产能置换情景下钢铁企业防护距离影响研究

李英华[1],马啸天[2],刘坤坤[3],李建晖[4],陈少博[4],伯鑫[4,5]
(1.吉林化工学院资源与环境工程学院,吉林 吉林 132022;2.吉林化工学院信息与控制工程学院,吉林 吉林 132022;3.冶金工业规划研究院,北京 100013;4.北京化工大学化学工程学院,北京 100029;5.北京化工大学北化中国工业碳中和研究院,北京 100029)

摘要:基于辽宁省某钢铁企业的污染源排放数据,建立现状和产能置换实施后两种情景,利用CALPUFF模型模拟了两种情景下该钢铁厂各类污染物排放对厂区周边大气环境防护距离和卫生防护距离设置的影响。结果显示:钢铁企业产能置换项目的实施对各主要污染物的减排效果明显,各主要污染物中颗粒物、SO_2、NO_X分别减排约53.4%、16.2%、50.9%。产能置换项目实施后,相较于现状情景下,钢铁厂周边区域的大气防护距离和卫生防护距离均得到了减少。

关键词:防护距离;钢铁;CALPUFF;产能置换;超低改造
中图分类号:X51　**文献标识码**:A　**文章编号**:2095-672X(2024)03-0068-09
DOI.10.16647/j.cnki.cn15-1369/X.2024.03.013

Research on the influence of protective distance of iron and steel enterprises under the scenario of capacity replacement

Li Yinghua[1], Ma Xiaotian[2], Liu Kunkun[3], Li Jianhui[4], Chen Shaobo[4], Bo Xin[4,5]
(1. School of Resources and Environmental Engineering, Jilin Institute of Chemical Technology, Jilin Jilin 132022, China; 2. School of Information and Control Engineering, Jilin Institute of Chemical Technology, Jilin Jilin 132022, China; 3. China Metallurgical Industry Planning and Research Institute, Beijing 100013, China; 4. College of Chemical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China; 5. BUCT Institute for Carbon-neutrality of Chinese Industries, Beijing 100029, China)

Abstract:Based on the pollution source emission data of an iron and steel enterprise in Liaoning Province, Business-As-Usual (BAU) scenario and after the implementation of capacity replacement scenario were established. The CALPUFF model was used to simulate the influence of various pollutant emissions of the steel plant on the atmospheric environment protection zone and health protection zone settings around the plant under two scenarios. The results showed that the implementation of the capacity replacement project of iron and steel enterprises had a significant ef-

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

fect on the reduction of major pollutants. Among the major pollutants, emission of particulate matter, SO_2 and NO_X were reduced by about 53.4 %, 16.2 % and 50.9 %, respectively. After the implementation of the capacity replacement project, the atmospheric protection distance and health protection distance in the surrounding area of the steel plant were reduced compared with BAU scenario.

Key words: Protection distance; Iron and steel; CALPUFF; Capacity replacement; Ultra-low emission retrofit

近年来，中国粗钢产量逐年增加，整个中国东北地区粗钢产量也在逐年攀升，其中辽宁省的粗钢产量从2013年的5972.90万t增长到2020年的7609.40万t[1]，2020年辽宁省粗钢产量占全国总产量的7.1%。随着钢铁产量的增加，随之而来的钢铁厂区周边的空气污染问题也越来越严重，给工业园区周围居民的身体健康带来巨大影响，民众对钢铁工业园区卫生防护距离和大气防护距离设置问题的关注度持续增加[2,3]。为应对上述问题，2018年，辽宁省人民政府印发了《辽宁省打赢蓝天保卫战三年行动方案（2018—2020年）的通知》[4]。在此背景下，进一步确定各工业园区周边卫生防护距离和大气防护距离则显得尤为重要。

