

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

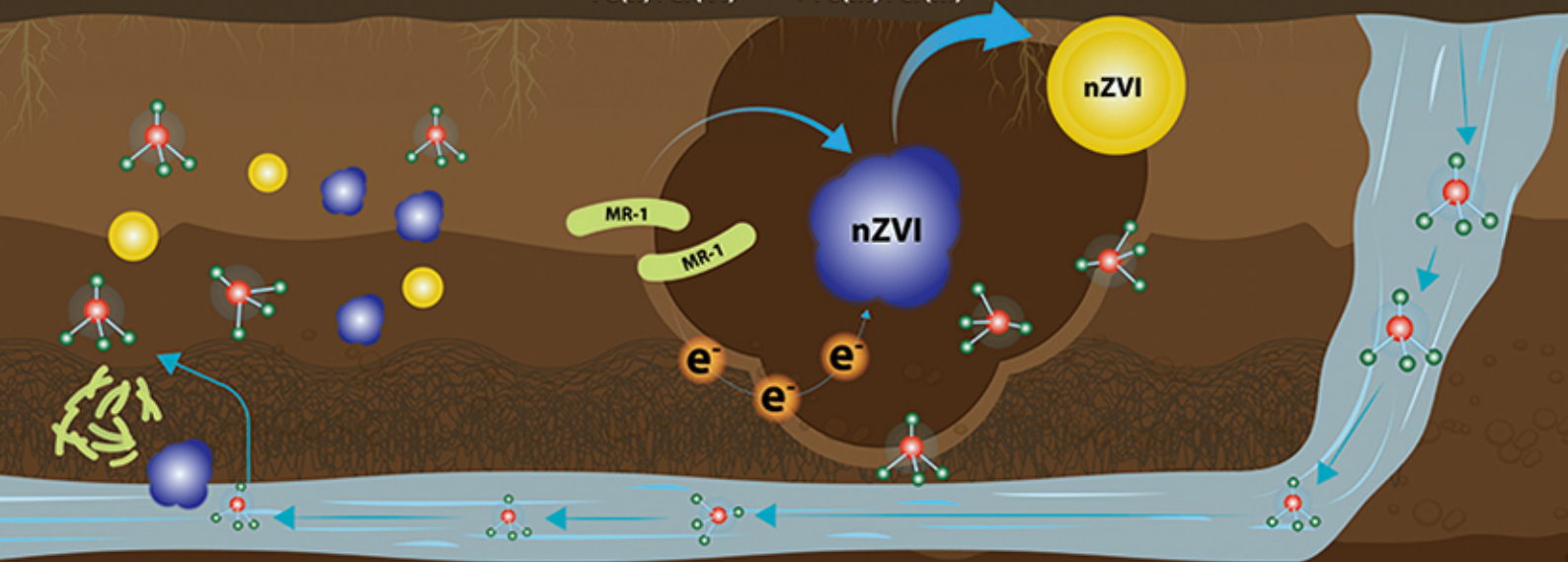
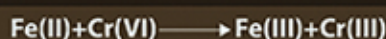
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

电活性微生物激活生物质炭/零价铁协同钝化Cr(VI)及机制

廖聪坚, 赵晓蕾, 刘凯, 钟松雄, 李芳柏, 方利平, 叶挺进, 石虎砚



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年9月

第42卷 第9期
Vol.42 No.9

目次

北京市 2014~2020 年 PM _{2.5} 和 O ₃ 时空分布与健康效应评估	陈菁, 彭金龙, 徐彦森 (4071)
京津冀地区高分辨率 PM _{2.5} 浓度时空变化模拟与分析	杨晓辉, 宋春杰, 范丽行, 张凌云, 魏强, 李夫星, 王丽艳, 王卫 (4083)
京津冀典型城市冬季人为源减排与气象条件对 PM _{2.5} 污染影响	邵玄逸, 王晓琦, 钟巍盛, 王瑞鹏 (4095)
太行山两侧污染物传输对横谷城市气溶胶的影响分析	王雁, 郭伟, 闫世明, 裴坤宁, 李明明, 陈二萍 (4104)
嘉善冬季碳质气溶胶变化特征及其来源解析	张颖龙, 李莉, 吴伟超, 吕升, 秦阳, 祝新明, 高晋徽, 唐倩, 夏峰 (4116)
基于机器学习算法的新冠疫情管控对河南省空气质量影响的模拟分析	魏煜, 徐起翔, 赵金帅, 张瑞芹 (4126)
新乡市大气 PM _{2.5} 载带金属元素季节分布、来源特征与健康风险	刘桓嘉, 贾梦珂, 刘永丽, 赵艺洁, 郑爱华, 刘恒志, 徐肃阳, 肖晴晴, 苏晓燕, 任言 (4140)
黄渤海气溶胶中砷的分布特征和季节变化	袁帅, 王艳, 刘汝海, 种习习, 刘晓雨, 邵龙 (4151)
天津市 2020 年冬季重污染过程气溶胶消光特性及其来源	李立伟, 肖致美, 杨宁, 蔡子颖, 闫斌峰, 元洁, 白宇, 郑乃源, 唐邈 (4158)
中国暖季近地面臭氧浓度空间格局演变及主要气象驱动因素	何超, 慕航, 杨璐, 王丹璐, 邱彦峰, 叶志祥, 易嘉慧, 柯碧钦, 田雅, 洪松 (4168)
乌海市夏季臭氧污染特征及基于过程分析的成因探究	张瑞欣, 陈强, 夏佳琦, 刘晓, 郭文凯, 李光耀, 陈梅 (4180)
珠江三角洲海岸背景区大气 VOCs 污染特征与来源	云龙, 李成柳, 张明棣, 何龙, 郭键锋 (4191)
永定河上游地表水-地下水水化学特征及其成因分析	孔晓乐, 杨永辉, 曹博, 王艺璇, 裴宏伟, 沈彦军 (4202)
汉江中下游水质时空变异与驱动因素识别	程兵芬, 张远, 夏瑞, 张楠, 张新飞 (4211)
环境持久性药物在江苏省地表水中的污染水平、分布特征及生态风险评估	赵美美, 范德玲, 古文, 汪贞, 梁梦园, 刘济宁, 张志 (4222)
柳江流域河流溶解态重金属时空分布及污染评价	张婉军, 辛存林, 于爽, 刘齐, 曾鹏 (4234)
雷州半岛地下水重金属来源解析及健康风险评价	师环环, 潘羽杰, 曾敏, 黄长生, 侯清芹, 皮鹏程, 彭红霞 (4246)
龙子祠泉域地下水金属元素分布特征及健康风险评价	谢浩, 梁永平, 李军, 邹胜章, 申豪勇, 赵春红, 王志恒 (4257)
硫氧同位素解析典型岩溶地下河流域硫酸盐季节变化特征和来源	任坤, 潘晓东, 兰干江, 彭聪, 梁嘉鹏, 曾洁 (4267)
包头南海湿地磷形态及污染源定量识别	拜亚红, 钱晨歌, 袁思静, 谢子嫣, 来凌子, 张敏, 刘颖, 苗春林 (4275)
城市新城区公园沟塘沉积物磷释放风险及影响因素分析	李如忠, 宋敏, 杨继伟 (4287)
水力停留时间对潜流湿地净化效果影响及脱氮途径解析	齐冉, 张灵, 杨帆, 颜昌宙 (4296)
锰砂人工湿地对污染物的强化去除	马权, 王东麟, 林慧, 柏耀辉 (4304)
4 种典型沉水植物对去除磷污染底泥的应用效果	陶理, 王沛芳, 袁秋生, 王洵, 胡斌 (4311)
输水情景下白洋淀好氧反硝化菌群落对溶解性有机物的响应	周石磊, 张甜娜, 陈召莹, 张紫薇, 于明会, 姚波, 崔建升, 罗晓 (4319)
木屑生物炭在雨水径流中的氮磷淋出和吸附特性	孟依柯, 王媛, 汪传跃 (4332)
海州湾潮间带沙蚕对沉积物微塑料的指示作用	王嘉旋, 宋可心, 孙一鑫, 方涛, 李瑾祯, 张涛, 冯志华 (4341)
纳米二氧化钛与镉对斜生栅藻 (<i>Scenedesmus obliquus</i>) 生长的拮抗效应及其作用机制	王璞, 赵丽红, 朱小山 (4350)
螺旋霉素废水处理过程中菌群结构、水质特征及抗性基因之间关系分析	武彩云, 李慧莉, 覃彩霞, 佟娟, 魏源送 (4358)
整合铁对厌氧铁氨氧化脱氮效能及微生物群落的影响	廖宏燕, 宋诚, 万柳杨, 时绍鹏, 王兴祖 (4366)
溶解氧对低碳源城市污水处理系统脱氮性能与微生物群落的影响	池玉蕾, 石烜, 任童, 王晓昌, 金鹏康 (4374)
间歇梯度曝气下缩短 SRT 强化短程 SNEDPR 系统脱氮除磷	张玉君, 李冬, 王歆鑫, 张杰 (4383)
生物膜系统中部分反硝化实现特性	于莉芳, 张兴秀, 张琼, 王晓玉, 彭党聪, 张日霞 (4390)
厌氧推流进水对反硝化除磷好氧颗粒污泥系统的影响	李冬, 曹思雨, 王琪, 张杰 (4399)
不同好氧/缺氧时长联合分区排泥优化生活污水短程硝化反硝化除磷颗粒系统运行	王文琪, 李冬, 高鑫, 张杰 (4406)
中国西南地区金属矿开采对矿区土壤重金属影响的 Meta 分析	张健琳, 瞿明凯, 陈剑, 杨兰芳, 赵永存, 黄标 (4414)
青藏高原典型流域土壤重金属分布特征及其生态风险评价	杜昊霖, 王莺, 王劲松, 姚玉璧, 周悦, 刘晓云, 芦亚玲 (4422)
电子垃圾拆解区土壤-农作物系统中镉元素的空间分布特征及其风险评价	张璐瑶, 赵科理, 傅伟军 (4432)
改性生物炭特性表征及对冶炼厂周边农田土壤铜镉形态的影响	王鑫宇, 孟海波, 沈玉君, 王佳锐, 张曦, 丁京涛, 周海宾, 李春燕, 程琼仪 (4441)
组配改良剂联合锌肥对土壤-水稻系统镉迁移转运的影响	周坤华, 周航, 王子钰, 刘雅, 刘佳伟, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (4452)
不同结构改良剂对铜镉污染土壤水稻生长和重金属吸收的影响	魏玮, 李平, 郎漫 (4462)
1 株草螺属植物内生菌 R-13 的分离鉴定及对龙葵吸收土壤镉的影响	鹿杰, 刘月敏, 黄永春, 王常荣, 刘斌, 刘仲齐, 黄益宗, 黄雁飞, 张长波 (4471)
不同地区土壤古菌群落对重金属污染响应	李雨桐, 杨杉, 张艺, 范例, 刘坤, 张晟 (4481)
高通量测序分析黄土高原退耕还林区土壤细菌群落特征	刘晓华, 魏天兴 (4489)
餐厨垃圾生物发酵液对黄土丘陵区土壤质量的影响试验	邵立明, 任俊达, 吕凡, 章骅, 何晶晶 (4500)
秦岭不同海拔土壤团聚体稳定性及其与土壤酶活性的耦合关系	马震菲, 胡汗, 李益, 郭鑫鑫, 任成杰, 赵发珠 (4510)
电活性微生物激活生物炭/零价铁协同钝化 Cr(VI) 及机制	廖聪坚, 赵晓蕾, 刘凯, 钟松雄, 李芳柏, 方利平, 叶挺进, 石虎砚 (4520)
降水变化对荒漠草原土壤呼吸的影响	蒿廉伊, 张丽华, 谢忠奎, 赵锐锋, 王军锋, 郭亚飞, 高江平 (4527)
氮肥分施次数及硝化抑制剂对盆栽玉米 N ₂ O 排放的影响	符佩娇, 吉恒宽, 何秋香, 汤水荣, 王鸿浩, 伍延正, 孟磊 (4538)
负载 NH ₄ ⁺ -N 生物炭对土壤 N ₂ O-N 排放和 NH ₃ -N 挥发的影响	马晓刚, 何建桥, 陈玉蓝, 李德天, 刘川, 董建新, 郑学博 (4548)
微塑料添加对橘园土壤有机碳矿化的影响	张秀玲, 鄢紫薇, 王峰, 王玺, 徐晗, 胡荣桂, 严昶, 林杉 (4558)
1985~2019 年中国全氟辛酸酯基化合物的动态物质流分析	王佳钰, 陈景文, 唐伟豪, 崔蕴晗, 王中钰, 宋国宝, 陈伟强 (4566)
《环境科学》征订启事(4201) 《环境科学》征稿简则(4340) 信息(4382, 4537, 4565)	

