

目次

基于机器学习的珠三角秋季臭氧浓度预测 陈镇, 刘润, 罗征, 薛鑫, 汪瑶, 赵志军 (1)

粤港澳大湾区大气PM_{2.5}浓度的遥感估算模型 代园园, 龚绍琦, 张存杰, 闵爱莲, 王海君 (8)

典型输送通道城市冬季PM_{2.5}污染与传输变化特征 代武俊, 周颖, 王晓琦, 齐鹏 (23)

郑州市夏季PM_{2.5}中二次无机组分污染特征及其影响因素 和兵, 杨洁茹, 徐艺斐, 袁明浩, 翟诗婷, 赵长民, 王申博, 张瑞芹 (36)

重庆典型城区冬季碳质气溶胶的污染特征及来源解析 彭超, 李振亮, 向英, 王晓宸, 汪凌韬, 张晟, 翟崇治, 陈阳, 杨复沫, 翟天宇 (48)

2022年8月成渝两地臭氧污染差异影响因素分析 陈木兰, 李振亮, 彭超, 邓也, 宋丹林, 谭钦文 (61)

2020年“三连击”台风对我国东部地区O₃污染的影响分析 花丛, 尤媛, 王晴, 张碧辉 (71)

北京城区夏季VOCs初始体积分数特征及来源解析 张博韬, 景宽, 王琴, 安欣欣, 鹿海峰, 王陈婧, 王友峰, 刘保献 (81)

机动车减排降碳综合评价体系综述 范朝阳, 佟惠, 梁晓宇, 彭剑飞 (93)

基于LEAP模型的长三角某市碳达峰情景 杨峰, 张贵驰, 孙伟, 谢放尖, 揣小伟, 孙瑞玲 (104)

广东省船舶二氧化碳排放驱动因素与减排潜力 翁淑娟, 刘颖颖, 唐凤, 沙青娥, 彭勃, 王焯嘉, 陈诚, 张雪驰, 李京洁, 陈豪琪, 郑君瑜, 宋献中 (115)

给水厂典型工艺碳排放特征与影响因素 张翔宇, 胡建坤, 马凯, 高欣慰, 魏月华, 韩宏大, 李克勋 (123)

中国饮用水中砷的分布特征及基于伤残调整寿命年的健康风险评估 襄殿程, 齐媛, 肖淑敏, 苏高新, 郭宇新 (131)

太湖水体和沉积物中有机磷酸酯的时空分布和风险评估 张成诺, 钟琴, 栾博文, 周涛, 顾帆, 李伟飞, 邹华 (140)

水产养殖环境中农兽药物的污染暴露水平及其风险影响评价 张楷文, 张海燕, 孔聪, 顾润润, 田良良, 杨光昕, 王媛, 陈冈, 沈晓盛 (151)

长江朱沱断面磷浓度与通量变化及来源解析 姜保峰, 谢卫民, 黄波, 刘旻璇 (159)

珠江河口地表水锰氧化物对磷的“载-卸”作用 李睿, 梁作兵, 伍祺瑞, 杨晨晨, 田帝, 高磊, 陈建耀 (173)

富春江水库浮游植物功能群变化的成因 张萍, 王炜, 朱梦圆, 国超旋, 邹伟, 许海, 朱广伟 (181)

合浦盆地西部地区地下水水化学特征及形成机制 陈雯, 吴亚, 张宏鑫, 刘怀庆 (194)

新疆车尔臣河流域绿洲带地下水咸化与污染主控因素 李军, 欧阳宏涛, 周金龙 (207)

京津冀地区生态系统健康时空演变及其影响因素 李魁明, 王晓燕, 姚罗兰 (218)

近30年辽河三角洲生态系统服务价值时空演变及影响因素分析 王耕, 张芙蓉 (228)

光伏电站建设对陆地生态环境的影响: 研究进展与展望 田政卿, 张勇, 刘向, 陈生云, 柳本立, 吴纪华 (239)

大兴安岭林草交错带植被NDVI时空演变及定量归因 石淞, 李文, 曲琛, 杨子仪 (248)

西南地区不同类型植被NPP时空演变及影响因素探究 徐勇, 郑志威, 孟禹弛, 盘钰春, 郭振东, 张炎 (262)

不同海拔梯度下极端气候事件对松花江流域植被NPP的影响 崔嵩, 贾朝阳, 郭亮, 付强, 刘东 (275)

基于InVEST与CA-Markov模型的昆明市碳储量时空演变与预测 帕茹克·吾斯曼江, 艾东, 方一舒, 张益宾, 李牧, 郝晋珉 (287)

基于PLUS-InVEST模型的酒泉市生态系统碳储量时空演变与预测 石晶, 石培基, 王梓洋, 程番苑 (300)

长江下游沿江平原土壤发育过程中碳库分配动态 胡丹阳, 张欢, 宿宝巍, 张娅璐, 王永宏, 纪佳辰, 杨浩, 高超 (314)

漓江流域喀斯特森林土壤有机碳空间分布格局及其驱动因子 申楷慧, 魏识广, 李林, 储小雪, 钟建军, 周景钢, 赵毅 (323)

不同土地利用方式对岩溶区土壤有机碳组分稳定性的影响 陈坚淇, 贾亚男, 贺秋芳, 江可, 陈畅, 叶凯 (335)

紫色土丘陵区坡地柑橘园土壤碳氮的空间分布特征 李子阳, 陈露, 赵鹏, 周明华, 郑静, 朱波 (343)

氮添加与凋落物处理对橡胶林砖红壤有机碳组分及酶活性的影响 薛欣欣, 任常琦, 罗雪华, 王文斌, 赵春梅, 张永发 (354)

重庆化肥投入驱动因素、减量潜力及环境效应分析 梁涛, 赵敬坤, 李红梅, 王妍, 曹中华, 张务帅, 王孝忠, 郭超仪, 石孝均, 陈新平 (364)

中国土壤中全氟和多氟烷基物质的分布、迁移及管控研究进展 刘浩然, 邢静怡, 任文杰 (376)

基于多源辅助变量和随机森林模型的耕地土壤重金属含量空间分布预测 解雪峰, 郭炜炜, 濮励杰, 缪源卿, 蒋国俊, 张建珍, 徐飞, 吴涛 (386)

基于源导向的农用地土壤重金属健康风险评估及优先控制因子分析 马杰, 葛森, 王胜蓝, 邓力, 孙静, 蒋月, 周林 (396)

铜陵某废弃硫铁矿矿区土壤重金属污染特征及来源解析 李如忠, 刘宇昊, 黄言欢, 吴鸿飞 (407)

天水市主城区公交站地表灰尘重金属来源解析及污染评价 李春艳, 王新民, 王海, 吕晓斌 (417)

基于大田试验的土壤-水稻镉对不同调理剂的响应 唐乐斌, 刘新彩, 宋波, 马丽钧, 黄凤艳 (429)

腐殖质活性组分对土壤镉有效性的调控效应与水稻安全临界阈值 胡秀芝, 宋毅, 王天雨, 蒋珍茂, 魏世强 (439)

生物质炭与铁钙材料对镉砷复合污染农田土壤的修复 吴秋产, 吴骥子, 赵科理, 连斌, 袁峰, 孙洪, 田欣 (450)

人体微塑料污染特征及健康风险研究进展 马敏东, 赵洋尘, 朱龙, 王伟平, 康玉麟, 安立会 (459)

聚苯乙烯微塑料联合镉污染对土壤理化性质和生菜(*Lactuca sativa*)生理生态的影响 牛佳瑞, 邹勇军, 简敏菲, 黄楚红, 李金燕, 穆霆, 刘淑丽 (470)

转录组分析植物促生细菌缓解高粱微塑料和重金属复合污染胁迫机制 刘泳岐, 赵超禹, 任学敏, 李玉英, 张英君, 张浩, 韩辉, 陈兆进 (480)

微塑料对土壤中养分和镉淋失的影响 赵群芳, 褚龙威, 丁原红, 王发园 (489)

微塑料和非对土壤化学性质、酶活性及微生物群落的影响 刘沙沙, 秦建桥, 吴贤格 (496)

民勤荒漠绿洲过渡带人工梭梭林土壤细菌群落结构及功能预测 王安林, 马瑞, 马彦军, 吕彦勋 (508)

不同灌溉水盐度下土壤真菌群落对生物炭施用的响应 郑志玉, 郭晓雯, 闵伟 (520)

厨余垃圾有机肥对土壤微生物活性及功能的影响 刘美灵, 汪益民, 金文豪, 王永冉, 王嘉和, 柴一博, 彭丽媛, 秦华 (530)

土壤真菌群落结构对辣椒长期连作的响应特征 陈芬, 余高, 王谢丰, 李廷亮, 孙约兵 (543)

叶面喷施硅肥对再生水灌溉水稻叶际细菌群落结构及功能基因的影响 梁胜贤, 刘春成, 胡超, 崔二革, 李中阳, 樊向阳, 崔丙健 (555)

昌黎县海域细菌群落和抗生素抗性基因分析 王秋水, 程波, 刘悦, 邓婕, 徐岩, 孙朝徽, 袁立艳, 左嘉, 司飞, 高丽娟 (567)

基于高通量定量PCR与高通量测序技术研究城市湿地公园抗生素抗性基因污染特征 黄福义, 周曙屹, 潘婷, 周昕原, 苏建强, 张娴 (576)

城区第四系沉积柱中抗生素的垂向分布特征及环境影响因素 刘可, 童蕾, 甘翠, 王逸文, 张嘉越, 何军 (584)

氢氧化钾改性玉米秸秆生物炭对水中土霉素的吸附特性及机制 刘总堂, 孙玉凤, 费正皓, 沙新龙, 温小菊, 钱彬彬, 陈建, 谷成刚 (594)

CO₂气氛热解与硝酸改性的生物炭Pb²⁺吸附性能对比 江豪, 陈瑞芝, 朱自洋, 王琳, 段文斌, 陈芳媛 (606)

《环境科学》征订启事(70) 《环境科学》征稿简则(193) 信息(334,554,605)

腐殖质活性组分对土壤镉有效性的调控效应与水稻安全临界阈值

胡秀芝^{1,2}, 宋毅^{1,2}, 王天雨^{1,2}, 蒋珍茂^{1,2}, 魏世强^{1,2*}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 重庆市农业资源与环境研究重点实验室, 重庆 400715)

摘要: 有机物料对于土壤中镉(Cd)的有效性和作物Cd累积具有重要影响. 通过田间小区试验, 结合化学连续提取形态分级方法, 探讨了有机物料中的主要活性组分胡敏酸(HA)和富里酸(FA)及其不同比例组合(HA/FA)对于水稻吸收累积Cd的影响及其与水稻土中Cd赋存形态和有效性变化的关系. 结果表明, 腐殖酸(HAs)对土壤Cd有效性和水稻籽粒Cd累积的影响受其活性组分含量比例制约. HA/FA \geq 4/6 处理对土壤Cd起钝化作用, Cd有效性明显降低, 水稻籽粒Cd含量相较于对照CK降低了15.2%~33.3%. HA/FA \leq 2/8 处理对土壤Cd起活化作用, Cd有效性明显增加, 水稻籽粒Cd含量相较于CK提高了24.2%~42.4%. HAs活性组分含量比例影响土壤Cd的形态转化, 与CK处理相比, HA/FA \geq 4/6 处理使土壤Cd由活性高的EX-Cd向活性低的CA-Cd和FM-Cd转化, 而HA/FA \leq 2/8 处理则相反. HAs对土壤pH和有效硫含量的影响随其活性组分的不同而异, 水稻分蘖期土壤中pH与HA添加量呈显著正相关, 而与FA添加量呈显著负相关, 土壤有效硫含量与FA添加量呈显著正相关. 因此, 为保障水稻品质安全, 应选择配比HA/FA \geq 4/6的有机物料. 研究结果为含腐殖酸类有机物料的定向利用提供了科学依据.

