

蝇蛆预处理及辅料添加对鸡粪堆肥氨挥发和温室气体排放的影响

刘尚斌, 郑祥洲, 王煌平, 吴一群, 吕健, 张玉树

引用本文:

刘尚斌, 郑祥洲, 王煌平, 吴一群, 吕健, 张玉树. 蝇蛆预处理及辅料添加对鸡粪堆肥氨挥发和温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(5): 1151-1162.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2023-0547>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[Fe₂O₃对鸡粪堆肥过程中含硫臭气排放的影响](#)

陈文旭, 李国学, 马若男, 刘燕, 袁京

农业环境科学学报. 2021, 40(11): 2465-2471 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0857>

[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>

[畜禽粪便堆肥过程中碳氮损失及温室气体排放综述](#)

袁京, 刘燕, 唐若兰, 马若男, 李国学

农业环境科学学报. 2021, 40(11): 2428-2438 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0986>

[添加生物炭对海南燥红壤N₂O和CO₂排放的影响](#)

刘丽君, 朱启林, 李凯凯, 李淼, 孟磊, 伍延正, 汤水荣, 何秋香

农业环境科学学报. 2021, 40(9): 2049-2056 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0187>

[工厂化条件下外源添加剂对猪粪堆肥过程中NH₃和H₂S的减排效果](#)

宋修超, 郭德杰, 成卫民, 罗佳, 徐焯红, 王光飞, 刘新红, 马艳

农业环境科学学报. 2021, 40(9): 2014-2020 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0221>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

刘尚斌, 郑祥洲, 王煌平, 等. 蝇蛆预处理及辅料添加对鸡粪堆肥氨挥发和温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(5): 1151-1162.

LIU S B, ZHENG X Z, WANG H P, et al. Effects of excipient incorporation and fly maggot pretreatment on ammonia emissions and greenhouse gases emissions during chicken manure composting[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(5): 1151-1162.



开放科学 OSID

蝇蛆预处理及辅料添加对鸡粪堆肥氨挥发和温室气体排放的影响

刘尚斌^{1,2}, 郑祥洲^{2*}, 王煌平², 吴一群², 吕健¹, 张玉树²

(1. 福建农林大学资源与环境学院/福建省土壤环境健康与调控重点实验室, 福州 350002; 2. 福建省农业科学院土壤肥料研究所/福建省植物营养与肥料重点实验室, 福州 350013)

摘要:为明确蝇蛆预处理及辅料添加对鸡粪堆肥过程中NH₃挥发及温室气体排放的影响,本研究分别将风化褐煤、厨余垃圾、蘑菇渣与鸡粪混合,在进行蝇蛆预处理后堆肥,研究试验过程中NH₃挥发和温室气体的排放规律。试验设置8个处理,分别为对照组(无蝇蛆预处理):纯鸡粪(CK1)、30%风化褐煤+70%鸡粪(CK2)、30%厨余垃圾+70%鸡粪(CK3)、30%蘑菇渣+70%鸡粪(CK4);试验组(蝇蛆预处理):纯鸡粪(T1)、30%风化褐煤+70%鸡粪(T2)、30%厨余垃圾+70%鸡粪(T3)、30%蘑菇渣+70%鸡粪(T4)。结果表明:蝇蛆预处理能够延长堆肥高温期,≥50℃天数均达到10d以上,相比CK1增加5~9d;在整个试验期间试验组NH₃挥发集中在堆肥第2天,试验组NH₃累积排放量显著低于对照组,降幅达到42.7%~61.1%,菇渣添加处理的NH₃累积排放量在对照组中最低;风化褐煤的添加能够显著降低N₂O排放,T2相比于T1降低84.2%,CK2相比于CK1降低51.7%。蝇蛆预处理能够显著降低CO₂排放当量,相比CK1降低32.1%~73.2%,其中,T4的CO₂排放当量最低。研究表明,蝇蛆预处理能够提高堆肥温度、延长堆肥高温期、显著降低NH₃排放和CO₂排放当量,若从堆肥温度及CO₂排放当量方面考虑蝇蛆预处理和菇渣组合为最优处理。

关键词:蝇蛆预处理;好氧堆肥;厨余垃圾;温室气体减排;氨挥发

中图分类号:X713;S141.4 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2024)05-1151-12 doi:10.11654/jaes.2023-0547

Effects of excipient incorporation and fly maggot pretreatment on ammonia emissions and greenhouse gases emissions during chicken manure composting

LIU Shangbin^{1,2}, ZHENG Xiangzhou^{2*}, WANG Huangping², WU Yiqun², LÜ Jian¹, ZHANG Yushu²

(1. College of Resource and Environmental Science, Fujian Agriculture and Forestry University/ Fujian Provincial Key Laboratory of Soil Environmental Health and Regulation, Fuzhou 350002, China; 2. Institute of Soil and Fertilizer, Fujian Academy of Agricultural Sciences/ Fujian Provincial Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer, Fuzhou 350013, China)

Abstract: To investigate the effects of fly maggot pretreatment and excipient incorporation on greenhouse gas emissions and NH₃ volatilization during chicken manure composting, a mixture of weathered lignite, kitchen waste, mushroom residue, and chicken manure was chosen for evaluation. Specifically, NH₃ volatilization and greenhouse gas emissions during composting were studied. The study included four control groups (no fly maggot pretreatment), which were composed of pure chicken manure (CK1), a blend of 30% weathered

收稿日期:2023-07-10 录用日期:2023-10-19

作者简介:刘尚斌(1998—),男,甘肃永靖人,硕士研究生,从事废弃物资源化研究。E-mail:1124285947@qq.com

*通信作者:郑祥洲 E-mail:z85103@qq.com

基金项目:福建省农业科学院科技创新团队项目(CXTD202102-2);福建省农业科学院农业高质量发展超越协同创新工程项目(XTCXGC2021009);福建省公益项目(2023R11030086,2023R1023001);福建省农业科学院英才项目(YC2021010)

Project supported: The Foundation of Fujian Academic of Agricultural Sciences(CXTD202102-2);Fujian Academy of Agricultural Sciences Agricultural High Quality Development Beyond Collaborative Innovation Project(XTCXGC2021009);The Basic Scientific Foundation of Public Service Research Institutes of Fujian Province,China(2023R11030086,2023R1023001);Fujian Academy of Agricultural Sciences Talent Prouect(YC2021010)

lignite and 70% chicken manure (CK2), 30% kitchen waste and 70% chicken manure (CK3), and 30% mushroom residue and 70% chicken manure (CK4). Additionally, there were four test groups with fly maggot pretreatment, including pure chicken manure (T1), a blend of 30% weathered lignite and 70% chicken manure (T2), 30% kitchen waste and 70% chicken manure (T3), and 30% mushroom residue and 70% chicken manure (T4). The results indicated that maggot pretreatment prolonged the period with temperatures ≥ 50 °C by 5–9 days compared to CK1. During the whole test period, the NH_3 emissions of the test group were concentrated in the 2nd day of composting, and the NH_3 cumulative emission of pretreatment of fly maggots was significantly lower than that of the control group, with a decrease of 42.7%–61.1%. The NH_3 cumulative emission from mushroom residue was the lowest in the control group. N_2O emissions were significantly reduced by weathered lignite. Fly maggot pretreatment significantly reduced CO_2 emission equivalent ($E_{\text{CO}_2,e}$), which is 32.1%–73.2% lower than CK1. The combined combination of mushroom residue and fly maggot pretreatment had the lowest $E_{\text{CO}_2,e}$. In summary, the test group experienced increased composting temperatures, while significantly reduced NH_3 and $E_{\text{CO}_2,e}$. Based on composting temperature and $E_{\text{CO}_2,e}$, a combination of fly maggot pretreatment and mushroom residue is recommended as an optimal management solution.

