

大气颗粒物来源解析与监测方法探讨

靳文霞

海西中科生态环境监测有限公司

DOI:10.32629/eep.v9i5.3216

[摘要] 大气颗粒物污染对人的身体健康以及区域环境质量造成持续的影响,弄清楚它的来源组成并创建起可靠的监测体系,才是制定精细管控措施的科学基础。本文对源排放清单、扩散模型和受体模型三种源解析技术的内在逻辑以及适用边界做了系统的梳理,评价了离线采样、在线连续监测和遥感反演等监测方法的技术特点以及协同方式。从分析结果可以看出,单一的技术途径无法完全表现颗粒物来源的时空异质性,多方法交叉验证以及数据融合是提高解析精度的重要方式。未来的研究工作要努力冲破二次颗粒物溯源的限制,创建起高时空分辨率的天地一体化观测网络。

[关键词] 大气颗粒物; 来源解析; 受体模型; 在线监测

中图分类号: P356 文献标识码: A

Exploration of Source Analysis and Monitoring Methods for Atmospheric Particulate Matter

Wenxia Jin

Haixi Zhongke Ecological Environment Monitoring Co., Ltd

[Abstract] Atmospheric particulate matter pollution has a sustained impact on human health and regional environmental quality. Understanding its source composition and establishing a reliable monitoring system are the scientific basis for developing refined control measures. This article systematically reviews the internal logic and applicable boundaries of three source apportionment techniques: source emission inventory, diffusion model, and receptor model. It evaluates the technical characteristics and collaborative methods of monitoring methods such as offline sampling, online continuous monitoring, and remote sensing inversion. From the analysis results, it can be seen that a single technical approach cannot fully represent the spatiotemporal heterogeneity of particulate matter sources. Multi method cross validation and data fusion are important ways to improve analytical accuracy. Future research efforts should strive to break through the limitations of secondary particle tracing and create a high spatiotemporal resolution integrated observation network for the sky and earth.

[Key words] atmospheric particulate matter; Source analysis; Receptor model; online monitoring

大气颗粒物是城市群大气复合污染的主要组成部分,化学组成复杂多样,来源众多且变化较大,给污染成因的判定以及有针对性地治理造成了很大困难。从技术角度出发,就大气环境管理的科学化转型而言,对探索和研究来源解析的方法以及监测手段之间的相互配合路径来说,具有重大的现实意义。

1 大气颗粒物来源解析技术体系

1.1 源排放清单的编制逻辑与局限

源排放清单是依据各种污染源的活动水平以及排放因子来计算的,用来创建出区域颗粒物排放时空分布框架,给溯源工作赋予宏观参照。清单编制包含污染源分类、数据核对、排放因子选取这三个主要部分,适应于工业、移动、扬尘、生物质燃烧等各种污染源。该技术方法具有明显的优势,能够清楚地整理出

各种污染源的排放贡献,可以支持重点污染源总量管控,编制成本较低,并且更新方式灵活,适合于宏观环境管理决策的需求。高分辨率清单可以利用时间分配因子对不同时段排放进行细化,符合现实的生产生活规律,还可以结合受体模型的结果来完成清单的校正更新。但其短板也比较明显,本地化排放因子的适用性不好会造成核算偏差,无组织、小型分散的污染物排放容易造成统计上的漏报。

1.2 扩散模型辅助的源识别路径

扩散模型以污染源排放数据为依据,用气象和大气化学机理来模拟污染物从排放到沉降的全过程,从而确定各种污染源的浓度贡献。主流的扩散模型可以分为两种,前者的目的是长距离输送跟踪,后者的目的是区域内精细模拟。其主要价值就是打

通污染源排放和环境浓度的物理化学关系, 可以开展情景推演和减排效果预测。模型模拟精度与气象数据、清单完整性、化学参数方案等有关, 对二次颗粒物的模拟误差更明显, 主要是由于大气前体物转化过程的复杂性、不确定性所造成的。

1.3 受体模型在源贡献量化中的核心作用

受体模型从环境观测端入手, 利用颗粒物化学组分的特征, 用统计的方法推算出污染源的贡献率, 可以脱离排放清单和气象数据独立完成解析。常用的模型分为两类, 化学质量平衡模型以成熟的源谱数据为基础进行解析, 在源体系清楚的情况下适用; 正定矩阵因子分解模型可以自主提取数据特征、识别污染源, 对于源谱缺失、源类复杂的地方更加适应。两个模型都有各自的不足之处, 前者容易受到同源化学指纹的影响而造成分析出错, 后者需要大量的样本才能得到稳定的成果, 并且因子判定也离不开专业的判断。采样误差、检测精度、模型理想化假设等都会造成解析结果的不确定性。目前新型耦合模型是在传统的统计框架之上加入化学约束条件, 有效地改善了源谱混叠、二次组分溯源难等行业的痛点, 并且提高了溯源结果的精确性以及公信力。

