中国钢铁行业排放清单及大气环境影响研究

汤 铃[1,2],贾 敏[1,3],伯 鑫[3*],薛晓达[2,3],郭 静[2,3],田 军[4],黄满堂[4],王 彤[5],崔 磊[6],董广霞[7*] (1.北京化工大学经济管理学院,北京 100029；2.北京航空航天大学经济管理学院,北京 100191；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,江苏 南京 210093；5.陕西省环境调查评估中心,陕西 西安 710000；6.中圣环境科技发展有限公司,陕西 西安 710000；7.中国环境监测总站,北京 100012)

摘要: 自下而上建立 2018 年中国高分辨率钢铁企业大气污染物排放清单(HSEC,2018),定量模拟中国钢铁企业 2018 年和未来年情景下排放各种大气污染物对环境的影响情况.结果表明:2018 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、氟化物分别为 29.02 万 t、66.57 万 t、28.73 万 t、11.69 万 t、2.24kg、89.21 万 t、4057.49 万 t、0.45 万 t、0.61 万 t、0.06 万 t、0.88 万 t,焦化、烧结、球团、高炉 4 个铁前工序是中国钢铁行业大气污染物主要排放环节,中国钢铁行业对各省份 SO_2、NO_x、$PM_{2.5}$ 年均浓度贡献比例平均值分别为 2.85%、3.37%、1.54%;未来年,中国钢铁企业 SO_2、NO_x、PM_{10} 排放量分别为 4.94 万 t、7.58 万 t、4.11 万 t,分别下降了 82.98%、88.61%、85.69%,中国钢铁行业对各省份 SO_2、NO_x、$PM_{2.5}$ 年均浓度贡献比例平均值分别为 0.31%、0.22%、0.02%.

关键词: 排放清单；钢铁；大气污染；CAMx；$PM_{2.5}$

中图分类号: X51 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2020)04-1493-14

DOI:10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2020.0167

High resolution emission inventory and atmospheric environmental impact research in Chinese iron and steel industry.

TANG Ling[1,2], JIA Min[1,3], BO Xin[3*], XUE Xiao-da[2,3], GUO Jing[2,3], TIAN Jun[4], HUANG Man-tang[4], WANG Tong[5], CUI Lei[6], DONG Guang-xia[7*] (1.School of Economics and Management, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China；2.School of Economics and Management, Beihang University, Beijing 100191, China；3.Appraisal Center 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.Shaanxi Environmental Investigation and Assessment Center, Xian 710000, China；6.Zhongsheng Environmental Technology Development Co., Ltd, Xian 710000, China；7.China National Environmental Monitoring Centre, Beijing 100012, China). *China Environmental Science*, 2020,40(4)：1493~1506

Abstract：In this study, a high-resolution steelmaking plants emission inventory for China (HSEC, 2018) was established to quantitatively simulate the environmental impact of various atmospheric pollutants emitted by Chinese iron and steel plants in 2018 and in the future years. The results showed that in 2018, the total emissions of SO_2, NO_x, PM_{10}, $PM_{2.5}$, PCDD/Fs, VOCs, CO, BC, OC, EC and fluoride were 290.2kt, 665.7kt, 287.3kt, 116.9kt, 2.24kg, 892.1kt, 40,574.9kt, 4.5kt, 6.1kt, 0.6kt and 8.8kt, respectively. Coking, sintering, pelletizing and blast furnace are the primary emission sources in Chinese iron and steel industry. Furthermore, Chinese iron and steel industry contributed 2.85%, 3.37% and 1.54%, respectively, to the average annual concentrations of SO_2, NO_x and $PM_{2.5}$ in each province. In the future situation, the emissions of SO_2, NO_x and $PM_{10}$from China's iron and steel plants will be 49.4kt, 75.8kt and 41.1kt respectively, decreasing by 82.98%, 88.61% and 85.69%, respectively. The corresponding contributions of Chinese iron and steel industry to the annual average concentration of SO_2, NO_x and $PM_{2.5}$in each province will be 0.31%, 0.22% and 0.02% in this case, respectively.

Key words：emission inventory；iron and steel；air pollution；CAMx；$PM_{2.5}$

近年来中国粗钢产量迅猛增长,1996~2018 年中国粗钢产量从 1.01 亿 t 增长到 9.28 亿 t[1],年均增长率 10.60%,截至 2018 年达世界总产量 51.33%.中国钢铁行业产量的高速增长带来严重的环境污染,并且已成为人民群众和政府重点关注问题之一.自 2018 年,中国钢铁行业逐步引入超低排放标准[2-3],进一步加严钢铁行业排放浓度限值,全面控制大气污染物排放总量.针对重点排放区域钢铁企业,如京津冀及周边地区[4],中国提出全面淘汰落后产能、推动大气污染防治、加快超低改造进程等要求.因此,

收稿日期：2019-09-26

基金项目：国家重点实验室开放基金资助课题(16K01ESPCT);国家重点研发计划项目(2016YFC0208101);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)

* 责任作者, 伯鑫, 高级工程师, boxinet@gmail.com; 董广霞, 正高级工程师, Donggx@cnemc.cn

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

为了准确评估政策管控下中国钢铁行业的排放现状和未来减排潜力,开展最新中国钢铁行业大气污染物排放清单研究,分析钢铁行业大气污染物区域传输过程至关重要.

国内外学者针对中国钢铁行业大气污染物排放清单、大气环境影响等方面展开一系列研究.在排放清单方面,现有研究分别从区域[5-10]和全国[11-19]维度估算中国钢铁行业排放总量,主要采用排放因子法核算 2000~2015 年中国钢铁行业排放量,缺少最新的、全国尺度的排放清单研究.另外,现有研究较多采用固定的、过时的(2013 年之前)排放因子,无法准确反映控制水平加严下,中国钢铁行业排放现状.在大气环境影响方面,现有研究主要围绕部分区域内钢铁行业大气污染排放对环境空气质量影响展开[20-22],缺少全国尺度空气质量影响研究,无法全面反映中国钢铁行业排放对大气环境影响水平.另外,现有研究缺少针对中国钢铁行业现状情景下和超低改造情景下对各省、各重点区域的空气质量贡献程度分析,无法为未来钢铁行业大气环境管理、钢铁企业布局、应急减排等提供依据.

为解决上述问题,本研究首先基于中国钢铁行业在线监测数据(CEMS),建立中国钢铁行业大气污染物排放因子数据库,其次结合环境统计数据,自下而上建立了 2018 年中国高分辨率钢铁行业大气污染物排放清单(HSEC,2018),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.最后,基于以上计算结果,从不同维度 (企业类型、分布区域、生产工序)对钢铁行业排放现状展开分析,并采用 CAMx (Comprehensive Air Quality Model Extensions,综合型空气质量模型)定量分析和模拟中国钢铁企业现状情景(2018 年)、未来年情景下各种大气污染物排放对环境影响情况,为中国大气污染物排污许可、供给侧改革及化解产能等提供数据支持.

1 研究方法

1.1 活动水平

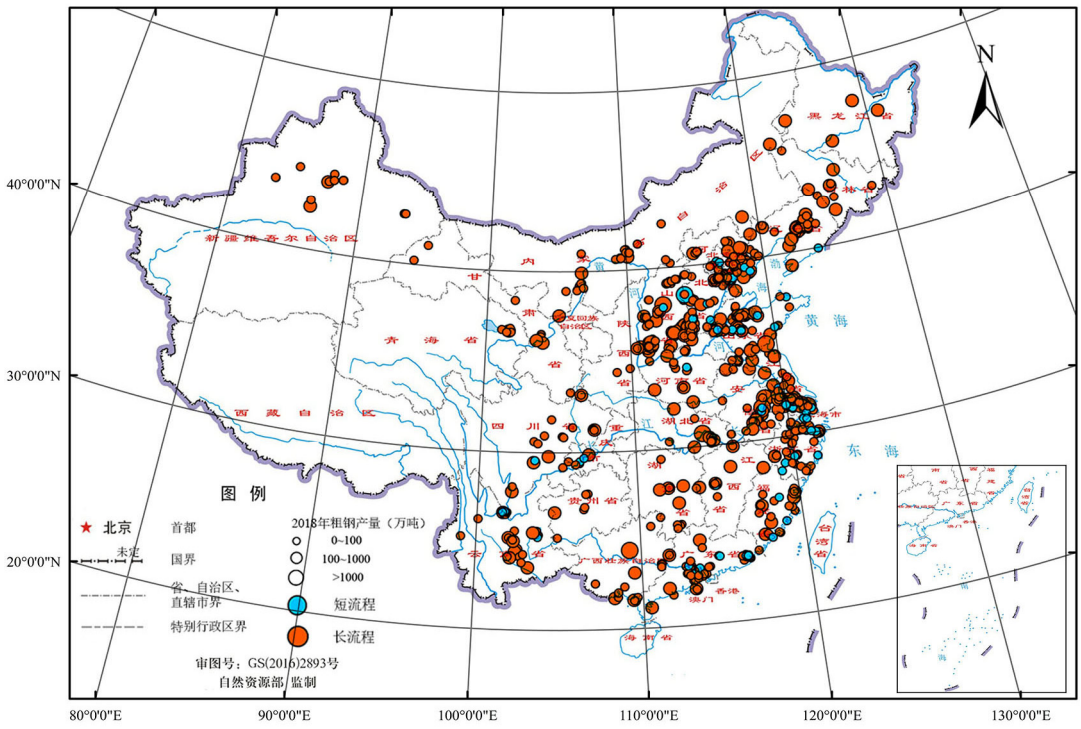


图 1 2018 年中国钢铁企业分布

Fig.1 Distribution map of Chinese iron and steel plants in 2018

本研究活动水平数据主要来源 2018 年生态环境部环境统计数据,研究区域包括中国大陆 29 个省、自治区及直辖市(香港、澳门、台湾、西藏地区暂不考虑).2018 年中国钢铁企业分布情况见图 1.从

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

图可以看出,河北、江苏、山东、辽宁等省份钢铁企业较为集中,呈现出“北重南轻”、“东多西少”的特点.从产量来看,1000 万粗钢产量以下的钢铁企业数量较多.从流程来看,长流程钢铁企业数量较多.

