

不同改良剂对石灰性镉污染土壤的镉形态和小白菜镉吸收的影响

李 丹, 李俊华*, 何 婷, 蒙佩佩

(新疆生产建设兵团绿洲生态农业重点实验室/石河子大学农学院, 新疆 石河子 832000)

摘 要:采用盆栽试验, 分别在正常土壤(A)、低镉含量土壤(B)、高镉含量土壤(C)三种土壤上种植小白菜, 研究4种改良剂(鸡粪、腐植酸、海泡石和生物炭)对小白菜生长、镉含量及土壤各形态含量的影响。结果表明, 高施用量的鸡粪能显著提高小白菜的生物量, 增加42.7%~79.8%。在B土壤中, 除海泡石外, 鸡粪、腐植酸和生物炭均增加小白菜地上部的镉含量; 在C土壤中, 4种改良剂对小白菜吸收镉均有促进作用。施入不同改良剂对土壤中镉形态的影响不同, 在A土壤中镉主要以交换态和铁锰氧化态形式存在, 在鸡粪和腐植酸处理下, 土壤中镉主要以交换态和碳酸盐结合态形式存在, 海泡石则增加了土壤中残渣态和有机态的比例。相关分析表明, 小白菜镉含量与土壤中交换态镉、碳酸盐结合态镉、铁锰氧化态镉和有机态镉存在极显著正相关关系($P < 0.01$), 与土壤总镉含量的相关性最好。

关键词:小白菜; 镉吸收; 改良剂; 镉形态

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2015)09-1679-07 doi:10.11654/jaes.2015.09.008

Effects of Different Amendments on Soil Cd Forms and Cd Uptake by Chinese Cabbage in Cd-contaminated Calcareous Soils

LI Dan, LI Jun-hua*, HE Ting, MENG Pei-pe

(The Key Laboratory of Oasis Eco-agriculture, Xinjiang Production and Construction Group/College of Agronomy of Shihezi University, Shihezi 832000, China)

Abstract: Soil amendments influence the forms and plant bioavailability of Cd in soil. In this pot experiment, Chinese cabbage was grown in different materials amended soils containing 0.3, 1.5, and 3 mg Cd·kg⁻¹. The amendments were biochar, chicken manure, humic acid, and sepiolite. The growth, biomass and Cd content of plant and the soil Cd forms were measured. Results showed that cabbage biomass increased by 42.7%~79.8% by the highest amount of chicken manure as compared to the control. At 1.5 and 3.0 mg Cd·kg⁻¹, all amendments increased the Cd content of cabbage, with exception of sepiolite at 1.5 mg Cd·kg⁻¹. Amendments significantly affected Cd forms. Soil Cd was mainly exchangeable and Fe-Mn oxide-bound forms at 0.3 mg Cd·kg⁻¹ soil. However, the major forms of Cd were exchangeable and carbonate-bound Cd in both chicken manure and humic acid treatments. The sepiolite treatment increased the proportion of residual Cd and organic matter-bound Cd. Correlation analysis showed that the Cd content of Chinese cabbage was significantly and positively correlated with exchangeable, carbonate-bound, Fe-Mn oxide-bound and organic matter-bound Cd in soil. The Cd content in Chinese cabbage was also highly correlated with soil total Cd.

Keywords: Chinese cabbage; Cd uptake; soil amendment; Cd form

由于工业三废的排放、农业生产中含镉肥料和农药的大量使用, 造成农田土壤中镉污染, 严重影响了生态环境和农产品安全。镉是植物非必需元素, 但可

以被植物吸收和富集, 并对其生长发育产生影响, 降低农产品的产量和品质。通过食物链的作用, 植物中的镉在人和动物体内富集, 并引发各种疾病。目前, 对重金属污染土壤施用改良剂进行修复的方法受到了国内外学者的广泛关注, 其实际应用也比较广泛^[1-3]。敖俊华等^[4]研究发现土壤中某些养分的有效性会随pH发生变化, 大多数养分在土壤pH 6.5~7.0时有效性最高或接近最高。杨丽娟等^[5]研究得出, 长期施用有机肥和氮肥能够提高土壤有效锌的含量。赵明等^[6]通

收稿日期: 2015-02-26

基金项目: 石河子大学高层次人才项目(RCZX201132); 国家自然科学基金项目(31360501); 国家科技支撑计划项目(2012BAD42B02-3)

作者简介: 李 丹(1988—), 女, 山西晋中人, 硕士研究生, 主要从事重金属污染土壤修复研究。E-mail: sxjzysld@163.com

* 通信作者: 李俊华 E-mail: ljh630703@163.com

过研究有机肥对西红柿质量和土壤重金属有效态含量的影响,发现施用有机肥后土壤中有效态镉含量有所增加。有关研究表明,在重金属污染土壤中施用改良剂可以有效提高植物修复效率,从而更好地修复被重金属污染的土壤^[7-8]。在我国西北地区石灰性土壤上开展改良剂与超积累植物联合修复的研究,将会成为今后重金属污染土壤修复的一个方向。

