

The Nutrient and Remediation Effect of Biochar on Heavy Metal Contaminated Soil

Yan Xu^{1,2,3,4}, Chendi Shi^{1,2,3,4}, Tingting Cao^{1,2,3,4}, Yike Wang^{1,2,3,4}

¹Key Laboratory of Degraded and Unused Land Consolidation Engineering, the Ministry of Land and Resources of China, Xi'an Shaanxi

²Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group, Xi'an Shaanxi

³Institute of Land Engineering and Technology, Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group, Xi'an Shaanxi

⁴Shaanxi Provincial Land Consolidation Engineering Technology Research Center, Xi'an Shaanxi

Email: 1213349323@qq.com

Received: May 22nd, 2019; accepted: June 6th, 2019; published: June 13th, 2019

Abstract

Through the biochar-cabbage pot experiment, the effects of fruit biochar and swine biochar on the nutrient and remediation effect of heavy metal contaminated soil before and after planting cabbage at the concentration of 0%, 5% and 10% (in terms of dry soil) were studied. The results showed that the addition of swine biochar before and after planting cabbage was beneficial to the improvement and maintenance of soil pH, total nitrogen, available phosphorus and available potassium. Compared with CK group before planting, the pH, total nitrogen and available potassium of the soil increased with the increase of two biochar concentrations, and the available phosphorus content decreased slightly with the increasing concentration. After planting, the addition of both biochars slowed down the decline of the nutrient content of the soil. In this test, the biochar-cabbage was not conducive to the repair of total Cr, Ni, Cu and As, but was beneficial to the restoration of total Pb, Hg, Zn and Cd. The repair effect was total Pb > total Hg > total Zn > total Cd. Among them, swine biochar was more beneficial to the repair of total Pb, total Zn and total Cd. The fruit biochar was more favorable for the repair of total Hg, and the remediation effect was more significant with the increase of concentration. In the later practice of compound heavy metal contaminated soil remediation, swine biochar can be preferred, and the concentration of 10% was better.

Keywords

Fruit Biochar, Swine Biochar, Cabbage, Soil Nutrient, Remediation of Heavy Metal Polluted Soil

生物炭对重金属污染土壤养分的影响及修复效果研究

徐艳^{1,2,3,4}, 师晨迪^{1,2,3,4}, 曹婷婷^{1,2,3,4}, 汪怡珂^{1,2,3,4}

¹国土资源部退化及未利用土地整治工程重点实验室, 陕西 西安

²陕西省土地工程建设集团有限责任公司, 陕西 西安

³陕西地建土地工程技术研究院有限责任公司, 陕西 西安

⁴陕西省土地整治工程技术研究中心, 陕西 西安

Email: 1213349323@qq.com

收稿日期: 2019年5月22日; 录用日期: 2019年6月6日; 发布日期: 2019年6月13日

摘要

通过生物炭-小白菜盆栽试验, 研究果木炭与猪粪炭在0%, 5%和10% (以风干土计)添加量下种植小白菜后对重金属污染土壤养分及修复效果的影响。结果表明: 种植小白菜前后猪粪炭的添加有利于土壤pH、全氮、有效磷和速效钾的含量的提升与保持。种植前相较CK组, pH、全氮和速效钾含量随两种生物炭浓度增加而增加, 有效磷含量随浓度增加而略有下降。种植后, 两种生物炭的添加均减缓了土壤中养分含量的下降。生物炭-小白菜联合修复不利于供试土壤中总Cr、总Ni、总Cu和总As的修复, 而对总Pb、总Hg、总Zn和总Cd的修复有利, 修复效果依次为总Pb > 总Hg > 总Zn > 总Cd。其中猪粪炭对总Pb、总Zn和总Cd的修复更有利, 果木炭对总Hg的修复更有利, 且随浓度增加效果更显著。后期复合重金属污染土壤修复实践中, 可优先选用猪粪炭, 且10%的用量效果更佳。