2018 年,本研究共涉及中国 996 家钢铁企业,纳入分析的钢铁企业粗钢产量为 8.95 亿 t,占中国粗钢产量的 96.43%(中国粗钢产量来源于国家统计局);涉及的工艺包括焦炉、烧结、球团、高炉、转炉、电炉、热轧和冷轧.2018 年粗钢产量小于 100 万 t 的钢铁企业数量为 769 家,粗钢总产量为 4565.70 万 t;粗钢产量 100 万~1000 万 t 的钢铁企业数量为 217 家,粗钢总产量为 71275.37 万 t;粗钢产量大于 1000 万 t 的钢铁企业的数量为 10 家,粗钢总产量为 13648.84 万 t.

本研究所有企业位置信息来源生态环境部环境统计数据、环境影响评价报告数据等,为保证空间信息的准确性,本研究采用地址坐标识别技术(Baidu Map API)方法,结合卫星遥感数据和人工目视检验,对企业主要工序的空间位置信息逐个校核.

1.2　排放因子

针对钢铁行业不同工序节点和污染物类型,本研究排放因子数据来源主要有以下 3 种:(1)基于 CEMS 在线监测数据核算排放因子;(2)基于大气污染物排放标准核算排放因子;(3)基于文献调研获取排放因子.

1.2.1　基于 CEMS 的排放因子　本研究 CEMS 数据主要来源为生态环境部生态环境执法局的 CEMS 数据库.截止 2018 年年底,中国钢铁行业 CEMS 数据覆盖了 433 个钢铁企业的 3999 个排口.本研究根据中国钢铁行业 CEMS 数据,核算单个排口及各个省份钢铁行业重点生产工序的 SO_2、NO_x、PM_{10} 排放因子,由于 CEMS 缺少设备规模、环保治理设施等信息,本研究不考虑按设备规模等方法计算排放因子.

按照钢铁行业 CEMS 在线监测设备安装要求[23],本研究分析 CEMS 数据库发现,除国家规定安装 CEMS 节点(焦炉烟囱和烧结机头等),部分钢铁企业在轧钢热处理炉、高炉热风炉等工序安装了 CEMS.因此,本研究 SO_2、NO_x、PM_{10} 的 CEMS 排放因子,综合考虑了焦炉烟囱、烧结机头、烧结机尾、球团焙烧、高炉出铁场、高炉热风炉、转炉二次、电炉、轧钢热处理炉工序.

本研究基于质量控制后的 CEMS 数据[24-26],计算出中国各安装 CEMS 在线监测设备的重要排污节点(焦炉、烧结机头、烧结机尾、球团焙烧、高炉热风炉、高炉出铁场、转炉二次、电炉、轧钢热处理炉)的 SO_2、NO_x、PM_{10} 年均浓度,结合各个排污节点的理论烟气量[27],计算得到各个 CEMS 排口的年排放因子,并通过算术平均计算各个省份的年平均排放因子,见表 1.对于缺少 CEMS 数据的省份污染物排放因子用中国平均值代替.见下式:

$$C_{\mathrm{AVG},f,s,p,j}=\sum_{h}C_{f,s,p,j,h}\Big/\sum_{j}\mathrm{Oph}_{j} \tag{1}$$

$$\mathrm{EF}_{f,s,p,j}=C_{\mathrm{AVG},f,s,p,j}V_{s,p} \tag{2}$$

$$\mathrm{EF}_{f,s,p,n}=\sum_{j}EF_{f,s,p,j}\Big/N_{f,s,p,n} \tag{3}$$

式中:EF 为排放因子,g/kg 产品;C_{AVG} 为排放浓度统计均值,mg/m^3;V 为理论烟气量,m^3/t 产品;f 为不同污染物;p 为不同工序;s 为不同排放源;n 为不同省份;j 为不同排口;h 为第 h 个运行小时;Oph 为纳入分析的监测小时数;N 为样本个数.

表 1　2018 年基于 CEMS 在线监测的各工序污染物排放因子(kg/t)

Table 1　Emission factors of each emission process based on CEMS in 2018 (kg/t)

省份	排放因子(kg/t)																		
	烧结				球团			焦化			高炉				转炉二次	电炉	轧钢		
	机头			机尾	焙烧			焦炉烟囱			出铁场	热风炉							
	PM_{10}	SO_2	NO_x	PM_{10}	PM_{10}	SO_2	NO_x	PM_{10}	SO_2	NO_x	PM_{10}	PM_{10}	SO_2	NO_x	PM_{10}	PM_{10}	PM_{10}	SO_2	NO_x
上海	0.03	0.014	0.228	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
贵州	0.069	0.045	0.535	0.024	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0.011	–	–	–
福建	0.029	0.098	0.503	0.013	0.036	0.236	0.047	–	–	–	0.026	–	–	–	0.016	0.003	–	–	–
河北	0.033	0.105	0.403	0.006	0.024	0.098	0.051	0.012	0.021	0.225	0.013	0.006	0.023	0.013	0.008	0.004	0.005	0.044	0.063
天津	0.027	0.109	0.461	0.007	0.009	0.061	0.122	–	–	–	0.014	0.002	0.057	0.06	0.007	0.006	0.005	0.005	0.118
浙江	0.037	0.111	0.362	0.007	0.015	0.083	0.035	0.019	0.044	0.515	0.017	–	–	–	–	–	–	–	–
山东	0.018	0.116	0.529	0.007	0.016	0.079	0.112	0.02	0.041	0.445	0.017	0.009	0.063	0.013	0.011	–	0.006	0.012	0.105

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

续表 1

省份	排放因子(kg/t)																		
	烧结				球团			焦化			高炉				转炉二次	电炉	轧钢		
	机头			机尾	焙烧			焦炉烟囱			出铁场	热风炉							
	PM_{10}	SO_2	NO_x	PM_{10}	PM_{10}	SO_2	NO_x	PM_{10}	SO_2	NO_x	PM_{10}	PM_{10}	SO_2	NO_x	PM_{10}	PM_{10}	PM_{10}	SO_2	NO_x
山西	0.037	0.126	0.358	0.01	0.018	0.137	0.028	0.02	0.042	0.295	0.018	0.005	0.028	0.031	0.009	–	0.005	0.053	0.135
安徽	0.034	0.138	0.492	0.007	0.038	0.155	0.027	–	–	–	0.022	–	–	–	0.012	–	–	–	–
陕西	0.05	0.138	0.5	0.004	0.023	0.108	0.11	–	–	–	–	0.006	0.069	0.05	–	–	0.007	0.039	0.173
黑龙江	0.035	0.141	0.331	0.01	0.053	0.168	0.025	–	–	–	0.015	–	–	–	–	–	0.002	0.012	0.128
江苏	0.037	0.143	0.477	0.008	0.032	0.097	0.036	0.014	0.028	0.328	0.016	0.007	0.054	0.055	0.006	0.002	0.002	0.045	0.069
河南	0.045	0.155	0.485	0.01	0.033	0.15	0.095	0.014	0.009	0.14	0.021	0.011	0.039	–	0.013	0.009	0.013	0.075	0.072
吉林	0.043	0.162	0.384	0.02	0.028	0.206	0.138	0.023	0.029	0.479	0.022	–	–	–	0.013	–	–	–	–
广东	0.049	0.164	0.494	0.018	0.02	0.006	0.349	0.004	0.014	0.162	0.009	–	–	–	–	–	–	–	–
云南	0.061	0.167	0.51	0.016	0.036	0.125	0.294	–	–	–	0.033	0.009	0.029	0.035	0.018	–	–	–	–
甘肃	0.059	0.168	0.337	0.015	0.023	0.225	0.057	0.012	0.055	0.027	0.017	–	–	–	–	0.017	–	–	–
江西	0.062	0.173	0.532	0.011	0.051	0.165	0.071	0.016	0.043	0.318	0.024	–	–	–	0.013	–	–	–	–
辽宁	0.053	0.196	0.429	0.01	0.024	0.175	0.15	0.027	0.033	0.335	0.02	–	–	–	0.015	–	–	–	–
湖南	0.059	0.2	0.415	0.017	0.054	0.077	0.252	0.009	0.015	0.025	0.033	–	–	–	–	0.013	–	–	–
湖北	0.046	0.216	0.541	0.014	0.043	0.268	0.252	–	–	–	–	0.008	0.037	0.007	–	0.009	–	–	–
新疆	0.034	0.23	0.359	0.009	0.043	0.192	0.164	0.026	0.077	0.724	0.014	0.006	0.04	0.037	0.01	0.017	0.007	0.046	0.028
重庆	0.058	0.266	0.394	–	–	–	–	–	–	–	–	0.003	0.032	0.099	–	–	–	–	–
四川	0.059	0.276	0.398	0.014	0.066	0.211	0.16	0.036	0.079	0.355	0.028	–	–	–	0.013	–	–	–	–
内蒙古	0.053	0.287	0.396	0.015	–	–	–	0.022	0.048	0.518	0.019	–	–	–	–	–	–	–	–
广西	0.063	0.679	0.554	–	0.045	0.141	0.124	0.011	0.072	0.404	–	0.014	0.065	0.023	–	–	–	–	–
中国	0.039	0.153	0.435	0.009	0.028	0.122	0.083	0.018	0.036	0.319	0.017	0.006	0.04	0.037	0.01	0.01	0.005	0.03	0.104

