基于 CALPUFF 模型模拟沧州市铸造行业减排效果评估

雷团团[1]，李时蓓[1]，伯鑫[1]，屈加豹[1]，马岩[1]，毛娜[2]，路瑞娟[2]

1. 生态环境部环境工程评估中心，北京 100012；2. 沧州市生态环境保护科学研究院，河北沧州 061000

摘要： 采用 CALPUFF 模型，评估铸造行业提升改造后对沧州市空气质量的改善效果。以 2017 年为基准年进行核算，从炉窑改造、末端治理技术升级、无组织排放管控三个角度进行情景分析。在执行减排策略下，沧州市铸造行业 SO_2、NO_x、$PM_{2.5}$、VOCs 减排量分别达 224.4 t/a、282.1 t/a、5631.9 t/a、245.6 t/a，较现状排放情景减排效率分别为 50.95%、41.13%、80.28%、55.74%。模拟结果显示，现状情景下 SO_2、NO_x、$PM_{2.5}$、VOCs 对国控点的年均浓度贡献值分别为 0.09 μg/m³、0.12 μg/m³、1.58 μg/m³、0.08 μg/m³，优化情景下 SO_2、NO_x、$PM_{2.5}$、VOCs 对国控点的年均浓度贡献值分别为 0.05 μg/m³、0.08 μg/m³、0.40 μg/m³、0.04 μg/m³，$PM_{2.5}$浓度下降 1.18 μg/m³，改善效果显著。

关键词： 铸造行业；大气污染；CALPUFF 模型；减排效果评估

DOI： 10.14068/j.ceia.2021.05.015

中图分类号： X51 **文献标识码：** A **文章编号：** 2095-6444(2021)05-0068-07

Evaluation of Emission Reduction of Cangzhou Foundry Industry Based on CALPUFF

LEI Tuantuan[1], LI Shibei[1], BO Xin[1], QU Jiabao[1], MA Yan[1], MAO Na[2], LU Ruijuan[2]

1. Appraisal Center for Environment and Engineering, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100012, China;
2. Ecology and Environmental Protection Science Research Institute of Cangzhou, Cangzhou 061000, China

Abstract: This study evaluated the impact of improvement degree of environmental air quality in Cangzhou after the upgrades and transformation of the foundry industry by CALPUFF model. In this study, 2017 was taken as the baseline year for accounting, and scenario analysis was made from three perspectives: fumace renovation, terminal management technology upgrades, disorganized emission control. Under the reduction strategy, the emission reduction of SO_2, NO_x, $PM_{2.5}$ and VOCs in Cangzhou foundry industry was 224.4 t/a, 282.1 t/a, 5631.9 t/a, 245.6 t/a. Compared with the baseline emission scenario, the reduction ratio was 50.95%, 41.13%, 80.28% and 55.74% respectively. The simulation results showed that average annual concentration contributions to national control points of SO_2, NO_x, $PM_{2.5}$ and VOCs were 0.09 μg/m³, 0.12 μg/m³, 1.58 μg/m³, 0.08 μg/m³ respectively under the baseline scenario and 0.05 μg/m³, 0.08 μg/m³, 0.40 μg/m³, 0.04 μg/m³ respectively under the emission reduction scenario, $PM_{2.5}$ concentration decreased by 1.18 μg/m³, showing significant emission reduction effect.

Key words: foundry industry; air pollution; CALPUFF; assessment of emission reduction effect

收稿日期： 2020-08-03

基金项目： 国家自然科学基金资助项目(71673107)；大气重污染成因与治理攻关项目(DQGG0209-07、DQGG0304-07)

作者简介： 雷团团(1993—)，女，河北石家庄人，硕士，助理工程师，主要研究方向为大气污染排放清单及数值模拟研究，E-mail：530767904@qq.com

通讯作者： 李时蓓(1962—)，女，江苏徐州人，学士，研究员，主要从事环境质量模型法规化与标准化研究，E-mail：lisb@acee.org.cn

近年来，国务院相继印发实施《大气污染防治行动计划》以及《打赢蓝天保卫战三年行动计划》等来改善大气环境，越来越多的行业被纳入大气污染治理范围内。2016 年对铸造行业的调查研究结果显示，我国铸造行业仅有 34.9%的大气污染治理设备可以做到达标排放[1]，铸造企业末端治理设备的使用效果较低，行业整体治理水平较低。刘树生等[2]通过对铸造行业颗粒物排放水平的研究，也指

