

目次

基于机器学习的珠三角秋季臭氧浓度预测	陈镇, 刘润, 罗征, 薛鑫, 汪瑶, 赵志军 (1)
粤港澳大湾区大气PM _{2.5} 浓度的遥感估算模型	代园园, 龚绍琦, 张存杰, 闵爱莲, 王海君 (8)
典型输送通道城市冬季PM _{2.5} 污染与传输变化特征	代武俊, 周颖, 王晓琦, 齐鹏 (23)
郑州市夏季PM _{2.5} 中二次无机组分污染特征及其影响因素	和兵, 杨洁茹, 徐艺斐, 袁明浩, 翟诗婷, 赵长民, 王申博, 张瑞芹 (36)
重庆典型城区冬季碳质气溶胶的污染特征及来源解析	彭超, 李振亮, 向英, 王晓宸, 汪凌韬, 张晟, 翟崇治, 陈阳, 杨复沐, 翟天宇 (48)
2022年8月成渝两地臭氧污染差异影响因素分析	陈木兰, 李振亮, 彭超, 邓也, 宋丹林, 谭钦文 (61)
2020年“三连击”台风对我国东部地区O ₃ 污染的影响分析	花丛, 尤媛, 王峰, 张碧辉 (71)
北京城区夏季VOCs初始体积分数特征及来源解析	张博韬, 景宽, 王琴, 安欣欣, 鹿海峰, 王陈婧, 王友峰, 刘保献 (81)
机动车减排降碳综合评价体系综述	范朝阳, 佟惠, 梁晓宇, 彭剑飞 (93)
基于LEAP模型的长三角某市碳达峰情景	杨峰, 张贵驰, 孙佑, 谢放尖, 揣小伟, 孙瑞玲 (104)
广东省船舶二氧化碳排放驱动因素与减排潜力	翁淑娟, 刘颖颖, 唐凤, 沙青娥, 彭勃, 王辉嘉, 陈诚, 张雪驰, 李京洁, 陈豪琪, 郑君瑜, 宋献中 (115)
给水厂典型工艺碳排放特征与影响因素	张翔宇, 胡建坤, 马凯, 高欣慰, 魏月华, 韩宏大, 李克勋 (123)
中国饮用水中砷的分布特征及基于伤残调整寿命年的健康风险评价	窦殿程, 齐媛, 肖淑敏, 苏高新, 郭宇新 (131)
太湖水体和沉积物中有机磷酸酯的时空分布和风险评价	张成诺, 钟琴, 栾博文, 周涛, 顾帆, 李伟飞, 邹华 (140)
水产养殖环境中农兽药物的污染暴露水平及其风险影响评价	张楷文, 张海燕, 孔聪, 顾润润, 田良良, 杨光昕, 王媛, 陈凤, 沈晓盛 (151)
长江朱沱断面磷浓度与通量变化及来源解析	姜保峰, 谢卫民, 黄波, 刘旻璇 (159)
珠江河口地表水锰氧化物对磷的“载-卸”作用	李睿, 梁作兵, 伍祺瑞, 杨晨晨, 田帝, 高磊, 陈建耀 (173)
富春江水库浮游植物功能群变化的成因	张萍, 王炜, 朱梦圆, 国超旋, 邹伟, 许海, 朱广伟 (181)
合浦盆地西部地区地下水水化学特征及形成机制	陈雯, 吴亚, 张宏鑫, 刘怀庆 (194)
新疆车尔臣河流域绿洲带地下水咸化与污染主控因素	李军, 欧阳宏涛, 周金龙 (207)
京津冀地区生态系统健康时空演变及其影响因素	李魁明, 王婉燕, 姚罗兰 (218)
近30年辽河三角洲生态系统服务价值时空演变及影响因素分析	王耕, 张芙蓉 (228)
光伏电站建设对陆地生态环境的影响:研究进展与展望	田政卿, 张勇, 刘向, 陈生云, 柳本立, 吴纪华 (239)
大兴安岭林草交错带植被NDVI时空演变及定量归因	石淞, 李文, 曲琛, 杨子仪 (248)
西南地区不同类型植被NPP时空演变及影响因素探究	徐勇, 郑志威, 孟禹弛, 盘钰春, 郭振东, 张炎 (262)
不同海拔梯度下极端气候事件对松花江流域植被NPP的影响	崔嵩, 贾朝阳, 郭亮, 付强, 刘东 (275)
基于InVEST与CA-Markov模型的昆明市碳储量时空演变与预测	帕茹克·吾斯曼江, 艾东, 方一舒, 张益宾, 李牧, 郝晋琨 (287)
基于PLUS-InVEST模型的酒泉市生态系统碳储量时空演变与预测	石晶, 石培基, 王梓洋, 程番苑 (300)
长江下游沿江平原土壤发育过程中碳库分配动态	胡丹阳, 张欢, 宿宝巍, 张娅璐, 王永宏, 纪佳辰, 杨洁, 高超 (314)
漓江流域喀斯特森林土壤有机碳空间分布格局及其驱动因子	申楷慧, 魏识广, 李林, 储小雪, 钟建军, 周景钢, 赵毅 (323)
不同土地利用方式对岩溶区土壤有机碳组分稳定性的影响	陈坚淇, 贾亚男, 贺秋芳, 江可, 陈畅, 叶凯 (335)
紫色土丘陵区坡地柑橘园土壤碳氮的空间分布特征	李子阳, 陈露, 赵鹏, 周明华, 郑静, 朱波 (343)
氮添加与凋落物处理对橡胶林砖红壤有机碳组分及酶活性的影响	薛欣欣, 任常琦, 罗雪华, 王文斌, 赵春梅, 张永发 (354)
重庆化肥投入驱动因素、减量潜力及环境效应分析	梁涛, 赵敬坤, 李红梅, 王妍, 曹中华, 张务帅, 王孝忠, 郭超仪, 石孝均, 陈新平 (364)
中国土壤中全氟和多氟烷基物质的分布、迁移及管控研究进展	刘浩然, 邢静怡, 任文杰 (376)
基于多源辅助变量和随机森林模型的耕地土壤重金属含量空间分布预测	解雪峰, 郭炜炜, 濮励杰, 缪源卿, 蒋国俊, 张建珍, 徐飞, 吴涛 (386)
基于源导向的农用地土壤重金属健康风险评估及优先控制因子分析	马杰, 葛森, 王胜蓝, 邓力, 孙静, 蒋月, 周林 (396)
铜陵某废弃硫铁矿矿区土壤重金属污染特征及来源解析	李如忠, 刘宇昊, 黄言欢, 吴鸿飞 (407)
天水市主城区公交站地表灰尘重金属来源解析及污染评价	李春艳, 王新民, 王海, 吕晓斌 (417)
基于大田试验的土壤-水稻镉对不同调理剂的响应	唐乐斌, 刘新彩, 宋波, 马丽钧, 黄凤艳 (429)
腐殖质活性组分对土壤镉有效性的调控效应与水稻安全临界阈值	胡秀芝, 宋毅, 王天雨, 蒋珍芬, 魏世强 (439)
生物炭与铁钙材料对镉砷复合污染农田土壤的修复	吴秋产, 吴骥子, 赵科理, 连斌, 袁峰, 孙洪, 田欣 (450)
人体微塑料污染特征及健康风险研究进展	马敏东, 赵洋尘, 朱龙, 王伟平, 康玉麟, 安立会 (459)
聚苯乙烯微塑料联合镉污染对土壤理化性质和生菜(<i>Lactuca sativa</i>)生理生态的影响	牛佳瑞, 邹勇军, 简敏菲, 黄楚红, 李金燕, 穆霞, 刘淑丽 (470)
转录组分析植物促生细菌缓解高粱微塑料和重金属复合污染胁迫机制	刘泳岐, 赵超禹, 任学敏, 李玉英, 张英君, 张浩, 韩辉, 陈兆进 (480)
微塑料对土壤中养分和镉淋失的影响	赵群芳, 褚龙威, 丁原红, 王发园 (489)
微塑料和非对土壤化学性质、酶活性及微生物群落的影响	刘沙沙, 秦建桥, 吴贤格 (496)
民勤荒漠绿洲过渡带人工梭梭林土壤细菌群落结构及功能预测	王安林, 马瑞, 马彦军, 吕彦勋 (508)
不同灌溉水盐度下土壤真菌群落对生物炭施用的响应	郑志玉, 郭晓雯, 闵伟 (520)
厨余垃圾有机肥对土壤微生物活性及功能的影响	刘美灵, 汪益民, 金文豪, 王永冉, 王嘉和, 柴一博, 彭丽媛, 秦华 (530)
土壤真菌群落结构对辣椒长期连作的响应特征	陈芬, 余高, 王谢丰, 李廷亮, 孙约兵 (543)
叶面喷施硅肥对再生水灌溉水稻叶际细菌群落结构及功能基因的影响	梁胜贤, 刘春成, 胡超, 崔二苹, 李中阳, 樊向阳, 崔丙健 (555)
昌黎县海域细菌群落和抗生素抗性基因分析	王秋水, 程波, 刘悦, 邓婕, 徐岩, 孙朝徽, 袁立艳, 左嘉, 司飞, 高丽娟 (567)
基于高通量定量PCR与高通量测序技术研究城市湿地公园抗生素抗性基因污染特征	黄福义, 周曙仡, 潘婷, 周昕原, 苏建强, 张炯 (576)
城区第四系沉积柱中抗生素的垂向分布特征及环境影响因素	刘可, 童蕾, 甘翠, 王逸文, 张嘉越, 何军 (584)
氢氧化钾改性玉米秸秆生物炭对水中土霉素的吸附特性及机制	刘总堂, 孙玉凤, 费正皓, 沙新龙, 温小菊, 钱彬彬, 陈建, 谷成刚 (594)
CO ₂ 气氛热解与硝酸改性的生物炭Pb ²⁺ 吸附性能对比	江豪, 陈瑞芝, 朱自洋, 王琳, 段文斌, 陈芳媛 (606)

