

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

基于高分影像的城市水体遥感综合分级方法

杨子谦, 刘怀庆, 吕恒, 李云梅, 朱利, 周亚明, 李玲玲, 毕顺



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年5月

第42卷 第5期

Vol.42 No.5

目次

北京冬季 PM_{2.5} 中有机气溶胶的化学特征和来源解析 徐楠, 王甜甜, 李晓, 唐荣志, 郭松, 胡敏 (2101)

北京地区 2019 年 2~3 月供暖结束前后两次污染过程特征分析 尹晓梅, 蒲维维, 王继康, 刘湘雪, 乔林 (2110)

北京 2019 年冬季一次典型霾污染特征与成因分析 廉涵阳, 杨欣, 张普, 陈义珍, 杨小阳, 赵好希, 何友江, 赵丹婷 (2121)

青岛沿海地区夏季和冬季新粒子生成特征对比 孙悦, 朱玉姣, 孟赫, 刘兵, 刘玉虹, 董灿, 姚小红, 王文兴, 薛丽坤 (2133)

太原市城乡居民区采暖季室内灰尘中重金属的污染特征及其生态风险评价 黄浩, 徐子琪, 严俊霞, 赵秀阁, 王丹璐 (2143)

西安市新装修公共场所空气污染物浓度分析及健康风险评价 范洁, 樊灏, 沈振兴, 党文鹏, 郑伟, 王志华, 付毅 (2153)

超低排放典型燃烧源颗粒物及水溶性离子排放水平与特征 胡月琪, 王铮, 郭建辉, 冯亚君, 丁萌萌, 颜旭 (2159)

合肥市夏季大气颗粒物中微生物群落的高通量测序分析 姜少毅, 孙博文, 代海涛, 王润芳, 马大卫, 朱仁斌 (2169)

郑州市细颗粒物时空差异及管控措施影响 董喆, 袁明浩, 苏方成, 张剑飞, 孙佳侯, 张瑞芹 (2179)

2016~2019 年江西省臭氧污染特征与气象因子影响分析 钱悦, 许彬, 夏玲君, 陈燕玲, 邓力琛, 王欢, 张根 (2190)

天山北坡城市群气溶胶光学特性时空分布特征 张喆, 丁建丽, 王瑾杰, 陈香月, 刘兴涛, 阿提干·吾斯曼 (2202)

基于高分影像的城市水体遥感综合分级方法 杨子谦, 刘怀庆, 吕恒, 李云梅, 朱利, 周亚明, 李玲玲, 毕顺 (2213)

太湖水体 Chl-a 预测模型 ARIMA 的构建及应用优化 李娜, 李勇, 冯家成, 单雅洁, 钱佳宁 (2223)

松花湖水水质空间差异及富营养化空间自相关分析 丁洋, 赵进勇, 张晶, 付意成, 彭文启, 陈渠昌, 李艳艳 (2232)

会仙岩溶湿地丰平枯水期地表水污染及灌溉适用性评价 朱丹尼, 邹胜章, 李军, 樊连杰, 赵一, 谢浩, 朱天龙, 潘民强, 徐利 (2240)

京杭大运河中下游段天然水化学变化特征及驱动因素 程中华, 邓义祥, 卓小可, 代丹, 于涛 (2251)

次降雨过程中不同土地利用配置对径流中氮流失的影响 罗义峰, 陈方鑫, 周豪, 龙翼, 严冬春, 谭文浩, 李丹丹, 陈晓燕 (2260)

碳氮同位素解析典型岩溶流域地下水中硝酸盐来源与归趋 任坤, 潘晓东, 梁嘉鹏, 彭聪, 曾洁 (2268)

冰封状态下达里湖冰-水中浮游细菌群落结构差异 李文宝, 杨旭, 田雅楠, 杜蕾 (2276)

城市再生水河道沉积物细菌群落空间变化分析:以京津冀北运河为例 邱莹, 靳燕, 苏振华, 邱琰若, 赵栋梁, 郭道宇 (2287)

太湖春夏两季反硝化与厌氧氨氧化速率的空间差异及其影响因素 赵锋, 许海, 詹旭, 朱广伟, 郭宇龙, 康丽娟, 朱梦圆 (2296)

三峡库区典型支流水库浮游动植物群落结构特征及其与环境因子的关系 陈莎, 谢青, 付梅, 江韬, 王永敏, 王定勇 (2303)

铁硫改性生物炭去除水中的磷 桑倩倩, 王芳君, 赵元添, 周强, 蔡雨麒, 邓颖, 田文清, 陈永志, 马娟 (2313)

钢渣对水体中磷的去除性能及机制解析 罗晓, 张峻搏, 何磊, 杨雪晶, 吕鹏翼 (2324)

BS-18 两性修饰膨润土对四环素和诺氟沙星复合污染的吸附 王新欣, 孟昭福, 刘欣, 王腾, 胡啸龙, 孙秀贤 (2334)

Ag₃PO₄/g-C₃N₄ 复合光催化剂的制备及其可见光催化性能 高闯闯, 刘海成, 孟无霜, 郝双玲, 薛婷婷, 陈国栋, Joseph Acquah (2343)

可见光驱动下罗丹明 B 自活化过硫酸盐降解双酚 A 张怡晨, 白雪, 石娟, 金鹏康 (2353)

铁钛共掺杂氧化铝诱发表面双反应中心催化臭氧氧化去除水中污染物 张帆, 宋阳, 胡春, 吕来 (2360)

硫化铁铜双金属复合材料的制备及除铬机制 屈敏, 王源, 陈辉霞, 王兴润, 徐红彬 (2370)

电催化-生物电化学耦合系统处理青霉素废水的机制 曲有鹏, 吕江维, 董跃, 冯玉杰, 张杰 (2378)

缺氧/好氧交替连续流的生活污水好氧颗粒污泥运行及污染物去除机制 李冬, 杨敬畏, 李悦, 李帅, 张诗睿, 王文强, 张杰 (2385)

反硝化除磷污泥聚集体内原位除磷活性及有机物浓度的影响 吕永涛, 姜晓童, 徒彦, 王旭东, 潘永宝, 刘爽, 崔双科, 王磊 (2396)

基于臭氧旁路处理的污泥原位减量技术工艺 薛冰, 刘宾寒, 韦婷婷, 王先恺, 陈思思, 董滨 (2402)

活性炭对城市有机固废厌氧消化过程抗生素抗性基因行为特征的影响 马佳莹, 王盼亮, 汪冰寒, 苏应龙, 谢冰 (2413)

6 种农业废弃物初期碳源及溶解性有机物释放机制 凌宇, 闫国凯, 王海燕, 董伟羊, 王欢, 常洋, 李丛宇 (2422)

中国典型农田土壤有机碳密度的空间分异及影响因素 李成, 王让会, 李兆哲, 徐扬 (2432)

不同水分条件和微生物生物量水平下水稻土有机碳矿化及其影响因子特征 刘琪, 李宇虹, 李哲, 魏晓梦, 祝贞科, 吴金水, 葛体达 (2440)

青藏高原林地土壤的氮转化特征及其影响因素分析:以祁连山和藏东南地区为例 何芳, 张丽梅, 申聪聪, 陈金全, 刘四义 (2449)

基于物元可拓模型的兰州市主城区公园表土重金属污染评价 胡梦瑶, 李春艳, 李娜娜, 吉天琪, 郑登友 (2457)

长期施用化肥和有有机肥对稻田土壤重金属及其有效性的影响 夏文建, 张丽芳, 刘增兵, 张文学, 蓝贤瑾, 刘秀梅, 刘佳, 刘光荣, 李祖章, 王萍 (2469)

川南山区土壤与农作物重金属特征及成因 韩伟, 王成文, 彭敏, 王乔林, 杨帆, 徐仁廷 (2480)

宁东能源化工基地核心区表层土壤中多环芳烃的空间分布特征、源解析及风险评价 杨帆, 罗红雪, 钟艳霞, 王幼奇, 白一茹 (2490)

重金属钝化剂阻控生菜 Cd 吸收的功能稳定性和适用性 鹿发虎, 吴雪姣, 孔雪菲, 曾亮, 王晓宇, 陈兆进, 姚伦广, 韩辉 (2502)

典型污染稻田水分管理对水稻镉累积的影响 张雨婷, 田应兵, 黄道友, 张泉, 许超, 朱挥华, 朱奇宏 (2512)

油茶果壳改性生物炭吸附性能及其耦合淹水对土壤 Cd 形态影响 蔡彤, 杜辉辉, 刘孝利, 铁柏清, 杨宇 (2522)

土地利用变化对松花江下游湿地土壤真菌群落结构及功能的影响 徐飞, 张拓, 怀宝东, 隋文志, 杨雪 (2531)

渔业复垦塌陷地抗生素抗性基因与微生物群落 程森, 路平, 冯启言 (2541)

3 种常用除草剂对细菌抗生素耐药性的影响 李曦, 廖汉鹏, 崔鹏, 白玉丹, 刘晨, 刘畅, 周顺桂 (2550)

污水再生利用微生物控制标准及其制定方法探讨 陈卓, 崔琦, 曹可凡, 陆韻, 巫寅虎, 胡洪营 (2558)

《环境科学》征订启事 (2439) 《环境科学》征稿简则 (2479) 信息 (2152, 2231, 2286)

