



**添加生物质炭对羊粪堆肥腐殖化的影响**

王海候, 程月琴, 金梅娟, 刘泽凯, 韩奇隆, 施林林, 沈明星

引用本文:

王海候,程月琴,金梅娟,刘泽凯,韩奇隆,施林林,沈明星. 添加生物质炭对羊粪堆肥腐殖化的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2022, 39(4): 766–774.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0130>

**您可能感兴趣的其他文章**

**Articles you may be interested in**

**土壤溶解性有机质结构和组成对秸秆、牛粪及其堆肥产品输入的响应特征**

田翔, 何天容, 尹德良, 冉澍, 汪妍, 周宪, 张舸

*农业资源与环境学报*. 2022, 39(3): 556–566 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0068>

**过磷酸钙在病死猪堆肥中保氮效果研究**

雷平, 刘标, 尹红梅

*农业资源与环境学报*. 2017, 34(3): 266–271 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2016.0269>

**不同过磷酸钙添加量对蔬菜废弃物堆肥的影响**

杨岩, 孙钦平, 李妮, 刘本生, 邹国元, 李吉进, 江丽华, 刘月仙

*农业资源与环境学报*. 2017, 34(1): 66–72 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2016.0218>

**生物质炭与草炭混配基质的养分状况及其对凤仙花生长的影响**

王媛, 李文庆, 李晗灏

*农业资源与环境学报*. 2019, 36(5): 656–663 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0233>

**基于葛渣肥料化利用的蚯蚓转化技术研究**

王馨悦, 成艳红, 何绍浪, 张昆, 黄尚书, 王斌强, 黄欠如

*农业资源与环境学报*. 2022, 39(1): 201–208 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0624>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王海候, 程月琴, 金梅娟, 等. 添加生物质炭对羊粪堆肥腐殖化的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(4): 766-774.

WANG H H, CHENG Y Q, JIN M J, et al. Effects of biochar addition on humification of sheep manure compost[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39(4): 766-774.



开放科学 OSID

## 添加生物质炭对羊粪堆肥腐殖化的影响

王海候<sup>1,2</sup>, 程月琴<sup>3</sup>, 金梅娟<sup>1,2</sup>, 刘泽凯<sup>1</sup>, 韩奇隆<sup>1</sup>, 施林林<sup>1,2</sup>, 沈明星<sup>2</sup>

(1. 江苏太湖地区农业科学研究所, 江苏 苏州 215100; 2. 国家土壤质量相城观测实验站, 江苏 苏州 215100; 3. 南京市耕地质量保护站, 南京 210019)

**摘要:**为探讨添加生物质炭条件下羊粪堆肥的腐殖化特征,采用静态堆制、高温好氧发酵的方法设置了3个处理,以羊粪与食用菌渣鲜质量比9:1混合体作为初级物料,在初级物料上分别添加450、650℃热解的稻壳生物质炭(占初级物料干质量百分比15%,BC450、BC650)以及未炭化的稻壳(与生物质炭等体积,CK),进行43 d的堆肥试验,监测了堆肥体水溶性有机物、总有机碳、可提取腐植酸含量等,分析了堆肥体腐殖化率、胡富比等。结果表明,与CK处理相比,添加生物质炭促进了羊粪与食用菌渣混合堆肥体的无害化及腐熟,其中BC650处理对堆肥腐解的促进作用优于BC450处理,但两者间无显著差异( $P>0.05$ );堆肥过程中BC450、BC650处理较CK处理减少了水溶性有机物、可提取腐植酸、富里酸、胡敏酸含量,降低了堆肥腐殖化率、腐殖化指数,提高了总有机碳、胡敏素含量,提升了胡富比,堆肥43 d后,BC450、BC650处理的可提取腐植酸含量比CK处理分别降低了29.32%、42.37%,富里酸含量分别降低了38.05%、46.77%,胡敏酸含量分别降低了26.28%、40.83%,但BC450、BC650处理之间均无显著差异( $P>0.05$ )。综合堆温、种子发芽指数、腐植酸及其组成等腐殖化特征来看,添加生物质炭促进了堆肥的腐解,虽没有提升腐植酸及其组分的绝对含量,但提高了腐植酸的稳定度,且450℃热解的稻壳生物质炭堆肥腐殖化程度优于650℃热解生物质炭。

**关键词:**生物质炭;热解温度;堆肥;腐植酸;羊粪;菌渣

中图分类号:S141.4

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2022)04-0766-09

doi: 10.13254/j.jare.2021.0130

### Effects of biochar addition on humification of sheep manure compost

WANG Haihou<sup>1,2</sup>, CHENG Yueqin<sup>3</sup>, JIN Meijuan<sup>1,2</sup>, LIU Zekai<sup>1</sup>, HAN Qilong<sup>1</sup>, SHI Linlin<sup>1,2</sup>, SHEN Mingxing<sup>2</sup>

(1. Taihu Research Institute of Agricultural Sciences, Suzhou 215100, China; 2. National Soil Quality Observation and Experimental Station in Xiangcheng, Suzhou 215100, China; 3. Nanjing Station of Quality Protection in Cultivated Land, Nanjing 210019, China)

**Abstract:** To investigate the humification characteristics of sheep manure compost following the addition of biochar, static stacking and high temperature aerobic fermentation was adopted. The three treatments involved mixtures of sheep dung and edible fungus residue with a fresh-weight ratio of 9:1 as the primary material. Rice husk biochar pyrolysis at 450 °C and 650 °C (15% dry weight of the primary material) was added to the primary material as BC450 and BC650 treatments, respectively. The uncharred rice husk (the same volume as biochar) was added to the primary material as the CK treatment. The composting experiment was carried out for 43 d. The compost was monitored for water soluble organic matter; total organic carbon; extracted humic acid; contents of fulvic acid, humic acid, and humin; humus, humic, and fulvic acid ratios; and humus index. Compared with the CK treatment, the addition of biochar promoted the innocuity and decay of the mixed compost body of sheep manure and edible fungus residue. BC650 treatment better promoted compost decomposition compared with BC450 treatment, but the difference was not significant ( $P>0.05$ ). Compared with CK treatment, BC450 and BC650

收稿日期: 2021-03-06 录用日期: 2021-05-29

作者简介: 王海候(1979—),男,江苏启东人,副研究员,主要从事农业废弃物资源化处置技术及其应用研究。E-mail: wanghaihou@126.com

基金项目: 江苏省基础研究计划(自然科学基金)面上项目(BK20181165);江苏省第五期“333高层次人才培养工程”科研项目(BRA2020128);苏州市农业科学院科研基金项目(21012)