铜陵某废弃硫铁矿区土壤重金属污染特征及来源解析

李如忠¹, 刘宇昊¹, 黄言欢², 吴鸿飞²

(1. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥 230009; 2. 安徽文川环保有限公司, 铜陵 244002)

摘要:为弄清铜陵市某硫铁矿开采对周边土壤重金属污染影响,在露天采矿场、农田、山林、村庄和河道等,采集50个点位表层土壤和沉积物样,分析Zn、Cr、Cu、Pb、Ni、Cd和As含量,解析土壤重金属空间分布特征,评估重金属污染程度和潜在生态风险水平,并识别土壤重金属污染源。结果表明,矿区土壤呈弱酸性(pH均值为6.32),除Ni元素外,其他重金属含量都超过铜陵市土壤背景值,且河流沉积物中Ni和Cd富集较为明显。根据内梅罗污染指数,判定Pb和As总体处于重度污染,Cu和Cd为中度污染,其他元素为轻污染或无污染;不同用地类型综合污染指数排序为:采矿场>河道>山林>农田>村庄,其中采矿场和河道属于重度污染,林地以中度污染为主,农田和村庄以轻度污染为主。Pb、As和Cd均属于中等生态风险,潜在生态风险指数贡献率分别为33.27%、27.39%和20.22%,远大于其他4种元素;不同用地类型潜在生态风险指数排序结果与综合污染指数相同,其中采矿场和河道属于高风险水平,林地中等风险,其余为轻微风险。相关性分析、主成分分析(PCA)和正定矩阵因子分解模型(PMF)所得结果一致,初步判定Zn、Cu、Pb、Cd和As主要来自硫铁矿开采活动,Cr主要来自成土母质和农业生产,Ni主要受成土母质和硫铁矿开采活动的共同影响。

关键词: 硫铁矿; 土壤重金属污染; 潜在生态风险评价; 来源解析; 铜陵市

中图分类号: X53; X825 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)01-0407-10 DOI: 10.13227/j.hj.kx.202301058

Contamination Characteristics and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in an Abandoned Pyrite Mining Area of Tongling City, China

LI Ru-zhong¹, LIU Yu-hao¹, HUANG Yan-huan², WU Hong-fei²

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Anhui Wenchuan Environmental Protection Co., Ltd., Tongling 244002, China)

Abstract: To investigate the impact of pyrite mining on the heavy metal pollution in the surrounding soil in Tongling City, 50 surface soil and sediment samples were collected from mining fields, farmland, forests, villages, and the river. The contents of Zn, Cr, Cu, Pb, Ni, Cd, and As in soils and sediments were analyzed. Then, the spatial distribution characteristics of heavy metals in soil were analyzed, and the degree of heavy metal pollution and potential ecological risk level were assessed. Finally, the sources of soil heavy metal pollution were identified. In general, the soil in the study area was weakly acidic (average pH = 6.32), and the contents of other heavy metals except Ni exceeded the background values of the soil in Tongling City. Moreover, Ni and Cd were enriched in the river sediments. According to the Nemerow pollution index, Pb and As reached heavy pollution levels, Cu and Cd reached moderate pollution levels, and other elements belonged to light or non-pollution levels. The comprehensive pollution index of different land types was ranked in the order of mining field > river > forest > farmland > village. Mining fields and the river were heavily polluted, forest land was moderately polluted, and farmland and villages were mainly mildly polluted. Pb, As, and Cd belonged to the medium ecological risk category. The contribution rates of the potential ecological risk index were 33.27%, 27.39%, and 20.22%, which were much higher than the other four elements. The ranking results of the potential ecological risk index of different land types was the same as that of the comprehensive pollution index. Mining fields and the river were at a high-risk level, forest land reached moderate risk, and the rest were at a slight risk level. The consistent results of correlation analysis, principal component analysis (PCA), and positive definite matrix factor analysis (PMF) indicated that Zn, Cu, Pb, Cd, and As were mainly derived from pyrite mining activities, Cr mainly came from the parent material and agricultural production, and Ni was mainly affected by soil-forming parent material and pyrite mining activities.

Key words: pyrite mining area; heavy metal contamination in soils; potential ecological risk assessment; source apportionment; Tongling City

根据全国土壤污染调查公报^[1],我国土壤重金属污染不容乐观,总检测点位超标率达16.1%,其中耕地土壤超标率达19.4%。从污染来源看,矿区周边土壤重金属污染往往主要由矿产资源的开采、加工和运输等活动造成^[2]。重金属元素不仅可以被生物富集并通过食物链进入人体^[3],还可借助灰尘和大气颗粒物等环境介质,通过皮肤接触和呼吸活动等暴露途径在人体累积^[4],从而造成健康危害。国外有关重金属污染的研究起步较早,提出了一批经典的污染评价和风险评估技术方法^[5,6],关注的热点大多集中在矿业开采导致的土壤重金属污染方面^[7-10]。近年来,土壤重金属污染引起了我国政府的重视,有关金属

矿山、涉重企业及工厂搬迁遗留场地重金属污染的调查、评价和修复日趋增多,相关研究主要涉及重金属赋存形态分析^[11]、来源解析^[12]、生态风险评估及健康风险评估^[13,14]等。目前,土壤重金属污染评价和生态风险评估模型方法已较为成熟,而对土壤重金属污染来源解析方法的研究则还处在不断探索中,除常用的相关性分析和主成分分析等方法外,近年来出现的正定矩阵因子分解模型因为可以量化识别

收稿日期: 2023-01-09; 修订日期: 2023-03-23

基金项目: 企业委托项目(W2019JSKF0473)

作者简介: 李如忠(1970~),男,博士,教授,主要研究方向为水土环境保护与修复机制,E-mail:lrz1970@163.com

未知污染源个数及污染贡献占比,深受众多学者的青睐^[15~18]。

铜陵是著名的有色多金属矿区,是我国重要的有色金属基地之一,具有2 000多年连绵不断的铜采冶历史。该市矿产种类多且储量丰富,优势金属矿种主要为Cu、Au和硫铁矿等,矿产地主要分布在铜官山、狮子山、新桥和凤凰山等矿区。近年来,不断有学者开展铜陵矿区(包括尾矿库)土壤和水体重金属污染研究^[19~21],但多针对有色金属矿区;对于硫铁矿的研究,大多都是从地质学或地球化学角度,探究成矿原因和作用等,且研究成果基本都集中在规模较大的新桥硫铁矿^[22, 23]。目前,绿色矿山建设已上升为国家战略,推动了中国矿业绿色发展和矿山生态修复。作为具有悠久采冶历史的有色金属矿业城市,铜陵市将一批废弃矿坑的环境综合治理纳入了长江经济带废弃矿山生态修复计划并付诸实施。本研究拟以铜陵市钟鸣镇某废弃硫铁矿为例,尝试就矿区周边土壤重金属污染特征和生态风险进行分析,解析土壤重金属污染来源,以期为后续矿区生态环境综合治理和生态修复提供依据。

1 研究区概况

铜陵市位于安徽省中南部、长江下游南岸,地处长江铜铁成矿带,是全国矿产资源种类最多且储量最丰富的城市之一,素有“中国古铜都、当代铜基地”的美誉。本研究的废弃硫铁矿位于该市东部钟鸣镇境内,地处东经118°03'30"~118°05'04",北纬30°56'08"~30°59'08"范围,属于亚热带湿润季风气候,平均气温16.2℃,年均降水量1 375.9 mm。该硫铁矿位于山体北坡,地势由南向北逐渐降低,矿区东、西两侧为山地,总体呈西南-东北方向分布,矿区位于铜陵复式褶皱中的舒家店背斜北东段北西翼^[24]。部分外露边坡岩性为黄红壤(黄棕壤)、石灰(岩)土和红壤性麻砂土。矿区周边山地林木茂密,主要有阔叶天然次生林、灌木林及少量竹林。累计查明铁矿石总储量约13.094万t,金属量6.582万t,全铁品位50.27%。整个采矿场占地约0.8 km²,西南风为次主导风向。采矿场南部为山坡且大部分已实施生态修复,植被覆盖程度较高。该矿于1976年开采,2008年停采,2011年闭矿。前期为露天开采,后期转为地下平硐,酸性矿山废水由矿区排出后进入狮牡河,再向北经黄浒河和荻港河等,最终汇入长江。据报道,狮牡河中上游河段Cd污染颇为严重^[25]。由于当地利用河水灌溉农作物,导致农田土壤重金属污染。尽管该硫铁矿已闭矿多年,但仍不断有酸性矿坑废水从平硐口流出(pH值约2.01),废水中 $\rho(\text{Cd})$ 、

$\rho(\text{Cu})$ 和 $\rho(\text{Zn})$ 平均值分别高达2.12、65.3和61.0 mg·L⁻¹, $\rho(\text{As})$ 达35.0 mg·L⁻¹。2020年钟鸣镇政府出资建设了一座处理能力3 000 m³·d⁻¹污水处理站,并委托安徽文川环保有限公司运营管理,推动了矿区下游河流水体水质改善。

2 材料与方法

2.1 样品采集与分析

在废弃硫铁矿选择5种主要土地利用类型,大致均匀布设50个采样点(图1),其中采矿场设置采样点3个、农田19个、村庄11个、山林7个、河流10个,采集表层土壤及沉积物样。在每个采样点1 m²范围内取4处表层(0~20 cm)土壤(合计约1 kg),混合均匀后装入自封袋;对于沉积物样,针对每个采样点(断面),分别在河道两侧水面下采集表层(0~10 cm)沉积物(合计约1 kg),混合均匀后装入自封袋。样品采集均使用非金属工具,并以GPS记录采样点位置坐标。在实验室,将样品放在阴凉通风处自然风干,剔除碎石和杂物后研磨,过100目筛,装入自封袋备用。