Keywords: fly maggot pretreatment; aerobic composting; kitchen waste; greenhouse gases mitigation; ammonia volatilization

我国是蛋鸡和肉鸡养殖大国,鸡粪的可持续利用是社会所面临的一个重大问题^[1]。我国每年约产生1.7亿t的鸡粪,且其资源化利用率不高,导致养分大量流失并造成严重的环境污染^[2]。堆肥是处理鸡粪的有效手段之一,堆肥产品可以作为土壤调理剂和作物长期的营养供应来源^[3]。但无论哪种堆肥方式均会在一定程度上产生有害气体,并直接对大气环境产生影响。氨(NH_3)作为主要的污染物是一种具有刺激性气味的气体,也是形成酸雨的主要气体,对大气及土壤造成很大的危害,氧化亚氮(N_2O)、二氧化碳(CO_2)、甲烷(CH_4)是引起全球变暖的主要温室气体^[4],因此在堆肥期间对 NH_3 和温室气体的减排至关重要。

一般情况下,新鲜鸡粪具有高含水量、高pH、高黏性和低C/N等特征,这些特征不利于鸡粪堆肥升温发酵而且堆肥过程中会产生大量温室气体^[5]。针对该问题,研究人员通过将稻草、木屑、生物炭等物料与鸡粪混合堆肥在不同程度上优化堆体,降低 NH_3 和温室气体排放^[6–7],但这也存在堆肥周期长、储存压力大和增加成本等缺点。除此之外,可以通过添加腐食性昆虫——蝇蛆对畜禽粪便进行快速预处理^[8],该技术可调节鸡粪理化性状、优化C/N、改善鸡粪黏性结构使其变松散进而缩短堆肥周期^[9],同时还可将鸡粪中多余的氮转化为高蛋白幼虫生物质,大幅度降低鸡粪堆体质量^[10]。有研究表明,该方式处理畜禽粪便过程中 NH_3 排放少,温室气体排放量低,不仅能减少碳素的损失,获得优质蛋白及有机肥,而且不会对环境产生二次污染^[11–13]。

鸡粪理化性质并不适宜蝇蛆生长,而添加辅料是改善物料理化性质、提高蝇蛆产量、提升后期堆肥效果的有效途径。通过添加辅料提高蝇蛆在预处理阶

段活性,是否可在一定程度上降低堆肥阶段 NH_3 挥发和温室气体排放并不明确,因此本文针对蝇蛆预处理阶段及堆肥阶段的 NH_3 和温室气体排放进行系统性研究,并在此基础上进一步探究不同辅料添加对蝇蛆预处理阶段及堆肥阶段 NH_3 和温室气体排放的影响,旨在为鸡粪资源化利用提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

本试验所用鸡粪取自福建省创辉生物科技有限公司,辅料分别为风化褐煤、菇渣、厨余垃圾,厨余垃圾取自当地食堂,经粉碎机粉碎为匀浆状。试验在该公司发酵车间进行,堆肥初始理化性质见表1。

表1 堆肥物料的理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of compost materials

物料 Material	含水率 Water content/%	pH	有机碳(干基) Organic carbon/%	总氮(干基) Total nitrogen/%	C/N
鸡粪	61.1	6.53	21.9	2.56	8.5
风化褐煤	6.4	6.20	9.5	0.42	22.7
厨余垃圾	64.5	3.87	39.8	3.79	10.5
菇渣	11.4	7.69	43.2	2.40	18.1

1.2 试验设计

试验采用双因素完全随机区组设计,底物在堆肥前部分进行蝇蛆预处理,部分不进行预处理。试验共设置8个处理(具体处理及编号见表2),每个处理设3组平行,以纯鸡粪堆肥为原始对照(CK1)。将辅料与鸡粪的含水量分别调至65%,以3:7比例进行混合,各处理底物总质量为100 kg,底物混合均匀后将其平铺成10 cm厚度的长方形。试验组将新鲜的蝇卵接种至底物上面,蝇卵的接种量为底物总质量的2%。

表2 堆肥试验处理

Table 2 Composting test treatments

对照组(无蝇蛆预处理) Control group (pretreatment without fly maggots)		试验组(蝇蛆预处理) Test group (fly maggots pretreatment)	
编号 Number	处理 Treatment	编号 Number	处理 Treatment
CK1	纯鸡粪	T1	纯鸡粪
CK2	30% 风化褐煤+70% 鸡粪	T2	30% 风化褐煤+70% 鸡粪
CK3	30% 厨余垃圾+70% 鸡粪	T3	30% 厨余垃圾+70% 鸡粪
CK4	30% 蘑菇渣+70% 鸡粪	T4	30% 蘑菇渣+70% 鸡粪

试验组蝇蛆预处理为期4 d,对照组静置4 d。试验第4天分离虫体后,将所有处理的含水量调至60%左右,称取25 kg底物转入约50 L(37 cm×37 cm×37 cm)泡沫箱中进行为期30 d的堆肥试验。堆肥期间采用强制间歇式通风设施,通风速率为 $0.15 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$,每间隔50 min鼓风10 min^[6,14]。分别于第7、14、22天翻堆。为区分试验阶段,蝇蛆预处理天数用罗马数字表示。

1.3 样品采集与测定

分别于蝇蛆预处理阶段第I、Ⅲ天和堆肥阶段第1、3、5、7、10、13、16、20、26天采集 NH_3 和温室气体进行测定。

NH_3 采用吸收法测定,用质量分数为2%的硼酸溶液吸收,然后用稀硫酸进行滴定^[15]。温室气体采集前关闭鼓风机,打开泡沫箱顶部盖子,使箱内与外界空气充分接触交换(约30 min),取周边空气作为对照,再将取样器连接于顶部,30 min后用医用针筒从取样器顶部预留的取气口采集60 mL箱内气体,存放在100 mL的密闭气袋内。温室气体浓度采用安捷伦气相色谱仪(7890A,美国)测定。 CH_4 和 CO_2 气体样品分析色谱柱采用填充60/80目porapak Q的填充柱,镍触媒转化器温度为 $375 \text{ }^\circ\text{C}$,FID温度为 $200 \text{ }^\circ\text{C}$,助燃气为空气,流速 $300 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 。 N_2O 气体样品分析色谱柱采用填充80/100目porapak Q的填充柱,ECD温度为 $330 \text{ }^\circ\text{C}$ 。3种气体同时测定,色谱柱的温度均为 $55 \text{ }^\circ\text{C}$,定量六通阀进样,进样量1 mL,载气为 N_2 ,流速 $30 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$,总测定时间为 $5 \text{ min}^{[6]}$ 。

试验期间测定鸡粪pH、铵态氮(NH_4^+-N)和硝态氮(NO_3^--N)的样品为鲜样,pH采用pH计[水土比(质量比)2.5:1]浸提测定, NH_4^+-N 和 NO_3^--N 采用戴氏合金蒸馏法^[17]测定。有机碳(TOC)采用重铬酸钾容量法测定,全氮(TN)采用 $\text{H}_2\text{SO}_4-\text{H}_2\text{O}_2$ 联合消煮,消煮至无色或者淡黄色的澄清液后使用凯氏定氮仪测定^[18]。

1.4 数据处理与分析

NH_3 排放通量计算公式:

$$F = \frac{c \times (V - V_0) \times 14.0}{W \times t} \quad (1)$$

式中: F 为 NH_3 排放通量, $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; c 为硫酸标准溶液浓度, $0.05 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$; t 为取样器所覆盖的时间,h; V 为样品滴定硫酸标准体积,mL; V_0 为空白滴定硫酸标准体积,mL; 14.0为氮原子摩尔质量, $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$; W 为取样器所覆盖的面积, $\text{m}^{2[15]}$ 。

N_2O 、 CO_2 和 CH_4 排放通量计算公式:

$$F = \rho \times \frac{dc}{dt} \times V \times \frac{273}{(273 + T) \times W} \quad (2)$$

式中: F 为气体排放通量, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; ρ 为被测气体标准状态下的密度, CH_4 为 $0.717 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 N_2O 为 $1.978 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 CO_2 为 $1.977 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; dc/dt 为单位时间内气体浓度增加量, $10^{-6} \cdot \text{h}^{-1}$ 或 $10^{-9} \cdot \text{h}^{-1}$; V 为取样器中气体的有效空间体积, m^3 ; W 为取样器所覆盖的面积, m^2 ; T 为环境温度, $^\circ\text{C}^{[19]}$ 。

通过相邻两次气体排放通量平均值和间隔时间计算该时间段内的排放气体总量,继而求出温室气体累积排放量,如公式(3)所示:

$$C_{i+1} = \sum_{i=1}^n \frac{F_{i+1} + F_i}{2} \times 24 \times D \quad (3)$$

式中: C_{i+1} 为第*i*次和第*i+1*次采样期间的气体累积排放量, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$; F_i 和 F_{i+1} 分别为第*i*次和第*i+1*次采样时气体瞬时排放速率, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; i 为采样次数; D 为两次采样间隔时间, $\text{d}^{[19]}$ 。

为更直观地表示试验过程中温室气体累积排放效应,根据IPCC 2014年第五次会议报告,以百年影响尺度为计算,在相同质量下, CH_4 和 N_2O 的增温潜势(GWP)分别是 CO_2 的28倍和265倍^[4]。 CO_2 排放当量(E_{CO_2e})的计算公式为:

$$E_{\text{CO}_2e} = 28 \times E_{\text{CH}_4} + 265 \times (E_{\text{N}_2\text{O}} + 0.01 \times E_{\text{NH}_3} \times 44/28) \quad (4)$$

式中: $E_{\text{N}_2\text{O}}$ 为 N_2O 排放量, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$; E_{CH_4} 为 CH_4 排放量, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$; E_{NH_3} 为 NH_3 排放量, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。 E_{CO_2e} 为 $E_{\text{N}_2\text{O}}$ 、 E_{CH_4} 直接排放产生的 CO_2 当量以及 E_{NH_3} 引起的 N_2O 间接排放产生的 CO_2 当量之和。