不同结构改良剂对铜镉污染土壤水稻生长和重金属吸收的影响

魏玮^{1,2}, 李平^{1,2*}, 郎漫^{1,2}

(1. 南京信息工程大学江苏省农业气象重点实验室, 南京 210044; 2. 南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044)

摘要: 本研究以铜(Cu)、镉(Cd)污染水稻土为对象,通过水稻盆栽试验研究聚丙烯酸(PAA)、聚丙烯酰胺(PAM)、聚乙烯醇(PVA)和腐殖酸(HA)这4种结构改良剂对水稻生长和重金属吸收的影响.结果表明,与对照处理相比,施用结构改良剂处理水稻株高和秸秆重分别增加了7.34%~22.0%和10.0%~32.2%,结构改良剂用量越高,增幅越大.施用0.4%的结构改良剂对水稻有一定的减产效应,籽粒重比对照处理降低了6.70%~32.6%.施用结构改良剂对土壤pH值无影响,但显著降低了土壤有效态Cu(5.38%~39.7%)和Cd含量(6.98%~59.6%),水稻根、秸秆和稻米中Cu含量分别降低了0.88%~27.2%、8.50%~45.2%和3.41%~31.2%,Cd含量分别降低了5.93%~20.5%、10.0%~51.4%和3.12%~50.7%,PAA处理的降幅最大,PVA处理的降幅最小.结构改良剂降低了Cu和Cd从根系向秸秆的转运系数,但增加了Cu和Cd从秸秆向稻米的转运系数.总体来看,施用结构改良剂促进了水稻生长,抑制了水稻对Cu和Cd的吸收,对重金属污染土壤具有一定的修复效果.

关键词: 结构改良剂; 铜; 镉; 生物有效性; 水稻

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)09-4462-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202101263

Effects of Different Soil Conditioners on Rice Growth and Heavy Metal Uptake in Soil Contaminated with Copper and Cadmium

WEI Wei^{1,2}, LI Ping^{1,2*}, LANG Man^{1,2}

(1. Jiangsu Key Laboratory of Agriculture Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: A rice pot experiment was conducted to study the effects of four soil conditioners, namely polyacrylic acid (PAA), polyacrylamide (PAM), polyvinyl alcohol (PVA), and humic acid (HA), on rice growth and heavy metal uptake from paddy soil contaminated with copper and cadmium. The results showed that the height and straw weight of rice in the conditioned soil treatments increased by 7.34%-22.0% and 10.0%-32.2%, respectively, compared to the control treatment. The increased height and straw weight was generally proportional to the amount of soil conditioners used in each treatment. Application of 0.4% soil conditioners led to a slight reduction in rice yield, with the grain weight decreasing by 6.70%-32.6% relative to the control treatment. Soil conditioners had no effect on soil pH, but significantly reduced the concentration of soil available Cu (5.38%-39.7%) and Cd (6.98%-59.6%). Similarly, concentrations of Cu in rice root, straw, and grain were decreased by 0.88%-27.2%, 8.50%-45.2%, and 3.41%-31.2%, respectively, while concentrations of Cd were decreased by 5.93%-20.5%, 10.0%-51.4%, and 3.12%-50.7%, respectively. The largest and smallest decreases occurred in the PAA and PVA treatments, respectively. Application of PAA, PAM, and HA significantly decreased the translocation factor of Cu from root to straw by 11.2%-27.1%, whereas the translocation factor of Cu from straw to grain increased by 17.9%-33.6%, respectively, compared with the control treatment. Application of PAA, PAM, and HA significantly decreased the translocation factor of Cd from root to straw by 15.2%-38.5%, compared with the control treatment, but with the exception of HA, had no effect on Cd translocation from straw to grain. In general, the application of soil conditioners promoted rice growth, inhibited the uptake of Cu and Cd by rice, and had a certain remediation effect on heavy metal contaminated soil.

Key words: soil conditioner; copper; cadmium; bioavailability; rice

随着我国社会经济的快速发展,工业生产中“三废”排放量的不断增加以及农业生产中污水灌溉和肥料的长期不合理施用导致我国土壤污染形势严峻,对我国生态环境安全造成严重威胁.重金属污染是我国众多土壤污染问题中的一个主要方面,不仅导致土壤质量退化、作物品质和产量下降,还通过食物链危害人体健康.文献[1]显示,全国土壤总点位超标率为16.1%,在众多污染物中以Cd和Cu污染较为严重,点位超标率高达7.0%和2.1%.因此,

开展重金属污染土壤的改良修复工作对维持土壤生产力和保障我国食品安全具有重要意义.目前常见的重金属污染土壤修复技术主要包括物理修复、化学修复、生物修复和农业生态工程技术,其中以向污染土壤中添加某些无毒害的无机和有机材料以降低

收稿日期: 2021-01-27; 修订日期: 2021-03-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(41301345, 41101284)