采用HNO₃-HCl-HClO₄对土壤进行加热消解。这里,Zn、Cr、Cu、Pb和Ni采用火焰原子吸收法(TAS-990 AFG原子吸收分光光度计,北京普析通用仪器)分析测试,Cd采用石墨炉原子吸收法(TAS-990 AFG原子吸收分光光度计,北京普析通用仪器)测试,As使用氢化物发生原子荧光法(AFS-8510原子荧光光谱仪,北京海光仪器)测试。Zn、Cr、Cu、Pb、Ni和Cd的检出限分别为1、4、1、10、3和0.05 mg·kg⁻¹、As检出限为0.01 mg·kg⁻¹。针对Fe元素的检测,也采用HNO₃-HCl-HClO₄加热消解,使用火焰原子吸收法(TAS-990 AFG原子吸收分光光度计,北京普析通用仪器)测定,检出限为25 mg·kg⁻¹。所有样品均做空白实验,并使用标准物质进行质量控制,各元素平行实验偏差均小于10%。样品pH值使用pH计测定(去离子水与样品比例为5:1)。相关分析测试工作均在安徽创怡环保科技有限公司完成。

2.2 评价方法

2.2.1 内梅罗污染指数

内梅罗污染指数是环境污染评价中使用较为广泛的一种评价方法,数学模型如下:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (1)$$

$$P_N = \sqrt{\frac{P_{\max}^2 + P_{\text{avg}}^2}{2}} \quad (2)$$

式中, P_i 为重金属*i*污染指数; C_i 为样品中重金属*i*实测值,mg·kg⁻¹; S_i 为重金属*i*背景值,mg·kg⁻¹; P_N 为内梅

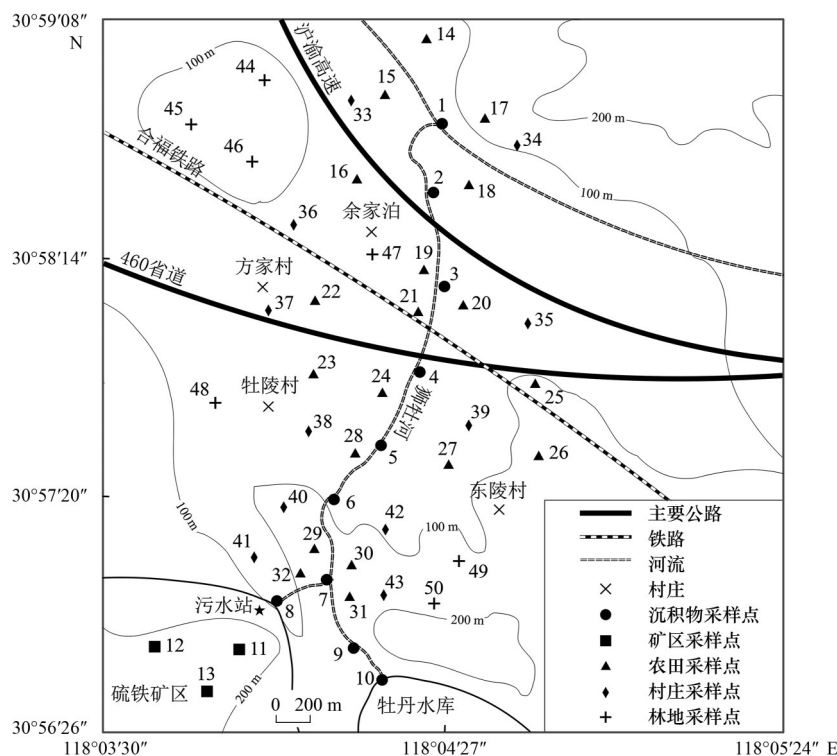


图1 研究区基本情况

Fig. 1 Basic situation of the study area

罗综合污染指数; $P_{\max}$ 为单因子指数的最大值; P_{avg} 为单因子指数平均值。

对于单因子污染指数, $P_i \leq 1$, 为无污染; $1 < P_i \leq 2$, 为轻度污染; $2 < P_i \leq 3$, 为中度污染; $P_i > 3$, 为重度污染。对于内梅罗综合污染指数, $P_N \leq 0.7$, 为无污染; $0.7 < P_N \leq 1$, 为警戒水平; $1 < P_N \leq 2$, 为轻度污染; $2 < P_N \leq 3$, 为中度污染; $P_N > 3$, 为重度污染。

2.2.2 潜在生态风险指数

1980年,瑞典学者 Hakanson^[6] 基于水环境沉积学原理,提出了潜在生态风险指数法,其中与风险评估关系密切的数学模型如下:

$$RI = \sum_{i=1}^m E_r^i = \sum_{i=1}^m T_r^i \times C_f^i = \sum_{i=1}^m T_r^i \times C_i / C_n^i \quad (3)$$

式中, C_f^i 为重金属 i 单项污染系数; C_i 为重金属 i 实测值, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; C_n^i 为重金属 i 背景值, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; E_r^i 为重金属 i 潜在生态风险系数; T_r^i 为重金属 i 毒性响应系数,其中 Zn、Cr、Cu、Pb、Ni、Cd 和 As 毒性响应系数分别取 1、2、5、5、5、30 和 10; RI 为潜在生态风险指数。

本研究的重金属种类和数量与经典潜在生态风险指数法存在差异,为此考虑对原有评价标准做适当调整。参照文献[26],将 C_f^i 最低上限值(1)与 T_r^i 最大毒性响应系数(30)相乘,并将结果(30)作为 E_r^i 最低级别上限值,其余级别上限值依次加倍;最后对于 RI 分级标准的最低上限值,由各种金属 T_r^i 之和(58)与 C_f^i 最低级别上限值相乘后取 10 的整数得到(58,取

整为 60),其余级别依次加倍。概括地,本研究采用的风险分级标准如下。

单项指标生态风险分级标准:若 $E_r^i < 30$, 为轻微风险; $30 \leq E_r^i < 60$, 为中等风险; $60 \leq E_r^i < 120$, 为高风险; $120 \leq E_r^i < 240$, 为很高风险; $E_r^i \geq 240$, 为极高风险。

潜在生态风险分级标准:若 $RI < 60$, 为轻微风险; $60 \leq RI < 120$, 为中等风险; $120 \leq RI < 240$, 为高风险; $RI \geq 240$, 为很高风险。

2.3 正定矩阵因子分解模型

正定矩阵因子分解模型(PMF)是 Paatero 等^[27]提出的一种基于受体模型并利用样本组成对污染源进行定量化解析的统计方法。其基本原理为将原始数据矩阵分解为因子分数矩阵、因子载荷矩阵和残差矩阵,通过求解结果定量分析各因子的贡献率。具体计算模型参见文献[16]。

2.4 数据处理

采用 Arcmap 10.8 软件,利用普通克里金插值法绘制重金属含量空间分布图;使用 SPSS 软件开展土壤重金属相关性分析与主成分分析(PCA),以 EPA PMF 5.0 软件完成重金属 PMF 来源解析,并以 Excel 软件绘制 PMF 模型分布图。

3 结果与分析

3.1 土壤重金属含量

矿区土壤 pH 变化范围为 3.57~7.86(平均值

6.32),呈弱酸性.有关土壤和沉积物重金属含量的统计结果见表1.这里,Zn、Cr、Cu、Pb、Ni、Cd和As含量平均值分别为铜陵市土壤背景值的1.13、1.19、1.76、4.30、0.63、1.84和3.73倍.显然,除Ni外,其他元素含量都高于铜陵市土壤背景值,更显著高于安徽省土壤背景值,特别是一类重金属污染物Pb、Cd和As含量,意味着矿区土壤重金属已有相当高的富集.这里,Ni仅在采矿场和河道中表

现出相对明显的富集现象,含量高于铜陵市土壤背景值,并与该市沉积物背景值接近,其他陆域采样点含量均不高.除Zn和Cr变异系数相对较小外,其它元素变异系数均高于100%,表明这些元素空间离散度较高,即分布不均,受人为活动影响较大.由表1可知,土壤中Fe含量远高于安徽省土壤背景值,且变异系数仅6.23%,意味着评价区Fe含量分布较为均匀.

表1 表层土壤及沉积物金属含量统计结果¹⁾

Table 1 Characteristics of heavy metal contents in surface soils and sediments

项目	Zn	Cr	Cu	Pb	Ni	Cd	As	Fe
最大值/mg·kg ⁻¹	330.50	206.92	838.25	2 292.50	79.00	6.16	1 394.68	1.82×10 ⁵
最小值/mg·kg ⁻¹	47.42	7.25	1.67	10.00	3.00	0.11	0.19	1.44×10 ⁵
平均值/mg·kg ⁻¹	157.73	93.54	139.12	287.90	21.11	1.31	84.80	1.62×10 ⁵
变异系数/%	47.04	51.45	122.59	155.32	101.74	109.28	287.91	6.23
铜陵土壤背景值 ^[28] /mg·kg ⁻¹	139	78	79	67	33	0.709	22.70	—
沉积物背景值 ^[28] /mg·kg ⁻¹	144	84.71	57.04	26.9	68	0.45	15	—
安徽土壤背景值 ^[29] /mg·kg ⁻¹	62	66.5	20.4	26.6	29.8	0.097	9.0	3.0×10 ⁴

1)“—”表示无数据

3.2 土壤重金属空间分布特征

矿区土壤重金属含量空间分布特征见图2.可以看出,Zn、Pb和As极高值均出现在采矿场及临近区域,并表现出向山下平坦地带逐步下降的扩散趋势.Cr也表现为采矿场富集程度较高,而在其他大部分空间富集水平接近.Cu的高值区不仅出现在采矿场及周围地区,在矿区中北部大范围内也出现较高的富集.这里,Ni和Cd都表现出在采矿场和沿狮牡河水流动方向显著富集的特点,其中Ni的高值区呈现斑块状,而Cd则表现为面状高富集现象,并向河道两侧农田和村庄方向扩展.另外,Zn、Cu和Cd在河道内的富集程度高于农田和村庄,而远离河道的农田和村庄土壤重金属含量接近铜陵市背景值,表明狮牡河承载着矿区重金属污染向下游地区传输的通道作用.同时,重金属Fe含量分布总体较为均匀,且矿区相对较高,与As具有大体相似的空间分布态势.

