

目次

河北南部城市臭氧和 VOCs 的污染特征及传输贡献	赵江伟, 聂赛赛, 于玉洁, 王帅, 崔建升, 王玮, 任晓伟, 朱烁 (4775)
基于卫星和地面监测的河西走廊 O ₃ 浓度时空分布及潜在源区分析	李锦超, 曹春, 方锋, 唐千惠, 梁朕月 (4785)
海南岛臭氧污染时空变化及敏感性特征	符传博, 丹利, 佟金鹤, 徐文帅 (4799)
华东地区对流层 O ₃ 和前体物 HCHO 及 NO ₂ 的时空特征	王晓雯, 刘昊霞, 王扬, 宋宜凯 (4809)
2006~2020 年广东省大气甲醛排放演变特征	明桂英, 朱曼妮, 沙青娥, 张雪驰, 饶思杰, 陈诚, 刘慧琳, 郑君瑜 (4819)
淄博市涂装行业 VOCs 排放水平及减排潜力	黄玥润, 杨文, 王秀艳, 王雨燕, 程颖, 王帅 (4832)
西安市城市降尘和土壤尘 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 中碳组分特征	沈利娟, 王红磊, 孙杰娟, 刘诗云, 刘焕武, 赵天良 (4843)
长江流域径流模拟及其对极端降雨的响应	高爽, 凌超普, 汤水荣, 王心亮, 王慧勇, 孟磊, 颜晓元 (4853)
黄河流域内蒙古段水化学同位素特征及水体转化关系	裴森森, 段利民, 苗平, 潘浩, 崔彩琪, 张波, 籍健勋, 罗艳云, 刘廷玺 (4863)
古堆泉域岩溶地下水水化学特征及成因	唐春雷, 申豪勇, 赵春红, 王志恒, 谢浩, 赵一, 梁永平 (4874)
华北平原典型城市(石家庄)地下水重金属污染源解析与健康风险评价	陈慧, 赵鑫宇, 常帅, 宋圆梦, 卢梦淇, 赵波, 陈昊达, 高赛, 王琳静, 崔建升, 张璐璐 (4884)
湖南东江湖表层沉积物重金属的空间分布、形态及生态风险	张同亮, 衣丽霞, 黎常成, 袁首枢, 豆奕轩, 田胜艳, 林尚璇 (4896)
太湖水华前表层水 CDOM 的光谱特征与来源解析	王永强, 卢少勇, 黄蔚, 韩镇阳, 国晓春 (4906)
白洋淀典型水域 COD 的组成及各组分贡献	李琦, 张超, 张文强, 温胜芳, 单保庆, 季恺悦 (4915)
白洋淀典型抗生素的源解析及其特定源风险评估	宋圆梦, 赵波, 卢梦淇, 赵鑫宇, 陈慧, 陈昊达, 高赛, 王琳静, 崔建升, 张璐璐 (4927)
雅鲁藏布江中游河流生态系统健康状态对水环境因子的响应	李晓东, 杨清, 刘惠秋, 巢欣, 杨胜烟, 巴桑 (4941)
鄱阳湖典型河湖交汇区浮游植物现状分析	于新平, 陈宇炜, 刘金福, 王俊颖, 徐光锋, 邹浩月, 陈楠, 夏雨 (4954)
不同黑臭程度下城市河道浮游植物群落结构、多样性和功能群	张琪琪, 曾劼, 尹卓, 冯杰, 刘静, 修宇鑫, 刘国, 许春阳 (4965)
反硝化脱氮对太湖蓝藻水华态势的影响	李昌杰, 许海, 詹旭, 张铮惠, 朱梦圆, 邹伟, 肖曼, 倪子怡, 朱慧 (4977)
密云水库入库河流微生物群落演替对氮素形态转化的影响	辛苑, 张耀方, 李添雨, 叶芝茜, 申佩弘, 魏源送, 高超龙, 舒舒兴, 张俊亚 (4985)
城市尾水氮代谢过程中芽孢杆菌对微藻作用机制	赵志瑞, 马超, 颜嘉晨, 李书缘, 李晴, 胡紫如, 呼庆, 刘硕, 万敬敏 (4996)
高效异养硝化-好氧反硝化菌 <i>Glutamicibacter</i> sp. WS1 低温下对多种氮源的脱氮特性及氮代谢机制	魏淑惠, 罗晓, 吕鹏翼, 马文凯, 苏金卫, 李伟, 崔建升 (5006)
大环内酯类抗生素在饮用水处理过程中的污染特征及其氯化反应机制	岑霞, 程思宇, 石宗民, 谢卓鸿, 张凌菱, 杨滨, 应光国 (5017)
不同堆肥工艺处理的城市污水污泥对滨海湿地土壤中养分释放特征和潜力的影响	贾培寅, 王馨, 花玉婷, 姜志翔 (5025)
淮河流域安徽段水体和沉积物微塑料赋存特征及风险评估	张海强, 高良敏, 葛娟, 赵兴兰, 张振, 慕明, 邱宇辉 (5036)
黄河三角洲湿地表层沉积物中微塑料的分布、来源和风险评估	耿娜, 赵广明, 张大海, 袁红明, 李先国 (5046)
固原市农田土壤微塑料的分布特征及风险评估	马贵, 丁家富, 周悦, 周炎炎, 廖彩云, 海金涛, 王欢 (5055)
鄱阳湖湿地淹水与非淹水状态下微塑料表面细菌群落分布特征	赵俊凯, 陈旭, 胡婷婷, 廖轶颖, 邹龙, 简敏菲, 刘淑丽 (5063)
聚苯乙烯微塑料对铜绿假单胞菌生物膜形成和结构变化的影响	陶辉, 于多, 杨兰, 陈泽扬, 周灵沁, 罗雲鑫 (5071)
聚苯乙烯微塑料对小白菜生长、生理生化及冠层温度特性的影响	郭冰林, 丰晨晨, 陈悦, 林迪, 李岚涛 (5080)
聚乙烯与磺胺二甲嘧啶复合胁迫对大豆种子萌发及幼苗生长生理特征的影响	赵肖琼, 张恒慧, 赵润枝, 张新梅 (5092)
离子类型、强度和铁氧化物影响下微塑料的迁移行为及模型计算	张然, 于可飞, 黄磊, 陈雅丽, 马杰, 翁莉萍, 李永涛 (5102)
土地利用和气候变化对农牧交错带生态系统服务的影响	徐文彬, 饶良懿 (5114)
有机碳流失对土壤侵蚀的响应及其驱动因素: 基于 Meta 分析	刘小岚, 黄金权, 齐瑜洁, 李威闻, 刘纪根, 陈燕飞, 高绣纺 (5125)
平衡施肥与秸秆覆盖对紫色土坡耕地养分及其化学计量的影响	张高宁, 徐绮雯, 何丙辉, 李天阳, 冯梦蝶, 梁珂 (5135)
稀土-重金属共污染土壤中真菌群落结构特征及主导影响因素	罗颖, 李敬伟, 袁浩, 包智华 (5145)
周年轮作休耕对土壤 AMF 群落和团聚体稳定性的影响	鲁泽让, 夏梓泰, 芦美, 赵吉霞, 李永梅, 王自林, 范茂攀 (5154)
华北平原典型城市土壤微生物群落时空变化规律及其驱动因子	赵鑫宇, 陈慧, 常帅, 宋圆梦, 赵波, 卢梦淇, 崔建升, 张璐璐 (5164)
高量秸秆还田配施芽孢杆菌对沙化土壤细菌群落及肥力的影响	聂扬眉, 步连燕, 陈文峰, 安德荣, 韦革宏, 王红雷 (5176)
基于大田试验的铅镉复合污染土壤中甜糯玉米低积累特性	唐乐斌, 李龙, 宋波, 董心月, 韦美溜 (5186)
不同阻控措施对生菜中镉铅累积及品质的影响	周洪印, 李嘉琦, 包立, 夏运生, 王晟, 吴龙华, 张乃明 (5196)
纳米氧化铜对镉胁迫下小油菜生理生化和重金属累积的影响	王诗琪, 孙约兵, 黄青青, 徐应明, 董如苗, 孟庆尧 (5204)
不同污染区巨菌草生物炭内源污染物分布及其生物毒性	刘莉雅, 崔红标, 刘笑生, 张雪, 董婷婷, 章腾, 周静 (5214)
CuFeO ₂ 改性生物炭对四环素的吸附特性	刘国成, 张新旺, 信帅帅, 王倩文, 阎清华, 周成智, 辛言君 (5222)
基于 Meta 分析的全氟化合物对鱼类生态毒性效应	陆宏, 周锦阳, 杨帆, 王蓓莉, 程治文, 申哲民, 袁涛 (5231)
基于 PMF 模型的县域尺度土壤重金属来源分析及风险评估	郑永立, 温汉辉, 蔡立梅, 罗杰, 汤端阳, 武妙, 李慧, 李鼎 (5242)
基于 PMF-PCA/APCS 与 PERI 的菏泽油田牡丹种植区表层土壤重金属潜在来源识别及生态风险评估	赵庆令, 李清彩, 安茂国, 于林松, 万鑫, 曹付恒, 韩文撑, 陈娟, 王天鸽 (5253)
重庆市煤矸山周边农产品镉健康风险评估及土壤环境基准值推导	马杰, 余泽蕾, 王胜蓝, 邓力, 孙静, 刘萍, 徐敏 (5264)
安徽典型硫铁矿集中开采区土壤重金属污染特征及来源解析	贾晗, 刘军省, 王晓光, 鞠林雪, 何鑫, 周建伟, 张羲 (5275)
湘东北典型河源区土壤重金属分布特征、来源解析及潜在生态风险评估	杨振宇, 廖超林, 邹炎, 谢伍晋, 陈晓威, 张驭飞 (5288)
不同含量外源镉在红壤中的变化特征	周子阳, 庞瑞, 宋波 (5299)
CO ₂ 泡沫混凝土碳封存潜力分析	张源, 他旭鹏, 覃述兵, 郝佑民 (5308)
综合环境社会经济指标的优先污染物筛选方法研究: 以电子废物拆解为例	陈源, 蔡震, 李金惠 (5316)
《环境科学》征订启事(4808) 《环境科学》征稿简则(4831) 信息(4842, 5124, 5153)	

安徽典型硫铁矿集中开采区土壤重金属污染特征及来源解析

贾晗^{1,2,3}, 刘军省^{1*}, 王晓光³, 鞠林雪¹, 何鑫³, 周建伟⁴, 张义¹

(1. 中化地质矿山总局地质研究院, 北京 100101; 2. 中国地质大学(武汉)地质调查院, 武汉 430074; 3. 新疆生产建设兵团自然资源国土整治中心, 乌鲁木齐 830000; 4. 中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430074)

摘要:为查明安徽某典型硫铁矿集中开采区周边土壤重金属元素污染特征及污染源,采集了研究区42个表层土壤样品和2个垂向剖面的16个土壤样品测定其pH值及Zn、Cu、Cd、Pb、Cr、Ni、Hg和As重金属元素含量,运用ArcGIS反距离权重插值法、内梅罗综合指数法、主成分分析法和绝对因子得分-多元线性回归(APCS-MLR)受体模型等方法进行了重金属元素分布特征分析、污染评价和来源解析。结果表明,土壤中8种重金属元素的含量平均值是铜陵地区背景值的1.03~13.14倍,Zn、Cu、Cd、Pb、Hg和As这6种重金属元素局部富集明显,在空间分布上与采矿活动位置基本一致。单因子污染指数评价显示,Zn、Cu、Cd、Pb和As这5种元素存在不同程度的污染风险,Cd和Cu元素污染程度最为严重,中度污染以上占比分别为47.62%和42.86%;内梅罗综合污染指数评价显示,研究区土壤样点中度污染以上占比为61.90%;地累积指数评价显示,研究区Zn、Cu、Cd、Pb、Hg和As这6种重金属元素污染程度主要为轻污染~强污染。在土壤剖面垂向变化上,重金属元素易在土壤表层富集,向深部迁移较缓慢,高含量主要在1 m以上位置。源解析表明,Zn、Pb和As的来源中地质高背景和采矿活动贡献率分别为37.82%、43.49%和46.63%,成土母质风化的自然来源贡献率分别为34.02%、40.88%和38.52%;Cr和Ni来源主要为成土母质风化的自然来源,贡献率分别为91.95%和73.68%;Cu的来源中地质高背景和采矿活动贡献率为41.91%,大气沉降和农业综合源贡献率为41.30%;Hg的来源较多,成土母质风化的自然来源贡献率为35.60%,地质高背景和采矿活动贡献率为29.87%,未知来源贡献率为34.05%;Cd的主要来源为大气沉降和农业综合源,贡献率为81.81%。

