

中国钢铁行业二氧化碳排放达峰路径研究

汪旭颖¹, 李冰^{2*}, 吕晨¹, 管志杰², 蔡博峰¹, 雷宇^{1*}, 严刚¹

1. 生态环境部环境规划院, 北京 100012

2. 冶金工业规划研究院, 北京 100013

摘要: 钢铁行业是我国重要的 CO₂ 排放源. 作为典型的资源能源密集型产业, 钢铁行业加快绿色低碳转型、尽早实现碳达峰并有效降碳, 既是行业自身高质量发展的内在需要, 也是支撑落实国家碳达峰、碳中和目标的客观要求. 本文综合考虑经济社会发展、资源能源利用、工艺结构调整、低碳技术应用等因素影响, 开展了基于情景分析的钢铁行业 CO₂ 排放达峰路径研究, 对不同情景下钢铁行业 CO₂ 的排放趋势进行测算, 识别钢铁行业 CO₂ 减排的主要驱动因素, 判断推动钢铁行业碳排放达峰的关键举措, 为制定“双碳”目标背景下钢铁行业 CO₂ 排放控制策略提供参考. 测算结果表明, 我国钢铁行业 CO₂ 总排放量有望在 2020—2024 年期间达到峰值; 行业 CO₂ 总排放量峰值为 18.1×10⁸~18.5×10⁸ t, 达峰后到 2030 年降幅将超过 3×10⁸ t. 研究显示, 粗钢产量是决定我国钢铁行业碳排放能否快速达峰的关键, 加大废钢资源利用、推进外购电力清洁化以及提高系统能效水平是 2030 年前钢铁行业实现碳排放达峰并有效降碳的重要途径. 到 2030 年, 粗钢产量降低、加大废钢资源利用、推进外购电力清洁化、提高系统能效水平以及氢能炼钢和二氧化碳捕集、利用与封存 (CCUS) 等前沿技术对钢铁行业 CO₂ 减排的贡献率分别为 11%~52%、34%~52%、7%~20%、5%~13% 和 2%~3%.

关键词: 碳达峰; 情景分析; 排放预测; 驱动力; 控制路径

中图分类号: X22

文章编号: 1001-6929(2022)02-0339-08

文献标志码: A

DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2021.11.11

China's Iron and Steel Industry Carbon Emissions Peak Pathways

WANG Xuying¹, LI Bing^{2*}, LÜ Chen¹, GUAN Zhijie², CAI Bofeng¹, LEI Yu^{1*}, YAN Gang¹

1. Chinese Academy of Environmental Planning, Beijing 100012, China

2. China Metallurgical Industry Planning and Research Institute, Beijing 100013, China

Abstract: The iron and steel industry is an important carbon dioxide (CO₂) emission source in China. As a typical resource and energy-intensive industry, accelerating low-carbon transformation and peaking carbon emissions is not only the high-quality development demand for the industry, but also the objective requirements for achieving carbon peak and carbon neutrality. Considering the influence of economic and social development, resource and energy utilization, process structure adjustment, low-carbon technology application and other factors, we carried out an integrated scenario study on CO₂ emission peak path of the iron and steel industry by calculating the CO₂ emission trends of the industry under different scenarios, analyzing the main driving factors of CO₂ emission reduction, and identifying the key measures to promote the carbon emission peak of the iron and steel industry. The research results can provide support for policy making on carbon emission control of the industry under the target of carbon peak and carbon neutrality. Based on the calculation results of this study, the total CO₂ emissions of the iron and steel industry in China may reach an inflection point in 2020-2024. The peak values of total CO₂ emissions of the industry are about 18.1×10⁸-18.5×10⁸ t. After reaching the peak, the total CO₂ emissions of the industry may decrease by more than 3×10⁸ t by 2030. The assessment results indicate that the production of crude steel is the key factor to determine whether the carbon emissions of China's iron and steel industry can peak quickly. Meanwhile, increasing the utilization of scrap resources, promoting cleanness of purchased electricity, and improving the energy efficiency of the system are important ways for the industry to

收稿日期: 2021-09-06

修订日期: 2021-11-04

作者简介: 汪旭颖 (1989-), 女, 河北唐山人, 助理研究员, 博士, 主要从事排放清单开发、大气环境管理、温室气体与大气污染物协同控制等研究, wangxy@caep.org.cn.

* 责任作者: ①李冰 (1977-), 女, 辽宁沈阳人, 正高级工程师, 硕士, 主要从事钢铁行业节能低碳研究, libing@mpi1972.com; ②雷宇 (1980-), 男, 四川攀枝花人, 研究员, 博士, 主要从事大气环境规划、大气环境管理、能源及大气污染控制策略等研究, leiyu@caep.org.cn

基金项目: 中国工程院战略研究与咨询项目 (No.2021-HYZD-14); 国家自然科学基金项目 (No.72074154)

Supported by Strategic Research and Consulting Project of Chinese Academy of Engineering (No.2021-HYZD-14); National Natural Science Foundation of China (No.72074154)

peak carbon emissions and achieve emission mitigation effectively before 2030. Based on our estimates, by 2030, the contribution of decrease of crude steel production, increasing scrap resource utilization, promoting clean electricity use, improving energy efficiency, and applying cutting-edge low carbon technologies such as H₂-DRI and CCUS will contribute to about 11%-52%, 34%-52%, 7%-20%, 5%-13% and 2%-3% of the CO₂ emission reductions for the industry, respectively.

Keywords: peak carbon emissions; scenario analysis; emission estimation; driving force; control strategy

钢铁行业是国民经济和社会发展的重要基础产业,也是我国重要的 CO₂ 排放源^[1-3]. 新中国成立以来,我国钢铁行业实现了跨越式发展,在现代化建设进程中发挥了不可替代的支撑和推动作用. 尤其是 2000 年以来,我国钢铁行业迅猛发展,产品产量快速增长. 2000 年以来的国家统计局年鉴数据显示,我国粗钢、生铁产量年均增速分别为 11.1%、10.0%, 2020 年产量分别达到 10.65×10⁸、8.9×10⁸ t^[4];我国粗钢产量在全球总产量中的占比从 15% 增至 57%,生铁产量占比从 23% 增至 63%^[5]. 由于规模体量大和其生产工艺特性^[6],我国钢铁行业 CO₂ 排放贡献突出. 据测算,我国钢铁行业能源活动中 CO₂ 排放量占全国 CO₂ 排放量的 15% 左右^[1,7-9],是仅次于电力行业的碳排放大户.

