



中国环境科学  
China Environmental Science  
ISSN 1000-6923, CN 11-2201/X

## 《中国环境科学》网络首发论文

题目： 基于电力数据优化大气污染物排放清单的研究  
作者： 周卫青, 李朋, 吴华成, 何学娟, 孙世达, 薄宇, 贺克斌  
DOI: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20230109.001  
网络首发日期: 2023-01-10  
引用格式: 周卫青, 李朋, 吴华成, 何学娟, 孙世达, 薄宇, 贺克斌. 基于电力数据优化大气污染物排放清单的研究[J/OL]. 中国环境科学.  
<https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20230109.001>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

## 基于电力数据优化大气污染物排放清单的研究

周卫青<sup>1</sup>,李 朋<sup>1</sup>,吴华成<sup>1</sup>,何学娟<sup>2</sup>,孙世达<sup>2</sup>,薄 宇<sup>2,3\*</sup>,贺克斌<sup>3</sup>(1.国网冀北电力有限公司电力科学研究院(华北电力科学研究院有限责任公司),北京 100045; 2. 清华大学地球系统科学系,地球系统数值模拟教育部重点实验室,北京 100084; 3. 清华大学环境学院,环境模拟与污染控制国家重点联合实验室,北京 100084)

**摘要:** 为提高工业部门大气污染物排放清单的时空分辨率,提出基于电力数据优化工业部门时间分配及空间分布的方法,并以河北省唐山市为例进行研究,将基础排放清单及优化后的排放清单输入 WRF-CMAQ 模型验证其优化效果.结果表明,WRF-CMAQ 模型很好地模拟了 2019 年 1 月、4 月、7 月、10 月唐山市各污染物浓度的时间变化与空间分布.与基础排放清单相比,优化后的排放清单 PM<sub>2.5</sub> 年均模拟值与监测值相关性提高了 3.3%,对 NO<sub>2</sub> 的改善效果最好.10 月份改善效果最明显,PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>、CO 的  $\Delta R^2$  均超 1.4%.优化后的排放清单 PM<sub>2.5</sub> 浓度变化具有更加明显的区域性特征,部分区域出现差异高值区,如迁西县、遵化市等.优化后的排放清单在一定程度上提升了空间模拟的精确度,更能体现工业部门的污染物排放变化.

**关键词:** 电力数据;工业部门;排放清单;时间分配系数;WRF-CMAQ

中图分类号: X511 文献标识码: A

**Research on optimizing air pollutant emission inventory based on electricity consumption data.** ZHOU Wei-qing<sup>1</sup>, LI Peng<sup>1</sup>, WU Hua-cheng<sup>1</sup>, HE Xue-juan<sup>2</sup>, SUN Shi-da<sup>2</sup>, BO Yu<sup>2,3\*</sup>, HE Ke-bin<sup>3</sup>(1.Jibe Electric Power Research Institute, State Grid Jibe Electric Power Co., Ltd., (North China Electric Power Research Institute Company Limited), Beijing 100045, China;2. Department of Earth System Science, Ministry of Education Key Laboratory for Earth System Modeling, Institute for Global Change Studies, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3.School of Environment, State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** In order to improve the spatial and temporal resolution of the air pollutant emission inventory in the industrial sector, the method of optimizing the time and spatial distribution in the industrial sector based on the electricity consumption data was proposed, and taken Tangshan city, Hebei province as an example, the basic emission inventory and the optimized emission inventory were input into the WRF-CMAQ model to verify its optimization effect. The results showed that the WRF-CMAQ model well simulated the temporal variation and spatial distribution of pollutant concentrations in Tangshan in January, April, July and October 2019. Compared with the basic emission inventory, the correlation between the annual average simulation value and the monitoring value of PM<sub>2.5</sub> in the optimized emission inventory increased by 3.3%, with the best improvement effect on NO<sub>2</sub>. The improvement effect was the most obvious in October, with the  $\Delta R^2$  of PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub> and CO exceeded 1.4. The change of PM<sub>2.5</sub> concentration in the optimized emission inventory had more obvious regional characteristics, with high value areas of difference appeared in some areas, such as Qianxi county and Zunhua city. The optimized emission inventory improved the accuracy of spatial simulation to a certain extent, and can better reflect the changes of pollutant emissions in the industrial sector.

**Key words:** electricity consumption data; industrial sector; emission inventory; temporal profile; WRF-CMAQ

2020 年中国钢铁行业生铁、粗钢、钢材产量分别为 88897.61 万 t、106476.68 万 t、132489.18 万 t,水泥行业产量 239470.83 万 t<sup>[1]</sup>.经济快速增长的同时也带来了巨大的环境污染负荷<sup>[2-3]</sup>.中国大气污染治理取得显著成绩,但仍任重道远.2020 年京津冀地区 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、颗粒物排放分别占全国排放的 5%、8%、6%<sup>[4-6]</sup>.京津冀地区作为重点污染区域引起广泛关注.唐山市 2020 年 PM<sub>2.5</sub> 年均浓度为 49 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,超过二级年均限值(35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ),是京津冀地区污染物排放强度最高的城市<sup>[7-8]</sup>.研究表明,2017 年 1 月北京市 PM<sub>2.5</sub> 工业源外来贡献占总浓度的 63.87%.唐山市对北京

市影响显著,贡献了北京市 PM<sub>2.5</sub> 工业源浓度的 24.78%<sup>[9]</sup>.工业源对 PM<sub>2.5</sub> 污染的贡献不可忽视<sup>[10-11]</sup>.目前已有不少学者对工业部门的污染物排放情况进行研究,建立了钢铁、水泥、焦化、玻璃、陶瓷等主要工业行业大气污染物排放清单<sup>[12-17]</sup>.近年来,我国大气污染防治工作也对工业部门精细化管理提出迫切需求<sup>[18]</sup>.建立高时空分辨率的工业部门大气污染物排放清单对区域空气质量模拟不可或缺<sup>[19]</sup>.

为了优化工业部门大气污染物排放清单,伯鑫等<sup>[20-22]</sup>利用全国污染源排放在线监测(CEMS)数据建立了基于生产工艺的全国钢铁及水泥行业大气

污染物排放清单管理系统.何敏等<sup>[23]</sup>建立了四川省2008—2014年高分辨率网格化水泥行业大气污染物排放清单.大气污染物排放清单输入空气质量模式前,需根据空气质量模式对时间分辨率的要求,将各污染物排放量(年尺度)分配到更精细的时间尺度(月/日/小时)<sup>[24]</sup>.目前常用的方法是根据月分配系数将各污染物排放量分配到月尺度,然后根据日分配系数分配到日尺度,最后根据小时分配系数分配到小时尺度<sup>[25]</sup>.以往研究中,工业部门排放清单的时间分配系数主要基于产品产量或调研生产规律获取<sup>[26]</sup>.按等比例进行均分的分配方法无法反映工业部门污染物的真实排放情况,会造成一定程度的误差<sup>[27]</sup>.电力大数据由于其能够反映用电部门真实的生产情况,在大气环境污染防治中发挥了重要的作用<sup>[28-31]</sup>.尤其是在水泥、铸造等以电力作为主要生产能源的行业<sup>[32-33]</sup>.雒军等<sup>[34]</sup>构建了基于大数据的火电厂智慧环保平台,对电厂开展深层挖掘数据使用价值的研究.张英杰等<sup>[35]</sup>基于2012年江苏省电力企业在线监控系统数据及大气核查核算表数据,分析了大型固定燃煤源主要污染物的总排放量和月变化特征.胡雪等<sup>[36]</sup>基于电力数据通过分析某市重点行业企业每日用电量和上一年用电总量及污染物排放总量数据来推算企业实时污染物排放量.而电力数据应用于优化工业部门大气污染物排放清单方面的研究却鲜有报道.

