

张艺腾, 范禹博, 徐笑天, 等. 鸡粪生物炭对土壤铜和锌形态及植物吸收的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(11): 2514–2521.

ZHANG Yi-teng, FAN Yu-bo, XU Xiao-tian, et al. Effects of chicken manure-derived biochar on Cu and Zn speciation in soil and uptake by plant[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(11): 2514–2521.

鸡粪生物炭对土壤铜和锌形态及植物吸收的影响

张艺腾, 范禹博, 徐笑天, 张秀芳, 李明堂*

(吉林农业大学资源与环境学院, 长春 130118)

摘要: 300 °C制备的鸡粪生物炭既可以固定碳和重金属,又可以克服鸡粪不当处理所产生的环境问题,但由于鸡粪中Cu和Zn的含量较高,因此使用时可能存在重金属污染风险。本文研究了温室大棚中土壤培养和小白菜盆栽下施用鸡粪生物炭对土壤Cu和Zn形态以及植物吸收的影响。结果表明施用鸡粪生物炭可以明显增加土壤pH,减少土壤有效态Cu含量,小白菜盆栽条件下鸡粪生物炭对有效态Cu抑制程度小于土壤培养。空白土壤中施入鸡粪生物炭后有效态Zn的含量增加了6.19 mg·kg⁻¹,使用鹿粪则可以减少鸡粪生物炭对土壤有效态Zn含量的影响。随着土壤培养时间的延长,施用鸡粪生物炭可降低酸溶态与可还原态Cu的比例,增加残渣态Cu比例,提高施加鸡粪生物炭处理中可氧化态与残渣态Zn比例。高温高湿环境下施用2%鸡粪生物炭能够促进小白菜的生长,增加小白菜干重,减少小白菜根部重金属Cu和Zn含量,降低Cu和Zn的根富集系数,二次盆栽后添加鸡粪生物炭还能够降低小白菜茎叶部Cu和Zn的含量。以上结果说明,鸡粪生物炭施入土壤后可引起短时间的污染风险,且Zn的污染风险大于Cu,但随着时间的延长,鸡粪生物炭既可促进小白菜的生长,减少Zn的释放,又能固定Cu和Zn,从而减少植物对Cu和Zn的吸收。

关键词: 鸡粪生物炭;有效态铜;有效态锌;黑钙土;鹿粪;小白菜

中图分类号: X53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2018)11-2514-08 doi:10.11654/jaes.2018-0390

Effects of chicken manure-derived biochar on Cu and Zn speciation in soil and uptake by plant

ZHANG Yi-teng, FAN Yu-bo, XU Xiao-tian, ZHANG Xiu-fang, LI Ming-tang*

(College of Resource and Environment, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

Abstract: The chicken manure-derived biochar at 300 °C can immobilize carbon and heavy metals, and decrease the environmental problems caused by improper treatment of chicken manure. However, with the higher content of Cu and Zn in chicken manure, there may be a potential risk of heavy metal pollution owing to the use of biochar. Soil culture and pot experiments using bok choy (*Brassica chinensis*) in a greenhouse were performed to investigate the effect of chicken manure-derived biochar on Cu and Zn speciation in soil and their uptake by plants. The results showed that the application of chicken manure-derived biochar significantly increased the pH of soil and reduced the content of available Cu in soil. The available Cu content increased by 6.19 mg·kg⁻¹ by adding chicken manure-derived biochar to blank soil, whereas the increase of the available Cu content could be prevented by adding deer manure. With time, the proportions of acid-soluble and reducible Cu were reduced, and the proportion of residual Cu was increased owing to chicken manure-derived biochar addition. For all the treatments with biochar, the proportions of oxidizable and residual Zn in soil were increased. At high temperature and humidity, the application of 2% biochar promoted the growth of bok choy, increased the dry weight, reduced the content of Cu and Zn in the roots, and reduced the accumulation coefficient of Cu and Zn in the roots. In the second pot experiment, the application of biochar reduced the content of

收稿日期: 2018-03-24 录用日期: 2018-05-09

作者简介: 张艺腾(1993—),男,硕士研究生,从事环境污染修复研究。E-mail: zyt1083@163.com

*通信作者: 李明堂 E-mail: limtdoc2008@163.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0801104); 吉林省科技发展计划项目(20160204025SF)

Project supported: The National Key R&D Program of China (2017YFD0801104); Jilin Scientific and Technological Development Program (20160204025SF)

Cu and Zn in the stems and leaves of bok choy. These results indicate that the application of chicken manure-derived biochar would cause pollution risk in the short term, and that Zn would cause greater pollution risk than Cu. However, with time, biochar application can promote the growth of bok choy, reduce the release of Zn, and immobilize Cu and Zn. Eventually, the uptake of Cu and Zn by the plants is reduced.

