

朱明玉, 初红涛, 高元官, 等. 移动监测技术在大气环境研究中的应用 [J]. 环境工程技术学报, 2024, 14(3): 826-835.

ZHU M Y, CHU H T, GAO Y G, et al. Application of mobile monitoring technology in atmospheric environment research [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2024, 14(3): 826-835.

移动监测技术在大气环境研究中的应用

朱明玉^{1,2}, 初红涛¹, 高元官^{2*}, 李刚², 全权浩³, 蔡熾基³, 赵刚², 张浩², 杨小阳²

1. 齐齐哈尔大学化学与化学工程学院

2. 中国环境科学研究院大气环境研究所

3. 韩国国立环境科学院

摘要 移动监测是把用于环境监测的设备安装在移动载体(汽车、自行车、无人机和船等)上, 开展环境质量监测的技术。移动监测技术以其灵活、机动、及时等优势, 近年来被广泛应用于大气环境监测中, 但针对移动监测技术在大气环境研究中的应用场景及其存在的优缺点等缺少系统性研究。通过文献调研的方式对国内外移动监测技术在大气环境研究中的应用进行综述, 重点讨论了监测设备及其搭载平台。将移动监测设备划分为传感器和大型设备2类, 其中传感器以体积小、成本低等优势被大量应用在无人机、汽车等平台中。大型设备则包括监测仪和分析仪, 但由于受到体积和成本的限制多被应用在飞机和船等面积较大的平台中。根据大气环境移动监测设备搭载的平台将其划分为车载移动监测、机载移动监测和船载移动监测三大类, 其中车载移动监测主要用于环境质量监测、溯源分析和热点监测、汽车尾气排放监测及空气污染暴露监测等, 机载移动监测主要用于环境空气质量监测、溯源分析和热点监测及大气污染物传输监测, 船载移动监测主要用于海表大气组分、溯源分析和船舶尾气排放等研究。最后讨论了移动监测平台现有应用中存在的问题(例如覆盖率、续航、数据质量等), 并对未来研究进行了展望。

关键词 气溶胶; 空气质量监测; 移动平台; 传感器; 研究进展

中图分类号: X831 文章编号: 1674-991X(2024)03-0826-10 doi: 10.12153/j.issn.1674-991X.20230604

Application of mobile monitoring technology in atmospheric environment research

ZHU Mingyu^{1,2}, CHU Hongtao¹, GAO Yuanguan^{2*}, LI Gang², JEON Kwonho³, CHAE Hyeogki³, ZHAO Gang², ZHANG Hao², YANG Xiaoyang²

1. School of Chemistry and Chemistry Engineering, Qiqihar University

2. Atmospheric Environment Institute, Chinese Research Academy of Environmental Sciences

3. National Institute of Environmental Research (NIER)

Abstract Mobile monitoring is a technique for conducting environmental quality assessments by deploying monitoring equipment on mobile platforms like cars, bicycles, unmanned aerial vehicles (UAVs) and boats. Due to its flexibility, mobility, and real-time capabilities, mobile monitoring technology has gained widespread application in recent years, particularly in atmospheric environmental monitoring. However, there is a shortage of systematic research regarding the application scenarios, advantages, and drawbacks of mobile monitoring technology in atmospheric environmental research. A literature-based review of the foreign and domestic applications of mobile monitoring technology in atmospheric environmental research was conducted, with a focus on the monitoring equipment and the platforms used for atmospheric environmental mobile monitoring. The mobile monitoring equipment is categorized into two groups: sensors and large-scale devices. Sensors, characterized by their compact size and cost-effectiveness, find extensive use on platforms like UAVs and automobiles. Conversely, large-scale devices, including monitors and analyzers, are primarily employed on larger platforms like aircraft and ships, mainly due to size and cost constraints. Atmospheric environmental mobile monitoring platforms are classified into three categories: vehicle-based, aircraft-based, and ship-based. Vehicle-based mobile monitoring is primarily employed

收稿日期: 2023-08-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3705804); 中韩合作“晴天计划”项目

作者简介: 朱明玉(1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事大气环境的移动监测研究, 935512230@qq.com

* 责任作者: 高元官(1990—), 男, 工程师, 主要从事城市大气环境污染治理相关研究, gaoyg@craes.org.cn

for environmental quality assessment, traceability analysis, hotspot monitoring, vehicle emissions tracking, and air pollution exposure measurement. Aircraft platforms play a key role in monitoring ambient air quality, traceability analysis, hotspot monitoring, and the tracking of atmospheric pollutant dispersion. Ship-based mobile monitoring platforms are chiefly utilized for studying sea surface atmospheric components, traceability analysis, and ship exhaust emissions research. Finally, current challenges in existing applications of mobile monitoring platforms, such as coverage, battery life, and data quality, were addressed, and future perspectives were presented for the field.

Key words aerosols; air quality monitoring; mobile platform; sensors; research progress

随着全球城市化持续快速发展,大气污染问题已经对人类赖以生存的环境形成严峻挑战,大气污染监测技术成为大气污染防治研究中的热点之一^[1]。传统大气污染监测技术多为固定监测,存在监测仪器昂贵、操作复杂且覆盖面积有限等问题^[2]。大气移动监测技术指把用于环境监测的设备或传感器置于移动载体(汽车、自行车、无人机和船等)上,完成对大气污染的监测^[3-4]。移动监测具有操作灵活、能够准确反映指定区域大气污染物的特征及其变化趋势以及成本较低的特点,移动监测技术在环境质量监测中发挥着越来越重要的作用^[5]。

近年来,移动监测技术在大气环境监测中得到了广泛的应用,日常的交通工具(如车、飞机和船等)是主要的移动监测载体。车载移动监测主要被用来协助实现环境空气质量监测、对污染热点的监测和溯源分析、汽车尾气排放研究以及评估居民在通勤过程中的暴露浓度。机载移动监测主要应用于环境空气质量、溯源分析和热点监测以及大气污染物的传输监测。船载移动监测主要应用在监测海表大气成分、溯源分析和监测船舶排放等方面。Wu等^[6]在沧州市基于出租车搭载颗粒物(PM)传感器的移动大气环境监测系统,表征了PM的空间和时间变化特征。Rüdiger等^[7]用无人机搭载监测设备对哥斯达黎加、意大利等地火山羽流的成分进行测量,证明无人机监测是代替地面监测的合适方案。Yang等^[8]在北部湾上空使用飞机对生物质燃烧的高空运输进行测量,结果表明飞机测量在表征污染物水平变化方面是准确的。Huang等^[9]测量了大型货船实际运行过程中等挥发性有机物(IVOC)、挥发性有机物(VOC)和一次有机气溶胶(POA)的排放量,结果表明船舶排放的IVOC对总有机物排放量有很大贡献。樊守彬等^[10]在呼和浩特市利用移动监测技术发现PM₁₀浓度峰值主要与施工活动密集和道路扬尘有关。贾天蛟等^[11]使用无人机搭载的设备对国家自然保护区森林站点中VOC和臭氧浓度的垂直分布特征进行测量,结果表明区域人为源的排放对我国南部亚热带森林大气影响显著。赵德龙等^[12]基于飞