1.2.2 基于大气污染物排放标准的排放因子 按照国家要求,对于不需要安装 CEMS 设备的其他工序排口,如烧结燃料破碎、配料和整粒及成品筛分、球团配料和整粒、焦化备煤、装煤、推焦和熄焦、高炉矿槽、转炉铁水预处理、转炉一次和地下料仓节点,则根据钢铁行业国家排放标准[28-32]的新建企业执行标准选取浓度值,其中河北省、山东省钢铁企业则根据地方排放标准[33-34]选取当前执行标准浓度值.最后,结合理论烟气量,计算中国钢铁行业其他工序排口的排放因子.

表 2 $PM_{2.5}$ 占 PM_{10} 比例(%)

Table 2 The 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[35]	机头	56.07[35]		出铁场	62.94[35]	倒灌及预处理	45.06[35]		
筛分机转运、备煤	37.78[35]	机尾	51.11[35]	43.37[36]	高炉矿槽	15.27[35]	转炉二次烟气	56.68[35]	74.14[36]	62.51
装煤及推焦	40.97[35]	配料	36.62[35]		其他	62.51[36]	转炉一次烟气	71.43[36]		
焦炉烟囱	40.97[35]	成品整粒	38.63[35]		–	–	地下料仓	71.43[36]		

表 3 2018 年不同工序的污染物排放因子

Table 3 Emission factors from different processes in 2018

污染物	PCDD/Fs(ng I-TEQ/t)	VOCs (kg/t)	CO (kg/t)	BC (%)	OC (%)	EC (%)	F (kg/t)
焦化	160.09	2.96[36]	1.6[36]	30[37]	35[37]	–	–
烧结	1582.95	0.25[36]	16[36]	1[37]	2.2[38]	0.4[38]	0.0028
球团	279.66	0.25[36]	0.064	1[37]	2.2[38]	0.4[38]	0.0009
高炉	2	–	15.29[36]	10[37]	6.2[38]	0.8[38]	–
转炉	277.47	0.06[36]	8.75[36]	1.175	8.8[38]	0.7[38]	0.0063
电炉	1245.85	0.06[36]	9[36]	14.19	8.8[38]	0.7[38]	0.0031
热轧	–	0.3[39]	1.28[36]	1.175	8.8	0.7	–
冷轧	–	0.062[12]	–	–	–	–	–

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

1.2.3　基于文献调研的排放因子　本研究其他污染物是指 BC、OC、EC、PCDD/Fs、VOC、CO、F, $PM_{2.5}$ 的排放量主要根据 PM_{10} 的排放量以及 PM_{10} 中 $PM_{2.5}$ 的质量百分含量计算,PM_{10} 中 $PM_{2.5}$ 的质量百分含量来源于文献调研,见表 2.通过国内外文献及参考资料调研,综合国内外的研究成果,获取钢铁行业各工序特征污染物排放因子(BC、OC、EC、PCDD/Fs、VOCs、CO、F).相关排放因子见表 3.

1.3　排放量计算

通过各工序环节污染物排放因子,结合焦化、烧结、高炉、转炉、电炉、轧钢等工序的产量、区域等信息,按照自下而上的方法,计算得到 2018 年中国各家企业各工序污染源的排放信息.排放量计算基本公式如下[40-42]:

$$E_f = \sum_n \sum_i \mathrm{AC}_{n,i,p} \mathrm{EF}_{f,s,p,n} \tag{4}$$

式中:E 为排放量,t/a;AC 为环境统计产品产量,t/a;i 为不同企业.

1.4　模拟模型

本研究的其他人为源排放清单综合考虑了 MEIC2016[43],将本研究的钢铁排放清单(HSEC, 2018)从 MEIC2016 年的背景工业源排放清单中分离出来,避免模式模拟过程中重复计算钢铁行业排放量贡献.

本研究气象模拟选用新一代中尺度气象模式 WRF(天气研究和预报模型)V3.8,采用完全可压缩的非静力方程、水平方向采用 Arakawa C 格点方案和垂直方向采用地形跟随质量坐标,选取的中心经纬度为(35°N,102°E),垂直共分为 31 层,最高层为 50hpa,主要模拟参数及嵌套网格设置见表 4.WRF 地形和地表类型数据采用美国地质调查局 USGS 全球数据,其中数字高程数据选用 SRTM3,精度约为 90m.

钢铁行业大气污染模拟,采用区域空气质量模型 CAMx 模拟[44-45],钢铁行业对不同区域污染物贡献,在计算主要大气污染物年均浓度贡献时,本研究以各省市的空气质量国控站点作为区域代表,通过计算钢铁行业大气污染物排放对全国各个空气质量国控站点的年均贡献度,再按省市范围对各国控站点的年均贡献进行算术平均,从而得到钢铁行业对各省市的大气污染物年均贡献度.另外,本次模拟时段选定为 2018 年的 1 月、4 月、7 月、10 月,模拟区域覆盖整个中国地区,模式网格水平分辨率为 36km.

表 4　CAMx 模式参数设置

Table 4　CAMx model parameter setting

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

2　结果与讨论

2.1　2018 年中国钢铁行业排放量分析

2018 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、F 分别为 29.02 万 t、66.57 万 t、28.73 万 t、11.69 万 t、2.24kg、89.21 万 t、4057.49 万 t、0.45 万 t、0.61 万 t、0.06 万 t、0.88 万 t.从图 2 可以看出,从企业规模维度,中型(粗钢产量 100 万 t~1000 万 t)钢铁企业各项大气污染物排放总量占比最大,平均达 71.20%,其次是小型(粗钢产量小于 100 万 t)钢铁企业(16.73%),大型(粗钢产量大于 1000 万 t)钢铁企业排放量最小(12.07%).这主要与企业产品产量相关,特别是中型企业 2018 年粗钢产量占比达 79.65%.此外,小型企业虽然企业数量最多(769 家),污染物排放量大于大型企业,但粗钢产量却最低(仅占总产量的 5.10%),而大型企业虽然数量少(10 家),但粗钢产量占比达 15.25%,这主要与企业空间分布相关.本研究发现,大型企业多分布于河北、山东和江苏等管控严格的东部、北部地区;而小型企业 27.15% 的粗钢产量均来自于四川、重庆和甘肃等欠发达的西南、西北部地区,这说明小型钢铁企业存在部分高耗能、高排放、高污染、低产能的落后企业,增加了小型企业排放绩效水平.进一步表明,钢铁企业大型化、严管控可进一步推动中国钢铁行业大气污

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

染物减排.

2018 年中国各省(直辖市)钢铁企业排放和空间分布情况见图 3.从区域排放量角度分析, 截止 2018 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(全国占比)分别为 5.14 万 t(17.69%)、3.00 万 t(10.32%)、2.95 万 t(10.17%);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 13.40 万 t(20.13%)、7.55 万 t(11.34%)、7.15 万 t(10.75%); PM_{10} 排放量较大的 3 个省份是河北、江苏和辽宁,排放量分别为 5.44 万 t(18.94%)、3.15 万 t(10.96%)、2.68 万 t(9.33%).这主要与河北、江苏、山东和辽宁较高的活动水平相关(占全国粗钢产量的 53.13%). 河北省各项大气污染物排放总量占比最高,平均达 20.51%,这与河北省粗钢产量大(占全国总产量的 25.01%)、企业数量多(占企业总数的 20.78%)的现状相吻合.另外,唐山市和邯郸市是河北省主要钢铁生产地和污染物排放源,其粗钢产量占河北总产量 71.49%,污染物排放占比达 68.65%;日照市和莱芜市是山东主要钢铁生产地和污染物排放源,其粗钢产量占山东总产量 50.23%,污染物排放占比达 55.30%; 苏州市和南京市是江苏主要钢铁生产地和污染物排放源,其粗钢产量占江苏总产量 50.05%,污染物排放占比达 52.94%;鞍山市和营口市是辽宁主要钢铁生产地和污染物排放源,其粗钢产量占辽宁总产量 54.72%,污染物排放占比达 56.80%.由此,应重点关注河北、山东和辽宁等产能密集分布区域、重点排放区域,优化产业布局,进一步淘汰落后产能,大幅降低污染排放.

