

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

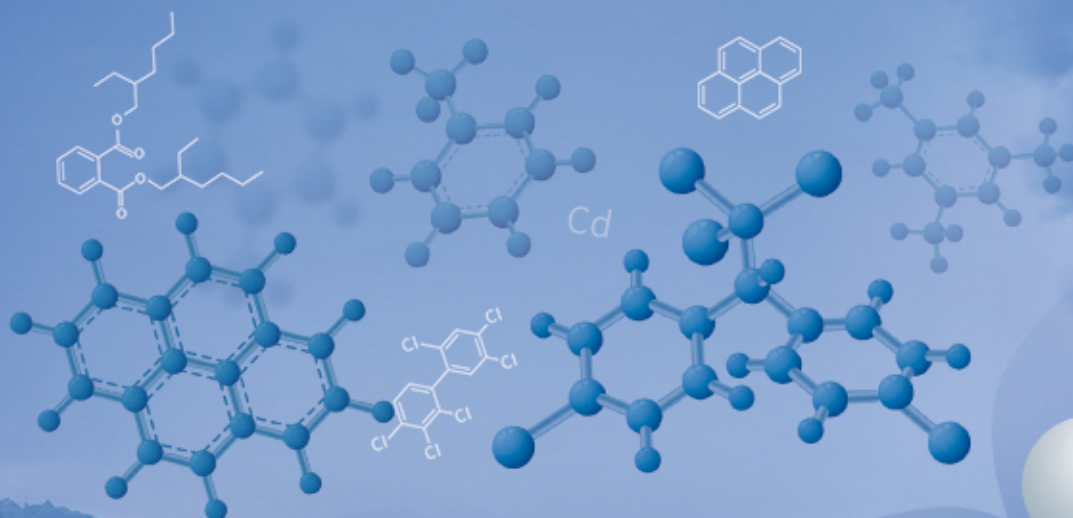
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

升金湖水体优先污染物筛选与风险评价

龚雄虎, 丁琪琪, 金苗, 薛滨, 张路, 姚书春, 王兆德, 卢少勇, 赵中华



PAHs

VOCs

HMs

PCBs

PAEs

OCPs

ANTs

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年10月

第42卷 第10期
Vol.42 No.10

目次

PM _{2.5} 化学组分连续观测在污染事件源解析中的应用	蔡凡涛, 尚玥, 戴维, 谢鸣捷 (4575)
汾渭平原 PM _{2.5} 空间分布的地形效应	黄小刚, 赵景波, 孙从建, 汤慧玲, 梁旭琦 (4582)
华中地区冬季灰霾天气下 PM _{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评价: 以湖北黄冈为例	李星谕, 毛瑶, 陈展乐, 刘威杰, 程铖, 石明明, 许安, 苏业旺, 胡天鹏, 祁士华, 邢新丽 (4593)
华北区域大气中羰基化合物体积分数水平及化学反应活性	黄禹, 陈曦, 王迎红, 刘子锐, 唐贵谦, 李杏茹 (4602)
成都市春季 O ₃ 污染特征及关键前体物识别	韩丽, 陈军辉, 姜涛, 徐晨曦, 李英杰, 王成辉, 王波, 钱骏, 刘政 (4611)
基于边界观测的长三角某工业区 O ₃ 来源特征	黄晴, 黄银芝, 张珊, 金丹, 高松, 修光利 (4621)
廊坊开发区 8~9 月 O ₃ 污染过程 VOCs 污染特征及来源分析	张敬巧, 王宏亮, 方小云, 刘锐泽, 丁文文, 凌德印, 王淑兰 (4632)
广东省家具行业基于涂料类型的 VOCs 排放特征及其环境影响	曾春玲, 邵霞, 刘锐源, 姚懿娟, 李银松, 侯墨, 刘洋, 范丽雅, 叶代启 (4641)
厦门湾空气质量对新冠疫情管控的响应	徐超, 吴水平, 刘怡靖, 钟雪芬 (4650)
北京平原和延庆地区山谷风异同及对污染的影响	吴进, 李琛, 马志强, 孙兆彬, 韩婷婷, 邱雨露, 马小会, 李颖若, 朱晓娟 (4660)
两湖盆地冬季区域大气颗粒物污染特征及独特的风场和下垫面影响	朱燕, 赵天良, 白永清, 徐家平, 孙晓芸, 胡未央, 常嘉成, 杨婕, 朱从祯 (4669)
燃煤电厂颗粒物中硫酸根与硝酸根离子的转化规律	杨柳, 何晴, 盛重义 (4678)
长江流域主要干/支流化学特征及外源酸的影响	王琪, 于爽, 蒋萍萍, 孙平安 (4687)
土地利用对太湖入流河道营养盐的影响	连心桥, 朱广伟, 杨文斌, 康丽娟, 朱梦圆, 许海 (4698)
基于 eDNA 技术的渭河浮游动物多样性及关键种生态位特征	梁东, 夏军, 宋进喜, 常剑波, 吴琼, 程丹东, 张怡恒, 孔飞鹤, 任源鑫 (4708)
三亚市水体中 PPCPs 的污染水平、分布特征及生态风险评价	任丙南, 耿静 (4717)
升金湖水体优先污染物筛选与风险评价	龚雄虎, 丁琪琪, 金苗, 薛滨, 张路, 姚书春, 王兆德, 卢少勇, 赵中华 (4727)
天目湖沙河水库水生态安全状况长期变化及影响因素	杨文斌, 段文秀, 崔扬, 朱广伟, 吴天浩, 许海, 朱梦圆 (4739)
华中地区供水水库抗生素抗性基因的季节变化及影响因素	张凯, 辛蕊, 李观家, 王倩, 王亚南, 许智恒, 崔向超, 魏巍 (4753)
快速城镇化进程中珠江三角洲硝酸型地下水赋存特征及驱动因素	吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 朱亮, 张玉玺 (4761)
盐城地区地表水化学空间特征及控制因素分析	王建, 张华兵, 许君利, 彭俊 (4772)
基于沉积物中总氮和总磷垂向分布与吸附解吸特征的白洋淀清淤深度	周亚婷, 陈兴宏, 李立青, 张伟军, 张美一, 王东升, 王洪杰 (4781)
硼酸和磷酸对 PMS/Co ²⁺ 均相催化氧化有机物的影响因素与机制	万琪琪, 陈铸昊, 曹瑞华, 王静怡, 文刚 (4789)
磁性生物炭负载 α-MnO ₂ 活化过一硫酸盐降解 2,2',4,4'-四溴联苯醚	李鑫, 尹华, 罗昊昱, 欧阳晓芳, 刘航, 祝铭韩 (4798)
紫外活化过硫酸钠灭活水中噬菌体 MS2 的特性及机制	张崇森, 杨昊明, 王真 (4807)
铈改性水葫芦生物炭对磷酸盐的吸附特性	王光泽, 曾薇, 李帅帅 (4815)
低温地下水净化工艺中氨氮去除性能及机制	李冬, 刘孟浩, 张瑞苗, 曾辉平, 张杰 (4826)
我国城市污泥中重金属的赋存形态与生态风险评价	耿源濂, 张传兵, 张勇, 黄豆豆, 闫姝晓, 孙腾飞, 程柳, 王静, 毛宇翔 (4834)
不同气候类型下污水厂活性污泥中微生物群落比较	杨思航, 秦泽生, 梁漫春 (4844)
部分亚硝化-厌氧氨氧化协同反硝化处理生活污水脱氮除碳	秦彦荣, 袁忠玲, 张明, 张民安, 刘安迪, 付雪, 马娟, 陈永志 (4853)
同步短程硝化-厌氧氨氧化-短程反硝化颗粒污泥培育过程及其性能	周峰, 刘勇弟, 厉巍 (4864)
多种微塑料提取方法在中国典型土壤中的应用	赵小丽, 刘子涵, 从辰宇, 韩剑桥 (4872)
柴达木盆地表土重金属污染与来源分析	陈亮, 张西营, 唐启亮, 耿盛, 王二龙, 李姜瑶 (4880)
快速城市化区域不同用地类型土壤重金属含量分布特征及生态风险	李梦婷, 沈城, 吴健, 黄沈发, 李大雁, 王敏 (4889)
广西都安县典型水田晒地球化学特征及影响因素	刘飞, 杨柯, 徐仁廷, 唐世琪 (4897)
炭化苹果枝通过减少土壤 DTPA-Cd 降低苹果砷木镉积累和镉伤害	邓波, 荀咪, 张玮玮, 杨洪强 (4908)
海南省集约化种植园中谷物、蔬菜和水果中重金属累积程度及健康风险	杨剑洲, 王振亮, 高健翁, 严慧, 胡树起, 唐世新, 龚晶晶 (4916)
环境中抗生素抗性基因丰度与抗生素和重金属含量的相关性分析: 基于 Web of Science 数据库检索	苗荪, 陈磊, 左剑恶 (4925)
银川市农田土壤中四环素类抗生素的污染特征及生态风险评估	张小红, 陶红, 王亚娟, 马志义, 周泽英 (4933)
施用不同来源粪肥对土壤中抗生素淋溶的影响	李斌绪, 朱昌雄, 宋婷婷, 马金莲, 张治国, 李红娜 (4942)
我国典型森林土壤微生物驱动的氮代谢途径特征解析	吕雪丽, 赵永鹏, 林清火, 彭显龙, 尹云锋, 蒋先军 (4951)
青藏高原高寒湿地春夏两季根际与非根际土壤反硝化速率及 nirS 型反硝化细菌群落特征分析	李玉倩, 马俊伟, 高超, 霍守亮, 夏星辉 (4959)
松嫩平原芦苇湿地退化与修复过程中土壤细菌和甲烷代谢微生物的群落结构	王秋颖, 王娜, 刘颖, 陈功, 何辉, 高婕, 庄绪亮, 庄国强 (4968)
不同轮作休耕下潮土细菌群落结构特征	南镇武, 刘柱, 代红翠, 张磊, 王娜, 徐杰, 刘开昌, 孟维伟, 王旭清 (4977)
稻田土壤光合细菌群落对镉污染的响应	罗路云, 金德才, 王殿东, 陈昂, 张德咏, 曾军, 匡炜, 张卓, 刘勇 (4988)
铁尾矿芦苇根际微生物和根内生菌群落分布及其限制性因子解析	曹曼曼, 王飞, 周北海, 陈辉伦, 袁蓉芳 (4998)
有机无机氮配施对不同程度盐渍土硝化和反硝化作用的影响	周慧, 史海滨, 张文聪, 王维刚, 苏永德, 闫妍 (5010)
水稻产量、稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放对长期大气 CO ₂ 浓度升高的响应	于海洋, 宋开付, 黄琼, 王天宇, 张广斌, 马静, 朱春梧, 徐华 (5021)
原料和热解温度对生物炭中可溶性有机质的影响	闫代红, 马亚培, 宋凯悦, 马红亮, 高人, 尹云锋 (5030)
中国 84 个主要城市大气热岛效应的时空变化特征及影响因素	李宇, 周德成, 闫章美 (5037)
室内建筑装饰装修材料气味物质及其释放研究进展	张万众, 张彭义 (5046)
《环境科学》征订启事 (4814) 《环境科学》征稿简则 (4871) 信息 (4907, 5009, 5029)	

