

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第11期

Vol.39 No.11

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2010~2015年我国水泥工业 NO _x 排放清单及排放特征	蒋春来, 宋晓晖, 钟悦之, 孙亚梅, 雷宇 (4841)
兰州市煅烧污染物排放清单及其对 PM _{2.5} 浓度贡献	郭文凯, 刘晓, 朱玉凡, 陈强, 杜永刚 (4849)
北京地区气溶胶水溶性组分粒径分布特征	杜翔, 赵普生, 苏捷, 董群 (4858)
郑州市夏、秋季大气颗粒物中水溶性无机离子质量浓度及粒径分布特征	赵庆炎, 姜楠, 燕启社, 王申博, 韩世杰, 杨留明, 张瑞芹 (4866)
菏泽市冬季 PM _{2.5} 中二元羧酸类 SOA 的昼夜变化特征	孟静静, 刘晓迪, 侯战方, 李静, 魏本杰, 邢继钊 (4876)
我国典型钢铁行业主要工艺环节排放颗粒物源成分谱特征	温杰, 杨佳美, 李蒲, 郁佳, 吴建会, 田瑛泽, 张进生, 史国良, 冯银厂 (4885)
嘉兴市 2015 年人为源 VOCs 排放清单	郝欢, 万梅, 戎宇, 兰亚琼, 熊传芳, 晁娜 (4892)
上海某石化园区周边区域 VOCs 污染特征及健康风险	盛涛, 陈筱佳, 高松, 刘启贞, 李学峰, 伏晴艳 (4901)
SBR 工艺城市污水处理厂微生物气溶胶逸散特征	杨凯雄, 侯红勋, 王颖哲, 史昊然, 许光素, 韩云平, 刘俊新, 李琳 (4909)
太湖有色可溶性有机物组成结构对不同水文情景的响应	石玉, 周永强, 张运林, 姚晓龙, 黄昌春 (4915)
巢湖 2016 年蓝藻水华时空分布及环境驱动力分析	胡旻琪, 张玉超, 马荣华, 张壹萱 (4925)
蓝藻水华形成过程对氮磷转化功能细菌群的影响	彭宇科, 路俊玲, 陈慧萍, 肖琳 (4938)
三峡水库低水位运行时干流回水对支流水环境的影响	陈紫娟, 宋献方, 张应华, 魏潇, 唐瑜, 秦文婧 (4946)
纳米银对胶州湾西北部海区及河口区沉积物反硝化能力和功能基因丰度的影响	白洁, 田延昭, 孙鹏飞, 白晓岩, 李岩然, 赵阳国 (4956)
澜沧江流域水体悬浮颗粒物 δ ¹⁵ N 空间差异及成因分析	唐咏春, 徐飘, 杨正健, 张思思, 刘德富, 纪道斌 (4964)
潮白河冲洪积扇典型包气带剖面反硝化强度垂向空间分布规律	耿宏志, 邹环, 李鸣晓, 张莹, 从辉, 席北斗 (4972)
蛤蟆通河流域地下水化学特征及控制因素	张涛, 何锦, 李敬杰, 曹月婷, 龚磊, 刘金巍, 边超, 蔡月梅 (4981)
典型岩溶地区岩溶泉溶解性碳浓度变化及其通量估算	熊佰炼, 张进忠, 彭韬, 郝卓, 高扬 (4991)
农村多水塘系统景观结构对非点源污染中氮截留效应的影响	李玉凤, 刘红玉, 刘军志, 娄彩荣, 王娟 (4999)
城市典型不透水下垫面径流中邻苯二甲酸酯的污染特征	刘雨童, 李田, 彭航宇 (5007)
不同降雨条件下植被对绿色屋顶径流调控效益影响	葛德, 张守红 (5015)
四氧化三铁改性沸石改良底泥对水中磷酸盐的吸附作用	王丹赫, 张宏华, 林建伟, 詹艳慧, 何思琪, 梁舒静, 汲雨, 奚秀清 (5024)
厌氧条件下可溶性有机质对汞的还原与氧化作用	卞永荣, 顾宝华, 朱波, 程虎, 谷成刚, 杨兴伦, 宋洋, 王芳, 叶茂, 蒋新 (5036)
光助-二茂铁/H ₂ O ₂ 非均相体系降解磺胺二甲基嘧啶	张彪军, 赵姚云川, 房岐, 石凤丽, 张月起, 赵群, 田森林, 李英杰 (5043)
基于同位素技术的短程硝化过程 N ₂ O 产生途径	杨玉兵, 杨庆, 李洋, 周薛扬, 李健敏, 刘秀红 (5051)
基质比对厌氧氨氧化耦合反硝化脱氮除碳的影响	安芳娇, 黄剑明, 黄利, 乔瑞, 王瑾, 陈永志 (5058)
厌氧/好氧 SPNDPR 系统实现低 C/N 城市污水同步脱氮除磷的优化运行	于德爽, 袁梦飞, 王晓霞, 陈光辉, 甄建园, 杜世明, 张帆 (5065)
污水处理厂 SNAD 工艺小试	李冬, 崔雅倩, 赵世勋, 刘志诚, 张杰 (5074)
盐度对中试厌氧氨氧化脱氮特性的影响及其恢复动力学	唐佳佳, 于德爽, 王晓霞, 陈光辉, 张军, 赵红, 韩长民 (5081)
中试 ANAMMOX-ASBR 处理火电厂脱硫脱硝尾液的抑制及恢复特性	张军, 于德爽, 王晓霞, 唐佳佳, 赵红, 韩长民, 应凌俏 (5090)
碳氮比对颗粒污泥 CANON 反应器脱氮性能和 N ₂ O 释放的冲击影响	付昆明, 姜娜, 苏雪莹, 廖敏辉, 仇付国, 曹秀芹 (5101)
污泥性质对微波预处理-厌氧消化的影响及古菌群落结构分析	房平, 唐安平, 付兴民, 李伟, 文洋, 佟娟, 魏源送 (5108)
重庆市农地重金属基线值的厘定及其积累特征分析	伍福琳, 陈丽, 易廷辉, 杨志敏, 陈玉成 (5116)
韩江流域土壤中有有机氯农药的特征分布	刘佳, 丁洋, 祁士华, 翟程凯 (5127)
有机磷酸酯在重庆不同城市功能区土壤的分布特征及来源	杨志豪, 何明靖, 杨婷, 卢俊峰, 魏世强 (5135)
纳米零价铁和过氧化钙联合降解土壤淋洗废液的 α-HCH	姚静波, 周杰, 王明新, 苟志祥, 薛金娟 (5142)
株洲清水塘工业区周边土壤微生物群落特征	申丽, 李振桦, 曾伟民, 余润兰, 吴学玲, 李交昆, 王烁琨 (5151)
生物炭对施粪肥土壤中根际真菌群落多样性及相互作用的影响	王丹丹, 杨泽平, 赵远, 梁玉婷 (5163)
生物炭负载氮还田对水稻生长、根系形态及氮素利用的影响	俞映惊, 王悦满, 侯朋福, 杨林章, Alfred Oduor Odindo, 薛利红 (5170)
颗粒有机质对水稻镉吸收及转运的影响	郭毅轩, 赵秀兰 (5180)
施肥对向日葵吸收积累 Cd 的影响	曹柳, 杨俊兴, 郭劲君, 郭俊梅, 郑国砥, 卢一富 (5189)
不同水稻品种对重金属的积累特性	林小兵, 周利军, 王惠明, 刘晖, 武琳, 俞莹, 胡敏, 何波, 周青辉, 黄欠如 (5198)
芦竹和木本植物间种修复重金属污染土壤	曾鹏, 郭朝晖, 肖细元, 彭驰, 黄博 (5207)
三峡库区典型河流水-气界面 CO ₂ 通量日变化观测及其影响因素分析	罗佳宸, 李思悦 (5217)
富营养化湖区 CH ₄ 排放特征及其影响因素	商东耀, 肖启涛, 胡正华, 谢燕红, 黄文晶, 张弥 (5227)
短期放牧对半干旱草地生态系统 CO ₂ 和 N ₂ O 排放的影响	申颜, 孙建平, 罗玉坤, 刁华杰, 闫卫东, 王常慧, 董宽虎 (5237)
覆膜方式和灌溉对夏玉米产量及农田碳排放强度的影响	罗晓琦, 张阿凤, 陈海心, 冯浩 (5246)
臭氧浓度升高对植物源挥发性有机化合物 (BVOCs) 影响的研究进展	冯兆忠, 袁相洋 (5257)
地下水“三氮”污染来源及其识别方法研究进展	杜新强, 方敏, 冶雪艳 (5266)
污水生物处理中抗生素的去除机制及影响因素	张翔宇, 李茹莹, 季民 (5276)
《环境科学》征订启事 (4848) 《环境科学》征稿简则 (4990) 信息 (5188, 5216, 5236)	

颗粒有机质对水稻镉吸收及转运的影响

郭毅轩^{1,2}, 赵秀兰^{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 400716)