“十一五”以来,我国积极在钢铁行业推行节能减排战略,尤其是“十三五”时期,钢铁行业深入推进供给侧结构性改革,节能降耗、超低改造等工作取得了积极进展,吨钢综合能耗持续下降. 中国钢铁工业协会统计数据显示,2020 年,我国重点钢铁企业吨钢综合能耗为 545.27 kg/t(以标准煤计),比 2015 年下降了 4.9%. 尽管如此,当前我国钢铁行业作为资源能源密集型产业的属性仍未改变. 长期以来,我国钢铁行业生产方式以长流程炼钢为主,对铁矿石资源以及煤炭、焦炭等能源高度依赖,导致资源能源消耗突出. 2020 年,我国电炉钢产量占粗钢产量的比例仅为 10% 左右,相较于美国 (71%)、欧盟 (42%) 以及全球平均水平 (26%) 存在较大差距;炼钢废钢比仅为 22%,也显著低于美国、欧盟、日本等发达国家和地区的水平 (30%~70%).

面对实现 2030 年前碳达峰和 2060 年前碳中和的总体要求,国内资源和环境约束将逐步趋紧,加之全球绿色竞争主力主导权争夺日趋激烈,我国钢铁行业传统的资源能源密集型生产方式正面临严峻挑战. 同时,多项研究^[10-16]表明,作为世界上最大的钢铁生产和消费国,我国钢铁行业未来仍将保持较高位运行,给碳排放控制进一步带来压力,行业绿色低碳转型已迫在眉睫. 一些基于资源能源视角的钢铁行业发展预测和研究^[8-9,17]表明,未来我国废钢资源供给将逐步增加,有利于推动钢铁行业生产结构进一步调整,电炉钢占比将逐步提升,钢铁行业 CO₂ 排放量可显著

下降. 此外,近年来关于氢能炼钢和二氧化碳捕集、利用与封存 (CCUS) 等技术的讨论逐渐增多^[18-26],为未来钢铁行业低碳乃至零碳发展提供了展望空间. Ren 等^[2]通过将可计算一般均衡 (CGE) 模型与自下而上的技术选择模块相结合,以我国钢铁行业 2050 年实现碳中和为目标,对行业低碳转型路径进行了研究,认为长期来看颠覆性技术的应用、电炉钢占比的提升以及能源供应部门的低碳化发展将对行业碳减排起到重要作用. 李新创等^[27]基于 2 °C 和 1.5 °C 的全球温控目标,从降低需求、能效提升、创新工艺等方面分别对我国钢铁行业低碳转型路径进行了分析,并预测了不同路径的减排贡献.

钢铁行业加快绿色低碳转型、尽早实现碳达峰并有效降碳,既是行业自身高质量发展的内在需要,也是支撑落实国家碳达峰、碳中和目标的客观要求. 该文开展基于情景分析的钢铁行业 CO₂ 排放达峰路径研究,综合考虑经济社会发展、资源能源利用、工艺结构调整、低碳技术应用等因素影响,测算了我国钢铁行业 CO₂ 未来排放趋势,分析了影响钢铁行业碳排放的主要驱动因素,识别了推动钢铁行业碳排放尽早达峰的关键举措,以期制定国家碳达峰、碳中和总体要求下的钢铁行业 CO₂ 排放控制策略提供参考.

1 方法与数据

1.1 技术路线

为系统研判钢铁行业发展趋势、CO₂ 排放达峰时间、峰值以及达峰实现路径,该研究构建了包含产量预测模块、控制情景模块以及排放分析模块的研究框架,对不同阶段钢铁行业发展情景和 CO₂ 排放变化趋势进行预测分析,以支撑钢铁行业 CO₂ 排放达峰路径的研究和判断,总体技术路线见图 1.

该研究中钢铁行业 CO₂ 排放测算范围包括燃料燃烧排放、工业生产过程排放等直接排放以及净购入使用的电力、热力等间接排放,CO₂ 总排放包括直接排放和间接排放两部分,CO₂ 排放量计算方法如式 (1)~(3) 所示.

$$Emi_{total} = Emi_d + Emi_{ind} \quad (1)$$

$$Emi_d = \sum_{i=1}^n EF_{comb,i} \times A_i + \sum_{j=1}^m EF_{indu,j} \times A_j \quad (2)$$

