

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

不同国家农用地土壤环境标准比较与启示
李勖之, 姜璐, 王国庆, 陈玉东, 龙涛, 林玉锁

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年2月

第43卷 第2期
Vol.43 No.2

目次

综述

- 不同国家农用地土壤环境标准比较与启示 李勤之, 姜蓉, 王国庆, 陈玉东, 龙涛, 林玉锁 (577)
再生水水质稳定性评价指标与体系 张馨怡, 魏东斌, 杜宇国 (586)

研究报告

- 兰州市采暖期和非采暖期大气降尘重金属的分布特征及来源 黄文, 王胜利 (597)
基于多种新型受体模型的 PM_{2.5} 来源解析对比 王振宇, 李永斌, 郭凌, 宋志强, 许艳玲, 王丰, 梁维青, 史国良, 冯银厂 (608)
华中地区夏季 PM_{2.5} 中水溶性离子污染特征及来源分析 苏业旺, 刘威杰, 毛瑶, 程铨, 石明明, 许安, 李星谕, 胡天鹏, 祁士华, 邢新丽 (619)
淄博 2021 年元宵节 PM_{2.5} 水溶性离子污染特征 陈巧, 吴丽萍, 徐勃, 张向炎, 李梦辉, 赵雪艳, 杨文 (629)
浙江省大气颗粒物 PM_{2.5} 中全氟化合物污染特征分析及健康风险评估 李冰洁, 陈金媛, 刘铮铮, 王静, 何士冲 (639)
2001~2019 年气象条件对江苏省 PM_{2.5} 分布的影响 潘晨, 康志明 (649)
基于神经网络和数值模型的重点区域 PM_{2.5} 预报比较分析 高愈霄, 汪巍, 黄永海, 王晓彦, 朱媛媛, 朱莉莉, 许荣, 李健军 (663)
2015~2020 年海南省臭氧时空变化及其成因分析 符传博, 徐文帅, 丹利, 佟金鹤 (675)
济南市城区夏季臭氧污染过程及来源分析 孙晓艳, 赵敏, 申恒青, 刘杨, 杜明月, 张文娟, 许宏宇, 范国兰, 公华林, 李青松, 李大秋, 高晓梅, 张丽娜 (686)
山东临沂大气夏季典型时段臭氧污染特征及其控制因素分析 杨雪, 安馨悦, 刘玉启, 江春美, 张鹏程, 李灵婕, 赵世阳, 张书源 (696)
基于气团老化程度对挥发性有机物分类改善 PMF 源解析效果 朱玉凡, 陈强, 刘晓, 张瑞欣, 郭文凯 (707)
日照市夏季 VOCs 物种空间分布特征及其对臭氧生成的影响 姚维杰, 王大玮, 谢付堂, 朱宏伟, 孟祥宇, 田雨, 刘航, 刘晓咏, 张宇婷, 雷山东, 孙业乐, 吴林, 潘小乐, 王自发 (714)
泰山大气卤代烃的长期变化趋势与来源 赵峰, 陈天舒, 董灿, 李洪勇, 刘子璐, 毕于健, 国兆新, 王新锋, 杨凌霄, 王韬, 王文兴, 薛丽坤 (723)
典型内燃叉车尾气挥发性有机物与正构烷烃的排放特征 周文钦, 李成, 刘俊文, 朱曼妮, 桂小亮, 余飞, 廖松地, 姜帆, 李光辉, 蒋斌, 郑君瑜 (735)
2000~2020 年黄河流域植被时空演化驱动机制 田智慧, 任祖光, 魏海涛 (743)
西南喀斯特流域土地利用对河流溶解无机碳及其同位素的影响 徐森, 李思亮, 钟君 (752)
生物炭添加对太湖滨岸带土壤氮矿化和淋失特征的影响 熊钰婷, 袁旭音, 周慧华, 高一丹, 汪宜敏 (762)
不同降雨条件下北运河河岸带类型对径流污染削减效果的影响 朱利英, 赵凯, 张俊亚, 王春荣, 魏源送 (770)
雨源型城市河流污染特征及水质联合评价: 以深圳龙岗河为例 毕业亮, 王华彩, 夏兵, 姜参参, 吴伟业, 李志林, 李诗敏, 宿辉, 白志辉, 徐圣君, 庄绪亮 (782)
廊坊市区径流污染时空分布特征及来源解析 潘欣荣, 左剑恶, 张宇, 门聪, 张丽萍, 黄守斌 (795)
北运河京津冀段河道浮游微生物群落多样性变化分析 郭芝芝, 苏振华, 邱琰茗, 郭道宇 (803)
河北省典型景观水体反硝化菌群落时空分布特征及驱动因素: 以石家庄为例 陈召莹, 张紫薇, 张甜娜, 周石磊, 张艺冉, 董宛佳, 于明会, 张一凡, 张家丰 (813)
青海湖流域有色可溶性有机物来源与特征分析 俞晓琴, 孟先强, 吴华武, 陈慧敏, 李宇阳, 朱俊羽, 郭燕妮, 姚磊 (826)
鄱阳湖丰枯情景对有色可溶性有机物生物可利用性及收支平衡的影响 郭燕妮, 姚晓龙, 陈慧敏, 俞晓琴, 李宇阳, 朱俊羽, 韩龙飞, 周蕾, 周永强 (837)
鄱阳湖沉积物溶解性有机质光谱特征 罗燕清, 万智巍, 晏彩霞, 聂明华, 丁明军, 鞠民, 刘赞 (847)
汤逊湖表层沉积物重金属污染与潜在生态风险评价 李星谕, 李朋, 苏业旺, 石明明, 胡天鹏, 毛瑶, 刘力, 张雅, 邢新丽, 祁士华 (859)
基于核密度估计的城市基础要素与街尘营养元素含量特征关联 王子娇, 李叙勇 (867)
新冠疫情下武汉典型饮用水水源中 DBPs 污染特征与风险评估 张坤峰, 昌盛, 涂响, 付青, 杨光, 樊月婷, 孙兴滨 (878)
铁改性石英砂过滤协同控制饮用水含氮消毒副产物和条件致病菌 齐鹏, 胡春, 邢学群, 毕志浩, 李泽松 (887)
氮掺杂生物炭催化臭氧对于布洛芬的降解特性与机制 柴铨, 许路, 金鑫, 石炬, 吴晨曦, 金鹏康 (896)
环糊精多孔聚合物对水中染料分子的吸附性能及主客效应 赵传靓, 王子婕, 闫仪, 徐慧, 周俊垣, 杨利伟, 王东升 (907)
冷冻 PN/A 颗粒污泥快速活化过程中的污泥形态与菌群演化特征分析 黄子恒, 张立, 崔舒惠, 张琦亮, 文言, 钱飞跃 (920)
不同阳离子聚丙烯酰胺有机脱水剂对污泥脱水性能的影响 冯齐云, 高宝玉, 岳钦艳, 石伟杰, 冯春晖, 周继柱, 王国瑞 (928)
云南某矿区小流域土壤重金属健康风险评价 刘洋, 何朝辉, 牛学奎, 张迪, 潘波 (936)
山地平原过渡带耕地土壤重金属空间特征及潜在生态风险因素探析 张丁, 黄容, 高雪松 (946)
地累积指数法评价多金属环境质量的方法优化探索: 以农业发达地区为例 鞠铁男, 雷梅 (957)
西南地质高背景区蔬菜 Pb 的安全生产阈值与土地质量类别划分 穆德苗, 孙约兵 (965)
典型锰矿区周边农田土壤-农作物重金属污染特征及生态风险评价 黄钟霆, 易盛炜, 陈贝贝, 彭锐, 石雪芳, 李峰 (975)
矿业废弃地不同生态修复模式下植物多样性及重金属富集迁移特征 周鹏飞, 张世文, 罗明, 魏洪斌, 宋强, 方兵, 庄红娟, 陈弘扬 (985)
不同种植年限蔬菜大棚土壤特性、重金属累积和生态风险 任强, 孙瑞玲, 郑凯旋, 刘祎丹, 阮心玲, 王洋洋 (995)
温室与大田种植方式对胡萝卜生长过程中重金属吸收的影响 曹春, 任丹, 吕贞英, 张鹏, 李锦超, 陈勋文, 王俊坚 (1004)
两种淹水模式下施用钝化材料对镉污染农田水稻安全性的影响 王港, 余海英, 李廷轩, 唐婵 (1015)
复合淋洗条件下农用地耕作层土壤去镉效率及其功能调节 曹坤坤, 张沙沙, 胡学玉, 张敏, 胡晓晓, 王子劲 (1023)
产多胺细菌调控根际细菌群落阻控小麦 Cd 吸收效应 李晓哲, 覃善梅, 陈兆进, 张君, 姚伦广, 李娜, 庞发虎, 韩辉 (1031)
土壤 *phoC* 和 *phoD* 微生物群落对化肥和有机肥配施生物炭的响应 杨文娜, 余冻, 罗东海, 熊子怡, 王莹燕, 王子芳, 高明 (1040)
刺槐林恢复过程中土壤微生物碳降解酶的变化及与碳库组分的关系 李文杰, 张颖皎, 赵雅萍, 许森平, 任成杰, 杨改河, 冯永忠, 任广鑫, 王晓娟, 韩新辉 (1050)
中亚热带不同林龄马尾松林土壤酶学计量特征 焦鹏宇, 郭文, 陈泽龙, 刘先, 胡亚林, 王玉哲 (1059)
稻田与旱地土壤中真菌和细菌对秸秆碳的利用特征 邓少虹, 郑小东, 毛婉琼, 陈香碧, 胡亚军, 程爱武, 何寻阳, 苏以荣 (1069)
模拟及实际根系分泌物对苤蓝土壤微生物群落的影响 韩博远, 张闻, 胡芳雨, 赵庆庆, 卢媛, 孔学, 吕俊岗 (1077)
德兴铜矿区抗生素抗性基因污染特征及其驱动因子 韩柳, 楼倩, 乔敏, 刘梦婷, 钟家有, 丁惠君 (1089)
陕西渭北旱塬区农田土壤有机质空间预测方法 尉芳, 刘京, 夏利恒, 徐仲伟, 龙小翠 (1097)
长三角农田轮作系统氨排放特征、转化机制和减排潜力 徐昶, 苗文亮, 倪远之, 沈根祥, 钱晓雍, 付侃, 高宗源, 王振旗 (1108)
《环境科学》征订启事 (618) 《环境科学》征稿简则 (761) 信息 (685, 935, 956)