目前，一些研究者针对工业园区周边卫生防护距离和大气防护距离的确定开展了一系列研究。王栋成等[5]对基于SCREEN3模型的大气环境防护距离确定技术进行了研究，同时对比分析了现行的卫生防护距离与《环境影响评价 大气环境》（HJ 2.2—2008）规定的大气环境卫生防护距离确定方法的差异。伯鑫等[6]针对现有钢铁联合企业防护距离确定方法均未考虑复杂地形情况影响的问题，利用AER MOD模式预测复杂地形案例，对现行方法进行对比，分析其中可能存在的问题，确定了更符合实际防护距离的方法。同时为有效控制钢铁行业大气污染物排放，国内很多研究者对超低改造情景下钢铁企业的减排效果做了研究与分析。陈克斯等[7]于2013年提出钢铁工业作为我国环境污染的重要源头，存在着严重的产能过剩现象，为进一步优化我国工业结构，淘汰落后产能，钢铁行业需要持续推进产能置换。王国栋等[8]提出可以通过优化系列钢铁企业流程的工艺技术来提高钢铁企业的生产效率，实现钢铁工业的绿色制造，促进中国新型工业化进程。伯鑫[9]通过构建基于CEMS数据的高时空分辨率清单核算方法，编制了不同时期全国全工序钢铁排放清单并模拟了未来年情景下钢铁企业大气污染的环境影响，结果表明若中国钢铁行业达到发达国家产业结构与超低排放水平，其对大气污染物浓度的贡献比例可平均控制在0.31%以下。由此可见，在钢铁行业减排的行业大背景下，对钢铁企业实施超低改造、产能置换后可以达到较为理想的减排效果，同时可以很大程度上改善对工业厂区周围居民的影响。

而目前尚无研究对中国钢铁行业进行产能置换前后的厂区周边卫生防护距离和大气防护距离的影响进行较为详细的分析。为了更好的定量分析钢铁工业进行产能置换和超低改造对卫生防护距离和大气防护距离确定的影响，本研究以辽宁省凌源市某钢铁集团为具体研究对象，结合气象模式WRF生成中尺度气象数据，采用CALPUFF空气质量模式模拟了该钢铁集团2021年在现状和产能置换预设情景下SO_2、NO_x、TSP、PM_{10}、$PM_{2.5}$、NH_3、H_2S、BaP、二噁英、氟化物、苯、非甲烷总烃、酚类、HCN等各类污染物对周边环境短期内的贡献浓度，评估典型钢铁企业实现产能置换后对空气质量的影响，进而确定产能置换对于钢铁厂区防护距离（大气防护距离及卫生防护距离）的影响，为国内各工业园区评估确定周边防护距离提供科学支撑。

1 研究方法概述

1.1 研究对象

该研究对象为辽宁省凌源市以钢铁为主业，兼营新材料、新能源、矿产资源、金融、地产的某长流程大型企业。公司拥有烧结、焦化、炼铁、炼钢、轧钢等完整的钢铁生产流程，现已形成年产铁水535万t、粗钢600万t、钢材690万t的生产能力，其中粗钢产能

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

占2021年辽宁省粗钢产量的8%，钢材产能占2021年辽宁省钢材产量的8.9%[1]。该钢铁厂现有主要生产装备包括：180m²、240m²、320m²烧结机各1台；链算机回转窑1台；122孔焦炉1座；2300m³高炉1座，450m³、1000m³高炉各2座；转炉120 t、35 t各3座；棒材轧线5条；线材轧线1条；中宽热带轧线1条；600 t/d麦尔兹石灰窑2座；以及配套的余压余热发电系统、污水处理、固废处理等配套公辅、环保设施等。该钢铁厂厂区及周边不涉及生态保护区、自然保护区、风景名胜区、饮用水源保护区等环境敏感目标，环保目标主要为居民区，厂区及厂区周边环境保护目标具体平面见图1。

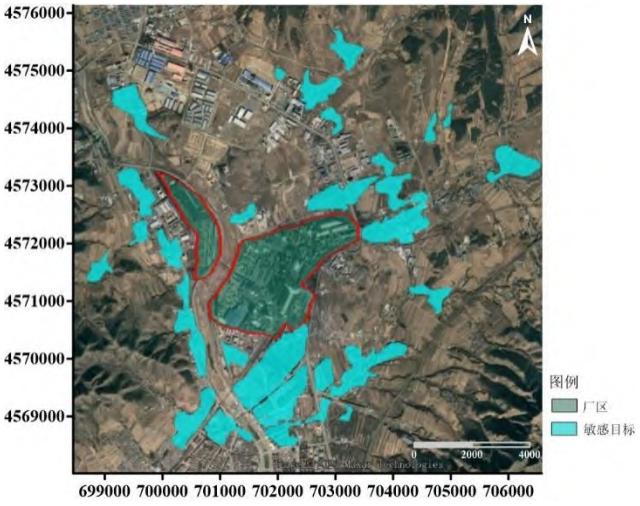


图1 厂区及敏感目标平面示意图(UTM坐标系，单位：m)

