

大气PM_{2.5}与挥发性有机物协同监测技术应用分析

李锐

沈阳市生态环境事务服务中心

DOI:10.32629/eep.v9i7.3261

[摘要] 我国目前的大气污染问题表现为细颗粒物(PM_{2.5})和臭氧互相影响的情况,挥发性有机物(VOCs)属于两者形成与转变的主要中间物质,它的排放量也成为空气质量改良的重要影响要素之一。传统只针对一种污染物进行监测的方式已经不能满足现代环境治理对准确、高效的要求。本文主要针对PM_{2.5}、VOCs的协同监测技术展开研究,从理论上出发,探究关键技术体系,同时对已有的主要协同监测方法的技术特点及实际应用效果进行了详细的总结。对区域污染源追踪、环境质量预报预警、企业排放监管等典型应用加以研究剖析,努力创建起一条包含多种污染物的综合监控体系,给完成生态环境协同治理和科学决策赋予参考。

[关键词] 大气PM_{2.5}; 挥发性有机物; 协同监测技术应用

中图分类号: X513 **文献标识码:** A

Analysis of the Application of Coordinated Monitoring Technology for Atmospheric PM_{2.5} and Volatile Organic Compounds

Rui Li

Shenyang Environmental Affairs Service Center

[Abstract] Currently, the air pollution problem in China is characterized by the mutual influence between fine particulate matter (PM_{2.5}) and ozone. Volatile organic compounds (VOCs) are the main intermediate substances in the formation and transformation of both, and their emissions also constitute one of the important influencing factors for improving air quality. The traditional approach of monitoring only one pollutant cannot meet the modern environmental governance requirements for accuracy and efficiency. This paper mainly conducts research on the coordinated monitoring technology for PM_{2.5} and VOCs, starting from theory, exploring the key technical system. At the same time, it summarizes the technical characteristics and practical application effects of the main coordinated monitoring methods. The typical applications such as regional pollution source tracking, environmental quality forecast and warning, and enterprise emission supervision are studied and analyzed, striving to create a comprehensive monitoring system covering multiple pollutants, providing a reference for completing ecological environment coordinated governance and scientific decision-making.

[Key words] Atmospheric PM_{2.5}; Volatile Organic Compounds; Coordinated Monitoring Technology Application

在国家大力推动大气污染防治的大背景下,依靠煤炭为主的污染源已经取得了初步的治理效果。目前我国大气污染特征正向PM_{2.5}和臭氧共同影响造成的复合型污染方向转变,其形成机理越来越复杂,治理难度也越来越大。挥发性有机化合物(VOCs)作为臭氧形成的重要前体物之一,也是细颗粒物PM_{2.5}中二次有机气溶胶的重要来源,与以上污染物存在着多层次的相互影响关系。本文结合国内外的相关研究以及技术实践案例,对VOCs、PM_{2.5}、臭氧三者联合作出阐述,并对它们的技术原理、分类方式、应用现状进行分析,在此基础上指出目前存在的问题以供后续技术开发及工程实施参考。

1 大气PM_{2.5}与VOCs污染协同转化机理及监测必要性

1.1 污染物协同转化机理

细颗粒物(PM_{2.5})是指直径小于或者等于2.5微米的颗粒物,化学组成有无机盐类、有机化合物和含碳物质等。二次有机气溶胶占PM_{2.5}总质量的比例大于30%,是决定空气质量的重要因素之一。挥发性有机物(VOCs)指的是在常温下具有高挥发性的碳氢化合物,它出现在工业生产、机动车尾气排放、餐饮活动、溶剂使用等各个方面。除了自身所具有的健康危害之外,VOCs还会经由光化学反应生成臭氧以及二次有机气溶胶,从而推动

气体污染物转变成颗粒态污染物。大气系统复杂的时候, VOCs浓度分布和组分特性对二次PM_{2.5}形成机制以及累积变化有重要影响。同时PM_{2.5}颗粒表面属于重要的气固两相界面, 极大地加快了VOCs的氧化降解速度, 这是复合型空气污染一直存在的根本原因以及不断恶化的原因。

1.2 协同监测的应用价值与政策依据

根据“十四五”全国细颗粒物和臭氧协同控制监测网络能力建设方案可知, 在重点区域要改善PM_{2.5}和VOCs的协同监测站点布局, 并创建起包含多种参数的综合大气污染观测体系, 从而促使大气污染防治策略由分散减排向整体联防联控转变。传统的监测技术有明显的不足之处, PM_{2.5}检测大多采用重量法或者 β 射线衰减法, VOCs分析一般要借助离线采样加实验室测定的方式来进行, 这样的操作过程容易造成时间序列上的差异、空间分布上不均衡的情况出现, 而且数据之间的联系也不够紧密, 不能很好地解决复杂的环境下对原因的诊断以及机制的阐释问题。

