

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)	

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^{1,2}, 顾高铨^{1,2}, 万小铭^{1,2*}, 雷梅^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 多功能区工业园具有生产和生活的双重功能, 园区内有色金属的冶炼和加工可能导致重金属污染从而威胁人体健康。本文选取位于长江经济带下游地区安徽中部某地级市的一个以铜加工和机械制原件为主导产业的工业园区为研究对象, 通过采集并测试土壤和灰尘样品, 对该园区土壤和灰尘重金属的空间分布和垂直分布特征进行分析, 借助生态风险指数来评估可能存在的较高风险区域, 利用相关性分析和主成分分析对重金属来源进行识别, 将研究结果与不同地块分区的使用功能结合讨论, 并从土壤与灰尘重金属在分布和含量上差异来探讨风险管控相关措施。结果表明, 在土壤和灰尘的空间分布特征上, 园区土壤中 Cu、Zn、As、Pb 和 Cd 的含量要明显高于当地土壤背景值, 分别达到背景值的 2.65、1.76、1.56、2.14 和 3.87 倍。灰尘的重金属含量则明显高于土壤, Cr、Ni、Cu、Zn、Hg、As、Pb 和 Cd 的含量均超过背景值, 分别达到背景值的 1.93、1.05、7.57、4.63、6.08、5.39、2.58 和 5.50 倍。水平分布上, 土壤重金属含量和综合生态风险较高的区域主要集中在园区西部; 垂直分布上, 随着土壤深度的增加, 重金属含量并没有出现显著地上升或者下降趋势。灰尘的高重金属含量和高生态风险地区则更靠近主要的交通干道。主成分分析结果表明, 靠近西边的土壤重金属偏高主要原因, 可能来源于早期河水灌溉, 而道路交通是导致灰尘重金属含量偏高的主要因素的可能性较大。这一土壤和灰尘重金属在空间分布来源上的差异, 将对园区加强风险管控提供可参考的科学建议。包括根据不同区域的使用功能分区管理, 来减少重金属对生态环境造成的污染和危害人体健康的可能性。

关键词: 风险管控; 重金属; 生态风险; 主成分分析; 场地污染

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)03-1105-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202010267

Heavy Metal Contents of Soil and Surface Dust and Its Ecological Risk Analysis in a Multifunctional Industrial Park

ZENG Wei-bin^{1,2}, GU Gao-quan^{1,2}, WAN Xiao-ming^{1,2*}, LEI Mei^{1,2}

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

Abstract: A multifunctional industrial park can perform both producing and living functions. The smelting and processing of non-ferrous metals may lead to soil pollution, posing risks to human beings. In this study, an industrial park located in central Anhui Province, China, with copper (Cu) processing and mechanical components as the main industries, was selected as the study object. By collecting and testing soil and dust samples, the horizontal and vertical distribution characteristics of heavy metals in soil and dust in the park were analyzed. The ecological risk index is used to identify areas with higher risks and correlation and principal component analysis are used to disclose the potential source of heavy metals. Results showed that the contents of Cu, Zn, As, Pb, and Cd in the soil were 2.65, 1.76, 1.56, 2.14, and 3.87 times that of the background value, respectively. The heavy metal content of dust was significantly higher than that of soil, with contents of Cr, Ni, Cu, Zn, Hg, As, Pb, and Cd of 1.93, 1.05, 7.57, 4.63, 6.08, 5.39, 2.58, and 5.50 times that of the background value, respectively. Horizontally, the areas with higher ecological risks concentrated in the western part of the park, while vertically there was no significant trend with increases in soil depth. For the dust samples, areas with high ecological risks were closer to the main traffic arteries. Principal component analysis indicated that the main source of heavy metal in western soils was probably irrigation with contaminated river water. Road traffic, on the other hand, is more likely to be the main contributor to high dust heavy metal levels. This result is important for the park to control the potential health risks caused by heavy metals through zoning management according to the functions of different areas.

Key words: risk control; heavy metals; ecological risks; principal component analysis; site contamination

重金属是场地污染的主要来源之一^[1-3]。被用于存放、处理、处置有毒有害物质的地块, 可能存在着危害人体健康或者影响生态环境的风险^[4-6]。在中国, 由于经济快速发展地区的产业政策的改变, 出现了较多的工业企业迁出和迁入现象^[7]。这些工业企业使用的地块, 常伴随土壤污染和废弃物污染等

环境问题^[8,9], 其中又以矿区、冶炼和电镀等场地污

收稿日期: 2020-10-31; 修订日期: 2020-11-27

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1800302); 中国科学院绿色过程制造创新院项目(IAGM-2019-A16-5)

作者简介: 曾伟斌(1997~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤重金属污染, E-mail: wbzeng2017@163.com

* 通信作者, E-mail: wanxm.06s@igsnrr.ac.cn

染最为集中.以铜矿开采和冶炼为例,有研究表明,长期的冶炼活动会导致周边土壤中 Cu、Pb、Cr、Ni 和 Zn 等元素出现明显偏高的现象^[10-12],在靠近矿区的街道,地表灰尘中的重金属(Cd、Pb 和 Cu)甚至会处于严重污染的水平^[13,14].

针对矿区和工业园区等场地的土壤和灰尘重金属污染特征的研究受到了广泛关注^[15-17].1997 年,Bech 等^[18]对拉美某国的铜矿采矿区周边土壤和植物中重金属的富集特征进行研究,结果表明土壤 As 和 Cu 含量明显高于其他元素,两者的含量分别可达到 $7\,670\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $5\,270\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.孙锐等^[19]以我国湖南的一处典型铅锌矿区为研究对象,分析了 Pb、Zn、Cr、Cu、Cd 和 Hg 等 6 种重金属的污染特征,发现中心区域重金属综合潜在生态危害明显高于周围区域,22% 的采样点处于很强生态危害等.除了评价污染特征和生态风险外,土壤和灰尘重金属的来源分析也受到关注.Manno 等^[20]对意大利某镇道路扬尘样品的主成分分析表明,Cu、Cr、Mo、Pb、Sb 和 Zn 等元素含量较高可能是交通导致.张一修等^[21]则以城市道路为研究目标,将灰尘和土壤结合分析来识别重金属来源,发现重金属元素来源不同,灰尘中 Pb 主要来源于交通和钢铁厂,而土壤 Cr 主要来源于外来客土.Li 等^[22]研究某矿区矸石及土壤中重金属的污染情况,通过对矸石和表层土壤中 Cd、Pb、Cu、Zn 和 Cr 的含量测定,分析了有毒金属的空间分布、潜在生态风险和潜在健康风险,结果表明表层土壤中 Cd、Pb、Cu 和 Zn 含量超过国家标准(GB 15618-1995).相关性分析和主成分分析结果表明,该地区的 Cd、Pb、Cu 和 Zn 元素主要来源于矸石堆.总的来看,针对工业园区场地重金属污染状况已有一定的研究基础^[23,24],但较多的研究都单一地针对工业园区土壤或者灰尘进行水平方向空间分布和风险评价,缺乏从多功能区的角度考虑土壤与灰尘的分布,且土壤与灰尘结合的综合分析研究相对较少.

