

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

长江经济带工业污染排放空间分布格局及其影响因素

李芸邑, 刘利萍, 刘元元



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年8月

第42卷 第8期
Vol.42 No.8

目次

上海市夏季臭氧污染特征及削峰方案	严茹莎, 王红丽, 黄成, 王倩, 安静宇 (3577)
天津市夏季不同臭氧浓度级别 VOCs 特征及来源	王文美, 高璟赞, 肖致美, 李源, 毕温凯, 李立伟, 杨宁, 徐虹, 孔君 (3585)
重庆市主城区 O ₃ 污染时期大气 VOCs 污染特征及来源解析	李陵, 李振亮, 张丹, 方维凯, 徐芹, 段林丰, 卢培利, 王锋文, 张卫东, 翟崇治 (3595)
汽车维修行业挥发性有机物排放特征及大气化学反应活性	陈鹏, 张月, 张梁, 熊凯, 邢敏, 李珊珊 (3604)
2016 冬季京津冀一次持续重度霾天气过程分析	毛曳, 张恒德, 朱彬 (3615)
北京与成都大气污染特征及空气质量改善效果评估	党莹, 张小玲, 饶晓琴, 康平, 何建军, 卢宁生, 华明, 向卫国 (3622)
郑州市 PM _{2.5} 组分、来源及其演变特征	赵孝因, 王申博, 杨洁茹, 马秋红, 刘洋, 张瑞芹 (3633)
上海市 PM _{2.5} 中重金属元素对 COVID-19 控制的高频响应	程凯, 常运华, 旷雅琼, 邹忠 (3644)
粤港澳大湾区吸收性气溶胶的解析	段家乐, 巨天珍, 黄蕊蕊, 梁卓红, 范佳晨 (3652)
河南省 2016~2019 年机动车大气污染物排放清单及特征	高丹丹, 尹沙沙, 谷幸珂, 卢轩, 张欢, 张瑞芹, 王玲玲, 齐艳杰 (3663)
广州地区室内灰尘中典型邻苯增塑剂的污染特征与暴露风险	刘晓途, 彭长凤, 陈达, 石玉盟, 汤书琴, 谭弘李, 黄维 (3676)
天津市主要河流和土壤中全氟化合物空间分布、来源及风险评价	武倩倩, 吴强, 宋帅, 任加国, 杨胜杰, 吴颜岐 (3682)
河网水源生态湿地水氢氧同位素分异特征	杨婷, 王阳, 徐静怡, 吴萍, 王为东 (3695)
重要饮用水源地天目湖水库有色可溶性有机物来源与组成特征	周蕾, 周永强, 张运林, 朱广伟 (3709)
城市不同类型水体有色可溶性有机物来源组成特征	俞晓琴, 崔扬, 陈慧敏, 朱俊羽, 李宇阳, 郭燕妮, 周永强, 韩龙飞 (3719)
白洋淀典型淀区沉积物间隙水溶解性有机物的光谱时空演变特征	周石磊, 陈召莹, 张甜娜, 张紫薇, 孙悦, 姚波, 崔建升, 李再兴, 罗晓 (3730)
夏季巢湖入湖河流溶解性有机质来源及其空间变化	宁成武, 包妍, 黄涛, 王杰 (3743)
洪泽湖浮游动物时空分布特征及其驱动因素	陈业, 彭凯, 张庆吉, 蔡永久, 张永志, 龚志军, 项贤领 (3753)
农业耕作对三峡水库支流库湾消落带土壤氮、磷含量及流失的影响	罗芳, 鲁伦慧, 李哲, 韦方强 (3763)
沱江流域总氮面源污染负荷时空演变	肖宇婷, 姚婧, 湛书, 樊敏 (3773)
微塑料对海水抗生素抗性基因的影响	周曙屹, 朱永官, 黄福义 (3785)
磺胺甲噁唑对海水养殖废水处理过程中抗性细菌及抗性基因的富集作用	王金鹏, 赵阳国, 胡钰博 (3791)
潮汐-复合流人工湿地系统优化及对抗生素抗性基因的去除效果	程羽霄, 吴丹, 陈铨乐, 高方舟, 杨永强, 刘有胜, 应光国 (3799)
三峡库区香溪河库湾土壤多环芳烃时空分布特征及风险评价	黄应平, 金蕾, 朱灿, 李锐, 谢平, David Johnson, 刘慧刚, 席颖 (3808)
长江经济带工业污染排放空间分布格局及其影响因素	李芸邑, 刘利萍, 刘元元 (3820)
淡水系统中 4 种塑料颗粒的老化过程及 DOC 产物分析	李婉逸, 刘智临, 苗令占, 侯俊 (3829)
DOM 对沉积物悬浮颗粒吸附铜的促进作用及机制	丁翔, 李忠武, 徐卫华, 黄梅, 文佳骏, 金昌盛, 周咪, 陈佳 (3837)
市政污水二级出水中溶解性有机质在紫外/氯处理过程中的转化特性	王雪凝, 张炳亮, 潘丙才 (3847)
亚硝酸盐不同生成方式对短程硝化反硝化除磷颗粒系统的影响	王文琪, 李冬, 高鑫, 张杰 (3858)
A ² /O 与倒置 A ² /O 工艺低温条件下的氨氮去除能力解析	李金成, 郭雅妮, 齐嵘, 杨敏 (3866)
厌氧氨氧化启动过程细菌群落多样性及 PICRUS2 功能预测分析	闫冰, 付嘉琦, 夏嵩, 易其臻, 桂双林, 吴九九, 熊继海, 魏源送 (3875)
活性污泥微生物群落结构及与环境因素响应关系分析	马切切, 袁林江, 牛泽栋, 赵杰, 黄崇 (3886)
汾河沿岸农田土壤微塑料分布特征及成因解析	朱宇恩, 王瀚萱, 李唐慧烟, 李华, 吴超, 张桂香, 阎敬 (3894)
基于 GIS 及 APCS-MLR 模型的兰州市主城区土壤 PAHs 来源解析	管贤贤, 周小平, 雷春妮, 彭熾雯, 张松林 (3904)
典型碳酸盐岩区耕地土壤剖面重金属形态迁移转化特征及生态风险评价	唐世琪, 刘秀金, 杨柯, 郭飞, 杨峰, 马宏宏, 刘飞, 彭敏, 李括 (3913)
大气 CO ₂ 摩尔分数升高对高、低应答水稻稻田 N ₂ O 排放的影响	于海洋, 黄琼, 王天宇, 张广斌, 马静, 朱春梧, 徐华 (3924)
椰糠生物炭对热区双季稻田 N ₂ O 和 CH ₄ 排放的影响	王紫君, 王鸿浩, 李金秋, 伍延正, 符佩娇, 孟磊, 汤水荣 (3931)
不同水分管理条件下添加生物炭对琼北地区水稻土 N ₂ O 排放的影响	王鸿浩, 谭梦怡, 王紫君, 符佩娇, 李金秋, 汤水荣, 伍延正, 孟磊 (3943)
物种多样性对铅锌尾矿废弃地植被及土壤的生态效应	杨胜香, 曹建兵, 李凤梅, 彭禧柱 (3953)
来利山锡尾矿区优势植物调查与生态修复潜力分析	秦芙蓉, 张仕颖, 夏运生, 张乃明, 吴程龙, 何忠俊, 岳献荣, 田森林 (3963)
黄河源区高寒沼泽湿地土壤微生物群落结构对不同退化的响应	林春英, 李希来, 张玉欣, 孙华方, 李成一, 金立群, 杨鑫光, 刘凯 (3971)
秸秆还田配施化肥对稻-油轮作土壤酶活性及微生物群落结构的影响	靳玉婷, 李先藩, 蔡影, 胡宏祥, 刘运峰, 付思伟, 张博睿 (3985)
镉胁迫对芒草根际细菌群落结构、共发生网络和功能的影响	陈兆进, 林立安, 李英军, 陈彦, 张浩, 韩辉, 吴乃成, Nicola Fohrer, 李玉英, 任学敏 (3997)
岩溶区稻田土壤真菌群落结构及功能类群特征	周军波, 靳振江, 肖筱怡, 冷蒙, 王晓彤, 潘复静 (4005)
锌冶炼地块剖面土壤对镉、铅的吸附特征及机制	刘凌青, 肖细元, 郭朝晖, 彭驰, 姜智超, 阳安迪 (4015)
不同土壤调理剂对土壤镉和邻-苯二甲酸酯迁移转化影响	王璨, 张煜行, 何明靖, 刘文新, 卢俊峰, 魏世强 (4024)
4 种钝化剂对污染水稻土中 Cu 和 Cd 的固持机制	丁园, 敖师营, 陈怡红, 肖亮亮 (4037)
叶施 L-半胱氨酸对水稻镉和矿质元素含量的影响	张雅芸, 王常荣, 刘月敏, 刘雅萍, 刘仲齐, 张长波, 黄永春 (4045)
镉对不同生长期籽粒菹植物螯合肽的影响	刘佳欣, 陈文清, 杨力, 李娜, 王宇豪, 康愉晨 (4053)
中国造纸业物质代谢演化特征	刘欣, 杨涛, 武慧君, 袁增伟 (4061)
《环境科学》征订启事 (3651) 《环境科学》征稿简则 (3718) 信息 (3836, 3885, 3893)	

