工程科学学报, 第 47 卷, 第 6 期: 1360−1376, 2025 年 6 月
Chinese Journal of Engineering, Vol. 47, No. 6: 1360−1376, June 2025
https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2024.10.29.002; http://cje.ustb.edu.cn

钢铁行业大气污染物排放清单、CO_2 排放清单的研究现状与未来展望

徐　鑫[1,2)], 单皖粤[1,2)], 张　峥[1,2)], 王　晴[1,2)], 伯　鑫[1,2)]✉

1) 北京化工大学环境科学与工程系, 北京 100029　2) 北京化工大学北化中国工业碳中和研究院, 北京 100029
✉通信作者, E-mail: boxin@buct.edu.cn

摘　要　排放清单能够有效表征研究区域污染特征及温室气体排放情况, 为制定污染物防控措施和协同减排策略提供科学依据. 在全球推动绿色低碳发展的背景下, 作为重要工业部门的钢铁行业, 其低碳转型已成必然趋势, 而低碳创新技术的不断发展与应用则对钢铁行业排放清单的精细化提出了新要求. 因此, 在查阅大量文献的基础上, 本文从钢铁行业大气污染物和温室气体 (以钢铁行业 CO_2 排放清单为准) 的清单核算方法, 全球、洲际、国家及城市/城市群的钢铁行业排放清单研究进展, 清单的不确定性分析, 局限性与未来展望 4 个方面对钢铁行业排放清单编制工作进行了汇总整理. 发现中国钢铁行业排放清单主要存在以下问题: 清单数据种类和质量问题、无组织核算体系构建问题、CO_2 核算体系和方法问题、主要工序挥发性有机化合物 (VOCs) 组分谱和颗粒物成分谱问题、基于烟气排放连续监测系统 (CEMS) 的钢铁企业详细时间谱的问题及清单应用问题等. 建议未来丰富钢铁行业排放清单数据种类, 加强实测数据的收集与分析, 保证基础数据的准确性; 建立系统化的无组织排放核算体系, 统筹优化 CO_2 核算体系和核算方法, 提升排放清单的时间分辨率并拓展排放清单的应用方向, 加强学科间和国际合作, 从而助力于全球大气污染物与温室气体协同控制.

关键词　钢铁行业; 排放清单; 温室气体; CO_2; 融合排放清单
分类号　X51

Current research and future prospects of air pollutant and CO_2 emission inventories in the iron and steel industry

XU Xin[1,2)], *SHAN Wanyue*[1,2)], *ZHANG Zheng*[1,2)], *WANG Qing*[1,2)], *BO Xin*[1,2)]✉

1) Department of Environmental Science and Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China
2) BUCT Institute for Carbon-neutrality of Chinese Industries, Beijing 100029, China
✉Corresponding author, E-mail: boxin@buct.edu.cn

ABSTRACT　Emission Inventory serves as a valuable tool for effectively characterizing pollution profiles and greenhouse gas emissions in the study area, offering a robust scientific foundation for developing pollutant prevention and control measures and collaborative emission reduction strategies. Amid global efforts to promote green and low-carbon development, the iron and steel industry, one of the key industrial sectors, has drawn increasing attention for its CO_2 and air pollutant emissions. The low-carbon transformation of this industry has become an inevitable trend. As low-carbon innovative technologies continue to develop and be implemented, emission inventories for the iron and steel industry are progressing toward greater precision and comprehensiveness. The emergence of new technologies, such as electric arc furnace steelmaking, hydrogen metallurgy, and carbon capture, utilization, and storage, offers innovative solutions for reducing carbon emissions while simultaneously increasing demands for more accurate emission

收稿日期: 2024−10−29
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(72174125); 中央高校基本科研业务费资助项目(buctrc202133)

中国知网　https://www.cnki.net

inventories. Traditionally, emission inventories have relied on generalized emission factors for estimating emissions. However, the advancement of low-carbon technologies introduces greater diversity in emission sources and variations in emission characteristics, necessitating the development of more refined emission inventories. Therefore, research on air pollutants and CO_2 emission inventories in the iron and steel industry is crucial. Drawing on extensive domestic and international literature, this study summarizes and organizes the development of emission inventories in this sector across four key dimensions: (1) accounting methods for air pollutants and greenhouse gases, with greenhouse gas accounting primarily focusing on CO_2; (2) emissions at global, intercontinental, national, urban, and urban agglomeration scales; spatial distribution of inventories; (3) uncertainty analysis, along with identified limitations and (4) future prospects for improvements. This study highlights several critical issues in China's iron and steel industry, including challenges related to the diversity and quality of emission inventory data, the construction of an unorganized emission accounting system, deficiencies in CO_2 accounting systems and methodologies, challenges in characterizing component spectra of volatile organic compounds (VOCs) and particulate matter profiles for key processes, obstacles in developing detailed time series for steel enterprises using continuous emission monitoring system (CEMS), and concerns in the practical application of emission inventories. Future efforts should prioritize diversifying the types of emission inventory data in the steel industry and enhancing the collection and analysis of measured data to improve the accuracy of foundational data. In addition, establishing a comprehensive, unorganized emission accounting system and optimizing the CO_2 accounting framework and methods are essential. Incorporating real-time CEMS monitoring data and integrating composition profiles of VOCs and particulate matter characteristics from key processes can remarkably enhance the resolution of emission inventories. Furthermore, expanding the applications of emission inventories, fostering interdisciplinary and international collaborations, and promoting green and low-carbon development in the iron and steel industry are vital for achieving the synergistic control of global air pollutants and greenhouse gas emissions.

KEY WORDS　iron and steel industry; emission inventory; greenhouse gases; carbon dioxide; integrative emission inventory

根据《巴黎协定》, 为将全球变暖控制在 1.5 ℃以内, 必须在 2050 年实现净零排放目标[1−2]. 作为能源消耗密集型的行业, 钢铁行业约占全球能源系统总排放量的 8%, 并占与能源相关的二氧化碳排放量的 7% ~ 10%[3]. 因此, 降低钢铁行业二氧化碳排放对实现全球长期可持续发展至关重要. 此外, 钢铁生产过程涉及高温、高压冶炼以及复杂的化学反应[4], 会向大气环境释放多种污染物, 包括 SO_2、NO_x、颗粒物 (PM)、CO、重金属和二噁英 (PCDD/Fs) 等[5], 不仅对空气质量产生影响, 还对全球气候变化、生态系统以及人类健康构成严重威胁. 因此, 有必要在不同时空尺度上深入探究钢铁行业 CO_2 等温室气体与多种大气污染物的排放情况及其潜在影响.

排放清单 (即大气污染物排放清单、温室气体排放清单、融合排放清单等) 是量化排放水平、识别典型污染源和特征污染物的重要工具, 同时也是大气污染防治、碳减排等政策制定的关键支撑. 先前的研究将钢铁行业作为重要工业源之一进行核算, 而非将其作为单独部门开展大气污染物排放清单的研究[6−9]. 然而, 低碳创新技术的更新和应用、向绿色钢铁生产的转型及超低排放技术的推广, 对钢铁行业排放清单的精细化提出了新要求[10−12]. 钢铁生产工序包括烧结、球团造粒、炼铁、炼钢和轧钢等[13−14], 涉及多种生产技术, 从而导致不同工序和技术排放的大气污染物和 CO_2 等温室气体具有差异性. 对于两种主要工艺路线, 即高炉−碱性氧炉 (BF−BOF) 和电弧炉 (EAF), 其在不同国家的市场份额、投入物结构及能源强度存在差异[15−16]. 此外, 随着向绿色钢铁生产过渡的清洁技术的实施和普及, 如氢基还原铁技术[17−19], 其市场渗透率和替代率的差异也会影响钢铁行业的大气污染物与温室气体排放变化. 因此, 精细和全面的钢铁行业排放清单是准确量化排放变化的关键. 与此同时, 随着《巴黎协定》的减排承诺在全球范围内的加强, 对大气污染物和温室气体融合排放清单的需求也日益增长, 同时给协同效应研究带来了巨大挑战. 钢铁行业协同效应研究涵盖了以排放水平或浓度的变化度量协同效应[20−22]、以健康水平的提高度量协同效应[23−24]、以减排成本降低度量协同效应等[25−26], 旨在分析其在实现气候目标的同时, 对减少大气污染物的潜在共同效益. 其中, 精细化的钢铁行业融合排放清单是准确度量协同效应的关键.

排放清单的科学性、规范性和一致性也已成为政策制定与行业标准化管理的核心关注点. 为此, 国家和行业层面陆续发布了多项技术指南和标准, 以规范排放清单的编制方法和核算框架, 确

中国知网　https://www.cnki.net

保其科学性和可操作性. 2014 年, 原中国环境保护部先后发布了《大气污染源优先控制分级技术指南 (试行)》和 8 个清单编制技术指南, 规定了排放清单的定义, 即指各种排放源在一定的时间跨度和空间区域内向大气中排放的大气污染物的量的集合. 发展改革委办公厅于 2013 年 10 月 15 日发布的《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》中的《中国钢铁生产企业温室气体排放核算方法与报告指南 (试行)》中对温室气体进行了定义, 即指《京都议定书》中所规定的六种温室气体, 分别为二氧化碳 (CO_2)、甲烷 (CH_4)、氧化亚氮 (N_2O)、氢氟碳化物 (HFCs)、全氟化碳 (PFCs) 和六氟化硫 (SF_6)[27]. 2023 年 10 月 14 日, 生态环境部办公厅发布《关于做好 2023—2025 年部分重点行业企业温室气体排放报告与核查工作的通知》(环办气候函〔2023〕332 号), 内附了 (企业温室气体排放核算与报告填报说明 钢铁生产)[28], 文件中的温室气体特指 CO_2. 此外, 2024 年 1 月 30 日, 生态环境部印发《大气污染物与温室气体融合排放清单编制技术指南 (试行)》(环办大气函〔2024〕28 号)[29], 规定了大气污染物与温室气体融合排放清单 (简称融合清单): 指在一定时间跨度和空间区域内, 按照一致的排放源分类分级体系、统一的排放量计算方法、共同的活动水平数据信息, 逐源确定大气污染物和温室气体排放明细, 在同一框架下汇总形成的排放数据集合. 其中, 大气污染物核算物质包括二氧化硫 (SO_2)、氮氧化物 (NO_x)、一氧化碳 (CO)、挥发性有机物 (VOCs)、氨 (NH_3)、总悬浮颗粒物 (TSP)、可吸入颗粒物 (PM_{10})、细颗粒物 ($PM_{2.5}$)、黑碳 (BC) 和有机碳 (OC); 温室气体核算物质包括二氧化碳 (CO_2)、甲烷 (CH_4)、氧化亚氮 (N_2O) 和氢氟碳化物 (HFCs). 在本文中, 钢铁行业排放清单主要指钢铁行业大气污染物排放清单、温室气体排放清单 (以钢铁行业 CO_2 排放清单为准) 及融合排放清单 (归纳排放清单研究进展时涉及).