**Project supported:** The Natural Science Foundation of Jiangsu Province of China (BK20181165); The 5th Scientific Research Project of “333 High-level Talents Training Project” of Jiangsu Province (BRA2020128); Scientific Research Foundation of Suzhou Academy of Agricultural Sciences (21012)

treatments reduced the contents of water-soluble organic matter, extractable humic acid, fulminic acid and humic acid in the composting process, reduced the humification rate and humification index of the compost, increased total organic carbon and humin content, and increased the humic fulvic acid ratio and the percentage of humic acid. After 43 d of composting, compared with CK treatment, the content of extractable humic acid in the BC450 and BC650 treatments was reduced by 29.32% and 42.37%, the content of fulvic acid decreased by 38.05% and 46.77%, and the humic acid content was decreased by 26.28% and 40.83%, respectively. No significant differences were evident between the BC450 and BC650 treatments ( $P>0.05$ ). Combined with humic acid and its components, the addition of biochar promoted the decomposition of compost. Although the absolute contents of humic acid and its components was not increased, the stability of humic acid was improved. Moreover, the stability of humic acid treated by BC450 was better than humic acid treated by BC650.

**Keywords:** biochar; pyrolysis temperature; composting; humic acid; sheep dung; fungus residue

高温好氧堆肥是实现农业废弃有机物料减量化、无害化和资源化最经济有效的处置技术,也是有机物料稳定化、腐殖化的过程<sup>[1]</sup>。通过堆肥处理,有机物料中不稳定的有机物质被逐步降解并生成稳定的腐殖质类物质<sup>[2]</sup>,施入农田后可增加土壤透气性,提高土壤保水保肥能力及微生物活性,促进作物产量与品质的提升<sup>[3]</sup>。因此,堆肥腐殖质类物质一直是评价堆肥有机物料腐熟度的重要指标,也是影响有机肥农用效果的重要因素<sup>[4]</sup>。现代“草-羊-田”农牧循环生产技术模式是江苏南部经济发达地区生态循环农业发展的一项最新研究成果,在这一技术模式中,养殖废弃物(羊粪)的堆肥化处置是实现物质链、技术链、价值链“三链融合”的重要环节,羊粪堆肥的稳定化与腐殖化程度是“草-羊-田”农牧循环模式可持续发展的关键环节,影响该技术模式的应用前景。

生物质炭是以农业废弃有机物为原料在高温厌氧条件下制取的黑色固态物质,拥有巨大的比表面积、多孔结构及官能团等,具有高度热稳定性和很强吸附能力<sup>[5]</sup>。将生物质炭作为辅助材料应用于堆肥工程,已取得了一定的研究进展,相关研究表明生物质炭在堆肥过程中能够促进堆温快速上升<sup>[6]</sup>、延长高温期<sup>[7]</sup>、减少氮素损失<sup>[8-9]</sup>、增加微生物数量及多样性<sup>[10]</sup>。围绕生物质炭添加对堆肥过程中腐殖质形成、形态与品质的影响,学者也开展了少量研究。孙文彬<sup>[11]</sup>的研究表明城市污泥堆肥过程中添加生物质炭会降低堆肥腐殖质含量,提高腐植酸中胡敏酸的百分含量。屠巧萍<sup>[12]</sup>研究发现猪粪堆肥中添加生物质炭可以显著提高堆肥结束后堆体中腐殖质总量。由于热解温度不同,生物质炭会形成不同的理化特征<sup>[13-14]</sup>,如热解温度的增加会导致生物质炭的孔隙结构更发达、比表面积增大、表面官能团数量减少、芳香度和疏水性增强等<sup>[15-16]</sup>,从而影响其堆肥腐熟进程和效应,而有关不同热解温度生物质炭对羊粪与菌

渣高温好氧堆肥过程腐殖质含量与组成变化的影响研究鲜见报道。为此,本研究采用模拟堆肥的方法,在羊粪、食用菌渣混合堆肥体中添加不同热解温度制备的生物质炭,探讨不同热解温度生物质炭对堆肥腐殖质含量、形态变化及腐殖化程度的影响,为堆肥工程中应用生物质炭提高堆肥质量提供技术支撑与理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

供试的堆肥材料主要为羊粪、食用菌渣、稻壳及2种不同热解温度制备的稻壳生物质炭。羊粪由太仓市城厢镇东林生态羊场提供,有机碳含量为 $362.10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,全氮含量为 $21.82\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,碳氮比(C/N)为16.6,含水率为74.5%,pH值为7.50。食用菌渣由太仓市城厢镇食用菌生产基地提供,有机碳含量为 $516.20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,全氮含量为 $9.80\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,C/N为51.6,含水率为12.6%,pH值为7.20。稻壳由太仓市城厢镇东林村生态米厂提供,有机碳含量为 $453.0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,全氮含量为 $8.90\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,C/N为50.8,含水率为4.1%,pH值为8.70。2种不同热解温度制备的生物质炭购自天津亚德尔生物质科技股份有限公司,生产方法具体为:以稻壳为原料,厌氧条件下,热裂解炭化温度分别为 $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,保持10 h,先自然冷却,再过 $0.38\text{ mm}$ 孔径筛。 $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 热解的生物质炭有机碳含量为 $562.0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,全氮含量为 $8.30\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,C/N为67.7,含水率为4.1%,pH值为8.70,阳离子交换量为 $12.5\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,比表面积为 $39.2\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ ;  $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ 热解的生物质炭有机碳含量为 $485.0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全氮含量为 $6.20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,C/N为78.2,含水率为3.0%,pH值为9.40,阳离子交换量为 $9.40\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,比表面积为 $53.5\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ 。

### 1.2 试验装置

试验在堆肥模拟反应器内进行,堆肥装置为立方

体箱,容积 $0.512\text{ m}^3$ (长、宽、高均为 $0.8\text{ m}$ ),采用厚度为 $2\text{ cm}$ 的PVC板焊拼而成;底部有4个高度为 $25\text{ cm}$ 的滚动轮,箱底留有圆形通气孔(直径 $2\text{ cm}$ ),通气孔总面积占箱底面积的 $1/3$ ;箱壁采用厚度为 $15\text{ mm}$ 的海绵覆盖并用铝箔胶带固定。

