中国钢铁行业大气环境影响

汤铃[1,2]，薛晓达[1,3]，伯鑫[3*]，贾敏[2,3]，郭静[1,3]，田军[4]，黄满堂[4]，崔维庚[5]，王彤[6]，李时蓓[3]，敬红[7]，甄瑞卿[8]，孙露[9]，成国庆[10]

(1. 北京航空航天大学经济管理学院，北京 100191；2. 北京化工大学经济管理学院，北京 100029；3. 生态环境部环境工程评估中心，北京 100012；4. 南京大学环境规划设计研究院股份公司，南京 210093；5. 长安大学地球科学与资源学院，西安 710054；6. 陕西省环境调查评估中心，西安 710000；7. 中国环境监测总站，北京 100012；8. 中冶京诚工程技术有限公司，北京 100176；9. 日本国立环境研究所，社会环境研究中心，日本茨城县 305-8506；10. 河北正润环境科技有限公司，石家庄 050091)

摘要: 本研究基于2015年在线监测等数据，分析中国钢铁行业主要工序(烧结和球团)排口烟气浓度情况，自下而上建立了2015年中国高时空分辨率钢铁行业大气污染物排放清单(HSEC，2015)，使用CAMx模型，定量模拟钢铁行业排放对区域大气污染物浓度贡献. 结果表明，2015年中国钢铁行业共排放SO_2、NO_x、PM_{10}、$PM_{2.5}$、PCDD/Fs、VOCs、CO、BC、OC、EC和F分别为37.48万t、72.05万t、33.48万t、15.03万t、1.91 kg、84.29万t、3 478.85万t、0.64万t、0.83万t、0.08万t和0.77万t. 从区域角度: 上海和天津钢铁行业单位面积污染排放强度最大，对区域大气污染贡献比例较高. 从工序角度: 2015年烧结和球团烟气排口月平均浓度降低. 从污染物角度: 2015年钢铁行业排放NO_x对区域污染物浓度贡献最大，NO_x具有较大的减排潜力.

关键词: 排放清单；钢铁；大气污染；CAMx模型；排放因子

中图分类号: X51 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2020)07-2981-14 **DOI:** 10.13227/j.hjkx.201912166

Contribution of Emissions from the Iron and Steel Industry to Air Quality in China

TANG Ling[1,2], XUE Xiao-da[1,3], BO Xin[3*], JIA Min[2,3], GUO Jing[1,3], TIAN Jun[4], HUANG Man-tang[4], CUI Wei-geng[5], WANG Tong[6], LI Shi-bei[3], JING Hong[7], ZHEN Rui-qing[8], SUN Lu[9], CHENG Guo-qing[10]

(1. School of Economics and Management, Beihang University, Beijing 100191, China; 2. School of Economics and Management, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China; 3. Appraisal Centre for Environment and Engineering, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100012, China; 4. Academy of Environmental Planning & Design, Co., Ltd., Nanjing University, Nanjing 210093, China; 5. School of Earth Sciences and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 6. Shaanxi Environmental Investigation and Assessment Center, Xi'an 710000, China; 7. China National Environmental Monitoring Centre, Beijing 100012, China; 8. MCC Capital Engineering & Research Incorporation Limited, Beijing 100176, China; 9. Center for Social and Environmental Systems Research, National Institute for Environmental Studies, Ibaraki 305-8506, Japan; 10. Hebei Zhengrun Environmental Technology Co., Ltd., Shijiazhuang 050091, China)

Abstract: Based on the data from a continuous emission monitoring systems network in 2015, this study analyzed the compliance rates of exhaust gas in the processes of China's iron and steel industry, and established a high-resolution steel plant emission inventory for China (HSEC, 2015), based on the bottom-up method. The contribution of emissions from the iron and steel industry to regional air quality was quantitatively simulated using a CAMx model. The results showed that in 2015, the total emissions of SO_2, NO_x, PM_{10}, $PM_{2.5}$, PCDD/Fs, VOCs, CO, BC, OC, EC, and F were 374 800 t, 720 500 t, 334 800 t, 150 300 t, 1.91 kg, 842 900 t, 34 788 500 t, 6 400 t, 8 300 t, 800 t, and 7 700 t, respectively. From a regional perspective, the iron and steel industry in Shanghai and Tianjin has the highest emission intensity per unit area and contributes a high proportion to regional air pollution. From a process perspective, in 2015, the exhaust concentration of flue gas in the main process gradually decreased, with a high compliance rate, and the emission factor significantly decreased to lower than that in the existing research results. From a species perspective, in 2015, NO_x emission from the steel industry contributed the most to regional air quality, and there is therefore a great emission reduction potential for NO_x.

Key words: emission inventory; iron and steel; air pollution; CAMx model; emission factor

钢铁行业是中国经济发展的基础工业之一，近 年来中国粗钢产量增长迅速，由1996年的1.01亿t

收稿日期: 2019-12-20; **修订日期:** 2020-02-11

基金项目: 国家重点实验室开放基金项目(16K01ESPCT)；国家重点研发计划项目(2016YFC0208101，2017YFC0210300)；大气重污染成因与治理攻关项目(DQGG0209-07，DQGG0304-07)；生态环境部环境工程评估中心创新科研项目(2019-10)；国家自然科学基金项目(71971007，71622011)

作者简介: 汤铃(1983～)，女，教授，博士生导师，主要研究领域为能源经济与管理，E-mail: lingtang@buaa.edu.cn

* 通信作者，E-mail: boxinet@gmail.com

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

上升至 2014 年 8.22 亿 t，但受经济下行等因素影响，2015 年中国粗钢产量首次下降(8.04 亿 t)[1]. 现行钢铁行业的污染物控制标准[2~6]，规定了 2015 年 1 月 1 日起，现有企业执行新建标准，排放浓度限值加严，推动了中国钢铁行业环保设施升级、污染物减排等工作. 受产量和排放控制水平影响，2015 年中国钢铁行业污染物排放量大幅下降[7]，因此，开展 2015 年钢铁行业大气污染物排放现状及其对空气质量影响的研究意义重大.

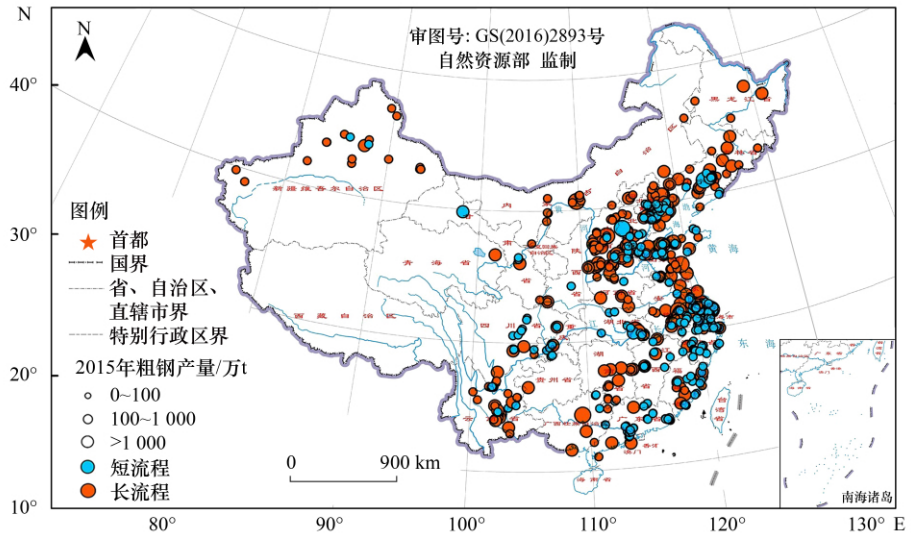
近年来国内外开展关于钢铁行业大气污染排放的研究，主要集中在大气污染物排放清单建立和空气质量贡献等方面. 在清单建立方面，目前研究无法反映钢铁行业最新的大气污染物排放水平. 已有研究采用排放因子法，研究中国钢铁行业 1990 ~ 2015 年的排放量，但采用的排放因子均为 2013 年之前的估算结果，无法反映最新标准实施带来的减排影响[8~16]. 基于有限钢铁工序排口的调研数据，排放因子数值计算涉及多种假设和间接参数(如燃料中污染物含量、污染物防治技术和去除效率等)，无法反映中国钢铁工序间排放的差异性和随时间变化的特性，导致较高的不确定性[8~16]. 在空气质量研究方面，目前没有研究全国范围的钢铁行业大气污染物排放对空气质量的贡献程度. 现有研究主要集中在城市和区域的空气质量贡献[17~19]. 在城市尺度下，已有研究采用空气质量模型或受体模型法，在不同城市研究钢铁行业大气排放对周围环境空气的贡献(如 $PM_{2.5}$、SO_2 和 NO_x)，例如：北京[20,21]、上海[22]、西安[23]、武汉[17]和兰州[24]. 在区域尺度下，相关研究模拟了钢铁行业排放对京津冀地区大气 $PM_{2.5}$ 浓度的贡献[19,25]. 因此，当前的研究无法反映中国钢铁行业最新的大气污染物排放状况和对空气质量贡献的影响.

