

DOI: 10.61369/NPS.2025010001

电氢耦合视角下我国钢铁－电力行业协同 减碳路径研究

许爽¹, 陈海涛^{2*}

(1. 北京农学院经济管理学院, 北京市 昌平区 102206;

2. 国网能源研究院有限公司, 北京市 昌平区 102209)

Study on the Collaborative Carbon Reduction Path of the Steel and Electricity Industries in China from the Perspective of Electricity-Hydrogen Coupling

XU Shuang¹, CHEN Haitao^{2*}

(1. School of Economics and Management, Beijing University of Agriculture, Changping District, Beijing 102206;

2. State Grid Energy Research Institute Co., Ltd., Changping District, Beijing 102209)

摘要:【目的】钢铁行业是我国重要的能源消费与碳排放行业, 未来将通过电能、氢能替代等过程与电力、氢能行业深度耦合, 其能否实现多能耦合下的高质量协同转型降碳, 对我国整体实现碳达峰与碳中和目标有重要影响。【方法】基于自下而上的综合评估模型, 从电氢耦合与跨行业协同视角, 对钢铁与电力行业协同节能降碳路径及成本进行对比分析。【结果】钢铁行业能源消费与碳排放已经实现达峰, 未来呈现稳步下降趋势。在深度电氢耦合推动下, 2060年钢铁行业能源消费和碳排放较2020年分别下降87%和93%, 以电能为主、氢能为辅的深度电氢耦合发展场景减碳潜力最高, 单位减排成本相对较低, 是较为推荐的转型发展模式。未来钢铁行业转型会通过电能替代、氢能替代将降碳压力转移至电力部门, 发电、制氢环节的清洁程度直接影响到协同转型质量。【结论】该研究发现有助于持续优化电力结构, 充分利用绿氢能源, 以高质量电氢耦合模式推动钢铁与电力行业的高质量协同转型。

关键词: 碳中和; 钢铁行业; 协同转型; 电炉炼钢; 氢冶金

ABSTRACT: [Objectives] The steel industry is a critical sector in terms of energy consumption and carbon emissions in China. Its transformation and development plans involve areas such as electric energy substitution and hydrogen energy substitution. The future will see deep integration with the power and hydrogen energy sectors. Whether the steel industry can achieve a coordinated transformation and carbon reduction

under the condition of multi-energy coupling will significantly impact China's overall goals of reaching carbon peak and achieving carbon neutrality. [Methods] This paper, based on a bottom-up comprehensive assessment model, analyzes the collaborative energy-saving and carbon reduction paths and costs of the steel and power industries from the perspective of multi-energy coupling and cross-industry collaboration. [Results] China's steel industry has already reached its peak in energy consumption and carbon emissions and is expected to show a steady downward trend in the future. Driven by in-depth electro-hydrogen coupled metallurgy, by 2060, energy consumption and carbon emissions are projected to decrease by 87% and 93% respectively compared to 2020. The scenario of deep electro-hydrogen coupling with electricity as the primary and hydrogen as the supplementary energy source has the highest carbon reduction capacity, relatively low unit abatement cost, and high economic benefits for emission reduction, making it a recommended transformation and development model. The pressure on the steel industry to save energy and reduce carbon emissions is transferred to the power sector. [Conclusions] The cleanliness of the hydrogen production process directly affects the quality of collaborative transformation, hence the need for continuous optimization of the power structure and enhancement of green hydrogen supply capabilities to achieve high-quality collaborative transformation of the steel and power industries through a high-quality electro-hydrogen coupling model.

KEY WORDS: carbon neutrality; the steel industry; collaborative transformation; electric furnace steelmaking;

基金项目: 北京农学院青年教师科研创新能力提升计划项目(QJKC-2022055); 北京市教育委员会科研计划项目(SM202410020001)。

Project Supported by Beijing University of Agricultural Young Teachers' Research and Innovation Ability Enhancement Plan (QJKC-2022055); R&D Program of Beijing Municipal Education Commission (SM202410020001).

hydrogen metallurgy

引言

习近平总书记在2023年9月首次提出新质生产力概念,之后在不同场合指出要摆脱传统经济增长方式、改变传统生产力发展路径,要向具有高科技、高效能、高质量特征的先进生产力状态转变。钢铁行业作为我国国民经济重要的基础性、支柱型工业产业,是典型的能源密集型传统产业,未来生产工艺高端化、能源消费低碳化、资源利用循环化、能源供给清洁化是其发展的必然趋势,也将成为新质生产力的重要组成部分。当前,我国碳排放占全球排放总量的30%左右,其中钢铁行业是重要的碳排放源,占排放总量的15.3%,且与碳排放占比达40.6%的电力行业紧密耦合,其未来转型路径的选择会对碳达峰碳中和进程产生重要影响^[1-4]。最新研究表明,钢铁、水泥等行业的转型发展过程将大幅度提升电力行业的用电需求,预计到2060年电力供应需求将上升206%^[5]。因此,在钢铁行业深度转型升级进程中,电力行业的清洁程度也会对整体的降碳效果产生重要影响,需要在制定低碳转型路径方案时,重点研究钢铁与电力行业之间的交互影响,避免降碳协同不力^[6-7]。

现有研究已对钢铁与电力行业的减碳路径进行了多维度对比分析。在方法选择方面,现有研究主要采用物质流与情景对比分析法^[1, 8-10]、边际成本曲线法^[11-12]、数据驱动法^[13]、生命周期评价方法分析我国钢铁与电力行业未来需求变化趋势,核算全生命周期的碳排放及减排潜力情况,并提出了碳达峰碳中和路线图。在模型选取方面,目前主要采取“自上而下”与“自下而上”的建模思路^[14]。“自上而下”模型多聚焦政策、产业结构调整等对钢铁与电力行业的影响评估,如李晨光等^[15]、李志俊等^[16]、Jiang等^[17]基于CGE模型模拟分析了钢铁行业低碳转型发展政策工具与路径,并评估了去产能的经济影响。张攀路等^[18]、魏宁等^[19]基于综合模型测算碳捕集、利用与封存(Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS)等技术影响下的钢铁行业减碳潜力。宋亚植等^[20]、齐绍洲等^[21]采用投入-产出随机前沿模型,研究了我国钢铁行业碳配额分配方案;“自下而上”模型多聚焦于具体技术体系对钢铁与电力转型的影响分析,如Liu等^[22-24]等基于自下而上的建模思