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

出我国铸造行业使用的环保设备无法满足达标排放的需求，仍有较大减排空间，而大多数企业在综合考虑经济成本、效益等因素下，会选择恰好满足排放标准的要求而不做进一步的减排考虑[3]。

刘树生等[4]对铸造行业的工艺及治理措施进行了梳理，指出了铸造行业在大气治理措施上的改善方向；瞿艳芝等[5]在详细分析铸造行业产污环节的基础上，介绍了欧盟的相关标准规范，给国内铸造企业提供了可行的治污建议。目前，对铸造行业的研究多集中在末端治理技术上，暂无针对铸造行业减排对城市空气质量改善程度的相关研究。污染源排放清单编制技术与空气污染模拟技术在大气污染防治研究及预测方面已有较广泛的应用，对于研究不同情景下的空气质量改善效果有较好的作用。

沧州市铸造产业聚集，产能较大(产能占全国总产能的 10%)，铸造行业深入开展减排效果评估，对沧州市大气污染防治工作具有重要的意义。2018 年，《沧州市打赢蓝天保卫战三年行动方案》提出要着力推进铸造行业整改提升。鉴于此，本研究基于 2017 年沧州市大气污染源排放清单及行业现状，从炉窑改造、末端治理技术升级、无组织排放管控三个角度进行情景分析研究，同时采用 CALPUFF 空气质量模型进行减排前、后的环境质量模拟，评估其减排效果，为沧州市深化铸造行业污染治理提供数据支撑。

1　研究区域与研究方法

1.1　研究区域及现状

本研究范围为沧州市全域，共有铸造企业 965 家，企业位置见图 1。企业聚集程度较高，多数为“作坊式”小企业，环保治理设施效率低、无组织排放突出，对其进行减排效果评估对其他地区铸造行业减排具有重要的参考意义。

沧州市目前多采用电炉铸造，铸造金属含铁、钢、铜、铝等，铸件类型为黑色金属铸造，使用的铸造工艺一般为树脂砂铸造、消失模铸造、覆膜砂铸造、蜡模铸造等。铸造业的主要产排污节点在浇筑、抛丸、落砂、砂回用、熔蜡、脱蜡等环节，其中在混砂、浇筑、落砂、砂回用等工序会产生大量的 $PM_{2.5}$；在造型、浇筑、熔化、表面涂装等工序会有挥发性有机物(VOCs)产生；在造型、熔化、热处理等环节也会产生 SO_2、NO_x。2017 年，原环境保护部环境工程评估中心项目组通过实地调研校验[6]，收集了包括工序工段、设备、治理技术等企业活动水平数据，并采用“自下而上”的方法计算得到铸造行业大气污染物排放量。

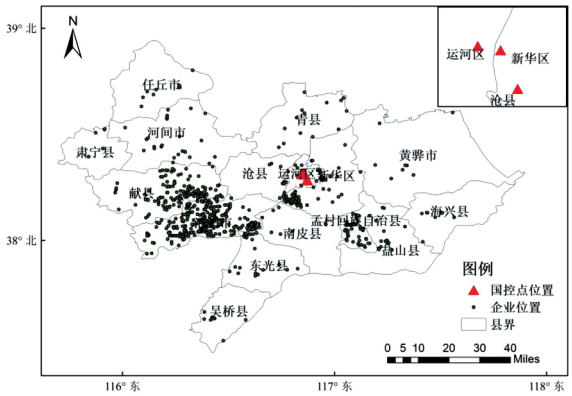


图 1　沧州市铸造企业位置示意图

Fag. 1 Schematic diagram of the location of foundry enterprises in Cangzhou

1.2　模型参数设置与数据来源

CALPUFF(California Puff Model)模型是三维非稳态拉格朗日扩散模式，能很好地处理 50 km 以上距离范围的污染物运输，具有生成和处理复杂三维风场及复杂地形算法的能力，目前已得到了广泛应用[7-8]，能很好地模拟沧州市污染物扩散变化规律。