川南山区土壤与农作物重金属特征及成因

韩伟^{1,2,3}, 王成文^{1,2,3}, 彭敏^{1,2,3}, 王乔林^{1,2,3*}, 杨帆^{1,2,3}, 徐仁廷^{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: 土壤及农作物中的重金属超标会影响人类生存环境和身体健康, 为研究重金属在川南山区土壤与农作物中的富集特征及成因, 以四川省南部山区的沐川县北部为研究区, 采集了耕作土壤样品 1699 件, 水稻籽实样品 30 件, 玉米籽实样品 31 件, 茶叶样品 15 件, 对应农作物根系土壤样品 76 件, 应用数理统计、主成分分析、相关分析等技术, 研究土壤和农作物中重金属富集特征及成因、重金属在农作物与根系土的相关性。结果表明耕作土壤中重金属含量较高, 其算术均值高于全国土壤背景值, 且均存在超过风险筛选值采样点, 其中 Cd 超标点数达 770 个; 耕作土壤中重金属主要来源于地质背景, 其次受土壤中的有机质及酸碱度和人类活动的影响。农作物中重金属均低于国家标准, 农作物对重金属的富集系数总体表现为: 茶叶 > 水稻 > 玉米。通过相关分析表明, 土壤中重金属总体特征为含量高和活性低, 未对 3 种农作物的质量安全造成影响, 而土壤中 CaO、Fe₂O₃ 和 MgO 对玉米和水稻籽实中重金属含量有一定影响。

关键词: 土壤重金属; 农作物重金属; 地质背景; 富集系数; 川南山区

中图分类号: X171.5; X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)05-2480-10 DOI: 10.13227/j.hjkk.202008257

Characteristics and Origins of Heavy Metals in Soil and Crops in Mountain Area of Southern Sichuan

HAN Wei^{1,2,3}, WANG Cheng-wen^{1,2,3}, PENG Min^{1,2,3}, WANG Qiao-lin^{1,2,3*}, YANG Fan^{1,2,3}, XU Ren-ting^{1,2,3}

(1. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Science, 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 Science, Langfang 065000, China)

Abstract: Excessive heavy metals in soils and crops will affect the human living environment and health. In order to study the enrichment characteristics and causes of heavy metals in soils and crops in a mountainous area of southern Sichuan, 1699 cultivated soil samples, 30 rice seed samples, 31 corn seed samples, 15 tea samples, and 76 crop root soil samples were collected. The enrichment characteristics and origins of heavy metals in the soil were studied using mathematical statistics, principal component analysis, and correlation analysis. The enrichment characteristics of heavy metals in crops and their correlations with root soil were discussed. The results showed that the content of heavy metals in cultivated soil was higher than the national soil background value, and many sampling points exceeded the risk screening value. Among them, 770 points of Cd, 176 points of Cu, 116 points of Cr, and 106 points of Ni exceeded the standard. Combining the factor analysis results, it was found that Cd, Cr, Cu, Ni, and Zn in cultivated soil mainly originated from the geological background, and Cd was also affected by soil organic matter and pH. Meanwhile, Hg and Pb were mainly related to human activities. The results showed that the contents of heavy metals in the crops were lower than the national standards; the enrichment coefficients of heavy metals in crops were generally small, and were mainly in the following order: tea > rice > corn. The correlation analysis of the heavy metal contents in the root soil and crops showed that there was no significant correlation among them. Thus, the heavy metals in the soil generally had a high content and low activity, which did not affect the quality and safety of the three crops. However, Cu in corn and CaO in root soil, As in corn seed and Fe₂O₃ in root soil, and Ni in corn seed and Fe₂O₃ in root soil showed significant correlations, whereas As in rice seed and CaO in root soil and Hg in rice seed and MgO in root soil showed significant correlations, and no significant correlations were found in tea.

Key words: soil heavy metals; heavy metals in crops; geological background; enrichment coefficient; mountain area of South Sichuan

土壤是由裸露在地表的岩石矿物经自然及人为因素作用, 发生物理、化学及生物作用形成的产物, 主要由土壤固相(矿物质与有机质)、气相(空气)和液相(水)三相组成^[1], 是人类赖以生存与发展的最基础自然资源之一^[2], 是粮食生产的最重要的物质保障^[3]. 随着我国进入工业化和城镇化快速发展期, 土壤重金属污染现象开始出现, 据 2014 年由环境保护部和国土资源部发布的全国土壤污染状况调

查公报显示, 我国耕地土壤点位超标率达 19.4%, 以重金属无机污染物为主^[4]. 据资料显示, 我国每年因重金属污染而减产粮食 1 000 多万 t^[5]. 近年来, 很

收稿日期: 2020-08-26; 修订日期: 2020-10-13

基金项目: 自然资源部中国地质调查局地质调查项目(DD20190522); 全国土壤污染状况详查示范项目(121201108000168530)

作者简介: 韩伟(1985~), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为勘查地球化学及环境地球化学, E-mail: 331224192@qq.com

* 通信作者, E-mail: wangqiaolin@igge.cn

多学者对农田土壤和农作物的重金属污染问题进行了研究和探索,取得的丰硕成果为污染防治提供了理论基础和科学依据.有研究表明,土壤中重金属主要来源为人类活动和自然来源,人类活动是指在农业中农药和化肥的使用,工业废水和垃圾的排放等,而自然来源主要指岩石经物理、化学及生物作用形成土壤时对母岩的继承^[6-12].一般认为,土壤中的过量重金属不仅对农作物的生长有不利影响,还会通过根系在农作物体内富集,并且可以由食物链进入动物或人体内危害其健康^[13-16].因此,研究土壤及农作物中的重金属含量特征对保障人类身体健康与和谐的自然环境具有重要的现实意义.

目前不少研究仅注重于农田土壤中重金属的含量评价,忽视了农作物中重金属的含量特征,基于不同区域元素地球化学性质、土壤理化性质和地质背景等多重因素的差异化,重金属在不同作物系统中的富集特征也会显著不同,可能会造成土壤中重金属评价结果欠妥.本文以位于乌蒙山区的研究区为例,对其农田和作物中的重金属的富集特征和成因进行分析,评价其重金属污染状况,探讨农田土壤与农作物中重金属关系及规律,以期能为土壤和农作物重金属污染评价研究提供科学参考.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究区位于我国西南乌蒙山区,隶属于四川省沐川县,地处乐山与宜宾、凉山的结合部,距县城 55 km,交通较为便捷.地貌主要为低山、低中山为主.研究区属亚热带湿润季风气候,具雨水多、湿度大、日照少的特殊气候特点.土壤类型主要为水稻土、黄壤、紫色土和石灰岩土,土地利用类型以林地、旱地和水田为主,其中旱地占研究区农田面积 72.48%,水田占 26.80%,茶园和果园合计占比不足 1%.地块破碎,多山间梯田,平原少,种植玉米、水稻和茶叶等农作物.区内工业不发达,以种植业为主.在地质构造上,位于扬子准地台四川台坳川中台拱西南缘的弧形褶皱带.地层主要为峨眉山玄武岩($P_2\beta$),岩性为灰绿色致密及杏仁状玄武岩、夹砂泥岩、煤线及硅质岩;铜街子及飞仙关组(T_1f+t),岩性为砂岩、泥岩、页岩和灰岩;嘉陵江组(T_1j),岩性为泥质灰岩,夹石膏层;垮洪洞及雷口坡组(T_2l-k),岩性为白云岩、灰岩、砂岩和页岩夹石膏层;香溪群(T_3-J_1x)时代为三叠纪至侏罗纪之间,岩性主要为砂岩和炭质页岩夹煤层;下沙溪庙组(J_2s^1),岩性为长石石英砂岩、粉砂岩和钙质泥岩,

具底砾岩;自流井组(J_2z),岩性为泥岩、石英砂岩,夹生物屑灰岩和泥灰岩.有学者认为,在西南山区地形条件下,富含重金属的碳酸盐岩和黑色岩系等母岩风化成土壤后,在接受自然风化输入的同时,还受到了农业耕作及矿产开发等人为扰动,属于典型的自然过程与人为活动交互影响的区域^[15],由此来看,研究区土壤中重金属易于富集,可能具有较高的污染风险.

1.2 样品采集与分析

1.2.1 样品采集

结合前期工作基础和研究区农业种植结构,较系统地采集了研究区内的耕作土壤、大宗种植农作物及对应的根系土壤,其中大宗农作物为水稻、玉米和茶叶.

本次工作耕作土壤样品均采集于农田中,主要为旱地和水田.样品重量 1 kg,采样深度为 0~20 cm,为增加样品代表性,由同一地块的 4 个子样等量混合组成 1 件样品,同时记录采样坐标、土壤颜色、土壤结构、土壤类型、成土母质、农作物种类及长势.水稻和玉米样品采集于收获盛期,选择无风晴天,在采样地块内选取多个植株,等量采集籽实,混匀组成 1 件混合样品,避开病虫害和其他特殊的植株.茶叶样品在同一地块内随机选取多棵植株,每株采集上、中、下多个部位的叶片混合成 1 件样品.共采集耕作土壤样品 1 699 件,水稻籽实样品 30 件,玉米籽实样品 31 件,茶叶样品 15 件,对应根系土壤样品 76 件(图 1).

