

罗洋, 高晋, 罗绪强, 等. 木炭施用对镉污染土壤小白菜生长及镉吸收的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(8): 1676–1682.

LUO Yang, GAO Jin, LUO Xu-qiang, et al. Effects of charcoal on growth and Cd uptake by *Brassica chinensis* in Cd-contaminated soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(8): 1676–1682.

## 木炭施用对镉污染土壤小白菜生长及镉吸收的影响

罗洋<sup>1</sup>, 高晋<sup>2</sup>, 罗绪强<sup>1</sup>, 李仪<sup>1</sup>

(1. 贵州师范学院地理与资源学院, 贵阳 550018; 2. 贵州大学农学院, 贵阳 550025)

**摘要:**以镉污染土壤和小白菜为供试对象, 采用盆栽试验, 研究了木炭在用量分别为 5、10、25、50 g·kg<sup>-1</sup> 水平时对土壤理化性质、小白菜生长及吸收镉的影响。结果表明, 木炭的施入可改善土壤理化性质, 当施用量 ≥ 25 g·kg<sup>-1</sup> 时能显著提高土壤 pH 值; 与对照相比, 添加木炭的各处理土壤有机质含量、碱解氮含量和有效磷含量等指标均显著增加, 土壤速效钾含量在木炭用量为 25 g·kg<sup>-1</sup> 时达最大, 达显著水平 ( $P < 0.05$ )。木炭的施用还促进了小白菜生长, 使其地上部生物量、叶绿素含量和根部生物量均呈增加趋势。同时, 木炭的添加降低了土壤镉有效性, 减少了小白菜对镉的吸收。与对照相比, 在木炭用量为 5~50 g·kg<sup>-1</sup> 范围内, 土壤 CaCl<sub>2</sub> 提取态镉含量、小白菜地上部镉含量和小白菜根部镉含量的降幅分别为 5.05%~20.57%、6.08%~35.98% 和 5.13%~31.50%, 小白菜各部位对镉的富集随处理水平呈递减趋势。研究表明添加适当比例的木炭可以抑制蔬菜对镉的吸收, 并改良土壤。

**关键词:** 镉污染; 木炭; 小白菜

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2018)08-1676-07 doi:10.11654/jaes.2018-0042

### Effects of charcoal on growth and Cd uptake by *Brassica chinensis* in Cd-contaminated soils

LUO Yang<sup>1</sup>, GAO Jin<sup>2</sup>, LUO Xu-qiang<sup>1</sup>, LI Yi<sup>1</sup>

(1. School of Geography and Resources, Guizhou Normal College, Guiyang 550018, China; 2. College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

**Abstract:** A pot experiment was conducted in Cd-contaminated soils to investigate the effects of amendment with charcoal at 5, 10, 25, and 50 g·kg<sup>-1</sup> on soil physicochemical properties, the growth of *Brassica chinensis*, and the absorption of Cd. The results showed that the application of charcoal could improve the physicochemical properties of soil. Soil pH significantly increased when the application amount was greater than or equal to 25 g·kg<sup>-1</sup>. The SOM, available N, and available P content under the charcoal application treatment were all significantly higher than those of the CK. The content of available K in soil was highest when charcoal was applied at 25 g·kg<sup>-1</sup> or higher, and this differed significantly from that of the CK ( $P < 0.05$ ). The application of charcoal also promoted the growth of *Brassica chinensis* in terms of increase in above ground biomass, chlorophyll content, and root biomass. The application of charcoal also reduced Cd availability to and absorption by *B. chinensis*. Compared with that in the CK, the soil CaCl<sub>2</sub>-extracted Cd content and Cd content in the shoot and root were decreased from 5.05% to 20.57%, 6.08% to 35.98% and 5.13% to 31.50% respectively, when the charcoal amount ranged from 5 to 50 g·kg<sup>-1</sup>. The Cd accumulation in each part of *B. chinensis* tended to decrease with increase in the amount of charcoal application. The results of the present study indicated that the appropriate application of charcoal can depress the absorption of Cd in vegetables and improve soil quality.

**Keywords:** cadmium contamination; charcoal; *Brassica chinensis*

收稿日期: 2018-01-12 录用日期: 2018-03-06

作者简介: 罗洋(1989—), 男, 贵州开阳人, 讲师, 主要研究方向为土壤污染修复。E-mail: luoyang2007730@163.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(41563007); 贵州省科技厅自然科学基金项目(黔科合J字[2014]2138号); 贵州省教育厅青年科技人才成长项目(黔教合KY字[2017]203号)

Project supported: The National Science Foundation of China(4156307); The Natural Science Foundation of the Science and Technology Department of Guizhou Province([2014]2138); The Young Scientists Growth Foundation of the Education Department of Guizhou Province([2017]203)

