

· 专论与综述 ·

大气污染物排放调查监测研究进展

王姝, 冯微微*, 丁莹, 邹滨, 杨卓琳

(中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙 410083)

摘要:系统总结了当前大气污染物排放调查监测的主要方法及其在全球、区域、局地等不同尺度的典型应用,分析了地面监测、模型模拟与遥感反演3种方法受排放源多样、成分复杂、时空变异显著等因素影响,在尺度效应、成分解析等方面存在的问题。从优化监测方法、改进监测模式、融合监测技术等角度,提出了构建现代化大气污染物排放调查监测网络、开展污染物在不同排放阶段的变化解析研究及在不同圈层间的迁移全过程研究等建议。

关键词: 大气污染物排放; 地面监测; 模型模拟; 遥感反演

中图分类号: X51 文献标志码: A 文章编号: 1006-2009(2023)01-0009-05

Research Progress in Investigation and Monitoring Methods of Air Pollutant Emission

WANG Shu, FENG Hui-hui*, DING Ying, ZOU Bin, YANG Zhuo-lin

(School of Geosciences and Info-physics, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China)

Abstract: This paper systematically summarized the main methods of current air pollutant emission investigation and monitoring and their typical applications at different scales such as global, regional and local levels, analyzed the influence of various emission sources, complex composition and significant spatio-temporal variation and other factors on the three methods of ground monitoring, model simulation and remote sensing inversion, and the existing problems in scale effect and composition analysis. From the perspectives of optimizing monitoring methods, improving monitoring modes and integrating monitoring technologies, suggestions were made to build a modern air pollutant emission investigation and monitoring network, carry out analytical research on the changes of pollutants in different emission stages and study the whole process of migration between different circles.

Key words: Air pollutant emission; Ground monitoring; Model simulation; Remote sensing inversion

大气污染已经成为世界各国较为普遍的环境问题^[1-2],精准掌握大气污染物排放状况对于污染时空演化研究、污染源头监管等具有重要意义^[3-5]。大气污染物排放通常指从地面将污染物排放到大气中的过程,根据排放源的分布特点,可将其分为点源(位置明确、集中、稳定排放的固定点状源,如烟囟),线源(自身或因移动呈线状排放的源,如机动车),以及面源(分布面积广、污染物种类多的面状排放源,如工厂聚集区)。现有大气污染物排放调查监测方法主要包括地面监测^[6-8]、模型模拟^[9]、遥感反演^[10-11]等,不同方法的监测结果主要为大气污染物浓度值和排放量,在此基础上获取污染物空间分布特征与时间变化趋势及源

解析等调查结果。由于大气污染物排放具有污染源多样、演化过程复杂、区域差异显著等特点,不同的调查监测方法均面临一定的技术瓶颈。鉴于此,今系统总结大气污染物排放调查监测方法及其典型应用,分析不同方法存在的问题及未来潜在发展趋势,为大气污染物排放调查监测方法研究提供参考。

收稿日期: 2022-03-30; 修订日期: 2022-10-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42071378); 湖南省自然科学基金资助项目(2020JJ3045); 中南大学研究生自主探索创新基金资助项目(2021zzts0841)

作者简介: 王姝(1998—),女,河南驻马店人,硕士研究生,从事资源环境遥感研究。

* 通信作者: 冯微微 E-mail: hhfeng@csu.edu.cn

1 大气污染物排放调查监测方法及应用

1.1 调查监测方法

1.1.1 地面监测

地面监测利用监测设备直接采集排放的污染物,可进一步被分为定点监测和移动监测两种方法。定点监测指在地面固定位置设置监测站点,持续收集大气污染物,优点是监测数据准确,能够长时间持续监测,缺点是点位布设较为分散,只能代表部分区域特征^[12]。移动监测是将测量仪器安装在野外移动监测车上,通过车辆行驶移动收集大气污染物,该方法虽然能够研究大气污染物的时空分布特征,弥补了定点监测的不足,但无法对某一特定区域开展持续性长期监测^[13]。地面监测能够直接获得大气污染物浓度,进一步利用获取的多站点、长时间监测数据,还可以分析污染物浓度的空间分布特征和时间变化趋势。

