

不同热解温度稻壳生物炭对羊粪堆肥腐熟度及温室气体排放的影响

王海候, 吕志伟, 金梅娟, 沈园, 陶玥玥, 周新伟, 施林林, 李茹, 陆长婴

引用本文:

王海候, 吕志伟, 金梅娟, 沈园, 陶玥玥, 周新伟, 施林林, 李茹, 陆长婴. 不同热解温度稻壳生物炭对羊粪堆肥腐熟度及温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(3): 696–703.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2023-0632>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

磷石膏和石膏对稻壳与油枯堆肥的影响及基质化利用评价

赵兵, 王宇蕴, 陈雪娇, 徐智

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2481–2488 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0558>

不同改良剂对旱地苹果园温室气体排放的影响

李钊, 刘帅, 丁艳宏, 孙文浩, 高晓东, 赵西宁

农业环境科学学报. 2021, 40(1): 227–236 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0846>

双氰胺和氢醌添加对堆肥温室气体排放的影响

杨燕, 尹子铭, 袁京, 罗一鸣, 李国学

农业环境科学学报. 2021, 40(11): 2439–2447 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0955>

不同磷石膏添加比例对稻壳与油枯堆肥过程的影响及基质化利用的评价

陈雪娇, 王宇蕴, 徐智, 赵乾旭

农业环境科学学报. 2018, 37(5): 1001–1008 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1463>

生物质炭对猪粪堆肥过程中氮素转化及温室气体排放的影响

付祥峰, 刘琪琪, 李恋卿, 潘根兴, 郑金伟, 张旭辉, 程琨

农业环境科学学报. 2017, 36(9): 1893–1900 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0182>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王海候, 吕志伟, 金梅娟, 等. 不同热解温度稻壳生物炭对羊粪堆肥腐熟度及温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(3): 696–703.

WANG H H, LÜ Z W, JIN M J, et al. Effects of rice husk biochar pyrolyzed at different temperatures on compost maturity and greenhouse gas emissions of sheep manure[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(3): 696–703.



开放科学 OSID

不同热解温度稻壳生物炭对羊粪堆肥腐熟度及温室气体排放的影响

王海候, 吕志伟, 金梅娟, 沈园, 陶玥玥, 周新伟, 施林林, 李茹, 陆长婴

(江苏太湖地区农业科学研究所/国家土壤质量相城观测实验站, 江苏 苏州 215100)

摘要: 为优化羊粪堆肥腐熟度与温室气体减排协同的技术工艺参数, 以2种不同热解温度制备的稻壳生物炭为堆肥辅料, 与羊粪、食用菌渣混合, 进行了43 d的堆肥试验。设置了3个处理, 羊粪与食用菌渣质量比9:1混合体作为预备物料, 在预备物料上分别添加450、650 °C热解的稻壳生物炭(占预备物料质量百分比15%)为BC450、BC650处理, 在预备物料上添加未热解炭化的稻壳(与稻壳生物炭同等体积)为CK处理。监测了堆肥温度、腐熟度指标($\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}$ 、EC值、种子发芽指数)、温室气体(CH_4 、 CO_2 、 N_2O)排放的变化动态, 分析了不同热解温度稻壳生物炭对堆肥腐熟度与温室气体减排的协同效果。结果表明: 添加450、650 °C热解的稻壳生物炭, 缩短了堆肥体 $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}$ 、T值、EC值及种子发芽指数达到腐熟度推荐值的所需时间, 与CK处理相比, BC450、BC650处理的腐熟周期分别缩短了15.0%、32.5%; 羊粪堆置43 d后, BC450、BC650处理的综合温室效应较CK处理分别显著降低了6.56%、24.36%, 且BC650处理综合温室效应比BC450处理显著降低了19.05% ($P<0.05$); 添加稻壳生物炭对羊粪堆肥腐熟度及温室气体减排具有协同促进作用, 建议优选650 °C制备的稻壳生物炭。

关键词: 生物炭; 热解温度; 羊粪; 堆肥; 腐熟度; 温室气体

中图分类号: X713; S141.4 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2024)03-0696-08 doi:10.11654/jaes.2023-0632

Effects of rice husk biochar pyrolyzed at different temperatures on compost maturity and greenhouse gas emissions of sheep manure

WANG Haihou, LÜ Zhiwei, JIN Meijuan, SHEN Yuan, TAO Yueyue, ZHOU Xinwei, SHI Linlin, LI Ru, LU Changying

(Taihu Research Institute of Agricultural Sciences/National Soil Quality Observation and Experimental Station in Xiangcheng, Suzhou 215100, China)

Abstract: In order to optimize the technical parameters of synergistic decomposition of sheep manure compost and greenhouse gas emission reduction, rice husk biochar pyrolyzed under two different temperatures were used as compost auxiliary material mixed with sheep manure and edible fungus residues. A 43-day compost experiment was conducted using three treatments. A mixture of sheep dung and edible fungus residues, with a mass ratio of 9:1, was used as the preparation material. This was treated with BC450 and BC650 by adding rice husk biochar pyrolyzed at 450 °C and 650 °C, respectively, accounting for 15% of the mass of the compost preparation material. Non-pyrolyzed rice husks with the same volume as rice husk biochar were added to the preparation material for CK treatment. The dynamics of compost temperature, maturation indexes ($\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}$, EC value, and seed germination index), and greenhouse gas emissions (CH_4 , CO_2 , and N_2O) were monitored, and the synergic effects of rice husk biochar pyrolyzed at different temperatures on compost maturation and greenhouse gas emission reduction were analyzed. The results showed that the addition of rice husk biochars pyrolyzed at 450 °C and

收稿日期: 2023-08-05 录用日期: 2023-12-12

作者简介: 王海候(1979—), 男, 江苏启东人, 硕士, 研究员, 从事农业有机废弃物无害化处理及循环利用研究。E-mail: wanghaihou@126.com

基金项目: 江苏省农业科技自主创新资金项目-江苏现代农业产业单项技术研发(CX(22)3126); 苏州市姑苏乡土人才培养计划科研项目(22037)

