

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

经济快速发展区场地污染特征、源-汇关系与管控对策专辑

我国经济快速发展区工业VOCs排放特征及管控对策

孟博文, 李永波, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 周喜斌, 李金灵, 苏贵金

VOCs



制药



喷涂



橡胶

京津冀 •

• 长三角

珠三角 •

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年3月

第42卷 第3期
Vol.42 No.3

目次

经济快速发展区场地污染特征、源-汇关系与管控对策专辑

我国经济快速发展区工业 VOCs 排放特征及管控对策	孟博文, 李永波, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 周喜斌, 李金灵, 苏贵金 (1023)
长江经济带湖北省人为源 VOCs 排放清单及变化特征	代伶文, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 苏贵金, 黄利宏 (1039)
经济快速发展区六氯丁二烯的来源与分布特征	陶誉铭, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 苏贵金, 郭立新 (1053)
近 20 年中国表层土壤中多环芳烃时空分布特征及源解析	马妍, 程芦, 阮子渊, 史鹏飞, 路超君, 运晓彤, 李璐嫣, 徐雁秋, 史怡 (1065)
电子废物拆解区微塑料与周围土壤环境之间的关系	柴炳文, 尹华, 魏强, 卢桂宁, 党志 (1073)
焦化场地内外土壤重金属空间分布及驱动因子差异分析	顾高铨, 万小铭, 曾伟斌, 雷梅 (1081)
典型石化工业城市土壤重金属源解析及空间分布模拟	孙雪菲, 张丽霞, 董玉龙, 朱林宇, 王政, 吕建树 (1093)
多功能区工业园土壤和地表灰尘重金属污染及生态风险差异分析	曾伟斌, 顾高铨, 万小铭, 雷梅 (1105)
龙岩市某铁锰矿区土壤重金属地球化学空间分布特征与来源分析	王蕊, 陈楠, 张二喜, 李小赛 (1114)
基于全周期场地概念模型的场地环境精准调查应用案例	李培中, 吴乃瑾, 王海见, 张骥, 荣立明, 李翔, 魏文侠, 宋云 (1123)
造纸厂土壤中短链和中链氯化石蜡的污染特征和风险评估	张佩萱, 高丽荣, 宋世杰, 乔林, 徐驰, 黄帝, 王爽, 蒋思静, 郝明辉 (1131)
典型再生铜冶炼厂周边土壤中 PCDD/Fs、PCBs 和 PCNs 的污染特征及健康风险评估	胡吉成, 郭静, 许晨阳, 金军 (1141)
柠檬酸与磷共存对土壤吸附铅的影响	宋子腾, 左继超, 胡红青 (1152)
两种能源草田间条件下对镉和锌的吸收累积	郑瑞伦, 石东, 刘文菊, 孙国新, 侯新村, 胡艳霞, 朱毅, 武菊英 (1158)
钒钛磁铁矿尾矿库复垦土地及周边土壤-玉米重金属迁移富集特征	孙厚云, 卫晓峰, 孙晓明, 贾凤超, 李多杰, 李健 (1166)
盐胁迫下八宝景天不同生态型对土壤中 Cd 积累特征	郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 万小铭, 孟晓飞, 陈同斌, 何孟轲, 周小勇, 徐铁兵 (1177)
水分条件对生物炭钝化水稻土铅镉复合污染的影响	汤家庆, 张绪, 黄国勇, 胡红青 (1185)
壳聚糖改性生物炭对水稻土甲基汞生成及其稻米积累的影响	杨雪玲, 王明星, 徐国敏, 王定勇 (1191)
铬污染对土壤细菌群落结构及其构建机制的影响	于皓, 安益君, 金德才, 靳拓, 王兴润 (1197)
研究报告	
COVID-19 疫情期间京津冀大气污染物变化及影响因素分析	赵雪, 沈楠驰, 李令军, 武高峰, 陶静, 赵文吉 (1205)
2020 年初疫情管控对山东省空气质量影响的模拟	刘厚凤, 徐薇, 魏敏, 隋潇, 许鹏举, 李明燕, 张美根 (1215)
南京北郊 PM _{2.5} 中有机组分的吸光性质及来源	尚玥, 余欢, 茅宇豪, 王成, 谢鸣捷 (1228)
西安市大气棕碳污染特性及发色团种类	陈前, 陈庆彩 (1236)
淄博市道路尘细粒子携带金属元素的来源与健康风险评价	郭清源, 白雯宇, 赵雪艳, 郭丽瑶, 王敬华, 耿春梅, 王晓丽, 王静, 杨文, 白志鹏 (1245)
北京市控制 PM _{2.5} 污染的健康效益评估	杜沛, 王建州 (1255)
西宁市大气污染来源和输送季节特征	刘娜, 余晔, 马学谦 (1268)
青岛近海不同污染过程下大气颗粒态氮磷浓度分布特征	袁刚, 祁建华, 丁雪 (1280)
基于走航监测的长三角工业园区周边大气挥发性有机物污染特征	王红丽, 高雅琴, 景盛翱, 楼晟荣, 胡馨遥, 安静宇, 吴宇航, 高伟, 朱亮, 黄成 (1298)
山地型城市冬季大气重污染过程特征及成因分析	刘伟诚, 牛月圆, 吴婧, 闫雨龙, 胡冬梅, 邱雄辉, 彭林 (1306)
兰-白城市群主要大气污染物网格化排放清单及来源贡献	王文鹏, 王占祥, 李继祥, 高宏, 黄韬, 毛蒲萱, 马建民 (1315)
2012~2019 年北京市储油库 VOCs 去除及排放水平变化监测分析	华岚英, 崔彤, 李金香, 邹本东, 杨妍妍, 程刚 (1328)
生活垃圾无害化处理大气污染物排放清单	马占云, 姜昱聪, 任佳雪, 张阳, 冯鹏, 高庆先, 孟丹 (1333)
长江口邻近海域表层沉积物中的细菌霍多醇及对低氧区的响应判别	尹美玲, 段丽琴, 宋金明, 张乃星 (1343)
鄱阳湖流域水体和水产品中苯酚的暴露特征及人体健康风险评估	徐倩云, 艾舜豪, 高祥云, 王晓南, 刘征涛, 赵师晴, 葛刚, 李霖 (1354)
衡水湖湿地水环境质量时空变化特征及污染源分析	刘魏魏, 郭子良, 王大安, 张曼胤, 张余广 (1361)
丹江口水库及其入库支流水体中微塑料组成与分布特征	潘雄, 林莉, 张胜, 翟文亮, 陶晶祥, 李丹文 (1372)
金盆水库暴雨径流时空演变过程及水质评价	黄诚, 黄廷林, 李扬, 李楠, 齐允之, 司凡, 华逢耀, 赵凌云 (1380)
汛期暴雨径流对饮用水水库溶解性有机质 (DOM) 光谱特征的影响	李程遥, 黄廷林, 温成成, 梁伟光, 林子深, 杨尚业, 李凯, 蔡晓春 (1391)
苏州古城区河道碳氮磷类污染物的分布特征	白冬锐, 张涛, 陈坦, 王洪涛, 金曦, 郑凯旋, 李忠磊, 杨婷, 金军 (1403)
娘子关泉群水化学特征及成因	唐春雷, 赵春红, 申豪勇, 梁永平, 王志恒 (1416)
过氧化钙重塑底泥对水中磷酸盐的吸附作用	徐楚天, 李大鹏, 王子良, 吴宇涵, 许鑫澎, 黄勇 (1424)
亚热带丘陵区绿狐尾藻人工湿地处理养猪废水氮磷去向	王丽莎, 李希, 李裕元, 张满谔, 吴金水 (1433)
紫外/亚硫酸盐高级还原工艺加速降解水中难降解含碘造影剂	刘子奇, 仇付国, 赖曼婷, 李津, 董慧岭, 强志民 (1443)
太阳能热活化过硫酸盐降解染料罗丹明 B 的效能	马萌, 许路, 金鑫, 金鹏康 (1451)
一步法 La@MgFe ₂ O ₄ 的制备及其吸附水中磷的性能	白润英, 宋博文, 张戎, 郝俊峰, 刘建明, 刘宇红 (1461)
工程规模长填龄渗滤液膜生物-纳滤组合设施各单元污染物去除效能	邵立明, 邓樱桃, 仇俊杰, 吕凡, 章骅, 何品品 (1469)
ANAMMOX 培养物中硫酸盐型氨氧化生物转化机制	毕贞, 董石语, 黄勇 (1477)
不同季节城市污水处理厂微生物群落特性	贺赞, 李魁晓, 王佳伟, 王慰, 樊鹏超, 陈行行, 王军静 (1488)
麻黄碱在斑马鱼体内的器官特异性蓄积及毒代动力学	殷行行, 郭昌胜, 邓洋慧, 邱紫雯, 张艳, 滕彦国, 徐建 (1496)
内蒙古白云鄂博矿区土壤稀土元素污染特征及评价	王哲, 赵莹晨, 骆逸飞, 郑春丽, 卞园, 张光宇 (1503)
广西典型岩溶区农田土壤-作物系统 Cd 迁移富集影响因素	马宏宏, 彭敏, 郭飞, 刘飞, 唐世琪, 杨峰, 张富贵, 周亚龙, 杨柯, 李括, 刘秀金 (1514)
超顺磁性纳米材料对镉污染稻田土壤微生物和酶的影响	方丹丹, 张立志, 王强 (1523)
水分管理与施硅对水稻根表铁膜及砷镉吸收的影响	陈佳, 赵秀兰 (1535)
四环素类抗生素对土壤-生菜系统的生物效应及其迁移降解特性	王卫中, 迟苏琳, 徐卫兰 (1545)
地膜覆盖对菜地垄沟 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	熊维霞, 江长胜, 赵仲婧, 曾唯, 胡曼利, 涂婷婷, 陈俊江, 郝庆菊 (1559)
对比研究生物炭和秸秆对麦玉米轮作系统 N ₂ O 排放的影响	唐占明, 刘杏认, 张晴雯, 李贵春 (1569)
流域生态空间管控下生境监测方法概述	阴琨, 刘海江, 王光, 金小伟 (1581)
《环境科学》征订启事 (1151) 《环境科学》征稿简则 (1342) 信息 (1402, 1415, 1580)	