基于上述背景, 本研究首先梳理了钢铁行业排放清单 (大气污染物排放清单、温室气体排放清单) 的核算方法, 其次系统综述了不同时空尺度钢铁行业排放清单 (大气污染物排放清单、温室气体排放清单、融合排放清单等) 的研究进展, 再次总结了钢铁行业排放清单的不确定性分析方法, 最后结合目前的研究进展讨论了钢铁行业排放清单发展的未来展望. 通过阐述这些关键问题, 强调全面、精确的钢铁行业排放清单在制定有效减排策略、推动钢铁行业绿色转型、促进国际合作、实现可持续发展及应对全球环境挑战中的重要性.

1　钢铁行业大气污染物和温室气体 (以 CO_2 为主) 排放量的核算方法研究

1.1　大气污染物排放量的核算研究

钢铁行业大气污染物排放量核算方法主要包含污染源调查法、排放因子法和在线监测法[1]. 本部分重点介绍钢铁行业大气污染物排放量核算的方法.

1.1.1　污染源调查法

污染源调查法主要依靠环境保护部门的现场调查及排查获得的数据, 可反映钢铁企业的真实排放情况, 核算的准确性相对较高. 伯鑫等[30] 采用钢铁企业环评报告书中大气点源的相关信息, 结合卫星遥感数据, 构建了钢铁行业主要工艺解译库, 获取了京津冀地区钢铁企业主要排污设施的地理信息, 实现了对钢铁企业污染源的准确定位, 并构建了京津冀地区钢铁行业高时空分辨率排放清单. 然而, 污染源调查法依赖于钢铁企业环评报告书等环保部门的现场调查及排查获得的数据, 由于企业环评报告自我披露可能导致信息不完整, 以及环境保护部门的调查资源和频率有限, 无法全面覆盖所有污染源, 进而影响对污染状况的准确评估.

1.1.2　排放因子法

排放因子法主要通过活动水平和排放因子进行核算 (式 (1))[31], 是钢铁行业大气污染物排放量核算应用最广泛的方法.

$$E=\sum_{n}\sum_{p}A_{n,p,i}F_{s,r,i,n}\times\left(1-\eta_{p,s,r,i}\right)\times10^{-3} \quad (1)$$

式中, E为排放量, $t\cdot a^{-1}$; A为产品产量, $t\cdot a^{-1}$; F为排放因子, $g\cdot kg^{-1}$ 产品; η为来自 p企业 i工序的 r排放源对污染物 s的去除效率, %; n为不同地区; p为不同企业; i为不同工序; s为不同污染物; r为不同排放源.

排放因子法被广泛用于核算 SO_2、NO_x 和 PM 等常规污染物的排放估计. 其中, 排放因子主要来自官方机构发布的权威文件, 如从 1972 年开始出版并由美国环境保护署 (Environmental Protection Agency, EPA) 不断更新的大气污染物排放系数汇编 (Compilation of air pollutant emission factors, AP-42)[32], 欧洲环境署 (European Environment Agency, EEA) 自 2006 年起向全社会公开发布并更新的 EMEP/EEA 空气污染物排放清单指南[33]. 此外, 2007 年我

中国知网　https://www.cnki.net

国开展第一次全国污染源普查后编制的《第一次全国污染源普查工业污染源产排污系数手册》及2017年开展第二次全国污染源普查后编制的《第二次全国污染源普查产排污核算系数手册》也有效推动了钢铁行业排放清单编制工作的发展[34−35]. 为实现全球对减排目标的共识和承诺, 不同的钢铁生产国 (组织) 对钢铁行业不同生产过程的 SO_2、NO_x 和 PM 制定了不同的排放标准, 如欧盟委员会发布的《钢铁生产最佳可用技术 (BAT) 参考文件》[36] 及中国颁布并实施的一系列相关标准[37−41]. 随着逐步收紧钢铁行业大气污染物排放标准限值, 我国钢铁行业不同工序的排放因子呈现降低的趋势 (表 1). 目前钢铁行业缺乏 PCDD/Fs 和重金属的实际监测数据. 然而, 工艺参数的变化 (如温度和原料成分)、原料的质量和成分以及控制装置的效率等因素会导致污染物的实际排放量与估计排放量之间产生差异. 此外, 就重金属而言, Wang 等[44] 参考先前的研究[46−47] 利用 S 型曲线预测有毒重金属的排放因子, 为编制排放清单提供了一种方法. 然而, 若要反映实际排放情况仍需要依靠实测数据以提高排放清单的准确性. 上述研究采用的固定排放因子无法准确反映经济发展水平的差异以及不同国家间技术应用的进展. 此外, 排放因子的确定通常依赖于与操作条件和控制措施相关的假设或间接参数, 这进一步增加了排放估算的不确定性.

1.1.3　在线监测法

相比之下, 基于烟气排放连续监测系统 (CEMS) 数据的方法具有显著优势. 为获取实时、准确的排放数据, 钢铁的主要生产国 (组织) 的钢铁企业都安装了连续排放监测系统 (CEMS). 在美国, 根据《清洁空气法》, 为确保持续监测和定期报告排放情况, 大型钢铁厂通常被要求安装 CEMS[48]; 欧盟要求某些类型的设施根据《工业排放指令》(IED) 配备在线监测设备, 以提高透明度和监管效率[49]; 为确保排放标准的全面实施, 中国建立了烟气排放

表 1　2010—2020 年不同排放清单下中国钢铁行业主要污染物排放因子的变化

Table 1　Variation in the emission factors of major pollutants in the Chinese iron and steel industry (2010—2020) across different emission inventories

Pollutant	Emission factor/(kg·t^{-1})											Reference
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	
SO_2	0.002	0.002	0.002									[6]
											0.48	[24]
			2.19			0.47			0.31			[31]
	3.31	3.25	2.96	2.76	2.38	1.89						[42]
	2.78	3.67	3.32	2.89	2.61	2.16	1.30	0.95	0.78	0.64	0.39	[43]
	3.45	3.37										[44]
	2.95	2.72	2.57	2.52	2.14	1.71	1.53	1.22	1.07	0.90	0.82	[45]
NO_x	0.01	0.01	0.01									[6]
											0.91	[24]
			2.55			0.90			0.72			[31]
	0.98	0.97	0.93	0.91	0.88	0.87						[42]
	1.56	1.39	1.34	1.23	1.23	1.30	1.68	1.65	1.45	1.16	0.87	[43]
	0.94	0.95										[44]
	2.50	2.51	2.48	2.26	2.26	2.23	2.26	2.11	1.96	1.75	1.41	[45]
PM_{10}	0.45	0.45	0.44									[6]
			0.94			0.42			0.31			[31]
	4.32	4.19	3.74	3.29	2.67	2.19						[42]
	2.58	3.01	2.50	2.38	5.20	4.44	2.21	1.49	1.26	1.00	0.46	[43]
	2.86	2.90										[44]
	2.82	2.76	2.68	2.19	1.93	1.64	1.46	1.23	1.17	1.08	0.98	[45]

Notes: The emission factors are calculated based on the emissions from various emission inventories divided by the crude steel production data published by the National Bureau of Statistics of China in 2010—2020.

中国知网　https://www.cnki.net

连续监测系统 (CEMS), 对工业企业的烟囱排放进行持续监测. Bo 等[12,50] 的研究表明到 2018 年, CEMS 覆盖了中国 72% 的钢铁厂, 占钢铁产量的 91%, 显著提高了排放数据的准确性和及时性, 能够提供高频次、精细化的监测数据 (如污染物浓度、污染物排放量、烟气量、含氧量等), 能够准确反映不同时间段的污染源排放特征, 显著提高了排放估计的准确性. 为保证数据代表性和准确性, 需要依据《固定污染源烟气 (SO_2、NO_x、颗粒物) 排放连续监测技术规范 (HJ 75—2017)》对 CEMS 数据中出现的无效、零值和异常观测值进行规范处理[51]. 基于质控后的 CEMS 数据及不同排污节点的污染物浓度 (式 (2)), 结合不同排污节点的理论烟气量, 从而计算出不同企业的年均排放因子 (式 (3)) 及各地区的年均排放因子 (式 (4)). 结合不同工序的产量等参数, 按照自下而上的方法计算得到不同企业各工序或不同地区的钢铁行业污染物排放量 (式 (5))[12,52−53]. 相较于传统的基于固定排放因子的估算方法, 在线监测法避免了基于假设或间接参数所带来的不确定性. 然而, 钢铁行业涉及的工序及排放源较多, 在线监测系统有时无法覆盖钢铁企业所有的排放源 (特别是无组织排放源). 在线监测法的具体计算公式如下.

$$C_{\mathrm{AVG},s,r,i,m} = \sum_{h} C_{s,r,i,m,h} \Big/ \sum_{m} \mathrm{Oph}_m \tag{2}$$

$$F_{s,r,i,m} = C_{\mathrm{AVG},s,r,i,m} V_{r,i} \times 10^{-6} \tag{3}$$

$$F_{s,r,i,n} = \sum_{m} F_{s,r,i,m} \Big/ N_{s,r,i,n} \tag{4}$$

$$E = \sum_{n} \sum_{p} A_{n,p,i} F_{s,r,i,n} \times 10^{-3} \tag{5}$$

式中, C_{AVG}为排放浓度统计均值, $\mathrm{mg\cdot m^{-3}}$; Oph为纳入分析的监测小时数; F为排放因子, $\mathrm{g\cdot kg^{-1}}$ 产品; V为理论烟气量, $\mathrm{m^3\cdot t^{-1}}$ 产品; N为样本个数; E为排放量, $\mathrm{t\cdot a^{-1}}$; A为产品产量, $\mathrm{t\cdot a^{-1}}$; s为不同污染物; r为不同排放源; i为不同工序; m为不同排口; h为第h个运行小时; n为不同地区; p为不同企业.

1.2　温室气体排放量 (CO_2) 的核算研究

本部分总结了国际和国内钢铁行业碳排放核算方法, 涵盖了核算方法、核算边界、排放因子概述及适用范围 (表 2). 钢铁行业碳排放的核算方法主要包括以下几种: 一是联合国政府间气候变化专门委员会国家温室气体特别工作组编写的《IPCC 国家温室气体清单指南》中的核算方法[54]; 二是国际钢铁协会 (World Steel Association, WSA) 提出的 CO_2 排放计算方法[55]; 三是世界资源研究所 (World Resources Institute, WRI) 与世界可持续发展工商理事会 (World Business Council for Sustainable Development, WBCSD) 共同开发的温室气体核算体系 (Greenhouse gas protocol, GHG Protocol), 该体系包括了 CO_2 排放的计算方法[56]. 此外, 我国于 2011 年、2013 年和 2016 年分别发布了《省级温室气体清单编制指南》、《中国钢铁生产企业温室气体排放核算方法与报告指南》及《温室气体排放核算与报告要求》等温室气体核算指南[57], 为钢铁行业 CO_2 排放计算提供参考. 2022 年美国钢铁学会发布的《钢铁生产温室气体排放计算指南》为研究钢铁生命周期的碳足迹和挖掘碳减排潜力提供重要工具[58]. 其中, IPCC 提供了钢铁企业典型工序的碳排放系数, 适合宏观层面排放量的核算; 国际钢铁协会提出的核算方法适用于研究钢铁生命周期碳足迹和减排潜力; 温室气体核算体系 (GHG Protocol) 则规定了不同的范围, 为企业、项目提供温室气体核算的标准化方法, 从而降低了核算成本. 此外, 《中国钢铁生产企业温室气体排放核算方法与报告指南 (试行)》主要反映钢铁企业整体的 CO_2 排放情况, 其排放因子的设定更符合我国的生产实际情况; 而《省级温室气体清单编制指南 (试行)》涵盖了更多的碳排放主体和区域, 适用于钢铁行业层面 CO_2 排放的统计工作; 《温室气体排放核算与报告要求》结合国内外现有计算方法推荐的排放因子和国内实际情况制定的各物料和能源的排放因子缺省值, 适用于钢铁行业层面 CO_2 排放的统计工作. 相比之下, 美国钢铁学会的指南所推荐的排放因子缺省值是基于美国多家钢铁制造企业的排放因子平均值. 综上, 目前国内外钢铁行业碳排放核算方法在核算边界、适用范围和核算侧重点方面存在差异. 在进行钢铁行业温室气体排放核算时, 需要依据收集的数据及核算目标进行方法的选择.

