

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

不同国家农用地土壤环境标准比较与启示
李勣之, 姜璐, 王国庆, 陈玉东, 龙涛, 林玉锁

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年2月

第43卷 第2期
Vol.43 No.2

目次

综述

- 不同国家农用地土壤环境标准比较与启示 李勛之, 姜蓉, 王国庆, 陈玉东, 龙涛, 林玉锁 (577)
再生水水质稳定性评价指标与体系 张馨怡, 魏东斌, 杜宇国 (586)

研究报告

- 兰州市采暖期和非采暖期大气降尘重金属的分布特征及来源 黄文, 王胜利 (597)
基于多种新型受体模型的 PM_{2.5} 来源解析对比 王振宇, 李永斌, 郭凌, 宋志强, 许艳玲, 王丰, 梁维青, 史国良, 冯银厂 (608)
华中地区夏季 PM_{2.5} 中水溶性离子污染特征及来源分析 苏业旺, 刘威杰, 毛瑶, 程铨, 石明明, 许安, 李星谕, 胡天鹏, 祁士华, 邢新丽 (619)
淄博 2021 年元宵节 PM_{2.5} 水溶性离子污染特征 陈巧, 吴丽萍, 徐勃, 张向炎, 李梦辉, 赵雪艳, 杨文 (629)
浙江省大气颗粒物 PM_{2.5} 中全氟化合物污染特征分析及健康风险评估 李冰洁, 陈金媛, 刘铮铮, 王静, 何士冲 (639)
2001~2019 年气象条件对江苏省 PM_{2.5} 分布的影响 潘晨, 康志明 (649)
基于神经网络和数值模型的重点区域 PM_{2.5} 预报比较分析 高愈霄, 汪巍, 黄永海, 王晓彦, 朱媛媛, 朱莉莉, 许荣, 李健军 (663)
2015~2020 年海南省臭氧时空变化及其成因分析 符传博, 徐文帅, 丹利, 佟金鹤 (675)
济南市城区夏季臭氧污染过程及来源分析 孙晓艳, 赵敏, 申恒青, 刘杨, 杜明月, 张文娟, 许宏宇, 范国兰, 公华林, 李青松, 李大秋, 高晓梅, 张丽娜 (686)
山东临沂大气夏季典型时段臭氧污染特征及其控制因素分析 杨雪, 安馨悦, 刘玉启, 江春美, 张鹏程, 李灵婕, 赵世阳, 张书源 (696)
基于气团老化程度对挥发性有机物分类改善 PMF 源解析效果 朱玉凡, 陈强, 刘晓, 张瑞欣, 郭文凯 (707)
日照市夏季 VOCs 物种空间分布特征及其对臭氧生成的影响 姚维杰, 王大玮, 谢付堂, 朱宏伟, 孟祥宇, 田雨, 刘航, 刘晓咏, 张宇婷, 雷山东, 孙业乐, 吴林, 潘小乐, 王自发 (714)
泰山大气卤代烃的长期变化趋势与来源 赵峰, 陈天舒, 董灿, 李洪勇, 刘子璐, 毕于健, 国兆新, 王新锋, 杨凌霄, 王韬, 王文兴, 薛丽坤 (723)
典型内燃叉车尾气挥发性有机物与正构烷烃的排放特征 周文钦, 李成, 刘俊文, 朱曼妮, 桂小亮, 余飞, 廖松地, 姜帆, 李光辉, 蒋斌, 郑君瑜 (735)
2000~2020 年黄河流域植被时空演化驱动机制 田智慧, 任祖光, 魏海涛 (743)
西南喀斯特流域土地利用对河流溶解无机碳及其同位素的影响 徐森, 李思亮, 钟君 (752)
生物炭添加对太湖滨岸带土壤氮矿化和淋失特征的影响 熊钰婷, 袁旭音, 周慧华, 高一丹, 汪宜敏 (762)
不同降雨条件下北运河河岸带类型对径流污染削减效果的影响 朱利英, 赵凯, 张俊亚, 王春荣, 魏源送 (770)
雨源型城市河流污染特征及水质联合评价: 以深圳龙岗河为例 毕业亮, 王华彩, 夏兵, 姜参参, 吴伟业, 李志林, 李诗敏, 宿辉, 白志辉, 徐圣君, 庄绪亮 (782)
廊坊市区径流污染时空分布特征及来源解析 潘欣荣, 左剑恶, 张宇, 门聪, 张丽萍, 黄守斌 (795)
北运河京津冀段河道浮游微生物群落多样性变化分析 郭芝芝, 苏振华, 邱琰茗, 郭道宇 (803)
河北省典型景观水体反硝化菌群落时空分布特征及驱动因素: 以石家庄为例 陈召莹, 张紫薇, 张甜娜, 周石磊, 张艺冉, 董宛佳, 于明会, 张一凡, 张家丰 (813)
青海湖流域有色可溶性有机物来源与特征分析 俞晓琴, 孟先强, 吴华武, 陈慧敏, 李宇阳, 朱俊羽, 郭燕妮, 姚磊 (826)
鄱阳湖丰枯情景对有色可溶性有机物生物可利用性及收支平衡的影响 郭燕妮, 姚晓龙, 陈慧敏, 俞晓琴, 李宇阳, 朱俊羽, 韩龙飞, 周蕾, 周永强 (837)
鄱阳湖沉积物溶解性有机质光谱特征 罗燕清, 万智巍, 晏彩霞, 聂明华, 丁明军, 鞠民, 刘赞 (847)
汤逊湖表层沉积物重金属污染与潜在生态风险评价 李星谕, 李朋, 苏业旺, 石明明, 胡天鹏, 毛瑶, 刘力, 张雅, 邢新丽, 祁士华 (859)
基于核密度估计的城市基础要素与街尘营养元素含量特征关联 王子娇, 李叙勇 (867)
新冠疫情下武汉典型饮用水水源中 DBPs 污染特征与风险评估 张坤峰, 昌盛, 涂响, 付青, 杨光, 樊月婷, 孙兴滨 (878)
铁改性石英砂过滤协同控制饮用水含氮消毒副产物和条件致病菌 齐鹏, 胡春, 邢学群, 毕志浩, 李泽松 (887)
氮掺杂生物炭催化臭氧对于布洛芬的降解特性与机制 柴铨, 许路, 金鑫, 石炬, 吴晨曦, 金鹏康 (896)
环糊精多孔聚合物对水中染料分子的吸附性能及主客效应 赵传靓, 王子婕, 闫仪, 徐慧, 周俊垣, 杨利伟, 王东升 (907)
冷冻 PN/A 颗粒污泥快速活化过程中的污泥形态与菌群演化特征分析 黄子恒, 张立, 崔舒惠, 张琦英, 文言, 钱飞跃 (920)
不同阳离子聚丙烯酰胺有机脱水剂对污泥脱水性能的影响 冯齐云, 高宝玉, 岳钦艳, 石伟杰, 冯春晖, 周继柱, 王国瑞 (928)
云南某矿区小流域土壤重金属健康风险评价 刘洋, 何朝辉, 牛学奎, 张迪, 潘波 (936)
山地平原过渡带耕地土壤重金属空间特征及潜在生态风险因素探析 张丁, 黄容, 高雪松 (946)
地累积指数法评价多金属环境质量的方法优化探索: 以农业发达地区为例 鞠铁男, 雷梅 (957)
西南地质高背景区蔬菜 Pb 的安全生产阈值与土地质量类别划分 穆德苗, 孙约兵 (965)
典型锰矿区周边农田土壤-农作物重金属污染特征及生态风险评价 黄钟霆, 易盛炜, 陈贝贝, 彭锐, 石雪芳, 李峰 (975)
矿业废弃地不同生态修复模式下植物多样性及重金属富集迁移特征 周鹏飞, 张世文, 罗明, 魏洪斌, 宋强, 方兵, 庄红娟, 陈弘扬 (985)
不同种植年限蔬菜大棚土壤特性、重金属累积和生态风险 任强, 孙瑞玲, 郑凯旋, 刘伟丹, 阮心玲, 王洋洋 (995)
温室与大田种植方式对胡萝卜生长过程中重金属吸收的影响 曹春, 任丹, 吕贞英, 张鹏, 李锦超, 陈勋文, 王俊坚 (1004)
两种淹水模式下施用钝化材料对镉污染农田水稻安全的影响 王港, 余海英, 李廷轩, 唐婵 (1015)
复合淋洗条件下农用地耕作层土壤去镉效率及其功能调节 曹坤坤, 张沙沙, 胡学玉, 张敏, 胡晓晓, 王子劲 (1023)
产多胺细菌调控根际细菌群落阻控小麦 Cd 吸收效应 李晓哲, 覃善梅, 陈兆进, 张君, 姚伦广, 李娜, 庞发虎, 韩辉 (1031)
土壤 *phoC* 和 *phoD* 微生物群落对化肥和有机肥配施生物炭的响应 杨文娜, 余冻, 罗东海, 熊子怡, 王莹燕, 王子芳, 高明 (1040)
刺槐林恢复过程中土壤微生物碳降解酶的变化及与碳库组分的关系 李文杰, 张颖皎, 赵雅萍, 许森平, 任成杰, 杨改河, 冯永忠, 任广鑫, 王晓娟, 韩新辉 (1050)
中亚热带不同林龄马尾松林土壤酶学计量特征 焦鹏宇, 郭文, 陈泽龙, 刘先, 胡亚林, 王玉哲 (1059)
稻田与旱地土壤中真菌和细菌对秸秆碳的利用特征 邓少虹, 郑小东, 毛婉琼, 陈香碧, 胡亚军, 程爱武, 何寻阳, 苏以荣 (1069)
模拟及实际根系分泌物对苤蓝土壤微生物群落的影响 韩博远, 张闻, 胡芳雨, 赵庆庆, 卢媛, 孔学, 吕俊岗 (1077)
德兴铜矿区抗生素抗性基因污染特征及其驱动因子 韩柳, 楼倩, 乔敏, 刘梦婷, 钟家有, 丁惠君 (1089)
陕西渭北旱塬区农田土壤有机质空间预测方法 尉芳, 刘京, 夏利恒, 徐仲伟, 龙小翠 (1097)
长三角农田轮作系统氨排放特征、转化机制和减排潜力 徐昶, 苗文亮, 倪远之, 沈根祥, 钱晓雍, 付侃, 高宗源, 王振旗 (1108)
《环境科学》征订启事 (618) 《环境科学》征稿简则 (761) 信息 (685, 935, 956)

