



王聪, 叶小梅, 奚永兰, 杜静, 孔祥平, 王莉, 韩挺, 朱飞, 张应鹏. 黑水虻幼虫处理餐厨垃圾过程中体内养分组成与消化酶活性变化规律的研究 [J]. 环境昆虫学报, 2023, 45 (2): 513–519.

黑水虻幼虫处理餐厨垃圾过程中体内养分组成与消化酶活性变化规律的研究

王 聪, 叶小梅*, 奚永兰, 杜 静, 孔祥平, 王 莉,
韩 挺, 朱 飞, 张应鹏

(江苏省农业科学研究院畜牧研究所, 循环农业研究中心, 农业农村部种养结合重点实验室, 南京 210014)

摘要: 黑水虻 *Hermetia illucens* 作为一种新型资源环境昆虫, 其幼虫可以处理餐厨垃圾、畜禽粪便、蔬菜残体等各种有机废弃物。幼虫富含蛋白质和油脂, 可以作为水产饲料的蛋白来源。本研究探索黑水虻幼虫处理餐厨垃圾过程中其养分组成与消化酶活性变化之间的关系。通过黑水虻幼虫自由取食餐厨垃圾, 每日采集样品用于物质养分和消化酶活性的测定。结果显示: 黑水虻幼虫粗蛋白含量呈现先下降后上升的变化规律, 而幼虫总糖含量呈现先上升后下降的变化规律, 粗脂肪含量维持上升的趋势。幼虫处理餐厨垃圾过程中, 体内蛋白酶在初期迅速上升, 第6天后逐渐下降, 而淀粉酶呈现出先缓慢上升再迅速上升最后下降的变化规律。脂肪酶在黑水虻幼虫处理餐厨垃圾前期保持较高的活性然后缓慢下降。同时, 通过相关性分析, 黑水虻幼虫粗蛋白含量变化与蛋白酶活性没有相关性, 而总糖与粗脂肪含量变化分别与淀粉酶、脂肪酶有相关性。因此, 部分消化酶活性变化与黑水虻幼虫养分组成具有一定的联系, 本研究结果为工厂化养殖黑水虻提供一定的理论基础。

关键词: 黑水虻; 餐厨垃圾; 养分组成; 消化酶活性; 转化效率

中图分类号: Q968.1; S89

文献标识码: A

文章编号: 1674-0858 (2023) 02-0513-07

Changes of nutrient and digestive enzyme activity in the conversion of kitchen waste by black soldier fly larvae

WANG Cong, YE Xiao-Mei*, XI Yong-Lan, DU Jing, KONG Xiang-Ping, WANG Li, HAN Ting, ZHU Fei, ZHANG Ying-Peng (Key Laboratory for Crop and Animal Integrated Farming, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Circular Agriculture Research Center, Institute of Animal Science, Jiangsu Academy of Agriculture Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: The black soldier fly is a new type of resource environment insect. Its larvae can dispose of various organic wastes such as kitchen waste, livestock and poultry manure, vegetable residues. Besides, the larvae are rich in protein and oil, which can be used as a protein source for aquatic feed. This experiment explored the relationship between the nutrient composition and the changes of digestive enzyme activity during the process of treating kitchen waste by the black soldier fly larvae (BSFL). BSFL freely ate food waste, and samples were collected daily for the determination of material nutrients and digestive enzyme activities. The results showed that the crude protein content of BSFL decreased first and then increased, while the total sugar content of the larvae increased first and then decreased, and the crude fat

基金项目: 江苏省农业科技自主创新项目 (CX [21] 1008)

作者简介: 王聪, 男, 硕士, 研究实习员, 研究方向为有机废物的生物转化, E-mail: 823658947@qq.com

* 通讯作者 Author for correspondence: 叶小梅, 女, 博士, 研究员, 研究方向为固体废弃物资源化利用, E-mail: yexiaomei610@126.com

收稿日期 Received: 2021-11-10; 接受日期 Accepted: 2022-03-05

content maintains a rising trend. In the process of larvae's disposal of food waste, protease rises rapidly at the initial stage, and gradually decreases after the 6th day, while amylase exhibits a change pattern of slowly rising first and then rapidly rising. Lipase maintains high activity in the first 10 days of the treatment process of BSFL. At the same time, through correlation analysis, the changes in crude protein content of BSFL were not correlated with protease activity, while changes in total sugar and crude fat content were correlated with amylase and lipase, respectively. Therefore, the changes in the activity of some digestive enzymes have a certain relationship with the nutrient composition of larvae. The results of this experiment provide a certain theoretical basis for the factory culture of BSFL.