### 1.3 试验设计及操作方法

堆肥试验采用静态堆制、高温好氧发酵的方法,于2019年7—9月在太仓市城厢镇东林村生态肥料厂进行。试验共设3个处理,先按肥料企业常规操作方式准备初级混合物料,即将羊粪与食用菌渣按鲜质量比 $9:1$ 混合均匀,再分别取初级物料,参照课题组前期研究<sup>[7]</sup>,添加经 $450$ 、 $650\text{ }^\circ\text{C}$ 热解温度制备的生物质炭(占初级物料干质量百分比 $15\%$ ),分别记为BC450、BC650处理;在初级物料中添加未炭化的稻壳(与BC450、BC650处理的生物质炭同等体积),记为CK处理。具备操作方法:先将 $1\ 620\text{ kg}$ 羊粪与 $180\text{ kg}$ 食用菌渣充分混合,形成堆肥初级混合物料 $1\ 800\text{ kg}$ ,再均分为3份,每个处理的堆肥物料先集中混合,其中第1、2份分别添加经 $450$ 、 $650\text{ }^\circ\text{C}$ 热解温度制备的生物质炭 $31.5\text{ kg}$ ,第3份添加与第1、2份生物质炭同等体积的稻壳(约 $23\text{ kg}$ ),控制每个处理的堆肥体含水率为 $65\%\sim 70\%$ ,之后每个处理的混合物料分别等量装入3个堆肥模拟反应器内,即3次重复,并记录质量。当堆体温度超过 $75\text{ }^\circ\text{C}$ 时或每隔 $5\sim 7\text{ d}$ 翻堆1次,翻堆采用人工作业方式,先将箱内物料全部取出,充分混合后再次装箱;堆肥过程不再调节堆肥体含水率,直至堆肥结束。每次翻堆均记录各个处理堆肥物料的质量。堆肥试验共计 $43\text{ d}$ 。

### 1.4 取样及测定方法

(1)堆温:每日 $9:00\text{—}10:00$ 或 $16:00\text{—}17:00$ ,采用长度为 $60\text{ cm}$ 的水银温度计测定堆肥体 $30\sim 40\text{ cm}$ 深度的温度,同时记录环境温度,直至堆肥结束。

(2)腐殖质含量及其组成:分别于堆肥第1、9、21、30、43天,均匀地从堆体内部多点采集样品,混合均匀,阴凉处自然风干、粉碎,用于测定总有机碳、水溶性有机物、可提取腐植酸、富里酸、胡敏酸、胡敏素含量等。堆肥腐殖质的提取和分组测定方法:称取 $2.0\text{ g}$ 过 $60$ 目筛的堆肥样品于 $100\text{ mL}$ 离心管中,加 $15\text{ mL}$ 去离子水,于恒温( $70\text{ }^\circ\text{C}\pm 2\text{ }^\circ\text{C}$ )振荡器内振荡浸提 $1\text{ h}$ ,之后以 $4\ 800\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 $10\text{ min}$ ,得到的上清液为水溶性有机物,沉淀为水难溶性物质;将上清液转移至 $50\text{ mL}$ 容量瓶定容,待测;向装有水难溶性沉淀物质的离心管中继续加入 $15\text{ mL}$ 焦磷酸钠与氢氧化

钠混合提取液( $0.1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NaOH}+0.1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ Na}_2\text{P}_2\text{O}_7$ ,体积比为 $1:1$ ),恒温振荡浸提 $1\text{ h}$ ,之后以 $4\ 800\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 $10\text{ min}$ ,所得上清液为可提取腐植酸,将上清液转移至 $100\text{ mL}$ 容量瓶;离心管内沉淀物质继续加入 $15\text{ mL}$ 焦磷酸钠与氢氧化钠混合提取液,可提取腐植酸浸提连续操作3次,离心取得的上清液即为可提取腐植酸,将其全部转移至 $100\text{ mL}$ 容量瓶定容,待测;最后离心管内沉淀部分为胡敏素;取可提取腐植酸溶液 $20\text{ mL}$ 至 $50\text{ mL}$ 离心管内,滴加 $0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的盐酸溶液调节 $\text{pH}$ 值为 $1.0\sim 1.5$ ,先促进胡敏酸絮状沉淀,再在 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 恒温保温 $1\text{ h}$ ,取出静置 $10\text{ h}$ 以上,生成胡敏酸沉淀,之后进行离心分离,上清液为富里酸,转移至 $50\text{ mL}$ 容量瓶定容,待测。堆肥样品总有机碳含量及上述浸提与分离的水溶性有机物、可提取腐植酸、富里酸含量均以碳含量计,分析测定采用JENA multi 3100 TOC测定仪完成。

(3)种子发芽指数:称取堆肥第43天的新鲜样品 $40\text{ g}$ 于 $1\text{ L}$ 容积的浸提瓶中,加入 $400\text{ mL}$ 去离子水,之后以 $150\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 速度振荡浸提 $30\text{ min}$ ,最后以 $4\ 000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 $10\text{ min}$ 并收集上清液;将大小适宜的滤纸放入干净无菌的培养皿(直径 $9\text{ cm}$ )中,吸取 $8\text{ mL}$ 堆肥第43天的浸提液于培养皿中,滤纸上整齐排放小白菜种子 $20$ 粒,并在 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 、黑暗条件下培养 $72\text{ h}$ ,测量小白菜种子的根长和发芽率,同时用去离子水作空白对照。

### 1.5 计算方法

$$\text{胡敏酸}(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})=\text{可提取腐植酸含量}-\text{富里酸含量} \quad (1)$$

$$\text{胡敏素}(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})=\text{总有机碳含量}-\text{水溶性有机物含量}-\text{可提取腐植酸含量} \quad (2)$$

$$\text{腐殖化率}(\%)=\text{可提取腐植酸含量}/\text{总有机碳含量}\times 100 \quad (3)$$

$$\text{腐殖化指数}(\%)=\text{胡敏酸含量}/\text{总有机碳含量}\times 100 \quad (4)$$

$$\text{胡富比}=\text{胡敏酸含量}/\text{富里酸含量} \quad (5)$$

$$\text{种子发芽指数}(\%)=(\text{浸提液处理的种子发芽率}\times \text{根长})/(\text{对照处理的种子发芽率}\times \text{根长})\times 100 \quad (6)$$

### 1.6 数据处理

试验数据整理、制图采用Microsoft Excel 2010完成,采用SPSS 20.0进行统计分析,以生物质炭类型为因子进行单因素方差分析[One-way ANOVA, Dunnett's t-test (2-sided)],利用多重比较(Duncan法)对处理组间的均值进行差异显著性检验。采用腐

