新冠期间河北省典型钢铁企业大气污染影响

陈 雷[1],王 鹏[2],伯 鑫[3*],薛晓达[4],王成鑫[5],杨朝旭[6],贾 敏[7],刘健佑[8],尤 倩[9],桑敏捷[10],淡 默[11] (1.陕西省环境科学研究院,陕西 西安 710061；2.北京化工大学数理学院,北京 100029；3.生态环境部环境工程评估中心,北京 100012；4.北京航空航天大学经济管理学院,北京 100191；5.四川大学建筑与环境学院,四川 成都 610065；6.中科三清科技有限公司,北京 100020；7.北京化工大学经济管理学院,北京 100029；8.西安九派数据科技有限公司,陕西 西安 710077；9.首都经济贸易大学管理工程学院,北京 100070；10.河北科技大学环境科学与工程学院,河北 石家庄 050018；11.北京市劳动保护科学研究所,北京 100054)

摘要:基于国家气象局气象预报数据,建立了基于AERMOD的钢铁企业污染预报模型,模拟了新冠疫情管控期(2020年2~3月)及解封后期(2020年4~10月)河北省某钢铁企业对大气污染的影响,并结合空气质量实测数据进行模型验证.结果显示,不利风向条件下,该钢铁厂大气污染物排放对当地3个国控站点 SO_2、NO_x 和 PM_{10} 的平均浓度贡献占比,在疫情管控期分别为 20.19%~33.81%,17.49%~23.46%和 2.02%~2.69%,在解封后期分别为13.43%~21.01%,11.09%~20.92%和1.20%~2.22%.由于疫情管控期受其他人为源干扰较少,该钢铁厂 SO_2、NO_x和 PM_{10} 的预报值和三个国控站点实际监测值的相关系数,在新冠疫情管控期(在单个站点中,最高分别为0.43、0.48和0.29)高于解封后期(最高分别为0.42、0.39和0.07).

关键词：AERMOD；企业污染预报；新冠；钢厂

中图分类号：X51 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2021)08-3927-07

DOI:10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20210324.008

Air quality impacts of emissions from a typical iron and steel plant in Hebei Province during the coronavirus disease (COVID-19). CHEN Lei[1], WANG Peng[2], BO Xin[3*], XUE Xiao-da[4], WANG Cheng-xin[5], YANG Zhao-xu[6], JIA Min[7], LIU Jian-you[8], YOU Qian[9], SANG Min-jie[10], DAN Mo[11] (1.Shaanxi Provincial Academy of Environmental Science, Xi'an 710061, China；2.College of Mathematics and Physics, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China；3.Appraisal Center for Environment and Engineering, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100012, China；4.School of Economics and Management, Beihang University, Beijing 100191, China；5.College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China；6.Zhongke Sanqing Technology Co., LTD, Beijing 100020, China；7.School of Economics and Management, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China；8.Xi'an Jiupai Data Technology Co., LTD, Xi'an 710077, China；9.School of Management and Engineering, Capital University of Economics and Business, Beijing 100070, China；10.School of Environmental Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China；11.Beijing Municipal Institute of Labour Protection, Beijing 100054, China). *China Environmental Science*, 2021,41(8)：3927~3933

Abstract：Based on the meteorological forecast data from the National Meteorological Bureau, this study developed an AERMOD-based pollution forecasting model for iron and steel plants, simulated air quality impacts of a typical iron and steel plant located in Hebei Province during the controlled period (from February to March in 2020) and the uncontrolled period (from April to October in 2020) of the COVID-19epidemic, and validated the model with real monitoring air quality data. In case of adverse wind direction, the results showed that the average contribution of SO_2, NO_x and PM_{10} from the plant to three state-controlled monitoring stations were 20.19~33.81%, 17.49~23.46% and 2.02~2.69% respectively during the controlled period, and 13.43~21.01%, 11.09~20.92% and 1.20~2.22% during the uncontrolled period. The correlation coefficients between the forecast values of SO_2, NO_x and PM_{10} emission of the plant and the real monitoring values of the three state-controlled monitoring stations were higher in the controlled period (the highest values are 0.43,0.48 and 0.29, respectively, at individual monitoring station) compared with the uncontrolled period (the highest values are 0.42,0.39 and 0.07, respectively) due to the less interference from other anthropogenic emission sources during the controlled period.

