

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价

彭驰, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元, 张严



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年1月

第43卷 第1期

Vol.43 No.1

目次

中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价 彭驰, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元, 张严 (1)

植物生长调节剂在土壤中的环境行为综述 陈亮, 侯杰, 胡晓蕾, 张纪兆, 王浩达 (11)

基于铁泥的磁性水处理材料制备及应用进展 曾辉平, 翟龙雪, 李冬, 张杰 (26)

不同臭氧度量指标对我国人群总死亡影响的 Meta 分析 阮芳芳, 刘纪新, 陈芷薇, 曾贤刚 (37)

北京市海坨山冬季不同污染过程下气溶胶化学组分及其潜在来源分析 赵德龙, 王飞, 刘丹彤, 田平, 盛久江, 周崑, 肖伟, 杜远谋, 卢俐, 黄梦宇, 何晖, 丁德平 (46)

武汉冬季大气 PM_{2.5} 小时分辨率源贡献识别及潜在影响域分析 蒋书凝, 孔少飞, 郑煌, 曾昕, 陈楠, 祁士华 (61)

运城市 PM_{2.5} 时空分布特征和潜在源区季节分析 王姝涛, 张强, 温肖宇, 冀乃超, 赵文婷, 罗淑贞, 陈志, 翟程凯 (74)

中国东部冷锋推进中的 PM_{2.5} 三维结构变化特征 牟南南, 朱彬, 卢文 (85)

粤港澳大湾区大气中硝基多环芳烃污染特征与风险评估 李彦希, 谢丹平, 黎玉清, 金梦, 丁紫荣, 闫雅楠, 赵波 (93)

西南地区大型综合工业区和周边区域大气 VOCs 污染特征及健康风险评估 李陵, 张丹, 胡伟, 徐芹, 吴虹, 袁睿, 蒲茜, 郝宇杭, 唐志欣, 赖明敏 (102)

拉萨市挥发性有机物的组成特征、季节变化和来源解析 余家燕, 韩燕, 陈木兰, 张惠芳, 陈阳, 刘建国 (113)

杭州 COVID-19 期间大气 VOCs 体积分数变化特征 林旭, 严仁嫦, 金嘉佳, 许凯儿, 何曦, 叶辉, 何纪平 (123)

上海城郊夏季大气 VOCs 在臭氧生成中的作用 金丹 (132)

铜川市秋冬季大气 VOCs 特征及其 O₃ 和 SOA 形成潜势分析 易宵霄, 李姜豪, 李光华, 路珍珍, 孙智钢, 高健, 邓顺熙 (140)

电子垃圾拆解回收 VOCs 排放特征与排放因子 谢丹平, 黄忠辉, 刘旺, 聂鹏, 黄钟坤, 贺辉, 陈晓燕 (150)

不同传输通道下珠江三角洲臭氧与前体物非线性响应关系 伍永康, 陈伟华, 颜丰华, 毛敬英, 袁斌, 王伟文, 王雪梅 (160)

淄博市城郊臭氧污染特征及影响因素分析 王雨燕, 杨文, 王秀艳, 王帅, 白瑾丰, 程颖 (170)

昭通市周边扬尘重金属污染特征及健康风险 庞晓晨, 韩新宇, 史建武, 包宇斋, 宁平, 张朝能, 向峰 (180)

城市路面积尘微塑料污染特征 方芹, 牛司平, 陈予东, 于江华 (189)

塔里木河流域东部降水稳定同位素特征与水汽来源 宋洋, 王圣杰, 张明军, 石玉东 (199)

赤水河流域水体抗生素污染特征及风险评估 吴天宇, 李江, 杨爱江, 李彦澄, 陈瑀, 何强, 马凯, 胡霞, 王斌, 艾佳, 钟雄 (210)

无定河流域地表地下水的水化学特征及控制因素 李书鉴, 韩晓, 王文辉, 李志 (220)

白洋淀府河影响区沉积物营养盐和重金属污染特征及风险评估 陈兴宏, 李立青, 张美一, 张伟军, 王东升, 王洪杰 (230)

九龙江口红树林湿地表层沉积物中微塑料赋存特征与重金属的关系 刘倡君, 罗专溪, 闫钰, 林惠荣, 胡恭任, 于瑞莲 (239)

北京市北运河水系底栖动物群落与水环境驱动因子的关系及水生态健康评价 胡小红, 左德鹏, 刘波, 黄振芳, 徐宗学 (247)

城市河道再生水特征水质因子空间变异机制分析 刘全忠, 彭柯, 苏振华, 邸琰茗, 郭道宇 (256)

苏州景观河道表层沉积物间隙水-上覆水中 DOM 特性分析 李超男, 何杰, 朱学惠, 李学艳 (267)

苏州城区雨水管道沉积物典型污染物分布特征 叶蓉, 盛铭军, 姜永波, 武宇圣, 黄天寅 (277)

信号分子强化改性挂膜沸石持续抑制沉积物中氨氮释放 徐金兰, 许洋, 李修民, 国森, 刘成海 (285)

三峡水库调度对支流水体叶绿素 a 和环境因子垂向分布的影响 田盼, 李亚莉, 李莹杰, 李虹, 王丽婧, 宋林旭, 纪道斌, 赵星星 (295)

李家河水库春季分层期 nirS 型反硝化菌群特征分析 梁伟光, 黄廷林, 张海涵, 杨尚业, 刘凯文, 李程遥, 温成成, 李伟涛, 蔡晓春 (306)

岗南水库沉积物好氧反硝化菌群落时空分布特征 张紫薇, 陈召莹, 张甜娜, 周石磊, 崔建升, 罗晓 (314)

宁夏地区地下水金属元素分布特征及健康风险评估 王晓东, 田伟, 张雪艳 (329)

快速城镇化三角洲地区高碘地下水赋存特征及驱动因素:以珠江三角洲为例 吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 周冰, 李备 (339)

长三角一体化示范区青浦区水环境中 22 种 PPCPs 的多介质分布特征及风险评估 张智博, 段艳平, 沈嘉豪, 俞文韬, 罗鹏程, 涂耀仁, 高峻 (349)

洞庭湖及入湖河流中 209 种多氯联苯同类物分布特征与风险评估 黄智峰, 郑丙辉, 尹大强, 崔婷婷, 赵兴茹 (363)

基于流量和溶存浓度的河流水系氧化亚氮释放量估算 李冰清, 胡敏鹏, 王铭烽, 张育福, 吴昊, 周佳, 吴锴彬, 戴之舟, 陈丁江 (369)

三峡库区万州段河流水-气界面 CO₂ 通量支干流对比及影响机制初探 秦宇, 欧阳常悦, 王雨潇, 方鹏 (377)

功能化凹凸棒吸附材料的制备及其对重金属废水中 Pb²⁺ 的吸附行为 廖晓峰, 钟静萍, 陈云嫩, 邱延省, 任嗣利 (387)

铁氮共掺杂生物炭对二级水溶解性有机物的吸附特性与长效性评价 吴晨曦, 许路, 金鑫, 石烜, 金鹏康 (398)

沸石悬浮填料生物移动床的亚硝化特性 邓翠兰, 郭露, 汪晓军, 陈振国 (409)

温度对 ANAMMOX 生物膜工艺的脱氮影响与菌群结构分析 吴珊, 王淑雅, 王芬, 季民 (416)

填料对 ANAMMOX 污泥活性恢复的影响及菌群特征 罗景文, 杨津津, 李绍康, 赵昕宇, 杨一飞, 韩嘉琛, 李翔 (424)

基于 PMF 模型的宁南山区小流域土壤重金属空间分布及来源解析 夏子书, 白一茹, 王幼奇, 高小龙, 阮晓晗, 钟艳霞 (432)

浙中典型硫铁矿田土壤重金属含量特征及健康风险 成晓梦, 孙彬彬, 吴超, 贺灵, 曾道明, 赵辰 (442)

农产品视角的城郊黑土地田土壤重金属风险分区 吴松泽, 王冬艳, 李文博, 王兴佳, 闫卓冉 (454)

基于 DGT 技术的广西碳酸盐岩区稻米镉含量主控因素 宋波, 肖乃川, 马丽钧, 李龙, 陈同斌 (463)

调理剂耦合水分管理对双季稻镉和铅累积的阻控效应 李林峰, 王艳红, 李义纯, 唐明灯, 李奇, 艾绍英 (472)

设施叶菜类蔬菜重金属镉、铅和砷累积特征及健康风险评估 董俊文, 高培培, 孙洪欣, 周昶, 张香玉, 薛培英, 刘文菊 (481)

电子垃圾拆解固废渣-土壤-蔬菜中多氯联苯污染特征与健康风险评估 张亚萍, 吕占禄, 王先良, 张晗, 郭凌川, 丁秀丽, 张金良 (490)

雷州半岛南部典型农用地土壤-作物的有机氯农药残留特征和健康风险评估 梁晓晖, 解启来, 郑芊, 杨北辰, 叶金明, 唐成金 (500)

重金属含量对城市土壤真菌群落结构的影响 郭大陆, 张建, 申思, 余子洁, 杨军顺, 罗红燕 (510)

长期施肥对黄土高原梯田土壤养分特征和微生物资源限制的影响 吴春晓, 高小峰, 闫本帅, 梁彩群, 陈佳瑞, 王国梁, 刘国彬 (521)

土地利用变化后不同种植年限香榧土壤微生物群落的组成及多样性 姜霓雯, 梁辰飞, 张勇, 蒋仲龙, 董佳琦, 吴家森, 傅伟军 (530)

化肥和有机肥配施生物炭对土壤磷酸酶活性和微生物群落的影响 杨文娜, 余添, 罗东海, 熊子怡, 王莹燕, 徐曼, 王子芳, 高明 (540)

秦岭中段撂荒地植被恢复过程中土壤微生物代谢特征 薛悦, 康海斌, 杨航, 冰德叶, 晁志, 张凯, 王得祥 (550)

全生物降解地膜原料颗粒对土壤性质、小麦生长和养分吸收转运的影响 闫文豪, 王春丽, 王莉玮, 易廷辉, 卞京军, 支梅, 孙琪惠, 宿锦锦, 赵秀兰 (560)

秸秆还田对冬小麦-夏玉米农田土壤固碳、氧化亚氮排放和全球增温潜势的影响 万小楠, 赵珂悦, 吴雄伟, 白鹤, 杨学云, 顾江新 (569)

《环境科学》征订启事(73) 《环境科学》征稿简则(209) 信息(229, 266, 338)

武汉冬季大气 PM_{2.5} 小时分辨率源贡献识别及潜在影响域分析

蒋书凝¹, 孔少飞^{1,2,*}, 郑煌¹, 曾昕¹, 陈楠^{2,3}, 祁士华^{1,2}

(1. 中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430074; 2. 湖北省大气复合污染研究中心, 武汉 430074; 3. 湖北省环境监测中心站, 武汉 430074)

摘要: 冬季是我国大气细颗粒物(PM_{2.5})污染较为严重的时段,武汉市PM_{2.5}受到明显的区域传输影响.本研究基于小时分辨率PM_{2.5}组分观测数据,采用受体模型,解析武汉冬季大气PM_{2.5}各类源的实时贡献.结合轨迹聚类 and 浓度权重,识别影响各类源的传输路径和潜在源区.武汉冬季大气平均 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 为 $(75.1 \pm 29.2) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.观测期间共有两次污染过程,第一次污染过程主要受西北方向气团影响,水溶性离子升高是PM_{2.5}呈现高值的主要原因, $\rho(\text{NH}_4^+)$ 、 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 和 $\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 分别是清洁时段的1.6、1.7和2.1倍;第二次污染过程则以正东方向气团为主,二次有机组分有明显的生成.对武汉冬季大气PM_{2.5}贡献最大的是二次源(34.1%),其次是机动车尾气(23.7%)、燃煤(11.5%)、道路尘(10.9%)、钢铁冶炼(8.7%)和烟花爆竹燃放(5.7%),贡献最小的是生物质燃烧(5.3%).钢铁冶炼贡献量的日变化最高值出现在08:00 [$(17.5 \pm 18.8) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$],最低值出现在01:00 [$(10.4 \pm 10.9) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$],呈现白天贡献量高和夜晚贡献量低的现象;机动车尾气的贡献量在上午09:00 [$(42.1 \pm 24.8) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]和晚上20:00 [$(41.6 \pm 19.5) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]出现明显峰值.第一次污染过程中,二次源贡献率明显升高,表明西北来向气团的长距离传输有利于二次组分的生成和老化;第二次污染过程中,机动车尾气、燃煤、钢铁冶炼和道路尘的贡献率升高,其源区主要分布在本地、江西西北部和安徽南部的长江沿线,反映出沿江密集分布的工业过程、工业原料和产品运输导致的尾气排放和运输扰动产生的道路尘等对于武汉市冬季大气PM_{2.5}的影响.生物质燃烧的源区主要集中在河南、安徽、江苏、河北南部和山西西南部,冬季华北平原地区生物质燃烧排放的污染物经区域传输会对武汉产生影响.本研究可为识别武汉市冬季大气颗粒物来源和区域联防联控提供参考.

