

秸秆还田对镉污染农田土壤中镉生物有效性的影响

贾 乐, 朱俊艳, 苏德纯

(中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘 要:通过温室盆栽试验和土壤培养试验,研究了重金属镉污染水稻土和人为模拟镉污染土壤上不同种类和不同量的作物秸秆还田后,土壤中可提取态镉的动态变化规律以及对白菜生长和吸收重金属镉的影响。结果表明,秸秆还田显著提高了2种镉污染土壤的pH值。镉污染水稻土上还田玉米和菜豆秸秆显著提高了土壤中醋酸铵提取态镉和DTPA提取态镉含量,秸秆还田后2周时醋酸铵提取态镉含量增加了17%~33%,随时间延长,土壤中可提取态镉增加变的不明显。模拟镉污染土壤上还田玉米和菜豆秸秆对土壤中醋酸铵提取态镉和DTPA提取态镉含量影响不明显。镉污染水稻土上秸秆还田量2%时显著降低了白菜体内镉含量,还田菜豆秸秆和玉米秸秆白菜体内镉含量分别降低了18%和27%。还田玉米秸秆影响了白菜生长,降低了白菜的产量;模拟镉污染土壤上还田菜豆秸秆对白菜生长和镉含量影响不明显,但还田2%玉米秸秆降低了白菜生物量,增加了白菜镉含量。

关键词:秸秆;土壤;镉;生物有效性

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)10-1992-07

Effects of Crop Straw Return on Soil Cadmium Availability in Different Cadmium Contaminated Soil

JIA Le, ZHU Jun-yan, SU De-chun

(College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: Pot experiments and soil incubation experiments were conducted under greenhouse conditions to investigate the effects of crop straw return on Cd uptake by chinese cabbage and dynamics of Cd availability in Cd-contaminated soil and artificial Cd-contaminated soil. The results showed that soil pH increased significantly in the Cd-contaminated soil and artificial Cd-contaminated soil with maize and kidney bean straw return. Crop straw returning significantly increased the concentrations of NH_4OAc and DTPA extractable Cd in the Cd-contaminated soil, concentration of NH_4OAc extractable Cd increased by 17%~33% after 2 weeks of straw-returning. Whereas in the artificial Cd-contaminated soil, there was no significant difference in the concentrations of NH_4OAc and DTPA extractable Cd between soils with and without crop straw return. The Cd concentration of chinese cabbage was decreased by 18%~27% with 2% crop straw return in the Cd-contaminated soil. However, the crop straw-returning did not lower the Cd concentration of chinese cabbage in artificial Cd-contaminated soil. Maize straw returning also decreased the shoot dry weight of chinese cabbage significantly on the two Cd-contaminated soils.

Keywords: crop straw; soil; cadmium; availability

土壤有机质含量是土壤质量和土壤生产力的重要指标。我国土壤有机质和谷物产量50 a相关数据表明,农田土壤有机质对作物高产稳产起到至关重要的作用。增加农田土壤有机碳固持既能减少温室效应气体排放,又能提高土壤农业生产力,是一个双赢的措施^[1]。在农田生态系统中,作物秸秆还田是增加土壤

有机质的重要途径和措施。目前我国每年产生农作物秸秆6~7亿t,直接还田的比例已达到35%以上。小麦、玉米和水稻等主要粮食作物秸秆还田面积约0.26亿 hm^2 ^[2]。由于我国人均耕地面积有限,粮食安全仍然是我国农业生产面临的首要问题,提高农田土壤生产力是实现粮食安全的基本保证,通过秸秆还田等措施提高土壤有机碳含量是提高土壤质量和土壤生产力的重要途径。但在重金属污染农田上,作物秸秆中重金属含量远高于收获的作物籽粒中重金属的含量,秸秆还田不仅向土壤输入了有机碳,同时也把作物吸收的大部分重金属也归还了土壤。还田的秸秆在土壤中

收稿日期:2010-04-23

基金项目:国家自然科学基金(40971261);公益性行业(农业)科研专项(200903015)