广西典型岩溶区农田土壤-作物系统 Cd 迁移富集影响因素

马宏宏^{1,2,3}, 彭敏^{1,2,3*}, 郭飞^{1,2,3}, 刘飞^{1,2,3}, 唐世琪^{1,2,3}, 杨峥^{1,2,3}, 张富贵^{1,2,3}, 周亚龙^{1,2,3}, 杨柯^{1,2,3}, 李括^{1,2,3}, 刘秀金^{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: 为揭示岩溶区农田土壤-作物系统 Cd 迁移富集主要影响因素, 选择广西典型岩溶区根系土-水稻籽实 Cd 含量及土壤 pH 值、有机质 (OM)、氧化物含量和质地数据, 通过 Spearman 相关性分析和主成分分析 (PCA), 开展了土壤理化性质对土壤和水稻籽实 Cd 含量的影响研究. 结果表明, 相比于全国土壤背景基准值, 研究区土壤中总氧化铁 (TFe_2O_3)、三氧化二铝 (Al_2O_3) 和氧化锰 (MnO) 相对富集, 平均含量分别为 20.2%、19.0% 和 0.2%, 且区内广泛发育 Fe-Mn 结核; 而二氧化硅 (SiO_2) 相对亏损, 平均含量为 41.0%, 呈现出典型的“脱硅富铝铁”特征, 表明研究区土壤经历了较强烈的风化淋溶作用. 相关性分析结果显示, 土壤 TFe_2O_3 和 MnO 含量分别与土壤总 Cd 含量和残渣态 Cd 百分比呈显著的正相关性, 与有效态 Cd 含量、水稻籽实 Cd 含量和 Cd 的生物富集系数 (BCF) 呈显著的负相关性. PCA 分析结果也显示, 土壤 TFe_2O_3 和 MnO 含量是影响土壤-作物系统 Cd 迁移富集的主要因素, 而土壤 pH 值、OM 和 Al_2O_3 含量等影响程度较小, SiO_2 含量和土壤质地间接地影响土壤-作物系统 Cd 的迁移富集. 综合研究认为, 土壤在交替氧化和还原条件下所形成的新生体 Fe-Mn 结核对 Cd 具有较强的吸附和固定作用, 导致 Cd 在残渣态中相对富集, 降低了土壤 Cd 的活动性, 因此 Fe-Mn 结核是研究区土壤 Cd 生物有效性的主要影响因素.

关键词: 岩溶区; Cd; 生物有效性; Fe-Mn 结核; 土壤-作物系统

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)03-1514-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202007138

Factors Affecting the Translocation and Accumulation of Cadmium in a Soil-Crop System in a Typical Karst Area of Guangxi Province, China

MA Hong-hong^{1,2,3}, PENG Min^{1,2,3*}, GUO Fei^{1,2,3}, LIU Fei^{1,2,3}, TANG Shi-qi^{1,2,3}, YANG Zheng^{1,2,3}, ZHANG Fu-gui^{1,2,3}, ZHOU Ya-long^{1,2,3}, YANG Ke^{1,2,3}, LI Kuo^{1,2,3}, LIU Xiu-jin^{1,2,3*}

(1. Institute of Geophysical & 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: To understand the main factors influencing the translocation and accumulation of cadmium (Cd) in soil-crop systems in typical karst areas, 68 sets of paddy soil and rice grain samples were collected in Guangxi Province. These were used to analyze Cd concentrations and soil properties (pH, organic matter (OM) content, oxide content, and texture). Spearman's correlation coefficients and principal component analysis (PCA) were used to examine the effects of soil properties on Cd concentrations and identify the main influencing factors. The studied soils were highly enriched in iron oxide (TFe_2O_3), aluminum oxide (Al_2O_3), and manganese oxide (MnO) compared to background levels, with average concentrations of 20.2%, 19.0%, and 0.2%, respectively. However, the soils are relatively depleted in silica (SiO_2), with an average concentration of 41.0%. The soils are strongly weathered and leached in study area, giving rise to rich occurrences of Fe-Mn nodules. The concentrations of TFe_2O_3 and MnO in the study soils were significantly correlated with soil Cd, rice seed Cd, and the Cd bioconcentration factor (BCF). The PCA analysis further showed that TFe_2O_3 and MnO in soils were the main factors affecting the migration and enrichment of Cd while soil pH, OM, and Al_2O_3 had less of an influence. Furthermore, SiO_2 and soil texture indirectly affected the migration and enrichment of Cd. It is suggested that the Fe-Mn nodules effectively adsorb and immobilize Cd in the study area soils, acting as a heavy metal scavenger that reduced the biological accessibility of Cd.

Key words: karst area; cadmium; bioavailability; Fe-Mn nodules; soil-crop system

镉 (Cd) 是一种有毒的重金属元素, 对土壤生物活性、植物代谢和人与动物的健康具有严重的危害^[1]. 例如: Cd 会导致植物丧失酶活性和细胞壁通透性、叶片萎黄病和积累非正常的代谢化合物^[2]; 人类接触或摄入高含量 Cd 会导致骨骼疾病、神经

收稿日期: 2020-07-14; 修订日期: 2020-08-27

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (DD20160313, DD20190522); 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所基本科研业务项目 (JY201906)

作者简介: 马宏宏 (1992~), 男, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为生态地球化学, E-mail: mahonghong@igge.cn

* 通信作者, E-mail: pengmin@igge.cn; liuxiujin@igge.cn

和消化道损伤以及癌症等^[3]. Cd 一般通过基岩风化成土过程或人为活动进入土壤中.

Cd 在环境中具有较强的持久性, 土壤中积累高含量的 Cd 被植物所吸收, 通过食物链进入人体是人类最重要的接触途径^[4]. 水稻是我国南方最主要的粮食作物, Cd 含量超标的土壤中产出的水稻, 将对当地居民构成健康威胁^[5]. 因此, 农田土壤-作物系统 Cd 污染风险及其影响因素等已经成为广大环境科学工作者的研究热点.

我国西南喀斯特岩溶区表层土壤中高 Cd 含量异常, 通常被认为主要与地质成因有关, 局部受到了采矿和冶炼等人为活动的影响^[6,7]. 全国土壤污染详查结果显示^[3], 广西表层土壤 Cd 含量的平均值是全国表层土壤的 4.5 倍. 广西典型的岩溶地貌在温暖湿润的亚热带季风气候作用下, 母岩碳酸盐岩在成土过程中发生了强烈的淋溶, 导致 Cd 富集, 是土壤中 Cd 含量偏高的重要原因^[8]. 前期针对广西典型碳酸盐岩区农田土壤重金属生物有效性的研究发现^[9], 本研究区土壤中 Cd 表现出高含量、低活性和低生态风险的特点. 此外, 针对广西岩溶区土壤和作物 Cd 的污染状况已有了大量的报道^[8,10,11]. 然而土壤-作物系统中 Cd 的活化、迁移、吸收和利用是一个复杂的动态过程, 受 Cd 的化学形态、土壤性质、微生物活动和作物品种等多种因素的影响, 已有的研究结果缺乏对广西岩溶区土壤-作物系统 Cd 迁移富集的主要控制因素研究.

一般来说, Cd 在土壤中的迁移率和生物有效性受吸附-解吸过程的控制, 该过程与土壤酸碱度 (pH 值)、有机质含量 (OM)、阳离子交换量 (CEC)、氧化

还原电位 (Eh)、黏土矿物、铁锰氧化物和土壤质地等因素有着密切的联系^[12~14]. 土壤 pH 值通常被认为在决定土壤中 Cd 的化学形式、迁移率和生物有效性方面起着重要的作用. 有研究证实, 土壤 pH 值与 Cd 的活动态组份和生物富集系数 (BCF) 之间存在负相关关系, 随着 pH 值的降低, 土壤对 Cd 的解吸与土壤溶液对 Cd 溶解作用显著增加, Cd 的迁移率和生物有效性越高^[7,15~17]. 土壤 OM 含量也是影响 Cd 生物有效性的重要因素之一, OM 可以结合土壤中的 Cd 形成可溶性或不可溶性的有机络合物, 从而影响 Cd 的生物有效性^[15]. 黏土矿物、金属氧化物或氢氧化物可以通过吸附、固定的方式降低 Cd 活性^[12], 例如: 土壤中铝土矿可以包裹、吸附 Cd 或 Cd 以类质同象的形式赋存在矿物晶格中, 使其被固定, 从而降低了 Cd 的迁移率^[18]; 土壤中 Fe-Mn 结核对重金属有很强的吸附能力, 被认为是土壤中重金属的重要清除剂^[19,20].

