

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.12
第41卷 第12期

目次(卷终)

我国地级及以上城市臭氧污染来源及控制区划分	闫慧, 张维, 侯墨, 李银松, 高平, 夏青, 孟晓艳, 范丽雅, 叶代启 (5215)
2015~2018年我国PM _{2.5} 健康损害价值的动态评估	李惠娟, 周德群, 魏永杰 (5225)
2011~2017年中国PM _{2.5} 多尺度时空分异特征分析	杨文涛, 谯鹏, 刘贤赵, 雷雨亮 (5236)
关中地区PM _{2.5} 时空演化及人口暴露风险	黄晓军, 祁明月, 李艳雨, 王森, 黄馨 (5245)
中原城市冬季两次重污染形成机制及来源	贾佳, 丛怡, 高清敏, 王玲玲, 杨静静, 张国辉 (5256)
西北工业城市冬季PM _{2.5} 污染特征及理化性质	杨燕萍, 陈强, 王莉娜, 杨丽丽 (5267)
基于PMF模型的PM _{2.5} 中金属元素污染及来源的区域特征分析	邓林俐, 张凯山, 殷子渊, 李欣悦, 武文琪, 向梓鹏 (5276)
重庆主城区降尘中重金属污染特征及评价	张夏, 刘斌, 肖柏林, 王佳, 万达 (5288)
鄂尔多斯市夏秋季气溶胶新粒子生成过程影响因素分析	孔祥晨, 王红磊, 张连霞, 呼群, 李瑞峰, 许彩琴 (5295)
杭州市城区挥发性有机物污染特征及反应活性	景盛翱, 高雅琴, 沈建东, 王倩, 彭亚荣, 李英杰, 王红丽 (5306)
成都市区夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析	徐晨曦, 陈军辉, 姜涛, 韩丽, 王波, 李英杰, 王成辉, 刘政, 钱骏 (5316)
石家庄市挥发性有机物和臭氧的污染特征及源解析	王帅, 崔建升, 冯亚平, 刘大喜, 陈静, 田亮, 冯超, 王梦璇, 王学臣, 王婷婷 (5325)
厦门市工业源VOCs排放清单及控制对策分析	吴冬阳, 庄马展, 吴艳聪, 金磊, 吴义诚, 高攀峰, 刘建福, 金月正, 潘亚雷, 傅海燕 (5336)
建筑胶黏剂使用VOCs排放系数与排放清单	梁小明, 孙西勃, 苏燕花, 黄礼海, 陈锋, 任璐, 卢清, 赖君怡, 陈朋龙, 陈来国 (5345)
我国西北工业城市大气多氯联苯来源及健康风险	毛潇萱, 李子璇, 宋世杰, 章晓冬, 高宏, 李春新, 黄韬, 马建民 (5352)
基于广州塔观测的城市近地面甲醛垂直分布特征	黄山, 裴成磊, 张莹, 宋奇聪, 齐吉朋, 赵一鸣, 王鸣, 邵敏 (5362)
新水沙条件下长江中下游干流水体总磷时空变化分析	卓海华, 姜保峰, 吴云丽, 王瑞琳, 陈杰, 兰静 (5371)
三峡库区汉丰湖水体氮磷及化学计量比季节变化特征	钱田, 黄祺, 何丙辉, 李天阳, 刘淑婧, 付适, 曾荣昌, 向可翠 (5381)
衡水湖沉积物营养盐形态分布特征及污染评价	张嘉雯, 魏健, 刘利, 王俭, 朱元荣, 段亮 (5389)
宜兴市横山水库底泥内源污染及释放特征	崔会芳, 陈淑云, 杨春晖, 唐婉莹, 殷鹏, 尹洪斌 (5400)
梅江流域清凉山水库沉积物重金属污染、生态风险评价及来源解析	江涛, 林伟稳, 曹英杰, 黎坤, 翟映雪, 李睿, 陈建耀 (5410)
汉江流域金水河与淇河潜在硝化速率及硝化功能基因的影响因子	赵彬洁, 王旭, 张健, 谭香, 何睿, 周全, 史航, 张全发 (5419)
山东省滨海旅游度假区水体环境典型全氟化合物污染特征及潜在生态风险	王世亮, 曹雪雅 (5428)
太湖重点区域多介质水体中有机磷酸酯的分布特征及来源解析	吕佳佩, 张振飞, 刘杨, 张恒, 王春英, 罗莹, 郭昌胜, 徐建 (5438)
岩溶地下水水体中有机氯农药和多氯联苯的残留特征及健康风险评价	叶凯, 孙玉川, 贾亚男, 朱琳跃, 徐昕 (5448)
澜沧江硅藻的地理分布模式与关键驱动因素	孙胜浩, 陈娟, 王沛芳, 王超, 王洵, 苗令占, 刘胜, 袁秋生 (5458)
白洋淀优势鱼类中喹诺酮类抗生素的生物累积特征及其与环境因子相关性	申立娜, 付雨, 张璐璐, 秦珊, 剧泽佳, 姚波, 崔建升 (5470)
生物炭粒径对负载MgO生物炭吸附水体中磷的影响	王鹏飞, 甄蒙蒙, 储昭升, 崔冠楠 (5480)
Bi ₂ MoO ₆ /Bi ₂ S ₃ 异质结光催化降解四环素-铜复合物	黄文鑫, 魏虎, 蒋彩云, 王玉萍 (5488)
超滤膜负载UiO-66@Fe ₃ O ₄ @UiO-66强化PPCPs去除和膜污染控制	尹越, 吴道文, 孙梦瑶, 吕路, 张炜铭 (5500)
低温季节水平潜流和垂直潜流人工湿地尾水深度处理中试	廖雪珂, 严晗璐, 王智源, 陈诚, 何东, 吴月龙, 陈求稳 (5509)
盐度渐增对水解微生物群落结构与功能的影响	高京, 张少华, 王锐, 金鹏康 (5518)
限NH ₄ ⁺ 和限NO ₂ ⁻ 厌氧氨氧化系统的运行特性及微生物种群特征	宋家俊, 朱明奕, 郭凯成, 汪倩, 刘文如, 沈耀良 (5527)
厌氧氨氧化菌富集培养过程微生物群落结构及多样性	闫冰, 夏嵩, 桂双林, 付嘉琦, 吴九九, 熊继海, 魏源送 (5535)
二价铁活化过氧化钙提高剩余活性污泥的脱水性能	毕薇薇, 阮书瑜, 陈昊傲啸, 梁方艺, 陈智文, 谢松儒, 唐晶, 邓靖 (5544)
中国北方某城市绿地土壤重金属空间分布特征、污染评价及来源解析	赵靓, 梁云平, 陈倩, 徐谦, 荆红卫 (5552)
我国南方水稻产地镉环境质量类别划分技术	窦韦强, 安毅, 秦莉, 林大松, 董明明 (5562)
晒在土壤-农作物系统中的分布特征及富硒土壤阈值	王锐, 邓海, 贾中民, 严明书, 周皎, 何忠庠, 梁绍标, 董金秀, 苏黎明 (5571)
广东鼻咽癌高发区土壤-作物系统重金属迁移特征及健康风险评价	叶脉, 张景茹, 张路路, 李朝晖, 李兴远, 周永章 (5579)
胺鲜酯与螯合剂GLDA联合强化柳枝稷吸收积累镉效果	王正, 孙兆军, SAMEH Mohamed, 王珍, 何俊, 韩磊 (5589)
毛竹遗态Fe/C复合材料对As(V)污染土壤的钝化修复性能	赵宁宁, 何豪, 冯国杰, 朱宗强, 方雅莉, 李超, 朱义年, 张立浩 (5600)
大麦虫幼虫肠道菌群对聚苯乙烯泡沫塑料降解	杨莉, 刘颖, 高婕, 彭霞薇, 白志辉, 庄绪亮 (5609)
1株耐油甲醛降解菌的分离鉴定及降解特性	韩茜, 王蓉蓉, 史纯珍 (5617)
铜尾矿白羊草叶际和根际细菌群落特征	贾彤, 姚玉珊, 王瑞宏 (5628)
生物炭施用对再生水灌溉空心菜根际微生物群落结构及多样性的影响	崔丙健, 崔二革, 胡超, 樊向阳, 高峰 (5636)
废弃物基水热炭改良对水稻产量及氮素吸收的影响	侯朋福, 薛利红, 冯彦房, 余嫻, 杨林章 (5648)
基于GIS和PMF模型的石嘴山市土壤多环芳烃空间分布及来源解析	夏子书, 王玉玉, 钟艳霞, 白一茹, 王幼奇, 杨帆, 李鸣骥 (5656)
氮肥和秸秆还田方式对麦玉轮作土壤N ₂ O排放的影响	许宏伟, 李娜, 冯永忠, 任广鑫, 谢呈辉, 吕宏菲, 马星霞, 郝嘉琪 (5668)
《环境科学》第41卷(2020年)总目录	(5677)
《环境科学》征订启事(5344)	
《环境科学》征稿简则(5361)	
信息(5287, 5499, 5508)	

