工程科学学报, 第 46 卷, 第 7 期: 1311−1323, 2024 年 7 月
Chinese Journal of Engineering, Vol. 46, No. 7: 1311−1323, July 2024
https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2023.07.31.001; http://cje.ustb.edu.cn

基于 CALPUFF 模型的山东省独立焦化行业大气污染物分析与预测

陈晓春[1)], 李建晖[1)], 陈少博[1)], 尤　倩[2)], 陈晓辉[1)], 伯　鑫[1)✉]

1) 北京化工大学化学工程学院, 北京 100029　2) 首都经济贸易大学管理工程学院, 北京 100070
✉通信作者, E-mail: boxin@buct.edu.cn

摘　要　基于已建立的 2018 年山东省高分辨率独立焦化行业排放清单, 结合焦化行业制定的相关政策, 本研究设置了基准情景(BAU-2018、BAU-2025、BAU-2035)和减排优化情景(ERO-2025、ERO-2035), 使用 CALPUFF 模型模拟了各情景下山东省独立焦化行业 SO_2、NO_x、PM_{10} 及 $PM_{2.5}$ 的污染情况及各污染物的减排潜力. 研究结果表明, 在 BAU-2018 情景中, 山东省各市 SO_2、NO_x、PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的年均贡献比例的范围分别为 0.06% ~ 0.84%、0.01% ~ 0.63%、0.04% ~ 0.19% 和 0.07% ~ 0.21%; 在各阶段中, ERO-2025 情景较于现状(BAU-2018)的各污染物排放与贡献浓度降低幅度最大; 最优情景 ERO-2035 较于 BAU-2018, SO_2、NO_x、PM_{10}、$PM_{2.5}$ 和 CO_2 的排放量分别为减少了 60.12%、78.24%、75.07%、74.20% 和 37.47%, SO_2、NO_x、PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 年均贡献浓度降幅分别为 60.74%、78.56%、75.00% 和 74.53%. 全面执行超低排放标准对污染物减排具有显著效果, 同时显示出巨大的污染物与 CO_2 的协同减排潜力.

关键词　焦化; CALPUFF; 环境影响; 超低排放; CO_2
分类号　X51

Analysis and prediction of air pollutants in the independent coking industry in Shandong Province based on the CALPUFF model

CHEN Xiaochun[1)], *LI Jianhui*[1)], *CHEN Shaobo*[1)], *YOU Qian*[2)], *CHEN Xiaohui*[1)], *BO Xin*[1)✉]

1) College of Chemical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China
2) School of Management and Engineering, Capital University of Economics and Business, Beijing 100070, China
✉Corresponding author, E-mail: boxin@buct.edu.cn

ABSTRACT　Since 2018, Shandong Province has successively issued a series of pollution prevention and control programs for air pollutants from the coking industry, which plays a key role in coke production in China. However, a comprehensive assessment of the effectiveness of these measures is lacking. For a better understanding of this issue, based on the published air pollutant emission inventory for the independent coking industry and related policies formulated in Shandong in 2018, this study developed business-as-usual scenarios (BAU-2018, BAU-2025, and BAU-2035) and emission reduction optimization scenarios (ERO-2025 and ERO-2035). The emission reduction potential of PM_{10}, SO_2, NO_x, $PM_{2.5}$, and CO_2 and their corresponding contributions to Shandong's air quality with the air quality model (CALPUFF) were assessed under different scenarios. In terms of scenario settings, the gross domestic product of the secondary industry and the coke output of independent coking enterprises were used for linear regression to predict the coke output in 2025 and 2035. The mesoscale atmospheric data model, Weather Research and Forecasting, provided simulated three-dimensional meteorological field data for this study. Regional terrain data (90 m) were obtained from the United States Geological

收稿日期: 2023−07−31
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(72174125); 中央高校基本科研业务费资助项目(buctrc202133); 国家重点实验室开放基金课题资助项目(22K07ESPCT)

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

Survey. The resolution of the land use type data was 30 m, according to our previous research results. We adopted the MESOPUFF II chemical mechanism to simulate SO_2, NO_x, SO_4^{2-}, NO_3^-, HNO_3, PM_{10}, and $PM_{2.5}$ pollutants. To ensure the accuracy of the enterprise location information, we examined the enterprise latitude and longitude information one by one using Google Earth location recognition and manual visual inspection. The results showed that in the BAU-2018 scenario, the annual contribution ratios of SO_2, NO_x, PM_{10}, and $PM_{2.5}$ in Shandong Province were 0.06%–0.84%, 0.01%–0.63%, 0.04%–0.19%, and 0.07%–0.21%, respectively. Linyi has the highest contribution of SO_2 and NO_x concentrations to air quality, whereas Jining has the highest contribution of PM_{10} and $PM_{2.5}$ concentrations to air quality. Compared with the current scenario (BAU-2018), the emission and contribution concentration of each pollutant showed an alarming decrease in the ERO-2025 scenario. Under the ERO-2035 scenario, the results showed that SO_2, NO_x, PM_{10}, $PM_{2.5}$, and CO_2 emissions would be reduced by 60.12%, 78.24%, 75.07%, 74.20%, and 37.47%, respectively, compared with those under the BAU-2018 scenario. In the ERO-2035 scenario, the average contribution concentrations of SO_2, NO_x, PM_{10}, and $PM_{2.5}$ decreased by 60.74%, 78.56%, 75.00%, and 74.53%, respectively. Moreover, the results of this study showed that the comprehensive implementation of ultralow emission standards in Shandong Province had a considerable impact on air pollutant reduction in the independent coking industry, and the synergistic reduction of air pollutants and carbon dioxide showed huge potential.

KEY WORDS coking; CALPUFF; environmental impacts; ultralow emission; CO_2

中国是世界上最大的焦炭生产国，焦炭产量多年来一直占据世界焦炭总产量的 67% 以上，焦炭产量约占焦化产品产量的 75% 左右[1]. 2021 年，中国焦炭产量 4.64 亿吨，其中独立焦化企业焦炭产量为 3.55 亿吨，占比 76.51%[2]. 独立焦化行业存在企业集中度低、减排效率低的问题[3−5]. 导致在独立焦化企业生产过程中，消耗大量的资源和能源，产生大量的污染物（如 SO_2、NO_x、颗粒物等）[6−8]，同时排放大量的 CO_2[9]. 山东省是中国工业大气污染物与 CO_2 排放大省，据中国碳核算数据库统计数据，2019 年山东省 CO_2 排放在全国排名第一，为 9.37 亿吨[10]；2020 年山东省 NO_x 与 SO_2 排放量分别位列全国第三、第四[11]. 2018 年，山东省独立焦化行业焦炭产量为 3108.716 万吨，全国排名第五[9]. 因此，分析山东省独立焦化行业大气污染物、CO_2 排放特征并评估其对大气空气质量影响具有典型意义.

部分研究者将钢铁联合焦化企业作为研究对象进行研究，这意味着此类研究无法获得中国独立焦化行业的大气污染物和碳排放特征[12−16]. 李宏艳等[17] 开展了 2021 年焦化区与非焦化区空气质量指数对比研究，发现焦化区的各种空气质量指数均高于非焦化区. Wang 等[6] 采用自下而上的排放因子法，估算了 2015 年中国焦化行业各类污染物的排放量，但未分析独立焦化行业大气污染物和 CO_2 排放量及排放特征. Chen 等[9] 使用自下而上的排放因子法建立了 2001—2018 年的中国独立焦化行业大气污染物和 CO_2 排放清单，但未对空气质量影响进行研究. 在环境影响评估方面，舒璐[18] 采用社区多尺度空气质量模拟系统（Community multiscale air quality, CMAQ）模式量化了 2018 年焦化行业对乌海市空气质量的污染贡献影响，其中 NO_2、O_3、$PM_{2.5}$ 的平均贡献率分别为 2.06% ~ 7.47%、0.59% ~ 1.83%、0.59% ~ 1.83%. 上述研究均尚未对山东省独立焦化企业大气污染物和 CO_2 展开排放分析及大气污染物污染贡献等研究.

2018 年 8 月至今，山东省依次发布了《山东省打赢蓝天保卫战作战方案暨 2013—2020 年大气污染防治规划三期行动计划（2018—2020 年）》《山东省焦化行业超低排放改造实施方案》等方案[19−22]，亟需开展政策有效性评估. 针对上述问题，本研究基于 2018 年山东省独立焦化行业排放清单与焦化行业相关政策，建立基准情景（BAU-2018、BAU-2025、BAU-2035）和减排优化情景（ERO-2025、ERO-2035），采用 CALPUFF 模型模拟不同情景下各独立焦化企业污染物排放情况，分析各情景对于山东省空气质量影响水平.