典型锰矿区周边农田土壤-农作物重金属污染特征及生态风险评价

黄钟霆¹, 易盛炜², 陈贝贝¹, 彭锐³, 石雪芳⁴, 李峰^{2*}

(1. 湖南省生态环境监测中心, 国家环境保护重金属污染监测重点实验室, 长沙 410027; 2. 湘潭大学环境与资源学院, 湘潭 411199; 3. 湖南省长沙生态环境监测中心, 长沙 410001; 4. 湘西州生态环境局花垣分局, 湘西 416400)

摘要:以湖南省某典型关停锰矿区为研究对象,采集了矿区周边(污染区)和远离矿区(对照区)的农作物及其对应的土壤样品,测定了Cr、Mn、Ni、Cu、Zn、As、Cd和Pb等8种重金属含量,利用ArcGIS空间插值和主成分分析法分析了土壤重金属的分布及主要来源,重点探讨了土壤及对应农作物间重金属迁移规律,采用单因子、综合污染指数法以及潜在生态风险指数法进行了生态风险评价。结果表明,污染区存在严重的Cd、Zn、As和Mn污染,其中旱田中的平均含量分别为6.22、612.28、37.72和1506.2 mg·kg⁻¹,相较农用地风险筛选值,Cd、Zn和As超标率分别为88.41%、94.2%和84.06%,Mn的平均含量是湖南土壤背景值的3倍,水田污染相对较轻。由主成分分析可知农田土壤中Cd、Zn和Mn的来源与锰矿开采有关,As可能来源于农业活动。污染区为重污染等级,Cd、Mn和Zn是主要的污染因子,土壤中Cd存在极强的潜在生态风险,其余重金属具有轻微的潜在生态风险。研究区农作物主要存在Cr、Pb和Cd超标且超标率在1.1%~37.3%,其中,玉米中各超标重金属含量均值均高于大米,叶菜类蔬菜中各重金属含量均值均高于根茎类蔬菜。农田土壤污染程度会影响作物的富集能力,且不同作物对重金属的富集能力不同,蔬菜和玉米中8种重金属以及大米中Cd和As与对应土壤中重金属呈现正相关。

关键词:农田土壤; 重金属; 污染程度; 生态风险; 评价

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)02-0975-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202105019

Pollution Properties and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils and Crops Around a Typical Manganese Mining Area

HUANG Zhong-ting¹, YI Sheng-wei², CHEN Bei-bei¹, PENG Rui³, SHI Xue-fang⁴, LI Feng^{2*}

(1. State Environmental Protection Key Laboratory of Monitoring for Heavy Metal Pollutants, Hunan Environmental Monitoring Center, Changsha 410027, China; 2. College of Environment and Resources, Xiangtan University, Xiangtan 411199, China; 3. Changsha Environmental Monitoring Center, Changsha 410001, China; 4. Huayuan Branch of Xiangxi Ecological Environment Bureau, Xiangxi 416400, China)

Abstract: In order to assess the ecological risks of heavy metals and explore the pattern of heavy metal migration between farmland and corresponding crops in a typical and closed manganese mining area in Hunan province, farmland soils and crops surrounding the mining area (pollution area) and away from the mining area (control area) were collected, and then the contents of Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, As, Cd, and Pb were analyzed. The sources and distribution of heavy metals in farmland soils were analyzed using Kriging spatial interpolation and principal component analysis, and the ecological risk was evaluated using the single factor index, comprehensive pollution index, and potential ecological risk index. The results showed that the surrounding farmland soils in the closed Manganese mining area presented serious pollution of Cd, Zn, As, and Mn, in which the average contents of the above heavy metals in the dry land soil in the polluted area were 6.22, 612.28, 37.72, and 1506.2 mg·kg⁻¹, respectively. Compared with the soil risk screening value of agricultural land, the over-standard rates of Cd, Zn, and As were 88.41%, 94.20%, and 84.06%, respectively, and the average content of Mn in the farmland soil was three times that of the background value in the Hunan soil; however, the heavy metal pollution in the paddy field was relatively light. The principal component analysis showed that the sources of Cd, Mn, and Zn in the farmland soil were related to the manganese ore mining, whereas the source of As in the farmland soil might originate from agricultural activities. The pollution area was at a heavy pollution level, and the main pollution factors were Cd, Mn, and Zn. The Cd in the farmland soil could pose a strong potential ecological risk, but the rest of the heavy metals presented only a slight potential ecological risk. The content of Cr, Pb, and Cd in the crops in the study area exceeded the standard, and the exceeding standard rate was between 1.1% and 37.3%, where the average content of over-standard heavy metals in corn was higher than that in rice, and the average content of heavy metals in leafy vegetables was higher than that in root vegetables. The soil pollution degree of heavy metals could affect the accumulation ability of crops, and different crops had different accumulation abilities. For instance, leafy vegetables and root vegetables easily accumulated Cd and Zn; however, rice and corn separately enriched Cd and Cr, as well as Zn and Cu. The contents of heavy metals in dryland soils had a positive correlation with the content of heavy metals in corresponding crops. The contents of Cd and As in the paddy field and rice presented a positive correlation, but the remaining six heavy metal contents in rice (i.e., Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, and Pb) did not correlate with the content of the paddy fields.

Key words: farmland soil; heavy metals; pollution degree; ecological risk; evaluation

农田土壤是保障人类生存和发展的重要资源,长期的矿山开采和金属冶炼活动会造成周边农田土壤重金属污染。由于各矿区的重金属污染特征、主要农作物类型和农作物富集能力的差异性,不同矿区周边农田土壤和农作物面临的生态风险不尽相

收稿日期: 2021-05-05; 修订日期: 2021-07-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(21577118); 湖南省教育厅开放创新基金项目(19K090); 湖南省环保基金项目

作者简介: 黄钟霆(1980~),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为环境分析监测, E-mail: 13643860@qq.com

* 通信作者, E-mail: lifeng6220@xtu.edu.cn

同,客观正确地评价典型矿区周边农田土壤和农作物的污染状况对今后矿区农用地污染控制修复以及安全利用有着积极意义。

湘西花垣县锰矿资源丰富,有中国锰矿“金三角”的美誉,但由于历史上开发无序及废弃矿石随意堆放,造成了矿区周边空气、河流和土壤不同程度地重金属污染^[1~4]。近年来,政府已负责任地关闭了大量的非法采选冶炼企业,但锰矿区开采遗留的重金属污染问题短时间内难以解决,仍存在一定的潜在风险。早期已有研究分别对花垣县部分矿区土壤和蔬菜重金属污染进行了调查^[5~9],但缺乏对花垣典型锰矿区周边农田土壤-农作物重金属污染特征和生态风险的系统性分析,尤其是不同类型和污染程度的土壤与对应农作物间重金属迁移规律尚不清楚。

为此,本文以湖南省某关闭锰矿区周边农田土壤及其农产品为研究对象,对不同类型土壤及粮食和蔬菜等农产品进行采样,利用克里金空间插值及主成分分析法解析土壤重金属空间分布并揭示其来源,并利用单因子污染指数法、内梅罗综合污染指数法和潜在生态风险评价法对其生态风险进行评价^[10~12],探讨了农田土壤和农作物中重金属污染特

征及其之间的关联特性,以期为矿区周边农田土壤的风险管控和保证农产品安全提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于湘西土家族苗族自治州花垣县东北部和中部,对照区距污染区直线距离约 20 km,锰矿集中分布在污染区行政村 1,污染区以锰矿尾矿渣堆积点为中心布设 30 个点位,对照区布设 119 个点位(图 1)。研究区农作物种植以水稻、玉米、白菜和萝卜等为主。污染区和对照区的 pH 范围为旱田 6.6~7.8,水田 6.5~7.2。

1.2 样品采集及处理方法

污染区水田和旱田,对照区水田和旱田土壤样品分别为 20 和 69、52 和 67 个,为作物根附着土混合样。农作物样品采集点位与土壤样品采集点位吻合,水田采集的脱壳稻米、玉米、白菜、空心菜、红菜苔、萝卜和葛笋样品分别为 94、74、95、57、57、68 和 35 份。土壤及农作物的采样布点详见图 1。采集的土壤样品自然风干,研磨过 100 目筛后装袋备用。采集的蔬菜样品用去离子水清洗后烘干至恒重,磨细装袋备用。