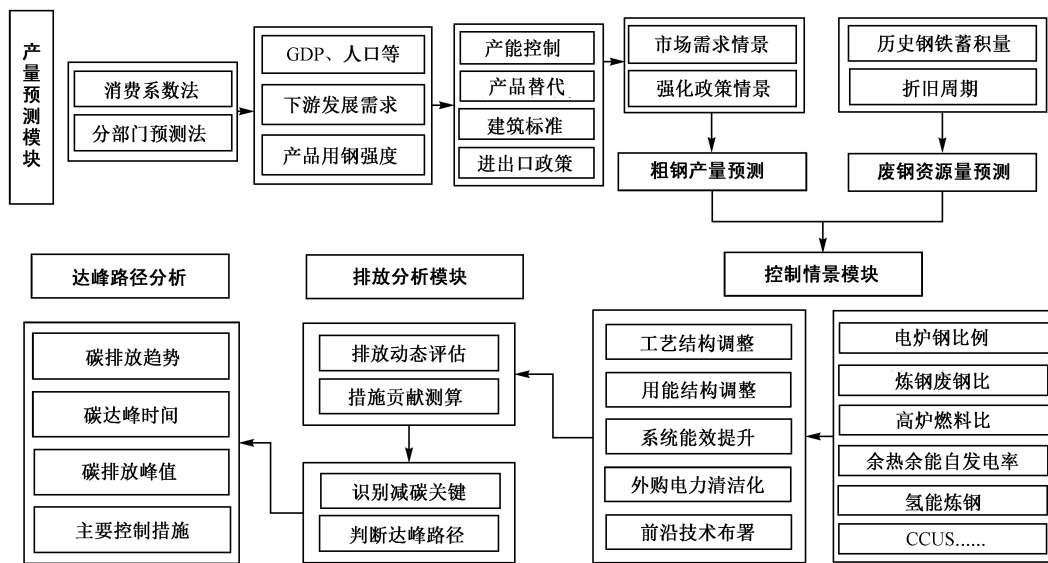


图 1 我国钢铁行业达峰路径研究技术路线

Fig.1 Approach framework of the carbon peak pathway study for China's iron and steel industry

$$Emi_{ind} = \sum_{k=1}^l EF_{ind,k} \times A_k \quad (3)$$

式中: Emi_{total} 为钢铁行业的 CO_2 总排放量, t; Emi_d 和 Emi_{ind} 分别为钢铁行业 CO_2 直接排放量和间接排放量, t; $EF_{comb,i}$ 、 $EF_{indu,j}$ 、 $EF_{ind,k}$ 分别为钢铁行业燃料燃烧相关过程 i 、工业生产相关环节 j 以及外购电力、热力过程相关环节 k 的 CO_2 排放因子; A_i 、 A_j 、 A_k 分别为相应环节的燃料消费量、产品产量以及净购入电力或热力值。

1.2 行业发展预测方法

首先, 该研究基于市场需求视角, 不考虑产量控制政策的影响, 采用消费系数法和分部门预测法两种方法对 2021—2035 年我国粗钢产量进行预测, 分别形成高需求情景和低需求情景 2 个情景. 其中, 消费系数法^[28](即高需求情景) 立足于我国工业化发展所处阶段, 综合参照“十二五”和“十三五”期间我国单位 GDP 钢材消费系数的变化情况, 结合对我国 2021—2035 年经济社会发展的宏观形势判断(基于笔者所在团队内部行业达峰系列研究成果, 相关参数取值见表 1), 对未来钢材消费量及粗钢产量开展预测; 分部门预测法(即低需求情景) 采用基于物质流分析的自下而上的多部门预测分析方法, 按照房屋建筑、机械、汽车、基建、家电等分类对不同部门钢材消费需求分别开展预测, 各类产品用钢强度、生命周期等参数根据已有研究^[9,13,29] 选取. 其次, 在上述 2 个市场需求情景的基础上, 从产能产量控制、产品替代、标准提升、进出口调节等角度考虑产量强化控制政策的影响, 建立高需求-强化控产和低需求-强化控产 2 个对应的

产量强化政策情景, 并对相应情景下的粗钢产量进行预测.

表 1 我国粗钢产量预测相关经济社会发展参数取值

Table 1 Assumed values of economic and social development parameters related to crude steel production prediction in China

年份	人口数量/(10 ⁸ 人)	GDP增速/%	城镇化率/%
2025	14.25	5.5	65
2030	14.30	5.0	69
2035	14.30	4.2	72

对于未来废钢资源量, 根据中国工程院基于社会钢铁蓄积量折算方法下的废钢产出量评估结果^[30], 并结合废钢进口形势判断综合确定. 随着我国钢铁积蓄量的持续增长^[30-31], 未来废钢产出量将进一步增加, 2025 年和 2030 年我国废钢资源年产出量预计分别为 $2.7 \times 10^8 \sim 3 \times 10^8$ 和 $3.2 \times 10^8 \sim 3.5 \times 10^8$ t. 考虑到再生钢铁原料进口已于 2021 年初放开, 未来国内废钢资源将进一步通过进口得到补充. 参考废钢进口量历史最大值为 2009 年的 $1\ 369 \times 10^4$ t, 笔者预计 2021—2025 年废钢进口量在 $1\ 000 \times 10^4$ t 左右, 2030 年之后或达到 $2\ 000 \times 10^4$ t. 综合判断, 预计到 2025 年、2030 年我国废钢资源供给量将分别在 3.0×10^8 和 3.6×10^8 t 左右, 分别为 2020 年的 1.2 和 1.5 倍.

1.3 情景设置

排放控制情景设计模块以 CO_2 排放控制措施相关参数为设计变量, 设计一般排放控制情景与强化排放控制情景 2 类. 其中, 一般排放控制情景设计原则为钢铁行业 CO_2 排放控制力度保持当前水平不变; 强化排放控制情景的设计原则为综合考虑资源基础、

技术成熟度、经济可行性等因素,从加大废钢资源利用、推进电炉短流程炼钢、提高系统能效水平、部署低碳前沿技术等方面对钢铁行业 CO₂ 排放加强控制,同时,考虑电力行业低碳发展对钢铁行业 CO₂ 间接排放的影响(2021—2035年电力行业 CO₂ 排放绩效预测值基于行业达峰系列研究成果确定,见文献[32])对行业 CO₂ 排放量进行测算.将上述2类 CO₂ 排放控制情景与1.2节所述4个产量情景相对应,共计得到8个钢铁行业碳排放情景,情景设置原则见表2.将一般排放控制情景对应的4个情景分别命名为高需求-一般控排、低需求-一般控排、高需求-强化控排、低需求-强化控排,强化排放控制情景对应的4个情景分别命名为高需求-强化控排、低需求-强化控排、高需求-强化控排-强化控排、低需求-强化控排-强化控排.其中,不同情景的2021—2030年炼钢废钢比取值根据相应情景下的粗钢产量和废钢资源量预测结果确定,其他控制措施相关参数取值综合考虑钢铁行业“减污降碳”治理现状、国家相关政策导向以及业内专家对相关低碳技术发展动向的预测等确定.

