

### 北京城区PM<sub>2.5</sub>各组分污染特征及来源分析

安欣欣, 曹阳, 王琴, 富佳明, 王陈婧, 景宽, 刘保献



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年5月

第43卷 第5期  
Vol.43 No.5

目次

北京城区 PM<sub>2.5</sub> 各组分污染特征及来源分析 ..... 安欣欣, 曹阳, 王琴, 富佳明, 王陈婧, 景宽, 刘保献 (2251)

基于时空混合效应模型的京津冀 PM<sub>2.5</sub> 浓度变化模拟 ..... 范丽行, 杨晓辉, 宋春杰, 李梦诗, 段继福, 王卫, 李夫星, 李伟妙 (2262)

2000~2018年京津冀城市群 PM<sub>2.5</sub> 时空演变及其与城市扩张的关联 ..... 赵安周, 相恺政, 刘宪锋, 张向蕊 (2274)

海-陆大气交汇作用下青岛冬季天气 PM<sub>2.5</sub> 污染特征与来源解析 ..... 虞雄, 杨凌霄, 张婉, 齐安安, 王滢铭, 王鹏程, 黄琦, 赵彤, 张雄飞, 徐鹏, 张天琪, 王文兴 (2284)

硫酸盐非均相机制对颗粒物污染的影响: 上海典型污染事件的 WRF-Chem 模拟 ..... 张茹涵, 张皓然, 冯伟航, 汤克勤, 马亚平, 王红丽, 黄成, 胡建林, 张宏亮, 李楠 (2294)

省会城市不同功能区大气 PM<sub>2.5</sub> 化学组分季节变化及来源分析 ..... 孙友敏, 范晶, 徐标, 李彦, 韩红, 张桂芹 (2304)

太原市冬季不同污染程度下 PM<sub>2.5</sub> 的化学组成、消光特征及氧化潜势 ..... 任娇, 赵荣荣, 王铭, 张欢欢, 尹诗杰, 薛永刚 (2317)

郑州市冬季大气 PM<sub>2.5</sub> 金属元素来源及健康风险评估 ..... 姚森, 王乾恒, 薛妍, 史来文, 张俊美, 杨书申 (2329)

淄博市冬季 PM<sub>2.5</sub> 载体金属元素污染特征、生态风险评估及来源分析 ..... 白雯宇, 徐勃, 郭丽瑶, 殷宝辉, 马银红, 李丽明, 杨文, 赵雪艳 (2336)

承德市 PM<sub>2.5</sub> 中多环芳烃的季节分布特征、来源解析及健康风险评估 ..... 贺博文, 聂赛赛, 李仪琳, 郭睿瑶, 姚波, 崔建升, 冯亚平, 王帅, 侯晓松 (2343)

珠三角大气中二噁英污染水平与区域迁移 ..... 付建平, 谢丹平, 黄锦琼, 杨艳艳, 冯桂贤, 周长风, 廖海婷, 青亮, 张漫雯, 吴明亮, 张素坤 (2355)

华北平原南部农村地区黑碳气溶胶浓度及来源 ..... 张玲, 孔少飞, 郑煌, 胡亮, 曾昕, 程溢, 祁士华 (2363)

基于模式过程分析技术天津地区 PM<sub>2.5</sub> 污染气象成因分析 ..... 郝团, 蔡子颖, 韩素芹, 杨旭, 樊文雁, 姚青, 邱晓滨 (2373)

基于排放量和大气反应活性的 VOCs 污染源分级控制 ..... 陈鹏, 张月, 邢敏, 李珊珊 (2383)

基于复杂网络的中国臭氧拓扑特征 ..... 菅娜, 陈建华, 李冬, 王迪, 薛志钢 (2395)

基于前体物多情景排放的兰州市 2030 年夏季臭氧预测 ..... 陈天雷, 吴敏, 潘成珂, 常莉敏, 李洪, 刘鹏, 高宏, 黄韬, 马建民 (2403)

基于源反演和气溶胶同化方法天津空气质量模式预报能力改进 ..... 蔡子颖, 唐邈, 肖致美, 杨旭, 朱玉强, 韩素芹, 徐虹, 邱晓滨 (2415)

基于空气质量监测数据的钢铁行业污染源识别方法 ..... 石耀鹏, 胡京南, 褚晰晰, 段青春, 胡丙鑫, 殷丽娜, 吕玲玲 (2427)

重污染天气应对“绩效分级、差异化管控”措施首次实践效果后评估 ..... 曾景海, 王灿 (2436)

黄河流域水污染风险分区 ..... 周夏飞, 曹国志, 於方, 杨威杉, 徐泽升 (2448)

黄河流域甘肃段工业行业水污染物空间排放特征 ..... 李雪迎, 杨曦, 乔琦, 刘丹丹, 张玥, 赵若楠, 白璐 (2459)

黄河沉积物重金属时空分布与污染评价 ..... 王韬轶, 潘保柱, 韩语, 王雨竹, 李晨辉, 杜蕾 (2467)

APCS-MLR 结合 PMF 模型解析厦门杏林湾近郊流域沉积物金属来源 ..... 沈宸宇, 闫钰, 于瑞莲, 胡恭任, 崔建勇, 颜妍, 黄华斌 (2476)

河流底泥 DOM、营养盐与重金属空间分异特征及响应关系 ..... 肖艳春, 于会彬, 宋永会 (2489)

太原市汾河河岸带土壤重金属分布特征、评价与来源解析 ..... 胡杰, 赵心语, 王婷婷, 苟奎贤, 王春玲 (2500)

洪泽湖溶解态有机质与重金属汞的结合特性 ..... 胡斌, 王沛芳, 张楠楠, 包天力, 金秋彤 (2510)

富营养化驱动下西凉湖百年生态演化轨迹 ..... 郑佳楠, 徐敏, 郑文秀, 朱可欣, 王荣, 张恩楼 (2518)

基于 DGT 技术的黄河上游典型水库沉积物氮磷释放与污染源解析 ..... 马玉坤, 朱翔, 庞晴晴, 孔明, 韩天伦, 彭福全, 谢磊, 汪龙眠, 徐斌, 何斐 (2527)

暴雨前后河南北部河流水质分异特征及其污染源解析 ..... 张彦, 邹磊, 梁志杰, 姜明, 李平, 黄仲冬, 齐学斌 (2537)

鄱阳湖流域水葫芦 (*Eichhornia crassipes*) 对水体微塑料的吸附截留效应 ..... 李文刚, 吴希恩, 简敏菲, 刘淑丽, 刘海球, 丁惠君 (2548)

太湖塑料添加剂时空分布和生态风险评估 ..... 刘舒娇, 丁剑楠, 石浚哲, 张军毅, 庄严, 邹华 (2557)

骆马湖表层沉积物微塑料的分布、来源及储量 ..... 姚明轩, 白雪, 徐振佳, 李凤杰, 陆滢, 李畅, 华祖林 (2566)

太湖不同介质中磷的污染特征及其治理启示 ..... 蔡梅, 陆志华, 王元元, 钱旭 (2575)

辽河四平段流域河流沉积物微生物群落多样性和结构分析 ..... 李鹏洋, 安启睿, 王新皓, 孙思宇, 李元乾, 郑娜 (2586)

面源污染诱导嘉陵江沉积物中细菌群落结构与功能异变 ..... 薛玉琴, 徐飞, 刘坤和, 王佳颖, 竹兰萍, 朱志豪, 张拓 (2595)

微塑料对沉积物细菌群落组成和多样性的影响 ..... 李汶璐, 王志超, 杨文煊, 张博文, 李卫平 (2606)

白洋淀冬季沉积物好氧反硝化菌垂直分布特征及群落构建 ..... 张甜娜, 陈召莹, 张紫薇, 周石磊, 孟佳靖, 陈哲, 张一凡, 董宛佳, 崔建升 (2614)

人工诱导水库分层水体提前混合对细菌群落结构和代谢活性的影响 ..... 高悦, 黄廷林, 李楠, 齐允之, 司凡, 杨斌 (2624)

鄱阳湖典型区铜锈环螺体内微塑料分布特征 ..... 江为群, 胡启武, 简敏菲, 邹龙, 刘淑丽 (2633)

负载多壁碳纳米管的多孔 Ti/SnO<sub>2</sub>-Sb-Ni 电极催化氧化双酚 A ..... 符远航, 刘安迪, 黄纬斌, 唐柏彬, 张进忠 (2640)

磁性 Mn<sub>0.6</sub>Zn<sub>0.4</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>@SiO<sub>2</sub> 催化 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 降解亚甲基蓝效能及机制 ..... 徐冬莹, 余静, 郝旗, 杨迎春, 方淑红 (2650)

两种纳米颗粒对沸石吸附环丙沙星的影响 ..... 蒋兰翠, 孟昭福, 刘贤, 刘欣, 王新欣, 曹雪雯 (2662)

AMD 污泥复合材料吸附 As(V) 的机制及其影响因素 ..... 张亚辉, 张瑞雪, 吴攀, 陈世万, 杨艳, 安丽, 傅渝然, 张子豪 (2673)

三氯生及其降解中间产物对活性污泥中微生物群落变化和硝化反硝化功能基因的影响 ..... 卢英源, 董小琦, 彭星然, 贾晓珊 (2685)

污染场地风险管控可持续评价指标体系构建及关键影响因素分析 ..... 李笑诺, 易诗懿, 陈卫平 (2699)

基于生态功能的滨海湿地土壤质量综合评价方法构建及实证分析 ..... 张雪, 孔范龙, 姜志翔 (2709)

铜山矿区周边农田土壤重金属来源解析及污染评价 ..... 陈航, 王颖, 王澍 (2719)

典型铁、锰矿物对稻田土壤砷形态与酶活性的影响 ..... 周一敏, 黄雅媛, 刘凯, 赵儒乐, 李冰玉, 雷鸣 (2732)

两种油菜施肥水溶性壳聚糖修复典型铅污染农田土壤 ..... 孟晓飞, 郑国砥, 陈同斌, 杨俊兴, 郭俊梅, 刘杰 (2741)

基于贝叶斯理论的小麦籽粒镉铅超标风险预测 ..... 王天齐, 李艳玲, 杨阳, 牛硕, 王美娥, 陈卫平 (2751)

紫色土旱坡地油菜/玉米轮作下氮流失的年度变化特征 ..... 徐曼, 高明, 余添, 朱浩宇, 邓华, 王子芳 (2758)

不同原料生物炭的理化特性及其作炭基肥缓释载体的潜力评价 ..... 邢莉彬, 成洁, 耿增超, 张宏伟, 梁宏旭, 王强, 孙倩倩, 李艳 (2770)

木醋液酸化生物炭与氮素配施对盐渍土壤活性氮及氨挥发的影响 ..... 申书伟, 张丹丹, 王敏鸽, 王旭东 (2779)

生物可降解地膜覆盖对关中地区小麦-玉米农田温室气体排放的影响 ..... 郭怡婷, 罗晓琦, 王锐, 陈海心, 冯浩 (2788)

戴云山南坡不同海拔森林土壤微生物群落结构特征和影响因素 ..... 何中声, 王紫薇, 朱静, 陈佳嘉, 谷新光, 江蓝, 陈博, 吴则焰, 刘金福, 陈文伟 (2802)

模拟增温和降雨增加对撂荒地土壤胞外酶活性及计量特征的影响 ..... 王兴, 钟泽坤, 简俊楠, 张硕宏, 杨改河, 任成杰, 冯永忠, 任广鑫, 王晓娇, 韩新辉 (2812)

中国主要城市的城市化对局地增温的贡献 ..... 李宇, 周德成, 闫章美, 张良侠 (2822)

《环境科学》征订启事(2293) 《环境科学》征稿简则(2426) 信息(2585, 2672, 2708)

# 太原市冬季不同污染程度下 $PM_{2.5}$ 的化学组成、消光特征及氧化潜势

任娇<sup>1</sup>, 赵荣荣<sup>1</sup>, 王铭<sup>2</sup>, 张欢欢<sup>2</sup>, 尹诗杰<sup>1</sup>, 薛永刚<sup>3</sup>

(1. 山西财经大学资源型经济转型发展研究院, 太原 030006; 2. 山西农业大学生命科学学院, 太原 030031; 3. 中国科学院地球环境研究所气溶胶化学与物理重点实验室, 西安 710061)

**摘要:** 为深入探究重污染地区气溶胶的消光特征和健康风险, 于2019年冬季开展了太原市  $PM_{2.5}$  主要化学成分和氧化潜势的分析. 采样期间  $\rho(PM_{2.5})$  为  $(89.9 \pm 33.6) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 其中水溶性离子和碳质气溶胶分别占到 43.3% 和 33.8%, 浓度较高的组分依次为:  $\text{OC} > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{EC} > \text{NH}_4^+ > \text{Cl}^- > \text{Ca}^{2+}$ . 随着污染程度的增加,  $PM_{2.5}$  中有机物(OM)和矿物尘的占比下降了 5.8% 和 11.2%, 而 SNA( $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{NH}_4^+$ ) 的质量分数由 33.9% 显著增加到 56.0%. 基于 IMPROVE 公式估算, 太原市冬季大气颗粒物的平均消光系数为  $(453.4 \pm 230.0) \text{Mm}^{-1}$ , 在清洁天和轻度污染时 OM 和元素碳(EC)在消光中起主要作用, 二者的总贡献率约占 55%; 而到重度污染时, SNA 的贡献率显著上升至 70% 左右, 成为影响大气能见度的主要成分. 氧化潜势  $\text{DTT}_v$  的平均值为  $(2.0 \pm 0.9) \text{nmol} \cdot (\text{min} \cdot \text{m}^3)^{-1}$ , 呈现出随着污染加剧而逐步上升的规律, 重度污染下的  $\text{DTT}_v$  是清洁天的 2.9 倍. 从来源上看, 二次源(31.7%) 及燃煤和生物质燃烧源(26.0%) 是太原市冬季  $PM_{2.5}$  的主要来源, 其次为机动车源(18.1%)、扬尘源(18.0%) 和工业源(6.3%). 对比两次重污染事件发现, 交通管制对于降低一次源排放的效果明显, 而二次源产生的颗粒物其氧化潜势水平可能更高.

