

大气颗粒物源解析方法研究进展

闫颖超 启黎明

内蒙古师范大学

DOI:10.32629/eep.v9i2.3093

[摘要] 大气污染源解析是科学治污、精准减排的重要基础,对于实现“减污降碳”协同增效目标具有关键意义。本文系统综述了大气颗粒物源解析的主要方法,包括排放源清单法、源模型法和受体模型法,分析了各类方法的优缺点及应用场景。同时,总结了国内外在大气污染源解析方面的研究进展。最后,本文探讨了传统方法的局限性及源解析技术的发展趋势,旨在为未来大气污染源解析研究提供理论支持和技术参考。

[关键词] 大气污染; 源解析; 研究进展

中图分类号: X131.1 **文献标识码:** A

Research Progress on Source Apportionment Methods for Atmospheric Particulate Matter

Yingchao Yan Liming Qi

Inner Mongolia Normal University, Hohhot

[Abstract] Source apportionment of atmospheric pollutants is a crucial foundation for scientific pollution control and targeted emission reduction, and holds key significance for achieving the synergistic goals of “pollution reduction and carbon mitigation”. This paper systematically reviews the primary methods for source apportionment of atmospheric particulate matter, including emission inventory methods, source-oriented modeling methods, and receptor modeling methods, and analyzes the advantages, disadvantages, and application scenarios of each approach. Additionally, it summarizes the research progress in atmospheric pollution source apportionment both domestically and internationally. Finally, this paper discusses the limitations of traditional methods and the developmental trends in source apportionment technologies, aiming to provide theoretical support and technical references for future research in atmospheric pollution source apportionment.

[Key words] Air pollution; Source apportionment; Research progress

引言

“十四五”时期,我国生态文明建设进入了以降碳为重点战略方向、推动减污降碳协同增效、促进经济社会发展全面绿色转型、实现生态环境质量由量变到质变的关键时期。研究表明温室气体和污染物具有同根同源性,2013年实施的大气污染防治行动计划极大的降低了污染物的浓度,同时也推动了二氧化碳的减排。由于碳中和目标与空气质量目标的高度一致性,生态环境部提出以“减污降碳”为总抓手,加快推动从末端治理向源头治理转变,通过应对气候变化降低碳排放,进而从根本上解决环境污染问题。大气颗粒物来源解析研究工作,是科学、有效开展大气污染防治工作的基础和前提,是追本溯源、量体裁衣、精准治霾、应急应对的重要决策依据。通过使用大气颗粒物源解析方法可以确定排放源的种类和排放源的贡献,可以突出重点治理污染严重的污染源及排放源,从而有效控制大气污染,提高空气质量。

1 大气污染源解析方法

颗粒物的来源解析方法主要有排放源清单法、源模型法和受体模型法三种。排放清单法是选定基准年以后,通过文献调研和实地调查的方法获得不同污染源的活动水平和排放因子,最终计算得到不同污染源对不同污染物的排放量(李贝贝等.,2020;Qi等.,2017),然而由于污染源的排放量和排放因子的不确定性、源清单精细化不足以及排放源对污染物的贡献的非线性关系,导致源排放清单法在源解析时的不确定性较大,因此该方法常作为其他源解析方法的基础支撑(孙丽袁等.,2016)。源模型法是通过空气质量模型模拟污染物从污染源排放出来后,在大气中的扩散传输、化学转化和沉降过程,最终得到不同污染源和不同源区对污染物的贡献(Kwok等.,2013;Burr和Yang,2011;Koo等.,2009),常用的空气质量模型法有气象-化学耦合的区域空气质量模型(WRF-CHEM)、综合空气质量模式(CMAX)、区域多尺度空气质量模型(CMAQ)和嵌套网格空气质量模式预报系统

(NAQMPS), 这种方法较依赖排放清单和气象条件的精准度, 若精准度不够的话, 就会造成源解析结果的不准。受体模型法, 是一种基于源的特征谱来定量不同源对样品的贡献的数学方法, 也是三种源解析方法中使用的最为广发的一种方法, 常用的受体模型法有化学质量平衡法 (Chemical Mass Balance, CMB) 和正交矩阵因子法 (Positive Matrix Factorization, PMF)。CMB模型是基于化学质量守恒原理, 通过化学物种丰度和源贡献的组合, 解析出各类源对污染物中各组分浓度的贡献 (Hopke, 2016), 其局限性在于CMB需要输入本地化的源谱, 且不能识别输入源谱以外的源, 而PMF源解析法不需要源谱信息, 仅仅基于受体成分谱来确定污染源类型和贡献大小 (A等., 2017)。因此相比于CMB源解析法, PMF源解析法更广泛的应用于污染源解析工作中 (张延君等., 2015), 美国EPA也将PMF源解析法作为源解析的推荐方法。

