

尹微琴, 孟莉蓉, 郁彬琦, 等. 垫料生物炭对土壤镉的钝化作用[J]. 江苏农业学报, 2018, 34(1): 62-67.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2018.01.009

## 垫料生物炭对土壤镉的钝化作用

尹微琴<sup>1</sup>, 孟莉蓉<sup>1</sup>, 郁彬琦<sup>1</sup>, 李 晖<sup>2</sup>, 杨婷婷<sup>1</sup>, 王圣森<sup>1,3</sup>, 王小治<sup>1,3,4</sup>

(1.扬州大学环境科学与工程学院, 江苏 扬州 225127; 2.扬州市环境保护局, 江苏 扬州 225002; 3.江苏省有机固体废弃物资源化协同创新中心, 江苏 南京 210095; 4.扬州大学农业科技发展研究院, 江苏 扬州 225127)

**摘要:** 在 500 ℃ 条件下采用限氧热解法制备垫料生物炭和秸秆生物炭, 研究垫料生物炭对土壤中镉的钝化效果。通过分析添加垫料生物炭后土壤 pH 和镉形态的变化, 并用小青菜盆栽试验和土柱淋滤试验等评估垫料生物炭对土壤镉固定效果的影响, 并与秸秆生物炭进行比较。结果表明, 添加垫料生物炭和秸秆生物炭后, 镉污染土壤的 pH 值均显著升高; 两种生物炭对镉都有很强的固定效果, 能显著降低镉的生物有效性, 向镉污染土壤中分别施加 5% 的垫料生物炭和秸秆生物炭后, 在培养 60 d 时的降低程度为 24.88% 和 21.94%; 添加垫料生物炭和秸秆生物炭能提高小青菜的产量, 并有效降低小青菜对镉的吸收, 降幅分别为 37.21% 和 29.70%; 垫料生物炭对土壤镉污染的修复效果优于秸秆生物炭。

**关键词:** 垫料; 秸秆; 生物炭; 钝化; 镉

**中图分类号:** X53 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2018)01-0062-06

## Passivation of Cd in soil by bedding materials derived-biochar

YIN Wei-qin<sup>1</sup>, MENG Li-rong<sup>1</sup>, YU Bin-qi<sup>1</sup>, LI Hui<sup>2</sup>, YANG Ting-ting<sup>1</sup>, WANG Sheng-sen<sup>1,3</sup>,  
WANG Xiao-zhi<sup>1,3,4</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China; 2. Yangzhou Environmental Protection Bureau, Yangzhou 225002, China; 3. Jiangsu Collaborative Innovation Center for Solid Organic Waste Resource Utilization, Nanjing 210095, China; 4. Institutes of Agricultural Science and Technology Development, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China)

**Abstract:** In this study, the bedding materials derived-biochar and rice straw derived-biochar were produced at pyrolysis temperature of 500 ℃ with limited oxygen. The effects of biochar on cadmium (Cd) stabilization in contaminated soil, and the changes of pH value and the speciation of Cd after adding biochar were analyzed. Both pot experiments of *Brassica chinensis* and soil column leaching study were carried out to evaluate the fixation capacity and bioavailability of Cd by two types of biochar. The results showed that the two biochar significantly increased pH of Cd contaminated soil as compared to control. Both biochar could evidently immobilize Cd and thus significantly reduced the Cd bioavailability to plants. It was found that Cd bioavailability in soil was decreased by 24.88% and 21.94% after 60 days' incubation with 5% bedding materials derived-biochar and rice straw derived-biochar on dry weight basis, respectively.

Both bedding materials derived-biochar and rice straw derived-biochar increased dry biomass of *Brassica chinensis*, and decreased Cd uptake by 37.21% and 29.70%, respectively. Thus, bedding materials derived-biochar showed better Cd immobilization capacity than rice straw derived-biochar.

