



黄周轲,王莉,叶小梅. 黑水虻生物堆肥处理鸡粪养分转化及气体排放规律研究[J]. 南京农业大学学报,2024,47(2):292-297.
HUANG Zhouke,WANG Li,YE Xiaomei. A study of nutrient transformation and gas emission during chicken manure biocomposting with black soldier fly[J]. Journal of Nanjing Agricultural University,2024,47(2):292-297.

黑水虻生物堆肥处理鸡粪养分转化及气体排放规律研究

黄周轲^{1,2},王莉²,叶小梅^{1,2*}

(1.江苏大学环境与安全工程学院,江苏 镇江 212013;

2.江苏省农业科学院农业农村部种养结合重点实验室,江苏 南京 210014)

摘要:[目的]本研究旨在探究添加黑水虻幼虫对鸡粪堆肥养分含量、腐熟度及气体排放变化的影响,为推广黑水虻生物堆肥处理鸡粪提供科学依据。[方法]本研究设置了2个处理,新鲜鸡粪添加黑水虻幼虫(黑水虻处理组)与不添加黑水虻幼虫处理(对照组),比较不同堆肥处理理化性质变化、温室气体与氨气排放变化规律。[结果]黑水虻生物堆肥转化鸡粪料虫比为6.70,生物转化率为38.3%,物料鲜重减量率为66.0%,对照组物料的鲜重减量率仅为47.6%;在周期为12 d的试验中,黑水虻处理组CO₂累积排放量在前6 d低于对照组,后期CO₂累积排放量高于对照组,而CH₄排放量远低于对照组,黑水虻处理组与对照组均未检测到N₂O的明显排放,黑水虻处理组非CO₂全球增温潜势显著低于对照组,仅为对照组的7.09%;黑水虻处理组NH₃累积排放量高于对照组。[结论]黑水虻能直接实现高湿物料鸡粪的减量化处理,并转化为有经济价值的虫体及虫粪,且温室气体的排放潜势显著低于对照组,是一种低碳高效高值的畜禽粪污处理模式。

关键词:黑水虻;生物转化;鸡粪;物化性质;气体排放

中图分类号:S186

文献标志码:A

文章编号:1000-2030(2024)02-0292-06

A study of nutrient transformation and gas emission during chicken manure biocomposting with black soldier fly

HUANG Zhouke^{1,2},WANG Li²,YE Xiaomei^{1,2*}

(1.School of the Environment and Safety Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

2. Key Laboratory For Crop and Animal Integrated Farming, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract:[Objectives]The purpose of this study was to explore the effects of the addition of black soldier fly on the nutrient and maturity of materials and gas emissions changes of materials during the transformation of chicken manure, providing scientific basis for promoting the biological composting of chicken manure by the black soldier fly. [Methods]Two treatments were set up in this experiment, one treatment was fresh chicken manure added with black water fly larvae (BSF treatment) and the other treatment was without black water fly larvae (control), comparing the changes of physical and chemical properties, greenhouse gas and ammonia emissions between these two treatments. [Results]Feed insect ratio of chicken manure treated with black soldier fly was 6.70, and the biotransformation rate was 38.3%, the fresh weight reduction rate of the material was 66.0%, but the fresh weight reduction rate of the control group material was only 47.6%. In the experiment with a period of 12 days, the accumulated CO₂ emission of the BSF treatment group was lower than that of the control group in the first 6 days, then the accumulated CO₂ emission was higher than that of the control group, but CH₄ emission was far lower than that of the control group. In addition, no obvious N₂O emission was observed in both BSF treatment group and control group, and the non-CO₂ global warming potential of BSF treatment group was significantly lower than that of the control group, which was only 7.09% of that produced in control group. Meanwhile, its cumulative emission of ammonia was higher than that of the control group. [Conclusions]The black soldier fly could directly reduce the amount of high-moisture material chicken manure and transform it into economically valuable insect body and vermiculite sand, and its emission potential of greenhouse gas was significantly lower than that of the control group. So, biocomposting of chicken manure by the black soldier fly was a low carbon, high efficiency and high value livestock and poultry manure treatment mode.