PM_{2.5} 化学组分连续观测在污染事件源解析中的应用

蔡凡涛, 尚玥, 戴维, 谢鸣捷*

(南京信息工程大学环境科学与工程学院, 大气环境与装备技术协同创新中心, 江苏省大气环境监测与污染控制高新技术研究重点实验室, 南京 210044)

摘要: 为探索 PM_{2.5} 组分高时间分辨观测数据在污染事件源解析中的应用, 于 2017 年 1 ~ 12 月对南京市环境空气中 PM_{2.5} 组分进行连续观测. 分别利用重金属自动分析仪、离子在线分析仪和半连续 OC/EC 分析仪测定 PM_{2.5} 中元素、水溶性离子和碳质组分的小时浓度. 选取其中 15 种元素与 5 种丰量组分, 分别基于 3 次污染事件(春节期间烟花爆竹燃放、春季沙尘暴和冬季灰霾)和全年的观测结果采用正矩阵因子分析(positive matrix factorization, PMF)模型进行源解析, 并比较不同输入数据条件下(PMF_{烟花-沙尘-灰霾} 和 PMF_{全年})的源贡献分布及特征组分平均浓度的估算情况. 结果表明, 基于不同观测数据的源解析结果在 PMF 因子类型、组成及贡献分布上均存在较大差异. 例如, 基于全年观测数据(PMF_{全年})的源解析结果中烟花爆竹燃放的平均贡献仅为 1.50%, 远低于 PMF_{烟花} 结果中对应的源贡献(5.24%); 扬尘源的平均相对贡献在 PMF_{沙尘} 结果中为 8.51%, 比 PMF_{全年} 结果中扬尘源的贡献(4.45%)高近 1 倍. 主要归结于 PMF 模型假设来源构成不发生变化, 基于长期观测数据的源解析结果易受到排放源变化的影响. 另外, 烟花爆竹燃放期间, 特征组分 K 的 PMF_{烟花} 估算结果 $[(1.32 \pm 1.17) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}, P = 0.64]$ 较 PMF_{全年} $[(1.16 \pm 1.19) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}, P = 0.0090]$ 更接近其观测平均值 $[(1.36 \pm 1.19) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$. 春季沙尘暴期间, 特征组分 Fe、Si 和 Ti 的 PMF_{全年} 估算结果 $[(0.061 \pm 0.042) \sim (1.06 \pm 0.65) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$ 均显著低于观测平均值 ($P < 0.05$), 而它们的 PMF_{沙尘} 估算值在峰值区域同观测值高度一致. 冬季灰霾污染期间, PM_{2.5} 各丰量组分 PMF_{全年} 和 PMF_{灰霾} 估算值同观测值的吻合程度均很高 ($r > 0.99$). 因此, 基于污染事件期间的连续观测结果进行 PMF 源解析能较准确地反映特征组分及相关排放源的短期变化, 有利于提高污染溯源的时效性.

关键词: PM_{2.5}; PMF 源解析; 污染事件; 连续观测; 贡献分布

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)10-4575-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.202102151

Continuous PM_{2.5} Composition Measurements for Source Apportionment During Air Pollution Events

CAI Fan-tao, SHANG Yue, DAI Wei, XIE Ming-jie*

(Jiangsu Key Laboratory of Atmospheric Environment Monitoring and Pollution Control, Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, School of Environmental Science & Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: To explore the application of high-temporal-resolution data in PM_{2.5} source apportionment during air pollution events, ambient air PM_{2.5} components were continuously monitored in urban Nanjing from January to December, 2017. Commercially available instruments for continuous measurements were deployed to obtain hourly concentrations of elements, water-soluble ions, and carbonaceous components of PM_{2.5}. Data for 15 elements and 5 bulk components during three pollution events (firework combustion during the Spring Festival, a spring sandstorm, and a winter haze event) and across the whole year comprised four datasets for source apportionment using positive matrix factorization (PMF), and the distribution of factor/source contributions and estimations of average concentrations of characteristic components were compared based on different input datasets (PMF_{firework-sand-haze} and PMF_{full-year}). The results showed that the identified factors/sources, factor profiles, and contributions differed largely between PMF_{firework-sand-haze} and PMF_{full-year} solutions. For example, the relative average contribution of the firework combustion factor derived from the PMF_{full-year} solution (was 1.50%) was far less than that of the PMF_{firework} solution. The dust factor had an average contribution of 8.51% in the PMF_{sand} solution, which was approximately double that of the PMF_{full-year} solution. This might be explained by the fact that PMF assumes unvaried source compositions during the measurement campaign, meaning that the source apportionment results based on long-term observations will include bias due to changes in emission sources. Furthermore, during the firework combustion event, the estimated average concentration of K from the PMF_{firework} solution $[(1.32 \pm 1.17) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}, P = 0.64]$ was closer to measured value $[(1.36 \pm 1.19) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$ than that of the PMF_{full-year} solution $[(1.16 \pm 1.19) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}, P = 0.0090]$. For the sand storm event, the concentrations of Fe, Si, and Ti were significantly underestimated by the PMF_{full-year} solution $[(0.061 \pm 0.042) \sim (1.06 \pm 0.65) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}, P < 0.05]$, while their peak concentrations agreed well between the PMF_{sand} estimations and the observations. During the winter haze event, all PM_{2.5} bulk components were well estimated by both the PMF_{full-year} and PMF_{haze} solutions. Based on these results, PMF source apportionment results based on continuous measurement data during pollution events can reasonably reflect short-term variations in characteristic PM_{2.5} components and their sources, which can improve the timeliness of air pollution source apportionment.

