

# 菜籽饼堆肥对水稻土壤 Cd 有效性及 Cd 在水稻全生育期转运与累积的影响

杨文弢<sup>1,2</sup>, 廖柏寒<sup>2</sup>, 吴攀<sup>1</sup>, 吴永贵<sup>1</sup>

(1. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵阳 550025; 2. 中南林业科技大学环境科学与工程学院, 长沙 410004)

**摘要:** 为研究菜籽饼堆肥对土壤 Cd 有效性和在水稻体内迁移转运与累积的影响, 在 Cd 污染 ( $Cd=0.72$  mg/kg) 土壤中施用不同添加量 (0.75%, 1.5%, 3.0%) 的菜籽饼堆肥, 以未添加菜籽饼堆肥为对照 (CK), 并进行水稻盆栽种植试验。结果表明: (1) 菜籽饼堆肥进入稻田土壤后会显著降低土壤中 TCLP 提取态 Cd 含量, 在熟化期施用 0.75%~3.0% 的菜籽饼堆肥, 与对照相比土壤 TCLP 提取态 Cd 含量下降了 45.1%~68.7%。但水稻的种植会影响菜籽饼堆肥对土壤中 TCLP 提取态 Cd 含量的降低效果, 使其含量随着水稻生育期的延长逐渐上升, 但仍低于同时期的对照土壤。(2) 施用菜籽饼堆肥能显著提高水稻产量, 但同时也增加水稻糙米中 Cd 含量。与对照相比, 施用 0.75%~3.0% 的菜籽饼堆肥, 水稻糙米中 Cd 含量为 0.04~0.14 mg/kg, 低于国家食品中污染物限量标准 (GB 2762—2012,  $Cd<0.2$  mg/kg)。同时, 每株水稻产量分别增加 3.6~4.3 g/株, 约为 1 620~1 935 kg/hm<sup>2</sup>。(3) 施用菜籽饼堆肥会提高 Cd 在水稻体内的转运能力, 同时显著提高水稻成熟期各部位 Cd 累积量, 特别是地上部分。总体来说, 施用菜籽饼堆肥增加水稻糙米中 Cd 含量, 但依然保持在较低水平, 满足中轻度 Cd 污染地区水稻的安全生产。但在 Cd 污染程度更高或者土壤 Cd 活性更强的土壤中施用菜籽饼堆肥, 种植水稻糙米 Cd 含量可能高于国家食品中污染物限量标准。因此, 在保证稻米安全的前提下对 Cd 污染稻田应该谨慎施用菜籽饼堆肥。

**关键词:** 外源有机肥; Cd 污染; 水稻 Cd 累积; 安全利用

中图分类号: X53; S511 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2019)02-0317-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.02.048

## Effects of Rapeseed Cake Compost on Cd Availability in Soil, and Its Translocation and Accumulation in Rice Plant

YANG Wentao<sup>1,2</sup>, LIAO Bohan<sup>2</sup>, WU Pan<sup>1</sup>, WU Yonggui<sup>1</sup>

(1. College of Resource and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025; 2. College of Environmental Science and Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004)

**Abstract:** The effects of rapeseed cake compost (RSC) on Cd availability in soil and its accumulation in different rice tissues were investigated using a pot experiment in this study. In order to provide reference for the safe production of moderately Cd-contaminated fields, RSC was applied to a Cd contaminated paddy soils ( $Cd = 0.72$  mg/kg) with different rates of 0, 0.75%, 1.5%, and 3.0% respectively, and then rice plants (Xiangwanxian 12#) were cultivated. The results showed that: (1) The application of RSC resulted in a sharp decrease in the soil TCLP-extractable Cd concentration. Compared with CK treatment, the soil TCLP-extractable Cd concentrations decreased by 45.1%~68.7% after 0.75%~3.0% RSC application. However, the soil TCLP-extractable Cd concentrations in the amended soil gradually increased during the rice growing period. (2) RSC was an effective organic fertilizer for increasing rice yield, but the total Cd concentrations in rice grain were also increased. Compared with CK treatment, when the 0.75%~3.0% RSC was applied, the total Cd concentrations in rice grain were 0.04~0.14 mg/kg, which met the national limit of Cd in food (GB 2762—2012,  $Cd<0.2$  mg/kg). The rice yield was increased by 3.6~4.3 g/pant, 1 620~1 935 kg/hm<sup>2</sup> approximately. (3) The application of RSC increased Cd transport from root to shoot and significant raised the amount of Cd accumulated in rice plant, especially in the aerial part. In general, in the present study, the application of RSC increased the total Cd concentrations in rice grain. And it still remained at a low level, could meet the safety production of rice in Cd moderately pollution area. However, if RSC was

收稿日期: 2018-10-19

资助项目: 贵州大学人才引进项目 (贵大人基合字 [2018] 26 号); 国家自然科学基金联合基金项目 (U1612442); 国家重点研发计划项目 (2016YFD0800705); 湖南省教育厅项目 (15K148); 贵州省生态学一流学科建设项目 (GNYL [2017] 007)

第一作者: 杨文弢 (1989—), 男, 博士, 讲师, 主要从事土壤重金属污染修复研究。E-mail: wtyang0803@163.com

applied to soil with higher Cd pollution level or higher Cd bioavailability, the total Cd concentrations in rice grain might be higher than the national limit of Cd in food. Therefore, we suggested that the application of RSC should be more prudent for the Cd-contaminated fields for the premise of ensuring rice safety production.