Key words：AERMOD；plants pollution forecast；COVID-19；iron and steel plant

---

收稿日期：2021-01-08

基金项目：国家重点研发计划项目(2016YFC0208101,2019YFE0194500);大气重污染成因与治理攻关项目(DQGG0209-07,DQGG0304-07);国家自然科学基金资助项目(71673107);欧盟地平线2020项目(870301)

* 责任作者，高级工程师, boxinet@gmail.com

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

2020年我国新冠疫情爆发期间,各省市先后启动重大突发公共卫生事件一级响应.大气污染物排放方面,来自生活源、交通源以及中小企业工业源的排放降低显著[1],但新冠疫情期间中国钢铁行业生产未受较大影响.河北省是中国粗钢产量大省,国家统计局数据显示,2019 年粗钢产量占全国总产量 24.25%,并且其大气污染物排放占比最大,2018 年平均占比达 20.51%[2].在新冠疫情管控期间:2020 年第 1 季度中国和河北省粗钢产量同比分别增长 1.46%和 0.16%.在全面复工复产后:2020 年第 2 季度全国粗钢产量同比增长 2.97%,河北省粗钢产量同比减少 2.39%;第 3 季度全国和河北省粗钢产量保持稳定增长[3-4].相关研究[5]指出,新冠防疫期间唐山市交通流量减少、餐饮企业关停,但唐山市钢铁企业未受影响,钢铁大气排放特征突显,2020 年 2 月 9 日~13 日污染过程唐山市空气质量受钢铁工业排放影响显著,说明新冠疫情对中国钢铁企业生产影响较小.

在钢铁行业大气环境影响方面,现有研究无法精准反映单个钢铁企业大气排放对国控站点的贡献.已有研究主要采用 CAMx 等区域大尺度模型和 AERMOD、CALPUFF 等小尺度模型模拟钢铁行业空气质量影响[6-9].例如,文献[10-13]采用 CAMx 等模型模拟不同年份不同区域钢铁行业大气污染影响.然而,受生活源和交通源等污染源排放清单不确定性影响,现有模拟结果无法精准反映中国单个或者多个典型钢铁企业排放对大气环境影响水平.相关研究[14-15]采用小尺度空气质量模型,模拟钢铁行业单部门的空气质量贡献水平,未考虑生活源和交通源等其他排放源的贡献和影响,无法对数值模拟结果与空气质量监测数据进行验证,进一步增加模拟结果不确定性.

针对上述问题,本文以河北某典型长流程钢铁厂为例,利用国家气象局 2020 年 2~10 月气象预报数据,建立基于 AERMOD 钢铁企业污染预报模型,模拟新冠疫情管控期(2~3 月)及解封后期(4~10 月)钢铁企业对大气污染的影响,并结合当地 3 个国控点的空气质量监测数据进行验证.由于河北省钢铁企业生产活动受疫情影响较小,且生活源和交通源等其他污染源排放大幅减少,在考虑不利风向下,模拟结果能更加精确地反映钢铁企业污染物排放对空气质量的影响,为典型钢铁企业污染预报研究提供新的思路.同时,可为钢铁企业排放管控和优化布局等提供数据支持.

1 研究方法

1.1 研究区域与对象

选取钢铁厂属于典型长流程钢铁企业,位于河北省某平原城市,周围地势平坦.2018 年,该企业烧结机共 5 台,高炉总容积达 14600m^3,粗钢年产量达 1122.84 万 t,占该市粗钢总产量的 27.23%.2020 年第 1 季度,该企业粗钢产量为 220.10 万 t,环比下降 0.45%,说明该企业钢铁生产受新冠疫情爆发影响程度较小.2020 年 2 月,该市发布公共卫生事件一级响应[16],要求尽量减少公共交通和自驾出行及公众聚集活动,说明该市交通源、生活源排放减少.

