

大气细颗粒物（PM2.5）源解析检测技术的进展

赵奕

山西嘉源环境检测有限公司，山西 阳泉 045000

摘要： 大气细颗粒物（PM2.5）因其粒径微小，能深入人体呼吸系统甚至血液循环系统，对人体健康危害极大，同时也对大气环境质量、气候变化产生显著影响。准确解析 PM2.5 的来源，是制定有效污染控制策略的关键。本文详细阐述了多种 PM2.5 源解析检测技术，包括受体模型、化学质量平衡法、同位素技术等，分析了各技术的原理、应用案例、优势及局限性，并探讨了源解析检测技术的未来发展趋势，旨在为深入了解 PM2.5 来源、推动大气污染治理提供参考。

关键词： 大气细颗粒物；PM2.5；源解析；检测技术；污染治理

The Progress of Source Apportionment Detection Technology for Fine Particulate Matter (Pm2.5) in the Atmosphere

Zhao Yi

Shanxi Jiayuan Environmental Testing Co., LTD. Yangquan, Shanxi 045000

Abstract： Atmospheric fine particulate matter (PM2.5), characterized by its ultrafine particle size, can penetrate deep into the human respiratory and circulatory systems, posing significant health risks while substantially impacting air quality and climate change. Accurate source apportionment of PM2.5 remains crucial for developing effective pollution control strategies. This paper systematically examines various PM2.5 source apportionment technologies, including receptor models, chemical mass balance methods, and isotope techniques. It analyzes the principles, application cases, advantages, and limitations of each method, while exploring future development trends in source apportionment technologies. The study aims to provide insights for comprehensive understanding of PM2.5 sources and advancement of air pollution control efforts. Keywords: Atmospheric fine particulate matter; PM2.5; source apportionment; detection technologies; pollution control

Keywords： fine particulate matter in the atmosphere; PM2.5; source resolution; detection technology; pollution control

引言

PM2.5 指环境空气中空气动力学当量直径小于等于 2.5 微米的颗粒物，其成分复杂，包含有机碳、元素碳、硫酸盐、硝酸盐、铵盐、重金属及各类痕量元素等。由于粒径小，PM2.5 能长时间悬浮于空气中，且可远距离传输，不仅导致大气能见度降低，引发雾霾天气，影响交通出行和生态景观，更严重威胁人体健康。流行病学研究表明，长期暴露于高浓度 PM2.5 环境中，会增加呼吸系统疾病（如肺癌、哮喘、慢性阻塞性肺疾病）、心血管疾病（如心脏病发作、中风）以及其他相关疾病的发病风险^[1]。

大气中 PM2.5 来源广泛且复杂，既包含自然源，如扬尘、火山喷发、森林火灾、海盐粒子等，也涵盖大量人为源，如化石燃料（煤炭、石油、天然气）燃烧排放、工业生产过程（如钢铁冶炼、水泥制造、化工生产）、机动车尾气排放、生物质燃烧（如秸秆焚烧、薪柴燃烧）以及二次气溶胶生成（气态前体物通过光化学反应、氧化反应等转化形成）。不同地区因产业结构、能源结构、地理气候条件等差异，PM2.5 的主要来源各不相同。例如，在工业发达地区，工业排放可能是主要来源；而在人口密集、交通拥堵的城市，机动车尾气排放和二次气溶胶生成的贡献则较为突出。因此，准确识别 PM2.5 的来源，量化各源对其浓度的贡献，对制定针对性强、科学有效的大气污染防治措施，改善空气质量具有重要意义。

一、受体模型

（一）基本原理

受体模型基于大气颗粒物在受体点（即采样点）的化学组成

特征，通过数学方法解析出各污染源对受体点颗粒物浓度的贡献。该模型无需详细了解污染物的传输过程和排放源强，而是利用源与受体之间化学组成的相似性来实现源解析。常见的受体模型有主成分分析 / 多元线性回归（PCA/MLR）、正定矩阵因子分

解 (PMF)、非负矩阵分解 (NMF) 等。

以 PMF 为例, 其核心思想是将观测到的颗粒物浓度矩阵 X 分解为两个非负矩阵 G 和 F , 即 $X = G \times F + E$ 。其中, G 矩阵表示各污染源对不同化学组分的贡献比例 (源谱矩阵), F 矩阵表示各污染源的贡献强度 (因子得分矩阵), E 为残差矩阵。PMF 通过最小化残差平方和来确定最优的 G 和 F 矩阵, 从而实现源解析^[9]。