本文以西北地区常见的石灰性镉污染土壤为研究对象,探讨改良剂种类和用量对土壤镉含量、有效态镉含量、小白菜生长及镉吸收的影响,试图在不同程度的镉污染土壤上选择最佳的改良剂和施用量,对西北地区镉污染土壤的修复具有现实意义。

1 材料与方法

1.1 试验材料

选取小白菜作为供试植物,品种为夏绿二号,试验地点为新疆石河子市石河子大学农学院试验站。供试土壤为当地石灰性土壤,外源镉采用 CdCl_2 溶液的形式添加到土壤中,使镉含量为 $1.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,分别记为低镉含量土壤(B)和高镉含量土壤(C),以不添加镉的正常土壤(A)为对照。试验前土壤各理化性状见表 1。

1.2 实验设计

本研究采用盆栽试验方法,在 3 种土壤中分别加入 4 种改良剂,分别为鸡粪、腐植酸、海泡石、生物炭,其镉本底含量分别为 0.26 、 0.45 、 0.20 、 $0.14 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。每种改良剂设高、低 2 个施用量,见表 2。每盆装入 2 kg 土,共 54 组,每组 3 盆作为重复。浇水 500 mL 待水土稳定 2 d 后,将 10 粒小白菜种子均匀撒施在土表并覆盖少量土,待小白菜真叶长出后选择长势一致的将每盆定苗至 3 株。45 d 后采集地上部分植株样品,分别用蒸馏水将其洗涤后,擦干表面水分,用电子天平称量每盆植株的鲜重,在 105°C 下杀青 0.5 h 后 75°C 烘干至恒重,烘干后用粉碎机粉碎待测。

1.3 测定方法

先用微波消解^[9-10],再用日立 Z-2000 石墨炉-原子分光光度计测定土壤镉总量及小白菜镉含量。根据

表 2 试验设计

Table 2 Experimental design

处理 Treatment		A 土壤 Soil A	B 土壤 Soil B	C 土壤 Soil C
对照 Check(CK)/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	—	0	0	0
鸡粪 Chicken manure(J)/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	高(JH) 低(JL)	30 10	30 10	30 10
腐植酸 Humic acid(F)/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	高(FH) 低(FL)	15 5	15 5	15 5
海泡石 Sepiolite(H)/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	高(HH) 低(HL)	15 5	15 5	15 5
生物炭 Biochar(BC)/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	高(BCH) 低(BCL)	15 5	15 5	15 5

Tessier 等^[11]连续提取法,将土壤中的镉分为交换态(Exch)、碳酸盐结合态(Carb)、铁锰氧化物结合态(FeMnOX)、有机结合态(OM)及土壤残渣态(Res)五种形态。取风干后过 100 目筛的土壤样品,进行连续提取^[12-13],提取液采用石墨炉原子吸收法测定不同形态镉的含量,用差减法计算土壤残渣态的镉含量,即利用镉总量减去前四种镉形态含量,余下的即确认为残渣态镉含量。

1.4 数据分析

试验数据为三次重复的平均值,采用 SPSS 13.0 和 Microsoft Excel 2003 软件对数据进行分析 and 处理,双因素方差分析 Duncun 法多重比较各处理间的差异显著性($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 改良剂对小白菜地上部生物量的影响

在该地区没有镉污染的土壤中施用改良剂均增加了小白菜地上部的生物量(图 1A)。与对照相比,改良剂对小白菜生物量的影响为 $\text{JH} > \text{FL} > \text{FH} > \text{BCH} > \text{JL} > \text{HH} > \text{HL} > \text{BCL}$,其中高含量的鸡粪使小白菜生物量增加幅度最大,显著高于对照($P < 0.05$),其次是低施用量的腐植酸,比对照增加了 42.7%。以低施用量的生物炭增加量最低,为 10.8%。总体而言,小白菜的生物量在鸡粪处理下达到最大。此外,小白菜地上部生物

表 1 供试土壤的基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of soils

土壤 Soil	镉背景值 Cd content/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	有机质 OM/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	pH	碱解氮 Avail. N/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	速效磷 Avail. P/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
正常土壤 Normal Soil(A)	0.32	27.42	7.36	47.73	46.32
低镉含量土壤 Low Cd content soil(B)	1.50	26.61	7.47	46.57	42.18
高镉含量土壤 High Cd content soil(C)	3.10	30.24	7.50	49.91	43.95

量因不同改良剂的施用量大小而不同。

图 1B 显示了 4 种改良剂对小白菜地上部生物量的影响,在 B 土壤上,鸡粪显著促进了小白菜的生长,较对照增加了 44.0%,其次为高含量的腐植酸,增加了 17.5%。改良剂对小白菜地上部生物量的影响顺序为 JH>JL>FH>HH>HL>BCH>BCL>FL。该结果与 A 土壤不同,说明改良剂对小白菜地上部生物量的影响与土壤中镉含量有关。除鸡粪和高含量的腐植酸外,其他改良剂的添加并未对小白菜的生物量产生影响,说明当镉污染程度较低时,生物炭和海泡石不能促进小白菜地上部的生长。

