

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

经济快速发展区场地污染特征、源-汇关系与管控对策专辑

我国经济快速发展区工业VOCs排放特征及管控对策

孟博文, 李永波, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 周喜斌, 李金灵, 苏贵金

VOCs



制药



喷涂



橡胶

京津冀 •

• 长三角

珠三角 •

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年3月

第42卷 第3期

Vol.42 No.3

目次

经济快速发展区场地污染特征、源-汇关系与管控对策专辑

我国经济快速发展区工业 VOCs 排放特征及管控对策	孟博文, 李永波, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 周喜斌, 李金灵, 苏贵金 (1023)
长江经济带湖北省人为源 VOCs 排放清单及变化特征	代伶文, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 苏贵金, 黄利宏 (1039)
经济快速发展区六氯丁二烯的来源与分布特征	陶誉铭, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 苏贵金, 郭立新 (1053)
近 20 年中国表层土壤中多环芳烃时空分布特征及源解析	马妍, 程芦, 阮子渊, 史鹏飞, 路超君, 运晓彤, 李璐嫣, 徐雁秋, 史怡 (1065)
电子废物拆解区微塑料与周围土壤环境之间的关系	柴炳文, 尹华, 魏强, 卢桂宁, 党志 (1073)
焦化场地内外土壤重金属空间分布及驱动因子差异分析	顾高铨, 万小铭, 曾伟斌, 雷梅 (1081)
典型石化工业城市土壤重金属源解析及空间分布模拟	孙雪菲, 张丽霞, 董玉龙, 朱林宇, 王政, 吕建树 (1093)
多功能区工业园土壤和地表灰尘重金属污染及生态风险差异分析	曾伟斌, 顾高铨, 万小铭, 雷梅 (1105)
龙岩市某铁锰矿区土壤重金属地球化学空间分布特征与来源分析	王蕊, 陈楠, 张二喜, 李小赛 (1114)
基于全周期场地概念模型的场地环境精准调查应用案例	李培中, 吴乃瑾, 王海见, 张骥, 荣立明, 李翔, 魏文侠, 宋云 (1123)
造纸厂土壤中短链和中链氯化石蜡的污染特征和风险评估	张佩萱, 高丽荣, 宋世杰, 乔林, 徐驰, 黄帝, 王爽, 蒋思静, 郝明辉 (1131)
典型再生铜冶炼厂周边土壤中 PCDD/Fs、PCBs 和 PCNs 的污染特征及健康风险评估	胡吉成, 郭静, 许晨阳, 金军 (1141)
柠檬酸与磷共存对土壤吸附镉的影响	宋子腾, 左继超, 胡红青 (1152)
两种能源草田间条件下对镉和锌的吸收累积	郑瑞伦, 石东, 刘文菊, 孙国新, 侯新村, 胡艳霞, 朱毅, 武菊英 (1158)
钒钛磁铁矿尾矿库复垦土地及周边土壤-玉米重金属迁移富集特征	孙厚云, 卫晓峰, 孙晓明, 贾凤超, 李多杰, 李健 (1166)
盐胁迫下八宝景天不同生态型对土壤中 Cd 积累特征	郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 万小铭, 孟晓飞, 陈同斌, 何孟轲, 周小勇, 徐铁兵 (1177)
水分条件对生物炭钝化水稻土铅镉复合污染的影响	汤家庆, 张绪, 黄国勇, 胡红青 (1185)
壳聚糖改性生物炭对水稻土甲基汞生成及其稻米积累的影响	杨雪玲, 王明星, 徐国敏, 王定勇 (1191)
铬污染对土壤细菌群落结构及其构建机制的影响	于皓, 安益君, 金德才, 靳拓, 王兴润 (1197)
研究报告	
COVID-19 疫情期间京津冀大气污染物变化及影响因素分析	赵雪, 沈楠驰, 李令军, 武高峰, 陶静, 赵文吉 (1205)
2020 年初疫情管控对山东省空气质量影响的模拟	刘厚凤, 徐薇, 魏敏, 隋潇, 许鹏举, 李明燕, 张美根 (1215)
南京北郊 PM _{2.5} 中有机组分的吸光性质及来源	尚玥, 余欢, 茅宇豪, 王成, 谢鸣捷 (1228)
西安市大气棕碳污染特性及发色团种类	陈前, 陈庆彩 (1236)
淄博市道路尘细粒子携带金属元素的来源与健康风险评价	郭清源, 白雯宇, 赵雪艳, 郭丽瑶, 王敬华, 耿春梅, 王晓丽, 王静, 杨文, 白志鹏 (1245)
北京市控制 PM _{2.5} 污染的健康效益评估	杜沛, 王建州 (1255)
西宁市大气污染来源和输送季节特征	刘娜, 余晔, 马学谦 (1268)
青岛近海不同污染过程下大气颗粒态氮磷浓度分布特征	袁刚, 祁建华, 丁雪 (1280)
基于走航监测的长三角工业园区周边大气挥发性有机物污染特征	王红丽, 高雅琴, 景盛翱, 楼晟荣, 胡馨遥, 安静宇, 吴宇航, 高伟, 朱亮, 黄成 (1298)
山地型城市冬季大气重污染过程特征及成因分析	刘伟诚, 牛月圆, 吴婧, 闫雨龙, 胡冬梅, 邱雄辉, 彭林 (1306)
兰-白城市群主要大气污染物网格化排放清单及来源贡献	王文鹏, 王占祥, 李继祥, 高宏, 黄韬, 毛蒲萱, 马建民 (1315)
2012~2019 年北京市储油库 VOCs 去除及排放水平变化监测分析	华岚英, 崔彤, 李金香, 邹本东, 杨妍妍, 程刚 (1328)
生活垃圾无害化处理大气污染物排放清单	马占云, 姜昱聪, 任佳雪, 张阳, 冯鹏, 高庆先, 孟丹 (1333)
长江口邻近海域表层沉积物中的细菌霍多醇及对低氧区的响应判别	尹美玲, 段丽琴, 宋金明, 张乃星 (1343)
鄱阳湖流域水体和水产品中苯酚的暴露特征及人体健康风险评估	徐倩云, 艾舜豪, 高祥云, 王晓南, 刘征涛, 赵师晴, 葛刚, 李霖 (1354)
衡水湖湿地水环境质量时空变化特征及污染源分析	刘魏魏, 郭子良, 王大安, 张曼胤, 张余广 (1361)
丹江口水库及其入库支流水体中微塑料组成与分布特征	潘雄, 林莉, 张胜, 翟文亮, 陶晶祥, 李丹文 (1372)
金盆水库暴雨径流时空演变过程及水质评价	黄诚, 黄廷林, 李扬, 李楠, 齐允之, 司凡, 华逢耀, 赵凌云 (1380)
汛期暴雨径流对饮用水水库溶解性有机质 (DOM) 光谱特征的影响	李程遥, 黄廷林, 温成成, 梁伟光, 林子深, 杨尚业, 李凯, 蔡晓春 (1391)
苏州古城区河道碳氮磷类污染物的分布特征	白冬锐, 张涛, 陈坦, 王洪涛, 金曦, 郑凯旋, 李忠磊, 杨婷, 金军 (1403)
娘子关泉群水化学特征及成因	唐春雷, 赵春红, 申豪勇, 梁永平, 王志恒 (1416)
过氧化钙重塑底泥对水中磷酸盐的吸附作用	徐楚天, 李大鹏, 王子良, 吴宇涵, 许鑫澎, 黄勇 (1424)
亚热带丘陵区绿狐尾藻人工湿地处理养猪废水氮磷去向	王丽莎, 李希, 李裕元, 张满谔, 吴金水 (1433)
紫外/亚硫酸盐高级还原工艺加速降解水中难降解含碘造影剂	刘子奇, 仇付国, 赖曼婷, 李津, 董慧岭, 强志民 (1443)
太阳能热活化过硫酸盐降解染料罗丹明 B 的效能	马萌, 许路, 金鑫, 金鹏康 (1451)
一步法 La@MgFe ₂ O ₄ 的制备及其吸附水中磷的性能	白润英, 宋博文, 张戎, 郝俊峰, 刘建明, 刘宇红 (1461)
工程规模长填龄渗滤液膜生物-纳滤组合设施各单元污染物去除效能	邵立明, 邓樱桃, 仇俊杰, 吕凡, 章骅, 何品品 (1469)
ANAMMOX 培养物中硫酸盐型氨氧化生物转化机制	毕贞, 董石语, 黄勇 (1477)
不同季节城市污水处理厂微生物群落特性	贺赞, 李魁晓, 王佳伟, 王慰, 樊鹏超, 陈行行, 王军静 (1488)
麻黄碱在斑马鱼体内的器官特异性蓄积及毒代动力学	殷行行, 郭昌胜, 邓洋慧, 邱紫雯, 张艳, 滕彦国, 徐建 (1496)
内蒙古白云鄂博矿区土壤稀土元素污染特征及评价	王哲, 赵莹晨, 骆逸飞, 郑春丽, 卞园, 张光宇 (1503)
广西典型岩溶区农田土壤-作物系统 Cd 迁移富集影响因素	马宏宏, 彭敏, 郭飞, 刘飞, 唐世琪, 杨峰, 张富贵, 周亚龙, 杨柯, 李括, 刘秀金 (1514)
超顺磁性纳米材料对镉污染稻田土壤微生物和酶的影响	方丹丹, 张立志, 王强 (1523)
水分管理与施硅对水稻根表铁膜及砷镉吸收的影响	陈佳, 赵秀兰 (1535)
四环素类抗生素对土壤-生菜系统的生物效应及其迁移降解特性	王卫中, 迟苏琳, 徐卫兰 (1545)
地膜覆盖对菜地垄沟 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	熊维霞, 江长胜, 赵仲婧, 曾唯, 胡曼利, 涂婷婷, 陈俊江, 郝庆菊 (1559)
对比研究生物炭和秸秆对麦玉米轮作系统 N ₂ O 排放的影响	唐占明, 刘杏认, 张晴雯, 李贵春 (1569)
流域生态空间管控下生境监测方法概述	阴琨, 刘海江, 王光, 金小伟 (1581)
《环境科学》征订启事 (1151) 《环境科学》征稿简则 (1342) 信息 (1402, 1415, 1580)	