为提高中国钢铁行业排放清单的分辨率，精确反映当前的钢铁行业大气污染物排放状况和对空气质量的影响，本文有机融合 2015 年中国钢铁行业在线监测数据(continuous emissions monitoring systems，CEMS)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，全面性地编制了 2015 年中国钢铁行业区大气污染物排放清单(HSEC，2015)；进而采用 CAMx 模型，定量评估了 2015 年中国钢铁行业大气污染物排放对空气质量的贡献. 同时进行全面的不确定性分析，验证了本次清单编制方法的可靠性. 因此，本研究对钢铁行业制定进一步的减排政策、产业布局优化、空气质量达标规划、重污染天气应对以及大气区域联控等提供科学技术支撑.

1 材料与方法

1.1 活动水平

本研究基准年为 2015 年，研究区域涵盖中国 29 个省、自治区及直辖市，未纳入西藏自治区、中国台湾、中国香港和澳门特别行政区(图 1). 2015 年中国钢铁行业基于工序的活动水平数据来自生态环境部的环境统计数据、环境影响评价报告数据等(原始数据未公开)，包括钢铁企业主要工序的产量、产能、生产技术信息、污染物控制技术、烟囱信息(高度、温度和流速等)和地理位置等. 为确保各个钢铁企业工序空间信息的精确性，采用谷歌卫星地图，逐个校准各工序的经纬度.



未纳入西藏自治区、中国台湾、中国香港和澳门特别行政区的相关数据，下同

图 1 2015 年中国钢铁企业分布示意

Fig. 1 Distribution of China's iron and steel enterprises in 2015

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

本次共纳入中国 937 家钢铁企业，其粗钢产量达 7.46 亿 t，占 2015 年中国粗钢总产量的 92.86%（中国粗钢总产量来自国家统计局）；涉及烧结、球团、焦炉、高炉、转炉、电炉和轧钢（包括热轧、冷轧）等主要工序. 本研究假设中国钢铁企业铁钢产量比为 1∶1（即消耗 1 t 生铁产生 1 t 粗钢），基于此假设以及环统粗钢产量数据，折算中国转炉钢、电炉钢产量，最终计算中国转炉钢、电炉钢比例约为 18.47∶1. 2015 年 734 家钢铁企业粗钢产量小于 100 万 t，其粗钢总产量达4 588.90万 t；193 家钢铁企业粗钢产量在 100 万 ~ 1 000 万 t，其粗钢总产量达 56 192.978万 t；10 家钢铁企业粗钢产量大于1 000 万 t，其粗钢总产量达13 863.511万 t.

1.2　排放因子

1.2.1　基于 CEMS 的排放因子

本研究 CEMS 数据来自生态环境部生态环境执法局（原始数据未公开）. 截止 2015 年，CEMS 数据包含 361 个钢铁企业，共涉及3 099个排口. 生态环境部要求钢铁企业的烧结机头、烧结机尾、球团焙烧、焦炉烟囱、高炉出铁场、转炉二次和电炉工序安装 CEMS 在线监测设备，监测 SO_2、NO_x 和 PM 的排口小时浓度[26]. 除规定工序外，CEMS 数据库中包含部分轧钢热处理炉和高炉热风炉工序的排口浓度. 因此，烧结机头、烧结机尾、球团焙烧、焦炉烟囱、高炉出铁场、高炉热风炉、转炉二次、电炉和轧钢热处理炉工序的 SO_2、NO_x 和 PM 的排放因子，基于 CEMS 浓度计算.

本研究按照规范对 CEMS 数据进行质量控制后[27,28]，计算出单个排口 SO_2、NO_x 和 PM 平均排放因子，见公式（1）. 对于没有安装 CEMS 的企业，用省平均和中国平均排放因子（见表 1 ~ 3）补充.

$$EF_{f,s,u,p,h} = c_{f,s,u,p,h} V_{s,u,p} \quad (1)$$

式中，f、s、u、p 和 h 分别代表污染物种类、排放源、工艺、工序和生产小时数；EF 代表排放因子，$g \cdot kg^{-1}$；c 代表排口的 CEMS 监测的污染物浓度，$g \cdot m^{-3}$；V 代表理论烟气量，$m^3 \cdot kg^{-1}$.

表 1　2015 年基于 CEMS 在线监测的烧结、球团的污染物排放因子/$kg \cdot t^{-1}$

Table 1　Emission factors of sintering and pelletizing based on CEMS in 2015/$kg \cdot t^{-1}$

省份	排放因子						
	烧结机头			烧结机尾	球团焙烧		
	PM	SO_2	NO_x	PM	PM	SO_2	NO_x
上海市	0.043	0.092	0.612	—	—	—	—
贵州省	0.18	0.509	0.39	—	—	—	—
福建省	0.051	0.193	0.457	0.01	—	—	—
河北省	0.064	0.182	0.433	0.019	0.042	0.14	0.252
天津市	0.04	0.096	0.447	0.014	0.029	0.105	0.209
浙江省	0.06	0.372	0.372	—	—	—	—
山东省	0.097	0.159	0.393	—	0.046	0.178	0.683
山西省	0.089	0.248	0.32	—	0.09	0.128	0.463
安徽省	0.057	0.204	0.525	0.027	0.025	0.283	—
陕西省	0.056	0.186	0.579	—	—	—	—
黑龙江省	—	—	—	—	0.081	0.345	0.428
江苏省	0.048	0.166	0.545	—	—	—	—
河南省	0.084	0.255	0.433	0.019	0.077	0.218	0.239
四川省	0.094	0.551	0.301	—	—	—	—
吉林省	0.068	0.361	0.281	—	0.044	0.423	0.567
广东省	0.127	0.292	0.458	—	—	—	—
云南省	0.062	0.266	0.485	—	0.165	0.243	0.376
甘肃省	0.121	—	1.407	0.01	0.07	0.408	—
江西省	0.117	0.363	0.459	—	0.046	0.396	—
辽宁省	0.066	0.252	0.361	—	0.054	0.295	0.267
湖南省	0.084	0.331	0.417	—	—	—	—
湖北省	0.066	0.296	0.666	0.031	—	—	—
新疆维吾尔自治区	0.072	0.495	0.231	0.034	—	1.099	0.297
重庆市	—	0.49	0.363	—	0.036	0.173	—
内蒙古自治区	—	—	—	0.05	—	—	—
广西壮族自治区	0.084	0.23	0.363	—	—	—	—
全国[1)]	0.071	0.212	0.431	0.02	0.05	0.173	0.32

1）未纳入西藏自治区、中国台湾、中国香港和澳门特别行政区的相关数据，下同

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 2 2015 年基于 CEMS 在线监测的焦化、出铁场、热风炉的污染物排放因子/kg·t^{-1}

Table 2 Emission factors of coking, blast furnace casting, and hot stove based on CEMS in 2015/kg·t^{-1}

省份	排放因子						
	焦化			出铁场	热风炉		
	PM	SO_2	NO_x	PM	PM	SO_2	NO_x
上海市	—	—	—	—	—	—	—
贵州省	—	—	—	—	—	—	—
福建省	—	—	—	—	—	—	—
河北省	0.031	0.067	0.632	0.031	—	—	—
天津市	—	—	—	0.029	—	—	—
浙江省	—	—	—	—	—	—	—
山东省	—	—	—	0.023	—	—	—
山西省	—	0.11	0.501	—	—	0.096	—
安徽省	—	—	—	—	—	—	—
陕西省	—	—	—	—	0.008	0.053	—
黑龙江省	—	—	—	—	—	—	—
江苏省	—	—	—	—	0.028	0.048	—
河南省	0.031	0.104	0.681	0.044	0.014	0.046	—
广西壮族自治区	—	—	—	—	—	—	—
吉林省	—	—	—	—	—	—	—
广东省	—	—	—	—	—	—	—
云南省	—	—	—	—	0.019	0.021	—
甘肃省	0.029	0.045	—	0.067	—	—	—
江西省	0.047	0.352	0.589	0.081	—	—	—
辽宁省	—	—	—	0.037	—	—	—
湖南省	—	—	—	—	—	—	—
湖北省	—	—	—	—	—	—	—
新疆维吾尔自治区	—	—	—	0.021	0.03	0.034	—
重庆市	0.043	0.296	0.565	—	0.009	0.039	0.071
四川省	—	—	—	—	—	—	—
全国[1)]	0.034	0.134	0.596	0.038	0.017	0.044	0.071

1) 未纳入西藏自治区、中国台湾、中国香港和澳门特别行政区的相关数据

表 3 2015 年基于 CEMS 在线监测的转炉二次和热轧的污染物排放因子/kg·t^{-1}

Table 3 Emission factors of secondary basic oxygen furnace off gas and hot rolling based on CEMS in 2015/kg·t^{-1}

省份	排放因子			
	转炉二次	热轧		
	PM	PM	SO_2	NO_x
上海市	—	—	—	—
贵州省	—	—	—	—
福建省	—	—	—	—
河北省	0.015	0.015	0.07	—
天津市	0.017	—	—	—
浙江省	—	—	—	—
山东省	—	—	—	—
山西省	—	—	—	—
安徽省	—	—	—	—
陕西省	—	—	—	—
黑龙江省	—	0.02	0.023	0.137
江苏省	—	—	—	—
河南省	0.023	—	—	—

1.2.2 基于标准的排放因子

根据国家规范，对于未要求安装 CEMS 装置的其他工艺的(如烧结工序中的燃料破碎和配料等)污染物排放浓度，选取钢铁行业污染物控制标准中新建企业执行的浓度限值[2-8]，其中山东和河北参照各省份的地方标准. 根据上述工序的污染物排放浓度和理论烟气量，计算其排放因子(见表 4). 基于标准的因子的算法具体见文献[9].

