

DOI: 10.11949/0438-1157.

中国合成氨行业碳-能-水足迹研究

刘福星^{1,2}, 李俊杰^{1,2}, 陈雨佳^{1,2}, 宋鑫岭^{1,2}, 曹颖^{1,2}, 裴亮³, 闫雨龙^{1,2}, 彭林^{1,2}

(¹北京交通大学碳中和与环境学院, 智能交通绿色低碳技术教育部工程研究中心, 北京 100044; ²北京交通大学碳中和与环境学院, 碳评估重点实验室国家铁路局铁路行业科技创新基地, 北京 100044; ³新疆干旱区环境污染与生态修复重点实验室, 中国科学院新疆生态与地理研究所, 新疆 乌鲁木齐 830063)

摘要: 合成氨是粮食安全基石, 我国煤制合成氨占比超75%, 其高碳排放、高能耗、高水耗引发广泛关注。现有研究多聚焦于不同原料路线制合成氨的碳足迹(CF)对比, 但对碳-能-水足迹的综合分析不足, 且未系统揭示技术升级与规模扩张对煤制合成氨碳-能-水足迹的影响机制。本研究构建了合成氨生产的碳-能-水足迹分析框架, 基于181家企业运行数据系统评估13种原料(煤、焦炉气、天然气)-技术(气流床、流化床、固定床)-规模(大、中、小)组合的碳-能-水足迹差异。结果表明, 焦炉气-中型组合环境表现最优, 其CF (0.92 t CO₂-eq/t) 和水足迹(WF) (4.39 m³/t) 仅为煤-固定床-小型组合的10.4%和12.4%, 但能源足迹(EF) (21.86 GJ/t) 介于天然气-中型和天然气-大型之间。研究结果为煤制合成氨行业推进固定床向气流床升级、装置规模化、分区精准管控及低碳原料路线(焦炉气、天然气)推广提供量化依据, 支撑碳-能-水协同减排。

关键词: 煤; 天然气; 焦炉气; 碳足迹; 能源足迹; 水足迹; 合成氨; 生命周期评价

中图分类号: TQ 028.8

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (XXXX) XX-0001-12

Research on carbon-energy-water footprints of China's ammonia synthesis industry

LIU Fuxing^{1,2}, LI Junjie^{1,2}, CHEN Yujia^{1,2}, SONG Xintong^{1,2}, CAO Ying^{1,2}, PEI Liang³, YAN Yulong^{1,2}, PENG Lin^{1,2}

(¹School of Carbon Neutrality and Environment, Beijing Jiaotong University, Engineering Research Center of Green and Low-Carbon Technology for Intelligent Transportation, Ministry of Education, Beijing 100044, China; ²School of Carbon Neutrality and Environment, Beijing Jiaotong University, Carbon Assessment Key Laboratory for Railway Industry Science and Technology Innovation Base of National Railway Administration, Beijing 100044, China; ³Xinjiang Key Laboratory of Environmental Pollution and Bioremediation, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830063, Xinjiang, China)

Abstract: Ammonia serves as the cornerstone of food security. In China, coal-based ammonia synthesis accounts for over 75% of the total production, and its high carbon emissions, high energy consumption, and high water consumption have attracted widespread attention. Existing research has mostly focused on comparing the carbon footprints (CF) of ammonia synthesis via different feedstock routes, but there is a lack of comprehensive analysis on the carbon-energy-water footprint. Moreover, the impact mechanisms of technological upgrading and scale

收稿日期: 2026-04-10 修回日期: 2026-05-18

通信作者: 李俊杰(1989—), 男, 博士, 副教授, jjli1@bjtu.edu.cn

第一作者: 刘福星(2002—), 男, 硕士研究生, 24126632@bjtu.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3709500); 国家自然科学基金项目(42475181)

引用本文: 刘福星, 李俊杰, 陈雨佳, 宋鑫岭, 曹颖, 裴亮, 闫雨龙, 彭林. 中国合成氨行业碳-能-水足迹研究[J]. 化工学报, XXXX, XX(XX): 1–12

Citation: LIU Fuxing, LI Junjie, CHEN Yujia, SONG Xintong, CAO Ying, PEI Liang, YAN Yulong, PENG Lin. Research on carbon-energy-water footprints of China's ammonia synthesis industry[J]. CIESC Journal, XXXX, XX(XX): 1–12

expansion on the carbon-energy-water footprint of coal-based ammonia synthesis have not been systematically revealed. This study constructs a carbon-energy-water footprint analysis framework for ammonia production, and systematically evaluates the differences in carbon-energy-water footprints among 13 feedstock-technology-scale combinations (including coal, coke oven gas, natural gas; entrained-flow bed, fluidized bed, fixed bed; large, medium, and small scales) based on the operational data of 181 enterprises. The results show that the medium-scale coke oven gas combination exhibits the optimal environmental performance. Its carbon footprint (CF, 0.92 t CO₂-eq/t) and water footprint (WF, 4.39 m³/t) are only 10.4% and 12.4% of those of the small-scale coal-fixed bed combination, respectively, while the energy footprint (EF, 21.86 GJ/t) is between that of the medium-scale and large-scale natural gas combinations. The research findings provide a quantitative basis for the coal-to-ammonia industry to promote the upgrading from fixed-bed to entrained-bed technologies, large-scale installation development, zoned precise regulation, and the popularization of low-carbon raw material routes (coke oven gas, natural gas), and support the coordinated reduction of carbon, energy and water footprints.

Keywords: coal; natural gas; coke oven gas; carbon footprint; energy footprint; water footprint; synthetic ammonia; life cycle assessment

引 言

合成氨是保障粮食安全的重要基石。我国是全球最大的合成氨生产国,产量占全球三分之一以上,其中煤制合成氨占比超过75%,产品广泛用于氮肥、制药等领域^[1]。煤制合成氨具有高碳排放、高能耗、高水耗的典型特征^[2-3],在“双碳”目标的驱动下^[4]面临较大的节能减排压力^[5];同时受我国煤炭资源与水资源空间逆向分布的影响,面临严峻的水资源约束。当前,关于如何推动合成氨可持续发展的研究多聚焦于绿氨技术创新^[6],但由于技术经济性相对不足^[7],短期内难以成为主流。因此,评估原料替代、技术升级与规模化^[8]对现有煤制合成氨行业的减排贡献,更具现实意义。

生命周期评价(LCA)是从原料开采、运输、到产品生产全过程系统分析合成氨环境影响的常用方法^[9]。现有研究多聚焦于不同原料路线(煤、天然气、焦炉气)制合成氨的碳足迹(CF)对比分析,研究表明,煤制合成氨CF达3.5 t CO₂-eq/t,占中国合成氨排放87.6%;天然气制合成氨较煤制合成氨低1.6 t CO₂-eq/t;焦炉气路线CF最低,减排潜力显著^[10]。有研究进一步探讨了煤制合成氨过程中耦合绿氢的环境效益,证实了利用绿氢和绿电可使绿氨生产过程的CO₂排放降为零^[11-12];同时绿氢合成氨的碳排放仅为0.57 t CO₂-eq/t,较传统煤制氨路线可降低96%以上^[13]。然而,现有研究仍存在两个关键缺口:一是缺乏对煤制合成氨“技术升级”(固定床→流化床/气流床)与“规模化”(小→中→大)两类环境效益

改善路径进行系统分析和对比研究^[14-15],难以厘清原料、技术与规模的选择对煤制合成氨环境效益的影响程度;二是鲜有在同一系统边界下开展合成氨碳-能-水足迹的综合分析^[16-18],难以揭示不同环境指标间的权衡关系及协同改善潜力^[19]。碳、能源与水三大资源之间相互关联、相互制约,单一维度的足迹评价难以全面反映合成氨行业的综合资源环境压力。开展多要素协同分析,能够有效弥补单一指标的局限,为行业同步推进降碳、节能、节水提供科学依据。为此,本文基于LCA理论,构建碳-能源-水一体化核算框架,统一系统边界与功能单位,确保三类足迹核算结果具备可比性与严谨性。

