京津冀地区典型钢铁企业超低排放对空气质量的影响

李厚宇[1,2]，崔磊[3]，贾敏[2,4]，甄瑞卿[5]，毛娜[6]，刘厚凤[1]，伯鑫[2]
(1. 山东师范大学地理与环境学院，山东 济南 250014；2. 生态环境部环境工程评估中心，北京 100012；3. 中圣环境科技发展有限公司，陕西 西安 710000；4. 北京化工大学经济管理学院，北京 100029；5. 中冶京诚工程技术有限公司，北京 100176；6. 沧州市生态环境保护科学研究院，河北 沧州 061000)

摘要：基于京津冀地区某典型钢铁企业排放清单，建立了超低排放改造前后两种情景，利用 AERMOD 模型模拟了两种情景下典型钢铁企业排放 SO_2、NOx 和一次 PM_{10} 对周边大气环境的影响。结果显示：从排放量来看，钢铁企业的超低排放改造对 NO_x 减排效果更为明显，NO_x 减排比例达到为 56.44%。现状情景下，典型钢铁企业对 5 个空气质量监测站 SO_2、NOx 和 PM_{10} 的年均贡献浓度分别为 0.11 μg/m³、0.34 μg/m³ 和 0.20 μg/m³。超低排放改造后，典型钢铁企业对 5 个空气质量监测站 SO_2、NOx 和 PM_{10} 的年均贡献浓度分别下降 0.05 μg/m³、0.16 μg/m³ 和 0.07 μg/m³。

关键词：钢铁企业；超低排放；空气质量；AERMOD
中图分类号：X820.6　**文献标识码：**A　**文章编号：**2095-672X(2020)09-0011-04
DOI:10.16647/j.cnki.cn15-1369/X.2020.09.005

The impact of the implementation of ultra-low emission standards for a typical iron and steelmaking plant on air quality in Beijing-Tianjin-Hebei region

Li Houyu[1,2], Cui Lei[3], Jia Min[2,4], Zhen Ruiqing[5], Mao Na[6], Lliu Houfeng[1], Bo Xin[2]
(1.College of Geography and Environment, Shandong Normal University,Ji'nan Shandong 250014,China;2.Appraisal Center for Environment and Engineering, Ministry of Ecology and Environment,Beijing 100012,China;3.Zhongsheng Environmental Technology Development Co.,Ltd.,Xi'an Shaanxi 710000,China;4.School of Economics and Management,Beijing University of Chemical Technology,Beijing 100029,China;5.Capital Engineering & Research Incorporation Limited,Beijing 100176,China;6. Ecology and Environmental Protection Science Research Institute of Cangzhou City,Cangzhou Hebei 061000,China)

Abstract: Based on the basic emission inventories of a typical iron and steelmaking plant in Beijing-Tianjin-Hebei region, two scenarios before and after the implementation of ultra-low emission standards were established.AERMOD model was used to quantitatively simulate the environmental impact of SO_2,NO_x and PM_{10} emitted by the typical iron and steelmaking plant on the surrounding atmospheric environment under the two scenarios. The results showed that the mitigation effect was more striking for NO_x emission if all emission facilities meeting ultra-low standards with the emission reductions of 56.44%,from the perspective of pollutants emissions. Under the current situation, the average annual contributions of SO_2, NO_x and PM_{10} of the typical iron and steelmaking plant are 0.11,0.34 and 0.20 μg/m³, respectively, to 5 air quality monitoring stations.After the implementation of ultra-low standards, the average annual contribution of SO_2, NO_x and PM_{10} decreased by 0.05, 0.16 and 0.07 μg/m³, respectively.

Key words: Iron and steelmaking plant；Ultra-low emission；Air quality；AERMOD

2018 年，中国粗钢产量为 9.3 亿 t，占全球粗钢产量的 51.3%[1]，钢铁工业企业排放大量的二氧化硫，氮氧化物，颗粒物和 VOCs 等污染物[2-3]。京津冀地区是钢铁企业重点分布区域，2018 年京津冀地区粗钢产量占全国产量的 27.7%[4]。京津冀钢铁企业具有较大的减排潜力[2,5-7]。为了继续降低京津冀地区排放水平，提高空气质量，打赢蓝天保卫战，生态环境部在钢铁行业推行超低排放改造，要求到 2020 年 10 月底前，京津冀及周边地区具备改造条件的钢铁企业基本完成超低排放改造。

