

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

长江经济带工业污染排放空间分布格局及其影响因素

李芸邑, 刘利萍, 刘元元



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年8月

第42卷 第8期
Vol.42 No.8

目次

上海市夏季臭氧污染特征及削峰方案	严茹莎, 王红丽, 黄成, 王倩, 安静宇 (3577)
天津市夏季不同臭氧浓度级别 VOCs 特征及来源	王文美, 高璟赞, 肖致美, 李源, 毕温凯, 李立伟, 杨宁, 徐虹, 孔君 (3585)
重庆市主城区 O ₃ 污染时期大气 VOCs 污染特征及来源解析	李陵, 李振亮, 张丹, 方维凯, 徐芹, 段林丰, 卢培利, 王锋文, 张卫东, 翟崇治 (3595)
汽车维修行业挥发性有机物排放特征及大气化学反应活性	陈鹏, 张月, 张梁, 熊凯, 邢敏, 李珊珊 (3604)
2016 冬季京津冀一次持续重度霾天气过程分析	毛曳, 张恒德, 朱彬 (3615)
北京与成都大气污染特征及空气质量改善效果评估	党莹, 张小玲, 饶晓琴, 康平, 何建军, 卢宁生, 华明, 向卫国 (3622)
郑州市 PM _{2.5} 组分、来源及其演变特征	赵孝因, 王申博, 杨洁茹, 马秋红, 刘洋, 张瑞芹 (3633)
上海市 PM _{2.5} 中重金属元素对 COVID-19 控制的高频响应	程凯, 常运华, 旷雅琼, 邹忠 (3644)
粤港澳大湾区吸收性气溶胶的解析	段家乐, 巨天珍, 黄蕊蕊, 梁卓红, 范佳晨 (3652)
河南省 2016~2019 年机动车大气污染物排放清单及特征	高丹丹, 尹沙沙, 谷幸珂, 卢轩, 张欢, 张瑞芹, 王玲玲, 齐艳杰 (3663)
广州地区室内灰尘中典型邻苯增塑剂的污染特征与暴露风险	刘晓途, 彭长凤, 陈达, 石玉盟, 汤书琴, 谭弘李, 黄维 (3676)
天津市主要河流和土壤中全氟化合物空间分布、来源及风险评价	武倩倩, 吴强, 宋帅, 任加国, 杨胜杰, 吴颜岐 (3682)
河网水源生态湿地水氢氧同位素分异特征	杨婷, 王阳, 徐静怡, 吴萍, 王为东 (3695)
重要饮用水源地天目湖水库有色可溶性有机物来源与组成特征	周蕾, 周永强, 张运林, 朱广伟 (3709)
城市不同类型水体有色可溶性有机物来源组成特征	俞晓琴, 崔扬, 陈慧敏, 朱俊羽, 李宇阳, 郭燕妮, 周永强, 韩龙飞 (3719)
白洋淀典型淀区沉积物间隙水溶解性有机物的光谱时空演变特征	周石磊, 陈召莹, 张甜娜, 张紫薇, 孙悦, 姚波, 崔建升, 李再兴, 罗晓 (3730)
夏季巢湖入湖河流溶解性有机质来源及其空间变化	宁成武, 包妍, 黄涛, 王杰 (3743)
洪泽湖浮游动物时空分布特征及其驱动因素	陈业, 彭凯, 张庆吉, 蔡永久, 张永志, 龚志军, 项贤领 (3753)
农业耕作对三峡水库支流库湾消落带土壤氮、磷含量及流失的影响	罗芳, 鲁伦慧, 李哲, 韦方强 (3763)
沱江流域总氮面源污染负荷时空演变	肖宇婷, 姚婧, 湛书, 樊敏 (3773)
微塑料对海水抗生素抗性基因的影响	周曙屹, 朱永官, 黄福义 (3785)
磺胺甲噁唑对海水养殖废水处理过程中抗性细菌及抗性基因的富集作用	王金鹏, 赵阳国, 胡钰博 (3791)
潮汐-复合流人工湿地系统优化及对抗生素抗性基因的去除效果	程羽霄, 吴丹, 陈铨乐, 高方舟, 杨永强, 刘有胜, 应光国 (3799)
三峡库区香溪河库湾土壤多环芳烃时空分布特征及风险评价	黄应平, 金蕾, 朱灿, 李锐, 谢平, David Johnson, 刘慧刚, 席颖 (3808)
长江经济带工业污染排放空间分布格局及其影响因素	李芸邑, 刘利萍, 刘元元 (3820)
淡水系统中 4 种塑料颗粒的老化过程及 DOC 产物分析	李婉逸, 刘智临, 苗令占, 侯俊 (3829)
DOM 对沉积物悬浮颗粒吸附铜的促进作用及机制	丁翔, 李忠武, 徐卫华, 黄梅, 文佳骏, 金昌盛, 周咪, 陈佳 (3837)
市政污水二级出水中溶解性有机质在紫外/氯处理过程中的转化特性	王雪凝, 张炳亮, 潘丙才 (3847)
亚硝酸盐不同生成方式对短程硝化反硝化除磷颗粒系统的影响	王文琪, 李冬, 高鑫, 张杰 (3858)
A ² /O 与倒置 A ² /O 工艺低温条件下的氨氮去除能力解析	李金成, 郭雅妮, 齐嵘, 杨敏 (3866)
厌氧氨氧化启动过程细菌群落多样性及 PICRUS2 功能预测分析	闫冰, 付嘉琦, 夏嵩, 易其臻, 桂双林, 吴九九, 熊继海, 魏源送 (3875)
活性污泥微生物群落结构及与环境因素响应关系分析	马切切, 袁林江, 牛泽栋, 赵杰, 黄崇 (3886)
汾河沿岸农田土壤微塑料分布特征及成因解析	朱宇恩, 王瀚萱, 李唐慧烟, 李华, 吴超, 张桂香, 阎敬 (3894)
基于 GIS 及 APCS-MLR 模型的兰州市主城区土壤 PAHs 来源解析	管贤贤, 周小平, 雷春妮, 彭熾雯, 张松林 (3904)
典型碳酸盐岩区耕地土壤剖面重金属形态迁移转化特征及生态风险评价	唐世琪, 刘秀金, 杨柯, 郭飞, 杨峰, 马宏宏, 刘飞, 彭敏, 李括 (3913)
大气 CO ₂ 摩尔分数升高对高、低应答水稻稻田 N ₂ O 排放的影响	于海洋, 黄琼, 王天宇, 张广斌, 马静, 朱春梧, 徐华 (3924)
椰糠生物炭对热区双季稻田 N ₂ O 和 CH ₄ 排放的影响	王紫君, 王鸿浩, 李金秋, 伍延正, 符佩娇, 孟磊, 汤水荣 (3931)
不同水分管理条件下添加生物炭对琼北地区水稻土 N ₂ O 排放的影响	王鸿浩, 谭梦怡, 王紫君, 符佩娇, 李金秋, 汤水荣, 伍延正, 孟磊 (3943)
物种多样性对铅锌尾矿废弃地植被及土壤的生态效应	杨胜香, 曹建兵, 李凤梅, 彭禧柱 (3953)
来利山锡尾矿区优势植物调查与生态修复潜力分析	秦芙蓉, 张仕颖, 夏运生, 张乃明, 吴程龙, 何忠俊, 岳献荣, 田森林 (3963)
黄河源区高寒沼泽湿地土壤微生物群落结构对不同退化的响应	林春英, 李希来, 张玉欣, 孙华方, 李成一, 金立群, 杨鑫光, 刘凯 (3971)
秸秆还田配施化肥对稻-油轮作土壤酶活性及微生物群落结构的影响	靳玉婷, 李先藩, 蔡影, 胡宏祥, 刘运峰, 付思伟, 张博睿 (3985)
镉胁迫对芒草根际细菌群落结构、共发生网络和功能的影响	陈兆进, 林立安, 李英军, 陈彦, 张浩, 韩辉, 吴乃成, Nicola Fohrer, 李玉英, 任学敏 (3997)
岩溶区稻田土壤真菌群落结构及功能类群特征	周军波, 靳振江, 肖筱怡, 冷蒙, 王晓彤, 潘复静 (4005)
锌冶炼地块剖面土壤对镉、铅的吸附特征及机制	刘凌青, 肖细元, 郭朝晖, 彭驰, 姜智超, 阳安迪 (4015)
不同土壤调理剂对土壤镉和邻-苯二甲酸酯迁移转化影响	王璨, 张煜行, 何明靖, 刘文新, 卢俊峰, 魏世强 (4024)
4 种钝化剂对污染水稻土中 Cu 和 Cd 的固持机制	丁园, 敖师营, 陈怡红, 肖亮亮 (4037)
叶施 L-半胱氨酸对水稻镉和矿质元素含量的影响	张雅芸, 王常荣, 刘月敏, 刘雅萍, 刘仲齐, 张长波, 黄永春 (4045)
镉对不同生长期籽粒菹植物螯合肽的影响	刘佳欣, 陈文清, 杨力, 李娜, 王宇豪, 康愉晨 (4053)
中国造纸业物质代谢演化特征	刘欣, 杨涛, 武慧君, 袁增伟 (4061)
《环境科学》征订启事 (3651)	《环境科学》征稿简则 (3718)
信息 (3836, 3885, 3893)	

典型碳酸盐岩区耕地土壤剖面重金属形态迁移转化特征及生态风险评价

唐世琪^{1,2,3}, 刘秀金^{1,2,3}, 杨柯^{1,2,3}, 郭飞^{1,2,3}, 杨峥^{1,2,3}, 马宏宏^{1,2,3}, 刘飞^{1,2,3}, 彭敏^{1,2,3}, 李括^{1,2,3}

(1. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 廊坊 065000; 2. 中国地质调查局土地质量地球化学调查评价研究中心, 廊坊 065000; 3. 中国地质科学院地球表层碳-汞地球化学循环重点实验室, 廊坊 065000)

摘要: 碳酸盐岩土壤母质区是我国耕地土壤重金属高含量的主要分布区, 且耕地重金属迁移转化受到自然过程与人为活动的交互影响. 以广西碳酸盐岩母质水田 9 条土壤剖面为研究对象, 在分析测试土壤 Cd、As、Zn、Cr、Cu、Hg、Ni 和 Pb 含量、pH、Corg 含量等土壤性质指标以及 Cd、As、Zn 和 Cr 赋存形态基础上, 重点探讨了研究区耕地土壤重金属形态垂向分布特征、重金属生态风险以及对比在自然成土过程中和人为活动干扰下重金属迁移转化的影响因素. 结果表明, 研究区土壤剖面中 Cd、As、Zn 和 Cr 存在样本超农用地(水田)污染风险筛选值, Cd 和 As 部分超管制值. 土壤剖面 Cd 各形态均有一定比例分布, 且随剖面深度由浅至深, Cd 生态风险较高的水溶态、离子交换态比例呈显著下降趋势; 土壤剖面 As、Zn 和 Cr 各深度段均以残渣态为主, 随深度加深, 水溶态和离子交换态比例变化不大. 风险评价编码法(RAC)和次生相与原生相分布比值法(RSP)评价结果显示, 研究区土壤 Cd 污染风险相对较高, 总体上 As、Zn 和 Cr 处于无污染或无风险状态. 研究区自然发育的土壤, 黏土矿物含量和土壤发育程度对 Cd 迁移活动性的影响较为显著, 而受人为活动影响的耕作层中, 土壤 pH 与有机质含量则成为其迁移活动性的主控因素; 土壤 As 的迁移能力主要与土壤有机质、Fe₂O₃ 含量以及土壤发育程度有关, 但在耕作层中, 有机质对其控制作用明显增强; 土壤中 Zn、Cr 迁移能力的主控因素均为 pH, 而在人类活动干扰下, pH 对其影响更为强烈.

