

添加生物炭对鹿粪堆肥 Cu、Zn 的钝化效果研究

李龙威¹, 冯佳音¹, 张 颀², 赵胜楠², 李忠和², 王 鑫^{2*}, 王秀飞^{2*}

(1. 长春市净月潭水库管理处, 长春 130000; 2. 吉林省农业科学院, 长春 130033)

摘要:堆肥是实现畜禽粪便资源化利用的有效方式之一,在堆肥中添加生物炭能够改善堆肥理化性质、钝化畜禽粪便中的重金属,从而提高堆肥品质。以玉米秸秆和鹿粪为原材料,分别添加不同比例的生物炭,研究堆肥理化指标和重金属 Cu、Zn 的含量及形态变化。结果表明,当生物炭添加比例为 5% 时,堆肥高温期持续时间最长;添加生物炭的处理组堆肥 pH 均高于对照组;随着堆肥时间的延长,堆肥含水率不断降低,但是添加生物炭能够减缓堆肥体系水分蒸发速率,使堆体的持水性能得到提高;堆肥结束后,添加生物炭的处理组碳氮比均低于 20,堆肥实现完全腐熟;生物炭添加量为 10% 时,对 Cu、Zn 的钝化效果最好。本试验明确了生物炭应用于鹿粪和玉米秸秆堆肥中对堆肥理化指标和 Cu、Zn 钝化效果的影响,为鹿粪堆肥的实际应用提供数据支持,也为提高堆肥品质、降低重金属在堆肥过程中的环境风险提供理论参考。

关键词:生物炭;鹿粪;堆肥;Cu;Zn

中图分类号:S141.4;X53

文献标识码:A

文章编号:2096-5877(2025)03-0093-09

Study on the Passivation Effect of Adding Biochar on Cu and Zn in Deer Manure Compost

LI Longwei¹, FENG Jiayin¹, ZHANG Di², ZHAO Shengnan², LI Zhonghe², WANG Xin^{2*}, WANG Xiufei^{2*}

(1. Changchun Jingyuetan Reservoir Management Office, Changchun 130000; 2. Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: Composting is an effective way to use livestock and poultry manure as a resource. Adding biochar to compost can improve its physical and chemical properties, passivate heavy metals in manure, thereby enhancing compost quality. Using corn stover and deer manure as raw materials, different proportions of biochar were added to study the physical and chemical indicators of compost, as well as the content and morphological changes of heavy metals Cu and Zn. The results showed that a 5% biochar addition resulted in the longest high-temperature period during composting. The pH of compost in the treatment group with added biochar was higher than that of the control group. As composting progresses, the moisture content of the compost decreases continuously. However, adding biochar can reduce the evaporation of moisture in the composting system, improving the water holding capacity of the compost. By the end of composting, the carbon to nitrogen ratio in the biochar-added treatment groups was below 20, indicating complete maturation of the compost. A 10% biochar addition showed the best passivation effect on Cu and Zn. This experiment clarified the effects of biochar application on the physicochemical properties and Cu and Zn passivation effects of deer manure and corn stover compost, providing data support for the practical application of deer manure compost and theoretical reference for improving compost quality and reducing environmental risks of heavy metals in the composting process.

Key words: Biochar; Deer manure; Composting; Cu; Zn

随着生产方式的不断进步,畜禽规模化、集约

化养殖场数量增多,畜禽粪便的排放量逐渐增加,如处理不当会对生态环境造成严重污染^[1-2]。在适宜的温度、含水率、pH 等参数条件下,好氧堆肥能够利用反应体系自身的微生物降解有机物,生成具有高度腐殖化的物质(堆肥)^[3]。在堆肥过程中加入生物炭,堆肥体系的有机物降解程度比未添加生物炭的体系中有机物降解程度更高^[4]。

收稿日期:2024-09-23

基金项目:吉林省农业科技创新工程项目(KYJF2024SJ008);国家重点研发计划子课题(2023YFD1701604)

作者简介:李龙威(1995-),男,工程师,硕士,从事环境保护研究。

通讯作者:王 鑫,E-mail: 261584342@qq.com

王秀飞,E-mail: 976760804@qq.com

研究表明,在农业废弃物堆肥中加入生物炭能够提高对重金属的钝化效果^[5-6]。梅花鹿在生长的过程中需要添加Cu、Zn元素促进鹿茸的生长,没有被代谢掉的Cu、Zn元素会随着粪便排泄进入到环境当中,因此鹿粪中Cu、Zn元素的污染风险较高。因此,本研究探索添加生物炭对鹿粪堆肥过程中Cu、Zn的钝化效果,为鹿粪堆肥产品的实际应用提供有效数据支撑。

1 材料与方 法

1.1 试验原料

鹿粪取自长春市双阳区养鹿农户家,鹿粪风干后置于自封袋内冷藏保存;秸秆取自长春市周边农田,切割成1 cm左右的小段,烘干后备用;生物炭购自河南金邦环保科技有限公司,由玉米秸秆高温限氧裂解而成。

1.2 试验装置

图1为反应器剖面图。反应器主体由有机玻璃构成,尺寸为350 mm×400 mm,有效容积约为25 L,顶部和外侧周围设有保温泡沫。反应器顶部为有机玻璃盖板,中间设有圆孔用于测定堆体温度和采取气体样品。底部设有通风筛板,侧面设有圆孔连接压力计、流量计等装置。