目前，钢铁企业超低排放研究主要集中在超低排放技术，鲜有关于钢铁企业超低排放对空气质量影响的研究。相关研究多集中在钢铁企业的源解析和数值模拟等方面。Jia 等[8]通过监测手段分析了钢铁行业不同工序排放不同粒径的颗粒物的化学成分。Dai 等[9]对钢铁企业周边的空气中颗粒物进行了排放源的识别和分配。段文娇等[5]、伯鑫等[7]分别利用 CAMx 模型模拟了京津冀地区钢铁行业对大气污染的影响。

为了评估典型城市钢铁企业超低排放对空气质量的影响，本研究基于京津冀地区某典型钢铁企业排放清单，设置了 2018 年现状排放、超低排放两种情景，利用 AERMOD 模型模拟了两种情景下该企业排放 SO_2、NO_x 和一次 PM_{10} 对周边大气环境的影响，以期为钢铁行业超低排放改造效果评估提供科学支撑。

1　研究方法

1.1　研究对象

近年来，由于资源和环境的限制，钢铁企业逐渐向沿海发展。本文所研究的钢铁企业位于京津冀东南部，渤海湾西岸，生产工序齐全，带钢年产能为 500 万吨。该区域地势低平，主要为平原和海岸，属于温带大陆性半干旱偏旱季风气候，受海陆风影响，具有典型代表意义。钢铁企业排放源与周边 5 个空气质量监测站的分布见图 1。离钢铁厂最近的空气质量监测站为 4 号监测站，距离为 32km。

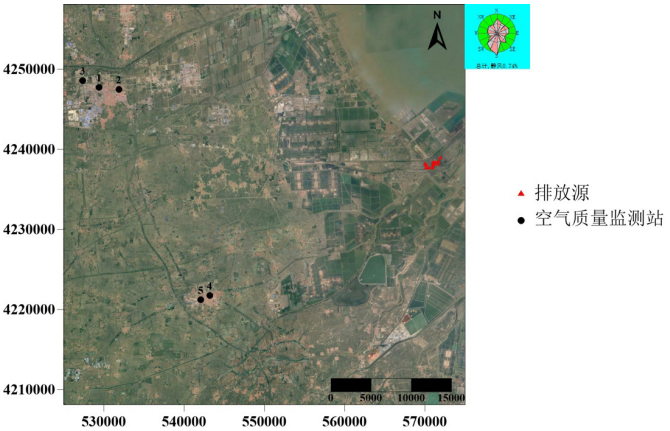


图 1　钢铁企业排放源与空气质量监测站分布

1.2　模拟模型

AERMOD 模型是广泛应用的一种空气质量模型[10-12]，是《环境影响评价技术导则　大气环境》（HJ2.2-2018）推荐的预测模型之一[13]。AERMOD 模型在小尺度的模拟中优于其他模型，并且被应用于钢铁企业的模拟研究中[14-15]。本研究采用 AERMOD 模型模拟典型钢铁企业 SO_2、

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

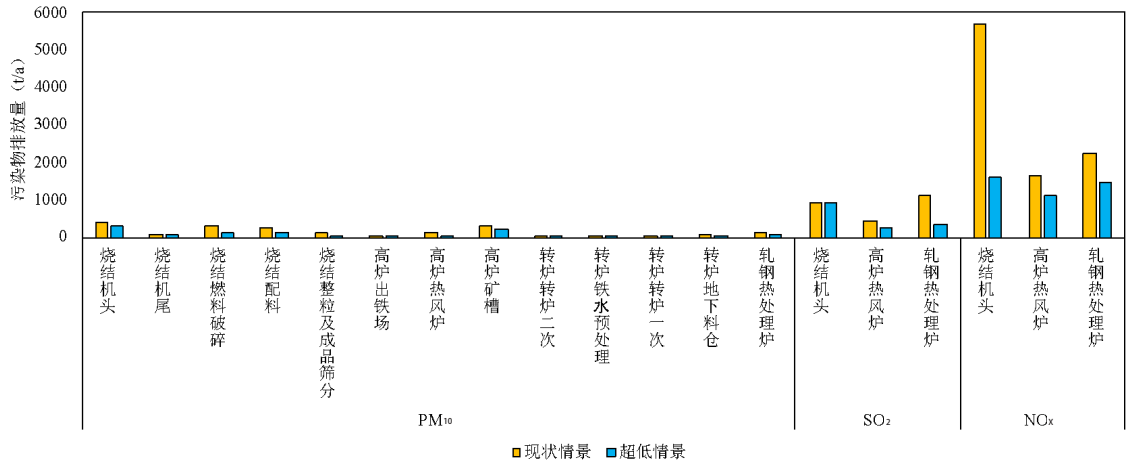


图 2　各生产节点污染物排放量

NO_x 和一次 PM_{10}3 种污染物的排放对周边地区空气质量的影响。模拟区域总范围为 50km×50km，水平网格分辨率为 500m×500m，网格点数设置为 100×100，不考虑化学反应机制。