关键词: 腐殖酸(HAs); 胡富比(HA/FA); 水稻Cd; 有效态Cd; Cd赋存形态; 临界阈值

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)01-0439-11 DOI: 10.13227/j.hjks.202301012

Regulation Effects of Humus Active Components on Soil Cadmium Availability and Critical Threshold for Rice Safety

HU Xiu-zhi^{1,2}, SONG Yi^{1,2}, WANG Tian-yu^{1,2}, JIANG Zhen-mao^{1,2}, WEI Shi-qiang^{1,2*}

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment Research, Chongqing 400715, China)

Abstract: Organic materials containing humic acids (HAs) play important roles in regulating the bioavailability of cadmium (Cd) in soils and thus its accumulation in crops. The effects of the two active components of HAs, humic acid (HA) and fulvic acid (FA), in organic materials and their different ratios (HA/FA) on Cd uptake and accumulation in rice were investigated using a field plot experiment, and their relationships with the Cd fractions and availability in paddy soil as influenced by the use of these organic materials were analyzed in combination with the fractionation method of chemical continuous extraction. The results showed that the effects of HAs on Cd availability in soil and Cd accumulation in rice grains were controlled by the ratios of the active components in the organic materials. The treatments with an HA/FA ratio \geq 4/6 had a passivating effect on soil Cd, resulting in a significant reduction in Cd availability. Compared with that in the control without the application of HAs (CK), rice grain Cd concentration was reduced by 15.2%-33.3%, whereas those with an HA/FA ratio \leq 2/8 activated Cd in soil, and the available Cd content was significantly increased. Compared with that in CK, rice grain Cd concentration was increased by 24.2%-42.4%. The ratios of HA/FA in HAs affected the morphological transformation of soil Cd. Compared with the CK treatment, the treatments with ratios of HA/FA \geq 4/6 promoted the transformation of soil Cd from the exchangeable form (EX-Cd) with high activity to the carbonate bound form (CA-Cd) and Fe and Mn oxide-bound forms (FM-Cd) with low activity, whereas those with ratios of HA/FA \leq 2/8 showed the opposite effects. The effects of HA and FA on soil pH and available sulfur concentration differed. Soil pH had a significant positive correlation with HA addition but a negative correlation with FA addition, and soil available sulfur content had a significant positive correlation with FA addition at the rice tillering stage. Therefore, to ensure the quality and safety of rice, organic materials with an HA/FA ratio \geq 4/6 should be selected. The results provided a scientific basis for the directed utilization of organic materials containing HAs.

Key words: humic acids(HAs); the ratio of humic acid to fulvic acid(HA/FA); cadmium concentration in rice; soil available cadmium; cadmium fractions; critical threshold

首次全国土壤污染状况调查表明,我国重金属污染的耕地面积约占中国耕地总数的20%,其中镉(Cd)的点位超标率最高,达到7.1%,且南方地区土壤Cd浓度高于北方地区^[1-3]. Cd可通过根部吸收进入植物,并分配到植物的各个组织^[4],通过食物链进入人体,可导致癌症、肾脏疾病和心血管疾病等严重健康损害^[5,6].

有机物料中的胡敏酸(HA)和富里酸(FA)是调控土壤中重金属有效性的主要活性组分,一般认为有机物料中的低相对分子质量组分如简单有机酸和

FA等可提高重金属的移动性和植物有效性,而高相对分子质量HA组分作用相反^[7-11]. 有研究发现土壤Cd与HA能形成稳定的络合物,降低Cd的迁移能力^[12]. Zhou等^[13]发现生物腐殖酸(BHA)会降低土壤交换态Cd(EX-Cd)占总Cd的比例. 邹传等^[14,15]发现

收稿日期: 2023-01-03; 修订日期: 2023-03-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(42177012); 国家重点研发计划项目(SQ2020YFF0426438); 中央高校基本科研业务费专项(SWU120074)

作者简介: 胡秀芝(1997~),女,硕士研究生,主要研究方向为土壤重金属Cd污染修复, E-mail: 2542403873@qq.com

* 通信作者, E-mail: sqwei@swu.edu.cn

从风化煤中提取的 HA 和 FA 作用于 Cd 污染土壤中, HA 对 Cd 的钝化能力要强于 FA 的活化能力. 罗梅^[16]将商品腐殖酸(humic acids, HAs)进行超滤分级,比较了不同相对分子质量对土壤 Cd 有效性的影响,相对分子质量 $< 10^4$ 的低分子组分对 Cd 起活化作用,而相对分子质量 $> 10^4$ 的高分子组分对 Cd 起钝化作用. 实际有机物料一般为复杂非均质混合物,其活性组分组成及其相对含量因有机物料来源、堆肥条件及腐熟化程度的不同而异,其对土壤重金属活性的表现效应是各种组分共同作用的结果^[17]. 施用有机物料是目前一项兼具改土培肥与重金属活性钝化的一项有效措施,但施用不当可能会增加作物重金属累积的风险^[18,19],探究阐明有机物料的关键活性组分及其赋存比例对 Cd 植物有效性的效应与机制,是利用该类材料进行土壤 Cd 污染修复的重要科学基础.

HA/FA 是传统用于衡量有机肥的腐殖化程度的重要指标^[20],同时也反映了有机物料中影响重金属活性关键组分的相对含量. 刘小虎等^[21]通过 23 a 定位试验结果证明,施用有机肥可增加土壤 HAs 含量、增加土壤 HA 的羧基、酚羟基含量和提升 HA/FA. 陈盈等^[22]研究表明从草炭、褐煤和风化煤中提取的 HAs 中 HA/FA 大小顺序为:草炭 $<$ 褐煤 $<$ 风化煤,与其对 Mn^{2+} 和 Zn^{2+} 的络合稳定常数大小顺序一致,与金属离子形成络合物的稳定程度呈显著正相关关系,表明高分子组分 HA 对金属离子有更强的吸持能力. 上述研究大多是基于有机物料整体效应结合其 HA/FA 值的测定进行的间接推断,难以排除有机物料中养分等其他组分差异的影响;或仅仅通过室内模拟分析 HAs 不同组分对重金属的络合能力与化学有效性的影响,难以直接反映不同 HA/FA 对作物重金属累积的影响,更缺乏 HA/FA 阻控重金属累积的临界

阈值研究.

为此,本研究以易累积 Cd 的主要粮食作物——水稻为对象,采用田间小区试验,以 HA 和 FA 为试材,探讨其不同比例组合(HA/FA)对水稻生长和水稻 Cd 积累的影响,同时与 3 种 HA/FA 不同的实际有机肥进行比较,阐明 HAs 影响下土壤 Cd 形态转化和有效性变化与水稻 Cd 累积的关系,明确 HA/FA 调控土壤 Cd 活性与水稻 Cd 累积的临界阈值,以期 Cd 污染土壤修复及含 HA 和 FA 物料的定向利用提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 供试材料

HA 购买自济宁三石生物科技有限公司,提取自风化煤,外观为黑亮色粉状, ω (HA)为 60%,含水量为 13.5%, ω (铁)为 0.02%,pH 为 8.5, ω (水不溶物)为 3%. FA 购买自武汉吉业升化工有限公司,植物残体经生物、化学工艺处理后提取,外观为棕黄色, ω (FA)为 90%,含水量为 1.8%,pH 为 6.3. 供试 HA 和 FA 的傅里叶变换红外光谱图(FT-IR 光谱)显示出相似的光谱特征(图 1),但 HA 的结构组成和官能团信息比 FA 更复杂. HA 和 FA 光谱图中均出现了由 $-OH$ 伸缩振动引起的峰,分别位于 $3\ 693.34$ 、 $3\ 399.1$ 和 $3\ 396.33\ cm^{-1}$ 处,表明 HA 和 FA 组分中均含有醇类、酚类和有机酸类^[23]. 位于 $1\ 585.85\ cm^{-1}$ 和 $1\ 608.6\ cm^{-1}$ 的峰属于 $C=C$ 的伸缩振动^[24]. 位于 $1\ 394.82\ cm^{-1}$ 的峰和 $1\ 403.81\ cm^{-1}$ 的峰属于羧基离子的不对称伸缩. 位于 $1\ 031.89\ cm^{-1}$ 和 $1\ 082.2\ cm^{-1}$ 处的峰属于 $C-O$ 振动,HA 在此处的吸收峰信号明显强于 FA. 由以上的特征峰可知,HA 中含有较多的 $C-O$ 键和脂类官能团,而 FA 中含有更多 $-OH$ 基、羧基和含氧官能团.

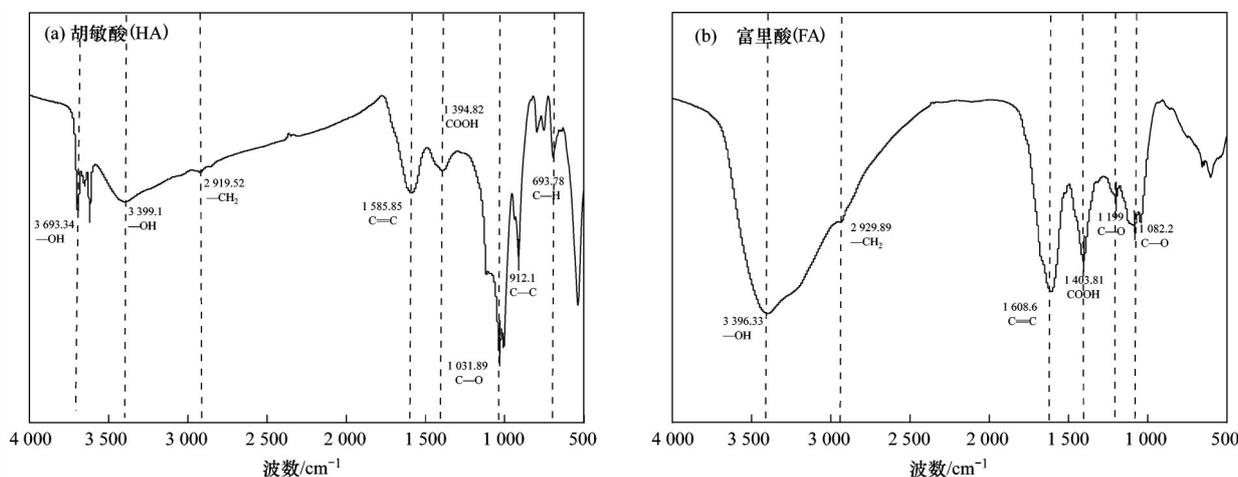


图 1 供试腐殖酸的傅里叶变换红外光谱图

Fig. 1 Fourier transform infrared spectroscopy of humic acid

3种供试有机肥为万植有机肥、万植生物有机肥和矿源腐殖质有机肥,万植有机肥和万植生物有机肥均购买自重庆市万植巨丰生态肥业有限公司, ω (有机质)分别为45%和60%。矿源腐殖质有机肥(土壤修复专用型)购自买地康食安(北京)农业科技有限公司, ω (有机质)为83%。3种供试有机肥中HA和FA实际含量及HA/FA存在差异。通过腐植酸与黄腐酸含量的快速测定试验,得出万植有机肥、万植生物有机肥和矿源腐殖质中 ω (HA)分别为37.93%、38.74%和28.7%, ω (FA)分别为3.16%、2.36%和3.74%。故万植有机肥中HA/FA = 12/1,万植生物有机肥中HA/FA = 16/1,矿源腐殖质中HA/FA = 8/1。在3种供试有机肥中HA/FA顺序由大到小为:万植生物有机肥 > 万植有机肥 > 矿源腐殖质。因此,有机肥料