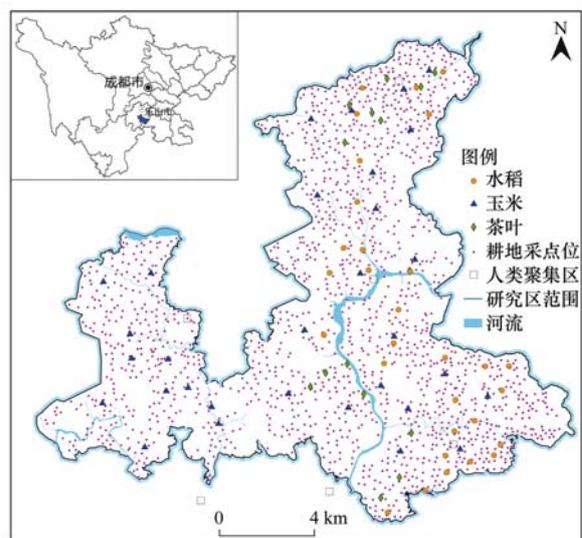


图 1 研究区地理位置及采样点位示意

Fig. 1 Geographic location and sampling sites of the study area

1.2.2 样品分析测试

所有样品分析测试均由自然资源部成都矿产资源监督检测中心完成,耕作土壤及根系土壤样

品分析指标为 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn、pH 和有机质等指标,农作物样品分析指标为 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 和无机砷. 土壤样品先加工处理至 -20 目,取 50g 装袋直接用于 pH 值分析,其余样品烘干、混匀后,粉碎至 -200 目,取 100 g 用于分析测试. 作物样品利用去离子水洗净、烘干后,用无污染粉碎机粉碎至 60 目,取 0.5

g 于干净的微波消解仪内罐,加入适量 $\text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{O}_2$ 进行消解,消解完成后加入适量 HClO_4 ,于电热板上加热溶样后待测试. 样品分析及检出限见表 1.

本研究分析测试工作方法、重复分析质量、分析准确度及精确度均按文献[17,18]的要求执行,样品分析结果合格率为 100%,结果可靠.

表 1 各项指标分析及检出限¹⁾

Table 1 Analysis method and detection limit of target elements

样品介质	指标	方法	检出限	样品介质	指标	方法	检出限
土壤	As	AFS	0.5	农作物	As	ICP-MS	0.01
	Cd	ICP-MS	0.03		Cd	ICP-MS	0.000 2
	Cr	XRF	2.5		Cr	ICP-MS	0.005
	Cu	XRF	1		Cu	ICP-MS	0.005
	Hg	AFS	0.000 5		Hg	ICP-MS	0.000 5
	Ni	XRF	1.5		Ni	ICP-MS	0.05
	Pb	XRF	2		Pb	ICP-MS	0.005
	Zn	XRF	4		Zn	ICP-MS	0.05
	pH	ISE	0.1		无机砷	AFS	0.01
	有机质	VOL	0.02				

1) 有机质的单位为质量分数($\times 10^{-2}$),pH 为无量纲,其他元素单位为 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; AFS 表示原子荧光光谱法; ICP-MS 表示等离子体质谱法; XRF 表示 X 射线荧光光谱法; VOL 表示容量法; ISE 表示离子选择性电极法

1.3 数据统计分析

考虑到土壤酸碱度会影响重金属元素的生物有效性,即当土壤 $\text{pH} < 7$ 时,会促进土壤中某些碳酸盐和氢氧化物等形式存在的重金属元素溶解,提高其生物有效性^[19-23],故本研究中土壤重金属采用《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)^[24] 给出的风险筛选值和管控值进行评价,评价原则为:当土壤中重金属含量等于或低于筛选值时,认为对农产品质量安全、农作物生长或土壤环境无风险;超过筛选值和低于管控值的,认为对农产品质量安全、农作物生长或土壤环境可能存在风险,采取必要措施后风险可控;当土壤中污染物超过管控值的,认为污染风险高. 土壤重金属风险评价时,结合耕地分布,以划分的最小空间单位(图斑)为评价单元,当评价单元中有 1 个数据时,该实测数据即为该评价单元的数据;当评价单元中有 2 个以上的实测数据时,用实测数据的算术平均值对评价单元进行赋值;当单元中没有实测数据时,用距离加权反比插值法使每个评价单元获得相应的评价数据.

数据结果采用 SPSS 和 Excel 软件进行处理统计分析,土壤环境评价由 ArcGIS 10.2.2、土地质量地球化学调查与评价数据管理与维护(应用)子系统完成.

2 结果与讨论

2.1 土壤重金属含量特征与评价

经统计,研究区耕作土壤 pH 值范围为 3.77 ~

8.4,均值为 4.80,其中强酸性($\text{pH} < 5.0$)土壤点位占 49.09%,酸性($5.0 \leq \text{pH} < 6.5$)土壤点位占 32.96%,中性($6.5 \leq \text{pH} < 7.5$)土壤点位占 6.24%,碱性($7.5 \leq \text{pH} < 8.5$)土壤点位占 11.71%,由此可知,研究区土壤主要以酸性土壤为主,碱性土壤较少. 研究区耕作土壤重金属元素含量由表 2 可见,土壤 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 的含量范围分别为 2.24 ~ 38.3、0.036 ~ 1.21、33.7 ~ 515、7.74 ~ 445、0.017 ~ 4.76、4.8 ~ 149、15.6 ~ 244 和 44 ~ 322 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 与全国土壤元素背景值^[25]对比可知,除 As 外,各重金属元素均呈不同程度地富集,其算术平均值均高于全国土壤背景值,其中 Cd 富集程度最高,是全国背景值的 3.39 倍,另外有机质含量亦呈高富集,为全国背景值的 9.32 倍,这可能与研究区大面积含煤线的地层相关. 研究区土壤重金属空间变异性主要为中高度变异,其中 Cu 和 Hg 的变异系数较高,分别为 1.03 和 1.50,表明其离散程度较高,可能受人为活动或地质条件所致.

通过对耕作土壤重金属进行评价发现(见表 3),Hg 元素有 2 个点超出管控值,属于高风险,后经核实,此 2 点位于人口聚居区边缘,受人类活动影响较大,初步判断为人为活动污染所致,且涉及地块已改种毛竹. 其余重金属元素均有超出筛选值,超标点数由大到小为 Cd(770) > Cu(176) > Cr(116) > Ni(106) > As(19) > Zn(4) > Pb(2),可以看出,Cd 为研究区主要污染元素,且易于被农产品吸收,可能会对研究区农产品安全造成威胁. Cu 的超标率为

10.36%, 为次要污染元素, 需引起一定重视. 其余元素超标率较低, 均不超过 7%, 可以认为安全风险较低. 从图 2 和图 3 可以看出, Cd 超标点主要分布于灰岩、玄武岩和含煤层的炭质页岩地层区, 即二叠系峨眉山玄武岩、三叠系铜街子及飞仙关组、三叠系嘉陵江组、三叠系垮洪洞组及雷口坡组; Cu 和 Ni 超

标点主要位于峨眉山玄武岩及三叠系铜街子及飞仙关组成土母岩区, 岩性为玄武岩及灰岩; Cr 超标点主要分布于三叠系铜街子及飞仙关组成土母岩区, 岩性主要为灰岩. 故从重金属高含量分布情况可以看出, 研究区耕作土壤中重金属可能来源于成土母岩.

表 2 研究区耕作土壤元素含量统计值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Table 2 Statistics of elements in cultivated soil in the study area/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

项目	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
最大值	38.3	1.21	515	445	4.76	149	244	322
最小值	2.24	0.036	33.7	7.74	0.017	4.8	15.6	44
平均值	11.2	0.329	94.6	38.7	0.105	34.3	35.9	94.1
中位值	9.95	0.313	82.9	28.7	0.094	30.9	35.5	93.7
标准离差	5.12	0.132	54.7	39.7	0.158	15.8	8.47	20.5
变异系数/%	45.5	40.1	57.8	103	150	45.9	23.6	21.8
中国土壤背景值	11.2	0.097	61.0	22.6	0.065	26.9	26	74.2

表 3 研究区土壤重金属超标点数统计¹⁾

Table 3 Statistics of the number of samples in excess of the heavy metal standards in soil in the study area

项目	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
无风险	1 680	929	1 583	1 523	1 697	1 593	1 697	1 695
风险可控	19	770	116	176	0	106	2	4
风险高	0	0	0	—	2	—	0	—

1) “—”表示无该指标标准点数

2.2 土壤重金属富集成因探讨

为进一步分析重金属来源, 对耕地土壤重金属元素、Se、pH 和有机质进行了因子分析, 经 KMO (0.658) 和 Bartlett 球性检验 (Sig. = 0.000) 数据适合做因子分析, 提取方法为主成分法, 将指标值分为 4 个主成分, 累积总方差解释 76.8% (表 4).

第一主成分 (F1) 解释总方差的 31.24%, 与 Cr、Cu、Ni 和 Zn 显著相关, 与 Cd 亦较相关, F1 主要由亲铜和铁族元素组成, 前人研究认为, 黑色岩系是含有机碳及硫化物 (铁硫化物为主) 较多的深灰-黑色的硅岩、碳酸盐岩、泥质岩 (含层凝灰岩) 及其变质岩石的组合体系^[26], 且西南地区碳酸盐岩较富含 Cd^[15], 故 F1 在一定程度上指示了地质背景的特征, 反映了土壤对成土母岩的继承.