**Key words:** bedding materials; rice straw; biochar; passivation; Cd

收稿日期: 2017-07-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(31772394); 江苏省农业科技自主创新基金项目[CX(12)1001-6]; 江苏省社会发展项目(BE2015661); 江苏省六大人才高峰项目(2013-NY-017)

作者简介: 尹微琴(1971-), 女, 江苏金坛人, 硕士, 高级农艺师, 主要从事农业资源与环境方面的研究。(E-mail) wqyin@yzu.edu.cn

通讯作者: 王小治, (E-mail) xzwang@yzu.edu.cn

垫料是发酵床养殖的重要组成部分,随着发酵床使用时间的延长,垫料内矿物元素不断富集,垫料对粪尿的消纳能力也逐步减弱,直至不再适宜使用<sup>[1-3]</sup>。如果将废弃垫料直接弃之不用,不仅浪费资源,而且污染环境。常见的处理方法是直接还田与做堆肥等。但胡海燕等<sup>[4]</sup>研究结果表明,废弃垫料中大肠杆菌和肠道寄生虫卵超标,直接还田存在一定的安全隐患。

生物炭是由生物质(如作物秸秆、木屑、动物粪便等)在完全或部分缺氧条件下经热解炭化而产生的一种性质稳定、含碳丰富的物质<sup>[5]</sup>。生物炭疏松多孔,比表面积大,容重小,表面能高,具有高度的芳香性、抗分解性和热稳定性。土壤中添加生物炭能够促进植物对营养元素的吸收,有利于土壤微生物的生长,还能够吸附环境中的重金属和有机污染物,减少农药残留<sup>[6-11]</sup>。以废弃生物质制备生物炭,并将其应用于农业生产具有重要意义<sup>[12]</sup>。

近年来,中国土壤重金属污染事件频发,越来越多的耕地受到重金属污染。由于土壤重金属具有积累性、稳定性和隐蔽性等特点<sup>[13]</sup>,重金属污染已威胁到粮食这一民生命脉<sup>[14]</sup>。镉(Cd)是毒性最强的重金属元素之一,与其他重金属相比,在土壤中活性更强,更易被植物吸收并通过食物链迁移,从而影响人类健康<sup>[15]</sup>。目前,中国镉污染耕地面积约 $1.3 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ,土壤中镉含量明显高于土壤背景值<sup>[16]</sup>。近年来,利用生物炭修复污染土壤的研究越来越多。甘文君等<sup>[17]</sup>用秸秆生物炭修复重金属污染土壤,发现生物炭可以通过改变重金属的形态分布稳定污染土壤;Houben等<sup>[18]</sup>发现施入芒果秸秆生物炭,可降低土壤中Cd、Pb、Zn的生物有效性;在Park等<sup>[19]</sup>研究中,鸡粪生物炭可降低芥菜对土壤中Cu、Cd、Pb的吸收。金睿等发现利用生物炭复配调理剂能有效降低土壤有效态镉,减少小白菜镉吸收量<sup>[20]</sup>。但有关生物炭对重金属迁移转化的机理仍缺乏系统研究,且目前的研究多针对酸性土壤,而对碱性土壤的修复效果尚不清楚。

由于垫料组成中含有大量有机质,将废弃垫料制成生物炭并用于土壤修复具有一定的可行性,目前国内外关于垫料生物炭的报道尚不多见。本研究选用发酵床废弃垫料为原料,在不同温度条件下制备生物炭,并以秸秆生物炭为对照,研究垫料生物炭对土壤中重金属镉的固定钝化效果,为垫料生物炭

的实际应用提供理论基础和参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料与设备

试验材料:垫料(取自南京六合发酵床试验基地),秸秆(取自扬州汉河附近农家)。试验土壤取自江苏省扬州市江都市小纪镇,土壤类型为清泥土,pH 6.9,有机碳 18.1 g/kg,土壤质地为砂壤。硝酸镉、硝酸钠、氢氧化钠、盐酸等试剂均为分析纯。

试验设备:马弗炉,原子吸收分光光度计,可调式电热板,电热恒温鼓风干燥箱,水浴恒温振荡器,pH计,电子分析天平,球磨仪。

### 1.2 生物炭的制备及表征

取一定量废弃垫料,混匀,风干,秸秆用水冲洗后烘干,之后研磨,过60目筛,置于自封袋中备用。称取过筛后的物料于坩埚中,压实,盖上盖子,置于马弗炉中,升温速率为 $5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ ,至 $500 \text{ }^\circ\text{C}$ ,恒温6 h,然后冷却至室温,得到垫料生物炭和秸秆生物炭,分别命名为D500和S500。通过垫料、秸秆灼烧前后的质量损失计算生物炭的产率。称取1 g生物炭,敞口放入马弗炉内, $800 \text{ }^\circ\text{C}$ 灰化4 h,根据灼烧前后质量平衡计算出灰分含量。称取2 g生物炭于50 ml离心管中,加入20 ml去离子水,震荡10 min,静置30 min,测量pH值。用X-ray能谱仪(S-4800II)分析生物炭元素组成。用Cary 610/670显微红外光谱仪测定生物炭的表面官能团。

