

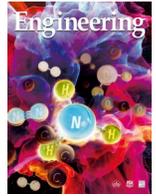


ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



Research
Environmental Engineering—Article

中国钢铁行业减污降碳协同的综合分析

谭全银, 刘菲, 李金惠*

State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China

ARTICLE INFO

Article history:

Received 3 January 2023

Revised 6 September 2023

Accepted 7 September 2023

Available online 22 November 2023

关键词

钢铁行业
碳和污染物排放
协同减排
技术结构
废钢
交叉弹性

摘要

钢铁行业 (ISI) 碳排放占中国人为源碳排放总量的 15%, 同时该行业也是国内大气污染物和水污染物的主要排放源。面对居高不下的钢铁需求, 钢铁行业的减污降碳面临严峻挑战。碳排放和污染物排放通常具有同源性, 从而可以实现协同减排。基于此, 本研究探讨了原料组成结构调整、技术结构调整和行业规模控制三种措施实现降碳 (CER) 和减污 (PER) 的内生潜力。本研究选取了五种典型污染物, 即废水中的石油烃、化学需氧量及废气中的颗粒物、二氧化硫和氮氧化物, 采用交叉弹性法研究了 2022—2035 年间减污降碳的协同效应。结果表明, 在高废钢比 (SSR) 情景下, 2025 年碳排放可减少 8.7%~11.7%, 除颗粒物外的其他四类污染排放可减少 20%~31%。此路径下, 废钢比和电炉钢 (EAF) 比在强化降碳和减污 (随污染物类型而变化) 间的协同作用方面发挥着关键作用。然而, 在废钢总量有限的情况下, 忽视电炉的废钢供给而盲目提高电炉钢比将会导致碳排放和污染物排放均增加。虽然通过废钢比和电炉钢比的优化可实现碳减排, 但当粗钢产量增长率保持在 2.2% 以下时, 相应优化措施才可将 2030 年的碳排放维持在与 2021 年相当的水平。因此, 在制定未来钢铁行业的发展路线时需考虑减污降碳的协同效应。

© 2023 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

气候变化、生物多样性丧失和污染问题是人类面临的三大相互关联的全球危机[1]。目前, 约有 140 个国家做出碳中和承诺, 致力于实现《巴黎协定》下碳中和的目标[2]。与此同时, 国际社会正在积极谈判, 谋求建立一个以污染防治为一项核心职能的独立机构[3]。抓好工业部门的有效脱碳和污染防治, 是达成气候目标和实现清洁地球的关键[1,4]。作为最大的工业排放源, 钢铁行业 (ISI) 排放的温室气体 (GHG) 约占工业部门排放量的 25% [5], 占全球人为碳排放量的 7% [6–8]。钢铁行业是一个

国家工业经济基础设施中最重要的部分[9], 其持续的增长将会对实现全球排放目标构成严峻挑战。对我国而言, 2020 年, 钢铁行业占全国人为源碳排放总量的 15% [10–11], 同时分别占国内 SO_2 、 NO_x 和颗粒物 (PM) 排放总量的 16.5%、22.3% 和 14.5% [12]。

为应对气候变化, 中国政府在 2020 年做出承诺, 并于 2021 年发布相关目标和相应时间节点[13]。为在实现碳排放目标的同时改善环境质量, 中国政府于 2020 年提出了协同推进减污降碳的发展理念[14]。随后, 中国于 2022 年发布《减污降碳协同增效实施方案》, 进一步加强环境治理能力。这些政策目标向钢铁行业施加了巨大的减排压力。

* Corresponding author.

E-mail address: jinhui@tsinghua.edu.cn (J. Li).

近几十年来,钢铁行业相关的许多研究主要聚焦于攻克冶炼[15–16]、余热利用[17–18]、超低排放[19]、碳捕集与封存[20]等环节的技术和设备瓶颈,从而降低行业的能耗和排放水平。近些年,越来越多的研究也探索和评估了钢铁行业的低碳发展路径[21]。通过在厂级层面开展节能技术的碳减排潜力评估[22]获取基础数据,从而进一步对整个行业进行综合评估[23–24]。部分研究探索了环境监管、碳排放强度(CEI)和经济增长之间的相关性[25–26]。另有研究聚焦于为钢铁行业构建高分辨率排放清单,以更好地评估和检测该行业的总排放量[20,27–29]。Ren等[5]和Wang等[21]基于对现有低碳技术的系统回顾,模拟了中国钢铁行业实现碳中和的路径。然而,大多数研究仍试图在单一控制碳排放的基础上,实现钢铁行业的全面优化。这些研究表明,有必要评估碳减排(CER)和污染物减排(PER)之间的协同性,以支持构建具有多重管理目标的综合发展路径。交叉弹性[30]这一源自经济研究的方法,近年来越来越多地被应用于交通部门[31–33]和不同区域[34–35]碳减排措施协同效应的定量分析。

本研究针对钢铁行业的一系列低碳发展路径,选用交叉弹性法量化了评估减污降碳协同增效的潜力。基于对中国推动钢铁行业高质量发展行动[36–38]的全面综述,本研究总结了在国家和工业部门计划中提出的五类要求,并鉴别了相应的末端措施。针对不同类型措施,通过测试主体间效应和交叉弹性系数,对其协同作用显著程度和协同度进行了评估。综合考虑行业发展目标、技术结构、技术水平以及中国和全球历史实践,本研究建立了2021年至2035年的行业发展路径,进一步分析不同情景下协同作用的差异和趋势,以探索符合政策目标的路径。我们发现PER的效益是CER的4.0~5.6倍,但PM排放的减少是CER的1.1~2.3倍。各措施之间的协调对于使该行业朝着协同减少碳排放和污染排放的方向发展至关重要。

2. 方法

2.1. 估算不同路径潜在的碳排放和污染物排放量

(1) 公式。为估算2021—2035年间钢铁行业不同路径下潜在的碳排放和污染物排放量,首先需要预测粗钢产量。本研究将采用自回归积分滑动平均模型(ARIMA)预测惯性增长路径下的粗钢产量(CSP)作为高产量情景,低产量情景控制为政策制定的产量目标1 Gt。上述两种途径的平均值作为中产量情景。废钢是粗钢生产时重要的原材料,包括自产废钢(S_a)、加工废钢(S_b)以及废旧废钢(S_c) [39],三者的加和为废钢的总量 S_{sc} ,如公式(1)所示。

$$S_{sc} = \sum_{m=a,b,c} S_m \quad (1)$$

自产废钢是指钢厂生产过程中产生的切屑、边角料、残次品,其产生量取决于钢厂的技术水平。近年来,自产废钢产生率逐步降低并稳定在5%左右。因此,本研究采用中国钢铁行业近十年的平均值4.9%作为2022—2035年间自产废钢率(y_a)。加工废钢是指设备制造商在钢材物理加工过程中产生的废钢,产生率(y_b)约为5%。废旧废钢是指终端产品在达到报废年限后产生的废旧钢铁。对于钢铁产量稳定的国家,可通过社会钢铁积蓄量法预测废旧废钢产生量,对于钢铁产量仍在增长的发展中国家,可通过生命周期法预测其产生量。由于我国处于这两种模式之间的过渡期,近十年来钢铁产量迅速增长,预计之后将受到严格控制,因此本研究采用这两种预测方法的均值作为废旧废钢产生量。

本研究以1 t粗钢为功能单位,系统边界覆盖从采矿到粗钢生产全流程。各工序的产品产量通过粗钢的当量系数计算。然后,采用排放因子法将各工艺的产量数据与相应排放系数相乘,从而估算各环节的碳排放和污染排放量[公式(2)和(3)]。除废水、废气和固体废物(SW)的产生量外,根据手册(参见数据来源部分)中相应的产生因子和末端处理技术的去除率,估算石油烃污染物(PHPs)、化学需氧量(COD)、废气中PM、SO₂、NO_x五种典型污染物的最终排放量。本研究主要基于各环节相应数据的可得性选取上述五类污染物进行评估。

$$E_i = \sum_j F_{ij} \times P_j \quad (2)$$

式中, E_i 表示碳排放量或污染产生量, $i=1$ (碳排放量)、 $i=2$ (废水)、 $i=3$ (废气)、 $i=4$ (固体废物)、 $i=5$ (石油烃)、 $i=6$ (化学需氧量)、 $i=7$ (颗粒物)、 $i=8$ (SO₂)和 $i=9$ (NO_x); F_{ij} 是指工序 j 的碳或污染物的排放系数(附录A中表S1); P_j 是指工艺 j 的产品产量。典型污染物($i=5, 6, 7, 8$ 和9)的排放因子通过公式(3)确定。

$$F_{i,j} = G_{i,j} \times (1 - R_{i,j}) \quad (i=5, 6, 7, 8, 9) \quad (3)$$

式中, $G_{i,j}$ 表示来自工艺 j 的污染物的产率; $R_{i,j}$ 表示各自的去除率。

(2) 数据来源。公式(2)使用中国产品全生命周期温室气体排放系数库中汇总的碳排放因子平均值(附录A中表S1) [40–41]。由于碳排放数据源存在较大的不确定性[42],采用均值能最大限度减少结果的不确定性。生态环境部基于对重点和非重点排放企业调查发布了《排放源统计调查产排污核算方法和系数手册》[43],本研究使用手册提供的产生强度和去除率计算得到污染物排放因子(附录A中表S2)。有关碳排放核算方法以及污染物排