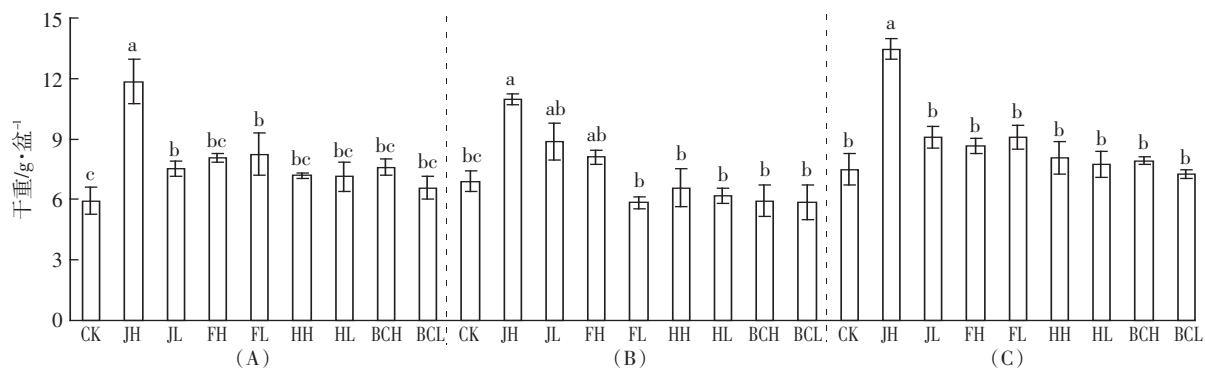
在 C 土壤上(图 1C),各改良剂处理的小白菜地上部生物量均高于对照,其中高施用量的鸡粪处理最有利于小白菜地上部生长,较对照显著高出了 79.8% ($P<0.05$),其余改良剂对小白菜的地上部生物量影响不显著。改良剂在 C 土壤上对小白菜的生物量影响与 A 土壤一致。

对比镉污染程度不同土壤中的对照处理(CK)可知,随着土壤中镉含量的增加,小白菜的生物量增加。小白菜生物量在 C 土壤达到最大,B 土壤次之,分别较 A 土壤增加了 26.4%和 16.3%,说明一定量的镉可

以刺激植物地上部生长。除低施用量的鸡粪之外,各改良剂处理下小白菜生物量在 C 土壤中最大,其次是 A 土壤。

2.2 不同改良剂对小白菜中镉含量的影响

小白菜中镉含量见表 3。A 土壤施用改良剂对小白菜地上部镉含量影响不显著,B 土壤海泡石处理下小白菜地上部镉含量最低,但与对照差异不显著。高含量的生物炭和低含量的鸡粪处理显著增加了小白菜镉含量 ($P<0.05$),分别比对照增加了 78.7%和 69.1%,其他改良剂对小白菜地上部分镉含量影响不大。各处理对小白菜中镉含量的影响表现为 BCH>JL>JH>BCL>FH>FL>CK>HH>HL。在 C 土壤中,添加土壤改良剂均促进了小白菜地上部分对镉的吸收。除高施用量的腐植酸和鸡粪之外,其他处理的小白菜地上部镉含量均显著高于对照 ($P<0.05$),表现为 HH、BCL、BCH、HL、FL 和 JL 分别比对照增加 88.2%、51.9%、48.2%、46.4%、30.6%和 29.6%。由此可以看出,在相同污染土壤中,不同改良剂种类及用量对小白菜的镉含量的影响不同。所以,在改良和修复镉污染土壤过程中,为了提高改良剂的修复效率,还应考虑各改良剂的最适用量。



A、B、C 依次表示未添加镉的土壤、添加低镉含量的土壤和添加高镉含量的土壤;不同小写字母表示每种土壤的处理间差异显著($P<0.05$)。下同
A, B and C represent normal, low Cd and high Cd soils, respectively;
Different letters within a soil indicate significant differences ($P<0.05$) between treatments. The same below

图 1 不同土壤上施用不同改良剂后小白菜干重

Figure 1 Effects of amendments on dry weight of Chinese cabbage in different soils

表 3 施用不同改良剂对小白菜地上部镉含量的影响($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 3 Effects of soil Cd content and amendments on Cd content in Chinese cabbage shoots($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

土壤 Soil	小白菜地上部镉含量 Cd content in Chinese cabbage shoots								
	CK	JH	JL	FH	FL	HH	HL	BCH	BCL
A	0.191a	0.159a	0.086a	0.093a	0.094a	0.115a	0.086a	0.069a	0.062a
B	0.699bc	0.866b	1.182a	0.831b	0.821b	0.550c	0.493c	1.248a	0.834b
C	0.636d	0.648d	0.825bc	0.660cd	0.831bc	1.197a	0.932bc	0.943ab	0.967ab

注:表中同一行的不同字母表示各处理间差异显著($P<0.05$)。下同。
Note: Values followed by different letters within a row are significantly different at 0.05 level. The same below.