本研究使用 CALPUFF 模型(6.42 版本)模拟铸造行业减排前后对沧州市大气环境质量的影响，采用中尺度气象模式 WRF(ARW3.9.1.1)模拟数据作为 CALWRF 输入数据，获得 CALPUFF 模型适用的模拟气象场，WRF 参数设置见表 1，此设置已在多个研究中获得较好的应用[9-11]。CALPUFF 模块源强以点源方式输入，模拟污染物为 SO_2、NO_x、一次 $PM_{2.5}$、VOCs，另外，在 CALPUFF 模型输出选项中勾选了源贡献，可根据各污染源所在地区及部门分析污染物浓度贡献，具体参数设置见表 2。

将 CALPUFF 模型模拟出的一次 $PM_{2.5}$ 浓度贡献值同时叠加 SO_2、NO_x 前体物的转化比率估算二次转化 $PM_{2.5}$ 的浓度，得到 $PM_{2.5}$ 的浓度贡献值。本研究采用已有成果[12]中污染物前体物的转化比率(SO_2 为 0.45，NO_x 为 0.51，VOCs 为 0.2)，$PM_{2.5}$ 浓度贡献值计算见公式(1)：

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

$$C_{PM_{2.5}} = C_{一次PM_{2.5}} + C_{SO_2} \times 0.45 + C_{NO_x} \times 0.51 + C_{VOCs} \times 0.2 \quad (1)$$

式中，$C_{PM_{2.5}}$ 为 $PM_{2.5}$ 浓度贡献值，$\mu g/m^3$；$C_{一次PM_{2.5}}$ 为一次 $PM_{2.5}$ 浓度贡献值，$\mu g/m^3$；C_{SO_2} 为 SO_2 浓度贡献值，$\mu g/m^3$；C_{NO_x} 为 NO_x 浓度贡献值，$\mu g/m^3$。

表 1 WRF 模式参数设置

Table 1 Parameter setting of WRF

微物理	长波辐射	短波辐射	陆面过程	积云对流	边界层	近地层
WSM6	RRTM	Dudhia	热量扩散方案	Kain-Fritsch	YSU 方案	Monin-Obukhov

表 2 CALPUFF 模型数据来源

Table 2 Data source of CALPUFF

模块	参数	数据/数据来源
CALMET	地形文件	90 m 美国地质勘探局(USGS)地形数据
	土地利用类型	30 m 全国土地利用数据[13]
	气象	WRF 中尺度气象数据
CALPUFF	坐标系	横轴墨卡托投影系统(UTM)
	地形高程	90 m USGS 地形数据
	模拟范围	319 km×242 km
	水平网格分辨率	3 km×3 km
	垂直层次	10
	计算步长	1 h
	排气筒参数(高度、内径、烟气流速等)	环评报告

1.3 情景设计与减排量计算

本文设计了现状情景和优化情景进行对比分析。

现状情景：以 2017 年沧州市大气污染物排放清单为基准形成现状污染物排放情景。

优化情景：在现状情景的基础上，根据铸造行业现状、未来治理措施方向等文献及沧州市对铸造业的提升整改措施，假定在无组织排放管控、末端治理和清洁能源替代方面均实现最佳可行性污染防治而形成的优化减排情景。主要减排措施如下：

(1) 在废气收集方面，物料与涉及喷涂的工序在密闭环境下储存或进行生产，在其他涉及无组织废气排放的工序上安装高效集气罩，并配备除尘设备[2]。

(2) 在末端治理方面，在烟气和粉尘排放环节中，统一采用袋式除尘器等高效除尘设施，涉 VOCs 工序时采用“活性炭+光催化氧化”等二级处理措施；依据《铸造工业大气污染物排放标准(征求意见稿)》编制说明，涉 SO_2、NO_x 工序时，均设定其达到较高的治理效率。