淄博市道路尘细粒子载带金属元素的来源与健康风险评价

郭清源^{1,2}, 白雯宇², 赵雪艳², 郭丽瑶², 王歆华², 耿春梅², 王晓丽^{1*}, 王静^{2*}, 杨文², 白志鹏²
(1. 天津理工大学环境科学与安全工程学院, 天津 300384; 2. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012)

摘要: 为研究淄博市道路尘细粒子中金属元素的污染特征及其来源和生态及健康风险, 于2016年10月至2017年5月在淄博市8区县共采集97个道路尘样品, 使用再悬浮系统将道路尘中粒径小于2.5 μm 的颗粒物悬浮并采集到滤膜上, 通过ICP-MS和ICP-OES分析测定其中的18种金属元素。结果表明, Ca的质量分数 $\omega(\text{Ca})$ 最高, 均值达到120 307.7 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 是山东省土壤背景值的7.2倍, $\omega(\text{Zn})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Sb})$ 和 $\omega(\text{Cd})$ 的均值分别为背景值的13.9、11.7、13.3和29.6倍。地累积指数(I_{geo})表明, 道路尘细粒子中Cd、Zn、Cu和Sb这4种元素受污染程度较高, 冬季都受到了重度以上的污染。富集因子值(EF)同样表明, 道路扬尘中的Cd、Zn、Sb和Cu这4种元素富集比较严重, 受人为影响明显。主成分分析(PCA)表明, 生物质燃烧、燃煤、机动车排放、钢铁冶炼和土壤扬尘为淄博市道路尘中金属元素的5个主要来源。潜在生态风险评价显示, Cd的潜在风险和总的潜在风险在3个季节都达到了极强且在冬季最高。健康风险评价显示As和Pb对儿童存在非致癌风险, Cr存在致癌风险。总之, 淄博市道路尘细粒子载带金属元素受人为源影响, 在冬季污染较强, 存在潜在生态风险, 对儿童具有一定的非致癌风险和致癌风险, 对于道路尘的源头控制需要引起重视。

关键词: 道路尘; $\text{PM}_{2.5}$; 金属元素; 来源; 健康风险

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)03-1245-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202007176

Source and Health Risk Assessment of $\text{PM}_{2.5}$ -Bound Metallic Elements in Road Dust in Zibo City

GUO Qing-yuan^{1,2}, BAI Wen-yu², ZHAO Xue-yan², GUO Li-yao², WANG Xin-hua², GENG Chun-mei², WANG Xiao-li^{1*}, WANG Jing^{2*}, YANG Wen², BAI Zhi-peng²

(1. College of Environmental Science & Safety Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: To study the pollution characteristics, sources, and ecological and health risk of $\text{PM}_{2.5}$ -bound metallic elements in road dust in Zibo City, a total of 97 dust samples were collected in eight districts between October 2016 and May 2017, and particles smaller than 2.5 μm were suspended filtered using a resuspension system. Inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) and optical emission spectrometry (ICP-OES) were used to investigate 18 metal elements within the dust samples. The results showed that the mass fraction of Ca [$\omega(\text{Ca})$] was highest with an average of 120 307.7 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, which was 7.2 times higher than the soil background values for Shandong Province. The mean values of $\omega(\text{Zn})$, $\omega(\text{Cu})$, $\omega(\text{Sb})$, and $\omega(\text{Cd})$ were 13.9, 11.7, 13.3, and 29.6 times higher than the background values, respectively. The geo-accumulation index (I_{geo}) indicated high levels of Cd, Zn, Cu, and Sb pollution, especially in winter. Enrichment factors (EFs) also indicated high concentrations of Cd, Zn, Sb, and Cu in the road dust, which were notably affected by human activities. Principal component analysis (PCA) showed that biomass combustion, coal burning, vehicle emissions, iron and steel smelting, and soil dust are the five main sources of metal elements in road dust in Zibo City. The potential ecological risk of Cd and the total potential risk were extremely high during three seasons and was highest in winter. Health risk assessment showed that As and Pb had a non-carcinogenic risk for children, while Cr presents a carcinogenic risk. In conclusion, pollution from $\text{PM}_{2.5}$ -bound metallic elements in road dust in Zibo City is derived from anthropogenic sources and is most severe during winter. Importantly, the levels of pollution detected represent potential ecological risk as well as some non-carcinogenic and carcinogenic risks for children. Therefore, the source control of road dust requires particular attention.

Key words: road dust; $\text{PM}_{2.5}$; metallic element; source; health risk

随着中国城市化的快速发展, 路网总长度、机动车保有量快速增加, 各类在建工程数量和总面积保持高位, 交通与储运作业等增加了道路扬尘的排放。道路扬尘是城市大气颗粒物的重要来源之一^[1~3], 是各单一尘源类(如土壤风沙尘、建筑水泥尘、煤烟尘和机动车尾气尘等)排放的颗粒物的混合物, 既

可以视为环境空气中颗粒物的排放源类, 又可以视

收稿日期: 2020-07-19; 修订日期: 2020-08-22

基金项目: 大气重污染成因与治理攻关项目(DQGG0107-20)

作者简介: 郭清源(1995~), 男, 硕士, 主要研究方向为大气颗粒物中金属元素的污染特征及健康风险评价, E-mail: 654931741@qq.com

* 通信作者, E-mail: tjutwsl@163.com; wangjing@craes.org.cn

为各单一尘源类所排放的颗粒物的受体^[4],其组成特征能够反映城市环境受到人为源影响的程度. 2018 年 7 月国务院发布的《打赢蓝天保卫战三年行动计划》中,在突出的 4 个重点行业和领域中明确提出了扬尘治理. 无组织排放源是大气颗粒物的重要来源之一^[1,5,6],道路尘容易在机动车、行人及风力的作用下反复扬起和沉降,有研究结果表明道路尘在扬尘中的贡献率可达 40%~50%^[7,8]. 淄博市 2018 年 PM_{2.5} 来源解析表明,非采暖季和采暖季扬尘源的贡献率分别为 14.1% 和 10.5%^[9].

道路尘中含有多种对人体有害的物质,如重金属^[10,11]和多环芳烃^[12,13]等. 源于道路扬尘的 PM_{2.5} 中的重金属可以通过口鼻的呼吸和皮肤接触等途径进入人体,危害人体健康^[14,15],当前发达国家已经过了大规模城市建设和城市改造阶段,机动车尾气管理严格,道路载尘少. 我国近年来由于城市建设改造、大规模的民用建筑工程施工等,道路积尘较多,因此道路尘中载带的重金属对人体存在的健康风险^[4,10,14,16]受到关注. 目前对道路尘的报道多针对于区域性和人口密集城市,如 Shen 等^[17]对中国东北、西北和华北 11 个城市的城市扬尘化学特征进行研究,陈薇佳等^[4]对上海主干道道路扬尘组分特征和来源进行研究,但关于重工业城市不同季节的道路尘中金属元素的研究还比较少.

淄博市位于山东省中部(117°32'~118°31'E、35°55'~37°17'N),地处鲁中山区与华北平原的接合部,南依沂蒙山区与临沂接壤,北临华北平原与东营、滨州相接,东接潍坊,西与省会济南接壤,交通发达,是沟通中原地区和山东半岛的通道,是山东省重要的交通枢纽城市. 淄博市是全国石油化工、医药和陶瓷生产地,为组团分布式城区,每个城区周边产业发达,货运量大. 汽车保有量持续上升,据文献^[18],2016 年淄博市机动车保有量为 105.0 万辆,城市铺装道路平均车流量为 1 520.0 万辆·a⁻¹. 为了认识淄博市道路尘细粒子中金属元素的污染现状,本研究于 2016 年 10 月 18 日至 2017 年 5 月 10 日在淄博市 8 个区县采集主干道、支干道、支路和快速车道共 97 个样品,通过课题组自主研发的再悬浮系统^[19],采集了道路尘中的 PM_{2.5} 部分,分析了其中 18 种金属元素,系统研究了道路尘细粒子载带金属的污染特征、来源、潜在生态风险及健康风险.

1 材料与方法

1.1 样品采集

本研究采样方法参照文献^[20],使用吸尘器(HX-1216,功率 1 800 W)按照 1 min·m⁻² 的速度均

匀吸扫路面上的积尘,采样面积视路面清洁程度横跨道路取 0.3~3 m 宽,对每条道路每隔 3 km 采集一个样品,每个样品至少需 3 个子样品混合. 采样完毕后,取下吸尘纸袋确保完好后编号将其装入密封袋保存. 采样需保证采样前 3 d 无雨雪,确保路面干燥,风力不大于 3 级. 具体采集时间为:2016 年 10 月 18 日~11 月 9 日(秋季)、2017 年 1 月 13~23 日(冬季)和 2017 年 5 月 5~10 日(春季),由于夏季和秋季的污染源类型和季节条件差异不大,因此只秋、冬和春这 3 个季节进行采集并做分析,采样位置见图 1.