2 颗粒物监测方法的技术特征与应用适配

2.1 离线采样与实验室分析手段

离线监测方法是以滤膜采样为基础, 把颗粒物采集到一定的材质滤膜上, 在实验室里进行质量浓度的称量和化学成分的分析, 是颗粒物监测的经典技术路线。质量浓度测定一般用重量法, 在恒温恒湿条件下准确称取样品质量后得到PM_{2.5}或者PM₁₀的质量浓度。化学成分分析有离子色谱法测定水溶性离子、热光法或者热光反射法测定元素碳和有机碳、电感耦合等离子体质谱法或者X射线荧光光谱法测定元素组分等多种技术途径。离线方法的显著优点就是分析参数覆盖面广、数据质量可控、样品可以长期保存供复测使用。它的主要缺点就是时间分辨率低, 常规采样周期一般为数小时到数十小时, 不能很好地反映颗粒物浓度的快速变化过程; 采样和分析的较长周期也影响了它在重污染应急预警上的应用。

2.2 在线连续监测技术特征

在线监测技术把自动化采样和分析系统结合起来, 可以实现颗粒物质量浓度和化学组分的近实时或者高时间分辨率的连续观测, 很好地克服了离线法的时效性缺点。 β 射线衰减法和锥形元件振荡微天平法都是质量浓度在线监测的主要方式, 前者是根据颗粒物沉积引起的 β 射线衰减效应来估算浓度, 后者是通过振荡频率的变化来测量质量增量。气溶胶质谱仪可以对颗粒物中的硫酸盐、硝酸盐、铵盐以及有机物等非难熔成分的粒径分布和浓度变化进行实时监测, 气溶胶化学组分在线监测仪利用水溶性离子在线分析的方法, 对离子组分实行小时级的连续观测。在线监测仪器运行维护要求较高, 环境温度和湿度的波动会造成测量漂移, 仪器之间数据可比性依靠定期校准和比对实验来保证。随着传感器微型化、价格降低, 基于光散射原理的低成本颗粒物传感器在网格化监测中得到了广泛的使用, 但

是其数据质量一般比标准方法差, 需要通过数据质控算法和标准仪器联校来提高可靠性。传感器网络数据的可用性评价包括环境因素干扰剔除、异常值自动检测、不同气候条件下的性能衰减规律等基本问题, 相关的标准化工作还处在逐步完善的过程中^[1]。

2.3 遥感与立体监测网络的协同布局

卫星遥感、地基遥感技术给人类提供了一种不同于地面点式观测的大规模颗粒物时空分布监测的方式。卫星携带的中分辨率成像光谱仪、多角度成像光谱辐射计等仪器可以反演气溶胶光学厚度, 进而得到近地面颗粒物浓度的空间分布模式。地基激光雷达用激光脉冲发射和大气后向散射信号得到气溶胶消光系数的垂直廓线, 对于颗粒物在边界层内的垂直分布和传输过程有特殊的探测能力。遥感方法具有覆盖范围广、空间连续性好等优势, 可以较好地识别出污染物在区域传输和跨界输送过程中所经过的路线以及通量, 但是它的反演精度会受到云层遮蔽、地表反照率和气溶胶类型假设等因素的影响。利用卫星遥感、地基遥感和地面点式观测等手段, 将遥感数据进行同化或者采用机器学习的方法融合起来形成天地一体化的立体监测系统, 成为提高颗粒物监测时间和空间覆盖范围、提高数据质量的新趋势。立体监测体系的建立要考虑站点密度、观测参数种类、设备选型标准以及数据共享等各方面因素来实现区域空气质量管理对监测数据多层次需求的全面支撑。在立体监测网络运行实践当中, 地空数据同化算法的选择会对融合产品精度造成较大的影响, 最优插值法、三维变分和集合卡尔曼滤波各有不同的适用场景, 需要根据观测系统时空特征以及业务化运行需求进行比较选择^[2]。

3 源解析与监测数据的协同整合路径

3.1 多技术交叉验证的实践逻辑

不同类型的源解析和监测技术产生的结果在时空尺度、解析对象以及不确定性来源上存在差异, 单一的技术不能满足精细化管理所有的信息需求, 多技术交叉验证才成为提高解析结论稳健性的主要途径。源排放清单给出的排放量级参照, 扩散模型给出的源贡献空间分布情况, 受体模型给出的源贡献率定量结果, 以及在线监测数据所体现的组分时间变化特点, 这四种信息互相支撑, 互相限制。在具体的交叉验证过程中, 可以将受体模型的源贡献时序和扩散模型模拟的同点位贡献序列进行趋势一致性比对, 如果两种独立的方法对于同一源类的贡献变化趋势比较一致, 那么解析结论的可信度就会大大提高。在线监测得到的高时间分辨率组分数据还可以用来检验受体模型的源谱稳定性, 看解析过程中所识别出的因子是否符合实际排放特征。多技术交叉验证推广要在一个研究区同时设置不同的监测手段, 这就对监测资源分配以及实验设计提出更高的要求。交叉验证有效进行的前提是各个技术路径的结果要能够准确地给出其不确定程度, 只有确定了每一个方法的误差范围及置信度之后, 才能判断结果间一致性是由真实信号的吻合引起的还是由于误差叠加造成的偶然重合^[3]。