镉是一种毒性很强的重金属,被联合国环境规划署列为危害全球环境的化学物质之首。土壤遭受镉污染一方面会引起其生产生态功能失调和土质降低,另一方面还会导致农作物产量和质量下降,并通过土壤-作物-食物的迁移方式被人体摄取<sup>[1-2]</sup>。镉一旦被人体吸收,将不可逆地在人体内进行积累,到一定量时将导致心脑血管疾病、肾衰竭、心血管功能紊乱甚至癌症等<sup>[3]</sup>。据报道,我国土壤重金属点位超标率达到16.1%,其中镉点位超标率为最高,达7.0%<sup>[4]</sup>。因此,如何降低土壤中镉的生物有效性,保障农作物的安全生产,从而实现中轻度污染农田“边生产边修复”的目标是当前亟需解决的课题之一。

生物炭是一种新型的环境功能材料,具有孔隙结构发达、呈碱性、比表面积大、离子交换能力强等特点,可有效地降低土壤中重金属的有效性,消减其风险。近年来,生物炭在治理重金属污染中的潜在应用价值已得到学术界的广泛认可,其在提高重金属稳定性、控制污染和修复土壤等方面具有非常广阔的前景<sup>[5]</sup>。木炭作为一种来源广泛、价格低廉的生物炭类型,也被越来越多地应用于土壤重金属污染修复研究中。杜志敏等<sup>[6]</sup>以黑麦草为修复植物,开展了不同改良剂对重金属镉污染土壤的田间原位修复实验,结果表明木炭能降低镉对生物和环境的直接毒害作用。崔红标等<sup>[7]</sup>通过田间试验发现木炭的添加提高了土壤pH值,改善了土壤微生物群落结构,使铜、镉由活性态向非活性态和潜在活性态转化,取得了较好的稳定化修复效果;罗惠莉等<sup>[8]</sup>的研究表明,随着木炭用量的增加,木炭对土壤中镉有效态的钝化效果增强,施用 $0.48 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 木炭在30 d时对土壤中有效态镉降幅达23.87%,并能抑制水稻镉吸收。

本文以受镉污染的黄壤为研究对象,通过添加不同梯度的木炭并种植小白菜,结合室内测定分析,研究木炭对镉污染土壤理化性质、小白菜生长及镉含量、土壤 $\text{CaCl}_2$ 提取态镉含量等的影响,从土壤-植物系统的角度探讨木炭作为土壤改良剂在镉污染预防中的潜力,以期木炭在镉污染土壤治理中的应用提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

供试植物为“桂星牌”小白菜(*Brassica chinensis*),购于贵阳市乌当区新添种子市场。木炭为市售机制木炭,由锯末经成型机挤压成木棒后放入炭化炉中高

温碳化而成。木炭的基本性质:粒径0.15 mm;比表面积 $40.58 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ;pH 8.56;有机质 $348.35 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;全氮 $6.19 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;全磷 $1.45 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;全钾 $22.83 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;镉 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

供试土壤采自贵阳市乌当区高雁垃圾填埋场附近某废弃农田,土壤类型为黄壤。取0~15 cm表层土,将土样混合均匀后按四分法取其二分之一土壤样品,带回实验室内自然风干,挑出土壤中的石块和植物根系等杂物,用研钵研磨过2 mm筛备用。其基本理化性质:pH 6.35;有机质 $24.48 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;碱解氮 $76.73 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;有效磷 $23.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;速效钾 $163.87 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;全镉 $2.68 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , $\text{CaCl}_2$ 提取态镉 $0.62 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

### 1.2 试验设计

试验在贵州师范学院盆栽基地进行。木炭共设置4个用量水平:5、10、25、 $50 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,分别记为C5、C10、C25、C50,并以不施木炭(CK)作为对照,共5个处理,每个处理3次重复。取研磨过筛的土壤与木炭按比例混匀,每盆装土1.5 kg。用称重法保持土壤含水量为田间持水量的60%左右,在室温下平衡一周后,每盆播种小白菜种子20粒,植物生长期每日观察并浇水,保持土壤含水量为最大田间持水量的60%左右,蔬菜长至两片真叶时定苗,每盆保留幼苗5株。在室外生长50 d后,分地上部和根部收获植株,先用自来水洗净,再用去离子水冲洗,擦干,称鲜重,105 °C下杀青20 min,85 °C下烘干至恒重后粉碎备用。土壤样品自然风干后磨碎,分别过2 mm和0.15 mm尼龙筛,装袋备用。

### 1.3 测定项目与方法

土壤有机质采用重铬酸钾容量法测定;土壤pH采用去 $\text{CO}_2$ 蒸馏水浸提(土水比1:2.5),精密pH计(雷兹PHS-3C)测定;碱解氮采用碱解扩散法测定;土壤有效磷采用钼锑抗比色法测定;土壤速效钾采用火焰光度法测定,上述指标具体测定步骤均参考文献[9]中的方法。