第二主成分 (F2) 解释总方差的 21.86%, 主要与有机质和 Se 显著相关, 与 Pb、Zn 和 Cd 较相关, 表征土壤中 Se、Pb、Zn 和 Cd 受有机质的吸附作用影响, 已有研究表明, 腐殖酸 (HAs) 是天然有机质的主要成分, 广泛分布于自然环境, 对土壤重金属的迁移转化和生物有效性具有重要影响, 施用含腐殖酸 (HAs) 的各类有机物料是调控土壤重金属有效性的简易且有效措施之一^[27]. 第三主成分 (F3) 解释总方差 13.61%, 主要与 pH、As 和 Cd 显著相关, 表明研究区酸碱度对土壤中 As 和 Cd 含量有一定控制

作用^[28]. 第四主成分 (F4) 解释总方差 10.04%, 与 Hg 和 Pb 显著相关, 结合其空间分布, 该主成分表征的应为人类活动对土壤的影响.

综上可知, 研究区耕作土壤中 Cr、Cu、Ni 和 Zn 主要来源于地质背景, 是对成土母岩的继承; 而 Cd 除来源于地质背景外, 还主要受土壤中的有机质及酸碱度的影响, 使其在土壤中富集; Hg 和 Pb 的富集主要受到人类活动的影响.

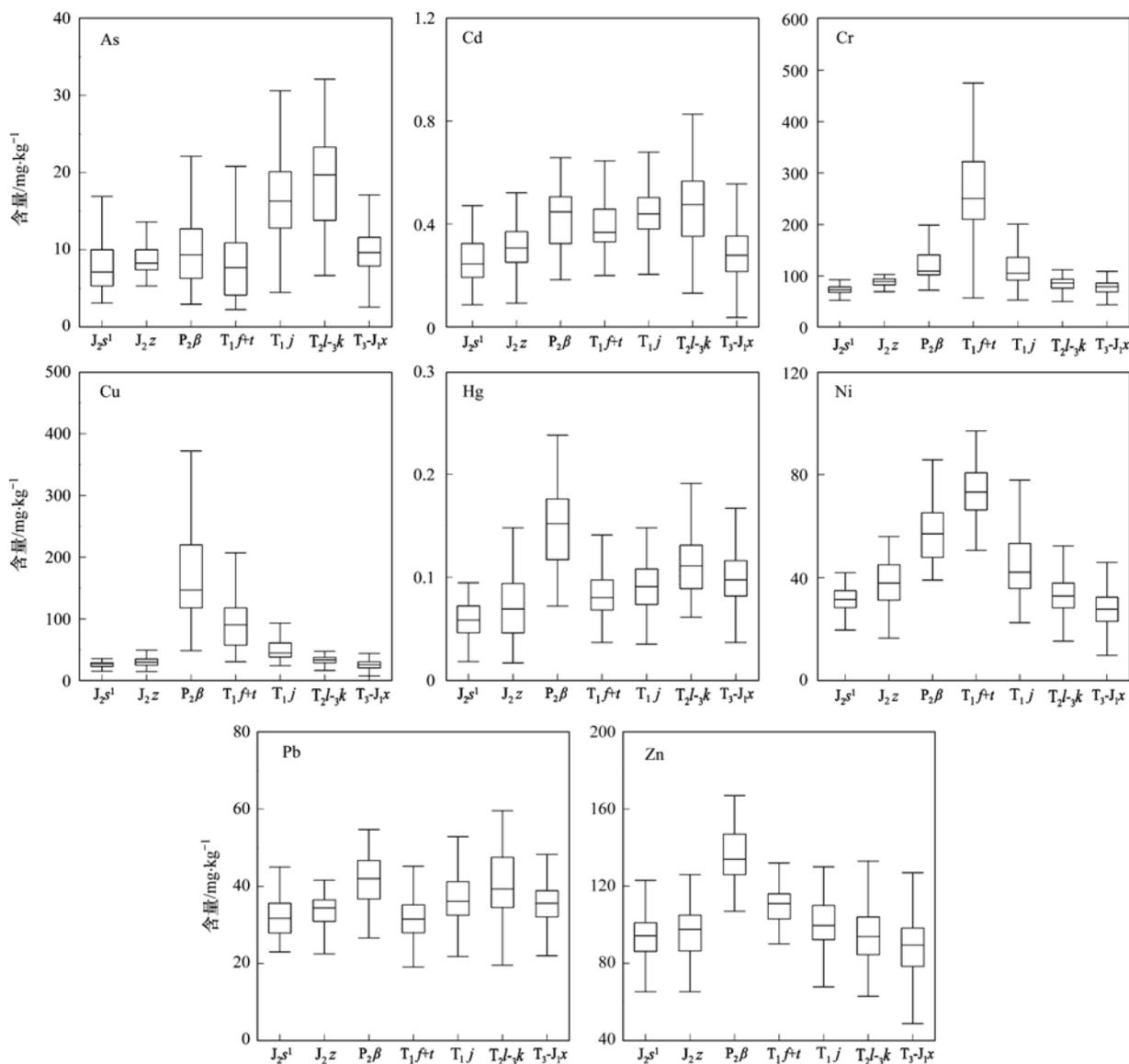
表 4 耕地土壤指标主成分分析

Table 4 Principal component analysis for target elements in soil in the study area

指标	主成分			
	F1	F2	F3	F4
As	-0.086	0.136	0.798	0.221
Cd	0.364	0.344	0.723	0.049
Cr	0.849	-0.202	-0.019	-0.046
Cu	0.771	0.114	0.001	0.075
Hg	0.010	-0.021	-0.021	0.929
Ni	0.934	-0.075	0.146	-0.018
Pb	0.094	0.474	0.302	0.668
Zn	0.657	0.415	0.251	0.095
Se	-0.162	0.874	0.145	0.160
SOM	0.108	0.874	-0.047	-0.002
pH	0.098	-0.152	0.847	-0.087
方差/%	31.24	21.86	13.61	10.04
累积方差/%	31.24	53.10	66.71	76.75

2.3 农作物重金属含量及富集特征

研究区所采集的农作物测试指标含量数据特征



J₂s¹: 侏罗系下沙溪庙组; J₂z: 侏罗系自流井组; P₂β: 二叠系峨眉山玄武岩; T₁f+t: 三叠系铜街子及飞仙关组;
T₁j: 三叠系嘉陵江组; T₂l₃k: 三叠系垮洪洞组及雷口坡组; T₃-J₁x: 香溪群

图 2 不同成土母岩土壤中重金属含量箱式图

Fig. 2 Box-chart of heavy metals in soil of different parent rocks

见表5, 据我国食品中污染物限量^[29]和茶叶中Cr、Cd、Hg、As及氟化物限量^[30], 各农作物重金属含量

表 5 研究区农作物元素含量统计值/mg·kg⁻¹

Table 5 Statistics of elements in crops in the study area/mg·kg⁻¹

作物种类	指标	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	Se	无机砷
水稻 (n=30)	最大值	0.232	0.079	0.15	4.321	0.013	0.424	0.105	108	0.088	0.172
	最小值	0.084	0.005	0.031	0.996	0.001	0.116	0.013	14.4	0.033	0.064
	平均值	0.158	0.027	0.091	1.826	0.004	0.184	0.036	28.5	0.055	0.113
	国家限量标准	— ¹⁾	0.2	1	—	0.02	—	0.2	—	—	0.2
玉米 (n=31)	最大值	0.029	0.011	0.093	4.17	0.01	0.887	0.143	29.8	0.061	0.024
	最小值	0.015	0.003	0.066	0.958	0.001	0.112	0.018	14.7	0.021	0.011
	平均值	0.019	0.007	0.078	2.59	0.002	0.322	0.058	22.3	0.037	0.015
	国家限量标准	0.5	0.1	1	—	0.02	—	0.2	—	—	—
茶叶 (n=15)	最大值	0.067	0.085	0.383	15.4	0.009	12.8	0.426	33.4	0.109	0.054
	最小值	0.024	0.016	0.135	8.46	0.003	6.03	0.112	16.8	0.052	0.014
	平均值	0.043	0.046	0.239	11.1	0.005	8.39	0.24	23.3	0.068	0.033
	国家限量标准	2	1	5	—	0.3	—	5	—	—	—