西北工业城市冬季 $PM_{2.5}$ 污染特征及理化性质

杨燕萍^{1,2,3,4}, 陈强^{1*}, 王莉娜⁴, 杨丽丽^{1,4}

(1. 兰州大学大气科学学院, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 兰州 730000; 2. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 兰州 730000; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 甘肃省环境监测中心站, 兰州 730000)

摘要: 为研究西北工业城市冬季 $PM_{2.5}$ 污染特征及理化性质, 以甘肃省白银市为例, 采用单颗粒气溶胶质谱等相关仪器, 开展实时在线 $PM_{2.5}$ 化学组分观测, 与兰州市同期进行对比分析. 结果表明, 观测期间白银市 $PM_{2.5}$ 浓度 ($44.89 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 显著低于同期兰州市 ($70.69 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 但含重金属颗粒物占比 (7.84%) 明显高于兰州市 (2.92%), 化学组分复杂, $PM_{2.5}$ 以较大粒径颗粒物贡献为主; 白银含 Cu、Pb 和 Zn 颗粒物粒径分布范围较宽, 其中含 Cu 和 Zn 颗粒物数量、颗粒物混合比多大于兰州市; 主要污染源为汽车尾气 30.91% 和二次无机源 13.00%, 机动车尾气贡献均高于其他对比城市; 2020 年 1 月 4 日发生的污染过程主要由汽车尾气和二次无机源贡献增加引起, 加之前期气象扩散条件较差. 白银冬季 $PM_{2.5}$ 污染治理应以汽车尾气和二次无机源减排为主, 同时加强大气重金属污染管控.

关键词: $PM_{2.5}$; 工业城市; 重金属; 化学组成; 混合状态

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)12-5267-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202002136

Winter Pollution Characteristics and Physicochemical Properties of $PM_{2.5}$ in a Northwest Industrial City

YANG Yan-ping^{1,2,3,4}, CHEN Qiang^{1*}, WANG Li-na⁴, YANG Li-li^{1,4}

(1. Key Laboratory of Arid Climatic Changing and Reducing Disaster of Gansu Province, College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. Northwest Institute of Eco-environmental Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Gansu Environmental Monitoring Center, Lanzhou 730000, China)

Abstract: To study winter pollution characteristics and physicochemical properties of $PM_{2.5}$ in a northwest industrial city, for example, Baiyin in Gansu Province, we used related instruments, such as single particle aerosol mass spectrometry to conduct real-time online $PM_{2.5}$ chemical composition observations, compared with Lanzhou in the same period. The results showed that, during the observation, $PM_{2.5}$ concentrations ($44.89 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) in Baiyin were significantly lower than the same period in Lanzhou ($70.69 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). However, the proportion of particles containing heavy metals (7.84%) was significantly higher than that of Lanzhou (2.92%), the chemical composition was complex, and $PM_{2.5}$ was mainly contributed by particles with larger particle sizes. The particle size distribution range of Cu, Pb, and Zn particles in Baiyin was relatively wide, the number of Cu and Zn particles was higher, and the mixing ratio of particles was higher than in Lanzhou. The main pollution source was automobile exhaust 30.91% and a secondary inorganic source was 13.00%. The pollution event on January 4, 2020 was mainly caused by the increased contributions of automobile exhaust and secondary inorganic sources, and the poor meteorological diffusion conditions in the early stage. The control of $PM_{2.5}$ pollution in Baiyin in winter should be dominated by emission reduction of automobile exhaust and secondary inorganic sources, and control of heavy metal pollution in the atmosphere should be strengthened.

Key words: $PM_{2.5}$; industrial city; heavy metal; chemical composition; mixing state

近些年,随着工业化进程加快,人类活动排放大量污染物,区域环境空气问题日趋复杂,雾-霾现象已成为频发且危害严重的新型灾害天气^[1]. 近3年,作为西北工业城市典型代表,甘肃省白银市采取了诸多颗粒物管控措施,但秋冬季以 $PM_{2.5}$ 为首要污染物的天数仍呈现逐年增加趋势,2020 年 1 月达到 27 d,治理工作进入瓶颈期. 2020 年是国家和省市打赢蓝天保卫战三年行动的最后一年,也是攻坚之年,开展白银市 $PM_{2.5}$ 污染特征理化性质深入研究刻不容缓.

$PM_{2.5}$ 是大气重要组成部分,具有粒径小、比表面积大及在环境空气中悬浮时间较长,对有害成分

吸附能力强等特点,影响环境空气质量和人体健康^[2,3]. Duan 等^[4] 的研究发现重金属主要富集在 $PM_{2.5}$ 为代表的细颗粒中,控制 $PM_{2.5}$ 是控制大气重金属颗粒的有效途径;目前对 $PM_{2.5}$ 的研究多集中在组分特征和来源解析^[5-8];传统细颗粒物组分特征研究方法多依赖滤膜采样辅助离线分析,需要时间较长,在保存、运输和实验过程中不可避免造成误差,不能及时有效反映环境空气质量和颗粒物理化

收稿日期: 2020-02-20; 修订日期: 2020-06-04

作者简介: 杨燕萍(1989~),女,博士研究生,主要研究方向为环境空气质量预报预警, E-mail: 306252573@qq.com

* 通信作者, E-mail: 18193351805@163.com

性质变化。飞行时间质谱可实现实时在线分析,具有较高时间分辨率,能有效反映环境空气质量和颗粒物短时变化情况^[9];同时激光能量较高,对重金属解析具有明显优势,研究人员利用 ATOFMS 开展含重金属气溶胶分析,发现检测到的重金属变化趋势与传统方法获得趋势非常一致^[10]。目前国内较常见的是广州禾信单颗粒气溶胶质谱(SPAMS),在大气颗粒物实时化学特性及颗粒物组分等多方面应用并有相关报道,但多集中在京津冀、长三角和珠三角地区,并极少应用于区域重金属研究^[11~18]。

目前对白银市 $\text{PM}_{2.5}$ 污染特征研究主要集中在浓度变化规律,组分研究较少且多采用离线方法,未开展在线组分监测;重金属污染研究多集中于土壤环境,Cu、Pb 和 Zn 等重金属是白银地区土壤主要重金属污染物,含量显著高于甘肃土壤背景值^[19,20]。至今未见利用单颗粒质谱开展白银 $\text{PM}_{2.5}$ 及大气重金属污染特征有关的研究报道。本研究通过使用单颗粒气溶胶质谱仪(SPAMS)对白银观测点位周边环境空气进行高时间分辨率连续观测,与临近城市兰州细颗粒物污染特征对比分析,以期对白银开展 $\text{PM}_{2.5}$ 及大气重金属污染研究提供新的思路,并为政府部门大气环境管控提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

白银市位于甘肃省中东部(东经 $103^{\circ}03' \sim 105^{\circ}34'$,北纬 $35^{\circ}33' \sim 37^{\circ}38'$),处于黄土高原和腾格里沙漠过渡地带,气候类型为中温带半干旱区向干旱区过渡,是我国重要矿业城市,矿产资源丰富,素有“铜城”之称,采矿和冶炼为主要工业门类,生产过程废气排放必然对当地空气质量产生影响。

1.2 样品采集

本次研究观测地点设置在甘肃省白银市白银区北京路金岭公园内(东经 104.15° ,北纬 36.55°),监测仪器均安装在大气移动综合监测车内,仪器进样口布设在监测车车顶(离地面 4.5m),观测点周围无高大建筑物和明显污染源,观测时间为 2019 年 12 月 18 日 12:00 至 2020 年 1 月 17 日 12:00。

利用禾信 SPAMS₀₅₂₅ 单颗粒质谱仪器对 $\text{PM}_{2.5}$ 数浓度、化学组分、粒径分布等进行观测;采用自适应共振神经网络聚类法(ART-2a)开展颗粒物分类分析^[21]。采用甘肃省兰州市环境监测站(东经 103.84° ,北纬 36.05°)布设于顶楼的 SPAMS 及国家环境空气质量监测站点铁路设计院(东经 103.84° ,北纬 36.05°) $\text{PM}_{2.5}$ 同期数据进行对比分析。气象参数采用芬兰 Vaisala WXT536 型气象仪观测,主要观

测因子包括温度(T)、相对湿度(RH)、风速/风向(WS/WD)和气压等,由芬兰 Vaisala PWD22 型仪器观测能见度,美国赛默飞(Thermo Fisher)5014ibeta 在线监测 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度,时间分辨率为 5 min。

SPAMS 主要由进样、测径、激光电离系统及质量分析器组成,气溶胶颗粒通过空气动力学透镜加速进入真空系统,颗粒被聚焦成粒子束逐一进入测径区进行粒径分析,随后进入电离区,被波长为 266 nm 的紫外脉冲激光电离产生正负离子,同时被双极飞行时间质量分析器检测,经数据采集系统处理后获得单个气溶胶粒子的正负质谱图^[22],SPAMS 采集粒径范围为 200 nm $\sim$ 2.0 μm ,在一定程度上能够反映细颗粒物数浓度及组成^[14]。