关键词

果木炭, 猪粪炭, 小白菜, 土壤养分, 重金属修复

Copyright © 2019 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

陕西潼关金矿区地处陕豫接壤的中国第二大黄金生产基地, 已有四十多年开采历史, 区内尾矿渣堆积成山[1] [2]。大量研究表明, 潼关小秦岭金矿区内尾矿渣周边农田土壤 Hg, Pb, Cd, Cu, Zn 等污染严重[3] [4], 给当地环境安全带来了严重威胁。国内外大量研究表明, 生物炭来源广成本低, 具多孔结构、较大的比表面积和丰富的表面官能团, 对重金属污染物的吸附能力较强[5] [6] [7] [8] [9], 且叶菜类植物对重金属吸附效果较好[10] [11]。目前关于稻壳炭、秸秆炭、竹炭对土壤理化性质及重金属污染修复的研究较多[12] [13], 而关于果木炭与猪粪炭对矿区重金属污染土壤养分及修复效果的研究较少。本文选用当地适生叶菜类植物小白菜为供试植物, 研究金矿区重金属污染土壤中添加不同比例(0%, 5%, 10%)果木炭与猪粪炭对重金属污染土壤养分及修复效果的影响, 以为生物炭在矿区重金属污染土壤修复方面提供依据。

2. 材料与方法

2.1. 供试材料

供试土壤采自潼关县安乐镇尾矿渣堆积区附近基本农田耕层土壤(0 cm~30 cm), 属于粉壤土。经实验

室测定, 供试土壤为潼关金矿区堆积尾矿与基本农田耕层土壤(0 cm~30 cm)按质量比 1:2 复配的土壤, pH 为 8.22, Hg、Pb、Cd、Cu 平均含量分别为 8.43 mg/kg、757.78 mg/kg、1.31 mg/kg 和 166.51 mg/kg, 为汞铅镉铜复合污染土壤[14]。供试果木炭购自陕西亿鑫生物能源科技开发有限公司, 是以苹果树为原料烧制而成, pH 为 9.81。供试猪粪炭购自青岛贝尔卡有限责任公司, pH 为 10.22。盆栽试验植物选用小白菜, 供试有机肥购自杨凌供销社。

2.2. 试验设计

本研究采用盆栽试验方法, 设置果木炭和猪粪炭 3 个生物炭施用水平, 浓度分别为 0% (CK), 5% (G5 和 Z5)和 10% (G10 和 Z10, 风干土质量百分比), 共 5 个处理组(表 1), 将重金属污染土壤除去石块、杂草、植物根系后过 5 mm 筛备用。试验选用 250 mm × 200 mm (上口径 × 高)塑料花盆, 盆底铺有网纱。有机肥施用量为 1%, 将土壤、有机肥及生物炭按设定比例混合均匀后装盆。每盆保持总重 2.5 kg, 自然压实, 各处理 3 组重复, 共计 15 盆。

Table 1. Pot experiment design
表 1. 盆栽试验设计

试验处理	编号
未添加生物炭	CK
添加 5% 果木炭	G5
添加 10% 果木炭	G10
添加 5% 猪粪炭	Z5
添加 10% 猪粪炭	Z10

每盆点播小白菜种 10 粒, 待出苗 1 周后间苗, 保留健壮幼苗 5 株。试验地点位于陕西省眉县陕西地建土地工程技术研究院秦岭野外监测站日光温室内。于 2018 年 5 月 1 日播种, 7 月 30 日收获, 温室内温度变化为 25℃~35℃, 每日适时浇灌, 保持各处理管理一致。