### 1.3 生物炭对镉污染土壤的修复试验

原始土壤(记为CK)风干去杂物后粉碎过20目筛,按 $3 \text{ mg/kg}$ 的施加量往土壤中加入 $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ ,形成镉单一污染土壤(记为CP)。待稳定平衡2周后将土壤装盆,每盆500 g,然后按5%(质量百分数)的投加量将生物炭加入盆中并充分混匀,加垫料生物炭的镉污染土壤记为PD500,加秸秆生物炭的镉污染土壤记为PS500,共3个处理,每处理3个重复。每隔1 d加去离子水将土壤水分维持在70%左右的田间持水量,室温培养60 d。每隔20 d取样一次,分析土壤pH值、不同形态Cd含量。

### 1.4 小青菜盆栽试验

分别取500 g原始土壤和镉污染土壤,装入11 cm(上口直径)×8 cm(下口直径)×10.5(高)cm塑料花盆中,将生物炭按5%的投加量加入盆中(加垫料生物炭或秸秆生物炭的原始土壤分别记为

CD500 和 CS500), 充分混匀, 设置未添加生物炭的试验土壤 (CK) 和污染土壤 (CP) 为对照, 连同 PD500 和 PS500 处理, 共 6 个处理, 每处理 3 个重复。将小青菜种子均匀播种在盆中, 每天用去离子水浇水一次, 每次浇 60~80 ml, 每 2~3 d 施加 40 ml 霍格兰营养液一次, 正常光照。在小青菜生长 40 d 时取样称重, 分析小青菜中 Cd 含量。

### 1.5 土柱淋滤试验

采用内径 4 cm、高 30 cm 的有机玻璃管淋溶柱, 底部放入 2 cm 厚的石英砂, 为保证土壤颗粒的稳定和淋溶液的流出, 其上覆盖玻璃纤维滤膜, 随后将 100 g 过 20 目筛的土壤样品均匀装入淋溶柱中。将淋溶柱置于支架上, 用 250 ml 的锥形瓶收集淋溶液。向淋溶柱中加入的土壤样品分别为镉污染土壤 (CP)、添加 5% 垫料生物炭或秸秆生物炭的镉污染土壤 (PD500 和 PS500), 共 3 个处理, 每个处理设 3 次重复。

表 1 垫料生物炭和秸秆生物炭的表面特性和元素组成

Table 1 Surface characteristics and elemental composition of bedding materials derived-biochar and rice straw derived-biochar

生物炭	产率 (%)	灰分 (%)	pH	元素质量分数 (%)						
				C	O	Na	Mg	Al	Si	K
垫料生物炭 (D500)	62.56	77.26	9.50	33.11	29.48	0.65	0.91	4.36	18.91	4.86
秸秆生物炭 (S500)	30.47	43.45	9.55	56.05	19.00	—	0.34	—	12.73	9.08

—: 未检测到。

垫料、秸秆生物炭的红外光谱图见图 1。在波数 3 458  $\text{cm}^{-1}$  处出现羟基 O-H 的特征峰, 1 609  $\text{cm}^{-1}$  和 1 419  $\text{cm}^{-1}$  处对应的峰分别为 C=C、C=O 伸缩振动峰<sup>[23]</sup>, 1 102  $\text{cm}^{-1}$ 、1 019  $\text{cm}^{-1}$ 、793  $\text{cm}^{-1}$ 、468  $\text{cm}^{-1}$  处为 Si-O-Si 振动吸收<sup>[24]</sup>。与 S500 相比, D500 的 O-H 及 Si-O-Si 振动峰相对较强, 这与表 1 中 D500 的 O、Si 含量较 S500 更高相一致。