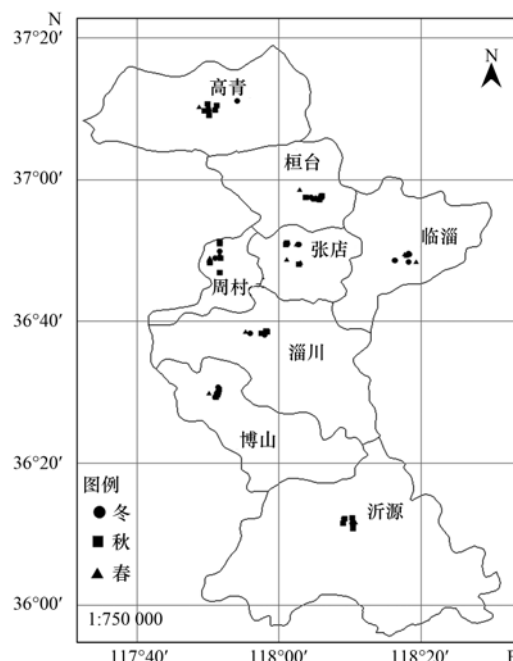


图 1 淄博市道路扬尘采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of road dust sampling points in Zibo City

1.2 样品前处理

将收集到的道路扬尘样品先去除其中的树叶和砂砾等杂物,放在阴凉干燥的地方自然干燥 7 d,通过 200 目的泰勒标准筛(0.075 mm),将过筛后的样品取 1.5 g 放入再悬浮仪器中,通过 PM_{2.5} 的切割头(切割粒径为 2.43 μm)将样品采集在 Teflon 滤膜上,最后得到 97 个 PM_{2.5} 滤膜样品,将得到的滤膜样品放在恒温恒湿的天平室平衡 24 h 后称量,备用.

1.3 样品分析及质量控制

取 1/2 Teflon 滤膜利用美国 Agilent 公司的 Agilent 7500a 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)分析测定样品中 14 种元素(K、Na、Zn、Mn、Cu、Cr、Pb、Ni、As、Sn、Co、Sb、Mo 和 Cd)的含量,另取 1/2 滤膜利用电感耦合等离子体光谱法(ICP-OES)测定样品中另外 4 种元素(Ca、Al、Fe 和 Mg)的含量;相对误差和标准偏差均需要小于 5%. 每批样品需要做空白实验,并进行 15% 的重复

测定,以保证检测结果满足质控要求,具体元素分析方法和质控措施参考陆平等^[21]对临沂市 PM_{2.5}和 PM₁₀中元素分布特征及来源解析的研究。

1.4 数据分析方法

1.4.1 地累积指数法

地累积指数(I_{geo})由 Muller^[22]提出后,目前广泛应用于道路尘中金属污染水平的评价^[14,23]。其计算公式为^[24]:

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{c_i}{k \times B_i} \right) \tag{1}$$

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,mg·kg⁻¹,具体取值见表 1^[25]; k 为因成岩运动可能引起背景值变动而设定的常数,依据前期研究取 1.5^[26]。地累积指数分级表见表 2^[27]。

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	Ca	Al	Fe	K	Mg	Na	Zn	Mn	Cu
土壤背景值	16 700	66 200	27 200	19 300	8 000	15 400	63.5	644	24
元素	Cr	Pb	Ni	As	Sn	Co	Sb	Mo	Cd
土壤背景值	66	25.8	29.4	9.3	2.6	13.6	0.9	6	0.084

表 2 地累积指数分级

Table 2 Ground accumulation index grading

地累积指数	$I_{geo} < 0$	$0 \leq I_{geo} < 1$	$1 \leq I_{geo} < 2$	$2 \leq I_{geo} < 3$	$3 \leq I_{geo} < 4$	$4 \leq I_{geo} < 5$	$I_{geo} \geq 5$
污染级别	0	1	2	3	4	5	6
污染程度	无	轻度	中度	偏重	重度	偏严重	严重

1.4.2 富集因子法

富集因子法是以土壤或地壳为背景介质来研究大气中元素的富集程度的重要指标,其值的大小可以识别元素的污染程度和季节变化,计算公式如下:

$$EF = (X_i/X_R)_{\text{颗粒物}} / (X_i/X_R)_{\text{地壳}} \tag{2}$$

式中, $(X_i/X_R)_{\text{颗粒物}}$ 和 $(X_i/X_R)_{\text{地壳}}$ 分别指大气和土壤中研究元素*i*与参比元素*R*含量的比值。土壤样本组分存在区域差异,本研究参考山东省 A 层土壤元素背景值^[25],选取在土壤中含有丰富且与所测元素之间相关性较好的 Al 作为参比元素^[28]。若所求元素 EF 值小于 5,表明该元素未被富集自然源为主要来源;若 EF 值在 5~10 之间,则该元素有一定程度富集,表明其来自于自然和人为混合源。若 EF 值大于 10,表明该元素在颗粒物中明显富集,受人为影响较大。

1.4.3 主成分分析法

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^[29]。为了进一步了解金属元素的来源并加以分类,本研究使用 SPSS 16.0 对 PM_{2.5}中的 18 种金属元素进行了主成分分析。

1.4.4 潜在生态风险评价法

潜在生态风险评价法是 1980 年由瑞典学者 Hakanson 从沉淀学的角度提出^[30],是对沉淀物和土壤中重金属污染水平进行评价的方法。因为重金属具有高毒性的特点,容易对生物和环境造成严重影

响,因此有必要对道路尘中的重金属进行潜在生态风险评价,为相关的环境质量评价提供理论依据。

本研究对道路尘 PM_{2.5}中部分重金属进行潜在生态风险评价,公式如下:

$$E_r^i = T_r^i \times C_i/C_o \tag{3}$$

$$RI = \sum E_r^i \tag{4}$$

式中, E_r^i 为第*i*种重金属元素的潜在风险指数; T_r^i 为第*i*种重金属元素的毒性系数,其中 Zn、Cr、Cu、Pb、Ni、As 和 Cd 的系数分别为 1、2、5、5、5、10 和 30^[31]; C_i 为第*i*种重金属元素的含量,mg·kg⁻¹; C_o 为第*i*种重金属元素的参比值,这里取山东省土壤元素背景值,mg·kg⁻¹; RI 为重金属元素的综合潜在生态风险指数。表 3 为潜在生态风险评价指数分级^[8,30,32]。

表 3 潜在生态风险评价指数分级

Table 3 Potential ecological risk assessment index graded

生态风险等级	轻微	中等	强	很强	极强
E_r^i	≤ 40	40~80	80~160	160~320	≥ 320
RI	≤ 150	150~300	300~600	600~1 200	$\geq 1 200$

1.4.5 健康风险评价法

本研究是基于 US EPA 提出的健康风险评价模型对淄博市的道路尘 PM_{2.5}载带的 9 种重金属元素 Zn、Mn、Cr、Pb、Ni、As、Co 和 Cd 进行健康风险评价。道路尘中重金属元素主要通过呼吸、手-口摄入和皮肤接触^[33,34]这 3 种暴露途径进入人体,其非致癌日均暴露量计算公式分别为:

$$ADD_{inh} = C \times \frac{EF \times ED}{AT \times BW} \times \frac{InhR}{PEF} \tag{5}$$

$$ADD_{ing} = C \times \frac{EF \times ED}{AT \times BW} \times IngR \times CF \tag{6}$$

$$ADD_{derm} = C \times \frac{EF \times ED}{AT \times BW} \times SL \times SA \times ABS \times CF \tag{7}$$

由于 US EPA 未给出摄入和皮肤接触致癌暴露量参考值,因此该研究仅考虑经呼吸途径的致癌风险,其终身日均暴露量计算公式:

$$LADD_{inh} = C \times \frac{EF}{PEF \times AT} \times \left(\frac{InhR_{child} \times ED_{child}}{BW_{child}} + \frac{InhR_{adult} \times ED_{adult}}{BW_{adult}} \right) \tag{8}$$

式中,ADD_{inh}、ADD_{ing}和ADD_{derm}分别为经呼吸、手-口摄入和皮肤接触的日均暴露量,mg·(kg·d)⁻¹;LADD_{inh}为致癌重金属经呼吸途径的终身日均暴露量,mg·(kg·d)⁻¹;C为重金属元素的含量,mg·kg⁻¹,采用95%置信区间的上限值来估计合理的最大暴露量.文献[35]统一

了中国人口的环境暴露参数,本研究通过参考手册来评估淄博市民的健康风险,其中参数的含义和取值见表4.

重金属元素*i*经*j*途径对人体的非致癌风险(HQ_{*i,j*}),非致癌风险(HI_{*i*})和致癌风险(Risk)计算公式如下:

$$HQ_{i,j} = ADD_{i,j}/RfD_{i,j} \tag{9}$$

$$HI_i = \sum HQ_{i,j} \tag{10}$$

$$Risk = LADD \times SF \tag{11}$$

式中,ADD_{*i,j*}为*i*金属经*j*途径进入人体的日均暴露量,mg·(kg·d)⁻¹;RfD_{*i,j*}为*i*金属经*j*途径进入人体的日暴露健康风险参考值,mg·(kg·d)⁻¹;LADD为致癌重金属经呼吸途径的终身日均暴露量,mg·(kg·d)⁻¹;SF为致癌重金属元素致癌斜率因子,(kg·d)·mg⁻¹.当HI_{*i*}≤1表明无健康危害,当HI_{*i*}>1表明可能存在健康危害^[36,37];当Risk在10⁻⁶~10⁻⁴之间需要采取风险管理措施^[38].表5是重金属元素通过3种方式进入人体的RfD和SF值^[36,37,39].

