

北京城区PM_{2.5}各组分污染特征及来源分析

安欣欣, 曹阳, 王琴, 富佳明, 王陈婧, 景宽, 刘保献

PM_{2.5} 化学组成

SO₄²⁻ NH₄⁺ NO₃⁻
元素碳 Cl⁻ 有机物 地壳元素

源解析

二次
颗粒物

机动车

扬尘

工业

燃煤

生物质
燃烧



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年5月

第43卷 第5期
Vol.43 No.5

目次

北京城区 PM _{2.5} 各组分污染特征及来源分析	安欣欣, 曹阳, 王琴, 富佳明, 王陈婧, 景宽, 刘保献 (2251)
基于时空混合效应模型的京津冀 PM _{2.5} 浓度变化模拟	范丽行, 杨晓辉, 宋春杰, 李梦诗, 段继福, 王卫, 李夫星, 李伟妙 (2262)
2000~2018 年京津冀城市群 PM _{2.5} 时空演变及其与城市扩张的关联	赵安周, 相恺政, 刘宪锋, 张向蕊 (2274)
海-陆大气交汇作用下青岛冬季大气 PM _{2.5} 污染特征与来源解析	虞雄, 杨凌霄, 张婉, 齐安安, 王滢铭, 王鹏程, 黄琦, 赵彤, 张雄飞, 徐鹏, 张天琪, 王文兴 (2284)
硫酸盐非均相机制对颗粒物污染的影响: 上海典型污染事件的 WRF-Chem 模拟	张茹涵, 张皓然, 冯伟航, 汤克勤, 马亚平, 王红丽, 黄成, 胡建林, 张宏亮, 李楠 (2294)
省会城市不同功能区大气 PM _{2.5} 化学组分季节变化及来源分析	孙友敏, 范晶, 徐标, 李彦, 韩红, 张桂芹 (2304)
太原市冬季不同污染程度下 PM _{2.5} 的化学组成、消光特征及氧化潜势	任娇, 赵荣荣, 王铭, 张欢欢, 尹诗杰, 薛永刚 (2317)
郑州市冬季大气 PM _{2.5} 金属元素来源及健康风险评价	姚森, 王乾恒, 薛妍, 史来文, 张俊美, 杨书申 (2329)
淄博市冬季 PM _{2.5} 载体金属元素污染特征、生态风险评价及来源分析	白雯宇, 徐勃, 郭丽瑶, 殷宝辉, 马银红, 李丽明, 杨文, 赵雪艳 (2336)
承德市 PM _{2.5} 中多环芳烃的季节分布特征、来源解析及健康风险评价	贺博文, 聂赛赛, 李仪琳, 郭睿瑶, 姚波, 崔建升, 冯亚平, 王帅, 侯晓松 (2343)
珠三角大气中二噁英污染水平与区域迁移	付建平, 谢丹平, 黄锦琼, 杨艳艳, 冯桂贤, 周长风, 廖海婷, 青亮, 张漫雯, 吴明亮, 张素坤 (2355)
华北平原南部农村地区黑碳气溶胶浓度及来源	张玲, 孔少飞, 郑煌, 胡尧, 曾昕, 程溢, 祁士华 (2363)
基于模式过程分析技术天津地区 PM _{2.5} 污染气象成因分析	郝团, 蔡子颖, 韩素芹, 杨旭, 樊文雁, 姚青, 邱晓滨 (2373)
基于排放量和大气反应活性的 VOCs 污染源分级控制	陈鹏, 张月, 邢敏, 李珊珊 (2383)
基于复杂网络的中国臭氧拓扑特征	菅娜, 陈建华, 李冬, 王迪, 薛志钢 (2395)
基于前体物多情景排放的兰州市 2030 年夏季臭氧预测	陈天雷, 吴敏, 潘成珂, 常莉敏, 李洪, 刘鹏, 高宏, 黄韬, 马建民 (2403)
基于源反演和气溶胶同化方法天津空气质量模式预报能力改进	蔡子颖, 唐邈, 肖致美, 杨旭, 朱玉强, 韩素芹, 徐虹, 邱晓滨 (2415)
基于空气质量监测数据的钢铁行业污染源识别方法	石耀耀, 胡京南, 褚咏晰, 段青春, 胡丙鑫, 殷丽娜, 吕玲玲 (2427)
重污染天气应对“绩效分级、差异化管控”措施首次实践效果后评估	曾景海, 王灿 (2436)
黄河流域水污染风险分区	周夏飞, 曹国志, 於方, 杨威杉, 徐泽升 (2448)
黄河流域甘肃段工业行业水污染物空间排放特征	李雪迎, 杨曦, 乔琦, 刘丹丹, 张玥, 赵若楠, 白璐 (2459)
黄河沉积物重金属时空分布与污染评价	王韬轶, 潘保柱, 韩语, 王雨竹, 李晨辉, 杜蕾 (2467)
APCS-MLR 结合 PMF 模型解析厦门杏林湾近郊流域沉积物金属来源	沈宸宇, 闫钰, 于瑞莲, 胡恭任, 崔建勇, 颜妍, 黄华斌 (2476)
河流底泥 DOM、营养盐与重金属空间分异特征及响应关系	肖艳春, 于会彬, 宋永会 (2489)
太原市汾河河岸带土壤重金属分布特征、评价与来源解析	胡杰, 赵心语, 王婷婷, 苟奎贤, 王春玲 (2500)
洪泽湖溶解态有机质与重金属汞的结合特性	胡斌, 王沛芳, 张楠楠, 包天力, 金秋彤 (2510)
富营养化驱动下西凉湖百年生态演化轨迹	郑佳楠, 徐敏, 郑文秀, 朱可欣, 王荣, 张恩楼 (2518)
基于 DGT 技术的黄河上游典型水库沉积物氮磷释放与污染源解析	马玉坤, 朱翔, 庞晴晴, 孔明, 韩天伦, 彭福全, 谢磊, 汪龙眠, 徐斌, 何斐 (2527)
暴雨前后河南北部河流水质分异特征及其污染源解析	张彦, 邹磊, 梁志杰, 姜明, 李平, 黄仲冬, 齐学斌 (2537)
鄱阳湖流域水葫芦 (<i>Eichhornia crassipes</i>) 对水体微塑料的吸附截留效应	李文刚, 吴希恩, 简敏菲, 刘淑丽, 刘海球, 丁惠君 (2548)
太湖塑料添加剂时空分布和生态风险评价	刘舒娇, 丁剑楠, 石波哲, 张军毅, 庄严, 邹华 (2557)
骆马湖表层沉积物微塑料的分布、来源及储量	姚明轩, 白雪, 徐振佳, 李凤杰, 陆滢, 李畅, 华祖林 (2566)
太湖不同介质中磷的污染特征及其治理启示	蔡梅, 陆志华, 王元元, 钱旭 (2575)
辽河四平段流域河流沉积物微生物群落多样性和结构分析	李鹏洋, 安启睿, 王新皓, 孙思宇, 李青乾, 郑娜 (2586)
面源污染诱导嘉陵江沉积物中细菌群落结构与功能异变	薛玉琴, 徐飞, 刘坤和, 王佳颖, 竹兰萍, 朱志豪, 张拓 (2595)
微塑料对沉积物细菌群落组成和多样性的影响	李汶璐, 王志超, 杨文煊, 张博文, 李卫平 (2606)
白洋淀冬季沉积物好氧反硝化菌垂直分布特征及群落构建	张甜娜, 陈召莹, 张紫薇, 周石磊, 孟佳靖, 陈哲, 张一凡, 董宛佳, 崔建升 (2614)
人工诱导水库分层水体提前混合对细菌群落结构和代谢活性的影响	高悦, 黄廷林, 李楠, 齐允之, 司凡, 杨斌 (2624)
鄱阳湖典型区铜锈环螺体内微塑料分布特征	江为群, 胡启武, 简敏菲, 邹龙, 刘淑丽 (2633)
负载多壁碳纳米管的多孔 Ti/SnO ₂ -Sb-Ni 电极电催化氧化双酚 A	符远航, 刘安迪, 黄伟斌, 唐彬彬, 张进忠 (2640)
磁性 Mn _{0.6} Zn _{0.4} Fe ₂ O ₄ 催化 H ₂ O ₂ 降解亚甲基蓝效能及机制	徐冬莹, 余静, 郝旗, 杨迎春, 方淑红 (2650)
两种纳米颗粒对沸石吸附环丙沙星的影响	蒋兰翠, 孟昭福, 刘贤, 刘欣, 王新欣, 曹雪雯 (2662)
AMD 污泥复合材料吸附 As(V) 的机制及其影响因素	张亚辉, 张瑞雪, 吴攀, 陈世万, 杨艳, 安丽, 傅渝然, 张子豪 (2673)
三氯生及其降解中间产物对活性污泥中微生物群落变化和硝化反硝化功能基因的影响	卢英源, 董小琦, 彭星星, 贾晓珊 (2685)
污染场地风险管控可持续评价指标体系构建及关键影响因素分析	李笑诺, 易诗懿, 陈卫平 (2699)
基于生态功能的滨海湿地土壤质量综合评价方法构建及实证分析	张雪, 孔范龙, 姜志翔 (2709)
铜山矿区周边农田土壤重金属来源解析及污染评价	陈航, 王颖, 王澍 (2719)
典型铁、锰矿物对稻田土壤砷形态与酶活性的影响	周一敏, 黄雅媛, 刘凯, 赵儒乐, 李冰玉, 雷鸣 (2732)
两种油菜施肥水溶性壳聚糖修复典型铅污染农田土壤	孟晓飞, 郑国砥, 陈同斌, 杨俊兴, 郭俊梅, 刘杰 (2741)
基于贝叶斯理论的小麦籽粒镉铅超标风险预测	王天齐, 李艳玲, 杨阳, 牛硕, 王美娥, 陈卫平 (2751)
紫色土旱坡地油菜/玉米轮作下氮流失的年度变化特征	徐曼, 高明, 余添, 朱浩宇, 邓华, 王子芳 (2758)
不同原料生物炭的理化特性及其作炭基肥缓释载体的潜力评价	邢莉彬, 成洁, 耿增超, 张宏伟, 梁宏旭, 王强, 孙倩倩, 李艳 (2770)
木醋液酸化生物炭与氮素配施对盐渍土壤活性氮及氮挥发的影响	申书伟, 张丹丹, 王敏鸽, 王旭东 (2779)
生物可降解地膜覆盖对关中地区小麦-玉米农田温室气体排放的影响	郭怡婷, 罗晓琦, 王锐, 陈海心, 冯浩 (2788)
戴云山南坡不同海拔森林土壤微生物群落结构特征和影响因素	何中声, 王紫薇, 朱静, 陈佳嘉, 谷新光, 江蓝, 陈博, 吴则焰, 刘金福, 陈文伟 (2802)
模拟增温和降雨增加对撂荒草地土壤胞外酶活性及计量特征的影响	王兴, 钟泽坤, 简俊楠, 张硕宏, 杨改河, 任成杰, 冯永忠, 任广鑫, 王晓娇, 韩新辉 (2812)
中国主要城市的城市化对局地增温的贡献	李宇, 周德成, 闫章美, 张良侠 (2822)
《环境科学》征订启事 (2293)	
《环境科学》征稿简则 (2426)	
信息 (2585, 2672, 2708)	