针对上述研究差距,本文基于全国181家合成氨企业的实际运行数据,开展了三方面研究:第一,按原料、气化技术、生产规模对合成氨项目进行分类和系统分析,构建覆盖全国主要产能的设施级数据库;第二,将碳-能-水三个足迹置于同一系统边界下进行综合分析^[20];第三,系统评估不同原料-技术-规模组合的碳-能-水足迹差异,量化技术升级与规模扩张对煤制合成氨环境效益的改善潜力。研究结果可为制定差异化、精细化的策略以改善煤制合成氨行业环境效益提供决策依据。

1 中国合成氨行业现状

1.1 技术特征

合成氨的生产技术可从原料、气化技术、规模三个维度进行划分。按原料类型,煤制合成氨占合成氨总产能的75%以上^[21];天然气制合成氨碳排放

较低,主要分布在西南地区^[22-23];焦炉气制合成氨则属于资源循环利用路线^[24]。按气化技术,煤制合成氨主要采用固定床、流化床和气流床三种工艺。固定床技术成熟、投资成本低,但多用于中小规模项目、装置普遍老旧;流化床煤种适应性较强,但在合成氨领域应用有限;气流床碳转化率高、单炉产能大,是现代大型合成氨装置的主流技术^[25-26]。按生产规模,装置可分为大、中、小三类装置可分为小规模(<20万吨/年)、中规模(20~50万吨/年)和大规模(>50万吨/年)三类。需要说明的是,焦炉气作为焦化行业副产物,其生产规模只能达到中小型,目前尚未有能达到大规模的工业化装置,导致分类中没有焦炉气-大型组合。同时,流化床气化炉因自身特性限制,单炉处理能力有限,放大时易出现流化不均、气固返混加剧、碳转化率下降等问题,故其工业应用规模仅限于中小型,亦无煤-流化床-大型组合。行业产能结构呈现大型装置占比持续提升、中小规模装置逐步退出的态势。

如图1所示,将原料、气化技术与规模分类进行耦合,可形成13种原料-技术-规模组合。煤制合成氨以气流床为主导,在中型(24.97%)与大型(19.38%)规模中合计占比近45%,是适配大型化装置的核心技术;固定床虽仍保有部分大型产能(12.55%),但其技术先进性不及气流床。天然气制合成氨高度集中于中型规模(13.96%);焦炉气和煤-流化床制合成氨均无大型产能。

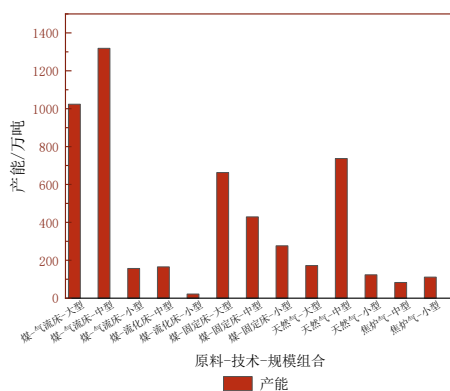


图1 13种原料-技术-规模组合的产能

Fig.1 Capacity of 13 feedstock-technology-scale combinations

1.2 企业分布特征

如图2所示,我国合成氨总产能为4691万吨,共涉及181家企业。合成氨产能高度集中于煤炭资源富集的华北及邻近地区,以及天然气资源丰富的西南与西北地区。这一空间格局与我国“富煤^[27]、贫

油^[28]、少气”的资源禀赋^[29]及粮食主产区的分布特征高度契合。其中,河南省(16.64%)、山东省(15.68%)、山西省(15.25%)、内蒙古自治区(12.14%)四省区合计占比近60%。山西省企业以中小规模为主、数量最多(28家),但总产能低于河南(9家)与山东(15家)。四川省(9.57%)、新疆维吾尔自治区(7.52%)处于第二梯队,其余省份占比均在5%以下。

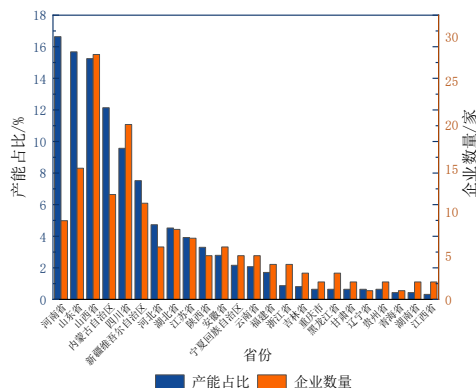


图2 24个省份合成氨产能与企业数量分布

Fig.2 Distribution of synthetic ammonia production capacity and number of enterprises in 24 provinces

如图3所示,多数省份以中型企业为主,其中辽宁省、贵州省的中型企业占比接近100%;江西省、河南省大型企业占比较高,规模化发展特征明显;山东省、河北省等省份三类企业分布均衡,产业结构呈现多元化特点。

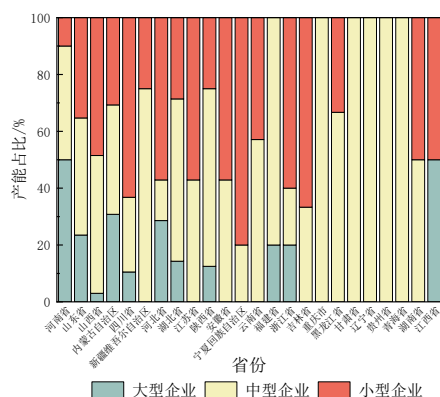


图3 24个省份不同规模合成氨企业产能占比分布

Fig.3 Distribution of production capacity proportion of synthetic ammonia enterprises by different scales in 24 provinces

如图4所示,各省份合成氨技术结构差异显著。湖南省固定床占比达100%,为省内唯一技术类型;贵州省气流床占比100%,青海省天然气占比100%,

均呈现单一技术主导格局。山西省固定床占比46.14%、气流床占比30.49%，两类技术为省内核心；河南省气流床占比86.31%，辅以少量固定床和流化床。多数省份以某类技术为核心，其余技术占比互补，如四川省天然气占比62.41%、气流床占比12.25%。

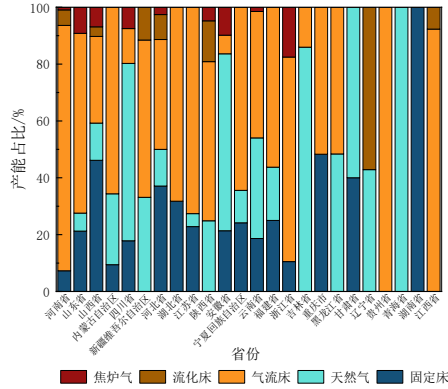


图4 24个省份不同工艺路线合成氨产能分布

Fig.4 Distribution of synthetic ammonia production capacity by different process routes in 24 provinces

2 方法与数据

2.1 系统边界与功能单位

本研究以生产1吨合成氨为功能单位，采用从摇篮到工厂大门的生命周期框架，涵盖合成氨生产工序，以及上游的原料（煤、焦炉气、天然气）、能源（燃料煤、电力、蒸汽等）、物料（催化剂等）供应环节和下游的固废（炉渣等）处置环节，具体如图5所示。针对合成氨生产过程中伴生的甲醇、硫磺等副产品，本研究采用经济分配原则分摊的环境影响。该方法以各产品2024年国内市场价格为基准，根据产品结构按经济价值进行分配。