关键词: 武汉; PM_{2.5}; 实时源解析; 潜在源区; 区域传输

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)01-0061-13 DOI: 10.13227/j.hjxx.202105171

Real-time Source Apportionment of PM_{2.5} and Potential Geographic Origins of Each Source During Winter in Wuhan

JIANG Shu-ning¹, KONG Shao-fei^{1,2,*}, ZHENG Huang¹, ZENG Xin¹, CHEN Nan^{2,3}, QI Shi-hua^{1,2}

(1. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Research Centre for Complex Air Pollution of Hubei Province, Wuhan 430074, China; 3. Eco-Environmental Monitoring Centre of Hubei Province, Wuhan 430074, China)

Abstract: China has always suffered from serious atmospheric fine particle (PM_{2.5}) pollution in winter, and PM_{2.5} in Wuhan is particularly affected by regional transportation. Based on the hourly monitoring dataset of chemical components during the winter period, this study identified the real-time sources of PM_{2.5} in Wuhan using a positive matrix factorization (PMF) model. A cluster analysis of backward trajectories and the concentration weighted trajectory were applied to obtain the potential source regions and transportation routes. During the observation period, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ was $(75.1 \pm 29.2) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, and there were two pollution episodes, one of which was mainly affected by the air masses coming from the northwest direction. In the first pollution episode, the increasing concentration of water-soluble ions was the main reason for the high PM_{2.5} value, and the concentrations of NH_4^+ , NO_3^- , and SO_4^{2-} were 1.6, 1.7, and 2.1 times those during the cleaning period, respectively. The other episode was affected by the air masses coming from the east direction, and the secondary organic components were clearly formed. Secondary inorganic aerosol contributed the most (34.1%) to PM_{2.5}, followed by vehicular exhaust (23.7%), coal combustion (11.5%), road dust (10.9%), iron- and steel-producing processes (8.7%), and firework displays (5.7%). Biomass burning contributed the least (5.3%). Our examination of the diurnal variation revealed that the maximum contribution of iron- and steel-producing processes appeared at 08:00 [$(17.5 \pm 18.8) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$], and the lowest was at 01:00 [$(10.4 \pm 10.9) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$], which stayed high in the daytime and low at night. The contribution of vehicular exhaust showed a double peak at 09:00 [$(42.1 \pm 24.8) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] and 20:00 [$(41.6 \pm 19.5) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]. In the first pollution period, the contribution rate of secondary inorganic aerosol increased significantly, indicating that the long-distance transport under the northwest air mass promoted the generation of secondary components. In the second pollution period, the contribution rates of vehicular exhaust, coal combustion, iron- and steel-producing processes, and road dust increased, mainly located in the local area, the northwest of Jiangxi and the south of Anhui province. This reflected the influence of industrial processes, road transportation, and dust contribution along the Yangtze River on PM_{2.5}. Biomass burning had a relatively high contribution for air masses from the northern regions, including Henan, Anhui, the south of Hebei, and the southwest of Shanxi provinces. The regional transport of pollutants from biomass combustion in the North China Plain during the winter would have an impact on Wuhan. This study can provide scientific and technological support for identifying the causes of atmospheric haze pollution in Wuhan during the winter and for the joint prevention and control of atmospheric particulate matter.

收稿日期: 2021-05-17; 修订日期: 2021-06-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41830965, 42077202); 湖北省科技厅技术创新专项重大项目(2017ACA089)

作者简介: 蒋书凝(1998~),女,硕士研究生,主要研究方向为PM_{2.5}在线源解析, E-mail: 20161004039@cug.edu.cn

* 通信作者, E-mail: kongshaofei@cug.edu.cn

Key words: Wuhan; fine particles ($PM_{2.5}$); real-time source apportionment; source regions; regional transportation

过度排放的人为污染物加之不利的气象条件,使得我国冬季灰霾污染事件频发^[1]. 污染物的区域传输也是加剧局部地区空气污染的重要因素之一^[2]. 在区域传输作用下,老化的二次气溶胶容易吸湿增长,导致下风向地区空气质量下降, $PM_{2.5}$ 浓度升高^[3~4]. 在一次冬季霾污染事件中,区域传输对北京市 $PM_{2.5}$ 的贡献率达到 55%^[5]. 长三角地区的相关研究表明^[6],河北、河南和湖北的污染物输送是造成江苏省霾污染的原因之一. 上海市环境空气质量主要受北、东和西这 3 个方向的气团影响,其中北向气团占全部气团的 44.8%^[7]. 在偏北气流的作用下,上海市大气颗粒物处于高浓度水平^[8]. Chen 等^[9]的研究对 2015 年的一次重霾事件分析发现,北风携带污染物进入珠江三角洲,使其北部地区 $PM_{2.5}$ 浓度的增长早于南部地区 1 d. 华中地区地处中国中部和东部区域大气传输的十字路口^[10],具有独特的“非静稳”气象条件,即强风、无逆温现象和不稳定的大气边界层结构^[11]. 目前,有关大气污染物区域传输的研究主要集中于京津冀^[12~14]、长江三角洲^[15~17]和珠江三角洲地区^[18~20],华中地区的相关研究较少^[21].

近年来,基于 $PM_{2.5}$ 在线监测仪器获取的高时间分辨率的化学组分数据^[22~23],开展重污染过程的成因解析和污染物来源的准确溯源研究,成为研究的热点^[24]. 现有研究主要是基于 $PM_{2.5}$ 小时分辨率数据,分析 $PM_{2.5}$ 的化学组成,并通过受体模型量化其来源^[25~27]. 如 Gao 等^[28]的研究分别采用主成分分析法、正定矩阵因子法(positive matrix factorization, PMF)和多元线性模型这 3 种模型对北京市 $PM_{2.5}$ 来源进行了解析. Tian 等^[29]的研究基于天津市 $PM_{2.5}$ 高时间分辨率数据探讨了 PMF 源解析模型的不确定性和最优建模方案. 高时间分辨率源解析结果为了了解重污染形成机制提供了重要的基础信息^[30]. 将受体模型与轨迹模拟相结合能够区分局地排放与区域传输对 $PM_{2.5}$ 的影响^[31].

武汉是华中地区唯一的国家中心城市,大气污染问题较为突出^[32]. 2019 年武汉市污染天占总天数的 32.9%,首要污染物为 $PM_{2.5}$ 有 38 d^[33]. 而区域传输是导致武汉市 $PM_{2.5}$ 浓度急剧上升的重要原因之一. Yu 等^[11]的研究表明,在一次重污染事件中非本地源排放的大气污染物对武汉市 $PM_{2.5}$ 浓度贡献超过 65%. 武汉大气 $PM_{2.5}$ 的污染来源主要为燃煤电厂、机动车尾气排放和周边郊区生物质燃烧^[34~37]. 目前,基于小时分辨率观测数据的相关研

究较少^[38]. 此外,探讨区域传输在武汉市霾污染事件形成中的作用研究较少^[39],尤其是在冬季重污染过程中,实时气团来向下 $PM_{2.5}$ 各类源贡献的潜在源区的分析不足.

本研究基于小时分辨率 $PM_{2.5}$ 组分(水溶性离子、微量元素和碳组分)观测数据,采用 PMF 模型进行来源解析,结合后向轨迹模式中的聚类分析、浓度权重分析(concentration weighted trajectory, CWT),分析 $PM_{2.5}$ 的传输路径及不同气团来向下各类贡献源的潜在源区,以为区域大气污染防治提供支撑.

1 材料与方法

1.1 样品采集

本研究监测点位(30.60°N, 114.28°E)位于武汉市环境科学研究院楼顶(图 1),周边分布有居民区和商业区,人口密集,交通流量大,属于城市中心交通和居民混合区站点.



图 1 观测点位示意

Fig. 1 Location of the observational site

本研究中利用在线观测仪器,测量了 $PM_{2.5}$ 的质量浓度及化学组分,包括水溶性离子(water-soluble ions, WSIs)、微量元素(trace element, TE)和碳组分. 时间段为 2019 年 12 月 1 日 00:00 至 12 月 31 日 23:00. $PM_{2.5}$ 质量浓度的监测采用 TEOM-1405F 型环境颗粒物在线监测仪^[25]. 水溶性离子组分(NH_4^+ 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 NO_3^- 和 SO_4^{2-})采用 MARGA-AD12080 型离子在线分析仪监测^[40]. 通过定期添加溴化锂(LiBr)进行内部校准,使得相对误差保持在 10% 以内. 使用阴阳离子标准溶液建立标准校准曲线,回收率均高于 95%^[41~42]. 微量元素监测采用 XactTM 625 型大气重金属在线监测仪定量 $PM_{2.5}$ 中 K、Ca、Cr、Mn、Fe、Cu、Zn、As、Ba 和 Pb 的浓度. 监测期间定期进行采样流量的核

查,流量的相对误差保持在 $\pm 5\%$ 以内. 监测期间定期对空白膜激发,对比空白膜和样品斑点的光谱,检查同种元素的特征峰,对采集信号与能量之间的转换进行线性校准^[28]. PM_{2.5} 中有机碳(organic carbon, OC)和元素碳(elemental carbon, EC)采用 Sunset RT-4 型气溶胶有机碳元素碳在线分析仪监测,并通过在每个样品分析结束时自动注入已知量的甲烷(氦气氛围下 5% CH₄ 气体),并以该外标气体对系统分析结果进行归一化校正^[43].

1.2 PMF 模型

本研究采用 PMF 5.0 对 PM_{2.5} 的实时源贡献进行解析. PMF 模型法是基于大量的受体观测数据,输出可能污染来源的源贡献矩阵和污染源成分谱矩阵. PMF 模型不需要源成分谱的输入,该法采取了非负值的约束条件,利用数据标准偏差来进行优化^[44]. 本研究选取 2~9 个因子分别进行迭代运算. 根据运行结果,选取 Q_{true} 和 Q_{robust} 最为稳定且接近的一组,保证大部分数据残差能够在 ± 3 范围以内. 同时,解析结果能做出合理解释. 通过对计算结果进行比较和判断,最终确定因子数为 7.

1.3 后向轨迹分析和 CWT 分析

本研究利用 MeteorInfo 软件结合 TrajStat 插件对研究期间气团进行模拟. 气象数据来源于美国国家环境预报中心(NCEP). 将观测点设为起始点,起始高度为 500 m,轨迹时长为 48 h,计算每小时的后向轨迹. 基于聚类分析,共得到 4 类轨迹(图 2). 其中,第一类气团来自山西省西南部(35.5%),经由河南中东部传输至观测点;第二类气团来自安徽省西南部(40.6%),经湖北省东部传输至观测点,传输通道为长江航道;第四类气团来自湖南省中西部(15.6%),经湖南北部和湖北东南部传输至观测点. 三者均为 500 hPa 以下的低空中短距离传输气

团. 第三类气团来自内蒙古自治区西部(8.33%),经宁夏、山西、山西和河南长距离传输过程至观测点,且传输过程中气团由高空降为低空.