淄博市冬季 $PM_{2.5}$ 载带金属元素污染特征、生态风险评价及来源分析

白雯宇¹, 徐勃², 郭丽瑶¹, 殷宝辉¹, 马银红¹, 李丽明¹, 杨文¹, 赵雪艳^{1*}

(1. 中国环境科学研究院, 北京 100012; 2. 山东省淄博生态环境监测中心, 淄博 255040)

摘要: 为研究淄博市城区冬季环境空气 $PM_{2.5}$ 载带金属元素的污染特征、来源和生态风险, 于 2019 年 1 月 8 ~ 23 日在淄博市采集环境空气 $PM_{2.5}$ 滤膜样品并分析获取 14 种金属元素的浓度。结果表明, K 含量均值为 $8\,071.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 是含量最高的元素, 但未超过山东省 A 层土壤背景值, 说明 K 主要来自自然源; Zn、Pb、Cu、Cr、As、Ni 和 Cd 等元素含量明显低于 K 元素 ($28.4 \sim 4\,282.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 但均明显高于山东省 A 层土壤背景值, 依次为背景值的 56.6、19.0、7.2、2.4、7.3、1.4 和 283.8 倍, 反映出人为源的影响。地累积指数 (I_{geo}) 表明, 冬季 $PM_{2.5}$ 中 Cd、Zn、Pb、Cu 和 As 受污染程度较高, 均为中度污染及以上。潜在生态风险评价结果显示 Cd 存在极强的生态危害风险。综合运用相关性分析、富集因子法和主成分分析多种方法解析出, 土壤扬尘、机动车尾气、燃煤和冶金行业是淄博市城区环境空气 $PM_{2.5}$ 载带金属元素的主要来源, 需要加强这几类污染源的管控。

关键词: $PM_{2.5}$; 金属元素; 地累积指数; 生态风险; 来源分析

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)05-2336-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.202108308

Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Sources of the Polluted Metallic Elements in $PM_{2.5}$ During Winter in Zibo City

BAI Wen-yu¹, XU Bo², GUO Li-yao¹, YIN Bao-hui¹, MA Yin-hong¹, LI Li-ming¹, YANG Wen¹, ZHAO Xue-yan^{1*}

(1. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. Zibo Ecological and Environmental Monitoring Center, Zibo 255040, China)

Abstract: In order to study the pollution characteristics, sources, and ecological risk of the metallic elements in ambient $PM_{2.5}$ during winter in Zibo City, ambient $PM_{2.5}$ samples were collected in January 2019, after which 14 types of metallic elements were investigated. The results showed that the average value of K content was $8\,071.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and was highest in the types of metallic elements, which was lower than that of the soil background value in Shandong province. The mean values of Zn, Pb, Cu, Cr, As, Ni, and Cd were 56.6, 19.0, 7.2, 2.4, 7.3, 1.4, and 283.8 times the background values, respectively, which were influenced by anthropogenic sources. The geo-accumulation index (I_{geo}) indicated that Cd, Zn, Pb, Cu, and As were highly polluted. The potential ecological risk indexes indicated that the potential risk of Cd was extremely high in winter. Source apportionment results were obtained using the enrichment factor (EF) and principal component analysis (PCA), and the results showed that soil dust, vehicle emission, coal burning, and metal smelting were the main sources of metallic elements in ambient $PM_{2.5}$ during winter in Zibo City.

Key words: $PM_{2.5}$; metallic element; geo-accumulation index; ecological risk; source apportionment

近十年来,我国在大气污染防治方面付出了巨大努力,北方城市空气污染有较大改善,但 $PM_{2.5}$ 仍是秋冬季重污染期间的首要污染物^[1,2]。淄博市 2018 年 $PM_{2.5}$ 年均浓度为 $55\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ^[3], 为 WHO 指导值 ($5\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)^[4] 的 11 倍。长期暴露在颗粒物中会增加肺癌、中风、痴呆、心血管疾病、慢性呼吸道疾病和下呼吸道感染等的风险^[5~9]。有研究显示为降低 $PM_{2.5}$ 相关的健康风险,除浓度外需要同时考虑颗粒物的化学组分和相关源类^[10~12]。颗粒物中的主要组分包括水溶性离子、碳组分和无机元素^[13], 其中金属元素主要富集在 $PM_{2.5}$ 等细颗粒物中^[14,15]。 $PM_{2.5}$ 进入人体肺部后,其载带的金属元素通过浸出从而对人体健康造成危害^[16]。因此评估重金属的风险,研究其来源具有十分重要的意义。

林海鹏等^[17]在兰州市开展的多种重金属联合潜在生态风险研究结果显示, TSP、 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的

重金属生态风险程度均为极强,其中 $PM_{2.5}$ 的生态风险指数最高,且 Cd 为多种重金属的联合生态风险指数中主要贡献因子。李友平^[18]的研究发现成都市城区 $PM_{2.5}$ 中 As 和 Cr 对成年人存在较高的致癌风险,应当予以重视。栾孟孝等^[19]研究了鞍山市秋季 $PM_{2.5}$ 载带金属元素的特征及来源,发现金属元素主要来源于机动车尾气、燃煤、燃油和钢铁冶炼。Thomaidis 等^[20]的研究使用主成分分析法解析希腊雅典 $PM_{2.5}$ 载带金属元素的来源,发现 Pb、As 和 Ni 具有共同的来源,均主要源自汽车尾气/燃油燃烧和道路尘的贡献。

淄博市位于山东省中部,是重要的工业城市,地

收稿日期: 2021-08-28; 修订日期: 2021-09-26

基金项目: 大气重污染成因与治理攻关项目 (DQGG2021202, DQGG0107-20); 北京市委“首都蓝天行动培育”项目 (Z191100009119011)

作者简介: 白雯宇 (1992 ~), 女, 硕士, 主要研究方向为大气颗粒物来源解析和重金属污染风险评价, E-mail: bai.wenyu@cares.org.cn

* 通信作者, E-mail: zhaoyx@cares.org.cn

势南高北低、三面环山,夏季湿热多雨,冬季干冷少雪^[21].特殊的地理气候条件和工业布局导致淄博市冬季易出现重污染^[22].2019年1月,京津冀及周边地区经历了一次大范围、长时间和较复杂的区域性大气重污染过程^[23],为了解淄博市城区冬季重污染期间PM_{2.5}载带金属元素的污染水平和生态风险,本研究于2019年1月8~23日采集了PM_{2.5}样品,对其中14种金属元素组分进行化学分析,深入分析了金属元素含量水平、污染特征和来源,并进行了生态风险评估,以为颗粒物中金属元素的污染防治和风险管理提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 样品采集

本研究采样点位于山东省淄博市主城区(张店区)南定环境空气质量监测站的二层楼顶(36°48′10.67″N, 118°01′28.19″E,图1),距离地

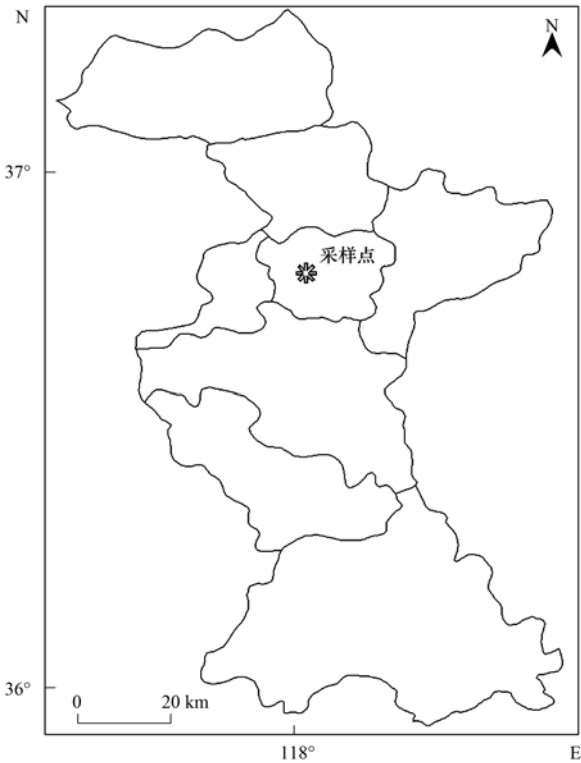


图1 采样点位置示意

Fig. 1 Location of sampling site

面约6 m.采样点周围是居民区和行政管理机构,距新村路约50 m,无其他明显污染源.

