

秸秆炭化后还田对不同镉污染农田土壤中镉生物有效性和赋存形态的影响

张 晶, 苏德纯*

(中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘 要:通过土壤培养试验和生物盆栽试验,研究不同镉污染土壤上作物秸秆炭化后还田对不同镉污染土壤中镉的赋存形态和生物有效性影响,结果表明:在碱性的镉污染土壤上,秸秆炭化后还田降低了玉米地上部生物量,但对玉米地上部镉含量和镉吸收量无显著影响;在酸性的模拟镉污染土壤上秸秆炭化后还田对玉米生长无影响,但还田含镉的油菜秸秆黑炭显著增加了玉米地上部镉含量和镉吸收量;还田不含镉的玉米秸秆黑炭对镉污染土壤中 DTPA 提取态镉含量没有明显影响,但还田含镉的油菜秸秆黑炭显著增加了镉污染土壤中 DTPA 提取态镉含量;施用含镉的油菜秸秆黑炭增加了镉污染土壤中水溶和交换态镉含量;施用玉米和油菜秸秆黑炭均显著降低了模拟镉污染土壤中水溶和交换态镉含量;增加了松有机结合态、碳酸盐结合态和紧有机结合态镉含量;模拟镉污染土壤施用玉米和油菜秸秆黑炭 6 个月后土壤中水溶和交换态镉仍然是土壤镉的主要赋存形态,水溶和交换态镉占土壤全镉的 70%以上。综合以上结果可知,秸秆黑炭不能降低污染土壤中镉的生物有效性和植物对土壤镉的吸收量。

关键词:秸秆黑炭;镉污染土壤;形态;生物有效性

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)10-1927-06

Phytoavailability and Chemical Speciation of Cd in Different Cd-contaminated Soils Influenced by Bio-char Incorporation

ZHANG Jing, SU De-chun*

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

Abstract: Greenhouse study was conducted to investigate the phytoavailability and chemical speciation of Cd in two Cd-contaminated soils influenced by bio-char incorporation and to assess the possible remediation by bio-char return to soil. Results showed that bio-char incorporation significantly decreased shoot dry weight but it had no effect on Cd concentration and uptake of maize in Cd-contaminated soil. Bio-char incorporation also had no effect on shoot dry weight of maize in artificial Cd-contaminated soil but it significantly increased Cd concentration and uptake of maize with Cd-containing bio-char incorporation. The DTPA extractable Cd concentration increased with the incorporation of Cd-containing bio-char in Cd-contaminated soil. With bio-char incorporating, the water soluble and exchangeable Cd concentration in soil decreased significantly and concentrations of organic bound and carbonate Cd increased significantly in artificial Cd-contaminated soil. While, the water soluble and exchangeable Cd concentration in soil increased significantly with Cd-containing bio-char incorporated into the Cd-contaminated soil. Bio-char incorporation did not decrease the phytoavailability of Cd in both of the two Cd-contaminated soils.

Keywords: bio-char incorporation; Cd contaminated soil; speciation; bioavailability

秸秆还田是提高农田土壤有机碳含量的重要途径。我国每年产生农作物秸秆达 6~7 亿 t, 直接还田的

比例达到 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 hm²[1]。但在重金属镉污染农田上, 由于作物吸收的重金属镉大部分存在于秸秆中, 作物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镉归还了土壤, 秸秆在土壤中周转较快, 秸秆中的镉也会随秸秆分解而释放出来增加后茬作物对重金属镉的吸收[2]。因此, 重金属污染农田

收稿日期: 2012-03-29

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: 张 晶(1983—), 女, 硕士, 主要从事农田土壤重金属污染防治研究。E-mail: jingzhang1004@yahoo.com.cn