中HA/FA的大小对水稻生长和水稻Cd累计产生的影响存在差异。

1.2 试验方法

采用田间小区试验研究不同HA/FA腐殖酸对于稻田土壤Cd活性的影响及其对水稻Cd累积的影响。

1.2.1 试验点位

试验点水稻田位于重庆市江津区某地(29°02'58"N,106°00'58"E),海拔239 m。土壤类型为紫色水稻土。试验点稻田土壤基本理化性质见表1。该水稻田中 ω (总Cd)为0.4 mg·kg⁻¹,超过了土壤环境质量标准中水田土壤污染风险筛选值(0.3 mg·kg⁻¹,GB 15618-2018),存在潜在农产品超标风险。试验时间为2021年4~10月。

表1 试验点稻田土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of paddy soil in test site

项目	ω (有机质) /g·kg ⁻¹	ω (总氮) /g·kg ⁻¹	ω (总磷) /g·kg ⁻¹	ω (总钾) /g·kg ⁻¹	ω (碱解氮) /mg·kg ⁻¹	ω (有效磷) /mg·kg ⁻¹	ω (有效钾) /mg·kg ⁻¹	ω (总Cd) /mg·kg ⁻¹	ω (DTPA-Cd) /mg·kg ⁻¹	pH	CEC /cmol·kg ⁻¹
数值	24.25	1.217	0.336	25.18	107.61	13.124	129.58	0.4	0.092	5.37	18.09

1.2.2 试验设计

田间试验共设置10个不同处理,即:不施有机物料对照CK记为T1;HA与FA的质量比:HA/FA = 10/0记为T2、HA/FA = 8/2记为T3、HA/FA = 6/4记为T4、HA/FA = 4/6记为T5、HA/FA = 2/8记为T6、HA/FA = 0/10记为T7;和3种商品有机肥:万植有机肥记为T8、万植生物有机肥记为T9、矿源腐殖质有机肥记为T10。

除对照外,所有处理按0.3 kg·m⁻²施用等量有机碳,万植有机肥(HA/FA = 12/1)的施用量为0.675 kg·m⁻²,万植生物有机肥(HA/FA = 16/1)的施用量为0.5 kg·m⁻²,矿源腐殖质有机肥(HA/FA = 8/1)的施用量为0.35 kg·m⁻²。不同处理的各小区中HA和FA施用质量见表2。各处理重复3次,10个处理共30个小区,每个小区的面积为5 m × 4 m = 20 m²,小区按随机区组排列。

表2 不同处理各小区中HA、FA和肥料施用量

Table 2 Application amounts of HA, FA, and fertilizer in different plots under different treatments

试验处理(材料施用量)	尿素/kg		过磷酸钙/kg	氧化钾/kg	HA/kg	FA/kg
	底肥	追肥				
T1(对照组CK)	0.56	0.14	1	0.25	0	0
T2(HA/FA = 10/0)	0.56	0.14	1	0.25	10	0
T3(HA/FA = 8/2)	0.56	0.14	1	0.25	8	1
T4(HA/FA = 6/4)	0.56	0.14	1	0.25	6	3
T5(HA/FA = 4/6)	0.56	0.14	1	0.25	4	4
T6(HA/FA = 2/8)	0.56	0.14	1	0.25	2	6
T7(HA/FA = 0/10)	0.56	0.14	1	0.25	0	7

所有小区统一按推荐用量施用肥料,N、P₂O₅和K₂O用量分别按15、7.5和7.5 g·m⁻²计算,氮肥用尿素(含N 46%,33 g·m⁻²),磷肥用过磷酸钙(含P₂O₅ 16%,63 g·m⁻²),钾肥用氧化钾(含K₂O 60%,10 g·m⁻²)。其中氮肥80%作基肥,20%作分蘖期追肥,磷钾肥全作基肥一次性施用。于2021年4月16日移栽3叶期水稻秧苗,水稻品种为当地推荐品种——深两优5814,水稻行株距20cm × 20cm,每个小区13行 × 25窝。除处理涉及的试验因子外,水分等其它田间管理

方法同当地常规种植一致。于2021年4月2日基肥施用前,采集初始土壤样品进行理化性质的测定。2021年7月6日水稻生长处于分蘖期时,采集土壤样品,同时测定水稻分蘖数和株高。2021年9月10日水稻生长处于成熟期时,采集土壤样品和水稻植株,同时称量水稻茎叶鲜重和茎叶干重,按小区单独收获计产。

1.3 分析方法

1.3.1 样品处理与测定方法

3种供试有机肥(万植有机肥、万植生物有机肥

和矿源腐殖质)中HA与FA的质量分数的测定采用《中华人民共和国化工行业标准 腐植酸与黄腐酸含量的快速测定方法》(HG/T 5937-2021),以焦磷酸钠为提取剂,紫外-可见分光光度计(上海精密仪器仪表有限公司,波长范围190~1100 nm)进行测定. FT-IR光谱使用 Nicolet IS10 傅立叶红外光谱仪(美国,尼高力),在(20±2)°C室温条件下,波长范围为400~4000 cm⁻¹,步长为4 cm⁻¹的条件下进行扫描. 土壤有机质、pH、氮、磷、钾、水分和灰分的测定采用《土壤农化分析与环境监测》^[25]中的方法. 土壤有效硫含量采用《中华人民共和国农业行业标准 土壤有效硫的测定》方法(NYT1121.14-2006)测定. 土壤有效态Cd含量采用二乙三胺五乙酸(DTPA)浸提-火焰原子吸收法(GB/T 23739-2009)测定. 全Cd含量采用王水提取-石墨炉原子吸收光谱仪测定(石墨炉: SHIMADZU-6880,下同). 土壤Cd形态采用 Tessier 连续提取法^[26, 27],将土壤Cd形态划分为可交换态Cd(EX-Cd)、碳酸盐结合态Cd(CA-Cd)、铁锰氧化物结合态Cd(FM-Cd)、有机质结合态Cd(OX-Cd)和残渣态Cd(RE-Cd),提取液中的Cd使用石墨炉原子吸收光谱仪测定.

采集的成熟期水稻植株将稻穗、秸秆和根系分开,用去离子水冲洗净,沥干后放入烘箱,在105°C下保持30 min进行杀青处理,再将温度调至65°C烘干48 h,然后粉碎过0.149 mm筛备用. 稻谷使用脱壳机脱壳,去壳后的籽粒烘干后磨粉过0.149 mm筛备用. 水稻根、茎、叶及籽粒中Cd含量采用HNO₃-HClO₄消解:称取植物样0.1000 g,加入4 mL硝酸及1 mL高氯酸,消煮至溶液清亮,冷却定容至50 mL后过滤,置于4°C下待测,采用石墨炉原子吸收光谱仪进行测定. 为保证分析结果的准确性及可靠性,采用国家标准土壤物质 GBW07405(GSS-5)及标准大米物质 GBW100353(GBW-1)进行分析质量控制,样品Cd的回收率分别为93%~106%及96%~104%,满足分析质量要求.

1.3.2 数据处理

3种供试有机肥中HA、FA的质量分数(ω)以%表示,按式(1)计算.

$$\omega = \frac{\rho \times V \times D}{m} \times 10^{-3} \times 100\% \quad (1)$$

式中, ρ 表示由工作曲线查出的HA和FA的质量浓度,mg·mL⁻¹;V表示测定时吸取的试样体积,mL;D表示测定时试样稀释倍数;m表示样品质量数值,g;10⁻³表示将mg换算成g的系数. 取平均测定结果的算术平均值作为测定结果,结果表示到小数点后两位.

生物富集系数(bioaccumulation factor, BAF):作

物籽粒某物质的含量与土壤中该物质的含量之比;转运系数(translocation factor, TF):水稻后一部位中重金属含量与前一部位中重金属含量的比值^[28]. 例如:籽粒中Cd的富集系数(BAF_{Grain})=籽粒Cd含量/土壤总Cd含量;水稻中Cd从根到茎的转运系数(TF_{Root-Stem})=茎Cd含量/根Cd含量,水稻其它部分的富集系数和转运系数按同样的方法进行计算.

土壤中有效态重金属迁移性强,易被植物吸收;交换态重金属与土壤结合能力较弱,易被释放,导致土壤重金属活性增加,因此将有效态和离子可交换态作为易被动植物吸收利用的形态来判定HA/FA对土壤Cd的钝化率^[29]. 土壤Cd的钝化率计算式(2)^[17]如下:

$$y_1 = \frac{Q_0 - Q_i}{Q_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中, y_1 表示土壤Cd的钝化率; Q_i 表示不同处理中的DTPA-Cd(或EX-Cd)含量,mg·kg⁻¹; Q_0 表示对照组CK中DTPA-Cd(或EX-Cd)含量,mg·kg⁻¹.

采用WPS Office 2019进行数据处理,Origin 2022进行数据分析作图,IBM SPSS Statistics 21进行数据统计分析.

2 结果与分析

2.1 不同HA/FA对水稻产量及Cd累积的影响

不同处理水稻生物量变化情况见表3. 与CK处理相比,HA/FA=6/4处理降低了水稻产量,但差异不显著,其余处理均显著($P < 0.05$)增加了水稻产量. HA/FA=10/0和HA/FA=0/10均显著提高了分蘖期株高、成熟期茎叶干重和鲜重以及水稻产量,其中产量增加幅度分别为3.2%和2.6%. HA/FA为8/2、4/6和2/8处理组的产量平均增加幅度为1.6%. 施3种供试有机肥显著提高了分蘖期株高、成熟期茎叶干重和鲜重以及水稻产量,其中产量平均增加幅度为5.0%. 结果说明使用不同HA/FA作为土壤Cd钝化剂不会导致水稻产量降低,含HAs的有机肥还有较明显的增产作用.

不同HA/FA腐殖酸及有机肥对水稻Cd累积的影响见表4. 与CK处理相比,3种供试有机肥均显著降低了水稻根、茎、叶和籽粒中的Cd含量,其中叶和籽粒Cd含量降幅分别为11.2%~32.6%和24.2%~42.4%;而HAs的影响则与其HA/FA值有关,HA/FA≥4/6的处理均显著降低了水稻根、茎、叶和籽粒中Cd含量,其叶和籽粒中Cd含量降幅分别为20.2%~42.7%和15.2%~33.3%;而HA/FA≤2/8的处理则显著提高了水稻籽粒、茎和叶中Cd含量,其叶和籽粒中Cd含量增幅分别为13.5%~43.8%和24.2%~42.4%.