使用小流量(16.7 L·min⁻¹)环境空气颗粒物采样器(青岛众瑞智能仪器有限公司,型号:ZR-3930B型)于2019年1月8~23日采集环境空气PM_{2.5}样品,所用滤膜为Teflon膜(美国Whatman公司,φ=47 mm).采样前,空白Teflon膜在60℃烘箱中烘烤2 h进行预处理.采样前后将滤膜置于恒温(20±1)℃、恒湿(50±5)%天平室内平衡24 h后使用百万分之一的自动称重天平系统(德国康姆德润达,型号:AWS-1)进行称重.称重后将样品膜放于冰箱于4℃冷藏保存,待分析测定.

1.2 样品分析及质控方法

取二分之一Teflon滤膜样品,使用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS,美国Agilent公司)测定样品中10种元素(Na、K、Cr、Mn、Ni、Cu、Zn、As、Cd和Pb)含量;使用电感耦合等离子体光谱仪(ICP-OES,美国Agilent公司)对剩余的1/2滤膜样品中4种元素(Al、Ca、Fe和Mg)进行测定.具体分析和质控方法参考文献[24].

1.3 数据分析方法

1.3.1 地累积指数

地累积指数(I_{geo})通常称为Muller指数,该指数同时考虑了自然地质过程造成的背景值和人为活动两方面对重金属污染的影响^[25].因此,该指数常被作为区分自然源和人为活动影响的重要参数,近年来被广泛应用于评价颗粒物中金属元素污染程度^[26~28].地累积指数计算公式为:

$$I_{geo} = \log_2 [C_i / (k \times B_i)]$$

式中, C_i 为样品中金属元素*i*的含量,mg·kg⁻¹; B_i 为*i*金属元素的地质背景值,本研究取山东省A层土壤元素背景值^[29],具体取值见表1; k 为因成岩运动可能引起背景值变动而设定的常数,依据前人研究取1.5^[30].本研究中地累积指数分级^[31]如下: $I_{geo} < 0$,无污染; $0 \leq I_{geo} < 1$,轻度污染; $1 \leq I_{geo} < 2$,中度污染; $2 \leq I_{geo} < 3$,偏重度污染; $3 \leq I_{geo} < 4$,重度污染; $4 \leq I_{geo} < 5$,偏严重污染; $I_{geo} \geq 5$,严重污染.

表1 山东省A层土壤元素背景值/mg·kg⁻¹

Table 1 Background values of soil elements in layer A of Shandong province/mg·kg⁻¹

元素	K	Ca	Al	Na	Zn	Fe	Mg	Mn	Pb	Cu	Cr	As	Ni	Cd
背景值	19 300	16 700	66 200	15 400	63.5	27 200	8 000	644	25.8	24.0	66.0	9.3	29.4	0.084

1.3.2 潜在生态风险评价

潜在生态风险评价法^[32]是1980年由瑞典学者Håkanson提出的,该方法的原理是沉淀物中金属的潜在生态危害指数与金属污染程度正相关,且多种

金属污染的生态危害具有加和性.潜在生态风险指数的计算公式如下:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times (C_i / B_i)$$

式中,RI 为颗粒物中多种金属元素潜在生态风险指数加和; E_r^i 为颗粒物中金属元素 i 的潜在生态风险指数; T_r^i 为金属元素 i 的毒性系数,反映其毒性水平和生物对其污染的敏感性; 其他参数同 1.3.1 节. 表 2 列出了 8 种重金属元素的毒性系数^[33].

表 2 重金属的毒性系数

元素	Zn	Mn	Pb	Cu	Cr	As	Ni	Cd
毒性系数	1	1	5	5	2	10	5	30

本研究中的 8 种重金属元素毒性系数的最大值为 T_r^{Cd} (30), 根据 Håkanson 对单因子潜在生态风险指数 E_r 污染等级划分规则进行了 E_r 等级划分的调整; 后又根据马建华等^[34]的研究成果,对 RI 进行了等级划分的调整. 调整后的潜在生态风险评价指标分级见表 3.

表 3 潜在生态风险评价分级

E_r^i	单因子生态危害程度	RI	总的潜在生态危害程度
<30	轻微	<70	轻微
30~60	中等	70~140	中等
60~120	较强	140~280	较强
120~240	强	280~560	很强
≥240	极强	≥560	极强

1.3.3 富集因子

富集因子常用于探讨颗粒物中元素的富集程度,从而判断和识别颗粒物中元素的自然来源和人为来源^[13,35]. 富集因子的计算公式如下:

$$EF_i = (C_i/C_r)/(B_i/B_r)$$

式中, EF_i 为颗粒物中测量元素 i 的富集因子; C_r 为颗粒物中参比元素 r 的含量 ($mg \cdot kg^{-1}$); B_r 为参比系统中参比元素 r 的含量 ($mg \cdot kg^{-1}$); 其余参数同 1.3.1 节. 本研究参比系统选择山东省 A 层土壤^[29], 参比元素选择 Al^[19].

一般认为 $EF_i < 1$ 时,表明测量元素 i 相对于参比系统未被富集,主要来源为自然源,由土壤岩石风化造成; 若 $EF_i > 10$ 时,则认为该元素主要来源为人为源^[36]. 本研究采用的富集因子分级^[19]如下: $EF_i < 1$ 时,无富集; $1 \leq EF_i < 2$ 时,轻微富集; $2 \leq EF_i < 5$ 时,中度富集; $5 \leq EF_i < 20$ 时,显著富集; $20 \leq EF_i < 40$,强烈富集; $EF_i \geq 40$ 时,极强富集.

1.3.4 Pearson 相关分析

数据统计分析采用 SPSS 软件. 在保证数据服从正态分布的前提下,对数据进行相关性分析,相关性检验 $P < 0.05$,表示两元素之间具有显著性相关关系.

1.3.5 主成分分析

主成分分析法(PCA)是常用的多元统计分析方法,是用来识别污染物主要来源的分析方法之一^[15,37]. 为了识别金属元素的来源并加以分类,本研究对 PM_{2.5} 载带的 14 种金属元素进行了主成分分析.