2 结果与讨论

2.1 PM_{2.5} 浓度变化

观测期间大气 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 范围为 13.0~163 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,平均值为 $(75.1 \pm 29.2) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,超出二级浓度限值. 由图 3 可以看出,研究期间共发生了两次污染过程,分别为 12 月 6 日 03:00 [$\rho(\text{PM}_{2.5})$ 为 85.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]至 7 日 00:00(83.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、12 月 12 日 18:00(75.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)至 16 日 07:00(75.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). 其中,第一次污染过程共持续 22 h,主要受西北气团影响,风向由东北向转为西北向. 气温在 12 月 6 日 15:00 到达峰值 12.6°C,此后持续下降. 该阶段考虑为一次冷锋过境,过境前气温达到高值,过境时由冷气团控制使得气温骤降. 第一次污染过程持续时间较短,主要由冷锋过境导致外来污染物输送所致;第二次污染过程共持续 86 h,属于典型的本地污染物排放累积过程. 风速维持在 0.16~2.30 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,风向在东北、北和东南之间转换,并在东南向维持了 31 h(90.1°~166°). 湿度呈现波动上升趋势,12 月 15 日 06:00 达到峰值 76.7%,此后小幅下降后继续上升,至 12 月 16 日 07:00 达到最高值 87.0%. 高湿度和低风速的气象条件加剧气态前体物的二次转化、促进颗粒物吸湿增长,导致 PM_{2.5} 的大量积累. $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 逐步增加到 12 月 14 日 09:00 的最高值(163 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),且自 12 月 14 日 07:00 连续 6 h 浓度维持在 150 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上. 12 月 15 日 18:00 风向发生突变,从偏东风转为北风, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 开始迅速下降,最大降幅为 0.8 倍,至 12 月 17 日 00:00 的最低值为 26.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

2.2 PM_{2.5} 实时化学组成特征

PM_{2.5} 各组分浓度的时间变化如图 4 所示. 第一次污染过程中水溶性离子占主导,平均 $\rho(\text{WSIs})$ 为 $(105 \pm 27.9) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,是第二次污染过程的 1.3 倍. 水溶性离子于 12 月 6 日 04:00 达到最高值(150 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),是研究期间平均浓度的 2.0 倍;第二次污染过程中 PM_{2.5} 各组分浓度均出现明显的峰值. 其中, $\rho(\text{EC})$ 、 $\rho(\text{OC})$ 和 $\rho(\text{TE})$ 分别在 12 月的 14 日 11:00(4.34 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、14 日 00:00(23.4 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 和 13 日 21:00(10.7 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 达到最高值,是研究期间其平均浓度的 1.9、1.6 和 2.0 倍. 水溶性离子在污染期间呈现小幅下降而后上升于 12 月 15 日 15:00 达到峰值(126 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$).

不同污染时期水溶性离子中各离子变化如图 5

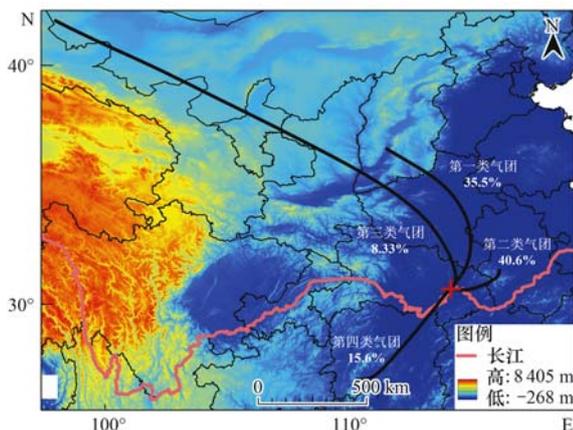
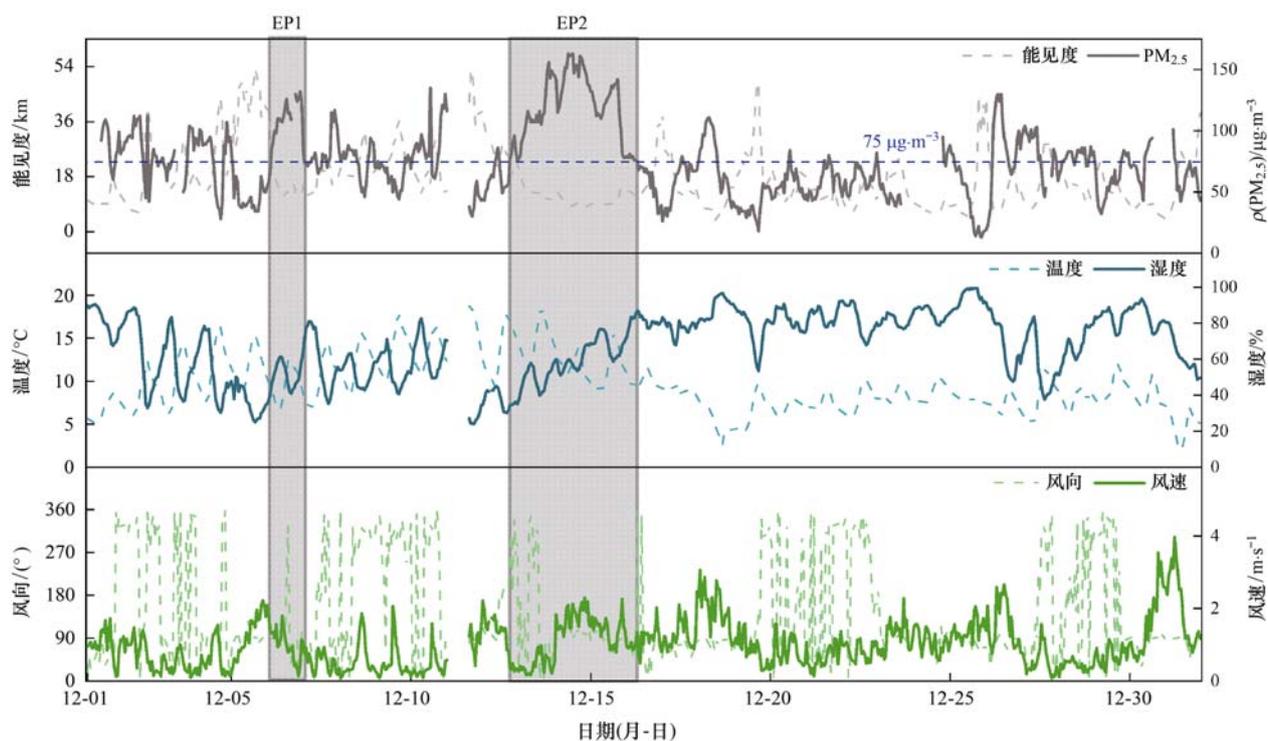
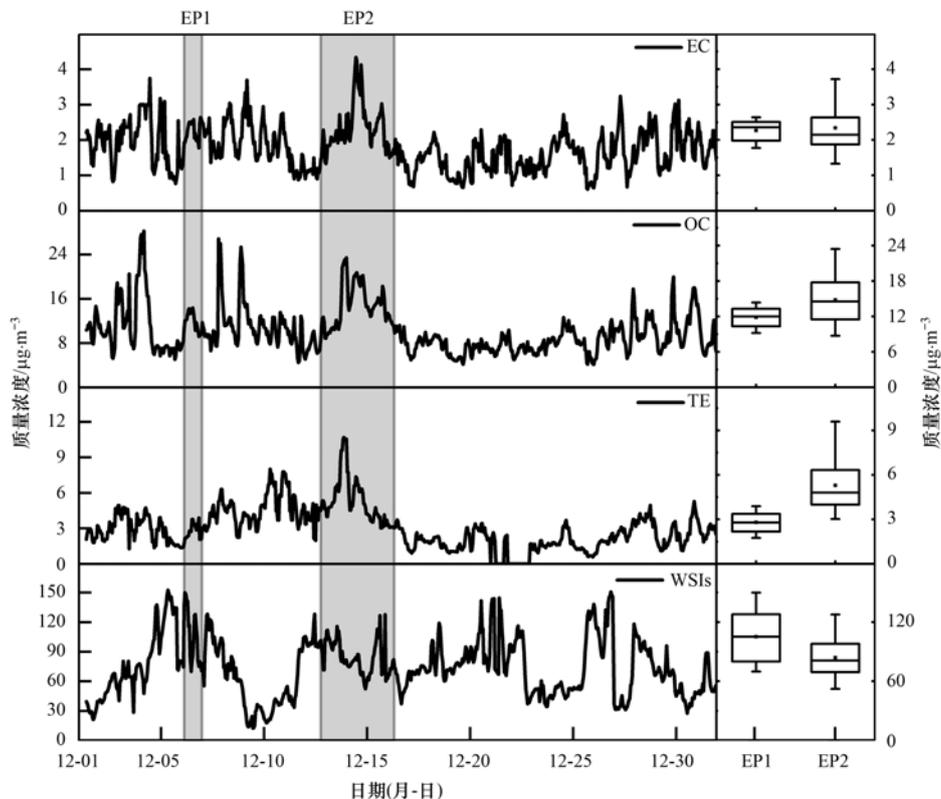


图 2 武汉市 12 月气团后向轨迹聚类分析

Fig. 2 Cluster analysis of backward trajectories transported to Wuhan in December

图3 观测期间 $PM_{2.5}$ 与气象参数时间序列Fig. 3 Time series of $PM_{2.5}$ and meteorological parameters during the observation period

EC:元素碳; OC:有机碳; TE:微量元素; WSIs:水溶性离子

图4 观测期间 $PM_{2.5}$ 化学组成时间序列及污染时期统计箱型图Fig. 4 Time series of chemical composition in $PM_{2.5}$ during observation period and statistical box chart of pollution episodes

所示. 第一次污染过程中各离子较清洁时段均有所上升. 其中, $\rho(NH_4^+)$ 、 $\rho(NO_3^-)$ 和 $\rho(SO_4^{2-})$ 的浓度明显升高, 分别是清洁时段的 1.6、1.7 和 2.1 倍.

反映出西北向气团在远距离传输过程中, 大气污染物老化充分, 促进二次离子的生成. 第二次污染过程中各离子较清洁时段变化幅度较小, 其中, SO_4^{2-} 增

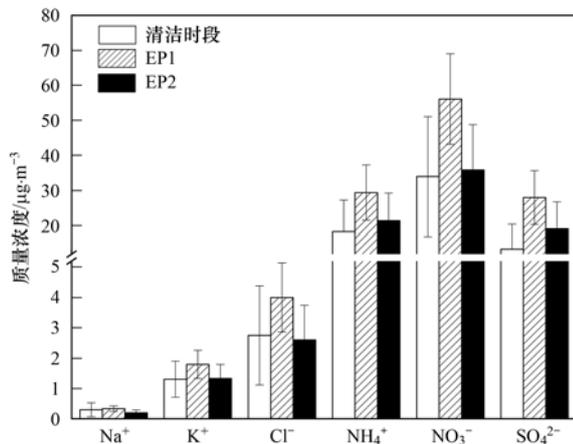


图5 观测期间不同污染时期各水溶性离子浓度对比

Fig. 5 Comparison of the concentration of water-soluble inorganic ions in different pollution periods during the observation period

幅最大, $\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 为清洁时段的 1.4 倍。

OC/EC 值可用来评价大气中二次污染的程度^[45]。本研究中, 清洁时段 OC/EC 值的变化范围为 3.11 ~ 13.9, 第一次污染过程为 4.69 ~ 6.23, 第二次污染过程为 4.21 ~ 8.73。前人指出, OC/EC 值为 1.00 ~ 4.20 时, 碳组分来自机动车尾气排放; OC/EC 值为 2.50 ~ 10.5 时, 碳组分来自燃煤排放; OC/

EC 值为 3.80 ~ 13.2 时, 碳组分来自生物质燃烧^[46,47]。因此, 两次污染过程主要受燃煤排放的影响, 而清洁时段受燃煤排放和生物质燃烧的共同影响。

当 OC/EC 值超过 2 时, 可以认为存在二次反应生成的二次有机碳 (secondary organic carbon, SOC)^[48]。由图 6 可知, 各时段均存在 SOC 污染。通过 OC/EC 最小比值法可以估计 SOC 的浓度, 计算公式为:

$$\text{SOC} = \text{OC} - \text{EC} \times (\text{OC}/\text{EC})_{\min}$$

式中, $(\text{OC}/\text{EC})_{\min}$ 为样品中 OC/EC 的最小值。

本研究中 $(\text{OC}/\text{EC})_{\min}$ 选择 3.11 (12 月 4 日 11:00)、4.69 (12 月 6 日 16:00) 和 4.21 (12 月 13 日 16:00) 分别代表清洁时段与两次污染过程的最小值。经计算清洁时段与两次污染过程中平均 $\rho(\text{SOC})$ 分别为 (3.90 ± 2.50) 、 (1.92 ± 0.91) 和 $(4.19 \pm 1.61) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。第二次污染过程 SOC 值更高, 该阶段二次有机组分有明显地生成。这是因为冬季本地燃煤排放使得有机物增多, 污染期间大气颗粒物难以扩散, 前体物滞留时间长, 促进二次反应的发生, 因此 SOC 浓度较高^[46]。