关键词:硫铁矿集中开采区; 土壤重金属; 分布特征; APCS-MLR受体模型; 来源解析

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)09-5275-13 DOI: 10.13227/j.hjkk.202209103

Pollution Characteristics and Sources of Heavy Metals in Soil of a Typical Pyrite Concentrated Mining Area in Anhui Province

JIA Han^{1,2,3}, LIU Jun-xing^{1*}, WANG Xiao-guang³, JU Lin-xue¹, HE Xin³, ZHOU Jian-wei⁴, ZHANG Yi¹

(1. Geology Institute of China Chemical Geology and Mine Bureau, Beijing 100101, China; 2. Institute of Geological Survey, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 3. Natural Resources and Land Control Center, The Xinjiang Production and Construction Corps, Urumqi 830000, China; 4. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: To identify the characteristics and sources of heavy metal pollution in the surrounding soil of a typical pyrite concentrated mining area in Anhui Province, the pH value and the concentrations of Zn, Cu, Cd, Pb, Cr, Ni, Hg, and As in 42 surface soil samples and 16 soil samples from two vertical sections in the study area were collected and measured. The distribution characteristics, pollution assessment, and source analysis of heavy metal elements were conducted using the ArcGIS inverse distance weight interpolation method, Nemerow comprehensive index method, principal component analysis method, and absolute factor score-multiple linear regression (APCS-MLR) receptor model. The results showed that the average concentration of the eight heavy metals was 1.03-13.14 times the background value in the Tongling area. The local enrichment of Zn, Cu, Cd, Pb, Hg, and As was obvious, and the spatial distribution was basically consistent with the location of man-made mining activities. The single-factor pollution index evaluation showed that Zn, Cu, Cd, Pb, and As had different degrees of pollution risk, and the pollution degree of Cd and Cu was the most serious, accounting for 47.62% and 42.86% of moderate pollution, respectively. The Nemerow comprehensive pollution index evaluation showed that 61.90% of the soil samples in the study area were moderately polluted. The ground accumulation index evaluation showed that the pollution degree of Zn, Cu, Cd, Pb, Hg, and As in the study area was mainly from light pollution to strong pollution. In the vertical soil profile variation, heavy metals were easily enriched in the surface layer of the soil but migrated slowly to the deep layer, with concentrations mainly above 1 m. The results of source analysis showed that the high geological background and mining contribution rates of Zn, Pb, and As were 37.82%, 43.49%, and 46.63%, respectively. The natural contribution rates of weathering of parent material were 34.02%, 40.88%, and 38.52%, respectively. The sources of Cr and Ni were mainly natural sources of weathering of the parent material, with contribution rates of 91.95% and 73.68%, respectively. Geological high background and mining activities contributed 41.91% of the Cu sources, and atmospheric sedimentation and agricultural comprehensive sources contributed 41.30%. There were many sources of Hg. The natural source of weathering of soil parent material contributed 35.60%, geological high background and mining activities contributed 29.87%, and unknown sources contributed 34.05%. The main source of Cd was atmospheric sedimentation and agricultural comprehensive sources, contributing 81.81%.

Key words: typical pyrite concentrated mining area; heavy metals in soil; distribution characteristics; APCS-MLR receptor model; source analysis

收稿日期: 2022-09-09; 修订日期: 2022-11-17

基金项目: 第七届中国科协青年人才托举工程项目(2021QNRC001); 中国煤炭地质总局化工矿山地质环境生态修复科技创新团队项目

作者简介: 贾晗(1990~),男,硕士研究生,工程师,主要研究方向为矿山地质环境与灾害,E-mail:89632257@qq.com

* 通信作者,E-mail:514061786@qq.com

近年来,随着人口急剧增长,工业迅猛发展,导致了土壤污染.据原环境保护部、国土资源部发布的《全国土壤污染状况调查公报》显示,工矿业、农业等人为活动以及土壤环境背景值高是造成土壤污染或超标的主要原因,土壤污染类型以无机型为主,Cd、Hg、As、Cu、Pb、Cr、Zn和Ni这8种重金属元素是重点关注的无机污染物,在采矿区中Cd、Pb和As为主要污染物^[1].截至2021年,我国土壤环境风险得到基本管控,土壤污染加重趋势得到初步遏制^[2],但以Cd为首要污染物的土壤重金属污染不容忽视.

国内学者梳理了我国近10年土壤重金属污染源解析研究进展,解析方法包括排放清单法、化学质量平衡模型、多元统计模型和空间分析法等,污染源主要包含有地质高背景、土壤母质、施肥为主的农业活动、采矿为主的工业活动和大气沉降等^[3,4].部分学者对铅锌矿、铜矿、煤矿、钨钼矿、汞矿、稀土矿、硫铁矿、铜银矿和煤矸石堆等不同类型的矿区周围土壤重金属污染进行了研究^[5~20],分析了重金属空间分布特征,采用单因子指数法、内梅罗综合指数法、地累积指数和生态风险评价等方法进行污染评价,采用同位素示踪、主成分分析、聚类分析、正定矩阵因子分解模型(PMF)和绝对因子得分-多元线性回归模型(APCS-MLR)等方法识别了污染源并进行了定量解析^[21~32].研究发现矿区周围土壤受到重金属元素污染的比例较高,采矿活动和自然高背景对土壤污染的贡献率在50%以上.

本文选取的研究区内采矿历史悠久,在产矿山、矿山废弃地、排土场和选矿厂等场地对土壤污染有着潜在威胁.已有研究对该地区农田土壤、河流沉积物、大气和植被中重金属进行了特征分析和污染评价^[33~45],但缺少对重金属的定量源解析.本文以硫铁矿集中开采区周边土壤为研究对象,分析土壤中Zn、Cu、Cd、Pb、Cr、Ni、Hg和As这8种重金属元素含量的空间分布特征及垂向迁移特征,评价土壤污染情况,基于主成分分析和APCS-MLR模型定量解析土壤重金属污染源,以期为该地区土壤污染防治与修复提供依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区处于长江中下游南岸,隶属于安徽省铜陵市义安区顺安镇,距离铜陵市区18 km,距离铜陵北站10 km,沪渝高速在研究区北部穿过,交通十分便利.研究区属于北亚热带湿润季风气候,全年气候

温和,四季分明,年平均气温16.2℃,多年平均降水量1375.9 mm.地形地貌上南部为低山丘陵,北部地势较平坦,偶见低丘.区内盛冲河发源于研究区南部的碳酸盐岩区,在新丰村处汇入新桥河,流向由南向北,区内有水库1座,为盛冲水库.区内出露的主要地层岩性为泥盆系上统五通组(D_3w)石英砂岩,二叠系下统栖霞组(P_1q)燧石灰岩和沥青质灰岩,第四系全新统(Q_4)褐黄色亚黏土、亚砂土和粉细砂^[46,47].土壤类型以灰潮土、水稻土和红壤土为主.灰潮土和水稻土主要分布于河漫滩和冲沟,红壤土和黄棕壤主要分布在岗地.土地利用现状主要为水田、水浇地、林地和采矿用地,区内农作物主要有水稻、小麦和玉米.

研究区总面积约21 km²,区内有硫铁矿露天采场4处,其中1处在产,3处闭坑,占地面积1.71 km²,方解石露天采场1处,占地0.16 km²;在产硫铁矿山配有污水处理厂,收集矿坑水、排土场渗滤水和井下开采地下水进行处理,日处理酸性废水能力30000 m³·d⁻¹;排土场位于研究区南部沟谷处,最大可堆积废石量 16.73×10^6 m³,目前占地面积0.78 km²;选矿厂位于研究区中部偏西,尾砂通过管道排放至废弃老采坑内.此外,现场调查发现研究区北部存在两处地表裸露无植被覆盖场地,为近期由硫铁矿废渣土平整的场地(图1).

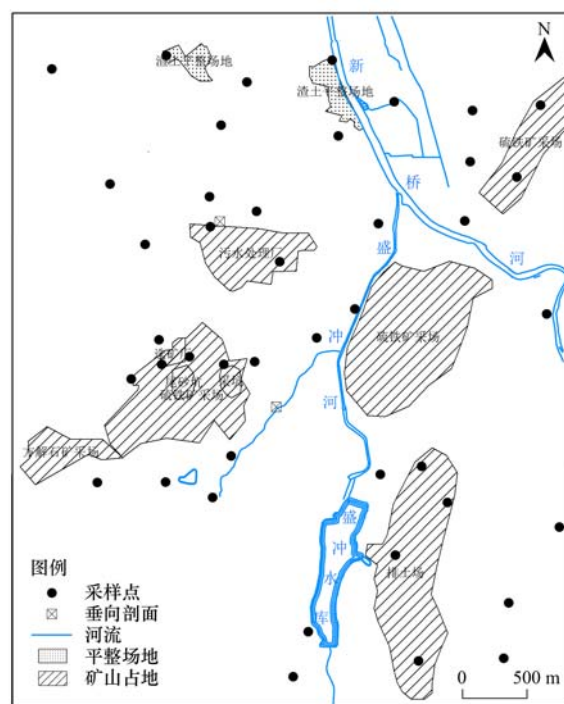


图1 研究区采样位置示意

Fig. 1 Schematic diagram of sampling location in the study area

1.2 样品采集与测定

采用网格化布点法采集表层土壤样品,将研究区划分为1 km²大小的网格20个,每个网格平均采

集样品 2~3 个,采样深度为 0~20 cm,每个采样点中心 20 m 范围内采集 3~5 个点组合,每个样品保证采集自相同的土地利用现状和土壤类型,采样重量不少于 1 kg,采样时去除地表落叶、砂砾石、有机物腐殖质等杂物^[48],共采集土壤样品 42 个.为探究重金属元素在土壤中垂向污染特征,垂向土壤剖面布置在潜在污染区紧邻矿业活动的农田中,机械挖掘浅井,刻槽法取样,采样间隔 25~50 cm,浅井深度 2.50~3.00 m,每个样品采集重量不少于 1 kg,共采集垂向剖面样品 16 个.样品自然风干后去除石块、植物体后过 20 目尼龙筛,取 500 g 样品送中化地质矿山总局中心实验室分析测试.

实验室采取原子荧光光谱法(iCap Qa,美国赛默飞世尔)测定 As 和 Hg,电感耦合等离子体质谱法(iCAP6300,美国赛默飞世尔)测定 Cu、Pb、Ni、Cd,电感耦合等离子体原子发射光谱法(XGY-1011A,中国廊坊)测定 Zn 和 Cr. Zn、Cu、Cd、Pb、Cr、Ni、Hg 和 As 方法检出限分别为 0.03、0.6、0.021、0.5、0.2、0.6、0.005 和 0.2 mg·kg⁻¹^[49].

1.3 土壤污染评价方法

1.3.1 单因子污染指数法

单因子污染指数法表示土壤中某单一重金属元

素的污染程度,其计算公式为:

$$P_i = C_i / S_i \tag{1}$$

式中, P_i 为土壤重金属元素 i 的污染指数; C_i 为重金属元素 i 的实测值(mg·kg⁻¹); S_i 为重金属 i 的评价标准值(mg·kg⁻¹),评价标准值选择为《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)中各重金属元素的风险筛选值^[50],并按照每个样点的 pH 值不区分地类,选择较严格的风险筛选值(表 1).根据污染指数值可划分污染等级程度(表 2),其中 $P_i \leq 1$ 表示清洁, $1 < P_i \leq 2$ 表示轻微污染, $2 < P_i \leq 3$ 表示轻度污染, $3 < P_i \leq 5$ 表示中度污染, $P_i > 5$ 表示重度污染^[23].

