

菌渣生物炭对镉污染土壤性质及小白菜吸收镉的影响

何梓林¹, 鲜杨¹, 孟晓霞², 吴倩兰¹, 张琪¹, 伍钧¹

(1. 四川农业大学环境学院, 成都 611130 2. 四川省环境保护科学研究所, 成都 610041)

摘要: 为探讨以菌渣为原料制备的生物炭修复重金属镉污染土壤的可行性。采用盆栽试验, 以香菇菌渣生物炭(SC)和平菇菌渣生物炭(PC)为研究对象, 设置 0.5%, 1%, 2% 的生物炭施用量(w/w, %), 研究其对镉污染土壤理化性质、土壤各形态镉分布、小白菜生长及镉吸收的影响。结果表明: 施用 SC 和 PC 均能显著提高土壤 pH 和有机质(SOM)含量。与对照相比, 2% 的生物炭处理, 土壤 pH 分别提高 1.05 和 1.10 个单位, SOM 含量分别提高 80.6% 和 61.2%。施用 SC 和 PC 使土壤可交换态镉降低, 而提高残渣态镉含量。相关分析表明, 土壤可交换态镉与 pH、SOM 和蔗糖酶呈显著负相关。与对照相比, 2% 处理下 SC 和 PC 显著降低小白菜镉含量, 分别降低 57.5% 和 54.1%; 1% 用量下小白菜产量分别提高 53.4% 和 41.6%, 表明高投加量菌渣生物炭对小白菜生长有不利影响。总体看来, SC 和 PC 均有利于改善土壤性质, 减轻镉对植物的毒害, 促进小白菜生长。

关键词: 菌渣生物炭; 小白菜; 土壤理化性质; 土壤修复; 镉

中图分类号: X53 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2019)01-0340-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.01.053

Effects of Mushroom Residues Biochar on Properties of Cadmium-contaminated Soil and Cd Uptake by Chinese Cabbage

HE Zilin¹, XIAN Yang¹, MENG Xiaoxia², WU Qianlan¹, ZHANG Qi¹, WU Jun¹

(1. College of Environmental Sciences, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130,

2. Sichuan Research Institute of Environmental Protection, Chengdu 610041)

Abstract: This study was to explore the feasibility of the biochar prepared from fungal residue as raw material for remediation of cadmium (Cd) contaminated soil. A pot experiment was carried out, and *Letinous edodes* (Berk.) sing residue biochar (SC) and *Pleurotus ostreatus* (Fr.) Kummer residue biochar (PC) were taken as the research objects, the effects of SC and PC on the physical and chemical properties of Cd contaminated soils, distribution of different forms cadmium in soils, Chinese cabbage growth and Cd accumulation were measured and analyzed. The application rates of 0.5%, 1% and 2% biochar (w/w, %) were set up. The results showed that SC and PC significantly increased soil pH and organic matter (SOM). Compared with the control, 2% biochar application could increase soil pH by 1.05 and 1.10 units, respectively; and increased soil organic matter (SOM) by 80.6% and 61.2%, respectively. Application of SC and PC reduced the content of soil exchangeable Cd and increased the residual Cd concentration. Correlation analysis showed that soil exchangeable Cd was significantly negatively correlated with pH, SOM and sucrase. Compared with the control, Cd accumulation in Chinese cabbage was significantly reduced by 57.5% and 54.1%, respectively, in 2%—SC and 2%—PC treatments. Compared with the control, the yield of Chinese cabbage was increased by 53.4% and 41.6%, respectively, in 1%—treatments, indicating that high dosage of fungal residue had negative effect on the growth of Chinese cabbage. On the whole, SC and PC could improve soil properties, reduce the toxicity of Cd to plants, and promote growth of Chinese cabbage.