2.3. 样品采集与分析

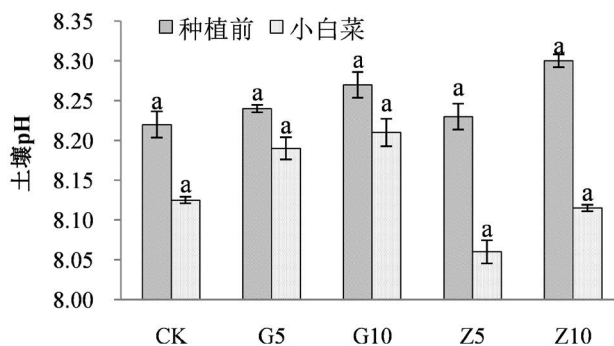
收获小白菜后用直径 2 cm 小土钻取扰动土样, 每盆各取 4 钻, 混合后风干研磨, 分别过 2 mm、1 mm 和 0.149 mm 筛待测。土壤 pH 采用 DELTA 320 pH 计测定(水土比 2.5:1); 速效钾采用 1 mol/L 乙酸铵浸提-火焰光度计法测定; 有效磷采用 0.5 mol/L 碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定; 全氮用凯氏定氮仪测定; 机械组成采用马尔文激光粒度分析仪(Mastersizer2000)测定; 土壤重金属 Cr、Ni、Cu、Zn、Pb、Cd 采用 ICP-MS 来测定; Hg、As 用原子荧光法测定。

采用 SPSS17.0 软件进行方差分析及显著性检验, 并计算标准差; 采用 Excel 2010 绘制直方图。

3. 结果

3.1. 添加生物炭前后对土壤 pH 的影响

图 1 可知, 种植前土壤 pH 为 8.22, 属于碱性土。添加生物炭后土壤 pH 介于 8.24~8.30, 相较 CK 组, G5、G10、Z5、Z10 组 pH 分别提高了 0.02、0.05、0.01 和 0.08 个单位, pH 随两种生物炭添加浓度的增加而增加。种植小白菜后各处理组土壤 pH 均有所下降, 介于 8.06~8.21, 各处理较种植前分别下降了 0.10、0.05、0.06、0.17 和 0.19 个单位。种植后土壤 pH 由大到小为 G10 > G5 > CK > Z10 > Z5, 说明种植前后猪粪炭的添加对土壤 pH 影响较大。

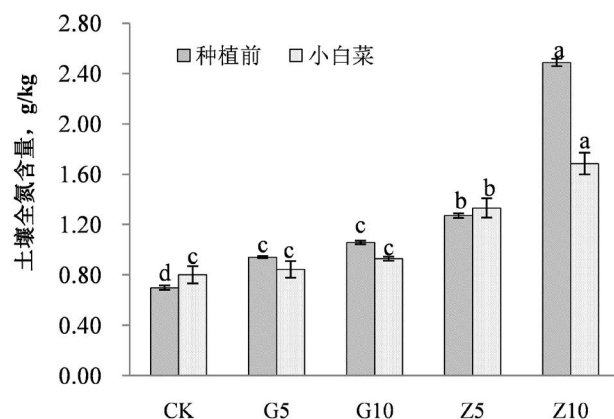


注: a 表示各处理的显著性检验水平。

Figure 1. The change of pH after adding biochar
图 1. 添加生物炭后土壤 pH 变化

3.2. 添加生物炭前后对土壤养分的影响

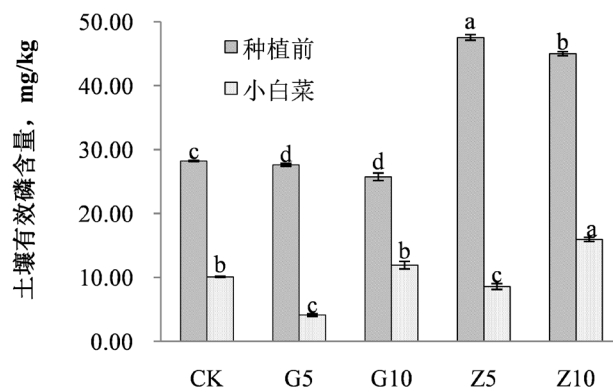
种植前土壤 CK 组全氮为 0.7 g/kg, 添加生物炭后各处理组土壤全氮含量随浓度增加而显著增加。G5、G10、Z5 和 Z10 处理组土壤全氮含量分别增长为 CK 组的 1.34、1.51、1.82 和 3.56 倍, 猪粪炭对土壤全氮含量的提升更为显著(图 2)。种植后相较于 CK 组(0.8 g/kg), G5、G10、Z5 和 Z10 处理组土壤全氮含量分别为 0.84 g/kg、0.93 g/kg、1.33 g/kg 和 1.68 g/kg, 全氮含量随浓度增加而增加。相较种植前, 土壤 CK 和 Z5 处理组全氮含量略有上升, 其余各组全氮含量均有所下降, Z10 组降幅最为显著。据此推断, 种植前后土壤全氮含量随生物炭浓度增加而增加, 且猪粪炭 Z10 处理对全氮含量提升效果最显著。