上海市 $PM_{2.5}$ 中重金属元素对 COVID-19 控制的高频响应

程凯¹, 常运华^{1*}, 旷雅琼¹, 邹忠²

(1. 南京信息工程大学应用气象学院, 耶鲁大学-南京信息工程大学大气环境中心, 南京 210044; 2. 复旦大学环境科学与工程系, 上海市大气颗粒物污染防治重点实验室, 上海 200433)

摘要: 为研究城市大气重金属元素在新冠控制前、中(与春节重叠)、后的演化和来源,利用多金属在线分析仪于2020年1月1日至2月26日测定了上海市 $PM_{2.5}$ 中重金属元素的小时浓度. 利用 PMF 模型确定了 8 个来源. 结果表明,大部分元素的浓度呈现“V”字型的变化趋势,主要受烟花爆竹(特征性元素有 K、Cu、Ba)、Se 工业、道路扬尘(Ca、Fe、Ba)和机动车(Mn、Zn、Fe、Cu)等排放源影响. 但在新冠控制期间,K、Ba 和 Cu 浓度仍较高. 以 Cu 元素为例的特殊事件分析表明,其浓度高值在控制期前显著受到外来传输的影响,在控制期内主要来自于本地烟花爆竹排放的影响.

关键词: 重金属元素; 新冠控制; 高频响应; 来源; PMF 模型

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)08-3644-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202012049

High-frequency Responses to the COVID-19 Shutdown of Heavy Metal Elements in $PM_{2.5}$ in Shanghai

CHENG Kai¹, CHANG Yun-hua^{1*}, KUANG Ya-qiong¹, ZOU Zhong²

(1. Yale-NUIST Center on Atmospheric Environment, International Joint Laboratory on Climate and Environment Change (ILCEC), School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Atmospheric Particle Pollution and Prevention (LAP³), Department of Environmental Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: To study the evolution and sources of heavy metal elements in the urban atmosphere before, during (overlapped with Chinese Lunar New Year), and after China's COVID-19 shutdown, a multi-metal online analyzer was deployed to determine the trace elements in $PM_{2.5}$ in Shanghai from January 1 to February 26, 2020. Meanwhile, source apportionment of the hourly measured heavy metal concentrations was performed using a PMF model, in which eight sources were identified. The results show that the concentrations of most elements presented a “V-shaped” trend, which was mainly influenced by emissions from fireworks (K, Cu, Ba as indicative elements), Se-related industry, road dust (Ca, Fe, Ba), and motor vehicles (Mn, Zn, Fe, Cu). However, during the COVID-19 shutdown period, the concentrations of K, Ba, and Cu were high. Case-specific analysis suggested that prior to the shutdown period, the high concentrations of Cu were significantly influenced by long-range transport, which shifted to a dominant contribution from local fireworks during the shutdown period.

Key words: heavy metal elements; COVID-19 shutdown; high-frequency response; source; PMF model

细颗粒物($PM_{2.5}$)作为目前中国城市大气的主要污染物之一,容易通过呼吸系统进入肺部,严重危害着人体健康^[1~3]. 重金属元素虽是 $PM_{2.5}$ 中占比较少的部分,但大部分元素如 Hg、Pb 和 As 等在大气中长期存在,具有不易降解,持久毒性等特征^[4~6]. 重金属元素能够随着空气进入人体,并在人体中长期贮存,对人的生命健康产生严重威胁^[7,8]. 如 Hg 会对人体的中枢和神经系统产生损害,大量的 Se 和 Zn 则会损害人体的呼吸道和其他器官等^[9]. 城市大气中重金属的来源复杂,有必要对其可能的来源进行研究分析.

2020年初,为了控制疫情的传播,全国各地的道路被迫封锁,交通被禁止,人们都被隔离在家,原本的春节时间由1月24~31日延长到2月10日.

在春节期间采取控制疫情的措施严重影响着我国的经济. 这些措施在减少病毒传播的同时,也导致了能源需求、车辆运行和国内航班等的大量减少,工厂企业几乎全部关闭. 例如,在新年期间我国的交通运输和国内航班减少了70%以上^[10].

新冠疫情的社会代价巨大,但也为研究大气污染对极端人为减排的响应提供了一个良好的契机. 迄今为止一些研究发现在 COVID-19 严格的控制期

收稿日期: 2020-12-06; 修订日期: 2021-01-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(41975166, 41705100); 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室专项(19K01ESPCT); 上海市大气颗粒物污染防治重点实验室开放课题项目(FDLAP19001)

作者简介: 程凯(1995~),男,硕士研究生,主要研究方向为大气重金属元素的监测,来源解析及健康评估, E-mail: 1633504022@qq.com

* 通信作者, E-mail: changy13@nuist.edu.cn

间我国的空气质量在短时间内改善了^[11]. PM_{2.5}中重金属元素的浓度可以作为一些特定来源的代表,例如:K、Cu 和 Ba 元素是烟花燃烧的可靠示踪剂^[12],As 和 Se 通常被视为中国煤炭相关排放的特定示踪剂等^[13]. 由于技术条件的限制,以往的研究较少涉及大气重金属元素的在线监测,从而较难厘清重金属元素污染与排放的快速响应关系.

本研究利用新冠疫情机会,在城市人为活动控制的前中后测得上海市 PM_{2.5}中重金属元素的小时浓度,继而研究 PM_{2.5}中重金属元素对极端污染控制的响应,以期为今后城市大气重金属有关的来源解析及人群健康影响提供有益参考.

1 材料与分析

1.1 监测站点

上海气候湿润,四季分明,冬季寒冷潮湿. 与北京等中国北方城市相比,上海的空气污染较低,但按世界标准来看仍然很严重,特别是在冬季^[14,15]. 本监测地点位于上海市浦东(31.233°N, 121.545°E; 15 m). 该站点靠近人口密集的海陆家嘴地区. 站点周边除了道路交通外,没有其他与金属相关的强排放源,附近也没有高层建筑来阻碍气流运行. 因此可认为是各种重金属排放源错综影响的理想城市受体点^[16]. 本实验时间自 2020 年 1 月 1 日至 2 月 26 日. 根据新冠控制的时间节点,分为控制前(2020-01-01 ~ 2020-01-23)、控制中期(2020-01-24 ~ 2020-02-10)和控制后(2020-02-10 ~ 2020-02-26).