本研究针对目前大气污染物排放清单时间分配及空间分布亟需精细化的问题,提出基于电力数据优化排放清单时空分辨率的方法.采用电力数据优化工业部门时间分配系数及工业企业经纬度.以河北省唐山市作为研究区域,获取重点工业行业电力数据并对该区域工业部门大气污染物排放清单的时间分配系数进行优化.以2019年为研究基准年,对基础排放清单及优化后的排放清单使用WRF-CMAQ空气质量模型模拟唐山市PM<sub>2.5</sub>等大气污染物浓度的时间变化与空间分布.并将污染物浓度模拟结果与实际监测值进行对比,评价排放清单的优化效果.以期为大气环境精细化治理和精准防控提供重要的科学依据.

## 1 数据与方法

### 1.1 研究数据

本研究使用的重点行业企业用电量数据来源于国家电网公司提供的电力营销数据,时间尺度为月级.环境污染物数据来源于清华大学研发的多尺度大气污染源排放清单MEIC<sup>[37]</sup>及唐山市生态环境局提供的2019年唐山市大气污染物排放清单.

### 1.2 重点行业选取

基于2019年唐山市大气污染物排放清单,选取主要污染物(颗粒物、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、VOCs)排放量占比与用电量占比较大的行业作为重点行业进行研究.包括钢铁行业、水泥行业、玻璃行业、焦化行业、陶瓷行业、铸造行业及砖瓦行业.

### 1.3 排放清单优化

使用大气污染物排放清单MEIC和2019年唐山市大气污染物排放清单校核后的本地清单作为基础排放清单.月、日、小时分配系数采用《城市大气污染源排放清单编制技术手册》附录C-2排放时间分配系数.考虑到工业部门企业基于月用电数据核算电费,月用电数据比其他时间尺度用电数据连续性更好,也更加准确.选取重点行业中电力数据质量良好的企业,获取各企业在电网营销端2019年月用电数据.将归一化后的重点行业月用电数据定义为优化后的月分配系数,对基础排放清单中相应工业部门月时间谱进行替换.日、小时分配系数采用《城市大气污染源排放清单编制技术手册》附录C-2排放时间分配系数,得到优化后的大气污染物排放清单.

优化前后唐山工业企业污染源的分布情况如图1所示.唐山地区工业企业集中分布在遵化市、玉田县、丰润区、路北区、路南区及丰南区.优化前排放清单中的排放源经纬度来自填报信息,易出现经纬度偏差.如分布在唐山市行政区划之外的排放源,以及经纬度和行政区划不匹配的排放源.使用唐山市本地清单中的信息修正后解决了填报经纬度偏差问题,更新了唐山市工业企业的地理坐标,污染源分布精细化程度更高.

### 1.4 WRF-CMAQ模型

本研究选择2019年1月、4月、7月、10月作为模拟时段.采用Lambert投影坐标系,将中央经线

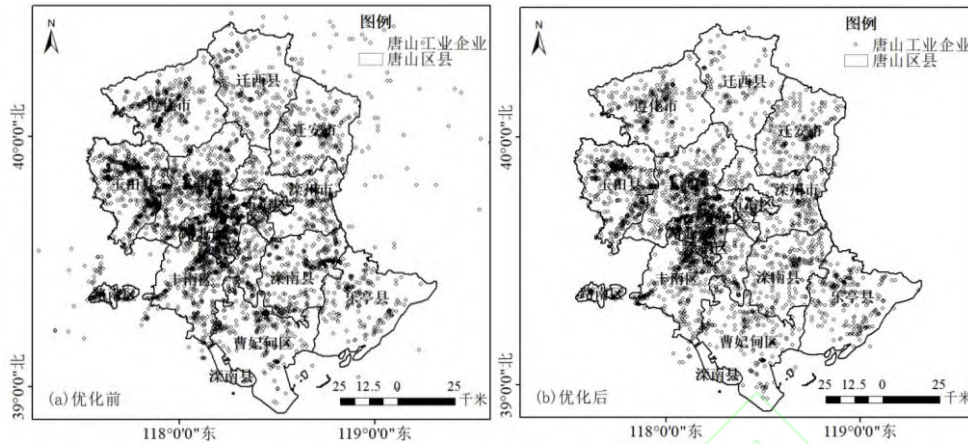


图1 优化前后2019年唐山工业企业空间分布

Fig.1 Spatial distribution of Tangshan industrial enterprises in2019 before and after optimization

119 E,两条标准纬线 25 N、47 N 输入研究区域城市所在的经纬度范围并设置坐标原点经纬度 (119 E,40 N),模拟区域如图2所示.WRFv3.8模型提供气象条件,CMAQ5.1模型模拟主要污染物浓度.WRF模型的初始气象场和侧边界条件数据采用美国国家环境预报中心(NCEP)提供的时间分辨率6h、水平分辨率1°×1°的FNL全球再分析资料.WRF模型模拟结果通过MCIP程序转换为CMAQ模型输入格式.模拟区域采用三层嵌套网格,网格分辨率分别设置为27km×27km、9km×9km、3km×3km,CMAQ网格数分别为106×133、97×85、73×67.WRF的垂直方向共设置28个气压层,层间距自下而上逐渐增大.CMAQ分层则选取其中的14

层,MCIP将其分解为14个化学传输模型层.CMAQ模型垂直分辨率的14σ水平分别为1.000、0.995、0.988、0.980、0.970、0.956、0.938、0.893、0.839、0.777、0.702、0.582、0.400、0.200和0.000.WRF模型短波和长波辐射选择New Goddard方案<sup>[38]</sup>和快速辐射传输模型(RRTM)<sup>[39]</sup>.此外,还选择了Kain-Fritsch云参数化方案<sup>[40]</sup>、ACM2 PBL方案<sup>[41]</sup>、Pleim-Xiu地表方案<sup>[42]</sup>和WSM6云微物理方案<sup>[43]</sup>.CMAQ模型化学机制选择CB05气相化学反应机理和AERO6气溶胶反应机理.