表4 重金属不同途径日均暴露量参数

Table 4 Average daily exposure of heavy metals via different pathways				
参数	单位	含义	取值	
			儿童	成人
EF	d·a ⁻¹	暴露频率	350	350
ED	a	暴露年限	6	24
AT	d	平均暴露时间	365 × ED(非致癌作用) 365 × ED(非致癌作用)	365 × 70(致癌作用) 365 × 70(致癌作用)
BW	kg	平均体质量	15	65.7
CF	kg·mg ⁻¹	单位转换	1 × 10 ⁻⁶	1 × 10 ⁻⁶
IngR	mg·d ⁻¹	摄食扬尘速率	200	100
InhR	m ³ ·d ⁻¹	呼吸速率	7.6	16.2
PEF	m ³ ·kg ⁻¹	颗粒物排放因子	1.36 × 10 ⁹	1.36 × 10 ⁹
SL	mg·(kg·d) ⁻¹	皮肤黏着度	2 000	700
SA	m ²	暴露皮肤面积	0.089 9	0.161
ABS	无量纲	皮肤吸收因子	0.001	0.001

表5 重金属元素进入人体的日暴露健康风险参考值(RfD)和致癌斜率因子(SF)

Table 5 Daily exposure health risk reference values (RfD) and carcinogenic slope factors (SF) for heavy metal elements entering the human body								
项目	Zn	Mn	Cr	Pb	Ni	As	Co	Cd
RfD _{inh}	3.00E-01	1.40E-05	2.86E-05	3.52E-03	2.06E-02	1.23E-04	5.71E-06	1.00E-03
RfD _{ing}	3.00E-01	4.70E-02	5.00E-03	3.50E-03	2.00E-02	3.00E-04	2.00E-02	1.00E-03
RfD _{derm}	6.00E-02	2.40E-03	2.50E-04	5.25E-04	1.00E-03	8.60E-05	1.60E-02	5.00E-05
SF	—	—	4.20E+01	—	8.40E-01	1.51E+01	9.80E+00	6.30E+00

2 结果与讨论

2.1 金属元素的含量分布特征

淄博市道路尘PM_{2.5}中金属元素的含量如图2所示,可以看出地壳元素Ca、Al、Fe、K、Mg和Na的含量较高,在检测的18种金属元素总和的占比在

春季、秋季和冬季分别为99.1%、99.1%和98.7%,春季中地壳元素含量的排序为Ca>Al>Fe>K>Mg>Na,秋季为Ca>Al>Fe>Mg>K>Na,冬季为Ca>Al>K>Fe>Mg>Na,3个季节中ω(Ca)最高,均值分别为118 161.0、121 187.6和121 574.7 mg·kg⁻¹,其次是ω(Al),均值分别为72 372.1、

69 413.1 和 58 959.0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 重金属元素中, $\omega(\text{Zn})$ 最高, 分别为 715.3、705.3 和 1 232.2 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其余 Cu、Cr、Pb、Sn、Co、Sb、Mo 和 Cd 中均是冬季含量最高, 这是由于冬季采暖和地面温度低逆温发生导致的污染物扩散和移动减少所致^[40,41].

样品分析得出采样期间 $\omega(\text{Ca})$ 的均值为 120 307.7 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 是山东省土壤背景值的 7.2 倍, 这与淄博市建筑施工和道路铺设有关. $\omega(\text{Zn})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Sb})$ 和 $\omega(\text{Cd})$ 的均值分别为 884.3、281.0、11.9 和 2.5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 分别是土壤背景值的 13.9、11.7、13.3 和 29.6 倍, 这 4 种金属元素含量都超过了土壤背景值的 10 倍, 说明这 4 种元素受人为影响比较严重. $\omega(\text{Al})$ 、 $\omega(\text{Fe})$ 、 $\omega(\text{K})$ 、 $\omega(\text{Na})$ 、 $\omega(\text{Mn})$ 、 $\omega(\text{Co})$ 、 $\omega(\text{Mo})$ 均值和土壤背景值的比值分别为 1.0、0.9、0.7、0.3、1.0、1.1 和 1.0, 表明其受人为影响较小.

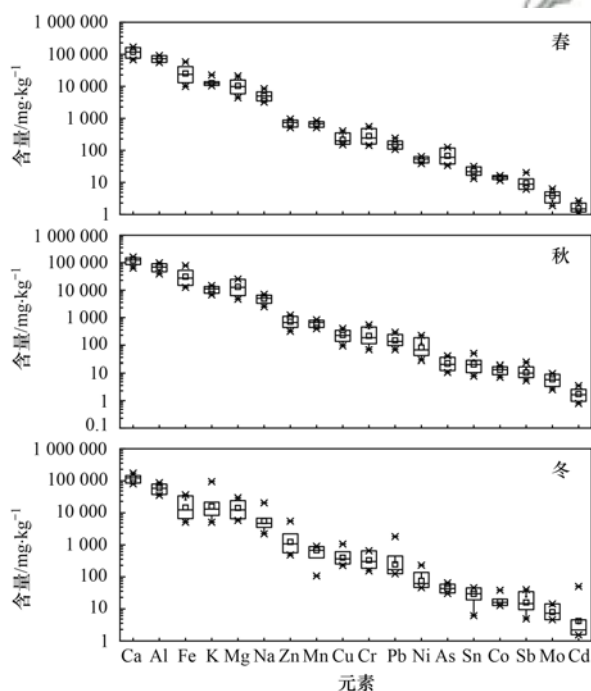


图2 3个季节道路扬尘 $\text{PM}_{2.5}$ 中载带的金属元素含量

Fig. 2 Percentages of metal mass concentrations in $\text{PM}_{2.5}$ in road dust during three seasons

2.2 金属元素污染程度及来源分析

2.2.1 地累积指数分析

利用地累积指数评价道路尘中重金属污染水平, 图3为道路尘中 $\text{PM}_{2.5}$ 载带的金属元素在3个季节的地累积指数. 从中可以看出, Ca 和 Sn 在3个季节都受到偏重度污染. Mg 在春季未受污染, 在秋冬季受到轻度污染. Zn 和 Cu 在春秋两季受到偏重度污染, 在冬季受到重度污染. Cr 在3个季节受到中度污染. Pb 在春秋两季受到中度污染, 冬季受到偏重度

污染. Ni 在3个季节都受到了轻度污染. As 在春季受到偏重度污染, 秋季受到轻度污染, 冬季受到中度污染. Sb 在春秋两季受到偏重度污染, 在冬季受到重度污染. Cd 在春秋两季受到中度污染, 在冬季受到严重污染. 整体来看除了 Ni 和 As 外其它受到人为污染源影响的元素均是冬季 I_{geo} 较高, 可能是受到了燃煤采暖等人为活动的影响, 另外 Cd、Zn、Cu 和 Sb 这4种元素受人为污染程度较高, 在冬季都受到了重度以上的污染. 这与张静等^[14]对天津市道路扬尘 $\text{PM}_{2.5}$ 中金属元素污染状况的研究结果相似.

2.2.2 富集因子分析

图4是3个季节的元素富集因子. 从中可知, Ni、Mg、Mo、Co、Mn、K、Fe 和 Na 这8种元素在春、秋和冬季的 EF 值均小于 5, 说明它们主要来自自然源. Ca 在3个季节的 EF 值都介于 5~10 之间; As 在春季和冬季的 EF 值在 5~10 之间, 秋季小于 5; Cr 在春秋两季 EF 值小于 5, 冬季在 5~10 之间, 说明这些元素受到了人为源和自然源的共同影响. Pb、Sn 和 Cu 在春秋两季的 EF 值在 5~10 之间, 冬季大于 10, 表明这些元素在冬季受人为源影响较大. Sb 在春季的 EF 值处于 5~10 之间, 秋冬季大于 10, Cd 和 Zn 这2种元素在3个季节的 EF 值都大于 10, 说明受人为源影响非常明显. 从不同季节的元素 EF 值来看, 元素在冬季的 EF 值整体偏高, 说明冬季采暖可能是导致金属元素富集程度显著上升的重要原因. 道路尘 Cd、Zn、Sb 和 Cu 这4种元素均与机动车相关, Cd 元素来源于机动车尾气排放、钢铁冶炼及燃煤^[42], Zn 主要来源于汽车轮胎机械磨损, Cu 主要来源于汽车金属零件和刹车里衬的磨损^[43], Sb 来自机动车尾气和刹车片的磨损^[44], 本研究中这4种元素富集程度都较高, 反映了道路尘受人为污染影响的特征, 该结果也与地累积指数结果相同.

2.2.3 主成分分析

表6为18种元素的主成分旋转因子载荷矩阵. 从中可知, 5个主成分因子共解释了总变量的72.10%, 其中因子1的贡献率为18.58%, 其中K的载荷达到0.896, Mn为0.923, K为生物质燃烧的标志物^[45], Mn来源于燃煤^[29], 因此因子1与生物质燃烧和燃煤有关; 因子2的贡献率为17.12%, Cu的载荷为0.881, 其次为Sb和Sn, 分别是0.741和0.654, Cu、Sb和Sn来源于机动车金属零件磨损、尾气和刹车片磨损^[23,43,44], 因此判断为机动车源; 因子3的贡献率为14.04%, Pb和Cd的载荷分别为0.818和0.776, 有研究证明Pb和Cd主要来源于钢铁冶炼和燃煤^[42,46], 因此判断为钢铁冶炼和燃煤;

