

田间施用石灰和有机肥对水稻吸收镉的影响

骆文轩^{1,2}, 宋肖琴³, 陈国安⁴, 徐炜杰^{1,2}, 马嘉伟^{1,2},
廖诗彦^{1,2}, 贾军伟^{1,2}, 叶正钱^{1,2}, 柳丹^{1,2}

(1.浙江农林大学,省部共建亚热带森林培育国家重点实验室,杭州 311300;

2.浙江农林大学,浙江省土壤污染生物修复重点实验室,杭州 311300;

3.义乌市种子和植物检疫站,浙江 义乌 322000; 4.义乌市农技推广服务中心,浙江 义乌 322000)

摘要: 通过大田试验探究不同用量的有机肥与石灰对土壤 pH、有机质和 Cd 有效态含量以及不同生育期水稻各器官中积累 Cd 的动态变化。结果表明:成熟期水稻各器官 Cd 含量规律为根>茎>叶片>稻壳>糙米。石灰的施用能显著提高土壤 pH,在分蘖期时,低用量石灰与高用量石灰处理下土壤 pH 分别提高 1.35,1.84 个单位;有机肥的施用可以增加有机质含量,与对照相比,高用量有机肥处理在分蘖期时有机质含量提高 6.60 g/kg,在成熟期提高 2.72 g/kg。灌浆期是水稻吸收积累 Cd 的重要时期,石灰和有机肥的施用均能降低灌浆期土壤中有有效态 Cd 含量,高用量有机肥与高用量石灰处理下土壤有效态 Cd 含量显著降低,分别降低 52.05%和 46.87%。有机肥和石灰均能显著降低糙米 Cd 含量,降 Cd 效果为高用量有机肥>高用量石灰>低用量有机肥>低用量石灰,高用量有机肥处理的效果最好,糙米 Cd 含量降低 68.20%。

关键词: 镉; 水稻; 钝化剂; 不同生育期; 土壤修复

中图分类号: S511.42; X53

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)03-0232-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.03.035

Effects of Applying Lime and Organic Fertilizer on Cadmium Uptake by Rice

LUO Wenxuan^{1,2}, SONG Xiaoqin³, CHEN Guoan⁴, XU Weijie^{1,2},

MA Jiawei^{1,2}, LIAO Shiyan^{1,2}, JIA Junwei^{1,2}, YE Zhengqian^{1,2}, LIU Dan^{1,2}

(1.State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang A&F University,

Hangzhou 311300; 2.Zhejiang Key Laboratory of Soil Contamination Bioremediation,

Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300; 3.Seed and Plant Quarantine Station of Yiwu City, Yiwu,

Zhejiang 322000; 4.Agricultural Technology Extension Service Center of Yiwu City, Yiwu, Zhejiang 322000)

Abstract: Field experiment was conducted to investigate the dynamic changes of soil pH, organic matter and cadmium (Cd) content in soil and Cd accumulation in rice organs at different growth stages under applying different amounts of organic fertilizer and lime. The results showed that Cd content in different organs of rice at the maturity stage followed the order of root>stem>leaf>husk>brown rice. The application of lime could increase the soil pH. At the tillering stage, the soil pH significantly increased by 1.35 and 1.84 units under the treatment of low amount lime and high amount lime, respectively. The application of organic fertilizer could increase the organic matter content. Compared with the control, the content of organic matter increased by 6.60 g/kg at tillering stage and 2.72 g/kg at maturity stage in the treatment of high amount of organic fertilizer. The filling stage was an important period for the absorption and accumulation of Cd in rice. The application of lime and organic fertilizer could reduce the available Cd content in the soil during the filling stage. Compared with the control group, the content of available Cd in soil treated with high amount organic fertilizer and lime significantly decreased by 52.05% and 46.87%, respectively. Both organic fertilizer and lime could significantly reduce the Cd content of brown rice, and the effect of reducing Cd followed the order of high amount of organic fertilizer> high amount of lime> low amount of organic fertilizer> low amount of lime, the effect of high amount organic fertilizer treatment was the best, Cd content of brown rice decreased by 68.20%.

