.04.002.
- [14] 上海市规划与自然资源局. 上海市城市总体规划2017—2035 [EB/OL]. (2010-01-01) [2023-04-05]. <https://ghzyj.sh.gov.cn/cmsres/13/135d5e42e159406ab1b4d1102eea2ffa/b86b9d44cb49dba1c00b7a2ac83be28d.pdf>.
Shanghai Municipal Bureau of Planning and Natural Resources. Shanghai Urban Master Plan 2017-2035 [EB/OL]. (2010-01-01) [2023-04-05]. <https://ghzyj.sh.gov.cn/cmsres/13/135d5e42e159406ab1b4d1102eea2ffa/b86b9d44cb49dba1c00b7a2ac83be28d.pdf>.
- [15] 上海市住房和城乡建设管理委员会. 《上海市车用加氢站布局专项规划》公示 [EB/OL]. (2021-02-07) [2023-04-05]. <https://zjw.sh.gov.cn/gsgg/20210207/890ef123de244d399fdd921ebfbdc af6.html>.
Shanghai Housing and Urban Rural Construction Management Committee. The "Shanghai vehicle hydrogen refueling station layout special plan" was announced [EB/OL]. (2021-02-07) [2023-04-05]. <https://zjw.sh.gov.cn/gsgg/20210207/890ef123de244d399fdd921ebfbdc af6.html>.
- [16] Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking. Hydrogen roadmap Europe: a sustainable pathway for the European energy transition [R/OL]. (2019-02-11) [2023-04-05]. https://www.clean-hydrogen.europa.eu/system/files/2019-02/Hydrogen%2520Roadmap%2520Europe_Report.pdf.
- [17] 李鹏, 肖建群. 电解水制氢在电厂和氢能项目的设计应用 [J]. *南方能源建设*, 2020, 7(2): 41-45. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.02.006.
LI P, XIAO J Q. Design and application of hydrogen production by electrolysis water in power plants and hydrogen energy projects [J]. *Southern energy construction*, 2020, 7(2): 41-45. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.02.006.
- [18] 万永江, 韩爽, 闫亚敏, 等. 风光制氢容量配置优化研究及绿氢经济性分析 [J]. *内蒙古电力技术*, 2023, 41(1): 8-14. DOI: 10.19929/j.cnki.nmgdljs.2023.0002.
WAN Y J, HAN S, YAN Y M, et al. Research on optimization of capacity allocation of wind power and photovoltaic hydrogen production and economic analysis of green hydrogen [J]. *Inner Mongolia electric power*, 2023, 41(1): 8-14. DOI: 10.19929/j.cnki.nmgdljs.2023.0002.
- [19] 范宏, 杨忠权, 夏世威. 考虑阶梯式碳交易机制的混氢天然气综合能源系统低碳经济运行 [J/OL]. *上海交通大学学报*: 1-21 (2023-03-12) [2023-04-01]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2022.377>.
FAN H, YANG Z Q, XIA S W. Low carbon economic operation of hydrogen enriched compressed natural gas integrated energy system considering step carbon trading mechanism Journal of Shanghai Jiao Tong University [J/OL]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*: 1-21 (2023-03-12) [2023-04-01]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2022.377>.
- [20] JENS J, WANG A, VAN DER LEUN K, et al. Extending the European hydrogen backbone, a European hydrogen infrastructure vision covering 21 countries [R/OL]. (2021-04-01) [2023-04-05]. <https://www.chb.eu/files/downloads/European-Hydrogen-Backbone-April-2021-V3.pdf>.
- [21] 李文琪. 中日韩可再生能源政策研究与合作前景探析 [J]. *国际石油经济*, 2022, 30(10): 90-98. DOI: 10.3969/j.issn.1004-7298.2022.10.012.
LI W Q. Research on renewable energy policy and cooperation prospects among China, Japan, and South Korea [J]. *International petroleum economics*, 2022, 30(10): 90-98. DOI: 10.3969/j.issn.1004-7298.2022.10.012.
- [22] 张灿, 张明震, 申升, 等. 中国氢能高质量发展的路径建议与政策探讨 [J]. *南方能源建设*, 2022, 9(4): 11-23. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.002.
ZHANG C, ZHANG M Z, SHEN S, et al. Path suggestion and policy discussion for China's high-quality development of hydrogen energy [J]. *Southern energy construction*, 2022, 9(4): 11-23. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.002.

作者简介:



黄宣旭

黄宣旭 (第一作者, 通信作者)
1975-, 男, 浙江奉化人, 新能源研究发展总监, 主要从事氢能研究与管理 (e-mail) huangxuanxu@yingde.com。

沈威

1972-, 男, 浙江嘉兴人, 副总裁, 复旦大学 EMBA, 主要从事工业气体行业的管理 (e-mail) shen-wei@yingde.com

丁光宏

1963-, 男, 安徽芜湖人, 教授, 博士生导师, 主要从事工程与生物力学方向的研究 (e-mail) ghding@fudan.edu.cn。

(编辑 叶筠英)