

大气颗粒物与持久性有机污染物的联合监测分析

王寅丹

上海市固体废物处置有限公司

DOI:10.12238/eep.v8i7.2755

[摘要] 本文聚焦于大气颗粒物与持久性有机污染物的联合监测分析。首先对相关概念与定义进行阐述,接着深入探讨大气颗粒物的来源,涵盖自然源与人为源的区分,剖析其物理与化学性质以及不同粒径分布对环境和健康产生的影响;同时介绍持久性有机污染物的特性。重点阐述联合监测技术与方法,包括采样技术的选择与比较、实验室分析方法及面临的挑战,还有监测数据的处理与质量控制等内容,旨在为大气颗粒物与持久性有机污染物的联合监测提供全面且深入的理论与实践指导。

[关键词] 大气颗粒物;持久性有机污染物;联合监测

中图分类号: X171.5 文献标识码: A

Joint Monitoring and Analysis of Atmospheric Particulate Matter and Persistent Organic Pollutants

Yindan Wang

Shanghai Solid Waste Disposal Co., Ltd.

[Abstract] This paper focuses on the joint monitoring and analysis of atmospheric particulate matter and persistent organic pollutants. It begins by elaborating on relevant concepts and definitions, then delves into the sources of atmospheric particulate matter, including the distinction between natural and anthropogenic sources, and analyzes their physical and chemical properties as well as the impacts of different particle size distributions on the environment and health. It also introduces the characteristics of persistent organic pollutants. The paper emphasizes joint monitoring techniques and methods, including the selection and comparison of sampling techniques, laboratory analysis methods, and the challenges faced, as well as the processing and quality control of monitoring data. The aim is to provide comprehensive and in-depth theoretical and practical guidance for the joint monitoring of atmospheric particulate matter and persistent organic pollutants.

[Key words] Atmospheric particulate matter; Persistent organic pollutants; Joint monitoring

引言

随着工业化和城市化的快速发展,大气环境问题日益凸显,其中大气颗粒物与持久性有机污染物是两类重要的污染物。大气颗粒物不仅会对空气质量产生直接影响,还能作为持久性有机污染物的载体,加剧其对环境和人体健康的危害。因此,对大气颗粒物与持久性有机污染物进行联合监测分析,对于深入了解大气污染状况、制定有效的污染控制策略具有重要意义。本文旨在系统阐述大气颗粒物与持久性有机污染物的联合监测技术与方法,为相关研究和实践提供理论支持。

1 相关概念与定义

大气颗粒物与持久性有机污染物(POPs)作为两类重要的环境污染物,其定义与特性对联合监测与环境影响分析具有基础性意义。大气颗粒物通常指悬浮于空气中的固态或液态微粒,其粒径范围可从纳米级到数十微米不等,根据空气动力学直径可分为PM₁₀(粒径 $\leq 10\ \mu\text{m}$)和PM_{2.5}(粒径 $\leq 2.5\ \mu\text{m}$)等类别。世

界卫生组织(WHO)2021年报告指出,全球每年因PM_{2.5}暴露导致的过早死亡人数达700万,凸显其对人体健康的严重威胁。持久性有机污染物则是一类具有长期残留性、生物蓄积性、半挥发性和高毒性的化学物质,包括二噁英、多氯联苯(PCBs)、滴滴涕(DDT)等12类初始控制物质^[1]。《斯德哥尔摩公约》(2001)明确将其定义为“通过环境介质长距离迁移并持久存在于环境中,具有潜在毒性并对人类健康和环境造成严重危害的有机污染物”。两类污染物的相互作用机制复杂,例如POPs可通过吸附于大气颗粒物表面实现长距离传输,美国环保署(EPA)研究显示,城市空气中90%以上的多环芳烃(PAHs)与PM_{2.5}结合存在,这种结合不仅改变了污染物的环境行为,还可能通过协同效应增强其生态毒性。

2 大气颗粒物的来源与特性

2.1 自然源与人为源的区分

自然源主要包括火山喷发、森林火灾、土壤扬尘、海浪飞

沫等自然过程释放的颗粒物。例如,火山灰中的细小颗粒可随气流传播至数千公里外,对区域空气质量产生显著影响。人为源则涵盖工业排放、交通尾气、燃煤取暖、农业活动(如秸秆焚烧)及建筑扬尘等领域。其中,机动车尾气排放的颗粒物因含有黑碳、有机碳等成分,对城市空气质量的影响尤为突出。不同来源的颗粒物在化学组成、粒径分布及毒性特征上存在显著差异,这直接决定了其环境行为与健康效应的复杂性。

2.2 颗粒物的物理与化学性质

颗粒物的物理性质主要包括粒径大小、形状、密度及表面结构等特征。粒径分布是决定颗粒物环境行为的关键因素,例如PM_{2.5}(空气动力学直径 $\leq 2.5\ \mu\text{m}$)可深入肺泡并引发心血管疾病,而超细颗粒(PM_{0.1})甚至能穿透血脑屏障。化学性质则涉及元素组成、有机物含量及氧化活性等方面,研究表明,含硫、氮的二次颗粒物比一次颗粒物具有更强的光化学烟雾生成潜力。此外,颗粒物表面常吸附重金属、多环芳烃等有毒物质,这种复合污染特性显著提升了其健康风险^[2]。