Key words: PM_{2.5}; PMF source apportionment; pollution event; continuous monitoring; contribution distribution

PM_{2.5} 是造成大气灰霾形成的首要污染物, 对大气能见度、地球辐射平衡和人体健康均有重要影响^[1-4]. 了解大气中 PM_{2.5} 的污染特征和来源, 对制定大气污染控制策略、评估大气污染治理效果及实

收稿日期: 2021-02-23; 修订日期: 2021-03-25

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(41701551)

作者简介: 蔡凡涛(1995 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气环境化学, E-mail: 549255079@qq.com

* 通信作者, E-mail: mingjie.xie@nuist.edu.cn

现经济的可持续发展均有重要意义^[5].

近 10 年来我国区域性霾污染事件频发. 不同污染事件中导致 PM_{2.5} 浓度升高的原因存在较大差异, 包括颗粒物及其前体物排放量骤升(例, 秸秆焚烧、集中供暖)和不利的天气条件(例, 静稳天气、高湿低温、逆温层高度低). PM_{2.5} 的化学组成在污染事件发生前、中和后期会发生很大变化, 同源排放、气象因子和大气过程及他们之间复杂的相互作用密切相关^[6,7]. 根据空气污染事件期间 PM_{2.5} 化学组成的高时间分辨连续观测结果, 结合受体模型分析, 可快速甄别污染事件中的主要污染源并量化其贡献, 为提高污染控制对策的时效性提供理论和技术支撑.

南京市位于长三角西部地区, 受本地排放和大气传输影响, 空气污染事件频发, 且具有代表性. 本研究根据该地区一城市采样点 2017 年 PM_{2.5} 化学组成的小时观测数据, 结合已有研究, 利用正矩阵因子模型(positive matrix factorization, PMF)对 3 个典型空气污染事件(春节期间烟花爆竹燃放、春季沙尘暴和冬季灰霾)中的 PM_{2.5} 进行源解析; 比较基于污染事件期间短期观测和基于全年观测数据的源解析结果, 阐明利用短期观测数据进行污染事件源解析的优势.

1 材料与方法

1.1 样品采集与分析

PM_{2.5} 化学组成高时间分辨(1 h)观测点位于市中心南京环保大厦楼顶(32.06 °N, 118.75 °E), 采样点距地面的高度约为 20 m. 距离交通干道虎踞路仅 200 m, 附近有住宅楼, 公园和学校. 采用重金属自动分析仪(Xact 625, 河北先河)检测 PM_{2.5} 中 K、Fe、Zn、Ca、Si、Mn、Pb、Cu、Ti、As、V、Ba、Cr、Se、Ag、Cd、Ni、Au、Co、Sn、Sb、Tl 和 Hg 共 23 种元素. 使用离子在线分析仪(MARGA ADI 2080, 瑞士万通)和半连续 OC/EC 碳质分析仪器(RT-4, 美国 Sunset laboratory)分别监测 PM_{2.5} 中的水溶性无机离子(NH₄⁺、SO₄²⁻、NO₃⁻、Cl⁻、Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺ 和 Na⁺)和有机碳(Organic carbon, OC)/元素碳(Elemental carbon, EC). PM_{2.5} 质量浓度由 BAM-1020 颗粒物连续监测仪(美国 Metone)记录. 本研究中 PM_{2.5} 各组分小时浓度观测的起止时间为 2017-01-01T00:00 ~ 2017-12-31T23:00, 期间各在线观测设备的设置、校准和观测结果验证详见文献^[8,9].

1.2 正矩阵因子分析(PMF)模型

本研究采用正矩阵因子分析模型(美国 EPA PMF 5.0)解析 PM_{2.5} 中各化学组分的来源. PMF 是

一种多变量受体模型, 假设受体处 PM_{2.5} 各组分的浓度为排放源贡献的线性组合.

$$X_{ij} = \sum_{k=1}^p (G_{ik} \times F_{kj}) + E_{ij} \quad (1)$$

式中, X_{ij} 为第 i 个样品中第 j 种化学组分的浓度, $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; G_{ik} 为第 i 个样本中第 k 类源的贡献, $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; F_{kj} 为第 k 类源中第 j 种化学组分所占的质量分数, $\mu\text{g}\cdot\mu\text{g}^{-1}$; E_{ij} 为第 i 个样品中第 j 种化学组分的残差.

PMF 模型通过寻求最小化目标函数 Q 的解确定污染源成分谱 F 和污染源贡献谱 G ^[10,11].

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{E_{ij}}{U_{ij}} \quad (2)$$

式中, U_{ij} 表示 i 样本中 j 物种的不确定性. 美国 EPA PMF 5.0 版本采用 3 种误差分析方法, 包括经典的自举法(bootstrapping, BS)、置换法(displacement, DISP)和自举-置换串联法(BS-DISP)评估解析结果的稳定性. 除源解析结果的可解释性外, 误差分析结果在本研究中也作为确定最终因子数的参考依据^[12~14].

1.3 PMF 输入数据选择和处理

Yu 等^[8,9] 对本研究中涉及的 2017 年 PM_{2.5} 组分连续观测数据进行分析, 发现 NH₄⁺、SO₄²⁻、NO₃⁻、OC 和 EC 的总平均质量浓度占 PM_{2.5} 质量浓度的 90% 以上. 所分析的 23 种元素中, Au、Co、Sn、Sb、Tl、Cd 和 Ag 的观测有超过 40% 缺失或低于检测限; 将 Hg 观测数据输入 PMF 模型会导致燃煤源解析结果的可解释性降低. 另外, Xact 625 于每天午夜 00:00 ~ 01:00 自动进行质控自检, 该时间范围内输出的元素检测数据未用于 PMF 模型分析. 经筛选后, 本研究用于 PMF 分析的 PM_{2.5} 化学组分数据包括 6 616 组含有 5 种 PM_{2.5} 丰量组分(NH₄⁺、SO₄²⁻、NO₃⁻、OC 和 EC)和 15 种元素示踪物(K、Fe、Zn、Ca、Si、Mn、Pb、Cu、Ti、As、V、Ba、Cr、Se、Ag、Cd 和 Ni)的小时观测结果. 为比较分析基于污染事件期间 PM_{2.5} 化学组分短期观测和基于长期观测的 PMF 源解析结果, 本研究根据筛选后的观测结果生成 4 个 PMF 输入数据集, 分别为 2017 全年观测($N = 6\,616$, PMF_{全年})、春节烟花爆竹燃放(2017-01-26 ~ 2017-02-16, $N = 456$, PMF_{烟花})、春季沙尘暴(2017-05-06 ~ 2017-05-11, $N = 113$, PMF_{沙尘})和冬季灰霾污染(2017-12-02 ~ 2017-12-29, $N = 322$, PMF_{灰霾}). 输入数据的不确定度由下式计算:

$$\text{不确定度} = \sqrt{(\text{误差百分比} \times \text{浓度})^2 + (0.5 \times \text{检测限})^2} \quad (3)$$

式中,误差百分比对所有组分均设为 10%^[15~18]. 各数据集中个别组分的缺失值由其余观测值的几何平均值替代,缺失值的不确定度被设定为其替代值的 4 倍;低于检测限的观测值被设定为检测限的 1/2,其不确定度为检测限的 5/6^[19].

1.4 统计分析方法

本研究分别采用 Student's *t*-test (*t* 检验)、Pearson 相关分析和离散系数 (coefficient of divergence, COD) 评估 PM_{2.5} 化学组分观测和基于不同输入数据 PMF 分析结果之间的显著性差异、相关系数 (correlation coefficient, *r*) 和离散程度. 其中 COD 的定义如下:

$$\text{COD} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i^{\text{estimated}} - x_i^{\text{observed}}}{x_i^{\text{estimated}} + x_i^{\text{observed}}} \right)^2} \quad (4)$$

式中, $x_i^{\text{estimated}}$ 和 x_i^{observed} 分别表示第 *i* 个样本中特定组分的 PMF 估算值与观测值, *n* 为输入数据集所包含的观测样本数. COD 值接近 0 和 1 分别表示高度的一致性和差异性^[20,21].