Keywords: mushroom residue biochar; Chinese cabbage; soil physical and chemical properties; soil remediation; Cd

随着经济的快速发展,大量工农业废物排入环境,导致土壤污染日趋严重。由于重金属的毒性强、长期性和非生物降解性,土壤重金属污染成为当今严重的环境问题^[1]。镉是毒性最强的元素之一^[2],不仅严重影响农产品的安全和生态环境,还可通过食物链的传递在人体内富集,从而引发各种疾病^[3]。因此,土壤镉污染的治理问题亟待解决。

目前,土壤重金属污染修复的方法主要有物理、化学和生物法^[4]。其中,改良修复是一种利用改良剂与土壤重金属进行络合、吸附和沉淀等反应将重金属固定在土壤中,从而减少重金属生物有效性的化学修复方法^[5]。因其操作便捷和成本低廉而受到广泛关注^[6]。常用的改良剂有石灰、泥炭和磷酸盐等,但这些改良剂通常会对土壤造成二次污染或带来不利影响^[5]。生物炭是有机质在完全或部分缺氧的情况下裂解的产物^[7],具有较大的比表面积、丰富的孔隙和官能团^[8],可降低土壤重金属的生物有效性和可移动性,作为一种环境友好的修复材料在修复土壤重金属污染方面具有较大的应用前景^[9]。生物炭原材料的不同,其性质存在明显差异,而性质的差异会影响生物炭对重金属的修复效果^[9]。杨惟薇等^[10]发现添加蚕沙生物炭的土壤中的弱酸可提取态 Cd 含量降低了 42.07%。李明遥等^[11]发现 600 °C 制得的水稻秸秆生物炭可降低土壤有效态镉 32.43%。目前,以香菇、平菇菌渣为原料制备生物炭对土壤中镉的修复研究却鲜有报道。

香菇和平菇是我国两大食用菌种,食用菌行业协

会统计数据表明,2015 年我国产量最大的 3 种食用菌分别是香菇、平菇和黑木耳,共占食用菌总产量的 57%。据统计,每生产 1 kg 食用菌将产生 5 kg 菌渣,而大量菌渣处理不当可能造成环境污染和资源浪费^[12]。如何有效合理地利用菌渣是目前极为关注的问题。因此本研究以香菇和平菇 2 种菌渣为原料制备生物炭,采用盆栽试验研究生物炭对镉污染土壤理化性质、镉形态变化和小白菜生长及吸收镉的影响。探讨香菇、平菇菌渣生物炭作为土壤改良剂的可行性,为菌渣的合理利用及土壤重金属污染治理提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

供试蔬菜为上海四季青小白菜。供试土壤采自四川省某市镉污染水稻土。

供试生物炭的制备:香菇菌渣、平菇菌渣经自然风干后粉碎,过 40 目筛装入陶瓷坩埚中压实盖紧,再分别置于马弗炉中在 500 °C 下炭化 2 h(升温速率 20 °C/min,升至 500 °C 保温 2 h),冷却至室温后磨碎过 100 目筛。香菇菌渣生物炭和平菇菌渣生物炭分别记为 SC、PC。

供试材料基本理化性质见表 1,生物炭理化性质见表 2。生物炭灰分含量测定参照《GB/T 12496.3—1999 木质活性炭灰分含量的测定》^[13];采用综合吸附仪测定生物炭比表面积和孔径结构;采用元素分析仪测定生物炭元素组成。

表 1 供试材料基本理化性质

供试材料	pH	有机质/ (g · kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg · kg ⁻¹)	速效磷/ (mg · kg ⁻¹)	速效钾/ (mg · kg ⁻¹)	总镉/ (mg · kg ⁻¹)
土壤	6.92	46.0	310.4	12.5	51	2.22
SC	10.64	356.8	149.1	300.7	4177	0.16
PC	10.37	327.4	132.3	285.9	3490	0.21

表 2 生物炭理化性质

生物炭	灰分/ %	比表面积/ (m ² · g ⁻¹)	元素分析/%				平均 孔径/nm
			C	H	O	N	
SC	35.67	47.07	45.92	1.94	12.36	2.11	5.97
PC	52.35	18.05	38.73	1.09	1.69	0.44	3.60

1.2 试验方案

采用盆栽试验,每盆装土 1.5 kg。试验共设置 7 个处理:SC 和 PC 按生物炭/土壤质量比,分别设置 0.5%,1%,2% 3 个水平,以空白处理(CK)为对照。每个处理设置 3 个重复。试验所用塑料盆规格为 180 mm×250 mm。将生物炭、底肥和土壤充分混匀平衡 1 周后,均匀撒种,待小白菜成苗均匀,每盆保留 4 株。在小白菜生长期间,定期浇水,使土壤中含水