2　钢铁行业大气污染物和温室气体排放清单研究进展

本部分重点总结不同空间尺度下钢铁行业排放清单的分辨率、物质类别、污染物排放特征、情景预测及相关健康风险, 旨在揭示钢铁行业在全球、区域 (洲际、国家) 和局地 (城市、城市群) 三个尺度上的污染物排放特征和环境影响, 从而为钢铁行业实现减污降碳目标提供有力支持.

2.1　全球尺度钢铁行业排放清单研究进展

目前, 大多数全球钢铁行业排放清单的研究

中国知网　https://www.cnki.net

表 2　国际和国内钢铁行业碳排放计算方法的比较

Table 2　Comparison of carbon emission calculation methods among international and domestic iron and steel industries

Year	Source of accounting methodology	Calculation methodology	Accounting boundaries	Overview of emission factors	Scope of applicability
Published in 2006 and revised in 2019	IPCC National Greenhouse Gas Inventory Guidelines, prepared by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) National Greenhouse Gas Inventory Task Force.	Three calculation methods (the emission factor method, the mass balance method, and the direct measurement method) were provided.	The accounting scope includes two components: emissions from fossil fuel combustion and emissions from production processes. Notably, all combustion processes in steel production, except for coking, are categorized as industrial process emissions.	The method encompasses carbon emission factors typical for various processes within steel enterprises.	Greenhouse gas emissions are accounted for by different entities, including national, corporate, and project levels.
First edition in 2009 and second edition in 2016	The CO_2 emission calculation methods proposed by the World Steel Association (WSA) include the first and second editions.	A lifecycle approach is employed, considering input and output at the process level, complemented by a comprehensive plant material balance.	The accounting scope includes direct and indirect emissions, considering carbon emission offsets from the recycling and reuse of by-products outside the steel plant.	The emission factors are based on weighted values from 160 global companies.	This approach is suitable for studying the carbon footprint of the steel lifecycle and exploring the potential for low-carbon emission reductions.
1998	CO_2 emission calculation methods for the steel industry jointly developed by the World Resources Institute (WRI) and the World Business Council for Sustainable Development (WBCSD).	Emissions are calculated using a material balance approach or stoichiometric method based on specific facilities or process flows.	The accounting scope includes direct carbon emissions (scope 1), indirect carbon emissions from electricity generation (scope 2), and other indirect carbon emissions (scope 3).	Scope 1 emissions are calculated using published emission factors based on the quantity of purchased commercial fuels. Scope 2 emissions are calculated using electricity consumption shown on meters and published emission factors from specific suppliers, local grids, or other entities. Scope 3 emissions are calculated using published or third-party emission factors based on activity data, such as fuel consumption or passenger miles.	The method is applicable for public reporting and participation in voluntary or mandatory greenhouse gas programs.
2011	Provincial Greenhouse Gas Inventory Compilation Guidelines (Trial Version).	The overall methodology follows the calculation methods outlined in the IPCC National Greenhouse Gas Inventory Guidelines.	The accounting scope primarily includes the steel production process, with CO_2 emissions arising from two main sources: the high-temperature decomposition of iron-making flux and the decarbonization process in steelmaking.	This method encompasses carbon emission factors typical for various processes within steel enterprises.	The method is applicable for accounting at the provincial level.
2013	Guidelines for the Accounting and Reporting of Greenhouse Gas Emissions for Steel Production Enterprises in China (Trial Version).	The method considers the inputs and outputs of materials and energy at the enterprise level.	The accounting scope includes emissions from fuel combustion, emissions from industrial production processes, emissions from net purchased electricity and heat, and emissions embedded in carbon-containing products.	The method is developed based on the actual conditions of Chinese steel enterprises.	The method is applicable to legally recognized production enterprises engaged in the creation of steel products, as well as independent accounting units regarded as legal entities.
2016	Guidelines for Greenhouse Gas Emission Accounting and Reporting Requirements.	Using the input–output approach, without considering the internal flow of carbon within various processes, CO_2 emissions in the steel production process are accounted for from a macro perspective at the enterprise level.	The accounting scope includes emissions from fossil fuel combustion, emissions from externally purchased carbon-containing raw materials and the decomposition and oxidation of fluxes at various production stages, emissions from purchased electricity and heat, emissions from generated output electricity and heat, and emissions embedded in carbon-containing products.	Default emission factors for various materials and energy have been established by combining existing emission factors recommended by domestic and international calculation methods with actual conditions in China. In addition, enterprises capable of self-measuring emission factors are encouraged to conduct their own measurements.	The method is applicable to the statistical work of CO_2 emissions at the steel industry level.

中国知网　https://www.cnki.net

表 2 (续)

Table 2 (Continued)

Year	Source of accounting methodology	Calculation methodology	Accounting boundaries	Overview of emission factors	Scope of applicability
2022	Greenhouse Gas Emission Calculation Guidelines for Steel Production published by the American Iron and Steel Institute.	The method is based on the product level, analyzing the steel production process by each unit operation. It considers inputs and outputs at the process level, supplemented by comprehensive plant material balance calculations for verification.	The accounting scope includes direct emissions (from stationary sources, mobile sources, and direct fugitive emissions), indirect emissions from scope 2 (purchased electricity), and other indirect emissions from scope 3 (raw material extraction, fuel and energy-related activities excluded in scope 1 or scope 2, upstream transportation, and distribution).	The recommended default emission factors in the method are based on the average values of emission factors from multiple steel manufacturing companies in the United States. The use of Continuous Emission Monitoring Systems (CEMS) for direct measurement is encouraged.	The method is applicable for studying the carbon footprint of the steel lifecycle and exploring carbon reduction potential.

并未将钢铁行业作为独立部门进行核算, 而是将其纳入在工业部门清单中进行分析 (表 3). 例如, Crippa 等[6] 构建了 1970—2012 年全球大气研究排放数据库 (即 EDGAR v4.3.2 版本, 目前更新到 EDGARv8.0), 涵盖全球人为排放的温室气体和污染物 (SO_2、NO_x、CO、非甲烷挥发性有机物 (NMVOC)、NH_3、PM_{10}、$PM_{2.5}$、BC 和 OC), 具有年度和月度的时间分辨率以及 0.1°×0.1°的空间分辨率, 其中钢铁行业作为工业源之一进行核算. Janssens-Maenhout 等[8] 编制的 HTAP_v2.2 数据集则提供了 2008 年和 2010 年的区域及全球排放网格, 包括大气气态污染物 (SO_2、NO_x、CO、NMVOC、NH_3) 和碳质颗粒物 (PM_{10}、$PM_{2.5}$、BC 和 OC), 其中钢铁行业作为重要的工业源被纳入核算. 此外, Klimont 等[9] 基于综合评估模型 GAINS 编制了 1990—2010 年全球人为颗粒物排放清单, 明确了污染物来源和技术特征, 其中钢铁行业被作为工业源的关键核算对象. 尽管上述全球尺度的排放清单在大气化学和输送模型及管理决策中发挥了关键的作用, 但是在编制方法、部门覆盖范围及时间和空间的一致性方面存在差异, 而且很少包含不确定性估计. 为此, Hoesly 等[59] 构建了 1750—2014 年历史人为化学反应气体和碳质气溶胶数据集, 满足了全球大气模拟和其他研究对长期一致性排放趋势的需求, 钢铁行业被纳入工业过程源核算. 上述研究中, 钢铁行业的排放估计被划分到工业部门进行核算研究, 通常具有较大的空间覆盖范围和较粗的分辨率, 适用于宏观趋势分析和全球性政策制定. 其局限性在于忽略了钢铁行业特有的排放特征和影响, 难以准确评估和制定有针对性的减排策略.

因此, 系统开展聚焦于钢铁行业本身的排放清单研究是推动钢铁行业向绿色、低碳方向发展的关键. 为深入理解钢铁行业历史排放趋势及驱动因素, Zhang 等[15] 根据 1960—2019 年各国钢铁行业特定的生产工艺和技术, 对全球钢铁行业多

表 3 不同年份全球尺度钢铁行业排放清单汇总

Table 3 Summary of the global emission inventory of iron and steel industries in different years

Emission inventory	Research year	Resolution and details	Type of material	References
EDGAR v4.3.2 (EDGAR v8.0)	1970—2012 (2024)	0.1° × 0.1° grid resolution	SO_2, NO_x, CO, NMVOC, NH_3, PM_{10}, $PM_{2.5}$, BC, and OC	[6]
HTAP_v2.2	2008, 2010	annual and monthly gridded maps of anthropogenic air pollution emissions (0.1° × 0.1° grid resolution)	SO_2, NO_x, CO, NMVOC, NH_3, PM_{10}, $PM_{2.5}$, BC, and OC	[8]
ECLIPSE V5a	1990—2010	0.5° × 0.5° grid resolution	PM_{10}, $PM_{2.5}$, PM_1, BC, OC, and OM	[9]
CEDS	1750—2014	emissions provided annually by country and sector and gridded on a monthly seasonal basis	CO, CH_4, NH_3, NO_x, SO_2, NMVOC, BC, OC, and CO_2	[59]
	1960—2019	225 countries and regions included	$PM_{2.5}$, PM_{10}, TSP, BC, OC, SO_2, NO_x, CO, PCDD/Fs, and heavy metals (Hg, Cd, Cr, Ni, As, Pb, Cu, Mn, Se, V, Zn)	[15]
CEADs-GSEI	2019	point source (19678 individual processing units located in 4883 individual iron and steel plants)	CO_2	[10]
GISD	1990—2019	encompasses 116 countries or regions and all operating facilities that create iron and steel products as well as related intermittent products	CO_2	[11]

中国知网 https://www.cnki.net

种空气污染物排放进行核算, 揭示了全球和区域钢铁行业排放时间变化的驱动因素 (钢铁出口、国家环境政策、生产过程和末端控制技术). 尽管在全球层面上讨论了钢铁行业发展的驱动因素和减排潜力, 但特定于工厂的缓解潜力和技术驱动的途径仍不明确. 为此, Lei 等[10] 基于炼焦、烧结、球团、炼铁和炼钢等主要工序的全球钢铁行业设施级别基础信息, 构建了 2019 年包含全球 4883 家钢铁厂, 共计 19678 个生产机组的全球钢铁行业碳排放数据库, 综合考虑设施特征、低碳技术发展、钢铁需求的变迁与相关气候目标, 构建了全球钢铁行业工厂级脱碳策略, 并制定全球钢铁行业减排路线. Xu 等[11] 建立了 1990—2019 年全球钢铁排放数据库 (Global iron and steel emission database, GISD), 对设施级的 CO_2 的直接排放量进行了建模, 利用厂龄与产量比率和排放强度两个指标进行成本效益分析, 计算了三种主要的减排策略 (淘汰多余产能、提高效率和向二次炼钢转型) 下生产的减排潜力和相关成本, 提出碳排放缓解措施, 为精细化的排放估算和减排策略提供了强有力的工具. 上述全球钢铁行业的排放清单对于理解钢铁生产对环境的影响、制定减排政策、以及推动技术创新具有重要意义.

