

引文: 李忻颖, 唐旭, 许传博, 等. “双碳”目标下中国工业部门氢能需求量测算及供给结构路径优化[J]. 天然气工业, 2024, 44(5): 146-156.  
LI Xinying, TANG Xu, XU Chuanbo, et al. Towards China's "dual carbon" goals: Industrial hydrogen demand estimation and supply structure optimization[J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(5): 146-156.

# “双碳”目标下中国工业部门氢能需求量测算 及供给结构路径优化

李忻颖<sup>1</sup> 唐旭<sup>1</sup> 许传博<sup>2</sup> 王敏<sup>1</sup> 马美艳<sup>1</sup>

1. 中国石油大学(北京)经济管理学院 2. 华北电力大学经济与管理学院

**摘要:** 在推进“双碳”目标实现的过程中, 中国的能源系统迫切需要加快转型。工业部门由于其特有的对传统化石能源燃料和原料的依赖, 发展过程中存在大量难减排的行业, 氢能以来源丰富、绿色低碳、应用广泛等优势为工业部门提供了一条切实可行的深度脱碳路线。为此, 构建了3阶段模型框架, 测算了中国工业部门重点行业氢能需求量, 最后探讨了氢能供给结构的优化路径。研究结果显示: ①工业部门用氢主要集中于钢铁、水泥、甲醇及合成氨等难以通过电气化实现脱碳的关键行业; ②从需求侧来看, 在参考情景、低渗透情景及高渗透情景下, 2060年工业部门的氢能需求量分别为 $2\,509.1 \times 10^4$  t、 $5\,037.8 \times 10^4$  t、 $6\,865.7 \times 10^4$  t; ③从供给侧来看, 氢能供给结构将从以化石能源为主的灰氢逐步过渡到以可再生能源为主的绿氢; ④随着绿氢的应用比例增高, 预计在2020—2060年期间, 氢能可累计替代煤炭 $41.7 \times 10^8$  t标准煤、石油 $11.3 \times 10^8$  t标准煤, 累计碳减排贡献比例有望达16.7%。结论认为, 中国工业部门减少化石能源需求量和碳排放量需要重点依托绿氢产业的高质量发展。

**关键词:** 中国; 工业部门; 氢能需求; 供给结构; 能源替代; 减排贡献

中图分类号: TE991.1 文献标识码: A DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2024.05.013

## Towards China's "dual carbon" goals: Industrial hydrogen demand estimation and supply structure optimization

LI Xinying<sup>1</sup>, TANG Xu<sup>1</sup>, XU Chuanbo<sup>2</sup>, WANG Min<sup>1</sup>, MA Meiyang<sup>1</sup>

(1. School of Economics and Management, China University of Petroleum - Beijing, Beijing 102249, China; 2. School of Economics and Management, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Natural Gas Industry, Vol.44, No.5, p.146-156, 5/25/2024. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

**Abstract:** Under the national drive to achieve carbon peak and carbon neutrality ("dual carbon"), it is imperative for China's energy system to accelerate the pace towards low-carbon transition. The industrial sector, with high dependency upon traditional fossil fuels and materials, is very hard to decarbonize in so many fields. Luckily, abundant, green and scalable hydrogen offers a feasible solution to the problem. As such, a three-stage model was set up to estimate the hydrogen demand of key industrial industries, and to explore optimized pathways towards hydrogen supply. The results show that: 1) major hydrogen consumption comes from steel and iron, cement, methanol and ammonia synthesis, all being hard-to-debate by electrification process; 2) under the reference scenario, high penetration and low penetration scenarios, the estimated hydrogen demand in 2060 is  $2\,509.1 \times 10^4$  t,  $5\,037.8 \times 10^4$  t,  $6\,865.7 \times 10^4$  t, respectively; 3) the supply structure will shift to green hydrogen (renewables) from gray hydrogen (fossil energy); 4) with increasing application of green hydrogen, it's estimated that between 2020 and 2060, hydrogen would replace coals of  $41.7 \times 10^8$  tce and petroleum of  $11.3 \times 10^8$  tce, reducing 16.7% of carbon emissions. In summary, scaling up hydrogen development is essential for China's industrial sectors to cut energy demand and carbon emissions.

**Keywords:** China; Industrial sector; Hydrogen demand; Supply structure; Energy substitution; Emission abatement

**基金项目:** 国家自然科学基金项目“多重目标下中国油气生产的锁定碳排放与解锁策略研究”(编号: 72174206)。

**作者简介:** 李忻颖, 1992年生, 博士研究生; 主要从事氢能经济与能源经济管理方面的研究工作。地址: (102249)北京市昌平区府学路18号。ORCID: 0009-0004-7551-1291。E-mail: lixy0711@163.com

**通信作者:** 唐旭, 1985年生, 教授, 博士; 主要从事能源经济管理、资源环境政策与管理、管理系统工程等领域的研究与教学工作。地址: (102249)北京市昌平区府学路18号。ORCID: 0000-0003-3068-1524。E-mail: tangxu2001@163.com

## 0 引言

随着“双碳”目标的提出和城镇化进程的加快，中国的能源系统迫切需要深度转型。根据国际能源署（International Energy Agency, IEA）的数据显示，2020 年中国能源活动二氧化碳排放量为  $100 \times 10^8$  t，其中工业部门排放占比达 68%<sup>[1]</sup>。由于碳达峰时间越早、峰值越低越有利于碳中和目标的实现<sup>[2-3]</sup>，因此有效控制工业部门碳排放对“双碳”目标的实现至关重要<sup>[4]</sup>。但工业部门由于其特有的对传统化石能源燃料和生产原料的依赖，存在大量难以电气化的环节<sup>[5-6]</sup>，在寻找替代能源时面临巨大的挑战。近年来，氢能凭借其来源丰富、绿色低碳、应用广泛等优势，为难以电气化的行业提供了解决深度脱碳问题的新思路<sup>[7-8]</sup>。

当前，对氢能需求量测算<sup>[9-11]</sup>的相关研究逐渐增多，但多数研究都聚焦于对整体或单一子行业氢能需求量测算<sup>[12-14]</sup>的研究，针对工业部门氢能需求量研究未综合涵盖所有重点行业，对氢能供给侧路径优化也有待深入探讨。为此，构建了面向工业部门

的氢能需求量测算及供给优化模型，得出未来一段时间内工业部门钢铁、水泥、甲醇、合成氨等重点行业的氢能供需关系发展路径，进而分析累计碳减排贡献以及化石能源节约量，以期为工业部门能源转型和深度脱碳提供参考。

## 1 氢能需求量测算及供给优化模型构建

为了测算中国工业部门氢能需求量并优化氢能供给结构，构建了三个阶段模型框架：第一阶段分别采用“S”形理论、多因素拟合分析法、弹性系数法、类比分析法等方法，对工业部门中钢铁、水泥、甲醇及合成氨等重点行业的产品需求量进行模拟计算；第二阶段主要采用马尔可夫模型对重点行业的氢能渗透率进行测算，进而得到未来氢能需求量；第三阶段考虑氢能供需平衡，以含碳制氢成本最小化为目标，构建供氢优化模型得到氢能供给结构。该模型框架旨在构建不确定情景下未来氢能供需测算体系，具体测算过程如图 1 所示。考虑到数据公开的时效性限制，本研究选定 2020 年作为基准年。