2 结果与讨论

2.1 PM_{2.5} 污染事件及特征组分

图 1 展示了 2017 年 3 次污染事件期间特征组分小时浓度的时间序列. 由于烟花爆竹燃放可释放大量富含 K 和 Ba 的细颗粒物^[22,23], 2017 年春节至

元宵节期间 (01-26 ~ 02-16) Ba 和 K 的小时平均浓度分别高达 $(0.076 \pm 0.13) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $(1.36 \pm 1.19) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 比全年其余观测结果的平均值分别高 8.04 倍和 2.47 倍. 南京已于 2015 年在市区全面禁止烟花爆竹燃放, 本研究 PM_{2.5} 中 K 和 Ba 浓度的激增 [图 1(a)] 主要归结于周边地区排放的扩散和传输. 在 05-06 ~ 05-11 期间, PM_{2.5} 中 Fe、Ca、Si 和 Ti 的小时浓度出现两次峰值 [图 1(b)], 其平均值分别为 (1.26 ± 0.82) 、 (0.74 ± 0.66) 、 (1.12 ± 1.06) 和 $(0.091 \pm 0.075) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 比其它时期观测的平均值高出 2.25 ~ 4.15 倍. 已有研究表明, 该时期我国东部因受来自中东亚地区沙尘暴的影响, 大气中粗颗粒物浓度比沙尘暴发生前高数倍^[24]. PM_{2.5} 在 12-02 ~ 12-29 期间的平均小时浓度高达 $(59.5 \pm 28.5) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 为其它时期平均值的 1.71 倍. 从化学组成上看, 该时期 PM_{2.5} 主要成分 NH_4^+ [$(10.9 \pm 5.68) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$]、 NO_3^- [$(24.5 \pm 14.3) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$]、 SO_4^{2-} [$(9.96 \pm 4.44) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$]、OC [$(9.61 \pm 2.16) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$] 和 EC [$(4.48 \pm 5.69) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$] 的平均小时浓度均显著升高 ($P < 0.05$), 是其它观测时期平均值的 1.11 ~ 2.22 倍. 除大气边界层高度降低和大气稳定度升高外, 冬季长三角地区低温高湿的环境条件有利于气态前体物 (NO_x 和 SO_2) 的二次转化, 加剧灰霾的形成^[25,26].

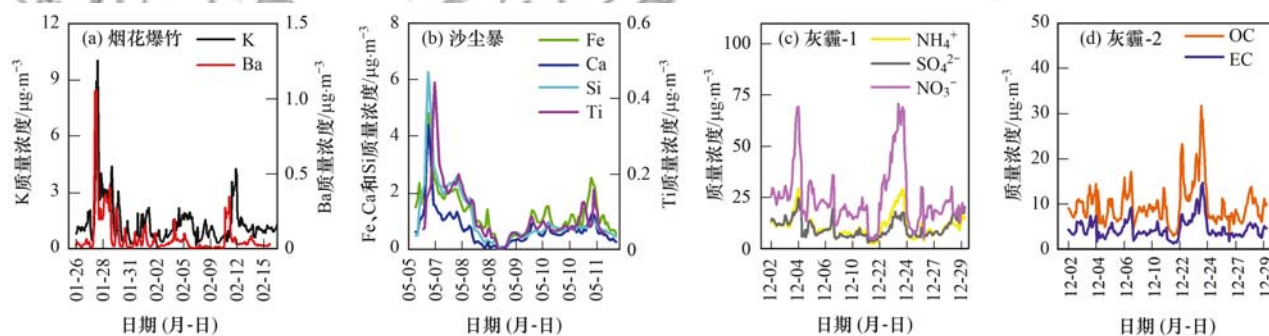


图 1 2017 年春节烟花爆竹燃放、春季沙尘暴和冬季灰霾期间 PM_{2.5} 特征组分的小时浓度时间序列

Fig. 1 Hourly concentration time series of PM_{2.5} characteristic components during Spring Festival with firework combustions, sandstorm periods in late spring, and haze periods in winter, 2017

2.2 基于全年和污染事件观测的 PMF 分析结果

Yu 等^[8,9]利用本研究中 2017 全年 PM_{2.5} 化学组分的小时观测数据进行 PMF 源解析, 识别并量化了 7 个排放源. 但这些已有研究的 PMF 输入数据中不包含春节烟花爆竹燃放和春季沙尘暴期间的观测结果, 且未针对冬季灰霾污染分析主要排放源的贡献分布. 因此, 有必要针对特定污染事件, 比较基于污染事件期间短期观测和基于长期观测数据的 PMF 源解析结果, 研究不同数据选择方案的优势.

本研究分别对 4 个 PM_{2.5} 化学组分小时浓度数

据集进行 PMF 分析, 获得基于全年和污染事件观测的源解析结果. 图 2 和图 3 分别展示了基于不同观测数据获得的标准化 PMF 因子组成和因子平均贡献分布. 利用全年观测数据共解析出 8 个因子. 通过与已有研究对比^[8,9], 这 8 个因子中有 7 个可分别解释为燃煤 (特征组分 As、Se 和 Pb, 平均贡献 1.26%, 下同)、扬尘 (Fe、Ca、Si 和 Ti, 4.45%)、重油燃烧 (Ni 和 V, 3.76%)、交通排放 (Cu、EC 和 OC, 12.7%)、冶金 (Cr 和 Mn, 1.89%)、二次硫酸盐 (NH_4^+ 和 SO_4^{2-} , 32.3%) 和二次硝酸盐 (NH_4^+ 和

NO_3^- , 42.1%). 不同于 Yu 等^[8,9]的工作,本研究分析的全年观测数据($\text{PMF}_{\text{全年}}$)包括春节烟花爆竹燃放和春季沙尘暴期间的观测结果,且基于全年观测解析出的第8个因子中富含K和Ba,因此笔者推断该因子和烟花爆竹燃放密切相关(平均贡献1.50%). 利用污染事件期间的短期观测结果进行PMF分析仅解析出6~7个因子. $\text{PMF}_{\text{烟花}}$ 、 $\text{PMF}_{\text{沙尘}}$ 和 $\text{PMF}_{\text{灰霾}}$ 的结果中均包括燃煤、扬尘、重油、冶金、二次硫酸盐/硝酸盐或二次无机盐,其中二次无机盐代表二次硫酸盐和二次硝酸盐贡献的总和(图2). 和 $\text{PMF}_{\text{全年}}$ 的结果相比, $\text{PMF}_{\text{烟花}}$ 的结果中未解析出交通排放源,同交通排放源密切相关的Cu、OC和EC在 $\text{PMF}_{\text{烟花}}$ 的结果中被分配至其它排放源

(例,扬尘、重油燃烧和二次无机盐). 南京城区禁止烟花爆竹燃放, $\text{PM}_{2.5}$ 化学组成仅在春节期间受周边地区大规模燃放的影响, $\text{PMF}_{\text{沙尘}}$ 和 $\text{PMF}_{\text{灰霾}}$ 的分析结果中均没有烟花爆竹排放源(图2). $\text{PM}_{2.5}$ 源组成不发生变化是PMF模型分析的重要前提假设之一. 尽管 $\text{PMF}_{\text{全年}}$ 因数据量最大其分析结果的稳定性比 $\text{PMF}_{\text{烟花-沙尘-灰霾}}$ 更高,但基于长期观测的PMF分析更容易受到排放源变化的影响. 例如,基于不同时期观测数据解析出的PMF因子类型和成分谱存在较大差异(图2); $\text{PMF}_{\text{全年}}$ 中烟花爆竹源的平均贡献(1.5%)远低于 $\text{PMF}_{\text{烟花}}$ (5.24%,图3); 扬尘源的平均相对贡献在 $\text{PMF}_{\text{沙尘}}$ 中为8.51%,约为 $\text{PMF}_{\text{全年}}$ 中扬尘源贡献(4.45%)的2倍(图3).