量维持在田间持水量的 60% 左右^[14]。试验于四川农业大学温室大棚内进行,小白菜于 2017 年 4 月 7 日播种,2017 年 5 月 22 日收获。

1.3 测定方法

土壤 pH 采用 pH 计测定(水土比 2.5:1);有机质含量采用重铬酸钾法测定^[15]。脲酶活性采用靛酚比色法测定;蔗糖酶活性采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定;过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法测定^[16]。

采集的植物鲜样在室内用刻度尺直接测量株高(地面至叶片最高点的距离)、叶面积($0.75 \times \text{长} \times \text{宽}$)和根长;小白菜冲洗干净晾干后直接称取鲜重;叶绿素采用丙酮提取法测定^[17]。

采用 BCR 连续提取法测定土壤镉形态,分为可交换态、可还原态、可氧化态和残渣态^[18]。小白菜杀青后在 70 °C 下烘干至恒重,粉碎过筛,经 $\text{HNO}_3 - \text{HClO}_4$ (4 : 1) 消解,0.45 μm 滤膜过滤后,用电感耦合等离子体质谱仪测定小白菜中镉含量^[19]。

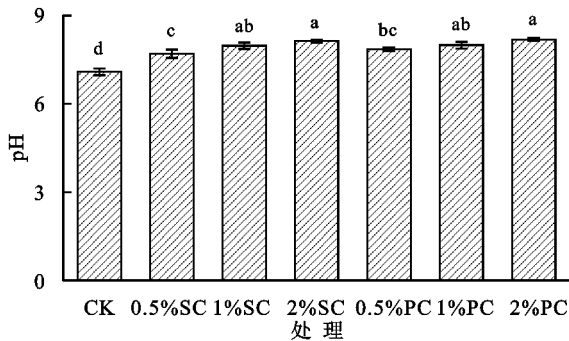
1.4 数据分析

试验数据采用 Excel 2010 软件进行处理,为 3 次重复的平均值;采用 SPSS 21.0 分析软件进行单因素方差分析,差异显著分析采用 LSD 法 ($P < 0.05$)。结果采用 Origin 9.0 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 生物炭对土壤理化性质的影响

2.1.1 土壤 pH 由图 1 可知,2 种菌渣生物炭在不同投加量下均能提高土壤 pH,且随投加量的增加而增加。2%SC 和 2%PC 处理下 pH 分别达最高值。相比 CK 处理,提高 pH 1.05 和 1.10 个单位,SC 和 PC 处理的土壤 pH 间无显著差异,而不同投加量处理下差异显著。



注:不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

图 1 生物炭对土壤 pH 的影响

2.1.2 土壤 SOM 由图 2 可知,对照组 SOM 含量为 49.35 g/kg,SC 和 PC 处理后土壤 SOM 含量显著提高,最高可分别提升 80.6% 和 61.2%。且 2%SC 处理比 2%PC 处理的土壤 SOM 含量提高了 20%。SC 处理的土壤 SOM 不同投加量间差异显著,而 PC 处理仅高投加量下差异显著。

2.1.3 土壤酶活性 由表 3 可知,施用生物炭后,过氧化氢酶和蔗糖酶的活性均有所提高,且随生物炭用量的增加呈上升趋势。SC 和 PC 分别提高蔗糖酶活性 11.3%~27.5% 和 8.3%~30.9%,过氧化氢酶 15%~17% 和 13%~16%,但 2 种生物炭的施用对脲酶活性影响不大。总体而言,SC 和 PC 对土壤酶活性的影响无显著差异。