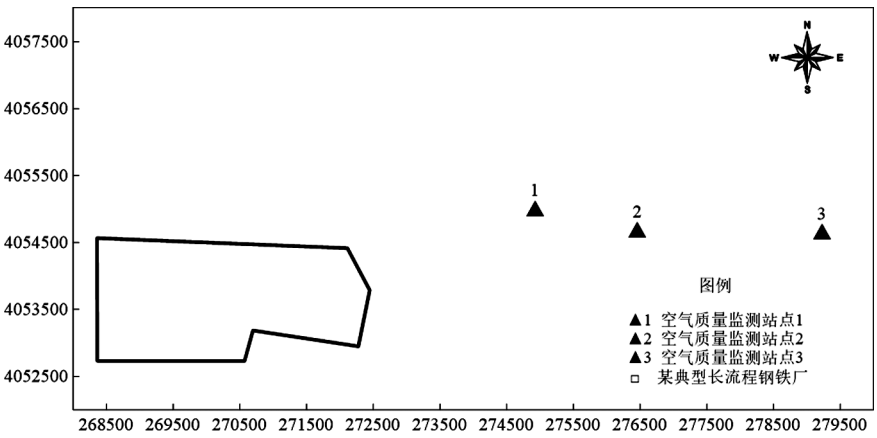


图 1 钢铁企业、空气质量监测点位关系

Fig.1 The location relationship between the iron and steel plant and air quality monitoring stations

UTM 坐标系,单位:m

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

空气质量监测数据来自企业周围 3 个空气质量监测站点(国控站),相对位置见图 1,1 号监测点离企业最近,为 2.82km,2 号和 3 号分别离企业 4.05km 和 6.83km.

1.2　模拟模型参数

预报模型来自研究团队开发的企业大气污染预报系统[17],该系统采用 AERMOD 作为污染预报模型.AERMOD 是美国环保署和中国生态环境部推荐的法规模型之一,广泛应用于工业排放源(包括火电、钢铁等)扩散模拟[18-23],适用于平坦地形条件下模拟.

表 1　地表参数

Table 1　Surface parameters

项目	分区(°)											
	0~30	30~60	60~90	90~120	120~150	150~180	180~210	210~240	240~270	270~300	300~330	330~360
正午反照率	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
伯恩率	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
地表粗超度	0.144	0.029	0.029	0.499	0.51	0.95	0.536	0.22	0.1	0.031	0.046	0.04