1.2.3 基于文献调研的排放因子

除上述污染物外，本研究还包括 $PM_{2.5}$、BC、OC、EC、PCDD/Fs、VOC、CO 和 F. 其中，$PM_{2.5}$ 的排放量根据其占 PM_{10} 的质量分数计算(见表 5)；BC、OC 和 EC 的排放量根据其占 $PM_{2.5}$ 的质量分数计算(见表 6)；PCDD/Fs、VOC、CO 和 F 的排放因子来源于文献调研(见表 6).

1.3 排放量计算

本研究采用自下而上的方法，基于钢铁行业各工序中产污节点的排放因子，结合相应工序的活动水平，核算 2015 年中国钢铁行业的污染物排放量，见公式(2)：

$$E_{f,s,u,p} = A_{u,p} \cdot EF_{f,s,u,p} \quad (2)$$

式中，E 代表排放量，t·a^{-1}；EF 代表排放因子，g·kg^{-1}；A 代表活动水平，t·a^{-1}.

本研究只考虑钢铁行业的有组织排放. 由于钢

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 4　2015 年基于标准的排放因子/kg·t^{-1}

Table 4　Emission factors based on emission standards in 2015/kg·t^{-1}

工序	工艺	标准	排放因子		
			SO_2	NO_x	PM
烧结	燃料破碎	中国[2 1)]	—	—	0.039
		山东地标[30]	—	—	0.026
		河北地标[31]	—	—	0.039
	配料	中国[2]	—	—	0.033
		山东地标[30]	—	—	0.022
		河北地标[31]	—	—	0.033
	整粒及成品筛分	中国[2]	—	—	0.015
		山东地标[30]	—	—	0.01
		河北地标[31]	—	—	0.015
高炉	矿槽	中国[3]	—	—	0.081
		山东地标[30]	—	—	0.065
		河北地标[31]	—	—	0.081
转炉	铁水预处理	中国[3]	—	—	0.01
		山东地标[30]	—	—	0.01
		河北地标[31]	—	—	0.01
	转炉一次	中国[3]	—	—	0.003
		山东地标[30]	—	—	0.003
		河北地标[31]	—	—	0.003
	地下料仓	中国[3]	—	—	0.01
		山东地标[30]	—	—	0.01
电炉	出钢	中国[3]	—	—	0.022
		山东地标[30]	—	—	0.022
		河北地标[31]	—	—	0.022
焦化	备煤	中国[4]	—	—	0.02
	装煤	中国[4]	0.036	—	0.018
	推焦	中国[4]	0.034 5	—	0.035
	熄焦(干法)	中国[4]	0.075	—	0.038
球团	整粒	中国[2]	—	—	0.015
		山东地标[30]	—	—	0.01
		河北地标[31]	—	—	0.015
	配料	中国[2]	—	—	0.033
		山东地标[30]	—	—	0.022
		河北地标[31]	—	—	0.033

1) 未纳入西藏自治区、中国台湾、中国香港和澳门特别行政区的相关数据

表 5　$PM_{2.5}$ 占 PM_{10} 比例/%

Table 5　Proportion of $PM_{2.5}$ in PM_{10}/%

焦化		烧结		球团	高炉		转炉		电炉	轧钢
干熄焦	30.46[33]	机头	56.07[33]	43.37[33]	出铁场	62.94[32]	倒灌及预处理	45.06[33]	74.14[33]	62.51[33]
筛分机转运、备煤	37.78[32]	机尾	51.11[32]		高炉矿槽	15.27[32]	转炉二次烟气	56.68[32]		
装煤及推焦	40.97[32]	配料	36.62[32]		其他	62.51[33]	转炉一次烟气	71.43[33]		
焦炉烟囱	40.97[33]	成品整粒	38.63[32]				地下料仓	71.43[33]		

表 6　2015 年不同工艺产污环节的污染物排放因子[1)]

Table 6　Emission factors of pollutants from different processes in 2015

污染物	PCDD/Fs	VOCs	CO	BC	OC	EC	F
焦化	160.09	2.96[33]	1.6[33]	30[34]	35[34]	—	—
烧结	1 582.95	0.25[33]	16[33]	1[34]	2.2[35]	0.4[35]	0.002 8
球团	279.66	0.25[33]	0.064	1[34]	2.2[35]	0.4[35]	0.000 9
高炉	2	—	15.29[33]	10[34]	6.2[35]	0.8[35]	—
转炉	277.47	0.06[33]	8.75[33]	1.175[34]	8.8[35]	0.7[35]	0.006 5
电炉	1 245.85	0.06[33]	9[33]	14.19[34]	8.8[35]	0.7[35]	0.003 1
热轧	—	0.3[33]	1.28[33]	1.175[34]	8.8[35]	0.7[35]	—
冷轧	—	0.062[10]	—	—	—	—	—

1) 二噁英单位为ng·t^{-1}(以 I-TEQ 计)，BC、OC 和 EC 的排放因子表示占 $PM_{2.5}$ 的质量分数，单位为%，其余单位为kg·t^{-1}

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

铁企业无组织排放源分布特征多样,排放属性不同,受不同地理、气象、气候等条件影响,从而产生污染监测困难、排放控制松散、源强核算复杂等问题,且核算结果与实际排放状况存在较大差异[36~38]. 故本次研究未纳入无组织排放量,会导致总排放量偏低.

1.4 不确定性分析

本研究使用蒙特卡罗方法来证实中国钢铁厂排放清单计算的可靠性. 蒙特卡罗方法通过产生随机数,表征相关运算参数(例如,活动水平和排放因子)的概率分布,并求解不同参数取值下对应的排放量,获取排放量的分布,以进一步确定其不确定性区间. 参照 Tang 等[39] 和 Zhao 等[40] 提出的方法,在蒙特卡罗框架下进行了10 000次模拟实验,求解了钢铁排放量的95%置信区间.

对于2015 年钢铁排放清单,第一,不确定性来自于 CEMS 小时浓度的高频波动,本文基于单个工序的不同污染物的小时浓度值,拟合相应的每月浓度的概率分布,对于没有 CEMS 的工序,采用 bootstrap 方法,从相同省份的相同工序的 CEMS 小时浓度中做有放回的等概率抽取[39]. 第二,由于技术、原料和工序工况的异质性,使用理论烟气量可能导致不确定性. CEMS 中包含部分机组的实测烟气量,用实测值来估计各工序的烟气量的95%的置信区间,其结果见表7. 按照均匀分布在相应工序的可能变动范围中随机抽取,针对没有样本的工序,按照最大的置信区间替代(±14.88%)[39]. 第三,不确定性来自于工序的活动水平,假设其服从变异系数为5%的正态分布[7]. 采用蒙特卡罗方法对 CEMS 浓度、理论烟气量和活动水平在单个工序的月维度基础上,依照各自的概率分布,随机生成数值,使3个参数的不确定性通过公式(1)和公式(2)传播到模型的输出,并进行了10 000次模拟,进而采用10 000次的模型输出(排放量)构成的概率分布,量化钢铁污染物排放量的不确定度范围.

表7 钢铁各工序理论烟气量95%的置信区间

Table 7 Possible ranges of theoretical flue gas rates at 95% confidence level

工序	节点	95%置信区间/%
烧结	机头	±2.98
烧结	机尾	±12.07
焦化	焦炉烟囱	±14.88
球团	焙烧	±9.79
高炉	出铁场	±11.16
轧钢	热处理炉	±14.88

分析结果表明,本文核算的中国钢铁排放清单结果是相对稳定的,2015 年排放清单总量的95%置信区间为(-1.47%,1.49%). 已有研究中基于传统排放因子的火电排放清单的不确定性范围在(-22%,38%)[41,42],钢铁排放清单不确定性范围在(-5%,71%)[7],结果表明基于 CEMS 的清单计算方法,大幅降低了钢铁排放清单不确定性.