(3) 在炉窑改造方面，以沧州市发布的《关于工业炉窑治理的专项实施方案》为依据，除冲天炉外，设定将现有的使用焦炭、煤炭等的炉窑改为采用电、天然气等清洁能源代替。

表 3 情景对比

Table 3 Scenario comparison

措施		现状情景	优化情景
无组织排放管控		多数安装简易集气罩，收集效率为 20%~30%	密闭环境下储存或生产；安装高效集气罩，集气效率达 80%~90%，并配备除尘设备[2]
末端治理技术升级	涉烟粉尘工序	普通除尘，平均去除效率为 93%[12]	袋式除尘，去除效率为 99.6%[6]
	涉 SO_2 工序	多数企业无相关治理措施	湿法脱硫技术，去除效率为 85%[2]
	涉 VOCs 工序	多数为光催化氧化或无治理措施，平均去除效率为 40%[14]	“活性炭+光催化氧化”等二级处理措施，去除效率为 60%[5]
炉窑改造		电、天然气、焦炭、煤炭等	电、天然气等清洁能源

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

通过上述减排措施，用未采取减排措施前的排放量减去采取减排措施后的排放量来计算减排量，计算公式见(2)：

$$R_j = E_{1,j} - E_{2,j} \quad (2)$$

式中，R 为减排量，t/a；E_1 为未采取减排措施前的排放量，t/a；E_2 为采取减排措施后的排放量，t/a；j 为污染物种类。

2　研究结果

2.1　减排量分析

2017 年，沧州市铸造行业 SO_2、NO_x、$PM_{2.5}$、VOCs 现状排放量分别为 440.4 t/a、686 t/a、7015.2 t/a、440.7 t/a，根据计算得到落实各项措施后 SO_2、NO_x、$PM_{2.5}$、VOCs 排放量分别为 216 t/a、403.9 t/a、1383.3 t/a、195.1 t/a(见表 4)，实际减排量分别为 224.4 t/a、282.1 t/a、5631.9 t/a、245.6 t/a，减排效率分别为 50.95%、41.13%、80.28%、55.74%，$PM_{2.5}$ 是铸造行业减排潜力最大的污染物。

表 4　不同情景污染物排放情况

Table 4　Pollutant discharge in different scenarios　(t/a)

污染物	SO_2	NO_x	$PM_{2.5}$	VOCs
现状情景	440.4	686.0	7015.2	440.7
减排情景	216.0	403.9	1383.3	195.1
减排效率	50.95%	41.13%	80.28%	55.74%

通过对各项减排措施的减排量分析(见图 2)可知，提高末端治理的有效性是最有效的减排方式，通过此方法核算的减排量均占各项污染物总减排量的 90%以上；无组织排放的废气主要是浇筑、熔化、抛丸、砂回用工序及原材料堆场产生的颗粒物，减排量较小。目前沧州市铸造业基本采用电炉进行生产，仍使用煤炭、焦炭等作为燃料的企业共 47 家(含 26 家使用冲天炉企业)，得到 SO_2、NO_x、$PM_{2.5}$、VOCs 减排量占比分别为 3.27%、4.61%、0.14%、3.58%。

表 5 为各县(市、区)不同情景下的铸造业排放量，各地排放量差异较大，这主要与各地区的活动水平差异有关，其中献县、泊头市、沧县是主要的铸造企业聚集区。献县的 SO_2、NO_x、$PM_{2.5}$ 减排量居全市最高，减排率分别为 20.8%、20.5%、39.28%；其次是泊头市，其 SO_2、NO_x、$PM_{2.5}$ 的减排率分别为 20.22%、14.2%、25.12%，泊头市以小企业居多，规模总量小于献县，因此排放量及减排量均低于献县。VOCs 较其他污染物不同，其在东光县的减排量最突出，减排率达 14.39%，这主要与企业所用工艺有关，东光县的铸造企业大多涉及涂装生产线，VOCs 排放量大。

