

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.12
第41卷 第12期

目次(卷终)

我国地级及以上城市臭氧污染来源及控制区划分 闫慧, 张维, 侯墨, 李银松, 高平, 夏青, 孟晓艳, 范丽雅, 叶代启(5215)

2015~2018年我国PM_{2.5}健康损害价值的动态评估 李惠娟, 周德群, 魏永杰(5225)

2011~2017年中国PM_{2.5}多尺度时空分异特征分析 杨文涛, 谯鹏, 刘贤赵, 雷雨亮(5236)

关中地区PM_{2.5}时空演化及人口暴露风险 黄晓军, 祁明月, 李艳雨, 王森, 黄馨(5245)

中原城市冬季两次重污染形成机制及来源 贾佳, 丛怡, 高清敏, 王玲玲, 杨静静, 张国辉(5256)

西北工业城市冬季PM_{2.5}污染特征及理化性质 杨燕萍, 陈强, 王莉娜, 杨丽丽(5267)

基于PMF模型的PM_{2.5}中金属元素污染及来源的区域特征分析 邓林俐, 张凯山, 殷子渊, 李欣悦, 武文琪, 向铎鹏(5276)

重庆主城大气降尘中重金属污染特征及评价 张夏, 刘斌, 肖柏林, 王佳, 万达(5288)

鄂尔多斯市夏秋季气溶胶新粒子生成过程影响因素分析 孔祥晨, 王红磊, 张连霞, 呼群, 李瑞锋, 许彩琴(5295)

杭州市城区挥发性有机物污染特征及反应活性 景盛翱, 高雅琴, 沈建东, 王倩, 彭亚荣, 李英杰, 王红丽(5306)

成都市区夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析 徐晨曦, 陈军辉, 姜涛, 韩丽, 王波, 李英杰, 王成辉, 刘政, 钱骏(5316)

石家庄市挥发性有机物和臭氧的污染特征及源解析 王帅, 崔建升, 冯亚平, 刘大喜, 陈静, 田亮, 冯超, 王梦璇, 王学臣, 王婷婷(5325)

厦门市工业源VOCs排放清单及控制对策分析 吴冬阳, 庄马展, 吴艳聪, 金磊, 吴义诚, 高攀峰, 刘建福, 金月正, 潘亚雷, 傅海燕(5336)

建筑胶黏剂使用VOCs排放系数与排放清单 梁小明, 孙西勃, 苏燕花, 黄礼海, 陈锋, 任璐, 卢清, 赖君怡, 陈朋龙, 陈来国(5345)

我国西北工业区城市大气多氯联苯来源及健康风险 毛潇萱, 李子璇, 宋世杰, 章晓冬, 高宏, 李春新, 黄韬, 马建民(5352)

基于广州塔观测的城市近地面甲醛垂直分布特征 黄山, 裴成磊, 张莹, 宋奇聪, 齐吉朋, 赵一鸣, 王鸣, 邵敏(5362)

新水沙条件下长江中下游干流水体总磷时空变化分析 卓海华, 娄保锋, 吴云丽, 王瑞琳, 陈杰, 兰静(5371)

三峡库区汉丰湖水体氮磷及化学计量比季节变化特征 钱田, 黄祺, 何丙辉, 李天阳, 刘淑婧, 付适, 曾荣昌, 向可翠(5381)

衡水湖沉积物营养盐形态分布特征及污染评价 张嘉雯, 魏健, 刘利, 王俭, 朱元荣, 段亮(5389)

宜兴市横山水库底泥内源污染及释放特征 崔会芳, 陈淑云, 杨春晖, 唐婉莹, 殷鹏, 尹洪斌(5400)

梅江流域清凉山水库沉积物重金属污染、生态风险评价及来源解析 江涛, 林伟稳, 曹英杰, 黎坤, 翟映雪, 李睿, 陈建耀(5410)

汉江流域金水河与淇河潜在硝化速率及硝化功能基因的影响因子 赵彬洁, 王旭, 张健, 谭香, 何睿, 周全, 史航, 张全发(5419)

山东省滨海旅游度假区水体环境典型全氟化合物污染特征及潜在生态风险 王世亮, 曹雪雅(5428)

太湖重点区域多介质水体中有机磷酸酯的分布特征及来源解析 吕佳佩, 张振飞, 刘杨, 张恒, 王春英, 罗莹, 郭昌胜, 徐建(5438)

岩溶地下水水体中有机氯农药和多氯联苯的残留特征及健康风险评价 叶凯, 孙玉川, 贾亚男, 朱琳跃, 徐昕(5448)

澜沧江硅藻的地理分布模式与关键驱动因素 孙胜浩, 陈娟, 王沛芳, 王超, 王洵, 苗令占, 刘胜, 袁秋生(5458)

白洋淀优势鱼类中喹诺酮类抗生素的生物累积特征及其与环境因子相关性 申立娜, 付雨, 张璐璐, 秦珊, 剧泽佳, 姚波, 崔建升(5470)

生物质粒径对负载MgO生物炭吸附水体中磷的影响 王鹏飞, 甄蒙蒙, 储昭升, 崔冠楠(5480)

Bi₂MoO₆/Bi₂S₃异质结构催化降解四环素-铜复合物 黄文鑫, 魏虎, 蒋彩云, 王玉萍(5488)

超滤膜负载UiO-66@Fe₃O₄@UiO-66强化PPCPs去除和膜污染控制 尹越, 吴道文, 孙梦瑶, 吕路, 张炜铭(5500)

低温季节水平潜流和垂直潜流人工湿地尾水深度处理中试 廖雪珂, 严晗璐, 王智源, 陈诚, 何东, 吴月龙, 陈求稳(5509)

盐度渐增对水解微生物群落结构与功能的影响 高京, 张少华, 王锐, 金鹏康(5518)

限NH₄⁺和限NO₂⁻厌氧氨氧化系统的运行特性及微生物种群特征 宋家俊, 朱明奕, 郭凯成, 汪倩, 刘文如, 沈耀良(5527)

厌氧氨氧化菌富集培养过程微生物群落结构及多样性 闫冰, 夏嵩, 桂双林, 付嘉琦, 吴九九, 熊继海, 魏源送(5535)

二价铁活化过氧化钙提高剩余活性污泥的脱水性能 毕薇薇, 阮书瑜, 陈吴傲啸, 梁方艺, 陈智文, 谢松儒, 唐晶, 邓靖(5544)

中国北方某城市绿地土壤重金属空间分布特征、污染评价及来源解析 赵靛, 梁云平, 陈倩, 徐谦, 荆红卫(5552)

我国南方水稻产地镉环境质量类别划分技术 窦韦强, 安毅, 秦莉, 林大松, 董明明(5562)

晒在土壤-农作物系统中的分布特征及富硒土壤阈值 王锐, 邓海, 贾中民, 严明书, 周皎, 何忠庠, 梁绍标, 董金秀, 苏黎明(5571)

广东鼻咽癌高发区土壤-作物系统重金属迁移特征及健康风险评价 叶脉, 张景茹, 张路路, 李朝晖, 李兴远, 周永章(5579)

胺鲜酯与螯合剂GLDA联合强化柳枝稷吸收积累镉效果 王正, 孙兆军, SAMEH Mohamed, 王珍, 何俊, 韩磊(5589)

毛竹遗态Fe/C复合材料对As(V)污染土壤的钝化修复性能 赵宁宁, 何豪, 冯国杰, 朱宗强, 方雅莉, 李超, 朱义年, 张立浩(5600)

大麦虫幼虫肠道菌群对聚苯乙烯泡沫塑料降解 杨莉, 刘颖, 高婕, 彭霞薇, 白志辉, 庄绪亮(5609)

1株耐油甲醛降解菌的分离鉴定及降解特性 韩茜, 王蓉蓉, 史纯珍(5617)

铜尾矿白羊草叶际和根际细菌群落特征 贾彤, 姚玉珊, 王瑞宏(5628)

生物质炭施用对再生水灌溉空心菜根际微生物群落结构及多样性的影响 崔丙健, 崔二革, 胡超, 樊向阳, 高峰(5636)

废弃物基水热炭改良对水稻产量及氮素吸收的影响 侯朋福, 薛利红, 冯彦房, 余姍, 杨林章(5648)

基于GIS和PMF模型的石嘴山市土壤多环芳烃空间分布及来源解析 夏子书, 王玉玉, 钟艳霞, 白一茹, 王幼奇, 杨帆, 李鸣骥(5656)

氮肥和秸秆还田方式对麦玉轮作土壤N₂O排放的影响 许宏伟, 李娜, 冯永忠, 任广鑫, 谢呈辉, 吕宏菲, 马星霞, 郝嘉琪(5668)

《环境科学》第41卷(2020年)总目录 (5677)

《环境科学》征订启事(5344) 《环境科学》征稿简则(5361) 信息(5287, 5499, 5508)

基于 PMF 模型的 PM_{2.5} 中金属元素污染及来源的区域特征分析

邓林俐, 张凯山*, 殷子渊, 李欣悦, 武文琪, 向铎鹏

(四川大学建筑与环境学院, 成都 610065)

摘要: 金属元素是大气 PM_{2.5} 的重要组成成分, 对人群危害性极强且兼具源特异性, 分析不同经济模式地区大气细颗粒物中金属污染状况及来源差异, 可以为科学规划城市产业布局和保护大气环境提供参考. 通过霾/非霾期大气 PM_{2.5} 采样, 使用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)测定成都市及仁寿县样品中 18 种金属元素质量浓度, 分析其污染水平, 并基于正定矩阵因子分解模型(PMF)解析两地大气 PM_{2.5} 中金属元素的来源. 结果表明, 成都市场尘源、移动源和燃煤源特征元素占元素总和的比值大于仁寿县, 而仁寿县生物质燃烧源、工业源以及燃油源特征元素占比则较高. 两地 Cr、Cd 和 As 元素浓度均超标, 表明 PM_{2.5} 中重金属污染严重. 随着霾污染加剧, 两地 PM_{2.5} 中金属元素总量上升, 但增幅远低于 PM_{2.5} 浓度增长. 此外, 不同元素在霾期和非霾期浓度比值存在差异, 成都市变化范围为 0.7 (Al) ~ 2.8 (Ba), 仁寿县介于 0.8 (Al) ~ 3.1 (Mn) 之间, 但总的来说两地大致呈现出燃煤和工业活动排放元素增幅较大, 机动车污染源次之, 扬尘源增幅较缓的状况. 受地区产业布局、经济规模和发展模式的影响, 大气 PM_{2.5} 中金属元素污染水平及来源呈现出不同的区域特征. 在重点发展第三产业的大型城市, 如成都, 更易遭受交通运输和城市建设等带来的大气污染, 而在仁寿等第二产业占比不断增加的郊县, 其污染主要受化石燃料燃烧和工业过程排放的影响.