放因子计算的详细信息，请参阅附录A中表S1和表S2及其附注。

2.2. 多情景的协同性分析

为量化碳减排 (ΔCE) 和污染减排 (ΔPE) 间的协同关系，根据第 t 年的交叉弹性确定了协同系数 [$E_{PE}^{CE}(t)$]，如公式 (4) 所示：

$$E_{PE}^{CE}(t) = \left(\frac{\Delta CE(t)}{CE(t-1)} \right) / \left(\frac{\Delta PE(t)}{PE(t-1)} \right) \quad (4)$$

$$= \left(\frac{CE(t-1) - CE(t)}{CE(t-1)} \right) / \left(\frac{PE(t-1) - PE(t)}{PE(t-1)} \right)$$

式中， $CE(t)$ 表示 t 年的碳排放量； $PE(t)$ 表示 t 年特定类别的污染或污染物排放量； $E_{PE}^{CE}(t)$ 表示特定措施在分析的情境下可能导致温室气体和污染物排放量呈现出一致的变化趋势，即同时增加或减少。当两者都减少且 $E_{PE}^{CE}(t)$ 大于 1 时，表明相较于污染物减排，碳减排更显著，反之亦然。当 $E_{PE}^{CE}(t)$ 为负数时，代表碳排放和污染物排放不存在协同效应。

2.3. 协同推进措施鉴别和情景设定

本研究根据政策确定并总结了五类基于政策的协同减排措施，详细阐述了可能实现减污降碳协同推进的措施。这些措施和目标列于附录A中表S3。目前，大多数政策和规划均针对“十四五”规划的末期（2025年）制定了目标。下文对情景分析的方法进行了介绍。预计到2025年，原料组成将进行结构性调整，废钢的消耗总量将从2021年的226 Mt显著增长至300 Mt以上。废钢比（SSR）是钢铁行业的关键指标，在废钢行业的具体规划中明确提出，到2025年废钢比应达30%。该目标值被作为本研究废钢比的标准情景。基于此，我们建立了以下四种情景：固定废钢比情景，废钢比保持为2021年的21.9%不变；废钢比缓慢增长情景，SSR目标为25%；两个积极情景，SSR目标分别为35%和40%。同时，基于前述确定的废钢比的不同增长情景，同时考虑废钢比不可能无限制增长的现实，以及国外废钢比使用的长期实践（例如，欧盟作为世界第二大粗钢生产区域，在过去十年的大部分时间里，其废钢比一直保持在55%左右；其他亚洲国家，如韩国和俄罗斯目前的废钢比约为40% [44]）。本研究假设2025年后国内废钢比在保持增长趋势的情况下最终达到的上限为50%。

技术结构方面，国家政策要求电炉钢（EAF）比由2021年的10.7%增加至2025年的不低于15%。类似地，本研究设定了2025年技术结构中电炉钢比的四个发展情景：固定比例情景（10.7%）、温和增长情景（12.5%）、积极增长情景（17.5%和20.0%）。“十四五”期间，我国

大力推进钢铁企业大气污染控制设施超低排放改造，以提升污染物排放控制技术；同时，地级市正在实施“无废城市”战略，固体废物源头减量是其重要任务之一，但前述政策尚未针对废物产生量或排放系数提出具体目标。如附录A中表S3所示，针对水资源消耗强度，我国规定“十四五”期间需降低10%以上。因此，本研究基于这一要求，即到2025年水资源消耗强度降低10%，作为技术进步影响的中等期望值假设。粗钢产量的情景假设具体见产量预测部分的阐述。所有情景假设详见附录A中表S4。目前，我国政策尚未对电炉钢的废钢比提出所需达到的目标要求，因此，本研究基于2021年的废钢比68.14%建立情景，并通过公式（5）计算高炉工艺的废钢比。

$$r_b = \frac{r_t \times p_t - r_e \times p_e}{p_b} = \frac{r_t \times (p_e + p_b) - r_e \times p_e}{p_b} \quad (5)$$

式中， r_t 、 r_e 和 r_b 分别代表钢铁行业、电炉工艺和高炉工艺的废钢比；类似地， p_t 、 p_e 和 p_b 分别代表钢铁行业、电炉工艺和高炉工艺的粗钢产量。

3. 结果

3.1. 碳排放和污染物排放

本研究根据我国粗钢历史产量以及碳排放和典型污染物排放的生产加权强度，预测了未来粗钢产量及相应年度的碳和污染物排放量[图1(a)和附录A中图S1]。主体间效应分析结果（附录A中表S5）表明，粗钢产量增加是钢铁行业碳排放、水和空气污染物排放增长的最关键因素。例如，在2030年，当粗钢产量严格按照政策要求被加以控制时，在受控情景（Sc；维持CSP在1 Gt）下的碳排放量为(1.81 ± 0.20) Gt。该结果与Pan等[45]在低碳发展路径下的估算结果（1.7 Gt）相当，预计将占我国峰值时碳排放量的13.68%~17.08% [46]。然而，当粗钢产量以历史增长率增加[常规情景（Sa）]，即从2021年的1.04 Gt增加至2030年的1.53 Gt，相应碳排放量将达(2.78 ± 0.30) Gt，为2021年排放量的1.53倍，预计占中国2030年碳排放量的21.07%~26.17%。保持该增速继续增长，2035年碳排放量则可高达(3.17 ± 0.35) Gt。如果粗钢产量以惯性增长率的50%增长[中等情景（Sm）]，2030年和2035年的碳排放量则分别为(2.30 ± 0.25) Gt和(2.50 ± 0.28) Gt。

尽管通过优化废钢比和电炉钢比可以降低碳排放强度，但仅当粗钢产量增长率保持在2.2%以下时，优化措施才能在2030年将行业碳排放量维持在与2021年相似水平。在此情况下，废钢比和电炉钢比分别为50.0%和14.8%，电炉工艺废钢比为84%。

