

中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价

彭驰, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元, 张严



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年1月

第43卷 第1期
Vol.43 No.1

目次

中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价	彭驰, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元, 张严 (1)
植物生长调节剂在土壤中的环境行为综述	陈亮, 侯杰, 胡晓蕾, 张纪兆, 王浩达 (11)
基于铁泥的磁性水处理材料制备及应用进展	曾辉平, 翟龙雪, 李冬, 张杰 (26)
不同臭氧度量指标对我国人群总死亡影响的 Meta 分析	阮芳芳, 刘纪新, 陈芷薇, 曾贤刚 (37)
北京市海坨山冬季不同污染过程下气溶胶化学组分及其潜在来源分析	赵德龙, 王飞, 刘丹彤, 田平, 盛久江, 周崑, 肖伟, 杜远谋, 卢俐, 黄梦宇, 何晖, 丁德平 (46)
武汉冬季大气 PM _{2.5} 小时分辨率源贡献识别及潜在影响域分析	蒋书凝, 孔少飞, 郑煌, 曾昕, 陈楠, 祁士华 (61)
运城市 PM _{2.5} 时空分布特征和潜在源区季节分析	王姝涛, 张强, 温肖宇, 冀乃超, 赵文婷, 罗淑贞, 陈志, 翟程凯 (74)
中国东部冷锋推进中的 PM _{2.5} 三维结构变化特征	牟南南, 朱彬, 卢文 (85)
粤港澳大湾区大气中硝基多环芳烃污染特征与风险评估	李彦希, 谢丹平, 黎玉清, 金梦, 丁紫荣, 闫雅楠, 赵波 (93)
西南地区大型综合工业区和周边区域大气 VOCs 污染特征及健康风险评估	李陵, 张丹, 胡伟, 徐芹, 吴虹, 袁睿, 蒲茜, 郝宇杭, 唐志欣, 赖明敏 (102)
拉萨市挥发性有机物的组成特征、季节变化和来源解析	余家燕, 韩燕, 陈木兰, 张惠芳, 陈阳, 刘建国 (113)
杭州 COVID-19 期间大气 VOCs 体积分数变化特征	林旭, 严仁娣, 金嘉佳, 许凯儿, 何曦, 叶辉, 何纪平 (123)
上海城郊夏季大气 VOCs 在臭氧生成中的作用	金丹 (132)
铜川市秋冬季大气 VOCs 特征及其 O ₃ 和 SOA 形成潜势分析	易宵霄, 李姜豪, 李光华, 路珍珍, 孙智钢, 高健, 邓顺熙 (140)
电子垃圾拆解回收 VOCs 排放特征与排放因子	谢丹平, 黄忠辉, 刘旺, 聂鹏, 黄钟坤, 贺辉, 陈晓燕 (150)
不同传输通道下珠江三角洲臭氧与前体物非线性响应关系	伍永康, 陈伟华, 颜丰华, 毛敬英, 袁斌, 王伟文, 王雪梅 (160)
淄博市城郊臭氧污染特征及影响因素分析	王雨燕, 杨文, 王秀艳, 王帅, 白瑾丰, 程颖 (170)
昭通市周边扬尘重金属污染特征及健康风险	庞晓晨, 韩新宇, 史建武, 包宇斋, 宁平, 张朝能, 向峰 (180)
城市路面积尘微塑料污染特征	方芹, 牛司平, 陈予东, 于江华 (189)
塔里木河流域东部降水稳定同位素特征与水汽来源	宋洋, 王圣杰, 张明军, 石玉东 (199)
赤水河流域水体抗生素污染特征及风险评估	吴天宇, 李江, 杨爱江, 李彦澄, 陈瑀, 何强, 马凯, 胡霞, 王斌, 艾佳, 钟雄 (210)
无定河流域地表水地下水的水化学特征及控制因素	李书鉴, 韩晓, 王文辉, 李志 (220)
白洋淀府河影响区沉积物营养盐和重金属污染特征及风险评估	陈兴宏, 李立青, 张美一, 张伟军, 王东升, 王洪志 (230)
九龙江口红树林湿地表层沉积物中微塑料赋存特征与重金属的关系	刘倡君, 罗专溪, 闫钰, 林惠荣, 胡恭任, 于瑞莲 (239)
北京市北运河水系底栖动物群落与水环境驱动因子的关系及水生态健康评价	胡小红, 左德鹏, 刘波, 黄振芳, 徐宗学 (247)
城市河道再生水特征水质因子空间变异机制分析	刘全忠, 彭柯, 苏振华, 邸琰茗, 郭道宇 (256)
苏州景观河道表层沉积物间隙水-上覆水中 DOM 特性分析	李超男, 何杰, 朱学惠, 李学艳 (267)
苏州城区雨水管道沉积物典型污染物分布特征	叶蓉, 盛铭军, 姜永波, 武宇圣, 黄天寅 (277)
信号分子强化改性挂膜沸石持续抑制沉积物中氨氮释放	徐金兰, 许洋, 李修民, 国森, 刘成海 (285)
三峡水库调度对支流水体叶绿素 a 和环境因子垂向分布的影响	田盼, 李亚莉, 李莹杰, 李虹, 王丽婧, 宋林旭, 纪道斌, 赵星星 (295)
李家水库春季分层期 nirS 型反硝化菌群特征分析	梁伟光, 黄廷林, 张海涵, 杨尚业, 刘凯文, 李程遥, 温成成, 李伟涛, 蔡晓春 (306)
岗南水库沉积物好氧反硝化菌群落时空分布特征	张紫薇, 陈召莹, 张甜娜, 周石磊, 崔建升, 罗晓 (314)
宁夏地区地下水金属元素分布特征及健康风险评估	王晓东, 田伟, 张雪艳 (329)
快速城镇化三角洲地区高碘地下水赋存特征及驱动因素;以珠江三角洲为例	吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 周冰, 李备 (339)
长三角一体化示范区青浦区水环境中 22 种 PPCPs 的多介质分布特征及风险评估	张智博, 段艳平, 沈嘉豪, 俞文韬, 罗鹏程, 涂耀仁, 高峻 (349)
洞庭湖及入湖河流中 209 种多氯联苯同类物分布特征与风险评估	黄智峰, 郑丙辉, 尹大强, 崔婷婷, 赵兴茹 (363)
基于流量和溶存浓度的河流水系氧化亚氮释放量估算	李冰清, 胡敏鹏, 王铭烽, 张育福, 吴昊, 周佳, 吴铭彬, 戴之舟, 陈丁江 (369)
三峡库区万州段河流水-气界面 CO ₂ 通量支干流对比及影响机制初探	秦宇, 欧阳常悦, 王雨潇, 方鹏 (377)
功能化凹凸棒吸附材料的制备及其对重金属废水中 Pb ²⁺ 的吸附行为	廖晓峰, 钟静萍, 陈云嫩, 邱廷省, 任嗣利 (387)
铁氮共掺杂生物炭对二级水溶解性有机物的吸附特性与长效性评价	吴晨曦, 许路, 金鑫, 石烜, 金鹏康 (398)
沸石悬浮填料生物移动床的亚硝化特性	邓翠兰, 郭露, 汪晓军, 陈振国 (409)
温度对 ANAMMOX 生物膜工艺的脱氮影响与菌群结构分析	吴珊, 王淑雅, 王芬, 季民 (416)
填料对 ANAMMOX 污泥活性恢复的影响及菌群特征	罗景文, 杨津津, 李绍康, 赵昕宇, 杨一飞, 韩嘉琛, 李翔 (424)
基于 PMF 模型的宁南山区小流域土壤重金属空间分布及来源解析	夏子书, 白一茹, 王幼奇, 高小龙, 阮晓晗, 钟艳霞 (432)
浙中典型硫铁矿农田土壤重金属含量特征及健康风险	成晓梦, 孙彬彬, 吴超, 贺灵, 曾道明, 赵辰 (442)
农产品视角的城郊黑土地农田重金属风险分区	吴松泽, 王冬艳, 李文博, 王兴佳, 闫卓冉 (454)
基于 DGT 技术的广西碳酸盐岩区稻米镉含量主控因素	宋波, 肖乃川, 马丽钧, 李龙, 陈同斌 (463)
调理剂耦合水分管理对双季稻镉和铅累积的阻控效应	李林峰, 王艳红, 李义纯, 唐明灯, 李奇, 艾绍英 (472)
设施叶菜类蔬菜重金属镉、铅和砷累积特征及健康风险评估	董俊文, 高培培, 孙洪欣, 周昶, 张香玉, 薛培英, 刘文菊 (481)
电子垃圾拆解固废-土壤-蔬菜中多氯联苯污染特征与健康风险评估	张亚萍, 吕占禄, 王先良, 张峰, 郭凌川, 丁秀丽, 张金良 (490)
雷州半岛南部典型农用地土壤-作物的有机氯农药残留特征和健康风险评估	梁晓晖, 解启来, 郑芊, 杨北辰, 叶金明, 唐成金 (500)
重金属含量对城市土壤真菌群落结构的影响	郭大陆, 张建, 申思, 余子洁, 杨军顺, 罗红燕 (510)
长期施肥对黄土高原梯田土壤养分特征和微生物资源限制的影响	吴春晓, 高小峰, 闫本帅, 梁彩群, 陈佳瑞, 王国梁, 刘国彬 (521)
土地利用变化后不同种植年限香榧土壤微生物群落的组成及多样性	姜宽雯, 梁辰飞, 张勇, 蒋仲龙, 董佳琦, 吴家森, 傅伟军 (530)
化肥和有机肥配施生物炭对土壤磷酸酶活性和微生物群落的影响	杨文娜, 余添, 罗东海, 熊子怡, 王莹燕, 徐曼, 王子芳, 高明 (540)
秦岭中段撂荒地植被恢复过程中土壤微生物代谢特征	薛悦, 康海斌, 杨航, 冰德叶, 晁志, 张凯, 王得祥 (550)
全生物降解地膜原料颗粒对土壤性质、小麦生长和养分吸收转运的影响	闵文豪, 王春丽, 王莉玮, 易廷辉, 卞京军, 支梅, 孙琪惠, 宿锦锦, 赵秀兰 (560)
秸秆还田对冬小麦-夏玉米农田土壤固碳、氧化亚氮排放和全球增温潜势的影响	万小楠, 赵珂悦, 吴雄伟, 白鹤, 杨学云, 顾江新 (569)