注: a, b, c, d 表示各处理的显著性检验水平。

Figure 2. The change of total nitrogen after adding biochar
图 2. 添加生物炭后土壤全氮变化

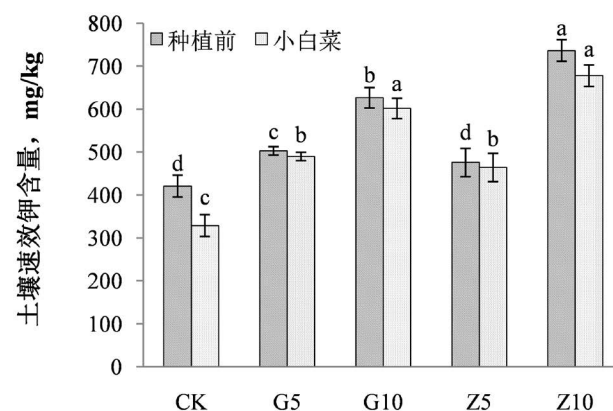
种植前土壤 CK 组有效磷含量为 28.2 mg/kg, 添加果木炭后 G5 和 G10 组土壤有效磷含量略有下降, 分别为 CK 的 0.97 和 0.91 倍。添加猪粪炭后土壤有效磷含量显著上升, Z5 和 Z10 组含量分别为 CK 的 1.43 和 1.27 倍, 土壤有效磷含量随生物炭添加浓度增加反而略有下降。种植小白菜后, 各处理土壤有效磷含量均有所下降, Z10 组含量最高, 达 15.93 mg/kg, 降幅由大到小依次为 Z5 > Z10 > G5 > CK > G10 (图 3)。相较种植前, 土壤有效磷降幅随生物炭浓度增加而减小; 种植后相较 CK 组, 土壤有效磷含量随生物炭浓度增加而增大。



注: a, b, c, d 表示各处理的显著性检验水平。

Figure 3. The change of effective phosphorus after adding biochar
图 3. 添加生物炭后土壤有效磷变化

种植前,添加生物炭后土壤速效钾含量随浓度增加而上升,G5、G10、Z5和Z10组速效钾含量分别为CK的1.20、1.49、1.13和1.75倍,与种植前土壤全氮含量变化一致,随添加浓度增加而增加,Z10含量最高,达736.48 mg/kg(图4)。种植后相较CK组,土壤速效钾含量随浓度增加而增加,Z10最高达678.08 mg/kg。相较种植前,各处理组速效钾含量均有所下降,CK组降幅最为显著,Z10组次之,说明添加生物炭后减缓了土壤中速效钾含量的下降,且猪粪炭对土壤速效钾的影响较大。



注: a, b, c, d 表示各处理的显著性检验水平。

Figure 4. The change of available potassium after adding biochar
图 4. 添加生物炭前后土壤速效钾变化