作者简介:贾 乐(1983—),女,硕士,主要从事农田土壤污染防治研究。E-mail:jialejill@yahoo.com.cn

通讯作者:苏德纯 E-mail:dcusu@cau.edu.cn

的周转不仅是土壤有机碳的循环,其过程对土壤中重金属的环境行为和生物有效性也会产生显著的影响。从产出的农产品质量安全考虑,重金属污染农田土壤上可否进行秸秆还田需要明确。研究表明,重金属污染农田土壤上,施用有机物和秸秆堆肥可以降低土壤中醋酸铵浸提的 Zn、Pb、Cu 含量,原位钝化土壤中重金属,减少黑麦草对重金属的吸收^[3-4]。但也有研究表明,土壤添加秸秆后短期内由于释放出可溶性有机质(DOM)而增加土壤 Cu、Cd 的溶出,从而促进小麦对 Cu、Cd 的吸收^[5]。这种结果的差异与还田秸秆的矿化过程和阶段有密切关系。研究还表明,以作物秸秆形式输入农田土壤的有机碳属于活性有机碳,在土壤中矿化速率较快,能进入稳定土壤碳库的比例较小,在土壤中的半衰期为 1.5~6 个月^[6],秸秆分解后所含的 Cd 也会释放到土壤中。这些过程都会影响土壤中重金属的有效性和后茬作物对重金属的吸收。本文通过土壤培养试验和生物盆栽试验,研究在不同类型的重金属镉污染土壤上还田不同的含重金属镉的作物秸秆后,土壤中有效态镉的动态变化规律和对后茬作物吸收镉的影响,为重金属污染农田土壤上秸秆还田措施的可行性提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

镉污染水稻土: 采自沈阳张士污灌区镉污染农田,土壤类型为水稻土,土壤全镉含量为 2.10 mg·kg⁻¹,土壤 pH5.55,有机质含量 28.9 g·kg⁻¹。土壤风干并过 2 mm 土筛备用。

模拟镉污染土壤:采自浙江嘉兴水稻田,土壤类型为青紫泥土,土壤全镉含量为 0.72 mg·kg⁻¹,土壤

pH5.41,有机质含量为 35.0 g·kg⁻¹。土壤风干过 2 mm 土筛后,加入用 CdSO₄ 配制的溶液,土壤添加的镉含量为 3.0 mg·kg⁻¹。反复研磨,充分混匀,并再过 2 mm 土筛并风干,放置平衡 1 周,用此土壤模拟由于事故新造成的镉污染农田土壤。

2 种土壤均按 N:0.3 g·kg⁻¹ 土,P₂O₅:0.20 g·kg⁻¹ 土,K₂O:0.3 g·kg⁻¹ 土施入底肥,施入肥料分别为 (NH₄)₂SO₄,KH₂PO₄ 和 KCl。分别将上述肥料配制成溶液加入少量该土壤,再将该土壤与要制备土壤反复混匀,最后将混合后土壤过 2 mm 土筛,1 周后开始培养试验和盆栽试验。

1.2 供试作物和作物秸秆

为了解不同种类秸秆的差异,试验中还田秸秆选择了 C/N 不同的收获于镉污染土壤上的玉米和菜豆苗期秸秆,为了能使秸秆在试验阶段内充分分解,用粉碎机把秸秆粉碎成粉末备用。菜豆秸秆中镉含量为 3.28 mg·kg⁻¹,C/N 为 17.6; 玉米秸秆中镉含量为 4.11 mg·kg⁻¹,C/N 为 33.1。

盆栽试验中供试作物为大白菜,品种为北京小杂 55。

1.3 试验方法

1.3.1 土壤培养试验

土壤培养试验在温室中进行。每盆装土 500 g,镉污染水稻土和模拟镉污染土壤两种土壤上分别进行 5 种处理:不加秸秆的对照处理、加 1%菜豆秸秆、2%菜豆秸秆、1%玉米秸秆和 2%玉米秸秆处理(表 1),把秸秆与土壤充分混匀,每个处理 3 个重复。培养时间为 10 周,温度保持在 18~30 ℃之间。每日浇水,保持土壤含水量与盆栽试验一致。每 2 周采 1 次样,采样时将土充分混匀后进行取样,剩余土样继续培养,

