



高艳珊,北京林业大学环境科学与工程学院副教授,硕士生导师,主要从事大气污染物控制研究,承担国家自然科学基金、北京市自然科学基金等项目,以第一/通讯作者在《Environmental Science & Technology》《Journal of Hazardous Materials》等期刊发表 SCI 论文 20 余篇,H 指数 32,总引用 4 400 余次,获授权中国发明专利 1 项。作为主要完成人获北京市科学技术三等奖、中国科技产业化促进会科技创新二等奖、教育部高等学校科学研究优秀成果(科学技术)二等奖;入选“北京市科协 2022~2024 年度青年人才托举工程”;任《能源环境保护》期刊青年编委,SCI 期刊《Frontiers in Chemistry》客座编辑。



移动扫码阅读

黄浩瑜,高艳珊,王强.我国人为源大气污染物排放清单研究进展[J].能源环境保护,2023,37(3):204-216.

HUANG Haoyu, GAO Yanshan, WANG Qiang. Research progress on emission inventory of anthropogenic air pollutants in China[J]. Energy Environmental Protection, 2023, 37(3): 204-216.

我国人为源大气污染物排放清单研究进展

黄浩瑜^{1,2},高艳珊^{1,2,*},王强^{1,2}

- (1. 北京林业大学 环境科学与工程学院 水体污染源控制技术北京市重点实验室,北京 100083;
2. 北京林业大学 环境科学与工程学院 污染水体源控制与生态修复技术北京市
高等学校工程研究中心,北京 100083)

摘要:大气污染物排放清单不仅能够提供大气污染物排放源的基本信息,助力大气污染防治政策的制定,还能为空气质量模式模拟提供基础数据。排放清单的准确性会极大程度上影响大气污染治理决策的有效性及模型建模的准确性,因此一份准确的大气污染物排放清单在大气污染防治工作中至关重要。本文总结了我国人为源大气污染物排放清单的研究现状,包括大气污染物排放清单编制方法、不同尺度排放清单研究现状以及排放清单评估方法三个方面,同时提出我国排放清单研究中存在的问题。在此基础上,结合我国当前“减污降碳”防治需求,分别从大气污染物排放清单与温室气体排放清单相结合,制定统一的减污降碳政策、建立即时更新的排放因子库、统一规范排放清单编制体系、统一各地精细化排放清单以及构建更精准的国家大气污染物排放清单等方面对我国人为源大气污染物排放清单的研究方向进行了展望。

关键词:人为源;大气污染物;排放清单;排放因子;不确定性

中图分类号:X53

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2023)03-0204-13

Research progress on emission inventory of anthropogenic air pollutants in China

HUANG Haoyu^{1,2}, GAO Yanshan^{1,2,*}, WANG Qiang^{1,2}

- (1. Beijing Key Lab for Source Control Technology of Water Pollution, College of Environmental Science and Engineering, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Engineering Research Center for Water Pollution Source Control & Eco-remediation, College of Environmental Science and Engineering, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: The air pollutant emission inventory can not only provide the basic information of air pollutant emission sources to facilitate the decision-making of air pollution prevention and control, but also provide essential data for air quality model simulation. The accuracy of emission inventory greatly affects

收稿日期:2023-01-25;责任编辑:金丽丽

DOI: 10.20078/j.eep.20230216

基金项目:细颗粒物 and 臭氧污染协同防控“一市一策”驻点跟踪项目(DQGG202126);国家自然科学基金项目(52270099)

作者简介:黄浩瑜(1999—),男,山东聊城人,硕士研究生在读,主要研究方向为大气污染控制。Email: hhy19990903@bjfu.edu.cn

通讯作者:高艳珊(1989—),女,北京人,副教授,主要研究方向为大气污染控制。Email: yanshan_gao@bjfu.edu.cn

the effectiveness of air pollution control decisions and the accuracy of model modeling, and therefore an accurate air pollutant emission inventory is very important to the prevention and control of air pollution. This paper summarizes the research status of the emission inventory of anthropogenic air pollutants in China, including the compilation method of anthropogenic air pollutants emission inventory, the research status of emission inventory at different scales and emission inventory assessment method, and at the same time puts forward the problems existing in the study of emission list. Based on the above information, combined with the current control needs of "reduction of pollution and carbon emissions", this paper looks forward to the research direction of the emission inventory of anthropogenic air pollutants in China, such as combining the air pollutant emission inventory with the greenhouse gas emission inventory, formulating a unified policy for reducing pollution and carbon, establishing a real-time updated emission factor library, standardizing the preparation system of emission inventory, and building a more accurate national air pollutant emission inventory by integrating the refined emission inventory of various regions, etc.

Keywords: Anthropogenic sources; Air pollutants; Emission inventory; Emission factory; Uncertainty

0 引言

21 世纪以来,随着经济的发展以及城市化进程的加快,珠江三角洲、长江三角洲、京津冀地区等区域大气污染日益严重^[1],成为中国城市面临的主要环境问题。恶劣的大气环境还会危害人类身心健康^[2-3]。近年来,各地深入推进大气污染治理,大气环境质量得到了明显改善。然而,“十四五”规划进一步提出了到 2025 年,全国地级及以上城市空气质量优良天数比率要提高到 87.5%。由于大气污染的多样性和复杂性,大气污染防控工作面临很大挑战。大气污染物排放清单不仅能够提供大气污染物排放源的基本信息,助力大气污染防治决策的制定,还能为空气质量模式模拟提供基础数据^[4-5],但是排放清单的准确性也会极大程度上影响大气污染防治决策的有效性及模型建模的准确性。因此一份准确的大气污染物排放清单在大气污染防治工作中至关重要。

自 1970 年美国颁布《空气清洁法案》以来,先后建立了污染源分类编码^[6]、污染源排放因子库^[7]、空气质量模拟平台^[8]等一系列标准化体系。同期,欧洲环境署也颁布了一系列排放清单编制技术手册、排放因子数据库^[9],以期管控欧洲各国间的大气污染物传输^[10-11]。我国有关大气污染物排放清单的研究开展较晚,从 20 世纪 90 年代开始,相关学者从排放清单编制方法学、排放清单校验评估等方面开展了一系列的研究,在我国建立了不同尺度的排放清单编制体系。本文主要从排放清单编制方法学、区域和城市尺度排放清单

编制以及排放清单校验评估三个方面系统论述了我国大气污染物排放清单的研究进展,并针对我国排放清单编制存在的问题提出建议与展望。

1 清单方法学研究进展

1.1 排放清单编制方法

大气污染物排放清单编制方法按照数据来源可以分为“自上而下”与“自下而上”法^[12]。“自上而下”法是通过有关部门发布的统计数据进行清单编制;“自下而上”法则是根据实地测试、调研等方式获取本地化的排放因子与更加精细的污染源活动水平数据来估算大气污染物排放量。

早期编制的大气污染物排放清单,大都使用“自上而下”法,基于统计年鉴和国外的排放因子编制我国尺度的排放清单。如王文兴等^[13]使用欧洲排放因子结合我国燃料消费量、燃料含硫率和化肥施用量等数据,对我国 SO_2 、 NO_x 以及 NH_3 排放量进行了估算。孙庆瑞等^[14]使用统计年鉴等资料计算了我国 1950—1953 年以来的氨排放量,并进行实地采样,测算出我国氨的时空分布特征。采用这种方法编制的大气污染物排放清单虽然能够在一定程度上反映我国大气污染物排放的特点,但由于不同地区的排放因子差异巨大,所以得到的排放清单并不完全符合实际排放情况。

随着对排放清单研究的不断深入,国内排放清单的编制方法由最初基于国家统计年鉴等数据的“自上而下”法转变为更加精准的“自下而上”法。近二十年来,研究者对工业源、移动源等源类进行了大量的调研与测试^[15-19],构建了本地化的