小白菜叶绿素含量用便携式叶绿素仪直接测定SPAD值;小白菜地上部和根部Cd含量采用 $\text{HNO}_3$ - $\text{HClO}_4$ 体系消解,土壤全Cd含量采用 $\text{HCl}:\text{HNO}_3$ (优级纯, $V:V=4:1$ )的混合酸液消煮,利用novAA 350原子吸收光谱仪(德国耶拿)测定;土壤 $\text{CaCl}_2$ 提取态Cd采用鲜土, $\text{CaCl}_2$ 浓度为 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ,土(干土)液比为1:10浸提,振荡2 h,离心、过滤,利用novAA 350原子吸收光谱仪(德国耶拿)测定滤液中Cd的浓度<sup>[10]</sup>。测试过程中加入国家标准物质土壤标准参考样(GSS系

列)和植物标准参考样(GSV系列),并设置空白和重复样进行分析质量控制。误差控制在5%以内。所用试剂均为优级纯。

#### 1.4 数据处理及分析

试验数据采用Microsoft Excel 2007进行数据整理,用SPSS 22.0进行单因素方差分析,用LSD法进行多重比较,显著性水平设置为 $P<0.05$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 木炭施用对土壤理化性质的影响

不同处理水平下的土壤理化性质变化情况见表1。木炭的施加提高了土壤pH值,C5、C10、C25、C50处理分别较CK处理提高了0.01、0.04、0.10、0.12个单位,当施加量 $\geq 25\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时达到显著水平( $P<0.05$ )。土壤有机质含量也随木炭用量的增加而显著增加,与CK处理相比,C5、C10、C25、C50处理的土壤有机质含量分别增加了18.68%、31.17%、63.64%、81.17%,其中木炭用量为 $50\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时有机质含量 $41.69\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

与对照相比,施加木炭各处理还不同程度地提高了土壤速效养分含量。其中,各处理碱解氮含量大小顺序为 $\text{C25}>\text{C50}>\text{C10}>\text{C5}>\text{CK}$ ,施加各梯度木炭处理组与对照组值相比均达显著水平,木炭施加量为 $25\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时碱解氮含量为对照的2.10倍。施加木炭还提高了土壤有效磷含量,其值亦与木炭用量大小一致,在最大用量时比对照处理增加134.55%。各处理速效钾含量大小顺序为 $\text{C25}>\text{C50}>\text{C10}>\text{C5}>\text{CK}$ ,但仅在木炭用量为 $25\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时与对照达显著差异水平,速效钾含量增加了10.41%,其余处理间差异均不显著。

### 2.2 木炭施用对小白菜生物量的影响

从表2可知,小白菜在添加木炭的镉污染土壤中生长50 d后,地上部鲜重比不加木炭的对照有所增加,增幅为0.97%~22.91%。但是除了C25处理外,其余处理与对照间无明显差异,表明当木炭添加量为

$25\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时土壤综合状况最佳,进而促进小白菜生长。不同木炭水平下的小白菜根部鲜重没有明显变化规律,各处理间也无显著性差异,说明单一施用木炭对小白菜根系生长的加强效应不明显。

### 2.3 木炭施用对小白菜叶绿素含量的影响

叶片SPAD值反映的是叶片的绿色,与叶绿素含量和氮素含量密切相关<sup>[11]</sup>。由图1可知,施加木炭能显著增加小白菜叶绿素含量。但增幅随木炭用量的加大呈先增加后减少趋势。小白菜叶片SPAD值在木炭用量为 $25\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时达最大,与对照相比增幅为65.78%,表明木炭施用对叶绿素的增加作用应当在

表2 木炭施用对小白菜生物量的影响  
Table 2 Effects of charcoal application on biomass of *Brassica chinensis*

处理	地上部鲜重/ $\text{g}\cdot\text{盆}^{-1}$	根部鲜重/ $\text{g}\cdot\text{盆}^{-1}$
CK	$32.93\pm 2.89\text{b}$	$2.57\pm 0.20\text{a}$
C5	$33.25\pm 2.18\text{b}$	$2.63\pm 0.19\text{a}$
C10	$33.39\pm 2.83\text{b}$	$2.47\pm 0.21\text{a}$
C25	$40.48\pm 3.93\text{a}$	$2.64\pm 0.14\text{a}$
C50	$32.98\pm 1.91\text{b}$	$2.55\pm 0.07\text{a}$

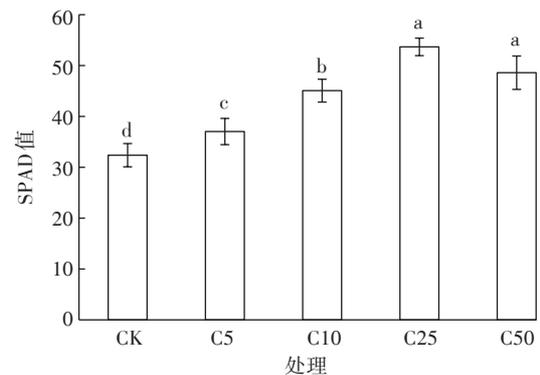


图1 不同处理水平下小白菜叶绿素含量

Figure 1 Sum of chlorophyll in *Brassica chinensis* under different treatments

表1 木炭施用对土壤理化性质的影响

Table 1 Effects of charcoal application on physical and chemical properties of soil