1.5 模拟模型

本研究选用中尺度气象模式(WRFV3.8)和区域空气质量模型(CAMxV6.40)对中国钢铁行业的大气污染浓度贡献进行模拟,并进行验证评估[43]. 其中 WRF 模式作为新一代中尺度气象模式,在气象研究和数值天气预报方面有着广泛的应用,其气象场模拟采用美国国家环境预报中心(NCEP)提供的6 h 间隔、1°×1°分辨率的 FNL 全球再分析资料作为边界场和初始场. CAMx 是由美国 ENVIRON 公司开发的一个欧拉光化学扩散模型,它基于“一个大气”的框架来模拟气态和颗粒态大气污染物的排放、传输、化学反应及沉降去除等过程,其所需的排放清单则综合考虑了清华大学的 MEIC2016[43] 和本研究的钢铁排放清单.

本研究的模拟区域覆盖整个中国地区,模式网格的中心经纬度为(35°N,102°E),水平分辨率为36 km,模拟时间段选取为2015 年1 月、4 月、7 月和10 月这4 个季节代表月份,具体模型参数设置如表8[43]. 钢铁行业对 $PM_{2.5}$ 年均浓度的贡献包括一次排放 $PM_{2.5}$ 和二次生成的硫酸盐、硝酸盐以及有机气溶胶等的总贡献.

表8 CAMx 模式参数设置

Table 8 CAMx mode parameter setting

设置	说明	设置	说明
水平网格	144×144	气相化学算法	EBI
网格距	36 km	水平平流方案	PPM
其他人为排放源	MEIC2016	垂直扩散方案	标准 K 理论
气相化学机制	CB05	干沉降参数化方案	WESELY89
气溶胶模式	AERO5/CF Scheme		

本文选取了2015 年的典型钢铁城市,以上海、南京、唐山、邯郸和临汾等城市的环境空气质量监测数据作为验证,如表9 所示,其中临汾 SO_2 模拟结果与观测值之间的相关系数 R 达到了0.80,模拟效果最好; 上海和南京的 NO_2 和 SO_2 模拟效果相对较差,主要原因可能是模拟采用的清单为 MEIC2016,而实际2015 年 SO_2 和 NO_2 的排放情况相对于清单更高,导致模拟出现高估的情况. 总体来讲,各监测点对 $PM_{2.5}$、PM_{10}、O_3 和 CO 的模拟效果较好,对 SO_2 和 NO_2 的模拟效果相对较差.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 9　2015 年上海、南京、唐山、邯郸和临汾的环境空气质量监测数据

Table 9　Air quality monitoring data of Shanghai, Nanjing, Tangshan, Handan, and Linfen

城市	评价指标	$PM_{2.5}$	PM_{10}	SO_2	NO_2	O_3	CO
上海		0.63	0.59	0.42	0.15	0.72	0.65
南京		0.62	0.60	0.32	0.43	0.67	0.51
唐山	*R*	0.54	0.50	0.50	0.42	0.79	0.54
邯郸		0.74	0.68	0.71	0.44	0.66	0.60
临汾		0.63	0.69	0.80	0.42	0.79	0.74
上海		−0.13	−0.40	0.86	0.20	−0.90	−0.34
南京		0.06	−0.34	0.48	0.09	−0.64	−0.18
唐山	FB	0.04	−0.33	0.26	−0.01	−0.88	−0.56
邯郸		−0.27	−0.72	−0.14	0.00	0.16	−0.41
临汾		−0.50	−0.74	−0.88	−0.03	−0.21	−1.26
上海		−0.12	−0.33	1.51	0.22	−0.62	−0.29
南京		0.06	−0.29	0.64	0.10	−0.48	−0.17
唐山	NMB	0.04	−0.28	0.30	−0.01	−0.61	−0.44
邯郸		−0.24	−0.53	−0.13	0.00	0.17	−0.34
临汾		−0.40	−0.54	−0.61	−0.03	−0.19	−0.77
上海		0.51	0.51	1.61	0.57	0.62	0.38
南京		0.52	0.49	0.84	0.44	0.57	0.42
唐山	NME	0.54	0.47	0.72	0.41	0.63	0.50
邯郸		0.48	0.57	0.49	0.33	0.60	0.51
临汾		0.46	0.56	0.83	0.29	0.42	0.77
上海		58.79	85.32	19.16	52.51	77.61	0.98
南京		66.82	111.24	19.86	56.46	47.93	0.96
唐山	Mean_obs	85.48	140.40	50.47	62.23	55.84	2.14
邯郸		95.07	165.33	44.57	50.03	30.03	1.27
临汾		87.34	123.24	123.91	39.34	54.70	2.31
上海		51.60	56.94	48.18	64.15	29.50	0.70
南京		70.62	78.54	32.53	62.00	24.70	0.80
唐山	Mean_sim	88.84	101.11	65.38	61.49	21.63	1.21
邯郸		72.13	78.11	38.92	49.96	35.13	0.84
临汾		52.37	56.88	48.37	38.13	44.52	0.53

2　结果与讨论

2.1　2015 年中国钢铁行业排放浓度分析

2015 年，中国钢铁主要工序大气污染物月均排放浓度基本保持下降趋势（图 2），其中烧结机头 SO_2、NO_x 和 PM 月均浓度下降 2.27%、0.30% 和 1.58%，球团焙烧 SO_2、NO_x 和 PM 月均浓度下降 5.89%、4.07% 和 1.50%. 虽然烧结机头 NO_x 月均浓度在部分月份上升（例如 4 月），但烧结机头 NO_x 排放浓度整体稳定在 150 $mg \cdot m^{-3}$ 左右，这是由于 2015 年烧结机头未大规模上脱硝设备. 在 2015 年年初球团焙烧工序大量新增脱硫设备，球团焙烧的 SO_2 月均浓度在 2 月份明显下降. 由此可见，自 2015 年中国新建标准执行以来，钢铁行业主要工序节点

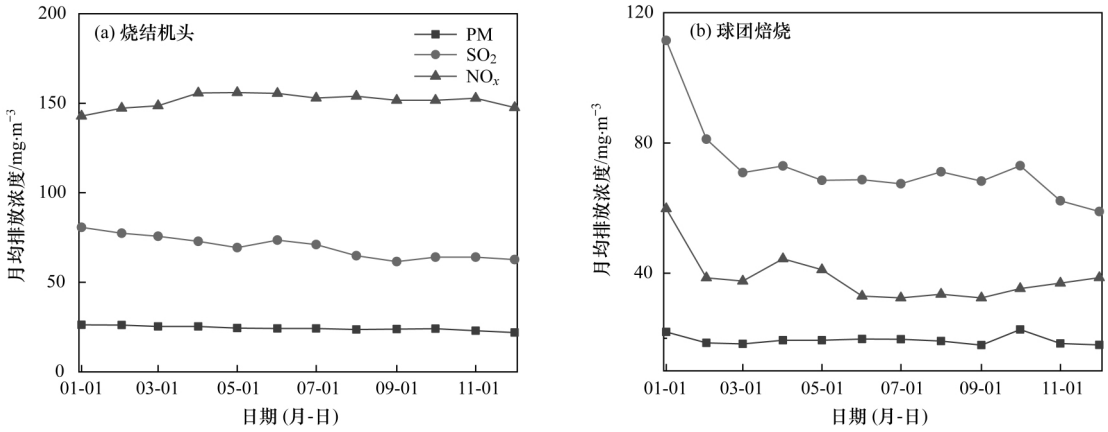


图 2　2015 年中国钢铁行业烧结机头和球团焙烧的污染物浓度月均值变化

Fig. 2　Mean monthly concentration of air pollutants from sintering and pelletizing in China's iron and steel industry in 2015

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

排放浓度逐步降低，排放水平持续下降.

2.2 2015 年中国钢铁行业排放量分析

2015 年，中国钢铁行业共排放 SO_2、NO_x、PM_{10}、$PM_{2.5}$、PCDD/Fs、VOCs、CO、BC、OC、EC 和 F 分别为 37.48 万 t、72.05 万 t、33.48 万 t、15.03 万 t、1.91kg、84.29 万 t、3478.85 万 t、0.64 万 t、0.83 万 t、0.08 万 t 和 0.77 万 t. 本节将分别从空间、工序和规模的角度分析污染物排放量的分布特征.

2015 年中国钢铁行业大气污染物排放的空间分布见图 3. 截止 2015 年年底，SO_2 排放量较大的 3 个省份是河北、辽宁和江苏，排放量(中国占比)分别为 7.89 万 t(21.04%)、3.53 万 t(9.41%)、3.42 万 t(9.13%)；NO_x 排放量较大的 3 个省份是河北、江苏和山东，排放量分别为 17.65 万 t(24.50%)、9.12 万 t(12.66%)和 6.37 万 t(8.83%)；PM_{10} 排放量较大的 3 个省份是河北、江苏和山东，排放量分别为 7.42 万 t(22.17%)、3.71 万 t(11.08%)、3.15 万 t(9.40%). 污染物的空间分布特征主要由钢铁的产量决定[见公式(2)]，钢铁行业在各省的大气污染物排放量与粗钢产量分布相一致，Pearson 相关系数均超过 0.95. 其中，河北省、江苏省、辽宁省和山东省，粗钢产量在中国占比超过 50%，是排放量最大的 4 个省份.