表3 不同处理水稻生物量变化情况¹⁾

Table 3 Changes in rice biomass after application of test materials

处理方法	分蘖期株高/cm	分蘖期分蘖数	成熟期茎叶鲜重 /g·窝 ⁻¹	成熟期茎叶干重 /g·窝 ⁻¹	产量/t·hm ⁻²
CK	95±3.21c	17±1.15a	161.54±4.36e	50.55±0.99e	8.57±0.05c
HA/FA = 10/0	99±4.04b	19±0.71a	167.92±4.66d	54.77±1.09b	8.84±0.09b
HA/FA = 8/2	97±4.73c	16±2.89b	167.18±3.62d	53.80±1.59b	8.66±0.37b
HA/FA = 6/4	99±3.00b	14±1.15c	163.08±2.18e	49.99±1.22f	8.52±0.03c
HA/FA = 4/6	99±1.53b	14±0.58c	178.47±8.70c	54.08±0.54b	8.82±0.05b
HA/FA = 2/8	101±1.53a	14±1.41c	182.31±7.62b	51.70±0.22d	8.65±0.13b
HA/FA = 0/10	100±1.15a	14±0c	193.08±1.09a	52.49±0.25c	8.80±0.14b
万植有机肥	98±3.79b	17±1.41a	194.62±7.62a	58.54±0.76a	9.34±0.12a
万植生物有机肥	105±1.73a	16±1.00a	171.13±1.23c	53.63±0.89b	9.01±0.06a
矿源腐殖质	99±2.08b	19±3.54a	166.32±0.96d	53.95±0.14b	8.65±0.15b

1)数据为平均值±标准误差;同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)

表4 不同HA/FA及有机肥对水稻Cd累积的影响¹⁾/mg·kg⁻¹Table 4 Cadmium accumulation in rice after application of test materials /mg·kg⁻¹

处理方法	根	茎	叶	籽粒
CK	9.13±0.04a	1.89±0.08c	0.89±0.05c	0.33±0.02b
HA/FA = 10/0	7.54±0.12c	1.73±0.06d	0.56±0.06f	0.23±0.04d
HA/FA = 8/2	8.03±0.35b	1.75±0.07d	0.60±0.06f	0.22±0.01d
HA/FA = 6/4	8.81±0.18a	1.82±0.03c	0.71±0.01d	0.28±0.01c
HA/FA = 4/6	7.69±0.21b	1.74±0.03d	0.51±0.04g	0.23±0.01d
HA/FA = 2/8	5.89±0.06e	2.05±0.02b	1.01±0.04b	0.41±0.01a
HA/FA = 0/10	6.35±0.12d	2.56±0.08a	1.28±0.01a	0.47±0.08a
万植有机肥	6.25±0.23d	1.63±0.03e	0.60±0.03f	0.19±0.01e
万植生物有机肥	5.7±0.02f	1.69±0.036e	0.63±0.06e	0.25±0.05c
矿源腐殖质	7.61±0.07c	1.20±0.01f	0.79±0.04c	0.23±0.04d

1)数据为平均值±标准误差;同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)

不同处理水稻Cd的富集系数和转运系数见表5. 与CK处理相比,HA/FA ≥ 4/6处理降低了 $TF_{Stem-Grain}$ 和 $TF_{Root-Grain}$,降低幅度分别为5.9%~23.5%和25%,表明Cd从水稻茎、根向籽粒的转运受到抑制,从而降低了籽粒Cd的累积量;而HA/FA ≤ 2/8处理则提高了 $TF_{Stem-Grain}$ 和 $TF_{Root-Grain}$,增加幅度分别为5.9%~17.6%和42.9%,表明其促进了Cd从水稻根、茎向籽粒的转运,提高了籽粒Cd的累积量^[30]. 与CK相比,HA/FA ≥ 4/6和3种供试有机肥处理均降低了

BAF_{Grain} 、 BAF_{Stem} 和 BAF_{Leaf} ,其中HA/FA ≥ 4/6处理对 BAF_{Grain} 的降低幅度为13.4%~31.7%,供试3种实际有机肥对 BAF_{Grain} 降低幅度为22.0%~42.7%;HA/FA ≤ 2/8处理增加了 BAF_{Grain} 、 BAF_{Stem} 和 BAF_{Leaf} ,其中对 BAF_{Grain} 的增加幅度为25.6%~42.7%.

结果说明含HAs有机物料对水稻籽粒Cd累积调控作用受其HA/FA制约,抑制或促进水稻籽粒Cd累积的临界阈值介于4/6和2/8之间. 供试3种实际有机肥,其HA/FA均>4/6,施用后均显著降低籽粒Cd

表5 不同处理水稻Cd的富集系数和转运系数

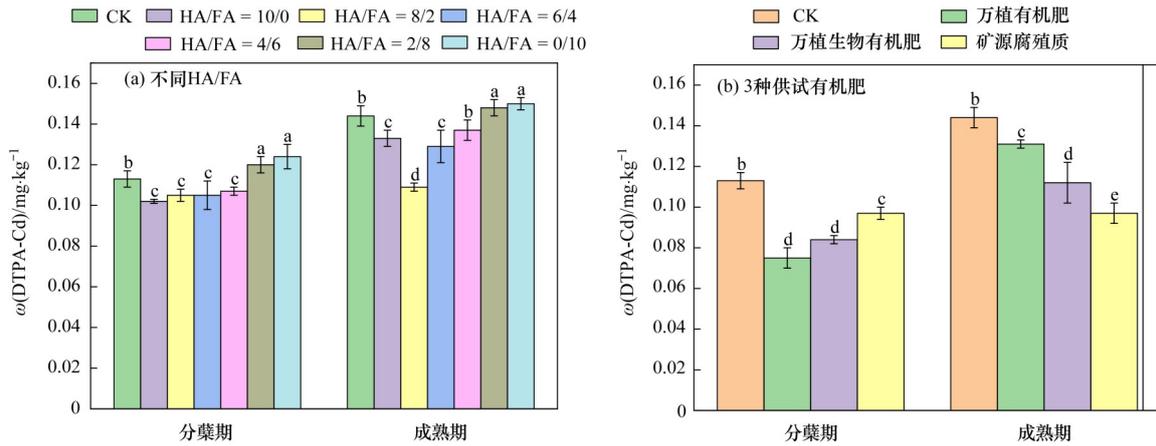
Table 5 Changes in enrichment and transport coefficients of Cd in rice

处理	BAF_{Root}	BAF_{Stem}	BAF_{Leaf}	BAF_{Grain}	$TF_{Root-Grain}$	$TF_{Root-Stem}$	$TF_{Stem-Leaf}$	$TF_{Stem-Grain}$
CK	22.81	4.71	2.21	0.82	0.04	0.21	0.47	0.17
HA/FA = 10/0	18.84	4.31	1.39	0.56	0.03	0.23	0.32	0.13
HA/FA = 8/2	20.06	4.38	1.50	0.56	0.03	0.22	0.34	0.13
HA/FA = 6/4	22.01	4.55	1.76	0.71	0.03	0.21	0.39	0.16
HA/FA = 4/6	19.21	4.35	1.26	0.58	0.03	0.23	0.29	0.13
HA/FA = 2/8	14.73	5.11	2.51	1.03	0.07	0.35	0.49	0.20
HA/FA = 0/10	15.86	6.40	3.20	1.17	0.07	0.40	0.50	0.18
万植有机肥	15.63	4.08	1.50	0.47	0.03	0.26	0.37	0.11
万植生物有机肥	14.24	4.23	1.58	0.64	0.04	0.30	0.37	0.15
矿源腐殖质	19.03	3.00	1.98	0.59	0.03	0.16	0.66	0.20

含量. 因此, 以有机物料作为水稻土壤 Cd 钝化剂, 控制其适宜的 HA/FA 值是发挥其钝化效应的关键.

2.2 不同 HA/FA 对水稻土壤中 Cd 有效态和赋存形态的影响

钝化材料常通过影响土壤 Cd 的形态转化和植物有效性进而影响作物的吸收累积. DTPA 提取法是常用的土壤有效 Cd 含量测定方法之一. 不同处理对水稻生长过程中土壤 DTPA-Cd 含量变化的影响见图 2. 土壤 DTPA-Cd 含量受 HA/FA 值和有机肥种类的影响



不同小写字母表示不同处理之间具有显著差异 ($P < 0.05$)

图 2 不同处理对水稻生长过程中土壤 DTPA-Cd 含量变化的影响

Fig. 2 Effects of different treatments on DTPA-Cd content during rice growth

综上所述, HA/FA $\geq 4/6$ 处理和供试 3 种实际有机肥处理均能显著降低土壤有效态 Cd 含量, 相反 HA/FA $\leq 2/8$ 处理增加了土壤有效态 Cd 含量. HA/FA 对土壤 Cd 植物有效性的调控效应临界阈值介于 4/6 和 2/8 之间, 与抑制或促进水稻籽粒 Cd 累积的临界阈值范围相同, 说明 HAs 通过影响土壤 Cd 的有效性而减少水稻籽粒 Cd 的累积. 供试 3 种实际有机肥, 其 HA/FA 均 $> 4/6$, 施用后均显著降低籽粒中 Cd 含量. 因此, 以有机物料作为水稻 Cd 钝化剂, 控制适宜的 HA/FA 是发挥其钝化作用的关键.

土壤 Cd 的植物有效性受其赋存状态的制约, 有机物料通过影响 Cd 的形态转化而制约其对水稻的有效性. 不同处理对水稻生长过程中土壤各 Cd 形态占全 Cd 的比例见图 3. 由图 3(a) 可见, 水稻分蘖期, 与 CK 处理相比, HA/FA $\geq 4/6$ 处理使 EX-Cd 降低 13.3% ~ 44.4%, CA-Cd 提高 8.6% ~ 45.7%, FM-Cd 提高 7.1% ~ 35.7%. HA/FA $\leq 2/8$ 处理使 EX-Cd 提高 24.4%, CA-Cd 降低 31.4% ~ 42.9%, FM-Cd 降低 21.4%. 万植生物有机肥和矿源腐殖质处理使 EX-Cd 降低 2.2% ~ 68.9%, CA-Cd 提高 5.7% ~ 17.1%, FM-Cd 提高 14.3% ~ 114.3%. 由图 3(b) 可见, 成熟期, 与 CK 相比, HA/FA $\geq 4/6$ 处理使 EX-Cd 降低 6.5% ~ 21%. HA/FA $\leq 2/8$ 处理使 EX-Cd 提高 0 ~ 22.6%, FM-

而呈现显著差异 ($P < 0.05$). 水稻分蘖期 HA/FA $\geq 4/6$ 处理显著降低了 DTPA-Cd 含量 ($P < 0.05$), 较 CK 处理降幅为 5.3% ~ 9.7%; HA/FA $\leq 2/8$ 处理显著增加了 DTPA-Cd 含量, 增幅为 6.2% ~ 9.7%; 供试 3 种实际有机肥降幅为 14.2% ~ 33.6%. 水稻成熟期, 与 CK 处理相比, HA/FA $\geq 4/6$ 处理显著降低了 DTPA-Cd 含量, 降幅为 4.9% ~ 24.3%; HA/FA $\leq 2/8$ 处理显著增加了 DTPA-Cd 含量, 增幅为 2.8% ~ 4.2%; 3 种实际有机肥处理降幅为 9.0% ~ 32.6%.