Keywords: cadmium; rice; passivator; different growth stages; soil remediation

收稿日期: 2019-10-29

资助项目: 国家自然科学基金项目(31670617); 浙江省科技厅重点研发项目(2015C03020-2)

第一作者: 骆文轩(1995—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事农田土壤重金属污染修复研究。E-mail: 308486526@qq.com

通信作者: 柳丹(1978—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事重金属污染修复研究。E-mail: liudan7812@aliyun.com

Cd 是主要的重金属污染元素之一,其在土壤中积累过多会引起土壤功能失调,造成土壤质量下降^[1]。此外,Cd 具有较强的积累性、可迁移性和生物可利用性,能通过食物链进入人体内,对生态环境和人体健康构成严重威胁^[2]。水稻(*Oryzasativa*)是我国种植面积最大的粮食作物,年产量 2.1 亿 t,约占粮食总产量的 40%。但近年来由于交通运输、工业生产以及农药化肥的施用,大量的重金属污染物进入土壤,每年受污染粮食多达 1.2×10^7 t,水稻安全生产面临巨大的挑战^[3-4]。因此,在农业实际生产中降低稻米中 Cd 含量,对于保障粮食安全具有重要意义。

目前,土壤重金属污染修复技术主要有物理、化学和生物修复技术。在农田土壤重金属污染修复中,原位钝化修复法因其具有修复效果好、成本低、操作简便等优点而被广泛应用^[5],而有机肥和石灰是最为常用的 2 种钝化剂。目前在有关有机肥修复 Cd 污染土壤的研究中,存在一定争议。如有研究^[6]发现,有机肥的施用可能会带入 DOM(可溶性有机质),使土壤中的 Cd 活化,增加植物对 Cd 的吸收。但也有研究^[7-8]表明,有机肥不仅可以改善土壤肥力,促进作物生长,还可以改变土壤中 Cd 的形态,使交换态 Cd 含量降低。江巧君等^[9]通过盆栽试验发现,有机肥的施用能降低水稻根部和糙米中 Cd 含量。此外,施用石灰可提高土壤 pH,减少土壤中的重金属元素向植物体内转运^[10]。朱奇宏等^[11]发现,施用石灰可降低土壤中 Cd 的生物有效性,并且随着施用量的增加,效果也会增强。有研究^[12]表明,土壤 pH 和 Cd 含量对稻米中 Cd 的积累具有重要影响。但王凯荣等^[13]曾报道,使用石灰等土壤改良剂修复 Cd 污染水稻土时,在田间环境下的试验效果并没有盆栽试验条件下的效果好。因此,在田间条件下进行试验对于钝化剂的实际应用研究必不可少。

本文通过大田试验探究施用不同用量的有机肥与石灰后,土壤中 Cd 的有效态含量变化,以及 Cd 在水稻不同生育期各器官中积累的动态变化,为实现水稻的安全生产提供理论依据和数据支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区域与供试材料

试验地点位于浙江省金华市某农田,地属亚热带季风气候,四季分明、雨量充沛,其土壤基本理化性质见表 1。种植水稻品种为“甬优 1540”,属感温籼型三系杂交稻。供试材料为熟石灰和以牛粪为主要原料的商品有机肥,熟石灰 pH 为 12.68,全 Cd 含量为 0.20 mg/kg,商品有机肥中有机质含量为 353 g/kg,全氮含量为 19.84 g/kg,全磷含量为 15.53 g/kg,全钾含量为 12.96 g/kg,全镉含量为 0.45 mg/kg。供试土壤 pH 为 5.44,有

机质含量为 17.00 g/kg,有效磷含量为 18.33 mg/kg,碱解氮含量为 168.00 mg/kg,速效钾含量为 87.39 mg/kg,全镉含量为 0.58 mg/kg。

1.2 试验设计

田间试验采用随机区组排列设计,每个小区面积为 90 m²,将试验田翻耕整平,筑埂覆膜,划分小区后添加钝化剂,再次翻耕。水稻采用育秧种植,秧苗于 2018 年 7 月 22 日移栽,11 月 10 日收割。田间设置 5 个处理,分别为:(1)CK:不添加钝化剂;(2)LL:添加低用量石灰 1 500 kg/hm²;(3)LM:添加低用量有机肥 11 500 kg/hm²;(4)HL:添加高用量石灰 2 500 kg/hm²;(5)HM:添加高用量有机肥 22 500 kg/hm²。每个处理重复 3 次,施肥、除虫、除草等田间管理与当地一致。