1 材料与方法

1.1 研究对象

本研究以 2018 年为基准年，研究对象为山东省 21 家独立焦化厂，其主要分布于滨州市、德州市、菏泽市、济宁市、临沂市、日照市、泰安市、潍坊市与枣庄市 9 个地级市. 本研究所有企业位置信息来源于环境统计数据，山东省重点企业自行监测信息发布平台[23] 等. 为确保企业位置信息的准确性，本研究通过谷歌地球（Google earth）位置识别以及人工目视检验，对企业经纬度信息进行逐个校核.

1.2 清单情况

本研究采用的山东省独立焦化大气污染物与

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

CO_2 排放清单是来自本团队已建立的 2018 年中国高空间分辨率独立焦化企业大气污染物与 CO_2 排放清单[9]. 该清单首次基于烟气排放连续监测系统(Continuous emission monitoring system, CEMS)在线监测数据, 自下而上地建立了 2001—2018 年中国独立焦化行业大气污染物和 CO_2 排放清单. 2018 年山东省独立焦化企业焦炭产量与污染物排放的空间分布如图 1 所示. 焦炭总产量为 31087.16 kt, PM_{10}、SO_2、NO_x、$PM_{2.5}$ 和 CO_2 排放量分别为 4.07、5.80、13.83、1.52 和 15854.45 kt, 其中滨州市各污染物及 CO_2 排放量最大.

1.3 产量预测

已有研究通过对国民生产总值(GDP)进行分析预测, 从而预测未来年份工业产品产量[9, 24]. 因此本研究采用线性回归方法, 对过去 10 年独立焦化行业焦炭产量与山东省第二产业增加值的自然对数进行相关分析, 发现两者之间存在良好的线性关系, 如图 2 所示. 因此, 本研究采用第二产业增加值与独立焦化企业的焦炭产量进行线性回归进行预测 2025 与 2035 年独立焦化行业焦炭产量.

如图 2 所示, 2025 与 2035 年山东省第二产业增加值的预测值分别为 35600.6、46571.9 亿元, 独立焦化行业预计分别生产焦炭 2435.58、1943.84 万吨, 相比于 2018 年分别减少了 21.65%、37.37%. 这可能与近些年来山东多项政策, 严禁新增焦炭产能、压减有关[25].

1.4 空气质量模型

CALPUFF 模型为三维非稳态拉格朗日扩散模式[26–28], 是中国生态环境部推荐的广泛应用于研究城市乃至区域尺度上污染物扩散规律的法规模式之一[29–34]. 中尺度数据大气模式 WRF 为本研究提供了模拟三维气象场数据; 区域地形数据精度为 90 m, 来自美国地质勘探局; 土地利用类型数据精度为 30 m, 来自于本团队之前的研究成果[35]. 本研究还考虑了各独立焦化厂的经纬度及烟囱高度、出口温度、烟气流速、污染物排放量等信息, 网格分辨率 8 km, 东西向 96 个格点,南北向 65 个格点. CALPUFF 模式中采用 MESOPUFF Ⅱ 化学机制, 模拟污染物为 SO_2、NO_x、SO_4^{2-}、NO_3^-、HNO_3、PM_{10} 与 $PM_{2.5}$. 详细网格参数与 CALPUFF 控制参数设置如表 1 及表 2 所示.

1.5 情景设置

近年来, 山东省发布了针对焦化行业的多项减排计划[19–22], 并确定焦化行业实现超低排放改造的时间为 2023 年底. 为评估这些计划的实施对山东空气质量的影响, 本研究基于山东省 2018 年独立焦化行业排放清单, 为山东省在 2018、2025 与 2035 年独立焦化行业设置了基准情景(Business as

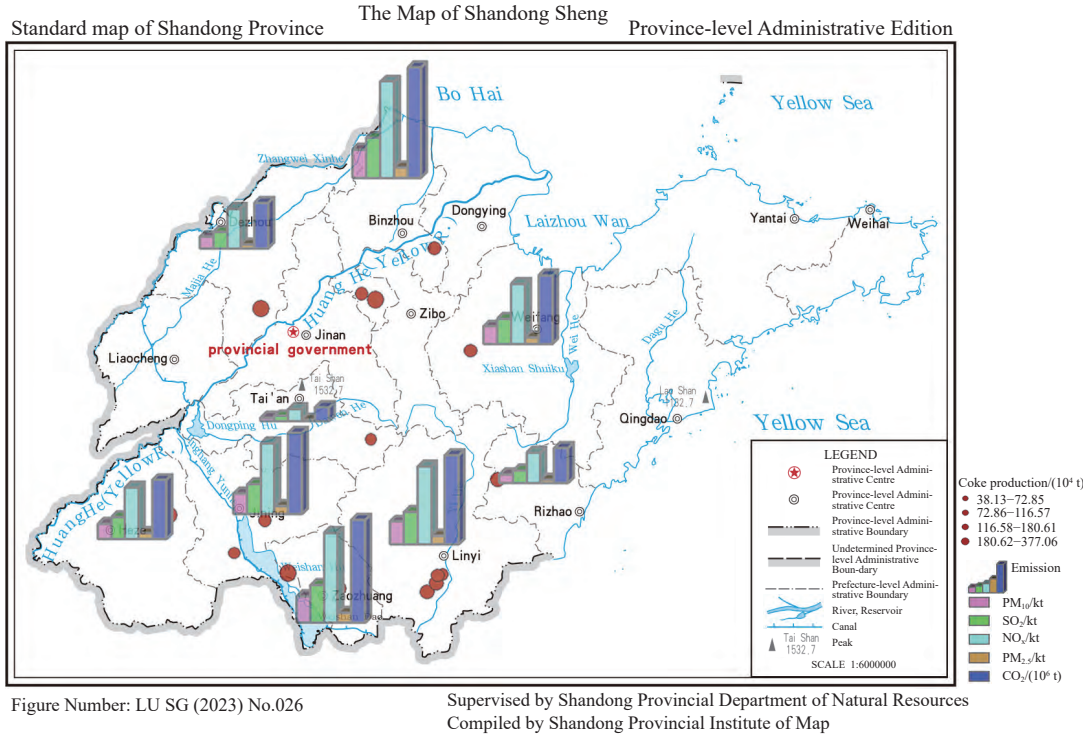


图 1 2018 年山东省独立焦化企业焦炭产量与各市污染物排放图

Fig.1 Coke production of independent coking enterprises and pollutant emission of each city in Shandong Province in 2018

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

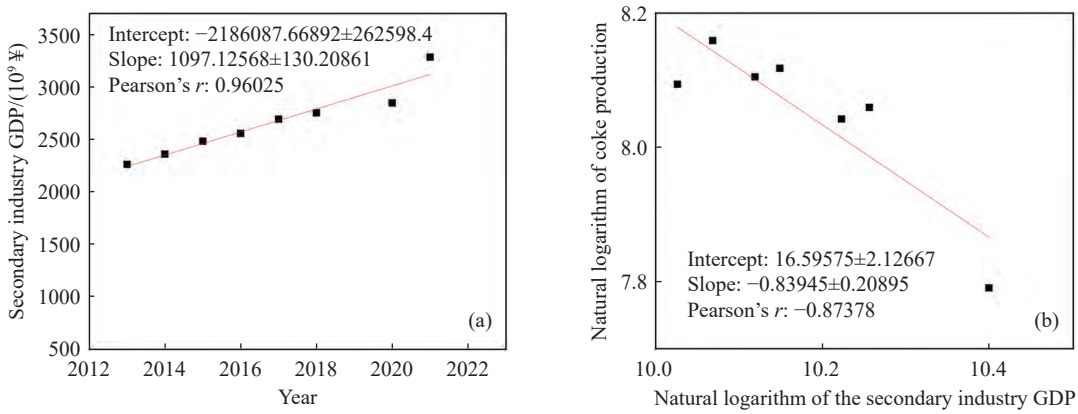


图 2　独立焦化工业焦炭产量与山东第二产业增加值的关系.(a)第二产业增加值与年份的关系; (b) 自然对数(焦炭产量)与自然对数(第二产业增加值)的关系

Fig.2　Relationship between the coke production of the independent coking industry and GDP of the Shandong secondary industry: (a) relationship between GDP of secondary industry and year; (b) relationship between natural logarithm of the coke production and natural logarithm of GDP

表 1　网格参数设置表

Table 1　Grid parameter settings

Parameter options	Settings
Mesh type	Rectangular coordinates, bottom left coordinates
Reference point definition location/km	(237.7750, 3791.9910)
Number of grid points in the *X*-direction	96
Number of grid points in the *Y*-direction	65
Vertical layer number	10
Based time zone	UTC+08:00 Beijing
Projection	Lambert Confomal Conics
DATUM code	WGS84
Latitude 1	25° N
Latitude 2	47° N
False easting/km	237.7750
False northing/km	3791.9910

表 2　CALPUFF 控制文件参数设置表

Table 2　Parameter settings of the CALPUFF control file

Run option	Settings
Regulatory option	Do not inspect settings as required by EPA regulations
Based time zone	UTC+08:00 Beijing
Running time	January 1, 2018—December 31, 2018
Chemical transformation method	Computed internally (MESOPUFF Ⅱ Scheme)
Meteorological data format	CALMET binary file
Calculate the grid points in the *X* direction	(1, 96)
Calculate the grid points in the *Y* direction	(1, 65)
Receptors	Grid points and national monitoring stations

usual, BAU-2018、BAU-2025、BAU-2035)和减排优化情景(Emission reduction optimization, ERO-2025、ERO-2035).