本研究中 SPAMS 数据统计使用 COCO 2.0 软件(运行在 Matlab 平台上,专用于单颗粒质谱数据分析),绘图使用 Origin 9.0 软件完成。

1.3 质量保证/质量控制

为保证数据的准确有效性,监测过程实施全程序质量控制:采样前对 SPAMS 开展颗粒物粒径校正,使用标准物质进行质谱校准,对仪器进行系统维护。通过气溶胶发生器产生标准粒径聚苯乙烯小球实现颗粒物粒径检测校正:加入 1~2 滴的 PSL 小球溶液到气溶胶发生器中,50 mL 蒸馏水混匀,利用干燥高纯氮气作为气溶胶发生气体,气溶胶经过硅胶扩散干燥器后进入仪器,测试不同粒径(0.2、0.3、0.5、0.72、1.0、1.3 和 2.0 μm)的 PSL 小球穿越两束测径激光的飞行时间,并绘制拟合曲线,确保校准系数 $R^2 > 0.99$ 。同时开展质量数校正(谱图校正),使用 10 $\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的 NaI 标准物质气溶胶对质谱漂移校准,正负离子图校正,查看质谱图是否按照校正数据正确显示质荷比值;若目标峰质量精度的绝对值 < 0.05 ,则谱图校正结果正确。在采样过程中,实时查看进样口压力,一旦发现压力变化超过预定范围(初始读数 ± 6.66 Pa),即刻对小孔片进行清洗更换,以免堵塞影响颗粒物进样量和数据有效性。

2 结果与讨论

2.1 颗粒物化学组成分析

观测期间,共采集到具有测径信息的颗粒物(SIZE)2261.6 万个,同时有正、负谱图的颗粒(MASS)617.5 万个,SIZE/MASS 约为 0.27,SPAMS 监测颗粒物数浓度与 Thermo Fisher 5014ibeta $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度变化趋势较为一致,相关性较好($r = 0.62$),SPAMS 的数浓度变化趋势能基本反映大气污染状况。

对颗粒物整体质谱信息统计分析,图 1 为观测期颗粒物平均质谱信息,横、纵坐标分别表示颗粒物质荷比和相对峰面积,其中正谱图中以元素碳、有机碳、混合碳和 NH_4^+ ($m/z = 18$) 等特征信号为主,同时出现明显 $^{63/65}\text{Cu}^+$ 峰和 $^{206/207/208}\text{Pb}^+$ 峰,含 Pb 气溶胶的主要来源是城市扬尘、燃烧源和机动车排放,汽车刹车时会产生金属,常见的柴油清净剂、分散添加剂含有铅盐;

已有研究表明工业企业排放是 Cu 和 Zn 重金属的重要来源,含 Pb 颗粒物更有利于 Cu 和 Zn 等金属离子的富集,Cu 和 Zn 在含 Pb 颗粒中所占比例是其在总颗粒上所占比例的数十倍^[23];负谱图中出现了明显的二次无机物信号,以 NO_2^- ($m/z = -46$)、 NO_3^- ($m/z = -62$) 和 HSO_4^- ($m/z = -97$) 等特征信号为主,表明气溶胶颗粒经历了明显的二次老化过程。

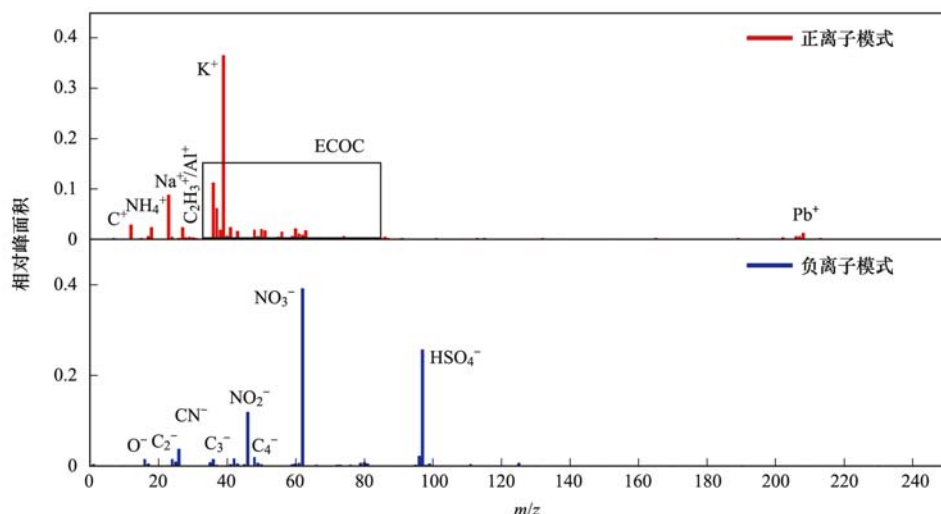


图 1 观测期颗粒物平均质谱图

Fig. 1 Mean mass spectrometry of particles in the observation period

观测期间,白银 PM_{2.5} ($44.89 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 浓度显著低于兰州市监测数据 ($70.69 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$); 采用自适应共振神经网络分类方法 (Art-2a) 对颗粒物进行组分分类,它是基于人工神经网络设计发展的一套理论方法,分类参数设置为:相似度 0.75,学习效率 0.05,经聚类统计,白银颗粒物主要类型划分为元素碳 (EC: 25.50%)、有机碳 (OC: 21.59%)、混合碳 (ECOC: 12.34%)、左旋葡聚糖 (Lev: 10.59%)、富钾 (K: 9.73%)、重金属 (HM: 7.84%)、富钠 (Na: 6.54%)、矿物质 (SiO_3 : 4.43%)、高分子有机物 (HOC: 0.72%) 和其他颗粒 (0.72%)。对比同期兰

州市颗粒物分类结果,白银含重金属颗粒物占比 (7.84%) 明显高于兰州市 (2.92%); 对比细颗粒中不同离子丰度 (图 2),白银除 Al^+ 和 SO_4^{2-} 外,离子丰度均高于兰州市,细颗粒物中不同离子化合程度较高,组分较兰州更为复杂,尤其对人体健康影响明显的含重金属离子颗粒物数量较大,治理难度加大。

2.2 颗粒物粒径分析

采用自适应共振神经网络聚类法 (ART-2a) 将颗粒物分类为 EC (元素碳) 和 OC (有机碳) 等不同类型,图 3 为 PM_{2.5} 观测期间不同粒径各类颗粒物占

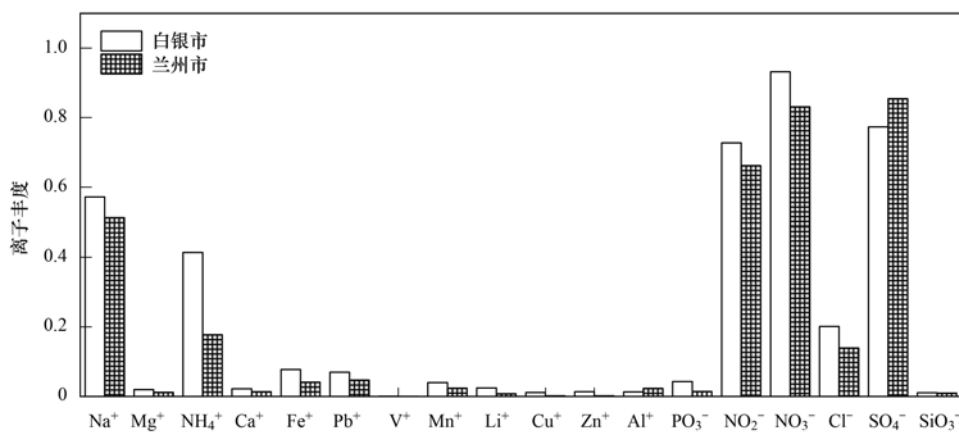


图 2 白银和兰州颗粒物离子丰度对比

Fig. 2 Comparison of particle ion abundance in Baiyin and Lanzhou

比,随着粒径增大, SiO_3 (硅酸盐)、Lev (左旋葡聚糖) 和 HM (重金属) 颗粒占比随之增加,EC 和 OC 颗粒占比随之减少,且变化程度明显. EC、OC 和 OCEC (混合碳) 颗粒统称为含碳颗粒物,EC 为典型燃烧产物,主要源于燃料不完全燃烧,可作为化石燃料燃烧的示踪剂^[24],同时也可能来源于柴油发动机燃烧排放的颗粒物^[25]; EC 在整个分析粒径段均有明显贡献,其主要贡献粒径范围可分为 2 段,第 1 段为 $0.2 \sim 0.3 \mu\text{m}$,该类 EC 颗粒由燃烧源直接排放,在大气中几乎未经明显老化,粒径较小,在该粒径段的气溶胶相对比较新鲜;第二段为 $0.6 \sim 1.2 \mu\text{m}$,该粒径段 EC 颗粒物在大气中经历了高度老化,与多种类型污染物发生物理化学反应或混合,粒径分布增大明显;随着粒径进一步增大,EC 颗粒比例逐