1.3 样品采集与测定

分别在水稻的分蘖期、抽穗期、灌浆期与成熟期采集 0—20 cm 土壤样品与整株水稻样品。土壤样品经风干磨细后,过 10 目筛与 100 目筛,备用。水稻样品经清洗,105 ℃杀青 30 min,75 ℃烘干至恒重。分蘖期采集的水稻样品分为根、茎、叶片 3 个部分,抽穗期采集的水稻样品分为根、茎、叶片、穗 4 个部分,灌浆期采集的水稻样品分为根、茎、叶片、籽粒 4 个部分,成熟期采集的水稻样品分为根、茎、叶、糙米、稻壳 5 个部分,每个部分用不锈钢磨样机粉碎。

土壤 pH 用电极法测定(土水比为 1:2.5),土壤有机质含量使用重铬酸钾稀释热法测定。土壤重金属有效态用 0.1 mol/L 的 HCl 溶液提取^[14],植物各器官 Cd 含量采用 HNO₃—H₂O₂消解,土壤 Cd 全量采用 HNO₃—HCl—HClO₄进行消解,并用标准物质进行质量控制,用原子吸收光谱仪石墨炉法测定^[15]。

1.4 数据处理

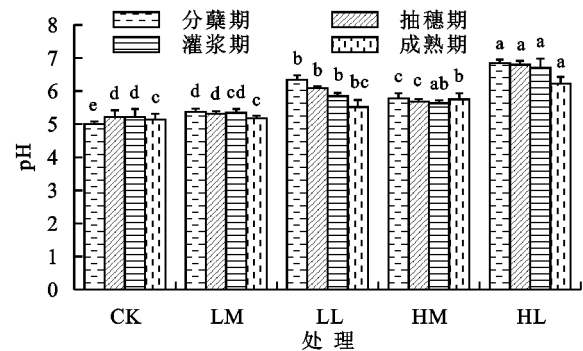
应用 Microsoft Excel 2013 和 SPSS 21.0 软件进行差异显著性比较和统计分析,检验不同处理之间的差异程度,使用 Origin 9.0 软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 石灰和有机肥对土壤 pH 和有机质的影响

2.1.1 石灰和有机肥对土壤 pH 的影响 由图 1 可知,CK 处理下,整个水稻生育期内,pH 无较大变化。施用石灰与有机肥均可提高土壤 pH,这也是钝化剂可以降低土壤中重金属生物有效性的一个重要原因。由于石灰为碱性材料,因此对土壤 pH 的影响较大,在分蘖期时,相比对照,LL 与 HL 处理下土壤 pH 显著提高,分别提高 1.35,1.84 个单位($p < 0.05$);而有机肥对 pH 的影响相对较小,LM 与 HM 分别比对照显著提高,分别提高 0.37,0.77 个单位。在抽穗期时,除 CK 的 pH 升高以外,其他处理的 pH 均呈下降趋势,尤其是添加低

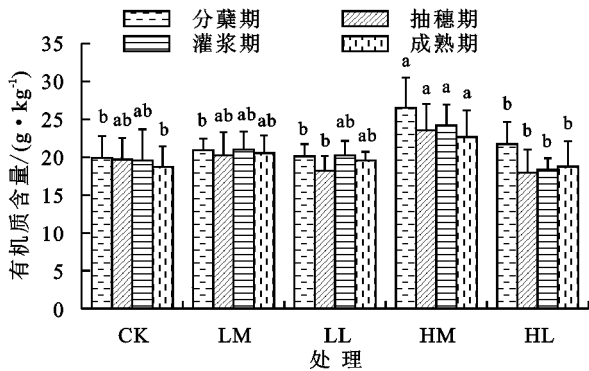
用量石灰的处理,与分蘖期时相比,LL 下降0.27个单位。在灌浆期,HL 处理的 pH 依然较高,比 CK 高出 1.47 个单位。在成熟期,各处理 pH 大小关系为:HL>HM>LL>LM>CK。HL 和 HM 处理对 pH 影响最大,分别比对照高出 1.09,0.62 个单位,存在显著差异($p<0.05$); HL 与 LL 处理相比具有显著差异,HL 高出 0.71 个单位($p<0.05$),说明随着用量的增加石灰对土壤 pH 的提升效果变好。