Keywords:black soldier fly; biotransformation; chicken manure; physical and chemical properties of materials; gaseous emissions

收稿日期:2023-03-21

基金项目:江苏省农业科技自主创新资金项目[CX(21)1008];江苏现代农业产业技术体系建设专项资金(JATS[2022]439)

*通信作者:叶小梅,研究员,主要从事废弃物的资源化利用研究, E-mail: yexiaomei610@126.com。

为满足人们对蛋奶肉不断增长的需求,畜禽养殖业发展迅猛。同时,畜禽粪便量的产生日益增加,目前我国每年畜禽粪污产量约为 38 亿 t,其中鸡粪产生量约为 1.8 亿 t。为消除畜禽粪便带来的环境危害,急需寻找新兴、高效的方法处理大量的畜禽粪便,并实现其资源化利用^[1]。

亮斑扁角水虻(*H. illucens*),俗称黑水虻(black soldier fly, BSF),主要集中在热带、亚热带和温带的大部分地区^[2]。黑水虻幼虫(BSFL)以易腐有机物为食,可实现有机废弃物的减量化及无害化处理,并产生具有经济价值的虫体和虫粪,特别是在餐厨垃圾上具有很好的处理效果。研究显示黑水虻能实现畜禽粪污的处理,可以在 1~2 周改变粪便的物理、化学和生物性质,改变畜禽粪便的初始水分和营养水平^[3];在安全的情况下,可用于生产动物饲料添加剂和生物肥料^[4]。此外,使用 BSFL 生物转化处理畜禽粪便可以显著减少新鲜粪便中存在的恶臭化合物的排放^[5]。黑水虻处理作为一种生物转化技术被越来越认可,目前关于黑水虻处理畜禽粪便的研究主要为黑水虻处理畜禽粪便养殖工艺、处理效率、虫体的营养及虫粪养分含量,其中黑水虻对鸡粪的生物转化率最高^[6],但对黑水虻生物堆肥处理鸡粪过程中碳、氮循环及气体排放研究数据较少。

在生物转化过程中,碳、氮损失是至关重要的因素。在黑水虻处理畜禽粪便过程中,碳和氮一部分是通过生物代谢作用以温室气体(CO₂、CH₄、N₂O 等)和氨气的形式排放,还有一部分被黑水虻同化为自身的蛋白质和脂肪等物质,剩余部分则未被利用或由虫体以虫粪形式排出,最终留在残余物中。鸡粪是一种高湿度、低 C/N、富含有机质的有机废弃物,是优质的有机肥原料^[7],但未腐熟的鸡粪具有一定的植物毒性^[8]。本研究比较分析了试验期间添加黑水虻幼虫处理新鲜鸡粪和未添加黑水虻鸡粪的碳与氮循环、温室气体以及氨气排放变化特征,为黑水虻生物堆肥处理鸡粪提供数据支撑及科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

黑水虻由江苏省农业科学院畜牧研究所养殖污染控制创新团队虫房提供,该品种来自华中农业大学选育的武汉亮斑品系。将黑水虻虫卵在 28 ℃ 恒温和 65% 恒湿条件下孵化 2~3 d,采用玉米粉和麦麸混合后调节含水率为 75% 进行饲料喂养;将 6 日龄黑水虻幼虫用于试验,新鲜鸡粪来自南京沃优生物肥料有限公司。