1.2 排放清单构建方法

本研究对象中所涉及到的钢铁厂排放清单数据，根据如下方法进行核算：针对现状情景下，由于该钢铁企业目前各工序产量已接近产能，根据2021年1—9月产量核算，主体工序铁、钢产能利用率分别达到97.7%、93%以上，因此对于已安装在线的排放源取2021年1—9月在线监测平均值，未安装在线的排放源取自2021年前三季度、月度、验收报告及年度监测报告中的平均值。具体核算方法如下：

$$E_{m,i,p} = T_i \times V_{m,i} \times C_{m,i,p} \quad (1)$$

式中，E_m为污染物排放量，t；T为年排放小时，h；V_m为在线监测排口排风量均值，$m^3 \cdot h^{-1}$；C_m为在线监测排口污染物浓度均值；i为废气排放设施；p为污染物种类。

1.3 基于CALPUFF模型模拟的大气环境防护距离核算方法

CALPUFF模式系统是中国生态环境部、美国环境署推荐的用于模拟污染物输送、转化和清除过程的法规模式[10-12]。在行业应用中较为常见的中尺度气象模式有MM5和WRF，其中WRF的使用较为广泛，WRF可利用地形、土地类型、气象观测数据以及全球气象初始场数据，预测更高时空分辨率的气象场[13]。该研究采用WRF气象模式和含有简单化学机制的CALPUFF模式对本研究对象排放大气污染物的环境影响进行预测。

WRF模式的模拟采用兰伯特(Lambert)投影方式，中心点经纬度41.27°N，119.41°E。模拟采用三层网格嵌套，D01覆盖中国华北区域，D02覆盖该钢铁厂所处地级市区域，D03主要覆盖该钢铁厂所处地区及周边区域，三层网格分辨率分别为9km、3km、1km。垂直共分为32层，最高层为100hpa[14]。区域内地形高度和土地利用类型等资料来自美国地质勘探局(USGS)精度90m数据[15]。CALPUFF在进行预测时采用UTM坐标系，CALPUFF其他参数选用模式的推荐值。地形采用航天飞机雷达拓扑测绘SRTM的90m分辨率数据[16]。气象数据采用中尺度气象模式WRF数据，结合当地地面气象数据，生成CALMET三维气象场。考虑到烟团的回流等情况，CALMET气象网格和CALPUFF计算网格均在预测范围各方向设置了一定的缓冲区，最终的气象网格范围为9km×12km，分辨率为0.05km。本研究在进行预测时采用直角坐标系网格受体，以规划区域中心(左下角UTM坐标：698.0km，4566.6km)为预测中心点，设置格距为50m的网格受体，横向网格数为180，纵向网格数为240，垂直分层为10层。

大气环境防护距离指为保护人群健康，减少正常排放条件下大气污染物对居住区的环境影响，在污染源与居住区之间设置的环境防护区域。在大气环境

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

防护距离内不应有长期居住的人群。根据环评[17]要求，大气环境防护距离为厂区内技改后所有污染源正常排放时的短期贡献浓度超标的区域。本研究将本项目现状及改造后污染源源强分别代入到CALPUFF模型中，计算大气环境防护距离。

1.4 卫生防护距离核算方法

根据《大气有害物质无组织排放卫生防护距离推导技术导则》(GB/T 39499—2020)[18]中卫生防护距离计算公式，计算该钢铁厂各生产车间的卫生防护距离，计算公式如下：

$$\frac{Q_C}{C_m}=\frac{1}{A}\left(BL^C+0.25r^2\right)^{0.5}L^D \quad (2)$$

式中：C_m为环境一次浓度标准限值(mg/m³)；Q_c为有害气体无组织排放量可以达到的控制水平(kg/h)；r为有害气体无组织排放源所在生产单元的等效半径(m)；L为工业企业所需的卫生防护距离(m)；B、C、D为计算系数。