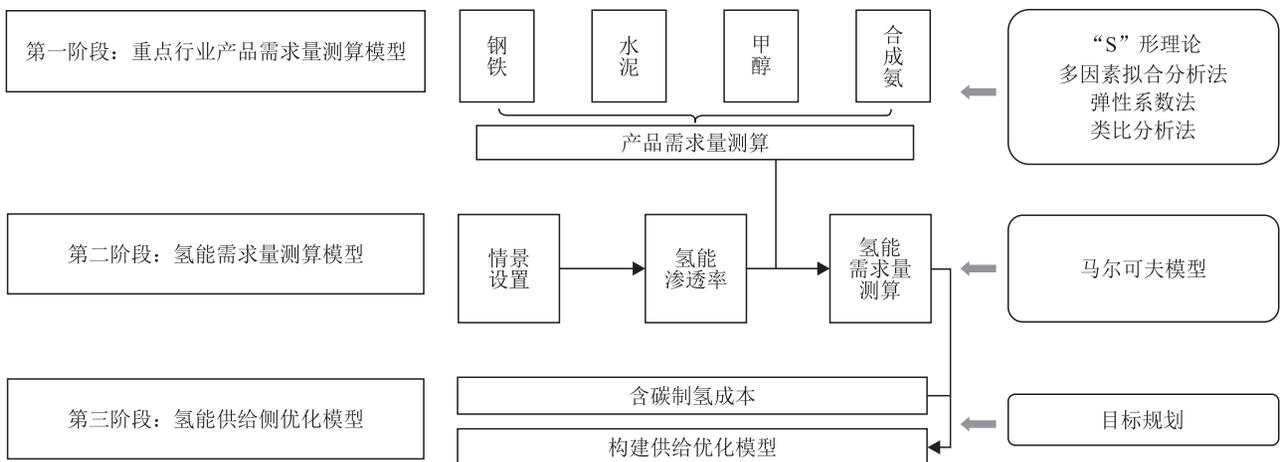


图 1 氢能供需模型框架图

### 1.1 重点行业需求量测算模型

#### 1.1.1 钢铁需求量测算模型

氢能在钢铁行业中主要代替焦炭作为还原剂。随着经济的发展，钢铁需求量与经济发展（用 GDP 数据表征）的关系符合“S”形规律<sup>[15-16]</sup>。“S”形规律有 3 个关键点，分别为起飞点、转折点和零增长点。起飞点即人均钢铁需求量高速增长的开始点；转折点即人均钢铁需求量由增速增长变为减速增长的点，随着城镇化水平不断提高、基础设施不断完善，与

钢铁相关产业相对稳定，人均钢铁需求量增长速率逐渐放缓并出现；零增长点即人均钢铁需求量达到峰值的点，由于社会基础设施建设趋于完备，人均钢铁需求量不再增长或出现缓慢下降的趋势。本研究在假设未来钢铁出口量保持不变的基础上，以人均 GDP 与人均钢铁需求量之间“S”形理论为依托，绘制人均 GDP 与人均钢铁需求量历史轨迹，并结合历史趋势，采用双曲切线数学方法，建立以人均 GDP 为自变量的钢铁需求量方程；其次根据情景中确定的 GDP 增长方案，在所属增长区内，按照其增长模式进行测算。

人均钢铁需求量与人均 GDP 曲线的非平坦式方程为:

$$PERS - PERS_i = A \frac{\exp[\alpha_1(G - G_i)] - \exp[-\alpha_3(G - G_i)]}{2 \cosh[\alpha_2(G - G_i)]} \quad (1)$$

式中  $PERS$  表示人均钢铁需求量,  $t/人$ ;  $PERS_i$  表示曲线在转折点对应的人均钢铁需求量,  $t/人$ ;  $A$  表示上述趋势方程的振幅值;  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$  表示指数常数;  $G$  表示人均 GDP, 美元/人;  $G_i$  表示曲线在转折点对应人均 GDP, 美元/人。

### 1.1.2 水泥需求量测算模型

氢能在水泥行业中可以替代部分煤炭作为热源, 用于煅烧水泥熟料。人均水泥需求量在达峰后通常经历一段高位振荡期, 随后呈现下降趋势直至慢慢趋于平缓达到基本稳定状态<sup>[17-18]</sup>。对水泥行业实际需求进行统计, 可以看出最主要的两大用途是房屋住宅和公路基础设施建设<sup>[19]</sup>。因此, 可借鉴社会经济水平较高的发达国家水泥需求量的历史趋势类比分析中国未来水泥需求量, 同时假设未来水泥出口量不变, 从下游建筑和公路部门的实际需求出发, 结合经济结构变化, 考虑城镇化率、第三产业占比、房屋建筑面积、公路里程等多种因素对水泥需求量的影响, 采用多因素拟合分析法结合类比分析法对未来水泥需求量进行测算:

$$\ln(perc_i) = \alpha_0 + \alpha_1 \ln(U_i) + \alpha_2 \ln(ThirdI_i) + \alpha_3 \ln(PerB_i) + \alpha_4 \ln(PerR_i) \quad (2)$$

式中  $perc_i$  表示第  $t$  年的人均水泥需求量,  $t/人$ ;  $U_i$  表示第  $t$  年的城镇化率;  $ThirdI_i$  表示第  $t$  年的第三产业占比;  $PerB_i$  表示第  $t$  年人均房屋建筑面积,  $m^2/人$ ;  $PerR_i$  表示第  $t$  年人均公路里程,  $km/人$ ;  $\alpha_k$  表示第  $k$  个变量的系数。采用对数形式以降低数据的波动性, 消除异方差性。

### 1.1.3 甲醇需求量测算模型

氢能是生产甲醇的重要工业原料。甲醇作为重要的基础有机化工原料, 具体可以用于传统下游产品(甲醛、醋酸等)制取、甲醇制乙烯和甲醇燃料。其中, 传统下游产品制取和甲醇燃料的下级细分场景多元复杂, 故笔者采用增长率方法进行需求量测算; 甲醇制乙烯场景单一, 且乙烯需求量与 GDP 相关性强, 故采用弹性系数法测算乙烯需求量, 进而计算甲醇需求量。综上所述, 从下游实际需求出发, 采用弹性系数和增长率相结合的方法, 对未来甲醇需求量进行测算:

$$M_t = M1_t + M2_t + M3_t \quad (3)$$

$$M1_t = M1_{t-1} \times (1 + \Delta M1_t) \quad (4)$$

$$M2_t = E_{t-1} \times (1 + \Delta G_t \times \gamma_t) \times r_t \times S_{(m-e)t} \times f_{m-e} \quad (5)$$

$$M3_t = M3_{t-1} \times (1 + \Delta M3_t) \quad (6)$$

式中  $M_t$  表示第  $t$  年的甲醇需求量,  $10^4 t$ ;  $M1_t$  表示第  $t$  年传统下游所需甲醇量,  $10^4 t$ ;  $M2_t$  表示第  $t$  年甲醇制乙烯所需甲醇量,  $10^4 t$ ;  $M3_t$  表示第  $t$  年甲醇燃料所需甲醇量,  $10^4 t$ ;  $\Delta M1_t$  表示第  $t$  年传统下游所需甲醇量增速;  $\Delta M3_t$  表示第  $t$  年甲醇燃料所需甲醇量增速;  $E_{t-1}$  表示第  $t-1$  年乙烯当量消费量,  $10^4 t$ ;  $\Delta G_t$  表示第  $t$  年 GDP 变化率;  $\gamma_t$  表示第  $t$  年弹性系数;  $r_t$  表示第  $t$  年乙烯自给率;  $S_{(m-e)t}$  表示第  $t$  年甲醇制乙烯工艺份额;  $f_{m-e}$  表示甲醇制乙烯转化系数。

### 1.1.4 合成氨需求量测算模型

氢能同样是作为合成氨的重要工业原料。合成氨下游用途主要分为 4 大类, 分别是农业用氨(尿素等肥料)、工业用氨(化工原料、烟气脱硝)、船舶用氨和发电用氨(新型用途)。笔者基于文献调研, 采用增长率法等分别对上述 4 种用途对合成氨的需求量进行测算:

$$A_t = A1_t + A2_t + A3_t + A4_t \quad (7)$$

$$A1_t = CLA_t \times PERA_t \quad (8)$$

$$A2_t = A2_{t-1} \times (1 + \Delta A2_t) \quad (9)$$

$$A3_t = WTED_t \times ap_t \quad (10)$$

$$A4_t = CP_t \times ap_t \quad (11)$$

式中  $A_t$  表示第  $t$  年的合成氨需求量,  $10^4 t$ ;  $A1_t$  表示第  $t$  年农业用氨量,  $10^4 t$ ;  $A2_t$  表示第  $t$  年工业用氨量,  $10^4 t$ ;  $A3_t$  表示第  $t$  年船舶用氨量,  $10^4 t$ ;  $A4_t$  表示第  $t$  年发电用氨量,  $10^4 t$ ;  $CLA_t$  表示第  $t$  年耕地面积,  $10^8 \text{ hm}^2$ ;  $PERA_t$  表示第  $t$  年单位耕地面积合成氨需求量,  $t/\text{hm}^2$ ;  $\Delta A2_t$  表示第  $t$  年工业用氨量增速;  $WTED_t$  表示第  $t$  年水路运输能源需求量,  $10^4 t$  标准煤 (1 t 标准煤 =  $29\,307.6 \times 10^6 \text{ J}$ );  $ap_t$  表示第  $t$  年氨能渗透率;  $CP_t$  表示第  $t$  年煤电发电量,  $10^4 t$  标准煤。