表 1 秸秆还田试验处理、秸秆还田量及还田秸秆中镉含量
Table 1 Treatments of crop straw return experiment and Cd concentration in straw

土壤	还田秸秆种类	秸秆中 Cd 含量/mg·kg ⁻¹	秸秆还田量/%	还田秸秆中 Cd 占土壤中总 Cd 比例/%
镉污染水稻土	不还田(对照)	—	0	0
	菜豆	3.28	1	1.5
			2	3.0
	玉米	4.11	1	1.9
			2	3.8
模拟镉污染土壤	不还田(对照)	—	0	0
	菜豆	3.28	1	0.9
			2	1.8
	玉米	4.11	1	1.1
			2	2.2

将取的土壤样品风干,过 2 mm 土筛备用。

1.3.2 生物盆栽试验

盆栽试验的处理与土壤培养试验相同,盆栽试验每盆装土 400 g,播种大白菜,白菜出苗 1 周后间苗,每盆留 4 株。白菜生长期 42 d,每日早晚浇水,保持土壤含水量为田间持水量的 60%~80%。白菜收获后,用自来水冲洗干净,再用去离子水清洗 3 遍,擦干水分,称鲜重。于 90 ℃杀青 0.5 h,在 55 ℃下烘干,称干重。将植物样用不锈钢粉碎机进行粉碎。

白菜收获后,将土壤倒出,风干。拣去其中根茬,磨碎过 2 mm 土筛备用。

1.4 测定项目和方法

培养试验的土壤样品和白菜收获后的盆栽试验土壤样品分别测定 pH(水土比 2.5:1),DTPA 提取 Cd ($0.005 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, pH 7.3,液土比 5:1,振荡 2 h)和醋酸铵提取 Cd ($1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, pH 5.2,液土比 5:1,振荡 2 h)。浸提液中 Cd 用原子吸收光谱法测定。

盆栽试验白菜样品中 Cd 含量的测定用 $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{O}_2$ 微波消解炉消解,原子吸收光谱法测定。用国家标准物质(GBW08510)进行分析质量控制。

2 结果与分析

2.1 秸秆还田对不同镉污染土壤 pH 和有效态镉的影响

图 1 是培养试验中不同镉污染土壤上还田不同种类和不同数量的秸秆后土壤 pH 的动态变化。试验所用 2 种镉污染土壤均为酸性土壤,初始 pH 分别为 5.55 和 5.41。从图 1a 镉污染水稻土还田不同种类和

不同数量的秸秆后土壤 pH 的动态变化可以看出,与对照相比,所有秸秆还田处理土壤 pH 均明显提高,培养 4 周后不同秸秆还田处理 pH 提高了 0.3~0.9。还田不同秸秆的土壤 pH 变化规律不同,随培养时间延长还田菜豆秸秆的处理土壤 pH 先下降然后上升,还田玉米秸秆的处理随培养时间的延长土壤 pH 一直上升。秸秆还田量增加,pH 上升幅度也增大。在模拟镉污染土壤秸秆还田处理土壤 pH 也明显高于秸秆不还田的对照处理(图 1b),但与镉污染水稻土秸秆还田不同的是,随培养时间延长,所有处理的土壤 pH 均在逐渐降低,这可能是由于模拟镉污染土壤加入的是硫酸镉,硫酸盐对土壤的酸化造成的。秸秆还田提高了土壤 pH 是由于秸秆分解时有机酸阴离子脱碳作用和氨化作用加强所致^[7-9],淹水条件下秸秆还田后,随秸秆的分解,土壤表层溶液的 pH 也能显著提高^[10]。土壤 pH 是影响土壤中重金属的生物有效性的重要因素之一,在酸性土壤上,pH 上升能增加土壤对镉的固定能力,减少土壤溶液中镉浓度,从而降低其生物有效性^[11]。

