

引用格式: 田旭, 李照令, 耿涌, 等. 碳中和目标下中国钢铁行业碳减排的资源环境影响[J]. 资源科学, 2024, 46(4): 700-716.  
[Tian X, Li Z L, Geng Y, et al. Resource and environmental impacts of carbon emission reduction in China's iron and steel sector under the carbon neutrality goal[J]. Resources Science, 2024, 46(4): 700-716.] DOI: 10.18402/resci.2024.04.04

# 碳中和目标下中国钢铁行业碳减排的资源环境影响

田旭<sup>1</sup>, 李照令<sup>2</sup>, 耿涌<sup>1</sup>, 陈伟<sup>3</sup>

(1. 上海交通大学国际与公共事务学院 联合国工业发展组织绿色增长联合研究院, 上海 200030;

2. 上海大学经济学院, 上海 200444; 3. 山东师范大学地理与环境学院, 济南 250358)

**摘要:**【目的】钢铁行业是能源终端消费领域碳排放最大的行业, 其碳减排与区域的经济社会发展息息相关。识别碳减排措施产生的资源环境影响并揭示区域差异性可为中国钢铁行业实现高质量绿色低碳转型提供支撑。【方法】本文基于自下而上的 Asian-Pacific Integrated Model (AIM)/Enduse 模型建立了反映资源经济关联的工厂级中国钢铁行业综合评估模型, 预测了2060年不同经济社会发展路径下粗钢需求, 重点识别了生产结构调整、减排技术普及、碳政策以及碳中和技术措施产生的资源影响(燃料、焦炭、电力、氢能、废能废热、铁矿石和废钢)和环境影响(CO<sub>2</sub>、十种大气污染物以及汞), 揭示了典型环境排放(CO<sub>2</sub>、甲烷和汞)的区域差异性及空间格局。【结果】①随着可回收废钢存量增加, 短流程的粗钢产量占比将由2020年的10.6%提高到2060年的70%; ②在多种减排措施协同作用下, 相较于2020年, 2060年中国钢铁行业的总能耗将下降70%~76%, 燃料消耗减少92%(其中煤炭占比将下降为0, 生物质能占比将上升69%, 具有还原剂属性的焦炭消耗量将下降90%), CO<sub>2</sub>排放量将减少89%~91%, 但甲烷、有机碳和汞排放增加需引起关注; ③在多种减排措施协同作用下, 不同粗钢需求路径下钢铁行业省级碳减排差异明显, 高粗钢需求情景下呈汞排放增加趋势的省份数量较多。【结论】中国钢铁行业碳减排应加强系统筹划, 警惕减排措施产生的环境排放要素间“抵消”影响; 钢铁行业高质量绿色低碳转型应充分考虑地区经济社会差异以及资源禀赋承载力。

**关键词:** 钢铁行业; 减污降碳; 资源环境影响; AIM模型; 绿色低碳转型; 中国

DOI: 10.18402/resci.2024.04.04

## 1 引言

为了应对全球气候变化, 中国政府提出“2030”碳达峰目标以及“2060”碳中和目标(即“双碳”目标)。工业部门是中国的碳排放大户, 亦是实现“双碳”目标的关键<sup>[1]</sup>; 其中, 钢铁行业是中国工业碳排放量较高的部门之一, 2020年钢铁行业碳排放量约占全国碳排放量的16%<sup>[2]</sup>, 其碳减排程度对于中国实现“双碳”目标具有重要影响<sup>[1,3-5]</sup>。

中国钢铁生产工艺主要包括两种: 一种是以焦

炭和铁矿石为原材料的长流程工艺, 内含炼焦、高炉炼铁(Blast Furnace, BF)、吹氧转炉炼钢(Basic Oxygen Furnace, BOF)和轧钢等流程; 另一种是以废钢和电力为主要原料的短流程工艺, 包括电弧炉炼钢(Electric Arc Furnace, EAF)和轧钢流程。此外, 以氢能和直接还原铁为原料的电弧炉技术(DRI-EAF)也正在研发试用中。然而, 上述钢铁生产工艺的经济环境优势不一, 对中国钢铁行业碳减排提出颇多挑战。例如, 长流程具有生产成本低、

收稿日期: 2023-10-26; 修订日期: 2024-01-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(72274120; 72088101); 上海市浦江人才计划项目(22PJC052)。

作者简介: 田旭, 女, 辽宁台安人, 副研究员, 硕士生导师, 研究方向为资源环境管理。E-mail: tianxu@sjtu.edu.cn

通讯作者: 耿涌, 男, 辽宁大连人, 教授, 博士生导师, 研究方向为资源环境管理。E-mail: ygeng@sjtu.edu.cn; 李照令, 女, 河北石家庄人, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为环境经济综合评估模型的开发与应用。E-mail: zhaolingli@shu.edu.cn

2024年4月

生产速度快、产品质量好以及品种多等优点,贡献了中国89%的粗钢生产<sup>[6]</sup>。短流程炼钢基于电能熔炼废钢,相较于长流程炼钢有明显的控碳优势,通常可比长流程炼钢节约50%左右的能源消耗、减少55%的SO<sub>2</sub>排放以及89%的颗粒物排放<sup>[7,8]</sup>;但由于废钢回收周期长、价格高以及电力成本高等因素,短流程炼钢占比持续下降<sup>[9-12]</sup>。DRI-EAF技术虽然具有显著的降碳优势,但其正处于试运行阶段,项目较少且生产成本较高,据估算,DRI-EAF的单位减排成本是钢铁行业平均减排成本的5倍左右<sup>[13]</sup>。由此,综合探索碳减排措施的经济-资源-环境影响是钢铁行业实现高质量绿色低碳发展的重要内容。

为了助力中国钢铁行业实现碳减排,学者们主要围绕钢铁行业实现碳目标路径<sup>[14]</sup>以及碳目标约束下不同技术和措施的碳减排潜力<sup>[2,15]</sup>开展相关研究。在碳目标路径方面,从理论层面阐述了钢铁行业碳达峰碳中和的实施路径<sup>[16,17]</sup>,概括了钢铁行业绿色化发展进程(节能、减排和脱碳三阶段),分析了其碳目标实现的关键时间节点、思路、切入口和技术路线图<sup>[18]</sup>。在技术和措施减排潜力方面,专门针对碳减排、碳零排以及碳负排三方面的低碳技术减排潜力开展研究<sup>[19,20]</sup>;此外,为了多维度推动钢铁行业减排,学者们也识别了不同技术和措施(技术<sup>[13,21-23]</sup>、电力系统低碳化<sup>[21]</sup>、生产结构调整<sup>[22]</sup>、碳税<sup>[22]</sup>、环境政策<sup>[23]</sup>)的碳减排潜力以及成本<sup>[13]</sup>。通过钢铁行业碳减排相关文献综述可以看出,以往研究较多聚焦在国家宏观尺度的减排措施影响以及减排路径研究,忽视了钢铁生产与地区经济社会之间的关联,缺乏与区域发展关联较密切的工厂尺度的减排效果评估。为了实现中国钢铁行业高质量绿色低碳发展,亟需开展上述研究内容的评估工作,进而为区域以及行业可持续发展提供基础支撑。

党的二十大报告明确指出:“协同推进降碳、减污、扩绿、增长”是中国新时期绿色发展方向标。由于碳排放与大气污染物之间具有同根同源同过程的特征<sup>[24-26]</sup>,实现钢铁行业的减污降碳亦是钢铁行业高质量发展的方向。针对这一命题,相关学者在国家<sup>[27]</sup>、区域<sup>[28-30]</sup>以及城市尺度<sup>[31]</sup>开展了相关研究,通过以往研究可以看出,钢铁行业的减污指标主要聚焦在PM、SO<sub>2</sub>以及NO<sub>x</sub>气体,缺乏更细化的大气

污染物排放影响的评估工作;此外,以往开展减污降碳潜力预测的研究,其方法较为简单,缺乏在系统的经济社会发展框架下的综合评估。为了避免区域钢铁行业碳减排政策使大气污染物产生“此消彼长”的不确定影响,仍需加强碳减排措施对于大气污染物更综合的评估工作,进而为不同地区的环境政策制定提供参考。

目前,开展政策措施中长期可持续发展路径综合评估的模型主要包括自上而下模型和自下而上模型两类。自上而下的综合评估模型可描述各核算账户间(如行业、居民、政府和市场等)的相互关联,通过评估消费、投资、政府支出、进出口、劳动力、土地和资本等多个要素,对由政策引起的经济活动和各核算账户间相互依存关系的变化进行描述、分析和模拟。该类模型已被广泛应用于碳税<sup>[32]</sup>、绿色消费<sup>[33]</sup>和碳交易<sup>[34]</sup>等政策对社会、宏观经济和环境的影响研究,代表性的模型有 Computable General Equilibrium (CGE)<sup>[35]</sup>、Integrated Global System Modeling (IGSM)<sup>[36]</sup>和 Global Change Analysis Model (GCAM)<sup>[37]</sup>。该类模型的缺点是其研究范畴简化了对中观和微观经济方面的分析。自下而上的综合评估模型可对自上而下模型的不足进行补充,充分考虑了各核算账户详细的技术选择或特定的气候变化减缓政策,并评估相应的减排成本,属于局部均衡模型,代表性的研究模型有 Greenhouse Gas and Air Pollution Interactions and Synergies (GAINS)、The Integrated MARKAL-EFOM System (TIMES)以及 Asian-Pacific Integrated Model/Enduse (AIM/Enduse)。GAINS模型是由国际应用系统分析研究所(IIASA)开发的用于制定和评价空气质量政策的工具,可对不同地区的空气污染物和温室气体的历史排放量进行分析,并对其未来的排放量以每5年为时间跨度进行评估<sup>[38]</sup>;TIMES模型由国际能源署(IEA)开发,更加侧重于对能源系统的分析<sup>[39]</sup>;AIM/Enduse模型是由日本国立环境研究所(NIES)开发的逐年递归模型,有助于跟踪分析碳达峰碳中和时间节点<sup>[40]</sup>。

基于以上背景和研究进展,本文旨在分析不同经济社会发展路径下,2060年中国钢铁行业碳减排措施产生的资源环境影响,并揭示典型温室气体和

大气污染物排放的工厂级时空分布格局。本文主要包括:①减排措施产生的钢铁行业能源(燃料、焦炭、电力、氢能以及废能废热)和原料消耗(铁矿石和废钢)影响;②减排措施产生的钢铁行业环境排放影响( $\text{CO}_2$ 、十种大气污染物以及汞);③减排措施对典型温室气体和污染物( $\text{CO}_2$ 、甲烷和汞)排放的工厂级时空格局影响。本文的主要创新包括:①基于工厂级的中国钢铁企业数据以及经济社会数据构建反映中国不同地区经济社会发展特征的钢铁行业综合评估模型,进而可量化不同区域经济社会发展路径下的钢铁行业碳减排影响并识别区域差异特征;②细化了钢铁企业的污染物排放清单数据,进而可综合表征钢铁行业的减污降碳影响。本文相关结果可为不同地区钢铁行业高质量绿色低碳转型、行业碳目标推进以及减污降碳政策制定提供有益参考。