表 1 土壤重金属污染风险筛选值

Table 1 Screening value of soil heavy metal pollution risk				
污染物 项目	风险筛选值/mg·kg ⁻¹			
	pH≤5.5	5.5<pH≤6.5	6.5<pH≤7.5	pH>7.5
Zn	200	200	250	300
Cu	50	50	100	100
Cd	0.3	0.3	0.3	0.6
Pb	70	90	120	170
Cr	150	150	200	250
Ni	60	70	100	190
Hg	1.3	1.8	2.4	3.4
As	40	40	30	25

表 2 污染指数等级划分

Table 2 Pollution index grade division					
单因子污染指数		内梅罗综合污染指数		地累积指数	
P_i	污染等级	P_N	污染等级	I_{geo}	污染等级
$P_i \leq 1$	清洁	$P_N \leq 0.7$	清洁	$I_{geo} < 0$	无污染
$1 < P_i \leq 2$	轻微污染	$0.7 < P_N \leq 1.0$	尚清洁(警戒线)	$0 \leq I_{geo} < 1$	无污染到中度污染
$2 < P_i \leq 3$	轻度污染	$1.0 < P_N \leq 2.0$	轻度污染	$1 \leq I_{geo} < 2$	中度污染
$3 < P_i \leq 5$	中度污染	$2.0 < P_N \leq 3.0$	中度污染	$2 \leq I_{geo} < 3$	中度污染到强污染
$P_i > 5$	重度污染	$P_N > 3.0$	重度污染	$3 \leq I_{geo} < 4$	强污染
				$4 \leq I_{geo} < 5$	强污染到极强度污染
				$I_{geo} \geq 5$	极强污染

1.3.2 内梅罗综合污染指数法

内梅罗综合污染指数法是在单因子污染指数的基础上反映出土壤中多种重金属的综合污染程度,并能突出污染最严重的因子,计算公式为:

$$P_N = \sqrt{(P_{ave}^2 + P_{max}^2)/2} \tag{2}$$

式中, P_N 为某个采样点综合所有评价的重金属元素的污染指数, P_{ave} 为该采样点中评价的所有重金属元素中单因子污染指数的平均值, P_{max} 为该采样点中所有重金属元素中单因子污染指数的最大值.根据污染指数值可划分污染等级程度(表 2),其中: $P_N \leq 0.7$,清洁; $0.7 < P_N \leq 1.0$,尚清洁(警戒线); $1.0 < P_N \leq 2.0$ 轻度污染; $2.0 < P_N \leq 3.0$,中度污染级; $P_N > 3.0$,重度污染^[23].

1.3.3 地累积指数法

地累积指数法不仅考虑了自然地质过程造成的背景值的影响,而且也充分注意了人为活动对重金属污染的影响,计算公式如下:

$$I_{geo} = \log_2 [C_i \times (K \times B_i)^{-1}] \tag{3}$$

式中, I_{geo} 为地累积指数; C_i 为重金属 i 实测含量值; K 为修正指数(通常取 1.5); B_i 为重金属 i 的土壤背景值.根据地累积指数 I_{geo} 可划分污染等级程度(表 2),其中: $I_{geo} < 0$,无污染; $0 \leq I_{geo} < 1$,无污染到中度污染; $1 \leq I_{geo} < 2$,中度污染; $2 \leq I_{geo} < 3$,中度污染到强污染; $3 \leq I_{geo} < 4$,强污染; $4 \leq I_{geo} < 5$,强污染到极强度污染; $I_{geo} \geq 5$,极强污染^[17,18].

1.4 绝对因子分析-多元线性回归受体模型

绝对因子分析/多元线性回归受体模型 (APCS-MLR) 的基本原理是将因子分析的主因子得分转化为绝对主因子得分 (APCS), 各重金属元素含量再分别对所有的 APCS 进行多元线性回归, 回归系数用于计算各个主因子对应的污染源对每个样本点位某指标含量的贡献率^[25,27,51,52]. 先对各重金属含量数据标准化:

$$Z_{ij} = (C_{ij} - \bar{C}_j) / \delta_j \tag{4}$$

再对所有重金属元素引入 1 个含量为 0 的人为样本, 计算各重金属 0 含量样本的因子分数, 如式 (5):

$$Z_{j0} = (0 - \bar{C}_j) / \delta_j = -\bar{C}_j / \delta_j \tag{5}$$

最后, 由主因子得分减去 0 含量样本因子分数得到每个样本的 APCS; 将 APCS 作为自变量, 各重金属含量为因变量进行多元线性回归分析, 利用回归系数计算各污染源对土壤重金属的贡献率, 如式 (6):

$$C_j = b_{j0} + \sum_{p=1}^n (b_{jp} \times \text{APCS}_{jp}) \tag{6}$$

式中, Z_{ij} 为第 i 个样本中 j 种重金属含量标准化值; C_{ij} 为第 i 个样本中 j 种重金属含量; $\bar{C}_j$ 为 j 种重金属平均含量; δ_j 为 j 种重金属的标准偏差; Z_{j0} 为重金属元素 j 的 0 含量样本; b_{j0} 为 j 种重金属多元回归的常数项, b_{jp} 为污染源 p 对 j 种重金属的回归系数, APCS_{jp} 是绝对主成分因子得分, n 为因子个数, $b_{jp} \times \text{APCS}_{jp}$ 为污染源 p 对 C_j 的贡献率.

为解决在计算贡献率时出现负数情况, Gholizadeh 等^[51] 提出了绝对值法来计算污染源的贡献率, 解析出来源的贡献率的计算方法如下:

$$\text{PC}_{jp} = \frac{|\text{APCS}_{jp} \times b_{jp}|}{|b_{j0}| + \sum_{p=1}^n |\text{APCS}_{jp} \times b_{jp}|} \times 100\% \tag{7}$$

未知来源的贡献率公式为:

$$\text{PC}_{jp} = \frac{|b_{j0}|}{|b_{j0}| + \sum_{p=1}^n |\text{APCS}_{jp} \times b_{jp}|} \times 100\% \tag{8}$$

式中, PC_{jp} 为污染源 p 对重金属 j 的贡献率.

1.5 数据处理

土壤重金属含量统计、相关性分析、主成分分析 (PCA) 和绝对因子得分-多元线性回归模型 (APCS-MLR) 由 Excel 2019 和 SPSS 22 完成, 箱线图由 Origin 2017 完成, 重金属空间分布图等图件由 ArcGIS 10.4 完成.

2 结果与讨论

2.1 表层土壤重金属含量分析

铜陵地区重金属元素 Zn、Cu、Cd、Pb 和 As 的背景值明显高于江淮流域背景值^[53], 这与该地区长期以来的矿业活动相关^[32,34,45]. 研究区土壤各元素含量特征见表 3, pH 值范围 3.47~8.53, 平均值 6.50, 中值 6.64, 为中酸性土壤. 研究区的 $\omega(\text{Zn})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Pb})$ 、 $\omega(\text{Cr})$ 、 $\omega(\text{Ni})$ 、 $\omega(\text{Hg})$ 和 $\omega(\text{As})$ 的平均值分别为 706.28、370.30、4.34、340.09、80.48、25.87、0.11 和 143.14 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 是铜陵地区背景值^[38] 的 1.03~13.14 倍, 中值分别为 276.00、148.00、1.04、126.50、74.55、25.02、0.09 和 42.75 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 是铜陵地区背景值的 0.99~3.24 倍. Zn、Cu、Cd、Pb、Hg 和 As 重金属元素平均值和中值均高于铜陵地区背景值数倍, 表现出不同程度的富集效应, Cr 和 Ni 平均值与背景值相当, 表明 Cr 和 Ni 这两种元素受到的外部影响较小.

8 种重金属元素的变异系数大小排序为: $\text{Cd} > \text{Cu} > \text{As} > \text{Pb} > \text{Zn} > \text{Hg} > \text{Cr} > \text{Ni}$, 其中 Zn、Cu、Cd、Pb 和 As 的变异系数均大于 100%, 属于强变异, 数据以均值为准的变异程度大, 表明此 5 种元素各采样点间元素含量相差大, 分布不均匀; Cr、Ni 和 Hg

表 3 研究区表层重金属含量统计

Table 3 Statistics of heavy metal content in the surface layer of the study area

项目	pH(无量纲)	Zn	Cu	Cd	Pb	Cr	Ni	Hg	As
最大值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	8.53	3 924.00	2 683.00	41.30	1 820.00	223.00	46.60	0.33	861.00
最小值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	3.47	78.30	33.40	0.10	28.30	30.80	9.24	0.02	10.20
平均值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	6.50	706.28	370.30	4.34	340.09	80.48	25.87	0.11	143.14
中值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	6.64	276.00	148.00	1.04	126.50	74.55	25.02	0.09	42.75
标准差/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	1.25	906.25	526.03	7.41	443.78	33.62	7.73	0.08	193.95
变异系数/%	19	128	142	171	130	42	30	74	135
偏度	-0.35	2.09	2.73	3.50	2.09	1.94	0.39	1.44	2.07
峰度	-0.38	4.27	8.71	14.81	3.79	6.56	1.09	1.21	4.13
铜陵地区背景值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$		113	47.7	0.33	39	73.5	25.2	0.051 0	24.3
江淮流域背景值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$		53.2	24.9	0.104	25.9	69.4	25	0.041	9.4

的变异系数分别为 42%、30% 和 74%，属于中等变异，数据以均值为准的变异程度较大，表明此 3 种元素各采样点间元素含量相差较大。综上，研究区的表层土壤重金属含量受到的外部扰动较大，主要原因可能是矿山采选活动影响。

2.2 表层土壤重金属空间分布特征

采用 ArcGIS 中的反距离权重法对研究区表层土壤重金属元素进行插值分析，由图 2 可知，表层土

壤中 Zn、Cu、Pb、Ni、Hg、As、Cd 和 Cr 含量的空间分布特征基本一致，高值区主要分布在研究区的中部和北部的局部区域，原因为研究区中部为两个大面积的硫铁矿露天采区，重金属含量高值点均位于采场范围内，北部 3 处高值点中两处为由硫铁矿废渣土平整的场地，一处为硫铁矿露天采场范围内。重金属含量低值区主要分布在无矿业活动的山地区域和距离矿业活动较远的农田区。此外，排土