### 2.2 垫料生物炭对土壤 pH 的影响

如图 2 所示, 添加生物炭后, 镉污染土壤的 pH 值较对照土壤均有明显升高, 添加垫料生物炭和秸秆生物炭的镉污染土壤 pH 值分别升高了 1.05 和 1.95。随着时间的推移, PD500 处理 pH 值略有升高, 从初始值 6.30 增加至第 60 d 的 6.68, 升高了 0.38。

### 2.3 垫料生物炭对镉污染土壤中不同形态镉含量的影响

培养试验结果表明, 添加生物炭能显著降低镉污染土壤中重金属镉的弱酸可提取态含量, 且降低

### 1.6 土壤理化性质分析

用 pH 计 (液土比 2.5 : 1.0) 测定土壤 pH, 土壤镉总量测定采用 HCl-HNO<sub>3</sub>-HF-HClO<sub>4</sub> 消煮提取法<sup>[21]</sup>, 小青菜中重金属含量按照《食品安全国家标准 食品中镉的测定》(GB5009.15-2004) 中的方法测定, 土壤重金属形态采用 BCR 三步连续浸提法<sup>[22]</sup> 和火焰原子吸收分光光度计测定。

## 2 结果与分析

### 2.1 垫料生物炭性质表征

由表 1 可见, 垫料生物炭灰分含量达到 77.26%, 高于秸秆生物炭的 43.45%。垫料生物炭和秸秆生物炭均呈碱性。垫料生物炭的元素组成较秸秆生物炭更丰富, 例如 Na、Al 等元素在秸秆生物炭中未能检测到。在垫料生物炭中, 无机元素中 Si 元素含量较大 (18.91%), 其他无机矿物元素含量相对较小。

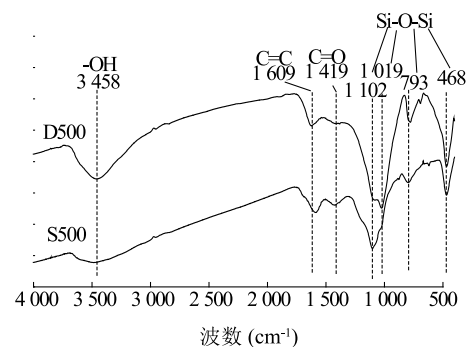
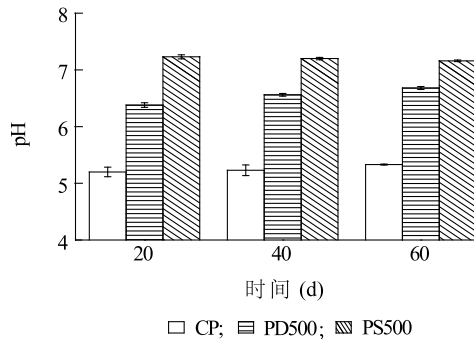


图 1 垫料生物炭 (D500)、秸秆生物炭 (S500) 的红外谱图

Fig. 1 FTIR spectra of bedding materials derived-biochar (D500) and rice straw derived-biochar (S500)

幅度随着时间的推移而增大 (图 3)。与对照相比, PD500 处理的弱酸可提取态 Cd 含量下降幅度在 20 d、40 d 和 60 d 分别为 5.28%、25.42% 和 40.42%; 可还原态与可氧化态镉含量有所下降但降幅不大,





CP: 镉污染土壤; PD500: 添加垫料生物炭的镉污染土壤; PS500: 添加秸秆生物炭的镉污染土壤。

图2 垫料生物炭对镉污染土壤 pH 的影响

Fig.2 Effect of bedding materials derived-biochar application on pH value of Cd-contaminated soil

残渣态镉含量明显升高, 上升幅度分别为 28.79%、111.95% 和 194.59%。PS500 处理土壤中各形态镉含量变化趋势与 PD500 近似。污染土壤中添加生物炭明显降低了土壤中生物有效性较高的弱酸提取态和可还原态镉含量, 在 60 d 时 PD500 和 PS500 处理降低程度分别为 24.88% 和 21.94%, 垫料生物炭处理效果更为显著。