关键词: PM_{2.5}; 金属元素; 正定矩阵因子分解模型(PMF); 源解析; 霾

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)12-5276-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.202004275

Characterization of Metal Pollution of Regional Atmospheric PM_{2.5} and Its Sources Based on the PMF Model

DENG Lin-li, ZHANG Kai-shan*, YIN Zi-yuan, LI Xin-yue, WU Wen-qi, XIANG Xin-peng

(College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: As important components of PM_{2.5}, metal elements are extremely harmful to people and also have source specificity. Understanding the characteristics of PM_{2.5} metal pollution in the two different types of cities can help adjust the layout of regional industrial structure and improve the environment. PM_{2.5} samples during haze/non-haze periods were collected in Chengdu City and Renshou County. Inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES) was used to determine the mass concentrations of eighteen metal elements in collected PM_{2.5} samples. The positive matrix factorization (PMF) model was used for source apportionment analysis for metal elements in PM_{2.5}. The analysis showed that the ratio of trace elements from fugitive dust, motor vehicle emissions, and coal burning to the total elements is greater in Chengdu City than that in Renshou County. The proportion of trace elements from biomass combustion, industrial, and fuel sources in Renshou County is higher than that in Chengdu City. In addition, concentrations of Cd, As, and Cr in both areas exceeded the standards, indicating the occurrences of heavy metal pollution. During the haze period, the total concentrations of compositional metal elements in PM_{2.5} increased, although the rate was much lower than that for PM_{2.5}. The ratios of elements between haze and non-haze periods ranged from 0.7 (Al) to 2.8 (Ba) in Chengdu City, and from 0.8 (Al) to 3.1 (Mn) in Renshou County. Among all metal elements, the increase rate for trace elements from coal burning and industrial activities was relatively large but small for those from fugitive dust, with the growth in trace elements from motor vehicles being modest. The results of this study indicated that the characteristics of pollution and source of metal elements in PM_{2.5} varied by economic scale, development mode, and industrial layout. In large cities such as Chengdu City, where economic development is mainly focused on tertiary industry, air pollution is mainly caused by transportation and urban construction, while in suburban area such as Renshou County, where secondary or heavy industry are the focus for economic development, the pollution is mainly affected by energy consumption and industrial production.

Key words: PM_{2.5}; metal elements; positive matrix factorization (PMF); source apportionment; haze

随着经济的发展,我国大气污染日趋严重,区域性霾污染事件频发. 大气 PM_{2.5} 与霾的产生密切相关^[1-3],其组分十分复杂. 金属元素作为 PM_{2.5} 的重要组成部分,对人群危害性极强^[4,5]. 同时,因金属元素的源特异性和稳定性,也使其常被用于污染来源解析的有效示踪剂^[6,7]. 探究大气 PM_{2.5} 中金属元素来

源对提高大气环境质量至关重要. 目前,常用的源

收稿日期: 2020-04-30; 修订日期: 2020-06-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(41877395); 四川泓远环保工程有限公司委托技术服务项目(18H0676)

作者简介: 邓林俐(1995~),女,硕士研究生,主要研究方向为环境数据分析,大气颗粒物采样测量及源解析, E-mail: dll.denglinli@foxmail.com

* 通信作者, E-mail: zhangkaishan@scu.edu.cn

解析受体模型有主成分分析/多元线性回归法 (PCA/MLR)^[8]、UNMIX 模型^[9]、化学质量平衡法 (CMB)^[10] 和正定矩阵因子分解 (positive matrix factorization, PMF)^[11] 等。其中, PCA/MLR 法先通过 PCA 对数据降维并消除共线性, 获取因子数及物种载荷, 继而结合物种载荷和各示踪元素浓度展开 MLR 分析, 获得的回归系数用以估算来源贡献^[12]。UNMIX 在数据空间降维的基础上通过自建模型曲线分辨率技术使源成分谱及源贡献服从非负约束^[13]。CMB 模型假设对受体有贡献的源类别和源谱已知, 基于质量守恒, 将各源类浓度之和作为测定的受体大气颗粒物总质量浓度^[14], 并依据源类浓度估算其贡献。PMF 模型把样品数据分解为因子贡献矩阵和因子源谱矩阵的乘积, 利用数据标准偏差进行优化模拟得出各个因子, 定量解析出污染来源^[9]。相较而言, PCA/MLR 解析出的来源贡献率可能出现负值, UNMIX 法需要尽量选取缺失值少的组分, 对数据质量要求较高, CMB 模型需要本地源成分谱信息以获取更准确的解析结果, 而 PMF 法不需要源谱信息, 分解矩阵中元素非负, 且可通过误差估计, 合理处理缺失值和异常值, 实现数据最大化利用^[15]。Yang 等^[16] 的研究从原理出发, 分析比较了 PCA/MLR、UNMIX 和 PMF 这 3 种方法的源解析结果, 认为 PMF 模型提供每个数据的误差, 得出的结果较其他两种方法更可信。这也是本文选择 PMF 研究 PM_{2.5} 中金属来源的主要原因。

四川盆地是我国霾污染严重区域之一^[17]。成都市作为四川盆地中心城市, 近年来生产总值猛增, 但经济与环境不平衡发展加之不利于污染物扩散的气候条件, 也导致成都遭受严重的霾污染。为了解霾的形成机制和为空气质量改善政策提供依据, 近年来众多学者已陆续针对成都大气 PM_{2.5} 污染展开研究。例如, 李培荣等^[18] 探究成都市不同 PM_{2.5} 污染状况下的气象特征及其潜在污染源, 发现重度污染下, 成都大气逆温层强, 混合层较低且边界层内风通量较小, 污染物扩散能力弱, 成都的南部和西南部是 PM_{2.5} 污染的重要源区。蒋燕等^[19] 的研究表明成都市 PM_{2.5} 中硫酸盐和硝酸盐对消光贡献较大, 尤其硝酸盐是大气能见度下降明显的主要原因。张菊等^[20] 的研究表明, 成都大气 PM_{2.5} 中总碳和有机碳浓度夏季略高于秋季, 有机碳和元素碳在夏季同源性较强, 夏秋季均有二次有机碳生成。吴明等^[21] 的研究分析了成都 2017 年冬季大气 PM_{2.5} 中水溶性离子和碳组分浓度, 并通过主成分分析探究其主要污染源, 结果表明成都冬季 PM_{2.5} 主要源于燃烧、二次无机污染和土壤扬尘等。作为 PM_{2.5} 重要组成成分

的金属元素, 其来源和贡献研究相对较少。例如, 张智胜等^[22] 的研究通过富集因子分析成都城区不同季节大气 PM_{2.5} 中金属元素污染水平和富集程度, 但不同大气污染条件下金属元素浓度变化规律的研究还有待开展。Wang 等^[23] 运用富集因子和主成分分析定性研究成都 PM_{2.5} 中金属元素来源, 但具体贡献尚有待量化。此外, 随着近年来成都市一些重工业外迁至周边城镇, 周边城镇也出现一定程度的大气污染。但这些污染是否与外迁的重工业密切相关? 污染是否具有显著的区域特点和行业特点? 寻求这些问题的答案便成为本研究的重要动因之一。

本文选取成都市及其南部仁寿县作为研究对象。成都市位于四川盆地的西部平原, 仁寿县隶属眉山市, 与成都南部接壤, 属于川中丘陵地区, 两地近年来饱受大气颗粒物污染的困扰。除了地形差异外, 两个地区经济状况及其发展模式也存在较大差别, 特别是近年来成都通过产业转移在城市周边市、县形成了多个大型工业园区, 仁寿县作为产业承接重点区域, 近年来以视高、文林和汪洋这 3 个工业园区为基础, 逐步成为了西南工业重镇。仁寿县 PM_{2.5} 污染状况如何? 两地在地形、经济发展模式和产业结构等方面差别较大, 其大气 PM_{2.5} 中金属元素污染状况有何差异? 来源是否有所不同? 回答这些问题, 对于了解区域环境空气质量状况, 采取更有效的大气污染控制措施有重要意义。

本研究通过大气 PM_{2.5} 采样及组分分析, 并采用 PMF 模型解析污染来源, 分析成都市及仁寿县霾/非霾期大气 PM_{2.5} 中金属元素污染特征及来源, 以期科学规划城市产业布局, 以及推进地区大气颗粒物重金属污染防治工作提供一定理论参考和数据支持。