殖化率、腐殖化指数、胡富比评价堆肥腐植酸品质。

## 2 结果与分析

### 2.1 添加生物质炭对堆肥腐解质量的影响

温度是表征堆肥中微生物活性、有机物料降解效果及是否符合无害化要求的一个重要过程参数。图1A为添加生物质炭条件下堆肥体的温度动态变化特征。堆肥1~7 d,添加生物质炭处理的堆温明显高于CK处理,BC650处理的堆温上升最为迅速,在第3天就进入高温分解阶段( $>55\text{ }^{\circ}\text{C}$ );堆肥8~14 d,3个处理的堆温均快速上升,但CK处理的堆温仍然低于 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;堆肥15~28 d,CK处理的堆温高于添加生物质炭处理,BC450、BC650处理的堆温相近,呈逐渐下降趋势;堆肥29~43 d,堆温均呈下降趋势,进入后熟期,堆温表现为 $\text{CK}>\text{BC450}>\text{BC650}$ 。整个堆肥过程中,3个处理的堆肥温度均达 $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 并保持了20 d以上,满足堆肥物料无害化的标准要求。

种子发芽指数是判断堆肥产品腐熟质量最敏感、有效的指标,随着堆肥中有毒物质的降解,种子发芽指数逐渐升高,种子发芽指数大于50%的堆肥产品被认为基本无毒害,种子发芽指数大于80%的堆肥产品达到完全腐熟。由图1B可知,CK、BC450、BC650处理的种子发芽指数分别为96.71%、100.39%、106.23%,添加生物质炭处理略高于CK处理,但差异不显著( $P>0.05$ ),3个处理均符合堆肥无害化及腐熟的标准要求。

### 2.2 添加生物质炭对堆肥总有机碳、水溶性有机物含量的影响

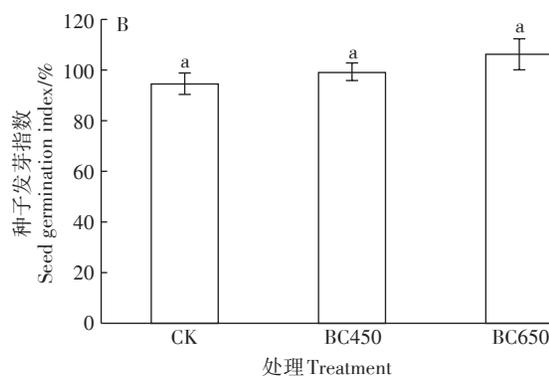
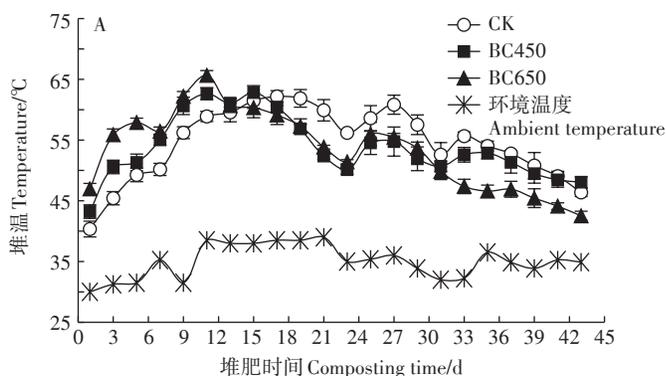
在堆肥过程中微生物利用有机碳进行新陈代谢

和矿化,含碳物质大部分以二氧化碳和易挥发有机酸等形式排放,剩余的部分用于微生物细胞质的合成。图2A为羊粪与生物质炭混合堆肥过程中总有机碳含量的动态变化曲线,总有机碳含量随着堆肥的进行呈下降的趋势,添加生物质炭的BC450、BC650处理堆肥体总有机碳含量高于CK处理,BC650处理的总有机碳含量高于BC450处理;堆肥43 d后,BC450、BC650处理的总有机碳含量较CK处理分别提高了8.87%、19.41%,统计分析结果表明,BC650处理的总有机碳含量显著高于CK处理( $P<0.05$ ),但BC450、BC650处理之间差异未达显著水平( $P>0.05$ )。

水溶性有机物是堆肥腐熟制品中最活跃、最有效的组分,易被微生物分解及植物吸收利用。堆肥过程中水溶性有机物含量的动态变化见图2B。在整个堆肥过程中,CK处理的堆肥体水溶性有机物含量高于添加生物质炭的BC450、BC650处理,其中CK处理的水溶性有机物含量呈先上升后下降的趋势,而BC450、BC650处理的水溶性有机物无明显上升趋势,保持平缓趋势后再下降,3个处理的水溶性有机物在堆肥后期均快速下降。堆肥过程中BC450、BC650处理之间差异较小,呈相同的变化规律。堆肥43 d后,BC450、BC650处理的水溶性有机物含量较CK处理分别降低了24.0%、26.96%,三者差异不显著( $P>0.05$ )。

### 2.3 添加生物质炭对堆肥可提取腐植酸及胡敏素含量的影响

可提取腐植酸是有机物料在微生物、酶的共同作用下形成的特殊的高分子化合物。图3A为堆肥过程中可提取腐植酸含量动态,可提取腐植酸含量随着堆肥时间的增加呈先上升后平缓下降的趋势,堆肥体可



不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。下同

The different lowercase letters indicate significant differences among treatments ( $P<0.05$ ). The same below

图1 堆肥过程中温度动态变化(A)和堆肥结束后种子发芽指数(B)

Figure 1 Dynamic changes of temperature(A) during composting and seed germination index(B) after composting

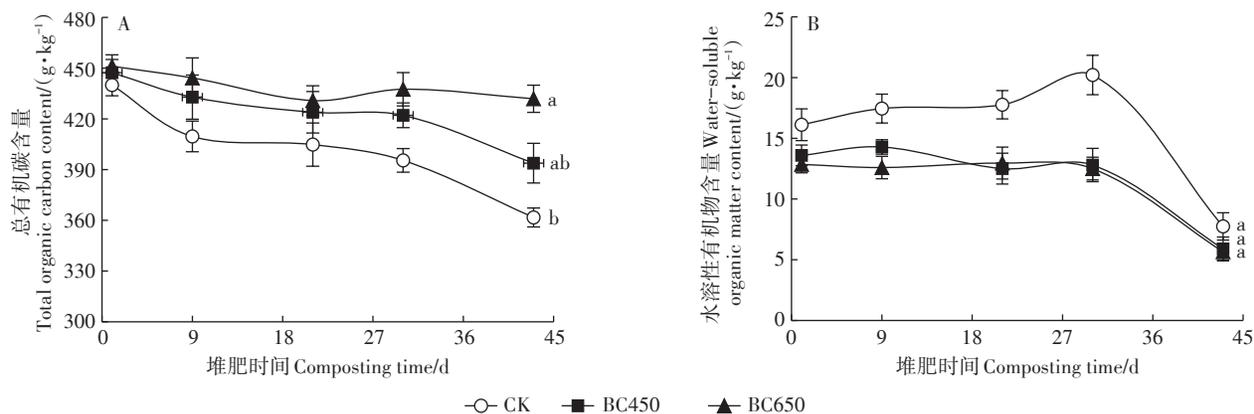


图2 堆肥过程中总有机碳(A)和水溶性有机物(B)含量变化

Figure 2 Changes of total organic carbon(A) and water-soluble organic matter contents(B) during composting