文中数据为3次重复的平均值,采用Excel 2021进行数据分析,利用SPSS 27.0软件在Duncan(SSR)方法下分析确定显著性差异,利用Origin Pro 2022制图。

2 结果与分析

2.1 试验过程中温度的变化规律

好氧堆肥过程中各温度变化如图1所示,在蝇蛆

养殖阶段各处理温度均保持在 40.0 °C 左右。堆肥阶段第 2 天各处理迅速进入高温期 (≥ 50.0 °C), 温度均达到 60 °C 以上, 其中 CK4、T3 和 T4 的温度分别为 72.6、71.0 °C 和 78.3 °C, 随即各处理温度整体上呈现出下降趋势。在第 8 天翻堆以后各处理的温度均出现不同程度的上升, 第 10 天时各处理温度均达到 50.0 °C 以上的高温。在第 15 天的第二次翻堆后只有 T1、T2 进入高温期, 其余处理温度并未发生明显变化。在整个堆肥过程中, 各处理的高温时间表现为 T3>CK4>T1=T2>T4>CK3=CK2>CK1, 高温时间依次为 14、13、12、12、10、7、7、5 d。T3、CK4、T1、T2 和 T4 的高温期均超过 10 d, 达到《粪便无害化卫生标准》(GB 7959—2012) 中好氧堆肥温度 ≥ 50.0 °C 至少 10 d 的要求。

2.2 试验过程中基本理化性质的变化

如表 3 所示, 经过 4 d 的蝇蛆预处理及陈化(堆肥第 0 天), 各处理 pH 迅速上升至 8.8 左右, 试验组 pH、C/N 均略高于对照组, $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 TN 含量均低于对照组。纯鸡粪处理中, T1 的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量高于 CK1。试验组 (T1、T2、T4) TOC 含量均低于对照组 (CK1、CK2、CK4)。堆肥结束时(堆肥第 28 天), C/N、TOC 和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 也出现不同程度下降, 试验组 TOC 低于对照组。各处理 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量降幅为 31.2%~82.3%, 其中 CK4 和 T4 仍有较高的含量, 分别为 $821.91 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $762.95 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。由于浓缩效应, 堆肥后各处理 TN 含量上升。

2.3 试验过程中 NH_3 排放规律

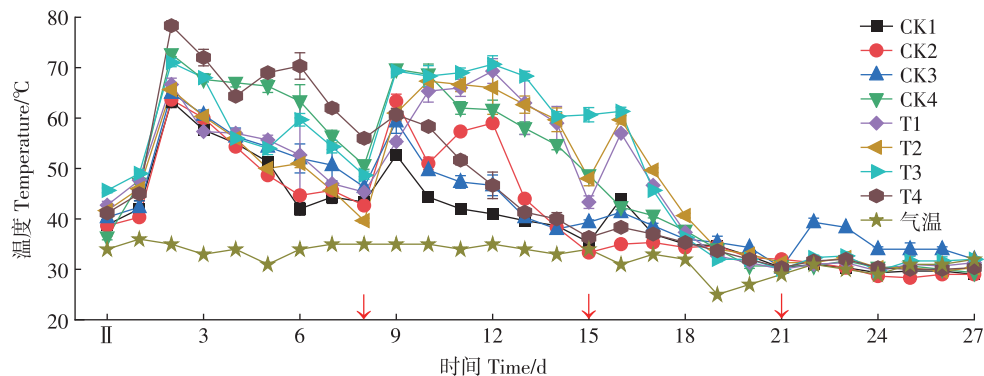
蝇蛆预处理及堆肥过程中 NH_3 排放通量和累积排放量如图 2 所示, T2 和 T3 的 NH_3 排放峰值在蝇蛆预处理第 III 天, 其余处理排放峰值均出现在好氧堆肥

第 2 天。试验组 NH_3 排放通量峰值要低于对照组。在好氧堆肥 8 d 后, NH_3 排放通量处于较低水平, 在翻堆后并无发生明显变化。图 2e 显示, 蝇蛆预处理能够大幅度降低 NH_3 累积排放量, T1 比 CK1 降低 47% 且处理间达到极显著差异水平 ($P<0.01$), 试验组 T2、T3 和 T4 的 NH_3 累积排放量分别比对照组 CK2、CK3 和 CK4 下降 52.7%、61.1% 和 42.7%, 且处理间也达到极显著差异水平 ($P<0.01$)。CK2 和 CK4 比 CK1 降低 21.8%、42.5%, 处理间达到显著差异水平 ($P<0.05$)。T2、T3 和 T4 处理比 T1 处理降低 30.2%、15.4% 和 37.8%, 且 T2 和 T4 与 T1 处理间的差异达到显著性水平 ($P<0.05$)。双因素方差分析表明, 预处理、辅料及两者交互作用对 NH_3 累积排放量均有极显著影响 ($P<0.01$)。

2.4 试验过程中温室气体排放规律

2.4.1 温室气体排放通量的变化

如图 3 显示, 试验第 1 天除 CK3 外其余处理均有较高水平的 CO_2 排放通量, 且试验组各处理 CO_2 排放通量均高于对照组。在好氧堆肥期间, 菇渣处理 CO_2 排放主要发生在第 2~6 天, 而在其余 T 处理主要在第 14~21 天, 各处理 CO_2 排放通量随着堆肥时间和翻堆时间呈现出先上升后下降的循环变化趋势, 在堆肥第 21 天后趋于稳定。此外, 堆肥期间试验组 CO_2 排放通量也均高于对照组。在整个试验中 N_2O 排放通量一直处于较低水平(图 4), CK4 和 T4 在试验第 I 天就达到排放峰值, 分别为 $7.7 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $12.9 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 其余处理在堆肥第 4、11、17 天出现短暂的排放高峰。纯鸡粪处理中, 蝇蛆预处理提高了 N_2O 排放通量。本试验中各处理 CH_4 排放通量峰值均出现在蝇



箭头指示位置表示翻堆时间。

The arrow indicates the location indicating the dumping time.

图 1 试验过程中各处理温度变化

Figure 1 Temperature of different treatments during experiment

表3 不同处理的基本理化性质变化

Table 3 Changes in basic physical and chemical properties of different treatments

处理 Treatment	时间 Time/d	pH	NH ₄ ⁺ -N/ (mg·kg ⁻¹)	NO ₃ ⁻ -N/ (mg·kg ⁻¹)	有机碳 Organic carbon/%	总氮 Total nitrogen/%	C/N
CK1	0	8.84±0.08b	1 223.32±81.63a	205.84±10.93b	15.96±0.15a	2.03±0.18b	7.95±0.04a
	28	9.11±0.05a	213.62±16.24b	430.96±29.56a	14.39±0.26b	2.59±0.04a	5.55±0.12b
CK2	0	8.80±0.29a	1 297.26±96.99a	214.67±23.92b	14.01±0.14a	1.27±0.06b	11.03±0.11a
	28	8.71±0.01a	478.82±16.71b	430.69±55.14a	11.48±0.28b	1.80±0.08a	6.37±0.09b
CK3	0	8.78±0.14a	1 420.21±58.37a	251.80±14.82b	16.88±0.31a	2.47±0.20b	6.83±0.10a
	28	8.34±0.03b	448.53±17.20b	404.61±81.25a	15.38±0.45a	3.06±0.09a	5.02±0.11b
CK4	0	8.83±0.06a	1 422.50±55.71a	273.61±21.03b	22.03±0.69a	2.51±0.04a	8.31±0.12a
	28	8.77±0.12a	821.91±46.15b	429.43±33.12a	18.59±0.41b	2.65±0.07a	7.40±0.15b
T1	0	9.12±0.04a	1 064.34±33.52a	284.81±14.19b	15.56±0.13a	1.45±0.07b	11.00±0.09a
	28	8.99±0.13a	300.39±21.03b	512.42±42.18a	13.98±0.25b	2.07±0.06a	6.75±0.11b
T2	0	8.91±0.18a	1 042.77±27.27a	315.70±20.57b	13.36±0.29a	0.97±0.05b	13.77±0.15a
	28	8.78±0.05a	532.22±66.15b	473.95±56.23a	12.40±0.21a	1.43±0.04a	8.67±0.04b
T3	0	8.84±0.07a	1 159.65±75.09a	220.74±27.90b	17.71±0.25a	2.07±0.21b	8.55±0.12a
	28	8.65±0.09b	449.64±19.56b	425.86±59.45a	15.43±0.36b	2.65±0.10a	5.82±0.08b
T4	0	8.94±0.11a	1 124.55±37.90a	270.56±16.88b	21.55±0.28a	2.40±0.15a	8.98±0.09a
	28	8.95±0.06 a	762.95±23.53b	417.52±23.12a	16.56±0.37b	2.51±0.04a	6.87±0.08b

注:不同字母表示同一处理第0天和第28天差异显著($P<0.05$)。

Note: Different letters indicate significant differences between the 0th and 28th days of the same treatment ($P<0.05$).