1.2 分析方法

利用 Xact 多金属在线分析仪(Model Xact™ 625; Cooper Environmental Services LLT, OR, USA),以小时精度测定上海大气 PM_{2.5}中的 14 种元素(Fe、K、Ca、Zn、Mn、Pb、Ba、Cu、As、Ni、Cr、Se、Hg、和 Au)的质量浓度. 具体而言,多金属在线分析仪通过采样泵提供抽力,将环境中的气体经过 PM_{2.5}切割器(Model VSCC-A, BGI Inc, MA, USA)以 16.7 L·min⁻¹的流量对空气进行采样,所吸入的样品收集在滤带. 滤带上产生的 PM_{2.5}沉积物由转轴进入分析区域,使用非破坏性的 XRF(X 射线荧光法)对所采样的金属元素的含量进行分析,并通过数据处理得出相应时间段的金属浓度,同时空白滤带部分进行下一样品的采集^[17]. 采样和分析几乎是连续同时进行的. 使用薄膜标准对每种目标金属元素进行 XRF 响应校准. 这些标准由多金属在线分析仪的制造商提供,通过将气相元素沉积在空白的核孔上来产生. 在气相沉积之前和之后称量已知面积的核

孔过滤器,来确定每种元素的浓度($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$). 1 h 分辨率的最低检出限($\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$)如下:Si(17.80)、K(1.17)、Ca(0.30)、V(0.12)、Cr(0.12)、Mn(0.14)、Fe(0.17)、Ni(0.10)、Cu(0.27)、Zn(0.23)、As(0.11)、Se(0.14)、Ag(1.90)、Cd(2.50)、Au(0.23)、Ba(0.39)、Hg(0.12)和 Pb(0.13)^[18].

1.3 正交矩阵因子分解(PMF)模型

PMF 模型是一种有效的源分配方法,用于解决污染源和量化源对颗粒物的贡献. 本研究采用 EPA PMF5.0 模型对 PM_{2.5}中元素的质量贡献和来源进行了量化. 对于元素,PMF 分析中的误差分数设置为 10%. 在本研究中,分析了 5 ~ 10 个因子的 PMF 源解析,并根据 Bootstrap(BS)和 dQ-controlled displacement of factor elements(DISPE)方法的不确定性分析确定了最终的因子数.

2 结果与讨论

2.1 数据概述和比较

本研究期间 PM_{2.5}中重金属元素的小时浓度时间序列演化如图 1 所示. 14 种重金属元素质量浓度的平均值和标准差从大到小逐个排列以及每种元素 3 个时间段浓度的平均值和标准差如图 2 所示.

在本研究中 K 元素浓度最高[(642.2 ± 552) $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$, mean ± 1 σ , 下同],其次是 Fe[(172.4 ± 152.3) $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$], Ca[(120.1 ± 178.1) $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$], Zn[(60.0 ± 75.8) $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$], Ba[(22.6 ± 22.1) $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$], Mn[(22.0 ± 33.2) $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$], Pb[(20.6 ± 19.3) $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$], Cu[(10.1 ± 8.3) $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$], As[(6.2 ± 5.3) $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$], Ni[(2.9 ± 2.2) $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$], Au[(2.6 ± 2.7) $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$], Hg[(2.2 ± 1.2) $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$], Se[(1.9 ± 1.9) $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$]和 Cr[(1.9 ± 2.9) $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$]. 根据中国(GB 3095-2012)和世卫组织(WHO)环境空气质量标准,Hg、As、Cr、Mn 和 Ni 大气浓度($\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$)的限值为:50(WHO 为 1000)、6(WHO 为 6.6)、0.025(WHO 无)、无(WHO 为 150)和 20(WHO 为 25). 本研究期间,上海市重金属元素浓度还未达到限值. 尽管如此,上海大气中大多数微量金属元素的浓度通常比欧洲和北美等地高一两个数量级,而通常与光州市等工业化城市的浓度水平相当^[18]. 上海有世界上最繁忙的集装箱港口, Ni 的 70% 是由远洋船舶发动机的重油燃烧排放的^[19].

2.2 3 个时期的元素浓度特征

如图 1 和图 2 所示,从整体来看, Ca、Mn、Fe、Zn 和 Cr 等元素的浓度在研究期内呈现为一个“V”