兰州市采暖期和非采暖期大气降尘重金属的分布特征及来源

黄文, 王胜利*

(兰州大学资源环境学院, 兰州 730000)

摘要: 在兰州市设置6个采样点, 于2010年4月至2018年3月每月采集大气降尘样品, 测定其中的重金属(Fe、Mn、Zn、Pb、Cr、Cu、Ni和Cd)含量, 探究重金属的时空变化规律, 并综合运用偏相关分析、富集因子法和主成分分析法判别大气降尘中重金属的来源。结果表明, 兰州市大气降尘中重金属的平均含量依次为: Fe > Mn > Zn > Pb > Cr > Cu > Ni > Cd, 其中Cd、Zn和Pb都存在一定的污染。从时间角度来看, 除地壳元素Fe和Mn外, 其他元素的含量大都表现为采暖期 > 非采暖期, 其中2011年和2013年中各元素在非采暖期和采暖期的含量差异较大。从空间角度来看, 各区域的非采暖期和采暖期存在一定的差异, 但除Zn和Cd外, 其他元素在各区域之间的差异不大。源解析结果表明, 兰州市大气降尘重金属在非采暖期主要来源于工业源, 其次是交通源和扬尘源; 在采暖期主要来源于燃煤、交通和工业活动, 其次是二次扬尘和自然源。

关键词: 大气降尘; 采暖期; 非采暖期; 重金属; 源解析

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)02-0597-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202103222

Distribution Characteristics and Sources of Heavy Metals in Atmospheric Deposition During Heating and Non-heating Period in Lanzhou

HUANG Wen, WANG Sheng-li*

(College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Six sampling sites were set up in Lanzhou City, and atmospheric deposition samples were collected from April 2010 to March 2018. Subsequently, the concentration of heavy metals (Fe, Mn, Zn, Pb, Cr, Cu, Ni, and Cd) was determined to explore the temporal and spatial characteristics of heavy metals. Finally, partial correlation analysis, the enrichment factor method, and the principal component analysis method were used to identify the source of heavy metals in the atmospheric deposition. The results show that the ranking of average heavy metal content in the atmospheric deposition in Lanzhou from high to low was Fe > Mn > Zn > Pb > Cr > Cu > Ni > Cd, and Cd, Zn, and Pb were all polluted. In terms of time, except for Fe and Mn, the other elements mostly showed a trend of higher content in the heating period than that in the non-heating period, and the contents of each element in the non-heating period and the heating period in 2011 and 2013 were significantly different. In terms of sites, there were certain differences between the non-heating period and the heating period in each region; however, the differences among elements were not significant except for Zn and Cd. The source analysis results show that in the non-heating period, the heavy metals in the atmospheric deposition in Lanzhou mainly came from industrial sources, followed by traffic sources and fugitive dust sources. In the heating period, the heavy metals in the atmospheric deposition in Lanzhou mainly came from coal-burning, transportation, and industry activities, followed by secondary dust and natural sources.

Key words: atmospheric deposition; heating period; non-heating period; heavy metals; source

大气降尘作为地球生态系统物质交换的一种形式,在地球表面生态系统的物质交换过程中起着重要作用,与生态、农业、健康和气候等领域密切相关^[1~3]。此外,大气降尘本身及其所携带的重金属、有机物和微生物等,会通过皮肤和呼吸等途径进入人体,在人体中逐渐累积,长期会对人体健康造成损害^[4,5]。其中,重金属具有难降解、易累积和毒性大等特点,此外大气降尘中重金属还具有传输距离远、迁移能力强和影响范围大等特点,因此污染范围更广^[6]。

近年来,已经有许多学者对大气降尘中重金属开展了研究。大气降尘作为地-气系统的交换方式,存在时间和空间上的变化规律^[7~10]。栾慧君等^[3]的研究表明徐州市大气降尘中Cd、Pb和As的含量在第四季度(采暖期)相对较高,Cr和Cu的含量在第三季度相对较高。张夏等^[8]的研究发现重庆市大气

降尘秋季重金属(Cd、Cr、Ni和Pb)的含量显著高于其他季节,且工业居住混合区和交通枢纽区的污染比郊区严重。此外,我国大气降尘中重金属的含量普遍高于国外^[11~15],对我国大气降尘重金属的污染特征及来源进行研究,可为今后大气降尘污染防治标准制定提供依据。然而国内对于大气降尘中重金属的研究时间跨度较短,鲜见长时间跨度的报道。

兰州市是我国最早出现光化学烟雾污染的城市。作为西北重要的工业城市,兰州市工业大气污染物排放量大,及其特殊的地形和气象条件,使兰州成为全国大气污染最严重的城市之一。本文通过监测2010年4月至2018年3月兰州市不同城区的大气

收稿日期: 2021-03-25; 修订日期: 2021-07-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1802905)

作者简介: 黄文(1994~),女,硕士研究生,主要研究方向为大气降尘重金属, E-mail: huangw17@lzu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: wangshengl@lzu.edu.cn

降尘,对兰州市大气降尘中重金属进行分析,评估兰州市大气降尘重金属的污染情况,并揭示其时空变化规律和来源解析,以期为兰州市及其他城市大气污染防治提供基础数据和科学支撑。

1 材料与方法

1.1 样品采集

根据兰州市城区划分,在安宁区、城关区、七里河区、西固区和榆中县这 5 个城区共设置 6 个采样点(图 1),采样点特征如表 1 所示.将降尘缸(直径 15 cm,高度 30 cm,且内壁光滑)放置在当地居民楼或办公楼楼顶,周围无高大遮挡物.于 2010 年 4 月至 2018 年 3 月期间(每年的 4~10 月为非采暖期,11 月至次年 3 月为采暖期;其中 2018 年 1~3 月为 2017 年采暖期数据),以月为周期连续采样,用毛刷将样品装入信封后再放入密封袋,带回实验室并存放于 4℃ 条件下,共收集大气降尘样品 576 个.每月采样结束后用 0.5% HNO₃ 溶液和去离子水先后清洗采样缸,以继续下月采样。

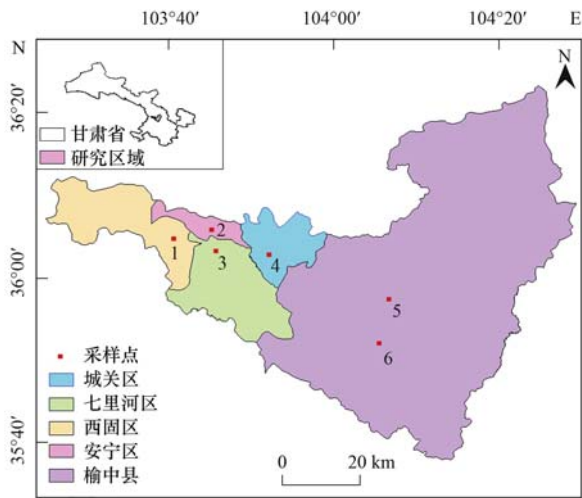


图 1 采样点分布示意

Fig. 1 Location of the sampling sites

表 1 采样点特征

Table 1 Characteristics of sampling sites

采样点编号	城区	特征
1	西固区	工业、交通、商业和居住的混合区域
2	安宁区	文教和商业的混合区域
3	七里河区	文教、工业和交通的混合区域
4	城关区	道路密集,流量大,为交通、商业和居住的混合区域
5	榆中县郊区	林地和农田,工业污染源少,有居民居住
6	榆中县城区	交通和商业的混合区域,但人流量和车流量相比于市区较少

1.2 样品处理及测定

收集的大气降尘样品均需过 100 目尼龙筛以去除石子和落叶等杂物,装袋后再存放于 4℃ 条件下。

液态大气降尘样品则先存放于 -18℃ 条件下,再进行冷冻干燥处理,干燥后的样品经研磨过筛后装袋存放于 4℃ 的条件下.大气降尘中重金属(Fe、Mn、Zn、Pb、Cr、Cu、Ni 和 Cd)的全量采用微波消解仪(Anton Paar, Multiwave PRO 3000)加入 HNO₃、HCl、HF 和 H₂O₂ 进行消解,消解后的样品使用原子吸收分光光度计(analytikjena, ZEE nit 700P)进行测定^[16].为减小误差,本实验过程中,采用国家标准土壤样品 GSS-8(GBW-07408)、空白样和平行样进行质量控制,标准样品中重金属的回收率为(100±5)%。

1.3 富集因子法

采用富集因子法(enrichment factor, EF)来判断和评估大气颗粒物中元素富集程度和来源^[17].具体公式如下:

$$EF = \frac{(C_i/c_n)_{\text{样点}}}{(C_i/c_n)_{\text{背景值}}}$$

式中, C_i 表示重金属元素 i 的含量, C_n 表示参考元素的含量.通常选用 Fe、Al 和 Si 等在地壳中分布相对均匀且含量比较稳定的矿质元素作为参考元素^[18],本文选择 Fe 作为参考元素.富集因子评价标准^[18,19]见表 2。

表 2 富集因子评价标准

Table 2 Evaluation criteria of enrichment factor

项目	污染评价
EF ≤ 2	轻度富集
2 < EF ≤ 5	中度富集
5 < EF ≤ 20	显著富集
20 < EF ≤ 40	高度富集
EF > 40	极高富集

1.4 主成分分析

利用主成分分析(principal component analysis, PCA)来确定大气降尘中重金属的来源.PCA 是一种通过降维思想,在损失少量数据的前提下,将多个变量转化为几个综合因子来确定其主要影响因素的分析方法^[20].利用 SPSS 24.0 软件对大气降尘样品进行主成分分析,在分析之前先对数据进行 KMO 和巴特利特球形检验,只有 KMO 值大于 0.5,巴特利特球形度检验中的显著性小于 0.05 才适合做主成分分析^[21].本文中分析的每组数据的 KMO 值和巴特利特球形度检验的显著性均满足上述要求,且提取的主成分因子的特征值均大于 1,适合做主成分分析。

2 结果与讨论

2.1 重金属的含量

对大气降尘重金属含量的数据统计结果见表

3. 大气降尘中各金属元素在含量上有明显的差异, 平均含量高低依次为: $\text{Fe} > \text{Mn} > \text{Zn} > \text{Pb} > \text{Cr} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Cd}$. 其中, Zn 、 Pb 、 Cr 、 Cu 、 Ni 和 Cd 的平均含量均高于甘肃省土壤元素背景值^[22]. 虽然 Fe 和 Mn 的平均含量较高, 但并没有超过背景值, 而低含量的 Cd 却远远超过了背景值. 有研究表明^[23,24], 元素的变异系数越高, 受人为活动干扰越多. 从表 3 可得,

除 Fe 和 Mn 外, 其他元素的变异系数均高于 0.40, 说明这些金属元素均很大程度上受人为因素的干扰. 此外, 大气降尘中 Zn 、 Pb 和 Cd 的平均含量分别为土壤风险筛选值的 1.61、1.15 和 16.32 倍, 其他元素平均含量均低于土壤风险筛选值^[25]. 因此对于大气降尘而言, Cd 、 Zn 和 Pb 存在一定污染, 需要重点关注.