## 1.2 氢能需求量测算模型

工业部门氢能需求量( $HD_t$ )计算方法如式(12)所示:

$$HD_t = SH_t + CH_t + MH_t + AH_t + R_t + OT_t = PERS_t \times P_t \times sp_t \times f_{s-h} + PERC_t \times P_t \times EI_t \times cp_t + M_t \times f_{m-h} + A_t \times f_{a-h} + R_{t-1} \times \Delta R_t + OT_t \quad (12)$$

式中  $SH_t$  表示第  $t$  年钢铁行业氢能需求量,  $10^4 t$ ;  $CH_t$  表示第  $t$  年水泥行业氢能需求量,  $10^4 t$ ;  $MH_t$  表示第  $t$  年甲醇行业氢能需求量,  $10^4 t$ ;  $AH_t$  表示第  $t$  年合成氨行业氢能需求量,  $10^4 t$ ;  $R_t$  表示第  $t$  年炼油行业氢能需求量,  $10^4 t$ ;  $OT_t$  表示第  $t$  年其他行业氢能需求量,  $10^4 t$ ;  $P_t$  表示第  $t$  年人口数量, 人;  $f_{s-h}$  表示每单位钢铁所需氢量,  $t$ ;  $sp_t$  表示第  $t$  年氨基还原铁工艺份额;

$EI_t$  表示第  $t$  年能源强度, kg 标准煤 / t;  $cp_t$  表示第  $t$  年氢能替代率, 采用马尔可夫测算;  $f_{m-h}$  表示每单位甲醇所需氢量, t;  $f_{a-h}$  表示每单位合成氨所需氢量, t。

### 1.3 氢能供给侧优化模型

中国当前的氢气生产结构仍以煤为主。根据中国氢能源及燃料电池产业创新战略联盟数据显示, 在 2020 年中国氢气生产中, 煤制氢产量占氢气总产量的 63.54%、工业副产氢量占 21.18%、天然气制氢量占 13.76%、电解水制氢量仅占 1.52%<sup>[20]</sup>。目前, 中国可再生能源装机量位列全球第一, 在低碳清洁的氢能供给上具有巨大潜力。因此, 未来氢能供给结构将随着技术进步与减排压力不断演化。

笔者以含碳制氢成本最小化为目标, 以煤制氢、工业副产氢、风电制氢、光伏制氢等各类制氢技术产氢量占比为决策变量, 以每种制氢技术产氢量份额比重之和为 100%, 以及每种制氢技术产氢量份额年度变化上下限为约束, 构建供氢体系结构优化模型:

$$\min c(x) = \sum_{i=1}^n x_{i,t} \times c_{i,t} \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{i,t} = 1 \quad (14)$$

$$lb_{i,t} \leq \Delta x_{i,t} \leq ub_{i,t} \quad (15)$$

式中  $c_{i,t}$  表示第  $i$  种制氢技术在第  $t$  年的含碳制氢成本, 元 / kg;  $x_{i,t}$  表示第  $i$  种制氢技术在第  $t$  年的份额占比;  $lb_{i,t}$ 、 $ub_{i,t}$  分别表示第  $i$  种制氢技术份额在第  $t$  年的变化幅度上、下限。

## 2 多情景测算结果及减排贡献分析

### 2.1 情景设置与参数假设

#### 2.1.1 情景定义及描述

鉴于目前多数低碳、零碳以及负碳技术仍处在培育阶段, 未来发展存在诸多不确定性, 本研究设立了参考情景、低渗透情景、高渗透情景, 对未来氢能发展进行展望 (表 1)。

表 1 情景设定描述表

情景名称	情景描述
参考情景	延续历史发展趋势, 且考虑当前正在实施或已经确定将要实施的政策
低渗透情景	在参考情景的基础上, 假设氢能产业较快发展, 甲醇燃料、船舶用氨、发电用氨等新兴应用场景加快发展落地。本情景比参考情景氢能渗透率更高
高渗透情景	与低渗透情景比, 假设未来氢能产业技术瓶颈更早突破, 更早实现大规模商业化应用

#### 2.1.2 关键参数假设

经济社会发展是能源服务需求的主要驱动力, 本研究假设社会经济发展参数具体如表 2 所示。

表 2 社会经济参数设定表

指标	2020 年	2025 年	2030 年	2040 年	2050 年	2060 年
GDP 增速	2.2%	5.6%	5.5%	4.5%	3.4%	2.4%
人口 / 亿人	14.1	14.1	14.0	13.7	13.1	12.0
城镇化率	63.9%	66.5%	70.6%	76.4%	80.0%	83.6%
第三产业占比	54.5%	57.7%	61.1%	68.8%	70.5%	73.0%

注: GDP 增速、第三产业占比预测数据来源于本文参考文献 [21]; 人口假设基于《中国统计年鉴 2022》<sup>[22]</sup> 所提供的历史数据、未来人口变化速率参考《世界人口展望 2022》中的预测趋势<sup>[23]</sup>; 城镇化率预测参考世界银行数据<sup>[24]</sup>, 2051—2060 年则采用趋势外推 (世界银行无该时段数据)。

### 2.2 氢能需求量测算结果分析

#### 2.2.1 钢铁行业氢能需求量

根据各个发达国家人均 GDP 增长数据显示, 当出现零增长点时, 人均 GDP 为 14 000 ~ 16 000 美元 (2015 年不变价美元)<sup>[15]</sup>。因此设定中国零增长点处的人均 GDP 初始值为 14 000 美元, 步长为 100 美元。基于中国 1995—2020 年历史数据进行拟合, 选择出符合现实情景且拟合度最优的拟合方程, 得到中国粗钢需求量“S”形曲线方程:

$$SP = 428.7616 + 913.4908 \times \left\{ \frac{\exp[0.0001067(G - 5116.44)] - \exp[0.0001067(G - 5116.44)]}{2 \cosh[0.0001559(G - 5116.44)]} \right\} \quad (16)$$

为了检测模型的有效性, 本文借鉴张红等<sup>[25]</sup>的研究思路, 采用该拟合方程推导历史需求量数据, 再结合历史真实数据, 计算出二者的对称平均绝对百分比误差 (SMAPE) 指标为 0.059, 拟合度较高。

由于短期内基础设施建设与终端消费需求维持在较高的水平, 中国的钢铁年需求量将在 2027 年前小幅上升, 需求量峰值为  $11.9 \times 10^8$  t, 之后迅速下降, 到 2060 年, 中国的钢铁年均需求量可降至  $5.9 \times 10^8$  t。综合发达国家钢铁发展模式、废钢供应前景以及现役设备厂龄, 2060 年低渗透情景、高渗透情景下氢基还原铁比重将分别达到 21%、33%, 氢能需求量分别为  $751.0 \times 10^4$  t、 $1166.0 \times 10^4$  t (图 2)。