### 1.5 模型性能及清单优化评价

基于WRF-CMAQ空气质量模型模拟基础排放清单及优化后的排放清单在研究区域内各污染物

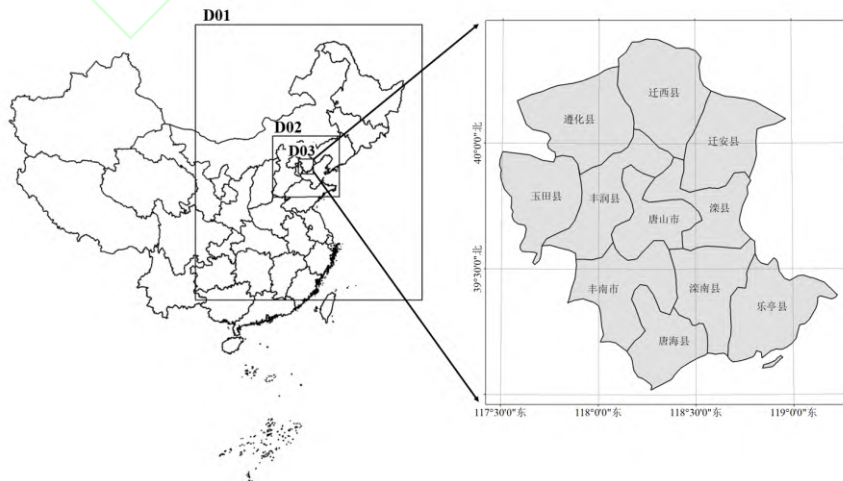


图2 模拟区域示意图

Fig.2 Schematic diagram of the simulation area



浓度.与唐山雷达站、十二中、物资局、供销社、小山、陶瓷公司等5个国控站点每小时监测到的主要污染物浓度数据做对比.使用相关系数( $R^2$ )、标准平均偏差(NMB)和标准平均误差(NME)等参数验证模型模拟结果的可靠性(见式1-式3).通过研究优化后的排放清单与基础排放清单  $R^2$ 、NMB 及 NME 的变化值评价清单的优化效果.当 $\Delta R^2$  为正数时,优化后的排放清单较基础排放清单模拟效果有所改善,数值越大,改善效果越好. $\Delta |NMB|$  值为负数时,优化后的排放清单较基础排放清单模拟偏差降低,负值越小,改善效果越好.当 $\Delta NME$  值为负数时,优化后的排放清单较基础排放清单模拟误差降低,负值越小,改善效果越明显.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (Sim_i - SIM)(Obs_i - OBS)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Sim_i - SIM)^2 \sum_{i=1}^N (Obs_i - OBS)^2}} \quad (1)$$

$$NMB = \frac{\sum_{i=1}^N (Sim_i - Obs_i)}{\sum_{i=1}^N (Obs_i)} \times 100 \quad (2)$$

$$NME = \frac{\sum_{i=1}^N |Sim_i - Obs_i|}{\sum_{i=1}^N (Obs_i)} \times 100 \quad (3)$$

式中: $N$  为样本总量. $SIM$  为模拟值的平均值, $Sim_i$  为第  $i$  个模拟值. $OBS$  为监测值的平均值, $Obs_i$  为第  $i$  个监测值.其中  $CO$  浓度单位为  $mg/m^3$ ,其余5种污染物浓度单位为  $\mu g/m^3$ . $R^2$  为相关系数,反映模拟值和监测值随时间变化的相似程度,通过统计显著性检验判定模拟值与监测值的相关性<sup>[44]</sup>.NMB(标准平均偏差)、NME(标准平均误差)代表模拟值与监测值的偏离程度,适用于空气质量数值模型模拟结果的验证<sup>[45]</sup>.

## 2 结果与讨论

### 2.1 重点行业月时间谱

大气污染物排放时间特征由时间特征谱进行表示<sup>[46-47]</sup>.优化前钢铁及玻璃行业的月时间谱最高值出现在4月,水泥及焦化行业最高值出现在5月及8月,陶瓷、铸造、砖瓦行业最高值均出现在6月(图3(a)).钢铁行业月时间谱变化趋势较平稳,平均8.33%.水泥行业5月高于其他月份,是1月的4.4倍.玻璃行业在3月至12月较为稳定,高于1月及2月.焦化行业变化波动较大,春、夏、秋季均高于冬季.

陶瓷、铸造、砖瓦行业1、2月较低,3月上升后至12月稳定.优化后,钢铁、水泥、玻璃、焦化、陶瓷、铸造及砖瓦行业的月时间谱最高值分别出现在1月、4月、12月、8月、1月、12月及5月(图3(b)).钢铁行业与陶瓷行业月时间谱变化趋势较为平稳.水泥行业与砖瓦行业变化趋势相近,在3月至12月较为稳定.玻璃行业12月高于其他月份,是2月的2.5倍.焦化行业变化明显,在8月份达到峰值13.20%.铸造行业1月、12月较高,达11.32%及14.01%.类似的变化趋势也可以在其他研究中发现<sup>[14,48-50]</sup>.整体来看,优化后的钢铁、玻璃及焦化行业的月时间谱更能体现月变化特征.水泥及砖瓦行业更新了月时间谱,与优化前的月时间谱变化趋势较一致.此外,优化前陶瓷及铸造行业使用砖瓦行业月时间谱进行替代,优化后更新了陶瓷及铸造行业,体现了不同的月排放特征.优化后各行业月时间谱在2月下降,3月回升后平稳波动,至10月下降后回升.原因可能跟2月份春节及10月份国庆节等节假日因素相关<sup>[35,51]</sup>.根据2019年唐山市统计月报获取了钢铁、水泥、玻璃、焦化、陶瓷行业的月产量百分比趋势图(见图4)<sup>[52]</sup>.与重点行业月时间谱对比显示出一定的相关性,反应出较为一致的月变化趋势.尤其是水泥行业,生产用电与污染物排放关联性较强,更能反应实际生产情况.值得注意的是,虽然钢铁行业月时间谱与月产量占比整体来看相关性较低,但在个别月份如4月、7月、10月有较强的相关性.

### 2.2 模型性能评价

WRF-CMAQ 模型模拟性能指标统计结果如表1所示, $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 、 $SO_2$ 、 $NO_2$ 、 $CO$  及  $O_3$  的 NMB 分别为 18.0%、17.6%、34.8%、-25.6%、14.0% 及 9.9%.NME 分别为 33.6%、32.6%、63.5%、28.6%、33.2% 及 23.2%. $R^2$  分别为 0.61、0.50、0.32、0.63、0.45 及 0.77.模型性能符合标准<sup>[53-55]</sup>.网格分辨率与排放源强是造成模型模拟偏差的主要因素,在一定程度上影响着模型模拟结果<sup>[56]</sup>.

唐山市2019年1月、4月、7月、10月各污染物日均浓度模拟值与监测值对比如图5所示.各污染物模拟值与监测值相关性较好.部分点位的模拟值与监测值差异较大,数据离散.其原因主要与模型在复杂地形下模拟的气象场误差、单个监测点的代表性及模拟区域平均值的可比性以及局地污染排