表 3 兰州市大气降尘中重金属的含量¹⁾/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

Table 3 Concentration of heavy metals in atmospheric deposition/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$								
项目	$\omega(\text{Fe})$	$\omega(\text{Mn})$	$\omega(\text{Zn})$	$\omega(\text{Pb})$	$\omega(\text{Cr})$	$\omega(\text{Cu})$	$\omega(\text{Ni})$	$\omega(\text{Cd})$
最小值	2 389	41.24	45.39	12.23	8.46	3.23	5.25	0.12
最大值	59 123	1 559.38	2 169.65	486.81	413.73	267.13	429.45	20.66
平均值	25 806	569.64	406.32	133.54	84.47	77.35	49.33	4.69
标准差	7 810	179.30	220.51	60.07	43.96	32.37	33.61	2.85
变异系数	0.30	0.31	0.54	0.45	0.52	0.42	0.68	0.61
甘肃省土壤背景值 ^[22]	30 900	653	68.50	18.80	70.20	24.10	35.20	0.12
风险筛选值 ¹⁾	— ²⁾	—	250	120	200	100	100	0.30

1) 风险筛选值为文献[25]中 $6.5 < \text{pH} \leq 7.5$ 条件下的值; 2) “—”表示文献中没有相关数据

为探究兰州市大气降尘中重金属在全国范围内的污染水平, 选择华北、西南、东部和东南等地区的城市进行对比. 各地大气降尘的重金属含量见表 4. 从中可知, 兰州市降尘重金属含量在全国处于中等水平, 同为西北省会城市, 兰州降尘中重金属含量低于西安^[26] (除 Cu 和 Ni), 而高于乌鲁木齐^[27] (除 Zn) 和银川^[28] (除 Mn); 相比于华北城市 (北京^[15]), 兰州的 Ni 和 Cd 含量高于北京; 相比于中部城市 (杭州^[29] 和南京^[30]), 除 Fe 、 Cr 和 Ni 外, 兰

州市其他元素含量均低于杭州和南京; 相比于华南城市 (泉州^[31]), 兰州市的 Cd 含量高于泉州; 相比于西南城市 (重庆^[32]), 兰州市的 Pb 、 Cu 和 Cd 含量较高. 由此可得, 兰州市在西北地区污染水平偏高, 可能是由于兰州市是我国重要的工业基地, 逆温现象频繁, 导致排放到大气中的污染物难以扩散^[33]; 在全国范围内, 兰州市 Cd 污染水平较高, 这可能是由于工业活动和民用燃煤导致的^[34,35]; 而其他元素与东部和东南部地区相比处于中等污染水平.

表 4 兰州市与国内其他城市大气降尘重金属的对比¹⁾/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

Table 4 Comparison of atmospheric heavy metals in Lanzhou and other cities in China/mg·kg ⁻¹									
地点	地图	ω(Fe)	ω(Mn)	ω(Zn)	ω(Pb)	ω(Cr)	ω(Cu)	ω(Ni)	ω(Cd)
北京 ^[15]	华北	—	707.94	439.73	152.20	85.97	84.16	47.64	3.19
重庆 ^[32]	西南	—	—	701.80	69.30	273.60	75.00	144.70	4.45
杭州 ^[29]	华东	21 149	741.10	1 820.40	363.70	—	223.60	27.80	15.60
南京 ^[30]	华东	—	—	526.66	147.35	81.29	168.28	45.32	5.18
泉州 ^[31]	华南	41 245	1 061.00	975.00	256.40	125.40	122.70	84.83	2.81
乌鲁木齐 ^[27]	西北	7 858	404.57	722.90	34.62	65.43	56.51	48.54	1.28
西安 ^[26]	西北	—	—	454.90	438.10	149.50	61.10	41.40	7.80
银川 ^[28]	西北	—	612.38	169.55	44.69	72.36	67.65	21.51	0.05
兰州(本研究)	西北	25 806	569.64	406.32	133.54	84.47	77.35	49.33	4.69

1) “—”表示文献中没有相关数据

2.2 时空变化规律

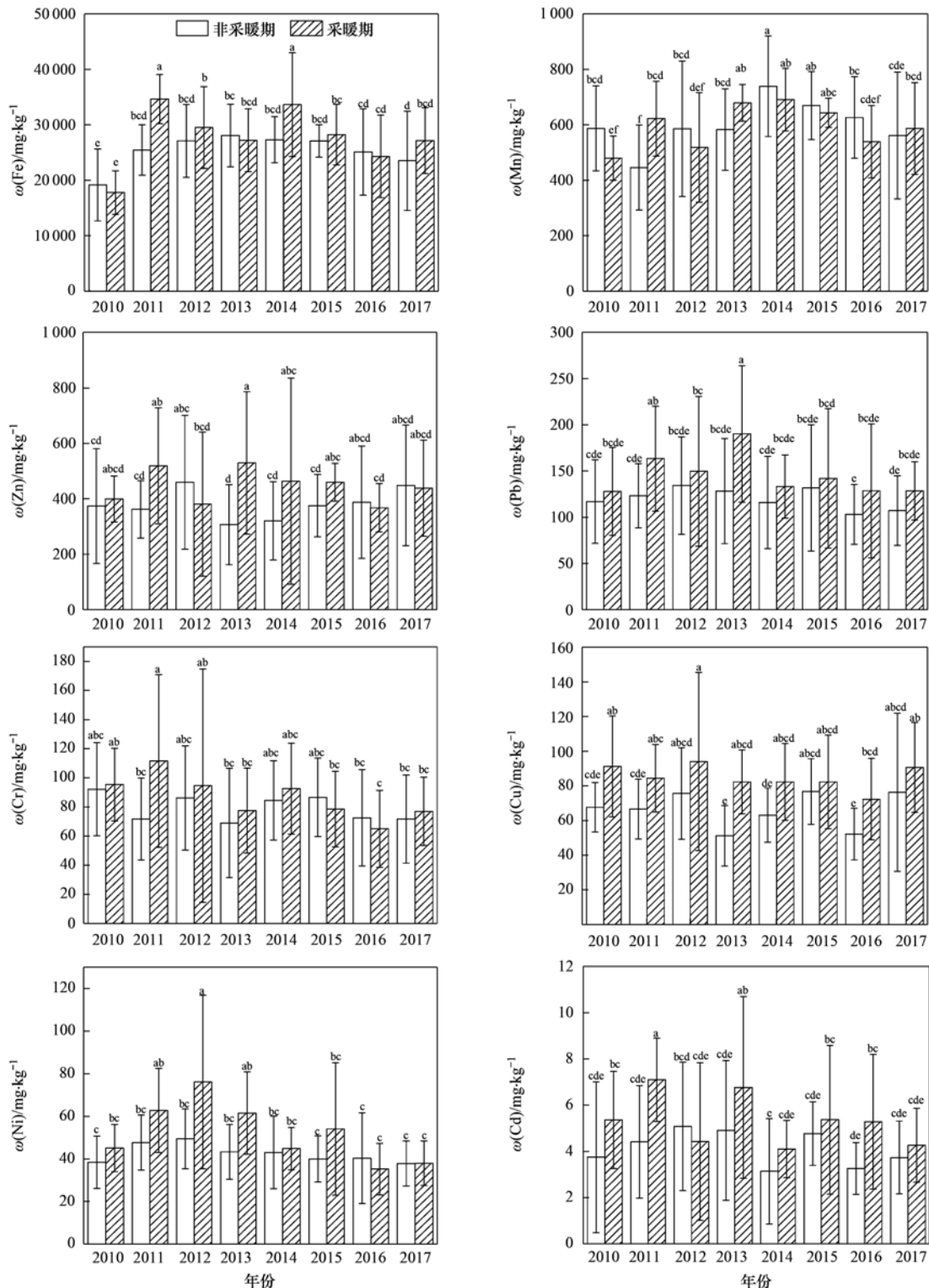
2.2.1 时间变化规律

对兰州市而言, 每年 4 ~ 10 月为非采暖期, 11 月到次年 3 月为采暖期. 非采暖期和采暖期大气降尘中重金属含量的时间变化如图 2 所示. 从时间角度分析非采暖期和采暖期的各元素含量变化如下.

对于 Fe 元素, 2010、2013 和 2016 年表现为非采暖期 > 采暖期, 其他年份为采暖期 > 非采暖期, 但只有 2011 年和 2014 年的非采暖期和采暖期之间存

在显著差异. 除 2010 年全年、2011 年采暖期和 2014 年采暖期外, 其他年份的 Fe 含量差异性不大, 且 2011 年采暖期和 2014 年采暖期的 Fe 含量略大于甘肃省土壤背景值. 说明 Fe 在非采暖期的含量仅受自然源的影响, 在采暖期除受到自然因素的影响之外, 还可能受到一定程度的人为活动影响.