基于此,本文以长江经济带下游地区的安徽省中部某工业园区为研究对象,采集园区内部土壤及地表灰尘样品,分析 Cr、Ni、Cu、Zn、Hg、As、Cd 和 Pb 这 8 种主要的重金属污染物在园区内部的空间和垂直分布特征,采用潜在生态风险指数评价出较高生态风险地区,运用相关性分析与主成分分析讨论了重金属的来源,并比较了土壤与灰尘样品重金属含量及生态风险结果之间的差异,同时指出了可能存在的外部污染来源和内部风险因素,以期为该地区进行风险管控,提供政策制定过程可参考的科学建议.

1 材料与方法

1.1 研究区域

研究区域位于安徽省中部某地级市,属亚热带湿润季风气候,年平均气温为 16.2°C ,年平均降水量为 $1\,375.9\text{ mm}$.该地区有较为丰富的矿产资源,对硫铁矿和铜矿等矿产有较长时间的开采历史,其工业园区成立于 21 世纪初,经过多年的建设发展,初步形成了以铜加工利用、机械制造电子元件为重点的主导产业.园区规划总面积为 14.2 km^2 ,比邻多条铁路和公路,园区西部以河流为界,河流自南向西北方向流动,且上游流经矿区冶炼厂.园区西南部也有矿区分布.园区主导风向为自西南向东北方向.本研究将该工业园区分为 3 类功能区,包括工业用地、居住用地和学校用地.如图 1 所示,Ⅰ区为学校 and 居民小区,Ⅱ区为学校,Ⅲ区为园区的工业工地.

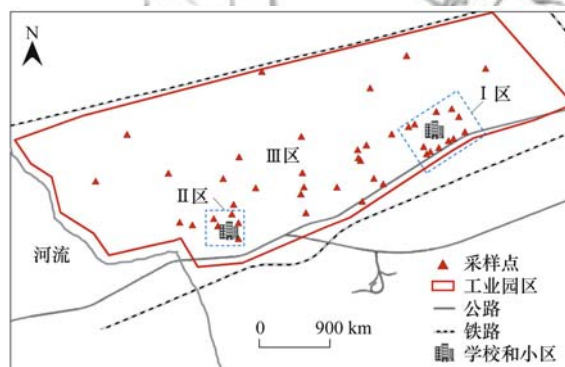


图 1 园区采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling points in the park

1.2 样品采集与测定

在研究区域布点时,对学校 and 居民小区等敏感受体以及涉重金属企业周边加密布点,其他区域均匀布点^[25-27].共设采样点 44 个,根据园区实际情况,部分点位同时采集土壤和灰尘,其它点位只采集土壤或者灰尘,土壤样品分层采集(0~10、10~20 和 20~30 cm)得到土壤样品 108 个.地表灰尘区别于土壤,主要是来自于道路表面停留的固体颗粒物.灰尘样品试用塑料毛刷和铲子收集,一个采样点附近采集 3 个样品等量混匀后,作为一个采样点的灰尘样品,并装入聚乙烯塑料袋贴上标签密封保存,得到灰尘样品 33 个.采集的土壤及灰尘样品经过剔除杂质,自然风干后,研磨过筛备用. Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd 和 Pb 的含量采用 $\text{HF-HNO}_3\text{-HClO}_4$ 在电热板上消解, 150°C 赶酸后,经冷却至室温,定容至 50 mL ,采用电感耦合等离子体质谱仪 ICP-MS 测定, Hg 含量使用测汞仪 DMA-80 测定.采用国家标准土壤物质 GSS-1 和 GSS-5 进行质量控制,各元素分析误差均小于 $\pm 10\%$.

1.3 潜在生态风险指数

潜在生态风险指数被应用于评估土壤中重金属对环境的影响^[28,29]. 它的计算公式如下:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times \frac{c^i}{c_n^i}$$

式中,RI 表示土壤内多种重金属的综合生态危险指数; E_r^i 表示土壤中第*i*种重金属元素的潜在生态危险系数; T_r^i 表示某重金属的毒性系数; c^i 表示重金属含量; c_n^i 表示计算所需的参考值(选择当地土壤背景值作为对比). 各种金属 Cr、Ni、Cu、Zn、Hg、As、Pb 和 Cd 的毒性系数分别为 2、5、5、1、40、10、5 和 30^[30].

表 1 潜在生态风险系数和潜在生态风险指数分级标准

Table 1 Grading standards of potential ecological risk index		
潜在生态风险系数(E_r^i) 范围	综合生态风险指数(RI) 范围	结果
<40	<150	低
40~80	150~300	中
80~160	300~600	较高
160~320	>600	高
>320		极高

1.4 数据处理与作图

本研究使用 Pearson 相关性分析和主成分分析对土壤和灰尘重金属来源进行分析^[31,32]. 本研究中数据处理、相关性分析及主成分分析由 Excel 2013 和 SPSS 22.0 完成. 由 Origin 8.0 和 ArcGIS 10.6 完成作图.

2 结果与讨论

2.1 重金属含量描述性统计

对土壤和灰尘进行重金属含量测定的结果如表

2 所示,表层土壤与灰尘的重金属含量差异较大. 以不同点位采样结果的平均值来看,园区表层土壤 Cu、Zn、As、Pb 和 Cd 的含量分别是 89.99、138.91、21.58、62.09 和 0.89 mg·kg⁻¹,要明显高于当地土壤背景值,分别是背景值的 2.65、1.76、1.56、2.14 和 3.87 倍,而 Cr 和 Ni 的含量平均值则与当地背景值相近. 灰尘的多个重金属含量要明显高于土壤,例如 Cu 元素含量的最大值可达到 1 822.38 mg·kg⁻¹,远大于土壤中 Cu 元素的最大值(320.15 mg·kg⁻¹),另一个元素 Cr 的含量最大值为 955.92 mg·kg⁻¹,是土壤中 Cr 最大值的 8.53 倍. 从平均值来看,灰尘中的各个重金属含量都要高于当地土壤背景值. 其中 As 含量平均值更要比国家标准(《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 36600-2018))中的风险筛选值(60.00 mg·kg⁻¹)要高.