基于 DGT 技术的广西碳酸盐岩区稻米镉含量主控因素

宋波^{1,2}, 肖乃川¹, 马丽钧¹, 李龙¹, 陈同斌^{1,3*}

(1. 桂林理工大学环境科学与工程学院, 桂林 541004; 2. 桂林理工大学岩溶地区水污染控制与用水安全保障协同创新中心, 桂林 541004; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 为探究广西碳酸盐岩区水稻在地质高背景下影响稻米 Cd 富集的主控因素, 以广西西南部和北部碳酸盐岩区水稻籽粒-根系土壤样品为基础, 同时结合梯度扩散薄膜技术(DGT), 分析讨论了土壤 pH、有机质(OM)、阳离子交换量(CEC)和 DGT-Cd 等与水稻籽粒 $\omega(\text{rice-Cd})$ -BCF 值的关系, 通过主成分分析确定主要因素并建立定量模型。结果表明, 水田土壤 $\omega(\text{soil-Cd})$ 均值为 $0.975 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 超标率 33.33%, 水稻籽粒 $\omega(\text{rice-Cd})$ 均值为 $0.020 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, BCF 均值为 0.038, 水稻籽粒 Cd 含量超标率为 4.2%, 整体呈现出水田土壤 Cd 含量较高但生物有效性较低的特点; 研究区水稻籽粒 BCF 值与土壤 pH 和阳离子交换量在 0.01 水平下显著负相关, 与 DGT-Cd 在 0.01 水平下显著正相关, 与有机质在 0.05 水平下显著负相关; 主成分分析结果显示, 土壤 Cd 全量、pH 和 DGT-Cd 是影响广西碳酸盐岩区水稻富集 Cd 的主要因素; 以土壤 Cd 全量、pH 和 DGT-Cd 为变量建立广西碳酸盐岩区水稻籽粒 BCF 值拟合方程, 模型决定系数为 0.717, 有较好的预测效果。

关键词: 镉积累; 地质高背景土壤; 生物有效性; 影响因素; 拟合模型; 梯度扩散薄膜技术(DGT)

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)01-0463-09 DOI: 10.13227/j.hjkk.202105145

Main Control Factors of Cadmium Content in Rice in Carbonate Rock Region of Guangxi Based on the DGT Technique

SONG Bo^{1,2}, XIAO Nai-chuan¹, MA Li-jun¹, LI Long¹, CHEN Tong-bin^{1,3*}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 2. Collaborative Innovation Center for Water Pollution Control and Water Safety in Karst Area, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: In order to explore the main controlling factors of Cd enrichment in rice under a geological high background in the Guangxi carbonate rock area, this study was based on rice grain-root soil samples from the carbonate rock areas in the southwest and north of Guangxi. Combined with diffusive gradients in thin films technology (DGT), the relationship between soil pH, organic matter, cation exchange capacity (CEC), DGT-Cd, and $\omega(\text{rice-Cd})$ -BCF value in rice grains was analyzed and discussed. The main factors were determined by principal component analysis, and a quantitative model was established. The results showed that the average value of $\omega(\text{soil-Cd})$ was $0.975 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, and the over-standard rate was 33.33%; the average value of $\omega(\text{rice-Cd})$ was $0.020 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, and the average BCF value was 0.038, and the over-standard rate of Cd content in rice grains was 4.2%. The content of Cd in paddy soil was high, but bioavailability was low in the study area. The BCF value of rice grains in the study area was significantly negatively correlated with soil pH and cation exchange capacity at the level of 0.01, positively correlated with DGT-Cd at the level of 0.01, and negatively correlated with organic matter at the level of 0.05. The results of principal component analysis showed that the total amount of Cd in the soil, pH, and DGT-Cd were the main factors affecting the accumulation of Cd in rice in the Guangxi carbonate rock area. Taking the total amount of Cd in the soil, pH, and DGT-Cd as variables, the fitting equation of BCF value of rice grains in the Guangxi carbonate rock region was established, and the determination coefficient of the model was 0.717, which could better predict the content of Cd in rice grains in this region.

Key words: cadmium accumulation; soil with high geological background; bioavailability; influence factors; fitting model; diffusive gradients in thin films technology(DGT)

土壤作为重要的环境组成部分之一,是保证农作物安全生产的基础,土壤中重金属含量更是将直接影响农作物的品质^[1]。近几年,有关稻米安全质量的问题常见报道,稻米安全质量问题已成为社会广泛关注的热点话题,其中稻米重金属污染对人体的危害尤其严重^[2]。造成土壤重金属污染的原因有两种:一是人为污染,主要与工农业生产以及城市发展产生的废水随意排放有关;二是自然背景,主要由成土母岩本身重金属含量导致土壤重金属富集,进而造成稻米中重金属含量超标^[3,4]。文献[5]显示,我国土壤重金属超标与地质成因密切相关,西南碳酸盐岩地区是我国土壤镉超标的主要分布区。这其中广西地区碳酸盐岩母质分布区面积 7.66 万

km^2 , 占整个广西陆地面积的 32.24%, 是我国岩溶发育最强烈的地区,同时也是我国土壤镉超标情况最为严重的地区之一^[6~9]。已有研究显示:广西碳酸盐岩区水田土壤 $\omega(\text{soil-Cd})$ 均值高达 $0.970 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 超标率高达 54.5%^[3]。

相较于土壤,该地区的水稻籽粒中 Cd 含量超标情况并不严重^[10,11],且有研究发现该地区水稻籽粒中 Cd 含量与土壤中 Cd 含量并无明显的线性关

收稿日期: 2021-05-14; 修订日期: 2021-06-22

基金项目: 广西科技重大专项(桂科 AA17204047); 国家重点研发计划项目(2018YFD0800600)

作者简介: 宋波(1972~),男,博士,教授,主要研究方向为污染土壤修复治理与安全利用, E-mail: songbo@glut.edu.cn

* 通信作者, E-mail: chentb@igsnrr.ac.cn

系,常出现水稻籽粒 Cd 含量超标严重而土壤 Cd 含量并不超标的情况^[12,13],这说明不能简单地以土壤 Cd 超标情况来判断该地区农作物超标情况,碳酸盐岩母质土壤中 Cd 的生物有效性受到多种理化性质的影响^[14,15].

梯度扩散薄膜技术(diffusive gradients in thin films, DGT)是近年来发展起来的一种新型的形态分析技术,目前已广泛应用于土壤等多种环境介质中各类元素的有效态含量测定^[16~18].采用 DGT 技术测定的有效态重金属包括土壤溶液和从土壤颗粒物表层释放的游离态、有机和无机络合态,其结果不仅反映了土壤颗粒和溶液之间的静态过程,还包括土壤固相释放补给土壤溶液的动态过程.有研究显示,在自然条件下,植物对重金属的吸收主要受扩散作用控制.因此,DGT 技术能较好地还原评价植物吸收土壤中重金属的过程^[19,20].目前,对于使用 DGT 装置评价土壤重金属植物有效性的效果仍有争议,有研究认为,相比于传统的化学提取法,DGT 法的结果可以更好地表征植物对重金属的吸收^[21,22];但也有研究认为,DGT 法测定的重金属有效态含量与植物吸收之间并不存在较好的相关性^[23~25],且测试结果与植物种类、重金属全量和复合污染有关系^[26].DGT 法能否适用于土壤重金属生物有效性评价仍需要进一步地研究.