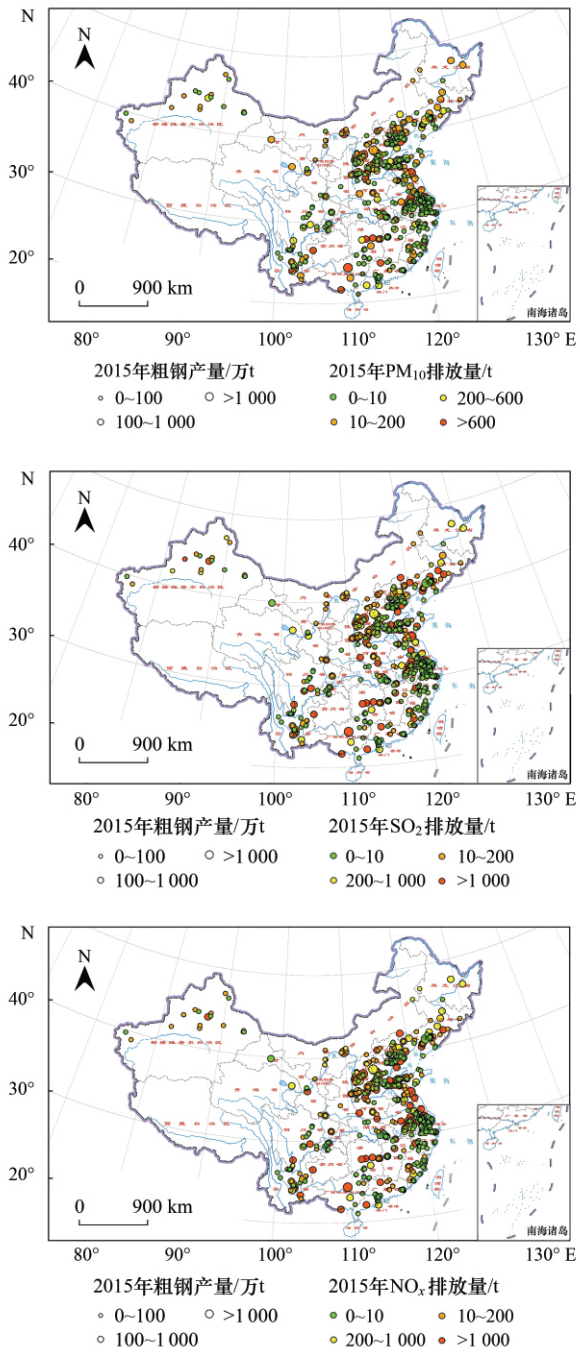


图 3 2015 年钢铁企业排放空间分布情况

Fig. 3 Spatial distribution of emissions from iron and steel plants in 2015

2015 年中国各省单位面积的排放强度见图 4. 2015 年，中国钢铁行业 SO_2、NO_x 和 PM_{10} 单位面积污染物排放强度分别是 0.061 6、0.149 8 和 0.060 8 kg·(万 t·km^2)$^{-1}$. SO_2 单位面积污染物排放强度最大的省份是上海市，上海市单位面积污染物排放强度水平约为中国平均水平的 9.36 倍. NO_x 单位面积污染物排放强度较大的省份是上海[1.938 8 kg·(万 t·km^2)$^{-1}$]和天津[0.788 8 kg·(万 t·km^2)$^{-1}$]. PM_{10} 单位面积污染物排放强度较大的省份是上海[0.640 9 kg·(万 t·km^2)$^{-1}$]和天津[0.352 4 kg·(万 t·km^2)$^{-1}$]. 一方面由于上海、天津等市钢铁产量大，大气污染物排放总量大，另一方面又因为占地面积小，钢铁厂分布密集，最终导致单位面积污染物排放强度相对高. 因此优化和调整钢铁产业布局，特别针对单位面积排放强度较大的省市(上海和天津等)，鼓励产能搬迁和置换，引导发展先进水平的电炉企业，有利于减缓京津冀和长江三角洲等地区的霾污染.

钢铁行业各工序排放如图 5 所示. SO_2、NO_x、PM_{10}、$PM_{2.5}$、PCDD/Fs 和 F 主要的污染源来自烧结工艺，分别为 22.64 万 t、45.68 万 t、17.33 万 t、8.10 万 t、1.60 kg 和 0.28 万 t，分别占总排放量的 60.40%、63.39%、51.75%、53.88%、84.16% 和 36.96%；CO 主要的污染源来自烧结和高炉工艺，分别为1 622.12万 t 和1 113.76万 t，占工艺总排放量的 46.63% 和 32.02%；VOCs 主要的污染源来自焦化和烧结工艺，分别为 34.56 万 t 和 25.35 万 t，分别占总排放量的 41.01% 和 30.07%；BC 主要的污染源来自高炉和焦化工艺，分别为 0.33 万 t 和 0.19 万 t，分别占总排放量的 51.06% 和 29.61%；OC 主要的污染源来自焦化和高炉工艺，分别为 0.22 万 t 和 0.20 万 t，分别占总排放量的 26.60% 和 24.38%；EC 主要的污染源来自烧结和高炉工

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

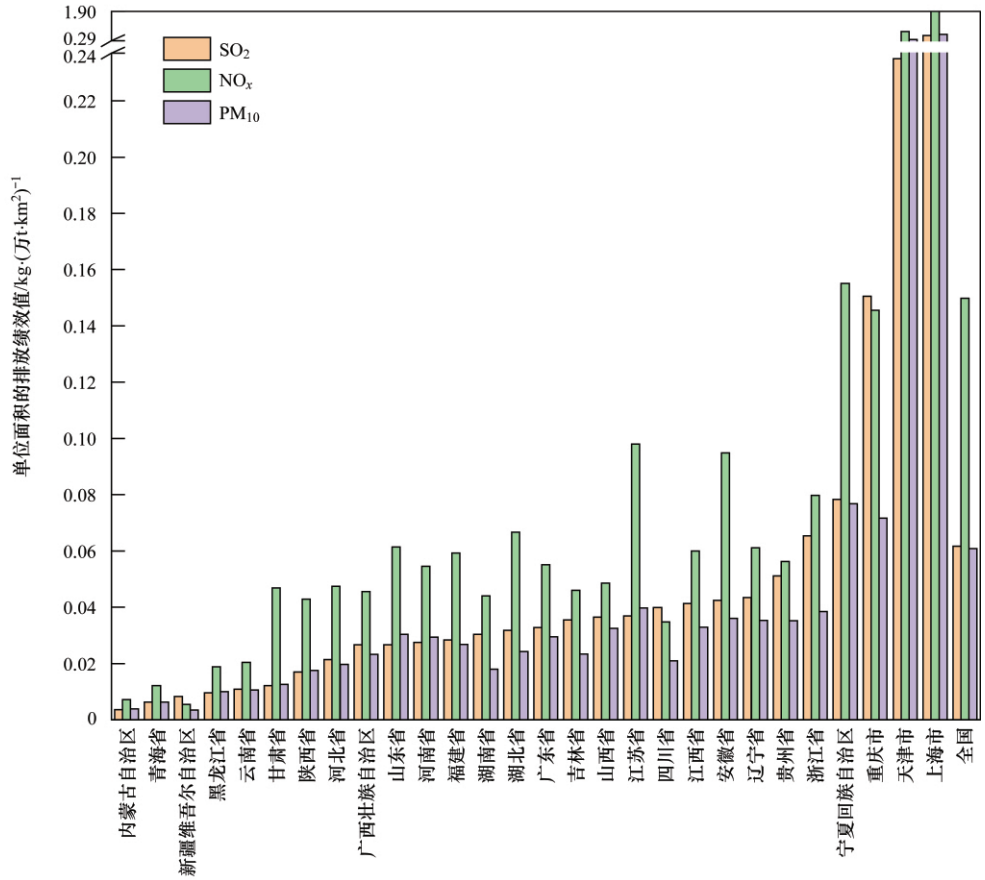


图 4　2015 年中国各省单位面积的排放绩效值

Fig. 4　Emission performance of air pollutants in 2015

艺，分别为 0.032 万 t 和 0.026 万 t，分别占总排放量的 41.48% 和 33.52%. 烧结过程中，烧结原料和燃料在车台上的燃烧，导致化学和冶金反应，产生大量的烟气和高浓度的污染物[45]. 其中，烧结烟气中的 SO_2 主要来自于铁矿石和燃料煤中的硫份氧化，80% 以上的 NO_x 来源于固体燃料中的氮，烟尘主要来自于机头的燃料和原料的燃烧以及机尾的热筛分过程，PCDD/Fs 主要通过前驱物合成，或者通过颗粒碳、氯等反应“从头合成”，F 主要受铁矿石中氟的含量和烧结矿进料碱度的影响[9,45]. 因此，当前政策着重控制烧结机污染物排放，现行标准 GB 28662-2012 与原标准相比，对 SO_2 的排放限值大幅提高，增加 NO_x、PCDD/Fs 和 F 的排放限值要求，由单一污染物管理，转变为多种污染物协同控制.