1.5 排放情景设置

本研究共设置两个情景，分别是现状情景和产能置换后情景。现状情景为该钢铁厂现有设备排污水平。针对产能置换情景下，该钢铁厂拟通过产能置换、装备升级，彻底淘汰现有老区限制类炼钢生产设施，结合老厂区现有实际情况，拟淘汰现有3座35 t转炉，在炼钢车间内置换1座120 t转炉，使该钢铁厂炼钢装备全部满足国家产业指导目录要求。在此基础上进一步制定相应的超低改造规划，包括有组织、无组织、监测监控方面。在2022年产能置换项目实施的同时开展47个改造项目，从而进一步减少对区域大气环境质量的影响。现状情景下年排放浓度及风量等参数按照实际情况以及设计参数进行考虑。

对于产能置换情景，年排放浓度及风量的核算，实施改造的项目按设计值或类比现有源，未实施改造的排放源取现有工程排放浓度及风量。另外，涉及源强的其他参数，未实施改造的排放源烟囱高度、内径、烟温、位置等同现状，实施改造或新增的排放源烟囱高度、内径、烟温按设计值进行确定。对于无组织排放的治理，原料、烧结机、回转窑、高炉、转炉车间颗粒物采用排污系数法核算，系数根据《排污许可证申请与核发技术规范 钢铁工业》(HJ 846—2017)[19]，结合企业改造方案及预期效果部分进行调整。

2 结果与讨论

2.1 产能置换前后污染物排放量变化分析

表1 产能置换实施前后污染物排放总量变化

污染物	现有工程排放量(t)	超低排放实施后排放量(t)	减少量(t)	减排比例(%)
颗粒物	4210.04	1962.80	2247.23	53.4
SO_2	1760.88	1476.49	284.39	16.2
NO_X	3788.54	1860.36	1928.19	50.9
二噁英	600	606.2	−6.2	−1.03
氟化物	32.54	32.89	−0.34	−1.1
BaP	0.0036	0.0004	0.0032	88.9
NH_3	5.26	0.59	4.67	88.7
H_2S	0.22	0.03	0.19	86.6
苯	0.38	0.04	0.34	90.2
酚类	0.0075	0.0075	–	–
HCN	0.0075	0.0075	–	–
非甲烷总烃	1.61	1.61	–	–
CO	8769.60	2184.00	6585.60	75.1

注：单位为t/a，其中二噁英排放量单位为mgTEQ/a。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

按目前装备及环保治理水平，现状情景下该钢铁厂达产情况下2021年污染物排放总量约为颗粒物4210.04 t、SO_2 1760.88 t、NO_X 3788.54 t。产能置换情景下该钢厂达产情况下污染物年排放总量约为颗粒物1962.80 t、SO_2 1476.49 t、NO_X 1860.36 t。其中在各类污染物减排情景下，苯的减排比例最高，为90.2%；BaP和NH_3的减排比例分别为88.9%和88.7%；H_2S和CO的减排比例分别为86.6%和75.1%；颗粒物和NO_X的减排比例分别为53.4%和50.9%；SO_2减排比例为16.2%。产能置换项目实施前后污染物排放总量变化情况具体见表1。

2.2 产能置换前后大气环境防护距离变化分析

以现状情景下污染源的各污染物排放量为依据，预测现状情景污染源对厂界外网格点SO_2、NO_X、PM_{10}、$PM_{2.5}$、NH_3、BaP、H_2S、二噁英、氟化物、苯、非甲烷总烃、酚类、HCN短期浓度占标率，通过计算结果可知SO_2、NH_3、BaP、H_2S、二噁英、氟化物、苯、非甲烷总烃、酚类、HCN等特征因子均未存在超标点，厂界浓度及厂界外大气污染物短期贡献浓度均未超标，不需要设置大气环境防护距离。而NO_X、PM_{10}及$PM_{2.5}$的短期贡献浓度均出现了不同程度的超标，因此需设置相应的大气环境防护距离。计算参数和计算结果见表2。