#### 2.2.2 水泥行业氢能需求量

对中国人均水泥需求量、城镇化率、第三产业

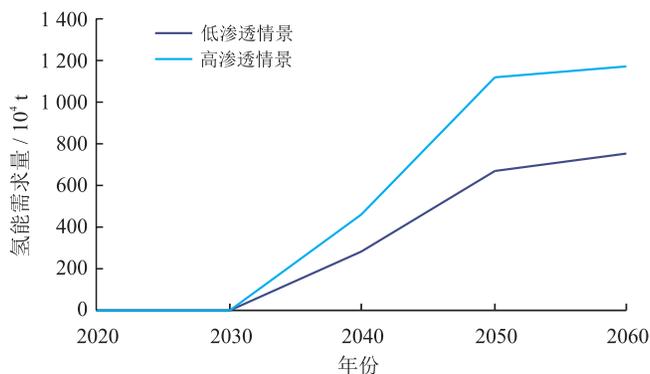


图2 不同情景下中国钢铁行业氢能需求量预测图

占比、房屋建筑面积和公路里程进行多元回归分析，得到人均水泥需求量方程：

$$\ln(perc_t) = -0.849 + 6.293 \times \ln(U_t) - 2.934 \times \ln(ThirdI_t) - 2.94 \times \ln(PERB_t) + 0.31 \times \ln(PERR_t) \quad (17)$$

其中，拟合优度  $R^2=0.98$ 。类似地，借鉴张红等<sup>[25]</sup>的思路检验水泥需求量测算模型的有效性，计算出二者的 SMAPE 指标为 0.023，拟合精度高。

第三产业占比、城镇化率采用表2相应数据。随着经济持续发展和人民生活水平的不断提高，预计2060年中国城镇人均建筑面积为45 m<sup>2</sup>、农村人均建筑面积将近55 m<sup>2</sup>、人均公共建筑面积将近25 m<sup>2</sup>。交通运输部发布的《公路“十四五”发展规划》明确提出，到2035年基本建成安全、便捷、高效、绿色、经济的现代化公路交通运输体系。基于上述政策加持，预计2035年中国公路密度接近日本、美国等发达经济体水平，随着公路交通运输体系的逐步完善，之后增速放缓，到2055年公路密度较2035年增长10%。人均建筑面积、人均公路里程如表3所示。

表3 水泥行业特有参数设置表

指标	2020年	2030年	2060年	处理方式
人均建筑面积 / (m <sup>2</sup> ·人 <sup>-1</sup> )	46.48	54.57	79.66	对数函数+类比法处理
人均公路里程 / (10 <sup>4</sup> km·人 <sup>-1</sup> )	36.81	52.97	82.37	指数函数+类比法处理

中国的水泥需求主要以房屋住宅和公路基础设施建设为主，随着中长期人口总量下降以及多年来房地产高速发展累计的存量住房，未来新增建筑面积将持续下降。同时伴随2035年中国公路交通运输体系的基本完成，公路建设呈现逐步放缓的趋势。总体来看，中国水泥需求量已过快速增长期，当前基本达峰，处于振荡期。到2060年，水泥产品需求量约12.8×10<sup>8</sup> t，与相关测算结果相符<sup>[26-27]</sup>。随着技

术进步和能源效率提升，假设2050年所有设备均达到标杆值水平，2060年所有设备均达到先进值水平，能源效率下降35%，2060年低渗透情景、高渗透情景下氢能热值替代率将分别达到5%、10%，氢能需求量分别为87.8×10<sup>4</sup> t、175.6×10<sup>4</sup> t（图3）。

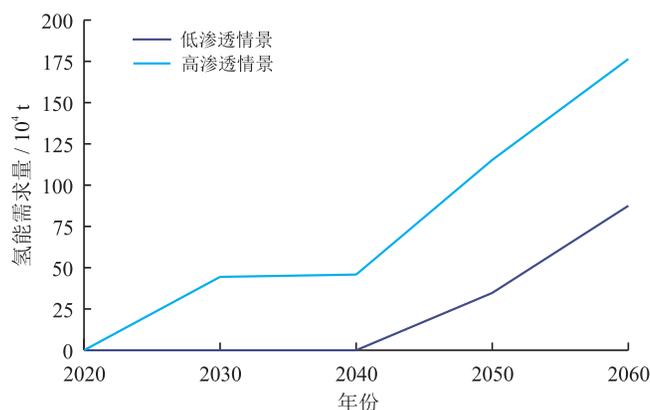


图3 不同情景下中国水泥行业氢能需求量预测图

### 2.2.3 甲醇行业氢能需求量

甲醇需求主要集中在传统下游产品（甲醛、醋酸等）制取、乙烯制取以及燃料应用这三方面。从结构来看，乙烯制取为甲醇最大的需求市场，其次是传统下游产品制取和燃料应用，2020年三者占比分别为46%、34%和20%。

在传统下游产品制取方面，2012—2020年用于生产传统下游产品的甲醇消费量年平均降速为0.69%<sup>[28-29]</sup>。考虑到甲醛、醋酸等传统下游产品当前发展已较为饱和，传统下游产品对甲醇需求量呈现逐渐下滑态势。因此，针对不同发展阶段，设置了梯级的年降速率：第一阶段（2021—2030年）保持年均降速0.69%，第二阶段（2031—2040年）年均降速2%，之后每10年年均降速增加0.5%。基于上述分析，采用式（4）计算得到2060年用于生产传统下游产品的甲醇需求量为849.9×10<sup>4</sup> t。

在乙烯制取方面，乙烯是石油化学工业最重要的基础原料，其需求增量与GDP增量呈现一定的弹性相关<sup>[28]</sup>。基于2001—2020年的乙烯当量消费量<sup>[28-29]</sup>和GDP数据，根据式（5）计算得到2021—2060年的国内乙烯当量消费量。计算结果显示，2060年乙烯需求量将增长至8130×10<sup>4</sup> t。在参考情景下，假设未来甲醇制乙烯工艺份额按照道琼斯数据的10%保持不变。伴随绿色甲醇产业发展以及新一代技术的发展，甲醇制乙烯工艺份额将随之增加，因此假设2060年低渗透情景、高渗透情景下甲醇制乙烯工艺份额将分别达到25%和30%。基于上述分析，在

参考情景、低渗透情景、高渗透情景下,2060年甲醇需求量分别为 $1\,964.8 \times 10^4 \text{ t}$ 、 $4\,898.1 \times 10^4 \text{ t}$ 、 $5\,877.9 \times 10^4 \text{ t}$ 。

在用于燃料应用方面,随着2019年《关于在部分地区开展甲醇汽车应用的指导意见》以及2022年《关于加快内河船舶绿色智能发展的实施意见》发布,甲醇作为燃料的需求量有望进一步增长。基于用于燃料应用的甲醇消费量历史数据<sup>[30]</sup>,针对3种情景设置了不同阶段的增速,根据式(6)计算得到参考情景、低渗透情景、高渗透情景下,用于燃料应用的甲醇需求量在2060年将分别达到 $3\,147.7 \times 10^4 \text{ t}$ 、 $4\,536 \times 10^4 \text{ t}$ 、 $4\,932.9 \times 10^4 \text{ t}$ 。

综上,通过式(3)汇总得到参考情景、低渗透情景、高渗透情景3种情景下2060年甲醇需求量分别为 $5\,962.5 \times 10^4 \text{ t}$ 、 $10\,284.03 \times 10^4 \text{ t}$ 、 $11\,660.8 \times 10^4 \text{ t}$ 。基于式(12),计算得到参考情景、低渗透情景、高渗透情景3种情景下2060年甲醇行业的氢能需求量分别为 $1\,134.6 \times 10^4 \text{ t}$ 、 $1\,956.9 \times 10^4 \text{ t}$ 、 $2\,218.9 \times 10^4 \text{ t}$ (图4)。