2.3 改良剂对小白菜地上部镉吸收量的影响

在 A 土壤中,高施用量的鸡粪显著促进了小白菜对镉的吸收量($P<0.05$)(表 4),较对照增加了 1.7 倍,生物炭显著降低了小白菜地上部分镉的吸收($P<0.05$),比对照降低了 58.7%;在 B 土壤中,相比对照,4 种改良剂使小白菜地上部镉吸收量均有所增加。鸡粪、高施用量的腐植酸和生物炭均显著增加了小白菜的镉吸收量($P<0.05$),分别为对照的 110.0%、56.3%和 55.1%;在 C 土壤中,4 种改良剂对小白菜地上部镉吸收量比对照均有增加,鸡粪和海泡石在不同施用量处理下均显著高于对照($P<0.05$),分别比对照高出了 69.1%和 75.8%,不同施用量的腐植酸与生物炭处理对小白菜镉吸收量影响不同,低施用量的腐植酸和高施用量的生物炭处理显著高于对照($P<0.05$),而高施用量的腐植酸和低施用量生物炭对小白菜镉吸收量的影响不显著。这说明在同一镉污染的土壤中,改良剂不同用量对小白菜吸收镉的影响不同。

2.4 改良剂对土壤中镉含量的影响

改良剂对土壤中镉含量的影响如图 2 所示。施用腐植酸、生物炭、鸡粪显著降低了土壤总镉含量($P<0.05$),A 土壤镉含量分别降低了 5.3%、4.7%、3.7%,B 土壤分别降低了 18.2%、21.1%、18.5%,C 土壤分别降低了 77.2%、30.1%、42.1%。海泡石在镉污染土壤(B 和 C 土壤)上显著降低了土壤镉含量($P<0.05$)。在 A 土壤中,改良剂对土壤镉含量降低幅度依次为腐植

酸>生物炭>鸡粪>海泡石;在 B 土壤中,土壤修复效果随鸡粪和腐植酸施用量的增加而增加,增加幅度分别为 19.9%和 12.6%,海泡石和生物炭施用量对土壤修复效果影响不显著;在 C 土壤中改良剂对土壤修复规律与 B 土壤类似。随着土壤镉含量增加,各改良剂的改良效果均增加。

2.5 改良剂对土壤中镉形态分布的影响

在对照土壤中,镉在 A、B 和 C 土壤中主要赋存形态是交换态镉(图 3),平均所占比例为 43.1%,其次是铁锰氧化态镉,占 29.1%,而碳酸盐结合态镉、有机结合态镉和残渣态镉所占比例之和只有 27.8%。改良剂类型对土壤中镉的存在形态影响不同:腐植酸处理使土壤中交换态镉和碳酸盐结合态镉的比例增加,海泡石降低了土壤中交换态镉的比例,增加了土壤中残渣态镉、铁锰氧化态镉和有机态镉的含量;生物炭明显增加了土壤中碳酸盐结合态镉含量比例,由对照的 9.2%增加到 18.6%;在鸡粪处理中,土壤镉主要以交换态、碳酸盐结合态和铁锰氧化态形式存在,其他含量均很少,尤其是残渣态镉和有机态镉。在重金属的各个存在形态中,可交换态和碳酸盐结合态金属之和即生物可利用态,铁锰氧化物结合态和有机物结合态之和为潜在生物可利用态,残渣态为植物难吸收利用形态^[14]。A、B、C 三种土壤中对照组的生物可利用态镉含量所占比例分别为 57.0%、50.1%、49.8%,潜在生物可利用态镉比例分别为 26.4%、36.3%、37.1%,难吸收

表 4 改良剂对小白菜地上部镉吸收量的影响($\mu\text{g}\cdot\text{盆}^{-1}$)

Table 4 Effects of soil Cd content and amendments on Cd uptake by Chinese cabbage shoots($\mu\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$)

土壤 Soil	小白菜地上部镉吸收量 Cd uptake by Chinese cabbage shoots								
	CK	JH	JL	FH	FL	HH	HL	BCH	BCL
A	1.112b	3.003a	0.652bc	0.748bc	0.788bc	0.842bc	0.621bc	0.510c	0.408c
B	4.780c	9.404a	10.335a	7.470b	4.787c	3.616cd	3.048d	7.412b	4.870c
C	4.769d	8.568ab	7.566abc	5.711cd	7.530abc	9.593a	7.174bc	7.471abc	6.994bcd