处理	pH	有机质/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	碱解氮/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	有效磷/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效钾/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
CK	$6.36\pm 0.02\text{b}$	$22.94\pm 0.86\text{e}$	$65.78\pm 1.76\text{e}$	$21.85\pm 1.67\text{e}$	$162.36\pm 6.96\text{b}$
C5	$6.37\pm 0.01\text{b}$	$27.22\pm 2.90\text{d}$	$80.27\pm 2.33\text{d}$	$28.46\pm 0.29\text{d}$	$164.91\pm 7.25\text{b}$
C10	$6.40\pm 0.04\text{b}$	$30.09\pm 1.33\text{c}$	$101.93\pm 0.92\text{c}$	$39.63\pm 2.17\text{c}$	$167.33\pm 11.74\text{ab}$
C25	$6.46\pm 0.03\text{a}$	$37.53\pm 2.10\text{b}$	$137.85\pm 1.02\text{a}$	$43.29\pm 0.58\text{b}$	$179.26\pm 13.61\text{a}$
C50	$6.48\pm 0.03\text{a}$	$41.69\pm 0.84\text{a}$	$126.33\pm 4.98\text{b}$	$51.25\pm 3.12\text{a}$	$173.77\pm 4.41\text{ab}$

注:数据为平均值,表中同一列的不同小写字母表示各处理间差异显著( $P<0.05$ ),下同。

Note: The data are the average, and the different lowercase letters in the same column in the table indicate that the differences in the processing are significant ( $P<0.05$ ), the same below.

一定范围,过高或过低都无法使效率最大化。

#### 2.4 木炭施用对小白菜镉含量的影响

小白菜地上部和根部镉含量随着木炭用量的增加而有不同程度的降低(图2)。对照(CK)组小白菜地上部镉含量最高,达 $0.25 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。而其他4个处理(C5、C10、C25、C50)地上部镉含量分别较对照降低了6.08%、14.95%、27.12%和35.98%,C10~C50处理,小白菜地上部镉含量显著降低( $P<0.05$ )。从GB 2762—2012《食品中污染物限量》规定叶菜类镉限量为 $0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 来看,试验中当木炭用量 $\geq 25 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时小白菜的镉含量均在食品安全标准之内。小白菜根部镉含量高于地上部,约是地上部的2~3倍(图2)。施用木炭对小白菜根部镉含量也有显著影响。与对照相比,从C10处理到C50处理小白菜根系镉含量显著降低( $P<0.05$ ),降幅分别达12.71%、20.17%和31.50%。差异显著性分析结果表明,随着木炭的加入,小白菜根部镉含量显著降低。

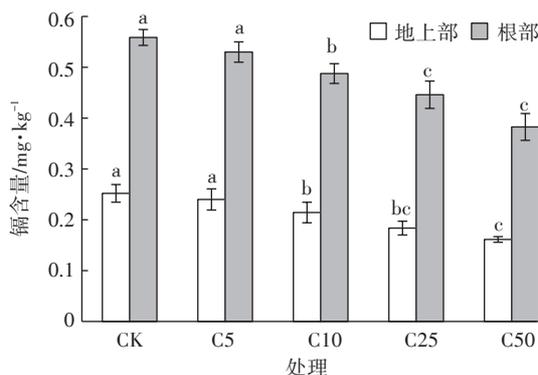


图2 不同处理水平下的小白菜镉含量

Figure 2 Cd content of *Brassica chinensis* under different treatments

#### 2.5 木炭施用对土壤CaCl<sub>2</sub>提取态镉含量的影响

植株对土壤镉的吸收和土壤中镉的有效性密切相关。有研究表明CaCl<sub>2</sub>溶液提取的重金属浓度与有效性之间的一致性较好<sup>[10]</sup>。因此,本研究选择CaCl<sub>2</sub>来浸提土壤有效态镉。随着木炭施用量的提高,土壤CaCl<sub>2</sub>提取态镉含量呈递减趋势。在试验设置的4种木炭用量水平下,土壤CaCl<sub>2</sub>提取态镉含量的降低幅度分别为5.05%、10.82%、18.18%和20.57%,各处理与对照之间均有显著差异( $P<0.05$ ),见图3。C5~C25各处理间差异显著,而C50处理土壤的CaCl<sub>2</sub>提取态镉含量相较C25处理并无明显下降,可见木炭的添加比例并不是越高越好,过量不仅不利于降低土壤镉有效性,而且增加成本,浪费资源。