**Keywords:** external organic fertilizer; Cd pollution; rice Cd accumulation; safety use

目前,我国耕地重金属污染情况不容乐观,超过 7% 的土壤存在不同程度的镉(Cd)污染<sup>[1]</sup>。水稻是我国乃至整个亚洲重要的粮食作物,近 50% 的人口以稻米为主要粮食<sup>[2]</sup>。在一定 Cd 污染的稻田中种植水稻,其籽粒中 Cd 含量很容易超出国家食品中污染物限量标准,进而危害人体健康<sup>[3]</sup>。

在中国南方地区,菜籽饼(rapeseed cake)作为稻田冬—夏(油菜—水稻)轮作的农业废料之一,堆肥后常常作为一种有机肥料用于夏季水稻种植前的土壤中,以保持土壤肥力,提高农作物产量。然而,在土壤 Cd 污染地区,这样的农艺措施可能会显著影响土壤中 Cd 的生物有效性,甚至可能提高 Cd 污染暴露风险。以往的研究<sup>[4-5]</sup>发现,在 Cd 污染的稻田土壤中施用菜籽饼堆肥可以维持土壤有机质含量,改善土壤化学和生物学性质,降低 Cd 植物有效性。Yin 等<sup>[6]</sup>的研究认为,施用菜籽饼能增加水稻土壤溶液中可溶性有机碳和可溶性有机氮的含量,减少土壤溶液中重金属浓度并降低土壤中重金属的生物利用度;Ok 等<sup>[7]</sup>的研究也证实了这一点。本课题之前的研究,一个 Cd 加标试验<sup>[8]</sup>,发现水稻 Cd 吸收的减少与施用菜籽饼堆肥后水稻根表面铁斑的形成密切相关。此外,使用菜籽饼堆肥作为绿肥可以减少水稻种植季节化肥施用量<sup>[9]</sup>。相反,也有一些研究<sup>[10-11]</sup>发现,施用过多的菜籽饼堆肥以及施用一些溶解性有机质,对 Cd 污染土壤中的 Cd 无显著钝化效果,甚至会增强其有效性。Wang 等<sup>[12]</sup>的盆栽试验发现,在试验条件下施用绿肥和猪粪会通过增加溶解性有机碳以及土壤中 Cd 的流动性来增加水稻对 Cd 的潜在摄取量,同时增加 Cd 向地下水迁移的风险。有机质在土壤—水稻系统中的环境行为十分复杂,有机物—重金属络合物的形成与分解<sup>[13]</sup>、有机物对土壤 pH、Eh、溶解性有机质以及阳离子交换量的影响<sup>[14-16]</sup>、对水稻

根际环境的影响<sup>[17]</sup>等都会影响其在土壤 Cd 修复中的表现。同时,有机质会显著影响水稻的生长<sup>[18-19]</sup>,这会显著影响水稻对 Cd 的吸收以及影响 Cd 在水稻体内的迁移与转运。

在 Cd 污染稻田上,水稻生长会受到一定的抑制<sup>[3]</sup>。施用菜籽饼堆肥能有效保持土壤肥力,增加土壤有机质含量,提高水稻产量,同时大量外源有机质的进入也会影响土壤中 Cd 的赋存形态,影响土壤—水稻系统中 Cd 的生物有效性,进而影响 Cd 在水稻籽粒中的累积。已有一些学者<sup>[5-7]</sup>对菜籽饼堆肥施用于 Cd 污染稻田开展了研究,但尚未得到深入的探索。特别是在中国南方的酸性 Cd 污染稻田中施用菜籽饼堆肥,本课题前期的研究也发现这样的农艺措施可能会显著提高稻田 Cd 污染暴露风险。本研究以菜籽饼堆肥为有机质添加物,通过盆栽试验和 TCLP 毒性浸出试验,对土壤—水稻系统中 Cd 的生物有效性进行评价,研究不同 Cd 污染程度和不同菜籽饼堆肥施用量下 Cd 在水稻全生育期体内迁移转运与含量的变化,旨在揭示菜籽饼堆肥与土壤中 Cd 活性以及 Cd 在水稻体内转运与累积的关系,为中轻度 Cd 污染稻田的安全利用提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

