

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

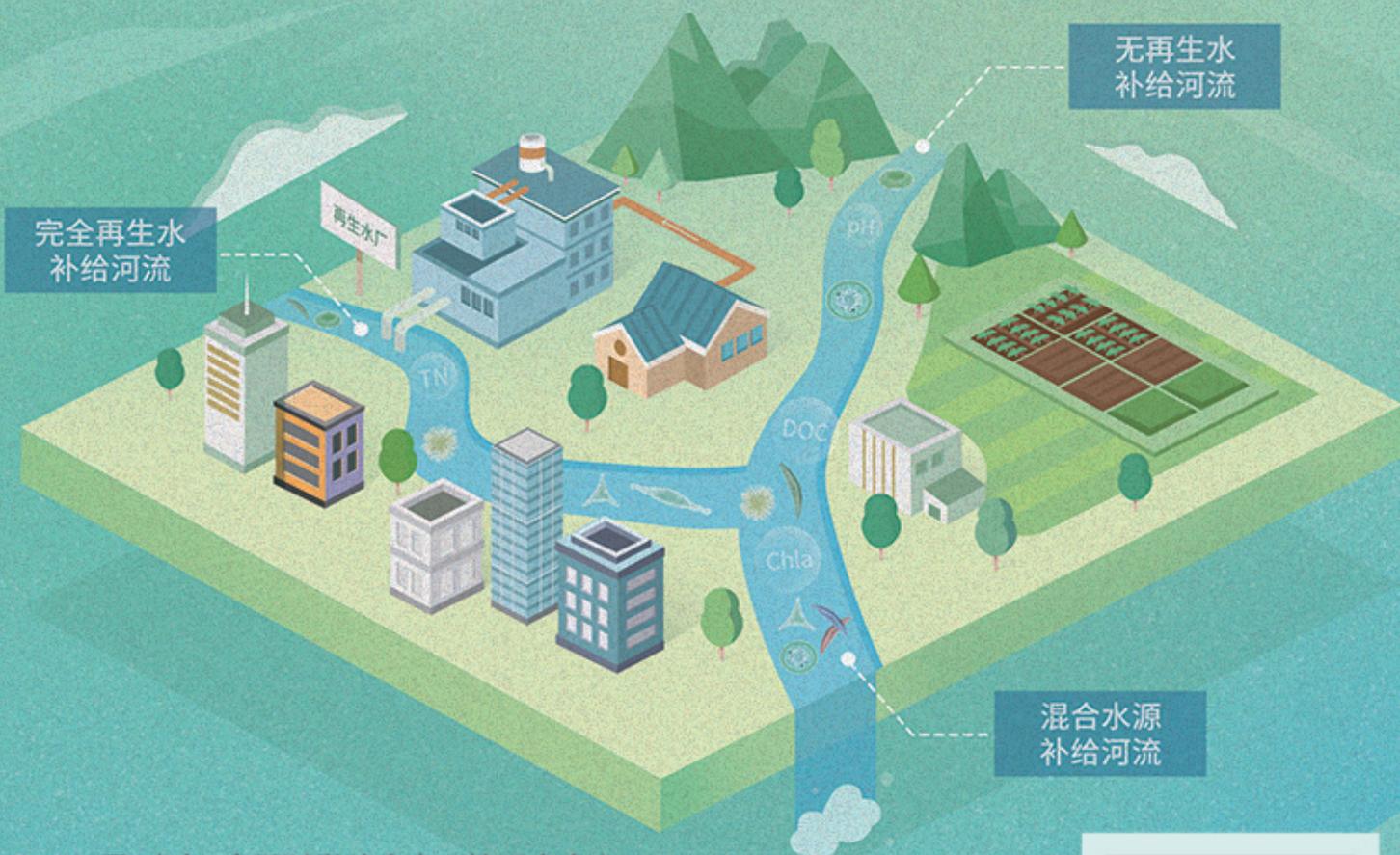
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

不同水源补给河流浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系

侯颖, 李信, 白灵, 白乙娟, 张淑荣, 王圣瑞, 郑蕾, 丁爱中



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年12月

第43卷 第12期

Vol.43 No.12

目次(卷终)

关中平原城市群 PM_{2.5} 时空演变格局及其影响因素 张军, 金梓函, 王玥, 李旭, 戴恩华(5333)

中原城市群 PM_{2.5} 浓度驱动因子联动效应及非线性影响 周志衡, 周廷刚, 秦宁(5344)

长株潭城市群 PM_{2.5} 和 O₃ 浓度时空分布特征及影响因素分析 刘贤赵, 张国桥, 杨文涛, 吴业荣, 李朝奎, 任毅(5354)

张掖市城区大气细颗粒物 PM_{2.5} 的化学组成及来源解析 潘成珂, 黄韬, 高宏, 常莉敏, 宋世杰, 毛潇萱, 王佳欣, 赵渊, 马建民(5367)

2018~2019年冬季天津和青岛 PM_{2.5} 中重金属污染特征与健康风险评估 赵明升, 任丽红, 李刚, 刘亚妮, 赵刚, 张佳浩, 高元官, 杨小阳(5376)

青岛大气降水中金属浓度、溶解度及其来源解析 孔令冬, 祁建华, 张旭(5387)

2015~2021年陕西关中城市群臭氧污染变化趋势 赵伟, 王硕, 庞晓蝶, 高博, 卢清, 刘明, 陈来国, 范绍佳(5399)

海南省背景区域臭氧及其前体物污染特征 谢文晶, 邢巧, 谢东海, 吴晓晨, 胡珊珊, 徐文帅(5407)

基于双维度校验的珠三角区域臭氧生成机制长期时空演化特征识别 杨雷峰, 谢丹平, 杨俊, 韩静磊, 刘丽君, 袁自冰(5421)

郑州市夏季大气 VOCs 污染特征及来源解析 齐一谨, 王玲玲, 倪经纬, 何海洋, 赵东旭, 龚山陵(5429)

兰州市夏季挥发性有机物污染特征及来源解析 杨燕萍, 陈强, 孟宪红, 孙健, 王莉娜, 陶会杰, 杨丽丽(5442)

地下停车场 VOCs 污染特征与健康风险评估 刘妍, 杨宁, 孙露娜, 吴亚君, 宋鹏飞, 赵耀, 姜昆, 毛洪钧(5453)

缸内直喷汽油车颗粒物化学组分特征 李家琛, 葛蕴珊, 王浩浩, 王欣, 郝利君, 谭建伟(5464)

废弃物焚烧处理温室气体排放情景模拟与预测 严薇, 刘舒乐, 吴正方, 高庆先, 杜海波, 马占云, 冯鹏(5470)

长江颗粒(类)金属元素分布、来源和向海输送 刘珈铭, 吴文涛, 刘笑天, 刘军, 王昊, 臧家业, 张爱军, 冉祥滨(5478)

澜沧江水系氮磷污染及硝酸盐来源解析 郭树芳, 陈安强, 刁斌, 居学海, 黄宏坤, 刘建香, 毛妍婷, 郭云周, 雷宝坤(5491)

小浪底水库水沙调控期滨河湿地地下水与河水转化关系 肖春艳, 刘怡凡, 赵同谦, 郭晓明, 陈飞宏, 杨晨(5499)

磨刀门水道输水水库群饮用水水源水质的时空变化 张坤锋, 昌盛, 张琦, 王思瑞, 谢琼, 张茉莉, 樊月婷, 杨光, 付青(5509)

疫情背景下长江中游地区典型饮用水源中 PPCPs 分布特征与风险评估 樊月婷, 昌盛, 张坤锋, 涂响, 杨光, 王山军, 张茉莉, 谢琼, 付青(5522)

北江中上游地表水和沉积物中 PAHs 和 PCBs 污染特征和风险评估 昌盛, 白云松, 涂响, 付青, 张坤锋, 潘杨, 王山军, 杨光, 汪星(5534)

平朔矿区不同水体水化学特征及氟分布成因 孙龙, 刘廷玺, 段利民, 张文瑞, 郑国峰(5547)

三峡水库典型消落带土壤 DOM 组分特征及其对有效态镉释放影响 张宝豪, 武亚遵, 徐东昱, 高丽, 李艳艳, 王启文, 高博(5560)

不同溶解氧条件下沉积物-水体系磷循环 刘笑天, 刘军, 王以斌, 刘珈铭, 吴文涛, 冯耀, 臧家业, 冉祥滨(5571)

2011~2019年鄱阳湖水质演化特征及主要污染因子解析 谢慧钰, 胡梅, 嵇晓燕, 曹炳伟, 贾世琪, 徐建, 金小伟(5585)

乌梁素海表层沉积物中营养盐和重金属分布特征以及风险评估 杜彩丽, 黎佳茜, 李国文, 李晓光, 赵琛, 张列宇(5598)

生物炭吸附雨水径流难生物降解有机氮效能及机制 苏增辉, 孙萍, 陈友媛, 罗冠杨, 王秀海, 郑天元(5608)

不同水源补给河流浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系 侯颖, 李信, 白灵, 白乙娟, 张淑荣, 王圣瑞, 郑蕾, 丁爱中(5616)

锰氧化物改性生物炭基质材料对典型喹诺酮类抗生素的吸附及其在人工湿地的应用 高惠子, 田伟君, 张子钰, 邹梦圆, 杨淑洁, 赵婧, 储美乐, 江俊峰(5627)

KOH 活化小麦秸秆生物炭对废水中四环素的高效去除 徐晋, 马一凡, 姚国庆, 张宇珊, 杨李琪, 周娜, 范世锁(5635)

改性凹凸棒负载硫化亚铁的制备及其对水中 Mo(VI) 的吸附机制 练建军, 邹洪艳, 叶天然, 孔巧平, 徐晴, 吴朝阳, 陈波, 牛司平(5647)

桉树生物炭负载绿色合成纳米零价铁去除水中 Cr(VI) 刘沁文, 丁爱中, 梁信, 谢颖辉, 鄢俊彬, 李娜(5657)

镁改性硅藻土回收废水氮磷产物对水中 Pb²⁺ 和 Zn²⁺ 的去除 吴盈秋, 夏鹏, 李远, 王学江(5667)

钠化改性河南南部膨润土吸附亚甲基蓝性能分析 程飞鹏, 杨冬亮, 常乐, 吴登峰(5676)

上海市典型工业用地土壤和地下水重金属复合污染特征及生态风险评估 李晓曼, 李青青, 杨洁, 黄沈发, 张施阳, 吉敏(5687)

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 马杰, 刘萍, 刘今朝, 郭春会, 张秀, 王玲灵(5698)

典型石油场地周边土壤重金属形态特征及源解析 官健, 何连生, 李强, 王耀锋, 曹莹, 刘晓雪, 高存富(5710)

基于 PMF 模型的垃圾焚烧厂周边农田土壤重金属源解析 张恬雨, 胡恭任, 于瑞莲, 林承奇, 黄华斌(5718)

香河县农田土壤重金属污染生态与健康风险评估 陈瑜佳, 屈星辰, 张斌, 李现涛, 朱国平, 查同刚(5728)

地质构造单元交接带表土中重金属污染特征对比及源解析:以重庆城口地区为例 刘永林, 吴梅, 刘睿, 李军, 倪润祥, 刘双燕, 田兴磊, 赵家宇, 刘怡, 夏传波(5742)

新疆典型地区植物和土壤多环芳烃污染特征、来源解析及健康风险评估 杨北辰, 解启来, 郑芊, 郑晓波, 叶金明, 唐成金, 梁晓晖(5751)

肥料调控强化象草对重度 Cd 污染农田修复效果 伍港繁, 周航, 唐棋, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒(5761)

微碱性土壤施用烟秆生物炭与磷酸盐降低小麦籽粒镉积累 杨艳征, 张银鸽, 李畅, 扶海超, 秦世玉, 王龙, 刘亥扬, 刘红恩, 唯福庆, 赵鹏(5769)