蛆预处理阶段第 I 天(图 5),好氧堆肥期间各处理 CH₄排放通量均低于 1 mg·m⁻²·d⁻¹,在腐熟后期呈现出缓慢上升的趋势。除 T4 处理在堆肥期间有小幅波动外,其余处理均在 0.2 mg·m⁻²·d⁻¹ 上下波动。

2.4.2 温室气体累积排放量

由图 6a 可知,蝇蛆预处理使得 CO₂ 累积排放量得到大幅度提高,T1、T2 和 T3 分别比 CK1、CK2 和 CK3 增加 39.2%、57.3% 和 48.9%,且处理间均达到极显著差异水平($P<0.01$)。CK4 比 CK1 增加 35.3%,且处理间达到显著差异水平($P<0.05$)。CK2 处理 CO₂ 累积排放量最低。在 N₂O 累积排放量方面(图 6b),除 T1 外试验组其他处理 N₂O 累积排放量均低于对照组,其中 T3、T4 相比于 CK3、CK4 分别降低 28.3% 和 30.4%,均达到显著差异水平($P<0.05$)。在辅料添加方面,风化褐煤的添加能够显著降低 N₂O 累积排放量,CK2 比 CK1 下降 52.7%,而 CK3 比 CK1 增加 37.7%。试验组中 T2、T3 和 T4 分别比 T1 下降 84.7%、47.8% 和 68.8%,各处理与 T1 间均达到显著差异水平($P<0.05$)。T1 的 CH₄ 累积排放量显著低于 CK1,降幅达到 37.6%。与 T1 相比,T4 下降 67.4%,而 T3 增加 29.1%。对照组中辅料的添加在不同程度上均降低了 CH₄ 排放量,CK2、CK3 和 CK4 相比于 CK1 降幅分别达到 33.1%、61.9% 和 87.1%,各处理均与 CK1 达到显

著差异水平($P<0.05$)。菇渣添加处理相比其他处理 CH₄ 累积排放量最低(图 6c)。

2.4.3 温室气体累积排放效应

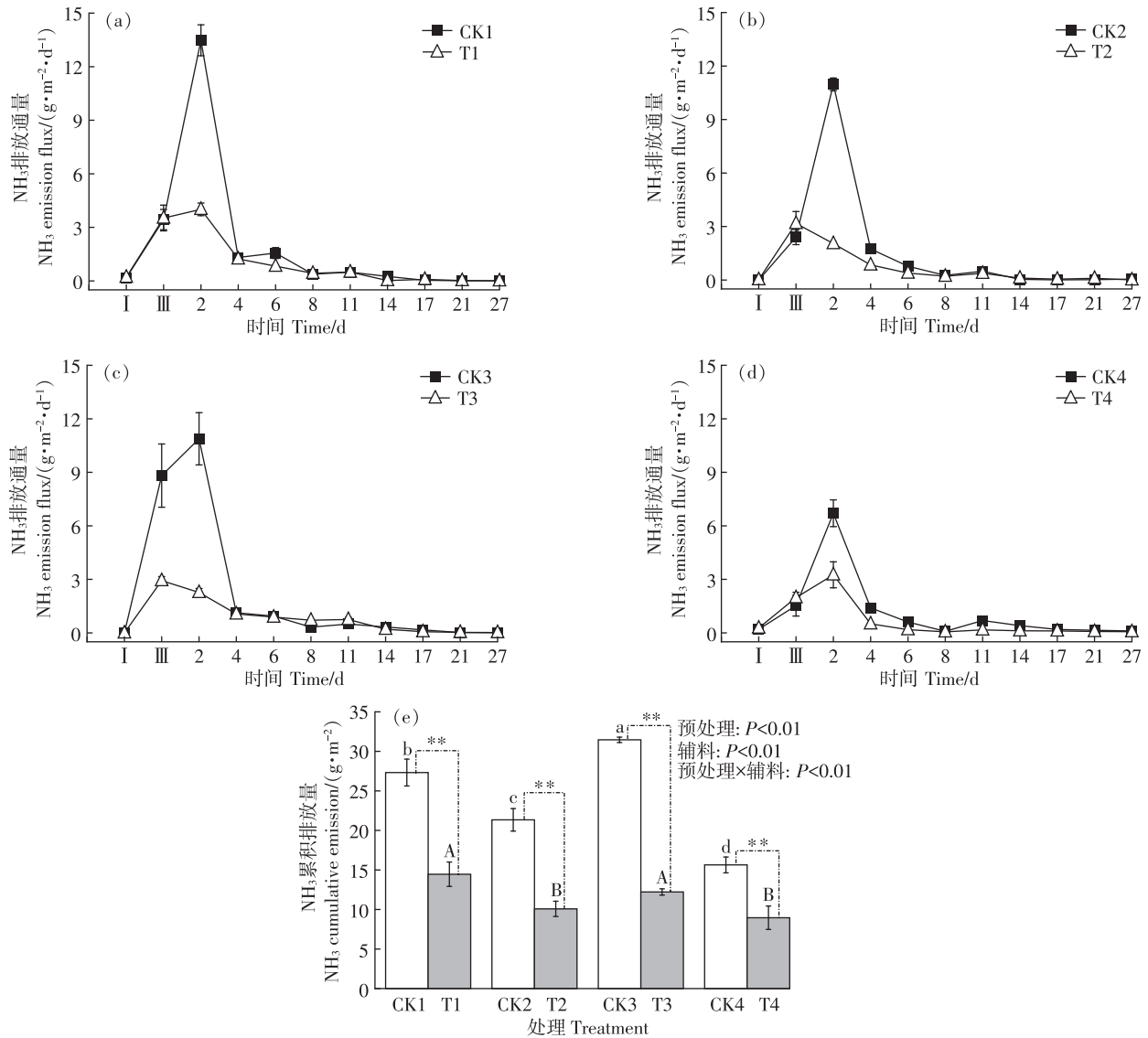
依据 IPCC 2014 年第五次会议报告中的温室气体折算方法,并参照《畜禽粪便腐殖化堆肥项目温室气体减排量核算技术规范》T/ZGGERIS 0006—2019^[20] 温室气体核算边界,动物粪便有机质属于生物源,堆肥过程中分解产生的 CO₂ 排放不计算在温室气体排放中。结果表明(表 4),蝇蛆预处理、辅料添加及其交互作用均能显著降低 E_{CO_2e} ,各处理表现为 CK1>CK3>CK2>T3>T1>T2>CK4>T4。T4 具有最低的 E_{CO_2e} ,为 66.90 g·m⁻²,相比 CK1 下降 71.8%。

2.4.4 不同辅料及堆体预处理方式对堆肥过程中温室气体排放的双因素分析

通过预处理和辅料之间的双因素方差分析可知(表 5),蝇蛆预处理仅对 CO₂ 排放和 E_{CO_2e} 有显著影响,辅料和辅料及预处理的交互作用显著影响 N₂O 排放、CH₄ 排放、CO₂ 排放和 E_{CO_2e} 。

2.4.5 气体排放与堆体理化因子间的相关性

相关分析表明(表 6):NH₃ 排放通量与堆体 pH 和 NH₄⁺-N 呈显著正相关,与 TN 呈显著负相关,与 NO₃⁻-N 呈极显著负相关。CO₂ 排放通量与 pH 呈极显著负相关,与 TN、TOC 呈极显著正相关。N₂O 排放通量与



不同小写字母表示对照组(CK)处理间差异显著($P < 0.05$),不同大写字母表示试验组(T)处理间差异显著($P < 0.05$),*代表处理间差异显著($P < 0.05$),**代表处理间差异极显著($P < 0.01$),ns代表处理间无显著差异。下同。

Different lowercase letters indicate significant differences between treatments in the control group(CK)($P < 0.05$), and different uppercase letters indicate significant differences between treatments in the experimental group(T)($P < 0.05$). * The difference between representative treatments is significant($P < 0.05$), while ** representative treatments have extremely significant differences($P < 0.01$). ns represents no significant difference between treatments. The same below.