#### 2.4 施加垫料生物炭对小青菜产量及镉含量的影响

小青菜盆栽试验结果表明, 小青菜生长 40 d 时, 镉未污染土壤中种植的小青菜产量为每盆 11.10 g, 而添加垫料生物炭和秸秆生物炭后, 小青菜产量分别提高了 36.67% 和 40.36% (表 2)。镉污染土壤中种植的小青菜产量盆 18.48 g, 添加垫料生物炭和秸秆生物炭后, 小青菜产量分别为每盆 21.75 g、19.96 g, 提升幅度不大, 分别为 17.69% 和 8.00%。镉污染土壤种植的小青菜产量高于原始土壤, 添加生物炭后, 镉污染土壤中小青菜产量仍高于原始土壤。由表 2 还可看出, 未添加生物炭的镉污染土壤种植 (CP 对照) 的小青菜每盆镉含量为 24.86  $\mu\text{g}$ , 施加垫料生物炭和秸秆生物炭后每盆小青菜镉含量分别比 CP 对照下降了 26.11% 和 24.05%。对于镉未污染土壤, 未添加与添加生物炭处理的每盆小青菜体内镉含量相差不大。

镉未污染对照 (CK) 小青菜中 Cd 含量为 0.18 mg/kg, 添加生物炭后其含量略有降低 (图 4)。镉污染土壤对照 (CP) 小青菜镉含量为 1.34 mg/kg, 添加垫料生物炭和秸秆生物炭后, 小青菜中的镉含量分别下降了 37.21% 和 29.70%, 均达极显著水平。

表 2 生物炭对小青菜产量和  $\text{Cd}^{2+}$  吸收量的影响

Table 2 Effects of biochar on the yield of *Brassica chinensis* and  $\text{Cd}^{2+}$  content in *Brassica chinensis*

处理	小青菜产量 (g, 1 盆)	小青菜中镉总量 ( $\mu\text{g}$ , 1 盆)
CK	11.10 $\pm$ 3.69 b	2.00 $\pm$ 0.10a
CD500	15.17 $\pm$ 2.11 ab	2.11 $\pm$ 0.01 ab
CS500	15.58 $\pm$ 4.81 ab	2.29 $\pm$ 0.20 b
CP	18.48 $\pm$ 1.60 ab	24.86 $\pm$ 0.11 e
PD500	21.75 $\pm$ 2.13 a	18.37 $\pm$ 0.12 c
PS500	19.96 $\pm$ 1.23 ab	18.88 $\pm$ 0.049 d

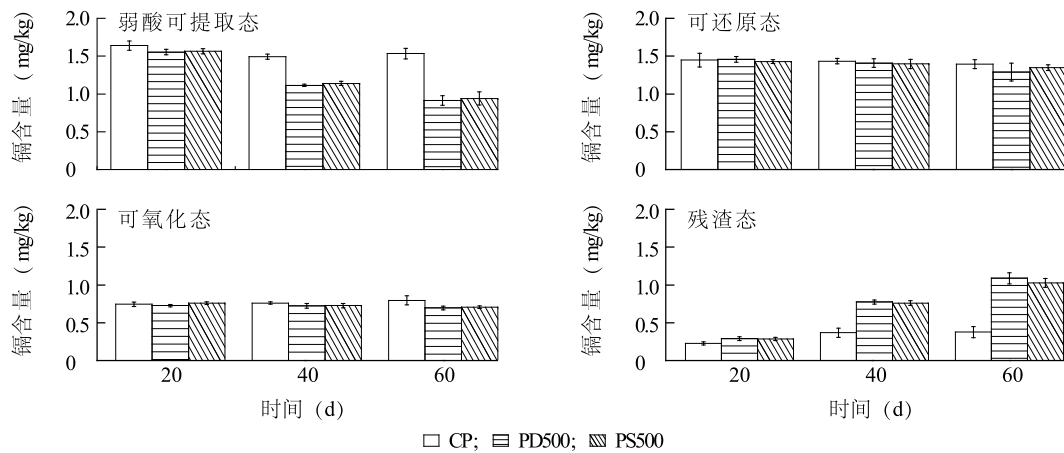
CK: 未添加生物炭和  $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$  的原始土壤; CD500: 添加垫料生物炭的原始土壤; CS500: 添加秸秆生物炭的原始土壤; CP: 未添加生物炭的镉污染土壤; PD500: 添加垫料生物炭的镉污染土壤; PS500: 添加秸秆生物炭的镉污染土壤。