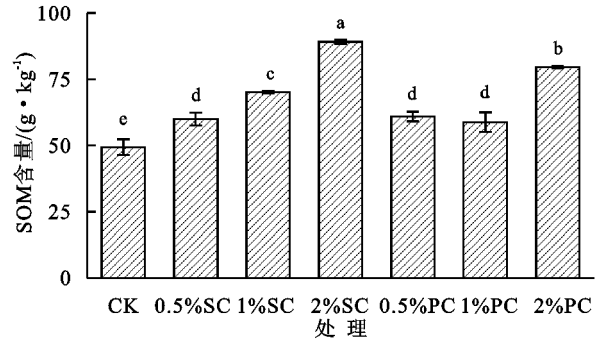


图 2 生物炭对土壤 SOM 的影响

表 3 生物炭对土壤中酶活性的影响

处理	过氧化氢酶/ ($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	脲酶/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	蔗糖酶/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
CK	1.00 ± 0.01b	1.11 ± 0.13a	28.22 ± 0.92d
0.5%SC	1.15 ± 0.01a	1.16 ± 0.08a	31.40 ± 0.76cd
1%SC	1.16 ± 0.06a	1.09 ± 0.00a	32.62 ± 0.54c
2%SC	1.17 ± 0.04a	1.20 ± 0.04a	35.99 ± 1.32ab
0.5%PC	1.13 ± 0.05a	1.20 ± 0.08a	30.57 ± 2.02cd
1%PC	1.14 ± 0.04a	1.20 ± 0.12a	32.96 ± 2.31bc
2%PC	1.16 ± 0.07a	1.19 ± 0.09a	36.95 ± 0.06a

注:表中数据为平均值 ± 标准误差;同列数据后不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

2.2 生物炭对土壤镉形态的影响

由图 3 可知,对照土壤中镉的主要存在形态为可交换态,占总镉 59.73%,其次是可还原态和残渣态,分别占 19.39% 和 17.61%,可氧化态占 3.27%。施加生物炭后,土壤中镉的形态均有不同程度的变化。与对照相比,2%SC 和 2%PC 处理下可交换态分别降低了 9.48%,8.43%,残渣态分别增加了 10.92%,9.48%,而可氧化态和可还原态无明显变化。

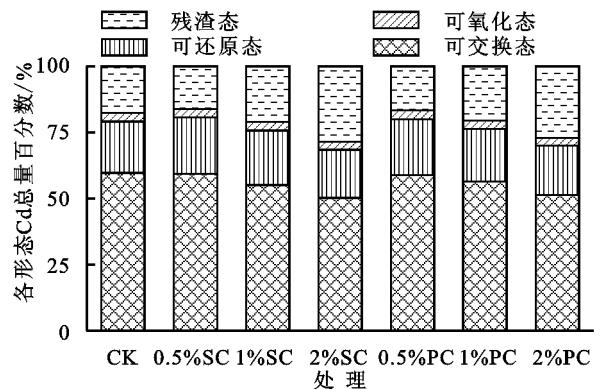


图 3 生物炭对土壤镉形态的影响

2.3 土壤可交换态、残渣态镉含量与土壤理化性质相关性分析

对土壤可交换态、残渣态镉含量与土壤理化性质进行相关性分析(表 4)。结果表明,施入 SC 和 PC 后,土壤可交换态镉含量与土壤 pH 呈显著负相关 ($P < 0.05$),与 SOM 和蔗糖酶均呈极显著负相关 ($P < 0.01$)。残渣态镉与 SOM 和蔗糖酶呈显著或极

显著正相关。

表 4 土壤中可交换态、残渣态镉含量与土壤理化性质的相关性

样品	项目	pH	SOM	过氧化氢酶	脲酶	蔗糖酶
SC	可交换态	-0.789*	-0.931**	-0.607	-0.177	-0.899**
	残渣态	0.672	0.865**	0.456	0.135	0.826*
PC	可交换态	-0.755*	-0.893**	-0.660	0.036	-0.906**
	残渣态	0.626	0.803*	0.542	-0.194	0.841**

注: * 表示显著相关($P < 0.05$); ** 表示极显著相关($P < 0.01$)。

2.4 生物炭对小白菜吸收镉的影响

由图 4 可知, SC 和 PC 能显著降低小白菜体内 Cd 的含量, 且随生物炭投加量的增加呈快速下降趋势。3 种投加量处理下差异显著, 与对照相比, SC 和 PC 处理下小白菜镉含量最高可降低 57.5% 和 54.1%。根据国家食品安全标准(GB 2762-2017)^[20] 规定, 新鲜蔬菜中 Cd 含量的最大允许值为 0.2 mg/kg。1% 和 2% 投加水平下, SC 和 PC 处理的小白菜镉含量均能降低至食品安全标准限值内。总体来看, 2 种生物炭处理的效果基本一致。

