

叶 牧,孔祥平,叶小梅,等.餐厨垃圾含水率和碳氮比对黑水虻幼虫养殖过程中气体释放的影响[J].江苏农业科学,2023,51(4):220-225.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.04.032

# 餐厨垃圾含水率和碳氮比对黑水虻幼虫养殖过程中气体释放的影响

叶 牧<sup>1,2</sup>,孔祥平<sup>2</sup>,叶小梅<sup>2</sup>,杜 静<sup>2</sup>,王 聪<sup>2</sup>,奚永兰<sup>2</sup>,张 敏<sup>3</sup>

(1. 江苏大学,江苏镇江 212013; 2. 江苏省农业科学院畜牧研究所,江苏南京 210014;

3. 南京农业大学资源与环境学院,江苏南京 210095)

**摘要:**近年来,利用黑水虻转化餐厨垃圾并生产饲料蛋白已经成为餐厨垃圾处理的重要途径。为了评估黑水虻养殖过程中气体排放对环境的影响,采用气体动态吸收采集方法考察不同初始物料含水率、碳氮比(C/N)对黑水虻幼虫转化餐厨垃圾过程中NH<sub>3</sub>、温室气体释放的影响。结果表明,提高初始物料含水率、C/N均可明显抑制NH<sub>3</sub>的释放,NH<sub>3</sub>的总释放量最高分别可降低53.71%、61.95%。物料含水率、C/N对CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O释放的影响较小,不同养殖条件下的CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O释放量均较低。CO<sub>2</sub>的释放速率与虫体生长发育紧密相关,当C/N为20.00时,CO<sub>2</sub>的释放速率峰值可达(3 242.69 ± 67.09) mg/h。从虫体生长角度看,当物料含水率为70%、C/N为10左右时更有利于幼虫生长,最佳条件下的总虫质量可达(1.16 ± 0.01) kg,与C/N为30.00的处理组相比,总虫质量提高了70.59%,幼虫粗蛋白、粗脂肪含量分别达到(35.36 ± 0.21)%、(30.97 ± 0.27)%。通过分析餐厨垃圾的基础理化特性对黑水虻养殖过程中气体排放的影响发现,不同初始物料含水率、C/N对养殖过程中气体排放及幼虫生长的影响显著,研究结果可为大规模黑水虻养殖过程中环境影响评估和臭气控制技术开发提供理论支撑。

**关键词:**黑水虻;餐厨垃圾;物料特性;氨气;温室气体

**中图分类号:**X71 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)04-0220-06

目前,我国城市有机废弃物年产量已达1.6亿t,有机废弃物资源循环利用对经济、环境的可持续发展具有重要意义。我国有机废弃物的处置主要遵循“减量化、无害化、资源化”的原则<sup>[1]</sup>,处理有机废弃物的主要方式为焚烧、填埋、厌氧发酵及好氧堆肥。近年来,利用昆虫(黑水虻、蝇蛆和黄粉虫等)转化有机废弃物来生产饲用蛋白、油脂表现出了显著的经济效益优势<sup>[2]</sup>。

亮斑扁角水虻(*Hermetia illucens* L.)俗称黑水虻,属双翅目水虻科,是一种起源于南美草原的食腐性昆虫<sup>[3]</sup>。研究发现,黑水虻幼虫体内含有32%~58%蛋白质和15%~39%脂质,其在畜禽、水产饲料添加剂领域有着广阔的市场前景。由黑水虻转化形成的虫粪可进行二次堆肥,形成富含腐殖质的有机肥产品<sup>[4-7]</sup>。利用黑水虻转化有机废弃物具有

转化周期短、资源利用效率高和经济效益显著的特点。例如,餐厨垃圾经过黑水虻转化7~9d,可产出200~250 kg/t幼虫、100~150 kg/t虫粪有机肥,餐厨垃圾综合经济效益可达600~800元/t。