3.3. 生物炭 - 小白菜对土壤重金属的修复效果

种植前对供试土壤重金属含量进行了测定。依据土壤环境质量标准(GB15618-2018)可知,供试土样各处理组土壤总Cu含量均值为166.51 mg/kg,总Cd均值为1.31 mg/kg,分别为风险筛选值的1.66和2.18倍;总Pb含量均值为757.78 mg/kg,为风险筛选值的4.46倍,总Hg含量均值为8.43 mg/kg,为风险管制值的1.41倍,供试土壤Hg、Pb污染较为严重。分析表明,CK、G5、G10、Z5和Z10处理组土壤为汞铅镉铜复合污染土壤。

图5可知,相较种植前,种植小白菜后各处理组土壤重金属总Cr、总Ni、总Cu和总As浓度均有所上升。各处理组总Cr含量上升幅度为G10 > Z5 > CK > G5 > Z10,说明果木炭添加对供试土壤总Cr含量影响较大,且随果木炭浓度增加,总Cr含量增大;猪粪炭添加对总Cr含量影响较小,且随猪粪炭

浓度增加, 总 Cr 含量涨幅减小。各处理总 Ni 上升幅度为 G5 > G10 > CK > Z5 > Z10, 果木炭添加对供试土壤总 Ni 含量影响较大, 随果木炭和猪粪炭浓度增加, 总 Ni 涨幅减小, 且猪粪炭的添加减缓了总 Ni 在土壤中的富集。

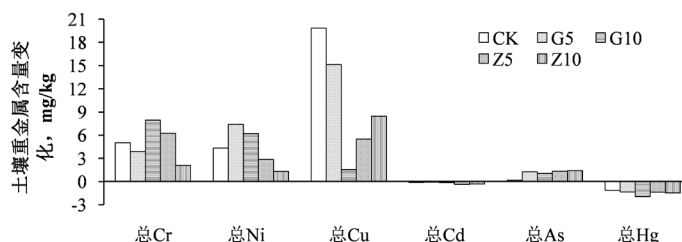


Figure 5. The changes of heavy metal content in soil
图 5. 土壤重金属含量变化

各处理组总 Cu 含量上升幅度为 CK > G5 > G10 > Z5 > Z10, 说明两种生物炭的添加减缓了总 Cu 在土壤中的富集, 且果木炭添加对土壤总 Cu 的含量变化影响较大。相较 CK 组, 各处理组总 As 含量涨幅明显增加且在 G5、G10、Z5 和 Z10 处理下, 土壤总 As 涨幅差异不大, 说明两种生物炭的添加加快了土壤中总 As 的富集, 且添加浓度对总 As 富集影响不大。

相较种植前, 各处理组供试土壤总 Cd、总 Hg、总 Zn 和总 Pb 含量均有所下降(图 5 和图 6), 相较 CK 组, 添加生物炭后 4 种重金属含量降幅均有所增加, 说明生物炭的添加对供试土壤中 4 种重金属的修复有一定效果。种植前后土壤中总 Cd 降幅为 Z5 (26.1%) > Z10 (21.3%) > G10 (12.2%) > G5 (10.6%) > CK (6.3%), 说明猪粪炭添加对总 Cd 修复效果优于果木炭, 但两种生物炭浓度增加对总 Cd 修复效果影响不显著; 总 Hg 降幅为 G10 (23.7%) > Z10 (17.5%) > G5 (16.8%) > Z5 (16.0%) > CK (14.6%), 说明果木炭的添加对总 Hg 的修复效果优于猪粪炭, 且随两种生物炭浓度增加, 总 Hg 修复效果更好。