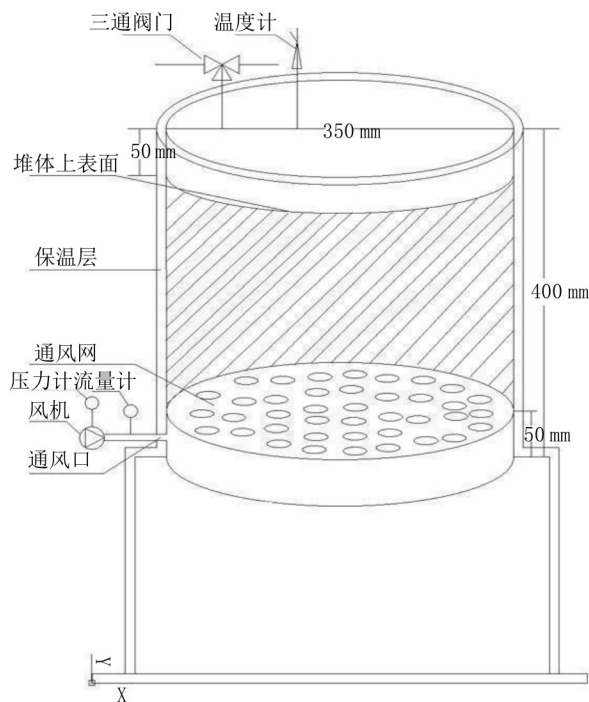


图1 堆肥反应器

Fig.1 Composting reactor

1.3 堆肥试验

以鹿粪和玉米秸秆为基质,共设置4组试验,

生物炭添加比例(以干重计)分别为:0%、2.5%、5%、10%(分别记为CK、BC₁、BC₂、BC₃),以能促进堆肥进程的最适宜的条件,将堆肥体系初始碳氮比设为30,含水率设为60%。

1.4 样品采集与指标测定

在堆肥启动后每间隔3 d取样一次,分别从堆体的上、中、下3个部分进行取样,混合均匀后用于指标测定,指标测定方法见表1。

表1 指标测定方法

Table 1 Indicator measurement methods

测试指标 Test indicator	测试方法 Test method
pH	pH计
含水率	干重法
脲酶活性	比色法
总有机碳	重铬酸钾氧化法
总氮	凯氏定氮法
种子发芽指数	培养法
铜(Cu)	原子吸收法
锌(Zn)	原子吸收法

2 结果与分析

2.1 添加生物炭对堆肥理化性质的影响

2.1.1 添加生物炭对堆肥温度的影响

堆肥过程各处理组温度变化如图2所示,整个试验过程中,各处理组的温度变化趋势相似,呈现出较为明显的中温期、高温期和降温期。试验开始的4 d内,CK、BC₂、BC₃处理组均进入高温期,BC₁组在第6天进入高温期。所有处理组中,BC₂组高温期最长,持续13 d,其他试验组的高温期持续时间为8~10 d。

从整体变化趋势来看,与对照组(CK)相比,添加生物炭的处理组(BC₁、BC₂、BC₃)高温期最高温度分别达到58℃、63℃、61℃,主要是由于生物炭丰富的空隙结构和较大的比表面积为微生物的生长繁殖提供便利条件,促进有机物的分解,提高堆体的温度^[7]。CZEKALA等^[8]的研究也得出了相似的结论,在堆肥过程中加入生物炭使得堆肥快速升温并明显缩短堆肥的高温期。

在堆肥初期,体系中拥有充足的营养成分和适宜微生物活动的氧气浓度,对微生物的生长繁殖产生积极影响,堆肥体系中的有机物被大量分解,导致堆体温度迅速升高^[9]。堆体处于高温期时,能够有效杀灭堆肥原料中的病原微生物,实

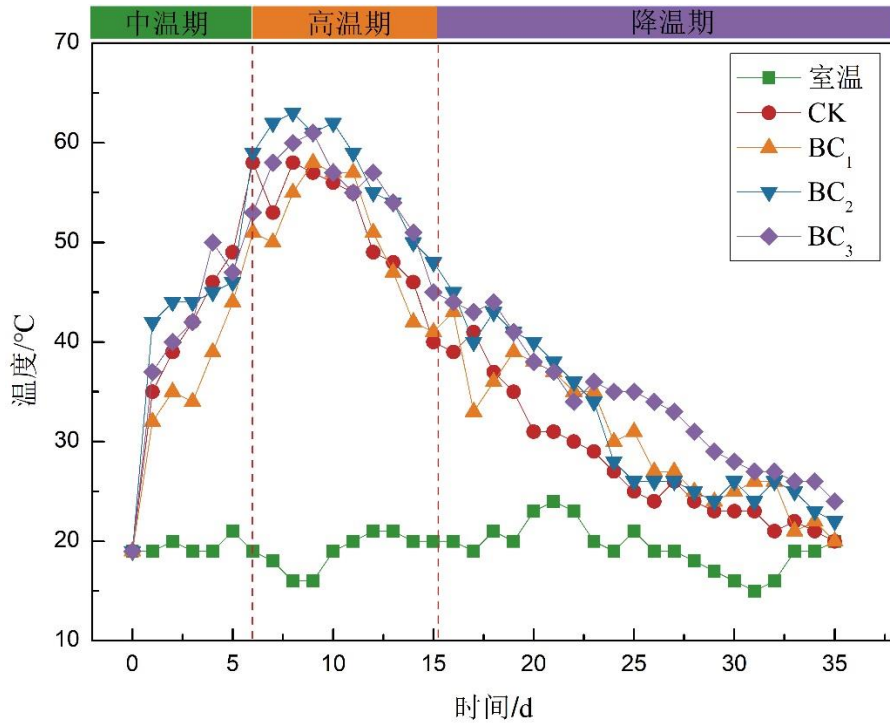


图2 堆肥过程各试验组温度变化情况

Fig.2 Temperature changes in each experimental group during the composting process