2 PM_{2.5}与VOCs主流协同监测技术类型

2.1 在线光谱协同监测技术

一体化在线光谱协同监测系统将差分吸收光谱分析与激光散射粒子检测结合起来, 主要用作PM_{2.5}和VOCs的同步检测。在PM_{2.5}检测上, 该系统把激光散射效应和 β 射线衰减机制融合起来, 再用双重校准算法, 准确得到颗粒浓度数据; 它的工作原理是利用颗粒物对入射激光散射强度产生影响而形成的改变, 然后再加上湿度以及粒径分布修正因子来达到在高湿度情况下依旧能够取得良好测量结果的效果。VOCs监测主要采用傅里叶变换红外光谱技术以及差分吸收光谱分析技术, 可以对苯系物、烷烃、醛酮类等多种污染物进行跟踪, 并给出各个VOCs组分浓度分布图谱信息^[1]。该综合性技术路线很好地提高了环境质量评价和污染源追踪水平。该技术最突出的优势就是有很好的即时反应能力、不需要化学试剂参与、运维成本低, 能够在几分钟内完成数据采集并且连续监测, 完全符合城市环境空气质量监控站运行的实际需要。目前主流的商业应用都采用了多传感器集成方案, 可以同时测定PM_{2.5}浓度、总挥发性有机物(TVOC)及其各个子组分, 并且具有很高的测量精确度和稳定性。

2.2 质谱联用协同监测技术

高精尖分析技术的代表就是质谱联用协同监测体系, 它把气溶胶汽化进样装置和质子转移反应飞行时间质谱仪的功能集成在一起。该技术在科学研究、精密溯源分析中具有很重要的价值, 主要是用气溶胶汽化进样模块对PM_{2.5}中的有机物进行快速挥发, 再利用质子转移反应飞行时间质谱仪同时完成气相挥发性有机化合物(VOCs)和颗粒态有机组分的定性定量测定, 进而全面认识有机气溶胶的分子结构及其挥发性有机化合物的组成构成^[2]。与传统的光谱分析相比, 质谱联用技术的灵敏度和分辨率要高出许多, 可以对上百种挥发性有机物(VOCs)、细颗粒物(PM_{2.5})等各种有机化合物进行准确检测, 而且可以对它们的空间分布情况进行详细的跟踪。该技术对于复杂环境问题的溯源

有重要的作用, 对于工业污染源的识别也有着重要的意义, 在科研领域也有着十分重要的应用前景, 可以对气溶胶相和颗粒态有机物同时进行分析, 进而认识VOCs向二次PM_{2.5}转化的主要化学机理。由于研发成本高、复杂的设备运维要求以及专业技术人才缺乏等问题, 高端分析手段还不能推广到基层常规监测网络中, 目前大多应用在高级超级站或者环保专项任务上^[3]。

3 协同监测技术的实际应用场景

3.1 区域复合型污染成因溯源

复合型大气污染治理存在许多问题, 其根本原因是复杂的排放源和多样的污染物种类, 单一指标监测不能全面认识本地排放和区域输送, 一次生成与二次转化之间存在的内在联系。因此, 协同监测技术应运而生。利用同步采集PM_{2.5}浓度变化、VOCs组分分布及气象情况等多种信息的方法来完成研究目的, 既可找出污染物传输机制, 也能判定污染物来源。在处理城市重污染时, 以VOCs关键活性组分的时间序列数据为基础, 并且考虑PM_{2.5}二次颗粒物所占比例的资料可以较为准确地判定二次污染的贡献程度以及其作用强弱, 从而辨别出工业废气、机动车尾气和扬尘这三大类主要污染物给空气质量下降带来了怎样的影响途径。

依靠多节点协同监测网络, 区域联防联控机制可以准确地找出污染物在空间上怎样移动, 它的扩散速度是多少, 又会影响到哪些区域, 给跨区域合作治理和差别化防控手段的形成赋予了决策支撑^[4]。

3.2 空气质量精准预警与管控

重污染天气预警的主要目的就是准确预测环境污染物爆发的规律。传统的预警方式都是只关注某一个指标, 即PM_{2.5}的浓度或者臭氧水平, 这样的反应速度迟缓, 准确度不高。而新一代的协同监测技术预警体系可以直接获得PM_{2.5}、VOCs这些关键指标的数据, 结合气象因素及历史污染模式来建立一个综合性的预测模型, 进而达到提前发现二次污染物产生的目的, 预警速度也得到了明显提高。该系统依靠对高活性VOCs累积趋势以及与其相伴随的理想气象状况进行实时监控, 可以事先发出预警信号, 从而给相应的应对措施留出足够的时间, 进而加强决策支持的效果。

4 协同监测技术应用现存问题

4.1 设备性能适配性参差不齐

目前市场上的协同监测设备呈现出明显的多元化特征, 各个生产厂家的产品在传感器响应精度、数据处理算法和信号校正技术等各方面存在较大的差别, 从而导致数据采集的一致性以及可比性受到限制。在湿度大、粉尘含量多或者多种污染共存的工况之下, 低端仪器容易产生数值漂移和测量误差, 不能达到准确检测的要求, 高端质谱分析仪虽然性能优越, 但是价格昂贵、操作复杂, 在基层站点和偏远地区应用受限较多。部分现有装置只能得到挥发性有机物(VOCs)总量的信息, 而不能对具体组分进行有效识别, 对于用这种技术开展环境污染源追踪的研究造成了较大的阻碍。