2.2 碳-能-水足迹计算方法

2.2.1 CF计算方法 CF包括生产过程的直接排放与上游下游的间接排放，直接排放按温室气体质量乘全球变暖潜势折算，间接排放由各输入量乘对应排放因子计算。因此，采用公式(1)、(2)、(3)构建CF模型^[30]。

$$CF_i = \frac{(DGE_i + IGE_i)a_i}{PV_i}, \#(1)$$

$$DGE_i = \sum_o DGE_{io} \cdot GWP_o, \#(2)$$

$$IGE_i = FS_i \cdot FCF + \sum_k ES_{ik} \cdot EFC_k + \sum_m MS_{im} \cdot MFC_m + \sum_n SW_{in} \cdot SFC_n, \#(3)$$

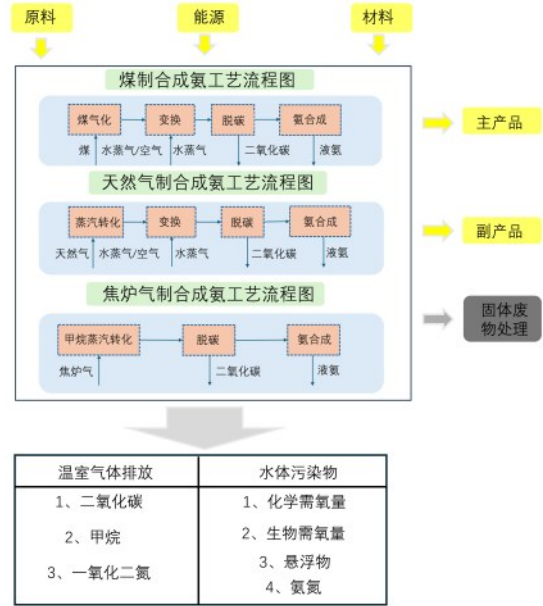


图5 生命周期系统边界图

Fig.5 Life cycle system boundary diagram

2.2.2 能源足迹(EF)计算方法 EF包括合成氨生产过程的直接能耗及上下游的间接能耗。直接能耗按原料及能源的热值之和计算；间接能耗由各类输入输出数据乘对应能源足迹因子计算。因此，采用公式(4)、(5)、(6)构建EF模型^[31]。

$$EF_i = \frac{(DE_i + IE_i)a_i}{PV_i}, \#(4)$$

$$DE_i = FS_i \cdot FH_i + \sum_k ES_{ik} \cdot EH_k, \#(5)$$

$$IE_i = FS_i \cdot FEF + \sum_k ES_{ik} \cdot EEF_k + \sum_m MS_{im} \cdot MEF_m + \sum_n SW_{in} \cdot SEF_n, \#(6)$$

2.2.3 水足迹(WF)计算方法 WF由蓝水和灰水两部分构成。蓝水指合成氨生产过程中直接消耗的淡水量与各环节间接消耗的虚拟水量之和；灰水指将液态污染物稀释至达标排放浓度所需的虚拟水量。因此，采用公式(7)、(8)、(9)构建WF模型^[32]。

$$WF_i = \frac{(BW_i + GW_i)a_i}{PV_i}, \#(7)$$

$$BW_i = FW_i + FS_i \cdot FWF + \sum_k ES_{ik} \cdot EWF_k + \sum_m MS_{im} \cdot MWF_m + \sum_n SW_{in} \cdot SWF_n, \#(8)$$

$$GW_i = \max_i \frac{LE_{il}}{b_i} + \max_i \frac{FS_i \cdot FLE_{il}}{b_i} + \max_i \frac{ES_{ik} \cdot ELE_{ikl}}{b_i} + \max_i \frac{MS_{im} \cdot MLE_{iml}}{b_i}, \#(9)$$

2.3 数据清单的构建

本研究数据分为实景数据与背景数据两类。实景数据来源于对181家合成氨装置2024年运行

数据的调研,涵盖原料、能源、材料、产品、副产品以及气体排放物、废弃物等类型。背景数据主要来自SimaPro 9.5软件内置的Ecoinvent 3.10数据库,并遵循地域及技术代表性原则进行筛选^[33]。

需要说明的是,本研究对天然气路线的技术分类是完整的,但仅选取各分类下代表性企业数据开展分析,未覆盖全部企业数据,可能在一定程度上影响研究结果的覆盖程度与数据完整性。

本研究采用蒙特卡洛法开展不确定性分析^[34],

经10000次模拟后,对输入数据的不确定性进行评估。

为清晰呈现煤制合成氨生产的资源消耗与污染物排放特征,本研究选取8家典型煤制合成氨企业,汇总其原料、能源、物料投入与产品、废弃物排放数据,企业1至企业8分别对应气流床、流化床、固定床及大、中、小生产规模。具体清单如表1所示。

表1 煤制合成氨企业清单

Table 1 List of coal-to-ammonia plants

编号	基本流	单位	消耗量/排放量								类型
			企业1	企业2	企业3	企业4	企业5	企业6	企业7	企业8	
1	原料煤	t	1.76×10^6	5.76×10^5	2.07×10^5	5.97×10^5	2.18×10^5	5.72×10^5	6.19×10^5	3.18×10^5	原料输入
2	燃料煤	t	9.16×10^5	1.18×10^5	9.11×10^4	3.42×10^5	1.49×10^5	1.89×10^5	6.14×10^5	3.98×10^5	能源输入
3	电力	kW·h	3.10×10^8	1.40×10^8	3.06×10^7	2.72×10^8	3.49×10^8	7.21×10^8	1.58×10^8	2.09×10^8	能源输入
4	蒸汽	t	1.66×10^6	6.24×10^5	2.49×10^5	4.28×10^5	3.31×10^5	7.54×10^5	3.03×10^6	3.18×10^5	能源输入
5	新鲜水	t	2.21×10^6	3.92×10^6	1.59×10^6	7.79×10^6	4.05×10^6	4.61×10^6	4.05×10^6	5.31×10^6	能源输入
6	硝酸	t	—	—	—	—	—	—	3.17×10^2	—	材料输入
7	氨水	t	—	—	2.09×10^2	2.38×10^3	6.09×10^2	2.38×10^4	7.16×10^1	1.17×10^3	材料输入
8	絮凝剂	t	—	6.52	3.79×10^2	—	—	1.63×10^2	—	—	材料输入
9	水处理剂	t	—	—	6.62×10^1	—	—	1.24×10^2	2.05×10^2	—	材料输入
10	碱性处理剂	t	—	—	2.21×10^4	1.03×10^3	—	2.89×10^3	—	1.07×10^5	材料输入
11	添加剂	t	2.04×10^3	5.32×10^3	—	4.61×10^1	—	7.81×10^2	3.72×10^1	—	材料输入
12	催化剂	t	7.02×10^2	3.30×10^2	—	6.03×10^2	—	1.95×10^2	—	—	材料输入
13	甲醇	t	1.08×10^3	5.93×10^2	—	—	—	1.44×10^2	—	—	材料输入
14	液氨	t	1.05×10^6	4.06×10^5	1.66×10^5	3.23×10^5	1.79×10^5	5.07×10^5	3.93×10^5	1.63×10^5	产品输出
15	副产物	t	5.61×10^6	9.07×10^3	6.67×10^3	6.12×10^4	8.58×10^4	7.01×10^4	1.84×10^6	8.37×10^4	副产品输出
16	甲烷	t	5.14×10^2	6.54×10^1	5.11×10^1	2.13×10^2	9.30×10^1	1.06×10^2	1.76×10^2	2.23×10^2	排放物输出
17	一氧化二氮	t	7.85×10^3	1.01×10^3	7.80×10^2	1.19×10^4	5.19×10^3	1.62×10^3	2.51×10^3	3.41×10^3	排放物输出
18	炉渣	t	5.18×10^5	1.55×10^5	5.97×10^4	2.12×10^5	8.73×10^4	1.60×10^5	2.05×10^5	1.12×10^5	废弃物输出