排放因子数据库,提高了排放清单的准确性。为了规范排放清单的编制方法,生态环境部于2014年先后颁布了包括《大气细颗粒物一次源排放清单编制技术指南(试行)》在内的共8个技术指南^[20-27],技术指南中提供了较为详细的源分类方法、排放因子以及末端处理技术的处理效率,并于2015年在北京、上海、广州等14个城市开展大气污染物排放清单编制试点工作。此外,也在排放清单的编制方法上进行了革新,使用逐步线性回归、蒙特卡洛模拟^[28]、库茨涅兹曲线^[29]等数学方法建立了一系列的模型,降低了编制排放清单的数据要求与工作量。Cheng等^[30]以邯郸市为研究区域构建了一种逐步回归模型,用该模型估算唐山市PM₁₀排放量,并与唐山市县级排放清单进行对比与误差分析(图1),结果表明使用回归模型计算的各个区县污染物排放误差均控制在100%

之内,取得了较好的效果;并在后续的研究中建立了线性优化模型,进一步提高逐步回归模型的准确性^[31];在此基础上,Zhou等^[32]讨论了SO₂、NO_x、CO以及VOCs的回归模型,在邯郸市范围内进行全面的污染源信息调查进行排放清单计算,之后使用统计分析方法筛选出可以代表该污染源的变量,将工业源与非工业源分别进行建模,得到不同污染物的线性回归模型。但这种模型只能应用于能源、产业结构类似的区域范围,所以并未得到广泛应用。

目前,我国排放清单编制方法仍旧以“自下而上”法为主,通过实地调查研究得到的排放因子与活动水平数据越来越精确,但仍旧未建立国家层面的排放因子数据库,诸多排放因子需要更新,排放清单编制方法也需要进一步完善。

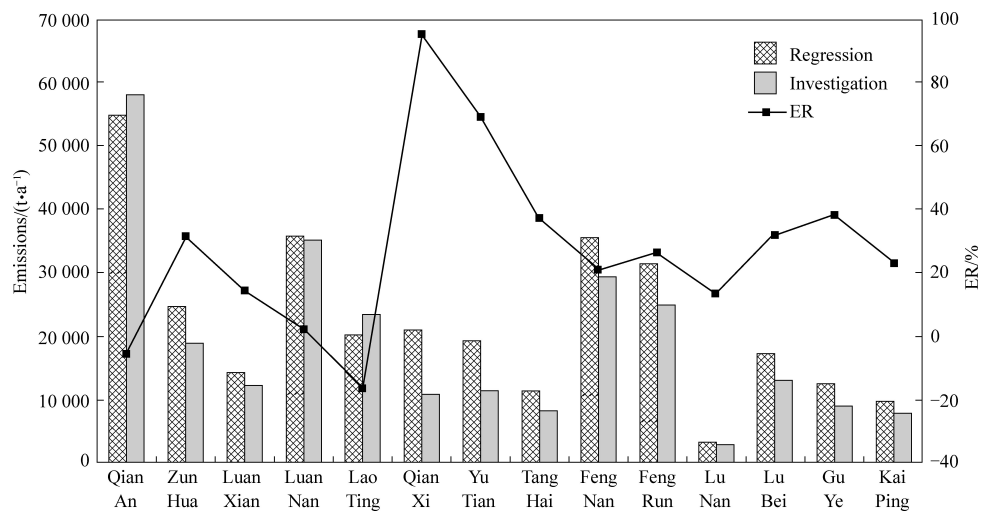


图1 回归模型计算排放量与唐山市县级排放清单对比结果^[30]

Fig. 1 The comparison between the emission calculated by regression model and the Tangshan county-level emission inventory^[30]

1.2 时空分配

随着第三代空气质量模型在我国的推广与应用,大气污染物排放清单作为模型重要的输入数据,污染物的时空分布特征也受到了广泛关注^[33-34]。污染物的时空分配就是将一定时间(一般为一年)内的污染物排放量根据表征数据进行时间(月、日、小时)和空间(一般为一定分辨率的网格)的分配。使用污染源的地理位置进行污染物排放量空间分配是最准确的方式^[35],但对于民用源、农业源等面源来说,获取准确的地理位置信息是十分困难的,所以对于道路移动源、面源等位置信息难以获取的排放源通常使用人口、GDP等栅格数据进行分配^[36]。早期由于缺乏准确的工

业源地理信息,空间分配一般使用栅格数据进行分配,如郑君瑜等^[37]使用珠江三角洲2006年的人口分布栅格数据作为空间分配权重因子,构建了珠江三角洲四种常规污染物网格化排放清单,为后续构建空气质量模拟平台打下基础。但仅使用栅格数据对污染物进行粗略的网格分配不能准确的反映污染物的空间分布情况,需要对研究区域开展实地调研,收集准确的工业源地理信息,将其与栅格数据结合进行更加精准的污染物空间分配研究。Huang等^[38]使用经纬度坐标对电厂等固定燃烧源进行空间分配,对于其他工业源则使用GDP栅格数据进行分配,构建中国长江三角洲地区人为源大气污染物网格化排放清单;Zheng

等^[39]收集了中国近 100 000 个工业设施的基础信息,并将其与中国多尺度排放清单模型 (MEIC) 结合,估算了中国 2013 年 30"×30" (~1 km) 的网格化排放清单,分配过程中将电厂、工业燃烧、工艺过程均视为点源,结合面源表征数据将污染物排放量分配至 1 km×1 km 的网格中,图 2 对比了 MEIC 与高分辨率 MEIC (MEIC-HR) 中点源、道路移动源与面源的占比,通过此方法极大程度上提高了 MEIC 清单的精度,降低了对于人口密集地区模型建模的偏差,改善了空气质量模型的模拟效果。

对于时间分配来说,需要使用与污染源时间排放特征相关性较高的表征数据来计算分配系数,对数据的要求较高,如电厂需要使用每月发电量来进行月份分配,工业源则需要使用每月产值来进行分配等^[40],精确到周与小时的时间分配则需要更加精细的表征数据。李莉莉等^[41]使用气象因子作为污染物的时间表征数据,根据哈尔滨市 13 个气象站的观测数据确定了扬尘源污染物排放的时间分配系数;Zhu 等^[42]使用取暖相关参数构建了能源消耗回归模型,综合考虑社会经济情况,计算出民用取暖部门的时间分配因子;Zheng 等^[43]对珠江三角洲地区的污染源进行了详细的调查,将部分排放源的污染物排放量分配至月、周以及小时,构建了高分辨率精细化的大气污染物排放清单,对当地污染防控工作提供可靠的数据支撑。

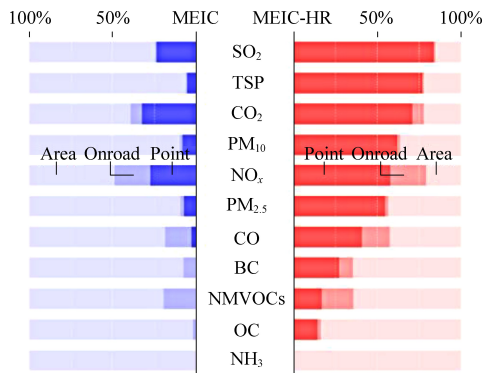


图 2 MEIC 与 MEIC-HR 中不同排放源类占比^[39]

Fig. 2 Proportion of different emission sources in MEIC and MEIC-HR^[39]

2 我国排放清单研究进展

2.1 区域尺度

区域尺度排放清单的编制有利于明确地区间污染物传输对当地大气环境的影响。随着我国国际影响力的不断增强,逐渐参与到部分国际排放

清单的编制工作中。Zhang 等^[44]基于美国国家航天局的 INTEX-B 计划编制了 2006 年亚洲区域的排放清单,使用动态更新的方法,结合国家统计年鉴,重点计算了中国的大气污染物排放量。清华大学在 MEIC 清单基础上与美国、韩国、日本等多国学者共同建立了亚洲排放清单数据库 MIX-Asia,包括九种常规大气污染物与部分温室气体,能够导出多种化学机制,对区域大气污染物模拟等工作具有重要意义。由于国家层面以上的排放清单编制需要收集多国数据,难度较大,因此近年来的研究主要集中于国家、城市尺度排放清单的编制。