表 2 是不同镉污染土壤秸秆还田后土壤醋酸铵提取态镉随时间的变化结果。从表 2 可以看出,对于镉污染水稻土,尽管还田秸秆中的镉只占还田土壤中镉的 1.5%~3.8%(表 1)且秸秆还田明显提高了土壤的 pH(图 1a),但秸秆还田后显著增加了土壤中醋酸铵提取态镉的含量,秸秆还田量越高,土壤中醋酸铵提取态镉含量增加也越多。在秸秆还田量相同的条件下,还田菜豆秸秆和玉米秸秆对土壤醋酸铵提取态镉

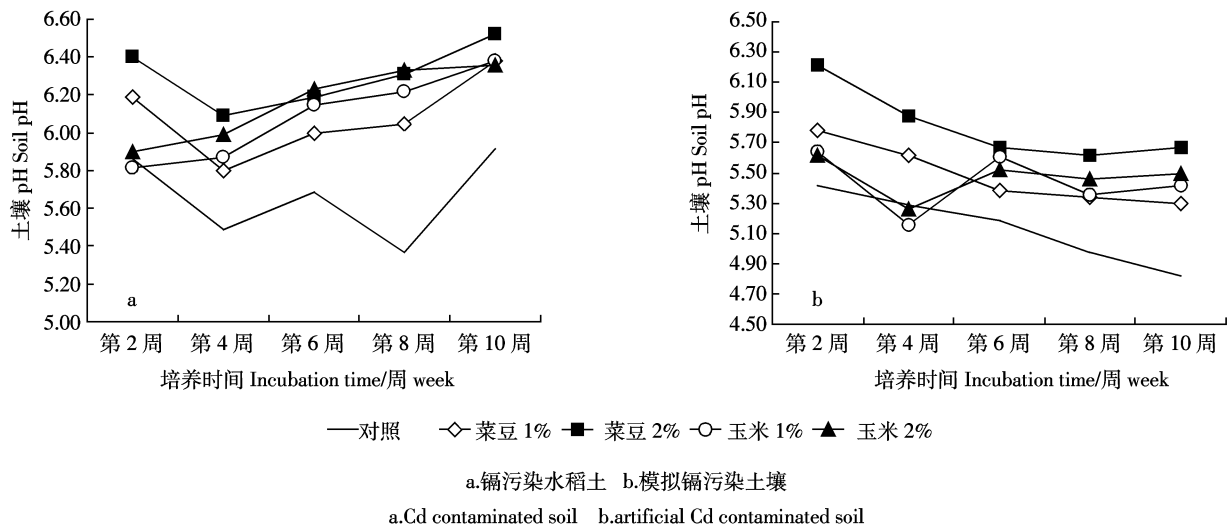


图 1 不同镉污染土壤还田不同秸秆后土壤 pH 的动态变化

Figure 1 Dynamics of soil pH of Cd-contaminated soil with crop straw return

含量的影响差异不显著。从秸秆还田后不同时间土壤醋酸铵提取态镉的变化可以看出,秸秆还田后的前 6 周与秸秆不还田的处理比土壤醋酸铵提取态镉增加显著,6 周后增加幅度越来越小。秸秆还田后显著增加了镉污染水稻土中醋酸铵提取态镉含量的主要原因可能是秸秆快速分解释放出大量有机酸和可溶性有机碳所致,因为还田秸秆中镉只占土壤中镉量的 1.5%~3.8%,但土壤中醋酸铵提取态镉在培养后的第 2 周还田处理比不还田的对照处理增加了 17%~33%。本试验中还田秸秆为菜豆和玉米的苗,还田前经过粉碎,因此还田后分解较快。作物秸秆形式还田的有机碳属于活性有机碳,在土壤中分解快,只有很小部分能进入稳定土壤碳库^[6]。本试验中用粉碎的秸秆,目的也是了解含镉秸秆还田后快速分解过程对土壤镉生物有效性的影响。

从表 2 还可以看出,对于人为添加水溶性硫酸镉的模拟镉污染土壤,由于添加水溶性硫酸镉后土壤中醋酸铵提取态镉含量相对很高,虽然加入的秸秆中含有一定量的镉,但还田不同种类和不同量的秸秆后对土壤中醋酸铵提取态镉含量影响不显著。同一处理秸秆还田后不同时间土壤醋酸铵提取态镉的变化也不明显。