## 2 研究方法

### 2.1 模型概述

本文采用自下而上的 AIM/Enduse 模型开展分析。该模型主要结合物质流分析、投入产出分析、生命周期分析和碳足迹分析等方法,在钢铁行业不同粗钢生产技术条件下,通过模拟能源和材料在各生产环节中的供应、流通和转换等相关过程,进而获得满足消费部门最终需求的能源和产品,分析行业在不同生产结构、生产流程和技术条件下产生的能源消耗和相应的温室气体及大气污染物的排放。模型进一步结合生产成本、原材料成本以及排放税费等参数,最终形成生产系统成本最小化的线性优化框架<sup>[41]</sup>。AIM/Enduse 通过多年动态递归,可用于评价节能减排政策并分析中长期的行业减排潜力。目前该模型已被广泛应用于国家减排目标路径<sup>[42-44]</sup>、能源转型<sup>[45]</sup>、产业低碳转型<sup>[46-48]</sup>等减排路径分析。模型关键流程设置概述如下:

#### 2.1.1 原材料投入

考虑了原材料的价格、 $\text{CO}_2$ 及污染物排放和可获得性等因素。如发展短流程炼钢的前提是需要有充足的废钢存量,根据前期研究成果,废钢回收量有望显著提高,可支撑短流程生产粗钢的比例由2020年的11%提高至2060年的77%<sup>[49]</sup>。随着氢能生产、储存技术的发展及氢能炼钢工艺技术的日

益成熟,其生产占比也将有所升高。

#### 2.1.2 技术设置

先进生产设备通常具有较高的生产效率,而生产设备大型化有助于提高生产效率。因此,模型基于不同的生产技术、设备尺寸及其生产效率分为不同的技术等级,并对每个技术等级赋予初始成本、维护成本和服役期限等基础参数。节能减排技术可有效减少生产过程中排放的大气污染物质的含量,每一生产环节通常伴随除尘、脱硫、脱硝和废能回收等多个节能减排需求;同一种节能减排需求下可包含多种技术,如除尘可由电除尘和布袋除尘技术分别单独完成或叠加组合完成。模型可根据设定的限制条件,考虑不同技术的成本和效果进行模拟分析。

#### 2.1.3 减排设置

生产结构和减排技术的进步会影响钢铁行业能源结构的变革。如短流程使用清洁电力和氢能等可再生能源将逐步替代长流程中消耗的煤基能源,实现能源结构清洁化;节能减排技术回收的废热和废能可促进能源的循环使用,减少外部能源的需求。

模型中的能耗和排放主要与所选取的生产工艺、节能减排技术和生产能效提升等因素有关。钢铁行业的大气污染物排放量计算如式(1)和式(2):

$$Q_i^m = \sum_j \sum_{(l,p) \in W_j} X_{l,p,i} \cdot e_{l,p,i}^m \quad (1)$$

$$e_{l,p,i}^m = [f_{0,l}^m + \sum_k f_{k,i}^m \cdot (1 - \varepsilon_{l,i}) \cdot E_{k,l,p,i} \cdot (1 - U_{k,i})] \cdot (1 - d_{l,p,i}^m) \quad (2)$$

式中: $Q_i^m$ 为大气污染物 $m$ 在行业或区域 $i$ 的排放量; $W_j$ 为生产工艺和污染物去除工艺的合集; $j$ 为合集的自然数; $X_{l,p,i}$ 为生产设备 $l$ 与污染物去除工艺 $p$ 组合在行业或区域 $i$ 的运行情况; $e_{l,p,i}^m$ 为行业或区域 $i$ 中,气体 $m$ 在生产设备 $l$ 与污染物去除工艺 $p$ 组合下的排放系数; $f_{0,l}^m$ 为气体 $m$ 在生产设备 $l$ 中的生产过程排放系数; $f_{k,i}^m$ 为行业或区域 $i$ 中,生产设备 $l$ 单位消耗能源类型 $k$ 所产生的气体 $m$ 的排放量; $\varepsilon_{l,i}$ 为行业或区域 $i$ 中,生产设备 $l$ 能效提高率; $E_{k,l,p,i}$ 为生产设备 $l$ 与污染物去除工艺 $p$ 组合在行业或区域 $i$ 的单位能源类型 $k$ 消耗率; $U_{k,i}$ 为生产设备 $l$ 中用于非燃烧操作的能源类型 $k$ 的比例; $d_{l,p,i}^m$ 为行业或区域 $i$ 中,



2024年4月

生产设备  $l$  与污染物去除工艺  $p$  组合的单位气体  $m$  去除率。

#### 2.1.4 优化框架设置

首先,模型设置了基础的限制条件,使模型更加贴近实际生产情况。例如,能源供应量需在可供能源的最大值和最小值之间、电力需求不能超过总供应最高值(考虑进出口后)以及粗钢的需求量应小于总供应量(进出口考虑在内)等,相关限制条件需经过发电量和电力消耗、钢铁产量和表观消费量等相关数据的检验。工业生产过程考虑了产能利用率问题,早期钢铁生产存在产能过剩的问题,但随着落后产能逐渐退出生产,产能利用率也逐步提高,相关结果详见钢铁行业未来布局和产能分配的相关研究<sup>[49]</sup>。其次,模型的最终目标是总成本最小化,总成本包括初期安装成本、后期维修成本、原材料投入成本,以及由政策实施产生的成本。模型以成本最小化为目标函数,构建线性的优化框架。

$$TC = \sum (C_a + C_o + C_b) \rightarrow \text{Minimization} \quad (3)$$

式中:  $TC$  为总成本;  $C_a$  为年化投资成本;  $C_o$  为年运营成本;  $C_b$  为环境税或能源税等相关成本。

## 2.2 情景设置

### 2.2.1 基于共享社会经济路径的钢铁需求情景

共享社会经济路径 (Shared Socioeconomic Pathways, SSPs) 是联合国气候小组发布的 5 种未来可能出现的社会发展路径 (SSP1-SSP5)<sup>[50]</sup>, 在这 5 种路径中分别包含了不同温室气体排放速度约束下的人口、城市密度、教育、土地利用和经济等参数的未来不同发展模式, 相关数据已被广泛应用于气候变化相关研究中, 可为气候变化模拟等研究提供更系统的情景框架<sup>[51]</sup>。鉴于中国经济社会发展的宏观轨迹遵循全球可持续发展目标, 而 SSP4 (不平等的发展路径) 和 SSP5 (高化石燃料消耗) 发展路径与可持续发展差距较大, 由此本文选取较为贴近可持续发展目标的 SSP1-SSP3 路径, 相关研究方法参考文献<sup>[52-54]</sup>。其中, SSP1 路径为可持续性模式, 该路径下世界将普遍转向更可持续的模式, 社会发展的重点从经济增长转向社会福祉, 地区间不平等性下降; SSP2 路径为中间模式, 该路径下各社会经济要素的发展遵循历史趋势, 全球努力实现可持续发展目标, 但进展缓慢, 收入不平等持续存在或改善缓

慢; SSP3 路径为可持续发展阻碍模式, 该路径下各国更加专注于本地区的能源和资源安全问题, 而牺牲了更长远的发展, 社会经济环境发展要素不可持续性较强。

粗钢未来需求分析参考 Akashi 等<sup>[55]</sup> 和 Hanaoka 等<sup>[56]</sup> 中提出的需求评估模型。该方法使用钢铁生产和贸易模型估计钢铁产量, 以人均 GDP 作为解释变量来制定人均粗钢消费, 假定人均消费随人均 GDP 增长呈 S 型曲线, 则未来粗钢需求等于人均消费量乘以人口。

$$\ln SCNSP_{i,t} = \frac{scnspa_i}{1 + \exp[-scnspc_i(GDPP_{i,t} - scnspb_i)]} \quad (4)$$

式中:  $SCNSP_{i,t}$  为  $t$  年份  $i$  区域的人均粗钢需求量;  $scnspa$  为粗钢需求量饱和水平;  $GDPP$  为人均 GDP;  $scnspb$  和  $scnspc$  分别为斜率和截距。

$$SCNS_{i,t} = SCNSP_{i,t} \times POP_{i,t} \quad (5)$$

式中:  $SCNS$  为粗钢需求量;  $POP$  为人口。本部分使用的 GDP、人口和人均消费等参数是基于 SSP 和工业生产模型设置的。

当生产量大于或等于需求量减进口加出口时, 生产量可满足消费需求。

$$SCN_{i,t} \geq (SCNS_{i,t} - SMC_{i,t} + SEXC_{i,t}) \quad (6)$$

式中:  $SCN$  为生产量;  $SMC$  为进口量;  $SEXC$  为出口量。

基于上述模拟方法, 得出中国 2020—2060 年 3 种共享社会经济路径下的钢铁需求 (图 1), 其中, 高需求路径、中需求路径和低需求路径分别对应 SSP1、SSP2 和 SSP3 路径。

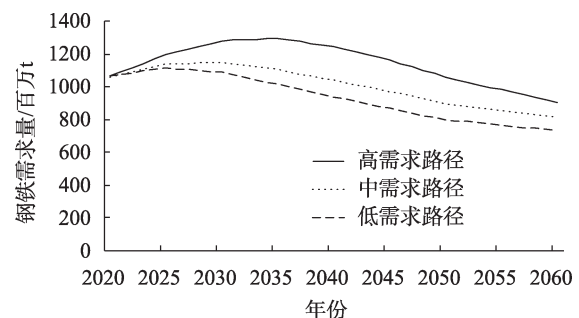


图1 不同共享社会经济路径下2020—2060年中国钢铁需求量

Figure 1 Iron and steel demand in China under different Shared Socioeconomic Pathways, 2020–2060

2.2.2 钢铁行业减排措施情景

模型中原材料价格采用近年平均价格,其CO<sub>2</sub>及污染物排放因子采用IPCC国家温室气体清单指南公布数据。生产技术和节能减排技术的初期安装成本、维护成本、普及率及节能减排效果等信息参考《国家重点节能低碳技术推广目录》等官方文件。粗钢产量和电弧炉比例等参数参考表1。基于钢铁行业的减排特点,本文主要考虑4种推进行业减排的关键措施,参见表2。基于4种减排措施设置了8种减排情景,例如,BaU\_F情景展现了钢铁的生产结构保持2020年水平,钢铁减排技术保持2020年水平且减排技术普及率是固定的,没有碳政策干预,也没有应用碳中和技术。

(1)生产结构调整

由于短流程和氢能炼钢等清洁生产方式受到

废钢回收量和生产成本等因素的制约,本文将首先分析未来中长期的废钢存量,以估算短流程生产潜力;其次,根据氢能源生产运输技术相关展望及研究结果假设氢能炼钢的未来发展潜力<sup>[18]</sup>。相应地,本文设定了两种生产结构情景,即生产结构不变情景(以表2中BaU代表)和长流程比例下降情景(以表2中Str代表)。

(2)减排技术普及程度

先进生产设备和先进节能减排技术的应用是钢铁行业实现低碳发展的关键要素之一,本文参考《钢铁行业节能减排先进适用技术指南》,选取23个节能减排技术,并分析减排技术普及程度变化产生的减排效果。具体技术见图2。