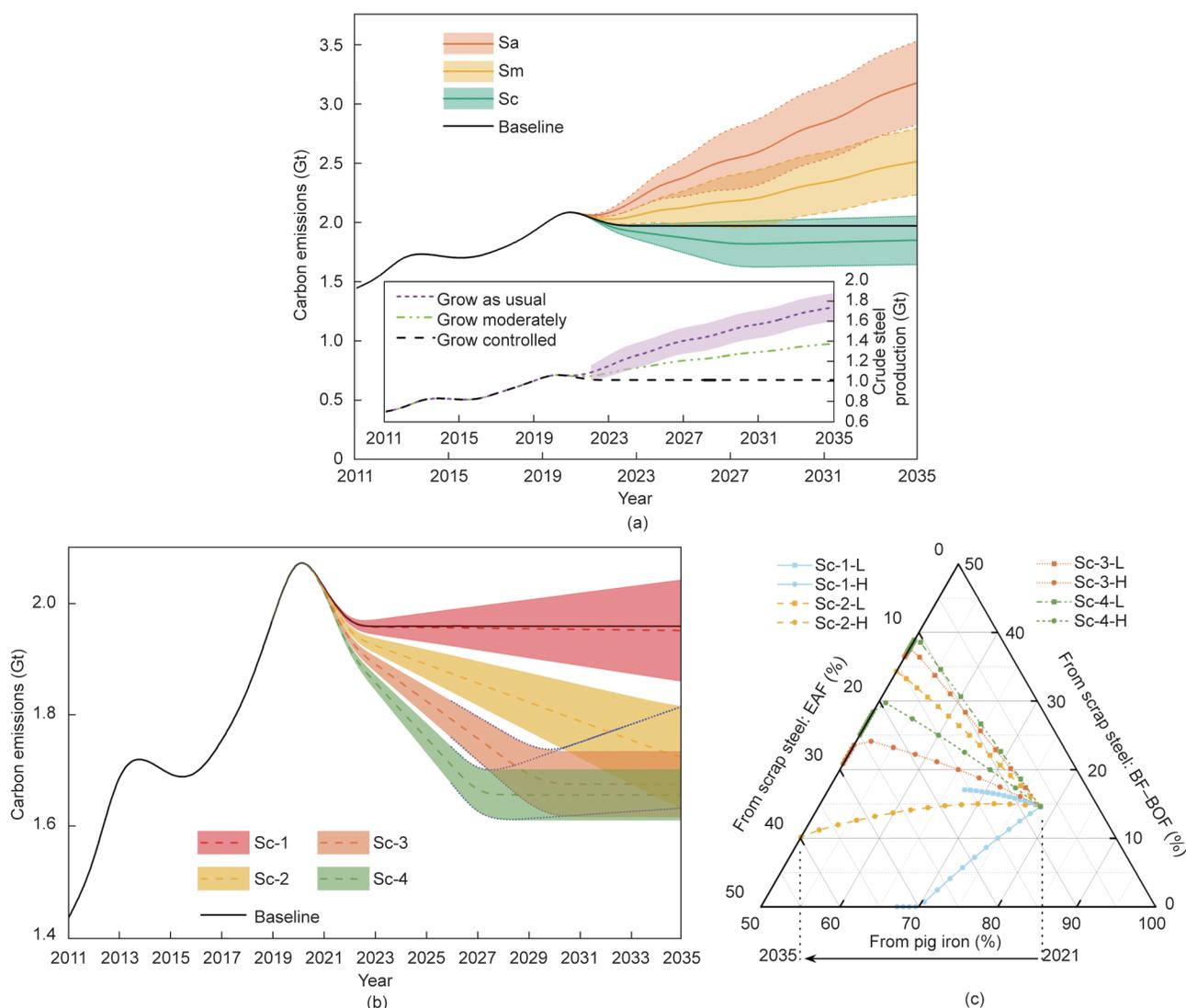


图1. (a) 粗钢产量按不同增长率增加时钢铁行业的碳排放；受控情景 (Sc) 不同废钢比路径下的行业碳排放 (b) 和粗钢生产的技术和原料组成 (c)。L 表示电炉钢比 (电炉工艺生产的粗钢与所有粗钢产量的比例) 为低增长路径, H 表示电炉钢比为高增长路径。Sa 和 Sm 分别代表常规和中等情景。

在 Sc 和 Sa 情景下, 2030 年钢铁行业源自粗钢生产的工业废水量将分别达到 $(8.87 \pm 1.54) \times 10^9 \text{ m}^3$ 和 $(13.57 \pm 2.35) \times 10^9 \text{ m}^3$ 。相应地, PHPs 排放量则分别为 $(1.43 \pm 0.56) \text{ kt}$ 和 $(2.19 \pm 1.08) \text{ kt}$, COD 排放量分别为 $(599.7 \pm 235.5) \text{ kt}$ 和 $(917.3 \pm 360.2) \text{ kt}$, 其中 COD 排放量占我国 2021 年统计 COD 排放量的 $2.4\% \pm 0.9\%$ 和 $3.6\% \pm 1.4\%$ [47]。在上述两种情景下, 废气的产生量可分别高达 $(9.98 \pm 1.63) \times 10^9 \text{ m}^3$ 和 $(15.1 \pm 2.31) \times 10^9 \text{ m}^3$, 同时其中所含 PM、SO₂ 和 NO_x 的排放量分别为 $(231.2 \pm 46.5) \text{ kt}$ 和 $(345.1 \pm 63.2) \text{ kt}$ 、 $(386.7 \pm 152.0) \text{ kt}$ 和 $(591.5 \pm 232.5) \text{ kt}$, 以及 $(185.1 \pm 72.8) \text{ kt}$ 和 $(283.2 \pm 111.3) \text{ kt}$ 。固体废物主要包括高炉、转炉和电炉的除尘灰和炉渣, 及来自废钢预处理的残余物, 预计分别为 $(360.3 \pm 24.9) \text{ Mt}$ 和 $(551.1 \pm 38.1) \text{ Mt}$ 。

研究结果表明, 当粗钢产量受严格控制时, 行业的碳

减排效果直接取决于废钢比的增长情况 [图 1 (b) 和 (c)]。Sc 情景下如图 1 (c) 和附录 A 中表 S4 所示的四种不同路径主要在 SSR 的增长率上有所差异, 即 2025 年的 SSR 预计在 Sc-1~Sc-4 情景中分别按 25%、30%、35% 和 40% 的顺序增长。考虑到电炉钢比对碳和污染排放的影响, 电炉钢比的最大值和最小值被设定为相应路径的上限和下限。结果表明, 在 2022–2035 年内, 随着 SSR 的增大碳排放量将减少, 而污染物排放量的变化则各不相同。例如, Sc-1 情景下, 2025 年 SSR 为 25% 时, 碳排放量将为 $(1.96 \pm 0.03) \text{ Gt}$, 平均排放量略低于基线情景。同年, 当 SSR 增加到 35% (Sc-3 情景) 和 40% (Sc-4 情景) 时, 碳排放量将分别为 $(1.83 \pm 0.03) \text{ Gt}$ 和 $(1.76 \pm 0.03) \text{ Gt}$, 与基线相比分别减少 5.6%~8.2% 和 8.7%~11.7%。对于这两种情景, SSR 预计将分别于 2030 年和 2028 年达到设定的上

限（50%），同年的相应碳排放量则分别为基线情景的85.5%和84.5%。此后，碳排放量将主要受工艺结构（电炉钢比和高炉钢比），以及废钢流向（电炉废钢比）的影响。这两个因素导致的碳排放量波动变化幅度大致相当，为2.76%~3.50%。

随着SSR的增加，污染物的产生和排放量预计将逐渐减少，与碳排放的趋势相似。如附录A中图S1所示，2025年，当SSR从Sc-1情景的25%增大到Sc-4情景的40%时，废水产生量将从 $1.096 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 减少到 $8.79 \times 10^9 \text{ m}^3$ ，而经处理后的COD排放量将从893 kt减少到715 kt。同时，Sc-4情景下废气产生量将比Sc-1情景的 $1.19 \times 10^{14} \text{ m}^3$ 减少18%，而 SO_2 和 NO_x 的排放量将分别从Sc-1情景的576 kt和276 kt减少20%。然而由于PM主要在废钢预处理过程中产生，PM排放量将随着SSR增长而显著增加，因此PM的排放量则呈相反趋势（增长8%）。钢渣产生量将从Sc-1情景的385 Mt减少到Sc-4情景的356 Mt。

3.2. 碳减排和污染物减排的协同效应

前述对各种Sc情景下的不同路径分析表明，可通过产量控制和原料结构调整实现碳减排。在不同发展路径下，钢铁行业碳减排和污染减排的协同效应如图2所示。根据图2（a）~（c）和附录A中图S2可看出，如果SSR和EAF比率均增加，碳减排率将为0.38%~6.23%。同时，尽管废水中PHPs和COD，以及废气中 SO_2 和 NO_x 的产生与排放工序不同，但其减排率相似，中位值分别为5.33%、5.43%、5.44%和5.44%。然而，PM的减排率明显低于前述四种污染物，中位值为2.40%。废水、废气和钢渣产生量的减少率则分别为0.99%~9.00%、0.87%~8.44%和0.35%~5.55%。其他发展路径下的碳减排和污染减排的详细比率可见附录A中图S1。

同时，本研究进一步探究了碳减排与不同污染物减排协同度，及其在不同情景下变化[图2（d）~（i）和附录A中图S3]。Sc-2情景下，由于PHP和COD的产生环节一致，所以碳减排与PHP、COD减排的协同系数大致相同，