注:图中不同英文字母表示不同处理间同一时期 pH 的差异达显著水平($P<0.05$)。

图 1 石灰和有机肥对土壤 pH 的影响

2.1.2 石灰和有机肥对土壤有机质含量的影响 由图 2 可知,由于有机肥中含有大量的有机质,高用量有机肥处理显著提高了土壤中的有机质含量,HM 处理的有机质含量在整个水稻生育期内呈先降低,再升高,再降低的趋势,可能是由于有机肥料的缓释效果。HM 处理与 CK 具有显著差异,在分蘖期时有机质含量高出 6.6 g/kg,在成熟期高出 2.72 g/kg。其他处理有机质与 CK 相比无显著差异,LM 处理对有机质含量提升较少,在成熟期比 CK 高出 0.61 g/kg。在抽穗期时,由于石灰为碱性材料,LL 与 HL 处理下有机质含量少于 CK。



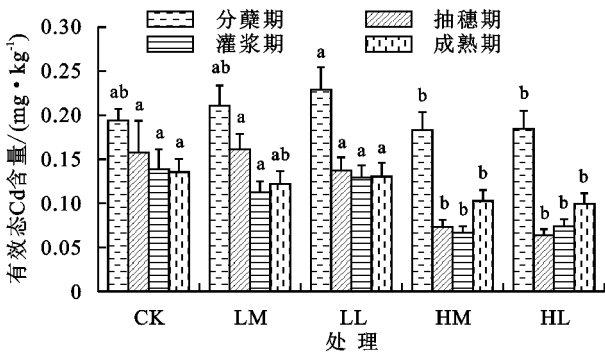
注:图中不同英文字母表示不同处理间同一时期有机质含量的差异显著性水平($P<0.05$)。

图 2 石灰和有机肥对土壤有机质含量的影响

2.2 石灰和有机肥对土壤 Cd 有效态含量的影响

从图 3 可以看出,随着水稻生长 CK 处理有效态含量呈降低趋势,而添加了石灰和有机肥的处理均呈先下降后上升的趋势。LM 与 LL 处理分蘖期 Cd 有

效态含量高于 CK, HM 与 HL 处理分蘖期 Cd 有效态含量则低于 CK。抽穗期时,施用有机肥和石灰的处理均比 CK 要低,并且 HM 与 HL 处理与 CK 有显著差异($p<0.05$)。在灌浆期和成熟期时,LM 与 LL 处理与 CK 相比并无显著差异,而 HM 与 HL 处理中有效态 Cd 含量相比 CK 显著降低($p<0.05$),在灌浆期时分别降低 52.05%和 46.87%。在成熟期时,各处理中土壤有效态 Cd 含量大小关系为:CK>LL>LM>HM>HL, HM 处理相比 CK 有效态含量显著减少,减少 24.13% ($p<0.05$),比 LM 处理减少 15.74%; HL 处理与 CK 和 LL 处理之间具有显著差异,相比 CK 减少 26.54%,比 LL 处理减少 23.63% ($p<0.05$)。



注:图中不同英文字母表示不同处理间同一时期有效态 Cd 含量的差异显著性水平($P<0.05$)。

图 3 石灰和有机肥对土壤有效态 Cd 含量的影响

2.3 石灰和有机肥对水稻中 Cd 含量的影响

2.3.1 石灰和有机肥对水稻营养器官 Cd 含量的影响 由图 4 可知,水稻分蘖期时各处理中 Cd 含量最高的器官均为根部,最低的器官为叶片。在叶片中, LM 与 LL 处理 Cd 含量相比对照均显著升高,分别升高 62.36%和 51.52%,而 HL 处理相比对照显著降低 53.32% ($p<0.05$)。