同时,本研究选取5家典型非煤原料路线合成氨企业,企业1至企业5分别对应天然气、焦炉气及大、中、小生产规模,其核心运行数据清单如表2所示。

3 结果

3.1 不同原料-技术-规模组合的碳-能-水足迹

焦炉气-中型组合的环境足迹总体最优,其CF与WF分别为 $0.92 \text{ t CO}_2\text{-eq/t}$ 和 $4.39 \text{ m}^3/\text{t}$,仅分别为煤-固定床-小型组合的10.4%和12.4%,初步来看,原料选择带来的足迹差异远大于技术或规模变化的影响^[35-36]。天然气-大型组合的EF最小,为 12.88 GJ/t 。在8种煤制合成氨的技术组合中,煤-气流

床-大型表现最优,CF、EF、WF分别为 $3.53 \text{ t CO}_2\text{-eq/t}$ 、 35.17 GJ/t 、 $8.26 \text{ m}^3/\text{t}$;而煤-固定床-小型表现最差,三项指标分别为 $8.87 \text{ t CO}_2\text{-eq/t}$ 、 60.01 GJ/t 、 $35.34 \text{ m}^3/\text{t}$ 。

同一技术下,规模效应显著。以煤-气流床为例,从小规模至中规模,CF降低1.10%;由中规模至大规模,CF进一步降低18.43%,EF与WF的降幅分别为2.58%-13.43%和11.25%-57.33%,表明规模扩张有助于改善环境绩效。在同一规模水平下,技术升级的效果更为突出。以大规模装置为例,由固定床升级为气流床,CF降低26.10%,优于同技术路径下规模扩张所带来的18.43%降幅。整体来看,技术升级带来的降幅普遍在25%以上,而规模扩张的降

表2 天然气与焦炉气制合成氨企业清单

Table 2 List of natural gas and coke oven gas-to-ammonia plants

编号	基本流	单位	消耗量/排放量					类型
			企业1	企业2	企业3	企业4	企业5	
1	天然气	t	2.34×10 ⁵	1.63×10 ⁵	1.30×10 ⁵	—	—	原料输入
2	焦炉气	t	—	—	—	1.67×10 ⁵	6.00×10 ⁴	原料输入
3	电力	kW·h	2.15×10 ⁸	1.04×10 ⁸	1.97×10 ⁸	3.22×10 ⁷	2.04×10 ⁷	能源输入
4	热力	t	9.27×10 ⁵	3.19×10 ⁵	3.36×10 ⁵	3.65×10 ⁵	2.84×10 ⁴	能源输入
5	新鲜水	t	7.70×10 ⁶	4.48×10 ⁶	3.38×10 ⁶	4.96×10 ⁵	1.28×10 ⁵	水资源输入
6	液碱	t	6.07×10 ²	2.31×10 ³	1.54×10 ³	—	—	材料输入
7	硫酸	t	6.00×10 ²	5.12×10 ²	3.42×10 ²	—	—	材料输入
8	盐酸	t	4.89×10 ²	6.91×10 ²	4.61×10 ²	—	—	材料输入
9	次氯酸钠	t	4.63×10 ²	—	—	—	—	材料输入
10	甲醛	t	3.43×10 ²	—	—	—	—	材料输入
11	催化剂	t	6.50×10 ¹	—	3.00×10 ²	—	4.40×10 ²	材料输入
12	絮凝剂	t	—	1.13×10 ²	9.33×10 ¹	—	1.24×10 ²	材料输入
13	液氨	t	6.06×10 ⁵	3.02×10 ⁵	1.91×10 ⁵	1.39×10 ⁵	3.25×10 ⁴	产品输出
14	二氧化碳	t	3.51×10 ⁵	3.26×10 ⁵	1.95×10 ⁵	9.33×10 ⁴	3.35×10 ⁴	排放物输出

幅多控制在20%以内。

从总体样本来看,技术升级(固定床→气流床)带来的CF降幅中位数为36.47%,是规模扩张(小→大,10.21%)的3.57倍,EF与WF亦呈现相似规律。这表明,采用更先进的技术比单纯扩大规模更能有效降低环境足迹。综合而言,中规模焦炉气路线在碳-水足迹协同改善方面优势显著^[37],尽管其EF介于天然气-中型和天然气-大型之间,但在当前“双碳”目标与水资源约束背景下,仍可视为综合环境绩效最优的路径之一。

表3 13种原料-技术-规模组合的碳-能-水足迹数据表

Table 3 Carbon-energy-water footprint data table for 13 raw material-technology-scale combinations

原料	气化技术	规模	CF/(t·CO ₂ -eq/t)	EF/(GJ/t)	WF/(m ³ ·t)
煤	气流床	大	3.52	35.17	8.26
煤	气流床	中	4.32	40.94	17.18
煤	气流床	小	4.37	42.04	19.36
煤	流化床	中	4.78	48.81	21.01
煤	流化床	小	6.40	53.97	25.80
煤	固定床	大	4.77	52.82	19.99
煤	固定床	中	6.44	55.79	34.17
煤	固定床	小	8.87	60.01	35.34
天然气	—	大	0.72	12.88	10.49
天然气	—	中	1.35	20.47	17.98
天然气	—	小	1.63	26.75	22.22
焦炉气	—	中	0.92	21.86	4.39
焦炉气	—	小	1.29	32.66	5.06

3.2 贡献度分析

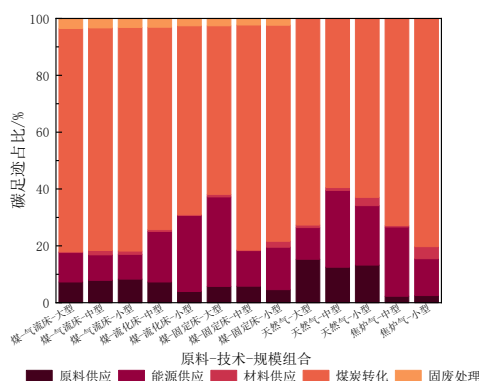
CF与EF的贡献结构存在相似性^[38](分别如图6a、6b所示),煤炭转化阶段均为最主要的贡献环节,占比分别为59.33%–80.26%和73.03%–98.50%,其中EF的占比高于CF。这一差异源于原料含有的部分碳元素在合成氨生产过程中固定至产品中,而原料含有的热量则在合成氨生产阶段完全释放^[39]。焦炉气路线在合成氨生产阶段的贡献(72.85%–80.26%)虽高于部分煤制合成氨组合,但其CF绝对值较低,这得益于其原料富氢特性减少了变换工段的CO₂排放。

WF的结构特征则显著不同。如图6c所示,其影响贯穿生产过程及上游的原料、能源、材料供应等环节,其中原料供应环节的贡献最为突出。在煤制合成氨路线中,上游环节占比为12.46%–41.34%,其中煤-气流床-大型组合高达41.34%;而天然气与焦炉气路线的占比较小,分别为13.61%–14.62%和3.67%–4.90%。这表明,煤制合成氨的WF改善需加强上游环节的全面管控^[40]。

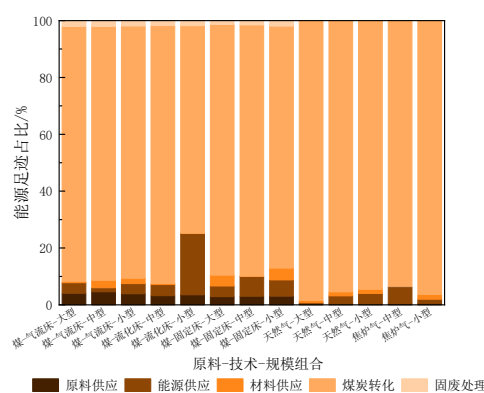
3.3 敏感度与不确定度分析

基于贡献度分析,设置三种改进措施,考察关键参数变化对足迹的影响:M1为提升原料转化率,M2为提升能源利用率,M3为提升合成氨产品选择性。以基准情景为对照,进行5%的变动分析。