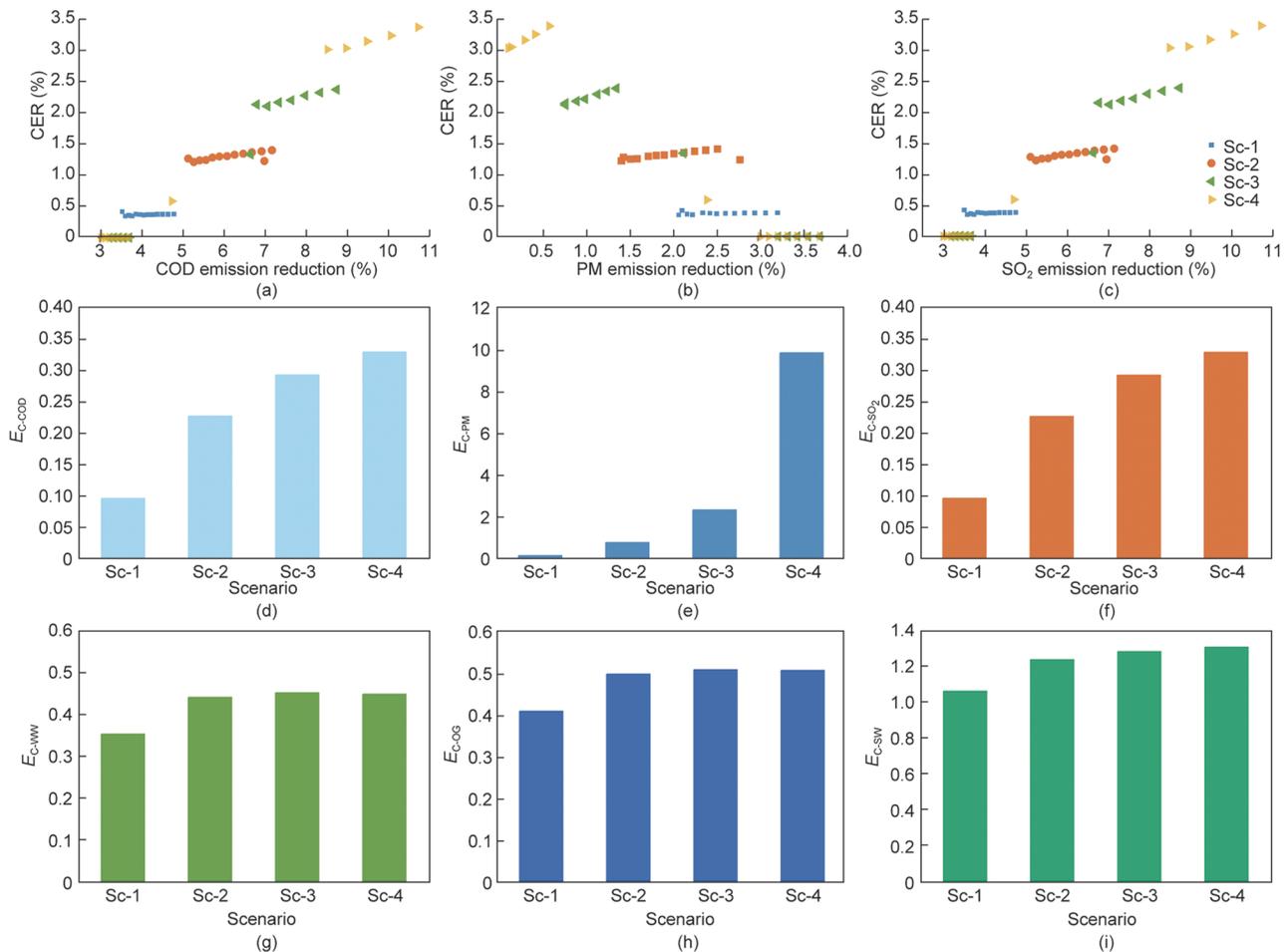


图2. (a)~(c)四种受控情景下的碳减排和不同污染物减排情况变化：(a) COD；(b) PM；(c) SO_2 。(d)~(i) 2025年碳减排与不同污染减排的协同度：(d) COD；(e) PM；(f) SO_2 ；(g) 废水(WW)；(h) 废气(OG)；(i) 固体废物(SW)。

范围为0.18~0.25。结果表明,提高废钢利用率并优化其在转炉和电炉设施中的分配,在实现碳减排的同时还能显著减少PHP和COD排放,且这些减排效益可高达碳减排效益的4.0~5.6倍,同时对于SO₂和NO_x的排放也有类似的协同效应。然而,PM的协同减排系数与前述四种污染物不同,将从2022年的0.88逐渐降低到2035年的0.44。结果表明当行业采用相应发展路径时,碳减排与PM减排间的协同性比其他四种污染物(COD、PHP、SO₂和NO_x)的减排更为一致。尽管PM的减排率仍高于碳减排率,但随着污染治理技术的进步,可以实现更高的协同减排。

以2025年为例,针对SSR增长率对减污降碳协同度影响[图2(d)~(i)和附录A中图S3]的结果表明,所有情境下协同系数均增加,增加强度不一。其中,碳/颗粒物(C-PM)的协同系数将从0.17增加到9.92,增幅显著高于其他协同系数,所有情景中,Sc-3情景的协同度最高。关于同一污染物减排的协同系数变化分析结果表明,在SSR相同的情况下,电炉钢比的增加将进一步强化污染物减排。具体而言,PHP减排的协同系数预计将从0.234下降到0.102,而SO₂减排的协同系数预计将从0.229下降到0.100,而PM减排的协同系数则将从0.811下降到0.472,这表明PHP和SO₂的减排率大于PM减排率。

3.3. 原料组成和结构变化的影响

在各国均致力于降低钢铁行业碳排放强度时,废钢的供应难以满足粗钢产量的需求。因此,亟须进一步调控废钢的流动,使钢铁行业朝着绿色脱碳方向发展。如图1(b)中的蓝色虚线所示,如果维持50%废钢比的同时持续增加电炉比,只能通过降低高炉工艺的废钢比以确保电炉工艺有足够的废钢原料供应。然而,废钢的分配将可能导致行业的碳排放和污染物排放的增长。

以Sc-3情景(电炉钢比2035年达43.25%)为例,当电炉钢比率持续增加时,2035年的行业总碳排放量将增加到1.82 Gt,与电炉钢比保持不变的情景相比增加81 Mt;而在Sc-4情景下,增幅甚至可高达113 Mt。这一差异的原因主要在于高炉工艺中产生的铁水为转炉中废钢的熔化提供了部分热量,从而一定程度上实现了节能和降低碳排放强度的作用。因此,鉴于以铁矿石为基础的高炉工艺在我国钢铁行业中仍至关重要,需要优化高炉工艺和电炉工艺中的废钢的分配,以确保可持续地实现行业的碳减排。一般而言,由于受熔铁中残余热量的限制以及废钢中合金元素含量的影响,高炉工艺的废钢比约为20%[48]。目前,业界通过提高熔铁温度、预热废钢和向转炉中添加焦粉等途径,尝试将高炉工艺的废钢比提高到

30%[49],甚至35%[50-51]。尽管这些措施与常规的转炉炼钢工序相比,会在一定程度上增加热量消耗,但利用铁水中的残余热量仍然有助于实现整体节能。

如图3所示,就碳排放而言,高炉炼铁过程(P3)即使在废钢比达50%的情况下,仍占行业碳排放的58.1%。相对而言,铁矿采选(P1)和矿物烧结(P2)环节的占比则很小,分别为1.3%和3.9%。这三个过程都直接与生铁生产相关,碳排放的总比例为63.3%,而这进一步表明了利用废钢以减少碳排放的重要性。碳排放量较高的其他工序则分别是废钢预处理(P4)和炼钢(P5),分别占总排放量的23.9%和12.9%。其中,源自转炉冶炼原生钢铁与废钢铁碳排放的占比分别为1.5%和1.0%,而电炉冶炼原生铁水和废钢铁碳排放的比例则分别为1.7%和8.7%。前述结果表明,炼钢工序中通过电炉冶炼废钢是碳排放的主要来源,同时也凸显了通过优化废钢的使用和提高电炉炼钢比例来减少碳排放的潜力。

污染物产生和排放方面,绝大部分工业废水及相应污染物(石油类污染物和COD),产生于铁矿采选环节(采矿和矿物浮选),其中废水和COD的产生量占行业产生总量的比例超过99%,对于石油类污染物而言,这一比例稍低为94.7%,而其余的均产生自炼钢环节。对于废气和颗粒物而言,在各个环节均会产生。其中废气主要为采矿环节产生,占比可达73.1%,其次为炼钢环节为13.0%。而颗粒物则主要产生于废钢预处理环节,比例为53.9%;其次为烧结球团环节,比例为14.2%。废气中SO₂和NO_x的产生环节特征具有很大的相似性,包括铁矿采选、烧结球团和高炉炼铁环节,SO₂的产生比例分别为33.1%、65.8%和1.2%,而NO_x的产生比例分别为28.4%、66.5%和5.1%。至于固体废物的产生情况,除尾矿之外的固体废物的产生环节主要包括高炉炼铁、废钢预处理和炼钢环节,其中高炉炼铁环节和炼钢环节产生比例最高,分别为43.6%和41.7%,剩余的则产生自废钢预处理环节。值得注意的是,由于尾矿的产生量与矿石的品位密切相关,不同矿石类型的品位差异很大[如磁铁矿精矿(最常见的铁矿石精矿),使用总铁含量60%精矿(最低品位的精矿:C60)进行生产时尾矿的理论产生量是使用最佳品位精矿(C68,总铁含量68%)时的1.4倍以上],因此,本研究中固体废物不包括尾矿。