**关键词:**  $PM_{2.5}$ ; 重污染; 消光特征; 氧化潜势; 太原

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)05-2317-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.202108305

## Chemical Compositions, Light Extinction Effect, and Oxidative Potential of $PM_{2.5}$ Under Different Pollution Levels During Winter in Taiyuan

REN Jiao<sup>1</sup>, ZHAO Rong-rong<sup>1</sup>, WANG Ming<sup>2</sup>, ZHANG Huan-huan<sup>2</sup>, YIN Shi-jie<sup>1</sup>, XUE Yong-gang<sup>3</sup>

(1. Research Institute of Transition of Resource-based Economics, Shanxi University of Finance and Economics, Taiyuan 030006, China; 2. College of Life Sciences, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030031, China; 3. Key Laboratory of Aerosol Chemistry and Physics, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China)

**Abstract:** In order to deeply explore the extinction characteristics and health risks of aerosols in heavy pollution areas, the main chemical components and oxidative potential of  $PM_{2.5}$  in Taiyuan were analyzed in the winter of 2019. The mass concentration of  $PM_{2.5}$  was  $(89.9 \pm 33.6) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  during the sampling period, in which water-soluble ions and carbonaceous aerosol accounted for 43.3% and 33.8%, respectively. The major components of  $PM_{2.5}$  were as follows:  $\text{OC} > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{EC} > \text{NH}_4^+ > \text{Cl}^- > \text{Ca}^{2+}$ . With the aggravation of pollution, the proportion of organic matter and mineral dust in  $PM_{2.5}$  decreased by 5.8% and 11.2%, respectively, whereas the proportion of secondary inorganic ions-SNA increased from 33.9% to 56.0%. The extinction coefficient of atmospheric particulate matter in Taiyuan in winter calculated by the IMPROVE formula was  $(453.4 \pm 230.0) \text{Mm}^{-1}$ . On the clean and light pollution days, OM and EC played a major role in the light extinction, accounting for approximately 55% of the total contribution, whereas the contribution of SNA increased to approximately 70% with the evolution into heavy pollution and became the main component affecting atmospheric visibility. The mean value of  $\text{DTT}_v$  was  $(2.0 \pm 0.9) \text{nmol} \cdot (\text{min} \cdot \text{m}^3)^{-1}$ , and it showed an increasing trend with the aggravation of haze pollution. The  $\text{DTT}_v$  under heavy pollution was 2.9 times that on clean days. The main sources were secondary sources (31.7%) and coal and biomass combustion sources (26.0%), followed by vehicle sources (18.1%), dust sources (18.0%), and industrial sources (6.3%). Comparing two heavy pollution events, it was found that traffic control had an obvious effect on reducing primary emissions, and the secondary sources may contribute to a higher  $\text{DTT}_v$  activity than other sources.

**Key words:**  $PM_{2.5}$ ; heavy pollution; extinction effect; oxidative potential; Taiyuan

随着工业化和城市化进程的不断加快, 空气污染已成为全球最大的环境健康风险因素, 会诱发多种呼吸道、心血管疾病甚至肺癌<sup>[1]</sup>. 中国的大气污染每年导致超过 100 万人过早死亡<sup>[2]</sup>, 其中细颗粒物  $PM_{2.5}$  是城市大气的首要污染物, 其比表面积大、附着多种有毒物质且穿透力强, 因此对人体健康的危害更大<sup>[3]</sup>.

近年来, 学者们针对大气  $PM_{2.5}$  的化学组分、来源解析和暴露风险等开展了一系列观测和研

究<sup>[4-9]</sup>. 结果表明, 本地积累和区域传输是重污染过程形成的主要原因,  $PM_{2.5}$  的来源和化学组成决定了其消光特征和毒性效应<sup>[10-13]</sup>. 相比于清洁天, 污染天的二次转化过程增强, 水溶性离子中  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$

收稿日期: 2021-08-27; 修订日期: 2021-10-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41807456); 山西财经大学青年科研基金项目(QN-2018010); 山西省“1331”提质增效工程山西财经大学资源型经济转型协同创新中心建设项目(晋教科[2021]4号)

作者简介: 任娇(1990~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为大气污染研究, E-mail: renjiao\_sxufe@163.com

和  $\text{NH}_4^+$  (合称为 SNA) 的比重显著增大<sup>[8,9,12]</sup>. SNA 对大气消光系数的贡献率较高,通常为 40%~60%,硫酸盐和硝酸盐是导致大气能见度降低的关键因子<sup>[14,15]</sup>. 元素碳 (EC) 作为主要的吸光气溶胶,其消光贡献一般为 5%~10%<sup>[15~17]</sup>.  $\text{PM}_{2.5}$  对健康的影响主要与活性氧化物种 (ROS) 引起的氧化应激损伤有关,氧化潜势 (oxidative potential, OP) 集成了颗粒物尺寸、表面特征和化学成分等性质,能更加全面地表征  $\text{PM}_{2.5}$  对人体健康的影响<sup>[18,19]</sup>. 国外较早开始了  $\text{PM}_{2.5}$  氧化潜势水平的评估<sup>[20]</sup>,而国内的研究起步较晚,目前主要集中在特大城市和东部沿海地区,例如北京、武汉、广州、南京和烟台等<sup>[21~24]</sup>,结果发现水溶性有机质、类腐殖酸、醌类化合物和过渡金属等组分可能具有更高的氧化潜势.

自 2013 年“大气十条”颁布以来,一系列污染防治措施卓有成效,全国  $\text{PM}_{2.5}$  浓度整体大幅下降<sup>[25,26]</sup>,然而大气污染的区域差异愈发明显. 高浓度  $\text{PM}_{2.5}$  和重污染天气在汾渭平原、京津冀周边和成渝等地区频发<sup>[26~28]</sup>,如何精准防控,进一步提升重污染城市的环境质量是当前环境管理的核心任务. 山西作为煤炭资源省份,其环境污染问题一直备受关注. 太原是山西的省会城市,由于其特殊的工业结构及三面环山的盆地地形,大气污染一直处于相对较高水平<sup>[29,30]</sup>,污染防治形势严峻. 不少学者已对太原市不同季节  $\text{PM}_{2.5}$  的水溶性离子、碳质组分和无机元素等进行了观测研究<sup>[31~34]</sup>,发现  $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{Cl}^-$  这 5 种离子的爆发性增长对太原市灰霾天污染的贡献最大<sup>[35]</sup>. 另一典型特征是,太原碳质气溶胶在  $\text{PM}_{2.5}$  中的占比高达 41.7%,EC 浓度明显高于其他城市<sup>[36,37]</sup>. 那么,太原市不同化学组分的大气消光贡献是否具有区别于其他城市的特征?  $\text{PM}_{2.5}$  的浓度高,那对应的氧化潜势和健康风险高低如何? 以上问题尚不清晰. 基于此,本研究对 2019 年太原市冬季大气  $\text{PM}_{2.5}$  样品进行了采样分析,从  $\text{PM}_{2.5}$  的化学组成、消光效应和健康风险这 3 个角度,综合剖析其不同污染程度下的演变规律,以期加深对京津冀周边重污染地区污染特征的理解.

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集

采样点位于太原市小店区山西财经大学育才楼楼顶 (37.79°N, 112.59°E),距地面高度约 20 m,周围以学校和居民住宅区为主,紧邻南中环、坞城路两条城市主干道. 为评估典型重污染期太原市  $\text{PM}_{2.5}$  的消光特征和氧化潜势,本研究选取重污染易发的

冬季月份进行加密采样,采样时间为 2019 年 12 月 1~30 日. 采用大流量采样器 (广州铭野环保科技有限公司) 对大气中的  $\text{PM}_{2.5}$  进行采集,流量为 300  $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ ,每日 24 h 连续监测 (08:00~次日 08:00). 采样滤膜为石英纤维滤膜 (Pall Life Science, 20.3  $\text{cm}\times 12.7\text{ cm}$ ),采样期间设置 3 个采样空白作为对照,采样后均置于  $-20^\circ\text{C}$  冰箱中保存. 研究期间的气态污染物浓度 ( $\text{NO}_2$  和  $\text{SO}_2$ ) 来自太原市国控点空气质量监测站,气温、相对湿度、风速、风向和能见度等气象数据来自于太原小店区国家基本气象站,数据来源于山西省气象信息中心.

### 1.2 $\text{PM}_{2.5}$ 化学组分分析

本研究对  $\text{PM}_{2.5}$  样品中的主要化学组分进行了测定,包括水溶性离子、有机碳 (OC)、元素碳 (EC) 和相关化学元素,实验分析在中国科学院地球环境研究所气溶胶化学与物理重点实验室完成. 取直径为 16 mm 的 3 张小膜片置于离心管中,加入 15 mL 超纯水,超声萃取 30 min 后过滤,取上清液使用离子色谱仪 (Dionex-ICS900 型,美国戴安公司) 对 8 种水溶性无机离子 (包括  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{Ca}^{2+}$ ) 的浓度进行测定<sup>[8,9]</sup>, $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{Ca}^{2+}$  的仪器检出限分别为 0.02、0.03 和 0.05  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,其余离子检出限均小于 0.01  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . 使用热/光碳分析仪 (DRI Model 2001,美国) 分析有机碳和元素碳,方法为 IMPROVE-A 的热光反射协议<sup>[11,21,36]</sup>,定义  $\text{OC} = \text{OC1} + \text{OC2} + \text{OC3} + \text{OC4} + \text{OP}$ , $\text{EC} = \text{EC1} + \text{EC2} + \text{EC3} - \text{OP}$ . OC 和 EC 的检出限分别为 0.55  $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$  和 0.08  $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ . 采用能量色散 X 射线荧光光谱仪 (ED-XRF, Epsilon4) 测定  $\text{PM}_{2.5}$  样品中的 15 种元素浓度<sup>[38]</sup>,包括 4 种常量元素 (Fe、Ca、K、Ti) 和 11 种痕量元素 (Cr、Mn、Ni、Cu、Zn、V、Co、As、Br、Sr、Pb). X 射线管最大电压 50 kV,最大电流 3 mA. 采用美国 MicroMatter 公司的薄膜滤纸作为标准物质建立工作曲线, NIST SRM2783 号标准物质进行质量控制,Fe、K、Cr、Zn、Mn 和 Pb 的仪器检测限分别为 0.022、0.020、0.011、0.014、0.011 和 0.008  $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ ,其他元素检出限均可达到 0.002  $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ . 本研究测试时每 10 个样品设置 1 个实验空白,空白膜与样品采用相同方法处理,所有数据均已扣除空白值,平行样复检的相对误差小于 10%.

### 1.3 大气消光系数的计算

#### 1.3.1 基于能见度观测

大气颗粒物会通过散射和吸收对太阳辐射造成消光,引起能见度下降. 借助能见度仪观测结果,通过 Koschmieder 公式进行推算,即可得到消光系

数<sup>[13,15]</sup>:

$$b_{\text{ext-v}} = [-\ln(\varepsilon)]/V \quad (1)$$

式中,  $b_{\text{ext-v}}$  为基于能见度观测的大气消光系数 ( $\text{Mm}^{-1}$ );  $V$  为水平能见度 (km), 来自气象站前向散射能见度仪 (DNQ1-V35, 北京华云升达) 的观测结果;  $\varepsilon$  为对比度阈值, 取值一般为 2%~5%<sup>[15]</sup>.