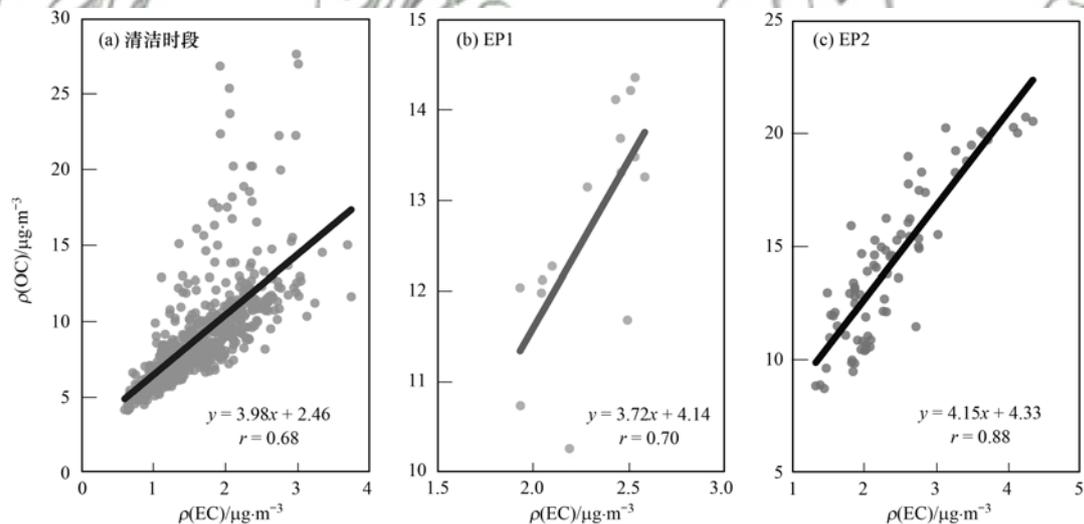


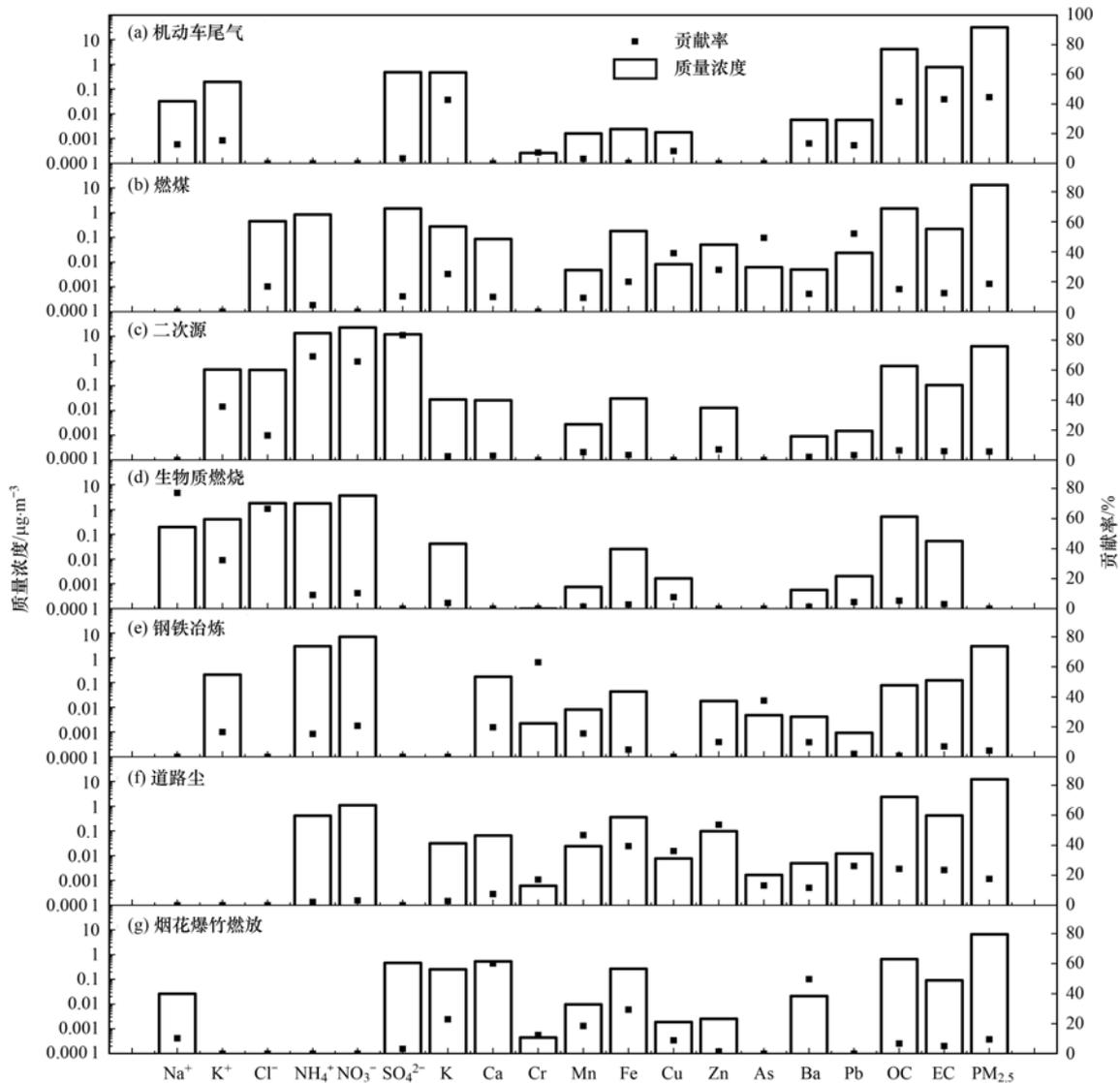
图6 观测期间不同污染时期碳组分对比

Fig. 6 Comparison of the concentration of the carbonaceous components in different pollution periods during the observation period

2.3 PM_{2.5} 实时源贡献

本研究解析得到的 7 类因子源成分谱如图 7 所示。因子 1 中 EC (43.2%)、OC (41.6%) 和 K (42.8%) 的贡献率较大, 定义因子 1 为机动车尾气^[49]; 因子 2 中贡献率较高的物种为 Pb (52.0%) 和 As (49.3%), Pb 来自化石燃料的燃烧^[50], As 被认为是煤燃烧的示踪剂^[51], 定义因子 2 为燃煤; 因子 3 中贡献率较高的物种为 SO_4^{2-} (83.3%)、 NH_4^+ (69.1%) 和 NO_3^- (65.7%), 定义因子 3 为二次源; 因子 4 中 Na^+ (77.1%)、 Cl^- (66.7%) 和 K^+

(32.3%) 的占比较高, Cl^- 易在生物质燃烧排放的颗粒物中富集^[52], K^+ 是生物质燃烧的标识性元素^[53], 定义因子 4 为生物质燃烧; 因子 5 中贡献较高的是 Cr (63.1%) 和 As (37.5%), Cr 主要来自钢铁制造、镀铬和不锈钢生产等冶炼过程^[54], As 也大量存在于冶炼行业排放的污染物中^[55], 定义因子 5 为钢铁冶炼; 因子 6 中 Zn (53.7%)、Mn (46.8%)、Fe (39.4%) 和 Cu (36.1%) 等地壳元素贡献率较高, Zn、Mn 和 Fe 大量存在于刹车和车辆轮胎的磨损粉尘中^[56], 定义因子 6 为道路尘; 因子 7 中

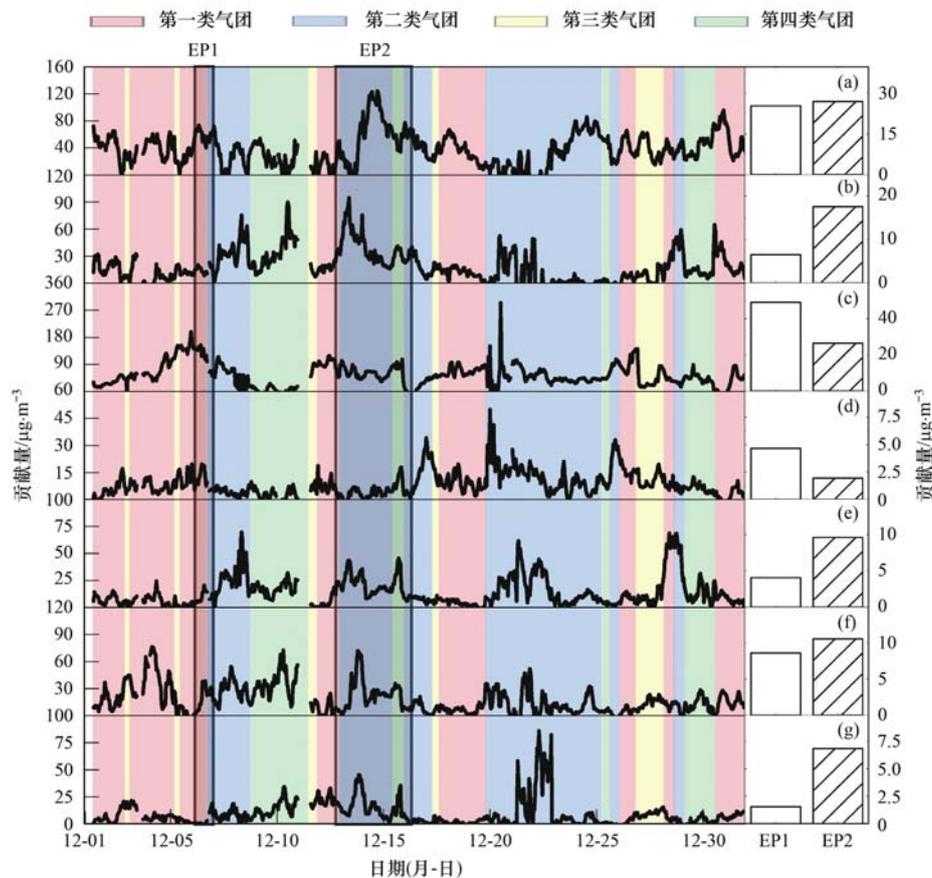
图7 12月武汉市大气PM_{2.5}源成分谱Fig. 7 Source profiles of PM_{2.5} in Wuhan in December

Ca (60.1%)、Ba (49.7%)、Fe (29.3%) 和 K (22.8%) 等贡献率高, Ca 是矿质组成元素之一, 在烟花爆竹制作过程中常用粘土封住爆竹的两端^[57], Ba 是烟花爆竹中主要的火焰着色剂^[58], 烟花爆竹中常用 KNO₃ 作为燃烧主要的氧化剂^[59~62]. 此外, 该因子的贡献量呈现特殊时段高值的特征, 在 12 月 22 日 (冬至) 前后出现大幅突增及回落, 最高值出现在 12 月 22 日 07:00 (86.0 μg·m⁻³, 图 8), 推测为庆祝冬至节气燃放烟花爆竹所致, 因此定义因子 7 为烟花爆竹燃放.

图 8 给出了不同气团来向下, 各类污染源贡献的实时变化. 观测期间对武汉市大气 PM_{2.5} 贡献最大的是二次源 (34.1%), 其次是机动车尾气 (23.7%)、燃煤 (11.5%)、道路尘 (10.9%)、钢铁冶炼 (8.7%) 和烟花爆竹燃放 (5.7%), 贡献率最小的是生物质燃烧 (5.3%). 对比两次污染过程的来

源特征可以发现, 第一次污染过程中二次源贡献率最高 (49.2%), 其次机动车尾气的贡献为 25.5%; 第二次污染过程是以机动车尾气 (27.0%)、二次源 (26.5%) 和燃煤 (17.6%) 为主要贡献源. 与第一次污染过程相比, 二次源和生物质燃烧的贡献比例明显下降, 而其余 5 类源的贡献率均有不同程度地上升, 其中第二次污染过程燃煤的贡献率上升了 2.7 倍.