(3)碳政策干预

碳税是促进行业减排和提升先进技术普及率的重要手段,本文以现行环境税为基础,对CO<sub>2</sub>及大气污染物排放征收税费(表2中Str\_T情景)。通过对不同税价的敏感性分析,确定当碳价在2060年达到2500元/t排放时实现减排成本效益最佳<sup>[49]</sup>;通过分析碳税对生产结构转变和先进生产技术和节能减排技术普及的影响,评估未来钢铁行业的碳排放变化。

(4)碳中和技术应用

长期来看,实现全废钢粗钢生产和全氢气生产过程仍然需要突破关键技术瓶颈,在粗钢生产流程中仍需消耗部分化石燃料用于调节钢铁中的元素含量和产品质量。碳捕集和封存技术(Carbon Capture and Storage, CCS)对钢铁行业实现碳中和目标

表1 模型部分参数设置

Table 1 Parameter settings in the model

参数类型	2020年	2030年	2040年	2055年	2060年
生产结构不变情景下EAF比例/%	10.6	10.6	10.6	10.6	10.6
长流程比例下降情景下EAF比例/%	10.6	30.7	44.0	48.4	77.2
长流程比例下降情景下产能利用率/%	89	90	89	87	87
自主减排计划中新能源占比/%	15	20	25 <sup>(a)</sup>	30 <sup>(a)</sup>	30 <sup>(a)</sup>
先进技术普及率/%	G	S	S	S	S
碳税/(元/t)	0	625	1250	1875	2500

注:(a)表示数据来自本文估算。G=数据来自钢铁工业先进适用节能减排技术指南<sup>[57]</sup>;S=模型选择。其他参数参考文献[49]。

表2 不同钢铁需求情景下的减排措施设置

Table 2 Setting of emission reduction measures under different iron and steel demand scenarios

仿真情景	减排措施情景描述			
	生产结构调整	减排技术普及	碳政策干预	碳中和技术应用
BaU_F	保持2020年水平	普及率固定,保持2020年水平	无	无
BaU_P	保持2020年水平	普及率随市场发展变化	无	无
BaU_T	保持2020年水平	普及率随市场发展变化	有	无
BaU_C	保持2020年水平	普及率随市场发展变化	有	有
Str_F	长短流程比例变化,短流程占比从2021年开始逐年升高	普及率固定,保持2020年水平	无	无
Str_P	长短流程比例变化,短流程占比从2021年开始逐年升高	普及率随市场发展变化	无	无
Str_T	长短流程比例变化,短流程占比从2021年开始逐年升高	普及率随市场发展变化	有	无
Str_C	长短流程比例变化,短流程占比从2021年开始逐年升高	普及率随市场发展变化	有	有

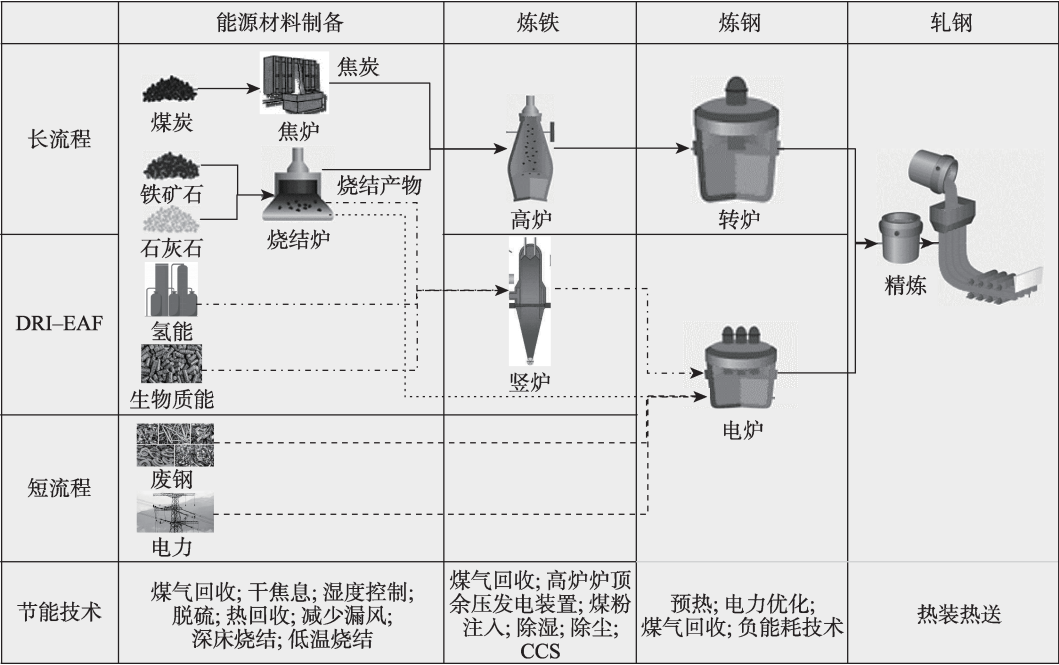


图2 钢铁不同生产流程及相应的节能减排技术

Figure 2 Different processes of iron and steel production and the corresponding energy saving and emission reduction technology

甚至负碳排放将发挥重要作用<sup>[1]</sup>。目前由于CCS技术成本较高以及去除效率低等因素,该技术尚未大范围投入使用。本文假设未来CCS成本将逐渐降低,去除效率逐步得到提升,在碳税等政策的激励下,CCS普及率将逐步提高(表2中Str\_C情景),从而提高钢铁行业的减排潜力。

本文将在SSP1-SSP3对应的高、中、低3种粗钢需求背景下,基于钢铁行业低碳发展趋势,分析上

述4种减排措施及其组合对中国钢铁行业2020—2060年的节能减排贡献。通过对比不同情景之间的结果,分析11种减排措施组合对钢铁行业低碳发展的影响,具体描述见表3。

本文中调查的能源类型主要包括煤炭、石油、天然气、生物质能、热力、回收再利用能、焦炭用煤、电力以及氢能;原料类型主要包括铁矿石和废钢;产生的气体排放主要包括CO<sub>2</sub>、甲烷(CH<sub>4</sub>)、一氧化

表3 不同减排措施对钢铁行业碳减排的影响

Table 3 Impact of different emission reduction measures on carbon emission reduction in the iron and steel industry

	情景对比	影响因素
$I_{str}$	Str_F-BaU_F	生产结构调整
$I_{pen}$	Str_P-Str_F	减排技术普及
$I_{tax}$	Str_T-Str_P	碳政策干预
$I_{ccs}$	Str_C-Str_T	碳中和技术应用
$C_{sp}$	Str_P-BaU_F	生产结构调整和减排技术普及组合
$C_{st}$	Str_T-BaU_P	生产结构调整和碳政策干预组合
$C_{pt}$	Str_T-Str_F	减排技术普及和碳政策干预组合
$C_{tc}$	Str_C-Str_P	碳政策干预和碳中和技术应用组合
$C_{stc}$	Str_C-BaU_P	生产结构调整、碳政策干预和碳中和技术应用组合
$C_{spt}$	Str_T-BaU_F	生产结构调整、减排技术普及和碳政策干预组合
$C_{ptc}$	Str_C-Str_F	减排技术普及、碳政策干预和碳中和技术应用组合
$C_{sptc}$	Str_C-BaU_F	生产结构调整、减排技术普及、碳政策干预和碳中和技术应用组合

二氮( $\text{N}_2\text{O}$ )、二氧化硫( $\text{SO}_2$ )、氮氧化物( $\text{NO}_x$ )、黑炭(BC)、细颗粒物( $\text{PM}_{2.5}$ 和 $\text{PM}_{10}$ )、有机碳(OC)、一氧化碳(CO)、氨气( $\text{NH}_3$ )、挥发性有机物(VOC)以及重金属汞排放。

本文的总体框架如图3所示。

### 3 数据来源

本文数据来源涵盖中国(因数据缺失和没有钢铁厂的原因,未分析台湾、西藏和澳门)和各省级行政区的统计年鉴、能源统计年鉴、钢铁工业年鉴、社会与经济发展统计数据库,以及美国国家航空航天局(NASA)、国际能源局(IEA)等机构发布的数据集和报告等。部分整合数据由AIM/Enduse模型获取。具体数据来源可参考文献[23,49,58]。

## 4 结果与分析

### 4.1 钢铁行业的能源和资源消耗

根据钢铁生产的特点,本文中钢铁的能源消耗

主要包括提供热量的燃料消耗、作为还原剂的焦炭消耗、电力消耗、氢能源及回收煤气消耗;原料消耗主要包括铁矿石和废钢。

#### 4.1.1 总能耗和能源消耗强度

2020年总能耗为7.65亿t煤当量(tce),随着粗钢需求的下降,在其他条件不变的情况下(BaU\_F情景),高、中、低需求路径下的总能耗将在2060年分别下降为6.52亿、5.87亿和5.25亿tce(图4)。生产结构调整将使总能耗在2060年比BaU\_F情景下降51%~55%( $I_{\text{str}}$ ),减排技术普及将比BaU\_F情景下降7%~24%( $I_{\text{pen}}$ ),碳政策干预和碳中和技术应用的节能效果( $I_{\text{tax}}$ 和 $I_{\text{ccs}}$ )仅为1%~6%。2060年,高、中、低需求路径下的总能耗最低将下降为2.28亿、2.05亿和1.84亿tce( $C_{\text{sptc}}$ ),比2020年能耗水平下降76%、73%和70%。