渐减少,这可能是 EC 颗粒在大气传输中,表面不断被二次组分包裹至饱和状态,大粒径段 EC 颗粒难以继续生成的原因. OC 颗粒物粒径集中在 $0.3 \sim 0.6 \mu\text{m}$ 的较细粒径段,主要来自燃烧源. OCEC 颗粒物在城市地区主要来源于汽车尾气,OCEC 颗粒贡献粒径段主要集中在 $0.3 \sim 0.5 \mu\text{m}$. OC、EC 和 OCEC 与二次无机组分 (如硝酸盐和硫酸盐) 混合后,碳质颗粒物的诸多性质均会发生显著改变. HOC (高分子有机物) 等组分在整体粒径段占比相对较小. 重金属颗粒物占比分布在 $0.2 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 粒径段逐渐降低,在 $0.6 \sim 1.9 \mu\text{m}$ 粒径段呈现升高后维持状态,除部分粒径段低于 OC 和 EC 占比外,均高于其他类型颗粒物占比,白银大气环境重金属污染明显.

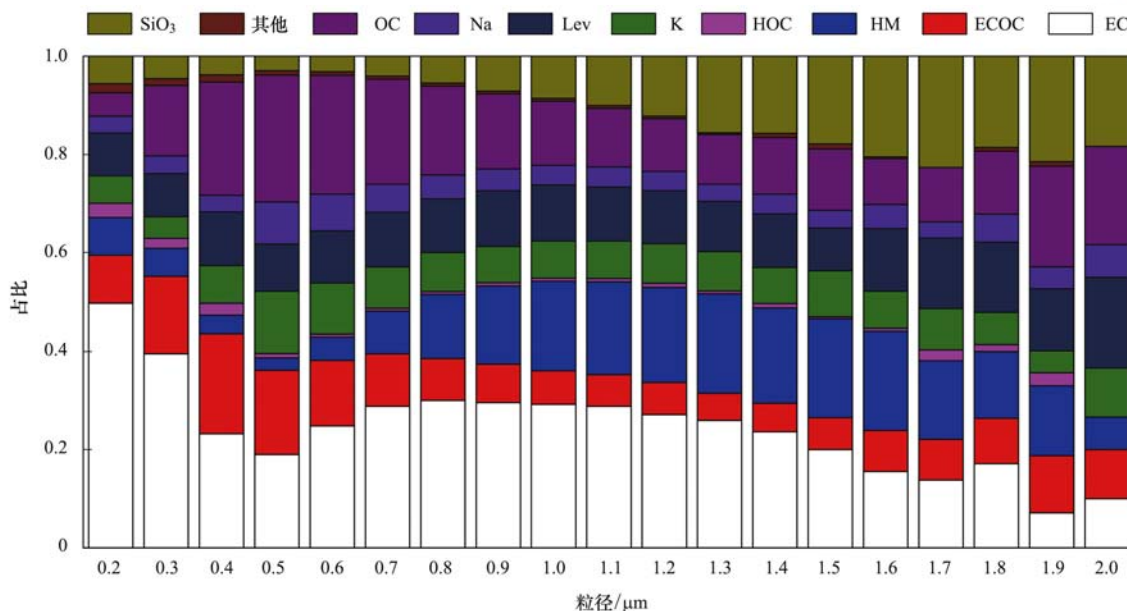


图3 不同粒径各类颗粒物占比

Fig. 3 Proportions of various particles with different sizes

图4为 MASS 和含 Cu、Pb 和 Zn 离子细颗粒物粒径分布,白银 MASS 数量明显低于兰州,与 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度监测结果一致;将 MASS 及含 Cu、Pb 和 Zn 离子的颗粒物粒径单独对比分析发现,白银含重金属颗粒物粒径分布范围相对较宽,MASS 主要分布在 $0.42 \sim 0.78 \mu\text{m}$,最高值位于 $0.48 \mu\text{m}$ 粒径段;兰州市 MASS 主要分布在 $0.40 \sim 0.64 \mu\text{m}$,数量最高值位于 $0.42 \mu\text{m}$ 粒径段,白银 $\text{PM}_{2.5}$ 以较大粒径颗粒物贡献为主.

白银含 Cu 颗粒物数量明显高于兰州市, $0.20 \sim 2.00 \mu\text{m}$ 各个粒径段均有数量较多的含 Cu 颗粒物,分布范围较宽,大于 $1.60 \mu\text{m}$ 粒径的含 Cu 颗粒物数量逐渐降低;兰州含 Cu 颗粒物分布在 $0.20 \sim 1.74 \mu\text{m}$,其余粒径段含 Cu 颗粒物数量几乎为 0,且大于 $1.26 \mu\text{m}$ 粒径的含 Cu 颗粒物数量很低.

含 Pb 颗粒物数量与兰州差距较小, $0.20 \sim 2.00 \mu\text{m}$ 各个粒径段均有数量较多的含 Pb 颗粒物,高值主要集中在 $0.42 \sim 1.22 \mu\text{m}$,大于 $1.22 \mu\text{m}$ 粒径的含 Pb 颗粒物数量逐渐降低;兰州含 Pb 颗粒物分布在 $0.42 \sim 1.04 \mu\text{m}$,白银和兰州环境空气均受机动车排放和扬尘污染影响. 白银含 Zn 颗粒物数量显著高于兰州市,粒径分布范围较宽;白银 $0.20 \sim 2.00 \mu\text{m}$ 各个粒径段均有数量较多的含 Zn 颗粒物,高值主要分布在 $0.54 \sim 1.06 \mu\text{m}$ 粒径段,大于 $1.06 \mu\text{m}$ 粒径的含 Zn 颗粒物数量逐渐降低;兰州含 Zn 颗粒物分布在 $0.36 \sim 1.68 \mu\text{m}$,其余粒径段含 Zn 颗粒物数量几乎为 0,高值主要分布在 $0.56 \sim 0.82 \mu\text{m}$ 粒径段. 对比分析发现,白银不同粒径段颗粒物中均含有重金属离子,对人体和环境影响加剧.