摘要: 采用盆栽试验, 通过测定不同颗粒有机质(POM)添加量下土壤、POM 中有机碳(POM-C)和 Cd(POM-Cd)含量及水稻各部位 Cd 含量, 研究了 POM 对紫色水稻土水稻镉吸收的影响及机制。结果表明: 添加 POM 提高了土壤有机碳(SOC)、溶解性有机碳(DOC)、POM-C、POM-Cd、POM 对 Cd 的富集系数和土壤有效 Cd 含量, 在 POM 添加量达 $2.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时可显著提高土壤 POM-C 和 POM-Cd 比例。添加 POM 提高了水稻植株生物量及 Cd 在水稻植株中的总累积量, 但使水稻根 Cd 含量降低 24%~42%, 茎叶 Cd 含量提高 9%~30%, 籽粒 Cd 含量在 POM 添加量为 $0.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时分别降低了 17% 和 36%, 添加量为 $2.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时提高了 39%。添加 POM 对 Cd 在水稻根和茎叶中的分配不显著, 但 POM 添加量较少时可抑制 Cd 从水稻茎叶向籽粒转运, POM 添加达到一定量时, 促进 Cd 从茎叶向籽粒转运, 最终提高籽粒中 Cd 含量。相关分析结果表明, 土壤有效 Cd 是影响茎叶 Cd 累积的主要因素, POM-Cd 总量是影响籽粒中 Cd 累积的主要因素。因此, 添加 POM 可通过改变土壤 SOC、DOC、POM-C、POM-Cd 及有效镉含量, 影响水稻对 Cd 的吸收。

关键词: 颗粒有机质(POM); 镉(Cd); 紫色水稻土; 水稻; 吸收

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)11-5180-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201801107

Effect of Particulate Organic Matter on Cadmium Uptake and Transport in Rice

GUO Yi-xuan^{1,2}, ZHAO Xiu-lan^{1,2*}

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, Chongqing 400716, China)

Abstract: A pot experiment was carried out to investigate the effects and mechanism of particulate organic matter (POM) on cadmium uptake of rice on purple paddy soil. Organic carbon content in soil and POM and Cd content in POM and rice were analyzed. The results showed that the contents of total soil organic carbon (SOC), dissolved organic carbon (DOC), organic carbon in POM (POM-C), Cd in POM (POM-Cd), and the Cd enrichment factor in POM increased with the application of POM. When POM was applied at a rate of $2.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, the proportion of POM-C and POM-Cd in soil significantly increased. Application of POM also increased rice plant biomass and enhanced the accumulation of Cd in rice. The Cd content was reduced by 24%~42% in rice roots and increased by 9%~30% in rice shoots with POM application, whereas it was reduced by 17% and 36% in rice grains when the application of POM was $0.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $1.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively, but increased by 39% when the application of POM was $2.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. Application of POM had no significant effect on the distribution of Cd in rice roots and shoots, but significantly affected the distribution of Cd in rice grains. The transportation of Cd from shoots to grains was inhibited at low rates of POM, but was promoted at high rates of POM, and consequently increased the Cd content in rice grains. Correlation analyses showed that the content of soil available Cd was the main factor affecting Cd accumulation in rice shoots, and the total content of POM-Cd in soil was the main factor affecting Cd accumulation in rice grains. Therefore, the addition of POM to soil could affect the Cd uptake of rice by changing the content of SOC, DOC, POM-C, POM-Cd, and available Cd in paddy soil.

Key words: particulate organic matter (POM); cadmium (Cd); purple paddy soil; rice; uptake

镉是土壤环境中迁移性和生物毒性最强的重金属元素之一^[1]。2014 年公布的《全国土壤污染状况调查公报》显示, 我国农田土壤镉(Cd)的点位超标率达 7%^[2], 成为一个严峻的土壤环境问题。土壤中镉过量不仅会引起土壤微生物和酶活性的变化, 影响植物对必需营养元素的吸收等生理过程, 还可在农产品中累积, 通过食物链的传递作用对人体健康构成严重威胁。水稻是我国主要的粮食作物之一, 也是对镉富集能力较强的农作物之一^[3]。研究土壤-水稻系统中镉的迁移转化过程及其影响因素对修复治理镉污染农田, 保障稻米质量安全具有十

分重要意义。

土壤有机质是土壤的重要组成成分, 也是影响重金属迁移转化和植物吸收的重要因素之一^[4]。土壤有机质是一个复杂的、非均质的混合物, 其对重金属生物有效性的影响不仅与其在土壤中的含量有关, 更与其组成有关^[5]。关于土壤有机质组分对重金属有效性影响的研究集中在通过化学提取剂分离

收稿日期: 2018-01-11; 修订日期: 2018-04-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(41471272)

作者简介: 郭毅轩(1994~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤污染防治, E-mail: guoyixuanswu@163.com

* 通信作者, E-mail: zxl@swu.edu.cn

的溶解性有机质和腐殖质等上,但化学方法对土壤有机质原状结构的破坏作用,使所得结果不能反映土壤有机碳库真正的形态和有机组分的作用^[6].由于土壤有机质90%以上是和土壤颗粒结合的,近年来,愈来愈多研究采用颗粒分组的方法来研究土壤有机质的作用和功能^[7].颗粒有机质(POM)为与粒径大于0.053 mm土壤矿质颗粒结合的有机质,是动植物残体向土壤腐殖质转化的活性中间产物,周转快,与微生物生长营养供给密切相关,可有效反映有机质特性,在土壤碳和养分循环中起重要作用^[8].有研究表明,POM对土壤重金属也具有明显的富集作用^[9].如在某一铜污染葡萄园土壤中Cu倾向积聚于POM中^[10],在某一铁矿石堆放点土壤POM中的Zn和Cu占土壤总Zn、总Cu的比例分别为12.2%~31.7%和15.8%~41.2%^[11],浙江23个非污染土壤中POM对Cd的富集系数为3.8~12.3^[12].关于POM对土壤重金属的迁移转化影响也有一些报道,Mohamed等^[13]的研究发现重金属污染的农田土壤中加入水稻秸秆、植物堆肥和猪粪后,土壤中交换态Cu和Cd含量降低,有机结合态和残渣态Cu和Cd含量增加,且与POM结合的Cu和Cd含量增加.但目前关于POM对水稻土镉的有效性及其对水稻土镉吸收影响的效果和机制鲜见报道.本研究采用盆栽试验,通过添加不同水平POM,分析紫色水稻土POM对镉的富集特征及其对水稻生长、镉吸收的影响,以期明确土壤有机质与镉的相互作用提供依据.

1 材料与方法

1.1 供试材料

水稻:品种为Y两优(*Oryza sativa* L. var. Y liangyou).

试验土壤:侏罗系沙溪庙组紫色砂泥岩母质发育的灰棕紫泥水稻土,采自重庆市北碚区西南大学试验农场0~20 cm土层,土壤样品经风干去除杂物后混匀磨碎,过2 mm尼龙筛.土壤有机质含量为16.69 g·kg⁻¹,pH值为6.33,Cd含量为0.14 mg·kg⁻¹.试验室制备污染土壤,土壤Cd添加量为1.5 mg·kg⁻¹,以CdCl₂溶液形式加入,陈化1个月备用.

颗粒有机质:分离自试验用土壤,其有机碳含量为180.65 g·kg⁻¹,Cd含量为0.56 mg·kg⁻¹.参照Balabane等^[14]的方法分离.取风干未磨碎的土壤样品100 g置于500 mL塑料瓶中,加300 mL去

离子水和若干玻璃珠,在摇床中于25℃,220 r·min⁻¹条件下振荡30h进行机械分散,然后用团聚体分析仪振荡30 min,将0.053~2.0 mm部分分离出来,用去离子水反复悬浮将POM分离出来,于55℃下烘干并称重,磨细过0.15 mm筛备用.

1.2 试验方法

盆栽试验于2016年4~8月在西南大学温室进行.每盆装污染土壤4 kg,装盆前施入化肥和分离出的POM,充分混匀,用去离子水淹水至3~5 cm,平衡1周后于2016年5月8日插秧,每盆1株.化肥氮磷钾分别以尿素、磷酸二氢铵、氯化钾施入,其中N 0.24 g·kg⁻¹,P₂O₅ 0.18 g·kg⁻¹,K₂O 0.12 g·kg⁻¹.POM的添加量以其含碳量计,设0.5、1.0和2.5 g·kg⁻¹这3个水平,分别记为C_{0.5}、C_{1.0}和C_{2.5},以不添加POM为对照(记为CK),共4个处理,每处理重复3次,随机排列,水稻生长期间保持淹水3~5 cm,每周随机更换盆栽位置.