Project supported: Jiangsu Province Agricultural Science and Technology Independent Innovation Fund Project-Jiangsu Modern Agricultural Industry Single Technology Research and Development(CX(22)3126); Suzhou City Gusu Local Talent Training Plan Research Project(22037)

650 °C shortened the time required for $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}$, T value, EC, and seed germination index to reach the recommended values for mature compost. Compared with CK treatment, the decomposition cycles of BC450 and BC650 treatments were shorter by 15.0% and 32.5%, respectively. After sheep manure was stored for 43 days, the comprehensive greenhouse effects of BC450 and BC650 treatments were significantly decreased by 6.56% and 24.36%, respectively, compared with CK treatment. Furthermore, the comprehensive greenhouse effect of the BC650 treatment was significantly decreased by 19.05% compared with the BC450 treatment ($P<0.05$). The addition of rice husk biochar has a synergistic effect on the composting maturity of sheep manure and emission reduction of greenhouse gases. It is suggested that rice husk biochar prepared at 650 °C is more beneficial.

Keywords: biochar; pyrolysis temperature; sheep manure; compost; maturity; greenhouse gas

高温好氧堆肥是实现农业农村有机废弃物无害化、减量化、资源化处理最经济有效的技术方法之一^[1],但堆肥过程中微生物降解作用产生大量挥发性气体,如: CO_2 、 CH_4 、 N_2O 、 NH_3 等,导致碳氮养分损失严重^[2-3],不仅降低了堆肥产品的农用价值,还显著增加了全球温室效应^[4-7]。如何有效提高堆肥产品的稳定性和农用价值并减少肥料化过程的温室气体排放,对我国落实“碳达峰碳中和”战略、实现农业全产业链高质量发展具有十分重要的意义。

生物炭是生物质在高温及限氧条件下热解制取的一类高度芳香化的难熔性固态物质,因具有良好的物理及化学吸附性和稳定的多孔结构以及来源广泛、成本低廉、制备技术成熟等特点^[8-9],被作为添加剂广泛用于控制堆肥过程中的气体排放^[10-12]。杨佳等^[10]将玉米秸秆生物炭应用于羊粪微好氧堆肥并发现其既可加速羊粪腐熟进程,又能有效减少堆肥体的温室气体总排放量; Chowdhury 等^[11]在鸡粪与稻草堆肥中添加生物炭,发现总温室气体排放减少 27%~32%; 王义祥等^[12]将花生壳生物炭应用于猪粪堆肥,认为随着花生壳生物炭添加比例的增加(质量比 3%~9%),温室气体减排效应增大。上述已有研究主要报道了不同制备原料生物炭及其添加量对堆肥温室气体排放的影响及减排效果^[13-15],而有关不同热解温度制备的生物炭对堆肥腐熟度及温室气体排放的作用效果还缺乏深入研究,并且生物炭理化性质与其热解温度关系

十分密切^[16],提高生物炭热解温度会显著改变生物炭孔隙结构、增大比表面积、增加孔隙度等,进而增强生物炭的吸附能力^[17];另外,常规商品购买性生物炭的热解温度主要在 300~500 °C,若提高生物炭热解温度,是否可以提高生物炭在堆肥工程中促腐及固碳作用潜力^[18]? 为此,本研究采用模拟堆肥的方法,以 450、650 °C 热解的稻壳生物炭为供试材料,研究 2 种不同热解温度稻壳生物炭对羊粪堆肥的腐熟度及温室气体排放的影响,以期稻壳生物炭在农业农村有机废弃物肥料化工程中绿色高效化应用提供理论依据与技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

堆肥材料主要包括:羊粪、食用菌渣及辅料,其中辅料为试验不同处理分别添加的堆肥辅助性材料,主要为 2 种热解温度制备的稻壳生物炭、未热解炭化的稻壳。羊粪由太仓市城厢镇东林村生态羊场提供,食用菌渣从太仓市城厢镇当地食用菌公司购买,稻壳由太仓城厢镇东林村生态米厂提供,2 种不同热解温度制备的生物质炭制备方法为:以稻壳为原料,参考生物炭常规生产的炭化温度为 300~500 °C 左右,为获得不同理化性质的生物炭材料,设计热裂解炭化温度分别为 450、650 °C,厌氧条件下保持 10 h,自然冷却,0.38 mm 孔径过筛。堆肥原料基本性状见表 1。

表 1 堆肥原料基本性状

Table 1 Properties of composting materials

试验材料 Test material	含水率 Moisture content/%	pH 值 pH value	总氮 Total N content/%	总碳 Total C content/%	碳氮比 C/N ratio
羊粪	74.5±1.1	7.50±0.2	2.18±0.06	36.2±1.6	16.6±1.3
食用菌渣	41.9±0.7	6.90±0.1	0.98±0.05	50.6±0.8	51.6±0.9
稻壳	12.6±0.5	7.20±0.2	0.89±0.02	45.3±1.1	50.8±1.1
450 °C 热解的稻壳生物炭	4.1±0.2	8.70±0.1	0.83±0.05	56.2±0.5	67.7±1.5
650 °C 热解的稻壳生物炭	3.0±0.3	9.40±0.4	0.62±0.04	48.5±0.8	78.2±0.9

1.2 试验设计与堆肥方法

试验共设3个处理,首先准备预备混合物料,按肥料厂常规操作方式,将羊粪与食用菌渣按质量比9:1混合均匀,参照课题组前期研究^[18],在预备物料上添加450、650℃热解温度制备的稻壳生物炭(占预备物料质量百分比15%)为处理,分别用B450、B650表示;为保障堆肥试验各项条件的相对一致性,在预备物料上添加未经炭化处理的稻壳(添加量与B450、B650处理中稻壳生物炭同等体积)为对照,用CK表示。每个处理重复3次。