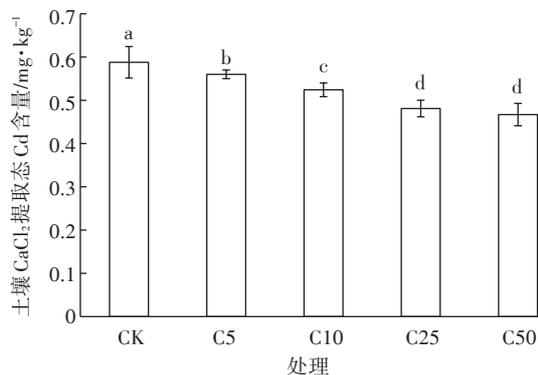


图3 木炭对土壤CaCl<sub>2</sub>提取态镉含量的影响

Figure 3 Effect of charcoal on CaCl<sub>2</sub>-extracted Cd content of soil

#### 2.6 木炭施用对小白菜体内镉富集迁移的影响

生物富集系数是植物体内重金属含量与相应的土壤重金属含量之比,表示植物从土壤中吸收重金属的能力。添加木炭后,小白菜地上部和根部富集系数与对照相比均不同程度地降低(表3),当施用量大于 $10 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时与对照有显著差异。表明在一定施用量下,木炭添加能降低小白菜各部位对镉的吸收。

重金属转移系数是地上各器官重金属含量与根部重金属含量之比,可以用来反映植株向地上各器官转运重金属的能力,其值越大,表示重金属在植物中的迁移能力越强。由表3可知,施用木炭能降低镉由小白菜根部向地上部迁移的能力。随着木炭添加量的增加,迁移系数值逐渐变小,在施用量为 $25 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时降至最低,仅为0.41,之后随着添加比例的提高有所回升,各处理之间差异不显著( $P>0.05$ )。

#### 2.7 土壤pH、CaCl<sub>2</sub>提取态镉含量与小白菜镉含量的相关性

对土壤pH、CaCl<sub>2</sub>提取态镉含量与小白菜镉含量间进行了相关性分析(表4),结果表明:本研究中土壤pH与土壤CaCl<sub>2</sub>提取态镉含量呈极显著负相关( $P<0.01$ ),说明pH值是影响土壤镉有效性的重要因素。

表3 不同处理水平下小白菜对镉的富集系数和迁移系数  
Table 3 Bioaccumulation factor values and translocation factor values of heavy metals in *Brassica chinensis* under different treatments

处理	地上部富集系数	根系富集系数	迁移系数
CK	0.09±0.01a	0.21±0.01a	0.45±0.04a
C5	0.09±0.02a	0.20±0.01a	0.45±0.02a
C10	0.08±0.01b	0.18±0.01b	0.44±0.03a
C25	0.07±0.01c	0.17±0.01c	0.41±0.05a
C50	0.06±0.00c	0.14±0.01d	0.42±0.04a

表4 土壤pH、CaCl<sub>2</sub>提取态镉含量与小白菜镉含量之间相关性Table 4 Correlation among soil pH, CaCl<sub>2</sub>-extracted Cd and Cd content in *Brassica chinensis*

R	pH	CaCl <sub>2</sub> 提取态镉含量	地上部镉含量	根系镉含量
pH	1	-0.710**	-0.836**	-0.749**
CaCl <sub>2</sub> 提取态镉含量		1	0.802**	0.921**
地上部镉含量			1	0.848**
根系镉含量				1

注:\*\*表示不同处理间极显著相关( $P < 0.01$ )。n=15。

Note:\*\* indicate significance at 0.01 levels. n=15.

土壤CaCl<sub>2</sub>提取态镉含量与小白菜地上部镉含量和根系镉含量均极显著正相关( $P < 0.01$ ),表明土壤CaCl<sub>2</sub>提取态镉含量的降低是小白菜地上部和根系镉吸收量降低的重要原因。

### 3 讨论

木炭是生物炭中最为传统和常见的类型之一,具有孔隙多、粒度细小、比表面积大、呈碱性、吸附性强、含氧官能团多和富含矿质营养元素等特征<sup>[12-15]</sup>。施入土壤中能增强土壤的保水保肥性能,促进植物的生长,因此在农业上常被用作土壤改良剂<sup>[16]</sup>。土壤pH值是其理化性质的重要指标之一,能影响土壤养分有效性、土壤重金属元素有效性、土壤微生物活动等。本试验结果显示,当木炭施加量 $\geq 25 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,土壤pH值较对照组处理有显著提高。原因是木炭中的碱性物质在施入土壤后得到释放,同时木炭中的钾、钙、镁等离子提高了土壤的盐基饱和度,降低活性氢离子和活性铝离子水平,使pH升高<sup>[17-18]</sup>。由于本研究供试木炭的有机质含量达 $348.35 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,施入土壤后随着木炭用量的增加土壤有机质含量也显著增加,这与前人研究结果一致<sup>[19]</sup>。土壤速效养分是指作物当季利用的那一部分,能表征作物的养分利用率。木炭的施用使土壤碱解氮、速效磷、速效钾含量与对照相比均有所增加,原因可能是因为一方面木炭本身含有一定量的N、P、K元素,另一方面木炭添加改变了土壤pH状况,增加了有效养分的比重,具体机制有待进一步研究。