表 5 生物炭小白菜生长状况的影响

处理	产量/ (g · 株 ⁻¹)	株高/ cm	叶面积/ cm ²	根长/ cm	叶绿素/ (mg · g ⁻¹)
CK	6.70 ± 0.24bc	13.65 ± 0.21bc	28.05 ± 1.38c	6.50 ± 0.40b	0.64 ± 0.00cd
0.5%SC	7.14 ± 0.42b	14.50 ± 0.42b	31.70 ± 0.40b	8.10 ± 0.14ab	0.82 ± 0.03a
1%SC	10.28 ± 0.25a	16.65 ± 0.64a	34.76 ± 0.49a	8.55 ± 0.07a	0.74 ± 0.04b
2%SC	6.18 ± 0.60c	12.75 ± 0.35cd	34.68 ± 0.13a	9.03 ± 0.18a	0.41 ± 0.01e
0.5%PC	7.32 ± 0.27b	13.55 ± 0.49bc	31.00 ± 0.57b	6.88 ± 0.11ab	0.67 ± 0.04c
1%PC	9.49 ± 0.04a	16.00 ± 0.28a	34.79 ± 1.03a	7.60 ± 0.42ab	0.60 ± 0.03d
2%PC	6.02 ± 0.51c	12.05 ± 0.49d	34.92 ± 0.15a	8.88 ± 0.25a	0.44 ± 0.01e

3 讨论

众多研究^[21-22]表明, 施用生物炭可显著改变土壤理化性质, 如 pH、孔隙度、持水性等。本研究中施加 2 种生物炭后, 土壤 pH 可显著提高 1.05 和 1.10 个单位。这是因为: (1) SC 和 PC 呈碱性, 施入土壤后可中和土壤中的 H⁺; (2) 同时生物炭含有 Ca²⁺、K⁺、Mg²⁺ 等盐基离子, 可通过交换作用降低土壤中 H⁺ 和 Al³⁺ 的浓度^[9], 进而提高土壤 pH。施用菌渣生物炭可提高土壤有机质含量, 首先是由于 SC 和 PC 本身含有较高的有机质, 加入土壤后对 SOM 起直接补充作用; 其次生物炭能够吸附土壤中的有机分子, 并通过表面催化活性促进小的有机分子聚合形成 SOM; 最后生物炭在土壤环境中缓慢分解能促进腐殖质的形成, 从而提高土壤有机质含量^[21-22]。张连科等^[4]研究表明, 油菜秸秆生物炭和胡麻秸秆生物炭均能有效提高土壤有机质含量。本研究中 SC 对 SOM 的提升效果优于 PC, 这可能与自身的有机碳含量有关。由表 1 可知, SC 有机质含量高于 PC, 施入土壤后, SC 可以更好地提升土壤 SOM

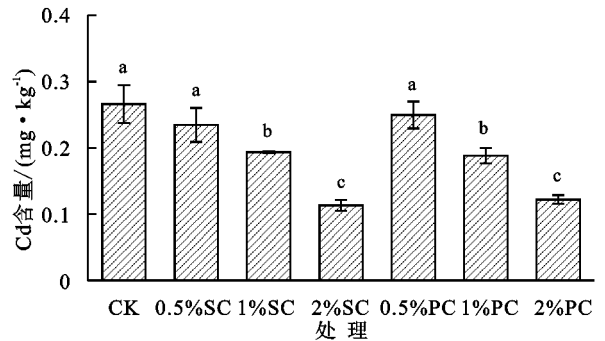


图 4 生物炭对小白菜吸收镉的影响

2.5 生物炭对小白菜生长状况的影响

由表 5 可知, 随着生物炭投加量的增加, 小白菜产量、株高和叶绿素含量呈先增长后下降的趋势。且在 1% 投加量水平下增幅达到最大, 相比对照 SC 与 PC 分别提高小白菜产量 53.4% 和 41.6%, 株高 22.0% 和 17.2%。但 2% 处理下 2 种生物炭会抑制小白菜的生长, 表现为其产量、株高和叶绿素含量均低于对照。与对照相比, 施加 SC 和 PC 后小白菜叶面积增加 13.01%~23.92% 和 10.52%~24.49%, 根长增加 24.62%~38.92% 和 5.8%~36.62%。