### 1.3.2 基于 IMPROVE 公式

基于美国 IMPROVE 观测网多年观测结果得到的定量 IMPROVE 经验公式, 在国内外气溶胶消光系数估算方面得到了广泛应用<sup>[15~17,38]</sup>. 本文使用改进版的 IMPROVE 公式计算大气消光系数<sup>[39]</sup>, 具体如下:

$$b_{\text{ext}} = b_{\text{scat}} + b_{\text{abs}} = 2.2 \times f_s(\text{RH}) \times [(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]_{\text{Small}} + 4.8 \times f_L(\text{RH}) \times [(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]_{\text{Large}} + 2.4 \times f_s(\text{RH}) \times [\text{NH}_4\text{NO}_3]_{\text{Small}} + 5.1 \times f_L(\text{RH}) \times [\text{NH}_4\text{NO}_3]_{\text{Large}} + 2.8 \times [\text{OM}]_{\text{Small}} + 6.1 \times [\text{OM}]_{\text{Large}} + 1 \times [\text{Fine soil}] + 10[\text{EC}] \quad (2)$$

式中,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 = 1.375 [\text{SO}_4^{2-}]$ ,  $\text{NH}_4\text{NO}_3 = 1.29 [\text{NO}_3^-]$ ,  $[\text{OM}]$  (organic matter) =  $1.6 \times [\text{OC}]$ .  $[X]$  是  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 $\text{NH}_4\text{NO}_3$  和 OM 的浓度, 根据各组分浓度高低划分为大、小两档并赋予不同的单位质量散射效率. 当  $[X] < 20 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  时,  $[X]_{\text{Large}} = \frac{[X]^2}{20}$ ; 当  $[X] \geq 20 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  时,  $[X]_{\text{Large}} = [X]$ ,  $[X]_{\text{Small}} = [X] - [X]_{\text{Large}}$ . 式中,  $f(\text{RH})$  是吸湿增长系数, 可从文献[39]中查到采样期不同湿度条件下的取值.

土壤矿物尘颗粒浓度 [Fine soil] 由式(3)计算:

$$[\text{Fine soil}] = [\text{Al}_2\text{O}_3] + [\text{SiO}_2] + [\text{K}_2\text{O}] + [\text{CaO}] + [\text{TiO}_2] + [\text{MnO}_2] + [\text{Fe}_2\text{O}_3] = 1.89 \times [\text{Al}] + 2.14 \times [\text{Si}] + 1.21 \times [\text{K}] + 1.4 \times [\text{Ca}] + 1.67 \times [\text{Ti}] + 1.58 \times [\text{Mn}] + 1.43 \times [\text{Fe}] \quad (3)$$

由于采样膜为石英纤维滤膜, 故 Si 和 Al 的数据无法使用. 粗颗粒和微量元素对消光的贡献很小, 主要研究细颗粒对大气能见度的影响<sup>[15,38]</sup>.

### 1.4 DTT 实验和氧化潜势分析

二硫苏糖醇 (DTT) 是一种强还原剂, 能与颗粒物中具有氧化性的物质发生反应生成 ROS, 模拟 PM<sub>2.5</sub> 在人体内氧化还原反应的过程, 通过 DTT 的消耗速率来表征 PM<sub>2.5</sub> 的氧化潜势水平. DTT 实验流程见文献[22,40], 加入 5,5'-二硫代双(2-硝基苯甲酸) (DTNB) 与过量 DTT 反应会生成 2-硝基-5 硫代苯甲酸 (TNB), 颜色呈黄棕色. 由于 TNB 在 412 nm

处具有特征吸收, 因此可通过测定其吸光度计算样品中剩余 DTT 的量. 随着时间的增加, 溶液颜色依次减弱, 说明 DTT 被逐渐消耗.

本研究中, 从 PM<sub>2.5</sub> 采样膜上裁取 3 个直径为 16 mm 的小膜片置于离心管中, 加入 5 mL 超纯水, 超声萃取 30 min 后使用 0.45  $\mu\text{m}$  的 PTFE 过滤头过滤. 在 1 mL PM<sub>2.5</sub> 提取液中加入 100  $\mu\text{L}$  磷酸钾溶液 ( $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ , pH = 7.4) 和 50  $\mu\text{L}$   $10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  的 DTT 溶液开始反应, 为了模拟人体环境, 将离心管中的反应体系放置于摇床暗室并 37°C 水浴加热. 分别在 0、10、20、30 和 40 min 时间点取出 50  $\mu\text{L}$  溶液, 加入提前加好 20  $\mu\text{L}$  10% TCA 的 96 孔板中终止反应. 待全部时间点的溶液都移出后, 每个孔中加入 100  $\mu\text{L}$  Tris ( $0.4 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ , pH = 8.9) 和 50  $\mu\text{L}$  的 DTNB ( $10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ , 含 20  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  的乙二胺四乙酸, EDTA), 溶液随即变成亮黄色. 通过酶标仪 (Bio-Rad) 于 412 nm 测定其吸光度, 可获得各时刻剩余的 DTT 浓度和 PM<sub>2.5</sub> 样品对 DTT 的消耗速率 ( $R_s$ ,  $\text{nmol} \cdot \text{min}^{-1}$ ).

DTT 的消耗速率一般通过两种方式表示: 一种是体积标准化, 即 DTT 消耗量除以加入反应的颗粒物采样体积, 以  $\text{DTT}_v$  表示, 与人类暴露的健康影响直接相关; 另一种是质量标准化, 以  $\text{DTT}_m$  表示, 表征单位质量颗粒物的氧化潜势<sup>[41]</sup>.

$$\text{DTT}_v = (R_s - R_b) / \left( V_t \times \frac{A_h}{A_t} \times \frac{V_s}{V_e} \right) \quad (4)$$

$$\text{DTT}_m = (R_s - R_b) / \left( M_t \times \frac{A_h}{A_t} \times \frac{V_s}{V_e} \right) \quad (5)$$

式中,  $R_s$  和  $R_b$  分别为样品和空白的 DTT 消耗速率 ( $\text{nmol} \cdot \text{min}^{-1}$ );  $V_t$  和  $M_t$  分别为样品对应的大气总采样体积 ( $\text{m}^3$ ) 和颗粒物的总质量 ( $\mu\text{g}$ );  $A_h$  和  $A_t$  分别为 DTT 实验萃取时的膜片面积和采样滤膜的总面积 ( $\text{cm}^2$ );  $V_s$  和  $V_e$  分别为参与 DTT 反应的样品体积和萃取体积 (mL). 同时设置 5 个梯度的 DTT 标样, 浓度分别为 0.025、0.05、0.1、0.25 和 0.5  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ , 标样浓度与吸光度之间的相关系数为 0.99, 线性方程为  $y = 4.07x + 0.193$ , 该工作曲线用来计算 PM<sub>2.5</sub> 样品反应体系中 DTT 的剩余量. DTT 实验中每 5 个样品设置 1 个去离子水空白, 用来反映实验室背景值; 每个样品做 3 次平行, 平行样的吸光度标准偏差小于 5%.

## 2 结果与讨论

### 2.1 PM<sub>2.5</sub> 浓度和演化特征

#### 2.1.1 各化学组分浓度

图 1 为 2019 年 12 月太原市 PM<sub>2.5</sub> 和 气态污染

物浓度的日值变化序列. 采样期间太原市  $\rho(\text{PM}_{2.5})$  范围为  $35.0 \sim 168.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 平均值为  $(89.9 \pm 33.6) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 是《环境空气质量标准》(GB 3095-2012) 二级标准日均浓度限值  $75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  的 1.2 倍. 与 2014 年和 2017 年太原冬季  $\rho(\text{PM}_{2.5})$  的平均值为  $189.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $146.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  相比<sup>[33,42]</sup>, 2019 年浓度分别下降了 52.7% 和 38.8%, 这与近年来全国大气污染状况整体好转的趋势是一致的<sup>[6]</sup>. 从气象条件

看, 采样期间平均温度为  $(-1.7 \pm 2.1)^\circ\text{C}$ , 相对湿度为  $(55.4 \pm 13.6)\%$ , 风速平均值为  $(1.9 \pm 0.8) \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . 小时能见度变化范围较大, 为  $0.8 \sim 30 \text{km}$ . 12 月 6 ~ 9 日和 12 月 21 ~ 24 日,  $\rho(\text{NO}_2)$  达到峰值 ( $> 60 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ), 受高湿度和低风速的共同影响, 大气扩散条件差,  $\text{PM}_{2.5}$  快速积累且浓度超过  $75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 能见度减低到  $10 \text{km}$  以下, 出现了两次典型的污染事件 (PE1 和 PE2, 图 1).

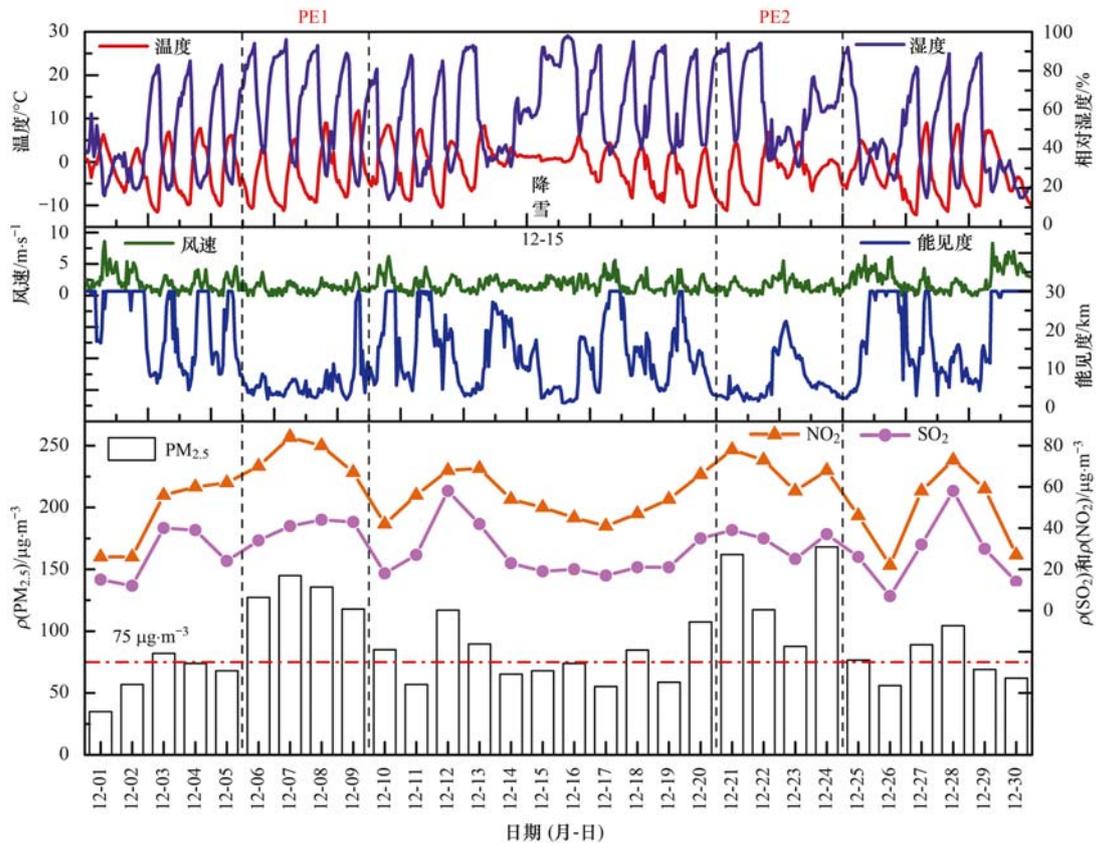


图 1 2019 年 12 月采样点气象条件及  $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_2$  浓度的变化特征

Fig. 1 Variation in meteorological conditions and  $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{SO}_2$ , and  $\text{NO}_2$  concentrations during sampling period

表 1 列出了本研究  $\text{PM}_{2.5}$  中水溶性离子、碳组分和相关化学元素的浓度概况. 可以看出, 水溶性无机离子是太原冬季  $\text{PM}_{2.5}$  中的主要成分, 8 种水溶性无机离子的总浓度为  $(40.0 \pm 18.7) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 占到  $\text{PM}_{2.5}$  的 43.3%. 无机离子的浓度由高到低顺序依次为:  $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{NH}_4^+ > \text{Cl}^- > \text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$ . 其中,  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$  和  $\text{NH}_4^+$  (SNA) 的浓度最高, 占到总离子浓度的 74%.  $\rho(\text{SO}_4^{2-})$  和  $\rho(\text{NO}_3^-)$  最高, 平均值分别为  $11.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $11.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . 受采暖季燃煤排放的影响,  $\rho(\text{Cl}^-)$  较高, 为  $4.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 远高于南京 ( $2.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )<sup>[43]</sup> 和武汉 ( $0.46 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )<sup>[44]</sup> 等南方城市, 表现出北方城市的煤烟型大气污染特征.

碳组分是太原冬季  $\text{PM}_{2.5}$  中的第二大组分, 采样

期间  $\rho$  [有机碳 (OC)] 和  $\rho$  [元素碳 (EC)] 的平均值分别为  $12.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $9.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . OC/EC 的比值常被用来判断大气中二次污染的程度, 一般来说, OC/EC 的值大于 2 时, 说明大气中存在二次有机碳 (SOC), OC/EC 比值越高表明大气中的二次污染越显著. 本研究中, OC/EC 的值为  $1.35 \pm 0.17$ , 低于北京 4.39 (2017 年 1 月)<sup>[45]</sup>、石家庄 3.85 (2017 年 1 月)<sup>[45]</sup> 和郑州 2.9 (2019 年 1 月)<sup>[46]</sup>, 而与 Mu 等<sup>[36]</sup> 和王成等<sup>[37]</sup> 在山西太原、晋城、长治和榆次等城市的观测结果相当 (比值均小于 2). 这表明山西省碳质气溶胶的污染整体较为严重, 尤其是燃煤和机动车尾气等一次排放源的影响较大, 而二次有机碳的比重较小.