现堆肥的无害化处理^[10]。根据美国国家环保局的规定,堆体温度达到 55 °C 持续 3 d 以上或达到 50 °C 持续 7 d 以上,堆肥实现无害化标准^[11],4 组堆肥试验温度处于 55 °C 以上的时间为 4~7 d,均达到无害化标准。随着堆肥时间的延长,体系中容易被分解的有机物含量逐渐降低,微生物的活

动进一步减弱,导致堆体温度呈现降低的趋势。同时,通风条件和堆肥体系水分的蒸发也会带走堆体的热量,导致堆体温度降低,直至接近室温。

2.1.2 添加生物炭对堆肥 pH 的影响

生物炭自身的弱碱性有助于维持堆体 pH^[12]。从图 3 可以看出,各试验组的 pH 变化情况较为相

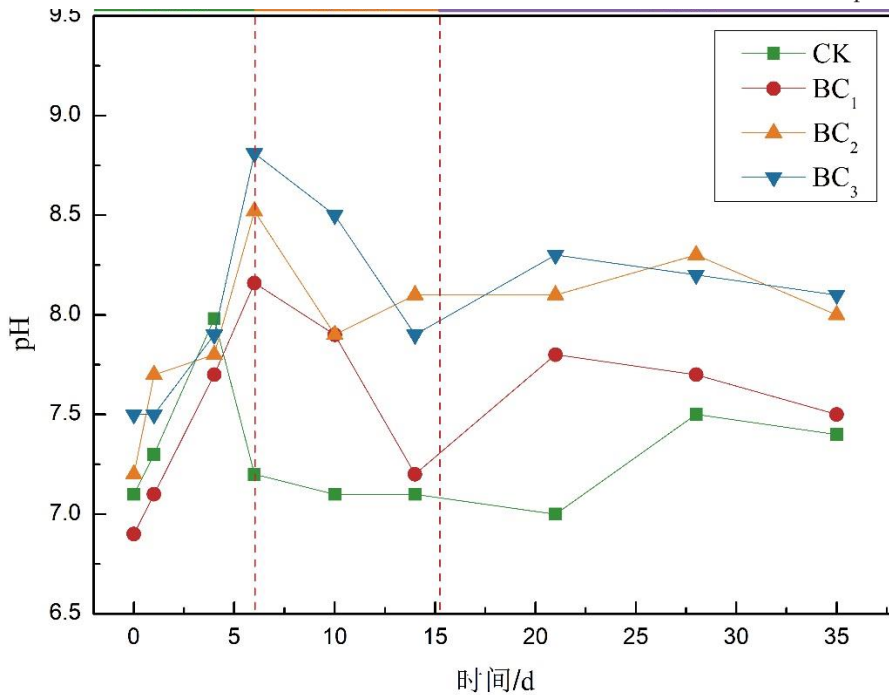


图3 堆肥过程各试验组 pH 变化情况

Fig.3 pH changes in each experimental group during the composting process

似。堆肥第4天,CK组达到峰值,BC₁、BC₂、BC₃组均在第6天达到峰值,添加生物炭提高处理组的pH峰值,与Li等^[13]研究结果一致。堆肥启动后,随着堆肥体系温度的不断升高,各试验组的pH也快速升高,达到峰值以后,出现降低的趋势。

在堆肥初期,有机物被大量分解,氨化作用产生大量NH₃,使堆体pH快速升高;生物炭表面存在的酸性官能团与NH₄⁺结合也使得添加生物炭的试验组pH略高于对照组^[14],随着有机物含量降低,微生物活动减弱,pH逐渐降低。另外,NH₃的挥发也导致体系pH下降,而后趋于稳定^[15]。此外,堆体中乙酸、丁酸等有机酸及酚类化合物的形成也会导致体系pH下降^[16]。

2.1.3 添加生物炭对堆肥含水率的影响

堆肥过程中含水率的变化与堆肥体系水分蒸发、渗滤液形成以及有机物的氧化分解密切相关^[17]。相关研究表明,堆肥的初始含水率最佳范围在50%~70%^[18]。各试验组含水率变化情况如图4所示。堆肥前期,含水率下降趋势明显,主要是因为堆肥前期温度较高,水分蒸发作用较大。整个堆肥过程中,添加生物炭的3个处理组含水率均高于对照组(CK),BC₃组在堆肥中温期阶段出现波动现象,在进入高温期后逐渐下降,堆肥结束后,BC₃组含水率相较于对照组高10.07%。