2016年8月26日收获,将水稻植株分为根、茎叶和籽粒3部分,用去离子水洗净,根部用0.2% EDTA浸泡2 h后用去离子水洗净,105℃杀青30 min,70℃烘干至恒重、称量.水稻各部分用粉碎机粉碎供植株Cd含量分析用;同时采集土壤样品,一部分用于DOC含量测定,另一部分样品风干,供POM分离及土壤、POM中的有机碳和镉含量测定.

水稻植株Cd含量用HNO₃+HClO₄消解,土壤和POM中Cd含量用HNO₃+HClO₄+HCl消解,有效态Cd含量用1 mol·L⁻¹NH₄OAC浸提(土液比1:10),消解液和浸提液中的Cd含量用原子吸收分光光度计测定(TAS-990).水稻收获后土壤鲜样加去离子水(土水比1:2)于180 r·min⁻¹振荡2 h,离心过滤得上清液,用碳氮分析仪测定DOC含量(multiN/C 2100 TOC).土壤和POM中有机碳含量用重铬酸钾容量法测定,具体方法参考文献^[15].采用空白试验、平行样和标准物质[标准土壤样品GBW07428(GSS-14)、标准植物样品GBW10046(GSB-24)]测定进行质量控制,土壤和植物标准样品Cd的平均含量分别为0.191 mg·kg⁻¹和0.020 mg·kg⁻¹,在其标准值的范围内.

1.3 数据统计与分析

采用Excel 2010进行数据处理,SPSS 21.0进行单因素方差分析、相关分析,Duncan法进行多重比较($P < 0.05$),Sigmaplot 12.5进行数据分析作图.

2 结果与讨论

2.1 POM 添加量对紫色水稻土 SOC、DOC 和 POM-C 含量的影响

由表 1 可知, 土壤 SOC (总有机碳) 和 DOC (可溶性有机碳) 含量均随 POM 用量增大而增加. 与对照相比, $C_{0.5}$ 、 $C_{1.0}$ 和 $C_{2.5}$ 处理 SOC 含量分别提高了 4%、8% 和 19%, 其中 $C_{2.5}$ 处理提高幅度达显著水平 ($P < 0.05$), 这是由于外源有机物料施入可提高土壤 SOC 含量^[16], 添加 POM 向土壤引入新的碳源, 提高了土壤 SOC 含量. 添加 POM 使 DOC 含量显著提高, 但不同 POM 添加量间 DOC 含量差异不显著. 土壤中 DOM 组分含量受外源输入、土壤生物耗损及微生物转化作用的影响, 施入有机物料是增加土壤 DOM 的重要途径^[17]. POM 主要是由动植

物残体、残根、真菌菌丝、孢子和动物粪便等组成^[18], 与其他有机物料类似, 被分解形成小分子有机酸等物质, 使土壤 DOC 含量提高.

与 SOC 和 DOC 不同的是, 与对照相比, 紫色水稻土 POM 含量在 POM 添加量为 $0.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时显著降低, 降低幅度为 25% 和 22%, 在 POM 添加量为 $2.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时显著提高, 提高幅度为 24%, 表明外源 POM 添加量达一定量时才能显著提高土壤 POM 含量. POM 是土壤有机质分解过程中间产物, 施入土壤后, 一方面通过矿化分解为 CO_2 和水, 另一方面通过腐殖化形成更稳定的 POM. 当 POM 添加量较少时, 加入土壤的 POM 激发了土壤中微生物活性, 促进了 POM 的降解, 使土壤 POM 含量降低, 当 POM 添加量达到一定量时, POM 添加量大于分解量, 使土壤中 POM 含量总体提高.

表 1 添加 POM 对土壤 SOC、DOC、POM 含量的影响¹⁾

Table 1 Contents of SOC, DOC, POM, and POM-C in purplepaddy soil as affected by POM addition

处理	SOC / $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	DOC / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	POM / $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	POM-C 含量 / $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	POM-C 总量 / $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	贡献率/%
CK	$8.80 \pm 0.15\text{c}$	$14.43 \pm 1.86\text{b}$	$15.88 \pm 0.21\text{b}$	$159.01 \pm 1.22\text{d}$	$2.53 \pm 0.02\text{b}$	$28.71 \pm 0.53\text{b}$
$C_{0.5}$	$9.13 \pm 0.06\text{bc}$	$40.47 \pm 3.37\text{a}$	$12.68 \pm 0.21\text{c}$	$176.21 \pm 2.16\text{c}$	$2.23 \pm 0.03\text{c}$	$24.48 \pm 0.36\text{c}$
$C_{1.0}$	$9.54 \pm 0.07\text{b}$	$41.97 \pm 4.94\text{a}$	$13.03 \pm 0.16\text{c}$	$197.87 \pm 3.24\text{b}$	$2.58 \pm 0.04\text{b}$	$27.03 \pm 0.26\text{b}$
$C_{2.5}$	$10.51 \pm 0.24\text{a}$	$44.72 \pm 4.00\text{a}$	$19.66 \pm 0.38\text{a}$	$215.65 \pm 2.66\text{a}$	$4.24 \pm 0.05\text{a}$	$40.39 \pm 1.30\text{a}$

1) SOC 为土壤总有机碳量, DOC 为土壤溶解性有机碳含量, POM-C 为 POM 中有机碳含量; 结果表示为平均值 $\pm$ 标准误, 不同小写字母表示不同 POM 添加量处理差异显著 ($P < 0.05$), 下同

土壤 POM-C 含量为 POM 中有机碳含量, POM-C 总量为土壤中 POM 含量与 POM 中有机碳含量的乘积^[19]. 添加 POM 显著提高了土壤 POM-C 含量, 与对照相比, $C_{0.5}$ 、 $C_{1.0}$ 和 $C_{2.5}$ 处理 POM-C 含量分别提高了 11%、24% 和 36%, 表明土壤 POM-C 含量随 POM 添加量的增大而显著增加. 作为有机质分解的中间产物, POM 施入土壤后可通过化学反应或酶促反应进行聚合和缩合形成难分解的大分子, 或与黏土矿物进行非酶促反应形成更为复杂更难分解的有机大分子, 使有机碳在 POM 中累积富集, 从而提高了土壤 POM-C 含量^[20]. 与对照相比, $C_{0.5}$ 处理 POM-C 总量和贡献率分别降低了 13% 和 17%, $C_{1.0}$ 处理 POM-C 总量和对土壤总有机碳的贡献率差异不显著, 而 $C_{2.5}$ 处理则提高了 68% 和 41%, 这与外源 POM 引起的土壤 POM 含量变化有关.

2.2 POM 添加量对土壤 POM-Cd 含量及有效 Cd 含量的影响

土壤 POM-Cd 含量为 POM 中 Cd 含量, POM-Cd 总量为土壤中 POM 含量与 POM 中 Cd 含量的乘

积^[19]. 从表 2 看出, 添加 POM 显著提高了土壤中 POM-Cd 含量 (POM 中 Cd 含量), 与对照相比, $C_{0.5}$ 、 $C_{1.0}$ 和 $C_{2.5}$ 处理 POM-Cd 含量分别提高了 3%、11% 和 21%, 表现出随 POM 添加量增大 POM-Cd 含量提高的趋势. POM 中重金属含量与土壤重金属总量的比值表示重金属在 POM 的富集情况, 若比值大于 1, 表示重金属在 POM 中富集^[21]. POM 对 Cd 的富集系数为 6.75 ~ 8.14, 这与 Balabane 等^[22]报道的 POM 对 Cd 的富集系数为 5 ~ 11 基本一致. 随着 POM 用量增大 POM 对 Cd 的富集系数显著提高. POM-Cd 对土壤总 Cd 的贡献率为 8.85% ~ 16.01%, 低于 Wiatrowska 等^[23]的研究结果 (最大贡献率为 45.30%). $C_{0.5}$ 和 $C_{1.0}$ 处理使 POM-Cd 的总量分别降低 21% 和 9%, $C_{2.5}$ 处理则提高了 49%, POM-Cd 对土壤总 Cd 的贡献率与土壤 POM-Cd 总量变化趋势一致, 同样是由于 $C_{0.5}$ 和 $C_{1.0}$ 处理土壤 POM 含量低于对照, 而 $C_{2.5}$ 处理土壤 POM 含量及 POM-Cd 含量高于对照引起.

为明确 POM 对 Cd 的富集作用机制, 将土壤 POM-Cd 含量和总量与土壤 SOC、POM-C 含量和总

量进行相关分析. 结果表明, 土壤 POM-Cd 含量与土壤 SOC、DOC、POM-C 含量和总量呈显著正相关关系, 土壤 POM-Cd 总量与土壤 SOC、POM-C 含量和总量及 POM-Cd 含量呈显著正相关关系(表 3). 有研究表明, 土壤有机质中含有羧基、羟基、酚羟基等对 Cd 有螯合功能的基团^[24], 固体核磁共振分析表明 POM 中的碳主要有烷基碳、羧基碳、芳香烃碳等^[25], 添加 POM 提高了土壤 SOC 和 POM-C 含量, 促进了 POM 与土壤的 Cd 形成络合物, 提高了

土壤 POM-Cd 含量. POM 施入土壤后分解成具有较大比表面积的有机质, 产生新的金属结合位点, 通过吸附作用富集土壤中 Cd. 此外, POM 水合反应能力强, 可作为土壤溶液的泵, 促进固液中交换, 在改变土壤干湿循环同时使 Cd 在 POM 中沉积, 最终提高了土壤 POM-Cd 总量. 由表 3 中相关系数可知, 土壤 POM-C 含量是影响土壤 POM-Cd 含量的主要因素, 土壤 POM-C 总量是影响土壤 POM-Cd 总量的主要因素.