* 通信作者: 苏德纯 E-mail: dcsu@cau.edu.cn

土壤上是否适合进行秸秆直接还田还有待深入研究。作物秸秆不完全燃烧后成为黑炭。黑炭具有化学和微生物惰性^[3]。黑炭在土壤中可以存留很长时间,研究表明黑麦草秸秆制成的黑炭在土壤最佳条件下的年分解率只有 0.5%^[4]。黑炭具有丰富的表面官能团,在大气、水和土壤中表现出很强的吸附能力。黑炭可用于吸附水体和土壤中的有机污染物和重金属阳离子,并影响其环境行为^[5-6]。秸秆炭化后的黑炭对土壤中重金属有强烈的吸附作用,由于其土壤中矿化很慢,可以用来修复重金属污染土壤^[7]。研究表明,在某些镉污染土壤上施用稻草秸秆和棉花秸秆炭化成的黑炭能提高作物的产量,显著降低土壤镉的生物有效性,减少作物对土壤镉的吸收^[8]。但也有研究表明,活性炭等惰性有机炭并不能降低土壤中重金属镉的生物有效性,甚至可增加作物对镉的吸收^[9]。本文通过研究不同重金属镉污染农田土壤上秸秆炭化后还田对土壤镉赋存形态和生物有效性的影响,探讨秸秆炭化后还田能否成为重金属镉污染农田土壤上镉生物有效性调控的措施,为重金属镉污染农田土壤的修复利用和农产品的安全生产提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

试验用镉污染土壤有 2 种,直接采自污染农田的镉污染土壤和人为添加水溶性镉盐的模拟镉污染土壤。镉污染土壤采自浙江富阳,土壤为水稻土,土壤全镉含量 $2.06 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤 pH 为 7.72,有机质含量为 $30.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。土壤风干并过 4 mm 筛备用。

模拟镉污染土壤采自浙江嘉兴,土壤为水稻土,土壤全镉含量 $0.72 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤 pH 为 5.61,有机质含量 $34.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;土壤风干并过 4 mm 筛,添加 CdSO_4 溶液,添加镉量为 $3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。添加 CdSO_4 溶液后土壤反复混匀,温室中风干并稳定 30 d。

1.2 供试植物

玉米 *Zea mays* (农大 437)。

1.3 试验用秸秆黑炭的制取及黑炭的基本性质

试验用秸秆为镉污染土壤上收获的油菜秸秆和非镉污染农田上的玉米秸秆。秸秆黑炭的制备方法如下:将粉碎过 2 mm 筛的油菜秸秆和玉米秸秆装入直径 10 cm、高 15 cm 的圆柱形不锈钢罐中,每罐 $40 \text{ g} \pm 2 \text{ g}$,然后放入马弗炉(Sx4-4-10)中,从室温升温至 450°C ,保温 2 h,断电 1 h,开启 30 min,冷却至室温。秸秆和制得的秸秆黑炭的基本性质见表 1。

1.4 温室盆栽试验

镉污染土壤和模拟镉污染土壤 2 种土壤均按照 $0.3 \text{ gN} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土, $0.20 \text{ gP}_2\text{O}_5 \cdot \text{kg}^{-1}$ 土, $0.3 \text{ gK}_2\text{O} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土,并分别以 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, KH_2PO_4 , K_2SO_4 溶液施肥。每种土壤上均设如下处理:空白(不施用秸秆黑炭,作为对照处理);施用 2%玉米秸秆黑炭;施用 2%油菜秸秆黑炭。秸秆黑炭与土壤充分混匀。每盆装土 500 g,每处理 3 个重复。每盆种植玉米 7 粒,待玉米出苗,保留 4 株。玉米生长 60 d 后收获。收取地上部分鲜样称重后,去离子水冲洗干净, 90°C 杀青 30 min,然后 65°C 烘干至恒重,粉碎混匀制成待测样品。

1.5 培养试验

试验处理与盆栽试验相同但不种植物,保持水分含量和盆栽试验相同,培养 6 个月,每个月采土样 1 次,风干过 1 mm 筛,测定 DTPA 提取态镉含量。并在培养后 1 个月和 6 个月取土样,用改进的 Tessier 连续提取法测定土壤中镉的赋存形态变化。

1.6 测定项目与方法

玉米地上部和玉米秸秆和油菜秸秆镉含量测定: $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{O}_2$ 微波消解(CEM MARS 5),原子吸收法测定(TAS-990 普析通用原子吸收分光光度计)。用植物标样(GBW08510)进行分析质量控制。

DTPA 提取态镉含量的测定: $0.005 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ DTPA + $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ CaCl_2 + $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ TEA 提取液, pH7.3,液土比 5:1,振荡 2 h,原子吸收法测定。