本文采用 Spearman 相关性和主成分分析 (PCA) 方法, 探讨了广西典型岩溶区土壤 pH 值、OM、氧化物和质地等理化性质对土壤总 Cd 含量、Cd 的化学形态和 Cd 生物富集系数的影响, 识别了土壤 Cd 生物有效性的主要控制因素, 以期为岩溶区 Cd 污染土壤的安全利用和修复治理提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于广西壮族自治区横县横州镇东北部, 与马岭镇毗邻, 总面积约 40 km² (图 1). 横州镇

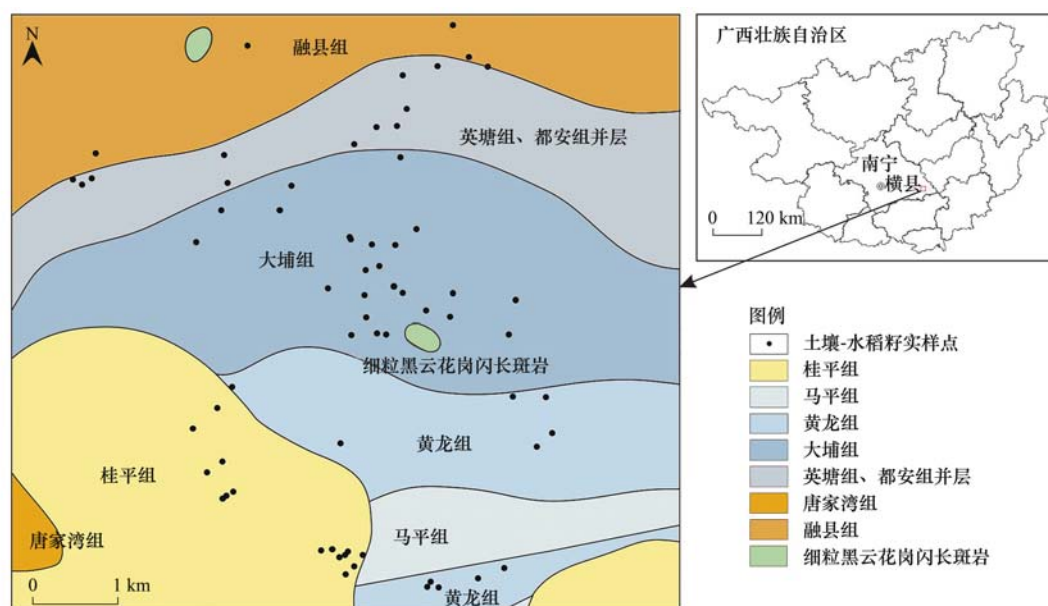


图 1 研究区地理位置、地层分布和和采样点位

Fig. 1 Geographical location, strata distribution, and sampling sites in the study area

是横县县城所在地,郁江穿城而过,水陆交通便利.该区属亚热带季风气候,太阳辐射强,日照充足,气候温暖,雨量充沛,夏长冬短,适宜水稻、茶叶和甘蔗等农作物和经济作物生产.区内地貌以丘陵和平原为主,是典型的喀斯特岩溶区.区内主要出露地层为泥盆纪唐家湾组和融县组,石炭纪英塘组、都安组、大埔组、黄龙组和马平组,岩性为碳酸盐岩;西南部出露地层为南华纪桂平组,岩性为碎屑岩.主要土壤类型为沙壤土.主要土地利用类型为农用地,包括水田、旱地和林地.区内经济发展以农业为主,无发达的工业.研究区土壤中广泛分布着粒径大小不等的 Fe-Mn 结核,呈近乎规则的球体和椭球体.

1.2 样品采集

按照文献[21]中的作物及根系土样品采集技术标准,共采集土壤和水稻籽实样品 68 套(各 68 件,图 1).在水稻成熟期采集水稻及对应根系土样品,每个采样点划设 3 个以上采样小区,每个采样小区用剪刀采集 10~20 株水稻穗,组合成一件分析样品,用尼龙网兜装样.在水稻样品的根系处,用不锈钢铲采集对应根系土样品,等量组合成一件土壤样品,用布袋装样.采集的土壤和水稻籽实样品,悬挂在整洁的室内自然阴干.土壤样品阴干过程中,适时翻动并用木棒敲碎防止黏结,阴干后剔除石块和植物根系等杂质,用橡胶锤反复碾压,过 10 目(2 mm)的尼龙筛,直至全部样品过筛为止;过筛后的土壤样品混合均匀,装入聚乙烯塑料瓶中送至实验室.水稻籽实样品直接送往实验室,实验室将水稻穗脱粒后做进一步加工分析.

1.3 样品分析

土壤和水稻籽实样品的测试分析工作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.实验室采用等离子体质谱法(ICP-MS)测定土壤 Cd 含量;用粉末压片-X 射线荧光光谱法(XPF)测定土壤二氧化硅(SiO_2)、三氧化二铝(Al_2O_3)、总氧化铁(TFe_2O_3)和氧化锰(MnO)含量;用电位法(POT)和氧化燃烧电位法(POT)分别测定土壤 pH 值和 OM 含量;分析过程中加入国家一级标准土壤样品监控分析测试的准确度,采用重复样监控分析测试的精密度.结果显示,所有元素和指标一级标准物质合格率均为 100%,重复样品合格率符合文献[22]中的样品分析质量控制要求.水稻籽实 Cd 含量采用等离子体质谱仪法(ICP-MS)测定,分析质量符合文献[23]中的生物样分析质量控制要求.

土壤 Cd 的赋存形态和土壤质地分析工作由安徽省地质实验室完成.用七步顺序提取法提取各赋存形态,采用全谱直读电感耦合等离子体发射光谱

(ICP-OES, IRIS Intrepid II)测定各形态含量;用比重计法测定土壤机械组成.详细的形态提取方法见文献[9,23].

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2013 和 SPSS 19.0 进行数据的描述性统计和相关性分析,用 Arcgis 10.2 和 CorelDRAW X7 进行图形处理.采用 SPSS 分析模块的 Kolmogorov-Smirnov(K-S)对各指标含量进行正态分布检验.结果表明,除水稻籽实 Cd 含量、Cd 的生物富集系数(BCF)和铁锰氧化物结合态(F_5)Cd 的相对含量不符合正态分布特征外,其他指标均符合正态分布特征.采用 Spearman 相关系数来衡量两个变量之间的相关性,并对相关指标含量进行主成分分析(PCA).

2 结果与分析

2.1 土壤总 Cd 含量与各赋存形态特征

研究区土壤总 Cd 含量统计结果见表 1.土壤总 Cd 含量在 $0.47 \sim 5.15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,平均值为 $1.91 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,高于全国土壤背景值 $0.14 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ [24].

研究区土壤中 Cd 各赋存形态占土壤总 Cd 百分比的相对含量(质量分数)特征见图 2.由于水溶态(F_1)Cd 的相对含量在 $0.04\% \sim 4.24\%$ 之间,平均值为 0.46% ,相对含量极低,这里将水溶态(F_1)与离子交换态(F_2)相加进行统计分析,称作可交换态($F_1 + F_2$).结果显示,土壤中 Cd 主要以残渣态(F_7)存在, F_7 态 Cd 的相对含量为 $26.50\% \sim 80.38\%$,平均值为 58.10% , F_7 态 Cd 被认为其化学性质相对稳定,不易被植物所吸收利用[25]. $F_1 + F_2$ 态 Cd 的相对含量为 $6.32\% \sim 39.16\%$,平均值为 16.80% , $F_1 + F_2$ 态是土壤中 Cd 最活跃的部分,易被植物吸收利用.腐殖酸结合态(F_4)Cd 的相对含量在 $0.77\% \sim 39.63\%$ 之间,平均值为 12.20% , F_4 态是指被有机质吸附,结合力较弱的部分[16].铁锰氧化物结合态(F_5)Cd 的相对含量在 $2.79\% \sim 22.52\%$ 之间,平均值为 5.76% , F_5 态是指被铁锰氧化物包裹或本身为氢氧化物沉淀的部分,在还原条件下可重新释放进入土壤[25].碳酸盐结合态(F_3)Cd 的相对含量在 $1.34\% \sim 10.68\%$ 之间,平均值为 4.20% , F_3 态是指被束缚在碳酸盐中的部分, F_3 态对 pH 值敏感,当 pH 值降低时可重新释放进入土壤[25].强有机结合态(F_6)Cd 的相对含量在 $0.12\% \sim 5.15\%$ 之间,相对含量较低,平均值为 2.94% .

2.2 土壤 pH 值、OM、氧化物和质地特征

研究区土壤以酸性为主,pH 值变化范围为 $4.6 \sim 7.8$,其中 60.3% 的土壤 pH 值 < 6.5 (表 1).土壤

表 1 研究区土壤 Cd 含量和土壤理化性质统计¹⁾

项目	Cd-S	Cd-R	Cd-B	pH	OM	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe ₂ O ₃	MnO
最小值	0.47	0.01	0.003	4.6	2.5	28.5	11.1	7.0	0.02
最大值	5.15	0.41	0.735	7.8	10.4	68.5	28.3	40.0	0.5
平均值	1.91	0.07	0.076	6.1	5.5	41.0	19.0	20.2	0.2
标准差	1.0	0.1	0.2	0.9	1.5	10.3	3.9	9.5	0.1
变异系数/%	53.4	134.3	207.4	14.7	26.2	25.2	20.6	46.8	76.8
全国土壤背景基准值 ^[24]	0.14	—	—	8	1.0	66.7	11.9	4.2	0.07

1) Cd-S 和 Cd-R 分别表示土壤和水稻籽实中 Cd 含量; Cd-B 表示 Cd 的生物富集系数; Cd-S 和 Cd-R 单位为 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; Cd-B 和 pH 值无量纲; 其他为%

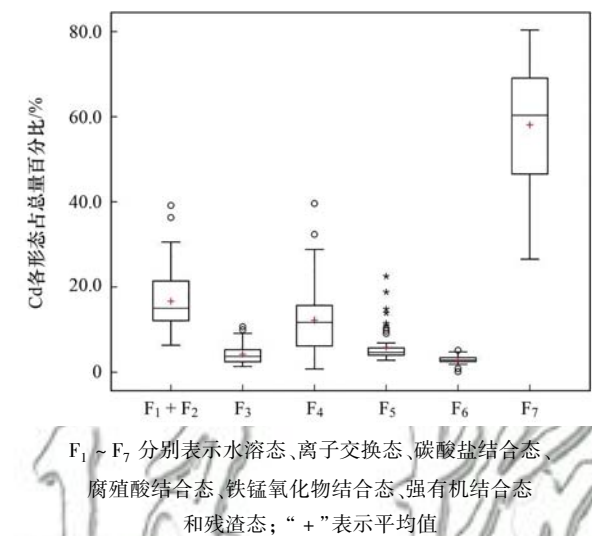


图 2 土壤 Cd 各形态占总量百分比

Fig. 2 Percent distributions of soil cadmium in F₁-F₇ fractions based on sequential extractions

OM 含量变化范围为 2.5% ~ 10.4%, 平均值为 5.5%, 明显高于全国土壤背景基准值(1.0%)^[24].