模拟所用的地形数据为美国地质勘探局 90m 分辨率数据，地表参数数据为 AERSURFACE 在线服务系统生成数据[16]，地面气象数据为沧州市气象站 2018 年逐时数据，高空气象数据为 WRF v3.9 模拟数据。

1.3　排放源数据

本研究钢铁排放清单数据来自研究团队的 2018 年全国高分率排放清单 (HSEC，2018)[17]，该清单是基于中国钢铁行业在线监测数据 (CEMS) 和环境统计数据，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。

本研究选取了钢铁厂烧结、高炉、转炉、轧钢 4 道工序中 13 个生产节点作为 AERMOD 模型中的点源输入。每个生产节点中排气筒的高度、直径、温度、和流速的数据见表 1。

表 1　钢铁厂排气筒高度、直径、温度、流速

生产节点	高度 (m)	直径 (m)	温度 (℃)	流速 (m/s)
烧结机头	120	5.0	81	14.38
烧结机尾	40	4.0	80	9.89
烧结燃料破碎	30	1.4	40	16.07
烧结配料	30	3.0	40	13.01
烧结整粒及成品筛分	30	3.0	40	10.30
高炉出铁场	40	3.0	30	14.94
高炉热风炉	80	5.0	10	5.38
高炉矿槽	30	4.5	10	13.77
转炉转炉二次	35	4.0	20	15.04
转炉铁水预处理	35	2.5	120	11.89
转炉转炉一次	80	2.2	120	11.55
转炉地下料仓	35	2.0	20	14.86
轧钢热处理炉	30	2.5	120	8.15

1.4　排放情景设置

本研究共设置现状情景、超低情景 2 种污染物排放情景，现状情景为 2018 年典型钢铁企业超低排放改造前年产 670 万 t 轧钢的大气污染物排放情景；超低情景为典型钢铁企业超低排放改造后年产 670 万 t 轧钢的大气污染物排放情景。

2　结果与讨论

2.1　典型钢铁企业排放量分析

2018 年该长流程钢铁企业现状情景下 SO_2、NO_x 和 PM_{10} 的排放量分别为 2 502.54/a、9 575.73t/a 和 1 931.28t/a；预测超低情景下 SO_2、NO_x 和 PM_{10} 的排放量分别为 1 596.60t/a、4 171.16t/a 和 1 219.16t/a。其中：超低情景较现状情景 NO_x 减排比例最高，为 56.44%；SO_2 和 PM_{10} 减排比例分别为 36.20% 和 36.87%。主要原因是超低标准对 NO_x 的控制较对 SO_2 和 PM_{10} 的控制更严格。超低标准与现状情景执行的新建企业标准相比较：NO_x 的排放浓度最高下降了 83.33%，高于 SO_2 和 PM_{10} 的下降比例（最高下降分别为 82.50% 和 80.00%）。预测结果表明：该钢铁企业的超低排放改造对 NO_x 减排效果更为明显。该钢铁企业现状情景和超低情景下各生产节点大气污染物排放情况见图 2。

对于主要排放污染物，SO_2 和 NO_x 主要排放来源于烧结机头、高炉热风炉和轧钢热处理炉节点。结合现状情景和超低排放情景下企业排放水平发现，该企业超低排放改造完成后 SO_2 减排潜力最大的排放节点是轧钢热处理炉，削减比例达到 66.67%，占 SO_2 减排总量的比例达 81.81%。说明未来要加强对轧钢热处理炉的脱硫控制水平，从源头减少企业 SO_2 排放总量。

对于 NO_x 排放，其削减比例和减排占比最大的排放节点是烧结机头（分别为 72.12% 和 76.12%），一方面，由于超低排放标准对于烧结机头控制力度最大（浓度限值下降达 83.33%，远高于其他节点）；另一方面，由于该企业烧结机头排放 NO_x 最多（占比达 38.12%，高于其他节点），减排潜力最大。