试验采用静态高温好氧发酵的方法,在堆肥模拟反应器内进行。堆肥反应器呈立方体箱形,箱体长、宽、高均为0.8 m,反应器底部有4个高度为25 cm的活动轮,底面均匀分布直径为2 cm的通气孔,通气孔总面积为底部面积的1/3。每个处理先将羊粪、食用菌渣、辅料按比例集中混合均匀,混合堆肥体质量600 kg、含水率65%~70%,再平均分为3份,分别装入3个堆肥模拟反应器内,即3次重复。当堆肥体温度 $\geq 70^\circ\text{C}$ 时或每隔7 d左右翻堆1次,人工翻堆时将物料全部取出,充分混合后再次装箱并记录每箱堆肥物料的质量,3个处理统一开展翻堆作业,整个堆肥过程翻堆4~5次;堆肥过程不调节堆肥体含水率,直至堆肥结束。堆肥时间共计43 d。

1.3 测定指标与分析方法

(1)堆肥温度与积温:堆肥反应器上中下位置布设3个测温点,深度30~40 cm,于每日9:00—10:00或16:00—17:00测定并记录堆肥温度,同步测定气温,直至结束并计算堆肥积温。以堆肥温度在 50°C 以上保持5~7 d或者 55°C 以上保持3 d作为堆肥卫生合格指标和堆肥腐熟条件的标准^[19],以堆肥积温达到 $10\,000^\circ\text{C}\cdot\text{h}$ 以上作为堆肥稳定化的要求^[20]。

(2) NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、TN、TC质量分数^[21]:于堆肥后第1、3、6、9、12、15、18、21、24、27、30、34、37、40、43天,每个堆肥体取混合样品2 kg,混合均匀并分为3份,一份用于堆肥样品的浸提处理、一份用于含水率测定、一份用于阴凉处风干处理。浸提处理先将鲜样与去离子水按1:10质量比混合,再以 $150\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 振荡浸提30 min,最后以 $4\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心10 min并收集上清液,采用电导率仪测定EC值,采用SKALA流动分析仪测定 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 质量分数,风干样品采用Element元素分析仪测定TC与TN质量分数。分别以 $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}$ 、 T 值(终点C/N与初始C/N的比值)作为堆肥腐熟度的评价标准, $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}$ 为0.16^[22]、 T 值为0.7^[23]

分别作为本试验羊粪堆肥腐熟推荐值。

(3)种子发芽指数^[10]: $GI=(\text{堆肥浸提液处理的种子发芽率}\times\text{根长})/(\text{对照种子发芽指数}\times\text{根长})\times 100\%$ 。以种子发芽指数达80%为堆肥完全腐熟推荐值^[22]。

(4) CH_4 、 CO_2 、 N_2O 排放速率^[24]及排放累积量^[7]:采用静态气体采集箱-气相色谱法测定。于堆肥后第1、3、6、9、12、15、18、21、24、27、30、34、37、40、43天,进行气体样品采集与测定,直至堆肥结束。每次采样于9:00—11:00,在堆肥反应器中物料表面上方中间位置,先安装气样采集箱底座(长25 cm×宽25 cm),之后盖上气体采集箱,水密封,分别于盖上采集箱后第0、5、10、15分钟在采气箱侧面2/3高度且居中位置,用针筒抽气100 mL,转移至100 mL铝箔气样袋,待分析。利用气相色谱仪(安捷伦7890 B)测定气样中 CH_4 、 CO_2 、 N_2O 浓度并计算3种气体的排放速率。 CH_4 、 CO_2 、 N_2O 排放累积量:将相邻2次的气体排放速率均值乘以相邻2次的天数,即某一时间段的气体排放累积量,再依次相加各时间段的气体排放累积量。

(5)温室气体排放当量^[25]:以 CO_2 作为参考气体,根据 CH_4 、 N_2O 在100 a尺度上相对 CO_2 的增温潜势: CO_2 为1, CH_4 为25, N_2O 为298,转换成 CO_2 的等效量,以 $\text{CO}_2\text{e}/\text{干物质质量}$ 计算, $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.4 数据处理与统计分析

采用SPSS 26.0分析软件进行方差分析[One-way ANOVA, Dunnett's t-test (2-sided)], LSD法检验处理组间的均值差异显著性。应用Excel 2021进行制图。

2 结果与分析

2.1 不同热解温度生物炭对羊粪堆肥高温累计时间与积温的影响

由表2可知,羊粪堆肥CK处理堆温初次达 55°C 的时间为8.33 d、BC450处理为6.67 d、BC650处理为3.66 d,CK处理堆温 55°C 以上的累计时间为31.00 d、BC450处理为15.33 d、BC650处理为21.33 d,3个处理的堆温均达到了卫生合格标准与腐熟条件要求,并且不同处理堆温初次达 55°C 时间及 55°C 以上累计时间的差异均达显著水平($P<0.05$)。另外,3个处理在堆制后7~15 d,堆肥积温已接近 $10\,000^\circ\text{C}\cdot\text{h}$,满足堆肥稳定化要求。

2.2 不同热解温度生物炭对堆肥腐熟指标变化的影响

2.2.1 对 $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}$ 与 T 值的影响

图1结果表明,CK处理的 $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}$ 比值在堆肥第37天达腐熟度推荐值0.16,BC450处理在堆肥第

表2 羊粪堆肥高温累计时间及各时间段堆肥积温变化

Table 2 Accumulation time of high temperature of sheep manure compost and the changes of accumulated temperature of compost in each period

处理 Treatment	初次达 55 ℃ 时间 Days heating up to 55 ℃ for the first time/d	≥55 ℃ 时间 Days of temperature higher than ≥55 ℃/d	堆肥积温 Accumulated temperature (×10 ⁴ ℃·h)				
			1~6 d	7~15 d	16~24 d	25~34 d	35~43 d
CK	8.33±0.58a	31.00±0.05a	0.44±0.02c	0.94±0.02c	1.07±0.01a	1.14±0.08a	0.87±0.01a
BC450	6.67±1.16b	15.33±2.52c	0.49±0.01b	0.98±0.01b	0.87±0.01b	0.90±0.03b	0.77±0.02b
BC650	3.66±0.58c	21.33±0.58b	0.57±0.01a	1.01±0.02a	0.89±0.02b	0.89±0.01b	0.66±0.02c

注:不同小写字母代表不同处理差异达0.05显著水平,Duncan法,下同。

Note: Different lowercase letters represent different treatment differences up to 0.05 significant level, Duncan method, the same below.