整体上看,矿区土壤重金属空间分布呈现西南高、东北低的特点,污染区域呈面状、片状或斑块状分布特征,可能与长期的铁矿开采活动导致重金属元素通过大气扩散、沉降或雨水冲刷、沉积等途径进入矿区周边土壤有关^[16,30].当然,硫铁矿周边其他金属矿区的开采活动,可能也在一定程度上影响了硫铁矿土壤和沉积物重金属含量的空间分布.

3.3 土壤重金属污染评价

计算各采样点的内梅罗单项污染指数,得到每一重金属对各污染等级的百分占比.总体上,7种重金属差别较为明显,其中Pb的重度污染点位占比高达38%,As、Cd和Cu占比达18%~22%,其他重金属

则不存在重度污染点位.这里,Zn、Cr、Cu、Pb、Ni、Cd和As处于无污染和轻度污染两个等级的采样点占比,分别达96%、96%、72%、52%、100%、68%和78%.

整个研究区土壤重金属的内梅罗污染指数统计结果见表2.7种重金属的单项污染指数(P_i)平均值大小排序为:Pb>As>Cd>Cu>Cr>Zn>Ni,其中Pb和As的 P_i 平均值达到了重度污染水平,Cu和Cd达到了中度污染水平,Zn和Cr达到了轻度污染水平,Ni则属于无污染.这里,Pb、As、Cd和Cu的重度污染采样点均出现在采矿场、狮牡河及连通两者的排水沟中,且相应的 P_i 远大于其他用地类型;Zn仅在采矿场与沉积物中出现了中度污染,Cr的轻度污染区主要集中在采矿场、农田及村庄,其余点位为未污染;Ni仅在采矿场和山林的部分采样点出现轻度污染.

5种用地类型内梅罗综合污染指数均值排序为:采矿场(25.30)>河道(17.17)>山林(2.55)>农田(1.75)>村庄(1.36).其中,采矿场和河道中所有点位均处于重度污染,林地中处于中度及以上污染水平的采样点占比高达71%,尽管农田和村庄总体上属于轻度污染水平,但仍有13%的采样点处于重度污染等级,需要引起注意.

3.4 土壤重金属潜在生态风险评价

在所有的50个采样点中,每种重金属的潜在生态风险系数处于各风险等级的占比情况见表3.显然,仅有Pb和As在部分采样点达到了极高风险水平,其中Pb处于高风险及以上风险等级的采样点占20%,As达16%;其次是Cd,处于高风险和很高风险

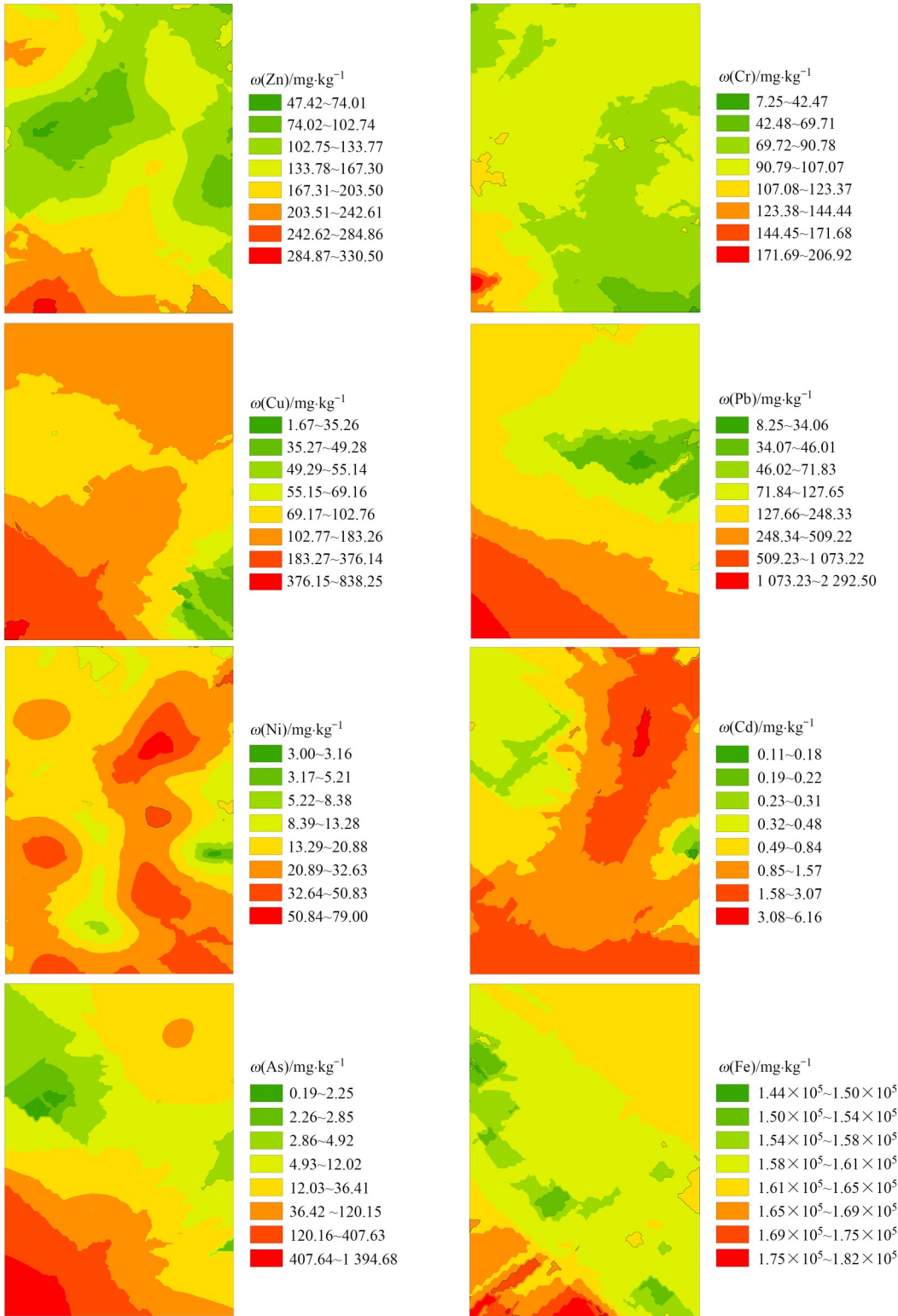


图2 研究区土壤重金属含量空间分布

Fig. 2 Spatial distribution characteristics of soil metal contents in the study area

的采样点占比分别达12%和6%;Cu处于高风险的采样点占4%,而Zn、Cr和Ni则全部处于轻微风险水平。

整个研究区每种重金属潜在生态风险系数统计结果见表4。7种重金属的潜在生态风险系数 E_i^p 均值排序为:Pb>As>Cd>Cu>Cr>Ni>Zn,其中Pb、As

和Cd的 E_i^p 均值远大于其他4种元素,但均属于中等风险,其他元素则均处于轻微风险水平。总体上,整个采矿区土壤潜在生态风险指数RI均值为166.69,达到高风险等级,其中Pb、As和Cd对于RI的贡献率分别高达33.27%、27.39%和20.22%。整个研究区50个采样点中,RI值隶属于轻微风险、中等风险、高

表 2 基于内梅罗污染指数的重金属污染评价结果

Table 2 Pollution assessment of heavy metals based on the Nemero index method

统计值	单因子污染指数(P_i)							综合污染指数(P_N)
	Zn	Cr	Cu	Pb	Ni	Cd	As	
最大值	2.38	2.65	12.23	45.11	1.75	13.68	61.44	44.94
最小值	0.34	0.09	0.02	0.12	0.04	0.15	0.01	0.87
平均值	1.12	1.19	2.02	6.93	0.52	2.41	4.57	6.27
污染等级	轻度	轻度	中度	重度	无污染	中度	重度	重度

表 3 所有采样点中每种重金属对各生态风险等级的占比

Table 3 Percentage of each heavy metal to each ecological risk level in all sampling sites

重金属	采样点占比/%				
	轻微风险	中等风险	高风险	很高风险	极高风险
Zn	100	0	0	0	0
Cr	100	0	0	0	0
Cu	88	8	4	0	0
Pb	62	18	6	2	12
Ni	100	0	0	0	0
Cd	68	14	12	6	0
As	82	2	4	4	8

风险和很高风险等级的采样点占比,分别为 50%、24%、6% 和 20%。

5 种土地利用类型 RI 均值排序为:采矿场(630.46) > 河道(449.73) > 山林(64.42) > 农田(54.20) > 村庄(42.27),其中采矿场和河道处于很高风险水平,山林处于中等风险水平,而农田和村庄仅为轻微风险等级。当然,每种用地类型中各采样点的 RI 值也存在差异性,如采矿场 3 个采样点 RI 值分别为 146.54、713.51 和 1 031.32;河道沉积物 RI 变化范围为 179.40~739.79,其中 8 个采样点处于很高风险等级、2 个处于高风险等级;山林 7 个采样点中 4 个处于中等风险、3 个处于轻微风险等级;农田和村庄的采样点几乎都处于轻微风险等级。值得注意的是,农田中等风险采样点(即 15、18、20、24、29 和 32 号)全部分布于狮牡河两侧,村庄中处于中等风险的 40 号和 41 号采样点则出现在靠近采矿场的