1) “—”表示暂无相关标准

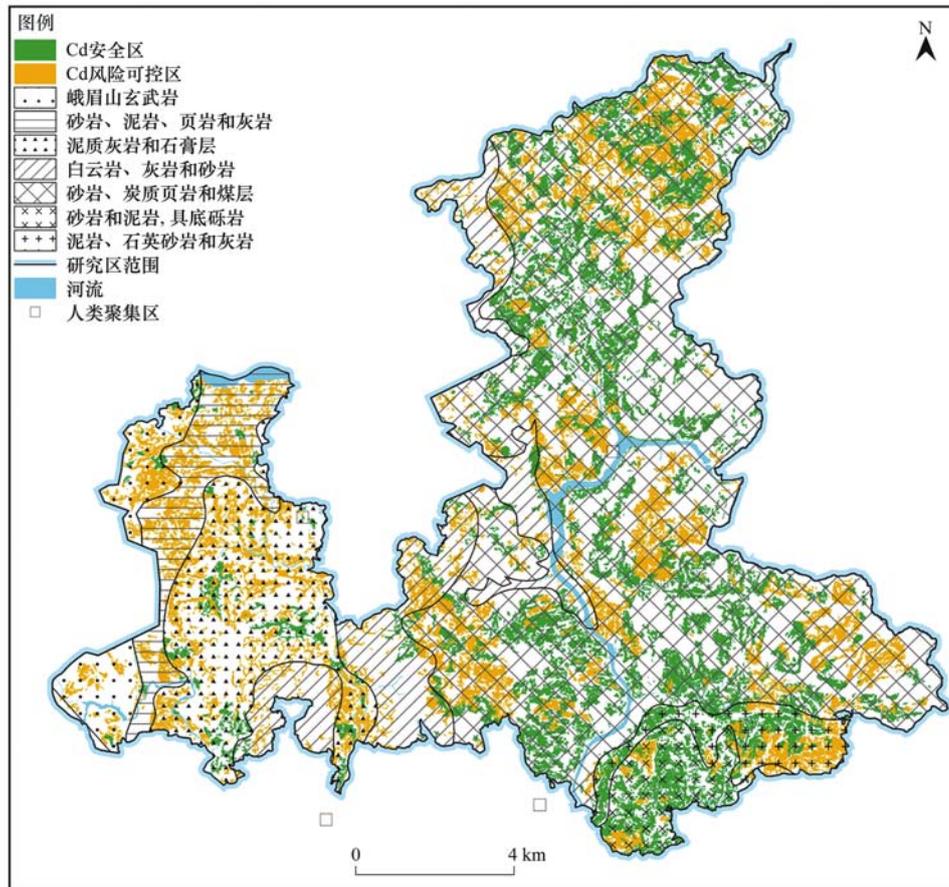


图3 研究区 Cd 污染风险评价与地层空间关系

Fig. 3 Spatial relationship between the Cd pollution assessment and stratum in the study area

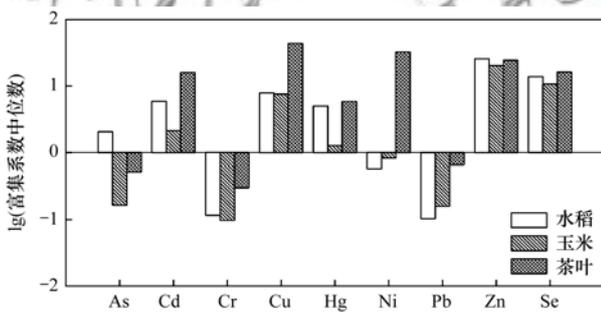


图4 不同农作物中元素富集系数

Fig. 4 Bioconcentration factors of elements in different crops

最大值均低于国家标准值。除此之外，部分水稻样品中 Se 含量均值已达到富硒水稻标准，经统计，30 件水稻样品中有 27 件 Se 含量达到富硒标准，富硒率为 90%。表明研究区土壤中重金属污染基本未对 3 种大宗农作物的质量安全造成影响，并且具有开发富硒水稻产业的潜力。可以看出，若仅以表层土壤中重金属含量进行污染划分，可能会出现土地资源浪费现象。

生物富集系数 (bioconcentration factors, BCF) 是表征化学物质被生物浓缩或富集于体内程度的指标，能够反映生态系统中的生物要素和元素对生物

富集作用的影响^[31,32]，其计算方法为： $BCF = \text{作物中元素含量} / \text{对应根系土中的元素含量} \times 100\%$ 。为探究研究区元素在土壤-作物间的迁移转换特征，统计了研究区农作物的富集系数，由表 6 和图 4 中看出，各类农作物对不同的元素富集程度差异明显，但总体富集系数较小，均未超 100%。水稻样品中，富集系数较高的元素为 Zn、Se、Cu、Cd 和 Hg，其中位数均超 5%，Cr、Ni 和 Pb 则较低，不足 1%，变异系数 Cd 和 Zn 较大，均超 50%，表明离散程度高，其余元素则较为均匀分布，这与南宁市的水稻样品较为一致^[33]；玉米样品中，富集系数较高的元素为 Zn、Se 和 Cu，其中位数均超 7%，Cr、Ni 和 Pb 则较低，不足 0.9%，变异系数较大的为 Hg、Cu 和 Ni，表明离散程度高，其余元素则较为均匀分布；茶叶样品中富集系数较高的元素为 Cu、Ni、Zn、Se 和 Cd，其中位数均超 10%，As、Cr 和 Pb 则较低，不足 0.7%，变异系数较大的为 Cd、Hg、Pb 和 Se，表明离散程度高，其余元素则均未超 50%，分布较为均匀。总体来看，茶叶样品对重金属富集较为明显，水稻次之，玉米则富集程度最小。

2.4 土壤重金属对农作物的影响

通过对根系土与农作物中重金属含量进行相关

分析, Spearman 相关系数显示, 同一种重金属元素在根系土和农作物中含量之间无显著相关性(图 5), 表明根系土中重金属含量不是农作物中重金属含量变化的主要因素. 有研究表明, 土壤中重金属不同赋存形态是植物体内重金属含量的影响因素之一, 一般认为, 土壤中重金属有 7 种赋存形态, 水溶

态、离子交换态和碳酸盐岩结合态易被植物吸收利用; 铁锰氧化物结合态、腐殖酸结合态和强有机结合态在强酸介质中能够被植物利用; 残渣态则存在于矿物晶格中, 难以被植物吸收^[34~38]. 调查区内土壤酸碱度主要呈酸性-强酸性, 重金属则表现出高含量, 而各类农作物中重金属含量低, 可能由于土壤中

表 6 研究区农作物富集系数统计值/%

Table 6 Statistics of BCF in the study area/%

作物种类	元素	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	Se
水稻 (n=30)	最大值	3.93	41.18	0.23	20.48	13.35	1.42	0.32	95.48	35.95
	最小值	1.26	1.37	0.04	3.86	0.98	0.29	0.03	14.97	7.35
	中位数	2.05	5.89	0.12	7.86	5.01	0.58	0.10	25.78	13.79
	标准离差	0.68	8.56	0.06	4.25	2.37	0.27	0.06	16.46	4.97
	变异系数	32	97	47	46	47	40	49	52	34
玉米 (n=31)	最大值	0.40	3.48	0.23	20.47	13.43	2.83	0.44	30.80	23.50
	最小值	0.05	0.83	0.02	0.86	0.37	0.24	0.06	15.47	4.92
	中位数	0.16	2.12	0.10	7.57	1.27	0.82	0.16	20.30	10.70
	标准离差	0.08	0.72	0.04	4.27	2.34	0.60	0.08	4.37	3.93
	变异系数	44	36	43	53	1.22	60	43	20	36
茶叶 (n=15)	最大值	0.89	68.65	0.51	90.73	19.86	42.24	2.07	52.46	48.02
	最小值	0.27	5.13	0.17	26.35	3.29	21.58	0.31	18.96	11.11
	中位数	0.52	15.93	0.30	43.69	5.85	32.49	0.66	24.42	16.22
	标准离差	0.17	18.80	0.10	18.21	4.72	6.49	0.46	8.26	10.68
	变异系数	31	83	30	38	66	20	58	31	52