对于 Mn 元素, 除了 2010 年和 2011 年外, 其他年份非采暖期和采暖期的含量无明显差异, 2010 年采暖期和 2011 年非采暖期的含量明显低于其他时



不同的小写字母表示数据差异性显著, $P < 0.05$

图2 2010~2017年非采暖期和采暖期大气降尘中重金属的含量

Fig. 2 Contents of heavy metals in atmospheric deposition during the non-heating period and the heating period from 2010 to 2017

期, 2013年采暖期至2015年非采暖期的Mn含量略高于甘肃省土壤元素背景值。

对于Zn元素, 2012、2016和2017年表现为非采暖期>采暖期, 其他年份均表现为采暖期>非采暖期, 但只有2011年和2013年的非采暖期和采暖期存在明显差异。此外各时期的Zn含量为甘肃省土

壤元素背景值的5~8倍, 表明Zn无论是在非采暖期还是在采暖期均受到很大程度的人为因素影响, 这是由于Zn元素主要来源于工业活动、煤燃烧和汽车轮胎磨损; 非采暖期Zn占全年的比重逐年增加, 表明随着汽车保有量的增加, 交通排放对大气降尘中Zn的贡献逐渐大于工业排放的贡献^[36,37]。

对于 Pb 元素,2010~2017 年的 Pb 含量均表现为采暖期 > 非采暖期,且各时期 Pb 的含量为甘肃省土壤背景值的 5~10 倍,但只有 2011 年和 2013 年的非采暖期和采暖期存在明显差异.从整体来看,除 2013 年采暖期和 2016 年非采暖期外,其他时期的差异性不大.可以得出,兰州市常年受到 Pb 污染,采暖活动能够在一定程度上增加大气降尘中 Pb 的含量.

对于 Cr 元素,除了 2011 年表现为采暖期 > 非采暖期,其他年份均无明显差异;除 2011 年采暖期外,其他时期无明显差异,且含量大小与甘肃省背景值相近.说明大气降尘中 Cr 的含量常年处于稳定水平,其主要来自于自然源.

对于 Cu 元素,所有年份皆表现为采暖期 > 非采暖期,且含量是甘肃省土壤背景值的 3~4 倍,但只有 2010、2013 和 2016 年的非采暖期和采暖期存在明显差异.说明大气降尘中的 Cu 主要受人为活动的影响,例如工业生产、燃料燃烧和交通污染等,尤其是冬季采暖期的燃料燃烧量增加会使大气降尘中 Cu 含量升高^[23,35,38].

对于 Ni 元素,除了 2012 年采暖期外,其他时期之间均无明显差异;且 2012 年采暖期含量为甘肃省背景值的 2.16 倍,而其余时期均在 1.50 倍左右.说明大气降尘中的 Ni 受到人为因素的影响,但影响不是特别明显,且主要集中在采暖期,这可能是由于兰州市冬季的大气逆温现象不利于污染物扩散,造成采暖期的 Ni 含量升高.

对于 Cd 元素,除 2012 年外,其他年份皆表现为采暖期 > 非采暖期,且含量为甘肃省土壤背景值的 27~61 倍,但只有 2011、2013 和 2016 年表现出明显差异.从整体来看,2011 年采暖含量明显高于其他时期,2014 年非采暖含量明显低于其他时期.由此可得,大气降尘中 Cd 污染严重,冬季采暖活动对其含量的影响很大,说明大气降尘中的 Cd 主要来源于人类活动,尤其是燃料燃烧^[38,39].

综上所述,除地壳元素 Fe 和 Mn 外,其他元素的含量大都表现为采暖期 > 非采暖期,其中 2011 年和 2013 年中各元素非采暖期和采暖期的含量差异较大.此外大气降尘中 Zn、Pb、Cu 和 Cd 常年超过甘肃省背景值,受人类活动的影响较大,其中采暖活动也会使大气降尘中这 4 种元素的含量升高.污染元素 Zn、Pb、Cu 和 Cd 的含量在 2011 年和 2013 年采暖期均较高,说明这两个年份采暖活动对大气降尘中重金属的含量影响较大.对于兰州市而言,大气降尘重金属含量采暖期 > 非采暖期的原因主要有两方面,一是采暖期城市采用燃煤供暖,煤燃烧排放的

污染物增多;二是兰州的峡谷地形和冬季的大气逆温不利于污染物的扩散,使得大气中污染物含量增多^[33,40].然而 2010~2017 年,非采暖期和采暖期存在差异的元素逐渐变少,说明采暖期对大气降尘的影响逐渐减小.

2.2.2 空间变化

非采暖期和采暖期大气降尘中重金属的空间分布如图 3 所示.从空间角度分析非采暖期和采暖期的各元素含量变化,具体变化规律如下.

对于 Fe 元素,各区域均表现出采暖期 > 非采暖期,但除城关区外,其他区域均无明显差异,且所有地区的 Fe 含量均低于甘肃省土壤元素背景值.表明大气降尘中 Fe 主要来源于自然源,采暖期排放会增加 Fe 元素的含量,但影响较小.

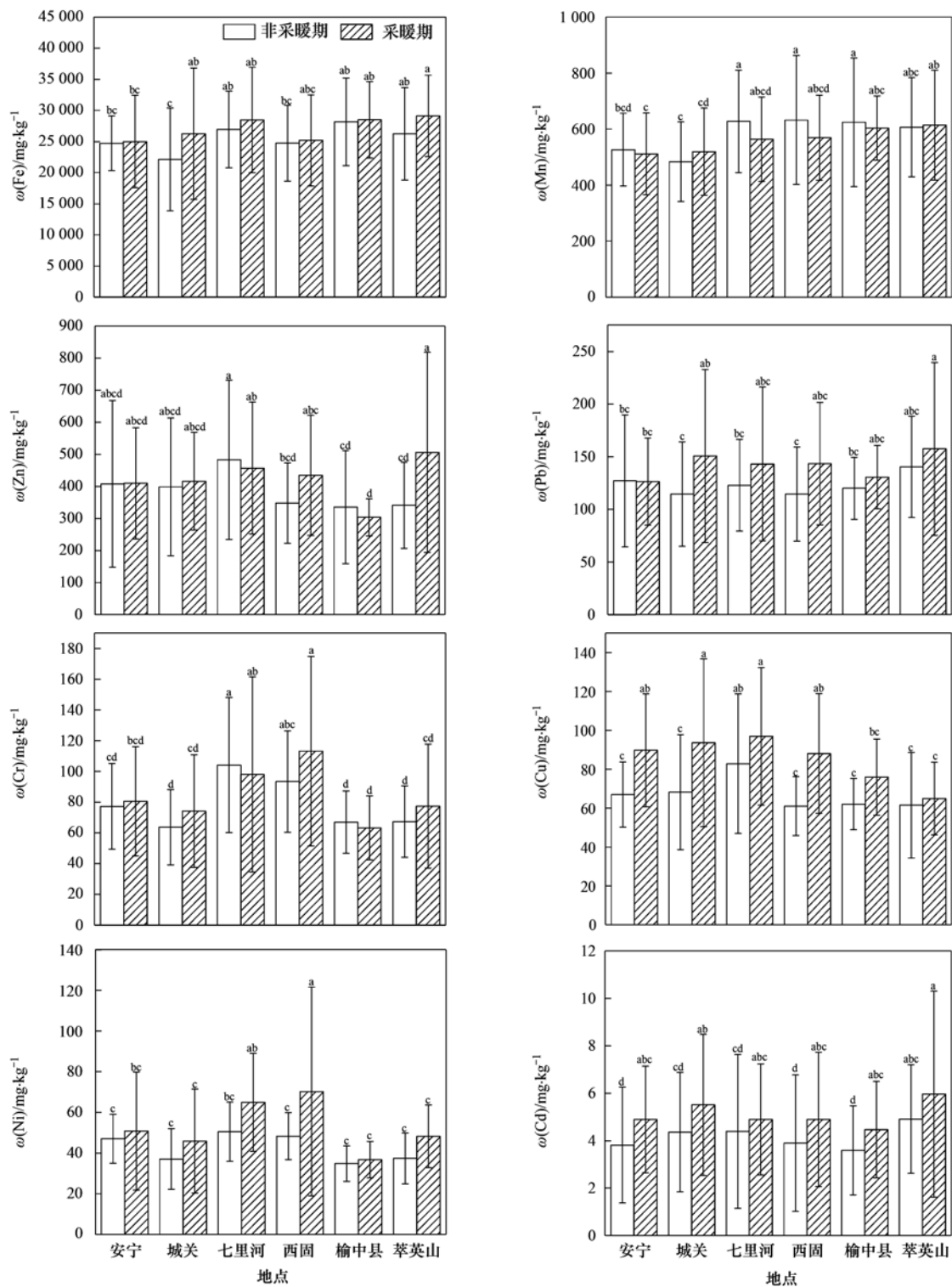
对于 Mn 元素,所有区域的非采暖期和采暖期 Mn 含量均无明显差异,且均低于甘肃省土壤元素背景值. Mn 在非采暖期的变化范围比较大,表明其受自然因素的影响比较大,这是由于春季多风,外来沙尘增多,导致 Mn 的含量变化范围扩大^[41,42].

对于 Zn 元素,除萃英山外,其他区域的非采暖期和采暖期 Zn 含量无明显差异,此外 Zn 的含量是甘肃省土壤元素背景值的 4~7 倍.说明 Zn 在空间尺度上主要受到人为因素的影响,采暖期农村(萃英山)的民用燃煤对大气降尘中 Zn 的含量贡献最大^[43],集居住和工业为一体的七里河区 Zn 含量在非采暖期时最高,可能是家庭厨房燃煤、交通排放和工业活动的共同影响^[44].

对于 Pb 元素,除城关区外,其他区域非采暖期和采暖期的 Pb 含量无明显差异,此外所有的 Pb 含量为甘肃省土壤背景值的 6~8 倍.各区域 Pb 含量在非采暖期无明显差异,在采暖期萃英山不同于其他区域.表明大气降尘中 Pb 主要受到人为因素的影响,尤其是使用民用燃煤的萃英山地区^[45];最小值出现在城关区非采暖期,且西固区非采暖期的 Pb 含量也较小,说明交通对 Pb 的影响得到了一定控制,目前需要重点关注燃煤对大气中 Pb 的贡献.

对于 Cr 元素,所有区域的 Cr 含量在非采暖期和采暖期均无明显差异,且含量大小与甘肃省背景值相近,其中 Cr 含量在七里河和西固两区域明显区别于其他区域,表明大气降尘中 Cr 的含量变化主要受人为因素的影响,尤其是工业活动,这与李萍^[46]的研究一致,但是 Cr 的含量与背景值差别不大,说明工业排放中 Cr 的含量不大.