在基准情景(BAU-2018、BAU-2025、BAU-2035)中, 独立焦化企业的活动水平随着山东省第二产业增加值的上升持续下降, 假设不考虑各项减排措施的实施, 因此中国所有独立焦化企业的污染排放能力保持在当前水平(2018 年).

对于减排优化情景(ERO-2025、ERO-2035), 山东省生态环境厅于 2022 年印发《山东省焦化行业超低排放改造实施方案》, 方案提出, 2023 年年底前, 全省全面完成焦化行业超低排放改造; 对于拟建焦化产能, 要求投产时全面实现超低排放. 本研究假设在 2025 年时所有独立焦化企业完成超低排放改造, 排放因子使用该方案提供的污染物浓度限值计算(表 3), 且独立焦化企业的活动水平随着山东省第二产业增加值的上升持续下降. 根据山东省人民政府印发的《关于加快七大高耗能行业高质量发展的实施方案》, 到 2025 年全省焦化企业户数压减到 20 家以内, 山东省单厂区焦化产能每年 100 万吨以下的企业全部退出, 引导形成千万吨级规模的煤焦化企业集团[36]. 因此, 本情景设置 2025 年小产能企业产量并入大产能企业, 在此基础上, 独立焦化企业位置不变.

1.6　CALPUFF 模型验证

根据环境空气质量模型遴选工作指南(试行)[37], 本研究利用 CALPUFF 模型和观测到的空气污染物浓度, 采用 Pearson 相关系数(R)对大气污染物浓度进行分析. 山东省的地表污染物浓度数据由中国国家环境监测中心提供, 可通过 http://www.cnemc.cn/

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

表 3 排放标准与山东超低排放改造方案中的大气污染物排放限值

Table 3 Air pollutant emission limits in emission standards and Shandong's implementation of ultralow emissions

Emission source	Concentration (GB 16171—2012)/ (mg·m^{-3})			Concentration (ultralow emissions in Shandong)/ (mg·m^{-3})		
	SO_2	NO_x	PM_{10}	SO_2	NO_x	PM_{10}
Coal preparation	—	—	30	—	—	10
Coal charging	100	—	50	50	—	10
Pushing	50	—	50	—	—	10
Coke oven smokestack	200	500	15	30	100	10
Quenching	100	—	50	50	—	10

访问. 本次模型参数的设置已在多个研究项目中得到了应用, 取得了很好的模拟效果[38–43].

2 结果与讨论

2.1 各情景排放量分析

在基准情景(BAU)中, 2018 年山东省独立焦化行业排放情况在 1.2 节已经介绍. 2025 年(BAU-2025), 山东省独立焦化企业 SO_2、NO_x、PM_{10}、$PM_{2.5}$ 和 CO_2 的排放量分别排放了 4.54、10.84、3.19、1.19 和 12421.48 kt, 较于 2018 年减排比例均为 21.65%, 这与 2025 年焦炭产量下降有关. 值得注意的是, 随着小产能企业关闭政策的实施, 企业布局有所改变(图 3). 焦炭产量、各污染物及 CO_2 的排放量最高的城市由滨州市变为枣庄市. 较于 BAU-2018, 2035 年(BAU-2035)各污染物与 CO_2 减排 37.47%.

在减排优化情景(ERO)中, ERO-2025 情景中, SO_2、NO_x、PM_{10}、$PM_{2.5}$ 和 CO_2 的排放量较于 BAU-2018 分别减少了 2.90、10.06、2.80、1.03 和 3432.98 kt, 减排比例分别为 50.03%、72.73%、68.76%、67.67% 和 21.65%. 大气污染物排放量的大幅下降是由于独立焦化行业全面完成超低排放改造以及焦炭产量降低. 污染物与 CO_2 的排放具有同根同源性[44], 在减少 CO_2 排放的同时也能降低大气污染物的排放. 并且随着产能的逐年削减, ERO-2035 情景中, 各污染物与 CO_2 的排放量分别在 ERO-2025 情景的基础上再减少了 20.19%. 因此显示出山东省独立焦化行业巨大的污染物与 CO_2 协同减排潜力.