有研究表明,添加木炭能使镉污染土壤上作物生物量得到增加<sup>[20]</sup>,原因可能是由于木炭自身含有一定数量的对作物生长发育有益的元素,可为作物生长发育提供良好的养分供应<sup>[21]</sup>,再加上木炭的施入降低了镉有效性,减轻毒害作用,使作物得到增产。本研究

结果显示木炭仅在用量为 $10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时使小白菜地上部鲜重较对照提高了22.91%,达显著水平,而其余处理对小白菜地上部和根部生物量影响不明显。原因一方面可能是由于木炭的施入改善了土壤理化性质,促进小白菜对N、P、K等营养元素的吸收;另一方面可能是降低了土壤镉的生物有效性,减轻了对小白菜的毒害作用。当木炭施用量过高时,可能会产生盐害抑制小白菜生长,导致生物量有所降低<sup>[22]</sup>。植物吸收重金属镉后,体内会产生自由基,攻击叶绿素,改变叶绿素合成酶的正常构型,使其合成受抑制,最终影响光合作用,导致叶片失绿<sup>[23-24]</sup>。本研究结果显示,加入木炭后,小白菜叶片SPAD值呈先增加后降低趋势,可能是因为木炭的加入降低了小白菜地上部对镉的吸收,从而减少镉对叶绿素的破坏作用,这与许杨贵等<sup>[25]</sup>的研究结果是相似的。

Amanullah等<sup>[26]</sup>和Bandara等<sup>[26]</sup>研究表明,土壤中镉的生物有效性随pH升高而降低;Puga等<sup>[28]</sup>也通过实验发现土壤有效态镉与土壤pH呈负相关。Uchimiya等<sup>[29]</sup>也认为,随着土壤pH的升高,生物炭有效降低了重金属的生物可利用性,原因是生物炭增加了土壤负电荷,导致土壤对重金属的吸附也增加。本试验同样证实这一结论,土壤pH与CaCl<sub>2</sub>提取态镉含量相关系数为-0.710,呈极显著水平。木炭的施加显著提高了土壤pH值,并通过吸附、络合和离子交换等方式固定镉<sup>[30]</sup>,使得土壤CaCl<sub>2</sub>提取态镉随木炭用量的增加而降低。

镉不是植物的必需营养元素,具有较高的生物毒性,可以累积在植物体内,通过食物链危害人体健康。据调查,人类摄入的镉 $\geq 70\%$ 是来自食用蔬菜<sup>[31]</sup>。因此,本研究以小白菜为供试作物,研究木炭添加对其体内镉含量及对富集迁移情况的影响有一定意义。本试验结果表明,小白菜根部镉含量和富集系数高于地上部,这与前人的研究结果一致<sup>[32-33]</sup>。小白菜从根际吸收镉,再将其转运和积累到地上部分。研究还发现,施用木炭显著降低了小白菜地上部和根部镉含量,这说明添加木炭在一定程度上能够通过改变土壤中镉的赋存形态,降低CaCl<sub>2</sub>提取态镉含量,进而减少根系的吸收作用,从而阻控镉在土壤-植物体系内的迁移<sup>[34-36]</sup>。同时,木炭丰富的表面负电荷及表面官能团与阳离子交换量等能够增加土壤表面的活性位点,从而提高土壤对重金属离子的吸附作用<sup>[37-38]</sup>。

本研究只是针对已污染土壤,初步研究木炭的修复效应。今后还需要探索不同污染水平、镉与其他重

金属复合、不同类型土壤的污染问题,在此基础上与田间试验衔接,逐步放大,才能更好地在实践中得以应用。

#### 4 结论

(1)木炭的添加改善了土壤理化性质,随着施用量的增加,土壤pH值、有机质、速效氮磷钾含量有不同程度的增加。

(2)在一定用量范围内,木炭的添加能促进小白菜的生长,当施用量为 $25\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时小白菜地上部生物量显著提高,小白菜叶绿素含量也达最大值。

(3)土壤提取态镉含量与小白菜地上部和根部镉含量显著正相关。木炭的添加显著降低了土壤中镉的有效性,小白菜地上部和根部的镉含量也随之降低,富集能力下降。因此,木炭具有钝化修复镉污染土壤的应用潜力。