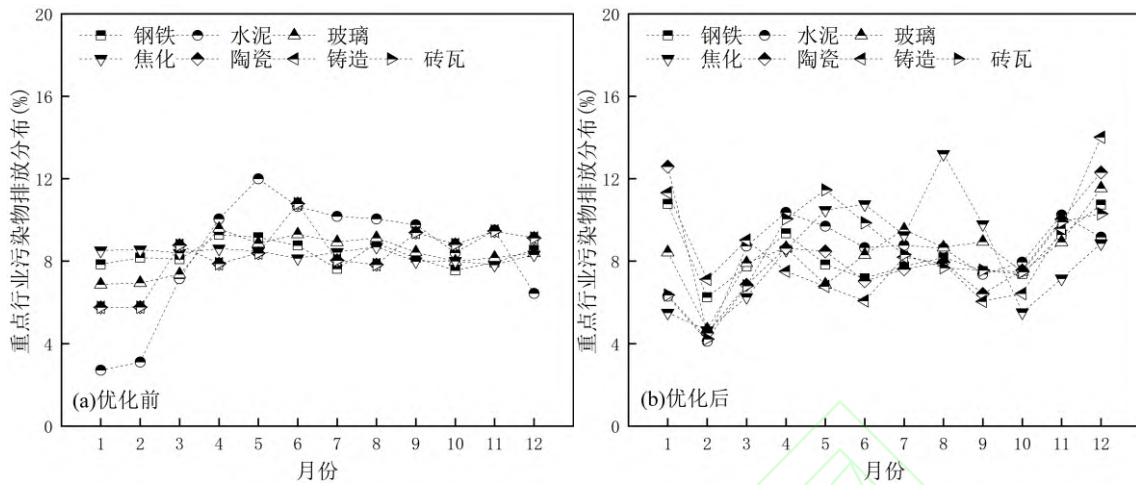


图3 重点行业月时间谱

Fig.3 Monthly temporal profile of key industries

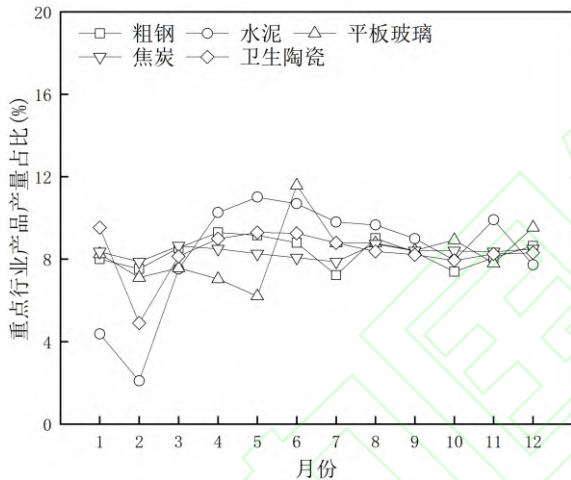


图4 重点行业月产量百分比趋势图

Fig.4 Monthly yield percentage trend chart of key industries

放的不确定性等有关<sup>[57]</sup>.

### 2.3 清单优化评价

2019年1月、4月、7月、10月基础排放清单及优化后的排放清单各污染物逐日浓度模拟值与监测值对比显示(图6),WRF-CMAQ模型很好地模拟了各污染物在唐山地区的逐日变化情况,合理地反映了各污染物浓度逐日演变情况.1月12日至20日呈缓慢下降趋势,10月4日至24日呈逐渐上升趋势.总体来看,模型能够模拟出污染物浓度的时间变化趋势,除个别时段个别污染物模拟浓度偏低外,绝大部分分时段模拟浓度与监测浓度接近.与监测值相比,优化后的排放清单较好地模拟了1月18日、4月4日、7月5日及10月27日PM<sub>2.5</sub>浓度的峰值,但高估了1

月3日、4月22日、7月14日及10月10日的浓度值,低估了1月12日及4月13日的浓度值.10月份除10月19日及10月28日等个别日期外,优化后的排放清单与监测值的相关性皆高于基础清单.其他污染物如SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>在1月份与监测值的相关性更高,CO、O<sub>3</sub>及PM<sub>10</sub>分别在4月、7月及10月的相关性更高.

优化后的排放清单较基础排放清单各污染物R<sup>2</sup>、NMB、NME的差值如表2所示.从年均值上看,PM<sub>2.5</sub>模拟值与监测值的相关性改善最大,ΔR<sup>2</sup>为3.3%.NO<sub>2</sub>的Δ|NMB|和ΔNME最小,改善效果最好.从典型月份上看,1月份SO<sub>2</sub>模拟值与监测值的相关性改善最大,ΔR<sup>2</sup>为1.6%.NO<sub>2</sub>的Δ|NMB|和ΔNME为-3.7%、-2.8%,改善效果最好.4月份CO模拟值与监测值的相关性改善最大,ΔR<sup>2</sup>为5.2%.SO<sub>2</sub>及NO<sub>2</sub>的改善效果最好,Δ|NMB|和ΔNME分别为-13.2%及-0.8%.10月份PM<sub>10</sub>模拟值与监测值的相关性改善最大,ΔR<sup>2</sup>为1.5%.PM<sub>2.5</sub>的改善效果最好,Δ|NMB|及ΔNME分别为-8.3%、-5.6%.综上,优化后的排放清单各污染物模拟结果均有一定程度的改善,更接近实际监测值.优化后的排放清单可有效提升空气质量模型的模拟效果.

2019年1月、4月、7月、10月基础排放清单及优化后的排放清单PM<sub>2.5</sub>浓度空间分布如图7所示.与基础排放清单对比,优化后的排放清单模拟的PM<sub>2.5</sub>浓度变化具有更加明显的区域性特征.部分区域出现差异高值区,如迁西县、遵化市等.1月份优化后的排放清单PM<sub>2.5</sub>浓度在中心城区周围出现明显

高值,较基础排放清单高  $6\mu\text{g}/\text{m}^3$ .4 月份优化后的排放清单  $\text{PM}_{2.5}$  浓度与基础排放清单模拟值相近.7 月份迁西县、丰润区及遵化市优化后的排放清单的  $\text{PM}_{2.5}$  浓度明显低于基础排放清单.10 月份优化后的排放清

单  $\text{PM}_{2.5}$  浓度在全市范围内均低于基础排放清单.综上所述,优化后的排放清单在一定程度上提升了空间模拟的精确度,更能体现工业部门的污染物排放变化.

表 1 模型模拟性能指标统计

Table 1 Statistical results of model simulation performance index

污染物	OBS( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	SIM( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )			R <sup>2</sup>			NMB(%)			NME(%)		
		优化前	优化后	变化值	优化前	优化后	变化值	优化前	优化后	变化值	优化前	优化后	变化值
PM <sub>2.5</sub>	58.3	68.8	70.3	1.5	0.61	0.64	0.03	18	20.7	2.7	33.6	34.1	0.5
PM <sub>10</sub>	106	125.2	126.5	1.3	0.5	0.53	0.03	17.6	21.7	4.1	32.6	35.3	2.7
SO <sub>2</sub>	19.9	27.2	28.8	1.6	0.32	0.34	0.02	34.8	49.6	14.8	63.5	78.2	14.7
NO <sub>2</sub>	51.7	38.4	38.8	0.4	0.63	0.62	-0.01	-25.6	-24.8	-0.8	28.6	28.1	-0.5
CO	1.4	1.6	1.6	0.0	0.45	0.47	0.02	14	16.6	2.6	33.2	34.9	1.7
O <sub>3</sub>	94.6	104	103.7	-0.3	0.77	0.77	0.00	9.9	9.6	-0.4	23.2	22.9	-0.3