同时一些元素的变异系数相对较大. 土壤中 Cd 含量最大可达到 9.29 mg·kg⁻¹,最小为 0.09 mg·kg⁻¹,变异系数为 1.85,这说明在本研究中的工业园区在空间分布上可能存在较大的变异性. 灰尘中重金属含量的变异性则更加明显. Hg、Cu 和 Cr 的变异系数分别为 1.97、1.21 和 1.02,这说明它们的空间分布均匀性较低. 在后续的重金属污染治理和风险管控上,需要考虑到这些元素含量在分布上差异较大. 另外统计结果表明,表层土和灰尘的各个重金属元素偏度都大于 0(正态分布偏度系数为 0),说明该分布为右偏.

表 2 表层土和灰尘重金属含量描述性统计^[33]

Table 2 Descriptive statistics of heavy metal content in surface soil and dust									
类型	项目	Cr	Ni	Cu	Zn	Hg	As	Pb	Cd
表层土	最大值/mg·kg ⁻¹	112.10	56.32	320.15	410.66	0.10	55.06	191.15	9.29
	最小值/mg·kg ⁻¹	47.90	13.58	43.70	70.93	0.01	12.21	20.95	0.09
	平均数/mg·kg ⁻¹	78.56	33.12	89.99	138.91	0.03	21.58	62.09	0.89
	中位数/mg·kg ⁻¹	76.46	31.94	63.10	101.45	0.03	20.36	35.91	0.31
	标准偏差	14.07	10.99	57.95	79.46	0.02	8.41	49.65	1.65
	变异系数	0.18	0.33	0.64	0.57	0.56	0.39	0.80	1.85
	偏度	0.41	0.35	2.16	1.72	1.43	1.99	1.36	4.13
	峰度	0.01	-0.12	5.87	2.69	2.70	6.05	0.37	19.80
灰尘	最大值/mg·kg ⁻¹	955.92	72.09	1 822.38	895.62	3.41	279.39	279.79	3.82
	最小值/mg·kg ⁻¹	54.07	13.24	51.70	97.13	0.03	10.98	24.79	0.09
	平均值/mg·kg ⁻¹	154.61	35.66	257.27	365.81	0.36	74.40	74.85	1.24
	中位数/mg·kg ⁻¹	105.92	34.48	185.90	299.91	0.16	49.79	67.79	0.77
	标准偏差	157.00	15.27	312.47	222.78	0.70	73.01	46.46	1.00
	变异系数	1.02	0.43	1.21	0.61	1.97	0.98	0.62	0.81
	偏度	4.41	0.37	4.19	0.76	3.77	1.64	2.82	0.88
	峰度	22.35	-0.63	20.58	-0.33	13.99	2.12	11.40	-0.13
风险筛选值/mg·kg ⁻¹		200	900.00	18 000.00		38.00	60.00	800.00	65.00
当地背景值/mg·kg ⁻¹		80.00	34.00	34.00	79.00	0.06	13.80	29.00	0.23

2.2 重金属的空间分布情况

表层土和灰尘重金属含量统计结果表明,工业

园区不同重金属的空间分布可能存在较大差距,部分重金属的空间分布差异较大. 为了进一步了解园

区内部的重金属含量的分布情况,本研究对测定的 8 种重金属元素 (Cr、Ni、Cu、Zn、Hg、As、Pb 和 Cd) 含量结合反距离权重 (IDW) 插值方法,分别得到图 2 和图 3 所示的表层土和灰尘的各重金属含量分布. 表层土中, Cr 和 Ni 的含量虽然分布相对均匀 (变异系数分别是 0.18 和 0.33), 但含量整体偏高, 其中 I 区 (学校和居民区) 和 II 区 (学校) 是含量最高的区域之一. 而其他 6 种重金属含量的分布趋势相近, 园区西部的 Cu、Zn、Hg、As、Pb 和 Cd 含量都普遍偏高. 特别是西南方向的园区边界拐角处是多个重金属含量最高的区域. 灰尘重金属的分布呈现出与表层土壤明显不同的趋势, 靠近园区主干道的样点重金属含量明显偏高, 特别是 Cr、Cu、Hg 和 As 这 4 种元素靠近园区南部国道的点位的含量是园区内最高的, 分别达到 955.92、1 822.38、3.41 和 279.39 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Cd 和 Zn 的分布出现西北部靠近边界含量偏高的现象. 土壤和灰尘出现的分布差异可能与园区土壤重金属存在多个外来输入途径有

关. 一方面, 携带重金属的颗粒物可能伴随着主导风向从位于在园区外南部及西南部的矿区吹入, 在园区内部沉降并造成灰尘和土壤中重金属含量偏高. 但这一途径的可能性相对较低, 因为园区内灰尘的重金属分布特点是主要的交通干道周边含量偏高, 而并没有出现和土壤相似的情况, 即园区西南部灰尘重金属含量偏高的现象. 另一方面, 园区西南及西部边界紧靠河流, 该河流流经矿区和冶炼厂, 并且重金属含量较高, 其中 Cd、Zn、As 和 Cu 的超标率分别达到 17.74%、4.84%、4.84% 和 3.22%^[34], 早期的河水灌溉会造成土壤重金属含量较高. 据此笔者推测工业园西南区域土壤重金属含量偏高的来源主要是紧靠边界的河流, 而灰尘中的重金属则与道路交通有更加紧密的联系. 但整体来说, 大气降尘、河流以及交通等因素的可能性还需要进一步调查研究, 各个重金属的来源的贡献值也需要被进一步量化.