3. 2时间分辨率匹配与数据融合策略

源解析模型和监测数据在时间分辨率上不能很好地融合,这是导致两者深度融合技术难题的主要原因。受体模型需要依靠几十个小时或者更长时间来完成对样品的源解析计算工作,而在线监测仪器能给出小时级甚至分钟级组分浓度数据,二者在时间上存在着较大的差别。就该矛盾而言,技术上可以从以下途径来加以突破,即利用高时间分辨率的在线组分数据驱动受体模型动态源解析,把解析时间窗缩减到小时级,从而达成源贡献变化趋势的细致追踪,利用数据融合算法把不同时间分辨率的观测数据纳入同化范畴之内,在保证数据信息含量的前提下构建起统一的分析框架,利用扩散模型输出的高时间分辨率模拟结果填补监测数据时间序列的空白部分,改善连续源解析的时间完备性。时间分辨率匹配问题解决的好坏,同技术精度的提高息息相关,同时它也决定着源解析结果在重污染应急响应过程中能否做到及时有效的决策支持。从数据治理的角度来说,创建统一的数据格式标准、质量标识体系和元数据描述规范,是推动多源异构数据有效流转并实现自动融合的基础条件,技术上的突破也必须同数据标准化建设一起进行^[4]。

4 技术瓶颈与发展趋势研判

4. 1二次颗粒物溯源的深层难点

二次颗粒物是大气中经过大气氧化作用形成的,二次颗粒物来源的识别要比直接观测更加复杂,目前对于该类来源的解析尚有争议。二次无机气溶胶的前体物有二氧化硫、氮氧化物和氨气,二次有机气溶胶的前体物是挥发性有机物及其大气氧化产物,两种前体物之间存在着非线性的化学耦合关系。传统受体模型不能直接分辨二次组分初始排放源,只能把解析结果归入硫酸盐、硝酸盐等二次组分大类,不能找到具体的排放源。解决该瓶颈的技术方向在于,在受体模型中加入光化学年龄参数或者气团老化程度指示物,来区分本地生成和区域输送的二次组分贡献,采用化学传输模型和受体模型耦合分析的方法,通过前体物示踪技术建立排放源和二次组分之间的定量联系,发展同位素示踪法,用硫、氮、氧等元素的稳定同位素比值特征区分不同的来源的前体物。利用放射性碳同位素和左旋葡聚糖等有机分子标志物对现代碳和化石碳进行区分,在生物质燃烧过程中识别出二次颗粒物,这些都属于二次颗粒物的溯源研究范畴。

4. 2高时空分辨率监测体系的未来走向

为达到精细化管理的要求,颗粒物监测体系正向着高时空

分辨率、化学组分更加广泛的、可以实现更好数据互联互通的方向发展。低成本传感器网络大规模部署之后,使得监测密度大幅提升成为可能,关键是创建传感器数据质量标准评价体系以及自动校准算法,保证海量传感器数据达到管理应用所要求的精度标准。时间上,飞行时间质谱等新的分析手段被引进来之后,单颗粒物化学成分的即时呈现变为可能,单颗粒源解析由研究工具变成业务化使用手段。就数据整合而言,多平台观测数据的及时汇合,质量控制以及融合分析都依靠智能化数据平台的支持,云计算同人工智能技术的渗入正改变着监测网络的数据加工模式。建立覆盖城市、区域和国家各个层次的立体化监测体系,使源解析和监测数据能够相互配合起来,给大气环境精细化管理提供可靠的信息支持^[5]。

5 结束语

大气颗粒物来源解析和监测方法互相依存,互相促进,共同发展。源解析技术由排放清单、扩散模拟、受体模型自上而下、自下而上地建立起了方法学链条,监测技术由离线分析、在线连续观测、天地一体化立体监测实现了时间分辨率和空间覆盖率不断升级的过程。目前二次颗粒物溯源难、多源数据融合少、监测网络空间覆盖率低等技术性不足问题,只有依靠跨学科的手段革新,仪器不断更替和数据互通共享来改善。未来要依靠高时空分辨率监测网络的规模化创建作为基础设施支撑,用多模型耦合和数据同化当作技术中心,促进颗粒物来源解析朝着更加精细化、业务化、智能化的方向不断前进,从而给大气环境质量的持续改善赋予更为精确的科学支撑。

[参考文献]

- [1]贾世铭.典型寒冷地区大气颗粒物中EPFRs的污染特征及其变化趋势研究[D].哈尔滨工业大学,2025.
- [2]周运宝.数据驱动的大气颗粒物来源解析与预测方法研究[D].北京交通大学,2024.
- [3]吴颖君.典型区域大气颗粒物的金属污染特征及内外暴露健康风险[D].广东工业大学,2023.
- [4]陈艳,胡玉玲.城市区域大气颗粒物解析与污染防治策略[J].清洗世界,2023,39(3):140-142.
- [5]赵强.昌吉市大气颗粒物污染特征及来源解析[D].新疆农业大学,2018.

作者简介:

靳文霞(1996--),女,汉族,青海省民和县人,本科,初级职称,研究方向:生态环境监测类。