机搭载的单颗粒黑炭光度计对北京地区的黑炭(BC)气溶胶垂直分布特征进行了探测分析,发现BC气溶胶的浓度随高度的升高而减小。宋雨辰等^[13]采集黄海和渤海PM样品,并分析水溶性离子和痕量有机酸离子的化学特性及主要来源,结果表明人类活动是非海盐硫酸盐和有机酸离子浓度变化的显著原因。

移动监测平台的应用使大气环境监测能够在陆地以外的海洋和天空等更多的场景展开,且环境监测的覆盖面积广、操作较为灵活,因此移动监测技术在大气环境污染研究中的应用日益广泛。笔者围绕移动监测技术在大气环境中的应用进行了综述,针对不同监测设备和移动平台的监测技术进行分析,在此基础上梳理了移动监测技术在研究和应用中存在的问题及挑战,并对未来移动监测技术的应用场景和发展进行了展望。

1 移动空气质量监测设备

移动空气质量监测设备主要分为传感器和大型设备。传感器可以指测量组件,也可以指由一个或多个传感器组件、电源、数据传输和数据显示等组成的检测系统^[14]。传感器具有成本低和灵活性高等优势,被广泛安装于车、无人机和船等平台上用于大气环境质量移动监测。

大型设备依据不同的监测目的通常分为监测仪和分析仪,这2种仪器都具有较高的灵敏度,即低检出限和低定量限,同时可以提供高分辨率的数据,具有自动校准和调零功能。此外,大型设备的小型化也在不断发展,如质谱仪的小型化设备等。大型设备主要在固定监测站使用,在移动监测中由于其体积限制,主要应用在车载移动实验室、飞机和轮船等较大平台上。

1.1 传感器

1.1.1 颗粒物传感器

PM传感器的检测方法有光散射法、电学法和静低压冲击撞击法^[15]等。其中光散射法PM传感器由于具有反应时间快、结构简单等优点被广泛应用,主要检测流程是PM在穿过可见光或红外光的聚焦

光束时会导致可见光或者红外光发生散射,随后通过光电探测器监测特定方向上散射光的强度变化计算出所测 PM 的浓度^[16]。Sayahi 等^[17]对 4 种传感器在真实条件下的长期监测结果表明,在冬季光散射法 PM 传感器与空气监测仪有良好的相关性。电学法传感器具有响应时间短等优点, Järvinen 等^[18]使用电学法传感器 PPS-M 测量城市空气质量,时间分辨率可高达 0.2 s。静低压冲击撞击法传感器是将粒径进行分级以监测 PM 浓度^[19],在实际应用中多用于对不同粒径段的 PM 的采样^[15,20]。

1.1.2 气体传感器

气体传感器根据原理的不同可分为半导体法、电化学法等^[21]。半导体材料包括金属氧化物、导电聚合物、碳纳米管等。其中金属氧化物气体传感器因具有易于制造、成本低和灵敏度高、稳定性好等优点而被广泛应用,但其选择性低且工作温度高等问题限制了金属氧化物气体传感器的实际应用^[22];导电聚合物气体传感器的优点是工作温度低、易于合成,但易受湿度影响;碳纳米管气体传感器稳定性强,对 NO 和 NH₃ 较为敏感,但响应和恢复速度较慢,成本较高^[23]。电化学法气体传感器具有低成本、低功耗、坚固耐用等优点,但寿命较短,易受干扰。

1.2 大型设备

1.2.1 监测仪

监测仪是种用于连续测量某条件的仪器,如浓度、粒径等物理性质,主要由显示屏、数据采集器、气体检测模块、电源、采样泵、PM 检测模块等组成。不同于实验室稳定环境下的实验仪器,这种用于现场测量的设备必须承受环境温度的变化及行驶过程的振动等,应具有坚固紧凑、自动化、易于操作、持久供电等性质^[24]。Xia 等^[25]用多种监测仪组成的移动监测平台,测量了 11 种气体的污染物浓度以及粒径在 0.01~20 μm 的 PM 浓度和粒径分布。

1.2.2 分析仪

分析仪为确定某一混合物中特定物质的数量、分子质量和类型,用于分析被测量物的化学成分^[24],主要使用光谱法、气相色谱法、质谱法以及气相色谱法与质谱法联用等方法。移动监测分析仪应具备在室外恶劣环境下也能保持稳定的性质。Zhao 等^[26]使用便携式气相色谱质谱仪(GC-MS)对现场样本直接采集并进行在线分析,获取了环境空气中 VOC 的快速定性和定量结果。

2 移动监测平台的应用

按照移动监测平台的不同,将移动监测平台分

为车载移动监测平台、机载移动监测平台和船载移动监测平台 3 种类型。

车载移动监测平台的主要监测区域为近地面大气,可以在地面对各个区域进行灵活的监测;机载移动监测平台多为三维立体监测,其中无人机监测应用最为广泛;船是海洋上最重要的交通工具,船载移动监测平台测量的是海洋上空的大气污染。各移动监测平台的应用如表 1 所示。

表 1 移动监测平台的应用

Table 1 Application of mobile monitoring platforms

搭载平台	应用场景	内容
车载	环境空气质量监测	测量环境污染物浓度和绘制高分辨率污染地图
	溯源分析和热点监测	对污染峰值进行定位和对污染源进行分析
	汽车尾气排放监测	对汽车尾气排放进行在线监测
	空气污染暴露监测	在交通工具内对通勤过程中的污染物进行监测
机载	环境空气质量监测	对城市与自然环境空气的水平和垂直方向进行监测
	溯源分析和热点监测	对工业区、农业区等环境污染源进行定位分析
	大气污染物的传输监测	低层大气下污染物的水平和垂直传输监测
船载	海表大气组分监测	对海表大气的具体成分和浓度进行分析
	溯源分析	海洋气溶胶来源分析
	船舶排放监测	对船舶排放进行实船测试

2.1 车载平台的应用

车载移动监测是指以汽车、自行车和有轨电车等作为平台搭载空气监测设备对大气环境进行监测的方式。其中,汽车搭载平台主要用到的车辆包括出租车、公交车、电动汽车和地图绘制车等。

出租车搭载平台可以对随机路线进行监测,与普通客车的固定路线相比覆盖的空间尺度更大,运行时间更长^[6],有利于精确识别道路相关污染源;公交车搭载平台的体积较大可同时搭乘多种监测设备,对多种污染物同时进行测量,有利于对污染热点准确定位^[21];电动汽车搭载平台相较于汽油车和柴油车避免了搭载平台本身尾气的干扰^[27];地图绘制车搭载平台与其他车辆常规移动监测不同,可以对城市的每条街道进行长期重复观测,有利于从数据中提取长期、稳定、持久的污染物信息^[28]。自行车搭载平台可以进入汽车无法到达的地方,同时可以避免监测时自身产生的尾气干扰监测结果^[29]。有轨电车搭载平台可以经过不同土地类型的区域,例如步行街、娱乐区、森林和农业区等,对多种环境类型的区域空气质量进行监测^[30]。总体来说,不同类型