观测期间, 太原市  $\text{PM}_{2.5}$  中 15 种测定元素的总浓度为  $(6.28 \pm 2.59) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . 其中, Fe、Ca、Zn 和

表 1 本研究 PM<sub>2.5</sub> 各化学组分浓度水平/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ Table 1 Mass concentrations of chemical components of PM<sub>2.5</sub> in this study/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 

项目	平均值	清洁天	污染天	变化比 <sup>1)</sup>	项目	平均值	清洁天	污染天	变化比
PM <sub>2.5</sub>	89.9	61.5	111.6	1.8	Fe	3.34	2.93	3.58	1.2
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	11.2	6.7	14.8	2.2	Ca	2.18	2.01	2.29	1.1
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	11.5	7.5	14.6	1.9	Ti	0.19	0.17	0.20	1.2
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	8.2	4.9	10.7	2.2	Mn	0.10	0.07	0.11	1.5
Na <sup>+</sup>	1.6	1.3	1.8	1.4	Cu	0.07	0.06	0.08	1.3
K <sup>+</sup>	0.8	0.5	1.1	2.1	Zn	0.22	0.15	0.26	1.7
Cl <sup>-</sup>	4.1	2.7	5.1	1.9	Cr	0.025	0.018	0.029	1.6
Mg <sup>2+</sup>	0.3	0.2	0.3	1.5	Ni	0.011	0.009	0.013	1.4
Ca <sup>2+</sup>	2.4	2.1	2.5	1.2	As	0.018	0.010	0.024	2.5
OC	12.4	9.0	15.0	1.7	Br	0.029	0.019	0.036	1.9
EC	9.6	6.5	12.0	1.9	Sr	0.025	0.021	0.027	1.3
					Pb	0.075	0.043	0.096	2.2

1) 变化比表示污染天和清洁天化学组分浓度的比值,无量纲

Cu 元素的浓度较高,分别为 3.34、2.18、0.22 和 0.07  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  (表 1)。微量元素中的 Cr 和 As 均超过了我国《环境空气质量标准》的年均浓度限值 (0.000 025  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和 0.006  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ),两种重金属污染严重。为了体现大气中元素的富集程度,本文以地球化学性质稳定的 Fe 和 Ti 作为参比元素进行了富集因子分析,元素的土壤背景值来自于文献[47, 48]。结果显示, Ca、Fe、Mn、Ti、Cr 和 Ni 元素的 EF 值均小于 10,主要来自地壳等自然源;而 As、Pb、Cu、Zn 和 Br 的 EF 值均大于 10,说明这些元素受到人为活动影响,被不同程度地富集。尤其是 Br 和 Pb 的富集程度极为严重,EF 值分别为 216.7 和 62.1。其中, Cu、Zn 和 Br 主要来源于机动车尾气排放、刹车片磨损和工业生产活动, As 和 Pb 主要来源于燃煤和机动车排放。这说明太原市的空气质量显著受到人为活动影响,同时该结果对于定性识别太原市 PM<sub>2.5</sub> 的污染源有一定帮助。

对比清洁天和污染天的化学组分,可以发现  $\rho(\text{PM}_{2.5})$  在污染天 (111.6  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 为清洁天 (61.5  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 的 1.8 倍 (表 1)。污染天  $\rho(\text{NO}_3^-)$ 、 $\rho(\text{SO}_4^{2-})$  和  $\rho(\text{NH}_4^+)$  分别为 14.8、14.6 和 10.7  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,分别是其在清洁天浓度的 2.2、1.9 和 2.2 倍,说明二次颗粒物是造成污染天 PM<sub>2.5</sub> 浓度升高的重要因素。此外, K<sup>+</sup>、As 和 Pb 等组分在污染天和清洁天的变化明显,比值均大于 2 (表 1),因此对不同污染程度下 PM<sub>2.5</sub> 组成的演化过程作进一步分析。

### 2.1.2 不同污染程度下 PM<sub>2.5</sub> 化学组分的变化特征

依据《环境空气质量指数 (AQI) 技术规定 (试行)》(HJ 633-2012) 中对应的  $\rho(\text{PM}_{2.5})$  限值,将采样期分为清洁天 (< 75  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )、轻度污染 (75 ~ 115  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )、中度污染 (115 ~ 150  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 和重度污染 (150 ~ 250  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )。随着污染加重, PM<sub>2.5</sub> 中

各化学组分的绝对浓度和相对组成都有所变化,如图 2 所示。

从 PM<sub>2.5</sub> 中各化学组分的浓度中可以看出 [图 2 (a)],随着污染程度的增加, OM 和 EC 的浓度均有所增加。其中,  $\rho(\text{OM})$  从清洁天的 14.44  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  变化为轻度污染的 21.48  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、中度污染的 27.63  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和重度污染的 25.02  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $\rho(\text{EC})$  从清洁天的 6.46  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  增加到 10.18、14.42 和 12.94  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,二者均在中度污染时达到浓度峰值。SNA ( $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NH}_4^+$ ) 在不同污染程度下的浓度分别为: 19.1、28.8、47.1 和 69.0  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,变化幅度最大。相较于清洁天,轻度污染、中度污染和重度污染天的 SNA 分别增加了 1.5、2.5 和 3.6 倍。SOR 和 NOR 能够反映气体污染物 ( $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$ ) 二次转化的程度,本研究中的 SOR 由清洁天的 0.21 上升到重度污染的 0.30, NOR 也由清洁天的 0.10 上升到重度污染的 0.21,而且 NOR 与相对湿度呈现出显著的正相关关系 ( $P < 0.05$ )。这表明,随着污染程度的加重,不断增加的相对湿度使得非均相氧化反应增强进而加剧了二次转化<sup>[49]</sup>。Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>、Mg<sup>2+</sup> 和 Ca<sup>2+</sup> 等离子体的浓度也都随着污染程度的加重有不同程度地增加。值得注意的是,矿物尘的浓度随着污染程度的加重先缓慢增加,而在重污染阶段急剧下降。

图 2(b) 呈现了不同污染程度 PM<sub>2.5</sub> 中化学组分的相对组成变化。可以看出,随着污染程度的加重, OM 在 PM<sub>2.5</sub> 中的质量分数有所下降,分别为 26.24%、26.31%、24.25% 和 20.35%; 而 EC 在 PM<sub>2.5</sub> 中的质量分数在不同的污染程度下没有太大的波动,平均维持在 11.81% 的水平,这与 EC 主要受一次排放源影响有关。相比之下, SNA 的质量分数随着污染程度的加深而显著增加,从 33.91% 增

加到 35.55%、41.37% 和 56.02% [图 2(b)]. 其中,  $\text{NO}_3^-$  的增加速率高于  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{NH}_4^+$ . 在清洁天、轻度污染、中度污染和重度污染,  $\text{NO}_3^-$  的质量分数分别达到了 11.79%、13.01%、15.32% 和 21.01%, 增长速率从 10.36% 增加到了 17.75% 和 37.08%. 这说明硝酸盐形成的速率比硫酸盐更高, 尤其是在重污染时段,  $\text{NO}_3^-$  的增长速度明显加快. 该结果与北京和石家庄等地的研究结果一致<sup>[49,50]</sup>, 表明  $\text{NO}_3^-$  作为重要的二次无机离子, 已经成为当前区域霾污染的主要驱动因子. 其次,  $\text{Cl}^-$  在  $\text{PM}_{2.5}$  中的质量分

数也较高, 平均值为 5.01%, 而且随着污染程度的加重,  $\text{Cl}^-$  的占比也在缓慢上升, 这是由于太原市冬季燃煤供暖所产生的 HCl 经过转化而来. 值得注意的是, 矿物尘在  $\text{PM}_{2.5}$  中的占比随污染程度的加重明显下降, 从清洁天到轻度污染、中度污染和重度污染, 矿物尘的质量分数分别为 15.36%、13.40%、10.09% 和 4.21%. 不同污染程度下  $\text{PM}_{2.5}$  组分绝对浓度和相对组成的上述演变特征共同表明, 太原市冬季的重污染天气并不是由有机物和扬尘所导致的, 而主要是受二次无机离子的快速增长所驱动.

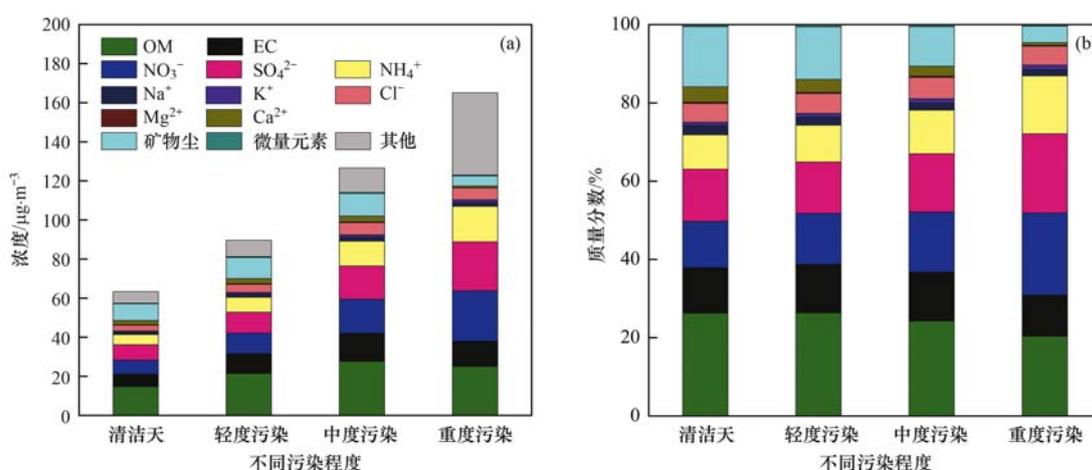


图 2 不同污染程度  $\text{PM}_{2.5}$  组分的浓度和相对组成的变化特征

Fig. 2 Variation in meteorological conditions and  $\text{PM}_{2.5}$  concentrations during sampling period

## 2.2 消光特征及贡献因子

通过将  $\text{PM}_{2.5}$  各化学组分的浓度结合 IMPROVE 公式, 本研究进行了大气  $\text{PM}_{2.5}$  的消光系数测算. 将 IMPROVE 公式估算得到的  $b_{\text{ext}}$  与能见度实测值计算的  $b_{\text{ext-v}}$  进行比较, 结果见图 3, 二者的相关系数达到 0.83, 表明 IMPROVE 公式基本准确地反映出了气溶胶消光的变化趋势. 由于能见度实测值计算的  $b_{\text{ext-v}}$  代表的是总的大气消光, 而 IMPROVE 公式仅计算了已测组分的消光贡献, 因此存在一定程度的低估. 太原市冬季大气  $\text{PM}_{2.5}$  的总消光系数  $b_{\text{ext}}$  为 130.8 ~ 972.2  $\text{Mm}^{-1}$ , 平均值为  $(453.4 \pm 230.0)$   $\text{Mm}^{-1}$ , 远高于南京、廊坊和广州等城市<sup>[15,16,51]</sup>, 与北京 2013 年冬季大气  $\text{PM}_{2.5}$  的消光系数  $(589.1 \pm 124.3)$   $\text{Mm}^{-1}$  相近<sup>[17]</sup>. 这说明, 尽管近几年污染防治成效显著,  $\text{PM}_{2.5}$  浓度有所下降, 但太原市冬季的消光系数仍处于全国较高水平, 对大气能见度有较大影响.