关键词: 碳酸盐岩; 耕地; 土壤剖面; 重金属形态; 迁移转化; 生态风险

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)08-3913-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202101066

Migration, Transformation Characteristics, and Ecological Risk Evaluation of Heavy Metal Fractions in Cultivated Soil Profiles in a Typical Carbonate-Covered Area

TANG Shi-qi^{1,2,3}, LIU Xiu-jin^{1,2,3}, YANG Ke^{1,2,3}, GUO Fei^{1,2,3}, YANG Zheng^{1,2,3}, MA Hong-hong^{1,2,3}, LIU Fei^{1,2,3}, PENG Min^{1,2,3}, LI Kuo^{1,2,3}

(1. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, China; 2. Research Center of Geochemical Survey and Assessment on Land Quality, China Geological Survey, Langfang 065000, China; 3. Key Laboratory of Geochemical Cycling of Carbon and Mercury in the Earth's Critical Zone, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, China)

Abstract: In China, high heavy metal concentrations in cultivated soil are mainly distributed in carbonate-covered areas. The migration and transformation of heavy metals in such soils are influenced by interactions between natural processes and human activities. This study examined the profiles of nine paddy soils, derived from carbonate rocks in Guangxi. The Cd, As, Zn, Cr, Cu, Hg, Ni, and Pb contents we determined, and soil properties such as pH, Corg content, and fractions of Cd, As, Zn, and Cr were tested. Based on the above data, we assessed the vertical distribution of heavy metal fractions, as well as the ecological risks and factors affecting the migration ability of heavy metals, under the influence of human activities and natural soil formation. The results show that compared with the carbonate rocks in Guangxi, the soil profile of the study area is significantly enriched with all eight heavy metals. Among them, Cd, As, Zn, and Cr exceeded China's agricultural land (paddy field) pollution risk screening values, and Cd and As partially exceed the risk intervention values. All fractions of Cd in the soil profiles are widely distributed. The proportion of water-soluble and ion-exchange Cd fractions with high ecological risk decreased significantly from the surface to greater depths in the soil profile. As, Zn, and Cr in the soil profile were mainly in residual states, and the proportion of water-soluble and ion-exchange fractions did not change considerably with increasing depth. The evaluation results of RAC and RSP show that Cd pollution risk in the study area is relatively high, whereas As, Zn, and Cr are generally pollution-free or risk-free. In naturally developed soil in the study area, the clay mineral content and degree of soil development have significant effects on Cd migration, whereas in the cultivated layer affected by human

收稿日期: 2021-01-08; 修订日期: 2021-02-05

基金项目: 中国地质调查局项目 (DD20190518)

作者简介: 唐世琪(1991 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境地球化学, E-mail: 642191779@qq.com

activities, the soil pH and organic matter content are the main controlling factors. The migration ability of soil As is mainly related to soil organic matter, Fe_2O_3 content, and soil development degree, but organic matter has an obviously enhanced effect in the tillage layer. The main controlling factor of Zn and Cr migration in soil is pH, and the effects are more intense under the disturbance of human activities.

Key words: carbonate rocks; cultivated land; soil profiles; fraction of heavy metals; migration and transformation; ecological risk

耕地是人们赖以生存的宝贵资源,是粮食安全生产的物质基础,我国人多地少的基本国情,更强调了耕地保护的重要性.但伴随现代工农业生产的迅猛发展,我国耕地重金属污染问题逐渐显现.重金属不易被微生物所分解,易于累积,耕地重金属污染可能造成其向农作物或水体迁移,进而危害人体健康^[1,2].

2015 年发布的中国耕地地球化学调查报告中指出,我国重金属污染耕地面积 7.6 万 km^2 (约 1.14 亿亩),其中,西南碳酸盐岩地区是我国耕地土壤重金属污染的主要分布区.广西壮族自治区陆域面积 23.76 万 km^2 ,其中碳酸盐岩母质分布区面积约 7.66 万 km^2 ,约占全区面积的 32.24%,是我国岩溶发育最强烈的地区,也是我国耕地重金属污染最严重的省份之一.已有研究证实,广西碳酸盐岩区土壤重金属含量,尤其是镉含量,显著高于我国其他地区^[3~7],碳酸盐岩风化成壤过程中产生的次生富集是广西岩溶区土壤重金属高含量的主要原因,而矿业及其他人为活动集中干扰进一步加剧了局部地区土壤重金属污染^[8~11].

广西碳酸盐岩区现有研究主要围绕表层土壤重金属污染评价,研究对象包括多种用地类型,且重金属主要关注镉^[12~15],针对耕地土壤重金属的形态研究尚显不足^[16~20].同时,现有研究主要为面积性调查成果,而面状调查往往不能反映重金属的垂向迁

移转化规律.本文以广西碳酸盐岩母质水田 9 条土壤剖面为研究对象,在分析测试土壤 Cd、As、Zn、Cr、Cu、Hg、Ni 和 Pb 含量、pH、有机碳(Corg)含量等土壤性质指标以及 Cd、As、Zn 和 Cr 赋存形态基础上,探讨了研究区土壤剖面重金属富集情况及重金属形态迁移转化特征,并利用风险评价编码法(RAC)和次生相与原生相分布比值法(RSP)对重金属进行生态风险评价.耕地土壤重金属在自然风化富集的同时,也受到农耕活动等人为扰动,是典型的自然过程与人为活动交互影响的区域,本文进而对比了受到人为活动影响和经历自然成土过程的耕地土壤中重金属迁移转化能力的影响因素.这些对于深入了解碳酸盐岩区耕地土壤重金属垂向迁移转化规律,科学认识碳酸盐岩区耕地土壤重金属污染风险,进而指导岩溶区农产品安全生产及生态风险防控等具有重要意义.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

为避免单一研究区缺乏代表性,选择了地理位置不同的 3 个碳酸盐岩母质研究区,分别位于贵港市、南宁市和来宾市(图 1).研究区主要位于广西壮族自治区中部,年均气温 22°C ,年降雨量约 1 450 mm,属炎热的亚热带气候,是典型的喀斯特地貌,化学风化作用强烈.

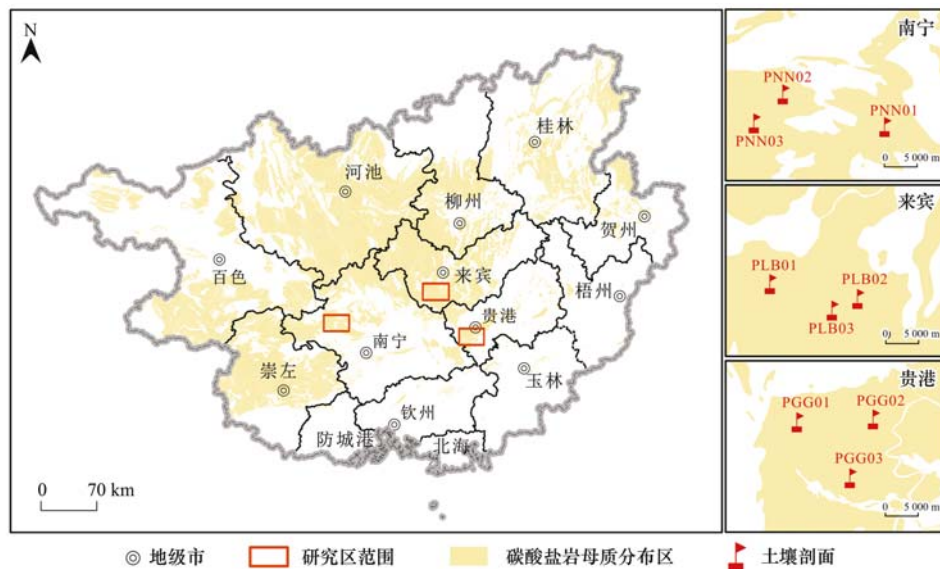


图 1 研究区及采样点位示意

Fig. 1 Location of the study area and sampling sites

1.2 样品采集与分析

土壤剖面布设在农田区水稻土中,在每个研究区内,分别布设 3 条土壤剖面(图 1),采集时间在稻田排干期,剖面样品按每 10 cm 1 个样采集,实际深度以遇到基岩或遇水深度为准,每条剖面深度不一,最浅为 120cm,最深为 170 cm,9 条土壤剖面共采集 137 件土壤样品。

土壤剖面样品测试 Cd、As、Zn、Cr、Pb、Ni、Hg、Cu、pH、Corg、Fe₂O₃、Al₂O₃、SiO₂ 指标以及 Cd、As、Zn、Cr 形态。土壤剖面样品各指标分析由中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所中心实验室完成,各指标分析测试方法和检出限见表 1。土壤重金属形态分析由湖北省地质实验测试中心完成,测试采用七步顺序提取法,操作步骤见表 2。分析测试的质量监控按中国地质调查局《生态地球化学评价

样品分析技术要求(试行)》(DD 2005-03)执行,所有分析测试结果均符合要求,数据质量可靠。

表 1 土壤剖面样品指标分析及检出限

Table 1 Instrumental methods and detection limits for soil profile samples		
指标	分析方法	检出限
Cd	等离子体质谱法(ICP-MS)	20 ng·g ⁻¹
As	氢化物-原子荧光光谱法(HG-AFS)	1 mg·kg ⁻¹
Zn	等离子体质谱法(ICP-MS)	2 mg·kg ⁻¹
Cr	X-射线荧光光谱(XRF)	5 mg·kg ⁻¹
Pb	等离子体质谱法(ICP-MS)	2 mg·kg ⁻¹
Ni	等离子体质谱法(ICP-MS)	2 mg·kg ⁻¹
Hg	冷蒸气-原子荧光光谱法(CV-AFS)	2 ng·g ⁻¹
Cu	等离子体质谱法(ICP-MS)	1 mg·kg ⁻¹
pH	电位法	0.1
Corg	气化热解-电位法	0.1%
Fe ₂ O ₃	X-射线荧光光谱(XRF)	0.05%
Al ₂ O ₃	X-射线荧光光谱(XRF)	0.05%
SiO ₂	X-射线荧光光谱(XRF)	0.1%