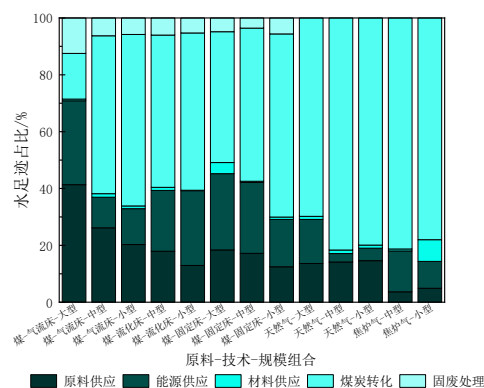
不同措施对各环境足迹的影响存在显著差异。如图7a所示,M1效果最为显著:原料效率提升5%,



(a) 不同原料-技术-规模组合下CF的阶段贡献占比



(b) 不同原料-技术-规模组合下EF的阶段贡献占比



(c) 不同原料-技术-规模组合下WF的阶段贡献占比

图6 不同工艺与规模合成氨生产各环节CF、EF、WF占比分布

Fig.6 Distribution of carbon, energy and water footprint proportions in each link of ammonia production with different processes and scales

可使CF降低1.93%–6.91%、EF降低2.09%–4.83%、WF降低0.71%–2.47%。其中,煤-气流床-大型组合的CF降幅最高,达6.91%,因其在基准情景下直接温室气体排放最少,降幅尤为突出^[41]。M3效果次之(如图7c):合成氨选择性提升5%,可使CF降低

0.53%–5.09%、EF降低0.53%–4.76%、WF降低0.53%–4.76%。其中,煤-固定床-大型组合三类足迹降幅均超过4.76%,主要由于固定床效率低、副反应多,且大型化放大了优化效果,使选择性小幅提升即可显著削减原料与能源消耗。M2在所有工艺组合中均表现出一定效果,但优化幅度相对较弱(如图7b):能源效率提升5%,可使CF降低0.56%–3.53%、EF降低0.14%–3.49%、WF降低0.11%–2.50%。

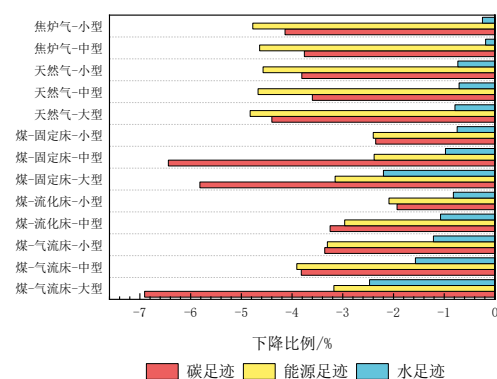
各工艺组合三类足迹的相对标准偏差(RSD)如图8所示:CF的RSD介于2.52%(煤-固定床-中型)至5.81%(天然气-小型)之间;EF的RSD介于2.63%(煤-固定床-大型)至8.02%(煤-气流床-中型)之间;WF的RSD介于3.69%(煤-流化床-中型)至8.15%(焦炉气-小型)之间。

三类环境足迹的RSD均低于10%,评估结果具有较好的稳健性。需指出的是,EF与WF的不确定性相对较高,主要原因在于这两类足迹受上游及下游过程的影响更大,而背景数据库中的排放因子、能耗因子和水耗因子等数据的不确定度通常高于现场实测的实景数据,从而引入了额外的不确定性^[42–43]。

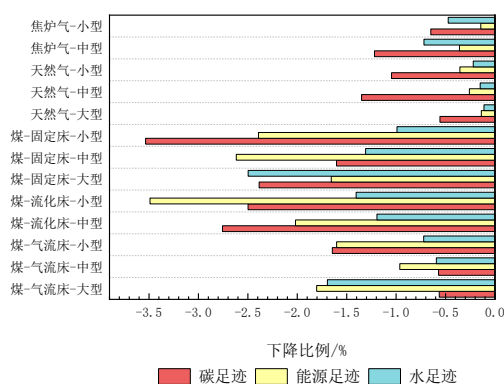
3.4 合成氨工业的碳-能-水足迹空间特征

将13种原料-技术-规模组合的环境足迹数据按全国及各省份产能结构加权归集,得到合成氨行业碳-能-水足迹平均强度及总量。

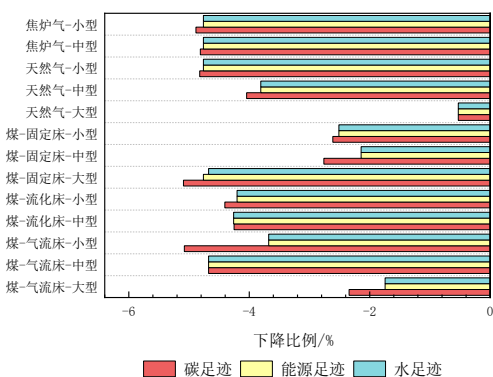
全国加权平均CF为3.93 t CO₂-eq/t, EF为39.18 GJ/t, WF为17.92 m³/t。各省份CF分布如图9a所示:湖南省最高,达7.00 t CO₂-eq/t,超出全国平均水平78.1%;重庆市次之,为5.34 t CO₂-eq/t。上述省份以煤-固定床-中小规模组合为主,足迹强度居高不下。青海省CF最低(1.35 t CO₂-eq/t),仅为全国平均水平的34.4%。吉林省(1.79 t CO₂-eq/t)、辽宁省(3.31 t CO₂-eq/t)等省份则以天然气、焦炉气路线为主。EF的空间异质性与CF高度一致(如图9b所示),湖南省最高(56.76 GJ/t),重庆市(48.11 GJ/t)次之,青海省最低(20.47 GJ/t)。WF的空间分布则呈现不同特征(如图9c所示),湖南省最高,为34.44 m³/t,超出全国平均水平92.2%;重庆市(25.38 m³/t)次之;江西省WF最低(9.61 m³/t)。WF高低与原料-技术-规模组合密切相关:固定床-中小型组合的WF普遍超过34 m³/t,而焦炉气路线(4.4–5.1 m³/t)与气流床-大型组合(8.3 m³/t)的WF明显较低。



(a) 提升5%原料转化率



(b) 提升5%能源利用率



(c) 提升5%合成氨选择性

图7 三种措施下不同工艺与规模合成氨碳-能-水足迹降幅分布

Fig.7 Distribution of carbon, energy, and water footprint reductions of ammonia production under three mitigation scenarios for various technologies and capacities

全国合成氨行业的CF总量达到208.67 Mt CO₂-eq, 年EF总量为2080.2 TJ, 年WF总量为951.33 Mm³。三类足迹的空间分布趋势高度一致, 整体呈现北方资源大省及中部人口与农业大省集中的特征。其中, 山西省三类足迹总量均居首位, CF为

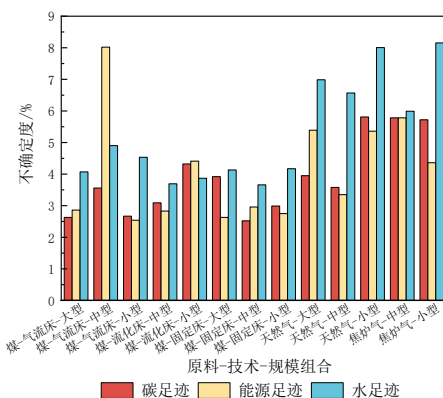


图8 不同工艺与规模合成氨CF、EF、WF不确定性分析

Fig.8 Uncertainty analysis of carbon, energy and water footprints of ammonia production with different processes and scales