在 4 类气团中, 第二类气团反映了局地排放的影响. 12 月 6 日 18:00 至 8 日 19:00 阶段为第二类气团主导, 该阶段钢铁冶炼与燃煤呈现出相似的峰值变化, 两者的贡献量均从 12 月 7 日 01:00 开始波动上升, 于 12 月 8 日 08:00 同时达到最高值 (69.6 μg·m⁻³ 和 75.5 μg·m⁻³). 12 月 12 日 23:00 至 15 日 09:00 同样为第二类气团主导, 该阶段烟花爆竹燃放、道路尘、钢铁冶炼、燃煤和机动车尾气均出



(a) 机动车尾气, (b) 燃煤, (c) 二次源, (d) 生物质燃烧, (e) 钢铁冶炼, (f) 道路尘, (g) 烟花爆竹燃放

图8 观测期间不同气团来向下各类污染源贡献量的时间序列及污染过程的来源特征对比

Fig. 8 Time series of contributions of pollution sources under different air masses during the observation period and comparison of source characteristics of pollution processes

现明显的峰值. 其中, 当烟花爆竹燃放在 12 月 13 日 19:00 出现最高值 ($45.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 时, 道路尘也同样达到最高贡献量 ($71.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). Tian 等^[63] 的研究认为烟花爆竹的引爆会将已沉积在地面上的物质发生再悬浮, 从而使得颗粒物中地壳元素含量升高. 此外, 机动车尾气和燃煤均在该阶段达到最高贡献量 ($124 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $84.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). 上述两个时段, 钢铁冶炼、燃煤、道路尘和机动车尾气排放贡献同时表现出高值, 这与 Li 等^[64] 基于船舶走航观测的研究结果相似, 即长江沿线城市中与煤燃烧相关的 PM 污染十分严重; 长江沿线道路和建筑活动使得各类尘再悬浮呈现高值; 沿江分布的造船厂和钢铁冶炼等工业呈现高贡献值. 这反映出沿江密集分布的工业过程、长江沿线各类工业企业原料和产品的运输导致的机动车尾气排放, 以及道路尘对颗粒物的影响.

此外, 12 月 19 日 17:00 至 26 日 01:00 阶段值得注意. 生物质燃烧在 12 月 20 日 00:00 呈现高值 ($49.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 紧接着于 04:00 快速降低, 降幅达到 0.5 倍. 同时, 二次源贡献量快速升高, 至 12:00 达到最高值 ($295 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). 时下气团为局地排放的第二类气团, 其对应的气象条件为高湿和低风速, 风

速最低值达到 $0.31 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 风向由西北风转为东北风. 二次离子呈现明显峰值, $\rho(\text{NH}_4^+)$ 和 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 的最高值分别达到 $21.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $24.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 自 00:00 开始逐步上升, 至 12:00 到达最高值 ($25.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). $\rho(\text{K}^+)$ 自 01:00 开始逐步上升至 13:00 到达最高值 ($1.16 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), $\rho(\text{Cl}^-)$ 自 02:00 开始上升至 05:00 达到最高值 ($6.77 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 此后大幅下降, 降幅达到 0.5 倍. Li 等^[65] 的研究表明生物质燃烧排放的新鲜颗粒物中含有大量的 KCl, 少量与 SO_4^{2-} 结合生成 K_2SO_4 . 此后, 在颗粒物传输过程中, KCl 粒子与 SO_2 之间发生光化学氧化和水相反应, 形成 K_2SO_4 并释放气态 HCl. 这反映出 04:00 之后生物质燃烧排放烟羽老化, KCl 粒子向硫酸盐和硝酸盐发生转化^[66].

2.4 PM_{2.5} 源贡献的日变化

各类源贡献的昼夜变化如图 9 所示, 钢铁冶炼的贡献量在 08:00 出现最高值 [$(17.5 \pm 18.8) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$], 01:00 为最低值 [$(10.4 \pm 10.9) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$], 呈现白天贡献量高和夜晚贡献量低的规律, 这与钢铁冶炼过程变化有关^[67]. 生物质燃烧的

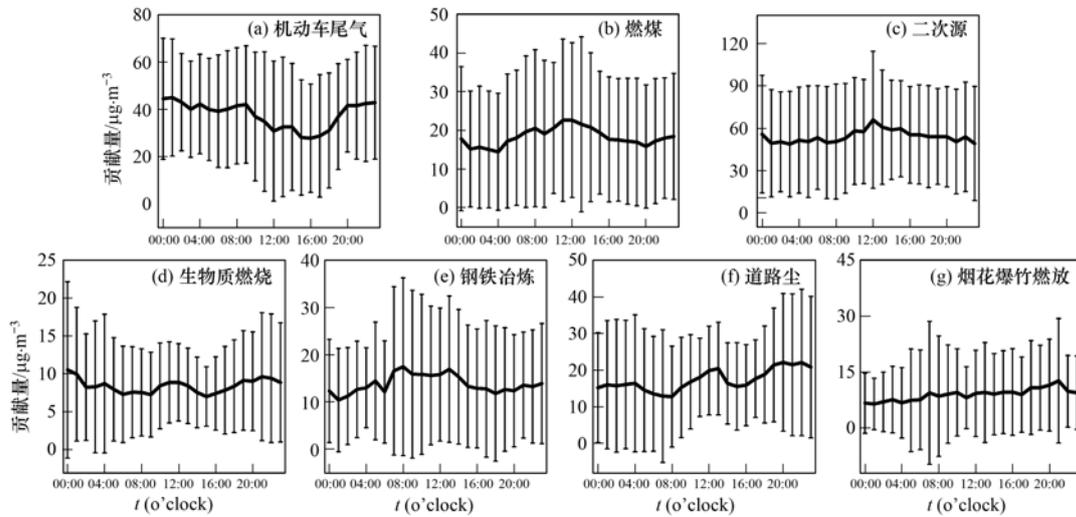


图9 观测期间各类污染源贡献量的昼夜变化

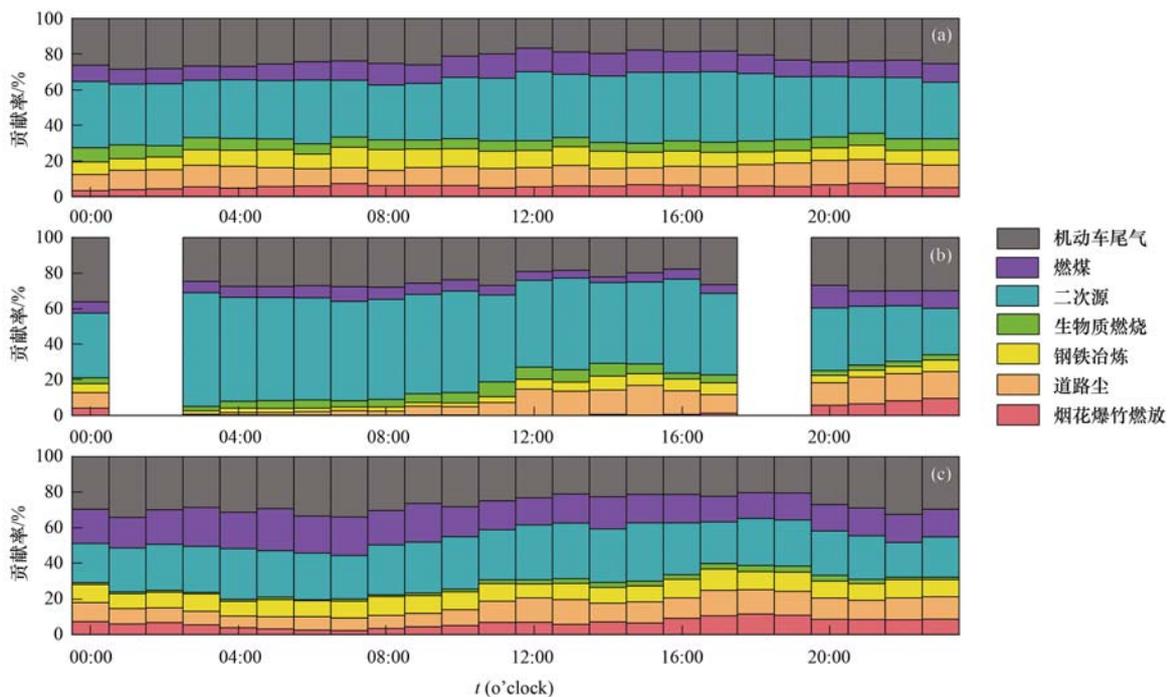
Fig. 9 Diurnal variations in contributions of pollution sources during the observation period

贡献量在中午 12:00 [$(8.92 \pm 5.09) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] 和晚上 22:00 [$(9.67 \pm 8.43) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] 出现两个峰值,推测与城市周边地区居民仍使用生物质燃烧做饭和取暖有关. 机动车尾气的贡献量在上午 09:00 [$(42.1 \pm 24.8) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] 和晚上 20:00 [$(41.6 \pm 19.5) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] 出现两个明显峰值,这反映了早、晚交通高峰. 其贡献量的最高值出现在凌晨 01:00 [$(45.0 \pm 24.7) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$], 这与武汉市货车限行政策有关^[68].

图 10 对比了清洁时段与两次污染过程各类源的贡献. 第一次污染过程与清洁时段及第二次污染

过程相比,二次源贡献明显升高,且为占比最高的源. 二次源的贡献率在凌晨 03:00 达到最高值 (64.0%),说明夜间高湿环境促进了液相反应的发生,进而对二次离子的生成产生较大的促进作用^[69].

第二次污染过程与其它时段相比,二次源和生物质燃烧的贡献比例明显下降,约为清洁时段的 0.7 和 0.3 倍; 机动车尾气、燃煤、钢铁冶炼和道路尘的贡献率升高,增幅达到 1.2、1.7、1.1 和 1.1 倍. 如前所述,上述源类的贡献高值,气团来向为武汉东部短距离传输,反映了沿江密集的工业过程、



(a) 清洁时段, (b) EPI, (c) EP2; EPI 共持续 22 h, 其中 18:00 ~ 19:00 因 TE 和碳组分数据缺失所以模型输出各类源的贡献量空白