提取腐植酸含量在堆肥中期达最大值,其中CK处理的可提取腐植酸在堆肥后期仍有上升的趋势。CK处理的可提取腐植酸含量最高,BC450处理其次,BC650处理最低。堆肥43 d后,BC450、BC650处理的可提取腐植酸含量较CK处理分别显著降低了29.32%、42.37% ( $P < 0.05$ ),而BC450、BC650处理之间差异不显著 ( $P > 0.05$ )。

胡敏素是与矿物质紧密结合的腐殖物质,具有大分子结构,呈现不均匀性和惰性。图3B为堆肥过程中胡敏素含量动态变化曲线,CK处理的胡敏素含量随堆肥时间的增加呈明显的下降趋势,且堆肥初期和后期降幅较堆肥中期更加明显。添加生物质炭的BC450、BC650处理的胡敏素含量总体呈下降的趋势,但BC650处理在堆肥后期有略微增加的趋势。添加生物质炭的BC450、BC650处理的胡敏素含量高于CK处理,且BC650处理与CK处理差异显著 ( $P < 0.05$ ),但与BC450处理差异不显著 ( $P > 0.05$ )。

## 2.4 添加生物质炭对堆肥可提取腐植酸组成变化的影响

### 2.4.1 富里酸含量变化

富里酸是可提取腐植酸中分子量较小、活性较大、氧化程度较高的组分。图4A为堆肥过程中堆肥体富里酸含量的动态变化曲线,随着堆肥时间的增加,堆肥体富里酸含量呈下降的趋势,CK处理的富里酸含量显著高于添加生物质炭的BC450、BC650处理 ( $P < 0.05$ ),但BC450处理与BC650处理差异不显著 ( $P > 0.05$ )。堆肥43 d后,BC450、BC650处理的富里酸含量较CK处理分别降低38.05%、46.77%。

### 2.4.2 胡敏酸含量变化

胡敏酸是可提取腐植酸中分子量较大的组分,比较稳定,对土壤养分保持及土壤结构形成具有重要意义。图4B显示,在整个堆肥过程中胡敏酸含量总体呈增加的趋势,CK处理的胡敏酸含量随着堆肥时间的增加持续上升,在堆肥中期上升的幅度较平缓,而

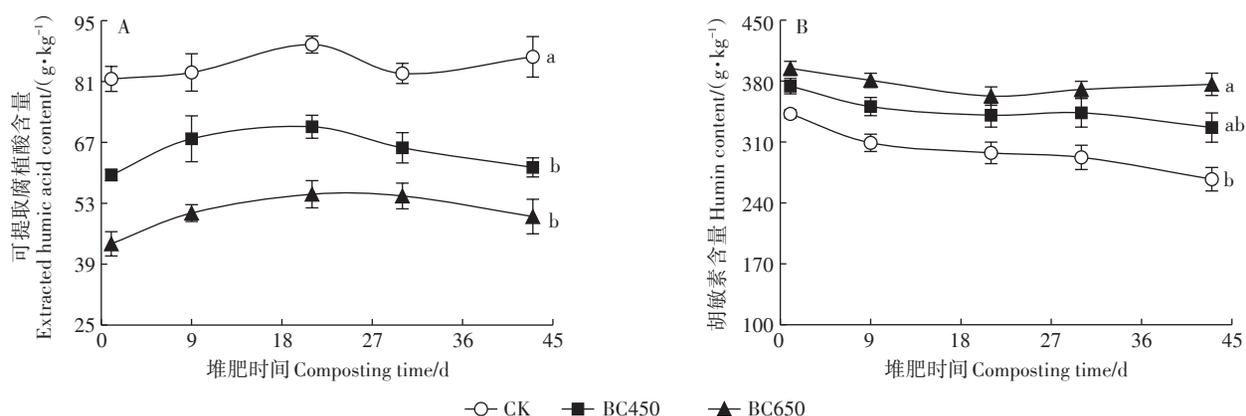


图3 堆肥过程中可提取腐植酸(A)和胡敏素(B)含量变化

Figure 3 Changes of extracted humic acid(A) and humin contents(B) during composting

BC450、BC650处理的胡敏酸含量在堆肥前期持续升高,在堆肥中期达到最大值,之后呈下降趋势,但下降的幅度较小。不同处理之间,CK处理的胡敏酸含量最高,BC450处理次之,BC650处理最低,堆肥中添加生物质炭降低了堆肥体的胡敏酸含量,且生物质炭热解温度越高,堆肥体的胡敏酸含量越低。堆肥43 d后,BC450、BC650处理的胡敏酸含量较CK处理分别显著降低 26.28%、40.83% ( $P<0.05$ ),但 BC450 和 BC650 处理间差异不显著 ( $P>0.05$ )。

2.5 添加生物质炭对堆肥腐殖化率、腐殖化指数、胡富比、胡敏酸百分比的影响

堆肥腐殖化率即可提取腐植酸占总有机碳的百分比。由图 5A 可以看出,3 个处理的腐殖化率变化具有明显差异,随着堆肥时间的增加,CK 处理的腐殖化率呈上升的趋势,在堆肥 30 d 时有小幅的降低,但之后又迅速上升。添加生物质炭后,堆肥体的腐殖化率呈先上升后下降的趋势,在堆肥前期上升较快,而堆肥后期下降较平缓。CK 处理的腐殖化率大于

BC450、BC650 处理,且 BC450 处理的腐殖化率在整个堆肥过程中均大于 BC650 处理,堆肥结束后,CK、BC450、BC650 处理的腐殖化率分别为 23.97%、15.56%、11.59%,可见添加生物质炭降低了堆肥体的腐殖化率,添加 650℃ 热解生物质炭处理的堆肥体腐殖化率低于 450℃ 热解生物质炭处理,但差异不显著 ( $P>0.05$ )。

腐殖化指数是堆肥过程中胡敏酸占总有机碳的百分比。腐殖化指数随着堆肥的进行呈上升趋势(图 5B),这主要是由于随着易降解有机物的不断分解,相对稳定的胡敏酸组分占堆肥有机碳的比例不断上升。各处理腐殖化指数表现为 CK>BC450>BC650,堆肥 43 d 后,CK、BC450、BC650 处理的腐殖化指数分别是堆肥起始值的 1.51、1.54、1.63 倍,说明添加生物质炭有利于增加堆肥产物结构的复杂程度,提高堆肥质量。