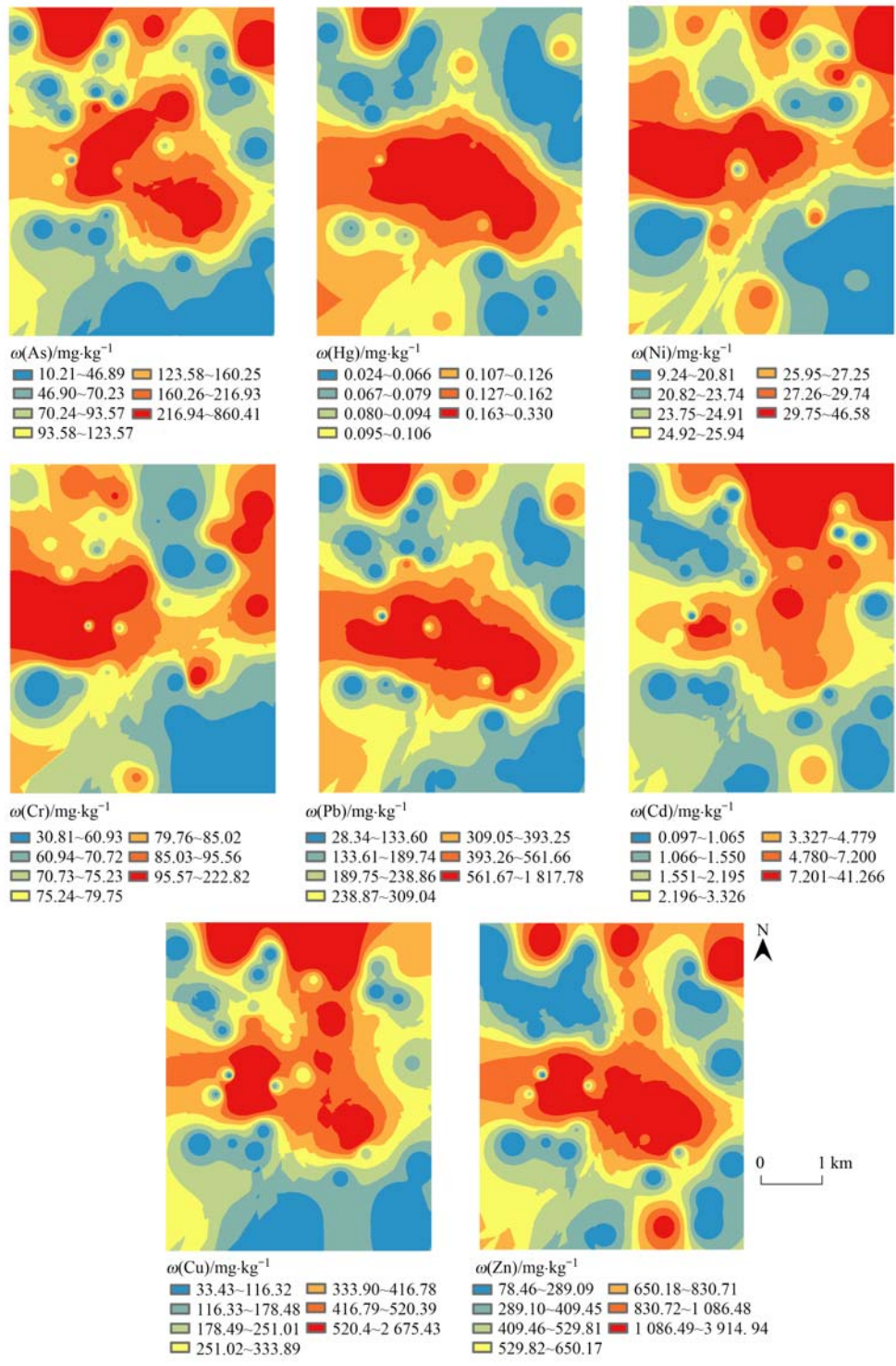


图 2 表层土壤重金属元素空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of heavy metals in surface soil

场的中南部区域样点的重金属含量并未表现出明显的高值,原因可能为排土场为山谷型排土场,废石堆放过程中对周围山地的表层土壤影响较小,堆场上的样点可能为复垦后表层覆盖的客土,土壤中重金属含量未受到矿业活动影响。

总体来看,重金属含量的高值区分布基本与人为采矿活动位置一致,表明研究区表层土壤重金属含量可能受到硫铁矿开采活动影响较大。

2.3 土壤垂向剖面重金属分布特征

垂向剖面 QJ 01 位于两个硫铁矿露天采场中部的农田内,每间隔 20 ~ 30 cm 采取一个样品。除底部 5 个深层样品中 Cu 含量和 2 个深层样品中 Cr 含量低于铜陵地区背景值外,其余样品的 8 种元素含量均超出背景值,其中 Zn 平均超标 2.42 倍, Cu 平均超标 1.01 倍, Cd 平均超标 3.09 倍, Pb 平均超标 7.82 倍, Cr 平均超标 1.06 倍, Ni 平均超标 1.29 倍, Hg 平均超标 2.11 倍, As 平均超标 1.72 倍。结合垂向剖面开挖时,发现土壤中夹杂有大量块石,初步判

定此处土壤并非自然土壤,应为矿山废弃渣土填埋,导致表层至深层样品的绝大多数超标。在垂向变化上,8 种重金属元素的含量均随着深度的增加而降低(图 3),且高含量主要在 1 m 以上位置,表明重金属易在土壤表层富集,向深部迁移较缓慢,这与该地区已有研究的结论基本一致^[47]。

垂向剖面 QJ 02 位于污水处理厂管道下的农田中,农田两侧为自然村庄,现场调查此处附近可见废水的跑冒滴漏现象,垂向剖面每间隔 30 ~ 50 cm 采集一个样品。由图 4 可知,表层样品(0 ~ 20 cm)中除 Ni 外,其余 7 种元素均超过铜陵地区背景值,超标倍数 1.5 ~ 20.4 倍; 50 ~ 70 cm 处样品, Cu 超背景值 2 倍, Cr 和 Ni 稍高于背景值,其余元素均低于背景值; 100 ~ 120 cm 处样品, Zn、Cu、Pb、Cr 和 Ni 高于背景值,深部 3 个样品 8 种元素均低于背景值。总体上来看,此处农田土壤的表层土壤重金属元素超标,表明受到外部扰动,这可能与滴漏的废水有关。深部 5 个样品的 8 种重金属元素的平均值与背

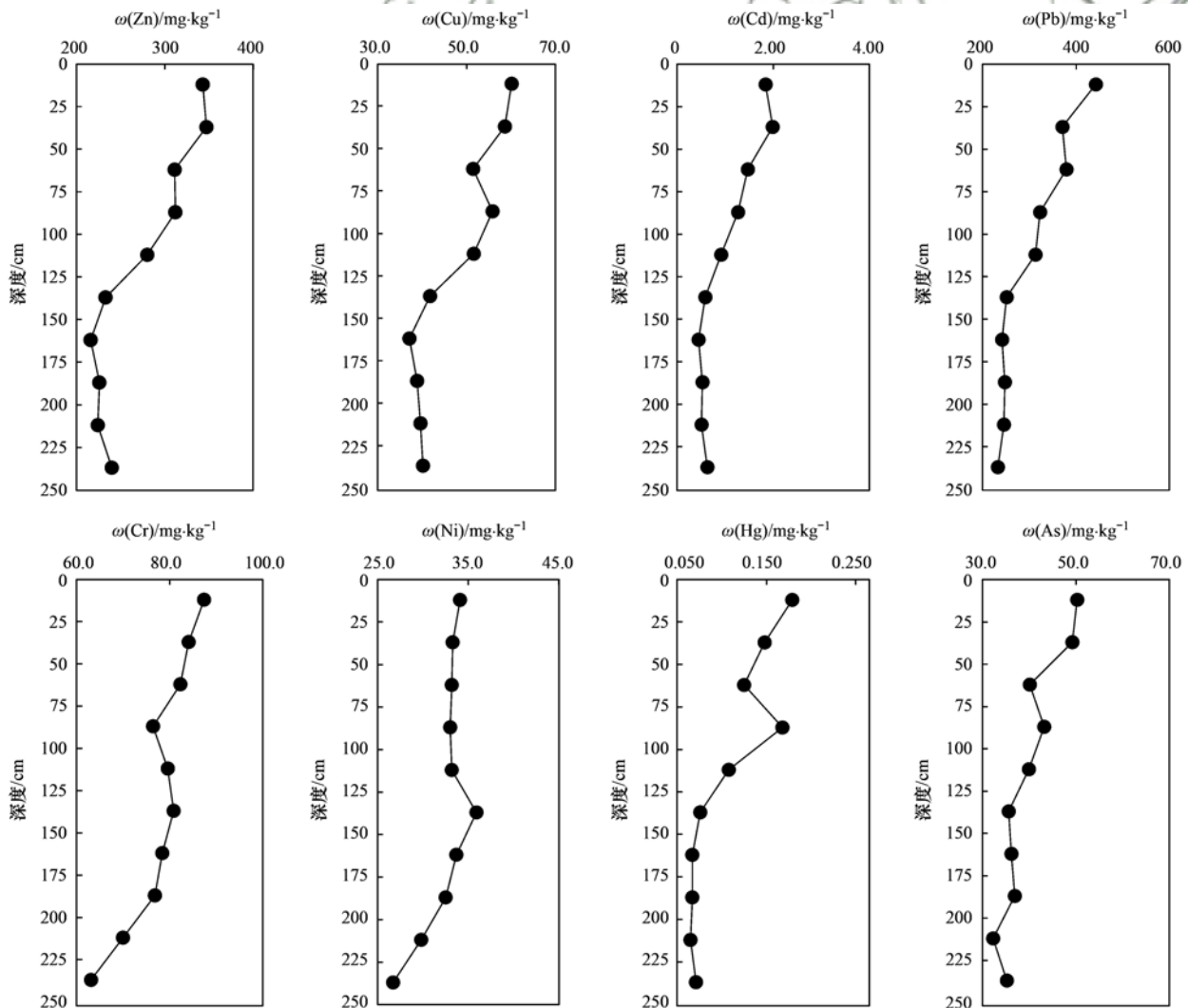


图 3 QJ 01 重金属垂向分布特征

Fig. 3 Vertical distribution characteristics of heavy metals in QJ 01

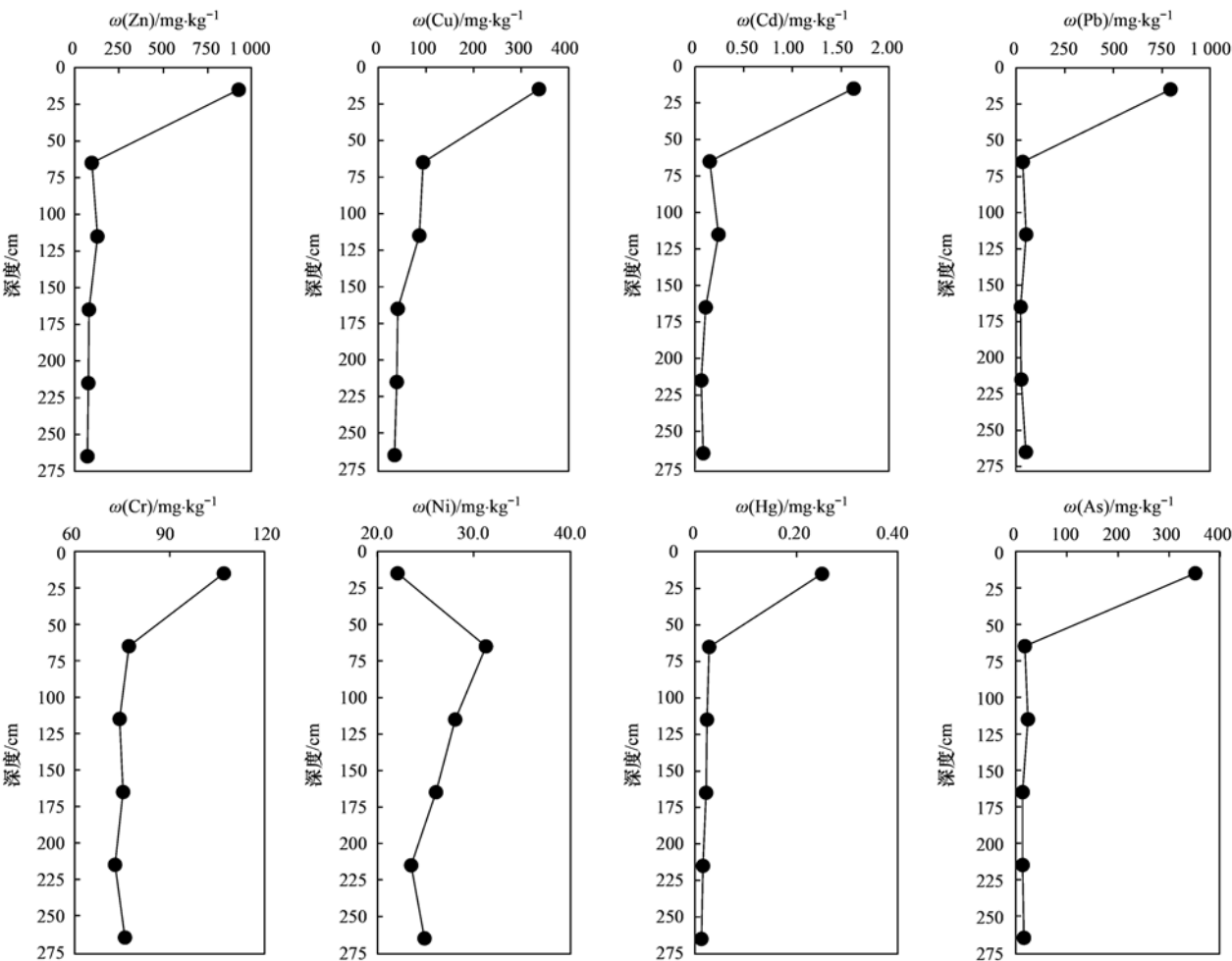


图4 QJ 02 重金属垂向分布特征

Fig. 4 Vertical distribution characteristics of heavy metals in QJ 02

景值相差不大,表现出近自然的状态.但值得引起注意的是 100 ~ 120 cm 处样品重金属元素表现出富集现象,可能与此处为黏土层对上述元素垂向迁移具有较好的阻滞作用有关^[20].