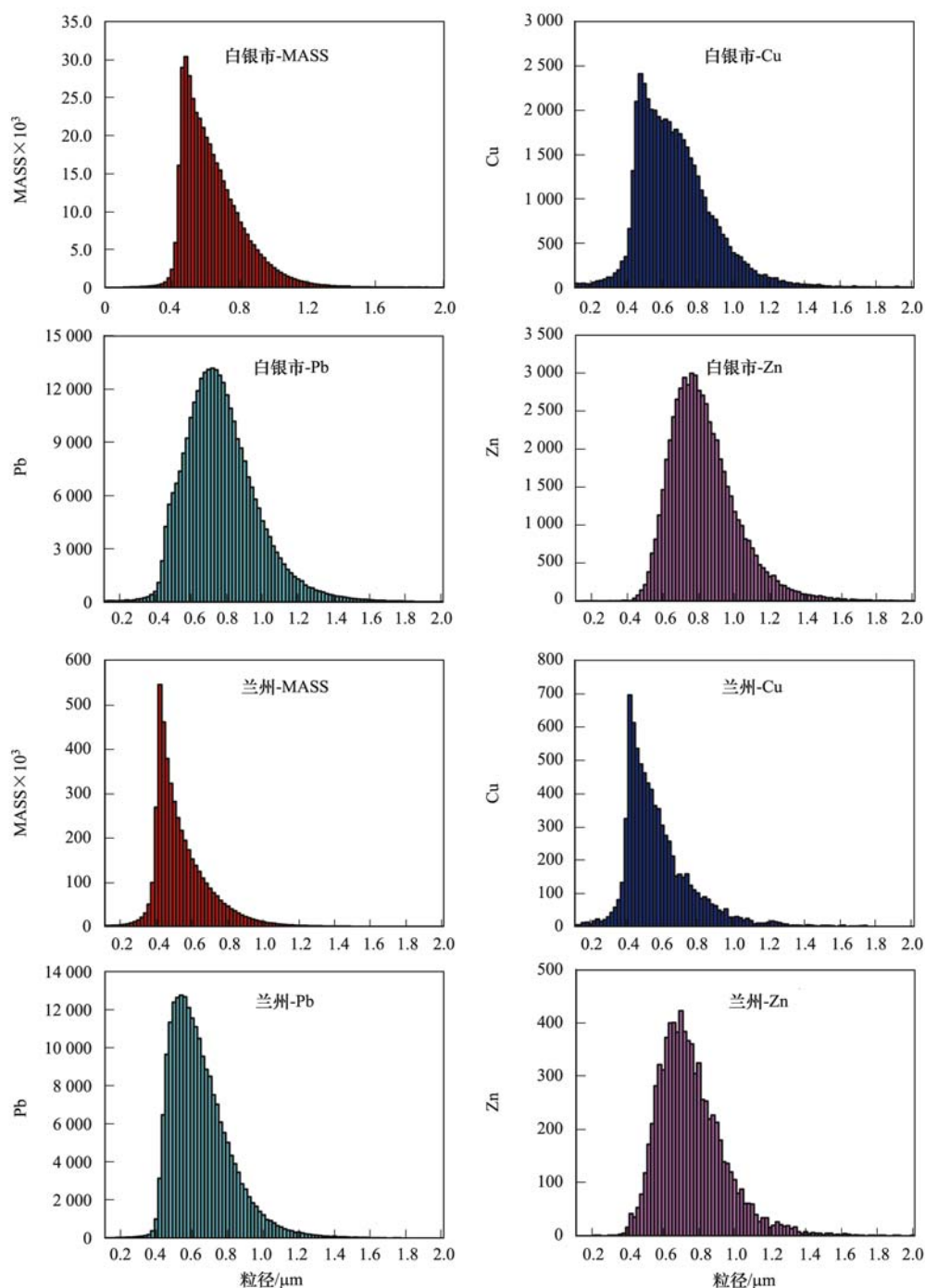


图4 含Cu、Pb和Zn离子细颗粒物粒径分布

Fig. 4 Particle size distribution of fine particles containing Cu, Pb, and Zn ions

2.3 颗粒物混合状态分析

单颗粒气溶胶混合状态影响其光学特性、反应性、吸湿性和健康效应等,同时混合状态能反映其在大气中的老化、演化过程^[26,27]。图5不同颜色代表含有对应化学组分颗粒数与某类型颗粒物总数的比值,其中横坐标表示不同类型颗粒物,纵坐标表示颗粒物中所含不同化学组分,从颗粒物混合状态中发现,白银除HOC(有机大分子)类型颗粒物混合比中部分数值外,其余混合比均高于兰州市。

颗粒物中的硫酸盐、硝酸盐对颗粒物性质有重

要影响。白银EC与 NO_3^- 、 NO_2^- 和 SO_4^{2-} 的混合比分别达到0.94、0.61和0.63,与 NO_3^- 的混合值最高,而OC与 NO_3^- 、 NO_2^- 和 SO_4^{2-} 的混合比分别达到0.89、0.64和0.92,与 SO_4^{2-} 混合值最高,表明它们在释放后即刻参与大气老化反应,并与二次粒子迅速混合,EC负谱图中 NO_3^- 比 SO_4^{2-} 信号更为明显,而OC负谱图中 SO_4^{2-} 信号最强; SiO_3 颗粒与 NO_3^- 、 NO_2^- 和 SO_4^{2-} 混合比分别为0.90、0.94和0.49,不同颗粒物与 NO_3^- 的混合比大多高于 SO_4^{2-} ,这与 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 的生成途径相关, SO_4^{2-} 主要来源

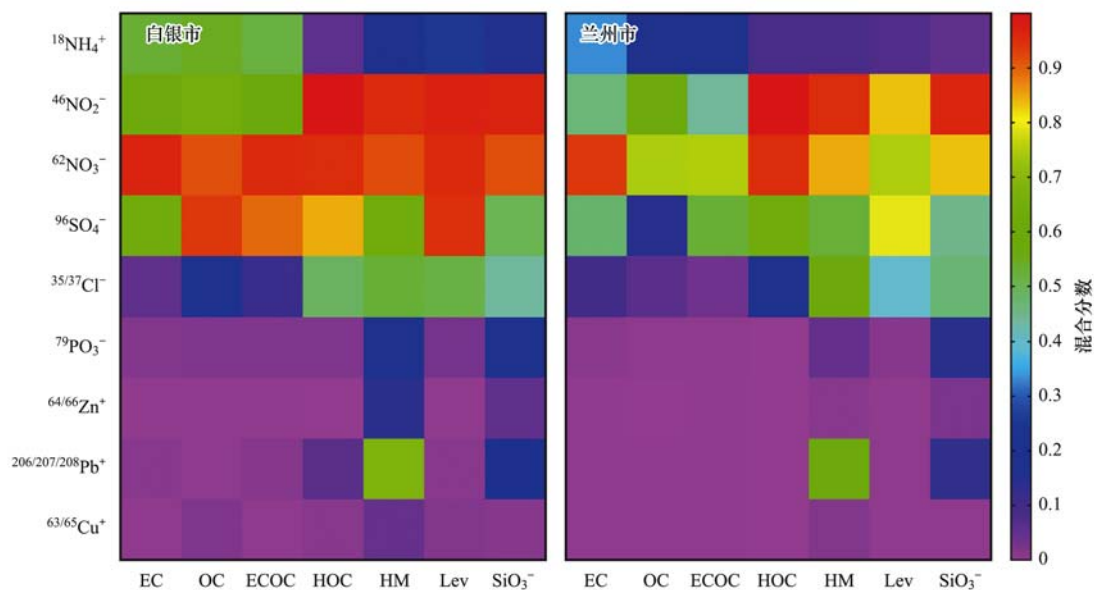


图5 白银和兰州颗粒物混合状态

Fig. 5 Particle mixing state diagram in Baiyin and Lanzhou

于二氧化硫云雾过程液相氧化反应,而 NO_3^- 主要来自气态硝酸及前体物气固分配平衡及阴阳离子反应^[16]; HOC 和 Lev 这两类有机粒子与二次离子混合比值较高; HM 颗粒与 NO_3^- 、 NO_2^- 和 SO_4^{2-} 混合比分别为 0.90、0.93 和 0.62,高于兰州 HM 颗粒与 NO_3^- 、 NO_2^- 和 SO_4^{2-} 混合比 0.85、0.93 和 0.52,表明白银重金属颗粒物进入大气后发生二次反应,老化程度较重。从整体颗粒物混合状态分析,与硝酸盐和硫酸盐离子混合的颗粒广泛存在于不同类型的颗粒物,尤其是前者,意味着颗粒物从排放源进入大气或在大气输送过程中均经历了不同程度的二次反应。 NH_4^+ 与 EC、OC 和 ECOC 混合程度较高,但与 HOC 和 SiO_3 颗粒混合程度低, Cl^- 与 EC、OC 和 ECOC 混合程度很低,但与其他颗粒物的混合比均较高,尤其与重金属达到了 0.51,说明 Cl^- 多与重金属混合存在。

分析含 Cu、Pb 和 Zn 颗粒物混合比发现,白银含 Zn 和 Cu 颗粒物与重金属混合比分别达到 0.14 和 0.04,兰州仅为 0.01 和 0.02,白银含 Cu 和 Pb 颗粒物与 OC 混合比分别为 0.02 和 0.01,兰州几乎为 0。作为西北工业城市,白银细颗粒物中重金属离子混合程度明显,且其只能通过湿沉降等方式清除,对人体健康和土壤、水环境也会造成持续影响。

2.4 颗粒物来源解析

基于观测结果,结合白银市能源和产业结构特征,将颗粒物排放源分为 8 类,分别为机动车尾气、燃煤、生物质燃烧、扬尘、工业工艺源(非燃烧产生的颗粒物)、二次无机源、餐饮和其他。其中机动车尾气源包含柴油车和汽油车等交通工具排放的颗

粒,示踪离子为 EC,以 C_5 以下短链碳为主;燃煤源包含了燃煤电厂和锅炉等排放颗粒,主要示踪离子为 Al^+ ,组分主要包括 Al^+ 、OC 和 SO_4^{2-} ;生物质燃烧源主要是秸秆、野草等焚烧及生物燃料燃烧产生,示踪离子为 K^+ 和左旋葡聚糖等;扬尘源包含建筑扬尘、道路扬尘和地表土壤尘等,示踪离子为 Al^+ 和 Si^+ 等;工业工艺源包含了化工和金属冶炼等工艺过程排放颗粒,主要以 OC 和金属离子(如: Cu^+ 、 Zn^+ 和 Pb^+ 等)为主;二次无机源是指质谱图中明显含有硫酸盐、硝酸盐和铵盐等二次离子成分颗粒物,这类颗粒物在一定程度上反映大气二次反应强度,未包含在上述源类以及未被识别的颗粒物归于其它源。经过聚类分析,白银市观测期间主要污染源为汽车尾气 30.91%、燃煤 26.40%、二次无机源 13.00%、工业工艺 10.15%、生物质燃烧 9.89%、扬尘 4.90%、餐饮 0.76% 和其它 3.99% (表 1)。