胡富比即胡敏酸与富里酸含量的比值。由图 6 可知,在堆肥初始阶段,不同处理之间的胡富比无明显

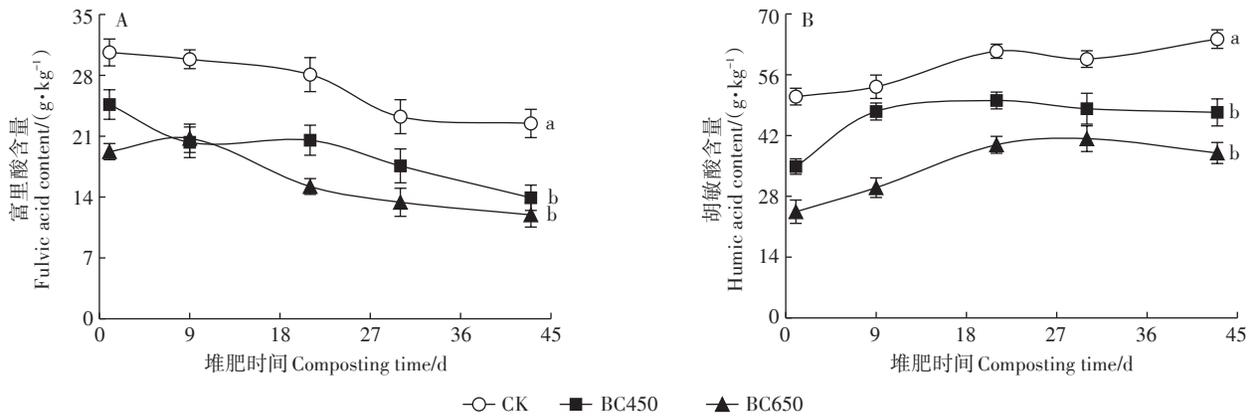


图4 堆肥过程中富里酸(A)和胡敏酸(B)含量变化

Figure 4 Changes of fulvic acid(A) and humic acid contents(B) during composting

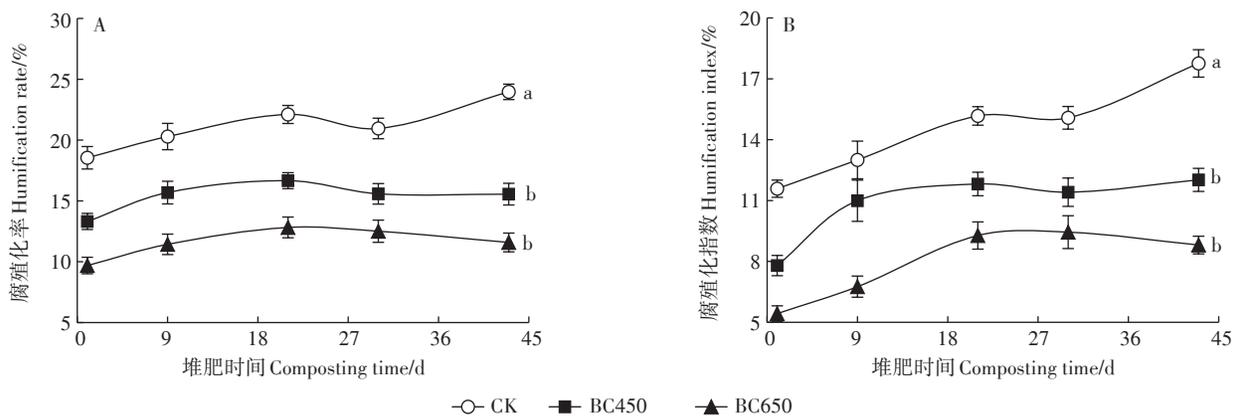


图5 堆肥过程中腐殖化率(A)和腐殖化指数(B)变化

Figure 5 Changes of humification rate(A) and humification index(B) during composting

显差异,中后期则表现为添加生物质炭处理的堆肥体胡富比大于对照处理,但3个处理之间的胡富比差异不显著( $P>0.05$ )。堆肥结束后CK、BC450和BC650处理的胡富比分别为2.86、3.41和3.19,一般认为堆肥胡富比 $>1.7$ 时堆肥完全腐熟,因此,3个堆肥处理均符合堆肥完全腐熟的要求,并且添加生物质炭促进了胡敏酸的合成及堆肥的腐熟。

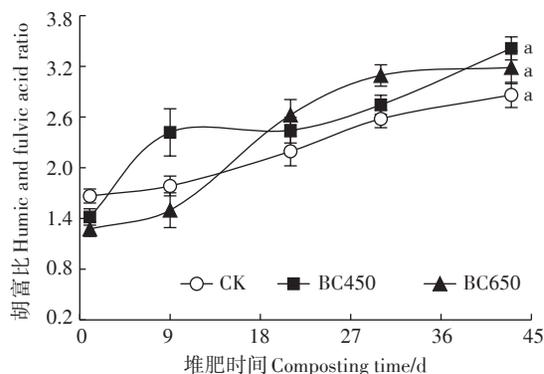


图6 堆肥过程中胡富比变化

Figure 6 Changes of humic and fulvic acid ratio during composting

### 3 讨论

本研究结果表明,随着堆肥时间的增加,堆肥体总有机碳含量呈下降的趋势,主要是由于堆肥过程中微生物的新陈代谢和细胞物质的合成需要大量的营养元素,堆肥物料中的碳素物质在微生物新陈代谢过程中提供能源和碳源,部分碳转化成二氧化碳被消耗掉,从而逐渐降低了堆肥体的总有机碳含量<sup>[17]</sup>。堆肥过程中添加生物质炭处理的总有机碳含量高于CK处理,且BC650处理的总有机碳含量高于BC450处理,主要是由于有机物料经高温厌氧处理后,显著降低物料中易被降解利用的有机碳含量,特别是在650℃条件下生物质炭热解更充分、芳香化程度更高,其不易被降解利用的有机碳含量高于450℃条件下热解的生物质炭,从而提高了堆肥体的总有机碳含量<sup>[16]</sup>。另外,堆肥过程中水溶性有机物主要为能溶于水的有机组分,包括可溶性糖、有机酸等,具有移动快、易氧化分解与矿化的特点<sup>[17-18]</sup>,生物质炭经热解处理后,一方面水溶性有机物被迅速炭化分解<sup>[19]</sup>,其含量本身就很低或几乎没有,另一方面生物质炭具有丰富的比表面积及孔隙结构,在堆肥体中对水溶性有机物具有吸附固定作用<sup>[20]</sup>,不易被水浸提出来,从而导致生物质炭处理的堆肥体水溶性有机物含量检测值明显低于