作者简介: 魏玮(1997~),女,硕士研究生,主要研究方向为土壤环境化学与污染控制, E-mail: 1695257267@qq.com

* 通信作者, E-mail: pli@nuist.edu.cn

土壤重金属生物有效性及毒性的原位钝化技术应用最为广泛^[2~6]。

土壤结构改良剂是一类天然或人工合成的高分子有机化合物,天然类结构改良剂包括多聚糖、腐殖酸和泥炭等,人工合成类结构改良剂主要有氨基聚合物、聚丙烯酰胺、聚乙烯醇等高分子材料^[7]。这类高分子材料富含大量酰胺基、羧基和羟基等强亲水性基团,具有高水膨胀性,常被作为保水剂用于改善土壤团粒结构,提高土壤通透性,促进降水入渗,减少地表径流^[8,9]。除了具备超高的吸水和保水能力,结构改良剂还具有很好的保肥性能。有研究表明,聚丙烯酰胺(PAM)与肥料混合施入土壤能有效降低肥料磷和钾的淋溶损失^[10],聚乙烯醇(PVA)具有促进尿素缓释的作用^[11],聚丙烯酸(PAA)能显著提高土壤有效磷和钾含量^[12],腐殖酸(HA)可以吸附固定土壤中的氮、磷和钾养分元素,保持土壤肥力,促进作物生长^[13]。此外,结构改良剂大多具有较大的比表面积,富含羧基、羟基、氨基、甲氧基和醚基等含氧活性官能基团,因而具有较强的阳离子交换性能及较高的吸附和络合能力,可以与金属离子发生螯合作用以降低其生物有效性^[14]。近几年来,已有研究人员尝试将土壤结构改良剂用于重金属污染土壤的改良修复。Dhiman 等^[15]的研究报道,施用 1% 的 PAM 后显著提高了土壤对 Cu、Cd、Zn 和 Fe 的吸附率,同时显著降低了吸附重金属离子的解吸率,进而显著降低了土豆果皮和果肉中的重金属含量。有研究发现^[11],PVA 可利用其多孔特性及其富含的羟基官能团上 Fe^{3+} 和孤电子对之间的静电相互作用提高土壤对 Fe 的吸附固定,降低其解吸量。Zhao 等^[16]的研究认为,因其对 Cu^{2+} 和 Cd^{2+} 的超强吸附性能,木质素基聚丙烯酸(LBPAA)是一种重金属污染土壤的潜在修复材料。HA 的有机质含量丰富,施用 HA 可显著降低土壤交换态 Cd 含量,有机结合态、铁锰氧化物结合态和残渣态 Cd 含量则显著增加^[17]。由此可见,结构改良剂在修复重金属污染土壤方面具有良好的应用前景,但目前研究大多针对某一种结构改良剂开展,多种结构改良剂修复重金属污染土壤的比较研究鲜见报道。

水稻是我国主要粮食作物,占据了我国 55% 的谷物年消耗量^[18]。我国南方地区稻田土壤重金属污染现象较为普遍,严重威胁我国稻米品质安全。因此,本研究以我国南方典型 Cu 和 Cd 污染水稻土为对象,通过水稻盆栽试验研究 PAA、PAM、PVA 和 HA 这 4 种结构改良剂对水稻生长、土壤 Cu 和 Cd 生物有效性及水稻吸收 Cu 和 Cd 的影响,并对其修复效果进行比较,以期为重污染土壤的改良修

复提供新的思路和理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤为采自江西省贵溪市某铜冶炼厂附近的红壤性水稻土耕作层土壤(0~20 cm),土壤基本理化性质为: pH 值 5.37,有机质含量为 $33.7 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,阳离子交换量为 $9.95 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$,全 N、P 和 K 含量分别为 1.77 、 0.43 和 $10.2 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全 Cu 和 Cd 含量分别为 $96.9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $2.45 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,分别为土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(GB 15618-2018, Cu $50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 Cd $0.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)的 1.94 和 8.17 倍,有效态 Cu 和 Cd 含量分别为 $18.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.81 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,黏粒、粉粒和砂粒含量分别为 17.0%、42.7% 和 40.3%。供试结构改良剂为聚丙烯酸(PAA)、聚丙烯酰胺(PAM)、聚乙烯醇(PVA)和腐殖酸(HA),PAA、PAM 和 PVA 购自国药集团化学试剂有限公司,HA 购自上海巨枫化学科技有限公司。供试水稻品种为中早 35,属籼型常规早稻品种。

1.2 试验设计

本研究采用水稻盆栽试验的方法,试验在南京信息工程大学玻璃温室进行。共设置 9 个处理:CK(不施结构改良剂)、PAA-1[施用 0.1% (占风干土的质量分数)聚丙烯酸]、PAA-2(施用 0.4% 聚丙烯酸)、PAM-1(施用 0.1% 聚丙烯酰胺)、PAM-2(施用 0.4% 聚丙烯酰胺)、PVA-1(施用 0.1% 聚乙烯醇)、PVA-2(施用 0.4% 聚乙烯醇)、HA-1(施用 0.1% 腐殖酸)和 HA-2(施用 0.4% 腐殖酸),每个处理 4 个重复。各结构改良剂的施用采用液施法,2018 年 4 月 21 日,将按设计用量配置的结构改良剂水溶液、10 kg 风干土壤及适量满足水稻生长所需的氮、磷和钾肥[分别为尿素(以 N 计) $150 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 KH_2PO_4 (以 P 计) $38 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 KCl (以 K 计) $150 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$]充分混匀后置于一个高 23 cm、直径 31 cm 的塑料桶中,加水保持土壤表面有 3 cm 淹水层,平衡 1 周后移栽水稻秧苗,每桶 3 株。水稻生育前期保持 3 cm 浅层淹水状态,灌浆期后不再淹水,保持土面处于湿润状态,水稻收获前晒田 1 周,于 2018 年 8 月 18 日收获。水稻分蘖期添加 $30 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的尿素(以 N 计)作为追肥。

1.3 样品采集与测定方法

水稻成熟收获后按水稻考种标准测定株高,将根系、秸秆和籽粒这 3 部分分离并分别经去离子水清洗后于 105°C 杀青 30 min,然后在 70°C 下烘干,所有植物样品均用不锈钢粉碎机粉碎后测定重金属

Cu 和 Cd 含量. 水稻收获的同时采集适量土壤样品, 风干过 2 mm 筛后用于测定土壤 pH 值和有效态 Cu 和 Cd 含量.

土壤 pH 采用电位法测定(水土比为 2.5:1); 土壤黏粒、粉粒和砂粒含量采用吸管法测定; 土壤有机质采用重铬酸钾容量法-外加热法测定; 土壤全氮采用开氏法测定; 土壤全磷采用酸溶-钼锑抗比色法测定; 土壤全钾采用酸溶-火焰光度法测定; 土壤阳离子交换量采用乙酸铵交换法测定; 土壤 Cu 和 Cd 全量采用 HF-HNO₃-HClO₄ 消煮, 植物样品中 Cu 和 Cd 全量采用 HNO₃-H₂O₂ 消煮^[19], 土壤有效态 Cu 和 Cd 采用 0.01 mol·L⁻¹ CaCl₂ 溶液提取^[20], 消煮液和提取液中 Cu 和 Cd 浓度采用原子吸收分光光度计测定, 每批试验均做 3 个空白和 20% 的样品重复, 植物和土壤样品测定过程中分别插入了大米标准物质(GBW10010)和土壤标准物质(GBW07450)进行质量控制, 两种标准物质中 Cu 的回收率分别为 92%~103% 和 94%~107%, Cd 的回收率分别为 90%~104% 和 93%~105%.

1.4 数据处理与统计分析

采用转运系数(translocation factor, TF)来评估重金属在水稻各部位之间的转运能力, 转运系数等于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^[21]. 全文采用 Origin 9.0 软件进行试验数据的分析与制图, 采用 SPSS 22.0 软件进行数据统计分析.

2 结果与分析

2.1 水稻生长

结构改良剂对水稻生长的影响见表 1, 从中可知, 施用 4 种结构改良剂均促进了水稻生长, 显著增加了水稻株高和秸秆重($P < 0.05$). 与不施结构改良剂的 CK 处理相比, PAA-1、PAM-1、PVA-1 和 HA-1 处理水稻株高和秸秆重分别增加了 7.34%~18.0% 和 10.0%~23.7% ($P < 0.05$), 而 PAA-2、PAM-2、PVA-2 和 HA-2 处理水稻株高和秸秆重分别增加了 8.97%~22.0% 和 18.3%~32.2%. 结构改良剂的施用量越大, 水稻长势越好, 各处理间水稻株高和秸秆重的大小顺序为: PVA > PAA > HA > PAM > CK. 从表 1 还可以看出, 施用低量结构改良剂对水稻产量没有显著影响($P > 0.05$), 而施用高量 PAA、PAM、PVA 和 HA 后水稻籽粒重下降了 6.70%~32.6% ($P < 0.05$), 各处理间水稻籽粒重的大小顺序为: CK > PVA > PAA > HA > PAM, 结构改良剂的施用量越大, 水稻产量越低.

表 1 不同处理水稻株高、秸秆和籽粒重¹⁾

Table 1 Height, straw, and grain weights of rice with different soil treatments

处理	株高/cm	秸秆重 /g·pot ⁻¹	籽粒重 /g·pot ⁻¹
CK	69.9f	29.3d	80.8a
PAA-1	79.9c	35.1abc	76.7a
PAA-2	81.9b	36.1ab	70.9bc
PAM-1	75.0e	32.2cd	75.4ab
PAM-2	76.2de	34.6bc	54.5d
PVA-1	82.5b	36.2ab	79.2a
PVA-2	85.2a	38.7a	75.3ab
HA-1	76.4de	34.6bc	76.5a
HA-2	77.2d	35.7abc	68.6c

1) 同列数据不同小写字母表示各处理间差异显著($P < 0.05$), 下同

2.2 土壤 pH 值与有效态 Cu 和 Cd 含量

表 2 为不同处理土壤 pH 值与有效态 Cu 和 Cd 含量. 与不施结构改良剂的 CK 处理相比, 施用 PAA、PAM 和 PVA 对土壤 pH 值没有显著影响($P > 0.05$), 但施用 HA 显著降低了土壤 pH 值($P < 0.05$). 与土壤 pH 值的变化不同, 施用结构改良剂显著降低了土壤 Cu 和 Cd 的生物有效性. 与 CK 处理相比, 施用 0.1% 的 PAA、PAM、PVA 和 HA 后土壤有效态 Cu 和 Cd 含量分别降低了 5.38%~32.8% 和 6.98%~50.0%, 施用 0.4% 的 PAA、PAM、PVA 和 HA 后土壤有效态 Cu 和 Cd 含量分别降低了 11.3%~39.7% 和 10.8%~59.6%. 不同处理间土壤有效态 Cu 和 Cd 含量的大小顺序为: CK > PVA > HA > PAM > PAA.