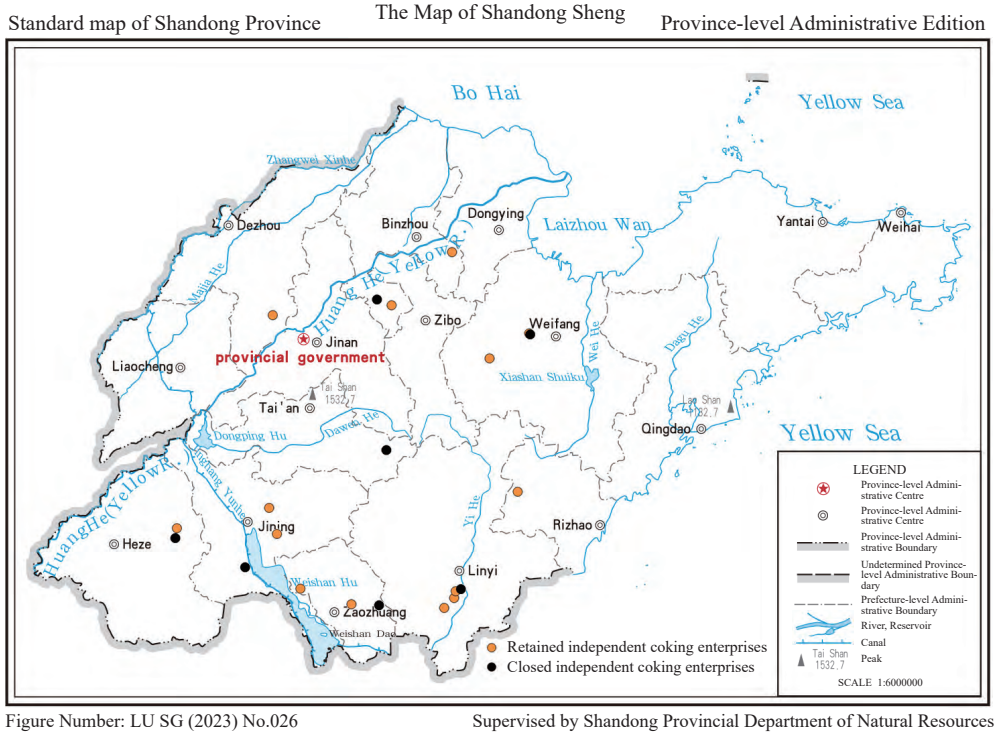


图 3 小产能企业关闭后独立焦化企业分布图

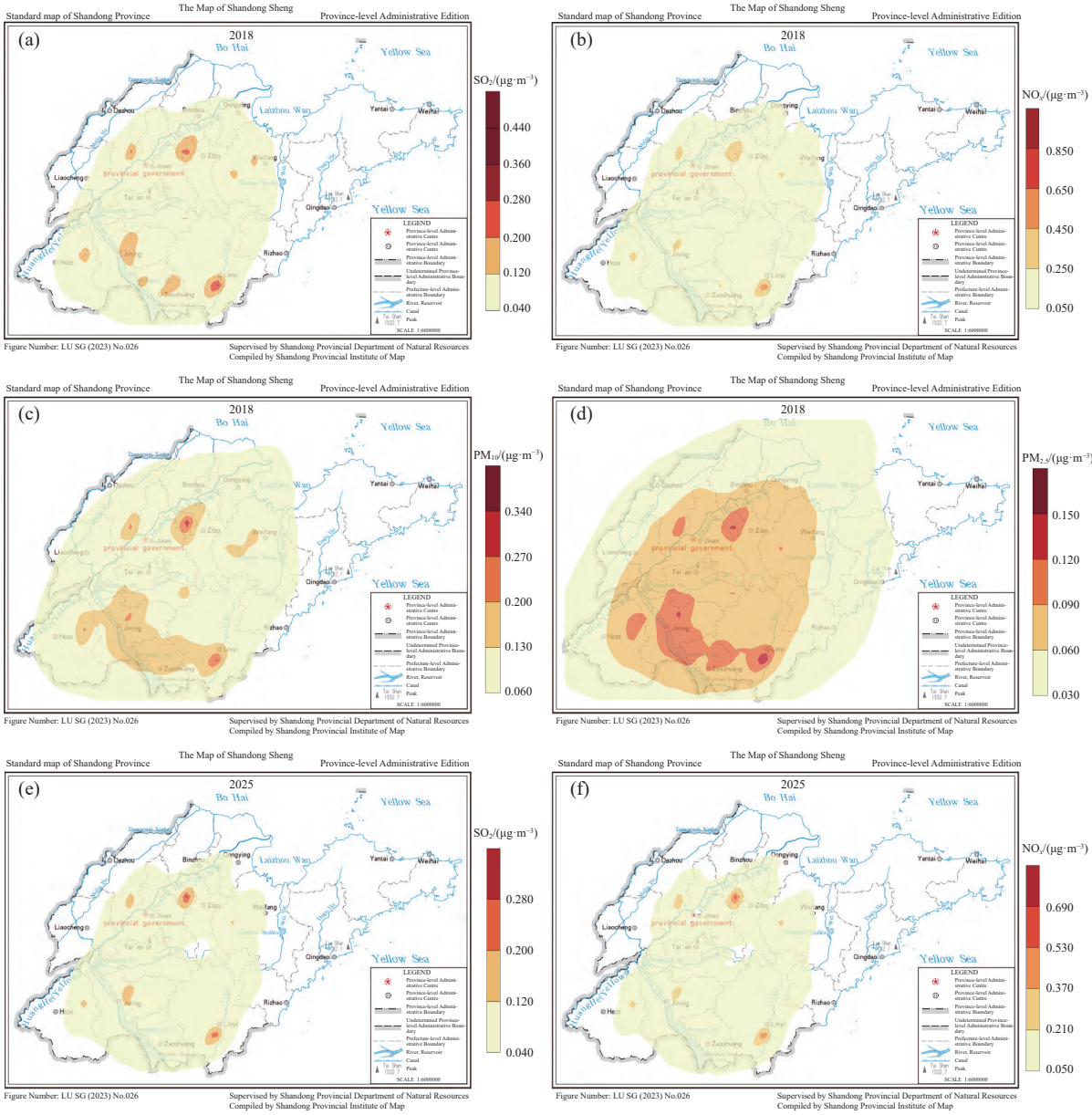
Fig.3 Distribution of the independent coking enterprises after closure of small capacity enterprises

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

2.2　BAU 情景下大气环境影响评估及现状模拟值与观测值对比

图 4 为 BAU 情景下山东省独立焦化企业 2018、2025 及 2035 年排放年均贡献浓度分布情况. 现状情景下独立焦化厂大气污染物排放年均贡献浓度与污染物排放分布较为一致(图 1),高值浓度主要集中在临沂市、济宁市、滨州市和枣庄市. BAU 情景下, 2018 年山东省独立焦化行业 SO_2、NO_x、PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的年均贡献质量浓度分别为 0.053、0.071、0.091 和 0.061 μg·m^{-3}, 其中 SO_2、NO_x 和 PM_{10} 年均贡献质量浓度最高的城市为临沂市, 分别为 0.151、0.263 和 0.178 μg·m^{-3}; $PM_{2.5}$ 年均贡献质量浓度最高的城市为济宁市, 为 0.109 μg·m^{-3}. 滨州市独立焦化企业各污染物年均贡献浓度处于水平中游, 这可能是滨州市国控点与市内的独立焦化企业距离较远, 不能准确反应出企业对城市空气质量的影响所导致的. BAU-2025 情景下, 焦炭产量减少, 污染物排放随之减少, SO_2、NO_x、PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的年均贡献质量浓度分别为 0.041、0.055、0.070 和 0.047 μg·m^{-3}, 较于 BAU-2018 降幅比例在 22.31% ~ 22.88% 之间. 在 BAU-2035 中, 各污染物年均贡献浓度较于 BAU-2018 降幅比例达到了 38.00% ~ 38.45%.

表 4 为 2018 年各市国控站点不同污染物预测浓度与监测浓度的对比. 总体来看各市 SO_2、NO_x、PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的年均贡献比例分别处于 0.06% ~ 0.84%、0.01% ~0.63%、0.04% ~0.19% 和0.07% ~0.21% 中, 低于钢铁、火电等重点行业[13, 30]. 市级地区 SO_2、NO_x 浓度贡献比例最大的是临沂市, 贡献比例分别达到了 0.84% 和 0.63%; 市级地区 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度贡献比例最大的是济宁市, 贡献比例分别达



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

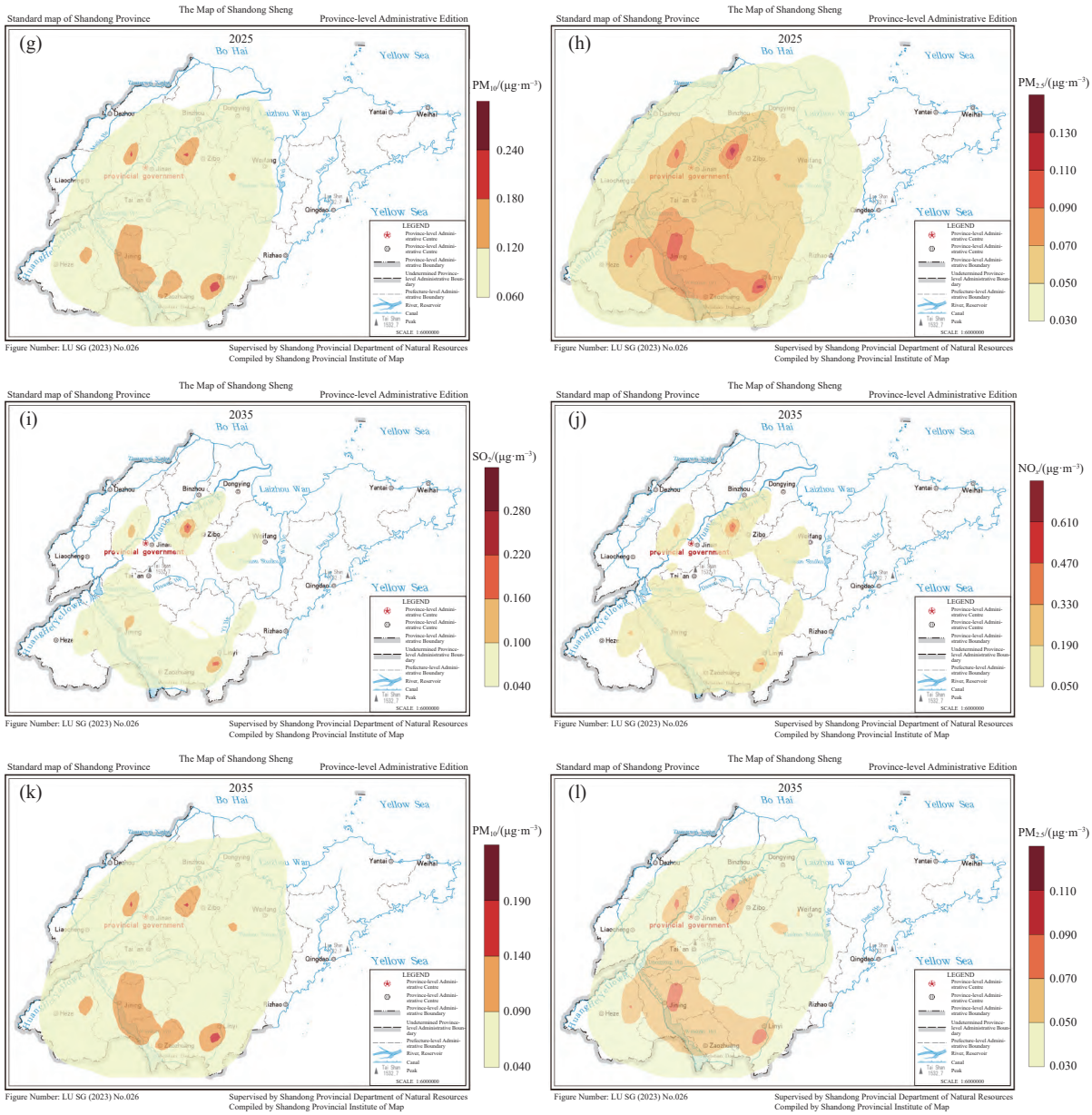


图 4 BAU 情景下独立焦化行业 SO_2、NO_x、PM_{10} 及 $PM_{2.5}$ 年均质量浓度分布图.(a ~ d)2018 年; (e ~ h)2025 年; (i ~ l)2035 年

Fig.4 Average annual concentration distribution of SO_2, NO_x, PM_{10}, and $PM_{2.5}$ in the independent coking industry under the BAU scenario: (a–d) 2018; (e–h) 2025; (i–l) 2035

到了 0.19% 和 0.21%. 因此独立焦化行业对于临沂市和济宁市主要大气污染物年均浓度贡献比例更大. 其中临沂市和济宁市独立焦化企业焦炭总产量占山东省全省产量的 28.08%. 两市的大气污染物年均浓度贡献浓度较高, 除了市内独立焦化企业焦炭产量高之外, 还与其临近市—枣庄市内的独立焦化企业分布在临沂市和济宁市两市的市分界线附近有关.