表 1 还列出了部分与本次研究污染源划分较为一致的国内其他城市不同污染源 $\text{PM}_{2.5}$ 贡献占比,发现白银市机动车尾气源和燃煤源占整体源贡献 50% 左右,这与其他城市研究结果一致,但机动车尾气贡献明显高于其他城市,随着机动车保有量的增加,机动车尾气已成为我国很多城市细颗粒的主要来源;白银冬季主要采用燃煤供暖,燃煤贡献占比较高。值得关注的是二次无机源贡献达到 13.00%,二次无机源贡献除太原市均高于其他城市,说明 SO_2 和 NO_x 等二次转化生成的气溶胶粒子对白银冬季大气污染贡献较大;工业工艺源贡献与北京、石家庄、兰州等城市差距不大,白银工业企业种类比较单一,主要以金属冶炼等为主,对重金属颗粒物有所

表 1 不同城市 PM_{2.5} 各污染源贡献/%

Table 1 Comparison of PM_{2.5} pollution contribution sources in different cities/%

项目	机动车尾气	燃煤	生物质燃烧	扬尘	工业工艺源	二次无机源	餐饮	其它
白银市(本研究)	30.91	26.40	9.89	4.90	10.15	13.00	0.76	3.99
兰州市(本研究)	28.81	25.76	14.52	5.28	10.74	10.55	1.20	3.24
广东鹤山 ^[28]	24.80	22.00	10.30	5.60	16.40	5.50	—	—
北京市 ^[17]	26.40	34.00	8.60	5.30	11.80	10.70	—	3.20
石家庄市 ^[6]	30.10	25.10	3.41	13.40	11.60	10.30	0.17	5.92
淮安市 ^[29]	24.50	31.20	13.40	8.10	10.30	8.30	—	4.20
太原市 ^[5]	19.70	27.80	5.00	8.90	17.80	17.60	—	3.20
南京江北新区 ^[7]	20.70	26.80	7.30	6.70	16.00	12.70	—	—

1) “—”表示文章中没有相关数据

贡献；扬尘源和兰州市差距不大,明显低于其他城市,扬尘是 Pb 的主要来源之一,这与前文研究中白银与兰州含 Pb 颗粒物差距较小的结果一致；燃煤、生物质燃烧贡献与其他城市差异不大。

2.5 颗粒物污染过程分析

在观测期间,发生了比较明显的 PM_{2.5} 污染过程,图 6 为观测期间源解析结果,阴影部分表示本研究所选污染过程发生时间段(2019 年 12 月 30 日至 2020 年 1 月 6 日)。从气象监测数据发现,自 2019 年 12 月 30 日起,观测点周边平均风速维持在 2.0 m·s⁻¹ 以下,呈静稳天气状态,主导风向与前期变化不大,气温缓慢升高,大气压呈现明显减压趋势,污染扩散条件不利。近地面出现以 PM_{2.5} 为首要污染物的轻度灰霾过程,环境空气质量逐渐转差,至 2020 年 1 月 4 日 PM₁₀、PM_{2.5} 和 PM₁ 小时最高质量浓度分别达到 246.90、120.48 和 83.81 μg·m⁻³,PM_{2.5}/PM₁₀ 能间接反映一次污染和二次污染,其比值相较清洁时段有增大趋势,维持在 0.51~0.85 之间,二次污染明

显；能见度与清洁时段相比降低 500m 左右。1 月 4 日后白银地区风速增加,气压逐渐升高,气温降低,大气弱波动较多,有冷空气过境,污染扩散条件较好,环境空气质量好转,至 1 月 5 日 00:00 PM₁₀、PM_{2.5} 和 PM₁ 分别降至 75.34、18.95 和 15.06 μg·m⁻³,环境空气质量级别达到优。从污染过程污染源贡献变化分析,相较于整个监测时段各污染源的贡献率,污染过程中,汽车尾气贡献率由 30.91% 上升至 32.80%,二次无机源贡献率由 13.00% 上升至 19.80%,燃煤贡献率由 26.4% 下降至 24%,下降幅度较低,其他污染源变化程度不明显；从颗粒物变化特征分析,污染发生时 OC 和 ECOC 颗粒浓度增加,EC 颗粒浓度减小,ECOC 是 OC 和 EC 颗粒在空气中二次反应所得,表明发生了较为明显的二次污染。综上所述 1 月 4 日的轻度污染过程主要以汽车尾气和二次无机源贡献为主,加之前期不利气象扩散条件导致污染累积和颗粒物老化程度加剧。因此白银市冬季 PM_{2.5} 污染应以汽车尾气和二次无机源管控为主。

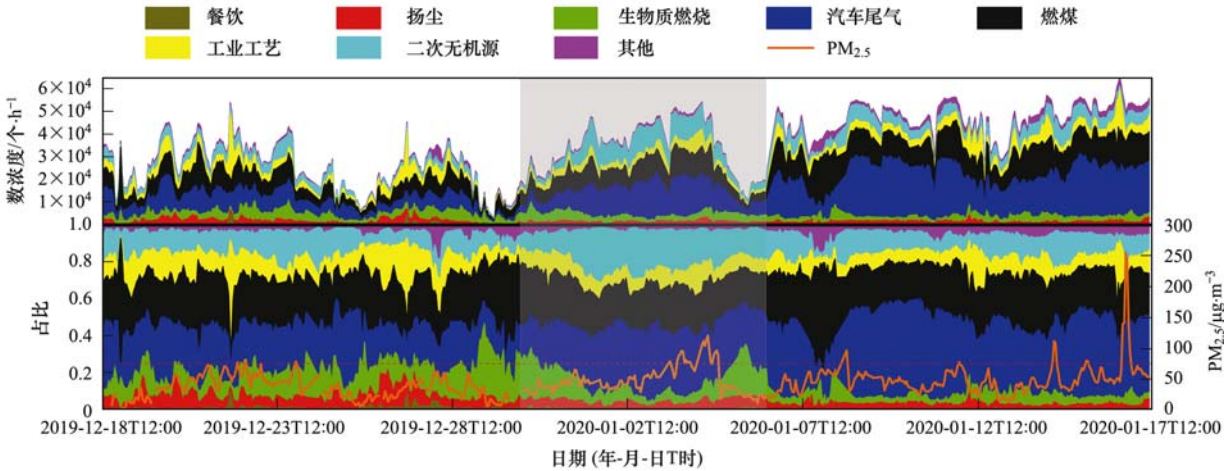


图 6 污染过程污染源贡献率变化

Fig. 6 Change in contribution rate of pollution source during the pollution event

3 结论

(1) 观测期间,白银市冬季 PM_{2.5} (44.89

μg·m⁻³) 浓度显著低于兰州市 (70.69 μg·m⁻³),但含重金属颗粒物占比 (7.84%) 明显高于兰州市 (2.92%),尤其含 Cu 和 Zn 细颗粒物数量显著高于

兰州市; MASS 和含重金属颗粒物粒径分布范围相对兰州较宽, 颗粒物混合比数值较大, $PM_{2.5}$ 组分较兰州更为复杂, 且对人体健康影响明显的含重金属颗粒物数量较多, 治理难度加剧。

(2) 白银机动车尾气贡献均高于其他对比城市, 二次转化生成气溶胶对白银市冬季大气污染贡献显著; 为改善白银环境空气质量, 保障居民身体健康, 工业企业应该自觉调整产业结构和能源结构, 采取积极的污染防治措施, 减少污染物的一次排放和二次生成, 特别是含重金属颗粒物, 环保部门同时应加强对工业企业排放管理。另外, 建议政府社会继续推广新能源汽车, 减少和淘汰老旧机动车, 加强汽车年检制度, 降低机动车排放对 $PM_{2.5}$ 的贡献。

参考文献:

- [1] 吴兑. 近十年中国灰霾天气研究综述[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(2): 257-269.
Wu D. Hazy weather research in China in the last decade: a review[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, **32**(2): 257-269.
- [2] Prather K. Our current understanding of the impact of aerosols on climate change[J]. ChemSusChem, 2009, **2**(6): 377-379.
- [3] 石广玉, 王标, 张华, 等. 大气气溶胶的辐射与气候效应[J]. 大气科学, 2008, **32**(4): 826-840.
Shi G Y, Wang B, Zhang H, et al. The radiative and climatic effects of atmospheric aerosols [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2008, **32**(4): 826-840.
- [4] Duan J C, Tan J H, Hao J M, et al. Size distribution, characteristics and sources of heavy metals in haze episod in Beijing[J]. Journal of Environmental Sciences, 2014, **26**(1): 189-196.
- [5] 刘淑丽. 基于 SPAMS 的太原市冬季 $PM_{2.5}$ 组成与来源研究[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2019, **42**(3): 698-705.
Liu S L. Composition and source of $PM_{2.5}$ during winter in Taiyuan based on SPAMS [J]. Journal of Shanxi University (Natural Science Edition), 2019, **42**(3): 698-705.
- [6] 周静博, 李治国, 路娜, 等. 抗战胜利 70 周年大阅兵期间石家庄大气细颗粒物在线来源解析[J]. 环境科学, 2016, **37**(8): 2855-2862.
Zhou J B, Li Z G, Lu N, et al. Online sources about atmospheric fine particles during the 70th anniversary of victory parade in Shijiazhuang[J]. Environmental Science, 2016, **37**(8): 2855-2862.
- [7] 于兴娜, 时政, 马佳, 等. 南京江北新区大气单颗粒来源解析及混合状态[J]. 环境科学, 2019, **40**(4): 1521-1528.
Yu X N, Shi Z, Ma J, et al. Source apportionment and mixing state of single particles in the Nanjing jiangbei new area [J]. Environmental Science, 2019, **40**(4): 1521-1528.
- [8] 饶芝茜, 罗彬, 张巍. 利用单颗粒气溶胶质谱(SPAMS)研究四川盆地城市的细颗粒物来源[J]. 四川环境, 2018, **37**(6): 55-64.
Rao Z H, Luo B, Zhang W. Source apportionment of particulate matter in cities of Sichuan basin by using single particle aerosol mass spectrometer [J]. Sichuan Environment, 2018, **37**(6): 55-64.
- [9] 刘慧琳, 宋红军, 陈志明, 等. 利用 SPAMS 研究南宁市冬季单颗粒气溶胶化学成分[J]. 环境科学, 2016, **37**(2): 434-442.
- [10] Moffet R C, Desyaterik Y, Hopkins R J, et al. Characterization of aerosols containing Zn, Pb, and Cl from an industrial region of Mexico city [J]. Environmental Science & Technology, 2008, **42**(19): 7091-7097.
- [11] 周静博, 段菁春, 王建国, 等. 2019 年元旦前后石家庄市重污染过程 $PM_{2.5}$ 污染特征及来源解析[J]. 环境科学, 2020, **41**(1): 39-49.
Zhou J B, Duan J C, Wang J G, et al. Analysis of pollution characteristics and sources of $PM_{2.5}$ during heavy pollution in Shijiazhuang city around new year's day 2019 [J]. Environmental Science, 2020, **41**(1): 39-49.
- [12] 宿文康, 鲍晓磊, 倪爽英, 等. 2018 年石家庄市秋冬季典型霾污染特征[J]. 环境科学, 2019, **40**(11): 4755-4763.
Su W K, Bao X L, Ni S Y, et al. Characteristics of haze pollution episodes during autumn and winter in 2018 in Shijiazhuang [J]. Environmental Science, 2019, **40**(11): 4755-4763.
- [13] 马乾坤, 成春雷, 李梅, 等. 鹤山气溶胶光学性质和单颗粒化学组分的研究[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(7): 2710-2720.
Ma Q K, Cheng C L, Li M, et al. The aerosol optical characteristics and chemical composition of single particles in Heshan [J]. China Environmental Science, 2019, **39**(7): 2710-2720.
- [14] Hudson P K, Murphy D M, Cziczo D J, et al. Biomass-burning particle measurements: characteristic composition and chemical processing [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2004, **109**(D23): D23S27.
- [15] Schauer J J, Kleeman M J, Cass G R, et al. Measurement of emissions from air pollution sources. 3. C_1 - C_{29} organic compounds from fireplace combustion of wood [J]. Environmental Science & Technology, 2001, **35**(9): 1716-1728.
- [16] 周静博, 任毅斌, 洪纲, 等. 利用 SPAMS 研究石家庄市冬季连续灰霾天气的污染特征及成因[J]. 环境科学, 2015, **36**(11): 3972-3980.
Zhou J B, Ren Y B, Hong G, et al. Characteristics and formation mechanism of a multi-day haze in the winter of Shijiazhuang using a single particle aerosol mass spectrometer (SPAMS) [J]. Environmental Science, 2015, **36**(11): 3972-3980.
- [17] 索娜卓嘎, 谭丽, 周芮平, 等. 采暖期北京大气 $PM_{2.5}$ 中碳组分的分布特征及来源解析[J]. 中国环境监测, 2018, **34**(4): 54-59.
Suo N, Tan L, Zhou R P, et al. Distribution characteristics and sources apportionment of carbonaceous components in $PM_{2.5}$ during the heating periods in Beijing [J]. Environmental Monitoring in China, 2018, **34**(4): 54-59.
- [18] 黄子龙, 曾立民, 董华斌, 等. 利用 SPAMS 研究华北乡村站点(曲周)夏季大气单颗粒物老化与混合状态[J]. 环境科学, 2016, **37**(4): 1188-1198.
Huang Z L, Zeng L M, Dong H B, et al. Analysis of single particle aging and mixing state at an agriculture site (Quzhou) in the north China plain in summer using a single particle aerosol mass spectrometer [J]. Environmental Science, 2016, **37**(4): 1188-1198.
- [19] 李有文, 王晶, 巨天珍, 等. 白银市不同功能区土壤重金属污染特征及其健康风险评价[J]. 生态学杂志, 2017, **36**

- (5): 1408-1418.
- Li Y W, Wang J, Ju T Z, *et al.* Heavy metal pollution characteristics and human health risk assessment in soils from different functional areas of Baiyin, Gansu, China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, **36**(5): 1408-1418.
- [20] Nan Z R, Zhao C Y. Heavy metal concentrations in gray calcareous soils of Baiyin region, Gansu province, P. R. China [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2000, **118**(1-2): 131-142.
- [21] 郭稳尚, 王帆, 刘焕武, 等. 使用单颗粒质谱仪 (SPAMS) 对 PM_{2.5} 中的含碳颗粒污染特征及混合程度的研究 [A]. 见: 2017 中国环境科学学会科学与技术年会论文集 [C]. 厦门: 中国环境科学学会, 2017.
- [22] 陈多宏, 何俊杰, 张国华, 等. 不同天气类型广东大气超级站细粒子污染特征初步研究 [J]. 地球化学, 2014, **43**(3): 217-223.
- Chen D H, He J J, Zhang G H, *et al.* A preliminary study on the characteristics of fine particle pollution characteristics for different weather type in the Guangdong atmospheric supersite [J]. Geochimica, 2014, **43**(3): 217-223.
- [23] 彭辉. 运用单颗粒气溶胶质谱技术研究成都大气重金属 (Pb, Cu, Zn) 污染 [D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- [24] Dall'Osto M, Harrison R M. Chemical characterisation of single airborne particles in Athens (Greece) by ATOFMS [J]. Atmospheric Environment, 2006, **40**(39): 7614-7631.
- [25] Chaloulakou A, Kassomenos P, Grivas G, *et al.* Particulate matter and black smoke concentration levels in central Athens, Greece [J]. Environment International, 2005, **31**(5): 651-659.
- [26] Li W J, Shao L Y. Transmission electron microscopy study of aerosol particles from the brown hazes in northern China [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2009, **114**(D9): D09302.
- [27] Pósfai M, Buseck P R. Nature and climate effects of individual tropospheric aerosol particles [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2010, **38**: 17-43.
- [28] 陈多宏, 李梅, 黄渤, 等. 区域大气细粒子污染特征及快速来源解析 [J]. 中国环境科学, 2016, **36**(3): 651-659.
- Chen D H, Li M, Huang B, *et al.* The pollution characteristics and source apportionment of regional atmospheric fine particles [J]. China Environmental Science, 2016, **36**(3): 651-659.
- [29] 潘海燕. 利用 SPAMS 研究淮南市冬季灰霾空气污染 [J]. 环境工程, 2015, **33**(S1): 450-452, 480.
- Pan H Y. Research on haze air pollution in winter using SPAMS [J]. Environmental Engineering, 2015, **33**(S1): 450-452, 480.