供试土壤来源于湖南省宁乡县双江口镇某地区稻田耕作层土壤(28°27.716'N, 113°16.356'E, 红壤, 0—30 cm);菜籽饼堆肥由菜籽饼厌氧堆肥 40 天制备,新鲜的菜籽饼由湖南娄底市天之源榨油坊提供;盆栽用盆为无盖圆柱形桶,直径 300 mm(内径),高 240 mm,由广东深圳威腾家居建材馆提供;水稻(*Oryza sativa* L.)品种选用湖南地区的常规稻“湘晚粳 12 号”,由湖南亚华种业有限公司提供。供试土壤和菜籽饼堆肥基本理化性质见表 1。

表 1 供试土壤和菜籽饼堆肥基本理化性质

试样	pH	OM/%	CEC/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	速效 N/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	速效 P/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	速效 K/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	全 Cd/ (mg · kg <sup>-1</sup> )
土壤	5.6±0.2	3.2±0.1	31.3±2.5	103.3±3.3	20.4±1.9	77.4±3.7	0.72±0.07
菜籽饼堆肥	7.1±0.5	45.2±1.5	—	2962.3±88.1	5260.2±224.6	3512.7±64.1	—

### 1.2 盆栽试验

盆栽试验在中南林业科技大学生命科技大楼 3 楼户外种植基地进行,该地区属亚热带季风性湿润气候,气候温和,降水充沛,雨热同期,四季分明。年平均气温 16.8~17.3 °C,年均降水量 1 358.6~1 552.5

mm。2015 年 5 月,将供试土壤自然风干、碾碎,去除石头、根茎等杂物,并装入盆栽试验用桶中,每桶装土(4.0±0.05)kg。在已有微量 Cd 污染的供试土壤中添加 CdCl<sub>2</sub> · 2.5 H<sub>2</sub>O 溶液,使土壤 Cd 总量达到 0.72 mg/kg。按照土壤的 70% 最大田间持水量加

入自来水,并用长木棍使土壤充分搅拌均匀,在通风的室内培育 7 天。7 月 12 日,将菜籽饼堆肥按照 0.75%,1.5%,3.0% 梯度施入,以未添加菜籽饼堆肥为对照(CK),与 Cd 污染土壤充分混合,继续培育 15 天。同时将水稻种子在 0.5% 的  $H_2O_2$  溶液中浸泡 24 h 后,覆上湿润纱布在培养皿中培养发芽,然后在未受污染的土壤中育秧。7 月 28 日,育秧及土壤培育完成。选取长势一致、健康的水稻幼苗进行插秧移栽,每盆插秧 2 株。整个水稻生长期间水分控制与传统种植方式一致,并喷洒农药防止病虫害。

### 1.3 样品采集与预处理

分别于 2015 年 7 月 12 日(菜籽饼堆肥施用前)、7 月 28 日(土壤熟化期)、8 月 29 日(水稻分蘖盛期)、10 月 9 日(水稻灌浆期)以及 11 月 3 日(水稻成熟期)采集各时期土壤(水稻根系上 0~5 mm)及后 3 个时期水稻样品。土壤样品自然风干、碾磨并过 10 目和 100 目尼龙筛,塑料封口袋保存待测。各时期水稻样品分为 2~4 个部分(包括根系、茎叶、谷壳、糙米),各个部分用自来水和去离子水洗净,晾干后放入 105 °C 烘箱杀青 30 min,之后将烘箱温度调为 70 °C 并烘干至恒重。使用小型脱壳机将水稻谷粒脱壳(分为谷壳和糙米),去离子水洗净,再 70 °C 并烘干至恒重。水稻各个部分用小型粉碎机粉碎,过 100 目尼龙筛,塑料封口袋保存待测。

### 1.4 样品测定方法

pH 采用酸度计(PHS-3C,雷磁)测定,土壤 pH 固液比为  $m(\text{固}):V(\text{液})=1:2.5$ ,供试有机质 pH 固液比为  $m(\text{固}):V(\text{液})=1:5$ ;土壤阳离子交换量采用乙酸铵<sup>[20]</sup>法测定。土壤有机质(OM)采用水合热重铬酸钾氧化—比色法<sup>[20]</sup>测定;土壤速效 N 采样碱解扩散法<sup>[20]</sup>测定;有效 P 含量采样碳酸氢钠提取比色法<sup>[20]</sup>测定;速效 K 含量采样乙酸铵提取法<sup>[20]</sup>测定;采用 TCLP 毒性浸出试验<sup>[21]</sup>评价土壤 Cd 的生物有效性。水稻糙米中 Cd 含量采用干灰化法消解(GB/T 5009—2010)。所有土壤样品溶液中 Cd 含量采用 ICP-AES(ICP 6300,Thermo)测定,水稻糙米样品溶液中 Cd 含量采用石墨炉原子吸收分光光度计(iCE-3500,Thermo)测定。以国家标准物质土壤(GBW(E)-070009 和湖南大米(GBW 10045(GSB-23))进行质量控制,同时做空白试验,土壤样品 Cd 和 大米样品 Cd 的回收率分别为 91%~103% 和 95%~107%。