目前,黑水虻转化有机废弃物的研究主要集中在不同有机废弃物对虫体生长和营养组成的影响、微生物与黑水虻协同降解有机废弃物、黑水虻源蛋白饲料对动物生长性能的影响等方面。为了评估黑水虻养殖过程中的碳排放潜力及其对环境的影响,Ermolaev等在0.036 m<sup>2</sup>小规模养殖盒中研究黑水虻转化废弃食物过程中温室气体、氨气的释放情况,发现在小规模转化过程中并未检测到氨气的释放<sup>[8]</sup>。Parodi等基于物质平衡计算研究了黑水虻养殖过程中温室气体和氨气的释放情况,结果表明,由氨气释放而损失的氮素占总氮质量的1%<sup>[9]</sup>。在实际生产过程中初始物料的营养组成、含水率是决定黑水虻转化物料效率的关键因素<sup>[10]</sup>,黑水虻依据物料特性来调节其生长、代谢速率<sup>[4,8]</sup>。Rehman等用牛粪和豆腐渣的混合物来调节基质的碳氮比(C/N),由此进行黑水虻的转化,结果表明,将2种特性互补的废弃物混合饲喂黑水虻有助于降低废

收稿日期:2022-03-31

基金项目:江苏省农业科技自主创新资金[编号:CX(21)1008]。

作者简介:叶 牧(1997—),男,安徽芜湖人,硕士,主要从事有机废弃物生物转化方面的研究。E-mail:825066731@qq.com。

通信作者:叶小梅,博士,研究员,主要从事有机废弃物能源化利用方面的研究。E-mail:yexiaomei610@126.com。

弃物的质量,同时提高幼虫的生长速率<sup>[11]</sup>。

传统堆肥过程中的含水率、C/N 是影响堆肥进程的关键因素,其对堆肥中微生物的生长代谢活动及最终的肥料品质具有决定性作用。物料含水率、C/N 同样对黑水虻生长、微生物繁殖及餐厨垃圾的生物转化起着至关重要的作用。本研究拟考察餐厨垃圾初始含水率、C/N 对黑水虻养殖过程中气体排放的影响,以期在黑水虻转化有机废弃物过程中的气体治理技术开发提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2021 年 6—7 月在江苏省农业科学院畜牧研究所进行。亮斑扁角水虻虫卵和黑水虻虫粪均由江苏省农业科学院畜牧研究所提供,黑水虻幼虫经多个世代继代养殖。餐厨垃圾由南京贝克环保科技有限公司提供,经匀浆机处理后的餐厨垃圾含水率为 73%。稻壳来自江苏省农业科学院试验

田种植的水稻,用粉碎机粉碎,经 20 目筛网筛分后存于阴凉处备用。相关试验原料的理化特性见表 1。

1.2 试验方法

取当日收集的黑水虻虫卵,置于温度为 30 ℃、相对湿度为 70% 的恒温恒湿孵化箱中孵化 3 d 以获得黑水虻幼虫虫苗。以按质量比 7 : 3 配制的麦麸和玉米粉混合物料(含水率为 65%)作为开口料饲养黑水虻幼虫虫苗。将幼虫虫苗养殖 4 d 后作为转化餐厨垃圾的虫苗。采用下底长 40 cm、宽 28 cm、高 22 cm 的蓝色养殖盒开展餐厨垃圾转化试验。在含水率(HSL)组内盒中加入 6 kg/盒餐厨垃圾,并加入适量稻壳粉或纯水来调节物料含水率,本试验共设置 65%、70%、75% 3 个含水率试验组。碳氮比(TD)组按不同碳氮比加入 6 kg/盒餐厨垃圾和淀粉的混合物料,本试验共设置 3 个碳氮比试验组,分别为 11.61(原始餐厨)、20.00、30.00,每个处理分别设置 3 个平行,具体试验参数设置见表 2。养殖物料为餐厨垃圾或餐厨垃圾和淀粉的混合物。

表 1 餐厨垃圾、稻壳粉的初始理化性质

试验材料	电导率(EC 值) (mS/cm)	pH 值	有机质含量 (%)	总氮含量 (%)	总钾含量 (%)	总磷含量 (%)	含水率 (%)	C/N
餐厨垃圾	4.05	4.09	91.73	2.87	0.29	3.63	73.00	11.61
稻壳粉			94.53	0.47	0.11	0.32	13.43	

表 2 各处理组初始物料的梯度设置

处理组	编号	含水率 (%)	投虫密度 (头/kg)	C/N	养殖物料用量 (kg/盒)
含水率组	HSL-1	65	1 700		6
	HSL-2	70	1 700		6
	HSL-3	75	1 700		6
碳氮比组	TD-1	70	1 700	11.61	6
	TD-2	70	1 700	20.00	6
	TD-3	70	1 700	30.00	6