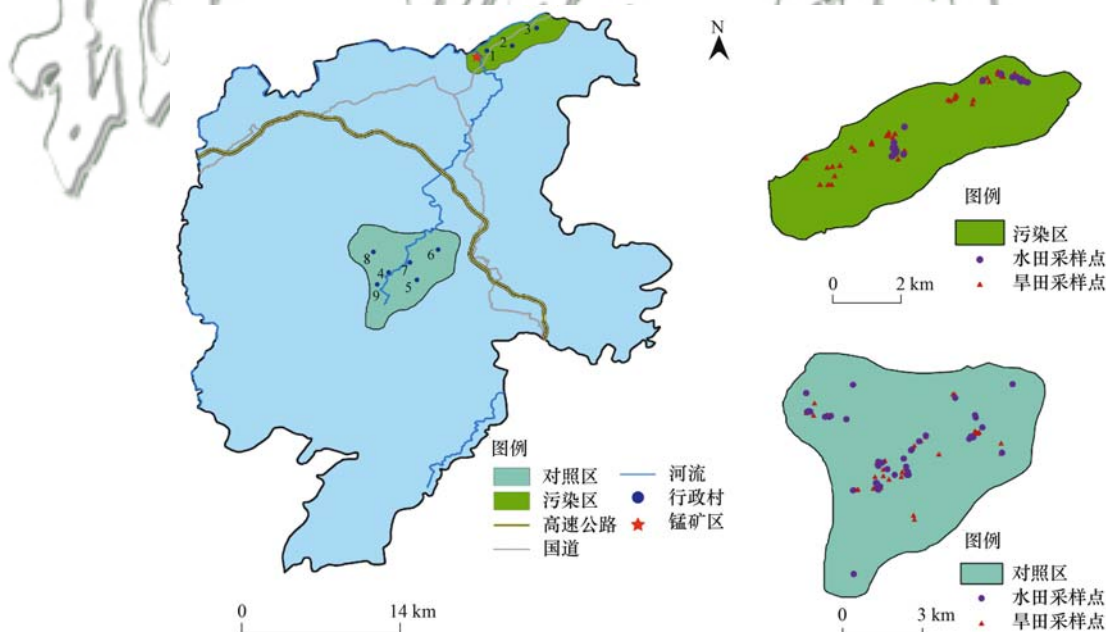


图 1 土壤样品采集区及采样点分布示意

Fig. 1 Distribution maps of soil sampling areas and points

1.3 样品分析方法

1.3.1 土壤和农作物中重金属的测定

土壤样品参考《土壤和沉积物-金属元素总量的消解-微波消解法》(HJ 832-2017)进行消解。农作物样品采用 $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{O}_2$ 加热消解。土壤消解液和农作物消解液经电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测

定。分析过程中使用国家标准样品和空白样品进行质控,标准样品为国家标准物质土壤(GBW07430)、大米(GBW10045)、玉米(GBW10012)和菠菜(GBW10015)。标准样品中总铬、总锰、总镍、总铜、总锌、总砷、总镉和总铅的加标回收率均在 90%~105% 之间。测试过程发现农作物中总砷含量

远小于无机砷标准限值,故仅测定总砷含量。

1.3.2 重金属污染评价方法

土壤中的重金属污染评价采用单因子污染指数法和综合污染指数法,以湖南省的土壤背景值作为标准^[13]进行评价。

单因子污染指数法:

$$P_i = C_i/S_i$$

式中, P_i 为重金属单因子污染指数, C_i 为重金属的实测值, S_i 为重金属 i 的评价标准值。 $P_i < 1$, 表示未污染; $P_i > 1$, 表示污染, P_i 越大污染越严重。

综合污染指数法:

$$P_{\text{zong}} = \sqrt{(P_{\text{ave}}^2 + P_{\text{max}}^2)/2}$$

式中, P_{zong} 为重金属综合污染指数, P_{ave} 为单因子污染指数的平均值, P_{max} 为单因子污染指数中的最大值。分级标准见文献^[14]。

潜在生态危害指数法:

$$E_i = T_i \times (C_i/S_i)$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_i$$

式中, C_i 、 S_i 、 T_i 和 E_i 分别为第 i 种土壤重金属的实测值、参比值、毒性系数和潜在生态危害系数; RI 为土壤中多种重金属的综合生态危害指数。相关分级标准见文献^[15,16]。

农作物中 Pb、Cd、As 和 Cr 采用《食品安全国

家标准-食品中污染物限量》(GB 2762-2017), Zn 和 Cu 分别采用《食品中锌限量卫生标准》(GB 13106-1991) 和《食品中铜限量卫生标准》(GB 15199-1994) 评价超标率, Mn 和 Ni 因无参考标准故未作评价^[17]。

生物富集系数(BCF)计算公式如下:

$$BCF = C_R/C_s$$

式中, C_R 为作物中重金属的含量, C_s 为对应土壤中同一重金属的含量。

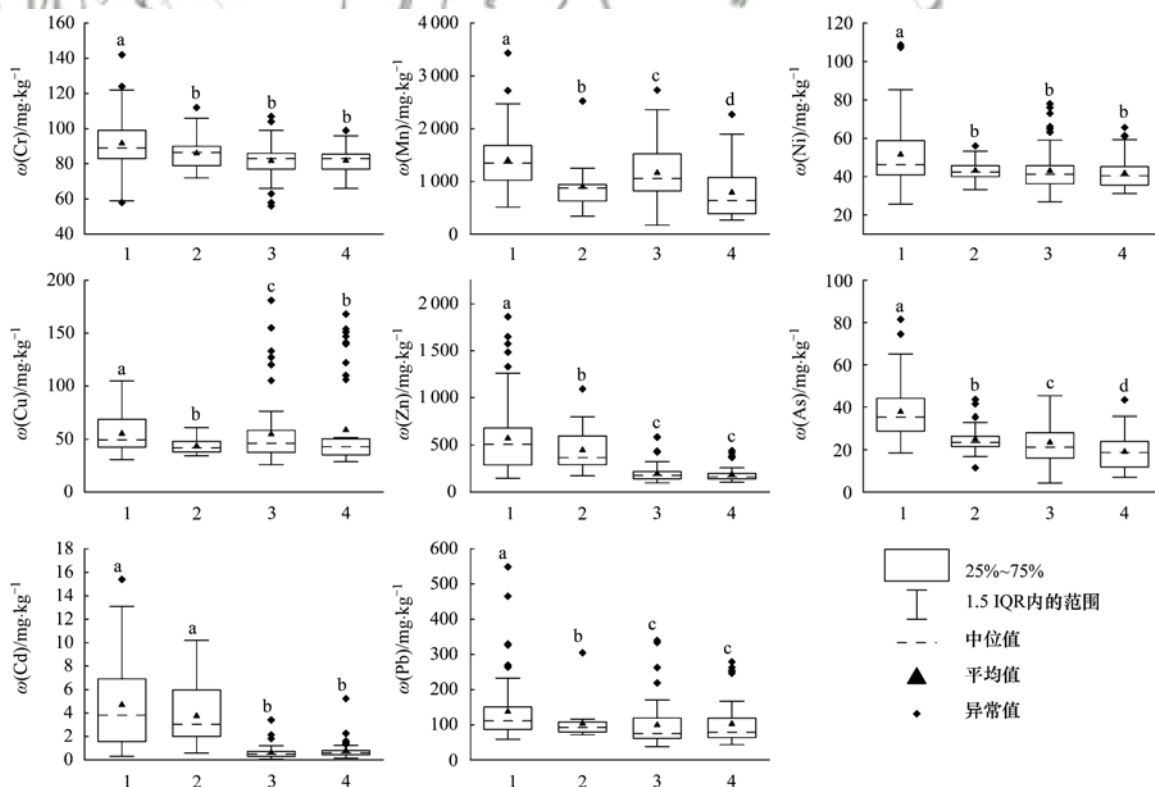
1.4 统计分析方法

数据分析和作图利用 ArcGIS 10.2.2、Origin 8.5 和 SPSS Statistics 25 等软件。

2 结果与讨论

2.1 土壤中重金属来源、分布及污染评价

土壤中重金属含量如图 2 所示,按照 GB 15618-2018 中土壤风险筛选值计算超标率,研究区土壤 Zn、Cd、As、Cu 和 Pb 均有超标,其中污染区旱田超标率分别为 94.2%、88.41%、8.06%、49.3% 和 8.7%,对照区旱田超标率为 29.9%、40.3%、37.31%、40.3% 和 4.5%, Cr 和 Ni 未超标。研究区水田中 Cu、Zn、Cd 和 Pb 等重金属超标率略低于旱田,而 As 在水田的超标率明显低于旱田,可能由于轮作中水稻相较蔬菜和玉米等旱田作物对土壤中砷



1. 污染区旱田, 2. 污染区水田, 3. 对照区旱田, 4. 对照区水田; 不同小写字母代表处理组间差异显著 ($P < 0.05$)

图 2 污染区和对照区不同类型土壤重金属含量水平

Fig. 2 Heavy metal contents of different types of soil in contaminated area and control area

的富集吸收能力更强导致^[18]. 污染区与对照区的旱田和水田中 Zn、Cd、As、Pb 和 Mn 均有显著性差异 ($P < 0.05$), 说明存在外界活动的干扰, 为进一步解析研究区土壤的重金属来源, 对研究区 8 种重金属进行主成分分析, 数据检验的 KMO 值为 0.747, Bartlett's 检验的 P 值小于 0.001, 可以进行主成分提取. 如图 3 所示, 提取了 2 个特征值大于 1 的成分, 累计解释了总方差的 62.8%. 第一主成分中具有较高载荷的重金属元素为 Cu、Ni、Cr、As 和 Pb, 方差贡献率为 44.2%, Cu、Ni、Cr、As 和 Pb 的 Pearson 相关系数在 0.401 ~ 0.8 之间, 相关性较强, 具有同源性, 可能来源于农业活动如施肥及污水灌溉; 第二主成分中具有较高载荷的重金属元素为 Cd、Zn、Pb 和 Mn, 方差贡献率为 18.6%, Cd 的载荷最大为 0.702, Cd、Zn 和 Pb 的相关系数在 0.357 ~ 0.627 之间, 可能来源于锰矿矿渣雨水淋溶、大气沉降和污水排放等重金属迁移途径. 值得注意的是, Pb 不仅来源于农业活动, 同时也受锰矿开采的影响. 严重的 Cd、Zn 和 As 等重金属污染会对作物及动物的生长发育产生显著抑制作用, 人群通过膳食暴露等途径长期摄入会造成较高的健康风险^[19,20].