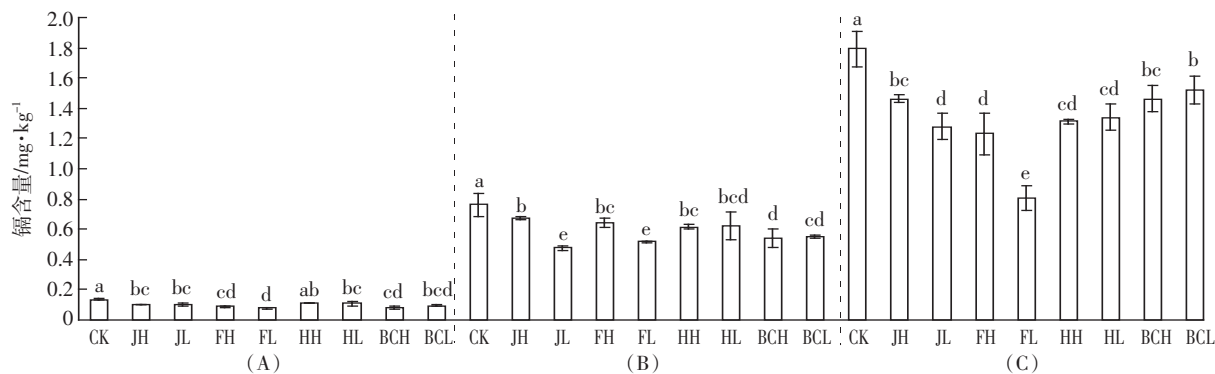


图 2 改良剂对土壤镉含量影响

Figure 2 Effects of amendments on Cd concentrations in three different soils

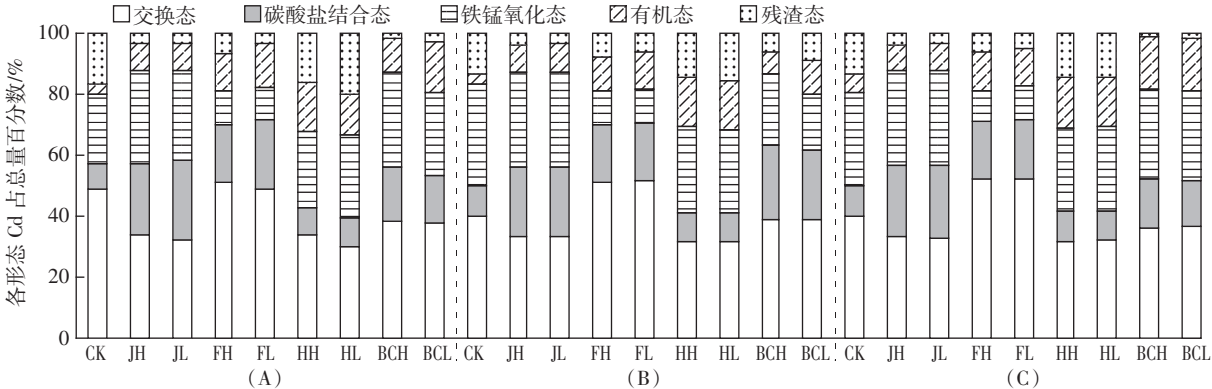


图 3 不同改良剂对土壤镉形态的影响
Figure 3 Effects of amendments on distribution of different Cd forms in soil at plant harvest

利用形态镉比例分别为 16.6%、13.6%、13.1%。

2.6 土壤中不同形态镉与小白菜镉含量的相关性

对小白菜镉含量、土壤总镉及土壤中不同形态镉含量间进行相关性分析(表 5),结果表明:小白菜镉含量与土壤总镉的相关性最好($P<0.01$),其次是交换态镉。小白菜镉含量与交换态镉、铁锰氧化态镉、碳酸盐结合态镉和有机态镉均呈现显著正相关关系($P<0.05$),与残渣态镉呈负相关;土壤总镉与交换态镉、铁锰氧化态镉、碳酸盐结合态镉和有机态镉显著正相关($P<0.05$),与残渣态镉显著负相关($P<0.05$);交换态镉、碳酸盐结合态镉、铁锰氧化态镉及有机态镉四种形态之间也相互存在显著的正相关关系($P<0.05$),残渣态镉与交换态镉、铁锰氧化态镉、有机态镉之间显著负相关($P<0.05$)。这说明施用改良剂后导致不同形态之间的相互转化,高活性态镉与低活性态镉间呈互为消长的关系。

3 讨论

有关研究表明,添加草木灰和啤酒污泥等改良剂后,小白菜生物量和品质均得到相应提高^[15]。肖光华

等^[16]研究表明,石灰+膨润土处理使土壤全氮、全磷、有效磷、全钾、速效钾含量显著升高,同时小白菜地上部全氮、地上部全磷和地上部全钾含量均比对照显著升高。郭利敏等^[17]研究则显示,添加石灰、钙镁磷肥、泥炭对镉处理下小白菜无明显的增产效果。本试验对不同污染土壤上小白菜生物量的研究表明,在 A 和 B 土壤上,添加改良剂均增加了小白菜地上部生物量,只有在 C 土壤上,高施用量的海泡石没有增加小白菜的生物量,而鸡粪的增量在各土壤中最高。这说明从增加作物生物量的角度出发,鸡粪处理可能会使植物带走更多镉,比其他改良剂在这方面的改良效果更具优势。

黏土矿物海泡石为硅氧八面体,土壤中的 Cd^{2+} 因 Mg^{2+} 取代而被吸附。此外,海泡石表面的 $Al-OH$ 、 $Si-OH$ 等基团也易与 Cd^{2+} 、 Zn^{2+} 发生表面络合吸附。在石灰性土壤中,土壤 pH 值较高,海泡石的吸附作用也较强^[18]。生物炭表面含有丰富的、与重金属形成稳定金属络合物的含氧官能团,增加土壤对重金属的专性吸附量,且能在环境中长久存在^[19-22],鸡粪和腐植酸不仅可以增加土壤有机质,促进植物的生长,还可以