注:投虫密度为 1 kg 餐厨垃圾中投入的黑水虻幼虫总数。

1.3 测试指标

使用如图 1 所示设备采集气体样品,将 4 个气泵连接密闭养殖箱的 4 个进气口,将 1 个出气口连接流量计,由橡胶管通入吸收液中进行气体的吸收。采用 0.001 mol/L 硫酸溶液连续吸收 1 h,用于测定氨气释放量,并用纳氏试剂分光光度法测定、分析吸收液中的 NH<sub>3</sub> 浓度。在氨气吸收完成后继续使用 500 mL 真空气袋<sup>[12]</sup>通过流量计以 0.8 L/min 的速度采集 30 s(400 mL 气体),通过气相

色谱采用热导检测器检测 CO<sub>2</sub> 浓度,分别用电子捕获检测器、火焰离子化检测器检测 N<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub> 的浓度。

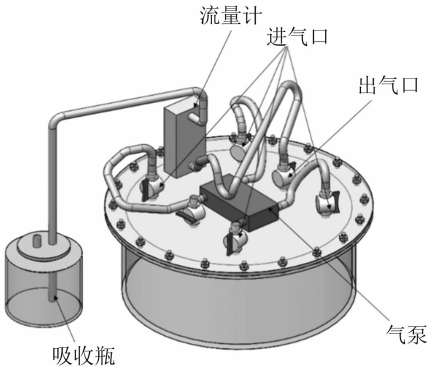


图1 昆虫养殖-集气一体化设备

2 结果与分析

2.1 含水率、碳氮比对 NH<sub>3</sub> 释放的影响

含水率不仅会影响转化体系中的微生物种类、活性,还会影响物料中的氧气含量、温度<sup>[13]</sup>。由图 2 可以看出,不同含水率的物料对转化过程中 NH<sub>3</sub> 释放速率的影响明显。各处理组的 NH<sub>3</sub> 释放速率

在转化过程中呈现出逐渐提高的趋势, HSL-1 组的  $\text{NH}_3$  释放速率在转化 6 d 后达到峰值, 为  $27\ 887.72\ \mu\text{g/h}$ 。物料温度在试验后 6 d 迅速提高到  $(44.5 \pm 0.41)^\circ\text{C}$ ,  $\text{NH}_3$  的快速释放可能由于 HSL-1 组在转化过程中的温度迅速提高(图 3-A)。由于 HSL-1 组中的物料含水率为 65%, 加速了自然堆肥的进程, 促进了物料升温, 物料中的含氮有机物被微生物快速降解为铵态氮并进一步转化为  $\text{NH}_3$ 。到转化后期, HSL-2、HSL-3 组的温度才逐渐超过  $40^\circ\text{C}$ , 同时产生大量  $\text{NH}_3$ , 由此可见,  $\text{NH}_3$  的释放与转化过程中物料的温度密切相关, 调节初始物料的含水率可以延缓物料升温, 进而抑制了  $\text{NH}_3$  的释放。同时, 黑水虻转化有机废弃物过程中的物料 pH 值逐渐升高, 转化中后期的物料 pH 值可达 9 左右, 碱性物料、高温环境促进了氨气的释放。Pang 等也发现, 物料 pH 值的提升是促进  $\text{NH}_3$  排放的主要原因<sup>[9]</sup>。

此外,  $\text{NH}_3$  释放速率变化曲线表明碳氮比对  $\text{NH}_3$  排放影响较明显, 各处理组在试验过程中均呈

现出先升后降的趋势(图 2)。在转化后 12 d,  $\text{NH}_3$  释放速率开始下降, TD-1 组的  $\text{NH}_3$  释放速率明显高于 TD-2、TD-3 组, TD-1 组的氨气释放速率最高达到  $10\ 373.63\ \mu\text{g/h}$ , 而 TD-2、TD-3 组的氨气释放速率最高分别达到  $2\ 767.15$ 、 $231.11\ \mu\text{g/h}$ , 物料 C/N 的提升降低了  $\text{NH}_3$  的排放速率。各处理组的温度峰值分别达到  $(41.5 \pm 0.24)$ 、 $(37 \pm 0.41)$ 、 $(33 \pm 0.41)^\circ\text{C}$ (图 3-B)。