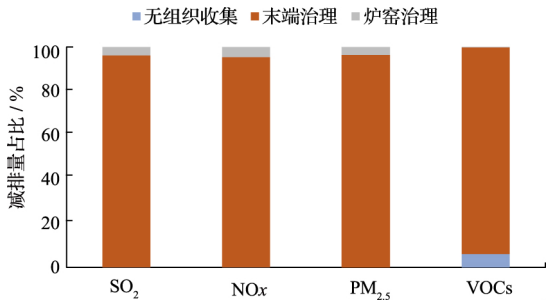


图 2　各项措施减排量占比

Fig. 2　Proportion of emission reductions of various measures

2.2　减排效果评估

通过 CALPUFF 模型模拟得到沧州市铸造行业现状情景下 SO_2、NO_x、$PM_{2.5}$、VOCs 的排放量对国控点的年均浓度贡献值分别为 0.09 μg/m³、0.12 μg/m³、1.58 μg/m³、0.08 μg/m³。$PM_{2.5}$ 模拟浓度(1.58 μg/m³)占 2017 年 $PM_{2.5}$ 年均浓度(66 μg/m³)的 2.4%，与项目组已有源解析结果中铸造行业污染贡献为 8%接近。

现状情景下污染物模拟浓度空间分布(见图 3)可看出，沧州市铸造行业浓度贡献总体呈现“西高东低”的分布趋势，在西南部地区的泊头市、献县及其周边地区浓度贡献较高，这与排放量分布趋势较为一致。铸造行业的污染物贡献主要分布在泊头市、献县、沧县及其主城区的运河区。SO_2 污染贡献较大的地区是泊头市、献县和运河区(占比分别为 23.57%、19.53%和 7.44%)；NO_x 污染贡献较大地区是泊头市、献县和沧县(占比分别为 25.37%、22.08%、6.88%)；$PM_{2.5}$ 在泊头、献县和运河区贡献较大(占比分别为 22.98%、19.73%、8.23%)；VOCs 在泊头市、献县和河间市贡献占比突出(占比分别为 23.23%、21.26%、7.57%)。污染物浓度空间分布主要由铸造产量、控制措施覆盖范围和气象条件等影响因素综合决定，泊头市、献县和沧县铸造产量最大，且铸造行业整体控制措施覆盖范围小，导致其浓度贡献大；沧州市主导风向为西南风，导致污染物有沿着主导风向迁移扩散的趋势。

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

表 5 各县(市、区)铸造行业排放情况

Table 5 Emissions from foundry industry in counties(cities, districts)

县(市、区)	企业数量	现状情景排放量/(t/a)				优化情景排放量/(t/a)			
		SO_2	NO_x	$PM_{2.5}$	VOCs	SO_2	NO_x	$PM_{2.5}$	VOCs
泊头市	447	169.8	224.7	2194.8	116.7	80.7	127.3	432.5	54.4
沧县	105	23.1	30.9	412.9	7.9	11.6	18.5	81.8	4.0
东光县	19	17.6	20.8	179.5	126.8	8.8	12.5	35.9	63.4
高新区	1	0	0.1	0	0.1	0	0	0	0.1
海兴县	7	0	0	0	0	0	0	0	0
河间市	25	0.8	1.0	135.5	87.2	0.4	0.6	22.0	43.6
黄骅市	8	0.7	0.8	119.1	75.7	0.4	0.5	20.4	37.8
开发区	11	0.2	0.4	1.8	0.5	0.1	0.3	0.3	0.3
孟村回族自治县	85	22.7	27.2	240.4	8.9	11.4	16.3	47.6	4.5
南皮县	14	8.1	9.5	79.6	0	4.1	5.7	15.9	0
青县	13	0.5	1.0	10.1	0	0.3	0.6	2.0	0
任丘市	8	0.6	0.8	19.6	0	0.3	0.5	3.4	0
肃宁县	5	5.6	6.5	64.3	2.0	2.8	3.9	12.4	1.0
吴桥县	9	2.9	3.7	56.8	0.7	1.4	2.0	10.9	0.3
献县	184	183.2	351.6	3441.8	13.9	91.6	210.9	686.3	7.0
新华区	4	0.4	0.5	5.6	0	0.2	0.3	1.1	0
盐山县	13	3.7	5.9	49.5	0	1.9	3.5	9.9	0
运河区	7	0.4	0.7	4.1	0	0.2	0.4	0.8	0
合计	965.0	440.4	686.0	7015.2	440.7	216.0	403.9	1383.3	216.3