土壤 SiO₂ 平均含量为 41.0%, 低于全国土壤背景基准值(66.7%), 然而土壤中 Al₂O₃、TFe₂O₃ 和 MnO 平均含量分别为 19.0%、20.2% 和 0.2%, 分别是全国土壤背景基准值的 1.6、4.8 和 2.9 倍(表 1), 表明研究区土壤 Al₂O₃、TFe₂O₃ 和 MnO 相对富集, 而 SiO₂ 相对贫化. 在亚热带地区高温多雨的条件下, 土壤成土过程中通常经历了强烈的风化淋溶作用, 母岩(成土母质)中硅酸和盐基大量淋失, 而黏土等次生矿物不断形成, 导致铁铝氧化物显著富集, 从而出现“脱硅富铝铁”效应. 相关性分析显示, 研究区土壤 TFe₂O₃ 与 MnO 成极强的线性正相关, 相关性系数 $r = 0.86$; SiO₂ 与 TFe₂O₃、MnO 成极强的负相关性, 相关系数分别为 $r = -0.93$ 和 $r = -0.92$ (图 3). 然而 Al₂O₃ 与 SiO₂、TFe₂O₃ 和 MnO 之间无显著的相关性(图 3).

研究区土壤中存在的大量 Fe-Mn 结核, 可能是导致土壤中 TFe₂O₃ 和 MnO 含量升高的重要原因之一. Fe-Mn 结核是土壤在交替氧化和还原条件下形

成的新生体, 常见于热带和亚热带土壤中, 成近乎完美的球状和椭球状, 粒径从几 mm 到几 cm 不等^[20,26]. Fe-Mn 结核通常包含土壤基质, 并在 Fe 和 Mn 氧化物的影响下胶结土壤物质(如骨骼颗粒和黏土矿物等), 相比于周围土壤基质具有更高的 TFe₂O₃ 和 MnO 含量^[19,20,27]. 例如: 苏春田等^[27] 对广西黎塘岩溶区土壤 Fe-Mn 结核地球化学特征的研究结果表明, Fe-Mn 结核中 Fe₂O₃ 含量由对应土壤中的 8.41% 增加到了 43.67%, MnO 的含量由土壤中的 0.05% 增加到了 0.17%, 而 SiO₂ 的平均含量低于对应土壤, 具有成核减弱的作用.

土壤质地(即土壤机械组成)指土壤中各级土粒含量的相对比例(所占质量分数)及其土壤砂黏性质. 研究区土壤机械组成特征统计结果见表 2, 相比而言, 土壤机械组成以砂粒(0.02 ~ 2 mm)为主, 平均值为 43.7%; 其次为黏粒, 平均值为 31.7%.

表 2 土壤机械组成特征/%

项目	砂粒 (0.02 ~ 2 mm)	粉砂 (0.002 ~ 0.02 mm)	黏粒 (< 0.002 mm)
最小值	7.8	11.3	11.0
最大值	77.6	43.1	65.3
平均值	43.7	24.6	31.7
标准差	19.7	6.0	17.5
变异系数/%	45.1	24.3	55.1

2.3 水稻籽实 Cd 含量特征与生物富集系数

研究区水稻籽实中 Cd 的含量与水稻籽实 Cd 的生物富集系数(BCF)特征见表 1. 水稻籽实中 Cd 的含量在 0.01 ~ 0.41 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 平均值为 0.07 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

生物富集系数(BCF)可以反映农作物从土壤中吸收富集重金属的能力, 用农作物某部位重金属含量与对应土壤中重金属含量的比值表示^[28]. 研究区水稻籽实 Cd 的 BCF 大小在 0.003 ~ 0.735 之间, 平均值为 0.076, 与已有的研究结果水稻籽实 Cd 的 BCF 在 0.014 ~ 1.470^[29] 和 0.003 ~ 3.400^[30] 之间相比, 本研究区水稻籽实 Cd 的 BCF 明显较低, 详细描

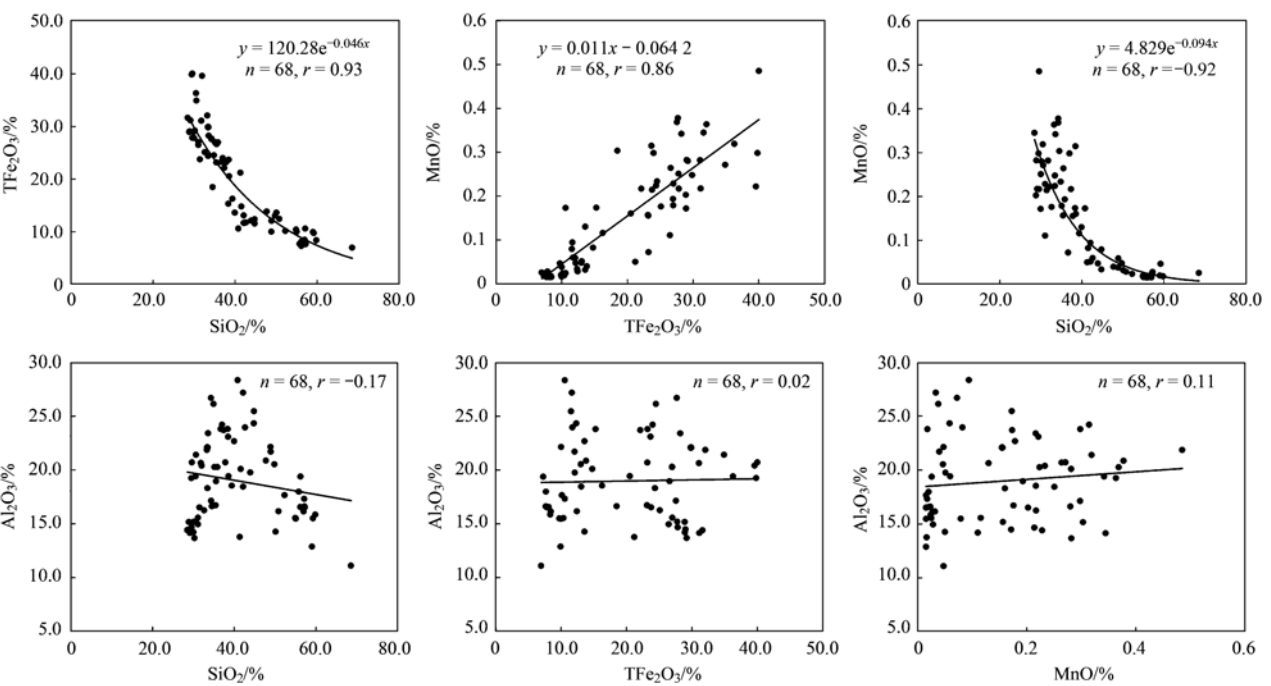


图3 土壤中各氧化物的二元相关
Fig. 3 Correlation diagrams between soil oxides

述见文献[9].

3 讨论

3.1 土壤 Cd 含量对水稻籽实中 Cd 的影响

重金属在土壤-植物系统中的迁移转化是一个复杂动态的生物地球化学过程,该过程受重金属自

身化学性质影响的同时,在一定程度上受土壤物理、化学和生物特征的控制^[31]. 本文采用 Spearman 相关性分析法,探讨土壤总 Cd 含量、Cd 各化学形态相对含量及 pH 值、OM 等理化性质对土壤-植物系统 Cd 生物有效性的影响. Spearman 相关性分析结果见表 3.

表3 土壤理化性质与 Cd 含量相关性¹⁾

Table 3 Relationships between cadmium content and soil properties								
	Cd-S	Cd-R	pH	OM	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe ₂ O ₃	MnO
Cd-S	1.000	-0.437 **	0.331 **	0.147	-0.837 **	0.191	0.789 **	0.820 **
F ₁ + F ₂	-0.384 **	0.430 **	-0.016	0.183	0.570 **	0.317 **	-0.566 **	-0.362 **
F ₃	0.060	-0.045	-0.197	0.072	0.019	-0.338 **	-0.150	-0.017
F ₄	-0.032	0.242 *	0.441 **	0.141	0.167	0.666 **	-0.101	0.136
F ₅	0.138	0.147	0.003	0.154	0.099	0.056	-0.153	0.014
F ₆	-0.059	0.265 *	0.417 **	0.178	0.266	0.584 **	-0.224	-0.050
F ₇	0.205	-0.393 **	-0.174	-0.185	-0.418 **	-0.499 **	0.411 **	0.132
Cd-R	-0.437 **	1.000	0.020	-0.224	0.571 **	0.090	-0.417 **	-0.316 **
Cd-B	-0.729 **	0.924 **	-0.103	-0.232	0.766 **	0.012	-0.630 **	-0.232

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

一般来说,随着土壤总 Cd 含量的升高,F₁ + F₂ 态 Cd 的含量相应上升,Cd 的活性也相应增加^[32]. 然而,研究区土壤总 Cd 含量与 F₁ + F₂ 态 Cd 的相对含量呈负相关性($r = -0.384, P < 0.01$),说明随着土壤总 Cd 含量的升高,F₁ + F₂ 态 Cd 的相对含量降低. 有研究显示^[16],自然成土过程中,Cd 总量的增加主要是稳定态 Cd 含量的增加,活动态 Cd 含量会略微降低,不会增大 Cd 的生态危害性.