本文在广西北部和西南部的碳酸盐岩水稻种植区采集土壤-水稻样品作为研究对象,结合 DGT 装置,讨论分析碳酸盐岩区土壤理化性质对 Cd 生物有效性的影响,通过主成分分析确定影响 Cd 生物有效性的主控因素并建立回归模型,以期对该地区土壤 Cd 的安全防控和水稻安全生产提供参考.

1 材料与方法

1.1 研究区背景

根据文献^[27]和本课题组前期调查结果,同时结合研究区地形地貌以及农作物种植情况等,将研究区域选定在广西的西南部和北部,西南部主要包括隆安县、天等县和田阳县,北部为融安县.每个县选择 2~3 个水稻种植面积较大的村落作为土壤-水稻样品采集区,研究区域及采样村落分布如图 1 所示.这些地区为典型的喀斯特岩溶地貌,其母岩碳酸盐岩在成土过程中发生淋溶,导致重金属富集而使得土壤中重金属背景值偏高,为典型的碳酸盐岩区域.研究区域内无涉重工业活动,未见显著的区域性人为污染.

1.2 野外样品采集与前处理

土壤-水稻样品采集于 2020 年 7~8 月,采样区



图 1 研究区地理位置示意

Fig. 1 Geographical location of the survey area

域为田阳县、天等县、隆安县和融安县的 2~3 个乡镇村落,每个县采集土壤-水稻样品 30 对,共采集样品 240 件,根系土壤与其相应水稻样品各 120 件.样品采集过程中综合考虑水田规模、连片性和周围环境因素,选择长势较好的稻田块,在每个代表田块上以五点采样法采集土壤样品,同时在代表田块协同采集 6~10 个水稻籽粒样混合为一个植物样品并记录经纬度,详细样点分布见图 2.

土壤样品在室内自然风干,除去植物根系和石粒等杂质后,用四分法留下约 1 kg 用于土壤 pH、全量 Cd、DGT-Cd 和阳离子交换量等指标分析.水稻样品用去离子水清洗干净后,在 80℃ 下烘干至恒重,然后对稻米脱壳和粉碎,过 0.15 mm (100 目)尼龙筛后装袋保存,用于测定稻米中 Cd 含量.

1.3 DGT 提取法

DGT 装置主要由滤膜、扩散膜和固定膜组合而成;滤膜作用为保护外界对扩散膜的损坏和污染,扩散膜作用为控制目标离子到固定膜的扩散通量;固定膜作用为吸附目标离子,且吸附材料根据富集的目标离子不同而存在差异,重金属离子吸附材料为 Chelex-100,即 Chelex 固定膜^[28].DGT 装置购买自南京智感环境科技有限公司,提取步骤参考公司用户手册和文献^[29,30],主要包括以下 3 个步骤.①土壤的预平衡:称取 20 g 土样加入 100 mL 离心管中,加入最大田间持水量 80% 的超纯水,使用电动搅拌器搅拌 3~5 min 直至土壤表面可以看到光滑平整的水膜,之后将保鲜膜覆盖到 DGT 表面,防止水分蒸发,在恒温(一般为 25℃)条件下放置平衡 48 h.②土壤样品的放置:待土壤加水平衡后,用干净塑料勺取少量处理好的土样(约 3 g)放入 DGT 装置内腔中,在桌面轻轻抖动,使得土壤与 DGT 装置暴露面充分接触,继续添加土壤直至填满内腔.将装

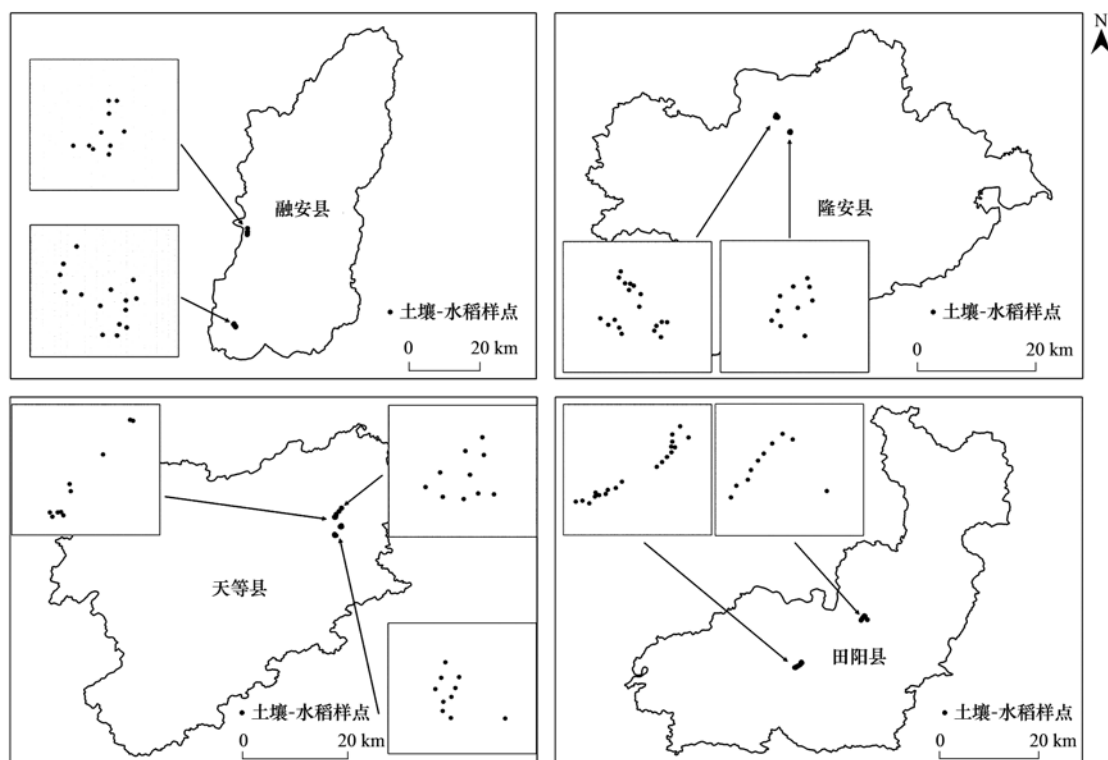


图2 样点分布示意

Fig. 2 Distribution of sampling sites

好的 DGT 装置放入事先放有少量超纯水的自封袋中,袋口应处于半封闭状态。③DGT 装置回收: DGT 装置在恒温条件下放置 24 h 后,取出膜心,利用超纯水冲洗膜心表面,之后将膜心撬开,取出 Chelex 固定膜,放入 2 mL 离心管中,加入 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 稀硝酸,确保固定膜完全浸没,室温静置 24 h,取出固定膜,保存提取液待分析,按照公式计算土壤中 Cd 生物有效性含量,公式如下:

$$M = c_e (V_e + V_g) / f_e \quad (1)$$

式中, c_e 为提取液中重金属 Cd 浓度 ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$); V_e 为提取液体积 (mL); V_g 为固定相体积 (土壤圆片一般记为 0.2 mL), f_e 为重金属 Cd 提取率 (参考 DGT 产品使用手册,本实验取 0.938)

利用公式(2)计算 DGT 浓度:

$$c_{\text{DGT}} = M \Delta g / D A t \quad (2)$$

式中, M 为固定膜中 Cd 的积累量 (μg), Δg 为扩散层厚度, D 为重金属 Cd 在扩散层中的扩散系数 ($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$), A 为每一个圆片膜的面积 (3.14 cm^2), t 为 DGT 装置的放置时间 (s)。

1.4 理化性质测定

本实验检测的指标包括:土壤 Cd 全量、土壤 Cd 有效态含量 (DGT 法)、土壤 pH、有机质 (OM) 和阳离子交换量。

根据 NY/T 1121.2-2006 采用玻璃电极法在水土比为 2.5:1 时测定土壤 pH, 根据 NY/T 295-1995

采用重铬酸钾氧化法测定土壤有机质含量, 根据 HJ 889-2019 采用三氯化六氨合钴浸提法测定土壤阳离子交换量, 土壤和水稻样品中 Cd 含量分析采用硝酸-高氯酸消解体系消解, 土壤 Cd 有效态含量采用 DGT 装置提取法 (见 1.3 节), 使用由美国 PerkinElmer 公司生产的 ELAN DRC-e 型电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS) 测定 Cd 含量。

分析过程中所用化学试剂均为优级纯, 本实验用水均为超纯水, 所用器皿均在 10% 硝酸中浸泡 24 h 以上。分析过程中加入 GBW 07404 (GSS-4) 土壤成分分析标准物质、GBW (E) 100357 大米成分分析标准物质和空白样品进行质量控制, 分析样品重复数为 10% ~ 15%, 标准物质中 Cd 回收率范围 88.4% ~ 113%, 符合质量控制要求^[31]。

1.5 统计分析

本研究中图形采用 ArcGis 10.2 和 Origin Pro 2016 绘制, 采用 SPSS 19.0 统计分析软件对原始数据进行相关统计分析。

2 结果与分析

2.1 研究区土壤基本理化性质

研究区域内采集的 120 件水田土壤样品理化性质统计结果见表 1。

土壤 pH 值是土壤最重要的理化性质之一, 也是影响植物吸收重金属的一个重要因素, 土壤 pH

可以影响重金属的活性,主要控制重金属离子活度、吸附和解吸,土壤 pH 值降低时水溶态的重金属会被释放,导致土壤中有效态增加,更易被植物所吸收^[32].由表 1 可以看出,研究区域土壤 pH 范围在 4.9~7.7,数据经对数转换后呈正态分布,以几何均值 6.43 表征,其中大于 6.5 的点位为 77 个,占比 64%,总体表现为中性土壤.这是由于研究区域为典型的岩溶地貌,是石灰岩经过漫长的溶蚀形成的,而石灰岩中含有大量的 CaCO_3 和 MgCO_3 等盐基性物质,这些岩石经过风化后产生氢氧离子,使得土壤为中性或偏碱性.