产多胺细菌提高小麦 Cd 抗性和消减 Cd 吸收机制 姬明飞, 吴雪姣, 李晚哲, 陈兆进, 姚伦广, 张君, 庞发虎, 韩辉(5778)

硫酸盐还原菌对碱性和酸性农田土壤中重金属的钝化效果及其作用机制 高羽, 刘雨辰, 郭晓芳, 吉莉, 张桂香, 张哲海, 夏红丽, 何文峰, 张博远(5789)

巨大芽孢杆菌对土壤理化性质及植物富集镉的影响 王萍, 李一曼, 王雪佳, 许亚琼, 张书强, 李倩, 徐凯莉, 李荣华, 张增强(5798)

嘉陵江滨岸带不同土地利用类型土壤真菌群落结构与功能多样性 竹兰萍, 徐飞, 王佳颖, 朱智豪, 张拓, 张富斌(5808)

添加生物炭对琼北地区双季稻田生物固氮的影响 赵炎, 袁新生, 唐瑞杰, 邵晓辉, 李凯凯, 文昌丽, 陈琦琦, 伍延正, 孟磊, 汤水荣(5819)

基于 g-C₃N₄ 研究环境中甲氧苄啶的光降解行为及其毒性 朱娜, 王星阳, 焦俊恒, 王磊, 梁栋, 李广科, 桑楠(5832)

“双碳”目标下中国省域碳排放核算分析 杨柏, 秦广鹏, 郭钦(5840)

长株潭城市群地类转移的碳传导效应与预测 杨旭, 刘贤赵(5850)

基于分类的张家港市生活垃圾典型处置情景环境效益分析 张涛, 郑钧文, 孙煜琛, 白冬锐, 杨婷, 张冰, 郭含文, 陈坦, 王洪涛(5861)

《环境科学》第43卷(2022年)总目录 (5873)

《环境科学》征订启事(5386) 《环境科学》征稿简则(5521) 信息(5607, 5741, 5768)

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

马杰^{1,2}, 刘萍^{1,2}, 刘今朝³, 郭春会⁴, 张秀^{1,2*}, 王玲灵¹

(1. 重庆市生态环境监测中心, 重庆 401147; 2. 农村生态与土壤监测技术研究中心, 重庆 401147; 3. 重庆市国土整治中心, 重庆 400020; 4. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715)

摘要:以重庆市南川区某煤矸山周边农用地土壤为研究对象,运用内梅罗指数法、地累积指数法和 GIS 地统计分析土壤重金属污染水平和分布特征,并采用相关性分析、主成分分析(PCA)和绝对因子得分-多元线性回归分析(APCS-MLR),探析研究区土壤重金属来源及其贡献率.结果表明,煤矸山周边旱地土壤中 8 项重金属含量均显著高于水田($P < 0.05$),Cd、Hg、As、Pb 和 Cr 含量显著高于园地($P < 0.05$);园地土壤中 Cu、Ni 和 Zn 含量显著高于水田($P < 0.05$).内梅罗综合污染指数表现为旱地(2.77) > 园地(1.04) > 水田(0.59),重金属污染程度由大到小表现为: Cd > Cu > Ni > Zn > Hg、As、Cr 和 Pb. 污染累积程度由大到小表现为: Cd > Hg > Cu > Ni > Zn > As > Cr > Pb. 污染源解析表明, Cd 和 Hg 存在显著正相关关系($r = 0.756$, $P < 0.01$),主要受到煤矸山长期堆存等矿业活动影响,贡献率分别为 51.6% 和 52.9%. Cu、Ni 和 Zn 之间存在显著正相关关系(r 为 0.755~0.955, $P < 0.01$),主要受到施肥等农业活动影响,贡献率分别为 72.3%、63.3% 和 59.2%. As 和 Pb 主要受到土壤母质等自然因素影响,贡献率分别为 60.8% 和 86.9%. Cr 主要受到施肥等农业活动和土壤母质等自然因素共同影响,贡献率分别为 38.9% 和 40.9%. 应重点加强对 Cd 的来源管控和污染防治.

关键词:煤矸山; 土壤; 重金属; 农用地; 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(2022)12-5698-12 DOI: 10.13227/j.hjkk.202202123

Pollution Evaluation and Quantitative Traceability Analysis of Heavy Metals in Farmland Soils Around the Gangue Heap of a Coal Mine in Chongqing

MA Jie^{1,2}, LIU Ping^{1,2}, LIU Jin-zhao³, GUO Chun-hui⁴, ZHANG Xiu^{1,2*}, WANG Ling-ling¹

(1. Chongqing Ecological and Environmental Monitoring Center, Chongqing 401147, China; 2. Rural Ecology and Soil Monitoring Technology Research Center, Chongqing 401147, China; 3. Chongqing Land Consolidation and Rehabilitation Center, Chongqing 400020, China; 4. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: To analyze the level and distribution characteristics of heavy metal pollution in the soil of farmland surrounding the gangue heap of a coal mine in Nanchuan, Chongqing, the Nemerow pollution index, Muller index, and ArcGIS Geostatistical methods were used. Additionally, to investigate the sources and contribution rate of heavy metals in the soil, correlation analysis, principal component analysis (PCA), and absolute principal component score-multiple linear regression receptor modeling (APCS-MLR) were employed. The results showed that it contained significantly higher amounts of Cd, Hg, As, Pb, Cr, Cu, Ni, and Zn in dry land than that in the paddy field ($P < 0.05$) and higher amounts of Cd, Hg, As, Pb, and Cr than that in the orchard ($P < 0.05$). However, there was only significant amounts of Cu, Ni, and Zn in the orchard than that in the paddy field ($P < 0.05$). The comprehensive Nemerow pollution index was: dry land (2.77) > garden land (1.04) > paddy field (0.59); the degree of heavy metal pollution was: Cd > Cu > Ni > Zn > Hg, As, Cr, and Pb; and the accumulation degree of heavy metals in the soil was: Cd > Hg > Cu > Ni > Zn > As > Cr > Pb. The analysis of pollution sources showed that Cd and Hg had a significant positive correlation ($r = 0.756$, $P < 0.01$), which was mainly affected by mining activities such as long-term accumulation of the gangue heap of the coal mine with a contribution rate of 51.6% and 52.9%, respectively. In addition, there was a significant positive correlation between Cu, Ni, and Zn (r 0.755-0.955, $P < 0.01$), which was mainly affected by agricultural activities such as fertilization with contribution rates of 72.3%, 63.3%, and 59.2%, respectively. Furthermore, the amount of As and Pb was affected by natural factors with contribution rates of 60.8% and 86.9%, respectively, and Cr was affected by agricultural factors and natural factors with contribution rates of 38.9% and 40.9%, respectively. Therefore, it is necessary to strengthen the source control of Cd, as well as pollution prevention.

Key words: gangue heap; soil; heavy metal; farmland; APCS-MLR receptor model; source apportionment

煤炭作为我国重要的主体能源,长期以来与国民经济快速增长密不可分,但由于开采技术不成熟、管理粗放和对环境问题不重视,在开采、分选和加工过程中产生了大量煤矸石,已成为我国最大的工业固体废弃物之一^[1~3]. 据统计我国煤矸石堆存量已超 60 亿 t,现存煤矸山占地约 20 km²,不仅造成大量土地资源的浪费,而且长期露天堆放,加剧了煤矸石的风化氧化,对周边生态环境造成一定威胁^[4~6].

近年来,煤矸山周边土壤重金属污染问题得到学者广泛关注. 陈昌东等^[7]研究发现平顶山矿区煤矸山周边土壤 Cd、Cr、Pb 和 Cu 污染较严重,内梅罗综

收稿日期: 2022-02-18; 修订日期: 2022-04-11

基金项目: 重庆市生态环境局项目(21C00344); 重庆市科技局科研机构绩效激励引导专项(cstc2021jxjl2002)

作者简介: 马杰(1986~),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为土壤和农村生态环境监测与评价, E-mail: pony312@qq.com

* 通信作者, E-mail: 704671443@qq.com

合污染指数为 47.94, 达到重度污染级别. 丛鑫等^[8]研究发现海州煤矿煤矸山周边土壤污染程度由高到低依次为 Cr、Ni、Cu、Pb 和 Zn, 其中 Ni 是最主要的潜在生态风险因子. Jiang 等^[9]研究发现吉林羊草沟煤矸山周边土壤潜在生态风险由高到低依次为 Cd、Pb、Cu、Cr 和 Zn. 上述研究还表现出距煤矸山越远, 土壤重金属含量总体呈下降趋势. 可见, 煤矸山经长年堆积和风化淋溶等作用会导致周边土壤重金属污染和富集. 除煤矸山外, 土壤重金属污染和富集还可能受自然源(成土母质等)、工业源(采矿、冶炼、燃煤、交通等)、农业源(农业投入品、灌溉水等)和生活源(生活污水、生活垃圾等)影响^[10,11]. 因此, 研究煤矸山对周边土壤环境的影响应结合区域实际情况, 开展土壤污染风险调查和评价, 探析污染来源和成因, 以便后续有针对性地开展污染防治.

当前土壤污染评价和源解析方法较多. 其中传统污染评价方法主要有内梅罗指数法、地累积指数法和潜在生态风险指数法等, 其缺点在于不能反映土壤含量空间分布特征和变化规律^[12~14]. 随着 GIS 地统计分析和 BP 人工神经网络模型应用到土壤污染预测和评价中, 逐步弥补了这一缺点, 配合传统方法使结果更加直观^[15~17]. 土壤重金属源解析主要有多元统计方法、GIS 成图法、同位素示踪法、正定矩阵因子分解法(PMF)和绝对因子得分-多元线性回归法(APCS-MLR)等^[18~22]. 多元统计方法是最常用的源解析方法, 包括主成分分析(PCA)、聚类分析(CA)和相关性分析等, 但不能获取污染元素的来源贡献, 仅能定性分析, 往往需配合绝对因子得分-多元线性回归法(APCS-MLR), 使解析结果量化^[10].

重庆作为西南地区最老的煤炭工业基地, 其中南川区曾是重庆三大原煤生产基地之一, 探明资源储量 2.1 亿 t, 产业结构转型之前, 采掘业产值在规模以上工业总产值的占比高达 50% 以上, 煤矿的过度开采, 遗留下较多煤矸山^[23]. 本文选取南川区某煤矸山周边农用地土壤为研究对象, 测定煤矸石和土壤中 Cd、Hg、As、Pb、Cr、Cu、Ni 和 Zn 含量, 运用多种评价方法和 GIS 地统计分析掌握土壤重金属污染水平和含量分布特征, 并利用相关分析、主成分分析(PCA)和绝对因子得分-多元线性回归法(APCS-MLR), 对土壤重金属来源进行定量解析, 以为区域土壤重金属污染防治提供科学支撑, 同时为探索一套重庆丘陵山区可复制、可推广的评估方法累积经验.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

重庆市南川区属亚热带湿润季风气候, 雨热同季, 年平均气温为 16.3℃, 年降雨量为 1 245 mm. 研究区位于南川区西南部, 面积约 40 hm², 海拔高度 570~680 m(图 1), 周边 1 km 范围内无其他工业、矿业污染源. 研究区东部主要干道和支路交汇处有集中居民区, 面积约 4 hm². 南部有煤矸山 1 座, 通过汽车从北侧主要干道和支路运输煤矸石, 经逐年顺坡倾倒入堆砌形成, 已堆存近 40 a, 高约 40 m, 现存废渣 10 万 t, 占地面积约 0.5 hm², 2019 年停止排矸. 煤矸山三面环山, 仅北侧至主要干道之间有成片农用地, 面积约 35 hm², 其中旱地面积约 13 hm², 以种植玉米为主, 水田面积约 7 hm², 以种植水稻为主, 园地面积约 15 hm², 以种植李子为主. 旱地和园地以黄壤为主, 水田以水稻土为主.