对于 Cu 元素,各区域的 Cu 含量均表现为采暖期 > 非采暖期,其中安宁、城关和西固的差异明显,且所有区域 Cu 含量均为甘肃省土壤背景值的 2~4



不同的小写字母表示数据差异性显著, $P < 0.05$

图3 各采样点非采暖期和采暖期大气降尘重金属的含量

Fig. 3 Content of heavy metals in atmospheric deposition during non-heating period and heating period at each sampling site

倍. 非采暖期时,七里河明显高于其他区域;采暖期时,萃英山明显低于其他区域. 说明大气降尘中的Cu 主要受人为活动的影响,冬季采暖和大气逆温现象会使主城区大气降尘中的Cu 含量增加^[47];此外,七里河和城关的交通排放对大气中Cu 含量的贡献比西固区的工业排放大.

对于Ni 元素,各区域Ni 的含量均表现为采暖期 > 非采暖期,但只有西固差异明显,其中西固采暖期的Ni 含量明显高于其他区域,说明大气降尘中的Ni 一般不受到人为因素的影响,只有在工业生产和采暖活动同时进行时才会受到影响^[48, 49].

对于Cd 元素,各区域均表现为采暖期 > 非采

暖期,其中安宁、城关、西固和榆中县的非采暖期和采暖期差异明显.非采暖期时,萃英山明显高于其他区域;采暖期时,各区域无明显差异.由此可得,农村家庭燃煤做饭和取暖对大气降尘中 Cd 的影响比工业排放大^[50].有研究表明蜂窝煤炉和煤球炉排放的 Cd 含量分别为工业锅炉的 2.13 倍和 5.45 倍^[34],因此兰州市萃英山地区需要着重治理农村家庭式燃煤,减少民用燃煤对大气中重金属的贡献.

从整体来看,各区域的非采暖期和采暖期存在一定的差异,但除 Zn 和 Cd 外,其他元素在各区域之间的差异不大.此外,Fe、Zn、Pb 和 Cd 的最高值均出现在萃英山的采暖期,表明民用燃煤采暖是大气重金属污染的重要来源.

2.3 来源解析

2.3.1 偏相关分析

相关性分析可以判断重金属的来源是否相同,

偏相关分析不仅可以计算出两种重金属间相关性强弱,还可以排除其他金属元素对该两种重金属相关性的影响^[51].通过 SPSS 软件分别对非采暖期和采暖期的重金属进行偏相关分析,结果见表 5.从中可知,非采暖期时,Cu 与 Zn 和 Fe,Ni 与 Cr 和 Fe,Pb 与 Cd,Mn 与 Cr 和 Fe,Zn 与 Cd 均呈现一定程度的正相关关系,表明以上元素可能有相同的来源.此外 Mn 与 Ni,Cr 与 Fe 呈现一定程度的负相关,表明两者可能来源不同.采暖期时,Cu 与 Pb,Ni 与 Pb 和 Cr,Pb 与 Cd 和 Fe,Mn 与 Cr 和 Fe,Zn 与 Cd 均呈现一定程度的正相关关系,其中 Ni 与 Cr,Pb 与 Cd,Mn 与 Fe 分别呈现出强,中等,中等的显著正相关,表明它们具有较高的同源性.此外 Mn 与 Cu 和 Ni,Fe 与 Cr 和 Cd 在 $P < 0.01$ 水平上呈现出负相关关系,表明以上元素可能来源不同但相互影响.

表 5 各重金属元素间的偏相关系数¹⁾
Table 5 Partial correlation coefficient of heavy metals

	Cu	Ni	Pb	Mn	Zn	Cr	Cd	Fe
Cu	1	-0.102	0.071	-0.057	0.346**	0.195**	-0.11	0.244**
Ni	-0.078	1	0.197**	-0.131*	0.026	0.297**	0.023	0.343**
Pb	0.358**	0.283**	1	-0.056	0.092	0.128*	0.398**	-0.017
Mn	-0.178**	-0.312**	-0.016	1	-0.063	0.497**	0.167*	0.332**
Zn	0.112	0.071	0.060	0.167**	1	0.123	0.251**	-0.127
Cr	0.134*	0.724**	-0.044	0.355**	-0.032	1	-0.088	-0.200**
Cd	-0.024	-0.097	0.518**	0.186**	0.220**	-0.070	1	0.095
Fe	0.140*	0.142*	0.335**	0.547**	-0.056	-0.218**	-0.244**	1

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$,黑体字为采暖期各元素之间的偏相关系数

2.3.2 富集因子分析

采暖期和非采暖期大气降尘重金属富集因子的变化见图 4.各元素的富集因子大小依次为: Cd > Pb > Zn > Cu > Ni > Cr > Mn.除 Mn 和 Zn 外,均表现为采暖期 > 非采暖期.元素大致可以分为四类:第一类是 EF 小于 2 的元素,包括 Ni、Cr 和 Mn,属于轻度富集;第二类是 EF 为 2 ~ 5 的元素,仅有 Cu,属于中度富集;第三类是 EF 为 5 ~ 20 的元素,包括 Pb 和 Zn,属于显著富集;第四类是 EF 大于 40 的元素,仅有 Cd,属于极高富集.数据表明,除了 Ni、Cr 和 Mn 外,其他元素的 EF 值均大于 2,则说明 Cd、Pb、Zn 和 Cu 均来自人为源.

2.3.3 主成分分析

通过对兰州市大气降尘中重金属进行主成分分析,进一步了解兰州市降尘中各重金属之间的关系,从而判断大气降尘的来源和影响因素.对兰州市非采暖期和采暖期的大气降尘分别进行主成分分析,分析结果见表 6 和图 5.

由表 6 和图 5 可得,非采暖期的大气降尘数据

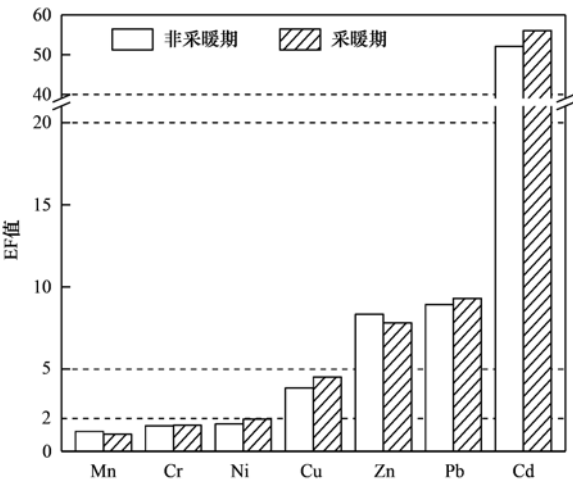


图 4 非采暖期和采暖期的富集因子变化

Fig. 4 Variation in EF during non-heating and heating periods

提取的 3 个主成分占总方差的 62.52%.第一个主成分占总方差的 33.86%,主成分 1 以 Ni、Pb、Cr 和 Cd 为主.Pb 一般来源于交通排放和工业活动,由于无铅汽油的使用,交通排放对大气中 Pb 的贡献减少,且 Cd 主要来源于燃煤和工业活动^[52],非采暖期

燃煤量减少,则将主成分 1 识别为工业源. 第二个主成分占总方差的 15. 08%, 主成分 2 以 Cu 和 Zn 为主, 且远高于其他元素的载荷. Cu 和 Zn 通常来源于汽车刹车和轮胎磨损等交通排放^[24], Siudek 等^[7]的研究指出, Zn 是交通量的一个很好的标志, 主要来源于车辆部件的磨损, 而重金属如 Cu 与交通堵塞相关. 由于兰州城市面积小, 道路宽度不大, 容易造成堵车现象, 增加了汽车怠速时尾气的排放^[53], 则将主成分 2 识别为交通源. 第三个主成分占总方差的 13. 58%, 主成分 3 以 Cu 和 Cr 为主, 两者的 EF 值均较低, 且非采暖期风速较采暖期大, 则将主成分 3 识别为扬尘. 由此可得, 兰州市非采暖期大气降尘主要来源于 33. 86% 的工业源、15. 08% 的交通源和 13. 58% 的扬尘源.

采暖期的大气降尘数据提取的 3 个主成分占总方差的 69. 25%. 第一个主成分占总方差的 35. 70%, 主成分 1 中 8 种元素的载荷均较高, 其中以 Cu、Pb 和 Fe 为主. 由于 Cu、Pb 和 Fe 主要来源于交通排放和煤炭燃烧^[54]. 除 Mn 外, 采暖期的其他元素的 EF 值均大于非采暖期, 则将主成分 1 识别为交通、工业和采暖燃煤的混合源. 第二个主成分占总方差的 19. 51%, 以 Ni 和 Cr 为主, 两者的 EF 值小于 2. 但非采暖期与采暖期的 Ni 和 Cr 含量均无

明显差异, 可能是由于冬季逆温使大气污染物无法扩散^[33], 植被覆盖率降低和降雨量减少造成二次扬尘. 则将主成分 2 识别为二次扬尘源. 第三个主成分占总方差的 14. 04%, 主成分 3 以 Mn 和 Fe 为主, 且含量均低于背景值. Mn 含量低于非采暖期, 而 Fe 含量高于非采暖期, 且采暖期的沙尘天气较少, 说明采暖活动或者大气逆温层使得大气降尘中 Fe 的含量略有增高, 但仍低于土壤背景值则将主成分 3 识别为自然源. 由此可得, 兰州市非采暖期大气降尘主要来源于 35. 70% 的交通、工业和采暖燃煤的混合源、19. 51% 的二次扬尘源和 14. 04% 的自然源.

综上可得, 兰州市大气降尘在非采暖期和采暖期的源解析结果相差较大. 对于非采暖期来说, 工业源占主导地位, 其次是交通源, 扬尘源最低. 说明工业排放仍然是非采暖期大气降尘的主要来源, 此外虽然春季沙尘天气较多, 但是非采暖期从 4 月份开始计算, 此时天气回暖, 植被覆盖率逐渐增加, 使得沙尘对非采暖期的影响较小. 对于采暖期来说, 燃煤、交通和工业活动对大气降尘的贡献最大, 其次是二次扬尘和自然源. 说明采暖期的燃煤活动和逆温现象使得大气中污染物混合, 无法精准区分; 此外采暖期植被覆盖率低, 二次扬尘和沙尘天气对大气环境也有一定影响.