2 结果与讨论

2.1 金属元素污染水平

研究期间 PM_{2.5} 载带金属元素含量特征如图 2 所示. K、Ca、Al、Na、Zn、Fe、Mg 和 Mn 为淄博市冬季 PM_{2.5} 载带的主要金属元素,其含量占所分析 14 种元素含量的 96.8%, 采样期间 PM_{2.5} 中 K、Ca、Al、Na、Zn、Fe、Mg、Mn、Pb、Cu、Cr、As、Ni 和 Cd 的含量均值分别为 8 071.6、6 234.3、4 575.9、4 573.5、4 282.3、2 419.7、1 010.4、680.6、560.6、193.2、168.3、73.1、43.5 和 28.4 $mg \cdot kg^{-1}$. 其中,Zn、Pb、Cu、Cr、As、Ni 和 Cd 含量高于山东省 A 层土壤背景值,依次为山东省 A 层土壤背景值的 56.6、19.0、7.2、2.4、7.3、1.4 和 283.8 倍. 可以看出,含量高于山东省 A 层土壤背景值的元素多为重金属元素,说明此类元素易受到人

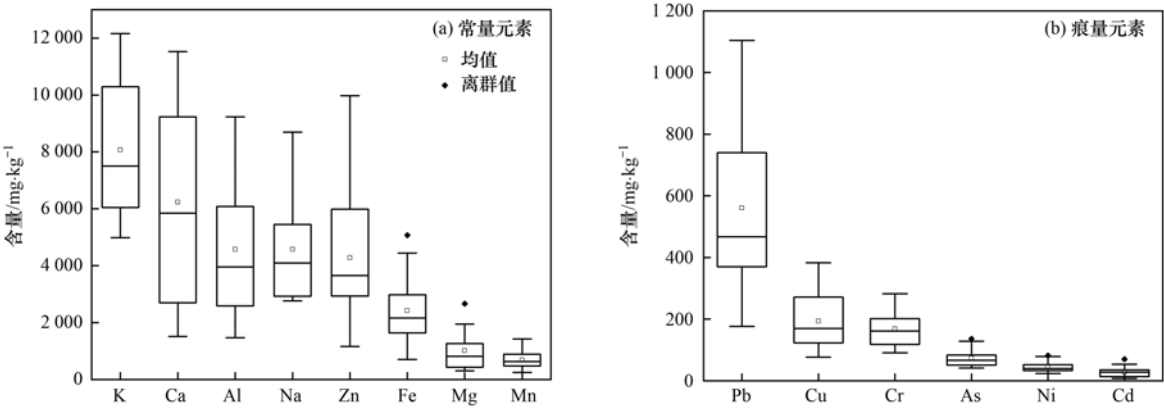


图 2 冬季 PM_{2.5} 载带金属元素含量特征

Fig. 2 Mass concentration of metallic elements in PM_{2.5} in winter

为源的影响. 与淄博南部相邻的临沂市相关研究结果^[38]相比较,K、Ca、Al、Fe、Mg、Pb 和 Cu 要低于临沂市冬季的含量水平,特别是 Al 和 Fe; Na、Zn、Mn、Cr、As、Ni 和 Cd 则是淄博市略高于临沂市,这与两个城市工业结构不同有关.

本研究使用地累积指数来评价 PM_{2.5} 载带金属元素的污染水平. 由图 3 可以看出,Cd 的 I_{geo} 值最高(7.6),其次为 Zn(5.2),二者均属于严重污染程度; Pb 的 I_{geo} 值为 3.7,属于重度污染; Cu 和 As 的 I_{geo} 值均为 2.3,属于偏重度污染; 剩余 9 种元素的 I_{geo} 值均

小于 1,属于轻度污染或无污染程度. 综上可以看出 Cd、Zn、Pb、Cu 和 As 受人为活动影响较大.

淄博市道路尘中的 Ca 和 Mg 的 I_{geo} 值等级分别为偏重度污染和轻度污染^[39](2017 年 1 月),而本研究中均为无污染,这主要是由于道路尘中地壳元素含量较高所致. Zn 在本研究和南昌市高速公路沿线(2018 年)PM_{2.5}^[28]中的评价结果均为严重污染,明显高于其在道路扬尘中的评价等级[宝鸡市^[31]为偏重度污染(2006 年 1 月)、北京市^[26]为轻度污染(2013 年)和淄博市^[39]为重度污染(2017 年 1 月)]. Pb 和 As 在成都市冬季(2010 年 1 月)PM_{2.5}^[18]中的 I_{geo} 值等级分别为严重污染和偏严重污染,高于本研究的重度污染和偏重度污染,Cd 的 I_{geo} 值等级与本研究相同,均为严重污染.

2.2 潜在生态风险评价

为了解金属元素污染可能造成的生态风险,对地累积指数偏高的 8 种元素(Zn、Mn、Pb、Cu、Cr、As、Ni 和 Cd)进行了潜在生态风险评价,评价结果如表 4 所示. 从单因子生态危害程度来看,Cd 的 E_r 最高(10 154.2),Mn 最低(1.1), E_r 的具体排序是: Cd > Pb > As > Zn > Cu > Ni > Cr > Mn. 总体来看,金属元素存在极强的潜在危害,RI 指数高达 10 462.6,其中 Cd 的贡献约为 97%.

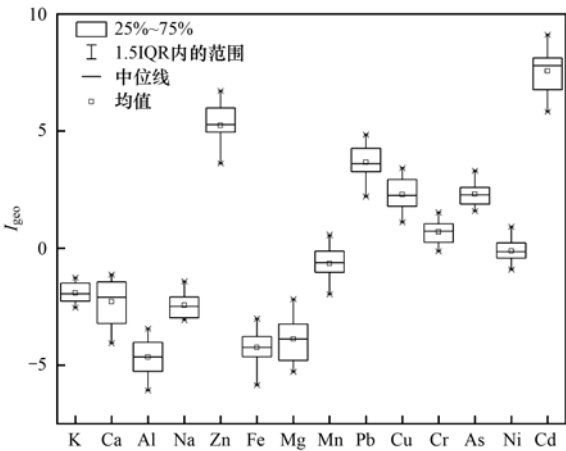


图3 PM_{2.5} 载带金属元素 I_{geo} 结果
Fig. 3 Metallic element I_{geo} results in PM_{2.5} in winter

表 4 潜在生态风险评价结果

Table 4 Evaluation results of potential ecological risk in winter in Zibo City								
金属元素种类	Zn	Mn	Pb	Cu	Cr	As	Ni	Cd
E_r	67.4	1.1	108.6	40.3	5.1	78.6	7.4	10 154.2
单因子生态危害程度	较强	轻微	较强	中等	轻微	较强	轻微	极强

郭清源^[39]对淄博市冬季道路扬尘金属元素风险评价的结果为: Cd > Cu > Pb > As > Zn > Ni > Cr, 与本研究在 Cu 的顺序上存在差别; 南昌市高速公路沿线 PM_{2.5} 载带重金属风险评价的结果为: Cd > Zn > Pb > Cu > Ni > Cr, 与本研究在 Zn 的顺序上存在差别; 造成这两种差异的原因可能是道路扬尘及高速公路沿线采样环境受机动车排放影响较大. 太原市^[40]居民生活区 PM_{2.5} 中金属元素的生态风险评价顺序为: Cd > Cu > Pb > Zn > Ni > As > Cr > Mn; 兰州市^[17]城区大气 PM_{2.5} 载带重金属元素的生态危害顺序为: Cd > Cu > Ni > Zn > Pb > Cr; 比较 3 个城市的城区结果可以看出, 危害程度最强的元素均为 Cd, 危害程度最低的为 Cr 和 Mn, 其余元素的危害程度顺序在各城市之间则差异较大.