CK处理,而不同热解温度生物质炭处理之间无显著差异,主要是因为本试验生物质炭添加量相同,且2种类型的生物质炭中易被浸提利用的水溶性有机物含量均较低,所以对堆肥物料中的水溶性有机物吸附能力相当<sup>[21]</sup>。

根据在焦磷酸钠与氢氧化钠混合液中的溶解性,腐殖质分为可提取的腐植酸和不可提取的胡敏素,其中再根据腐植酸在酸碱溶液中的溶解度,分为富里酸和胡敏酸<sup>[22]</sup>。本试验结果表明,羊粪与食用菌渣混合堆肥过程中,添加生物质炭处理的可提取腐植酸、富里酸、胡敏酸含量均显著低于CK处理( $P<0.05$ )。这与孙文彬<sup>[11]</sup>将550℃制取的生物质炭应用于城市污泥堆肥过程中得到的腐植酸含量的结果一致,该研究认为堆肥过程中添加生物质炭会因“稀释作用”而降低堆肥体中腐植酸含量。另外,本研究还发现添加650℃热解生物质炭处理的可提取腐植酸、富里酸、胡敏酸含量均低于添加450℃热解的生物质炭处理。一般认为堆肥中的腐植酸一部分来源于堆肥物料,另一部分来源于堆肥体中原有腐植酸<sup>[23]</sup>。许多学者认为堆肥过程中生物质炭对堆肥腐殖化进程的促进,主要归因于生物质炭与堆肥有机碳的交互作用<sup>[10]</sup>以及生物质炭对微生物活动的影响<sup>[24]</sup>,但也有研究表明堆肥的腐殖化过程与矿质化分解过程同时存在,共同影响堆肥中腐植酸的含量<sup>[19]</sup>。堆肥腐植酸形成过程需要堆肥体提供生成腐植酸的前体物质,如脂肪族碳等物质<sup>[23]</sup>,但是这类物质极易在高温厌氧条件裂解,并且当热解温度 $\leq 400$ ℃时,生物质炭中残留有机质较多、脂肪族碳含量相对较高<sup>[25]</sup>,而本试验中2种生物质炭的热解温度分别为450、650℃,其芳香化结构和致密性加强,且孔隙结构更发达、比表面积更大<sup>[16,20]</sup>,不仅不能为堆肥体的腐殖化形成提供前体物质,反而因吸附作用固定腐植酸,从而导致可浸提的腐植酸、富里酸、胡敏酸含量降低。因此,项目组在下一步的研究中需增设低于400℃热解的生物质炭处理,解析堆肥中可提取腐植酸及其组分对生物质炭热解温度的响应机制。

堆肥腐殖化率、腐殖化指数是评价堆肥腐殖化程度的直观性指标,腐殖化率、腐殖化指数越高说明堆肥产品质量越好<sup>[19]</sup>。本试验结果表明BC450、BC650处理的堆肥腐殖化率、腐殖化指数低于CK处理,并且BC650处理的堆肥腐殖化率、腐殖化指数低于BC450处理,综合图3、图4结果可见,羊粪与食用菌渣混合堆肥过程中,添加生物质炭提高了堆肥体总有机碳含

量、降低了可提取腐植酸与胡敏酸含量,则必然导致堆肥腐殖化率、腐殖化指数的降低。另外,堆肥过程中富里酸分子量较小、结构简单、容易被微生物分解,随着有机物料的分解,部分富里酸也被分解,同时生成结构复杂的胡敏酸<sup>[25]</sup>。胡敏酸是腐植酸中分子量、稳定性高的物质,且含有多种功能基团,如羧基、酚羟基等对土壤修复有益的物质<sup>[3]</sup>。胡富比是评价堆肥腐殖化品质和稳定性的常用指标<sup>[19]</sup>,本试验结果表明,在堆肥中后期,BC450、BC650处理堆肥体的胡富比大于CK处理,与屠巧萍<sup>[12]</sup>、闫金龙等<sup>[26]</sup>研究结果一致,说明添加生物质炭可以提高堆肥中腐植酸的稳定性。另外,堆肥结束后BC450处理的胡富比大于BC650处理,说明生物质炭热解温度的提高并不利于提升堆肥物料腐殖化的品质和稳定性。

#### 4 结论

(1)羊粪与食用菌渣混合堆肥中,添加生物质炭促进了第1~14天堆肥温度的快速上升,缩短了堆温达55℃的升温时间,提高了种子发芽指数,满足羊粪堆肥无害化及腐熟的标准要求,其中添加650℃热解的生物质炭对堆肥腐熟的促进作用优于450℃热解的生物质炭。

(2)添加生物质炭降低了堆肥体的水溶性有机物、可提取腐植酸、富里酸、胡敏酸含量以及腐殖化率和腐殖化指数,提高了总有机碳、胡敏素含量以及胡富比。堆肥43 d后,添加450℃热解生物质炭的处理中可提取腐植酸及其组分含量、腐殖化程度均高于添加650℃热解生物质炭的处理。

(3)添加生物质炭促进了堆肥的腐解,虽没有提高腐植酸及其组分的绝对含量,但提升了腐植酸的稳定性,且添加450℃热解生物质炭处理的堆肥腐殖化程度优于添加650℃热解生物质炭处理。

#### 参考文献:

[1] JIANG J S, HUANG Y M, LIU X L, et al. The effects of apple pomace, bentonite and calcium superphosphate on swine manure aerobic composting[J]. *Waste Management*, 2014, 34(9): 1595-1602.

[2] KHAN N, CLARK I, SANCHEZ-MONEDERO M A, et al. Maturity indices in co-composting of chicken manure and sawdust with biochar[J]. *Bioresource Technology*, 2014, 168: 245-251.

[3] SHAN Y N, CHEN J H, WANG L, et al. Influences of adding easily degradable organic waste on the minimization and humification of organic matter during straw composting[J]. *Journal of Environmental Science and Health Part B*, 2013, 48(5): 384-392.

[4] 李洋, 席北斗, 赵越, 等. 不同物料堆肥腐熟度评价指标的变化特性

[J]. 环境科学研究, 2014, 27(6): 623-627. LI Y, XI B D, ZHAO Y, et al. Study of maturity parameter characteristics in composting process using different materials[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, 27(6): 623-627.

[5] 张阿凤, 潘根兴, 李恋卿. 生物黑炭及其增汇减排与改良土壤意义[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2459-2463. ZHANG A F, PAN G X, LI L Q. Biochar and the effect on C stock enhancement, mission reduction of greenhouse gases and soil reclamation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(1): 2459-2463.