表 6 兰州市非采暖期和采暖期大气降尘样品的主成分分析
Table 6 PCA of atmospheric fallout during non-heating period and heating period in Lanzhou

项目	非采暖期		采暖期	
	方差百分比/%	高载荷元素	方差百分比/%	高载荷元素
主成分 1	33. 86	Ni、Pb、Cr 和 Cd	35. 70	Cu、Pb 和 Fe
主成分 2	15. 08	Cu 和 Zn	19. 51	Ni 和 Cr
主成分 3	13. 58	Cu 和 Cr	14. 04	Mn 和 Fe
累积百分比/%	62. 52	—	69. 25	—

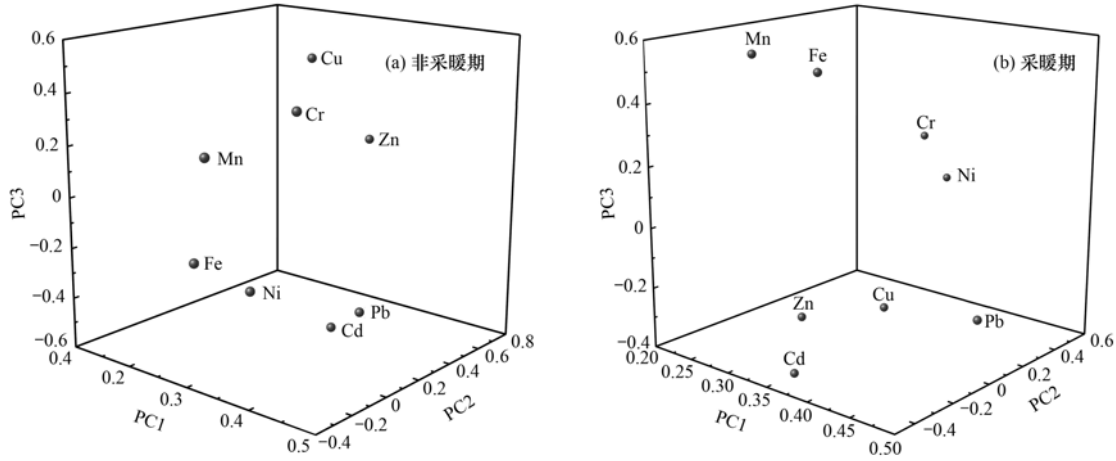


图 5 大气降尘的主成分分析
Fig. 5 PCA of atmospheric deposition

3 结论

(1) 兰州市大气降尘中重金属的含量顺序为: $\text{Fe} > \text{Mn} > \text{Zn} > \text{Pb} > \text{Cr} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Cd}$, 其中 Cd 、 Zn 和 Pb 存在一定污染, 需要重点关注。此外, 兰州市在西北地区污染较为严重, 在全国范围内, 兰州市的污染水平处于中等, 较东部和东南地区低。

(2) 从时间角度来看, 除地壳元素 Fe 和 Mn 外, 其他元素的含量大都表现为采暖期 $>$ 非采暖期。但 2010~2017 年, 非采暖期和采暖期存在差异的元素逐渐变少。从空间角度来看, 各区域的非采暖期和采暖期存在一定的差异, 但除 Zn 和 Cd 外, 其他元素在各区域之间的差异不大。

(3) 大气降尘中各重金属元素的富集因子大小顺序依次为: $\text{Cd} > \text{Pb} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Cr} > \text{Mn}$ 。兰州市大气降尘重金属在非采暖期主要来源于工业源, 其次是交通源和扬尘源; 在采暖期主要来源于燃煤、交通和工业活动, 其次是二次扬尘和自然源。

参考文献:

- [1] Feng W L, Guo Z H, Xiao X Y, *et al.* Atmospheric deposition as a source of cadmium and lead to soil-rice system and associated risk assessment[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, **180**: 160-167.
- [2] Cai K, Li C, Na S Y. Spatial distribution, pollution source, and health risk assessment of heavy metals in atmospheric depositions: a case study from the sustainable city of Shijiazhuang, China[J]. *Atmosphere*, 2019, **10**(4): doi: 10.3390/atmos10040222.
- [3] 栾慧君, 塞古, 徐蕾, 等. 徐州北郊大气降尘重金属污染特征与风险评价[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(11): 4679-4687.
Luan H J, Mohamed-Conde S, Xu L, *et al.* Characteristics and risk assessment of heavy metals from atmospheric deposition in northern suburban of Xuzhou[J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(11): 4679-4687.
- [4] Blondet I, Schreck E, Viers J, *et al.* Atmospheric dust characterisation in the mining district of Cartagena-La Unión, Spain: air quality and health risks assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **693**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.07.302.
- [5] 解成祥, 卢新卫. 西安市各功能区 7 月大气降尘中多环芳烃污染特征及风险评价[J]. *环境污染与防治*, 2019, **41**(4): 452-457.
Xie C X, Lu X W. Pollution characteristics and risk assessment of PAHs in July dustfall from different functional areas in Xi'an[J]. *Environmental Pollution and Control*, 2019, **41**(4): 452-457.
- [6] Liu A, Ma Y K, Gunawardena J M A, *et al.* Heavy metals transport pathways: the importance of atmospheric pollution contributing to stormwater pollution[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, **164**: 696-703.
- [7] Siudek P, Frankowski M. Atmospheric deposition of trace elements at urban and forest sites in central Poland-Insight into seasonal variability and sources[J]. *Atmospheric Research*, 2017, **198**: 123-131.
- [8] 张夏, 刘斌, 肖柏林, 等. 重庆主城大气降尘中重金属污染特征及评价[J]. *环境科学*, 2020, **41**(12): 5288-5294.
Zhang X, Liu B, Xiao B L, *et al.* Pollution characteristics and assessment of heavy metals in atmospheric deposition in core urban areas, Chongqing[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(12): 5288-5294.
- [9] 何予川, 王明姬, 王明仕, 等. 中国降尘重金属的污染及空间分布特征[J]. *生态环境学报*, 2018, **27**(12): 2258-2268.
He Y C, Wang M Y, Wang M S, *et al.* Pollution and spatial distribution characteristics of heavy metals in dustfall in China[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, **27**(12): 2258-2268.
- [10] 王梦梦, 原梦云, 苏德纯. 我国大气重金属干湿沉降特征及时空变化规律[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(11): 4085-4096.
Wang M M, Yuan M Y, Su D C. Characteristics and spatial-temporal variation of heavy metals in atmospheric dry and wet deposition of China[J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(11): 4085-4096.
- [11] Lee P K, Choi B Y, Kang M J. Assessment of mobility and bio-availability of heavy metals in dry depositions of Asian dust and implications for environmental risk[J]. *Chemosphere*, 2015, **119**: 1411-1421.
- [12] Torghabeh A K, Jahandari A, Jamsab R. Concentration, contamination level, source identification of selective trace elements in Shiraz atmospheric dust sediments (Fars Province, SW Iran)[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26**(7): 6424-6435.
- [13] Michael A S, Bola D E, Idowu A O. Assessment of heavy metals distribution and contamination in atmospheric dust from major roads in Ado-Ekiti, Ekiti State using pollution indices[J]. *International Journal of New Technology and Research*, 2018, **4**(4): 34-40.
- [14] Cheng Z, Chen L J, Li H H, *et al.* Characteristics and health risk assessment of heavy metals exposure via household dust from urban area in Chengdu, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **619-620**: 621-629.
- [15] Guo L L, Lyu Y L, Yang Y Y. Concentrations and chemical forms of heavy metals in the bulk atmospheric deposition of Beijing, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, **24**(35): 27356-27365.
- [16] Zang F, Wang S L, Nan Z R, *et al.* Immobilization of Cu, Zn, Cd and Pb in mine drainage stream sediment using Chinese loess[J]. *Chemosphere*, 2017, **181**: 83-91.
- [17] Khademi H, Gabarrón M, Abbaspour A, *et al.* Environmental impact assessment of industrial activities on heavy metals distribution in street dust and soil[J]. *Chemosphere*, 2019, **217**: 695-705.
- [18] Tan J H, Duan J C, Ma Y L, *et al.* Source of atmospheric heavy metals in winter in Foshan, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **493**: 262-270.
- [19] 吴红璇, 史常青, 张艳, 等. 乌海市煤矿区及周边春季降尘污染特征及来源分析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(3): 1167-1175.
Wu H X, Shi C Q, Zhang Y, *et al.* Characteristics and source apportionment of dustfall pollution in the coal mine area and surrounding areas of Wuhai City in spring[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(3): 1167-1175.
- [20] Su Y, Yuan Z H, Qi X X. A feature extraction method of rolling bearings faults based on PCA and power spectrum analysis[J]. *International Journal of Advancements in Computing Technology*,