研究区土壤总 Cd 含量分别与水稻籽实 Cd 含量($r = -0.437, P < 0.01$)和 Cd 的 BCF ($r =$

$-0.729, P < 0.01$)呈显著负相关性,水稻籽实 Cd 的含量和 Cd 的 BCF 随着土壤中总 Cd 含量的增加而降低,可见,土壤总 Cd 含量并不是影响作物中 Cd 含量的决定性因素. F₁ + F₂ 态 Cd 的相对含量与水稻籽实 Cd 含量呈正相关性($r = 0.430, P < 0.01$),说明活动态 Cd 含量是预测作物中 Cd 含量和土壤 Cd 生物有效性的良好指标,这一观点得到了之前研究土壤和沉积物中 Cd 的生物利用度结果的支持^[13,33]. F₇ 态 Cd 的相对含量与水稻籽实 Cd 含量呈负相关性($r = -0.393, P < 0.01$),这与 F₇ 态 Cd

主要存在于矿物晶格,短时间难以被植物所吸收和利用的认识一致^[34]。

3.2 土壤 pH 值和 OM 对土壤和水稻籽实中 Cd 的影响

土壤 pH 值会显著影响土壤中重金属的溶解和迁移^[35]。土壤 pH 值越低, H^+ 越多, 重金属被解吸得越多, 导致重金属活动性增加, 加大了重金属向作物体内的迁移率^[36]。研究区土壤 pH 值与土壤总 Cd 含量呈正相关性($r=0.331$, $P<0.01$, 表 3), 说明碱性条件下土壤 Cd 含量会相对增加, 可能的原因是 $CdHCO_3$ 溶解度较低, 在碱性条件下相对稳定, Cd 不容易被淋溶迁移^[37]。土壤 pH 值分别与 F_4 态 Cd($r=0.441$, $P<0.01$) 和 F_6 态 Cd($r=0.417$, $P<0.01$) 的相对含量呈正相关性, 说明 pH 值越高, 越有利于 F_4 和 F_6 态 Cd 的存在。有研究表明^[12,38], 土壤中 Cd 可移动形式主要为 Cd^{2+} , 在酸性土壤环境下, 与土壤固相的结合作用较弱, 会优先析出, 从而增加 Cd 的活性。研究区土壤 pH 值与 $F_1 + F_2$ 态 Cd 的相对含量和水稻籽实 Cd 含量没有显著的相关性, 表明 pH 值不是区内土壤 Cd 生物有效性的主要影响因素。

土壤 OM 由于其高的比表面积和含有的大量 S—、O—和 N—官能团而成为重金属的有效吸附剂, 通过与重金属形成各种可溶或不可溶性有机络合物, 控制重金属的固定和迁移, 从而降低或提高重金属的生物有效性^[12]。根据文献^[39]的报道, 腐殖酸的加入降低了富含重金属土壤中 $F_1 + F_2$ 态重金属的含量, 说明 OM 可以对重金属起到固定作用。而刘旭等^[18]的研究显示, 土壤中 $F_1 + F_2$ 态 Cd 的相对含量随着 OM 含量的增加而显著增加, F_7 态 Cd 的相对含量随 OM 含量增加而减少, 可能的原因是 OM 表面吸附的 Cd, 在弱酸提取时变成了 $F_1 + F_2$ 态的一部分^[16]。也有研究表明^[33], 环境中的天然有机质可以与重金属形成可溶性有机络合物, 并成为生物可利用部分。Spearman 相关性分析显示(表 3), 研究区土壤 OM 与总 Cd 含量、Cd 的各赋存形态及水稻籽实 Cd 含量没有显著的相关性, OM 含量也不是影响研究区土壤 Cd 生物有效性的主要因素。

3.3 土壤氧化物对土壤和水稻籽实中 Cd 的影响

研究区土壤中 SiO_2 含量与土壤总 Cd 含量呈较强的负相关性($r=-0.837$, $P<0.01$, 表 3), 说明土壤中硅酸盐矿物含量越低, 土壤中 Cd 含量越高。研究区土壤在强烈的风化淋溶作用中, “脱硅富铝化作用”导致 SiO_2 含量显著降低(平均值为 41.0%, 低于全国基准值的 66.7%, 表 1)。在风化成土过程中, Cd 并没有发生明显的淋溶、贫化, 而是被新生的

黏土矿物、铁铝矿物等吸附, 发生了次生富集。有研究表明^[4], 我国南方喀斯特地区土壤 Cd 含量高主要源于碳酸盐岩 Cd 的高背景及风化成土过程 Cd 相对富集的自然因素。土壤 SiO_2 含量与 $F_1 + F_2$ 态 Cd 的相对含量($r=0.570$, $P<0.01$)、水稻籽实 Cd 含量($r=0.571$, $P<0.01$) 和 Cd 的 BCF($r=0.766$, $P<0.01$) 均呈正相关性, 而与 F_7 态 Cd 的相对含量呈负相关性($r=-0.418$, $P<0.01$)。以上表明研究区碳酸盐岩成土过程中随着脱硅作用的持续进行, 土壤中 SiO_2 不断淋溶流失, 而 Cd 持续残留富集, 且主要以残渣态富集于矿物晶格中。即经历的风化淋溶作用越强, 土壤中 SiO_2 含量越低, 土壤总 Cd 含量越高, 但主要增加的是 F_7 态 Cd, 因此 $F_1 + F_2$ 态 Cd 的相对含量和 Cd 的生物有效性相应降低。

Al、Fe 和 Mn 的氧化物和氢氧化物通过与重金属形成共价键连接, 能够显著影响重金属的固定、迁移和生物有效性^[40]。研究区土壤 Al_2O_3 含量与总 Cd 含量没有显著的相关性(表 3), 与 $F_1 + F_2$ 态 Cd 的相对含量呈较弱的正相关性($r=0.317$, $P<0.01$), 与 F_7 态 Cd 相对含量呈负相关性($r=-0.499$, $P<0.01$), 说明随着土壤中 Al_2O_3 含量的升高, $F_1 + F_2$ 态 Cd 会随之升高, 而 F_7 态 Cd 含量相对降低。刘旭等^[18]对广西碳酸盐岩区土壤 Cd 影响因素的研究发现, 铝土矿对 Cd 的包裹、吸附和 Cd 以类质同象的形式赋存在矿物晶格中导致了土壤中 Cd 的富集, 但是 Cd 主要以 F_7 态形式赋存在土壤中, 生物可利用低。可能由于区域和土壤中各组分含量的差异, 本文的研究数据并不能支持这一观点。

Fe 和 Mn 氧化物相比于 Al 氧化物和其他黏土矿物对重金属具有较高的吸附能力^[41]。研究区土壤 TFe_2O_3 和 MnO 含量与土壤总 Cd 含量均呈较强的正相关性, 相关系数分别为($r=0.789$, $P<0.01$) 和 ($r=0.820$, $P<0.01$)。土壤中 Fe 和 Mn 氧化物含量越高, Cd 含量越高。2.2 节中介绍了土壤中 Fe-Mn 结核的存在, 是土壤中 TFe_2O_3 和 MnO 含量较高的主要原因, Fe-Mn 结核对 Cd 的有效吸附, 可能造成了 Cd 的富集及活性的降低。因为有大量的研究表明^[19,20,26], 土壤中 Fe-Mn 结核对许多有毒金属污染物具有很强的吸附能力, 它们被认为是控制土壤系统中金属动力学的主要环境物质和主要清除剂。例如: Gasparatos 等^[19]的研究发现, Fe-Mn 结核中 Cd 的含量高于周围土壤基质中的含量, 是对应土壤基质的 15 倍(平均值); Neaman 等^[42]的研究发现 Fe-Mn 结核中 Cd 的含量是对应土壤基质 Cd 含量的 9 倍。研究区土壤 TFe_2O_3 和 MnO 与 $F_1 + F_2$ 态 Cd 的相对含量呈负相关性, 相关系数分别为($r =$

-0.566 , $P < 0.01$) 和 ($r = -0.362$, $P < 0.01$); TFe_2O_3 含量与 Cd 的 F_7 态相对含量呈正相关性 ($r = 0.411$, $P < 0.01$). 表明随着土壤中 Fe、Mn 氧化物含量的升高, $F_1 + F_2$ 态 Cd 的相对含量减少, 而 F_7 态 Cd 的相对含量增加, 可能的原因是 Fe-Mn 结核中吸附和固定的 Cd 主要以残渣态存在, 降低了 Cd 的活动性. 唐健生等^[43]的研究发现, 广西黎塘岩溶区 Fe-Mn 结核中 Cd 主要以 F_7 存在, 占全量的 94.85%, Fe-Mn 结核中 Cd 处于闭蓄状态, 其活性和生物有效性显著降低. TFe_2O_3 和 MnO 含量与水稻籽实 Cd 含量呈负相关性, 相关系数分别为 ($r =$

-0.417 , $P < 0.01$) 和 ($r = -0.316$, $P < 0.01$), 土壤中 Fe、Mn 氧化物含量越高, 水稻籽实中 Cd 含量越低, Fe-Mn 结核可有效降低 Cd 的生物有效性.

3.4 土壤质地对土壤和水稻籽实中 Cd 的影响

土壤质地是影响重金属分布的重要因素. 一般来说, 相比于粗粒, 黏粒 ($< 0.002 \text{ mm}$) 中黏土矿物和 OM 含量较高, 单位比表面积大, 可以增加吸附能力, 会积累更高浓度的重金属, 而砂质土壤对重金属的吸附能力较低, 孔隙较大, 对 Cd 的吸附能力较低, 导致重金属随地下水和地表水运移^[44,45]. 研究区土壤质地与 Cd 的 Spearman 相关性分析结果见表 4.