#### 参考文献:

- [1] 毛懿德, 铁柏清, 叶长城, 等. 生物炭对重污染土壤镉形态及油菜吸收镉的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2015, 31(4): 579-582.  
MAO Yi-de, TIE Bo-qing, YE Chang-cheng, et al. Effects of biochar on forms and uptake of cadmium by rapeseed in cadmium-polluted soil [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2015, 31(4): 579-582.
- [2] Varalakshmi L R, Ganeshamurthy A N. Phytotoxicity of cadmium in radish and its effects on growth, yield, and cadmium uptake[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2013, 44(9): 1444-1456.
- [3] Grant C, Flaten D, Tenuta M, et al. The effect of rate and Cd concentration of repeated phosphate fertilizer applications on seed Cd concentration varies with crop type and environment[J]. *Plant and Soil*, 2013, 372(2): 221-233.
- [4] 中华人民共和国环境保护部, 中华人民共和国国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[R]. 北京, 2014: 10-11.  
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. Survey communique of soil pollution in China[R]. Beijing, 2014: 10-11.
- [5] Kramer R W, Kujawinski E B, Hatcher P G. Identification of black carbon derived structures in a volcanic ash soil humic acid by fourier transform ion cyclotron resonance mass spectrometry[J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, 38(12): 3387-3395.
- [6] 杜志敏, 周静, 郝建设, 等. 4种改良剂对土壤-黑麦草系统中镉行为的影响[J]. 生态环境学报, 2010, 19(11): 2728-2732.  
DU Zhi-min, ZHOU Jing, HAO Jian-she, et al. Effects of four amendments on behaviors of cadmium in soil-ryegrass system[J]. *Ecology and Environmental Science*, 2010, 19(11): 2728-2732.
- [7] 崔红标, 范玉超, 周静, 等. 改良剂对土壤铜镉有效性和微生物群落结构的影响[J]. 中国环境科学, 2016, 36(1): 197-205.  
CUI Hong-biao, FAN Yu-chao, ZHOU Jing, et al. Availability of soil Cu and Cd and microbial community structure as affected by applica-
- [8] 罗惠莉, 王宇霖, 周思, 等. 生物炭基调理剂对水稻镉吸收的影响[J]. 环境工程学报, 2018, 12(4): 1190-1197.  
LUO Hui-li, WANG Yu-lin, ZHOU Si, et al. Effect on absorption of Cd in rice applying biochar-based conditioner[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2018, 12(4): 1190-1197.
- [9] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 农业出版社, 2000: 39-114.  
BAO Shi-dan. Analysis of soil agrochemical analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 39-114.
- [10] 章明奎, 方利平, 周翠. 污染土壤重金属的生物有效性和移动性评价: 四种方法比较[J]. 应用生态学报, 2006, 17(8): 1501-1504.  
ZHANG Ming-kui, FANG Li-ping, ZHOU Cui. Evaluation of heavy metals bioavailability and mobility in polluted soils: A comparison of four methods[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(8): 1501-1504.
- [11] 俞映侠, 薛利红, 杨林章, 等. 生物炭添加对酸化土壤中小白菜氮素利用的影响[J]. 土壤学报, 2015, 52(4): 759-767.  
YU Ying-liang, XUE Li-hong, YANG Lin-zhang, et al. Effect of biochar application on pakchoi (*Brassica Chinensis* L.) utilizing nitrogen in acid soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(4): 759-767.
- [12] 贾铭勋, 孙镜明. 木炭的土地利用及碳汇效应[J]. 吉林林业科技, 2009(5): 82-83.  
JIA Ming-xun, SUN Jing-ming. The application of charcoal and its carbon sink effect[J]. *Jilin Forestry and Technology*, 2009(5): 82-83.
- [13] 辛泽鑫. 木炭对土壤作用机制及小麦生长的影响[D]. 临汾: 山西师范大学, 2016: 1-2.  
XIN Ze-xin. Effects of charcoal on soil and wheat growth mechanism [D]. Linfen: Shanxi Normal University, 2016: 1-2.
- [14] 郭文娟, 梁学峰, 林大松, 等. 土壤重金属钝化修复剂生物炭对镉的吸附特性研究[J]. 环境科学, 2013, 34(9): 3716-3721.  
GUO Wen-juan, LIANG Xue-feng, LIN Da-song, et al. Absorption of Cd<sup>2+</sup> on biochar from aqueous solution[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(9): 3716-3721.
- [15] 张小凯, 何丽芝, 陆扣萍, 等. 生物质炭修复重金属及有机物污染土壤的研究进展[J]. 土壤, 2013, 45(6): 970-977.  
ZHANG Xiao-kai, HE Li-zhi, LU Kou-ping, et al. Use of biochar for remediation of soils contaminated with heavy metals and organic pollutants: A review[J]. *Soils*, 2013, 45(6): 970-977.
- [16] 蔡函臻, 宁西翠, 王权, 等. 碱性固体对污泥的调质堆肥影响及产品对土壤的改良潜力[J]. 环境科学, 2016, 37(12): 4848-4856.  
CAI Han-zhen, NING Xi-cui, WANG Quan, et al. Effect of alkali solids amendment on sewage sludge aerobic composting and the potential of related products on infertile soil amelioration[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(12): 4848-4856.
- [17] Zhao R D, Jiang D W, Neil C, et al. Effects of biochar on the acidity of a loamy clay soil under different incubation conditions[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, 15(9): 1919-1926.
- [18] Van Z L, Kimber S, Morris S, et al. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility[J]. *Plant and Soil*, 2010, 327(1): 235-246.