### 1.5 数据统计与分析

水稻体内 Cd 的转运系数(TF)<sup>[22]</sup>计算公式为:

$$TF_{ij} = \frac{C_i}{C_j}$$

式中: $TF_{ij}$  为水稻  $i$  到  $j$  部位 Cd 的转运系数; $C_i$  为水稻  $i$  部位 Cd 含量(mg/kg); $C_j$  为水稻  $j$  部位 Cd 含量(mg/kg)。

采样 $[Cd]/Cd[CK]$ 来表征在某一水稻生育期施用菜籽饼堆肥对土壤 Cd 有效性的影响<sup>[23]</sup>。其中 Cd 和 Cd[CK]分别为某一水稻生育期菜籽饼堆肥处理下和对照土壤 TCLP 提取态 Cd 含量(mg/kg)。

试验中的数据结果均为平均值±标准偏差( $n=3$ )。本研究数据统计与分析均采用 SPSS 17.0 显著性  $F$  测验和 Duncan 多重比较法( $p<0.05$  和  $p<0.01$ )进行分析,图形采用 OriginPro 8.5.1 软件进行处理。

## 2 结果与分析

### 2.1 菜籽饼堆肥对土壤 pH、有机质含量和 Cd 有效性的影响

从图 1 可以看出,供试土壤属于酸性稻田土壤,土壤 pH 为 5.58,未添加菜籽饼堆肥前(7 月 12 日)土壤有机质含量和 TCLP 提取态 Cd 含量分别为 32.6,0.29 mg/kg。