土壤有机质(OM)含量是影响土壤中镉生物有效性的另一个重要指标,土壤有机质中的有机配体会与重金属发生离子交换、表面吸附、配位和络合反应,进而影响土壤中镉的生物有效性^[33].由表 1 可以看出研究区域土壤 $\omega(\text{OM})$ 在 8.39~46.81 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,几何均值为 26.26 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,略高于全国耕层土壤有机质均值(24.65 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$),这主要是由于水稻土人为施肥、长期淹水和水稻秸秆等腐烂后有机

质还田的原因.

土壤阳离子交换量(CEC)是指土壤胶体所能吸附的各种阳离子的总量,反映土壤的保肥能力,同样是土壤理化性质的一个重要指标,土壤 CEC 越高,其中重金属吸附点位越多,重金属能够更多地被吸附和共沉淀,促进向更稳定的残渣态转变^[34].研究区域土壤 CEC 范围为 0.90~19.95 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$,几何均值为 6.249 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$,为保肥能力较弱的土壤.

一般来说,土壤中重金属含量越高,其生长的作物中重金属超标风险就越高,由统计结果可以看出,研究区 $\omega(\text{soil-Cd})$ 在 0.17~6.02 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,数据经对数转换后偏度系数接近 0,可近似用几何均值 0.533 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 表征.其中,超过《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)中农用地土壤污染风险筛选值点位 40 个, $\omega(\text{soil-Cd})$ 样点超标率 33.33%.总体来看,研究区水田土壤中重金属 Cd 表现出较高的以自然背景为主的分布特征.

表 1 研究区水田土壤理化性质

Table 1 Soil physical and chemical properties in paddy fields

指标	分布类型	范围	中位数	算术均值	几何均值	标准差	变异系数/%
pH	对数正态	4.9~7.7	6.500	6.412	6.439	0.632	9.8
$\omega(\text{OM})/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	对数正态	8.39~46.81	27.54	28.13	26.26	9.746	34.6
$\omega(\text{soil-Cd})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	非正态分布	0.17~6.02	0.400	0.975	0.533	1.481	151.9
$\text{CEC}/\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$	对数正态	0.90~19.95	6.592	7.465	6.249	4.010	53.7

2.2 研究区稻米镉富集特征

对采集的 120 个水稻籽粒样品中 Cd 含量进行统计,结果见表 2.水稻籽粒中 Cd 含量原始数据经过对数转换后成正态分布,因此为了更好地体现数据的集中分布趋势,采用几何均值来表示水稻籽粒中 Cd 含量大小.

从水稻籽粒中 Cd 含量来看,研究区水稻籽粒 $\omega(\text{rice-Cd})$ 变化范围在 0.002~0.364 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,几何均值为 0.020 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,变异系数为 140.4%,属于高度变异,表明该地区种植的水稻籽粒中 Cd 含量差异较大,但整体来说大部分水稻籽粒中 Cd 含量均低于《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762-2017)中大米 Cd 的限定标准值 0.2 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,仅有 5 个样品超过该标准,超标率为 4.2%.以“土十条”中规定的到 2030 年,受污染耕

地安全利用率达到 95% 以上为标准,研究区水稻中 Cd 含量并不存在安全风险.

考虑到水稻籽粒中 Cd 元素的绝对含量并不能完全客观地反映水稻吸收 Cd 的能力,因此引入富集系数(作物某部位元素含量与根系土中该元素含量的比值)来表征 Cd 从土壤向水稻籽粒的迁移能力.水稻籽粒对 Cd 的富集系数范围在 0.001~1.174,变异系数为 167.1%,属于高度变异,表明该地区土壤中的 Cd 向水稻籽粒迁移的能力有很大差异,富集系数几何均值为 0.038,其中超过 0.5 的样品数为 8 个,仅占全部样品的 6.7%,整体来看研究区土壤中的 Cd 向水稻籽粒的迁移能力较弱.

综合来说,研究区呈现出水田土壤中 Cd 含量较高,但生物有效性较低的特点,这也与前人的研究结果一致^[10,11].

表 2 研究区稻米镉富集特征统计

Table 2 Statistics of cadmium enrichment in rice in the study area

指标	分布类型	范围	算术均值	几何均值	标准差	变异系数/%	超标率/%
$\omega(\text{rice-Cd})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	对数正态	0.002~0.364	0.047	0.020	0.066	140.4	4.2
BCF	对数正态	0.001~0.174	0.134	0.038	0.224	167.1	

2.3 水稻样品 BCF 值与土壤理化性质关系

一般来说,土壤中 Cd 全量越高,土壤中有有效态 Cd 含量也会增高,并且土壤 Cd 全量是决定 Cd^{2+} 活性的重要因素^[35],而研究区在土壤中 Cd 全量超标较为严重的情况下,其土壤上生长的水稻超标情况并不显著,为了探究其原因,对水稻籽粒的 BCF 值与土壤各理化指标进行相关性分析并线性拟合,相关系数和拟合结果如图 3 所示:研究区水稻籽粒 BCF 值与测定的理化性质均达到显著相关水平,

BCF 值与土壤 pH 值、土壤阳离子交换量在 0.01 水平下显著负相关,与 DGT-Cd 在 0.01 水平下显著正相关,与土壤有机质在 0.01 水平下显著负相关。BCF 值与 pH、有机质、阳离子交换量和 DGT-Cd 相关系数依次为 -0.589、-0.223、-0.477 和 0.631,其中与 DGT-Cd 和 pH 的相关系数绝对值较高,表明这两者对水稻籽粒 BCF 值的影响程度较大,阳离子交换量次之,有机质对水稻籽粒 BCF 值的影响程度最小。

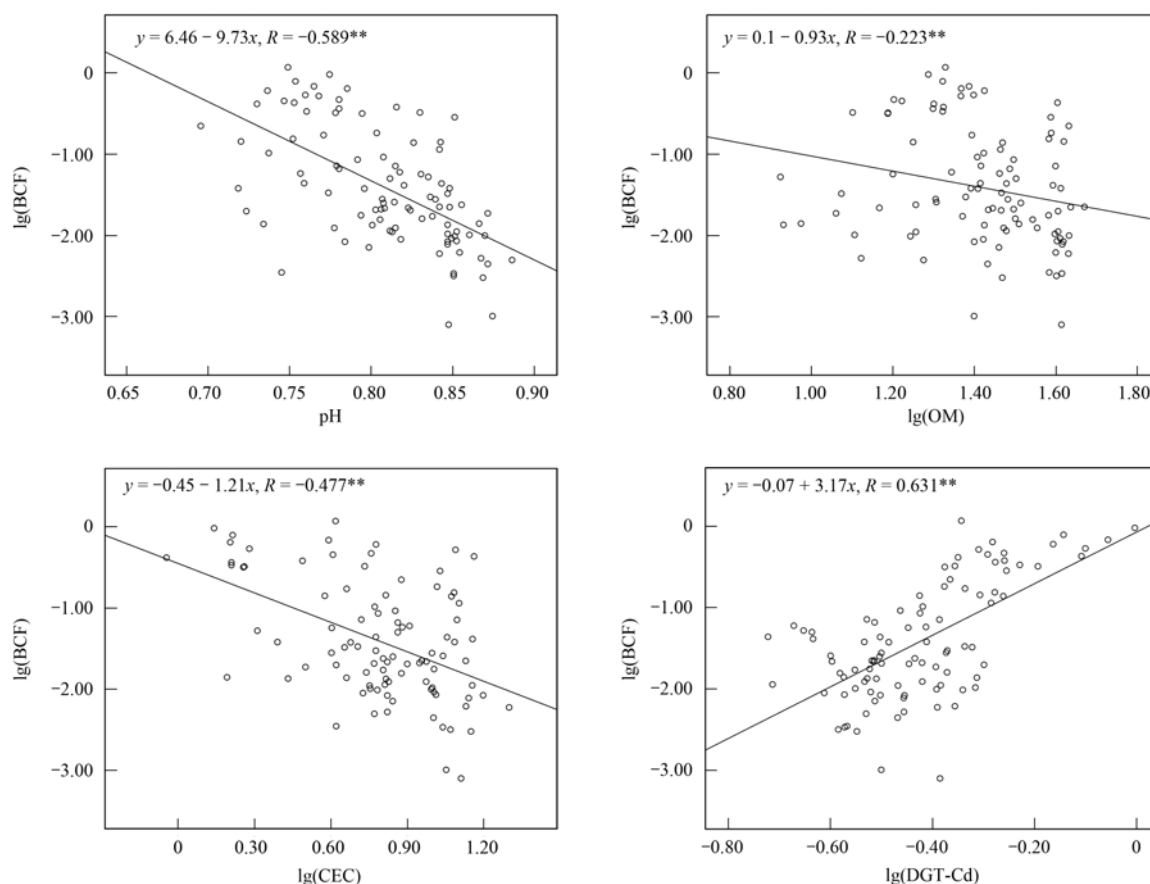


图 3 水稻籽粒 BCF 值与土壤理化性质散点拟合及相关系数

Fig. 3 Scatter fitting and correlation coefficient between BCF of corps and physical and chemical properties