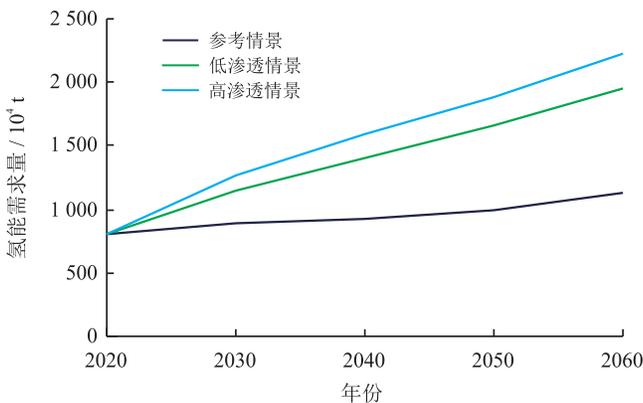


图4 不同情景下中国甲醇行业氢能需求量预测图

#### 2.2.4 合成氨行业氢能需求量

现阶段,合成氨需求量主要集中在农业部门和工业部门,其占比分别约为70%和30%。未来,船舶用氨和发电用氨将成为合成氨需求量的新增长点。

在农业用氨方面,合成氨主要用于生产化肥,随着耕地面积的减少,合成氨在农业领域呈现下降趋势。笔者采用耕地面积和单位耕地面积合成氨需求量来计算农业用氨量。预计到2050年中国耕地面积降至 $1.2 \times 10^8 \text{ hm}^2$ <sup>[31]</sup>,2050—2060年的耕地面积保持不变。基于上述分析,采用式(8)计算农业领域合成氨的需求量,结果显示到2060年,将降至 $1\,738.8 \times 10^4 \text{ t}$ 。

在工业用氨方面,合成氨在工业领域的应用主要

体现在环保、新材料等方面,随着“双碳”目标的提出,合成氨在工业领域的需求量将持续上升。2021—2025年,用于工业领域的合成氨需求量年均增速为5%<sup>[32]</sup>,2026—2060年,采用函数 $y=492.24x^{0.4976}$ 拟合得到。基于上述分析,采用式(9)进行测算,2060年工业用氨需求量为 $3\,115 \times 10^4 \text{ t}$ 。

在船舶用氨方面,氨能动力船舶有助于推进“双碳”目标的实现,并符合国际海事组织温室气体减排战略导向,将成为未来水路交通运输工具的重要发展方向<sup>[33]</sup>。笔者采用水路运输能源需求量<sup>[34]</sup>和氨能驱动船舶渗透率<sup>[14]</sup>进行船运燃料的合成氨需求量计算。基于公式(10)进行计算,低渗透情景、高渗透情景下2060年船运燃料合成氨需求量分别为 $218.2 \times 10^4 \text{ t}$ 、 $1\,363.9 \times 10^4 \text{ t}$ 。

在发电用氨方面,煤炭掺氨发电是煤电机组改造的重要手段。笔者采用煤电机组耗煤量<sup>[35]</sup>、掺氨发电改造渗透率以及掺氨比例<sup>[14]</sup>进行发电用氨对合成氨需求量的计算。基于式(11)的计算结果显示,低渗透情景、高渗透情景下2060年发电用氨对合成氨的需求量分别为 $3\,639.9 \times 10^4 \text{ t}$ 、 $7\,273.8 \times 10^4 \text{ t}$ 。

综上所述,基于式(7)计算,参考情景、低渗透情景、高渗透情景3种情景下合成氨的需求量分别为 $4\,853.8 \times 10^4 \text{ t}$ 、 $8\,709 \times 10^4 \text{ t}$ 、 $13\,491.5 \times 10^4 \text{ t}$ 。通过式(12)计算得出3种情景下氢能需求量分别为 $1\,024.4 \times 10^4 \text{ t}$ 、 $1\,838.1 \times 10^4 \text{ t}$ 、 $2\,847.5 \times 10^4 \text{ t}$ (图5)。

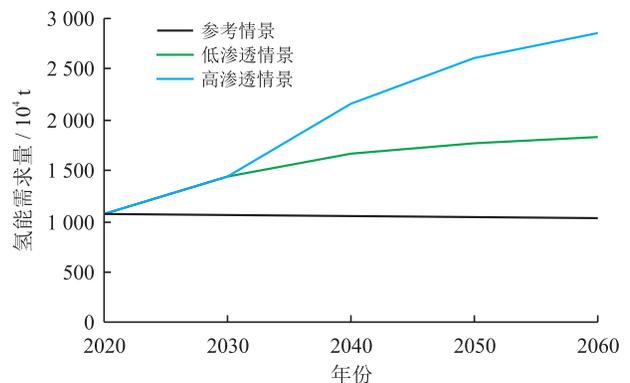


图5 不同情景下中国合成氨行业氢能需求量预测图

#### 2.2.5 炼油及其他行业氢能需求量

加氢处理和加氢裂化是炼油厂中主要的耗氢过程。笔者采用成品油需求量<sup>[36]</sup>和氢能需求量的对应关系来测算未来炼油行业的氢能需求量。假设不同情景下炼油行业氢能需求量保持一致,通过式(12)计算得到2021—2060年炼油行业的氢能需求量(图6-a)。短期内由于成品油需求量的增长和品质要求的提升,

炼油行业氢能需求量有望持续增加，但在 2025 年后，由于成品油需求量的大幅下降以及能源效率和电气化率持续提升，炼油行业氢能需求量将大幅下降，由 2020 年的  $820 \times 10^4 \text{t}$  降至 2060 年的  $134.4 \times 10^4 \text{t}$ 。

其他行业主要包括高温热量行业以及回炉助燃

等应用。笔者主要参考中国氢能源及燃料电池产业创新战略联盟<sup>[37]</sup>测算的高温热量所对应的氢能需求量测算结果。参考情景、低渗透情景、高渗透情景下 2060 年氢能需求量分别为  $215.7 \times 10^4 \text{t}$ 、 $269.6 \times 10^4 \text{t}$ 、 $323.4 \times 10^4 \text{t}$  (图 6-b)。

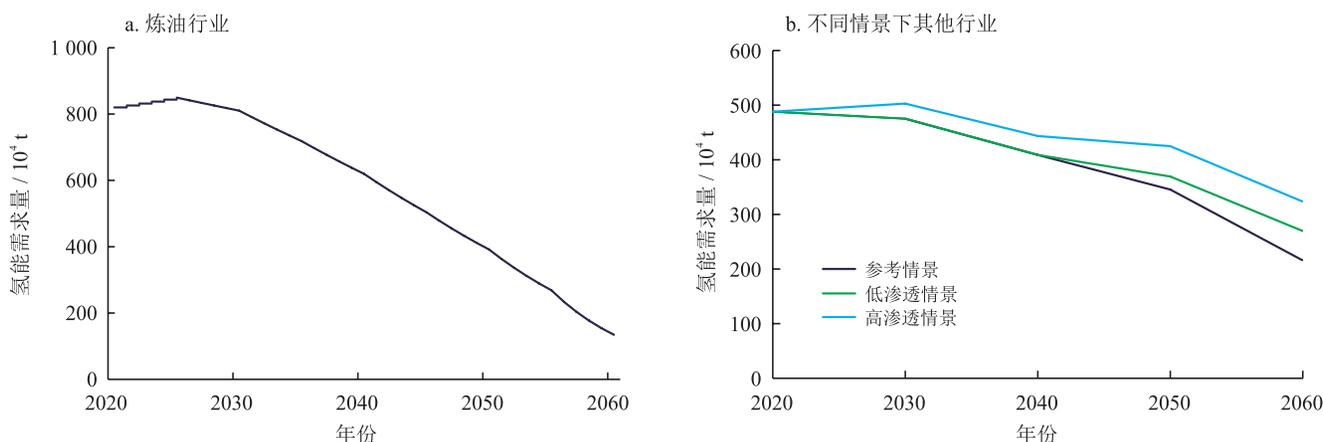


图 6 不同情景下中国炼油行业氢能需求量和 其他行业氢能需求量预测图

综上所述，在参考情景、低渗透情景及高渗透情景下，2060 年工业部门的氢能需求量分别为  $2\ 509.1 \times 10^4 \text{t}$ 、 $5\ 037.8 \times 10^4 \text{t}$ 、 $6\ 865.7 \times 10^4 \text{t}$  (图 7)。从总体趋势来看，参考情景下氢能需求量先增后降，转折点在 2025 年左右，而低渗透情景和高渗透情景下氢能需求量持续上升。其中，由于甲醇制乙烯、甲醇燃料、船舶用氨以及发电用氨等新兴领域的应用规模扩大，甲醇和合成氨行业的氢能需求量上升幅度