综上所述, 全球钢铁行业排放清单的发展历程是伴随着特定情景需求的变化而逐步演进的. 早期的全球排放数据集通常将钢铁行业的排放纳入整体核算, 缺乏对行业内具体排放源的细致划分. 然而, 随着全球气候变化的日益加剧, 以及《巴黎气候协定》的签署和实施, 国际社会对更为精细化的钢铁行业排放清单的需求日益增长. 因此, 近年来, 全球钢铁行业排放清单逐渐向工厂级别精细化, 能够详细反映各个工厂的排放特征, 涵盖了从生产工艺、设备老化到产量等多方面的因素, 从而为准确地量化排放源, 支持政策制定, 在全球范围内实现精准的减污降碳目标提供了科学依据.

2.2　洲际、国家尺度钢铁行业排放清单研究进展

洲际、国家尺度排放清单能够反映特定区域内的排放动态, 评估区域内不同地区之间的排放差异及其对区域空气质量的影响, 从而为制定更有针对性的环境治理策略提供科学依据 (表 4). 尽管洲际尺度的排放清单中钢铁行业的排放尚未进行独立核算, 但在亚洲层面, 已有多项研究提供了重要的数据支持. Streets 等[60] 和 Zhang 等[61] 分别编制了 2000 年亚洲主要人为来源的污染物排放清单和 2006 年亚洲区域包含钢铁行业在内的人为源空气污染物排放清单 INTEX-B, 为理解区域尺度上的空气污染物浓度及通量提供数据支撑. Klimont 等[62] 构建的亚洲 SO_2、NO_x 和含碳气溶胶的排放清单, 时间尺度涵盖 2000、2005、2010、2020 和 2030 年, 提供了历史排放数据并预测了未来的排放趋势, 为评估政策干预措施的影响提供了重要依据. Kurokawa 等[63] 更新了亚洲区域排放清单 (REAS) 至 2.1 版本, 涵盖 2000—2008 年亚洲地区 (东亚、东南亚、南亚和中亚以及俄罗斯的亚洲部分) 的大多数主要空气污染物和温室气体, 并提供高分辨率 (0.25°×0.25°) 的逐月网格化数据, 为亚洲各国空气质量变化及预测未来排放等提供重要参考. 随着国际间合作和技术交流的不断深入, 国内的研究者也参与到洲际排放清单的编制工作. Li 等[64] 根据 MICS-Asia III 和半球空气污染运输工作队 (TF HTAP) 的基准年模拟并编制了 2008 年和 2010 年亚洲 29 个国家和地区所有主要人为源的大气污染物排放清单 MIX, 为区域模拟提供一致的排放输入. Ohara 等[65] 构建了亚洲 1980—2020 年期间的排放清单, 也是第一个以统一的方法构建亚洲历史、现在和未来排放清单的研究, 为理解和应对亚洲的空气污染问题奠定了坚实基础. 上述亚洲尺度的排放清单为亚洲的空气污染传输研究和跨区域污染防治提供了关键数据支持, 而钢铁行业包含在工业部门内进行核算. 许多欧洲层面排放清单的研究也存在类似情况. 例如, Klimont 等[66] 编制的 1990—2010 年欧洲颗粒物排放清单及 Lee 等[67] 基于生产和消费统计活动水平数据编制的欧洲工业排放清单均未对钢铁行业进行单独核算. 上述研究表明洲际尺度的排放清单为理解空气污染传输和实施跨区域污染防治提供了关键数据支持, 而钢铁行业并未作为独立的部门进行核算.

相比于洲际尺度的排放清单, 国家尺度的排放清单能够更详细地反映出国家内部的排放源分布和排放强度, 捕捉到区域差异和特定行业的排放特征. 在国家尺度方面, Sugiyama 等[68] 构建了 1990—2000 年日本高分辨率的 $PM_{2.5}$ 排放清单, 涵盖了包含钢铁行业在内的 400 个部门. Alyuz 等[69] 构建了 2010 年土耳其的 CO_2、PM、SO_x、CO、NO_x、VOCs、NH_3 和 N_2O 排放清单, 涵盖了 7 个主要类别和 53 个子部门, 其中钢铁行业为重要的工业排放源, 填补了土耳其排放清单中工业排放部分的空白. 美国的 AP-42(Compilation of air pollutant emission factors, 大气污染物排放系数汇编) 为美国大

中国知网　https://www.cnki.net

表 4 不同年份洲际、国家尺度钢铁行业排放清单汇总

Table 4 Summary of the emission inventory of iron and steel industries at the intercontinental and national scales in different years

Emission inventory	Research year	Scales	Resolution and details	Type of material	References
	2000	Asia	majority of regional models designed at a resolution of 1° × 1°, whereas those focused on urban scales at a finer resolution of 30" × 30"	SO_2, NO_x, CO_2, CO, CH_4, NMVOC, BC, OC, and NH_3	[60]
INTEX-B	2006	Asia	spatial resolution: 30 min × 30 min; seasonality: monthly	SO_2, NO_x, CO, NMVOC, PM_{10}, $PM_{2.5}$, BC, and OC	[61]
	2000, 2005, 2010, 2020, and 2030	Asia		SO_2, NO_x, BC and OC	[62]
REAS 2.1	2000—2008	Asia	spatial resolution: 0.25° × 0.25°; temporal resolution: monthly	SO_2, NO_x, CO, NMVOC, PM_{10}, $PM_{2.5}$, BC, OC, NH_3, CH_4, N_2O, and CO_2	[63]
MIX	2008 and 2010	Asia	spatial resolution: 0.25° × 0.25°; seasonality: monthly	SO_2, NO_x, CO, NMVOC, NH_3, PM_{10}, $PM_{2.5}$, BC, OC, and CO_2	[64]
REAS 1.1	1980—2020	Asia	0.5° × 0.5° resolution	SO_2, NO_x, CO, BC, OC, NMVOC, CO_2, N_2O, NH_3, and CH_4	[65]
	1990—2010	Europe		SO_2, NO_x, VOCs, NH_3, and primary PM	[66]
	1991	Europe	50 km × 50 km	Ca	[67]
	1990—2000	Japan		$PM_{2.5}$	[68]
	2010	Turkey		CO_2, PM, SO_x, CO, NO_x, VOCs, NH_3, and N_2O	[69]
	2001	China		TSP, PM_{10}, $PM_{2.5}$, BC, OC, Ca, and Mg	[70]
	1990—2005	China	30′ × 30′ resolution	TSP, PM_{10}, $PM_{2.5}$, BC, OC, Ca, and Mg	[71]
	2001	China	30 min × 30 min resolution	CO	[72]
	1995—2010	China		NO_x	[73]
	2005—2010	China		SO_2, NO_x, CO, TSP, PM_{10}, $PM_{2.5}$, BC, OC, Ca, Mg, and CO_2	[74]
	2010—2017	China	China's emissions by sector and year	SO_2, NO_x, NMVOC, NH_3, CO, TSP, PM_{10}, $PM_{2.5}$, BC, OC, and CO_2	[75]
	2010	China	estimates of sector-based emissions for different species	SO_2, NO_x, NMVOC, NH_3, CO, PM_{10}, $PM_{2.5}$, BC, and OC	[76]
CHRED 3.0A	2018	China	10 km ×10 km	CO_2, CO, NO_x, VOCs, SO_2, $PM_{2.5}$, PM_{10}, NH_3, BC, and OC	[77]
	2011	China	0.5° × 0.5° resolution	Hg, Pb, Cd, As, Cr, and Ni	[78]
	2015	China		SO_2, NO_x, PM, $PM_{2.5}$, PM_{10}, and PCDD/Fs	[79]
	2010—2015	China		SO_2, NO_x, $PM_{2.5}$, PM_{10}, and TSP	[42]
	2012	China		SO_2, NO_x, VOCs, PCDD/Fs, $PM_{2.5}$, and TSP	[80]
	2013	China		SO_2, NO_x, PM, PM_{10}, $PM_{2.5}$, and PCDD/Fs	[81]
	2018	China	point source database records steel and cement plants under each ownership	CO_2, SO_2, NO_x, and $PM_{2.5}$	[82]
	2020	China	811 steel enterprises across five major production processes	SO_2, NO_x, $PM_{2.5}$, and CO_2	[24]
	2012	China		$PM_{2.5}$, SO_2, and NO_x	[83]
HSEC, 2015	2015	China	937 steel enterprises across different production processes	SO_2, NO_x, PM_{10}, $PM_{2.5}$, PCDD/Fs, VOCs, CO, BC, OC, EC, and F	[84]
HSEC, 2018	2018	China	996 steel enterprises across different production processes	SO_2, NO_x, PM_{10}, $PM_{2.5}$, PCDD/Fs, VOCs, CO, BC, OC, EC, and fluorides	[52]
	2012, 2015, 2018	China	high-resolution temporal (hourly) and spatial (by emission source)	SO_2, NO_x, PM_{10}, $PM_{2.5}$, BC, OC, EC, CO, and VOCs	[31]
CEAIS	2014—2018	China	high-resolution temporal (hourly) and spatial (by equipment)	PM, SO_2, and NO_x	[12]

气污染物排放系数数据库[32], 涵盖了包含钢铁行业在内的各种工业过程和活动的空气污染物排放因子, 为排放清单编制、空气质量模型模拟以及环境政策制定提供了重要依据. 国内包含钢铁行业在内的全国尺度的多部门排放清单为钢铁行业的排放特征分析和影响贡献提供了重要的数据基础. 例如, Zhang 等[70] 建立的 2001 年中国颗粒物排放清单, 首次实现了对中国钢铁行业颗粒物 (TSP、PM_{10}

中国知网 https://www.cnki.net

和 $PM_{2.5}$) 排放的粒径分布和主要成分的核算. Lei 等[71] 编制了我国 1990—2005 年人为源颗粒物及关键化学组分排放清单, 分析了钢铁行业颗粒物及其重要化学组分的排放历史变化趋势和地理分布特征. Streets 等[72] 和 Zhao 等[73] 分别构建了 2001 年中国的 CO 排放清单和 1995—2010 年中国的 NO_x 排放清单, 探究了包含钢铁行业在内的 CO 和 NO_x 排放的动态变化. Zhao 等[74] 构建了 2005—2010 年各省和全国的人为大气污染物和 CO_2 排放清单, 揭示了控制措施对中国人为源排放的年际趋势、部门 (包括钢铁行业) 和空间分布的影响. Zheng 等[75] 对 2010—2017 年中国包含钢铁行业在内的人为排放趋势进行了量化, 并进一步确定了排放趋势的主要驱动因素. 此外, 由清华大学开发并维护的中国多尺度排放清单模型 (Multiresolution emission inventory for China, MEIC) 是近年来我国区域大气污染研究中最为广泛应用的排放清单之一[45], 该模型涵盖了中国大陆地区全年和逐月的电力、工业、民用、交通和农业五个主要部门的 10 种大气污染物的排放数据, 其中钢铁行业归属于工业部门. 2015 年在原有的基础上升级到 MEIC v1.2, Li 等[76] 基于 MEIC v1.2, 综合考虑了排放源的多样性、技术组合的复杂性及可靠测量方法的不足, 系统总结了涵盖钢铁行业在内的各类源的本地排放因子、源特征及分部门排放量估算结果. Gao 等[77] 构建了 2018 年全国大气污染物与碳排放清单 (China high resolution emission database, CHRED 3.0A), 揭示了钢铁行业是 CO_2 及大多数空气污染物的主要排放源之一. 相比于洲际排放清单, 国家尺度的排放清单在捕捉行业的排放特征方面具有明显优势, 然而, 其在有效捕捉钢铁行业的具体排放特征和时空演变规律等方面仍存在局限性.