的车辆由于其体积和行驶路线差异适用于不同的研究目的,如环境空气质量监测、溯源分析和热点监测、汽车尾气排放监测以及空气污染暴露监测。

2.1.1 环境空气质量监测

各种空气污染物对人类身体健康有一定影响,因此对于环境空气质量的监测研究受到越来越多的关注^[31]。通常对污染物浓度的观测都是使用固定监测器测量,但在城市道路中受交通排放和复杂的城市环境影响较大,固定监测器数量少,覆盖范围小,而车载移动监测可以依托道路交通工具对污染物浓度进行测量,绘制高分辨率的污染地图。Hasenfratz等^[32]在有轨电车顶部安装10个传感器节点,收集了2年多的超细颗粒物(UFP)浓度数据,生成具有100 m×100 m高空间分辨率的污染地图,该研究有助于对城市环境空气质量进行更详细和准确的评估。

在农村地区进行监测可以用于与交通繁忙城市地区的污染情况进行对比。与传统的固定测量方式相比,由于移动监测中的数据测量均由同一仪器完成,因此在不同区域进行测量时不必相互校准^[33]。Weijers等^[34]使用搭载冷凝粒子计数器和激光气溶胶光谱仪的小型货车,测量荷兰不同地区(城市、农村和沿海)道路沿线颗粒物数量和质量的时空变异性。

2.1.2 溯源分析和热点监测

大气污染物溯源即寻找污染物的来源。溯源研究能够找到污染源,从源头控制污染物的排放,为污染防治措施提供数据支持。由于传统的固定监测站数量有限和城市环境复杂等原因,在城市污染物精细化溯源方面存在一定的困难,而基于移动车载平台进行监测时可以提供高时空分辨率的污染物特征,有助于污染物的热点定位和溯源^[35-36]。Wallace等^[37]使用货车搭载NO_x、SO₂、CO等监测仪对加拿大汉密尔顿市全市进行移动监测,结果表明高速公路和工业源的污染物浓度远超固定监测仪记录的每小时最大值。Targino等^[38]使用自行车作为移动平台搭载便携式监测仪,绘制BC和PM_{2.5}的空间分布图,确定空气污染热点,并评估可能影响这些污染物浓度的因素。

在工业园区对VOC进行监测时,传统监测方式无论是手工采样或监测站定点监测,都很难准确识别工业园区的无组织排放问题,移动监测提高了观测的效率,同时能够更加全面地反映工业园区的污染特征^[39]。高家乐等^[40]使用搭载单光子电离质谱仪(single photon ionization mass spectrometer, SPIMS)的走航观测车,对南京江北化工园区环境空气中的

VOC进行观测,对VOC浓度峰值进行定位,并分析了污染成分的来源。

2.1.3 汽车尾气排放监测

汽车尾气的排放是全球大气污染的主要来源。汽车尾气排放的测量通常在室内进行,会受到试验环境和设备的限制,不能有效地模拟车辆实际运行状态下的尾气排放。基于移动车载平台进行测量的方式比在实验室进行台架试验更能真实地反映排放因子的变化特性^[41]。葛蕴珊等^[42]研究了便携式排放测试系统,并对比了实际排放与实验室认证的差别,结果表明实际道路中NO_x的排放量远高于实验室认证下的排放。

2.1.4 空气污染暴露监测

空气污染暴露是指个人通过鼻子和口腔等身体外部边界在某一环境下与污染物接触的过程。道路交通是城市地区PM空气污染的主要来源,通勤者在靠近交通微环境时可能会短时间内大量接触PM和气体,从而对健康产生不同程度的影响^[43]。固定地点的监测方法无法充分表征个人在交通微环境中的暴露情况,而移动监测设备可直接对交通工具内部进行实时监测。Nazelle等^[44]将监测仪器放置在汽车座位、自行车车筐以及手推车内部,对通勤者在不同出行方式下的暴露浓度进行监测与比较。

2.2 机载平台的应用

由于PM的质量浓度、粒径分布和化学成分在垂直分布方向上随高度的不同会有较大差异,而通常在地面上进行测量无法充分反映其变化^[45-46]。因此,研究污染物垂直分布对于进一步了解大气中污染物的空间特征和时间变化具有重要意义。在空中对大气污染物进行垂直观测的方法有气象塔、系留气球、遥感和飞机等^[47]。机载移动监测即以无人机、载人飞机和直升机等平台搭载空气监测设备对大气环境进行监测的方式。载人飞机多为货运和客机,飞行路线固定,可以对同一区域进行重复测量^[8]。直升机作为移动平台进行测量时,分析仪器的安装不受空间大小限制,但高度受限制,最低只能测量到100 m左右。而无人机作为移动平台时,测量高度调整更加灵活同时成本也较低。由于无人机制造业以及便携式探测器建设领域的快速发展,无人机辅助测量大气的研究发展越来越快。

2.2.1 环境空气质量监测

与车载平台的应用方向一致,机载移动监测也主要应用于环境空气质量监测。但与车载平台不同的是,机载平台除了对城市等人员密集地区进行监测外,还常用于北极冻土层融化、森林野火、火山爆

发等自然环境的大气环境监测,在这些自然环境中释放的温室气体和其他气体都是大气污染物的重要来源。据估计,北极地区冻土融化释放的 CH_4 占全球排放量的 3.5%^[48],野火导致的每年 CO_2 排放量占全球的 5%~10%^[49],火山爆发排放的 SO_2 会引起酸雨, CO_2 会引起温室效应^[50]。

在对北极 CH_4 的空间分布进行测量时,固定监测站数量少且覆盖范围小,无法对污染源进行定位,卫星测量可以对全球大范围进行监测,但对地面 CH_4 污染源的准确定位不足,分辨率较低,且成本非常高。与其他通过直升机^[51]、小型飞机^[52] 测量 CH_4 数据的方法相比,无人机成本更低,更灵活,也可以针对特定的排放源进行监测。Oberle 等^[53] 将甲烷传感器 3DR Solo 搭载在无人机上,测量北极永久冻土沿线的 CH_4 空间分布。在对火山和森林野火进行监测时,如果在地面采样,工作人员和仪器的安全得不到保证,而无人机可以搭载传感器和采样器进行远距离观测,安全系数得到了提高^[7,54]。

在对城市空气进行监测时,传统的固定监测和车载的移动平台提供的大多为地面污染物的评估,而无人机可以同时探测污染物的水平和垂直方向的分布特征。Samad 等^[55] 使用六旋翼无人机开发的系统对道路附近的 PM 和 BC 以及气温、湿度、风速等气象条件进行高分辨率三维剖面分析。但无人机的探空高度以及搭载仪器的能力有限,而飞机可以填补这一不足。以飞机为移动平台搭载大型设备可以对城市地区的 O_2 、 O_3 、NO、 NO_2 等气体以及 $\text{PM}_{2.5}$ 、BC 等 PM 的垂直分布特征进行监测^[56-59]。