3.4. 粗钢产量的影响以及废钢供需缺口

由于降低碳排放强度的要求会增加对废钢的需求,粗钢产量的增加将会加剧废钢的供需缺口。如图4所示,高炉工艺主导了行业的碳排放和污染排放。在Sc情景下,

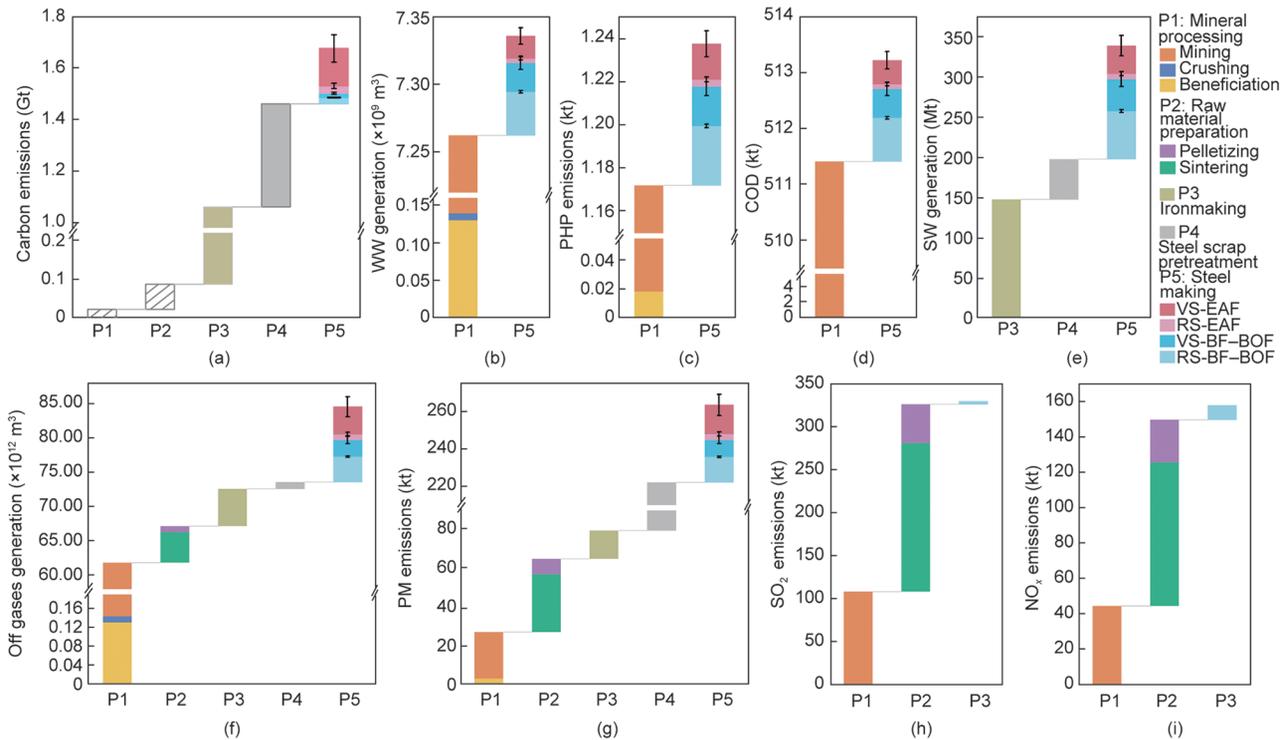


图3. 2035年Sc-3情景中粗钢各生产工序的碳和污染物排放情况：(a) 碳排放；(b) 废水产生；(c) PHP排放；(d) COD排放；(e) SW产生；(f) 废气产生；(g) PM排放；(h) SO_2 排放；(i) NO_x 排放。VS：原生钢，指来源于矿石生产的粗钢；RS：再生钢，指来源于钢铁废料生产的粗钢。(a) 图中P1和P2柱的斜线表示该数据是对应流程中所有步骤的碳排放总量。

即粗钢产量维持在1.0 Gt的情况下，2030年高炉工艺碳排放预计将占钢铁行业总碳排放量的78.3%。与高炉工艺相比，电炉工艺不仅能提高废钢利用率，而且碳排放强度仅为高炉工艺的30%~50% [52-53]，因此电炉工艺是许多国家减少钢铁行业碳排放的关键。同时，在污染的产生和排放方面，电炉工艺占钢铁行业工业废水、废气和钢渣产生量的96.5%、91.8%和81.0%。在不同污染物的排放方面，高炉工艺排放的COD排放占比最高，占行业总排放量的96.9%，除了PM排放仅占64.8%外，其他所有污染物排放的占比均超过95.0%。

粗钢产量对废钢的供需平衡也造成了严重影响。如图5所示，在废钢的资源供给方面而言，不同粗钢产量增长情景下，废旧废钢一直是废钢铁原料的最主要的部分，占比达61.9%~80.5%；其次是自产废钢和加工废钢，分别占9.8%~18.8%和9.7%~19.3%。由于自产废钢和加工废钢分别产生自当年的钢铁生产和钢铁产品加工过程，其总量直接受粗钢产量变化的影响。而废旧废钢产生自社会钢铁消费形成的存量的废弃，因此与其他两类废钢不同，呈现一定的滞后性。目前，大部分废旧废钢来自于21世纪初，这一时期粗钢消费量的持续增长，为总废钢比的持续升高提供了更多的废旧废钢资源保障。在Sc情景下，2025年和2030年的废旧废钢量将分别增长至238.2 Mt和336.6 Mt。

在Sa情景下，粗钢产量和消费量的增加，可使得折旧废钢量和废钢资源总量持续增加。废钢资源总量在2025年将达到371.3 Mt，2030年将达到510.5 Mt，其中折旧废钢的量将分别为252.8 Mt和367.5 Mt。相关结果略高于Zhang等[54]对2025年和2030年废钢总量的预测（分别为约330 Mt和420 Mt）。差异的原因主要在于Zhang等[54]的研究认为粗钢产量将呈逐年减少（到2030年为880 Mt）的趋势，这导致了生产过程中产生的自产废钢数量相对较少。到2035年，总废钢量将达到592.8 Mt，其中折旧废钢为431.7 Mt。

随着中国钢铁行业逐步提高总废钢比和电炉炼钢比例，对废钢的需求也会随之增加。通过计算不同情景下的废钢总需求和废钢资源量，分析了废钢的需求缺口变化情况（图5）。在粗钢产量和废钢比保持不变的基线情景下，废钢供应潜力将自2020年起超过行业需求量，且废钢的数量将逐年增加，到2025年盈余为112.60 Mt，并在2030年增加至211.05 Mt。然而，随着总废钢比的逐渐升高，资源的盈余逐渐缩小甚至变为短缺。在低总废钢比（25%）情境下，即2025年SSR为25%（Sc-1），2025年盈余废钢的数量将为81.66 Mt。如果2025年SSR上升至30%（Sc-2），盈余量将缩小至25.17 Mt。若废钢比目标继续增加，则将呈现总废钢比缺口。在2025年SSR分别为35%和40%的Sc-3和Sc-4情景下，同年供需缺口将进一