2.3 园区不同深度土壤重金属分布特征

为进一步了解园区内重金属元素在不同土壤深

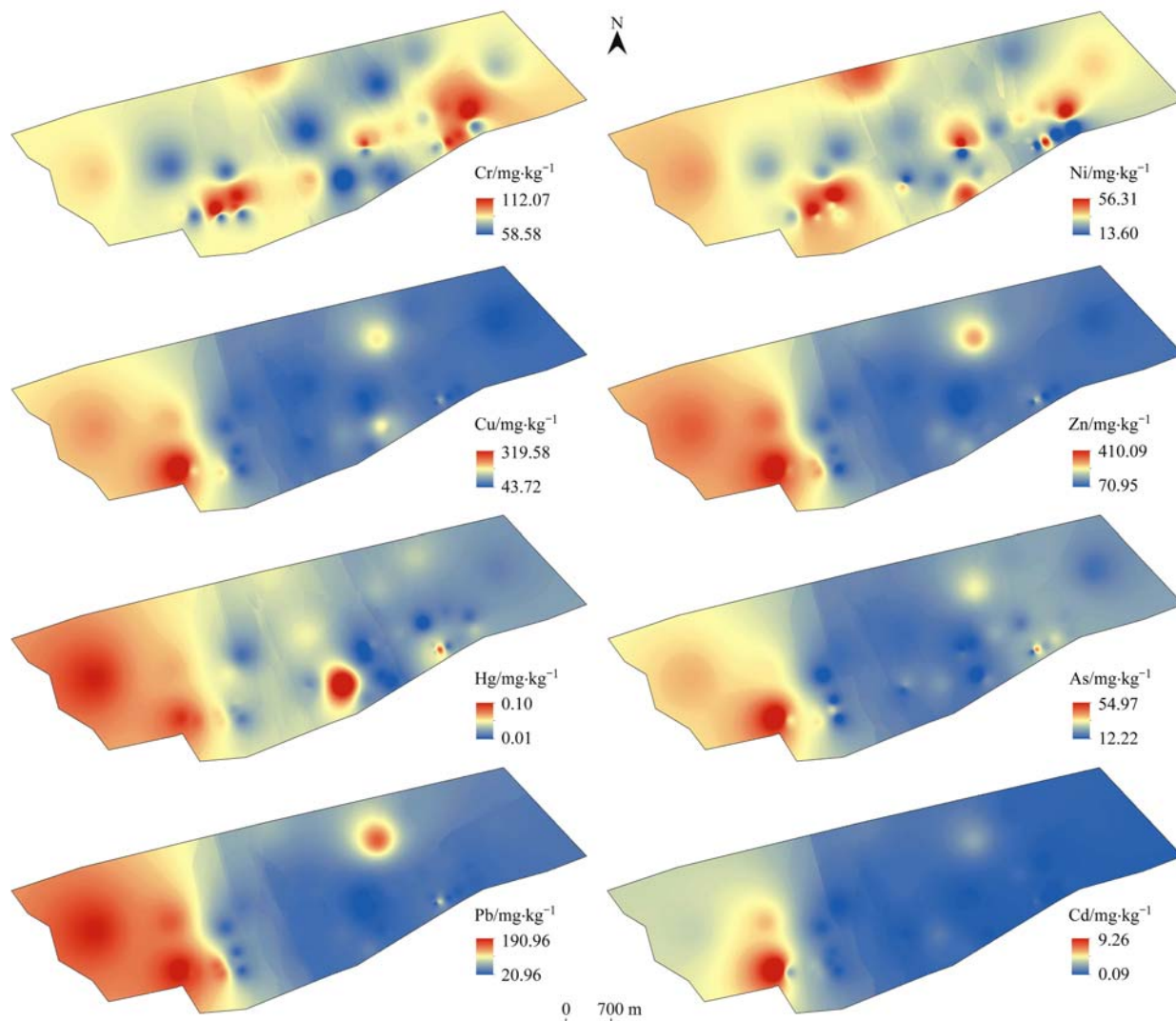


图 2 表层土各金属含量空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of metal content in surface soil

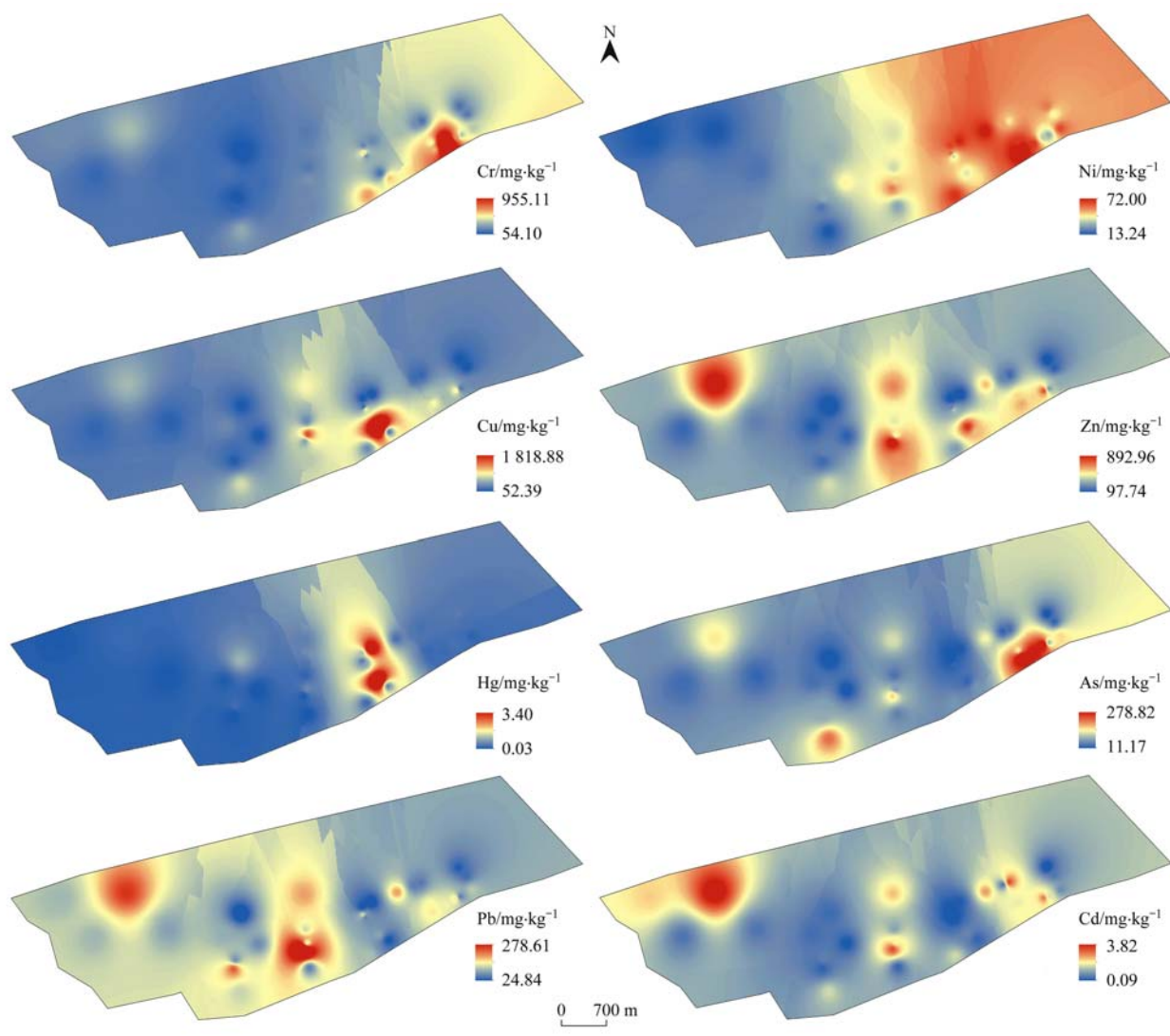


图3 灰尘各重金属含量空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of heavy metal content in dust

度的分布特征,根据样品测定结果,得到如图4所示的重金属含量分布.为了对比分析,将灰尘作为土壤深度为0 cm的样品与分层采取的土壤样品结合分析.采样点分成3个区域(图1).不同分区的地表灰尘的重金属含量要显著高于土壤中的重金属,例如灰尘中Cu元素含量为237.68~292.82 mg·kg⁻¹,远高于土壤中的Cu含量62.30~110.68 mg·kg⁻¹.Zn元素的垂直分布与Cu有着相似特征.但对于不同深度的土壤来说,大部分重金属元素并没有出现随着深度的增加含量明显下降或者上升的趋势.Cr、Cu、Zn和As这4种元素的含量在土壤深度不断增加时,浓度基本和表层土壤保持一致.从不同分区角度来看,存在敏感受体的Ⅱ区(学校)的土壤和灰尘中,Cu、Zn、Pb和Cd的含量要高于Ⅲ区(工业工地)的土壤和灰尘,说明Ⅱ区的生态风险可能要高于Ⅲ区.