表 2 不同处理土壤 pH 值与有效态 Cu 和 Cd 含量

Table 2 Soil pH and concentrations of available Cu and Cd in soil with different treatments

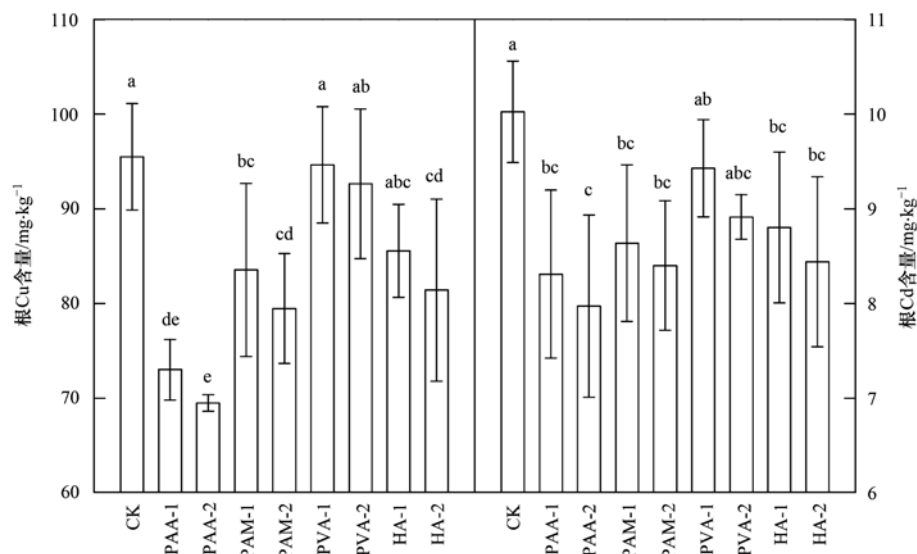
处理	pH	有效态 Cu /mg·kg ⁻¹	有效态 Cd /mg·kg ⁻¹
CK	5.34a	19.5a	0.86a
PAA-1	5.30ab	13.1g	0.43f
PAA-2	5.27b	11.8h	0.35g
PAM-1	5.30ab	15.1e	0.54e
PAM-2	5.29ab	14.3f	0.49e
PVA-1	5.34a	18.5b	0.80b
PVA-2	5.31ab	17.3c	0.77bc
HA-1	5.25b	17.9bc	0.73cd
HA-2	5.13c	16.0d	0.69d

2.3 水稻不同部位 Cu 和 Cd 含量

各结构改良剂降低了土壤中 Cu 和 Cd 的生物有效性, 也抑制了水稻对 Cu 和 Cd 的吸收. 由图 1 可知, 受 Cu 和 Cd 毒性影响, CK 处理水稻根系 Cu 和 Cd 含量分别高达 95.5 mg·kg⁻¹ 和 10.0 mg·kg⁻¹. 而施用结构改良剂处理水稻根系 Cu 和 Cd 含量分别为 69.5~94.6 mg·kg⁻¹ 和 7.97~9.43

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 分别比 CK 处理降低了 0.88%~27.2% 和 5.93%~20.5%, 除 PVA 外, PAA、PAM 和 HA 均显著降低了水稻根系对 Cu 和 Cd 的吸收 ($P < 0.05$). 施用结构改良剂后水稻根系吸收 Cu 和 Cd 的减少也降低了水稻秸秆 Cu 和 Cd 含量 (图 2), CK 处理水稻秸秆 Cu 和 Cd 含量分别为 $14.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $2.10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 而施用结构改良剂处理水稻秸秆 Cu 和 Cd 含量分别比 CK 处理下降了 8.50%~45.2% 和 10.0%~51.4% ($P < 0.05$). 由图 3 可以看出, CK 处理水稻稻米 Cu 含量为 $6.35 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 未超过我国食品中 Cu 限量卫生标准 (GB 15199-1994, 10

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 而稻米 Cd 含量为 $0.401 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 是我国食品中 Cd 限量卫生标准 (GB 2762-2017, $0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 的 2.0 倍, 是名副其实的“镉米”. 施用结构改良剂后水稻稻米 Cu 和 Cd 含量分别比 CK 处理降低了 3.41%~31.2% 和 3.12%~50.7%, PAM 和 PAA 两种结构改良剂的修复效果显著 ($P < 0.05$), 其中 PAA-2 处理稻米 Cd 含量 ($0.198 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 降到食品中 Cd 限量卫生标准以下. 各处理间水稻各部位 Cu 和 Cd 含量的大小顺序为: CK > PVA > HA > PAM > PAA, 结构改良剂的施用量越大, 水稻对 Cu 和 Cd 的吸收量越小.



柱内竖线表示标准差,不同小写字母表示各处理间差异显著 ($P < 0.05$),下同

图1 不同处理水稻根 Cu 和 Cd 含量

Fig. 1 Concentrations of Cu and Cd in rice roots with different soil treatments

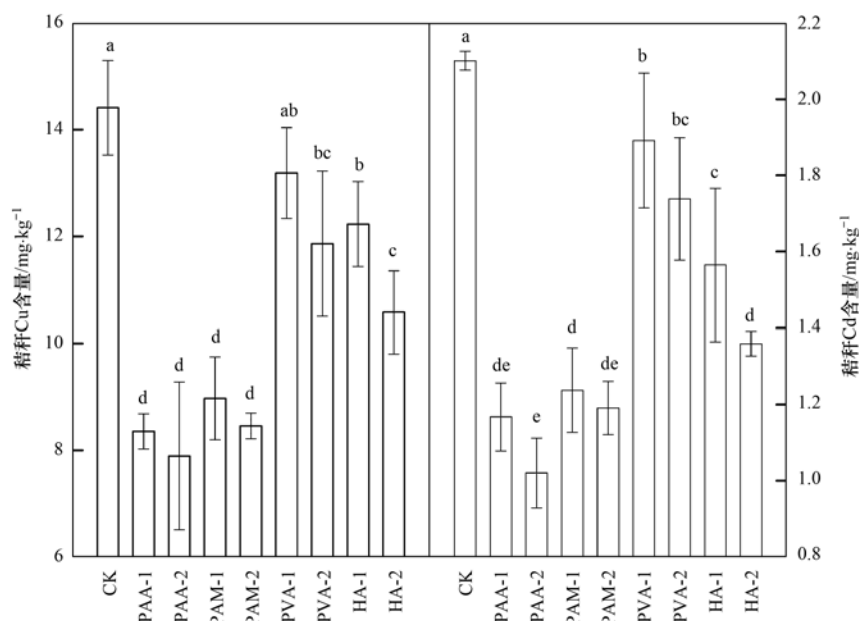


图2 不同处理水稻秸秆 Cu 和 Cd 含量

Fig. 2 Concentrations of Cu and Cd in rice straw with different soil treatments

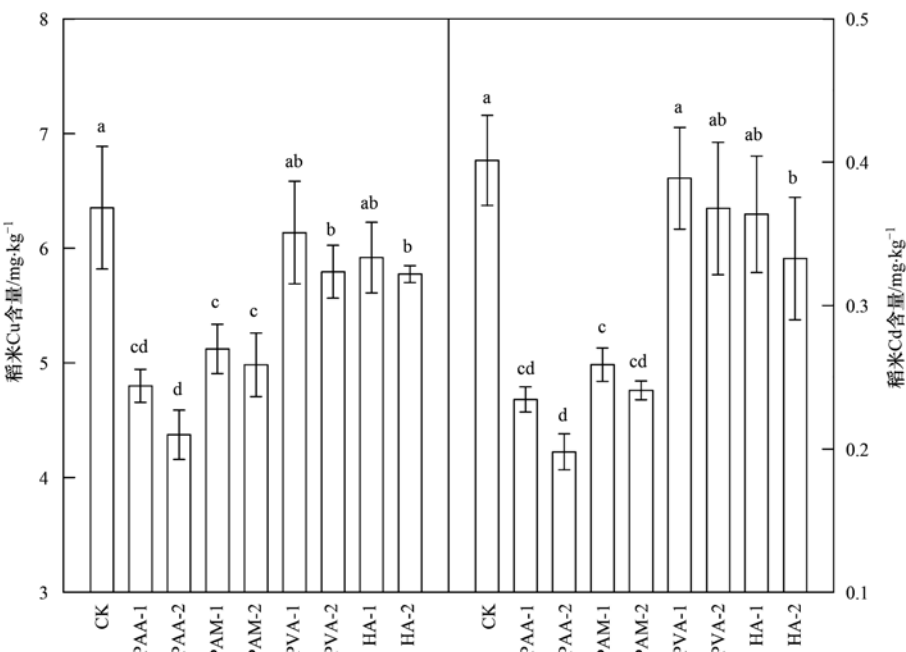


图3 不同处理水稻稻米 Cu 和 Cd 含量

Fig. 3 Concentrations of Cu and Cd in rice grain with different soil treatments

2.4 Cu 和 Cd 在水稻植株体内的转运

结构改良剂对 Cu 和 Cd 在水稻植株体内不同部位间转运的影响见表3. 从中可知,施用 PVA 对 Cu 和 Cd 由根系到秸秆的转运系数没有显著影响 ($P > 0.05$),而施用 PAA、PAM 和 HA 后 Cu 和 Cd 由根系到秸秆的转运系数比 CK 处理下降了 11.2%~27.1%

和 15.2%~38.5%,差异达显著水平 ($P < 0.05$). 从表3 还可以看出,除 PVA 外,施用 PAA、PAM 和 HA 后显著增加了 Cu 由秸秆到稻米的转运系数,增幅达 17.9%~33.6% ($P < 0.05$). 施用 HA 显著增加了 Cd 由秸秆到稻米的转运系数,而 PAA、PAM 和 PVA 对 Cd 从秸秆到稻米的转运没有显著影响 ($P > 0.05$).