不同化学组分对总消光系数的贡献率如图 4 所示. 从采样期间的平均状况看, OM 的贡献率最大, 为 28.2%; 其次为  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  和  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ , 分别为 23.4% 和 22.1%, 二次离子的贡献率加起来占到

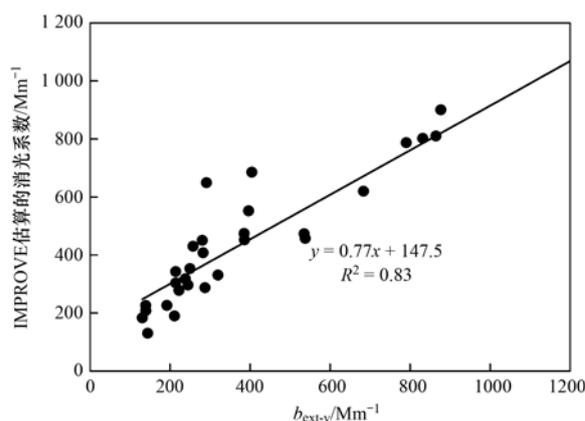


图 3 消光系数估算值与实测值的线性关系

Fig. 3 Correlation between the calculated and observed light extinction coefficients

45.5%; 矿物尘仅占到 2.8% [图 4(a)]. EC 是颗粒物中最主要的吸光物质, 本研究中 EC 对消光系数的平均贡献率达到 23.6%, 而在杭州<sup>[13]</sup>、南京<sup>[15]</sup>、廊坊<sup>[16]</sup>和北京<sup>[17]</sup>, EC 对  $\text{PM}_{2.5}$  的消光贡献分别为 6.9%、9.3%、8.8% 和 7.6%, 均小于 10%. 与这些城市相比, 太原市 EC 对  $\text{PM}_{2.5}$  消光贡献偏高, 与 OM 和两种二次无机离子化合物的贡献相当, 因此改善太原市的大气能见度, 需要同时加强一次和二次排

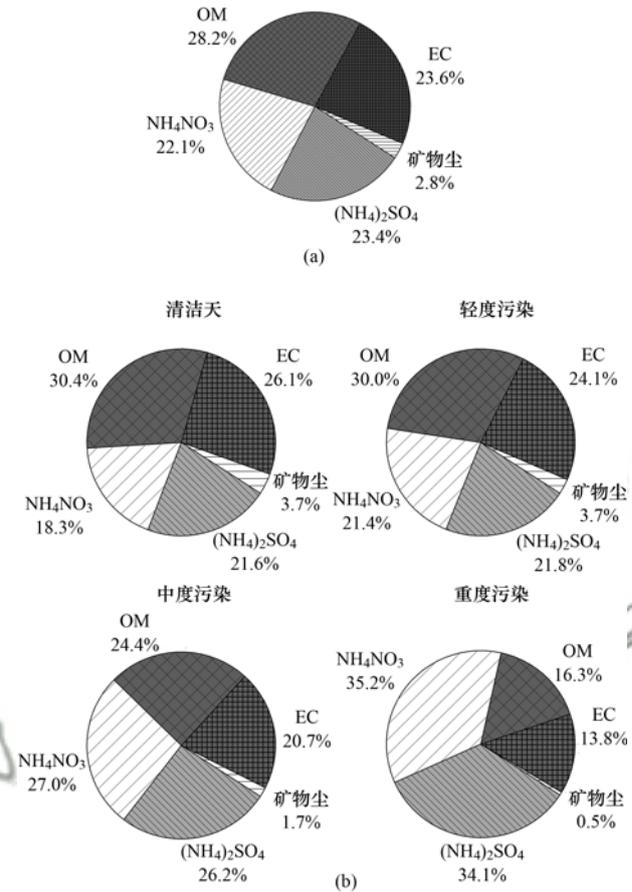
放源的控制。

从清洁天、轻度污染、中度污染到重度污染,太原市冬季大气 PM<sub>2.5</sub> 的消光系数逐步升高,  $b_{ext}$  分别为 275.4、436.5、703.6 和 936.5 Mm<sup>-1</sup>, 能见度随之从 19.1、13.2 和 7.2 km 下降到 3.8 km。不同污染程度下,各化学组分对消光的贡献率也发生了明显变化,如图 4(b) 所示。在清洁天和轻度污染时, OM (30.4% 和 30.0%) 和 EC (26.1% 和 24.1%) 在气溶胶消光中起主要作用,二者的总贡献率接近 55%; 而 (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (21.6% 和 21.8%) 和 NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> (18.3% 和 21.4%) 的占比相对较低。随着污染的加重, OM、EC 和矿物尘的贡献率显著下降,而 (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 和 NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 的贡献率明显上升[图 4(b)]。在重度污染时, NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 和 (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 对总消光系数的贡献率比清洁天时分别升高了 12.5% 和 16.9%, 各组分对消光系数的贡献率按顺序变化为: NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> (35.2%) > (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (34.1%) > OM (16.3%) > EC (13.8%) > 矿物尘 (0.5%), SNA 的总占比接近 70%。这表明二次无机离子是太原市冬季重污染天的主要消光成分,其生成和不断积累导致了大气能见度的下降。

### 2.3 氧化潜势分析

本研究中,太原市冬季 PM<sub>2.5</sub> 的 DTT<sub>v</sub> 变化范围为 0.45 ~ 4.5 nmol·(min·m<sup>3</sup>)<sup>-1</sup>, 平均值是 (2.0 ± 0.9) nmol·(min·m<sup>3</sup>)<sup>-1</sup>; DTT<sub>m</sub> 的变化范围为 12.4 ~ 33.8 nmol·(min·mg)<sup>-1</sup>, 平均值是 (22.3 ± 5.9) nmol·(min·mg)<sup>-1</sup>。表 2 汇总了国内其他城市 PM<sub>2.5</sub> 氧化潜势的相关研究。通过比较发现,太原市冬季大气 PM<sub>2.5</sub> 的 DTT<sub>v</sub> 高于西安和杭州<sup>[11,22]</sup>, 但低于广州、武汉、北京和天津等城市<sup>[10,18,21,24]</sup>, 与南京和济南所报道的氧化潜势相当<sup>[23,52]</sup>, 处于全国中等水

平。DTT<sub>m</sub> 高于广州<sup>[10]</sup>, 与烟台和锦州等城市的 DTT<sub>m</sub> 相当<sup>[24]</sup>。值得注意的是,在 PM<sub>2.5</sub> 浓度相当的情况下 (90 μg·m<sup>-3</sup> 左右), 太原市冬季 PM<sub>2.5</sub> 的 DTT<sub>v</sub> 约为是西安和杭州的 4 倍, 说明其对人体健康的危害更大。



(a) 总体平均贡献率, (b) 不同污染程度下的贡献率

图 4 不同化学组分对消光系数的贡献率

Fig. 4 Relative contribution of each chemical composition for PM<sub>2.5</sub> total light extinction coefficient

表 2 本研究 PM<sub>2.5</sub> 氧化潜势与国内其他城市的对比<sup>1)</sup>

Table 2 Comparison of PM<sub>2.5</sub> oxidative potential in this study and other cities

城市	采样年份	季节	$\rho$ (PM <sub>2.5</sub> ) /μg·m <sup>-3</sup>	DTT <sub>v</sub> /nmol·(min·m <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup>	DTT <sub>m</sub> /nmol·(min·mg) <sup>-1</sup>	文献
太原	2019	冬季	89.9 ± 33.6	2.0 ± 0.9	22.3 ± 5.9	本研究
广州	2018	冬季	51.65 ± 24.49	4.67 ± 1.06	13.47 ± 3.86	[10]
西安	2017	冬季	97.8 ± 35.1	0.64 ± 0.14	\	[11]
武汉	2018	冬季	146.9 ± 45.4	5.6 ± 1.4	40.2 ± 14.2	[18]
杭州	2017	冬季	88.8 (26.8 ~ 214.3)	0.62 (0.11 ~ 1.20)	6.53 (3.83 ~ 13.01)	[22]
北京	2016	全年	113.8 ± 62.7	12.36 ± 6.82	130 ± 100	[21]
南京	2018 ~ 2020	全年	41.7 ± 25.1	2.1 ± 1.1	55 ± 24	[23]
天津	2015 ~ 2016	全年	120.1 ± 54.8	6.8 ± 3.4	49 ± 16	[24]
锦州	2015 ~ 2016	全年	114.6 ± 50.5	4.4 ± 2.6	35 ± 18	[24]
烟台	2015 ~ 2016	全年	113.8 ± 88.3	4.2 ± 2.7	30 ± 16	[24]
济南	2018	夏季	\	1.7 (0.91 ~ 3.1)	\	[52]
北京	2012	春季	100 (20 ~ 270)	0.24 (0.09 ~ 0.32)	\	[53]

1) 括号外的数据表示平均值, 括号内的数据表示最小值 ~ 最大值的范围, “\” 表示无相关信息

图5呈现了不同污染程度下太原市冬季 $PM_{2.5}$ 氧化潜势的变化特征.在清洁天、轻度污染、中度污染和重度污染天, $DTT_v$ 分别为1.4、2.2、2.3和4.1  $nmol \cdot (min \cdot m^3)^{-1}$ ,表现出随着空气质量的恶化,氧化潜势逐步上升的规律[图5(a)].尤其是从轻度和中度污染演变到重度污染时, $DTT_v$ 显著增加

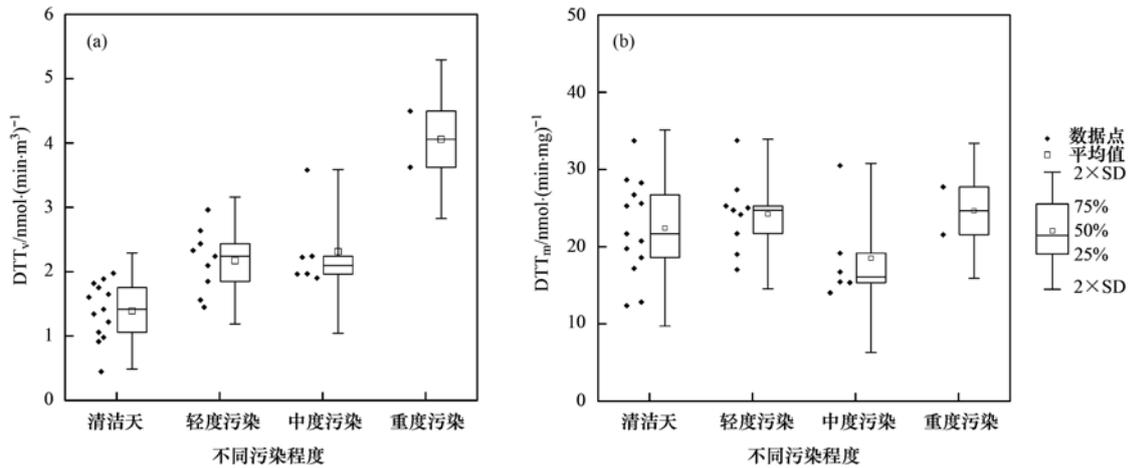


图5 不同污染程度下 $PM_{2.5}$ 氧化潜势的变化特征

Fig. 5 Variation in  $PM_{2.5}$  oxidative potential under different pollution levels

表3列出了本研究中 $DTT_v$ 与各化学组分的皮尔逊相关分析结果.可以看出, $DTT_v$ 与 $PM_{2.5}$ 和二次离子 $NO_3^-$ 、 $NH_4^+$ 、 $SO_4^{2-}$ 的浓度表现出最强的相关性, $r$ 为0.70~0.77,该结果与已有研究的结果一致<sup>[22,24]</sup>,表明细颗粒物的浓度直接影响其暴露风险,而且二次源对太原市冬季 $PM_{2.5}$ 产生的氧化潜势贡献较大. $DTT_v$ 与 $K^+$ 和 $Cl^-$ 的相关性也较强, $r$ 为0.67和0.52;与OC和EC呈现中度相关, $r$ 为0.44~0.49.已有研究发现,大气颗粒物氧化潜势与过渡金属存在较好的相关性,例如Fe、Cu和Mn等<sup>[40]</sup>.然而,本研究中 $DTT_v$ 与Fe、Cu、Zn和Mn等元素含量均未呈现出相关性,仅与Pb和Br相关性显著,相关系数分别为0.424和0.480.该结果一方面是由于本研究测的是颗粒物中元素总量,而不是水溶性过渡金属含量;另一方面可能是由于采样点靠近交通干道,受机动车源影响较大导致的,这与北京城区交通干道附近采样点的研究结果相似<sup>[53]</sup>.

## 2.4 来源分析

### 2.4.1 平均来源贡献

为了进一步明确太原市冬季 $PM_{2.5}$ 的来源,本研究应用正定矩阵因子法(EPA PMF 5.0)对主要化学组分进行来源解析,经过多次比较分析,最终确定5个因子,如图6所示.因子1中,Cu和Zn的贡献率高达64.8%和44.6%,可能来自机动车尾气、刹车片和轮胎磨损<sup>[38]</sup>;OC和EC作为机动车排放的标志性产物,贡献率也较高,分别为29.0%和29.3%.

为中度污染时的1.8倍,单位体积空气内 $PM_{2.5}$ 的人体暴露风险迅速升高.然而,不同污染水平下 $DTT_m$ 的变化较小,分别为22.4、24.2、18.5和24.6  $nmol \cdot (min \cdot mg)^{-1}$ [图5(b)].这说明太原市冬季 $PM_{2.5}$ 的氧化潜势与颗粒物质量显著相关,经质量标准后氧化潜势的“密度”较为均一.

表3  $DTT_v$ 与 $PM_{2.5}$ 各化学组分的相关系数<sup>1)</sup>

Table 3 Correlation coefficient of  $DTT_v$  and chemical compositions in  $PM_{2.5}$

组分	$DTT_v$	组分	$DTT_v$
$PM_{2.5}$	<b>0.77</b> **	Ti	-0.18
OC	0.49 **	Cr	0.27
EC	0.44 *	Mn	0.04
$NO_3^-$	<b>0.75</b> **	Fe	-0.11
$SO_4^{2-}$	<b>0.70</b> **	Ni	0.38 *
$NH_4^+$	<b>0.76</b> **	Cu	-0.15
SNA	<b>0.75</b> **	Zn	0.19
$Na^+$	0.43 *	As	0.18
$K^+$	<b>0.67</b> **	Br	0.48 **
$Cl^-$	<b>0.52</b> **	Sr	-0.17
$Ca^{2+}$	-0.19	Pb	0.42 *
$Mg^{2+}$	0.04	Ca	-0.27

1) \*表示相关性在0.05水平显著(双侧), \*\*表示相关性在0.01水平显著(双侧);黑体字表示相关系数大于0.50

因此因子1被认定为机动车源.因子2中, $Cl^-$ 的贡献率最高,为60.4%,其次为As、Pb和 $K^+$ ,贡献率分别为53.34%、53.7%和47.4%.其中 $Cl^-$ 是标志性的燃烧产物,主要来源于燃煤产生的HCl的化学转化;As是燃煤标志元素,燃煤也是Pb的主要来源; $K^+$ 主要来自于生物质的燃烧.因此,将因子2归纳为燃煤和生物质燃烧源.因子3中,二次无机离子 $NO_3^-$ 、 $SO_4^{2-}$ 和 $NH_4^+$ 为主要贡献组分,贡献率分别为45.8%、43.4%和38.5%,因此将因子3归纳为二次源.因子4中,Ti、 $Mg^{2+}$ 、Ca和Fe为主要贡

献源, 贡献率分别是 47.1%、41.1%、39.0% 和 38.63. Ti、Ca 和 Fe 是地壳物质的主要组成元素, Mg<sup>2+</sup> 是典型的扬尘特征组分, 因此认为因子 4 为扬尘源. 因子 5 中, Cr 和 Ni 贡献较高, 贡献率分别为 79.9% 和 46.6%; 其次为 Fe 和 Mn, 贡献率分别为 13.0% 和 11.4%. Cr 和 Ni 主要来源于炼钢工业, 为冶金工业的标志组分, Fe 和 Mn 同样也是金属加工过程的产物<sup>[32]</sup>, 因此因子 5 被认为是工业源.