Keywords: chicken manure-derived biochar; available copper; available zinc; chernozem; deer manure; bok choy

随着养鸡业的迅速发展,鸡粪产量急剧增加。另外饲料添加剂中过多的Cu和Zn难以被吸收利用,导致鸡粪中含有大量的Cu和Zn,有研究调查我国多个地区鸡粪中Cu和Zn含量,其最高值分别可达到 $775\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $688\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。张妍等^[2]分别研究表明,土壤中有效态Cu和Zn的含量随着鸡粪添加量的增加而增加,当鸡粪添加量为 $222\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时有效态Cu与Zn可分别增加到 $119.8\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $215.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。因此鸡粪的不当处理和利用会产生Cu和Zn的污染风险。

鸡粪的资源化利用主要为好氧堆肥,由于堆肥过程中臭味难以控制,场地需求大,并且在低温期较长的东北地区还存在堆肥成本高、腐熟率低和重金属固定效果差的问题^[3],因此迫切需要新的鸡粪资源化利用途径。由于生物炭不仅具有固碳减排的作用,还可以固定土壤中的重金属^[4],因此国内外学者逐渐开展了利用鸡粪制备生物炭的研究。Subedi等^[5]研究将鸡粪以 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为制备温度制备成生物炭,发现 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 制备的鸡粪生物炭相对于对照与 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 制备的鸡粪生物炭可以有效地提高土壤养分的有效性从而显著增加作物的生物量。侯艳伟等^[6]探究鸡粪生物炭施入红壤后对土壤性质与重金属形态的变化情况,结果说明生物炭能够提高土壤有机质,增加Cu与Zn的生物有效性比例,降低Cd与Pb的生物有效性比例。Gaskin等^[7]研究表明禽类粪便在制备成生物炭后还可以大量保留其中营养物质,成为鸡粪资源化利用的一个方向,但Khan等^[8]研究发现,生物炭的制备能够使其中重金属的浓度得到一定的富集,施入环境中会有一定的释放风险。

目前对鸡粪生物炭实际应用效果的研究较少,尤其是在具有高温、高湿和自然干扰小的塑料大棚内的重金属释放以及对植物生长的影响等的研究鲜有报道。因此本文研究了在塑料大棚环境中土壤培养和小白菜盆栽条件下施用鸡粪生物炭对空白土壤和添加鹿粪的土壤Cu和Zn有效态、赋存形态以及对小白菜生长和吸收Cu和Zn的影响,以期科学合理利用鸡粪生物炭提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

鸡粪和鹿粪由吉林省长春市某养殖场提供,经自然风干过10目筛装于自封袋中干燥保藏。鸡粪以 $15\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升温速率在 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下热解2 h,冷却后过20目筛作为试验用生物炭。低温制备生物炭的基本特征为:pH值10.19,EC值 $3.19\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$,灰分含量30.27%,比表面积 $1.8\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$,C、H、N元素含量分别为24.01%、1.23%和0.66%,Cu和Zn总量分别为 $101.67\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $364.17\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效态含量分别为 $7.28\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $89.33\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。鹿粪的基本特征为:pH值7.59,EC值 $6.96\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$,C、H、N元素含量分别为31.47%、4.69%和2.40%,Cu和Zn总量分别为 $85.33\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $159.83\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效态含量分别为 $7.30\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $68.55\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

供试土壤为黑钙土,取自吉林农业大学试验基地,土壤pH值为6.35,EC值 $60.1\text{ }\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,有机质含量 $23.45\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,Cu和Zn含量分别为 $27.88\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $84.22\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。实验用土均经过自然风干,除去杂物,过5 mm筛。供试小白菜为吉林农业大学培育的耐热型杂交小白菜。

1.2 温室大棚培养试验

取 20 kg 土样装入规格为 $60\text{ cm}\times 30\text{ cm}\times 25\text{ cm}$ 的树脂培养盆中,处理分为:添加2%鸡粪生物炭(B)、添加5%鹿粪(DM)、添加5%鹿粪和2%鸡粪生物炭(DM+B),并以无任何添加的空白土壤作为对照(CK)。每种处理做6个平行,共24盆,一半用于土壤培养试验,一半用于小白菜盆栽实验。

土壤培养试验:将土壤含水量调整至田间持水量的60%(田间持水量为33.25%),在温室大棚内培养,每日补充一次水分,培养60 d,每盆每30 d按五点法取一次土样,制备成混合样,用于测定土壤中的Cu和Zn。

小白菜盆栽试验:每盆取间隔相同的14个点,每个点播种三颗小白菜种子,出苗后选取14株长势相近的小白菜,培养时间从播种后开始计算,培养30 d

后收获,然后以相同的方式重新种植小白菜。小白菜培养过程中不施肥,不打农药,每日补充一次水分。每次收获时取走所有的植株,并采集根际土壤。茎叶和根部经清洗后在105℃烘箱中杀青30 min,再降低至75℃烘干到恒质量,称量各干质量后快速研磨装入自封袋于干燥器中保存待测,土壤样品均自然风干过筛,用于测定Cu和Zn。

培养实验在吉林农业大学温室大棚中进行,培养时间为2017年5—7月,大棚内温度变化幅度为20~35℃。

1.3 测定方法

土壤有效态Cu和Zn按照NY/T 890—2004标准中的DTPA-TEA浸提法进行提取,土壤重金属形态分布采用欧共体物质标准局提出的BCR逐级提取法。Cu和Zn含量均使用原子吸收分光光度计测定。样品pH与EC值采用酸度计与电导率仪进行测定^[9]。灰分测定参考GT/T 17664—1999标准,将生物炭平铺于陶瓷坩埚底部后置于马弗炉内750℃灰化6 h,灰分的质量与灰化前生物炭质量的比值即为灰分所占比例。

1.4 数据处理

采用Excel 2007软件和Origin 2017软件进行数据处理及绘图,结合SPSS 21.0处理数据间显著性分析。

根富集系数=植株重金属含量(mg·kg⁻¹)/土壤重金属含量(mg·kg⁻¹)