研究证实,生物炭疏松的孔隙结构会将水分子固定在这些微孔和介孔等结构中,减缓水分的

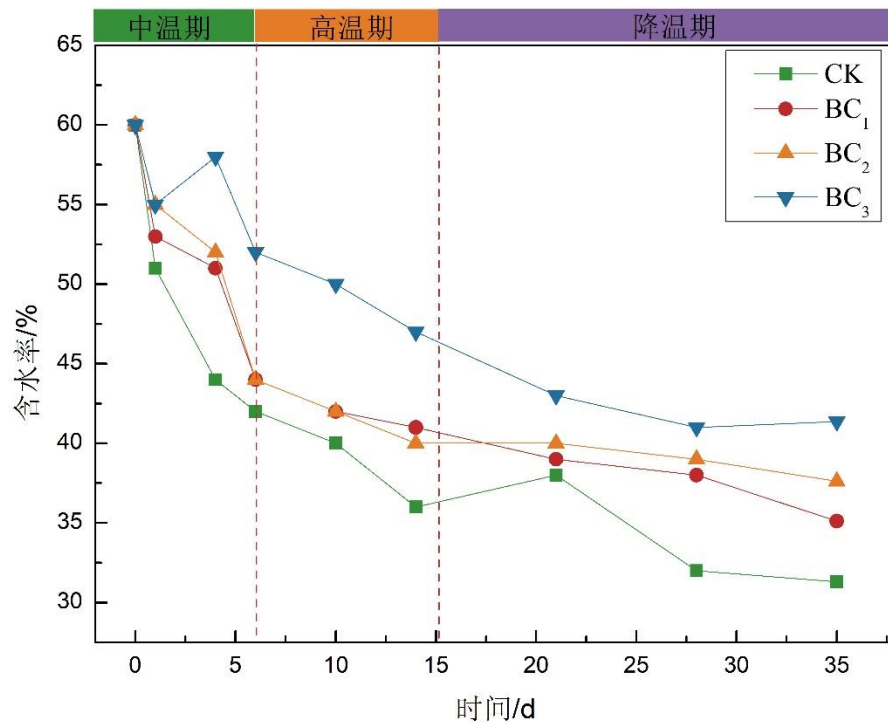


图4 堆肥过程各试验组含水率变化情况

Fig.4 Changes in moisture content of each experimental group during composting process

蒸发,降低堆肥体系中的水分流失^[7,19]。

2.1.4 添加生物炭对堆肥碳氮比的影响

碳氮比是影响堆肥腐熟程度的重要指标之一,而腐熟度是衡量堆肥体系稳定性、反应堆肥品质的重要指标^[20]。堆肥过程中,微生物的生长繁殖主要依赖堆肥体系中的各种碳源和氮源,因此,适宜的碳氮比是微生物活动的重要影响因素之一。

堆肥初始碳氮比较合适的范围是25~35,当体系碳氮比小于20则认为堆肥完全腐熟^[7]。由图5可知,整个堆肥过程中,碳氮比呈现先上升后下

降,最后趋于稳定状态,并在20左右的范围内波动。堆肥启动后,添加生物炭的3个试验组碳氮比在第1天就达到峰值,对照组(CK)在第4天达到峰值。堆肥结束后,对照组(CK)的碳氮比为22.18,处理组BC₁、BC₂、BC₃的碳氮比分别为13.02、15.73、19.93,处理组的碳氮比均小于20,实现堆肥腐熟,对照组未达到完全腐熟,由此可见,添加生物炭对促进堆肥腐熟产生积极影响。

2.2 添加生物炭对堆肥Cu、Zn含量及形态的影响

2.2.1 添加生物炭对堆肥Cu、Zn含量的影响

堆肥前后各试验组Cu、Zn含量变化如表2

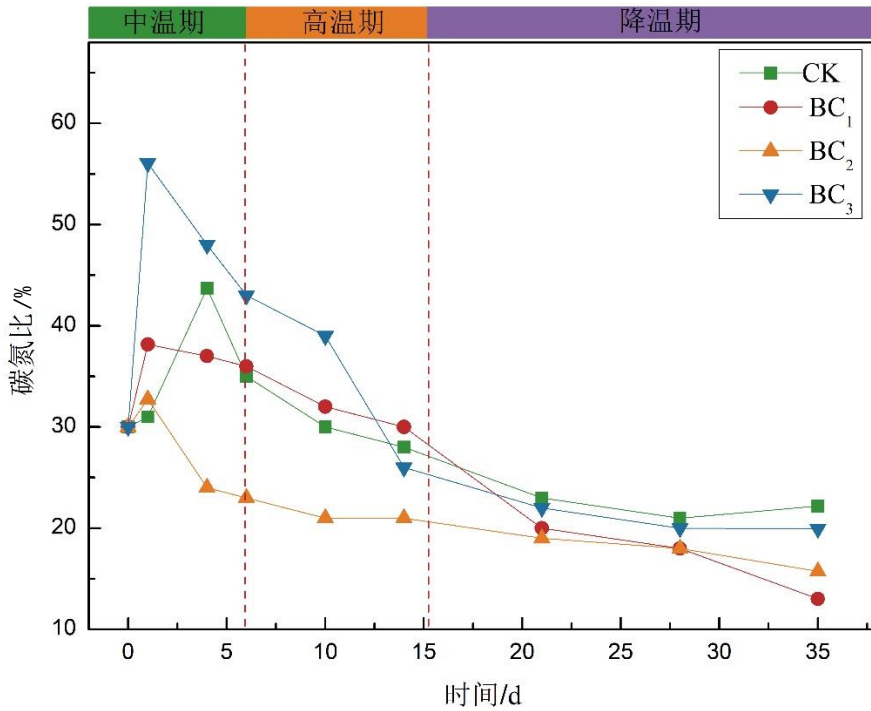


图5 堆肥过程各试验组碳氮比变化情况

Fig.5 Changes in carbon nitrogen ratio of each experimental group during composting process