我国区域排放清单的编制工作主要集中在“三区十群”等重污染地区。郑君瑜团队于 2008 年起至今,建立了包括污染物排放量^[43, 45-47]、不确定性分析^[48-49]、模式预报预警平台^[50-51]在内的完善的珠江三角洲排放清单编制体系,并对现有广东省排放清单编制工作进行总结,从污染物排放量、部门贡献占比、时空分配研究方法等方面对比了 2006、2010 与 2012 三年的排放清单,其中 2012 年广东省大气污染物排放量如图 3 所示,结果表明珠江三角洲区域 (PRD) 与非珠江三角洲区域 (NPRD) 污染物排放源贡献占比呈现明显差异,基于 2012 年编制的广东省污染物排放清单更为可靠,不确定性较低,为其它地区排放清单的更新改进提供参考^[52]。目前海峡西岸城市群^[53]、山东城市群^[54-58]、京津冀地区^[59-61]等区域均已建立了相对完整的排放清单编制体系,为大气污染联防联控提供基础数据支撑。鲁胜坤等^[62]使用排放因子法计算了浙江省人为源 NH₃ 排放量,并与 PM_{2.5} 监测数据中的 NH₄⁺ 浓度进行统计分析,发现控制 NH₃ 排放对降低大气中 PM_{2.5} 治理有积极作用;伯鑫团队^[63-64]对京津冀地区火电行业进行研究,编制了京津冀地区火电行业排放清单,并利用在线监测数据,构建了钢铁行业大气污染物排放清单动态管理系统。Zhang 等^[65]为了明确大气中甲醛 (HCHO) 的来源,采用卫星观测数据与排放因子相结合的方式构建了逐小时的广东省生物质开放燃烧 VOCs 组分排放清单,并使用空气质量模型模拟了生物质开放燃烧源对大气中 HCHO 的排放贡献,研究结果表明生物质开放燃烧每年贡献的 HCHO 排放量占广东省总排放量的 14%,并且臭氧污染天气有利于生物质开放燃烧排放的乙烯转化为 HCHO,明确了大气中 HCHO 生成机理,为制定有效的大气污染控制政策打下基础。

在双碳的大背景下,也有部分研究将大气污染物排放清单与碳排放清单进行对比,明确温室气体与大气污染物之间的关系,为我国减污降碳协同增效提供新思路。Zhang 等^[66]评估了我国钢铁行业使用节能措施所带来的大气污染物、温室气体协同减排的收益,构建了节能供应曲线(EC-SC),并将其输入污染物与温室气体的协同减排模型中,研究表明中国钢铁行业到2030年节能减排潜力约为5.7 EJ,节能增效措施可以极大的降低大气污染控制成本。

然而,较大尺度的排放清单编制过程中容易忽略一些较小的污染物排放源,并且各个城市之间的能源与产业结构不尽相同,导致较大尺度的排放清单并不适用于解决单一城市的大气污染问题。

2.2 城市尺度

近几年,我国排放清单研究重点从国家、区域尺度逐渐转变为更加精细的城市尺度,源类划分

也更加全面,逐渐涉及到特定源类、单一污染物以及污染物组分的城市排放清单。Gong 等^[67]、张雅瑞等^[68]分别建立了郑州市、渭南市的道路移动源排放清单,并根据道路类型、车流量等数据对污染物排放量进行时空分配,对于缺少车流量数据的道路使用基于调查的车型比例进行分配^[69];邵蕊等^[70]使用排放因子法建立了青岛市人为源NH₃排放清单,并使用表征数据对污染物排放量进行空间分配,计算得出青岛市北部的NH₃排放强度最高;庞可等^[71]对工业企业进行实地调研,使用发放调查表的方式获取企业活动水平数据,利用排放因子法建立了天水市人为源VOCs排放清单,明确道路移动源为天水市VOCs的主要排放源,为大气环境治理提供数据支撑;Yuan 等^[72]对喷漆和印刷过程中挥发性有机化合物排放的成分进行了采样和测量,构建了北京市溶剂使用源VOCs组分清单,发现在生产过程中利用水性涂料代替溶剂型涂料会大大降低OFP的排放。

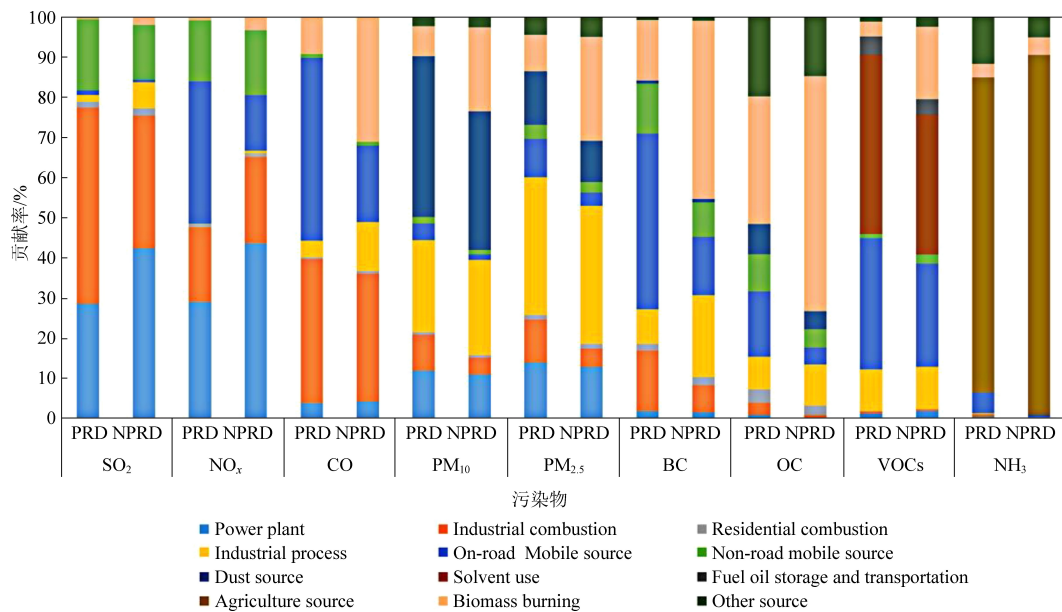


图3 广东省2012年大气污染物排放源贡献率^[52]

Fig. 3 Emission contributions by categories in Guangdong province in 2012^[52]

城市尺度的排放清单可以通过实地调查获取详细的活动水平数据,能够在一定程度上提升排放清单准确性,但目前城市尺度的排放清单研究主要集中在我国东部污染较为严重的城市,对西部及其他城市的研究较少。

除区域尺度和城市尺度外,目前排放清单的研究还涉及机场大气污染物^[73]、火电厂大气污染物^[64]以及船舶大气污染物^[74]等分部门、分行业编制的排放清单。

3 排放清单评估方法

3.1 不确定性分析

不确定性分析是评估排放清单的重要方法,主要包括:定性分析和定量分析。排放清单的不确定性来源包括数据来源误差、计算方法误差、合并误差、清单核算误差以及编制人为错误等,活动水平与排放因子作为计算排放清单的基础数据,其不确定性会极大程度影响排放清单的质量^[75]。

准确的数据对提升排放清单准确性至关重要,相关研究发现我国不同官方统计数据之间也存在较大差异^[76-77],使排放清单不确定性进一步增加。

随着对清单研究的不断深入,带有较强主观性的定性分析方法并不能对清单做出较为合理的评价。部分学者开始将研究重点放在定量不确定性分析上,通过专家判断或统计学方法,对排放因子、活动水平以及其他参数进行量化,再通过数值模拟等方法将其不确定性传递至排放清单中。早期的定量分析大都基于专家判断法,当某一排放源缺乏经验数据时,即可通过专家判断的方式,确定其不确定度。