2 国内外研究进展

国外早在1970年就开始了颗粒物的源解析工作, Singh等 (2017) 总结了南亚51个通过受体模型进行颗粒物源解析的研究, 研究表明机动车排放是最重要的 $PM_{2.5}$ 来源, 其贡献为 $37\% \pm 20\%$, 其次是工业源 ($23 \pm 16\%$)、二次气溶胶 ($22 \pm 12\%$) 和自然源 ($20 \pm 15\%$)。该研究还表明特定的源变化趋势具有很强的区域特点和季节性, 在巴基斯坦和阿富汗, 自然源和工业源影响较大; 而在恒河平原机动车排放、自然源和工业排放则是主要的来源; 在孟加拉国, 汽车排放、生物质燃烧和工业排放影响较为明显。gonRyou等 (2018) 对韩国2000–2017年采用PMF和CMB进行 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的研究总结发现, 颗粒物来源可以分为七类, 包括机动车、二次气溶胶、土壤尘、生物质燃烧、燃烧、工业、自然源和其他, 而机动车排放和二次气溶胶是韩国颗粒物中最常见和最影响的来源。Liang等 (2016) 对细颗粒物源解析结果总结发现, 不同国家和地区细颗粒物的来源类型可概括为八大类, 分别是交通源、燃煤源、生物质燃烧、燃油、工业源、矿尘、二次无机盐 (SIA) 和二次有机物 (SOA), 其中SIA (35%)、SOA (19%)、燃煤 (25%) 和交通排放 (20%) 是 $PM_{2.5}$ 最主要的来源。

我国源解析工作自20世纪80年代才开始 (戴树桂等., 1987), 目前已经有大量源解析结果, Zhang等 (2017) 总结了我国在2005–2014期 $PM_{2.5}$ 化学组成和采用受体模型进行来源解析的结果表明: 在北方, 二次源、机动车尾气、燃煤、尘、生物质燃烧和工业排放 $PM_{2.5}$ 的平均贡献分别为 $22\% \pm 17\%$ 、 $17\% \pm 7\%$ 、 $17\% \pm 9\%$ 、 $10\% \pm 12\%$ 、 $8\% \pm 7\%$ 和 $8\% \pm 7\%$, 而在南方, 二次源、机动车尾气、燃煤、尘、生物质燃烧和工业排放对 $PM_{2.5}$ 的平均贡献分别为 $32\% \pm 16\%$ 、 $22\% \pm 8\%$ 、 $5\% \pm 6\%$ 、 $6\% \pm 10\%$ 、 $7\% \pm 7\%$ 和 $10\% \pm 13\%$, 南方的二次源和机动车的贡献分别比北方高10%和5%, 而北方的燃煤贡献则比南方高12%。Zhu等 (2018) 总结了我国在1987–2017年期间239个有关颗粒物源解析的研究, 发现化石燃料燃烧和工业排放是硫酸盐 (63.5%–88.1%) 和硝酸盐 (47.3%–70%) 的最重要的来源, 而农业排放是铵盐的最重要的来源 (53.9%–90%); 此外, 北京和南京长期的源解析结果表明, 经过严格的排放控制后化石燃

料和工业源的贡献正在逐步下降, 而交通源的贡献在逐步增加。Huang等 (2017) 基于受体模型 (PMF) 对京津冀典型城市及背景地区 $PM_{2.5}$ 的主要来源进行了较为详细的解析, 其结果显示: 燃煤、机动车排放、二次无机盐、土壤尘和工业过程排放是城市大气细颗粒物的主要来源, 机动车尾气的直接排放也是城市大气细颗粒物的重要来源。

由于传统的受体模型法是离线采样, 然后分析化学组分, 再结合受体模型法进行来源解析, 因此只能获得有限个采样点和采样时间的源解析结果, 这种低时空分辨率无法捕捉短时间污染的复杂过程, 尽管后来使用在线测量获得高时间分辨率的化学组分数据进行来源解析, 也依然存在空间代表性和排放源代表性不足的局限, 而数值模式可以模拟大气颗粒物及其化学组分的浓度, 模式的输出结果在时间精度和空间覆盖性上都比观测采样获得的结果更细、更广, 因此用模式模拟结果结合受体模型进行来源解析具有更高的时间精度和更广的空间覆盖性 (2015)。陈璞珑等 (2018) 发展了以区域大气环境模式 (RegAEMS) 和PMF相结合的颗粒物来源解析技术, 以2014年南京青奥会为例进行比较, 发现本方法解析出来的 $PM_{2.5}$ 主要排放源贡献与基于离线采样分析的源解析结果基本一致。魏哲等 (2017) 应用WRF-Chem和PMF相结合的颗粒物来源解析技术, 研究了邯郸市2014年10月的 $PM_{2.5}$ 来源, 结果表明本地燃煤源贡献了37.1%, 其次分别为金属冶炼源 (18.4%)、机动车源 (15.1%)、扬尘源 (13.3%) 和生物质燃烧源 (6.2%)。