2.4 土壤重金属污染评价

2.4.1 单因子污染指数评价

以《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)^[50]中重金属风险筛选值作为评价标准进行单因子评价,可反映出某个样点中单个元素的污染情况,指数值大于 1 表示该元素存在污染.评价结果表明,所有样品中 Ni 和 Hg 元素单因子指数值小于 1,仅有 1 个样点的 Cr 元素单因子指数值大于 1,表明 Cr、Ni 和 Hg 这 3 种元素几乎无土壤污染风险;Zn、Cu、Cd、Pb 和 As 这 5 种元素存在不同程度的污染风险,受污染的样点占比分别为 52.38%、69.05%、76.19%、57.14% 和 66.67% (图 5),其中 Cd 和 Cu 这两种元素污染程度最为严重,中度污染以上占比分别为 47.62% 和 42.86%.

2.4.2 内梅罗综合污染指数评价

在单因子污染指数评价的基础上,利用公式

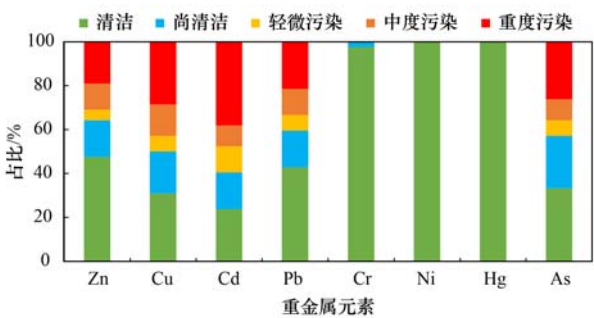


图5 土壤重金属单因子评价污染程度占比

Fig. 5 Proportion of single factor assessment pollution degree of heavy metals in soil

(2)进行内梅罗综合污染指数评价,可反映出样点综合污染情况(图 6).研究区内内梅罗综合污染指数变化范围 0.65 ~ 98.29,平均值 11.06,污染程度警戒线以下占比为 19.05%,中度污染以上占比为 61.90%,整体上污染情况较为严重.从空间分布上看,中度污染点均分布在与硫铁矿开采活动相关的场地上,轻度、中度污染点分布在硫铁矿开采活动场地附近区域,警戒线以下土壤点大多数分布在距离硫铁矿开采活动较远的农田土壤中,表明土

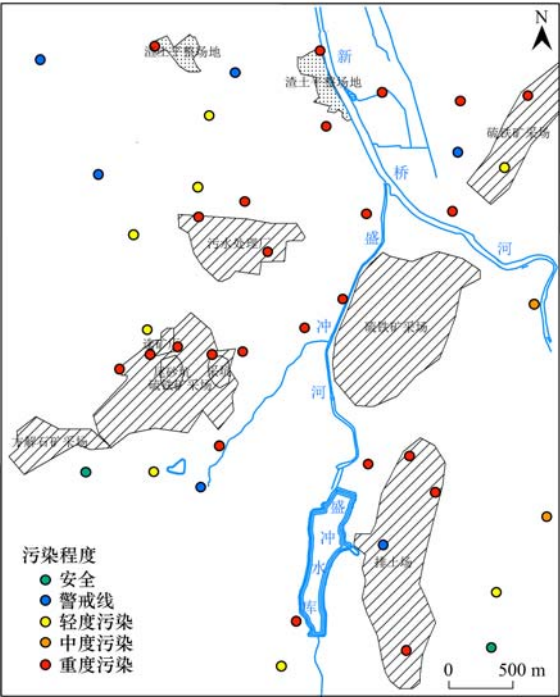


图 6 内梅罗综合污染指数评价污染程度分布
Fig. 6 Distribution of pollution degree assessed by Nemerow comprehensive pollution index

壤污染严重程度与采样点距离硫铁矿采选活动的距离呈反比.

2.4.3 地累积指数评价

地累积指数评价既可以考虑自然地质过程造成的背景值影响也能判别人为活动的影响,因此采用研究区的背景值^[38]作为评价参比值. Cr 和 Ni 的地累积指数平均值为 -0.56 和 -0.62,属无污染($I_{geo} < 0$); Hg 和 As 的地累积指数平均值为 0.21 和 0.87,属轻度污染~中度污染($0 \leq I_{geo} < 1$); Zn、Cu、Cd 和 Pb 的地累积指数平均值为 1.09、1.28、1.53 和 1.53,属中度污染($1 \leq I_{geo} < 2$). Zn、Cu、Cd、Pb、Hg 和 As 地累积指数值的箱体较长且主要位

于轻污染~强污染范围之内(图 7),占比分别为 45.24%、52.38%、35.71%、50.00%、57.14% 和 40.48%,表明土壤中这 6 种元素除了受地质背景影响外,受到的人为活动影响比较明显,污染程度主要为轻污染~强污染,个别样点污染水平达到强污染~极强污染.

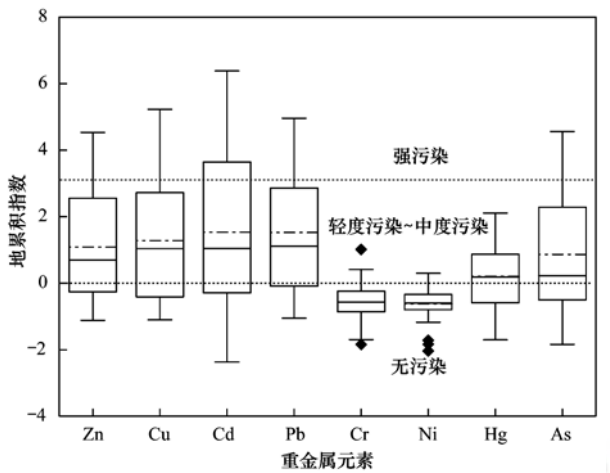


图 7 土壤重金属地累积指数箱线图
Fig. 7 Boxplot of soil heavy metal accumulation index

2.5 土壤污染来源解析

2.5.1 相关性分析

对土壤中 8 种重金属元素进行相关性分析,可根据相关系数大小来判定重金属元素来源的同源性,相关性系数越大表明同一来源可能性越大,反之说明存在多个来源相互作用. 从表 4 中可看出 Zn、Cu、Pb、Hg 和 As 这 5 种元素两两之间在 0.01 水平上显著相关,相关系数 0.795~0.875,表明可能具有相同的来源; Cr 和 Ni 在 0.01 水平上显著相关,相关系数为 0.772,表明这两种元素有着相同来源; Cd 与 Cu 和 Zn 在 0.01 水平上显著相关,相关系数分别为 0.601 和 0.395,表明 Cd 与 Cu 和 Zn 可能具有相同或相似来源.

表 4 土壤重金属元素相关分析¹⁾

Table 4 Correlation analysis of heavy metals in soil

	Zn	Cu	Cd	Pb	Cr	Ni	Hg	As
Zn	1							
Cu	0.815 **	1						
Cd	0.395 **	0.601 **	1					
Pb	0.875 **	0.718 **	0.264	1				
Cr	0.141	-0.008	-0.122	0.234	1			
Ni	0.369 *	0.239	0.201	0.320 *	0.772 **	1		
Hg	0.803 **	0.615 **	0.205	0.913 **	0.267	0.321 *	1	
As	0.795 **	0.743 **	0.256	0.868 **	0.197	0.306 *	0.761 **	1

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

2.5.2 主成分分析重金属来源

利用 SPSS 22 对原始数据进行标准化处理,对标准化后的数据进行 KMO 检验和 Bartlett 球度检

验,KMO 统计量值为 0.753(大于 0.5),巴特利特球形检验的结果为 0.00(小于 0.05),表明数据适合做主成分因子分析. 根据主成分特征值大于 1 和前 m

个主成分累积频率大于 85% 两个原则相结合的方法提取 3 个主因子。3 个主因子特征值分别为 4.564、1.645 和 0.996，累积总方差贡献率为 90.057%，表明 3 个主因子可解释研究区 8 种重金属元素 90.057% 的信息。其中因子载荷系数 > 0.75 为强载荷，因子载荷系数 0.5 ~ 0.75 为中等载荷，因子载荷系数 (0.3 ~ 0.5) 为弱载荷。主成分分析结果见表 5。

表 5 主成分分析结果

Table 5 Result of principal component analysis			
项目	旋转后的主因子载荷系数		
	PC1	PC2	PC3
Zn	0.881	0.13	0.307
Cu	0.731	-0.011	0.582
Cd	0.15	0.009	0.958
Pb	0.958	0.147	0.095
Cr	0.113	0.938	-0.178
Ni	0.182	0.920	0.209
Hg	0.912	0.179	0.013
As	0.900	0.122	0.132
特征值	4.564	1.645	0.996
方差贡献率/%	57.050	20.560	12.448
累积贡献率/%	57.050	77.609	90.057

主因子 1 (PC1) 解释方差变量的 57.05%，Zn、Cu、Pb、Hg 和 As 在 PC1 上有较高的正载荷，分别为 0.881、0.731、0.958、0.912 和 0.900，且以上元素两两间在 0.01 水平上显著正相关，表明此 5 种重金属元素来源相似。5 种重金属元素的平均值超过研究区背景值，变异系数 0.74 ~ 1.42，空间分布上与采矿活动较一致，且 Zn、Cu、Pb 和 As 这 4 种元素大部分样点超过了农用地风险筛选值，表明这些元素可能受到了人类活动的影响。研究区为矽卡岩型硫铁矿集中开采区，采矿历史悠久，硫化物矿石中含有较高含量的 Zn、Cu 和 Pb，这 3 种重金属元素具有相似的地球化学性质^[46]，在矿石开采、选矿和废渣堆放等过程中，矿石和围岩中重金属元素在风化作用和雨水冲蚀作用下加速迁移转化至土壤中，表层土壤样品中 3 种元素的高值点均位于采矿用地和矿山周边的农用地中。Hg 是典型的亲硫元素，在硫化矿物中常常与 Zn 和 Cu 伴生，表层样品中 Hg 的平均值高于背景值，但未超过农用地风险筛选值，表明 Hg 可能来源于岩石矿物中的迁移转化。研究区 As 的背景值和表层样品中的平均值均远高于江淮流域背景值，两个垂向剖面深部样品中 As 的最小值高于江淮流域 As 的背景值。有研究表明矿床是该地区 As 污染的主要原因^[43,45]，特殊的地质背景导致区内 As 含量较高^[44]；As 常伴生于 Cu、Zn 和 Pb 等硫化矿物中，采矿活动加剧了 As 在土壤中的累