路,较为全面的分析了钢铁行业的直接排放与间接排放,禹湘等^[25]等将宏观经济模型与重点行业技术、环境排放模型相耦合,分情景研判了我国工业二氧化碳排放形势。Li等^[26]、张静等^[27]探讨了我国中长期省级电力行业的低碳发展路径,段文娇等^[28]细化了炼钢工序,研究了多污染物排放清单,并提出了钢铁行业的转型技术路径与排放趋势。在研究发现方面,当前研究较为一致的指出,钢铁行业的碳排放峰值已经出现^[8, 22, 29],提出钢铁行业可以通过提高废钢利用比例、优化炉料结构、推广全废钢电炉短流程等措施来实现生产过程中的碳减排^[30-32],电力行业的碳排放峰值则在2030年前后达到峰值^[26, 33],提出可以通过淘汰落后煤电机组、加快清洁能源替代、提升电网调度灵活性等措施,推动能源结构优化,减少碳排放^[34-35]。

当前研究对钢铁碳达峰碳中和路径进行了量化分析,但多聚焦于单一行业的转型路径分析,鲜少涉及转型中的跨行业能源与碳排放转移问题探讨,尤其通过电氢耦合实现钢铁、电力协同转型还是一个前沿课题,走单一技术炼钢路径还是多元组合炼钢路径目前还缺乏系统的理论和量化数据支撑,同时也需进一步厘清不同转型发展模式背后的成本问题,从而遴选钢铁与电力行业低成本“双升级”路径。因此,本文旨在通过构建包含详细技术清单的自下而上的国家能源战略与规划-钢铁模型(National Energy Strategy and Alternatives Planning Model-Iron, NESAP-Iron),分情景探讨了我国钢铁行业转型发展路径、分工序碳排放路径以及与电力、制氢行业的碳转移关系,并遴选了电氢耦合下钢铁与电力行业低成本协同转型发展路径,为顶层设计钢铁与电力行业协同转型发展路径、制定相关保障政策提供支撑。

1 研究数据和方法

1.1 研究方法

1.1.1 NESAP-Iron模型

本文基于NESAP-Iron模型,对钢铁转型路径及成本进行分析。NESAP-Iron模型是自下而上的钢铁行业能源、经济与环境系统协同转型综合模型,包含能源、经济、环境三大系统,划分为社会经济需求驱动模块、能源消费模块、能源转化与供给模块、环境排放模块、水资源模块和自然碳汇等6个模块,可实现对钢铁生产过程中的能源、经济

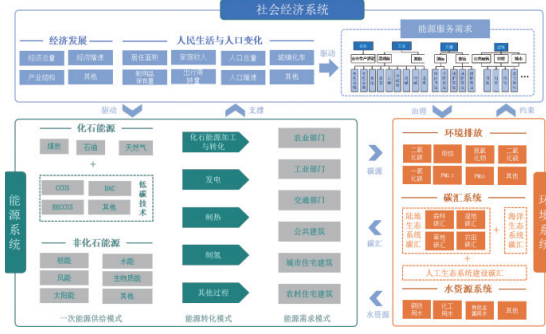


图1 钢铁行业 NESAP 模型框架

Fig.1 NESAP model framework for the steel industry

与环境系统的联动量化分析,优化遴选低碳能源转型情景路径,模型架构如图1所示。

NESAP-Iron模型以经济发展和人民生活水平提升为主要驱动因素,其中经济发展包含经济总量、经济增速、产业结构等。人民生活水平主要包含人均建筑面积、耐用品保有量、家庭收入、出行周转量等。社会经济持续发展和人民对美好生活的更高追求影响下,带来建筑、工业、交通、居民等部门的钢铁需求,由此驱动钢铁行业进行生产活动,从而产生煤炭、电力、天然气等能源消费活动,并产生环境排放。模型中的减碳措施主要包含工艺与能源结构升级节能降碳、人工固碳和自然碳汇。该模型还包含了钢铁行业满足社会经济活动需求的生产技术细节。基于我国钢铁工业生产工艺与工序特点,NESAP-Iron模型将钢铁生产工艺划分成长流程工艺和短流程工艺。长流程工艺炼钢主要包含焦化、烧结、炼铁、炼钢、轧钢等工序,其中炼铁工序又划分成高炉炼铁、电弧炉直接还原炼铁和氢基直接还原炼铁3种工艺过程,并包含了CCUS等固碳技术体系,炼钢工序分为转炉炼钢和电弧炉炼钢2种工艺过程;短流程工艺炼钢主要以废钢为主要原料,通过电弧炉直接冶炼得到成品钢。

1.1.2 钢铁产量、能源消费与碳排放计算方法

钢铁产品服务需求是能源消费的重要驱动因素,本文将钢铁产品需求场景具体细分为建筑、交通等,并采用自底向上的动态物质流分析法进行测算,其计算式为

$$AL = \sum_{i=1}^3 \alpha_i RF_i + \sum_{i=1}^n \beta_i TR_i + \gamma RE + Ex \quad (1)$$

式中: AL 为粗钢需求量; RF 为建筑面积增加量; TR 为交通工具增加量; RE 为家电产品增加量; Ex 为其它领域钢铁需求; α 、 β 、 γ 为建筑、交通和

家电等产品的用钢强度。本文进而根据钢铁生产水平与相应设备的能源强度计算得到能源消费量,计算过程为^[33]

$$EC_k = \sum_i \sum_j EI_{i,j} \times AL_{i,j} \times S_{i,j,k} \quad (2)$$

式中: EC_k 为钢铁行业 k 类能源总需求量; $EI_{i,j}$ 为 i 工序 j 设备的钢铁生产的能源强度; AL 为 i 工序 j 设备的钢铁生产水平; $S_{i,j,k}$ 为 i 工序 j 设备第 k 类能源品种的消费占比。

生产钢铁所采用的电力等能源在传输、分配过程中具有一定损失,损失量为^[36]

$$Loss_k = \frac{EC_k}{\eta_k} \times (1 - \eta_k) \quad (3)$$

式中: $Loss_k$ 为第 k 种能源的损失量; η_k 为能源传输效率。

在发电、制氢、制热等能源加工转换过程中存在一定损失,转换过程中损失和消耗的能源计算方法为

$$ET_k = \frac{EC_k + Loss_k}{\varphi_k} \times (1 - \varphi_k) \quad (4)$$

式中: ET_k 为 k 种能源加工转换的能源消费总量, φ_k 为第 k 种能源的加工转换效率。

能源需求总量可以通过终端能源需求、中间过程加工转换和损失量测算获得,其计算式为

$$E_k = EC_k + ET_k + Loss_k \quad (5)$$

式中: E_k 为第 k 种能源消费总量。本文基于排放系数法计算钢铁企业的 CO_2 排放量,其计算公式为

$$E_{CO_2} = \sum_i^n (E_i \times ef_i) \quad (6)$$

式中: E_{CO_2} 为二氧化碳排放量; E_i 为第 i 种能源消费量; ef_i 为 i 类能源的燃烧碳排放因子。

除能源燃烧外,钢铁生产中还会产生过程排放,通常采用钢铁产品产量与过程排放因子相乘的方法测算其计算式为

$$E_{CO_2}^{process} = AL \times ef^{process} \quad (7)$$

式中: $E_{CO_2}^{process}$ 为钢铁产品工业过程排放量; $ef^{process}$ 为钢铁产品工业过程排放因子,排放因子来自《2006年 IPCC 国家温室气体清单指南》。