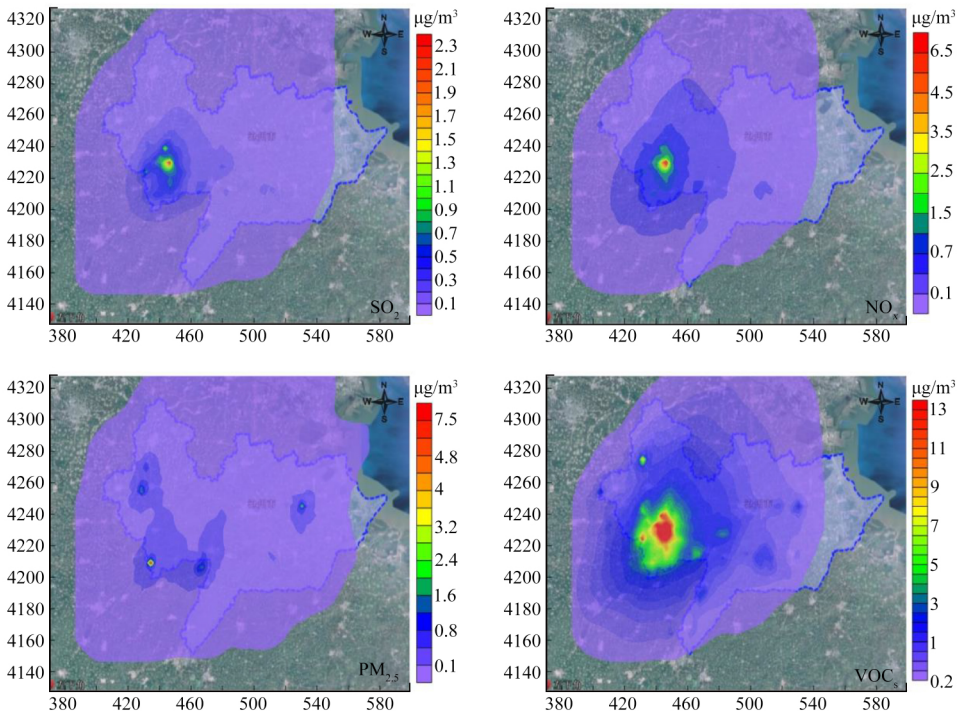


图 3 现状情景下 SO_2、NO_x、$PM_{2.5}$、VOCs 模拟浓度分布图

Fig. 3 Simulation concentration distribution diagram of SO_2, NO_x, $PM_{2.5}$ and VOCs under present situation scenario

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

优化情景下污染物模拟浓度空间分布见图 4。沧州市铸造行业 SO_2、NO_x、$PM_{2.5}$、VOCs 对国控点的年均浓度贡献值分别为 0.05 μg/m³、0.08 μg/m³、0.40 μg/m³、0.04 μg/m³，从污染物浓度空间分布上看，优化情景较现状情景无明显变化，仍聚集在泊头市、献县、沧县地区，但污染物浓度贡献值明显变小。其中 SO_2 贡献较大的地区是泊头市、献县和运河区(占比分别为 24.32%、18.82%和 7.19%)；NO_x 贡献较大的地区是泊头市、献县和沧县(占比分别为 25.34%、20.48%、6.97%)；$PM_{2.5}$ 在泊头市、献县和运河区贡献较大(占比分别为 23.82%、20.38%、7.55%)；VOCs 聚集在泊头市、东光县和南皮县(占比分别为 21.24%、13.44%、9.46%)。

根据上述结果得出，铸造行业经过深度治理后，沧州市 SO_2、NO_x、$PM_{2.5}$、VOCs 对国控点的年均浓度贡献值分别下降了 0.04 μg/m³、0.04 μg/m³、1.18 μg/m³、0.04μg/m³，国控点的污染物浓度下降率分别为 44.44%、33.33%、74.68%、50.00%，总体减排效果较为明显。可以看出，减排潜力最大的是 $PM_{2.5}$，其中泊头市、献县是主要的减排贡献区，可通过减小地区行业规模与控制措施的覆盖范围等加强管理，达到削减排放、改善空气质量的目的。