1.2 样品采集与测定

鉴于重庆地处丘陵山区, 耕地破碎程度高, 为保障研究区点位布设具有代表性, 根据现场情况, 在每个耕作台面进行点位布设, 共布设 31 个(图 1), 其中水田区 9 个, 旱地和园地区各 11 个. 现场用双对角线 5 点混合法采 0~20 cm 表层土壤, 经四分法取土装入自封袋, 并记录采样点和周边环境信息, 贴上样品标签带回实验室. 自然风干后, 将测定 pH 的土壤过 2 mm 孔径筛, 按《土壤 pH 值的测定电位法》(HJ 962-2018)要求^[24], 用 SevenExcellence 酸度计



图 1 研究区区位和土壤采样点位分布示意

Fig. 1 Location of the study area and distribution of soil sampling

测定;将测定 Cd 和 Hg 的土壤过 0.150 mm 孔径筛,Cd 按《土壤质量铅、镉的测定 石墨炉原子吸收分光光度法》(GB/T 17141-1997)要求^[25],用 ZEE nit700P 石墨炉火焰原子吸收分光光度计测定,Hg 按《土壤质量总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法第 1 部分:土壤中总汞的测定》(GB/T 22105.1-2008)要求^[26],用 AFS-9750 原子荧光光度计测定;将测定 Pb、Cr、Cu、Zn、Ni 和 As 的土壤过 0.075 mm 孔径筛,按《土壤和沉积物无机元素的测定 波长色散 X 射线荧光光谱法》(HJ 780-2015)要求^[27],用 S8 TIGER 型 X 荧光光谱仪测定.此外,在研究区采集 3 个表层煤矸石样品,带回实验室经自然风干,研磨过 0.150 mm 孔径筛,经微波消解法预处理后,Pb、Cr、Cu、Zn、Ni 和 As 按《固体废物 22 种金属元素的测定 电感耦合等离子体发射光谱法》(HJ 781-2016)要求^[28],用 ICP-AES Icap6300Radial 测定,Hg 和 As 按《固体废物汞、砷、硒、铋、锑的测定 微波消解/原子荧光法》(HJ 702-2014)要求^[29],用 AFS-9750 原子荧光光度计测定.土壤和煤矸石样品分析测试条件均满足标准分析方法质控要求.

1.3 评价方法

1.3.1 内梅罗指数法

内梅罗指数法兼顾单因子污染指数的平均值和最高值,突出重度污染物对土壤环境的影响,计算公式为式(1)和式(2)^[12].

$$P_i = C_i/S_i \quad (1)$$

$$P_{\text{综}} = \sqrt{[(C_i/S_i)_{\text{max}}^2 + (C_i/S_i)_{\text{ave}}^2]/2} \quad (2)$$

式中, P_i 为土壤重金属 i 污染指数; C_i 为土壤重金属 i 实测值; S_i 为土壤重金属 i 评价参比值; $(C_i/S_i)_{\text{max}}$ 和 $(C_i/S_i)_{\text{ave}}$ 分别表示土壤重金属 i 污染指数

的最大值与均值; $P_{\text{综}}$ 为综合污染指数.评价参比值采用《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618-2018)中的风险筛选值(表 1),其中研究区水田 Cd、Hg、As、Pb 和 Cr 选用风险筛选值中“水田”限值,Cu 选用风险筛选值中“其他”限值;旱地 Cd、Hg、As、Pb、Cr 和 Cu 选用风险筛选值中“其他”限值;园地 Cd、Hg、As、Pb 和 Cr 选用风险筛选值中“其他”限值,Cu 选用风险筛选值中“园地”限值.

单因子污染指数分 5 个等级,分别为无污染($P_i \leq 1$)、轻微污染($1 < P_i \leq 2$)、轻度污染($2 < P_i \leq 3$)、重度污染($3 < P_i \leq 5$)和极强污染($P_i > 5$).综合污染指数分为 5 个等级,分别为安全($P_{\text{综}} \leq 0.7$)、警戒线($0.7 < P_{\text{综}} \leq 1.0$)、轻污染($1.0 < P_{\text{综}} \leq 2.0$)、中污染($2.0 < P_{\text{综}} \leq 3.0$)和重污染($P_{\text{综}} > 3.0$).

1.3.2 地质累积指数法

地质累积指数法既考虑了自然成土过程地质背景的影响,也考虑了人为活动对重金属污染的影响,常用于反映重金属富集程度,计算公式为式(3)^[13].

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \frac{C_n}{KB_n} \quad (3)$$

式中, I_{geo} 为地累积指数; C_n 为土壤重金属 n 实测值; B_n 为土壤重金属 n 背景参比值; K 为成岩作用可能对背景值的影响,修正值 K 取 1.5.背景参比值来源于重庆土地质量地球化学调查数据(表 1)^[30].

地质累积指数分为 7 个等级,分别为无污染($I_{\text{geo}} < 0$)、轻度污染($0 \leq I_{\text{geo}} < 1$)、偏中污染($1 \leq I_{\text{geo}} < 2$)、中度污染($2 \leq I_{\text{geo}} < 3$)、偏重污染($3 \leq I_{\text{geo}} < 4$)、重污染($4 \leq I_{\text{geo}} < 5$)和严重污染($I_{\text{geo}} \geq 5$).

表 1 农用地土壤污染风险筛选值和背景值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

Table 1 Risk screening values and regional background values of agricultural soils/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

项目		风险筛选值				背景值
		pH ≤ 5.5	5.5 < pH ≤ 6.5	6.5 < pH ≤ 7.5	pH > 7.5	
Cd	水田	0.3	0.4	0.6	0.8	0.28
	其他	0.3	0.3	0.3	0.6	
Hg	水田	0.5	0.5	0.6	1.0	0.069
	其他	1.3	1.8	2.4	3.4	
As	水田	30	30	25	20	6.62
	其他	40	40	30	25	
Pb	水田	80	100	140	240	28.1
	其他	70	90	120	170	
Cr	水田	250	250	300	350	74.4
	其他	150	150	200	250	
Cu	果园	150	150	200	200	24.6
	其他	50	50	100	100	
Ni		60	70	100	190	31.6
Zn		200	200	250	300	81.9

1.4 绝对因子得分-多元线性回归模型

绝对因子得分-多元线性回归模型 (APCS-MLR) 是通过主成分分析 (PCA) 得到绝对主成分因子得分 (APCS), 再利用各重金属含量分别对 APCS 进行多元线性回归分析, 获取回归系数, 计算各个主因子对土壤点位重金属含量的贡献量^[22]. 具体计算步骤如下:

首先将各重金属含量数据标准化[式(4)], 并计算主因子得分; 其次对各重金属引入 1 个浓度为 0 的人为样本, 计算各重金属 0 浓度样本的因子分数[式(5)]; 然后由主因子得分减去 0 浓度样本因子分数得到每个样本的 APCS; 最后将 APCS 作为自变量, 以各重金属含量作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量[式(6)].

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

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

$$C_j = b_{j0} + \sum_{p=1}^p (b_{pj} \times \text{APCS}_p) \quad (6)$$

式中, Z_{ij} 为第 i 个样本中第 j 种重金属含量标准化值, C_{ij} 为第 i 个样本中第 j 种重金属含量, \bar{C}_j 和 δ_j 分别为第 j 种重金属平均含量和标准偏差, Z_{j0} 为重金属元素 j 浓度为 0 的样本, C_j 为第 j 种重金属含量, b_{j0} 为第 j 种重金属多元回归的常数项, b_{pj} 为污染源 p 对第 j 种重金属的回归系数, APCS_p 是绝对主成分因子得分, p 为因子个数, $b_{pj} \times \text{APCS}_p$ 为污染源 p 对 C_j 的贡献率.

1.5 数据处理

数据统计由 Excel 2013 完成, 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 SPSS 24.0 完成, 地统计分析由 ArcGIS 10.2 完成.

2 结果与讨论

2.1 土壤重金属含量特征

研究区表层土壤 pH 值和重金属含量如表 2 所示. 旱地土壤 pH 均值为 6.4, 低于水田和园地土壤 pH 均值, 且与水田和园地存在显著差异 ($P < 0.05$). 旱地土壤中除 Cu 均值含量略低于园地外, 其他 7 项重金属均高于园地和水田, 且 Cd、Hg、As、Pb 和 Cr 含量与园地存在显著差异 ($P < 0.05$), 8 项重金属含量均与水田存在显著差异 ($P < 0.05$); 园地土壤中除 Hg 和 Cr 均值略低于水田外, 其他 6 项重金属含量高于水田, 且 Cu、Ni 和 Zn 含量与水田存在显著差异 ($P < 0.05$). 与土壤背景值比, 旱地、园地和水田 8 项重金属均值都高于背景值. 从变异系数来看, 旱地土壤 pH 和 8 项重金属变异系数均高于园地和水田, 说明旱地受人为活动影响更大. 与煤矸石重金属含量比(表 2), 除 Hg 外, 旱地土壤中其他 7 项重金属均值高于煤矸石. 有研究表明, 煤矸石长期堆存, 在自然条件下发生淋溶, 重金属会以硫酸盐形式析出, 通过雨刷冲刷迁移至土壤中, 经多年积累使周边土壤酸化, 重金属含量升高, 甚至高于煤矸石^[31,32]. 张明亮等^[33]通过淋溶模拟试验发现土壤重金属含量随距煤矸石堆的距离减小而呈明显上升趋势. 故推测研究区煤矸山堆存近 40 a, 对周边旱地土壤酸化和重金属富集影响较大.

2.2 土壤重金属含量空间分布

利用 ArcGIS 10.2 地统计克里格空间插值分

表 2 土壤和煤矸石重金属含量统计情况¹⁾/mg·kg⁻¹

Table 2 Statistical characteristics of heavy metals concentrations in soil/mg·kg⁻¹

区域	统计	pH	Cd	Hg	As	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
旱地 (n=11)	最小值	4.7	0.33	0.125	7.93	25.6	86.9	29.5	33.6	109
	最大值	8.4	2.85	0.463	17.3	68.1	169	97.8	161	327
	平均值	6.4a	1.43a	0.307a	11.9a	41.0a	117a	60.6a	77.4a	172a
	变异系数/%	21.0	59.4	30.1	25.0	25.3	22.6	38.9	53.0	44.2
水田 (n=9)	最小值	7.4	0.42	0.126	7.96	26.3	90.7	31.7	23.9	73.8
	最大值	8.1	0.80	0.256	11.4	39.2	138	52.8	41.1	152
	平均值	7.8b	0.58b	0.192b	9.99b	33.9b	106b	39.2b	29.4b	94.6b
	变异系数/%	3.12	22.2	25.7	11.9	10.6	13.4	20.2	18.4	24.5
园地 (n=11)	最小值	6.6	0.47	0.117	7.42	25.5	88.8	33.2	36.9	90.2
	最大值	8.2	1.32	0.221	12.2	40.5	127	102	81.1	192
	平均值	7.7b	0.70b	0.164b	9.84b	33.4b	103b	67.6a	57.6a	137a
	变异系数/%	7.56	40.5	21.2	15.3	13.4	11.1	36.5	29.2	22.5
煤矸石 (n=3)	最小值	6.8	0.58	0.406	7.44	30.4	53.5	26.0	19.3	42.9
	最大值	7.2	0.66	0.507	8.40	40.5	59.2	29.4	21.5	50.1
	平均值	6.9	0.61	0.462	7.91	36.3	56.6	27.3	20.3	45.3
	变异系数/%	3.33	6.79	11.1	6.06	14.5	5.08	6.82	5.55	9.11