27天、BC650处理在堆肥第21天就达到了腐熟度推荐值(图1a);由图1b可知,CK、BC450、BC650处理的T值分别在堆肥第40、34、27天达到腐熟度推荐值0.7。

2.2.2 对EC值与种子发芽指数的影响

EC值越小,表示堆肥体越趋于腐熟与稳定。图2a结果表明,CK处理的EC值最高、BC450处理其次、BC650处理的EC值最小。由图2b可知,堆肥第21天,BC650处理的种子发芽指数已符合完全腐熟度推荐值80%,而BC450、CK处理尚低于80%,BC450、CK处理的种子发芽指数分别在堆肥第34、37天达到腐

熟度推荐值。

2.3 不同热解温度生物炭对堆肥过程温室气体排放的影响

2.3.1 对CH₄排放速率及排放累积量的影响

由图3a可知,羊粪堆肥过程中不同处理的CH₄排放速率在堆肥1~15 d差异较小,堆肥16~43 d,不同处理之间的CH₄排放速率由大到小依次为CK、BC450、BC650处理,从而表现为堆肥43 d后,3个处理的CH₄排放累积量由高到低依次为CK、BC450、BC650(图3b),且差异达显著水平($P<0.05$),与CK处理相比,

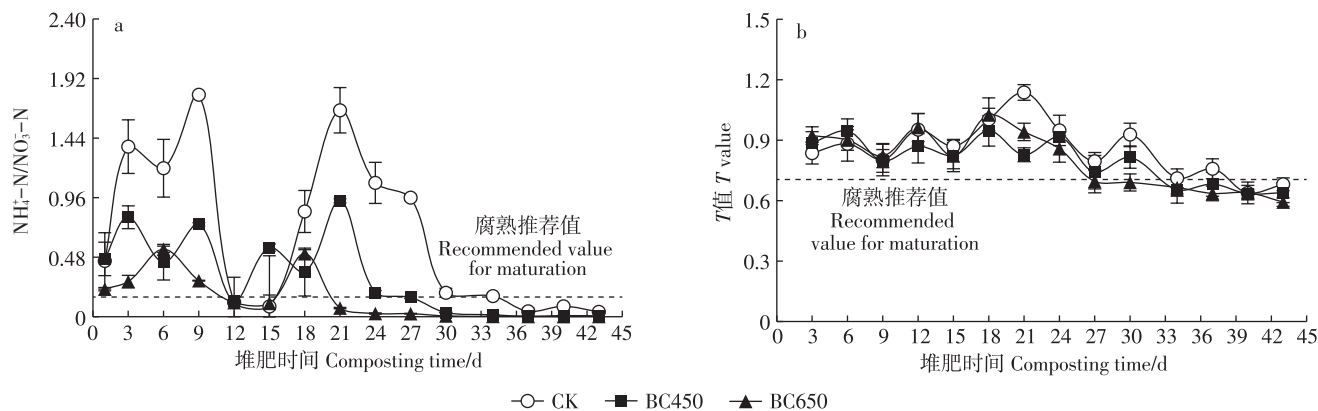
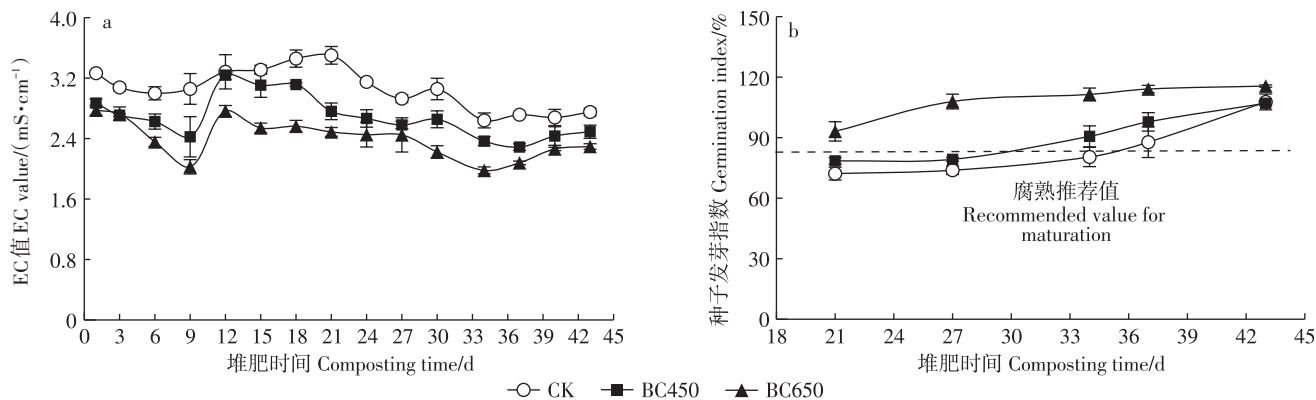
图1 羊粪堆肥的 $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{NO}_3^-\text{-N}$ (a)与T值(b)动态变化Figure 1 Dynamic changes of $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{NO}_3^-\text{-N}$ (a) and T values(b) in sheep manure compost

图2 羊粪堆肥的EC值(a)与种子发芽指数(b)动态变化

Figure 2 Dynamic changes of EC value(a) and seed germination index(b) of sheep manure compost