表3 不同处理水稻各部位间的 Cu 和 Cd 转运系数

Table 3 Translocation factor of Cu and Cd among different rice organs with different soil treatments

处理	Cu		Cd	
	根-秸秆	秸秆-稻米	根-秸秆	秸秆-稻米
CK	0.151a	0.443c	0.210a	0.188c
PAA-1	0.113cd	0.585a	0.143de	0.202bc
PAA-2	0.110d	0.591a	0.129e	0.195bc
PAM-1	0.117cd	0.529ab	0.145de	0.210abc
PAM-2	0.113cd	0.577a	0.143de	0.203bc
PVA-1	0.140ab	0.467bc	0.201ab	0.207abc
PVA-2	0.129bc	0.493bc	0.195ab	0.213abc
HA-1	0.134b	0.522ab	0.178bc	0.236ab
HA-2	0.125bcd	0.574a	0.162cd	0.245a

3 讨论

3.1 结构改良剂对水稻生长的影响

本研究结果表明,施用结构改良剂后水稻株高和秸秆重均有不同幅度地增加,说明结构改良剂促进了水稻生长. 一方面,结构改良剂显著降低了土壤有效态 Cu 和 Cd 含量(表2),进而减轻了两重金属离子的生物有效性及其对水稻根系的毒害作用. 此外,结构改良剂还能改善水稻根际微环境,提高土壤中与氮、磷供应相关的脲酶、磷酸酶和过氧化氢酶等微生物酶的活性^[22, 23],进而促进水稻生长. 另一

方面,结构改良剂可以改善土壤物理性质,显著提高土壤团聚体稳定性、土壤透气性和保水能力^[24],有利于水稻根系的生长. 本研究所使用的4种结构改良剂均为高分子有机化合物,施入土壤后可以通过自身的生物降解过程释放出有机碳以补充土壤有机质,供水稻生长所需. 彭丽成等^[25]的研究发现,某 Pb 和 Cd 污染土壤施用 HA 和高吸水树脂 SAP (super absorbent polymer) 后,土壤有机质含量有不同幅度地增加,玉米叶面积和株高也随之增加. Seleiman 等^[26]的研究也报道,某 Cd 污染土壤施用 PAM 后显著增加了玉米叶面积指数、株高和产量.

土壤结构改良剂在改善土壤团聚体结构的同时,也会影响土壤氮、磷和钾等养分元素的循环转化,提高土壤溶液中各养分元素的活性^[27]. 有研究表明, PAM 和 HA 可以增加土壤对氮、磷和钾的吸附固定,降低它们的淋溶损失^[28]; PAA 能显著提高土壤有效磷和有效钾含量,保持土壤肥力^[12]; PVA 能够促进尿素缓释,提高水肥利用效率^[11],这些性质的改善均有利于水稻的生长. 本研究还发现,各结构改良剂在增加水稻株高和秸秆重的同时,反而有一定的减产效应(表 1),这可能是由于结构改良剂降低了土壤速效氮含量^[22],使得水稻吸氮量下降,水稻生长前期吸收的氮主要用于营养生长阶段促进株高和植株生物量的增长,后期生殖生长阶段供氮不足,导致产量下降. 陈嘉恒等^[29]也曾报道,施用 PAA 和 PAM 显著增加了花生株高,但却显著降低了花生地上部和根系干物质质量. 本研究所使用的 4 种结构改良剂中以 PAM 的减产效应最为明显,可能因为植物根系的向水性生长特点,根会不断向结构改良剂方向生长而进入其中, PAM 的生物降解性能相对较差,水稻根系与 PAM 相互缠绕,使根部不能与土壤充分接触,影响根系对土壤养分元素的吸收^[30];而 PVA 的生物降解性强,不会对根系产生缠绕现象,不影响水稻对土壤养分的吸收^[29]. 由此看来,有关结构改良剂对作物生长的影响还需开展进一步地深入研究.

3.2 结构改良剂对水稻吸收和转运 Cu 和 Cd 的影响

本研究中各结构改良剂处理水稻不同部位 Cu 和 Cd 含量显著低于对照处理,说明施用结构改良剂降低了土壤 Cu 和 Cd 的生物有效性,抑制了水稻对土壤中 Cu 和 Cd 的吸收,具有较好的修复效果. 已有的研究表明^[2~6],改良剂大多通过提高土壤 pH 值以固定重金属离子,降低土壤重金属生物有效性的途径达到修复重金属污染土壤的目的. 本研究中施用结构改良剂后土壤有效态 Cu 和 Cd 含量显著降低,但土壤 pH 值却没有显著变化,说明结构改良剂对土壤重金属的解毒作用不是通过影响土壤 pH 值来实现. 闫家普等^[31]在研究不同改良剂对土壤 Cd 形态的影响时也发现,施用 PAM 后土壤 pH 值没有显著变化,但却降低了土壤有效态 Cd 含量. 因此,结构改良剂可能主要通过改变土壤有机质含量、有效磷含量和氧化还原电位等理化性质,增大土壤对重金属离子的吸附络合作用来固定活性重金属离子. 结构改良剂的比表面积和阳离子交换量较大,且富含羧基、羟基、羰基、氨基、甲氧基和醌基等含氧活性官能基团^[14],这些官能团在溶液中能够解离释放

出质子,使其表面带有负电荷,进而通过静电引力吸附土壤中的 Cu^{2+} 和 Cd^{2+} . 此外,各官能团中的氢、氮、氧、磷和硫可作为配位原子与土壤中的 Cu^{2+} 和 Cd^{2+} 发生配位络合反应使其被吸附固定^[32, 33],以降低其生物有效性,抑制植物的吸收. 有研究发现^[34], PAM 可以通过表面阴离子和 Cu^{2+} 发生吸附络合反应来降低土壤中 Cu^{2+} 的含量. 房瑜静等^[35]的研究认为,聚丙烯酸钠可通过羧基和羟基的轻度交联形成网络结构,其内部网孔和分子表面及断链处的羧基可以与 Cu^{2+} 进行络合,从而实现对 Cu^{2+} 的吸附和固持,且被吸附的 Cu^{2+} 较难被解吸,由此降低植物对 Cu 的吸收. 罗梅等^[36]的研究发现, HA 与 Cd^{2+} 形成的配合物与土壤的结合能力强,添加 HA 促进了土壤对 Cd^{2+} 的吸附固定,降低了土壤中 Cd 的生物有效性.

本研究中,不同结构改良剂对土壤 Cu 和 Cd 生物有效性的影响存在一定差异(表 2). 相同施用量下, PAA 降低土壤 Cu 和 Cd 生物有效性、抑制水稻吸收 Cu 和 Cd 的效果最好, PVA 的效果相对较差(图 1~3),这可能与各结构改良剂的分子结构组成差异有关. 有研究表明^[37],高分子有机化合物的含氧官能团容易与金属离子发生表面络合反应,但不同官能团与金属离子形成络合物的稳定性存在差异. 羟基与金属离子络合一般只用到一个氧,而羧基比羟基多了一个邻位的双键氧,因此它与金属离子形成的络合物更稳定^[38]. 潘响亮等^[39]的研究也发现,羧基与 Zn^{2+} 的结合能力要强于羟基. 本研究所用 PAA 的分子式为 $[\text{CH}_2\text{CHCOOH}]_n$,其分子结构中含有羧基官能团; PVA 的分子式为 $[\text{CH}_2\text{CHOH}]_n$,其分子结构中含有醇羟基官能团. 因此, PAA 与土壤中的 Cu^{2+} 和 Cd^{2+} 形成的络合物比 PVA 更稳定,使得土壤中 Cu 和 Cd 的生物有效性更低. PAM 的分子式为 $[\text{CH}_2\text{CHCONH}_2]_n$,其分子结构中含有羰基和氨基官能团,除了双键氧的配位络合作用,氨基也可以与土壤中的 Cu^{2+} 和 Cd^{2+} 络合而使其稳定存在于土壤中^[40],由此 PAM 降低土壤 Cu 和 Cd 生物有效性的效果要好于 PVA. HA 的分子结构中虽然同时含有羧基和酚羟基两种官能团,但施用高量和低量 HA 后土壤 pH 值仅有 5.13 和 5.25,而酸性条件下土壤中的 Cu^{2+} 和 Cd^{2+} 主要通过与其邻位羧基络合的模式被固定,碱性条件下才以与酚羟基络合模式为主^[41]. 魏行^[42]在研究细菌吸附铜离子的作用机制时也发现,细菌所含的羧基、磷酸基和羟基等官能团中,羧基在吸附铜离子的过程中起主要作用. HA 的分子结构组成比 PAA 复杂,分子量大于 PAA,相同施用量下 HA 含有的羧基官能团少于

PAA,使其对土壤 Cu 和 Cd 生物有效性和水稻吸收 Cu 和 Cd 的抑制作用弱于 PAA.