表2 钢铁行业碳排放情景设置原则

Table 2 Setting principles of the 8 emission scenarios for the iron and steel industry

钢铁行业碳排放情景	对应产量情景	对应排放控制情景
高需求-一般控排	高需求	一般排放控制
低需求-一般控排	低需求	一般排放控制
高需求-强化控排-一般控排	高需求-强化控排	一般排放控制
低需求-强化控排-一般控排	低需求-强化控排	一般排放控制
高需求-强化控排	高需求	强化排放控制
低需求-强化控排	低需求	强化排放控制
高需求-强化控排-强化控排	高需求-强化控排	强化排放控制
低需求-强化控排-强化控排	低需求-强化控排	强化排放控制

1.4 碳排放分析方法

排放分析模块基于粗钢产量和废钢资源量预测

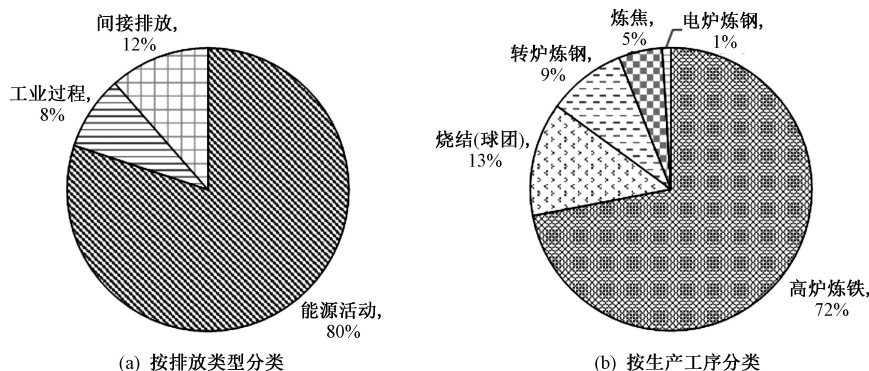


图2 2020年我国钢铁行业 CO₂ 排放构成

Fig.2 Distribution for CO₂ emissions of China's iron and steel industry in 2020

结果以及 CO₂ 排放控制情景对相关措施参数的设定,对不同情景下钢铁行业 CO₂ 排放变化趋势进行测算,并对各类控制因素的潜在减碳贡献进行动态评估,识别影响钢铁行业碳排放的主要驱动因素.在此基础上,判断钢铁行业 CO₂ 排放达峰形势,筛选推动钢铁行业碳排放尽早达峰并有效减碳的关键举措.

1.5 数据来源

该研究基准年为2020年,研究时段为2021—2035年,CO₂ 排放趋势分析与控排效果评估以2021—2030年为主.基准年钢铁行业产品产量、分类型能源消费量等活动水平数据来自国家统计局统计数据、全国第二次污染源普查数据以及国家环境统计数据等,能源活动及工业生产过程(主要包括熔剂使用、炼钢降碳)等相关排放环节的 CO₂ 排放因子根据政府间气候变化专门委员会(IPCC)以及国家发展和改革委员会公布的相关推荐系数^[33-36]确定.

2 结果与讨论

2.1 行业排放现状和特征

基于该研究确定的 CO₂ 核算边界和方法进行测算,2020年我国钢铁行业 CO₂ 总排放量为 18.1×10⁸ t,其中,直接排放 16.0×10⁸ t,间接排放 2.1×10⁸ t.CO₂ 直接排放中,化石燃料燃烧、炼钢降碳及熔剂使用产生的 CO₂ 排放量分别为 14.5×10⁸、1.1×10⁸ 和 0.4×10⁸ t.化石燃料燃烧引起的能源活动排放是钢铁行业最主要的碳排放来源,占钢铁行业 CO₂ 直接排放量和总排放量的比例分别为 90.6% 和 80.1%.从不同生产工序的贡献来看,钢铁行业 CO₂ 排放主要来自高炉炼铁、烧结(球团)、转炉炼钢、炼焦等工序环节,上述工序环节的 CO₂ 排放占比分别为 72%、13%、9%、5%左右(见图2).由此可见,生铁冶炼以及烧结(球团)、炼焦等铁前工艺生产是当前我国钢铁行业 CO₂ 排放的重要贡献源,减少长流程生铁生产应作为钢铁行业源头控碳的重点方向予以考虑.

2.2 行业发展预测结果

行业发展预测结果显示,我国粗钢产量当前已在高位徘徊,预计将在“十四五”时期达峰,之后逐步下降,但2030年前总体仍将保持较高水平(见图3)。具体地,在高需求和低需求-强化控排情景设置下,我国粗钢产量将在2025年达峰,产量峰值分别为 11.3×10^8 和 11.0×10^8 t,2030年粗钢产量将分别降至 10.5×10^8 和 10.0×10^8 t;在低需求产量情景下,我国粗钢产量将在2021年达峰,产量峰值为 10.7×10^8 t,2030年粗钢产量将分别降至 9.2×10^8 t;在低需求-强化控排情景下,我国粗钢产量在2020年达峰,2030年粗钢产量将降至 8.7×10^8 t。

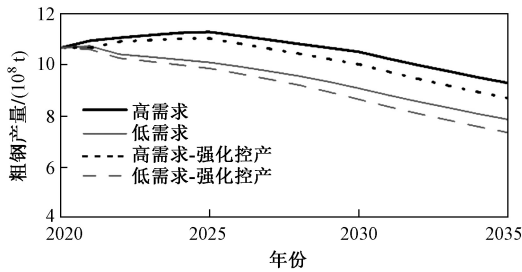


图3 不同情景下我国粗钢产量预测结果

Fig.3 Prediction results of crude steel production under different scenarios in China