2.3 ERO 情景下大气环境影响评估

如图 5 所示为 ERO 情景下山东省独立焦化企业 2025(ERO-2025) 及 2035 年 (ERO-2035) SO_2、NO_x、PM_{10} 与 $PM_{2.5}$ 年均贡献浓度分布情况. ERO-2025 相较于 BAU-2018 情景, SO_2、NO_x、PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 年均贡献浓度降幅分别为 50.81%、73.14%、68.67% 和 68.09%. 一方面, 随着《山东省焦化行业超低排放改造实施方案》的实施[20], 各独立焦化企业已逐步升级和完善脱硝脱硫设备, 使得独立焦化行业的污染物排放大幅下降. 另一方面, 钢铁行业作为焦化企业的下游, 正逐步执行更为严格的环保措施, 并倾向于未来使用绿色还原剂替代焦炭[45], 这进一步导致了焦炭的需求逐渐减少. 预期到 2025 年, 污染物的排放和贡献浓度的降幅将达到最大值. 而在 ERO-2035 情景中, SO_2、NO_x、PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 年均贡献浓度在 ERO-2025 的基础上减少

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

表 4　山东省各市独立焦化行业污染预测浓度与监测浓度对比

Table 4　Comparison between the predicted and monitored concentrations of independent coking industry pollution in Shandong Province

City	Average annual concentration of SO_2			Average annual concentration of NO_x			Average annual concentration of PM_{10}			Average annual concentration of $PM_{2.5}$		
	Predicted/ ($\mu g \cdot m^{-3}$)	Monitored/ ($\mu g \cdot m^{-3}$)	Ratio/%	Predicted/ ($\mu g \cdot m^{-3}$)	Monitored/ ($\mu g \cdot m^{-3}$)	Ratio/%	Predicted/ ($\mu g \cdot m^{-3}$)	Monitored/ ($\mu g \cdot m^{-3}$)	Ratio/%	Predicted/ ($\mu g \cdot m^{-3}$)	Monitored/ ($\mu g \cdot m^{-3}$)	Ratio/%
Jinan	0.055	16	0.34	0.062	44	0.14	0.104	107	0.10	0.072	51	0.14
Qingdao	0.012	10	0.12	0.007	31	0.02	0.040	72	0.06	0.030	34	0.09
Zibo	0.066	24	0.28	0.094	43	0.22	0.109	106	0.10	0.073	55	0.13
Zaozhuang	0.100	19	0.53	0.159	36	0.44	0.137	115	0.12	0.087	59	0.15
Yantai	0.006	10	0.06	0.002	27	0.01	0.026	66	0.04	0.020	29	0.07
Weifang	0.051	17	0.30	0.063	36	0.18	0.089	104	0.09	0.060	53	0.11
Jining	0.126	20	0.63	0.192	36	0.53	0.174	92	0.19	0.109	52	0.21
Taian	0.055	18	0.30	0.064	36	0.18	0.106	102	0.10	0.074	51	0.15
Rizhao	0.018	12	0.15	0.018	35	0.05	0.050	79	0.06	0.037	42	0.09
Dongying	0.039	18	0.22	0.045	36	0.13	0.082	94	0.09	0.056	49	0.11
Weihai	0.004	7	0.06	0.002	17	0.01	0.022	50	0.04	0.017	25	0.07
Laiwu	0.058	23	0.25	0.075	41	0.18	0.106	110	0.10	0.073	58	0.13
Linyi	0.151	18	0.84	0.263	42	0.63	0.178	106	0.17	0.104	54	0.19
Dezhou	0.022	17	0.13	0.018	37	0.05	0.055	109	0.05	0.040	56	0.07
Liaocheng	0.040	14	0.28	0.039	39	0.10	0.085	120	0.07	0.060	60	0.10
Binzhou	0.056	22	0.25	0.065	39	0.17	0.097	98	0.10	0.065	54	0.12
Heze	0.040	14	0.29	0.042	39	0.11	0.081	119	0.07	0.057	58	0.10

了 20.19%. 在对 BAU 情景的分析中, 2035 年产量减少对各污染物的贡献浓度降低范围在 38.00% ~ 38.45% 之间, 因此全面执行超低排放标准对污染物减排效果更为显著. NO_x 年均贡献浓度降幅最大, 这与焦化行业超低排放改造方案中对 NO_x 的减排措施加强、限值减幅更大有关[20].

从城市尺度来看, ERO 情景的 SO_2、NO_x、PM_{10} 贡献浓度最高城市为临沂市, $PM_{2.5}$ 贡献浓度最高城市为济宁市. 据表 5 中模拟结果, ERO-2035 情景各城市较于 BAU-2018, SO_2、NO_x、PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 贡献浓度分别降低了 58.57% ~ 65.63%、77.00% ~ 81.94%、74.04% ~ 76.98% 和 73.60% ~ 76.35%. 此外, SO_2 与 NO_x 的降幅最低的是济宁市, 分别为 58.57% 和 77.00%, 这是由于《关于加快七大高耗能行业高质量发展的实施方案》的实施[36], 济宁市关闭的小产能企业较少, 其他市的小产能企业产量并入济宁市独立焦化企业导致活动水平上升, 因此济宁市较于其他城市各污染物贡献浓度的减少比例较低.

2.4　模型验证及与其他研究的对比

本研究选择了临沂市、济宁市、枣庄市、滨州市、潍坊市五个城市(焦炭总产量占据全省独立焦化企业的 74.58%)的国控站点的模拟值与监测值进行时空配对分析(山东省国控站点分布如图 6 所示), 分析结果如表 6. 根据环境空气质量模型遴选工作指南(试行)中的评价标准: $R^2 > 0.2$[37], 模拟效果整体较好, 且均通过了显著性检验.

本研究对独立焦化行业 SO_2、NO_x 和 PM 的模拟贡献浓度与其他研究中模拟贡献浓度进行了比较, 如表 7 所示. 其他研究中的污染物贡献浓度整体高于本研究, 有以下 3 点原因:

(1) 在对于乌海市焦化企业的研究中, 其模拟时间选择了 2018 年 6 月 1 日 ~ 9 日的重点污染时段, 单位时间内活动水平更高, 污染物排放强度较高; (2) 中国钢铁行业中包含一部分的钢铁联合焦化企业, 其数量占据中国焦化企业的 35%[9], 此外, 中国钢铁行业污染物排放量也远高于独立焦化企业[9, 13]; (3) 本研究独立焦化行业的排放因子来源于 CEMS 数据, 可以更加准确的体现焦化企业的排放特征.

