

解码大气奥秘：质谱学在环境监测中的奇妙应用

郭盼盼

广州禾信仪器股份有限公司, 广东 广州 510700

DOI: 10.61369/SSSD.2025110001

摘 要： 本文基于“解码大气奥秘：质谱学在环境监测中的奇妙应用”，阐述质谱学应用意义与路径。意义方面，能够突破传统监测局限，精准识别和量化大气污染物；为大气污染溯源提供助力，让污染治理更具科学依据；采用新型大气污染物监测方法，迎接环境监测严峻挑战。路径方面：采取从质谱技术的特性出发，满足监测场景需求；基于色谱联用技术，提升大气污染物分离与检测能力等策略，让大气环境监测与治理不再是难题，而是具备关键技术支撑。

关 键 词： 大气奥秘；质谱学；环境监测；应用

Decoding the Mysteries of the Atmosphere: The Wonderful Application of Mass Spectrometry in Environmental Monitoring

Guo Panpan

Guangzhou Hexin Instrument Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510700

Abstract： Based on the theme of "Decoding the Mysteries of the Atmosphere: The Wonderful Application of Mass Spectrometry in Environmental Monitoring", this paper expounds the significance and application paths of mass spectrometry. In terms of significance, it can break through the limitations of traditional monitoring, accurately identify and quantify atmospheric pollutants; provide support for the source tracing of air pollution, making pollution control more scientifically based; and adopt new monitoring methods for atmospheric pollutants to meet the severe challenges of environmental monitoring. In terms of application paths: strategies such as starting from the characteristics of mass spectrometry technology to meet the needs of monitoring scenarios, and based on chromatography coupling technology to improve the separation and detection capabilities of atmospheric pollutants are adopted. These measures make atmospheric environmental monitoring and governance no longer a problem, but equipped with key technical support.

Keywords： atmospheric mysteries; mass spectrometry; environmental monitoring; application

大气对于地球生命来说是一道无形屏障，其成分是否平衡直接关系到人类的生命健康、全球气候变化等^[1]。随着经济的发展和社会的进步，城市化进程不断加速，全球正面临着大气污染这一环境难题，PM2.5、二氧化硫、VOCs等各类污染物层出不穷，其自身具备的痕量、复杂等特征，导致传统的检测技术失效。传统的监测方法如分光光度法、电化学传感器法等，尽管具有诸多优势，如操作便利、成本较低，但也存在一些局限，如灵敏度较低（无法对ppb/ppt级痕量的污染物进行监测）、特异性水平不高（容易受复杂基质的干扰）等，既不利于精准溯源，也会对实时预警造成不利影响。质谱学具有高灵敏度、高分辨率、多组分同时分析的显著优势，让大气奥秘不复存在，成为解码该奥秘的秘密武器，有人曾将其比喻为显微镜，即能对大气中的污染物进行精准识别，甚至能够对万亿分之一浓度的痕量物质进行有效捕捉，以便解析大气污染来源，开展过程管控，并为后续的应急处置奠定基石，使其具备一手数据支撑^[2]。

一、质谱学在环境监测中的奇妙应用意义

（一）突破传统监测局限，精准识别和量化大气污染物

以往的大气环境监测手段主要采用化学分析法、光学传感器，往往能够胜任简单的大气组分的监测，但当其组分较为复杂的时候，则存在一定的局限，如识别的精度不足、受诸多因素干扰等^[3]。如，大气中微量的挥发性有机化合物（VOCs），如果采用传统方法，往往无法精准区分，这里主要指的是区分烷烃、烯

烃与芳香烃，此外，也无法精准捕捉它在不同的时段和区域产生的变化。质谱学以高分辨率和灵敏度优势，有利于突破局限，便于对大气污染物进行精准识别和量化分析^[4]。

质谱学能够对大气样品进行离子化，基于离子的质荷比差异分离、检测污染物，能够对大气中痕量、超痕量污染物成分进行精准识别，判断其属于哪种污染物，如重金属离子、持久性有机污染物（POPs）等，此外，还能精准量化污染物浓度，具有较高的检测限，即达到了纳克级甚至是皮克级。这对于科研人员、

监测人员来说,无疑是提供了可靠资料,便于他们分析大气污染物,了解其种类构成、分布规律等,让污染源和风险评估具有了数据依据,有利于打破传统检测困境,助力大气监测环境转型,即从以往的模糊判断转变为精准解码^[5]。