2.2.2 溯源分析和热点监测

无人机还可用于点源、面源等复杂工业场景中难以接近的污染源的气体流量测量、泄漏检测以及污染地图的绘制^[60]。如在工业区和矿场的挖掘和运输等活动多会造成污染物以无组织形式的排放,与固定监测和车载监测相比,无人机系统不受地形的限制,操作更加灵活,同时能够量化点源的排放。Alvarado 等^[61] 基于无人机搭载光学粒子计数器,用于监测采矿活动产生的 PM_{10} 浓度。此外 Iwaszenko 等^[62] 将六旋翼无人机携带的甲烷传感器应用于探测埋地管道的天然气泄漏,使用无人机监测可以代替手动测量,不但提高了效率还确保了工作人员的安全。污水处理厂和垃圾填埋场是各种温室气体的主要来源,无人机为污水处理厂提供了一种便捷监测方式来测量现场气味浓度^[63];无人机成像系统和原型气体传感器的结合在垃圾填埋场中有助于定位排放热点和分析填埋地形^[64]。而飞机测量有助于加深

对工业排放污染物羽流传输特征和化学演变时空分布特征的了解^[65]。Zaveri 等^[66] 使用飞机监测了燃煤发电厂羽流中气溶胶和微量气体的夜间化学演变。

农业中的大气污染主要为农场车辆的排放、畜牧业中动物运动和粪便排泄造成的空气污染。无人机监测与复杂而昂贵的固定监测设备相比,扩大了采样区域,可以灵活地测量污染来源。如 Araujo 等^[67] 通过将电化学传感器装到 DJI Matrix 100 无人机上,对拖拉机的废气排放进行了监测;Vinković 等^[68] 使用创新的 AirCore 系统对奶牛场下风处的 CH_4 摩尔分数进行了精确测量。

2.2.3 大气污染物的传输监测

大气污染物受大气水平运动以及大气的各种不同程度的扰动运动的影响,会形成不同程度的输送,污染物的传输包括水平传输和垂直传输,具有持续性、季节性、跨区域性的特点。机载平台可用于探究大气污染物在低层大气下的水平和垂直分布、化学物理转化、远距离传输特征和传输机制。

受到无人机飞行高度、续航、飞行距离等的限制,在大气污染物的传输研究中,多使用常规飞机如商用和民用客机等搭载监测设备对污染物进行监测。Hatakeyama 等^[69] 利用飞机观测了西北环太平洋地区的大气污染物,研究发现 O_3 和 NO_x 的相关性与背景区域的相关性相反,推测是受到上层大气贡献的影响。Yang 等^[70] 通过飞机观测获取了中国北部湾地区的高时间分辨率的 BC、CO 和 CO_2 的垂直剖面特征,研究发现生物质燃烧强度、大气热力学和大气传输对 BC、CO 和 CO_2 垂直分布有重要影响。Wu 等^[71] 观测了大西洋东南部阿森松岛生物质燃烧气溶胶特性和垂直分布,研究表明该地区每年都受到南部非洲生物质气溶胶远程输送的影响。

2.3 船载平台的应用

船载移动监测即以轮船为平台搭载空气监测设备对大气环境进行监测的方式,其主要的研究方向为海表大气组分、溯源分析和船舶排放尾气的监测等。船舶包括货船、科考船、邮轮和渡轮等类型^[72]。其中,货船在进行观测研究时是沿着商业的固定路线进行的,但不经过南印度洋和高纬度海洋地区。同时分析仪器放置的位置不佳会降低仪器的性能。邮轮和渡轮的航线会提供高质量重复监测,用于安装分析仪器的环境条件比货船环境更好。科考船上仪器安装的位置最佳,且同时拥有大量周边基础设施和设备的支持,因此通常被用于热点地区观测^[73]。

相对于监测内陆空气质量,监测海表大气的研究相对较少。陆地上的大气观测站可以对从海上抵

达的空气进行采样,但易受到人为活动干扰^[72]。目前,海洋上空气溶胶成分的绝大多数采样都是在科考船上进行,这样可以尽可能避开人为污染,减少观测结果的不确定性^[74]。船基观测不仅可以监测海洋大气,也可同时进行海洋环境的监测,例如海水温度、盐度、空气温度和风速等,这是由于船舶作为观测平台能够携带大量仪器开展综合观测。

2.3.1 海表大气组分

海洋气溶胶是全球大气的重要组成部分,海洋气溶胶的沉降输入是将许多陆地的天然物质和污染物输送到海洋的重要途径^[75]。基于船载平台对海表大气进行分析主要有2种方法:一是离线采样分析,即使用采样器进行样品采集后送到实验室进行成分分析。Srinivas等^[76]采用大流量采样器采集气溶胶样品,分析了海洋大气边界层中无机磷浓度的时空变化。Golobokova等^[77]通过对北极气溶胶的化学组分观测,评估了北极生态系统受到当前气候过程和人为影响的空气环境现状,总结了该地区正在发生的变化。二是在线分析,采用质谱仪、光谱仪等仪器对海洋大气成分进行实时监测分析。Sun等^[78]使用在线质谱仪对南海气溶胶中化学成分进行分析,包括硫酸盐、硝酸盐、有机物、铵和氯化物等。

海洋是温室气体重要的源和汇^[79],李嘉鑫等^[80]为更深入了解海洋和海陆相互作用对温室气体分布特征的影响,使用船载光腔衰荡光谱法观测海表大气中的温室气体;盛立芳等^[81]在渤海基于科考船使用大型设备对气体污染物 SO_2 和 O_3 等浓度进行在线测量。

2.3.2 溯源分析

基于船载平台对海洋大气的溯源研究目前主要集中在近海地区,例如基于科考船使用气溶胶采样器在黄海、渤海、东海等近海水域对气溶胶化学组分以及来源进行分析,研究表明近海海洋气溶胶污染受到陆地人为排放污染物的影响较大^[82-84]。Liang等^[85]在南海对气溶胶的粒径分布、化学组分、气体浓度进行分析,结果表明中南半岛的气团污染物对夏季南海北部大气存在显著影响。Yang等^[86]在船舶上对渤海春夏季 $\text{PM}_{2.5}$ 元素组成进行测量,并对 $\text{PM}_{2.5}$ 特征和来源进行分析,结果表明近海地区的平均铁浓度受到工业排放、扬尘和重油燃烧共同影响。

由于船基观测航线较短且集中在近海区域,而近海受人为因素影响较大,因此对远海的研究更能反映真实海洋气溶胶化学组成情况。付丹^[87]在极地科考船中使用采样器采集气溶胶,发现南大洋海域气溶胶金属元素主要来源于自然源。张敏^[88]基于客

轮为移动监测平台对大西洋等海域气溶胶进行采样分析,结果表明北大西洋的气溶胶主要受撒哈拉沙尘和非洲中部生物质燃烧的混合影响。

2.3.3 船舶排放监测

由于世界贸易的90%是由船舶进行的,因此测量船舶污染排放对研究海表大气有重要影响^[89]。船舶排放的主要废气包括 CO_2 、 NO_x 、 SO_x 、CO、碳氢化合物和PM,上述物质的组成与排放量受船舶中机油和燃料的不完全燃烧影响^[90]。