(二) 应用案例

在某特大城市的大气污染研究中, 运用 PMF 模型对多个采样点连续一年的 PM2.5 样品进行源解析。结果表明, 机动车尾气排放对 PM2.5 浓度的贡献约为 25%, 二次气溶胶 (主要由二氧化硫、氮氧化物、挥发性有机物等前体物转化生成) 贡献达 30%, 工业源排放贡献约 20%, 扬尘贡献 15%, 生物质燃烧贡献 10%。基于此结果, 当地政府制定了针对性措施, 如加强机动车尾气排放标准执行力度、对重点工业污染源实施深度治理、强化城市扬尘管控等, 有效降低了 PM2.5 浓度。

(三) 优势与局限性

受体模型的优势在于对污染源排放清单数据依赖小, 可直接利用受体点实测数据进行解析; 能处理多变量数据, 有效识别出潜在污染源; 适用于不同空间尺度的源解析研究, 从城市尺度到区域尺度均可应用。然而, 受体模型也存在局限性。例如, 模型结果依赖于所选取的化学组分数据, 若数据不完整或存在误差, 可能导致源解析结果偏差; 无法准确区分具有相似化学组成的污染源, 如不同类型工业源之间; 对于源谱的确定存在一定主观性, 不同研究团队可能因源谱设定差异得到不同解析结果^[9]。

三、化学质量平衡法 (CMB)

(一) 基本原理

CMB 法基于质量守恒原理, 假设在受体点采集的 PM2.5 样品中, 各化学组分的浓度是由不同污染源排放的相应组分浓度线性叠加而成。通过测量受体点颗粒物的化学组成 (如元素浓度、离子浓度、碳质组分浓度等) 以及各潜在污染源排放颗粒物的化学组成 (即源谱), 建立质量平衡方程, 求解方程得到各污染源对受体点 PM2.5 浓度的贡献。

(二) 应用案例

在某工业城市, 为确定影响城市空气质量的主要 PM2.5 污染源, 采用 CMB 法开展源解析工作。研究人员首先对钢铁厂、水泥厂、燃煤电厂、机动车尾气等主要潜在污染源进行详细采样分析, 获取其排放颗粒物的源谱数据。同时, 在城市多个功能区设置采样点, 采集 PM2.5 样品并分析其化学组成。通过 CMB 模型计算, 得出钢铁厂排放对 PM2.5 浓度贡献约为 35%, 水泥厂贡献 20%, 燃煤电厂贡献 18%, 机动车尾气贡献 15%, 其他源贡献 12%。根据这一结果, 当地对钢铁、水泥等重点行业实施了更为严格的减排措施, 取得了良好的空气质量改善效果^[14]。

(三) 优势与局限性

CMB 法的优点是原理直观、概念清晰, 模型计算结果具有明确的物理意义; 在污染源排放清单和源谱数据准确的情况下, 能较为准确地量化各污染源贡献。但其局限性也较为明显, 该方法对源谱数据质量要求极高, 源谱的不确定性会显著影响解析结果准确性; 实际操作中, 获取全面、准确的污染源排放清单和源谱

数据难度较大, 尤其是对于一些小型、分散污染源; CMB 法假设各污染源排放的颗粒物在传输过程中化学组成不变, 这与实际情况存在一定偏差, 可能导致解析误差。

四、同位素技术

(一) 基本原理

同位素技术利用不同来源的 PM2.5 中某些元素的稳定同位素组成差异来进行源解析。例如, 碳、氮、硫等元素存在多种稳定同位素, 不同污染源排放的颗粒物由于形成过程、原料来源等不同, 其同位素丰度比 (如 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 、 $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ 、 $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$) 会有所不同。通过高精度质谱仪测量受体点 PM2.5 样品中相关元素的同位素丰度比, 并与已知污染源的同位素特征进行比对, 可判断 PM2.5 的来源。

以碳同位素为例, 化石燃料燃烧排放的碳具有特定的 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比值范围, 而生物质燃烧排放的碳同位素比值与之存在差异。通过分析 PM2.5 中有机碳和元素碳的碳同位素组成, 可区分化石燃料源和生物质燃烧源对 PM2.5 中碳质组分的贡献。

(二) 应用案例

在对某区域雾霾天气过程中 PM2.5 来源解析研究时, 运用碳、氮同位素技术。研究发现, 在雾霾期间, PM2.5 中有机碳的 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比值显示出明显的生物质燃烧特征, 结合氮同位素分析结果, 确定生物质燃烧排放对此次雾霾期间 PM2.5 中碳质组分和含氮组分的贡献显著增加, 分别达到 40% 和 30% 左右, 为该区域雾霾污染成因分析和防控措施制定提供了重要依据。