- 2013, **5**(4): 681-688.
- [21] 武松. SPSS 实战与统计思维[M]. 北京: 清华大学出版社, 2019.
- [22] 国家环境保护局, 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.
- [23] 方文稳, 张丽, Blaise D, 等. 兰州市降尘重金属的来源与生态风险研究[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2016, **52**(1): 24-30.
Fang W W, Zhang L, Blaise D, *et al.* Source apportionment and ecological risks of heavy metal elements in the dustfall of Lanzhou City[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2016, **52**(1): 24-30.
- [24] Huang S S, Tu J, Liu H Y, *et al.* Multivariate analysis of trace element concentrations in atmospheric deposition in the Yangtze River Delta, East China[J]. Atmospheric Environment, 2009, **43**(36): 5781-5790.
- [25] GB 15618-2018, 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)[S].
- [26] 杨文娟, 陈莹, 赵剑强, 等. 西安市大气降尘污染时空分异特征[J]. 环境科学与技术, 2017, **40**(3): 10-14.
Yang W J, Chen Y, Zhao J Q, *et al.* Spatial and temporal variation of atmospheric deposition pollution in Xi'an City[J]. Environmental Science & Technology, 2017, **40**(3): 10-14.
- [27] 魏疆, 张海珍, 张克磊. 乌鲁木齐市大气降尘中重金属来源分析[J]. 干旱区地理, 2015, **38**(3): 463-468.
Wei J, Zhang H Z, Zhang K L. Source of heavy metals in atmospheric dust pollutants on Urumqi City[J]. Arid Land Geography, 2015, **38**(3): 463-468.
- [28] 刘志坚, 张琇. 银川市大气降尘重金属污染状况评价[J]. 物探与化探, 2017, **41**(2): 316-321.
Liu Z J, Zhang X. Contamination status assessment of heavy metals from atmospheric dust falls in Yinchuan[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, **41**(2): 316-321.
- [29] 焦荔, 沈建东, 姚琳, 等. 杭州市大气降尘重金属污染特征及来源研究[J]. 环境污染与防治, 2013, **35**(1): 73-76, 80.
Jiao L, Shen J D, Yao L, *et al.* Pollution characteristics and sources of heavy metals in atmospheric dustfall of Hangzhou[J]. Environmental Pollution and Control, 2013, **35**(1): 73-76, 80.
- [30] 王呈, 钱新, 李慧明, 等. 南京公园降尘中重金属污染水平及风险评价[J]. 环境科学, 2016, **37**(5): 1662-1669.
Wang C, Qian X, Li H M, *et al.* Pollution evaluation and risk assessment of heavy metals from atmospheric deposition in the parks of Nanjing[J]. Environmental Science, 2016, **37**(5): 1662-1669.
- [31] 张棕巍, 胡恭任, 于瑞莲, 等. 泉州市大气降尘中金属元素污染特征及来源解析[J]. 环境科学, 2016, **37**(8): 2881-2888.
Zhang Z W, Hu G R, Yu R L, *et al.* Characteristics and source apportionment of metals in the dustfall of Quanzhou city[J]. Environmental Science, 2016, **37**(8): 2881-2888.
- [32] 陈丽, 杜诗劼, 易廷辉, 等. 重庆市农产品产地大气降尘重金属含量特征和来源探究[J]. 南方农业, 2016, **10**(33): 123-125.
- [33] 张强. 地形和逆温层对兰州市污染物输送的影响[J]. 中国环境科学, 2001, **21**(3): 230-234.
Zhang Q. The influence of terrain and inversion layer on pollutant transfer over Lanzhou City[J]. China Environmental Science, 2001, **21**(3): 230-234.
- [34] 赵霞芳, 于洪国, 刘良燕, 等. 天津市家庭燃煤污染物测定与分析[J]. 辐射防护通讯, 1994, **14**(4): 98-99.
- [35] 孟菁华, 史学峰, 向怡, 等. 大气中重金属污染现状及来源研究[J]. 环境科学与管理, 2017, **42**(8): 51-53.
Meng J H, Shi X F, Xiang Y, *et al.* Current status and sources of heavy metal in atmosphere[J]. Environmental Science and Management, 2017, **42**(8): 51-53.
- [36] 庞绪贵, 王晓梅, 代杰瑞, 等. 济南市大气降尘地球化学特征及污染源研究[J]. 中国地质, 2014, **41**(1): 285-293.
Pang X G, Wang X M, Dai J R, *et al.* Geochemical characteristics and pollution sources identification of the atmospheric dust-fall in Jinan City[J]. Geology in China, 2014, **41**(1): 285-293.
- [37] 陈翔, 张林燕, 刘爽, 等. 兰州城区道路交通拥堵的成因及治理[J]. 甘肃高师学报, 2012, **17**(2): 60-62.
Chen X, Zhang L Y, Liu S, *et al.* The cause of formation of Lanzhou urban traffic congestion and management[J]. Journal of Gansu Normal Colleges, 2012, **17**(2): 60-62.
- [38] 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.
- [39] 谭吉华, 段青春. 中国大气颗粒物重金属污染. 来源及控制建议[J]. 中国科学院研究生院学报, 2013, **30**(2): 145-155.
Tan J H, Duan J C. Heavy metals in aerosol in China: pollution, sources, and control strategies [J]. Journal of Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2013, **30**(2): 145-155.
- [40] 熊秋林, 赵文吉, 束同同, 等. 北京降尘重金属污染水平及其空间变异特征[J]. 环境科学研究, 2016, **29**(12): 1743-1750.
Xiong Q L, Zhao W J, Shu T T, *et al.* Heavy metal pollution levels and spatial variation characteristics of dust deposition in Beijing[J]. Research of Environmental Sciences, 2016, **29**(12): 1743-1750.
- [41] 李旭, 周海, 王式功, 等. 兰州降尘的气候诊断分析[J]. 安徽农业科学, 2010, **38**(3): 1339-1342, 1420.
Li X, Zhou H, Wang S G, *et al.* Climate diagnosis of Lanzhou dustfall[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, **38**(3): 1339-1342, 1420.
- [42] 李玉霖, 拓万全, 崔建垣. 兰州市沙尘和非沙尘天气沉降物的化学特性比较[J]. 中国沙漠, 2006, **26**(4): 648-651.
Li Y L, Tuo W Q, Cui J Y. Comparison of chemical composition between dustfall under dust and non-dust weather in Lanzhou City [J]. Journal of Desert Research, 2006, **26**(4): 648-651.
- [43] 王明仕, 曹景丽, 李晗, 等. 焦作市采暖期降尘中重金属生态风险评价与源解析[J]. 生态环境学报, 2017, **26**(5): 824-830.
Wang M S, Cao J L, Li H, *et al.* Ecological risk assessment and source analysis of heavy metals in dust-fall in Jiaozuo City, China [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, **26**(5): 824-830.
- [44] 朱媛婕, 卢新卫. 西安市灞桥燃煤电厂周边土壤重金属含量、形态及来源分析[J]. 山东农业科学, 2016, **48**(10): 110-116.
Zhu Y J, Lu X W. Contents, speciations and sources of heavy metals in soils around Baqiao coal-fired power plant of Xi'an City [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2016, **48**(10): 110-116.
- [45] 张银晓, 卢春颖, 张剑, 等. 民用燃煤排放细颗粒中金属元素排放特征及单颗粒分析[J]. 中国环境科学, 2018, **38**(9): 3273-3279.
Zhang Y X, Lu C Y, Zhang J, *et al.* Emission characteristics

- and individual particle analysis of metals in fine particles emitted from residential coal burning[J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(9): 3273-3279.
- [46] 李萍. 兰州市大气降尘重金属污染规律研究及风险评价[D]. 兰州: 兰州大学, 2014. 22-24.
- Li P. Pollution evaluation and environment risk assessment of heavy metals from atmospheric deposition in Lanzhou [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2014. 22-24.
- [47] 高枳亭, 张仁健, 苏丽欣. 长春秋冬季大气黑碳气溶胶的特征分析[J]. *高原气象*, 2009, **28**(4): 803-807.
- Gao Z T, Zhang R J, Su L X. Characteristic analysis of atmospheric black carbon aerosols in Changchun in autumn and winter[J]. *Plateau Meteorology*, 2009, **28**(4): 803-807.
- [48] 张春荣, 吴正龙, 田红, 等. 青岛市区大气降尘重金属的特征和来源分析[J]. *环境化学*, 2014, **33**(7): 1187-1193.
- Zhang C R, Wu Z L, Tian H, *et al.* Characteristics and sources analysis of heavy metals in atmospheric dust of Qingdao [J]. *Environmental Chemistry*, 2014, **33**(7): 1187-1193.
- [49] 梁俊宁, 刘杰, 陈洁, 等. 陕西西部某工业园区采暖期大气降尘重金属特征[J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(2): 318-324.
- Liang J N, Liu J, Chen J, *et al.* Characteristics of heavy metals in atmospheric deposition in heating periods of an industrial park in western Shaanxi Province, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(2): 318-324.
- [50] 代杰瑞, 祝德成, 庞绪贵, 等. 济宁市近地表大气降尘地球化学特征及污染来源解析[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(1): 40-48.
- Dai J R, Zhu D C, Pang X G, *et al.* Geochemical characteristics and pollution sources identification of the near-surface atmosphere dust-fall in Jining City[J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(1): 40-48.
- [51] 王珊, 苏亮, 刘远立, 等. 皮尔森和偏相关系数模型在稻谷重金属污染程度研究中的应用[J]. *中国食品卫生杂志*, 2020, **32**(6): 631-635.
- Wang S, Su L, Liu Y L, *et al.* Application of Pearson and partial correlation coefficient model in the research of heavy metal pollution in rice[J]. *Chinese Journal of Food Hygiene*, 2020, **32**(6): 631-635.
- [52] Fu Z M, Zhai Y B, Wang L F, *et al.* Morphological, geochemical composition and origins of near-surface atmospheric dust in Changsha city of China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, **66**(8): 2207-2216.
- [53] Wang Y N, Jia C H, Tao J, *et al.* Chemical characterization and source apportionment of PM_{2.5} in a semi-arid and petrochemical-industrialized city, Northwest China [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **573**: 1031-1040.
- [54] 林晓辉, 赵阳, 樊孝俊, 等. 南昌市秋季大气PM_{2.5}中金属元素富集特征及来源分析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(1): 35-40.
- Lin X H, Zhao Y, Fan X J, *et al.* Enrichment characteristics and source analysis of metal elements in PM_{2.5} in autumn in Nanchang City[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(1): 35-40.