综上所述, 观测期间太原市大气 PM<sub>2.5</sub> 的主要污染源为机动车源、燃煤和生物质燃烧源、二次源、扬尘源和工业源. 其中, 二次源对 PM<sub>2.5</sub> 的贡献最大 (31.7%), 其次为燃煤和生物质燃烧源 (26.0%)、机动车源 (18.1%)、扬尘源 (18.0%)、工业源 (6.3%). 因此针对太原市的污染情况, 应该在加强一次排放管控的基础上, 更加重视对二次组分, 特别是二次离子形成的前体物的管控.

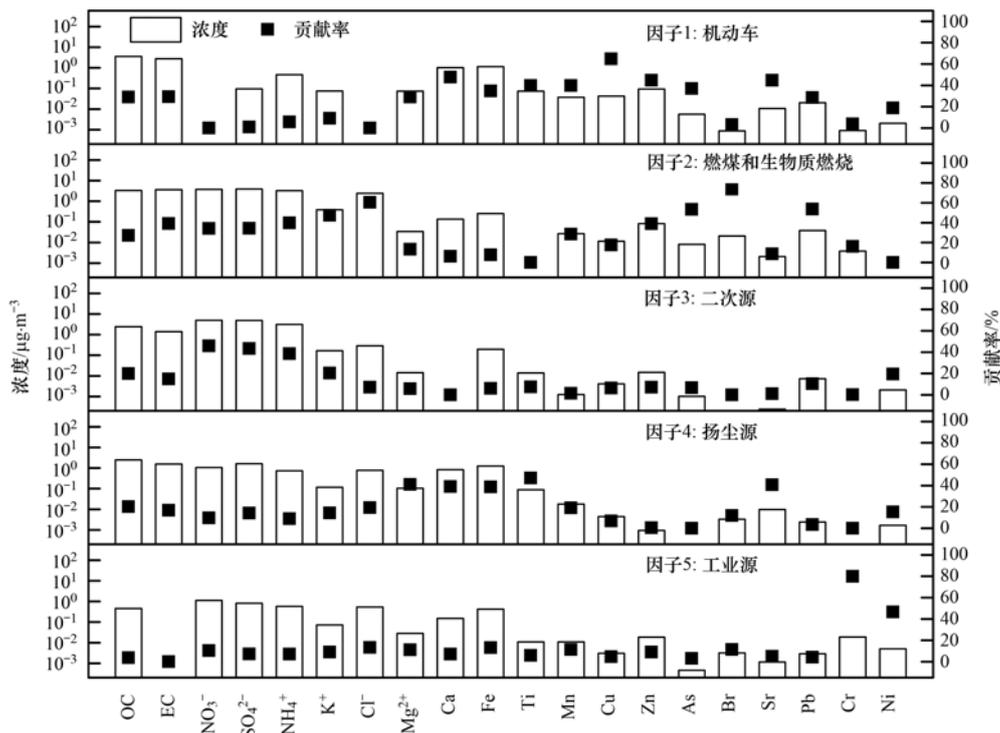


图 6 2019 年太原采暖季大气 PM<sub>2.5</sub> 来源成分谱

Fig. 6 Source profiles of PM<sub>2.5</sub> calculated by PMF in Taiyuan during heating season in 2019

#### 2.4.2 重污染事件分析

采样期间发生了 2 次能见度连续小于 10 km 且  $\rho(\text{PM}_{2.5})$  高于  $75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  的霾污染事件, 分别是 12 月 6~9 日和 12 月 21~24 日 (见图 1, PE1 和 PE2). 两次重污染事件的化学组分特征和来源显著不同.

PE1 期间,  $\rho(\text{EC})$  显著升高, 达到  $15.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 是清洁天的 2.4 倍; 同时 Ca<sup>2+</sup> 和 Fe、Ti 等多种土壤尘元素的浓度显著升高. PMF 源解析的结果显示, PE1 阶段燃煤和生物质燃烧对 PM<sub>2.5</sub> 的贡献率最大, 占到 34.3%, 显著高于 12 月平均贡献 (26.0%); 其次为二次源、机动车源和扬尘源, 分别为 29.3%、20.3% 和 14.3% (见图 7). PE2 期间 (12 月 23~25 日), 由于不利天气形势, 扩散条件较差, 太原市发布了重污染天气红色预警, 采取单双号限行的交通管制措施. 如图 7 所示, PE2 期间机动车源对 PM<sub>2.5</sub> 的贡献率显著降低, 仅占 5.2%. 该阶段大气相对湿度较高, 平均值为 69%, 高于 12 月平均

相对湿度 55.4%, 二次转化程度 NOR 和 SOR 显著升高到 0.24 和 0.32, SNA 的浓度在 12 月 24 日达到采样期间最高. 这表明 PE2 是一次以二次源为主的重污染事件, PMF 源解析的结果显示 PE2 二次源的来源贡献增加到 62% (图 7). 可见, 交通管制对于降低一次排放源的效果十分明显, 是冬季重污染易发时段的有效环境管理措施.

对比 PE1 和 PE2 两次重污染事件 PM<sub>2.5</sub> 的氧化潜势水平, 其 DTT<sub>v</sub> 分别为  $2.02 \text{ nmol}\cdot(\text{min}\cdot\text{m}^3)^{-1}$  和  $3.66 \text{ nmol}\cdot(\text{min}\cdot\text{m}^3)^{-1}$ , 显著高于清洁天 (图 7), 分别是清洁天 DTT<sub>v</sub> 的 1.5 倍和 2.6 倍. 而且, PE2 的 DTT<sub>v</sub> 是 PE1 时期的 1.8 倍, 这表明尽管交通管制导致机动车源对 PM<sub>2.5</sub> 的贡献大幅降低 (18% 降低到 5%), 但从人体健康风险的角度来看, PE2 重污染阶段颗粒物的氧化潜势明显更高 (图 7), 这可能主要归因于该时段二次源贡献的增加 (由 31.7% 升高到 62%).

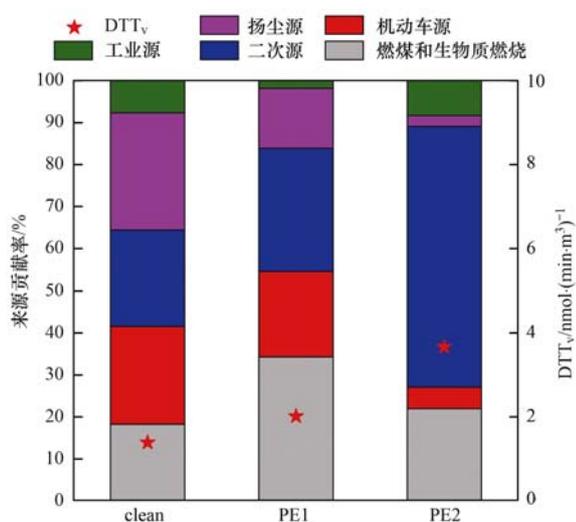


图7 对比两次重污染过程  $PM_{2.5}$  的来源贡献率和氧化潜势

Fig. 7 Comparison of source contributions to the  $PM_{2.5}$  and oxidative potential during clean days and two pollution episodes

### 3 结论

(1) 2019年太原市冬季  $\rho(PM_{2.5})$  的平均值为  $(89.9 \pm 33.6) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 处于全国中等水平, 水溶性离子和碳质气溶胶约占  $PM_{2.5}$  的 67.3%~86.7%, 浓度较高的组分包括: OC ( $12.4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )、 $\text{SO}_4^{2-}$  ( $11.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )、 $\text{NO}_3^-$  ( $11.2 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )、EC ( $9.6 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ) 和  $\text{NH}_4^+$  ( $8.2 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ), 且 OC/EC 比值较低 ( $1.35 \pm 0.17$ ), 表明作为典型的北方能源基地城市, 太原市一次排放源的影响仍然较大。

(2) 随着污染水平加重, SNA 占  $PM_{2.5}$  的质量分数由 33.9% 增加至 56.0%, 而 OM 和矿物尘组分的比例明显下降, EC 的比重较为稳定;  $\text{NO}_3^-$  的增长速率最快, 重度污染天的 NOR 是清洁天的 2 倍以上, 且 NOR 与相对湿度呈现出显著的正相关关系, 硝酸盐的快速增长可能是导致太原市冬季  $PM_{2.5}$  重污染的关键过程;

(3) 基于 IMPROVE 公式估算, 观测期间太原市大气  $PM_{2.5}$  的消光系数为  $(453.4 \pm 230.0) \text{Mm}^{-1}$ . 在清洁天和轻度污染时, OM 和 EC 在气溶胶消光中起主要作用, 二者的总贡献率约占 55%; 随着污染的加重,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  和  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  的贡献率明显上升, 在重度污染时 SNA 的消光贡献接近 70%, 二次无机离子是重污染天影响大气能见度的主要成分。

(4) 采用 DTT 法测定了太原市冬季  $PM_{2.5}$  的氧化潜势,  $\text{DTT}_v$  和  $\text{DTT}_m$  的平均值分别为  $(2.0 \pm 0.9) \text{nmol} \cdot (\text{min} \cdot \text{m}^3)^{-1}$  和  $22.3 \pm 5.9 \text{nmol} \cdot (\text{min} \cdot \text{mg})^{-1}$ . 随着空气质量的恶化,  $\text{DTT}_v$  逐步上升, 尤其是到重度污染时, 氧化潜势迅速增加为中度污染时的 1.8

倍.  $\text{DTT}_v$  与  $PM_{2.5}$  和 SNA 的浓度相关性较高, 且与  $\text{K}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 、OC、EC、Pb 和 Br 呈显著正相关。

(5) 源解析结果表明, 太原市冬季  $PM_{2.5}$  的来源以二次源 (31.7%)、燃煤和生物质燃烧源 (26.0%) 为主, 其次为机动车源 (18.1%)、扬尘源 (18.0%) 和工业源 (6.3%). 对比两次重污染事件发现, PE2 时期机动车源对  $PM_{2.5}$  的贡献显著降低到 5.2%, 而二次源贡献升高到 62%, 表明交通管制对降低一次源排放的效果较为明显。

#### 参考文献:

- [1] Cohen A J, Brauer M, Burnett R, *et al.* Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution; an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015[J]. *The Lancet*, 2017, **389**(10082): 1907-1918.
- [2] Lelieveld J, Evans J S, Fnais M, *et al.* The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale[J]. *Nature*, 2015, **525**(7569): 367-371.
- [3] Delfino R J, Sioutas C, Malik S. Potential role of ultrafine particles in associations between airborne particle mass and cardiovascular health[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2005, **113**(8): 934-946.
- [4] Ming L L, Jin L, Li J, *et al.*  $PM_{2.5}$  in the Yangtze River Delta, China: Chemical compositions, seasonal variations, and regional pollution events[J]. *Environmental Pollution*, 2017, **223**: 200-212.
- [5] Liu H J, Tian H Z, Zhang K, *et al.* Seasonal variation, formation mechanisms and potential sources of  $PM_{2.5}$  in two typical cities in the Central Plains Urban Agglomeration, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **657**: 657-670.
- [6] Jiang Z J, Jolleys M D, Fu T M, *et al.* Spatiotemporal and probability variations of surface  $PM_{2.5}$  over China between 2013 and 2019 and the associated changes in health risks: An integrative observation and model analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **723**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137896.
- [7] 夏丽, 朱彬, 王红磊, 等. 长三角地区一次区域污染过程中细颗粒物的来源解析及其光学特性[J]. *环境科学*, 2021, **42**(2): 556-563.  
Xia L, Zhu B, Wang H L, *et al.* Source apportionment and optical properties of fine particles associated with regional pollution in the Yangtze River Delta[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(2): 556-563.
- [8] 刀谓, 吉东生, 张显, 等. 京津冀及周边地区采暖季  $PM_{2.5}$  化学组分变化特征[J]. *环境科学研究*, 2021, **34**(1): 1-10.  
Dao X, Ji D S, Zhang X, *et al.* Characteristics of chemical composition of  $PM_{2.5}$  in Beijing-Tianjin-Hebei and its surrounding areas during the heating period[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, **34**(1): 1-10.
- [9] Huang X J, Liu Z R, Liu J Y, *et al.* Chemical characterization and source identification of  $PM_{2.5}$  at multiple sites in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(21): 12941-12962.
- [10] 张曼曼, 李慧蓉, 杨闻达, 等. 基于 DTT 法测量广州市区  $PM_{2.5}$  的氧化潜势[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(6): 2258-2266.  
Zhang M M, Li H R, Yang W D, *et al.* Measurement based on DTT method of the  $PM_{2.5}$  oxidative potential in Guangzhou urban area[J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(6): 2258-