表 5 土壤中镉形态与小白菜镉含量之间的相关性
Table 5 Correlation between soil Cd forms and Cd content in Chinese cabbage

相关系数 Correlation	交换态 Exch	铁锰氧化态 FeMnOX	碳酸盐结合态 Carb	有机态 OM	残渣态 Res	土壤总镉 Total Cd	小白菜镉含量 Cd content in Chinese cabbage
交换态 Exch	1	0.814**	0.838**	0.776**	-0.598**	0.959**	0.636**
铁锰氧化态 FeMnOX		1	0.765**	0.777**	-0.625**	0.935**	0.559**
碳酸盐结合态 Carb			1	0.663**	-0.274	0.853**	0.630**
有机态 OM				1	-0.503**	0.823**	0.566**
残渣态 Res					1	-0.651**	-0.368
土壤总镉 Total Cd						1	0.648**
小白菜镉含量 Content Cd in Chinese cabbage							1

注:** 表示不同处理间极显著相关($P<0.01$)。n=27。
Note:** indicate significance at 0.01 levels. n=27.

提高土壤肥力。刘秀珍等^[23]研究表明有机肥可通过改变污染土壤中的重金属形态而降低其生物有效性,可用于重金属污染土壤修复。腐植酸是分布最为广泛的天然有机物质,能与环境中的金属离子、氧化物、氢氧化物、矿物质、有机质、有毒活性污染物等物质发生相互作用,对 Cu、Pb、Cd 三种金属元素具有吸附和解吸能力^[24]。本研究通过研究以上四种改良剂对土壤镉的修复效果得出:在 B 土壤上,鸡粪、生物炭和腐植酸均有提高镉污染土壤(B 和 C)上小白菜地上部对镉吸收的作用。海泡石对小白菜地上部分镉含量有明显的抑制作用。其原因可能是海泡石影响小白菜根系对镉的吸收,具体机理还需要进一步研究。在 C 土壤上,HH、BCL、BCH、HL、FL 和 JL 处理对小白菜地上部镉含量均显著高于对照,而只有低施用量的鸡粪和高施用量的海泡石显著增加了小白菜地上部镉的吸收量。可见,小白菜地上部镉含量是土壤镉污染修复效应的一个方面,在改良剂修复过程中要综合植物对镉的吸收。

土壤重金属镉仍具有较大的生物可利用性,会对植物及土壤微生物产生毒害作用。改良剂的施用在显著降低土壤可交换态镉比例的同时,也增加了其他形态镉的比例,而且不同形态之间的转化趋势与改良剂种类有关^[25]。猪粪腐熟后含有腐植酸,施用后增加了土壤养分和有机质含量,改变了重金属的形态,土壤中重金属被钝化,生物有效性降低^[26]。王开峰等^[27]对小麦土壤研究表明,长期施用中、高量有机肥提高了锌、铜、镉总量及有效态含量。本文中有有机改良剂腐植酸、鸡粪和生物炭不同程度地促进了土壤镉由不可利用态向潜在可利用态和可利用态的转化,且潜在可利用态和可利用态之间存在显著的正相关关系($P < 0.05$)。可能是由于在碱性土壤中加入鸡粪或腐植酸等物质使土壤 pH 值降低,土壤镉的生物有效性增加。代允超等^[28]研究表明,泥炭因含有有机质、腐植酸、纤维素等对离子有较强的交换作用,可降低土壤 pH 值,改变土壤中镉的存在形态。张云青等^[29]研究得出石灰性土壤施用鸡粪和猪粪后 2 个月, Cu、Zn、Cd、Pb 的生物有效性分别为等量相应重金属无机盐处理的 11%~29% 和 3.4%~41%。此外,石灰性土壤中 Ca^{2+} 含量较高,镉在土壤中容易形成碳酸盐沉淀,当土壤 pH 降低时, H^{+} 含量增加,对 Ca^{2+} 起到拮抗作用。生物炭增加了土壤碳酸盐结合态镉的存在比例。鸡粪作为一种特殊的有机改良剂施入土壤后,土壤镉主要以交换态、碳酸盐结合态和铁锰氧化态形式存在,其他形态镉含量较

少,说明鸡粪可以活化土壤镉,促进植物对镉的吸收。植物对镉的吸收与土壤可利用态镉呈极显著相关($P < 0.05$),改良剂在修复土壤方面对镉存在形态的影响至关重要。

4 结论

(1)在石灰性土壤上,有机改良剂对促进小白菜的生长作用优于无机改良剂。基本呈现鸡粪>腐植酸>生物炭≈海泡石。在镉污染程度较低的土壤(B 土壤)中,4 种改良剂对小白菜地上部分镉的吸收都有促进作用,鸡粪在该土壤上的修复效果更好。在镉污染程度较高的土壤(C 土壤)上,改良剂对小白菜吸收镉总量的影响大小为海泡石>鸡粪>生物炭>腐植酸。