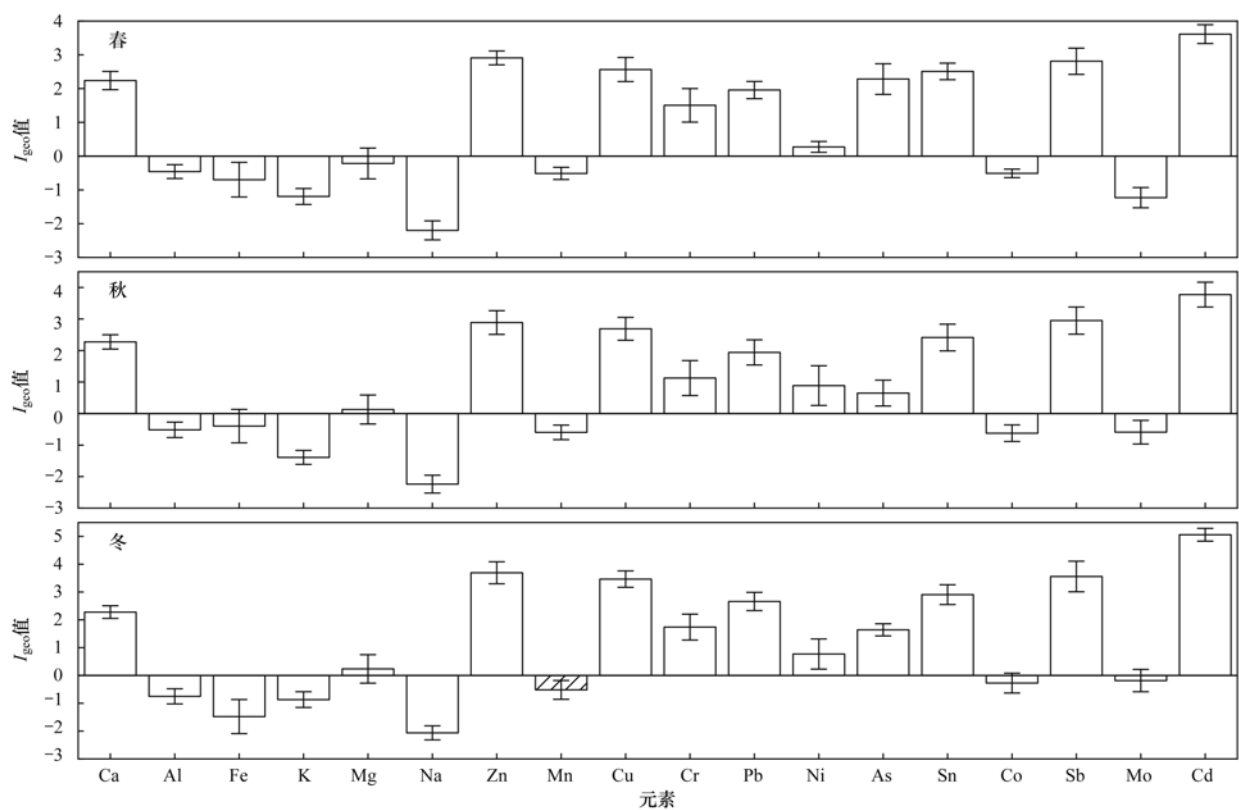


图3 3个季节道路扬尘PM_{2.5}中载带的金属元素 I_{geo} 结果
Fig. 3 Metal I_{geo} results for PM_{2.5} in road dust during three season

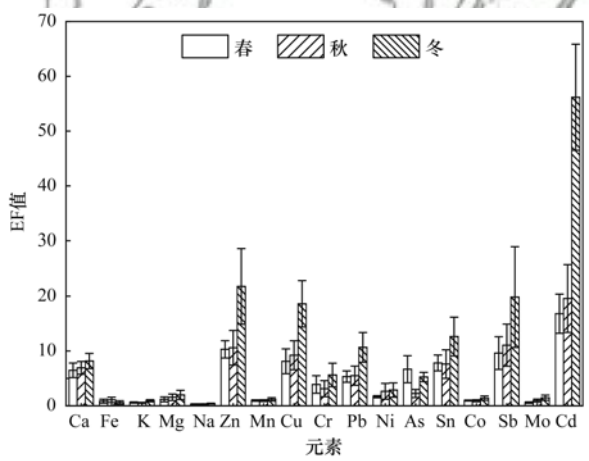


图4 3个季节的元素富集因子结果
Fig. 4 Enrichment factors of metals during in three seasons

因子4的贡献率为13.11%,Ca、Al、Fe和Mg都是地壳元素,Ca为土壤建筑尘的标志物^[46],因此判断因子4为土壤扬尘;因子5贡献率为9.25%,As元素的载荷为0.832,为燃煤源的标志物^[47],因此判断因子5为燃煤源.综上所述,淄博市道路尘中金属元素的主要来源有生物质燃烧、燃煤、机动车排放、钢铁冶炼和土壤扬尘.

2.3 潜在生态风险评价

本研究对道路尘PM_{2.5}中的7种重金属Zn、Cu、Cr、Pb、Ni、As和Cd进行潜在生态风险评价,结果如表7所示.从中可知,春季,Zn、Cr、Pb和Ni

表6 主成分旋转因子荷载矩阵

Table 6 Load matrix principal component rotation factors					
项目	因子1	因子2	因子3	因子4	因子5
Ca	0.192	0.152	-0.338	0.632	-0.185
Al	-0.015	-0.287	0.027	0.705	0.317
Fe	0.063	-0.22	0.03	0.724	-0.04
K	0.896	0.102	0.102	-0.042	0.184
Mg	-0.008	0.197	0.013	0.819	-0.109
Na	0.847	0.035	0.181	0.094	-0.043
Zn	0.26	0.479	0.535	-0.219	-0.097
Mn	0.923	0.046	0.043	0.069	-0.004
Cu	0.168	0.881	0.098	-0.021	-0.084
Cr	0.071	0.631	-0.052	0.239	0.349
Pb	0.27	0.089	0.818	-0.129	0.149
Ni	0.361	-0.007	0.38	0.213	-0.63
As	0.178	0.113	0.117	0	0.832
Sn	0.335	0.654	0.336	-0.171	0.115
Co	0.647	0.255	0.368	0.106	-0.173
Sb	-0.171	0.741	0.373	-0.165	0.047
Mo	0.088	0.534	0.499	-0.05	-0.407
Cd	0.166	0.351	0.776	0.125	-0.141
方差贡献率/%	18.58	17.12	14.04	13.11	9.25
累积方差贡献率/%	18.58	35.70	49.74	62.85	72.10

1) 黑字体表示因子中特征元素的载荷值

这4种元素存在轻微生态风险($E_r^i \leq 40$),Cu和As存在中等生态风险($40 < E_r^i < 80$),Cd存在极强生态风险($E_r^i \geq 320$);秋季,Zn、Cr、Pb、Ni和As存在轻微生态风险,Cu存在中等生态风险,Cd存在极

强生态风险; 冬季, Zn、Cr、Ni 存在轻微生态风险, Pb 和 As 存在中等生态风险, Cu 存在强生态风险 ($80 < E_r^i < 160$), Cd 存在极强生态风险. Cd 的生态风险值极高, 在 3 个季节分别达到了 551.0、615.8 和 1 501.2, 这与其毒性系数较大以及污染严重有关, 因此对 Cd 污染的治理刻不容缓. 3 个季

节中除 Ni 和 As 以外其它 5 种元素均是冬季的潜在生态风险指数最高. 总的潜在生态风险指数为冬季 > 秋季 > 春季, 春季和秋季 RI 值均大于 700 存在很强的生态风险, 而冬季 RI 值高达 1 720.6, 存在极强的生态风险, 表明道路尘的潜在生态风险在冬季最高.

表 7 淄博市 3 个季节潜在生态风险评价结果

Table 7 Potential ecological risks from metals in road dust during three seasons in Zibo City

季节	E_r^i						RI
	Zn	Cu	Cr	Pb	Ni	As	
春季	11.3	44.4	8.5	29.1	9.1	73.0	726.4
秋季	11.1	48.4	6.6	28.8	13.9	23.6	748.0
冬季	19.4	82.9	10.0	47.5	12.8	46.8	1 720.6

2.4 健康风险评价

表 8 是 3 个季节重金属元素的非致癌和致癌风险评价参数计算结果. 从中可知, 在 3 种暴露途径中, 通过手-口摄入途径接触道路降尘重金属的风险最高, 其次为皮肤接触, 呼吸途径最低, 这与文献 [39] 的研究结果一致. 3 个季节中不同暴露途径非致癌风险和非致癌总风险均表现为儿童高于成人的特点. 在手-口摄入途径中, 儿童 HQ 值比成人高一个数量级, 这可能是儿童的特殊行为模式频繁的手-口接触所致^[34]; 在皮肤接触中 Cr 的 HQ 值大于其

它重金属, 冬季最高为 1.75×10^{-2} ; 在呼吸途径中 Mn 的 HQ 值最高, 冬季为 1.91×10^{-2} . 在春季, 儿童和成人的 HI 值排序均为 As > Cr > Pb > Mn > Ni > Zn > Cd > Co, 其中只有 As 在儿童中的 HI 值高于 1, 存在非致癌风险, 其余元素无非致癌风险. 在秋季, 儿童和成人的 HI 值排序均为 As > Cr > Pb > Mn > Zn > Cd > Ni > Co, 其中 As 在儿童中的 HI 值高于 1, 存在非致癌风险, 其余元素无非致癌风险. 在冬季, 儿童和成人的 HI 值排序均为 As > Pb > Cr > Mn > Cd > Zn > Ni > Co, 其中 As 和 Pb 在儿童中的 HI 值

表 8 春、秋和冬季重金属元素的非致癌风险和致癌风险

Table 8 Non-carcinogenic risks and carcinogenic risks of heavy metals in road dust during spring, autumn, and winter