- 2266.
- [11] Chen Q C, Wang M M, Wang Y Q, *et al.* Oxidative potential of water-soluble matter associated with chromophoric substances in PM<sub>2.5</sub> over Xi'an, China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, **53**(15): 8574-8584.
- [12] 李立伟, 肖致美, 杨宁, 等. 天津市 2020 年冬季重污染过程气溶胶消光特性及其来源[J]. *环境科学*, 2021, **42**(9): 4158-4167.
- Li L W, Xiao Z M, Yang N, *et al.* Extinction characteristics of aerosols and the contribution of pollution sources to light extinction during three heavy pollution episodes in the winter of 2020 in Tianjin [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(9): 4158-4167.
- [13] 吴丹, 蔺少龙, 杨焕强, 等. 杭州市 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性离子的污染特征及其消光贡献[J]. *环境科学*, 2017, **38**(7): 2656-2666.
- Wu D, Lin S L, Yang H Q, *et al.* Pollution characteristics and light extinction contribution of water-soluble ions of PM<sub>2.5</sub> in Hangzhou [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(7): 2656-2666.
- [14] Liu F, Tan Q W, Jiang X, *et al.* Effects of relative humidity and PM<sub>2.5</sub> chemical compositions on visibility impairment in Chengdu, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2019, **86**: 15-23.
- [15] 王鑫, 安俊琳, 苏筱倩, 等. 南京北郊水溶性离子污染特征及其光学特性[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(2): 506-512.
- Wang X, An J L, Su X Q, *et al.* Characteristics and optical properties of water-soluble ion pollution in the northern suburbs of Nanjing [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(2): 506-512.
- [16] 李倩, 吴琳, 张进生, 等. 廊坊市夏季大气气溶胶消光特性及其来源[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(6): 2249-2257.
- Li Q, Wu L, Zhang J S, *et al.* Extinction characteristics of aerosol and the contribution of pollution source to light extinction in Langfang [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(6): 2249-2257.
- [17] 黄玉虎, 李媚, 曲松, 等. 北京城区 PM<sub>2.5</sub> 不同组分构成特征及其对大气消光系数的贡献[J]. *环境科学研究*, 2015, **28**(8): 1193-1199.
- Huang Y H, Li M, Qu S, *et al.* Characteristics of different components of PM<sub>2.5</sub> and contribution to ambient light extinction coefficient in Beijing [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, **28**(8): 1193-1199.
- [18] 陈丹鈺, 张志豪, 张坤, 等. 武汉市冬季重污染期 PM<sub>2.5</sub> 的氧化潜势分析[J]. *环境科学与技术*, 2020, **43**(10): 171-176.
- Chen D H, Zhang Z H, Zhang S, *et al.* Analysis of PM<sub>2.5</sub> oxidative potential during a period of heavy pollution in winter, Wuhan [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, **43**(10): 171-176.
- [19] Daellenbach K R, Uzu G, Jiang J H, *et al.* Sources of particulate-matter air pollution and its oxidative potential in Europe [J]. *Nature*, 2020, **587**(7834): 414-419.
- [20] Cho A K, Sioutas C, Miguel A H, *et al.* Redox activity of airborne particulate matter at different sites in the Los Angeles Basin [J]. *Environmental Research*, 2005, **99**(1): 40-47.
- [21] Yu S Y, Liu W J, Xu Y S, *et al.* Characteristics and oxidative potential of atmospheric PM<sub>2.5</sub> in Beijing: Source apportionment and seasonal variation [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **650**: 277-287.
- [22] Wang J P, Lin X, Lu L P, *et al.* Temporal variation of oxidative potential of water soluble components of ambient PM<sub>2.5</sub> measured by dithiothreitol (DTT) assay [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **649**: 969-978.
- [23] Yang F, Liu C, Qian H. Comparison of indoor and outdoor oxidative potential of PM<sub>2.5</sub>: pollution levels, temporal patterns, and key constituents [J]. *Environment International*, 2021, **155**, doi: 10.1016/j.envint.2021.106684.
- [24] Liu W J, Xu Y S, Liu W X, *et al.* Oxidative potential of ambient PM<sub>2.5</sub> in the coastal cities of the Bohai Sea, northern China: Seasonal variation and source apportionment [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **236**: 514-528.
- [25] Zhang Q, Zheng Y X, Tong D, *et al.* Drivers of improved PM<sub>2.5</sub> air quality in China from 2013 to 2017 [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, **116**(49): 24463-24469.
- [26] 中华人民共和国生态环境部. 2020 年中国生态环境状况公报 [EB/OL]. <http://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb/202105/P020210526572756184785.pdf>, 2021-05-14.
- [27] Wang Y S, Li W J, Gao W K, *et al.* Trends in particulate matter and its chemical compositions in China from 2013-2017 [J]. *Science China Earth Sciences*, 2019, **62**(12): 1857-1871.
- [28] 徐丹妮, 王瑾婷, 袁自冰, 等. 汾渭平原复杂地形影响下冬季 PM<sub>2.5</sub> 污染分布特征、来源及成因分析[J]. *环境科学学报*, 2021, **41**(4): 1184-1198.
- Xu D N, Wang J T, Yuan Z B, *et al.* Temporal-spatial variations, source apportionment, and formation mechanisms of PM<sub>2.5</sub> pollution over Fenwei Plain, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(4): 1184-1198.
- [29] 贾小花, 解静芳, 马翔, 等. 太原市冬季 PM<sub>2.5</sub> 水溶性组分污染特征分析[J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(4): 599-604.
- Jia X H, Xie J F, Ma X, *et al.* Analysis of water-soluble constituents in winter of PM<sub>2.5</sub> in Taiyuan city [J]. *China Environmental Science*, 2013, **33**(4): 599-604.
- [30] He Q S, Yan Y L, Guo L L, *et al.* Characterization and source analysis of water-soluble inorganic ionic species in PM<sub>2.5</sub> in Taiyuan city, China [J]. *Atmospheric Research*, 2017, **184**: 48-55.
- [31] 李永麒, 张国斌. 太原市春季大气 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性离子在线观测分析[J]. *环境化学*, 2017, **36**(8): 1777-1784.
- Li Y Q, Zhang G B. Continuous online observation analysis of water-soluble ions in PM<sub>2.5</sub> from the atmosphere in spring in Taiyuan [J]. *Environmental Chemistry*, 2017, **36**(8): 1777-1784.
- [32] 刘珊, 彭林, 温彦平, 等. 太原市 PM<sub>2.5</sub> 中有机碳和元素碳的污染特征[J]. *环境科学*, 2015, **36**(2): 396-401.
- Liu S, Peng L, Wen Y P, *et al.* Pollution characteristics of organic and elemental carbon in PM<sub>2.5</sub> in Taiyuan [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(2): 396-401.
- [33] 刘素, 马彤, 杨艳, 等. 太原市冬季 PM<sub>2.5</sub> 化学组分特征与来源解析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(4): 1537-1544.
- Liu S, Ma T, Yang Y, *et al.* Chemical composition characteristics and source apportionment of PM<sub>2.5</sub> during winter in Taiyuan [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(4): 1537-1544.
- [34] 倪登峰, 刘素, 曹力媛, 等. 太原市采暖季 PM<sub>2.5</sub> 组分特征及重污染事件分析[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(7): 2821-2828.
- Ni D F, Liu S, Cao L Y, *et al.* Composition characteristics of PM<sub>2.5</sub> and heavy pollution events in Taiyuan city during heating season [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(7): 2821-2828.
- [35] 丁新航, 梁越, 肖化云, 等. 太原市采暖季清洁天与灰霾天

- PM<sub>2.5</sub>中水溶性无机离子组成及来源分析[J]. 环境化学, 2019, **38**(6): 1356-1366.
- Ding X H, Liang Y, Xiao H Y, *et al.* Composition and source analysis of water-soluble inorganic ions of PM<sub>2.5</sub> in clean and haze days during heating season in Taiyuan City[J]. Environmental Chemistry, 2019, **38**(6): 1356-1366.
- [36] Mu L, Tian M, Zheng L R, *et al.* Characterisation and source apportionment of atmospheric organic and elemental carbon in an urban-rural fringe area of Taiyuan, China [J]. Environmental Chemistry, 2019, **16**(3): 187-196.
- [37] 王成, 曹靖原, 段小琳, 等. 山西省四城市冬季PM<sub>2.5</sub>中碳质组分特征及来源分析[J]. 环境工程, 2021, **39**(6): 114-121.
- Wang C, Cao J Y, Duan X L, *et al.* Characteristics and sources analysis of carbonaceous components in PM<sub>2.5</sub> in winter in four cities of Shanxi province[J]. Environmental Engineering, 2021, **39**(6): 114-121.
- [38] Wang Q Y, Liu S X, Li N, *et al.* Impacts of short-term mitigation measures on PM<sub>2.5</sub> and radiative effects: a case study at a regional background site near Beijing, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2019, **19**(3): 1881-1899.
- [39] Pitchford M, Malm W, Schichtel B, *et al.* Revised algorithm for estimating light extinction from IMPROVE particle speciation data [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2007, **57**(11): 1326-1336.
- [40] Liu Q Y, Lu Z J, Xiong Y, *et al.* Oxidative potential of ambient PM<sub>2.5</sub> in Wuhan and its comparisons with eight areas of China [J]. Science of the Total Environment, 2020, **701**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134844.
- [41] Fang T, Zeng L H, Gao D, *et al.* Ambient size distributions and lung deposition of aerosol dithiothreitol-measured oxidative potential: contrast between soluble and insoluble particles[J]. Environmental Science & Technology, 2017, **51**(12): 6802-6811.
- [42] 张腾. 太原市采暖季大气颗粒物化学组成特征及来源解析和重污染成因分析[D]. 太原: 太原理工大学, 2016.
- Zhang T. Study on chemical characteristics and source of particulate matter and heavy pollution analysis in heating season, Taiyuan[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2016.
- [43] 贺瑶, 韩秀秀, 黄晓虎, 等. 南京市不同功能区冬季大气PM<sub>2.5</sub>分布特征及其来源解析[J]. 环境科学学报, 2021, **41**(3): 830-841.
- He Y, Han X X, Huang X H, *et al.* Distribution characteristics and source apportionment of atmospheric PM<sub>2.5</sub> in winter season from different functional areas of Nanjing [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, **41**(3): 830-841.
- [44] 程渊, 吴建会, 毕晓辉, 等. 武汉市大气PM<sub>2.5</sub>中水溶性离子污染特征及来源[J]. 环境科学学报, 2019, **39**(1): 189-196.
- Cheng Y, Wu J H, Bi X H, *et al.* Characteristics and source apportionment of water-soluble ions in ambient PM<sub>2.5</sub> in Wuhan, China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, **39**(1): 189-196.
- [45] 张俊峰, 韩力慧, 程水源, 等. 京津冀地区典型城市大气细颗粒物碳质组分污染特征及来源[J]. 环境科学研究, 2020, **33**(8): 1729-1739.
- Zhang J F, Han L H, Cheng S Y, *et al.* Characteristics and sources of carbon pollution of fine particulate matter in typical cities in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Research of Environmental Sciences, 2020, **33**(8): 1729-1739.
- [46] 王维思, 王楠, 高玉娟, 等. 2019年郑州冬、春季重污染期间PM<sub>2.5</sub>污染特征分析[J]. 环境科学学报, 2020, **40**(5): 1594-1603.
- Wang W S, Wang N, Gao Y J, *et al.* Analysis of PM<sub>2.5</sub> heavy pollution characteristics in spring and fall for 2019 in Zhengzhou [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, **40**(5): 1594-1603.
- [47] 史崇文, 赵玲芝, 郭新波, 等. 山西省土壤元素背景值的分布规律及其影响因素[J]. 农业环境保护, 1996, **15**(1): 24-28.
- [48] 魏复盛, 陈静生, 吴燕玉, 等. 中国土壤环境背景值研究[J]. 环境科学, 1991, **12**(4): 12-19.
- Wei F S, Chen J S, Wu Y Y, *et al.* Study on the Background Contents on 61 Elements of Soils in China [J]. Environmental Science, 1991, **12**(4): 12-19.
- [49] Wang Y H, Wang Y S, Wang L L, *et al.* Increased inorganic aerosol fraction contributes to air pollution and haze in China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2019, **19**(9): 5881-5888.
- [50] Luo L, Zhu R G, Song C B, *et al.* Changes in nitrate accumulation mechanisms as PM<sub>2.5</sub> levels increase on the North China Plain: A perspective from the dual isotopic compositions of nitrate [J]. Chemosphere, 2021, **263**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.127915.
- [51] Chen W H, Wang X M, Zhou S Z, *et al.* Chemical composition of PM<sub>2.5</sub> and its impact on visibility in Guangzhou, Southern China [J]. Aerosol and Air Quality Research, 2016, **16**(10): 2349-2361.
- [52] 张俊美. 山东典型地区PM<sub>2.5</sub>中无机元素、多环芳烃及其衍生物污染特征和氧化潜势[D]. 济南: 山东大学, 2019.
- Zhang J M. The pollution characteristics of inorganic elements, polycyclic aromatic hydrocarbons and their derivatives, and oxidative potential of PM<sub>2.5</sub> in Shandong Province [D]. Ji'nan: Shandong University, 2019.
- [53] Liu Q Y, Baumgartner J, Zhang Y X, *et al.* Oxidative potential and inflammatory impacts of source apportioned ambient air pollution in Beijing [J]. Environmental Science & Technology, 2014, **48**(21): 12920-12929.