对于 PM_{10} 排放，该企业 PM_{10} 排放主要来源于烧结机头、烧结燃料破碎和烧结配料等节点，且烧结工序成为该企业主要排放源（排放占比达 58.83%），超低改造完成后烧结工序减排占比最大（达 58.21%），平均削减比例为 34.36%。说明未来烧结工序仍然是该钢铁企业除尘控制的重中之重。

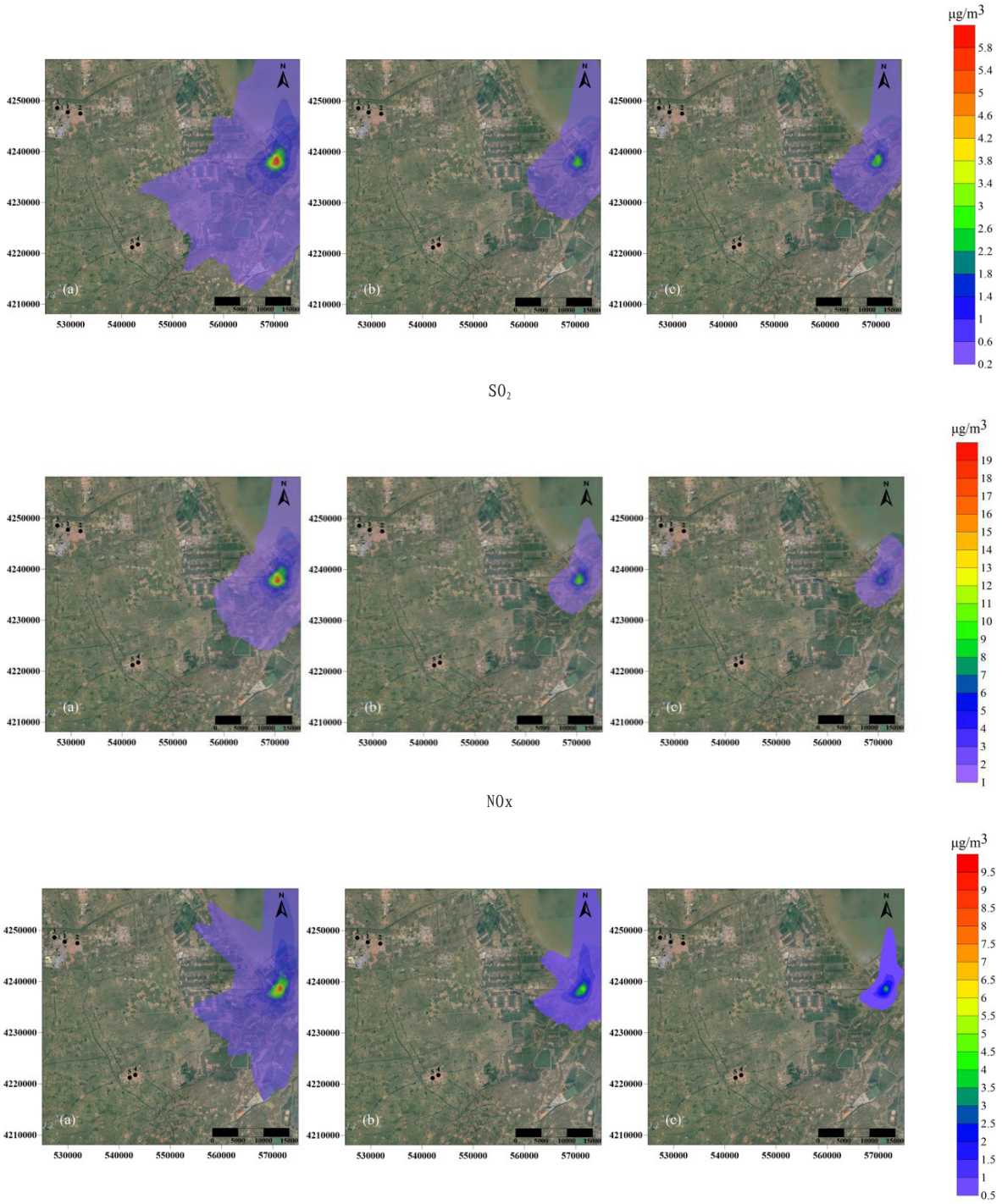
2.2　典型钢铁企业周边环境空气质量影响分析

分析该钢铁企业 2018 年现状情景和超低情景下排放 SO_2、NO_x 和一次 PM_{10} 对周边大气环境的影响和对空气质量监测站的浓度贡献。

图 3 显示了在现状情景和超低情境下典型钢铁企业周边的 SO_2、NO_x 和一次 PM_{10} 年均浓度，以及两种情况之间的差异。空气质量模型的结果表明，现状情景下 SO_2、NO_x 和一次 PM_{10} 高浓度区域均主要分布在该企业厂区周边和北偏东和西偏南方向，超低情景下污染物分布与现状情景基本一致，但高值区浓度出现明显的下降。在模拟范围内，现状情景下 SO_2 年均最大网格浓度为 7.69 μg/m^3，NO_x 年均最大网格浓度为 18.89 μg/m^3，一次 PM_{10} 年均最大网格浓度为 9.32 μg/m^3。超低情景下 SO_2 年均最大网格浓度为 3.15 μg/m^3，较现状情景下降了 47.23%；NO_x 年均最大网格浓度为 11.35 μg/m^3，较现状情景下降了 47.77%；一次 PM_{10} 年均最大网格浓度为 5.42 μg/m^3，较现状情景下降了 37.85%。

现状情景下，典型钢铁企业对 5 个空气质量监测站 SO_2、NO_x 和 PM_{10} 的年均贡献浓度分别为 0.08~0.16 μg/m^3、0.24~0.48 μg/m^3 和

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



（a）现状情景　　（b）超低情景　　（c）差值

图 3　年均浓度贡献

0.14~0.28 μg/m^3，分别占监测值的 0.40% ～ 0.72%、0.60% ～ 1.32% 和 0.16% ～ 0.28%。其中 NO_x 贡献浓度的占比最高，平均占比为 0.87%。超低情景下，典型钢铁企业对 5 个空气质量监测站 SO_2、NO_x 和 PM_{10} 的年均贡献浓度分别为 0.04~0.08 μg/m^3、0.13~0.26 μg/m^3 和 0.09~0.18 μg/m^3，分别占监测值的 0.21% ～ 0.37%、0.32% ～ 0.71% 和 0.10% ～ 0.18%。其中 NO_x 贡献浓度的占比由 0.87% 下降到 0.47%，平均下降了 0.4 个百分点，下降最为明显；PM_{10} 的一次贡献浓度占比下降相对较少，平均下降了 0.08 个百分点。