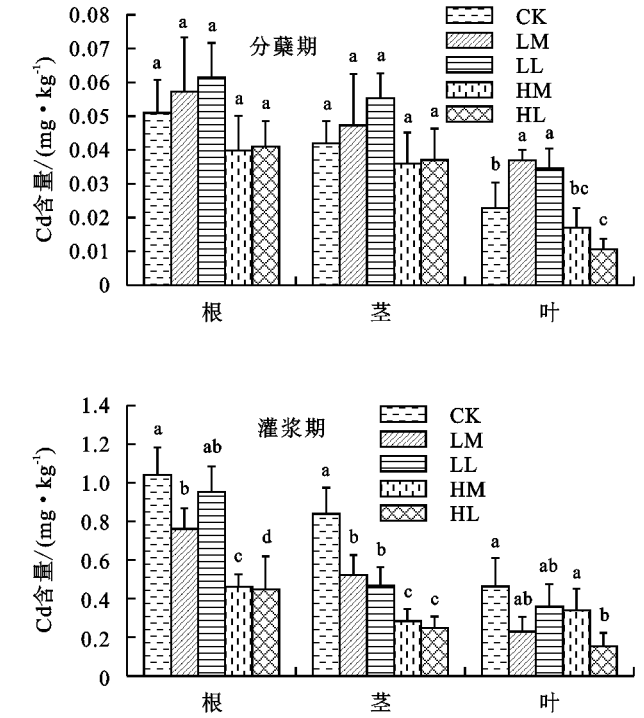
水稻抽穗期时,添加有机肥和石灰均减少了水稻各个部位的 Cd 含量,在根与茎中 Cd 含量最少的是施用高用量有机肥的处理,相比对照分别降低 34.98%和 51.62%。而在叶片中, Cd 含量最少的处理为 HL,相比对照降低 53.09%,但根、茎、叶中的 Cd 含量均无显著差异($p>0.05$)。

在灌浆期时,水稻各器官中 Cd 含量从多到少依次为:根>茎>叶片。各处理根部 Cd 含量大小关系为:CK>LL>LM>HM>HL。添加石灰和添加有机肥均能减少 Cd 在水稻根、茎、叶中的积累。LM、HM、HL 处理下水稻根中的 Cd 含量相比对照显著降低($p<0.05$),其中以添加高用量石灰处理的效果最好,根部 Cd 含量比 CK 降低 56.90%。而在茎中各处理与对照相比均有显著差异,而且高用量的处理与低用量的处理之间也存在显著差异, HM 比 CK 降低 66.16%,比 LM 降低 45.59%, HL 比 CK 降低 70.45%,比 LL 降低

46.78% ($p<0.05$)。在叶片中,HL 处理与 CK 之间具有显著差异,降低 66.79%。

在水稻成熟期时,在水稻根部与茎中各处理 Cd 含量大小顺序为 CK>LM>LL>HM>HL,与对照相比,添加高用量石灰与有机肥的处理中根部 Cd

含量均有显著降低 ($p<0.05$),分别降低 49.23% 和 44.62%。在茎中,LL、HM 与 HL 处理和 CK 相比均显著降低,Cd 含量分别减少 39.38%,68.13%,56.25%。在水稻叶中 HM 处理 Cd 含量相比对照显著降低,降低 66.67% ($p<0.05$)。



注:图中不同英文字母表示不同处理间同一时期同一器官 Cd 含量的差异显著性水平 ($P<0.05$)。

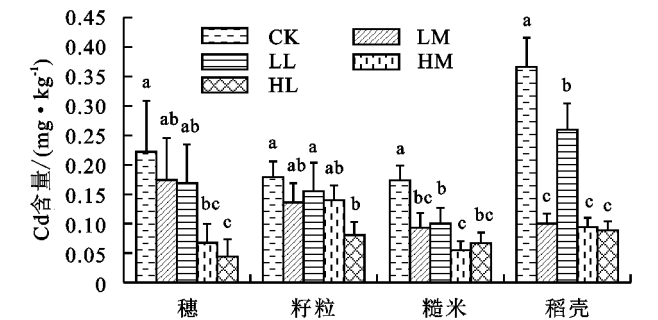
图 4 石灰和有机肥对水稻不同生育期各器官 Cd 含量的影响

2.3.2 石灰和有机肥对水稻籽粒 Cd 含量的影响

由图 5 可知,抽穗期时,各处理间穗的 Cd 含量大小关系为:CK>LM>LL>HM>HL。与对照相比,在高用量有机肥和高用量石灰的处理中穗的 Cd 含量显著降低 ($p<0.05$),分别降低 69.37% 和 80.18%。在灌浆期,各处理间籽粒的 Cd 含量大小关系为:CK>LL>HM>LM>HL,添加高用量石灰的处理籽粒中的 Cd 含量比对照降低 55.30%,存在显著差异 ($p<0.05$)。在成熟期,高用量的有机肥和石灰处理中稻米 Cd 含量与 CK 相比存在显著差异,分别降低 68.20% 和 61.27%,低用量的有机肥和石灰处理中稻米 Cd 含量分别降低 46.24% 和 42.20%,存在显著差异 ($p<0.05$)。高用量有机肥与高用石灰的处理均能显著降低水稻根、茎、糙米以及稻壳中的 Cd 含量,且高用量有机肥的效果比石灰更好,但高用量有机肥处理下水稻稻壳中的 Cd 含量高于高用量石灰的处理。