不同生产设备规模排放量见图 5. 中型和大型生产设备污染物排放贡献最大. 其中，烧结、球团、高炉、转炉和电炉生产设备中，中型和大型生产设备各种污染物排放量占比分别达到 96.46%、53.63%、97.94%、98.37% 和 90.82%. 2015 年中国钢铁行业生产以中型和大型生产设备为主，其产品产量占比较大，导致较高的污染物排放.

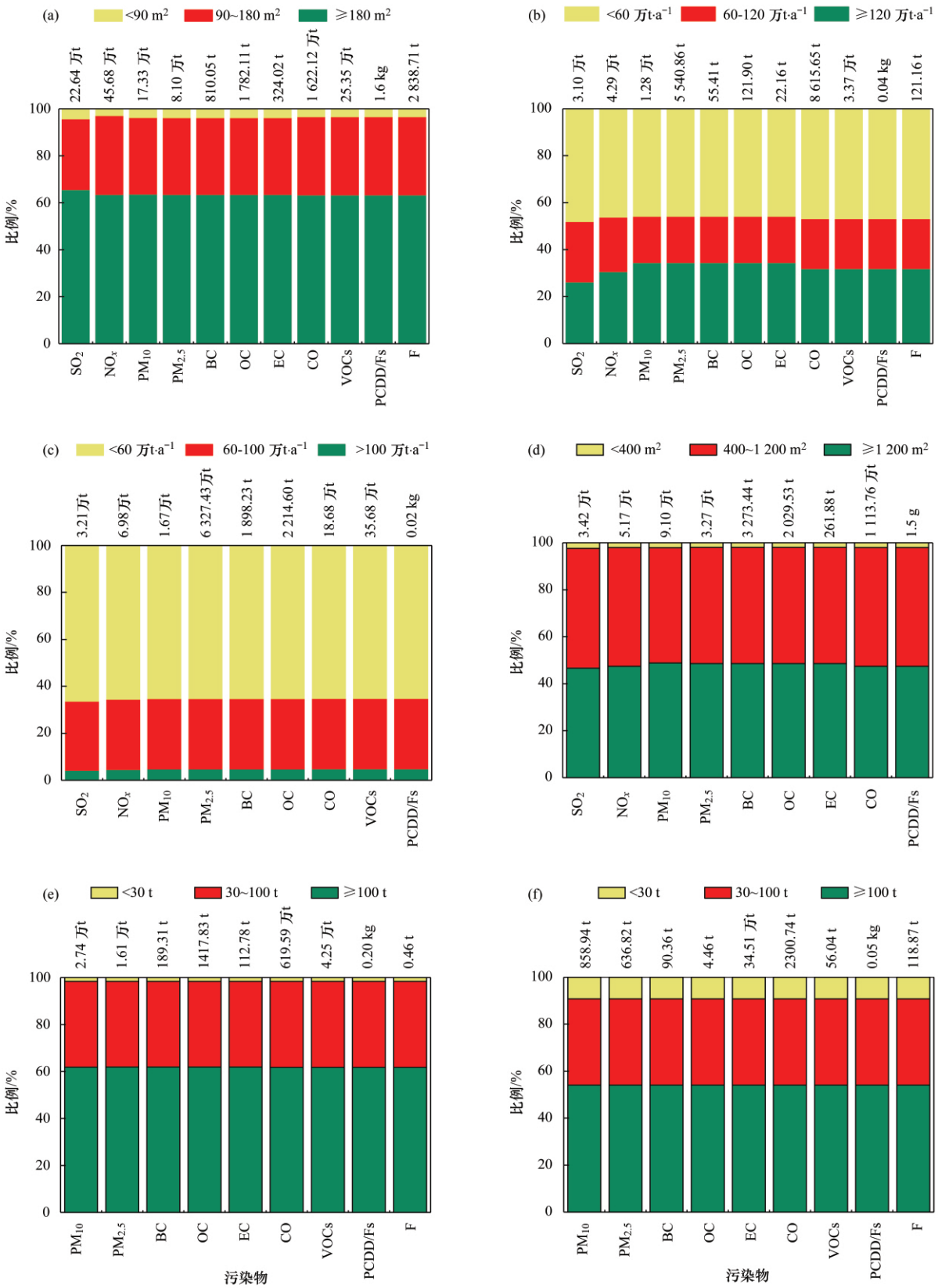
2.3　2015 年中国钢铁行业排放因子对比

与现有排放因子对比[7,9,10,46,47]，基于 CEMS 计算所得 PM、SO_2 和 NO_x 排放因子水平较低. 由于近年来中国钢铁行业政策和标准的影响，其排放因子发生巨大变化. 而现有研究中的钢铁排放因子未考虑具体工序、规模和管理水平等差异，且研究的样本存在数据较少以及时间较早的问题，无法有效反映钢铁行业由于技术进步和标准加严等因素引起的排放因子变化. 本研究基于中国在线监测数据，综合考虑现有生产水平、污染物控制水平和治理技术等影响因素，真实反映了企业 2015 年动态的和实时的排放因子(图 6).

2.4　2015 年中国钢铁行业大气环境影响分析

钢铁行业大气污染物浓度(图 7)和排放量(图 3)的空间分布相似. 钢铁行业排放对大气污染物浓度贡献比例较大的省份，主要集中在河北省(SO_2、NO_x 和 $PM_{2.5}$ 的贡献比例分别为 8.80%、9.88% 和 4.07%)、辽宁省(7.75%、5.64% 和 3.32%)和江苏省(7.62%、6.72% 和 3.50%). 这 3 个省份粗钢产量较大，占中国粗钢总量的 46%，进而产生大量污染物，其中 SO_2、NO_x 和 PM 排放量占钢铁行业排放总量的 39.59%、44.01% 和

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a) 烧结; (b) 球团; (c) 焦化; (d) 高炉; (e) 转炉; (f) 电炉

图 5 2015 年中国钢铁不同工艺和规模污染物排放量比例

Fig. 5 Proportion of pollutants discharged by different processes and scales in China's iron and steel industry in 2015

41.69%,因此对区域大气污染贡献比例最高. 此外上海(4.50%、6.06% 和 3.93%) 和天津(4.46%、5.29% 和 3.08%) 钢铁企业排放 SO_2、NO_x 和 $PM_{2.5}$ 对区域大气污染贡献比例较高,同时上海和