1.2 试验设计

将 6 日龄幼虫按每千克物料 2 000 头进行接种,即 10 000 头黑水虻幼虫接种投入装有 5 kg 新鲜鸡粪的塑料盒中(37 cm×26.5 cm×14 cm)。采用一次性布料的方式进行饲养,对照组塑料盒中装 5 kg 鸡粪,但不投加黑水虻幼虫,试验组和对照组放置在恒温恒湿虫房内,每日检查虫房环境,确保虫房空气流通正常。新鲜鸡粪平均含水率为 76.4%,饲养环境温度(26±1) ℃,相对湿度为(70±2)%,当黑水虻生物转化鸡粪第 12 天时进行虫体与虫粪的分筛,计算黑水虻生物转化过程中的料虫比、生物转化率、物料鲜重减重率。料虫比=初始物料鲜重/虫体鲜重;生物转化率=(收获虫体干重-初始虫体干重)/(初始物料干重-剩余物料干重)×100%;物料鲜重减重率=(初始物料鲜重-收获物料鲜重)/初始物料鲜重×100%。物料每 3 d 采样 1 次,一部分风干后用于其基本理化性质的测定,一部分物料存于 4 ℃ 冰箱用于物料鲜样指标的测定;采用静态箱法测定不同处理气体排放通量。静态箱的示意图如图 1 所示,静态箱的直径为 24 cm,高 29.5 cm,箱内顶部安装有 1 个小风扇,箱体上部 1 个采气孔。采气时将采样箱放置到盆钵的凹槽内,凹槽内加水密封,使采样箱保持密闭状态。气体样品采集时间为 14:00—15:00,采样频率为每日 1 次,分别于关箱后 10、20、30 min 用气泵将箱体内气体抽入 500 mL 的气袋中,共采集 3 次,保存于气袋中的气体用于后续温室气体浓度的测定^[9],采用静态箱密闭法-硼酸滴定法测定氨气排放通量^[10]。

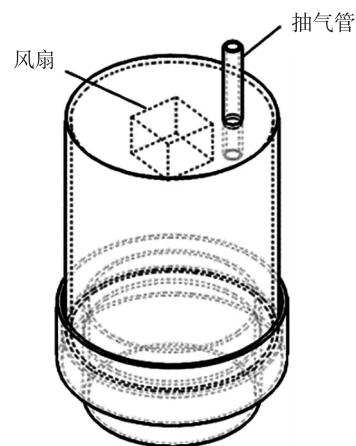


图 1 静态箱装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of static box device

1.3 指标测定

依据文献[11]的方法进行物料基本理化性质测定,采用烘干法测定物料含水率;采用稀释热法测定有机碳含量;采用凯氏定氮仪(型号 K9860,海能)测定总氮含量;使用火焰光度计(型号 FP640,昶析)测定总钾含量;采用钼酸盐比色法测定总磷含量;使用 pH 仪(型号 HZP-T502,华志)测定 pH 值。种子发芽指数按照《有机肥料:NY/T 525—2021》中的方法进行测定,发芽指数=处理组平均发芽率×处理组平均根长/(空白平均发芽率×空白平均根长)×100%。采用气相色谱仪(型号 7890A,安捷伦)测定 CO₂、CH₄ 和 N₂O 的浓度,再利用差量法计算气体排放通量^[9],CO₂、CH₄、N₂O 排放通量 F_i (mg·m⁻²·h⁻¹) 的计算公式: $F_i = \rho \times H \times d(c_{i+1} - c_i) / d(t_{i+1} - t_i)$ 。式中: ρ 为标大准气压下 CO₂、CH₄、N₂O 密度,CO₂、CH₄、N₂O 的对应值分别为 1.96、0.716 和 1.96 g·L⁻¹; H 为静态箱高度, $H=0.295$ m; c 为采集气体的浓度; i 为采样次数; t 为采样时间。气体累积排放量 E_c (mg·kg⁻¹) 的计算公式: $E_c = \sum F_i \times 24 \times 0.083$ 。式中: F_i 为 CO₂、CH₄、N₂O 或 NH₃ 排放通量 (mg·m⁻²·h⁻¹); 24 为 1 d 的小时数, 0.083 为单位换算系数。温室气体二氧化碳当量值 (greenhouse gas emission equivalent value, GHGE)^[12] (kg·t⁻¹) 的计算公式: $GHGE = E_{CH_4} \times 34 \times 10^{-3} + E_{N_2O} \times 298 \times 10^{-3}$ 。式中: E_{CH_4} 为 CH₄ 累积排放量 (mg·kg⁻¹); E_{N_2O} 为 N₂O 累积排放量 (mg·kg⁻¹); CO₂ 的全球变暖潜能值为 1, CH₄ 和 N₂O 的全球变暖潜能分别为 34 和 298。采用静态箱吸收法进行 NH₃ 测定,将装有 2% 硼酸溶液的杯子放置在静态箱中吸收 30 min,收集吸收液后滴加溴甲酚绿甲基红指示剂,然后用 0.01 mol·L⁻¹ 硫酸滴定,计算 NH₃ 的排放速率^[10]。