1) 不同小写字母表示存在显著差异 ($P < 0.05$)

析,研究区土壤重金属空间分布如图 2 所示.除 Pb 外,其他 7 项重金属含量在煤矸山山脚和东北方

300 m 处旱地周边明显偏高,这可能与 Pb 的理化性质有关.王俭等^[34]研究发现煤矸石中 Pb 浸出浓度

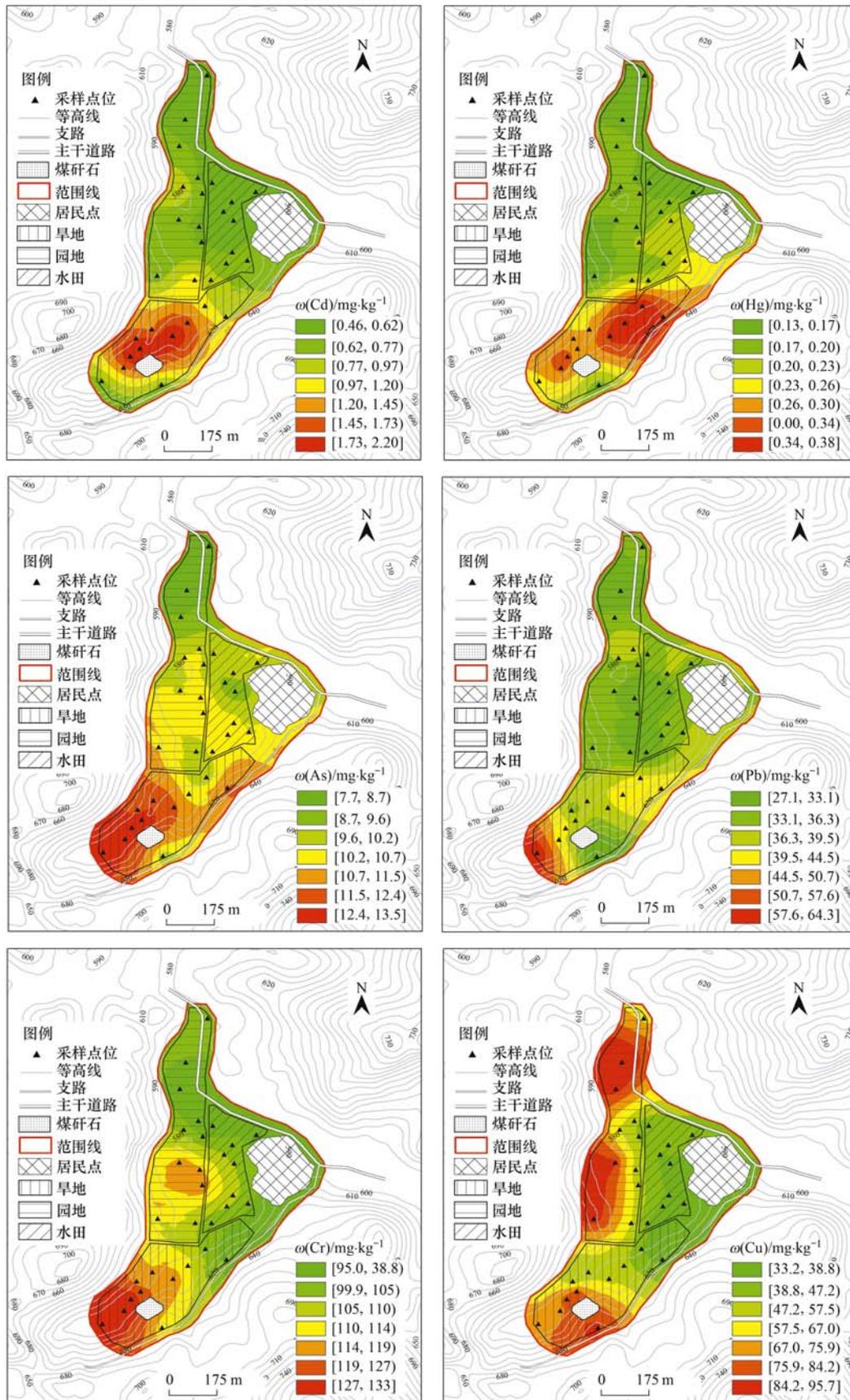
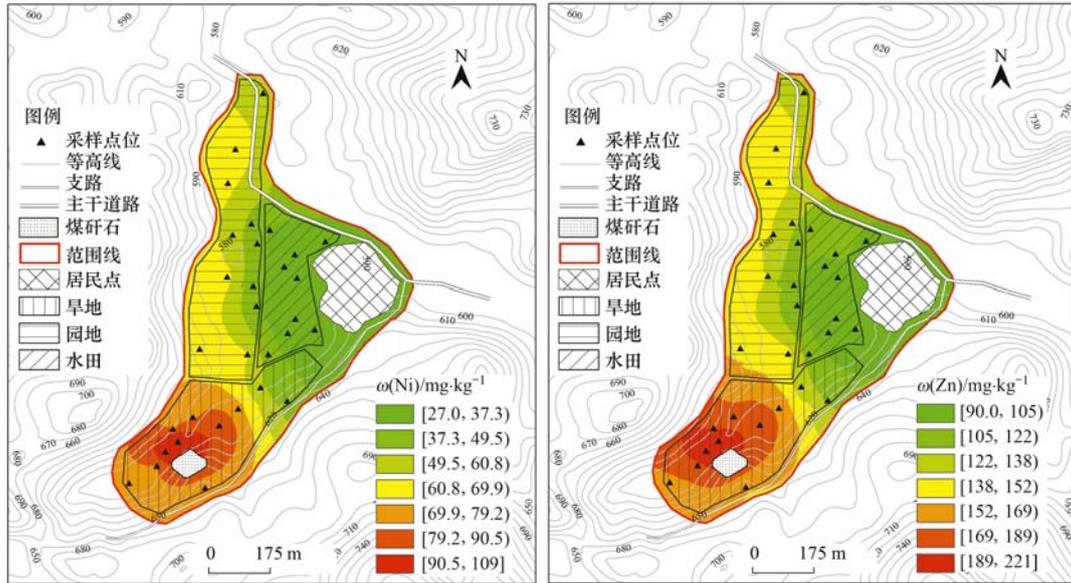


图 2 土壤重金属含量空间分布

Fig. 2 Spatial distributions of heavy metal content on soil

续图 2



变化与其他重金属相比更复杂,随 pH 增高,呈现降低、升高的循环趋势. Da Silva 等^[35]认为煤矸石中硫酸盐与溶出的 Pb 结合产生沉淀,导致 Pb 的浸出浓度降低. 煤矸山山脚其他 7 项重金属含量偏高,如前所述可能受雨水长期冲刷,使煤矸石中重金属在土壤中富集. 而煤矸山东北方 300 m 处,通过实地调查发现该区地势坡度较大,土壤中夹杂煤渣,存在将风化煤矸石农用现象. 有研究表明,煤矸石中含有丰富的有机质和无机养分,但利用煤矸石复垦,会造成重金属向土壤中转移^[36,37]. 故推定煤矸山东北方 300 m 处周边土壤重金属含量较高与煤矸石覆土有关. 此外, Cu、Ni 和 Zn 含量除煤矸山周边较高外,园地中含量也相对偏高,与水田存在显著差异 ($P < 0.05$),说明园地中 Cu、Ni 和 Zn 可能受除煤矸山外的其他污染源影响,由于研究区周边 1 km 范围内并无其他工业和矿业污染源,推测与土地利用类型、施肥和农业生产方式等不同有关.

2.3 土壤重金属污染状况评价

2.3.1 内梅罗指数法

按内梅罗指数法评价结果如图 3 和表 3 所示. 研究区旱地综合污染指数 $P_{综}$ 均值为 2.77,评价为中污染,其中 Cd 为主要污染物,极强污染 ($P_i > 5$) 占比 18.2%,重度污染 ($3 < P_i \leq 5$) 占比 45.5%,轻度污染 ($2 < P_i \leq 3$) 占比 18.2%,轻微污染 ($1 < P_i \leq 2$) 占比 9.1%; Cu、Ni 和 Zn 为次要污染物,轻微污染 ($1 < P_i \leq 2$) 分别占比 36.4%、27.3% 和 18.2%; Hg、As、Pb 和 Cr 评价为无污染; 园地综合污染指数 $P_{综}$ 均值为 1.04,评价为轻污染,其中 Cd 为主要污染物,重度污染 ($3 < P_i \leq 5$) 占比 9.1%,轻微污染 ($1 < P_i \leq 2$) 占比 54.5%; 其他 7 项重金属评价为无

污染; 水田综合污染指数 $P_{综}$ 均值为 0.59,评价为安全,其中 Cd 为主要污染物,轻微污染 ($1 < P_i \leq 2$) 占比 22.2%; 其他 7 项重金属评价为无污染. 综上,研究区土壤重金属污染表现为: Cd > Cu > Ni > Zn > Hg、As、Pb 和 Cr, 污染程度表现为: 旱地 > 园地 > 水田.

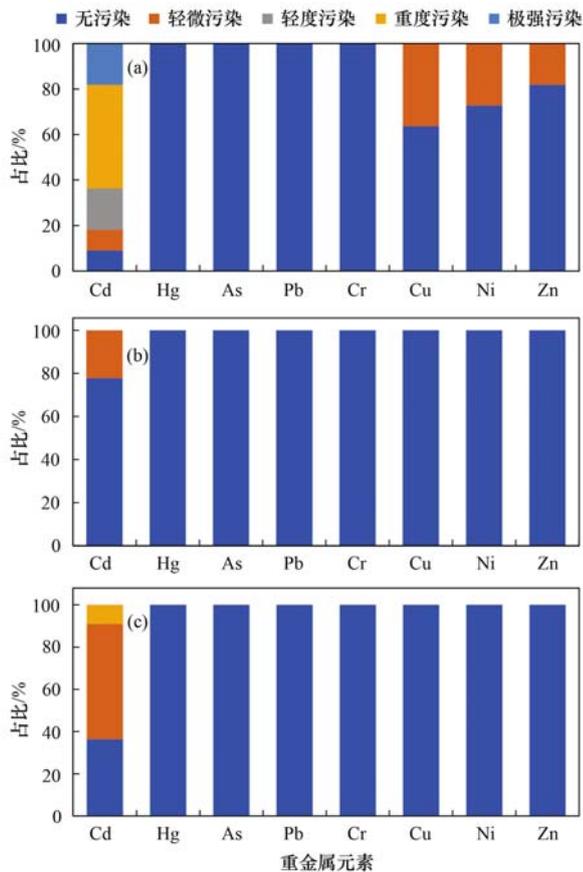
表 3 土壤内梅罗污染指数评价结果统计

Table 3 Statistical results of Nemerow pollution index in soil

评价指数	污染等级	指数均值		
		旱地	水田	园地
$P_{综} \leq 0.7$	安全			
$0.7 < P_{综} \leq 1.0$	警戒线			
$1.0 < P_{综} \leq 2.0$	轻污染	2.77	0.59	1.04
$2.0 < P_{综} \leq 3.0$	中污染			
$P_{综} > 3.0$	重污染			