醋酸铵提取的重金属镉主要为交换态镉,活性较大,容易被植物吸收。DTPA 提取态镉则为土壤中螯合态镉,也称为“有效态”镉,是常用来衡量其生物可吸收性的另一个指标^[11]。表 3 是不同镉污染土壤秸秆还田后土壤 DTPA 提取态镉随时间的变化结果。从表 3 可以看出,秸秆还田同样显著提高了镉污染水稻土

中的 DTPA 提取态镉的量,秸秆还田后 2 周时差异最为显著,与不还田的对照相比,秸秆还田处理土壤 DTPA 提取态镉增加了 6%~28%。但随培养时间延长,这种增加变的不明显。从表 3 还可以看出,在培养前期,还田量相同的情况下还田玉米秸秆的土壤 DTPA 提取态镉的增加比还田菜豆秸秆的处理更明显。

对于人为添加水溶性硫酸镉的模拟镉污染土壤,同样由于添加水溶性硫酸镉后土壤中 DTPA 提取态镉含量很高,还田不同种类和不同量的秸秆后对土壤中 DTPA 提取态镉含量影响不显著。从表 3 还可以看出,对于人为添加水溶性硫酸镉的模拟镉污染土壤,水溶性镉在土壤中存在老化作用,但本培养试验阶段老化作用不明显。有研究表明水溶性镉在土壤中的老化过程需要 120 d 或更长^[12]。

2.2 镉污染土壤上秸秆还田对白菜生长、镉含量及土壤有效镉的影响

表 4 是不同镉污染土壤上还田不同种类和数量秸秆后对白菜生长和镉吸收的影响。从表中可以看出,不论在镉污染水稻土上还是在模拟镉污染土壤上,还田菜豆秸秆对白菜生长没有显著影响,但还田玉米秸秆均显著降低了白菜的生物量。造成这种差异的原因与秸秆 C/N 比有关,玉米秸秆 C/N 比高,分解时微生物会吸收土壤中更多的氮素,尽管白菜种植前施用了肥料,由于玉米秸秆分解时秸秆对土壤养分的竞争影响了白菜的生长,还田玉米秸秆处理的白菜在第 3 周时仍表现出缺氮症状。从白菜体内镉含量看,在镉污染水稻土上,1%秸秆还田量对白菜体内镉含量没有影响,2%秸秆还田量显著降低了白菜体内镉

表 2 不同镉污染土壤秸秆还田后土壤醋酸铵提取态镉随时间的变化($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 2 Dynamics of NH_4OAc extractable Cd in soil with straw return($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

土壤	秸秆种类	秸秆用量/%	培养时间/周				
			2	4	6	8	10
镉污染水稻土	对照	0	0.562 c	0.845 b	0.578 c	0.875 ab	0.830 b
	菜豆	1	0.658 b	0.898 ab	0.610 bc	0.895 ab	0.842 b
		2	0.688 ab	0.932 a	0.640 b	0.920 a	0.868 ab
	玉米	1	0.685 ab	0.942 a	0.647 b	0.823 b	0.858 ab
		2	0.748 a	0.960 a	0.737 a	0.803 b	0.917 a
	对照	0	2.00 a	2.16 a	2.10 a	2.10 a	2.38 a
模拟镉污染土壤	菜豆	1	2.05 a	2.19 a	2.09 a	2.08 a	2.29 a
		2	2.10 a	2.19 a	2.08 a	2.08 a	2.27 a
	玉米	1	2.12 a	2.19 a	2.06 a	2.11 a	2.29 a
		2	2.21 a	2.28 a	2.04 a	2.10 a	2.29 a
	对照	0	2.00 a	2.16 a	2.10 a	2.10 a	2.38 a
	菜豆	1	2.05 a	2.19 a	2.09 a	2.08 a	2.29 a

注:同一列、同一土壤数字后无共同字母表示差异达到 5%显著性,以下表同。

表 3 不同镉污染土壤秸秆还田后土壤 DTPA 提取态镉随时间的变化(mg•kg⁻¹)
Table 3 Dynamics of DTPA extractable Cd in soil with straw return(mg•kg⁻¹)