1 材料与方法

1.1 大气 PM_{2.5} 样品采集

本研究参考《环境空气质量手工监测技术规范》(HJ 194-2017) 和《环境空气质量监测点位布设技术规范》(试行)(HJ 664-2013) 中相关要求, 并综合考虑当地气象条件、地形和社会经济状况等因素在成都市和仁寿县开展大气 PM_{2.5} 样品采集。

1.1.1 采样地点

大气 PM_{2.5} 样品采集实验采样点布置如图 1 所示。为获取人口最密集、经济最发达的成都市中心城区大气细颗粒物中金属污染状况, 在成都市主城区一、二和三环之间设置 3 个采样点, 分别位于电子科技大学沙河校区体育馆顶层 (104°06'E, 30°40'N)、西南交通大学九里堤校区体育馆顶层 (104°03'

E, 30°41'N) 和凤凰山公园观景台 (104°04' E, 30°44'N). 各采样点附近 2 km 内为 10~50 m 高的城市建筑群, 无大型工业企业和单一特定污染源, 周边环境可以代表成都市中心典型城区环境. 仁寿县设置两个采样点, 分别代表城区和郊区两种环境类型. 一点位于仁寿县中心城区审计局楼顶 (104°09' E, 29°59'N), 附近 2 km 内为城市建筑群及繁忙街道, 周边环境可以代表仁寿县城区环境. 另一点位于县郊峰密山民房楼顶 (104°07' E, 30°03'N), 周围为典型山区环境, 远离城区各类污染源.

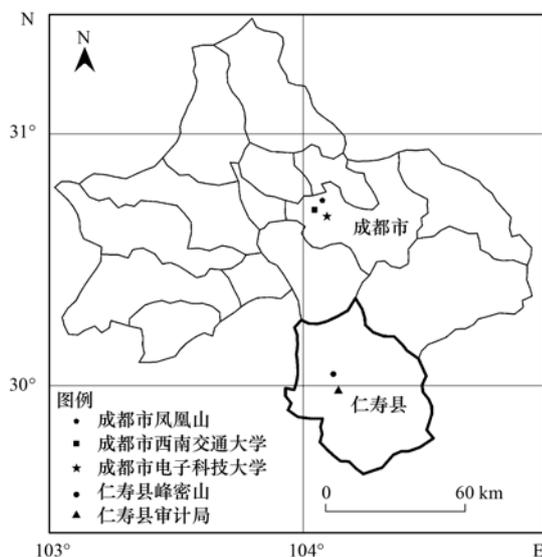


图1 成都市和仁寿县大气采样点示意

Fig. 1 Atmospheric sampling sites in Chengdu City and Renshou County

研究使用中流量大气颗粒物采样器(青岛路博 LB-120F 型, $100 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$) 采集样品, 滤膜选用石英纤维滤膜 (Whatman; $d = 90 \text{ mm}$), 每个样品采集 24 h. 采样后将样品滤膜装入滤膜盒内置于 -18°C 冰箱避光保存至分析.

1.1.2 采样时间

为获取更全面的大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中金属元素污染状况, 本研究分霾期和非霾期在研究地开展采样工作. 霾期和非霾期的确定是依据采样时采样地点的空气质量是否发生霾而定. 霾辨别根据中国气象局颁布的气象行业标准《霾的观测和预报等级》(QX/T 133-2010) 而定. 于 2018 年 6~9 月和 2019 年 3~4 月开展采样. 在成都市采集霾期样品 24 个, 非霾期样品 72 个. 在仁寿县采集霾期样品 12 个, 非霾期样品 16 个.

1.2 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量及其金属元素分析

1.2.1 $\text{PM}_{2.5}$ 质量分析

$\text{PM}_{2.5}$ 的质量分析采用样品滤膜称量法. 所用滤膜为石英滤膜 (Whatman; $d = 90 \text{ mm}$). 石英滤

膜在采样前用铝箔包裹并置于 450°C 马弗炉中烘烤 8 h 以除去滤膜上少量有机物. 采样前后滤膜均放在恒温恒湿设备 (上海一恒 LHS-80HC-1; 温度: $20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$; 湿度: $50\% \pm 5\%$) 中平衡 24 h, 然后用十万分之一的天平 (德国赛多利斯 SQP) 称量. 最近 3 次称量的误差不超过 0.30 mg. 采样前后石英滤膜质量的净增加即为颗粒物质量, 颗粒物质量除以标况下的采样体积即可确定 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量浓度.

1.2.2 金属元素分析

金属元素分析采用电感耦合等离子体发射光谱仪 (ICP-OES, Agilent 725). 由于 ICP-OES 只能分析液态样品, 本研究在分析 $\text{PM}_{2.5}$ 中金属元素时对样品滤膜先进行微波消解. 消解时切取 1/4 滤膜样品, 用陶瓷剪刀剪碎后放入消解罐, 加入 6 mL HNO_3 (分析纯, 65.0%~68.0%)、2 mL H_2O_2 (分析纯, 30%) 和 1 mL HF (优级纯, 40.0%) 组成的混合酸消解体系消解样品. 将罐体置于微波消解仪中升温至 180°C 并保持 90 min. 消解结束后用超纯水定容至 25 mL, 最后将样品转移至 PET 瓶, 在 4°C 冰箱中避光保存至分析. 同时, 用相同的方法制备 10 个空白滤膜样品试液. 测试的金属元素为 Al、Ba、Cd、Cr、Cu、Fe、Mn、Ni、Ti、V、Zn、As、Pb、Sr、K、Ca、Na 和 Mg 共 18 种. 每个待测样重复测定 3 次后, 若相对偏差小于 3% 则数据可用, 否则重新进样测定. 测试 10 个空白膜样品试液, 通过空白膜测定的平均空白值的 3 倍标准偏差计算各元素的方法检出限^[24].

1.3 金属元素的富集因子 (EF) 及来源分析

1.3.1 EF 分析

EF 可用于分析元素富集程度, 同时了解自然源和人为源对大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中无机元素的贡献, 并为后续受体模型源解析结果判别提供一定参考^[25]. 本文选取土壤中稳定存在, 且人为污染源排放较小的 Fe 元素作为参比因子, 根据四川省各元素的表层土壤平均值^[26] (见表 1), 按下述公式 (1) 计算霾期和非霾期 $\text{PM}_{2.5}$ 中金属元素的富集因子. 当 $\text{EF} < 1$ 说明元素主要来自地壳源; $1 < \text{EF} < 10$, 说明元素出现不同程度富集; $\text{EF} > 10$, 说明元素来自人为源^[27].

富集因子的计算公式如下:

$$\text{EF} = \frac{(C_\alpha/C_\beta)}{(C_{\alpha 1}/C_{\beta 1})} \quad (1)$$

式中, C_α/C_β 为颗粒物中元素 α 与参比元素 β 的含量比值, $C_{\alpha 1}/C_{\beta 1}$ 为地壳中元素 α 与参比元素 β 的含量比值.

表 1 土壤中金属元素背景值¹⁾

Table 1 Background concentrations of metal elements in the soil			
金属元素	背景值/mg·kg ⁻¹	金属元素	背景值(质量分数)/%
Cd	0.079	Na	0.85
Cr	79	K	2.02
Cu	31.1	Mg	0.85
Mn	657	Ca	1.13
Ni	21.6	Al	6.26
Pb	30.9	Ti	0.1
V	96	Fe	3.3
Zn	86.5		
Ba	474		
Sr	120		

1)表中数据来源于文献[26]中四川省各金属元素的表层土壤平均值,由于其中各元素测量方法不一,精确度有所不同,故表中元素背景值的有效数字不一致

1.3.2 正定矩阵因子(PMF)模型分析

本研究采用 PMF 用于金属元素来源分析. PMF 是一个多元因子分析工具^[28],它把输入模型的样品浓度数据矩阵分解成因子贡献(\mathbf{G})和因子成分谱(\mathbf{F})两个矩阵,通过多线性多次迭代(ME)算法识别因子数量和因子贡献^[29].

例如,给定 i 个样本和 j 种化学物质组成的 $i \times j$ 矩阵 \mathbf{X} ,通过矩阵运算,可将矩阵分解为因子贡献(\mathbf{G})和因子成分谱(\mathbf{F})两个矩阵^[30,31]:

$$\mathbf{X}_{ij} = \sum_{k=1}^p \mathbf{G}_{ik} \mathbf{F}_{kj} + \mathbf{E}_{ij} \quad (2)$$

式中, p 为因子个数; i 为第 i 个样品; j 为第 j 种元素; \mathbf{X}_{ij} 为 i 个样品 j 种元素浓度构成的 $i \times j$ 矩阵; \mathbf{G}_{ik} 是因子 k 对每个样品 i 的贡献; \mathbf{F}_{kj} 是对于每个来源的物种分布; \mathbf{E}_{ij} 为残差矩阵. \mathbf{G}_{ik} 和 \mathbf{F}_{kj} 的值被约束为正.

上述公式(2)的求解通过不确定度估计 u_{ij} 以及非负性矩阵元素 \mathbf{G}_{ik} 、 \mathbf{F}_{kj} 作为约束条件,设计目标函数 Q ,并将其最小化:

$$Q = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left(\frac{\mathbf{X}_{ij} - \sum_{k=1}^p \mathbf{G}_{ik} \mathbf{F}_{kj}}{u_{ij}} \right)^2 \quad (3)$$

不确定度 u_{ij} 根据 EPA PMF 5.0 用户指南^[32] 估算:

$$u_{ij} = \frac{5}{6} \times \text{MDL} \quad (c \leq \text{MDL}) \quad (4)$$

$$u_{ij} = \sqrt{(ef \times X_{ij})^2 + (0.5 \times \text{MDL})^2} \quad (c > \text{MDL}) \quad (5)$$

式中,MDL 为元素测量仪器的方法检出限. ef 为测量结果不确定度的百分比,一般设置为 10%^[28].