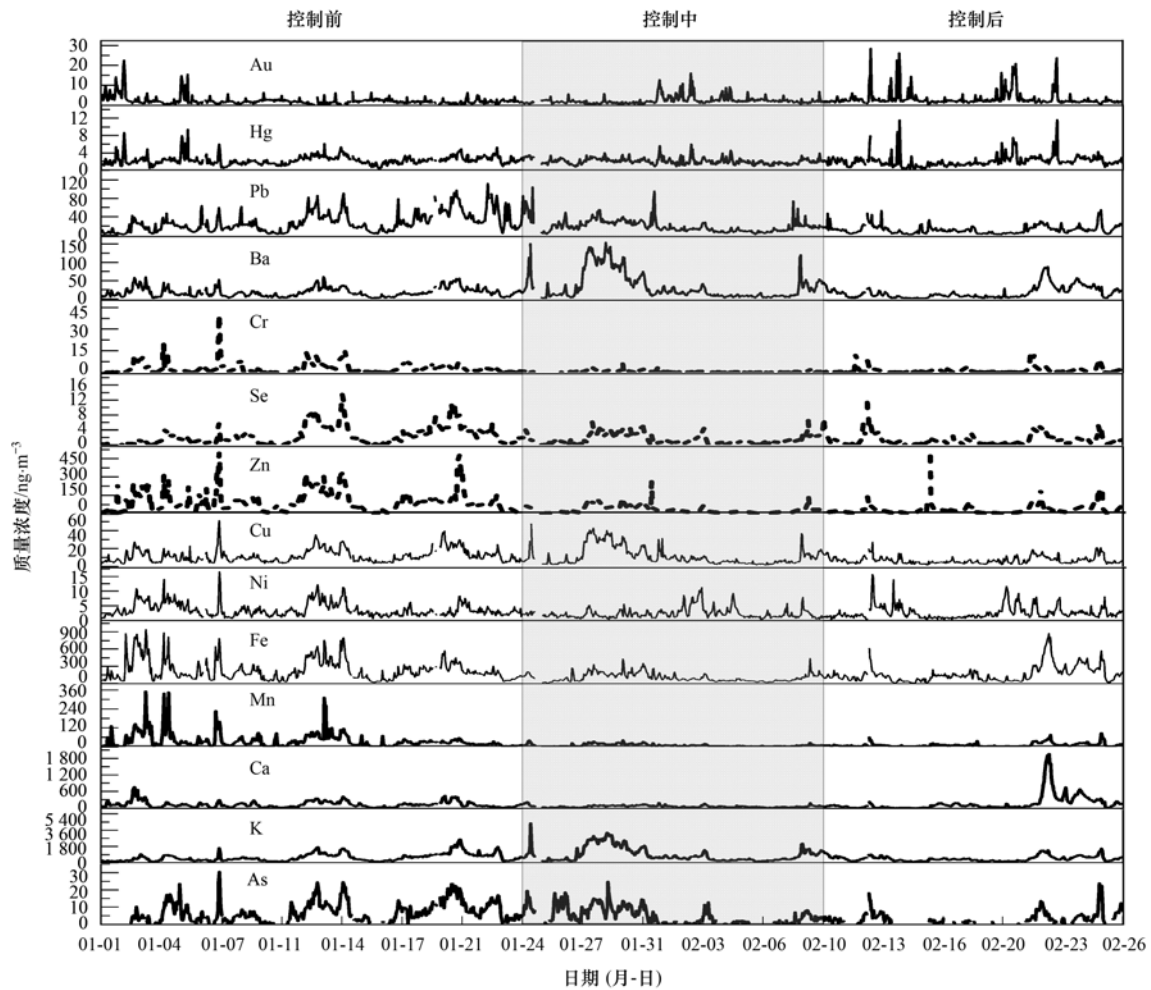


图1 2020年初上海大气PM_{2.5}中重金属元素浓度的小时时间序列演化

Fig. 1 Hourly time series of trace element concentrations in PM_{2.5}

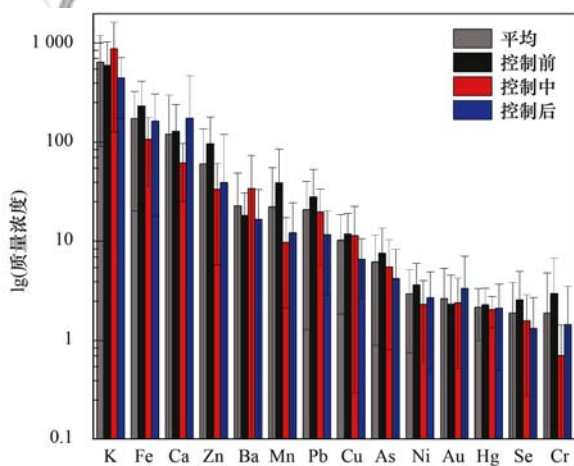


图2 重金属元素的平均质量浓度对比

Fig. 2 Comparison of the average mass concentrations of trace elements

字型的变化趋势. 其中 Mn、Cr、Zn、Fe 和 Ca 元素具有较大的浓度变化. Mn 在控制前的浓度为 $38.7 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 而在控制中期下降为 $9.6 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$, 下降幅度达到了 75%, 在控制后又增加到了 $12 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$; Cr 从控制前的 $3.0 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 下降到控制中期的 0.7

$\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$, 下降幅度达到了 70%, 在控制后又增加到 $2.1 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$; Zn 在控制前的浓度为 $96.0 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$, 在控制中期下降为 $33.3 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 下降了 65% 以上, 在控制后又增加到了 $38.8 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$; Fe 的浓度从控制前期的 $231.4 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 下降到控制中期的 $106.3 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$, 下降幅度约为 54%, 而在控制后又增加到了 $162.1 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$; Ca 在控制前的浓度值为 $128.0 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 而在控制中期下降为 $61.2 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$, 下降了 52% 左右, 在控制后增加为 $174.5 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$. Ni 和 Hg 在控制中期也有一定的降幅但变化较小. Au 在控制前和控制中期的变化很小, 在控制后期有一个明显的增幅. 以上结果表明受新冠疫情的影响大部分重金属元素的浓度在控制中期都有一定的降幅.

Pb、As 和 Se 这 3 种元素的浓度从控制前期到控制后期始终处于下降的趋势. Pb 的浓度值从控制前的 $27.9 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 下降到控制后的 $11.5 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$; As 的浓度值从控制前的 $7.6 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 下降到控制后的 $4.2 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$; Se 的浓度值从控制前的 $2.6 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 下降到控制后的 $1.3 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$. 这说明 Pb、As

和 Se 受疫情的影响较大,即使在复工复产后他们的浓度仍然处于一个较低的水平。

K、Cu 和 Ba 在控制期内的浓度依然很高。K 在控制前的浓度为 $595.8 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$,控制中期增加为 $879.3 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$,增加了大约 32%,控制后下降为 $445.3 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$; Ba 在控制前的浓度为 $18.1 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$,在控制中期达到了 $33.8 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$,增加了 46% 左右,控制后下降到了 $16.5 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$; Cu 在控制前期 ($11.7 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$) 和控制中期 ($11.3 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$) 浓度都很高,而控制后下降到了 $6.6 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 。K、Cu 和 Ba 的浓度变化可能与春节期间烟花爆竹的燃烧有关。

以上结果表明上海市重金属元素的浓度变化受人为排放的影响较大。为了进一步探究各种元素可能的来源,下文将对元素的来源进行进一步分析。

2.3 重金属来源分析

重金属的来源可能受到气象因素的影响,但有研究表明气象因子并不是造成 2020 年新年期间污染的主要原因^[10],重金属的浓度变化主要受到其他因素的影响。

在本研究中,使用 PMF 模型分析了 14 个被测元素,并对整个数据集进行了 5~9 个因子的求解,得出 8 个因子为最优解。图 3 给出了 PMF 模型识别的 8 个来源,图 4 是 PMF 模型识别的 8 个来源的日变化。

因子 1 被确认为车辆运输源,其特征是 Mn、Zn、Fe 和 Cu 的质量分数较大,分别占浓度的 80%、61%、43% 和 21%。从来源的日变化中可以看出,在 07:00~09:00 和 18:00~20:00 的浓度达到峰值,这与上下班的时间相一致,这说明这些元素与机动车相关。根据 Zhu 等^[20]的微量元素排放清单,超过 55% 的铜和大约 10% 的锌排放来自刹车和轮胎磨损。铜主要用于构成制动踏板主要含量的润滑剂和摩擦材料,而锌被添加到轮胎胎面以促进硫化过程^[21]。Fe 是刹车片的支撑材料,制动踏板的材料中也含有 Zn 和 Mn^[22,23]。因此 Mn、Zn、Fe 和 Cu 的来源归为车辆运输。

因子 2 被确认为船舶源,其特征是 Ni 的质量分数达到了 64%。有研究表明上海拥有世界上最繁忙的集装箱港口, Ni 大约 70% 是由船舶发动机的重油燃烧排放的^[19]。

因子 3 被确认为燃煤源,其特征是 As、Pb 和 Hg 的质量分数较大,其中 As 的质量分数达到了 95%, Pb 和 Hg 分别为 38% 和 23%。在中国, 73% 的 As 和 56% 的 Pb 的排放被发现是煤燃烧^[13]。因此, As、Pb 和 Hg 通常被视为中国煤炭相关排放的特定示踪剂^[24-26]。煤炭燃烧主要用于工业生产,而上海

作为中国第一大工业城市,其煤炭使用量位居中国前列。新冠疫情期间由于严格的限制措施,煤炭使用量大幅下降。

因子 4 被确认为 Se 工业源,其特征是 Se、Pb 和 K 的质量分数分别为 80%、36% 和 34%。Se 粉作为脱色剂在玻璃生产过程中被广泛应用,而玻璃生产是 Se 排放的主要来源,在玻璃生产过程中也有一定的 Pb 和 K 产生^[20]。

因子 5 被确认为金属冶炼源,其主要元素是 Au (95%) 和 Hg (53%)。有研究表明在冶炼过程中^[18],有色金属矿石中的 Au 和 Hg 等金属将不可避免地被蒸发释放到空气中^[27]。因此因子 5 来源于金属冶炼。

因子 6 被确认为道路扬尘源,其主要元素是 Ca、Fe 和 Ba,质量分数分别为 83%、28% 和 25%。Ca 可作为扬尘或沙尘的示踪元素。上海市位于中国东部沿海,很少受到来自中国西北部风尘和戈壁沙漠的地壳物质的远距离迁移^[15, 16, 28]。因此 Ca 可能来源于道路逸散粉尘或城市建筑工地。Fe 和 Ba 是由于刹车片和轮胎磨损造成的,疫情期间的严格措施使得 Ca 等元素更有可能来源于道路扬尘。

因子 7 被确认为烟花燃烧源,其元素特征是 K、Cu、Ba 的元素含量很高,质量分数分别为 45%、38% 和 62%。在来源的日变化中可以看到 20:00~06:00 这个时间段质量浓度居高不下,这与新年放烟花爆竹的时间相吻合。而 Kong 等^[12]的研究也说明 K、Ba 和 Cu 是烟花燃烧的可靠示踪剂。