表 2 重金属化学形态分析步骤

Table 2 Analytical steps for determining the chemical fraction of heavy metals			
分析步骤	分析形态	提取剂	操作步骤
F1	水溶态	蒸馏水	25 mL,摇匀,振荡 30 min,离心 20 min,过滤
F2	离子交换态	1 mol·L ⁻¹ 氯化镁溶液	25 mL,摇匀,振荡 30 min,离心 20 min,过滤
F3	碳酸盐结合态	1 mol·L ⁻¹ 醋酸钠溶液	25 mL,摇匀,振荡 1 h,离心 20 min,过滤
F4	腐殖酸结合态	0.1 mol·L ⁻¹ 焦磷酸钠溶液	50 mL,摇匀,振荡 40 min,放置 2 h,离心 20 min,过滤
F5	铁锰氧化态	0.25 mol·L ⁻¹ 盐酸羟胺-盐酸混合液	50 mL,摇匀,振荡 1 h,离心 20 min
F6	强有机结合态	30% 过氧化氢、(1+1) 硝酸溶液和 3.2 mol·L ⁻¹ 醋酸铵-硝酸混合液	3 mL HNO ₃ 、5 mL H ₂ O ₂ ,摇匀,恒温水浴 1.5 h,补加 3 mL H ₂ O ₂ ,恒温水浴 70 min,加入 2.5 mL 醋酸铵-硝酸溶液,稀释至 25 mL,放置 10 h,离心 20 min,过滤
F7	残渣态	—	F6 剩余残渣态风干,磨细,称重

1.3 图形与数据处理

研究中采用 Kolmogorov-Smirnov (K-S) 和 Q-Q 图对数据进行正态分布检验,采用 Excel 2013 和 SPSS 21 对数据进行描述性统计以及相关分析,用 Arcgis 10.2、Grapher 12.0 和 CorelDRAW X4 进行图形处理。

2 结果与讨论

2.1 土壤剖面重金属富集及分布特征

正态分布检验结果显示,部分研究数据不符合正态分布特征,故以下均采用中位值作为统计参数,土壤剖面重金属含量统计结果见表 3。

研究区土壤剖面中 8 种重金属含量变化较大,Cd、As、Zn、Cr、Pb、Ni、Hg 和 Cu 含量范围分别为 0.06 ~ 9.60、2.1 ~ 163.1、47.0 ~ 558.7、72.9 ~ 355.3、11.8 ~ 136.1、15.3 ~ 135.6、0.02 ~ 0.45 和 9.1 ~ 91.9 mg·kg⁻¹。其中,Zn 和 Cr 相对含量较高,主要与其在地壳中的丰度有关。除 Cu 外,研究区土壤重金属含量显著高于中国土壤背景值和世界土壤^[21,22];西南地区是我国主要的岩溶分布区,相比

于瞿飞等^[23]研究中的贵州碳酸盐岩母质土壤,除 Hg 和 Pb 外,研究区土壤重金属含量仍明显较高(表 3)。这是由于碳酸盐岩风化成壤过程中碳酸盐母质大量流失而造成了土壤中重金属元素的显著富集,而广西的亚热带气候导致其化学风化作用更为强烈。

土壤剖面重金属元素垂向分布特征显示(图 2),不同位置的土壤剖面中重金属元素含量与分布存在着较大的差异,说明碳酸盐岩类成土母质土壤中的微量元素演化,因其所处位置环境条件的不同,其剖面中的分布模式可表现出不同的变化规律。因剖面均位于水田中,部分剖面重金属元素含量表现出深高浅低的分布特征,推测与水的向下淋滤作用有关。此外,水田中的土壤剖面也同时受到人为作用影响,这些因素均导致了剖面重金属元素含量分布的规律性变差。

依据土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(GB 15618-2018),研究区土壤剖面重金属超筛选值比例由高到低依次为 Cd (55.47%)、As(54.01%)、Zn (12.41%) 和 Cr (0.73%),Pb、

Ni、Hg 和 Cu 无样本含量超筛选值;超管制值比例 Cd(18.25%)和 As(2.92%),其他重金属无样本含量超管制值.从重金属元素含量看,研究区土壤 Cd 污染风险最高,As 次之,Zn 和 Cr 也存在一定程度污染风险,土壤 Pb、Ni、Hg 和 Cu 则未显示污染风险.

表 3 土壤剖面重金属含量统计结果/mg·kg⁻¹

Table 3 Concentrations of heavy metals from study area/mg·kg ⁻¹								
项目	Cd	As	Zn	Cr	Pb	Ni	Hg	Cu
本研究	最小值	0.06	2.1	47.0	72.9	11.8	15.3	0.02
	最大值	9.60	163.1	558.7	355.3	136.1	135.6	0.45
	中位值	0.96	23.9	159.3	156.3	39.5	52.2	0.18
	变异系数	1.22	0.86	0.59	0.39	0.67	0.44	0.52
	超筛选值/%	55.47	54.01	12.41	0.73	0.00	0.00	0.00
	超管制值/%	18.25	2.92	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
中国土壤背景值 ^[21]	0.097	11.2	74.2	61.0	26.0	26.9	0.065	22.6
世界土壤 ^[22]	0.35	—	90.0	40.0	19.0	20.0	—	30.0
贵州碳酸盐岩母质土壤 ^[23]	0.661	17.2	—	60.8	40.0	—	0.605	—
上地壳丰度(UCC) ^[24]	0.09	4.8	67.0	92.0	17.0	47.0	0.05	28.0
广西碳酸盐岩 ¹⁾	0.35	1.9	11.9	10.9	3.9	7.4	—	4.7
世界碳酸盐岩 ^[26]	0.04	—	20.0	11.0	9.0	20.0	—	4.0

1)广西碳酸盐岩数据由文献[6,25]的数值求平均

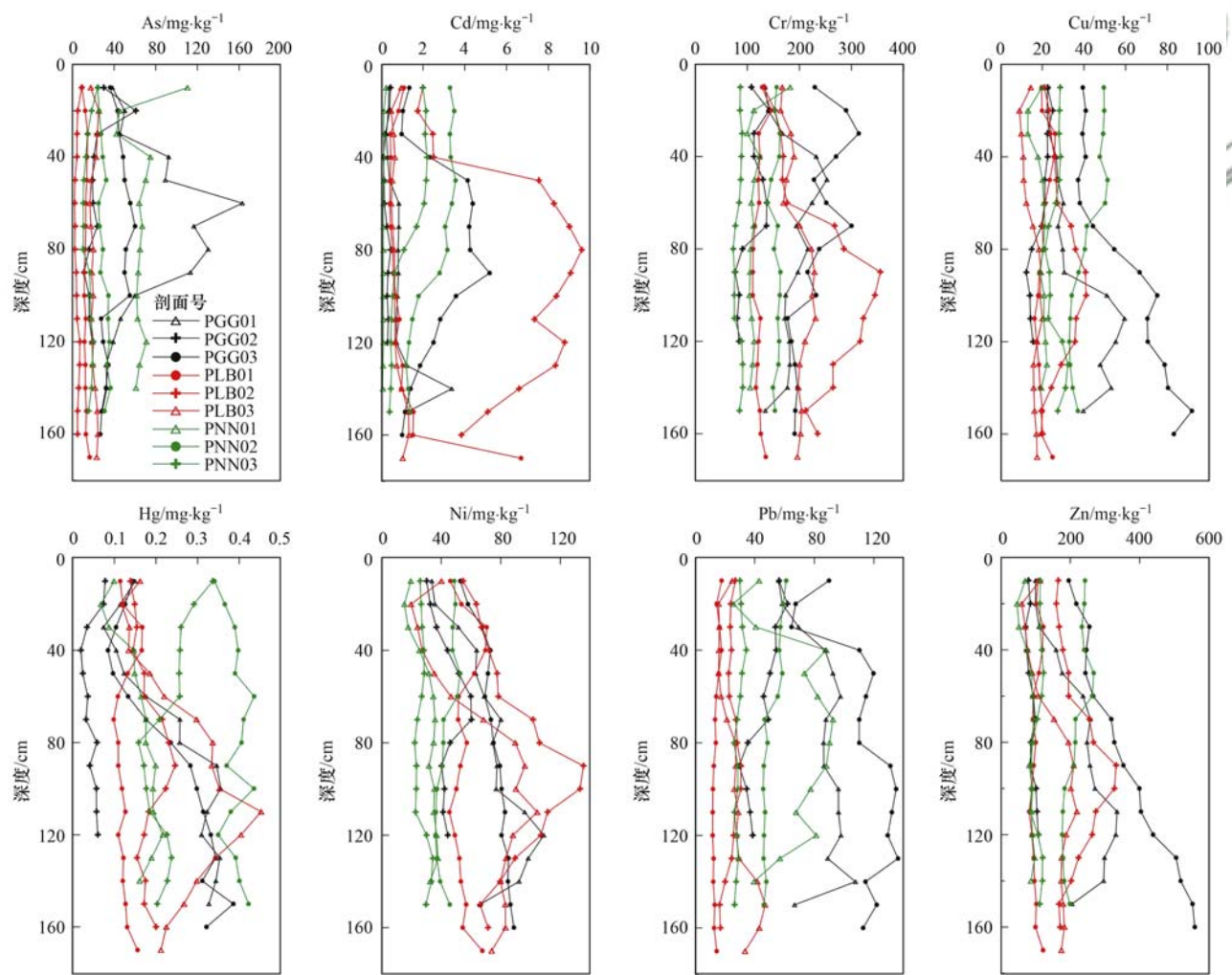


图 2 土壤剖面重金属元素含量垂向分布

Fig. 2 Vertical distribution of heavy metal contents in soil profiles

上地壳元素丰度(UCC)是地壳各种岩石各元素的加权平均值,与土壤母岩、土壤和地表水等地表圈层各要素的元素丰度有十分紧密的关系^[24].元素与 UCC 相对应比值为元素的标准化值,也称作富集

系数,当比值大于 1 时说明该元素富集,当比值小于 1 时说明该元素亏损^[27].