(2)4 种改良剂对镉污染土壤均有修复作用,可以显著降低土壤中镉含量,且不同施用量对土壤修复效果不同。添加改良剂对土壤中镉的存在形态有所改变,对照土壤中主要以交换态和铁锰氧化态两种形式存在,在镉污染土壤中,4 种改良剂对土壤中镉的活化效果为腐植酸>鸡粪≈生物炭>海泡石。

参考文献:

- [1] 刘宛茹, 张磊, 杨惟薇, 等. 外源有机酸对红蛋植物吸收和转运镉的影响[J]. 土壤通报, 2014, 45(1): 205-209.
LIU Wan-ru, ZHANG Lei, YANG Wei-wei, et al. Effect of organic acids amendment on cadmium uptake and translocation by *Echinodorus Osiris*[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45(1): 205-209.
- [2] 徐磊, 周静, 梁家妮, 等. 巨菌草对 Cu、Cd 污染土壤的修复潜力[J]. 生态学报, 2014, 34(18): 5342-5348.
XU Lei, ZHOU Jing, LIANG Jia-ni, et al. The remediation potential of *Pen-nisetum* sp. on Cu, Cd contaminated soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(18): 5342-5348.
- [3] 林鸾芳, 王昌全, 李冰, 等. 秸秆还田下改良剂对水稻生长和 Cd 吸收积累的影响[J]. 生态环境学报, 2014, 23(9): 1492-1497.
LIN Luan-fang, WANG Chang-quan, LI Bing, et al. Effect of amendments on rice growth and Cd uptake based on straw returning[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(9): 1492-1497.
- [4] 敖俊华, 黄振瑞, 江永, 等. 石灰施用对酸性土壤养分状况和甘蔗生长的影响[J]. 中国农学通报, 2010, 26(15): 266-269.
AO Jun-hua, HUANG Zhen-rui, JIANG Yong, et al. Effects of applying lime on the properties of acid soil and the growth of sugarcane[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(15): 266-269.
- [5] 杨丽娟, 李天来, 刘好, 等. 长期施用有机肥和化肥对菜田土壤锌有效性的影响[J]. 土壤通报, 2005, 36(3): 395-397.
YANG Li-juan, LI Tian-lai, LIU Yu, et al. Effect of long-term fertilization on the availability of Zn in vegetable soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(3): 395-397.
- [6] 赵明, 蔡葵, 孙永红, 等. 不同施肥处理对番茄产量品质及土壤有效态重金属含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(6): 1072-1078.
ZHAO Ming, CAI Kui, SUN Yong-hong, et al. Influence of organic and chemical fertilizers on tomato yield, quality, and the content of available