牧东村。

概括地,废弃硫铁矿区以露天采矿场与河道的潜在生态风险最为突出,且对 RI 贡献最高的是 Pb、As 和 Cd,这与其他有关铜陵地区土壤重金属污染研究的结论基本一致^[31]。由于 Pb、As 和 Cd 的毒性较高、健康危害性较大,在矿区生态修复和环境综合治理中需要格外关注。

3.5 土壤重金属来源解析

众所周知,影响土壤重金属污染来源的因素很多且关系复杂,往往难以通过一种方法即可获得有说服力的评判结果,需要借助多种方法的综合运用。本研究采用相关性分析、PCA 分析和 PMF 模型相结合的方法,从定性和定量相结合的角度,判别采矿区土壤重金属污染来源。

3.5.1 相关性分析

废弃硫铁矿区土壤重金属元素的 Spearman 相关系数见表 5。可以看出,除 Cr 外,其他重金属元素都与 Fe 具有显著或极显著相关性,表明这些重金属与硫铁矿开采有着密切的联系。而且,Zn、Cu、Cd、Pb 和 As 之间也都表现出显著或极显著相关关系,表明同源性或伴生关系十分显著。这里,虽然 Ni 与 Fe 也具有显著相关性,但逊色于其他元素与 Fe 的关系,而且 Ni 与 Cu、Pb 和 As 都没有表现出显著相关性,意味着硫铁矿开采并不是 Ni 的主要来源。至于 Cr 元素,不仅与 Fe 没有显著的相关关系,与 Cu、Pb 和 As 也如此,意味着硫铁矿开采活动对土壤 Cr 影响微弱,即 Cr 应该存在其他主要污染来源。

表 4 重金属的潜在生态风险系数与风险指数

Table 4 Potential ecological risk coefficient and risk index of heavy metals

统计值	潜在生态风险系数(E_i^r)							RI
	Zn	Cr	Cu	Pb	Ni	Cd	As	
最大值	2.38	26.53	85.59	360.89	15.75	191.52	614.40	1 031.32
最小值	0.34	0.86	0.15	0.99	0.35	2.16	0.08	25.59
平均值	1.12	11.94	14.15	55.46	4.66	33.70	45.66	166.69
风险等级	轻微	轻微	轻微	中等	轻微	中等	中等	高

3.5.2 PCA 分析

采用 Bartlett 球形度检验和 KMO 检验,开展土壤重金属含量数据分析,得到 KMO 值为 0.576 ($P < 0.05$),表明数据可用于主成分分析^[32, 33],结果见表 6。

这里,共筛选出 3 种主成分,其中第一主成分贡献率为 54.28%,载荷较高元素为 Zn、Cu、Pb、Cd 和 As;第二主成分贡献率为 26.43%,载荷较高元素是 Cr 和 Ni,两种主成分的累计贡献率 80.71%,可以较

表 5 相关性分析结果¹⁾

Table 5 Correlation analysis results

	Zn	Cr	Cu	Pb	Ni	Cd	As	Fe
Zn	1							
Cr	-0.401**	1						
Cu	0.681**	0.050	1					
Pb	0.716**	-0.056	0.746**	1				
Ni	0.437**	-0.436**	0.202	0.060	1			
Cd	0.700**	-0.419**	0.606**	0.415**	0.655**	1		
As	0.545**	0.143	0.822**	0.926**	0.003	0.342*	1	
Fe	0.558**	-0.201	0.635**	0.628**	0.318*	0.642**	0.590**	1

1)**表示在 0.01 水平(双侧)显著相关,*表示在 0.05 水平(双侧)显著相关

表 6 主成分分析结果

Table 6 Principal component analysis results

指标	成分矩阵		
	第一主成分	第二主成分	第三主成分
Zn	0.890	-0.173	-0.162
Cr	-0.275	0.753	0.565
Cu	0.874	0.294	0.190
Pb	0.854	0.393	-0.235
Ni	0.447	-0.718	0.405
Cd	0.781	-0.444	0.236
As	0.794	0.548	-0.039
特征值	3.80	1.85	0.66
贡献率/%	54.28	26.43	9.40
累计贡献率/%	54.28	80.71	90.11

好地解释原有数据的大部分信息。显然,第三主成分中Cr和Ni依然具有较大载荷,对比第二、三主成分的载荷信息,可以推断Cr和Ni来源不完全相同,即不受单一污染因素制约。不难看出,PCA分析与相关性分析结果相同,即Zn、Cu、Pb、Cd和As具有同源性,而Ni和Cr可能受其他不同污染来源的控制。

3.5.3 PMF模型模拟

使用EPA PMF 5.0软件导入实验数据,所有元素的信噪比(S/N)均为9.0左右,全部属于“strong”分类。当设置因子数为3时, Q_{Robust} 与 Q_{True} 相接近,且样品的大部分残差处于-3~3之间,真实含量值与模型预测值之间达到最佳的拟合效果,此时除了Cu和Cd的拟合曲线 r^2 值稍低(分别为0.556和0.446),其余元素的 r^2 值均大于0.9,说明PMF模型拟合效果较好,所选因子数较为真实地解释了实测数据。图3展示了PMF模型得到的采矿区土壤重金属污染来源解析结果。

由图3,第一主成分载荷元素为Zn、Cu、Pb、Cd和As,贡献率分别为39.09%、58.03%、68.96%、64.13%和76.09%;第二主成分载荷元素为Cr,贡献率为87.78%;第三主成分载荷元素为Ni,贡献率为95.20%。显然,PMF模型模拟结果与前述两种方法一致,即Zn、Cu、Pb、Cd和As具有同源性,而Cr和Ni主

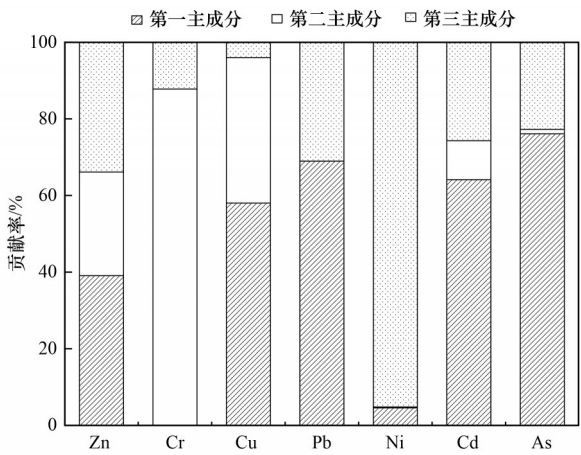


图3 各重金属元素来源PMF模型

Fig. 3 Sources of heavy metals in PMF model

要来自其他污染源,且两者不受同一污染源主导。

综合3种方法的分析结果,参考其他学者有关铜陵市新桥硫铁矿重金属污染来源识别成果^[34, 35],可以判定Zn、Cu、Pb、Cd和As主要来自硫铁矿开采活动。成晓梦等^[14]和贾晗等^[36]在对硫铁矿区重金属污染来源解析的研究中,也发现Zn、Cu、Pb、Cd和As受地质高背景和矿产开采活动共同影响较大。由图2可以看出,矿区河流沉积物Cr含量低于周边农田和林地,说明露天采矿场以外区域的土壤Cr不大可能受硫铁矿开采活动控制。事实上,化肥和农药的大量使用也可能带来土壤Cr含量的增高^[37, 38]。结合研究区总体较为均匀的Cr分布特征,初步推断土壤成土母质及农业生产等可能是Cr的主要来源。至于矿区土壤Ni元素,由于整体水平低于铜陵市土壤背景值,且高值区仅局限于采矿场及矿区河道,加之与Fe表现出显著相关性,可推测受成土母质和硫铁矿开采活动共同影响的可能性较大。

4 讨论

在狮牡河沉积物中,大多数重金属表现出了明显的富集特征,且呈现出由河道向两侧空间扩展的

变化趋势. Galán 等^[8]研究发现,河流沉积物中 Zn、Cu 和 Cd 大部分以可交换态或酸溶态的形式存在,易于通过解吸或离子交换向环境中释放,并随水流或地形影响进行扩散;As 和 Pb 以可还原态吸附在氢氧化铁颗粒中,可迁移性较差;Cr 和 Ni 大多以残渣态存在于矿物颗粒的晶体结构中,同样不易随水流迁移,因此对于 Zn、Cu 和 Cd,往往可以明显观察到随河流扩散的趋势. 本研究中,矿区河流沉积物 Cr 含量低于周边农田与林地(图 2),在一定程度上说明硫铁矿开采不是土壤 Cr 的主要贡献源;而研究区 Cr 含量较为均匀的分布特征,也印证了这一推断. 有研究认为,土壤中 Cr 含量不仅受成土母质影响较大^[15, 39, 40],化肥和农药的大量使用也可能带来农田和林地土壤 Cr 含量的增高^[37, 38],推断 Cr 受地质背景和农业活动共同影响具有合理性. 本研究中, Ni 含量高于背景值的高值区呈斑块状分布于河道中,其余区域平均含量低于铜陵市土壤背景值,推断矿区 Ni 主要受成土母质影响同样具有合理性. 当然, Ni 与 Zn 和 Cd 呈现的极显著相关性,与 Fe 表现出的显著相关性,暗示了矿山开采也影响了 Ni 来源. 另外,由 Ni 与 Cr 表现出的极显著负相关,说明两者的主要污染来源存在出入. 众所周知,石油和煤炭等化石燃料的燃烧可能释放多种重金属元素^[41-43],包括 Zn、Pb、Cd、Ni 和 As 等. 铜陵市属于矿业城市,近几十年来金属冶炼加工对于石油与煤炭等能源消耗量巨大. 矿业开采活动导致大型燃油运输车辆往来频繁,加之高速公路和省级高等级公路穿越评价区域,巨大的车流量也在一定程度上影响了评价区土壤重金属含量. 此外,当地居民生产生活也都消耗大量的煤炭,因此化石燃料燃烧对 Ni 贡献可能也不容忽视. 实际上,其他学者在对铜陵市土壤重金属污染问题的研究中,也发现 Cr 和 Ni 与其他重金属(Zn、Cu、Pb、Cd 和 As 等)在来源方面存在较为明显的出入,如陈婧^[44]在对铜陵市土壤和灰尘重金属污染的研究中,发现 Ni 和 Cr 与其它重金属元素无明显相关性;汪峰等^[45]在对铜陵市东部城区的顺安镇、钟鸣镇和义安经济开发区表层土壤重金属来源解析中,也发现 Ni 和 Cr 有着不同的污染来源.