2 结果与分析

2.1 鸡粪生物炭施用对土壤pH的影响

土壤培养和小白菜盆栽实验中各处理组土壤pH变化情况如表1所示。从表中可以看出添加生物炭可以提高空白土壤及添加鹿粪土壤的pH值,种植小白菜后根际土壤pH值均高于土壤培养期间所采集的土壤且随种植时间的延长pH值逐渐增加,盆栽培养收获两次后添加鸡粪生物炭pH值分别提高了0.67

(B)和0.56(DM+B)。

2.2 鸡粪生物炭施用对土壤有效态Cu和Zn含量的影响

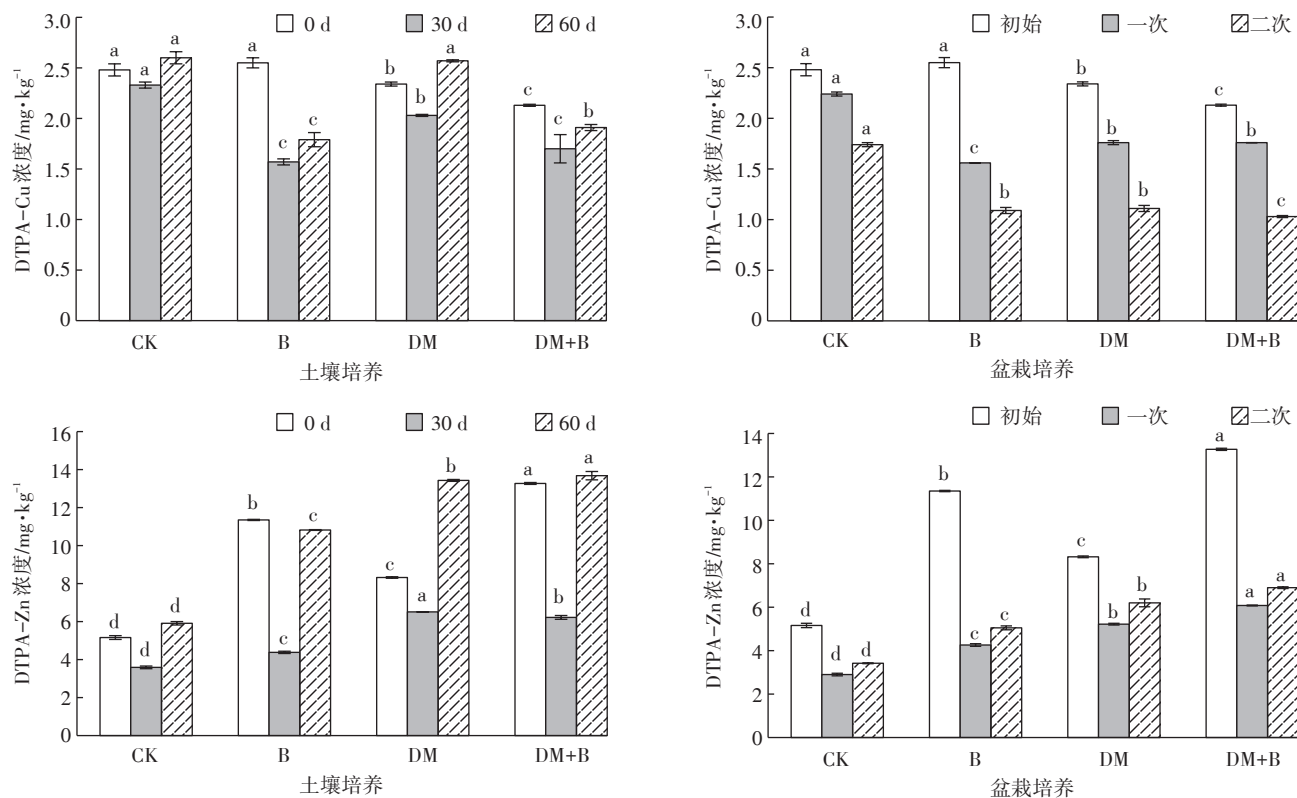
土培与盆栽试验各处理组有效态Cu和Zn含量变化如图1所示。土壤培养30 d后,鸡粪生物炭的添加可以显著降低土壤中有效态Cu的含量,相比于空白土壤与添加鹿粪土壤,鸡粪生物炭的施用使有效态Cu含量分别下降了32.62%与16.26%,土壤培养60 d后有效态Cu含量均会有小幅上升,但添加鸡粪生物炭依然可以使空白土壤与添加鹿粪土壤有效态Cu含量分别降低31.15%和25.68%,而且添加生物炭的土壤经过60 d培养后有效态Cu含量相对于0 d也有明显降低,分别降低了29.80%(B)和10.37%(DM+B),而空白土壤与添加鹿粪土壤皆超出0 d时含量。盆栽组经过一次种植后,添加生物炭土壤可以使空白土壤有效态Cu含量降低30.36%,而鹿粪土壤施用鸡粪生物炭后变化无明显差异。经过第二次种植后,施用鸡粪生物炭的土壤有效态Cu含量分别降低了37.36%(B)与7.20%(DM+B)。相对于盆栽培养,土壤初始时有效态Cu含量经过两次种植后各培养分别降低了29.84%(CK)、57.25%(B)、52.56%(DM)和51.64%(DM+B)。