1.4 数据处理与分析

采用 Origin 2023 软件进行数据处理和图表绘制,采用 SPSS 20 统计软件进行方差分析, LSD 法进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 物料理化性质变化特征

将 125 g 黑水虻幼虫投入 5 kg 鸡粪中, 12 d 后收获黑水虻鲜虫均重为 0.746 kg, 黑水虻处理鸡粪料虫比为 6.70, 即 6.70 kg 鸡粪产生 1 kg 的虫体, 计算其生物转化率为 38.3%。5 kg 新鲜鸡粪经黑水虻转化后剩余物料重为 1.63 kg, 鲜重减重率为 66.0%, 而对照组最终的物料重为 2.62 kg, 减重率仅为 47.6%。

从表 1 可知, 黑水虻生物堆肥处理鸡粪后物料含水率由 76.4% 下降至 56.4%, 而对照组因发生了部分厌氧发酵, 物料含水率增加, 达到 80.2%, 黑水虻处理组和对照组有机碳含量均略微降低, 但总氮含量均显著降低, 其中试验组的降低幅度大于对照组。鸡粪经黑水虻生物转化后由酸性变为碱性, 对照组仍为酸性, 且黑水虻处理组和对照组剩余物料的发芽指数差异显著, 黑水虻生物堆肥处理鸡粪后剩余物料的发芽指数显著增加, 达 61.2%, 而对照组为 20.1% (表 1)。

表 1 物料理化性质变化情况

Table 1 Changes in physical and chemical properties of materials

物料 Component	含水率/% Moisture content	pH 值 pH value	有机碳含量/ (g·kg ⁻¹) Total organic carbon content	总氮含量/ (g·kg ⁻¹) Total nutrient content	总磷含量/ (g·kg ⁻¹) Total phosphorous content	总钾含量/ (g·kg ⁻¹) Total potassium content	种子发芽 指数/% Germination index of seed
初始新鲜鸡粪 Initial fresh chicken manure	76.4±0.3 ^b	6.40±0.01 ^b	317±4 ^a	39.3±0.4 ^a	5.50±0.10 ^b	9.62±0.05 ^c	8.23±0.5 ^c
黑水虻处理组剩余物料 Residues manure in BSFL treatment	56.4±1.6 ^c	7.92±0.06 ^a	287±6 ^c	13.7±0.5 ^c	7.01±0.30 ^a	13.1±0.14 ^a	61.2±1.1 ^a
对照组剩余物料 Residues manure in control check	80.2±0.5 ^a	6.41±0.04 ^b	305±3 ^b	20.3±0.2 ^b	6.98±0.11 ^a	11.4±0.13 ^b	20.1±0.5 ^b

注:不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。

Note: Lowercase letters indicate significant difference at 0.05 level.

碳、氮循环分析结果(表 2)显示, 黑水虻处理组碳在幼虫中的分配比例为 12.1%, 在剩余物虫砂中的比例为 54.9%, 损失比例为 32.9%; 氮 19.5% 转移到幼虫中, 残留在虫砂中比例为 30.6%, 损失比例达到 49.7%。未添加黑水虻的对照组碳在剩余物中的比例为 42.3%, 损失比例为 57.7%; 氮在剩余物比例 22.9%, 损失比例为 77.1%。总之, 黑水虻生物堆肥处理鸡粪碳和氮的损失均显著小于未加黑水虻幼虫的对照组。

表 2 物料碳、氮循环分析

Table 2 Carbon and nitrogen cycle analysis of materials

%

指标 Index	黑水虻处理组 Black soldier fly (BSF) treatment group			对照组 Control group	
	幼虫中比例 Proportion of larvae	虫砂中比例 Proportion of vermin sand	损失比例 Proportion of loss	剩余物中比例 Proportion of residues	损失比例 Proportion of loss
C	12.1±0.5	54.9±0.7	32.9±0.4 ^b	42.3±0.8	57.7±0.8 ^a
N	19.5±0.4	30.6±0.7	49.7±0.4 ^b	22.9±0.6	77.1±0.5 ^a