BC450、BC650 处理的 CH_4 排放累积量分别降低了 23.35%、59.11%。

2.3.2 对 CO_2 排放速率及排放累积量的影响

图 4a 结果表明, 3 个处理在堆肥 1~15 d, CO_2 排放速率由大到小依次为 BC650、BC450、CK 处理, 在堆肥 16~43 d, CO_2 排放速率由大到小依次为 CK、BC450、BC650。由图 4b 可知, 堆肥 43 d 后, BC450 与 BC650 处理的 CO_2 排放累积量显著小于 CK 处理 ($P<0.05$), 但 BC450、BC650 处理之间无显著差异, 与 CK 处理相比, BC450、BC650 处理 CO_2 排放累积量分别显著降低了 17.41%、27.99% ($P<0.05$)。

2.3.3 对 N_2O 排放速率及排放累积量的影响

羊粪堆肥过程中 N_2O 排放速率动态变化特征见图 5a, 综合整个堆肥过程的 N_2O 排放速率, 与 CK 处理相比, 添加生物炭处理提高了堆肥过程 N_2O 排放速率, 因此 BC450、BC650 处理的 N_2O 排放累积量大于 CK 处理 (图 5b); 堆肥 43 d 时, 3 个处理的 N_2O 排放累积量由高到低依次分别为: BC450、BC650、CK, 与 CK 处理相比, BC450、BC650 处理的 N_2O 排放累积量分别

提高了 89.38%、69.41%, BC450、BC650 处理之间差异不显著 ($P>0.05$)。

2.4 羊粪堆肥过程温室气体排放的综合温室效应及减排潜力分析

由表 3 可知, 与 CK 处理相比, BC450、BC650 处理的综合温室效应分别降低了 6.56%、24.36%, 不同处理之间差异达显著水平 ($P<0.05$); BC650 处理各温室气体排放等同 CO_2 当量均小于 BC450 处理, 其中 CH_4 、 CO_2 排放等同当量的差异性达显著水平 ($P<0.05$), 而 N_2O 排放等同当量的差异性不显著 ($P>0.05$)。3 个处理的 CO_2 排放对综合温室效应的贡献均表现为最大, CK 处理 CH_4 排放产生的温室效应占综合温室效应比例高于 N_2O , 而 BC450、BC650 处理 CH_4 排放产生的温室效应占比则低于 N_2O 。

进一步探讨堆肥过程温室气体减排潜力, 根据不同处理达到腐熟度标准所需时间周期及其对应的温室气体综合温室效应分析结果 (图 6), CK 处理第 40 d 的综合温室效应为 $34.90 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、BC450 处理第 34 d 的综合温室效应为 $29.65 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、BC650 处理

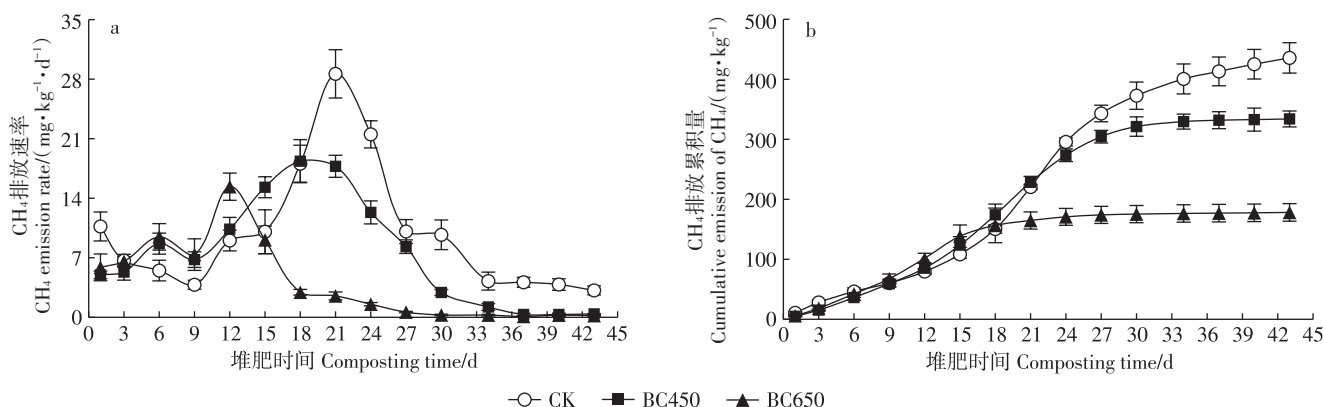


图3 羊粪堆肥过程 CH_4 排放速率(a)及排放累积量(b)动态变化

Figure 3 Dynamic changes of CH_4 emission rate(a) and emission accumulation(b) during sheep manure composting

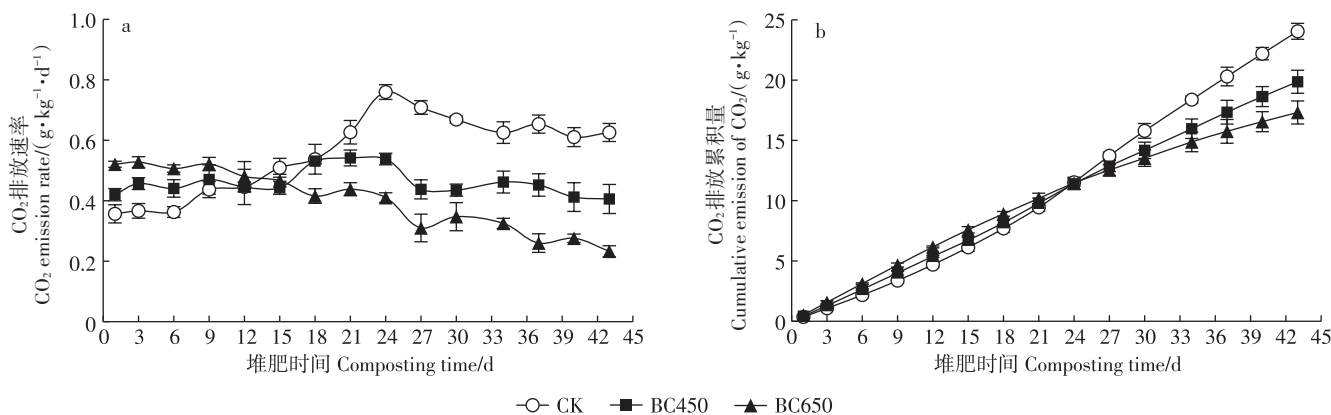


图4 羊粪堆肥过程 CO_2 排放速率(a)及排放累积量(b)动态变化

Figure 4 Dynamic changes of CO_2 emission rate(a) and emission accumulation(b) during sheep manure composting