目前多国已经构建空气质量监测网络,为国家和地区大气污染预防与控制策略的制定奠定了基础,如美国建立的SLAMS(4 000多个站点)、NAMS(1 080个站点)、PAMS(78个站点)、CASTNET(97个站点)、NATTS(27个站点)、SPMS等监测网络^[14-15]。我国于20世纪70年代中期开始建设空气质量监测网络,截至“十三五”末期,已经形成涵盖国家、省、市、县4个层级的环境空气质量监测网,被广泛应用于不同尺度的大气污染物调查监测^[16-18]。此外,国家环境空气质量监测网还包括温室气体监测、酸雨监测、沙尘影响空气质量监测和大气颗粒物组分/光化学监测,逐步实现了污染源监测的全覆盖。

1.1.2 模型模拟

模型模拟在大气污染物排放调查监测中得到了广泛应用,并且发展了多种模型和算法^[19],主要包括排放清单法、扩散模型法、受体模型法等。

排放清单法是在对各种污染源开展统计调查的基础上,利用不同污染源的排放因子,建立符合实际的大气污染物排放清单数据库,进而评价和分析大气污染物排放情况。目前,主要采用“自上而下”和“自下而上”两种方法编制排放清单^[20-21]。排放清单法除了能够直接模拟得到大气污染物排放量之外,还能得到污染物排放量的空间分布及时间变化特征、污染来源解析等调查结果。该方法虽然简单明了、覆盖面广,但受排放因子不确定性等因素影响,精度和空间分辨率较低,难以确定微小

排放源^[22-23]。

扩散模型法从污染源出发,利用不同尺度的数值模型定量描述大气污染物从源到受体的物理化学过程,从而定量估算不同区域、不同类型污染源对大气污染的贡献^[24]。早期的扩散模型主要有箱模型、高斯模型和拉格朗日轨迹模型等,随后发展了以ADMS、UAM等为代表的第二代扩散模型,可以模拟较为复杂环境下的污染传输问题,近年来又出现了CMAQ、CHIMERE等新型模型^[25]。扩散模型法可以模拟得到大气污染物的浓度,并以此分析其变化规律和特征。

受体模型法是最常用的源解析手段,该方法从污染区域出发,分析环境受体采样点测得的大气污染物物理、化学性质,从而反推出大气污染物排放的来源和贡献^[26]。受体模型法按照原理可被分为两类:一类是需要输入污染源详细成分谱信息的模型,主要代表是化学质量平衡模型(CMB)^[27],其基本原理为质量守恒;另一类是基于环境受体的统计模型,主要代表有主成分分析(PCA)、因子分析(FA)、正定矩阵因子分解(PMF)等。目前,使用最为广泛的源解析技术是CMB模型和PMF模型^[28-29]。受体模型法主要被应用于大气污染物源解析,用以分析不同污染源的贡献率。

1.1.3 遥感反演

近年来,遥感技术发展迅速,成为大气污染物排放调查监测领域的新兴技术。遥感反演的基本原理为不同气体成分有其固定的辐射和吸收光谱,可以根据光谱特征差异来推算污染气体成分^[30]。目前,主要采用差分吸收光谱(DOAS)^[31-32]、傅里叶变换红外光谱(FTIR)^[33]、激光雷达(LiDAR)^[34]等方法开展大气污染物排放遥感调查监测。遥感调查监测方法按照电磁波辐射源的不同可被分为被动式遥感和主动式遥感两种^[35],按照遥感平台的的不同可被分为地面遥感、航空遥感、航天遥感3类^[10]。卫星遥感是最为常见的一种方法,具有范围广、速度快、效果好、可以连续动态监测等特点,能够揭示其他方法难以发现的污染源及排放状况,成为目前大气污染物排放遥感调查监测的主流方法^[36]。常用的卫星传感器有NOAA/AVHRR、Terra&Aqua/MODIS、ERS-2/GOME、Aura/OMI,以及我国的FY/VIRR和HJ/IRS等^[37]。遥感方法不仅能够直接反演得到污染物的成分、含量、浓度等监测信息,还能获取污染物的时空分布及变化趋势