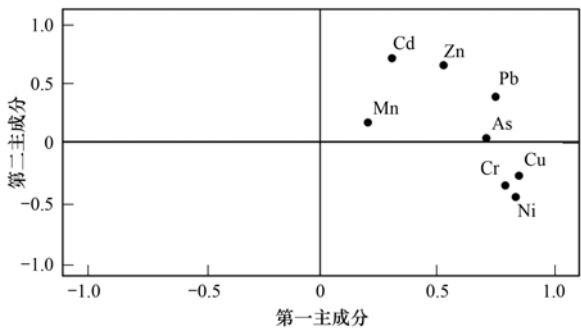


图 3 污染区土壤重金属元素主成分荷载

Fig. 3 Heavy metal loading of the principal components in contaminated soil

研究区土壤 8 种重金属含量在空间上分布如图 4 所示, 污染区高浓度重金属区域主要分布于西南部的行政村 1 内, 该村锰矿企业分布较为集中. 污染区河流上游两侧土壤中 Cd、Mn、Zn、As 和 Pb 等重金属浓度较高, 未来应加强河流中的重金属监测, 防范土壤中重金属通过雨水冲刷或下渗等方式向河流迁移.

如图 5 所示, 按单因子污染指数法评价, 污染区土壤受 8 种重金属污染程度为: Cd > Mn > Zn > As > Pb, Cu、Cr 和 Ni 无污染. 从综合污染指数评价知, 污染区 3 个行政村均属于重污染, 对照区的行政村

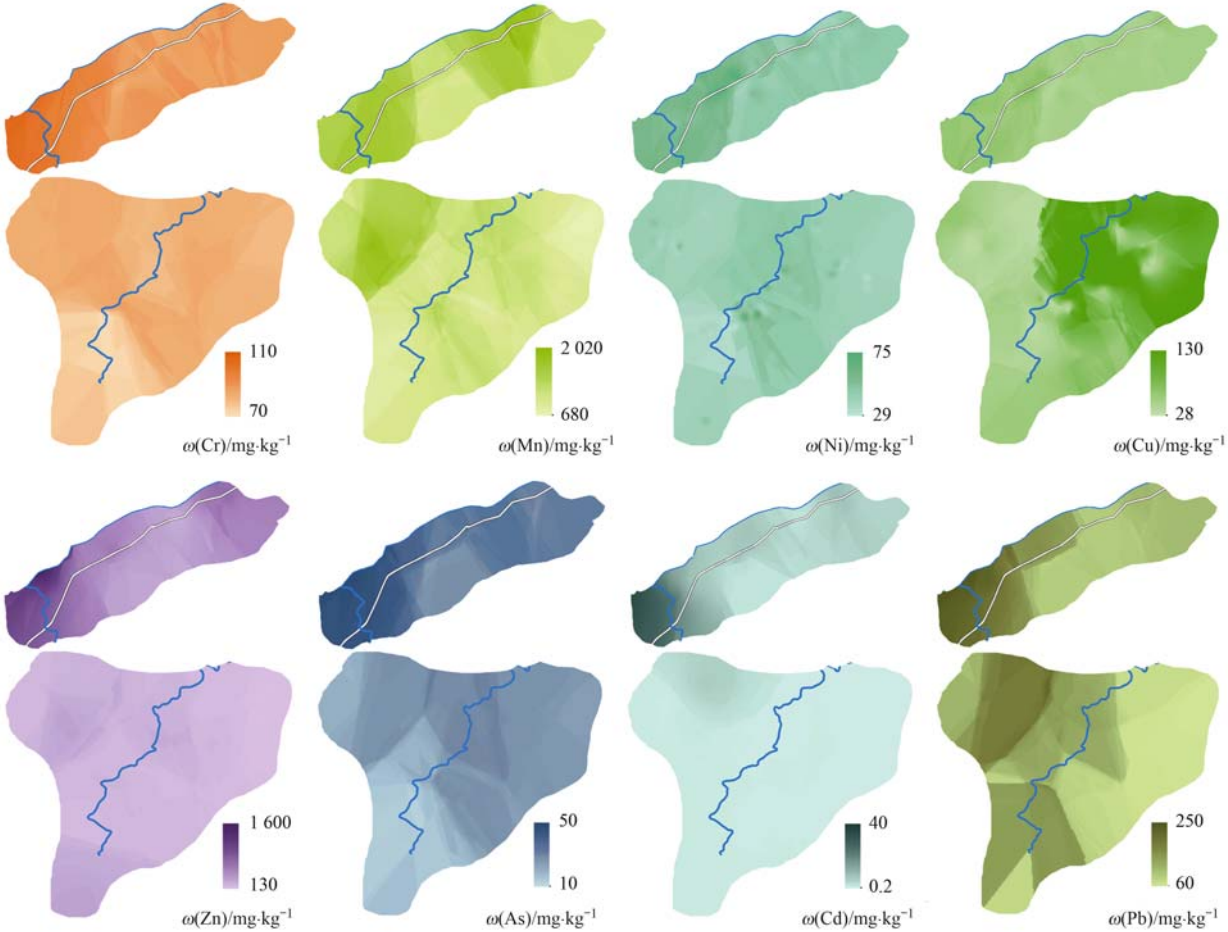
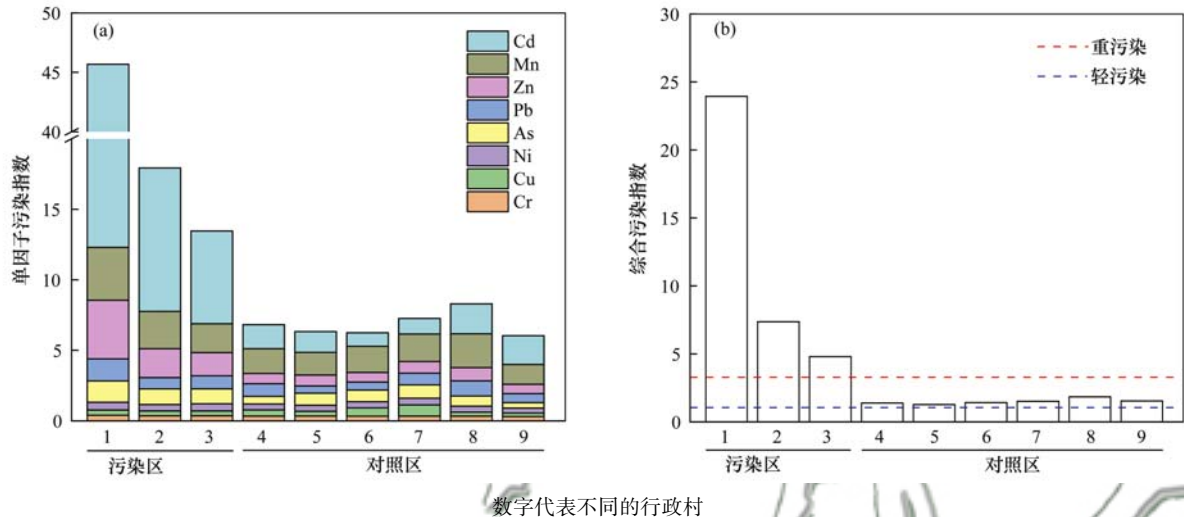


图 4 污染区和对照区土壤中 8 种重金属含量空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of eight heavy metal concentrations in the contaminated area and control area

均属于轻污染,其中 Cd、Mn 和 Zn 是导致污染指数偏高的主要原因. 由表 1 可知,污染区及对照区土壤中 Cd 的潜在生态风险指数均达到了极强等级,其余重金属生态风险为轻微等级. 有学者调查北方或南方工矿业周边农田土壤同样发现 Cd 存在极强的

潜在生态风险^[21~23]. 由综合潜在生态风险指数知,污染区和对照区的生态风险等级分别为极强和中等级. 值得注意的是,Cd 是造成潜在生态风险的主要因素,其次为 Pb 和 As. Mn 虽然造成了较为严重的土壤重金属污染,但潜在生态风险较低.