基于已有研究中广西碳酸盐岩重金属含量,与上地壳相比,广西碳酸盐岩中 Cd、As、Zn、Cr、Pb、Ni 和 Cu 的富集系数分别为 3.89、0.39、0.18、0.12、0.23、0.16 和 0.17. 可见对于广西碳酸盐岩,除 Cd 元素在岩石中产生明显富集外,其他重金属元素在岩石中均为亏损状态. 同时,广西碳酸盐岩中 Cd 含量约为世界碳酸盐岩中 Cd 含量的 10 倍,而其他重金属含量则约等于或显著低于世界碳酸盐岩.

本次土壤剖面重金属含量对比广西碳酸盐岩, Cd、As、Zn、Cr、Pb、Ni 和 Cu 分别富集了 2.74、12.85、13.41、14.29、10.26、7.03 和 5.10 倍. 可见土壤中重金属元素相比于岩石均产生了较大程度富集,但相比于其他重金属而言,土壤中 Cd 的富集程度并不突出. 说明除次生富集作用引起研究区土壤重金属元素普遍富集外,研究区土壤 Cd 污染程度最高则是受到内因与外因的叠加作用.

2.2 土壤剖面重金属形态分布特征

化学形态是研究土壤重金属地球化学行为的关键内容之一. 土壤中重金属形态往往比总量更为重要,不同化学形态直接影响着元素的迁移转换能力,进而决定着元素的生物有效性和对生态环境的危害

程度^[28].

以 50 cm 为间隔,将研究区土壤剖面分为 0 ~ 50、50 ~ 100 和 > 100 cm 这 3 个深度段. 不同深度段重金属形态比例统计结果显示(表 4),研究区土壤剖面 Cd 各形态均有一定比例分布,总体上残渣态和铁锰氧化态比例相对较高,离子交换态、碳酸盐结合态和腐殖酸结合态次之,强有机结合态和水溶态比例相对较低.

3 个深度段对比结果显示,相比于 0 ~ 50 cm 深度段, 50 ~ 100 cm 土壤 Cd 水溶态、离子交换态、碳酸盐结合态、腐殖酸结合态、强有机结合态和残渣态分别减少了 0.08%、8.78%、3.16%、2.83%、0.05% 和 3.14%,而铁锰氧化态增加了 6.59%; 相比于 50 ~ 100 cm 深度段, > 100 cm 土壤 Cd 水溶态、离子交换态和腐殖酸结合态分别减少了 0.02%、0.59% 和 2.34%,而碳酸盐结合态、铁锰氧化态、强有机结合态和残渣态增加了 0.04%、0.80%、1.29% 和 8.10% [表 4 和图 3(a)]. 以上对比可见随着土壤剖面由浅至深,土壤 Cd 各形态比例均有一定幅度变化,但值得注意的是,随深度加深,生态风险较高的 Cd 水溶态、离子交换态比例降低,且在 0 ~ 50 cm 向 50 ~ 100 cm 过渡时变化最为显著,而在 50 ~ 100 cm 向 > 100 cm 过渡时则变化不大.

表 4 剖面不同深度段 Cd、As、Zn 和 Cr 各形态比例统计/%

Table 4 Statistical fraction proportions of Cd, As, Zn, and Cr in different depth sections/%

元素	剖面深度/cm	N	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
Cd	0 ~ 50	45	0.17	14.77	8.41	9.89	17.59	2.77	40.21
	50 ~ 100	45	0.09	5.99	5.25	7.06	24.18	2.72	37.07
	> 100	47	0.07	5.40	5.29	4.72	24.98	4.01	45.17
As	0 ~ 50	45	0.10	0.03	0.11	6.91	3.95	0.04	87.20
	50 ~ 100	45	0.05	0.04	0.07	9.56	4.92	0.02	84.29
	> 100	47	0.01	0.12	0.48	0.91	0.54	3.18	94.63
Zn	0 ~ 50	45	0.03	0.06	0.43	4.28	2.40	1.11	90.68
	50 ~ 100	45	0.01	0.05	0.35	3.83	2.67	0.72	92.35
	> 100	47	0.01	0.06	0.35	3.70	2.61	0.92	91.53
Cr	0 ~ 50	45	0.02	0.13	0.45	0.84	0.77	3.54	93.21
	50 ~ 100	45	0.01	0.12	0.48	0.91	0.54	3.18	94.63
	> 100	47	0.02	0.15	0.47	0.70	0.42	3.04	94.07

这一规律在剖面重金属形态垂向分布中的表现更为直观,不同于研究区土壤剖面重金属总量垂向分布的差异性,9 条剖面重金属形态垂向分布特征基本一致,以 PGG01 为例,随剖面深度由浅至深, Cd 水溶态、离子交换态比例呈显著下降趋势,且多在 50 cm 以深范围内趋于稳定[图 4(a)].

研究区土壤剖面 As 总体上以残渣态存在,各深度段残渣态比例均在 80% 以上,其余形态则有少量比例分布. 相比于 0 ~ 50 cm 深度段, 50 ~ 100 cm 土壤 As 水溶态、碳酸盐结合态、强有机结合态、残渣态

分别减少了 0.05%、0.04%、0.02% 和 2.91%,而离子交换态、腐殖酸结合态、铁锰氧化态增加了 0.01%、2.65% 和 0.97%; 相比于 50 ~ 100 cm 深度段, > 100 cm 土壤 As 水溶态、腐殖酸结合态和铁锰氧化态分别减少了 0.02%、8.65% 和 4.38%,而离子交换态、碳酸盐结合态、强有机结合态、残渣态增加了 0.08%、0.41%、3.16% 和 10.34% [表 4 和图 3(b)]. 结合图 4(b)可见,随深度加深,土壤 As 水溶态、离子交换态比例变化不大,只有腐殖酸结合态、残渣态等其他形态发生了一定幅度变化.

研究区土壤剖面 Zn 和 Cr 总体上以残渣态存在,各深度段残渣态比例均在 90% 以上(表 4). 随深度变化,Zn 和 Cr 各形态比例均变化不大,变化幅

度在 -1%~2% 之间[图 3(c)、图 3(d)、图 4(c)和图 4(d)],说明研究区土壤 Zn 和 Cr 较为稳定,迁移转化能力较低.

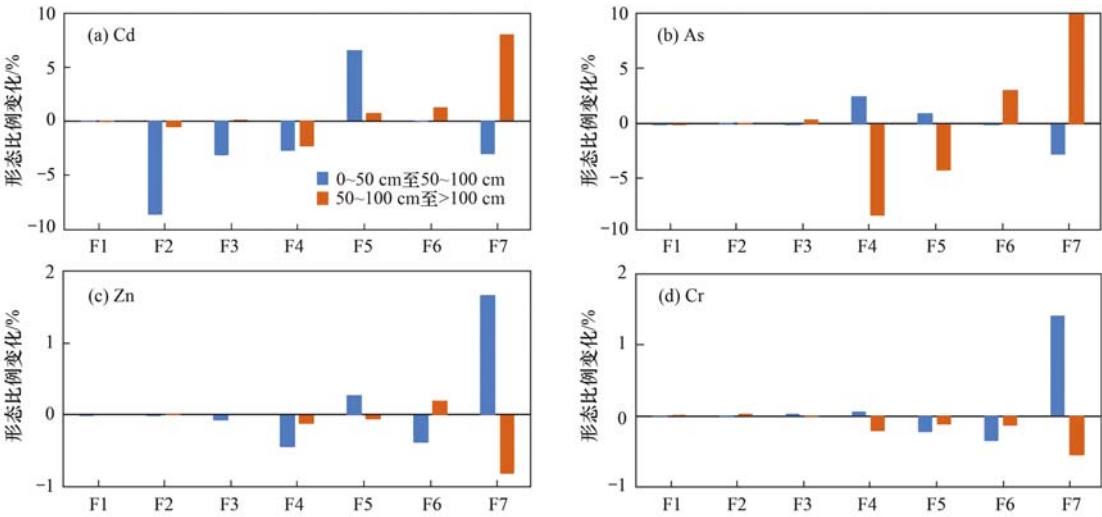
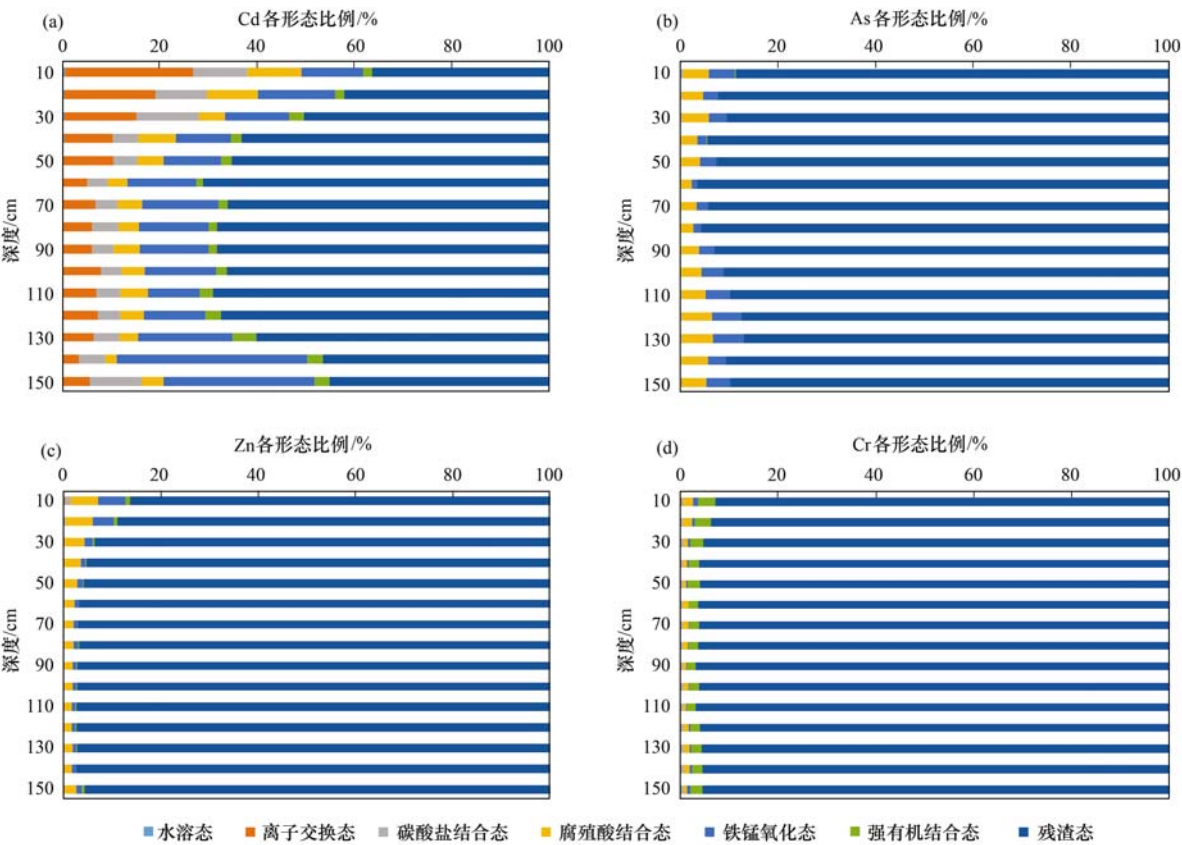