1.1.3 减排成本评估方法

本文基于碳排放路径和成本参数,对不同情景路径下的钢铁行业转型成本进行定量测算,以对比分析不同路径下的减排效果及技术经济性,其中单位碳减排成本为^[37]

$$MC_n = \frac{TC_n^s - TC_n^b}{M_n^b - M_n^s} \quad (8)$$

式中： TC_n^s 为钢铁行业转型情景 s 中实施技术路径 n 所需的成本投入，包括投资成本、固定成本、生产成本等； TC_n^b 为基准情景中采用既定转炉炼钢技术路径 n 的成本投入； M_n^b 为基准情景累计 CO_2 减少量； M_n^s 为采用转型情景 s 中实施技术路径 n 的累计减排量； MC_n 为情景路径 n 的单位碳减排成本。

1.2 情景设计与数据来源

1.2.1 情景设计

宏观社会经济是我国钢铁需求和能源消费的驱动因素，因此，在NESAP-Iron模型中设定人口、经济增速、产业结构、能源结构目标等变量为我国钢铁消费的主要驱动边界，典型年份的边界参数设置见表1。人口趋势方面，本文结合我国生育率、死亡率、年龄结构等特征，并参考当前研究对整体发展趋势的研判，认为我国人口已经达到相对高峰，未来将呈现下降趋势，预计到2060年，人口降至12.8亿，城镇化率则呈现稳步上升趋势，但速度有所放缓，到2060年城镇人口占比达到77%左右。在模型中，人口与城镇化率参数主要用作家用电器用钢、居民建筑用钢和交通用钢的驱动因素。在经济发展速度方面，本文结合我国宏观经济规划，以及研究机构的相关研究成果，设定未来我国经济仍将呈现稳定增长趋势，但增速将阶段性放缓，预计2050—2060年，经济增速保持在3.5%左右，产业结构逐渐向三产转移，到2060年二产占比将降低至23.5%，经济参数主要用作商业与公共建筑用钢、工业用钢等的驱动因素。在整体的能源结构目标方面，设定以国家层面2030年碳达峰、2060年碳中和为主要目标，并根据我国发布的《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》等政策规划文件设定能源结构边界值。

表1 社会经济发展外生边界设定

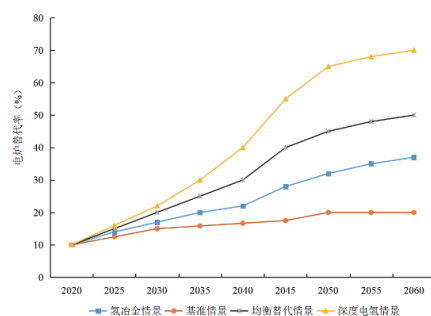
Table.1 Setting external boundaries for socio-economic development

参数	2030年	2035年	2050年	2060年
人口(亿)	14.3	14.0	13.1	12.8
GDP 增速	4.8%	4.5%	3.5%	3%
产业结构	6:35:59	5.4:28.1:66.5	3.5:24.1:72.3	2.5:23.5:74
城镇化率	65.0%	68.5%	75%	77%
能源结构目标	非化石能源消费占一次能源消费比重在2030年达到25%以上，2060年超过80%。			

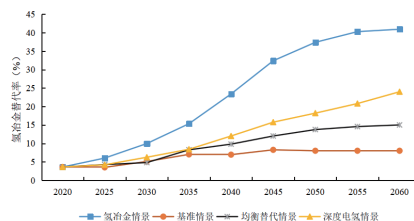
注：以上参数主要参考文献[25]等。

钢铁行业低碳转型的影响因素呈现多元性，如全社会钢铁消费需求、工艺结构、固碳技术等，其中工艺结构调整和能源电力清洁程度是影响其排放的关键因素^[38-41]。因此，本文以电氢耦合视角下的钢铁行业工艺结构调整和电力系统发电结构升级为关键考量，构建了基准情景、氢冶金情景、均衡发展情景和深度电氢4种典型情景，重点探讨不同技术路线下的钢铁行业能源转型路径、排放趋势及转型成本问题。

基准情景中，未来钢铁行业延续当前减排与转型发展节奏。钢铁行业继续延续传统转炉钢为主的工艺路线，突破性技术使用较晚，电炉钢与氢能冶金工艺替代速度缓慢，2060年分别为20%和8%（如图2所示），未来发电和氢气生产变得更清洁，到2060年，90%的可再生能源电力和75%的绿色氢气用于钢铁行业；氢冶金情景中，钢铁生产结构调整加速，氢能冶金技术实现突破式进展，技术路线以氢直接还原炼钢为主，电炉钢为辅，转炉钢逐渐淘汰，到2060年，氢直接还原炼钢、电炉钢的份额分别为41%和37%；发电和制氢主要以清洁方式进行，2060年可再生能源占80%~85%，绿氢占95%；均衡替代情景中，转炉钢、氢冶金与电炉钢实现了相对均衡式发展，2060年分别达到15%和50%^[22]。



(a) 电炉替代率



(b) 氢冶金替代率

图2 钢铁行业不同工艺的替代趋势

Fig.2 The trend of substitution of different processes in the steel industry

深度电氢情景中，钢铁生产结构加速调整，氢能冶金、电炉钢实现深度耦合替代，技术路线以电炉钢为主，氢直接还原炼钢为辅，转炉钢逐渐淘

汰。根据《工业领域碳达峰实施方案》电炉钢的替代规划进度，预计到2030年氢基竖炉直接还原铁、富氢碳循环高炉冶炼等技术取得突破应用，届时短流程电炉炼钢工艺占比将超20%，2060年氢直接还原炼钢、电炉钢的份额分别为24%和70%^[42]。