本研究采用 EPA PMF5.0^[32] 分析研究区域大气 PM_{2.5} 中的金属元素来源,并按模型运行要求准备各

金属元素的原始浓度数据文件和不确定度文件. 浓度文件包含所有样本中的金属元素浓度值,不确定度文件包含所有元素的方法检出限和不确定度百分比,当元素测量浓度小于或等于检出限时,按公式(4)估算其相应的不确定度,当元素测量浓度大于检出限时,按公式(5)估算其相应的不确定度. 当元素测量浓度值缺失时,用该元素其他测量值的中位数代替该缺失值,并用该中位数的 4 倍值作为其相应的不确定度^[32,33].

由于因子数目的选取会影响模拟的结果,故本研究在模型运行时,选择随机种子模式,选取 3~7 个因子分别进行 20 次迭代运算,通过观察缺失数据和低于 MDL 数据比例、信噪比(S/N)、物种比例残差和观测值与预测值之间的相关性(r^2)对不同物种进行强、弱、坏分类,调整元素不确定度,最终选取最佳因子数目和确定其相应贡献. PMF 基于各因子贡献矩阵的方差百分比计算各因子的贡献率^[32].

2 结果与讨论

2.1 研究区域大气 PM_{2.5} 污染特征

采样期间成都大气 PM_{2.5} 日均浓度变化范围为 23.5~204.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,平均质量浓度为 (96.5 ± 11.0) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,霾期 PM_{2.5} 浓度为非霾期的 2.6 倍. 仁寿县采样期间大气 PM_{2.5} 日均浓度在 28.2~119.3 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间,平均质量浓度为 (67.0 ± 9.8) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,霾期与非霾期浓度比值为 2.6.

采样期间成都市和仁寿县各采样点霾期和非霾期大气 PM_{2.5} 浓度如图 2 所示. 成都市采样期间大气 PM_{2.5} 浓度均是凤凰山 > 电子科大 > 西南交大. 这是因为凤凰山北部存在中铁产业园等工业园区、机械制造企业以及物流贸易公司,属于工业交通混合区,产生较严重污染. 电子科技大学位于一环路,

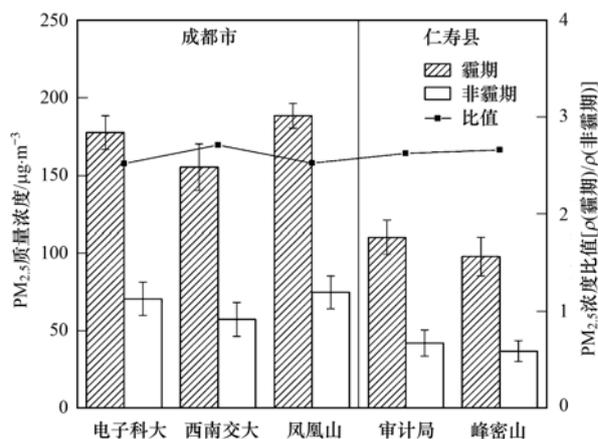


图 2 成都市和仁寿县各采样点大气 PM_{2.5} 质量浓度
Fig. 2 Average PM_{2.5} mass concentrations at sampling sites in Chengdu City and Renshou County

是典型的交通区,人口稠密,交通密集,拥堵情况严重,产生的 $PM_{2.5}$ 污染不容忽视.西南交大采样点附近多居民区,且交通源较少,该点 $PM_{2.5}$ 浓度在3个采样点中较低.采样期间仁寿县审计局 $PM_{2.5}$ 浓度均大于峰密山,仁寿县审计局位于县城区,是交通、工业和居住的混合区,该点以南1 km左右为文林工业园区,综合来说污染源复杂,污染较重.而峰密山位于郊外,车流量小,但附近有工地施工,加之 $PM_{2.5}$ 远距离运输特性,城区污染源对郊区有一定贡献,因此,峰密山采样点 $PM_{2.5}$ 浓度仍有超标情况.

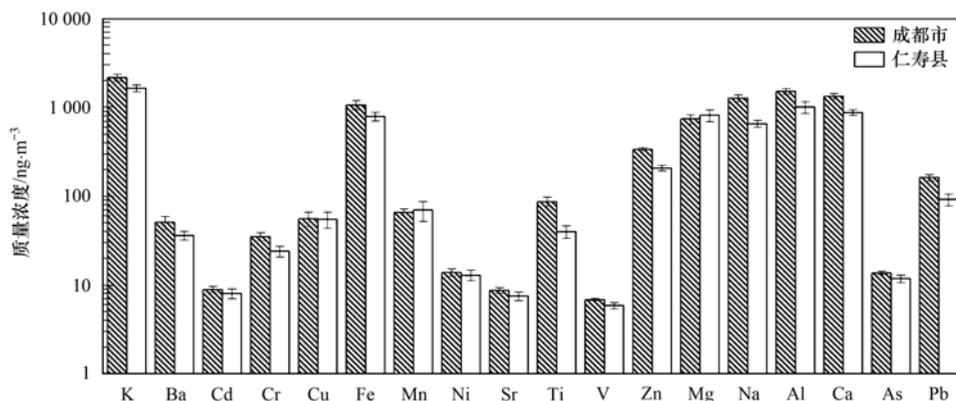
总体而言,成都市和仁寿县在不同季节均出现不同程度的大气细颗粒物污染.成都市大气 $PM_{2.5}$ 平均浓度是仁寿县的1.4倍,相较而言污染更严重,这可能与成都市经济规模、机动车保有量和人口总量等都远大于仁寿县有关.两地霾期和非霾期 $PM_{2.5}$ 浓度差异明显,这与气象条件和采样点附近的污染源排放特征有关.大气 $PM_{2.5}$ 浓度空间分布受采样点周围人为活动和污染源分布的影响,成都市中心城区呈现出工业交通混合区 $PM_{2.5}$ 浓度较大,交通区次之,居住区较小的趋势,仁寿县城中混合区 $PM_{2.5}$ 浓度大于郊区.

2.2 研究区域大气 $PM_{2.5}$ 中金属元素污染特征

成都市和仁寿县大气 $PM_{2.5}$ 中金属元素质量浓度分布如图3所示.成都市 $PM_{2.5}$ 中18种金属元素平均质量浓度总和为 $8\,939.2\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$,占 $PM_{2.5}$ 平均质量浓度的9.3%.按元素可能的来源分类后,成都市Al和Ti等扬尘源元素占各元素浓度总和的67.3%,生物质燃烧源特征元素K占比为24.3%,Zn和Cu等表征机动车排放的元素占比4.4%,燃煤源特征元素As、Ba和Pb等占比2.5%,金属冶炼、制造源特征元素Mn、Cr和Cd等占比为1.3%,燃油源特征元素Ni和V占比为0.2%.相比之下,仁寿县 $PM_{2.5}$ 中金属元素浓度稍小,总和为 $6\,344.6\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$,

但在颗粒物中的比重与成都市相当,占 $PM_{2.5}$ 平均质量浓度的9.5%.其中,扬尘源特征元素Al、Ca和Ti等占元素浓度总和的65.8%,生物质燃烧特征元素K占比为25.9%,机动车排放源特征元素Zn和Cu占比为4.1%,燃煤排放的As、Ba和Pb等元素占比为2.2%,金属冶炼、制造源特征元素Mn、Cr和Cd等占比为1.7%,燃油源特征元素Ni和V占比为0.3%.此外,在本研究的采样期间,成都市和仁寿县大气 $PM_{2.5}$ 中Cd、As和Cr元素均超过环境空气质量标准中二级浓度限值^[34],重金属污染不容忽视.

图4和图5分别展示成都市和仁寿县在霾期和非霾期大气 $PM_{2.5}$ 中金属元素浓度的对比情况.对成都市而言,从非霾期到霾期,金属元素总和从 $8\,216.3\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 升到 $10\,776.8\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$,增加31.2%.但元素总和在 $PM_{2.5}$ 中的比例却明显下降,其占比在非霾期和霾期分别为12.0%和6.1%.这说明随着大气污染加剧,大气 $PM_{2.5}$ 中金属元素浓度的增幅低于 $PM_{2.5}$ 浓度的增幅,霾期大气 $PM_{2.5}$ 浓度剧增不仅与金属元素浓度的增加有关,还与 $PM_{2.5}$ 中其他化学组分有关,例如二次气溶胶的形成等.此外,各金属元素浓度在非霾期和霾期变化情况不一.表征燃煤源的As和Ba等元素和Mn和Cr等工业冶炼、制造源元素增幅较大,其元素霾期与非霾期浓度比值在1.5~2.8之间.由于成都市区燃煤取暖情况较少,煤炭消耗基本与工业活动有关,故成都市远郊工业源及相关排放与霾期 $PM_{2.5}$ 污染加重有较大关联.机动车排放源特征元素霾期与非霾期比值在1.1~1.8之间,相比其他人为源排放元素增幅较小,说明成都市机动车排放相对持续且稳定.代表扬尘源的特征元素增幅最小,霾期和非霾期比值在0.7~1.4之间,其中Al和Mg元素非霾期浓度水平较高,Mg、Na、Ti和Fe元素霾期更高,这与采样期间气象条件及采样点附近城市建设活动周期有关.