积，一些含 As 的硫化物和氧化物岩石易在风化作用和雨水冲蚀作用下迁移到土壤中^[47]。张鑫^[47]对研究区内矿床矿石风化过程进行过相关研究，发现在岩石风化过程中 Zn、Cu 和 As 明显流失，在岩-土界面中 Cu、Zn、Pb 和 Hg 明显富集。综上所述，主因子 1 可以推断为地质高背景和采矿活动叠加综合影响源。

主因子 2 (PC2) 解释方差变量 20.56%，Cr 和 Ni 在 PC2 上具有较高的正载荷，分别为 0.938 和 0.920。Cr 和 Ni 在 0.01 水平上显著相关，相关系数为 0.772，表明两种元素的来源相似。两种元素未出现污染点位，平均值与研究区背景值相差不大，变异系数均小于 0.5，表明受到外界扰动较小。此外，潜在污染区的两个垂向剖面中表层土壤样品 Cr 含量略高于深层土壤样品，但深层样品中 Cr 含量变化范围不大；两个垂向剖面中 Ni 含量在表层样品和深层样品中未表现出明显的逐步递减规律性，表明 Cr 和 Ni 受到采矿活动影响，但影响不大。多数研究认为 Cr 和 Ni 通常来源于成土母岩自然风化成土过程^[17,18,22]，因此可推断主因子 2 为成土母质风化的自然来源。

主因子 3 (PC3) 解释方差变量 12.448%，Cd 在 PC3 上的载荷系数为 0.958，为强载荷；Cu 在主因子 3 上载荷系数为 0.582，为中等载荷；Zn 在主因子 3 上载荷系数为 0.307，为弱载荷；Cd 与 Cu 和 Zn 在 0.01 水平上显著相关，表明 Cd 与 Cu 和 Zn 的来源有一定的相似性。Cd 的变异系数为 1.71，属于强变异，且研究区背景值远高于江淮流域区域背景值，超标农用地风险筛选值的点位数占比最高，垂向剖面反映出 Cd 在表层土壤中明显富集特征，表明受到明显的外部干扰。Cd、Pb 和 Zn 化学性质相似，是工业排放的典型元素，有研究表明矿区附近土壤 Cd 超标受工业排放和农业上化肥、农药施用影响较大^[21,26,27,31]，交通源也会造成土壤中 Cd 累积^[32]，研究区内未超标点位位于山坡林地和远离矿山、交通道路的农田中。此外，有研究发现本地区大气沉降中 Cd、Cu、As 和 Zn 对土壤中这 4 种元素的富集贡献很大，Cd、Cu 和 Zn 主要源自采矿扬尘和冶金烟尘^[35,36]。综上，推断主因子 3 为采矿粉尘、冶金烟尘和交通废气造成的大气沉降和农业上农药、化肥施用共同作用的混合源，即大气沉降和农业综合源。

2.5.3 基于 APCS-MLR 的污染源贡献率定量计算
根据 APCS-MLR 受体模型的基本原理，将因子分析 (主成分分析) 的主因子得分转化为绝对主因子得分 (APCS)，8 种重金属元素的含量对 3 个绝对主因子进行多元线性回归分析，可得到 Zn、Cu、

Cd、Pb、Cr、Ni、Hg 和 As 的拟合度 R^2 分别为 0.88、0.86、0.94、0.94、0.92、0.92、0.85 和 0.83,结果均大于 0.75,且各重金属元素预测含量与实测含量比值均接近于 1,说明基于 APCS-MLR 模型的源解析结果具有较高准确性。

主成分分析中识别出 3 个主因子,根据 APCS-MLR 模型,可计算出 3 个识别确定污染源的贡献率和 1 个未知污染源的贡献率。结果显示(图 8),研究区土壤中 Zn、Cu、Pb 和 As 主要来源为地质高背景和采矿活动,来源贡献率分别为 37.82%、41.91%、43.49% 和 46.63%,Zn、Pb 和 As 受到成土母质风化的自然来源贡献也较大,贡献率分别为 34.02%、40.88% 和 38.52%,Cu 受到大气沉降和农业综合源贡献率为 41.30%。Cr、Ni 和 Hg 的主要来源为成土母质风化的自然来源,贡献率分别为 91.95%、73.68% 和 35.60%,Ni 还受到未知来源贡献率为 20.56%,Hg 受到地质高背景和采矿活动、未知来源贡献率为 29.87% 和 34.05%。Cd 的主要来源为采矿粉尘、冶金烟尘、交通废气造成的大气沉降和农业上农药、化肥施用共同作用的综合源,贡献率为 81.81%,地质高背景和采矿活动的贡献率为 10.34%。未知来源可能为工业废气排放、燃煤和酸性废水污染^[41]等多种污染源,需要进一步探究。

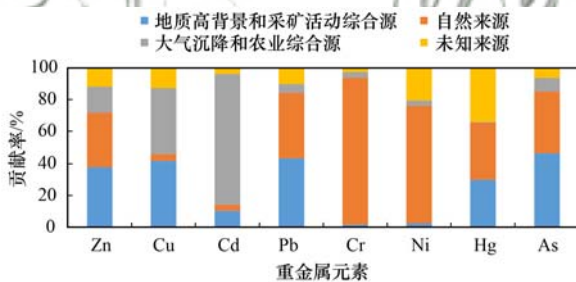


图 8 土壤重金属污染源贡献率

Fig. 8 Contribution rate of soil heavy metal pollution sources

3 结论

(1)研究区土壤为中酸性土壤,除 Cr 和 Ni 含量平均值与地区背景值相当外,Zn、Cu、Cd、Pb、Hg 和 As 重金属元素含量平均值和中值均高于地区背景值数倍,表现出不同程度的富集效应。在空间分布上,重金属元素高值区主要分布在研究区的中部和北部的局部区域,基本与人为矿山活动位置一致。

(2)研究区潜在污染区土壤中的 8 种重金属元素含量在垂向变化上随着深度的增加而降低,易在土壤表层富集,向深部迁移较缓慢,黏土层对重金属元素的向下迁移有明显的阻滞作用,造成中部层位富集。

(3)单因子污染指数评价显示 Zn、Cu、Cd、Pb

和 As 这 5 种元素存在不同程度的污染风险,Cd 和 Cu 两种元素污染程度最为严重,中度污染以上占比分别为 47.62% 和 42.86%;内梅罗综合污染指数评价显示研究区土壤样点中度污染以上占比 61.90%;地累积指数评价显示 Zn、Cu、Cd、Pb、Hg 和 As 这 6 种重金属元素污染程度主要为轻污染~强污染。3 种指数评价结果基本一致。

(4)研究区土壤中重金属元素主要来源为地质高背景和采矿活动综合源、成土母质风化的自然来源、大气沉降与农业综合源和未知来源。其中 Zn、Cu、Pb、As 和 Hg 主要来源为地质高背景和采矿活动综合源、成土母质风化的自然来源,Cr 和 Ni 主要来源为成土母质风化的自然来源,Cd 的主要来源为大气沉降和农业综合源。

参考文献:

- [1] 环境保护部,国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报 [EB/OL]. http://www.gov.cn/govweb/foot/2014-04/17/content_2661768.htm, 2014-04-17.
- [2] 中华人民共和国生态环境部. 2021 中国生态环境状况公报 [EB/OL]. http://www.gov.cn/xinwen/2022-05/28/content_5692799.htm, 2022-05-28.
- [3] 于旦洋,王颜红,丁茯,等. 近十年来我国土壤重金属污染源解析方法比较[J]. 土壤通报, 2021, 52(4): 1000-1008.
Yu D Y, Wang Y H, Ding F, *et al.* Comparison of analysis methods of soil heavy metal pollution sources in China in last ten years[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021, 52(4): 1000-1008.
- [4] 陈雅丽,翁莉萍,马杰,等. 近十年中国土壤重金属污染源解析研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(10): 2219-2238.
Chen Y L, Weng L P, Ma J, *et al.* Review on the last ten years of research on source identification of heavy metal pollution in soils[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38(10): 2219-2238.
- [5] Wang Z, Luo Y F, Zheng C L, *et al.* Spatial distribution, source identification, and risk assessment of heavy metals in the soils from a mining region: a case study of Bayan Obo in northwestern China [J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2021, 27(5): 1276-1295.
- [6] Fang H X, Gui H R, Yu H, *et al.* Characteristics and source identification of heavy metals in abandoned coal-mining soil: a case study of Zhuxianzhuang coal mine in Huaibei coalfield (Anhui, China)[J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2021, 27(3): 708-723.
- [7] Zhu X C, Cao L X, Liang Y. Spatial distribution and risk assessment of heavy metals inside and outside a typical lead-zinc mine in southeastern China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(25): 26265-26275.
- [8] Gao Y F, Liu H L, Liu G X. The spatial distribution and accumulation characteristics of heavy metals in steppe soils around three mining areas in Xilinhot in Inner Mongolia, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24(32): 25416-25430.
- [9] Zhou M, Liao B, Shu W S, *et al.* Pollution assessment and potential sources of heavy metals in agricultural soils around four Pb/Zn mines of Shaoguan city, China[J]. Soil and Sediment