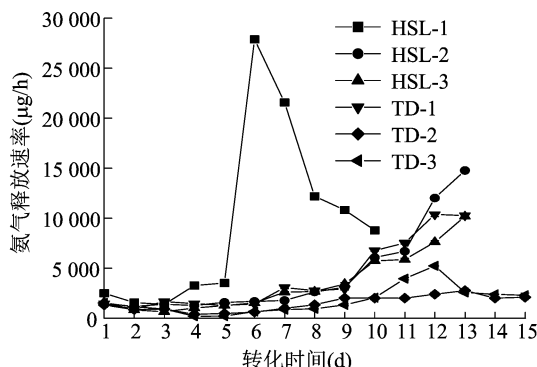
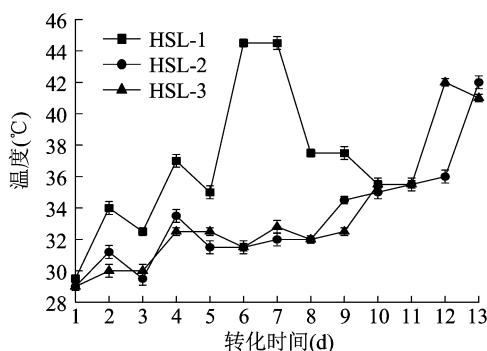
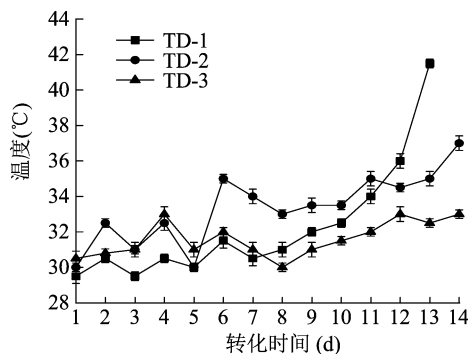


图2 含水率、碳氮比对黑水虻转化餐厨垃圾过程中  $\text{NH}_3$  释放规律的影响



A. 含水率组



B. 碳氮比组

图3 不同含水率、碳氮比对黑水虻转化餐厨垃圾过程中温度变化的影响

## 2.2 含水率、碳氮比对 $\text{CO}_2$ 释放的影响

由图 4 可以看出, 含水率对黑水虻转化餐厨垃圾过程中  $\text{CO}_2$  释放速率变化的影响非常显著, HSL-1 组的  $\text{CO}_2$  浓度在转化后 7 d 达到峰值, 可能由于较低的含水率(65%)易导致自然堆肥快速启动, 使微生物快速增殖并产生大量的  $\text{CO}_2$ 。其他试验组  $\text{CO}_2$  浓度的变化趋势较为平缓, 可能是由于高含水率的餐厨垃圾抑制了自然堆肥过程和黑水虻的代谢活动, 从而减少了  $\text{CO}_2$  的产生。

与不同含水率组  $\text{CO}_2$  的释放速率趋势不同, 不同碳氮比对黑水虻转化餐厨垃圾过程中  $\text{CO}_2$  释放量的影响与对氨气释放量的影响相似。TD-2 组的

$\text{CO}_2$  释放速率峰值可达  $(3\ 242.69 \pm 67.09)\ \text{mg/h}$ (图 4), 分别比 TD-1、TD-3 组的  $\text{CO}_2$  释放速率峰值高 79.55%、54.11%。合适的 C/N 有利于黑水虻和转化体系中微生物的生长代谢, 进而使得  $\text{CO}_2$  释放速率提高。

## 2.3 含水率和碳氮比对 $\text{CH}_4$ 释放的影响

由图 5 可以看出, 在黑水虻转化餐厨垃圾的过程中,  $\text{CH}_4$  释放速率均为  $0.5\ \text{mg/h}$  左右, 并出现多个峰值, 最大速率峰值由高到低分别为 HSL-3、HSL-2、HSL-1 组。初始物料含水率过高, 造成物料中下层处于厌氧状态, 导致试验初期产气中的  $\text{CH}_4$  释放速率较高。随着幼虫的不断蠕动, 使物料