总体来看,水稻在 4 个生育期内各部位中 Cd 含量呈现出的总体规律为:根>茎>叶片>稻壳>糙米。在 4 个生育期内水稻各器官 Cd 积累量的变幅较大,尤其以根部最为明显,变化范围为 0.040~2.167 mg/kg;水稻茎中 Cd 含量变化范围为 0.036~1.600

mg/kg;水稻叶片中 Cd 含量的变化范围为 0.011~0.750 mg/kg。在分蘖期,有机肥的施用降低了 Cd 在水稻根部的积累量。而在灌浆期与成熟期,高用量的有机肥、石灰施用能显著减少根部对 Cd 的吸收。试验结果表明,添加高用量的处理比低用量的处理可以更好地降低 Cd 在水稻中的积累,添加有机肥的处理比添加石灰的效果更好。



注:图中不同英文字母表示不同处理间同一时期同水稻籽粒 Cd 含量的差异显著性 ($P<0.05$)。

图 5 石灰和有机肥对水稻籽粒 Cd 含量的影响

3 讨论

土壤中的 Cd 以多种形态存在,其中有效态的含量对植物吸收转运 Cd 具有重要影响^[16]。试验结果表明,添加有机肥和石灰都能减少稻米中 Cd 的积

累,并且效果随着用量增加而变好。在灌浆期时, HM 与 HL 处理中有效态 Cd 含量相比 CK 分别降低 52.05% 和 46.87%,这是造成高用量有机肥和石灰对糙米降 Cd 效果较好的一个重要原因。土壤 pH 和有机质都会影响重金属的有效态含量。土壤 pH 可以控制土壤中重金属的吸附—解吸和沉淀—溶解平衡等化学过程,对 Cd 的生物有效性和可迁移性具有重要影响^[17],本试验区域土壤呈酸性,因此石灰的施用可以使 pH 提高,土壤表面电荷对 Cd^{2+} 的吸附量增加,降低了 Cd 的可迁移性^[18]。此外,石灰还可以使土壤中的 Fe、Mn 等离子形成羟基化合物,提供更多的重金属吸附点位^[19],从而使 Cd 的有效态含量降低。另一方面,石灰中的大量 Ca^{2+} 会和 Cd^{2+} 在水稻根表面竞争吸收,使水稻根系吸收的 Cd^{2+} 减少^[18]。高用量石灰处理对降低糙米中 Cd 含量的效果比低用量石灰好,在低用量石灰处理中,分蘖期水稻根系中 Cd 含量反而高于 CK,这可能使 Cd 进入食物链的风险增大^[20]。

试验结果同时显示,高用量的有机肥对于降低糙米中 Cd 含量的效果最好,原因可能是有机肥降低了土壤中活性较高的交换态 Cd 含量,使其转换为活性较低的有机结合态 Cd^{2+} 。有机肥料中含有大量的有机质,而有机质具有很大的比表面积以及大量的官能团,比如羧基和酚羟基可以有效吸附土壤中的 Cd、Zn 等重金属元素^[22];并且有机质中的部分腐殖质可分解成腐殖酸,与土壤中的重金属发生螯合或络合反应,使 Cd 的有效性降低^[21]。另一方面,有机肥的施用会导致铵离子的产生,使前期土壤 pH 的升高,从而影响了 Cd 的活性^[23]。施用有机肥后的处理,水稻地上部各器官 Cd 含量均比对照低,说明有机肥可能会直接或间接影响韧皮部对 Cd 的运输,而使水稻糙米中 Cd 含量降低^[9]。