因子 8 被确认为 Cr 工业源, Cr 的质量分数达到了 84%。有研究表明 Cr 广泛应用于电镀(添加剂金属表面处理)和皮革(作为鞣制过程中使用的铬鞣剂)行业^[29]。据报告,特定的金属加工业也与 Cr 排放有关^[30]。

从整体来看,车辆运输源占 PM_{2.5}总元素浓度的 13.6% ($137 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$),其控制前、中和后期的平均浓度为 243、58 和 $58 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$,受疫情影响车辆运输源的浓度在中后期处于较低的数值;船舶源占 PM_{2.5}总元素浓度的 4.7% ($53 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$),前、中和后期平均浓度分别为 63、43 和 $51 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$,船舶源的变化符合小 V 字型的变化趋势,这与疫情期间的控制相符合;燃煤源占 PM_{2.5}总元素浓度的 4.2% ($45 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$),其前、中、后的浓度分别为 62、45 和 $21 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$,整体处于下降趋势;Se 工业源占 PM_{2.5}总元素浓度的 23.9% ($255 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$),前、中和后的平均浓度分别为 343、219 和 $168 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$,整体处于下降状态;金属冶炼占 PM_{2.5}总元素浓度的 7.4% ($79 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$),前、中和后的平均浓度为 70、84 和 88

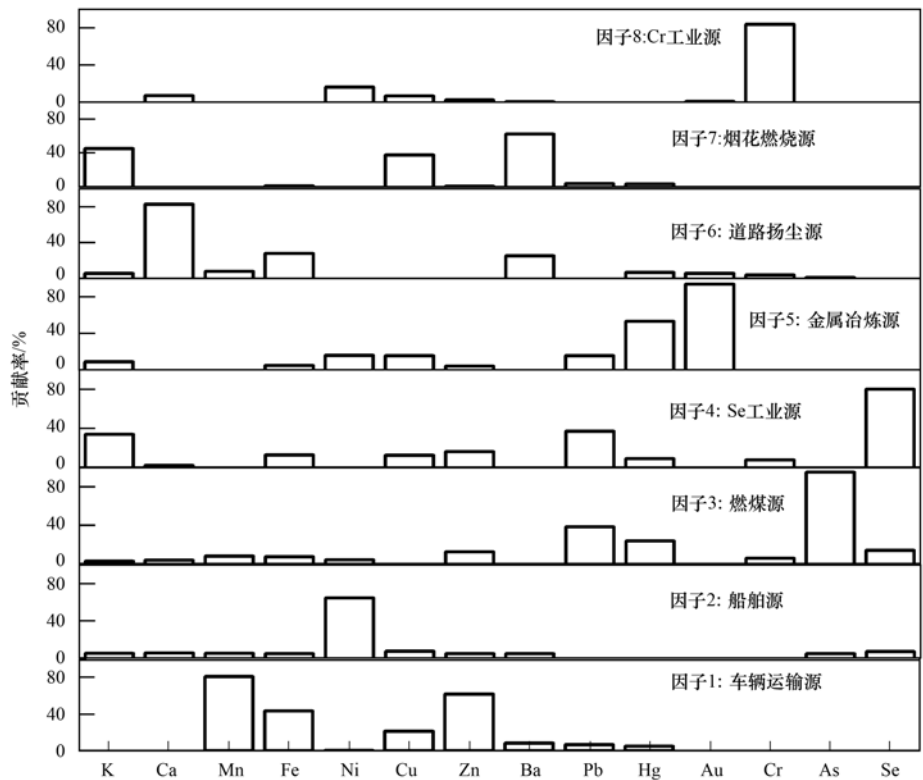


图 3 PMF 模型确定大气重金属的 8 个来源

Fig. 3 Atmospheric heavy metals from eight sources identified by the PMF model

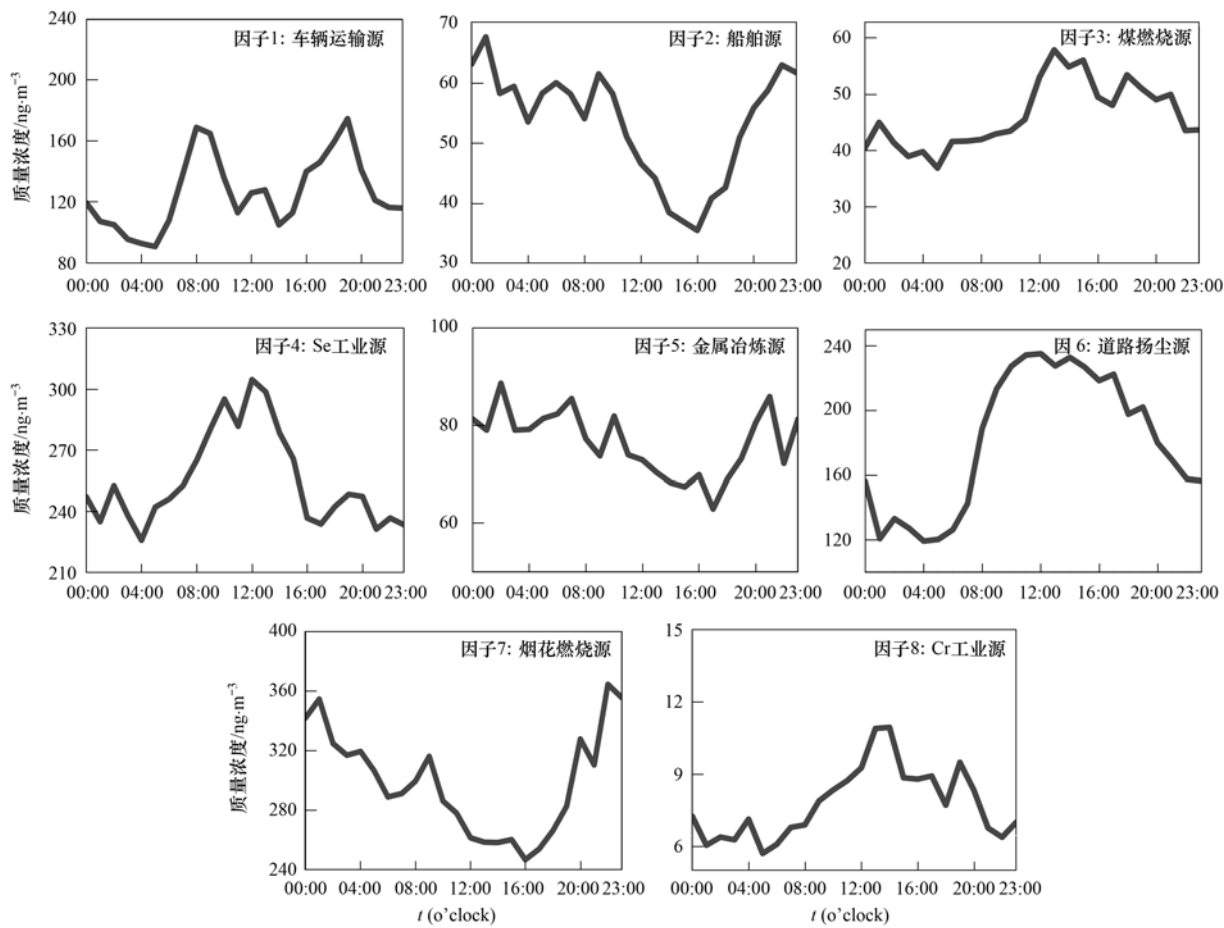


图 4 PMF 模型确定 8 个来源的日变化

Fig. 4 Diurnal variations of the eight sources identified by the PMF model

ng·m⁻³,整体处于上升的状态;道路扬尘占 PM_{2.5} 总元素浓度的 17% (181 ng·m⁻³),前、中和后的平均浓度为 177、92 和 286 ng·m⁻³,其前、中、后的变化符合大的 V 字型变化趋势,这表明道路扬尘源受疫情影响较大;烟花燃烧占 PM_{2.5} 总元素浓度的 28.4% (299 ng·m⁻³),其前、中和后的平均浓度分别为 181、593 和 136 ng·m⁻³,烟花燃烧源的变化最大,特殊的是其变化为倒 V 字型;Cr 工业源占 PM_{2.5} 总元素浓度的 0.8% (8 ng·m⁻³),其中前、中和后的浓度分别为 14、2 和 6 ng·m⁻³,Cr 工业源也是受到疫情影响,整体处于一个 V 字型的变化趋势。