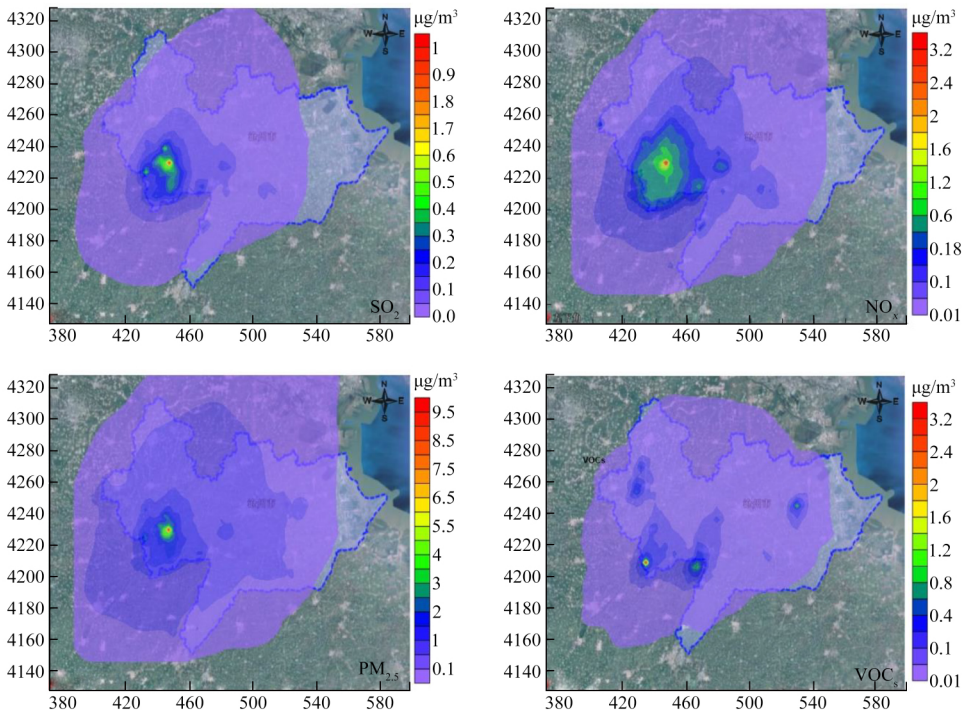


图 4　优化情景 SO_2、NO_x、$PM_{2.5}$、VOCs 模拟浓度分布图

Fag. 4　Simulation concentration distribution diagram of SO_2, NO_x, $PM_{2.5}$ and VOCs under optimization scenarios

2.3　不确定性分析

末端治理效率存在不确定性。本研究中现状情景、优化情景下均未对末端治理效率进行本地化测试，存在一定的不确定性。

模型模拟存在不确定性。本研究利用 CALPUFF 模型模拟时未考虑区域其他污染源的贡献影响，此外，已有研究表明，模型在自身运行中存在一定的不确定性[15]，均会导致模拟结果与实际结果有一定的差异。

3　结论与建议

当前，各城市为达到环境空气质量考核目标值出台了不同的管理措施，沧州市铸造行业减排后在一定程度上对沧州市整体空气质量起到了改善作用，存在较大的减排空间，其中 $PM_{2.5}$ 对国控点的浓度贡献值下降了 1.18 μg/m³。应持续推进铸造行业的深度治理，完善污染控制措施的覆盖范围并加强监管保证末端治理设施的正常运行，压减排放总量以改

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

善空气质量。

参考文献(References):

[1] 生态环境部.《铸造工业大气污染物排放标准(征求意见稿)》编制说明[EB/OL].(2018-03-02).http://www.mee.gov.cn.

[2] 刘树生,乔世杰,曹林锋,等.我国铸造行业颗粒物排放水平调研[J].铸造工程,2020,44(1):61-67.

[3] 李元元,陈维平,黄丹,等.铸造行业的节能减排现状及对策分析[C].2010 年中国铸造活动周论文集.北京:中国机械工程学会铸造分会,2010:6-16.