用改进的 Tessier 法^[10-11](表 2)测定培养土壤培养 1 个月和 6 个月时土壤镉赋存形态。

表 1 试验用秸秆及秸秆黑炭的基本性质

Table 1 Physico-chemical properties of crop straw and bio-char

秸秆	来源	出炭率/%	镉含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	pH	C 含量/%	N 含量/%	C/N
玉米秸秆	非污染农田	—	—	—	45.7	0.378	120.9
油菜秸秆	镉污染农田	—	0.781	—	46.7	0.419	111.3
玉米秸秆黑炭	玉米秸秆炭化	28	0.183	10.2	73.2	0.763	96.0
油菜秸秆黑炭	油菜秸秆炭化	32	1.140	10.1	66.8	0.795	84.1

注:“—”含量低于检测限。

土壤和秸秆黑炭中全镉含量用盐酸-硝酸-氢氟酸-高氯酸消解,原子吸收法测定,同时用土壤标样(GBW08303)进行分析质量控制。

1.7 数据统计和分析方法

试验数据统计和差异显著性分析使用 Excel 2003 和 SAS V8 做差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 秸秆炭化后还田对不同镉污染农田土壤上玉米生长和吸收镉的影响

表 3 是不同镉污染土壤上不同的秸秆炭化后还田对种植的玉米生长和吸收镉的影响。可以看出,在镉污染土壤上施用秸秆炭化后的黑炭影响了玉米生长,降低了玉米的地上部生物量。其中施用油菜秸秆黑炭的玉米地上干重显著低于空白。但在模拟镉污染土壤上则不同,施用秸秆炭化后的黑炭对玉米地上部的生物量无显著影响。这可能是由于取于浙江富阳的镉污染土壤,其 pH 值为 7.7,中性偏碱。施用的油菜秸秆黑炭和玉米秸秆黑炭均为强碱性,pH 值均在 10 以上(表 1),施用秸秆黑炭后使土壤的 pH 进一步提高,高 pH 土壤影响了玉米生长和土壤中养分的有效性,试验中玉米生长后期镉污染土壤上施用秸秆黑炭的 2 种处理的玉米都出现了磷缺乏的症状。周建斌等^[8]也发现,施用棉秆黑炭后提高了土壤的 pH 值,进

而影响了白菜的生长。但模拟镉污染土壤 pH 值为 5.61,呈酸性,施用秸秆黑炭后 pH 值提高使其更接近适合玉米生长的中性,施用秸秆黑炭后各个处理之间玉米地上部生物量没有差异。

从表 3 不同处理玉米地上部镉含量和镉吸收量可以看出,在 2 种镉污染土壤上施用油菜秸秆黑炭后均增加了玉米地上部镉的含量,但施用玉米秸秆黑炭处理玉米地上部镉含量与对照比无显著差异,这可能是由于油菜秸秆为采自镉污染农田土壤的秸秆,油菜秸秆黑炭中含镉(表 1),施用油菜秸秆黑炭后增加了土壤中有效态镉含量所致。由于施用油菜秸秆黑炭处理种植的玉米地上部镉含量的显著增加,模拟镉污染土壤上玉米的镉吸收量也显著增加。但在镉污染土壤上不同,由于施用油菜秸秆黑炭也降低了玉米地上部干重,虽然玉米体内镉含量增加但总吸镉量与对照比无显著差异。以上结果表明,不论是酸性的模拟镉污染土壤还是碱性的镉污染土壤,施用秸秆黑炭不能降低土壤镉的生物有效性和植物对镉的吸收。如果秸秆黑炭中含镉,还会增加污染土壤中镉的生物有效性和植物吸镉量。