项目	类型	Zn	Mn	Cr	Pb	Ni	As	Co	Cd
儿童(春)	HQ _{inh}	9.06E-07	1.82E-02	4.40E-03	1.65E-05	1.36E-06	1.62E-04	9.29E-04	5.99E-07
	HQ _{ing}	3.24E-02	1.94E-01	8.40E-01	5.93E-01	5.00E-02	2.38E+00	9.49E-03	2.15E-02
	HQ _{derm}	1.46E-04	3.42E-03	1.51E-02	3.55E-03	8.99E-04	7.47E-03	1.07E-05	3.86E-04
	HI	3.26E-02	2.16E-01	8.59E-01	5.97E-01	5.09E-02	2.39E+00	1.04E-02	2.18E-02
成人(春)	HQ _{inh}	4.41E-07	8.88E-03	2.00E-03	8.02E-06	6.60E-07	7.90E-05	4.52E-04	2.92E-07
	HQ _{ing}	3.70E-03	2.22E-02	9.59E-02	6.77E-02	5.71E-03	2.72E-01	1.08E-03	2.45E-03
	HQ _{derm}	2.08E-05	4.90E-04	2.16E-03	5.09E-04	1.29E-04	5.74E-06	1.53E-06	5.52E-05
	HI	3.72E-03	3.16E-02	1.00E-01	6.82E-02	5.84E-03	2.72E-01	1.54E-03	2.50E-03
	Risk	—	—	1.24E-06	—	5.93E-09	7.61E-08	1.31E-08	9.54E-10
儿童(秋)	HQ _{inh}	9.17E-07	1.72E-02	3.09E-03	1.66E-05	4.18E-07	2.77E-04	8.80E-04	6.76E-07
	HQ _{ing}	3.28E-02	1.83E-01	6.32E-01	5.96E-01	1.54E-02	4.06E+00	8.99E-03	2.42E-02
	HQ _{derm}	1.47E-04	3.22E-03	1.14E-02	3.57E-03	2.77E-04	1.27E-02	1.01E-05	4.35E-04
	HI	3.30E-02	2.03E-01	6.47E-01	6.00E-01	1.57E-02	4.07E+00	9.88E-03	2.46E-02
成人(秋)	HQ _{inh}	4.46E-07	8.35E-03	1.50E-03	8.06E-06	2.03E-07	1.35E-04	4.28E-04	3.29E-07
	HQ _{ing}	3.75E-03	2.09E-02	7.22E-02	6.80E-02	1.76E-03	4.63E-01	1.03E-03	2.76E-03
	HQ _{derm}	2.11E-05	4.61E-04	1.63E-03	5.11E-04	3.97E-05	9.79E-06	1.45E-06	6.22E-05
	HI	3.77E-03	2.97E-02	7.53E-02	6.86E-02	1.80E-03	4.64E-01	1.46E-03	2.82E-03
	Risk	—	—	9.37E-07	—	1.83E-09	1.30E-07	1.24E-08	1.08E-09
儿童(冬)	HQ _{inh}	1.91E-06	1.91E-02	4.76E-03	3.77E-05	8.11E-07	2.61E-04	1.17E-03	2.80E-06
	HQ _{ing}	6.83E-02	2.03E-01	9.74E-01	1.36E+00	2.99E-02	3.83E+00	1.20E-02	1.00E-01
	HQ _{derm}	3.07E-04	3.58E-03	1.75E-02	8.13E-03	5.38E-04	1.20E-02	1.35E-05	1.80E-03
	HI	6.86E-02	2.26E-01	9.96E-01	1.36E+00	3.04E-02	3.84E+00	1.32E-02	1.02E-01
成人(冬)	HQ _{inh}	9.29E-07	9.27E-03	2.32E-03	1.83E-05	3.95E-07	1.27E-04	5.71E-04	1.36E-06
	HQ _{ing}	7.80E-03	2.32E-02	1.11E-01	1.55E-01	3.41E-03	4.37E-01	1.37E-03	1.15E-02
	HQ _{derm}	4.39E-05	5.12E-04	2.51E-03	1.16E-03	7.69E-05	9.23E-06	1.93E-06	2.58E-04
	HI	7.84E-03	3.30E-02	1.16E-01	1.56E-01	3.49E-03	4.37E-01	1.94E-03	1.17E-02
	Risk	—	—	1.44E-06	—	3.54E-09	1.22E-07	1.66E-08	4.46E-09

都高于1,存在非致癌风险,其余元素无非致癌风险.冯于耀等^[15]对城市道路扬尘研究表明,As、Cd、Pb的非致癌风险值均大于1且手-口摄入的非致癌风险也大于1,李越洋等^[48]对天津道路降尘的研究表明,As对儿童的非致癌风险大于1且手-口摄入的非致癌风险也大于1.有研究表明As主要来源于煤炭燃烧^[42,47],Pb主要来源于汽车尾气、燃煤和钢铁冶炼^[46,49],因此需要进行煤炭总量和机动车流量的控制,积极推进清洁绿色能源的使用,同时也要尽量减少儿童在道路周边的暴露,以减少重金属对人体的危害.

呼吸途径进入人体的致癌风险在春季和秋季的排序为Cr>As>Co>Ni>Cd,在冬季的排序为Cr>As>Co>Cd>Ni.在春季和冬季Cr的Risk值分别为 1.24×10^{-6} 和 1.44×10^{-6} ,都在 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 之间,存在致癌风险,道路尘中Cr主要来源于工业沉降和轮胎、刹车片的磨损^[50],因此需对相关源进行管控.

综上所述,在春季Cr存在致癌风险;秋季As对儿童存在非致癌风险;冬季As和Pb都对儿童存在非致癌风险,Cr元素存在致癌风险.

3 结论

(1)淄博市所测18种金属元素中Ca、K、Mg、Na、Zn、Mn、Cu、Cr、Pb、Sn、Co、Sb、Mo和Cd的含量在冬季最高,这是由于冬季燃煤和机动车排放污染物扩散和移动减少所致.Zn、Cu、Sb和Cd的含量均值分别是山东省土壤背景值的13.9、11.7、13.3和29.6倍,说明这4种元素受人为影响比较严重.

(2)通过地累积指数和富集因子对金属元素污染程度分析表明,冬季元素受人为的影响较大,其中Cd、Zn、Sb和Cu这4种元素污染比较严重,结合主成分分析推测,淄博市道路尘PM_{2.5}中金属元素的主要来源有生物质燃烧、燃煤、机动车排放、钢铁冶炼和土壤扬尘.

(3)潜在生态风险评价表明,总的潜在生态风险指数为冬季>秋季>春季,3个季节都存在极强的生态风险.Zn、Cr和Ni这3种元素存在轻微生态风险,Pb和As存在轻微到中等生态风险,Cu存在中等到较强生态风险,Cd存在极强的生态风险.

(4)健康风险分析表明,儿童在3种途径的非致癌风险都大于成人,手-口摄入是道路尘PM_{2.5}载带的重金属元素进入人体的主要途径.3个季节中As对儿童的HI值都大于1,在冬季Pb对儿童的HI值也大于1,都对儿童存在非致癌风险.在春季和冬

季Cr的Risk值分别为 1.24×10^{-6} 和 1.44×10^{-6} ,对人体存在致癌风险,因此对As、Pb、Cr的来源中的燃煤和机动车的控制应该受到重视.

参考文献:

- [1] 李风华,吴琳,张静,等.典型道路路边空气颗粒物及无机元素特征分析[J].中国环境科学,2017,37(7):2460-2469.
Li F H, Wu L, Zhang J, et al. Characteristic analysis of inorganic elements in PM_{2.5} and PM₁₀ at urban roadside environment[J]. China Environmental Science, 2017, 37(7): 2460-2469.
- [2] 樊守彬,田刚,李钢,等.北京铺装道路交通扬尘排放规律研究[J].环境科学,2007,28(10):2396-2399.
Fan S B, Tian G, Li G, et al. Emission characteristics of paved roads fugitive dust in Beijing[J]. Environmental Science, 2007, 28(10): 2396-2399.
- [3] 张伟,姬亚芹,李树立,等.天津市春季样方法道路扬尘PM_{2.5}粒度乘数特征[J].中国环境科学,2016,36(7):1955-1959.
Zhang W, Ji Y Q, Li S L, et al. PM_{2.5} size multiplier feature of road dust in Tianjin during spring with quadrat sampling method [J]. China Environmental Science, 2016, 36(7): 1955-1959.
- [4] 陈筱佳,程金平,江璇,等.上海市中心城区主干道道路扬尘组分特征及来源解析[J].环境污染与防治,2015,37(6):10-13.
Chen X J, Cheng J P, Jiang X, et al. Study on the chemical compositions characteristics and source apportionment in road dust of main roads in Shanghai central district[J]. Environmental Pollution & Control, 2015, 37(6): 10-13.
- [5] 张伟,姬亚芹,张军,等.辽宁省典型城市道路尘PM_{2.5}成分谱研究[J].中国环境科学,2018,38(2):412-417.
Zhang W, Ji Y Q, Zhang J, et al. Study on the road dust source profile of PM_{2.5} in Liaoning Province typical cities[J]. China Environmental Science, 2018, 38(2): 412-417.
- [6] 胡月琪,李萌,颜旭,等.北京市典型道路扬尘化学组分特征及年际变化[J].环境科学,2019,40(4):1645-1655.
Hu Y Q, Li M, Yan X, et al. Characteristics and interannual variation of chemical components in typical road dust in Beijing [J]. Environmental Science, 2019, 40(4): 1645-1655.
- [7] Zhang R, Jing J, Tao J, et al. Chemical characterization and source apportionment of PM_{2.5} in Beijing: seasonal perspective [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, 13(14): 7053-7074.
- [8] 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.
- [9] 张显.典型“组团式”城市秋冬季大气PM_{2.5}污染特征研究[D].天津:天津师范大学,2019.
Zhang X. Study on atmospheric PM_{2.5} pollution characteristics of the typical “group” city in autumn and winter [D]. Tianjin: Tianjin Normal University, 2019.
- [10] 武媛媛,李如梅,彭林,等.运城市道路扬尘化学组成特征及来源分析[J].环境科学,2017,38(5):1799-1806.
Wu Y Y, Li R M, Peng L, et al. Chemical compositions and source apportionment of road dust in Yuncheng [J]. Environmental Science, 2017, 38(5): 1799-1806.
- [11] Li H H, Chen L J, Yu L, et al. Pollution characteristics and risk