能源消耗强度在BaU\_F情景下将保持在719 kgce/t的能耗水平,在高、中、低需求路径下,通过各

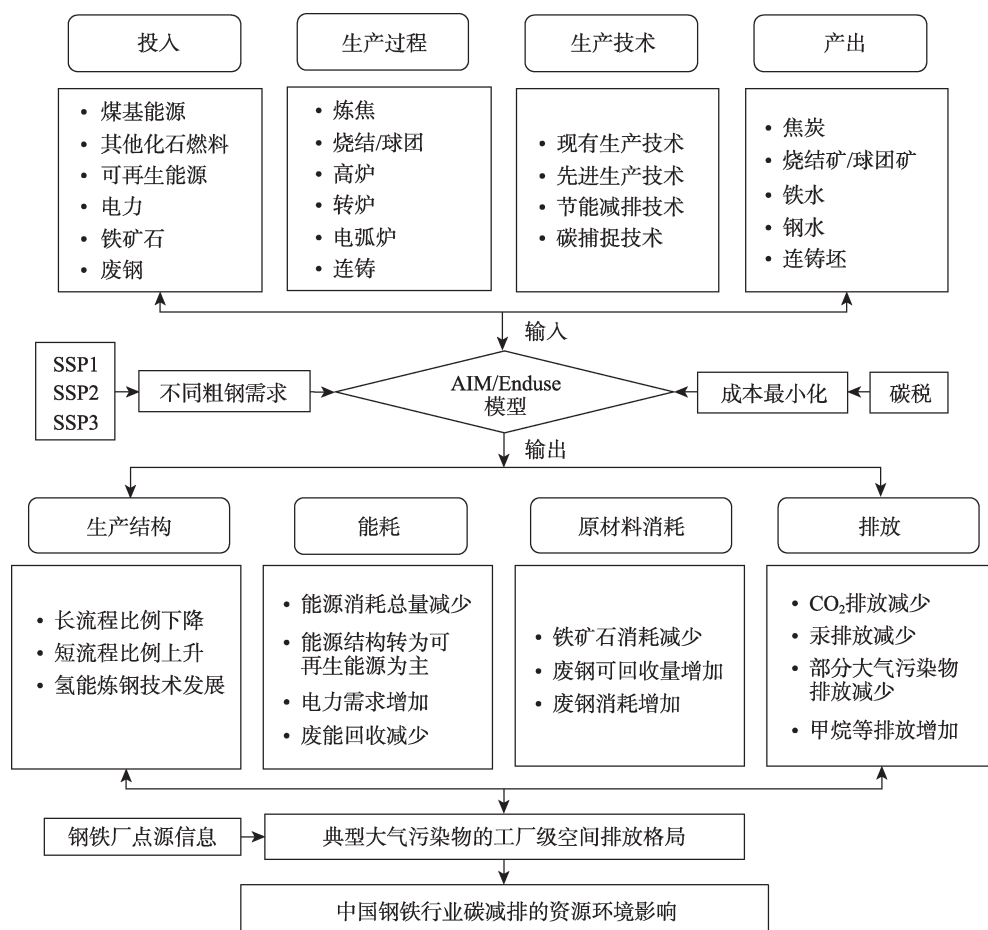


图3 研究框架图

Figure 3 Framework of this study



2024年4月

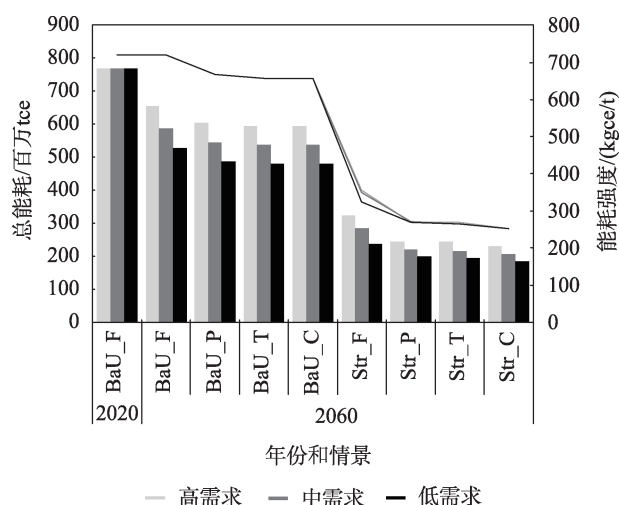


图4 不同需求路径下钢铁行业各情景总能耗  
(柱状图,左轴)及能耗强度(线形图,右轴)

Figure 4 Total energy consumption (histogram, left axis) and energy intensity (line graph, right axis) in the iron and steel industry under different crude steel demand situations

种减排措施的共同作用( $C_{sptc}$ ),2060年能源消耗强度将减少约65%,分别下降至252、251和252 kgce/t。燃料消耗强度在2020年为105 kgce/t,通过4种减排措施综合作用( $C_{sptc}$ ),2060年燃料消耗强度将在高、中、低需求路径下分别下降为12、11和12 kgce/t;而电力消耗强度将由2020年的76 kgce/t分别增加至97、96和97 kgce/t。

#### 4.1.2 燃料消耗

燃料在钢铁生产过程中可提供热量,使钢铁生产达到所需要的反应温度。2020年钢铁行业燃料消耗总量为1.12亿 tce。在低需求路径下,能耗将随着需求量在2025年达到1.17亿 tce的峰值,随后下降至2060年的0.77亿 tce(图5a)。在2060年,中需求和高需求路径下的燃料消耗将比低需求路径下分别增加12%和24%左右;根据废钢存量分析,2060年短流程的粗钢产量占总产量比例约70%,直接还原铁电弧炉(DRI-EAF)比例约1.5%,由此,生产结构由长流程为主转变为短流程为主的调整策略( $I_{str}$ )将减少55%的燃料消耗。减排技术普及( $I_{pen}$ )和碳政策干预( $I_{tax}$ )将减少40%和13%的燃料消耗;生产结构调整和减排技术普及将比BaU\_F情景( $C_{sp}$ )节约78%的燃料消耗。燃料消耗在低需求路径和多减排措施协同作用下将达到2060年最低

消耗值867万 tce,这将比BaU\_F情景( $C_{sptc}$ )节约88%的燃料,同时比2020年水平降低92%。

2020年,煤炭、天然气和热力分别占能源消耗总量的76%、17%和6%(图5b)。在BaU\_F情景下,2060年将保持现有能源结构,而随着减排措施的不断强化,在BaU\_C情景下煤炭消耗降低为60%,生物质能将初步应用到钢铁生产中,并提供生产所需7%的热量。随着生产结构的调整,虽然总燃料消耗量在2060年有了大幅下降,但在减排技术普及( $Str_P$ )和碳税政策( $Str_C$ )情景下,煤炭的占比仍高达52%,而在碳中和技术应用情景下( $Str_C$ )煤炭占比逐步下降为0,被占比为69%的生物质能所替代。

#### 4.1.3 焦炭消耗

除提供热量外,部分煤基能源还承担了还原剂的作用,同时调节钢成分。因此,该部分焦炭消耗很难被其他类型能源所替代。2020年焦炭消耗量为4.32亿 tce,在BaU\_F情景下焦炭消耗将随着高、中、低需求情景下粗钢需求量变化先增加,后分别下降至2060年的3.68亿、3.31亿和2.96亿 tce。生产结构调整策略( $I_{str}$ )将使Str\_F情景下2060年的焦炭消耗量比BaU\_F情景下降72%~78%;减排技术普及( $I_{pen}$ )将带来1%~35%不等的焦炭节约效果;碳政策干预( $I_{tax}$ )和碳中和技术应用( $I_{ccs}$ )对降低焦炭消耗的作用不明显,最高仅为15%。通过降低粗钢消耗,以及各节能措施叠加实施( $C_{sptc}$ ),2060年最低焦炭消耗量可将至4471万 tce,将比BaU\_F情景降低83%,比2020年水平下降90%。

#### 4.1.4 电力和氢能源消耗

钢铁行业2020年的电力消耗量为8055万 tce,随着高、中、低需求情景下粗钢生产量的不同,电力消耗在BaU\_F情景下将分别下降至6855万、6173万和5525万 tce。电力作为短流程的主要能量来源,随着短流程比例的上升( $I_{str}$ ),电力消耗将迅速增加36%~40%(图6a)。由于目前节能减排技术多应用于长流程,因此减排技术普及( $I_{pen}$ )可节约4%~7%的用电量。碳中和技术应用增加将大幅提高电力消耗。由此,各减排措施叠加实施后( $C_{sptc}$ ),高、中、低粗钢需求量情景下2060年的电力消耗将分别为8783万、7874万和7079万 tce,虽比BaU\_F情景增加



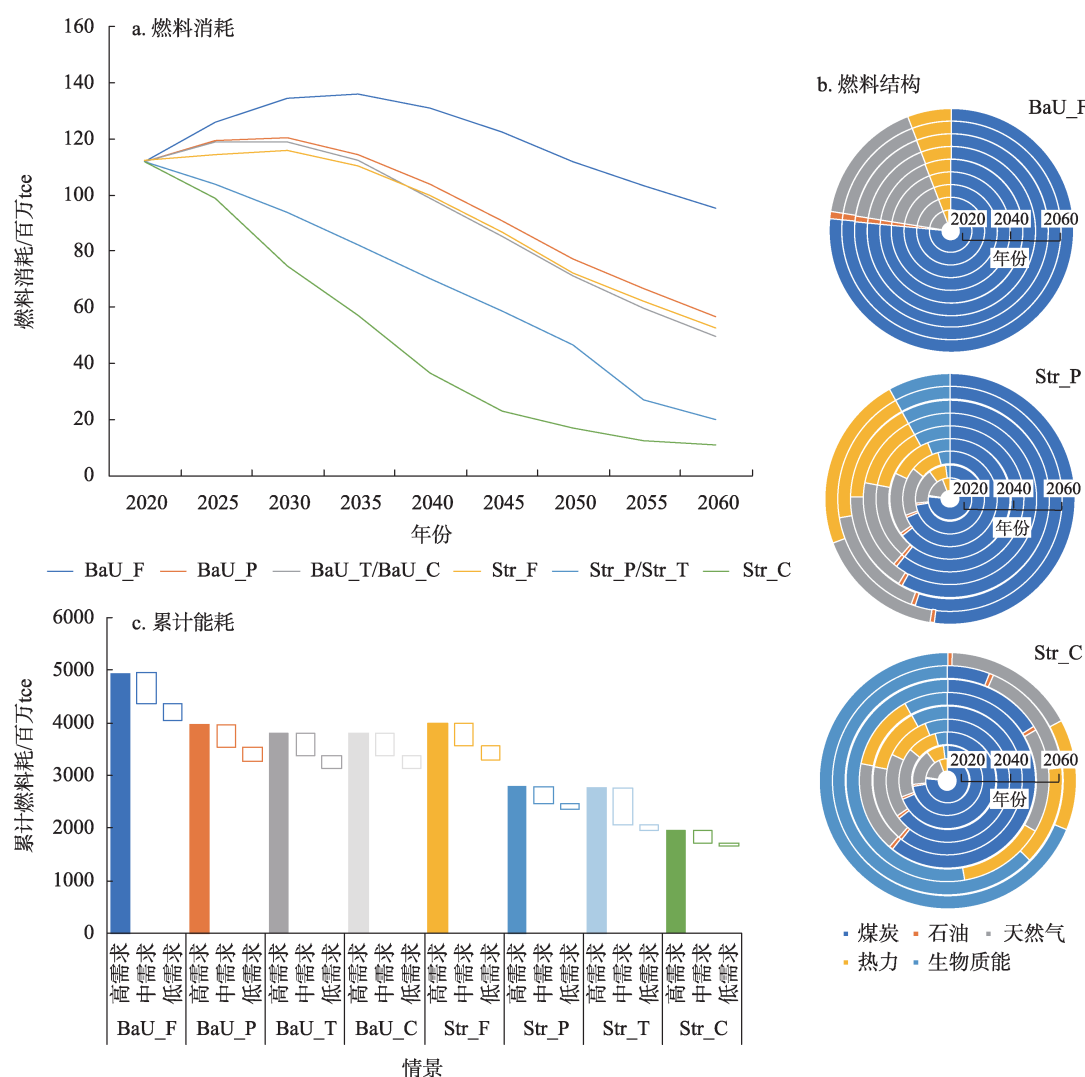


图5 高需求路径下不同情景的粗钢生产燃料消耗(a)和燃料结构(b),以及不同需求路径下不同情景的累计能耗量(c)

Figure 5 Fuel consumption (a) and fuel structure (b) for crude steel production under different scenarios in the high demand situation, and the cumulated fuel consumption under different scenarios in different demand situations (c)