Key words: *Hermetia illucens*; kitchen waste; nutrition composition; digested enzyme activity; conversion efficiency

随着生活水平的提高,餐厨垃圾已成为城市主要污染物之一 (Hoc *et al.*, 2019)。与其它有机废弃物相比,餐厨垃圾具有高含水率、高有机质以及高油脂等特性 (Huang *et al.*, 2021)。因此,若餐厨垃圾处理不当会对生态环境以及人类健康造成巨大的危害 (Zhang *et al.*, 2012)。目前,餐厨垃圾的主要处理手段为焚烧、填埋、好氧堆肥与厌氧消化等 (Liu *et al.*, 2019; Luo *et al.*, 2019),但这些处理手段都存在一定的不足,比如处理时间长、资源化利用程度低等。目前,昆虫与微生物互作处理餐厨垃圾是一种新型绿色环保的处理方法 (Lee *et al.*, 2007; Liu *et al.*, 2019)。昆虫可以高效地处理有机废弃物并产生可为人类利用的生物资源,比如黑水虻、家蝇 *Musca domestica* 等 (Cheng *et al.*, 2021; Matos *et al.*, 2021; Tan *et al.*, 2021) 均可以处理有机废弃物并转化为生物蛋白和生物肥料 (Rehman *et al.*, 2019; Tan *et al.*, 2021)。

黑水虻是一种新型资源环境昆虫,其幼虫阶段可以取食餐厨垃圾、蔬菜残体和畜禽粪便等各种有机废弃物 (Chen *et al.*, 2019; Mazza *et al.*, 2020)。研究表明黑水虻幼虫对于畜禽粪便、奶牛粪和猪粪的减量率可以达到 50% ~ 65% (Diener *et al.*, 2009; Luo *et al.*, 2019; Matos *et al.*, 2021)。黑水虻幼虫处理有机废弃物过程中,可以降低臭气的排放以及抑制有害微生物生长,比如大肠杆菌 *Escherichia coli* 和沙门氏菌 *salmonella* 等 (Liu *et al.*, 2017; Schiavone *et al.*, 2019)。并且幼虫可以在富含重金属条件下正常完成生命周期 (Li *et al.*, 2018)。同时,黑水虻幼虫粗蛋白含量为 43% ~ 47%,粗脂肪含量为 30% ~ 34%,可以广泛应用于家禽、水产饲料的生产 (Barragan-Fonseca *et al.*, 2019; Kawasaki *et al.*, 2019)。

国内外已经对黑水虻幼虫处理废弃物过程中

的基本生理生化特征进行大量的研究。蛋白酶、脂肪酶以及淀粉酶等消化酶在幼虫处理废弃物过程中发挥重要作用 (Bonelli *et al.*, 2019; Guerreiro *et al.*, 2020)。但消化酶活性和废弃物类型导致黑水虻幼虫对废弃物的转化率、减量率和其生长性能仍存在差异 (Beskin *et al.*, 2018; Giannetto *et al.*, 2020; Nikkhah *et al.*, 2021)。因此,本研究目的是通过测定黑水虻幼虫不同生长时期营养成分情况和消化酶活性,探索其生长过程中养分需求以及和消化酶活性变化之间的规律,为工厂化黑水虻养殖提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 实验用虫养殖

黑水虻新鲜虫卵孵化于恒温恒湿箱中 (温度 28℃、相对湿度 70%),并用 65% 含水率的麦麸饲养至第 5 天作为实验用虫。

1.2 实验材料获取

餐厨垃圾从江苏省现代农业科学院食堂获取,充分粉碎混匀,含水率为 75%。前期养分测定结果:餐厨垃圾的粗蛋白含量为 28.34%,粗脂肪含量为 36.79%,总糖为 23.72%。

1.3 实验设计

每个处理组挑选 200 头 5 日龄的黑水虻幼虫置于饲养盒内 [长 (20 cm) × 宽 (10 cm) × 高 (6 cm)],根据预实验结果,每个饲养盒内均匀放入 200 g 的餐厨垃圾供黑水虻幼虫自由取食。每日随机挑选 3 组,将所有幼虫与物料进行分离,并用无菌水洗净,滤纸吸干水分后于 -70℃ 保存用于后续指标测定,共 30 个处理组。当 90% 的幼虫变成预蛹时,实验停止。本次实验的环境温度为 30℃,相对湿度为 70%。

1.4 养分指标测定

主要测定实验样品中粗脂肪、粗蛋白与总糖的含量。粗蛋白的测定方法为采取凯氏定氮法 (GB 5009.5-2010), 粗脂肪测定方法为索氏提取法 (GB/T 5009.6-2003), 总糖测定方法参照 (GB 5009.7-2016)。