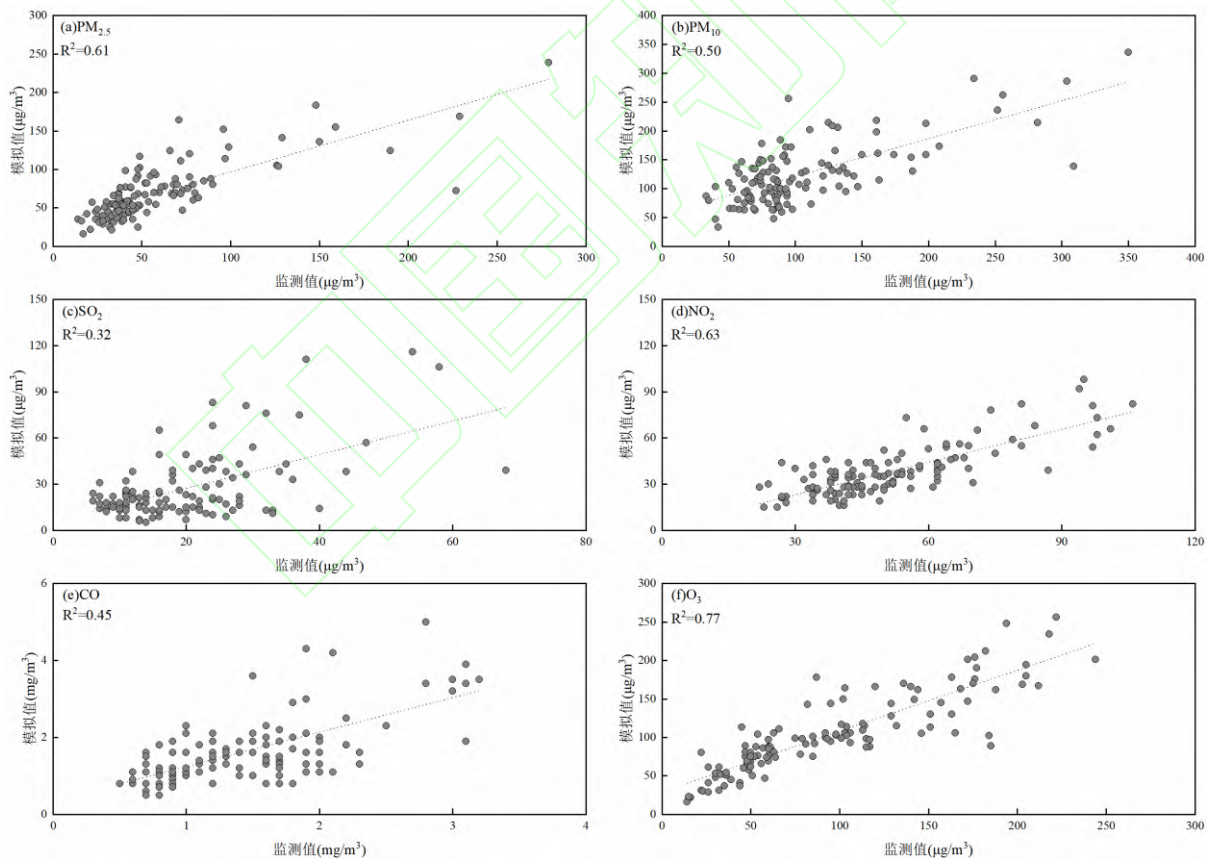


图 5 唐山市 2019 年 1 月、4 月、7 月、10 月各污染物日均浓度模拟值与监测值的散点图

Fig.5 Scatter plots of the simulated daily mean concentration of pollutants with the observed values in January, April, July and October 2019 in Tangshan



表 2 优化后的排放清单评价结果(%)

Table 2 Optimize emission inventory evaluation results (%)

污染物	1月			4月			7月			10月		
	$\Delta R$	$\Delta  NM $	$\Delta NM$	$\Delta R$	$\Delta  NM $	$\Delta NM$	$\Delta R$	$\Delta  NM $	$\Delta NM$	$\Delta R$	$\Delta  NM $	$\Delta NM$
	<sup>2</sup>	B	E	<sup>2</sup>	B	E	<sup>2</sup>	B	E	<sup>2</sup>	B	E
PM <sub>2.5</sub>	-1.3	13.5	5.9	0.0	-0.2	0.1	0.7	-2.4	-2.3	1.4	-8.3	-5.6
PM <sub>10</sub>	-2.8	15.7	8.5	-0.1	-3.4	3.5	0.3	-2.6	-2.3	1.5	-6.2	-2.5
SO <sub>2</sub>	1.6	35.6	33.8	-0.2	-13.2	10.4	0.8	-1.2	3.7	-0.5	-7.0	-3.8
NO <sub>2</sub>	0.7	-3.7	-2.8	0.7	-0.9	-0.8	0.3	0.8	0.7	-0.5	1.4	1.3
CO	-1.6	13.6	10.2	5.2	-2.7	-0.5	0.4	-6.9	-3.6	1.4	-5.2	-2.2
O <sub>3</sub>	0.1	-3.3	-2.7	-0.4	-0.1	0.1	0.4	-0.3	-0.2	0.0	0.6	0.2

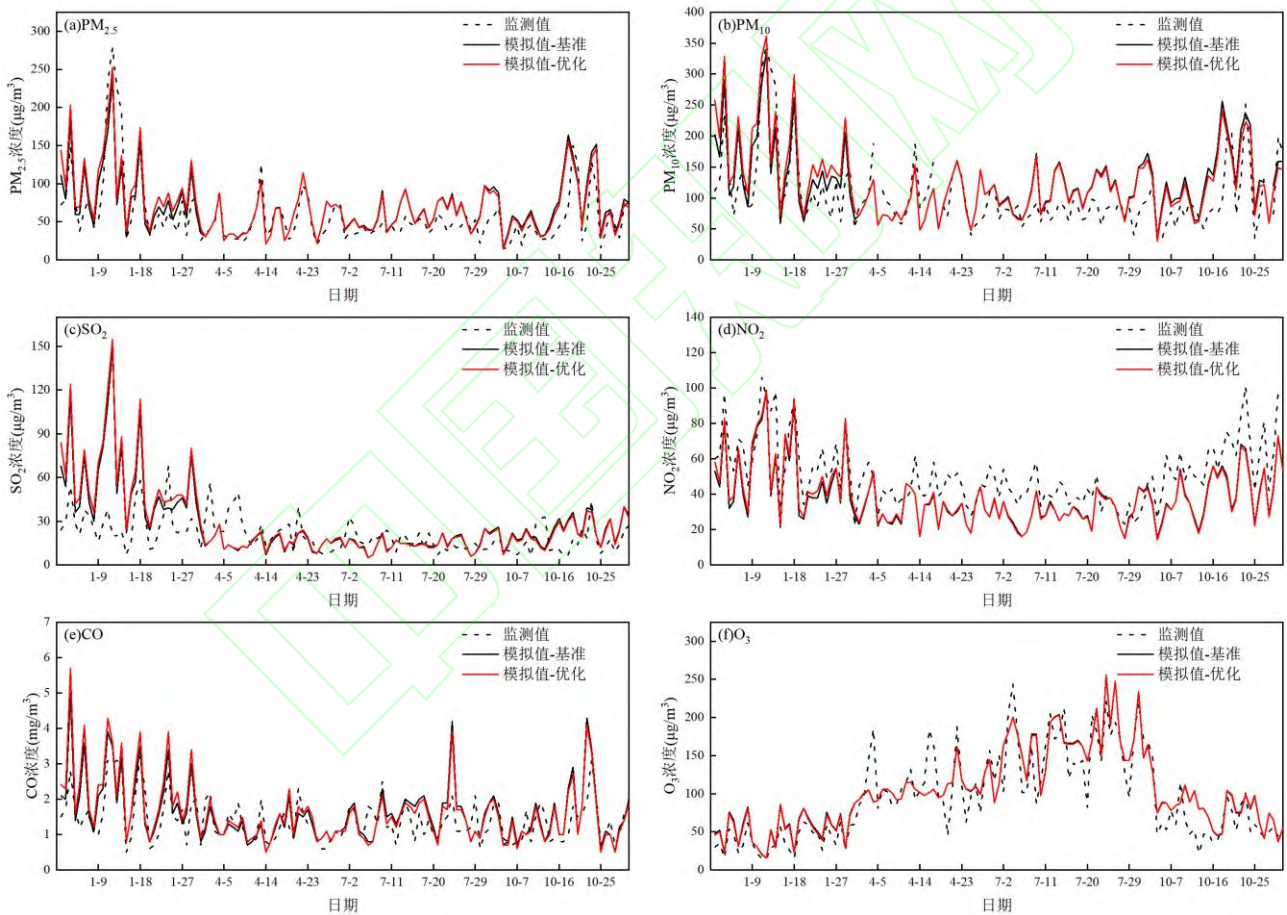


图 6 2019 年 1 月、4 月、7 月、10 月基础排放清单及优化后的排放清单各污染物逐日浓度模拟值与监测值对比

Fig.6 Comparison of simulated and monitored daily concentrations of pollutants in the basic emission inventory and the optimized emission inventory for January, April, July and October 2019