图 3 剖面不同深度段 Cd、As、Zn 和 Cr 各形态比例变化
Fig. 3 Variation in the fractional proportions of Cd, As, Zn, and Cr in different depth sections



以 PGG01 为例

图 4 剖面 Cd、As、Zn 和 Cr 形态垂向分布

Fig. 4 Vertical distribution of the fractional proportions of Cd, As, Zn, and Cr in profiles

2.3 土壤剖面重金属形态污染风险评价

基于土壤重金属总量的生态风险评价往往难以有效反映重金属的化学活性及生物可利用性,而基于重金属形态学的评价则能更加真实地预测出土壤重金属的生态风险,为土壤重金属污染防治提供更

科学的依据.
Singh 等^[29]的研究认为由人类活动引起的可交换态和碳酸盐结合态含量升高会增加土壤重金属的生物有效性,Jain^[30]在此基础上建立了风险评价编码法 RAC(risk assessment code),将可交换态和碳酸

盐结合态之和所占比例划分为 5 个等级：<1% 视为对环境无风险，1%~10% 为低风险，10%~30% 为中等风险，30%~50% 为高风险，>50% 视为极高风险^[31,32]。本文采用七步形态分析法，因此将水溶态和离子交换态归并到可交换态。

RAC 评价结果显示，研究区土壤 Cd 总体上中风险比例最高，其次为低、高和极高风险（表 5）；土壤 As、Zn 和 Cr 则以无风险为主，低风险存在少比例分布（表 5）。

3 个深度段对比结果显示，从 0~50 cm 到 50~100 cm 再到 >100 cm，土壤 Cd 中、高和极高风险比例逐渐降低，低风险比例逐渐增加；土壤 As、Zn 和 Cr 低风险比例逐渐降低，无风险比例逐渐增加（表 5）。

此外，次生相与原生相比值法 RSP（ratio of secondary phase and primary phase）同样可以基于土壤重金属形态对其做出生态风险评价^[33,34]。

$$RSP = M_{sec}/M_{prim}$$

式中，RSP 表示污染程度，M_{sec} 表示次生相中（除残渣态之外的其他形态）的重金属含量，M_{prim} 表示原生相中（残渣态）的重金属含量。RSP <1 视为无污染，1 < RSP < 2 轻度污染，2 < RSP < 3 中度污染，

RSP >3 视为重度污染。

RSP 评价结果显示，研究区土壤 Cd 总体上无污染比例最高，其次为轻度、重度和中度污染；土壤 As 以无污染为主，存在较少比例轻度污染；土壤 Zn 和 Cr 则全部为无污染（表 5）。

3 个深度段对比结果显示，从 0~50 cm 到 50~100 cm 再到 >100 cm，土壤 Cd 仅无污染比例逐渐增加，其他 3 个等级并未显示出由重度污染向轻度污染转化的趋势；土壤 As 在由浅至深 3 个深度段轻度污染比例先增加后减少，无污染比例先减少后增加（表 5）。

两种评价方法评价结果不一致在不少研究中均有报道^[34~38]。造成这种差异的原因主要是两种方法的关注点和判断标准不同，RAC 主要关注生物有效组分的污染程度，而 RSP 则侧重于生物有效和潜在生物有效组分的污染程度。

以上两种基于重金属形态的评价结果反映出研究区土壤 Cd 污染风险相对较高，土壤 As 污染风险略高于 Zn 和 Cr，但总体上 As、Zn 和 Cr 3 种重金属处于无污染或无风险状态，同时，4 种重金属生物有效形态组分污染风险均有由浅至深逐渐降低的趋势。

表 5 剖面不同深度段 Cd、As、Zn 和 Cr 的 RAC 与 RSP 评价结果/%
Table 5 Evaluation results of RAC and RSP for Cd, As, Zn, and Cr in different depth sections/%

元素	深度/cm	RAC					RSP			
		无风险	低风险	中风险	高风险	极高风险	无污染	轻度污染	中度污染	重度污染
Cd	0~50	0.00	20.00	40.00	28.89	11.11	28.89	28.89	17.78	24.44
	50~100	0.00	37.78	33.33	22.22	6.67	35.56	17.78	17.78	28.89
	>100	0.00	42.55	34.04	21.28	2.13	40.43	21.28	21.28	17.02
As	0~50	80.00	20.00	0.00	0.00	0.00	97.78	2.22	0.00	0.00
	50~100	84.44	15.56	0.00	0.00	0.00	93.33	6.67	0.00	0.00
	>100	91.49	8.51	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00
Zn	0~50	68.89	31.11	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00
	50~100	80.00	20.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00
	>100	95.74	4.26	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00
Cr	0~50	68.89	31.11	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00
	50~100	80.00	20.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00
	>100	93.21	6.79	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00

2.4 土壤剖面重金属迁移转化影响因素

水稻土是典型的自然过程与人为活动交互影响的土壤类型，翻耕、灌水、播种、施肥和排水等人类活动势必对浅部耕作区土壤理化性质造成一定影响。结合重金属元素形态垂向分布特征，即水溶态和离子交换态等活动性较高的形态多在 0~50 cm 深度段富集，而 >50 cm 相对稳定，将土壤剖面分为 0~50 cm 和 >50 cm 两个深度段，其中 0~50 cm 代表受到人类活动影响的土壤，>50 cm 代表经历自然成土过程、较少受到人类活动影响的土壤。

两个深度段土壤重金属全量的 Spearman 相关分析结果显示（表 6），>50 cm 深度段土壤中重金属除 As 与 Cd 和 As 与 Ni 表现为负相关外，其他重金属间绝大多数为显著正相关，表明自然成土过程中研究区土壤重金属来源相似，主要来源于下覆碳酸盐岩成土母质。而 0~50 cm 深度段土壤中重金属间相关强度普遍减弱，且 Cd 与 Pb、As 与 Zn、As 与 Hg、Cr 与 Hg 和 Hg 与 Pb 由正相关变为负相关，说明人为活动扰乱了成土过程中重金属元素的自然演化规律，并可能带来了外源重金属输入。

表 6 剖面不同深度段重金属含量 Spearman 相关系数¹⁾

Table 6 Spearman correlation coefficient of heavy metal contents in different depth sections

深度/cm	元素	Cd	As	Zn	Cr	Hg	Ni	Pb	Cu
0 ~ 50	Cd	1							
	As	-0.414 **	1						
	Zn	0.775 **	-0.094	1					
	Cr	0.213	0.286	0.415 **	1				
	Hg	0.641 **	-0.364 *	0.478 **	-0.136	1			
	Ni	0.381 **	-0.216	0.723 **	0.480 **	0.018	1		
	Pb	-0.037	0.756 **	0.367 *	0.251	-0.177	0.144	1	
	Cu	0.652 **	0.071	0.847 **	0.126	0.449 **	0.467 **	0.510 **	1
> 50	Cd	1							
	As	-0.275 **	1						
	Zn	0.670 **	0.196	1					
	Cr	0.646 **	0.012	0.766 **	1				
	Hg	0.309 **	0.413 **	0.627 **	0.397 **	1			
	Ni	0.507 **	-0.115	0.743 **	0.850 **	0.271 **	1		
	Pb	0.032	0.813 **	0.512 **	0.176	0.457 **	0.131	1	
	Cu	0.542 **	0.321 **	0.745 **	0.342 **	0.525 **	0.274 **	0.596 **	1

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

土壤中重金属的迁移活动性是其生态环境效应的重要表征,重金属的迁移能力越强,污染范围越容易扩大,进而产生更大的生态风险.有研究者提出重金属的迁移能力大小可以通过迁移系数 M 来描述^[39,40].

$$M = \frac{F1 + F2}{F1 + F2 + F3 + F4 + F5 + F6 + F7}$$

式中,F1:水溶态含量;F2:离子交换态含量;F3:碳酸盐态含量;F4:腐殖酸结合态含量;F5:铁锰氧化态含量;F6:强有机结合态含量;F7:残渣态含量.

研究区土壤 Cd 在 0 ~ 50 cm 深度段 M 为 0.149, >50 cm 深度段为 0.061,相比于深层,浅层土壤 Cd 迁移系数变化率 144.26%,表明受到人类活动影响土壤中 Cd 的迁移能力会显著增强.同时,0 ~ 50 cm 深度段土壤 Cd 迁移系数与土壤 pH 和 Corg 含量显著相关(表 7),说明受到人类活动影响的土壤, Cd 活动性主要受控于土壤 pH 和有机质.

表 7 剖面不同深度段重金属迁移系数(M)与土壤性质 Spearman 相关系数¹⁾

Table 7 Spearman correlation coefficient of M for heavy metals and soil properties in different depth sections

元素	深度/cm	pH	Corg	TFe ₂ O ₃	Sa
M (Cd)	0 ~ 50	-0.562 **	0.662 **	-0.157	0.017
	> 50	-0.272 **	0.460 **	-0.505 **	0.459 **
M (As)	0 ~ 50	-0.203	0.392 **	-0.584 **	0.387 **
	> 50	0.140	0.232 *	-0.856 **	0.729 **
M (Zn)	0 ~ 50	-0.702 **	0.265	0.239	-0.180
	> 50	-0.516 **	-0.020	-0.030	0.133
M (Cr)	0 ~ 50	-0.547 **	0.162	-0.170	0.150
	> 50	-0.448 **	-0.008	-0.204	0.413 **

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

pH 对于土壤 Cd 等重金属迁移活动性的影响已在大量研究中被证实^[41].随着 pH 降低,土壤中的 OH⁻ 浓度减少,土壤表面的负电荷越来越少,土壤对于重金属元素的吸附能力就会越来越弱,进而造成 Cd 等重金属元素的解吸和迁移^[42,43].另外,pH 降低也会造成被有机质或黏土矿物等吸附的重金属离子的解吸^[44~47].