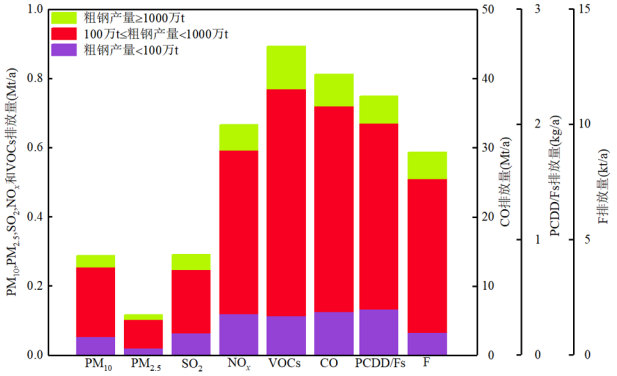
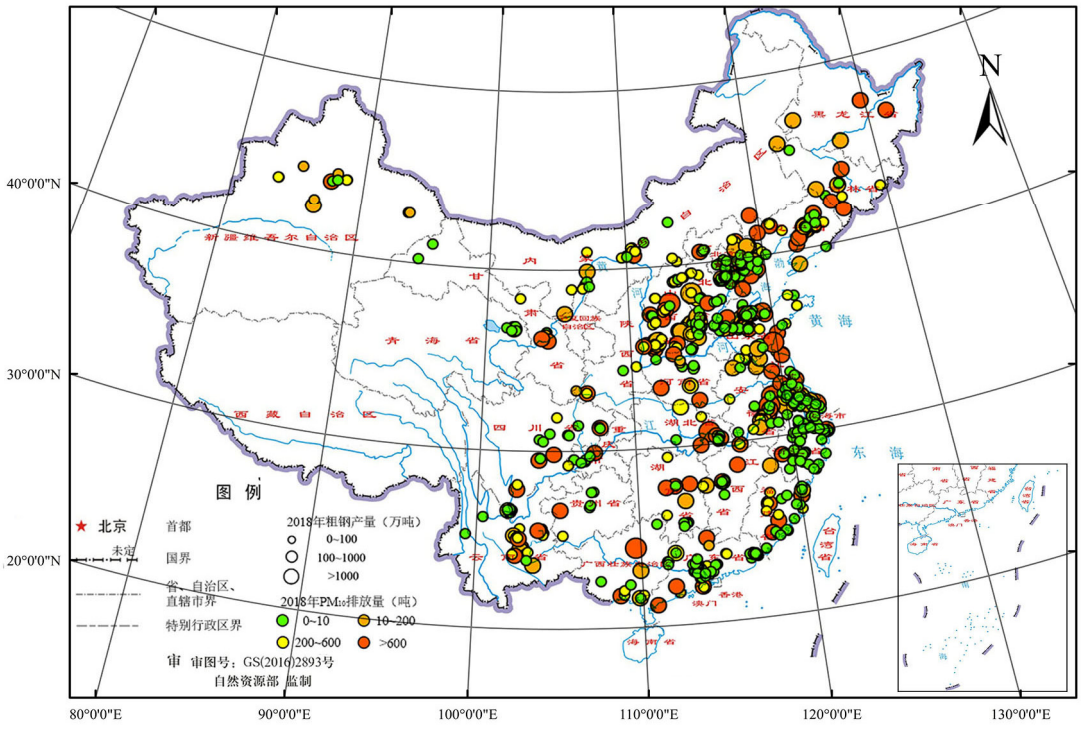


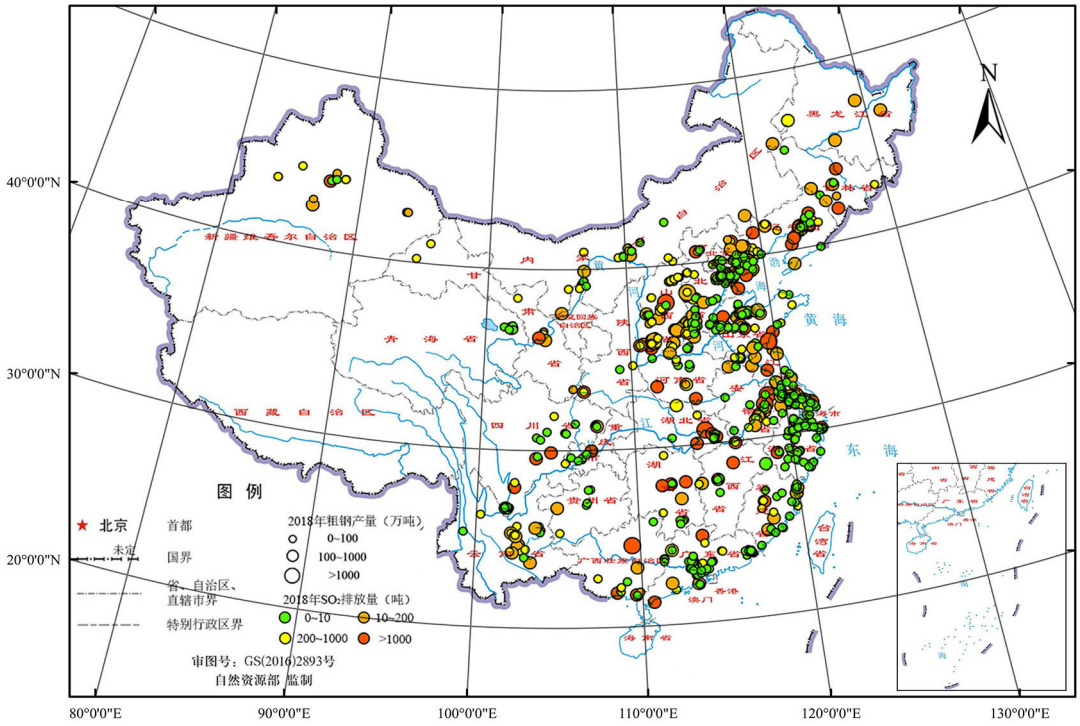
图 2 2018 年中国钢铁行业大气污染物排放量

Fig.2 Emissions of air pollutants from Chinese iron and steel industry in 2018

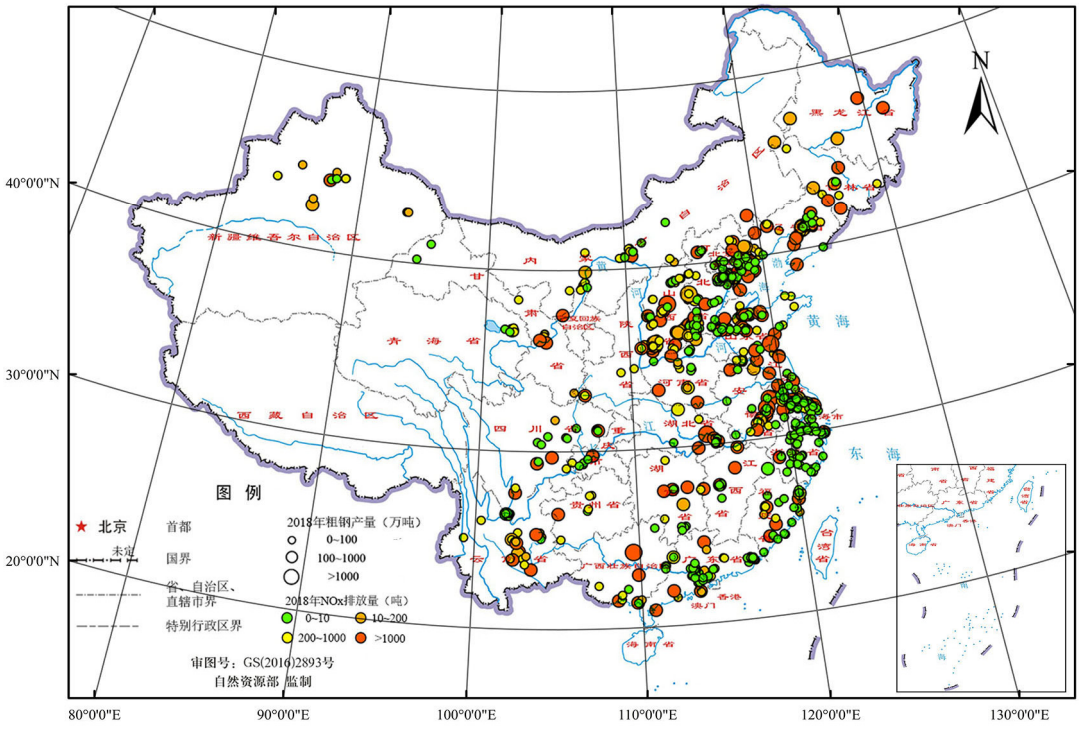


(1)PM_{10}

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



(2)SO_2



(3)NO_x

图 3　2018 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 2018

另外,本文通过各个省份主要污染物(SO_2、NO_x、PM_{10})排放绩效值核算,反映不同省份污染物排放强度水平.具体见式(5).结果表明,SO_2 排放绩效值较大的省份是宁夏(1.93kg/t)、内蒙古(1.20kg/t),NO_x 排放绩效值较大的省份是宁夏(5.41kg/t)、内蒙古(1.53kg/t),PM_{10} 排放绩效值较大的省份是宁夏(1.77kg/t)、内蒙古(0.89kg/t),具体见图 4.从图 4 可知,对于河北、江苏、山东等钢铁产能大省,虽然大气污