2.3 不同粒径分布对环境和健康的影响

不同粒径的颗粒物在环境和健康方面产生的影响具有显著差异。PM₁₀(空气动力学直径 $\leq 10\ \mu\text{m}$)颗粒物主要沉积在上呼吸道,可引发鼻炎、咽炎等呼吸系统疾病,而PM_{2.5}因能深入肺泡,导致慢性阻塞性肺病、肺癌等严重健康问题。超细颗粒物(PM_{0.1})由于具有更大的比表面积,更容易吸附有毒有害物质,且能够穿透肺泡进入血液循环,甚至引发神经系统损伤。从环境角度看,粒径较小的颗粒物在大气中停留时间更长,传播距离更远,容易形成区域性污染,而较大粒径的颗粒物则更容易沉降,对局部环境造成直接影响。此外,不同粒径的颗粒物对能见度的影响程度也不同,细颗粒物是造成雾霾天气的主要因素之一。

3 持久性有机污染物的特性

持久性有机污染物(POPs)作为一类具有长期残留性、生物蓄积性、半挥发性和高毒性的化学物质,其定义核心在于其环境持久性与跨介质迁移能力。根据《斯德哥尔摩公约》的界定,POPs需同时满足四个关键特征:在环境中难以降解(半衰期 >6 个月)、可通过食物链富集(生物浓缩因子 >1000)、具备远距离迁移潜力(蒸气压 $10^{-2}\sim 10^4\ \text{Pa}$)、并对生物体产生显著毒性效应。从化学结构分类看,POPs主要包含十二类典型物质,其中二噁英类(PCDD/Fs)因其极强毒性(毒性当量因子TEF达1.0)成为研究焦点,2004年比利时鸡肉二噁英超标事件导致欧盟27国紧急封锁相关产品,凸显其食品链污染风险;多环芳烃类(PAHs)中苯并[a]芘作为强致癌物,其大气浓度与肺癌发病率的相关性在墨西哥城研究中呈现显著正相关($r=0.78, p<0.01$);而有机氯农药类(OCPs)如滴滴涕(DDT),虽在1972年斯德哥尔摩人类环境会议后逐步禁用,但印度农业区土壤中仍检测到0.12~3.85ng/g的残留量,通过大气传输影响喜马拉雅山脉冰川。溴代阻燃剂类(PBDEs)作为新兴POPs,其全球排放量从1970年的10吨激增至2010年的40000吨,北美电子垃圾拆解区儿童血液中PBDEs浓度达150ng/g脂质,是普通人群的3倍~5倍。

4 联合监测技术与方法

4.1 采样技术的选择与比较

在大气颗粒物与持久性有机污染物(POPs)的联合监测中,采样技术的选择直接决定了监测数据的准确性与可靠性。目前常用的采样技术主要包括滤膜采样法、吸附管采样法以及被动采样法,每种技术均具有独特的适用场景与局限性。滤膜采样法通过截留空气中的颗粒物实现污染物富集,其核心优势在于可同时捕获颗粒相与气相污染物,例如,在工业区监测中,采用玻璃纤维滤膜结合聚氨酯泡沫(PUF)的组合采样器,可有效收集PM_{2.5}中的多环芳烃及气相中的二噁英类物质。但该方法对采样流量控制要求较高,流量波动超过5%会显著影响颗粒物截留效率,且高湿度环境下滤膜易发生水分吸附导致污染物损失。吸附管采样法利用活性炭或Tenax等吸附剂选择性捕获气态POPs,在低温条件(如 $-20\ ^\circ\text{C}$)下可实现苯并[a]芘等半挥发性有机物的稳定保存,但该方法对极性化合物捕获效率较低,且采样后需立即进行低温密封运输以防止解析。被动采样法通过分子扩散原理实现污染物累积,无需动力设备且维护成本低,适用于长期连续监测网络建设,然而其采样速率受温度、风速等环境因素影响显著,在复杂气象条件下数据可比性较差^[3]。