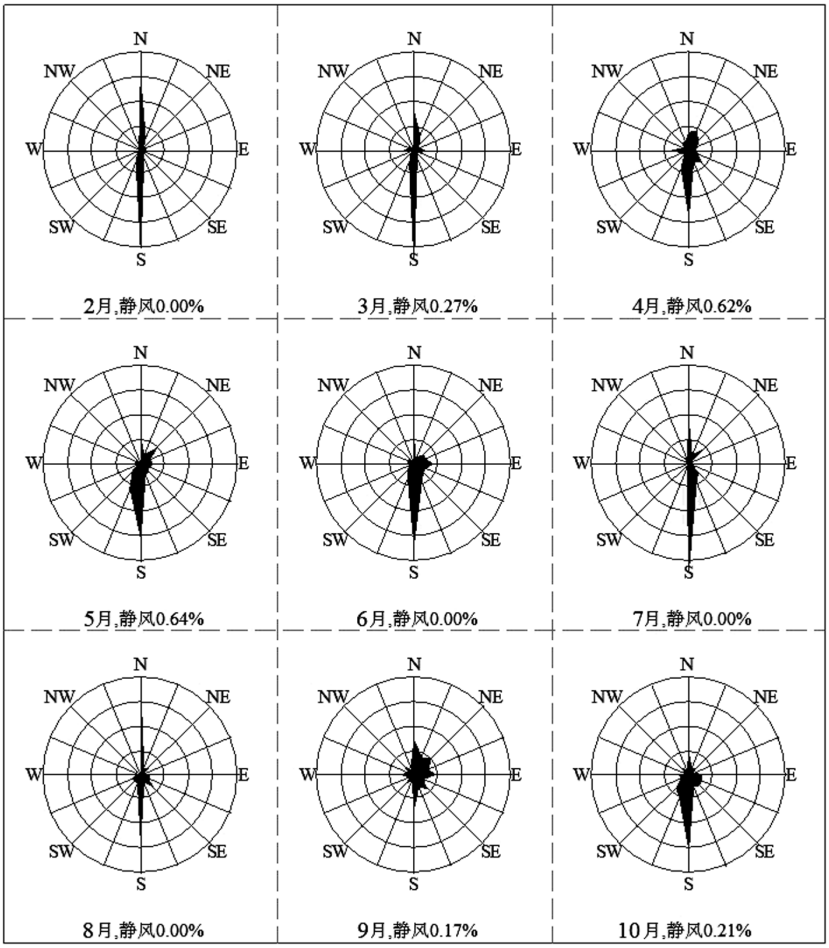


图 2　2020 年 2 月 1 日~10 月 31 日预报风玫瑰

Fig.2　Wind rose maps from February 1st to October 31 th in 2020

获取了国家气象局 2020 年 2 月 1 日~10 月 31 日预报数据,该预报资源融合了多种全球数值模式产品 GRAPES(中国气象局)/GFS、T639(中国气象局)/GMF 等,使用数据为每天预测未来 1d 的连续数据,经处理后转换成 AERMOD 模型可读取的预报气象数据.预报期间风玫瑰图见图 2,主导风向为南风(S)和北风(N).

钢铁企业排放信息来自研究团队全国高分辨率钢铁排放清单(HSEC),污染物因子包括 SO_2、NO_x 和 PM_{10},模拟范围 15.2km×15.2km,水平分辨率

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

200m,东西向 76 个格点,南北向 76 个格点,3 个国控点作为敏感点,计算时间步长按 1h 考虑,研究时间段为 2020 年 2 月 1 日~10 月 31 日,地表参数(表 1)来自研究团队开发的 AERSURFACE 在线服务系统[19].

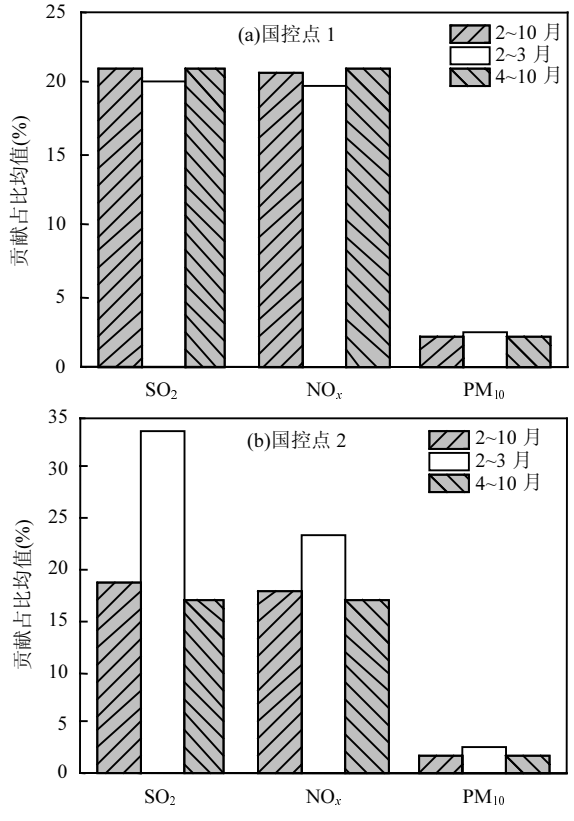
由于模拟期间主导风向为南风(S)和北风(N)(图 2),而三个国控站点基本位于钢铁企业的东北方向(图 1),该情况下,钢铁企业对 3 个国控站点的影响较小,模拟结果的代表性不好,很难反映该企业真实的环境影响.因此,本文选取钢铁厂对国控点影响的不利风向下(200°~290°),分析 SO_2、NO_x 和 PM_{10} 的模拟值和实测值的占比及相关性.且在该不利风向条件下,模拟区域范围内,没有其他钢铁厂对国控点造成影响.

1.3 模拟模型评估

参考国内外文献的评估方法[24-26],利用统计学方法计算钢铁企业大气污染物排放预报值(包括 SO_2、NO_x 和 PM_{10})和国控点实际监测值的相关系数,验证模型的模拟效果.