2.3 行业碳排放预测及达峰路径

2.3.1 行业二氧化碳排放预测结果

不同情景下钢铁行业CO₂排放预测结果见图4。

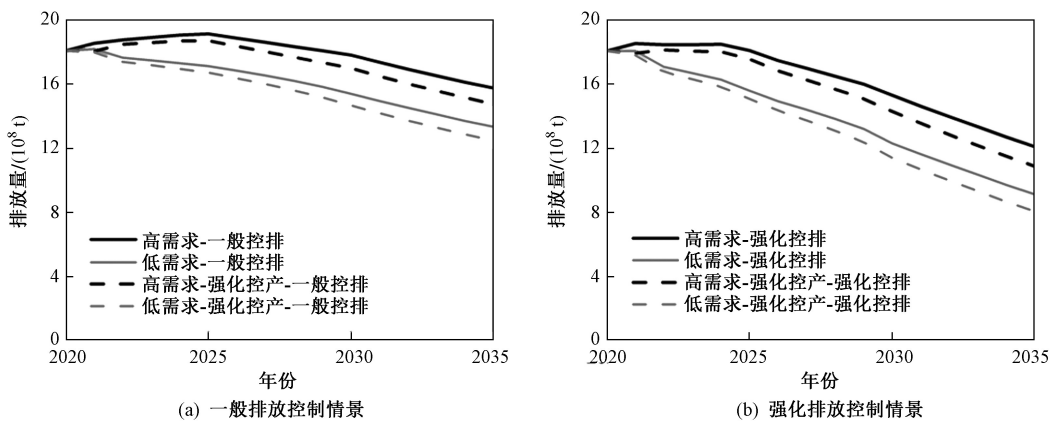


图4 不同情景下我国钢铁行业CO₂总排放量变化趋势对比

Fig.4 CO₂ emission trends of the iron and steel industry under different scenarios in China

2.3.2 不同影响因素下CO₂减排效果动态评估

为识别未来钢铁行业的主要CO₂减排驱动力,结合该研究对钢铁行业产量情景与碳排放强化控制情景的相关设置,以2020年为基准年,对粗钢产量变化、加大废钢利用(同时提高电炉钢生产比例)、能效水平提升、外购电力清洁化、发展氢能炼钢以及实

结果表明:一般排放控制情景下,钢铁行业CO₂排放达峰趋势与产量达峰趋势保持一致。强化排放控制情景下,高需求-强化控排、低需求-强化控排、高需求-强化控排-强化控排以及低需求-强化控排-强化控排情景对应的钢铁行业CO₂排放总量达峰时间分别为2024年、2021年、2022年和2020年,峰值为 $18.1 \times 10^8 \sim 18.5 \times 10^8$ t。具体地,高需求-强化控排情景下,钢铁行业碳排在2021—2024年处于峰值平台期,CO₂直接排放量和总排放量分别在2021年和2024年达峰,到2025年、2030年,CO₂直接排放量分别比峰值减少 0.3×10^8 、 2.7×10^8 t,CO₂总排放量分别比峰值减少 0.4×10^8 、 3.0×10^8 t。低需求-强化控排情景下,钢铁行业CO₂直接排放量和总排放量均将在2021年左右达峰,到2025年、2030年,CO₂直接排放量分别比峰值减少 2.2×10^8 、 5.0×10^8 t,CO₂总排放量分别比峰值减少 2.5×10^8 、 5.6×10^8 t。高需求-强化控排-强化控排情景下,钢铁行业CO₂直接排放量和总排放量均将在2022年达峰,到2025年、2030年,CO₂直接排放量分别比峰值减少 0.5×10^8 、 3.3×10^8 t,CO₂总排放量分别比峰值减少 0.6×10^8 、 3.7×10^8 t。低需求-强化控排-强化控排情景下,钢铁行业CO₂直接排放量和总排放量均在2020年达峰,到2025年、2030年,CO₂直接排放量分别比峰值减少 2.6×10^8 、 5.8×10^8 t,CO₂总排放量分别比峰值减少 3.0×10^8 、 6.5×10^8 t。

施CCUS等因素对钢铁行业CO₂总排放量产生的影响进行分析,不同影响因素下的减排效果测算原则见表3。不同产量情景下,各类驱动因素对钢铁行业CO₂排放的控制效果动态评估结果见图5。

产量变化对钢铁行业碳排放的影响与产量预测情况紧密相关,在高需求产量情景和高需求-强化控

表3 不同影响因素对钢铁行业碳排放影响的测算原则

Table 3 Estimation principle on the effect of CO₂ emission mitigations of different factors for the iron and steel industry

影响因素	碳排放影响测算原则
粗钢产量变化	行业排放因子和生产结构均保持2020年状态不变,粗钢产量变化对CO ₂ 排放的影响
加大废钢利用	与保持2020年炼钢废钢比水平相比,加大废钢资源利用、提高电炉钢生产比例对CO ₂ 排放的影响
能效水平提升	与保持2020年能效水平相比,通过优化燃料结构、推进余热余能利用等措施提高行业系统能效水平对CO ₂ 排放的影响
电力清洁化	从外购电角度出发,与保持2020年电力排放绩效水平相比,未来电力清洁低碳化发展对行业CO ₂ 间接排放的影响
氢能炼钢	与无氢能炼钢相比,实施氢能炼钢对行业CO ₂ 排放的影响
CCUS	与无CCUS相比,开展CCUS对行业CO ₂ 排放的影响

产情景下,2025年前,粗钢产量仍将继续增长,钢铁行业控碳压力将进一步加大;2025年后,随着粗钢产量逐步下降,产量变化将对钢铁行业CO₂控排产生积极作用.在低需求产量情景和低需求-强化控产情景下,产量变化分别在2021年和2020年后对CO₂控排产生正向作用.综合4个产量情景分析,到2025年和2030年,粗钢产量变化对钢铁行业CO₂总排放量的削减贡献分别为 $-1.0 \times 10^8 \sim -1.4 \times 10^8$ t和 $0.3 \times 10^8 \sim 3.5 \times 10^8$ t.

在其他影响钢铁行业碳排放的控制因素中,2021—2030年期间,加大废钢资源利用、外购电力清洁化以及系统能效水平提升对钢铁行业CO₂减排贡献较为突出.评估结果显示,在该研究的控制情景下,到2030年,实施上述措施可实现的CO₂减排量依次为 $1.7 \times 10^8 \sim 2.4 \times 10^8$ 、 $0.5 \times 10^8 \sim 0.6 \times 10^8$ 和 $0.3 \times 10^8 \sim 0.4 \times 10^8$ t.