本研究中,废弃硫铁矿已闭矿多年,但对周边环境的影响一直存在. 2020 年铜陵市义安区钟鸣镇政府出资建设了设计能力为 $3\ 000\ \text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 的污水处理站,通过 EPCO 模式交由安徽文川环保有限公司运营管理. 两年多来,虽然该污水处理站较好地执行了《污水综合排放标准》中一级排放标准,但河道沉积物依旧呈现出显著的重金属富集. 笔者以为可能有 3 个方面的原因:①自硫铁矿开采以来产生的酸性废水基本上都为直接排放,导致河道底部重金属负荷

量较大,河道上覆水水质状况的改善虽有利于底泥中部分重金属的释放,但短期内很难从根本上削减内源负荷;②尽管近年来矿区下游河流水系进行了水环境综合治理和修复工作,但相关工作并不充分,特别是底泥疏浚和生态清淤方面,导致沉积物中重金属(如 Cd 等)仍旧富集严重;③矿区下游河道不仅接纳硫铁矿酸性废水,同时也是周边其他金属矿山酸性废水的受纳水体. 因此,全面开展汇流区矿山环境综合治理、推进河道生态疏浚十分必要. 至于狮牡河呈现的两侧土壤重金属向外扩散趋势,可能主要来自两方面原因,即一方面可能与暴雨期间河水泛滥,雨水裹挟着采矿场露天矿坑废水和平峒酸性废水淹没两侧大片土地并沉积下来有关^[13];另一方面可能与当地村民长期使用狮牡河水灌溉两侧土地,导致土壤重金属富集有一定关系.

在土壤污染程度评价方面,已有一些经典的评价方法,但从实际应用情况看,并非所有评价方法都具有普遍适用性,需要结合具体情况合理选用. 特别是,对于毒性强、生态危害性大的重金属,及时引起关注可能更为重要. 笔者也曾采用地累积指数(I_{geo})评价了该矿区土壤重金属污染状况,结果发现仅 Pb 达到轻微污染水平,其他元素均为未污染状态,这与 Zn、Cr、Cu、Pb、Cd 和 As 含量平均值高于铜陵市土壤背景值的实际情况不大相符. 本研究中,不同用地类型每种重金属含量也存在较大差异性,采用整体评价可能弱化重金属含量高值点位的影响. 由于内梅罗污染指数强调了整体数据中最不利因素,相应放大了极高值带来的不良影响,从而可以起到很好的预警效果^[45, 46]. 由此,笔者认为基于内梅罗污染指数的评价结果更符合该废弃硫铁矿重金属污染的真实状况.

5 结论

(1) 采矿区土壤 pH 呈弱酸性,且除 Ni 以外,其他重金属平均含量均明显高于铜陵市土壤背景值,总体表现出沿采矿场向坡下农田、山林和村庄扩散的趋势,而且 Ni 和 Cd 在狮牡河富集现象相对较为显著.

(2) 采矿区土壤 Pb 和 As 总体属于重度污染, Cu 和 Cd 为中度污染, Zn 和 Cr 为轻度污染, Ni 为无污染状态;根据内梅罗综合污染指数,采矿场和河道属于重度污染,林地处于中度污染,农田和村庄基本属于轻度污染.

(3) 采矿区土壤 Pb、As 和 Cd 均属于中等潜在生态风险水平,其他元素为轻微风险, Pb、As 和 Cd 对潜在生态风险指数的贡献率分别为 33.27%、27.39% 和 20.22%;在用地类型方面,采矿场和河道属于高风险水平,其他均属于轻微风险.

(4)采用多种方法综合识别土壤重金属来源,既可以相互印证,也提高了识别结果的可靠性,初步判定Zn、Cu、Pb、Cd和As主要来自硫铁矿开采活动,Cr主要来自成土母质和农业生产,Ni主要受成土母质和硫铁矿开采活动的共同影响。

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[R]. 北京: 环境保护部, 国土资源部, 2014.
- [2] Zhong X, Chen Z W, Li Y Y, *et al.* Factors influencing heavy metal availability and risk assessment of soils at typical metal mines in eastern China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **400**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.123289.
- [3] Sun R G, Gao Y, Yang Y. Leaching of heavy metals from lead-zinc mine tailings and the subsequent migration and transformation characteristics in paddy soil[J]. *Chemosphere*, 2022, **291**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.132792.
- [4] Gope M, Mastro R E, George J, *et al.* Bioavailability and health risk of some potentially toxic elements (Cd, Cu, Pb and Zn) in street dust of Asansol, India[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, **138**: 231-241.
- [5] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. *GeoJournal*, 1969, **2**(3): 108-118.
- [6] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [7] Azizi M, Faz A, Zornoza R, *et al.* Environmental pollution and depth distribution of metal(loid)s and rare earth elements in mine tailing[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2022, **10**(3), doi: 10.1016/j.jece.2022.107526.
- [8] Galán E, Gómez-Ariza J L, González I, *et al.* Heavy metal partitioning in river sediments severely polluted by acid mine drainage in the Iberian Pyrite Belt[J]. *Applied Geochemistry*, 2003, **18**(3): 409-421.
- [9] Beattie R E, Henke W, Davis C, *et al.* Quantitative analysis of the extent of heavy-metal contamination in soils near Picher, Oklahoma, within the Tar Creek Superfund Site[J]. *Chemosphere*, 2017, **172**: 89-95.
- [10] Hosseini S M, Rezazadeh M, Salimi A, *et al.* Distribution of heavy metals and arsenic in soils and indigenous plants near an iron ore mine in northwest Iran[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(5): 363-367.
- [11] 李如忠, 姜艳敏, 潘成荣, 等. 典型有色金属矿山城市小河流沉积物重金属形态分布及风险评估[J]. *环境科学*, 2013, **34**(3): 1067-1075.
- [12] Li R Z, Jiang Y M, Pan C R, *et al.* Fraction distribution and risk assessment of heavy metals in stream sediments from a typical nonferrous metals mining city[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(3): 1067-1075.
- [13] He B H, Zhao X L, Li P, *et al.* Lead isotopic fingerprinting as a tracer to identify the pollution sources of heavy metals in the southeastern zone of Baiyin, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **660**: 348-357.
- [14] Wang Z X, Yu Y J, Ye T T, *et al.* Distribution characteristics and environmental risk assessment following metal(loid)s pollution incidents at Southwest China mining site[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2022, **32**(12): 4062-4075.
- [15] 成晓梦, 孙彬彬, 吴超, 等. 浙中典型硫铁矿矿区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.
- [16] 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.
- [17] 黄华斌, 林承奇, 胡恭任, 等. 基于PMF模型的九龙江流域农田土壤重金属来源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(1): 430-437.
- [18] Huang H B, Lin C Q, Hu G R, *et al.* Source appointment of heavy metals in agricultural soils of the Jiulong River Basin based on positive matrix factorization[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 430-437.
- [19] 梁家辉, 田亦琦, 费杨, 等. 华北典型工矿城镇土壤重金属来源解析及潜在生态风险评价[J]. *环境科学*, 2023, **44**(10): 5657-5665.
- [20] Liang J H, Tian Y Q, Fei Y, *et al.* Source apportionment and potential ecological risk assessment of soil heavy metals in typical industrial and mining towns in North China[J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(10): 5657-5665.
- [21] 张恬雨, 胡恭任, 于瑞莲, 等. 基于PMF模型的垃圾焚烧厂周边农田土壤重金属源解析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(12): 5718-5727.
- [22] Zhang T Y, Hu G R, Yu R L, *et al.* Source analysis of heavy metals in farmland soil around a waste incineration plant based on PMF model[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(12): 5718-5727.
- [23] 王成, 赵艳萍, 谢鸣捷. 苏南典型工农业交错区土壤铅富集特征及源解析——基于PCA-PMF方法[J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(1): 279-287.
- [24] Wang C, Zhao Y P, Xie M J. Characteristics of lead enrichment in the soil from a typical peri-urban agricultural area of the southern Jiangsu and source appointment based on the PCA-PMF method[J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(1): 279-287.
- [25] 陆金, 赵兴青. 铜陵狮子山矿区土壤重金属污染特征及生态风险评价[J]. *环境化学*, 2017, **36**(9): 1958-1967.
- [26] Lu J, Zhao X Q. Characteristics and ecological risk assessment of polluted soil by heavy metals in Shizishan, Tongling[J]. *Environmental Chemistry*, 2017, **36**(9): 1958-1967.
- [27] 陈淑英. 铜陵市杨山冲尾矿土壤-植物典型重金属分布特征与污染研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.
- [28] Chen S Y. Distribution characteristics and pollution of typical heavy metals in soil-plant in Yangshan Chongwei Mine, Tongling City[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020.
- [29] 王春光, 刘军省, 殷显阳, 等. 基于IDW的铜陵地区土壤重金属空间分析及污染评价[J]. *安全与环境学报*, 2018, **18**(5): 1989-1996.
- [30] Wang C G, Liu J X, Yin X Y, *et al.* Spatial analysis and pollution assessment of heavy metals in the soils of Tongling urban area based on IDW[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2018, **18**(5): 1989-1996.
- [31] 张宇, 邵拥军, 周鑫, 等. 安徽铜陵新桥铜硫铁矿床胶状黄铁矿主、微量元素特征[J]. *中国有色金属学报*, 2013, **23**(12): 3492-3502.
- [32] Zhang Y, Shao Y J, Zhou X, *et al.* Major and trace elements' characteristics of colloidal pyrites in Xinqiao Cu-S-Fe deposit, Tongling, Anhui Province, China[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2013, **23**(12): 3492-3502.
- [33] 谢巧勤, 陈天虎, 范子良, 等. 铜陵新桥硫铁矿床中胶状黄铁矿微尺度观察及其成因探讨[J]. *中国科学: 地球科学*, 2014, **44**(12): 2665-2674.
- [34] Xie Q Q, Chen T H, Fan Z L, *et al.* Morphological characteristics