土壤	秸秆种类	秸秆用量/%	培养时间/周				
			2	4	6	8	10
镉污染水稻土	对照	0	0.862 b	0.830 b	0.803 a	1.07 a	1.02 a
		1	0.920 b	0.838 b	0.785 a	1.08 a	1.03 a
		2	0.950 ab	0.897 ab	0.808 a	1.13 a	1.07 a
	玉米	1	1.01 a	0.920 ab	0.875 a	1.05 a	1.09 a
		2	1.11 a	0.955 a	0.928 a	1.08 a	1.14 a
模拟镉污染土壤	对照	0	2.86 a	2.81 a	2.73 a	3.03 a	3.09 a
		1	2.82 a	2.84 a	2.72 a	3.09 a	2.98 a
		2	2.80 a	2.87 a	2.70 a	3.05 a	2.91 a
	玉米	1	3.00 a	2.90 a	2.70 a	3.06 a	3.06 a
		2	2.98 a	2.99 a	2.78 a	3.09 a	3.09 a

含量。还田 2%玉米秸秆和还田 2%菜豆秸秆白菜体内镉含量分别降低了 18%和 27%。在模拟镉污染土壤上,还田 2%玉米秸秆的处理白菜体内镉含量则显著高于其他处理,其他秸秆还田处理白菜体内镉的含量与秸秆不还田的对照比没有显著变化。秸秆还田后增加了镉污染水稻土中醋酸铵提取态镉(表 2)和 DTPA 提取态镉含量(表 3),但白菜对镉的吸收并没有增加,甚至减少,这可能是因为两种提取态镉含量的增加是在秸秆还田后的前期,这个阶段白菜吸收镉能力较低所致。

白菜地上部吸镉量是生物量变化和白菜体内镉含量变化的综合表现。从表 4 可以看出,镉污染水稻土上种植的白菜只有还田 2%玉米秸秆的处理其吸镉量降低,而此降低则是由于生物量降低所造成。在模拟镉污染土壤上,还田 2%玉米秸秆的处理白菜生物量也降低了,但由于此处理白菜含镉量增加,白菜的

总吸镉量并没有降低。从表 4 两种土壤上不同处理白菜体内镉含量结果还可以看出,模拟镉污染土壤上由于加入的水溶性硫酸镉生物有效性很高,白菜镉含量高出镉污染水稻土上白菜的 6 倍以上。

表 5 是不同镉污染土壤秸秆还田并种植白菜后土壤 pH 和有效态镉的变化。从表 5 可以看出,与不种白菜的土壤培养试验结果类似,秸秆还田后 2 种镉污染土壤 pH 值也均明显提高。在镉污染水稻土上,还田菜豆和玉米秸秆并种植白菜后也仍表现出提高了土壤中醋酸铵和 DTPA 提取态镉含量,与不还田的对照处理相比,还田 2%玉米秸秆处理均达到差异显著水平。在模拟镉污染土壤上,秸秆还田对土壤中醋酸铵和 DTPA 提取态镉含量的影响也不明显。比较秸秆还田后种植白菜(表 5)和不种作物(表 2、表 3)土壤中提取态镉含量的变化可以看出,相同处理土壤中醋酸铵和 DTPA 提取态镉含量种白菜后比不种作物

表 4 不同镉污染土壤秸秆还田对白菜生长和白菜镉含量的影响
Table 4 Dry weight and Cd uptake of Chinese cabbage in Cd contaminated soil with straw return

土壤	秸秆种类	秸秆用量/%	地上部干重/g•pot ⁻¹	地上部镉含量/mg•kg ⁻¹	地上部吸镉量/mg•pot ⁻¹
镉污染水稻土	对照	0	5.71 a	10.2 a	0.06 a
		1	4.53 bc	10.0 a	0.05 a
		2	5.19 ab	7.4 b	0.04 a
	玉米	1	3.87 c	10.3 a	0.04 a
		2	2.61 d	8.4 b	0.02 b
模拟镉污染土壤	对照	0	4.25 a	69.4 b	0.30 a
		1	4.28 a	64.6 b	0.28 b
		2	4.28 a	65.3 b	0.28 b
	玉米	1	3.17 b	78.1 b	0.24 b
		2	3.31 b	97.9 a	0.32 a