CONTENTS

Sources and Control Area Division of Ozone Pollution in Cities at Prefecture Level and Above in China	YAN Hui, ZHANG Wei, HOU Mo, <i>et al.</i> (5215)
Dynamic Assessment of PM _{2.5} Health Damage Value in China from 2015 to 2018	LI Hui-juan, ZHOU De-qun, WEI Yong-jie (5225)
Analysis of Multi-scale Spatio-temporal Differentiation Characteristics of PM _{2.5} in China from 2011 to 2017	YANG Wen-tao, QIAO Peng, LIU Xian-zhao, <i>et al.</i> (5236)
Spatio-temporal Evolution and Population Exposure Risk to PM _{2.5} in the Guanzhong Area	HUANG Xiao-jun, QI Ming-yue, LI Yan-yu, <i>et al.</i> (5245)
Formation Mechanism and Source Analysis of Two Heavy Pollution Periods in Winter in a Central Plains City	JIA Jia, CONG Yi, GAO Qing-min, <i>et al.</i> (5256)
Winter Pollution Characteristics and Physicochemical Properties of PM _{2.5} in a Northwest Industrial City	YANG Yan-ping, CHEN Qiang, WANG Li-na, <i>et al.</i> (5267)
Characterization of Metal Pollution of Regional Atmospheric PM _{2.5} and Its Sources Based on the PMF Model	DENG Lin-li, ZHANG Kai-shan, YIN Zi-yuan, <i>et al.</i> (5276)
Pollution Characteristics and Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Deposition in Core Urban Areas, Chongqing	ZHANG Xia, LIU Bin, XIAO Bo-lin, <i>et al.</i> (5288)
Factors Influencing New Atmospheric Particle Formation in Ordos During Summer and Autumn 2019	KONG Xiang-chen, WANG Hong-lei, ZHANG Lian-xia, <i>et al.</i> (5295)
Characteristics and Reactivity of Ambient VOCs in Urban Hangzhou, China	JING Sheng-ao, GAO Ya-qin, SHEN Jian-dong, <i>et al.</i> (5306)
Characteristics and Sources of Atmospheric Volatile Organic Compounds Pollution in Summer in Chengdu	XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, JIANG Tao, <i>et al.</i> (5316)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs and O ₃ in Shijiazhuang	WANG Shuai, CUI Jian-sheng, FENG Ya-ping, <i>et al.</i> (5325)
Analysis of Industrial VOCs Emission Inventory and Countermeasures in Xiamen	WU Dong-yang, ZHUANG Ma-zhan, WU Yan-cong, <i>et al.</i> (5336)
Emission Inventory and Emission Factors of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Architectural Adhesives	LIANG Xiao-ming, SUN Xi-bo, SU Yan-hua, <i>et al.</i> (5345)
Sources and Health Risks of Atmospheric Polychlorinated Biphenyls in an Urban/Industrial Areas, Northwest China	MAO Xiao-xuan, LI Zi-xuan, SONG Shi-jie, <i>et al.</i> (5352)
Vertical Distribution of Surface Formaldehyde in the Pearl River Delta Urban Area Based on Observations at the Canton Tower	HUANG Shan, PEI Cheng-lei, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (5362)
Temporal and Spatial Characteristics of Total Phosphorus in the Middle and Lower Yangtze River Mainstem Under New Water and Sediment Conditions	ZHUO Hai-hua, LOU Bao-feng, WU Yun-li, <i>et al.</i> (5371)
Seasonal Variations in Nitrogen and Phosphorus Concentration and Stoichiometry of Hanfeng Lake in the Three Gorges Reservoir Area	QIAN Tian, HUANG Qi, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (5381)
Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Nutrients in Hengshui Lake Sediments	ZHANG Jia-wen, WEI Jian, LIU Li, <i>et al.</i> (5389)
Endogenous Pollution and Release Characteristics of Bottom Sediments of Hengshan Reservoir in Yixing City	CUI Hui-fang, CHEN Shu-yun, YANG Chun-hui, <i>et al.</i> (5400)
Pollution and Ecological Risk Assessment and Source Apportionment of Heavy Metals in Sediments of Qingliangshan Reservoir in the Meijiang Basin	JIANG Tao, LIN Wei-wen, CAO Ying-jie, <i>et al.</i> (5410)
Influence Factors of Potential Nitrification Rates and Functional Genes Abundance in the Jinshui River and the Qihe River of the Hanjiang River Basin	ZHAO Bin-jie, WANG Xu, ZHANG Jian, <i>et al.</i> (5419)
Contamination Characteristics and Potential Ecological Risks of Typical Perfluoroalkyl Substances in the Water and Sediment of Coastal Tourism Resorts in Shandong Province	WANG Shi-liang, CAO Xue-zhi (5428)
Distribution Characteristics and Source Identification of Organophosphate Esters in Key Waters Areas of Taihu Lake	LÜ Jia-pei, ZHANG Zhen-fei, LIU Yang, <i>et al.</i> (5438)
Residual Characteristics and Health Assessment Analysis of OCPs and PCBs in Karst Groundwater	YE Kai, SUN Yu-chuan, JIA Ya-nan, <i>et al.</i> (5448)
Biogeographic Distribution Patterns of Diatoms in Lancang River and Their Key Drivers	SUN Sheng-hao, CHEN Juan, WANG Pei-fang, <i>et al.</i> (5458)
Bioaccumulation Characteristics of Quinolones (QNs) in Dominant Fish Species and Their Correlation with Environmental Factors in Baiyangdian Lake	SHEN Li-na, FU Yu, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> (5470)
Effect of Biomass Particle Size on the Adsorption of Phosphorus from Aqueous Solution by MgO-loaded Biochar	WANG Peng-fei, ZHI Meng-meng, CHU Zhao-sheng, <i>et al.</i> (5480)
Photocatalytic Degradation of Tetracycline and Copper Complex by Bi ₂ MoO ₆ /Bi ₂ S ₃ Heterojunction	HUANG Wen-xin, WEI Hu, JIANG Cai-yun, <i>et al.</i> (5488)
Enhancing PPCPs Removal and Membrane Fouling Control of Ultrafiltration Membrane by UiO-66@Fe ₃ O ₄ @UiO-66	YIN Yue, WU Dao-wen, SUN Meng-yao, <i>et al.</i> (5500)
Advanced Treatment of Tail Water Using Pilot-scale Horizontal and Vertical Subsurface Flow Constructed Wetlands in Low-temperature Seasons	LIAO Xue-ke, YAN Han-lu, WANG Zhi-yuan, <i>et al.</i> (5509)
Metagenomic Insights into Salinity Build-up in Microbial Communities and Metabolism of Hydrolytic Bioreactor Treating High-color PDWW	GAO Jing, ZHANG Shao-hua, WANG Rui, <i>et al.</i> (5518)
Performance and Microbial Characteristics of Ammonium-limited and Nitrite-limited ANAMMOX Systems	SONG Jia-jun, ZHU Ming-yi, GUO Kai-cheng, <i>et al.</i> (5527)
Microbial Community Structure and Diversity During the Enrichment of Anaerobic Ammonium Oxidation Bacteria	YAN Bing, XIA Song, GUI Shuang-lin, <i>et al.</i> (5535)
Enhanced Dewaterability of Waste-Activated Sludge in Presence of Fe(II)-Activated Calcium Peroxide	BI Wei-wei, RUAN Shu-yu, CHEN Wu-ao-xiao, <i>et al.</i> (5544)
Spatial Distribution, Contamination Assessment, and Sources of Heavy Metals in the Urban Green Space Soils of a City in North China	ZHAO Liang, LIANG Yun-ping, CHEN Qian, <i>et al.</i> (5552)
Technological Classification of Cadmium Quality in the Rice Producing Areas of South China	DOU Wei-qiang, AN Yi, QIN Li, <i>et al.</i> (5562)
Distribution Characteristics of Selenium in a Soil-Crop System and the Threshold of Selenium-Rich Soils	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> (5571)
Transfer Factor and Health Risk Assessment of Heavy Metals in a Soil-Crop System in a High Incidence Area of Nasopharyngeal Carcinoma, Guangdong	YE Mai, ZHANG Jing-ru, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> (5579)
DA-6 and GLDA Enhanced <i>Panicum virgatum</i> L. to Phytoextract Cd from Contaminated Soils	WANG Zheng, SUN Zhao-jun, Sameh Mohamed, <i>et al.</i> (5589)
Remediation Performance via the Passivation of a Porous Biomorph Genetic Composite of α -Fe ₂ O ₃ /Fe ₃ O ₄ /C Using a Bamboo Template on As(V) Contaminated Soils	ZHAO Ning-ning, HE Hao, FENG Guo-jie, <i>et al.</i> (5600)
Biodegradation of Expanded Polystyrene Foams in <i>Zophobas morio</i> : Effects of Gut Microbiota	YANG Li, LIU Ying, GAO Jie, <i>et al.</i> (5609)
Isolation, Identification, and Degrading Characteristics of an Oil Resistant Formaldehyde-Degrading Bacterium	HAN Xi, WANG Rong-rong, SHI Chun-zhen (5617)
Characteristics of Phyllosphere and Rhizosphere Bacterial Communities in <i>Bothriochloa ischaemum</i> in Copper Tailings	JIA Tong, YAO Yu-shan, WANG Rui-hong (5628)
Effects of Selected Biochars Application on the Microbial Community Structures and Diversities in the Rhizosphere of Water Spinach (<i>Ipomoea aquatica</i> Forssk.) Irrigated with Reclaimed Water	CUI Bing-jian, CUI Er-ping, HU Chao, <i>et al.</i> (5636)
Effects of Modified Biowaste-based Hydrochar on Rice Yield and Nitrogen Uptake	HOU Peng-fu, XUE Li-hong, FENG Yan-fang, <i>et al.</i> (5648)
Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Soil PAHs in Shizuishan City Based on GIS and PMF Model	XIA Zi-shu, WANG Yu-yu, ZHONG Yan-xia, <i>et al.</i> (5656)
Effects of Nitrogen Fertilizer and Straw Returning Methods on N ₂ O Emissions in Wheat-Maize Rotational Soils	XU Hong-wei, LI Na, FENG Yong-zhong, <i>et al.</i> (5668)