另一方面,结构改良剂抑制水稻对 Cu 和 Cd 的吸收与土壤中 Cu 和 Cd 存在形态的转变有关.前人研究表明^[26,34,36],土壤施用 PAM 和 HA 后显著降低了水溶态和交换态 Cu 和 Cd 含量,增加了有机结合态和残渣态 Cu 和 Cd 含量,进而降低了土壤 Cu 和 Cd 的生物有效性,抑制了 Cu 和 Cd 在作物体内的富集.郝宏斌^[43]的研究也发现,利用 PAA-PAM 制备的聚合物复合材料显著降低了土壤交换态 Cu 和 Cd 含量,提高了有机结合态和残渣态 Cu 和 Cd 含量,达到修复土壤重金属污染的目的.本研究结果也表明,施用 4 种结构改良剂显著影响了土壤不同粒径团聚体中不同形态 Cu 和 Cd 的分布特征,土壤水溶态和交换态 Cu 和 Cd 含量有不同幅度的降低(本文未列出相关数据).

结构改良剂的施用降低了土壤 Cu 和 Cd 的生物有效性,抑制了水稻根系对 Cu 和 Cd 的吸收,也显著降低了 Cu 和 Cd 从根到秸秆的转运系数(表 3),这与前人研究结果一致^[15,21,26].然而,各结构改良剂同时也增加了 Cu 和 Cd 从秸秆到稻米的转运系数,导致虽然各结构改良剂处理稻米 Cd 含量显著低于对照处理,但仍然高于我国食品中 Cd 限量卫生标准,这可能与土壤有效态 Cd 含量较高有关.有研究表明^[44,45],当重金属离子浓度过高时,结构改良剂与重金属离子的螯合作用增加了改良剂的交联度,使亲水基团减少,造成表面收缩,吸水率下降,其网络结构不能进一步扩张,外部的重金属离子难以持续进入结构改良剂内部,结构改良剂对重金属离子的吸附容量很快达到饱和,进而可能影响其修复效果.水稻对土壤重金属的吸收受多种因素的影响,未来还需强化结构改良剂抑制水稻吸收重金属的机制研究.

综上所述,结构改良剂对水稻吸收土壤 Cu 和 Cd 及其在水稻体内的转运分配具有较好的阻控作用,对 Cu 和 Cd 污染土壤具有较好的修复效果.考虑到结构改良剂对土壤物理性质的影响,未来应加强结构改良剂与其它无机、有机钝化剂的联合修复研究,在降低土壤重金属生物有效性的同时,维持良好的土壤结构,保证修复后土壤的可耕性,以达到修复和生产双赢的目的.此外,本研究只开展了一季温室水稻盆栽试验,而温室所处的环境条件与田间实际情况有一定差异.因此,应通过长期田间试验开展结构改良剂修复重金属污染土壤的时效性研究,为促进结构改良剂在土壤修复方面的应用提供理论基础.

4 结论

施用结构改良剂显著影响水稻生长,显著增加了水稻株高和秸秆重,但施用高量结构改良剂表现出一定的减产效应.结构改良剂对土壤 pH 值没有显著影响,但显著降低了土壤有效态 Cu 和 Cd 含量,减轻了 Cu 和 Cd 对水稻的毒害作用,抑制了水稻对 Cu 和 Cd 的吸收.施用结构改良剂显著降低了水稻根、秸秆和稻米中的 Cu 和 Cd 含量,抑制了 Cu 和 Cd 从根系向秸秆的转运,但促进了 Cu 和 Cd 从秸秆向稻米的转运.本研究只进行了一季温室水稻盆栽试验,未来应加强长期田间试验研究以进一步明确结构改良剂修复重金属污染土壤的相关机制和时效性.

参考文献:

- [1] 环境保护部,国土资源部.全国土壤污染状况调查公报[EB/OL]. http://www.gov.cn/foot/2014-04/17/content_2661768.htm, 2014-04-17/2021-01-10.
- [2] Smolders E, Wagner S, Prohaska T, *et al.* Sub-millimeter distribution of labile trace element fluxes in the rhizosphere explains differential effects of soil liming on cadmium and zinc uptake in maize[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **738**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140311.
- [3] Jing F, Chen C, Chen X M, *et al.* Effects of wheat straw derived biochar on cadmium availability in a paddy soil and its accumulation in rice[J]. *Environmental Pollution*, 2020, **257**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113592.
- [4] Chen H P, Zhang W W, Yang X P, *et al.* Effective methods to reduce cadmium accumulation in rice grain[J]. *Chemosphere*, 2018, **207**: 699-707.
- [5] 张静静,朱爽阁,朱利楠,等.不同钝化剂对微碱性土壤镉、镍形态及小麦吸收的影响[J]. *环境科学*, 2020, **41**(1): 460-468.
Zhang J J, Zhu S G, Zhu L N, *et al.* Effects of different amendments on fractions and uptake by winter wheat in slightly alkaline soil contaminated by cadmium and nickel [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 460-468.
- [6] 李义纯,王艳红,唐明灯,等.改良剂对根际土壤-水稻系统中镉运移的影响[J]. *环境科学*, 2019, **40**(7): 3331-3338.
Li Y C, Wang Y H, Tang M D, *et al.* Effects of an amendment on cadmium transportation in the rhizosphere soil-rice system[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(7): 3331-3338.
- [7] 朱咏莉,刘军,王益权.国内外土壤结构改良剂的研究利用综述[J]. *水土保持学报*, 2001, **15**(6): 140-142.
Zhu Y L, Liu J, Wang Y Q. Summary of soil structure conditioners utilization [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, **15**(6): 140-142.
- [8] 赵文举,曹强忠,曹涛鸿,等.保水剂对砂壤土水分二维入渗的影响[J]. *兰州理工大学学报*, 2020, **46**(6): 66-71.
Zhao W J, Cao Q Z, Cao T H, *et al.* Effect of water retaining agent on two-dimensional infiltration of sandy loam soil moisture [J]. *Journal of Lanzhou University of Technology*, 2020, **46**(6): 66-71.
- [9] 苟春林,王新爱,李永胜,等.保水剂与氮肥的相互影响及节水保肥效果[J]. *中国农业科学*, 2011, **44**(19): 4015-4021.