(二) 为大气污染源提供助力,让污染治理更具科学依据

想要有效治理大气污染,重点为明确其来源、确定污染物传输的路径。实际上,大气一直处于动态流动状态,污染物会受多种气象因素的影响,如风力、湿度等,传输和转化不仅会跨区域还会跨层级,如果采用传统的监测手段,往往无法对污染物的迁移轨迹进行有效、完整追踪,使得溯源工作陷入被动局面。质谱学的出现和应用则有利于解决上述问题,为其溯源和传输路径的解析提供了新的思路,让污染治理决策具有了导航仪的功能^[6]。

监测人员可利用质谱学技术对该污染物的指纹特征加以捕捉。如果污染物来源不同,如有的来自工业排放,有的则属于机动车排放的尾气,其在组分构成、与同位素丰度方面存在显著不同,质谱学对于这些差异能够进行精准识别,并基于来源特征建立谱库。把不同区域、不同时间段的监测数据和谱库进行比对,并基于大气扩散这一模型进行反向推导,由此得出污染物的主要排放源;与此同时,通过实时监测该污染物,如梯度浓度和组分变化等,有利于明确污染物传输路径,勾勒其转化过程,如对某区域的PM_{2.5}进行有效识别,判断其来源,是否为本地排放还是外来传输,在传输时是否和其他污染物产生化学反应^[7]。上述信息对于环保部门而言具有积极意义,有利于其针对污染制定治理方案,并赋予该方案差异化基因,此外,也为其开展联防联控创造了有利条件,使其具备了科学依据,助力污染治理转型升级,即从以往的盲目施策转变为精准发力^[8]。

(三) 采用新型大气污染物监测,迎接环境监测严峻挑战

当下,人类活动的范围正在逐步扩大,加之工业技术的不断发展,使得大气环境中的污染物越来越多,种类也日益丰富,如微塑料、全氟化合物(PFCs)等。和传统的污染物相比,它们具有难降解、毒性强、易累积、浓度低等特点,如果采用传统的检测手段往往效果不佳,即监测方法针对性不强,不能有效捕捉。在此背景下,质谱学监测脱颖而出。该监测方法具有强大的组分分析能力与灵活的技术适配性,能够对新型污染物进行有效监测,满足其监测需求,是应对严峻监测挑战的重要途径^[9]。

质谱学不仅能对离子源类型进行调整,还能对检测参数进行优化,同时,借助色谱联用技术来建立监测方法,以便对新型污染物进行有效监测。如针对大气悬浮的微塑料颗粒,可采用热解吸-气相色谱-质谱联用技术,对微塑料进行分解,使其变为特征小分子片段,在此基础上进行识别和定量;针对具有较强挥发性的PPCPs,为了检测其痕量浓度,可采用高灵敏度的三重四极杆质谱。除此之外,质谱学能够对新型污染物进行实时跟踪,以便于了解其在大气浓度当中的变化,分析其转化趋势,从而能更好地把握其对于人和生态环境的影响。面对新型污染物,质谱学表现出了较强的监测能力,既是对传统监测技术的突破,又有助于监测工作转型,使其从以往的被动跟随转变为主动预判,通过将这类污染风险扼杀在摇篮中,有利于为大气环境安全树立保护

屏障^[10]。

二、质谱学在环境监测中的奇妙应用路径

(一) 从质谱技术的特性出发,满足监测场景需求

质谱学不属于单一技术,实际上它包含的技术类型众多。质谱技术类型不同,具有的优势也不尽相同,如有的优势体现在分辨率方面,有的则是具有较高的灵敏度,还有的是在监测速度方面具有优势等,有利于满足多样化的监测场景需求。从监测需求出发,选择质谱技术,有利于充分发挥其在环境监测当中的作用。

针对实验室这一分析场景,由于其对于精度具有较高的要求,应选择高分辨率质谱技术,如FT-ICR-MS或高分辨飞行时间质谱(HR-TOF-MS)。对该类技术进行分析,发现其具备较高的质荷比分辨率(可达 10^6 以上),除了能对大气中复杂的污染物组分进行准确识别之外,还能对同分异构体与同位素进行有效区分,可将其用在大气污染物精细组分分析、转化机制等方面的研究中。如借助HR-TOF-MS分析大气颗粒物中的有机物,区分多环芳烃(PAHs),便于后续对其毒性、来源特征等方面进行深入研究。

针对野外现场、应急领域的监测,选择的质谱技术应具备便携性强、检测速度快等特征,如便携式四极杆质谱、实时直接分析质谱(DART-MS)等。该技术能够对大气污染物进行实时在线监测,适用的场景如下:突发的环境污染,如有毒、有害气体泄漏;对偏远地区的大气质量进行移动监测,便于监测人员及时了解监测情况,并以此为依据制定应急处置方案,有利于提高该方案的科学性。