2.4 综合生态风险评估

通过计算潜在生态风险系数 E_i^p 和综合生态风

险指数RI,结合插值方法,土壤和灰尘的综合生态风险结果如图5和图6所示.整体来看,土壤和灰尘重金属生态风险结果相同点在风险等级较高的区域都相对集中,但不同点在于两者的高风险区域并不一致.园区内的36个土壤采样点中,69.4%的样点风险等级为低风险,8.3%的点位是中等风险,16.7%点位为高风险,而极高风险点位占5.6%.综合生态风险指数整合了本研究选取的8种重金属元素的生态风险,表明工业园区的西部土壤是生态风险较高的区域,特别是西南方向的拐角处生态风险指数的等级为极高($RI \geq 600$),这一区域靠近Ⅱ区(学校),因此有必要采取进一步措施来防控重金属污染.而园区中部以及东部土壤的风险等级更低,处于低风险等级,其中Ⅰ区(学校和居民区)也在其中.灰尘重金属的生态风险评价结果则与土壤不同,风险系数较高的区域集中在中部地区.就采样点生态风险指数来看,3.03%的样点风险等级为低风险,

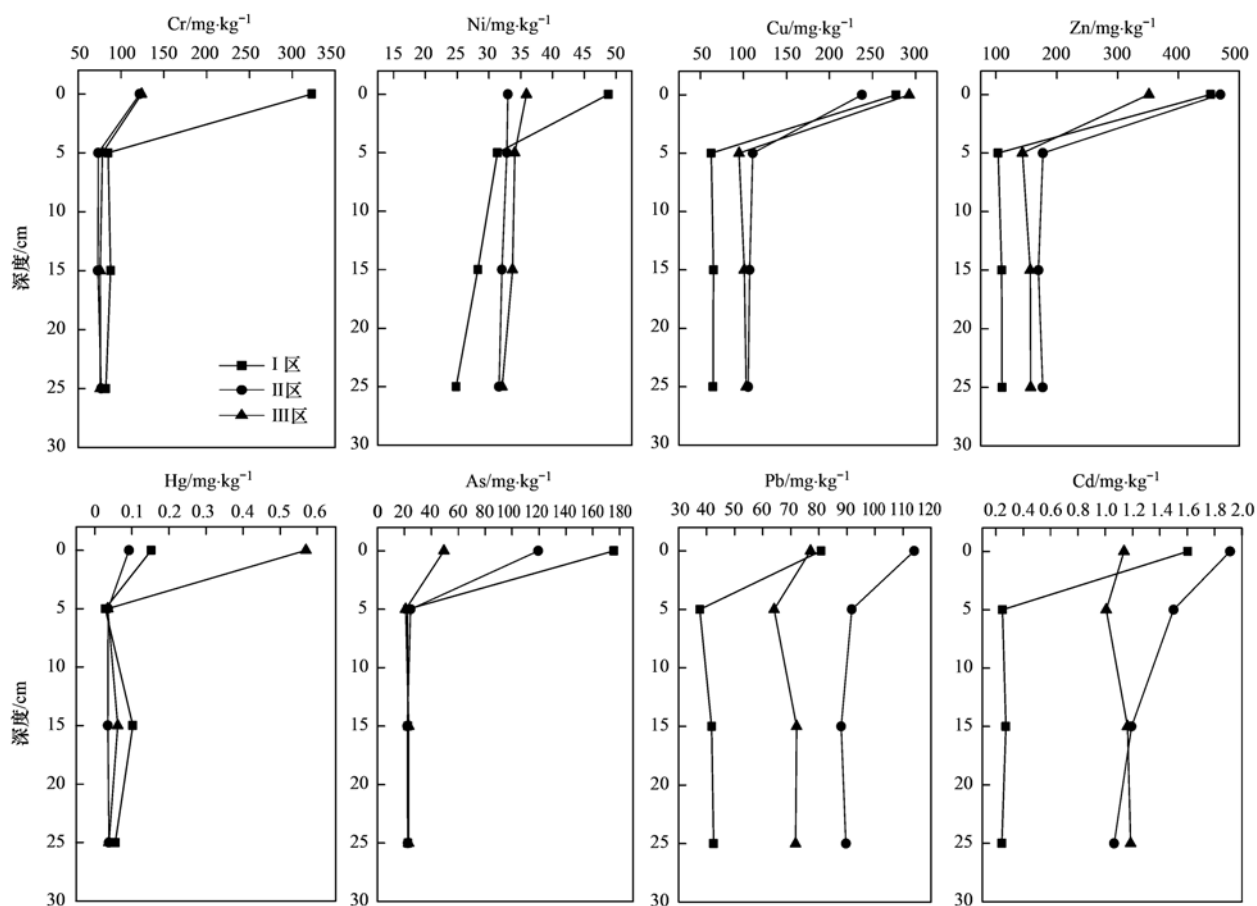


图4 园区土壤和灰尘重金属不同深度分布

Fig. 4 Vertical distribution of heavy metals in soil and dust in the park

33.3% 的点位是中等风险,36.4% 点位为高风险,而极高风险点位占 27.3%,说明灰尘的重金属生态风险普遍要比土壤更高.