33.75 Mt CO₂-eq、EF为317.4 TJ、WF为157.93 Mm³; 河南省(28.02 Mt CO₂-eq、287.41 TJ、101.03 Mm³)与山东省(23.39 Mt CO₂-eq、239.01 TJ、881.53 Mm³)次之; 内蒙古自治区(16.99 Mt CO₂-eq、163.04 TJ、742.84 Mm³)等省份三类足迹亦处于较高水平。相比之下, 青海省三类足迹总量均为最低, 分别为0.54 Mt CO₂-eq、8.21 TJ、7.19 Mm³, 区域间资源环境压力差异显著。

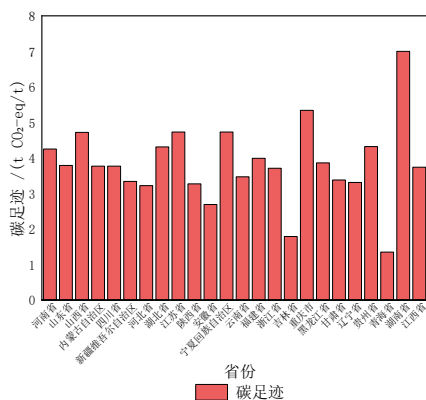
3.5 政策建议

针对合成氨技术层级偏低、能耗及排放偏高、行业产能布局不均等问题, 结合行业实际, 提出以下政策建议。

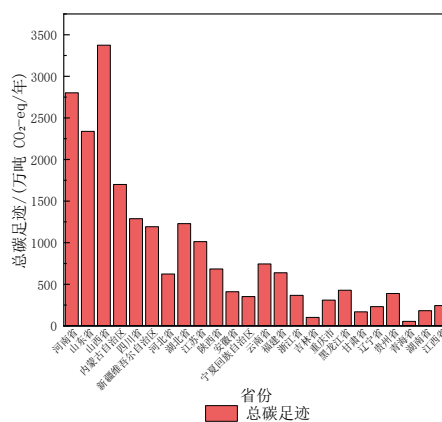
一是推进原料-技术-规模差异化改造。焦炉气-中型组合的CF、WF仅为煤-固定床-小型组合的10.4%和12.4%, 固定床升级为气流床的减排效果是规模扩张的3.57倍。应优先淘汰煤-固定床-小规模落后工艺^[44], 以高效气化、余热回收为核心推进全流程改造, 推动老旧装置向大型气流床升级, 拓展焦炉气等低碳原料路线, 实现能耗与排放协同降低。

二是分技术工艺精准减排。合成氨选择性提升5%可使碳足迹最大降幅达5.09%, 煤炭转化是CF、EF的核心贡献源。固定床与气流床路线应聚焦提升选择性及煤炭转化率; 天然气路线提高原料利用率; 焦炉气路线强化高效转化以减少变换工段碳排放, 并严控上游水足迹, 实现分技术路线碳-能-水协同降耗。

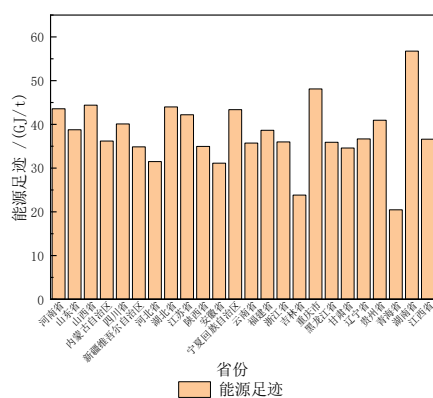
三是优化空间布局。合成氨产能集中于煤炭富集区, 但该区域普遍缺水、本地需求不足, 而农业



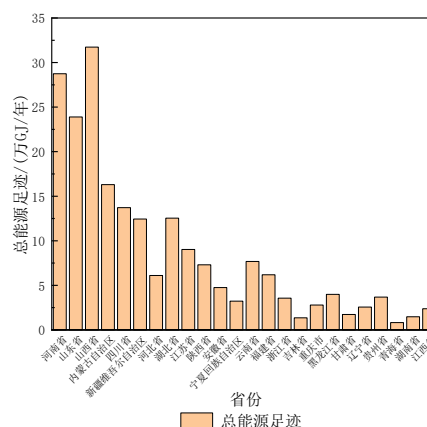
(a) 各省份CF分布



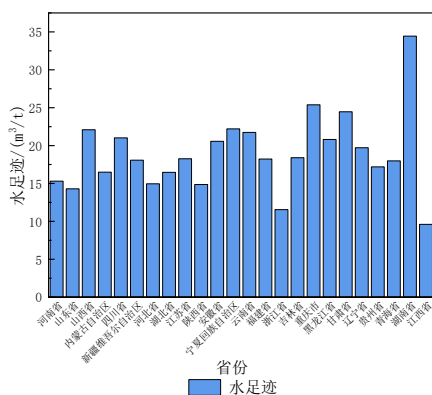
(a) 各省份CF总量分布



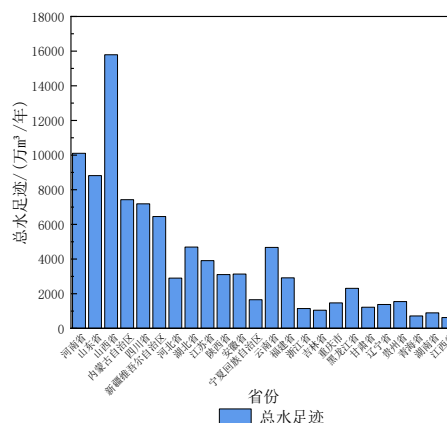
(b) 各省份EF分布



(b) 各省份EF总量分布



(c) 各省份WF分布



(c) 各省份WF总量分布

图9 全国各省份合成氨碳-能-水足迹分布

Fig.9 Distribution of carbon footprints of ammonia production by different processes across provinces

主产区与工业集中区需求旺盛、水资源承载力更优^[45]。山西省、河南省、山东省的足迹总量居全国前列,布局与资源、需求、水资源条件不匹配^[46]。立足水资源约束,山西省、河南省应严控煤基产能扩张并推进节水改造;山东省应引导产能向水资源充裕、需求集中区域转移,从空间层面实现足迹整体削减。

图10 全国各省份合成氨碳-能-水足迹总量分布

Fig.10 Distribution of total carbon, energy and water footprints of ammonia production by province in China

4 结论

本研究基于合成氨碳-能-水足迹分析框架,对13种原料-技术-规模耦合工艺组合开展了系统性

评估,揭示了不同技术与规模下三种足迹的显著差异。

研究结果表明:装置规模扩大对三类足迹均有显著减排效果。以煤-气流床为例,从中型升级至大型后,CF降低18.43%,EF与WF降幅分别为2.58%~13.43%和11.25%~57.33%。技术迭代的减排成效优于规模扩张,固定床升级为气流床后CF降幅中位数达36.47%,高于规模扩张的平均降幅。煤炭转化阶段是CF与EF的核心来源,贡献占比分别为59.33%~80.26%和73.03%~98.50%;WF则呈现全链条多环节驱动特征,上游原料供应环节贡献突出。原料转化率是协同减排的关键控制点,提升5%原料转化率可使CF降低1.93%~6.91%、EF降低2.09%~4.83%,对焦炉气工艺增效最为明显。

在省级层面,工艺结构的差异导致煤制合成氨行业碳-能-水足迹呈现显著的空间异质性,高值区集中于华东、华中及西南地区。河南省、山东省、山西省面临严峻的足迹总量压力,需构建全链条协同优化体系,通过推广先进煤气化技术、加快清洁能源替代、强化绿色采煤实践,并在技术路径选择中综合考量规模效应、区域资源禀赋与环境承载力,制定差异化的产业发展策略。