1.2.2 数据来源

本文应用的生铁和粗钢产量等现状年数据来自《中国钢铁统计年鉴》，未来钢铁产量预测数据主要参考文献[9, 22]。现状年钢铁能源消费总量及结构数据来自《中国能源统计年鉴》，现状年焦化、烧结、炼铁等工序的单位产品综合能耗主要参考《中国钢铁统计年鉴》，政策规划参数、氢能冶金能耗参数主要参考文献[32, 41–43]等，电炉钢、转炉钢工艺参数参考文献[44–45]等，未来各行业钢铁需求强度参考文献[13, 22]等，钢铁生产过程中焦化、烧结、球团、高炉炼铁、轧钢等工序的能源结构参数参考文献[46–47]等，并根据实地调研数据进行了参数更新校正。本文所需要的各类能源品种的碳排放因子主要参考政府间气候变化专门委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）所提供的全球平均水平参考值以及《省级温室气体清单编制指南》，钢铁工业过程排放因子主要参考《2006年IPCC国家温室气体清单指南》，转炉、电炉以及氢冶金成本参数参考文献[12,32]等，制氢成本计算排放参数见表2。

表 2 制氢经济成本及碳排放参数

Table.2 Economic cost and carbon emission parameters of hydrogen production				
种类	投资 (元/kW)	运营及维 护成本 /%	可变成 本 /%	CO ₂ 排放量 (kg CO ₂ /kg H ₂)
煤制氢	18 027	4~5	1	20.2
天然气制氢	6 144	4.0~4.7	1	8.9
工业副产品制氢	611	4	1	<5
电解水制氢	5 739	1.5~4.0	1	0

2. 结果与分析

2.1 钢铁产量预测分析

模型计算结果表明，受我国逐渐向高端制造业、服务业高质量转型和人口下滑影响，未来我国对钢铁需求量将呈现稳步下降趋势。其中建筑、重型机械等传统行业的钢铁需求量持续下降，钢铁需求逐渐向汽车、电力等行业转移。尤其是在新型电力系统建设背景下，风机、光伏等近中期

对钢材需求快速增长，但增幅有限。测算结果表明，2030—2045年是新能源快速发展期，到2045年新增风光装机的钢铁需求较2020年增长64%，占需求总量的2.2%，不会影响钢铁需求的下降趋势。预计到2060年，钢铁需求总量降至5.25亿t，较2020年下降48.8%。在钢铁产能方面，基准情景下延续当前转炉炼钢工艺，2060年产能占比达72%，氢冶金情景下重点发展氢能冶金工艺，到2060年氢能炼钢产量较基准情景提升4倍，均衡替代情景与深度电氢情景，短流程电炉炼钢产量最高，分别是基准情景1.5倍和2.5倍。

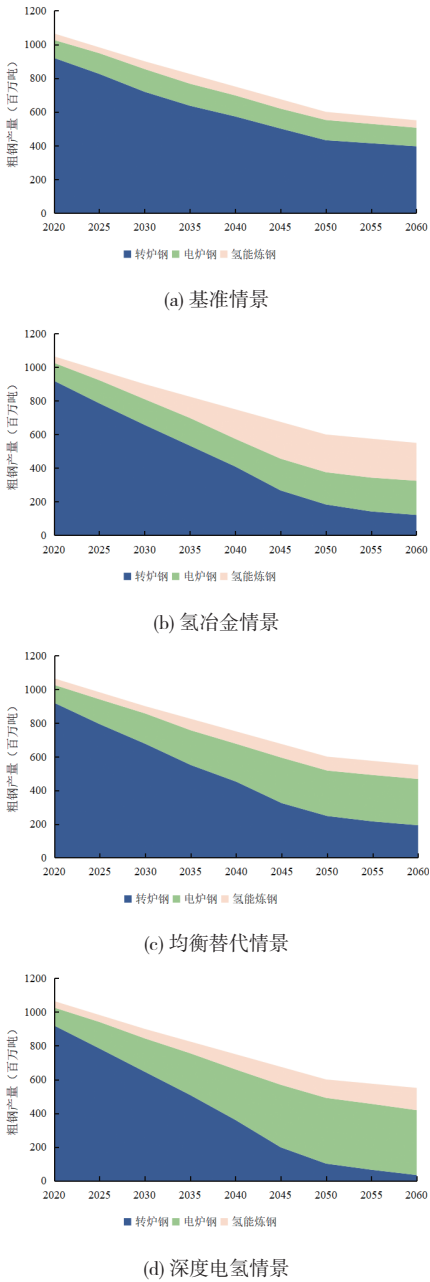


图 3 不同情景下钢铁行业粗钢生产结构趋势
Fig.3 Trends in crude steel production structure in the steel industry under different scenarios

2.2 碳排放量预测分析

整体而言,我国钢铁行业碳排放已实现达峰,未来将呈现持续下降趋势,不同工艺结构升级与减碳措施组合影响下,到2060年碳排放较基准情景可下降42%~72%,钢铁行业整体排放趋势如图4所示。基准情景下,钢铁行业CO₂直接排放量整体呈现下降趋势,但相较于其他情景排放量较高,到2060年CO₂直接排放降至4.8亿t。深度电氢替代情景下,CO₂排放量最低,到2060年排放量较基准情景下降72.0%,氢能情景与均衡发展情景排放趋势介于两者之间。