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

染物排放总量大,但排放绩效控制较好,其中, SO_2、NO_x、PM_{10} 排放绩效值分别在 0.23~0.44kg/t、0.60~0.95kg/t、0.24~0.39kg/t 之间,远低于宁夏、内蒙古等地区.这主要由于我国近年来对河北、山东、辽宁等重点钢铁生产区域的管理控制水平加强,尤其是在河北和山东实施了更为严格的地方排放标准,有效降低了排放强度水平.相反,甘肃、内蒙古、宁夏等省份大气污染控制水平较差,污染物排放绩效值较大,进一步说明未来中国钢铁行业大气污染减排应关注西部等欠发达地区,加大管控力度,降低西部地区排放强度水平.

$$EP_{n,f}=E_{n,f}/AC_{CS,n} \quad (5)$$

式中:EP 为排放绩效值, kg/t 粗钢产量;AC_{CS} 为粗钢产量,t.

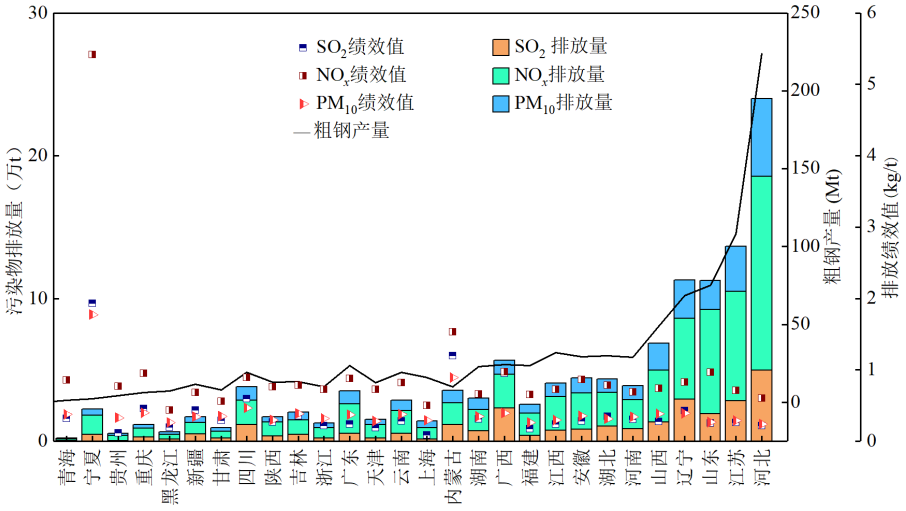


图 4 中国钢铁行业大气污染物排放绩效值

Fig.4 Emission performance value of primary pollutants from Chinese iron and steel plants

从各工序排放量角度分析,SO_2、NO_x、PM_{10}、$PM_{2.5}$、PCDD/Fs、F 主要的污染源来自烧结工艺,分别为 18.82 万 t、52.40 万 t、15.00 万 t、6.59 万 t、1.85kg、0.33 万 t,分别占总排放量的 64.84%、78.72%、52.21%、56.40%、82.45%、37.14%.烧结工序的高 SO_2 排放可能与铁矿石原料和燃料较高的含硫量相关[4].CO 主要的污染源来自烧结和高炉工艺,分别为 1869.11 和 1293.07 万 t,占工艺总排放量的 46.07%和 31.87%.其中,高炉工序出铁时,可能由于较低的煤气回收率造成大量 CO 排放[4].除此以外,VOCs 主要的污染源来自烧结和焦化工艺,分别为 29.20 和 27.12 万 t,分别占总排放量的 32.74%和 30.40%;BC 主要的污染源来自高炉和焦化工艺,分别为 0.22 和 0.13 万 t,分别占总排放量的 49.53%和 28.53%;OC 主要的污染源来自焦化和烧结工艺,分别为 0.151 和 0.145 万 t,分别占总排放量的 24.68%和 23.77%;EC 主要的污染源来自烧结和高炉工艺,分别为 0.026 万 t 和 0.018 万 t,分别占总排放量的 44.28%和 30.09%.综上分析,由于我国目前仍然以长流程企业为主,因此烧结、球团、焦化、高炉 4 个铁前工序仍是中国钢铁行业大气污染物主要排放环节,未来应进一步加强对铁前工序污染物控制力度,加快长流程企业向短流程企业的转型,扩大电炉炼钢使用范围,从源头降低污染物排放(见图 5).

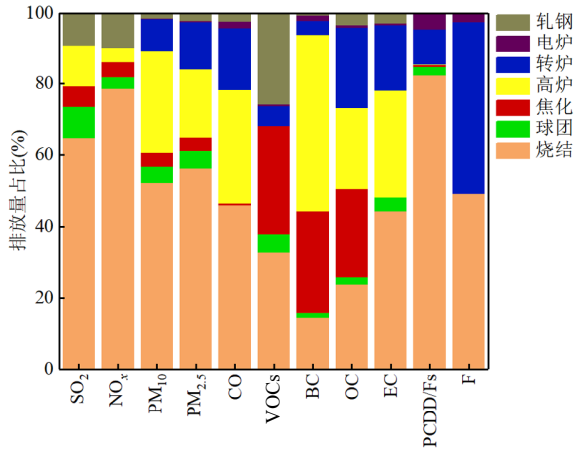


图 5 2018 年中国钢铁不同工序污染物排放量比例

Fig.5 Proportion of emissions among different processes from Chinese iron and steel plants in 2018

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

2.2　2018 年中国钢铁行业大气环境影响分析

2.2.1　模式验证　本研究分别选取了 2018 年上海、南京、唐山、邯郸、临汾的环境空气质量监测数据做验证(均为“2+26”城市、汾渭平原、长三角地区的典型钢铁城市),如表 5 所示.其中南京 PM_{10}、$PM_{2.5}$ 的模拟结果与观测值之间的相关系数 R 达 0.81,模拟效果最好.SO_2、NO_2 模拟效果略差,主要原因可能是模拟采用的清单为 MEIC2016,而实际 2018 年 SO_2 和 NO_2 的排放情况相对于清单更低,导致模拟出现高估的情况.唐山、邯郸、上海、临汾站点也出现类似情况,总体对 $PM_{2.5}$、PM_{10} 模拟效果较好.

表 5　2018 年上海、南京、唐山、邯郸、临汾的环境空气质量监测数据

Table 5　Environmental air quality monitoring data in Shanghai, Nanjing, Tangshan, Handan and Linfen in 2018

地区	评价指标	$PM_{2.5}$	PM_{10}	SO_2	NO_2
上海		0.8	0.68	0.49	0.63
南京		0.81	0.76	0.26	0.43
唐山	*R*	0.69	0.62	0.61	0.49
邯郸		0.73	0.67	0.72	0.54
临汾		0.74	0.63	0.84	0.58
上海		0.34	−0.19	1.22	0.42
南京		0.29	−0.28	0.99	0.18
唐山	FB	0.36	−0.09	0.7	0.17
邯郸		0.02	−0.48	0.39	−0.19
临汾		−0.31	−0.75	−0.05	0.06
上海		0.41	−0.17	3.13	0.53
南京		0.34	−0.24	1.95	0.2
唐山	NMB	0.44	−0.09	1.08	0.18
邯郸		0.02	−0.38	0.49	−0.17
临汾		−0.27	−0.55	−0.05	0.06
上海		0.63	0.46	3.14	0.63
南京		0.59	0.41	2	0.42
唐山	NME	0.44	−0.09	1.08	0.18
邯郸		0.02	−0.38	0.49	−0.17
临汾		−0.27	−0.55	−0.05	0.06
上海		33.4	62.43	10.35	39.68
南京		49.1	95.86	10.4	50.4
唐山	Mean_obs	53.5	95.84	27.68	50.45
邯郸		64.4	131.8	24.22	59.48
临汾		67.5	118.8	48.47	35.84
上海		47	51.58	42.75	60.53
南京		65.6	72.53	30.62	60.64
唐山	Mean_sim	76.9	87.46	57.48	59.54
邯郸		65.9	81.13	36.06	49.36
临汾		49.5	53.77	46.02	37.92

2.2.2　各省贡献分析　表 6 为 2018 年(现状情景下)中国钢铁行业对各省份主要大气污染物年均浓度贡献比例情况.中国钢铁行业对各省份 SO_2、NO_x、$PM_{2.5}$ 年均浓度贡献比例平均值分别为 2.85%、3.37%、1.54%,说明 2018 年钢铁行业对区域污染物浓度贡献最大的是 NO_x.从各省份主要大气污染物浓度贡献比例来看,中国钢铁行业对河北、辽宁等省份主要大气污染物浓度贡献比例较大,这主要与区域大气污染物排放量相关.具体地,钢铁企业排放 SO_2 对区域大气污染贡献比例较高的省份为广西、辽宁、江苏,分别为 10.32%、6.67%、5.98%;排放 NO_x 对区域大气污染贡献比例较高的省份为广西、江西、湖北,分别为 8.30%、7.38%、7.05%;排放 $PM_{2.5}$ 对区域大气污染贡献比例较高的省份为辽宁、河北、上海,分别为 2.99%、2.80%、2.72%.