独立的钢铁行业排放清单够提供详尽的排放数据, 还能揭示不同生产环节的排放特征, 对于准确评估该行业的减排潜力和环境健康至关重要. 在排放特征方面, 王堃等[78] 编制了 2011 年我国钢铁行业等 6 种有害重金属 (Hg、Pb、Cd、As、Cr、Ni) 的排放清单, 揭示了钢铁行业不同工序的重金属排放特征. Gao 等[79] 基于原料燃料投入、中间产品、生产设备、污染物控制技术和节能技术等信息, 建立了 2015 年中国钢铁行业大气污染物的排放清单, 分析了排放的时空特征, 并对中国钢铁行业未来的大气污染物排放进行了预测. Wang 等[42] 构建了第一个基于设施的中国钢铁行业 SO_2、NO_x、$PM_{2.5}$、PM_{10} 和 TSP 排放清单, 时间跨度为 2010—2015 年, 分析了污染物排放的时间趋势以及不同控制措施对减排的影响. 在减排潜力方面, Wu 等[80] 和赵羚杰[81] 分别构建了 2012 年和 2013 年的中国钢铁行业主要工序的大气污染物排放清单, 涵盖的污染物均包含了 SO_2、NO_x、VOCs、PCDD/Fs 和颗粒物, 前者基于技术发展趋势和排放控制政策预测了 2030 年主要污染物 (SO_2、NO_x、TSP) 的未来排放量; 后者考虑节能减排技术和末端治理技术, 评估了不同减排情景下污染物的减排潜力成本. Chen 等[82] 则以 2018 年为基准年, 基于不同技术路线的能源消耗、创新技术的脱碳路径以及大气污染物的协同影响, 探索基于最低成本方法的中国钢铁脱碳路径并致力于实现净零排放目标. 随着研究的不断深入, 将环境健康纳入协同减排的考虑因素. Wu 等[24] 建立了中国 2020 年钢铁行业分工序 CO_2 排放和大气污染物 (SO_2、NO_x、$PM_{2.5}$ 和 CO_2) 融合排放清单, 评估了不同省份钢铁企业各工序排放的 $PM_{2.5}$ 对居民超额死亡率的影响, 为环境健康影响和减污降碳协同控制提供重要支撑. 不同于聚焦钢铁行业本身, 杨皓哲[83] 的研究将视角扩展至钢铁行业及其上下游产业, 采用投入产出方法估算钢铁行业上游行业的排放, 建立了 2012 年基于点源的钢铁行业大气污染物 ($PM_{2.5}$、SO_2 和 NO_x) 排放清单, 评估了下游行业在消费和产出两个方面对钢铁行业污染排放的拉动作用, 最后使用多目标优化模型分析了钢铁行业协同控制 CO_2、$PM_{2.5}$ 和成本的最优化减排方案. 上述研究从钢铁行业层面开展了排放特征、减排潜力和环境健康研究.

然而, 上述钢铁行业清单大多采用排放因子法开展中国钢铁行业污染物的排放量的估计, 基于有限的钢铁工序排口的调研数据, 排放因子的计算涉及多种假设和间接参数 (如燃料中污染物含量、污染物防治技术和去除效率等), 无法反映钢铁行业工序间的排放差异及其随时间变化的特性, 也无法反映最新的大气污染物排放水平及最新排放标准实施后的减排效果.

为克服上述问题, 汤铃等有机融合中国钢铁行业在线监测数据和环境统计数据, 创新性地提出了一套新的时 (各小时)–空 (各排放源) 高分辨率钢铁大气排放清单核算方法, 分别构建了 2015 年[84] 和 2018 年[52] 中国高分辨率钢铁行业大气污染物排放清单, 涵盖了中国钢铁企业主要生产工序的污染物排放量和活动水平 (产量、空间位置、技术、规模等) 信息, 模拟现状和未来情景下的大气污染物排放对环境的影响贡献, 研究结果为钢

中国知网　https://www.cnki.net

铁行业的减排政策制定、产业布局优化、空气质量达标规划以及大气区域联控提供了重要的科学数据支持. 伯鑫[31]在前期的研究基础上进一步探讨了 2012、2015 和 2018 年中国钢铁行业各工序和各地区的大气污染物的环境影响及未来发展趋势, 实现了高时间 (小时级别的数据核算每个月份及全年的排放) 和高空间分辨率 (在空间上精确到具体企业的经纬度及单个点源). 此外, 基于构建的 2014—2018 年中国钢铁厂时 (每小时) –空 (各设备) 高精度污染物 (PM、SO_2 和 NO_x) 排放大数据库, 发现中国钢铁行业在五年内污染物排放量下降了近一半, 并指出在“碳达峰, 碳中和”背景下, “减污降碳”协同治理应成为政府的主要政策方向[12]. 上述研究引入了实时动态的异质主体数据, 有效克服了以往研究中参数假设较多、不确定性较高的问题, 并通过多维度验证研究结果, 提高了排放清单的准确性和可靠性. 然而, 上述研究未纳入基于 CEMS 的时间谱分析, 也未考虑钢铁行业无组织排放的相关问题. 未来的研究应考虑纳入基于 CEMS 的时间谱分析, 以便更好地捕捉钢铁行业排放动态变化, 此外, 亟需加强钢铁行业无组织排放的分析, 从而建立更加全面的钢铁行业排放清单, 从而为钢铁行业的减排策略提供更为科学的依据.

2.3　城市/城市群尺度钢铁行业排放清单研究进展

城市/城市群尺度的钢铁行业排放清单, 有助于识别主要污染源和关键排放时段, 为大气污染源解析、污染物传输扩散研究及大气污染防治提供重要的数据支持 (表 5). 在识别主要污染源和关键排放时段研究方面, Huang 等[85]和 Zheng 等[86]分别编制了 2007 年长三角地区主要的人为大气污染物及挥发性有机物排放清单及 2006 年珠江三角洲区域高分辨率的时空排放清单, 揭示了包含钢铁行业在内的不同部门的排放特征, 为制定有效的空气质量管理策略提供重要参考. 吴文景等[87]基于 2010 年东亚地区背景的 MIX 排放清单和前期建立的 2012 年全国大气污染物高时空分辨率排放清单, 识别出钢铁冶金行业为重点控制对象, 为优化京津冀地区 $PM_{2.5}$ 污染治理的排放控制策略提供科学依据.

在污染物传输扩散和污染控制方面, 伯鑫等[30]基于企业在线监测排放数据 (CEMS)、污染源调查数据和钢铁行业调研数据, 采用自下而上的方法, 建立了 2012 年京津冀地区钢铁行业高时空分辨率的排放清单 (BTH-Steel version 1.0), 污染物涵盖了 SO_2、NO_x 和烟粉尘, 并分析了不同控制情景下的污染物排放量. 随后, 基于该高分辨率排放清单, 结合淘汰产能设备名单, 通过 CAMx 模式模拟分析了现状和化解产能情景下京津冀地区钢铁行业对 SO_2、NO_x 和 $PM_{2.5}$ 的影响[88]. 此外, 基于全国钢铁企业在线监测排放数据 (CEMS), 建立了全国钢铁行业大气污染物排放清单管理系统, 实现了排放清单的动态管理[89]. 上述研究通过构建高分辨率排放清单、分析污染物传输扩散及建立动态管理系统, 为钢铁行业的环境治理和污染管控提供了科学依据.

综上所述, 相比于全球尺度、洲际、国家尺度的钢铁行业排放清单, 城市/城市群钢铁行业排放清单提供了更为精细的排放信息, 为研究区域的污染源解析和污染防治提供了重要的科学依据. 然而, 目前仍缺少主要工序 VOCs 组分谱和颗粒物成分谱的研究, 以及基于 CEMS 的钢铁企业详细时间谱的分析. 未来应重点关注这些领域, 进一步完善城市/城市群钢铁行业排放清单, 从而制定更加精准的污染防治策略.

表 5　不同年份城市/城市群尺度钢铁行业排放清单汇总

Table 5　Summary of the emission inventory of iron and steel industries at the urban/urban agglomeration scale in different years

Emission inventory	Research year	Scales	Resolution and details	Type of material	References
	2007	Yangtze River Delta region	4 km × 4 km	SO_2, NO_x, CO, PM_{10}, $PM_{2.5}$, VOCs, and NH_3	[85]
	2006	Pearl River Delta region	3 km × 3 km	SO_2, NO_x, VOCs, CO, PM_{10}, and $PM_{2.5}$	[86]
	2012	Beijing–Tianjin–Hebei region		SO_2, NO_x, PM_{10}, $PM_{2.5}$, BC, OC, NMVOC, and NH_3	[87]
BTH-Steel Version 1.0	2012	Beijing–Tianjin–Hebei region.		SO_2, NO_x, and PM	[30]
BTH-Steel Version 2.0	2012	Beijing–Tianjin–Hebei region	239 steel enterprises were included, comprising 2776 pollution emission outlets	SO_2, NO_x, and $PM_{2.5}$	[88]

中国知网　https://www.cnki.net

3　钢铁行业排放清单的不确定性分析

排放清单不确定性分析研究旨在确定不确定因素的具体来源, 并通过对不确定因素的定性和定量分析, 最终提高排放清单的准确性. 钢铁行业的排放清单的不确定性主要体现在活动水平和排放因子两个方面. 在活动水平方面, 钢铁生产涉及多种工艺和设施, 每个生产单元的操作条件和工艺流程差异显著[90−91]. 不同钢铁企业的操作条件, 如炉温、燃料种类和用量等, 都会影响活动水平的数据准确性[92−93]. 此外, 工艺流程的复杂性和多样性, 例如高炉、转炉和电炉的使用比例差异, 也增加了活动水平的不确定性[94−96]. 尽管已有大量研究收集了钢铁企业各生产单元的详细活动水平数据[12,31,52,84,97], 但若要精确反映实际排放情况, 仍需进一步补充更多相关参数.