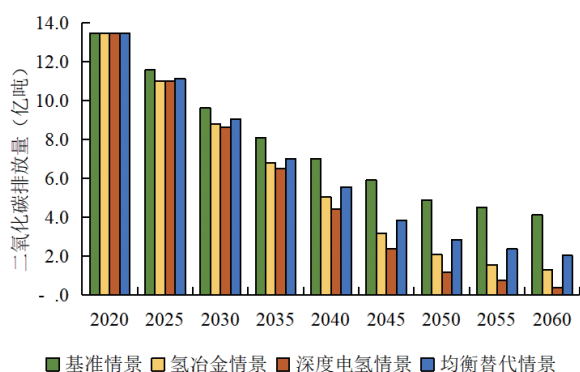


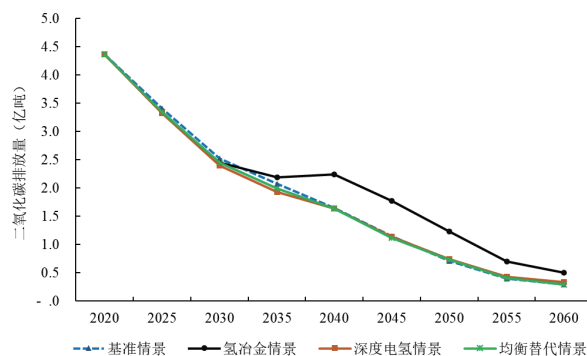
图4 不同情景下我国钢铁行业碳排放趋势

Fig.4 Carbon emission trends in China's steel industry under different scenarios

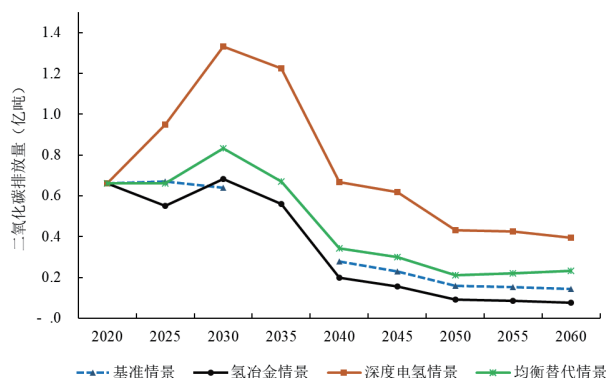
钢铁行业间接碳排放主要包含电力和氢能间接排放,其中电力间接排放最高。整体而言,钢铁行业的电力间接排放呈现下降趋势,如图5a所示。基准情景下,电能替代进程较为缓慢,叠加产量稳步下降、发电结构持续优化等因素影响,电力间接碳排放相较于其他情景最低,且在钢铁总排放中的占比呈现下降趋势,到2060年,排放占比下降至6%;如图5b所示,氢能间接排放呈现较低水平,2030年为峰值平台期,CO₂排放量稳定在0.7亿t左右,2030年后呈现下降趋势。

钢铁行业电力间接排放占比方面,转型情景的电力间接排在钢铁总体排放占比中呈现先升后降趋势。其中,均衡替代在2040年左右占比达到峰值,之后稳步下降,如图6所示。氢冶金与均深度电氢情景下,电力间接排放占比推迟至2050年达到峰值,占比达到33%。远期来看,随着电力、氢能生产的深度清洁化,电力间接排放呈现下降趋势^[48]。其中电力行业加装CCUS等固碳设备后,2060年深度电氢情景下电力排放可降低76.9%,几乎可以实现净零排放。因此,在高电力、氢能应用

场景下,电力是否清洁直接影响着钢铁行业低碳转型效果。



(a) 钢铁行业电力间接排放趋势



(b) 钢铁行业氢能间接排放趋势

图5 不同情景下我国钢铁行业间接碳排放趋势

Fig.5 Indirect carbon emissions trends in China's steel industry under different scenarios

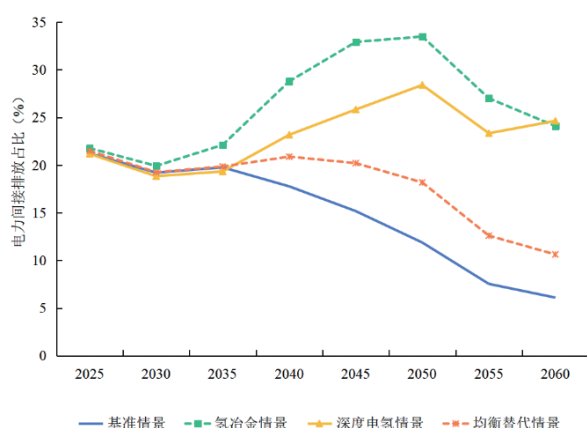


图6 钢铁行业电力间接CO₂排放占比趋势

Fig.6 Trend of indirect CO₂ emissions from electricity in the steel industry

在钢铁各工序排放方面,炼铁、焦化及轧钢工序的排放占比最大,如图7所示。中长期来看,随着电炉炼钢与氢冶金技术占比逐渐提升,炼铁工序

的CO₂排放占比呈现稳步下降趋势，电炉炼钢工序排放量占比呈现上升趋势。深度节能炼钢技术下，转炉炼钢可以实现能源回收利用，同时释放余热供其他环节使用，因此炼钢工序CO₂排放量为负值。

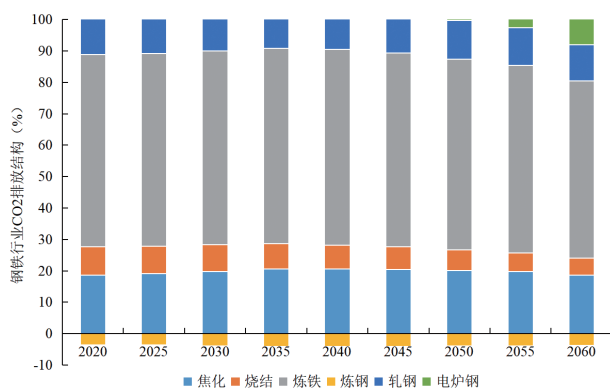


图7 深度电氢情景下钢铁行业CO₂排放结构

Fig.7 CO₂ emission structure of the steel industry under deep electric hydrogen scenario

2.3 边际碳减排成本分析

本文基于边际成本测算方法，研究了不同技术组合情景下的边际减排成本发展趋势，如图8所示。氢冶金情景下，边际减排成本整体呈现倒U趋势，且高于其他情景。近中期，随着氢冶金技术渗透率逐渐提升，整体的碳减排成本呈现上升趋势，到2035年达到峰值1296元/t，之后随着氢能成本的下降，边际减排成本有所回落，到碳中和阶段，边际减排成本降至762元/t，较基准情景累计减碳46亿t。

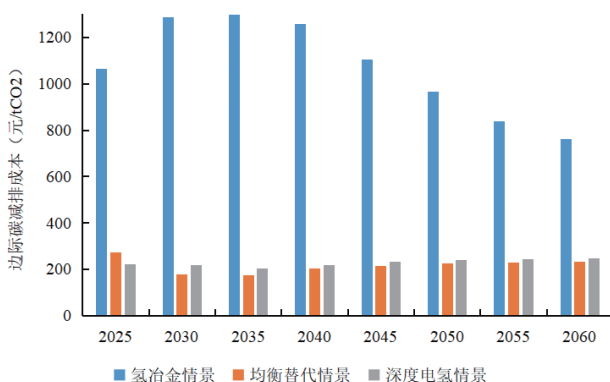


图8 不同情景下钢铁行业碳减排成本趋势

Fig.8 Cost Trends of Carbon Reduction in the Steel Industry under Different Scenarios

均衡替代情景下，边际减排成本整体呈现U趋势。该技术组合场景下，近中期主要以电炉钢技术路线为主，中长期氢冶金逐渐介入。由于近中期

电能替代具有较高的减碳潜力，且技术成本并未实现突破式上升，因此边际减碳成本呈现下降趋势，到2035年边际成本为176元/t，之后随着氢冶金和电能替代的深度介入，边际减排成本呈现上升趋势，到碳中和阶段，边际减排成本升至235元/t，较基准情景累计减碳54亿t，减排潜力及成本在各情景中处于中等水平。

深度电氢情景下，边际减排成本最低。该情景下主要以电炉钢技术路线为主，氢冶金逐渐介入。由于近中期电能替代具有较高的减碳潜力，且技术成本并未实现突破式上升，因此边际减碳成本呈现下降趋势，到2035年边际成本为204元/t，较基准情景累计减碳12.6亿t，到2060年，边际减排成本升至249元/t。整体而言，在各情景中该路径在前期减排潜力最大、经济性最高，后期成本略高于均衡替代情景，但整体是较优的减排方案。