约28%,但仍比2020年水平下降2%~12%。

本文通过评估DRI\_EAF技术在未来生产成本下降和生产效率提升的潜力,以成本最小化为目标分析得到,在碳政策干预和碳中和技术应用推动下,DRI\_EAF技术将在2060年生产约4%的粗钢,相应的氢能源消耗也将逐年增加,在高、中、低需求情景下,2060年的氢能消费将增加至926万、834万和746万tce。

#### 4.1.5 废能废热回收

在长流程生产过程中可产生焦炉煤气、高炉煤气、转炉煤气和显热等副产品,通过废气废热回收再利用技术,将此部分煤气和热量重新导入到生产

过程中,可替代部分化石能源消耗,从而减少外部能量的消耗。2020年共有1.4亿tce回收煤气被重新再利用(图6b),在其他条件不变的情况下,随着高、中、低粗钢需求路径中粗钢产量下降,2060年回收煤气将分别下降至11966万、10775万和9645万tce。随着长流程比例逐渐下降,Str\_F情景下2060年煤气回收量将比BaU\_F情景( $I_{str}$ )下降73%~79%;随着先进技术的普及( $I_{pen}$ )可增加20%~172%不等的煤气回收再利用比例;而碳政策干预和碳中和技术最高可使煤气回收再利用量( $I_{tax}$ 和 $I_{ccs}$ )增加15%。最终通过多措并举( $C_{spic}$ ),2060年煤气回收量在高、中、低需求路径下降为6471万、5829万和5215万

2024年4月

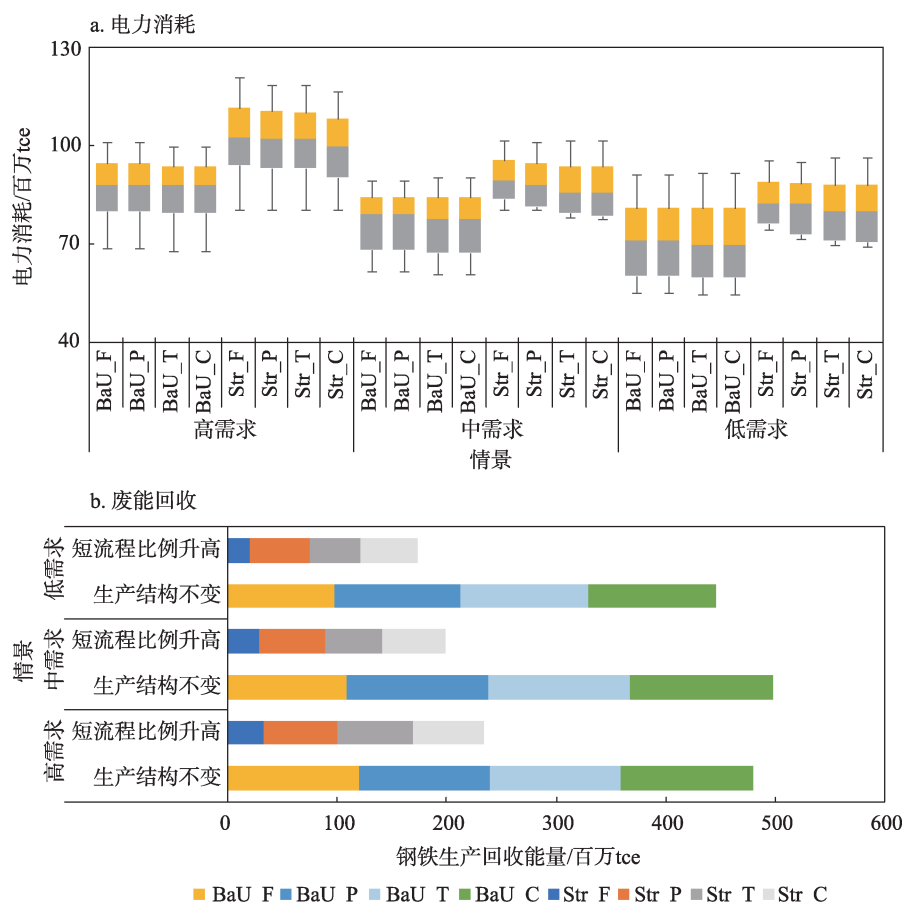


图6 不同需求路径下2060年不同情景的钢铁行业电力消耗(a)及2060年废能回收(b)

Figure 6 Electricity consumption in different scenarios for 2060 (a) and recycled energy in 2060 of the iron and steel industry under different demand situations (b)

tce, 分别比2020年水平下降了54%、59%和63%。

#### 4.1.6 钢铁生产原材料消耗

作为长流程炼钢的主要原材料,2020年铁矿石消耗量为14.3亿t,随着粗钢需求量减少,在BaU\_F情景下,2060年铁矿石消耗量在高、中、低需求路径下将分别下降为12.19亿、10.97亿和9.82亿t。而Str\_F情景中短流程生产比例的增加,将使2060年铁矿石消耗比BaU\_F情景下降72%~79%( $I_{str}$ )。在综合减排措施作用下(Str\_C情景),2060年铁矿石消耗在高、中、低需求路径下可下降为3.34亿、3.01亿和2.70亿t,分别比2020年水平下降81%、79%和77%。

废钢作为短流程的生产原材料,在2020年消耗量为1.2亿t。在BaU\_F情景下,随着粗钢需求量减少,2060年在高、中、低需求路径下的废钢消耗量将分别下降为1.03亿、0.93亿和0.83亿t。随着短流程

比例的不断上升以及短流程生产过程中铁水的使用量逐步下降至5%,2060年废钢的使用量将在高、中、低需求路径的Str\_C情景下分别上升至6.79亿、6.11亿和5.47亿t。

## 4.2 钢铁行业的环境排放影响

本文中钢铁行业CO<sub>2</sub>和大气污染物排放包含燃料燃烧产生的直接排放和电力消耗产生的间接排放。电力生产结构参考国家电网能源研究所最新出版的中国能源和电力展望:火电比例将在2060年下降至5%,结合CCS技术,电力行业将在2060年实现零排放。表4展示了不同需求路径及减排措施下钢铁行业2060年的环境排放影响。

### 4.2.1 CO<sub>2</sub>排放

2020年CO<sub>2</sub>排放量为20.71亿t。在BaU\_F情景下,2060年CO<sub>2</sub>排放量在高、中、低需求路径下将下降至17.63亿、15.87亿和14.21亿t。从单一减排

表4 不同需求路径及减排措施下钢铁行业环境排放影响

Table 4 Impacts of environmental emissions from the iron and steel industry under different demand paths and implementations

序号	环境变量	$I_{str}$	$I_{pen}$	$I_{tax}$	$I_{ccs}$	$C_{sp}$	$C_{st}$	$C_{pt}$	$C_{tc}$	$C_{sic}$	$C_{spt}$	$C_{ptc}$	$C_{spic}$
1	CO <sub>2</sub> (×10 <sup>9</sup> t)	-1.12	-0.29	0.00	-0.12	-1.40	-1.21	-0.29	-0.12	-1.33	-1.40	-0.41	-1.53
2	CH <sub>4</sub> (×10 <sup>5</sup> t)	-1.81	-0.42	0.00	1.33	-2.22	-1.71	-0.42	1.33	-0.37	-2.22	0.92	-0.89
3	N <sub>2</sub> O (×10 <sup>6</sup> t)	-3.49	-1.21	0.00	0.02	-4.70	-3.75	-1.21	0.02	-3.73	-4.70	-1.19	-4.68
4	SO <sub>2</sub> (×10 <sup>6</sup> t)	-1.93	-0.75	0.00	-0.21	-2.67	-2.21	-0.75	-0.21	-2.42	-2.67	-0.96	-2.89
5	NO <sub>x</sub> (×10 <sup>5</sup> t)	-1.78	-3.55	0.00	-0.51	-5.33	-3.02	-3.55	-0.51	-3.53	-5.33	-4.06	-5.84
6	BC (×10 <sup>4</sup> t)	-0.03	-0.92	0.00	0.01	-0.95	-0.33	-0.92	0.01	-0.32	-0.95	-0.91	-0.94
7	PM <sub>2.5</sub> (×10 <sup>5</sup> t)	-3.48	-0.90	0.00	-0.13	-4.38	-3.65	-0.90	-0.13	-3.78	-4.38	-1.03	-4.51
8	PM <sub>10</sub> (×10 <sup>5</sup> t)	-4.71	-1.65	0.00	-0.06	-6.36	-5.07	-1.65	-0.06	-5.13	-6.36	-1.70	-6.42
9	OC (×10 <sup>3</sup> t)	-0.10	-2.37	0.00	2.58	-2.47	-0.44	-2.37	2.58	2.14	-2.47	0.21	0.11
10	CO (×10 <sup>7</sup> t)	-0.42	-0.53	0.00	-0.03	-0.95	-0.58	-0.53	-0.03	-0.61	-0.95	-0.56	-0.98
11	NH <sub>3</sub> (×10 <sup>4</sup> t)	-1.07	-1.26	0.00	-0.23	-2.33	-1.48	-1.26	-0.23	-1.72	-2.33	-1.49	-2.56
12	VOC (×10 <sup>4</sup> t)	-1.19	-2.16	0.00	2.49	-3.35	-1.47	-2.16	2.49	1.02	-3.35	0.33	-0.85
13	Hg (t)	4.78	-4.80	0.00	-0.99	-0.01	3.07	-4.80	-0.99	2.08	-0.01	-5.78	-1.00
14	CO <sub>2</sub> (×10 <sup>9</sup> t)	-1.03	-0.24	-0.06	-0.06	-1.26	-1.14	-0.29	-0.11	-1.20	-1.32	-0.35	-1.37
15	CH <sub>4</sub> (×10 <sup>5</sup> t)	-1.66	-0.34	3.42	-2.28	-2.00	1.88	3.07	1.14	-0.40	1.42	0.79	-0.87
16	N <sub>2</sub> O (×10 <sup>6</sup> t)	-3.20	-1.03	0.46	-0.46	-4.23	-2.91	-0.56	0.003	-3.37	-3.76	-1.03	-4.23
17	SO <sub>2</sub> (×10 <sup>6</sup> t)	-1.77	-0.64	-0.10	-0.09	-2.41	-2.09	-0.74	-0.19	-2.18	-2.51	-0.83	-2.60
18	NO <sub>x</sub> (×10 <sup>5</sup> t)	-1.58	-3.22	-0.24	-0.22	-4.80	-2.97	-3.47	-0.47	-3.19	-5.04	-3.69	-5.27
19	BC (×10 <sup>4</sup> t)	-0.01	-0.84	0.26	-0.26	-0.85	-0.04	-0.58	-0.001	-0.30	-0.59	-0.84	-0.85
20	PM <sub>2.5</sub> (×10 <sup>5</sup> t)	-3.20	-0.74	0.02	-0.14	-3.94	-3.27	-0.73	-0.12	-3.41	-3.93	-0.87	-4.06
21	PM <sub>10</sub> (×10 <sup>5</sup> t)	-4.33	-1.40	0.43	-0.50	-5.73	-4.13	-0.97	-0.06	-4.63	-5.30	-1.46	-5.79
22	OC (×10 <sup>3</sup> t)	-0.03	-2.19	6.89	-4.71	-2.22	6.49	4.70	2.19	1.79	4.67	-0.01	-0.04
23	CO (×10 <sup>7</sup> t)	-0.38	-0.48	0.08	-0.11	-0.86	-0.44	-0.40	-0.03	-0.55	-0.77	-0.51	-0.88
24	NH <sub>3</sub> (×10 <sup>4</sup> t)	-0.97	-1.13	-0.21	-0.01	-2.10	-1.54	-1.33	-0.21	-1.55	-2.30	-1.34	-2.31
25	VOC (×10 <sup>4</sup> t)	-1.04	-1.97	6.67	-4.55	-3.01	5.34	4.70	2.11	0.79	3.65	0.14	-0.90
26	Hg (t)	4.53	-4.54	-0.57	-0.33	-0.01	2.19	-5.11	-0.90	1.86	-0.58	-5.44	-0.91
27	CO <sub>2</sub> (×10 <sup>9</sup> t)	-0.98	-0.15	-0.05	-0.05	-1.13	-1.02	-0.20	-0.10	-1.07	-1.18	-0.25	-1.23
28	CH <sub>4</sub> (×10 <sup>5</sup> t)	-1.58	-0.21	3.06	-1.98	-1.79	1.68	2.85	1.08	-0.30	1.27	0.86	-0.72
29	N <sub>2</sub> O (×10 <sup>6</sup> t)	-3.05	-0.74	0.42	-0.40	-3.78	-2.61	-0.32	0.01	-3.01	-3.37	-0.72	-3.77
30	SO <sub>2</sub> (×10 <sup>6</sup> t)	-1.68	-0.46	-0.10	-0.08	-2.14	-1.87	-0.56	-0.18	-1.95	-2.24	-0.64	-2.33
31	NO <sub>x</sub> (×10 <sup>5</sup> t)	-1.50	-2.80	-0.22	-0.20	-4.30	-2.66	-3.01	-0.41	-2.85	-4.52	-3.21	-4.71
32	BC (×10 <sup>4</sup> t)	-0.01	-0.76	0.23	-0.23	-0.76	-0.03	-0.52	0.01	-0.26	-0.53	-0.75	-0.76
33	PM <sub>2.5</sub> (×10 <sup>5</sup> t)	-3.05	-0.48	0.01	-0.12	-3.53	-2.93	-0.47	-0.11	-3.05	-3.51	-0.59	-3.64
34	PM <sub>10</sub> (×10 <sup>5</sup> t)	-4.12	-1.01	0.39	-0.43	-5.13	-3.70	-0.62	-0.04	-4.13	-4.74	-1.05	-5.17
35	OC (×10 <sup>3</sup> t)	-0.03	-1.96	6.17	-4.09	-1.99	5.81	4.21	2.08	1.72	4.18	0.12	0.09
36	CO (×10 <sup>7</sup> t)	-0.36	-0.41	0.07	-0.10	-0.77	-0.39	-0.33	-0.02	-0.49	-0.69	-0.43	-0.79
37	NH <sub>3</sub> (×10 <sup>4</sup> t)	-0.92	-0.96	-0.18	-0.005	-1.88	-1.38	-1.14	-0.19	-1.38	-2.06	-1.14	-2.06
38	VOC (×10 <sup>4</sup> t)	-0.99	-1.70	5.97	-3.96	-2.70	4.78	4.26	2.01	0.82	3.27	0.30	-0.69
39	Hg (t)	4.38	-4.39	-0.51	-0.29	-0.01	1.96	-4.90	-0.80	1.67	-0.52	-5.19	-0.81