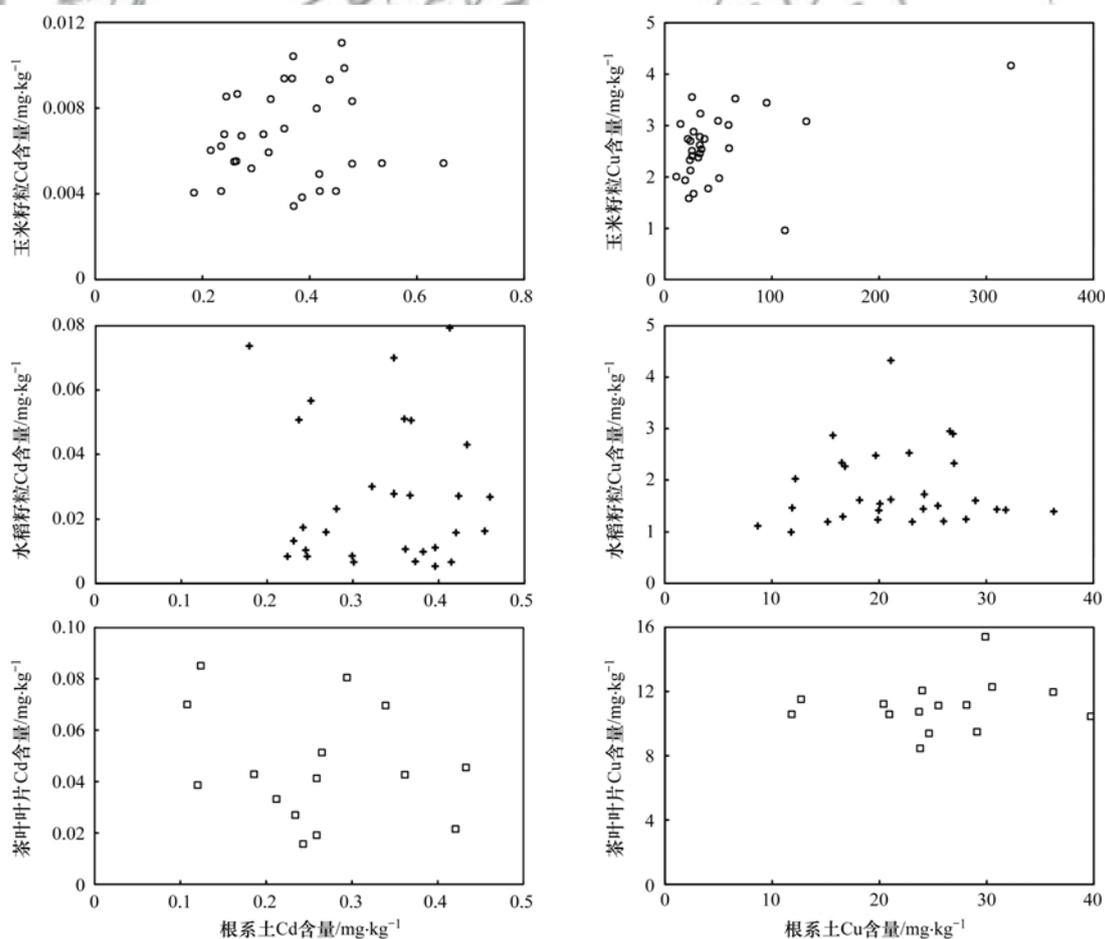


图 5 农作物与根系土重金属含量关系

Fig. 5 Relationships between the heavy metals in soil and crops

重金属多以残渣态形式存在,农作物无法对其进行吸收利用,从而出现农作物中重金属含量较低,这与马宏宏等^[38]对广西碳酸盐岩区农田土壤及农作物重金属的研究结果相似。

前人的研究表明,土壤中某些矿质营养元素会影响作物对重金属的吸收和富集,介质中较高含量的必需元素(如 Ca、Fe 和 Mg)能够显著降低作物对重金属的吸收速率,而当介质中缺乏这些矿质营养元素时,有些重金属由于具有与之相似的水合半径等物化性质,会通过 Ca 等矿质养分元素的载体蛋白被主动运输进入细胞内^[39,40]。对根系土中常量氧化物(K_2O 、 MgO 、 Na_2O 、 CaO 、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3)和农作物

中重金属的相关分析结果(图 6)显示:茶叶中重金属含量与根系土中常量氧化物均无显著相关性;玉米籽实 Cu 与根系土 CaO(在 0.05 置信水平,相关系数为 0.393)、玉米籽实 As 与根系土 Fe_2O_3 (在 0.05 置信水平,相关系数为 -0.383)、玉米籽实 Ni 与根系土 Fe_2O_3 (在 0.05 置信水平,相关系数为 -0.359)有显著相关性,其他均无显著相关;水稻籽实中只有 As 与根系土 CaO(在 0.01 置信水平,相关系数为 -0.531)、Hg 与根系土 MgO (在 0.05 置信水平,相关系数为 -0.372)存在显著相关性。可以看出,玉米籽实和水稻籽实中部分重金属含量受到土壤中常量氧化物影响,而茶叶则基本不受其影响。

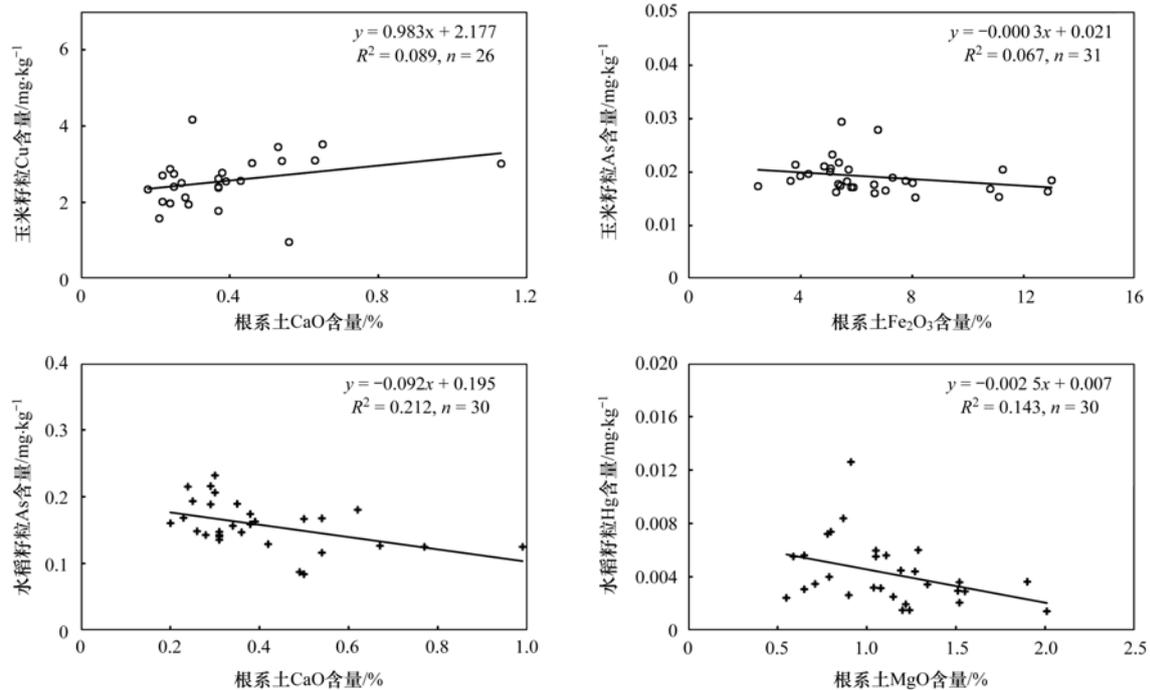


图 6 农作物重金属与根系土常量氧化物关系

Fig. 6 Relationships between the heavy metals in crops and oxides in soil

3 结论

(1) 研究区内耕作土壤酸碱度以酸性-强酸性为主,各重金属相对于全国背景值均呈不同程度地富集,土壤重金属污染风险主要来自于 Cd、Cu、Cr 和 Ni,超标率分别为 45.32%、10.36%、6.83% 和 6.24%,其他重金属污染风险较低。

(2) 研究区耕作土壤中 Cr、Cu、Ni 和 Zn 主要来源于地质背景; Cd 除来源于地质背景外,还主要受土壤中的有机质及酸碱度的影响,使其在土壤中富集; Hg 和 Pb 来源受到人类活动的影响; As 的富集主要受控于土壤酸碱度。

(3) 与耕作土壤比较,农作物中重金属均未超标;从富集系数来看,3 类农作物对不同的元素富集程度差异明显,与水稻和玉米相比,茶叶样品对重

金属富集较为明显,但总体来看富集系数较小,不足以对农作物质量安全造成影响。

(4) 结合前人研究,研究区土壤中重金属总体特征为含量高和活性低,基本未对 3 种大宗农作物的质量安全造成影响,可以认为土壤中重金属含量不是农作物中重金属含量变化的主要因素。通过相关分析表明,土壤中常量氧化物 CaO、 Fe_2O_3 和 MgO 对玉米和水稻籽实中重金属含量有一定影响。因此,在开展农田土壤重金属评价工作时,有必要同时对农作物中重金属含量进行评价,以确定合理的土壤重金属污染阈值,从而安全、科学地提高农田利用效率。

参考文献:

- [1] 黄昌勇,徐建明. 土壤学[M]. (第三版). 北京:中国农业出版社,2010.
- [2] Jallad K N. Heavy metal exposure from ingesting rice and its related potential hazardous health risks to humans [J].