#### 2.4 不确定性分析

本文模拟结果的不确定性主要来源于网格分辨率及排放源强,网格分辨率低会导致区域局地环流和污染源分布情况反映不准确,排放源强不细致则难以

反映区域实时污染物排放,从而影响模拟结果.除此之外,本研究只验证了优化月排放特征的模拟效果.对于更高时间分辨率如日尺度、小时尺度时间优化的实际效果有待进一步确定.



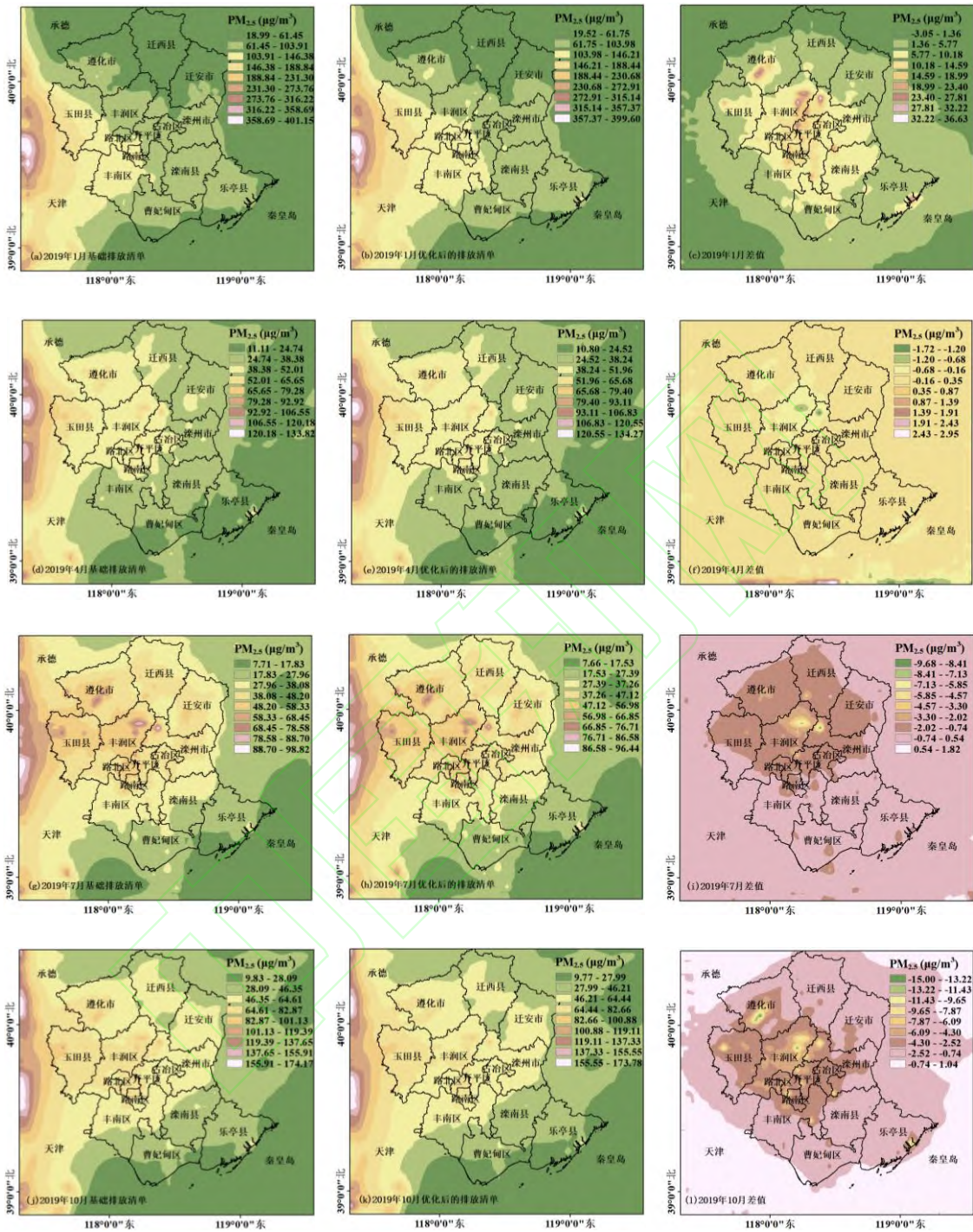


图7 不同情景下CMAQ模拟的PM<sub>2.5</sub>浓度空间分布图

Fig.7 Spatial distribution of PM<sub>2.5</sub> concentration simulated by CMAQ under different scenarios

### 3 结论

3.1 基于电力数据得到重点行业月时间谱.结果显示,钢铁、水泥、玻璃、焦化、陶瓷、铸造及砖瓦行业的月时间谱最高值分别出现在1月、4月、12月、

8月、1月、12月及5月.各行业呈现出不同的月变化趋势.

3.2 排放清单的优化包括重点行业月度分配系数优化和部分源空间分布优化.本研究模拟性能的提升来自月度分配系数的优化.优化后的排放清单模

拟结果显示  $PM_{2.5}$  的相关性改善最大,  $\Delta R^2$  为 3.3%。 $NO_2$  的  $\Delta|NMB|$  和  $\Delta NME$  最小, 改善效果最好。优化后的排放清单各污染物模拟结果均有一定程度的改善, 10 月份改善效果最明显。优化后的排放清单可有效提升空气质量模型的模拟效果。

3.3 与基础排放清单对比, 优化后的排放清单模拟的  $PM_{2.5}$  浓度变化具有更加明显的区域性特征。部分区域出现差异高值区, 如迁西县、遵化市等。优化后的排放清单在一定程度上提升了空间模拟的精确度, 更能体现工业部门的污染物排放变化。