2.2 秸秆炭化后还田对不同镉污染土壤中 DTPA 提取态镉含量的动态影响

DTPA 提取态镉是常用来表征土壤中生物有效态镉含量高低的指标,图 1 为秸秆炭化还田后不同镉污染土壤中 DTPA 提取态镉含量平均值随培养时

表 2 改进的 Tessier 法连续浸提方法
Table 2 An improved Tessier sequential extraction method

组分名称 Fraction	提取剂 Extraction agent	操作条件 Operation condition
I.水溶+交换 Exchangeable	1 mol·L ⁻¹ MgCl ₂ , pH7.0	25 ℃振荡 1 h,离心分离,液/土=10/2.5
II.松有机结合 Weakly bound OM	0.1 mol·L ⁻¹ Na ₄ P ₂ O ₇ , pH9.5	25 ℃振荡 2 h,离心分离,液/土=10/2.5
III.碳酸盐结合 Carbonates	1 mol·L ⁻¹ NaAc-HAc, pH5.0	25 ℃振荡 6 h,离心分离,液/土=20/2.5
IV.锰氧化物结合 Mn oxides	0.1 mol·L ⁻¹ NH ₄ OH·HCl, pH2.0	25 ℃振荡 0.5 h,离心分离,液/土=20/2.5
V.紧有机结合 Strongly bound OM	30%H ₂ O ₂ , 1 mol·L ⁻¹ NH ₄ Ac, pH5.0	85 ℃水浴近干,冷却后提取,振荡 2 h,离心分离
VI.铁氧化物结合 Fe oxides	0.2 mol·L ⁻¹ HAc+ 0.2 mol·L ⁻¹ NH ₄ Ac+0.1 mol·L ⁻¹ L Vc, pH3.0	96 ℃恒温水浴 0.5 h,离心分离,液/土=20/2.5

表 3 秸秆炭化后还田对不同镉污染农田土壤上玉米生长和吸收镉的影响
Table 3 Shoot dry weight, Cd concentration and Cd uptake of maize grown on different Cd contaminated soils with biochar incorporated

土壤样品	处理	地上部干重/g·pot ⁻¹	地上部镉含量/mg·kg ⁻¹	镉吸收量/μg·pot ⁻¹
镉污染土壤	空白(对照)	9.75a	8.06ab	75.0a
	玉米秸秆黑炭	7.34ab	7.69b	56.7a
	油菜秸秆黑炭	6.40b	9.13a	58.2a
模拟镉污染土壤	空白(对照)	12.5a	24.3b	301.7b
	玉米秸秆黑炭	12.8a	24.9b	320.1b
	油菜秸秆黑炭	12.1a	33.0a	399.3a

注:同种土壤、同列中不同字母表示差异达到显著性(P<0.05)。

间的变化动态,图中“污空”为污染土壤空白,“污玉”为污染土壤还田玉米秸秆黑炭,“污油”为污染土壤还田油菜秸秆黑炭。“模空”、“模玉”、“模油”分别为“模拟污染土壤的空白、还田玉米秸秆黑炭和油菜秸秆黑炭”。从图 1 可以看出,在镉污染土壤上,与空白处理相比还田不含镉的玉米秸秆黑炭对土壤中 DTPA 提取态镉含量没有明显影响,但还田污染土壤上收获的含镉的油菜秸秆黑炭显著增加了前期(4 个月以内)土壤中 DTPA 提取态镉含量,培养 6 个月后这种差异则变为不明显。在人为添加水溶性镉的模拟镉污染土壤上则不同,只有培养的第 1 个月还田污染土壤上收获的含镉的油菜秸秆黑炭显著增加土壤中 DTPA 提取态镉含量,以后不同处理间 DTPA 提取态镉含量没有显著差异。由于还田污染土壤上收获的含镉的油菜秸秆黑炭增加了 2 种污染土壤上 DTPA 提取态镉含量,增加了种植的玉米对镉的吸收(表 3)。从图 1 还可以看出,由于模拟镉污染土壤中人为添加了水溶性镉,其不同处理的 DTPA 提取态镉含

量每个培养时期均分别显著高于镉污染土壤的不同处理。

2.3 秸秆炭化后还田对不同镉污染土壤镉赋存形态的影响

表 4 为镉污染土壤上施用不同秸秆黑炭后 1 个月和 6 个月时土壤中镉赋存形态的变化。可以看出,在镉污染土壤上施用秸秆黑炭 1 个月后,与对照相比施用油菜秸秆黑炭处理土壤中水溶和交换态的镉含量显著增加,这可能是由于油菜秸秆黑炭中含水溶性镉所致。施用玉米秸秆黑炭和油菜秸秆黑炭土壤中的松有机结合态镉含量和紧有机结合态镉含量与对照比均显著增加,但此 2 种形态的镉的含量均较低,不到水溶和交换态镉含量的 1/5。培养 6 个月后,施用玉米秸秆黑炭和油菜秸秆黑炭土壤中镉的形态与对照比除氧化铁结合态含量显著增加外,其他形态各处理间均无显著差异。