在排放因子方面, 很少研究将单位级别的减排技术信息整合到排放清单中, 从而导致单位层面的排放因子存在不确定性. 研究者通常按工艺类别进行污染物排放计算, 假设整个工艺统一采取减排措施[44,80], 忽略了不同工艺可能需要不同的减排策略, 尤其是每个工艺内部存在多个排放源的情况下. 因此, 未能充分反映减排技术所带来的潜在减排效果. 进一步地, 随着全球经济形势的变化以及政策的干预, 推动了钢铁行业低碳和创新技术的发展和应用, 特别是在《巴黎协定》签订之后, 世界各国纷纷在钢铁行业内实施了多项政策. 如欧盟通过了《欧洲绿色协议》[98], 提出到 2050 年实现碳中和目标, 并推动低碳钢铁制造技术的发展. 此外, 欧盟资助低碳炼钢技术的研发与应用, 促进技术创新和产业升级[99]; 美国环保署通过实施《清洁空气法》和《清洁水法》严格监管钢铁企业的空气和水污染排放, 要求企业采用先进的环保技术以减少污染. 此外, 政府通过《生产税收抵免》(PTC) 和《投资税收抵免》(ITC) 为使用清洁能源和减少碳排放的钢铁企业提供税收减免和补贴[100−101]; 德国的碳税和补贴政策鼓励钢铁企业减少碳排放, 投资低碳技术和工艺[102]; 日本政府提供资金支持以升级设备和工艺, 国家与企业联合开展研发绿色技术项目, 如 COURSE50 计划, 旨在减少二氧化碳排放[103]; 中国明确提出“碳达峰, 碳中和”目标后, 在政策层面, 发布了针对钢铁行业的超低排放标准, 要求企业大幅度减少污染物排放[37−41]. 在技术创新方面, 作为传统高炉炼铁的低碳替代方案, 氢基炼铁技术在欧盟和日本等国家受到重视[104−108]. 此外, 碳捕获与封存技术 (CCS) 在钢铁行业逐步推广, 美国和欧洲多家企业已开展试点项目以减少温室气体排放[109]. 中国钢铁行业在行业政策法规实施的推动下, 陆续安装了新的烟气处理设施和集气装置, 以提高排放控制效果[80]. 上述政策的干预和创新技术的应用推广对钢铁行业排放因子的准确性产生了显著影响.

评估排放清单不确定性的方法主要包括定性分析、半定量分析和定量分析. 对于难以开展定量不确定性分析的污染物, 可通过综合评估数据源的可靠性、估计方法的适用性以及排放因子相关不确定性来确定排放估计的不确定性[86]. 对于数据较为充足的污染物, 则可开展排放估算的定量不确定性分析. 蒙特卡洛模拟方法能够有效处理各参数之间复杂的相互作用及不确定性传递, 尤其适用于需综合考虑多个不确定性的情景, 因而应用广泛[110]. 目前, 钢铁行业的排放清单大多采用蒙特卡洛模拟方法来量化排放清单的不确定性范围. 随着钢铁行业排放清单估算方法的不断发展和完善, 活动水平以及基于官方统计数据和现场实测的技术信息日益丰富, 使得相关排放的不确定性逐步降低.

在开展排放清单不确定分析之后, 对排放清单校验也至关重要. 除了与先前相同尺度下的排放量进行对比外[23,31,42,81,83], 研究者还利用空气质量监测站数据、卫星遥感数据及模型反演技术等来核验污染物的排放量、时空排放特征及污染源贡献. 例如, 基于构建的钢铁行业排放清单, 采用 CAMx 空气质量模型模拟污染物扩散, 将模拟值与空气质量监测站的实测数据进行比较, 验证了清单的准确性[12,31]. 此外, 借助卫星数据等多种数据集对清单进行独立验证, 以检验连续排放监测系统 (CEMS) 数据所揭示的减排效果对大气环境的实际影响[52]. 上述排放清单核验方法为提高排放清单的准确性提供了有效的方法支持和指导.

4　未来展望

本研究通过系统梳理钢铁行业排放清单的编制工作, 结合全球推动绿色低碳发展的时代背景, 展望了中国钢铁行业排放清单未来的核心发展方向, 旨在强调通过提升数据的精确性和时效性, 为我国钢铁行业制定科学减排政策和技术措施提供参考. 具体的展望如下:

(1) 中国本地化的参数对于排放清单的准确性至关重要. 尽管实时监测技术能够提供比定期手

中国知网　https://www.cnki.net

动数据收集方法更为细致和及时的数据信息, 但如何对其质控、核验和校准确保能够精准反映污染物的波动仍需进一步加强. 在人工智能快速发展的背景下, 基于历史数据、生产率和其他相关变量应用机器学习算法预测未来的排放量, 将产生更有效的减排战略. 此外, 有必要整合新的监测技术对钢铁行业的新兴污染物进行监测, 从而细化并丰富钢铁行业排放清单的污染物种类. 此外, 亟需加强基于 CEMS 的每个钢铁企业详细时间谱的深入分析, 以提高排放清单的准确性和全面性.

(2) 针对钢铁行业主要工序大气污染物无组织排放核算体系问题, 中国亟需建立系统化的无组织排放核算体系, 并加强实测数据的收集与分析, 以实现更加准确的排放评估和科学的环境治理策略.

(3) 钢铁行业应积极开展有组织排放的 VOCs 的组分谱、颗粒物成分谱、重金属的实测数据以及二噁英的实测数据的研究, 从而为控制钢铁行业污染物特征提供重要依据, 助力于制定更科学的减排政策和环境管理措施.

(4) 未来亟需建立钢铁企业的 CO_2 排放核算体系, 构建钢铁企业 CO_2 实测排放因子库. 同时, 通过整合和分析不同企业和地区的钢铁行业 CO_2 排放因子, 旨在形成统一的核算标准, 增强数据的可比性. 此外, 将无组织排放的监测和新工艺 (如氢冶炼) 纳入核算体系, 从而促进对钢铁行业整体碳排放的科学评估和有效管理.

(5) 为应对钢铁行业技术快速更新带来的挑战, 排放清单的更新机制有待进一步优化. 建议引入人工智能和大数据分析等先进数据处理技术, 建立更加灵活高效的数据收集与处理系统, 以确保能够及时反映新工艺、新设备及环保措施对排放状况的影响, 从而提升排放清单的时效性.

(6) 在全球气候政策和区域环境协作背景下, 钢铁行业的排放清单将进一步向综合化、动态化方向发展, 未来应增强国际合作, 以应对全球大气污染物与温室气体协同控制的需求. 同时, 随着对钢铁行业污染物跨介质迁移及其对健康影响的深入研究, 排放清单将被更广泛地应用于污染物的跨介质迁移转化及其对公共健康的潜在威胁, 助力协同环境治理.

参 考 文 献

[1] Davis S J, Lewis N S, Shaner M, et al. Net-zero emissions energy systems. *Science*, 2018, 360(6396): eaas9793

[2] Masson-Delmotte V, Zhai P M, Pörtner H O, et al. Global warming of 1.5 ℃[J/OL]. *The Intergovernmental Panel on Climate Change* (*IPCC*) *website* [2024–10–29]. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2022/06/SR15_Full_Report_HR.pdf

[3] Ren L, Zhou S, Peng T D, et al. A review of CO_2 emissions reduction technologies and low-carbon development in the iron and steel industry focusing on China. *Renewable Sustainable Energy Rev*, 2021, 143: 110846

[4] Zou Y, Liu X L, Zhu T Y, et al. Simultaneous removal of NO_x and SO_2 by MgO combined with O_3 oxidation: The influencing factors and O_3 consumption distributions. *ACS Omega*, 2019, 4(25): 21091

[5] Huang Y, Chen Y, Li Y, et al. Atmospheric emissions of PCDDs and PCDFs in China from 1960 to 2014. *J Hazard Mater*, 2022, 424: 127320

[6] Crippa M, Guizzardi D, Muntean M, et al. Gridded emissions of air pollutants for the period 1970–2012 within EDGAR v4. *3. 2. Earth Syst Sci Data*, 2018, 10(4): 1987

[7] Crippa M, Janssens-Maenhout G, Dentener F, et al. Forty years of improvements in European air quality: regional policy-industry interactions with global impacts. *Atmos Chem Phys*, 2016, 16(6): 3825

[8] Janssens-Maenhout G, Crippa M, Guizzardi D, et al. HTAP_v2.2: A mosaic of regional and global emission grid maps for 2008 and 2010 to study hemispheric transport of air pollution. *Atmos Chem Phys*, 2015, 15(19): 11411

[9] Klimont Z, Kupiainen K, Heyes C, et al. Global anthropogenic emissions of particulate matter including black carbon. *Atmos Chem Phys*, 2017, 17(14): 8681

[10] Lei T Y, Wang D P, Yu X, et al. Global iron and steel plant CO_2 emissions and carbon-neutrality pathways. *Nature*, 2023, 622(7983): 514

[11] Xu R C, Tong D, Davis S J, et al. Plant-by-plant decarbonization strategies for the global steel industry. *Nat Clim Change*, 2023, 13: 1067

[12] Bo X, Jia M, Xue X D, et al. Effect of strengthened standards on Chinese ironmaking and steelmaking emissions. *Nat Sustainability*, 2021, 4(9): 811

[13] Mousa E, Wang C, Riesbeck J, et al. Biomass applications in iron and steel industry: An overview of challenges and opportunities. *Renewable Sustainable Energy Rev*, 2016, 65: 1247

[14] Na H M, Sun J C, Qiu Z Y, et al. A novel evaluation method for energy efficiency of process industry: A case study of typical iron and steel manufacturing process. *Energy*, 2021, 233: 121081

[15] Zhang J J, Shen H Z, Chen Y L, et al. Iron and steel industry emissions: A global analysis of trends and drivers. *Environ Sci Technol*, 2023, 57(43): 16477

[16] Tian B H, Wei G S, Li X, et al. Effect of hot metal charging on economic and environmental indices of electric arc furnace steelmaking in China. *J Cleaner Prod*, 2022, 379: 134597

[17] Devlin A, Kossen J, Goldie-Jones H, et al. Global green hydrogen-based steel opportunities surrounding high quality

中国知网 https://www.cnki.net

renewable energy and iron ore deposits. *Nat Commun*, 2023, 14(1): 2578

[18] Wang R R, Zhao Y Q, Babich A, et al. Hydrogen direct reduction (H-DR) in steel industry—An overview of challenges and opportunities. *J Cleaner Prod*, 2021, 329: 129797

[19] Lopez G, Farfan J, Breyer C. Trends in the global steel industry: Evolutionary projections and defossilisation pathways through power-to-steel. *J Cleaner Prod*, 2022, 375: 134182

[20] Zhang Q, Xu J, Wang Y J, et al. Comprehensive assessment of energy conservation and CO_2 emissions mitigation in China's iron and steel industry based on dynamic material flows. *Appl Energy*, 2018, 209: 251

[21] Liu X, Du H B, Tang L, et al. Relocating industrial plants delivers win–win emission reduction benefits to origin and destination regions. *Environ Sci Technol*, 2022, 56(22): 16043

[22] Tan Q Y, Liu F, Li J H. An integrated analysis on the synergistic reduction of carbon and pollution emissions from China's iron and steel industry. *Engineering*, 2024, 40: 111