3. 结论

本文基于自下而上的NESAP-Iron模型，分情景对比分析了钢铁行业能源转型过程中能源需求、能源结构和碳排放演化趋势，识别了由钢铁转型引起的电力、氢能间接能源投入与碳转移量，并量化分析了多元组合炼钢路径的减碳潜力和转型成本，为遴选电氢耦合下的钢铁与电力行业的协同转型路径提供了数据参考，主要研究结论如下：

1) 钢铁行业直接碳排放呈现下降趋势，由电能与氢能替代引起的电力与氢能的间接排放是影响“双碳”目标的重要因素。各情景中，直接排放与电力间接排放均呈现稳步下降趋势，但随着电能替代逐渐深入，电力间接排放占比呈现持续上升趋势，到2050年占比达到33%；近期氢能间接排放呈现快速上升趋势，其中激进氢能替代的氢冶金情景下，2030年CO₂间接排放量达到1.3亿t左右。因此，在高电力、氢能应用场景下，电氢能否实现清洁绿色耦合直接影响着钢铁行业低碳转型效果。

2) 钢铁行业转型发展情景的边际碳减排成本呈现U型趋势，其中电炉炼钢与氢冶金技术组合是未来钢铁行业的优选转型路径。近中期电能替代具有较高的减碳潜力，且技术成本较低，因此边际减碳成本呈现下降趋势，中远期随着氢冶金和电能替代的深度介入，边际减排成本呈现上升趋势。通过情景对比分析发现，深度电氢发展情景具有较高的节能降碳效果，同时边际减排成本较低，是较为

推荐的优选发展场景。

4. 政策建议

1) 进一步加强钢铁转型发展的顶层设计。研究表明,不同政策导向与工艺选择会导致迥异的能源需求、碳排放路径及减排成本,部分情景对氢能、电能供应安全保障要求极高。为此,需要进一步明确钢铁行业转型发展的顶层思路与工艺路径,分阶段明确工艺替代规模、技术路径,突出创新驱动引领,强化高端材料、绿色低碳工艺技术应用。

2) 推进电氢耦合模式下的电力与钢铁行业耦合协同发展,提高电力、氢能供应适配性、有效性。电力行业的快速清洁转型可有力推动钢铁行业用能方式的绿色清洁化和低碳化,大幅降低间接排放,同时钢铁行业的高强度用能需求也将成为促进新能源消纳的重点领域。因此,应注重统筹推进协同减污降碳,可在新能源富集基地附近,积极探索电氢耦合模式下的钢铁与电力行业协同发展策略,促进可再生能源消纳模式与钢铁行业用能方式的双重升级变革。

3) 加强电氢替代,鼓励电炉钢与氢能冶金组合发展模式置换长流程炼钢。未来电气化、氢能化生产工艺将是未来钢铁转型的重要特征,必然会带来钢铁等行业用能方式的变革,成为新质生产力的重要物质驱动力。因此,需加快对电炉炼钢、氢能冶金组合发展路径的政策支持,促进关键技术创新,为低成本电力冶炼、氢能冶金技术的推广应用提前做好技术储备,有序引导电炉炼钢、氢能炼钢发展,同时加大废钢回收利用等循环经济支持力度,推动绿色循环可持续发展。

参考文献

- [1] 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 Y M, YU B Y, TANG B J, 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.
- [2] 许洪华,邵桂萍,鄂春良,等.我国未来能源系统及能源转型现实路径研究[J].发电技术,2023,44(4):484-491.
XU H H, SHAO G P, E C L, et al. Research on China's future energy system and the realistic path of energy transformation[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(4): 484-491.
- [3] 胡山鹰,金涌,张臻烨.发展新质生产力,实现碳中和[J].发电技术,2025,46(1):1-8.
HU S Y, JIN Y, ZHANG Z Y. Developing new quality productive forces to achieve carbon neutrality[J]. Power Generation Technology, 2025, 46(1): 1-8.
- [4] 邹风华,朱星阳,殷俊平,等.“双碳”目标下建筑能源系统发展趋势分析[J].综合智慧能源,2024,46(8):36-40.
ZOU F H, ZHU X Y, YIN J P, et al. Development trend analysis on building energy systems under “dual carbon” target[J]. Integrated Intelligent Energy, 2024, 46(8): 36-40.
- [5] DONG J C, CAI B F, ZHANG S H, et al. Closing the gap between carbon neutrality targets and action: technology solutions for China's key energy-intensive sectors[J]. Environmental Science & Technology, 2023, 57(11): 4396-4405.
- [6] 赵长红,张李琳,邵云姝,等.发电上市公司低碳信息披露与低碳转型效率研究[J].发电技术,2024,45(6):1121-1134.
ZHAO C H, ZHANG L L, SHAO Y S, et al. Research on low carbon information disclosure and low carbon transition efficiency of listed power generation companies[J]. Power Generation Technology, 2024, 45(6): 1121-1134.
- [7] 杨阳,杨东泰,张超群,等.双碳背景下火电厂低碳化改造技术路径及经济分析[J].电力科技与环保,2025,41(1):13-26.
YANG Y, YANG D T, ZHANG C Q, et al. Tech-economic and carbon emissions analysis of net zero emissions technologies under the background of carbon peaking and carbon neutrality[J]. Electric Power Environmental Protection, 2025, 41(1): 13-26.
- [8] 张琦,田硕硕,沈佳林.中国钢铁行业碳达峰碳中和时间表与路线图[J].钢铁,2023,58(9):59-68.
ZHANG Q, TIAN S S, SHEN J L. Roadmap and timetable for achieving carbon peak and carbon neutrality of China's iron and steel industry[J]. Iron & Steel, 2023, 58(9): 59-68.
- [9] 薛英岚,张静,刘宇,等.“双碳”目标下钢铁行业控煤降碳路线图[J].环境科学,2022,43(10):4392-4400.
XUE Y L, ZHANG J, LIU Y, et al. Roadmap of coal control and carbon reduction in the steel industry under the carbon peak and neutralization target[J]. Environmental