图2 不同处理NH₃排放通量和累积排放量的变化

Figure 2 Emission flux and cumulative amount of NH₃ from different treatments

NO₃-N呈显著正相关。CH₄排放通量与pH呈极显著负相关,与TOC呈极显著正相关。

3 讨论

3.1 辅料添加显著降低堆体NH₃排放

NH₃是导致堆肥过程中氮素大量损失的主要活性氮气体之一,其挥发也是导致最终有机肥品质降低的重要原因^[21]。在对照处理中30%蘑菇渣引入相对于其他对照处理减排效果最佳,比纯鸡粪处理下降

44.1%。蘑菇渣具有疏松多孔的结构,以及丰富的酶含量(如纤维素酶、酯酶),可通过优化堆体条件提高微生物数量,以微生物同化作用来减少氮素损失^[22-23],同时疏松结构也能够提高堆肥过程中的供氧效率,而堆体含氧量的增加可以增强NH₃向NO₃-N的硝化过程并提高硝化细菌的活性,从而显著降低气态氮的损失来达到NH₃减排的目的^[24]。其次胡伟桐等^[25]的研究还表明添加的辅料的比表面积也会影响气体排放,蘑菇渣的比表面积最大且具有极性,更易于吸附

NH_3 。因此蘑菇渣与鸡粪堆肥,有无蝇蛆预处理时,其 NH_3 和 $E_{\text{CO}_2\text{e}}$ 排放均最低。风化褐煤的添加也能够

显著降低 NH_3 排放量,这与Mei等^[26]的研究一致,由于风化褐煤偏酸性,经风化褐煤添加改良后的鸡粪pH

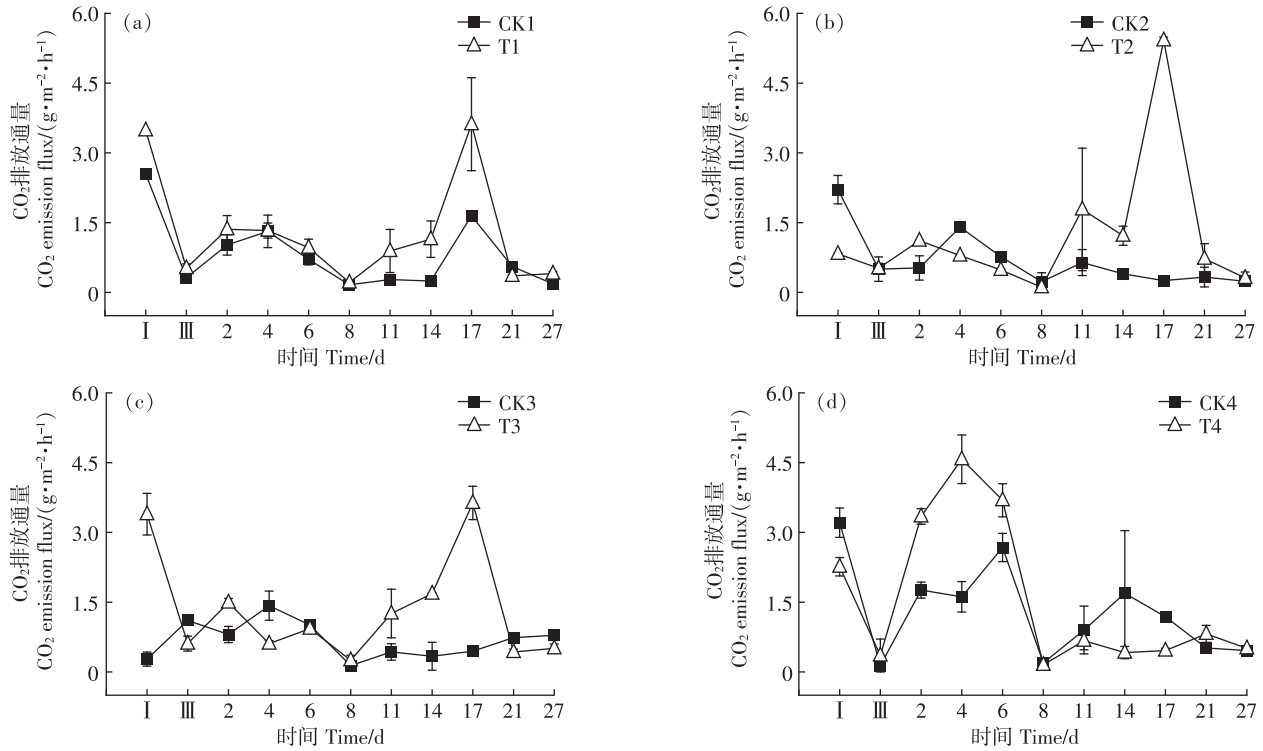


图3 不同试验处理CO₂排放通量

Figure 3 CO₂ emission flux of different treatments during experiment

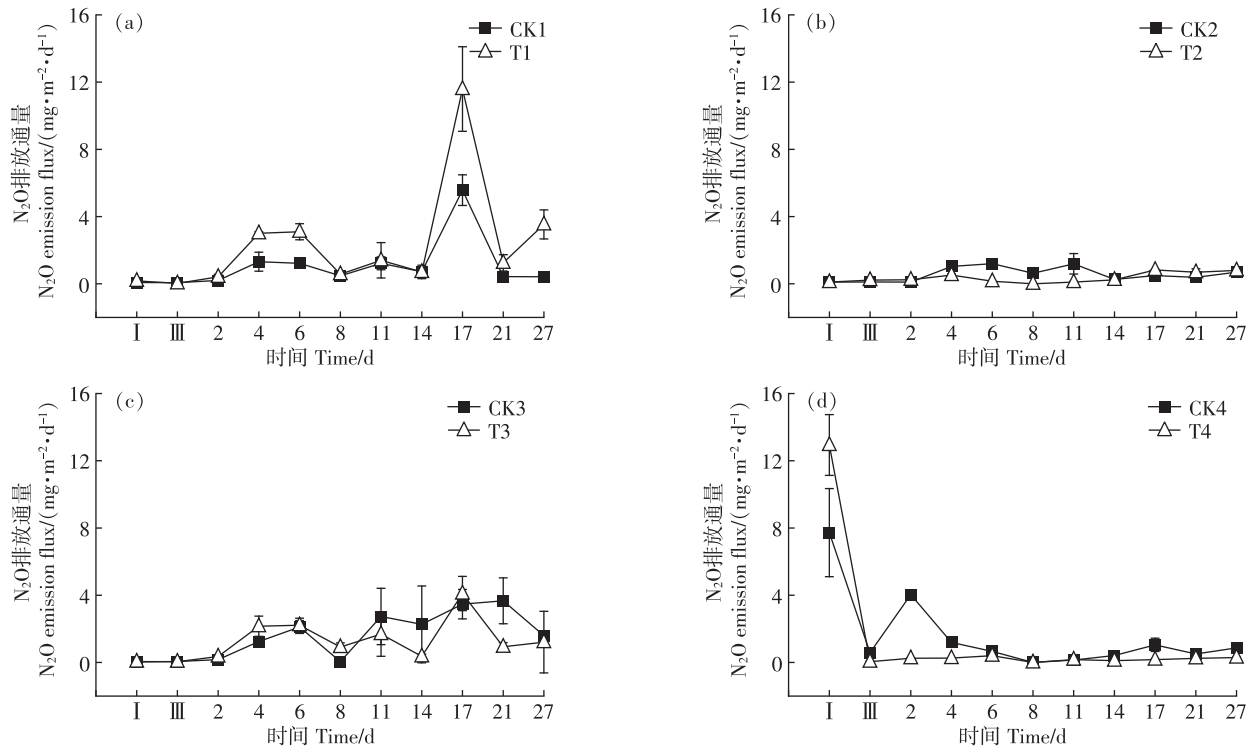


图4 不同试验处理N₂O排放通量

Figure 4 N₂O emission flux of different treatments during experiment

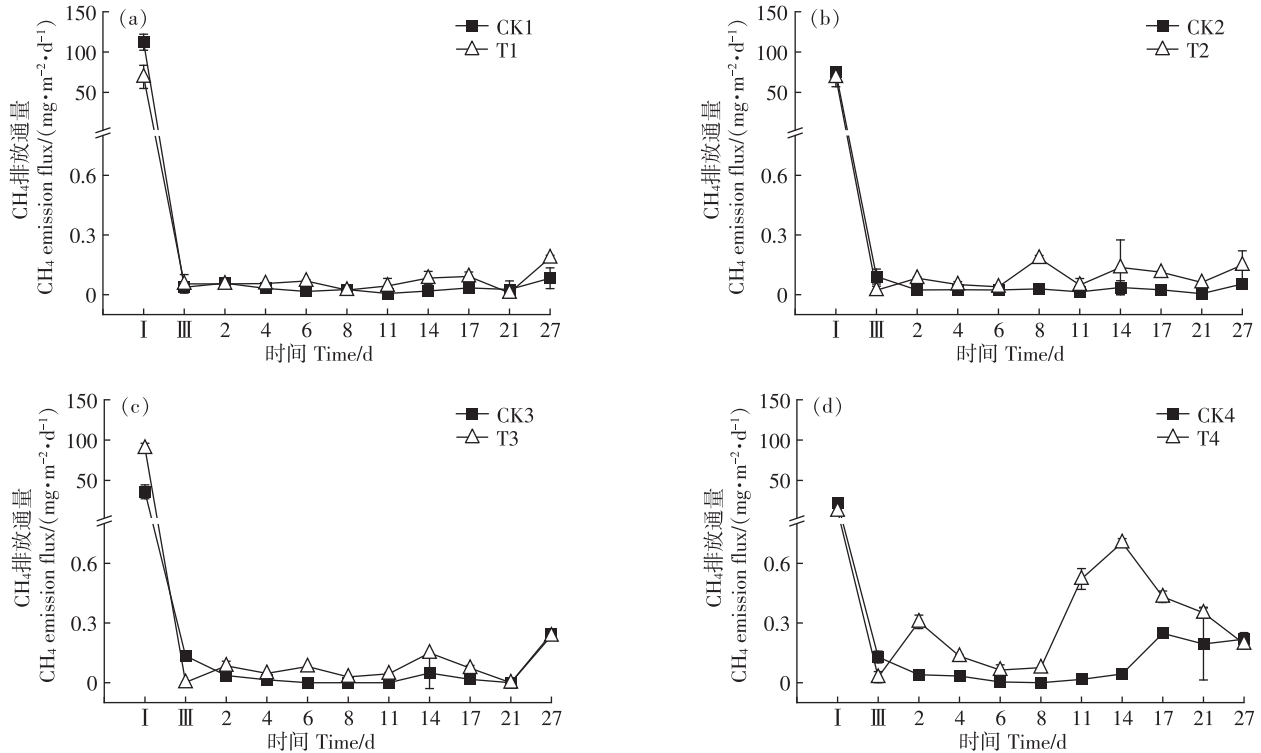


图5 不同试验处理CH₄排放通量

Figure 5 CH₄ emission flux of different treatments during experiment

表4 不同试验处理温室气体累积排放效应

Table 4 Cumulative greenhouse gas emissions of different treatments

处理 Treatment	E_{N_2O} N ₂ O emission/(g·m ⁻²)		E_{CH_4} CH ₄ emission/(g·m ⁻²)		E_{NH_3} NH ₃ emission/(g·m ⁻²)		E_{CO_2} /(g·m ⁻²)
	N ₂ O	CO ₂ e	CH ₄	CO ₂ e	NH ₃	CO ₂ e	
CK1	0.036	9.54	4.06	113.68	27.32	113.77	236.99
CK2	0.017	4.50	2.70	75.60	21.34	88.87	168.97
CK3	0.058	15.37	1.56	43.68	31.46	131.01	190.06
CK4	0.035	9.27	0.54	15.12	15.64	65.13	89.52
T1	0.080	21.2	2.54	71.12	14.46	60.22	152.54
T2	0.012	3.18	2.54	71.12	10.08	41.98	116.28
T3	0.042	11.13	3.28	91.84	12.22	50.89	153.86
T4	0.025	6.63	0.82	22.96	8.96	37.31	66.90

表5 不同辅料、堆体预处理及其交互作用对堆肥过程中气体排放双因素分析