- heavy metals in soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(6):1072-1078.
- [7] Martínez F D, Walker D J. The effects of soil amendments on the growth of *Atriplex halimus* and *Bituminaria bituminosa* in heavy metal-contaminated soils[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2012, 223(1):63-72.
- [8] 李磊, 陈宏, 潘家星, 等. 改良剂对红蛋植物修复污染土壤重金属铅和镉效果的影响[J]. 生态环境学报, 2010, 19(4):822-825.
LI Lei, CHEN Hong, PAN Jia-xing, et al. Effect of amendments on Phytoremediation of *Echinodorus Osiris* in the soil contaminated by Pb and Cd[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(4):822-825.
- [9] 况辉, 卢邦俊. 微波消解-原子吸收分光光度法测定土壤中的 Cu, Zn, Pb, Cd, Cr 和 Ni[J]. 分析仪器, 2007(4):29-31.
KUANG Hui, LIU Bang-jun. Determination of Cu, Zn, Pb, Cd, Cr and Ni in soil samples by microwave digestion-AAS[J]. *Analytical Instrumentation*, 2007(4):29-31.
- [10] 郭希敏, 李艳辉. 微波消解-石墨炉原子吸收光谱法测定蔬菜中铅和镉[J]. 现代农业科技, 2010(11):268-270.
GUO Xi-min, LI Yan-hui. Determination of lead and cadmium in vegetables by microwave digestion-graphite furnace atomic absorption spectrometric[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2010(11):268-270.
- [11] 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.
- [12] 秦普丰, 廖柏寒, 雷鸣, 等. 两种形态分析法对 EDTA 萃取前后土壤重金属的生物可利用性分析[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(3):722-727.
QIN Pu-feng, LIAO Bo-han, LEI Ming, et al. Bioavailabilities of heavy metals in two contaminated soils before and after extracted with EDTA using two sequential extraction procedures[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(3):722-727.
- [13] 王新, 周启星. 外源镉铅铜锌在土壤中形态分布特性及改性剂的影响[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(5):541-545.
WANG Xin, ZHOU Qi-xing. Distribution of forms for cadmium, lead, copper and zinc in soil and its influences by modifier[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(5):541-545.
- [14] Bacon J R, Davidson C M. Is there a future for sequential chemical extraction?[J]. *Analyst*, 2008, 133(1):25-46.
- [15] 李新颖, 朱雅兰, 陈泉源. 改良剂对 Cd 污染土壤中小白菜品质的影响[J]. 环境污染与防治, 2012, 34(5):63-67.
LI Xin-ying, ZHU Ya-lan, CHEN Quan-yuan. Effects of amendments on quality of pakchoi in Cd polluted soil[J]. *Environmental Pollution and Control*, 2012, 34(5):63-67.
- [16] 肖光华, 陈日远, 刘厚诚, 等. 改良剂对镉污染土壤和小白菜养分含量的影响[J]. 广东农业科学, 2014(20):58-61.
XIAO Guang-hua, CHEN Ri-yuan, LIU Hou-cheng, et al. Effects of amendments on contents of nutrient elements of soil and pakchoi contaminated with cadmium[J]. *College of Horticulture, South China Agricultural University*, 2014(20):58-61.
- [17] 郭利敏, 艾绍英, 唐明灯, 等. 不同改良剂对镉污染土壤中小白菜吸收镉的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(3):654-658.
GUO Li-min, AI Shao-ying, TANG Ming-deng, et al. Effect of amendment on Cd uptake by *Brassica chinensis* in Cd-contaminated soils[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(3):654-658.
- [18] 林大松, 刘尧, 徐应明, 等. 海泡石对污染土壤镉、锌有效态的影响及其机制[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2010, 46(3):346-350.
LIN Da-song, LIU Yao, XU Ying-ming, et al. Effects of sepiolite on the immobilization of cadmium and zinc in soil[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2010, 46(3):346-350.
- [19] Lehmann J. Black is the new green[J]. *Nature*, 2006, 442(10):624-626.
- [20] Liang B, Lehmann J, Solomon D, et al. Black carbon increases cation exchange capacity in soils[J]. *Soil Science Society of America*, 2006, 70(5):1719-1730.
- [21] 李力, 刘娅, 陆宇超, 等. 生物炭的环境效应及其应用的研究进展[J]. 环境化学, 2011, 30(8):1411-1421.
LI Li, LIU Ya, LU Yu-chao, et al. Effects of biochar and its applications in environmental[J]. *Environmental Chemistry*, 2011, 30(8):1411-1421.
- [22] 安增莉, 侯艳伟, 蔡超, 等. 水稻秸秆生物炭对 Pb(II) 的吸附特性[J]. 环境化学, 2011, 30(11):1851-1857.
AN Zeng-li, HOU Yan-wei, CAI Chao, et al. Characteristics of biochar on rice straw adsorption in for Pb(II)[J]. *Environmental Chemistry*, 2011, 30(11):1851-1857.
- [23] 刘秀珍, 马志宏, 赵兴杰. 不同有机肥对镉污染土壤镉形态及小麦抗性的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(3):243-252.
LIU Xiu-zhen, MA Zhi-hong, ZHAO Xing-jie. Effect of different organic manure on cadmium form of soil and resistance of wheat in cadmium contaminated soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(3):243-252.
- [24] 魏世强, 李光林, Sterberg R, 等. 腐植酸-金属离子反应动力学特征与稳态指标的探讨[J]. 土壤学报, 2003(4):554-561.
WEI Shi-qiang, LI Guang-lin, Sterberg R, et al. Kinetics of metal ion reactions with humic acids and index for steady-state[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003(4):554-561.
- [25] 高译丹, 梁成华, 裴中健, 等. 施用生物炭和石灰对土壤镉形态转化的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(2):258-261.
GAO Yi-dan, LIANG Cheng-hua, PEI Zhong-jian, et al. Effects of biochar and lime on the fraction transform of Cd in contaminated soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(2):258-261.
- [26] 晁雷, 周启星, 陈苏, 等. 施用猪粪农田重金属分布迁移和污染评价[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2006, 25(6):951-954.
CHAO Lei, ZHOU Qi-xing, CHEN Su, et al. Distribution, transfer and pollution assessment of heavy metals in farmland with swine manure applied[J]. *Journal of Liaoning Technical University*, 2006, 25(6):951-954.
- [27] 王开峰, 彭娜, 王凯荣, 等. 长期施用有机肥对稻田土壤重金属含量及其有效性的影响[J]. 水土保持学报, 2008, 22(1):105-108.
WANG Kai-feng, PENG Na, WANG Kai-rong, et al. Effects of long-term manure fertilization on heavy metal content and its availability in paddy soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(1):105-108.
- [28] 代允超, 吕家珑, 刁展, 等. 改良剂对不同性质镉污染土壤中有有效镉和小白菜镉吸收的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(1):80-86.
DAI Yun-chao, LÜ Jia-long, DIAO Zhan, et al. Effects of soil amendments on Cd bioavailability to and uptake by *Brassica chinensis* in different Cd-contaminated soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(1):80-86.
- [29] 张长青, 张涛, 李洋, 等. 畜禽粪便有机肥中重金属在不同农田土壤中生物有效性动态变化[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(1):87-96.
ZHANG Yun-qing, ZHANG Tao, LI Yang, et al. Bioavailability dynamics of heavy metals in livestock and poultry manure added to different farmland soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(1):87-96.