2 结果与讨论

2.1 钢铁企业大气环境影响分析



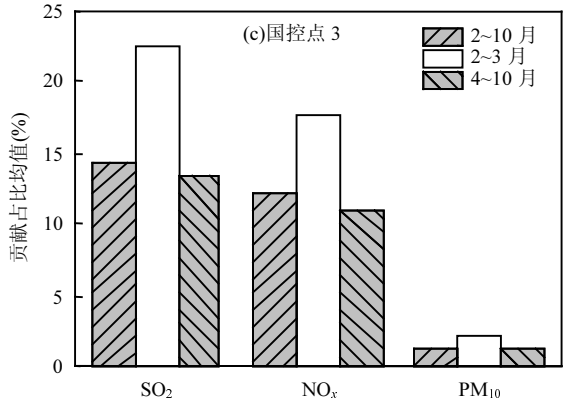


图 3 不利条件下该钢厂排放 SO_2、NO_x 和 PM_{10} 对国控点占比

Fig.3 Contribution of SO_2, NO_x and PM_{10}emission from the iron and steel plant to three state-controlled monitoring stations under adverse conditions

不利风向条件下,在新冠疫情管控期(2020 年 2~3 月),该钢铁厂排放对 3 个国控点 SO_2、NO_x 和 PM_{10} 的浓度贡献占比分别为 20.19%~33.81%,17.49%~23.46%和 2.02%~2.69%(图 3).在解封后期(2020 年 4~10 月),该钢铁厂大气污染物排放对 3 个国控点 SO_2、NO_x 和 PM_{10} 的浓度贡献占比分别为 13.43%~21.01%,11.09%~20.92%和 1.20%~2.22%.由于在新冠疫情管控期,居民封闭在家,道路源、生活源等污染源的干扰较小,导致该钢铁企业排放的 3 种污染物对国控站点的贡献占比均显著增加($P< 0.1$).同时,钢铁厂排放对国控点 1 的贡献占比最大,对国控点 3 的占比最小(图 3).表明距离钢铁厂越近,其排放对环境的影响越大;因此优化和调整钢铁厂布局,要充分考虑风向、距敏感点距离等因素.

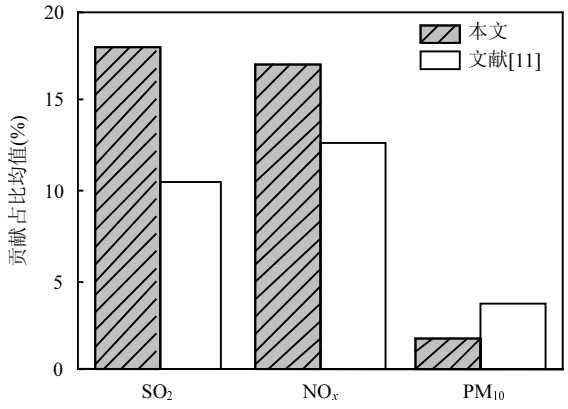


图 4 研究企业大气环境影响文献对比

Fig.4 Comparison of the average contribution of main air pollutants from the plant under study

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

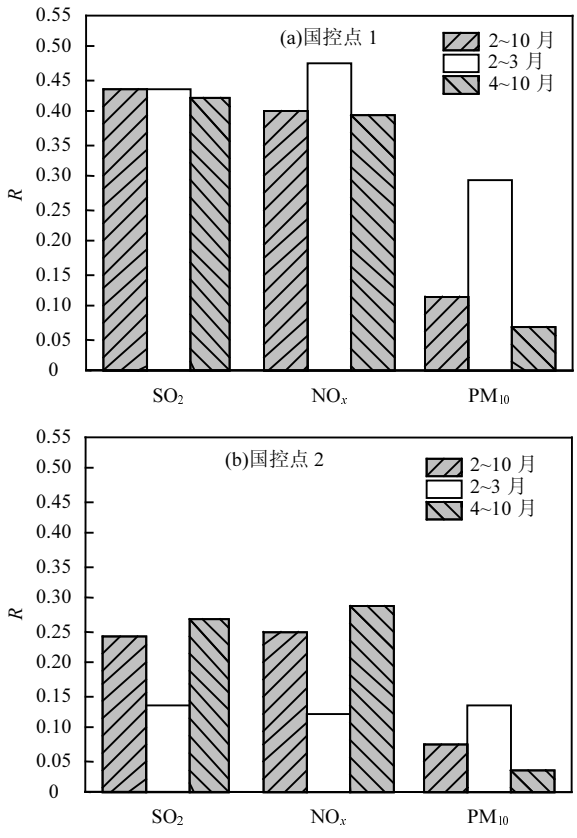
钢铁厂排放的 PM_{10} 对国控站点贡献占比最小,SO_2 贡献占比最大,这是由于钢铁企业除尘技术成熟,可实现较低的排放浓度.因此,下一步要着重加强钢铁企业 SO_2 和 NO_x 排放的管控,提升脱硫和脱硝设备的覆盖率和效率[10].