表 6　现状情景下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(%)

Table 6　The contribution of emissions from national iron and steel plants to annual average pollutants emission concentration in each province (Under current situation) (%)

省份	SO_2 年平均贡献比例 (%)	NO_x 年平均贡献比例 (%)	$PM_{2.5}$ 年平均贡献比例 (%)
北京	2.17	1.66	1.25
天津	3.10	4.25	2.17
上海	2.07	2.74	2.72
重庆	0.41	1.07	0.63
河北	5.31	6.93	2.80
吉林	2.36	1.93	1.45
黑龙江	1.10	0.72	0.76
辽宁	6.67	5.88	2.99
内蒙古	4.18	3.56	1.95
山西	1.73	4.25	1.69
陕西	0.52	0.77	0.65
河南	1.96	2.21	1.30
西藏	0.04	0.00	0.11
甘肃	1.83	1.67	1.11
青海	2.40	2.46	1.15
宁夏	0.89	1.97	1.04
新疆	4.62	3.31	2.33
山东	1.83	3.14	1.44
安徽	5.26	4.10	1.71
湖北	4.30	7.05	1.94
湖南	1.92	3.23	1.48
江苏	5.98	5.12	2.68
浙江	1.77	1.80	1.41
江西	4.84	7.38	2.09
福建	3.32	5.01	1.73
广东	1.26	1.58	1.15
广西	10.32	8.30	1.94
贵州	0.43	2.01	0.72
四川	1.68	1.80	0.77
海南	1.69	2.90	1.19
云南	2.39	5.64	1.48
中国平均	2.85	3.37	1.54

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

图 6 为中国钢铁行业排放大气污染物年均贡献浓度分布情况,可以看出,钢铁行业排放大气污染物年均贡献浓度与 2018 年中国钢铁排放清单分布较为一致,京津冀及周边地区("2+26"区域)年均贡献浓度较高.另外,2018 年中国钢铁行业排放对北京 SO_2、NO_x、$PM_{2.5}$ 年均浓度贡献比例平均值分别为 2.17%、1.66%、1.25%.

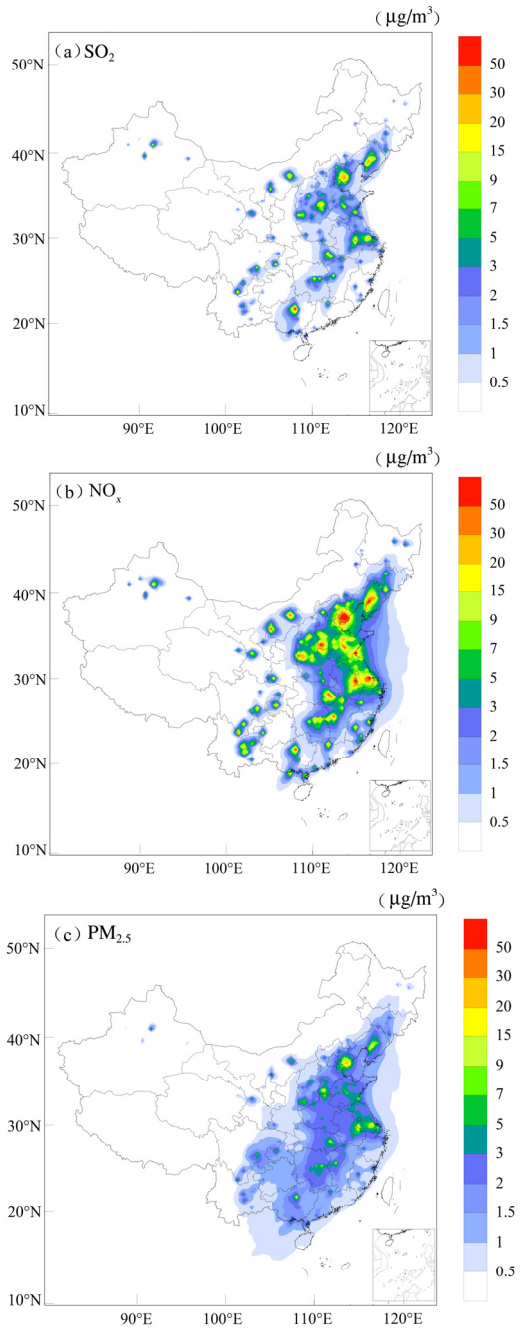


图 6 2018 年中国钢铁行业排放大气污染物年均贡献浓度图

Fig.6 The contribution of emissions from national iron and steel plants to annual average pollutants emission concentration in 2018

2.2.3 "2+26"城市贡献分析 从表 7 中各 "2+26" 城市主要大气污染物浓度贡献比例来看,中国钢铁行业对唐山市、邯郸市、安阳市等城市主要大气污染物浓度贡献比例较大,这与唐山市和邯郸市等地区的高污染物排放占比一致.其中钢铁企业冬季排放 SO_2 对区域大气污染贡献比例较高的城市均为唐山市、邯郸市、安阳市,分别为 9.12%、8.00%、5.10%,排放 NO_x 对区域大气污染贡献比例较高的城市均为唐山市、邯郸市、安阳市,贡献比例分别为 14.31%、11.12%、7.29%,排放 $PM_{2.5}$ 对区域大气污染贡献比例较高的城市均为唐山市、邯郸市、太原市,分别为 4.74%、2.25%、1.85%.

表 7 现状情景下中国钢铁企业排放对 "2+26"各城市主要大气污染物的浓度贡献比例(%)

Table 7 The contribution of emissions from national iron and steel plants to annual average pollutants emission concentration in "2+26" cities(Under current situation) (%)

城市	$PM_{2.5}$ 冬季平均贡献(%)	$PM_{2.5}$ 夏季平均贡献(%)	SO_2 冬季平均贡献(%)	SO_2 夏季平均贡献(%)	NO_x 冬季平均贡献(%)	NO_x 夏季平均贡献(%)
北京市	0.35	1.56	0.90	2.88	0.82	2.22
天津市	0.79	2.50	1.46	3.36	2.18	4.42
石家庄市	1.34	2.67	2.87	4.13	4.50	5.44
唐山市	4.74	8.36	9.12	11.71	14.31	16.92
廊坊市	0.50	2.25	1.22	3.29	1.66	4.01
保定市	0.22	1.34	0.43	1.19	0.84	1.08
沧州市	0.37	1.63	0.76	2.06	1.47	3.15
衡水市	0.38	1.37	0.86	1.19	1.77	1.42
邢台市	0.75	3.06	2.38	7.12	3.90	8.59
邯郸市	2.25	5.27	8.00	12.73	11.12	14.40
太原市	1.85	3.25	2.11	3.44	6.36	8.13
阳泉市	0.48	1.22	0.31	0.55	1.40	1.32
长治市	0.95	1.97	1.60	2.60	4.23	4.68
晋城市	0.88	2.07	1.27	2.43	4.23	5.66
济南市	0.47	1.87	0.80	2.16	1.98	3.48
淄博市	0.76	2.00	1.51	2.25	3.00	3.72
济宁市	0.33	1.37	0.62	0.80	1.49	0.75
德州市	0.33	1.50	0.73	1.98	1.68	3.19
聊城市	0.42	1.26	0.85	1.20	2.02	2.08
滨州市	0.49	1.79	0.97	1.79	2.06	3.13
菏泽市	0.32	1.06	0.72	1.06	1.49	0.71
郑州市	0.37	0.81	0.67	0.68	1.16	0.56
开封市	0.40	1.11	0.86	1.15	1.56	0.81
安阳市	1.71	4.42	5.10	9.42	7.29	10.41
鹤壁市	1.31	2.92	3.82	6.12	5.57	6.55
新乡市	0.56	1.28	1.35	1.44	2.33	1.26
焦作市	0.59	1.33	1.12	1.41	2.44	1.33
濮阳市	0.53	1.25	1.64	1.77	2.73	1.57
区域城市最高	4.74	8.36	9.12	12.73	14.31	16.92

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

中国钢铁行业夏季排放 SO_2 对区域大气污染贡献比例较高的城市为唐山市、邯郸市、安阳市,分别为 12.73%、11.71%、9.42%,排放 NO_x 对区域大气污染贡献比例较高的城市为唐山市、邯郸市、安阳市,分别为 16.92%、14.40%、10.41%,排放 $PM_{2.5}$ 对区域大气污染贡献比例较高的城市为唐山市、邯郸市、安阳市,分别为 8.36%、5.27%、4.42%.