Table 5 Interaction effects of auxiliary materials and reactor pretreatment on gas emissions during composting

处理因素 Treatment factor	N ₂ O 排放 N ₂ O emissions	CH ₄ 排放 CH ₄ emissions	E_{CO_2}	CO ₂ 排放 CO ₂ emissions
蝇蛆预处理	3.061ns	0.102ns	22.735**	448.546**
辅料	145.520**	36.358**	62.005**	38.366**
辅料×预处理	72.697**	17.639**	8.071**	33.848**

注:表中数据为F值,* P<0.05,** P<0.01,ns代表无显著影响。

Note:The data in the table is an F value,* P<0.05,** P<0.01,ns represents no significant effect.

降低,从而降低了NH₃排放量,本研究结果也显示NH₃排放通量与pH呈显著正相关。此外,风化褐煤具有的较多的裂缝和孔隙可在一定程度上吸收NH₄

和NH₃以达到减排效果。

3.2 蝇蛆预处理进一步降低堆体NH₃排放

在本试验中,蝇蛆预处理相比对照处理降低初始

表6 温室气体排放通量与理化因子间的相关分析

Table 6 Correlation coefficient between greenhouse gas emission and environmental factors

项目 Item	pH	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	TN	TOC	C/N
CO ₂ 排放通量 CO ₂ emission rate	-0.723**	0.238*	-0.056	0.623**	0.410**	0.260
N ₂ O排放通量 N ₂ O emission rate	0.003	-0.077	0.275*	0.005	0.310	-0.269
CH ₄ 排放通量 CH ₄ emission rate	-0.309**	0.091	0.161	0.208	0.423**	-0.160
NH ₃ 排放通量 NH ₃ emission rate	0.231*	0.271*	-0.405**	-0.347*	-0.148	0.031

注:*表示在0.05水平上显著相关;**表示在0.01水平上显著相关。

Note:*indicates significant correlation at the 0.05 level.**indicates significant correlation at the 0.01 level.

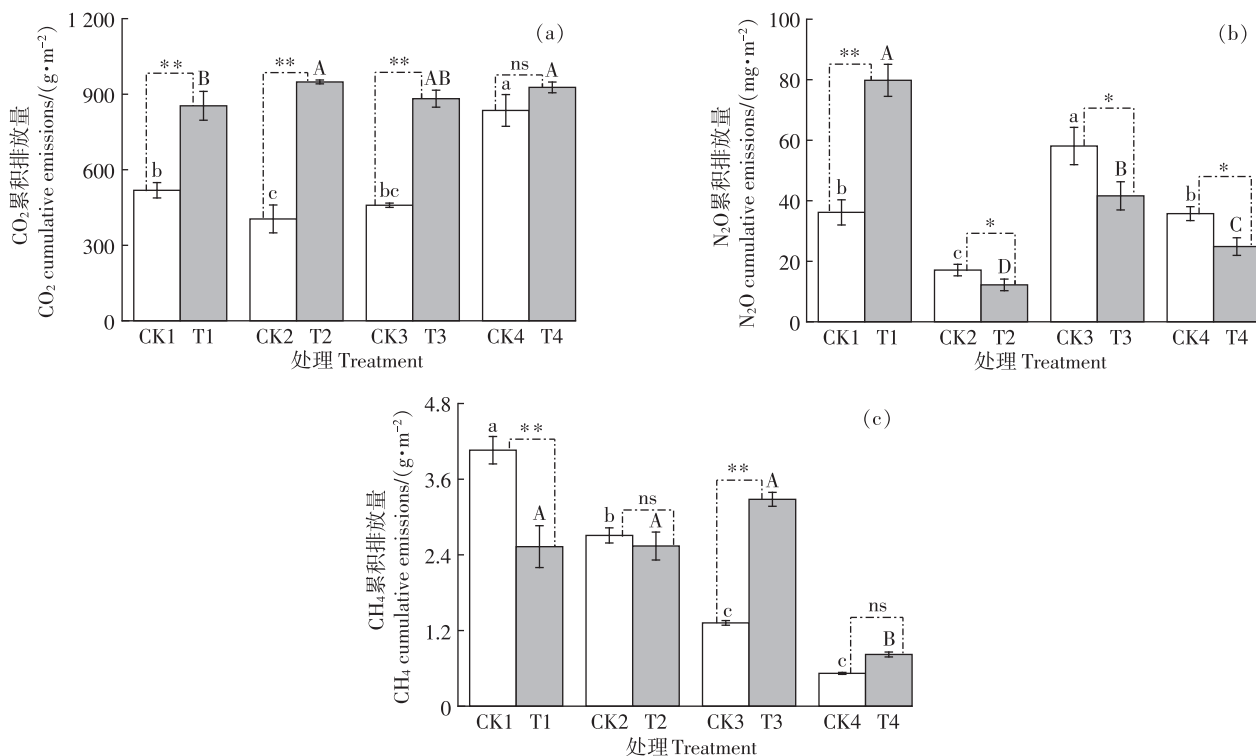


图6 不同试验处理温室气体累积排放量

Figure 6 Cumulative greenhouse gas emissions of different treatments

底物中NH₄⁺-N和TN含量,相关性分析表明NH₄⁺-N与NH₃排放通量呈显著正相关,试验组NH₃累积排放量也显著低于对照组(图2),这一结果与Chen等^[27]的研究一致。相比于传统堆肥,黑水虻在不同含水率下生物转化畜禽粪便可大幅度降低NH₃排放,而在此过程中只有1.47%~2.75%的氮转化为NH₃和温室气体。在整个试验初期引入蝇蛆进行预处理,能在短期内快速消耗大量氮源。Alejandro等^[28]的研究也表明黑水虻的添加使得转化后的猪粪中氮减少25%,这可能是此次试验中试验组NH₃排放量降低的主要原因之一。此外,预处理后的虫沙黏度降低、疏松多孔,氧气的大量进入能够促进堆体中微生物繁殖及代谢活动,从而对NH₃排放量起到有效的抑制作用^[29]。