2.4 特殊事件分析

通过上述分析可知,新冠控制措施对大部分元素是有效的,但对 K、Ba 和 Cu 等元素的影响却不显著。尤其特殊的是 Cu,其在控制期前和控制期内一直具有较高的浓度,因而以下将通过 Cu 高值的特殊事件分析来探究其是来自外来传输或者是本地

污染。从图 1 可知,Cu 元素在 1 月 7 日(控制前)和 1 月 24 日(控制中)均出现高值。这两天的 500 m 气流后向轨迹如图 5 所示。从图 5(a)中可以看出 1 月 7 日上海市的污染物来源比较复杂,其中大约 33% 的污染物是直接来自于区域传输,这说明 Cu 元素的高浓度受到了外来区域传输的影响,由此推测在控制期前 Cu 元素的较高浓度可能来自于外来传输和城市内机动车的污染物。在控制期内,由于机动车等被严格控制,Cu 元素的浓度应该随之降低,但是在控制期内 Cu 元素的浓度依然很高,那么 Cu 的高浓度究竟是外来传输造成的还是新年期间烟花爆竹的燃烧造成的。因此,本研究分析了 1 月 24 日上海市 500 m 后向轨迹,从图 5(b)中可以看出其污染物主要来自海上。而海面相较于陆地来说其污染物浓度要小得多,因此并不是外来传输造成 Cu 浓度的升高。由此推测 Cu 元素在控制期内的高浓度主要是本区域内烟花爆竹的燃烧造成的。

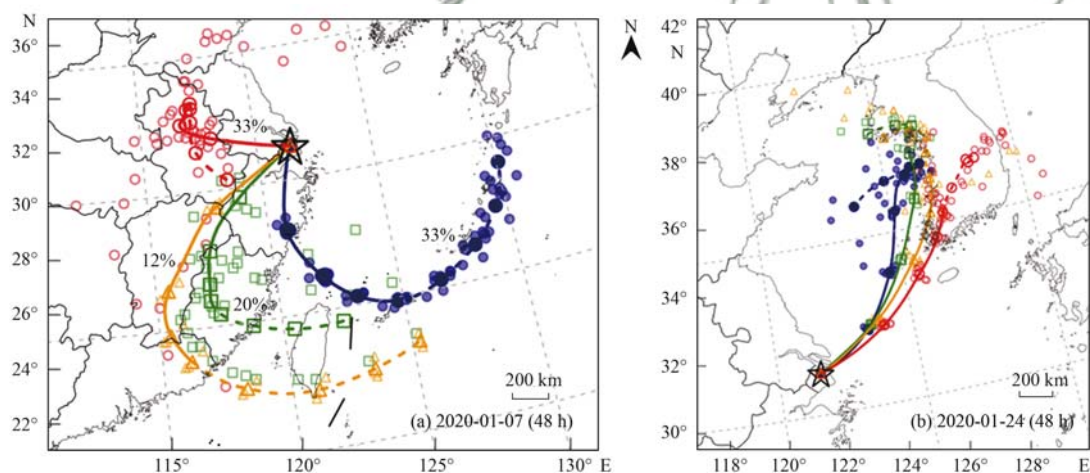


图 5 HYSPLIT 模拟的监测点 500 m 气流后向轨迹

Fig. 5 HYSPLIT simulated backward trajectories of 500 m air masses

3 结论

(1) 上海的重金属浓度相较于其他国家和城市高出一两个数量级,这表明了中国需要找到科学的方法、技术和资源来控制重金属的排放。

(2) 在研究的 3 个时期,整体来看,大部分元素的浓度呈现为 V 字形的变化趋势,但中国春节期间(控制期中)烟花的燃烧对 K、Cu 和 Ba 浓度有较大的影响。

(3) 新冠控制期间,在排除气象因素的干扰下上海市大气重金属浓度的变化主要受人排放的控制。重金属元素主要来源于烟花爆竹、Se 工业、道路扬尘和机动车等因素。

(4) K、Ba 和 Cu 等元素变化较特殊。以 Cu 为例,其浓度在控制期前受到外来传输和机动车的双

重影响,而在控制期内 Cu 元素浓度升高则是烟花爆竹的燃烧造成的。这表明上海节庆时期的烟花爆竹尽管受禁,其仍是重金属的重要来源之一。

参考文献:

- [1] 段时光,姜楠,杨留明,等.郑州市冬季大气 PM_{2.5} 传输路径和潜在源分析[J]. 环境科学, 2019, 40(1): 86-93.
Duan S G, Jiang N, Yang L M, et al. Transport pathways and potential sources of PM_{2.5} during the winter in Zhengzhou[J]. Environmental Science, 2019, 40(1): 86-93.
- [2] Sobhanardakani S. Ecological and human health risk assessment of heavy metal content of atmospheric dry deposition, a case study: Kermanshah, Iran [J]. Biological Trace Element Research, 2019, 187(2): 602-610.
- [3] Wu Y J, Wang P, Yu S C, et al. Residential emissions predicted as a major source of fine particulate matter in winter over the Yangtze River Delta, China [J]. Environmental Chemistry Letters, 2018, 16(3): 1117-1127.
- [4] 闫广轩,张朴真,黄海燕,等.郑州-新乡冬季 PM_{2.5} 中元素