表 5 不同镉污染土壤秸秆还田种植白菜后土壤 pH 和有效态镉的变化
Table 5 Soil pH and extractable Cd in soil with straw return after grown Chinese cabbage

土壤	秸秆种类	秸秆用量/%	土壤 pH	NH ₄ OAc-Cd/mg·kg ⁻¹	DTPA-Cd/mg·kg ⁻¹
镉污染水稻土	对照	0	6.2 d	0.68 bc	0.86 c
		1	6.6 b	0.72 ab	0.91 c
		2	7.0 a	0.63 c	0.90 c
	玉米	1	6.3 cd	0.69 bc	1.00 b
		2	6.4 bc	0.76 a	1.07 a
模拟镉污染土壤	对照	0	5.6 b	1.52 a	2.10 a
		1	5.7 b	1.62 a	2.16 a
		2	6.1 a	1.58 a	2.18 a
	玉米	1	6.0 a	1.66 a	2.26 a
		2	6.1 a	1.55 a	2.15 a

降低了近 1/3，这表明 2 种提取态镉是作物吸收镉的重要的来源。本试验中秸秆还田后增加了土壤中醋酸铵和 DTPA 提取态镉含量,但白菜体内镉含量和总吸镉量没有显著增加的原因一方面是由于秸秆还田养分竞争影响了白菜生长,另一方面是由于还田秸秆经过了粉碎,在土壤中分解快,醋酸铵和 DTPA 提取态镉含量增加主要是还田后的前期，而此时期白菜很小,根系吸收的量低造成的。

3 讨论

我国有约 14 000 hm² 的镉污染农田土壤，且大部分为轻度污染^[11]。通过农业措施降低农田土壤中重金属生物有效性，生产符合人体健康要求的农产品对耕地资源紧缺的我国农业生产有重要意义^[13]。一般情况下作物秸秆中重金属含量远高于收获的作物籽粒中重金属的含量，重金属污染农田上秸秆还田不仅提高了土壤生产力，同时也把作物吸收的大部分重金属也归还了土壤。另外,秸秆在土壤中分解对土壤中重金属的环境行为和生物有效性也会产生显著的影响,从生产的农产品的质量安全考虑,重金属污染农田土壤上可否进行秸秆还田需要明确。本研究表明,秸秆还田后虽然显著提高了土壤的 pH,但土壤中醋酸铵和 DTPA 提取态镉含量也显著增加,秸秆还田后 2 周时土壤中醋酸铵提取态镉含量增加了 17%~33%，而还田秸秆带入土壤的镉只占土壤全镉的 3.8%以下,因此可以推断,土壤中有效态镉的增加主要是由于秸秆分解时释放出的有机酸和水溶性有机碳对土壤中镉的活化作用所致，相关的研究也证明了此推断^[9]。但也有研究表明,施用秸秆等有机物可以原位钝化土壤中重金属^[3],这主要与还田秸秆在

土壤中的转化过程有关，腐殖化过程会增加对土壤重金属的吸附,降低重金属的有效性。但作物秸秆形式还田的有机碳属于活性有机碳,在土壤中分解快，半衰期为 1.5~6 个月,能进入稳定土壤碳库的比例较小^[6]。因此,秸秆还田后矿化过程是主要过程,秸秆分解后所含的 Cd 也会释放到土壤中。秸秆还田后提高了土壤中镉的生物有效性应受到关注。本研究条件下秸秆还田提高了土壤中有效态镉含量，但种植的白菜体内镉含量没有增加甚至降低,这可能是由于白菜生长期短,前期吸收能力弱有关。另外,秸秆还田后影响了白菜的生长也是一个重要因素，这些需要进一步深入研究。