表 2 添加 POM 对 POM 富集 Cd 的影响¹⁾

Table 2 Enrichment characteristics of Cd in POM as affected by POM addition				
处理	POM-Cd 含量 /mg·kg ⁻¹	富集系数	POM-Cd 总量 /mg·kg ⁻¹	POM-Cd 贡献率 /%
CK	9.52 ± 0.02c	6.75 ± 0.02c	0.15 ± 0.01b	10.72 ± 0.03b
C _{0.5}	9.84 ± 0.12bc	6.98 ± 0.09bc	0.12 ± 0.01c	8.85 ± 0.11c
C _{1.0}	10.60 ± 0.11ab	7.51 ± 0.07ab	0.14 ± 0.01bc	9.79 ± 0.10bc
C _{2.5}	11.48 ± 0.54a	8.14 ± 0.39a	0.23 ± 0.01a	16.01 ± 0.76a

1) POM-Cd 为土壤 POM 中 Cd 含量

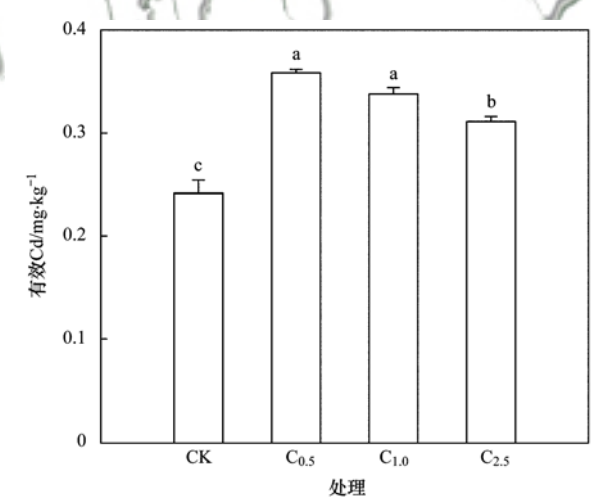
表 3 土壤 POM-Cd 含量与土壤有机碳、POM-C 含量相关性分析¹⁾

Table 3 Correlation between the content of soil available Cd and the content of SOC, DOC, POM-C, and POM-Cd						
项目	DOC	SOC	POM-C 含量	POM-C 总量	POM-Cd 含量	POM-Cd 总量
POM-Cd 含量	0.647 *	0.814 **	0.879 **	0.785 **	—	—
POM-Cd 总量	0.245	0.781 **	0.667 *	0.974 **	0.780 **	—
有效镉	0.847 **	0.281	0.458	-0.088	0.290	-0.213

1) ** 表示在 0.01 水平上显著相关, * 表示在 0.05 水平上显著相关, n = 12

土壤重金属有效量指示土壤中重金属可被水稻吸收利用的程度. 图 1 可看出, 添加 POM 显著提高了土壤有效镉的含量, C_{0.5}、C_{1.0} 和 C_{2.5} 处理土壤有效镉含量较对照分别提高了 48%、40% 和 29%, 表现出随 POM 添加量的提高有效镉含量降低的趋势. 表明添加 POM 可提高土壤中镉的生物可利用性, 但随着 POM 添加量 Cd 的生物可利用性增加程度降低. POM 不稳定易分解, 在分解过程中产生 DOC 可提高土壤 Cd 活性, POM 又可通过其—RCOOH 和—ROH 等基团的外层吸附土壤或溶液中的 Cd^[26], 降低 Cd 的生物可利用性. 由表 1 可知, 添加 POM 显著提高土壤 DOC 含量, 导致土壤有效 Cd 含量升高, 而随 POM 添加量提高有效 Cd 降低与其引起的土壤 POM 数量增多、吸附作用增强有关.

为进一步明确 POM 及其富集的 Cd 对土壤有效 Cd 的影响, 将土壤有效 Cd 含量与 SOC、DOC、POM-C、POM-Cd 含量及总量进行相关分析. 结果表明, 土壤有效 Cd 含量与土壤 SOC、POM-C、POM-Cd 含量及总量无显著关系, 但与 DOC 含量呈



不同小写字母表示土壤有效 Cd 含量在 0.05 水平上差异显著, 下同

图 1 添加 POM 对土壤有效镉含量的影响

Fig. 1 Available Cd contents in soil as affected by POM addition

显著正相关关系(表 3). 这是由于 DOC 中含有羧基、羟基、巯基等多种可与土壤 Cd 发生配位和络合反应的官能团, 使 DOC 成为 Cd 迁移活化的“载体”^[27], 可促进土壤 Cd 的活化. 添加 POM 可提高

土壤 DOC 含量, 活化的 Cd 与 DOC 形成水溶性络合物, 提高了有效镉含量.

2.3 POM 添加量对水稻植株生物量的影响

从图 2 看出, 添加 POM 影响水稻植株生物量. 与对照相比, $C_{0.5}$ 、 $C_{1.0}$ 和 $C_{2.5}$ 处理水稻根生物量分别提高了 34%, 48% 和 49%; 茎叶生物量在 $C_{0.5}$ 和 $C_{1.0}$ 处理时与对照无显著差异, $C_{2.5}$ 处理则提高了

14%; 水稻籽粒生物量在 $C_{0.5}$ 处理变化不显著, $C_{1.0}$ 和 $C_{2.5}$ 处理分别提高了 13% 和 12%. 表明 POM 添加量达到一定量 ($2.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 时可显著提高水稻茎叶和籽粒生物量. POM 与微生物生长、营养供给密切相关, 在土壤碳和养分循环中起重要作用, 添加 POM 可为水稻生长提供营养物质, 促进水稻的生长, 导致水稻生物量增加.

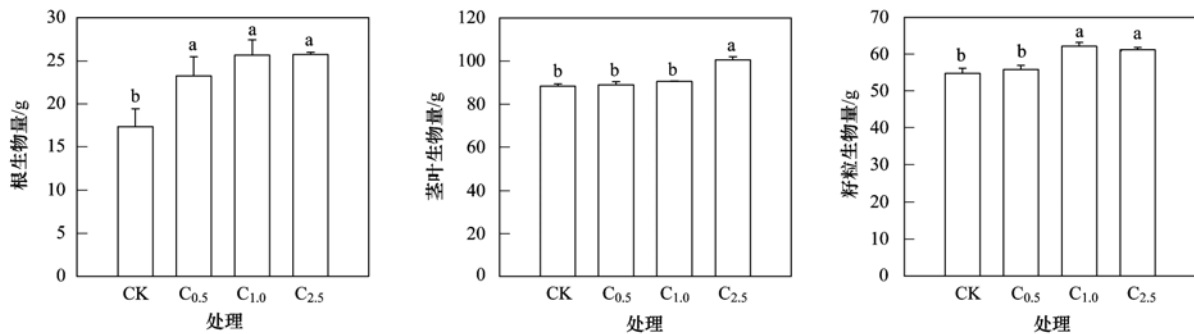


图 2 添加 POM 对水稻各部位生物量的影响

Fig. 2 Dry weight of rice root, straw and grain as affected by POM addition

2.4 POM 添加量对水稻植株各部位 Cd 含量及累积的影响

水稻各部位 Cd 含量表现为根 > 茎叶 > 籽粒, 这与 Cd 在植物代谢旺盛器官含量较高, 营养储存器官含量较低的分布规律一致, 辜娇峰等也得出类似的结果^[28]. 尽管本研究土壤 Cd 的添加量在 $1.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上, 但稻米中的 Cd 含量仍未超过国家规定的稻米中 Cd 含量的限量标准 ($0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, GB 2762-2017)^[29], 冯莲莲等^[30] 在 Cd-Pb 严重污染土壤种植 7 个品种的水稻, 其稻米 Cd 含量也低于国家现有的限量标准. 稻米 Cd 的富集系数 (稻米与土壤的 Cd 含量比值) 在 0.027 ~ 0.050 6 之间, 在张红振等^[31] 报道的稻米 Cd 富集系数范围内 (0.014 ~

1.470). 与对照相比, $C_{0.5}$ 、 $C_{1.0}$ 和 $C_{2.5}$ 处理水稻根的镉含量较对照分别降低 24%、38% 和 42% (图 3), 表明添加 POM 可显著降低水稻根中 Cd 含量, 且随着 POM 用量愈大, 水稻根中 Cd 含量降低幅度愈大; $C_{0.5}$ 和 $C_{1.0}$ 处理使水稻茎叶中 Cd 含量分别提高 28% 和 9%, $C_{2.5}$ 处理水稻茎叶中镉含量差异不显著, 表明水稻茎叶中 Cd 含量的提高幅度随 POM 添加量的增大而降低, 仅在添加量小于 $1.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时才可提高水稻茎叶中镉含量; 水稻籽粒中 Cd 含量 $C_{0.5}$ 和 $C_{1.0}$ 处理分别降低 36% 和 17%, 而 $C_{2.5}$ 处理提高了 39%, 表明 POM 添加量小于或等于 $1.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 可降低水稻籽粒 Cd 含量, $2.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 可提高水稻籽粒 Cd 含量.