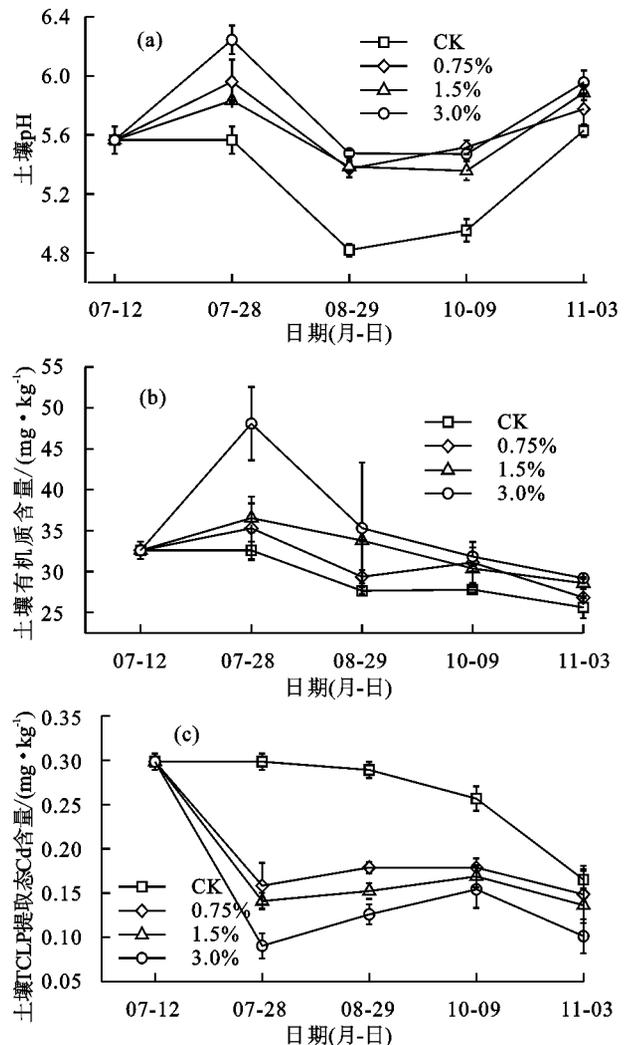


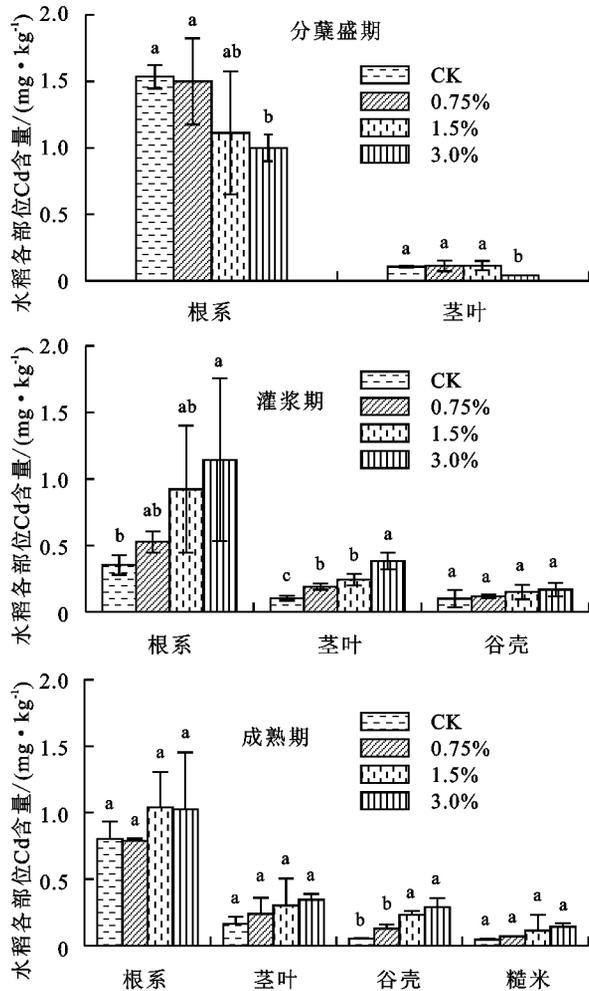
图 1 菜籽饼堆肥对土壤 pH、有机质含量和 TCLP 提取态 Cd 含量的影响

在土壤熟化期(7 月 28 日)施用菜籽饼堆肥能显著提高土壤 pH 和有机质含量。在种植水稻后,土壤 pH 呈现在水稻分蘖盛期(8 月 29 日)显著下降之后又逐渐上升的趋势(图 1a),土壤有机质含量随着水稻生育期的

延长(7月28日至11月3日)逐渐下降(图1b)。对照中(CK)土壤 TCLP 提取态 Cd 含量在水稻各采样期均逐渐降低(图1c),在熟化期(7月28日)施用 0.75%~3.0%的菜籽饼堆肥,与对照相比土壤 TCLP 提取态 Cd 含量下降了 45.1%~68.7%,但随着水稻生育期的延长,土壤中 TCLP 提取态 Cd 含量在显著下降后又逐渐上升,但仍低于同时期的对照土壤。

## 2.2 菜籽饼堆肥对水稻各部位 Cd 含量的影响

菜籽饼堆肥对水稻分蘖盛期(8月29日)、灌浆期(10月9日)及成熟期(11月3日)各部位 Cd 含量影响显著( $p < 0.05$ )(图2)。在水稻分蘖盛期(8月29日),随着菜籽饼堆肥施用量的增加,水稻根系和茎叶中 Cd 含量均逐渐下降。与对照(CK)相比,施用 0.75%~3.0%的菜籽饼堆肥,水稻根系、茎叶中 Cd 含量分别下降 2.3%~34.9%,5.5%~63.0%。



注:图中不同小写字母表示各处理间差异显著。

图2 菜籽饼堆肥对水稻分蘖盛期、灌浆期和成熟期各部位 Cd 含量的影响

与分蘖盛期情况不同,随着菜籽饼堆肥施用量的增加,水稻灌浆期和成熟期根系、茎叶、谷壳和糙米中 Cd 含量均不同程度的上升。在水稻灌浆期(10月9日),与对照相比,施用 0.75%~3%的菜籽饼堆肥,水稻根系、茎叶、

谷壳中 Cd 含量分别上升了 49.5%~224.9%,83.9%~271.6%,17.8%~67.2%。在水稻成熟期(11月3日),与对照相比,施用 0.75%~3.0%的菜籽饼堆肥,水稻根系、茎叶、谷壳、糙米中 Cd 含量分别上升 27.5%~29.8%,45.1%~109.8%,147.1%~464.7%,53.9%~214.9%。

## 2.3 菜籽饼堆肥对 Cd 在水稻根系向上转运的影响

Cd 在被水稻根系吸收进入水稻植株体内后,经由木质部向茎叶、谷壳和糙米中转运<sup>[24-25]</sup>。从表2可以看出,施用菜籽饼堆肥能不同程度地增加水稻根系对土壤 Cd 向地上部的转运能力,但未达到显著水平( $p > 0.05$ )。在一定程度上施用菜籽饼堆肥能促进 Cd 在水稻地下部分向地上部分的转运能力。此外,对同一菜籽饼堆肥处理而言,随着水稻生育期的延长,Cd 在水稻地下部分向地上部分的转运逐渐增大。与分蘖盛期(8月29日)相比,水稻生育后期(10月9日至11月3日)Cd 在水稻地下部分到地上部分的转运系数分别增大了 2.0~4.7 倍。