表2 现状及产能置换情景下基于CALPUFF模型模拟的大气防护距离核算表

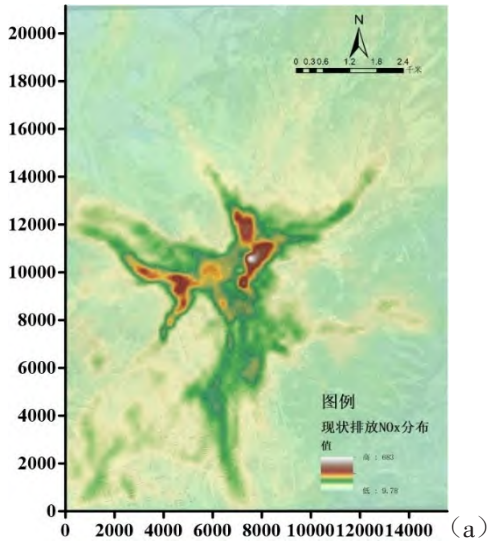
污染物	情景设置	最大落地浓度点(km)	浓度贡献	标准值	占标率(%)	计算结果
SO_2	现状	700.625 4571.775	3.97E+02	500	79.39	不需设置大气防护距离
	置换后	700.625 4572.075	3.12E+02		62.39	不需设置大气防护距离
NO_X	现状	702.275 4572.525	6.83E+02	250	273.20	需要设置大气防护距离
	置换后	700.775 4572.075	2.38E+02		95.34	不需设置大气防护距离
PM_{10}日均	现状	702.425 4572.075	1.92E+02	150	127.83	需要设置大气防护距离
	置换后	702.425 4572.225	6.59E+01		43.94	不需设置大气防护距离
$PM_{2.5}$日均	现状	702.575 4572.375	8.00E+01	75	106.62	需要设置大气防护距离
	置换后	700.625 4571.475	2.85E+01		38.03	不需设置大气防护距离
NH_3	现状	701.825 4571.175	1.07E+02	200	53.31	不需设置大气防护距离
	置换后	702.125 4571.625	9.34E+00		4.67	不需设置大气防护距离
BaP	现状	702.125 4571.625	8.30E-08	0.0025	0.003	不需设置大气防护距离
	置换后	702.125 4571.625	7.60E-09		0.000	不需设置大气防护距离
H_2S	现状	701.825 4571.175	4.37E+00	10	43.66	不需设置大气防护距离
	置换后	702.125 4571.625	6.90E-01		6.90	不需设置大气防护距离
二噁英	现状	702.275 4571.7	1.13E-01	3.6	3.13	不需设置大气防护距离
	置换后	702.275 4571.7	1.23E-01		3.42	不需设置大气防护距离
氯化物	现状	699.575 4572.3	4.06E+00	20	20.30	不需设置大气防护距离
	置换后	699.425 4567.2	4.21E+00		21.05	不需设置大气防护距离
苯	现状	702.275 4571.775	1.10E+01	110	10.00	不需设置大气防护距离
	置换后	702.125 4571.625	8.71E-01		0.79	不需设置大气防护距离
非甲烷总烃	现状	702.125 4571.625	3.75E+01	2000	1.87	不需设置大气防护距离
	置换后	702.125 4571.625	3.75E+01		1.87	不需设置大气防护距离
酚类	现状	702.875 4572.225	1.74E-01	20	0.85	不需设置大气防护距离
	置换后	702.875 4572.225	1.27E+00		1.27	不需设置大气防护距离
HCN	现状	702.875 4572.225	1.74E-01	30	0.58	不需设置大气防护距离
	置换后	702.875 4572.225	2.25E-01		0.75	不需设置大气防护距离

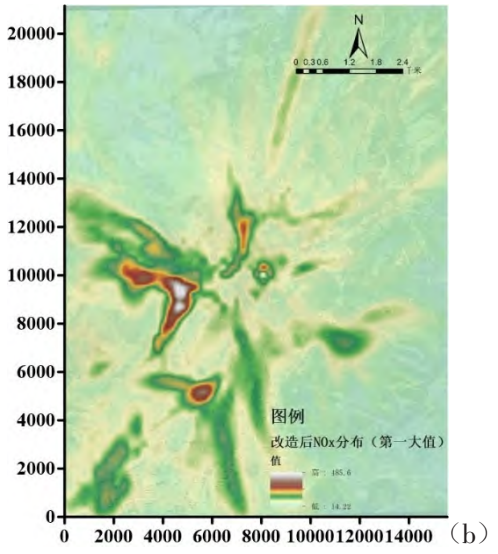
注：各污染物浓度为 μg/m³，其中二噁英浓度为 pgTEQ/m³。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