与现有文献模拟结果相比[11],钢铁企业排放的 SO_2、NO_x 和 PM_{10} 对当地大气污染物贡献比例的趋势相同,其中 PM_{10} 贡献比例最低, SO_2 和 NO_x 的贡献比例较高(图 4).由于本文只考虑不利风向下典型钢铁企业对国控站点的影响,本次模拟中 SO_2 和 NO_x 贡献比例相对较高.

2.2　模型模拟效果分析

为控制气象因素的影响,本文重点分析在不利风向下(200°~290°),SO_2、NO_x 和 PM_{10} 的模拟值与实测值的相关性(图 5).结果表明:模拟值与实测值的整体相关性较好,但在不同时段的相关系数有明显差异.

在不利风向下,新冠疫情爆发以来(2020 年 2 月~10 月),该钢铁厂 SO_2、NO_x 和 PM_{10} 模拟值与每个国控站点实测值进行对比,相关系数最高分别为 0.43、0.40 和 0.11.



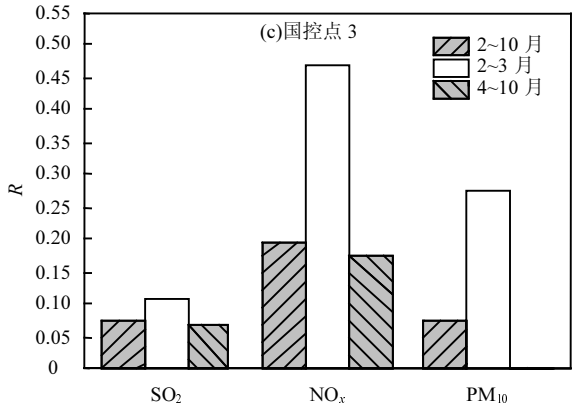


图 5　研究企业排放对国控点月贡献预测值和监测值相关系数

Fig.5　Correlation coefficients between predicted and monitored value of monthly contribution of enterprise emission from the plant under study to three state-controlled monitoring stations

在不同时段中,模拟值与实测值的相关性在新冠疫情管控期(2020 年 2~3 月)高于解封后期(2020 年 4~10 月);从各国控站点分析,距离钢铁厂越近,相关性越好;从不同污染物角度分析,NO_x、SO_2 的相关系数好于 PM_{10}.在新冠疫情管控期,国控点 1 的 SO_2、NO_x 和 PM_{10} 相关系数 R 最高,分别为 0.43、0.48 和 0.29;在解封后期,同样是国控点 1 的 SO_2、NO_x 和 PM_{10} 相关系数 R 最高,分别为 0.42、0.39 和 0.07.在新冠疫情管控期,生活源和交通源等污染源排放的大幅减少,导致该钢铁企业排放对国控站点的影响程度较大,模拟值和监测值的相关系数更高.因此,在新冠疫情管控期,能更加精确地反映钢铁企业排放对国控站点的影响.对照美国 EPA 传统的放示踪剂 SF_6 的方法,本文提出了一个新的模型验证思路.

2.3　不确定性分析

本文存在几个不确定因素:(1)钢铁源强不确定性,钢铁企业各个工序生产存在一定波动,大气污染物排放核算存在不确定性[27].(2)预报气象不确定性,气象预报结果与实际气象观测结果有一定偏差,会导致模拟结果存在差异.(3)数值模型不确定性,AERMOD 模拟未考虑 SO_2 和 NO_x 化学反应机制[28],使得 PM_{10} 等模拟结果存在不确定性.

3　结论

3.1　在不利风向条件下,该钢铁厂大气污染物排放对三个国控站点 SO_2、NO_x 和 PM_{10} 的浓度贡献占比

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

和相关系数,在新冠疫情管控期(对单个站点最大贡献占比为 33.81%、23.46%和 2.69%;最大相关系数为 0.43、0.48 和 0.29)高于解封后期(最大贡献占比为 21.01%、20.92%和 2.22%;最大相关系数为 0.42、0.39 和 0.07).表明在新冠疫情管控期,受其他人为源干扰较少,开展钢铁企业污染贡献模拟,在不利风向条件下,可精确地反映钢铁企业排放对国控站点的影响.