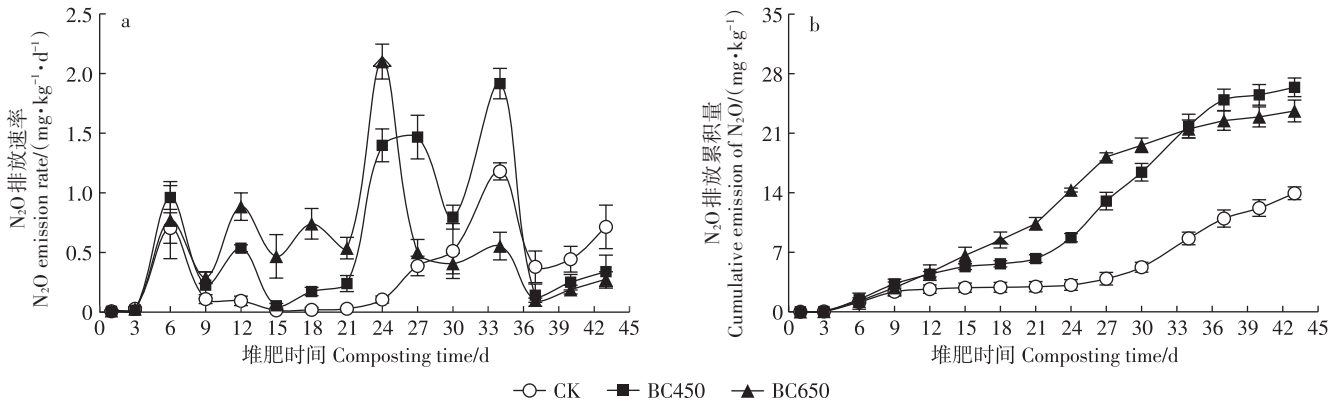


图5 羊粪堆肥过程N₂O排放速率(a)及排放累积量(b)动态变化
Figure 5 Dynamic changes of N₂O emission rate(a) and emission accumulation(b) during sheep manure composting

处理 Treatment	综合温室效应 Total greenhouse effect/(g·kg ⁻¹)	各温室气体排放等同CO ₂ 当量 Each greenhouse gas emission is equivalent to CO ₂ equivalent/(g·kg ⁻¹)			各温室气体排放占综合温室效应的比例 Proportion of each greenhouse gas emission to the overall warming potential/%		
		CH ₄	CO ₂	N ₂ O	CH ₄	CO ₂	N ₂ O
		Equivalent to CO ₂ equivalent/(g·kg ⁻¹)			Proportion of each greenhouse gas emission to the overall warming potential/%		
CK	37.52±1.12a	9.15±1.06a	24.05±0.26a	4.32±0.23b	24.34±2.21a	64.14±2.17a	11.51±0.41b
BC450	35.06±1.21b	7.01±0.39b	19.86±0.95b	8.18±0.68a	20.04±1.83b	56.64±0.83b	23.32±1.21ab
BC650	28.38±1.17c	3.74±0.61c	17.32±0.39c	7.32±0.79a	13.14±1.75c	61.11±3.41ab	25.75±1.77a

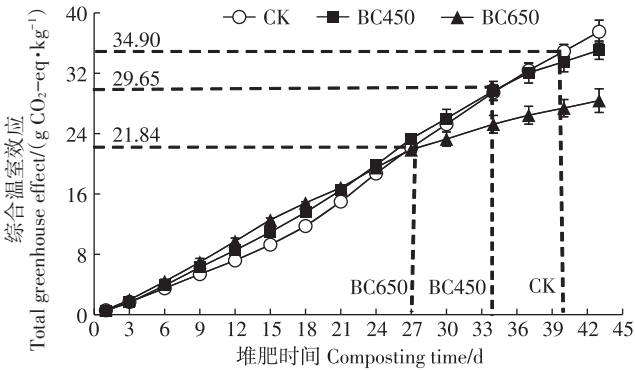


图6 羊粪堆肥过程综合温室效应变化动态
Figure 6 Dynamic changes of comprehensive greenhouse effect in sheep manure composting process

第27 d的综合温室效应为21.84 g·kg⁻¹; BC450、BC650处理达到腐熟度推荐值所需的时间周期内产生的综合温室效应分别较CK处理降低了15.04%、37.42%。可见,若堆肥体达到腐熟度标准立即终止堆肥进程,即通过缩短堆肥周期可有效促进堆肥体温室气体减排。

3 讨论

众多研究表明,生物炭具有丰富的孔隙结构及比表面积^[26],可为堆肥体中的微生物的扩繁与增殖提供良好的场所并增强微生物活性^[5],通过吸附作用不仅

可以降低堆肥中NH₄⁺-N含量、减少堆肥氨挥发的产生^[27],还能促进NH₄⁺-N向NO₃⁻-N转化^[28],加速有机物料好氧发酵的无害化与稳定化进程^[29]。本试验结果表明,与CK处理(不添加稻壳生物炭)相比,羊粪堆肥过程添加450、650℃热解的稻壳生物炭,促进了堆肥快速进入高温阶段(>55℃),缩短了堆肥体NH₄⁺-N/NO₃⁻-N、T值、EC值及种子发芽指数达到腐熟度推荐值所需的时间,与前人相关研究结论一致^[10,13,15];另外,650℃热解的稻壳生物炭比450℃热解的稻壳生物炭具有更丰富的孔隙结构、更发达的比表面积及更强的吸附能力^[16-18],从而表现为堆肥过程中添加650℃热解的稻壳生物炭对羊粪腐熟的正向促进作用优于450℃热解的稻壳生物炭处理。