有研究表明,随着 pH 的增加,土壤表层负电荷会增多,土壤对镉元素的吸附能力会越来越强^[36,37];有机质同样影响着农作物 BCF 值,前人研究表明,随着有机质含量升高,土壤中的镉会向着更稳定的形态转化,土壤镉 BCF 值会随着根系土壤有机质含量的升高而呈现出下降趋势^[38];阳离子交换量的升高则会增加镉在土壤中的吸附能力,从而降低其向作物中迁移的能力^[39].从图 3 的散点拟合情况来看,研究区水稻 BCF 值随着 pH、有机质和阳离子交换量的上升都呈下降趋势,这与以上的研究结果一致。

对于重金属来说,DGT 技术不同于其他传统化学分析方法,DGT 有效态主要包括游离金属离子和

不稳定无机络合形态等,而这些形态正是易被植物吸收产生生物毒性的形态,相比传统的化学提取有效态,DGT 技术提取的生物有效态能更好地反映生物体所吸收的重金属含量^[29].在本研究中,水稻籽粒 BCF 值和 DGT-Cd 在 0.01 水平下显著相关,相关系数为 0.631,即 DGT-Cd 含量影响水稻籽粒 BCF 值的程度为 63.1%,随着 DGT-Cd 的升高,水稻籽粒 BCF 值也相应升高,散点图均匀分布在拟合直线附近,相比其他土壤理化性质,这两者间相关程度最为密切,DGT-Cd 对广西碳酸盐岩区的水稻籽粒 BCF 值有较好的预测效果。

2.4 主成分分析与预测模型

综合相关性分析结果来看,土壤的各理化性质

与水稻籽粒 BCF 值的关系是不同的,其中 DGT-Cd 与 BCF 值有很好的线性关系,可以较好地预测 BCF 值,而有机质虽与 BCF 值相关性较弱,但依然对其存在影响,实际上,土壤是一个复杂的系统,各理化性质相互之间也会产生不同的影响,对于一元线性拟合方程,始终无法做到较为精确地预测.主成分分析法是一种可以将多个具有相关性的指标转化为几个不相关的综合指标以此降低数据维度,得出对因变量影响最大因子的分析方法.表 3 为各因素经标准化处理后的相关系数,从中可知,各因素间具有不同程度的相关性,因此进一步采用主成分分析法对影响水稻 BCF 值的各因素进行分析.各主成分特征值、方差贡献率、累计贡献率和主成分荷载矩阵如表 4 和表 5,其中特征值表示对应的主成分描述原有信息的多少,由表 4 可知,前两主成分特征值大于 1,累计贡献率为 70.8%,代表了原始信息的 70.8%,达到了降低数据维度的目的.表 5 表明,soil-Cd、CEC 和 OM 在第一主成分中占有较高权重且与主成分表现为正相关,再结合表 3 可知,soil-Cd 与 CEC 和 OM 存在显著正相关,故可用 soil-Cd 代表

CEC 和 OM 的信息,因此第一主成分代表因子为 soil-Cd.第二主成分主要代表因子为 pH 和 DGT-Cd 且表现出与 pH 呈负相关,与 DGT-Cd 呈正相关,表明它们对原始变量的影响相反,故都保留,因此第二主成分代表因素为 pH 和 DGT-Cd.综上,造成研究区水稻籽粒 BCF 值差异的主要因素为:soil-Cd、pH 和 DGT-Cd.

以 soil-Cd、pH 和 DGT-Cd 为变量建立广西碳酸盐岩区水稻籽粒 BCF 值多元线性回归拟合方程如表 6 所示,通过多元线性回归分析得到的 3 个模型均达到极显著相关水平,但评判模型精确度的决定系数 R^2 存在一定差异,其中模型 3 的拟合效果最好,决定系数为 0.717,模型具有较好的预测效果.

表 3 各因素间相关系数¹⁾

Table 3 Correlation between various factors				
	pH	soil-Cd	DGT-Cd	OM
soil-Cd	0.446 **			
DGT-Cd	-0.394 **	-0.125		
OM	-0.019	0.386 **	-0.084	
CEC	0.402 **	0.433 **	-0.234 **	0.682 **

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

表 4 主成分特征值及方差贡献率

Table 4 Principal component characteristic value and variance contribution rate						
主成分	初始特征值			提取载荷平方和		
	特征值	方差贡献率/%	累计贡献率/%	特征值	方差贡献率/%	累计贡献率/%
1	2.325	46.467	48.731	2.325	46.497	46.497
2	1.219	24.385	70.881	1.219	24.385	70.881

表 5 主成分载荷矩阵

Table 5 Principal component loading matrix		
因子	主成分 1	主成分 2
pH	0.610	-0.636
soil-Cd	0.849	0.031
DGT-Cd	-0.355	0.631
OM	0.622	0.609
CEC	0.778	0.213

3 讨论

目前,前人对于水稻的 Cd 积累特征及影响因素已经做了很多工作,但大多数研究是针对人为来源导致的 Cd 污染区域,而对于地质高背景下稻米 Cd 积累的影响因素缺乏关注.和君强等^[40]研究了长沙某 Cd 污染地区水稻 BCF 值与土壤参数性质的

关系并建立预测模型,结果表明 BCF 值主要受到土壤 pH、Cd 全量和 SOM 的影响,其中 pH 值对 BCF 值的影响作用大于全量 Cd 和 SOM 且更为稳定.柳影^[41]研究了钢铁厂周边土壤、冶炼厂周边土壤等 6 种不同污染来源水稻土的 Cd 生物有效性影响因素并建立模型,结果表明土壤活性 Cd 含量主要受土壤中 Cd 含量影响,而 pH 和 SOM 会通过影响 Cd 在土壤中的吸附解吸过程进而影响土壤活性 Cd 分配系数.郑顺安等^[42]的研究结果表明:影响潜育水稻土上生长水稻的 Cd 积累主要因素为土壤 Cd 全量,而影响潜育水稻土上生长水稻的 Cd 积累主要因素为土壤 Cd 全量和 CEC.唐世琪等^[7]对广西碳酸盐岩区土壤 Cd 生物有效性影响因素的研究发现:影响碳酸盐岩母质土壤 Cd 生物有效性的主要土壤性

表 6 水稻籽粒富集系数的多元回归预测方程¹⁾

Table 6 Multiple regression prediction equation		
编号	拟合模型	决定系数(R^2)
1	$\lg(\text{BCF}) = 3.195 \lg(\text{Cd}_{\text{DGT}}) - 0.072$	0.394 **
2	$\lg(\text{BCF}) = 2.816 \lg(\text{Cd}_{\text{DGT}}) - 0.988 \lg(\text{Cd}_{\text{soil}}) - 0.503$	0.692 **
3	$\lg(\text{BCF}) = 2.509 \lg(\text{Cd}_{\text{DGT}}) - 0.845 \lg(\text{Cd}_{\text{soil}}) - 0.314\text{pH} + 1.950$	0.717 **

1) ** 表示 $P < 0.01$

质有 pH、SOM 和黏土矿物等,影响程度由强到弱依次为 pH、黏土矿物和有机质. 以上研究表明,对于不同地区、不同成土母质和不同理化性质的土壤,影响 Cd 生物有效性的因素也不同. 另一方面,相比传统的测定方法,DGT 技术能够在原位条件下较为真实地反映介质中目标污染物的生物可利用性,它的富集过程在一定程度上还原了目标污染物在水土固液相和土壤-植物根系这一系统之间的动力学吸收过程,目前已有很多研究证明相比传统的形态分析方法提取的重金属有效态浓度,DGT 法可以更好地反映生物体所吸收的重金属且不易受到其他土壤理化性质影响^[43,44]. 在本研究中,即使是野外环境水稻品种不尽相同的情况下,DGT-Cd 与水稻籽粒 BCF 值依然有很好的线性关系,通过多元回归分析得到的模型也有较好的拟合效果,DGT 技术在预测和评价土壤重金属生物有效性方面具有很好的可行性和广阔的应用前景.