- Gou C L, Wang X A, Li Y S, *et al.* Interaction between water retaining agent and nitrogen fertilizers and the effect of water and fertilizer conservation[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, **44** (19): 4015-4021.
- [10] 陈晓佳, 吕晓男, 麻万诸. 保水剂对肥料淋失和百喜草生长的影响[J]. *浙江农业科学*, 2004, (3): 130-131.
- Chen X J, Lv X N, Ma W Z. Effects of water-absorbing polymers on fertilizer loss and growth of Bahiagrass [J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2004, (3): 130-131.
- [11] Sarkar K, Sen K. Polyvinyl alcohol based hydrogels for urea release and Fe(III) uptake from soil medium [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2018, **6** (1): 736-744.
- [12] 刘慧军, 刘景辉, 于健, 等. 聚丙烯酸盐类土壤改良剂对燕麦土壤微生物量氮及酶活性的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2013, (1): 25-31.
- Liu H J, Liu J H, Yu J, *et al.* Effect of soil amendment of polyacrylate on soil microbial biomass nitrogen and soil enzyme activity[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2013, (1): 25-31.
- [13] Liu D, Huang Z B, Men S H, *et al.* Nitrogen and phosphorus adsorption in aqueous solutions by humic acids from weathered coal: isotherm, kinetics and thermodynamic analysis[J]. *Water Science & Technology*, 2019, **79**(11): 2175-2184.
- [14] de Varennes A, Queda C. Application of an insoluble polyacrylate polymer to copper-contaminated soil enhances plant growth and soil quality[J]. *Soil Use and Management*, 2005, **21** (4): 410-414.
- [15] Dhiman J, Prasher S O, Elsayed E, *et al.* Heavy metal uptake by wastewater irrigated potato plants grown on contaminated soil treated with hydrogel based amendments [J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2020, **19**, doi: 10.1016/j.eti.2020.100952.
- [16] Zhao T Q, Zhang K, Chen J W, *et al.* Changes in heavy metal mobility and availability in contaminated wet-land soil remediated using lignin-based poly(acrylic acid) [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, **368**: 459-467.
- [17] 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.
- [18] Ye X X, Ma Y B, Sun B. Influence of soil type and genotype on Cd bioavailability and uptake by rice and implications for food safety[J]. *Journal of Environmental Science*, 2012, **24**(9): 1647-1654.
- [19] 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.
- [20] Sparks D L, Page A L, Helmke P A, *et al.* Methods of soil analysis part 3: chemical methods[M]. Madison: Soil Science Society of America, Inc. and American Society of Agronomy, Inc., 1996. 869-919.
- [21] 胡雪芳, 田志清, 梁亮, 等. 不同改良剂对铅镉污染农田水稻重金属积累和产量影响的比较分析[J]. *环境科学*, 2018, **39**(7): 3409-3417.
- Hu X F, Tian Z Q, Liang L, *et al.* Comparative analysis of different soil amendment treatments on rice heavy metal accumulation and yield effect in Pb and Cd contaminated farmland[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(7): 3409-3417.
- [22] 黄震, 黄占斌, 孙朋成, 等. 环境材料对作物吸收重金属 Pb、Cd 及土壤特性研究[J]. *环境科学学报*, 2012, **32**(10): 2490-2499.
- Huang Z, Huang Z B, Sun P C, *et al.* A study of environmental materials on lead and cadmium absorption by crops and soil characteristics [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, **32** (10): 2490-2499.
- [23] Sun Y B, Sun G H, Xu Y M, *et al.* Evaluation of the effectiveness of sepiolite, bentonite, and phosphate amendments on the stabilization remediation of cadmium-contaminated soils [J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, **166**: 204-210.
- [24] Albalasmeh A A, Hamdan E H, Gharaibeh M A, *et al.* Improving aggregate stability and hydraulic properties of Sandy loam soil by applying polyacrylamide polymer [J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, **206**, doi: 10.1016/j.still.2020.104821.
- [25] 彭丽成, 黄占斌, 石宇, 等. 环境材料对 Pb、Cd 污染土壤玉米生长及土壤改良效果的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2011, **19**(6): 1386-1392.
- Peng L C, Huang Z B, Shi Y, *et al.* Effects of environmental materials on maize growth and soil remediation of Pb and Cd contaminated soils [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, **19**(6): 1386-1392.
- [26] Seleiman M F, Kheir A M S. Maize productivity, heavy metals uptake and their availability in contaminated clay and sandy alkaline soils as affected by inorganic and organic amendments [J]. *Chemosphere*, 2018, **204**: 514-522.
- [27] Shaheen S M, Rinklebe J. Sugar beet factory lime affects the mobilization of Cd, Co, Cr, Cu, Mo, Ni, Pb, and Zn under dynamic redox conditions in a contaminated floodplain soil [J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, **186**: 253-260.
- [28] 张艳艳, 唐泽军. PAM 调控土壤养分元素迁移与流失试验研究[J]. *水土保持通报*, 2017, **37**(4): 33-39, 46.
- Zhang Y Y, Tang Z J. Regulation and control of PAM on vertical transport and leaching loss of soil nutrient [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2017, **37**(4): 33-39, 46.
- [29] 陈嘉恒, 吴国杰, 陈宗发, 等. CTS-PVA 和 P(AA-AM) 保水剂对土壤性质及花生生长的影响[J]. *仲恺农业工程学院学报*, 2013, **26**(3): 32-37, 54.
- Chen J H, Wu G J, Chen Z F, *et al.* Effects of CTS-PVA and P(AA-AM) water retaining agent on soil properties and growth of peanut seedlings [J]. *Journal of Zhongkai University of Agriculture and Engineering*, 2013, **26**(3): 32-37, 54.
- [30] 李晓华, 李维国. 聚丙烯酰胺对几种植物种子萌发及生长的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2002, **10**(4): 77-79.
- Li X H, Li W G. Effects of polyacrylamide on germination and growth of several plant seeds [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2002, **10**(4): 77-79.
- [31] 闫家普, 丁效东, 崔良, 等. 不同改良剂及其组合对土壤镉形态和理化性质的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2018, **37** (9): 1842-1849.
- Yan J P, Ding X D, Cui L, *et al.* Effects of several modifiers and their combined application on cadmium forms and physicochemical properties of soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, **37**(9): 1842-1849.
- [32] Yang X, Liu J J, McGrouther K, *et al.* Effect of biochar on the extractability of heavy metals (Cd, Cu, Pb, and Zn) and enzyme activity in soil [J]. *Environmental Science and Pollution*

- Research, 2016, **23**(2): 974-984.
- [33] Sarfraz R, Shakoor A, Abdullah M, *et al.* Impact of integrated application of biochar and nitrogen fertilizers on maize growth and nitrogen recovery in alkaline calcareous soil[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2017, **63**(5): 488-498.
- [34] 施培俊, 王冠华, 吴迪, 等. 几种有机、无机钝化剂对铜污染土壤的钝化效果研究[J]. 环境工程, 2016, **34**(6): 173-176.
- Shi P J, Wang G H, Wu D, *et al.* Research on passivation effects of several organic and inorganic passivating agents on copper contaminated soil[J]. Environmental Engineering, 2016, **34**(6): 173-176.
- [35] 房瑜静, 秦端端, 陈望舒, 等. 保水剂对土壤铜形态和植物吸铜的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, **46**(19): 319-322, 330.
- Fang Y J, Qin D D, Chen W S, *et al.* Effects of water retaining agent on transformation of Cu forms in soil and Cu uptake of plant [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, **46**(19): 319-322, 330.
- [36] 罗梅, 柏宏成, 陈亭悦, 等. 腐殖酸对土壤铅镉吸附、赋存形态及生物可给性的影响[J]. 中国环境科学, 2020, **40**(3): 1191-1202.
- Luo M, Bai H C, Chen T Y, *et al.* Effects of humic acids on the adsorption, chemical speciation, and bioaccessibility of soil lead and cadmium[J]. China Environmental Science, 2020, **40**(3): 1191-1202.
- [37] Vilela P B, Matias C A, Dalalibera A, *et al.* Polyacrylic acid-based and chitosan-based hydrogels for adsorption of cadmium: equilibrium isotherm, kinetic and thermodynamic studies [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2019, **7**(5), doi: 10.1016/j.jece.2019.103327.
- [38] Pan B, Qiu M Y, Wu M, *et al.* The opposite impacts of Cu and Mg cations on dissolved organic matter-ofloxacin interaction[J]. Environmental Pollution, 2012, **161**: 76-82.
- [39] 潘响亮, 王建龙, 张道勇, 等. 硫酸盐还原菌混合菌群胞外聚合物对 Zn^{2+} 的吸附和机理[J]. 环境科学研究, 2005, **18**(6): 53-55.
- Pan X L, Wang J L, Zhang D Y, *et al.* Zn^{2+} sorption and mechanism by EPS of mixed SRB population[J]. Research of Environmental Sciences, 2005, **18**(6): 53-55.
- [40] 黄美荣, 刘睿, 李新贵. 芳香族二胺聚合物修饰电极对痕量重金属离子的络合与探测[J]. 分析测试学报, 2005, **24**(2): 109-113.
- Huang M R, Liu R, Li X G. Complexation and detection of trace heavy metal ions with Poly (aromatic diamine) modified electrodes[J]. Journal of Instrumental Analysis, 2005, **24**(2): 109-113.
- [41] 郑红磊, 巩冠群, 李亚军, 等. 黄腐酸法处理重金属离子的作用机理研究[J]. 煤炭技术, 2015, **34**(2): 314-315.
- Zheng H L, Gong G Q, Li Y J, *et al.* Analysis on functional mechanism of heavy metal ions treatment with fulvic acids[J]. Coal Technology, 2015, **34**(2): 314-315.
- [42] 魏行. 胞外聚合物在细菌吸附铜离子中的作用及机理研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2011. 6-10.
- Wei X. Research on the role and mechanisms of EPS in the adsorption of copper by bacteria [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2011. 6-10.
- [43] 郝宏斌. 生物降解聚合物复合材料制备以及在重金属污染土壤中的性能研究[D]. 太原: 中北大学, 2020. 39-41.
- Hao H B. Preparation of biodegradable polymer composites and its performance in heavy metal contaminated soil[D]. Taiyuan: North University of China, 2020. 39-41.
- [44] 王晓佳, 王百田, 李德宁, 等. 聚丙烯酰胺高吸附树脂与重金属离子的相互作用[J]. 北京林业大学学报, 2016, **38**(3): 81-88.
- Wang X J, Wang B T, Li D N, *et al.* Interaction between polyacrylamide super absorbent polymers and heavy metal ions [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2016, **38**(3): 81-88.
- [45] 曲贵伟. 聚丙烯酸盐对重金属污染修复作用的研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2011. 17-27.
- Qu G W. Remediation of soils contaminated with heavy metals using polyacrylate polymers [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2011. 17-27.