表2 菜籽饼堆肥对 Cd 在水稻根系向茎叶转运系数的影响

菜籽饼堆肥 施用量/%	分蘖盛期 (8月29日)	灌浆期 (10月9日)	成熟期 (11月3日)
CK	0.070±0.007a	0.299±0.066a	0.214±0.091a
0.75	0.082±0.045a	0.368±0.090a	0.301±0.155a
1.5	0.107±0.014a	0.325±0.212a	0.335±0.107a
3.0	0.072±0.004a	0.416±0.238a	0.382±0.167a

注:表中数据为平均值±标准差;数字后不同小写字母表示在同一水稻生育期中各菜籽饼堆肥处理间差异显著( $p < 0.05$ )。

## 3 讨论

### 3.1 菜籽饼堆肥对水稻种植前后土壤 Cd 有效性的影响

菜籽饼堆肥处理下的土壤 TCLP 提取态 Cd 含量在各采样时期均低于对照(图1),但从熟化期(7月28日)开始这种降低效果随着水稻生育期的延长逐渐减弱,甚至在成熟期菜籽饼堆肥 0.75%施用量下略有上升。用 Cd/Cd[CK]的比值表征某一时期不同菜籽饼堆肥施用量对土壤中 Cd 有效性的影响(图3)。可知在未种植水稻时(7月12日至7月28日),菜籽饼堆肥对土壤中 Cd 有效性均呈现显著的抑制作用,但开始种植水稻后向活化作用转化,且随着水稻生育期的延长(7月28日至11月3日)有机质对土壤 Cd 活性的活化作用逐渐增强。认为菜籽饼堆肥在水稻—土壤系统中对 Cd 的环境行为可能分为 2 个过程:第一为抑制过程,有机质进入土壤后分解形成的羟基、羧基、酚羟基等活性基团,可以和土壤中的重金属形成稳定的有机质—重金属络合物,从而降低土壤重金属 Cd 的活性<sup>[26]</sup>;第二为释放过程,随着水稻生育期的延长,在水稻根系和微生物作用下,有机质会进一步被水稻根系利用,分解成低分子有机酸,将之前络合、螯合等作用稳

定下来的 Cd 逐渐地重新释放出来<sup>[27]</sup>。

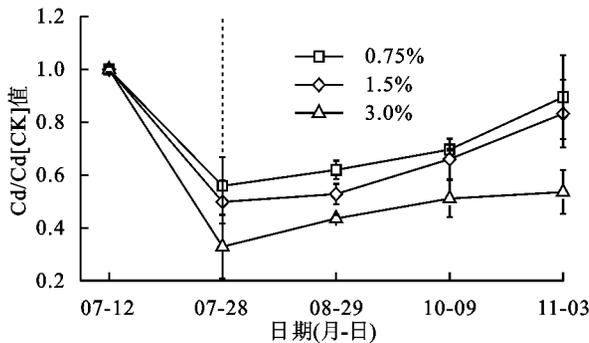


图 3 菜籽饼堆肥对水稻种植前后土壤 Cd 有效性的影响

### 3.2 菜籽饼堆肥对水稻各部位 Cd 累积量的影响

分析了菜籽饼堆肥对水稻各部位 Cd 累积量的影响(图 4),这与土壤中 Cd 有效性的变化趋势相同。在水稻分蘖盛期(8 月 29 日),水稻地上和地下部分的 Cd 累积量随着菜籽饼堆肥施用量的增加逐渐降低,但在灌浆期(10 月 9 日)和成熟期(11 月 3 日)显著上升,特别是地上部分。这是因为水稻体内的 Cd 累积是在这之前一段时间内土壤中 Cd 有效性累积作用的结果。在水稻分蘖盛期之前,菜籽饼堆肥对土壤中 Cd 有效性的影响呈显著抑制,因此在分蘖盛期随着有机质施用量的增加呈现逐渐下降的趋势。随着水稻生育期的延长,菜籽饼堆肥对土壤 Cd 有效性呈现活化作用并逐渐增强,因此在水稻生育后期水稻地上部分的 Cd 累积量呈现显著的上升。在水稻生育后期,施用菜籽饼堆肥显著增加水稻各部位 Cd 累积的原因是 2 个方面的结果:一方面(土壤方面),菜籽饼堆肥的进一步分解和对前期固定下来的 Cd 的再释放过程,使得在土壤根际微环境中的 Cd 活性显著增加,这可能与根际微环境中的微生物量、酶活性以及根系分泌物的增加有关,这也需要进一步的研究来证实;另一方面(水稻方面),施用菜籽饼堆肥后,土壤肥力得到较好的保持,显著促进了水稻的生长和增加了水稻产量,这增强了水稻蒸腾作用和对土壤中养分摄取能力,导致水稻根系对土壤 Cd 向地上部的转运能力,在水稻根际活性较强的 Cd 通过根系经木质部到韧皮部的转运,进而累积到水稻各个部位。