[23] Yang H Z, Tao W, Liu Y, et al. The contribution of the Beijing, Tianjin and Hebei region's iron and steel industry to local air pollution in winter. *Environ Pollut*, 2019, 245: 1095

[24] Wu W L, Tang Q, Xue W B, et al. Quantifying China's iron and steel industry's CO_2 emissions and environmental health burdens: A pathway to sustainable transformation. *Environ Sci Ecotechnol*, 2024, 20: 100367

[25] Wu X C, Zhao L, Zhang Y X, et al. Cost and potential of energy conservation and collaborative pollutant reduction in the iron and steel industry in China. *Appl Energy*, 2016, 184: 171

[26] Ma D, Chen W Y, Yin X, et al. Quantifying the co-benefits of decarbonisation in China's steel sector: An integrated assessment approach. *Appl Energy*, 2016, 162: 1225

[27] National Development and Reform Commission of the People's Republic of China. Accounting methods and reporting guidelines for greenhouse gas emissions of steel production enterprises in China (trial) [J/OL]. *National Development and Reform Commission of the People's Republic of China website* (2013–11–01) [2024–10–29]. https://www.gov.cn/gzdt/att/att/site1/20131104/001e3741a2cc13e13f1803.pdf
(中华人民共和国国家发展改革委会. 中国钢铁生产企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行) [J/OL]. 中华人民共和国国家发展改革委会(2013–11–01) [2024–10–29]. https://www.gov.cn/gzdt/att/att/site1/20131104/001e3741a2cc13e13f1803.pdf)

[28] Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Notice on the report and verification of greenhouse gas emissions of enterprises in some key industries from 2023 to 2025 [J/OL]. *Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China website* (2023–10–18) [2024–10–29]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/202310/t20231018_1043427.html
(中华人民共和国生态环境部. 关于做好 2023—2025 年部分重点行业企业温室气体排放报告与核查工作的通知[J/OL]. 中华人民共和国生态环境部(2023–10–18) [2024–10–29]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/202310/t20231018_1043427.html)

[29] Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Technical guide for compilation of emission inventories of air pollutants and greenhouse gases (trial) [J/OL]. *Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China website* (2024–01–30) [2024–10–29]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/202401/t20240130_1065242.html
(中华人民共和国生态环境部. 大气污染物与温室气体融合排放清单编制技术指南(试行) [J/OL]. (2024–01–30) [2024–10–29]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/202401/t20240130_1065242.html)

[30] Bo X, Zhao C L, Wu T, et al. Emission inventory with high temporal and spatial resolution of steel industry in the Beijing–Tianjin–Hebei Region. *China Environ Sci*, 2015, 35(8): 2554
(伯鑫, 赵春丽, 吴铁, 等. 京津冀地区钢铁行业高时空分辨率排放清单方法研究. 中国环境科学, 2015, 35(8): 2554)

[31] Bo X. *Emission Characteristics and Environmental Impacts of Air Pollutants in China's Iron and Steel Industry*[Dissertation]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2019
(伯鑫. 中国钢铁行业大气污染物排放特征及其环境影响研究[学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2019)

[32] United States Environmental Protection Agency. AP-42: Compilation of air pollutant emission factors [J/OL]. *United States Environmental Protection Agency website* (2021–01–19) [2024–10–29]. https://19january2021snapshot.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-compilation-air-emissions-factors_.html

[33] European Environment Agency. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook—2013 [J/OL]. *European Environment Agency website* (2013–09–29) [2024–10–29]. http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2013

[34] China Pollution Source Census. *Handbook of Emission Factors of Industrial Pollution Sources for the First National Pollution Source Survey*. Beijing: China Environmental Science Press, 2011
(第一次全国污染源普查资料编纂委员会. 污染源普查产排污系数手册. 北京: 中国环境科学出版社, 2011)

[35] China Pollution Source Census. *Handbook of Emission Factors of Industrial Pollution Sources for the Second National Pollution Source Survey*. Beijing: China Environmental Publishing Group, 2022
(生态环境部第二次全国污染源普查工作办公室. 第二次全国污染源普查产排污系数手册. 北京: 中国环境出版集团, 2022)

[36] Serge R, Rainer, R, Luis D S, et al. Best available techniques (BAT) reference document for iron and steel production [J/OL]. *Publications Office of the European Union* (2013–01–24) [2024–10–29]; https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/eaa047e8-644c-4149-bdcb-9dde79c64a12

中国知网 https://www.cnki.net

[37] Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. GB 28662—2012 *Emission Standard of Air Pollutants for Sintering and Pelletizing of Iron and Steel Industry*. Beijing: China Environmental Press, 2012
(中华人民共和国环境保护部. GB 28662—2012 钢铁烧结、球团工业大气污染物排放标准. 北京: 中国环境科学出版社, 2012)

[38] Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. GB 28663—2012 *Emission Standard of Air Pollutants for Iron Smelt Industry*. Beijing: China Environmental Press, 2012
(中华人民共和国环境保护部. GB 28663—2012 炼铁工业大气污染物排放标准. 北京: 中国环境科学出版社, 2012)

[39] Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. GB 28664—2012 *Emission Standard of Air Pollutants for Steel Smelt Industry*. Beijing: China Environmental Press, 2012
(中华人民共和国环境保护部. GB 28664—2012 炼钢工业大气污染物排放标准. 北京: 中国环境科学出版社, 2012)

[40] Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. GB 28665—2012 *Emission Standard of Air Pollutants for Steel Rolling Industry*. Beijing: China Environmental Press, 2012
(中华人民共和国环境保护部. GB 28665—2012 轧钢工业大气污染物排放标准. 北京: 中国环境科学出版社, 2012)

[41] Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. GB 16171—2012 *Emission Standard of Pollutants for Coking Chemical Industry*. Beijing: China Environmental Press, 2012
(中华人民共和国环境保护部. GB 16171—2012 炼焦化学工业污染物排放标准. 北京: 中国环境科学出版社, 2012)

[42] Wang X Y, Lei Y, Yan L, et al. A unit-based emission inventory of SO_2, NO_x and PM for the Chinese iron and steel industry from 2010 to 2015. *Sci Total Environ*, 2019, 676: 18

[43] Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Annual China Statistic Report on Environment in China [J/OL]. *Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China website* (2023–12–29) [2024–10–29], https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/sthjtjnb

[44] Wang K, Tian H Z, Hua S B, et al. A comprehensive emission inventory of multiple air pollutants from iron and steel industry in China: Temporal trends and spatial variation characteristics. *Sci Total Environ*, 2016, 559: 7

[45] Geng G N, Liu Y X, Liu Y, et al. Efficacy of China's clean air actions to tackle $PM_{2.5}$ pollution between 2013 and 2020. *Nat Geosci*, 2024, 17: 987

[46] Bond T C, Bhardwaj E, Dong R, et al. Historical emissions of black and organic carbon aerosol from energy-related combustion, 1850—2000. *Global Biogeochem Cycles*, 2007, 21(2): GB2018

[47] Tian H Z, Zhou J R, Zhu C Y, et al. A comprehensive global inventory of atmospheric antimony emissions from anthropogenic activities, 1995–2010. *Environ Sci Technol*, 2014, 48(17): 10235

[48] DuPont A. Improving and monitoring air quality. *Environ Sci Pollut Res Int*, 2018, 25(15): 15253

[49] Coleman M D, Ellison M, Robinson R A, et al. Uncertainty requirements of the European Union's Industrial Emissions Directive for monitoring sulfur dioxide emissions: Implications from a blind comparison of sulfate measurements by accredited laboratories. *J Air Waste Manage Assoc*, 2019, 69(9): 1070

[50] Bo X, Li Z L, Qu J B, et al. The spatial-temporal pattern of sintered flue gas emissions in iron and steel enterprises of China. *J Cleaner Prod*, 2020, 266: 121667

[51] Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Technical Specification for continuous monitoring of flue gas (SO_2, NOx, particulate matter) emissions from fixed sources [J/OL]. *Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China website* (2018–03–01) [2024–10–29]. https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/jcffbz/201801/W020180322535566350157.pdf
(中华人民共和国环境保护部. 固定污染源烟气(SO_2、NO_x、颗粒物)排放连续监测技术规范[J/OL]. 中华人民共和国环境保护部 (2018–03–01) [2024–10–29]. https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/jcffbz/201801/W020180322535566350157.pdf)

[52] Tang L, Jia M, Bo X, et al. High resolution emission inventory and atmospheric environmental impact research in Chinese iron and steel industry. *China Environ Sci*, 2020, 40(4): 1493
(汤铃, 贾敏, 伯鑫, 等. 中国钢铁行业排放清单及大气环境影响研究. 中国环境科学, 2020, 40(4): 1493)

[53] Tang L, Qu J B, Mi Z F, et al. Substantial emission reductions from Chinese power plants after the introduction of ultra-low emissions standards. *Nat Energy*, 2019, 4: 929

[54] Yu S J, Lin F J, Zhao G, et al. Accurate carbon accounting based on industrial metabolism for the lean management of carbon emission. *Energy Rep*, 2023, 9: 3872

[55] 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 Cleaner Prod*, 2021, 306: 127259

[56] Damassa T. Carbon dioxide (CO_2) inventory report for calendar years 2006 & 2007 [J/OL]. *World Resources Institute website* (2008–12–01) [2024–10–29]. http://pdf.wri.org/wri_co2_inventory_report_2006-2007.pdf

[57] Zhu R J. *The Study on the Synergies between Air Pollution and Carbon Emissions Control for Iron and Steel Industry in the Typical City in Hebei Province* [Dissertation]. Tianjin: Tianjin University, 2021
(朱荣杰. 河北省典型城市钢铁行业大气污染物与 CO_2 协同减排研究[学位论文]. 天津: 天津大学, 2021)

[58] American Iron and Steel Institute. Steel production greenhouse gas emissions calculation methodology guidelines [J/OL]. *American Iron and Steel Institute website* (2022–11–03) [2024–10–29]. https://www.steel.org/wp-content/uploads/2022/11/AISI-GHG-Emissions-Calculation-Methodology-Guidelines-final-11-3-22.pdf

[59] Hoesly R M, Smith S J, Feng L Y, et al. Historical (1750—2014)

中国知网 https://www.cnki.net

anthropogenic emissions of reactive gases and aerosols from the community emissions data system (CEDS). *Geosci Model Dev*, 2018, 11(1): 369

[60] Streets D G, Zhang Q, Wu Y. Projections of global mercury emissions in 2050. *Environ Sci Technol*, 2009, 43(8): 2983

[61] Zhang Q, Streets D G, Carmichael G R, et al. Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission. *Atmos Chem Phys*, 2009, 9(14): 5131

[62] Klimont Z, Cofala J, Xing J, et al. Projections of SO_2, NO_x and carbonaceous aerosols emissions in Asia. *Tellus B Chem Phys Meteorol*, 2009, 61(4): 602

[63] Kurokawa J, Ohara T, Morikawa T, et al. Emissions of air pollutants and greenhouse gases over Asian regions during 2000-2008: Regional Emission inventory in ASia (REAS) version 2. *Atmos Chem Phys*, 2013, 13(21): 11019