从表 4 还可以看出,在镉污染土壤上水溶和交换态镉所占的比例最大,约占土壤全镉的 50%以上。施用秸秆黑炭后,随培养时间延长水溶和交换态镉所占的比例降低,松有机结合态、碳酸盐结合态和紧有机结合态镉含量增加,但 2 种秸秆黑炭处理之间没有显著差异。水溶和交换态是生物有效性最高的一种形态,其他各种形态随提取的步骤增加而有效性降低,残渣态是最不利于植物吸收的形态^[12-14],从镉污染土壤中镉的赋存形态变化也可以看出,镉污染土壤上施用秸秆黑炭对土壤中镉并没有起到钝化的作用,如果秸秆黑炭中含镉还会增加土壤中有效态镉的含量,盆栽试验中增加玉米对土壤镉的吸收也证明了这一点(表 3)。虽然施用秸秆黑炭在初期增加了土壤中松有机结合态和紧有机结合态镉的含量,但对土壤中有机结合态镉含量的影响是短期的,对土壤镉的生物有效性影响作用较小。

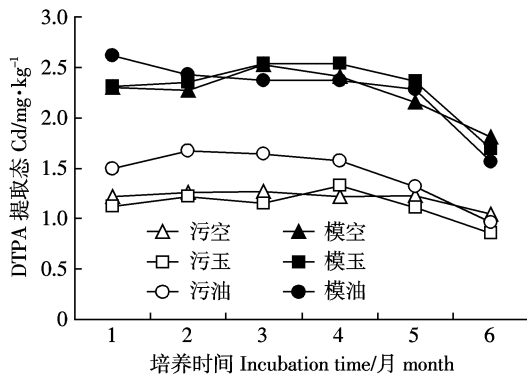


图 1 秸秆炭化后还田对不同镉污染土壤中 DTPA 提取态镉含量的动态影响

Figure 1 Dynamics of DTPA extractable Cd concentration in different Cd contaminated soils incorporated with biochar

表 4 秸秆炭化后还田对镉污染土壤中镉赋存形态的影响($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 4 Change of Cd speciation in Cd-contaminated soil with biochar incorporation($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

镉形态	培养 1 个月			培养 6 个月		
	对照	玉米秸秆黑炭	油菜秸秆黑炭	对照	玉米秸秆黑炭	油菜秸秆黑炭
水溶和交换态	1.147±0.115b	1.147±0.153b	1.430±0.071a	1.147±0.212a	1.047±0.153a	1.247±0.071a
松有机结合态	0.027±0.058b	0.050±0.018a	0.073±0.011a	0.128±0.009a	0.118±0.046a	0.130±0.022a
碳酸盐结合态	0.259±0.054a	0.202±0.087a	0.254±0.003a	0.304±0.049a	0.247±0.066a	0.268±0.047a
锰氧化物结合态	0.072±0.003a	0.063±0.003a	0.061±0.010a	0.063±0.005a	0.061±0.008a	0.060±0.002a
紧有机结合态	0.181±0.003b	0.216±0.004a	0.195±0.021ab	0.241±0.020a	0.242±0.061a	0.266±0.010a
氧化铁结合态	0.169±0.013a	0.158±0.002a	0.179±0.030a	0.139±0.002b	0.177±0.030a	0.198±0.009a

注:相同培养时间、同行内不同字母表示差异达到显著性($P<0.05$)。

表 5 秸秆炭化后还田对模拟镉污染土壤中镉赋存形态的影响($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)Table 5 Change of Cd speciation in artificial Cd-contaminated soil with biochar incorporation($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

镉形态	培养 1 个月			培养 6 个月		
	对照	玉米秸秆黑炭	油菜秸秆黑炭	对照	玉米秸秆黑炭	油菜秸秆黑炭
水溶和交换态	3.093±0.037a	2.720±0.045b	2.645±0.047b	2.752±0.064a	2.539±0.037b	2.347±0.133c
松有机结合态	0.049±0.010b	0.098±0.014a	0.118±0.032a	0.114±0.059a	0.125±0.028a	0.210±0.104a
碳酸盐结合态	0.039±0.006c	0.059±0.011b	0.140±0.005a	0.080±0.023b	0.116±0.003b	0.243±0.030a
锰氧化物结合态	0.027±0.003b	0.028±0.006b	0.044±0.006a	0.032±0.007c	0.054±0.007b	0.068±0.001a
紧有机结合态	0.144±0.015c	0.204±0.048b	0.245±0.021a	0.203±0.025b	0.268±0.016ab	0.306±0.056a
氧化铁结合态	0.032±0.001a	0.043±0.028a	0.038±0.005a	0.043±0.007b	0.077±0.006ab	0.080±0.008a