较大，2060 年分别为  $1\ 134.6 \times 10^4 \sim 2\ 218.9 \times 10^4 \text{t}$ 、 $1\ 024.4 \times 10^4 \sim 2\ 847.5 \times 10^4 \text{t}$ 。高渗透情景下，甲醇和合成氨行业氢能需求增量占工业整体氢能需求增量的比重分别为 38.6%、48.1%。相比之下，炼油行业氢能需求量持续下降，从 2020 年的  $820 \times 10^4 \text{t}$  下降至 2060 年的  $134.4 \times 10^4 \text{t}$ ；此外，钢铁行业和水泥行业的氢能需求量成为新的增长点，高渗透情景下，氢能需求增量占工业整体氢能需求增量的比重分别为 31.7%、4.8%。

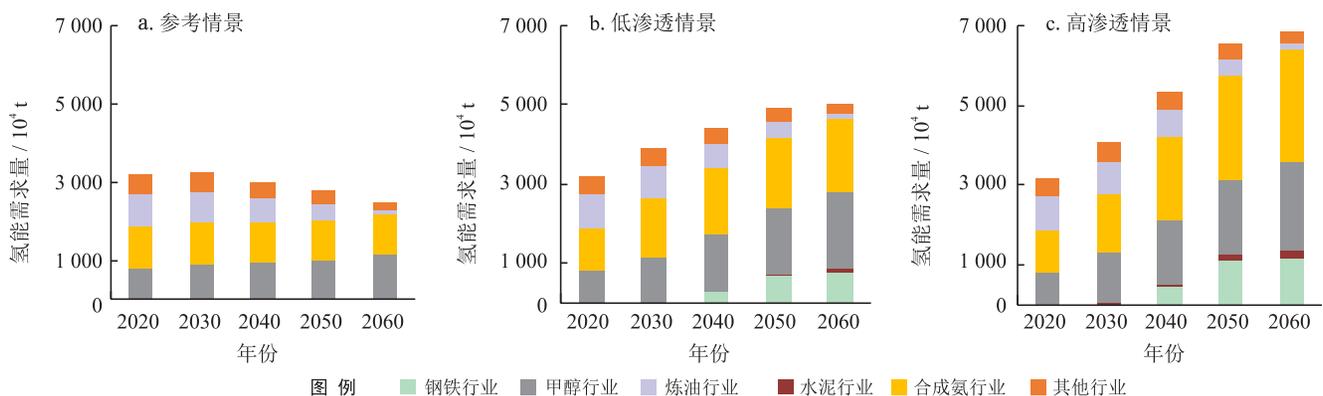


图 7 不同情景下中国工业部门氢能需求量预测图

### 2.3 氢能供给结构分析

根据氢气生产来源和碳排放量的不同，业内通常将氢能分为灰氢、蓝氢、绿氢 3 种类型。其中灰氢包括煤气化制氢、天然气催化重整制氢、工业副产制氢；蓝氢包括煤气化制氢 + CCS、天然气催化重整制氢 + CCS；绿氢主要包括电解水制氢（其中电力

来源包括水电、风电、光伏发电、核电）、生物质制氢等<sup>[38-39]</sup>。

由于“双碳”目标的约束，不同制氢技术产生的碳排放将对未来制氢方式的选取起到主导作用。现有文献中，王彦哲等<sup>[40]</sup>研究了不同技术路线的含碳排放平准化制氢成本（表 4）。2030 年前，碳价低于

表 4 含碳排放成本的平准化制氢成本表 单位：元/kg

制氢技术	制氢成本				
	2020 年	2030 年	2040 年	2050 年	2060 年
煤气化制氢	12.1	13.0	17.0	26.7	42.1
天然气催化重整制氢	18.8	19.3	21.1	25.9	33.3
工业副产品制氢	15.6	15.6	15.6	15.6	15.6
煤气化制氢 + CCS	21.7	18.2	16.1	16.6	17.7
天然气催化重整制氢 + CCS	23.8	21.9	20.7	20.7	20.9
水电电解水制氢	24.7	18.4	16.8	16.2	16.4
风电电解水制氢	32.2	23.3	19.9	18.3	17.8
光伏电解水制氢	33.0	20.4	16.0	14.2	13.9
核电电解水制氢	28.0	20.2	17.2	16.2	16.1
生物质制氢	33.0	29.9	28.6	27.5	26.5

注：数据来源于本文参考文献 [40]。

100 元/t CO<sub>2</sub>，制氢成本的市场竞争力尚未有所影响，之后由于碳价的大幅上涨，碳排放成本成为影响制氢成本的主要因素，预计到 2045 年绿氢成为成本最低的制氢方式。

基于供给优化模型得到 2020—2060 年氢能供给结构(图 8)。截至 2030 年，煤气化制氢仍占主导地位，其产量占氢能总产量的 58.5%，工业副产制氢由于成本以及碳排放等优势，可作为近期发展重点，2030 年其占比增长至 27.2%。随着技术的完善和新型电力系统的构建，可再生能源制氢成本大幅下降，2045 年基本建成以可再生能源制氢为主，工业副产制氢、化石能源结合 CCUS 制氢等为辅助的多元经济供氢体系。2060 年，绿氢有望成为绝对主体，其占比达到 74%。

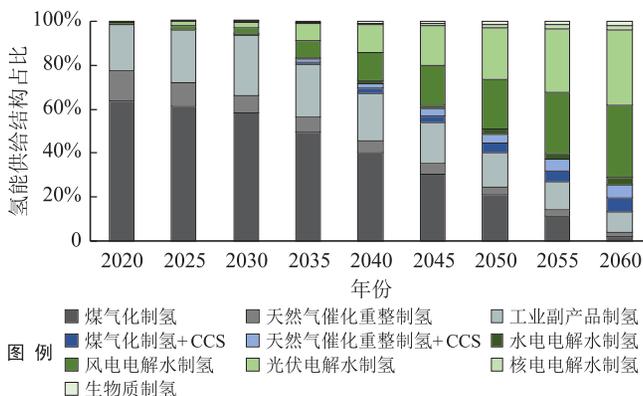


图 8 2020—2060 年中国氢能供给结构占比图

## 2.4 氢能供需碳减排贡献分析

不同情景下，2020—2060 年工业部门各行业累计碳排放量如表 5 所示。参考情景下，钢铁、水泥、甲醇、合成氨等用氢行业累计碳排放量为 959×10<sup>8</sup>t；高渗透情景下，按当前供氢结构测算各行业累计碳排放量仍高达 930×10<sup>8</sup>t；随着多元低碳供氢体系的建立，累计碳排放量有望减少至 798×10<sup>8</sup>t。高渗透情景下，2020—2060 年累计碳减排贡献比例为 16.7%，煤炭需求量将减少 41.7×10<sup>8</sup>t 标准煤，石油需求量减少 11.3×10<sup>8</sup>t 标准煤，但由于天然气催化重整制氢的使用，天然气的需求量将增加 0.9×10<sup>8</sup>t 标准煤(图 9)。

表 5 2020—2060 年工业部门各行业累计二氧化碳排放量表 单位：10<sup>8</sup>t

各用氢行业	累计碳排放量		
	参考情景	需求侧 (高渗透情景)	供给侧 (结构优化)
钢铁行业	641.6	561.9	534.1
水泥行业	148.2	151.4	147.3
甲醇行业	70.1	101.0	53.7
合成氨行业	80.8	96.4	50.1
其他行业	18.0	18.9	13.0
合计	958.7	929.7	798.3