2.3.2 地质累积指数法

按地质累积指数法评价结果如图 4 所示. 研究区旱地 Cd 累积污染最重,评价为中度污染 ($2 \leq I_{geo} < 3$) 占比为 27.3%,偏中污染 ($1 \leq I_{geo} < 2$) 占比 45.5%,轻度污染 ($0 \leq I_{geo} < 1$) 占比 18.2%; 其次是 Hg,评价为中度污染 ($2 \leq I_{geo} < 3$) 占比 9.1%,偏中污染 ($1 \leq I_{geo} < 2$) 占比 81.8%,轻度污染 ($0 \leq I_{geo} < 1$) 占比 9.1%; 再次是 Cu、Ni 和 Zn,评价为偏中污染 ($1 \leq I_{geo} < 2$) 分别占比 27.3%、27.3% 和 18.2%,轻度污染 ($0 \leq I_{geo} < 1$) 分别占比 54.5%、45.5% 和 45.5%. 最后是 As 和 Pb,评价为轻度污染 ($0 \leq I_{geo} < 1$) 分别占比 63.6% 和 26.6%; 水田 Hg 累积污染最重,评价为偏中污染 ($1 \leq I_{geo} < 2$) 和轻度污染 ($0 \leq I_{geo} < 1$) 分别占比 44.4% 和 55.6%; 其次是 Cd,均评价为轻度污染 ($0 \leq I_{geo} < 1$),最后是 As、Cr、Cu 和 Zn,评价为轻度污染 ($0 \leq I_{geo} < 1$) 分别占比 66.7%、22.2%、44.4% 和 11.1%,Pb 和 Ni 评价为



(a) 旱地, (b) 水田, (c) 园地

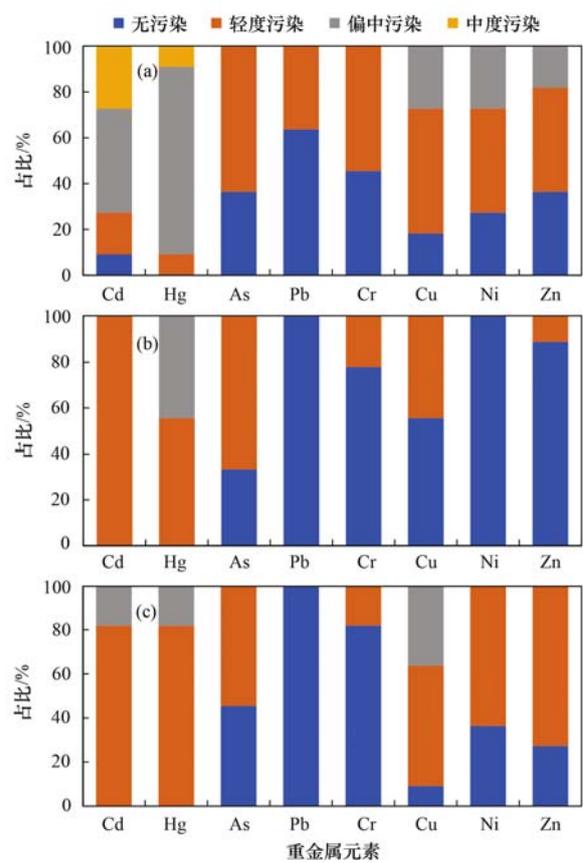
图3 土壤污染单因子指数评价结果

Fig. 3 Statistical results of single factor pollution in soil

无污染($I_{geo} < 0$); 园地 Cu 累积污染最重, 评价为偏中污染($1 \leq I_{geo} < 2$) 占比 36.4%, 轻度污染($1 \leq I_{geo} < 2$) 占比 54.5%; 其次是 Cd 和 Hg 评价为偏中污染($1 \leq I_{geo} < 2$) 占比均为 18.2%, 轻度污染($0 \leq I_{geo} < 1$) 占比均为 81.8%; 最后是 As、Cr、Ni 和 Zn, 评价为轻度污染($0 \leq I_{geo} < 1$) 分别占比 54.5%、18.2%、63.6% 和 72.7%; Pb 均评价为无污染($I_{geo} < 0$). 综上, 研究区土壤重金属累积污染程度表现为: Cd > Hg > Cu > Ni > Zn > As > Cr > Pb. 累积污染程度 Hg 表现为: 旱地 > 水田 > 园地; Cu 表现为: 园地 > 旱地 > 水田; 其他 6 项重金属表现为: 旱地 > 园地 > 水田.

2.3.3 污染状况评价结果比较

内梅罗指数法是将各单项污染指数综合考虑, 反映区域土壤综合污染现状, 而地质累积指数法评价结果常用于反映重金属富集程度^[38]. 二者比较发现, 除 Hg 外, 两种方法评价结果基本一致, 表现为: Cd > Cu > Ni > Zn > As、Cr 和 Pb. 而 Hg 按单项污染指数评价为无污染, 按地质累积指数评价污染程度仅次于 Cd, 原因在于两种方法选用的参比值差异较大, 说明虽然 Hg 含量远低于土壤风险筛选值, 但高于土壤背景值. 有研究表明, 耕地 Hg 的空间



(a) 旱地, (b) 水田, (c) 园地

图4 地质累积指数法评价结果统计

Fig. 4 Statistical results of Muller index in soil

变异性会受到尾矿矿渣堆积的影响, 污染范围一般以渣堆为中心向四周扩散^[39,40]. 从空间分布上看(图2), Hg 在土壤中的累积与煤矸山有密切关系, 以煤矸山为中心呈现南北递减趋势. 尤其是煤矸山东北方 300m 处周边土壤 Hg 含量较高, 在地表径流的影响下, 将直接影响水田区域, 导致 Hg 在水田中富集. 此外, Hg 还可能受施肥等农业生产影响, 任顺荣等^[41]通过长期定位施肥试验表明, 各施肥处理土壤中均表现为 Hg 含量累积程度最高. 而水田作为独特的湿地生态系统, 有利于无机汞向甲基汞的转化, 导致甲基汞被水稻吸收并富集于稻米中, 造成较高的甲基汞暴露风险^[42,43]. 因此, 研究区 Hg 已存在明显富集, 需加强对土壤和水稻中 Hg 的关注.

2.4 土壤重金属污染来源分析

2.4.1 相关性分析

相关性分析在一定程度上反映土壤重金属之间的关系, 相关系数越大, 说明污染来自同一污染源的可能性就越大^[44]. 相关性分析结果如表4所示, Cd 和 Hg 存在显著正相关关系($P < 0.01$), 相关系数为 0.756; Cu、Ni 和 Zn 之间存在显著正相关关系($P < 0.01$), 相关系数在 0.754 ~ 0.955 之间, 说明 Cd

和 Hg 可能存在相同污染源, Cu、Ni 和 Zn 之间可能存在相同污染源. 其他重金属之间虽然个别也存在

显著正相关关系, 但相关性系数相对偏小, 在 0.373 ~ 0.532 之间.

表 4 土壤重金属含量相关性分析结果¹⁾

Table 4 Correlation between the heavy metals in soil

	Cd	Hg	As	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
Cd	1							
Hg	0.756 **	1						
As	0.345	0.314	1					
Pb	0.455 *	0.532 **	0.504 **	1				
Cr	0.255	0.290	0.446 *	0.272	1			
Cu	0.023	-0.158	0.138	0.141	0.476 **	1		
Ni	0.408 *	0.126	0.238	0.394 *	0.373 *	0.806 **	1	
Zn	0.508 **	0.195	0.202	0.444 *	0.349	0.754 **	0.955 **	1

1) * 表示显著相关性, $P < 0.05$, ** 表示显著相关性, $P < 0.01$

2.4.2 主成分分析

根据 KMO (Kaiser-Meyer-Olkin) 检验统计值为 0.581 > 0.5, Bartlett's 球体检验 $P < 0.01$, 表明可进一步对其进行主成分分析, 结合土壤重金属之间相关性分析结果, 设置主因子数为 3, 结果如表 5 所示. 第一主因子的贡献率为 52.6%, 主要重金属元素是 Cu、Ni 和 Zn, 元素方差最大正交旋转后的第一主因子正载荷系数均在 0.8 以上, 结合前述煤矸山对土壤重金属污染的影响范围有限, Cu、Ni 和 Zn 含量除煤矸山周边较高外, 园地中含量也相对偏高, 说明园地中 Cu、Ni 和 Zn 可能受除煤矸山外的其他污染源影响. 有研究表明, 长期使用化肥和禽畜有机肥等, 会导致土壤中各类重金属不同程度积累^[45,46]. 通过实地调查, 水田主要施用氮磷钾复合肥为主, 旱地和园地则是以施用有机肥和磷肥为主, 有机肥主要是鸡粪、鸭粪等畜禽粪便, 来源于距研究区 2 km 的畜禽养殖场. 有研究发现, 畜禽粪肥对农田土壤中 Cu 和 Zn 贡献率分别为 69% 和 51%^[47], 鸡粪带入 Cu 和 Zn 在耕层土壤中的积累率分别为 72.1% ~ 88.7% 和 63.9% ~ 78.9%^[48]. 沃惜慧等^[49] 研究发现, 在鸡粪中 Cu、Zn 和 Ni 相较其他肥料含量最高, 而长期施用重金属含量过高的畜禽粪肥, 会增加农田土壤重金属污染的环境风险. 综上, 推定第一主因子为农业源, 土壤中 Cu、Ni 和 Zn

含量主要受施肥等农业活动影响.

第二主因子的贡献率为 18.9%, 主要重金属元素是 Cd 和 Hg, 元素方差最大正交旋转后的第二主因子正载荷系数分别为 0.781 和 0.882, 从空间含量分布来看, Cd 和 Hg 含量在煤矸山周边最高, 并沿南北呈递减趋势, 结合 Cd 和 Hg 变异系数偏大, 尤其是煤矸山周边的旱地区域, 且地质累积指数评价污染程度相对较高, 说明 Cd 和 Hg 含量与煤矸山堆存有关. 这与部分学者在研究煤矸山周边土壤污染状况时, 也发现 Cd 和 Hg 存在显著相关性、且污染较重一致^[50,51]. 综上, 推定第二主因子为矿业源, 受煤矸山长期堆存等矿业活动影响.

第三主因子的贡献率为 11.5%, 主要重金属元素是 As、Pb 和 Cr, 元素方差最大正交旋转后的第三主因子正载荷系数分别为 0.743、0.893 和 0.523, 鉴于 As、Pb 和 Cr 变异系数偏小, 地质累积指数法评价结果为累积污染程度低, 说明受人为活动影响相对较小. 目前, 已有大量研究结果表现为 Cr 主要来自自然源^[52,53]. 但 As 和 Pb 易受到农业源和工业源的影响^[54,55], 与本研究存在差异, 这可能和本研究区小尺度区域内农民施肥、种植习惯和无其他工矿业污染源等有关. 因此, 推定第三主因子为自然源, 受土壤母质等影响. 这与于林松等^[56] 研究姜湖贡米产地, 土壤 As、Cr 和 Pb 主要来源于自然源结论一致.

表 5 主因子影响因素

Table 5 Influence factors of the principal factors

项目	第一主因子		第二主因子		第三主因子	
	贡献率/%	旋转后载荷系数	贡献率/%	旋转后载荷系数	贡献率/%	旋转后载荷系数
Cd		0.551		0.781		0.163
Hg		-0.051		0.882		0.276
As		0.275		0.205		0.743
Pb		0.011	18.9	0.124		0.893
Cr	52.6	0.498		0.259	11.5	0.523
Cu		0.891		-0.291		0.050
Ni		0.904		0.300		0.229
Zn		0.863		0.379		0.217

2.4.3 污染源定量解析

根据 APCS-MLR 受体模型将因子分析的 3 个主因子得分,得到绝对主因子得分,再利用各重金属含量分别对 APCS 进行多元线性回归分析,结果如图 5 所示. Cd、Hg、As、Pb、Cr、Cu、Ni 和 Zn 拟合度 R^2

分别为 0.934、0.857、0.669、0.813、0.589、0.589、0.881、0.959 和 0.936. 拟合度 R^2 越接近于 1 说明多元线性回归拟合度越好. 除 Cr 和 As 拟合度 R^2 相对偏低外,其他重金属拟合度 R^2 均在 0.8 以上,说明模型预测含量与实测含量拟合良好,源解析结果可靠.