所示。堆肥结束后,对照组和处理组Cu、Zn含量都明显增加。堆肥结束后,对照组(CK)Cu含量由643.17 mg·kg⁻¹增加至787.46 mg·kg⁻¹,Zn含量由662.95 mg·kg⁻¹增加至772.63 mg·kg⁻¹;处理组中BC₃组Cu含量增幅最大(25.70%),BC₂组Zn含量增幅最大(28.15%)。

由表2数据可知,对照组和处理组重金属含

量均有明显的增幅,说明生物炭的添加并未影响重金属Cu、Zn含量的提高。研究发现,重金属在堆肥结束后会表现出“相对浓缩效应”,主要是由于重金属性质稳定,不易被降解,堆肥结束后堆体的体积和质量下降,因此重金属质量分数升高^[21]。

表2 堆肥前后各试验组Cu、Zn含量变化

Table 2 Changes in Cu and Zn content in each experimental group before and after composting

试验组 Test group	Cu		Zn	
	堆肥前/mg·kg ⁻¹ Before composting	堆肥后/mg·kg ⁻¹ After composting	堆肥前/mg·kg ⁻¹ Before composting	堆肥后/mg·kg ⁻¹ After composting
CK	643.17±0.68a	787.46±0.45A	662.95±0.34a	772.63±0.23A
BC ₁	621.28±0.83b	712.88±0.22B	650.97±0.73b	740.25±0.57B
BC ₂	599.02±0.46c	669.35±0.63C	623.84±0.94c	799.46±0.73C
BC ₃	544.36±1.27d	684.27±0.17E	592.38±1.35d	701.27±0.36E

注:表中小写字母表示各试验组堆肥前含量差异显著(P<0.05),大写字母表示各试验组堆肥后重金属含量差异显著(P<0.05)。

Note: Lowercase letters indicate significant differences (P<0.05) in pre-composting heavy metal content among experimental groups, while uppercase letters denote significant differences (P<0.05) in post-composting heavy metal content.

2.2.2 添加生物炭对堆肥Cu形态和钝化效果的影响

重金属的不同存在形态(可交换态-EXC、还原态-RED、氧化态-OXI、残渣态-RES)能够反映

出重金属的生物可利用性以及其产生的环境风险^[22]。由表2可知,堆肥后重金属Cu、Zn含量均有所提高,但重金属的形态尚不确定,因此采用重金属形态分配系数评价其是否具有环境风险。

Cu形态分布如图6所示。堆肥开始之前,Cu主要以RED存在,堆肥后,主要以OXI存在,RES的比例也略微增加。随着堆肥的进行,堆肥体系中的腐殖质含量大幅增加,使Cu向稳定态转化^[23],降低其可能产生的环境风险。由堆肥前后重金属可

交换态的分配率能够计算出重金属的钝化效果^[7],Cu的钝化效果如图7所示。从钝化效果来看,各试验组对Cu的钝化效果由高到低依次为BC₃、BC₁、BC₂、CK,BC₃处理组对Cu的钝化效果最好,明显高于其他处理组。