图中数据为相应采样区域所有样品中各金属元素浓度数据的均值,成都与仁寿样品数分别为96个和28个

图3 成都市和仁寿县大气 $PM_{2.5}$ 中金属元素平均浓度

Fig. 3 Average concentrations of metal elements in $PM_{2.5}$ in Chengdu City and Renshou County

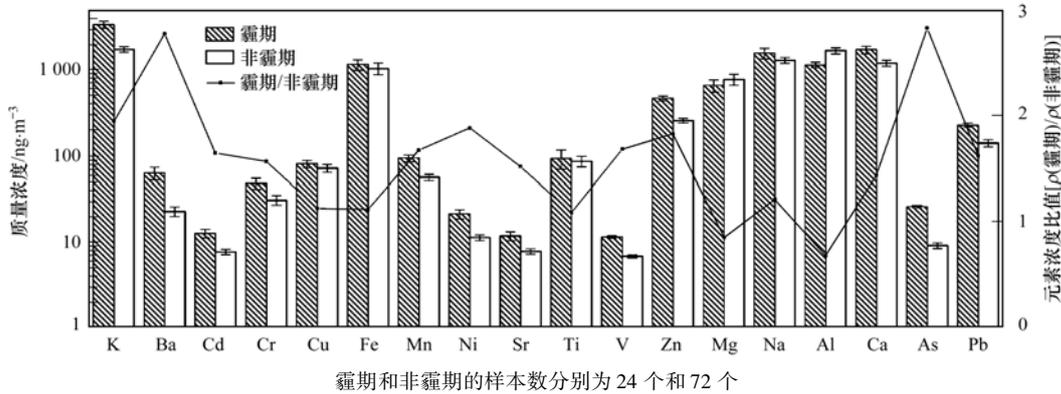


图 4 成都市不同大气污染状况下 PM_{2.5} 中金属元素浓度

Fig. 4 Average concentrations of metal elements in PM_{2.5} under different air pollution conditions in Chengdu City

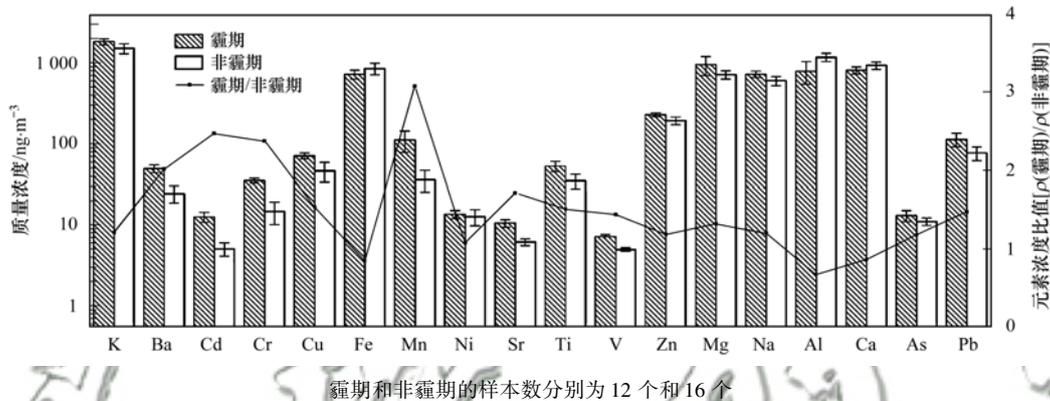


图 5 仁寿县不同大气污染状况下 PM_{2.5} 中金属元素浓度

Fig. 5 Average concentrations of metal elements in PM_{2.5} under different air pollution conditions in Renshou County

与成都市情况相似,如图 5 所示,仁寿县霾期大气 PM_{2.5} 中金属元素总和也高于非霾期,从 5 938.9 ng·m⁻³ 升至 7 285.5 ng·m⁻³, 上升 22.7%。但金属元素总和在 PM_{2.5} 中比例霾期较非霾期显著下降,分别为 7.0% 和 15.1%。这同样说明 PM_{2.5} 的增加除一次排放外,二次气溶胶的贡献不容忽视。此外,霾期与非霾期相比,仁寿县大气 PM_{2.5} 中不同来源的金属元素增幅各有不同。表征金属冶炼、制造源的 Mn、Cr 和 Cd 等元素增幅最大,霾期与非霾期元素浓度比值在 1.7~3.1 之间,说明工业生产排放对仁寿县霾的形成有较大贡献。Ba、As、Zn、Cu 和 K 等燃煤、机动车和生物质燃烧排放源特征元素霾期与非霾期浓度比值为 1.2~2.0, 相较而言增幅较小,说明这类元素的污染源排放可能比较稳定。扬尘源的特征元素增幅最小,霾期和非霾期比值在 0.8~1.5 之间,Al、Fe 和 Ca 元素非霾期浓度水平较高,Mg、Na 和 Ti 元素霾期更高,这可能与非霾期风速较大,更易产生土壤扬尘及采样点周围建筑工地施工周期有关。

总体上,成都市和仁寿县大气 PM_{2.5} 中金属元素污染存在一定的地区差异。从浓度水平上看,成都市

大气 PM_{2.5} 中金属元素浓度总和较大,其中扬尘源特征元素 Na、Al、Ca 和 Ti 和移动源特征元素 Zn 和 Pb 等成都市明显大于仁寿县,但其余元素两地质量浓度差别不明显。从元素浓度与总浓度的占比上看,成都市扬尘源、移动源和燃煤源特征元素占元素总和的比值大于仁寿县,而仁寿县生物质燃烧源、工业源以及燃油源特征元素占比则较高。此外,两地的各元素浓度从非霾期到霾期增幅不一,但从元素来源上看,大致呈现出燃煤、工业活动排放元素增幅较大,机动车污染源次之,扬尘源增幅较缓的状况,说明两地 PM_{2.5} 污染的加重与人为活动有较大关联。

2.3 大气 PM_{2.5} 中金属元素 EF 及来源分析

2.3.1 金属元素 EF 分析

表 2 列出本研究霾期和非霾期成都市和仁寿县大气 PM_{2.5} 中各金属元素的富集因子。

就成都市而言,非霾期大气 PM_{2.5} 中金属元素富集因子范围为 0.9~3 060.4。其中,Al 元素富集因子小于 1,在颗粒物中基本无富集,其来源应主要为地壳或土壤扬尘; Mg、Ti、Sr、V、Mn、Ca、K、Na 和 Ba 元素富集因子在 1~10 之间,这些元素均有地壳和人为活动的共同贡献;而其余元素富集因子在

表 2 不同污染条件下成都市和仁寿县大气 PM_{2.5} 中金属元素富集因子Table 2 Enrichment factors of metal elements in PM_{2.5} during haze and non-haze periods in Chengdu City and Renshou County

金属元素	成都市			仁寿县		
	非霾期	霾期	比值 (霾期/非霾期)	非霾期	霾期	比值 (霾期/非霾期)
K	2.7	4.8	1.7	2.9	5.8	2.0
Ba	4.5	12.8	2.8	5.0	13.8	2.8
Cd	3 060.4	4 510.6	1.5	2 486.0	7 251.8	2.9
Cr	12.3	17.2	1.4	7.2	20.2	2.8
Cu	72.8	73.5	1.0	57.5	103.9	1.8
Mn	2.7	4.1	1.5	2.1	7.7	3.6
Ni	10.9	18.5	1.7	15.0	19.0	1.3
Sr	2.0	2.8	1.4	2.0	4.0	2.0
Ti	2.7	2.7	1.0	1.4	2.4	1.8
V	2.2	3.4	1.5	2.0	3.4	1.7
Zn	93.9	153.9	1.6	86.2	120.5	1.4
Mg	2.9	2.2	0.8	3.3	5.1	1.6
Na	4.8	5.3	1.1	2.7	3.9	1.4
Al	0.9	0.5	0.6	0.7	0.6	1.0
Ca	3.4	4.3	1.3	3.2	3.3	1.0
As	27.7	70.2	2.5	41.2	57.3	1.4
Pb	143.5	208.6	1.5	96.0	167.3	1.7

10 以上,主要受工业排放、化石燃料燃烧以及道路交通等人为活动的影响. 相比之下,霾期 PM_{2.5} 中金属元素富集因子的变化范围相对较大,在 0.5 ~ 4 510.6 之间. 与非霾期类似,Al 元素富集因子也低于 1, Mg、Ti、Sr、V、Mn、Ca、K 和 Na 元素富集因子介于 1 ~ 10 之间,富集因子变化较小,说明其来源和排放基本保持不变. 而其余 Cr、Cd、Pb、Ni、Zn、As 和 Ba 元素富集因子在 10 以上,且霾期与非霾期相比,有显著提高,增幅介于 1.4 ~ 2.8 倍之间,这说明特征人为污染源排放增加可能是导致霾发生的重要因素.

就仁寿县而言,非霾期大气 PM_{2.5} 中各金属元素的富集因子范围为 0.7 ~ 2 486.0. 其中,Al 元素富集因子低于 1,主要为天然源的贡献, Mg、Ti、Sr、V、Mn、Ca、K、Na、Ba 和 Cr 元素富集因子在 1 ~ 10 之间,为天然源和人为源的混合贡献,其余元素富集因子在 10 以上,应主要受人为污染源影响. 霾期各金属元素富集因子变化范围为 0.6 ~ 7 251.8. Al 元素富集因子几乎没有变化, Mg、Ti、Sr、V、Mn、Ca、K 和 Na 等元素富集因子比非霾期略有提升,但仍介于 1 ~ 10 之间,说明该混合源对 PM_{2.5} 的贡献相对稳定. 但 Cr、Cu 和 Zn 等元素富集因子均大于 10,且有显著增加,霾期与非霾期富集因子比值介于 1.3 ~ 2.9 之间. 可见,相关人为活动污染排放增加对霾发生的贡献不容忽视.