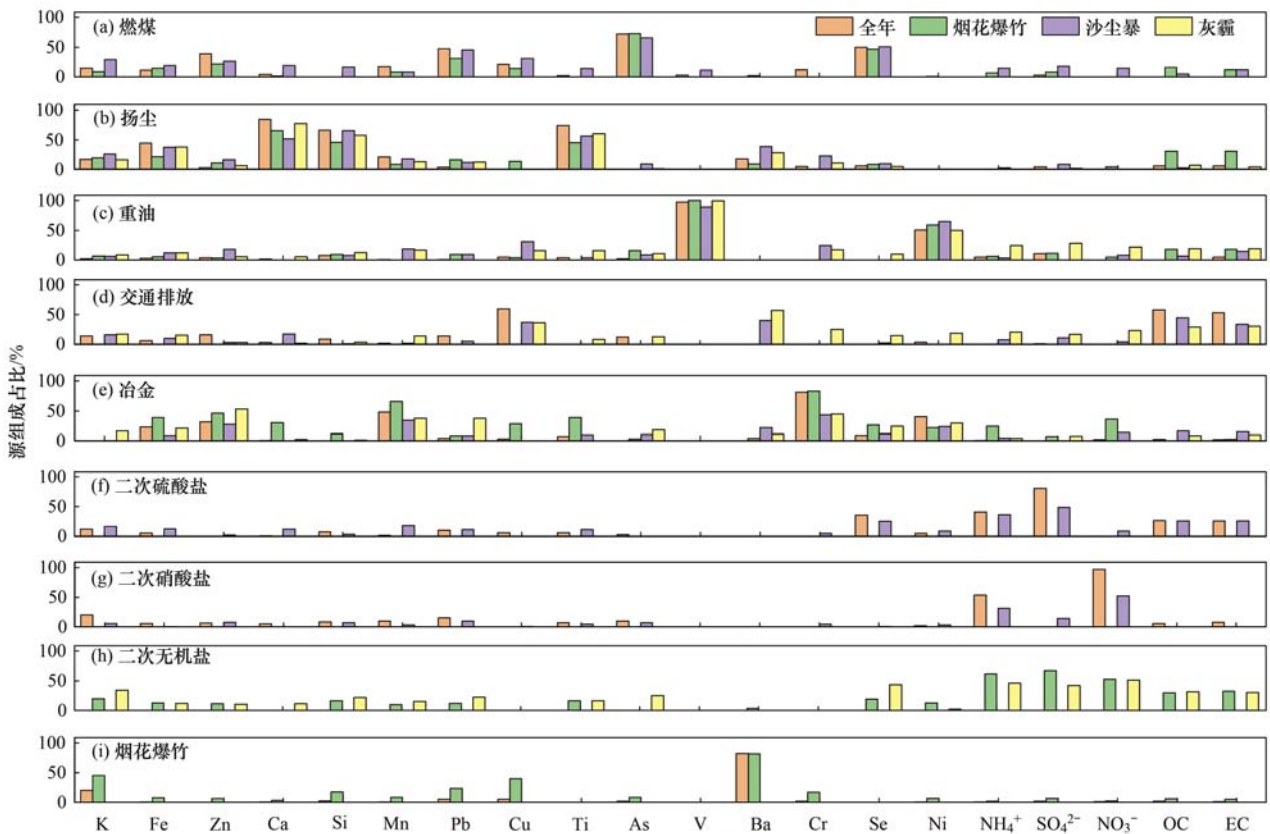


图2 基于全年和污染事件观测数据分析的标准化PMF因子(或源)组成

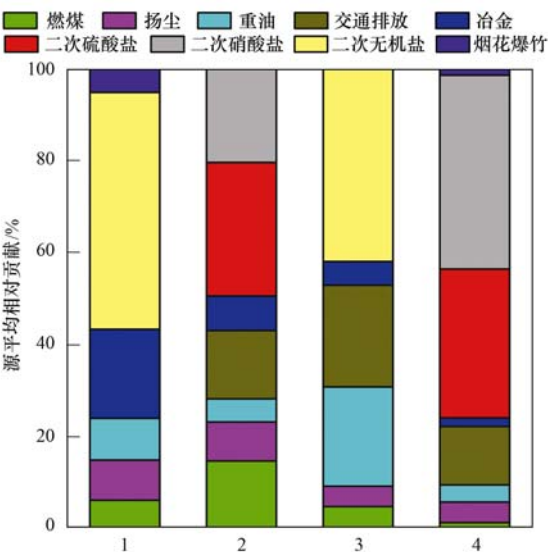
Fig. 2 Normalized PMF factor(or source) profiles based on the analysis of measurement data for full-year and pollution events

2.3 基于全年和污染事件观测的PMF源贡献对比

2.3.1 特征组分平均质量浓度估算

表1给出3次污染事件所对应特征组分的观测平均值、基于 $\text{PMF}_{\text{烟花-沙尘-灰霾}}$ 和 $\text{PMF}_{\text{全年}}$ 分析结果的估算平均值. 对春节烟花爆竹燃放事件, Ba的 $\text{PMF}_{\text{烟花}}$ 和 $\text{PMF}_{\text{全年}}$ 估算结果同观测平均值均没有显著性差异(P 为0.56和0.97); K的 $\text{PMF}_{\text{烟花}}$ 估算结果 $[(1.32 \pm 1.17) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}, P = 0.64]$ 较 $\text{PMF}_{\text{全年}}$ $[(1.16 \pm 1.19) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}, P = 0.0090]$ 更接近观测平均值 $[(1.36 \pm 1.19) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$. 春季沙尘暴期间特

征组分(Fe、Ca、Si和Ti)的观测平均值 $[(0.091 \pm 0.075) \sim (1.26 \pm 0.82) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$ 与 $\text{PMF}_{\text{沙尘}}$ 分析结果的估算平均值 $[(0.089 \pm 0.073) \sim (1.23 \pm 0.75) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$ 均无显著性差异(P 为0.55~0.99). 除Ca以外, Fe、Si和Ti的 $\text{PMF}_{\text{全年}}$ 估算结果 $[(0.061 \pm 0.042) \sim (1.06 \pm 0.65) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$ 均显著低于观测平均值(P 为0.036、0.00021和0.00025). 烟花爆竹燃放和沙尘暴事件主要导致 $\text{PM}_{2.5}$ 中特征源示踪物(例,K和Fe)浓度的急剧升高,而冬季灰霾污染期间,源排放的增加和不利的天气条件促进 $\text{PM}_{2.5}$



1. 烟花爆竹事件, 2. 沙尘暴时间, 4. 灰霾时间, 3. 全年
图3 基于不同观测数据进行 PMF 分析的源平均相对贡献
Fig. 3 Average relative contributions of identified sources from PMF analysis of different measurement data

各组分浓度整体升高,特别是丰量组分中的二次无机盐. 如表 1 所示,PM_{2.5} 主要丰量组分 (NH₄⁺、NO₃⁻、SO₄²⁻、OC 和 EC) 的 PMF_{灰霾} 和 PMF_{全年} 估算结果均能解释 90% 以上的观测平均值,但 OC 的 PMF_{全年} 估算均值显著低于观测均值 ($P=0.0078$). 以上结果表明,利用污染事件期间的短期观测结果进行 PMF 分析,特征组分的源贡献总和能更准确地反映其在污染事件期间的平均浓度. 这可归结于 PMF 模型假设排放源组成不发生改变,在求解过程中最大程度拟合各组分的平均值,从而易低估污染事件期间相关特征组分观测的极大值,高估这些组分在非污染事件期间的极小值^[27~29].

2.3.2 特征组分 PMF 估算值和观测值的时间变化
由图 4 可见,除 Ti、V 和 Cr 等少数元素外,3 个污染事件期间各输入组分 PMF_{烟花-沙尘-灰霾} 和 PMF_{全年} 估算值同观测值的相关系数 (r) 均大于 0.99,离散系数 (COD) 均小于 0.2,说明基于污染事件短期和全年长期观测的 PMF 分析均能较合理反

表 1 春节烟花爆竹燃放、春季沙尘暴和冬季灰霾事件对应特征组分的观测平均值、
基于 PMF_{烟花-沙尘-灰霾} 和基于 PMF_{全年} 分析结果的估算平均值/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 1 Average mass concentrations of characteristic components of firework combustion during Spring Festival, spring sand storms, and winter haze events derived from measurements and estimations based on PMF_{firework-sand-haze} and PMF_{full-year} data sets/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

事件	组分	观测均值	PMF _{烟花-沙尘-灰霾} 估算均值	PMF _{全年} 估算均值
烟花爆竹燃放 (01-26 ~ 02-26)	K	1.36 ± 1.19	1.32 ± 1.17	1.16 ± 1.19
	Ba	0.076 ± 0.13	0.071 ± 0.12	0.076 ± 0.13
	Fe	1.26 ± 0.82	1.23 ± 0.75	1.06 ± 0.65
春季沙尘暴 (05-06 ~ 05-11)	Ca	0.74 ± 0.66	0.69 ± 0.50	0.85 ± 0.60
	Si	1.12 ± 1.06	1.12 ± 1.08	0.65 ± 0.43
	Ti	0.091 ± 0.075	0.089 ± 0.073	0.061 ± 0.042
冬季灰霾 (12-02 ~ 12-29)	NH ₄ ⁺	10.90 ± 5.68	10.60 ± 4.93	10.90 ± 5.86
	SO ₄ ²⁻	9.96 ± 4.44	9.29 ± 4.25	10.09 ± 4.63
	NO ₃ ⁻	24.50 ± 14.3	22.70 ± 11.1	24.70 ± 14.3
	OC	9.61 ± 2.16	9.38 ± 3.95	8.74 ± 3.89
	EC	4.48 ± 5.69	4.37 ± 1.91	4.51 ± 1.97