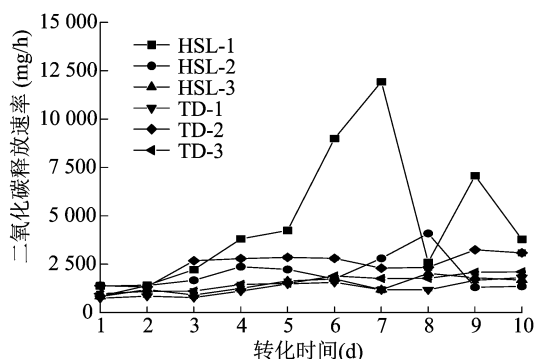


图4 含水率和碳氮比对黑水虻转化餐厨垃圾过程中  $\text{CO}_2$  释放规律的影响

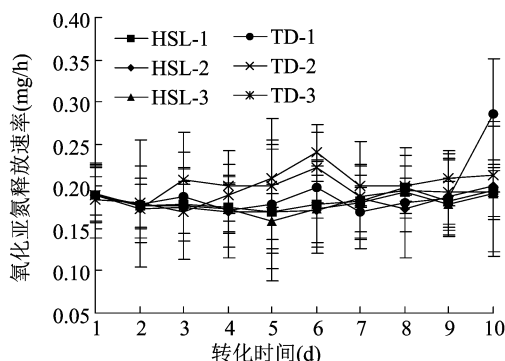


图6 含水率和碳氮比对黑水虻转化餐厨垃圾过程中  $\text{N}_2\text{O}$  释放规律的影响

变得蓬松,增加了物料中的氧气含量,减少了厌氧区域,从而抑制了产甲烷菌的活性,最终导致  $\text{CH}_4$  释放速率逐渐降低。由图 5 还可以看出,不同碳氮比对黑水虻转化过程中  $\text{CH}_4$  的释放均没有明显影响,  $\text{CH}_4$  释放速率的变化趋势也基本一致,在转化后 6 d 达到最大值,碳氮比为 11.61、20.00、30.00 时甲烷释放速率的最大值分别为  $(0.49 \pm 0.018)$ 、 $(0.48 \pm 0.023)$ 、 $(0.48 \pm 0.049)$  mg/h。

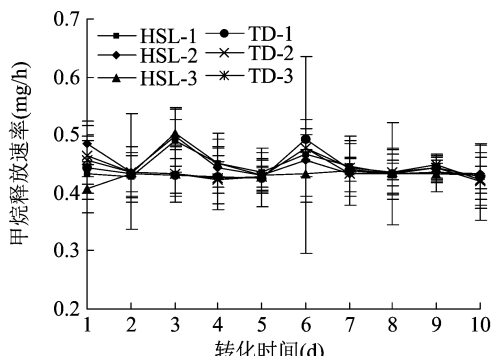


图5 含水率和碳氮比对黑水虻转化餐厨垃圾过程中  $\text{CH}_4$  释放规律的影响

## 2.4 含水率和碳氮比对 $\text{N}_2\text{O}$ 释放的影响

由图 6 可以看出,不同含水率对黑水虻转化餐厨垃圾过程中  $\text{N}_2\text{O}$  释放速率的影响较小,各试验组的  $\text{N}_2\text{O}$  释放速率相对较低,均低于 0.3 mg/h。与含水率不同,碳氮比对  $\text{N}_2\text{O}$  释放速率的影响相对较大,在试验的 0~9 d,各处理组均在 6 d 时达到峰值,TD-2 组的释放速率峰值是 TD-1 组的 1.21 倍(图 6)。由此可见,高 C/N(添加的淀粉含量高)会导致物料较为黏稠,造成物料通透性差,可能是导致  $\text{N}_2\text{O}$  释放速率增加的主要原因<sup>[14-15]</sup>。