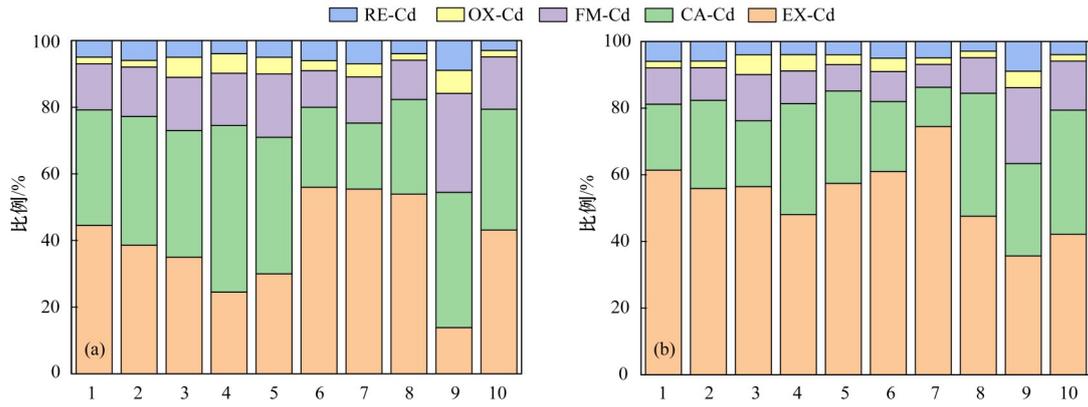
Cd 降低 18.2% ~ 36.4%. 供试 3 种实际有机肥处理使 EX-Cd 降低了 21% ~ 41.9%, CA-Cd 提高了 40% ~ 90%.

不同处理对 Cd 钝化率的影响见图 4. 随着 HA/FA 的降低, 钝化率在整体上呈现下降的趋势. 水稻处于分蘖期和成熟期时: 当 HA/FA $\geq 4/6$ 时, Cd 的钝化率大于 0; 当 HA/FA $\leq 2/8$ 时, Cd 钝化率小于 0. 即, HA/FA $\geq 4/6$ 时对土壤 Cd 具有钝化作用, 而 HA/FA $\leq 2/8$ 时则表现为活化作用.

综上所述, HA/FA $\geq 4/6$ 处理使得土壤中 Cd 由活性高的 EX-Cd 向活性低的 CA-Cd 和 FM-Cd 转化. HA/FA $\leq 2/8$ 处理使得土壤中 Cd 由活性低的 CA-Cd 和 FM-Cd 向活性高的 EX-Cd 转化. HAs 影响下的 Cd 形态转化与 DTPA-Cd 的变化高度一致.

2.3 不同 HA/FA 对水稻土壤 pH 和有效硫含量的影响

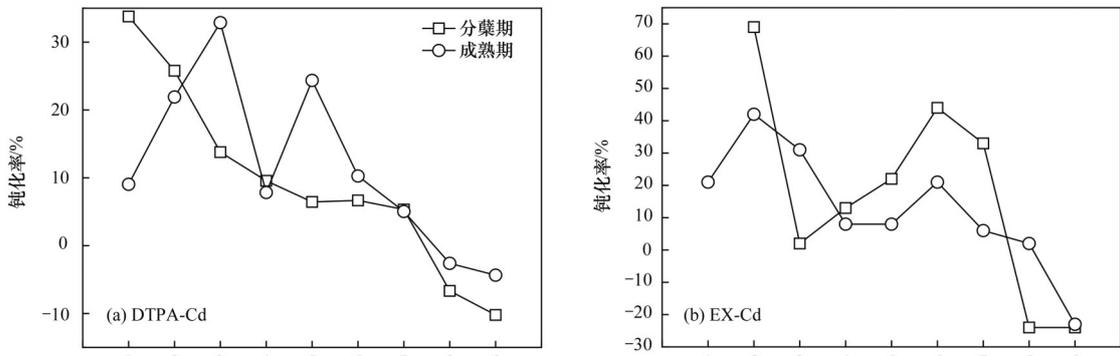
土壤 pH 值被认为是对土壤 Cd 有效性和 Cd 赋存形态影响最为显著的因素^[31]. pH 影响土壤重金属赋存形态的机制在于 pH 可使土壤吸附位点发生改变、影响吸附表面的配位及稳定^[32]. 不同处理对水稻生长过程中土壤 pH 的影响见图 5. 由图 5(a) 可见, 分蘖期: 与 CK 相比, HA/FA 为 10/0、8/2 和 6/4 处理均提高了土壤 pH, 分别提高了 0.12、0.02 和 0.22 个单位;



(a)分蘖期, (b)成熟期; 1. CK, 2. HA/FA = 10/0, 3. HA/FA = 8/2, 4. HA/FA = 6/4, 5. HA/FA = 4/6, 6. HA/FA = 2/8, 7. HA/FA = 0/10, 8. 万植有机肥, 9. 万植生物有机肥, 10. 矿源腐殖质

图3 不同处理对水稻生长过程中土壤Cd形态占全Cd比例的影响

Fig. 3 Effects of different treatments on the proportion of soil cadmium to total cadmium during rice growth



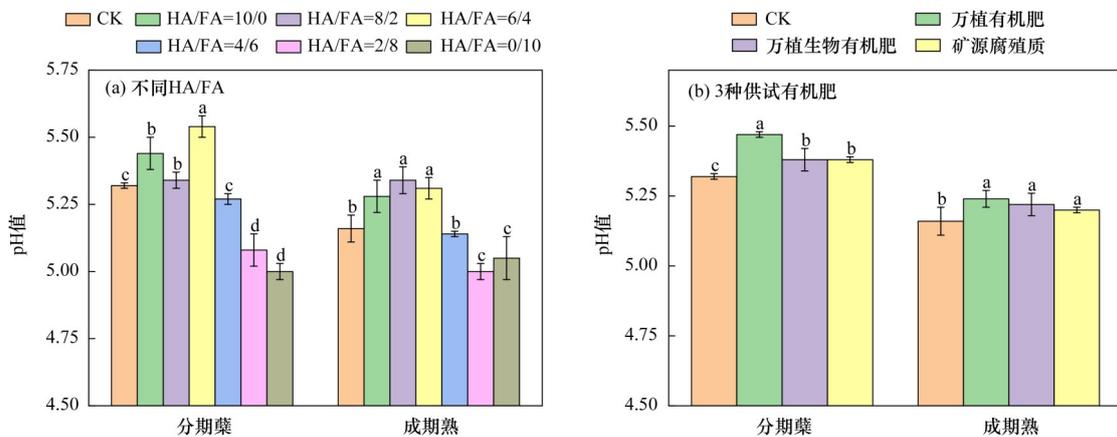
1. 万植有机肥, 2. 万植生物有机肥, 3. 矿源腐殖质, 4. HA/FA = 10/0, 5. HA/FA = 8/2, 6. HA/FA = 6/4, 7. HA/FA = 4/6, 8. HA/FA = 2/8, 9. HA/FA = 0/10

图4 不同处理对土壤Cd钝化率的影响

Fig. 4 Effect on the percentage of soil cadmium passivation

HA/FA为4/6、2/8和0/10处理则降低了土壤pH,分别降低了0.05、0.24和0.32个单位. 供试3种实际有机肥使土壤pH显著提高了0.06~0.15个单位. 成熟期时[图5(b)]:与CK相比,HA/FA ≥ 6/4处理显著提高了土壤pH, pH ≤ 4/6处理降低了土壤pH; 供试3种

实际有机肥均显著提高了土壤pH,分蘖期提高了0.06~0.15个单位、成熟期提高了0.04~0.08个单位. 结果说明HA/FA较高的(≥ 6/4)HAs或含HAs有机物料,可以提升或维持土壤较高的pH,因此,也有利于降低土壤中Cd的有效性.



不同小写字母表示不同处理之间具有显著差异(P < 0.05),下同

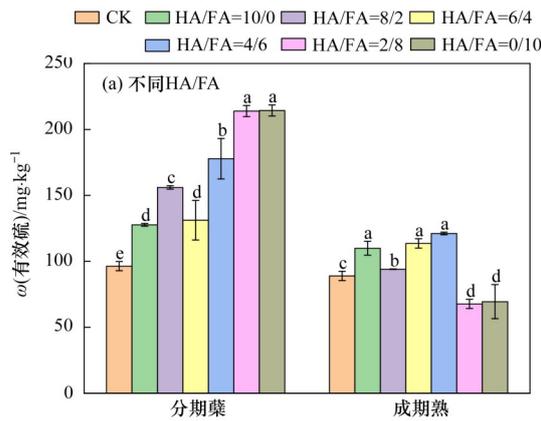
图5 不同处理对水稻生长过程中土壤中pH的影响

Fig. 5 Effects of different treatments on soil pH during rice growth

硫是植物生长过程中不可缺少的必需营养元素,同时土壤中硫的形态转化也会影响土壤酸度.不同处理对水稻生长过程中土壤有效硫含量的影响见图6.水稻生长处于分蘖期时,施用不同HA/FA显著提高了土壤有效硫含量,当HA/FA达到2/8时,土壤有效硫含量达到最高,较CK增加了122%;3种供试有机肥使水稻分蘖期土壤中有有效硫含量增加了33.3%~65.8%,以万植有机肥增加幅度最大.至水稻成熟期,土壤有效硫含量整体降低,但不同处理土壤有效硫含量变化差异较大,特别是HA/FA为2/8和0/10的处理组,成熟期显著低于其他处理,较CK降低了21.9%~23.9%.表明HAs中FA组分水稻生长前期对土壤硫的有效性提升作用较大,而HA组分能持续维持土壤全生育期中有效硫较高的状态.

2.4 土壤Cd有效性及籽粒Cd累积主要影响因素分析

前文分析表明,施用HAs及含HAs有机物料显



著改变了土壤pH、有效硫含量和Cd形态.为进一步了解有机物料影响下,土壤性质变化及其与Cd有效性和水稻籽粒累积的关系,首先基于不同HA/FA腐殖酸处理(T1~T7)结果,对HA、FA添加量与分蘖期和成熟期土壤中有有效Cd、pH、有效硫含量以及籽粒Cd含量做皮尔逊相关性分析(表6).结果表明,水稻分蘖期土壤中有有效Cd含量与HA添加量呈显著负相关而与FA添加量为显著正相关;同时,HA添加量与土壤pH呈显著正相关关系($P < 0.05$),而与FA添加量则为显著负相关,且FA添加量还与分蘖期土壤有效硫含量呈显著正相关($P < 0.05$).结果证实HAs通过影响土壤pH和有效硫含量,进而影响土壤中有有效态Cd,而有效态Cd则与水稻籽粒中Cd的含量呈高度正相关($P < 0.01$);HAs中HA和FA组分对土壤Cd活性的作用相反,前者表现为钝化效应,而后者则起活化作用,不同HA/FA的影响则是两者综合作用的结果.