4 结论

(1) 研究区域 $\omega(\text{soil-Cd})$ 均值为 $0.975 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,超标率 33.33%,表现出较高的积累特征; $\omega(\text{rice-Cd})$ 均值为 $0.020 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,BCF 均值为 0.038,水稻籽粒 Cd 含量超标率 4.2%;研究区总体呈现出水田土壤中 Cd 含量较高,但生物有效性较低的特点.

(2) 研究区水稻籽粒 BCF 值与土壤 pH、有机质和阳离子交换量显著负相关,相关系数依次为 -0.589 、 -0.223 和 -0.477 ;与 DGT-Cd 显著正相关,相关系数为 0.631 ;DGT-Cd 与广西碳酸盐岩区水稻籽粒 Cd 含量关系最为密切.

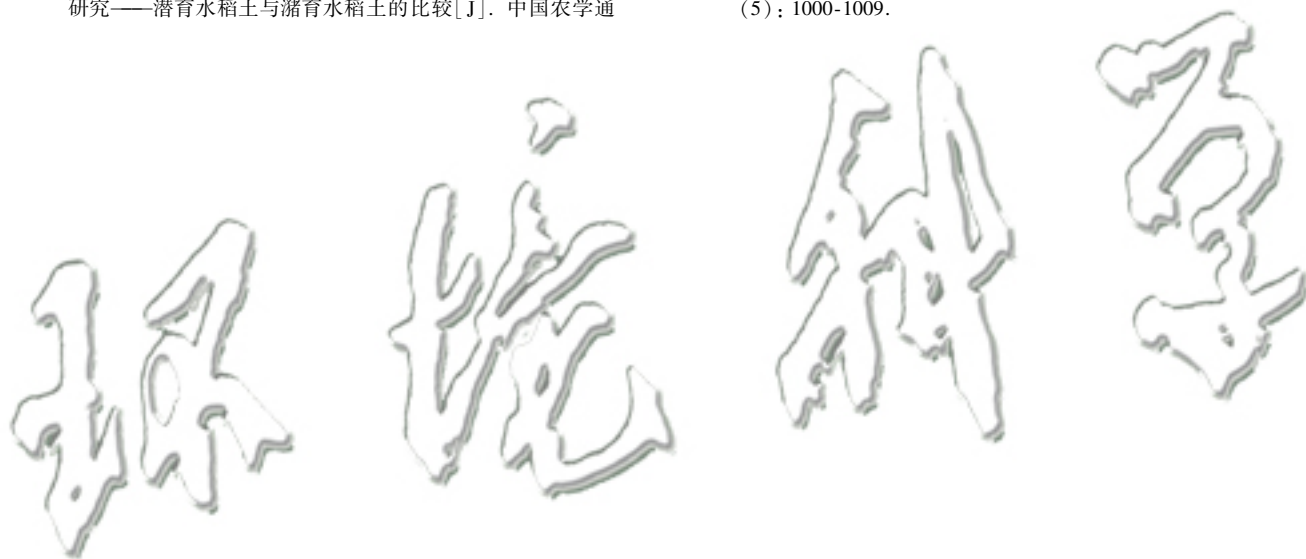
(3) 主成分分析结果显示,soil-Cd、pH 和 DGT-Cd 是影响广西碳酸盐岩区水稻富集 Cd 的主要因素;以 soil-Cd、pH 和 DGT-Cd 为变量建立广西碳酸盐岩区水稻籽粒 BCF 值拟合方程,模型决定系数为 0.717 ,有较好的预测效果.

参考文献:

- [1] 陈晶中,陈杰,谢学俭,等. 土壤污染及其环境效应[J]. 土壤, 2003, **35**(4): 298-303.
Chen J Z, Chen J, Xie X J, *et al.* Soil pollution and its environmental impact[J]. Soils, 2003, **35**(4): 298-303.
- [2] 雷鸣,曾敏,王利红,等. 湖南市场和污染区稻米中 As、Pb、Cd 污染及其健康风险评价[J]. 环境科学学报, 2010, **30**(11): 2314-2320.
Lei M, Zeng M, Wang L H, *et al.* Arsenic, lead, and cadmium pollution in rice from Hunan markets and contaminated areas and their health risk assessment[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, **30**(11): 2314-2320.
- [3] 宋波,王佛鹏,周浪,等. 广西高镉异常区水田土壤 Cd 含量特征及生态风险评价[J]. 环境科学, 2019, **40**(5): 2443-2452.
- [4] Song B, Wang F P, Zhou L, *et al.* Cd content characteristics and ecological risk assessment of paddy soil in high cadmium anomaly area of Guangxi[J]. Environmental Science, 2019, **40**(5): 2443-2452.
- [4] 代子雯,方成,孙斌,等. 地质高背景农田土壤下不同水稻品种对 Cd 的累积特征及影响因素[J]. 环境科学, 2021, **42**(4): 2016-2023.
Dai Z W, Fang C, Sun B, *et al.* Cadmium accumulation characteristics and impacting factors of different rice varieties under paddy soils with high geological backgrounds [J]. Environmental Science, 2021, **42**(4): 2016-2023.
- [5] 国土资源部中国地质调查局. 中国耕地地球化学调查报告[R]. 嘉兴: 国土资源部中国地质调查局, 2015.
- [6] 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), 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 Science), 2019, **55**(4): 678-687.
- [7] 唐世琪,杨峥,马宏宏,等. 岩溶区土壤镉生物有效性影响因素研究[J]. 农业环境科学学报, 2020, **39**(6): 1221-1229.
Tang S Q, Yang Z, Ma H H, *et al.* Study on factors affecting soil cadmium bioavailability in soil in karst area[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, **39**(6): 1221-1229.
- [8] 李杰,战明国,钟晓宇,等. 广西典型岩溶地区重金属在土壤-农作物系统中累积特征及其影响因素[J]. 环境科学学报, 2021, **41**(2): 597-606.
Li J, Zhan M G, Zhong X Y, *et al.* Distribution and accumulation of heavy metals in soil-crop systems from a typical carbonate rocks area in Guangxi [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, **41**(2): 597-606.
- [9] 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.
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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Gu Q B, Yang Z F, Yu T, *et al.* From soil to rice - a typical study of transfer and bioaccumulation of heavy metals in China [J]. Acta Agriculturae Scandinavica, 2018, **68**(7): 631-642.