数字代表不同的行政村
图5 土壤重金属单因子污染指数和综合污染指数
Fig. 5 Single-factor and composite pollution index of heavy metals in soil

表1 污染区土壤潜在生态风险指数及综合潜在生态风险指数统计特征

Table 1 Descriptive statistics of potential risk coefficients and integrated potential ecological risk index of heavy metals in soils in the contaminated area and control area

项目	潜在生态风险指数								综合潜在生态风险指数
	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb	
污染区	最小值	1.71	0.77	4.02	5.70	1.56	8.21	121.52	183.09
	最大值	4.18	11.83	16.98	19.41	34.39	58.21	22 556.96	22 622.63
	均值	2.66	3.11	7.76	9.76	6.05	24.91	2 388.87	2 467.14
	变异系数	0.15	0.57	0.31	0.31	0.78	0.38	1.34	1.3
对照区	最小值	1.65	0.39	4.2	4.81	1.02	3.07	21.65	83.72
	最大值	3.15	7.07	12.19	80.74	6.18	32.36	1 984.94	2 061.05
	均值	2.40	2.35	6.64	13.16	2.04	15.42	263.98	294.6
	变异系数	0.11	0.59	0.23	0.93	0.47	0.43	0.9	0.75

2.2 作物中重金属含量

由表 2 可知,污染区大米和玉米中的 Cr、Pb、Cd 和 Cu 存在超标且超标率在 3.3%~37.3% 之间,Cd 的超标率最低. 大米中各超标重金属的含量均值低于玉米,可能是因为水田在淹水条件下部分重金属生成了硫化物沉淀,生物有效性有所降低^[24]. 从变异系数来看,粮食中 Pb、Cr、Cu 和 Ni 为高等变异(CV>35%),Cd、Mn、As 和 Zn 为弱变异(CV<15%). 可见土壤中污染越重的重金属,对应粮食作物中含量越相近,而重金属污染程度较轻的土壤中重金属生物有效性受空间分布、pH 和有机质含量等土壤性质影响较大,导致粮食作物中重金属各点位含量差异显著,这也是对照区大米和玉米中 Cr 和 Pb 的均值含量高于污染区的可能原因,因此土壤中重金属污染程度可能影响粮食作物对重金属的吸收

富集^[25,26]. 进一步说明利用现行土壤环境质量标准及生态风险标准在评价特定粮食种植安全性时应考虑土壤中重金属的空间分布差异、生物有效性及赋存状态^[27,28].

如表 3 所示,研究区蔬菜 Pb、Cd、Cr 和 As 存在超标,超标率在 1.1%~10.9% 之间,其中 Cd 和 Pb 的超标率较高,叶菜类蔬菜各重金属含量均值高于根茎类蔬菜. 污染区蔬菜中 Cd 和 Zn 的含量明显高于对照区. 值得注意的是,由于研究区土壤中 Zn 和 Cu 含量较高,且蔬菜对于 Zn 和 Cu 的生物富集能力除低于 Cd 外远高于其余重金属,直接导致研究区蔬菜中的 ω(Zn) 最高达 15.6 mg·kg⁻¹, ω(Cu) 最高达 5.71 mg·kg⁻¹. ω(Cu) 在空心菜中最高、ω(Zn) 在红菜薹中最高,过量摄入 ω(Zn) 和 ω(Cu) 过高的蔬菜对人体产生的健康风险未来也值得关注^[29].

表 2 污染区和对照区中大米和玉米重金属元素的含量水平/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 2 Heavy metal contents in rice and maize produced in the pollution area and the control area/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

重金属	粮食种类	区域	均值	标准差	超标率/%	变异系数/%	P 值	标准限值	
Pb	大米	污染区	0.04	0.05	4.2	135	0.081	0.2	
		对照区	0.07	0.13	5.2	186			
	玉米	污染区	0.41	0.59	21.7	145	<0.05		
		对照区	0.59	1.00	35.3	169			
Zn	大米	污染区	12.04	2.32	0	19	0.05	50	
		对照区	13.03	4.03	0	31			
	玉米	污染区	22.83	7.98	0	35	<0.05		
		对照区	18.15	4.66	0	26			
Cu	大米	污染区	1.14	0.76	0	67	0.083	10	
		对照区	1.03	0.75	0	73			
	玉米	污染区	14.14	19.89	34.78	141	0.657		
		对照区	10.98	19.48	23.52	177			
Cr	大米	污染区	0.19	0.40	8.3	205	<0.05	1.0	
		对照区	0.53	0.76	22.9	144			
	玉米	污染区	0.59	0.69	26.1	117	<0.05		
		对照区	1.09	1.37	37.3	126			
Ni	大米	污染区	0.34	0.54	/	158	0.719	/	
		对照区	0.35	1.62	/	468			
	玉米	污染区	0.84	1.09	/	131	0.643		
		对照区	0.89	3.26	/	368			
Cd	大米	污染区	0.06	0.04	3.3	0.76	0.118	0.2	
		对照区	0.05	0.11	6.5	2.12			
	玉米	污染区	0.07	0.12	18.5	1.90	0.055		0.1
		对照区	0.03	0.06	7.5	1.71			
Mn	大米	污染区	7.09	1.63	/	0.23	0.795	/	
		对照区	7.18	1.86	/	0.26			
	玉米	污染区	4.69	1.13	/	0.24	0.205		
		对照区	6.07	2.24	/	0.37			
As	大米	污染区	0.09	0.04	0	0.40	0.067	0.2	
		对照区	0.09	0.06	0	0.65			
	玉米	污染区	0.01	0.01	3.7	1.30	<0.05		
		对照区	0.02	0.03	11.3	1.64			

2.3 农作物对重金属的富集系数评价

不同农作物对重金属的富集能力一般存在着较大的差异^[30,31]。如图 6 所示,污染区和对照区的叶

菜类蔬菜和根茎类蔬菜均容易富集 Cd、Cu 和 Zn,其富集系数明显高于其他 5 种重金属,这与张鹏帅等^[32]调查福州市郊农田蔬菜中各重金属富集系数

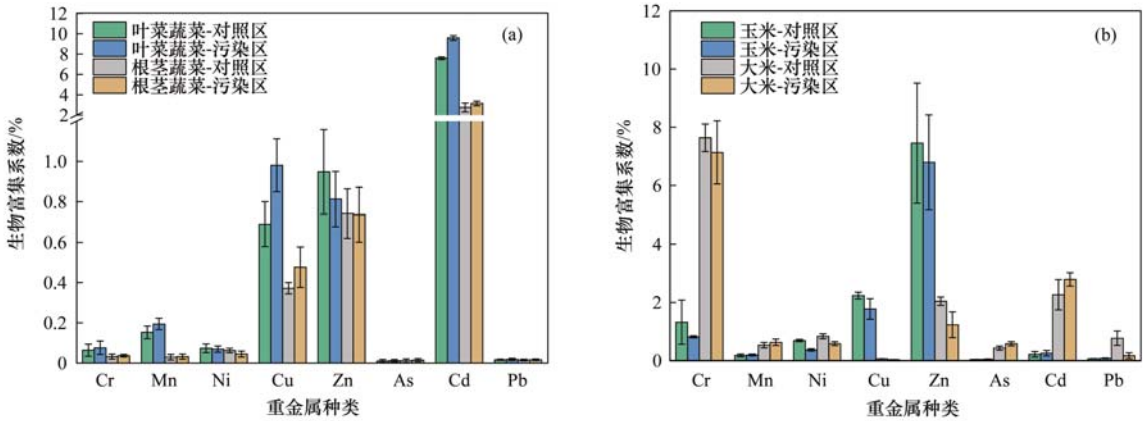


图 6 污染区和对照区大米、玉米和蔬菜对 8 种重金属的富集系数

Fig. 6 Biological concentration factors of rice, maize, and vegetables for eight heavy metals in the contaminated area and control area

得出的结论一致. 叶菜类蔬菜的重金属富集能力高于根茎类蔬菜,这与孙硕等^[33]调查河北省大棚蔬菜中重金属富集能力得出的结论一致,可能是由于叶菜蔬菜发达的根系对重金属的吸收转运能力较强导致^[34,35]. 大米更容易富集 Cd、Zn 和 Cr,玉米更容易富集 Zn、Cu 和 Cr,与前人的研究结果较为一致^[36].

土壤污染程度会影响作物的富集能力,其中土壤污染程度加深明显提高了农作物对 Cd 的富集能力,降低了对 Zn 的富集能力. 大米和玉米中 Cr、Ni 和 Zn 的富集系数明显高于蔬菜,叶菜类蔬菜对 Cd 富集系数明显高于玉米和大米. 在实际生产中,应充分考虑农作物重金属累积特性以保证作物安全生产.

表 3 污染区 and 对照区叶菜蔬菜及根茎蔬菜中重金属元素的含量水平/mg·kg⁻¹

Table 3 Heavy metal contents in leaf and root vegetable produced in the pollution area and the control area/mg·kg ⁻¹								
重金属	粮食种类	区域	均值	标准差	超标率/%	变异系数/%	<i>P</i> 值	标准限值
Pb	叶菜类	污染区	0.10	0.16	8.4	1.61	0.086	0.3
		对照区	0.05	0.04	0.00	0.78		
	根茎类	污染区	0.06	0.18	12.70	3.03	<0.05	0.1
		对照区	0.04	0.04	8.30	1.05		
Zn	叶菜类	污染区	3.90	3.01	0.00	0.77	<0.05	20
		对照区	2.35	1.18	0.00	0.50		
	根茎类	污染区	2.59	2.86	0.00	1.10	<0.05	
		对照区	1.91	1.09	0.00	0.57		
Cu	叶菜类	污染区	0.49	0.57	0.00	1.16	<0.05	10
		对照区	0.57	0.50	0.00	0.86		
	根茎类	污染区	0.40	0.85	0.00	2.15	<0.05	
		对照区	0.32	0.31	0.00	0.98		
Cr	叶菜类	污染区	0.13	0.25	5.30	1.95	<0.05	0.5
		对照区	0.08	0.13	2.60	1.66		
	根茎类	污染区	0.13	0.32	0.80	2.47	0.352	
		对照区	0.05	0.06	0.00	1.13		
Ni	叶菜类	污染区	0.16	0.41	/	2.53	<0.05	/
		对照区	0.11	0.34	/	2.99		
	根茎类	污染区	0.13	0.22	/	1.63	0.073	
		对照区	0.05	0.04	/	0.80		
Cd	叶菜类	污染区	0.08	0.11	9.50	1.45	<0.05	0.2
		对照区	0.03	0.03	0.90	1.01		
	根茎类	污染区	0.05	0.11	10.90	2.17	<0.05	0.1
		对照区	0.03	0.03	2.10	1.24		
Mn	叶菜类	污染区	3.10	3.20	/	1.03	<0.05	/
		对照区	3.80	6.04	/	1.59		
	根茎类	污染区	0.87	1.03	/	1.18	<0.05	
		对照区	1.35	1.63	/	1.21		
As	叶菜类	污染区	0.01	0.01	1.10	1.40	0.742	0.5
		对照区	0.01	0.01	0.90	1.45		
	根茎类	污染区	0.01	0.10	1.80	5.91	<0.05	
		对照区	0.01	0.05	0.00	2.14		