专家判断仍旧带有一定的主观性,Zheng等^[78]提出可以使用自展模拟法对排放因子进行

量化,此方法在排放因子数据充足的条件下可以给出其概率分布模型,被广泛应用于排放因子不确定性的量化之中。钟流举等^[79]明确提出了不确定性分析的具体流程(图4),并以电厂NO_x排放清单作为案例,定量分析了排放量的不确定性,为我国排放清单定量不确定性分析打下基础。此外,Zhao等^[80]利用自展模拟和蒙特卡罗模拟法构建了包括详细燃烧技术和燃料品质分类的中国燃煤电厂排放因子数据集。活动水平数据受制于其自身的独特性,一般无法根据自展模拟等统计学方法对其进行量化,一般默认概率分布模型为对数正态分布,并采用专家判断的方式给出其概率分布模型参数^[81]。

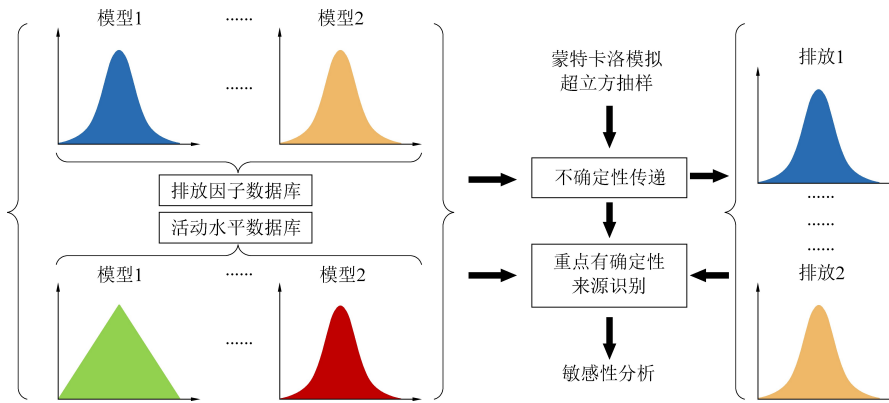


图4 定量不确定性分析流程^[79]

Fig. 4 Quantitative uncertainty analysis process^[79]

不确定性传递的方法包括:误差分析法、拉丁超立方抽样以及蒙特卡洛模拟等。误差分析法基于泰勒展开式,只能以相互独立并且呈正态分布特征的样本进行不确定性的模拟传递,适用范围较窄,在定量不确定性分析中并不常用。拉丁超立方抽样^[82]和蒙特卡洛模拟^[83]适用于具有任何分布特征的不确定性传递,是排放清单定量不确定性传递最灵活、最准确的方法。Chen等^[84]通过排放因子法建立了中国燃煤电厂排放清单,并使用蒙特卡洛模拟分析了排放清单的不确定性,在此基础上进一步分析了不确定性的敏感来源,确定了山东等燃煤大省对排放清单不确定性贡献较大。He等^[85]建立了2003—2007年珠江三角洲地区生物质燃烧源排放清单,并使用蒙特卡洛模拟量化了排放清单的不确定性,明确了主要不确定性来源。

目前国外已经建立起了相对完善的排放清单不确定分析体系,国内早期排放清单中几乎没有不确定性分析的相关内容,近几年才开始逐渐重

视。魏巍等^[86]使用蒙特卡洛模拟评估了中国人为源VOCs排放清单的不确定性,识别出对不确定度影响最大的20个输入信息,分别为生物质燃烧、机动车等部门的活动水平与排放因子。李楠^[87]编制了广东省大气污染物排放清单,并建立了分行业的排放因子数据库,对源清单进行定量不确定性分析等研究,发现排放因子是排放清单最重要的不确定性来源,活动水平其次。巫玉杞^[88]从数据质量、空间分布等多方面对2017年广东排放清单进行评估,依据前期研究^[86, 89]总结出了活动水平数据不确定性判断表格(表1),根据不确定性分析评估结果,可以识别重点不确定性贡献源,从而指导排放清单的进一步优化工作。王君驰等^[90]使用实测因子法与比值法两种方法编制了广东省移动源排放清单,并使用蒙特卡洛模拟对两种方法进行定量不确定性分析,结果表明使用实测因子法计算的排放清单不确定度明显低于比值法。

表 1 数据不确定性水平评价标准^[87-88]Table 1 Evaluation criteria for data uncertainty level^[87-88]

级别	编制方法	活动水平数据来源	来源可靠性	不确定性范围
A	合理	来源于权威统计,能 95%以上代表该类源	信息足以进行校验	N.A.
B	合理	来源于权威统计,能 90%以上代表该类源	信息足以进行校验	<5%
C	较合理	来源于权威统计,能 95%以上代表该类源	信息足以进行校验	5%~10%
D	较合理	来源于权威统计,能 90%以上代表该类源	信息足以进行校验	10%~15%
E	较合理	来源于权威统计,能 80%以上代表该类源	缺乏足够的信息进行校验	15%~30%
F	较合理	来源于一般统计,数据经推测得到,能 80%以上代表该类源	缺乏足够的信息进行校验	30%~40%
G	新方法或未经验证	来源于一般统计,数据经推测得到,能 50%以上代表该类源	缺乏足够的信息进行校验	40%~60%
H	未受普遍接受	来源于一般统计,数据经推测得到,能 50%以上代表该类源	仅有较少的数值信息	60%~100%

由于我国排放清单研究起步较晚,并未建立完善的本地化排放因子库,导致不确定性分析只能通过查阅文献等方式参考国外相关研究进行,无疑增加了工作难度。据有关统计,我国近年来发布的 600 余篇大气污染物排放清单文献中,60%讨论了清单不确定性,其中仅有 40%进行了定量不确定性分析^[91]。

3.2 模型校验

模型校验主要包括两种方法,一是使用正交矩阵因子分解模型(PMF)以及化学质量平衡模型(CMB)对观测数据进行解析,由于 CMB 模型需要使用污染物成分谱,对数据要求偏高,所以目前大都使用 PMF 模型开展研究。PMF 使用的观测数据不受到排放因子、活动水平的影响,主要包括污染物的浓度与污染物的组分浓度,将模型输出的结果与排放清单中源贡献率进行对比,评估清单质量,一般常用于 VOCs 与 PM_{2.5}排放清单校验研究中。如采用“示踪物比值-PMF”联用方法对煤炭资源城市人为源 VOCs 排放清单进行验证,结果表明清单基本准确,但仍有一部分污染物排放量存在较大差异,需要重点研究以提升清单质量^[92]。Li 等^[93]根据卫星观测数据与 PMF 模型评估了京津冀地区的人为源 VOCs 排放清单,结果表明排放清单中大大低估了民用燃煤的排放,需要使用更精确的估算方法。LIU 等^[94]使用足迹模型、PMF 等多种模型分析了北京 2016 年冬季 PM_{2.5}排放源类型与来源,对先前研究中的排放清单进行评估优化,构建了新的高时间分辨率的北京市冬季 PM_{2.5}排放清单。

另一种模型校验的方法则是基于第三代空气质量模型对高精度的排放清单进行模拟,将模拟结果与观测值进行对比,以此来验证清单的准确性。目前较为常用的空气质量模型有:嵌套网格

空气质量模式预报系统(NAQPMS)、扩展综合空气质量模型(CAMx)以及多尺度空气质量模型(CMAQ),其中 CMAQ 是最新一代空气质量模型的代表模型^[95]。CMAQ 模型的适用范围十分广泛,包括但不限于模拟大气污染物浓度、评估源清单、研究大气污染物的产生机理等。夏泽群等^[96]使用 CMAQ 模型模拟验证了不同源成分谱对模式模拟的影响,选取美国 SPECIATE 数据库中的 PM_{2.5}成分谱与国内不同研究者构建的不同区域本地化 PM_{2.5}成分谱进行模拟对比,结果表明对模拟效果影响较大的分别为燃煤电厂、水泥制造、道路移动源等源类的本地化成分谱,明确了提升模拟准确度的首要任务就是建立符合实际情况的排放源成分谱。刘扬、祝禄祺^[97-98]分别使用 WRF-Chem、WRF-CMAQ 模式对天水市人为源排放清单进行模拟验证,为当地大气污染物治理提供数据支撑。