2.2 温室气体排放通量比较

黑水虻处理畜禽粪便转化过程中气体排放是碳和氮损失的主要途径,气体排放通量及累积排放量可以直观反映该过程中碳、氮损失情况。图 2 结果显示,气体排放碳的损失主要为 CO₂,其中不添加黑水虻的对照组有一定量 CH₄ 排放,而黑水虻处理组 CH₄ 排放量极低。黑水虻处理组和对照组前试验 3 d CO₂ 的排放通量无明显差异;4~6 d 对照组排放通量高于黑水虻处理组 1 倍;7 d 时黑水虻处理组 CO₂ 的排放通量急剧升高,达到最高值,随后出现大幅降低,7~8 d 黑水虻处理组显著高于对照处理组;9~12 d 黑水虻处理组 CO₂ 的排放降至初始水平,与对照组无差异。CO₂ 累积排放量的结果显示,黑水虻处理组 CO₂ 累积排放量在试验前 6 d 均低于对照组,后 6 d 的累积排放量高于对照组。

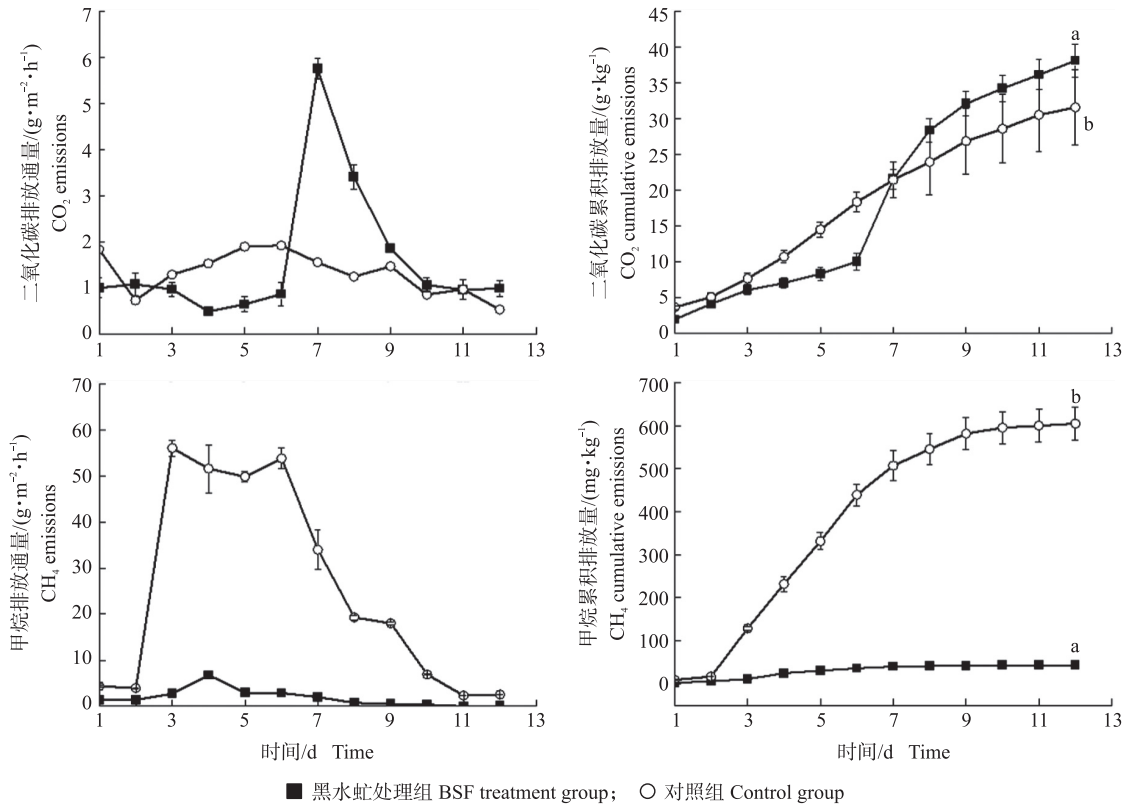


图 2 黑水虻处理组和对照组温室气体排放比较分析

Fig. 2 Comparative analysis of greenhouse gas emissions between BSF treatment group and control group