土壤有机质例如腐殖酸、富里酸等含有大量的有机配体^[48,49],一般重金属可以与这些有机配体发生络合反应使其在土壤中的淋滤迁移量减少^[50~54].土壤有机质包括了可溶有机质、颗粒有机质和微生物有机质等不同形式的有机质^[55],其中可溶有机质等吸附的重金属,可能在分析测试中变成了水溶态和离子交换态的一部分,这应是造成本次结果中 Cd 等重金属迁移能力与土壤有机质含量显著正相关的原因.

> 50 cm 深度段 Cd 迁移系数与土壤 pH 和 Corg 含量相关程度明显减弱,并出现与土壤 Fe₂O₃ 含量的显著负相关以及与 Sa 值的显著正相关(表 7).

M (Cd)与土壤 Fe₂O₃ 含量的显著负相关应与土壤中铁氧化物、氢氧化物类黏土矿物的水解作用有关. Forbes 等^[56]提出黏土矿物表面对重金属离子的亲和力可以被认为是基于矿物表面对 Cd 等重金属的羟基物的亲和力.金属离子在水解过程中, Cd 可以通过络合作用进入—OH 基团,形成化合键稳定的羟基络合物^[41],进而使其迁移淋滤量减少.

硅铝比(Sa = SiO₂/Al₂O₃)常用于描述土壤矿物风化程度, Sa 越小,表示土壤风化发育程度越强^[57].以上说明自然成土过程中黏土矿物对于 Cd

的吸附作用逐渐凸显,且随土壤发育程度增强,Cd 活动性会逐渐减弱。

土壤 As 在 0~50 cm 深度段的 M 为 0.001 6,在 >50 cm 深度段为 0.001 0,相比于深层,浅层土壤 As 迁移系数变化率 60%,表明人类活动会造成土壤 As 迁移能力有所增强。两个深度段 As 迁移系数均与土壤 Corg 含量、 Fe_2O_3 含量和 Sa 值显著相关(表 7)。

张良东等^[58]利用同步辐射技术观测到土壤颗粒上 As 与 Fe 的高含量信号点高度重合,Ilgén 等^[59]的研究发现在中性厌氧条件下,Fe-As 共沉淀体系对较宽浓度范围内的 As 都具有显著的固持作用,表明土壤中的铁氧化物等对 As 起到较为重要的固定作用。 $M(\text{As})$ 与土壤 Corg 含量显著正相关的原因与 Cd 类似。

两个深度段对比结果显示,无论是否受到人类活动影响,土壤 As 的活动性都与土壤有机质、 Fe_2O_3 含量以及土壤发育程度有关。但自然成土过程中土壤有机质对 As 活动性的影响减弱,而土壤中的铁含量和土壤发育程度对于 As 活动性的影响增强。

土壤 Zn 和 Cr 在 0~50 cm 深度段的 M 分别为 0.000 8 和 0.001 7,>50 cm 深度段分别为 0.000 7 和 0.001 5,相比深层,浅层土壤 Zn 和 Cr 迁移系数变化率分别为 14.28% 和 13.33%,表明人类活动对土壤 Zn 和 Cr 迁移能力影响不大。两个深度段 Zn 和 Cr 迁移系数均与土壤 pH 显著相关,但 >50 cm 深度段相关强度减弱。

以上对比表明,土壤中 Zn 和 Cr 迁移能力的主控因素为 pH,但在人类活动干扰下,pH 对其影响更为强烈。他人研究中同样报道了土壤 pH 是 Zn 和 Cr 活动性的主要控制因素^[60~63]。

3 结论

(1)研究区碳酸盐岩母质水田土壤剖面中 Cd、As、Zn 和 Cr 超农用地污染风险筛选值比例分别为 55.47%、54.01%、12.41% 和 0.73%;Cd、As 部分超管制值,比例分别为 18.25% 和 2.92%;Pb、Ni、Hg 和 Cu 无样本含量超标。

(2)研究区土壤剖面中 Cd 各形态均有一定比例分布,随剖面深度由浅至深,生态风险较高的 Cd 水溶态、离子交换态比例呈显著下降趋势;土壤剖面 As、Zn 和 Cr 总体上以残渣态存在,随深度加深,水溶态、离子交换态比例变化不大,较为稳定。

(3)风险评价编码法(RAC)和次生相与原生相分布比值法(RSP)评价结果反映出研究区土壤 Cd

污染风险相对较高,As 污染风险略高于 Zn 和 Cr,但总体上 As、Zn 和 Cr 3 种重金属处于无污染或无风险状态,且 4 种重金属生物有效形态组分污染程度均有由浅至深逐渐减弱的趋势。

(4)总体来看,深层剖面反映出人为扰动较少的土壤,其自然理化性质如黏土矿物含量和土壤发育程度等对重金属迁移活动性的影响更大,而受到人为活动强烈干扰的浅部耕作层,土壤 pH 和有机质含量等则是重金属迁移活动能力的主控因素,因此科学调控耕作层土壤 pH 和有机质含量对岩溶区土壤重金属污染风险防控尤为重要。

参考文献:

- [1] Rezapour S, Atashpaz B, Moghaddam S S, et al. Cadmium accumulation, translocation factor, and health risk potential in a wastewater-irrigated soil-wheat (*Triticum aestivum* L.) system [J]. *Chemosphere*, 2019, **231**: 579-587.
- [2] Wang C X, Mo Z, Wang H, et al. The transportation, time-dependent distribution of heavy metals in paddy crops [J]. *Chemosphere*, 2003, **50**(6): 717-723.
- [3] Wang L, Cui X F, Cheng H G, et al. A review of soil cadmium contamination in China including a health risk assessment [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(21): 16441-16452.
- [4] 钟雪梅,夏德尚,宋波,等. 广西土壤镉含量状况与风险评估研究进展[J]. *自然资源学报*, 2017, **32**(7): 1256-1270. Zhong X M, Xia D S, Song B, et al. Review on soil cadmium study and risk assessment in Guangxi [J]. *Journal of Natural Resources*, 2017, **32**(7): 1256-1270.
- [5] 邓齐玉,赵银军,林清,等. 广西重金属镉的区域性分布特征与土壤污染状况评价[J]. *环境工程*, 2019, **37**(1): 164-171, 92. Deng Q Y, Zhao Y J, Lin Q, et al. Regional distribution characteristics of cadmium and evaluation of soil pollution situation in Guangxi [J]. *Environmental Engineering*, 2019, **37**(1): 164-171, 92.
- [6] Wen Y B, Li W, Yang Z F, et al. Enrichment and source identification of Cd and other heavy metals in soils with high geochemical background in the karst region, Southwestern China [J]. *Chemosphere*, 2020, **245**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.125620.
- [7] 田恒川,徐国志. 镉地球化学行为与我国西南地区镉污染[J]. *现代矿业*, 2014, (11): 134-136.
- [8] 罗慧,刘秀明,王世杰,等. 中国南方喀斯特集中分布区土壤 Cd 污染特征及来源[J]. *生态学杂志*, 2018, **37**(5): 1538-1544.
- [9] Luo H, Liu X M, Wang S J, et al. Pollution characteristics and sources of cadmium in soils of the karst area in South China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, **37**(5): 1538-1544.
- [9] 刘芳,兰翠玲,黄科瑞,等. 广西百色不同功能区土壤重金属污染与来源[J]. *地球与环境*, 2012, **40**(2): 232-237. Liu F, Lan C L, Huang K R, et al. Contamination and source identification of soil heavy metals in different functional zones at Baise, Guangxi [J]. *Earth and Environment*, 2012, **40**(2): 232-237.
- [10] 宋波,张云霞,庞瑞,等. 广西西江流域农田土壤重金属含量特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2018, **39**(9): 4317-4326.