由于 CMAQ 等大气模型由外国学者开发,在某些方面不能直接应用于国内的大气模拟,所以需要对其进行本地化工作。如 CMAQ 输入排放源文件处理程序稀疏矩阵排放清单处理系统(SMOKE),需要将时空分布要素与源成分谱本地化才能对我国排放清单进行处理,这就导致需要花费大量人力与时间进行模型的本地化工作。

3.3 卫星反演

卫星反演法就是使用高精度的卫星观测数据对污染物排放进行估算,再将得到的污染物排放量与排放清单进行对比从而评估排放清单的准确性。卫星反演得到的污染物排放量不同于普通的“自上而下”或“自下而上”法编制的排放清单,其优势在于具有与卫星观测数据相同的空间分辨率,并与污染物实际的空间分布具有一致性。相比于传统方法编制的排放清单而言,卫星反演得

到的污染物排放量更容易进行更新,不需要通过收集活动水平数据、测算排放因子等方式进行估算。但是卫星反演涉及到逆建模过程,通过化学传输模型对排放清单进行处理,计算得到各个污染物的浓度场,将浓度场信息与卫星观测数据进行对比,得到的浓度差异用于指导排放清单的调整和改进。

随着卫星技术的成熟,卫星反演法也被应用于排放清单的校验中。近些年针对 SO_2 、 NO_x 、 NH_3 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 等污染物开展了一系列卫星反演研究,并对卫星反演方法进行改进,得到了相对准确的卫星反演产品。如使用卫星观测数据对中国燃煤电厂排放的 SO_2 、 NO_x 信号进行识别,对比两种污染物的浓度变化,并依据浓度变化识别出新建大型排放设施的地理位置^[99]。此外,通过 OMI 卫星数据可以构建用于输入 CMAQ 模型的排放反演系统,显著提高华北地区夏季和冬季 NO_2 的模拟水平,表明卫星观测数据对反演污染物排放量以及空气质量模拟具有一定的科学性和参考价值^[100]。Gu 等^[101]也提出了一种基于 OMI 卫星观测数据与 CMAQ 模式模拟地面 NO_2 浓度的方法,并对其结果的准确性进行了验证,结果显示出较好的相关性。根据 2014 年的 OMI 卫星观测数据结合 CMAQ 模型计算出中国大陆 2014 年的 NO_2 排放清单。在此基础上,Kourtidis 等^[102]提出了一种新的 SO_2 卫星反演的增强比值方法,通过使用低风速下的 NO_x 与 SO_2 卫星观测数据和基于卫星估算出的 NO_x 数据来计算 SO_2 排放量,估算了中国地区 2007—2011 年的 SO_2 排放量,并将构建的 ERM DECSOv1 模型以及更新过后的 ERM DECSOv3a 模型与中国 MEIC 排放清单进行对比分析,发现计算结果与 MEIC 清单基本一致。

目前,在国家尺度上使用卫星反演的研究较多,由于受到卫星分辨率的限制,不能满足我国当前对小区域范围内排放清单校验、污染防治措施评估等工作的需要;其次由于我国尚未建立完善的排放清单编制体系,导致排放清单编制精度不同,精细化排放清单较少,卫星反演产品难以应用于实际排放清单改进工作中,因此仍需开展进一步的研究工作。

4 展 望

(1) 减污降碳协同增效

在碳达峰碳中和背景下,温室气体的排放清

单也逐渐受到关注,将大气污染物排放清单与温室气体排放清单相结合,可以精准把控大气污染物与温室气体的共同来源,有利于管理者制定精准、高效的大气环境管控政策。

(2) 规范排放清单编制方法

虽然目前国内发布了一些排放清单编制技术手册,但不同手册指南之间推荐的污染源划分与污染物的计算方法都存在或多或少的差异,因此需要建立一个统一规范的排放清单编制体系。

(3) 建立本地化排放因子数据库

准确的排放因子能够极大程度上提高排放清单的可靠性,虽然已经有部分研究者对一些重点区域开展了排放因子本地化工作,但在其他没有研究基础的地区编制排放清单就只能使用其他地区的研究成果。所以我国应该系统的建立一份全面的排放因子数据库,降低排放清单编制的难度和不确定性。

(4) 编制国家层面排放清单

在规范统一编制方法与排放因子的基础上,根据不同城市的污染状况构建不同分辨率的排放清单,并由国家对排放清单进行统一整合,编制完善准确的国家大气污染物排放清单,降低排放清单的不确定性,保障大气污染联防联控工作的开展。

参考文献 (References):

- [1] 张恺, 骆春会, 陈旭锋, 等. 中国不同尺度大气污染物排放清单编制工作综述[J]. 中国环境监测, 2019, 35(3): 59-68.
ZHANG Kai, LUO Chunhui, CHEN Xufeng, et al. Review of atmospheric pollutant inventories at different scales in China [J]. Environmental Monitoring of China, 2019, 35(3): 59-68.
- [2] GE W, CHEN R, SONG W, et al. Daily visibility and hospital admission in Shanghai, China [J]. Biomedical and Environmental Sciences, 2011, 24(2): 117-121.
- [3] LIU M, HUANG Y, MA Z, et al. Spatial and temporal trends in the mortality burden of air pollution in China: 2004—2012 [J]. Environment International, 2017, 98: 75-81.
- [4] 昌敦虎, 周继, 李曼, 等. 与中国环境管理对接的大气污染源排放清单分析[J]. 中国环境监测, 2022, 38(5): 18-26.
CHANG Dunhu, ZHOU Ji, LI Man, et al. Analysis on the integration of air pollutant emission inventory with environmental management in China [J]. Environmental Monitoring of China, 2022, 38(5): 18-26.
- [5] 刘一鸣, 周慧娟, 李思婷, 等. 不同季节人为氯排放对二次气溶胶影响的数值模拟[J]. 中国环境科学, 2022, 42(9): 4059-4072.