表 4 土壤质地与 Cd 的相关性

Table 4 Correlations between cadmium and soil texture

项目	Cd-S	$F_1 + F_2$	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7	Cd-R	Cd-B
砂粒	0.822 **	-0.677 **	-0.308 *	-0.258	-0.089	-0.269 *	0.584 **	-0.516 **	-0.750 **
粉砂	-0.302 *	0.526 **	0.601 **	0.155	0.443 **	0.282 *	-0.497 **	0.372 **	0.412 **
黏粒	-0.813 **	0.619 **	0.177	0.273 *	-0.026	0.241	-0.534 **	0.475 **	0.720 **

结果显示, 研究区土壤砂粒 ($0.02 \sim 2 \text{ mm}$) 含量与土壤总 Cd 含量 ($r = 0.822$, $P < 0.01$) 和 F_7 态 Cd 的相对含量呈较强的正相关性 ($r = 0.584$, $P < 0.01$); 与 $F_1 + F_2$ 态 Cd 的相对含量呈较强的负相关性 ($r = -0.677$, $P < 0.01$), 说明随着土壤砂粒含量的升高, 土壤总 Cd 含量越高, 且主要增加的是 F_7 态 Cd, $F_1 + F_2$ 态 Cd 的相对含量显著降低. 相反地, 土壤黏粒 ($< 0.002 \text{ mm}$) 含量与土壤总 Cd 含量 ($r = -0.813$, $P < 0.01$) 和 F_7 态 Cd 的相对含量 ($r = -0.534$, $P < 0.01$) 呈较强的负相关性; 与 $F_1 + F_2$ 态 Cd 的相对含量呈较强的正相关性 ($r = 0.619$, $P < 0.01$). 黏粒含量越高, $F_1 + F_2$ 态 Cd 的相对含量越高, 而总 Cd 含量和 F_7 态 Cd 的相对含量越低. 研究区土壤砂粒有利于富集 Cd, 但主要富集的是稳定态 Cd, 活动态 Cd 含量相对较低. 砂粒含量与水稻籽实 Cd 含量 ($r = -0.516$, $P < 0.01$) 和 Cd 的 BCF ($r = -0.750$, $P < 0.01$) 呈负相关性, 砂粒含量越高, 不利于水稻籽实中 Cd 的富集. 上述相关性分析结果与黏粒会积累更高浓度重金属的认识不同. 有研究表明, 对金属离子的吸附能力不仅与黏粒含量有关, 而不同粒度中的黏土矿物组成也是重要的因素^[38]. 此外, 也可能与研究区土壤中 Cd 主要富集于粒径较大的 Fe-Mn 结核中有关.

进一步分析了土壤质地与土壤氧化物的相关性 (表 5). 结果显示, 土壤砂粒含量与 TFe_2O_3 ($r = 0.890$, $P < 0.01$) 和 MnO ($r = 0.786$, $P < 0.01$) 呈较强的正相关性, 与 SiO_2 ($r = -0.871$, $P < 0.01$) 呈较强的负相关性. 相反地, 土壤黏粒含量与 TFe_2O_3 ($r = -0.835$, $P < 0.01$) 和 MnO ($r = -0.752$, $P <$

0.01) 呈较强的负相关性, 与 SiO_2 ($r = 0.836$, $P < 0.01$) 呈较强的正相关性. 说明砂粒中含有较高的 TFe_2O_3 和 MnO 含量, 而 SiO_2 含量相对较低, 黏粒则与之相反. 表明研究区土壤中的砂粒主要以 Fe-Mn 结核为主, 而黏粒的主要成份为含水铝硅酸盐矿物. 上述结果进一步证实 Fe-Mn 结核对 Cd 的吸附和固定, 是研究区土壤砂粒中相对富集总 Cd 和 F_7 态 Cd 的重要原因.

表 5 土壤质地与氧化物的相关性

Table 5 Correlations between soil texture and soil properties

项目	SiO_2	Al_2O_3	TFe_2O_3	MnO
砂粒	-0.871 **	0.040	0.890 **	0.786 **
粉砂	0.419 **	-0.163	-0.445 **	-0.346 **
黏粒	0.836 **	0.014	-0.835 **	-0.752 **

3.5 Cd 主要影响因素识别

采用主成分分析方法 (PCA) 识别控制土壤和水稻籽实 Cd 含量及 Cd 生物有效性的主要因素. 通过上述相关性分析, 发现大部分土壤性质与土壤中总 Cd 含量或水稻籽实 Cd 含量之间存在显著的相关性, Bartlett 的球形度检验相伴概率为 0.00, 小于显著性水平 0.05, KMO (Kaiser-Meyer-Olkin) 检验统计值为 0.694, 表明本研究数据可以做主成分分析. 根据特征值大于 1 的原则, 筛选出 3 个成分共解释了 81.93% 的原有信息. 主成分分析结果见表 6.

第一主成分 (F_1) 方差贡献率为 49.91%, 在土壤总 Cd 含量、水稻籽实 Cd 含量、Cd 的 BCF、 SiO_2 、 TFe_2O_3 和 MnO 的含量上具有较高的载荷. 研究区土壤 SiO_2 含量与土壤 Cd 含量、水稻籽实含量具有显著的相关性, 但是脱硅富铝、铁作用导致 SiO_2 含

量显著降低, SiO₂ 含量并不是控制土壤 Cd 富集的主要因素. 综合上述的分析结果, 土壤 TF_{Fe2O3} 和 MnO 含量是影响土壤 Cd 富集和 Cd 生物有效性的主要因素.

表 6 土壤 Cd 与土壤性质的主成分分析成分矩阵

指标	主成分		
	F1	F2	F3
Cd-S	0.812	-0.208	0.155
Cd-R	-0.689	-0.290	0.591
Cd-B	-0.777	-0.297	0.455
pH	0.497	0.340	0.650
OM	0.310	0.644	-0.145
SiO ₂	-0.934	0.208	0.098
Al ₂ O ₃	0.387	0.644	0.477
TF _{Fe2O3}	0.827	-0.481	0.065
MnO	0.840	-0.344	0.250
初始特征值	4.492	1.554	1.328
方差贡献率/%	49.91	17.26	14.75
累积方差贡献率/%	49.91	67.18	81.93

4 结论

采用 Spearman 相关性分析方法对广西典型岩溶区土壤 pH 值、OM、氧化物及土壤质地等与总 Cd 含量、Cd 的化学形态及水稻籽实 Cd 的 BCF 进行了相关性分析. 结果显示, 土壤中总 TF_{Fe2O3}、MnO 含量与总 Cd 含量均呈较强的正相关, 与水稻籽实 Cd 含量和 Cd 的 BCF 分别呈负相关; 土壤中 TF_{Fe2O3} 含量与残渣态 Cd 呈正相关. 主成分分析(PCA)显示, 土壤 TF_{Fe2O3} 和 MnO 含量是影响土壤-作物系统 Cd 迁移富集的主要因素, 而土壤 pH 值、OM 含量和 Al₂O₃ 等影响程度较小, SiO₂ 含量和土壤质地间接地影响 Cd 的迁移富集. 结合对 Fe、Mn 氧化物含量的分析和已有的研究成果, 研究区土壤在强烈的风化淋溶过程中, Cd 与 Fe、Mn 氧化物等发生了显著富集. 土壤在交替氧化和还原条件下所形成的新生体 Fe-Mn 结核对 Cd 的有效吸附和固定, 使得残渣态 Cd 的相对含量增加, 降低了 Cd 的生物有效性, Fe-Mn 结核是土壤中重金属的有效固定剂.

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] Hasan S A, Fariduddin Q, Ali B, *et al.* Cadmium: toxicity and tolerance in plants[J]. *Journal of Environmental Biology*, 2009, **30**(2): 165-174.

[3] Chen H Y, Teng Y G, Lu S J, *et al.* Contamination features and health risk of soil heavy metals in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **512-513**: 143-153.

[4] Qian Y Z, Chen C, Zhang Q, *et al.* Concentrations of cadmium, lead, mercury and arsenic in Chinese market milled rice and associated population health risk[J]. *Food Control*, 2010, **21**

(12S): 1757-1763.

[5] Ye X X, Li H Y, Ma Y B, *et al.* The bioaccumulation of Cd in rice grains in paddy soils as affected and predicted by soil properties[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2014, **14**(8): 1407-1416.

[6] 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.

[7] 周艳, 陈楠, 邓绍坡, 等. 西南某铅锌矿区农田土壤重金属空间主成分分析及生态风险评价[J]. *环境科学*, 2018, **39**(6): 2884-2892.

Zhou Y, Chen Q, Deng S P, *et al.* Principal component analysis and ecological risk assessment of heavy metals in farmland soils around a Pb-Zn mine in southwestern China[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(6): 2884-2892.

[8] 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.

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.

[9] 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.

[10] 陈同斌, 庞瑞, 王佛鹏, 等. 桂西南土壤镉地质异常区水稻种植安全性评估[J]. *环境科学*, 2020, **41**(4): 1855-1863.

Chen T B, Pang R, Wang F P, *et al.* Safety assessment of rice planting in soil cadmium geological anomaly areas in southwest Guangxi[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(4): 1855-1863.

[11] Zhu G X, Xiao H Y, Guo Q J, *et al.* Heavy metal contents and enrichment characteristics of dominant plants in wasteland of the downstream of a lead-zinc mining area in Guangxi, Southwest China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, **151**: 266-271.

[12] Alamgir M. The effects of soil properties to the extent of soil contamination with metals[A]. In: Hasegawa H, Rahman I M M, Rahman M A, (Eds.). *Environmental Remediation Technologies for Metal-contaminated Soils* [M]. Tokyo: Springer, 2016. 1-19.