3 大气源解析的发展趋势

随着监测技术的发展, 高时空分辨率的在线观测数据将更广泛地应用于源解析中, 通过整合多元数据增加对污染源的识别。发展数值模型与受体模型的耦合技术, 并融合地基、走航、遥感等“天地空”一体化观测数据, 以提升解析的时空分辨率和可靠性。随着机器学习和大数据技术的发展, 近年来利用机器学习、深度学习算法挖掘监测数据的隐含信息, 辅助因子识别、贡献量计算和不确定性量化, 实现源解析的智能化和自动化。

4 结语

本文总结了大气颗粒物源解析的常用方法, 排放源清单法、源模型法和受体模型法的优缺点, 发现受体模型法不需要源谱数据, 而更广泛的应用与污染源解析研究中, 进一步总结了国内外应用PMF受体模型解析的大气污染源研究进展。未来大气污染源解析技术将朝着多数据融合、模型耦合与智能化方向发展: 高时空分辨率在线观测数据的多元整合, 将进一步提升污染源识别精度; 数值模型与受体模型的耦合技术, 结合“天地空”一体化观测体系, 将有效改善源解析结果的时空分辨率与可靠性; 而机器学习、深度学习等大数据技术的应用, 也将推动源解析实现智能化、自动化发展, 为精准治污、科学降碳提供更坚实的技术支撑。本综述可为未来大气污染源解析研究提供理论支持和技术参考。

[基金项目]

(1)内蒙古自然科学基金(2022QN04001); (2)内蒙古师范大学人才启动资金支持项目; (3)内蒙古自然科学基金博士基金(2021BS02013)。

[参考文献]

- [1]陈璞琬,王体健,谢晓栋,等.基于数值模式的细颗粒物来源解析[J].科学通报,2018,63(18):1829-1838.
- [2]戴树桂,朱坦,曾幼生,等.从元素组成看渤海、黄海海域大气气溶胶的特征与来源[J].海洋环境科学,1987,(03):9-13.
- [3]李贝贝,黄玉虎,毕晓辉,等.北京市土壤风蚀扬尘排放因子本地化[J].环境科学,2020,41(06):2609-2616.
- [4]魏哲,侯立泉,魏巍,等.结合WRF/Chem和PMF方法的邯郸市PM_{2.5}源解析[J].环境科学与技术,2017,40(11):67-74.
- [5]喻义勇,王苏蓉,秦玮.大气细颗粒物在线源解析方法研究进展[J].环境监测管理与技术,2015,27(03):12-17.
- [6]张延君,郑玫,蔡靖,etal.PM_{2.5}源解析方法的比较与评述[J].科学通报,2015,60(02):109-121+101-102.
- [7]A,Y.Z.,A,J.C.,B,S.W.,et al.Review of receptor-based source apportionment research of fine particulate matter and its challenges in China[J].ScienceDirect,2017,586:917-929.
- [8]Burr,M.J.,Yang, Z.J.A.P.R. Source apportionment of fine particulate matter over the Eastern U.S.Part I:source sensitivity simulations using CMAQ with the Brute Force method[J].2011,2(3):300-317.
- [9]Gon,R.H.,Jongbae,H.,Sun-Young,K.J.E.P.Source apportionment of PM₁₀ and PM_{2.5} air pollution, and possible impacts of study characteristics in South Korea[J].2018,240: 963-972.
- [10]Huang,X.,Liu,Z.,Liu,J.,et al. Chemical characterization and source identification of PM_{2.5} at multiple sites in the Beijing-Tianjin-Hebei region,China[J].2017.
- [11]Hopke PK. Review of receptor modeling methods for source apportionment[J].Journal of the Air & Waste Management Association,2016,66(3):237-259.
- [12]Kwok,R.,Napel'nenok,S.L.,Baker,K.R.J.A.E.Implementation and evaluation of PM_{2.5} source contribution analysis in a photochemical model[J].2013,80(6):398-407.
- [13]Liang, C.S., Duan, F.K., He, K.B., et al. Review on recent progress in observations, source identifications and countermeasures of PM_{2.5}[J].2016,86(JAN.):150-170.
- [14]Qi,J.,Zheng,B.,Li,M.,et al.A high-resolution air pollutants emission inventory in 2013 for the Beijing-Tianjin-Hebei Region, China[J].2017,170(dec.):156-168.
- [15]Zhu, Y.,Huang, L.,Li, J., et al. Sources of particulate matter in China: Insights from source apportionment studies published in 1987-2017[J].2018,115(JUN.):343-357.

作者简介:

闫颖超(1995--),女,汉族,内蒙古赤峰市人,博士研究生,讲师,研究方向:大气化学。

启黎明(1990--),女,蒙古族,内蒙古自治区兴安盟人,博士研究生,讲师,研究方向:环境分析化学。