船舶排放试验是获取船舶排放特征的有效方法,这种测试包括关于船舶发动机的台架测试和实船测试^[91]。由于台架测试是在实验室进行的研究,并不能完全体现实际工况下的各种排放,因此需要在船舶实际航行中进行测试。研究表明,船舶在海上的运行模式(停泊、操纵和巡航)^[92-94]和燃油类型^[95-96]的不同都会导致其排放浓度存在差异。此外也有研究通过对内河船舶排放的实船测试,计算了相应的排放因子^[97]。

3 总结和展望

3.1 总结

(1)移动空气质量监测设备包括传感器和大型设备。其中,传感器根据监测污染物类型不同分为PM传感器和气体传感器,大型设备依据监测目的不同分为监测仪和分析仪。移动空气质量监测设备根据监测要求的不同分别搭载在车载移动监测平台、机载移动监测平台、船载移动监测平台上。

(2)车载移动监测平台主要应用在环境空气质量监测、溯源分析和热点监测、汽车尾气排放监测和空气污染暴露监测等方面。车载移动平台相对于传统的固定监测,覆盖率更广,能够提供高分辨率的污染物特征,有助于污染物的溯源。但车载移动监测区域主要集中在城市交通道路,对交通不便的地区(如野外、农村等地区)监测能力有限。同时对城市环境和工业区等进行监测时,观测的数据会受到其他车辆以及走航车本身的影响。

(3)机载移动监测平台中无人机的应用最为广泛,主要是对环境的空气质量监测、溯源分析和热点监测、大气污染物传输监测。无人机平台的成本较低、操作灵活同时能够用于研究污染物的垂直分布特征,不受地形限制,可远距离进行监测,保障了工作人员的安全。但无人机平台受有效载荷重量和电池寿命限制,不能搭载大型设备和进行长时间的监测,使用飞机可以克服以上问题,同时飞机也可以测量对流层大气中污染物的传输、化学转化等过程。

(4) 船载移动监测平台的应用主要为对海表大气成分的具体分析、溯源分析以及船舶排放的监测,用于研究海表大气污染情况。船舶移动监测平台不但可以对环境空气质量进行监测,还可以对海洋生物环境进行监测,但目前船舶平台的应用主要以科考船为主,成本较高,对私人船舶以及商业船舶的自动化观测的开发力度还需要加大。

3.2 展望

(1) 数据质量问题。对传感器进行校准和对算法进行校正可以提高监测准确性和有效性,此外在实际应用中可以结合环境等客观因素对传感器的测量数据进行优化和后期处理以提高数据质量。

(2) 仪器的更小型化。在当前的移动监测中,监测仪器的体型往往限制了监测平台类型的选择,如质谱仪的体积较大,往往只能搭载于汽车、船和飞机上,因此需要研发更小型的监测仪器,扩展移动监测平台的应用场景。

(3) 移动监测数据和其他数据的结合。目前移动监测数据通常与气象信息结合使用,较为单一。为了更好地精细化评估污染源对环境空气质量的影响,需要加强与其他领域数据(如人口分布、工业生产、交通数据等)的结合应用。

(4) 扩展移动监测的应用方向。目前移动监测已广泛应用于陆、空、海的环境质量监测中,更小型化、多样化、智能化的监测方式是大势所趋,需要在工业、农业、医学、交通能源等领域不断探索更加广泛和灵活的应用方向。

参考文献

- [1] BOANINI C, MECCA D, POGNANT F, et al. Integrated mobile laboratory for air pollution assessment: literature review and cc-TrAIRer design[J]. *Atmosphere*, 2021, 12(8): 1004.
- [2] 李冬, 陈建华, 张月帆, 等. 道路扬尘检测方法研究进展 [J]. 环境工程技术学报, 2021, 11(3): 537-545.
LI D, CHEN J H, ZHANG Y F, et al. Research progress of detection methods of road dust[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2021, 11(3): 537-545.
- [3] KOLB C E, HERNDON S C, McMANUS J B, et al. Mobile laboratory with rapid response instruments for real-time measurements of urban and regional trace gas and particulate distributions and emission source characteristics[J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, 38(21): 5694-5703.
- [4] DIAS D, TCHEPEL O. Spatial and temporal dynamics in air pollution exposure assessment[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15(3): 558.
- [5] BOSSCHE D V J, PETERS J, VERWAEREN J, et al. Mobile monitoring for mapping spatial variation in urban air quality: development and validation of a methodology based on an extensive dataset[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 105: 148-161.
- [6] WU Y Z, WANG Y X, WANG L W, et al. Application of a taxi-based mobile atmospheric monitoring system in Cangzhou, China[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2020, 86: 102449.
- [7] RÜDIGER J, TIRPITZ J L, de MOOR J M, et al. Implementation of electrochemical, optical and denuder-based sensors and sampling techniques on UAV for volcanic gas measurements: examples from Masaya, Turrialba and Stromboli volcanoes[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2018, 11(4): 2441-2457.
- [8] YANG X Y, XU J, BI F, et al. Aircraft measurement over the Gulf of Tonkin capturing aloft transport of biomass burning[J]. *Atmospheric Environment*, 2018, 182: 41-50.
- [9] HUANG C, HU Q Y, LI Y J, et al. Intermediate volatility organic compound emissions from a large cargo vessel operated under real-world conditions[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(21): 12934-12942.
- [10] 樊守彬, 杨力鹏, 程水源. 道路环境颗粒物浓度空间分布研究 [J]. 环境科学与技术, 2011, 34(7): 56-58.
FAN S B, YANG L P, CHENG S Y. Spatial distribution of PM₁₀ in regional road environment[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 34(7): 56-58.
- [11] 贾天蛟, 葛艳丽, 刘奔, 等. 岭南亚热带森林冠层大气挥发性有机物污染特征及区域人为源的影响 [J]. 环境工程技术学报, 2023, 13(2): 473-482.
JIA T J, GE Y L, LIU B, et al. Pollution characteristics of volatile organic compounds above subtropical forest canopy in Lingnan and the influence of regional anthropogenic emissions[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2023, 13(2): 473-482.
- [12] 赵德龙, 周崑, 盛久江, 等. 基于飞机观测不同天气条件下北京地区黑碳气溶胶的垂直分布及其混合态特性 [J]. 环境化学, 2021, 40(5): 1405-1412.
ZHAO D L, ZHOU W, SHENG J J, et al. Vertical distribution and mixed state characteristics of black carbon aerosols in Beijing Area based on aircraft observation under different weather conditions[J]. *Environmental Chemistry*, 2021, 40(5): 1405-1412.
- [13] 宋雨辰, 周胜杰, 张洪海, 等. 夏季黄海渤海上空大气颗粒物中水溶性离子浓度分布与化学特征 [J]. 环境科学研究, 2016, 29(11): 1575-1581.
SONG Y C, ZHOU S J, ZHANG H H, et al. Distribution and chemical characteristics of water soluble ions in particulate matter over the Yellow Sea and the Bohai Sea in summer[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, 29(11): 1575-1581.
- [14] MORAWSKA L, THAI P K, LIU X T, et al. Applications of low-cost sensing technologies for air quality monitoring and exposure assessment: how far have they gone[J]. *Environment International*, 2018, 116: 286-299.
- [15] 李朋, 吴华成, 周卫青, 等. 民用燃煤不同燃烧阶段细颗粒物排放特征 [J]. 中国环境科学, 2020, 40(11): 4652-4659.
LI P, WU H C, ZHOU W Q, et al. Emission characteristics of fine particulate matter at different combustion phases of residential coal[J]. *China Environmental Science*, 2020, 40(11): 4652-4659.
- [16] RAI A C, KUMAR P, PILLA F, et al. End-user perspective of low-cost sensors for outdoor air pollution monitoring[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 607/608: 691-705.
- [17] SAYAHI T, BUTTERFIELD A, KELLY K E. Long-term field