2.3 来源分析

2.3.1 相关性分析

相关性分析可以确定金属元素是否来自同一污

染源. 图 4 的相关性分析结果表明, 淄博市 PM_{2.5} 载带 14 种元素中, 超过 50% 以上的元素两两之间存在显著相关关系, 其中: K-Pb-Cd-Cu、Ca-Al-Na-Mn 和 Cr-As-Ni 这 3 组元素的组内元素之间均为极显著相关($P < 0.01$), 说明组内元素可能来自同一类源; Fe 仅与 Cd 之间显著相关($P < 0.05$), 与其他元素均不显著相关, 说明 Fe 和 Cd 可能具有相似的来源.

2.3.2 富集因子

图 5 是 14 种金属元素的富集因子结果. Na、Fe 和 Mg 这 3 种元素的 EF 值小于 5, 说明其主要来自自然源; K、Ca 和 Mn 的 EF 值介于 5.0 ~ 16.0 之间, 为显著富集等级, 来源除自然源外, 也有少部分来自人为源; Ni 是强烈富集, 说明受到人为源的影响较大; Zn、Pb、Cu、Cr、As 和 Cd 均是极强富集, 说明其主要来源均为人为源. Zn、Pb、Cu、Cr、As 和 Cd 为与交通排放、化石燃料燃烧和金属冶炼相

K	K	○	○*	○**	○	○	○	○*	○**	○**	○	○**	○**	○**
Ca	0.50	Ca	○**	○**	○**	○	○**	○**	○	○	○	○	○**	○
Al	0.58	0.93	Al	○**	○**	○	○*	○**	○**	○*	○*	○*	○**	○
Na	0.77	0.72	0.82	Na	○	○	○	○**	○**	○**	○*	○**	○**	○*
Zn	0.22	0.70	0.71	0.51	Zn	○	○**	○**	○	○	○	○	○	○
Fe	0.21	0.44	0.36	0.11	0.32	Fe	○	○	○	○	○	○	○	○*
Mg	0.08	0.75	0.64	0.37	0.68	0.37	Mg	○*	○	○	○	○	○	○
Mn	0.54	0.74	0.77	0.75	0.88	0.36	0.61	Mn	○**	○*	○	○	○*	○*
Pb	0.82	0.50	0.65	0.82	0.49	0.30	0.18	0.71	Pb	○**	○*	○**	○**	○**
Cu	0.72	0.46	0.62	0.68	0.41	0.48	0.19	0.57	0.91	Cu	○	○*	○*	○**
Cr	0.49	0.44	0.52	0.60	0.44	-0.19	0.16	0.50	0.54	0.25	Cr	○**	○**	○
As	0.72	0.43	0.53	0.79	0.21	0.10	0.01	0.45	0.77	0.59	0.72	As	○**	○*
Ni	0.71	0.75	0.78	0.89	0.45	0.11	0.38	0.63	0.72	0.58	0.73	0.84	Ni	○
Cd	0.69	0.38	0.41	0.60	0.22	0.59	0.23	0.53	0.77	0.81	0.05	0.54	0.49	Cd

* 表示 $P \leq 0.05$, ** 表示 $P \leq 0.01$; 圆越大,表示相关系数越大

图 4 $PM_{2.5}$ 载带金属元素之间的相关性

Fig. 4 Pearson correlation coefficient of metallic elements in $PM_{2.5}$

关的元素^[14,41,42]. 结合这些组分的来源判断淄博市 $PM_{2.5}$ 载带金属元素的人为来源主要包括机动车尾气源、燃煤源和冶金行业.

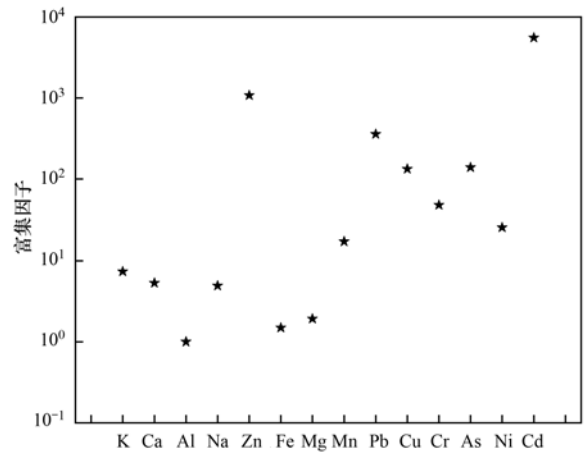


图 5 $PM_{2.5}$ 载带金属元素富集因子结果

Fig. 5 Metallic element EF results in $PM_{2.5}$

2.3.3 主成分分析

对 14 种金属元素进行主成分分析,提取了 3 个主成分因子,共解释了总变量的 85.75%. 其中因子 1、2 和 3 分别解释了总变量的 58.06%、15.25% 和 12.45%.

因子 1 的贡献率为 58.06%. 与因子 2 和因子 3 相比较,因子 1 中大部分金属元素载荷均较高,其中 Ca、Al、Na、Mn、Pb 和 Ni 这 6 种元素的载荷高于 0.8. Ca、Al、Na 和 Mn 之间显著相关,且富集因子均较低,因此判断其主要来自自然源^[41]; Pb-Cd-Cu 彼此之间均显著相关,且均极强富集,结合相关研究

分析其可能来自交通源^[43]; Ni-As-Cr 存在显著的相关性,且三者含量均高于山东省 A 层土壤背景值,属于强烈富集和极强富集的程度,可以排除仅来自自然源的可能性,且 As 是燃煤尘的标志物^[19], Ni 和 Cr 主要来源于燃料燃烧^[44],因此推测 Ni-As-Cr 来自燃煤源. 因此,因子 1 可归为自然源、交通源、燃煤源的混合源.

因子 2 的贡献率为 15.25%,其中 Mg 的载荷最高,为 0.76,其次为 Zn,载荷为 0.57. 根据相关性分析结果,Mg 元素主要和地壳元素显著相关,且富集因子较小;与 Zn 显著相关的元素富集因子均较小,但是 Zn 属于极强富集,而 Zn 主要来源于交通污染^[43]. 结合二者特征,推断因子 2 为道路扬尘源.