[4] 刘树生,乔世杰,曹林锋,等.大气污染治理设备在我国铸造行业的应用[J].铸造工程,2019,43(4):54-59.

[5] 瞿艳芝,张增杰,王军玲,等.铸造业产污环节及大气污染防治最佳可行技术研究[C].2014 年中国环境科学学会学术年会论文集(第六章).北京:中国环境科学学会,2014:135-139.

[6] 冉海潮,雷团团,伯鑫,等.基于管理数据的工业源排放清单校核研究:以沧州为例[J].环境影响评价,2019,41(4):46-49,54.

[7] HAO J T,WANG L T,SHEN M J,et al. Air quality impacts of power plant emissions in Beijing. Environmental Pollution,2007,147(2):401-408.

[8] 田飞,伯鑫,薛晓达,等.基于复杂地形—气象场的二噁英污染物沉降研究[J].中国环境科学,2019,39(4):1678-1686.

[9] 雷团团.沧州市大气污染源排放清单及环境影响研究[D].石家庄:河北科技大学,2019.

[10] 马岩,伯鑫,高爽,等.沧州主城区重点企业大气环境影响研究[J].环境影响评价,2019,41(2):16-19,23.

[11] 高爽,伯鑫,马岩,等.基于 SOA 转化机制的沧州市重点企业秋冬季大气污染模拟[J].环境科学,2019,40(4):1575-1584.

[12] 高爽,李时蓓,马岩,等.基于气象条件分型的城市大气环境允许排放量测算方法研究[J].中国环境科学,2021(2):95-102.

[13] 伯鑫,王刚,田军,等.AERMOD 模型地表参数标准化集成系统研究[J].中国环境科学,2015,35(9):2570-2575.

[14] 贺克斌.《城市大气污染物排放清单编制技术手册》编委会.城市大气污染物排放清单编制技术手册[R].北京:清华大学环境学院,2015.

[15] JONATHAN I L,JOHN D S,DENNIS H,et al. Using CALPUFF to evaluate the impacts of power plant emissions in Illinois:model sensitivity and implications. Atmospheric Environment[J]. Atmospheric Environment,2002,36(6):1063-1075.

(上接第 62 页)

参考文献(References):

[1] 苏文杰,权珊珊,赵国斌,等.天然气气井钻井安全管理实效性分析[J].化工设计通讯,2020,46(5):258,262.

[2] 刘安琪,王嘉麟,喻干,等.页岩气开发环境保护实践及环境监管思考:以中国石油集团为例[J].环境影响评价,2019,41(1):1-5.

[3] 陈春虎.油气田废弃井安全措施分析[J].化工设计通讯,2018,44(3):21.

[4] 姜永清.文南油田长停井废弃井井控安全处置技术研究与应用[D].西安:西安石油大学,2015.

[5] AER. Directive 020 well abandonment guide[EB/OL].[2021-04-20].https://www.aer.ca/documents/directives/Directive020.pdf.

[6] 原国家环境保护总局.环境影响评价技术导则陆地石油天然气开发建设项目:HJ/T 349—2007[S].北京:中国环境科学出版社,2007.

[7] 国家能源局.石油天然气工业健康、安全与环境管理体系:SY/T 676—1997[S].北京:石油工业出版社,2015.

[8] 国家能源局.海上油气生产设施废弃处置管理暂行规定[Z].2010.

[9] 新疆维吾尔自治区人民代表大会常务委员会.新疆维吾尔自治区煤炭石油天然气开发环境保护条例[Z].2014.

[10] 陕西省人民代表大会常务委员会.陕西省煤炭石油天然气开发生态环境保护条例[Z].2019.

[11] 余秉森,袁士宝.油田废弃井和闲置井封堵要求和监管:兼谈美国加利福尼亚州经验[J].国际石油经济,2017,25(11):78-84.

[12] 柳言国,刘超,王遂平,等.油田废弃井探测定位技术研究[J].安全,健康和环境,2018,18(7):6-8.

[13] 王遂平,孙振华,陈凯,等.废弃井探测数据处理及识别软件开发研究[J].中国化工贸易,2018,10(34):238.

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