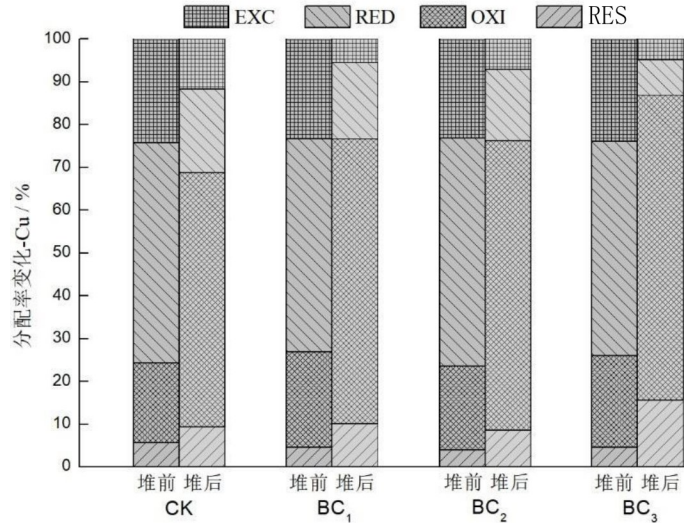


图6 堆肥前后Cu形态分布

Fig.6 Distribution of Cu forms before and after composting

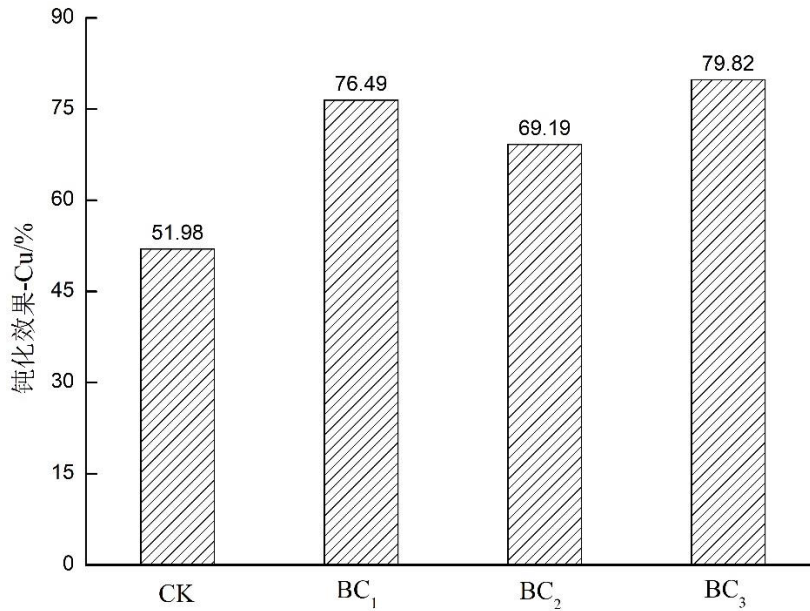


图7 Cu钝化效果

Fig.7 Cu passivation effect

2.2.3 添加生物炭对堆肥 Zn 形态和钝化效果的影响

如图8所示,Zn在堆肥前后主要以RED形式存在,与Cu在堆肥前后的形态变化存在一定的差异。堆肥结束后,OXI、RED、RES形态的Zn比例均有略微上升,EXC形态的Zn则呈现明显的降低趋势。Zn的存在状态和钝化效果均与Cu存在较大的差异。Cu主要以氧化态存在,而Zn主要以

还原态存在,这与重金属自身的性质有关。

堆肥体系中的胡敏酸对Cu的固定能力高于Zn,铁锰氧化物与Zn的结合能力较强,导致Cu和Zn的形态在堆肥结束后存在差异。从钝化效果来看(图9),各试验组对Zn的钝化效果由高到低依次为BC₃、BC₁、BC₂、CK。相关研究表明,堆肥的温度、pH、含水率等理化性质与堆肥中重金属的形态变化具有一定的相关关系^[24-25]。