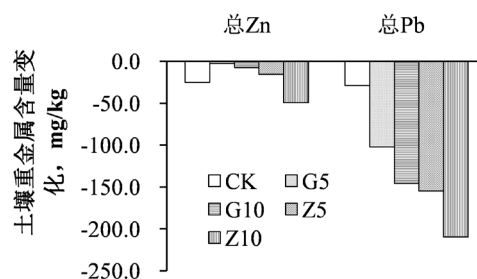


Figure 6. The changes of heavy metal content in soil
图 6. 土壤重金属含量变化

种植前后土壤总 Zn 降幅为 Z10 (22.4%) > CK (15.1%) > Z5 (8.9%) > G10 (5.2%) > G5 (1.8%), 说明猪粪炭添加对总 Zn 修复效果优于果木炭, 但仅 Z10 组修复效果优于 CK 组; 4 种重金属中, 总 Pb 降幅在种植前后最大, 为 Z10 (24.2%) > Z5 (20.5%) > G10 (19.1%) > G5 (13.3%) > CK (4.3%), 说明 4 种重金属复合污染重, 生物炭-小白菜对总 Pb 的修复效果最好, 猪粪炭的添加对总 Hg 的修复效果优于果木炭, 且随两种生物炭浓度增加总 Pb 修复效果更好。

4. 讨论

添加生物炭后, 土壤 pH 随两种生物炭添加浓度增加而增加, 且猪粪炭对土壤 pH 影响较大, 但由于供试土壤 pH 本身较高, 为 8.22, 属于碱性土, 与果木炭和猪粪炭均具有较高的盐基离子[15], 因此添加

这两种生物炭对碱性土壤 pH 的影响并不显著。种植小白菜后土壤 pH 有所下降,且添加猪粪炭后 pH 降幅更明显,一方面与种植小白菜对土壤 pH 的影响有关,另一方面由于生物炭尤其是猪粪炭对土壤溶液中 H^+ 具有稀释和吸附作用,导致溶液中 H^+ 浓度降低[16]。

氮磷钾是植物生长发育中必不可少的养分元素,对植物的生长,发育,代谢,抗逆等起重要作用[17]。本试验中种植前后,相较 CK 组,添加猪粪炭对供试土壤全氮、有效磷和速效钾的含量影响较大,其中种植前相较 CK 组,全氮和速效钾含量随两种生物炭浓度增加而增加;种植后,两种生物炭的添加均减缓了土壤中养分含量的下降,且猪粪炭各处理组的土壤养分含量随浓度增加而增大。可能由于生物炭本身含有大量 K, Na, Ca, Mg 等矿质元素和 N, P 等营养元素,且猪粪炭的灰分含量明显高于木质炭的灰分含量[18][19],阳离子交换能力和可交换离子量也相对较高[20],因此猪粪炭对土壤养分的影响更为显著。

种植前供试土壤有效磷含量及种植后有效磷含量降幅随两种生物炭浓度增加而略有下降。可能原因是添加生物炭后土壤 pH 随浓度增加而增加,添加浓度越大,促使土壤中磷酸钙沉淀增加,磷的有效性降低,这与孙雪等的研究一致[21]。综合来看,本试验中猪粪炭的施用效果优于果木炭,且 10% 的用量效果较佳。

种植小白菜后,供试土壤中总 Cr、总 Ni、总 Cu 和总 As 有所富集。添加果木炭对供试土壤总 Cr、总 Ni 和总 Cu 的含量变化影响较大,且果木炭浓度增加加快了土壤中总 Cr 的富集,减缓了总 Ni 和总 Cu 在土壤中的富集;而猪粪炭对其影响较小,且猪粪炭的浓度增加减缓了土壤中总 Cr、总 Ni 和总 Cu 在土壤中的富集。此外,两种生物炭的添加均加快了土壤中总 As 的富集,但浓度增加对总 As 富集的影响不大。这一变化不仅与供试果木炭本身总 Cr 和总 Ni 含量较高,猪粪炭本身总 Zn 和总 Cd 含量较高有关,而且受两种生物炭吸附性质及添加浓度的影响[22]。

种植小白菜后,供试土壤各处理组土壤总 Cd、总 Zn、总 Hg 和总 Pb 含量均有所下降。汞铅镉铜复合污染中,生物炭-小白菜对 4 种重金属修复效果依次为总 Pb > 总 Hg > 总 Zn > 总 Cd。猪粪炭的添加对总 Pb、总 Zn 和总 Cd 的修复效果优于果木炭,且随猪粪炭浓度增加,修复效果越显著;果木炭的添加对总 Hg 的修复效果优于猪粪炭,且随两种生物炭浓度增加,总 Hg 修复效果越显著。