- Science, 2022, 43(10): 4392–4400.
- [10] 刘惠, 蔡博峰, 张立, 等. 中国电力行业 CO₂减排技术及成本研究 [J]. 环境工程, 2021, 39(10): 8–14.
LIU H, CAI B F, ZHANG L, et al. Research on carbon dioxide abatement technologies and cost in China's power industry[J]. Environmental Engineering, 2021, 39(10): 8–14.
- [11] 罗玉伶, 彭道刚, 赵慧荣, 等. 面向高耗能企业铝加工过程的节能减碳潜力评价及画像研究 [J]. 综合智慧能源, 2024, 46(8): 1–11.
LUO Y L, PENG D G, ZHAO H R, et al. Evaluation on energy-saving and carbon-reduction potential of aluminum processing in high-energy-consuming enterprises and their profiles[J]. Integrated Intelligent Energy, 2024, 46(8): 1–11.
- [12] 董金池, 汪旭颖, 蔡博峰, 等. 中国钢铁行业 CO₂减排技术及成本研究 [J]. 环境工程, 2021, 39(10): 23–31.
DONG J C, WANG X Y, CAI B F, et al. Mitigation technologies and marginal abatement cost for iron and steel industry in China[J]. Environmental Engineering, 2021, 39(10): 23–31.
- [13] CHEN H T, ZHANG B, WANG Z H. Hidden inequality in household electricity consumption: Measurement and determinants based on large-scale smart meter data[J]. China Economic Review, 2022, 71: 101739.
- [14] 张杰, 李强, 基于 CGE 模型的高炉 + 转炉炼钢企业碳减排效益评价研究 [J]. 工业加热, 2023, 52(12): 43–47+51.
ZHANG J, LI Q. Research on carbon emission reduction benefit evaluation of blast furnace + converter steel enterprises based on CGE model[J]. Industrial Heating, 2023, 52(12): 43–47+51.
- [15] 李晨光, 王帅, 郭雨蕙. 碳中和背景下钢铁行业低碳转型发展政策工具与路径分析: 基于动态 CGE 模型的模拟研究 [J]. 经济问题探索, 2023(1): 34–59.
LI C G, WANG S, GUO Y H. Analysis of policy tools and pathways for low-carbon transformation development of iron and steel industry: a simulation study based on dynamic CGE model[J]. Inquiry into Economic Issues, 2023(1): 34–59.
- [16] 李志俊, 原鹏飞. 去产能战略的影响评价及建议: 基于动态 CGE 模型的研究 [J]. 中国软科学, 2018(1): 10–18.
LI Z J, YUAN P F. Evaluation and route of overcapacity cutting: analysis based on dynamic computable general equilibrium model[J]. China Soft Science, 2018(1): 10–18.
- [17] JIANG H D, HAO W T, XU Q Y, et al. Socio-economic and environmental impacts of the iron ore resource tax reform in China: a CGE-based analysis[J]. Resources Policy, 2020, 68: 101775.
- [18] 张攀路, 都沁军, 张凯旋, 等. 中国钢铁行业碳排放: 达峰情景与中和路径 [J]. 环境科学, 2024, 45(11): 6336–6343.
ZHANG P L, et al. Carbon emissions in China's iron and steel industry: Peak scenarios and neutralization pathways[J]. Environmental Science, 2024, 45(11): 6336–6343.
- [19] 魏宁, 刘胜男, 李桂菊, 等. CCUS 对中国粗钢生产的碳减排潜力评估 [J]. 中国环境科学, 2021, 41(12): 5866–5874.
WEI N, LIU S N, LI G J, et al. Mitigation potential evaluation of CO₂ capture and storage in crude steel industries of China[J]. China Environmental Science, 2021, 41(12): 5866–5874.
- [20] 宋亚植, 李银, 李仲飞. 基于产出效率的中国钢铁行业碳配额分配方案 [J]. 资源科学, 2023, 45(2): 333–343.
SONG Y Z, LI Y, LI Z F. Carbon quota scheme for China's iron and steel industry based on output efficiency[J]. Resources Science, 2023, 45(2): 333–343.
- [21] 齐绍洲, 徐珍珍, 杨芷萱. 欧盟碳边境调节机制下中国钢铁行业的碳配额分配策略 [J]. 资源科学, 2022, 44(2): 274–286.
QI S Z, XU Z Z, YANG Z X. Carbon allowance allocation strategy in China's steel industry under the EU carbon border adjustment mechanism[J]. Resources Science, 2022, 44(2): 274–286.
- [22] LIU D C, WANG P, SUN Y, et al. Co-abatement of carbon and air pollutants emissions in China's iron and steel industry under carbon neutrality scenarios[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024, 191: 114140.
- [23] 逯飞, 薛英岚, 李梧森, 等. 双碳目标下河北钢铁行业减污降碳路径探讨 [J]. 环境工程, 2023, 41(S2): 332–336.
LU F, XUE Y L, LI W S, et al. Discussion on the path of pollution reduction and carbon reduction in Hebei iron and steel industry under the dual carbon target[J]. Environmental Engineering, 2023, 41(S2): 332–336.
- [24] 邹安全, 罗杏玲, 全春光. 基于 EIO-LCA 的钢铁产品生命周期碳排放研究 [J]. 管理世界, 2013, 29(12): 178–179.
ZOU A Q, LUO X L, QUAN C G. Research on life cycle carbon emissions of steel products based on EIO-LCA[J]. Management World, 2013, 29(12): 178–179.
- [25] 禹湘, 姜峰, 谭畅. 基于 CIE-CEAM 模型的中国工