- LIU Yiming, ZHOU Sixian, LI Siting, et al. Numerical simulation of impacts of anthropogenic chlorine emissions on secondary aerosols in different seasons[J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(9): 4059-4072.
- [6] EPA. Source classification codes (SCCs) [EB/OL]. (2016-07-21) [2022-12-19]. <https://sor-scc-api.epa.gov/sccweb-services/sccsearch>.
- [7] EPA. AP-42: Compilation of air emissions factors [EB/OL]. (2022-12-14) [2022-12-19]. <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-compilation-air-emissions-factors>.
- [8] EPA. Emissions modeling platforms [EB/OL]. (2022-08-30) [2022-12-19]. <https://www.epa.gov/air-emissions-modeling/emissions-modeling-platforms>.
- [9] EEA. EMEP/CORINAIR Atmospheric emission inventory guidebook [EB/OL]. (2022-08-12) [2022-12-19]. <https://www.eea.europa.eu/publications/EMEP-CORINAIR4>.
- [10] VENKATALAXMI A, PADMAVATHI B S, AMARANATH T. A general solution of unsteady Stokes equations[J]. *Fluid Dynamics Research*, 2004, 35(3): 229-236.
- [11] MAES J, VLEGEN J, VAN V K, et al. Spatial surrogates for the disaggregation of CORINAIR emission inventories[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(6): 1246-1254.
- [12] 潘春梅, 朱翔, 王健, 等. 大气污染源排放清单研究进展[J]. *环境科学导刊*, 2020, 39(4): 72-78.
- PAN Chunmei, ZHU Xiang, WANG Jian, et al. Research progress on emission inventory of air pollution sources[J]. *Environmental Science Survey*, 2009, 43(6): 1246-1254.
- [13] 王文兴, 王纬, 张婉华, 等. 我国 SO₂ 和 NO_x 排放强度地理分布和历史趋势[J]. *中国环境科学*, 1996(3): 161-167.
- WANG Wenxing, WANG Wei, ZHANG Wanhua, et al. Geographical distribution and historical trend of SO₂ and NO_x emission intensity in China[J]. *China Environmental Science*, 1996(3): 161-167.
- [14] 孙庆瑞, 王美蓉. 我国氨的排放量和时空分布[J]. *大气科学*, 1997, 21(5): 590-598.
- SUN Qingrui, WANG Meirong. Ammonia emission and concentration in the atmosphere over China[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1997, 21(5): 590-598.
- [15] 李陵, 李振亮, 方维凯, 等. 重庆市主要工业源 VOCs 组分排放清单及其臭氧生成潜势[J]. *环境科学*, 2022, 43(4): 1756-1765.
- LI Ling, LI Zhenliang, FANG Weikai, et al. Speciated emission inventory of VOCs from industrial sources and their ozone formation potential in Chongqing[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(4): 1756-1765.
- [16] 张帅, 李光华, 邓顺熙, 等. 西安市典型道路扬尘排放清单及化学组分[J]. *环境科学学报*, 2022, 42(6): 318-328.
- ZHANG Shuai, LI Guanghua, DENG Shunxi, et al. Emission inventory and chemical compositions of fugitive dust sources at typical roads in Xi'an, China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022, 42(6): 318-328.
- [17] 钱骏, 韩丽, 陈军辉, 等. 四川省餐饮源挥发性有机物组分特征和清单[J]. *环境科学*, 2022, 43(3): 1296-1306.
- QIAN Jun, HAN Li, CHEN Junhui, et al. Emission characteristics and inventory of volatile organic compounds from cooking in Sichuan province [J]. *Environmental Science*, 2022, 43(3): 1296-1306.
- [18] GARGAVA P, RAJAGOPALAN V. Source prioritization for urban particulate emission control in India based on an inventory of PM₁₀ and its carbonaceous fraction in six cities[J]. *Environmental Development*, 2015, 16: 44-53.
- [19] 傅立新, 贺克斌, 何东全, 等. MOBILE 汽车源排放因子计算模式研究[J]. *环境科学学报*, 1997(4): 89-94.
- FU Lixin, HE Kebin, HE Dongquan, et al. A study on models of mobiles of mobile source emission factors[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1997(4): 89-94.
- [20] 中华人民共和国生态环境部. 大气氨源排放清单编制技术指南(试行) [EB/OL]. (2014-08-20) [2022-12-19]. <https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201408/W020140828351293771578.pdf>.
- [21] 中华人民共和国生态环境部. 大气挥发性有机物源排放清单编制技术指南(试行) [EB/OL]. (2014-08-20) [2022-12-19]. <https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201408/W020140828351293705457.pdf>.
- [22] 中华人民共和国生态环境部. 大气可吸入颗粒物一次源排放清单编制技术指南(试行) [EB/OL]. (2014-08-20) [2022-12-19]. <https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201501/W020150107594587771088.pdf>.
- [23] 中华人民共和国生态环境部. 道路机动车大气污染物排放清单编制技术指南(试行) [EB/OL]. (2014-12-31) [2022-12-19]. <https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201501/W020150107594587771088.pdf>.
- [24] 中华人民共和国生态环境部. 非道路移动源大气污染物排放清单编制技术指南(试行) [EB/OL]. (2014-12-31) [2022-12-19]. <https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201501/W020150107594587960717.pdf>.
- [25] 中华人民共和国生态环境部. 大气细颗粒物一次源排放清单编制技术指南(试行) [EB/OL]. (2014-12-31) [2022-12-19]. <https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201408/W020140828351293619540.pdf>.
- [26] 中华人民共和国生态环境部. 生物质燃烧源大气污染物排放清单编制技术指南(试行) [EB/OL]. (2014-12-31) [2022-12-19]. <https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201501/W020150107594588071383.pdf>.
- [27] 中华人民共和国生态环境部. 扬尘源颗粒物排放清单编制技术指南(试行) [EB/OL]. (2014-12-31) [2022-12-19]. <https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201501/W020150107594588131490.pdf>.
- [28] ZHANG L, WANG S, WANG L, et al. Updated emission inventories for speciated atmospheric mercury from anthropogenic sources in China[J]. *Environmental Science and Technology*, 2015, 49(5): 3185-3194.
- [29] WANG H, XIANG Z, WANG L, et al. Emissions of volatile organic compounds (VOCs) from cooking and their speciation:

- A case study for Shanghai with implications for China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 621: 1300-1309.
- [30] CHENG S, ZHOU Y, LI J, et al. A new statistical modeling and optimization framework for establishing high-resolution PM₁₀ emission inventory - I. Stepwise regression model development and application[J]. *Atmospheric Environment*, 2012, 60: 613-622.
- [31] ZHOU Y, CHENG S, CHEND, et al. A new statistical approach for establishing high-resolution emission inventory of primary gaseous air pollutants[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 94: 392-401.
- [32] ZHOU Y, CHENG S, LI J, et al. A new statistical modeling and optimization framework for establishing high-resolution PM₁₀ emission inventory - II. Integrated air quality simulation and optimization for performance improvement [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, 60: 623-631.
- [33] 杨柳林, 曾武涛, 张永波, 等. 珠江三角洲大气排放源清单与时空分配模型建立[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(12): 3521-3534.
- YANG Liulin, ZENG Wutao, ZHANG Yongbo, et al. Establishment of emission inventory and spatial-temporal allocation model for air pollutant sources in the Pearl River Delta region [J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(12): 3521-3534.
- [34] 陈国磊, 周颖, 程水源, 等. 承德市大气污染源排放清单及典型行业对 PM_{2.5} 的影响[J]. *环境科学*, 2016, 37(11): 4069-4079.
- CHEN Guolei, ZHOU Ying, CHENG Shuiyuan, et al. Air pollutant emission inventory and impact of typical industries on PM_{2.5} in Chengde [J]. *Environmental Science*, 2016, 37(11): 4069-4079.
- [35] LI M, LIU H, GENG G, et al. Anthropogenic emission inventories in China: A review [J]. *National Science Review*, 2017, 4(6): 834-866.
- [36] 侯新红. 长江三角洲高分辨率网格化氨排放清单的建立[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2021: 1-63.
- [37] 郑君瑜, 张礼俊, 钟流举, 等. 珠江三角洲大气面源排放清单及空间分布特征[J]. *中国环境科学*, 2009, 29(5): 455-460.
- ZHENG Junyu, ZHANG Lijun, ZHONG Liuju, et al. Area source emission inventory of air pollutant and its spatial distribution characteristics in Pearl River Delta[J]. *China Environmental Science*, 2009, 29(5): 455-460.
- [38] HUANG C, CHEN C H, LI L, et al. Emission inventory of anthropogenic air pollutants and VOC species in the Yangtze River Delta region, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, 11(9): 4105-4120.
- [39] ZHENG B, CHENG J, GENG G, et al. Mapping anthropogenic emissions in China at 1km spatial resolution and its application in air quality modeling[J]. *Science Bulletin*, 2021, 66(6): 612-620.
- [40] 谭晓东. 基于 ISAT 模型的 CMAQ 污染源清单构建[D]. 长春: 吉林大学, 2022: 1-2.
- TAN Xiaodong. Construction of CMAQ Pollution Source Inventory Based on ISAT Model[D]. Changchun: Jilin University, 2022: 1-2.
- [41] 李莉莉, 王琨, 刘帆, 等. 哈尔滨市土壤扬尘排放清单及其时空分布[J]. *环境污染与防治*, 2021, 43(6): 679-683.
- LI Lili, WANG Kun, LIU Fan, et al. Emission inventory and temporal and spatial distribution of soil dust in Harbin[J]. *Environmental Pollution and Control*, 2021, 43(6): 679-683.
- [42] ZHU D, TAO S, WANG R, et al. Temporal and spatial trends of residential energy consumption and air pollutant emissions in China[J]. *Applied Energy*, 2013, 106: 17-24.
- [43] ZHENG J, ZHANG L, CHE W, et al. A highly resolved temporal and spatial air pollutant emission inventory for the Pearl River Delta region, China and its uncertainty assessment[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(32): 5112-5122.
- [44] ZHANG Q, STREETS D G, CARMICHAEL G R, et al. Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, 9(14): 5131-5153.
- [45] 尹沙沙, 郑君瑜, 张礼俊, 等. 珠江三角洲人为氨源排放清单及特征[J]. *环境科学*, 2010, 31(5): 1146-1151.
- YIN Shasha, ZHENG Junyu, ZHANG Lijun, et al. Anthropogenic Ammonia emission inventory and characteristics in the Pearl River Delta region [J]. *Environmental Science*, 2010, 31(5): 1146-1151.
- [46] BIAN Y, HUANG Z, OU J, et al. Evolution of anthropogenic air pollutant emissions in Guangdong province, China, from 2006 to 2015[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, 19(18): 11701-11719.
- [47] 王延龙, 李成, 黄志炯, 等. 2013 年中国海域船舶大气污染物排放对空气质量的影响[J]. *环境科学学报*, 2018, 38(6): 2157-2166.
- WANG Yanlong, LI Cheng, HUANG Zhitong, et al. Impact of ship emission on air quality over Chinese waters in 2013 [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(6): 2157-2166.
- [48] YANG L, LUO H, YUAN Z, et al. Quantitative impacts of meteorology and precursor emission changes on the long-term trend of ambient ozone over the Pearl River Delta, China, and implications for ozone control strategy[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, 19(20): 12901-12916.
- [49] 张夏夏, 袁自冰, 郑君瑜, 等. 大气污染物监测数据不确定度评估方法体系建立及其对 PMF 源解析的影响分析[J]. *环境科学学报*, 2019, 39(1): 95-104.
- ZHANG Xiaxia, YUAN Zibing, ZHENG Junyu, et al. Establishment of an uncertainty assessment framework for atmospheric pollutant monitoring data and its impact on PMF source apportionment [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, 39(1): 95-104.
- [50] CHE W, ZHENG J, WANG S, et al. Assessment of motor vehicle emission control policies using Model-3/CMAQ model for the Pearl River Delta region, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(9): 1740-1751.