鸡粪生物炭施入土壤使土壤培养中有效态Zn含量分别增加了6.19 mg·kg⁻¹(B)和4.95 mg·kg⁻¹(DM+B),土壤培养30 d与0 d相比添加鸡粪生物炭使得空白土壤与添加鹿粪土壤有效态Zn浓度明显降低,降低幅度分别为61.41%(B)和53.17%(DM+B)。土壤培养60 d后各培养有效态Zn含量均明显回升,且添加鸡粪生物炭有效态Zn含量仍高于空白土壤与添加鹿粪土壤含量,但添加鸡粪生物炭可以使鹿粪土壤有效态Zn含量保持在培养前左右,而鹿粪土壤培养60 d后有效态Zn含量上涨61.42%。盆栽培养经一次种植与初始相比添加鸡粪生物炭土壤的有效态Zn含量也会有较大幅度下降,第二次种植结束后有效态Zn含量未出现较大回升,添加鸡粪生物炭土壤有效态Zn含量还会略高于空白土壤与添加鹿粪土壤。

表1 鸡粪生物炭对土壤pH的影响

Table 1 Effects of biochar prepared from chicken manure on soil pH

处理	土培			盆栽	
	0 d	30 d	60 d	一次	二次
CK	6.35±0.02	6.29±0.01	6.32±0.02	6.45±0.04	6.49±0.01
B	6.72±0.03	7.35±0.04	7.31±0.03	7.25±0.01	7.39±0.03
DM	6.62±0.06	6.69±0.03	6.71±0.02	7.14±0.02	7.19±0.04
DM+B	6.93±0.01	7.21±0.06	6.98±0.02	7.37±0.02	7.49±0.02



不同字母代表同一时期各实验组在 $P < 0.05$ 水平上差异显著

Different letter stands for significant difference at the same time $P < 0.05$ level of all experimental groups

图1 温室中土壤培养和小白菜盆栽下生物炭对土壤有效态Cu和Zn含量的影响

Figure 1 Effects of biochar on available Cu and Zn content in soil under greenhouse soil culture and bok choy pot experiments

2.3 生物炭施用对重金属赋存形态的影响

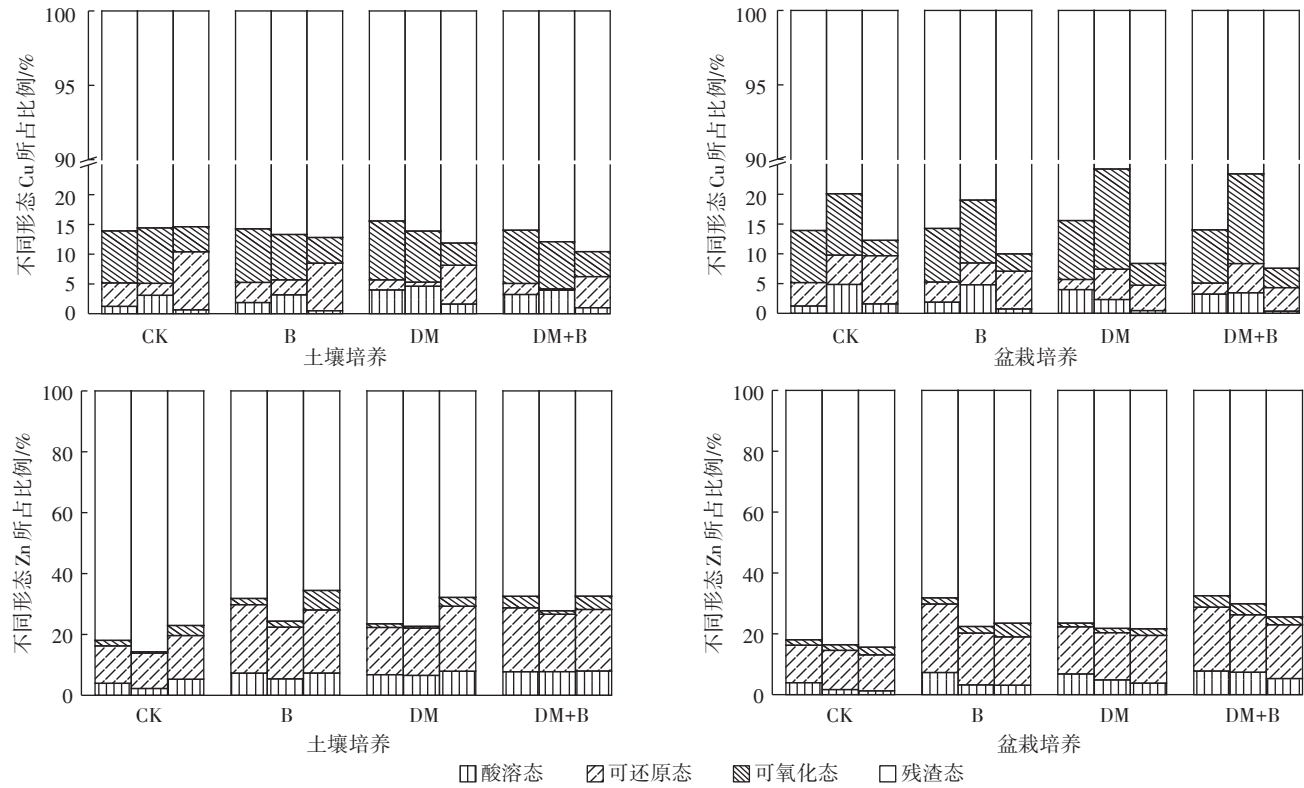
土壤中Cu、Zn赋存形态分布如图2所示。土壤培养30 d后添加鸡粪生物炭对空白土壤与添加鹿粪土壤中酸溶态与可还原态Cu的影响不大,但能够降低可氧化态Cu所占比例,提高残渣态比例。土壤培养60 d后添加鸡粪生物炭可使空白土壤与添加鹿粪土壤中酸溶态与可还原态Cu所占比例之和均降低1.91%,添加鸡粪生物炭残渣态Cu所占比例也有所提高,相比于空白土壤(85.38%)与添加鹿粪土壤(88.12%),添加生物炭残渣态比例可以达到87.19%(B)与89.57%(DM+B)。盆栽培养经一次种植后所有培养Cu的前三种形态所占比例之和均有明显增长,而添加鸡粪生物炭处理前三形态比例之和要低于空白土壤与添加鹿粪土壤。经第二次种植后各培养Cu的前三种比例之和有明显下降,残渣态Cu比例明显提升,相比于空白土壤(87.73%)与添加鹿粪土壤(91.62%)添加生物炭后残渣态Cu所占比例能够达到90.01%(B)、92.43%(DM+B)。