等调查结果。

1.2 典型应用

基于上述方法,各国学者开展了不同尺度的大气污染物排放调查监测。

开展全球尺度的调查监测,有助于系统把握不同气候、地理、人文状况条件下大气污染物排放的区域差异性,进而为理解其全球宏观特征奠定基础。不同国家和地区构建的具有大量站点的地面监测网络为开展全球尺度的调查监测提供了可能。Hung等^[38]以持久性有机污染物(POPs)为研究对象,将世界各地的监测站点构建成一个监测网络。Sprovieri等^[39]构建了全球汞观测系统(GMOS),监测汞的浓度及时间变化。模型模拟对于研究全球性的大气污染物排放情况较为适用。Zhang等^[40]使用排放清单法,对2004年全球16种被美国EPA列为优先污染物的多环芳烃(PAHs)开展了排放清单的编制。Chen等^[41]使用三维全球化学迁移模型(MATCH),分析了1996—2001年全球甲烷排放情况。遥感卫星数据因覆盖范围广的特点而被广泛应用于大气污染物排放全球调查监测。Xiao等^[42]使用空间分辨率较高的臭氧监测仪(OMI),监测了全球对流层NO₂的时空分布特征。Fioletov等^[43]使用PCA算法处理了OMI的SO₂测量值,并使用该数据来监测点排放源或面排放源。

区域尺度是分析某一区域范围内的大气污染物排放状况,研究其区域分布特征及发展规律,是开展区域大气污染溯源追踪与综合治理的重要依据。地面监测通过布设在不同地区的监测站点,可以实现区域尺度的研究。臧星华等^[44]采集了我国190个地面监测站的数据,研究了4种常规污染物(NO₂、PM₁₀、PM_{2.5}、SO₂)的时空分布特征。Font等^[45]在伦敦65条街道的监测点上观测了NO_x、PM、黑碳(CBLK)、CO₂的变化趋势。模型法在区域尺度的应用方面也取得了较好的进展。Chakraborty等^[46]使用HYSPIT、FLEXPART模型分析了印度7个主要城市多氯联苯(PCBs)的排放来源。Baldasano等^[47]使用受体模型法评估了西班牙马尔托雷尔市挥发性有机物(VOCs)的排放来源。遥感法是一种新兴的观测方法,传感器分辨率的多样性使其能适用于不同的区域范围。White^[48]使用遥感影像分析了巴西亚马逊州2003—2016年火灾发生的时空变化及大气污染物排放状况。Liu等^[49]基于多角度成像光谱仪(MI-

SR)测量的气溶胶光学厚度(AOT)与PM_{2.5}数据建立了经验模型,用于估算美国东部地面PM_{2.5}浓度。

局地尺度是调查监测某一站点或某一部小范围,分析小范围的大气污染物排放及污染状况,是研究大气污染物排放影响机制的重要理论依据。使用地面监测开展局地尺度研究是目前的最优方法。吴莹等^[50]监测了泰州市6种大气污染物(NO₂、SO₂、O₃、CO、PM₁₀、PM_{2.5})的排放状况并分析了其污染来源。Mattielli等^[51]研究了法国某铅锌精炼厂5 km范围内锌的排放状况。使用模型法开展局地尺度的研究较少,仅有少数学者通过模型分析了小范围局地污染物排放通量及来源。胡崑等^[52]使用PMF受体模型对南京市江北工业区的受体点——南京信息工程大学的VOCs开展了来源解析。Ghermandi等^[53]使用MSS模型微观模拟了意大利某电厂的NO_x排放。

2 主要问题分析

虽然目前大气污染物排放调查监测已经多方法、多尺度开展了相关研究,但是由于不同方法的原理特点和适用条件不同,在开展调查监测时应根据其优缺点,选择最为适用的方法。

地面监测因其简单直接、准确有效等优点,在小尺度大气污染物排放调查监测中发挥了极为重要的作用。该方法的缺点为:①监测站点布设不合理,覆盖面不足。目前在边远城市、农村地区、背景区域布设的污染物排放监测点位仍显不足^[15],同时由于城市迅速发展,较多城市站点及背景站已失去其原有功能,须建立新的有代表性的监测站点。②监测项目单一,污染物不全。目前我国常见的大气监测项目为SO₂、NO₂、PM₁₀等,对于CO、O₃、PM_{2.5}等受到普遍关注的大气污染物的监测能力仍然不足^[54]。③自动监测尚未完善,系统化不足。现有的大气污染物监测站点尚未形成完善的自动化监测系统,部分站点仍须手工操作采样,监测效率较低,监测能力薄弱。④质量控制措施不全,体系化不足。目前仍缺乏成熟的体系化的质量保证与质量控制机制,大气污染物排放调查监测的质量难以得到保证,给后续分析研究带来一定的不确定性。