(三) 优势与局限性

同位素技术的优势在于同位素组成受环境因素干扰小, 具有较好的示踪性, 可有效区分一些化学组成相似但来源不同的污染源; 对样品量要求相对较少, 适用于痕量分析; 能提供关于污染源形成过程和物质来源的独特信息。不过, 同位素技术也面临挑战。一方面, 同位素分析需要高精度、高灵敏度的质谱仪器, 设备昂贵且维护成本高; 另一方面, 目前对于某些污染源的同位素特征研究还不够完善, 缺乏全面的同位素源谱数据库, 限制了该技术的广泛应用^[15]。

五、单颗粒质谱技术

(一) 基本原理

单颗粒质谱技术能够对单个大气颗粒物的粒径和化学成分进行实时在线分析。仪器通过进样系统将大气中的颗粒物引入真空腔室, 利用激光或电子束等手段使颗粒物离子化, 产生的离子在电场和磁场作用下加速并飞行, 根据离子的飞行时间或质荷比等特征, 通过质谱仪检测并记录离子信号, 从而获得单个颗粒物的化学成分信息。通过对大量单颗粒质谱数据的统计分析, 可识别不同类型的颗粒物, 进而推断其来源。

例如, 禾信公司研发的大气细颗粒物在线源解析质谱监测系统, 可将解析大气细颗粒物来源的时间从传统方法的 3 个多月缩短至 1 小时内, 实现了快速、高效的源解析。该系统利用单颗粒飞行时间质谱方法, 直接对目标大气颗粒物的粒径和成分信息进行测量, 得到包含颗粒物粒径和成分的单颗粒在线质谱数据, 再

结合其他分析手段进行源解析^[6]。

(二) 应用案例

在某城市的大气污染应急监测中,运用单颗粒质谱技术对突发污染事件中的PM_{2.5}进行实时源解析。在污染事件发生后的数小时内,通过对采集到的大量单颗粒质谱数据快速分析,准确识别出污染源为周边一家化工企业的异常排放,其排放的含硫、含氮有机颗粒物在PM_{2.5}中占比较高。相关部门迅速采取措施,对该企业进行停产整顿,有效控制了污染扩散。

(三) 优势与局限性

单颗粒质谱技术具有高时间分辨率、可实时在线监测的优势,能够快速捕捉到污染源排放的变化,对大气污染应急响应具有重要意义;可获取单个颗粒物详细的化学成分信息,有助于深入了解颗粒物的形成机制和来源;能有效区分一次颗粒物和二次颗粒物。然而,该技术也存在不足。仪器设备复杂,成本高昂,限制了其大规模应用;对仪器操作和维护人员要求较高;数据分析处理难度大,需要专门的算法和软件来处理海量的单颗粒质谱数据;由于大气颗粒物成分复杂多变,部分颗粒物的质谱特征识别存在一定困难,可能影响源解析结果的准确性^[7]。

六、智能电镜技术

(一) 基本原理

智能电镜即计算机控制扫描电子显微镜,实现了软硬件深度融合。颗粒物样品采集后,置于智能电镜下,通过电子束扫描样品表面,产生二次电子、背散射电子等信号,这些信号被探测器接收并转化为图像和能谱数据。智能电镜可自动获得颗粒的形貌、成分、粒径、混合状态和表面特征等详细信息,基于这些信息利用相关算法和数据库分析颗粒的来源和老化过程。相较于传统电镜手动测试、人工识别颗粒物、手动采集并处理数据的方式,智能电镜颗粒物测试效率大幅提高,可达每小时数千个^[8]。

(二) 应用案例

在中国环境科学研究院的研究中,利用智能电镜技术对北京冬奥会及冬残奥会期间北京及周边15个重点城市进行多点位布点采样分析。通过IntelliSEM EPAS(智能扫描电镜环境颗粒物分析系统)获得了一百多万单颗粒数据,成功解析出不同城市PM_{2.5}中各类颗粒物的来源。例如,在对唐山市采样点分析时,通过智能电镜识别出大量球形铁球颗粒物,结合当地产业特点及采样点周边情况,表明唐山市钢铁工业对周边PM_{2.5}污染影响较大^[9]。