含量, 提高土壤肥力。

生物炭的施用对土壤重金属形态分布有较大影响^[23]。可交换态移动性强易被生物吸收, 视为有效态; 残渣态不易被植物吸收利用, 视为无效态^[24]。本研究显示, 在镉污染土壤上施加 SC 和 PC 均能有效降低土壤可交换态镉含量, 增加残渣态镉含量。由此表明, 施用 SC 和 PC 能促进有效态镉向无效态镉转化, 降低土壤中镉的活性。重金属形态的变化受土壤理化性质的影响, 一方面 pH 的升高将影响 Cd 的水解平衡, 使其通过沉淀反应被固定下来^[25]; 另一方面, 施加生物炭能提高土壤有机质含量, 进而改变土壤中微生物的群落结构, 降低土壤中 Cd 的有效性^[9]。此外, 生物炭表面含有丰富的官能团和孔隙结构, 能通过吸附作用与土壤中的镉形成金属络合物, 进而将镉固定在土壤中, 降低其在土壤中的可移动性和生物有效性^[25]。从表 2 可以看出, SC 表面积较 PC 表面积大, 说明 SC 对重金属的吸附潜能更好, 但 PC 灰分更多, 从而其电导率和阳离子交换量更高, 可

以增加土壤对重金属的吸附量^[9],弥补 PC 表面积不足对重金属吸附弱的劣势,这也与本研究结果 SC 和 PC 对镉的影响无显著差异相符合。

土壤酶活性也是反映土壤环境变化的重要指标^[26]。在本研究中,可交换态镉含量与蔗糖酶活性呈极显著负相关($P < 0.01$),这与王学峰等^[27]研究指出蔗糖酶对 Cd、Ni 单一污染及复合污染的敏感性较高的结论相似。因此,蔗糖酶活性的增加间接表明 SC 和 PC 可降低重金属镉的活性。

重金属生物有效性与植物中重金属的积累量显著相关^[23]。本研究中,施加 SC 和 PC 明显提高了土壤对可交换态镉的固定,减少了小白菜体内镉含量。这与李衍亮等^[22]的研究结果一致。本研究中 SC 和 PC 处理后的小白菜 Cd 含量分别降低至 0.11, 0.12 mg/kg,均达到国家食品安全标准的允许水平。由此可见,在本试验下的镉污染土壤中施用 SC 和 PC,可以有效抑制镉的活性,削弱土壤重金属镉向植物迁移的能力,最终实现农产品的安全生产。

生物炭能改善土壤肥力,从而促进植物生长^[21]。本研究中,适量的 SC 和 PC 能显著提高小白菜产量、株高和叶绿素含量,主要是因为:(1)SC 和 PC 自身含有较高的 pH 和速效养分(表 1),施入土壤后能有效提高土壤的保肥性,改善土壤质地;(2)同时生物炭丰富的孔隙结构为微生物提供了良好的栖息场所,提升土壤的生态功能,从而使土壤肥力得到提高^[21]; (3)生物炭能降低土壤中重金属的毒性,从而改善植物的生长环境^[21,26]。刘阿梅等^[28]发现在基质中添加生物炭能有效地提高萝卜及青菜的株高和鲜重。本研究中,SC 较 PC 能更好地促进小白菜生长,这主要和菌渣生物炭自身的性质有关,SC 的养分含量相对较高,施入土壤后可以更好满足小白菜生长的需要。但高投加量的生物炭对小白菜生长产生抑制作用,这与陈心想等^[29]的研究结果一致。造成这一结果的原因可能是过量的菌渣生物炭导致土壤 pH 和盐含量过高,以及高温制备下生物炭产生的多环芳烃和焦油等有毒物质^[30],破坏了植物生长环境,从而抑制植物的生长。