生物炭对重金属离子的吸附效果受生物炭原材料,添加量、热解温度、重金属离子理化性质、溶液或土壤 pH 等因素影响[23]。本试验中,相同条件下猪粪炭对重金属离子的修复效果优于果木炭,与 Cao 等(2010) [24]、梁媛等(2013) [25]、续晓云(2015) [26]等的研究结果较为一致。猪粪炭修复效果较好可能由于猪粪炭本身富含的 K, Na, Ca, Mg 等矿质元素可通过离子交换或共沉淀方式将重金属吸附到生物炭中;富含的 P 可与重金属离子发生沉淀或共沉淀作用,较其他吸附作用贡献率较大;另外供试土壤属汞铅镉铜复合污染土壤,几种重金属元素共存时存在竞争吸附现象。4 种重金属中对总 Pb 的修复效果最好,一方面由于 Pb 与 PO_4^{3-} , CO_3^{2-} 结合能力最强,另一方面由于 Pb 的电负性常数最大,水合离子半径最小,与含氧官能团的络合能力也最强[26]。综上,添加猪粪炭对重金属污染土壤的修复效果优于果木炭,且 Z10 的修复效果最佳。

5. 结论

本试验中种植前添加生物炭后土壤 pH 由 8.22 上升到 8.24~8.30,随生物炭浓度增加而增加。种植小白菜后各处理组土壤 pH 均有所下降,介于 8.06~8.21。种植前后猪粪炭的添加对土壤 pH 影响较大。种植前后,相较 CK 组,添加猪粪炭对供试土壤全氮、有效磷和速效钾的含量影响较大。种植前相较 CK 组,全氮和速效钾含量随两种生物炭浓度增加而增加,有效磷含量随其浓度增加而略有下降。种植后,两种生物炭的添加均减缓了土壤中养分含量的下降,且猪粪炭各处理组的土壤养分含量随浓度增加而增

大。总体来看, 种植前后猪粪炭添加对土壤 pH、全氮、有效磷和速效钾的影响较大, 有利于土壤养分的提升与保持。4 种处理中, Z10 效果最佳。

种植小白菜后, 供试土壤中总 Cr、总 Ni、总 Cu 和总 As 有所富集, 总 Pb、总 Hg、总 Zn 和总 Cd 有所下降。果木炭的增加加快了土壤中总 Cr 富集, 减缓了总 Ni 和总 Cu 的富集; 而猪粪炭的增加减缓了 3 种元素的富集。此外, 两种生物炭的添加均加快了土壤中总 As 的富集。生物炭-小白菜对 Pb、Hg、Zn 和 Cd 的修复效果依次为总 Pb > 总 Hg > 总 Zn > 总 Cd。猪粪炭的添加对总 Pb、总 Zn 和总 Cd 的修复效果优于果木炭, 且随猪粪炭浓度增加, 修复效果更显著; 果木炭的添加对总 Hg 的修复效果优于猪粪炭, 且随两种生物炭浓度增加, 总 Hg 修复效果更显著。后期复合重金属污染土壤修复实践中, 可优先选用猪粪炭进行修复。