## 2.5 含水率、碳氮比对黑水虻转化餐厨垃圾过程中氮素平衡的影响

由表 3 可以看出,随着物料含水率的提升, $\text{NH}_3$

的释放总量占物料总氮含量的比例降低,当含水率从 65% 提高到 75% 时,  $\text{NH}_3$  释放量占比下降了 53.71%;当碳氮比从 11.61 提高到 20.00 时,可降低 61.95% 的氨气释放量。在研究发现中,初始物料中 39.57%~45.98% 的氮素被黑水虻吸收利用并转化为昆虫蛋白。转化后的虫粪中仍含有大量氮素(含量为 49.40%~58.65%),为后续高氮有机肥产品的开发提供了物质基础。在不同含水率和 C/N 的试验条件下,通过  $\text{NH}_3$  释放造成的氮损失仅占初始物料总氮含量的 1.87%~4.04%。由此可见,不同初始物物理化特征对于黑水虻转化餐厨垃圾过程中  $\text{NH}_3$  释放的影响明显,调节物料的含水率和碳氮比可以有效控制转化过程中的氮损失。

## 2.6 不同含水率和碳氮比对黑水虻转化餐厨垃圾过程中幼虫生长发育的影响

由表 4 可以看出,HSL-1、HSL-2、HSL-3 组收获的幼虫总质量分别为  $(1.12 \pm 0.01)$ 、 $(1.14 \pm 0.01)$ 、 $(1.15 \pm 0.01)$  kg,可见物料初始含水率对黑水虻产量的影响较小。然而在低含水率物料转化过程中,氮素的大量损失导致最终虫体中的粗蛋白含量下降了 5% 左右,而粗脂肪含量提高了 2% 左右。初始物料含水率对虫体灰分含量的影响较小,灰分含量稳定在 14% 左右。

黑水虻可以在较宽泛的 C/N 范围内生长发育,物料的 C/N 对黑水虻产量的影响非常明显。用 3 种不同 C/N 的物料养殖黑水虻发现,收获的幼虫总质量有明显差异。与 TD-3 组相比,TD-1 组收获的总虫质量提高了 70.59%。提高物料的 C/N 会直接影响黑水虻幼虫的生长发育,虽然能在一定程度上控制气体排放,但是不利于提高黑水虻转化餐厨垃圾过程的经济效益。

表 3 黑水虻转化餐厨垃圾过程中的氮素转化对比

处理组	编号	氨气释放量 (mg/kg)	氨气释放占总氮比例 (%)	虫沙总氮占总氮比例 (%)	虫体总氮占总氮比例 (%)
含水率组	HSL-1	379.15±2.19	4.04±0.13	53.05±0.43	42.52±0.43
	HSL-2	223.95±1.91	2.38±0.08	54.98±0.98	42.03±0.45
	HSL-3	175.30±3.52	1.87±0.15	58.26±1.12	39.57±0.66
碳氮比组	TD-1	210.67±1.45	2.24±0.09	55.65±0.55	41.38±0.87
	TD-2	80.17±0.54	1.87±0.04	57.38±0.67	38.68±1.02
	TD-3	108.81±1.56	3.93±0.07	49.40±1.01	45.98±0.94

注:氨气排放量为各处理组 1 kg 物料转化过程中释放的氨气量,表中的总氮以初始物料计。

表 4 不同初含水率、碳氮比对黑水虻转化餐厨垃圾过程中幼虫生长发育的影响

处理组	编号	总虫质量 (kg)	粗蛋白含量 (%)	粗脂肪含量 (%)	灰分含量 (%)
含水率组	HSL-1	1.12±0.01	30.63±0.22	33.02±0.22	14.76±0.11
	HSL-2	1.14±0.01	35.75±0.25	31.61±0.32	14.99±0.22
	HSL-3	1.15±0.01	35.57±0.31	30.43±0.33	13.51±0.16
碳氮比组	TD-1	1.16±0.01	35.36±0.21	30.97±0.27	14.63±0.23
	TD-2	0.74±0.01	21.66±0.17	33.35±0.41	9.47±0.07
	TD-3	0.68±0.01	17.36±0.18	35.49±0.11	4.29±0.21

注:幼虫的营养组成含量均为幼虫干物质的百分比。

3 讨论与结论

研究表明,不同初始物料特征对于黑水虻转化餐厨垃圾过程中气体释放的影响明显。CO<sub>2</sub> 是黑水虻转化餐厨垃圾过程中产生的主要气体产物,CO<sub>2</sub> 的产生速率可以间接表明底物的生物降解率<sup>[8,16]</sup>。HSL-1 组由于含水率较低,温度迅速上升,间接导致 CO<sub>2</sub>、NH<sub>3</sub> 大量释放。此外,与 CO<sub>2</sub>、NH<sub>3</sub> 释放相比,N<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub> 的释放速率均较低。由于 CH<sub>4</sub> 是在厌氧环境下由多种微生物协同作用的代谢产物<sup>[17]</sup>,初始物料含水率对于前期 CH<sub>4</sub> 排放的影响显著,含水率的升高会造成 CH<sub>4</sub> 释放速率的上升。