2.4 土壤中重金属含量与农作物中重金属含量的相关性分析

为明确调查区土壤对农作物中重金属累积的影响,根据土壤和农作物中重金属含量的测定结果,对蔬菜和粮食中重金属含量与土壤中重金属含量进行 Pearson 相关性检验分析,其结果列于表 4 中. 结果

表 4 污染区与对照区土壤与农作物中重金属含量之间的 Pearson 相关性分析¹⁾

	Pearson 相关系数(R ²)							
	Pb	Zn	Cr	Cu	Ni	Cd	Mn	As
旱地土壤-玉米	0.651 7	0.716 7	0.877 6	0.712 1	0.630 7	0.618 3	0.591 2	0.620 9
旱地土壤-叶菜类蔬菜	0.799 4	0.665 9	0.800 8	0.772 7	0.664 3	0.530 6	0.659 6	0.729 1
旱地土壤-根块类蔬菜	0.762 1	0.766 8	0.662 8	0.747 6	0.695 7	0.739 0	0.784 1	0.712 3
水田土壤-大米	—	—	—	—	—	0.721 4	—	0.517 2

1) “—”表示相关系数小于 0.3,即相关程度极弱,视为不相关

表明:旱地土壤中 8 种重金属含量与叶菜类蔬菜、根茎类蔬菜及玉米中相应重金属含量呈正相关关系,即土壤中重金属含量越高,对应作物中含量也越高,相关系数范围为 0.662 8~0.800 8;除了大米中 Cd 和 As 具有相关性外,其余 6 种重金属与水田土壤重金属的含量不呈相关性,与前人得出的结论基本一致^[37,38].说明土壤重金属在水稻生长过程中的迁移转化行为更加复杂^[39].

3 结论

(1)污染区周边农田土壤存在严重的 Cd、Zn、As 和 Mn 污染.由主成分分析可知 Cd、Zn 和 Mn 源于锰矿的生产活动,Cu、Ni、Cr 和 As 源于农业活动如施肥及污水灌溉,Pb 则源于上述两者活动的影响.

(2)污染区河流上游两侧土壤中 Cd、Mn、Zn、As 和 Pb 等重金属浓度较高,未来应加强河流中的重金属监测,防范土壤中重金属通过雨水冲刷或下渗等方式向河流迁移.

(3)Cd、Mn 和 Zn 是主要的污染因子,污染区 3 个行政村土壤污染程度均为重污染,对照区 6 个行政村土壤均为轻污染.研究区土壤中 Cd 均存在极强的潜在生态风险.未来除了加强对污染区 Cd、Zn、As 和 Mn 等重金属的修复,还应开展对照区土壤及农作物协同监测,进一步保障农产品质量安全.

参考文献:

- [1] 孙厚云,卫晓锋,孙晓明,等.钒钛磁铁矿尾矿库复垦土地及周边土壤-玉米重金属迁移富集特征[J].环境科学,2021,42(3):1166-1176.
Sun H Y, Wei X F, Sun X M, *et al.* Bioaccumulation and translocation characteristics of heavy metals in a soil-maize system in reclaimed land and surrounding areas of typical Vanadium-Titanium magnetite tailings[J]. Environmental Science, 2021, 42(3): 1166-1176.
- [2] 窦韦强,安毅,秦莉,等.农田土壤重金属垂直分布迁移特征及生态风险评价[J].环境工程,2021,39(2):166-172.
Dou W Q, An Y, Qin L, *et al.* Characteristics of vertical distribution and migration of heavy metals in farmland soils and ecological risk assessment [J]. Environmental Engineering, 2021, 39(2): 166-172.
- [3] 朱佳文.湘西花垣铅锌矿区重金属污染土壤生态修复研究[D].长沙:湖南农业大学,2012.13-14.
Zhu J W. The research on the eco-remediation of heavy metals contaminated soils in Huayuan Pb/Zn Mine Area of Xiangxi[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2012. 13-14.
- [4] 黄小娟,江长胜,郝庆菊.重庆溶溪锰矿区土壤重金属污染评价及植物吸收特征[J].生态学报,2014,34(15):4201-4211.
Huang X J, Jiang C S, Hao Q J. Assessment of heavy metal pollutions in soils and bioaccumulation of heavy metals by plants in Rongxi Manganese mineland of Chongqing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(15): 4201-4211.
- [5] 张永江,田川,邓茂,等.典型锰矿开采冶炼区域重金属分布及潜在风险评价[J].环境影响评价,2017,39(4):66-70,84.
Zhang Y J, Tian C, Deng M, *et al.* Distribution and potential ecological risk assessment of heavy metal in certain typical manganese ore area [J]. Environmental Impact Assessment, 2017, 39(4): 66-70, 84.
- [6] Sawut R, Kasim N, Maihemuti B, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in the vegetable bases of northwest China[J]. Science of the Total Environment, 2018, 642: 864-878.
- [7] 熊云武,唐彪,林晓燕,等.湘西锰矿区土壤重金属含量及优势植物吸收特征[J].安徽农业科学,2016,44(8):84-87,95.
Xiong Y W, Tang B, Lin X Y, *et al.* Soil heavy metals content and dominant plants absorption characteristics in Xiangxi manganese mining area [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2016, 44(8): 84-87, 95.
- [8] 杨胜香,袁志忠,李朝阳,等.湘西花垣矿区土壤重金属污染及其生物有效性[J].环境科学,2012,33(5):1718-1724.
Yang S X, Yuan Z Z, Li Z Y, *et al.* Heavy metal contamination and bioavailability in Huayuan manganese and lead/zinc mineland, Xiangxi[J]. Environmental Science, 2012, 33(5): 1718-1724.
- [9] 杨胜香,易浪波,刘佳,等.湘西花垣矿区蔬菜重金属污染现状及健康风险评价[J].农业环境科学学报,2012,31(1):17-23.
Yang S X, Yi L B, Liu J, *et al.* Heavy metals concentrations and health risk in vegetables grown on Mn and Pb/Zn mineland in Huayuan county, west Hunan province, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31(1): 17-23.
- [10] 唐瑞玲,王惠艳,吕许朋,等.西南重金属高背景区农田系统土壤重金属生态风险评价[J].现代地质,2020,34(5):917-927.
Tang R L, Wang H Y, Lv X P, *et al.* Ecological risk assessment of heavy metals in farmland system from an area with high background of heavy metals, southwestern China [J]. Geoscience, 2020, 34(5): 917-927.
- [11] 王金霞,罗乐,陈玉成,等.三峡库区库尾典型农用地土壤重金属污染特征及潜在风险[J].农业环境科学学报,2018,37(12):2711-2717.
Wang J X, Luo L, Chen Y C, *et al.* The characteristics and potential risk of heavy metals pollution in farmland soil of an agricultural land in the three Gorges Reservoir area[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(12): 2711-2717.
- [12] 孙彤,纪艺凝,李可,等.弱碱性玉米地土壤重金属赋存形态及生态风险评价[J].环境化学,2020,39(9):2469-2478.
Sun T, Ji Y N, Li K, *et al.* The speciation distributions of heavy metals in weakly alkaline maize soils and its potential ecological risk[J]. Environmental Chemistry, 2020, 39(9): 2469-2478.
- [13] 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.
- [14] Nemerow N L. Stream, lake, estuary, and ocean pollution[M]. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1985.
- [15] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.
- [16] 林小兵,武琳,王惠明,等.不同功能区蔬菜地土壤重金属污染特征及其风险评价[J].生态环境学报,2020,29(11):