#### 2.5 添加生物炭对镉污染土壤 $\text{Cd}^{2+}$ 淋出特征的影响

由图 5 可知, 不同处理中  $\text{Cd}^{2+}$  淋出量存在差异, 每次淋出液中  $\text{Cd}^{2+}$  释放量随着淋滤次数的增加逐渐减少, 第 2 次  $\text{Cd}^{2+}$  淋出量较第 1 次迅速降低, 之后降低速率减小, 在第 4 次收集的淋出液中  $\text{Cd}^{2+}$  基本检测不出。第 1 次收集的淋出液中, 对照 (CP) 的  $\text{Cd}^{2+}$  含量为 4.20  $\mu\text{g}$ , 而添加垫料生物炭和秸秆生物炭处理 (PD500 和 PS500) 的分别为 2.66  $\mu\text{g}$  和 3.87  $\mu\text{g}$ , 降幅分别为 36.67% 和 7.86%。第 2 次的淋出液中 PD500 和 PS500 处理分别较 CP 下降了 58.50% 和 36.73%, 第 3 次 PD500 和 PS500 处理分别较 CP 下降了 58.93% 和 66.07%。添加垫料生物炭和秸秆生物炭后,  $\text{Cd}^{2+}$  淋出总量分别较对照 (CP) 下降了 44.29% 和 20.48%。对照 (CP) 淋洗出的镉占土壤中总镉的 2.07%, PD500 和 PS500 处理分别占 1.18% 和 1.65%。可见, 添加两种生物炭后,  $\text{Cd}^{2+}$  淋出量均有所降低, 且降幅明显, 其中垫料生物炭对污染土壤中  $\text{Cd}^{2+}$  的固定效果更为显著。

### 3 讨论

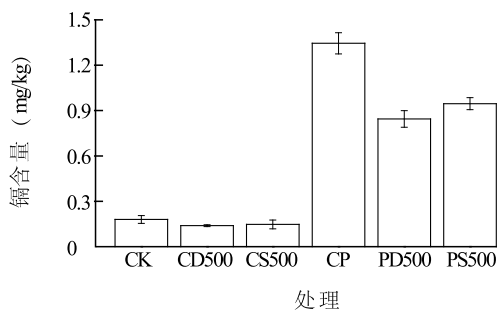
生物炭施入土壤后, 土壤 pH 显著升高, 与丁文川等<sup>[25]</sup>、Mbagwu 等<sup>[26]</sup>的研究结果一致。这与生物炭自身性质有关, 生物炭富含碱性物质, 例如氧化物 (氧化镁、氧化钙等) 和碳酸盐类 (碳酸钠、碳酸钾等), 可中和土壤酸度, 增加土壤 pH<sup>[27]</sup>。随着土壤 pH 的升高, 镉形态随之变化, 其中弱酸提取态镉含量显著降低而残渣态含量显著升高, 说明生物炭的



CP: 镉污染土壤; PD500: 添加垫料生物炭的镉污染土壤; PS500: 添加秸秆生物炭的镉污染土壤。

图 3 垫料生物炭对镉污染土壤重金属形态的影响

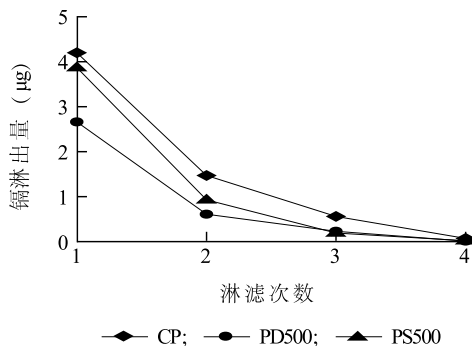
Fig.3 Effect of bedding materials derived-biochar application on speciation of Cd in Cd-contaminated soil



各处理见表 2 注。

图 4 生物炭对种植于 Cd 污染土壤中的小青菜镉含量的影响

Fig.4 Effects of biochar on Cd content in *Brassica chinensis* planted in Cd-contaminated soil



CP: 未添加生物炭的镉污染土壤; PD500: 添加垫料生物炭的镉污染土壤; PS500: 添加秸秆生物炭的镉污染土壤。

图 5 添加生物炭的镉污染土壤中  $\text{Cd}^{2+}$  的淋出特征

Fig.5 Release characteristics of  $\text{Cd}^{2+}$  from the contaminated soils with biochar