添加鸡粪生物炭能够明显提升土壤中酸溶态与可还原态Zn所占比例,土壤培养30 d与0 d相比添加

生物炭处理后的空白土壤与添加鹿粪土壤中酸溶态与可还原态Zn所占比例之和分别下降了7.41%、2.11%。土壤培养60 d与0 d相比空白土壤与添加鹿粪土壤酸溶态与可还原态Zn所占比例之和均有所升高,而添加生物炭之后该两种形态百分比含量均有所下降。盆栽培养经两次种植后酸溶态Zn所占比例均有明显下降,残渣态Zn比例逐渐升高分别从初始的81.95%(CK)、68.19%(B)、76.50%(DM)和67.49%(DM+B)提高到84.41%(CK)、76.52%(B)、78.36%(DM)和74.46%(DM+B)。

2.4 鸡粪生物炭施用对小白菜Cu和Zn吸收的影响

小白菜茎叶与根部Cu、Zn含量如图3所示,一次盆栽结束后,施用鸡粪生物炭后小白菜根部Cu和Zn浓度相比于空白土壤与添加鹿粪土壤种植小白菜根部含量要有所降低,其中Cu含量降低了25.42%(B)与4.88%(DM+B),Zn含量降低了19.42%(B)与6.30%(DM+B)。相对于空白土壤添加鸡粪生物炭会提高小白菜茎叶部Cu、Zn含量,而对于鹿粪土壤小白菜的茎叶部没有显著影响。二次盆栽结束后,添加鸡粪生物炭不仅能够有效地降低空白土壤与添加鹿粪土壤



土壤培养每组柱子从左到右依次为培养0、30、60 d三个时期,盆栽培养每组柱子从左到右依次为初始、一次盆栽和二次盆栽
The columns from left to right in soil culture are the three periods of culture 0 d, 30 d and 60 d, respectively. The columns from left to right in bok choy pot experiment are the initial, one potted plant and the second potted plant respectively

图2 温室中土壤培养和小白菜盆栽下生物炭对土壤Cu和Zn赋存形态的影响

Figure 2 Effects of biochar on a Cu and Zn chemical speciation under soil culture and bok choy pot experiments in greenhouse

小白菜根部Cu、Zn含量,还能够使茎叶部Cu、Zn含量显著降低。通过表2对小白菜的根富集系数分析得出,添加鸡粪生物炭可以使空白土壤与添加鹿粪土壤培养的小白菜Cu、Zn的根富集系数降低。

2.5 鸡粪生物炭施用对小白菜干质量的影响

盆栽试验中小白菜的干重变化如表3所示,单独添加鹿粪和鸡粪生物炭都可以促进小白菜的茎叶和根部干质量,但鹿粪的促进作用明显好于鸡粪生物炭,鸡粪生物炭的施用并不能增加添加鹿粪土壤中

小白菜的茎叶和根部干质量。以上结果表明在土壤营养元素和有机质缺乏时鸡粪生物炭对小白菜的干质量促进作用明显,但在营养丰富和有机质含量充足时,鸡粪生物炭的促进作用会受到影响。

3 讨论

鸡粪生物炭灰分中碱性矿物质元素会使生物炭呈碱性,能够有效提高土壤pH值^[10-11],通过种植后pH值提升更明显,这可能是因为生物炭的施用可以

表2 生物炭对小白菜根富集系数的影响

Table 2 Effects of biochar on root bioaccumulation of bok choy

处理	根富集系数			
	一次盆栽		二次盆栽	
	Cu	Zn	Cu	Zn
CK	0.22±0.004b	0.95±0.015a	0.33±0.005a	0.89±0.004a
B	0.17±0.011c	0.66±0.001d	0.27±0.002b	0.64±0.024b
DM	0.27±0.002a	0.86±0.002b	0.21±0.001c	0.58±0.001c
DM+B	0.26±0.004a	0.80±0.008c	0.18±0.001d	0.49±0.041c

注:不同字母代表在P<0.05水平上差异显著。下同。
Note: Different letter stands for significant difference P<0.05 level. The same below.