(二) 基于色谱联用技术,提升大气污染物分离与检测能力

对大气环境进行分析,发现其污染物组分较为复杂,包含无机物、有机物、同系物、同分异构体,如果监测时直接采用质谱技术往往效果不佳,即发生离子峰重叠、干扰信号多等问题,导致监测结果失真。把该技术和色谱技术进行联用,借助色谱自身的分离能力和质谱的检测能力,有利于解决这一问题。在此过程中,应注重两大能力的结合,从而提升大气污染物分离与检测能力。

气相色谱-质谱联用(GC-MS)技术主要是对大气中挥发性与半挥发性有机污染物进行监测。其中,气相色谱从污染物沸点出发,结合极性差异,能够对混合物进行分离,尤其是那些复杂的混合物,使其变为单一组分,然后借助质谱开展逐一检测,有利于解决污染物干扰的问题。液相色谱-质谱联用(LC-MS)技术主要是对大气中极性较强、热稳定性差的污染物进行监测,如部分PPCPs、PFCs等。液相色谱借助液体流动来对污染物进行分离,接下来充分利用质谱的检测优势,以有效捕捉这类难挥发物。除此之外,还可将该技术和预处理技术进行有效结合,以提高检测效率,尤其是针对大气当中的痕量污染物效果更佳,此外,针对复杂的大气组分,也有利于构建分离检测的完整闭环,有利于精准分析的全面落地。

（三）建设质谱监测网络，对大气环境进行动态监控

想要了解大气环境状况，不能采用单一的质谱监测点位，特别是在区域尺度的大气污染防治中，除了了解污染物自身的时间变化规律，还要全面把握其空间分布、传输规律。构建质谱监测网络，注重网络覆盖的区域和层级，整合分析质谱监测站点数据，以便全方位监控大气环境，并通过这种动态化监控，充分发挥质谱学在环境监测中的作用。

为了构建该监测网络，可基于区域功能来设置监测站点，并注重站点的类型：针对城市的核心区域，设置的监测站点应为固定在线站，从而对交通源、工业源排放的污染物浓度进行实时监测；针对广大的郊区或农村地区，设置的监测站点应为移动站，通过车载或无人机来搭载便携式质谱仪，从而对该区域进行灵活监测。这种监测模式，有利于打破以往的监测局限，为相关工作者的了解大气环境状况创造了有利条件，此外，通过提供数据共享

平台，有利于区域的联防联控，同时，也为跨部门协同治理提供了便利，助力污染治理的转型升级，即从以往的单点防控顺利转变为全域协同，推动大气环境管理迈向精细化和智能化阶段。

三、结语

总之，质谱学具有高分辨率和灵敏度方面的显著优势，有利于突破大气环境监测的传统局限，让污染溯源不再是难题，同时，也能有效应对新型污染物的严峻挑战。未来，质谱技术将会和大数据、AI 进行深度融合，这无疑会进一步发挥其在大气环境治理当中的功效，从而在进行精准治污的同时，也能科学护蓝，为大气环境守护具有了更为坚实的技术护航，同时，也有助于破解大气奥秘。

参考文献

- [1] 宋俊超. 环境空气监测全程质量控制的分析 [J]. 黑龙江环境通报, 2024 (5) : 66-68.
- [2] 李虹霖, 秦忠雪, 袁悦, 等. 超声提取-气相色谱串联质谱法测定大气颗粒物 PM_{2.5} 中 18 种多氯联苯 [J]. 预防医学情报杂志, 2025 (1) : 131-137.
- [3] 王其臣. 水环境中有机污染物监测存在的问题与优化对策 [J]. 皮革制作与环保科技, 2023 (2) : 59-61.
- [4] 张艳飞. 顶空 / 气相色谱-质谱法测定水中的挥发性有机物 [J]. 中国资源综合利用, 2023 (12) : 51-54.
- [5] 吴丽娟, 杨丽莉, 胡恩宇, 等. 气相色谱-质谱法测定土壤中 14 种苯胺类和联苯胺类化合物 [J]. 色谱, 2023 (12) : 1127-1134.
- [6] 吴娟. 气相色谱-质谱联用技术在环境检测中的应用 [J]. 科学与财富, 2021, 13(1):310.
- [7] 蒋欢. 基于气相色谱-质谱联用技术的环境检测研究 [J]. 电脑爱好者 (普及版) (电子刊), 2021(9):2765-2766.
- [8] 王雪松. 气相色谱-质谱联用测定水源中联苯胺 [J]. 建筑工程技术与设计, 2021(23):2230.
- [9] 何宁, 王玲, 郝红霞. 便携式气相色谱-质谱联用技术的应用进展 [J]. 分析实验室, 2021(9):1100-1108.
- [10] 邢跃雯. 固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术测定废气中 24 种挥发性有机物 [J]. 山东化工, 2021, 50(7):94-96.