3　结论

(1) 2035 年山东省独立焦化企业焦炭产量预计较于 2018 年下降 37.37%. 由于独立焦化行业全

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

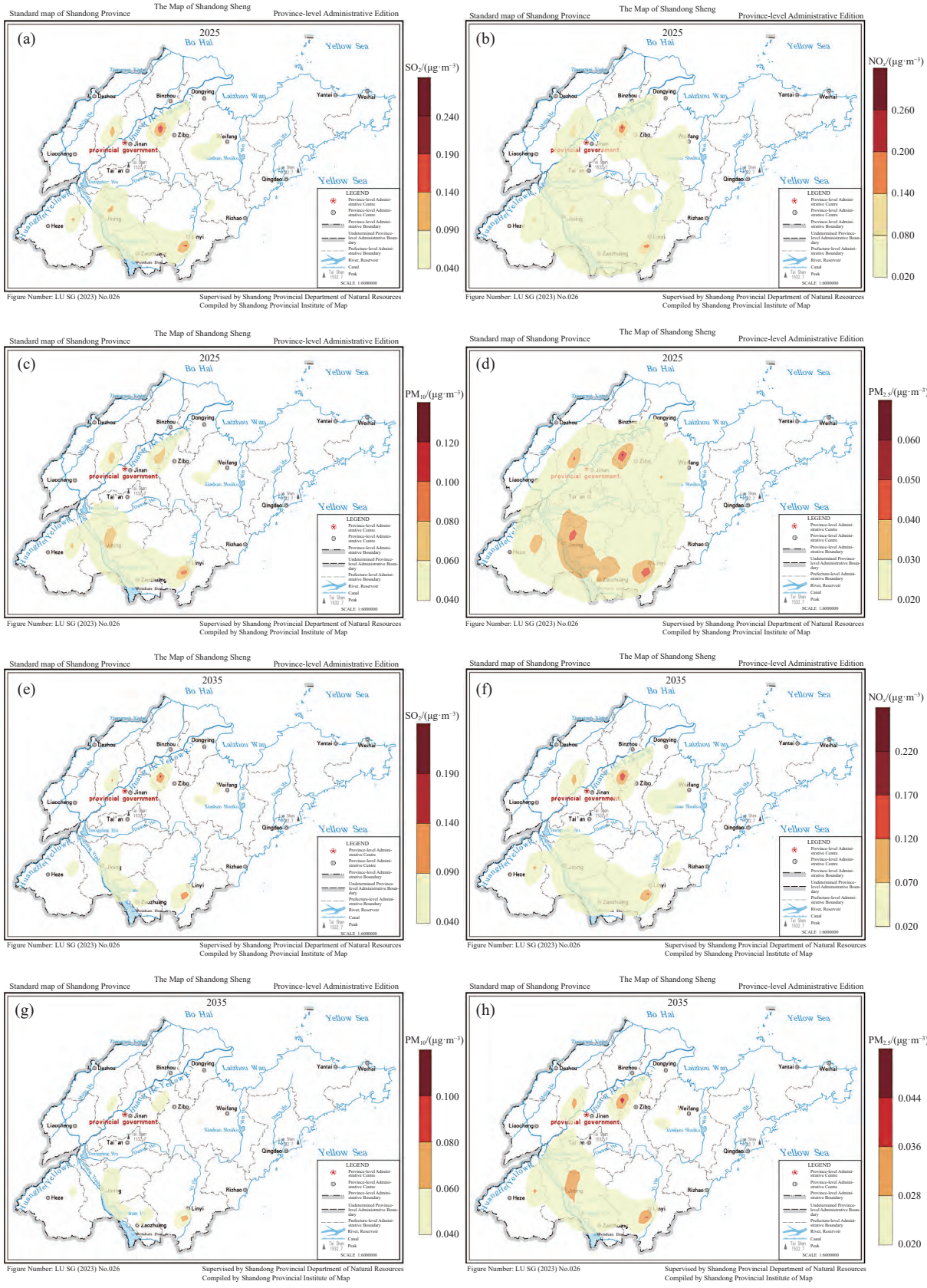


图 5 ERO 情景下独立焦化行业 SO_2、NO_x、PM_{10} 及 $PM_{2.5}$ 年质量均浓度分布图.(a ~ d)2025 年; (e ~ h) 2035 年

Fig.5 Average annual concentration distribution of SO_2, NO_x, PM_{10}, and $PM_{2.5}$ in the independent coking industry under the ERO scenario: (a–d) 2025; (e– h) 2035

面实行了超低排放改造以及焦炭产量降低的综合影响, ERO-2025 情景 SO_2、NO_x、PM_{10}、$PM_{2.5}$ 和 CO_2 的排放量较于 BAU-2018 将分别减少了 2.90、10.06、2.80、1.03 和 3432.98 kt, 减排比例分别为 50.03%、

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

表 5　山东省各市独立焦化行业污染 BAU-2018 与 ERO-2035 预测浓度对比

Table 5　Comparison of BAU-2018 and ERO-2035 predicted pollution concentrations in the independent coking industries in various cities in Shandong Province

City	Average annual concentration of SO_2			Average annual concentration of NO_x			Average annual concentration of PM_{10}			Average annual concentration of $PM_{2.5}$		
	BAU-2018/ ($\mu g \cdot m^{-3}$)	ERO-2035/ ($\mu g \cdot m^{-3}$)	Declined ratio/%	BAU-2018/ ($\mu g \cdot m^{-3}$)	ERO-2035/ ($\mu g \cdot m^{-3}$)	Declined ratio/%	BAU-2018/ ($\mu g \cdot m^{-3}$)	ERO-2035/ ($\mu g \cdot m^{-3}$)	Declined ratio/%	BAU-2018/ ($\mu g \cdot m^{-3}$)	ERO-2035/ ($\mu g \cdot m^{-3}$)	Declined ratio/%
Jinan	0.0549	0.0223	59.33	0.0620	0.0139	77.52	0.1038	0.0267	74.31	0.0717	0.0187	73.93
Qingdao	0.0116	0.0046	60.55	0.0073	0.0015	78.89	0.0397	0.0102	74.36	0.0303	0.0079	73.93
Zibo	0.0664	0.0263	60.44	0.0937	0.0205	78.12	0.1093	0.0271	75.18	0.0728	0.0183	74.84
Zaozhuang	0.0999	0.0388	61.14	0.1589	0.0332	79.08	0.1374	0.0340	75.22	0.0867	0.0219	74.74
Yantai	0.0063	0.0025	60.47	0.0025	0.0005	78.71	0.0258	0.0067	74.22	0.0199	0.0052	73.73
Weifang	0.0507	0.0181	64.34	0.0634	0.0119	81.19	0.0888	0.0209	76.48	0.0604	0.0146	75.87
Jining	0.1259	0.0521	58.57	0.1922	0.0442	77.00	0.1740	0.0445	74.43	0.1091	0.0282	74.16
Taian	0.0549	0.0219	60.04	0.0644	0.0141	78.12	0.1063	0.0267	74.86	0.0740	0.0189	74.45
Rizhao	0.0183	0.0072	60.39	0.0182	0.0039	78.55	0.0500	0.0127	74.59	0.0367	0.0095	74.16
Dongying	0.0394	0.0157	60.15	0.0454	0.0100	78.06	0.0817	0.0206	74.80	0.0563	0.0144	74.39
Weihai	0.0041	0.0016	60.32	0.0015	0.0003	78.42	0.0216	0.0056	74.08	0.0169	0.0045	73.65
Laiwu	0.0579	0.0199	65.63	0.0750	0.0136	81.94	0.1063	0.0245	76.98	0.0733	0.0173	76.35
Linyi	0.1511	0.0598	60.42	0.2628	0.0569	78.37	0.1780	0.0444	75.07	0.1040	0.0264	74.58
Dezhou	0.0224	0.0090	59.83	0.0181	0.0040	77.83	0.0552	0.0143	74.11	0.0400	0.0106	73.56
Liaocheng	0.0397	0.0163	59.01	0.0391	0.0089	77.15	0.0846	0.0220	74.04	0.0600	0.0158	73.60
Binzhou	0.0557	0.0211	62.12	0.0645	0.0132	79.59	0.0967	0.0237	75.49	0.0651	0.0164	74.88
Heze	0.0399	0.0157	60.68	0.0418	0.0089	78.68	0.0811	0.0206	74.57	0.0571	0.0148	74.02

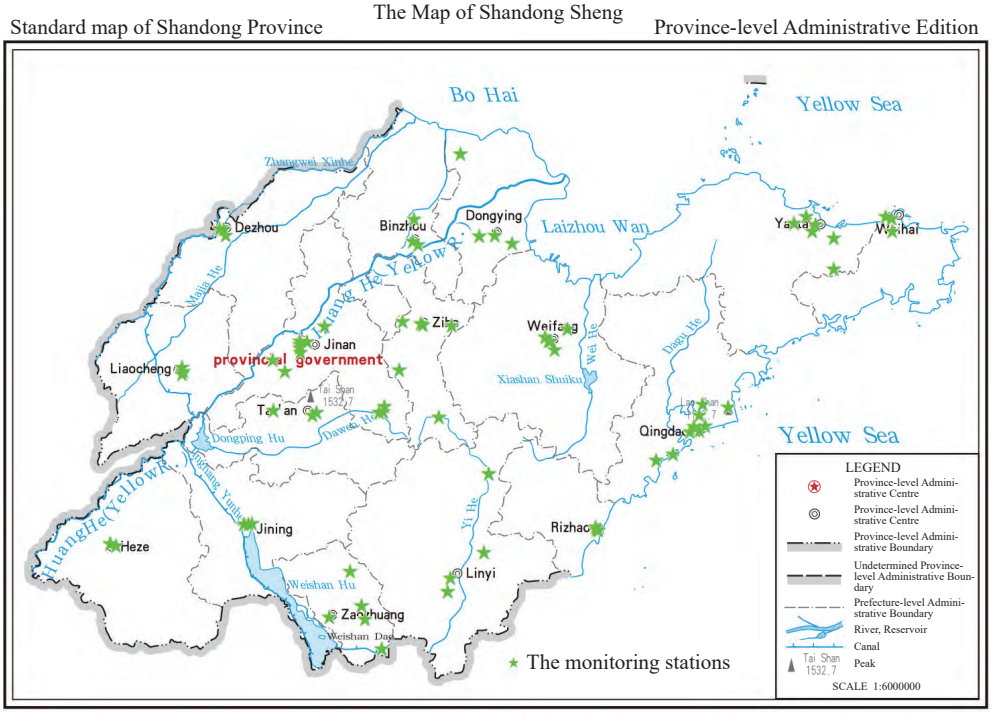


图 6　山东省各国控站点分布图

Fig.6　Distribution of monitoring stations in Shandong Province

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

表 6 CALPUFF 模型验证结果(皮尔逊系数 *R*)