参考文献

- [1]冉嘉鹏,邓萌杰,宋华英,等.武汉市城区大气细颗粒物(PM_{2.5})中水溶性离子年际变化特征研究[J/OL].环境科学学报,1-10[2025-07-10].https://doi.org/10.13671/j.hjkxxb.2025.0061.
- [2]王文浚.大气细颗粒物(PM_{2.5})污染特征及防治策略研究[J].黑龙江环境通报,2025,38(04):99-101.
- [3]王挺,王丽,胡栋娇,等.秋冬季大气PM_{2.5}颗粒物二次粒子污染浓度垂直变化特征研究[J].环境科学与管理,2025,50(04):126-130.
- [4]孟娜,刘素云,李砾凝,等.河北地区大气颗粒物(PM_{2.5})与急性冠脉综合征的相关性[J].中西医结合心脑血管病杂志,2025,23(03):418-421.
- [5]邵莹莹,王晨,崔安风,等.太原市大气细颗粒物PM_{2.5}对老年慢性阻塞性肺疾病患者短期肺功能影响的时间序列研究[J].公共卫生与预防医学,2025,36(01):18-22.
- [6]赵蔼容,严驰,谭坤,等.贵阳市云岩区大气颗粒物PM_{2.5}的组分特征及来源解析[J].绿色科技,2024,26(14):120-125.DOI:10.16663/j.cnki.lskj.2024.14.040.
- [7]李双江,周建文,叶彤,等.夏秋季石家庄南郊大气颗粒物PM_{2.5}和PM₁₀中微塑料的赋存特征[J].环境科学学报,2025,45(03):13-22.DOI:10.13671/j.hjkxxb.2024.0404.
- [8]孙思宇.冶金区大气颗粒物PM_{2.5}中铅和镉在人体呼吸道的暴露研究及健康风险[D].吉林大学,2023.DOI:10.27162/d.cnki.gjlin.2023.007465.
- [9]林亦东.江西省上饶市大气细颗粒物(PM_{2.5})污染特征及防治策略[J].能源研究与管理,2023,15(04):139-145+168.DOI:10.16056/j.2096-7705.2023.04.021.
- [10]范月莹.上海市环境空气质量及大气细颗粒物(PM_{2.5})污染特征的变化[D].上海师范大学,2024.DOI:10.27312/d.cnki.gshsu.2024.001622.

(三) 优势与局限性

智能电镜技术的优势在于可提供颗粒物微观层面丰富、详细的信息,有助于准确识别颗粒物类型和来源;测试效率高,能在短时间内处理大量样品,获取海量数据;结合被动式采样技术进行网格化布点,可有效提高城市颗粒物源解析的时空分辨率,适用于颗粒物低浓度水平下城市精准治污研究。但智能电镜也存在一定局限。设备购置和维护成本高;样品前处理相对复杂,需要专业技术人员操作;目前智能电镜技术在数据处理和分析算法方面仍有待进一步优化,以提高源解析结果的准确性和可靠性。

七、其他技术

除上述主要技术外,还有一些其他技术在PM_{2.5}源解析中也有应用。例如,X射线荧光光谱(XRF)技术可对颗粒物中的元素组成进行快速分析,通过对比不同污染源的元素特征,辅助源解析工作。在某矿区周边大气污染研究中,利用XRF分析PM_{2.5}中重金属元素含量,发现铅、锌、镉等元素含量较高,且其特征与矿区开采、冶炼活动排放的元素特征相符,从而确定矿区活动是该区域PM_{2.5}污染的重要来源之一^[10]。

表面增强拉曼光谱(SERS)与扫描电子显微镜(SEM)、电子诱导X射线光谱(EDX)相结合的技术,可对PM_{2.5}进行全面的物理和化学表征。SERS用于揭示颗粒物的化学组成,SEM用于分析颗粒形貌,EDX用于确定元素组成。在对成都郊区PM_{2.5}研究中,运用该技术发现当地PM_{2.5}主要来源包括汽车尾气、大气光化学反应引起的二次污染、扬尘、附近工业废气排放、生物颗粒、其他聚集颗粒和吸湿性颗粒等。

八、结论

大气细颗粒物(PM_{2.5})源解析检测技术对于深入了解PM_{2.5}污染成因、制定科学有效的大气污染防治策略至关重要。受体模型、化学质量平衡法、同位素技术、单颗粒质谱技术、智能电镜技术以及其他相关技术在PM_{2.5}源解析中各有其原理、应用优势及局限性。随着技术的不断发展,多种技术联用、提高时空分辨率、应用大数据与人工智能以及完善源谱数据库等将成为未来PM_{2.5}源解析检测技术的重要发展方向。通过持续推动源解析技术创新与进步,有望更精准地识别PM_{2.5}污染源,为打赢蓝天保卫战、改善大气环境质量提供坚实的技术保障。