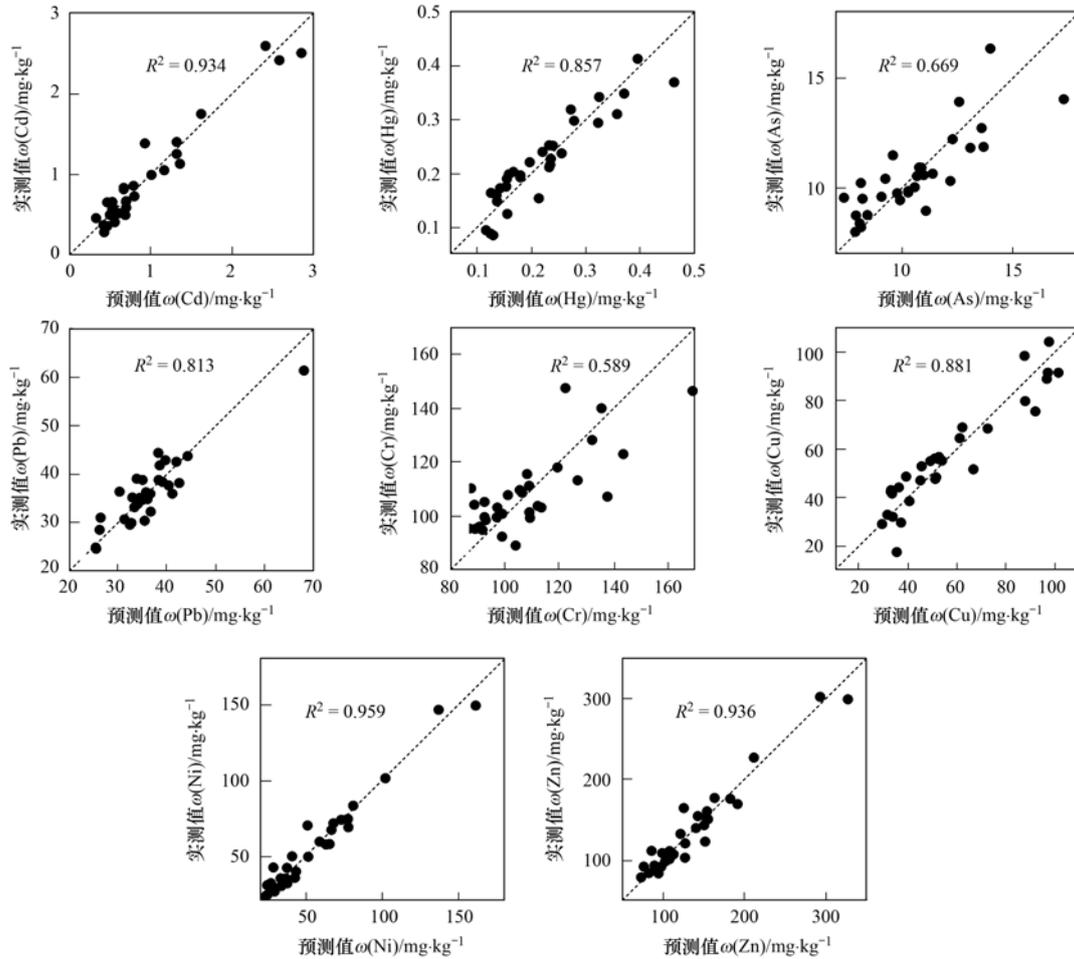


图 5 土壤重金属污染源回归分析

Fig. 5 Regression analysis of pollution source

结合前述两种传统评价方法、GIS 地统计分析、相关分析、主成分分析 (PCA) 和绝对因子得分-多元线性回归法 (APCS-MLR) 综合分析,得到污染源识别和定量源解析结果如图 6 所示. Cd 和 Hg 主要受到煤矸山长期堆存等矿业活动影响,贡献率分别为 51.6% 和 52.9%. 其次是受到施肥等农业活动影响,贡献率分别为 37.7% 和 30.6%,最后受到土壤母质等自然因素影响,贡献率分别为 10.7% 和 16.5%. As 主要受到土壤母质等自然因素影响,贡献率为 60.8%,受煤矸山长期堆存等矿业活动影响略低于施肥等农业活动影响,贡献率分别为 16.8% 和 22.5%. Pb 主要受到土壤母质等自然因素影响,贡献率高达 86.9%,Cr 主要受到土壤母质等自然因素和施肥等农业活动共同影响,贡献率分别为

40.9% 和 38.9%. Cu、Ni、Zn 主要受到施肥等农业活动影响,贡献率分别为 72.3%、63.3% 和 59.2%,其次是受到煤矸山长期堆存等矿业活动影响,最后是受到土壤母质等自然因素影响.

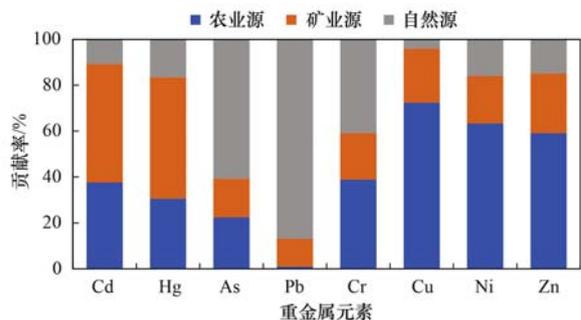


图 6 土壤重金属污染源贡献率

Fig. 6 Source contribution ratios of heavy metals in soil

3 结论

(1) 研究区旱地土壤中除 Cu 均值含量略低于园地外,其他 7 项重金属均高于园地和水田,其中 Cd、Hg、As、Pb 和 Cr 含量与园地存在显著差异($P < 0.05$),8 项重金属含量均与水田存在显著差异($P < 0.05$); 园地土壤中 Cd、As、Pb、Cu、Ni 和 Zn 均值含量高于水田,其中 Cu、Ni 和 Zn 含量与水田存在显著差异($P < 0.05$). 空间分布上,除土壤中 Pb 外,其他 7 项重金属在煤矸山山脚和东北方 300 m 处含量明显偏高,与煤矸山长期受雨水冲刷、地表径流影响和煤矸石覆土农用有关。

(2) 研究区综合污染指数表现为:旱地(2.77) > 园地(1.04) > 水田(0.59),土壤重金属污染以 Cd 为主,污染程度由大到小表现为: Cd > Cu > Ni > Zn > Hg、As、Cr 和 Pb,应重点加强对 Cd 的来源管控和污染防治. 土壤重金属累积程度由大到小表现为: Cd > Hg > Cu > Ni > Zn > As > Cr > Pb,其中 Hg 表现为:旱地 > 水田 > 园地,Cu 表现为:园地 > 旱地 > 水田,其他 6 项重金属表现为:旱地 > 园地 > 水田。

(3) 土壤中 Cd 与 Hg 存在显著正相关关系($P < 0.01$),相关系数为 0.756,主要受到煤矸山长期堆存等矿业活动影响,贡献率分别为 51.6% 和 52.9%. 其次是受到施肥等农业活动影响,贡献率分别为 37.7% 和 30.6%,最后受到土壤母质等自然因素影响. Cu、Ni 和 Zn 之间存在显著正相关关系($P < 0.01$),相关系数在 0.755 ~ 0.955 之间,主要受到施肥等农业活动影响,贡献率分别为 72.3%、63.3% 和 59.2%. As 和 Pb 主要受到土壤母质等自然因素影响,贡献率分别为 60.8% 和 86.9%. Cr 主要受到土壤母质等自然因素和施肥等农业活动共同影响,贡献率分别为 40.9% 和 38.9%。

参考文献:

- [1] 殷腾飞. 煤炭工业高质量发展评价体系与路径研究文献综述 [J]. 煤炭工程, 2021, **53**(12): 179-183.
Yin T F. Literature review of evaluation system and path of coal industry's high-quality development [J]. Coal Engineering, 2021, **53**(12): 179-183.
- [2] 魏忠义, 王萍, 王秋兵. 膨胀性阻水层对煤矸山水分入渗的影响 [J]. 水土保持学报, 2010, **24**(2): 188-191.
Wei Z Y, Wang P, Wang Q B. Effect of expansive water-resisting layer on water infiltration of coal waste [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, **24**(2): 188-191.
- [3] 张拓, 王鑫蹇, 陈芯怡, 等. 攀枝花煤矿区周围农田重金属污染特征及风险分析 [J]. 地球与环境, 2022, **50**(2): 192-201.
Zhang T, Wang X J, Chen X Y, et al. Characteristics and risk analysis of heavy metal pollution in farmland around Panzhihua coal mining area [J]. Earth and Environment, 2022, **50**(2): 192-201.
- [4] 周楠, 姚依南, 宋卫剑, 等. 煤矿矸石处理技术现状与展望 [J]. 采矿与安全工程学报, 2020, **37**(1): 136-146.
Zhou N, Yao Y N, Song W J, et al. Present situation and prospect of coal gangue treatment technology [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2020, **37**(1): 136-146.
- [5] 周新华, 舒悦, 周亮亮, 等. pH 值对碱性煤矸石碱度和重金属释放规律影响研究 [J/OL]. 安全与环境学报. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?doi=10.13637/j.issn.1009-6094.2021.1342,2021-10-06>.
Zhou X H, Shu Y, Zhou L L, et al. Study on effects of pH value on alkalinity and heavy metal release of alkaline coal gangue [J/OL]. Journal of Safety and Environment. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?doi=10.13637/j.issn.1009-6094.2021.1342,2021-10-06>.
- [6] 陈雪, 许丹丹, 钱雅慧, 等. 淮北矿区煤矸石多环芳烃污染特征及毒性评价 [J]. 中国环境科学, 2022, **42**(2): 753-760.
Chen X, Xu D D, Qian Y H, et al. Pollution characteristics and toxicity assessment of PAHs in coal gangue from mine area in Huabei [J]. China Environmental Science, 2022, **42**(2): 753-760.
- [7] 陈昌东, 张安宁, 腊明, 等. 平顶山矿区矸石山周边土壤重金属污染及优势植物富集特征 [J]. 生态环境学报, 2019, **28**(6): 1216-1223.
Chen C D, Zhang A N, La M, et al. Soil heavy metal contamination and enrichment of dominant plants in coal waste piles in Pingdingshan area [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, **28**(6): 1216-1223.
- [8] 丛鑫, 雷旭涛, 付玲, 等. 海州煤矿矸石山周边土壤重金属污染特征及生态风险评估 [J]. 地球与环境, 2017, **45**(3): 329-335.
Cong X, Lei X T, Fu L, et al. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in soils around the gangue heap of Haizhou coal mine, China [J]. Earth and Environment, 2017, **45**(3): 329-335.
- [9] Jiang X, Lu W X, Zhao H Q, et al. Potential ecological risk assessment and prediction of soil heavy-metal pollution around coal gangue dump [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2014, **14**(6): 1599-1610.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 李武江, 朱四喜. 某矿区农田土壤重金属分布特征与生态风险评估 [J]. 有色金属(冶炼部分), 2021, (3): 93-101.
Li W J, Zhu S X. Spatial distribution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in farmland soil of a mining area [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2021, (3): 93-101.
- [13] 赵庆令, 李清彩, 谢江坤, 等. 应用富集系数法和地累积指