3.3 蝇蛆预处理与辅料添加及其交互处理具有不同的温室气体排放规律

堆肥过程中N₂O排放是由微生物活动、堆肥表面硝化作用和堆肥内部反硝化作用产生的。在本试验中,试验组中T2、T3和T4的N₂O累积排放量显著低于CK2、CK3和CK4,说明蝇蛆预处理能够有效降低N₂O排放,这与Boakye等^[30]的研究一致,黑水虻蠕动会引起底物内的曝气,通过减少反硝化细菌数量来抑制反硝化,从而降低N₂O排放。在蝇蛆预处理阶段第I天中CK4和T4均处于N₂O排放通量峰值,其余处理都维持在很低的水平。由此可见,蘑菇渣的加入对堆肥过程中N₂O排放有着较大的影响。Zhang等^[31]研究发现,鸡粪与适量的蘑菇渣共堆肥时,N₂O的排放主要

发生在堆肥初期,各处理在第1天时排放通量达到峰值。 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 是微生物硝化和反硝化的基质, N_2O 的产生在很大程度上受这两种基质影响,堆肥前期 NO_3^--N 含量高是导致 N_2O 排放的重要原因,同时活性反硝化细菌也有着较高的贡献^[32-33]。除添加蘑菇渣处理的CK4、T4,其余处理均表现出前期 N_2O 的排放量维持在很低的水平,随着堆肥时间的增加 N_2O 的排放通量也小幅度增加,这与Miguel等^[34]和Jiang等^[35]的研究相似,在堆肥过程早期,高温和高浓度的游离铵($300\sim 1\ 650\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)可能对硝化细菌产生抑制作用,有效碳源的缺乏也会在一定程度上抑制异养反硝化细菌活性。也有研究表明 N_2O 排放的关键因素是堆体氮素的供应水平^[36],反硝化细菌在消耗尽有机碳后才会产生 N_2O ^[37]。CK2和T2处理相比于其他处理 N_2O 累积排放量均处于较低水平,且处理间并没有显著的差异($P>0.05$)。有研究表明风化褐煤表面有较多的孔隙及裂隙^[38],而风化褐煤的添加能延长堆肥高温阶段及堆体通风量,促进硝化作用,导致 N_2O 排放量降低。

好氧堆肥过程中 CO_2 的排放主要是微生物降解有机质引起的, CO_2 的排放通量可以直接反映堆肥过程中微生物的活性及有机质的降解矿化速率^[39]。在生物转化阶段 CO_2 排放通量也可以间接表明底物的生物降解率^[40]。试验初期, CO_2 主要来源于底物中微生物活动代谢和蝇蛆幼虫呼吸,在生物转化第1天T2和T4的 CO_2 排放通量明显低于对照组,这可能是风化褐煤及蘑菇渣的加入对蝇蛆活性具有抑制作用或者辅料与蝇蛆的协同作用在一定程度上抑制了 CO_2 排放。在堆肥阶段试验组 CO_2 排放均来自于微生物代谢,而在此阶段 CO_2 的排放通量明显高于对照组,说明蝇蛆引入能够改善底物性状,提高微生物活性。菇渣添加使得堆体 CO_2 排放通量在堆肥前期就达到峰值,这是因为菇渣疏松多孔的结构使堆体氧气较为充裕,再加上堆肥初期堆体养分含量较高,好氧微生物快速繁殖,使部分容易分解的可溶性物质氧化分解生成 CO_2 和 H_2O ^[41]。试验组其余处理 CO_2 排放通量峰值均出现在堆肥第17天,由于试验初期大量的有机物料被生物转化,所以导致堆肥初期 CO_2 排放较少。随着堆肥天数的增加,不易分解的有机物料被转化,导致堆肥中期大量的 CO_2 排出^[42]。对照组在前期也具有较低的 CO_2 排放通量,其主要原因在于物料性状,鸡粪的黏性结构不同程度地抑制了微生物活性。此外,随着含水率的降低,鸡粪抱团为小球状阻隔了

氧气的进入,使其内部的氧气含量降低,进而导致 CO_2 排放较低^[43-44]。

试验过程中氧气浓度是影响 CH_4 产生的重要因子,堆体内部的易降解有机物质及水分含量在一定程度上能够加速 CH_4 的释放^[7]。各处理 CH_4 排放主要集中在整个试验的第1天,早期阶段底物水分含量大、孔隙度低和微生物活动较为剧烈,当完成有氧代谢后堆体中出现部分小分子有机酸(甲酸、乙酸和丙酸),在厌氧条件下甲烷菌利用 CO_2 和乙酸产生 CH_4 ^[45],这可能是导致第1天 CH_4 排放通量高的主要原因。本试验中T1处理 CH_4 排放通量峰值和累积排放量均低于CK1,说明蝇蛆预处理在一定程度上能够降低 CH_4 排放,有机物降解过程中的厌氧条件会产生大量的 CH_4 排放,而蝇蛆的饲养在半好氧条件下,因此导致较低的 CH_4 排放^[46]。此外,蝇蛆通过生物转化和蠕动改善底物空气循环并减少 CH_4 产生^[47]。本研究发现,翻堆后 CH_4 排放通量会出现小幅度下降。Jiang等^[35]的研究也发现不翻堆处理 CH_4 排放量显著高于翻堆处理。分析表明,底层环境条件包括厌氧环境、低于200 mV的氧化还原电位和较高的温度均有利于 CH_4 的排放^[32]。Szanto等^[48]也有类似发现,翻堆以 CH_4 的形式损失0.4%的初始有机碳,而静态堆肥损失12.9%。翻动堆体能使物料混合均匀并能改善堆体通风,而且能使有厌氧条件的大颗粒破碎^[49]。

4 结论

(1)蝇蛆预处理可以延长堆肥高温期,使其各处理高温期均超过10 d,相比无蝇蛆预处理的纯鸡粪堆肥增加了5~9 d,符合《粪便无害化卫生标准》(GB 7959—2012)。

(2) NH_3 排放通量与pH、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 和总氮间具有显著相关性。蝇蛆预处理相比于无预处理对照组能够显著降低 NH_3 排放,在纯鸡粪条件下蝇蛆预处理降低47%的 NH_3 排放,菇渣和蝇蛆预处理组合达到最佳减排效果,比纯鸡粪处理降低67.1%。

(3)蝇蛆预处理能够显著降低 CO_2 排放当量($E_{\text{CO}_2,e}$),但同时提高各处理 CO_2 排放量。其中,菇渣和蝇蛆预处理组合有最低的 $E_{\text{CO}_2,e}$,其相比CK1下降73.2%。

参考文献:

- [1] LIM S S, PARK H J, HAO X Y, et al. Nitrogen, carbon, and dry matter losses during composting of livestock manure with two bulking agents