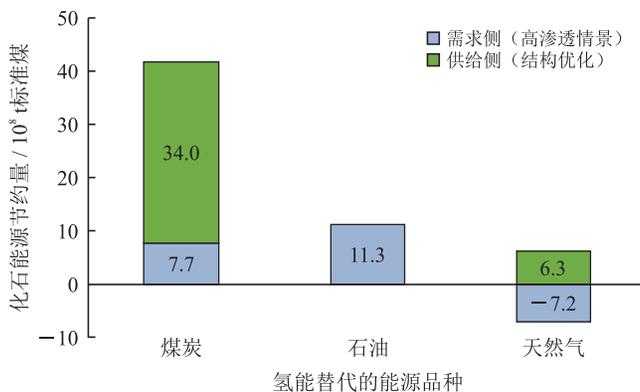


图 9 高渗透情景下 2020—2060 年累计节约化石能源量图

## 3 结论与建议

中国工业部门减少化石能源需求量和碳排放量需要重点依托绿氢产业的高比例发展。基于氢能供需测算体系，对不同情景下工业部门氢能需求量进行模拟计算，同时基于氢能终端需求量结果，优化构建面向中长期的氢能供给侧结构，并对其累计碳减

排贡献和节约化石能源进行了测算。主要结论如下：

1) 针对中国工业部门在“双碳”目标背景下的氢能需求及供给结构进行了测算与分析。工业部门用氢主要集中于钢铁、水泥、甲醇及合成氨等难以通过电气化实现脱碳的关键行业。构建了包含重点行业需求量测算、氢能需求量测算和氢能供给侧优化的三阶段模型, 实现了不同情景下 2020—2060 年中国工业部门氢能需求量的精确计算以及氢能供给结构的优化, 为构建工业部门重点行业的氢能供需发展路径提供了理论方法。

2) 从需求侧来看, 在参考情景、低渗透情景及高渗透情景下, 2060 年中国工业部门的氢能需求量分别为  $2\,509.1 \times 10^4 \text{ t}$ 、 $5\,037.8 \times 10^4 \text{ t}$ 、 $6\,865.7 \times 10^4 \text{ t}$ 。其中, 钢铁需求量在达到峰值  $11.9 \times 10^8 \text{ t/a}$  后迅速下降, 到 2060 年中国的钢铁年均需求量可降至  $5.9 \times 10^8 \text{ t}$ , 钢铁行业的氢能需求量在高渗透情景下可达到  $1\,166.0 \times 10^4 \text{ t}$ 。中国水泥需求量已过快速增长期, 当前基本达峰并处于振荡期, 到 2060 年中国水泥产品需求量约为  $12.8 \times 10^8 \text{ t}$ , 水泥行业的氢能需求量在高渗透情境下可达到  $175.6 \times 10^4 \text{ t}$ 。在高渗透情景下, 2060 年甲醇和合成氨的需求量将分别持续上升至  $11\,660.8 \times 10^4 \text{ t}$ 、 $13\,491.5 \times 10^4 \text{ t}$ , 相应的氢能需求量分别为  $2\,218.9 \times 10^4 \text{ t}$ 、 $2\,847.5 \times 10^4 \text{ t}$ 。此外, 炼油行业氢能需求量将持续下降, 从 2020 年的 25.7% 降至 2060 年的 2.0%。

3) 从供给侧来看, 氢能供给结构将从化石能源为主的灰氢逐步过渡到以可再生能源为主的绿氢。不同制氢技术产生的碳排放将对未来制氢方式的选取起到主导作用。随着技术进步和碳价上涨, 到 2045 年绿氢成为成本最低的制氢方式, 将基本建成以可再生能源制氢为主, 工业副产制氢、化石能源结合 CCUS 制氢等为辅助的多元经济供氢体系。预计到 2060 年, 绿氢有望成为绝对主体, 绿氢产量占氢能总产量的 74%。随着绿氢的高比例应用, 预计在 2020—2060 年期间, 氢能可累计替代  $41.7 \times 10^8 \text{ t}$  标准煤煤炭、 $11.3 \times 10^8 \text{ t}$  标准煤石油, 累计碳减排贡献比例有望达 16.7%。

4) 建议中国工业部门氢能供需体系的发展按照三阶段路径进行: ①近期(2022—2030 年)推进氢能制—储—输—用各环节关键核心技术研发, 突破清洁能源制氢技术, 显著提高氢能技术经济性, 深挖氢能在工业部门应用潜力, 有序推进示范应用; ②中期(2031—2045 年)形成氢能产业体系, 氢能利用具备经济可行性, 多元用氢生态初具规模, 基本建

成多元供氢体系; ③远期(2046—2060 年), 多元氢能应用生态基本建成, 绿氢在能源绿色转型发展起到绝对支撑作用。

#### 参 考 文 献

- [1] 丁仲礼. 碳中和对中国的挑战和机遇[J]. 中国新闻发布(实务版), 2022(1): 16-23.  
DING Zhongli. Carbon neutrality: Challenges and opportunities for China[J]. China News Release, 2022(1): 16-23.
- [2] 何建坤. 碳达峰碳中和目标导向下能源和经济的低碳转型[J]. 环境经济研究, 2021, 6(1): 1-9.  
HE Jiankun. Low carbon transformation of energy and economy aiming for the peaking of carbon emission and carbon neutrality[J]. Journal of Environmental Economics, 2021, 6(1): 1-9.
- [3] ZHANG Shu, CHEN Wenyong. Assessing the energy transition in China towards carbon neutrality with a probabilistic framework[J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 87.
- [4] 项目综合报告编写组. 《中国长期低碳发展战略与转型路径研究》综合报告[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(11): 1-25.  
Project Synthesis Report Writing Team. Report on China's long-term low-carbon development strategy and transition path[J]. China Population, Resources and Environment, 2020, 30(11): 1-25.
- [5] SHAO Tianming, PAN Xunzhang, LI Xiang, et al. China's industrial decarbonization in the context of carbon neutrality: A sub-sectoral analysis based on integrated modelling[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 170: 112992.
- [6] 袁晓玲, 郝继宏, 李朝鹏, 等. 中国工业部门碳排放峰值预测及减排潜力研究[J]. 统计与信息论坛, 2020, 35(9): 72-82.  
YUAN Xiaoling, XI Jihong, LI Zhaopeng, et al. A study on carbon emission peak forecast and emission reduction potential of China's industrial sector[J]. Journal of Statistics and Information, 2020, 35(9): 72-82.
- [7] IHS Markit. Hydrogen and renewable gas forum[EB/OL]. (2020-06-15)[2021-02-19]. <https://cdn.ihsmarkit.com/www/pdf/0720/Hydrogen-and-Renewable-Gas-Forum-Brochure.pdf>.
- [8] 邹才能, 李建明, 张茜, 等. 氢能工业现状、技术进展、挑战及前景[J]. 天然气工业, 2022, 42(4): 1-20.  
ZOU Caineng, LI Jianming, ZHANG Xi, et al. Industrial status, technological progress, challenges and prospects of hydrogen energy[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(4): 1-20.
- [9] YUSAF T, LAIMON M, ALREFAE W, et al. Hydrogen energy demand growth prediction and assessment (2021–2050) using a system thinking and system dynamics approach[J]. Applied Sciences, 2022, 12(2): 781.