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

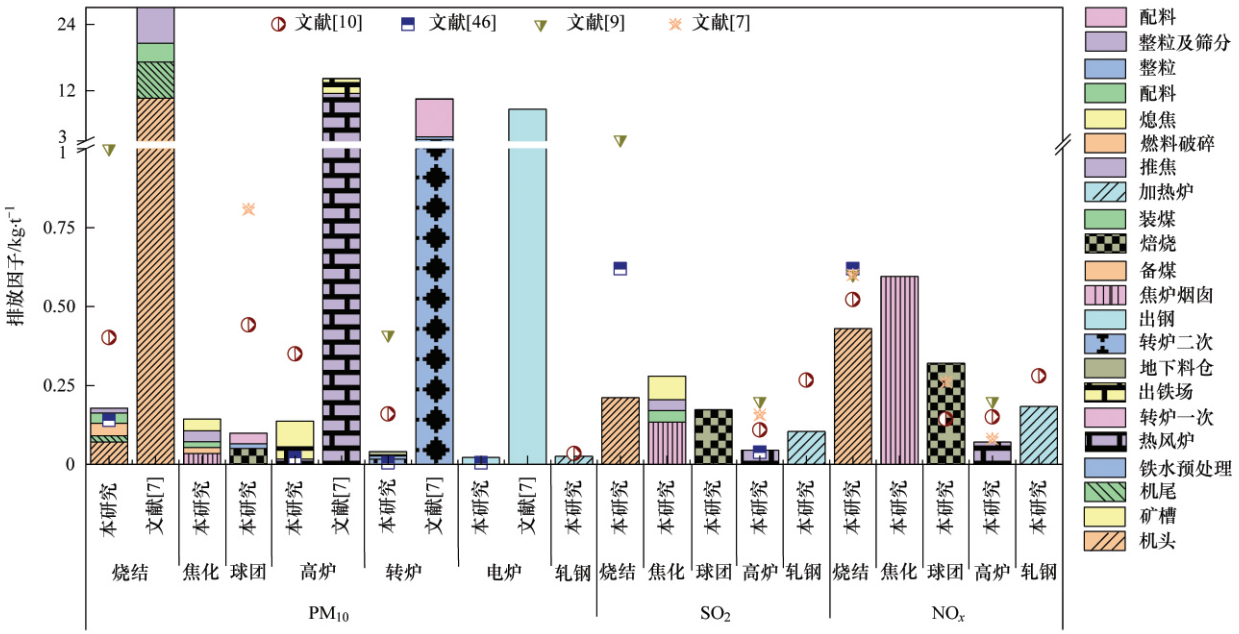


图 6　2015 年中国钢铁工序排放因子对比

Fig. 6　Comparison of emission factors from the steel process in China in 2015

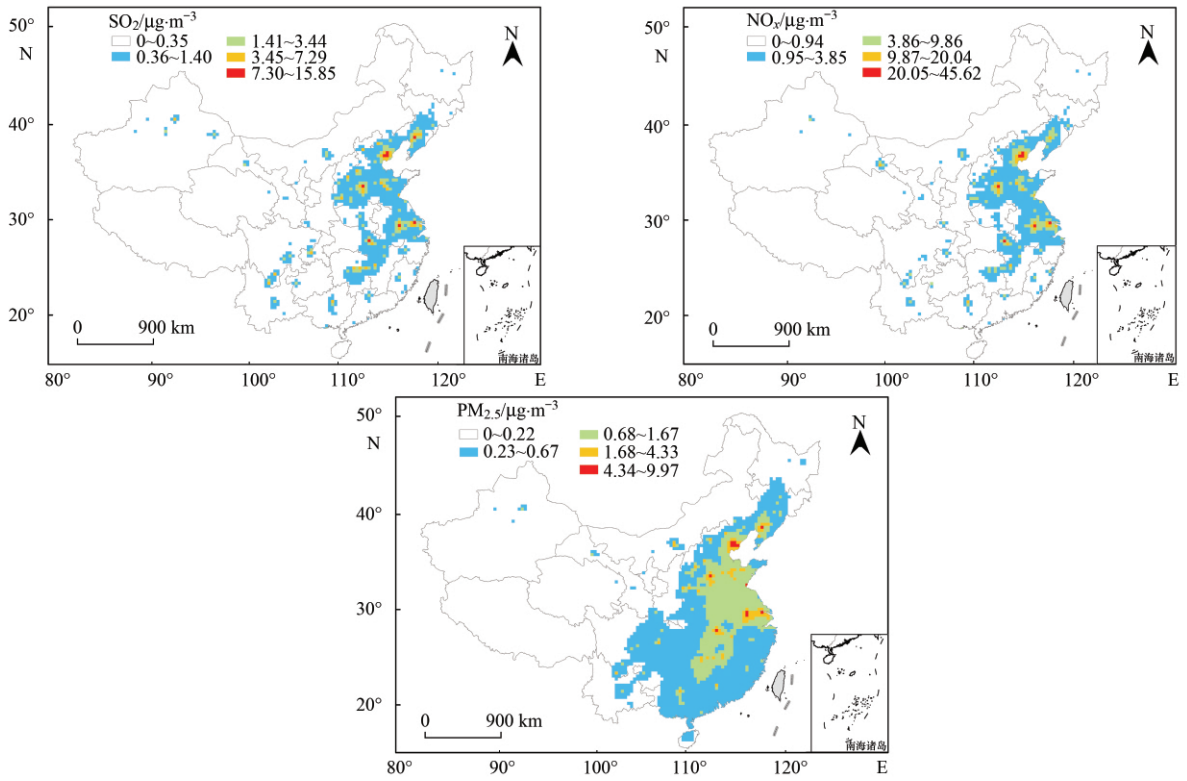


图 7　2015 年中国钢铁行业排放大气污染物年均贡献浓度

Fig. 7　Annual contribution concentration of air pollutants emitted by China's steel and iron industry in 2015

天津钢铁企业的单位面积污染排放强度最大(见 2.2 节),因此建议下一步着重控制上海和天津的钢铁行业,通过出台地方标准加严排放控制水平,制定区域产能调控方案,提出区域产能控制目标和布局调整措施,有效控制该地区的钢铁大气污染排放量.

中国钢铁行业对各省份 SO_2、NO_x 和 $PM_{2.5}$ 年均浓度贡献比例平均值分别为 2.85%、3.37% 和 1.54%(图 8),说明 2015 年钢铁行业对区域污染物浓度贡献最大的是 NO_x. 这是由于钢铁行业在 2015 年未大规模上脱硝设备. 因此,钢铁行业 NO_x 具有较大的减排潜力,下一步要着重加强 NO_x 的管控,提升脱硝设备的覆盖率,优化脱硝系统,提升脱硝效率.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

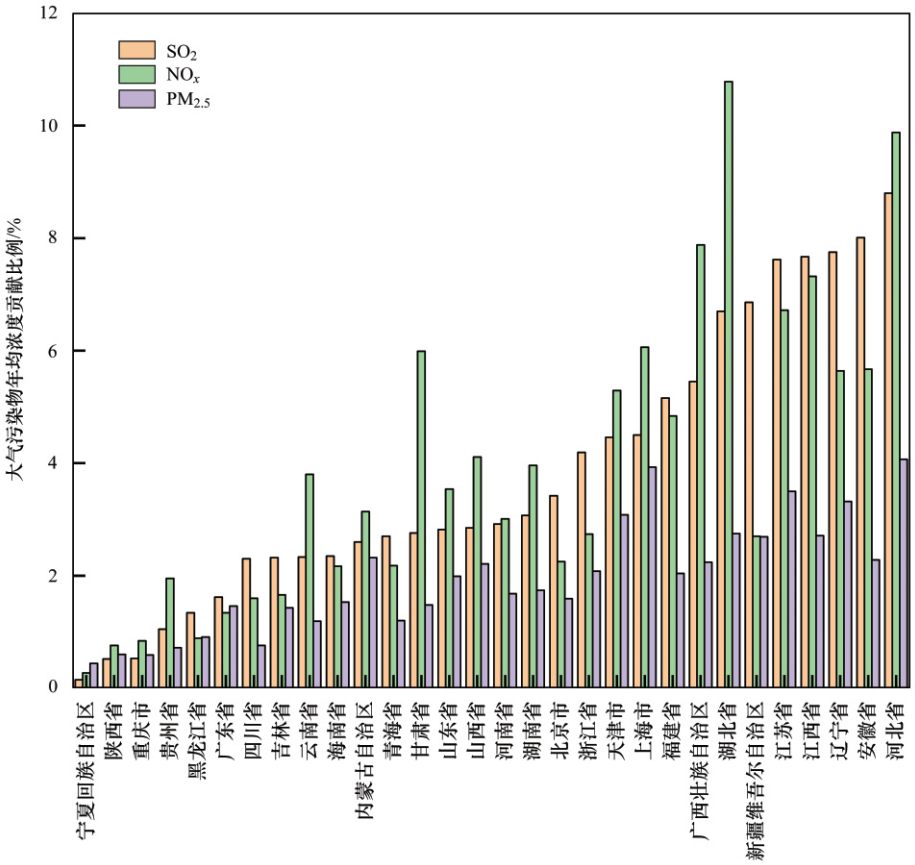


图 8 中国钢铁企业排放对各省主要大气污染物年均浓度贡献比例

Fig. 8 Contribution of emissions to the annual average concentration of major atmospheric pollutants in each province

3 结论

(1) 2015 年中国钢铁行业执行新建企业大气污染物排放浓度限值以来,主要工序烟气排口月浓度逐步降低; 本研究排放因子低于现有研究结果.

(2) 2015 年中国钢铁行业大气污染物排放量最大的 3 个省份是河北、辽宁和江苏,对区域大气污染物浓度贡献比例最高. 此外上海和天津钢铁企业排放对区域大气污染贡献比例较高,同时单位面积污染排放强度最大,因此建议下一步着重管控.

(3) 2015 年钢铁行业对区域污染物浓度贡献最大的是 NO_x,具有较大的减排潜力,下一步要着重加强 NO_x 的管控.

参考文献:

[1] World Steel Association (WSA). Steel Statistical Yearbook 1990-2019 (World steel Association, 1990-2019) [EB/OL]. https://www.worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/steel-statistical-yearbook.html.

[2] GB 28662-2012, **钢铁烧结、球团工业大气污染物排放标准** [S].
GB 28662-2012, Emission standard of pollutants for sintering and pelletizing of iron and steel [S].

[3] GB 28664-2012, **炼钢工业大气污染物排放标准** [S].
GB 28664-2012, Emission standard of air pollutants for steel smelt industry [S].

[4] GB 16171-2012, **炼焦化学工业污染物排放标准** [S].
GB 16171-2012, Emission standard of pollutants for coking chemical industry [S].

[5] GB 28663-2012, **炼铁工业大气污染物排放标准** [S].
GB 28663-2012, Emission standard of air pollutants for iron smelt industry [S].

[6] GB 28665-2012, **轧钢工业大气污染物排放标准** [S].
GB 28665-2012, Emission standard of air pollutants for iron smelt industry [S].

[7] 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 [J]. Science of the Total Environment, 2019, **676**: 18-30.

[8] Zheng B, Tong D, Li M, *et al*. Trends in China's anthropogenic emissions since 2010 as the consequence of clean air actions [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018, **18**(19): 14095-14111.