黑水虻处理组 CH₄ 排放通量在整个试验过程中均较低,变化幅度为 0.03~6.77 mg·m⁻²·h⁻¹;而对照组 CH₄ 排放通量显著高于黑水虻处理组,在试验 3 d 达到最高值(56.1 mg·m⁻²·h⁻¹),整体呈先升高后逐渐降低的变化趋势,试验结束时降至 2.31 mg·m⁻²·h⁻¹。黑水虻处理组 CH₄ 累积排放量为 43.0 mg·kg⁻¹,对照组 CH₄ 累积排放量显著高于处理组,达 605 mg·kg⁻¹。

2.3 全球变暖潜势值比较

图 3 显示:对照组全球变暖潜势值,即温室气体

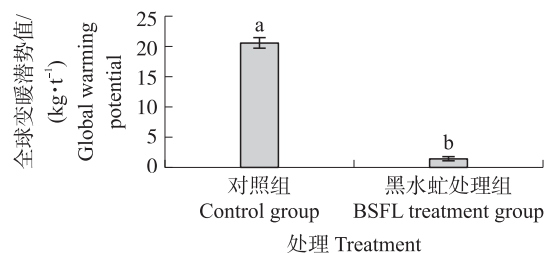


图 3 黑水虻处理组和对照组全球变暖潜势值比较
Fig. 3 Comparison of global warming potential between BSF treatment group and control group

二氧化碳当量值为 $20.6 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$; 黑水虻处理组产生的温室气体二氧化碳当量值为 $1.46 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$, 仅为对照组的 7.09%。因此, 相较于对照组, 采用黑水虻处理新鲜的鸡粪能显著降低全球变暖潜势, 是一种高效高值低碳的畜禽粪污处理模式。

2.4 NH_3 排放比较

从图 4 可知, 黑水虻处理组 NH_3 排放通量在整个试验过程均高于对照组, 黑水虻处理组和对照组 NH_3 排放通量随处理时间均呈整体下降趋势, 变化范围分别为 $103 \sim 411 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $41.8 \sim 197 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。黑水虻处理组 NH_3 累积排放量达 $147 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 是对照组的 2 倍。

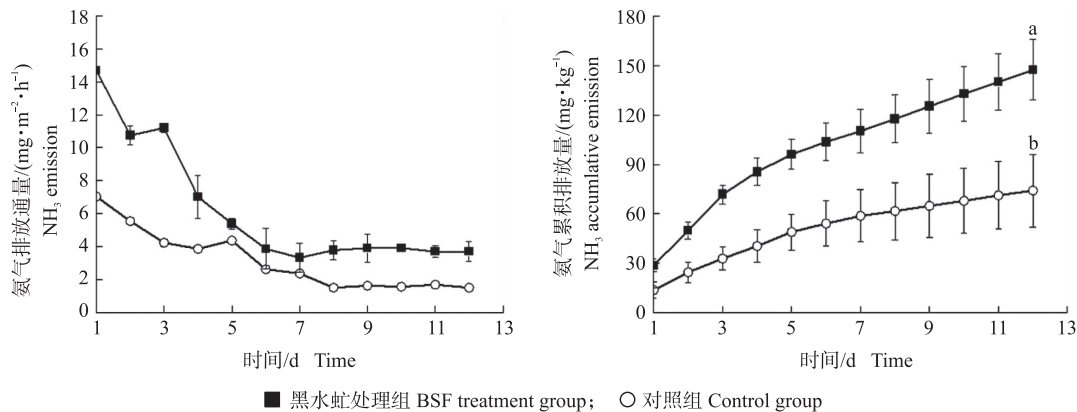


图 4 黑水虻处理组和对照组氨气排放比较分析

Fig. 4 Comparative analysis of ammonia emission flux between BSF treatment group and control group