- and genesis of colloform pyrite in Xinqiao Fe-S deposit, Tongling, Anhui Province[J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2014, **44**(12): 2665-2674.
- [24] 胡发卯, 陈雷, 林刚, 等. 安徽省铜陵县桃园硫铁矿核査矿区资源储量核査报告[R]. 马鞍山: 安徽省化工地质勘查总院地质分院, 2009.
- [25] 王宇, 郑青雅, 胡兆云, 等. 狮牡河重金属污染及生态风险评价[J]. *安徽农业大学学报*, 2022, **49**(3): 469-475.
Wang Y, Zheng Q Y, Hu Z Y, *et al.* Pollution and ecological risk assessment of heavy metals in Shimu River[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2022, **49**(3): 469-475.
- [26] 李如忠, 徐晶晶, 姜艳敏, 等. 铜陵市惠溪河滨岸带土壤重金属形态分布及风险评估[J]. *环境科学研究*, 2013, **26**(1): 88-96.
Li R Z, Xu J J, Jiang Y M, *et al.* Fraction distribution and ecological risk assessment of soil heavy metals in the riparian zone of Huixi stream in Tongling city[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2013, **26**(1): 88-96.
- [27] Paatero P, Tapper U. Positive matrix factorization: a non-negative factor model with optimal utilization of error estimates of data values[J]. *Environmetrics*, 1994, **5**(2): 111-126.
- [28] 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.
- [29] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [30] Zhang Y X, Song B, Zhou Z Y. Pollution assessment and source apportionment of heavy metals in soil from lead-Zinc mining areas of South China [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2023, **11**(2), doi: 10.1016/j.jece.2023.109320.
- [31] 陈莉微, 徐晓春, 王军, 等. 铜陵相思河流域重金属分布特征研究[J]. *环境科学*, 2014, **35**(8): 2967-2973.
Chen L W, Xu X C, Wang J, *et al.* Distribution of heavy metals in Xiangsi River valley of Tongling, China [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(8): 2967-2973.
- [32] 周艳, 陈樯, 邓绍坡, 等. 西南某铅锌矿区农田土壤重金属空间主成分分析及生态风险评价[J]. *环境科学*, 2018, **39**(6): 2884-2892.
Zhou Y, Chen Q, Deng S P, *et al.* Principal component analysis and ecological risk assessment of heavy metals in farmland soils around a Pb-Zn mine in Southwestern China [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(6): 2884-2892.
- [33] 杨安, 王艺涵, 胡健, 等. 青藏高原表土重金属污染评价与来源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(2): 886-894.
Yang A, Wang Y H, Hu J, *et al.* Evaluation and source of heavy metal pollution in surface soil of Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(2): 886-894.
- [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] Jiang H, Nie J R, Fan S S, *et al.* Integrating GIS to determine the spatial distribution of principal components and the sources of heavy metals in farmland soils near mining area in Tongling, China[J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2018, **27**(5): 2662-2670.
- [36] 贾晗, 刘军省, 王晓光, 等. 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[J]. *环境科学*, 2023, **44**(9): 5275-5287.
- Jia H, Liu J X, Wang X G, *et al.* Pollution characteristics and sources of heavy metals in soil of a typical pyrite concentrated mining area in Anhui Province[J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(9): 5275-5287.
- [37] Men C, Liu R M, Wang Q R, *et al.* Spatial-temporal characteristics, source-specific variation and uncertainty analysis of health risks associated with heavy metals in road dust in Beijing, China[J]. *Environmental Pollution*, 2021, **278**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.116866.
- [38] Su C H, Wang J W, Chen Z W, *et al.* Sources and health risks of heavy metals in soils and vegetables from intensive human intervention areas in South China [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, **857**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.159389.
- [39] 吕建树, 何华春. 江苏海岸带土壤重金属来源解析及空间分布[J]. *环境科学*, 2018, **39**(6): 2853-2864.
Lü J S, He H C. Identifying the origins and spatial distributions of heavy metals in the soils of the Jiangsu Coast [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(6): 2853-2864.
- [40] 孙雪菲, 张丽霞, 董玉龙, 等. 典型石化工业城市土壤重金属源解析及空间分布模拟[J]. *环境科学*, 2021, **42**(3): 1093-1104.
Sun X F, Zhang L X, Dong Y L, *et al.* Source apportionment and spatial distribution simulation of heavy metals in a typical petrochemical industrial city[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(3): 1093-1104.
- [41] Sanz-Robinson J, Williams-Jones A E. The solubility of Nickel (Ni) in crude oil at 150, 200 and 250°C and its application to ore genesis [J]. *Chemical Geology*, 2020, **533**, doi: 10.1016/j.chemgeo.2019.119443.
- [42] Oboirien B O, Thulari V, North B C. Enrichment of trace elements in bottom ash from coal oxy-combustion: effect of coal types [J]. *Applied Energy*, 2016, **177**: 81-86.
- [43] 白雯宇, 徐勃, 郭丽瑶, 等. 淄博市冬季PM_{2.5}载带金属元素污染特征、生态风险评价及来源分析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(5): 2336-2342.
Bai W Y, Xu B, Guo L Y, *et al.* Characteristics, ecological risk assessment, and sources of the polluted metallic elements in PM_{2.5} during winter in Zibo City [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(5): 2336-2342.
- [44] 陈婧. 典型金属矿山城市土壤重金属污染及健康风险评估[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.
Chen J. Pollution and health risk assessment of heavy metals in urban soil and dust near the mine[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013.
- [45] 汪峰, 黄言欢, 李如忠, 等. 有色金属矿业城市典型村镇土壤重金属污染评价及来源解析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(9): 4800-4809.
Wang F, Huang Y H, Li R Z, *et al.* Contamination assessment and source apportionment of soil heavy metals in typical villages and towns in a nonferrous metal mining city [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(9): 4800-4809.
- [46] 余高, 陈芬, 张晓东, 等. 锰矿区周边农田土壤重金属污染特征、来源解析及风险评价[J]. *环境科学*, 2023, **44**(8): 4416-4428.
Yu G, Chen F, Zhang X D, *et al.* Pollution characteristics, source analysis, and risk assessment of heavy metals in the surrounding farmlands of manganese mining area [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(8): 4416-4428.