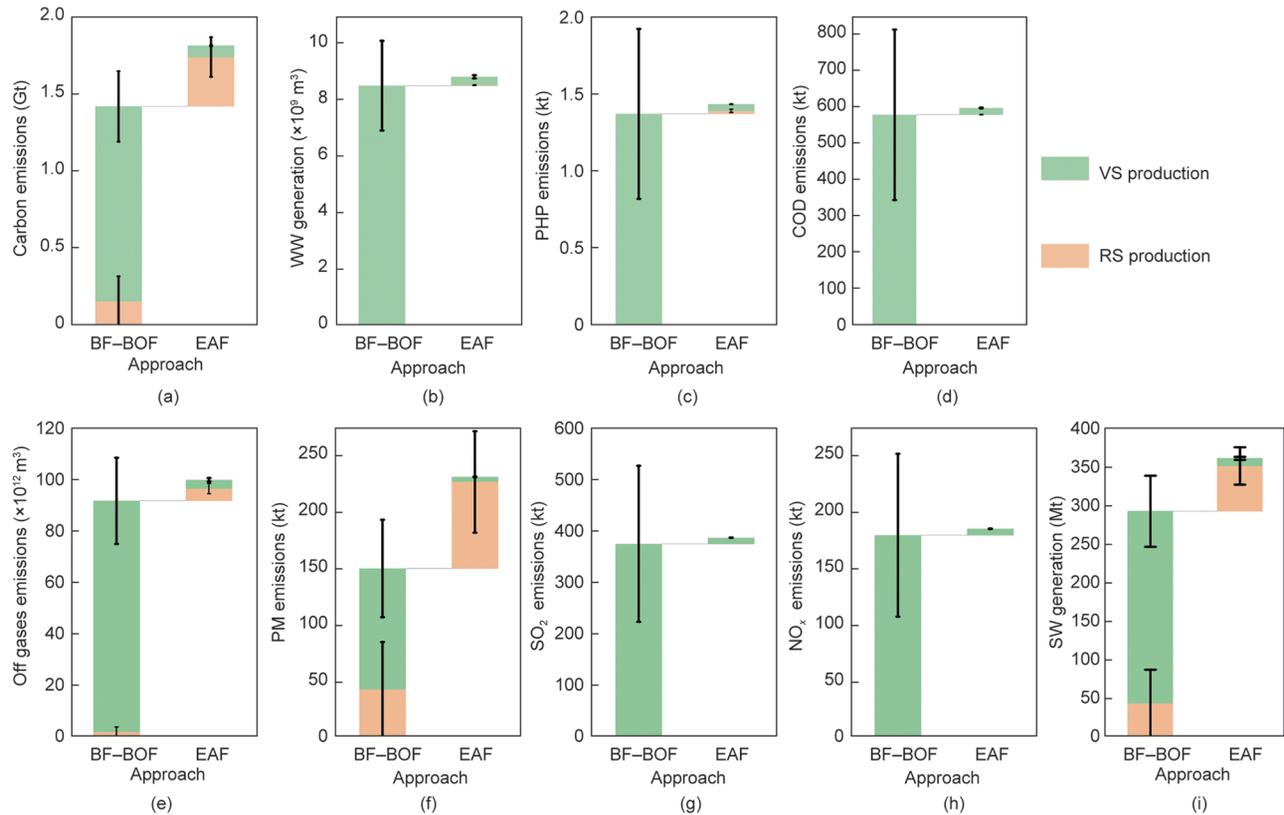


图4. 不同技术工艺中的碳排放和污染物排放的分布情况：(a) 碳排放；(b) 废水产生量；(c) PHP 排放；(d) COD 排放；(e) 废气产生量；(f) PM 排放；(g) SO₂ 排放；(h) NO_x 排放；(i) 固体废物产生量。

步扩大至 18.3 Mt 和 69.9 Mt。在 Sa 情景下，粗钢产量和废钢比的同步增长将加剧废钢短缺，到 2025 年可能达到 136.2 Mt。

4. 讨论

4.1. 加强原料结构调整

为了实现碳达峰和碳中和的承诺，中国致力于降低多种行业的碳排放强度。对于钢铁行业，中国提出了一系列措施，包括提高废钢的利用率、提升电炉工艺设施的产能和产量，以及限制钢铁产量等。重塑原料结构将显著增加钢铁行业对废钢的需求。自产废钢和加工废钢共占国内废钢的 61.9%~80.5% [55]，其余则是收集的来自于报废的产品、设备和建筑的折旧废钢。

尽管过去十余年，我国的粗钢消费量迅速增长，但这些钢材需 20~25 年后才能被回收再利用，难以支撑未来持续增长的粗钢产量。为实现更大的碳减排和污染减排，一方面，在目前已达 24% 的收集率 [56] 的基础上，仍然需要进一步提高收集率。另一方面，国外供应商和国内进口商对于我国于 2020 年发布的再生钢铁标准仍持观望态度。2021 年，再生钢铁进口量仅为 552.8 kt [56]。仍需要更进

一步明确该标准的具体实施要求，以促进进口再生原料，缓解供需缺口。对于其他正在扩大城市化和工业化的发展中国家而言，增长的钢铁产品需求与控制碳排放的压力，对其钢铁废物/废料收集和进口政策提出了更大挑战。

4.2. 优化技术结构实现碳减排

为了实现碳减排，中国在钢铁行业实现碳达峰的行动计划中提出了同时调整废钢比和电炉钢比的要求。如果废钢比增加，高炉工艺的能耗强度将显著降低，当 SSR 约为 40% 时，高炉工艺的能耗强度将可与电炉工艺相当 [57-58]。本研究结果表明，在总废钢供应量一定的情况下，一味提高电炉钢比例，而忽视可用于电炉使用的废钢原料的供应，可能反而导致碳排放和污染排放的增长。因此在政策的执行过程中，还需要系统考虑区域废钢的长期供给潜力，结合原料在转炉和电炉设施中的分配比例调控，优化结构减排的实施节奏；并应该提出针对不同类型设施的原料比例要求，从而实现更好的碳减排和污染物减排效果。在技术减排方面，由于能源系统减排有专门性的研究，本研究主要聚焦钢铁生产和污染控制设施的技术进步的影响，未探讨能源绿化的作用，这是本研究的局限之一。同时，考虑新兴生产技术（如氢冶金）仍然处于技术研发和

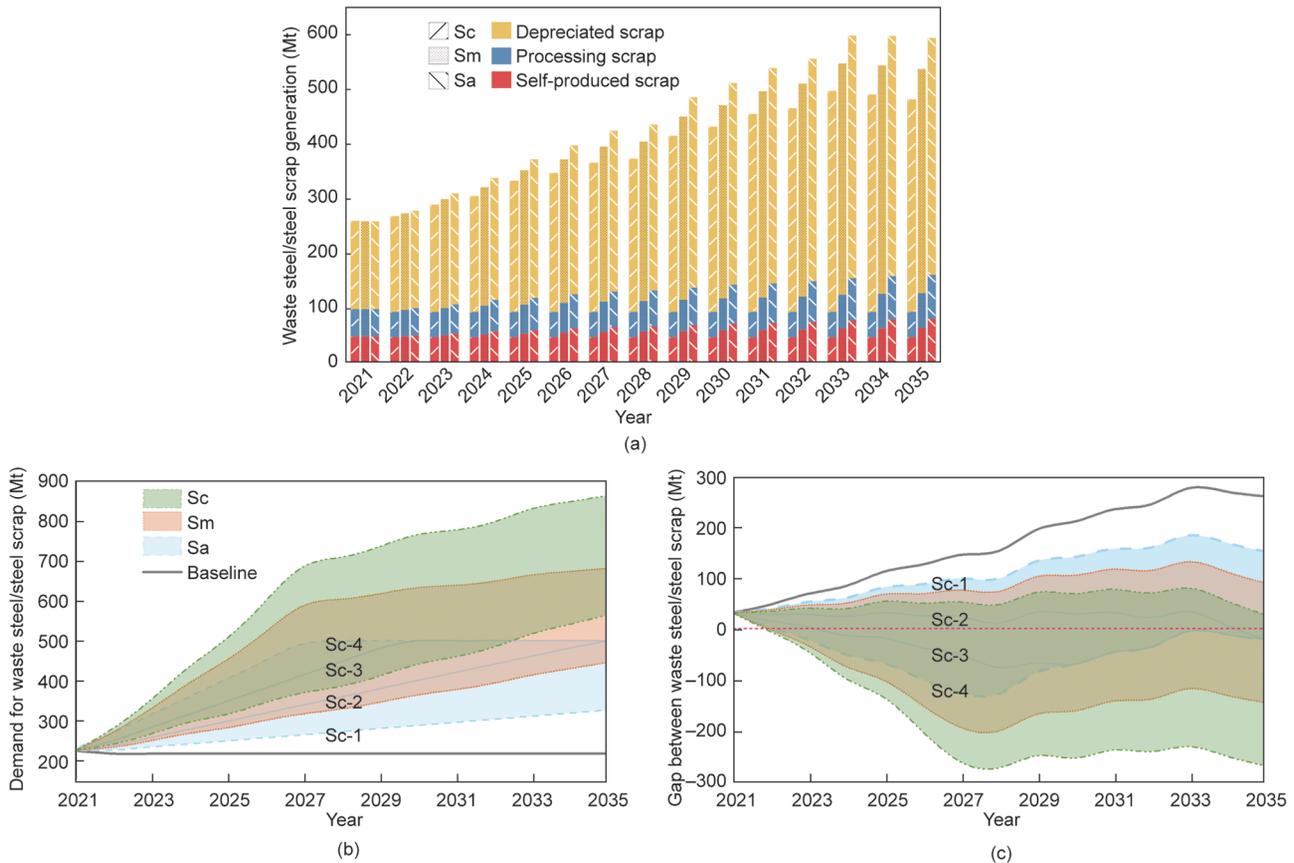


图5. (a) 中国废钢/钢铁废料组成的变化情况；(b) 中国废钢和钢铁废料的需求情况；(c) 不同情景下行业对废钢和钢铁废料的需求缺口。

中试阶段，所以本文未进行分析，因此对于未来的碳排放和污染物排放可能存在高估，也是本研究的另一局限。

4.3. 控制钢铁行业产量

研究结果表明，限制粗钢产量在减少钢铁行业的碳排放和污染排放中起着根本性作用。提高原料减排和结构减排，对于控制行业碳排放的目标仅为辅助作用。当粗钢产量增长率为2%左右时，通过大量使用废钢铁和电炉钢设施，也仅能实现2030年碳排放量与2021年相当。此外，粗钢产量的增长也会导致各种污染物（如PHPs、PM和SO₂）的排放持续增加。中国虽然于2021年提出了严控粗钢产量的要求，但是2021年的产量仍然比控制目标高35 Mt；且2022年前三季度的产量已达0.81 Gt，为年度控制目标的81%，仍然过高，因此，亟须进一步严格落实控制粗钢产量的行动。而这对于那些城镇化率低、没有足够历史存量来提供所需折旧废钢的国家和区域而言，也可以减少其对废钢的需求。