施用降低了土壤镉的有效性。秸秆生物炭相较于垫

料生物炭对土壤 pH 的增加程度更大,但对土壤镉的钝化能力较低,说明 pH 值并不是影响土壤镉活性的唯一因素,不同类型生物炭的表面官能团也是重要影响因素。生物炭表面的含氧官能团使生物炭呈现亲水与疏水性,对酸碱的缓冲能力及较高的阳离子交换能力<sup>[28]</sup>。

镉污染土壤处理的小青菜产量高于未污染土壤对照,主要是由于添加的  $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$  中的硝态氮促进了小青菜的生长。原始土壤添加生物炭后,小青菜的生物量明显增加,且两种类型生物炭的效果大致相当。对于镉污染土壤,添加生物炭对小青菜产量的提高有一定作用但未达到显著效果。Zhang 等<sup>[29]</sup>也发现在农田中使用生物炭能够提高作物产量。生物炭能够增加土壤有机质,通过长期作用促进土壤肥力的增强<sup>[30]</sup>,从而提高作物产量。添加生物炭可降低镉污染土壤中小青菜体内镉含量,垫料生物炭相对于秸秆生物炭的效果更为明显。但本试验中添加生物炭处理的小青菜镉含量仍超过叶菜类蔬菜的 0.2 mg/kg 镉限量标准<sup>[31]</sup>。刘阿梅<sup>[32]</sup>等研究表明,要使栽培在镉污染浓度为 3 mg/kg 的土壤中的小青菜达到可食用安全标准并充分促进其生长发育,生物炭的参考添加剂量为 10%。因此,本试验中如果增加生物炭的施加量,可望进一步降低小青菜体内镉含量。

从土柱淋滤试验结果可以看出,施加生物炭能有效降低镉污染土壤中  $\text{Cd}^{2+}$  的淋出量。与不加生物炭的对照相比,施加生物炭后,淋出液中  $\text{Cd}^{2+}$  含

量的降幅可达 50% 以上,说明生物炭有助于固定土壤中的重金属镉,且垫料生物炭的固定效果优于秸秆生物炭。这主要由于生物炭表面含氧官能团可与土壤重金属形成表面络合物,降低重金属的迁移率<sup>[33]</sup>。而不同原料制备的生物炭,性质差异很大,本试验制得的两种生物炭 D500 和 S500,表面均出现 C=O、-OH、Si-O-Si 等含氧官能团,但 D500 所含官能团振动峰较强,含量更高,这与垫料生物炭对镉的固定效果优于秸秆生物炭的结果相一致。