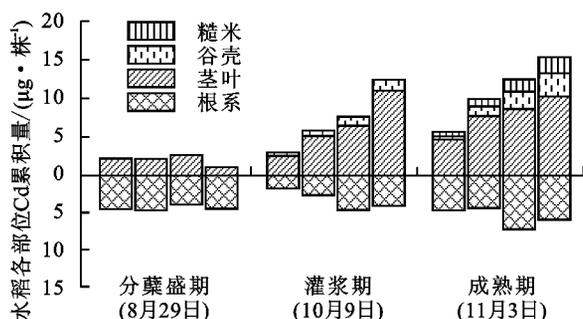


图 4 菜籽饼堆肥对水稻各部位 Cd 累积量的影响

### 3.3 菜籽饼堆肥对水稻稻谷品质的影响

施用菜籽饼堆肥显著增加水稻糙米中 Cd 含量,同时也增加了水稻产量(图 5)。在本研究中,供试 Cd 污染土壤(Cd=0.72 mg/kg)中种植水稻,施用 0.75~3.0% 的菜籽饼堆肥,糙米中 Cd 含量为 0.04~0.14 mg/kg,低于国家食品中污染物限量标准(GB 2762—2012, Cd<0.2 mg/kg)。同时,施用的菜籽饼堆肥增加了水稻产量,与对照相比,每株水稻产量分别增加 3.6~4.3 g/株,约为 1 620~1 935 kg/hm<sup>2</sup>。总体来说,施用菜籽饼堆肥能增加水稻产量,同时会增加土壤 Cd 污染暴露风险。在本研究中施用菜籽饼堆肥,增加了水稻糙米中 Cd 含量,但依然保持在较低水平,满足了中轻度 Cd 污染地区水稻的安全生产。但在 Cd 污染程度更高或者土壤 Cd 活性更强的土壤中施用菜籽饼堆肥,种植水稻糙米 Cd 含量可能高于国家食品中污染物限量标准。因此,在保证稻米安全的前提下,对于 Cd 污染稻田而言,施用菜籽饼堆肥应该更加的谨慎。

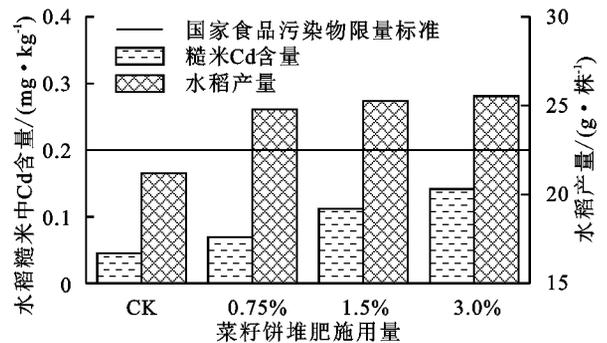


图 5 菜籽饼堆肥对水稻产量和糙米中 Cd 含量的影响

## 4 结论

(1) 菜籽饼堆肥进入稻田土壤后显著降低土壤中 TCLP 提取态 Cd 含量,但水稻的种植会影响菜籽饼堆肥对土壤中 Cd 活性的抑制效果,使土壤中 TCLP 提取态 Cd 含量又逐渐上升,但仍低于同时期的对照土壤。

(2) 施用菜籽饼堆肥能不同程度地增加水稻根系对 Cd 向地上部的转运能力,显著增加水稻生育后期地上部分(包括茎叶、谷壳、糙米)中 Cd 累积量。

(3) 菜籽饼堆肥对水稻各部位 Cd 含量的影响与土壤 Cd 有效性的变化有关,施用菜籽饼堆肥显著增加水稻糙米中 Cd 含量,施用 0.75%~3.0% 的菜籽饼堆肥,糙米中 Cd 含量为 0.04~0.14 mg/kg,低于国家食品中污染物限量标准。在中低 Cd 污染稻田中施用菜籽饼堆肥能增加水稻产量,但同时会增加土壤 Cd 污染暴露风险。因此,在保证稻米安全的前提下,对于中低 Cd 污染稻田而言,应该谨慎施用菜籽饼堆肥。