此外,成都市 Zn 和 Pb 等移动源特征元素的富集程度明显高于仁寿县,而仁寿县与工业冶炼、燃料燃烧相关的元素有更高富集水平. 此外,常量元素

霾期富集因子增幅较小,甚至部分元素有所下降,而两地与人为活动相关的重金属微量元素在霾期富集程度显著上升,这表明,人为污染源排放对两地霾污染有重要贡献.

2.3.2 金属元素 PMF 来源分析

本研究通过选取不同因子数量和多次迭代运行 PMF,最终确定 5 个因子分析成都和仁寿县金属元素的来源及其贡献.

PMF 模型分析的结果如图 6 ~ 9 所示. 对成都市而言,大气 PM_{2.5} 中金属元素来源的因子成分谱及贡献率见图 6 和图 7. 因子 1 中 Cd、Cr、Mn 和 Pb 是特征元素,其中 Cr 元素主要源于燃煤和冶金工业,例如镀铬、钢铁制造和不锈钢生产等过程^[35], Cd 元素可能来源于工业生产释放的废气^[36], Mn 与金属冶炼、制造密切相关^[37]. Pb 元素可能源于冶金尘和燃煤^[10]. 因此,结合成都北部和东部郊区分布着部分金属压延、钢铁加工和机械制造业的情况,可将因子 1 归为工业源,其贡献率为 15.4%; 因子 2 中 Ti、Mg、Al 和 Ca 等元素占比较高,由于 Al 元素的富集因子(EF)值低于 1,主要源于地壳,而 Ti、Mg 和 Ca 元素与建设施工活动产生的扬尘密切相关^[38],考虑到成都近年来城市基建活动频繁,各采样点 5 km 内均有道路铺设、房屋建筑等活动,故将因子 2 视为土壤及建筑扬尘源,其相应的贡献率为 28.7%; 因子 3 中 Ba、Na、As 和 Pb 元素占比突出, Ba 与燃煤排放有关,在燃煤锅炉尾部烟气中浓度较高^[17,39], Na、As 和 Pb 与燃煤排放有关^[10,40,41]等,故将因子 3 作为燃煤排放影响的代表,其相应的贡献

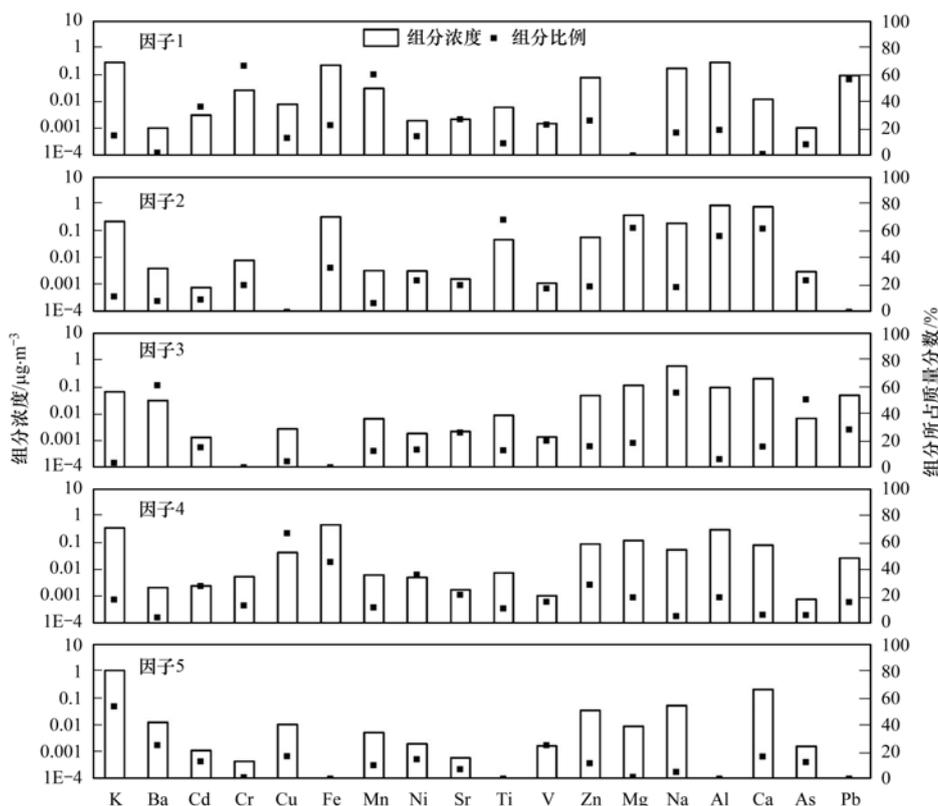


图6 成都市各因子成分谱

Fig. 6 Source profiles of each metal element resolved from PMF model analysis in Chengdu City

率 13.5%；因子 4 中 Cu、Fe、Ni 和 Zn 为特征元素，其中 Cu 和 Zn 是机动车尾气、轮胎和刹车磨损排放的特征元素^[42]，Pb 来源广泛，包括汽车尾气、冶金尘和燃煤^[10]，Ni 是燃油排放的特征元素^[17]，Fe 可能来源于道路扬尘^[43]等。因此，结合成都市各采样点附近存在众多交通干道，车流量大的情况，且成都市机动车保有量居全国前列，机动车排放不可忽视，故将因子 4 作为道路移动源的代表，其贡献率为 32.6%；因子 5 中 K 是特征元素，而 K 元素是生物质燃烧排放的特征元素^[44]，故因子 5 可以反映生物质燃烧尘对颗粒物形成的影响，其贡献率为 9.8%。

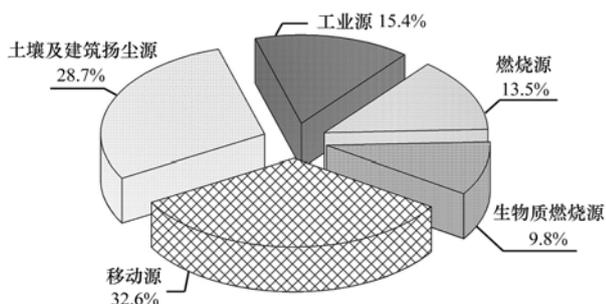
图7 成都市大气 PM_{2.5} 中金属元素来源及贡献率Fig. 7 Source and contribution of metal element pollution in PM_{2.5} in Chengdu City

图 8 和图 9 是仁寿县大气 PM_{2.5} 中金属元素来源及相应的贡献率。其中因子 1 中 Cr、Cu、Ni、Zn

和 Pb 元素占比较高，Cr 和 Cu 可能来源于汽油车和柴油车尾气排放^[45]，Ni 是燃油燃烧的特征元素^[17,46]，Zn 元素是橡胶轮胎和刹车磨损以及尾气排放的特征元素^[45]，Pb 与机动车尾气排放以及橡胶轮胎磨损有关^[43]等，因此，因子 1 可以作为道路移动源的代表，其对颗粒物形成的贡献率为 18.1%；因子 2 中特征元素为 Fe、Ti、Mg、Na 和 Al。根据上述富集因子分析结果，仁寿县 Fe 和 Al 元素主要来自于地壳，Ti、Mg、Na 源于自然和人为的混合源，由于 Mg 元素在各种建筑材料中广泛存在^[47]，因此，综上将因子 2 作为土壤及建筑扬尘源的代表，其相应的贡献率为 14.7%；因子 3 中 Mn、Cu 和 Cd 元素占比较高。由于机械加工、冶炼是 Mn 的主要来源^[48]，Cu 可能来源于工业冶金过程^[42]，Cd 与工业冶金、钢铁制造和机械加工有关^[36,49]，加之仁寿县北部视高工业园和成眉工业集中发展区集聚了多家金属压延、锻造和机械加工制造企业，据此，可将因子 3 作为工业源的代表，其相应的贡献率为 20.9%；因子 4 中 As、Pb、Ca 和 Ba 元素占比较高。由于 As、Ba 与燃煤排放密切相关^[17,39]，Pb 可能来源于化石燃料燃烧^[40]，Ca 与煤或者焦炭燃烧产生的粉尘排放有关^[50]，而仁寿是工业重镇，燃煤在其能源结构中占主导地位，工业燃煤锅炉众多，故将因子 4 作为燃煤源的代表，其相应的贡献率为