- 2296-2306.
- Lin X B, Wu L, Wang H M, *et al.* Heavy metals pollution characteristics and risk assessment of vegetable soil in different functional areas [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, **29**(11): 2296-2306.
- [17] 陈志良, 黄玲, 周存宇, 等. 广州市蔬菜中重金属污染特征研究与评价[J]. *环境科学*, 2017, **38**(1): 389-398.
- Chen Z L, Huang L, Zhou C Y, *et al.* Characteristics and evaluation of heavy metal pollution in vegetables in Guangzhou [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(1): 389-398.
- [18] 朱岗辉, 汪成, 李璐, 等. 湘潭金石锰矿周边土壤污染特征及生态风险评价[J]. *安徽农业科学*, 2018, **46**(34): 48-52.
- Zhu G H, Wang C, Li L, *et al.* Pollution characteristics and ecological risk assessment of soil in Xiangtan Jinshi manganese mining area[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2018, **46**(34): 48-52.
- [19] 刘小燕, 陈棉彪, 李良忠, 等. 云南会泽铅锌冶炼厂周边土壤重金属污染特征及健康风险评价[J]. *农业资源与环境学报*, 2016, **33**(3): 221-229.
- Liu X Y, Chen M B, Li L Z, *et al.* Contaminant characteristics and health risk assessment of heavy metals in soils from lead-zinc melting plant in Huize county, Yunnan Province, China [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2016, **33**(3): 221-229.
- [20] 蒋宗宏, 陆凤, 马先杰, 等. 贵州铜仁典型锰矿区土壤及蔬菜重金属污染特征及健康风险评价[J]. *农业资源与环境学报*, 2020, **37**(2): 293-300.
- Jiang Z H, Lu F, Ma X J, *et al.* Characteristics and health risk assessments of heavy metals in soils and vegetables in manganese mining areas in Tongren County, Guizhou Province, China [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, **37**(2): 293-300.
- [21] 余嘉衍, 李冰玉, 周一敏, 等. 湖南省某矿遗址周围农业土壤重金属污染及风险评价[J]. *环境化学*, 2020, **39**(4): 1024-1030.
- Yu J Y, Li B Y, Zhou Y M, *et al.* Pollution and risk assessment of heavy metal in agricultural soil around an abandon mine site in Hunan Province [J]. *Environmental Chemistry*, 2020, **39**(4): 1024-1030.
- [22] 孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 等. 河南省典型工业区周边农田土壤重金属分布特征及风险评价[J]. *环境科学*, 2021, **42**(2): 900-908.
- Meng X F, Guo J M, Yang J X, *et al.* Spatial distribution and risk assessment of heavy metal pollution in farmland soils surrounding a typical industrial area of Henan province [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(2): 900-908.
- [23] 孙德尧, 薛忠财, 韩兴, 等. 冀北山区某矿区周边耕地土壤重金属污染特征及生态风险评价[J]. *生态与农村环境学报*, 2020, **36**(2): 242-249.
- Sun D Y, Xue Z C, Han X, *et al.* Polluting characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in cultivated land around a mining Area in northern Hebei province [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020, **36**(2): 242-249.
- [24] 杨刚, 沈飞, 钟贵江, 等. 西南山地铅锌矿区耕地土壤和谷类产品重金属含量及健康风险评价[J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(9): 2014-2021.
- Yang G, Shen F, Zhong G J, *et al.* Concentration and health risk of heavy metals in crops and soils in a zinc-lead mining area in southwest mountainous regions [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, **31**(9): 2014-2021.
- [25] 周艳, 万金忠, 李群, 等. 铅锌矿区玉米中重金属污染特征及健康风险评价[J]. *环境科学*, 2020, **41**(10): 4733-4739.
- Zhou Y, Wan J Z, Li Q, *et al.* Heavy metal contamination and health risk assessment of corn grains from a Pb-Zn mining area [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(10): 4733-4739.
- [26] 周亚龙, 杨志斌, 王乔林, 等. 雄安新区农田土壤-农作物系统重金属潜在生态风险评估及其源解析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(4): 2003-2015.
- Zhou Y L, Yang Z B, Wang Q L, *et al.* Potential ecological risk assessment and source analysis of heavy metals in soil-crop system in Xiong'an new district [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(4): 2003-2015.
- [27] 周东美, 王玉军, 陈怀满. 论土壤环境质量重金属标准的独立性与依存性[J]. *农业环境科学学报*, 2014, **33**(2): 205-216.
- Zhou D M, Wang Y J, Chen H M. Independence and dependence of soil environmental quality standard for heavy metals [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, **33**(2): 205-216.
- [28] 韦壮绵, 陈华清, 张煜, 等. 湘南柿竹园东河流域农田土壤重金属污染特征及风险评价[J]. *环境化学*, 2020, **39**(10): 2753-2764.
- Wei Z M, Chen H Q, Zhang Y, *et al.* Pollution characteristics and risk assessment of heavy metals in farmland soils at Shizhuyuan Donghe River basin of Southern Hunan [J]. *Environmental Chemistry*, 2020, **39**(10): 2753-2764.
- [29] Huang Y, Chen Q Q, Deng M H, *et al.* Heavy metal pollution and health risk assessment of agricultural soils in a typical peri-urban area in southeast China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, **207**: 159-168.
- [30] 李富荣, 徐爱平, 吴志超, 等. 大湾区根茎类蔬菜-农田土壤系统中10种重金属吸收特性及其种植安全性研究[J]. *生态环境学报*, 2020, **29**(6): 1251-1259.
- Li F R, Xu A P, Wu Z C, *et al.* Study on the absorption characteristics of 10 heavy metal elements and planting safety in the rootstock vegetable-farmland soil system in the greater bay area [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, **29**(6): 1251-1259.
- [31] 周莉, 郑向群, 丁永祯, 等. 农田镉砷污染防控与作物安全种植技术探讨[J]. *农业环境科学学报*, 2017, **36**(4): 613-619.
- Zhou L, Zheng X Q, Ding Y Z, *et al.* Probes of prevention and control of farmland pollution by cadmium & arsenic and crop production safety [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, **36**(4): 613-619.
- [32] 张鹏帅, 朱旭彬, 苏雪玲, 等. 福州市郊农田土壤与蔬菜重金属污染状况分析[J]. *福建师范大学学报(自然科学版)*, 2018, **34**(3): 85-94.
- Zhang P S, Zhu X B, Su X L, *et al.* Analysing the pollution of heavy metal contamination in soils and vegetables in Fuzhou suburb [J]. *Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition)*, 2018, **34**(3): 85-94.
- [33] 孙硕, 李菊梅, 马义兵, 等. 河北省蔬菜大棚土壤及蔬菜中重金属累积分析[J]. *农业资源与环境学报*, 2019, **36**(2): 236-244.
- Sun S, Li J M, Ma Y B, *et al.* Accumulation of heavy metals in soil and vegetables of greenhouses in Hebei province, China [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, **36**(2): 236-244.
- [34] 张浩, 王辉, 汤红妍, 等. 铅锌尾矿库土壤和蔬菜重金属污染特征及健康风险评价[J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(3): 1085-1094.

- Zhang H, Wang H, Tang H Y, *et al.* Heavy metal pollution characteristics and health risk evaluation of soil and vegetables in various functional areas of lead-zinc tailings pond [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(3): 1085-1094.
- [35] 余志, 陈凤, 张军方, 等. 锌冶炼区菜地土壤和蔬菜重金属污染状况及风险评估[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(5): 2086-2094.
- Yu Z, Chen F, Zhang J F, *et al.* Contamination and risk of heavy metals in soils and vegetables from zinc smelting area[J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(5): 2086-2094.
- [36] 林承奇, 蔡宇豪, 胡恭任, 等. 闽西南土壤-水稻系统重金属生物可给性及健康风险[J]. *环境科学*, 2021, **42**(1): 359-367.
- Lin C Q, Cai Y H, Hu G R, *et al.* Bioaccessibility and health risks of the heavy metals in soil-rice system of southwest Fujian province[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 359-367.
- [37] 贾亚琪, 刘文政, 秦俊虎, 等. 汞矿区土壤和农产品重金属污染状况及风险评估[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2021, (3): 43-50.
- Jia Y Q, Liu W Z, Qin J H, *et al.* Pollution and risk assessment of heavy metals in soil and agricultural products around mercury mining areas [J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2021, (3): 43-50.
- [38] 张雨婷, 田应兵, 黄道友, 等. 典型污染稻田水分管理对水稻镉累积的影响[J]. *环境科学*, 2021, **42**(5): 2512-2521.
- Zhang Y T, Tian Y B, Huang D Y, *et al.* Effects of water management on cadmium accumulation by rice (*Oryza sativa* L.) growing in typical paddy soil[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(5): 2512-2521.
- [39] 陈洁, 王娟, 王怡雯, 等. 影响不同农作物镉富集系数的土壤因素[J]. *环境科学*, 2021, **42**(4): 2031-2039.
- Chen J, Wang J, Wang Y W, *et al.* Influencing factors of cadmium bioaccumulation factor in crops [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(4): 2031-2039.