- Contamination; An International Journal, 2015, **24**(1): 76-89.
- [10] Wang J, Su J W, Li Z G, *et al.* Source apportionment of heavy metal and their health risks in soil-dustfall-plant system nearby a typical non-ferrous metal mining area of Tongling, Eastern China [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **254**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113089.
- [11] 郭光海, 王晨昇, 陈鸿汉. 内蒙古废弃钨钼矿区周围土壤重金属污染生态环境评价及成因分析[J]. *中国地质*, 2020, **47**(6): 1838-1852.
Wu G H, Wang C S, Chen H H. Eco- environmental assessment and genetic analysis of heavy metal pollution in the soil around the abandoned tungsten- molybdenum mine area in Inner Mongolia[J]. *Geology in China*, 2020, **47**(6): 1838-1852.
- [12] 湛天丽, 黄阳, 滕应, 等. 贵州万山汞矿区某农田土壤重金属污染特征及来源解析[J]. *土壤通报*, 2017, **48**(2): 474-480.
Zhan T L, Huang Y, Teng Y, *et al.* Pollution characteristics and sources of heavy metals in farmland soil in Wanshan mining areas, Guizhou Province[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, **48**(2): 474-480.
- [13] 张扣扣, 贺婧, 钟艳霞, 等. 基于 GIS 对宁夏某铜银矿区周边土壤重金属来源解析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(11): 5192-5204.
Zhang K K, He J, Zhong Y X, *et al.* Identification of soil heavy metal sources around a copper-silver mining area in Ningxia based on GIS[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(11): 5192-5204.
- [14] 王哲, 赵莹晨, 骆逸飞, 等. 内蒙古白云鄂博矿区土壤稀土元素污染特征及评价[J]. *环境科学*, 2021, **42**(3): 1503-1513.
Wang Z, Zhao Y C, Luo Y F, *et al.* Characteristics and evaluation of soil rare earth element pollution in the Bayan Obo mining region of Inner Mongolia[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(3): 1503-1513.
- [15] 陈航, 王颖, 王树. 铜山矿区周边农田土壤重金属来源解析及污染评价[J]. *环境科学*, 2022, **43**(5): 2719-2731.
Chen H, Wang Y, Wang S. Source analysis and pollution assessment of heavy metals in farmland soil around Tongshan mining area[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(5): 2719-2731.
- [16] 李志涛, 王夏晖, 何俊, 等. 四川省江安县某硫铁矿周边农田土壤重金属来源解析及污染评价[J]. *农业环境科学学报*, 2019, **38**(6): 1272-1279.
Li Z T, Wang X H, He J, *et al.* Source identification and pollution assessment of heavy metals in farmland soils around a pyrite mining area in Jiang'an county, Sichuan province, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, **38**(6): 1272-1279.
- [17] 陈盟, 潘泳兴, 黄奕翔, 等. 阳朔典型铅锌矿区流域土壤重金属空间分布特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(10): 4545-4555.
Chen M, Pan Y X, Huang Y X, *et al.* Spatial distribution and sources of heavy metals in soil of a typical Lead-Zinc mining area, Yangshuo[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(10): 4545-4555.
- [18] 成晓梦, 孙彬彬, 吴超, 等. 浙中典型硫铁矿农田土壤重金属含量特征及健康风险[J]. *环境科学*, 2022, **43**(1): 442-453.
Cheng X M, Sun B B, Wu C, *et al.* Heavy metal concentration characteristics and health risks of farmland soils in typical pyrite mining area of the central Zhejiang Province, China [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(1): 442-453.
- [19] 马杰, 刘萍, 刘今朝, 等. 重庆市煤矸山周边农用地土壤重金属污染评价和定量溯源解析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(12): 5698-5709.
Ma J, Liu P, Liu J Z, *et al.* Pollution evaluation and quantitative traceability analysis of heavy metals in farmland soils around the gangue heap of a coal mine in Chongqing[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(12): 5698-5709.
- [20] 孙厚云, 卫晓锋, 贾凤超, 等. 承德伊逊河钒钛磁铁矿小流域土壤重金属地球化学基线及生态风险累积效应[J]. *地质学报*, 2021, **95**(2): 588-604.
Sun H Y, Wei X F, Jia F C, *et al.* Geochemical baseline and ecological risk accumulation effect of soil heavy metals in the small-scale drainage catchment of V-Ti-magnetite in the Yixun River basin, Chengde [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, **95**(2): 588-604.
- [21] 贾中民. 渝西北土壤重金属污染特征、源解析与生态健康风险评价[D]. 重庆: 西南大学, 2020.
Jia Z M. Characteristics, source apportionment, and ecological health risk assessment of soil heavy metals contamination in Northwest Chongqing [D]. Chongqing: Southwest University, 2020.
- [22] 王诚煜, 李玉超, 于成广, 等. 葫芦岛东北部土壤重金属分布特征及来源解析[J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(11): 5227-5236.
Wang C Y, Li Y C, Yu C G, *et al.* Distribution characteristics and sources of soil heavy metals in soils in the area of northeastern Huludao city [J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(11): 5227-5236.
- [23] 赖书雅, 董秋瑶, 宋超, 等. 南阳盆地东部山区土壤重金属分布特征及生态风险评价[J]. *环境科学*, 2021, **42**(11): 5500-5509.
Lai S Y, Dong Q Y, Song C, *et al.* Distribution characteristics and ecological risk assessment of soil heavy metals in the eastern mountainous area of the Nanyang Basin [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(11): 5500-5509.
- [24] 姜凤成, 李义连, 杨森, 等. 秦王川盆地土壤重金属来源、分布及污染评价[J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(6): 2243-2252.
Jiang F C, Li Y L, Yang S, *et al.* Source analysis, distribution and pollution assessment of the soil heavy metals in the Qinwangchuan basin [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(6): 2243-2252.
- [25] 霍明珠, 高秉博, 乔冬云, 等. 基于 APCS-MLR 受体模型的农田土壤重金属源解析[J]. *农业环境科学学报*, 2021, **40**(5): 978-986.
Huo M Z, Gao B B, Qiao D Y, *et al.* Source apportionment of heavy metals in farmland soil based on the APCS-MLR model [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, **40**(5): 978-986.
- [26] 宋清泉, 徐夕博, 吴泉源, 等. 基于 PMF 模型的土壤重金属定量源解析及环境风险评价[J]. *湖南师范大学自然科学学报*, 2022, **45**(1): 76-83.
Song Q Q, Xu X B, Wu Q Y, *et al.* Quantitative analysis of environmental risk of heavy metal sources in soil based on PMF mode [J]. *Journal of Natural Science of Hunan Normal University*, 2022, **45**(1): 76-83.
- [27] 张旺, 高珍冉, 邵粤鹰, 等. 基于 APCS-MLR 受体模型的贵州喀斯特矿区水田土壤重金属源解析[J]. *农业工程学报*, 2022, **38**(3): 212-219.
Zhang W, Gao Z R, Tai Y Y, *et al.* Source analysis of the heavy

- metals in paddy field soils in Karst mining areas of Guizhou using APCS-MLR receptor model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, **38**(3): 212-219.
- [28] 孙慧, 毕如田, 郭颖, 等. 广东省土壤重金属溯源及污染源解析[J]. 环境科学学报, 2018, **38**(2): 704-714.
- Sun H, Bi R T, Guo Y, *et al.* Source apportionment analysis of trace metal contamination in soils of Guangdong province, China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, **38**(2): 704-714.
- [29] 夏子书, 白一茹, 王幼奇, 等. 基于 PMF 模型的宁南山区小流域土壤重金属空间分布及来源解析[J]. 环境科学, 2022, **43**(1): 432-441.
- Xia Z S, Bai Y R, Wang Y Q, *et al.* Spatial distribution and source analysis of soil heavy metals in a small watershed in the mountainous area of Southern Ningxia based on PMF model [J]. Environmental Science, 2022, **43**(1): 432-441.
- [30] 陈丹青, 谢志宜, 张雅静, 等. 基于 PCA/APCS 和地统计学的广州市土壤重金属来源解析[J]. 生态环境学报, 2016, **25**(6): 1014-1022.
- Chen D Q, Xie Z Y, Zhang Y J, *et al.* Source apportionment of soil heavy metals in Guangzhou based on the PCA/APCS model and geostatistics [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, **25**(6): 1014-1022.
- [31] 叶盼青, 阿不都艾尼·阿不里, 孙小丽, 等. 基于 PMF 模型的天山北坡经济带土壤重金属污染评价及来源分析[J]. 中国环境科学, 2022, **42**(10): 4704-4712.
- Ye P Q, Abliz A, Sun X L, *et al.* Evaluation and source analysis of soil heavy metal pollution in economic belt of northern slope of Tianshan Mountains based on PMF model [J]. China Environmental Science, 2022, **42**(10): 4704-4712.
- [32] 汤金来, 赵宽, 胡睿鑫, 等. 滁州市表层土壤重金属含量特征、源解析及污染评价[J]. 环境科学, 2023, **44**(6): 3562-3572.
- Tang J L, Zhao K, Hu R X, *et al.* Heavy metals concentration, source and pollution assessment in topsoil of Chuzhou city [J]. Environmental Science, 2023, **44**(6): 3562-3572.
- [33] 李湘凌, 周涛发, 袁峰, 等. 安徽铜陵新桥矿区土壤 Pb 的富集特征及 Pb 同位素源解析[J]. 地质论评, 2015, **61**(6): 1347-1358.
- Li X L, Zhou T F, Yuan F, *et al.* Pb enrichment and Pb isotope source appointment of soil in the Xinqiao mining area, Tongling, Anhui [J]. Geological Review, 2015, **61**(6): 1347-1358.
- [34] 王银泉. 铜陵市新桥矿区土壤重金属污染评价及源解析研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2014.
- Wang Y Q. Pollution assessment and source apportionment of heavy metals in soils around Xinqiao mining area in Tongling, Anhui province [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2014.
- [35] 池源. 安徽铜陵地区土壤和河流沉积物重金属分布特征与污染评价[D]. 南京: 南京大学, 2013.
- Chi Y. Distribution characteristics and pollution evaluation of soil and river sediment heavy metals in Tongling, Anhui [D]. Nanjing: Nanjing University, 2013.
- [36] 殷汉琴. 铜陵市大气降尘源解析及其对土壤重金属累积的影响[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2006.
- Yin H Q. Source apportionment of atmospheric dustfall and its effect on heavy metal accumulation in soil in Tongling city [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2006.
- [37] 殷汉琴, 周涛发, 陈永宁, 等. 铜陵市大气降尘中 Cd 元素污染特征及其对土壤的影响[J]. 地质论评, 2011, **57**(2): 218-222.
- Yin H Q, Zhou T F, Chen Y N, *et al.* Pollution character of Cd in dust fall of Tongling city and its effect on soil [J]. Geological Review, 2011, **57**(2): 218-222.
- [38] 贾晗, 刘军省, 殷显阳, 等. 安徽铜陵硫铁矿集中开采区矿山地质环境评价研究[J]. 地学前缘, 2021, **28**(4): 131-141.
- Jia H, Liu J X, Yin X Y, *et al.* Ecological evaluation of the Tongling pyrite mining district in Anhui province [J]. Earth Science Frontiers, 2021, **28**(4): 131-141.
- [39] 贾晗, 刘军省, 王春光, 等. 基于铜陵地区地球化学基线的土壤重金属污染评价及分析[J]. 环境工程, 2019, **37**(5): 50-55.
- Jia H, Liu J X, Wang C G, *et al.* Evaluation and analysis of soil heavy metal pollution based on geochemical baseline in Tongling area [J]. Environmental Engineering, 2019, **37**(5): 50-55.
- [40] 夏毅民, 郑刘根, 邱征, 等. 铜陵某富硫尾矿库周边土壤重金属污染特征及风险评价[J]. 环境污染与防治, 2020, **42**(4): 493-499.
- Xia Y M, Zheng L G, Qiu Z, *et al.* Heavy metal pollution characteristics and risk assessment of soil around a sulfur-rich tailings pond in Tongling [J]. Environmental Pollution & Control, 2020, **42**(4): 493-499.
- [41] 王娟. 铜陵新桥矿区大气—植物—土壤系统重金属污染特征及铅同位素源解析[D]. 合肥: 安徽大学, 2019.
- Wang J. Pollution characteristics and lead isotope source apportionment for heavy metals in atmosphere-plant-soil system around Xinqiao mining area in Tongling [D]. Hefei: Anhui University, 2019.
- [42] 查建军, 孙庆业, 徐欣如, 等. 酸性矿山废水对稻田土壤元素组成的影响——以铜陵某处硫铁矿为例[J]. 西南农业学报, 2019, **32**(8): 1817-1824.
- Zha J J, Sun Q Y, Xu X R, *et al.* Effect of acid mine drainage on elemental composition in paddy soil: case study of pyrite in Tongling city [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2019, **32**(8): 1817-1824.
- [43] 祁轶宏. 基于 GIS 的铜陵地区土壤重金属元素的空间分布及污染评价[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2006.
- Qi Y H. The study on the spatial distribution and pollution assessment of heavy metal elements in soil of Tongling area based on Gis [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2006.
- [44] 李湘凌, 祁轶宏, 周涛发, 等. 基于 Hazen 概率曲线确定铜陵土壤 As 元素含量[J]. 武汉理工大学学报, 2006, **28**(12): 56-60.
- Li X L, Qi Y H, Zhou T F, *et al.* Research of background content for As element of soil based on Hazen probability curve in Tongling [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2006, **28**(12): 56-60.
- [45] 白晓宇, 袁峰, 李湘凌, 等. 铜陵矿区土壤重金属元素的空间变异及污染分析[J]. 地学前缘, 2008, **15**(5): 256-263.
- Bai X Y, Yuan F, Li X L, *et al.* Spatial variance and pollution analysis of soil heavy metals in Tongling Mining area, South China [J]. Earth Science Frontiers, 2008, **15**(5): 256-263.
- [46] 张宇, 邵拥军, 刘忠法, 等. 安徽铜陵新桥铜硫铁矿床地球化学特征及成因分析[J]. 中国有色金属学报, 2013, **23**(6): 1666-1680.
- Zhang Y, Shao Y J, Liu Z F, *et al.* Geochemical characteristics and genesis of Xinqiao Cu-S-Fe deposit, Tongling, Anhui province, China [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, **23**(6): 1666-1680.
- [47] 张鑫. 安徽铜陵矿区重金属元素释放迁移地球化学特征及其环境效应研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2005.
- Zhang X. Geochemical characteristics and environmental effects

of heavy-metal elements releasing and migrating in Tongling mine area, Anhui Province [J]. Hefei: Hefei University of Technology, 2005.

[48] DZ/T 0295-2016, 土地质量地球化学评价规范[S].

[49] DZ/T 0279-2016, 区域地球化学样品分析方法[S].

[50] GB 15618-2018, 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)[S].