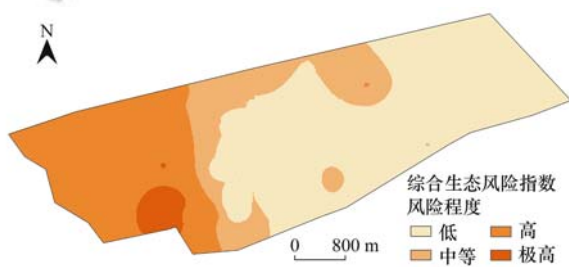


图5 土壤重金属综合生态风险指数

Fig. 5 Comprehensive ecological risk index of soil heavy metals

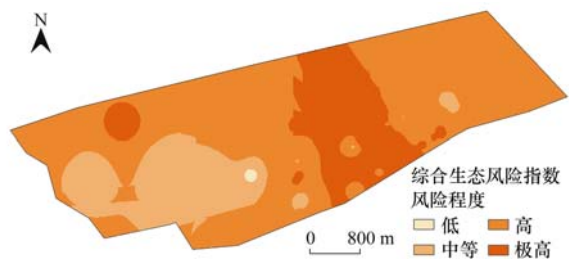


图6 灰尘重金属综合生态风险指数

Fig. 6 Comprehensive ecological risk index of dust and heavy metals

2.5 土壤及灰尘重金属来源差异性分析

相关性结果表明,表层土壤中,多个重金属之间存在极显著的相关性(表3). Cu 与 Pb、Cd、As 和 Zn 之间存在着极显著的相关性($P < 0.01$), Zn 与 Pb 之间相关系数达到 0.973 ($P < 0.01$), Zn 与 As 和 Cd 的相关系数达到 0.85 ($P < 0.01$) 和 0.872 ($P < 0.01$), As 与 Pb 和 Cd 的相关系数分别为 0.798 ($P < 0.01$) 和 0.81 ($P < 0.01$),而 Pb 与 Cd 之间也存在着显著的相关性($P < 0.05$). 灰尘样品中 Zn 与 As、Pb 和 Cd 的相关系数分别为 0.59 ($P < 0.01$)、0.668 ($P < 0.01$) 和 0.647 ($P < 0.01$),存在显著的相关性(表4).

主成分分析被多个研究用于土壤和灰尘重金属的来源识别和分析. 对表层土壤 Cr、Ni、Cu、Zn、Hg、As、Pb 和 Cd 这 8 种重金属元素的主成分分析结果共提取出两组主成分(图7),第一主成分和第二组成分的方差分别为 61.07% 和 20.49%,共解释总方差的 81.56%. 其中,Cu、Zn、Hg、As、Pb 和 Cd 在第一主成分上载荷较大,Cr 和 Ni 在第二主成分上载荷较大. 土壤重金属主成分载荷如图7所示. 由于铜矿开采和冶炼是当地主要的产业,并且伴随着铜冶炼过程,冶炼废水中 Cu、Pb、Cd 和 As 等离子

表 3 表层土壤重金属相关性分析¹⁾

Table 3 Correlation analysis of heavy metals in surface soil

	Cr	Ni	Cu	Zn	Hg	As	Pb	Cd
Cr	1	0.555 **	0.224	-0.177	-0.364 *	0.004	-0.166	-0.131
Ni		1	-0.049	-0.002	-0.218	-0.222	0.014	-0.019
Cu			1	0.942	0.543 **	0.812 **	0.886 **	0.899 **
Zn				1	0.616 **	0.85 **	0.973 **	0.872 **
Hg					1	0.531 **	0.599 **	0.492 **
As						1	0.798 **	0.81 **
Pb							1	0.783 *
Cd								1

1) ** 表示 $P < 0.01$ (极显著); * 表示 $P < 0.05$ (显著), 下同

表 4 灰尘重金属相关性分析¹⁾

Table 4 Correlation analysis of heavy metals in dust

	Cr	Ni	Cu	Zn	Hg	As	Pb	Cd
Cr	1	0.377 *	0.035	0.247	-0.101	0.58 **	0.087	0.22
Ni		1	-0.04	0.027	0.128	0.268	0.06	0.013
Cu			1	0.548	0.62	0.171	0.111	0.14
Zn				1	0.062	0.59 **	0.668 **	0.647 **
Hg					1	-0.195	-0.223	-0.211
As						1	0.448 *	0.577 **
Pb							1	0.613 **
Cd								1

含量较高^[35]. 而本研究中紧靠园区西部的河流上游流经铜矿开采区域. 结合相关性分析结果, Cu 与 Pb、Cd、As 和 Zn 之间分别存在着显著的相关性. 据此推测, 河流携带的多种重金属元素是造成园区土壤重金属含量较高的主要原因. 而对于第二主成分上载荷较大的 Cr 和 Ni 两种元素, 两者更多地受到地球化学因素的影响, 主要由地质成因导致^[21,36,37].

灰尘样品的重金属元素主成分分析结果则提取出 3 组主成分(图 8), 第一、第二和第三主成分的

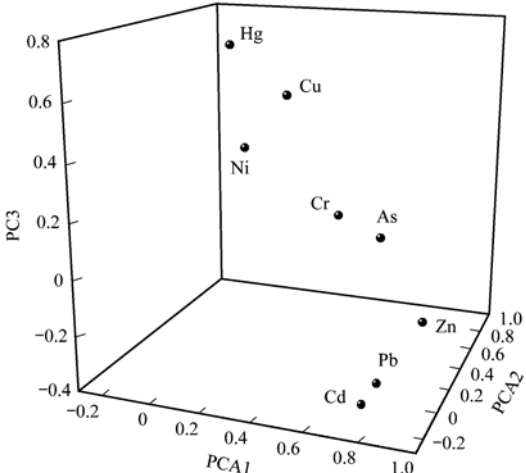


图 8 灰尘重金属元素主成分载荷

Fig. 8 Principal component load diagram of heavy metal elements in dust

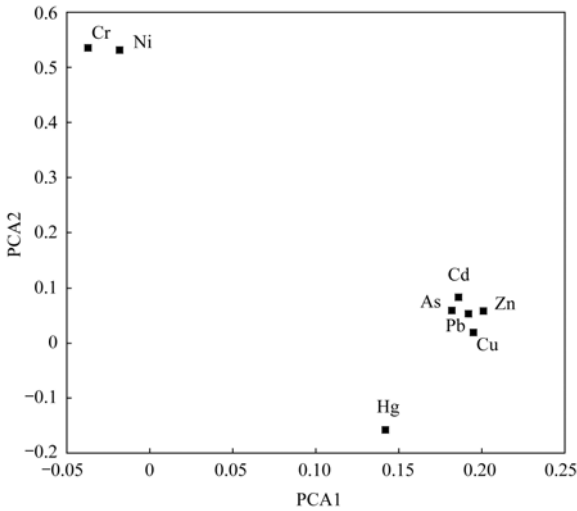


图 7 土壤重金属元素主成分载荷

Fig. 7 Principal component loading diagram of soil heavy metal elements

方差分别为 38.46%、22.33% 和 17.49%, 共解释总方差的 78.28%, 第一主成分中 Zn、As、Pb 和 Cd 的载荷较大, 第二主成分中 As 和 Cu 较大, 而第三主成分中 Cr 和 Ni 的载荷较大. Zn、As、Pb 和 Cd 这些重金属元素彼此之间存在着显著的相关性(表 4), 他们的来源一方面可能是园区外围铜冶炼过程产生, 并随着大气迁移扩散沉降在地表; 另一方面园区内部也存在部分涉及重金属企业, 运输车辆, 在园区内部以及和外部转运物资过程也会导致地表灰尘重金属含量较高. 结合上文对多个重金属的空间分布结果(图 2 和图 3)可知, 道路交通是主要因素的