- [14] 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.
- [15] 王锐, 邓海, 贾中民, 等. 典型喀斯特地区土壤-作物系统镉的富集特征与污染评价[J]. 环境科学, 2021, **42**(2): 941-951.
Wang R, Deng H, Jia Z M, *et al.* Characteristics of cadmium enrichment and pollution evaluation of a soil-crop system in a typical karst area [J]. Environmental Science, 2021, **42**(2): 941-951.
- [16] 陈宏, 王冬梅, 刘永生, 等. 聚丙烯酸钠为结合相的薄膜扩散梯度技术测定水中 Cu^{2+} [J]. 环境化学, 2011, **30**(5): 1034-1039.
Chen H, Wang D M, Liu Y S, *et al.* Sodium polyacrylate as a binding phase in diffusive gradients in thin-films for the measurement of free copper(II) ion in water [J]. Environmental Chemistry, 2011, **30**(5): 1034-1039.
- [17] Davison W, Zhang H. *In situ* speciation measurements of trace components in natural waters using thin-film gels [J]. Nature, 1994, **367**(6463): 546-548.
- [18] Ding S M, Xu D, Sun Q, *et al.* Measurement of dissolved reactive phosphorus using the diffusive gradients in thin films technique with a high-capacity binding phase [J]. Environmental Science & Technology, 2010, **44**(21): 8169-8174.
- [19] 罗军, 王晓蓉, 张昊, 等. 梯度扩散薄膜技术(DGT)的理论及其在环境中的应用 I: 工作原理、特性与在土壤中的应用 [J]. 农业环境科学学报, 2011, **30**(2): 205-213.
Luo J, Wang X R, Zhang H, *et al.* Theory and application of diffusive gradients in thin films in soils [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, **30**(2): 205-213.
- [20] 魏天娇, 管冬兴, 方文, 等. 梯度扩散薄膜技术(DGT)的理论及其在环境中的应用 III——植物有效性评价的理论基础与应用潜力 [J]. 农业环境科学学报, 2018, **37**(5): 841-849.
Wei T J, Guan D X, Fang W, *et al.* Theory and application of diffusive gradients in thin-films (DGT) in the environment III: Theoretical basis and application potential in phytoavailability assessment [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, **37**(5): 841-849.
- [21] Davison W, Hooda P S, Zhang H, *et al.* DGT measured fluxes as surrogates for uptake of metals by plants [J]. Advances in Environmental Research, 2000, **3**(4): 550-555.
- [22] Nolan A L, Zhang H, McLaughlin M J. Prediction of zinc, cadmium, lead, and copper availability to wheat in contaminated soils using chemical speciation, diffusive gradients in thin films, extraction, and isotopic dilution techniques [J]. Journal of Environmental Quality, 2005, **34**(2): 496-507.
- [23] Soriano-Disla J M, Speir T W, Gómez I, *et al.* Evaluation of different extraction methods for the assessment of heavy metal bioavailability in various soils [J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2010, **213**(1-4): 471-483.
- [24] Cornu J Y, Denaix L. Prediction of zinc and cadmium phytoavailability within a contaminated agricultural site using DGT [J]. Environmental Chemistry, 2006, **3**(1): 61-64.
- [25] Almás A R, Lombnæs P, Sogn T A, *et al.* Speciation of Cd and Zn in contaminated soils assessed by DGT-DIFS, and WHAM/Model VI in relation to uptake by spinach and ryegrass [J]. Chemosphere, 2006, **62**(10): 1647-1655.
- [26] 宋宁宁, 王芳丽, 沈跃, 等. 梯度薄膜扩散技术(DGT)与传统化学方法评估黑麦草吸收 Cd 的对比 [J]. 环境化学, 2012, **31**(12): 1960-1967.
Song N N, Wang F L, Shen Y, *et al.* Comparison of the method of diffusive gradients in thin films with traditional chemical extraction techniques for evaluating cadmium bioavailability in ryegrass [J]. Environmental Chemistry, 2012, **31**(12): 1960-1967.
- [27] 谢学锦, 任天祥, 孙焕振. 中国地球化学图集 [M]. 北京: 地质出版社, 2012.
- [28] Davison W, Zhang H. Progress in understanding the use of diffusive gradients in thin films (DGT) - back to basics [J]. Environmental Chemistry, 2012, **9**(1): 1-13.
- [29] 陈静, 孙琴, 姚羽, 等. DGT 和传统化学法比较研究复合污染土壤中 Cd 的生物有效性 [J]. 环境科学研究, 2014, **27**(10): 1172-1179.
Chen J, Sun Q, Yao Y, *et al.* Comparison of DGT technique with traditional methods for evaluating cadmium bioavailability in soils with combined pollution [J]. Research of Environmental Sciences, 2014, **27**(10): 1172-1179.
- [30] 刘小莲, 杜平, 陈娟, 等. 基于梯度扩散薄膜技术评估稻田土壤中镉的生物有效性 [J]. 农业环境科学学报, 2017, **36**(12): 2429-2437.
Liu X L, Du P, Chen J, *et al.* Evaluation of cadmium bioavailability via diffusive gradients in thin film technology for agricultural soils [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, **36**(12): 2429-2437.
- [31] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 王涛, 段积德, 王锦霞, 等. 生物炭对土壤重金属的修复效应研究进展 [J]. 湖南生态科学学报, 2020, **7**(3): 55-65.
Wang T, Duan J D, Wang J X, *et al.* Research on the remediation effect of biochar on heavy metals in soil [J]. Journal of Hunan Ecological Science, 2020, **7**(3): 55-65.
- [35] Sauvé S, Hendershot W, Allen H E. Solid-solution partitioning of metals in contaminated soils: dependence on pH, total metal burden, and organic matter [J]. Environmental Science & Technology, 2000, **34**(7): 1125-1131.
- [36] 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.
- [37] 李志涛, 王夏晖, 赵玉杰, 等. 南方典型区域水稻镉富集系数差异影响因素探析 [J]. 环境科学与技术, 2017, **40**(10): 1-7.
Li Z T, Wang X H, Zhao Y J, *et al.* Analysis of the difference and causes in rice cadmium uptake factor in typical south region [J]. Environmental Science & Technology, 2017, **40**(10): 1-7.
- [38] 曹会聪, 王金达, 张学林. 东北地区污染黑土中重金属与有机质的关联作用 [J]. 环境科学研究, 2007, **20**(1): 36-41.
Cao H C, Wang J D, Zhang X L. Study on the association between heavy metals and organic matter in polluted black soil in northeast China [J]. Research of Environmental Sciences, 2007,

- 20(1): 36-41.
- [39] 李江遐, 吴林春, 张军, 等. 生物炭修复土壤重金属污染的研究进展[J]. 生态环境学报, 2015, 24(12): 2075-2081.
- Li J X, Wu L C, Zhang J, *et al.* Research progresses in remediation of heavy metal contaminated soils by biochar[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(12): 2075-2081.
- [40] 和君强, 贺前锋, 刘代欢, 等. 土壤镉食品卫生安全阈值影响因素及预测模型——以长沙某地水稻土为例[J]. 土壤学报, 2017, 54(5): 1181-1194.
- He J Q, He Q F, Liu D H, *et al.* Major factors affecting threshold of soil Cd for food health safety and relevant prediction models: a case study of paddy soil in Changsha[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(5): 1181-1194.
- [41] 柳影. 不同污染来源水稻土 Cd 生物有效性及其影响因素[D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
- [42] 郑顺安, 刘代丽, 章明奎, 等. 水稻镉积累特点及影响因素研究——潜育水稻土与潴育水稻土的比较[J]. 中国农学通报, 2020, 36(30): 62-67.
- Zheng S A, Liu D L, Zhang M K, *et al.* Characteristics and influencing factors of cadmium accumulation in rice: Gleyed paddy soil and hydrogic paddy soil[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2020, 36(30): 62-67.
- [43] 王进进, 白玲玉, 曾希柏. 薄膜扩散梯度技术测定水体中砷及其影响因素研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(1): 190-197.
- Wang J J, Bai L Y, Zeng X B. Study on measurement and influencing factors of inorganic arsenic with use of diffusive gradients in thin films technique in waters[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(1): 190-197.
- [44] 鄂倩, 赵玉杰, 刘潇威, 等. 不同土壤镉提取方法预测稻米富集镉性能评估[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(5): 1000-1009.
- E Q, Zhao Y J, Liu X W, *et al.* Screening and evaluation of soil cadmium extraction methods for predicting cadmium accumulation in rice[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(5): 1000-1009.