### 参考文献:

- [1] 陈俊翰,周 禾. 猪舍废弃垫料对 2 种草坪草生长与耐旱性的影响[J]. 草地学报, 2013, 21(4): 744-751.
- [2] 李买军,马 晗,郭海宁,等. 发酵床养猪对土壤重金属含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(3): 520-525.
- [3] 朱 洪. 基于畜禽废弃物管理的发酵床技术研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2007.
- [4] 胡海燕,于 勇,张玉静,等. 发酵床养猪废弃垫料的资源化利用评价[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 19(1): 261-267.
- [5] E M. Putting the carbon back: black is the new green[J]. Nature, 2006, 442: 624-626.
- [6] 兰 天,张 辉,刘 源,等. 玉米秸秆生物炭对 Pb<sup>2+</sup>、Cu<sup>2+</sup> 的吸附特征与机制[J]. 江苏农业学报, 2016, 32(2): 368-375.
- [7] 张忠河,林振衡,付娅琦,等. 生物炭在农业上的应用[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(22): 11880-11882.
- [8] 张学艳,曹 莹,孟 军,等. 生物炭对镉胁迫下水稻生长及光合产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(5): 97-101.
- [9] 刘丽珠,范如芹,卢 信,等. 农业废弃物生物炭在设施栽培中应用的研究进展[J]. 江苏农业学报, 2016, 32(6): 1434-1440.
- [10] 蒋艳艳,胡孝明,金卫斌. 生物炭对废水中重金属吸附研究进展[J]. 湖北农业科学, 2013(13): 2984-2988.
- [11] 朱灵峰,何怡雪,耿 悦,等. 还原剂改性生物炭吸附亚甲基蓝的动力学[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(9): 232-234.
- [12] 何绪生,耿增超,余 雕,等. 生物炭生产与农用的意义及国内外动态[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 1-7.
- [13] 黄益宗,郝晓伟,雷 鸣,等. 重金属污染土壤修复技术及其修复实践[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(3): 409-417.
- [14] 杨苏才,南忠仁,曾静静. 土壤重金属污染现状与治理途径研究进展[J]. 安徽农业科学, 2006, 34(3): 549-552.
- [15] DANT V, KRISHNAR S, SAXENAP K. Metal tolerance of scented geranium; Effects of cadmium and nickel on chlorophyll fluorescence kinetics [J]. International Journal of Phytoremediation, 2001, 2(1): 91-104.
- [16] 黄 震,黄占斌,孙朋成,等. 环境材料对作物吸收重金属 Pb、Cd 及土壤特性研究[J]. 环境科学学报, 2012, 32(10): 2490-2499.
- [17] 甘文君,何 跃,张孝飞,等. 秸秆生物炭修复电镀厂污染土壤的效果和作用机理初探[J]. 生态与农村环境学报, 2012, 28(3): 305-309.
- [18] HOUBEN D, EVRARD L, SONNET P. Beneficial effects of bio-char application to contaminated soils on the bio-availability of Cd, Pb and Zn and the biomass production of rapeseed [J]. Biomass Bioenergy, 2013, 57(11): 196-204.
- [19] PARK J H, CHOPPALA G K, BOLAN N S, et al. Biochar reduces the bioavailability and phytotoxicity of heavy metals [J]. Plant Soil, 2011, 348(1/2): 439-451.
- [20] 金 睿,刘可星,艾绍英,等. 生物炭复配调理剂对镉污染土壤性状和小白菜镉吸收及其生理特性的影响[J]. 南方农业学报, 2016, 47(9): 1480-1487.
- [21] 赵忠明,陈卫平,焦文涛,等. 再生水灌溉对土壤性质及重金属垂直分布的影响[J]. 环境科学, 2012, 33(12): 4094-4099.
- [22] 王亚平,黄 毅,王苏明,等. 土壤和沉积物中元素的化学形态及其顺序提取法[J]. 地质通报, 2005, 24(8): 728-734.
- [23] LEHMANN J, JOSEPH S. Biochar for environmental management: Science and technology [M]. London: Earthscan, 2009: 1-81.
- [24] CAO X, HARRIS W. Properties of dairy-manure-derived biochar pertinent to its potential use in remediation [J]. Bioresource Technology, 2010, 101(14): 5222-5228.
- [25] 丁文川,朱庆祥,曾晓岚,等. 不同热解温度生物炭改良铅和镉污染土壤的研究[J]. 科技导报, 2011, 29(14): 22-25.
- [26] MBAGWU J S C, PICCOLO A. Effects of humic substances from oxidized coal on soil chemical properties and maize yield [C]// IHSS, Polish Society of Humic Substances. The role of humic substances in the ecosystems and in environmental protection. Poland: Wroclaw, 1997: 921-925.
- [27] 杨璋梅,方战强. 生物炭修复 Cd、Pb 污染土壤的研究进展[J]. 化工环保, 2014, 34(6): 525-531.
- [28] LEE J W, KIDDER M, EVANS B R. Characterization of biochars produced from corn stovers for soil amendment [J]. Environmental Science and Technology, 2010, 44(20): 7970-7974.
- [29] ZHANG A F, CUI L Q, PAN G X. Effect of biochar amendment on yield and methane and nitrous oxide emissions from a rice paddy from Tai Lake plain [J]. Agriculture Ecosystem Environment, 2010, 139(4): 469-475.
- [30] 章明奎,唐红娟. 生物炭对土壤有机质活性的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(2): 127-131.
- [31] 中华人民共和国卫生部. 食品安全国家标准 食品中污染物限量: GB2762-2012 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [32] 刘阿梅,向言词,田代科,等. 生物炭对植物生长发育及重金属镉污染吸收的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(5): 193-198, 204.
- [33] 王萌萌,周启星. 生物炭的土壤环境效应及其机制研究[J]. 环境化学, 2013, 32(5): 768-780.

(责任编辑:张震林)