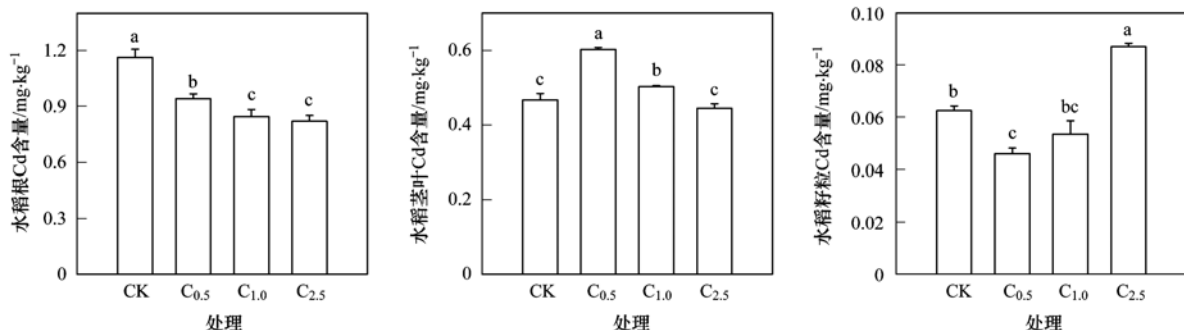


图 3 添加 POM 对水稻各部位 Cd 含量的影响

Fig. 3 Cd concentrations in the roots, straw, and grains of rice shoot as affected by POM contents

从表 4 可知, Cd 在水稻各部位的累积量表现为茎叶 > 根 > 籽粒. 目前关于有机物料对植物 Cd 吸收和累积的影响存在两种不同的结果. 一些研究

认为添加有机物降低了土壤 Cd 的有效量, 从而降低植物对 Cd 的吸收^[32], 而另有研究则发现, 有机质能活化土壤 Cd, 促进植物对 Cd 的吸收^[33]. 与对

照相比, 添加 POM 使水稻 Cd 累积总量显著提高, 提高幅度随 POM 用量的增大而降低, 表明在本研究的用量范围内, POM 可促进水稻对 Cd 的吸收, 但其促进作用随用量的增大而降低. 不同部位 Cd 的累积量随 POM 用量的增大呈不同的变化趋势. 水稻根部 Cd 累积量差异不显著, 水稻茎叶中 Cd 的

累积量在 C_{0.5}、C_{1.0} 和 C_{2.5} 处理时分别提高 30%、10% 和 9%, 也表现出随 POM 添加量增大累积量降低的趋势, 而籽粒 Cd 累积量 C_{0.5} 处理较对照降低 33%, C_{1.0} 处理与对照无显著性差异, 而 C_{2.5} 处理较对照提高了 56%, 这与 C_{2.5} 处理籽粒中 Cd 含量和水稻籽粒部分生物量均高于对照有关.

表 4 添加 POM 对水稻植株各部位 Cd 累积的影响/ $\mu\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$

Table 4 Accumulation of Cd in different parts of rice as affected byPOM addition/ $\mu\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$				
处理	根	茎叶	籽粒	总累积量
CK	20.18 $\pm$ 0.76a	41.19 $\pm$ 1.53c	3.43 $\pm$ 0.10b	64.80 $\pm$ 2.03c
C _{0.5}	21.88 $\pm$ 0.62a	53.61 $\pm$ 0.49a	2.57 $\pm$ 0.12c	78.07 $\pm$ 0.93a
C _{1.0}	21.68 $\pm$ 0.97a	45.50 $\pm$ 0.25b	3.33 $\pm$ 0.32b	70.50 $\pm$ 1.42b
C _{2.5}	21.06 $\pm$ 0.82a	44.70 $\pm$ 1.22b	5.33 $\pm$ 0.08a	71.10 $\pm$ 0.73b

2.5 POM 添加量对水稻植株 Cd 分配及转运的影响

Cd 在水稻根、茎叶、籽粒中累积量分别占水稻植株总量的 28.03% ~ 31.15%、62.86% ~ 68.68% 和 3.29% ~ 3.51% (图 4), 表明水稻累积的 Cd 主要分配在水稻茎叶中, 在水稻籽粒中累积的比例较低, 即 Cd 在水稻中向籽粒转运的量很低. 与对照相比, 添加 POM 对 Cd 在水稻根中的分配影响不显著, 除 POM 添加量为 0.5 g·kg⁻¹ 时 Cd 在水稻茎叶中的分配比例显著提高外, 其余两个处理对 Cd 在水稻茎叶中的分配影响不显著. C_{0.5} 和 C_{1.0} 处理使

Cd 在水稻籽粒中的分配比例降低 60% 和 12%, C_{2.5} 处理使 Cd 在水稻籽粒中的分配提高 42%, 表明 POM 主要影响 Cd 在籽粒中的分配比例. 土壤 Cd 从水稻根系吸收到稻米累积要经过 3 个阶段: 根系吸收 Cd 和木质部的装载、茎节间定向转运分配、叶片中 Cd 通过韧皮部向籽粒进一步转移^[34], 该过程受土壤 Eh、pH、有机质、植物营养成分和品种等多种因素的影响^[35], POM 可能通过改变土壤的性质或植株内营养元素含量、作物生长等多种因素影响 Cd 的转运, 但具体机制有待进一步研究.

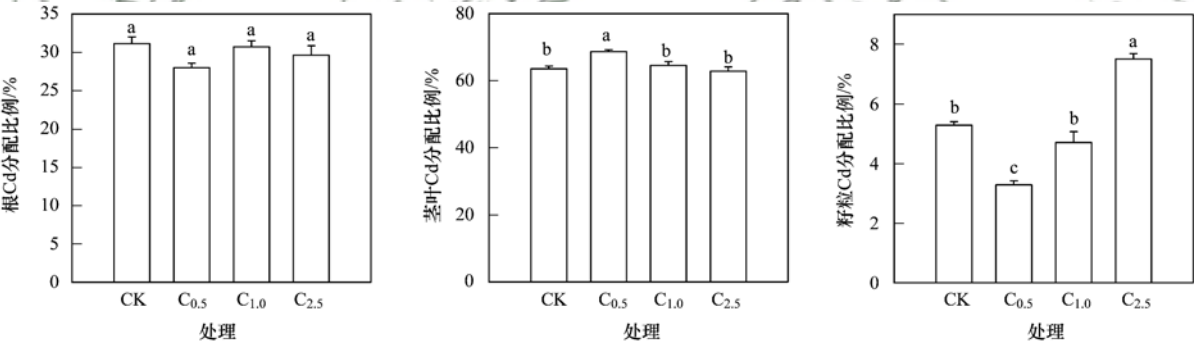


图 4 添加 POM 对水稻各部位 Cd 分配的影响

Fig. 4 Distribution of Cd in different parts of rice as affected by POM addition

转运系数 (TF) 用于评估植物各部位之间对于重金属的转运能力, 其值越大说明该部位对重金属的转运能力越强^[36]. 从表 5 可知, 水稻 Cd 的转运系数为 TF_{茎叶/根} > TF_{籽粒/茎叶}, 说明 Cd 从水稻根系向茎叶的转运能力大于从茎叶向籽粒的转运能力. 添加 POM 显著提高了 TF_{茎叶/根}, 表明 POM 有利于 Cd 从根向茎叶转运. TF_{籽粒/茎叶} 在 C_{0.5} 和 C_{1.0} 处理时分别较对照降低了 76% 和 26%, C_{2.5} 处理提高了 46%, 说明 POM 添加量较少时可抑制 Cd 从水稻茎叶向籽粒转运, 但 POM 添加达到一定量时, 促进 Cd 从茎叶向籽粒转运, 最终提高籽粒中 Cd 含量,

Table 5 Transport coefficient of Cd in rice as affected by POM addition		
处理	TF _{茎叶/根}	TF _{籽粒/茎叶}
CK	0.40 $\pm$ 0.02c	0.13 $\pm$ 0.01b
C _{0.5}	0.64 $\pm$ 0.02a	0.08 $\pm$ 0.01d
C _{1.0}	0.60 $\pm$ 0.03ab	0.11 $\pm$ 0.01c
C _{2.5}	0.55 $\pm$ 0.03b	0.20 $\pm$ 0.01a

1) 迁移系数 TF_{茎叶/根} 为水稻茎叶 Cd 含量与水稻根部 Cd 含量之比; TF_{籽粒/茎叶} 为水稻籽粒 Cd 含量与水稻茎叶 Cd 含量之比

结果与 Cd 在水稻中分配比例的变化一致. 为进一步说明 POM 对水稻吸收 Cd 的影响, 对

水稻各部位 Cd 含量及累积量与土壤 SOC、DOC、POM-C、POM-Cd 和有效 Cd 含量进行相关分析,结果见表 6. 根中 Cd 含量与土壤 SOC、DOC 含量、POM-C、POM-Cd 总量和有效 Cd 含量均呈显著负相关关系,与土壤 POM-C 和 POM-Cd 含量无显著相关性,而根中 Cd 的累积量与其相关性均不显著. 这是因为水稻根部镉含量随 POM 增加而降低,但根部生物量随 POM 增大而提高,产生了稀释效应,两者综合作用使添加 POM 对水稻根部 Cd 累积无显著影响.