因子 3 的贡献率为 12.45%,其中 Fe 的载荷最高,为 0.72,其次为 Cd,载荷为 0.62,Cd 含量高于山东省 A 层土壤背景值,为山东省 A 层土壤背景值的 283.8 倍,且根据相关性分析,二者之间显著相关($r = 0.59, P < 0.05$),因此判断因子 3 为人为源. 由于 Fe 是钢铁冶炼的标志组分,Cd 的主要来源是钢铁冶炼^[19]和交通源^[45],共同来源为钢铁冶炼,因此推断因子 3 是钢铁冶炼.

3 结论

(1) 本研究中冬季 $PM_{2.5}$ 载带 14 种金属元素的含量大小顺序为: $K > Ca > Al > Na > Zn > Fe > Mg > Mn > Pb > Cu > Cr > As > Ni > Cd$; Zn、Pb、Cu、Cr、As、Ni 和 Cd 含量高于山东省 A 层土壤背景值,依

次为山东省 A 层土壤背景值的 56.6、19.0、7.2、2.4、7.3、1.4 和 283.8 倍,说明这 7 种元素受人为源影响较大。

(2)通过地累积指数对金属元素污染程度分析,结果表明 Cd、Pb、As、Zn 和 Cu 具有较强的污染程度,其中 Cd 污染最严重,为严重污染程度($I_{geo} = 7.6$)。

(3)通过潜在生态风险评价法对金属元素的生态风险进行分析,Cd、Pb、As、Zn 和 Cu 具有较高的潜在生态风险,其中 Cd 属于极强生态危害程度($E_r = 10\ 154.2$)。

(4)相关性分析、富集因子法和主成分分析法多种源解析方法结果显示:淄博市城区 PM_{2.5} 载带金属元素主要来自土壤扬尘、机动车尾气源、燃煤源和冶金行业。因此需要重视这些行业的管控来降低相应金属元素所造成的风险。

参考文献:

- [1] Xiao C C, Chang M, Guo P K, *et al.* Analysis of air quality characteristics of Beijing-Tianjin-Hebei and its surrounding air pollution transport channel cities in China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2020, **87**: 213-227.
- [2] Ji H B, Wang Q G, Yu Y Y, *et al.* How have the characteristics of air quality in a typical large Chinese city changed between 2011 and 2017? [J]. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 2019, **12**(4): 401-410.
- [3] Li M H, Wu L P, Zhang X Y, *et al.* Comparison of PM_{2.5} chemical compositions during haze and non-haze days in a heavy industrial city in north China [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2020, **20**(9): 1950-1960.
- [4] World Health Organization. WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide [EB/OL]. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329>, 2021-09-23.
- [5] Carey I M, Anderson H R, Atkinson R W, *et al.* Are noise and air pollution related to the incidence of dementia? A cohort study in London, England [J]. *BMJ Open*, 2018, **8**(9), doi: 10.1136/bmjopen-2018-022404.
- [6] Wu C F, Wu S Y, Wu Y H, *et al.* Cancer risk assessment of selected hazardous air pollutants in Seattle [J]. *Environment International*, 2009, **35**(3): 516-522.
- [7] Pope III C A, Dockery D W. Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2006, **56**(6): 709-742.
- [8] Chu C, Zhang H Y, Cui S J, *et al.* Ambient PM_{2.5} caused depressive-like responses through Nrf2/Nlrp3 signaling pathway modulating inflammation [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, **369**: 180-190.
- [9] Laden F, Schwartz J, Speizer F E, *et al.* Reduction in fine particulate air pollution and mortality: extended follow-up of the Harvard Six Cities study [J]. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 2006, **173**(6): 667-672.
- [10] Park M, Joo H S, Lee K, *et al.* Differential toxicities of fine particulate matters from various sources [J]. *Scientific Reports*, 2018, **8**, doi: 10.1038/s41598-018-35398-0.
- [11] Yang L W, Liu G, Lin Z Y, *et al.* Pro-inflammatory response and oxidative stress induced by specific components in ambient particulate matter in human bronchial epithelial cells [J]. *Environmental Toxicology*, 2016, **31**(8): 923-936.
- [12] Bell M L, Ebisu K, Leaderer B P, *et al.* Associations of PM_{2.5} constituents and sources with hospital admissions; analysis of four counties in Connecticut and Massachusetts (USA) for persons ≥ 65 years of age [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2014, **122**(2): 138-144.
- [13] Feng J L, Yu H, Liu S H, *et al.* PM_{2.5} levels, chemical composition and health risk assessment in Xinxiang, a seriously air-polluted city in North China [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2017, **39**(5): 1071-1083.
- [14] Duan J C, Tian J H, Hao J M, *et al.* Size distribution, characteristics and sources of heavy metals in haze episode in Beijing [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, **26**(1): 189-196.
- [15] Gautam S, Patra A K, Kumar P. Status and chemical characteristics of ambient PM_{2.5} pollutions in China: a review [J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2019, **21**(4): 1649-1674.
- [16] Sato K, Tamura T, Furuta N. Partitioning between soluble and insoluble fractions of major and trace elements in size-classified airborne particulate matter collected in Tokyo [J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2008, **10**(2): 211-218.
- [17] 林海鹏, 武晓燕, 战景明, 等. 兰州市某城区秋冬季大气颗粒物及重金属的污染特征 [J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(5): 810-815.
- [18] 李友平, 刘慧芳, 周洪, 等. 成都市 PM_{2.5} 中有毒重金属污染特征及健康风险评价 [J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(7): 2225-2232.
- [19] 梁孟孝, 姬亚芹, 王伟, 等. 鞍山市秋季大气 PM_{2.5} 中元素污染特征和来源分析 [J]. *环境化学*, 2016, **35**(10): 2197-2203.
- [20] Thomaidis N S, Bakeas E B, Siskos P A, *et al.* Characterization of lead, cadmium, arsenic and nickel in PM_{2.5} particles in the Athens atmosphere, Greece [J]. *Chemosphere*, 2003, **52**(6): 959-966.
- [21] 欧盛菊, 吴丽萍, 王信梧, 等. 典型“组团式”城市夏季大气颗粒物中水溶性离子化学特征及来源 [J]. *环境科学研究*, 2018, **31**(4): 669-678.
- [22] 代杰瑞, 喻超, 张明杰, 等. 淄博市区大气颗粒物重金属元素分布特征及其来源分析 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2018, **48**(4): 1201-1211.
- [23] Dai J R, Yu C, Zhang M J, *et al.* Distribution characteristics and sources of heavy metals in urban atmospheric particulate matter in Zibo City [J]. *Journal of Jilin University (Earth*