- [51] WANG S, ZHENG J, FU F, et al. Development of an emission processing system for the Pearl River Delta regional air quality modeling using the SMOKE model: Methodology and evaluation [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(29): 5079–5089.
- [52] ZHONG Z, ZHENG J, ZHU M, et al. Recent developments of anthropogenic air pollutant emission inventories in Guangdong province, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 627: 1080–1092.
- [53] 鲁斯唯. 海峡西岸经济区大气污染物排放清单研究 [D]. 厦门: 厦门大学, 2014: 1–2.
LU Siwei. Research on air pollutant emission inventory in the Western Taiwan Straits Economic Zone [D]. Xiamen: Xiamen University, 2014: 1–2.
- [54] XIONG T, JIANG W, GAO W. Current status and prediction of major atmospheric emissions from coal-fired power plants in Shandong province, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, 124: 46–52.
- [55] JIANG P, CHEN X, LI Q, et al. High-resolution emission inventory of gaseous and particulate pollutants in Shandong province, eastern China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 259: 120806.
- [56] ZHOU M, JIANG W, GAO W, et al. Anthropogenic emission inventory of multiple air pollutants and their spatiotemporal variations in 2017 for the Shandong province, China [J]. *Environmental Pollution*, 2021, 288: 117666.
- [57] SUN S, JIANG W, GAO W. Vehicle emission trends and spatial distribution in Shandong province, China, from 2000 to 2014 [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, 147: 190–199.
- [58] 赵国梁, 常景云, 成杰民, 等. 2008—2018年山东省人为源氨排放清单研究 [J]. *环境污染与防治*, 2021, 43(2): 259–265.
ZHAO Guoliang, CHANG Jingyun, CHENG Jiemin, et al. Anthropogenic ammonia emission inventory in Shandong province from 2008 to 2018 [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2021, 43(2): 259–265.
- [59] LANG J, CHENG S, WEI W, et al. A study on the trends of vehicular emissions in the Beijing - Tianjin - Hebei (BTH) region, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, 62: 605–614.
- [60] QI J, ZHENG B, LI M, et al. A high-resolution air pollutants emission inventory in 2013 for the Beijing-Tianjin-Hebei region, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, 170: 156–168.
- [61] 吴华成, 张茹婷, 陈传敏, 等. 京津冀地区散煤燃烧大气污染物排放清单 [J]. *中国环境科学*, 2022, 42(10): 4547–4555.
WU Huacheng, ZHANG Ruting, CHEN Chuanmin, et al. Emission inventory of air pollutants from coal combustion in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(10): 4547–4555.
- [62] 鲁胜坤, 晁娜, 陈金媛, 等. 浙江省 2013—2020 年人为源氨排放清单 [J]. *中国环境科学*, 2022, 42(10): 4525–4536.
LU Shengkun, CHAO Na, CHEN Jinyuan, et al. Anthropogenic ammonia emission inventories of Zhejiang province from 2013 to 2020 [J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(10): 4525–4536.
- [63] 伯鑫, 徐峻, 杜晓惠, 等. 京津冀地区钢铁企业大气污染影响评估 [J]. *中国环境科学*, 2017, 37(5): 1684–1692.
BO Xin, XU Jun, Du Xiaohui, et al. Impacts assessment of steel plants on air quality over Beijing-Tianjin-Hebei area [J]. *China Environmental Science*, 2017, 37(5): 1684–1692.
- [64] 伯鑫, 王刚, 温柔, 等. 京津冀地区火电企业的大气污染影响 [J]. *中国环境科学*, 2015, 35(2): 364–373.
BO Xin, WANG Gang, WEN Rou, et al. Air pollution effect of the thermal power plants in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(2): 364–373.
- [65] ZHANG C, LI J, ZHAO W, et al. Open biomass burning emissions and their contribution to ambient formaldehyde in Guangdong province, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 838: 155904.
- [66] ZHANG S, WORRELL E, CRIJNS Graus W, et al. Co-benefits of energy efficiency improvement and air pollution abatement in the Chinese iron and steel industry [J]. *Energy*, 2014, 78: 333–345.
- [67] GONG M, YIN S, GU X, et al. Refined 2013-based vehicle emission inventory and its spatial and temporal characteristics in Zhengzhou, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 599–600: 1149–1159.
- [68] 张雅瑞, 李光华, 邓顺熙, 等. 渭南市道路移动源高分辨率污染物排放清单及特征研究 [J]. *环境科学学报*, 2022, 42(2): 332–340.
ZHANG Yarui, LI Guanghua, DENG Shunxi, et al. A study of high temporal-spatial resolution vehicle emission inventory and its characteristics of on-road mobile source in Weinan, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022, 42(2): 332–340.
- [69] ZHAO B, WANG P, MA J Z, et al. A high-resolution emission inventory of primary pollutants for the Huabei region, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, 12(1): 481–501.
- [70] 邵蕊, 吕建华, 徐琬莹, 等. 青岛市人为源氨排放清单及分布特征 [J]. *环境科学学报*, 2021, 41(11): 4449–4458.
SHAO Rui, LV Jianhua, XU Wanying, et al. Establishment and distribution characteristics of anthropogenic ammonia emission inventory in Qingdao [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(11): 4449–4458.
- [71] 庞可, 张芊, 马彩云, 等. 天水市人为源挥发性有机物排放清单及特征研究 [J]. *环境科学与管理*, 2021, 46(10): 101–106.
PANG Ke, ZHANG Qian, MA Caiyun, et al. Emission inventory and characteristic analysis of anthropogenic volatile organic compounds in Tianshui city [J]. *Environmental Science and Management*, 2021, 46(10): 101–106.
- [72] YUAN B, SHAO M, LU S, et al. Source profiles of volatile organic compounds associated with solvent use in Beijing,