[13] Spence A, Hanson R E, Grant C N, *et al.* Assessment of the bioavailability of cadmium in Jamaican soils[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, **186**(7): 4591-4603.

[14] 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.

[15] Zeng F R, Ali S, Zhang H T, *et al.* The influence of pH and organic matter content in paddy soil on heavy metal availability and their uptake by rice plants[J]. *Environmental Pollution*, 2011, **159**(1): 84-91.

[16] 侯青叶, 杨忠芳, 杨晓燕, 等. 成都平原区水稻土成土剖面 Cd 形态分布特征及影响因素研究[J]. *地学前缘*, 2008, **15**(5): 36-46.

- Hou Q Y, Yang Z F, Yang X Y, *et al.* Study of distribution of geochemical speciation of cadmium and factors controlling the distribution in paddy soil profiles, Chengdu Plain, Southwest China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, **15**(5): 36-46.
- [17] 王锐, 胡小兰, 张永文, 等. 重庆市主要农耕地土壤 Cd 生物有效性及影响因素[J]. *环境科学*, 2020, **41**(4): 1864-1870.
- Wang R, Hu X L, Zhang Y W, *et al.* Bioavailability and influencing factors of soil Cd in the major farming areas of Chongqing[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(4): 1864-1870.
- [18] 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.
- [19] Gasparatos D, Tarenidis D, Haidouti C, *et al.* Microscopic structure of soil Fe-Mn nodules; environmental implication[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2005, **2**(4): 175-178.
- [20] Yu X L, Lu S G. Micrometer-scale internal structure and element distribution of Fe-Mn nodules in Quaternary red earth of Eastern China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, **16**(2): 621-633.
- [21] DZ/T 0295-2016, 土地质量地球化学评价规范[S].
- [22] DZ/T 0258-2014, 多目标区域地球化学调查规范(1:250 000)[S].
- [23] DD2005-03, 生态地球化学评价样品分析技术要求[S].
- [24] 王学求, 周建, 徐善法, 等. 全国地球化学基准网建立与土壤地球化学基准值特征[J]. *中国地质*, 2016, **43**(5): 1469-1480.
- Wang X Q, Zhou J, Xu S F, *et al.* China soil geochemical baselines networks; data characteristics[J]. *Geology in China*, 2016, **43**(5): 1469-1480.
- [25] 杨伟林, 祖艳群, 李元. 土壤重金属化学形态的空间异质性及其影响因素研究[J]. *云南农业大学学报*, 2007, **22**(6): 912-916.
- Yang W L, Zu Y Q, Li Y. Spatial variability of sequential extraction parts of heavy metals and its affecting factors in soil [J]. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 2007, **22**(6): 912-916.
- [26] Gasparatos D. Fe-Mn concretions and nodules to sequester heavy metals in soils[A]. In: Lichtfouse E, Schwarzbauer J, Robert D, (Eds.). *Environmental Chemistry for a Sustainable World* [M]. Dordrecht: Springer, 2012. 443-474.
- [27] 苏春田, 唐健生, 单海平, 等. 黎塘岩溶区土壤铁锰结核的地球化学特征研究[J]. *中国岩溶*, 2008, **27**(1): 43-49.
- Su C T, Tang J S, Shan H P, *et al.* Study on the geochemical properties of Fe-Mn nodule in Litang karst area[J]. *Carsologica Sinica*, 2008, **27**(1): 43-49.
- [28] 李杰, 朱立新, 康志强. 南宁市郊周边农田土壤—农作物系统重金属元素迁移特征及其影响因素[J]. *中国岩溶*, 2018, **37**(1): 43-52.
- Li J, Zhu L X, Kang Z Q. Characteristics of transfer and their influencing factors of heavy metals in soil-crop system of peri-urban agricultural soils of Nanning, South China[J]. *Carsologica Sinica*, 2018, **37**(1): 43-52.
- [29] Zhang H Z, Luo Y M, Song J, *et al.* Predicting As, Cd and Pb uptake by rice and vegetables using field data from China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, **23**(1): 70-78.
- [30] Chen W P, Li L Q, Chang A C, *et al.* Characterizing the solid-solution partitioning coefficient and plant uptake factor of As, Cd, and Pb in California croplands[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2009, **129**(1-3): 212-220.
- [31] Song Y T, Swift S, Swedlund P J, *et al.* Cadmium (II) distribution in complex aquatic systems containing ferrihydrite, bacteria and an organic ligand: the effect of bioactivity [J]. *Applied Geochemistry*, 2011, **26**(5): 898-906.
- [32] 丁疆华, 温琰茂, 舒强. 土壤环境中镉、锌形态转化的探讨[J]. *城市环境与城市生态*, 2001, **14**(2): 47-49.
- Ding J H, Wen Y M, Shu Q. Fraction transformation of cadmium and zinc in soils[J]. *Urban Environment & Urban Ecology*, 2001, **14**(2): 47-49.
- [33] Luo X S, Yu S, Li X D. The mobility, bioavailability, and human bioaccessibility of trace metals in urban soils of Hong Kong[J]. *Applied Geochemistry*, 2012, **27**(5): 995-1004.
- [34] Nolan A L, Lombi E, McLaughlin M J. Metal bioaccumulation and toxicity in soils—Why bother with speciation? [J]. *ChemInform*, 2003, **34**(28), doi: 10.1002/chin.200328295.
- [35] Zhao K L, Liu X M, Xu J M, *et al.* Heavy metal contaminations in a soil-rice system: Identification of spatial dependence in relation to soil properties of paddy fields [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **181**(1-3): 778-787.
- [36] 杨远, 邓良基. 四川省水稻土中主要重金属对水稻籽粒的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2005, **24**(S1): 174-177.
- Yang Y, Deng L J. Effects of heavy metals in the paddy soil in Sichuan province on rice grain[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, **24**(S1): 174-177.
- [37] Lalor G C. Review of cadmium transfers from soil to humans and its health effects in the Jamaican environment[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, **400**(1-3): 162-172.
- [38] Huang S, Zhang R D, Zhang J Y, *et al.* Effects of pH and soil texture on the adsorption and transport of Cd in soils[J]. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2009, **52**(11): 3293-3299.
- [39] Halim M, Conte P, Piccolo A. Potential availability of heavy metals to phytoextraction from contaminated soils induced by exogenous humic substances[J]. *Chemosphere*, 2003, **52**(1): 265-275.
- [40] 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.
- [41] Brown Jr G E, Parks G A. Sorption of trace elements on mineral surfaces; modern perspectives from spectroscopic studies, and comments on sorption in the marine environment [J]. *International Geology Review*, 2001, **43**(11): 963-1073.
- [42] Neaman A, Mouélé F, Trolard F, *et al.* Improved methods for selective dissolution of Mn oxides; applications for studying trace element associations[J]. *Applied Geochemistry*, 2004, **19**(6): 973-979.
- [43] 唐健生, 苏春田, 潘晓东, 等. 岩溶区土壤铁锰结核重金属元素形态分析[J]. *河南农业科学*, 2011, **40**(5): 100-103.
- Tang J S, Su C T, Pan X D, *et al.* Analysis of heavy metals in soil Fe-Mn nodules in karst area [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2011, **40**(5): 100-103.
- [44] Cao X R, Wang X Z, Tong W B, *et al.* Distribution, availability and translocation of heavy metals in soil-oilseed rape (*Brassica napus* L.) system related to soil properties[J]. *Environmental Pollution*, 2019, **252**: 733-741.
- [45] Luo Z, Wadhawan A, Bouwer E J. Sorption behavior of nine chromium (III) organic complexes in soil [J]. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 2010, **7**(1): 1-10.