Table 6 Results of the CALPUFF model verification (Pearson correlation coefficient)

City	SO_2	NO_x	PM_{10}	$PM_{2.5}$
Linyi	0.48	0.61	0.58	0.56
Jining	0.44	0.48	0.62	0.67
Zaozhuang	0.37	0.43	0.57	0.45
Binzhou	0.19	0.49	0.54	0.66
Weifang	0.47	0.45	0.59	0.60

表 7 与其他研究的模拟污染物浓度对比

Table 7 Comparison with simulated pollutant concentrations from other studies

Industry	Area	Simulation time	Model	Concentration/ ($\mu g \cdot m^{-3}$)				Sources
				SO_2	NO_x	PM_{10}	$PM_{2.5}$	
Coking	Wuhai City	June 1–9, 2018	WRF-CMAQ		0.52–1.42	0.61–2.04	0.37–0.99	Shu[18]
Iron and steel	5 cities in China	January, April, July, and October 2018	WRF-CAMx	0.21–1.47	1.09–4.12		0.91–1.80	Tang, et al[13]
Independent coking	Shandong Province	2018	CALPUFF	0.06–0.15	0.08–0.26	0.11–0.18	0.07–0.11	This study

72.73%、68.76%、67.67% 和 21.65%. ERO-2035 情景各污染物与 CO_2 的排放量分别在 ERO-2025 情景的基础上再各减少了 20.19%. 山东省独立焦化行业污染物与 CO_2 的协同减排潜力巨大.

(2) BAU-2018 中, 山东省独立焦化企业年均贡献浓度与监测值进行比较, 各市 SO_2、NO_x、PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的年均贡献比例的范围分别为 0.06%～0.84%、0.01%～0.63%、0.04%～0.19% 和 0.07%～0.21%. SO_2、NO_x 质量浓度贡献比例最大的是临沂市, PM_{10}、$PM_{2.5}$ 质量浓度贡献比例最大的是济宁市.

(3) 在最优情景 ERO-2035 中, SO_2、NO_x、PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 年均贡献质量浓度降幅分别为 60.74%、78.56%、75.00%、和 74.53%. 全面执行超低排放标准对污染物减排效果十分显著. 具体到城市尺度, ERO 与 BAU 情景中 SO_2、NO_x、PM_{10} 贡献质量浓度最高城市均为临沂市, $PM_{2.5}$ 贡献质量浓度最高城市为济宁市. 相关城市应加强对相关污染物的减排措施.

参 考 文 献

[1] National Bureau of Statistics. Coke production [DB/OL]. *National Bureau of Statistics*. (2023-07-30) [2023-07-31]. https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01
(国家统计局. 年度数据库—焦炭产量[DB/OL]. 国家统计局 (2023-07-30) [2023-07-31]. https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01)

[2] Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. Operation of the coking industry in 2021 [EB/OL]. *Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China*. (2022-01-30) [2023-07-31]. https://wap.miit.gov.cn/jgsj/ycls/gzdt/art/2022/art_753fa62a16ea4c97adf4cff1580039ad.html
(中华人民共和国工业和信息化部. 2021 年焦化行业运行情况[EB/OL]. 中华人民共和国工业和信息化部. (2022-01-30) [2023-07-31]. https://wap.miit.gov.cn/jgsj/ycls/gzdt/art/2022/art_753fa62a16ea4c97adf4cff1580039ad.html)

[3] Zhao C L, Qiao J. Environmental dilemma and green transformation strategy for coking industry in China. *Environ Prot Chem Ind*, 2019, 39(3): 321
(赵春丽, 乔皎. 我国焦化行业面临的环境困境及绿色转型策略. *化工环保*, 2019, 39(3): 321)

[4] Bo X, Wang G, Wen R, et al. Health risk assessment of coke oven PAHs emissions. *Environ Sci*, 2014, 35(7): 2742
(伯鑫, 王刚, 温柔, 等. 焦炉排放多环芳烃与人体健康风险评价研究. 环境科学, 2014, 35(7): 2742)

[5] Mu L, Peng L, Liu X F, et al. Emission characteristics and size distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons from coke production in China. *Atmos Res*, 2017, 197: 113

[6] Wang Y, Cheng K, Tian H Z, et al. Analysis of reduction potential of primary air pollutant emissions from coking industry in China. *Aerosol Air Qual Res*, 2018, 18(2): 533

[7] Huo H, Lei Y, Zhang Q, et al. China's coke industry: Recent policies, technology shift, and implication for energy and the environment. *Energy Policy*, 2012, 51: 397

[8] Pilarczyk E, Sowa F, Kaiser M, et al. Emissions at coke plants: European environmental regulations and measures for emission control. *Trans Indian Inst Met*, 2013, 66(5): 723

[9] Chen X C, Li J H, Jia M, et al. High spatial resolution emission inventory of air pollutants and carbon in China's independent coking industry. *Atmosphere*, 2023, 14(2): 348

[10] Carbon Emission Accounts and Datasets. National database [DB/OL]. *Carbon Emission Accounts and Datasets* (2022-10-25)

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

[2023-07-31]. https://www.ceads.net.cn/data
(中国碳核算数据库. 国家级清单[DB/OL]. 中国碳核算数据库(2022-10-25) [2023-07-31]. https://www.ceads.net.cn/data)

[11] National Bureau of Statistics. Annual data by province - Emissions of major pollutants in exhaust gases [EB/OL]. *National Bureau of Statistics*. (2023-07-30) [2023-07-31]. https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01
(国家统计局. 分省年度数据—废气中主要污染物排放[EB/OL]. 国家统计局 (2023-07-30) [2023-07-31]. https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01)

[12] Bo X, Jia M, Xue X D, et al. Effect of strengthened standards on Chinese ironmaking and steelmaking emissions. *Nat Sustain*, 2021, 4(9): 811

[13] Tang L, Jia M, Bo X, et al. High resolution emission inventory and atmospheric environmental impact research in Chinese iron and steel industry. *China Environ Sci*, 2020, 40(4): 1493
(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. 中国环境科学, 2020, 40(4): 1493)

[14] Tang L, Xue X D, Bo X, et al. Contribution of emissions from the iron and steel industry to air quality in China. *Environ Sci*, 2020, 41(7): 2981
(汤铃, 薛晓达, 伯鑫, 等. 中国钢铁行业大气环境影响. 环境科学, 2020, 41(7): 2981)

[15] Tang L, Xue X D, Jia M, et al. Iron and steel industry emissions and contribution to the air quality in China. *Atmos Environ*, 2020, 237: 117668

[16] 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. *China Environ Sci*, 2015, 35(8): 2554
(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. 中国环境科学, 2015, 35(8): 2554)

[17] Li H Y, Huang S D, Zhao Z X, et al. Effects of high pollution emissions from coking industry on ambient air quality in China. *Acta Sci Circumstantiae*, 2023, 43(5): 375
(李宏艳, 黄时丹, 赵志新, 等. 焦化行业高污染排放对中国空气质量的影响. 环境科学学报, 2023, 43(5): 375)

[18] Shu L. *Research on the Impact of Coking Industry on Air Quality in Wuhai City Based on CMAQ Model* [Dissertation]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020
(舒璐. 基于 CMAQ 模型焦化行业对乌海市空气质量影响的研究[学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2020)

[19] The People's Government of Shandong Province. Notice on printing and distributing the operation plan of Shandong Province for winning the blue sky defense war and the third phase action plan of the 2013—2020 Air Pollution Prevention and Control Plan (2018—2020) [EB/OL]. *The People's Government of Shandong Province* (2018-08-08) [2023-07-31]. http://www.shandong.gov.cn/art/2018/8/8/art_107851_87984.html
(山东省人民政府. 关于印发山东省打赢蓝天保卫战作战方案暨 2013—2020 年大气污染防治规划三期行动计划(2018—2020 年)的通知[EB/OL]. 山东省人民政府(2018-08-08)[2023-07-31]. http://www.shandong.gov.cn/art/2018/8/8/art_107851_87984.html)

[20] Department of Ecology and Environment of Shandong Province. Notice on issuing the implementation plan for ultra-low emission transformation of cement industry in Shandong Province and the Implementation Plan for ultra-low emission transformation of coking industry in Shandong Province [EB/OL]. *Department of Ecology and Environment of Shandong Province* (2022-06-20) [2023-07-31].http://xxgk.sdein.gov.cn/zfwj/lhf/202207/t20220701_3986039.html
(山东省生态环境厅. 关于印发山东省水泥行业超低排放改造实施方案、山东省焦化行业超低排放改造实施方案的通知[EB/OL]. 山东省生态环境厅 (2022-06-20) [2023-07-31]. http://xxgk.sdein.gov.cn/zfwj/lhf/202207/t20220701_3986039.html)