- evaluation of the plantower PMS low-cost particulate matter sensors[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 245: 932-940.
- [18] JÄRVINEN A, KUULUVAINEN H, NIEMI J V, et al. Monitoring urban air quality with a diffusion charger based electrical particle sensor[J]. *Urban Climate*, 2015, 14: 441-456.
- [19] 秦孝良, 高健, 王永敏, 等. 传感器技术在环境空气监测与污染治理中的应用现状、问题与展望 [J]. *中国环境监测*, 2019, 35(4): 162-172.
- QIN X L, GAO J, WANG Y M, et al. Application of sensor technology in environmental air monitoring and pollution control: status, problems and prospects[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2019, 35(4): 162-172.
- [20] LIU X W, XU Y S, ZENG X P, et al. Field measurements on the emission and removal of PM_{2.5} from coal-fired power stations. 1: case study for a 1 000 MW ultrasupercritical utility boiler[J]. *Energy & Fuels*, 2016, 30(8): 6547-6554.
- [21] 汤明珍, 任建宁, 伍丽青, 等. 移动式空气质量传感器的研究与应用进展 [J]. *环境科学研究*, 2022, 35(4): 971-978.
- TANG M Z, REN J N, WU L Q, et al. Advances in research and application of mobile air quality sensors[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, 35(4): 971-978.
- [22] LIN T T, LV X, HU Z N, et al. Semiconductor metal oxides as chemoresistive sensors for detecting volatile organic compounds[J]. *Sensors*, 2019, 19(2): 233.
- [23] NIKOLIC M V, MILOVANOVIC V, VASILJEVIC Z Z, et al. Semiconductor gas sensors: materials, technology, design, and application[J]. *Sensors*, 2020, 20(22): 6694.
- [24] WARDENCKI W, KATULSKI R J, STEFAŃSKI J, et al. The state of the art in the field of non-stationary instruments for the determination and monitoring of atmospheric pollutants[J]. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 2008, 38(4): 259-268.
- [25] XIA T, CATALAN J, HU C, et al. Development of a mobile platform for monitoring gaseous, particulate, and greenhouse gas (GHG) pollutants[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2021, 193(1): 7.
- [26] ZHAO Y, LIU M Y. The method study on emergency detection of aromatic compounds and chlorides based on portable GC-MS[J]. *Procedia Engineering*, 2014, 84: 731-735.
- [27] KIMBROUGH S, KRABBE S, BALDAUF R, et al. The Kansas City transportation and local-scale air quality study (KC-TRAQS): integration of low-cost sensors and reference grade monitoring in a complex metropolitan area. part 1: overview of the project[J]. *Chemosensors*, 2019, 7(2): 26.
- [28] APTE J S, MESSIER K P, GANI S, et al. High-resolution air pollution mapping with google street view cars: exploiting big data[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(12): 6999-7008.
- [29] CHEN M J, YUAN W C, CAO C, et al. Development and performance evaluation of a low-cost portable PM_{2.5} monitor for mobile deployment[J]. *Sensors*, 2022, 22(7): 2767.
- [30] HAGEMANN R, CORSMEIER U, KOTTMEIER C, et al. Spatial variability of particle number concentrations and NO_x in the Karlsruhe (Germany) area obtained with the mobile laboratory "AERO-TRAM"[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 94: 341-352.
- [31] ADAMS M D, DeLUCA P F, CORR D, et al. Mobile air monitoring: measuring change in air quality in the city of Hamilton, 2005-2010[J]. *Social Indicators Research*, 2012, 108(2): 351-364.
- [32] HASENFRATZ D, SAUKH O, WALSER C, et al. Deriving high-resolution urban air pollution maps using mobile sensor nodes[J]. *Pervasive and Mobile Computing*, 2015, 16: 268-285.
- [33] BUKOWIECKI N, DOMMEN J, PRÉVÔT A S H, et al. A mobile pollutant measurement laboratory: measuring gas phase and aerosol ambient concentrations with high spatial and temporal resolution[J]. *Atmospheric Environment*, 2002, 36(36/37): 5569-5579.
- [34] WEIJERS E P, KHLYSTOV A Y, KOS G P A, et al. Variability of particulate matter concentrations along roads and motorways determined by a moving measurement unit[J]. *Atmospheric Environment*, 2004, 38(19): 2993-3002.
- [35] 白杨, 秦凯, 吴立新, 等. 徐州市区主干道黑炭气溶胶浓度移动观测实验 [J]. *地理与地理信息科学*, 2014, 30(1): 45-49.
- BAI Y, QIN K, WU L X, et al. A mobile measurement on black carbon concentrations along the main roads of Xuzhou downtown[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2014, 30(1): 45-49.
- [36] 崔爱伟, 苗纯萍, 何欢, 等. 基于移动观测的城市街道峡谷大气污染物时空分布特征 [J]. *生态学杂志*, 2022, 41(10): 2035-2042.
- CUI A W, MIAO C P, HE H, et al. Spatiotemporal distribution characteristics of air pollutants in urban street canyons as observed by mobile monitoring[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2022, 41(10): 2035-2042.
- [37] WALLACE J, CORR D, DELUCA P, et al. Mobile monitoring of air pollution in cities: the case of Hamilton, Ontario, Canada[J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2009, 11(5): 998-1003.
- [38] TARGINO A C, GIBSON M D, KRECL P, et al. Hotspots of black carbon and PM_{2.5} in an urban area and relationships to traffic characteristics[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 218: 475-486.
- [39] 王红丽, 高雅琴, 景盛翱, 等. 基于走航监测的长三角工业园区周边大气挥发性有机物污染特征 [J]. *环境科学*, 2021, 42(3): 1298-1305.
- WANG H L, GAO Y Q, JING S A, et al. Characterization of volatile organic compounds (VOCs) using mobile monitoring around the industrial parks in the yangzte river delta region of China[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(3): 1298-1305.
- [40] 高家乐, 乐昊, 盖鑫磊. 南京江北化工园区挥发性有机物走航观测 [J]. *环境工程*, 2021, 39(1): 89-95.
- GAO J L, LE H, GAI X L. Mobile measurement of ambient volatile organic compounds in the Jiangbei chemical industrial park of Nanjing, China[J]. *Environmental Engineering*, 2021, 39(1): 89-95.
- [41] 陈婷, 何潇, 陈文倩, 等. 基于车载测试的轻型汽车排放特征 [J]. *环境工程技术学报*, 2022, 12(4): 1033-1040.
- CHEN T, HE X, CHEN W Q, et al. Emission characteristics of light-duty vehicles based on portable emission measurement system (PEMS)[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022, 12(4): 1033-1040.
- [42] 葛蕴珊, 丁焰, 尹航. 机动车实际行驶排放测试系统研究现状 [J]. *汽车安全与节能学报*, 2017, 8(2): 111-121.
- GE Y S, DING Y, YIN H. Research status of real driving emission measurement system for vehicles[J]. *Journal of Automotive Safety and Energy*, 2017, 8(2): 111-121.
- [43] KAUR S, NIEUWENHUIJSEN M J, COLVILE R N. Fine particulate matter and carbon monoxide exposure concentrations