- as affected by co-amendments of phosphogypsum and zeolite[J]. *Ecology Environment & Conservation*, 2017, 10(2):280-290.
- [2] 陈江珊. 水虻转化农业有机废弃物过程中氮素形态及转化效率研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2021:1-9. CHEN J S. The research on nitrogen forms and conversion efficiency of agricultural organic wastes by black soldier fly[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2021:1-9.
- [3] TURAN N G. Nitrogen availability in composted poultry litter using natural amendments[J]. *Waste Management & Research*, 2009, 27(1):19-24.
- [4] IPCC 2014. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [R]. Geneva: Climate Change 2014 Synthesis Report, 2014.
- [5] SOREN O, PETENSR, SVEN G, et al. Ammonia and nitrous oxide interactions: roles of manure organic matter management[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2011, 166:503-513.
- [6] 王义祥, 高凌飞, 辛思洁, 等. 菌渣-发酵床废弃垫料堆肥中温室气体排放及与微生物的关系[J]. 环境科学学报, 2017, 37(12):4662-4669. WANG Y X, GAO L F, XIN S J, et al. Greenhouse gas emission and its correlation with microbial in composting of waste packing and fungus chaff[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(12):4662-4669.
- [7] 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 NH_3 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. Effect of peanut shell biochar on greenhouse gas and NH_3 emission during swine manure composting[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2021, 26(6):114-125.
- [8] 王芳, 朱芬, 雷朝亮. 中国家蝇资源化利用研究进展[J]. 应用昆虫学报, 2013, 50(4):1149-1156. WANG F, ZHU F, LEI C L. Recent advances in the utilization of the housefly as a food resource in China[J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2013, 50(4):1149-1156.
- [9] HUIS V A, ONINCX B A G D. The environmental sustainability of insects as food and feed: a review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2017, 37(5):275-282.
- [10] BORTNINI S, MACAVEI I L, SAADUON H J, et al. *Hermetia illucens* (L.) larvae as chicken manure management tool for circular economy[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 262:121289.
- [11] YANG F, LI G X, SHI H, et al. Effects of phosphogypsum and superphosphate on compost maturity and gaseous emissions during kitchen waste composting[J]. *Waste Management*, 2015, 36(6):70-76.
- [12] BESKIN K V, HOLCOMB C D, JONATHAN A, et al. Larval digestion of different manure types by the black soldier fly (*Diptera: Stratiomyidae*) impacts associated volatile emissions[J]. *Waste Management*, 2018, 74:213-220.
- [13] 朱新梦. 洱河流域奶牛粪便堆肥过程中氮素转化和温室气体排放研究[D]. 北京:中国农业科学院, 2017:1-5. ZHU X M. Research of nitrogen transformation and greenhouse gas emissions in Erhai basin during dairy manure composting[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2017:1-5.
- [14] 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.
- [15] 刘沐衡, 王贵云, 张彦东, 等. 牛场粪水添加外源添加物施用后对土壤氮挥发的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(11):2568-2573. LIU M H, WANG G Y, ZHANG Y D, et al. Effect of exogenous additives in cattle farm slurry on soil ammonia volatilization after application[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(11):2568-2573.
- [16] 王跃思, 刘广仁, 王迎红, 等. 一台气相色谱仪同时测定陆地生态系统 CO_2 , CH_4 和 N_2O 排放[J]. 环境污染治理技术与设备, 2003(10):84-90. WANG Y S, LIU G R, WANG Y H, et al. Simultaneous measurement of CO_2 , CH_4 and N_2O emission from terrestrial ecosystem with one improved gas chromatography[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2003(10):84-90.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社, 2000. BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [18] 中华人民共和国农业农村部. 有机肥料: NY/T 525—2021[S]. 北京:中国农业出版社, 2021. Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the PRC. Organic fertilizer: NY/T 525—2021[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2021.
- [19] 赵伟东, 郭宝玲, 郑祥洲, 等. 烟-稻轮作不同施肥土壤 N_2O 排放对水分的响应[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(7):1655-1665. ZHAO W D, GUO B L, ZHENG X Z, et al. Effects of moisture content on N_2O emission in different fertilized soils under tobacco-rice rotation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(7):1655-1665.
- [20] 中关村生态乡村创新服务联盟. 畜禽粪便腐殖化堆肥项目温室气体减排核算技术规范: T/ZGCERIS 0006—2019[S]. 北京:中关村生态乡村创新服务联盟, 2019. Eco-Rural Innovation Services. Technical specification for accounting of greenhouse gas emission reduction of livestock manure humus composting project: T/ZGCERIS 0006—2019[S]. Beijing: Eco-Rural Innovation Services, 2019.
- [21] CHEN W, LIAO X D, WU Y B, et al. Effects of different types of biochar on methane and ammonia mitigation during layer manure composting[J]. *Waste Management*, 2017, 61:506-515.
- [22] MENG X Y, LIU B, XI C, et al. Effect of pig manure on the chemical composition and microbial diversity during co-composting with spent mushroom substrate and rice husks[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 251:22-30.
- [23] WANG G Y, KONG Y L, LIU Y, et al. Evolution of phytotoxicity during the active phase of co-composting of chicken manure, tobacco powder and mushroom substrate[J]. *Waste Management*, 2020, 114:25-32.
- [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] 胡伟桐, 余雅琳, 李喆, 等. 不同调理剂对生物沥浸污泥堆肥氮素

- 损失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(12): 2379-2385. HU W T, YU Y L, LI Z, et al. Effects of different organic bulking agents on nitrogen loss during composting of dewatered bioleached sludge on a commercial scale[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(12): 2379-2385.
- [26] MEI B, ROBERT I, TREVOR C, et al. Lignite effects on NH_3 , N_2O , CO_2 and CH_4 emissions during composting of manure[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 271: 110960.
- [27] CHEN J S, HOU D J, PANG W C, et al. Effect of moisture content on greenhouse gas and NH_3 emissions from pig manure converted by black soldier fly[J]. *Ecology Environment & Conservation*, 2019, 697(C): 133840.
- [28] ALEJANDRO P, WALTER J J, GERRTIS, et al. Black soldier fly reared on pig manure: bioconversion efficiencies, nutrients in the residual material, greenhouse gas and ammonia emissions[J]. *Waste Management*, 2021, 126: 674-683.
- [29] CHEN H, AWASTHI K S, LIU T, et al. Effects of microbial culture and chicken manure biochar on compost maturity and greenhouse gas emissions during chicken manure composting[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 389: 121908.
- [30] BOAKYE Y K A, ALESSIO I, DANIELE D. Greenhouse gas emissions and life cycle assessment on the black soldier fly (*Hermetia illucens* L.)[J]. *Sustainability*, 2022, 14: 10456.
- [31] ZHANG B X, YIN R X, TAN Y, et al. Evaluation of maturity and greenhouse gas emission in co-composting of chicken manure with tobacco powder and vinasse/mushroom bran[J]. *Processes*, 2021, 12(9): 2105.
- [32] LI R H, WANG Q, ZHANG Z Q, et al. Nutrient transformation during aerobic composting of pig manure with biochar prepared at different temperatures[J]. *Environmental Technology*, 2015, 36(7): 815-826.
- [33] YASUDA T, WAKI M, FUKUMOTO Y, et al. Community structure of denitrifying and total bacteria during nitrogen accumulation in an ammonia-loaded biofilter[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2017, 123(6): 1498-1511.
- [34] MIGUEL A, SANCHEZ M, NURIA S, et al. Greenhouse gas emissions during composting of two-phase olive mill wastes with different agroindustrial by-products[J]. *Chemosphere*, 2010, 81(1): 18-25.
- [35] JIANG T, SCHUCHARDT F, LI X G, et al. Gaseous emission during the composting of pig feces from Chinese Ganqinfen system[J]. *Chemosphere*, 2013, 90(4): 1544-1551.
- [36] HUI C H, SO N K, LEE G Y S. Nitrous oxide flux from landfill leachate-sawdust nitrogenous compost[J]. *Chemosphere*, 2003, 52(9): 1547-1551.
- [37] HE Y, INAMORI Y, MIZUOCHI M, et al. Nitrous oxide emissions from aerated composting of organic waste[J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, 35(11): 2347-2351.
- [38] 张双斌, 赵树峰, 郭红玉, 等. 风化煤与褐煤转化生物甲烷的差异性分析[J/OL]. 煤炭科学技术, 1-10[2023-05-25]. <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1945>. ZHANG S B, ZHAO S F, GUO H Y, et al. Analysis of the difference between weathered coal and lignite in the conversion of biomethane[J]. *Coal Science and Technology*, 1-10 [2023-05-25]. <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1945>.
- [39] HE X Q, YIN H J, SUN X X, et al. Effect of different particle-size biochar on methane emissions during pig manure/wheat straw aerobic composting: insights into pore characterization and microbial mechanisms[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 268: 633-637.
- [40] ERMOLAEV E, LALANDER C, VINNERAS B. Greenhouse gas emissions from small-scale fly larvae composting with *Hermetia illucens* [J]. *Waste Management*, 2019, 96(C): 65-74.
- [41] 朱海生, 左福元, 董红敏, 等. 堆体规模对牛粪堆肥氨气和温室气体排放的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(5): 77-84. ZHU H S, ZUO F Y, DONG H M, et al. Effect of pile scale on emission of ammonia and greenhouse gas during cattle manure composting[J]. *Journal of Northwest A&F University*, 2018, 46(5): 77-84.
- [42] GOLD M, TOMBERLIN K J, DIENER S, et al. Decomposition of bio-waste macronutrients, microbes, and chemicals in black soldier fly larval treatment: a review[J]. *Waste Management*, 2018, 82: 302-318.
- [43] 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, 22(1): 56-59. XIE J F, LI Y E. Release of greenhouse gases from composting treatments on pig-gery excreta[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2003, 22(1): 56-59.
- [44] 孙凯佳, 戚鑫, 付彤, 等. 塑料薄膜覆盖对牛粪便温室气体排放的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 262-267. SUN K J, QI X, FU T, et al. Effects of plastic sheet covering on greenhouse gas emission from beef cattle manure during storage[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(3): 262-267.
- [45] ZANG B, LI S Y, MICHEL F, et al. Effects of mix ratio, moisture content and aeration rate on sulfur odor emissions during pig manure composting[J]. *Waste Management*, 2016, 56: 498-505.
- [46] PEREDNIA D A, ANDERSON J, RICE A, et al. A comparison of the greenhouse gas production of black soldier fly larvae versus aerobic microbial decomposition of an organic feed material[J]. *Journal of Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 5: 10-16.
- [47] LINDBERG L, ERMOLAEV E, VINNERAS B, et al. Process efficiency and greenhouse gas emissions in black soldier fly larvae composting of fruit and vegetable waste with and without pre-treatment[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 338: 130552.
- [48] SZANTO G L, HAMELERS H V M, RULKENS W H, et al. NH_3 , N_2O and CH_4 emissions during passively aerated composting of straw-rich pig manure[J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98(14): 2659-2670.
- [49] JIANG T, SCHUCHARDT F, LI X G, et al. Effect of C/N ratio, aeration rate and moisture content on ammonia and greenhouse gas emission during the composting[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, 23(10): 1754-1760.

(责任编辑:李丹)