CONTENTS

A Comparative Study of Soil Environmental Standards for Agricultural Land Among Different Countries and Its Implication for China	LI Xu-zhi, JIANG Rong, WANG Guo-qing, <i>et al.</i>	(577)
Evaluation Parameters and System for Reclaimed Water Quality Stability	ZHANG Xin-yi, WEI Dong-bin, DU Yu-guo	(586)
Distribution Characteristics and Sources of Heavy Metals in Atmospheric Deposition During Heating and Non-heating Period in Lanzhou	HUANG Wen, WANG Sheng-li	(597)
PM _{2.5} Source Apportionment Based on a Variety of New Receptor Models	WANG Zhen-yu, LI Yong-bin, GUO Ling, <i>et al.</i>	(608)
Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Pollution in PM _{2.5} During Summer in Central China	SU Ye-wang, LIU Wei-jie, MAO Yao, <i>et al.</i>	(619)
Pollution Characteristics of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During the Lantern Festival of 2021 in Zibo City	CHEN Qiao, WU Li-ping, XU Bo, <i>et al.</i>	(629)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Perfluorinated Compounds in PM _{2.5} in Zhejiang Province	LI Bing-jie, CHEN Jin-yuan, LIU Zheng-zheng, <i>et al.</i>	(639)
Impact of Meteorological Conditions on PM _{2.5} in Jiangsu Province from 2001 to 2019	PAN Chen, KANG Zhi-ming	(649)
Comparison and Analysis of PM _{2.5} Forecast in Key Areas Based on the Neural Network Model and Numerical Model	GAO Yu-xiao, WANG Wei, HUANG Yong-hai, <i>et al.</i>	(663)
Temporal and Spatial Variations in Ozone and Its Causes over Hainan Province from 2015 to 2020	FU Chuan-bo, XU Wen-shuai, DAN Li, <i>et al.</i>	(675)
Ozone Formation and Key VOCs of a Continuous Summertime O ₃ Pollution Event in Ji'nan	SUN Xiao-yan, ZHAO Min, SHEN Heng-qing, <i>et al.</i>	(686)
Pollution Characteristic and Control Factor Analysis of Atmospheric Ozone During Summer Typical Periods in Linyi, Shandong	YANG Xue, AN Xin-yue, LIU Yu-qi, <i>et al.</i>	(696)
Improved Performance of PMF Source Apportionment for Volatile Organic Compounds Based on Classification of VOCs' Aging Degree in Air Mass	ZHU Yu-fan, CHEN Qiang, LIU Xiao, <i>et al.</i>	(707)
Spatial Distribution Characteristics of VOCs and Its Impact on Ozone Formation Potential in Rizhao City in Summer	YAO Wei-jie, WANG Da-wei, XIE Fu-ying, <i>et al.</i>	(714)
Long-term Trends and Sources of Atmospheric Halocarbons at Mount Taishan, Northern China	ZHAO Feng, CHEN Tian-shu, DONG Can, <i>et al.</i>	(723)
Emission Characteristics of VOCs and <i>n</i> -alkanes from Diesel Forklifts	ZHOU Wen-qin, LI Cheng, LIU Jun-wen, <i>et al.</i>	(735)
Driving Mechanism of the Spatiotemporal Evolution of Vegetation in the Yellow River Basin from 2000 to 2020	TIAN Zhi-hui, REN Zu-guang, WEI Hai-tao	(743)
Effects of Land Use on Riverine Dissolved Inorganic Carbon (DIC) and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in a Karst River Basin, Southwestern China	XU Sen, LI Si-liang, ZHONG Jun	(752)
Effects of Biochar Addition on Soil Nitrogen Mineralization and Leaching Characteristics in Riparian Zone of Taihu Lake	XIONG Yu-ting, YUAN Xu-yin, ZHOU Hui-hua, <i>et al.</i>	(762)
Impacts of Riparian Buffer Zone Type on Reduction in Runoff Pollution in the North Canal River Under Different Rainfall Events	ZHU Li-ying, ZHAO Kai, ZHANG Jun-ya, <i>et al.</i>	(770)
Pollution Characterization and Comprehensive Water Quality Assessment of Rain-source River: A Case Study of the Longgang River in Shenzhen	BI Ye-liang, WANG Hua-cai, XIA Bing, <i>et al.</i>	(782)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Runoff Pollution in Langfang City	PAN Xin-rong, ZUO Jian-e, ZHANG Yu, <i>et al.</i>	(795)
Analysis on Diversity of Plankton Microbial Community in the Beijing-Tianjin-Hebei Section of the North Canal River	GUO Zhi-zhi, SU Zhen-hua, DI Yan-ming, <i>et al.</i>	(803)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Driving Factors of Denitrification Bacterial Community Structure from Landscape Water in Hebei Province: Taking Shijiazhuang as Example	CHEN Zhao-ying, ZHANG Zi-wei, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i>	(813)
Source and Optical Dynamics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in the Watershed of Lake Qinghai	YU Xiao-qin, MENG Xian-qiang, WU Hua-wu, <i>et al.</i>	(826)
Influences of Hydrological Scenarios on the Bioavailability, Fate, and Balance of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Lake Poyang	GUO Yan-ni, YAO Xiao-long, CHEN Hui-min, <i>et al.</i>	(837)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Sediments from Poyang Lake	LUO Yan-qing, WAN Zhi-wei, YAN Cai-xia, <i>et al.</i>	(847)
Pollution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Tangxun Lake	LI Xing-yu, LI Peng, SU Ye-wang, SHI Ming-ming, <i>et al.</i>	(859)
Identifying Relationship Between Nutrient Contents in Road-Deposited Sediment and Urban Basic Elements Based on Kernel Density Estimation	WANG Zi-qiao, LI Xu-yong	(867)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of DBPs in Typical Drinking Water Sources in Wuhan Under the COVID-19 Pandemic	ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, TU Xiang, <i>et al.</i>	(878)
Synergistic Control of Nitrogenous Disinfection By-products and Opportunistic Pathogens in Drinking Water by Iron-Modified Quartz Sand Filtration	QI Peng, HU Chun, XING Xue-ci, <i>et al.</i>	(887)
Degradation Characteristics and Mechanism of Ibuprofen by Ozone Catalyzed by Nitrogen-Doped Biochar	CHAI Cheng, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i>	(896)
Adsorption Properties and Host-guest Effects of Porous Cyclodextrin Polymers for Dye Molecules in Water	ZHAO Chuan-liang, WANG Zi-jie, YAN Yi, <i>et al.</i>	(907)
Characterization of Sludge Morphology and Bacterial Community Evolution in the Rapid Activation of Freeze-stored PV/A Granular Sludge	HUANG Zi-heng, ZHANG Li, CUI Shu-hui, <i>et al.</i>	(920)
Effect of Different Cationic Polyacrylamide Organic Dehydrating Agents on Sludge Dewatering Performance	FENG Qi-yun, GAO Bao-yu, YUE Qin-yan, <i>et al.</i>	(928)
Health Risk Assessment of Soil Heavy Metals in a Small Watershed of a Mining Area in Yunnan	LIU Yang, HE Zhao-hui, NIU Xue-kui, <i>et al.</i>	(936)
Spatial Characteristics and Potential Ecological Risk Factors of Heavy Metals in Cultivated Land in the Transition Zone of a Mountain Plain	ZHANG Ding, HUANG Rong, GAO Xue-song	(946)
Geo-accumulation Index Method to Optimize the Evaluation Method of Polymetallic Environment Quality: Taking Developed Agricultural Areas as an Example	JU Tie-nan, LEI Mei	(957)
Safety Production Threshold and Land Quality Classification of Vegetable Pb in High Geological Background Area of Southwest China	MU De-miao, SUN Yue-bing	(965)
Pollution Properties and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils and Crops Around a Typical Manganese Mining Area	HUANG Zhong-ting, YI Sheng-wei, CHEN Bei-bei, <i>et al.</i>	(975)
Characteristics of Plant Diversity and Heavy Metal Enrichment and Migration Under Different Ecological Restoration Modes in Abandoned Mining Areas	ZHOU Peng-fei, ZHANG Shi-wen, LUO Ming, <i>et al.</i>	(985)
Soil Properties, Heavy Metal Accumulation, and Ecological Risk in Vegetable Greenhouses of Different Planting Years	REN Qiang, SUN Rui-ling, ZHENG Kai-xuan, <i>et al.</i>	(995)
Effects of Greenhouse and Open-field Cultivation on Heavy Metal Uptake During Carrot Growth	CAO Chun, REN Dan, LÜ Zhen-ying, <i>et al.</i>	(1004)
Effects of Different Amendments on Cadmium Accumulation in Rice Safety in Cadmium-Contaminated Farmland Under Two Flooding Treatments	WANG Gang, YU Hai-ying, LI Ting-xuan, <i>et al.</i>	(1015)
Effect of Composite Leaching on Cadmium Removal Efficiency in Plow Layer Soil of Agricultural Land and Its Functional Regulation	CAO Kun-kun, ZHANG Sha-sha, HU Xue-yu, <i>et al.</i>	(1023)
Polyamine-producing Bacteria Regulated the Community Structure of Rhizosphere Bacteria and Reduced the Absorption of Cd in Wheat	LI Xiao-zhe, QIN Shan-mei, CHEN Zhao-jin, <i>et al.</i>	(1031)
Responses of Soil <i>PhoC</i> and <i>PhoD</i> Gene Microbial Communities to the Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers	YANG Wen-na, YU Luo, LUO Dong-hai, <i>et al.</i>	(1040)
Changes in Soil Microbial Carbon-Degrading Enzymes and Their Relationships with Carbon Pool Components During the Restoration Process of <i>Robinia pseudoacacia</i>	LI Wen-jie, ZHANG Zhen-jiao, ZHAO Ya-ping, <i>et al.</i>	(1050)
Soil Enzyme Stoichiometric Characteristics of <i>Pinus massoniana</i> Plantations at Different Stand Ages in Mid-subtropical Areas	JIAO Peng-yu, GUO Wen, CHEN Ze-long, <i>et al.</i>	(1059)
Characteristics of Microbial Utilization for Crop Residue-Derived C in Paddy and Upland Soils	DENG Shao-hong, ZHENG Xiao-dong, MAO Wan-qiong, <i>et al.</i>	(1069)
Influence of Artificial Root Exudates and Actual Root Exudates on the Microbial Community in Pyrene-contaminated Soil	HAN Bo-yuan, ZHANG Wen, HU Fang-yu, <i>et al.</i>	(1077)
Pollution Characteristics and Driving Factors of Antibiotic Resistance Genes in Dexing Copper Mine	HAN Liu, LOU Qian, QIAO Min, <i>et al.</i>	(1089)
Spatial Prediction Method of Farmland Soil Organic Matter in Weiwei Dryland of Shaanxi Province	WEI Fang, LIU Jing, XIA Li-heng, <i>et al.</i>	(1097)
Emission Characteristics, Transformation Mechanism, and Reduction Potential of Ammonia Emissions from a Crop Rotation System in Yangtze River Delta	XU Chang, MIAO Wen-liang, NI Yuan-zhi, <i>et al.</i>	(1108)