- assessment of human exposure to oral bioaccessibility of heavy metals via urban street dusts from different functional areas in Chengdu, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **586**: 1076-1084.
- [12] Wei C, Bandowe B A M, Han Y M, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and their derivatives (alkyl-PAHs, oxygenated-PAHs, nitrated-PAHs and azaarenes) in urban road dusts from Xi'an, Central China[J]. *Chemosphere*, 2015, **134**: 512-520.
- [13] Soltani N, Keshavarzi B, Moore F, *et al.* Ecological and human health hazards of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in road dust of Isfahan metropolis, Iran [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **505**: 712-723.
- [14] 张静, 张衍杰, 方小珍, 等. 道路扬尘 PM_{2.5} 中金属元素污染特征及健康风险评价[J]. *环境科学*, 2017, **38**(10): 4071-4076.
- Zhang J, Zhang Y J, Fang X Z, *et al.* Characteristics and health risk assessment of metallic elements in PM_{2.5} fraction of road dust [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(10): 4071-4076.
- [15] 冯于耀, 史建武, 钟曜谦, 等. 有色冶炼园区道路扬尘中重金属污染特征及健康风险评价[J]. *环境科学*, 2020, **41**(8): 3547-3555.
- Feng Y Y, Shi J W, Zhong Y Q, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in road dust from non-ferrous smelting parks[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(8): 3547-3555.
- [16] Van Pelt R S, Zobeck T M. Chemical constituents of fugitive dust[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2007, **130**(1-3): 3-16.
- [17] Shen Z X, Sun J, Cao J J, *et al.* Chemical profiles of urban fugitive dust PM_{2.5} samples in Northern Chinese cities [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **569-570**: 619-626.
- [18] 山东省统计局. 山东统计年鉴-2017[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.
- [19] Yu H, Zhao X Y, Wang J, *et al.* Chemical characteristics of road dust PM_{2.5} fraction in oasis cities at the margin of Tarim Basin[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2020, **95**: 217-224.
- [20] HJ/T 393-2007, 防治城市扬尘污染技术规范[S].
- [21] 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.
- [22] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. *GeoJournal*, 1969, **2**(3): 109-118.
- [23] 周盼, 秦伟, 郭硕, 等. 石家庄市冬季道路积尘 PM_{2.5} 中金属元素污染特征及来源[J]. *环境科学研究*, 2018, **31**(8): 1366-1372.
- Zhou P, Qin W, Guo S, *et al.* Pollution characteristics and source analysis of metal elements in PM_{2.5} of paved road dust in Shijiazhuang City during winter[J]. *Research of Environmental Science*, 2018, **31**(8): 1366-1372.
- [24] 方文稳, 张丽, 叶生霞, 等. 安庆市降尘重金属的污染评价与健康风险评价[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(12): 3795-3803.
- Fang W W, Zhang L, Ye S X, *et al.* Pollution evaluation and health risk assessment of heavy metals from atmospheric deposition in Anqing[J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(12): 3795-3803.
- [25] 国家环境保护局. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 姬亚芹, 朱坦, 冯银厂, 等. 用富集因子法评价我国城市土壤风沙尘元素的污染[J]. *南开大学学报(自然科学版)*, 2006, **39**(2): 94-99.
- Ji Y Q, Zhu T, Feng Y C, *et al.* Application of the enrichment factor to analyze the pollution of elements in soil dust in China [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis*, 2006, **39**(2): 94-99.
- [29] 闫丽娜, 左昊, 张聚全, 等. 石家庄市大气 PM₁、PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中重金属元素分布特征及来源的对比研究[J]. *地学前缘*, 2019, **26**(3): 263-270.
- Yan L N, Zuo H, Zhang J Q, *et al.* Comparative study on the distribution characteristics and sources of heavy metal elements in PM₁, PM_{2.5} and PM₁₀ in Shijiazhuang City[J]. *Earth Science Frontiers*, 2019, **26**(3): 263-270.
- [30] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [31] 徐争启, 倪师军, 虞先国, 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.
- [32] 熊秋林, 赵佳茵, 赵文吉, 等. 北京市地表土重金属污染特征及潜在生态风险[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(6): 2211-2221.
- Xiong Q L, Zhao J Y, Zhao W J, *et al.* Pollution characteristics and potential ecological risks of heavy metals in topsoil of Beijing [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(6): 2211-2221.
- [33] Du Y R, Gao B, Zhou H D, *et al.* Health risk assessment of heavy metals in road dusts in urban parks of Beijing, China[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2013, **18**: 299-309.
- [34] Li K X, Liang T, Wang L Q, *et al.* Contamination and health risk assessment of heavy metals in road dust in Bayan Obo Mining Region in Inner Mongolia, North China [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2015, **25**(12): 1439-1451.
- [35] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册[M]. 北京: 中国环境出版社, 2013.
- [36] Zheng N, Liu J S, Wang Q C, *et al.* Health risk assessment of heavy metal exposure to street dust in the zinc smelting district, Northeast of China[J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**(4): 726-733.
- [37] Zheng N, Liu J S, Wang Q C, *et al.* Heavy metals exposure of children from stairway and sidewalk dust in the smelting district, northeast of China[J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(27): 3239-3245.
- [38] Guney M, Zagury G J, Dogan N, *et al.* Exposure assessment and risk characterization from trace elements following soil ingestion by children exposed to playgrounds, parks and picnic areas[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **182**(1-3): 656-664.
- [39] Ferreira-Baptista L, De Miguel E. Geochemistry and risk assessment of street dust in Luanda, Angola: a tropical urban

- environment[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(25): 4501-4512.
- [40] Gertler A, Kuhns H, Abu-Allaban M, *et al.* A case study of the impact of Winter road sand/salt and street sweeping on road dust re-entrainment[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(31): 5976-5985.
- [41] Li X L, Ma Y J, Wang Y F, *et al.* Temporal and spatial analyses of particulate matter (PM_{10} and $PM_{2.5}$) and its relationship with meteorological parameters over an urban city in northeast China [J]. *Atmospheric Research*, 2017, **198**: 185-193.
- [42] 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.
- [43] Yeung Z L L, Kwok R C W, Yu K N. Determination of multi-element profiles of street dust using energy dispersive X-ray fluorescence (EDXRF) [J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2003, **58**(3): 339-346.
- [44] Thorpe A, Harrison R M. Sources and properties of non-exhaust particulate matter from road traffic: a review[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, **400**(1-3): 270-282.
- [45] 邓林俐, 张凯山, 殷子渊, 等. 基于 PMF 模型的 $PM_{2.5}$ 中金属元素污染及来源的区域特征分析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(12): 5276-5287.
- Deng L L, Zhang K S, Yin Z Y, *et al.* Characterization of metal pollution of regional atmospheric $PM_{2.5}$ and its sources based on PMF model[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(12): 5276-5287.
- [46] 王伟, 张静, 姬亚芹, 等. 鞍山市夏季 $PM_{2.5}$ 中元素污染特征与来源初探[J]. *南开大学学报(自然科学版)*, 2015, **48**(1): 34-39.
- Wang W, Zhang J, Ji Y Q, *et al.* The preliminary exploration of pollution characteristics and sources of elements in $PM_{2.5}$ during summer in Anshan City [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis*, 2015, **48**(1): 34-39.
- [47] 杨麒, 傅致严, 刘湛, 等. 郴州市大气 $PM_{2.5}$ 中无机元素污染特征及来源分析[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2019, **46**(6): 133-140.
- Yang Q, Fu Z Y, Liu Z, *et al.* Characteristics and sources of inorganic elements in atmospheric $PM_{2.5}$ at Chenzhou City [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2019, **46**(6): 133-140.
- [48] 李越洋, 姬亚芹, 王士宝, 等. 天津市春季道路降尘 $PM_{2.5}$ 中重金属污染特征及健康风险评估[J]. *环境科学研究*, 2018, **31**(5): 853-859.
- Li Y Y, Ji Y Q, Wang S B, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of $PM_{2.5}$ -bound heavy metals in road dust deposition during spring in Tianjin city [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, **31**(5): 853-859.
- [49] 谭吉华, 段菁春. 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.
- [50] Zannoni D, Valotto G, Visin F, *et al.* Sources and distribution of tracer elements in road dust: The Venice mainland case of study [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2016, **166**: 64-72.