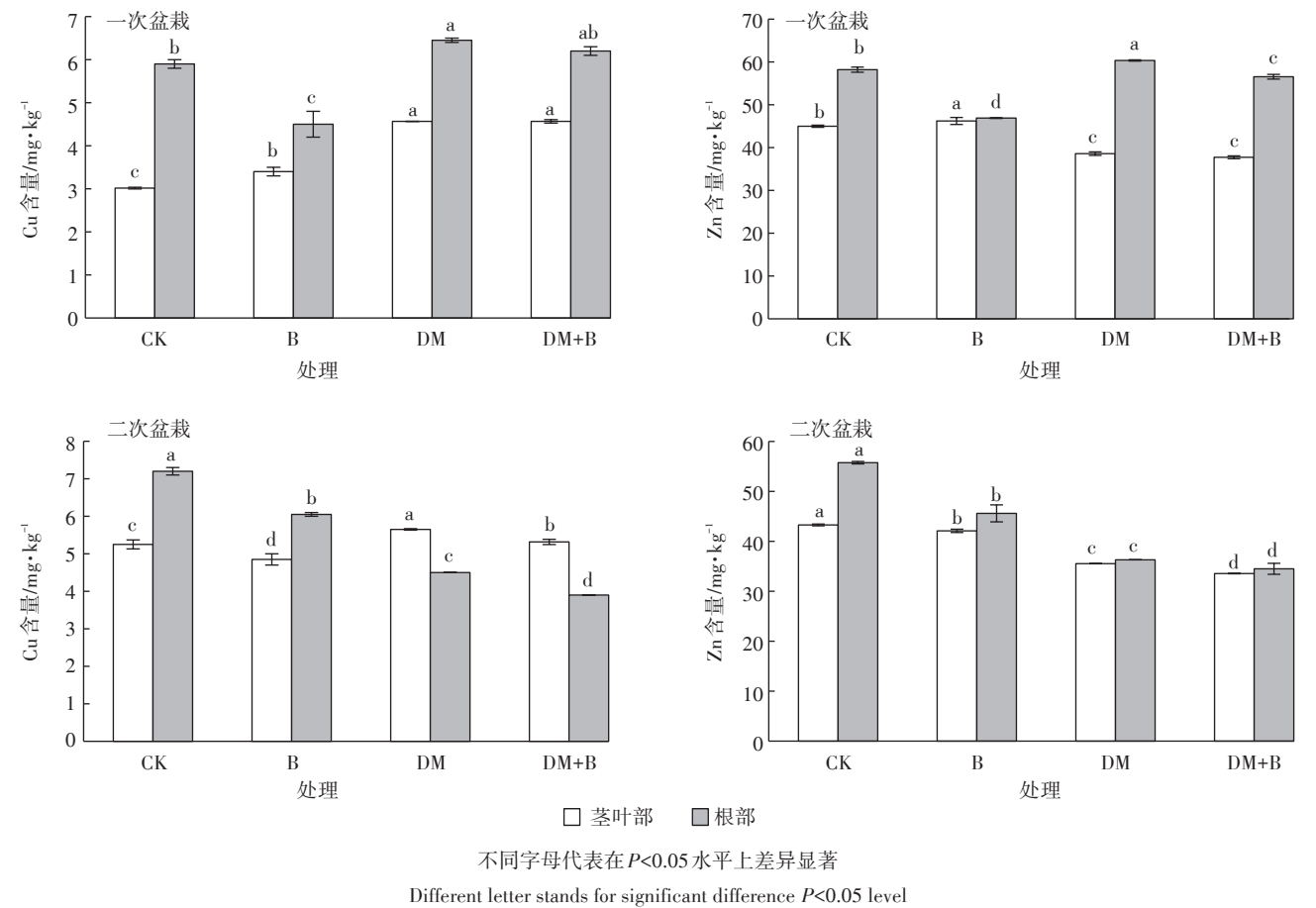


图3 生物炭对小白菜茎叶和根部Cu和Zn含量的影响

Figure 3 Effects of biochar on Cu and Zn content in stems and leaves of bok choy

表3 生物炭对小白菜干质量的影响($\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$)

Table 3 Effects of biochar on the dry weight of bok choy($\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$)

处理	小白菜干质量			
	一次盆栽		二次盆栽	
	茎叶部	根部	茎叶部	根部
CK	1.48±0.19d	0.06±0.01c	1.31±0.11d	0.03±0.01c
B	2.05±0.18c	0.12±0.01b	1.90±0.26c	0.07±0.01b
DM	5.59±0.40a	0.20±0.03a	6.10±1.44b	0.11±0.03a
DM+B	5.18±0.58b	0.19±0.01a	6.31±0.47a	0.10±0.02a

增加土壤中硝态氮的含量^[12],从而使根系分泌出OH⁻或HCO₃⁻导致根际pH值升高^[13],经过60 d培养后添加鸡粪生物炭能够降低空白土壤与添加鹿粪土壤中有效态Cu含量,增加土壤中有效态Zn含量,但施用鸡粪生物炭能够减少鹿粪土壤随培养时间增加所释放的有效态Zn含量。说明鸡粪生物炭对Cu具有较强固定作用,而鸡粪生物炭本身的有效态Zn含量高,虽然在培养结束后含量大幅减少,但仍稍高于对照组,因此存在一定的使用风险,经过两次种植后土壤中有

效态Cu与Zn出现了明显的降低,可能是因为植物的生长需求以及根系生态系统作用。Park等^[14]研究发现施入鸡粪生物炭的土壤能够显著降低土壤中硝酸铵提取态Cu、Pb、Cd的浓度,起到一定的稳固作用,这取决于生物炭较大的比表面积及其表面所含有的丰富有机基团对重金属拥有良好的吸附能力^[15-16]。生物炭施入能提高土壤pH值从而加强对重金属的吸附与离子间交换作用,其表面的含氧官能团又可与重金属产生络合作用^[17-18],另外土壤pH上升导致重金属形成