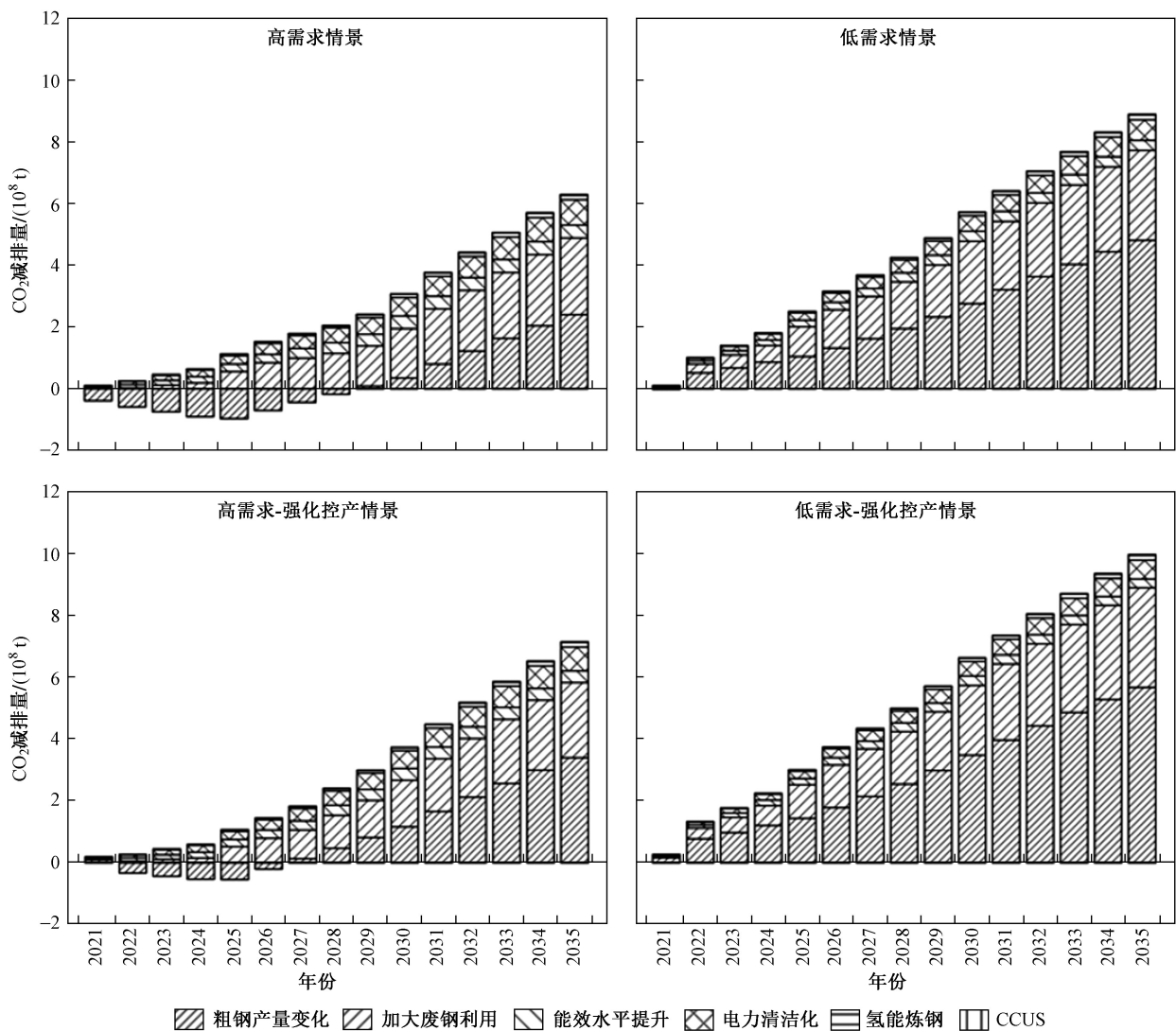


图5 不同影响因素对钢铁行业CO₂减排效果的动态评估

Fig.5 Dynamic evaluation results of CO₂ emission mitigation effect of different factors on the iron and steel industry

氢能炼钢和CCUS可实现的碳减排效果与相关技术发展情况紧密相关,根据该研究的情景设置,到2030年,以上两项措施可实现的CO₂减排量相对较低,分别为 0.1×10^8 和 0.01×10^8 t左右。

2.3.3 行业达峰路径判定及措施建议

基于不同情景下钢铁行业碳排放趋势(见图4)判断,我国钢铁行业CO₂总排放量将在2020—2024年达到峰值,行业CO₂总排放量峰值为 $18.1 \times 10^8 \sim 18.5 \times 10^8$ t,直接排放量峰值为 $16.0 \times 10^8 \sim 16.4 \times 10^8$ t,达峰后到2030年总排放量将下降 $3.0 \times 10^8 \sim 6.5 \times 10^8$ t,直接排放量将下降 $2.7 \times 10^8 \sim 5.8 \times 10^8$ t。总体而言,在高需求和高需求-强化控产情景下,即较长时期内粗钢消费需求仍相对旺盛、粗钢产量在“十四五”处于峰值平台期的情况下,在现有力度基础上进一步强化碳排放控制可推动我国钢铁行业碳排放达峰时间提前1~3年,并推进2030年行业CO₂总排放量较一般排放控制情景分别减少 2.3×10^8 和 2.5×10^8 t;在低需求和低需求-强化政策的产量情景下,即当前粗钢消费需求已近峰值、未来逐步降低的情况下,强化碳排放控制可推动我国钢铁行业碳排放达峰时间提前0~1年,并推进2030年行业CO₂总排放量较一般控制情景分别减少 2.9×10^8 和 3.1×10^8 t。