茎叶中 Cd 含量与土壤 SOC、DOC、POM-C 和 POM-Cd 含量无显著关系,与土壤 POM-C 和 POM-Cd 总量呈显著负相关关系,但与土壤有效镉含量呈显著正相关关系. 茎叶中 Cd 的累积量与土壤

SOC、DOC、POM-C 及 POM-Cd 含量和总量均无显著关系,与土壤有效 Cd 含量呈显著正相关,表明土壤有效 Cd 含量是影响水稻茎叶 Cd 含量及累积量的主要因素. 如前所述,土壤有效 Cd 含量与 DOC 显著正相关,而水稻茎叶 Cd 累积其与 DOC 含量为正相关,但相关性不显著,这可能与水稻茎叶 Cd 累积受其他多种因素的影响有关.

籽粒中 Cd 含量和累积量与土壤 DOC 和有效 Cd 含量无显著相关关系,但与土壤 SOC 含量、POM-C 和 POM-Cd 含量及总量呈显著正相关. 从相关系数看,籽粒中 Cd 含量及累积 Cd 量均与土壤 POM-Cd 总量的相关系数最高,说明 POM-Cd 总量是影响水稻籽粒 Cd 累积的主要因素.

表 6 水稻 Cd 含量及累积量与土壤 SOC、DOC、POM-C、POM-Cd 含量、总量及有效 Cd 的相关分析

Table 6 Correlation between Cd in rice shoot and soil SOC, DOC, POM-C, POM-Cd, and available Cd

	SOC	DOC	POM-C 含量	POM-C 总量	POM-Cd 含量	POM-Cd 总量	有效 Cd
根 Cd	-0.788 **	-0.911 **	-0.477	-0.870 **	-0.346	-0.703 *	-0.707 *
茎叶 Cd	-0.420	0.240	-0.334	-0.670 *	-0.431	-0.716 **	0.592 *
籽粒 Cd	0.677 *	0.110	-0.545	0.918 **	0.553	0.949 **	-0.380
根累积 Cd	-0.072	0.416	0.154	-0.110	0.096	-0.172	0.432
茎叶累积 Cd	-0.057	0.532	0.005	-0.330	-0.125	-0.409	0.733 **
籽粒累积 Cd	0.765 **	0.249	0.669 *	0.947 **	0.743 **	0.953 **	-0.258

3 结论

(1) 随 POM 用量增大,土壤 SOC、DOC 和 POM-C 含量提高,但土壤 POM 含量及 POM-C 总量及其在土壤 SOC 的比例先降低后提高,在 POM 添加量达到 2.5 g·kg⁻¹时,上述指标均显著提高.

(2)POM 对 Cd 的富集系数为 6.75~8.14. 提高 POM 用量使土壤 POM-Cd 含量及对 Cd 的富集系数提高,但土壤 POM-Cd 总量及其在土壤 Cd 中的比例也在 POM 添加量达 2.5 g·kg⁻¹时才显著提高. 添加 POM 可显著提高土壤镉的生物可利用性,但随 POM 用量增大,Cd 的生物可利用性增加程度降低.

(3)添加 POM 可提高水稻根、茎叶和籽粒生物量,促进水稻对 Cd 的吸收,显著影响 Cd 在籽粒中的分布,当 POM 添加量小于或等于 1.0 g·kg⁻¹时 Cd 在籽粒中的分布降低,而 POM 添加量为 2.5 g·kg⁻¹时 Cd 在籽粒中的分布显著提高.

(4)相关分析表明,有效 Cd 是影响茎叶 Cd 累积的主要因素,土壤 POM-Cd 总量是影响籽粒中 Cd 累积的主要因素.

参考文献:

[1] Lin H M, Fang C X, Li Y Z, *et al.* Cadmium-stress mitigation

through gene expression of rice and silicon addition [J]. *Plant Growth Regulation*, 2017, **81**(1): 91-101.

[2] 王玉军,刘存,周东美,等. 客观地看待我国耕地土壤环境质量的现状——关于《全国土壤污染状况调查公报》中有问题的讨论和建议 [J]. *农业环境科学学报*, 2014, **33**(8): 1465-1473.

Wang Y J, Liu C, Zhou D M, *et al.* A critical view on the status quo of the farmland soil environmental quality in China: discussion and suggestion of relevant issues on report on the national general survey of soil contamination [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, **33**(8): 1465-1473.

[3] 王梦梦,何梦媛,苏德纯. 稻田土壤性质与稻米镉含量的定量关系 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(4): 1918-1925.

Wang M M, He M Y, Su D C. Quantitative relationship between paddy soil properties and cadmium content in rice grains [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(4): 1918-1925.

[4] Filipović L, Romić M, Romić D, *et al.* Organic matter and salinity modify cadmium soil (phyto) availability [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, **147**: 824-831.

[5] 张晶,于玲玲,辛术贞,等. 根茬连续还田对镉污染农田土壤中镉赋存形态和生物有效性的影响 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(2): 685-691.

Zhang J, Yu L L, Xin S Z, *et al.* Phytoavailability and chemical speciation of cadmium in different Cd contaminated soils with crop root return [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(2): 685-691.

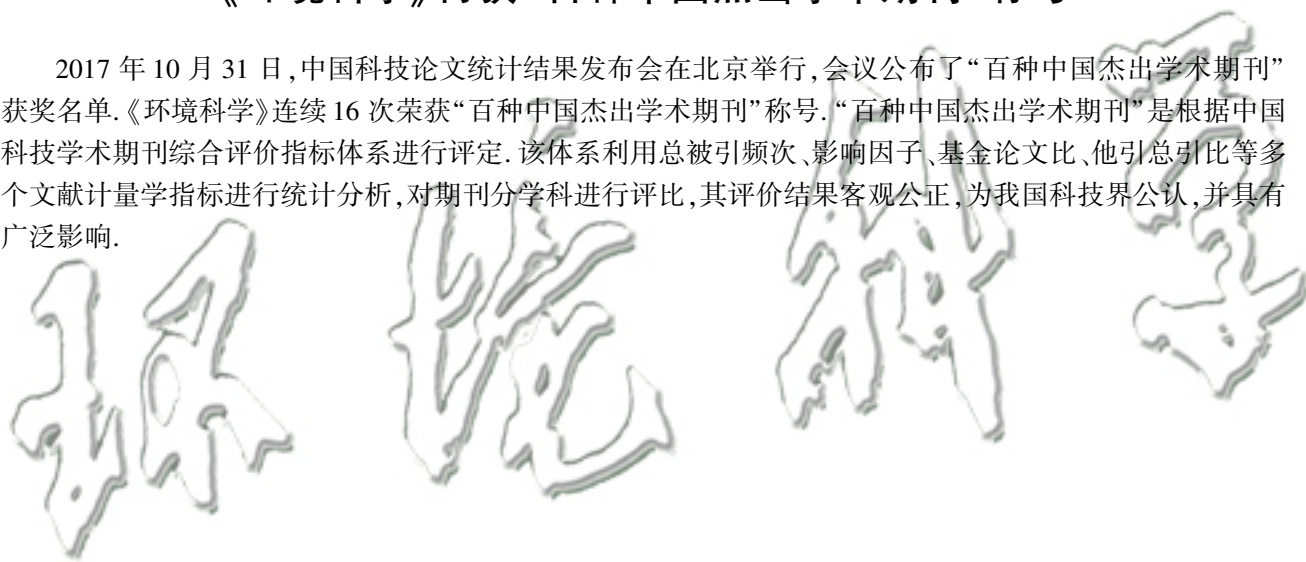
[6] Benbi D K, Boparai A K, Brar K. Decomposition of particulate organic matter is more sensitive to temperature than the mineral associated organic matter [J]. *Soil Biology and Biochemistry*,