CONTENTS

Industrial Emission Characteristics and Control Countermeasures of VOCs in Chinese Rapid Economic Development Areas	MENG Bo-wen, LI Yong-bo, MENG Jing, <i>et al.</i>	(1023)
VOCs Emission Inventory and Variation Characteristics of Artificial Sources in Hubei Province in the Yangtze River Economic Belt	DAI Ling-wen, MENG Jing, LI Qian-qian, <i>et al.</i>	(1039)
Sources and Distribution Characteristics of HCBd in Rapid Economic Development Areas	TAO Yu-ming, MENG Jing, LI Qian-qian, <i>et al.</i>	(1053)
Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soil of China (2000-2020): Temporal and Spatial Distribution, Influencing Factors	MA Yan, CHENG Lu, RUAN Zi-yuan, <i>et al.</i>	(1065)
Relationships Between Microplastic and Surrounding Soil in an E-Waste Zone of China	CHAI Bing-wen, YIN Hua, WEI Qiang, <i>et al.</i>	(1073)
Analysis of the Spatial Distribution of Heavy Metals in Soil from a Coking Plant and Its Driving Factors	GU Gao-quan, WAN Xiao-ming, ZENG Wei-bin, <i>et al.</i>	(1081)
Source Apportionment and Spatial Distribution Simulation of Heavy Metals in a Typical Petrochemical Industrial City	SUN Xue-fei, ZHANG Li-xia, DONG Yu-long, <i>et al.</i>	(1093)
Heavy Metal Contents of Soil and Surface Dust and Its Ecological Risk Analysis in a Multifunctional Industrial Park	ZENG Wei-bin, GU Gao-quan, WAN Xiao-ming, <i>et al.</i>	(1105)
Geochemical Patterns and Source Analysis of Soil Heavy Metals in an Iron and Manganese Ore Area of Longyan City	WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi, <i>et al.</i>	(1114)
Application Case of Accurate Site Investigation with Life-Cycle Conceptual Site Model Development	LI Pei-zhong, WU Nai-jin, WANG Hai-jian, <i>et al.</i>	(1123)
Levels and Risk Assessment of Short and Medium-Chain Chlorinated Paraffins in Soil from Paper Mill Area	ZHANG Pei-xuan, GAO Li-rong, SONG Shi-jie, <i>et al.</i>	(1131)
Characterization and Health Risks of PCDD/Fs, PCBs, and PCNs in the Soil Around a Typical Secondary Copper Smelter	HU Ji-cheng, WU Jing, XU Chen-yang, <i>et al.</i>	(1141)
Effect of Citric Acid and Phosphorus Coexistence on Cadmium Adsorption by Soil	SONG Zi-teng, ZUO Ji-chao, HU Hong-qing	(1152)
Uptake and Accumulation of Cadmium and Zinc by Two Energy Grasses: A Field Experiment	ZHENG Rui-lun, SHI Dong, LIU Wen-ju, <i>et al.</i>	(1158)
Bioaccumulation and Translocation Characteristics of Heavy Metals in a Soil-Maize System in Reclaimed Land and Surrounding Areas of Typical Vanadium-Titanium Magnetite Tailings	SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, SUN Xiao-ming, <i>et al.</i>	(1166)
Cd Accumulation Characteristics in Different Populations of <i>Hylotelephium spectabile</i> Under Salt Stress	GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, YANG Jun, <i>et al.</i>	(1177)
Effect of Water Regimes on Pb and Cd Immobilization by Biochar in Contaminated Paddy Soil	TANG Jia-qing, ZHANG Xu, HUANG Guo-yong, <i>et al.</i>	(1185)
Effects of Chitosan-modified Biochar on Formation of Methylmercury in Paddy Soils and Its Accumulation in Rice	YANG Xue-ling, WANG Ming-xing, XU Guo-min, <i>et al.</i>	(1191)
Effects of Chromium Pollution on Soil Bacterial Community Structure and Assembly Processes	YU Hao, AN Yi-jun, JIN De-cai, <i>et al.</i>	(1197)
Analysis of Changes and Factors Influencing Air Pollutants in the Beijing-Tianjin-Hebei Region During the COVID-19 Pandemic	ZHAO Xue, SHEN Nan-chi, LI Ling-jun, <i>et al.</i>	(1205)
Impact of Pollutant Emission Reduction on Air Quality During the COVID-19 Pandemic Control in Early 2020 Based on RAMS-CMAQ	LIU Hou-feng, XU Wei, WEI Min, <i>et al.</i>	(1215)
Light-absorbing Properties and Sources of PM _{2.5} Organic Components at a Suburban Site in Northern Nanjing	SHANG Yue, YU Huan, MAO Yu-hao, <i>et al.</i>	(1228)
Pollution Characteristics and Chromophore Types of Brown Carbon in Xi'an	CHEN Qian, CHEN Qing-cai	(1236)
Source and Health Risk Assessment of PM _{2.5} -Bound Metallic Elements in Road Dust in Zibo City	GUO Qing-yuan, BAI Wen-yu, ZHAO Xue-yun, <i>et al.</i>	(1245)
Health Benefit Assessment of PM _{2.5} Pollution Control in Beijing	DU Pei, WANG Jian-zhou	(1255)
Seasonal Characteristics of Air Pollutant Sources and Transport Pathways in Xining City	LIU Na, YU Ye, MA Xue-qian	(1268)
Concentrations and Patterns of Atmospheric Particulate Nitrogen and Phosphorus During Different Weather Conditions in Qingdao Coastal Region	YUAN Gang, QI Jian-hua, DING Xue	(1280)
Characterization of Volatile Organic Compounds (VOCs) Using Mobile Monitoring Around the Industrial Parks in the Yangtze River Delta Region of China	WANG Hong-li, GAO Ya-qin, JING Sheng-ao, <i>et al.</i>	(1298)
Characteristics and Cause Analysis of Heavy Air Pollution in a Mountainous City During Winter	LIU Zhuo-cheng, NIU Yue-yuan, WU Jing, <i>et al.</i>	(1306)
Gridded Emission Inventories of Major Criteria Air Pollutants and Source Contributions in Lan-Bai Metropolitan Area, Northwest China	WANG Wen-peng, WANG Zhan-xiang, LI Ji-xiang, <i>et al.</i>	(1315)
VOCs Removal and Emission Monitoring of Beijing Bulk Gasoline Terminals in 2012-2019	HUA Lan-ying, CUI Tong, LI Jin-xiang, <i>et al.</i>	(1328)
Emission Inventory of Air pollutants for the Harmless Treatment of Municipal Solid Waste	MA Zhan-yun, JIANG Yu-cong, REN Jia-xue, <i>et al.</i>	(1333)
Response of Bacteriophage Polymers to Hypoxic Conditions in the Surface Sediments of the Yangtze Estuary and Its Adjacent Areas	YIN Mei-ling, DUAN Li-qin, SONG Jin-ming, <i>et al.</i>	(1343)
Human Health Risk Assessment of Phenol in Poyang Lake Basin	XU Qian-yun, AI Shun-hao, GAO Xiang-yun, <i>et al.</i>	(1354)
Spatial-Temporal Variation of Water Environment Quality and Pollution Source Analysis in Hengshui Lake	LIU Wei-wei, GUO Zi-liang, WANG Da-an, <i>et al.</i>	(1361)
Composition and Distribution Characteristics of Microplastics in Danjiangkou Reservoir and Its Tributaries	PAN Xiong, LIN Li, ZHANG Sheng, <i>et al.</i>	(1372)
Temporal and Spatial Evolution of Storm Runoff and Water Quality Assessment in Jinpen Reservoir	HUANG Cheng, HUANG Ting-lin, LI Yang, <i>et al.</i>	(1380)
Influence of Storm Runoff on the Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in a Drinking Water Reservoir During the Flood Season	LI Cheng-yao, HUANG Ting-lin, WEN Cheng-cheng, <i>et al.</i>	(1391)
Distribution Characteristics of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus Bearing Pollutants in the Ancient Town Rivers of Suzhou	BAI Dong-rui, ZHANG Tao, CHEN Tan, <i>et al.</i>	(1403)
Chemical Characteristics and Causes of Groups Water in Niangziguan Spring	TANG Chun-lei, ZHAO Chun-hong, SHEN Hao-yong, <i>et al.</i>	(1416)
Adsorption Behavior of Phosphate by CaO ₂ Remolded Sediment	XU Chu-tian, LI Da-peng, WANG Zi-liang, <i>et al.</i>	(1424)
Nitrogen and Phosphorus Removal in Surface Flow Constructed Wetland Planted with <i>Myriophyllum elatinoide</i> s Treating Swine Wastewater in Subtropical Central China	WANG Li-sha, LI Xi, LI Yu-yuan, <i>et al.</i>	(1433)
Accelerated Degradation of Aqueous Recalcitrant Iodinated Contrasting Media Using a UV/SO ₃ ²⁻ Advanced Reduction Process	LIU Zi-qi, QIU Fu-guo, LAI Man-ting, <i>et al.</i>	(1443)
Degradation of Dye Rhodamine B by Solar Thermally Activated Persulfate	MA Meng, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i>	(1451)
One-step Preparation of Lanthanum-Magnesium Ferrite and Its Phosphate Adsorption Capacity in Aqueous Solutions	BAI Run-ying, SONG Bo-wen, ZHANG Yu, <i>et al.</i>	(1461)
Pollutant Removal Efficiency of Different Units Along a Mature Landfill Leachate Treatment Process in a Membrane Biological Reactor-Nanofiltration Combined Facility	SHAO Li-ming, DENG Ying-tao, QIU Jun-jie, <i>et al.</i>	(1469)
Biological Conversion Mechanism of Sulfate Reduction Ammonium Oxidation in ANAMMOX Consortia	BI Zhen, DONG Shi-yu, HUANG Yong	(1477)
Microbial Community Structure of Waste Water Treatment Plants in Different Seasons	HE Yun, LI Kui-xiao, WANG Jia-wei, <i>et al.</i>	(1488)
Organ-Specific Accumulation and Toxicokinetics of Ephedrine in Adult Zebrafish (<i>Danio rerio</i>)	YIN Xing-xing, GUO Chang-sheng, DENG Yang-hui, <i>et al.</i>	(1496)
Characteristics and Evaluation of Soil Rare Earth Element Pollution in the Bayan Obo Mining Region of Inner Mongolia	WANG Zhe, ZHAO Ying-chen, LUO Yi-fei, <i>et al.</i>	(1503)
Factors Affecting the Translocation and Accumulation of Cadmium in a Soil-Crop System in a Typical Karst Area of Guangxi Province, China	MA Hong-hong, PENG Min, GUO Fei, <i>et al.</i>	(1514)
Effects of Superparamagnetic Nanomaterials on Soil Microorganisms and Enzymes in Cadmium-Contaminated Paddy Fields	FANG Dan-dan, ZHANG Li-zhi, WANG Qiang	(1523)
Effects of Water Management and Silicon Application on Iron Plaque Formation and Uptake of Arsenic and Cadmium by Rice	CHEN Jia, ZHAO Xiu-lan	(1535)
Biological Effect of Tetracycline Antibiotics on a Soil-Lettuce System and Its Migration Degradation Characteristics	WANG Wei-zhong, CHI Sun-lin, XU Wei-hong	(1545)
Effect of Plastic Film Mulching on Methane and Nitrous Oxide Emissions from the Ridges and Furrows of a Vegetable Field	XIONG Wei-xia, JIANG Chang-sheng, ZHAO Zhong-jing, <i>et al.</i>	(1559)
Effects of Biochar and Straw on Soil N ₂ O Emission from a Wheat Maize Rotation System	TANG Zhan-ming, LIU Xing-ren, ZHANG Qing-wen, <i>et al.</i>	(1569)
Overview on Habitat Monitoring Methods Under Watershed Ecological Space Management	YIN Kun, LIU Hai-jiang, WANG Guang, <i>et al.</i>	(1581)