表 2　空气质量监测站浓度年均贡献值

污染物	空气质量监测站	年均值	现状情景		超低情景	
			预测年均值（μg/m^3）	占比	预测年均值（μg/m^3）	占比
SO_2	1	14.5	0.08	0.56%	0.04	0.28%
	2	20.9	0.08	0.40%	0.04	0.21%
	3	17.7	0.08	0.44%	0.04	0.22%
	4	21.9	0.16	0.72%	0.08	0.37%
	5	28.5	0.15	0.53%	0.08	0.27%
	平均	20.7	0.11	0.53%	0.06	0.27%

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

污染物	空气质量监测站	年均值	现状情景		超低情景	
			预测年均值（μg/m³）	占比	预测年均值（μg/m³）	占比
NO_x	1	41.3	0.25	0.60%	0.13	0.32%
	2	40.4	0.26	0.64%	0.14	0.35%
	3	37.0	0.24	0.64%	0.13	0.34%
	4	40.2	0.48	1.20%	0.26	0.64%
	5	35.3	0.47	1.32%	0.25	0.71%
	平均	38.8	0.34	0.87%	0.18	0.47%
PM_{10}	1	94.5	0.15	0.16%	0.09	0.10%
	2	87.6	0.15	0.18%	0.10	0.11%
	3	85.5	0.14	0.16%	0.09	0.10%
	4	99.8	0.28	0.28%	0.18	0.18%
	5	102.6	0.27	0.27%	0.17	0.17%
	平均	94.0	0.20	0.21%	0.12	0.13%

2.3 不确定性分析

（1）钢铁排放清单的不确定性。本次研究对钢铁排放清单中有组织污染源进行模拟分析，未分析无组织排放影响，模拟结果存在一定的不确定性。（2）本研究的模拟中，未考虑 SO_2、NO_x、VOCs 等化学反应机制，使 NO_x、PM_{10} 等模拟结果存在不确定性。（3）本研究选取的气象场数据年份为 2018 年，气象场选取的年份不同，会导致模拟结果存在差异。