映大多组分的时间变化^[30]. 尽管如此,大多组分 PMF_{全年} 估算值比 PMF_{烟花-沙尘-灰霾} 估算值偏离观测结果的程度更大. 例如,春节烟花爆竹燃放事件期间, K 的 PMF_{烟花} 估算结果对应的 COD 值为 0.075,仅为 PMF_{全年} 估算结果对应 COD 的 48.6% [图 4(a)]. 春季沙尘暴期间各特征组分 (Fe、Ca、Si 和 Ti) 的 PMF_{沙尘}-COD(0.046 ~ 0.065) 为 PMF_{全年}-COD(0.11 ~ 0.26) 的 0.20 ~ 0.61 倍. 另外,图 5 给出了春季沙尘暴期间 PM_{2.5} 中 Fe、Ca、Si 和 Ti 于最大峰值前后的小时浓度变化(05-06 T06:00 ~ 05-06T10:00). Fe、Ca、Si 和 Ti 的观测峰值均出现在 5 月 6 日的早上 08:00, 分别为 4.82、4.40、6.28 和 0.44 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Fe、Si 和 Ti 的 PMF_{沙尘} 估算值在峰值区域

同观测值高度吻合,而 PMF_{全年} 估算值在峰值区域则远低于观测值[图 5(a)、5(c)和 5(d)]. Ca 的 PMF_{沙尘} 和 PMF_{全年} 估算值时间变化一致,但在峰值处均远低于观测值. 冬季灰霾时期,各丰量组分 (NH₄⁺、NO₃⁻、SO₄²⁻、OC 和 EC) PMF_{全年} 和 PMF_{灰霾} 估算值同观测值的吻合程度均很高 (COD_{灰霾} 为 0.057 ~ 0.12, COD_{全年} 为 0.061 ~ 0.13, $r>0.99$),且 PMF_{全年} 的估算结果和观测值相比并未体现出更高的一致性. 这些结果表明,利用污染事件期间的短期观测结果进行 PMF 分析时,相关组分的源贡献总和能更准确地体现其在污染事件期间的的时间变化,而采用长期观测数据进行 PMF 分析易低估污染事件期间相关特征组分的源贡献.

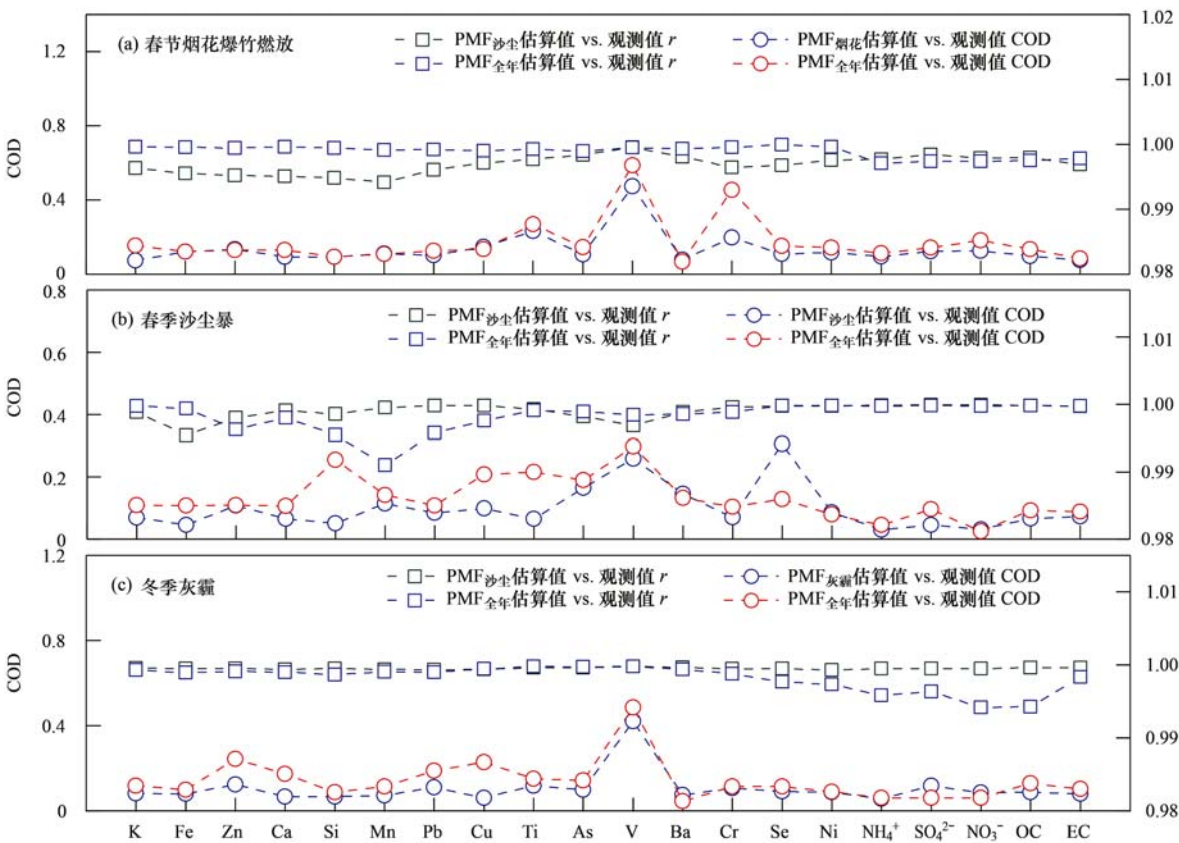


图 4 $PM_{2.5}$ 各组分 ($N=20$) 在春节烟花爆竹燃放、春季沙尘暴和冬季灰霾期间基于污染事件和全年观测的 PMF 估算值同观测值的相关系数 (r) 和离散系数 (COD)

Fig. 4 Correlation coefficients(r) and coefficients of divergence(COD) between PMF estimations of $PM_{2.5}$ components($N=20$) based on pollution-event and full-year observations and their measurements for firework combustions during Spring Festival, spring sand storm, and winter haze

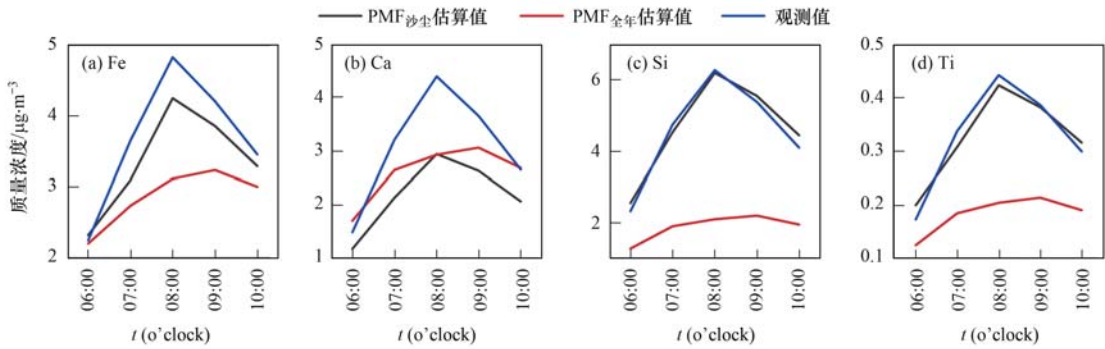


图 5 春季沙尘暴期间 Fe、Ca、Si 和 Ti 于峰值前后 PMF_{沙尘} 估算值、PMF_{全年} 估算值和观测值的小时变化(5月6日)

Fig. 5 Hourly concentrations of Fe, Ca, Si, and Ti before and after their peak values derived from PMF_{sand} estimation, PMF_{full-year} estimation, and measurements during the spring sand-storm event(6th May)

3 结论

(1) PMF_{全年} 源解析结果中烟花爆竹燃放和扬尘源的平均相对贡献均远低于 PMF_{烟花} 和 PMF_{沙尘} 结果中对应的排放源贡献,说明尽管 PMF_{全年} 因数据量大其分析结果的稳定性比 PMF_{烟花-沙尘-灰霾} 结果更高,但基于长期观测的 PMF 源解析结果更容易受到排放源变化的影响。

(2) 各污染事件中特征组分平均浓度的 PMF_{烟花-沙尘-灰霾} 估算结果较 PMF_{全年} 更接近观测值。利用污染事件期间的观测结果进行 PMF 源解析时,相关特征组分的源贡献总和能更准确地体现其浓度的短期变化,而利用长期观测数据进行 PMF 分析易低估污染事件期间相关特征组分的源贡献。主要归结于 PMF 模型在求解过程中最大程度拟合各组分的平均值,导致基于长期观测的源解析结果易低估短期污染事件相关特征组分浓度的极大值。