金属氢氧化物、磷酸盐或碳酸盐沉淀^[19], Houben 等^[20]研究生物炭施入对重金属污染土壤的影响, 发现生物炭刚施入导致土壤 pH 值提高, 从而使得土壤氯化钙提取态重金属的含量降低, 且随生物炭施入量的增加这种酸中和能力作用也随之加强。也有国内外学者研究表明, 生物炭灰分中的一些元素对重金属起到共沉淀作用, 形成例如 $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 等较为稳定的产物^[21-22]。在培养期间 Cu 和 Zn 含量呈先降低后回升的趋势, 主要因为土壤中施入像畜禽粪便生物炭这种外加重金属时, 随着土壤环境的变化重金属会在土壤中得到一定的活化^[23]。

土壤中重金属的赋存形态也是影响重金属生物有效性的因素之一^[24], 其中酸溶态与可还原态是植物较容易利用的形态, 而可氧化态和残渣态为植物较难利用的形态。添加生物炭能够提高 Zn 的酸溶态和可还原态, 降低 Cu 前三种形态所占比例之和, 但随着培养时间的延长, 土壤培养中 Zn 的前两种形态所占比例之和均呈先降低后又有所升高的趋势, 其中添加鹿粪土壤前两种形态所占比例之和明显高于初始时比例, 而施用鸡粪生物炭后可以使添加鹿粪土壤中该两种形态比例之和停留于培养初始时的比例附近。另外施用鸡粪生物炭能够使空白土壤与添加鹿粪土壤残渣态的比例得到提高, 降低根富集系数, 说明生物炭处理能够有效控制土壤 Cu 和 Zn 向植物体根部转移。王凤等^[25]在室温条件下通过向土壤中施用不同比例生物炭来探究生物炭对土壤中 Cd 的赋存形态变化以及对盆栽所种植油菜的富集与转运系数的影响, 结果表明随着生物炭施入比例的提高, 土壤中 Cd 的赋存逐渐向生物难以利用的形态转化。另外与空白对照相比施加生物炭处理后油菜的富集系数有所下降, 说明生物炭能较好地阻止 Cd 进入植物体。Houben 等^[26]在受重金属污染的土壤中施用生物炭和石灰, 发现生物炭施用比例为 10% 时能够有效减少油菜幼苗中重金属含量且产量相比石灰处理增加两倍, 而无添加的对照处理植物均死亡。

由于鹿粪往往被人们应用到蔬菜种植中, 因此本文研究了鹿粪及鹿粪和生物炭混合施用下小白菜的生长和对 Cu、Zn 的吸收, 结果表明单独添加鹿粪和鸡粪生物炭均能明显促进小白菜的生长, 增加小白菜干质量。与单独添加鹿粪土壤相比, 鸡粪生物炭和鹿粪混合施用对小白菜各部分的干质量没有马上产生促进作用, 随培养时间延长作用越明显。在土壤营养元素和有机质缺乏时鸡粪生物炭对小白菜的干质量促

进作用明显, 但在营养丰富和有机质含量充足时, 鸡粪生物炭的促进作用会受到影响, 这可能是生物炭施入土壤后以缓释的方式促进植物的生长^[27]。

4 结论

(1) 低温制备的鸡粪生物炭在有无植物生长的情况下均能有效提高土壤 pH 值。施用鸡粪生物炭能够降低空白土壤与添加鹿粪土壤中有有效态 Cu 含量, 同时控制鹿粪土壤中有有效态 Zn 的释放, 使酸溶态、可还原态与可氧化态 Cu 比例降低。另外, 提高了施加生物炭处理自身的可氧化态与残渣态 Zn 比例, 但有效态 Zn 与 Zn 的前两种赋存形态仍高于对照处理, 虽然土壤对两者的环境容量较大, 在高 pH、高有机质的土壤中少量施用含 Cu 与 Zn 的生物炭不会造成太大的环境风险, 但在低 pH、低有机质地区还会存在一定的潜在风险。

(2) 施用鸡粪生物炭可以使小白菜根部 Cu 和 Zn 含量显著减少, 降低根部重金属富集系数, 二次盆栽结束后施用鸡粪生物炭能够降低茎叶部 Cu 和 Zn 含量。添加生物炭明显促进空白土壤小白菜的生长, 而对添加鹿粪的土壤中小白菜的干质量没有马上起到明显的促进作用, 但随培养时间延长作用越明显。

参考文献:

- [1] 张树清, 张夫道, 刘秀梅, 等. 规模化养殖畜禽粪主要有害成分测定分析研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(6): 822-829.
ZHANG Shu-qing, ZHANG Fu-dao, LIU Xiu-mei, et al. Determination and analysis on main harmful composition in excrement of scale livestock and poultry feedlots[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(6): 822-829.
- [2] 张妍, 罗维, 崔晓勇, 等. 施用鸡粪对土壤与小白菜中 Cu 和 Zn 累积的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(12): 3460-3467.
ZHANG Yan, LUO Wei, CUI Xiao-yong, et al. Effect of chicken manure application on Cu and Zn accumulation in soil and *Brassica sinensis* L.[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(12): 3460-3467.
- [3] 刘辉, 王凌云, 刘忠珍, 等. 我国畜禽粪便污染现状与治理对策[J]. 广东农业科学, 2010, 37(6): 213-216.
LIU Hui, WANG Ling-yun, LIU Zhong-zhen, et al. Pollution condition and cure countermeasures of excrements from livestock and poultry[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2010, 37(6): 213-216.
- [4] Troy S M, Nolan T, Leahy J J, et al. Effect of sawdust addition and composting of feedstock on renewable energy and biochar production from pyrolysis of anaerobically digested pig manure[J]. *Biomass & Bioenergy*, 2013, 49(2): 1-9.
- [5] Subedi R, Taupe N, Ikoyi I, et al. Chemically and biologically-mediated fertilizing value of manure-derived biochar[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 550: 924-933.