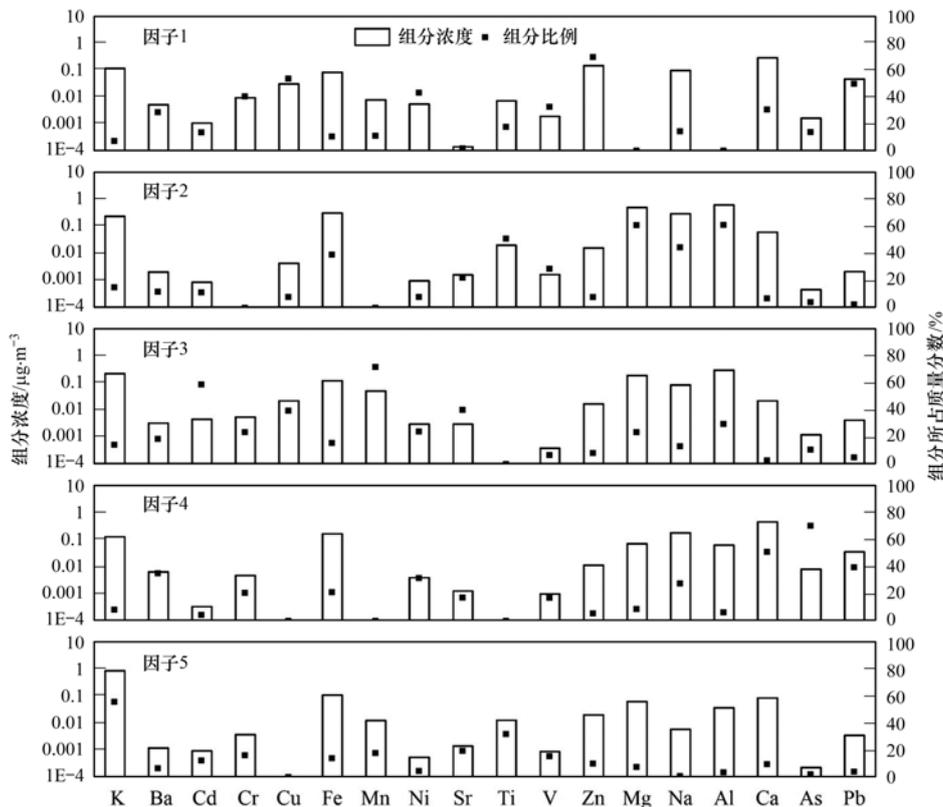
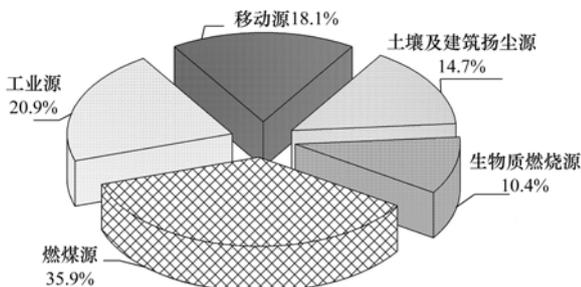


图8 仁寿县各因子成分谱

Fig. 8 Source profiles of each metal element resolved from PMF model analysis in Renshou County

35.9%；因子5中K和Ti元素为特征元素，而K主要来自以燃料秸秆、薪柴燃烧为主的生物质燃烧源^[50]，Ti是扬尘源的特征元素^[27]，且仁寿县周边偏僻乡村无组织排放较多，多用燃料秸秆、薪柴作为民用燃料，故将因子5作为生物质燃烧源的代表，其相应的贡献率为10.4%。

图9 仁寿县大气PM_{2.5}中金属元素来源及贡献率Fig. 9 Source and contribution of metal element pollution in PM_{2.5} in Renshou County

综上所述，成都市大气PM_{2.5}中金属元素的主要来源包括道路移动源、土壤及建筑扬尘源、工业源、燃煤源和生物质燃烧源，而仁寿县的主要来源包括燃煤源、工业源、道路移动源、土壤及建筑扬尘源和生物质燃烧源。成都市机动车排放源和土壤及建筑扬尘源贡献接近60%，是其PM_{2.5}中金属元素的主要来源，而燃煤、工业排放和生物质燃烧贡献率相对较

低。这与成都市的产业布局紧密相关。例如，成都市近年来机动车增速快，其保有量已位列全国第二^[51]；作为第三产业发展迅速的西部中心城市，大型工程项目建设鳞次栉比，机动车尾气排放和建筑扬尘对大气污染的贡献可以预见。而相比之下，由于重工业外迁和能源结构升级，工业排放和燃煤消耗则相对较小，其对污染的影响较小也可以预见。

仁寿县燃煤源和工业源对PM_{2.5}中金属污染的贡献较大，受扬尘源和生物质燃烧源影响较小。这也与仁寿县的产业结构一致。仁寿县第二产业工业占比较高，并以重工业为主^[52~54]，县城中心以及城郊的大型工业园区中分布着大量工业企业。此外，仁寿县能源结构以燃煤为主^[52~54]，且作为重点发展第二产业的工业强县，燃煤和工业排放对大气污染的贡献不容忽视。

3 结论

(1) 采样期间成都市大气PM_{2.5}平均质量浓度大于仁寿县，两地PM_{2.5}浓度均超过国家标准限值。霾期与非霾期PM_{2.5}质量浓度差异明显，且霾基本都在冬季发生，这与冬季不利于污染物扩散的气象条件有关。成都市工业交通混合区PM_{2.5}浓度较大，交通区次之，居住区较小，仁寿县城区PM_{2.5}浓度大于郊区。

(2)成都市和仁寿县 PM_{2.5} 中金属元素浓度水平存在地区差异。成都市大气 PM_{2.5} 中金属元素浓度总和大于仁寿县。成都市扬尘源特征元素和移动源特征元素浓度水平较高,其余元素两地质量浓度差别较小。成都市扬尘源、移动源和燃煤源特征元素占元素总和的比值大于仁寿县,而仁寿县生物质燃烧源、工业源以及燃油源特征元素占比则较高。

(3)与非霾期相比,霾期成都市和仁寿县 PM_{2.5} 中金属元素总量均有上升,但增幅远低于 PM_{2.5} 浓度的增长。成都市和仁寿县 PM_{2.5} 中各元素浓度在霾期增幅不一,但从元素来源上看,两地大致呈现出燃煤、工业活动排放元素增幅较大,机动车污染源次之,扬尘源增幅较缓的状况,两地 PM_{2.5} 污染的加重与人为活动有较大关联。

(4)大气 PM_{2.5} 中金属元素污染及来源受经济规模、发展模式和产业布局的影响呈现出不同的地区特征。在重点发展第三产业的大型城市,如成都,更易遭受交通运输、城市建设等带来的大气污染,而在第二产业占比不断增加的郊县,如仁寿,其污染主要受能源消耗和工业生产的影响。因此,要多方面考虑工业布局、产业转移等对整个大气环境的影响,总量减排和清洁生产应伴随城市发展规划同时开展。

参考文献:

- [1] 贺泓,王新明,王跃思,等. 大气灰霾成因与控制[J]. 中国科学院院刊, 2013, **28**(3): 344-352.
He H, Wang X M, Wang Y S, *et al.* Formation mechanism and control strategies of haze in China [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2013, **28**(3): 344-352.
- [2] Kfoury A, Ledoux F, Roche C, *et al.* PM_{2.5} source apportionment in a French urban coastal site under steelworks emission influences using constrained non-negative matrix factorization receptor model [J]. Journal of Environmental Sciences, 2016, **40**: 114-128.
- [3] Qie G H, Wang Y, Wu C, *et al.* Distribution and sources of particulate mercury and other trace elements in PM_{2.5} and PM₁₀ atop Mount Tai, China [J]. Journal of Environmental Management, 2018, **215**: 195-205.
- [4] Zhang F Y, Li L P, Krafft T, *et al.* Study on the association between ambient air pollution and daily cardiovascular and respiratory mortality in an urban district of Beijing [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2011, **8**(6): 2109-2123.
- [5] Esposito S, Galeone C, Lelli M, *et al.* Impact of air pollution on respiratory diseases in children with recurrent wheezing or asthma [J]. BMC Pulmonary Medicine, 2014, **14**: 130.
- [6] Visser S, Slowik J G, Furger M, *et al.* Kerb and urban increment of highly time-resolved trace elements in PM₁₀, PM_{2.5} and PM_{1.0} winter aerosol in London during ClearLo 2012 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, **15**(5): 2367-2386.
- [7] 冯春婷. 典型煤炭型城市重金属污染特征和健康风险评估 [D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
- [8] 李敏, 连晓文, 王静, 等. 广州两城区大气 PM_{2.5} 金属成分的污染特征 [J]. 环境与职业医学, 2016, **33**(7): 650-656.
Li M, Lian X W, Wang J, *et al.* Pollution characteristics of metal components in PM_{2.5} in two districts of Guangzhou [J]. Journal of Environmental & Occupational Medicine, 2016, **33**(7): 650-656.
- [9] 张玉欣. 南京北郊 VOCs 来源解析及其对臭氧和健康的影响 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2018.
- [10] 刘亚勇. 颗粒物源成分谱对 CMB 源解析结果的影响研究 [D]. 北京: 中国环境科学研究院, 2017.
- [11] Tian H Z, Cheng K, Wang Y, *et al.* Temporal and spatial variation characteristics of atmospheric emissions of Cd, Cr, and Pb from coal in China [J]. Atmospheric Environment, 2012, **50**: 157-163.
- [12] 陈晓红, 唐湘博, 田耘. 基于 PCA-MLR 模型的城市区域 PM_{2.5} 污染来源解析实证研究——以长株潭城市群为例 [J]. 中国软科学, 2015, (1): 139-149.
Chen X H, Tang X B, Tian Y. Urban PM_{2.5} pollution source apportionment and control countermeasures based on PCA-MLR model: an example of Chang-Zhu-Tan city cluster [J]. China Soft Science, 2015, (1): 139-149.
- [13] 王菊, 张悦悦, 金美英, 等. 应用 UNMIX 模型解析长春市大气中 PM₁₀ 来源 [J]. 生态环境学报, 2014, **23**(5): 812-816.
Wang J, Zhang Y Y, Jin M Y, *et al.* Source apportionment of atmospheric PM₁₀ in Changchun by UNMIX [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, **23**(5): 812-816.
- [14] 李妙玲. 北京大气细颗粒物的化学组成特征及来源解析 [D]. 北京: 北京化工大学, 2018.
- [15] Huang S L, Rahn K A, Arimoto R. Testing and optimizing two factor-analysis techniques on aerosol at Narragansett, Rhode Island [J]. Atmospheric Environment, 1999, **33**(14): 2169-2185.
- [16] Yang B, Zhou L L, Xue N D, *et al.* Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils of Huanghuai Plain, China: Comparison of three receptor models [J]. Science of the Total Environment, 2013, **443**: 31-39.
- [17] Tao J, Zhang L M, Cao J J, *et al.* A review of current knowledge concerning PM_{2.5} chemical composition, aerosol optical properties, and their relationships across China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, 2017, doi: 10.5194/acp-2017-271.
- [18] 李培荣, 肖天贵. 成都地区秋冬季污染天气形势下 PM_{2.5} 的扩散与输送 [J]. 中国环境科学, 2020, **40**(1): 63-75.
Li P R, Xiao T G. The diffusion and transport of PM_{2.5} under the polluted weather conditions during autumn and winter seasons in Chengdu [J]. China Environmental Science, 2020, **40**(1): 63-75.
- [19] 蒋燕, 王斌, 罗彬. PM_{2.5} 及其组分对成都大气能见度的影响分析 [J]. 环境科学与技术, 2017, **40**(S2): 211-215.
Jiang Y, Wang B, Luo B. The impact of the components of PM_{2.5} on visibility in Chengdu [J]. Environmental Science & Technology, 2017, **40**(S2): 211-215.
- [20] 张菊, 林瑜, 乔玉红, 等. 成都市西南郊区夏秋季 PM_{2.5} 碳组分化学特征 [J]. 环境工程, 2017, **35**(10): 100-104.
Zhang J, Lin Y, Qiao Y H, *et al.* Character of carbonaceous aerosol in PM_{2.5} during Summer-Autumn period in southwest suburb of Chengdu [J]. Environmental Engineering, 2017, **35**(10): 100-104.
- [21] 吴明, 吴丹, 夏俊荣, 等. 成都冬季 PM_{2.5} 化学组分污染特征及来源解析 [J]. 环境科学, 2019, **40**(1): 76-85.
Wu M, Wu D, Xia J R, *et al.* Analysis of pollution characteristics and sources of PM_{2.5} chemical components in