- [10] YANG Xi, NIELSEN C P, SONG Shaojie, et al. Breaking the hard-to-abate bottleneck in China's path to carbon neutrality with clean hydrogen[J]. *Nature Energy*, 2022, 7(10): 955-965.
- [11] 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 Wei, WAN Yanming, XIONG Yalin, 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.
- [12] CHOI W, YOO E, SEOL E, et al. Greenhouse gas emissions of conventional and alternative vehicles: Predictions based on energy policy analysis in South Korea[J]. *Applied Energy*, 2020, 265: 114754.
- [13] YIN Ruiyu, LIU Zhengdong, SHANGGUAN Fangqin. Thoughts on the implementation path to a carbon peak and carbon neutrality in China's steel industry[J]. *Engineering*, 2021, 7(12): 1680-1683.
- [14] 熊亚林, 刘玮, 高鹏博, 等. “双碳”目标下氢能在我国合成氨行业的需求与减碳路径[J]. *储能科学与技术*, 2022, 11(12): 4048-4058.  
XIONG Yalin, LIU Wei, GAO Pengbo, et al. Research on the hydrogen energy demand and carbon-reduction path in China's synthetic ammonia industry to achieve the "carbon peak" and "carbon neutrality" goals[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2022, 11(12): 4048-4058.
- [15] 贾逸卿, 张艳飞, 陈小荣, 等. 京津冀地区铁矿石需求预测[J]. *地球学报*, 2021, 42(2): 217-222.  
JIA Yiqing, ZHANG Yanfei, CHEN Xiaorong, et al. Forecast of iron ore demand in the Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2021, 42(2): 217-222.
- [16] 王安建. 能源和矿产资源消费增长规律的再认识[J]. *中国矿业*, 2021, 30(7): 1-7.  
WANG Anjian. Recognition of the growth rule of energy and mineral resources consumption[J]. *China Mining Magazine*, 2021, 30(7): 1-7.
- [17] ZHANG Chengyao, HAN Rong, YU Biying, et al. Accounting process-related CO<sub>2</sub> emissions from global cement production under Shared Socioeconomic Pathways[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 184: 451-465.
- [18] RMI, 中国水泥协会. 加速工业深度脱碳: 中国水泥行业碳中和之路[R/OL]. (2022-09-07)[2023-04-06]. <https://max.book118.com/html/2022/0904/5024213333004332.shtm>.  
RMI & CHINA CEMENT Association. Accelerating deep decarbonization in industry: the path to carbon neutrality for China's cement industry[R/OL]. (2022-09-07)[2023-04-06]. <https://max.book118.com/html/2022/0904/5024213333004332.shtm>.
- [19] 张呈尧. 水泥行业节能减排路径模拟方法及其应用研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2018.  
ZHANG Chengyao. Study on simulation method and application of energy conservation and emission reduction path in cement industry[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2018.
- [20] China Hydrogen Energy and Fuel Cell Industry Innovation Strategy Alliance. Hydrogen production and consumption in China—Hydrogen flow chart[DB/OL]. [2023-06-08]. <https://www.chinah2data.com/>.
- [21] 魏一鸣, 余碧莹, 唐葆君, 等. 中国碳达峰碳中和路径优化方法[J]. *北京理工大学学报(社会科学版)*, 2022, 24(4): 1-12.  
WEI Yiming, YU Biying, TANG Baojun, et al. Optimization method for China's carbon peak and carbon neutrality roadmap[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition)*, 2022, 24(4): 1-12.
- [22] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2022[M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.  
National Bureau of Statistics of China. China statistics yearbook 2022[M]. Beijing: China Statistics Press, 2022.
- [23] United Nations. World population prospects: 2019 revision. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, population division[DB/OL]. [2022-05-29]. <https://population.un.org/wpp/>.
- [24] 世界银行. 世界银行公开数据[DB/OL]. [2022-05-29]. <https://data.worldbank.org.cn/>.  
World Bank. World bank open data[DB/OL]. [2022-05-29]. <https://data.worldbank.org.cn/>.
- [25] 张红, 袁铁江, 谭捷. 统一能源系统氢负荷中长期预测[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(10): 3364-3372.  
ZHANG Hong, YUAN Tiejia, TAN Jie. Medium and long-term forecast of hydrogen load in unified energy system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(10): 3364-3372.
- [26] 魏一鸣, 余碧莹, 唐葆君, 等. 中国碳达峰碳中和时间表与路线图研究[J]. *北京理工大学学报(社会科学版)*, 2022, 24(4): 13-26.  
WEI Yiming, YU Biying, TANG Baojun, et al. Roadmap for achieving China's carbon peak and carbon neutrality pathway[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition)*, 2022, 24(4): 13-26.
- [27] International Energy Agency. An energy sector roadmap to carbon neutrality in China[R]. Paris: IEA, 2021.
- [28] 赵文明. “十四五”乙烯行业高质量发展策略研究[J]. *化学工业*, 2020, 38(2): 10-20.  
ZHAO Wenming. Research on the high-quality development strategy of the ethylene industry in the Fourteenth Five-Year Plan[J]. *Chemical Industry*, 2020, 38(2): 10-20.
- [29] 中国石化集团经济技术研究院有限公司. 2021 中国能源化工

- 产业发展报告 [R]. 北京: 中国石化出版社, 2021.  
Sinopec Economic and Technological Research Institute Co., Ltd. 2021 China energy and chemical industry development report[R]. Beijing: China Petrochemical Press, 2021.
- [30] 李抒苾, 薛雨军, 王珮珊, 等. 碳中和目标下的中国化工零碳之路 [R]. 北京: 落基山研究所, 2022.  
LI Shuyi, XUE Yujun, WANG Peishan, et al. The path to zero-carbon in China's chemical industry under carbon neutrality goals[R]. Beijing: Rocky Mountain Institute, 2022.
- [31] 郑海霞, 尤飞, 罗其友, 等. 面向 2050 年我国农业资源平衡与国际进口潜力研究 [J]. 中国工程科学, 2022, 24(1): 20-28.  
ZHENG Haixia, YOU Fei, LUO Qiyu, et al. Agricultural resource balance and international import potential of China by 2050[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(1): 20-28.
- [32] 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 Qian. Analysis of the development situation and future trend of the synthetic ammonia industry[J]. Fertilizer & Health, 2020, 47(2): 6-13.
- [33] 胡玉真, 王敏, 李灵东, 等. 我国氨氢动力海上船舶创新发展研究 [J]. 中国工程科学, 2023, 25(2): 133-146.  
HU Yuzhen, WANG Min, LI Lingdong, et al. Innovative development of ammonia-hydrogen powered marine ships in China[J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(2): 133-146.
- [34] 欧训民, 袁志逸, 欧阳丹华, 等. 中国碳中和愿景下交通部门能源碳排放研究 [M]. 北京: 经济管理出版社, 2022.  
OU Xunmin, YUAN Zhiyi, OUYANG Danhua, et al. Energy use and CO emissions in the transportation sector under China's carbon neutral vision in future[M]. Beijing: Economic Management Press, 2022.
- [35] 舒印彪, 张丽英, 张运洲, 等. 我国电力碳达峰、碳中和路径研究 [J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 1-14.  
SHU Yinbiao, ZHANG Liying, ZHANG Yunzhou, et al. Carbon peak and carbon neutrality path for China's power industry[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 1-14.
- [36] 中国石油集团经济技术研究院. 2060 年世界与中国能源展望报告 (2021 版) [R]. 北京: 中国石油集团经济技术研究院, 2021.  
China National Petroleum Corporation (CNPC) Economic and Technical Research Institute. 2060 World and China energy outlook (2021 Edition)[R]. Beijing: China National Petroleum Corporation (CNPC) Economic and Technical Research Institute, 2021.
- [37] 中国氢能源及燃料电池产业创新战略联盟. 中国氢能源及燃料电池产业发展报告 (2020): 碳中和战略下的低碳清洁供氢体系 [M]. 北京: 人民日报出版社, 2021.  
China Hydrogen Energy and Fuel Cell Industry Innovation Strategy Alliance. China hydrogen energy and fuel cell industry development report: Low carbon clean hydrogen supply system under the 2020 carbon neutrality strategy[M]. Beijing: People's Daily Press, 2021.
- [38] 徐硕, 余碧莹. 中国氢能技术发展现状与未来展望 [J]. 北京理工大学学报 (社会科学版), 2021, 23(6): 1-12.  
XU Shuo, YU Biying. Current development and prospect of hydrogen energy technology in China[J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition), 2021, 23(6): 1-12.
- [39] International Energy Agency. The future of hydrogen: Seizing today's opportunities[R]. Paris: IEA, 2019.
- [40] 王彦哲, 欧训民, 周胜. 基于学习曲线的中国未来制氢成本趋势研究 [J]. 气候变化研究进展, 2022, 18(3): 283-293.  
WANG Yanzhe, OU Xunmin, ZHOU Sheng. Future cost trend of hydrogen production in China based on learning curve[J]. Climate Change Research, 2022, 18(3): 283-293.

(修改回稿日期 2024-04-28 编辑 陈 嵩)



本  
文  
互  
动