#### 参考文献:

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2021. National Bureau of Statistics in China. China Statistical Yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2021.
- [2] Wang X, Lei Y, Yan L, et al. A unit-based emission inventory of  $SO_2$ ,  $NO_x$  and PM for the Chinese iron and steel industry from 2010 to 2015 [J]. Science of The Total Environment, 2019, 676: 18-30.
- [3] Hua S B, Tian H Z, Wang K, et al. Atmospheric emission inventory of hazardous air pollutants from China's cement plants: temporal trends, spatial variation characteristics and scenario projections [J]. Atmospheric Environment, 2016, 128: 1-9.
- [4] 国家统计局. 北京统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2021. National Bureau of Statistics in China. Beijing Statistical Yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2021.
- [5] 国家统计局. 天津统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2021. National Bureau of Statistics in China. Tianjin Statistical Yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2021.
- [6] 国家统计局. 河北经济年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2021. National Bureau of Statistics in China. Hebei Economic Yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2021.
- [7] 中国环境保护部. 2020 中国生态环境状况公报 [EB/OL]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkqb/202105/P020210526572756184785.pdf>. Ministry of Environmental Protection of China. 2021 China ecological environment bulletin [EB/OL]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkqb/202105/P020210526572756184785.pdf>.
- [8] Yang H, Tao W, Liu Y, et al. The contribution of the Beijing, Tianjin and Hebei region's iron and steel industry to local air pollution in winter [J]. Environmental Pollution, 2019, 245: 1095-1106.
- [9] 邵玄逸, 王晓琦, 钟巍盛, 等. 京津冀典型城市冬季工业源排放与  $PM_{2.5}$  污染关系 [J]. 环境科学与技术, 2021, 44(S1): 141-149. Shao X Y, Wang X Q, Zhong Y S, et al. Response of Industrial Emission to  $PM_{2.5}$  Pollution in Typical Cities of Beijing-Tianjin-Hebei Region in Winter [J]. Environmental Science & Technology, 2021, 44(S1): 141-149.
- [10] 吴文景, 常兴, 邢佳, 等. 京津冀地区主要排放源减排对  $PM_{2.5}$  污染改善贡献评估 [J]. 环境科学, 2017, 38(3): 867-875. Wu W J, Chang X, Xing J, et al. Assessment of  $PM_{2.5}$  Pollution Mitigation due to Emission Reduction from Main Emission Sources in the Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. Environmental Science, 2017, 38(3): 867-875.
- [11] 胡亚男, 马晓燕, 沙桐, 等. 不同排放源对华东地区  $PM_{2.5}$  影响的数值模拟 [J]. 中国环境科学, 2018, 38(5): 1616-1628. Hu Y N, Ma X Y, Sha T, et al. Impact of different emission sources on  $PM_{2.5}$  over East China based on numerical study [J]. China Environmental Science, 2018, 38(5): 1616-1628.
- [12] 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.
- [13] 王永红, 薛志钢, 柴发合, 等. 我国水泥工业大气污染物排放量估算 [J]. 环境科学研究, 2008, 21(2): 207-212. Wang Y H, Xue Z G, Cai F H, et al. Estimation of Air Pollutants Emissions of Cement Industry in China [J]. Research of Environmental Sciences, 2008, 21(2): 207-212.
- [14] 汤铃, 薛晓达, 伯鑫, 等. 中国水泥排放清单及分布特征 [J]. 环境科学, 2020, 41(11): 4776-4785. Tang L, Xue X D, Bo X, ET AL. Contribution of Emissions from Cement to Air Quality in China [J]. Environmental Science, 2020, 41(11): 4776-4785.
- [15] 郑昊天, 赵斌, 王书肖, 等. 钢铁与焦化行业大气污染物排放及空气质量影响分析 [J]. 环境影响评价, 2020, 42(4): 16-21. Zheng H T, Zhao B, Wang S X, et al. Air Pollutant Emissions From Steel and Coking Industries and Their Impacts on Ambient Air Quality in China [J]. Environmental Impact Assessment, 2020, 42(4): 16-21.
- [16] 钟悦之, 宋晓晖, 王彦超, 等. 中国平板玻璃行业大气污染物排放特征研究 [J]. 中国环境科学, 2018, 38(12): 4451-4459. Zhong Y Z, Song X H, Wang Y C, et al. Emission characteristics from flat-glass industry in China [J]. China Environmental Science, 2018, 38(12): 4451-4459.
- [17] 刘晓, 胡京南, 王红梅, 等. 基于多源数据融合的河南省建材行业排放清单 [J]. 环境科学, 2022. Liu X, Hu J N, Wang H M, et al. Emission Inventory of Building Materials Industry in Henan Province Based on Multi-source Data Integration [J]. Environmental Science, 2022.
- [18] Liu H, Wu B, Liu S, et al. A regional high-resolution emission inventory of primary air pollutants in 2012 for Beijing and the surrounding five provinces of north China [J]. Atmospheric Environment, 2018, 181: 20-33.
- [19] Ma X, Sha T, Wang J, et al. Investigating impact of emission inventories on  $PM_{2.5}$  simulations over north China plain by WRF-Chem [J]. Atmospheric Environment, 2018, 195: 125-140.
- [20] 伯鑫, 何友江, 商国栋, 等. 基于 CEMS 全国污染源清单数据库系统开发与应用 [J]. 环境工程, 2014, 21(8): 105-113. Bo X, He Y J, Shang G D, et al. Development and application of the national pollution emission inventory database system with CEMS [J]. Environmental Engineering, 2014, 21(8): 105-113.
- [21] 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(5): 578-582. Bo X, Zhen R Q, Qu J B, et al. Study on the management system of