- China[J]. *Atmospheric Environment*, 2010, 44(15): 1919-1926.
- [73] 尤倩, 李洪枚, 伯鑫, 等. 中国民用航空机场大气污染物及碳排放清单[J]. *中国环境科学*, 2022, 42(10): 4517-4524.
- YOU Qian, LI Hongmu, BO Xin, et al. Air pollution and CO₂ emission inventory of Chinese civil aviation airport[J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(10): 4517-4524.
- [74] 汪承杰, 环久峰, 张洪朋, 等. 2018 年大连海域船舶大气污染物排放特征及影响分析[J]. *中国环境监测*, 2022, 38(4): 165-173.
- WANG Chengjie, HUAN Jiufeng, ZHANG Hongpeng, et al. Emission characteristics and impacts of air pollutants from ships in Dalian Sea Area in 2018 [J]. *Environmental Monitoring of China*, 2022, 38(4): 165-173.
- [75] KINI, M D, FREY, H C. Probabilistic evaluation of mobile source air pollution; Volume 1, probabilistic modeling of exhaust emissions from light duty gasoline vehicles [EB/OL]. (1997-12-01) [2022-12-19]. <https://ntlrepository.blob.core.windows.net/lib/21000/21800/21875/PB99146292.pdf>.
- [76] GUAN D, LIU Z, GENG Y, et al. The gigatonne gap in China's carbon dioxide inventories[J]. *Nature Climate Change*, 2012, 9(2): 672-675.
- [77] HONG C, ZHANG Q, HE K, et al. Variations of China's emission estimates: Response to uncertainties in energy statistics[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, 17(2): 1227-1239.
- [78] ZHENG J, FREY H C. Quantification of variability and uncertainty using mixture distributions: Evaluation of sample size, mixing weights, and separation between components[J]. *Risk Anal*, 2004, 24(3): 553-571.
- [79] 钟流举, 郑君瑜, 雷国强, 等. 大气污染物排放源清单不确定性定量分析方法及案例研究[J]. *环境科学研究*, 2007(4): 15-20.
- ZHONG Liuju, ZHENG Junyu, LOUIE Peter, et al. Quantitative uncertainty analysis in air pollutant emission inventories: Methodology and case study[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2007(4): 15-20.
- [80] ZHAO Y, WANG S, NIELSEN C P, et al. Establishment of a database of emission factors for atmospheric pollutants from Chinese coal-fired power plants [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, 44(12): 1515-1523.
- [81] 郑君瑜. 区域高分辨率大气排放源清单建立的技术方法与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 134-146.
- [82] BUTTERBACH BAHL K, KRAUS D, KIESE R, et al. Activity data on crop management define uncertainty of CH₄ and N₂O emission estimates from rice: A case study of Vietnam [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2022, 185(6): 793-806.
- [83] SUPER I, DELLAERT STIJN N C, VISSCHEDIJK A J H, et al. Uncertainty analysis of a European high-resolution emission inventory of CO₂ and CO to support inverse modelling and network design[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, 20(3): 1795-1816.
- [84] CHEN L, SUN Y, WU X, et al. Unit-based emission inventory and uncertainty assessment of coal-fired power plants[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 99: 527-535.
- [85] HE M, ZHENG J, YIN S, et al. Trends, temporal and spatial characteristics, and uncertainties in biomass burning emissions in the Pearl River Delta, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(24): 4051-4059.
- [86] 魏巍, 王书肖, 郝吉明. 中国人为源 VOC 排放清单不确定性研究[J]. *环境科学*, 2011, 32(2): 305-312.
- WEI Wei, WANG Shuxiao, HAO Jiming. Uncertainty analysis of emission inventory for volatile organic compounds from anthropogenic sources in China [J]. *Environmental Science*, 2011, 32(2): 305-312.
- [87] 李楠. 广东省 2012 年大气排放源清单定量不确定及校验研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017: 21-22.
- LI Nan. Quantitative uncertainty analysis and verification of emission inventory in Guangdong Province, 2012[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017: 21-22.
- [88] 巫玉杞. 排放因子不确定性数据集建立与清单质量评估方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020: 22-24.
- WU Yuqi. Study on the establishment of emission factor uncertainty dataset and inventory quality evaluation method [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020: 22-24.
- [89] ZHAO Y, NIELSEN C P, LEI Y, et al. Quantifying the uncertainties of a bottom-up emission inventory of anthropogenic atmospheric pollutants in China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, 11(5): 2295-2308.
- [90] 王君驰, 黄志炯, 袁自冰, 等. 广东省移动源中等挥发性有机物(IVOCs)排放清单及不确定性分析[J]. *环境科学学报*, 2022, 42(9): 408-418.
- WANG Junchi, HUANG Zhijong, YUAN Zibing, et al. Development and uncertainty analysis of intermediate volatility organic compounds IVOCs emission inventories from mobile sources in Guangdong Province [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022, 42(9): 408-418.
- [91] 郑君瑜. 排放源清单与大气化学传输模型不确定性分析[G]. 北京: 科学出版社, 2022: 28-30.
- [92] 牛月圆. 典型煤炭资源城市挥发性有机物排放清单的建立和验证[D]. 北京: 华北电力大学, 2021: 1-2.
- NIU Yueyuan. Establishment and verification of anthropogenic volatile organic compound emission inventory in a typical coal resource-based City [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021: 1-2.
- [93] LI J, HAO Y, SIMAYI M, et al. Verification of anthropogenic VOC emission inventory through ambient measurements and satellite retrievals [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, 19(9): 5905-5921.
- [94] LIU Y, ZHENG M, YU M, et al. High-time-resolution source apportionment of PM_{2.5} in Beijing with multiple models [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, 19(9): 6595-6609.

- [95] 李冉. 基于 SMOKE 模型的 CMAQ 污染源清单的构建[D]. 长春: 吉林大学, 2022: 12-15.
- [96] 夏泽群, 范小莉, 黄志炯, 等. 国内外 PM_{2.5} 源谱对比及其对空气质量模拟效果的影响[J]. 环境科学研究, 2017, 30(3): 359-367.
- XIA Zequn, FAN Xiaoli, HUANG Zhijiong, et al. Comparison of domestic and foreign PM_{2.5} source profiles and influence on air quality simulation [J]. Research of Environmental Sciences, 2017, 30(3): 359-367.
- [97] 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 Yang, WANG Ying, LIU Hao, 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.
- [98] 祝禄祺. 天水市人为源大气污染排放清单的建立与评估[D]. 兰州: 兰州大学, 2021: 1-2.
- ZHU Luqi. Establishment and evaluation of anthropogenic air pollutant emissions inventory in Tianshui city[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2021: 1-2.
- [99] ZHANG Q, STREETS D G, HE K. Satellite observations of recent power plant construction in Inner Mongolia, China[J]. Geophysical Research Letters, 2009, 36(15): L15809.
- [100] CHENG X, XU X, DING G. An emission source inversion model based on satellite data and its application in air quality forecasts[J]. Science China Earth Sciences, 2010, 53(5): 752-762.
- [101] GU J, CHEN L, YU C, et al. Ground-level NO₂ concentrations over China inferred from the satellite OMI and CMAQ model simulations[J]. Remote Sensing, 2017, 9(6): 519.
- [102] KOURTIDIS K, GEORGOULIAS A K, MIJLING B, et al. A new method for deriving trace gas emission inventories from satellite observations: The case of SO₂ over China [J]. Science of the Total Environment, 2018, 612: 923-930.