- Science Edition), 2018, **48**(4): 1201-1211.
- [23] 周静博, 段青春, 王建国, 等. 2019 年元旦前后石家庄市重污染过程 PM_{2.5} 污染特征及来源解析[J]. 环境科学, 2020, **41**(1): 39-49.
- Zhou J B, Duan J C, Wang J G, *et al.* Analysis of pollution characteristics and sources of PM_{2.5} during heavy pollution in Shijiazhuang City around New Year's Day 2019 [J]. Environmental Science, 2020, **41**(1): 39-49.
- [24] 赵雪艳, 谷超, 杨焕明, 等. 新疆奎独乌区域冬季大气重污染过程 PM_{2.5} 组成特征及来源解析[J]. 环境科学研究, 2017, **30**(10): 1515-1523.
- Zhao X Y, Gu C, Yang H M, *et al.* Chemical composition and source apportionment of PM_{2.5} during a winter air pollution episode in the Kui-Du-Wu Area of Xinjiang Uygur Autonomous Region [J]. Research of Environmental Sciences, 2017, **30**(10): 1515-1523.
- [25] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. GeoJournal, 1969, **2**(108): 108-118.
- [26] 胡月琪, 郭建辉, 张超, 等. 北京市道路扬尘重金属污染特征及潜在生态风险[J]. 环境科学, 2019, **40**(9): 3924-3934.
- Hu Y Q, Guo J H, Zhang C, *et al.* Pollution characteristics and potential ecological risks of heavy metals in road dust in Beijing [J]. Environmental Science, 2019, **40**(9): 3924-3934.
- [27] 曹治国, 余刚, 吕香英, 等. 北京市典型室内外灰尘中重金属的粒径和季节变异特征及人体暴露评估[J]. 环境科学, 2016, **37**(4): 1272-1278.
- Cao Z G, Yu G, Lv X Y, *et al.* Particle size distribution, seasonal variation characteristics and human exposure assessment of heavy metals in typical settled dust from Beijing [J]. Environmental Science, 2016, **37**(4): 1272-1278.
- [28] 李晓宝, 廖祖文, 赵红, 等. 高速公路沿线 PM_{2.5} 中重金属污染特征[J]. 环境科学, 2019, **40**(9): 3916-3923.
- Li X B, Liao Z W, Zhao H, *et al.* Pollution characteristics of heavy metals in PM_{2.5} near highway[J]. Environmental Science, 2019, **40**(9): 3916-3923.
- [29] 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.
- [30] 胡恭任, 戚红璐, 于瑞莲, 等. 大气降尘中重金属形态分析及生态风险评价[J]. 有色金属, 2011, **63**(2): 286-291.
- Hu G R, Qi H L, Yu R L, *et al.* Speciation analysis of heavy metal in atmospheric dust and ecological risk assessment [J]. Nonferrous Metals, 2011, **63**(2): 286-291.
- [31] Lu X E, Wang L J, Lei K, *et al.* Contamination assessment of copper, lead, zinc, manganese and nickel in street dust of Baoji, NW China[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **161**(2-3): 1058-1062.
- [32] Håkanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [33] 徐争启, 倪师军, 庾先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术, 2008, **31**(2): 112-115.
- Xu Z Q, Ni S J, Tuo X G, *et al.* Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index[J]. Environmental Science & Technology, 2008, **31**(2): 112-115.
- [34] 马建华, 韩昌序, 姜玉玲. 潜在生态风险指数法应用中的一些问题[J]. 地理研究, 2020, **39**(6): 1233-1241.
- Ma J H, Han C X, Jiang Y L. Some problems in the application of potential ecological risk index [J]. Geographical Research, 2020, **39**(6): 1233-1241.
- [35] Song S J, Wu Y, Jiang J K, *et al.* Chemical characteristics of size-resolved PM_{2.5} at a roadside environment in Beijing, China [J]. Environmental Pollution, 2012, **161**: 215-221.
- [36] Hsu S C, Liu S C, Tsai F, *et al.* High wintertime particulate matter pollution over an offshore island (Kinmen) off southeastern China: an overview [J]. Journal of Geophysical Research, 2010, **115**(D17), doi: 10.1029/2009JD013641.
- [37] 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.
- [38] 陆平, 赵雪艳, 殷宝辉, 等. 临沂市 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中元素分布特征及来源解析[J]. 环境科学, 2020, **41**(5): 2036-2043.
- Lu P, Zhao X Y, Yin B H, *et al.* Distribution characteristics and source apportionment of elements bonded with PM_{2.5} and PM₁₀ in Linyi [J]. Environmental Science, 2020, **41**(5): 2036-2043.
- [39] 郭清源, 白雯宇, 赵雪艳, 等. 淄博市道路尘细粒子携带金属元素的来源与健康风险评估[J]. 环境科学, 2021, **42**(3): 1245-1254.
- Guo Q Y, Bai W Y, Zhao X Y, *et al.* Source and health risk assessment of PM_{2.5}-bound metallic elements in road dust in Zibo City [J]. Environmental Science, 2021, **42**(3): 1245-1254.
- [40] 李丽娟, 温彦平, 彭林, 等. 太原市采暖季 PM_{2.5} 中元素特征及重金属健康风险评估[J]. 环境科学, 2014, **35**(12): 4431-4438.
- Li L J, Wen Y P, Peng L, *et al.* Characteristic of elements in PM_{2.5} and health risk assessment of heavy metals during heating season in Taiyuan [J]. Environmental Science, 2014, **35**(12): 4431-4438.
- [41] Pio C A, Castro L M, Cerqueira M A, *et al.* Source assessment of particulate air pollutants measured at the southwest European coast [J]. Atmospheric Environment, 1996, **30**(19): 3309-3320.
- [42] Tripathee L, Kang S C, Huang J, *et al.* Concentrations of trace elements in wet deposition over the central Himalayas, Nepal [J]. Atmospheric Environment, 2014, **95**: 231-238.
- [43] Johansson C, Norman M, Burman L. Road traffic emission factors for heavy metals [J]. Atmospheric Environment, 2009, **43**(31): 4681-4688.
- [44] Cong Z Y, Kang S C, Zhang Y L, *et al.* Atmospheric wet deposition of trace elements to central Tibetan Plateau [J]. Applied Geochemistry, 2010, **25**(9): 1415-1421.
- [45] Yang H H, Dhital N B, Wang L C, *et al.* Chemical characterization of fine particulate matter in gasoline and diesel vehicle exhaust [J]. Aerosol and Air Quality Research, 2019, **19**(6): 1439-1449.

CONTENTS

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