本研究足迹评估基于代表性装置的实际运行数据,虽已覆盖行业主要技术路线与规模类型,但部分省份或特定技术组合的样本数量有限,可能对研究结果在行业层面的代表性造成一定偏差。未来可进一步扩充样本覆盖范围,结合全生命周期成本与碳减排效益开展多目标优化研究,为煤制合成氨行业实现碳-能-水协同管控提供更全面的科学支撑。

符 号 说 明

a	经济分配系数
BW	蓝水量, m^3/t
b	液态污染物的允许排放浓度限值, mg/L
CF	单位功能单位的碳足迹, $t\ CO_2\ eq/t$
DE	为直接能耗, GJ
DGE	直接排放的温室气体量, t
ECF	能源供给碳足迹因子, $t\ CO_2\ eq/t$
EEF	能源供给的能源足迹因子, GJ/t
EF	单位功能单位的能源足迹, GJ/t
EH	单位能源的热值, GJ/t
ELE	能源供给的液态污染物排放因子, t/t
ES	能源供给量, t

EFW	能源供给的蓝水因子, m^3/t
FCF	原料供给碳足迹因子, $t\ CO_2\ eq/t$
FEF	原料供给的能源足迹因子, GJ/t
FH	单位原料的热值, GJ/t
FLE	原料供给的液态污染物排放因子, t/t
FS	原料供给量, t
FWF	原料供给的蓝水因子, m^3/t
FW	直接消耗的淡水量, m^3/t
GWP	单位温室气体的全球变暖潜势
GW	灰水量, m^3/t
IGE	间接排放的温室气体量, t
IE	为间接能耗, GJ
LE	直接排放的液态污染物量, t/t
MCF	物料供给碳足迹因子, $t\ CO_2\ eq/t$
MEF	物料供给的能源足迹因子, GJ/t
MLE	物料供给的液态污染物排放因子, t/t
MS	物料供给量, t
MWF	物料供给的蓝水因子, m^3/t
PV	合成氨产量, t
SCF	固废处置的碳足迹因子, $t\ CO_2\ eq/t$
SEF	固废处置的能源足迹因子, GJ/t
SLE	固废处置的液态污染物排放因子, t/t
SWF	固废处置的蓝水因子, m^3/t
SW	固废处置量, t
WF	单位功能单位的水足迹, m^3/t

下角标

i	原料-技术-规模类型
k	能源类型
l	液态污染物类型
m	物料类型
n	固废类型
o	温室气体类型

参考文献

- [1] 谢克昌. 新型能源体系发展背景下煤炭清洁高效转化的挑战及途径[J]. 煤炭学报, 2024, 49(01): 47-56.
Xie K C. Develop new energy system and promote clean and efficient conversion of coal[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 47-56.
- [2] 张晓龙. "双碳"目标下火电厂降耗增效技术体系构建与实践[J]. 清洗世界, 2026, 42(4): 7-9.
Zhang X L. Construction and practice of energy saving and efficiency improvement technology system for thermal power plants under the dual carbon target[J]. Cleaning World, 2026, 42(4): 7-9.
- [3] 王智. 基于绿色化学理念的合成氨与尿素工艺优化研究[J]. 现代盐化工, 2025, 52(3): 41-43.
Wang Z. Study on process optimization of synthetic ammonia and urea based on green chemistry concept[J]. Modern Salt and Chemical Industry, 2025, 52(3): 41-43.

- [4] 曲志鹏, 池若夕. 化工合成氨工艺增效及节能减排脱硝技术优化[J]. 山西化工, 2025, **45**(10): 210–212.
Qu Z P, Chi R X. Optimization of efficiency enhancement, energy conservation, emission reduction, and disposal technology for chemical synthetic ammonia process[J]. Shanxi Chemical Industry, 2025, **45**(10): 210–212.
- [5] 韦佳宁. 合成氨工业节能减排技术探析[J]. 中国设备工程, 2024(14): 227–229.
Wei J N. Discussion on energy saving and emission reduction technology of synthetic ammonia industry[J]. China Plant Engineering, 2024(14): 227–229.
- [6] 刘迪, 汤玮健, 韩伟, 等. 绿氢时代的船用燃料: 绿色甲醇和绿氨[J]. 化工进展, 2025, **44**(12): 6747–6754.
Liu D, Tang W J, Han W, et al. Marine fuels in the era of green hydrogen: green methanol and green ammonia[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2025, **44**(12): 6747–6754.
- [7] 梁嘉麟, 宋健伟. 可持续合成氨技术研究进展: 传统工艺优化与绿氨产业化对比[J]. 化工设计通讯, 2026, **52**(2): 1–4.
Liang J L, Song J W. Research progress on sustainable ammonia synthesis technology: optimization of traditional processes and challenges in green ammonia industrialization[J]. Chemical Engineering Design Communications, 2026, **52**(2): 1–4.
- [8] 贾蓉蓉, 任腊春, 王井, 等. 绿电制氢规模优化分析[J]. 当代化工, 2026, **55**(1): 188–192.
Jia R R, Ren L C, Wang J, et al. Analysis of green hydrogen scale optimization[J]. Contemporary Chemical Industry, 2026, **55**(1): 188–192.
- [9] 杨洋, 初祺涵, 黄海博, 等. 轨道交通列车碳排放核算与低碳减排技术综述[J]. 铁道运输与经济, 2026, **48**(3): 1–17.
Yang Y, Chu Q H, Huang H B, et al. Review of carbon emission accounting and low-carbon emission reduction technologies for rail transit trains[J]. Railway Transport and Economy, 2026, **48**(3): 1–17.
- [10] Chen X J, Lei T Y, Zhao W C, et al. China's petrochemical plants' CO₂ emissions and high-impact contributors for carbon-neutrality production[J]. Science Advances, 2026, **12**(12): eadx7784.
- [11] 余青汀, 高翔. 基于专利视角的生物质化工耦合绿氢技术发展态势分析[J]. 中国科技产业, 2026(3): 62–66.
She Q T, Gao X. Development trend analysis of biomass chemical coupling green hydrogen technology based on patent perspective[J]. Science & Technology Industry of China, 2026(3): 62–66.
- [12] 李娟. 光伏制绿氢绿氨发展和展望[J]. 价值工程, 2026, **45**(4): 81–84.
Li J. Development and prospect of photovoltaic green hydrogen and green ammonia production[J]. Value Engineering, 2026, **45**(4): 81–84.
- [13] Zhang Y L, Liu H, Li J J, et al. Life cycle assessment of ammonia synthesis in China[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2022, **27**(1): 50–61.
- [14] 汪家铭. 安徽晋煤中能化工新60万吨/年合成氨智能升级技术改造项目开工[J]. 四川化工, 2017, **20**(4): 57.
Wang J M. Anhui Jinmei Zhongneng Chemical Industry started the new 600, 000-ton/year intelligent upgrading technical transformation project of synthetic ammonia[J]. Sichuan Chemical Industry, 2017, **20**(4): 57.
- [15] 朱桂芳. 煤基氨联产天然气技改项目的技术经济可行性分析[J]. 煤化工, 2015, **43**(5): 51–53, 66.
Zhu G F. Techno-economic analysis of the upgrading project for coal-based ammonia plants to co-generate SNG[J]. Coal Chemical Industry, 2015, **43**(5): 51–53, 66.
- [16] 张洪航, 梁传彬, 张文歆, 等. 水-能-碳视角下的中国主粮作物热量生产力评估[J]. 水资源与水工程学报, 2025, **36**(5): 195–204.
Zhang H H, Liang C B, Zhang W X, et al. Caloric productivity assessment of major grain crops in China from water-energy-carbon perspective[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2025, **36**(5): 195–204.
- [17] 王红瑞, 李晓军, 张力, 等. 水-能源-碳排放复杂关系研究进展及展望[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, **21**(1): 13–21.
Wang H R, Li X J, Zhang L, et al. Research progress and the prospect of a complex relationship between water-energy-carbon emission[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, **21**(1): 13–21.
- [18] 杨屹, 张园园. 呼包鄂榆资源型城市群"水-能-碳"耦合变化及影响因素[J]. 中国环境科学, 2023, **43**(11): 6212–6224.
Yang Y, Zhang Y Y. Analysis of the coupling process and the influencing factors of the "water-energy-carbon" relationship in the Hohhot-Baotou-Ordos-Yulin resource-based urban agglomeration[J]. China Environmental Science, 2023, **43**(11): 6212–6224.
- [19] 陈小时. 双碳目标下新疆油田甲烷与VOCs协同减排路径与安全管控研究[J]. 化工安全与环境, 2026, **39**(3): 79–84, 88.
Chen X S. Research on synergistic emission reduction path and safety management and control of methane and VOCs in Xinjiang Oilfield under the double carbon target[J]. Chemical Safety & Environment, 2026, **39**(3): 79–84, 88.
- [20] 贺帅. 四川省农业水-能-碳系统影响因素及耦合关系研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2025.
He S. Research on the influencing factors and coupling relationships of agricultural water-energy-carbon nexus in Sichuan Province[D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2025.
- [21] 刘梦华, 黄逍, 李爽, 等. 基于全生命周期评价的中国制氨路线碳排放、能源效率研究及展望[J]. 中国科学(技术科学), 2024, **54**(7): 1329–1346.
Liu M H, Huang X, Li S, et al. Carbon emission and energy efficiency analysis of ammonia production routes in China from life-cycle perspective and prospects[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2024, **54**(7): 1329–1346.
- [22] Li G X, Chen R Y, Wen Z X, et al. Global coal-rock gas resource potential and distribution[J]. Petroleum Exploration and Development, 2026, **53**(1): 16–30.
- [23] 郭丽, 王亚楠, 许文, 等. 我国天然气制合成氨行业发展现状及建议[J]. 化学工业, 2025, **43**(2): 33–36, 40.
Guo L, Wang Y N, Xu W, et al. The development situation and suggestions of natural gas synthetic ammonia production in China[J]. Chemical Industry, 2025, **43**(2): 33–36, 40.
- [24] Zhao Y X, Zhao Y J, Huang Y, et al. Pinch analysis for heat integration of pulverized coke chemical looping gasification coupled with coke-oven gas to methanol and ammonia[J]. Processes, 2022, **10**(9): 1879.
- [25] 窦睿然, 殷景雨, 李敏. 水煤浆气化技术研究进展与展望[J]. 氮肥技术, 2025, **46**(6): 4–7, 15.
Dou R R, Yin J Y, Li M. Research progress and prospects of