注:相同培养时间、同行内不同字母表示差异达到显著性($P<0.05$)。

表 5 为模拟镉污染土壤上施用不同秸秆黑炭后 1 个月和 6 个月时土壤中镉赋存形态的变化。从表 5 可以看出,在模拟镉污染土壤上施用秸秆黑炭后 1 个月土壤中水溶和交换态镉含量显著降低,松有机结合态、碳酸盐结合态和紧有机结合态镉含量显著增加,且油菜秸秆黑炭处理碳酸盐结合态和紧有机结合态的增加量显著高于玉米秸秆黑炭处理。与镉污染土壤上不同的是施用秸秆黑炭 6 个月后,模拟镉污染土壤中水溶和交换态镉含量仍显著低于对照,而紧有机结合态和碳酸盐结合态镉含量仍显著高于对照。这是因为模拟镉污染土壤是人为加入水溶性镉的土壤且为酸性,其水溶态镉的含量很高,施用碱性的秸秆黑炭后一部分水溶态镉会较容易转化成有机结合态和碳酸盐结合态并持续很长时间,由于油菜秸秆黑炭比玉米秸秆黑炭颗粒大,其吸附作用也更强。但由于模拟镉污染土壤中水溶态镉的含量很高,转化的比例占总镉比例并不大,这种形态转化对玉米吸收镉并没有显著影响(表 3)。

从表 5 还可以看出,虽然秸秆黑炭显著降低了模拟镉污染土壤中水溶和交换态镉含量,但施用秸秆黑炭 6 个月时,水溶和交换态镉仍然是模拟镉污染土壤的主要形态,这个形态的镉仍能占土壤全镉的 70% 左右,使土壤中有效态镉含量维持很高水平。

3 讨论

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潜力,是一个双赢的措施^[15]。秸秆还田是提高农田土壤有机碳含量的重要途径,但在重金属镉污染农田上,秸秆还田增加了后茬作物对重金属镉的吸收^[2]。秸秆炭化后还田的黑炭是惰性有机碳,把植物残体制成的黑炭施入土壤既能提高土壤综合生产力又能提高土壤有机碳固持^[16],有

研究表明施用秸秆黑炭能提高作物的产量,并通过吸附和共沉淀作用显著降低土壤镉的生物有效性,减少作物对土壤镉的吸收^[8]。还有研究认为秸秆黑炭可以用来修复重金属污染土壤^[6-7]。但本试验条件下的研究结果表明,不论是碱性的镉污染土壤还是酸性的模拟镉污染土壤,施用秸秆黑炭不能降低土壤镉的生物有效性和植物对镉的吸收。如果秸秆黑炭中含镉,还会增加污染土壤中 DTPA 提取态镉的含量和植物对镉的吸收。从土壤中镉的赋存形态变化看,施用秸秆黑炭虽然降低了模拟镉污染土壤中水溶和交换态镉含量,增加松有机结合态、碳酸盐结合态和紧有机结合态镉含量,但这种形态变化没有降低植物对土壤镉的吸收。这可能是由于模拟镉污染土壤上水溶和交换态镉是土壤中镉的主要赋存形态,占土壤全镉的 70% 以上。

秸秆黑炭虽然改变了部分形态的含量,但其改变的绝对数量有限,因而没有影响作物对土壤镉的吸收。另外,也可能是因为土壤中被秸秆黑炭吸附的镉仍能被植物吸收,仍具有较高的植物有效性所致。有研究表明,秸秆黑炭的阳离子交换量远低于腐殖质,且吸附的镉、铅等金属阳离子易解吸^[17]。因此能否用秸秆黑炭来修复重金属污染土壤,降低作物对镉的吸收还需要商榷和深入研究。

4 结论

(1) 本试验条件下施用秸秆黑炭不能降低 2 种镉污染土壤中镉的生物有效性和植物对镉的吸收。如果秸秆黑炭中含镉,还会增加污染土壤中镉的生物有效性和植物吸镉量。

(2) 还田不含镉的玉米秸秆黑炭对镉污染土壤中 DTPA 提取态镉含量没有影响,但还田含镉的油菜秸秆黑炭显著增加了镉污染土壤中 DTPA 提取态镉

含量。

(3)施用玉米和油菜秸秆黑炭均显著降低了模拟镉污染土壤中水溶和交换态镉含量,增加松有机结合态、碳酸盐结合态和紧有机结合态镉含量。施用油菜秸秆黑炭增加了镉污染土壤中水溶和交换态镉含量,水溶和交换态镉是这2种污染土壤中镉的主要赋存形态。