2018 年,中国钢铁行业对“2+26”区域污染物浓度贡献最大的是 NO_x,需加强钢铁企业 NO_x 前体物控制;钢铁行业大气污染物浓度贡献比例较高的区域主要集中在以唐山、邯郸、安阳为中心的区域.

2.3　未来年(产业结构调整并全面超低情景)钢铁对区域污染物浓度贡献分析

表 8　未来年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(%)

Table 8　The contribution of emissions from national iron and steel plants to annual average pollutants emission concentration in each province in the future (%)

省份	SO_2 年平均贡献比例(%)	NO_x 年平均贡献比例(%)	$PM_{2.5}$ 年平均贡献比例(%)
北京	0.38	0.22	0.05
天津	0.54	0.52	0.10
上海	0.37	0.33	0.08
重庆	0.07	0.13	0.04
河北	0.95	0.86	0.14
吉林	0.41	0.24	0.08
黑龙江	0.19	0.10	0.05
辽宁	1.20	0.73	0.14
内蒙古	0.75	0.44	0.12
山西	0.30	0.52	0.08
陕西	0.10	0.10	0.06
河南	0.34	0.27	0.07
西藏	0.01	0.00	0.02
甘肃	0.32	0.21	0.07
青海	0.42	0.29	0.07
宁夏	0.15	0.23	0.07
新疆	0.82	0.39	0.10
山东	0.32	0.39	0.07
安徽	0.94	0.52	0.07
湖北	0.76	0.89	0.11
湖南	0.33	0.41	0.10
江苏	1.08	0.63	0.12
浙江	0.31	0.23	0.06
江西	0.87	1.00	0.11
福建	0.59	0.64	0.10
广东	0.22	0.20	0.07
广西	1.95	1.09	0.15
贵州	0.08	0.27	0.06
四川	0.30	0.23	0.06
海南	0.29	0.39	0.08
云南	0.43	0.68	0.12
中国平均	0.31	0.22	0.02

表 9　未来年中国钢铁企业排放对“2+26”各城市主要大气污染物的浓度贡献比例(%)

Table 9　The contribution of emissions from national iron and steel plants to annual average pollutants emission concentration in “2+26” cities in the future (%)

城市	$PM_{2.5}$ 冬季平均贡献(%)	$PM_{2.5}$ 夏季平均贡献(%)	SO_2 冬季平均贡献(%)	SO_2 夏季平均贡献(%)	NO_x 冬季平均贡献(%)	NO_x 夏季平均贡献(%)
北京市	0.01	0.10	0.16	0.50	0.10	0.29
天津市	0.04	0.16	0.25	0.59	0.26	0.56
石家庄市	0.08	0.18	0.50	0.73	0.54	0.66
唐山市	0.25	0.47	1.68	2.22	1.89	2.29
廊坊市	0.02	0.14	0.21	0.57	0.20	0.51
保定市	0.01	0.10	0.07	0.20	0.10	0.16
沧州市	0.01	0.14	0.13	0.34	0.17	0.43
衡水市	0.01	0.09	0.15	0.20	0.21	0.21
邢台市	0.03	0.17	0.40	1.28	0.45	1.09
邯郸市	0.10	0.27	1.45	2.43	1.39	1.93
太原市	0.06	0.15	0.37	0.60	0.76	1.01
阳泉市	0.01	0.10	0.05	0.09	0.17	0.17
长治市	0.03	0.14	0.28	0.45	0.51	0.60
晋城市	0.03	0.13	0.22	0.42	0.51	0.70
济南市	0.01	0.12	0.14	0.37	0.24	0.46
淄博市	0.02	0.14	0.26	0.36	0.35	0.40
济宁市	0.01	0.12	0.11	0.13	0.18	0.09
德州市	0.01	0.11	0.13	0.33	0.20	0.46
聊城市	0.01	0.10	0.14	0.20	0.24	0.28
滨州市	0.01	0.12	0.17	0.30	0.24	0.38
菏泽市	0.01	0.12	0.12	0.17	0.18	0.11
郑州市	0.01	0.07	0.11	0.11	0.14	0.07
开封市	0.01	0.09	0.15	0.19	0.19	0.12
安阳市	0.07	0.21	0.91	1.71	0.90	1.31
鹤壁市	0.05	0.17	0.67	1.09	0.68	0.82
新乡市	0.02	0.10	0.23	0.24	0.28	0.17
焦作市	0.02	0.10	0.19	0.24	0.29	0.17
濮阳市	0.02	0.10	0.28	0.29	0.33	0.22
区域城市最高	0.25	0.47	1.68	2.43	1.89	2.29

根据甄瑞卿等研究结果[46],未来中国步入发达国家,钢铁产业结构调整(电炉钢比例提高),电炉钢和转炉钢分别为 2.1 和 2.1 亿 t.本研究在上述电炉钢、转炉钢的产量预测结果上,对未来排放情景做出如下假定:(1)未来年情景,假定各个区域钢铁企业均达到超低排放标准水平;(2)未来年情景,假定各个区域钢铁企业产业结构调整后排放占比不变;(3)未来年情景,在总产量大幅降低的前提下,假定各个区域钢铁企业数量、空间位置等保持不变.基于以上假定,中国钢铁企业 SO_2、NO_x、PM_{10} 排放量分别为 4.94,7.58,4.11 万 t,与 2018 年现状情景相比, SO_2、NO_x、PM_{10} 排放量分别下降了 82.98%、88.61%、

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

85.69%.

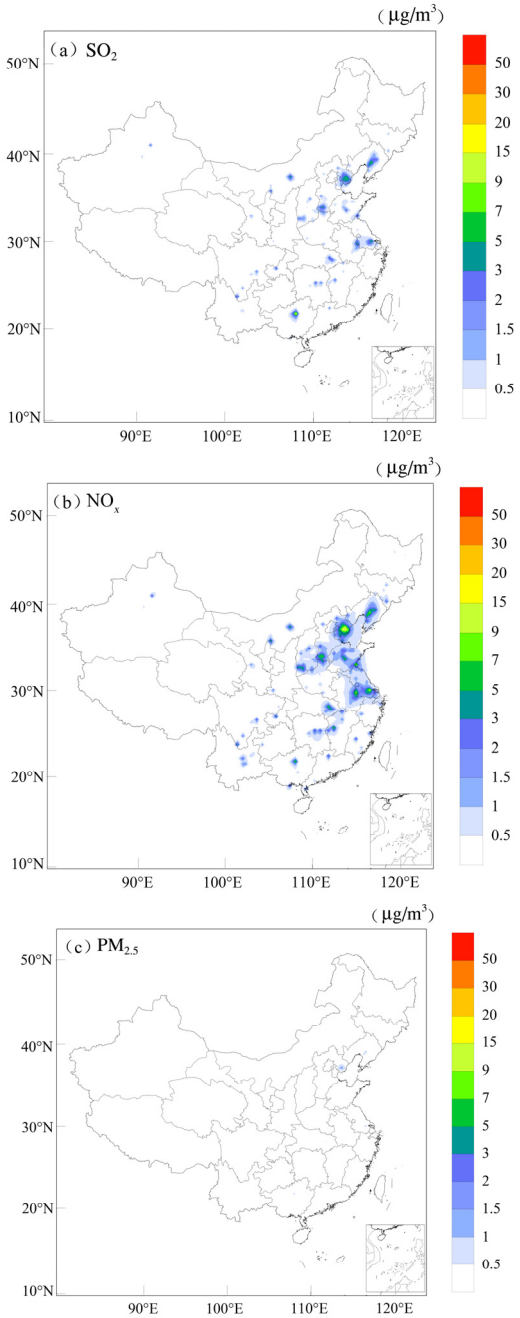


图 7 未来年(情景 2)中国钢铁行业排放大气污染物年均贡献浓度

Fig.7 The contribution of emissions from national iron and steel plants to annual average pollutants emission concentration in the future

中国钢铁行业对各省份、“2+26”城市的大气污染浓度贡献均大幅度改善(见表 8~9 和图 7).中国钢铁行业对各省份 SO_2、NO_x、$PM_{2.5}$ 年均浓度贡献比例平均值分别为 0.31%、0.22%、0.02%,与 2018 年相比,未来年钢铁行业对各省 SO_2、NO_x、$PM_{2.5}$ 年均浓度贡献比例平均值分别下降了 93.47%、98.70%、89.12%;中国钢铁行业对“2+26”城市 SO_2、NO_x、$PM_{2.5}$ 年均浓度贡献比例最高值为 3.63%、1.64%、0.34%,与 2018 年最高值相比,下降了 80.91%、86.47%、94.38%.

2.4 不确定性分析

本研究使用蒙特卡罗方法来证实中国钢铁企业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[40]和 Zhao 等[47]提出的方法,针对 2018 年的清单,在蒙特卡罗框架下进行了 10000 次模拟实验,求解了钢铁排放量的 95%置信区间.