- Chengdu in winter[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(1): 76-85.
- [22] 张智胜, 陶俊, 龙颖贤, 等. 成都城区 PM_{2.5} 中有害微量元素污染特征[J]. *中国科学院大学学报*, 2014, **31**(3): 426-430, 438.
- Zhang Z S, Tao J, Long Y X, *et al.* Characteristics of hazardous trace elements in PM_{2.5} in urban area of Chengdu[J]. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 2014, **31**(3): 426-430, 438.
- [23] Wang H B, Qiao B Q, Zhang L M, *et al.* Characteristics and sources of trace elements in PM_{2.5} in two megacities in Sichuan Basin of southwest China[J]. *Environmental Pollution*, 2018, **242**: 1577-1586.
- [24] 张梦. 成都市东区大气颗粒物源解析[D]. 成都: 成都理工大学, 2017.
- [25] 张霖琳, 王超, 刀谱, 等. 京津冀地区城市环境空气颗粒物及其元素特征分析[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(12): 2993-3000.
- Zhang L L, Wang C, Dao X, *et al.* Characterization of elements in air particulate matters in Beijing-Tianjin-Hebei megacities, China[J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(12): 2993-3000.
- [26] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [27] 杨怀金, 杨德容, 叶芝祥, 等. 成都西南郊区春季 PM_{2.5} 中元素特征及重金属潜在生态风险评价[J]. *环境科学*, 2016, **37**(12): 4490-4503.
- Yang H J, Yang D R, Ye Z X, *et al.* Characteristics of elements and potential ecological risk assessment of heavy metals in PM_{2.5} at the southwest suburb of Chengdu in spring[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(12): 4490-4503.
- [28] Li Y Y, Chang M, Ding S S, *et al.* Monitoring and source apportionment of trace elements in PM_{2.5}: implications for local air quality management [J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, **196**: 16-25.
- [29] Liu G, Li J H, Wu D, *et al.* Chemical composition and source apportionment of the ambient PM_{2.5} in Hangzhou, China[J]. *Particuology*, 2015, **18**: 135-143.
- [30] Paatero P. Least squares formulation of robust non-negative factor analysis[J]. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 1997, **37**(1): 23-35.
- [31] Park M B, Lee T J, Lee E S, *et al.* Enhancing source identification of hourly PM_{2.5} data in Seoul based on a dataset segmentation scheme by positive matrix factorization (PMF)[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2019, **10**(4): 1042-1059.
- [32] Norris G N, Duval R, Brown S, *et al.* EPA Positive Matrix Factorization (PMF) 5.0 fundamentals and user guide [R]. Washington: U. S. EPA Office of Research and Development, 2014.
- [33] Joshi U M, Balasubramanian R. Characteristics and environmental mobility of trace elements in urban runoff [J]. *Chemosphere*, 2010, **80**(3): 310-318.
- [34] GB 3095-2012, 环境空气质量标准[S].
- [35] 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.
- [36] 周雪明, 郑乃嘉, 李英红, 等. 2011~2012 年北京大气 PM_{2.5} 中重金属的污染特征与来源分析[J]. *环境科学*, 2017, **38**(10): 4054-4060.
- Zhou X M, Zheng N J, Li Y H, *et al.* Chemical characteristics and sources of heavy metals in fine particles in Beijing in 2011-2012[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(10): 4054-4060.
- [37] 郑玫, 张延君, 闫才青, 等. 中国 PM_{2.5} 来源解析方法综述[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2014, **50**(6): 1141-1154.
- Zheng M, Zhang Y J, Yan C Q, *et al.* Review of PM_{2.5} source apportionment methods in China [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2014, **50**(6): 1141-1154.
- [38] Huy D H, Thanh L T, Hien T T, *et al.* Comparative study on water-soluble inorganic ions in PM_{2.5} from two distinct climate regions and air quality[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2020, **88**: 349-360.
- [39] 陶君, 谷小兵, 何忠勋, 等. 0.3 MW_{th} CFB 燃煤锅炉痕量元素排放特性[J]. *电力科技与环保*, 2019, **35**(2): 38-41.
- Tao J, Gu X B, He Z L, *et al.* Trace elements emission characteristics of a 0.3 MW_{th} coal fired circulating fluidized bed boiler [J]. *Electric Power Technology and Environmental Protection*, 2019, **35**(2): 38-41.
- [40] 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.
- [41] Gao J J, Tian H Z, Cheng K, *et al.* Seasonal and spatial variation of trace elements in multi-size airborne particulate matters of Beijing, China: mass concentration, enrichment characteristics, source apportionment, chemical speciation and bioavailability[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **99**: 257-265.
- [42] Yatkin S, Bayram A. Elemental composition and sources of particulate matter in the ambient air of a Metropolitan City[J]. *Atmospheric Research*, 2007, **85**(1): 126-139.
- [43] 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.
- [44] Tao J, Zhang L M, Zhang R J, *et al.* Uncertainty assessment of source attribution of PM_{2.5} and its water-soluble organic carbon content using different biomass burning tracers in positive matrix factorization analysis — a case study in Beijing, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **543**: 326-335.
- [45] Harrison R M, Jones A M, Giehl J, *et al.* Estimation of the contributions of brake dust, tire wear, and resuspension to nonexhaust traffic particles derived from atmospheric measurements[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(12): 6523-6529.
- [46] 陈衍婷, 杜文娇, 陈进生, 等. 海西城市群 PM_{2.5} 中重金属元素的污染特征及健康风险评价[J]. *环境科学*, 2017, **38**(2): 429-437.
- Chen Y T, Du W J, Chen J S, *et al.* Pollution characteristics of heavy metals in PM_{2.5} and their human health risks among the coastal city group along western Taiwan straits region, China[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(2): 429-437.
- [47] Kuang C, Neumann T, Norra S, *et al.* Land use-related chemical composition of street sediments in Beijing [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2004, **11**(2): 73-83.
- [48] 林瑜, 叶芝祥, 杨怀金, 等. 成都市西南郊区春季大气 PM_{2.5} 的污染水平及来源解析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(5): 1629-1638.
- Lin Y, Ye Z X, Yang H J, *et al.* Pollution level and source

- apportionment of atmospheric particles PM_{2.5} in southwest suburb of Chengdu in spring [J]. *Environmental Science*, 2016, **37** (5): 1629-1638.
- [49] 陈锦超. 北京市霾与非霾期间 PM_{2.5} 中无机组分特征及源解析的研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2018.
- [50] Hao Y F, Meng X P, Yu X P, *et al.* Characteristics of trace elements in PM_{2.5} and PM₁₀ of Chifeng, northeast China: Insights into spatiotemporal variations and sources [J]. *Atmospheric Research*, 2018, **213**: 550-561.
- [51] 李欣悦, 张凯山. 成都市气态污染物 NO₂、SO₂ 与大气颗粒物相关性分析[J]. *环境工程*, 2019, **37**(6): 111-116.
- Li X Y, Zhang K S. Analysis on relationships of gaseous pollutants NO₂ and SO₂ with atmospheric particles in Chengdu [J]. *Environmental Engineering*, 2019, **37**(6): 111-116.
- [52] 眉山市统计局. 眉山市 2017 统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.
- [53] 眉山市统计局. 眉山市 2018 统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [54] 眉山市统计局. 眉山市 2019 统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.

《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

2019 年 11 月 19 日, 中国科技论文统计结果发布会在北京举行, 会议公布了“百种中国杰出学术期刊”获奖名单. 《环境科学》连续 18 次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号. “百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定. 该体系利用总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标进行统计分析, 对期刊分学科进行评比, 其评价结果客观公正, 为我国科技界公认, 并具有广泛影响.



CONTENTS

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