[9] 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 [J]. Science of the Total Environment, 2016, **559**: 7-14.

[10] 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 [J]. Aerosol and Air Quality Research, 2015, **15**(4): 1422-1432.

[11] Zhao B, Wang S X, Liu H, *et al*. NO_x emissions in China: historical trends and future perspectives [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, **13**(19): 9869-9897.

[12] Tang X L, Zhang Y, Yi H H, *et al*. Development a detailed inventory framework for estimating major pollutants emissions inventory for Yunnan Province, China [J]. Atmospheric

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Environment, 2012, **57**: 116-125.

[13] Lei Y, Zhang Q, He K B, *et al*. Primary anthropogenic aerosol emission trends for China, 1990-2005 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, **11**(3): 931-954.

[14] Zhang Q, Streets D G, Carmichael G R, *et al*. Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission [J]. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, 2009, **9**(1): 4081-4139.

[15] Ohara T, Akimoto H, Kurokawa J, *et al*. An Asian emission inventory of anthropogenic emission sources for the period 1980–2020 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2007, **7**(16): 4419-4444.

[16] Streets D G, Bond T C, Carmichael G R, *et al*. An inventory of gaseous and primary aerosol emissions in Asia in the year 2000 [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2003, **108**(D21): 8809.

[17] Acciai C, Zhang Z Y, Wang F J, *et al*. Characteristics and source analysis of trace elements in $PM_{2.5}$ in the urban atmosphere of Wuhan in Spring [J]. Aerosol and Air Quality Research, 2017, **17**(9): 2224-2234.

[18] Di Gilio A, Ventrella G, Giungato P, *et al*. An intensive monitoring campaign of PAHs for assessing the impact of a steel plant [J]. Chemosphere, 2017, **168**: 171-182.

[19] **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** [J]. **中国环境科学**, 2017, **37**(5): 1684-1692.
Bo X, Xu J, Du X H, *et al*. Impacts assessment of steel plants on air quality over Beijing-Tianjin-Hebei area [J]. China Environmental Science, 2017, **37**(5): 1684-1692.

[20] Jia J, Cheng S Y, Yao S, *et al*. Emission characteristics and chemical components of size-segregated particulate matter in iron and steel industry [J]. Atmospheric Environment, 2018, **182**: 115-127.

[21] Song Y, Zhang M S, Cai X H. PM_{10} modeling of Beijing in the winter [J]. Atmospheric Environment, 2006, **40**(22): 4126–4136.

[22] Tan J N, Zhang Y, Ma W C, *et al*. Impact of spatial resolution on air quality simulation: A case study in a highly industrialized area in Shanghai, China [J]. Atmospheric Pollution Research, 2015, **6**(2): 322-333.

[23] Huang R J, Zhang Y L, Bozzetti C, *et al*. High secondary aerosol contribution to particulate pollution during haze events in China [J]. Nature, 2014, **514**(7521): 218-222.

[24] Tan J H, Zhang L M, Zhou X M, *et al*. Chemical characteristics and source apportionment of $PM_{2.5}$ in Lanzhou, China [J]. Science of the Total Environment, 2017, **601-602**: 1743-1752.

[25] **段文娇, 郎建垒, 程水源, 等. 京津冀地区钢铁行业污染物排放清单及对 $PM_{2.5}$ 影响** [J]. **环境科学**, 2018, **39**(4): 1445-1454.
Duan W J, Lang J L, Cheng S Y, *et al*. Air pollutant emission inventory from iron and steel industry in the Beijing-Tianjin-Hebei region and its impact on $PM_{2.5}$ [J]. Environmental Science, 2018, **39**(4): 1445-1454.

[26] **中华人民共和国生态环境部. 钢铁行业应实施自动监控系统的主要大气污染源点位清单** [EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgth/201408/W020140813421435564878.pdf.

[27] **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** [J]. **环境污染与防治**, 2017, **39**(5): 578-582.
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 [J]. Environmental Pollution & Control, 2017, **39**(5): 578-582.

[28] **伯鑫, 何友江, 商国栋, 等. 基于 CEMS 全国污染源清单数据库系统开发与应用** [J]. **环境工程**, 2014, **32**(8): 105–108, 113.
Bo X, He Y J, Shang G D, *et al*. Development and application of the national pollutant emission inventory database system with CEMS [J]. Environmental Engineering, 2014, **32**(8): 105–108, 113.

[29] **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** [J]. **中国环境科学**, 2015, **35**(8): 2554-2560.
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 [J]. China Environmental Science, 2015, **35**(8): 2554-2560.

[30] DB 37/990-2013, **山东省钢铁工业污染物排放标准** [S].

[31] DB 13/2169-2015, **钢铁工业大气污染物排放标准** [S].
DB 13/2169-2015, Emission standard of air pollutants for iron and steel industry [S].

[32] **张革. 钢铁企业颗粒物排放特性的研究** [D]. **沈阳: 东北大学**, 2015.
Zhang G. Emission characteristics of particulate matter of steel plants [D]. Shenyang: Northeastern University, 2015.

[33] **贺克斌. 城市大气污染物排放清单编制技术手册** 2017 [R]. **北京: 清华大学环境学院**, 2017.

[34] **雷宇. 中国人为源颗粒物及关键化学组分的排放与控制研究** [D]. **北京: 清华大学**, 2008.
Lei Y. Research on anthropogenic emissions and control of primary particles and its key chemical components [D]. Beijing: Tsinghua University, 2008.

[35] **温杰, 杨佳美, 李蒲, 等. 我国典型钢铁行业主要工艺环节排放颗粒物源成分谱特征** [J]. **环境科学**, 2018, **39**(11): 4885-4891.
Wen J, Yang J M, Li P, *et al*. Chemical source profiles of PM emitted from the main processes of the iron and steel industry in China [J]. Environmental Science, 2018, **39**(11): 4885-4891.

[36] **孙威, 黄学敏, 李培. 钢铁企业原料场扬尘污染估算** [J]. **环境科学与管理**, 2009, **34**(9): 178-179.
Sun W, Huang X M, Li P. The assessment of iron and steel enterprises' raw materials field [J]. Environmental Science and Management, 2009, **34**(9): 178-179.

[37] **郭健, 刘善军, 黄宪江. 某钢铁企业颗粒物无组织排放核算与监测对比分析** [J]. **环境保护科学**, 2017, **43**(3): 14-18.
Guo J, Liu S J, Huang X J. Comparison analysis of accounting and monitoring of particulates fugitive emissions from an iron and steel enterprise [J]. Environmental Protection Science, 2017, **43**(3): 14-18.

[38] **郭健, 马召坤, 李蕾, 等. 钢铁企业无组织排放特征污染物的监测分析** [J]. **中国环境管理**, 2016, **8**(1): 97-102.
Guo J, Ma Z K, Li L, *et al*. Monitoring and analysis on characteristic pollutants of fugitive emission in iron and steel enterprises [J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2016, **8**(1): 97-102.

[39] 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 [J]. Nature Energy, 2019, **4**(11): 929–938.

[40] Zhao Y, Nielsen C P, Lei Y, *et al*. Quantifying the uncertainties of a bottom-up emission inventory of anthropogenic atmospheric pollutants in China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, **11**(5): 2295-2308.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[41] Liu F, Zhang Q, Tong D, *et al*. High-resolution inventory of technologies, activities, and emissions of coal-fired power plants in China from 1990 to 2010 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, **15**(23): 13299-13317.

[42] Chen L H, Sun Y Y, Wu X C, *et al*. Unit-based emission inventory and uncertainty assessment of coal-fired power plants [J]. Atmospheric Environment, 2014, **99**: 527-535.

[43] Bo X, Xue X D, Xu J, *et al*. Aviation's emissions and contribution to the air quality in China [J]. Atmospheric Environment, 2019, **201**: 121-131.

[44] **清华大学. 中国多尺度排放清单模型**(MEIC) [EB/OL]. https://www.bnu.edu.cn/xzdt/86984.htm, 2018-04-03.
Tsinghua University, Multi-resolution emission inventory of China (MEIC) [EB/OL]. https://www.bnu.edu.cn/xzdt/86984.htm, 2018-04-03.

[45] **任重培, 朱天乐, 朱廷钰, 等. 烧结过程 NO_x 和 SO_2 形成规律及烧结料组成对 NO_x 排放的影响** [J]. **环境科学**, 2014, **35**(10): 3669-3673.
Ren Z P, Zhu T L, Zhu T Y, *et al*. NO_x and SO_2 formation in the sintering process and influence of sintering material composition on NO_x emissions [J]. Environmental Science, 2014, **35**(10): 3669-3673.

[46] Guo Y Y, Gao X, Zhu T Y, *et al*. Chemical profiles of PM emitted from the iron and steel industry in northern China [J]. Atmospheric Environment, 2017, **150**: 187-197.

[47] Zhao B, Wang P, Ma J Z, *et al*. A high-resolution emission inventory of primary pollutants for the Huabei region, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012, **12**(1): 481-501.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net