- [19] Major J, Rondon M, Molina D, et al. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol[J]. *Plant and Soil*, 2010, 333(2):117-128.
- [20] Thomas H D. Charcoal effects on soil solution chemistry and growth of *Koeleria macrantha* in the Ponderosa Pine/Douglas-fir ecosystem[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2007, 43(3):303-311.
- [21] Zheng H, Wang Z, Deng X, et al. Characteristics and nutrient values of biochars produced from giant reed at different temperatures[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 130(2):463-471.
- [22] 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.
- [23] 张鑫, 李昆伟, 陈康健, 等. 镉胁迫对丹参生长及有效成分积累的影响研究[J]. 植物科学学报, 2013, 31(6):583-589.  
ZHANG Xin, LI Kun-wei, CHEN Kang-jian, et al. Effects of cadmium stress on seedlings growth and active ingredients in *Salvia miltiorrhiza*[J]. *Plant Science Journal*, 2013, 31(6):583-589.
- [24] 薛永, 王苑颀, 姚泉洪, 等. 植物对土壤重金属镉抗性的研究进展[J]. 生态环境学报, 2014, 23(3):528-534.  
XUE Yong, WANG Yuan-yuan, YAO Quan-hong, et al. Research progress of plants resistance to heavy metal Cd in soil[J]. *Ecology and Environmental Science*, 2014, 23(3):528-534.
- [25] 许杨贵, 李琦, 刘晖, 等. 不同肥料对镉污染土壤中两种菜心生长与Cd吸收的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(11):2059-2066.  
XU Yang-gui, LI Qi, LIU Hui, et al. Effects of different fertilizers on two genotype Chinese flowering cabbage in Cd contaminated soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(11):2059-2066.
- [26] Amanullah M, Wang P, Li R H, et al. Immobilization of lead and cadmium in contaminated soil using amendments: A review[J]. *Pedosphere*, 2015, 25(4):555-568.
- [27] Bandara T, Herath I, Kumarathilaka P, et al. Efficacy of woody biomass and biochar for alleviating heavy metal bioavailability in serpentine soil[J]. *Environmental Geochemistry & Health*, 2017, 39(2):391-401.
- [28] Puga A P, Abreu C A, Melo L C, et al. Biochar application to a contaminated soil reduces the availability and plant uptake of zinc, lead and cadmium[J]. *Journal of Environmental Management*, 2015, 159(5):86-93.
- [29] Uchimiya M, Lima I M, Klasson K T, et al. Immobilization of heavy metal ions (Cu II, Cd II, Ni II, and Pb II) by broiler litter-derived biochars in water and soil[J]. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 2010, 58(9):5538-5544.
- [30] 王圆方, 朱宁, 颜丽, 等. 外源Cd<sup>2+</sup>在土壤各级微团聚体中的含量和形态分布[J]. 生态环境学报, 2009, 18(4):1764-1766.  
WANG Yuan-fang, ZHU Ning, YAN Li, et al. Contents and chemical speciation of water soluble Cd<sup>2+</sup> added in soil microaggregates[J]. *Ecology and Environmental Science*, 2009, 18(4):1764-1766.
- [31] Alarol M A, Jarvis S C, Gregory P J, et al. Factors affecting potassium in different soils[J]. *Soil Use and Management*, 2004, 20(2):182-189.
- [32] 王凤花, 任超, 李新燕, 等. 三种肥料对镉污染土壤中小白菜吸收镉的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2016(1):124-128.  
WANG Feng-hua, REN Chao, LI Xin-yan, et al. Effects of three fertilizers on cadmium absorption in Chinese cabbage with cadmium contaminated soil[J]. *Soil and Fertilizer Science in China*, 2016(1):124-128.
- [33] Yasmin K K, Ali B, Cui X Q, et al. Cow manure and cow manure-derived biochar application as a soil amendment for reducing cadmium availability and accumulation by *Brassica chinensis* L. in acidic red soil[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017, 16(3):725-734.
- [34] Shute T, Macfie S M. Cadmium and zinc accumulation in soybean: A threat to food safety?[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 371(3):63-73.
- [35] 王风, 王梦露, 许堃, 等. 生物炭施用对棕壤重金属镉赋存形态及油菜吸收镉的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(5):907-914.  
WANG Feng, WANG Meng-lu, XU Kun, et al. Effects of biochar application on cadmium transformation in brown soil and uptake by baby bokchoi[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(5):907-914.
- [36] Cui H, Fan Y, Fang G, et al. Leachability, availability and bioaccessibility of Cu and Cd in a contaminated soil treated with apatite, lime and charcoal: A five-year field experiment[J]. *Ecotoxicology & Environmental Safety*, 2016, 134(1):148-155.
- [37] 余琴芳, 吕凡, 於进, 等. 污泥生物炭在污泥好氧降解中的原位应用[J]. 中国环境科学, 2016, 36(6):1794-1801.  
YU Qin-fang, LÜ Fan, YU Jin, et al. In-situ application of sludge-derived biochar in aerobic biodegradation of sludge[J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(6):1794-1801.
- [38] Tharanga B, Indika H, Prasanna K, et al. Role of woody biochar and fungal-bacterial co-inoculation on enzyme activity and metal immobilization in serpentine soil[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2017, 17(3):665-673.