图 10 清洁和污染时段各类污染源贡献率的昼夜变化

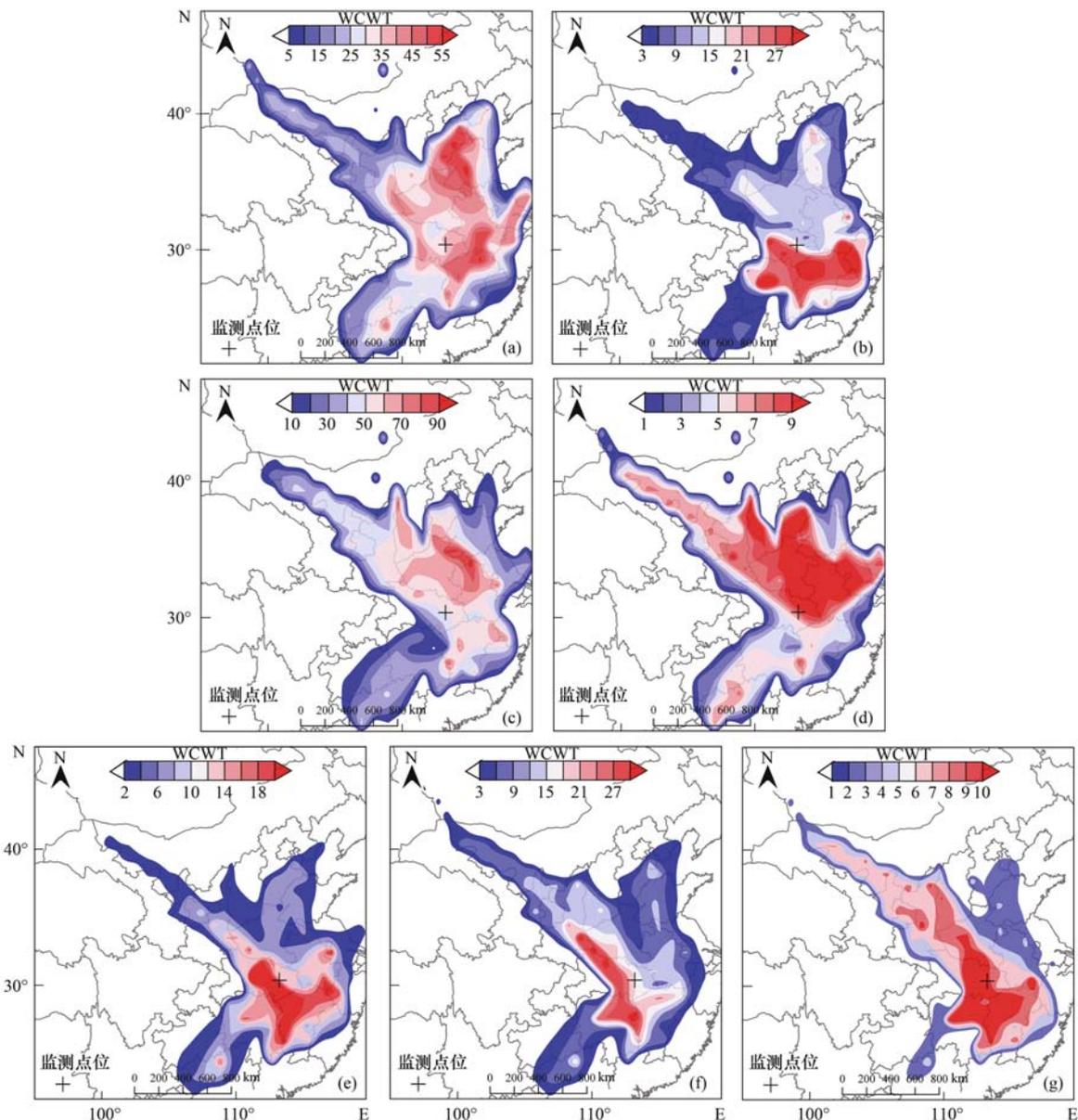
Fig. 10 Diurnal variations in contribution rates of pollution sources during clean and pollution periods

运输尾气排放和扰动引起的尘贡献. 由此可见, 武汉东部地区, 长江沿线的工业分布对于武汉市冬季大气 PM_{2.5} 的影响需要引起重视.

2.5 各类源的潜在贡献源区

根据气团后向轨迹, 叠加 PMF 实时源解析结果, 采用 CWT 模型加权计算 WCWT 值, 从而得到各污染源的潜在源区. 如图 11 所示, 二次源主要受山东西南部菏泽、安徽合肥以北地区和河南除南阳以外地区的影响. 机动车尾气主要受河北沧州以南地区、山东泰安以西地区、江西南昌以西北部地区、安徽铜陵以南地区和湖北武汉以东地区的影响. 烟花爆竹燃放主要受湖北荆州以东地区、湖南益阳以东北部地区、江西吉安以北地区和河南南阳的影

响. 近些年尽管地方政府出台了严格的烟花燃放管控措施, 部分城市如北京^[70]、上海^[71]和深圳^[72]等地因烟花燃放造成的霾污染仍时有发生. Yao 等^[73]的研究发现, 由于城区禁燃的相关规定, 部分烟花燃放开始由市区向郊区转移, 导致上海郊区在除夕夜前后 PM_{2.5} 浓度要明显高于市区. 湖南与江西省是我国重要的烟花爆竹生产基地. 与其它地区相比, 其高贡献量可能是由于存在更多的烟花爆竹售卖点和燃放量. 钢铁冶炼主要受湖北荆门以东地区、江西吉安以北地区和安徽黄山的部分影响. 燃煤与其有相似的贡献量空间分布, 而目前钢铁冶炼、工业生产的锅炉主要以煤为燃烧燃料^[74]. 这表明长江两岸分布的各种大型电厂、石化和钢铁工业、农田和船舶



(a) 机动车尾气, (b) 燃煤, (c) 二次源, (d) 生物质燃烧, (e) 钢铁冶炼, (f) 道路尘, (g) 烟花爆竹燃放

图 11 观测期间 PM_{2.5} 各贡献源的潜在源区

Fig. 11 Potential source regions for contributing sources of PM_{2.5} during the observation period

排放对长江航道的区域空气质量产生的影响^[75]。

生物质燃烧在研究区及其以北的区域呈现出较高的贡献量,主要集中在河南全部地区、安徽除黄山和宣城以外地区、江苏镇江以北地区、河北保定以南地区和山西吕梁以南地区,而研究区以南的区域贡献量较低。生物质燃烧排放主要集中在农业活动密集、农村人口数量多的区域^[76]。Wu 等^[77]的研究表明,东北平原、华北平原、北方干旱半干旱区和黄土高原的秸秆焚烧(田间和室内)是生物质燃烧排放的主要来源,平均贡献率为 73%。由此,冬季华北平原地区生物质燃烧排放的污染物经区域传输会对武汉产生影响。

3 结论

(1) 2019 年 12 月 武汉市大气平均 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 为 $(75.1 \pm 29.2) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 超出二级浓度限值。观测期间共有两次污染过程,第一次污染过程主要受来自山西省西南部经由河南中东部传输至观测点的气团(35.5%)影响;第二次污染过程则主要来自安徽省西南部经长江航道传输至观测点的气团(40.6%)为主。第一次污染过程中水溶性离子升高是 $\text{PM}_{2.5}$ 呈现高值的主要原因, $\rho(\text{NH}_4^+)$ 、 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 和 $\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 分别是清洁时段的 1.6、1.7 和 2.1 倍;第二次污染过程中二次有机组分有明显的生成。

(2) 观测期间对武汉市大气 $\text{PM}_{2.5}$ 贡献最大的是二次源(34.1%),其次是机动车尾气(23.7%)、燃煤(11.5%)、道路尘(10.9%)、钢铁冶炼(8.7%),烟花爆竹燃放(5.7%),贡献率最小的是生物质燃烧(5.3%)。

(3) 钢铁冶炼贡献量的日变化最高值出现在 08:00 [$(17.5 \pm 18.8) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$], 01:00 为最低值 [$(10.4 \pm 10.9) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$], 呈现白天贡献量高和夜晚贡献量低的现象;生物质燃烧的贡献量在中午 12:00 [$(8.92 \pm 5.09) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] 和晚上 22:00 [$(9.67 \pm 8.43) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] 出现双峰;机动车尾气的贡献量在上午 09:00 [$(42.1 \pm 24.8) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] 和晚上 20:00 [$(41.6 \pm 19.5) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] 出现明显峰值。

(4) 第一次污染过程中,二次源贡献率明显升高且为占比最高的污染来源,说明西北来向气团下的长距离传输有利于二次组分的生成和老化;第二次污染过程中,机动车尾气、燃煤、钢铁冶炼和道路尘的贡献率升高,主要分布在湖北、江西西北部地区和安徽南部地区,反映出沿江密集分布的工业过程排放、工业原材料和产品运输导致的尾气排放和运输扰动产生的道路扬尘等对于武汉市冬季大气 $\text{PM}_{2.5}$ 的影响。

(5) 生物质燃烧主要集中在河南、安徽除黄山和宣城以外地区、江苏镇江以北地区、河北保定以南地区和山西吕梁以南地区;观测期间发现传输贡献高值($49.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),传输老化导致二次组分贡献增多。冬季华北平原区域生物质燃烧排放经传输对武汉大气 $\text{PM}_{2.5}$ 的影响不容忽视。

参考文献:

- [1] Wang J, Hu Z M, Chen Y Y, *et al.* Contamination characteristics and possible sources of PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ in different functional areas of Shanghai, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **68**: 221-229.
- [2] Hu W Y, Zhao T L, Bai Y Q, *et al.* Importance of regional $\text{PM}_{2.5}$ transport and precipitation washout in heavy air pollution in the Twain-Hu Basin over Central China: Observational analysis and WRF-Chem simulation [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **758**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143710.
- [3] Guo J P, Lou M Y, Miao Y C, *et al.* Trans-Pacific transport of dust aerosols from East Asia: Insights gained from multiple observations and modeling[J]. *Environmental Pollution*, 2017, **230**: 1030-1039.
- [4] Miao Y C, Guo J P, Liu S H, *et al.* Relay transport of aerosols to Beijing-Tianjin-Hebei region by multi-scale atmospheric circulations[J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **165**: 35-45.
- [5] Jiang C, Wang H, Zhao T, *et al.* Modeling study of $\text{PM}_{2.5}$ pollutant transport across cities in China's Jing-Jin-Ji region during a severe haze episode in December 2013[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(10): 5803-5814.
- [6] Yu S C, Zhang Q Y, Yan R C, *et al.* Origin of air pollution during a weekly heavy haze episode in Hangzhou, China[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2014, **12**(4): 543-550.
- [7] Wang H L, Qiao L P, Lou S R, *et al.* Chemical composition of $\text{PM}_{2.5}$ and meteorological impact among three years in urban Shanghai, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, **112**: 1302-1311.
- [8] Fu X, Cheng Z, Wang S X, *et al.* Local and regional contributions to fine particle pollution in winter of the Yangtze River Delta, China[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2016, **16**(4): 1067-1080.
- [9] Chen Q, Sheng L F, Gao Y, *et al.* The effects of the trans-regional transport of $\text{PM}_{2.5}$ on a heavy haze event in the Pearl River Delta in January 2015[J]. *Atmosphere*, 2019, **10**(5), doi: 10.3390/atmos10050237.
- [10] Shen L J, Wang H L, Zhao T L, *et al.* Characterizing regional aerosol pollution in central China based on 19 years of MODIS data: Spatiotemporal variation and aerosol type discrimination [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **263**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114556.
- [11] Yu C, Zhao T L, Bai Y Q, *et al.* Heavy air pollution with a unique "non-stagnant" atmospheric boundary layer in the Yangtze River middle basin aggravated by regional transport of $\text{PM}_{2.5}$ over China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, **20**(12): 7217-7230.
- [12] Chen B, Xu X D. Climatology of wintertime long-distance transport of surface-layer air masses arriving urban Beijing in 2001-2012[J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **151**: 70-81.
- [13] 姚森, 张哈宇, 王晓琦, 等. 2016 年 1 月京津冀地区大气污染特征与多尺度传输量化评估[J]. *环境科学*, 2021, **42**(2): 534-545.