注:序号1~13为高需求路径情景、序号14~26为中需求路径情景、序号27~39为低需求路径情景; $I_{str}$ 至 $C_{spic}$ 情景代码请参见表3;数值为负表示减排措施产生的排放量降低的效果,数值为正表示增长的效果。



2024年4月

措施效果看,与基准情景相比,2060年生产结构调整( $I_{str}$ )将减少63%~68%的 $CO_2$ 排放,提高减排技术普及率( $I_{pen}$ )有助于在 $I_{str}$ 基础上进一步减少11%~44%的 $CO_2$ 排放,碳政策干预以及碳中和技术应用可分别在 $I_{str}$ 和 $I_{pen}$ 基础上进一步降低3%~34%的 $CO_2$ 排放( $I_{tax}$ 和 $I_{ccs}$ )。4种措施综合作用减排效果最强,使 $CO_2$ 排放量在2060年可分别降至2.37亿t(高需求路径)、2.13亿t(中需求路径)和1.91亿t(低需求路径)。

#### 4.2.2 大气污染物排放

总体来看,相较于2020年,2060年大气污染物的排放量均呈下降趋势,降幅在30%~96%左右;在不同需求情景下,不同减排措施对于大气污染物的影响效果不一,其中较为明显的是由于 $CH_4$ 、 $N_2O$ 、BC、OC以及VOC排放与生物质能源消耗有关,因此这些污染物会在一些措施情景中呈增长的趋势。综合减排措施( $C_{sptc}$ )对于降低 $SO_2$ 、 $NO_x$ 、 $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$ 、CO以及 $NH_3$ 的减排效果较为明显。

#### 4.2.3 汞排放

在BaU\_F情景下,汞排放将从2020年的21.50 t,下降为2060年的18.30 t(高需求路径)、16.50 t(中需求路径)和14.80 t(低需求路径)。短流程炼钢是汞排放的重要来源,因此随着生产结构向以短流程生产为主的转变,2060年生产结构调整( $I_{str}$ )将增加为23.10 t(高需求路径)、21.00 t(中需求路径)和19.10 t(低需求路径)的汞排放,减排技术普及可在 $I_{str}$ 基础上降低21%~23%的汞排放( $I_{pen}$ ),碳政策干预和碳中和应用可分别在 $I_{str}$ 和 $I_{pen}$ 基础上降低2%~5%的汞排放( $I_{tax}$ 和 $I_{ccs}$ )。多措施综合作用下,可使2060年汞排放下降到17.30 t(高需求路径)、15.60 t(中需求路径)和14.00 t(低需求路径)。

### 4.3 典型温室气体、大气污染物工厂级空间排放格局

#### 4.3.1 $CO_2$ 排放

在4种减排措施的综合作用下,相较于2020年,在2060年3种需求情景下,钢铁厂碳排放的省级空间格局发生了变化(图7a-7c)。2020年碳排放量前五的省份是河北、江苏、辽宁、山东和山西。高需求路径下,2060年 $CO_2$ 排放量前五的省份为河北、山东、江苏、广东和山西,这些省份亦是钢铁厂

分布较多的省份;对于每一个省份来说, $CO_2$ 排放量较大的钢铁厂分别为河北津西钢铁、日照钢铁、江苏沙钢、湛江宝钢和太原钢铁。碳排放量下降比较大的省份为重庆(99.22%)、北京(98.14%)和安徽(97.03%),其中,重庆钢铁、首钢以及马鞍山钢铁分别为上述三省碳减排最大的钢铁厂。中需求路径下,2060年 $CO_2$ 排放量前五的省份为河北、江苏、山东、广东和山西,其最大排放钢铁厂信息同高需求情景; $CO_2$ 排放量下降幅度较大的省份为重庆(99.15%)、贵州(98.65%)和北京(97.99%),其中贵州降幅最大的钢铁厂为贵阳钢铁。低需求路径下,2060年 $CO_2$ 排放量前五的省份为江苏、河北、广东、山东和广西,广西排放最大的钢铁厂为防城港钢铁,其他省份钢铁厂情况同高需求情景;碳排放量降幅较大的省份为内蒙古(99.73%)、重庆(98.88%)以及吉林(98.49%),其中,华业特钢、重庆钢铁以及四平现代钢铁为上述三省碳排放降幅最大的钢铁厂。

#### 4.3.2 甲烷排放

2060年在高、中、低需求情景甲烷排放量较高的省份以及钢铁厂与碳排放情况趋同(图7d-7f)。3个情景下,甲烷排放下降最大的省份以及钢铁厂情况与碳减排信息相同,但各省的甲烷减排程度不同,例如,高需求情景下,重庆、北京和安徽分别下降94.84%、87.76%以及80.47%;中需求情景下,重庆、贵州以及北京分别下降94.61%、91.40%以及87.20%;低需求情景下,内蒙古、重庆以及吉林分别下降98.22%、92.65%以及90.08%。

#### 4.3.3 汞排放

2060年在高、中、低需求情景汞排放量较高的省份以及钢铁厂均与碳排放情况趋同(图7g-7i)。2060年,不同情景下汞排放影响呈现区域异质性。在高、中、低需求情景中,分别有12个、5个以及3个省份呈汞排放增长趋势,代表性省份是广东、黑龙江和广西,上述省份汞排放增长最大的钢铁厂是湛江宝钢、建龙钢铁以及防城港钢铁。在高、中、低需求情景中,分别有18个、25个和27个省份呈汞排放下降的趋势,其中3个情景中下降最大省份以及工厂信息同碳排放的3个情景。