CONTENTS

Industrial Emission Characteristics and Control Countermeasures of VOCs in Chinese Rapid Economic Development Areas	MENG Bo-wen, LI Yong-bo, MENG Jing, <i>et al.</i>	(1023)
VOCs Emission Inventory and Variation Characteristics of Artificial Sources in Hubei Province in the Yangtze River Economic Belt	DAI Ling-wen, MENG Jing, LI Qian-qian, <i>et al.</i>	(1039)
Sources and Distribution Characteristics of HCBd in Rapid Economic Development Areas	TAO Yu-ming, MENG Jing, LI Qian-qian, <i>et al.</i>	(1053)
Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soil of China (2000-2020): Temporal and Spatial Distribution, Influencing Factors	MA Yan, CHENG Lu, RUAN Zi-yuan, <i>et al.</i>	(1065)
Relationships Between Microplastic and Surrounding Soil in an E-Waste Zone of China	CHAI Bing-wen, YIN Hua, WEI Qiang, <i>et al.</i>	(1073)
Analysis of the Spatial Distribution of Heavy Metals in Soil from a Coking Plant and Its Driving Factors	GU Gao-quan, WAN Xiao-ming, ZENG Wei-bin, <i>et al.</i>	(1081)
Source Apportionment and Spatial Distribution Simulation of Heavy Metals in a Typical Petrochemical Industrial City	SUN Xue-fei, ZHANG Li-xia, DONG Yu-long, <i>et al.</i>	(1093)
Heavy Metal Contents of Soil and Surface Dust and Its Ecological Risk Analysis in a Multifunctional Industrial Park	ZENG Wei-bin, GU Gao-quan, WAN Xiao-ming, <i>et al.</i>	(1105)
Geochemical Patterns and Source Analysis of Soil Heavy Metals in an Iron and Manganese Ore Area of Longyan City	WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi, <i>et al.</i>	(1114)
Application Case of Accurate Site Investigation with Life-Cycle Conceptual Site Model Development	LI Pei-zhong, WU Nai-jin, WANG Hai-jian, <i>et al.</i>	(1123)
Levels and Risk Assessment of Short and Medium-Chain Chlorinated Paraffins in Soil from Paper Mill Area	ZHANG Pei-xuan, GAO Li-rong, SONG Shi-jie, <i>et al.</i>	(1131)
Characterization and Health Risks of PCDD/Fs, PCBs, and PCNs in the Soil Around a Typical Secondary Copper Smelter	HU Ji-cheng, WU Jing, XU Chen-yang, <i>et al.</i>	(1141)
Effect of Citric Acid and Phosphorus Coexistence on Cadmium Adsorption by Soil	SONG Zi-teng, ZUO Ji-chao, HU Hong-qing	(1152)
Uptake and Accumulation of Cadmium and Zinc by Two Energy Grasses: A Field Experiment	ZHENG Rui-lun, SHI Dong, LIU Wen-ju, <i>et al.</i>	(1158)
Bioaccumulation and Translocation Characteristics of Heavy Metals in a Soil-Maize System in Reclaimed Land and Surrounding Areas of Typical Vanadium-Titanium Magnetite Tailings	SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, SUN Xiao-ming, <i>et al.</i>	(1166)
Cd Accumulation Characteristics in Different Populations of <i>Hylotelephium spectabile</i> Under Salt Stress	GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, YANG Jun, <i>et al.</i>	(1177)
Effect of Water Regimes on Pb and Cd Immobilization by Biochar in Contaminated Paddy Soil	TANG Jia-qing, ZHANG Xu, HUANG Guo-yong, <i>et al.</i>	(1185)
Effects of Chitosan-modified Biochar on Formation of Methylmercury in Paddy Soils and Its Accumulation in Rice	YANG Xue-ling, WANG Ming-xing, XU Guo-min, <i>et al.</i>	(1191)
Effects of Chromium Pollution on Soil Bacterial Community Structure and Assembly Processes	YU Hao, AN Yi-jun, JIN De-cai, <i>et al.</i>	(1197)
Analysis of Changes and Factors Influencing Air Pollutants in the Beijing-Tianjin-Hebei Region During the COVID-19 Pandemic	ZHAO Xue, SHEN Nan-chi, LI Ling-jun, <i>et al.</i>	(1205)
Impact of Pollutant Emission Reduction on Air Quality During the COVID-19 Pandemic Control in Early 2020 Based on RAMS-CMAQ	LIU Hou-feng, XU Wei, WEI Min, <i>et al.</i>	(1215)
Light-absorbing Properties and Sources of PM _{2.5} Organic Components at a Suburban Site in Northern Nanjing	SHANG Yue, YU Huan, MAO Yu-hao, <i>et al.</i>	(1228)
Pollution Characteristics and Chromophore Types of Brown Carbon in Xi'an	CHEN Qian, CHEN Qing-cai	(1236)
Source and Health Risk Assessment of PM _{2.5} -Bound Metallic Elements in Road Dust in Zibo City	GUO Qing-yuan, BAI Wen-yu, ZHAO Xue-yun, <i>et al.</i>	(1245)
Health Benefit Assessment of PM _{2.5} Pollution Control in Beijing	DU Pei, WANG Jian-zhou	(1255)
Seasonal Characteristics of Air Pollutant Sources and Transport Pathways in Xining City	LIU Na, YU Ye, MA Xue-qian	(1268)
Concentrations and Patterns of Atmospheric Particulate Nitrogen and Phosphorus During Different Weather Conditions in Qingdao Coastal Region	YUAN Gang, QI Jian-hua, DING Xue	(1280)
Characterization of Volatile Organic Compounds (VOCs) Using Mobile Monitoring Around the Industrial Parks in the Yangtze River Delta Region of China	WANG Hong-li, GAO Ya-qin, JING Sheng-ao, <i>et al.</i>	(1298)
Characteristics and Cause Analysis of Heavy Air Pollution in a Mountainous City During Winter	LIU Zhuo-cheng, NIU Yue-yuan, WU Jing, <i>et al.</i>	(1306)
Gridded Emission Inventories of Major Criteria Air Pollutants and Source Contributions in Lan-Bai Metropolitan Area, Northwest China	WANG Wen-peng, WANG Zhan-xiang, LI Ji-xiang, <i>et al.</i>	(1315)
VOCs Removal and Emission Monitoring of Beijing Bulk Gasoline Terminals in 2012-2019	HUA Lan-ying, CUI Tong, LI Jin-xiang, <i>et al.</i>	(1328)
Emission Inventory of Air pollutants for the Harmless Treatment of Municipal Solid Waste	MA Zhan-yun, JIANG Yu-cong, REN Jia-xue, <i>et al.</i>	(1333)
Response of Bacteriophage Polys to Hypoxic Conditions in the Surface Sediments of the Yangtze Estuary and Its Adjacent Areas	YIN Mei-ling, DUAN Li-qin, SONG Jin-ming, <i>et al.</i>	(1343)
Human Health Risk Assessment of Phenol in Poyang Lake Basin	XU Qian-yun, AI Shun-hao, GAO Xiang-yun, <i>et al.</i>	(1354)
Spatial-Temporal Variation of Water Environment Quality and Pollution Source Analysis in Hengshui Lake	LIU Wei-wei, GUO Zi-liang, WANG Da-an, <i>et al.</i>	(1361)
Composition and Distribution Characteristics of Microplastics in Danjiangkou Reservoir and Its Tributaries	PAN Xiong, LIN Li, ZHANG Sheng, <i>et al.</i>	(1372)
Temporal and Spatial Evolution of Storm Runoff and Water Quality Assessment in Jinpen Reservoir	HUANG Cheng, HUANG Ting-lin, LI Yang, <i>et al.</i>	(1380)
Influence of Storm Runoff on the Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in a Drinking Water Reservoir During the Flood Season	LI Cheng-yao, HUANG Ting-lin, WEN Cheng-cheng, <i>et al.</i>	(1391)
Distribution Characteristics of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus Bearing Pollutants in the Ancient Town Rivers of Suzhou	BAI Dong-rui, ZHANG Tao, CHEN Tan, <i>et al.</i>	(1403)
Chemical Characteristics and Causes of Groups Water in Niangziguan Spring	TANG Chun-lei, ZHAO Chun-hong, SHEN Hao-yong, <i>et al.</i>	(1416)
Adsorption Behavior of Phosphate by CaO ₂ Remolded Sediment	XU Chu-tian, LI Da-peng, WANG Zi-liang, <i>et al.</i>	(1424)
Nitrogen and Phosphorus Removal in Surface Flow Constructed Wetland Planted with <i>Myriophyllum elatinoide</i> s Treating Swine Wastewater in Subtropical Central China	WANG Li-sha, LI Xi, LI Yu-yuan, <i>et al.</i>	(1433)
Accelerated Degradation of Aqueous Recalcitrant Iodinated Contrasting Media Using a UV/SO ₃ ²⁻ Advanced Reduction Process	LIU Zi-qi, QIU Fu-guo, LAI Man-ting, <i>et al.</i>	(1443)
Degradation of Dye Rhodamine B by Solar Thermally Activated Persulfate	MA Meng, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i>	(1451)
One-step Preparation of Lanthanum-Magnesium Ferrite and Its Phosphate Adsorption Capacity in Aqueous Solutions	BAI Run-ying, SONG Bo-wen, ZHANG Yu, <i>et al.</i>	(1461)
Pollutant Removal Efficiency of Different Units Along a Mature Landfill Leachate Treatment Process in a Membrane Biological Reactor-Nanofiltration Combined Facility	SHAO Li-ming, DENG Ying-tao, QIU Jun-jie, <i>et al.</i>	(1469)
Biological Conversion Mechanism of Sulfate Reduction Ammonium Oxidation in ANAMMOX Consortia	BI Zhen, DONG Shi-yu, HUANG Yong	(1477)
Microbial Community Structure of Waste Water Treatment Plants in Different Seasons	HE Yun, LI Kui-xiao, WANG Jia-wei, <i>et al.</i>	(1488)
Organ-Specific Accumulation and Toxicokinetics of Ephedrine in Adult Zebrafish (<i>Danio rerio</i>)	YIN Xing-xing, GUO Chang-sheng, DENG Yang-hui, <i>et al.</i>	(1496)
Characteristics and Evaluation of Soil Rare Earth Element Pollution in the Bayan Obo Mining Region of Inner Mongolia	WANG Zhe, ZHAO Ying-chen, LUO Yi-fei, <i>et al.</i>	(1503)
Factors Affecting the Translocation and Accumulation of Cadmium in a Soil-Crop System in a Typical Karst Area of Guangxi Province, China	MA Hong-hong, PENG Min, GUO Fei, <i>et al.</i>	(1514)
Effects of Superparamagnetic Nanomaterials on Soil Microorganisms and Enzymes in Cadmium-Contaminated Paddy Fields	FANG Dan-dan, ZHANG Li-zhi, WANG Qiang	(1523)
Effects of Water Management and Silicon Application on Iron Plaque Formation and Uptake of Arsenic and Cadmium by Rice	CHEN Jia, ZHAO Xiu-lan	(1535)
Biological Effect of Tetracycline Antibiotics on a Soil-Lettuce System and Its Migration Degradation Characteristics	WANG Wei-zhong, CHI Sun-lin, XU Wei-hong	(1545)
Effect of Plastic Film Mulching on Methane and Nitrous Oxide Emissions from the Ridges and Furrows of a Vegetable Field	XIONG Wei-xia, JIANG Chang-sheng, ZHAO Zhong-jing, <i>et al.</i>	(1559)
Effects of Biochar and Straw on Soil N ₂ O Emission from a Wheat Maize Rotation System	TANG Zhan-ming, LIU Xing-ren, ZHANG Qing-wen, <i>et al.</i>	(1569)
Overview on Habitat Monitoring Methods Under Watershed Ecological Space Management	YIN Kun, LIU Hai-jiang, WANG Guang, <i>et al.</i>	(1581)