- 数法研究济宁南部区域土壤重金属污染特征及生态风险评价[J]. 岩矿测试, 2015, **34**(1): 129-137.
- Zhao Q L, Li Q C, Xie J K, *et al.* Characteristics of soil heavy metal pollution and its ecological risk assessment in south Jining district using methods of enrichment factor and index of geoaccumulation[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2015, **34**(1): 129-137.
- [14] 湛润生, 胡冬梅, 甄莉娜, 等. 山西省天镇县设施菜地土壤重金属污染评价及其源解析[J]. 环境污染与防治, 2021, **43**(12): 1573-1577.
- Zhan R S, Hu D M, Zhen L N, *et al.* Pollution evaluation and source analysis of heavy metals in facility vegetable land soils of Tianzhen county of Shanxi province[J]. *Environmental Pollution and Control*, 2021, **43**(12): 1573-1577.
- [15] 谢云峰, 杜平, 曹云者, 等. 基于地统计条件模拟的土壤重金属污染范围预测方法研究[J]. 环境污染与防治, 2015, **37**(1): 1-6.
- Xie Y F, Du P, Cao Y Z, *et al.* Estimating the area of heavy metal contaminated soil using geostatistical conditional simulation[J]. *Environmental Pollution and Control*, 2015, **37**(1): 1-6.
- [16] 范俊楠, 张钰, 贺小敏, 等. 基于BP神经网络的重点行业企业周边土壤重金属污染预测及评价[J]. 华中农业大学学报, 2019, **38**(4): 55-62.
- Fan J N, Zhang Y, He X M, *et al.* BP neural network based prediction and evaluation of heavy metal pollution in soil around the enterprises in key areas of Hubei province[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2019, **38**(4): 55-62.
- [17] 孟源思, 高琳琳, 李子杰, 等. 农田土壤重金属污染风险评价模型与方法研究[J]. 地球与环境, 2020, **48**(4): 489-495.
- Meng Y S, Gao L L, Li Z J, *et al.* Review on risk assessment model and method of heavy metal pollution in farmland Soil[J]. *Earth and Environment*, 2020, **48**(4): 489-495.
- [18] 孙天河, 刘伟, 靳立杰, 等. 基于多元统计的土壤主要重金属影响因素分析——以济南市平阴县城区及附近区域为例[J]. 安全与环境学报, 2021, **21**(2): 834-840.
- Sun T H, Liu W, Jin L J, *et al.* Assessment of the heavy metal influential factors based on the multivariate statistical analysis—a case study of the urban and nearby areas of Pinyin county of Jinan, China[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2021, **21**(2): 834-840.
- [19] 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.
- [20] 赵奕然, 谷建辉, 万卫, 等. 株洲城郊农田土壤重金属污染特征与Pb同位素示踪[J]. 环境科学学报, 2020, **40**(3): 1074-1084.
- Zhao Y R, Gu J H, Wan W, *et al.* The features of heavy metal contamination and possible sources from Pb isotopic evidence in farmland soils, Zhuzhou suburb [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(3): 1074-1084.
- [21] 魏迎辉, 李国琛, 王颜红, 等. PMF模型的影响因素考察——以某铅锌矿周边农田土壤重金属源解析为例[J]. 农业环境科学学报, 2018, **37**(11): 2549-2559.
- Wei Y H, Li G C, Wang Y H, *et al.* Investigating factors influencing the PMF model: A case study of source apportionment of heavy metals in farmland soils near a lead-zinc ore[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, **37**(11): 2549-2559.
- [22] 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.
- [23] 郭利君, 胡唤雨, 胡魁, 等. 矿业城市南川转型路径选择[J]. 中国矿业, 2012, **21**(4): 25-28.
- Guo L J, Hu H Y, Hu K, *et al.* The selection of transition direction on economic development for mining city, Nanchuan [J]. *China Mining Magazine*, 2012, **21**(4): 25-28.
- [24] HJ 962-2018, 土壤 pH 值的测定 电位法[S].
- [25] GB/T 17141-1997, 土壤质量 铅、镉的测定 石墨炉原子吸收分光光度法[S].
- [26] GB/T 22105. 1-2008, 土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法 第 1 部分: 土壤中总汞的测定[S].
- [27] HJ 780-2015, 土壤和沉积物 无机元素的测定 波长色散 X 射线荧光光谱法[S].
- [28] HJ 781-2016, 固体废物 22 种金属元素的测定 电感耦合等离子体发射光谱法[S].
- [29] HJ 702-2014, 固体废物 汞、砷、硒、铋、锑的测定 微波消解/原子荧光法[S].
- [30] 鲍丽然, 邓海, 贾中民, 等. 重庆秀山西北部农田土壤重金属生态健康风险评价[J]. 中国地质, 2020, **47**(6): 1625-1636.
- Bao L R, Deng H, Jia Z M, *et al.* Ecological and health risk assessment of heavy metals in farmland soil of northwest Xiushan, Chongqing[J]. *Geology in China*, 2020, **47**(6): 1625-1636.
- [31] 杨娅, 季宏兵. 新化矿区煤矸石中微量元素赋存形态及浸出特征[J]. 地球与环境, 2016, **44**(1): 36-46.
- Yang Y, Ji H B. A study on chemical forms and leaching characteristics of trace elements in coal gangue from Xinhua coal mine in Guizhou province, China[J]. *Earth and Environment*, 2016, **44**(1): 36-46.
- [32] 王心义, 杨建, 郭慧霞. 矿区煤矸石堆放引起土壤重金属污染研究[J]. 煤炭学报, 2006, **31**(6): 808-812.
- Wang X Y, Yang J, Guo H X. Study on heavy metals in soil contaminated by coal waste rock pile[J]. *Journal of China coal Society*, 2006, **31**(6): 808-812.
- [33] 张明亮, 王海霞. 煤矿区矸石山周边土壤重金属污染特征与规律[J]. 水土保持学报, 2007, **21**(4): 189-192.
- Zhang M L, Wang H X. Characteristics on soil heavy metal pollution around coal mine waste piles[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, **21**(4): 189-192.
- [34] 王俭, 吴永贵, 刘方, 等. 浸提剂 pH 值对煤矸石和煤泥污染物浸出特性的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, **29**(6): 1144-1149.
- Wang J, Wu Y G, Liu F, *et al.* Various pH values of extractant impact on the leaching characteristics of coal mining discharge waste pollutants [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, **29**(6): 1144-1149.
- [35] Da Silva E B, Li S W, De Oliveira L M, *et al.* Metal leachability from coal combustion residuals under different pHs and liquid/solid ratios [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, **341**: 66-74.
- [36] 任晓玲, 周蕙昕, 高明, 等. 煤矸石肥料的研究进展[J]. 中国煤炭, 2021, **47**(1): 103-109.
- Ren X L, Zhou H X, Gao M, *et al.* Research progress of coal gangue fertilizer[J]. *China Coal*, 2021, **47**(1): 103-109.
- [37] 武海霞, 郭爱科, 陶涛, 等. 煤矸石栽培基质在农业中资源化利用研究现状[J]. 北方园艺, 2021, (23): 134-141.
- Wu H X, Guo A K, Tao T, *et al.* Research status of resource utilization of coal gangue cultivation matrix in agriculture [J].

- Northern Horticulture, 2021, (23): 134-141.
- [38] 范拴喜, 甘卓亭, 李美娟, 等. 土壤重金属污染评价方法进展[J]. 中国农学通报, 2010, **26**(17): 310-315.
Fan S X, Gan Z T, Li M J, *et al.* Progress of assessment methods of heavy metal pollution in soil[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, **26**(17): 310-315.
- [39] 李强, 姚万程, 赵龙, 等. 燃煤工业区不同土地利用类型土壤汞含量污染评价[J]. 环境科学, 2022, **43**(7): 3781-3788.
Li Q, Yao W C, Zhao L, *et al.* Evaluation of mercury pollution in soil of different land use types in coal-fired industrial area[J]. Environmental Science, 2022, **43**(7): 3781-3788.
- [40] 魏洪斌, 罗明, 吴克宁, 等. 长江三角洲典型县域耕地土壤重金属污染生态风险评价[J]. 农业机械学报, 2021, **52**(11): 200-209, 332.
Wei H B, Luo M, Wu K N, *et al.* Ecological risk assessment of heavy metal pollution in cultivated soil at typical county level in Yangtze river delta[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, **52**(11): 200-209, 332.
- [41] 任顺荣, 邵玉翠, 高宝岩, 等. 长期定位施肥对土壤重金属含量的影响[J]. 水土保持学报, 2005, **19**(4): 96-99.
Ren S R, Shao Y C, Gao B Y, *et al.* Effects of long-term located fertilization on heavy-metal content of soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, **19**(4): 96-99.
- [42] 裴鹏刚, 穆德苗, 马文艳, 等. 汞矿周边稻田汞和甲基汞污染特征及生态风险[J]. 生态与农村环境学报, 2022, **38**(1): 112-119.
Pei P G, Mu D M, Ma W Y, *et al.* Characteristic of mercury and methylmercury pollution in paddy soils around mercury mine area and its ecological risk [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022, **38**(1): 112-119.
- [43] 李雨琴, 孙涛, 邓晗, 等. 汞在酸性紫色水稻土的转化与水稻汞富集特征[J]. 环境科学, 2018, **39**(5): 2472-2479.
Li Y Q, Sun T, Deng H, *et al.* Characteristics of mercury transformation in soil and accumulation in rice plants in an acidic purple paddy soil area[J]. Environmental Science, 2018, **39**(5): 2472-2479.
- [44] 陈航, 王颖, 王澍. 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.
- [45] 邢维芹, 冉永亮, 梁爽, 等. 施肥对土壤重金属的影响研究进展[J]. 河南农业科学, 2010, (5): 129-133.
- [46] 吴科堰, 范成五, 刘桂华, 等. 黔西南某农用地土壤重金属风险评估与来源解析[J]. 西南农业学报, 2021, **34**(8): 1721-1727.
Wu K Y, Fan C W, Liu G H, *et al.* Risk assessment and source analysis of heavy metals in soil on a farm land in southwest Guizhou province[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2021, **34**(8): 1721-1727.
- [47] Luo L, Ma Y B, Zhang S Z, *et al.* An inventory of trace element inputs to agricultural soils in China[J]. Journal of Environmental Management, 2009, **90**(8): 2524-2530.
- [48] 何梦媛, 董同喜, 茹淑华, 等. 畜禽粪便有机肥中重金属在土壤剖面中积累迁移特征及生物有效性差异[J]. 环境科学, 2017, **38**(4): 1576-1586.
He M Y, Dong T X, Ru S H, *et al.* Accumulation and migration characteristics in soil profiles and bioavailability of heavy metals from livestock manure [J]. Environmental Science, 2017, **38**(4): 1576-1586.
- [49] 沃惜慧, 杨丽娟, 曹庭悦, 等. 长期定位施肥下设施土壤重金属积累及生态风险的研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, **38**(10): 2319-2327.
Wo X H, Yang L J, Cao T Y, *et al.* Accumulation and ecological risk of heavy metals in greenhouse soil under long-term fertilization [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, **38**(10): 2319-2327.
- [50] 宋文, 何天容, 潘鲁生. 贵州水城煤矸石风化土壤-农作物系统中汞分布规律研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, **29**(7): 1326-1332.
Song W, He T R, Pan L S. Distribution of mercury species in the soils from weathered coal mine spoils and crops in Shuicheng, Guizhou province, China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, **29**(7): 1326-1332.
- [51] Sun X B, Sun L P, Zhang X, *et al.* The spatial distribution of soil heavy metals and ecological restoration of Datong abandoned coal mine in Huainan city [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, **1732**(1), doi: 10.1088/1742-6596/1732/1/012101.
- [52] 李杰, 朱立新, 战明国, 等. 南方典型丘陵区酸性土壤重金属地球化学分布特征及来源分异解析[J]. 地质学报, 2016, **90**(8): 1978-1987.
Li J, Zhu L X, Zhan M G, *et al.* The geochemical distribution characteristics and source analysis of heavy metals in the typical hilly acidic soil region of south China [J]. Acta Geologica Sinica, 2016, **90**(8): 1978-1987.
- [53] 王玉, 辛存林, 于爽, 等. 南方丘陵区土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评价: 以江西省兴国县西北部为例[J]. 环境科学, 2022, **43**(9): 4756-4766.
Wang Y, Xin C L, Yu S, *et al.* Evaluation of heavy metal content, sources, and potential ecological risks in soils of southern hilly areas: an example from northwestern Xingguo county, Jiangxi province [J]. Environmental Science, 2022, **43**(9): 4756-4766.
- [54] 李奕, 陈金萍, 李祥余, 等. 不同农业土地利用方式对土壤重金属含量影响及生态风险评价[J]. 北方园艺, 2021, (18): 95-102.
Li Y, Chen J P, Li X Y, *et al.* Effects of different agricultural land use patterns on soil heavy metal content and ecological risk assessment [J]. Northern Horticulture, 2021, (18): 95-102.
- [55] 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.
- [56] 于林松, 万方, 范海印, 等. 姜湖贡米产地土壤重金属空间分布、源解析及生态风险评价[J]. 环境科学, 2022, **43**(8): 4199-4211.
Yu L S, Wan F, Fan H Y, *et al.* Spatial distribution, source apportionment, and ecological risk assessment of soil heavy metals in Jianghugongmi producing area, Shandong province [J]. Environmental Science, **43**(8): 4199-4211.