(3)在确保观测样本数量的前提下,建议采用短期连续观测结果对污染事件进行溯源分析,既能较准确地反映特征组分及相关排放源的短期变化,又有利于提高源解析工作的时效性。

参考文献:

- [1] Deng J J, Du K, Wang K, *et al.* Long-term atmospheric visibility trend in Southeast China, 1973-2010[J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **59**: 11-21.
- [2] Huang X J, Liu Z R, Zhang J K, *et al.* Seasonal variation and secondary formation of size-segregated aerosol water-soluble inorganic ions during pollution episodes in Beijing [J]. *Atmospheric Research*, 2016, **168**: 70-79.
- [3] Wang Y J, Li L, Chen C H, *et al.* Source apportionment of fine particulate matter during autumn haze episodes in Shanghai, China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, **119**(4): 1903-1914.
- [4] Wei X Y, Liu M, Yang J, *et al.* Characterization of PM_{2.5}-bound PAHs and carbonaceous aerosols during three-month severe haze episode in Shanghai, China; chemical composition, source apportionment and long-range transportation [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **203**: 1-9.
- [5] 余晔, 夏敦胜, 陈雷华, 等. 兰州市 PM₁₀ 污染变化特征及其成因分析[J]. *环境科学*, 2010, **31**(1): 22-28.
Yu Y, Xia D S, Chen L H, *et al.* Analysis of particulate pollution characteristics and its causes in Lanzhou, Northwest China[J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(1): 22-28.
- [6] Nel A. Air pollution-related illness: effects of particles [J]. *Science*, 2005, **308**(5723): 804-806.
- [7] Bellouin N, Boucher O, Haywood J, *et al.* Global estimate of aerosol direct radiative forcing from satellite measurements [J]. *Nature*, 2005, **438**(7071): 1138-1141.
- [8] Yu Y Y, He S Y, Wu X L, *et al.* PM_{2.5} elements at an urban site in Yangtze River Delta, China: high time-resolved measurement and the application in source apportionment [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **253**: 1089-1099.
- [9] Yu Y Y, Ding F, Mu Y F, *et al.* High time-resolved PM_{2.5} composition and sources at an urban site in Yangtze River Delta, China after the implementation of the APPCAP [J]. *Chemosphere*, 2020, **261**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.127746.
- [10] Paatero P. Least squares formulation of robust non-negative factor analysis[J]. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 1997, **37**(1): 23-35.
- [11] Park M B, Lee T J, Lee E S, *et al.* Enhancing source identification of hourly PM_{2.5} data in Seoul based on a dataset segmentation scheme by positive matrix factorization (PMF) [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2019, **10**(4): 1042-1059.
- [12] Norris G, Duval R, Brown S, *et al.* EPA positive matrix factorization (PMF) 5.0 fundamentals and user guide [R]. Washington DC, USA: EPA Office of Research and Development, 2014.
- [13] Paatero P, Eberly S, Brown S G, *et al.* Methods for estimating uncertainty in factor analytic solutions [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2014, **7**(3): 781-797.
- [14] Brown S G, Eberly S, Paatero P, *et al.* Methods for estimating uncertainty in PMF solutions: examples with ambient air and water quality data and guidance on reporting PMF results [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **518-519**: 626-635.
- [15] Kim E, Hopke P K, Qin Y J. Estimation of organic carbon blank values and error structures of the speciation trends network data for source apportionment [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2005, **55**(8): 1190-1199.
- [16] Kim E, Hopke P K. Comparison between sample-species specific uncertainties and estimated uncertainties for the source apportionment of the speciation trends network data [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(3): 567-575.
- [17] Chang Y H, Huang K, Xie M J, *et al.* First long-term and near real-time measurement of trace elements in China's urban atmosphere: temporal variability, source apportionment and precipitation effect [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(16): 11793-11812.
- [18] Liu B S, Wu J H, Zhang J Y, *et al.* Characterization and source apportionment of PM_{2.5} based on error estimation from EPA PMF 5.0 model at a medium city in China [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **222**: 10-22.
- [19] Polissar A V, Hopke P K, Paatero P, *et al.* Atmospheric aerosol over Alaska; 2. Elemental composition and sources [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1998, **103** (D15): 19045-19057.
- [20] Legendre P, Legendre L. Numerical ecology (2nd ed.) [M]. Amsterdam: Elsevier, 1998.
- [21] Kim E, Hopke P K, Pinto J P, *et al.* Spatial variability of fine particle mass, components, and source contributions during the regional air pollution study in St. Louis [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(11): 4172-4179.
- [22] Moreno T, Querol X, Alastuey A, *et al.* Effect of fireworks events on urban background trace metal aerosol concentrations: is the cocktail worth the show? [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **183**(1-3): 945-949.
- [23] Kong S F, Li L, Li X X, *et al.* The impacts of firework burning at the Chinese Spring Festival on air quality: insights of tracers, source evolution and aging processes [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(4): 2167-2184.
- [24] Zhang X X, Sharratt B, Liu L Y, *et al.* East Asian dust storm in May 2017: observations, modelling, and its influence on the Asia-Pacific region [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(11): 8353-8371.
- [25] 陈秋方, 孙在, 谢小芳. 杭州灰霾天气超细颗粒浓度分布特征 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(8): 2851-2856.
Chen Q F, Sun Z, Xie X F. Distribution of atmospheric ultrafine particles during haze weather in Hangzhou [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(8): 2851-2856.
- [26] 张远航. 张远航: 大气复合污染是灰霾内因 [J]. *环境*, 2008, (7): 32-33.
- [27] Xie M J, Hannigan M P, Dutton S J, *et al.* Positive matrix factorization of PM_{2.5}: comparison and implications of using different speciation data sets [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(21): 11962-11970.
- [28] Xie M, Barsanti K C, Hannigan M P, *et al.* Positive matrix factorization of PM_{2.5}-eliminating the effects of gas/particle partitioning of semivolatile organic compounds [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(2): 5199-5232.
- [29] Henry R C, Christensen E R. Selecting an appropriate multivariate source apportionment model result [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44** (7): 2474-2481.
- [30] Krudysz M A, Froines J R, Fine P M, *et al.* Intra-community spatial variation of size-fractionated PM mass, OC, EC, and trace elements in the Long Beach, CA area [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(21): 5374-5389.