综上,在镉污染土壤中添加 SC 和 PC,可改善土壤理化性质,提高土壤 pH、有机质含量和酶活性,促进可交换态镉向残渣态镉转化,降低小白菜对重金属镉的吸收,从而促进小白菜增产。且在改善土壤和小白菜增产方面,SC 作用效果较 PC 更好,但二者对土壤镉形态的转变及小白菜吸收镉的影响无明显差异。综合考虑 SC 和 PC 对小白菜增产和降低重金属含量 2 个方面,投加量选用 1% 较适宜。

4 结论

(1)镉污染土壤上施用 SC 和 PC 能明显提高土

壤 pH、SOM 含量和酶活性,改善土壤理化性质,且 SC 的改善效果优于 PC。

(2)施用 SC 和 PC 后,能改变土壤中镉的形态分布,使可交换态镉含量降低,残渣态镉含量明显增加,减少小白菜对重金属镉的吸收,且 2% 施用量效果最佳。

(3)施用适量菌渣生物炭能显著提高小白菜产量,促进小白菜生长。1% 的生物炭投加量较为适宜。

参考文献:

- [1] Zhou N, Chen H, Xi J, et al. Biochars with excellent Pb(II) adsorption property produced from fresh and dehydrated banana peels via hydrothermal carbonization [J]. *Bioresource Technology*, 2017, 232: 204-210.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 张连科,刘心宇,王维大,等.2种油料作物秸秆生物炭对土壤中铅的钝化修复[J].*生态环境学报*,2018,27(1):166-173.
- [5] 许剑臣,李晔,肖华锋,等.改良剂对重金属复合污染土壤的修复效果[J].*环境工程学报*,2017,11(12):6511-6517.
- [6] Wang H, Xia W, Lu P. Study on adsorption characteristics of biochar on heavy metals in soil [J]. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2017, 34(6): 1867-1873.
- [7] Lehmann J, Rillig M C, Thies J, et al. Biochar effects on soil biota: A review [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2011, 43(9): 1812-1836.
- [8] Xu C, Wen D, Zhu Q, et al. Effects of peanut shell biochar on the adsorption of Cd(II) by paddy soil [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2017, 98(3): 413-419.
- [9] 李江遐,吴林春,张军,等.生物炭修复土壤重金属污染的研究进展[J].*生态环境学报*,2015,24(12):2075-2081.
- [10] 杨惟薇,张超兰,潘丽萍,等.水稻秸秆和蚕沙生物炭对玉米植株镉累积的影响[J].*西南农业学报*,2017,30(5):1115-1120.
- [11] 李明遥,杜立宇,张妍,等.不同裂解温度水稻秸秆生物炭对土壤 Cd 形态的影响[J].*水土保持学报*,2013,27(6):261-264.
- [12] Chang B, Fan S, Tsai Y, et al. Removal of emerging contaminants using spent mushroom compost [J]. *Science of The Total Environment*, 2018, 634: 922-933.
- [13] 中华人民共和国质量技术监督局,中国国家标准化管理委员会.GB/T 12496.3-1999 木质活性炭灰分含量的测定[S].北京:中国标准出版社,2000.