初始物料中的 C/N 会显著影响黑水虻转化过程中的气体释放。当 C/N 为 10~20 时,对黑水虻转化过程中 CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O 的产生有促进作用,而在 C/N 高于 20 时会对 CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O 的产生产生抑制作用,这与 Lǚ 等的研究结果不同,他们的研究发现,C/N 在城市污泥蚯蚓堆肥中对 N<sub>2</sub>O 释放起着重要作用,并且 N<sub>2</sub>O 排放与 C/N 呈明显的负相关关系<sup>[18]</sup>。本研究的结果表明,C/N 在一定范围内与 N<sub>2</sub>O 的释放呈正相关关系,N<sub>2</sub>O 可以在厌氧区域反硝化细菌的作用下产生<sup>[10,19]</sup>。不同 C/N 对于 CH<sub>4</sub> 的释放无明显影响,Jiang 等用玉米秸秆混合猪粪进行堆肥的研究也发现了类似结果<sup>[20]</sup>。结果表明,C/N 是影响微生

物同化作用的关键因素,碳源不仅可为微生物提供能量来源,也是构成微生物细胞的主要物质来源,而氮主要被用于合成蛋白质等物质。当物料的 C/N 越低时,过量的氮素不被用于微生物细胞合成,则易被分解为氨气释放到环境中<sup>[21]</sup>。

对黑水虻转化餐厨垃圾过程中的氮素平衡进行分析发现,NH<sub>3</sub> 释放量占总氮的比例较小,黑水虻能够将物料中的氮素大量吸收并转化为自身的蛋白质以实现资源化利用。而传统好氧堆肥中由于 NH<sub>3</sub> 排放所损失的氮约占初始总氮量的 22.1%~33.3%<sup>[22]</sup>。由此可见,与传统好氧堆肥相比,黑水虻转化技术在减少氮损失方面有较大潜力。然而,黑水虻生物转化餐厨垃圾的过程存在氨气释放周期集中、释放期间氨气浓度较高等特点,后续工厂化生产应注重后期转化区内的 NH<sub>3</sub> 治理。

此外,本研究发现不同初始物料的含水率、C/N 对幼虫发育的影响较大,Cammack 等也报道了类似的情况,他们的研究结果表明,当物料中水分含量过高时,氧气在基质中的扩散受限,空气不流通,从而抑制黑水虻的生长甚至导致其死亡<sup>[23]</sup>。随着含水率的上升,幼虫虫体的粗蛋白含量增加,粗脂肪含量随之降低。Lalander 等指出,物料中的养分含量是控制幼虫生长的关键因素<sup>[2]</sup>。C/N 的提升减少了物料中氮素的供给,直接影响了幼虫发育,各

项指标(总虫质量、粗蛋白含量、粗脂肪含量、灰分含量)均呈现下降趋势。

综上所述,黑水虻转化餐厨垃圾过程中的主要释放气体为  $\text{CO}_2$ 、 $\text{NH}_3$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  的排放量相对较少。 $\text{CO}_2$ 、 $\text{NH}_3$  的释放速率与黑水虻幼虫的生长发育密切相关,物料含水率较低,会导致虫体发育较好,而物料温度升高会加快幼虫、微生物的代谢,从而使得  $\text{CO}_2$ 、 $\text{NH}_3$  大量产生。此外,较高的 C/N 可以明显降低  $\text{NH}_3$ 、 $\text{CO}_2$  的释放量,使得  $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{CH}_4$  在整个转化过程中的总释放量相对较低。在传统堆肥过程中, $\text{N}_2\text{O}$  的释放机制非常复杂,涉及多种影响因素,其中包括硝化作用、反硝化作用<sup>[18]</sup>。黑水虻转化体系中的  $\text{N}_2\text{O}$  释放模式与传统堆肥、蚯蚓堆肥明显不同,传统堆肥、蚯蚓堆肥在初始阶段会立即释放出相对较高浓度的  $\text{N}_2\text{O}$ <sup>[24-25]</sup>。本研究结果表明,基于物料特性开发适宜的养殖工艺可以在工厂化养殖黑水虻的过程中有效减少臭气、温室气体的排放。