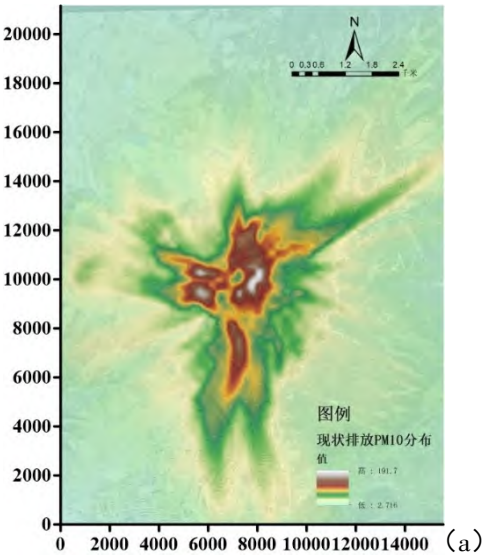
以产能置换后情景下污染源的各污染物排放量为依据，预测产能置换后情景下污染源对厂界外网格点 SO_2、NO_x、PM_{10}、$PM_{2.5}$、NH_3、BaP、H_2S、二噁英、氟化物、苯、非甲烷总烃、酚类、HCN 短期浓度占标率，通过计算结果可知 SO_2、NO_x、PM_{10}、$PM_{2.5}$、NH_3、BaP、H_2S、二噁英、氟化物、苯、非甲烷总烃、酚类、HCN 等特征因子均未存在超标点，厂界浓度及厂界外大气污染物短期贡献浓度均未超标，不需要设置大气环境防护距离。具体计算参数和计算结果见表2。

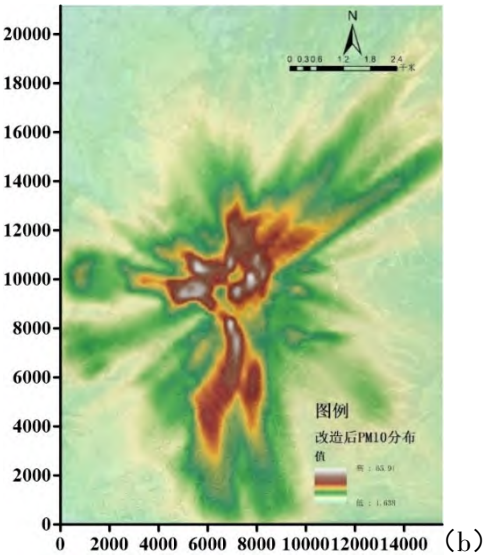
现状情景和产能置换情景下 NO_x 最大小时浓度分布情况、PM_{10} 最大日均浓度分布情况、$PM_{2.5}$ 最大日均浓度分布情况见图2。