3 讨论

本研究中, 黑水虻处理组剩余物料的总氮含量显著低于对照组, 因黑水虻处理组物料中的氮一部分转化为虫体氮, 且处理过程中氨气的挥发损失高于对照组。碳元素和氮元素一部分因幼虫与微生物的代谢作用以 CO_2 、 CH_4 和 NH_3 等气体的形式释放, 一部分被虫体同化为生物质固定, 剩余部分遗留在物料中, 与不添加黑水虻的对照组相比, 黑水虻处理组转化过程中碳和氮的损失分别减少 43.2% 和 35.5%。因物质消耗的浓缩效应, 黑水虻处理组和对照组剩余物料的总钾和总磷含量均增加, 与 Liu 等^[13]的研究结果一致。黑水虻幼虫投入鸡粪后生长状况良好, 最终收获了具有经济价值的虫体及虫砂, 料虫比为 6.70, 且产生的虫砂发芽指数为 61.2%, 可能因黑水虻幼虫肠道对鸡粪中有机物质进行了分解转化, 相较于对照组, 大幅度提高了物料的腐熟度, 但还未达到商品有机肥的腐熟度要求^[14]。这说明黑水虻生物转化能直接实现高湿物料鸡粪的减量化处理。

黑水虻处理组试验前 6 d CO_2 排放通量低于对照组, 可能因黑水虻对鸡粪环境中的微生物生长代谢具有一定的抑制作用, 这与江承亮^[15]的研究结果一致。在试验 7 d 时黑水虻处理组 CO_2 排放通量大幅上升, 可能因该阶段黑水虻进入快速生长阶段, 代谢能力变强, 导致 CO_2 排放通量增加, 最终导致黑水虻处理组后期 CO_2 累积排放量高于对照组。 CH_4 是碳损失的一部分, 也是一种强效温室气体, 因鸡粪含水率较高, 易产生厌氧环境, 而黑水虻处理组因黑水虻在鸡粪中的蠕动和对物料中水分的吸收利用, 物料处于好氧或兼性厌氧状态, 因此导致黑水虻处理组 CH_4 产生量较低^[16], 仅为对照组的 7.09%。此外, 黑水虻处理组与对照组 N_2O 排放通量均极低, 测得数值与空气水平相近, 该现象与前人报道^[17-19]一致。因此, 采用黑水虻进行新鲜鸡粪生物堆肥处理, 减少了由于鸡粪随意堆积放置产生大量的温室气体 CH_4 及资源的浪费。本研究中黑水虻处理组和对照组 N_2O 排放通量均极低, 因此本研究中仅计算 CH_4 产生的全球增温潜势, 以 CO_2 全球变暖潜势值为 1 来定义, CH_4 的全球变暖潜势为 34。黑水虻生物堆肥处理相较于对照组减少了 92.9% 的全球变暖潜势, 是一种低碳高效的处理模式。鸡粪也可以采用厌氧发酵的方式生产清洁能源 CH_4 , 如将产生的 CH_4 气体收集利用, 其全球增温潜势可能将低于黑水虻生物堆肥处理, 而且厌氧发酵需要投入大量的设备成本, 且产生沼液的还田利用较固体有机肥的施用困难, 总体经济效益较黑水虻生物堆肥低。

NH_3 是一种刺激性的污染气体, 黑水虻处理组 NH_3 排放通量始终高于对照组, 该结果与 Parodi 等^[19]的结果一致。 NH_3 的排放与 pH 值、温度、湿度和物料表面的空气流速均有关。本研究空气温度和湿度基

本保持一致,而黑水虻处理组物料 pH 值高于未添加黑水虻幼虫的对照组,因 pH 值在 8~11 时对 $\text{NH}_3\text{-NH}_4^+$ 的平衡影响较大,添加幼虫导致更高的 pH 值会引起更多的 NH_3 损失^[13]。 NH_3 排放量增加还可能因为黑水虻幼虫的机械运动,引起鸡粪物料表面的空气流动更为强烈^[20],或可能幼虫的尿酸被微生物转化为 NH_3 释放^[21]。 CO_2 与 NH_3 是畜禽粪便处理过程中碳氮流失的最主要途径,本研究证实了黑水虻生物堆肥处理鸡粪相对于自然堆放减少了其碳、氮损失,为推广黑水虻生物堆肥处理畜禽粪便提供数据支撑。

参考文献 References:

- [1] Awasthi M K, Sarsaiya S, Wainaina S, et al. A critical review of organic manure biorefinery models toward sustainable circular bioeconomy: technological challenges, advancements, innovations, and future perspectives[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 111: 115-131.
- [2] Spranghers T, Michiels J, Vranx J, et al. Gut antimicrobial effects and nutritional value of black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) prepupae for weaned piglets[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2018, 235: 33-42.
- [3] Matos J S, Barberino A T M S, de Araujo L P, et al. Potentials and limitations of the bioconversion of animal manure using fly larvae[J]. *Waste and Biomass Valorization*, 2021, 12(7): 3497-3520.
- [4] Lalander C, Diener S, Zurbrugg C, et al. Effects of feedstock on larval development and process efficiency in waste treatment with black soldier fly (*Hermetia illucens*) [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 208: 211-219.
- [5] Bortolini S, Macavei L, Hadj S J, et al. *Hermetia illucens* (L.) larvae as chicken manure management tool for circular economy [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 262: 121289.
- [6] Ooninx D G A B, van Huis A, van Loon J J A. Nutrient utilisation by black soldier flies fed with chicken, pig, or cow manure [J]. *Journal of Insects as Food and Feed*, 2015, 1(2): 131-139.
- [7] 沈其荣,王瑞宝,王岩,等.堆肥制作中的生物化学变化特征[J].*南京农业大学学报*, 1997, 20(2): 55-61. DOI: 10.7685/j.issn.1000-2030.1997.02.011.
Shen Q R, Wang R B, Wang Y, et al. Biochemical characteristics of composting [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 1997, 20(2): 55-61 (in Chinese with English abstract).
- [8] Zhao X L, Li B Q, Ni J P, et al. Effect of four crop straws on transformation of organic matter during sewage sludge composting [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, 15(1): 232-240.
- [9] 马文林,吴淑勋,朱法江,等.玉米田长期施粪肥的温室气体排放研究[J].*中国农机化学报*, 2020, 41(10): 168-175, 182.
Ma W L, Wu S X, Zhu F H, et al. Research on greenhouse gas emissions from long-term application of manure in maize fields [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2020, 41(10): 168-175, 182 (in Chinese with English abstract).
- [10] 王权. 添加剂对猪粪好氧堆肥过程的影响及其机制研究 [D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2018.
Wang Q. Mechanism of additives on aerobic composting process of pig manure [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018 (in Chinese with English abstract).
- [11] 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 ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000 (in Chinese).
- [12] Jiang T, Ma X, Tang Q, et al. Combined use of nitrification inhibitor and struvite crystallization to reduce the NH_3 and N_2O emissions during composting [J]. *Bioresource Technology*, 2016, 217: 210-218.
- [13] Liu T, Awasthi M K, Chen H Y, et al. Performance of black soldier fly larvae (Diptera: Stratiomyidae) for manure composting and production of cleaner compost [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 251: 109593.
- [14] Zheng L Y, Crippen T L, Singh B, et al. A survey of bacterial diversity from successive life stages of black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) by using 16S rDNA pyrosequencing [J]. *Journal of Medical Entomology*, 2013, 50(3): 647-658.
- [15] 江承亮. 黑水虻幼虫肠道菌群对餐厨垃圾生物降解的影响机制研究 [D]. 杭州:浙江大学, 2018.
Jiang C L. Effects of gut microbiome of black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) on the bio-degradation of food waste [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018 (in Chinese with English abstract).
- [16] Neue H U, Wassmann R, Kludze H K, et al. Factors and processes controlling methane emissions from rice fields [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1997, 49(1): 111-117.
- [17] 庞万程. 水虻对有机废弃物碳氮转化率及其温室气体减排研究 [D]. 武汉:华中农业大学, 2020.
Pang W C. The research on carbon and nitrogen conversion rate and greenhouse gas emission reduction of organic waste by black soldier fly [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020 (in Chinese with English abstract).
- [18] 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]. *The Science of the Total Environment*, 2019, 697: 133840.
- [19] Parodi A, Gerrits W J J, van Loon J J A, 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.
- [20] Gold M, Tomberlin J K, Diener S, et al. Decomposition of biowaste macronutrients, microbes, and chemicals in black soldier fly larval treatment: a review [J]. *Waste Management*, 2018, 82: 302-318.
- [21] Green T R, Popa R. Enhanced ammonia content in compost leachate processed by black soldier fly larvae [J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2012, 166(6): 1381-1387.