- Environmental Science and Pollution Research, 2015, **22**(20): 15449-15458.
- [3] 徐建明, 孟俊, 刘杏梅, 等. 我国农田土壤重金属污染防治与粮食安全保障[J]. 中国科学院院刊, 2018, **33**(2): 153-159.
Xu J M, Meng J, Liu X M, *et al.* Control of heavy metal pollution in farmland of China in terms of food security [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2018, **33**(2): 153-159.
- [4] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报 [EB/OL]. http://www.gov.cn/foot/2014-04/17/content_2661768.htm, 2014-04-17.
- [5] 高翔云, 汤志云, 李建和, 等. 国内土壤环境污染现状与防治措施[J]. 环境保护, 2006, (4): 50-53.
Gao X Y, Tang Z Y, Li J H, *et al.* Current situation of soil environmental pollution and countermeasures of prevention and control in China[J]. Environmental Protection, 2006, (4): 50-53.
- [6] 吕悦风, 孙华. 浙江某县域耕地土壤重金属空间分异特征、污染评价及来源分析[J]. 农业环境科学学报, 2019, **38**(1): 95-102.
Lv Y F, Sun H. Spatial differentiation characteristics, pollution evaluation, and source analysis of heavy metals in farmland soil in a county in northern Zhejiang Province, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, **38**(1): 95-102.
- [7] 周旭, 吕建树. 山东省广饶县土壤重金属来源、分布及生态风险[J]. 地理研究, 2019, **38**(2): 414-426.
Zhou X, Lv J S. Sources, distribution and ecological risk of soil heavy metals in Guangrao county, Shandong province [J]. Geographical Research, 2019, **38**(2): 414-426.
- [8] 李伟迪, 崔霞霞, 曾撑撑, 等. 太滹运河流域农田土壤重金属污染特征与来源解析[J]. 环境科学, 2019, **40**(11): 5073-5081.
Li W D, Cui Y X, Zeng C C, *et al.* Pollution characteristics and source analysis of heavy metals in farmland soils in the Taige canal valley[J]. Environmental Science, 2019, **40**(11): 5073-5081.
- [9] 陈文轩, 李茜, 王珍, 等. 中国农田土壤重金属空间分布特征及污染评价[J]. 环境科学, 2020, **41**(6): 2822-2833.
Chen W X, Li Q, Wang Z, *et al.* Spatial distribution characteristics and pollution evaluation of heavy metals in arable land soil of China[J]. Environmental Science, 2020, **41**(6): 2822-2833.
- [10] 徐金英, 郑利林, 徐力刚, 等. 南方丘陵区河流表层沉积物重金属污染评价[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(8): 3420-3429.
Xu J Y, Zheng L L, Xu L G, *et al.* Ecological risk assessment and source analysis of heavy metals in surface sediments of rivers located in the hilly area of southern China [J]. China Environmental Science, 2019, **39**(8): 3420-3429.
- [11] 赵东杰, 王学求. 滇黔桂岩溶区河漫滩土壤重金属含量、来源及潜在生态风险[J]. 中国环境科学, 2020, **40**(4): 1609-1619.
Zhao D J, Wang X Q. Distribution, sources and potential ecological risk of heavy metals in the floodplain soils of the karst area of Yunnan, Guizhou, Guangxi [J]. China Environmental Science, 2020, **40**(4): 1609-1619.
- [12] 唐启琳, 刘秀明, 刘方, 等. 贵州罗甸北部喀斯特地区耕地土壤镉含量特征与风险评价[J]. 环境科学, 2019, **40**(10): 4628-4636.
Tang Q L, Liu X M, Liu F, *et al.* Cd accumulation and risk assessment for arable soils in the Karst region of northern Luodian, Guizhou[J]. Environmental Science, 2019, **40**(10): 4628-4636.
- [13] 温晓华, 张琢, 何中发. 根系土中重金属元素分布特征及在农作物中的迁移[J]. 上海国土资源, 2012, **33**(2): 34-38.
Wen X H, Zhang Z, He Z F. The distribution of heavy metals in the rhizosphere and their migration in crops[J]. Shanghai Land & Resources, 2012, **33**(2): 34-38.
- [14] 王怡雯, 芮玉奎, 李中阳, 等. 冬小麦吸收重金属特征及与影响因素的定量关系[J]. 环境科学, 2020, **41**(3): 1482-1490.
Wang Y W, Rui Y K, Li Z Y, *et al.* Characteristics of heavy metal absorption by winter wheat and its quantitative relationship with influencing factors [J]. Environmental Science, 2020, **41**(3): 1482-1490.
- [15] 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.
- [16] 张晓薇, 刘博. 铬对农作物生长的影响[J]. 环境科技, 2010, **23**(2): 48-51.
Zhang X W, Liu B. Effect of chromium on crops growth [J]. Environmental Science and Technology, 2010, **23**(2): 48-51.
- [17] DZ/T 0258-2014, 多目标区域地球化学调查规范(1: 250 000) [S].
- [18] DD 2005-03, 生态地球化学评价样品分析技术要求(试行) [S].
- [19] 张婷, 刘爽, 宋玉梅, 等. 柘林湾海水养殖区底泥中重金属生物有效性及生态风险评价[J]. 环境科学学报, 2019, **39**(3): 706-715.
Zhang T, Liu S, Song Y M, *et al.* Bioavailability and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of marine aquaculture in Zhelin Bay [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, **39**(3): 706-715.
- [20] 郭超, 文字博, 杨忠芳, 等. 典型岩溶地质高背景土壤镉生物有效性及其控制因素研究[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2019, **55**(4): 678-687.
Guo C, Wen Y B, Yang Z F, *et al.* Factors controlling the bioavailability of soil cadmium in typical karst areas with high geogenic background [J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 2019, **55**(4): 678-687.
- [21] Shahid M, Dumat C, Khalid S, *et al.* Cadmium bioavailability, uptake, toxicity and detoxification in soil-plant system [J]. Reviews of Environmental Contamination and Toxicology, 2017, **241**: 73-137.
- [22] McBride M B. Cadmium uptake by crops estimated from soil total Cd and pH [J]. Soil Science, 2002, **167**(1): 62-67.
- [23] Spark K M, Wells J D, Johnson B B. Characterizing trace metal adsorption on kaolinite [J]. European Journal of Soil Science, 1995, **46**(4): 633-640.
- [24] GB 15618-2018, 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行) [S].
- [25] 魏复盛, 陈静生, 吴燕玉, 等. 中国土壤环境背景值研究 [J]. 环境科学, 1991, **12**(4): 12-19.
- [26] Wei F S, Chen J S, Wu Y Y, *et al.* Study on the background contents on 61 elements of soils in China [J]. Environmental Science, 1991, **12**(4): 12-19.
- [26] 范德廉, 张焘, 叶杰, 等. 中国的黑色岩系及其有关矿床

- [M]. 北京: 科学出版社, 2004. 17-40.
- [27] 罗梅, 柏宏成, 陈亭悦, 等. 腐殖酸对土壤铅镉吸附、赋存形态及生物可给性的影响[J]. 中国环境科学, 2020, **40**(3): 1191-1202.
Luo M, Bai H C, Chen T Y, *et al.* Effects of humic acids on the adsorption, chemical speciation, and bioaccessibility of soil lead and cadmium[J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(3): 1191-1202.
- [28] 杨秀敏, 任广荫, 李立新, 等. 土壤 pH 值对重金属形态的影响及其相关性研究[J]. 中国矿业, 2017, **26**(6): 79-83.
Yang X M, Ren G M, Li L X, *et al.* Effect of pH value on heavy metals form of soil and their relationship [J]. *China Mining Magazine*, 2017, **26**(6): 79-83.
- [29] GB 2762-2017, 食品安全国家标准 食品中污染物限量[S].
- [30] NY 659-2003, 茶叶中铬、镉、汞、砷及氟化物限量[S].
- [31] 陈怀满. 土壤中化学物质的行为与环境质量[M]. 北京: 科学出版社, 2002. 23-45.
- [32] Efronson R A, Sample B E, Suter II G W. Uptake of inorganic chemicals from soil by plant leaves: regressions of field data[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2001, **20**(11): 2561-2571.
- [33] 钟晓宇, 李方林, 李杰, 等. 南宁市典型耕地区水稻籽实微量元素生物富集差异分析[J]. 桂林理工大学学报, 2019, **39**(3): 706-712.
Zhong X Y, Li F L, Li J, *et al.* Difference analysis of bioconcentration of trace elements in rice seeds in typical cultivated areas of Nanning[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2019, **39**(3): 706-712.
- [34] Zhao K L, Liu X M, Zhang W W, *et al.* Spatial dependence and bioavailability of metal fractions in paddy fields on metal concentrations in rice grain at a regional scale[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2011, **11**(7): 1165-1177.
- [35] Kong X Y, Liu T, Yu Z H, *et al.* Heavy metal bioaccumulation in rice from a high geological background area in Guizhou Province, China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, **15**(10), doi: 10.3390/ijerph15102281.
- [36] Zhang J R, Li H Z, Zhou Y Z, *et al.* Bioavailability and soil-to-crop transfer of heavy metals in farmland soils: a case study in the Pearl River Delta, South China [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **235**: 710-719.
- [37] 蓝小龙, 宁增平, 肖青相, 等. 广西龙江沉积物重金属污染现状及生物有效性[J]. 环境科学, 2018, **39**(2): 748-757.
Lan X L, Ning Z P, Xiao Q X, *et al.* Spatial distribution, sources and bioavailability of heavy metals in the surface sediments of Longjiang river, southern China [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(2): 748-757.
- [38] 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.
- [39] Reeves P G, Chaney R L. Bioavailability as an issue in risk assessment and management of food cadmium: a review [J]. *Science of the Total Environment*, 2008, **398**(1-3): 13-19.
- [40] 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.