参考文献:

- [1] 张福锁. 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. Research report of fertilizer industry and fertilization strategy in China[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2008: 61-71.
- [2] 贾 乐, 朱俊艳, 苏德纯. 秸秆还田对镉污染农田土壤中镉生物有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(10): 1992-1998.
JIA Le, ZHU Jun-yan, SU De-chun. Effects of crop straw return on soil cadmium availability in different cadmium contaminated soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(10): 1992-1998.
- [3] Schmidt M W I, Noack A G. Black carbon in soils and sediments: Analysis, distribution, implications, and current challenges[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, 14(3): 777-793.
- [4] Kuzyakov Y, Subbotina I, Chen H Q, et al. Black carbon decomposition and incorporation into soil microbial biomass estimated by ^{14}C labeling[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41(2): 210-219.
- [5] 龚兵丽, 邱宇平, 程海燕, 等. 炭质吸附剂吸附溶解性有机质的研究进展[J]. 净水技术, 2008, 27(1): 32-34.
GONG Bing-li, QIU Yu-ping, CHENG Hai-yan, et al. Research progress on the adsorption of dissolved organic matter by carbonaceous adsorbent[J]. *Water Purification Technology*, 2008, 27(1): 32-34.
- [6] Rhodes A H, Carlin A, Semple K T. Impact of black carbon in the extraction and mineralization of phenanthrene in soil[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(3): 740-745.
- [7] 毕于运, 寇建平, 王道龙. 中国秸秆资源综合利用技术[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2008: 170-174.
BI Yu-yun, KOU Jian-ping, WANG Dao-long. Straw resources utilization technology of China[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2008: 170-174.
- [8] 周建斌, 邓丛静, 陈金林, 等. 棉秆炭对镉污染土壤的修复效果[J]. 生态环境, 2008, 17(5): 1857-1860.
ZHOU Jian-bin, DENG Cong-jing, CHEN Jin-lin, et al. Remediation effects of cotton stalk carbon on cadmium(Cd) contaminated soil[J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(5): 1857-1860.
- [9] 孟令阳, 辛术贞, 苏德纯. 不同惰性有机碳物料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, 2011, 30(8): 1531-1538.
MENG Ling-yang, XIN Shu-zhen, SU De-chun. Effects of materials containing different inert organic carbon on Cd speciation and bio-availability in soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(8): 1531-1538.
- [10] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals[J]. *Analytical Chemistry*, 1979, 51(7): 844-851.
- [11] 韩凤祥, 胡霭堂, 秦怀英. 不同土壤环境中镉的形态分配及活性研究[J]. 环境化学, 1990, 9(1): 49-53.
HAN Feng-xiang, HU Ai-tang, QIN Huai-ying. Fractionation and availability of added soluble cadmium in soil environment[J]. *Environmental Chemistry*, 1990, 9(1): 49-53.
- [12] Marchioretto M M, Bruning H, Loan N T P, et al. Heavy metal extraction from anaerobically digested sludge[J]. *Water Science and Technology*, 2002, 46(10): 1-8.
- [13] Ahumada I, Escudero P, Adriana C, et al. Use of sequential extraction to assess the influence of sewage sludge amendment on metal mobility in Chilean soils[J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2004, 6(4): 327-334.
- [14] 韩凤祥, 胡霭堂, 秦怀英, 等. 几种土壤组分对原有土壤中锌的富集能力的研究[J]. 土壤学报, 1991, 28(3): 327-332.
HAN Feng-xiang, HU Ai-tang, QIN Huai-ying, et al. Enrichment capability of native zinc by some components of soils in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1991, 28(3): 327-332.
- [15] 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 & Environment*, 2009, 129(1-3): 344-348.
- [16] Mark P M. Agricultural bio-char production, renewable energy generation and farm carbon sequestration in Western Australia: Certainty, uncertainty and risk[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2009, 129(1-3): 1-7.
- [17] 吴 成, 张晓丽, 李关宾. 黑炭吸附汞砷铅镉离子的研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(2): 770-774.
WU Cheng, ZHANG Xiao-li, LI Guan-bin. Sorption of Hg^{2+} , As^{3+} , Pb^{2+} and Cd^{2+} by black carbon[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(2): 770-774.