- 浓度特征及其源分析[J]. 环境科学, 2019, **40**(5): 2027-2035.
- Yan G X, Zhang P Z, Huang H Y, *et al.* Concentration characteristics and source analysis of PM_{2.5} during wintertime in Zhengzhou-Xinxiang [J]. Environmental Science, 2019, **40**(5): 2027-2035.
- [5] 雷建容, 云龙, 苏翠平, 等. 深圳城市大气 PM_{2.5} 中金属元素的在线测量与来源特征[J]. 环境科学学报, 2019, **39**(1): 80-85.
- Lei J R, Yun L, Su C P, *et al.* On-line measurement and source characteristics of metals in PM_{2.5} urban Shenzhen [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, **39**(1): 80-85.
- [6] 姚青, 韩素芹, 蔡子颖. 天津采暖期大气 PM_{2.5} 中重金属元素污染及其生态风险评价[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(9): 1596-1600.
- Yao Q, Han S Q, Cai Z Y. The pollution characteristics and potential ecological risk of heavy metals in PM_{2.5} during heating season in Tianjin [J]. China Environmental Science, 2013, **33**(9): 1596-1600.
- [7] Huang K, Zhuang G, Lin Y, *et al.* How to improve the air quality over megacities in China: pollution characterization and source analysis in Shanghai before, during, and after the 2010 World Expo [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, **13**(12): 5927-5942.
- [8] 陈锦超, 董雪玲, 张婉, 等. 北京市霾天 PM_{2.5} 污染特征及其与气象因素的关系[J]. 环境科学与技术, 2018, **41**(8): 87-94.
- Chen J C, Dong X L, Zhang W, *et al.* Characteristics of PM_{2.5} in haze days in Beijing and its relationship with meteorological factors [J]. Environmental Science & Technology, 2018, **41**(8): 87-94.
- [9] 许翔楠, 曾立民, 张远航, 等. 北京市怀柔区冬季大气重金属污染状况分析[J]. 环境化学, 2016, **35**(12): 2460-2468.
- Xu X N, Zeng L M, Zhang Y H, *et al.* The pollution status analysis of atmospheric heavy metal elements during winter in Huairou District of Beijing [J]. Environmental Chemistry, 2016, **35**(12): 2460-2468.
- [10] Chang Y H, Huang R J, Ge X L, *et al.* Puzzling haze events in China during the coronavirus (COVID-19) shutdown [J]. Geophysical Research Letters, 2020, **47**(12), doi: 10.1029/2020GL088533.
- [11] Wang P F, Chen K Y, Zhu S Q, *et al.* Severe air pollution events not avoided by reduced anthropogenic activities during COVID-19 outbreak [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2020, **158**, doi: 10.1016/j.resconrec.2020.104814.
- [12] 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.
- [13] Tian H Z, Zhu C Y, Gao J J, *et al.* Quantitative assessment of atmospheric emissions of toxic heavy metals from anthropogenic sources in China: historical trend, spatial distribution, uncertainties, and control policies [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, **15**(17): 10127-10147.
- [14] Han T T, Qiao L P, Zhou M, *et al.* Chemical and optical properties of aerosols and their interrelationship in winter in the megacity Shanghai of China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2015, **27**: 59-69.
- [15] 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.
- [16] Chang Y H, Zou Z, Deng C R, *et al.* The importance of vehicle emissions as a source of atmospheric ammonia in the megacity of Shanghai [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016, **16**(5): 3577-3594.
- [17] 李礼, 向洪, 李学峰. Xact-625 型环境空气多金属在线分析仪的应用[J]. 三峡环境与生态, 2012, **34**(5): 36-38.
- Li L, Xiang H, Li X F. Application of XactTM 625 automated multi-metals monitor for ambient air [J]. Environment and Ecology in the Three Gorges, 2012, **34**(5): 36-38.
- [18] Chang Y H, Huang K, Xie M J, *et al.* First long-term and near real-time measurement of trace elements in China's urban atmosphere: temporal variability, source apportionment and precipitation effect [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018, **18**(16): 11793-11812.
- [19] Chang Y H, Huang K, Deng C R, *et al.* First long-term and near real-time measurement of atmospheric trace elements in Shanghai, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, 2017, doi: 10.5194/acp-2017-613.
- [20] Zhu C Y, Tian H Z, Hao Y, *et al.* A high-resolution emission inventory of anthropogenic trace elements in Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) region of China [J]. Atmospheric Environment, 2018, **191**: 452-462.
- [21] Lin Y C, Tsai C J, Wu Y C, *et al.* Characteristics of trace metals in traffic-derived particles in Hsuehshan Tunnel, Taiwan: size distribution, potential source, and fingerprinting metal ratio [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, **15**(8): 4117-4130.
- [22] Zhao J Y, Lewinski N, Riediker M. Physico-chemical characterization and oxidative reactivity evaluation of aged brake wear particles [J]. Aerosol Science and Technology, 2015, **49**(2): 65-74.
- [23] 杨毅红, 贾燕, 卞国建, 等. 珠海市郊区大气 PM_{2.5} 中元素特征及重金属健康风险评价[J]. 环境科学, 2019, **40**(4): 1553-1561.
- Yang Y H, Jia Y, Bian G J, *et al.* Elemental characteristics and health risk assessment of heavy metals in atmospheric PM_{2.5} in a suburb of Zhuhai city [J]. Environmental Science, 2019, **40**(4): 1553-1561.
- [24] 陈展乐, 田倩, 毛瑶, 等. 华中地区黄冈市一次重度污染期间 PM_{2.5} 中 12 种微量元素特征及来源解析[J]. 环境科学, 2020, **41**(8): 3475-3483.
- Chen Z L, Tian Q, Mao Y, *et al.* Characteristics and sources of 12 trace amount elements in PM_{2.5} during a period of heavy pollution in Huanggang, central China [J]. Environmental Science, 2020, **41**(8): 3475-3483.
- [25] 徐静, 李杏茹, 张兰, 等. 北京城郊 PM_{2.5} 中金属元素的污染特征及潜在生态风险评价[J]. 环境科学, 2019, **40**(6): 2501-2509.
- Xu J, Li X R, Zhang L, *et al.* Concentration and ecological risk assessment of heavy metals in PM_{2.5} collected in urban and suburban areas of Beijing [J]. Environmental Science, 2019, **40**(6): 2501-2509.
- [26] 陈楚, 王体健, 李源昊, 等. 濮阳市秋冬季大气细颗粒物污染特征及来源解析[J]. 环境科学, 2019, **40**(8): 3421-3430.
- Chen C, Wang T J, Li Y H, *et al.* Pollution characteristics and source apportionment of fine particulate matter in autumn and winter in Puyang, China [J]. Environmental Science, 2019, **40**

- (8): 3421-3430.
- [27] Duan J C, Tan J H. Atmospheric heavy metals and Arsenic in China: situation, sources and control policies[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **74**: 93-101.
- [28] Wang S B, Yan Q S, Yu F, *et al.* Distribution and source of chemical elements in size-resolved particles in Zhengzhou, China: effects of regional transport[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2018, **18**(2): 371-385.
- [29] Liu J W, Chen Y J, Chao S H, *et al.* Emission control priority of PM_{2.5}-bound heavy metals in different seasons: a comprehensive analysis from health risk perspective[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **644**: 20-30.
- [30] Querol X, Viana M, Alastuey A, *et al.* Source origin of trace elements in PM from regional background, urban and industrial sites of Spain[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(34): 7219-7231.