[51] Gholizadeh M H, Melesse A M, Reddi L, *et al.* Water quality assessment and apportionment of pollution sources using APCS-MLR and PMF receptor modeling techniques in three major rivers of South Florida[J]. Science of the Total Environment, 2016, **566-567**: 1552-1567.

[52] Cheng G W, Wang M J, Chen Y, *et al.* Source apportionment of water pollutants in the upstream of Yangtze River using APCS-MLR[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2020, **42** (11): 3795-3810.

[53] 陈兴仁, 陈富荣, 贾十军, 等. 安徽省江淮流域土壤地球化学基准值与背景值研究[J]. 中国地质, 2012, **39**(2): 302-310.

Chen X R, Chen F R, Jia S J, *et al.* Soil geochemical baseline and background in Yangtze River-Huaihe River basin of Anhui province[J]. Geology in China, 2012, **39**(2): 302-310.



CONTENTS

Pollution Characteristics and Transport contributions of Ambient Ozone and Volatile Organic Compounds in Southern Hebei Cities	ZHAO Jiang-wei, NIE Sai-sai, YU Yu-jie, <i>et al.</i> (4775)
Temporal and Spatial Distributions of O ₃ Concentration and Potential Source Area Analysis of Hexi Corridor Based on Satellite and Ground Monitoring	LI Jin-chao, CAO Chun, FANG Feng, <i>et al.</i> (4785)
Spatial and Temporal Variations in Ozone Pollution and Sensitivity Characteristics in Hainan Island	FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, <i>et al.</i> (4799)
Temporal and Spatial Characteristics of Troposphere O ₃ and Precursors HCHO and NO ₂ in East China	WANG Xiao-wen, LIU Min-xia, WANG Yang, <i>et al.</i> (4809)
Evolution Characteristics of Atmospheric Formaldehyde Emissions in Guangdong Province from 2006 to 2020	MING Gui-ying, ZHU Man-ni, SHA Qing-e, <i>et al.</i> (4819)
VOCs Emission Level and Emission Reduction Potential of Coating Industry in Zibo	HUANG Yue-run, YANG Wen, WANG Xiu-yan, <i>et al.</i> (4832)
Pollution Characteristics of Carbonaceous Components in PM ₁₀ and PM _{2.5} of Road Dust Fall and Soil Dust in Xi'an	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, SUN Jie-juan, <i>et al.</i> (4843)
Runoff Simulation and Its Response to Extreme Precipitation in the Yangtze River Basin	GAO Shuang, TI Chao-pu, TANG Shui-rong, <i>et al.</i> (4853)
Water Chemical Isotope Characteristics and Water Transformation Relationship in Mongolian Section of the Yellow River Basin	PEI Sen-sen, DUAN Li-min, MIAO Ping, <i>et al.</i> (4863)
Hydrochemical Characteristics and Formation Causes of Ground Karst Water Systems in Gudui Spring Catchment	TANG Chun-lei, SHEN Hao-yong, ZHAO Chun-hong, <i>et al.</i> (4874)
Source Analysis and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Groundwater of Shijiazhuang, a Typical City in North China Plain	CHEN Hui, ZHAO Xin-yu, CHANG Shuai, <i>et al.</i> (4884)
Spatial Distribution, Speciation, and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Dongjiang Lake, Hunan Province	ZHANG Tong-liang, YI Li-xia, LI Chang-cheng, <i>et al.</i> (4896)
Spectral Characteristics and Source Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Surface Water of Taihu Lake Before Cyanobacterial Blooming	WANG Yong-qiang, LU Shao-yong, HUANG Wei, <i>et al.</i> (4906)
Chemical Oxygen Demand(COD) Composition and Contribution in Typical Waters of Baiyangdian Lake	LI Qi, ZHANG Chao, ZHANG Wen-qiang, <i>et al.</i> (4915)
Source Apportionment and Source-specific Risk of Typical Antibiotics in Baiyangdian Lake	SONG Yuan-meng, ZHAO Bo, LU Meng-qi, <i>et al.</i> (4927)
Response of River Ecosystem Health Status to Water Environmental Factors in the Middle Reaches of Yarlung Zangbo River	LI Xiao-dong, YANG Qing, LIU Hui-qi, <i>et al.</i> (4941)
Analysis on the Current Situation of Phytoplankton in the Typical River- Lake Ecotone of Lake Poyang	YU Xin-ping, CHEN Yu-wei, LIU Jin-fu, <i>et al.</i> (4954)
Phytoplankton Community Structure, Diversity, and Functional Groups in Urban River Under Different Black and Odorous Levels	ZHANG Qi-qi, ZENG Jie, YIN Zhuo, <i>et al.</i> (4965)
Influence of Denitrification on Cyanobacterial Blooms Trends in Lake Taihu, China	LI Chang-jie, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (4977)
Effects of Nitrogen Speciation Transformation on Microbial Community Succession in Input Rivers of Miyun Reservoir	XIN Yuan, ZHANG Yao-fang, LI Tian-yu, <i>et al.</i> (4985)
Action Mechanism of <i>Bacillus</i> on Microalgae During Nitrogen Metabolism in Urban Tailwater	ZHAO Zhi-ni, MA Chao, YAN Jia-chen, <i>et al.</i> (4996)
Nitrogen Removal Characteristics and Metabolism Mechanism of High-Efficiency Cold-Tolerant Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterium <i>Glutamicibacter</i> sp. WSI for Various Nitrogen Sources at Low Temperature	WEI Bo-hui, LUO Xiao, LÜ Peng-yi, <i>et al.</i> (5006)
Pollution Characteristics of Macrolide Antibiotics During Drinking Water Treatment and Their Chlorination Reaction Mechanism	CEN Xia, CHENG Si-yu, SHI Zong-min, <i>et al.</i> (5017)
Effects of Different Biochar and Effective Microorganism Agent Improvement Approaches on the Nutrient Release Characteristics and Potential of Compost	JIA Pei-yin, WANG Xin, HUA Yu-ting, <i>et al.</i> (5025)
Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Water and Sediments of Anhui Section of Huaihe River Basin	ZHANG Hai-qiang, GAO Liang-min, GE Juan, <i>et al.</i> (5036)
Distribution, Sources, and Risk Assessment of Microplastics in Surface Sediments of Yellow River Delta Wetland	GENG Na, ZHAO Guang-ming, ZHANG Da-hai, <i>et al.</i> (5046)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Farmland Soil in Guyuan	MA Gui, DING Jia-fu, ZHOU Yue, <i>et al.</i> (5055)
Distribution Characteristics of Microplastic Surface Bacterial Communities Under Flooded and Non-flooded Conditions in Nanjishan Wetland of Poyang Lake	ZHAO Jun-kai, CHEN Xu, HU Ting-ting, <i>et al.</i> (5063)
Influence of Polystyrene Microplastics on the Formation and Structural Change of <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Biofilm	TAO Hui, YU Duo, YANG Lan, <i>et al.</i> (5071)
Effects of Polystyrene Microplastics on Growth, Physiology, Biochemistry, and Canopy Temperature Characteristics of Chinese Cabbage Pakchoi (<i>Brassica chinensis</i> L.)	GUO Bing-lin, FENG Chen-chen, CHEN Yue, <i>et al.</i> (5080)
Effects of Combined Stress of Polyethylene and Sulfamethazine on Seed Germination, Seedling Growth, and Physiological Characteristics of Soybean	ZHAO Xiao-qiong, ZHANG Heng-hui, ZHAO Run-zhu, <i>et al.</i> (5092)
Transport and Model Calculation of Microplastics Under the Influence of Ionic Type, Strength, and Iron Oxide	ZHANG Ran, YU Ke-fei, HUANG Lei, <i>et al.</i> (5102)
Impacts of Land Use and Climate Change on Ecosystem Services in Agro-pastoral Ecotone	XU Wen-bin, RAO Liang-yi (5114)
Response of Organic Carbon Loss to Soil Erosion and Its Drivers: A Meta-analysis	LIU Xiao-lan, HUANG Jin-quan, QI Yu-jie, <i>et al.</i> (5125)
Effects of Balanced Fertilization and Straw Mulching on Soil Nutrients and Stoichiometry in Purple Soil Slope	ZHANG Gao-ming, XU Qi-wen, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (5135)
Characteristics and Dominant Influencing Factors of the Fungal Community Structure in Soils Co-contaminated with Rare Earth Elements and Heavy Metals	LUO Ying, LI Jing-wei, YUAN Hao, <i>et al.</i> (5145)
Effects of Annual Crop Rotation and Fallow on Soil AMF Community and Aggregate Stability	LU Ze-rang, XIA Zi-tai, LU Mei, <i>et al.</i> (5154)
Spatial-temporal Changes and Driving Factors of Soil Microbial Communities in a Typical City of North China Plain	ZHAO Xin-yu, CHEN Hui, CHANG Shuai, <i>et al.</i> (5164)
Effect of High-volume Straw Returning and Applying <i>Bacillus</i> on Bacterial Community and Fertility of Desertification Soil	NIE Yang-mei, BU Lian-yan, CHEN Wen-feng, <i>et al.</i> (5176)
Low Accumulation Characteristics of Sweet-waxy Maize in Pb and Cd Complex Contaminated Soils Based on Field Trials	TANG Le-bin, LI Long, SONG Bo, <i>et al.</i> (5186)
Effects of Different Control Measures on Cadmium and Lead Accumulation and Quality in Lettuce	ZHOU Hong-yin, LI Jia-qi, BAO Li, <i>et al.</i> (5196)
Effects of Nano-copper Oxide on Physiobiochemical Properties of <i>Brassica chinensis</i> L. and Its Heavy Metal Accumulation Under Cadmium Stress	WANG Shi-qi, SUN Yue-bing, HUANG Qing-qing, <i>et al.</i> (5204)
Distribution and Biototoxicity of Endogenous Pollutants in <i>Pennisetum</i> sp. Biochar from Different Polluted Areas	LIU Li-ya, CUI Hong-biao, LIU Xiao-sheng, <i>et al.</i> (5214)
Adsorption Characteristics of Tetracycline by CuFeO ₂ -modified Biochar	LIU Guo-cheng, ZHANG Xin-wang, XIN Shuai-shuai, <i>et al.</i> (5222)
Ecological Toxic Effect of Perfluorinated Compounds on Fish Based on Meta-analysis	LU Hong, ZHOU Jin-yang, YANG Fan, <i>et al.</i> (5231)
Source Analysis and Risk Assessment of Heavy Metals in Soil of County Scale Based on PMF Model	ZHENG Yong-li, WEN Han-hui, CAI Li-mei, <i>et al.</i> (5242)
Potential Source Identification and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Soil of Heze Oil Peony Planting Area Based on PMF-PCA/APCS and PERI	ZHAO Qing-ling, LI Qing-cai, AN Mao-guo, <i>et al.</i> (5253)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Cadmium in Farmland Soils around the Gangue Heap of Coal Mine, Chongqing	MA Jie, SHE Ze-lei, WANG Sheng-lan, <i>et al.</i> (5264)
Pollution Characteristics and Sources of Heavy Metals in Soil of a Typical Pyrite Concentrated Mining Area in Anhui Province	JIA Han, LIU Jun-xing, WANG Xiao-guang, <i>et al.</i> (5275)
Distribution Characteristics, Source Analysis and Potential Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Typical River Source Areas of Northeastern Hunan Province	YANG Zhen-yu, LIAO Chao-lin, ZOU Yan, <i>et al.</i> (5288)
Variation Characteristics of Exogenous Cadmium with Different Contents in Red Soil	ZHOU Zi-yang, PANG Rui, SONG Bo (5299)
Analysis of Carbon Storage Potential of CO ₂ Foamed Concrete	ZHANG Yuan, TA Xu-peng, QIN Shu-bing, <i>et al.</i> (5308)
Research on the Screening Method of Priority Pollutants with Integrated Environmental Socio-economic Indicators: Example of E-waste Dismantling	CHEN Yuan, CAI Zhen, LI Jin-hui (5316)