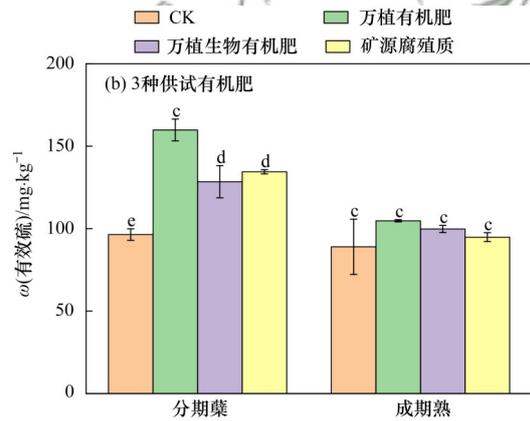


图6 不同处理对水稻生长过程中土壤中有有效硫含量的影响

Fig. 6 Effects of different treatments on soil available sulfur during rice growth

表6 HA和FA添加量与土壤性质的相关性¹⁾(N=7)

Table 6 Correlation between HA and FA addition and soil properties (N=7)

	分蘖期土壤有效Cd	分蘖期土壤pH	分蘖期土壤有效硫含量	成熟期土壤有效Cd	成熟期土壤pH
HA添加量	-0.853*	0.690*	-0.180	-0.762*	0.797*
FA添加量	0.758*	-0.760*	0.858*	0.552	-0.744*
籽粒Cd含量	0.924**	-0.752*	0.231	0.797*	-0.770*

1)*表示在0.05水平上显著相关,**表示在0.01水平上极显著相关;

HAs对土壤pH、有效硫等性质的影响,势必影响土壤中Cd的赋存形态,从而表现出不同的有效性,且分蘖期的影响比成熟期更显著.为此,将包括实际供试有机肥在内的所有分蘖期处理的土壤pH、有效硫含量和Cd赋存形态等性质因子与土壤Cd有效性和水稻籽粒Cd之间进行相关性分析(表7),以进一步分析各因子之间的相互联系,同时以水稻籽粒Cd含量作为目标变量,采用逐步回归法定量分析不同因子对水稻Cd累积的贡献(表8).由表8可以看出,影响水稻籽粒Cd累积的第一因素为土壤有效Cd,第二

因素为土壤pH,水稻籽粒Cd含量随着有效Cd的增大而增大,随着pH的增大而减小.同时水稻籽粒Cd的含量随着水稻叶和茎中Cd的累积而累积.

由表7可知,水稻籽粒Cd含量与有效Cd呈显著正相关($P < 0.01$)、与pH呈显著负相关($P < 0.01$)、与CA-Cd呈显著负相关($P < 0.05$).故土壤pH和CA-Cd含量的增加均能降低籽粒Cd含量.有效Cd与pH呈显著负相关($P < 0.05$),pH与有效硫含量呈显著负相关($P < 0.01$),与不同HA/FA腐殖酸处理(T1~T7)的相关性结果一致.另EX-Cd与CA-Cd和FM-

表 7 水稻生长处于分蘖期时各因素之间的相互相关性¹⁾

Table 7 Correlation between various factors at tillering stage of rice growth

	籽粒 Cd	有效 Cd	pH	有效硫	EX-Cd	CA-Cd	FM-Cd
籽粒 Cd	1						
有效 Cd	0.792**	1					
pH	-0.829**	-0.717*	1				
有效硫	0.553	0.427	-0.767**	1			
EX-Cd	0.467	0.328	-0.515	0.494	1		
CA-Cd	-0.633*	-0.329	0.785**	-0.672*	-0.843**	1	
FM-Cd	-0.297	-0.401	0.224	-0.319	-0.849**	0.475	1

1)*表示在 0.05 水平上显著相关, **表示在 0.01 水平上极显著相关

表 8 不同因子对于水稻籽粒 Cd 累积的贡献¹⁾

Table 8 Contribution of different factors to cadmium accumulation in rice grains

回归方程	复相关系数	第一影响因素		第二影响因素	
		因子	偏相关系数	因子	偏相关系数
$Y = 1.361 + 2.826X_1 - 0.257X_2$	-0.7	有效 Cd	0.527	pH	-0.382
$Y = -0.093 + 0.238X_3 + 0.110X_4$	0.686	叶 Cd	0.771	茎 Cd	0.622

1) X_1 表示水稻分蘖期土壤中有效 Cd; X_2 表示水稻分蘖期土壤的 pH; X_3 表示水稻叶中 Cd 的含量; X_4 表示水稻茎中 Cd 的含量

Cd 呈显著负相关 ($P < 0.01$).

3 讨论

3.1 HA/FA 处理对水稻土壤性质和 Cd 形态及有效性的影响

本研究结果表明, HAs 对于土壤 pH、有效硫含量和 Cd 赋存形态和有效性均有显著影响, 其影响方向和程度随其活性组分的不同而有很大差异. 单纯 HA 处理能显著增加土壤 pH、降低有效 Cd 含量, 而单纯 FA 处理能显著降低 pH, 增加有效硫含量、促进了土壤 Cd 由活性较低的 FM-Cd 向活性高的 EX-Cd 转化, 从而升高了土壤有效 Cd 含量, 这与 HA 和 FA 结构和性质差异密切相关. HA 相对分子质量高, 一般在 3 000 ~ 100 000 之间^[33], 聚合程度高且结构更加复杂, 其酸缓冲能力更强, 同时更易于与土壤无机胶体结合形成复合胶体, 改变土壤结构和缓冲性能, 进而改变土壤不同组分对 Cd 的固持能力和形态分配^[10]. 因此, HA 处理能够增加土壤 pH^[34,35], 降低土壤有效态 Cd 含量^[12], 促进土壤中的 Cd 向活性低的形态转化; 而 FA 相对分子质量低, 一般在 500 ~ 5 000 之间^[33], 在土壤中移动性更强, 同时 FA 带有更多的酸性功能基团, 进入土壤后增加体系中 H^+ 的浓度, 降低土壤 pH^[30,36], 促进土壤中的 Cd 向离子态和 EX-Cd 的转化^[36], 提升了土壤 Cd 的移动性和植物有效性. 此外, 本研究发现, FA 可以增加土壤有效硫含量, 有研究表明土壤中有效硫含量增加能有效促进土壤有效 Cd 含量增加^[37]. 单纯施用 FA 使土壤中有效硫含量较 CK 增加了 65.8%, 张立超等^[38]通过元素分析仪测定出的 HA 和 FA 中 S 质量含量占比仅为 0.18% 和

1.21%, 说明 HAs 对土壤有效硫含量的影响非自身成分的直接影 响, 而是通过促进土壤中的硫发生的氧化还原反应, 产生的硫酸和金属氧化物反应生成水溶性硫酸盐和吸附态硫酸盐, 从而增加了土壤中有 效硫含量. 实际有机物料中 HA 和 FA 的含量和相对 比例因其物料种类、堆肥条件的不同而异, 其对土壤 中 Cd 有效性的影响是各种组分综合作用的结果. 本 研究通过系列试验得出, 既提升水稻产量, 又确保粮 食安全的 HA/FA 的适用范围应为 $HA/FA \geq 4/6$.

3.2 HA/FA 处理对水稻 Cd 吸收转运和累积的影响

田间试验结果表明, 降低水稻籽粒对 Cd 累积的 $HA/FA \geq 4/6$, 与 HAs 调控土壤 Cd 有效态的阈值范围 一致, 说明 HAs 通过调控土壤 Cd 的有效性而影响水 稻对 Cd 的吸收累积, 籽粒 Cd 累积量与土壤中 Cd 有 效态含量的高度相关性也进一步证实了此观点. 如 前所述, 大分子的 HA 通过其自身对 Cd 的络合固定 作用^[39], 与土壤无机胶体紧密结合形成复合胶体, 强 化了土壤对 Cd 的固持能力; 而低分子的 FA 通过降低 pH、形成移动性强的络合物, 从而增加土壤有效 Cd 含量, 促进了水稻对 Cd 的吸收^[40]. 同时, 本研究还 发现, HA/FA 还影响水稻植株体内 Cd 的分配转运. $HA/FA \geq 4/6$ 处理使 Cd 由茎向籽粒和根向籽粒的转 运系数分别降低了 5.9% ~ 23.5% 和 25%, 而 $HA/FA \leq 2/8$ 处理使 Cd 由茎向籽粒和根向籽粒的转 运系数分别上升了 5.9% ~ 17.6% 和 42.9%, 表明 HA/FA 不仅影响土壤 Cd 的有效性, 同时也影响植株 体内 Cd 的转运分配, 这可能与不同 HA/FA 影响下水 稻吸收 Cd 的形态有关, 有研究表明有效态 Cd 更容易 被植物所吸收^[41], HA/FA 影响下水稻 Cd 吸收、转运

的生理机制值得进一步研究. 需要说明的是, 本试验条件下, 尽管 HA/FA $\geq 4/6$ 的 HAs 和实际有机肥对水稻均显示了显著的降 Cd 效果, 籽粒 Cd 降低幅度达 15.2% ~ 33.3%, 但水稻籽粒 Cd 含量尚未达到食品安全国家标准 (GB 2762-2017) 的标准限值 ($0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 要求, 意味着单施有机物料调控尚难保证水稻籽粒达标, 需要有多种措施结合^[28].

4 结论

(1) HA 和 FA 通过影响土壤 pH、Cd 的形态和有效性从而影响水稻 Cd 的吸收、分配转运和累积. 两者作用方向不同, 前者促进土壤对 Cd 的固定, 降低土壤有效态 Cd 含量, 从而降低水稻籽粒 Cd 含量, 而后者作用则相反. HA/FA 抑制或促进水稻籽粒 Cd 累积的临界阈值介于 4/6 和 2/8 之间.

(2) 3 种实际有机肥施用后, 均显著降低了土壤中 DTPA-Cd 含量和水稻籽粒 Cd 含量. 而 3 种供试有机肥的 HA/FA 均大于 $> 4/6$, 与研究确定的临界阈值吻合, 证实有机肥对于土壤 Cd 活性的调控作用确受其活性组分 HA/FA 相对含量的制约.

(3) 实际有机肥常含有不同 HA 和 FA 组成的复杂混合物, 其对 Cd 污染土壤上水稻 Cd 的吸收、转运分配和累积的效应是各种组分共同作用的结果. 选择以有机物料作为土壤 Cd 污染修复材料, 控制其适宜的 HA/FA 是关键.

参考文献:

[1] Li J R, Xu Y M. Immobilization remediation of Cd-polluted soil with different water condition [J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, **193**: 607-612.

[2] Zhang X Y, Chen D M, Zhong T Y, *et al.* Assessment of cadmium (Cd) concentration in arable soil in China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(7): 4932-4941.

[3] 张丽, 李如霞, 何玉垒, 等. 生物炭与氮肥复施对镉污染水稻土修复效应及机制[J]. *环境科学*, 2023, **44**(8): 4479-4488.

Zhang L, Li R X, He Y L, *et al.* Remediation effect and mechanism of biochar in combination with nitrogen fertilizer on Cd-contaminated paddy soil [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(8): 4479-4488.

[4] Sterckeman T, Thomine S. Mechanisms of cadmium accumulation in plants [J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2020, **39**(4): 322-359.

[5] Sun J H, Jia Q, Li Y, *et al.* Effect of arbuscular mycorrhiza fungus *Diversispora eburnea* inoculation on *Lolium perenne* and *Amorpha fruticosa* growth, cadmium uptake, and soil cadmium speciation in cadmium-contaminated soil [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2023, **20**(1), doi: 10.3390/ijerph20010795.

[6] Yan L J, Allen D C. Cadmium-induced kidney injury: oxidative damage as a unifying mechanism [J]. *Biomolecules*, 2021, **11**(11), doi: 10.3390/biom11111575.