CH₄、CO₂、N₂O等气体是堆肥过程不可避免的外排产物^[2],目前,对于有机废弃物自然生物降解产生CO₂的温室效应计算方法尚存在争议,有学者认为堆肥中CO₂产生于微生物的呼吸,可不计入对温室效应的贡献^[30]。作者认为,本试验研究对象为堆肥系统,对于一定体量的物料在堆肥作用下产生的气体排放都是“固态碳汇”向“气态碳源”的转化,并且导致堆肥产品品质的下降^[2-4];并且本试验结果表明不同处理各温室气体排放量等同CO₂当量及综合温室效应的差异均达显著水平,说明与CK处理相比,添加稻壳生

物炭对堆肥系统不同温室气体的排放具有显著的影响^[15,26],为此,本研究将CO₂纳入了温室气体排放综合效应的计算范围。表3结果显示,BC450、BC650处理的综合温室效应分别较CK处理显著降低了6.56%、24.36% ($P<0.05$),并且BC650处理各温室气体排放等同CO₂当量均小于BC450处理;羊粪堆肥中添加稻壳生物炭,产生CH₄、CO₂及N₂O排放的易降解含碳或含氮底物被稻壳生物炭吸附固定^[29,31],因BC650生物炭具有更发达且丰富的孔隙结构与比表面积^[16],其对易降解碳氮养分的附吸作用强于BC450生物炭^[18],从而表现为BC650处理的综合温室效应显著低于BC450处理 ($P<0.05$)。另外,表3结果还显示,羊粪堆肥过程添加稻壳生物炭显著降低了堆肥体CH₄与CO₂排放、提高了N₂O的排放 ($P<0.05$),由于稻壳生物炭对羊粪堆肥中CO₂与CH₄气体的减排幅度大于N₂O气体的增排幅度,所以堆肥综合温室效应表现为减排的趋势。一般认为堆肥过程中N₂O的排放与氮素矿化、硝化与反硝化作用密切相关,堆肥体中添加生物炭可以改变堆肥温度、pH值、含氧量及易降解氮素含量,进而影响与N₂O产生相关的功能微生物^[15,26]。本试验结果表明,羊粪堆肥体N₂O排放主要在堆肥后第12天开始,此时CK处理的堆温高于BC450、BC650处理,并且维持在60℃以上,而添加稻壳生物炭处理的堆肥温度却逐渐下降且低于60℃^[18]。CK处理的高温环境抑制了硝化细菌的生长繁殖^[4],易降解氮素养分主要以NH₃形式损失,N₂O产生量较低^[12];而添加稻壳生物炭处理的堆肥不仅温度适宜硝化作用,稻壳生物炭丰富的孔隙结构还为硝化细菌的扩增提供了一个相对适宜的环境^[10],并且提高了堆肥体氧气的相对含量^[15,26],因此提高了BC450、BC650处理的硝化作用,从而增加了N₂O排放。

4 结论

(1)添加450℃(BC450)、650℃(BC650)热解的稻壳生物炭,促进了羊粪堆肥快速进入高温阶段(>55℃),缩短了堆肥体NH₄⁺-N/NO₃⁻-N、T值、EC值及种子发芽指数达到腐熟度推荐值所需的时间,与CK处理(不添加稻壳生物炭)相比,BC450、BC650处理的堆肥腐熟周期分别缩短了15.0%、32.5%。

(2)羊粪堆置43 d后,BC450、BC650处理的综合温室效应较CK处理分别显著降低了6.56%、24.36%,且BC650处理综合温室效应比BC450处理显著降低

了19.05% ($P<0.05$);综合不同处理达到腐熟度推荐值所需时间,通过缩短羊粪堆肥周期,BC450、BC650处理的综合温室效应减排潜力分别可达15.04%、37.42%。

(3)羊粪堆肥工程中添加稻壳生物炭有利于促进羊粪堆肥腐熟及温室气体减排,建议优选650℃制备的稻壳生物炭。

参考文献:

- [1] 焦敏娜,任秀娜,何熠锋,等. 畜禽粪污清洁堆肥—机遇与挑战[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(11): 2361–2371. JIAO M N, REN X N, HE Y F, et al. Opportunities and challenges in a livestock manure cleaner composting process[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(11): 2361–2371.
- [2] 袁京,刘燕,唐若兰,等. 畜禽粪便堆肥过程中碳氮损失及温室气体排放综述[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(11): 2428–2438. YUAN J, LIU Y, TANG R L, et al. A review of carbon and nitrogen losses and greenhouse gas emissions during livestock manure composting[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(11): 2428–2438.
- [3] 姜继韶,黄懿梅,黄华,等. 猪粪秸秆高温堆肥过程中碳氮转化特征与堆肥周期探讨[J]. 环境科学学报, 2011, 31(11): 2511–2517. JIANG J S, HUANG Y M, HUANG H, et al. Carbon and nitrogen dynamics and stabilization time of a swine manure–straw compost[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(11): 2511–2517.
- [4] 曹玉博,张陆,王选,等. 畜禽废弃物堆肥氨气与温室气体协同减排研究[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(4): 923–932. CAO Y B, ZHANG L, WANG X, et al. Synergistic mitigation of ammonia and greenhouse gas emissions during livestock waste composting[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(4): 923–932.
- [5] 谢军飞,李玉娥. 不同堆肥处理猪粪温室气体排放与影响因子初步研究[J]. 农业环境科学学报, 2003(1): 56–59. XIE J F, LI Y E. Release of greenhouse gases from composting treatments on piggery excreta[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003(1): 56–59.
- [6] 郭海宁,李建辉,马晗,等. 不同养猪模式的温室气体排放研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(12): 2457–2462. GUO H N, LI J H, MA H, et al. Greenhouse gas emissions in different pig raising modes[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(12): 2457–2462.
- [7] 刘明辉,沈红,张世早,等. 畜禽粪便堆肥大气污染物排放及其控制研究进展[J]. 农业工程, 2022, 12(5): 36–44. LIU M H, SHEN H, ZHANG S Z, et al. Research progress on air pollutant emission and control of livestock manure compost[J]. *Agricultural Engineering*, 2022, 12(5): 36–44.
- [8] 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(12): 2459–2463.
- [9] INYANG M, DICKENSON E. The potential role of biochar in the removal of organic and microbial contaminants from potable and reuse water: a review[J]. *Chemosphere*, 2015, 134: 232–240.
- [10] 杨佳,王国英,唐若兰,等. 生物炭和菌剂对羊粪微好氧堆肥腐熟度和温室气体排放的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(10): 224–231. YANG J, WANG G Y, TANG R L, et al. Effects of biochar and