- Song B, Zhang Y X, Pang R, *et al.* Analysis of characteristics and sources of heavy metals in farmland soils in the Xijiang river draining of Guangxi[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(9): 4317-4326.
- [11] 宋书巧, 胡伟. 广西某喀斯特流域土壤重金属 Cd 分布及其来源分析[J]. *科学技术与工程*, 2015, **15**(17): 237-241.
- Song S Q, Hu W. Cadmium content of soil in karst basin of Guangxi district: distribution and source recognition[J]. *Science Technology and Engineering*, 2015, **15**(17): 237-241.
- [12] 凌乃规. 广西不同类型农田土壤重金属含量状况分析[J]. *农业环境与发展*, 2010, **27**(4): 91-94.
- [13] 王素娟, 李正文, 廖秋佳, 等. 广西矿区土壤镉、铅污染状况研究[J]. *生态科学*, 2008, **27**(1): 50-54.
- Wang S J, Li Z W, Liao Q J, *et al.* A study on contamination status of the Cd and Pb in the mines soil of Guangxi [J]. *Ecological Science*, 2008, **27**(1): 50-54.
- [14] Li M S, Luo Y P, Su Z Y. Heavy metal concentrations in soils and plant accumulation in a restored manganese mineland in Guangxi, South China[J]. *Environmental Pollution*, 2007, **147**(1): 168-175.
- [15] 李杰, 陈彪, 刘枝刚, 等. 贵港城区土壤重金属的空间分布特征及来源解析[J]. *南方国土资源*, 2013, (4): 29-32.
- [16] 马宏宏, 彭敏, 刘飞, 等. 广西典型碳酸盐岩区农田土壤-作物系统重金属生物有效性及迁移富集特征[J]. *环境科学*, 2020, **41**(1): 449-459.
- Ma H H, Peng M, Liu F, *et al.* Bioavailability, translocation, and accumulation characteristic of heavy metals in a soil-crop system from a typical carbonate rock area in Guangxi, China[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 449-459.
- [17] 刘旭, 顾秋蓓, 杨琼, 等. 广西象州与横县碳酸盐岩分布区土壤中 Cd 形态分布特征及影响因素[J]. *现代地质*, 2017, **31**(2): 374-385.
- Liu X, Gu Q B, Yang Q, *et al.* Distribution and influencing factors of cadmium geochemical fractions of soils at carbonate covering area in Hengxian and Xiangzhou of Guangxi [J]. *Geoscience*, 2017, **31**(2): 374-385.
- [18] 刘意章, 肖唐付, 熊燕, 等. 西南高镉地质背景区农田土壤与农作物的重金属富集特征[J]. *环境科学*, 2019, **40**(6): 2877-2884.
- Liu Y Z, Xiao T F, Xiong Y, *et al.* Accumulation of heavy metals in agricultural soils and crops from an area with a high geochemical background of cadmium, southwestern China[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(6): 2877-2884.
- [19] 唐豆豆, 袁旭音, 汪宜敏, 等. 地质高背景农田土壤中水稻对重金属的富集特征及风险预测[J]. *农业环境科学学报*, 2018, **37**(1): 18-26.
- Tang D D, Yuan X Y, Wang Y M, *et al.* Enrichment characteristics and risk prediction of heavy metals for rice grains growing in paddy soils with a high geological background [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, **37**(1): 18-26.
- [20] Gu Q B, Yu T, Yang Z F, *et al.* Prediction and risk assessment of five heavy metals in maize and peanut: a case study of Guangxi, China [J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2019, **70**, doi: 10.1016/j.etap.2019.103199.
- [21] 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.
- [22] Adriano D C. Trace elements in the terrestrial environment[M]. Springer Science & Business Media, 2013.
- [23] 瞿飞, 文林宏, 范成五, 等. 不同母质土壤重金属含量与生态风险评价[J]. *矿物学报*, 2020, **40**(6): 676-684.
- Qu F, Wen L H, Fan C W, *et al.* Heavy metal contents in soils developed from different parent materials and their ecological risk assessment[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2020, **40**(6): 676-684.
- [24] Rudnick R L, Gao S. Composition of the continental crust[J]. *Treatise on Geochemistry*, 2014, **4**: 1-51.
- [25] 郑国东. 广西北部湾地区表层土壤重金属分布特征及其影响因素研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016.
- Zheng G D. Factors influencing the distribution and accumulation of heavy metals in topsoil across Beibu Gulf of Guangxi [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2016.
- [26] Salomons W, Förstner U. Metals in the hydrocycle[M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2012.
- [27] 刘文景, 涂成龙, 郎赞超, 等. 喀斯特地区黄壤和石灰土剖面化学组成变化与风化成土过程[J]. *地球与环境*, 2010, **38**(3): 271-279.
- Liu W J, Xu C L, Lang Y C, *et al.* Major and trace element compositions of yellow and limestone soils in the karst area of southwest China: implications for weathering and soil-formation processes[J]. *Earth and Environment*, 2010, **38**(3): 271-279.
- [28] Adamo P, Javazzo P, Albanese S, *et al.* Bioavailability and soil-to-plant transfer factors as indicators of potentially toxic element contamination in agricultural soils [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **500-501**: 11-22.
- [29] Singh K P, Mohan D, Singh V K, *et al.* Studies on distribution and fractionation of heavy metals in Gomti river sediments—a tributary of the Ganges, India[J]. *Journal of Hydrology*, 2005, **312**(1-4): 14-27.
- [30] Jain C K. Metal fractionation study on bed sediments of river Yamuna, India[J]. *Water Research*, 2004, **38**(3): 569-578.
- [31] 陈岩, 李宏兵, 朱先芳, 等. 北京市得田沟金矿和崎峰金矿周边土壤重金属形态分析和潜在风险评价[J]. *农业环境科学学报*, 2012, **31**(11): 2142-2151.
- Chen Y, Ji H B, Zhu X F, *et al.* Fraction distribution and risk assessment of heavy metals in soils around the gold mine of Detianguo-Qifengcha, Beijing City, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, **31**(11): 2142-2151.
- [32] 王静, 张杨珠. 土壤中重金属的形态区分法与环境风险评价方法研究进展[J]. *湖南农业科学*, 2010, (1): 46-48, 53.
- Wang J, Zhang Y Z. Progress of differentiating methods for heavy metals forms in soil and risk assessment methods for environment [J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2010, (1): 46-48, 53.
- [33] 霍文毅, 黄风茹, 陈静生, 等. 河流颗粒物重金属污染评价方法比较研究[J]. *地理科学*, 1997, **17**(1): 81-86.
- Huo W Y, Huang F R, Chen J S, *et al.* Comparative study of assessment method for river particulate heavy metal pollution[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1997, **17**(1): 81-86.
- [34] 胡青青, 沈强, 陈飞, 等. 重构土壤垂直剖面重金属 Cd 赋存形态及影响因素[J]. *环境科学*, 2020, **41**(6): 2878-2888.
- Hu Q Q, Shen Q, Chen F, *et al.* Reconstructed soil vertical profile heavy metal Cd occurrence and its influencing factors[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(6): 2878-2888.
- [35] 陈明, 杨涛, 徐慧, 等. 赣南某钨矿区土壤中 Cd、Pb 的形态特征及生态风险评价[J]. *环境化学*, 2015, **34**(12): 2257-2262.
- Chen M, Yang T, Xu H, *et al.* Distribution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals Cd and Pb in soils around a tungsten mine of Gannan [J]. *Environmental Chemistry*, 2015, **34**(12): 2257-2262.
- [36] 杨新明, 庄涛, 韩磊, 等. 小清河污灌区农田土壤重金属形态分析及风险评价[J]. *环境化学*, 2019, **38**(3): 644-652.

- Yang X M, Zhuang T, Han L, *et al.* Fraction distribution and ecological risk assessment of soil heavy metals in the farmland soil from the sewage irrigated area of Xiaoqing River [J]. *Environmental Chemistry*, 2019, **38**(3): 644-652.
- [37] 叶宏萌, 李国平, 郑茂钟, 等. 武夷山茶园土壤中五种重金属的化学形态和生物有效性[J]. *环境化学*, 2016, **35**(10): 2071-2078.
- Ye H M, Li G P, Zheng M Z, *et al.* Speciation and bioavailability of five toxic heavy metals in the tea garden soils of Wuyishan[J]. *Environmental Chemistry*, 2016, **35**(10): 2071-2078.
- [38] Marrugo-Negrete J, Pinedo-Hernández J, Díez S. Assessment of heavy metal pollution, spatial distribution and origin in agricultural soils along the Sinu River Basin, Colombia [J]. *Environmental Research*, 2017, **154**: 380-388.
- [39] Maiz I, Arambarri I, Garcia R, *et al.* Evaluation of heavy metal availability in polluted soils by two sequential extraction procedures using factor analysis [J]. *Environmental Pollution*, 2000, **110**(1): 3-9.
- [40] Pueyo M, López-Sánchez J F, Rauret G. Assessment of CaCl_2 , NaNO_3 and NH_4NO_3 extraction procedures for the study of Cd, Cu, Pb and Zn extractability in contaminated soils [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2004, **504**(2): 217-226.
- [41] Loganathan P, Vigneswaran S, Kandasamy J, *et al.* Cadmium sorption and desorption in soils: a review [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2012, **42**(5): 489-533.
- [42] Mahdavi S, Jalali M, Afkhami A. Heavy metals removal from aqueous solutions using TiO_2 , MgO , and Al_2O_3 nanoparticles [J]. *Chemical Engineering Communications*, 2013, **200**(3): 448-470.
- [43] Tahervand S, Jalali M. Sorption, desorption, and speciation of Cd, Ni, and Fe by four calcareous soils as affected by pH [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2016, **188**(6), doi: 10.1007/s10661-016-5313-4.
- [44] Tiller K G, Gerth J, Brümmer G. The relative affinities of Cd, Ni and Zn for different soil clay fractions and goethite [J]. *Geoderma*, 1984, **34**(1): 17-35.
- [45] Afkhami A, Saber-Tehrani M, Bagheri H. Simultaneous removal of heavy-metal ions in wastewater samples using nano-alumina modified with 2, 4-dinitrophenylhydrazine [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **181**(1-3): 836-844.
- [46] Rajkumar M, Sandhya S, Prasad M N V, *et al.* Perspectives of plant-associated microbes in heavy metal phytoremediation [J]. *Biotechnology Advances*, 2012, **30**(6): 1562-1574.
- [47] Marciano-Martinez E, McBride M B. Comparison of the titration and ion adsorption methods for surface charge measurement in oxisols [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1989, **53**(4): 1040-1045.
- [48] Kalbitz K, Wennrich R. Mobilization of heavy metals and arsenic in polluted wetland soils and its dependence on dissolved organic matter [J]. *Science of the Total Environment*, 1998, **209**(1): 27-39.
- [49] Neal R H, Sposito G. Effects of soluble organic matter and sewage sludge amendments on cadmium sorption by soils at low cadmium concentrations [J]. *Soil Science*, 1986, **142**(3): 164-172.
- [50] Antoniadis V, Robinson J S, Alloway B J. Effects of short-term pH fluctuations on cadmium, nickel, lead, and zinc availability to ryegrass in a sewage sludge-amended field [J]. *Chemosphere*, 2008, **71**(4): 759-764.
- [51] Liu L N, Chen H S, Cai P, *et al.* Immobilization and phytotoxicity of Cd in contaminated soil amended with chicken manure compost [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **163**(2-3): 563-567.
- [52] Garrett R G, MacLaurin A I, Gawalko E J, *et al.* A prediction model for estimating the cadmium content of durum wheat from soil chemistry [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1998, **64**(1-3): 101-110.
- [53] Santana L, Castaldi P, Melis P. Evaluation of the interaction mechanisms between red muds and heavy metals [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, **136**(2): 324-329.
- [54] Zarcinas B A, Pongsakul P, McLaughlin M J, *et al.* Heavy metals in soils and crops in Southeast Asia 2. Thailand [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2004, **26**(3-4): 359-371.
- [55] Harter R D, Naidu R. Role of metal-organic complexation in metal sorption by soils [J]. *Advances in Agronomy*, 1995, **55**: 219-263.
- [56] Forbes E A, Posner A M, Quirk J P. The specific adsorption of divalent Cd, Co, Cu, Pb, and Zn on goethite [J]. *European Journal of Soil Science*, 1976, **27**(2): 154-166.
- [57] Guggenberger G, Bäuml R, Zech W. Weathering of soils developed in eolian material overlying glacial deposits in Eastern Nepal [J]. *Soil Science*, 1998, **163**(4): 325-337.
- [58] 张良东, 杨建军, 夏星, 等. Eh 耦合的稻田土壤镉、砷释放机制 [J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(5): 1828-1835.
- Zhang L D, Yang J J, Xia X, *et al.* Eh-coupled release mechanisms of cadmium and arsenic in a contaminated paddy soil: a microcosm and synchrotron-based spectroscopic study [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(5): 1828-1835.
- [59] Ilgen A G, Foster A L, Trainor T P. Role of structural Fe in nontronite NAu-1 and dissolved Fe(II) in redox transformations of arsenic and antimony [J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 2012, **94**: 128-145.
- [60] Finžgar N, Tlustoš P, Leštan D. Relationship of soil properties to fractionation, bioavailability and mobility of lead and zinc in soil [J]. *Plant Soil and Environment*, 2007, **53**(5): 225-238.
- [61] Janssen R P T, Peijnenburg W J G M, Postuma L, *et al.* Equilibrium partitioning of heavy metals in dutch field soils. I. Relationship between metal partition coefficients and soil characteristics [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1997, **16**(12): 2470-2478.
- [62] Reijonen I, Hartikainen H. Oxidation mechanisms and chemical bioavailability of chromium in agricultural soil-pH as the master variable [J]. *Applied Geochemistry*, 2016, **74**: 84-93.
- [63] 向云, 程曼, 刘永杰, 等. 冶炼企业周边农田土壤铬形态分布及其影响因素研究 [J]. *山西农业大学学报(自然科学版)*, 2020, **40**(2): 94-102.
- Xiang Y, Cheng M, Liu Y J, *et al.* Forms, distribution, and the influencers of chromium in the soil of agricultural fields contaminated by the metallurgy industry [J]. *Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2020, **40**(2): 94-102.