CONTENTS

A Comparative Study of Soil Environmental Standards for Agricultural Land Among Different Countries and Its Implication for China	LI Xu-zhi, JIANG Rong, WANG Guo-qing, <i>et al.</i>	(577)
Evaluation Parameters and System for Reclaimed Water Quality Stability	ZHANG Xin-yi, WEI Dong-bin, DU Yu-guo	(586)
Distribution Characteristics and Sources of Heavy Metals in Atmospheric Deposition During Heating and Non-heating Period in Lanzhou	HUANG Wen, WANG Sheng-li	(597)
PM _{2.5} Source Apportionment Based on a Variety of New Receptor Models	WANG Zhen-yu, LI Yong-bin, GUO Ling, <i>et al.</i>	(608)
Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Pollution in PM _{2.5} During Summer in Central China	SU Ye-wang, LIU Wei-jie, MAO Yao, <i>et al.</i>	(619)
Pollution Characteristics of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During the Lantern Festival of 2021 in Zibo City	CHEN Qiao, WU Li-ping, XU Bo, <i>et al.</i>	(629)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Perfluorinated Compounds in PM _{2.5} in Zhejiang Province	LI Bing-jie, CHEN Jin-yuan, LIU Zheng-zheng, <i>et al.</i>	(639)
Impact of Meteorological Conditions on PM _{2.5} in Jiangsu Province from 2001 to 2019	PAN Chen, KANG Zhi-ming	(649)
Comparison and Analysis of PM _{2.5} Forecast in Key Areas Based on the Neural Network Model and Numerical Model	GAO Yu-xiao, WANG Wei, HUANG Yong-hai, <i>et al.</i>	(663)
Temporal and Spatial Variations in Ozone and Its Causes over Hainan Province from 2015 to 2020	FU Chuan-bo, XU Wen-shuai, DAN Li, <i>et al.</i>	(675)
Ozone Formation and Key VOCs of a Continuous Summertime O ₃ Pollution Event in Ji'nan	SUN Xiao-yan, ZHAO Min, SHEN Heng-qing, <i>et al.</i>	(686)
Pollution Characteristic and Control Factor Analysis of Atmospheric Ozone During Summer Typical Periods in Linyi, Shandong	YANG Xue, AN Xin-yue, LIU Yu-qi, <i>et al.</i>	(696)
Improved Performance of PMF Source Apportionment for Volatile Organic Compounds Based on Classification of VOCs' Aging Degree in Air Mass	ZHU Yu-fan, CHEN Qiang, LIU Xiao, <i>et al.</i>	(707)
Spatial Distribution Characteristics of VOCs and Its Impact on Ozone Formation Potential in Rizhao City in Summer	YAO Wei-jie, WANG Da-wei, XIE Fu-ying, <i>et al.</i>	(714)
Long-term Trends and Sources of Atmospheric Halocarbons at Mount Taishan, Northern China	ZHAO Feng, CHEN Tian-shu, DONG Can, <i>et al.</i>	(723)
Emission Characteristics of VOCs and <i>n</i> -alkanes from Diesel Forklifts	ZHOU Wen-qin, LI Cheng, LIU Jun-wen, <i>et al.</i>	(735)
Driving Mechanism of the Spatiotemporal Evolution of Vegetation in the Yellow River Basin from 2000 to 2020	TIAN Zhi-hui, REN Zu-guang, WEI Hai-tao	(743)
Effects of Land Use on Riverine Dissolved Inorganic Carbon (DIC) and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in a Karst River Basin, Southwestern China	XU Sen, LI Si-liang, ZHONG Jun	(752)
Effects of Biochar Addition on Soil Nitrogen Mineralization and Leaching Characteristics in Riparian Zone of Taihu Lake	XIONG Yu-ting, YUAN Xu-yin, ZHOU Hui-hua, <i>et al.</i>	(762)
Impacts of Riparian Buffer Zone Type on Reduction in Runoff Pollution in the North Canal River Under Different Rainfall Events	ZHU Li-ying, ZHAO Kai, ZHANG Jun-ya, <i>et al.</i>	(770)
Pollution Characterization and Comprehensive Water Quality Assessment of Rain-source River: A Case Study of the Longgang River in Shenzhen	BI Ye-liang, WANG Hua-cai, XIA Bing, <i>et al.</i>	(782)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Runoff Pollution in Langfang City	PAN Xin-rong, ZUO Jian-e, ZHANG Yu, <i>et al.</i>	(795)
Analysis on Diversity of Plankton Microbial Community in the Beijing-Tianjin-Hebei Section of the North Canal River	GUO Zhi-zhi, SU Zhen-hua, DI Yan-ming, <i>et al.</i>	(803)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Driving Factors of Denitrification Bacterial Community Structure from Landscape Water in Hebei Province: Taking Shijiazhuang as Example	CHEN Zhao-ying, ZHANG Zi-wei, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i>	(813)
Source and Optical Dynamics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in the Watershed of Lake Qinghai	YU Xiao-qin, MENG Xian-qiang, WU Hua-wu, <i>et al.</i>	(826)
Influences of Hydrological Scenarios on the Bioavailability, Fate, and Balance of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Lake Poyang	GUO Yan-ni, YAO Xiao-long, CHEN Hui-min, <i>et al.</i>	(837)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Sediments from Poyang Lake	LUO Yan-qing, WAN Zhi-wei, YAN Cai-xia, <i>et al.</i>	(847)
Pollution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Tangxun Lake	LI Xing-yu, LI Peng, SU Ye-wang, SHI Ming-ming, <i>et al.</i>	(859)
Identifying Relationship Between Nutrient Contents in Road-Deposited Sediment and Urban Basic Elements Based on Kernel Density Estimation	WANG Zi-qiao, LI Xu-yong	(867)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of DBPs in Typical Drinking Water Sources in Wuhan Under the COVID-19 Pandemic	ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, TU Xiang, <i>et al.</i>	(878)
Synergistic Control of Nitrogenous Disinfection By-products and Opportunistic Pathogens in Drinking Water by Iron-Modified Quartz Sand Filtration	QI Peng, HU Chun, XING Xue-ci, <i>et al.</i>	(887)
Degradation Characteristics and Mechanism of Ibuprofen by Ozone Catalyzed by Nitrogen-Doped Biochar	CHAI Cheng, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i>	(896)
Adsorption Properties and Host-guest Effects of Porous Cyclodextrin Polymers for Dye Molecules in Water	ZHAO Chuan-liang, WANG Zi-jie, YAN Yi, <i>et al.</i>	(907)
Characterization of Sludge Morphology and Bacterial Community Evolution in the Rapid Activation of Freeze-stored PV/A Granular Sludge	HUANG Zi-heng, ZHANG Li, CUI Shu-hui, <i>et al.</i>	(920)
Effect of Different Cationic Polyacrylamide Organic Dehydrating Agents on Sludge Dewatering Performance	FENG Qi-yun, GAO Bao-yu, YUE Qin-yan, <i>et al.</i>	(928)
Health Risk Assessment of Soil Heavy Metals in a Small Watershed of a Mining Area in Yunnan	LIU Yang, HE Zhao-hui, NIU Xue-kui, <i>et al.</i>	(936)
Spatial Characteristics and Potential Ecological Risk Factors of Heavy Metals in Cultivated Land in the Transition Zone of a Mountain Plain	ZHANG Ding, HUANG Rong, GAO Xue-song	(946)
Geo-accumulation Index Method to Optimize the Evaluation Method of Polymetallic Environment Quality: Taking Developed Agricultural Areas as an Example	JU Tie-nan, LEI Mei	(957)
Safety Production Threshold and Land Quality Classification of Vegetable Pb in High Geological Background Area of Southwest China	MU De-miao, SUN Yue-bing	(965)
Pollution Properties and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils and Crops Around a Typical Manganese Mining Area	HUANG Zhong-ting, YI Sheng-wei, CHEN Bei-bei, <i>et al.</i>	(975)
Characteristics of Plant Diversity and Heavy Metal Enrichment and Migration Under Different Ecological Restoration Modes in Abandoned Mining Areas	ZHOU Peng-fei, ZHANG Shi-wen, LUO Ming, <i>et al.</i>	(985)
Soil Properties, Heavy Metal Accumulation, and Ecological Risk in Vegetable Greenhouses of Different Planting Years	REN Qiang, SUN Rui-ling, ZHENG Kai-xuan, <i>et al.</i>	(995)
Effects of Greenhouse and Open-field Cultivation on Heavy Metal Uptake During Carrot Growth	CAO Chun, REN Dan, LÜ Zhen-ying, <i>et al.</i>	(1004)
Effects of Different Amendments on Cadmium Accumulation in Rice Safety in Cadmium-Contaminated Farmland Under Two Flooding Treatments	WANG Gang, YU Hai-ying, LI Ting-xuan, <i>et al.</i>	(1015)
Effect of Composite Leaching on Cadmium Removal Efficiency in Plow Layer Soil of Agricultural Land and Its Functional Regulation	CAO Kun-kun, ZHANG Sha-sha, HU Xue-yu, <i>et al.</i>	(1023)
Polyamine-producing Bacteria Regulated the Community Structure of Rhizosphere Bacteria and Reduced the Absorption of Cd in Wheat	LI Xiao-zhe, QIN Shan-mei, CHEN Zhao-jin, <i>et al.</i>	(1031)
Responses of Soil <i>PhoC</i> and <i>PhoD</i> Gene Microbial Communities to the Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers	YANG Wen-na, YU Luo, LUO Dong-hai, <i>et al.</i>	(1040)
Changes in Soil Microbial Carbon-Degrading Enzymes and Their Relationships with Carbon Pool Components During the Restoration Process of <i>Robinia pseudoacacia</i>	LI Wen-jie, ZHANG Zhen-jiao, ZHAO Ya-ping, <i>et al.</i>	(1050)
Soil Enzyme Stoichiometric Characteristics of <i>Pinus massoniana</i> Plantations at Different Stand Ages in Mid-subtropical Areas	JIAO Peng-yu, GUO Wen, CHEN Ze-long, <i>et al.</i>	(1059)
Characteristics of Microbial Utilization for Crop Residue-Derived C in Paddy and Upland Soils	DENG Shao-hong, ZHENG Xiao-dong, MAO Wan-qiong, <i>et al.</i>	(1069)
Influence of Artificial Root Exudates and Actual Root Exudates on the Microbial Community in Pyrene-contaminated Soil	HAN Bo-yuan, ZHANG Wen, HU Fang-yu, <i>et al.</i>	(1077)
Pollution Characteristics and Driving Factors of Antibiotic Resistance Genes in Dexing Copper Mine	HAN Liu, LOU Qian, QIAO Min, <i>et al.</i>	(1089)
Spatial Prediction Method of Farmland Soil Organic Matter in Weiwei Dryland of Shaanxi Province	WEI Fang, LIU Jing, XIA Li-heng, <i>et al.</i>	(1097)
Emission Characteristics, Transformation Mechanism, and Reduction Potential of Ammonia Emissions from a Crop Rotation System in Yangtze River Delta	XU Chang, MIAO Wen-liang, NI Yuan-zhi, <i>et al.</i>	(1108)