CONTENTS

Temporal and Spatial Evolution Pattern of PM _{2.5} and Its Influencing Factors in Guanzhong Plain Urban Agglomeration	ZHANG Jun, JIN Zi-han, WANG Yue, <i>et al.</i> (5333)
Linkage Effect and Nonlinear Impact of PM _{2.5} Concentration Driving Factors in Central Plains Urban Agglomeration	ZHOU Zhi-heng, ZHOU Ting-gang, QIN Ning (5344)
Analysis of Spatiotemporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and O ₃ in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Urban Agglomeration, China	LIU Xian-zhao, ZHANG Guo-qiao, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (5354)
Chemical Composition and Source Apportionment of PM _{2.5} in Zhangye City	PAN Cheng-ke, HUANG Tao, GAO Hong, <i>et al.</i> (5367)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of PM _{2.5} Heavy Metals in Tianjin and Qingdao in Winter of 2018-2019	ZHAO Ming-sheng, REN Li-hong, LI Gang, <i>et al.</i> (5376)
Concentration, Solubility, and Sources of Metal Elements in Atmospheric Precipitation in Qingdao	KONG Ling-dong, QI Jian-hua, ZHANG Xu (5387)
Trends of Ozone Pollution in Guanzhong Urban Agglomeration from 2015 to 2021	ZHAO Wei, WANG Shuo, PANG Xiao-die, <i>et al.</i> (5399)
Pollution Characteristics of Ozone and Its Precursors in Background Region of Hainan Province	XIE Wen-jing, XING Qiao, XIE Dong-hai, <i>et al.</i> (5407)
Identification of Ozone Formation Mechanism Long-term Spatio-temporal Evolutions in PRD Based on Two-dimensional Mutual Verification	YANG Lei-feng, XIE Dan-ping, YANG Jun, <i>et al.</i> (5421)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient Summer Volatile Organic Compounds in Zhengzhou, China	QI Yi-jin, WANG Ling-ling, NI Jing-wei, <i>et al.</i> (5429)
Summer Pollution Characteristics and Sources of Volatile Organic Compounds in Lanzhou	YANG Yan-ping, CHEN Qiang, MENG Xian-hong, <i>et al.</i> (5442)
Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs in an Underground Parking Garage	LIU Yan, YANG Ning, SUN Lu-na, <i>et al.</i> (5453)
Chemical Characterizations of Particles from Direct-injection Gasoline Vehicles	LI Jia-chen, GE Yun-shan, WANG Hao-hao, <i>et al.</i> (5464)
Scenario Simulation and Prediction of Greenhouse Gas Emissions from Incineration of Solid Waste	YAN Wei, LIU Shu-le, WU Zheng-fang, <i>et al.</i> (5470)
Distribution, Sources, and Export of the (Sub-) Metal Elements in the Changjiang River	LIU Jia-ming, WU Wen-tao, LIU Xiao-tian, <i>et al.</i> (5478)
Analysis of Nitrogen and Phosphorus Pollution and Nitrogen Sources in the Lancang River	GUO Shu-fang, CHEN An-qiang, XI Bin, <i>et al.</i> (5491)
Transformation Relationship of Groundwater and River Water in Riparian Wetland During Water and Sediment Regulation of Xiaolangdi Reservoir in Yellow River	XIAO Chun-yan, LIU Yi-fan, ZHAO Tong-qian, <i>et al.</i> (5499)
Spatiotemporal Variation in Water Quality of Modaomen Waterway Conveyance Reservoir Drinking Water Sources	ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (5509)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Typical Drinking Water Sources in the Middle Reaches of the Yangtze River During the COVID-19 Pandemic	FAN Yue-ting, CHANG Sheng, ZHANG Kun-feng, <i>et al.</i> (5522)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PAHs and PCBs in Surface Water and Sediments in Middle and Upper Reaches of Beiji River	CHANG Sheng, BAI Yun-song, TU Xiang, <i>et al.</i> (5534)
Hydrochemical Characteristics and Fluorine Distribution and Causes of Different Water Bodies in Pingshuo Mining Area	SUN Long, LIU Ting-xi, DUAN Li-min, <i>et al.</i> (5547)
Characteristics of Dissolved Organic Matters and Their Influence on Labile Cadmium Release from Soils of Typical Water Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir	ZHANG Bao-hao, WU Ya-zun, XU Dong-yu, <i>et al.</i> (5560)
Phosphorus Cycling in a Sediment-water System Controlled by Different Dissolved Oxygen Levels of Overlying Water	LIU Xiao-tian, LIU Jun, WANG Yi-bin, <i>et al.</i> (5571)
Water Quality Evolution Characteristics and Pollution Factor Analysis in Poyang Lake from 2011 to 2019	XIE Hui-yu, HU Mei, JI Xiao-yan, <i>et al.</i> (5585)
Distribution and Risk Assessment on the Nutrients and Heavy Metals in Surface Sediments of Wuliangsu Lake	DU Cai-li, LI Jia-xi, LI Guo-wen, <i>et al.</i> (5598)
Effect and Mechanism of Biochar Adsorption on Unbiodegradable Organic Nitrogen in Stormwater Runoff	SU Zeng-hui, SUN Ping, CHEN You-yuan, <i>et al.</i> (5608)
Phytoplankton Community Structures and Their Relationship with Environmental Factors in Rivers Supplied with Different Water Sources	HOU Ying, LI Xin, BAI Ling, <i>et al.</i> (5616)
Adsorption of Typical Quinolone Antibiotics by Manganese Oxide-Modified Biochar Substrate and Its Application in CWs	GAO Hui-zi, TIAN Wei-jun, ZHANG Zi-yu, <i>et al.</i> (5627)
Effect of KOH Activation on the Properties of Biochar and Its Adsorption Behavior on Tetracycline Removal from an Aqueous Solution	XU Jin, MA Yi-fan, YAO Guo-qing, <i>et al.</i> (5635)
Preparation of Modified Attapulgite-supported Iron Sulfide and Its Adsorption Mechanism for Mo(VI)	LIAN Jian-jun, WU Hong-yan, YE Tian-ran, <i>et al.</i> (5647)
Removal of Cr(VI) from Water Using Green Synthesis Nanoscale Zero-Valent Iron Supported on <i>Eucalyptus</i> Biochar	LIU Qin-wen, DING Ai-zhong, LIANG Xin, <i>et al.</i> (5657)
Removal of Pb(II) and Zn(II) from Wastewater via Magnesium-Modified Diatomite Product Recovering Nitrogen and Phosphorus	WU Ying-qiu, XIA Peng, LI Yuan, <i>et al.</i> (5667)
Adsorption of Methylene Blue on Sodium-Modified Bentonite from Southern Part of Henan	CHENG Fei-peng, YANG Dong-liang, CHANG Le, <i>et al.</i> (5676)
Compound Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Groundwater of Typical Industrial Lands in Shanghai	LI Xiao-man, LI Qing-qing, YANG Jie, <i>et al.</i> (5687)
Pollution Evaluation and Quantitative Traceability Analysis of Heavy Metals in Farmland Soils Around the Gangue Heap of a Coal Mine in Chongqing	MA Jie, LIU Ping, LIU Jin-zhao, <i>et al.</i> (5698)
Species Distribution and Source Analysis of Heavy Metals in Surrounding Soil Around Typical Petroleum Sites	GONG Jian, HE Lian-sheng, LI Qiang, <i>et al.</i> (5710)
Source Analysis of Heavy Metals in Farmland Soil Around a Waste Incineration Plant Based on PMF Model	ZHANG Tian-yu, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (5718)
Ecological and Health Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil of Xianghe County	CHEN Yu-jia, QU Xing-chen, ZHANG Bin, <i>et al.</i> (5728)
Comparison of the Concentrations, Sources, and Distributions of Heavy Metals in Topsoils of the Junction Zone of Geological Tectonic Units: A Case Study in Chengkou County, China	LIU Yong-lin, WU Mei, LIU Rui, <i>et al.</i> (5742)
Occurrence, Source Analysis, and Health Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Plants and Soils from Typical Areas of Xinjiang, China	YANG Bei-chen, XIE Qi-lai, ZHENG Qian, <i>et al.</i> (5751)
Effects of Strengthening <i>Pennisetum purpureum</i> Schumacher with Fertilizer Application Strategy on Remediation of Severely Cadmium-polluted Farmland	WU Gang-fan, ZHOU Hang, TANG Qi, <i>et al.</i> (5761)
Tobacco Stem Biochar and Phosphate Application Decrease Wheat Grain Cadmium Accumulation in Alkaline Soils	YANG Yan-zheng, ZHANG Yin-ge, LI Chang, <i>et al.</i> (5769)
Polyamine-producing Bacteria Improve Cd Resistance and Reduce Uptake of Cd in Wheat	JI Ming-fei, WU Xue-jiao, LI Xiao-zhe, <i>et al.</i> (5778)
Effect and Mechanism of Sulfate-Reducing Bacteria on the Passivation of Heavy Metals in Alkaline and Acidic Agricultural Soils	GAO Yu, LIU Yu-chen, GUO Xiao-fang, <i>et al.</i> (5789)
Effects of <i>Bacillus megaterium</i> on Soil Physicochemical Properties and Its Effects on the Accumulation of Cd and Zn in Plant	WANG Ping, LI Yi-man, WANG Xue-jia, <i>et al.</i> (5798)
Soil Fungal Community Structure and Function Diversity of Different Land Use Types in the Waterfront Area Along the Jialing River	ZHU Lan-ping, XU Fei, WANG Jia-ying, <i>et al.</i> (5808)
Effect of Biochar Application on Biological Nitrogen Fixation in Double Cropping Paddy Field in Northern Hainan	ZHAO Yan, YUAN Xin-sheng, TANG Rui-jie, <i>et al.</i> (5819)
Photodegradation Behaviors and Toxicity Characteristics of Trimethoprim into Different Environmental Media with the Presence of g-C ₃ N ₄	ZHU Na, WANG Xing-yang, JIAO Jun-heng, <i>et al.</i> (5832)
Analysis of Provincial CO ₂ Emission Accounting in China Under the Carbon Peaking and Carbon Neutrality Goals	YANG Bai, QIN Guang-peng, WU Qin (5840)
Temporal and Spatial Differences in Carbon Conduction and Prediction Effect of Land Type Transfer in Chang-Zhu-Tan Urban Agglomeration	YANG Xu, LIU Xian-zhao (5850)
Environmental Benefit Analysis of Municipal Solid Waste Typical Disposal Scenarios in Zhangjiagang City Based on Classification	ZHANG Tao, ZHENG Jun-wen, SUN Yu-can, <i>et al.</i> (5861)