CONTENTS

Characteristics and Control Strategies on Summertime Peak Ozone Concentration in Shanghai	YAN Ru-sha, WANG Hong-li, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (3577)
Characteristics and Sources of VOCs at Different Ozone Concentration Levels in Tianjin	WANG Wen-mei, GAO Jing-yun, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (3585)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric VOCs During Ozone Pollution Period in the Main Urban Area of Chongqing	LI Ling, LI Zhen-liang, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (3595)
Emission Characteristics and Atmospheric Chemical Reactivity of Volatile Organic Compounds(VOCs) in Automobile Repair Industry	CHEN Peng, ZHANG Yue, ZHANG Liang, <i>et al.</i> (3604)
Analysis of the Continuous Heavy Pollution Process in the Winter of 2016 in Beijing, Tianjin, and Hebei	MAO Ye, ZHANG Heng-de, ZHU Bin (3615)
Evaluation of Air Pollution Characteristics and Air Quality Improvement Effect in Beijing and Chengdu	DANG Ying, ZHANG Xiao-ling, RAO Xiao-qin, <i>et al.</i> (3622)
Chemical Components and Sources of PM _{2.5} and Their Evolutive Characteristics in Zhengzhou	ZHAO Xiao-nan, WANG Shen-bo, YANG Jie-ru, <i>et al.</i> (3633)
High-frequency Responses to the COVID-19 Shutdown of Heavy Metal Elements in PM _{2.5} in Shanghai	CHENG Kai, CHANG Yun-hua, KUANG Ya-qiong, <i>et al.</i> (3644)
Analysis of Ultraviolet Aerosol Index in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DUAN Jia-le, JU Tian-zhen, HUANG Rui-rui, <i>et al.</i> (3652)
Vehicle Air Pollutant Emission Inventory and Characterization in Henan Province from 2016 to 2019	GAO Dan-dan, YIN Sha-sha, GU Xing-ke, <i>et al.</i> (3663)
Characterization and Exposure Risk Assessment of Non-phthalate Plasticizers in House Dust from Guangzhou	LIU Xiao-tu, PENG Chang-feng, CHEN Da, <i>et al.</i> (3676)
Distribution, Sources, and Risk Assessment of Polyfluoroalkyl Substances in Main Rivers and Soils of Tianjin	WU Qian-qian, WU Qiang, SONG Shuai, <i>et al.</i> (3682)
Differentiation of Hydrogen and Oxygen Isotopes in the Water Source Treatment Wetlands of Stream Networks	YANG Ting, WANG Yang, XU Jing-yi, <i>et al.</i> (3695)
Characterizing Sources and Composition of Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Key Drinking Water Reservoir Lake Tianmu	ZHOU Lei, ZHOU Yong-qiang, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (3709)
Sources and Optical Dynamics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Different Types of Urban Water Bodies	YU Xiao-qin, CUI Yang, CHEN Hui-min, <i>et al.</i> (3719)
Temporal and Spatial Evolution Characteristics of DOM Spectra in Sediment Interstitial Water in Typical Zones of Baiyangdian Lake	ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i> (3730)
Sources and Spatial Variation of Dissolved Organic Matter in Summer Water of Inflow Rivers Along Chaohu Lake Watershed	NING Cheng-wu, BAO Yan, HUANG Tao, <i>et al.</i> (3743)
Spatio-temporal Distribution Characteristics and Driving Factors of Zooplankton in Hongze Lake	CHEN Ye, PENG Kai, ZHANG Qing-ji, <i>et al.</i> (3753)
Effects of Farming Practices on Soil Nitrogen and Phosphorus Concentrations and Its Loss in the Drawdown Area of the Tributary Embayment of the Three Gorges Reservoir	LUO Fang, LU Lun-hui, LI Zhe, <i>et al.</i> (3763)
Temporal and Spatial Evolution of Non-point Source Pollution Load of Total Nitrogen in Tuojiang River Basin	XIAO Yu-ting, YAO Jing, CHEN Shu, <i>et al.</i> (3773)
Microplastic-Induced Alterations to Antibiotic Resistance Genes in Seawater	ZHOU Shu-yi-dan, ZHU Yong-guan, HUANG Fu-yi (3785)
Enrichment of Antibiotic Resistant Bacteria and Antibiotic Resistance Genes by Sulfamethoxazole in the Biological Treatment System of Mariculture Wastewater	WANG Jin-peng, ZHAO Yang-guo, HU Yu-bo (3791)
Optimization of Tidal-Combined Flow Constructed Wetland System and Its Removal Effect on Antibiotic Resistance Genes	CHENG Yu-xiao, WU Dan, CHEN Quan-le, <i>et al.</i> (3799)
Temporal-spatial Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil of Xiangxi Bay in Three Gorges Reservoir Area	HUANG Ying-ping, JIN Lei, ZHU Can, <i>et al.</i> (3808)
Spatial Distribution Pattern and Influencing Factors of Industrial Pollution Emissions in Yangtze River Economic Belt	LI Yun-yi, LIU Li-ping, LIU Yuan-yuan (3820)
Aging Process and DOC Analysis of Four Different Types of Plastic Particles in Freshwater Systems	LI Wan-yi, LIU Zhi-lin, MIAO Ling-zhan, <i>et al.</i> (3829)
Promotion and Mechanisms of DOM on Copper Adsorption by Suspended Sediment Particles	DING Xiang, LI Zhong-wu, XU Wei-hua, <i>et al.</i> (3837)
Transformation Characteristics of Dissolved Organic Matter During UV/Chlorine Treatment of Municipal Secondary Effluent	WANG Xue-ning, ZHANG Bing-liang, PAN Bing-cai (3847)
Effects of Different Nitrite Generation on the Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules System	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (3858)
Ammonia Nitrogen Removal Performance with Parallel Operation of Conventional and Inverted A ² /O Sewage Treatment Processes in Winter	LI Jin-cheng, GUO Ya-ni, QI Rong, <i>et al.</i> (3866)
Diversity and PICRUS2-based Predicted Functional Analysis of Bacterial Communities During the Start-up of ANAMMOX	YAN Bing, FU Jia-qi, XIA Song, <i>et al.</i> (3875)
Microbial Community Structure of Activated Sludge and Its Response to Environmental Factors	MA Qie-qie, YUAN Ling-jiang, NIU Ze-dong, <i>et al.</i> (3886)
Distribution and Sources of Microplastics in Farmland Soil Along the Fenhe River	ZHU Yu-en, WEN Han-xuan, LI Tang-hui-xian, <i>et al.</i> (3894)
Source Apportionment of Soil PAHs in Lanzhou Based on GIS and APCS-MLR Model	GUAN Xian-xian, ZHOU Xiao-ping, LEI Chun-ni, <i>et al.</i> (3904)
Migration, Transformation Characteristics, and Ecological Risk Evaluation of Heavy Metal Fractions in Cultivated Soil Profiles in a Typical Carbonate-Covered Area	TANG Shi-qi, LIU Xiu-jin, YANG Ke, <i>et al.</i> (3913)
Effect of Elevated CO ₂ on N ₂ O Emissions from Different Rice Cultivars in Rice Fields	YU Hai-yang, HUANG Qiong, WANG Tian-yu, <i>et al.</i> (3924)
Effects of Coconut Chaff Biochar Amendment on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Paddy Fields in Hot Areas	WANG Zi-jun, WANG Hong-hao, LI Jin-qiu, <i>et al.</i> (3931)
Effects of Biochar Addition Under Different Water Management Conditions on N ₂ O Emission From Paddy Soils in Northern Hainan	WANG Hong-hao, TAN Meng-yi, WANG Zi-jun, <i>et al.</i> (3943)
Ecological Effects of Species Diversity on Plant Growth and Physico-Chemical Properties in a Pb-Zn Mine Tailings	YANG Sheng-xiang, CAO Jian-bing, LI Feng-mei, <i>et al.</i> (3953)
Investigation of Dominant Plants and Analysis of Ecological Restoration Potential in Lailishan Tin Tailings	QIN Fu-rong, ZHANG Shi-ying, XIA Yun-sheng, <i>et al.</i> (3963)
Responses of Different Degradation Stages of Alpine Wetland on Soil Microbial Community in the Yellow River Source Zone	LIN Chun-ying, LI Xi-lai, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (3971)
Effects of Straw Returning with Chemical Fertilizer on Soil Enzyme Activities and Microbial Community Structure in Rice-Rape Rotation	JIN Yu-ting, LI Xian-fan, CAI Ying, <i>et al.</i> (3985)
Shifts in Rhizosphere Bacterial Community Structure, Co-occurrence Network, and Function of <i>Miscanthus</i> Following Cadmium Exposure	CHEN Zhao-jin, LIN Li-an, LI Ying-jun, <i>et al.</i> (3997)
Investigation of Soil Fungal Communities and Functionalities within Karst Paddy Fields	ZHOU Jun-bo, JIN Zhen-jiang, XIAO Xiao-yi, <i>et al.</i> (4005)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Cd and Pb in Tiered Soil Profiles from a Zinc Smelting Site	LIU Ling-qing, XIAO Xi-yuan, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> (4015)
Influence of Different Soil Conditioner on the Transfer and Transformation of Cadmium and Phthalate Esters in Soil	WANG Can, ZHANG Yu-liang, HE Ming-jing, <i>et al.</i> (4024)
Immobilization Mechanism of Four Types of Amendments on Cu and Cd in Polluted Paddy Soil	DING Yuan, AO Shi-ying, CHEN Yi-hong, <i>et al.</i> (4037)
Foliar Application of L-Cysteine: Effects on the Concentration of Cd and Mineral Elements in Rice	ZHANG Ya-hui, WANG Chang-rong, LIU Yue-min, <i>et al.</i> (4045)
Effect of Cadmium Stress on Phytochelatins in <i>Amaranthus hypochondriacus</i> L. During Different Growth Periods	LIU Jia-xin, CHEN Wen-qing, YANG Li, <i>et al.</i> (4053)
Evolution of Material Metabolism in China's Pulp and Paper Industry	LIU Xin, YANG Tao, WU Hui-jun, <i>et al.</i> (4061)