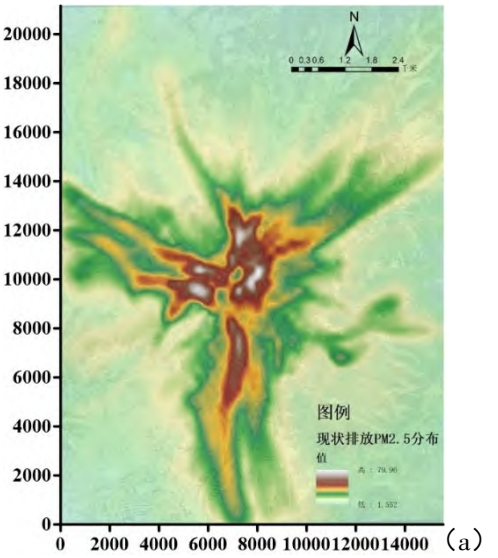


NO_x 最大小时浓度分布情况

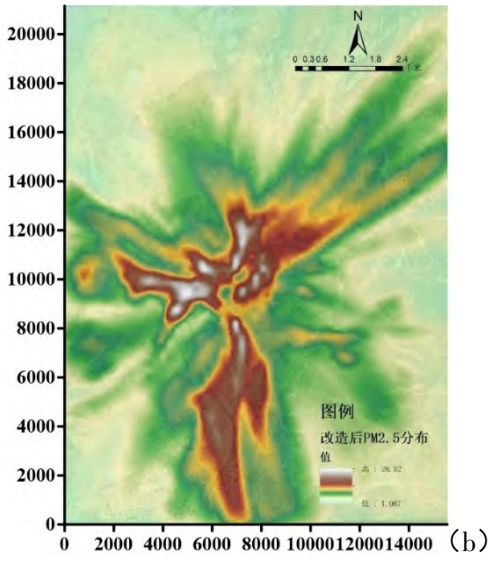




PM_{10} 最大日均浓度分布情况



(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



$PM_{2.5}$最大日均浓度分布情况

注:(a)现状情景;(b)产能置换情景

图2 污染物平均浓度分布图

2.3 产能置换前后卫生防护距离变化分析

将现状情景和产能置换情景下各污染物的模拟浓度代入卫生防护距离计算公式,计算后可得现状情景和产能置换情景下的卫生防护距离,具体结果见表3。由前后计算结果可知经过产能置换项目的实施,该钢铁厂周边卫生防护距离的设置有了明显的变化,其中1#烧结机车间的卫生防护距离减少最多,为1100m;1-3#焦炉(炉体)和1#烧结机车间卫生防护距离的减少次之,为900m,对周边居民的潜在健康影响进一步减小。

2.4 不确定分析

因该钢铁厂在实施产能置换项目时,为分阶段分批次对厂区落后产能设备进行置换,所以在此过程中存在置换周期过长、置换期间空气质量影响不明确等一系列不确定因素,导致在本研究的实验模拟过程中存在模型污染源数据输入不准确等不确定性因素,进而影响本研究针对产能置换后的各污染物浓度分析的精确度。在此基础上计算得出的防护距离也会有一定程度的误差。

表3 产能置换前后卫生防护距离计算结果统计表 单位:m

车间	TSP	PM_{10}	$PM_{2.5}$	BaP	NH_3	苯	H_2S	非甲烷总烃	酚	HCN	CO	最终
洗精煤料场	100(50)	50(50)	50(50)	-	-	-	-	-	-	-	-	100(50)
1#北门原料场	400(100)	100(50)	100(50)	-	-	-	-	-	-	-	-	400(100)
2#新区原料场	1000(50)	400(50)	300(50)	-	-	-	-	-	-	-	-	1000(50)
高炉喷煤料棚	-(50)	-(50)	-(50)	-	-	-	-	-	-	-	-	-(50)
1#烧结机	1400(300)	700(100)	600(100)	-	-	-	-	-	-	-	-	1400(300)
2#烧结机	1200(300)	1000(100)	900(100)	-	-	-	-	-	-	-	-	1200(300)
3#烧结机	300(300)	100(100)	100(100)	-	-	-	-	-	-	-	-	300(300)
回转窑	200(50)	50(50)	50(50)	-	-	-	-	-	-	-	-	200(50)

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

续表3

1-3#焦炉（炉体）	100(50)	100(50)	50(50)	1200(300)	200(50)	50(50)	100(50)	-	-	-	-	1200(300)
1-3#焦炉（备煤）	50(50)	50(50)	50(50)	-	-	-	-	-	-	-	-	50(50)
1-3#焦炉（化产）	-(50)	-(50)	-(50)	50(50)	50(50)	50(50)	50(50)	50(50)	50(50)	50(50)	-	50(50)
1#高炉	600(300)	300(200)	300(200)	-	-	-	-	-	-	-	600(600)	600(600)
2#高炉	600(300)	300(200)	300(200)	-	-	-	-	-	-	-	600(600)	600(600)
3#高炉	700(400)	400(200)	300(200)	-	-	-	-	-	-	-	700(-)	700(400)
4#高炉	800(400)	400(200)	400(200)	-	-	-	-	-	-	-	700(-)	800(400)
5#高炉	1000(300)	500(100)	500(100)	-	-	-	-	-	-	-	1000(-)	1000(300)
1-3#35t 转炉	700(200)	300(50)	200(50)	-	-	-	-	-	-	-	-	700(200)
1#120t 转炉	500(200)	200(50)	100(50)	-	-	-	-	-	-	-	-	500(200)
2-3#120t 转炉	700(300)	200(100)	200(50)	-	-	-	-	-	-	-	-	700(300)