从各项人为控制措施的CO₂减排潜力来看,加大废钢资源利用、外购电力清洁化以及提升系统能效水平的CO₂减排效果最为突出,是有效降低钢铁行业碳排放的重要途径。在该研究设定的强化排放控制情景下,到2025年,上述3类措施对行业CO₂减排总量(与一般控制情景相比)的贡献率分别为49%~69%、15%~27%和13%~22%;到2030年,上述措施的减排贡献分别为59%~72%、15%~22%和10%~15%。因此,围绕落实碳达峰相关要求,2030年前钢铁行业应重点从加大废钢资源利用力度、提升系统能效水平以及提高绿电使用比例等方面加快推进绿色低碳转型发展;同时,着眼实现碳中和愿景的需要,应坚持短期与中长期工作相结合,加快推进氢能炼钢、CCUS等低碳前沿技术的部署。

3 结论

a) 基于情景分析的钢铁行业碳排放路径研究显示,我国钢铁行业CO₂将于“十四五”时期达峰并在之后逐步下降,可为全国实现碳达峰目标发挥重要贡献。钢铁行业CO₂总排放量有望在2020—2024年期间达到峰值,行业CO₂总排放量峰值为 $18.1 \times 10^8 \sim 18.5 \times 10^8$ t,直接排放量峰值为 $16.0 \times 10^8 \sim 16.4 \times 10^8$ t,达峰后到2030年CO₂总排放量将下降 $3.0 \times 10^8 \sim 6.5 \times 10^8$ t,直接

排放量将下降 $2.7 \times 10^8 \sim 5.8 \times 10^8$ t。

b) 根据不同情景下我国钢铁行业CO₂减排效果动态评估结果,粗钢产量是决定我国钢铁行业碳排放能否快速达峰的关键,加大废钢资源利用、推进外购电力清洁化和提高系统能效水平是钢铁行业实现碳排放达峰和有效降碳的重要途径,氢能炼钢和CCUS等前沿低碳技术在2030年前对钢铁行业碳排放控制的贡献作用相对有限。到2030年,粗钢产量降低、加大废钢资源利用、推进外购电力清洁化、提高系统能效水平以及氢能炼钢和CCUS等前沿技术对钢铁行业CO₂减排贡献分别为11%~52%、34%~52%、7%~20%、5%~13%和2%~3%。

c) 2030年前,加大废钢资源利用是对钢铁行业降碳具有最突出贡献的控制途径,应充分发挥废钢对铁矿石在钢铁冶炼过程中的原料替代作用,将其作为钢铁行业碳排放达峰行动的核心举措加以推动实施。随着社会钢铁蓄积量的逐渐增长,我国未来废钢资源供给量将逐渐增加,炼钢废钢比具有较大提升空间,有利于推进钢铁资源循环回收利用和生产方式低碳转型。到2030年,我国炼钢废钢比有望提高到33%~40%,加大废钢资源利用可带动钢铁行业实现CO₂减排 $1.7 \times 10^8 \sim 2.4 \times 10^8$ t左右。实施电炉短流程炼钢是提高废钢资源利用水平、削减钢铁行业碳排放的重要手段,同时也是减少污染物排放的重要措施。建议应统筹考虑减污降碳要求和区域资源能源条件,加快推进我国电炉短流程炼钢工艺发展,优化调整钢铁产业结构和空间布局,尤其加强对京津冀及周边地区等重点区域的短流程炼钢布局和部署,推动“降碳”与“减污”进一步协同增效。

参考文献(References):

- [1] 生态环境部.中华人民共和国气候变化第二次两年更新报告[EB/OL].北京:生态环境部,(2019-07-01)[2021-07-11].<http://www.mee.gov.cn/ywgz/ydqhbh/wsqkz/201907/P020190701765971866571.pdf>.
- [2] 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.
- [3] 李新, 路路, 穆献中, 等. 基于LEAP模型的京津冀地区钢铁行业中长期减排潜力分析[J]. *环境科学研究*, 2019, 32(3): 365-371.
LI X, LU L, MU X Z, et al. Emission reduction potential of pollutants emissions from iron and steel industry over Beijing-Tianjin-Hebei Region based on LEAP[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, 32(3): 365-371.
- [4] 国家统计局.中华人民共和国2020年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL].北京:国家统计局,(2021-02-28)[2021-07-11].http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/202102/t20210227_1814154.html.
- [5] World Steel Association. World Steel in Figures 2021[EB/OL]. Brussels: Belgium, (2021-04-30)[2021-07-11]. <https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:976723ed-74b3-47b4-92f6-81b6a452b8>