- Yao S, Zhang H Y, Wang X Q, *et al.* Air pollution characteristics and quantitative evaluation of multi-scale transport in the Beijing-Tianjin-Hebei region in January, 2016 [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(2): 534-545.
- [14] Kong S F, Han R, Bai R P, *et al.* Receptor modeling of PM_{2.5}, PM₁₀ and TSP in different seasons and long-range transport analysis at a coastal site of Tianjin, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**(20): 4681-4694.
- [15] Ding A J, Fu C B, Yang X Q, *et al.* Ozone and fine particle in the western Yangtze River Delta: an overview of 1 yr data at the SORPES station [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(11): 5813-5830.
- [16] 李瑞, 李清, 徐健, 等. 秋冬季区域性大气污染过程对长三角北部典型城市的影响 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(4): 1520-1534.
- Li R, Li Q, Xu J, *et al.* Regional air pollution process in winter over the Yangtze River Delta and its influence on typical Northern cities [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(4): 1520-1534.
- [17] Fu X, Wang S X, Cheng Z, *et al.* Source, transport and impacts of a heavy dust event in the Yangtze River Delta, China, in 2011 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(3): 1239-1254.
- [18] Cheng S Y, Wang F, Li J, *et al.* Application of trajectory clustering and source apportionment methods for investigating trans-boundary atmospheric PM₁₀ pollution [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2013, **13**(1): 333-342.
- [19] Gai H Y, Chen W H, Dai W, *et al.* Source apportionment of PM_{2.5} in Guangzhou combining observation data analysis and chemical transport model simulation [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **116**: 262-271.
- [20] Lu X C, Yao T, Li Y, *et al.* Source apportionment and health effect of NO_x over the Pearl River Delta region in southern China [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **212**: 135-146.
- [21] Sun J J, Huang L, Liao H, *et al.* Impacts of regional transport on particulate matter pollution in China: a review of methods and results [J]. *Current Pollution Reports*, 2017, **3**(3): 182-191.
- [22] Dall'Osto M, Querol X, Amato F, *et al.* Hourly elemental concentrations in PM_{2.5} aerosols sampled simultaneously at urban background and road site during SAPUSS-diurnal variations and PMF receptor modelling [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(8): 4375-4392.
- [23] Morishita M, Keeler G J, Kamal A S, *et al.* Identification of ambient PM_{2.5} sources and analysis of pollution episodes in Detroit, Michigan using highly time-resolved measurements [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(8): 1627-1637.
- [24] Xu Q C, Wang S X, Jiang J K, *et al.* Nitrate dominates the chemical composition of PM_{2.5} during haze event in Beijing, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **689**: 1293-1303.
- [25] Liu Y, Zheng M, Yu M Y, *et al.* High-time-resolution source apportionment of PM_{2.5} in Beijing with multiple models [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(9): 6595-6609.
- [26] Gao J J, Wang K, Wang Y, *et al.* Temporal-spatial characteristics and source apportionment of PM_{2.5} as well as its associated chemical species in the Beijing-Tianjin-Hebei region of China [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **233**: 714-724.
- [27] Peng X, Shi G L, Gao J, *et al.* Characteristics and sensitivity analysis of multiple-time-resolved source patterns of PM_{2.5} with real time data using Multilinear Engine 2 [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **139**: 113-121.
- [28] Gao J, Peng X, Chen G, *et al.* Insights into the chemical characterization and sources of PM_{2.5} in Beijing at a 1-h time resolution [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **542**: 162-171.
- [29] Tian Y Z, Zhang Y F, Liang Y L, *et al.* PM_{2.5} source apportionment during severe haze episodes in a Chinese megacity based on a 5-month period by using hourly species measurements: explore how to better conduct PMF during haze episodes [J]. *Atmospheric Environment*, 2020, **224**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117364.
- [30] Lv L L, Chen Y J, Han Y, *et al.* High-time-resolution PM_{2.5} source apportionment based on multi-model with organic tracers in Beijing during haze episodes [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **772**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144766.
- [31] Bressi M, Sciare J, Ghersi V, *et al.* Sources and geographical origins of fine aerosols in Paris (France) [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(16): 8813-8839.
- [32] Lyu X P, Wang Z W, Cheng H R, *et al.* Chemical characteristics of submicron particulates (PM_{1.0}) in Wuhan, Central China [J]. *Atmospheric Research*, 2015, **161-162**: 169-178.
- [33] 武汉市生态环境局. 2019年武汉市生态环境状况公报 [EB/OL]. http://hbj.wuhan.gov.cn/fbjd_19/xxgkml/zwgk/hjjc/hjzkgb/202006/t20200608_1369067.html, 2020-06-08.
- [34] Liu D R, Deng Q L, Ren Z G, *et al.* Variation trends and principal component analysis of nitrogen oxide emissions from motor vehicles in Wuhan City from 2012 to 2017 [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **704**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134987.
- [35] Lyu X P, Chen N, Guo H, *et al.* Chemical characteristics and causes of airborne particulate pollution in warm seasons in Wuhan, central China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(16): 10671-10687.
- [36] Zhang F, Wang Z W, Cheng H R, *et al.* Seasonal variations and chemical characteristics of PM_{2.5} in Wuhan, central China [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **518-519**: 97-105.
- [37] Liao W J, Zhou J B, Zhu S J, *et al.* Characterization of aerosol chemical composition and the reconstruction of light extinction coefficients during winter in Wuhan, China [J]. *Chemosphere*, 2020, **241**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.125033.
- [38] Zheng H, Kong S F, Chen N, *et al.* Significant changes in the chemical compositions and sources of PM_{2.5} in Wuhan since the city lockdown as COVID-19 [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **739**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140000.
- [39] Lu M M, Tang X, Wang Z F, *et al.* Investigating the transport mechanism of PM_{2.5} pollution during January 2014 in Wuhan, central China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2019, **36**(11): 1217-1234.
- [40] Jongejan P A C, Bai Y, Veltkamp A C, *et al.* An automated field instrument for the determination of acidic gases in air [J]. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 1997, **66**(4): 241-251.
- [41] Chow J C, Watson J G. Guideline on Speciated Particulate Monitoring [Z]. US EPA, 1998. 4-37.
- [42] Khlystov A, Wyers G P, Slanina J. The steam-jet aerosol collector [J]. *Atmospheric Environment*, 1995, **29**(17): 2229-2234.
- [43] Bauer J J, Yu X Y, Cary R, *et al.* Characterization of the sunset semi-continuous carbon aerosol analyzer [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2009, **59**(7): 826-833.

- [44] Paatero P, Tapper U. Positive matrix factorization: a non-negative factor model with optimal utilization of error estimates of data values[J]. *Environmetrics*, 1994, **5**(2): 111-126.
- [45] Chow J C, Watson J G, Lu Z Q, *et al.* Descriptive analysis of PM_{2.5} and PM₁₀ at regionally representative locations during SJVAQS/AUSPEX [J]. *Atmospheric Environment*, 1996, **30**(12): 2079-2112.
- [46] Schauer J J, Kleeman M J, Cass G R, *et al.* Measurement of emissions from air pollution sources. 2. C₁ through C₃₀ organic compounds from medium duty diesel trucks [J]. *Environment Science & Technology*, 1999, **33**(10): 1578-1587.
- [47] Schauer J J, Kleeman M J, Cass G R, *et al.* Measurement of emissions from air pollution sources. 5. C₁ through C₃₂ organic compounds from gasoline-powered motor vehicles [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**(6): 1169-1180.
- [48] Lian X B, Huang J P, Huang R J, *et al.* Impact of city lockdown on the air quality of COVID-19-hit of Wuhan city[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **742**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140556.
- [49] 肖致美, 徐虹, 李立伟, 等. 基于在线观测的天津市 PM_{2.5} 污染特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(10): 4355-4363.
Xiao Z M, Xu H, Li L W, *et al.* Characterization and source apportionment of PM_{2.5} based on the online observation in Tianjin [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(10): 4355-4363.
- [50] Tian H Z, Wang Y, Xue Z G, *et al.* Trend and characteristics of atmospheric emissions of Hg, As, and Se from coal combustion in China, 1980-2007 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10**(23): 11905-11919.
- [51] Zhou S Z, Davy P K, Huang M J, *et al.* High-resolution sampling and analysis of ambient particulate matter in the Pearl River Delta region of southern China; source apportionment and health risk implications[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(3): 2049-2064.
- [52] Yao X H, Lau A P S, Fang M, *et al.* Size distributions and formation of ionic species in atmospheric particulate pollutants in Beijing, China: 1-inorganic ions[J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(21): 2991-3000.
- [53] Duan F K, Liu X D, Yu T, *et al.* Identification and estimate of biomass burning contribution to the urban aerosol organic carbon concentrations in Beijing[J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(9): 1275-1282.
- [54] Song F, Gao Y. Size distributions of trace elements associated with ambient particulate matter in the affinity of a major highway in the New Jersey-New York metropolitan area [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(37): 6714-6723.
- [55] 邓林俐, 张凯山, 殷子渊, 等. 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[J]. *环境科学*, 2020, **41**(12): 5276-5287.
Deng L L, Zhang K S, Yin Z Y, *et al.* Characterization of metal pollution of regional atmospheric PM_{2.5} and its sources based on the PMF model [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(12): 5276-5287.
- [56] 张剑飞, 姜楠, 段时光, 等. 郑州市 PM_{2.5} 化学组分的季节变化特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(11): 4813-4824.
Zhang J F, Jiang N, Duan S G, *et al.* Seasonal chemical composition characteristics and source apportionment of PM_{2.5} in Zhengzhou[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(11): 4813-4824.
- [57] Kong S F, Li L, Li X X, *et al.* The impacts of firework burning at the Chinese Spring Festival on air quality: insights of tracers, source evolution and aging processes[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(4): 2167-2184.
- [58] Wang Y, Zhuang G S, Xu C, *et al.* The air pollution caused by the burning of fireworks during the lantern festival in Beijing[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(2): 417-431.
- [59] Moreno T, Querol X, Alastuey A, *et al.* Recreational atmospheric pollution episodes; inhalable metalliferous particles from firework displays[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(5): 913-922.
- [60] Dutcher D D, Perry K D, Cahill T A, *et al.* Effects of indoor pyrotechnic displays on the air quality in the Houston Astrodomo [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 1999, **49**(2): 156-160.
- [61] Kulshrestha U C, Rao T N, Azhagavel S, *et al.* Emissions and accumulation of metals in the atmosphere due to crackers and sparkles during Diwali festival in India [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(27): 4421-4425.
- [62] Drewnick F, Hings S S, Curtius J, *et al.* Measurement of fine particulate and gas-phase species during the New Year's fireworks 2005 in Mainz, Germany[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(23): 4316-4327.
- [63] Tian Y Z, Wang J, Peng X, *et al.* Estimation of the direct and indirect impacts of fireworks on the physicochemical characteristics of atmospheric PM₁₀ and PM_{2.5} [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(18): 9469-9479.
- [64] Li Z, Li C L, Ye X N, *et al.* Air quality in the middle and lower reaches of the Yangtze River channel: a cruise campaign [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(19): 14445-14464.
- [65] Li J, Pósfai M, Hobbs P V, *et al.* Individual aerosol particles from biomass burning in southern Africa: 2, Compositions and aging of inorganic particles [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, **108**(D13), doi: 10.1029/2002JD002310.
- [66] Li J, Anderson J R, Buseck P R. TEM study of aerosol particles from clean and polluted marine boundary layers over the North Atlantic [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, **108**(D6), doi: 10.1029/2002JD002106.
- [67] Merico E, Grasso F M, Cesari D, *et al.* Characterisation of atmospheric pollution near an industrial site with a biogas production and combustion plant in southern Italy[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **717**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137220.
- [68] Kleeman M J, Schauer J J, Cass G R. Size and composition distribution of fine particulate matter emitted from motor vehicles [J]. *Environment Science & Technology*, 2000, **34**(7): 1132-1142.
- [69] Ravishankara A R. Heterogeneous and multiphase chemistry in the troposphere[J]. *Science*, 1997, **276**(5315): 1058-1065.
- [70] Zhang Y Y, Wei J M, Tang A H, *et al.* Chemical characteristics of PM_{2.5} during 2015 Spring Festival in Beijing, China [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2017, **17**(5): 1169-1180.
- [71] Chang Y H, Deng C R, Cao F, *et al.* Assessment of carbonaceous aerosols in Shanghai, China - part 1: long-term evolution, seasonal variations, and meteorological effects [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(16): 9945-9964.
- [72] Lai Y H, Brimblecombe P. Regulatory effects on particulate pollution in the early hours of Chinese New Year, 2015 [J].

- Environmental Monitoring and Assessment, 2017, **189**(9), doi: 10.1007/s10661-017-6167-0.
- [73] Yao L, Wang D F, Fu Q Y, *et al.* The effects of firework regulation on air quality and public health during the Chinese Spring Festival from 2013 to 2017 in a Chinese megacity [J]. Environment International, 2019, **126**: 96-106.
- [74] Sun Z Y, Zong Z, Tian C G, *et al.* Reapportioning the sources of secondary components of PM_{2.5}: a combined application of positive matrix factorization and isotopic evidence [J]. Science of the Total Environment, 2021, **764**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142925.
- [75] Fu H B, Shang G F, Lin J, *et al.* Fractional iron solubility of aerosol particles enhanced by biomass burning and ship emission in Shanghai, East China [J]. Science of the total Environment, 2014, **481**: 377-391.
- [76] Wu J, Kong S F, Zeng X, *et al.* First high-resolution emission inventory of levoglucosan for biomass burning and non-biomass burning sources in China [J]. Environmental Science & Technology, 2021, **55**(3): 1497-1507.
- [77] Wu J, Kong S F, Wu F Q, *et al.* The moving of high emission for biomass burning in China: View from multi-year emission estimation and human-driven forces [J]. Environment International, 2020, **142**, doi: 10.1016/j.envint.2020.105812.