[64] Li M, Zhang Q, Kurokawa J I, et al. MIX: A mosaic Asian anthropogenic emission inventory under the international collaboration framework of the MICS-Asia and HTAP. *Atmos Chem Phys*, 2017, 17(2): 935

[65] Ohara T, Akimoto H, Kurokawa J, et al. An Asian emission inventory of anthropogenic emission sources for the period 1980–2020. *Atmos Chem Phys*, 2007, 7(16): 4419

[66] Klimont Z, Cofala J, Bertok I, et al. Modeling particulate emissions in Europe. A framework to estimate reduction potential and control costs [J/OL]. *International Institute for Applied Systems Analysis website* (2002–12–01) [2024–10–29]. https://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/6712/1/IR-02-076.pdf

[67] Lee D S, Pacyna J M. An industrial emissions inventory of calcium for Europe. *Atmos Environ*, 1999, 33(11): 1687

[68] Sugiyama T, Nansai K, Tohno S, et al. Compilation and application of a primary $PM_{2.5}$ emissions inventory with high sectoral resolution in Japan. *Atmos Environ*, 2009, 43(4): 759

[69] Alyuz U, Alp K. Emission inventory of primary air pollutants in 2010 from industrial processes in Turkey. *Sci Total Environ*, 2014, 488: 369

[70] Zhang Q, Streets D G, He K B, et al. Major components of China's anthropogenic primary particulate emissions. *Environ Res Lett*, 2007, 2(4): 045027

[71] Lei Y, Zhang Q, He K B, et al. Primary anthropogenic aerosol emission trends for China, 1990—2005. *Atmos Chem Phys*, 2011, 11(3): 931

[72] Streets D G, Zhang Q, Wang L T, et al. Revisiting China's CO emissions after the transport and chemical evolution over the Pacific (TRACE-P) mission: Synthesis of inventories, atmospheric modeling, and observations. *J Geophys Res Atmos*, 2006, 111,D14: 306

[73] Zhao B, Wang S X, Liu H, et al. NO_x emissions in China: Historical trends and future perspectives. *Atmos Chem Phys*, 2013, 13(19): 9869

[74] Zhao Y, Zhang J, Nielsen C P. The effects of recent control policies on trends in emissions of anthropogenic atmospheric pollutants and CO_2 in China. *Atmos Chem Phys*, 2013, 13(2): 487

[75] Zheng B, Tong D, Li M, et al. Trends in China's anthropogenic emissions since 2010 as the consequence of clean air actions. *Atmos Chem Phys*, 2018, 18(19): 14095

[76] Li M, Liu H, Geng G N, et al. Anthropogenic emission inventories in China: a review. *Natl Sci Rev*, 2017, 4(6): 834

[77] Gao Y, Zhang L, Huang A S, et al. Unveiling the spatial and sectoral characteristics of a high-resolution emission inventory of CO_2 and air pollutants in China. *Sci Total Environ*, 2022, 847: 157623

[78] Wang K, Hua S B, Tian H Z, et al. Atmospheric emission inventory of typical heavy metals from iron and steel industry in China, 2011. *China Environ Sci*, 2015, 35(10): 2934
(王堃, 滑申冰, 田贺忠, 等. 2011 年中国钢铁行业典型有害重金属大气排放清单. 中国环境科学, 2015, 35(10): 2934)

[79] Gao C K, Gao W G, Song K H, et al. Spatial and temporal dynamics of air-pollutant emission inventory of steel industry in China: A bottom-up approach. *Resour Conserv Recycl*, 2019, 143: 184

[80] Wu X C, Zhao L J, Zhang Y X, et al. Primary air pollutant emissions and future prediction of iron and steel industry in China. *Aerosol Air Qual Res*, 2015, 15(4): 1422

[81] Zhao L J. *Study on Air Pollutant Emissions of Iron and Steel Plants in China and the Cost of Emission Reduction* [Dissertation]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016
(赵羚杰. 中国钢铁行业大气污染物排放清单及减排成本研究[学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2016)

[82] Chen P P, Zhang S H, Meng J, et al. Technological solutions to China's carbon neutrality in the steel and cement sectors. *Earth's Future*, 2023, 11(9): e2022EF003255

[83] Yang H Z. *Analysis on the Contribution of China's Steel Industry to Air Pollution and Emission Reduction Measures* [Dissertation]. Beijing: Peking University, 2019
(杨皓哲. 中国钢铁行业对大气污染的贡献及减排措施分析[学位论文]. 北京: 北京大学, 2019)

[84] Tang L, Xue X D, Bo X, et al. Contribution of emissions from the iron and steel industry to air quality in China. *Environ Sci*, 2020, 41(7): 2981
(汤铃, 薛晓达, 伯鑫, 等. 中国钢铁行业大气环境影响. 环境科学, 2020, 41(7): 2981)

[85] Huang C, Chen C H, Li L, et al. Emission inventory of anthropogenic air pollutants and VOC species in the Yangtze River Delta region, China. *Atmos Chem Phys*, 2011, 11(9): 4105

[86] Zheng J Y, Zhang L J, Che W W, et al. A highly resolved temporal and spatial air pollutant emission inventory for the Pearl River Delta region, China and its uncertainty assessment. *Atmos Environ*, 2009, 43(32): 5112

[87] Wu W J, Chang X, Xing J, et al. Assessment of $PM_{2.5}$ pollution mitigation due to emission reduction from main emission sources in the Bejing–Tianjin–Hebei region. *Environ Sci*, 2017, 38(3):

中国知网 https://www.cnki.net

867
(吴文景, 常兴, 邢佳, 等. 京津冀地区主要排放源减排对 $PM_{2.5}$ 污染改善贡献评估. 环境科学, 2017, 38(3): 867)

[88] Bo X, Xu J, Du X H, et al. Impacts assessment of steel plants on air quality over Beijing–Tianjin–Hebei area. *China Environ Sci*, 2017, 37(5): 1684
(伯鑫, 徐峻, 杜晓惠, 等. 京津冀地区钢铁企业大气污染影响评估. 中国环境科学, 2017, 37(5): 1684)

[89] Bo X, Zhen R Q, Qu J B, et al. Study on the management system of atmospheric pollutant emission inventory for steel industry of China. *Environ Pollut Control*, 2017, 39(5): 578
(伯鑫, 甄瑞卿, 屈加豹, 等. 中国钢铁行业大气污染物排放清单管理系统研究. 环境污染与防治, 2017, 39(5): 578)

[90] Yu J Y, Xu R S, Zhang J L, et al. A review on reduction technology of air pollutant in current China's iron and steel industry. *J Cleaner Prod*, 2023, 414: 137659

[91] Yuan Y X, Na H M, Chen C, et al. Status, challenges, and prospects of energy efficiency improvement methods in steel production: A multi-perspective review. *Energy*, 2024, 304: 132047

[92] Wang R Q, Jiang L, Wang Y D, et al. Energy saving technologies and mass-thermal network optimization for decarbonized iron and steel industry: A review. *J Cleaner Prod*, 2020, 274: 122997

[93] Sun C, Li B J, Chen L, et al. An improved hourly-resolved atmospheric NO_x emission inventory of industrial sources based on continuous emission monitoring system data: Case of Jiangsu Province, China. *J Cleaner Prod*, 2023, 419: 138192

[94] Marchiori F, Belloni A, Benini M, et al. Integrated dynamic energy management for steel production. *Energy Procedia*, 2017, 105: 2772

[95] Fan Z Y, Friedmann S J. Low-carbon production of iron and steel: Technology options, economic assessment, and policy. *Joule*, 2021, 5(4): 829

[96] Kasych A, Cherniavska O, Bondarenko S, et al. Industry 4.0 technologies in ensuring environmental friendliness of production and product quality//2022 *IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System* (*MEES*). Kremenchuk, 2022: 1

[97] Wang S, Liu J, Yi H H, et al. Trends in air pollutant emissions from the sintering process of the iron and steel industry in the Fenwei Plain and surrounding regions in China, 2014—2017. *Chemosphere*, 2022, 291: 132917

[98] Manta O. Innovative financial instruments in the context of the European Green Agreement (2020—2050). *J Financ Monetary Econo*, 2020, 8(1): 220

[99] Li C Z, Zhang L B, Wang Q W, et al. Towards low-carbon steel: System dynamics simulation of policies impact on green hydrogen steelmaking in China and the European Union. *Energy Policy*, 2024, 188: 114073

[100] Taylor A A, Khan M Y. Federal air and water regulations: Clean air act, clean water act, and safe drinking water act//Gad S C. *Regulatory Toxicology*, third edition, Boca Raton: CRC Press 2018

[101] Saha D, Shrestha R, Feldmann J. Designing the next generation of federal tax credits for low-carbon technologies [J/OL]. *World Resources Institute website* (2002–12–01) [2024–10–29]. https://www.wri.org/research/federal-tax-credits-low-carbon-technologies

[102] Ahmann L, Banning M, Lutz C. Modeling rebound effects and counteracting policies for German industries. *Ecol Econ*, 2022, 197: 107432

[103] Kawabata N. Evaluating the technology path of Japanese steelmakers in green steel competition. *Jpn Polit Econ*, 2023, 49(2-3): 231

[104] Li Y R, Xing Y, Sun Y J, et al. Low-carbon green development path and practice of the iron and steel industry. *Chin J Eng*, 2023, 45(9): 1583
(李毅仁, 邢奕, 孙宇佳, 等. 钢铁工业低碳绿色发展路径与实践. 工程科学学报, 2023, 45(9): 1583)

[105] Wang X D, Shangguan F Q, Xing Y, et al. Research on the low-carbon development technology route of iron and steel enterprises under the "double carbon" target. *Chin J Eng*, 2023, 45(5): 853
(王新东, 上官方钦, 邢奕, 等. "双碳"目标下钢铁企业低碳发展的技术路径. 工程科学学报, 2023, 45(5): 853)

[106] Cui Z F, Xu A J, Shangguan F Q. Low-carbon development strategy analysis of the domestic and foreign steel industry. *Chin J Eng*, 2022, 44(9): 1496
(崔志峰, 徐安军, 上官方钦. 国内外钢铁行业低碳发展策略分析. 工程科学学报, 2022, 44(9): 1496)

[107] Xing Y, Cui Y K, Tian J L, et al. Application status and prospect of low carbon technology in iron and steel industry. *Chin J Eng*, 2022, 44(4): 801
(邢奕, 崔永康, 田京雷, 等. 钢铁行业低碳技术应用现状与展望. 工程科学学报, 2022, 44(4): 801)

[108] Xing Y, Zhang W B, Su W, et al. Research of ultra-low emission technologies of the iron and steel industry in China. *Chin J Eng*, 2021, 43(1): 1
(邢奕, 张文伯, 苏伟, 等. 中国钢铁行业超低排放之路. 工程科学学报, 2021, 43(1): 1)

[109] Shen M H, Kong F L, Tong L G, et al. Carbon capture and storage (CCS): Development path based on carbon neutrality and economic policy. *Carbon Neutrality*, 2022, 1(1): 37

[110] Di Maio F, Pettorossi C, Zio E. Entropy-driven Monte Carlo simulation method for approximating the survival signature of complex infrastructures. *Reliab Eng Syst Saf*, 2023, 231: 108982

中国知网 https://www.cnki.net