[21] Department of Ecology and Environment of Shandong Province. Notice on the issuance of the "Ten Actions" work plan for ecological and environmental protection in the Yellow River basin in 2022 [EB/OL]. *Department of Ecology and Environment of Shandong Province* (2022-07-15) [2023-07-31]. http://xxgk.sdein.gov.cn/zfwj/lhbh/202209/t20220914_4058190.html
(山东省生态环境厅. 关于印发黄河流域生态环境保护 2022 年"十大行动"工作方案的通知[EB/OL]. 山东省生态环境厅 (2022-07-15) [2023-07-31]. http://xxgk.sdein.gov.cn/zfwj/lhbh/202209/t20220914_4058190.html)

[22] Department of Ecology and Environment of Shandong Province. Notice on the issuance of Shandong Province pollution reduction carbon synergistic efficiency implementation plan [EB/OL]. Department of *Ecology and Environment of Shandong Province* (2023-05-23) [2023-07-31]. http://xxgk.sdein.gov.cn/zfwj/lhf/202305/t20230526_4332589.html
(山东省生态环境厅. 关于印发山东省减污降碳协同增效实施方案的通知[EB/OL]. 山东省生态环境厅 (2023-05-23) [2023-07-31]. http://xxgk.sdein.gov.cn/zfwj/lhf/202305/t20230526_4332589.html)

[23] Department of Ecology and Environment of Shandong Province. Self-monitoring information release platform for key enterprises in Shandong province [EB/OL]. *Department of Ecology and Environment of Shandong Province* (2023-07-30) [2023-07-31]. http://fb.sdem.org.cn:8801/zxjc/index.htm
(山东省生态环境厅. 山东省重点企业自行监测信息发布平台[EB/OL]. 山东省生态环境厅 (2023-07-30) [2023-07-31]. http://fb.sdem.org.cn:8801/zxjc/index.htm)

[24] Xu Z, Chen S, Sang M, et al. Air quality improvement through vehicle electrification in Hainan province, China. *Chemosphere*, 2023, 316: 137814

[25] Department of Industry and Information Technology of Shangdong Province. Shandong Province coking capacity and production reduction work plan in 2021 [EB/OL]. *Department of Industry and Information Technology of Shangdong Province* (2021-06-11) [2023-07-31]. http://gxt.shandong.gov.cn/
(山东省工业和信息化厅. 2021 年全省焦化产能和产量压减工作方案[EB/OL]. 山东省工业和信息化厅(2021-06-11) [2023-07-31]. http://gxt.shandong.gov.cn/)

[26] Bo X. *Technical Method and Application of CALPUFF Model*. Beijing: China Environmental Science Press, 2016

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

(伯鑫. CALPUFF 模型技术方法与应用. 北京: 中国环境出版社, 2016)

[27] Chen Y J, Meng Y B, Cao H B. Simulation of spatial distributions of atmospheric heavy metals in Xinzhuang and assessment of their health risks // *Proceedings of the 7th Annual Meeting of Risk Analysis Council of China Association for Disaster Prevention*. Changsha, 2016: 464

[28] Bo X, Yang Z X, Jia Y L, et al. *Study on Environmental Impact of Dioxin Pollutants Discharged from Incineration Plants in Typical Areas of Southwest China*. Beijing: China Environmental Science Press, 2020
(伯鑫, 杨朝旭, 贾瑜玲, 等. 西南典型区域焚烧厂排放二噁英类污染物环境影响研究. 北京: 中国环境出版社, 2020)

[29] Kan H, Bo X, Qu J B, et al. Air quality impacts of power plant emissions in Hainan Province, 2015. *China Environ Sci*, 2019, 39(1): 428
(阚慧, 伯鑫, 屈加豹, 等. 2015 年海南省火电行业大气环境影响研究. 中国环境科学, 2019, 39(1): 428)

[30] Bo X, Wang G, Wen R, et al. Air pollution effect of the thermal power plants in Beijing-Tianjin-Hebei region. *China Environ Sci*, 2015, 35(2): 364
(伯鑫, 王刚, 温柔, 等. 京津冀地区火电企业的大气污染影响. 中国环境科学, 2015, 35(2): 364)

[31] Bo X, Wu Z X, Wang G, et al. Study on the standardized application of CALPUFF model. *Environ Sci Technol*, 2014, 37(Suppl 2): 530
(伯鑫, 吴忠祥, 王刚, 等. CALPUFF 模式的标准化应用技术研究. 环境科学与技术, 2014, 37(增刊 2): 530)

[32] Bo X, Ding F, Xu H, et al. Review of atmospheric diffusion spersion model CALPUFF technology. *Adm Tech Environ Monit*, 2009, 21(3): 9
(伯鑫, 丁峰, 徐鹤, 等. 大气扩散 CALPUFF 模型技术综述. 环境监测管理与技术, 2009, 21(3): 9)

[33] Cui J S, Lei T T, Bo X, et al. Studies on air pollutant emission inventory and environmental impact in Hainan Province. *Environ Pollut Contr*, 2020, 42(6): 651
(崔建升, 雷团团, 伯鑫, 等. 海南省大气污染源排放清单及环境影响研究. 环境污染与防治, 2020, 42(6): 651)

[34] Tian F, Bo X, Xue X D, et al. Study on settlement of dioxin pollutants under complex terrain-weather conditions. *China Environ Sci*, 2019, 39(4): 1678
(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. 中国环境科学, 2019, 39(4): 1678)

[35] Wang C X, Chu Y H, Ruan J H, et al. Research on the influence of AERMOD model surface parameter update on simulation effect. *China Environ Sci*, 2022, 42(5): 2070
(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. 中国环境科学, 2022, 42(5): 2070)

[36] The People's Government of Shandong Province. Implementation plan for accelerating the high-quality development of seven high energy-consuming industries [EB/OL]. *The People's Government of Shandong Province* (2018-11-05) [2023-07-31]. http://www.shandong.gov.cn/art/2018/11/5/art_2259_28944.html
(山东省人民政府. 关于加快七大高耗能行业高质量发展的实施方案[EB/OL]. 山东省人民政府(2018-11-05)[2023-07-31]. http://www.shandong.gov.cn/art/2018/11/5/art_2259_28944.html)

[37] Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Guidelines for selection of ambient air quality models (trial) [EB/OL]. *Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China* (2015-08-27) [2023-07-31]. https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgth/201508/W020150911488652824265.pdf
(中华人民共和国生态环境部. 环境空气质量模型遴选工作指南(试行) [EB/OL]. 中华人民共和国生态环境部(2015-08-27)[2023-07-31]. https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgth/201508/W020150911488652824265.pdf)

[38] Shan W Y, Chen S B, Wang G, et al. Clearing the air: Assessing the effectiveness of emission policy in Qinhuangdao's key industries. *Atmosphere*, 2023, 14(8): 1218

[39] Shi M X, Bo X, Tian F, et al. Study on deposition effects of dioxins based on different air quality models. *China Environ Sci*, 2020, 40(1): 24
(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. 中国环境科学, 2020, 40(1): 24)

[40] Sun B F, Bo X, Zhang S X, et al. Effect of exhaust gas from sintering machines on the concentration of dioxin in soil around a steel plant. *China Environ Sci*, 2017, 37(11): 4222
(孙博飞, 伯鑫, 张尚宣, 等. 钢厂烧结机烟气排放对土壤二噁英浓度的影响. 中国环境科学, 2017, 37(11): 4222)

[41] Tang L, Guo J, Guo P H, et al. PCDD/Fs emission inventory and environmental impact of municipal solid waste incineration plants in Shandong Province. *China Environ Sci*, 2023, 43(2): 735
(汤铃, 郭静, 郭朋恒, 等. 山东省垃圾焚烧电厂 PCDD/Fs 排放清单及其环境影响. 中国环境科学, 2023, 43(2): 735)

[42] Xu X, Wang C X, Wang P, et al. Bioaerosol dispersion and environmental risk simulation: Method and a case study for a biopharmaceutical plant of Gansu Province, China. *Sci Total Environ*, 2023, 860: 160506

[43] Yuan W Y, Wang P, Bo X, et al. The potential impact of bioaerosol emissions on human health threats. *China Environ Sci*, 2020, 40(7): 3173
(袁文燕, 王鹏, 伯鑫, 等. 含菌气溶胶扩散对人群的潜在影响风险. 中国环境科学, 2020, 40(7): 3173)

[44] Gao Y, Zhang L, Huang A S, et al. Unveiling the spatial and sectoral characteristics of a high-resolution emission inventory of CO_2 and air pollutants in China. *Sci Total Environ*, 2022, 847: 157623

[45] Lin S H. Research on the application and development trend of hydrogen energy in iron and steel metallurgy. *China Coal*, 2022, 48(10): 95
(林圣华. 氢能在钢铁冶金中的应用及发展趋势研究. 中国煤炭, 2022, 48(10): 95)

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