- in urban street transport microenvironments[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(23): 4781-4810.
- [44] NAZELLE D A, FRUIN S, WESTERDAHL D, et al. A travel mode comparison of commuters' exposures to air pollutants in Barcelona[J]. *Atmospheric Environment*, 2012, 59: 151-159.
- [45] MINGUILLÓN M C, BRINES M, PÉREZ N, et al. New particle formation at ground level and in the vertical column over the Barcelona area[J]. *Atmospheric Research*, 2015, 164/165: 118-130.
- [46] TANG G Q, ZHANG J Q, ZHU X W, et al. Mixing layer height and its implications for air pollution over Beijing, China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, 16(4): 2459-2475.
- [47] 李岳, 殷宝辉, 耿春梅, 等. 武清地区冬季一次重污染过程垂直分布特征 [J]. 环境科学研究, 2019, 32(6): 1012-1019.
- LI Y, YIN B H, GENG C M, et al. The vertical distribution of air pollutants in a typical winter haze episode in Wuqing area[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, 32(6): 1012-1019.
- [48] SCHUUR E A G, McGUIRE A D, SCHÄDEL C, et al. Climate change and the permafrost carbon feedback[J]. *Nature*, 2015, 520: 171-179.
- [49] KNORR W, JIANG L, ARNETH A. Climate, CO₂ and human population impacts on global wildfire emissions[J]. *Biogeosciences*, 2016, 13(1): 267-282.
- [50] ROBOCK A. Volcanic eruptions and climate[J]. *Reviews of Geophysics*, 2000, 38(2): 191-219.
- [51] PEKNEY N J, DIEHL J R, RUEHL D, et al. Measurement of methane emissions from abandoned oil and gas wells in Hillman State Park, Pennsylvania[J]. *Carbon Management*, 2018, 9(2): 165-175.
- [52] KOHNERT K, SERAFIMOVICH A, METZGER S, et al. Strong geologic methane emissions from discontinuous terrestrial permafrost in the Mackenzie Delta, Canada[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 1-6.
- [53] OBERLE F K J, GIBBS A E, RICHMOND B M, et al. Towards determining spatial methane distribution on Arctic permafrost bluffs with an unmanned aerial system[J]. *SN Applied Sciences*, 2019, 1(3): 236.
- [54] AURELL J, GULLETT B, HOLDER A, et al. Wildland fire emission sampling at Fishlake National Forest, Utah using an unmanned aircraft system[J]. *Atmospheric Environment*, 2021, 247: 118193.
- [55] SAMAD A, ALVAREZ FLOREZ D, CHOURDAKIS I, et al. Concept of using an unmanned aerial vehicle (UAV) for 3D investigation of air quality in the atmosphere: example of measurements near a roadside[J]. *Atmosphere*, 2022, 13(5): 663.
- [56] 陈鹏飞, 张蕾, 权建农, 等. 北京地区臭氧时空分布特征的飞机探测研究 [J]. 环境科学, 2012, 33(12): 4141-4150.
- CHEN P F, ZHANG Q, QUAN J N, et al. Temporal and spatial distribution of ozone concentration by aircraft sounding over Beijing[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2012, 33(12): 4141-4150.
- [57] 刘思晗, 王红磊, 赵德龙, 等. 京津冀地区一次复合污染过程中气溶胶和 BC 垂直分布特征的飞机观测 [J]. 地球与环境, 2023, 51(5): 537-548.
- LIU S H, WANG H L, ZHAO D L, et al. Aircraft observation of aerosol and black carbon aerosol vertical distribution during a complex air pollution process in the Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *Earth and Environment*, 2023, 51(5): 537-548.
- [58] 谢文琪, 姚波, 吴国明, 等. 河北省中南部二氧化碳浓度的飞机探测研究 [J]. 中国环境科学, 2023, 43(2): 525-531.
- XIE W Q, YAO B, WU G M, et al. Airborne observation of carbon dioxide concentration in central and southern Hebei Province[J]. *China Environmental Science*, 2023, 43(2): 525-531.
- [59] 赵德龙, 肖伟, 杨燕, 等. 北京冬季重污染过程黑碳气溶胶的飞机观测 [J]. 中国环境科学, 2021, 41(12): 5539-5547.
- ZHAO D L, XIAO W, YANG Y, et al. Aircraft observation of black carbon aerosols during heavy pollution in winter in Beijing[J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(12): 5539-5547.
- [60] GÅLFALK M, NILSSON PÅLEDAL S, BASTVIKEN D. Sensitive drone mapping of methane emissions without the need for supplementary ground-based measurements[J]. *ACS Earth and Space Chemistry*, 2021, 5(10): 2668-2676.
- [61] ALVARADO M, GONZALEZ F, ERSKINE P, et al. A methodology to monitor airborne PM₁₀ dust particles using a small unmanned aerial vehicle[J]. *Sensors*, 2017, 17(2): 343.
- [62] IWASZENKO S, KALISZ P, SŁOTA M, et al. Detection of natural gas leakages using a laser-based methane sensor and UAV[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(3): 510.
- [63] BURGUÉS J, ESCLAPEZ M D, DOÑATE S, et al. RHINOS: a lightweight portable electronic nose for real-time odor quantification in wastewater treatment plants[J]. *iScience*, 2021, 24(12): 103371.
- [64] DAUGĒLA I, SUZIEDELYTE VISOCKIENE J, KUMPIENE J. Detection and analysis of methane emissions from a landfill using unmanned aerial drone systems and semiconductor sensors[J]. *Detritus*, 2020, 10: 127-138.
- [65] MA J Z, WANG W, LIU H J, et al. Pollution plumes observed by aircraft over North China during the IPAC-NC field campaign[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(34): 4329-4336.
- [66] ZAVERI R A, BERKOWITZ C M, BRECHTEL F J, et al. Nighttime chemical evolution of aerosol and trace gases in a power plant plume: implications for secondary organic nitrate and organosulfate aerosol formation, NO₃ radical chemistry, and N₂O₅ heterogeneous hydrolysis[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2010, 115(D12): 1-22.
- [67] ARAUJO J O, VALENTE J, KOOISTRA L, et al. Experimental flight patterns evaluation for a UAV-based air pollutant sensor[J]. *Micromachines*, 2020, 11(8): 768.
- [68] VINKOVIĆ K, ANDERSEN T, de VRIES M, et al. Evaluating the use of an unmanned aerial vehicle (UAV)-based active AirCore system to quantify methane emissions from dairy cows[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 831: 154898.
- [69] HATAKEYAMA S, MURANO K, BANDOW H, et al. The 1991 PEACAMPOT aircraft observation of ozone, NO_x, and SO₂ over the East China Sea, the Yellow Sea, and the Sea of Japan[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1995, 100(D11): 23143-23151.
- [70] YANG X Y, JI D S, LI J W, et al. Impacts of springtime biomass burning in Southeast Asia on atmospheric carbonaceous components over the Beibu Gulf in China: insights from aircraft observations[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 857: 159232.
- [71] WU H H, TAYLOR J W, SZPEK K, et al. Vertical variability of the properties of highly aged biomass burning aerosol transported over the southeast Atlantic during CLARIFY-2017[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, 20(21): 12697-