CONTENTS

Prediction of Autumn Ozone Concentration in the Pearl River Delta Based on Machine Learning	CHEN Zhen, LIU Run, LUO Zheng, <i>et al.</i> (1)
Remote Sensing Model for Estimating Atmospheric PM _{2.5} Concentration in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DAI Yuan-yuan, GONG Shao-qi, ZHANG Cun-jie, <i>et al.</i> (8)
Variation Characteristics of PM _{2.5} Pollution and Transport in Typical Transport Channel Cities in Winter	DAI Wu-jun, ZHOU Ying, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (23)
Characteristics of Secondary Inorganic Ions in PM _{2.5} and Its Influencing Factors in Summer in Zhengzhou	HE Bing, YANG Jie-ru, XU Yi-fei, <i>et al.</i> (36)
Characteristics and Source Apportionment of Carbonaceous Aerosols in the Typical Urban Areas in Chongqing During Winter	PENG Chao, LI Zhen-liang, XIANG Ying, <i>et al.</i> (48)
Analysis of Influencing Factors of Ozone Pollution Difference Between Chengdu and Chongqing in August 2022	CHEN Mu-lan, LI Zhen-liang, PENG Chao, <i>et al.</i> (61)
Analysis of O ₃ Pollution Affected by a Succession of Three Landfall Typhoons in 2020 in Eastern China	HUA Cong, YOU Yuan, WANG Qian, <i>et al.</i> (71)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs Initial Mixing Ratio in Beijing During Summer	ZHANG Bo-tao, JING Kuan, WANG Qin, <i>et al.</i> (81)
Review of Comprehensive Evaluation System of Vehicle Pollution and Carbon Synergistic Reduction	FAN Zhao-yang, TONG Hui, LIANG Xiao-yu, <i>et al.</i> (93)
Study of Peak Carbon Emission of a City in Yangtze River Delta Based on LEAP Model	YANG Feng, ZHANG Gui-chi, SUN Ji, <i>et al.</i> (104)
Driving Forces and Mitigation Potential of CO ₂ Emissions for Ship Transportation in Guangdong Province, China	WENG Shu-juan, LIU Ying-ying, TANG Feng, <i>et al.</i> (115)
Carbon Emission Characteristics and Influencing Factors of Typical Processes in Drinking Water Treatment Plant	ZHANG Xiang-yu, HU Jian-kun, MA Kai, <i>et al.</i> (123)
Distribution Characteristics of Arsenic in Drinking Water in China and Its Health Risk Based on Disability-adjusted Life Years	DOU Dian-cheng, QI Rong, XIAO Shu-min, <i>et al.</i> (131)
Spatiotemporal Occurrence of Organophosphate Esters in the Surface Water and Sediment of Taihu Lake and Relevant Risk Assessment	ZHANG Cheng-nuo, ZHONG Qin, LUAN Bo-wen, <i>et al.</i> (140)
Exposure Level and Risk Impact Assessment of Pesticides and Veterinary Drugs in Aquaculture Environment	ZHANG Kai-wen, ZHANG Hai-yan, KONG Cong, <i>et al.</i> (151)
Variation in Phosphorus Concentration and Flux at Zhutuo Section in the Yangtze River and Source Apportionment	LOU Bao-feng, XIE Wei-min, HUANG Bo, <i>et al.</i> (159)
“Load-Unload” Effect of Manganese Oxides on Phosphorus in Surface Water of the Pearl River Estuary	LI Rui, LIANG Zuo-bing, WU Qi-rui, <i>et al.</i> (173)
Factors Influencing the Variation in Phytoplankton Functional Groups in Fuchunjiang Reservoir	ZHANG Ping, WANG Wei, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (181)
Hydrochemical Characteristics and Formation Mechanism of Groundwater in the Western Region of Hepu Basin, Beihai City	CHEN Wen, WU Ya, ZHANG Hong-xin, <i>et al.</i> (194)
Controlling Factors of Groundwater Salinization and Pollution in the Oasis Zone of the Cherchen River Basin of Xinjiang	LI Jun, OUYANG Hong-tao, ZHOU Jin-long (207)
Spatial-temporal Evolution of Ecosystem Health and Its Influencing Factors in Beijing-Tianjin-Hebei Region	LI Kui-ming, WANG Xiao-yan, YAO Luo-lan (218)
Spatial and Temporal Evolution and Impact Factors Analysis of Ecosystem Service Value in the Liaohe River Delta over the Past 30 Years	WANG Geng, ZHANG Fu-rong (228)
Effects of Photovoltaic Power Station Construction on Terrestrial Environment: Retrospect and Prospect	TIAN Zheng-qing, ZHANG Yong, LIU Xiang, <i>et al.</i> (239)
Spatiotemporal Evolution and Quantitative Attribution Analysis of Vegetation NDVI in Greater Khingan Mountains Forest-Steppe Ecotone	SHI Song, LI Wen, QU Chen, <i>et al.</i> (248)
Spatio-temporal Variation in Net Primary Productivity of Different Vegetation Types and Its Influencing Factors Exploration in Southwest China	XU Yong, ZHENG Zhi-wei, MENG Yu-chi, <i>et al.</i> (262)
Impacts of Extreme Climate Events at Different Altitudinal Gradients on Vegetation NPP in Songhua River Basin	CUI Song, JIA Zhao-yang, GUO Liang, <i>et al.</i> (275)
Spatial and Temporal Evolution and Prediction of Carbon Storage in Kunming City Based on InVEST and CA-Markov Model	Paruke Wusimanjiang, AI Dong, FANG Yi-shu, <i>et al.</i> (287)
Spatial-Temporal Evolution and Prediction of Carbon Storage in Jiuquan City Ecosystem Based on PLUS-InVEST Model	SHI Jing, SHI Pei-ji, WANG Zi-yang, <i>et al.</i> (300)
Soil Carbon Pool Allocation Dynamics During Soil Development in the Lower Yangtze River Alluvial Plain	HU Dan-yang, ZHANG Huan, SU Bao-wei, <i>et al.</i> (314)
Spatial Distribution Patterns of Soil Organic Carbon in Karst Forests of the Lijiang River Basin and Its Driving Factors	SHEN Kai-hui, WEI Shi-guang, LI Lin, <i>et al.</i> (323)
Effect of Land Use on the Stability of Soil Organic Carbon in a Karst Region	CHEN Jian-qi, JIA Ya-nan, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> (335)
Spatial Distribution Characteristics of Soil Carbon and Nitrogen in Citrus Orchards on the Slope of Purple Soil Hilly Area	LI Zi-yang, CHEN Lu, ZHAO Peng, <i>et al.</i> (343)
Effects of Experimental Nitrogen Deposition and Litter Manipulation on Soil Organic Components and Enzyme Activity of Latosol in Tropical Rubber Plantations	XUE Xin-xin, REN Chang-qi, LUO Xue-hua, <i>et al.</i> (354)
Analysis on Driving Factors, Reduction Potential, and Environmental Effect of Inorganic Fertilizer Input in Chongqing	LIANG Tao, ZHAO Jing-kun, LI Hong-mei, <i>et al.</i> (364)
Research Progress on Distribution, Transportation, and Control of Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Chinese Soils	LIU Hao-ran, XING Jing-yi, REN Wen-jie (376)
Prediction of Spatial Distribution of Heavy Metals in Cultivated Soil Based on Multi-source Auxiliary Variables and Random Forest Model	XIE Xue-feng, GUO Wei-wei, PU Li-jie, <i>et al.</i> (386)
Health Risk Assessment and Priority Control Factors Analysis of Heavy Metals in Agricultural Soils Based on Source-oriented	MA Jie, GE Miao, WANG Sheng-lan, <i>et al.</i> (396)
Contamination Characteristics and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in an Abandoned Pyrite Mining Area of Tongling City, China	LI Ru-zhong, LIU Yu-hao, HUANG Yan-huan, <i>et al.</i> (407)
Source Appointment and Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Dust in the Main District Bus Stops of Tianshui City	LI Chun-yan, WANG Xin-min, WANG Hai, <i>et al.</i> (417)
Response of Cadmium in Soil-rice to Different Conditioners Based on Field Trials	TANG Le-bin, LIU Xin-cai, SONG Bo, <i>et al.</i> (429)
Regulation Effects of Humus Active Components on Soil Cadmium Availability and Critical Threshold for Rice Safety	HU Xiu-zhi, SONG Yi, WANG Tian-yu, <i>et al.</i> (439)
Using Biochar and Iron-calcium Material to Remediate Paddy Soil Contaminated by Cadmium and Arsenic	WU Qiu-chan, WU Ji-zi, ZHAO Ke-li, <i>et al.</i> (450)
Research Progress on Characteristics of Human Microplastic Pollution and Health Risks	MA Min-dong, ZHAO Yang-chen, ZHU Long, <i>et al.</i> (459)
Effects of Polystyrene Microplastics Combined with Cadmium Contamination on Soil Physicochemical Properties and Physiological Ecology of <i>Lactuca sativa</i>	NIU Jia-rui, ZOU Yong-jun, JIAN Min-fei, <i>et al.</i> (470)
Transcriptome Analysis of Plant Growth-promoting Bacteria Alleviating Microplastic and Heavy Metal Combined Pollution Stress in Sorghum	LIU Yong-qi, ZHAO Si-yu, REN Xue-min, <i>et al.</i> (480)
Effects of Microplastics on the Leaching of Nutrients and Cadmium from Soil	ZHAO Qun-fang, CHU Long-wei, DING Yuan-hong, <i>et al.</i> (489)
Effect of Microplastics and Phenanthrene on Soil Chemical Properties, Enzymatic Activities, and Microbial Communities	LIU Sha-sha, QIN Jian-qiao, WU Xian-ge (496)
Prediction of Soil Bacterial Community Structure and Function in Minqin Desert-oasis Ecotone Artificial <i>Haloxylon ammodendron</i> Forest	WANG An-lin, MA Rui, MA Yan-jun, <i>et al.</i> (508)
Response of Soil Fungal Community to Biochar Application Under Different Irrigation Water Salinity	ZHENG Zhi-yu, GUO Xiao-wen, MIN Wei (520)
Effects of Organic Fertilizer of Kitchen Waste on Soil Microbial Activity and Function	LIU Mei-ling, WANG Yi-min, JIN Wen-hao, <i>et al.</i> (530)
Response Characteristics of Soil Fungal Community Structure to Long-term Continuous Cropping of Pepper	CHEN Fen, YU Gao, WANG Xie-feng, <i>et al.</i> (543)
Effects of Foliar Application of Silicon Fertilizers on Phyllosphere Bacterial Community and Functional Genes of Paddy Irrigated with Reclaimed Water	LIANG Sheng-xian, LIU Chun-cheng, HU Chao, <i>et al.</i> (555)
Analysis of Bacterial Communities and Antibiotic Resistance Genes in the Aquaculture Area of Changli County	WANG Qiu-shui, CHENG Bo, LIU Yue, <i>et al.</i> (567)
High-throughput qPCR and Amplicon Sequencing as Complementary Methods for Profiling Antibiotic Resistance Genes in Urban Wetland Parks	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, PAN Ting, <i>et al.</i> (576)
Characteristics of Vertical Distribution and Environmental Factors of Antibiotics in Quaternary Sedimentary Column in Urban Areas	LIU Ke, TONG Lei, GAN Cui, <i>et al.</i> (584)
Adsorption Performance and Mechanism of Oxytetracycline in Water by KOH Modified Biochar Derived from Corn Straw	LIU Zong-tang, SUN Yu-feng, FEI Zheng-hao, <i>et al.</i> (594)
Comparison of Pb ²⁺ Adsorption Properties of Biochars Modified Through CO ₂ Atmosphere Pyrolysis and Nitric Acid	JIANG Hao, CHEN Rui-zhi, ZHU Zi-yang, <i>et al.</i> (606)