- rainfall simulation[J]. *Geoderma*, 2012, 189: 164-169.
- [6] Smets T, Poesen J, Langhans C, et al. Concentrated flow erosion rates reduced through biological geotextiles [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2009, 34(4): 493-502.
- [7] 张建生, 张梅花, 李庆会, 等. 生态垫覆盖对沙漠土壤水分和温度的影响[J]. *中国沙漠*, 2008(2): 280-283.
- [8] 李宏钧, 孔亚平, 张岩, 等. 植物纤维毯对道路边坡微生物环境的影响[J]. *公路交通科技*, 2016, 33(6): 146-151.
- [9] 张科利, 细山田健三. 人工防蚀生草膜保持及改良土壤作用的研究[J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1997, 3(4): 21-25.
- [10] 张利, 罗麟, 朱欣伟, 等. 生态毯对川西北流动沙地生态恢复的影响[J]. *草地学报*, 2017, 25(5): 1156-1159.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [12] 刘志光. 土壤氧化还原电位的研究及其应用[J]. *土壤学进展*, 1983(4): 1-10.
- [13] Rickson R J. Controlling sediment at source: An evaluation of erosion control geotextiles [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2006, 31(5): 550-560.
- [14] Mitchell D J, Barton A P, Fullen M A, et al. Field studies of the effects of jute geotextiles on runoff and erosion in Shropshire, UK [J]. *Soil Use and Management*, 2003, 19(2): 182-184.
- [15] Bhattacharyya R, Fullen M A, Booth C A. Using palm-mat geotextiles on an arable soil for water erosion control in the UK [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2011, 36(7): 933-945.
- [16] Bhattacharyya R, Fullen M A, Booth C A, et al. Effectiveness of biological geotextiles for soil and water conservation in different agro-environments [J]. *Land Degradation & Development*, 2011, 22(5): 495-504.
- [17] Sutherland R A, Ziegler A D. Effectiveness of coir-based rolled erosion control systems in reducing sediment transport from hillslopes [J]. *Applied Geography*, 2007, 27(3/4): 150-164.
- [18] Bhattacharyya R, Yi Z, Yongmei L, et al. Effects of biological geotextiles on aboveground biomass production in selected agro-ecosystems [J]. *Field Crops Research*, 2012, 126: 23-36.
- [19] Kalibova J, Jacka L, Petru J. The effectiveness of jute and coir blankets for erosion control in different field and laboratory conditions [J]. *Solid Earth*, 2016, 7(2): 469-479.
- [20] 任改, 白芝兵, 赵迪, 等. 不同生态护坡下水土保持效果动态变化研究[J]. *人民长江*, 2017, 48(17): 25-27, 45.
- (上接第 344 页)
- [14] 李素霞, 韦司棋, 刘云霞. 3 种改良剂对氮镉互作下小白菜产量和品质的影响[J]. *西南农业学报*, 2015, 28(4): 1709-1712.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 25-79.
- [16] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986: 295-323.
- [17] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 122-123.
- [18] Pueyo M, Mateu J, Rigol A, et al. Use of the modified BCR three-step sequential extraction procedure for the study of trace element dynamics in contaminated soils [J]. *Environmental Pollution*, 2008, 152(2): 330-341.
- [19] 朱启红. 酒糟生物炭输入对重度重金属复合污染土壤性质及水稻生长的影响[D]. 成都: 四川农业大学, 2016.
- [20] 中华人民共和国卫生部, 中国国家标准化管理委员会. GB 2762-2017 食品中污染物限量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [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.
- [22] 李衍亮, 黄玉芬, 魏岚, 等. 施用生物炭对重金属污染农田土壤改良及玉米生长的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(11): 2233-2239.
- [23] 徐楠楠, 林大松, 徐应明, 等. 生物炭在土壤改良和重金属污染治理中的应用[J]. *农业资源与环境学报*, 2013, 30(4): 29-34.
- [24] 李丹, 李俊华, 何婷, 等. 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[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(9): 1679-1685.
- [25] 许妍哲, 方战强. 生物炭修复土壤重金属的研究进展[J]. *环境工程*, 2015, 33(2): 156-159.
- [26] Mierzwa-hersztek M, Gondek K, Baran A. Effect of poultry litter biochar on soil enzymatic activity, ecotoxicity and plant growth [J]. *Applied Soil Ecology*, 2016, 105: 144-150.
- [27] 王学锋, 尚菲, 刘修和, 等. Cd、Ni 单一及复合污染对土壤酶活性的影响[J]. *环境工程学报*, 2014, 8(9): 4027-4034.
- [28] 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.
- [29] 陈心想, 何绪生, 耿增超, 等. 生物炭对不同土壤化学性质、小麦和糜子产量的影响[J]. *生态学报*, 2013, 33(20): 6534-6542.
- [30] 魏彬萌, 王益权, 李忠徽. 烟杆生物炭对砷砂岩与沙复配土壤理化性状及玉米生长的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(2): 217-222.