- 2014, **70**: 183-192.
- [7] Kantola I B, Masters M D, DeLucia E H. Soil particulate organic matter increases under perennial bioenergy crop agriculture[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, **113**: 184-191.
- [8] Gosling P, Parsons N, Bending G D. What are the primary factors controlling the light fraction and particulate soil organic matter content of agricultural soils? [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2013, **49**(8): 1001-1014.
- [9] Zhou T, Wu L H, Luo Y M, *et al.* Effects of organic matter fraction and compositional changes on distribution of cadmium and zinc in long-term polluted paddy soils[J]. *Environmental Pollution*, 2018, **232**: 514-522.
- [10] Besnard E, Chenu C, Robert M, *et al.* Influence of organic amendments on copper distribution among particle-size and density fractions in Champagne vineyard soils[J]. *Environmental Pollution*, 2001, **112**: 329-337.
- [11] Zhang M K, Ke Z X. Copper and zinc enrichment in different size fractions of organic matter from polluted soils [J]. *Pedosphere*, 2004, **14**(1): 27-36.
- [12] 郑顺安, 王丽平, 章明奎. 非污染土壤中颗粒态有机质对重金属的富集作用[J]. *科技通报*, 2008, **24**(4): 548-552, 558.
- Zheng S A, Wang L P, Zhang M K. Enrichment of heavy metals in particulate organic matter from non-polluted soils[J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2008, **24**(4): 548-552, 558.
- [13] Mohamed I, Ahamadou B, Li M, *et al.* Fractionation of copper and cadmium and their binding with soil organic matter in a contaminated soil amended with organic materials[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2010, **10**(6): 973-982.
- [14] Balabane M, Faivre D, Van Oort F, *et al.* Mutual effects of soil organic matter dynamics and heavy metals fate in a metallophyte grassland [J]. *Environmental Pollution*, 1999, **105**(1): 45-54.
- [15] 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.
- [16] 郝耀旭, 刘继璇, 袁梦轩, 等. 长期定位有机物料还田对关中平原冬小麦-玉米轮作土壤 N_2O 排放的影响[J]. *环境科学*, 2017, **38**(6): 2586-2593.
- Hao Y X, Liu J X, Yuan M X, *et al.* Effects of long-term organic amendments on soil N_2O emissions from winter wheat-maize cropping systems in the Guanzhong plain [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(6): 2586-2593.
- [17] 倪中应, 沈倩, 章明奎. 秸秆还田配施石灰对水田土壤铜、锌、铅、镉活性的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2017, **34**(3): 215-225.
- Ni Z Y, Shen Q, Zhang M K. Effects of crop straw returning with lime on activity of Cu, Zn, Pb and Cd in paddy soil[J]. *Agro-Environment and Development*, 2017, **34**(3): 215-225.
- [18] Xiao W, Feng S Z, Liu Z F, *et al.* Interactions of soil particulate organic matter chemistry and microbial community composition mediating carbon mineralization in karst soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, **107**: 85-93.
- [19] 李秋言, 赵秀兰. 紫色水稻土颗粒有机质对重金属的富集特征[J]. *环境科学*, 2017, **38**(5): 2146-2153.
- Li Q Y, Zhao X L. Enrichment characteristics of heavy metals in particulate organic matter of purple paddy soil [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(5): 2146-2153.
- [20] 吴建国, 徐德应. 土地利用变化对土壤有机碳的影响——理论、方法和实践[M]. 北京: 中国林业出版社, 2004.
- [21] 史琼彬, 赵秀兰, 常同举, 等. 耕作方式对紫色水稻土团聚体中有机质及重金属的分布特征影响[J]. *环境科学*, 2016, **37**(5): 1923-1930.
- Shi Q B, Zhao X L, Chang T J, *et al.* Effects of tillage on distribution of heavy metals and organic matter within purple paddy soil aggregates [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(5): 1923-1930.
- [22] Balabane M, Van Oort F. Metal enrichment of particulate organic matter in arable soils with low metal contamination [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, **34**(10): 1513-1516.
- [23] Wiatrowska K, Komisarek J, Dluzewski P. Metal enrichment of particulate organic matter in soil contaminated by metallurgical fallout in Poland[J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2013, **22**(11): 3424-3432.
- [24] Waqas M, Khan A L, Kang S M, *et al.* Phytohormone-producing fungal endophytes and hardwood-derived biochar interact to ameliorate heavy metal stress in soybeans [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2014, **50**(7): 1155-1167.
- [25] Rabbi S M F, Linser R, Hook J M, *et al.* Characterization of soil organic matter in aggregates and size-density fractions by solid state ^{13}C CPMAS NMR spectroscopy[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2014, **45**(11): 1523-1537.
- [26] Guo X Y, Zhang S Z, Shan X Q, *et al.* Characterization of Pb, Cu, and Cd adsorption on particulate organic matter in soil[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2006, **25**(9): 2366-2373.
- [27] 肖晓, 何小松, 席北斗, 等. 垃圾填埋水溶性有机物组成、演化及络合重金属特征[J]. *环境科学*, 2017, **38**(9): 3705-3712.
- Xiao X, He X S, Xi B D, *et al.* Composition, evolution, and complexation of dissolved organic matter with heavy metals in landfills [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(9): 3705-3712.
- [28] 辜娇峰, 周航, 贾润语, 等. 三元土壤调理剂对田间水稻镉砷累积转运的影响[J]. *环境科学*, 2018, **39**(4): 1910-1917.
- Gu J F, Zhou H, Jia R Y, *et al.* Effects of a tribasic amendment on cadmium and arsenic accumulation and translocation in rice in a field experiment [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(4): 1910-1917.
- [29] GB 2762-2017, 食品安全国家标准食品中污染物限量[S].
- [30] 冯莲莲, 郭京霞, 黄梓琛, 等. 水稻土中7个水稻品种对土壤Cd、Pb的富集与转运: 田间研究[J]. *生态环境学报*, 2017, **26**(12): 2146-2153.
- Feng L L, Guo J X, Huang Z C, *et al.* A field study on the accumulation and translocation of cadmium and lead from a contaminated paddy rice field by seven rice cultivars[J]. *Ecology and Environmental Science*, 2017, **26**(12): 2146-2153.
- [31] 张红振, 骆永明, 章海波, 等. 水稻、小麦籽粒砷、镉、铅富集系数分布特征及规律[J]. *环境科学*, 2010, **31**(2): 488-495.
- Zhang H Z, Luo Y M, Zhang H B, *et al.* Characterizing the plant uptake factor of As, Cd and Pb for rice and wheat cereal [J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(2): 488-495.
- [32] 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 amendments treated on rice heavy metals accumulation and yield effect in Pb and Cd contaminated farmland[J]. Environmental Science, 2018, **39**(7): 3409-3417.
- [33] Khan S, Chao C, Waqas M, *et al.* Sewage sludge biochar influence upon rice (*Oryza sativa* L.) yield, metal bioaccumulation and greenhouse gas emissions from acidic paddy soil[J]. Environmental Science & Technology, 2013, **47**(15): 8624-8632.
- [34] 付铄岚, 王昌全, 李冰, 等. 外源 Cd 在不同品种水稻组织中的细胞分布和化学形态特征研究[J]. 中国生态农业学报, 2017, **25**(6): 903-910.
- Fu S L, Wang C Q, Li B, *et al.* Histocyte distribution and cadmium forms in different rice cultivar seedlings with exogenous cadmium supply[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, **25**(6): 903-910.
- [35] Li H, Luo N, Li Y W, *et al.* Cadmium in rice: transport mechanisms, influencing factors, and minimizing measures[J]. Environmental Pollution, 2017, **224**: 622-630.
- [36] Yang L Q, Huang B, Hu W Y, *et al.* The impact of greenhouse vegetable farming duration and soil types on phytoavailability of heavy metals and their health risk in eastern China [J]. Chemosphere, 2014, **103**: 121-130.

《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

2017年10月31日,中国科技论文统计结果发布会在北京举行,会议公布了“百种中国杰出学术期刊”获奖名单.《环境科学》连续16次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号.“百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定.该体系利用总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标进行统计分析,对期刊分学科进行评比,其评价结果客观公正,为我国科技界公认,并具有广泛影响.