基金项目

陕西省土地工程建设集团内部科研项目 DJNY2018-3。

参考文献

- [1] 武俊杰, 王虎, 孙阳, 等. 陕西省尾矿堆存及综合利用现状分析[J]. 矿冶, 2018, 27(2): 100-103.
- [2] 张江华, 赵阿宁, 陈华清, 等. 小秦岭金矿区西峪河底泥重金属污染的潜在生态危害评价[J]. 地质通报, 2008, 27(8): 1286-1288.
- [3] 张蕊. 金矿尾矿场周边土壤与植被重金属污染现状研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安科技大学, 2011.
- [4] 徐友宁, 张江华, 陈社斌, 等. 小秦岭金矿区不同污染方式土壤剖面上重金属含量分布特征[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(1): 200-206.
- [5] Chen, Z., Fang, Y., Xu, Y., *et al.* (2012) Adsorption of Pb²⁺ by Rice Straw Derived-Biochar and Its Influential Factors. *Acta Scientiae Circumstantiae*, **32**, 769-776.
- [6] 戴静, 刘阳生. 生物炭的性质及其在土壤环境中应用的研究进展[J]. 土壤通报, 2013, 44(6): 1521-1525.
- [7] 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.
- [8] 黄代宽, 李心清, 董泽琴, 等. 生物炭的土壤环境效应及其重金属修复应用的研究进展[J]. 贵州农业科学, 2014, 42(11): 159-165.
- [9] Jin, H.P., Girish, K., Choppala, N., *et al.* (2011) Biochar Reduces the Bioavailability and Phytotoxicity of Heavy Metals. *Plant Soil*, **348**, 439-451. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-0948-y>
- [10] 崔宏莉, 解静芳, 杨彪, 等. 污灌与镉胁迫对菠菜几种抗氧化酶活性的影响[J]. 生态毒理学报, 2010, 2(5): 274-279.
- [11] 刘芳, 刘世亮, 介晓磊, 等. 石灰性土壤中磷镉交互作用对菠菜生长及其吸收磷镉的影响[J]. 中国农学通报, 2015, 21(4): 310-314.
- [12] 刘玉学, 王耀辉, 吕豪豪. 不同稻秆炭和竹炭施用水平对小青菜产量、品质以及土壤理化性质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(6): 1438-1444.
- [13] 张伟明. 生物炭的理化性质及其在作物生产上的应用[D]: [博士学位论文]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2012.
- [14] 土壤环境质量标准[S]. GB15618-2018.
- [15] Jun, M., Li, L., Wang, X., *et al.* (2013) Physicochemical Properties of Biochar Produced from Aerobically Composted Swine Manure and Its Potential Use as an Environmental Amendment. *Bioresource Technology*, **142**, 641-646. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.05.086>
- [16] 孙雪, 刘琪琪, 郭虎, 等. 猪粪生物炭对土壤肥效及小白菜生长的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(9): 1756-1763.
- [17] 黄昌勇, 徐建明. 土壤学[M]. 第三版. 北京: 中国农业出版社, 2010.
- [18] 陈心想. 生物炭对土壤性质、作物产量及养分吸收的影响[D]: [硕士学位论文]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
- [19] 辛泽鑫. 木炭对土壤作用机制及小麦生长的影响[D]: [硕士学位论文]. 临汾: 山西师范大学, 2016.
- [20] 尚杰. 添加生物炭对土壤理化性质和作物生长的影响[D]: [硕士学位论文]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.

- [21] 孙雪. 鸡粪和猪粪生物质炭对土壤肥效及小白菜产量与品质的影响[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京农业大学, 2016.
- [22] Li, H.B., Xiao, L., Evandro, B., *et al.* (2017) Mechanisms of Metal Sorption by Biochars: Biochar Characteristics and Modifications. *Chemosphere*, **178**, 466-478. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.03.072>
- [23] 赵凌宇. 不同来源生物质炭对汞的去除性能和固定机制研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京师范大学, 2015.
- [24] Cao, X.D. and Harris, W. (2010) Properties of Dairy-Manure-Derived Biochar Pertinent to Its Potential Use in Remediation. *Bioresource Technology*, **101**, 5222-5228. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.02.052>
- [25] 梁媛, 李飞跃, 杨帆, 等. 含磷材料及生物炭对复合重金属污染土壤修复效果与修复机理[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(1): 163-167.
- [26] 续晓云. 生物炭对无机污染物的吸附转化机制研究[D]: [博士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2015.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2164-5507, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>
期刊邮箱: hjas@hanspub.org