- [6] 侯艳伟, 曾月芬, 安增莉. 生物炭施用对污染红壤中重金属化学形态的影响[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版), 2011, 42(4):460-466.
HOU Yan-wei, ZENG Yue-fen, AN Zeng-li. The effects of biochar on the chemical morphology of heavy metals in red soil[J]. *Journal of Inner Mongolia University(Natural Science Edition)*, 2011, 42(4):460-466.
- [7] Gaskin J W, Steiner C, Harris K, et al. Effect of low-temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use[J]. *Transactions of the Asabe*, 2008, 51(6):2061-2069.
- [8] Khan S, Chao C, Waqas M, et al. Sewage sludge biochar influence upon rice (*Oryza sativa* L.) yield, metal bioaccumulation and greenhouse gas emissions from acidic paddy soil[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(15):8624-8632.
- [9] 王煌平, 张青, 李昱, 等. 热解温度对畜禽粪便生物炭产率及理化特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(11):2208-2214.
WANG Huang-ping, ZHANG Qing, LI Yu, et al. Effects of pyrolysis temperature on yield and physicochemical characteristics of biochar from animal manures[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(11):2208-2214.
- [10] Hass A, Gonzalez J M, Lima I M, et al. Chicken manure biochar as liming and nutrient source for acid Appalachian soil[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2012, 41(4):1096-1106.
- [11] Uchimiya M, Cantrell K B, Hunt P G, et al. Retention of heavy metals in a typic kandiudult amended with different manure-based biochars[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2012, 41(4):1138-1149.
- [12] 黄婷. 生物质炭对滴灌棉花氮磷养分吸收的影响机制[D]. 石河子:石河子大学, 2017.
HUANG Ting. Mechanism of biochar effects on nitrogen and phosphorus of cotton uptake under drip irrigation conditions[D]. Shihezi: Shihezi University, 2017.
- [13] 张福锁. 植物根引起的根际pH值改变的原因及效应[J]. 土壤通报, 1993(1):43-45.
ZHANG Fu-suo. Causes and effects of root pH changes caused by plant roots[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1993(1):43-45.
- [14] 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.
- [15] 朱庆祥. 生物炭对Pb、Cd污染土壤的修复试验研究[D]. 重庆:重庆大学, 2011.
ZHU Qing-xiang. Experimental study on lead and cadmium contaminated soil remediation with biochar[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.
- [16] Fellet G, Marchiol L, Delle Vedove G, et al. Application of biochar on mine tailings: Effects and perspectives for land reclamation[J]. *Chemosphere*, 2011, 83(9):1262-1267.
- [17] Méndez A, Gómez A, Paz-Ferreiro J, et al. Effects of sewage sludge biochar on plant metal availability after application to a Mediterranean soil[J]. *Chemosphere*, 2012, 89(11):1354-1359.
- [18] 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(4):29-34.
XU Nan-nan, LIN Da-song, XU Ying-ming, et al. Application of biochar on soil improvement and heavy metal pollution abatement[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2013(4):29-34.
- [19] Borchard N, Prost K, Kautz T, et al. Sorption of copper(II) and sulphate to different biochars before and after composting with farmyard manure[J]. *European Journal of Soil Science*, 2011, 63(3):399-409.
- [20] Houben D, Evrard L, Sonnet P. Mobility, bioavailability and pH-dependent leaching of cadmium, zinc and lead in a contaminated soil amended with biochar[J]. *Chemosphere*, 2013, 92(11):1450-1457.
- [21] 宋延静, 龚骏. 施用生物质炭对土壤生态系统功能的影响[J]. 鲁东大学学报(自然科学版), 2010, 26(4):361-365.
SONG Yan-jing, GONG Jun. Effects of biomass charcoal on soil ecosystem function[J]. *Ludong University Journal(Natural Science Edition)*, 2010, 26(4):361-365.
- [22] Wagner A, Kaupenjohann M. Suitability of biochars (pyro- and hydrochars) for metal immobilization on former sewage-field soils[J]. *European Journal of Soil Science*, 2014, 65(1):139-148.
- [23] Hmid A, Al C Z, Sillen W, et al. Olive mill waste biochar: A promising soil amendment for metal immobilization in contaminated soils[J]. *Environmental Science & Pollution Research International*, 2015, 22(2):1444-1456.
- [24] Legros S, Doelsch E, Masion A, et al. Combining size fractionation, scanning electron microscopy, and X-ray absorption spectroscopy to probe zinc speciation in pig slurry[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2010, 39(39):531-540.
- [25] 王凤, 王梦露, 党秀丽, 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, DANG Xiu-li, 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.
- [26] Houben D, Evrard L, Sonnet P. Beneficial effects of biochar application to contaminated soils on the bioavailability of Cd, Pb and Zn and the biomass production of rapeseed (*Brassica napus* L.)[J]. *Biomass & Bioenergy*, 2013, 57(11):196-204.
- [27] Yao Y, Gao B, Chen J, et al. Engineered biochar reclaiming phosphate from aqueous solutions: Mechanisms and potential application as a slow-release fertilizer[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(15):8700-8708.