- 6e/World%2520Steel%2520in%2520Figures%25202021.pdf.
- [6] 李新,路路,穆献中,等.京津冀地区钢铁行业协同减排成本-效益分析[J].环境科学研究,2020,33(9):2226-2234.
LI X,LU L,MU X Z,et al.Cost-benefit analysis of synergistic emission reduction in steel industry in Beijing-Tianjin-Hebei Region, China[J].Research of Environmental Sciences,2020,33(9):2226-2234.
- [7] YANG H Z,LIU J F,JIANG K J,et al.Multi-objective analysis of the co-mitigation of CO₂ and PM_{2.5} pollution by China's iron and steel industry[J].Journal of Cleaner Production,2018,185:331-341.
- [8] WANG X Y,LEI Y,YAN L,et al.A unit-based emission inventory of SO₂, NO_x and PM for the Chinese iron and steel industry from 2010 to 2015[J].Science of the Total Environment,2019,676:18-30.
- [9] ZHANG Q,XU J,WANG Y J,et al.Comprehensive assessment of energy conservation and CO₂ emissions mitigation in China's iron and steel industry based on dynamic material flows[J].Applied Energy,2018,209:251-265.
- [10] SUN J C,NA H M,YAN T Y,et al.A comprehensive assessment on material, exergy and emission networks for the integrated iron and steel industry[J].Energy,2021,235:121429.
- [11] SHEN J L,ZHANG Q,XU L S,et al.Future CO₂ emission trends and radical decarbonization path of iron and steel industry in China[J].Journal of Cleaner Production,2021,326:129354.
- [12] YIN X,CHEN W Y.Trends and development of steel demand in China: a bottom-up analysis[J].Resources Policy,2013,38(4):407-415.
- [13] WANG P,JIANG Z Y,GENG X Y,et al.Quantification of Chinese steel cycle flow: historical status and future options[J].Resources, Conservation and Recycling,2014,87:191-199.
- [14] KARALI N,XU T F,SATHAYE J.Developing long-term strategies to reduce energy use and CO₂ emissions: analysis of three mitigation scenarios for iron and steel production in China[J].Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change,2016,21(5):699-719.
- [15] MA D,CHEN W Y,YIN X,et al.Quantifying the co-benefits of decarbonisation in China's steel sector: an integrated assessment approach[J].Applied Energy,2016,162:1225-1237.
- [16] IEA.World Energy Outlook 2020[EB/OL].Paris:IEA publications,(2020-10-01)[2021-07-11].<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020>.
- [17] 岳强,王鹤鸣,陆钟武.基于总物流分析的我国钢铁工业生态效率分析[J].环境科学研究,2014,27(8):915-921.
YUE Q,WANG H M,LU Z W.Ecological efficiency of iron and steel industry in China based on bulk material flow analysis[J].Research of Environmental Sciences,2014,27(8):915-921.
- [18] REN L,ZHOU S,PENG T D,et al.A review of CO₂ emissions reduction technologies and low-carbon development in the iron and steel industry focusing on China[J].Renewable and Sustainable Energy Reviews,2021,143:110846.
- [19] YUN S,JANG M G,KIM J K.Techno-economic assessment and comparison of absorption and membrane CO₂ capture processes for iron and steel industry[J].Energy,2021,229:120778.
- [20] ONARHEIM K,ARASTO A,TSUPARI E,et al.Techno-economic comparison of CO₂ emission reduction concepts for an integrated iron and steel mill[C/OL].Finland:VTI Publications Register,13th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies,(2017-01-01)[2021-08-25].https://www.researchgate.net/profile/Kristin-Onarheim/publication/306502219_Techno-economic_comparison_of_CO2_emission_reduction_concepts_for_an_integrated_iron_and_steel_mill/links/57beae2908aed1ec386450d/Techno-economic-comparison-of-CO2-emission-reduction-concepts-for-an-integrated-iron-and-steel-mill.pdf.
- [21] CORMOS A M,DRAGAN S,PETRESCU L,et al.Techno-economic and environmental evaluations of decarbonized fossil-intensive industrial processes by reactive absorption & adsorption CO₂ capture systems[J].Energies,2020,13(5):1268.
- [22] ZHANG X Y, JIAO K X, ZHANG J L, et al. A review on low carbon emissions projects of steel industry in the World[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 306: 127259.
- [23] TANG J,CHU M S,LI F,et al.Development and progress on hydrogen metallurgy[J].International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials,2020,27(6):713-723.
- [24] WANG P,RYBERG M,YANG Y,et al.Efficiency stagnation in global steel production urges joint supply- and demand-side mitigation efforts[J].Nature Communications,2021,12:2066.
- [25] 王深,吕连宏,张保留,等.基于多目标模型的中国低成本碳达峰、碳中和路径[J].环境科学研究,2021,34(9):2044-2055.
WANG S,LÜ L H,ZHANG B L,et al.Multi objective programming model of low-cost path for China's peaking carbon dioxide emissions and carbon neutrality[J].Research of Environmental Sciences,2021,34(9):2044-2055.
- [26] 张利娜,李辉,程琳,等.国外钢铁行业低碳技术发展概况[J].冶金经济与管理,2018(5):30-33.
- [27] 李新创,李冰.全球温控目标下中国钢铁工业低碳转型路径[J].钢铁,2019,54(8):224-231.
LI X C,LI B.Low carbon transition path of China's iron and steel industry under global temperature-control target[J].Iron & Steel, 2019,54(8):224-231.
- [28] 陈程,管志杰,刘琦,等.我国钢材需求预测研究[J].冶金经济与管理,2019(2):12-16.
- [29] CHEN W Y,YIN X,MA D.A bottom-up analysis of China's iron and steel industrial energy consumption and CO₂ emissions[J].Applied Energy,2014,136:1174-1183.
- [30] “黑色金属矿产资源强国战略研究”专题组.我国黑色金属资源发展形势研判[J].中国工程科学,2019,21(1):97.
- [31] 董丽伟,邢奕,刘景洋,等.我国社会废钢回收量预测[J].环境科学研究,2011,24(11):1325-1330.
DONG L W,XING Y,LIU J Y,et al.Forecast of society's scrap steel recovery amount in China[J].Research of Environmental Sciences,2011,24(11):1325-1330.
- [32] 王丽娟,张剑,王雪松,等.中国电力行业二氧化碳排放达峰路径研究[J].环境科学研究,2021. doi:10.13198/j.issn.1001-6929.2021.11.24.
WANG L, ZHANG J, WANG X, et al. Pathway of carbon emissions peak for in China's electric power industry[J]. Research of Environmental Sciences, 2021. doi:10.13198/j.issn.1001-6929.2021.11.24.
- [33] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventory [R/OL]. Geneva: IPCC, (2019-05-12)[2021-08-30].<https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories>.
- [34] EFDB-Emission Factor Database.IPCC排放因子数据库[EB/OL]. Switzerland:IPCC,(2020-12-03)[2021-07-15].<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/EFDB/main.php>.
- [35] 蔡博峰,姚波,刘晓曼,等.中国工艺过程和产品使用(IPPU)温室气体排放清单方法[M].北京:中国环境出版集团,2020.
- [36] 国家发展和改革委员会.国家发展改革委办公厅关于印发首批10个行业企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)的通知[EB/OL].北京:国家发展和改革委员会,(2013-10-15)[2021-07-11].<https://zfxgk.ndrc.gov.cn/web/iteminfo.jsp?id=1776>.