- atmospheric pollutant emission inventory for steel industry of China [J]. *Environmental Protection Technology*, 2017,39(5):578-582.
- [22] 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 [J]. *中国环境科学*, 2015,35(8):2554-2560.  
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 [J]. *China Environmental Science*, 2015,35(8):2554-2560.
- [23] 何敏,陈军辉,韩丽,等.四川省2008-2014年水泥行业大气污染物排放清单及时空分布特征 [J]. *环境科学学报*, 2017,37(1):34-43.  
He M, Chen J H, Han L, et al. Cement industrial emission inventories development and their temporal and spatial distribution for Sichuan province from 2008-2014. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017,37(1):34-43.
- [24] 刘扬,王颖,刘灏,等.基于WRF-Chem模拟验证的天水市主城区大气污染源排放清单 [J]. *中国环境科学*, 2022,42(1):32-42.  
Liu Y, Wang Y, Liu H, et al. Air pollutants emission inventory for the main urban area of Tianshui City based on verification by WRF-Chem simulation [J]. *China Environmental Science*, 2022,42(1):32-42.
- [25] 毛红梅,张凯山,第宝锋,等.成都市大气污染物排放清单高分辨率的时空分配 [J]. *环境科学学报*, 2017,37(1):23-33.  
Mao H M, Zhang K S, Di B F, et al. The high-resolution temporal and spatial allocation of emission inventory for Chengdu [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017,37(1):23-33.
- [26] 何斌,梅士龙,陆琛莉,等.MEIC排放清单在空气质量模式中的应用研究 [J]. *中国环境科学*, 2017,37(10):3658-3668.  
He B, Mei S L, Lu C L, et al. The application of MEIC emission inventory in air quality model [J]. *China Environmental Science*, 2017,37(10):3658-3668.
- [27] 杨文夷,李杰,朱莉莉,等.我国空气污染物人为源排放清单对比 [J]. *环境科学研究*, 2013,26(7):703-711.  
Yang W Y, Li J, Zhu L L, et al. Comparison of Anthropogenic Emission Inventories of China [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2013,26(7):703-711.
- [28] 陈建华,李政,刘翰青,等.基于企业用电数据的大气污染防治工作研究进展 [J]. *环境工程技术学报*, 2022:1-12.  
Chen J H, Li Z, Liu H Q, et al. Research progress of air pollution prevention and control based on enterprise electricity consumption data [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022:1-12.
- [29] 奚增辉,王卫斌,洪祎祺,等.基于电力大数据的大气污染物实时排放总量测算研究 [J]. *环境科学与管理*, 2022,47(5):77-81.  
Xi Z H, Wang W B, Hong Y Q, et al. Estimation of real-time emissions of air pollutants based on electric power big data [J]. *Environmental Science and Management*, 2022,47(5):77-81.
- [30] 李睿.电力大数据在大气污染精准防控领域的应用及建议 [J]. *环境保护*, 2022,50(10):28-31.  
Li R. Application and suggestion of power big data in the field of air pollution precise prevention and control [J]. *Environmental Protection*, 2022,50(10):28-31.
- [31] 吴佳静,贾璐.电力大数据在生态保护中的应用探索 [J]. *中国电力企业管理*, 2022(20):60-61.  
Wu J J, Jia L. Exploration on the application of power big data in ecological protection [J]. *China Power Enterprise Management*, 2022(20):60-61.
- [32] 张沛,杨华飞,许元斌.电力大数据及其在电网公司的应用 [J]. *中国电机工程学报*, 2014,34(20):85-92.  
Zhang P, Yang H F, Xu Y B, et al. Power big data and its application scenarios in power grid [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014,34(20):85-92.
- [33] 张山山,吴巧玲,王仁雷,等.基于“互联网+”的火电厂环保智能监管系统研究与应用 [J]. *华电技术*, 2020,42(1):20-24.  
Zhang S S, Wu Q L, Wang R L, et al. Research and application of environmental intelligent supervision system for thermal power plants based on “Internet +” [J]. *Huadian Technology*, 2020,42(1):20-24.
- [34] 雒军,唐坚,赵喆,等.基于大数据的电力环保数据平台建设 [J]. *电力大数据*, 2020,23(1):58-63.  
Luo J, Tang J, Zhao Z, et al. Construction of Power Environmental Protection Data Platform Based on Big Data [J]. *Power Systems and Big Data*, 2020,23(1):58-63.
- [35] 张英杰,孔少飞,汤莉莉,等.基于在线监测的江苏省大型固定燃煤源排放清单及其时空分布特征 [J]. *环境科学*, 2015,36(8):2775-2783.  
Zhang Y J, Kong S F, Tang L L, et al. Analysis on Emission Inventory and Temporal-Spatial Characteristics of Pollutants from Key Coal-Fired Stationary Sources in Jiangsu Province by OnLine Monitoring Data [J]. *Environmental Science*, 2015,36(8):2775-2783.
- [36] 胡雪,王鑫,刘启贞,等.典型大气污染源动态排放清单编制方法及应用研究 [J]. *中国环境监测*, 2020,36(5):54-62.  
Hu X, Wang X, Liu Q Z, et al. Research on the technique and application of compiling dynamic emission inventory of Typical Air Pollution Sources [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2020,36(5):54-62.
- [37] 清华大学.多尺度大气污染源排放清单 MEIC[EB/OL]. <http://meicmodel.org/>.  
Tsinghua University. Multi-scale atmospheric pollutant emission inventory [EB/OL]. <http://meicmodel.org/>.
- [38] Chou M D, Suarez M J, Ho C H, et al: Parameterizations for cloud overlapping and shortwave single-scattering properties for use in general circulation and cloud ensemble models [J]. *Climate*, 1998,11:202-214.
- [39] Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, et al. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave [J]. *Geophys. Res.-Atmos.*, 1997,102:16663-16682.
- [40] Kain J S. The Kain-Fritsch convective parameterization: an update [J]. *Appl. Meteor.*, 2004,43:170-181.
- [41] Pleim J E. A combined local and nonlocal closure model for the atmospheric boundary layer. Part II: Application and Evaluation in a mesoscale meteorological model [J]. *Appl. Meteorol. Climatol.*, 2007,46:1396 - 1409.
- [42] Xiu A J, Pleim J E. Development of a land surface model. part I: application in a mesoscale meteorological model [J]. *Appl. Meteorol.*, 2001,40:192-209.
- [43] Hong S Y, Lim J O J. The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6) [J]. *Korean Meteor. Soc.*, 2006,42:129-151.
- [44] Jena C, Ghude S D, Beig G, et al. Inter comparison of different NOx emission inventories and associated variation in simulated surface



- ozone in Indian region [J]. *Atmospheric Environment*, 2015,117:61-73.
- [45] 曹天慧,王 哲,张 晶,陈学舜,等.“9·3”阅兵期间协同减排措施对北京市大气  $PM_{2.5}$  质量浓度及其来源影响的数值模拟 [J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2017,53(2):201-207.
- Cao T H, Wang Z, Zhang J, et al. Coordinated emission reduction measures for atmospheric  $PM_{2.5}$  in Beijing during the parade on September 3 [J]. *Journal of Beijing Normal University (Nature Science)*, 2017,53(2):201-207.
- [46] 伯 鑫,阚 慧,陈金胜,等.中国电力行业大气污染物排放时间特征谱研究 [C]//2017 中国环境科学学会科学与技术年会论文集(第一卷), 2017:798-803.
- Bo X, Kan H, Chen J S, et al. Study on time temporal profile of air pollutant emission from power industry in China [C]//2017 Annual Conference of Science and Technology, Chinese Society of Environmental Sciences (Vol.1), 2017:798-803.
- [47] Zhang M D, Chen W W, Shen X J, et al. Comprehensive and high-resolution emission inventory of atmospheric pollutants for the northernmost cities agglomeration of Harbin-Changchun, China: Implications for local atmospheric environment management [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2021,104:150-168.
- [48] 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):46-54.
- Ran H C, Lei T T, Bo X, et al. Research on the verification of industrial source emission inventory considering environmental management data: taking Cangzhou as an example [J]. *Environmental impact assessment*, 2019,41(4):46-54.
- [49] Tang L, Xue X D, Jia M, et al. Iron and steel industry emissions and contribution to the air quality in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2020,237:117668.
- [50] 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*, 2018,38(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 Its Impact on  $PM_{2.5}$  [J]. *Environmental Science*, 2018,38(4):1445-1454.
- [51] Bo X, Li Z L, Qu J B, et al. The spatial-temporal pattern of sintered flue gas emissions in iron and steel enterprises of China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020(266),121667.
- [52] 唐山市统计局.2019 年唐山市统计月报 [EB/OL]. <http://www.tangshan.gov.cn/zhuzhan/sjfb/>
- Tangshan Bureau of Statistics. Tangshan statistical monthly report 2019 [EB/OL]. <http://www.tangshan.gov.cn/zhuzhan/sjfb/>
- [53] US EPA (Environmental Protection Agency), 2007. Guidance on the Use of Models and Other Analyses for Demonstrating Attainment of Air Quality Goals for Ozone,  $PM_{2.5}$ , and Regional Haze [EB/OL]. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P1009OL1.PDF?Dockey=P1009OL1.PDF>
- [54] Boylan J W, Russell A G. PM and light extinction model performance metrics, goals, and criteria for three-dimensional air quality models [J]. *Atmospheric Environment*, 2005,40(26):4946-4959.
- [55] Emery C, Liu Z, Russell A G, et al. Recommendations on statistics and benchmarks to assess photochemical model performance [J]. *Air Waste Management Association*, 2017,67(5):582-598.
- [56] Zhang S X, Zhang Z Z, Li Y, et al. Formation processes and source contributions of ground-level ozone in urban and suburban Beijing using the WRF-CMAQ modelling system [J]. *Journal of Environmental Science*, 2023,127:753-766.
- [57] Abushammala M F M, Basir N E A, Basir H, et al. Regional landfills methane emission inventory in Malaysia [J]. *Water Management & Research*, 2011,29(8):863-873.

作者简介:周卫青(1981-),男,江西人,高级工程师,硕士,主要从事能源与环保领域相关研究,发表论文 20 余篇。