欢迎订阅 2021 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 Control Strategies on Summertime Peak Ozone Concentration in Shanghai	YAN Ru-sha, WANG Hong-li, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (3577)
Characteristics and Sources of VOCs at Different Ozone Concentration Levels in Tianjin	WANG Wen-mei, GAO Jing-yun, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (3585)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric VOCs During Ozone Pollution Period in the Main Urban Area of Chongqing	LI Ling, LI Zhen-liang, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (3595)
Emission Characteristics and Atmospheric Chemical Reactivity of Volatile Organic Compounds(VOCs) in Automobile Repair Industry	CHEN Peng, ZHANG Yue, ZHANG Liang, <i>et al.</i> (3604)
Analysis of the Continuous Heavy Pollution Process in the Winter of 2016 in Beijing, Tianjin, and Hebei	MAO Ye, ZHANG Heng-de, ZHU Bin (3615)
Evaluation of Air Pollution Characteristics and Air Quality Improvement Effect in Beijing and Chengdu	DANG Ying, ZHANG Xiao-ling, RAO Xiao-qin, <i>et al.</i> (3622)
Chemical Components and Sources of PM _{2.5} and Their Evolutive Characteristics in Zhengzhou	ZHAO Xiao-nan, WANG Shen-bo, YANG Jie-ru, <i>et al.</i> (3633)
High-frequency Responses to the COVID-19 Shutdown of Heavy Metal Elements in PM _{2.5} in Shanghai	CHENG Kai, CHANG Yun-hua, KUANG Ya-qiong, <i>et al.</i> (3644)
Analysis of Ultraviolet Aerosol Index in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DUAN Jia-le, JU Tian-zhen, HUANG Rui-ni, <i>et al.</i> (3652)
Vehicle Air Pollutant Emission Inventory and Characterization in Henan Province from 2016 to 2019	GAO Dan-dan, YIN Sha-sha, GU Xing-ke, <i>et al.</i> (3663)
Characterization and Exposure Risk Assessment of Non-phthalate Plasticizers in House Dust from Guangzhou	LIU Xiao-tu, PENG Chang-feng, CHEN Da, <i>et al.</i> (3676)
Distribution, Sources, and Risk Assessment of Polyfluoroalkyl Substances in Main Rivers and Soils of Tianjin	WU Qian-qian, WU Qiang, SONG Shuai, <i>et al.</i> (3682)
Differentiation of Hydrogen and Oxygen Isotopes in the Water Source Treatment Wetlands of Stream Networks	YANG Ting, WANG Yang, XU Jing-yi, <i>et al.</i> (3695)
Characterizing Sources and Composition of Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Key Drinking Water Reservoir Lake Tianmu	ZHOU Lei, ZHOU Yong-qiang, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (3709)
Sources and Optical Dynamics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Different Types of Urban Water Bodies	YU Xiao-qin, CUI Yang, CHEN Hui-min, <i>et al.</i> (3719)
Temporal and Spatial Evolution Characteristics of DOM Spectra in Sediment Interstitial Water in Typical Zones of Baiyangdian Lake	ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i> (3730)
Sources and Spatial Variation of Dissolved Organic Matter in Summer Water of Inflow Rivers Along Chaohu Lake Watershed	NING Cheng-wu, BAO Yan, HUANG Tao, <i>et al.</i> (3743)
Spatio-temporal Distribution Characteristics and Driving Factors of Zooplankton in Hongze Lake	CHEN Ye, PENG Kai, ZHANG Qing-ji, <i>et al.</i> (3753)
Effects of Farming Practices on Soil Nitrogen and Phosphorus Concentrations and Its Loss in the Drawdown Area of the Tributary Embayment of the Three Gorges Reservoir	LUO Fang, LU Lun-hui, LI Zhe, <i>et al.</i> (3763)
Temporal and Spatial Evolution of Non-point Source Pollution Load of Total Nitrogen in Tuojiang River Basin	XIAO Yu-ting, YAO Jing, CHEN Shu, <i>et al.</i> (3773)
Microplastic-Induced Alterations to Antibiotic Resistance Genes in Seawater	ZHOU Shu-yi-dan, ZHU Yong-guan, HUANG Fu-yi (3785)
Enrichment of Antibiotic Resistant Bacteria and Antibiotic Resistance Genes by Sulfamethoxazole in the Biological Treatment System of Mariculture Wastewater	WANG Jin-peng, ZHAO Yang-guo, HU Yu-bo (3791)
Optimization of Tidal-Combined Flow Constructed Wetland System and Its Removal Effect on Antibiotic Resistance Genes	CHENG Yu-xiao, WU Dan, CHEN Quan-le, <i>et al.</i> (3799)
Temporal-spatial Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil of Xiangxi Bay in Three Gorges Reservoir Area	HUANG Ying-ping, JIN Lei, ZHU Can, <i>et al.</i> (3808)
Spatial Distribution Pattern and Influencing Factors of Industrial Pollution Emissions in Yangtze River Economic Belt	LI Yun-yi, LIU Li-ping, LIU Yuan-yuan (3820)
Aging Process and DOC Analysis of Four Different Types of Plastic Particles in Freshwater Systems	LI Wan-yi, LIU Zhi-lin, MIAO Ling-zhan, <i>et al.</i> (3829)
Promotion and Mechanisms of DOM on Copper Adsorption by Suspended Sediment Particles	DING Xiang, LI Zhong-wu, XU Wei-hua, <i>et al.</i> (3837)
Transformation Characteristics of Dissolved Organic Matter During UV/Chlorine Treatment of Municipal Secondary Effluent	WANG Xue-ning, ZHANG Bing-liang, PAN Bing-cai (3847)
Effects of Different Nitrite Generation on the Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules System	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (3858)
Ammonia Nitrogen Removal Performance with Parallel Operation of Conventional and Inverted A ² /O Sewage Treatment Processes in Winter	LI Jin-cheng, GUO Ya-ni, QI Rong, <i>et al.</i> (3866)
Diversity and PICRUS2-based Predicted Functional Analysis of Bacterial Communities During the Start-up of ANAMMOX	YAN Bing, FU Jia-qi, XIA Song, <i>et al.</i> (3875)
Microbial Community Structure of Activated Sludge and Its Response to Environmental Factors	MA Qie-qie, YUAN Ling-jiang, NIU Ze-dong, <i>et al.</i> (3886)
Distribution and Sources of Microplastics in Farmland Soil Along the Fenhe River	ZHU Yu-en, WEN Han-xuan, LI Tang-hui-xian, <i>et al.</i> (3894)
Source Apportionment of Soil PAHs in Lanzhou Based on GIS and APCS-MLR Model	GUAN Xian-xian, ZHOU Xiao-ping, LEI Chun-ni, <i>et al.</i> (3904)
Migration, Transformation Characteristics, and Ecological Risk Evaluation of Heavy Metal Fractions in Cultivated Soil Profiles in a Typical Carbonate-Covered Area	TANG Shi-qi, LIU Xiu-jin, YANG Ke, <i>et al.</i> (3913)
Effect of Elevated CO ₂ on N ₂ O Emissions from Different Rice Cultivars in Rice Fields	YU Hai-yang, HUANG Qiong, WANG Tian-yu, <i>et al.</i> (3924)
Effects of Coconut Chaff Biochar Amendment on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Paddy Fields in Hot Areas	WANG Zi-jun, WANG Hong-hao, LI Jin-qiu, <i>et al.</i> (3931)
Effects of Biochar Addition Under Different Water Management Conditions on N ₂ O Emission From Paddy Soils in Northern Hainan	WANG Hong-hao, TAN Meng-yi, WANG Zi-jun, <i>et al.</i> (3943)
Ecological Effects of Species Diversity on Plant Growth and Physico-Chemical Properties in a Pb-Zn Mine Tailings	YANG Sheng-xiang, CAO Jian-bing, LI Feng-mei, <i>et al.</i> (3953)
Investigation of Dominant Plants and Analysis of Ecological Restoration Potential in Lailishan Tin Tailings	QIN Fu-rong, ZHANG Shi-ying, XIA Yun-sheng, <i>et al.</i> (3963)
Responses of Different Degradation Stages of Alpine Wetland on Soil Microbial Community in the Yellow River Source Zone	LIN Chun-ying, LI Xi-lai, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (3971)
Effects of Straw Returning with Chemical Fertilizer on Soil Enzyme Activities and Microbial Community Structure in Rice-Rape Rotation	JIN Yu-ting, LI Xian-fan, CAI Ying, <i>et al.</i> (3985)
Shifts in Rhizosphere Bacterial Community Structure, Co-occurrence Network, and Function of <i>Miscanthus</i> Following Cadmium Exposure	CHEN Zhao-jin, LIN Li-an, LI Ying-jun, <i>et al.</i> (3997)
Investigation of Soil Fungal Communities and Functionalities within Karst Paddy Fields	ZHOU Jun-bo, JIN Zhen-jiang, XIAO Xiao-yi, <i>et al.</i> (4005)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Cd and Pb in Tiered Soil Profiles from a Zinc Smelting Site	LIU Ling-qing, XIAO Xi-yuan, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> (4015)
Influence of Different Soil Conditioner on the Transfer and Transformation of Cadmium and Phthalate Esters in Soil	WANG Can, ZHANG Yu-liang, HE Ming-jing, <i>et al.</i> (4024)
Immobilization Mechanism of Four Types of Amendments on Cu and Cd in Polluted Paddy Soil	DING Yuan, AO Shi-ying, CHEN Yi-hong, <i>et al.</i> (4037)
Foliar Application of L-Cysteine: Effects on the Concentration of Cd and Mineral Elements in Rice	ZHANG Ya-hui, WANG Chang-rong, LIU Yue-min, <i>et al.</i> (4045)
Effect of Cadmium Stress on Phytochelatins in <i>Amaranthus hypochondriacus</i> L. During Different Growth Periods	LIU Jia-xin, CHEN Wen-qing, YANG Li, <i>et al.</i> (4053)
Evolution of Material Metabolism in China's Pulp and Paper Industry	LIU Xin, YANG Tao, WU Hui-jun, <i>et al.</i> (4061)