4.4. 减污降碳协同推进实现多重环境效益

本研究结果阐释了由于各环节碳排放强度和污染物排放强度（PEI）的差异，导致不同的碳减排措施对于污染

物减排协同程度存在差异。尤其是颗粒物排放，甚至可能呈现与其他污染物相反的排放变化。一方面，由于不同地区环境容量的差异，需要综合考虑污染物减排和碳减排的多重目标，针对性地优化行业发展路径。

另一方面，由于矿石以及钢铁废料的来源多样，其中源于矿石或多样化产品生产过程中添加的有害重金属，以及使用和收集过程中附着的组成复杂的污染物，可能会显著改变行业的污染排放，尤其是高度关注污染物的排放。例如，含有溶剂、油漆和清漆的废铁桶应该作为危险废物处置，但越来越多地在钢铁行业的窑炉中回收利用，以利用高温完全分解有机污染物。然而，常见的废气和废水环境保护设施并未充分考虑对挥发性有机污染物（如苯、甲苯或甲醛）以及储存和预处理阶段产生的有害残余液体等的控制。同时，为增强产品功能性，钢铁产品会使用如镉、铬和钒等重金属，而随着废钢比的提高，钢渣中重金属的含量也可能发生变化，从而对钢渣的管理形成挑战。目前研究中关于污染物分析极少关注高风险的重金属和相应危险废物，需要进一步调查它们在矿石、钢铁废料中的含量以及加工过程中的迁移和归趋，从而支撑不同地区在协同实现气候、碧水、蓝天和净土过程中优先控制目标的确定。

中国推动碳和污染物协同减排的经验对于其他发展中国家而言也有着广泛的启示。例如,对于印度、巴西、南非等发展中国家,这些国家有着大比例的碳排放,同时也承受着各类污染对健康的严重影响[59]。这些国家与我国类似,城市化率将会进一步提升[60],而人均钢铁消费量仍然处于相对较低的水平[44,61],仍会面临大量消费需求。对于消费增长型国家,防止粗钢产量过度增长是控制总碳排放和污染物排放的关键。此外,识别可以加强废钢供应的关键来源至关重要,尤其是在需要增加废钢比的情况下。只有在确保足够的废钢供应的情况下,大规模采用电炉工艺生产才是一条合理的路径。

钢铁行业是主要的碳排放和污染排放源[6],尤其是对于大气污染物而言。我国在协同减排方面的措施将为其他发展中国家在不久的将来提供可行的优化途径和发展模式,以更好应对规模减排、原料减排、结构减排和技术减排之间的优化,进而转型进入一个低碳和低排放的发展模式。

4.5. 不确定性分析

为验证碳排放和污染排放估算的可靠性,本研究采用蒙特卡洛框架进行了不确定性分析。根据不同情景下的粗钢产量、废钢比、电炉钢比及污染物排放因子的范围生成随机值,共进行了10 000次模拟运行以评估不确定性范围。结果表明,估算结果具有可靠性(附录A中图S4),在Sa情景下碳排放的不确定性范围略大,两倍标准差(2SD)为 ± 0.84 ,而Sc和Sm情景下均为 ± 0.52 ,各情景下污染排放的不确定性结果相似。在所有估算的污染排放中,Sa-H情景中的COD排放具有最大的不确定性范围,2SD值为 ± 578.17 ;其次为SO₂、固体废物产生量和PM,2SD值分别为 ± 374.57 、 ± 193.77 和 ± 188.03 。这主要是源自排放估算的关键模型输入的影响,包括活动水平数据,即粗钢产量和相关系数(废钢比、电炉钢比和污染排放强度)。结果表明,在Sa-H情景中,SSR在相关系数中对碳排放的影响最大,贡献率为68.13%。另一方面,污染排放强度是影响SO₂排放量和固体废物产生量最大的参数,贡献率分别为88.66%和87.04%。此外,由于生产设施的技术、原料、运营等条件的异质性,使用稳定的排放因子值可能会增加不确定性。我们假设每个生产步骤的碳排放因子变化5%,导致模型估算的碳排放变化在0.06%~2.86%之间。

致谢

本项工作受国家重点研发计划(2019YFC1904800)和

国家自然科学基金(72274105)的资助,同时感谢清华大学的王楚凡在研究中做出的贡献。

Compliance with ethics guidelines

Quanyin Tan, Fei Liu, and Jinhui Li declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.eng.2023.09.018>.

References

- [1] United Nations Environment Programme (UNEP). Making Peace with Nature: a scientific blueprint to tackle the climate, biodiversity and pollution emergencies. Nairobi: United Nations Environment Programme; 2021. p. 166.
- [2] Wallach O. Race to net zero: carbon neutral goals by country [Internet]. Vancouver: Visual Capitalist; 2021 Jun 8 [cited 2022 Oct 1]. Available from: <https://www.visualcapitalist.com/sp/race-to-net-zero-carbon-neutral-goals-by-country/>.
- [3] United Nations Environment Programme (UNEP). Science-policy panel to contribute further to the sound management of chemicals and waste and to prevent pollution [UNEP/EA. 5/RES. 8] [Internet]. Gigiri: United Nations Environment Programme; 2022 Nov 4 [cited 2022 Jun 30]. Available from: <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/39719>.
- [4] Rogelj J, den Elzen M, Höhne N, Fransen T, Fekete H, Winkler H, et al. Paris agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2 °C. *Nature* 2016;534(7609):631–9.
- [5] Ren L, Zhou S, Peng T, Ou X. A review of CO₂ emissions reduction technologies and low-carbon development in the iron and steel industry focusing on China. *Renew Sustain Energy Rev* 2021;143:110846.
- [6] Ritchie H, Roser M, Rosado P. CO₂ and greenhouse gas emissions [Internet]. Oxford: Our World in Data; 2017 May [cited 2022 Jun 30]. Available from: <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>.
- [7] Yoro KO, Daramola MO. Chapter 1—CO₂ emission sources, greenhouse gases, and the global warming effect. In: Rahimpour MR, Farsi M, Makarem MA, editors. *Advances in carbon capture*. Cambridge: Woodhead Publishing; 2020. p. 3–28.
- [8] Çiftçi B. Potential game changers for the future of steelmaking. Brussels: World Steel Association; 2017.
- [9] Kumar D, Kumar D. Chapter 1—introduction. In: Kumar D, Kumar D, editors. *Management of coking coal resources*. Amsterdam: Elsevier; 2016. p. 1–8.
- [10] Energy Transitions Commission; Rocky Mountain Institute. China 2050: a fully developed rich zero-carbon economy. London: Energy Transitions Commission; Rocky Mountain Institute; 2019.
- [11] World Steel Association. 2019 steel statistical yearbook. Brussels: World Steel Association; 2020.
- [12] National Bureau of Statistics of China; Ministry of Ecology and Environment of China. 2021 China statistical yearbook on environment. Beijing: National Bureau of Statistics; 2022. Chinese.
- [13] Central Committee of the Communist Party of China; the State Council of the People's Republic of China. Working guidance for carbon dioxide peaking and carbon neutrality in full and faithful implementation of the new development philosophy [Internet]. Beijing: Central Committee of the Communist Party of China; 2021 Sep 22 [cited 2023 Jun 19]. Available from: https://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content_5644613.htm. Chinese.
- [14] Xinhua News Agency. The central economic work conference was held in Beijing [Internet]. Beijing: China Xinhua News; 2020 Dec 18 [cited 2022 Oct