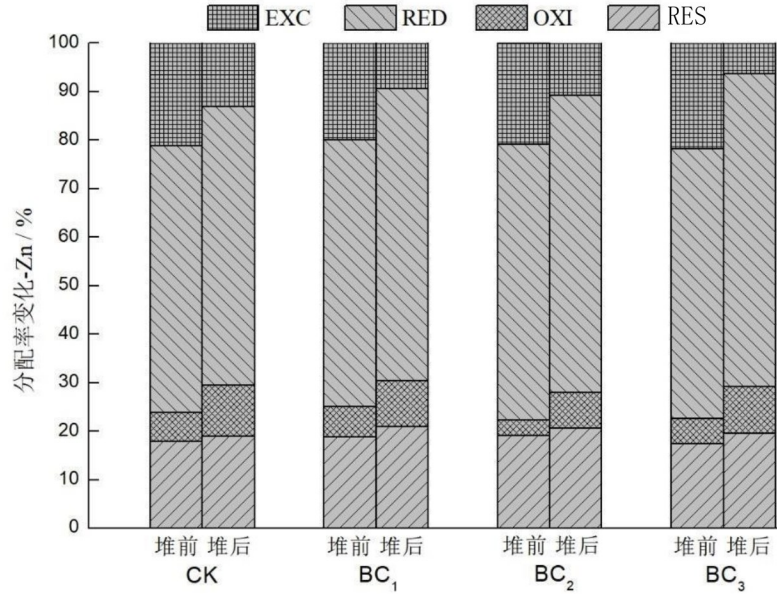


图8 堆肥前后 Zn 形态分布

Fig.8 Distribution of Zn forms before and after composting

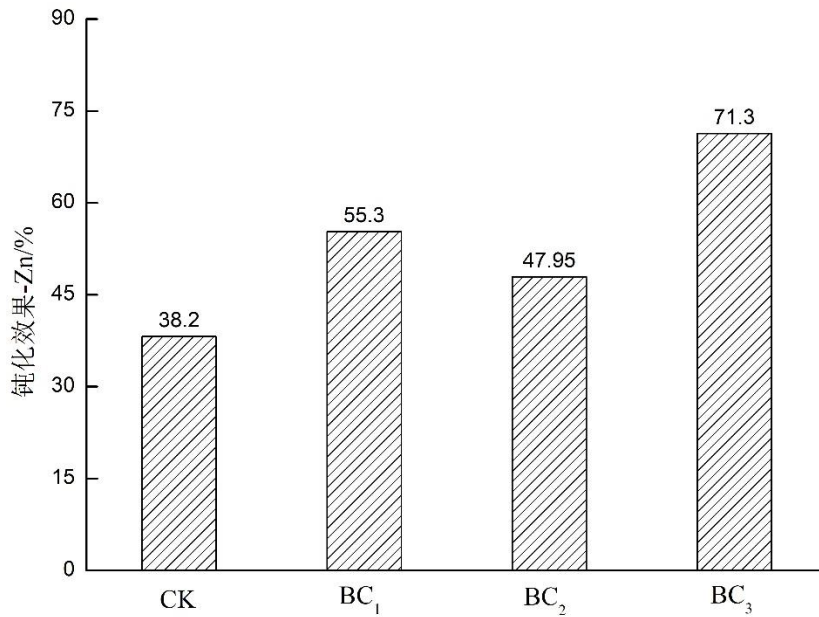


图9 Zn钝化效果

Fig.9 Zn passivation effect

3 讨论与结论

3.1 添加生物炭对堆肥理化性质的影响

生物炭在改善堆肥理化性质、促进微生物的生长和繁殖等方面具有显著作用^[26]。本试验以玉米秸秆和鹿粪为原材料进行堆肥,研究添加不同比例的生物炭对堆肥基本理化参数的影响,结果表明,BC₂组(生物炭添加比例为5%)高温期持续时间最长,为13 d;BC₃组(生物炭添加比例为10%)含水率相较于对照组高10.07%,改善了

堆体的保水性能;堆肥结束后,BC₁、BC₂、BC₃组的碳氮比分别为13.02、15.73、19.93,实现堆肥腐熟,对照组堆肥未达到完全腐熟。

将生物炭作为添加剂加入堆肥中,对堆肥温度、pH、含水率及碳氮比等基本理化指标都具有一定的调控作用。生物炭的加入能够延长堆肥高温期的保持时间,并且使堆肥过程提前6~7 d进入高温期^[27];SANCHEZ等^[4]研究发现,加入生物炭使堆肥初始pH得到提高;堆肥进入高温期以后,温度的升高导致水分蒸发较快,生物炭自身固有

的多孔隙结构会抑制水分的蒸发,使堆体的保水性能得到提升,且生物炭的裂解温度越高,其对水分蒸发的抑制作用越明显^[13]。除此之外,生物炭对堆肥体系内微生物菌群结构和酶活也具有一定的影响^[28]。

3.2 添加生物炭对堆肥重金属含量及形态变化的影响

堆肥结束后,重金属 Cu、Zn 的含量均有所增加。各试验组对 Cu 的钝化效果由高到低依次为 BC₃、BC₁、BC₂、CK, BC₃ 组对 Cu 的钝化效果最好,明显高于其他处理组;各试验组对 Zn 的钝化效果由高到低依次为 BC₃、BC₁、BC₂、CK,也是当生物炭添加比例为 10% 时对 Zn 的钝化效果最好。由此可见,生物炭对 Cu、Zn 的钝化效果比未添加生物炭的对照组更好。

堆肥中的腐殖质可以通过络合作用固定重金属,这种络合作用能够降低重金属的溶解度,从而有效降低重金属的生物有效性,而在堆肥中加入生物炭明显提高重金属的溶解度^[4],说明生物炭对腐殖质的形成具有促进作用。除此之外,生物炭的静电引力作用和表面官能团作用也使重金属生物有效性被降低^[29-30]。

参考文献:

- [1] LI L W, XU J L, WANG H X, et al. Study of the performance of biogas production by mixed fermentation of cow dung, deer manure, and mushroom fungus[J]. *Energy Science & Engineering*, 2020, 8: 466-475.
- [2] QIAN Y, SONG K, HU T, et al. Environmental status of livestock and poultry sectors in China under current transformation stage[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 622-623: 702-709.
- [3] WANG Q, AWASHI M K, ZHAO J, et al. Improvement of pig manure compost lignocellulose degradation, organic matter humification and compost quality with medical stone[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 243: 771-777.
- [4] SANCHEZ-GARCIA M, ALBURQUERQUE J A, SANCHEZ-MONEDERO M A, et al. Biochar accelerates organic matter degradation and enhances N mineralisation during composting of poultry manure without a relevant impact on gas emissions[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 192: 272-279.
- [5] 王义祥,李波,叶菁,等.生物炭添加对猪粪菌渣堆肥过程中 Cu、Zn 的钝化作用[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(5): 1176-1184.
- WANG Y X, LI B, YE J, et al. Passivating effect of biochar on heavy metals (Cu and Zn) during composting of pig manure and mushroom residues[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(5): 1176-1184. (in Chinese)
- [6] CHEN Y, LIU Y, LI Y, et al. Influence of biochar on heavy metals and microbial community during composting of river sediment with agricultural wastes[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 243: 347-355.
- [7] WANG C, LU H, DONG D, et al. Insight into the effects of biochar on manure composting: Evidence supporting the relationship between N₂O emission and denitrifying community[J]. *Environmental Science and Technology*, 2013, 47(13): 7341-7349.
- [8] CZEKALA W, MALINSKA K, CACERES R, et al. Co-composting of poultry manure mixtures amended with biochar - The effect of biochar on temperature and C-CO₂ emission[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 200: 921-927.
- [9] 李龙威.生物炭对鹿粪堆肥过程中重金属钝化及肥效的影响研究[D].长春:东北师范大学,2020.
- LI L W. Effect of biochar on heavy metal passivation and fertilizer efficiency in deer manure compost[D]. Changchun: Northeast Normal University, 2020. (in Chinese)
- [10] WANG Q, WANG Z, AWASTHI M K, et al. Evaluation of medical stone amendment for the reduction of nitrogen loss and bioavailability of heavy metals during pig manure composting[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 243: 297-304.
- [11] 徐同宝,李吕木,甄长丰,等.不同微生物对猪粪堆肥过程及其养分状况的影响[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(11): 217-221.
- XU T B, LI L M, ZHEN C F, et al. Effects of different microorganism consortiums on composting process of pig manures and their nutrient status[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(11): 217-221. (in Chinese)
- [12] AWASTHI M K, WANG M, CHEN H, et al. Heterogeneity of biochar amendment to improve the carbon and nitrogen sequestration through reduce the greenhouse gases emissions during sewage sludge composting[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 224: 428-438.
- [13] LI R, WANG Q, ZHANG Z, et al. Nutrient transformation during aerobic composting of pig manure with biochar prepared at different temperatures[J]. *Environmental Technology*, 2015, 36(5-8): 815-826.
- [14] ZHANG J, CHEN G F, SUN H F, et al. Straw biochar hastens organic matter degradation and produces nutrient-rich compost [J]. *Bioresource Technology*, 2016, 200: 876-883.
- [15] JIANG T, MA X, TANG Q, et al. Combined use of nitrification inhibitor and struvite crystallization to reduce the NH₃ and N₂O emissions during composting[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 217: 210-218.
- [16] EKLIND Y, KIRCHMANN H. Composting and storage of organic household waste with different litter amendments, II: nitrogen turnover and losses[J]. *Bioresource Technology*, 2000, 74: 125-133.
- [17] FEVZI S, ISMAIL T, KAMIL E, et al. The effect of FAS and C/N ratios on co-composting of sewage sludge, dairy manure and tomato stalks[J]. *Waste Management*, 2018, 80: 450-456.
- [18] 吴银宝,汪植三,廖新岷,等.猪粪堆肥腐熟指标的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2003, 22(2): 189-193.
- WU Y B, WANG Z S, LIAO X D, et al. Study on mature index