[7] 何雨帆, 刘宝庆, 吴明文, 等. 腐殖酸对小白菜吸收 Cd 的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2006, **25**(S1): 84-86.

He Y F, Liu B Q, Wu M W, *et al.* Effect of humus on uptake of cadmium in Pakehoi [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, **25**(S1): 84-86.

[8] 陕红, 李书田, 刘荣乐. 秸秆和猪粪的施用对土壤镉有效性的影响和机理研究[J]. *核农学报*, 2009, **23**(1): 139-144.

Shan H, Li S T, Liu R L. Availability and the related mechanisms of cadmium in soils as influenced by the application of straw or pig manure [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2009, **23**(1): 139-144.

[9] An J, Jho E H, Nam K. Effect of dissolved humic acid on the Pb bioavailability in soil solution and its consequence on ecological risk [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, **286**: 236-241.

[10] 王冰清, 阳琴, 李虹颖, 等. 铵态氮肥和腐殖酸协同促进孔雀草对土壤中 Cd 的去除[J]. *环境科学*, 2021, **42**(12): 6006-6013.

Wang B Q, Yang Q, Li H Y, *et al.* Ammonium nitrogen fertilizer and humic acid synergically promote the removal of Cd from soil by *Tagetes patula* L. [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(12): 6006-6013.

[11] 魏世强, 李光林, Österberg R, 等. 腐殖酸—金属离子反应动力学特征与稳态指标的探讨[J]. *土壤学报*, 2003, **40**(4): 554-561.

Wei S Q, Li G L, Österberg R, *et al.* Kinetics of metal ion reactions with humic acids and index for steady-state [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, **40**(4): 554-561.

[12] Rashid I, Murtaza G, Dar A A, *et al.* The influence of humic and fulvic acids on Cd bioavailability to wheat cultivars grown on sewage irrigated Cd-contaminated soils [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, **205**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.111347.

[13] Zhou H B, Meng H B, Zhao L X, *et al.* Effect of biochar and humic acid on the copper, lead, and cadmium passivation during composting [J]. *Bioresource Technology*, 2018, **258**: 279-286.

[14] 邹传. 风化煤矿源腐殖酸对稻田土壤镉赋存形态及生物有效性的影响[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2019.

Zou C. Effects of humic acids from weathered coal sources on the speciation and bioavailability of cadmium in paddy soils [D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2019.

[15] 邹传, 郭彬, 林义成, 等. 不同粒径腐殖酸颗粒对土壤有效态镉的影响[J]. *浙江农业学报*, 2019, **31**(4): 616-623.

Zou C, Guo B, Lin Y C, *et al.* Effects of humic acid particles with different sizes on available cadmium in soil [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2019, **31**(4): 616-623.

[16] 罗梅. 腐殖酸不同分子量组分对镉生物活性的调控效应与机制[D]. 重庆: 西南大学, 2020.

Luo M. Effects of humic acids fractions with different molecular weight on speciation of bioavailability of Cd [D]. Chongqing: Southwest University, 2020.

[17] 王青清, 蒋珍茂, 王俊, 等. 腐殖酸活性组分及其比例对紫色潮土中铅形态转化和有效性演变动态的影响[J]. *环境科学*, 2017, **38**(5): 2136-2145.

Wang Q Q, Jiang Z M, Wang J, *et al.* Effects of the active components of humic acids and their proportions on the dynamics of lead transformation and availability in purple alluvial soil [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(5): 2136-2145.

[18] Sun N, Thompson R B, Xu J X, *et al.* Arsenic and cadmium accumulation in soil as affected by continuous organic fertilizer application: implications for clean production [J]. *Agronomy*, 2021, **11**(11), doi: 10.3390/agronomy11112272.

[19] Hussain B, Ashraf M N, Shafeeq-ur-Rahman, *et al.* Cadmium

- stress in paddy fields: effects of soil conditions and remediation strategies[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **754**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142188.
- [20] 徐金忠, 孟凯, 崔晓阳, 等. 不同施肥处理对黑土腐殖质组成的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2009, **37**(11): 84-85.
Xu J Z, Meng K, Cui X Y, *et al.* Effects of different fertilization treatments on humus composition of black soil [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2009, **37**(11): 84-85.
- [21] 刘小虎, 贾庆宇, 安婷婷, 等. 不同施肥处理对棕壤腐殖酸组成和性质的影响[J]. *土壤通报*, 2005, **36**(3): 328-332.
Liu X H, Jia Q Y, An T T, *et al.* Effect of fertilization on soil humus components and brown soil properties [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, **36**(3): 328-332.
- [22] 陈盈, 张满利, 张威, 等. 不同来源腐殖酸与 Mn^{2+} 和 Zn^{2+} 络合稳定常数的确定[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2008, **27**(3): 478-480.
Chen Y, Zhang M L, Zhang W, *et al.* Stability constants of complication of Mn^{2+} and Zn^{2+} with humic acids from three different sources [J]. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)*, 2008, **27**(3): 478-480.
- [23] Wu M, Song M Y, Liu M, *et al.* Fungicidal activities of soil humic/fulvic acids as related to their chemical structures in greenhouse vegetable fields with cultivation chronosequence [J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**, doi: 10.1038/srep32858.
- [24] 徐丽娜, 李忠佩, 车玉萍. 淹水厌氧条件下腐殖酸对红壤中铁异化还原过程的影响[J]. *环境科学*, 2009, **30**(1): 221-226.
Xu L N, Li Z P, Che Y P. Influences of humic acids on the dissimilatory iron reduction of red soil in anaerobic condition [J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(1): 221-226.
- [25] 杨剑虹, 王成林, 代享林. 土壤农化分析与环境监测[M]. 北京: 中国大地出版社, 2008.
- [26] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals [J]. *Analytical Chemistry*, 1979, **51**(7): 844-851.
- [27] 李明远, 张小婷, 刘汉焱, 等. 水分管理对稻田土壤铁氧化物形态转化的影响及其与腐活性变化的耦合关系[J]. *环境科学*, 2022, **43**(8): 4301-4312.
Li M Y, Zhang X T, Liu H Y, *et al.* Effects of water management on the transformation of iron oxide forms in paddy soils and its coupling with changes in cadmium activity [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(8): 4301-4312.
- [28] 彭华, 邓凯, 石宇, 等. 连续施硅对双季稻硅累积效应的影响[J]. *环境科学*, 2022, **43**(8): 4271-4281.
Peng H, Deng K, Shi Y, *et al.* Impacts of uptake and accumulation of Cd on double rice-paddy soil by silicon fertilizer continuous application [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(8): 4271-4281.
- [29] 汪斌, 谭建新, 代静玉. 腐殖酸对池塘底泥中铅、镉的离子形态分布及其活性的影响[J]. *土壤通报*, 2007, **38**(1): 106-110.
Wang B, Tan J X, Dai J Y. Effect of humic acid on ionic form distribution and activity of lead and cadmium in pond sediment [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, **38**(1): 106-110.
- [30] Liu H, Zhang T, Tong Y A, *et al.* Effect of humic and calcareous substance amendments on the availability of cadmium in paddy soil and its accumulation in rice [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, **231**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2022.113186.
- [31] 吴丽娟, 任兰, 陆喜红, 等. 南京市农用地土壤中重金属形态特征分析[J]. *环境监测管理与技术*, 2018, **30**(4): 57-59, 64.
Wu L J, Ren L, Lu X H, *et al.* Research on the chemical speciation of heavy metals in agricultural soil in Nanjing [J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2018, **30**(4): 57-59, 64.
- [32] 关天霞, 何红波, 张旭东, 等. 土壤中重金属元素形态分析方法及形态分布的影响因素[J]. *土壤通报*, 2011, **42**(2): 503-512.
Guan T X, He H B, Zhang X D, *et al.* The methodology of fractionation analysis and the factors affecting the species of heavy metals in soil [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, **42**(2): 503-512.
- [33] 陈亭悦. 腐殖酸不同分子量组分对铅生物有效性的调控效应与机制[D]. 重庆: 西南大学, 2020.
Chen T Y. Effects of humic acids fractions with different molecular weight on speciation of bioavailability of lead [D]. Chongqing: Southwest University, 2020.
- [34] 谢晓梅, 方至萍, 廖敏, 等. 低积累水稻品种联合腐殖酸、海泡石保障重镉污染稻田安全生产的潜力[J]. *环境科学*, 2018, **39**(9): 4348-4358.
Xie X M, Fang Z P, Liao M, *et al.* Potential to ensure safe production from rice fields polluted with heavy cadmium by combining a rice variety with low cadmium accumulation, humic acid, and sepiolite [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(9): 4348-4358.
- [35] Chen Y L, Ma J, Li Y T, *et al.* Enhanced cadmium immobilization in saturated media by gradual stabilization of goethite in the presence of humic acid with increasing pH [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **648**: 358-366.
- [36] 李雨清, 何江, 吕昌伟, 等. 富里酸对重金属在沉积物上吸附及形态分布的影响[J]. *环境科学*, 2016, **37**(3): 1008-1015.
Li Y Q, He J, Lü C W, *et al.* Effects of fulvic acid on absorption and form distribution of heavy metals on sediments [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(3): 1008-1015.
- [37] 张雪霞, 张晓霞, 郑煜基, 等. 水分管理对硫铁镉在水稻根区变化规律及其在水稻中积累的影响[J]. *环境科学*, 2013, **34**(7): 2837-2846.
Zhang X X, Zhang X X, Zheng Y J, *et al.* Accumulation of S, Fe and Cd in rhizosphere of rice and their uptake in rice with different water managements [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(7): 2837-2846.
- [38] 张立超, 王绍伟, 水晶, 等. 土壤胡敏酸和富里酸的性质表征[J]. *淮北师范大学学报(自然科学版)*, 2022, **43**(4): 65-69.
Zhang L C, Wang S W, Shui J, *et al.* Characterization of humic acid and fulvic acid in soil [J]. *Journal of Huaibei Normal University (Natural Sciences)*, 2022, **43**(4): 65-69.
- [39] Rong Q, Zhong K, Huang H, *et al.* Humic acid reduces the available cadmium, copper, lead, and zinc in soil and their uptake by tobacco [J]. *Applied Sciences*, 2020, **10**(3), doi: 10.3390/app10031077.
- [40] Gao M, Tang F, Wang K D, *et al.* Heterogeneity of humic/fulvic acids derived from composts explains the differences in accelerating soil Cd-hyperaccumulation by *Sedum alfredii* [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, **301**, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.113837.
- [41] Yin X, Wang Y L, Wei L E, *et al.* Reduced cadmium (Cd) accumulation in lettuce plants by applying $KMnO_4$ modified water hyacinth biochar [J]. *Heliyon*, 2022, **8**(11), doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e11304.