- 30]. Available from: http://www.xinhuanet.com/politics/leaders/2020-12/18/c_1126879325.htm. Chinese.
- [15] International Energy Agency. Energy technology perspectives 2016: towards sustainable urban energy systems. Paris: International Energy Agency; 2016.
- [16] Wang X, Hao L. Analysis of modern ironmaking technology and low-carbon development direction. *MetalChin* 2021;31(5):1–5,18. Chinese.
- [17] Li Z, Xu Y, Yi W, Huang Y, Liu X, Li X. Evaluation, selection and application of low-carbon technology in iron and steel enterprises. *Res Environ Sci* 2022; 35(6):1538–46. Chinese.
- [18] Jouhara H, Khordehghah N, Almahmoud S, Delpech B, Chauhan A, Tassou SA. Waste heat recovery technologies and applications. *Therm Sci Eng Prog* 2018;6: 268–89.
- [19] Zhu T, Wang X, Yu Y, Li C, Yao Q, Li Y. Multi-process and multi-pollutant control technology for ultra-low emissions in the iron and steel industry. *J Environ Sci* 2022;123:83–95.
- [20] Bo X, Jia M, Xue X, Tang L, Mi Z, Wang S, et al. Effect of strengthened standards on Chinese ironmaking and steelmaking emissions. *Nat Sustain* 2021;4:811–20.
- [21] Wang X, Yu B, An R, Sun F, Xu S. An integrated analysis of China's iron and steel industry towards carbon neutrality. *Appl Energy* 2022;322:119453.
- [22] Wang X, Zhang Q, Xu L, Tong Y, Jia X, Tian H. Water–energy–carbon nexus assessment of China's iron and steel industry: case study from plant level. *J Clean Prod* 2020;253:119910.
- [23] Long W, Wang S, Lu C, Xue R, Liang T, Jiang N, et al. Quantitative assessment of energy conservation potential and environmental benefits of an iron and steel plant in China. *J Clean Prod* 2020;273:123163.
- [24] Zhao X, Ma X, Chen B, Shang Y, Song M. Challenges toward carbon neutrality in China: strategies and countermeasures. *Resour Conserv Recycl* 2022; 176: 105959.
- [25] Wu R, Lin B. Environmental regulation and its influence on energy–environmental performance: evidence on the Porter Hypothesis from China's iron and steel industry. *Resour Conserv Recycl* 2022;176:105954.
- [26] Yu B, Li X, Qiao Y, Shi L. Low-carbon transition of iron and steel industry in China: carbon intensity, economic growth and policy intervention. *J Environ Sci* 2015;281:37–47.
- [27] Gao Y, Zhang L, Huang A, Kou WH, Bo X, Cai B, et al. Unveiling the spatial and sectoral characteristics of a high-resolution emission inventory of CO₂ and air pollutants in China. *Sci Total Environ* 2022;847:157623.
- [28] Zhong H, Zhao Y, Muntean M, Zhang L, Zhang J. A high-resolution regional emission inventory of atmospheric mercury and its comparison with multiscale inventories: a case study of Jiangsu. *China Atmos Chem Phys* 2016;16:15119–34.
- [29] Hua H, Jiang S, Sheng H, Zhang Y, Liu X, Zhang L, et al. A high spatial–temporal resolution emission inventory of multi-type air pollutants for Wuxi City. *J Clean Prod* 2019;229:278–88.
- [30] Acutt MZ, Dodgson JS. Cross-elasticities of demand for travel. *Transp Policy* 1995;2(4):271–7.
- [31] Zeng QH, He LY. Study on the synergistic effect of air pollution prevention and carbon emission reduction in the context of “dual carbon”: evidence from China's transport sector. *Energy Policy* 2023;173:113370.
- [32] Alimujiang A, Jiang P. Synergy and co-benefits of reducing CO₂ and air pollutant emissions by promoting electric vehicles—a case of Shanghai. *Energy Sustain Dev* 2020;55:181–9.
- [33] Jiao J, Huang Y, Liao C. Co-benefits of reducing CO₂ and air pollutant emissions in the urban transport sector: a case of Guangzhou. *Energy Sustain Dev* 2020;59:131–43.
- [34] Chen J, Cheng S, Song M, Wang J. Interregional differences of coal carbon dioxide emissions in China. *Energy Policy* 2016;96:1–13.
- [35] Wu K, Liu X, Dai H, Zhang S, Zhou Z, Ma T, et al. Mutual effects of CO₂ emission reduction and air pollution control policies in Beijing–Tianjin–Hebei region. *Front Environ Sci* 2022;10:1006142.
- [36] Ministry of Industry and Information Technology of China; Ministry of Science and Technology of China; Ministry of Natural Resources of China. The “14th Five-Year” plan for the development of raw material industry. Beijing: The State Council of the People's Republic of China; 2021. Chinese.
- [37] Ministry of Industry and Information Technology of China; National Development and Reform Commission of China; Ministry of Ecology and Environment of China. Implementation plan for peaking carbon dioxide emissions in industry sector. Beijing: The State Council of the People's Republic of China; 2022. Chinese.
- [38] Ministry of Industry and Information Technology of China; National Development and Reform Commission of China; Ministry of Ecology and Environment of China. Guideline on promoting the high-quality development of the iron and steel industry. Beijing: The State Council of the People's Republic of China; 2022. Chinese.
- [39] Wang M, Tian Y, Liang Y, Zhou R, Luo Y, Li X. Forecast scrap generation and emission reduction of China's steel industry. In: Xu J, Ahmed SE, Cooke FL, Duca G, editors. Proceedings of the 13th International Conference on Management Science and Engineering Management (ICMSEM 2019); 2019 Aug 5–8; Ontario, Canada. Berlin: Springer International Publishing; 2020. p. 283–92.
- [40] China City Greenhouse Gas Working Group. China products carbon footprint factors database. Beijing: China City Greenhouse Gas Working Group; 2022.
- [41] Cai BF, Liang S, Zhou J, Wang JN, Cao LB, Qu S, et al. China high resolution emission database (CHRED) with point emission sources, gridded emission data, and supplementary socioeconomic data. *Resour Conserv Recycl* 2018;129: 232–9.
- [42] He K, Mi Z, Zhang J, Li J, Coffman DM. The polarizing trend of regional CO₂ emissions in China and its implications. *Environ Sci Technol* 2023; 57(11): 4406–14.
- [43] Ministry of Ecology and Environment of China. Manual of accounting method and coefficient of generation and emission for industrial source. Beijing: The State Council of the People's Republic of China; 2021. Chinese.
- [44] Bureau of International Recycling. World steel recycling in figures. 12th edition. Brussels: Bureau of International Recycling; 2021. p. 40.
- [45] Pan C, Wang B, Hou X, Gu Y, Xing Y, Liu Y, et al. Carbon peak path of the Chinese iron and steel industry based on the LMDI–STIRPAT model. *Chin J Eng* 2023;45(6):1034–44.
- [46] Project Team on the Strategy and Pathway for Peaking Carbon Emissions and Carbon Neutrality. Analysis of a peaked carbon emission pathway in China toward carbon neutrality. *Engineering* 2021;7(12):1673–7.
- [47] Ministry of Ecology and Environment of China. Annual report of China ecology and environment statistics 2021. Beijing: The State Council of the People's Republic of China; 2023. p. 66. Chinese.
- [48] Liu L, Zhang D, Ren T, Hu Z, Zhou W, Chen H. Process practice of increasing converter scrap ratio by using hot scrap. *Shanxi Metal* 2022; 28(6): 97–9. Chinese.
- [49] Wimmer G. Greening converter steelmaking [Internet]. London: Metals Magazine; 2020 Jan 1 [cited 2023 Sep 14]. Available from: <https://magazine.primetals.com/2020/01/01/greening-converter-steelmaking/>.
- [50] Fang W, Yang N, You X, Wu L. Research on high efficiency low consumption high scrap ratio converter. *Steelmaking* 2020;36(6):8–13. Chinese.
- [51] Feng T, Hao H, Chen J, Wei J. Application practice of improving scrap ratio in converter smelting. *Metall Info Rev* 2019;25(3):40–2.
- [52] Steel Manufacturers Association. Steelmaking emissions report 2022. Report. Washington, DC: Steel Manufacturers Association; 2022.
- [53] Li F, Chu M, Tang J, Liu Z, Zhou Y. Environmental performance analysis of coal gasification-shaft furnace-electric furnace process and BF–BOF process based on life cycle assessment. *J Iron Steel Res Int* 2020;32(7):577–83.
- [54] Zhang Q, Tian S, Shen J. Roadmap and timetable for achieving carbon peak and carbon neutrality of China's iron and steel industry. *Iron Steel* 2023; 1–14. Chinese.
- [55] Editorial Board of China Steel Yearbook. China steel yearbook 2021. Beijing: China Iron and Steel Association; 2021. Chinese.
- [56] China National Resources Recycling Association. Report on the development of recycling industry in China. Beijing: China National Resources Recycling Association; 2022. Chinese.
- [57] He K. Research on energy saving and efficiency increasing potential of energy regulation and process optimization in metallurgical system [dissertation]. Beijing: University of Science and Technology Beijing; 2019. p. 133. Chinese.
- [58] Dai Y, Wang W. Converter's energy consumption and raising of scrap return ratio. *J Northeast Univ* 1994;15(4):384–9. Chinese.
- [59] United Nations Environment Programme (UNEP). Earth observation for monitoring pollution [Internet]. Genève: United Nations Environment Programme; undated [cited 2022 Oct 30]. Available from: <https://wesr.unepgrid.ch/?project=MX-JOJ-8ME-I4T-G9M-I9E&language=en>.
- [60] Wahba Tadros SN, Wellenstein A, Das MB, Palmari N, D' Aoust OS, Singh G, et al. Demographic trends and urbanization. Washington, DC: World Bank Group; 2021.
- [61] World Steel Association. World steel in figures 2022: apparent steel use per capita 2017 to 2021 [Internet]. Genève: United Nations Environment Programme; undated [cited 2022 Oct 30]. Available from: <https://worldsteel.org/steel-topics/statistics/world-steel-in-figures-2022/#apparent-steel-useper-capita-2017-to-2021>.