## CONTENTS

Chemical Characteristics and Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> in Urban Area of Beijing .....	AN Xin-xin, CAO Yang, WANG Qin, <i>et al.</i> (2251)
Modeling of PM <sub>2.5</sub> Concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei Region Using a Space-time Linear Mixed Effects Model .....	FAN Li-hang, YANG Xiao-hui, SONG Chun-jie, <i>et al.</i> (2262)
Spatio-temporal Evolution Patterns of PM <sub>2.5</sub> and Relationship with Urban Expansion in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration from 2000 to 2018 .....	ZHAO An-zhou, XIANG Kai-zheng, LIU Xian-feng, <i>et al.</i> (2274)
Characteristics and Source Analysis of PM <sub>2.5</sub> in Qingdao in Winter Under the Action of Sea-Land-Atmosphere Convergence .....	TUO Xiong, YANG Ling-xiao, ZHANG Wan, <i>et al.</i> (2284)
Impacts of Heterogeneous Uptake Pathway on Sulfate Formation: A Case Study in Shanghai Based on WRF-Chem .....	ZHANG Ru-han, ZHANG Hao-ran, FENG Wei-hang, <i>et al.</i> (2294)
Source Apportionment and Seasonal Changes in PM <sub>2.5</sub> Chemical Components from Different Functional Areas of a Provincial Capital City .....	SUN You-min, FAN Jing, XU Biao, <i>et al.</i> (2304)
Chemical Compositions, Light Extinction Effect, and Oxidative Potential of PM <sub>2.5</sub> Under Different Pollution Levels During Winter in Taiyuan .....	REN Jiao, ZHAO Rong-rong, WANG Ming, <i>et al.</i> (2317)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of Metal Elements in Ambient PM <sub>2.5</sub> in the Winter of Zhengzhou .....	YAO Sen, WANG Qian-heng, XUE Yan, <i>et al.</i> (2329)
Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Sources of the Polluted Metallic Elements in PM <sub>2.5</sub> During Winter in Zibo City .....	BAI Wen-yu, XU Bo, GUO Li-yao, <i>et al.</i> (2336)
Seasonal Distribution Characteristics, Source Analysis, and Health Risk Evaluation of PAHs in PM <sub>2.5</sub> in Chengde .....	HE Bo-wen, NIE Sai-sai, LI Yi-lin, <i>et al.</i> (2343)
Pollution Level and Regional Migration of PCDD/Fs in Ambient Air from Pearl River Delta, China .....	FU Jian-ping, XIE Dan-ping, HUANG Jin-qiong, <i>et al.</i> (2355)
Concentrations and Sources of Black Carbon Aerosols in Rural Areas of Southern North China Plain .....	ZHANG Ling, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (2363)
Research on Causes of Severely Polluted Weather in Tianjin Based on Process Analytical Technology .....	HAO Jian, CAI Zi-ying, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (2373)
Classification Control of Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission Pollution Sources Based on Emission Amounts and Atmospheric Reactivity .....	CHEN Peng, ZHANG Yue, XING Min, <i>et al.</i> (2383)
Complex Networks Reveal the Characteristics of Ozone in China .....	YING Na, CHEN Jian-hua, LI Dong, <i>et al.</i> (2395)
Ozone Simulation of Lanzhou City Based on Multi-scenario Emission Forecast of Ozone Precursors in the Summer of 2030 .....	CHEN Tian-lei, WU Min, PAN Cheng-ke, <i>et al.</i> (2403)
Improvement of Environmental Model Prediction Based on Inversion and Aerosol Assimilation .....	CAI Zi-ying, TANG Miao, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (2415)
Method of Identifying Air Pollution from Iron and Steel Industry Based on Ambient Air Quality Monitoring Data Analysis .....	SHI Yao-peng, HU Jing-nan, CHU Yang-xi, <i>et al.</i> (2427)
Assessment of "Differentiated Response Requirement Based on Performance Grading" Policy During Heavy Air Pollution Alert .....	ZENG Jing-hai, WANG Can (2436)
Risk Zoning of Water Pollution in the Yellow River Basin .....	ZHOU Xia-fei, CAO Guo-zhi, YU Fang, <i>et al.</i> (2448)
Emission Characteristics of Industrial Water Pollutants in Gansu Section of the Yellow River Basin .....	LI Xue-ying, YANG Xi, QIAO Qi, <i>et al.</i> (2459)
Spatial-temporal Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Yellow River .....	WANG Tao-yi, PAN Bao-zhu, HAN Xu, <i>et al.</i> (2467)
APCS-MLR Combined with PMF Model to Analyze the Source of Metals in Sediment of Xinglin Bay Suburban Watershed, Xiamen .....	SHEN Chen-yu, YAN Yu, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2476)
Spatial Differentiation Characteristics and Response Relationship of DOM, Nutrients, and Heavy Metals in River Sediments .....	XIAO Yan-chun, YU Hui-bin, SONG Yong-hui (2489)
Distribution Characteristics, Evaluation, and Source Analysis of Heavy Metals in Soils of Fenhe Riparian Zone in Taiyuan City .....	HU Jie, ZHAO Xin-yu, WANG Ting-ting, <i>et al.</i> (2500)
Binding Affinity Between Heavy Metal Hg and Dissolved Organic Matter in Hongze Lake .....	HU Bin, WANG Pei-fang, ZHANG Nan-nan, <i>et al.</i> (2510)
Ecosystem Evolutionary Trajectory of Lake Xiliang over the Past Century Driven by Eutrophication .....	ZHENG Jia-nan, XU Min, ZHENG Wen-xiu, <i>et al.</i> (2518)
Sediment Release and Pollution Source Analysis of Typical Reservoirs in the Upper Reaches of the Yellow River Based on DGT Technology .....	MA Yu-shen, ZHU Xiang, PANG Qing-qing, <i>et al.</i> (2527)
Differential Characteristics and Source Identification of Water Quality of the Rivers in Northern Henan Before and After Rainstorm .....	ZHANG Yan, ZOU Lei, LIANG Zhi-jie, <i>et al.</i> (2537)
Adsorption and Interception Effects of <i>Eichhornia crassipes</i> on Microplastics in Water of the Poyang Lake Basin .....	LI Wen-gang, WU Xi-en, JIAN Min-fei, <i>et al.</i> (2548)
Spatiotemporal Distribution and Ecological Risk Assessment of Plastic Additives in Taihu Lake .....	LIU Shu-jiao, DING Jian-nan, SHI Jun-zhe, <i>et al.</i> (2557)
Distribution Characteristics, Sources, and Storage of Microplastics in Surface Sediments of Luoma Lake .....	YAO Ming-xuan, BAI Xue, XU Zhen-jia, <i>et al.</i> (2566)
Pollution Characteristics of Phosphorus in Different Media in Taihu Lake and Its Treatment Enlightenment .....	CAI Mei, LU Zhi-hua, WANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (2575)
Analysis on Diversity and Structure of Microbial Community in River Sediment of Siping Section of Liaohe River .....	LI Peng-yang, AN Qi-rui, WANG Xin-hao, <i>et al.</i> (2586)
Non-point Source Pollution (NPS) Induces Structural and Functional Variation in Bacterial Communities in Sediments of Jialing River .....	XUE Yu-qin, XU Fei, LIU Kun-he, <i>et al.</i> (2595)
Effects of Microplastics on Bacterial Community Composition and Diversity in Sediments .....	LI Wen-lu, WANG Zhi-chao, YANG Wen-huan, <i>et al.</i> (2606)
Vertical Distribution Characteristics and Community Construction of Aerobic Denitrification Bacteria from the Sediments of Baiyangdian Lake During the Winter Freezing Period .....	ZHANG Tian-na, CHEN Zhao-ying, ZHANG Zi-wei, <i>et al.</i> (2614)
Effect of Induced Mixing on Bacterial Community Structure and Metabolic Activity in Reservoir .....	GAO Yue, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2624)
Distribution Characteristics of Microplastics in <i>Bellamyia aeruginosa</i> in Typical Area of Poyang Lake .....	JIANG Wei-qun, HU Qi-wu, JIAN Min-fei, <i>et al.</i> (2633)
Electrocatalytic Oxidation of Bisphenol A by Porous Ti/SnO <sub>2</sub> -Sb-Ni Electrode Loaded with Multi-wall Carbon Nanotubes .....	FU Yuan-hang, LIU An-di, HUANG Wei-bin, <i>et al.</i> (2640)
Efficiency and Mechanism of Degradation of Methylene Blue with H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Catalyzed by Magnetic Mn <sub>0.6</sub> Zn <sub>0.4</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> @SiO <sub>2</sub> .....	XU Dong-ying, YU Jing, HAO Qi, <i>et al.</i> (2650)
Effect of Two Types of Nanoparticles on the Adsorption of Ciprofloxacin on Zeolite .....	JIANG Lan-cui, MENG Zhao-fu, LIU Xian, <i>et al.</i> (2662)
Adsorption Mechanisms and Effect Factors of As(V) by AMD Sludge Composite Material .....	ZHANG Ya-hui, ZHANG Rui-xue, WU Pan, <i>et al.</i> (2673)
Shifts in Microbial Community and Variation in Functional Genes for Nitrification and Denitrification in Activated Sludge Affected by Triclosan and Its Transformed Intermediates .....	LU Ying-yuan, DONG Xiao-qi, PENG Xing-xing, <i>et al.</i> (2685)
Construction of Sustainability Evaluation Index System for Contaminated Site Risk Management and Analysis on Key Influential Factors .....	LI Xiao-nuo, YI Shi-yi, CHEN Wei-ping (2699)
Construction and Empirical Analysis of a Comprehensive Evaluation Method of Coastal Wetland Soil Quality Based on Ecological Functions .....	ZHANG Xue, KONG Fan-long, JIANG Zhi-xiang (2709)
Source Analysis and Pollution Assessment of Heavy Metals in Farmland Soil Around Tongshan Mining Area .....	CHEN Hang, WANG Ying, WANG Shu (2719)
Effects of Typical Iron and Manganese Minerals on Arsenic Speciation and Enzyme Activities in Paddy Soil .....	ZHOU Yi-min, HUANG Ya-yuan, LIU Kai, <i>et al.</i> (2732)
Phytoremediation Efficiency of Two Cultivars of <i>Brassica napus</i> L. Under Water-soluble Chitosan Treatment in Typical Pb-contaminated Farmland Soils .....	MENG Xiao-fei, ZHENG Guo-di, CHEN Tong-bin, <i>et al.</i> (2741)
Risk Prediction of Cadmium and Lead in Wheat Grains Based on Bayes Theorem .....	WANG Tian-qi, LI Yan-ling, YANG Yang, <i>et al.</i> (2751)
Interannual Variation Characteristics of Nitrogen Loss Under Rapeseed/Maize Rotation in Purple Soil Sloping Field .....	XU Man, GAO Ming, YU Luo, <i>et al.</i> (2758)
Physicochemical Properties of Biochars Prepared from Different Feedstocks and Evaluation of Its Potential as A Slow-release Carriers for Biochar-based Fertilizers .....	XING Li-bin, CHENG Jie, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (2770)
Effects of Combined Application of Wood Vinegar-Acidified Biochar and Nitrogen on Active Nitrogen and Ammonia Volatilization in Saline Soil .....	SHEN Shu-wei, ZHANG Dan-dan, WANG Min-ge, <i>et al.</i> (2779)
Effects of Biodegradable Plastic Film Mulching on Greenhouse Gas Emissions Under Wheat-Maize Rotation System in the Guanzhong Plain .....	GUO Yi-ting, LUO Xiao-qi, WANG Rui, <i>et al.</i> (2788)
Forest Soil Microbial Community Structure Characteristics and Its Influencing Factors at Different Elevations on the Southern Slope of Daiyun Mountain .....	HE Zhong-sheng, WANG Zi-wei, ZHU Jing, <i>et al.</i> (2802)
Effects of Simulated Warming and Increased Precipitation on Soil Extracellular Enzyme Activity and Enzymatic Stoichiometry of Abandoned Grassland .....	WANG Xing, ZHONG Ze-kun, JIAN Jun-nan, <i>et al.</i> (2812)
Contribution of Urbanization to Local Warming in Major Cities of China .....	LI Yu, ZHOU De-cheng, YAN Zhang-mei, <i>et al.</i> (2822)