- microbial inoculum on maturity and greenhouse gas emissions during microaerobic composting of sheep manure[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(10):224-231.
- [11] CHOWDHURY M A, DE NEERGAARD A, JENSEN L S. Potential of aeration flow rate and bio-char addition to reduce greenhouse gas and ammonia emissions during manure composting[J]. *Chemosphere*, 2014, 97:16-25.
- [12] 王义祥, 叶菁, 林怡, 等. 花生壳生物炭用量对猪粪堆肥温室气体和NH₃排放的影响[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(6):114-125. WANG Y X, YE J, LIN Y, et al. Effects of peanut shell biochar on greenhouse gas and NH₃ emissions during swine manure composting[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2021, 26(6):114-125.
- [13] 张地方, 袁京, 王国英, 等. 木本泥炭添加比例对猪粪堆肥腐熟度和污染及温室气体排放的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(增刊2):233-240. ZHANG D F, YUAN J, WANG G Y, et al. Effects of woody peat addition on maturity and gaseous emissions during pig manure composting[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(Suppl2):233-240.
- [14] 向秋洁, 杨雨滢, 张成, 等. 不同用量竹炭对污泥堆肥过程温室气体排放的影响[J]. 环境科学, 2017, 38(10):4390-4397. XIANG Q J, YANG Y H, ZHANG C, et al. Effects of bamboo biochar on greenhouse gas emissions during the municipal sludge composting process[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(10):4390-4397.
- [15] 刘国涛, 夏璇, 李蕾, 等. 生物炭对有机废物好氧堆肥化过程的影响研究进展[J]. 安全与环境学报, 2018, 18(4):1523-1526. LIU G T, XIA X, LI L, et al. Research advances of the influence of biochar on the aerobic constitution process of the organic wastes[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2018, 18(4):1523-1526.
- [16] 孙涛, 李典鹏, 闫翠侠, 等. 热解温度和时间对秸秆生物炭特性的影响[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.
- [17] WANG H H, SHAO T Y, ZHOU Y J, et al. The effect of biochar prepared at different pyrolysis temperatures on microbially driven conversion and retention of nitrogen during composting[J]. *Heliyon*, 2023, 9:e13698.
- [18] 王海候, 韩奇隆, 刘泽凯, 等. 不同热解温度生物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.
- [19] 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.
- [20] 陈同斌, 黄启飞, 高定, 等. 城市污泥好氧堆肥过程中积温规律的探讨[J]. 生态学报, 2002, 22(6):911-915. CHEN T B, HUANG Q F, GAO D, et al. Accumulated temperature as an indicator to predict the stabilizing process in sewage sludge composting[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(6):911-915.
- [21] 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.
- [22] BERNAI M P, PAREDES C, SDNCHEZ-MONEDEROA M A, et al. Maturity and stability parameters of composts prepared with a wide range of organic wastes[J]. *Bioresource Technology*, 1998, 63:91-99.
- [23] 张桥, 吴启堂, 黄焕忠, 等. 城市污染与稻草堆肥的腐熟度指标研究[J]. 农业环境科学学报, 2002, 23(4):782-786. ZHANG Q, WU Q T, HUANG H Z, et al. Maturity indices of co-composting sewage sludge with rice straw[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2002, 23(4):782-786.
- [24] 徐路巍, 杨艳, 张阿凤, 等. 蔬菜废弃物和小麦秸秆对堆肥过程中温室气体排放的影响[J]. 环境科学研究, 2016, 29(10):1546-1553. XU L W, YANG Y, ZHANG A F, et al. Effects of vegetable waste and wheat straw on greenhouse gas emissions during composting[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, 29(10):1546-1553.
- [25] 江滔, 李国学, 唐琼, 等. 腐熟堆肥筛上粗颗粒对堆肥化过程中温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(7):1363-1370. JIANG T, LI G X, TANG Q, et al. Effect of adding coarse materials from matured compost on greenhouse gas emissions from organic wastes during composting[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(7):1363-1370.
- [26] 陈伟, 王燕, 廖新伟. 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):44-50. CHEN W, WANG Y, LIAO X D. Application of biochar in organic waste aerobic composting[J]. *China Poultry*, 2015, 37(19):44-50.
- [27] 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 *Elodea Nuttallii*[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(19):234-240.
- [28] 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.
- [29] 付祥峰, 刘琪琪, 李恋卿, 等. 生物质炭对猪粪堆肥过程中氮素转化及温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(9):1893-1900. FU X F, LIU Q Q, LI L Q, et al. Effects of biochar on nitrogen transformation and greenhouse gas emissions during swine manure composting[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(9):1893-1900.
- [30] 袁京, 何胜洲, 李国学, 等. 添加不同辅料对污泥堆肥腐熟度及气体排放的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(增刊2):241-246. YUAN J, HE S Z, LI G X, et al. Effects of different additives on evaluation of maturity and gaseous emissions during sewage sludge composting[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(Suppl. 2):241-246.
- [31] 杨雨滢, 易建婷, 任小玉, 等. 生物质炭对城市污泥堆肥温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(3):567-575. YANG Y H, YI J T, REN X Y, et al. Influences of biochar on greenhouse gas emissions during municipal sludge composting[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(3):567-575.

(责任编辑:叶飞)