模型模拟因其物理化学机制明确、能够定性定量分析等优点,被广泛应用于较大尺度的调查监测中。该方法存在以下不足:①模型解析不确定性大,精确度不足。各种模型受到多种不确定性因素

干扰,例如源排放清单中排放因子的不确定性、PMF模型中统计分析排放源的不确定性等。②模型构建较为困难,模拟受限制。模型模拟过程需要考虑各种因素及参数,而这些因素的选择和参数的获取非常复杂且困难,给模型应用带来极大限制。③模型内部机制复杂,模型推广难。一些模型需要考虑大气的物理化学转化过程,内部机制非常复杂。

遥感反演因其宏观、形象、快速、经济、动态等优点,在大尺度的大气污染物排放调查监测中发挥了越来越重要的作用。该方法存在以下问题:①反演算法存在差异,估算差异大。由于卫星传感器设计不同,以及反演算法原理不同,不同遥感产品的估算结果存在一定的差异,给大气污染物排放调查监测带来不确定性。②时空分辨率不足,监测受限制。遥感技术虽然对于研究大范围长时间的大气污染物排放状况具有显著优势,但对于区域甚至局地小范围的调查监测尚存在局限性,当前的时空分辨率还不能满足调查监测的需求。③监测对象局限性大,广泛开展难。目前遥感监测主要针对森林火灾、草原火灾、工业生产热点、秸秆焚烧等产生热异常且集中的排放区域,而对于其他比较破碎分散的排放源头,例如交通运输尾气、自然扬尘等,使用遥感卫星数据难以监测。

3 未来发展趋势

未来除了解决上述3种方法存在的问题之外,还应在更宽的领域,用更广的视角开展大气污染物排放调查监测。

(1)形成具有“空天地一体化”能力的现代化大气污染物排放调查监测网络,实现调查监测的全方位、多时相覆盖。应充分发挥地面监测、模型模拟、遥感反演等多种方法的特点及优势,将各种先进技术有机结合,建立功能完善、指标齐全、覆盖广泛的现代化调查监测网络,同时建立完善的质量控制与监督体系,确保监测结果的准确性。

(2)准确识别污染物在排放过程中的状态变化,开展不同阶段污染物的变化解析研究。大气污染物在排放过程中会经历一系列物理化学反应而产生不同的状态,同种污染物状态的不同会导致其排放特征的不同。因此,准确识别污染物的状态变化,对于调查监测研究至关重要。

(3)开展大气污染物迁移全过程调查监测,在地球系统框架下研究污染物在大气圈、岩石圈、水

圈等不同圈层间的复杂迁移过程。目前大气污染物排放研究多针对其从地面到大气圈的迁移过程,多圈层的迁移研究较少。大气污染物迁移既包括从下到上的排放,也包括自上而下的沉降,污染物经排放输入大气,大气沉降又将部分污染物输出至地面。因此,必须将多个圈层有机结合,开展大气污染物迁移全过程研究。

[参考文献]