各处理中土壤 Cd 有效态含量在分蘖期时与对照相比并无显著降低,但在抽穗期和灌浆期具有显著性差异,在水稻分蘖期与抽穗期时,各处理中根部的 Cd 含量并未有显著差异,但在灌浆期,各处理中根部对 Cd 的吸收出现显著性差异,说明灌浆期是水稻吸收积累 Cd 的重要时期^[24]。本试验研究结果表明,无论是否施用石灰或有机肥,水稻各器官的 Cd 含量总体规律为根>茎>叶>稻壳>糙米,并且随着水稻的生长,各器官的 Cd 含量逐渐增加,说明土壤中的 Cd 被根部吸收之后,经木质部向地上部运输,在水稻营养生长期 Cd 会储存在茎叶中,在抽穗期之后再转移至籽粒中^[25]。

4 结论

(1)石灰和有机肥都可以降低土壤中有效态 Cd

含量,但它们的影响机制不同,石灰主要通过改变土壤 pH,有机肥主要增加了土壤中有机质含量。

(2)随着水稻的生长,水稻各器官中 Cd 含量逐渐增加,灌浆期是水稻籽粒吸收积累 Cd 的重要时期。根部是水稻富集 Cd 最多的器官,并且在 Cd 向上转运的过程中,茎和叶片会起到一定的拦截作用。

(3)在田间试验条件下石灰和有机肥均能显著降低水稻糙米中的 Cd 含量,降 Cd 效果顺序为:高用量有机肥>高用量石灰>低用量有机肥>低用量石灰,高用量有机肥处理的效果最好,稻米 Cd 含量降低 68.20%。

参考文献:

- [1] Li S, Islam E, Peng D L, et al. Accumulation and localization of cadmium in moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*) grown hydroponically [J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2015, 37(3): 1-7.
- [2] Li S, Chen J R, Islam E, et al. Cadmium-induced oxidative stress, response of antioxidants and detection of intracellular cadmium in organs of moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*) seedlings [J]. Chemosphere, 2016, 153: 107-114.
- [3] 徐建明, 孟俊, 刘杏梅, 等. 我国农田土壤重金属污染防治与粮食安全保障 [J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(2): 153-159.
- [4] Yan W B, Mahmood Q, Peng D L, et al. The spatial distribution pattern of heavy metals and risk assessment of moso bamboo forest soil around lead-zinc mine in Southeastern China [J]. Soil and Tillage Research, 2015, 153: 120-130.
- [5] Wang R Y, Shafi M, Ma J W, et al. Effect of amendments on contaminated soil of multiple heavy metals and accumulation of heavy metals in plants [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25: 28695-28704.
- [6] Wu L H, Tan C Y, Liu L, et al. Cadmium bioavailability in surface soils receiving long-term applications of inorganic fertilizers and pig manure [J]. Geoderma, 2012, 173/174(2): 224-230.
- [7] 谢运河, 纪雄辉, 吴家梅. 不同有机肥对土壤镉锌生物有效性的影响 [J]. 应用生态学报, 2015, 26(3): 826-832.
- [8] 张亚丽, 沈其荣, 姜洋. 有机肥料对镉污染土壤的改良效应 [J]. 土壤学报, 2001, 38(2): 212-218.
- [9] 江巧君, 周琴, 韩亮亮, 等. 有机肥对镉胁迫下不同基因型水稻镉吸收和分配的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(1): 9-14.
- [10] 张振兴, 纪雄辉, 谢运河, 等. 水稻不同生育期施用生石灰对稻米镉含量的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(10): 1867-1872.
- [11] 朱奇宏, 黄道友, 刘国胜, 等. 石灰和海泡石对镉污染土

壤的修复效应与机理研究[J].水土保持学报,2009,23(1):111-116.

[12] 王美娥,彭驰,陈卫平.水稻品种及典型土壤改良措施对稻米吸收镉的影响[J].环境科学,2015,36(11):4283-4290.

[13] 王凯荣,张玉烛,胡荣桂.不同土壤改良剂对降低重金属污染土壤上水稻糙米铅镉含量的作用[J].农业环境科学学报,2007,26(2):476-481.

[14] 甘国娟,刘妍,朱晓龙,等.3 种提取剂对不同类型土壤重金属的提取效果[J].中国农学通报,2013,29(2):148-153.

[15] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2005.