CONTENTS

Emissions Inventory and Characteristics of NO _x from Cement Industry	JIANG Chun-lai, SONG Xiao-hui, ZHONG Yue-zhi, <i>et al.</i> (4841)
Emissions Inventory of Smoldering Chinese Kangs and Their Contribution to PM _{2.5} Pollution in Lanzhou City	GUO Wen-kai, LIU Xiao, ZHU Yu-fan, <i>et al.</i> (4849)
Size Distributions of Water-soluble Components in Ambient Aerosol of Beijing	DU Xiang, ZHAO Pu-sheng, SU Jie, <i>et al.</i> (4858)
Size Distribution Characteristics of Water-Soluble Inorganic Ions During Summer and Autumn in Zhengzhou	ZHAO Qing-yan, JIANG Nan, YAN Qi-she, <i>et al.</i> (4866)
Diurnal Variation of Dicarboxylic Acids and Related SOA in PM _{2.5} from Heze City in Winter	MENG Jing-jing, LIU Xiao-di, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i> (4876)
Chemical Source Profiles of PM Emitted from the Main Processes of the Iron and Steel Industry in China	WEN Jie, YANG Jia-mei, LI Pu, <i>et al.</i> (4885)
VOCs Emission Inventory of Anthropogenic Sources in Jiaxing	HAO Huan, WAN Mei, RONG Yu, <i>et al.</i> (4892)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs in Areas Surrounding a Petrochemical Park in Shanghai	SHENG Tao, CHEN Xiao-jia, GAO Song, <i>et al.</i> (4901)
Characteristics of Bioaerosols Emitted from WWTP with SBR Treatment Process	YANG Kai-xiong, HOU Hong-xun, WANG Ying-zhe, <i>et al.</i> (4909)
Response of Chromophoric Dissolved Organic Matter Composition to Different Hydrological Scenarios in Large Eutrophic Lake Taihu	SHI Yu, ZHOU Yong-qiang, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (4915)
Spatial and Temporal Dynamics of Floating Algal Blooms in Lake Chaohu in 2016 and Their Environmental Drivers	HU Min-qi, ZHANG Yu-chao, MA Rong-hua, <i>et al.</i> (4925)
Dynamic Changes of Nitrogen-Transforming and Phosphorus-Accumulating Bacteria Along with the Formation of Cyanobacterial Blooms	PENG Yu-ke, LU Jun-ling, CHEN Hui-ping, <i>et al.</i> (4938)
Impact of Mainstream Backwater on the Water Environment of the Tributaries of the Three Gorges Reservoir at Low Water Level	CHEN Zi-juan, SONG Xian-fang, ZHANG Ying-hua, <i>et al.</i> (4946)
Effect of Silver Nanoparticles on Denitrification and Functional Gene Abundances of Sediment in Dagu River Estuary and Northwest of Jiaozhou Bay	BAI Jie, TIAN Yan-zhao, SUN Peng-fei, <i>et al.</i> (4956)
Spatial Difference and Causes Analysis of the $\delta^{15}\text{N}$ of Suspended Particulate Matter in the Lancang River Basin	TANG Yong-chun, XU Piao, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (4964)
Vertical Spatial Distribution of Denitrification Intensity in the Vadose Zone of Typical Sections of Chaobai River Alluvial Fan	GENG Hong-zhi, HUAN Huan, LI Ming-xiao, <i>et al.</i> (4972)
Major Ionic Features and Possible Controls in the Groundwater in the Hamatong River Basin	ZHANG Tao, HE Jin, LI Jing-jie, <i>et al.</i> (4981)
Concentration Variations and Flux Estimation of Dissolved Carbon in Karst Spring of a Typical Karst Area	XIONG Bai-lian, ZHANG Jin-zhong, PENG Tao, <i>et al.</i> (4991)
Effect of Different Multi-pond Network Landscape Structures on Nitrogen Retention Over Agricultural Watersheds	LI Yu-feng, LIU Hong-yu, LIU Jun-zhi, <i>et al.</i> (4999)
Characteristics of Phthalic Acid Esters Pollution in Urban Surface Runoff in Shanghai, China	LIU Yu-tong, LI Tian, PENG Hang-yu (5007)
Impacts of Vegetation on Hydrological Performances of Green Roofs Under Different Rainfall Conditions	GE De, ZHANG Shou-hong (5015)
Adsorption of Phosphate from Aqueous Solutions on Sediments Amended with Magnetite-Modified Zeolite	WANG Dan-he, ZHANG Hong-hua, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (5024)
Reduction and Oxidation of Mercury by Dissolved Organic Matter Under Anaerobic Conditions	BIAN Yong-rong, GU Bao-hua, ZHU Bo, <i>et al.</i> (5036)
Photo-assisted Degradation of Sulfamethazine by Ferrocene-catalyzed Heterogeneous Fenton-like System	ZHANG Biao-jun, ZHAO Yao-yun-chuan, FANG Qi, <i>et al.</i> (5043)
N ₂ O Production Pathways in Partial Nitrification Based on Isotope Technology	YANG Yu-bing, YANG Qing, LI Yang, <i>et al.</i> (5051)
Effect of Substrate Ratio on Removal of Nitrogen and Carbon Using Anaerobic Ammonium Oxidation and Denitrification	AN Fang-jiao, HUANG Jian-ming, HUANG Li, <i>et al.</i> (5058)
Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal Characteristics of An Anaerobic/Aerobic Operated SPNDPR System Treating Low C/N Urban Sewage	YU De-shuang, YUAN Meng-fei, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (5065)
Lab-scale SNAD Process in Wastewater Treatment Plant	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i> (5074)
Effect of Salinity on Nitrogen Removal Performance of a Pilot-scale Anaerobic Ammonia Oxidation Process and Its Recovery Kinetics	TANG Jia-jia, YU De-shuang, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (5081)
Suppression and Recovery Characteristics of Pilot-scale ANAMMOX-ASBR System Treating Desulfurization and Denitrification Tailings from Thermal Power Plant	ZHANG Jun, YU De-shuang, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (5090)
Impact of C/N Ratio on Nitrogen Removal Performance and N ₂ O Release of Granular Sludge CANON Reactor	FU Kun-ming, JIANG Shan, SU Xue-ying, <i>et al.</i> (5101)
Impacts of Sludge Characteristics on Anaerobic Digestion with Microwave Pretreatment and Archaeal Community Structure Analysis	FANG Ping, TANG An-ping, FU Xing-min, <i>et al.</i> (5108)
Determination of Heavy Metal Baseline Values and Analysis of Its Accumulation Characteristics in Agricultural Land in Chongqing	WU Fu-lin, CHEN Li, YI Ting-hui, <i>et al.</i> (5116)
Characteristics of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Soil Samples of Hanjiang River Basin, Southeast China	LIU Jia, DING Yang, QI Shi-hua, <i>et al.</i> (5127)
Occurrence and Distribution of the Organophosphate Esters in Soils of Mixed-land Use Area in Chongqing City	YANG Zhi-hao, HE Ming-jing, YANG Ting, <i>et al.</i> (5135)
Degradation of α -HCH in Soil Washing Solutions with nZVI and CaO ₂	YAO Jing-bo, ZHOU Jie, WANG Ming-xin, <i>et al.</i> (5142)
Microbial Communities in Soils of Qingshitang Industrial District in Zhuzhou	SHEN Li, LI Zhen-hua, ZENG Wei-min, <i>et al.</i> (5151)
Effect of Biochar Addition on the Diversity and Interaction of Rhizosphere Fungi in Manure-fertilized Soil	WANG Dan-dan, YANG Ze-ping, ZHAO Yuan, <i>et al.</i> (5163)
Effects of Returning Nitrogen by Biochar Loading on Paddy Growth, Root Morphology, and Nitrogen Use Efficiency	YU Ying-liang, WANG Yue-man, HOU Peng-fu, <i>et al.</i> (5170)
Effect of Particulate Organic Matter on Cadmium Uptake and Transport in Rice	GUO Yi-xuan, ZHAO Xiu-lan (5180)
Effect of Fertilizers on Cadmium Uptake and Accumulation by Sunflowers	CAO Liu, YANG Jun-xing, GUO Jin-jun, <i>et al.</i> (5189)
Accumulation of Heavy Metals in Different Rice Varieties	LIN Xiao-bing, ZHOU Li-jun, WANG Hui-ming, <i>et al.</i> (5198)
Intercropping <i>Arundo donax</i> with Woody Plants to Remediate Heavy Metal-Contaminated Soil	ZENG Peng, GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (5207)
Daily Variation of CO ₂ Flux at Water-Air Interface and Analysis of Its Affecting Factors in a Typical River of the Three Gorges Reservoir	LUO Jia-chen, LI Si-yue (5217)
CH ₄ Emissions Characteristics and Its Influencing Factors in an Eutrophic Lake	SHANG Dong-yao, XIAO Qi-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (5227)
Short-term Effects of Different Grazing Intensities on Greenhouse Gas Fluxes in Semi-arid Grassland	SHEN Yan, SUN Jian-ping, LUO Yu-kun, <i>et al.</i> (5237)
Effects of Plastic Film Mulching Patterns and Irrigation on Yield of Summer Maize and Greenhouse Gas Emissions Intensity of Field	LUO Xiao-qi, ZHANG A-feng, CHEN Hai-xin, <i>et al.</i> (5246)
Effects of Elevated Ozone on Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs) Emission: A Review	FENG Zhao-zhong, YUAN Xiang-yang (5257)
Research Progress on the Sources of Inorganic Nitrogen Pollution in Groundwater and Identification Methods	DU Xin-qiang, FANG Min, YE Xue-yan (5266)
Mechanisms and Influencing Factors of Antibiotic Removal in Sewage Biological Treatment	ZHANG Xiang-yu, LI Ru-ying, JI Min (5276)