CONTENTS

Continuous PM _{2.5} Composition Measurements for Source Apportionment During Air Pollution Events	CAI Fan-tao, SHANG Yue, DAI Wei, <i>et al.</i>	(4575)
Orographic Influences on the Spatial Distribution of PM _{2.5} on the Fen-Wei Plain	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, SUN Cong-jian, <i>et al.</i>	(4582)
Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} Under Winter Haze Conditions in Central China: A Case Study of Huanggang, Hubei Province	LI Xing-yu, MAO Yao, CHEN Zhan-le, <i>et al.</i>	(4593)
Concentration and Reactivity of Carbonyl Compounds in the Atmosphere of North China	HUANG Yu, CHEN Xi, WANG Ying-hong, <i>et al.</i>	(4602)
Characteristics of O ₃ Pollution and Key Precursors in Chengdu During Spring	HAN Li, CHEN Jun-hui, JIANG Tao, <i>et al.</i>	(4611)
O ₃ Source Characteristics of an Industrial Area in the Yangtze River Delta Based on Boundary Observations	HUANG Qing, HUANG Yin-zhi, ZHANG Shan, <i>et al.</i>	(4621)
Characteristics and Source of VOCs During O ₃ Pollution Between August to September, Langfang Development Zones	ZHANG Jing-qiao, WANG Hong-liang, FANG Xiao-yun, <i>et al.</i>	(4632)
Coating-derived VOCs Emission Characteristics and Environmental Impacts from the Furniture Industry in Guangdong Province	ZENG Chun-ling, SHAO Xia, LIU Rui-yuan, <i>et al.</i>	(4641)
Response of Air Quality to COVID-19 Lockdown in Xiamen Bay	XU Chao, WU Shui-ping, LIU Yi-jing, <i>et al.</i>	(4650)
Similarities and Differences of Valley Winds in the Beijing Plain and Yanqing Areas and Its Impact on Pollution	WU Jin, LI Chen, MA Zhi-qiang, <i>et al.</i>	(4660)
Characteristics of Atmospheric Particulate Matter Pollution and the Unique Wind and Underlying Surface Impact in the Twain-Hu Basin in Winter	ZHU Yan, ZHAO Tian-liang, BAI Yong-qing, <i>et al.</i>	(4669)
Conversion Characterizations of Sulfate Ion and Nitrate Ion in Particulate Matter from Coal-fired Power Plants	YANG Liu, HE Qing, SHENG Zhong-yi	(4678)
Water Chemical Characteristics and Influence of Exogenous Acids in the Yangtze River Basin	WANG Qi, YU Shi, JIANG Ping-ping, <i>et al.</i>	(4687)
Effects of Land Use on Nutrient Concentrations in the Inflow River of Lake Taihu, China	LIAN Xin-qiao, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i>	(4698)
Diversity of Zooplankton and Niche Characteristics of Keystone Species in the Weihe River Based on eDNA	LIANG Dong, XIA Jun, SONG Jin-xi, <i>et al.</i>	(4708)
Occurrence, Distribution, and Ecological Risk Assessment of Pharmaceutical and Personal Care Products in the Aquatic Environment of Sanya City, China	REN Bing-nan, GENG Jing	(4717)
Screening of Priority Pollutants and Risk Assessment for Surface Water from Shengjin Lake	GONG Xiong-hu, DING Qi-qi, JIN Miao, <i>et al.</i>	(4727)
Long-term Changes and Drivers of Ecological Security in Shahe Reservoir, China	YANG Wen-bin, DUAN Wen-xiu, CUI Yang, <i>et al.</i>	(4739)
Seasonal Variation and Influencing Factor Analysis of Antibiotic Resistance Genes in Water Supply Reservoirs of Central China	ZHANG Kai, XIN Rui, LI Kuang-jia, <i>et al.</i>	(4753)
Geochemical Characteristics and Driving Factors of NO ₃ -Type Groundwater in the Rapidly Urbanizing Pearl River Delta	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i>	(4761)
Spatial Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Surface Water in the Yancheng Area	WANG Jian, ZHANG Hua-bing, XU Jun-li, <i>et al.</i>	(4772)
Identification of Dredging Depths Based on Sediment Vertical Distribution Profiles of Total Nitrogen and Total Phosphorus and Their Adsorption-desorption Equilibria	ZHOU Ya-ting, CHEN Xing-hong, LI Li-qing, <i>et al.</i>	(4781)
Role of Borate and Phosphate Buffers in the Degradation of Organic Compounds in a PMS/Co ²⁺ System: Influencing Factors and Mechanisms	WAN Qi-qi, CHEN Zhu-hao, CAO Rui-hua, <i>et al.</i>	(4789)
Degradation 2,2',4,4'-Tetrabromodiphenyl Ether by Activated Peroxymonosulfate Using Magnetic Biochar Supported α -MnO ₂	LI Xin, YIN Hua, LUO Hao-yu, <i>et al.</i>	(4798)
Characteristics and Mechanisms of Bacteriophage MS2 Inactivation in Water by UV Activated Sodium Persulfate	ZHANG Chong-miao, YANG Hao-ming, WANG Zhen	(4807)
Adsorption Characteristics of Phosphate on Cerium Modified Water Hyacinth Biochar	WANG Guang-ze, ZENG Wei, LI Shuai-shuai	(4815)
Removal Efficiency and Mechanism of Ammonia Nitrogen in a Low Temperature Groundwater Purification Process	LI Dong, LIU Meng-hao, ZHANG Rui-miao, <i>et al.</i>	(4826)
Speciation and Ecological Risk Assessment of Heavy Metal(loid)s in the Municipal Sewage Sludge of China	GENG Yuan-meng, ZHANG Chuan-bing, ZHANG Yong, <i>et al.</i>	(4834)
Meta-analysis of Microbial Communities in the Activated Sludge of Wastewater Treatment Plants Under Different Climate Types	YANG Si-hang, QIN Ze-sheng, LIANG Man-chun	(4844)
Partial Nitrification and Anaerobic Ammonia Oxidation Synergistic Denitrification to Remove Nitrogen and Carbon from Domestic Sewage	QIN Yan-rong, YUAN Zhong-ling, ZHANG Ming, <i>et al.</i>	(4853)
Cultivation and Performance Analysis of Simultaneous Partial Nitrification, ANAMMOX, and Denitrification Granular Sludge	ZHOU Feng, LIU Yong-di, LI Wei	(4864)
Application of Various Methods to Extract Microplastic from Typical Soils in China	ZHAO Xiao-li, LIU Zi-han, CONG Chen-yu, <i>et al.</i>	(4872)
Evaluation and Sources of Heavy Metal Pollution in the Surface Soil of the Qaidam Basin	CHEN Liang, ZHANG Xi-ying, TANG Qi-liang, <i>et al.</i>	(4880)
Content and Ecological Risks of Heavy Metals in Soil with Different Land Uses in a Rapidly Urbanizing Area	LI Meng-ting, SHEN Cheng, WU Jian, <i>et al.</i>	(4889)
Selenium Geochemical Characteristics and Influencing Factors of Paddy Fields in Du'an County, Guangxi	LIU Fei, YANG Ke, XU Ren-ting, <i>et al.</i>	(4897)
Carbonized Apple Branches Decrease the Accumulation and Damage of Cadmium on Apple Rootstock by Reducing DTPA-Cd in Soil	DENG Bo, XUN Mi, ZHANG Wei-wei, <i>et al.</i>	(4908)
Accumulation and Health Risk of Heavy Metals in Cereals, Vegetables, and Fruits of Intensive Plantations in Hainan Province	YANG Jian-zhou, WANG Zhen-liang, GAO Jian-weng, <i>et al.</i>	(4916)
Correlation Analysis among Environmental Antibiotic Resistance Genes Abundance, Antibiotics Concentrations, and Heavy Metals Concentrations Based on Web of Science Searches	MIAO Sun, CHEN Lei, ZUO Jian-e	(4925)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Tetracycline Antibiotics in Farmland Soil in Yinchuan	ZHANG Xiao-hong, TAO Hong, WANG Ya-juan, <i>et al.</i>	(4933)
Effect of Manure from Different Sources on the Leaching of Antibiotics in Soil	LI Bin-xu, ZHU Chang-xiong, SONG Ting-ting, <i>et al.</i>	(4942)
Analysis of the Traits of Nitrogen Metabolism Pathways for Several Forest Soils in Eastern China	LÜ Xue-li, ZHAO Yong-peng, LIN Qing-huo, <i>et al.</i>	(4951)
Denitrification Rates and <i>nirS</i> -type Denitrifying Bacteria Community Structure Characteristics of Bulk and Rhizosphere Soil in Spring and Summer in the Alpine Wetlands of the Qinghai-Tibet Plateau	LI Yu-qian, MA Jun-wei, GAO Chao, <i>et al.</i>	(4959)
Microbial Community Structure of Soil Methanogens and Methanotrophs During Degradation and Restoration of Reed Wetlands in the Songnen Plain	WANG Qiu-ying, WANG Na, LIU Ying, <i>et al.</i>	(4968)
Characteristics of Bacterial Community Structure in Fluvio-aquic Soil Under Different Rotation Fallow	NAN Zhen-wu, LIU Zhu, DAI Hong-cui, <i>et al.</i>	(4977)
Response of Photosynthetic Bacterial Community to Cadmium Contamination in Paddy Soil	LUO Lu-yun, JIN De-cai, WANG Dian-dong, <i>et al.</i>	(4988)
Community Distribution of the Rhizospheric and Endophytic Bacteria of <i>Phragmites australis</i> and Their Limiting Factors in Iron Tailings	CAO Man-man, WANG Fei, ZHOU Bei-hai, <i>et al.</i>	(4998)
Effects of Combination of Organic and Inorganic Nitrogen on Nitrification and Denitrification in Two Salinized Soils	ZHOU Hui, SHI Hai-bin, ZHANG Wen-cong, <i>et al.</i>	(5010)
Response of Yield, CH ₄ , and N ₂ O Emissions from Paddy Fields to Long-term Elevated CO ₂ Concentrations	YU Hai-yang, SONG Kai-fu, HUANG Qiong, <i>et al.</i>	(5021)
Effects of Feedstock Material and Pyrolysis Temperature on Dissolved Organic Matter in Biochars	YAN Dai-hong, MA Ya-pei, SONG Kai-yue, <i>et al.</i>	(5030)
Spatiotemporal Variations in Atmospheric Urban Heat Island Effects and Their Driving Factors in 84 Major Chinese Cities	LI Yu, ZHOU De-cheng, YAN Zhang-mei	(5037)
Research Progress in the Odorants and Their Emissions from Indoor Building Decoration Materials	ZHANG Wan-zhong, ZHANG Peng-yi	(5046)