CONTENTS

Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Urban Soils of Major Cities in China	PENG Chi, HE Ya-lei, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i>	(1)
Environmental Behaviors of Plant Growth Regulators in Soil: A Review	CHEN Liang, HOU Jie, HU Xiao-lei, <i>et al.</i>	(11)
Preparation and Application of Magnetic Water Treatment Materials Based on Iron Sludge	ZENG Hui-ping, ZHAI Long-xue, LI Dong, <i>et al.</i>	(26)
Meta-analysis of the Impact of Different Ozone Metrics on Total Mortality in China	RUAN Fang-fang, LIU Ji-xin, CHEN Zhi-wei, <i>et al.</i>	(37)
Variation Characteristics and Potential Sources of the Mt. Haituo Aerosol Chemical Composition in Different Pollution Processes During Winter in Beijing, China	ZHAO De-long, WANG Fei, LIU Dan-tong, <i>et al.</i>	(46)
Real-time Source Apportionment of PM _{2.5} and Potential Geographic Origins of Each Source During Winter in Wuhan	JIANG Shu-ning, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i>	(61)
Spatiotemporal Distribution and Seasonal Characteristics of Regional Transport of PM _{2.5} in Yuncheng City	WANG Yun-tao, ZHANG Qiang, WEN Xiao-yu, <i>et al.</i>	(74)
Three-dimensional Structure Variation of PM _{2.5} During Cold Front Advance in Eastern China	MOU Nan-nan, ZHU Bin, LU Wen	(85)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nitrated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Atmosphere of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	LI Yan-xi, XIE Dan-ping, LI Yu-qing, <i>et al.</i>	(93)
Atmospheric VOCs Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Large-scale Integrated Industrial Area and Surrounding Areas in Southwest China	LI Ling, ZHANG Dan, HU Wei, <i>et al.</i>	(102)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Lhasa	YU Jia-yan, HAN Yan, CHEN Mu-lan, <i>et al.</i>	(113)
Variation Characteristics of Ambient Volatile Organic Compounds (VOCs) Volume Fraction During Hangzhou COVID-19 Period	LIN Xu, YAN Ren-chang, JIN Jia-jia, <i>et al.</i>	(123)
Role of Atmospheric VOCs in Ozone Formation in Summer in Shanghai Suburb	JIN Dan	(132)
Characteristics of VOCs and Formation Potentials of O ₃ and SOA in Autumn and Winter in Tongchuan, China	YI Xiao-xiao, LI Jiang-hao, LI Guang-hua, <i>et al.</i>	(140)
Emission Characteristics and Emission Factors of Volatile Organic Compounds from E-waste Dismantling and Recycling Processes	XIE Dan-ping, HUANG Zhong-hui, LIU Wang, <i>et al.</i>	(150)
Nonlinear Response Relationship Between Ozone and Precursor Emissions in the Pearl River Delta Region Under Different Transmission Channels	WU Yong-kang, CHEN Wei-hua, YAN Feng-hua, <i>et al.</i>	(160)
Characteristics of Ozone Pollution and Influencing Factors in Urban and Suburban Areas in Zibo	WANG Yu-yan, YANG Wen, WANG Xiu-yan, <i>et al.</i>	(170)
Pollution Characteristics and Health Risk of Heavy Metals in Fugitive Dust Around Zhaotong City	PANG Xiao-chen, HAN Xin-yu, SHI Jian-wu, <i>et al.</i>	(180)
Characteristics of Microplastic Present in Urban Road Dust	FANG Qin, NIU Si-ping, CHEN Yu-dong, <i>et al.</i>	(189)
Stable Isotopes of Precipitation in the Eastern Tarim River Basin and Water Vapor Sources	SONG Yang, WANG Sheng-jie, ZHANG Ming-jun, <i>et al.</i>	(199)
Characteristics and Risk Assessment of Antibiotic Contamination in Chishui River Basin, Guizhou Province, China	WU Tian-yu, LI Jiang, YANG Ai-jiang, <i>et al.</i>	(210)
Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Surface Water and Groundwater in Wuding River Basin	LI Shu-jian, HAN Xiao, WANG Wen-hui, <i>et al.</i>	(220)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nutrients and Heavy Metals in Sediments of the Fuhe River Influenced Area, Baiyangdian Lake	CHEN Xing-hong, LI Li-qing, ZHANG Mei-yi, <i>et al.</i>	(230)
Occurrence Characteristics of Microplastics in Mangrove Sediments in the Jiulong River Estuary and the Association with Heavy Metals	LIU Chang-jun, LUO Zhuan-xi, YAN Yu, <i>et al.</i>	(239)
Quantitative Analysis of the Correlation Between Macroenthos Community and Water Environmental Factors and Aquatic Ecosystem Health Assessment in the North Canal River Basin of Beijing	HU Xiao-hong, ZUO De-peng, LIU Bo, <i>et al.</i>	(247)
Analysis on the Spatial Variability Mechanism of the Characteristic Water Quality Factors of Urban River Channel Reclaimed Water	LIU Quan-zhong, PENG Ke, SU Zhen-hua, <i>et al.</i>	(256)
DOM Characteristics Analysis of Surface Sediment-overlying Water in Suzhou Landscape River Course	LI Chao-nan, HE Jie, ZHU Xue-hui, <i>et al.</i>	(267)
Distribution of Typical Pollutants from Rainwater Sewer Sediments in Suzhou City	YE Rong, SHENG Ming-jun, JIANG Yong-bo, <i>et al.</i>	(277)
Persistent Inhibition of Ammonium Released from Contaminated Sediments Through a Modified Zeolite and Biofilm System Enhanced by Signaling Molecules	XU Jin-lan, XU Yang, LI Xiu-min, <i>et al.</i>	(285)
Effects of the Three Gorges Reservoir Operation on Vertical Distribution of Chlorophyll a and Environmental Factors in Tributaries	TIAN Pan, LI Ya-li, LI Ying-jie, <i>et al.</i>	(295)
Characteristic Analysis of <i>nirS</i> Denitrifying Bacterial Community in Lijiahe Reservoir During Stratification	LIANG Wei-guang, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i>	(306)
Spatial and Temporal Distribution of Aerobic Denitrification Bacterial Community in Sediments of Gangnan Reservoir	ZHANG Zi-wei, CHEN Zhao-ying, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i>	(314)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metal Elements for Groundwater in the Ningxia Region of China	WANG Xiao-dong, TIAN Wei, ZHANG Xue-yan	(329)
Geochemical Characteristics and Driving Factors of High-Iodine Groundwater in Rapidly Urbanized Delta Areas: A Case Study of the Pearl River Delta	LU Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i>	(339)
Multimedia Distribution Characteristics and Risk Assessment of 22 PPCPs in the Water Environment of Qingpu District, Yangtze River Delta Demonstration Area	ZHANG Zhi-bo, DUAN Yan-ping, SHEN Jia-hao, <i>et al.</i>	(349)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of 209 Polychlorinated Biphenyls in Dongting Lake and the Inflow Rivers	HUANG Zhi-feng, ZHENG Bing-hui, YIN Da-qiang, <i>et al.</i>	(363)
Estimation of Nitrous Oxide Emission from River System Based on Water Discharge and Dissolved Nitrous Oxide Concentration	LI Bing-qing, HU Min-peng, WANG Ming-feng, <i>et al.</i>	(369)
Comparison Between Tributary and Main Stream and Preliminary Influence Mechanism of CO ₂ Flux Across Water-air Interface in Wanzhou in the Three Gorges Reservoir Area	QIN Yu, OUYANG Chang-yue, WANG Yu-xiao, <i>et al.</i>	(377)
Preparation of Functional Attapulgite Composite and Its Adsorption Behaviors for Congo Red	LIAO Xiao-feng, ZHONG Jing-ping, CHEN Yun-nen, <i>et al.</i>	(387)
Adsorption Characteristics and Long-term Effectiveness Evaluation of Iron-nitrogen Co-doped Biochar for Secondary Water-Soluble Organic Matter	WU Chen-xi, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i>	(398)
Nitrification Performance of Zeolite Moving Bed Biofilm Reactor for Ammonium Wastewater Treatment	DENG Cui-lan, GUO Lu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i>	(409)
Effect of Temperature on ANAMMOX Process in Sequencing Batch Biofilm Reactors: Nitrogen Removal Performance and Bacterial Community	WU Shan, WANG Shu-ya, WANG Fen, <i>et al.</i>	(416)
Effects of Carriers on ANAMMOX Sludge Activity Recovery and Microbial Flora Characteristics	LUO Jing-wen, YANG Jin-jin, LI Shao-kang, <i>et al.</i>	(424)
Spatial Distribution and Source Analysis of Soil Heavy Metals in a Small Watershed in the Mountainous Area of Southern Ningxia Based on PMF Model	XIA Zi-shu, BAI Yi-ru, WANG You-qi, <i>et al.</i>	(432)
Heavy Metal Concentration Characteristics and Health Risks of Farmland Soils in Typical Pyrite Mining Area of the Central Zhejiang Province, China	CHENG Xiao-meng, SUN Bin-bin, WU Chao, <i>et al.</i>	(442)
Risk Zoning of Heavy Metals in a Peri-urban Area in the Black Soil Farmland Based on Agricultural Products	WU Song-ze, WANG Dong-yan, LI Wen-bo, <i>et al.</i>	(454)
Main Control Factors of Cadmium Content in Rice in Carbonate Rock Region of Guangxi Based on the DGT Technique	SONG Bo, XIAO Nai-chuan, MA Li-jun, <i>et al.</i>	(463)
Inhibitory Effects of Soil Amendment Coupled with Water Management on the Accumulation of Cd and Pb in Double-Cropping Rice	LI Lin-feng, WANG Yan-hong, LI Yi-chun, <i>et al.</i>	(472)
Characteristics and Health Risk Assessment of Cadmium, Lead, and Arsenic Accumulation in Leafy Vegetables Planted in a Greenhouse	DONG Jun-wen, GAO Pei-pe, SUN Hong-xin, <i>et al.</i>	(481)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyls in E-waste Disposal Residue-Soil-Vegetable	ZHANG Ya-ping, LÜ Zhan-lu, WANG Xian-jiang, <i>et al.</i>	(490)
Soil-crop Distribution and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides on Typical Agricultural Land in Southern Leizhou Peninsula	LIANG Xiao-hui, XIE Qi-lai, ZHENG Qian, <i>et al.</i>	(500)
Effects of Heavy Metal Content on Fungal Community Structure in Urban Soil	GUO Da-lu, ZHANG Jian, SHEN Si, <i>et al.</i>	(510)
Effects of Long-term Fertilization on Soil Nutrient Characteristics and Microbial Resource Restrictions in a Terrace on the Loess Plateau	WU Chun-xiao, GAO Xiao-feng, YAN Ben-shuai, <i>et al.</i>	(521)
Microbial Composition and Diversity in Soil of <i>Torreya grandis</i> cv. <i>Merrillii</i> Relative to Different Cultivation Years After Land Use Conversion	JIANG Ni-wen, LIANG Chen-fei, ZHANG Yong, <i>et al.</i>	(530)
Effect of Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizer and Organic Fertilizer on Soil Phosphatase Activity and Microbial Community	YANG Wen-na, YU Luo, LUO Dong-hai, <i>et al.</i>	(540)
Extracellular Enzyme Stoichiometry and Microbial Metabolism Limitation During Vegetation Restoration Process in the Middle of the Qinling Mountains, China	XUE Yue, KANG Hai-bin, YANG Hang, <i>et al.</i>	(550)
Effects of Biodegradable Film Raw Material Particles on Soil Properties, Wheat Growth, and Nutrient Absorption and Transportation	MIN Wen-hao, WANG Chun-li, WANG Li-wei, <i>et al.</i>	(560)
Effects of Stalk Incorporation on Soil Carbon Sequestration, Nitrous Oxide Emissions, and Global Warming Potential of a Winter Wheat-Summer Maize Field in Guanzhong Plain	WAN Xiao-nan, ZHAO Ke-yue, WU Xiong-wei, <i>et al.</i>	(569)