## 参考文献:

- [1] 中华人民共和国环境保护部,国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[EB/OL]. (2014-04-17)[2018-09-01]. <http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/t20140417-270670.htm>.
- [2] Juliano B O, Hicks P A. Rice functional properties and rice food products [J]. *Food Reviews International*, 1996,12(1):71-103.
- [3] 杨文弢,周航,邓贵友,等. 组配改良剂对污染稻田中铅、镉和砷生物有效性的影响[J]. *环境科学学报*, 2016, 36(1):257-263.
- [4] Lee S S, Lim J E, Abd El-Azeem S A M, et al. Heavy metal immobilization in soil near abandoned mines using eggshell waste and rapeseed residue[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, 20:1719-1726.
- [5] Yang W T, Gu J F, Zou J L, et al. Impacts of rapeseed dregs on Cd availability in contaminated acid soil and Cd translocation and accumulation in rice plants[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23:20853-20861.
- [6] Yin B K, Zhou L Q, Yin B, et al. Effects of organic amendments on rice (*Oryza sativa* L.) growth and uptake of heavy metals in contaminated soil[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 16:537-546.
- [7] Ok S Y, Usman A R A, Lee S S, et al. Effects of rapeseed residue on lead and cadmium availability and uptake by rice plants in heavy metal contaminated paddy soil [J]. *Chemosphere*, 2011, 85:677-682.
- [8] Yang W T, Zhou H, Gu J F, et al. Influence of rapeseed cake on iron plaque formation and cd uptake by rice (*Oryza sativa* L.) seedlings exposed to excess Cd[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2017, 99:601-606.
- [9] Zhang R H, Li Z G, Liu X D, et al. Immobilization and bioavailability of heavy metals in greenhouse soils amended with rice straw-derived biochar[J]. *Ecological Engineering*, 2017, 98:183-188.
- [10] 王玉军,窦森,李业东,等. 鸡粪堆肥处理对重金属形态的影响[J]. *环境科学*, 2009, 30(3):913-917.
- [11] 易卿,胡学玉,柯跃进,等. 不同生物质黑碳对土壤中来源镉(Cd)有效性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(1):88-94.
- [12] Wang G M, Zhou L X. Application of green manure and pig manure to cd-contaminated paddy soil increases the risk of cd uptake by rice and cd downward migration into groundwater: Field micro-plot trials[J]. *Water Air Soil Pollut*, 2017:228-229.
- [13] 郭微,戴九兰,王仁卿. 溶解性有机质影响土壤吸附重金属的研究进展[J]. *土壤通报*, 2012, 43(3):761-768.
- [14] 葛滢,黄丹丹,周权锁. 添加有机物料对淹水土壤 Cd 活性的影响机制[J]. *中国环境科学*, 2009, 29(10):1093-1099.
- [15] 李慧,刘艳,卢海威,等. 湖南镉污染农田土壤钝化后两个品种水稻的生长效应[J]. *安全与环境学报*, 2016, 16(6):298-302.
- [16] 杨文弢,王英杰,周航,等. 水稻不同生育期根际及非根际土壤砷形态迁移转化规律[J]. *环境科学*, 2015, 36(2):323-328.
- [17] 罗安程,Subedi T B,章永松,等. 有机肥对水稻根际土壤中微生物和酶活性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 1999, 5(4):321-327.
- [18] 韩新忠,朱利群,杨敏芳,等. 不同小麦秸秆还田量对水稻生长、土壤微生物生物量及酶活性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(11):2192-2199.
- [19] 王丹英,彭建,徐春梅,等. 油菜作绿肥还田的培肥效应及对水稻生长的影响[J]. *中国水稻科学*, 2011, 26(1):85-91.
- [20] 鲁如坤. 土壤农化分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社.
- [21] 李造煌,杨文弢,邹佳玲,等. 钙镁磷肥对土壤 Cd 生物有效性和糙米 Cd 含量的影响[J]. *环境科学学报*, 2017, 37(6):2322-2330.
- [22] 吴玉俊,周航,朱维,等. 碳酸钙和海泡石组配对水稻中 Pb 和 Cd 迁移转运的影响[J]. *环境工程学报*, 2015, 9(8):4047-4054.
- [23] Toshimitsu H, Hiroto O, Ayako K K, et al. Optimal soil Eh, pH, and water management for simultaneously minimizing arsenic and cadmium concentrations in rice grains[J]. *Environmental Science and Technology*, 2016, 50:4178-4185.
- [24] Ueno D, Koyama E, Yamaji N, et al. Physiological, genetic, and molecular characterization of a high-Cd-accumulating rice cultivar, Jarjan[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2011, 62(7):2265-2272.
- [25] Takahashi R, Ishimaru Y, Shimo H. The OsHMA2 transporter is involved in root-to-shoot translocation of Zn and Cd in rice[J]. *Plant Cell and Environment*, 2012, 35(11):1948-1957.
- [26] Garcia-Mina J M. Stability solubility and maximum metal binding capacity in metal-humic complexes involving humic substances extracted from peat and organic compost[J]. *Organic Geochemistry*, 2006, 37(12):1960-1972.
- [27] 王意钡,张焕朝,郝秀珍,等. 有机物料在重金属污染农田土壤修复中的应用研究[J]. *土壤通报*, 2010, 41(5):1275-1280.