CONTENTS

Prediction of Autumn Ozone Concentration in the Pearl River Delta Based on Machine Learning	CHEN Zhen, LIU Run, LUO Zheng, <i>et al.</i> (1)
Remote Sensing Model for Estimating Atmospheric PM _{2.5} Concentration in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DAI Yuan-yuan, GONG Shao-qi, ZHANG Cun-jie, <i>et al.</i> (8)
Variation Characteristics of PM _{2.5} Pollution and Transport in Typical Transport Channel Cities in Winter	DAI Wu-jun, ZHOU Ying, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (23)
Characteristics of Secondary Inorganic Ions in PM _{2.5} and Its Influencing Factors in Summer in Zhengzhou	HE Bing, YANG Jie-ru, XU Yi-fei, <i>et al.</i> (36)
Characteristics and Source Apportionment of Carbonaceous Aerosols in the Typical Urban Areas in Chongqing During Winter	PENG Chao, LI Zhen-liang, XIANG Ying, <i>et al.</i> (48)
Analysis of Influencing Factors of Ozone Pollution Difference Between Chengdu and Chongqing in August 2022	CHEN Mu-lan, LI Zhen-liang, PENG Chao, <i>et al.</i> (61)
Analysis of O ₃ Pollution Affected by a Succession of Three Landfall Typhoons in 2020 in Eastern China	HUA Cong, YOU Yuan, WANG Qian, <i>et al.</i> (71)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs Initial Mixing Ratio in Beijing During Summer	ZHANG Bo-tao, JING Kuan, WANG Qin, <i>et al.</i> (81)
Review of Comprehensive Evaluation System of Vehicle Pollution and Carbon Synergistic Reduction	FAN Zhao-yang, TONG Hui, LIANG Xiao-yu, <i>et al.</i> (93)
Study of Peak Carbon Emission of a City in Yangtze River Delta Based on LEAP Model	YANG Feng, ZHANG Gui-chi, SUN Ji, <i>et al.</i> (104)
Driving Forces and Mitigation Potential of CO ₂ Emissions for Ship Transportation in Guangdong Province, China	WENG Shu-juan, LIU Ying-ying, TANG Feng, <i>et al.</i> (115)
Carbon Emission Characteristics and Influencing Factors of Typical Processes in Drinking Water Treatment Plant	ZHANG Xiang-yu, HU Jian-kun, MA Kai, <i>et al.</i> (123)
Distribution Characteristics of Arsenic in Drinking Water in China and Its Health Risk Based on Disability-adjusted Life Years	DOU Dian-cheng, QI Rong, XIAO Shu-min, <i>et al.</i> (131)
Spatiotemporal Occurrence of Organophosphate Esters in the Surface Water and Sediment of Taihu Lake and Relevant Risk Assessment	ZHANG Cheng-nuo, ZHONG Qin, LUAN Bo-wen, <i>et al.</i> (140)
Exposure Level and Risk Impact Assessment of Pesticides and Veterinary Drugs in Aquaculture Environment	ZHANG Kai-wen, ZHANG Hai-yan, KONG Cong, <i>et al.</i> (151)
Variation in Phosphorus Concentration and Flux at Zhutuo Section in the Yangtze River and Source Apportionment	LOU Bao-feng, XIE Wei-min, HUANG Bo, <i>et al.</i> (159)
“Load-Unload” Effect of Manganese Oxides on Phosphorus in Surface Water of the Pearl River Estuary	LI Rui, LIANG Zuo-bing, WU Qi-ru, <i>et al.</i> (173)
Factors Influencing the Variation in Phytoplankton Functional Groups in Fuchunjiang Reservoir	ZHANG Ping, WANG Wei, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (181)
Hydrochemical Characteristics and Formation Mechanism of Groundwater in the Western Region of Hepu Basin, Beihai City	CHEN Wen, WU Ya, ZHANG Hong-xin, <i>et al.</i> (194)
Controlling Factors of Groundwater Salinization and Pollution in the Oasis Zone of the Cherchen River Basin of Xinjiang	LI Jun, OUYANG Hong-tao, ZHOU Jin-long (207)
Spatial-temporal Evolution of Ecosystem Health and Its Influencing Factors in Beijing-Tianjin-Hebei Region	LI Kui-ming, WANG Xiao-yan, YAO Luo-lan (218)
Spatial and Temporal Evolution and Impact Factors Analysis of Ecosystem Service Value in the Liaohe River Delta over the Past 30 Years	WANG Geng, ZHANG Fu-rong (228)
Effects of Photovoltaic Power Station Construction on Terrestrial Environment: Retrospect and Prospect	TIAN Zheng-qing, ZHANG Yong, LIU Xiang, <i>et al.</i> (239)
Spatiotemporal Evolution and Quantitative Attribution Analysis of Vegetation NDVI in Greater Khingan Mountains Forest-Steppe Ecotone	SHI Song, LI Wen, QU Chen, <i>et al.</i> (248)
Spatio-temporal Variation in Net Primary Productivity of Different Vegetation Types and Its Influencing Factors Exploration in Southwest China	XU Yong, ZHENG Zhi-wei, MENG Yu-chi, <i>et al.</i> (262)
Impacts of Extreme Climate Events at Different Altitudinal Gradients on Vegetation NPP in Songhua River Basin	CUI Song, JIA Zhao-yang, GUO Liang, <i>et al.</i> (275)
Spatial and Temporal Evolution and Prediction of Carbon Storage in Kunming City Based on InVEST and CA-Markov Model	Paruke Wusimanjiang, AI Dong, FANG Yi-shu, <i>et al.</i> (287)
Spatial-Temporal Evolution and Prediction of Carbon Storage in Jiuquan City Ecosystem Based on PLUS-InVEST Model	SHI Jing, SHI Pei-ji, WANG Zi-yang, <i>et al.</i> (300)
Soil Carbon Pool Allocation Dynamics During Soil Development in the Lower Yangtze River Alluvial Plain	HU Dan-yang, ZHANG Huan, SU Bao-wei, <i>et al.</i> (314)
Spatial Distribution Patterns of Soil Organic Carbon in Karst Forests of the Lijiang River Basin and Its Driving Factors	SHEN Kai-hui, WEI Shi-guang, LI Lin, <i>et al.</i> (323)
Effect of Land Use on the Stability of Soil Organic Carbon in a Karst Region	CHEN Jian-qi, JIA Ya-nan, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> (335)
Spatial Distribution Characteristics of Soil Carbon and Nitrogen in Citrus Orchards on the Slope of Purple Soil Hilly Area	LI Zi-yang, CHEN Lu, ZHAO Peng, <i>et al.</i> (343)
Effects of Experimental Nitrogen Deposition and Litter Manipulation on Soil Organic Components and Enzyme Activity of Latosol in Tropical Rubber Plantations	XUE Xin-xin, REN Chang-qi, LUO Xue-hua, <i>et al.</i> (354)
Analysis on Driving Factors, Reduction Potential, and Environmental Effect of Inorganic Fertilizer Input in Chongqing	LIANG Tao, ZHAO Jing-kun, LI Hong-mei, <i>et al.</i> (364)
Research Progress on Distribution, Transportation, and Control of Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Chinese Soils	LIU Hao-ran, XING Jing-yi, REN Wen-jie (376)
Prediction of Spatial Distribution of Heavy Metals in Cultivated Soil Based on Multi-source Auxiliary Variables and Random Forest Model	XIE Xue-feng, GUO Wei-wei, PU Li-jie, <i>et al.</i> (386)
Health Risk Assessment and Priority Control Factors Analysis of Heavy Metals in Agricultural Soils Based on Source-oriented	MA Jie, GE Miao, WANG Sheng-lan, <i>et al.</i> (396)
Contamination Characteristics and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in an Abandoned Pyrite Mining Area of Tongling City, China	LI Ru-zhong, LIU Yu-hao, HUANG Yan-huan, <i>et al.</i> (407)
Source Apportionment and Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Dust in the Main District Bus Stops of Tianshui City	LI Chun-yan, WANG Xin-min, WANG Hai, <i>et al.</i> (417)
Response of Cadmium in Soil-rice to Different Conditioners Based on Field Trials	TANG Le-bin, LIU Xin-cai, SONG Bo, <i>et al.</i> (429)
Regulation Effects of Humus Active Components on Soil Cadmium Availability and Critical Threshold for Rice Safety	HU Xiu-zhi, SONG Yi, WANG Tian-yu, <i>et al.</i> (439)
Using Biochar and Iron-calcium Material to Remediate Paddy Soil Contaminated by Cadmium and Arsenic	WU Qiu-chan, WU Ji-zi, ZHAO Ke-li, <i>et al.</i> (450)
Research Progress on Characteristics of Human Microplastic Pollution and Health Risks	MA Min-dong, ZHAO Yang-chen, ZHU Long, <i>et al.</i> (459)
Effects of Polystyrene Microplastics Combined with Cadmium Contamination on Soil Physicochemical Properties and Physiological Ecology of <i>Lactuca sativa</i>	NIU Jia-rui, ZOU Yong-jun, JIAN Min-fei, <i>et al.</i> (470)
Transcriptome Analysis of Plant Growth-promoting Bacteria Alleviating Microplastic and Heavy Metal Combined Pollution Stress in Sorghum	LIU Yong-qi, ZHAO Si-yu, REN Xue-min, <i>et al.</i> (480)
Effects of Microplastics on the Leaching of Nutrients and Cadmium from Soil	ZHAO Qun-fang, CHU Long-wei, DING Yuan-hong, <i>et al.</i> (489)
Effect of Microplastics and Phenanthrene on Soil Chemical Properties, Enzymatic Activities, and Microbial Communities	LIU Sha-sha, QIN Jian-qiao, WU Xian-ge (496)
Prediction of Soil Bacterial Community Structure and Function in Minqin Desert-oasis Ecotone Artificial <i>Haloxylon ammodendron</i> Forest	WANG An-lin, MA Rui, MA Yan-jun, <i>et al.</i> (508)
Response of Soil Fungal Community to Biochar Application Under Different Irrigation Water Salinity	ZHENG Zhi-yu, GUO Xiao-wen, MIN Wei (520)
Effects of Organic Fertilizer of Kitchen Waste on Soil Microbial Activity and Function	LIU Mei-ling, WANG Yi-min, JIN Wen-hao, <i>et al.</i> (530)
Response Characteristics of Soil Fungal Community Structure to Long-term Continuous Cropping of Pepper	CHEN Fen, YU Gao, WANG Xie-feng, <i>et al.</i> (543)
Effects of Foliar Application of Silicon Fertilizers on Phyllosphere Bacterial Community and Functional Genes of Paddy Irrigated with Reclaimed Water	LIANG Sheng-xian, LIU Chun-cheng, HU Chao, <i>et al.</i> (555)
Analysis of Bacterial Communities and Antibiotic Resistance Genes in the Aquaculture Area of Changli County	WANG Qiu-shui, CHENG Bo, LIU Yue, <i>et al.</i> (567)
High-throughput qPCR and Amplicon Sequencing as Complementary Methods for Profiling Antibiotic Resistance Genes in Urban Wetland Parks	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, PAN Ting, <i>et al.</i> (576)
Characteristics of Vertical Distribution and Environmental Factors of Antibiotics in Quaternary Sedimentary Column in Urban Areas	LIU Ke, TONG Lei, GAN Cui, <i>et al.</i> (584)
Adsorption Performance and Mechanism of Oxytetracycline in Water by KOH Modified Biochar Derived from Corn Straw	LIU Zong-tang, SUN Yu-feng, FEI Zheng-hao, <i>et al.</i> (594)
Comparison of Pb ²⁺ Adsorption Properties of Biochars Modified Through CO ₂ Atmosphere Pyrolysis and Nitric Acid	JIANG Hao, CHEN Rui-zhi, ZHU Zi-yang, <i>et al.</i> (606)