对于本研究 2018 年排放清单,结果不确定性主要来源于以下几个方面:(1) 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,对于无 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[40]. (2) 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,因此,本文假设理论烟气量服从变异系数为 5%的正态分布. (3) 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[47].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,并进行模拟,估计了钢铁污染物排放量的不确定度范围.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,2018 年钢铁企业排放清单总量的 95%置信区间为±1.81%.

3 结论

3.1 2018 年,从企业规模角度分析,中国钢铁行业大气污染物排放中型企业占比最大,小型企业次之,大型企业污染物排放量最小;从分布区域角度分析,河北、江苏、山东等钢铁产能大省,大气污染物排放总量大,但排放绩效控制较好;相反,由于控制水平较低,甘肃、内蒙古、宁夏等省份污染物排放绩效控制较差,从生产工序角度分析,烧结、球团、焦化、高炉 4 大铁前工序是钢铁行业污染物排放主要来源.

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

3.2　2018 年,中国钢铁行业大气污染物排放主要影响省份为河北省,“2+26”城市主要影响城市为唐山市、邯郸市和安阳市,主要由于该区域钢铁企业较为集中,大气污染排放量较大. 2018 年钢铁行业对区域污染物浓度贡献最大的是 NO_x, NO_x 存在较大的减排空间.

3.3　未来年情景,结合中国钢铁行业产业结构调整(电炉钢比例提高)并全面达到超低排放标准水平,中国钢铁行业 SO_2、NO_x、PM_{10} 排放量分别为 4.94, 7.58,4.11 万 t,分别下降了 82.98%、88.61%、85.69%, 未来年中国钢铁行业对各省份 SO_2、NO_x、$PM_{2.5}$ 年均浓度贡献比例平均值分别为 0.31%、0.22%、0.02%.

参考文献：

[1] World Steel Association. Steel Statistical Yearbook [M]. World Steel Association, 1990−2019.

[2] 生态环境部.关于推进实施钢铁行业超低排放的意见. [EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk03/201904/t20190429_701463.html/2019−04−28.
Ministry of Ecology and Environment of the People’s Republic of China. Opinions on promoting the implementation of ultra−low emissions in the iron and steel industry. [EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk03/201904/t20190429_701463.html/2019−04−28.

[3] 生态环境部.钢铁企业超低排放改造工作方案(征求意见稿) [EB/OL]. http://www.jsyj.org.cn/default.php?mod=article&do=detail&tid=975883/2018−05−07.
Ministry of Ecology and Environment of the People’s Republic of China. Work plan for ultra−low emissions transformation of iron and steel enterprises (consultation draft) [EB/OL]. http://www.jsyj.org.cn/default.php?mod=article&do=detail&tid=975883/2018−05−07.

[4] 生态环境部.京津冀及周边地区 2018~2019 年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案 [EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk03/201809/W020181010396066238543.pdf/2019−10−11.
Ministry of Ecology and Environment of the People’s Republic of China. Action plan for comprehensive management of air pollution in autumn and winter in Beijing–Tianjin–Hebei and surrounding areas 2018–2019 [EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk03/201809/W020181010396066238543.pdf/2019−10−11.

[5] 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.

[6] 李　佳,张晓郁,孙庆宇.唐山市钢铁行业大气污染物排放清单建立 [J]. 中国环境监测, 2016,(5):30−34.
Li J, Zhang X Y, Sun Q Y. Research on the establishment of the atmospheric pollutant emission inventory of Tangshan iron and steel industry [J]. Environmental Monitoring in China, 2016,(5):30−34.

[7] 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, 2018,4:1−14.
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, 2018,4:1−14.

[8] 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 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011,11(9):4105−4120.

[9] Liu H, Wu B, Liu S, et al. A regional high−resolution emission inventory of primary air pollutants in 2012for Beijing and the surrounding five provinces of North China [J]. Atmospheric environment, 2018,181:20−33.

[10] Qiu P, Tian H, Zhu C, et al. An elaborate high resolution emission inventory of primary air pollutants for the Central Plain Urban Agglomeration of China [J]. Atmospheric environment, 2014,86:93−101.

[11] Wang K, Tian H, Hua S, 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.

[12] Wu X, Zhao L, Zhang Y, 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..

[13] Wang X, 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.

[14] 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 [D]. 杭州:浙江大学, 2016.
Zhao L J. Study on air pollutant emissions of iron and steel plants in China and the cost of emissions reduction [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.

[15] Gao C, Gao W, Song K, et al. Spatial and temporal dynamics of air−pollutant emission inventory of steel industry in China: A bottom−up approach [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2019,143:184−200.

[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).

[17] 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.

[18] Zheng H, Zhao B, Wang S, et al. Transition in source contributions of $PM_{2.5}$ exposure and associated premature mortality in China during 2005~2015 [J]. Environment international, 2019,132:105111.

[19] 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.

[20] 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.

[21] Yang H, 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 [J]. Environmental pollution, 2019,245:1095−1106.

[22] 杨皓哲.中国钢铁行业对大气污染的贡献及减排措施分析 [D]. 北京:北京大学, 2019.
Yang H Z. The contribution of China’s iron and steel industry to air

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

pollution and analysis of emission mitigation strategies [D]. Beijing: Peking University, 2019.

[23] 生态环境部.关于 2014 年上半年污染源自动监控数据传输有效率考核工作的通报 [EB/OL]. http://www.envsc.cn/details/index/391/2014-08-04.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Notice on the efficient evaluation of automatic monitoring data transmission of pollution sources in the first half of 2014 [EB/OL]. http://www.envsc.cn/details/index/391/2014-08-04.

[24] 生态环境部.国家监控企业污染源自动监测数据有效性审核办法 [EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/200910/t20091022_174629.htm/2009-07-22.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Measures for the verification of the validity of automatic monitoring data of pollution sources by national monitoring enterprises [EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/200910/t20091022_174629.htm/2009-07-22.

[25] 生态环境部.国家重点监控企业污染源自动监测设备监督考核规程 [EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/200910/t20091022_174629.htm/2009-07-22.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Monitoring Enterprise Pollution Automatic Monitoring Facilities Assessment Procedures [EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/200910/t20091022_174629.htm/2009-07-22.

[26] HJ75-2017 固定污染源烟气(SO_2、NO_x、颗粒物)排放连续监测技术规范 [S].
HJ75-2017 Specifications for continuous emissions monitoring of SO_2, NO_x, and particulate matter in the flue gas emitted from stationary sources [S].

[27] HJ846-2017 排污许可证申请与核发技术规范 钢铁工业 [S].
HJ846-2017 Technical specification for application and issuance of pollutant permit iron and steel industry [S].

[28] 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 air pollutants for sintering and pelletizing of iron and steel industry [S].

[29] GB 28663-2012 炼铁工业大气污染物排放标准 [S].
GB 28662-2012 Emission standard of air pollutants for iron smelt industry [S].

[30] 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].

[31] 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 steel rolling industry [S].

[32] 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].

[33] DB 37/990-2013 山东省钢铁工业污染物排放标准 [S].
DB 37/990-2013 Emission standard of air pollutants for iron and steel industry in Shandong Province [S].

[34] 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].

[35] 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.

[36] 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.
He K B. Technical manual for the preparation of urban air pollutant emission inventory 2017 [R]. Beijing: School of Environment, Tsinghua University, 2017.

[37] 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.

[38] 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.

[39] 生态环境部.大气挥发性有机物源排放清单编制技术指南(试行) [EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201408/t20140828_288364.htm/2014-08-20.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Technical guide of emission inventory compilation of atmospheric volatile organic compounds (Trial). [EB/OL]. http: //www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201408/t20140828_288364.htm/2014-08-20.

[40] Tang L, Qu J, Mi Z, et al. Substantial emission reductions from Chinese power plants after the introduction of ultra-low emissions standards [J]. Nature Energy, 2019:1-10.

[41] Karplus V J, Zhang S, Almond D. Quantifying coal power plant responses to tighter SO_2emissions standards in China [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2018,115(27):7004-7009.

[42] De Gouw J A, Parrish D D, Frost G J, et al. Reduced emissions of CO_2, NO_x, and SO_2 from US power plants owing to switch from coal to natural gas with combined cycle technology [J]. Earth's Future, 2014, 2(2):75-82.

[43] 清华大学.中国多尺度排放清单模型 [EB/OL]. http://meicmodel.org/index.
Tsinghua University. Multi-resolution Emission Inventory for China (MEIC) [EB/OL]. http://meicmodel.org/index.

[44] 伯 鑫.空气质量模型:技术、方法及案例研究 [M]. 北京:中国环境出版社, 2018:1-2.
Bo X. Air quality models: technology, methods and case studies [M]. Beijing: China Environmental Press, 2018:1-2.

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

[46] 甄瑞卿,张 红,董广霞,等.基于产业结构调整情景下的中国钢铁行业大气污染排放预测 [J]. 环境工程, 2017,(6):114-117,179.
Zhen R Q, Zhang H, Dong G X, et al. Forecast on air pollution emission of China's steel industry based on industrial restructuring [J]. Environmental Engineering, 2017,(6):114-117,179.

[47] 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.

作者简介：汤 铃(1983-),女,广西桂林人,教授,博士,主要研究领域为能源经济与管理.发表论文 80 余篇.

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