#### 参考文献:

- [1] 孙娜娜. 生物废弃物监管体系初探[D]. 青岛:中国海洋大学, 2011:18.
- [2] 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.
- [3] 陈 辉, 王慧莹, 张 洋, 等. 一种亮斑扁角水虻幼虫饲养装置: CN 201320335604.2 [P]. 2013–12–25.
- [4] 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.
- [5] Barragan – Fonseca K B, Dicke M, van Loon J J A. Nutritional value of the black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) and its suitability as animal feed; a review [J]. Journal of Insects as Food and Feed, 2017, 3(2): 105–120.
- [6] Singh A, Kanchan K. An inclusive approach for organic waste treatment and valorisation using black soldier fly larvae; a review [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 251: 109569.
- [7] 王 聪, 叶小梅, 奚永兰, 等. 蚯蚓梯级利用餐厨垃圾及黑水虻虫粪研究 [J]. 江苏农业科学, 2021, 49(20): 242–247.
- [8] Ermolaev E, Lalander C, Vinnerås B. Greenhouse gas emissions from small – scale fly larvae composting with *Hermetia illucens* [J]. Waste Management, 2019, 96: 65–74.
- [9] Parodi A, de Boer I J M, Gerrits W J J, et al. Bioconversion efficiencies, greenhouse gas and ammonia emissions during black soldier fly rearing; a mass balance approach [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 271: 122488.
- [10] Pang W C, Hou D J, Nowar E E, et al. The influence on carbon, nitrogen recycling, and greenhouse gas emissions under different C/N ratios by black soldier fly [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27: 42767–42777.
- [11] Ur – Rehman K, Rehman A, Cai M M, et al. Conversion of mixtures of dairy manure and soybean curd residue by black soldier fly larvae (*Hermetia illucens* L.) [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 154: 366–373.
- [12] 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: 31–32.
- [13] 沈中泉, 袁家富. 商品性有机肥料工厂化生产研究动态 [J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(2): 117–122.
- [14] Kumar – Awasthi M, Wang Q, Huang H, et al. Influence of zeolite and lime as additives on greenhouse gas emissions and maturity evolution during sewage sludge composting [J]. Bioresource Technology, 2016, 216: 172–181.
- [15] Tsutsui H, Fujiwara T, Matsukawa K, et al. Nitrous oxide emission mechanisms during intermittently aerated composting of cattle manure [J]. Bioresource Technology, 2013, 141: 205–211.
- [16] Kumar – Awasthi M, Wang Q, Ren X N, et al. Role of biochar amendment in mitigation of nitrogen loss and greenhouse gas emission during sewage sludge composting [J]. Bioresource Technology, 2016, 219: 270–280.
- [17] Wang Q, Kumar – Awasthi M, Ren X N, et al. Combining biochar, zeolite and wood vinegar for composting of pig manure: the effect on greenhouse gas emission and nitrogen conservation [J]. Waste Management, 2018, 74: 221–230.
- [18] Lü B Y, Zhang D, Cui Y X, et al. Effects of C/N ratio and earthworms on greenhouse gas emissions during vermicomposting of sewage sludge [J]. Bioresource Technology, 2018, 268: 408–414.
- [19] Abebe N, Thomas W K, Sander B, et al. Vermicomposting as a technology for reducing nitrogen losses and greenhouse gas emissions from small – scale composting [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 139: 429–439.
- [20] Jiang T, Schuchardt F, Li G X, 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.
- [21] 张 鹤. 不同碳氮比对好氧堆肥进程和腐殖质及其组分含量的影响 [D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2018: 35–36.
- [22] 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, 2590.
- [23] Cammack J A, Jeffery K, Kerry W, et al. The impact of diet protein and carbohydrate on select life – history traits of the black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) (Diptera: Stratiomyidae) [J]. Insects, 2017, 8(2): 56.
- [24] 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  $\text{NH}_3$  排放的影响 [J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(6): 114–125.
- [25] 肖 波. 农村垃圾蚯蚓堆肥处理工艺及其温室气体排放特征 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011: 40–41.