4.2 实验室分析方法与挑战

在大气颗粒物与持久性有机污染物(POPs)的联合监测与环境影响分析中,实验室分析方法的选择与挑战直接决定了研究结果的准确性与可靠性。当前,针对大气颗粒物中POPs的实验室分析主要依赖高效液相色谱-质谱联用技术(HPLC-MS/MS)和气相色谱-质谱联用技术(GC-MS/MS),这两种技术能够实现对多环芳烃(PAHs)、二噁英类等典型POPs的定量分析。例如,在针对大气颗粒物中二噁英类物质的检测时,GC-MS/MS技术可通过选择离子监测模式(SIM)有效排除基质干扰,其检测限可低至0.01pg/m³量级。而HPLC-MS/MS技术则凭借其优异的分离能力,在分析多环芳烃同分异构体时展现出独特优势,特别是对四环以上高环PAHs的检测灵敏度较传统方法提升约3个数量级^[4]。然而,这两种技术均面临基质效应干扰的挑战,实验证明当颗粒物样品中有机碳含量超过10mg时,质谱信号抑制率可达40%~60%,需通过同位素内标法或标准加入法进行校正。此外,样品前处理过程中的萃取效率差异也是重要误差来源,采用加速溶剂萃取(ASE)结合固相萃取净化(SPE)的复合前处理技术,可使目标物回收率稳定。对于极性较强的含氧POPs物质,超高效液相色谱-轨道阱质谱技术通过提高分辨率,可有效区分结构类似物,但在实际样品分析中仍存在离子化效率波动的问题,需通过优化电喷雾离子源参数(如毛细管电压、脱溶剂温度)来改善。

实验室分析的另一大挑战在于分析模型的构建与验证。POPs在大气颗粒物中的存在形式复杂,既可能以游离态存在,也可能与颗粒物表面发生吸附或化学反应。因此,简单的定量分析往往无法全面反映其环境行为。某研究团队在分析长三角地区大气颗粒物样本时,结合主成分分析(PCA)和正定矩阵分解(PMF)模型,发现PM_{2.5}中POPs的来源可分为工业排放、交通尾气和生

物质燃烧三类,这一分类结果为后续污染控制提供了科学依据。然而,模型的准确性高度依赖输入数据的完整性和代表性。当数据存在缺失或异常值时,模型解析结果可能出现显著偏差。例如,在冬季采暖期采集的样本中,由于燃煤排放的干扰,部分模型会将生物质燃烧源误判为工业排放源。为提高模型可靠性,研究者需结合多维度数据验证,包括气象参数(风速、风向)、源排放清单以及受体化学组成特征。此外,机器学习算法如随机森林和神经网络的应用,为复杂环境介质中POPs的源解析提供了新思路,但这类模型需要大规模训练数据集支撑,且存在“黑箱”解释性不足的问题^[5]。

4.3 监测数据的处理与质量控制

在大气颗粒物与持久性有机污染物的联合监测中,监测数据的处理与质量控制是确保研究结果科学性和可靠性的关键环节。由于大气颗粒物和持久性有机污染物(POPs)的监测数据往往受到采样环境、仪器精度、分析方法等多重因素的影响,数据处理过程中必须严格遵循质量控制标准。例如,在采样阶段,需根据不同粒径颗粒物的特性选择合适的采样器,如使用级联冲击采样器分离PM_{2.5}和PM₁₀,并通过空白样品检测排除采样过程中的污染干扰。实验室分析阶段,则需采用高灵敏度的仪器,如气相色谱-质谱联用仪(GC-MS)或高效液相色谱(HPLC),结合标准物质进行定量校准,确保POPs检测的准确性。在数据处理环节,需对原始数据进行预处理,包括异常值剔除、缺失值填补以及数据平滑等操作。例如,针对采样过程中因仪器故障或环境突变导致的异常数据,可通过设置合理的阈值范围进行自动筛选,并结合相邻时间点的数据进行插值修正。同时,为评估数据质量,需计算关键指标如相对标准偏差(RSD)、回收率等,确保重复测量结果的稳定性。此外,建立数据审核机制,由专业人员对处理后的数据进行交叉验证,可进一步降低人为误差。在质量控制方面,

定期参与国际比对实验或能力验证计划,能够检验实验室分析体系的可靠性,并为持续改进提供依据。

5 结束语

综上所述,大气颗粒物与持久性有机污染物的联合监测分析对于深入了解环境污染状况、评估其对环境和人体健康的影响具有重要意义。通过科学的监测技术和方法,能够更准确地掌握污染物的分布、来源及变化趋势,为制定有效的污染控制策略提供科学依据。未来,随着监测技术的不断进步和完善,有望实现对大气颗粒物与持久性有机污染物的更全面、更精准的监测,为保护生态环境和人类健康作出更大贡献。

[参考文献]

- [1]钟梅珍.激光雷达技术在大气颗粒物监测中的应用与发展研究[J].皮革制作与环保科技,2024,5(24):39-41.
- [2]张孟燊,陈志辉,徐敏,等.不同污染天气下大气颗粒物及化学成分干沉降通量的粒径演变特征[J].生态环境学报,2024,33(12):1882-1890.
- [3]赵立健,丁宏,官艳玲,等.基于物联网大数据的大气颗粒物监测与溯源系统及其应用[J].高科技与产业化,2024,30(10):75-78.
- [4]关天奕,李荣斌,孙潇,等.典型污染源大气颗粒物、BC与VOCs的排放特征[J].能源环境保护,2023,37(04):100-108.
- [5]阿米拉,耿柠波,曹蓉,等.大气颗粒物中典型有机物的分析方法和污染特征研究进展[J].环境化学,2021,40(12):3774-3786.

作者简介:

王寅丹(1986--),男,汉族,上海市人,本科,研究方向:大气监测。