[6] 王海候, 金梅娟, 徐军, 等. 生物质炭添加量对伊乐藻堆肥过程氮素损失的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(19): 234-240. WANG H H, JIN M J, XU J, et al. Effect of biochar addition amount on nitrogen loss during composting process of *Eloдея Nuttallii*[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(19): 234-240.

[7] 王海候, 何胥, 陶玥玥, 等. 添加不同粒径炭基辅料改善猪粪好氧堆肥质量的效果[J]. 农业工程学报, 2018, 34(9): 224-232. WANG H H, HE X, TAO Y Y, et al. Improving pig manure aerobic composting quality by using carbonaceous amendment with different particle sizes[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(9): 224-232.

[8] 刘宁, 周嘉良, 马双双, 等. 生物炭对鸡粪好氧堆肥主要氮素形态含量影响与保氮机制[J]. 农业机械学报, 2016, 47(12): 233-239. LIU N, ZHOU J L, MA S S, et al. Impacts of biochar on major forms contents and conservation mechanism of nitrogen during aerobic composting of chicken manure[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(12): 233-239.

[9] 王海候, 何胥, 陶玥玥, 等. 炭基辅料对羊粪好氧堆肥中氮素损失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(4): 928-936. WANG H H, HE X, TAO Y Y, et al. Effect of carbonaceous amendment on nitrogen loss during the aerobic composting of sheep manure[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(4): 928-936.

[10] 陈伟, 王燕, 廖新佛. 生物质炭在有机废弃物好氧堆肥中的应用研究进展[J]. 中国家禽, 2015, 37(19): 41-50. CHEN W, WANG Y, LIAO X D. Application of biochar in organic waste aerobic composting[J]. *China Poultry*, 2015, 37(19): 41-50.

[11] 孙文彬. 生物质炭对城市污泥好氧堆肥过程中碳素转化及堆肥品质的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2013. SUN W B. Effect of biochar on transformation of organic matter during sewage sludge composting and quality of compost[D]. Chongqing: Southwest University, 2013.

[12] 屠巧萍. 生物质炭添加对猪粪堆肥腐殖化的影响及机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014. TU Q P. Effects of biochar addition on humification of pig manure compost and its mechanism[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.

[13] 林婉婷, 夏建国, 肖欣娟, 等. 不同热解温度茶渣生物质炭对茶园土壤吸附解吸NH<sub>4</sub>-N的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(6): 326-332. LIN W P, XIA J G, XIAO X J, et al. Effect of NH<sub>4</sub>-N adsorption by tea residue biochar prepared at different pyrolysis temperature in tea plantation soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(6): 326-332.

[14] 王海候, 沈明星, 涂荣文, 等. 生物质炭对伊乐藻堆肥过程氮挥发

- 的作用效应研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(11):2266-2272. WANG H H, SHEN M X, TU R W, et al. Effects of biochar on ammonia volatilization during *Elodea nuttallii* composting[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(11):2266-2272.
- [15] 孙涛, 李典鹏, 闫翠侠, 等. 热解温度和时间对秸秆生物质炭特性的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(12):110-116. SUN T, LI D P, YAN C X, et al. Effect of different pyrolysis temperature and time on characteristics of straw-biochar[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2019, 33(12):110-116.
- [16] 王海候, 韩奇隆, 刘泽凯, 等. 不同热解温度生物质炭对羊粪堆肥过程氮素损失的减控效果[J]. 农业工程学报, 2020, 36(19):184-191. WANG H H, HAN Q L, LIU Z K, et al. Effects of biochar at different pyrolysis temperatures on reduction and control of nitrogen loss in sheep manure composting process[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(19):184-191.
- [17] 王玉军, 窦森, 张晋京, 等. 农业废弃物堆肥过程中腐殖质组成变化[J]. 东北林业大学学报, 2009(8):79-81. WANG Y J, DOU S, ZHANG J J, et al. Changes of humic components during agricultural waste composting[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2009(8):79-81.
- [18] 马怀良, 许修宏. 不同 C/N 对堆肥腐植酸的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2009(6):64-66. MA H L, XU X H. Effect of C/N on humus in composting[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2009(6):64-66.
- [19] 闫思佳, 胡建杭, 刘泽伟, 等. 温度和低氧条件对成型生物质炭孔结构影响的实验研究[J]. 化工进展, 2018, 37(8):3100-3106. YAN S J, HU J H, LIU Z W, et al. Experimental study on the effect of temperature and low oxygen conditions on pore structure of molding biochar[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2018, 37(8):3100-3106.
- [20] 徐路魏, 王旭东. 生物质炭对蔬菜废弃物堆肥化过程氮素转化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(6):1160-1166. XU L W, WANG X D. Effect of biochar on nitrogen transformation in vegetable wastes during composting[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(6):1160-1166.
- [21] 赵世翔, 于小玲, 李忠徽, 等. 不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响:对土壤腐殖物质组成及性质的影响[J]. 环境科学, 2017, 38(2):769-783. ZHAO S X, YU X L, LI Z H, et al. Effects of biochar pyrolyzed at varying temperatures on soil organic carbon and its components: Influence on the composition and properties of humic substances[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(2):769-783.
- [22] 姚武, 顾燕青, 巫阳, 等. 畜粪堆肥过程中腐殖质形成特征研究进展[J]. 杭州师范大学学报(自然科学版), 2014(5):517-522. YAO W, GU Y Q, WU Y, et al. On the formation characteristics of humic substances in livestock manure compost[J]. *Journal of Hangzhou Normal University(Natural Science Edition)*, 2014(5):517-522.
- [23] 李恕艳, 李吉进, 张邦喜, 等. 菌剂对鸡粪堆肥腐殖质含量品质的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(增刊2):268-274. LI S Y, LI J J, ZHANG B X, et al. Influence of inoculants on content and quality of humus during chicken manure composting[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(Suppl 2):268-274.
- [24] ZHANG L, SUN X Y. Changes in physical, chemical, and microbiological properties during the two-stage co-composting of green waste with spent mushroom compost and biochar[J]. *Bioresource Technology*, 2014, 171:274-284.
- [25] CHENG C H, LEHMANN J, THIES J E, et al. Oxidation of black carbon by biotic and abiotic processes[J]. *Organic Geochemistry*, 2006, 37(11):1477-1488.
- [26] 闫金龙, 江韬, 赵秀兰, 等. 含生物质炭城市污泥堆肥中溶解性有机质的光谱特征[J]. 中国环境科学, 2014, 34(2):459-465. YAN J L, JIANG T, ZHAO X L, et al. Spectral characteristics of dissolved organic matter in co-composting process of municipal sludge with biochar[J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(2):459-465.