- [1] 王文兴,柴发合,任阵海,等. 新中国成立70年来我国大气污染防治历程、成就与经验[J]. 环境科学研究,2019,32(10):1621-1635.
- [2] 刘海猛,方创琳,黄解军,等. 京津冀城市群大气污染的时空特征与影响因素解析[J]. 地理学报,2018,73(1):177-191.
- [3] 万霖,何凌燕,黄晓锋. 船舶大气污染排放的研究进展[J]. 环境科学与技术,2013,36(5):57-62.
- [4] 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.
- [5] GUTTIKUNDA S K, GOEL R, PANT P. Nature of air pollution, emission sources, and management in the Indian cities[J]. Atmospheric Environment,2014,95:501-510.
- [6] 李燕丽,邢振雨,穆超,等. 移动监测法测量厦门春秋季节近地面CO₂的时空分布[J]. 环境科学,2014,35(5):1671-1679.
- [7] 李飞,唐晓,王自发,等. 基于京津冀高密度地面观测网络的大气污染物浓度地面观测代表性误差估计[J]. 大气科学,2019,43(2):277-284.
- [8] 王跃思,宫正宇,刘子锐,等. 京津冀及周边地区大气污染综合立体观测网的建设与应用[J]. 环境科学研究,2019,32(10):1651-1663.
- [9] 喻义勇,王苏蓉,秦玮. 大气细颗粒物在线源解析方法研究进展[J]. 环境监测管理与技术,2015,27(3):12-17.
- [10] 陈泽青,刘诚,胡启后,等. 大气成分的遥感监测方法与应用[J]. 地球科学进展,2019,34(3):255-264.
- [11] 李正强,谢一淞,张莹,等. 大气气溶胶成分遥感研究进展[J]. 遥感学报,2019,23(3):359-373.
- [12] 李令军,王英. 基于卫星遥感与地面监测分析北京大气NO₂污染特征[J]. 环境科学学报,2011,31(12):2762-2768.
- [13] 张红星,韩立建,任玉芬,等. 北京城市与西北远郊地表臭氧浓度梯度移动监测研究[J]. 生态学报,2019,39(18):6803-6815.
- [14] 李培,陆轶青,杜讚,等. 美国空气质量监测的经验与启示[J]. 中国环境监测,2013,29(6):9-14.
- [15] 钟流举,郑君瑜,雷国强,等. 空气质量监测网络发展现状与趋势分析[J]. 中国环境监测,2007,23(2):113-118.
- [16] 张菊,苗鸿,欧阳志云,等. 近20年北京城市近郊区环境空气质量变化及其影响因素分析[J]. 环境科学学报,2006,26(11):1886-1892.
- [17] 于群,杨华. 广州市近年空气质量现状及趋势分析[J]. 中国环境监测,2010,26(4):74-77.
- [18] 张霖琳,刀谓,王超,等. 我国四个大气背景点颗粒物浓度及