欢迎订阅 2022 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如工程索引 Ei Compendex;医学索引 MEDLINE; Scopus; 化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA): Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA): Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS): Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

国内统一连续出版物号:CN 11-1895/X

国际标准连续出版物号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205

国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;传真:010-62849343;E-mail:hjcx@rcees.ac.cn;网址:www.hjcx.ac.cn

CONTENTS

Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Urban Soils of Major Cities in China	PENG Chi, HE Ya-lei, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> (1)
Environmental Behaviors of Plant Growth Regulators in Soil; A Review	CHEN Liang, HOU Jie, HU Xiao-lei, <i>et al.</i> (11)
Preparation and Application of Magnetic Water Treatment Materials Based on Iron Sludge	ZENG Hui-ping, ZHAI Long-xue, LI Dong, <i>et al.</i> (26)
Meta-analysis of the Impact of Different Ozone Metrics on Total Mortality in China	RUAN Fang-fang, LIU Ji-xin, CHEN Zhi-wei, <i>et al.</i> (37)
Variation Characteristics and Potential Sources of the Mt. Haituo Aerosol Chemical Composition in Different Pollution Processes During Winter in Beijing, China	ZHAO De-long, WANG Fei, LIU Dan-tong, <i>et al.</i> (46)
Real-time Source Apportionment of PM _{2.5} and Potential Geographic Origins of Each Source During Winter in Wuhan	JIANG Shu-ning, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (61)
Spatiotemporal Distribution and Seasonal Characteristics of Regional Transport of PM _{2.5} in Yuncheng City	WANG Yun-tao, ZHANG Qiang, WEN Xiao-yu, <i>et al.</i> (74)
Three-dimensional Structure Variation of PM _{2.5} During Cold Front Advance in Eastern China	MOU Nan-nan, ZHU Bin, LU Wen (85)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nitrated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Atmosphere of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	LI Yan-xi, XIE Dan-ping, LI Yu-qing, <i>et al.</i> (93)
Atmospheric VOCs Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Large-scale Integrated Industrial Area and Surrounding Areas in Southwest China	LI Ling, ZHANG Dan, HU Wei, <i>et al.</i> (102)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Lhasa	YU Jia-yan, HAN Yan, CHEN Mu-lan, <i>et al.</i> (113)
Variation Characteristics of Ambient Volatile Organic Compounds (VOCs) Volume Fraction During Hangzhou COVID-19 Period	LIN Xu, YAN Ren-chang, JIN Jia-jia, <i>et al.</i> (123)
Role of Atmospheric VOCs in Ozone Formation in Summer in Shanghai Suburb	FANG Qin, NIU Si-ping, CHEN Yu-dong, <i>et al.</i> (132)
Characteristics of VOCs and Formation Potentials of O ₃ and SOA in Autumn and Winter in Tongchuan, China	YI Xiao-xiao, LI Jiang-hao, LI Guang-hua, <i>et al.</i> (140)
Emission Characteristics and Emission Factors of Volatile Organic Compounds from E-waste Dismantling and Recycling Processes	XIE Dan-ping, HUANG Zhong-hui, LIU Wang, <i>et al.</i> (150)
Nonlinear Response Relationship Between Ozone and Precursor Emissions in the Pearl River Delta Region Under Different Transmission Channels	WU Yong-kang, CHEN Wei-hua, YAN Feng-hua, <i>et al.</i> (160)
Characteristics of Ozone Pollution and Influencing Factors in Urban and Suburban Areas in Zibo	WANG Yu-yan, YANG Wen, WANG Xiu-yan, <i>et al.</i> (170)
Pollution Characteristics and Health Risk of Heavy Metals in Fugitive Dust Around Zhaotong City	PANG Xiao-chen, HAN Xin-yu, SHI Jian-wu, <i>et al.</i> (180)
Characteristics of Microplastic Present in Urban Road Dust	FANG Qin, NIU Si-ping, CHEN Yu-dong, <i>et al.</i> (189)
Stable Isotopes of Precipitation in the Eastern Tarim River Basin and Water Vapor Sources	SONG Yang, WANG Sheng-jie, ZHANG Ming-jun, <i>et al.</i> (199)
Characteristics and Risk Assessment of Antibiotic Contamination in Chishui River Basin, Guizhou Province, China	WU Tian-yu, LI Jiang, YANG Ai-jiang, <i>et al.</i> (210)
Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Surface Water and Groundwater in Wuding River Basin	LI Shu-jian, HAN Xiao, WANG Wen-hui, <i>et al.</i> (220)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nutrients and Heavy Metals in Sediments of the Fuhe River Influenced Area, Baiyangdian Lake	CHEN Xing-hong, LI Li-qing, ZHANG Mei-yi, <i>et al.</i> (230)
Occurrence Characteristics of Microplastics in Mangrove Sediments in the Jiulong River Estuary and the Association with Heavy Metals	LIU Chang-jun, LUO Zhuan-xi, YAN Yu, <i>et al.</i> (239)
Quantitative Analysis of the Correlation Between Macroenthos Community and Water Environmental Factors and Aquatic Ecosystem Health Assessment in the North Canal River Basin of Beijing	HU Xiao-hong, ZUO De-peng, LIU Bo, <i>et al.</i> (247)
Analysis on the Spatial Variability Mechanism of the Characteristic Water Quality Factors of Urban River Channel Reclaimed Water	LIU Quan-zhong, PENG Ke, SU Zhen-hua, <i>et al.</i> (256)
DOM Characteristics Analysis of Surface Sediment-overlying Water in Suzhou Landscape River Course	LI Chao-nan, HE Jie, ZHU Xue-hui, <i>et al.</i> (267)
Distribution of Typical Pollutants from Rainwater Sewer Sediments in Suzhou City	YE Rong, SHENG Ming-jun, JIANG Yong-bo, <i>et al.</i> (277)
Persistent Inhibition of Ammonium Released from Contaminated Sediments Through a Modified Zeolite and Biofilm System Enhanced by Signaling Molecules	XU Jin-lan, XU Yang, LI Xiu-min, <i>et al.</i> (285)
Effects of the Three Gorges Reservoir Operation on Vertical Distribution of Chlorophyll a and Environmental Factors in Tributaries	TIAN Pan, LI Ya-li, LI Ying-jie, <i>et al.</i> (295)
Characteristic Analysis of <i>nirS</i> Denitrifying Bacterial Community in Lijiahe Reservoir During Stratification	LIANG Wei-guang, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i> (306)
Spatial and Temporal Distribution of Aerobic Denitrification Bacterial Community in Sediments of Gangan Reservoir	ZHANG Zi-wei, CHEN Zhao-ying, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i> (314)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metal Elements for Groundwater in the Ningxia Region of China	WANG Xiao-dong, TIAN Wei, ZHANG Xue-yan (329)
Geochemical Characteristics and Driving Factors of High-Iodine Groundwater in Rapidly Urbanized Delta Areas: A Case Study of the Pearl River Delta	LU Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i> (339)
Multimedia Distribution Characteristics and Risk Assessment of 22 PPCPs in the Water Environment of Qingpu District, Yangtze River Delta Demonstration Area	ZHANG Zhi-bo, DUAN Yan-ping, SHEN Jia-hao, <i>et al.</i> (349)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of 209 Polychlorinated Biphenyls in Dongting Lake and the Inflow Rivers	HUANG Zhi-feng, ZHENG Bing-hui, YIN Da-qiang, <i>et al.</i> (363)
Estimation of Nitrous Oxide Emission from River System Based on Water Discharge and Dissolved Nitrous Oxide Concentration	LI Bing-qing, HU Min-peng, WANG Ming-feng, <i>et al.</i> (369)
Comparison Between Tributary and Main Stream and Preliminary Influence Mechanism of CO ₂ Flux Across Water-air Interface in Wanzhou in the Three Gorges Reservoir Area	QIN Yu, OUYANG Chang-yue, WANG Yu-xiao, <i>et al.</i> (377)
Preparation of Functional Attapulgite Composite and Its Adsorption Behaviors for Congo Red	LIAO Xiao-feng, ZHONG Jing-ping, CHEN Yun-nen, <i>et al.</i> (387)
Adsorption Characteristics and Long-term Effectiveness Evaluation of Iron-nitrogen Co-doped Biochar for Secondary Water-Soluble Organic Matter	WU Chen-xi, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i> (398)
Nitritation Performance of Zeolite Moving Bed Biofilm Reactor for Ammonium Wastewater Treatment	DENG Cui-lan, GUO Lu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (409)
Effect of Temperature on ANAMMOX Process in Sequencing Batch Biofilm Reactors; Nitrogen Removal Performance and Bacterial Community	WU Shan, WANG Shu-ya, WANG Fen, <i>et al.</i> (416)
Effects of Carriers on ANAMMOX Sludge Activity Recovery and Microbial Flora Characteristics	LUO Jing-wen, YANG Jin-jin, LI Shao-kang, <i>et al.</i> (424)
Spatial Distribution and Source Analysis of Soil Heavy Metals in a Small Watershed in the Mountainous Area of Southern Ningxia Based on PMF Model	XIA Zi-shu, BAI Yi-ru, WANG You-qi, <i>et al.</i> (432)
Heavy Metal Concentration Characteristics and Health Risks of Farmland Soils in Typical Pyrite Mining Area of the Central Zhejiang Province, China	CHENG Xiao-meng, SUN Bin-bin, WU Chao, <i>et al.</i> (442)
Risk Zoning of Heavy Metals in a Peri-urban Area in the Black Soil Farmland Based on Agricultural Products	WU Song-ze, WANG Dong-yan, LI Wen-bo, <i>et al.</i> (454)
Main Control Factors of Cadmium Content in Rice in Carbonate Rock Region of Guangxi Based on the DGT Technique	SONG Bo, XIAO Nai-chuan, MA Li-jun, <i>et al.</i> (463)
Inhibitory Effects of Soil Amendment Coupled with Water Management on the Accumulation of Cd and Pb in Double-Cropping Rice	LI Lin-feng, WANG Yan-hong, LI Yi-chun, <i>et al.</i> (472)
Characteristics and Health Risk Assessment of Cadmium, Lead, and Arsenic Accumulation in Leafy Vegetables Planted in a Greenhouse	DONG Jun-wen, GAO Pei-pe, SUN Hong-xin, <i>et al.</i> (481)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyls in E-waste Disposal Residue-Soil-Vegetable	ZHANG Ya-ping, LU Zhan-lu, WANG Xian-jiang, <i>et al.</i> (490)
Soil-crop Distribution and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides on Typical Agricultural Land in Southern Leizhou Peninsula	LIANG Xiao-hui, XIE Qi-lai, ZHENG Qian, <i>et al.</i> (500)
Effects of Heavy Metal Content on Fungal Community Structure in Urban Soil	GUO Da-lu, ZHANG Jian, SHEN Si, <i>et al.</i> (510)
Effects of Long-term Fertilization on Soil Nutrient Characteristics and Microbial Resource Restrictions in a Terrace on the Loess Plateau	WU Chun-xiao, GAO Xiao-feng, YAN Ben-shuai, <i>et al.</i> (521)
Microbial Composition and Diversity in Soil of <i>Torreya grandis</i> cv. <i>Merrillii</i> Relative to Different Cultivation Years After Land Use Conversion	JIANG Ni-wen, LIANG Chen-fei, ZHANG Yong, <i>et al.</i> (530)
Effect of Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizer and Organic Fertilizer on Soil Phosphatase Activity and Microbial Community	YANG Wen-na, YU Luo, LUO Dong-hai, <i>et al.</i> (540)
Extracellular Enzyme Stoichiometry and Microbial Metabolism Limitation During Vegetation Restoration Process in the Middle of the Qinling Mountains, China	XUE Yue, KANG Hai-bin, YANG Hang, <i>et al.</i> (550)
Effects of Biodegradable Film Raw Material Particles on Soil Properties, Wheat Growth, and Nutrient Absorption and Transportation	MIN Wen-hao, WANG Chun-li, WANG Li-wei, <i>et al.</i> (560)
Effects of Stalk Incorporation on Soil Carbon Sequestration, Nitrous Oxide Emissions, and Global Warming Potential of a Winter Wheat-Summer Maize Field in Guanzhong Plain	WAN Xiao-nan, ZHAO Ke-yue, WU Xiong-wei, <i>et al.</i> (569)