- 业“双碳”路径模拟[J]. 中国人口·资源与环境, 2022, 32(7): 49–56.
- YU X, LOU F, TAN C. A simulation study of the pathway of achieving the ‘dual carbon’ goals in China’s industrial sectors based on the CIE–CEAM Model[J]. China Population, Resources and Environment, 2022, 32(7): 49–56.
- [26] LI R, TANG B J, SHEN M, et al. Low-carbon development pathways for provincial-level thermal power plants in China by mid-century[J]. Journal of Environmental Management, 2023, 342: 118309.
- [27] 张静, 杨萌, 张伟, 等. “双碳”背景下河南省电力行业中长期控煤降碳路径[J]. 环境科学, 2024, 45(3): 1285–1292.
- ZHANG J, YANG M, ZHANG W, et al. Coal control and carbon reduction path in Henan Province’s power industry under the carbon peak and neutralization target: a medium-and long-term study[J]. Environmental Science, 2024, 45(3): 1285–1292.
- [28] 段文娇, 郎建垒, 程水源, 等. 京津冀地区钢铁行业污染物排放清单及对PM_{2.5}影响[J]. 环境科学, 2018, 39(4): 1445–1454.
- DUAN W J, LANG J L, CHENG S Y, et al. Air pollutant emission inventory from iron and steel industry in the Beijing–Tianjin–Hebei Region and its impact on PM_{2.5}[J]. Environmental Science, 2018, 39(4): 1445–1454.
- [29] REN M, LU P T, LIU X R, et al. Decarbonizing China’s iron and steel industry from the supply and demand sides for carbon neutrality[J]. Applied Energy, 2021, 298: 117209.
- [30] 邢晓雯, 黄琳, 胡建林. 江苏省电力行业不同低碳发展路径的二氧化碳与大气污染物协同减排效益分析[J]. 环境科学, 2024, 45(11): 6326–6335.
- XING X W, HUANG L, HU J L. Co-benefits of CO₂ and air pollutant reduction under different low-carbon development pathways in Jiangsu’s power industry[J]. Environmental Science, 2024, 45(11): 6326–6335.
- [31] 宋晓聪, 杜帅, 邓陈宁, 等. 钢铁行业生命周期碳排放核算及减排潜力评估[J]. 环境科学, 2023, 44(12): 6630–6642.
- SONG X C, DU S, DENG C N, et al. Life cycle carbon emission accounting and emission reduction potential assessment of steel industry[J]. Environmental Science, 2023, 44(12): 6630–6642.
- [32] FAN Z Y, FRIEDMANN S J. Low-carbon production of iron and steel: Technology options, economic assessment, and policy[J]. Joule, 2021, 5(4): 829–862.
- [33] CHEN H T, WANG Z H, XU S, et al. Energy demand, emission reduction and health co-benefits evaluated in transitional China in a 2 °C warming world[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 264: 121773.
- [34] CAO J X, ZHANG J, CHEN Y, et al. Current status, future prediction and offset potential of fossil fuel CO₂ emissions in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 426: 139207.
- [35] 单思珂, 刘含笑, 刘美玲, 等. 我国火电行业碳足迹评估综述[J]. 发电技术, 2024, 45(4): 575–589.
- SHAN S K, LIU H X, LIU M L, et al. Review of carbon footprint for thermal power industry in China[J]. Power Generation Technology, 2024, 45(4): 575–589.
- [36] 吴琼, 马昊, 任洪波, 等. 基于LEAP模型的临港新片区中长期碳排放预测及减排潜力分析[J]. 环境科学, 2024, 45(2): 721–731.
- WU Q, MA H, REN H B, et al. Medium and long-term carbon emission projections and emission reduction potential analysis of the Lingang special area based on the LEAP model[J]. Environmental Science, 2024, 45(2): 721–731.
- [37] 耿直, 陈柯宇, 刘媛媛, 等. 太阳能与燃气-蒸汽联合循环互补性能分析[J]. 综合智慧能源, 2023, 45(12): 79–86.
- GENG Z, CHEN K Y, LIU Y Y, et al. Complementarity analysis of solar energy and gas turbine combined cycle[J]. Integrated Intelligent Energy, 2023, 45(12): 79–86.
- [38] 刘清梅, 张福明. 钢铁工业减碳与CO₂资源化利用技术的研究进展[J]. 钢铁, 2024, 59(2): 13–24.
- LIU Q M, ZHANG F M. Research progress of carbon reduction and CO₂ resource technology utilization in iron and steel industry[J]. Iron & Steel, 2024, 59(2): 13–24.
- [39] 张贤, 李凯, 马乔, 等. 碳中和目标下CCUS技术发展定位与展望[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(9): 29–33.
- ZHANG X, LI K, MA Q, et al. Orientation and prospect of CCUS development under carbon neutrality target[J]. China Population, Resources and Environment, 2021, 31(9): 29–33.
- [40] 郑励行, 董耿林, 汪鹏, 等. 钢铁行业氢冶金技术的替代潜力与经济性分析: 以广东为例[J]. 新能源进展, 2023, 11(6): 583–592.
- ZHENG L X, DONG G L, WANG P, et al. Substitution potential and economic analysis of hydrogen metallurgy technology in iron and steel industry: a case study of Guangdong Province[J]. Advances in New and Renewable Energy, 2023, 11(6): 583–592.

- [41] 朱法华, 徐静馨. 双碳背景下中国与主要发达国家电力低碳转型比较 [J]. 电力科技与环保, 2024, 40(6): 561–571.
ZHU F H, XU J X. Comparison of low-carbon transformation in electricity between China and major developed countries under the background of carbon peaking and carbon neutrality[J]. Electric Power Environmental Protection, 2024, 40(6): 561–571.
- [42] LI Z L, HANAOKA T. Plant-level mitigation strategies could enable carbon neutrality by 2060 and reduce non-CO₂ emissions in China's iron and steel sector[J]. One Earth, 2022, 5(8): 932–943.
- [43] WANG Z H, CHEN H T, HUO R, et al. Marginal abatement cost under the constraint of carbon emission reduction targets: an empirical analysis for different regions in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 249: 119362.
- [44] 中国钢铁工业协会电炉短流程炼钢发展研究课题组. 我国电炉短流程炼钢发展研究 [J]. 冶金管理, 2023(20): 4–20.
Research Group on the Development of Electric Furnace Short Process Steelmaking of China Iron and Steel Industry Association. Research on the development of electric furnace short process steelmaking in China[J]. China Steel Focus, 2023(20): 4–20.
- [45] 富志生. 转炉炼钢工序能耗计算与分析 [J]. 冶金能源, 2010, 29(4): 15–17, 33.
FU Z S. Converter steelmaking process calculation and analysis of energy consumption[J]. Energy for Metallurgical Industry, 2010, 29(4): 15–17, 33.
- [46] 张福明, 颀建新, 殷瑞钰. 钢铁制造流程炼铁区段耗散结构的解析 [J]. 钢铁, 2022, 57(3): 1–9.
ZHANG F M, XIE J X, YIN R Y. Analysis on dissipative structure of ironmaking procedure for iron and steel manufacturing process[J]. Iron & Steel, 2022, 57(3): 1–9.
- [47] 刘泽森, 谢志辉, 张泽龙, 等. 焦化工序能耗及二氧化碳排放量计算与参数影响 [J]. 钢铁研究, 2016, 44(2): 1–4+40.
LIU Z M, XIE Z H, ZHANG Z L, et al. Calculation of energy consumption and CO₂ emission and investigation of the parameter influences for coking process[J]. Research on Iron and Steel, 2016, 44(2): 1–4+40.
- [48] 王志轩. 碳达峰、碳中和目标实现路径与政策框架研究 [J]. 电力科技与环保, 2021, 37(3): 1–8.
WANG Z X. Research on the pathway and policy framework of achieving carbon peak and carbon neutrality[J]. Electric Power Environmental Protection, 2021, 37(3): 1–8.

收稿日期: 2025-03-07。

作者简介:



樊茂

许爽 (1992), 女, 博士, 讲师, 研究方向为低碳经济, xushuang8510@163.com。



陈海涛

陈海涛 (1991), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为能源经济与复杂系统建模, htchenn@163.com。

(责任编辑 树相)