4 结论

(1)镉污染土壤上秸秆还田显著提高了土壤 pH 值。镉污染水稻土上还田玉米和菜豆秸秆显著提高了土壤中醋酸铵提取态镉和 DTPA 提取态镉含量,还田后 2 周时醋酸铵和 DTPA 提取态镉含量增加幅度分别达到 17%和 6%以上,随时间延长土壤中可提取态镉增加变得不明显。人为添加水溶性镉的模拟镉污染土壤上还田玉米和菜豆秸秆对土壤中醋酸铵提取态镉和 DTPA 提取态镉含量影响均不明显。

(2)镉污染水稻土上秸秆还田量 1%时对白菜镉含量影响不明显,秸秆还田量 2%时显著降低了白菜镉含量。还田 2%玉米秸秆和菜豆秸秆白菜体内镉含量分别降低了 18%和 27%。还田玉米秸秆影响了白菜生长,显著降低了白菜的生物量。模拟镉污染土壤上还田菜豆秸秆对白菜生长和镉含量影响不明显，还田 2%玉米秸秆降低了白菜生物量但增加了白菜镉含量。

参考文献:

- [1] Pan G X, Smith P, Pan W N. The role of soil organic matter in maintaining the productivity and yield stability of cereals in China[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2009, 129(1-3):344-348.
- [2] 张福锁, 等. 我国肥料产业与科学施肥战略研究报告[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2008:61-71.
- ZHANG Fu-suo, et al. Report on fertilizer production and fertilization stratagem of China[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2008:61-71.
- [3] Alvarenga P, Goncalves A P, Fernandes R M, et al. Organic residues as immobilizing agents in aided phytostabilization: (I) Effect on soil chemical characteristics[J]. *Chemosphere*, 2009, 74(10):1292-1300.
- [4] Susan T, John R H, Mark A N, et al. Remediation of metal polluted mine soil with compost: Co-composting versus incorporation[J]. *Environmental Pollution*, 2009, 157(2):690-697.
- [5] 单玉华, 李昌贵, 陈 晨, 等. 施用秸秆对淹水土壤镉、铜溶出的影响[J]. 生态学杂志, 2008, 27(8):1362-1366.
- SHAN Yu-hua, LI Chang-gui, CHEN Chen, et al. Effects of straw incorporation on the solubility of cadmium and copper in flooded soil[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(8):1362-1366.
- [6] 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, 2004:30-40.
- WU Jian-guo, XU De-ying. Effects of land use on soil organic carbon: theory, method and practice[M]. Beijing: China Forest Industry Press, 2004:30-40.
- [7] Duong T T T, Baumann K, Marschner P. Frequent addition of wheat straw residues to soil enhances carbon mineralization rate[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41:1475-1482.
- [8] Xu J M, Tang C, Chen Z L. The role of plant residues in pH change of acid soils differing in initial pH[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38:709-719.
- [9] Yan F, Huetsch B W, Schubert S. Soil pH dynamics after incorporation of fresh and oven-dried plant shoot materials of faba bean and wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2006, 169:506-508.
- [10] 戴志刚, 鲁剑巍, 鲁明星, 等. 水稻秸秆用量对淹水培养土壤表层溶液理化性质的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(1):20-24.
- DAI Zhi-gang, LU Jian-wei, LU Ming-xing, et al. Effect of rice straw on the physicochemical properties of field surface solution under water-logged incubation[J]. *Chinese Journal of Eco-agriculture*, 2010, 18(1):20-24.
- [11] 陈怀满, 等. 土壤-植物系统中的重金属污染[M]. 北京: 科学出版社, 1996:88-92.
- CHEN Huai-man, et al. Heavy metals in plant-soil systems[M]. Beijing: Science Press, 1996:88-92.
- [12] Tang X Y, Zhu Y G, Cui Y S, et al. The effect of ageing on the bioaccessibility and fractionation of cadmium in some typical soils of China[J]. *Environment International*, 2006, 32(5):682-689.
- [13] 吴飞龙, 苏德纯. 油菜连作及施用堆肥对土壤镉赋存形态和生物有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(4):658-662.
- WU Fei-long, SU De-chun. Phytoavailability and speciation of Cd in contaminated soil after repeated cropping of oilseed rapes and amended with compost[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(4):658-662.