3.2 钢铁厂排放的 SO_2 和 NO_x 贡献占比较高(2020 年 2~10 月,对单个站点最大贡献占比为 20.90%和 20.73%),与现有研究结果一致,下一步要着重控制其排放.同时,在优化和调整钢铁厂布局,要充分考虑风向、距敏感点距离等因素.

参考文献:

[1] Tian H, Liu Y, Li Y, et al. An investigation of transmission control measures during the first 50 days of the COVID-19 epidemic in China [J]. Science, 2020,368(6491):638-642.

[2] 国家统计局.分省月度数据库-粗钢 [EB/OL]. https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=E0101.
National Bureau of Statistics. Monthly data by province-Crude steel [EB/OL]. https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=E0101.

[3] 国家统计局.月度数据库-粗钢 [EB/OL]. https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=A01.
National Bureau of Statistics. Monthly data-Crude steel [EB/OL]. https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=A01.

[4] 中国产业信息网.2020 年 1~10 月河钢集团邯钢公司钢材、粗钢、生铁产量及增速统计 [EB/OL]. https://www.chyxx.com/shuju/202101/920574.html.
China Industrial Information Network. Statistics on output and growth rate of steel, crude steel and pig iron of Handan Iron and Steel Co., Ltd. of Hegang group from January to October 2020 [EB/OL]. https://www.chyxx.com/shuju/202101/920574.html.

[5] 张宝军,郎红梅,毕晶秀,等.唐山新冠肺炎防疫期间空气质量变化特征及污染成因分析 [J]. 环境污染与防治, 2020,42(8):1033-1038.
Zhang B J, Lang H M, Bi J X, et al. Characteristics of air quality and causes of serious pollution during the COVID-19epidemic prevention in Tangshan [J]. Environmental Pollution & Control, 2020,42(8):1033-1038.

[6] Gulia S, Kumar A, Khare M. Performance evaluation of CALPUFF and AERMOD dispersion models for air quality assessment of an industrial complex [J]. 2015.

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

[8] Abdul-Wahab S, Fadlallah S, Al-Rashdi M. Evaluation of the impact of ground-level concentrations of SO_2, NO_x, CO, and PM_{10} emitted from a steel melting plant on Muscat, Oman [J]. Sustainable Cities and Society, 2018,38:675-683.

[9] 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 lts lmpact on $PM_{2.5}$ [J]. Environmental Science, 2018,39(4):1445-1454.

[10] 汤 铃,薛晓达,伯 鑫,等.中国钢铁行业大气环境影响 [J]. 环境科学, 2020,41(7):2981-2994.
Tang L, Xue X D, Bo X, et al. Contribution of emissions from the iron and steel industry to air quality in China [J]. Environmental Science, 2020,41(7):2981-2994.

[11] 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):1493-1506.
Tang L, Jia M, Bo X, et al. High resolution emission inventory and atmospheric environmental impact research in Chinese iron and steel industry [J]. China Environmental Science, 2020,40(4):1493-1506.

[12] 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.

[13] Tang L, Xue X, Jia M, et al. Iron and steel industry emissions and contribution to the air quality in China [J]. Atmospheric Environment, 2020,237:117668.

[14] 宋 宇,陈家宜,蔡旭晖.石景山工业区 PM_{10} 污染对北京市影响的模拟计算 [J]. 环境科学, 2002,(S1):65-68.
Song Y, Chen J Y, Cai X H. The Modeling of PM_{10} Contribution to Beijing by the Shijingshan Industrial Area [J]. Environmental Science, 2002,(S1):65-68.

[15] 伯 鑫,杨朝旭,马 岩,等.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.2019 中国环境科学学会科学技术年会论文集(第一卷), 2019:652-656.
Bo X, Yang C X, Ma Y et al. Study on optimal layout of urban iron and steel plants based on air quality model AERMOD [C]//Chinese Society for Environmental Sciences. Proceedings of science and technology annual meeting of Chinese society of Environmental Sciences in 2019 (Volume I), 2019:652-656.

[16] 邯郸市卫生健康委员会 [EB/OL]. http://wjw.hd.gov.cn/news/20_37_18956.shtml.2020-02-01.
Health Commission of Handan [EB/OL]. http://wjw.hd.gov.cn/news/20_37_18956.shtml.2020-02-01.