3 结论

（1）钢铁企业超低排放改造后，从排放量来看，NO_x 减排比例最高为 56.44%，SO_2 和 PM_{10} 减排比例分别为 36.20% 和 36.87%。典型钢铁企业的超低排放改造对 NO_x 减排效果更为明显。（2）典型钢铁企业超低排放改造后，对 5 个空气质量监测站 SO_2、NO_x 和 PM_{10} 的年均贡献浓度分别下降 0.05 μg/m³、0.16 μg/m³ 和 0.07 μg/m³，在京津冀地区城市空气质量目标值持续降低的背景下，典型钢铁企业的超低排放改造具有一定的意义。

参考文献

[1]World Steel Association AISBL. World Steel in Figures 2019[EB/OL].https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:96d7a585-e6b2-4d63-b943-4cd9ab621a91

[2]Wu Xuecheng,Zhao Lingjie,Zhang Yongxin,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.

[3] 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(05):578-582.

[4] 国家统计局．国家数据 [EB/OL].http://data.stats.gov.cn

[5] 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(04):1445-1454.

[6]Rui Hu, Qun Zhang. Study of a low-carbon production strategy in the metallurgical industry in China[J]. Energy,2015,90.

[7] 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(05):1684-1692.

[8]Jia Jia, Shuiyuan Cheng, Sen Yao, et al. Emission characteristics and chemical components of size-segregated particulate matter in iron and steel industry[J]. Atmospheric Environment,2018,182.

[9]Dai, Q., Li, L., Yang, J. et al. The fractionation and geochemical characteristics of rare earth elements measured in ambient size-resolved PM in an integrated iron and steelmaking industry zone[J]. Environ Sci Pollut Res,2016(23):17191-17199.

[10]Mutahharah M. Mokhtar, Mimi H. Hassim, Rozainee M. Taib. Health risk assessment of emissions from a coal-fired power plant using AERMOD modelling[J]. Process Safety and Environmental Protection,2014,92(5).

[11] 张尚宣，伯鑫，周甜，等．AERMOD 模式在我国环境影响评价应用中的标准化研究 [J]．环境影响评价，2018,40(02):51-55.

[12]Afsaneh Afzali, M. Rashid, Mahboubeh Afzali,et al.Prediction of air pollutants concentrations from multiple sources using AERMOD coupled with WRF prognostic model[J]. Journal of Cleaner Production,2017,166.

[13]HJ2.2-2018 环境影响评价技术导则：大气环境 [S].

[14]Mostafa Kalhor,Mehrshad Bajoghli. Comparison of AERMOD, ADMS and ISC3 for incomplete upper air meteorological data (case study: Steel plant)[J]. Atmospheric Pollution Research,2017(6).

[15] 伯鑫．基于空气质量模型 AERMOD 的城市钢铁厂优化布局研究 [C]．中国环境科学学会 (Chinese Society for Environmental Sciences)．2019 中国环境科学学会科学技术年会论文集（第一卷）．中国环境科学学会 (Chinese Society for Environmental Sciences)：中国环境科学学会，2019:652-656.

[16] 生态环境部环境工程评估中心．AERSURFACE 在线服务系统 [EB/OL].https://ieimodel.org/,2019-02-26.

[17] 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 [J]．中国环境科学，2020,40(4).

收稿日期：2020-06-22

基金项目：生态环境部环境工程评估中心创新科研项目（2019-10）；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）

作者简介：李厚宇（1994-），男，工程师，研究方向为大气环境模拟与环境规划。

通讯作者：伯鑫（1983-），男，高级工程师，研究方向为排放清单及大气污染模拟。

（上接第 10 页）

是必然要求，因此必须不断地完善环境影响评价工作，使其更具标准化、科学化、规范化、合理化，以进一步促进我国社会发展与生态环境的和谐相处。

参考文献

[1] 陈莉．我国环境影响评价发展现状及问题对策研究 [J]．环境与发展，2018,30(3):224-225.

[2] 臧磊．浅谈我国环境影响评价中公众参与存在的问题与对策 [J]．低碳世界，2017(25):8-9.

[3] 冯家发．我国环境影响的评价现状及存在问题 [J]．化工设计通讯，2019,45(04):210-211.

[4] 张阳．当前规划环境影响评价遇到的问题和几点建议 [J]．环境与发展，2018(11):17-18.

收稿日期：2020-07-01

作者简介：邢明敏（1979-），男，汉族，本科学历，中级，研究方向为环境影响评价。

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