CONTENTS

Chemical Characteristics and Source Apportionment of Organic Aerosols in Atmospheric PM _{2.5} in Winter in Beijing	XU Nan, WANG Tian-tian, LI Xiao, <i>et al.</i> (2101)
Characteristics of Two Pollution Episodes Before and After City Heating in Beijing from February to March of 2019	YIN Xiao-mei, PU Wei-wei, WANG Ji-kang, <i>et al.</i> (2110)
Analysis of Characteristics and Causes of a Typical Haze Pollution in Beijing in the Winter of 2019	LIAN Han-yang, YANG Xin, ZHANG Pu, <i>et al.</i> (2121)
New Particle Formation Events in Summer and Winter in the Coastal Atmosphere in Qingdao, China	SUN Yue, ZHU Yu-jiao, MENG He, <i>et al.</i> (2133)
Characteristics of Heavy Metal Pollution and Ecological Risk Evaluation of Indoor Dust from Urban and Rural Areas in Taiyuan City During the Heating Season	HUANG Hao, XU Zi-qi, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (2143)
Concentration Analysis and Health Risk Assessment of Air Pollutants in Newly Decorated Public Places in Xi'an	FAN Jie, FAN Hao, SHEN Zhen-xing, <i>et al.</i> (2153)
Emission Concentration and Characteristics of Particulate Matter and Water-Soluble Ions in Exhaust Gas of Typical Combustion Sources with Ultra-Low Emission	HU Yue-qi, WANG Zheng, GUO Jian-hui, <i>et al.</i> (2159)
High-Throughput Sequencing Analysis of Microbial Communities in Summertime Atmospheric Particulate Matter in Hefei City	JIANG Shao-yi, SUN Bo-wen, DAI Hai-tao, <i>et al.</i> (2169)
Spatiotemporal Variations in Fine Particulate Matter and the Impact of Air Quality Control in Zhengzhou	DONG Zhe, YUAN Ming-hao, SU Fang-cheng, <i>et al.</i> (2179)
Characteristics of Ozone Pollution and Relationships with Meteorological Factors in Jiangxi Province	QIAN Yue, XU Bin, XIA Ling-jun, <i>et al.</i> (2190)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Aerosol Optical Properties in Urban Agglomerations on the North Slope of the Tianshan Mountains	ZHANG Zhe, DING Jian-li, WANG Jin-jie, <i>et al.</i> (2202)
Comprehensive Classification Method of Urban Water by Remote Sensing Based on High-Resolution Images	YANG Zi-qian, LIU Huai-qing, LÜ Heng, <i>et al.</i> (2213)
Construction and Application Optimization of the Chl-a Forecast Model ARIMA for Lake Taihu	LI Na, LI Yong, FENG Jia-cheng, <i>et al.</i> (2223)
Spatial Differences in Water Quality and Spatial Autocorrelation Analysis of Eutrophication in Songhua Lake	DING Yang, ZHAO Jin-yong, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2232)
Pollution and Irrigation Applicability of Surface Water from Wet, Normal, and Dry Periods in the Huixian Karst Wetland, China	ZHU Dan-ni, ZOU Sheng-zhang, LI Jun, <i>et al.</i> (2240)
Changes in Water Chemistry and Driving Factors in the Middle and Lower Reaches of the Beijing-Hangzhou Grand Canal	CHENG Zhong-hua, DENG Yi-xiang, ZHUO Xiao-ke, <i>et al.</i> (2251)
Effects of Different Land Use Practices on Nitrogen Loss from Runoff During Rainfall Events	LUO Yi-feng, CHEN Fang-xin, ZHOU Hao, <i>et al.</i> (2260)
Sources and Fate of Nitrate in Groundwater in a Typical Karst Basin: Insights from Carbon, Nitrogen, and Oxygen Isotopes	REN Kun, PAN Xiao-dong, LIANG Jia-peng, <i>et al.</i> (2268)
Changes in the Bacterioplankton Community Between "Ice" and "Water" in the Frozen Dali Lake	LI Wen-bao, YANG Xu, TIAN Ya-nan, <i>et al.</i> (2276)
Analysis of the Spatial Changes in Bacterial Communities in Urban Reclaimed Water Channel Sediments; A Case Study of the North Canal River	QIU Ying, JIN Yan, SU Zhen-hua, <i>et al.</i> (2287)
Spatial Differences and Influencing Factors of Denitrification and ANAMMOX Rates in Spring and Summer in Lake Taihu	ZHAO Feng, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (2296)
Structural Characteristics of Zooplankton and Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in a Typical Tributary Reservoir in the Three Gorges Reservoir Region	CHEN Sha, XIE Qing, FU Mei, <i>et al.</i> (2303)
Application of Iron and Sulfate-Modified Biochar in Phosphorus Removal from Water	SANG Qian-qian, WANG Fang-jun, ZHAO Yuan-tian, <i>et al.</i> (2313)
Analysis of the Performance and Mechanism of Phosphorus Removal in Water by Steel Slag	LUO Xiao, ZHANG Jun-bo, HE Lei, <i>et al.</i> (2324)
Adsorption of BS-18 Amphoterically Modified Bentonite to Tetracycline and Norfloxacin Combined Pollutants	WANG Xin-xin, MENG Zhao-fu, LIU Xin, <i>et al.</i> (2334)
Preparation of Ag ₃ PO ₄ /g-C ₃ N ₄ Composite Photocatalysts and Their Visible Light Photocatalytic Performance	GAO Chuang-chuang, LIU Hai-cheng, MENG Wu-shuang, <i>et al.</i> (2343)
Activation of Permonosulfate by Rhodamine B for BPA Degradation Under Visible Light Irradiation	ZHANG Yi-chen, BAI Xue, SHI Juan, <i>et al.</i> (2353)
Fe-Ti Co-Doped Alumina-Induced Surface Dual Reaction Center for Catalytic Ozonation to Remove Pollutants from Water	ZHANG Fan, SONG Yang, HU Chun, <i>et al.</i> (2360)
Preparation of Sulfidated Copper-Iron Bimetallic Compositing Material and Its Mechanism for Chromium Removal	QU Min, WANG Yuan, CHEN Hui-xia, <i>et al.</i> (2370)
Mechanisms of Penicillin Wastewater Treatment by Coupled Electrocatalytic and Bioelectrochemical Systems	QU You-peng, LÜ Jiang-wei, DONG Yue, <i>et al.</i> (2378)
Aerobic Granular Sludge Operation and Nutrient Removal Mechanism from Domestic Sewage in an Anaerobic/Aerobic Alternating Continuous Flow System	LI Dong, YANG Jing-wei, LI Yue, <i>et al.</i> (2385)
In-situ Phosphorus Removal Activity and Impact of the Organic Matter Concentration on Denitrifying Phosphorus Removal in Sludge Aggregates	LÜ Yong-tao, JIANG Xiao-tong, TU Yan, <i>et al.</i> (2396)
In-situ Sludge Reduction Technology Based on Ozonation	XUE Bing, LIU Bin-han, WEI Ting-ting, <i>et al.</i> (2402)
Effects of Activated Carbon on the Fate of Antibiotic Resistance Genes During Anaerobic Digestion of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste	MA Jia-ying, WANG Pan-liang, WANG Bing-han, <i>et al.</i> (2413)
Release Mechanisms of Carbon Source and Dissolved Organic Matter of Six Agricultural Wastes in the Initial Stage	LING Yu, YAN Guo-kai, WANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2422)
Spatial Differentiation of Soil Organic Carbon Density and Influencing Factors in Typical Croplands of China	LI Cheng, WANG Rang-hui, LI Zhao-zhe, <i>et al.</i> (2432)
Characteristics of Paddy Soil Organic Carbon Mineralization and Influencing Factors Under Different Water Conditions and Microbial Biomass Levels	LIU Qi, LI Yu-hong, LI Zhe, <i>et al.</i> (2440)
Analysis of Nitrogen Transformation Characteristics and Influencing Factors of Forestland Soil in the Qinghai-Tibet Plateau; A Case Study of the Qilian Mountains and Southeast Tibet	HE Fang, ZHANG Li-mei, SHEN Cong-cong, <i>et al.</i> (2449)
Using the Matter-Element Extension Model to Assess Heavy Metal Pollution in Topsoil in Parks in the Main District Park of Lanzhou City	HU Meng-jun, LI Chun-yan, LI Na-na, <i>et al.</i> (2457)
Effects of Long-Term Application of Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers on Heavy Metals and Their Availability in Reddish Paddy Soil	XIA Wen-jian, ZHANG Li-fang, LIU Zeng-bing, <i>et al.</i> (2469)
Characteristics and Origins of Heavy Metals in Soil and Crops in Mountain Area of Southern Sichuan	HAN Wei, WANG Cheng-wen, PNEG Min, <i>et al.</i> (2480)
Spatial Distribution Characteristics, Source Apportionment, and Risk Assessment of Topsoil PAHs in the Core Area of the Ningdong Energy and Chemical Industry Base	YANG Fan, LUO Hong-xue, ZHONG Yan-xia, <i>et al.</i> (2490)
Functional Stability and Applicability of Heavy Metal Passivators in Reducing Cd Uptake by Lettuce	PANG Fa-hu, WU Xue-jiao, KONG Xue-fei, <i>et al.</i> (2502)
Effects of Water Management on Cadmium Accumulation by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) Growing in Typical Paddy Soil	ZHANG Yu-ting, TIAN Ying-bing, HUANG Dao-you, <i>et al.</i> (2512)
Adsorption Properties of Oiltea Camellia Shell-Modified Biochar and Effects of Coupled Waterlogging on Soil Cd Morphology	CAI Tong, DU Hui-hui, LIU Xiao-li, <i>et al.</i> (2522)
Effects of Land Use Changes on Soil Fungal Community Structure and Function in the Riparian Wetland Along the Downstream of the Songhua River	XU Fei, ZHANG Tuo, HUAI Bao-dong, <i>et al.</i> (2531)
Distribution of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in a Fishery Reclamation Mining Subsidence Area	CHENG Sen, LU Ping, FENG Qi-yan (2541)
Effects of Three Commonly Used Herbicides on Bacterial Antibiotic Resistance	LI Xi, LIAO Han-peng, CUI Peng, <i>et al.</i> (2550)
Discussion of Microbial Control Standards of Water Reclamation and Formulation Methods	CHEN Zhuo, CUI Qi, CAO Ke-fan, <i>et al.</i> (2558)