- 其元素分布特征[J]. 环境化学, 2015, 34(1): 70-76.
- [19] 戴树桂, 朱坦, 白志鹏. 受体模型在大气颗粒物源解析中的应用和进展[J]. 中国环境科学, 1995, 15(4): 252-257.
- [20] 张恺, 骆春会, 陈旭峰, 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.
- [21] 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.
- [22] 曹国良, 张小曳, 龚山陵, 等. 中国区域主要颗粒物及污染气体的排放源清单[J]. 科学通报, 2011, 56(3): 261-268.
- [23] 黄成, 陈长虹, 李莉, 等. 长江三角洲地区人为源大气污染物排放特征研究[J]. 环境科学学报, 2011, 31(9): 1858-1871.
- [24] 谭成好, 陈昕, 赵天良, 等. 空气质量数值模型的构建及应用研究进展[J]. 环境监控与预警, 2014, 6(6): 1-7.
- [25] 王占山, 李晓倩, 王宗爽, 等. 空气质量模型 CMAQ 的国内外研究现状[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(S1): 386-391.
- [26] HOPKE P K. Recent developments in receptor modeling[J]. *Journal of Chemometrics*, 2003, 17(5): 255-265.
- [27] 高健, 李慧, 史国良, 等. 颗粒物动态源解析方法综述与应用展望[J]. 科学通报, 2016, 61(27): 3002-3021.
- [28] 张桂芹, 姜德超, 李曼, 等. 城市大气挥发性有机物排放源及来源解析[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(S2): 195-200.
- [29] 张延君, 郑玫, 蔡靖, 等. PM_{2.5}源解析方法的比较与评述[J]. 科学通报, 2015, 60(2): 109-121.
- [30] 刘红, 张清海, 林绍霞, 等. 遥感技术在水环境和大气环境监测中的应用研究进展[J]. 贵州农业科学, 2013, 41(1): 187-191.
- [31] 郭永彩, 张天华, 高潮, 等. 差分吸收光谱技术及在大气监测领域中的应用[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2003, 26(8): 27-31.
- [32] PLATT U, PERNER D, PÄTZ H W. Simultaneous measurement of atmospheric CH₂O, O₃, and NO₂ by differential optical absorption[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1979, 84(C10): 6329-6335.
- [33] 谢品华, 刘文清, 魏庆农. 大气环境污染气体的光谱遥感监测技术[J]. 量子电子学报, 2000, 17(5): 385-394.
- [34] 董云升, 刘文清, 刘建国, 等. 激光雷达在城市交通污染中应用研究[J]. 光学学报, 2010, 30(2): 315-320.
- [35] 程立刚, 王艳姣, 王耀庭. 遥感技术在大气环境监测中的应用综述[J]. 中国环境监测, 2005, 21(5): 17-23.
- [36] 田彪, 丁明虎, 孙维君, 等. 大气 CO 研究进展[J]. 地球科学进展, 2017, 32(1): 34-43.
- [37] 张兴赢, 张鹏, 方宗义, 等. 应用卫星遥感技术监测大气痕量气体的研究进展[J]. 气象, 2007, 33(7): 3-14.
- [38] HUNG H, MACLEOD M, GUARDANS R, et al. Toward the next generation of air quality monitoring: Persistent organic pollutants[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 80: 591-598.
- [39] SPROVIERI F, PIRRONI N, BENCARDINO M, et al. Atmospheric mercury concentrations observed at ground-based monitoring sites globally distributed in the framework of the GMOS network[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, 16(18): 11915-11935.
- [40] ZHANG Y, TAO S. Global atmospheric emission inventory of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) for 2004[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(4): 812-819.
- [41] CHEN Y H, PRINN R G. Estimation of atmospheric methane emissions between 1996 and 2001 using a three-dimensional global chemical transport model[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2006, 111(D10): 307-331.
- [42] XIAO Z Y, JIANG H, SONG X D, et al. Monitoring of atmospheric nitrogen dioxide using Ozone Monitoring Instrument remote sensing data[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2013, 7(1): 3534-3551.
- [43] FIOLETOV V E, MCLINDEN C A, KROTKOV N, et al. A global catalogue of large SO₂ sources and emissions derived from the Ozone Monitoring Instrument[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, 16(18): 1-45.
- [44] 臧星华, 鲁垠涛, 姚宏, 等. 中国主要大气污染物的时空分布特征研究[J]. 生态环境学报, 2015, 24(8): 1322-1329.
- [45] FONT A, FULLER G W. Did policies to abate atmospheric emissions from traffic have a positive effect in London? [J]. *Environmental Pollution*, 2016, 218: 463-474.
- [46] CHAKRABORTY P, ZHANG G, ECKHARDT S, et al. Atmospheric polychlorinated biphenyls in Indian cities: levels, emission sources and toxicity equivalents[J]. *Environmental Pollution*, 2013, 182: 283-290.
- [47] BALDASANO J M, DELGADO R, CALBÓ J. Applying receptor models to analyze urban/suburban VOCs air quality in Martorell (Spain) [J]. *Environmental Science & Technology*, 1998, 32(3): 405-412.
- [48] WHITE B L A. Spatiotemporal variation in fire occurrence in the state of Amazonas, Brazil, between 2003 and 2016 [J]. *Acta Amazonica*, 2018, 48(4): 358-367.
- [49] LIU Y, SARNAT J A, KILARU V, et al. Estimating ground-level PM_{2.5} in the eastern United States using satellite remote sensing [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39(9): 3269-3278.
- [50] 吴莹, 程滢, 陈军, 等. 夏收和秋收期间泰州市空气质量特征研究[J]. 环境监测管理与技术, 2018, 30(1): 31-35.
- [51] MATTIELLI N, PETIT J C J, DEBOUDT K, et al. Zn isotope study of atmospheric emissions and dry depositions within a 5 km radius of a Pb-Zn refinery[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(6): 1265-1272.
- [52] 胡崑, 王鸣, 郑军, 等. 基于 PMF 量化工业排放对大气挥发性有机物(VOCs)的影响: 以南京市江北工业区为例[J]. 环境科学, 2018, 39(2): 493-501.
- [53] GHERMANDI G, FABBI S, ZACCANTI M, et al. Micro-scale simulation of atmospheric emissions from power-plant stacks in the Po Valley[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2015, 6(3): 382-388.
- [54] 解淑艳, 王瑞斌, 李健军, 等. 现代化环境空气质量监测网络构想[J]. 环境与可持续发展, 2012, 37(4): 26-31.