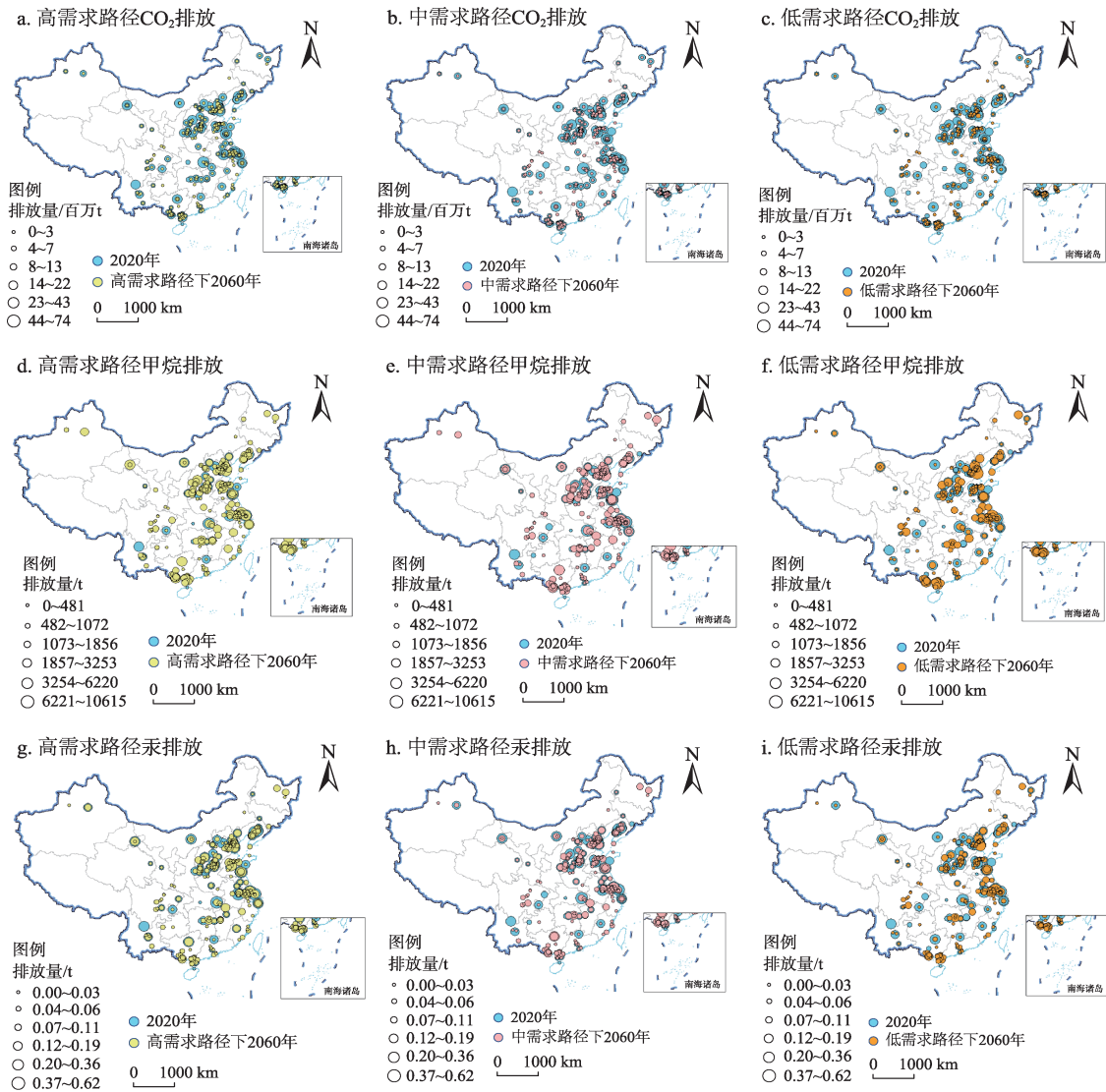


图7 不同需求路径下2060年各地区钢铁行业工厂级大气污染物空间格局

Figure 7 Spatial pattern of air pollutants at the factory level in the steel industry in various regions under different demand pathways, 2060

注:基于自然资源部标准地图服务网站GS(2019)1823号标准地图制作,底图边界无修改。

## 5 结论与政策启示

### 5.1 结论

中国钢铁行业正由高速增长阶段向高质量发展阶段逐步过渡,处在转变发展方式、优化经济结构、转换增长动能和积极稳妥推进碳中和的攻关时期。本文通过构建钢铁行业低碳发展综合评估模型,分析2060年不同粗钢需求路径下钢铁行业在生产结构调整、减排技术普及、碳政策以及碳中和技术等措施影响下的资源环境影响,以典型环境排放为例揭示上述影响的区域差异性。主要结论如下:

(1)资源消耗方面。在多种减排措施的综合作

用下,相较于2020年,在2060年钢铁行业总能耗将下降70%~76%。由于碳中和技术的应用,生物质能消耗占燃料消耗总量的比重将上升至69%,电力消耗呈增长趋势。随着氢能源炼钢的推广,氢能的需求也将不断增长。短流程炼钢作为未来钢铁行业低碳发展的主要工艺将增加电力消耗以及废钢的消耗量(至5.41亿~6.79亿t),但铁矿石消耗量将下降77%~81%,煤气回收量将下降54%~63%。

(2)环境排放方面。总体来看,减排措施对于不同环境污染物排放的影响程度不一,减排措施在高需求情景下对于环境污染物排放影响较大。4种

2024年4月

措施组合对于CO<sub>2</sub>的减排效果明显,相较于2020年,多举措减排措施将使碳排放量在2060年减少89%~91%,达到1.91亿~2.37亿t。碳减排措施对于其他大气污染的抵消效应不容忽视,例如,碳中和技术的应用将导致甲烷、有机碳以及挥发性有机物的增加;以短流程为主的钢铁生产趋势将导致汞排放的增加。

(3)区域减污降碳治理方面。典型污染物CO<sub>2</sub>和甲烷的省级尺度和工厂尺度的排放特征趋同,但减排程度不同。汞排在3种情景下区域排放特征异质性明显。

## 5.2 政策启示

上述研究结论为中国钢铁行业高质量绿色低碳转型政策制定提供的启示如下:

(1)钢铁行业生产结构转型需系统谋划,减排措施应用及政策制定应充分考虑区域社会经济发展路径以及区域资源环境禀赋承载力,严防减排措施导致的资源环境治理的“抵消”影响。

(2)钢铁行业短流程发展需考虑多元化污染防治策略,可尝试通过提高废钢质量以及综合污染防治政策等途径从源头降低例如汞等其他污染物排放增高的风险,实现污染物协同减排。

(3)电力系统的可持续发展与钢铁行业高质量低碳发展之间关联不容忽视。生产结构的长变短流程的调整对于电力需求的扩张不容忽视。为了确保钢铁行业高质量低碳转型,电力的清洁化也尤为重要,鉴于中国能源的供应以及消纳之间存在的区域异质性,保障电力的安全以及可持续供应是需要攻克的重要内容。

(4)钢铁行业零碳目标的技术升级仍需重点关注。氢能以及CCS技术是未来钢铁行业重要的减排技术,但现在仍存在技术壁垒以及成本高等瓶颈,未来应加大绿氢和CCS技术的降本研发,从而推动其商业化运用。此外,现有节能减排先进技术主要应用于长流程,而应用于短流程的节能技术较少,未来仍需加大短流程相关节能技术的研发,以适应未来新形势下的钢铁行业发展。

## 参考文献(References):

[1] Shao T M, Pan X Z, Li X, 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, DOI: 10.1016/j.rser.2022.112992.

[2] Liu X M, Peng R, Bai C Q, et al. Technological roadmap towards optimal decarbonization development of China's iron and steel industry[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.157701.

[3] 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, DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.117209.

[4] Liu Z, Deng Z, He G, et al. Challenges and opportunities for carbon neutrality in China[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, 3(2): 141-155.

[5] Kang Z, Liao Q L, Zhang Z, et al. Carbon neutrality orientates the reform of the steel industry[J]. *Nature Materials*, 2022, 21: 1094-1098.

[6] Worldsteel. Steel Statistical Yearbook of Time Series 2020[M]. Belgium: World Steel Association, 2020.

[7] Ren L, Zhou S, Peng T D, et al. A review of CO<sub>2</sub> emissions reduction technologies and low-carbon development in the iron and steel industry focusing on China[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, DOI: 10.1016/j.rser.2021.110846.

[8] Kim J, Sovacool B K, Bazilian M, et al. Decarbonizing the iron and steel industry: A systematic review of sociotechnical systems, technological innovations, and policy options[J]. *Energy Research & Social Science*, 2022, DOI: 10.1016/j.erss.2022.102565.

[9] 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: 1-11.

[10] 张元林, 张上, 李金惠, 等. 中国钢结构建筑的物质流分析[J]. *资源科学*, 2021, 43(3): 546-555. [Zhang Y L, Zhang S, Li J H, et al. Measuring material flow performance of China's steel structure buildings[J]. *Resources Science*, 2021, 43(3): 546-555.]

[11] 李虹, 王帅, 李晨光, 等. 电价调整对宏观经济及产业结构的影响[J]. *资源科学*, 2022, 44(1): 156-168. [Li H, Wang S, Li C G, et al. Impact of electricity price adjustment on macro economy and industrial structure[J]. *Resources Science*, 2022, 44(1): 156-168.]

[12] 刘妍心, 李华姣, 安海忠, 等. 基于“废钢回收”的中国钢铁产业链资源-经济-环境动态耦合[J]. *资源科学*, 2021, 43(3): 588-600. [Liu Y X, Li H J, An H Z, et al. Dynamic coupling of the resource-economic-environment systems of China's steel industrial chain based on scrap steel recycling[J]. *Resources Science*, 2021, 43(3): 588-600.]

[13] 董金池, 汪旭颖, 蔡博峰, 等. 中国钢铁行业CO<sub>2</sub>减排技术及成本研究[J]. *环境工程*, 2021, 39(10): 23-40. [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): 23-40.]

[14] Shen J L, Zhang Q, Xu L S, et al. Future CO<sub>2</sub> emission trends and



- radical decarbonization path of iron and steel industry in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.129354.
- [15] 张锁江, 张香平, 葛蔚, 等. 工业过程绿色低碳技术[J]. *中国科学院院刊*, 2022, 37(4): 511–521. [Zhang S J, Zhang X P, Ge W, et al. Carbon neutral transformative technologies for industrial process[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2022, 37(4): 511–521.]
- [16] 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.]
- [17] 苍大强. 钢铁工业“碳达峰”“碳中和”及低碳技术的误区及现实路径[J]. *中国冶金*, 2021, 31(9): 3–8. [Cang D Q. Misunderstandings and realistic path of “carbon peak” “carbon neutrality” and low carbon technologies in iron and steel industry[J]. *China Metallurgy*, 2021, 31(9): 3–8.]
- [18] 上官方钦, 刘正东, 殷瑞钰. 钢铁行业“碳达峰”“碳中和”实施路径研究[J]. *中国冶金*, 2021, 31(9): 15–20. [Shangguan F Q, Liu Z D, Yin R Y. Study on implementation path of “carbon peak” and “carbon neutrality” in steel industry in China[J]. *China Metallurgy*, 2021, 31(9): 15–20.]
- [19] 邢奕, 崔永康, 田京雷, 等. 钢铁行业低碳技术应用现状与展望[J]. *工程科学学报*, 2022, 44(4): 801–811. [Xing Y, Cui Y K, Tian J L, et al. Application status and prospect of low carbon technology in iron and steel industry[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2022, 44(4): 801–811.]
- [20] Ren L, Zhou S, Ou X M. The carbon reduction potential of hydrogen in the low carbon transition of the iron and steel industry: The case of China[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, DOI: 10.1016/j.rser.2022.113026.
- [21] Yu X, Tan C. China’s pathway to carbon neutrality for the iron and steel industry[J]. *Global Environmental Change*, 2022, DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2022.102574.
- [22] 张琦, 沈佳林, 许立松. 中国钢铁工业碳达峰及低碳转型路径[J]. *钢铁*, 2021, 56(10): 152–163. [Zhang Q, Shen J L, Xu L S. Carbon peak and low-carbon transition path of China’s iron and steel industry[J]. *Iron and Steel*, 2021, 56(10): 152–163.]
- [23] Li Z L, Dai H C, Song J N, et al. Assessment of the carbon emissions reduction potential of China’s iron and steel industry based on a simulation analysis[J]. *Energy*, 2019, 183: 279–290.
- [24] Lu Z Y, Huang L, Liu J, et al. Carbon dioxide mitigation co-benefit analysis of energy-related measures in the air pollution prevention and control action plan in the Jing-Jin-Ji region of China[J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2019, DOI: 10.1016/j.rscx.2019.100006.
- [25] 狄乾斌, 陈小龙, 侯智文. “双碳”目标下中国三大城市群减污降碳协同治理区域差异及关键路径识别[J]. *资源科学*, 2022, 44(6): 1155–1167. [Di Q B, Chen X L, Hou Z W. Regional differences and key pathway identification of the coordinated governance of pollution control and carbon emission reduction in the three major urban agglomerations of China under the “Double Carbon” targets[J]. *Resources Science*, 2022, 44(6): 1155–1167.]
- [26] 陈晓红, 张嘉敏, 唐湘博. 中国工业减污降碳协同效应及其影响机制[J]. *资源科学*, 2022, 44(12): 2387–2398. [Chen X H, Zhang J M, Tang X B. Synergistic effect of industrial air pollution and carbon emission reduction in China and influencing mechanism[J]. *Resources Science*, 2022, 44(12): 2387–2398.]
- [27] 高玉冰, 邢有凯, 何峰, 等. 中国钢铁行业节能减排措施的协同控制效应评估研究[J]. *气候变化研究进展*, 2021, 17(4): 388–399. [Gao Y B, Xing Y K, He F, et al. Research on co-control effectiveness evaluation of energy saving and emission reduction measures in China’s iron and steel industry[J]. *Climate Change Research*, 2021, 17(4): 388–399.]
- [28] 杨中雅, 孙启宏, 沈鹏, 等. 钢铁行业节能技术潜力与成本分析: 以长三角地区为例[J]. *环境工程技术学报*, 2023, 13(3): 1249–1258. [Yang Z Y, Sun Q H, Shen P, et al. Analysis of cost and potential of energy-conservation technologies in iron and steel industry: A case study of the Yangtze River Delta region[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2023, 13(3): 1249–1258.]
- [29] 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.]
- [30] 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: 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 double-carbon target[J]. *Environmental Engineering*, 2023, 41: 332–336.]
- [31] Wang Y H, Wen Z G, Lv X J, et al. The spatial heterogeneity of synergy and trade-off linkages between carbon and air pollutant mitigations in China’s steel industry[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.138166.
- [32] Li Z L, Dai H C, Sun L, et al. Exploring the impacts of regional unbalanced carbon tax on CO<sub>2</sub> emissions and industrial competitiveness in Liaoning province of China[J]. *Energy Policy*, 2018, 113: 9–19.
- [33] Lin B, Wu W. The impact of electric vehicle penetration: A recursive dynamic CGE analysis of China[J]. *Energy Economics*, 2021, DOI: 10.1016/j.eneco.2020.105086.
- [34] Lin B, Jia Z. What will China’s carbon emission trading market affect with only electricity sector involvement? A CGE based study [J]. *Energy Economics*, 2019, 78: 301–311.
- [35] Robinson S, Roland-Holst D W. Macroeconomic structure and