- of composting swine manure[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2003, 22(2): 189-193. (in Chinese)
- [19] LIM S L, LEE L H, WU T Y. Sustainability of using composting and vermicomposting technologies for organic solid waste bio-transformation: Recent overview, greenhouse gases emissions and economic analysis[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 111: 262-278.
- [20] XUE W, HU X, WEI Z, et al. A fast and easy method for predicting agricultural waste compost maturity by image-based deep learning[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 290: 121761.
- [21] LI R, WANG J J, ZHANG Z, et al. Nutrient transformations during composting of pig manure with bentonite[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 121:362-368.
- [22] 孙西宁,张增强,张永涛,等.污泥堆肥过程中重金属的形态变化研究—Sposito浸提法[J].*农业环境科学学报*,2007,26(6):2339-2344.
SUN X N, ZHANG Z Q, ZHANG Y T, et al. Changes of heavy metal forms in sludge during the composting process: Sposito method[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2007, 26(6): 2339-2344. (in Chinese)
- [23] 熊雄,李艳霞,韩杰,等.堆肥腐殖质的形成和变化及其对重金属有效性的影响[J].*农业环境科学学报*,2008,27(6):2137-2142.
XIONG X, LI Y X, HAN J, et al. Formation and transformation of humus in composting and its impacts on bioavailability of toxic metals[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2008, 27(6): 2137-2142. (in Chinese)
- [24] WU S, SHEN Z, YANG C, et al. Effects of C/N ratio and bulking agent on speciation of Zn and Cu and enzymatic activity during pig manure composting[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2017, 119: 429-436.
- [25] HSU J H, LO S L. Effect of composting on characterization and leaching of copper, manganese, and zinc from swine manure[J]. *Environmental Pollution*, 2001, 114(1): 119-127.
- [26] 张頔,李龙威,王鑫,等.生物炭对畜禽粪便好氧堆肥的影响研究进展[J].*玉米科学*,2022,30(6):138-148.
ZHANG D, LI L W, WANG X, et al. Research progress on the effect of stalk biochar on livestock manure aerobic composting [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2022, 30(6): 138-148. (in Chinese)
- [27] CANO I L, ROIG A, CAYUELA M L, et al. Biochar improves N cycling during composting of olive mill wastes and sheep manure [J]. *Waste Management*, 2016, 49: 553-559.
- [28] WU H, ZENG G, LIANG J, et al. Responses of bacterial community and functional marker genes of nitrogen cycling to biochar, compost and combined amendments in soil[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2016, 100(19): 8583-8591.
- [29] 张頔.聚乙烯亚胺功能化秸秆生物炭对水中Cu²⁺、Pb²⁺、Cd²⁺的吸附性能研究[D].长春:东北师范大学,2020.
ZHANG D. Adsorption of Cu²⁺、Pb²⁺、Cd²⁺ in water by polyethyleneimine functionalized straw biochar[D]. Changchun: Northeast Normal University, 2020. (in Chinese)
- [30] 刘佳遥,王占海,魏尊苗,等.不同秸秆生物炭对土壤质量及油莎豆生长的影响[J].*东北农业科学*,2023,48(2):72-77.
LIU J Y, WANG Z H, WEI Z M, et al. Effects of different straw biochars on the growth and soil quality of *Cyperus esculentus*[J]. *Journal of Northeast Agricultural Science*, 2023, 48(2): 72-77. (in Chinese)

(责任编辑:王 昱)