4.2数据联动分析体系不完善

目前环境监测体系当中存在着数据孤岛情况,PM_{2.5}和挥发性有机物(VOCs)的数据各自被置于不同的系统里,并没有构建起涵盖各个方面的综合分析架构。尽管大多数监测平台可以进行污染物的实时同步采集,但是有关PM_{2.5}和VOCs相互作用机理的研究工具还很欠缺,使得其协同演化规律、临界阈值以及响应特性不能得到充分的研究。由于数据融合方面,监测信息同气象状况、污染源排放特性、区域扩散趋向这些众多异构数据之间的深度联系还没有被充分揭示,这对环境质量全面评价模型的创建造成了阻碍,并且降低了监测结果对于污染防治实践活动的引导作用,总体上数据分析的效能还有待提高^[5]。

5 协同监测技术优化与发展对策

5.1优化设备技术与场景适配能力

按照国家技术标准体系来创建包含技术指标、检测方法以及质量控制等方面统一的规范框架,促使协同监测设备的标准化研发工作顺利开展,改善行业市场化运营秩序,提升跨平台数据一致性、兼容性。根据实际情况来制订不同的设备配置方案,城市常规监测点优先选择经济型、可靠性高的光学光谱分析仪器,对重点工业区和高污染区安装高灵敏度质谱仪,供基层执法机关和应急救援机构使用,佩戴便携式快速测定装置。采用技术创新提高预处理单元的功能,在高湿、高粉尘的环境中也能保证设备能够正常运行,并且可以提高微量组分的分析精度,从而全方位提高设备的实际应用范围和综合性能表现。

5.2构建智能化数据联动分析平台

创建起一体化生态环境综合监测分析平台,将PM_{2.5}、挥发性有机物(VOCs)、大气其它参数以及污染源排放数据等各类数据集中在一起加以融合,从而达到统一存储、规范化管理并且实现跨域关联解析的目的。依靠大数据技术架构和先进的机器学习算法,创建污染物协同演化机制模型,溯源追踪模型,智能预测预警系统,细致探究PM_{2.5}同VOCs之间的互动影响机理,确定主因贡献因子,弄清极端污染事件出现的规律。利用可视化的方法将区域环境质量空间分布情况和变化趋势以图的形式展现出来,给生态保护决策提供可靠的数据支持,提高监测结果的实际运用能力。

5.3完善标准化质控与运维管理体系

按照国家大气环境监测技术规范要求,必须创建起包含协同监测全生命周期质量控制体系,对设备选型、布置位置、定时校准、日常保养、数据审查这些关键部分做出具体的技术标准

和操作规程,从而达成监测工作标准化的治理目标。要依靠周期性零点校准、量程校验和比对观测这些质控办法,及时找出并解决问题在使用过程中出现的状况,保证所得到的数据是真实的、正确的。应加强基层技术人员的培训,主要提高他们对高端仪器的操作能力、质量评价以及数据分析等各方面的能力,从而提高设备的运维水平。建立健全动态监测网络评价机制,对设备进行定期的性能检测及综合评价,淘汰不合格的检测仪器,保证整个检测系统高效可靠地工作。

6 结束语

综上所述,PM_{2.5}和VOCs共同监测技术属于一种综合性的大气污染治理技术体系,是环境精细化管理的重要支撑,也符合我国多污染物协同控制的战略要求。本文对三种主流协同监测技术的理论基础和实践优势进行了系统的阐述,并且对它们在污染源识别、风险评价预警和行政执法等各个方面的应用价值做了详细的分析。从上面的研究结论可以看出,该领域存在仪器设备兼容性差、数据融合不好、质量控制体系不健全等各个方面的问题。依靠技术创新推动、信息化平台的整合优化、标准体系的构建形成新的局面,促使协同监测技术朝向集成化、精准化、智能化的方向发展,提高监测数据的决策支持能力,改善空气质量并且健全生态环境治理体制。

[参考文献]

- [1]欧盛菊,管欣,莫声乾,等.2015—2022年广西大气PM_{2.5}和O₃复合污染特征及成因分析[J].环境监控与预警,2026,18(4):1-8.
- [2]康真,刘洋,付饶,等.哈尔滨市大气PM_{2.5}中多环芳烃的源解析和人群致癌风险评价[J].公共卫生与预防医学,2026,37(4):6-10.
- [3]崔耀,顾雪松,蒋晓晓.无人机技术在大气PM_{2.5}监测中的应用[J].科技创新与应用,2026,16(19):169-172.
- [4]许枋天,王晓聪,王依婷.多尺度机制与大气环流驱动下的云贵高原边缘城市PM_{2.5}-O₃复合污染研究[J].四川环境,2026,45(3):26-34.
- [5]范梦超,商蕾,王火青,等.2020—2024年邢台市大气PM_{2.5}中水溶性阴离子特征分析[J].职业与健康,2026,42(12):1660-1663+1669.

作者简介:

李锐(1977—),男,黑龙江省哈尔滨市人,高级工程师,博士,研究方向:环境监测。