2024年4月

- computable general equilibrium models[J]. *Journal of Policy Modeling*, 1988, 10(3): 353–375.
- [36] Prinn R G. Development and application of earth system models [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 110: 3673–3680.
- [37] Edmonds J A, Wise M A, MacCracken C N. Advanced Energy Technologies and Climate Change: An Analysis Using the Global Change Assessment Model (GCAM)[R/OL]. (1994–05–01) [2023–01–10]. <https://sedac.ciesin.columbia.edu/mva/MCPAPER/mcpaper.html>.
- [38] Klimont Z. Greenhouse Gas and Air Pollution Interactions and Synergies (GAINS)[R/OL]. (2023–03–09) [2023–03–20]. <https://iiasa.ac.at/models-tools-data/gains>.
- [39] Loulou R, Goldstein G, Kanudia A, et al. Documentation for the TIMES Model Part I[R/OL]. (2021–02–01) [2023–03–20]. [https://iea-etsap.org/docs/Documentation\\_for\\_the\\_TIMES\\_Model-Part-I.pdf](https://iea-etsap.org/docs/Documentation_for_the_TIMES_Model-Part-I.pdf).
- [40] Hibino G, Pandey R, Matsuoka Y, et al. A Guide to AIM/Enduse Model[A]. Kainuma M, Matsuoka Y, Morita T, et al. *Climate Policy Assessment*[C]. Tokyo: Springer, 2003.
- [41] Zhang R S, Hanaoka T. Cross-cutting scenarios and strategies for designing decarbonization pathways in the transport sector toward carbon neutrality[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 1–10.
- [42] Vishwanathan S S, Hanaoka T, Garg A. Impact of Glasgow climate pact and updated nationally determined contribution on mercury mitigation abiding by the Minamata convention in India[J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 57(43): 16265–16275.
- [43] Zhang R S, Hanaoka T. Opportunities and challenges of post-pandemic's new normal: Rethinking the contribution of the transport sector to China's carbon neutrality by 2060[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.164976.
- [44] Zhang R S, Hanaoka T. Deployment of electric vehicles in China to meet the carbon neutral target by 2060: Provincial disparities in energy systems, CO<sub>2</sub> emissions, and cost effectiveness[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105622.
- [45] Oshiro K, Fujimori S, Ochi Y, et al. Enabling energy system transition toward decarbonization in Japan through energy service demand reduction[J]. *Energy*, 2021, DOI: 10.1016/j.energy.2021.120464.
- [46] Chunark P, Hanaoka T, Limmeechokchai B. Shared socioeconomic pathways and long-term GHG mitigation towards 2050 in Thailand cement industry[J]. *Cleaner and Responsible Consumption*, 2021, DOI: 10.1016/j.clrc.2020.100006.
- [47] Luo Y J, Wang W X, Zhao D Q. The impacts of carbon emission trading mechanism on the power transition pathway: Taking Guangdong–Hong Kong–Macao Greater Bay Area as an example[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.129894.
- [48] Xing R, Hanaoka T, Masui T. Deep decarbonization pathways in the building sector: China's NDC and the Paris Agreement[J]. *Environmental Research Letters*, 2021, DOI: 10.1088/1748-9326/abe008.
- [49] Li Z L, Hanaoka T. Development of large-point source emission downscale model by estimating the future capacity distribution of the Chinese iron and steel industry up to 2050[J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2020, DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.104853.
- [50] 徐牧天, 鲍超. 资源环境承载力弹性区间测度与未来情景分析: 以兰西城市群为例[J]. *资源科学*, 2023, 45(10): 1961–1976. [Xu M T, Bao C. Elastic range measurement of resource and environmental carrying capacity and future scenario analysis: A case study of the Lanzhou–Xining urban agglomeration[J]. *Resources Science*, 2023, 45(10): 1961–1976.]
- [51] 翁宇威, 蔡闻佳, 王灿. 共享社会经济路径 (SSPs) 的应用与展望[J]. *气候变化研究进展*, 2020, 16(2): 215–222. [Weng Y W, Cai W J, Wang C. The application and future directions of the Shared Socioeconomic Pathways (SSPs)[J]. *Climate Change Research*, 2020, 16(2): 215–222.]
- [52] van Vuuren D P, Stehfest E, Gernaat D E H J, et al. Energy, land–use and greenhouse gas emissions trajectories under a green growth paradigm[J]. *Global Environmental Change*, 2017, 42: 237–250.
- [53] Fricko O, Havlik P, Rogelj J, et al. The marker quantification of the SSP2: A middle of the road scenario for the 21st century[J]. *Global Environmental Change*, 2017, 42: 251–267.
- [54] Fujimori S, Hasegawa T, Masui T, et al. SSP3: AIM implementation of shared socioeconomic pathways[J]. *Global Environmental Change*, 2017, 42: 268–283.
- [55] Akashi O, Hanaoka T, Matsuoka Y, et al. A projection for global CO<sub>2</sub> emissions from the industrial sector through 2030 based on activity level and technology changes[J]. *Energy*, 2011, 36(4): 1855–1867.
- [56] Hanaoka T, Masui T. Co-benefit reductions of short-lived climate pollutants and air pollutants by 2050 while achieving the 2-degree target in Asia[J]. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water Environment Systems*, 2018, 6(3): 505–520.
- [57] 中华人民共和国工业和信息化部. 《国家工业节能技术应用指南与案例(2022年版)》之一: 钢铁行业节能提效技术[S/OL]. (2022–12–06) [2023–04–05]. [https://www.miit.gov.cn/jgsj/jns/nyjy/art/2022/art\\_a7e7d9f2443a45b38065653e3c139641.html](https://www.miit.gov.cn/jgsj/jns/nyjy/art/2022/art_a7e7d9f2443a45b38065653e3c139641.html). [Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. *National Industrial Energy-saving Technology Application Guide and Case Studies (2022 Edition): Energy-saving and Efficiency-enhancing Technologies for the Steel Industry* [S/OL]. (2022–12–06) [2023–04–05]. [https://www.miit.gov.cn/jgsj/jns/nyjy/art/2022/art\\_a7e7d9f2443a45b38065653e3c139641.html](https://www.miit.gov.cn/jgsj/jns/nyjy/art/2022/art_a7e7d9f2443a45b38065653e3c139641.html).]
- [58] Li Z L, Hanaoka T. Plant-level mitigation strategies could enable carbon neutrality by 2060 and reduce non-CO<sub>2</sub> emissions in China's iron and steel sector[J]. *One Earth*, 2022, 5(8): 932–943.

# Resource and environmental impacts of carbon emission reduction in China's iron and steel sector under the carbon neutrality goal

TIAN Xu<sup>1</sup>, LI Zhaoling<sup>2</sup>, GENG Yong<sup>1</sup>, CHEN Wei<sup>3</sup>

(1. SJTU-UNIDO Joint Institute of Inclusive and Sustainable Industrial Development, School of International and Public Affairs, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China; 2. School of Economics, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 3. College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250358, China)

**Abstract:** [Objective] The iron and steel industry is the largest carbon emitter in the field of energy end-consumption and its carbon emission reduction is closely related to regional economic and social development, thus identifying the resource and environmental impacts of its carbon emission reduction measures and revealing the regional disparities is the key to realizing the high-quality green and low-carbon transformation of this industry in China. [Methods] This study developed a factory-level comprehensive evaluation model of China's iron and steel industry that reflects the resource, environmental, and economic linkages based on a bottom-up Asian-Pacific Integrated Model (AIM)/Enduse model. This model predicts crude steel demand under different socioeconomic development paths by 2060, and focuses on identifying the resource and environmental impacts of production structural adjustment, permeation of abatement technologies, carbon policies, and carbon neutral technology measures, revealing the regional disparities and spatial pattern of typical environmental emissions. [Results] (1) With the increase of recyclable scrap stock, the share of crude steel production of short-process will increase from 10.6% (2020) to 70% (2060); (2) With the synergistic effect of various emission reduction measures, the total energy consumption of China's iron and steel industry will decrease by 70%-76% and fuel consumption will be reduced by 92% in 2060, compared with 2020 (with the share of coal decreasing to 0 and biomass increasing by 69%, and the consumption of coke, which has the property of a reducing agent, will fall by 90%), and carbon dioxide emissions will decrease by 89%-91%; but the increase in methane, organic carbon, and mercury emissions needs to be a cause for concern; (3) Under the synergistic effect of multiple emission reduction measures, there are obvious differences in carbon emission reduction at the provincial level in the iron and steel industry under different crude steel demand paths, and there is a larger number of provinces that show an increasing trend of mercury emissions under the scenario of high crude steel demand; [Conclusion] Therefore, carbon emission reduction in China's iron and steel industry should be strengthened by systematic planning to prevent the "canceling out" effects among environmental emission factors generated by emission reduction measures, and the high-quality green and low-carbon transformation of China's iron and steel industry should take into full consideration of regional economic and social disparities as well as resource endowment and carrying capacity.

**Key words:** iron and steel industry; reduction of carbon emissions and air pollutants; resource and environmental impacts; AIM model; green and low-carbon transformation; China