注:()内为产能置换后的卫生防护距离,单位均为m。

3 结论

(1)按照本研究所预设的产能置换情景,该钢铁厂在实施产能置换项目后,各污染物的排放量都得到了一定程度的降低,可以达到预设的减排要求,其中各主要污染中颗粒物、SO_2、NO_x分别减少约53.4%、16.2%、50.9%。

(2)产能置换项目按照预设实施后,该钢铁厂周边区域的大气防护距离为0m,同时各车间的卫生防护距离也得到了减小,其中1#烧结机车间的卫生防护距离减少最多,为1100m;1-3#焦炉(炉体)和1#烧结机车间卫生防护距离的减少次之,为900m。由此可见,在响应国家针对钢铁企业进行产能置换和超低改造政策大背景之下,积极响应国家产业结构调整政策,可以有效减少钢铁厂区各环境污染物的排放量,同时厂区周边大气防护距离和卫生防护距离均得到了减小,对周边居民的身体健康影响也会进一步减轻。

参考文献

[1]国家统计局. 国家数据. 工业产品总量[EB/OL]. https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01.

[2]Bo X, Jia M, Xue X, et al. Effect of strengthened standards on Chinese ironmaking and steelmaking emissions[J]. Nature Sustainability, 2021, 4(9): 811-820.

[3]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.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[4]辽宁省人民政府. 辽宁省人民政府关于印发辽宁省打赢蓝天保卫战三年行动方案(2018—2020年)的通知[EB/OL]. http://www.ln.gov.cn/zfxx/zfwj/szfwj/zfwj2011_125195/201810/t20181023_3331201.html.

[5]王栋成, 王静, 曹洁, 等. 大气环境防护距离与卫生防护距离确定技术方法对比研究[J]. 气象与环境学报, 2009,25(4):66-71.

[6]伯鑫, 张玲, 刘梦, 等. 复杂地形下确定钢铁联合企业防护距离研究[J]. 环境工程, 2011(S1): 298-302.

[7]陈克新. 解决钢铁产能过剩需要产业置换[J]. 中国经贸, 2013 (17): 31-31.

[8]王国栋. 钢铁行业技术创新和发展方向[J]. 钢铁, 2015, 50(9): 1-10.

[9]伯鑫. 中国钢铁行业大气污染物排放特征及其环境影响研究[D]. 北京科技大学,2020.

[10]伯鑫, 丁峰, 徐鹤, 等. 大气扩散CALPUFF 模型技术综述[J]. 环境监测管理与技术, 2009 (3): 9-13.

[11]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.

[12]Xu X, Wang C, Wang P, et al. Bio-aerosol dispersion and environmental risk simulation: Method and a case study for a biopharmaceutical plant of Gansu province, China[J]. Science of The Total Environment, 2023, 860: 160506.

[13]SCIRE J S,STRIMAITIS D G,YAMARTINO R J. A user's guide for the CALPUFF dispersion model(Version 5) [M]. Concord,MA: Earth Tech, 2000:1-79.

[14]杨景朝,蒋兴文,伯鑫,等.WRF模式最优参数化方案在不同空气质量模式的应用[J].环境科学,2023,44(1):104-117.

[15]美国地质勘探局. 全球地形高程数据[EB/OL].https://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/.

[16]王成鑫,楚英豪,阮建辉,等.AERMOD模型地表参数更新对模拟效果影响[J]. 中国环境科学,2022,42(5):2070-2077.

[17]生态环境部. 环境影响评价技术导则 大气环境:HJ 2.2-2018,[S]. 北京:生态环境部,2018.

[18]国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会. 大气有害物质无组织排放卫生防护距离推导技术导则:GB/T 39499-2020,[S]. 北京:中国标准出版社,2020.

[19]环境保护部. 排污许可证申请与核发技术规范 钢铁工业:HJ 846-2017,[S]. 北京:中国环境科学出版社,2017:7.

收稿日期:2023-02-22

基金项目:国家自然科学基金项目(72174125);中央高校基本科研业务费资助(buctrc202133)。

作者简介:李英华(1972—),吉林省吉林市人,教授,主要研究方向为环境污染物源解析,发表论文30 余篇。

通讯作者:伯鑫(1983—),男,教授,研究方向为排放清单及大气污染模拟。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net