- water-coal slurry gasification technology[J]. *Danfei Jishu*, 2025, **46**(6): 4–7, 15.
- [26] 张志东, 周建欣, 孙洋洋, 等. E-Gas 水煤浆气化与常规水煤浆气化技术对比分析[J]. *中氮肥*, 2025(5): 15–18.
- Zhang Z D, Zhou J X, Sun Y Y, et al. Comparative analysis of E-Gas coal water slurry gasification and conventional coal water slurry gasification technology[J]. *M-Sized Nitrogenous Fertilizer Progress*, 2025(5): 15–18.
- [27] 王强民. 生态脆弱富煤区矿井水水文地球化学成因及资源化利用[J]. *工业水处理*, 2026, **46**(4): 81–88.
- Wang Q M. Hydrogeochemical causes and resource utilization of mine water in ecologically fragile coal-rich areas[J]. *Industrial Water Treatment*, 2026, **46**(4): 81–88.
- [28] Shu C, Xiang N, Li S N, et al. Temporal-sectoral assessment and driving factors exploration of air pollution and carbon reduction synergy during the transformation process in a petroleum resource-based city[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2025, **537**: 147194.
- [29] Yang J D, Guan Y F, Wang R, et al. The impact of resource endowment and digital transformation on the efficiency of energy transition[J]. *Energy Science & Engineering*, 2026, **14**(4): 2182–2205.
- [30] Wang Z, Zhang Y H, Wang J, et al. Carbon footprint calculation for power transmission and distribution equipment: a comprehensive review of methodologies, standards, and applications[J]. *Resources, Conservation & Recycling Advances*, 2025, **28**: 200295.
- [31] 李俊杰. 基于GIS-LCA的中国现代煤化工行业环境足迹研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2022.
- Li J J. GIS-LCA based assessment of the environmental footprint of the advanced coal chemical industry in China[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, Beijing, 2022.
- [32] Wang K, Wang X P, Feng X, et al. Improved gray water footprint calculation and assessment method for polyester fabric production[J]. *AATCC Journal of Research*, 2022, **9**(2): 74–80.
- [33] Zhang J, Li J J, Wang Y R, et al. Unveiling the heterogeneity of environmental impacts of China's coal washing plants by a configuration-specific life cycle assessment[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2025, **110**: 107725.
- [34] Liu Y R, Lv D, Wang W, et al. Insight into magnetic characteristics and magnetization plateaus of the metal-coordinated polymer $[Dy_2Cu_2]_n$ [J]. *Applied Physics A*, 2026, **132** (5): 386.
- [35] Li J Y, Ma X X, Liu H, et al. Life cycle assessment and economic analysis of methanol production from coke oven gas compared with coal and natural gas routes[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, **185**: 299–308.
- [36] Wen Z G, Meng F X, Di J H, et al. Technological approaches and policy analysis of integrated water pollution prevention and control for the coal-to-methanol industry based on Best Available Technology[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, **113**: 231–240.
- [37] Wang S, Yu S J, Feng T X, et al. Life cycle environmental impacts based on detailed stages and synergistic environmental benefits of coke production in China[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2025, **13**(5): 117527.
- [38] Wu R N, Wang R N, Nian Z W, et al. Spatio-temporal variation and decoupling effects of energy carbon footprint based on nighttime light data: Evidence from counties in Northeast China[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2025, **16**(2): 102366.
- [39] Chen J J, Yang S Y, Qian Y. A novel path for carbon-rich resource utilization with lower emission and higher efficiency: an integrated process of coal gasification and coking to methanol production[J]. *Energy*, 2019, **177**: 304–318.
- [40] Cui P Z, Yao D, Ma Z Y, et al. Life cycle water footprint comparison of biomass-to-hydrogen and coal-to-hydrogen processes[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **773**: 145056.
- [41] Liu J, Yu M, Ren Y Q, et al. LCA-based environment and economic assessment of UCG coupled with CCS for methanol production[J]. *Energy*, 2025, **336**: 138573.
- [42] Zeng T, Chen Y Q, Wang L H, et al. Carbon emission calculation during the production and construction phases of overhead transmission lines[J]. *Energies*, 2026, **19**(4): 873.
- [43] Yang J, Zhang P D. Assessment methods of carbon dioxide emitted from bioenergy utilization[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, **15**(6): 2684–2689.
- [44] Ma R, Duan W T, Zhang Q. Integrated liquid hydrogen production technology with cascade separation and waste heat&cooling energy utilization[J]. *Energy*, 2025, **335**: 138224.
- [45] Liu Z Y, Yu Q B, Xie H Q, et al. Process design and kinetic-based simulation of a coupled biomass gasification and chemical looping ammonia generation system[J]. *Processes*, 2026, **14** (4): 588.
- [46] Soni K, Lanjekar P R, Panwar N L. Biomass-based green ammonia: Pathways, technologies, and sustainability for a carbon-neutral future[J]. *Unconventional Resources*, 2025, **8**: 100241.