- 12719.
- [72] SMITH S R, ALORY G, ANDERSSON A, et al. Ship-based contributions to global ocean, weather, and climate observing systems[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2019, 6: 434.
- [73] WANNINKHOF R, PICKERS P A, OMAR A M, et al. A surface ocean CO₂ reference network, SOCONET and associated marine boundary layer CO₂ measurements[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2019, 6: 400.
- [74] CARSLAW K S, LEE L A, REDDINGTON C L, et al. Large contribution of natural aerosols to uncertainty in indirect forcing[J]. *Nature*, 2013, 503(7474): 67-71.
- [75] DUCE R A, LISS P S, MERRILL J T, et al. The atmospheric input of trace species to the world ocean[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1991, 5(3): 193-259.
- [76] SRINIVAS B, SARIN M M. Atmospheric pathways of phosphorous to the Bay of Bengal: contribution from anthropogenic sources and mineral dust[J]. *Tellus Series B: Chemical and Physical Meteorology*, 2012, 64(1): 1-12.
- [77] GOLOBOKOVA L, KRUGLINSKY I, POCHUFAROV A, et al. Chemical composition of atmospheric aerosol in Arctic regions in summer 2021[J]. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2023, 59(Suppl 1): S70-S80.
- [78] SUN Q B, LIANG B L, CAI M F, et al. Cruise observation of the marine atmosphere and ship emissions in South China Sea: aerosol composition, sources, and the aging process[J]. *Environmental Pollution*, 2023, 316: 120539.
- [79] 孔少飞, 陆炳, 韩斌, 等. 天津近海大气中 CH₄, N₂O 和 CO₂ 季节变化分析 [J]. *中国科学 (地球科学)*, 2010, 40(5): 666-676.
- KONG S F, LU B, HAN B, et al. Analysis of seasonal variation of CH₄, N₂O and CO₂ in Tianjin offshore atmosphere[J]. *Scientia Sinica (Terra)*, 2010, 40(5): 666-676.
- [80] 李嘉鑫, 臧昆鹏, 林溢, 等. 海洋大气二氧化碳船基走航连续观测数据的质量控制方法 [J]. *环境化学*, 2022, 41(10): 3335-3344.
- LI J X, ZANG K P, LIN Y, et al. Study of data quality assurance/control on the shipborne continuous CO₂ observations[J]. *Environmental Chemistry*, 2022, 41(10): 3335-3344.
- [81] 盛立芳, 高会旺, 张英娟, 等. 夏季渤海 NO_x、O₃、SO₂ 和 CO 浓度观测特征 [J]. *环境科学*, 2002, 23(6): 31-35.
- SHENG L F, GAO H W, ZHANG Y J, et al. Observational characteristics of the concentrations of NO_x, O₃, SO₂ and CO over Bohai Sea in summer[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2002, 23(6): 31-35.
- [82] 石金辉, 张云, 高会旺, 等. 东海大气气溶胶的化学特征及来源 [J]. *环境科学学报*, 2011, 31(8): 1750-1757.
- SHI J H, ZHANG Y, GAO H W, et al. Characteristics and sources of atmospheric aerosols over the East China Sea[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(8): 1750-1757.
- [83] 盛立芳, 郭志刚, 高会旺, 等. 渤海大气气溶胶元素组成及物源分析 [J]. *中国环境监测*, 2005, 21(1): 16-21.
- SHENG L F, GUO Z G, GAO H W, et al. Preliminary study on Element composition and source apportionment of atmospheric aerosol over Bohai Sea[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2005, 21(1): 16-21.
- [84] 薛磊, 张洪海, 杨桂朋. 春季黄渤海大气气溶胶的离子特征与来源分析 [J]. *环境科学学报*, 2011, 31(11): 2329-2335.
- XUE L, ZHANG H H, YANG G P. Characteristics and source analysis of atmospheric aerosol ions over the Yellow Sea and the Bohai Sea in spring[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(11): 2329-2335.
- [85] LIANG B L, CAI M F, SUN Q B, et al. Source apportionment of marine atmospheric aerosols in northern South China Sea during summertime 2018[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 289: 117948.
- [86] YANG X Y, GAO Y G, LI Q B, et al. Maritime and coastal observations of ambient PM_{2.5} and its elemental compositions in the Bohai Bay of China during spring and summer: levels, spatial distribution and source apportionment[J]. *Atmospheric Research*, 2023, 293: 106897.
- [87] 付丹. 中国近海至南大洋大气 NO_x 及气溶胶中金属元素和 PAHs 分布特征及源解析 [D]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2017.
- [88] 张敏. 远洋船基及上海地基大气气溶胶理化特性研究 [D]. 上海: 复旦大学, 2011.
- [89] ÜNLÜGENÇOĞLU K, KÖKKÜLÜNK G, ALARÇIN F. Estimation of shipping emissions via novel developed data collecting and calculation software: a case study for the Region of Ambarlı Port[J]. *International Journal of Global Warming*, 2019, 19(3): 293.
- [90] EYRING V, KÖHLER H W, van AARDENNE J, et al. Emissions from international shipping: 1. the last 50 years[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2005, 110(D17): 1-12.
- [91] BAI C J, LI Y, LIU B X, et al. Gaseous emissions from a seagoing ship under different operating conditions in the coastal region of China[J]. *Atmosphere*, 2020, 11(3): 305.
- [92] WINNES H, FRIDELL E. Emissions of NO_x and particles from manoeuvring ships[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2010, 15(4): 204-211.
- [93] COOPER D A. Exhaust emissions from ships at berth[J]. *Atmospheric Environment*, 2003, 37(27): 3817-3830.
- [94] van CHU T, RISTOVSKI Z, POURKHESALIAN M A, et al. On-board measurements of particle and gaseous emissions from a large cargo vessel at different operating conditions[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 237: 832-841.
- [95] WINNES H, FRIDELL E. Particle emissions from ships: dependence on fuel type[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2009, 59(12): 1391-1398.
- [96] WINNES H, MOLDANOVA J, ANDERSON M, et al. On-board measurements of particle emissions from marine engines using fuels with different sulphur content[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 2016, 230(1): 45-54.
- [97] FU M L, DING Y, GE Y S, et al. Real-world emissions of inland ships on the Grand Canal, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 81: 222-229. □