[16] Chen Z, Tang Y T, Yao A J, et al. Mitigation of Cd accumulation in paddy rice (*Oryza sativa* L.) by Fe fertilization[J]. Environmental Pollution, 2017, 231: 549-559.

[17] 陈杰华,王玉军,王汉卫,等.基于 TCLP 法研究纳米羟基磷灰石对污染土壤重金属的固定[J].农业环境科学学报,2009,28(4):645-648.

[18] 罗远恒,顾雪元,吴永贵,等.钝化剂对农田土壤镉污染的原位钝化修复效应研究[J].农业环境科学学报,2014,33(5):890-897.

[19] Gray C W, McLaren R G, Roberts A H C, et al. Sorption and desorption of cadmium from some New Zealand soils: Effect of pH and contact time[J].Australian Journal of Soil Research,1998,36(2):199-216.

[20] Yang Y J, Chen J M, Huang Q N, et al. Can liming reduce cadmium (Cd) accumulation in rice (*Oryza sativa*) in slightly acidic soils? A contradictory dynamic equilibrium between Cd uptake capacity of roots and Cd immobilisation in soils[J].Chemosphere,2018,193:547-556.

[21] 张丽娜,宗良纲,沈振国.有机肥和生态肥对土壤中镉行为以及水稻生长的影响[J].土壤通报,2007,38(6):1182-1186.

[22] 吴曼,徐明岗,徐绍辉,等.有机质对红壤和黑土中外源铅镉稳定化过程的影响[J].农业环境科学学报,2011,30(3):461-467.

[23] 李平,王兴祥,朗漫,等.改良剂对 Cu、Cd 污染土壤重金属形态转化的影响[J].中国环境科学,2012,32(7):1241-1249.

[24] 李冰,王昌全,李枝,等.Cd 胁迫下杂交水稻对 Cd 的吸收及其动态变化[J].生态环境学报,2014,23(2):312-316.

[25] 居学海,张长波,宋正国,等.水稻籽粒发育过程中各器官镉积累量的变化及其与基因型和土壤镉水平的关系[J].植物生理学报,2014,50(5):634-640.

(上接第 231 页)

[14] Chen J, Zheng M J, Pang D W, et al. Straw return and appropriate tillage method improve grain yield and nitrogen efficiency of winter wheat[J].Journal of Integrative Agriculture,2017,16(8):1708-1719.

[15] 张姗,杨四军,顾克军,等.施氮和秸秆还田对晚播小麦养分平衡和产量的影响[J].应用生态学报,2015,26(9):2714-2720.

[16] 周建斌.作物营养从有机肥到化肥的变化与反思[J].植物营养与肥料学报,2017,23(6):1686-1693.

[17] 谭德水,金继运,黄绍文,等.长期施钾及小麦秸秆还田对北方典型土壤固钾能力的影响[J].中国农业科学,2010,43(10):2072-2079.

[18] Yan B, Hou Y. Effect of soil magnesium on plants: A review[J].IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,2018,170(2):e022168.

[19] Sharma U, Paliyal S S, Sharma S P, et al. Effects of continuous use of chemical fertilizers and manure on soil fertility and productivity of maize-wheat under rainfed conditions of the Western Himalayas[J].Communications in Soil Science and Plant Analysis,2014,45(20):2647-2659.

[20] 丁玉川,焦晓燕,聂督,等.山西省主要类型土壤镁素供应状况及镁肥施用效果[J].水土保持学报,2011,25(6):139-143.

[21] 王飞,王建国,李林,等.施钙与覆膜栽培对缺钙红壤花生 Mg、Fe、Zn 吸收,积累及分配的影响[J].核农学报,2019,33(11):2261-2270.

[22] 王亮,李双异,汪景宽,等.长期施肥与地膜覆盖对棕壤交换性钙、镁的影响[J].植物营养与肥料学报,2013,19(5):1200-1206.

[23] Geng Y H, Cao G J, Wang L C, et al. Effects of equal chemical fertilizer substitutions with organic manure on yield, dry matter, and nitrogen uptake of spring maize and soil nitrogen distribution[J].PLoS One, 2019,14(7):e0219512.

[24] 李朝苏,谢瑞芝,黄钢,等.稻麦轮作区保护性耕作条件下氮肥对水稻生长发育和产量的调控效应[J].植物营养与肥料学报,2010,16(3):528-535.