可能性更大。

3 结论

(1)在土壤和灰尘的空间分布特征上,园区土壤中 Cu、Zn、As、Pb 和 Cd 的含量要明显高于当地土壤背景值,分别是 89.99、138.91、21.58、62.09 和 0.89 mg·kg⁻¹,分别达到背景值的 2.65、1.76、1.56、2.14 和 3.87 倍。土壤重金属含量较高的区域主要集中在园区西部,同时随着土壤深度的增加,重金属含量并没有出现显著的上升或者下降趋势。灰尘的重金属含量则明显高于土壤,Cr、Ni、Cu、Zn、Hg、As、Pb 和 Cd 的含量均超过背景值,分别为 154.61、35.66、257.27、365.81、0.36、74.40、74.85 和 1.24 mg·kg⁻¹,且灰尘的高重金属含量地区则更靠近主要的交通干道。

(2)综合生态风险评价结果表明,土壤 69.4% 的样点风险等级为低风险,极高风险点位占 5.6%,极高风险地区集中在西南拐角处紧靠河流的区域。灰尘 3.03% 的样点风险等级为低而极高风险点位占 27.3%,集中在园区中部。土壤和灰尘这一在生态风险评价结果上的差异和两者重金属含量不同有直接的关系。地表灰尘和土壤之间存在直接的接触,两者彼此联系,但两者的污染特征不同,应当结合土地利用类型进行有差异的管理和控制风险。

(3)重金属来源分析结果表明,土壤中 Cu 与 Pb、Cd、As 和 Zn 之间分别存在着显著的相关性($P < 0.01$),靠近西边的土壤重金属偏高,可能与早期河水灌溉有关,Cr、Ni 受到地质成因影响的可能性较大。灰尘中 Zn、As、Pb 和 Cd 的相关性较强($P < 0.01$),道路交通是主要因素的可能性更大。这意味着对工业园区进行风险管控过程,采取的措施需要综合考虑可能造成污染的多个途径。

参考文献:

- [1] 骆永明. 中国土壤环境污染态势及预防、控制和修复策略[J]. 环境污染与防治, 2009, **31**(12): 27-31.
Luo Y M. Trends in soil environmental pollution and the prevention-controlling-remediation strategies in China [J]. Environmental Pollution & Control, 2009, **31**(12): 27-31.
- [2] 侯文隽, 龚星, 詹泽波, 等. 粤港澳大湾区丘陵地带某电镀场地重金属污染特征与迁移规律分析[J]. 环境科学, 2019, **40**(12): 5604-5614.
Hou W J, Gong X, Zhan Z B, et al. Heavy metal contamination and migration in correspondence of an electroplating site on the hilly lands of the Guangdong-Hong Kong-Macau Greater Bay Area, China[J]. Environmental Science, 2019, **40**(12): 5604-5614.
- [3] 吴健, 王敏, 张辉鹏, 等. 复垦工业场地土壤和周边河道沉积物重金属污染及潜在生态风险[J]. 环境科学, 2018, **39**(12): 5620-5627.
Wu J, Wang M, Zhang H P, et al. Heavy metal pollution and potential ecological risk of soil from reclaimed industrial sites and surrounding river sediments[J]. Environmental Science, 2018, **39**(12): 5620-5627.
- [4] Dhaliwal S S, Singh J, Taneja P K, et al. Remediation techniques for removal of heavy metals from the soil contaminated through different sources: a review[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, **27**(2): 1319-1333.
- [5] Zhang H, Yao Q S, Zhu Y M, et al. Review of source identification methodologies for heavy metals in solid waste[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, **58**(2): 162-168.
- [6] 李海光, 施加春, 吴建军. 污染场地周边农田土壤重金属含量的空间变异特征及其污染源识别[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2013, **39**(3): 325-334.
Li H G, Shi J C, Wu J J. Spatial variability characteristics of soil heavy metals in the cropland and its pollution source identification around the contaminated sites[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences), 2013, **39**(3): 325-334.
- [7] 吴志远, 张丽娜, 夏天翔, 等. 基于土壤重金属及 PAHs 来源的人体健康风险定量评价: 以北京某工业污染场地为例[J]. 环境科学, 2020, **41**(9): 4180-4196.
Wu Z Y, Zhang L N, Xia T X, et al. Quantitative assessment of human health risks based on soil heavy metals and PAHs sources: take a polluted industrial site of Beijing as an example[J]. Environmental Science, 2020, **41**(9): 4180-4196.
- [8] 骆永明. 中国污染场地修复的研究进展、问题与展望[J]. 环境监测管理与技术, 2011, **23**(3): 1-6.
Luo Y M. Contaminated site remediation in China: progresses, problems and prospects[J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2011, **23**(3): 1-6.
- [9] Liu S X, Wang J Z, Zhou G Q, et al. Effects of different freezing rates on purification efficiency of sandy soil contaminated by heavy metal copper[J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, **163**: 1-7.
- [10] 凌其聪, 严森, 鲍征宇. 大型冶炼厂重金属环境污染特征及其生态效应[J]. 中国环境科学, 2006, **26**(5): 603-608.
Ling Q C, Yan S, Bao Z Y. The environmental pollution character and its ecological effect of a large scale smelter[J]. China Environmental Science, 2006, **26**(5): 603-608.
- [11] Zhang J, Shi Q, Fan S K, et al. Distinction between Cr and other heavy-metal-resistant bacteria involved in C/N cycling in contaminated soils of copper producing sites [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, **402**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.123454.
- [12] Zhao F J, Ma Y B, Zhu Y G, et al. Soil contamination in China: current status and mitigation strategies [J]. Environmental Science & Technology, 2015, **49**(2): 750-759.
- [13] 韩晓涛, 郭宇, 鲍征宇, 等. 大冶市街尘重金属污染评价及化学形态特征[J]. 地球化学, 2012, **41**(6): 585-592.
Han X T, Guo Y, Bao Z Y, et al. The level and speciation of metals in street dusts of Daye, Hubei Province[J]. Geochimica, 2012, **41**(6): 585-592.
- [14] Guo L, Lan J R, Du Y G, et al. Microwave-enhanced selective leaching of arsenic from copper smelting flue dusts[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, **386**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121964.
- [15] Nagajyoti P C, Lee K D, Sreekanth T V M. Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review[J]. Environmental Chemistry Letters, 2010, **8**(3): 199-216.
- [16] Negahban S, Mokarram M, Pourghasemi H R, et al. Ecological risk potential assessment of heavy metal contaminated soils in Ophiolitic formations[J]. Environmental Research, 2021, **192**,