CONTENTS

Spatiotemporal Distribution and Health Impacts of PM _{2.5} and O ₃ in Beijing, from 2014 to 2020	CHEN Jing, PENG Jin-long, XU Yan-sen (4071)
High-resolution Estimation of Spatio-temporal Variation in PM _{2.5} Concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	YANG Xiao-hui, SONG Chun-jie, FAN Li-hang, <i>et al.</i> (4083)
Impacts of Anthropogenic Emission Reduction and Meteorological Conditions on PM _{2.5} Pollution in Typical Cities of Beijing-Tianjin-Hebei in Winter	SHAO Xuan-yi, WANG Xiao-qi, ZHONG Yi-sheng, <i>et al.</i> (4095)
Influence of Pollutant Transport from Both Sides of the Taihang Mountains on Cross-Valley Urban Aerosols	WANG Yan, GUO Wei, YAN Shi-ming, <i>et al.</i> (4104)
Variation Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Aerosols in Winter in Jiashan	ZHANG Ying-long, LI Li, WU Wei-chao, <i>et al.</i> (4116)
Simulation Analysis of the Impact of COVID-19 Pandemic Control on Air Quality in Henan Province based on Machine Learning Algorithm	WEI Yu, XU Qi-xiang, ZHAO Jin-shuai, <i>et al.</i> (4126)
Seasonal Variation, Source Identification, and Health Risk of PM _{2.5} -bound Metals in Xinxiang	LIU Huan-jia, JIA Meng-ke, LIU Yong-li, <i>et al.</i> (4140)
Distribution Characteristics and Seasonal Variations of Arsenic in Atmospheric Aerosols over the Yellow Sea and Bohai Sea	YUAN Shuai, WANG Yan, LIU Ru-hai, <i>et al.</i> (4151)
Extinction Characteristics of Aerosols and the Contribution of Pollution Sources to Light Extinction During Three Heavy Pollution Episodes in the Winter of 2020 in Tianjin	LI Li-wei, XIAO Zhi-mei, YANG Ning, <i>et al.</i> (4158)
Spatial Variation of Surface Ozone Concentration During the Warm Season and Its Meteorological Driving Factors in China	HE Chao, MU Hang, YANG Lu, <i>et al.</i> (4168)
Exploring Characteristics and Causes of Summer Ozone Pollution Based on Process Analysis in Wuhai	ZHANG Rui-xin, CHEN Qiang, XIA Jia-qi, <i>et al.</i> (4180)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric VOCs in the Coastal Background of the Pearl River Delta	YUN Long, LI Cheng-liu, ZHANG Ming-di, <i>et al.</i> (4191)
Hydrochemical Characteristics and Factors of Surface Water and Groundwater in the Upper Yongding River Basin	KONG Xiao-le, YANG Yong-hui, CAO Bo, <i>et al.</i> (4202)
Temporal and Spatial Variations in Water Quality of Hanjiang River and Its Influencing Factors in Recent Years	CHENG Bing-fen, ZHANG Yuan, XIA Rui, <i>et al.</i> (4211)
Pollution Level, Distribution Characteristic, and Ecological Risk Assessment of Environmentally Persistent Pharmaceutical Pollutants in Surface Water of Jiangsu Province	ZHAO Mei-mei, FAN De-ling, GU Wen, <i>et al.</i> (4222)
Spatial and Temporal Distribution and Pollution Evaluation of Soluble Heavy Metals in Liujiang River Basin	ZHANG Wan-jun, XIN Cun-lin, YU Shi, <i>et al.</i> (4234)
Source Analysis and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Groundwater of Leizhou Peninsula	SHI Huan-huan, PAN Yu-jie, ZENG Min, <i>et al.</i> (4246)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metal Elements in Groundwater of Longzici Spring Area	XIE Hao, LIANG Yong-ping, LI Jun, <i>et al.</i> (4257)
Seasonal Variation and Sources Identification of Dissolved Sulfate in a Typical Karst Subterranean Stream Basin Using Sulfur and Oxygen Isotopes	REN Kun, PAN Xiao-dong, LAN Gan-jiang, <i>et al.</i> (4267)
Phosphorus Fractions and Quantitative Identification of Pollution Sources in Nanhai Wetland, Baotou	BAI Ya-hong, QIAN Chen-ge, YUAN Si-jing, <i>et al.</i> (4275)
Release Risk of Phosphorus by Sediments and Its Influencing Factors in Ponds and Ditches of a New Urban District Park	LI Ru-zhong, SONG Min, YANG Ji-wei (4287)
Effect of Hydraulic Residence Time on Removal Efficiency of Pollutants in Subsurface Flow Constructed Wetlands and Analysis of Denitrification Mechanism	QI Ran, ZHANG Ling, YANG Fan, <i>et al.</i> (4296)
Enhanced Removal of Pollutants in Constructed Wetlands with Manganese Sands	MA Quan, WANG Dong-lin, LIN Hui, <i>et al.</i> (4304)
Application Effect of Four Typical Submerged Macrophytes on Removing Cadmium from Polluted Sediment	TAO Li, WANG Pei-fang, YUAN Qiu-sheng, <i>et al.</i> (4311)
Structure of Aerobic Denitrification Bacterial Community in Response to Dissolved Organic Matter in Baiyangdian Lake During the Water Delivery Period	ZHOU Shi-lei, ZHANG Tian-na, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i> (4319)
Nitrogen and Phosphorus Leaching Characteristics and Adsorption Properties of Hardwood Biochar in Stormwater Runoff	MENG Yi-ke, WANG Yuan, WANG Chuan-yue (4332)
Indicator Function of Ragworm (<i>Nereididae</i>) on Sediment Microplastic in Haizhou Bay Intertidal Zone	WANG Jia-xuan, SONG Ke-xin, SUN Yi-xin, <i>et al.</i> (4341)
Antagonistic Effect and Mechanism of Nano Titanium Dioxide and Cadmium on the Growth of <i>Scenedesmus obliquus</i>	WANG Pu, ZHAO Li-hong, ZHU Xiao-shan (4350)
Mutual Influence Between Microbial Community, Wastewater Characteristics, and Antibiotic Resistance Genes During Spiramycin Production Wastewater Treatment	WU Cai-yun, LI Hui-li, QIN Cai-xia, <i>et al.</i> (4358)
Effect of Chelated Iron on Nitrogen Removal Efficiency and Microbial Community Structure in the Anaerobic Ferric Ammonium Oxidation	LIAO Hong-yan, SONG Cheng, WAN Liu-yang, <i>et al.</i> (4366)
Effects of Dissolved Oxygen on Nutrient Removal Performance and Microbial Community in Low Carbon/Nitrogen Municipal Wastewater Treatment Process	CHI Yu-lei, SHI Xuan, REN Tong, <i>et al.</i> (4374)
Shortening SRT of Intermittent Gradient Aeration to Realize Nitrogen and Phosphorus Removal in Short-range SNEDPR System	ZHANG Yu-jun, LI Dong, WANG Xin-xin, <i>et al.</i> (4383)
Characteristics of Partial Denitrification in Biofilm System	YU Li-fang, ZHANG Xing-xiu, ZHANG Qiong, <i>et al.</i> (4390)
Effect of Anaerobic Plug-flow on Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Aerobic Granular Sludge with Intermittent Aeration	LI Dong, CAO Si-yu, WANG Qi, <i>et al.</i> (4399)
Combining Different Aerobic/Anoxic Durations with Zoned Sludge Discharge to Optimize Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules in Domestic Sewage	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (4406)
Meta-analysis of the Effects of Metal Mining on Soil Heavy Metal Concentrations in Southwest China	ZHANG Jian-lin, QU Ming-kai, CHEN Jian, <i>et al.</i> (4414)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Watersheds of the Qinghai-Tibet Plateau	DU Hao-lin, WANG Ying, WANG Jin-song, <i>et al.</i> (4422)
Spatial Distribution Characteristics and Risk Assessment of Cadmium Pollution in Soil-crops system of an E-waste Dismantling Area	ZHANG Lu-yao, ZHAO Ke-li, FU Wei-jun (4432)
Characteristics of Modified Biochars and Their Immobilization Effect on Cu and Cd in Polluted Farmland Soil Around Smelter	WANG Xin-yu, MENG Hai-bo, SHEN Yu-jun, <i>et al.</i> (4441)
Combined Effects of Soil Amendment and Zinc Fertilizer on Accumulation and Transportation of Cadmium in Soil-Rice System	ZHOU Kun-hua, ZHOU Hang, WANG Zi-yu, <i>et al.</i> (4452)
Effects of Different Soil Conditioners on Rice Growth and Heavy Metal Uptake in Soil Contaminated with Copper and Cadmium	WEI Wei, LI Ping, LANG Man (4462)
Isolation and Identification of the Plant Endophyte R-13 and Its Effect on Cadmium Accumulation in <i>Solanum nigrum</i> L.	PANG Jie, LIU Yue-min, HUANG Yong-chun, <i>et al.</i> (4471)
Response of Soil Archaeal Community to Heavy Metal Pollution in Different Typical Regions	LI Yu-tong, YANG Shan, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (4481)
High-throughput Sequencing Analysis of Soil Bacterial Community in the Grain for Green Project Areas of the Loess Plateau	LIU Xiao-hua, WEI Tian-xing (4489)
Experimental Influence of Food Waste Fermentation Broth on the Soil Quality in a Loess Hilly Area	SHAO Li-ming, REN Jun-da, LÜ Fan, <i>et al.</i> (4500)
Stability of Soil Aggregates at Different Altitudes in Qinling Mountains and Its Coupling Relationship with Soil Enzyme Activities	MA Huan-fei, HU Han, LI Yi, <i>et al.</i> (4510)
Reactivation of Passivated Biochar/Nanoscale Zero-Valent Iron by an Electroactive Microorganism for Cooperative Hexavalent Chromium Removal and Mechanisms	LIAO Cong-jian, ZHAO Xiao-lei, LIU Kai, <i>et al.</i> (4520)
Influence of Precipitation Change on Soil Respiration in Desert Grassland	HAO Lian-yi, ZHANG Li-hua, XIE Zhong-kui, <i>et al.</i> (4527)
Effects of Nitrogen Fertilizer Application Times and Nitrification Inhibitor on N ₂ O Emission from Potted Maize	FU Pei-jiao, JI Heng-kuan, HE Qiu-xiang, <i>et al.</i> (4538)
Gaseous Nitrogen Emission from Soil After Application of NH ₄ ⁺ -N Loaded Biochar	MA Xiao-gang, HE Jian-qiao, CHEN Yu-lan, <i>et al.</i> (4548)
Effects of Microplastics Addition on Soil Organic Carbon Mineralization in Citrus Orchard	ZHANG Xiu-ling, YAN Zi-wei, WANG Feng, <i>et al.</i> (4558)
Dynamic Material Flow Analysis of Perfluorooctane Sulfonate in China; 1985-2019	WANG Jia-yu, CHEN Jing-wen, TANG Wei-hao, <i>et al.</i> (4566)