[17] 伯 鑫,雷团团,杨朝旭,等.企业大气污染预报系统 [C]//中国环境科学学会.2020 中国环境科学学会科学技术年会论文集(第一卷), 2020:5.
Bo X, Lei T T, Yang C X, et al. Enterprise air pollution forecast system [C]//Chinese Society for Environmental Sciences. Proceedings of science and technology annual meeting of Chinese Society of Environmental Sciences in 2020 (Volume I), 2020:5.

[18] 伯 鑫,李时蓓,吴忠祥,等.基于反演模型的焦炉无组织苯并[a]芘排放因子研究 [J]. 中国环境科学, 2016,36(5):1340-1344.
Bo X, Li S B, Wu Z X, et al. Determination of benzo (a) pyrene emission factor using inverse model [J]. China Environmental Science, 2016,36(5):1340-1344.

[19] 伯 鑫,王 刚,田 军,等.AERMOD 模型地表参数标准化集成系统

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

研究 [J]. 中国环境科学, 2015,35(9):2570−2575.
Bo X, Wang G, Tian J, et al. Standard systems of surface parameters in AERMOD [J]. China Environmental Science, 2015,35(9):2570−2575.

[20] 史梦雪,伯　鑫,田　飞,等.基于不同空气质量模型的二噁英沉降效果研究 [J]. 中国环境科学, 2020,40(1):24−30.
Shi M X, Bo X, Tian F, et al. Study on deposition effects of dioxins based on different air quality models [J]. China Environmental Science, 2020,40(1):24−30.

[21] 郭　斌,姜　晶.基于 AERMOD 模式的规划大气环境影响预测研究 [C]. 中国环境科学学会.2014 中国环境科学学会学术年会(第四章), 2014:1352−1355.
Guo B, Jiang J. Research on planning atmospheric environmental impact prediction based on AERMOD model [C]//Chinese Society for Environmental Sciences. Proceedings of science and technology annual meeting of Chinese Society of Environmental Sciences in 2014 (Volume Ⅳ), 2014:1352−1355.

[22] 马洁云,易红宏,唐晓龙,等.基于 AERMOD 及减排政策的昆明市工业 SO_2 情景模拟 [J]. 中国环境科学, 2013,33(10):1884−1890.
Ma J Y, Yi H H, Tang X L, et al. SO_2 scenario simulation of Kunming industrial park based on AERMOD modeling system and emission reduction policy [J]. China Environmental Science, 2013,33(10):1884−1890.

[23] 伯　鑫,武士蓉,丁　峰,等.基于 AERMOD 模式的固定源对不同楼层大气污染预测研究 [J]. 环境污染与防治, 2013,35(9):49−53.
Bo X, Wu S R, Ding F, et al. Air pollution prediction of fix pollution source on different floors of building based on AERMOD [J]. Environmental Pollution & Control, 2013,35(9):49−53.

[24] HJ 1130−2020　环境空气质量数值预报技术规范 [S].
HJ 1130−2020　Technical guideline for numerical forecasting of ambient air quality [S].

[25] 李传亮.相关系数的意义 [J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2010,32(6):74.
Li C L. Significance of correlation coefficient [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2010,32(6):74.

[26] 朱玉祥,黄嘉佑,丁一汇.统计方法在数值模式中应用的若干新进展 [J]. 气象, 2016,42(4):456−465.
Zhu Y X, Huang J Y, Ding Y H. Some new advances in application of statistical methods to numerical models [J]. Meteorological Monthly, 2016,42(4):456−465.

[27] 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(2):51−55.
Zhang S X, Bo X, Zhou T, et al. Study on standardization of AERMOD in the application of EIA in China [J]. Environmental Impact Assessment, 2018,40(2):51−55.

[28] 李厚宇,崔　磊,贾　敏,等.京津冀地区典型钢铁企业超低排放对空气质量的影响 [J]. 环境与发展, 2020,32(9):11−14.
Li H Y, Cui L, Jia M, et al. 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 [J]. Environment and Development, 2020,32(9):11−14.

作者简介：陈　雷(1980−),男,陕西安康人,高级工程师,硕士,主要从事生态环境空间管控和环境管理研究.发表论文 12 篇.

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