- doi: 10.1016/j.envres.2020.110305.
- [17] Ma Y J, Wang Y T, Chen Q, *et al.* Assessment of heavy metal pollution and the effect on bacterial community in acidic and neutral soils[J]. *Ecological Indicators*, 2020, **117**, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106626.
- [18] Bech J, Poschenrieder C, Llugany M, *et al.* Arsenic and heavy metal contamination of soil and vegetation around a copper mine in Northern Peru[J]. *Science of the Total Environment*, 1997, **203**(1): 83-91.
- [19] 孙锐, 舒帆, 郝伟, 等. 典型 Pb/Zn 矿区土壤重金属污染特征与 Pb 同位素源解析[J]. *环境科学*, 2011, **32**(4): 1146-1153.
- Sun R, Shu F, Hao W, *et al.* Heavy metal contamination and Pb isotopic composition in natural soils around a Pb/Zn mining and smelting area[J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(4): 1146-1153.
- [20] Manno E, Varrica D, Dongarrà G. Metal distribution in road dust samples collected in an urban area close to a petrochemical plant at Gela, Sicily[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(30): 5929-5941.
- [21] 张一修, 王济, 秦樊鑫, 等. 贵阳市道路灰尘和土壤重金属来源识别比较[J]. *环境科学学报*, 2012, **32**(1): 204-212.
- Zhang Y X, Wang J, Qin F X, *et al.* Comparison of sources of metals in road-dust and soil in Guiyang[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, **32**(1): 204-212.
- [22] Li K J, Gu Y S, Li M Z, *et al.* Spatial analysis, source identification and risk assessment of heavy metals in a coal mining area in Henan, Central China[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2018, **128**: 148-154.
- [23] 廖晓勇, 崇忠义, 阎秀兰, 等. 城市工业污染场地: 中国环境修复领域的新课题[J]. *环境科学*, 2011, **32**(3): 784-794.
- Liao X Y, Chong Z Y, Yan X L, *et al.* Urban industrial contaminated sites: a new issue in the field of environmental remediation in China[J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(3): 784-794.
- [24] 陈梦舫. 我国工业污染场地土壤与地下水重金属修复技术综述[J]. *中国科学院院刊*, 2014, **29**(3): 327-335.
- Chen M F. Review on heavy metal remediation technology of soil and groundwater at industrially contaminated site in China[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2014, **29**(3): 327-335.
- [25] 陈辉, 张广鑫, 惠怀胜. 污染场地环境调查的土壤监测点位布设方法初探[J]. *环境保护科学*, 2010, **36**(2): 61-63.
- Chen H, Zhang G X, Hui H S. Preliminary study on spot setting methods for soil monitoring of the environmental investigation of contaminated sites[J]. *Environmental Protection Science*, 2010, **36**(2): 61-63.
- [26] 刘芳, 王书肖, 吴清茹, 等. 大型炼锌厂周边土壤及蔬菜的汞污染评价及来源分析[J]. *环境科学*, 2013, **34**(2): 712-717.
- Liu F, Wang S X, Wu Q R, *et al.* Evaluation and source analysis of the mercury pollution in soils and vegetables around a large-scale zinc smelting plant [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(2): 712-717.
- [27] 陈天恩, 陈立平, 王彦集, 等. 基于地统计的土壤养分采样布局优化[J]. *农业工程学报*, 2009, **25**(S2): 49-55.
- Chen T E, Chen L P, Wang Y J, *et al.* Optimal arrangement of soil nutrient sampling based on geo-statistics[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, **25**(S2): 49-55.
- [28] 张富贵, 彭敏, 王惠艳, 等. 基于乡镇尺度的西南重金属高背景区土壤重金属生态风险评价[J]. *环境科学*, 2020, **41**(9): 4197-4209.
- Zhang F G, Peng M, Wang H Y, *et al.* Ecological risk assessment of heavy metals at township scale in the high background of heavy metals, Southwestern, China [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(9): 4197-4209.
- [29] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [30] 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.
- [31] Sabouhi M, Ali-Taleshi M S, Bourliva A, *et al.* Insights into the anthropogenic load and occupational health risk of heavy metals in floor dust of selected workplaces in an industrial city of Iran[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **744**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140762.
- [32] 方志青, 王永敏, 王训, 等. 三峡库区支流汝溪河沉积物重金属空间分布及生态风险[J]. *环境科学*, 2020, **41**(3): 1338-1345.
- Fang Z Q, Wang Y M, Wang X, *et al.* Spatial distribution and risk assessment of heavy metals in sediments of the Ruxi Tributary of the Three Gorges Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(3): 1338-1345.
- [33] 李如忠, 潘成荣, 陈婧, 等. 铜陵市区表土与灰尘重金属污染健康风险评估[J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(12): 2261-2270.
- Li R Z, Pan C R, Chen J, *et al.* Heavy metal contamination and health risk assessment for urban topsoil and dust in Tongling City [J]. *China Environmental Science*, 2012, **32**(12): 2261-2270.
- [34] 魏伟. 安徽铜陵地区河流重金属污染、生物多样性研究与评价[D]. 合肥: 安徽大学, 2012.
- Wei W. Research and evaluation on heavy metal contamination and biodiversity of rivers in Tongling of Anhui Province [D]. Hefei: Anhui University, 2012.
- [35] 罗发生, 徐晓军, 李新征, 等. 微电解法处理铜冶炼废水中重金属离子研究[J]. *水处理技术*, 2011, **37**(3): 100-104.
- Luo F S, Xu X J, Li X Z, *et al.* Micro-electrolysis treatment of copper smelting of heavy metals in wastewater[J]. *Technology of Water Treatment*, 2011, **37**(3): 100-104.
- [36] Hanesch M, Scholger R, Dekkers M J. The application of fuzzy C-means cluster analysis and non-linear mapping to a soil data set for the detection of polluted sites[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 2001, **26**(11-12): 885-891.
- [37] Borůvka L, Vacek O, Jehlička J. Principal component analysis as a tool to indicate the origin of potentially toxic elements in soils [J]. *Geoderma*, 2005, **128**(3-4): 289-300.

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, <i>et al.</i>	(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, <i>et al.</i>	(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, <i>et al.</i>	(1255)
Seasonal Characteristics of Air Pollutant Sources and Transport Pathways in Xining City	LIU Na, YU Ye, MA Xue-qian, <i>et al.</i>	(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, <i>et al.</i>	(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 Polymers 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, <i>et al.</i>	(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, <i>et al.</i>	(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, <i>et al.</i>	(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, <i>et al.</i>	(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)