1.5 消化酶活性测定

每个处理挑选生长一致黑水虻幼虫 10 头, 用无菌水将虫体表面洗净, 滤纸擦干。迅速在冰盒中取出黑水虻幼虫肠道, 加入预冷的 200 mM 磷酸盐缓冲液, 用电动研磨棒在冰上充分匀浆。将匀浆等量分装于 1.5 mL 离心管中, 于高速离心机上 4℃, 10 000 r/min, 离心 30 min, 移液枪吸取上清液为粗酶液, 分装用于酶活性测定。

蛋白酶测定: 用福林-酚试剂法测定酪氨酸的生成。酶活力定义: 在一定条件下, 1 min 酶解酪蛋白产生 1 μg 酪氨酸为一个酶活力单位, 用 U/mL 表示。

淀粉酶测定: 采用碘-淀粉比色法。酶活力定义: 在一定条件下, 在紫外分光光度计 660 nm 处测量吸光值, 1 mL 酶粗液每分钟分解产生酪氨酸对应吸光值增大 0.001, 定义为 1 个淀粉酶活力单位, 用 U/mL 表示。

脂肪酶测定: 使用 0.01 M 对硝基苯棕榈酸酯并用分光光度计在 610 nm 处测量并与对硝基苯酚

标准曲线进行比较 (Winkler & Stuckmann, 1979)。脂肪酶活性用 U/mL 进行表示。

1.6 计算与数据分析

本研究使用的公式如下: 废弃物减量率(%) = $(W1 - W2 / W1) \times 100$, 其中 W1 为初始餐厨垃圾重量 (DM), W2 为残渣重量 (DM); 生物转化率(%) = 总幼虫生物量 (DM) / 摄入食物的重量 (DM) $\times 100$ 。

用 Microsoft Excel 2016 进行数据分析, 数据之间差异性分析用软件 SPSS 24.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA) 进行处理。结果通过单因素方差分析 (ANOVA) 进行分析, 使用 Tukey's HSD 进行事后检验, 以比较不同处理方法之间的显著性 (P)。如 $P < 0.05$ 认为处理间存在显著性差异。

2 结果与分析

2.1 不同生长阶段黑水虻幼虫的养分组成含量变化规律

不同生长阶段的黑水虻幼虫体内的粗蛋白、粗脂肪以及总糖含量均呈现不同的变化规律。黑水虻幼虫初始粗蛋白含量约为 53.15%, 逐渐下降至 36.54% (表 1)。老熟幼虫以及预蛹阶段, 虫体粗蛋白含量约为 40% (表 1)。粗脂肪含量随着

表 1 黑水虻幼虫不同生长阶段养分组成含量
Table 1 Nutrient composition content of BSF in different life steps

发育龄期 (d) Development time	粗蛋白 (%) Crude protein	粗脂肪 (%) Crude fat	总糖 (%) Total sugar
5 日龄 5 days old	53.15 ± 0.52 b	7.66 ± 0.04 b	4.89 ± 0.11 a
6 日龄 6 days old	49.96 ± 0.41 c	9.75 ± 0.04 c	5.43 ± 0.09 b
7 日龄 7 days old	48.59 ± 0.74 c	13.22 ± 0.17 d	5.66 ± 0.21 b
8 日龄 8 days old	44.71 ± 0.51 d	19.02 ± 0.35 e	6.17 ± 0.31 c
9 日龄 9 days old	43.85 ± 0.11 de	22.25 ± 0.21 f	6.45 ± 0.08 c
10 日龄 10 days old	41.33 ± 0.36 f	24.45 ± 0.30 g	7.43 ± 0.15 d
11 日龄 11 days old	39.82 ± 0.53 g	27.78 ± 0.12 h	8.29 ± 0.19 f
12 日龄 12 days old	38.26 ± 0.84 h	28.84 ± 0.10 i	7.88 ± 0.21 d
13 日龄 13 days old	37.48 ± 0.68 hi	29.04 ± 0.07 ij	6.53 ± 0.11 c
14 日龄 14 days old	36.54 ± 0.71 i	29.50 ± 0.14 j	5.58 ± 0.06 b
15 日龄 15 days old	40.73 ± 0.33 i	29.96 ± 0.08 j	4.94 ± 0.08 a
预蛹 Prepupa	40.37 ± 0.33 fg	30.58 ± 0.28 k	4.49 ± 0.05 a

注: 每个处理均有 3 个重复, 数据为平均值 ± 标准差, 同一列中不同字母表示差异显著 (Tukey HSD 测试, $n = 3, P < 0.05$)。Note: Each treatment had three replicates and data were means ± SE. Means in the same column with different letters were significantly different (Tukey HSD test, $n = 3, P < 0.05$)。

幼虫龄期增加而增长,其幼虫体内粗脂肪含量从 7.66% 上升至 30.58%。黑水虻幼虫总糖含量呈现的变化规律与粗蛋白变化规律相反,即先上升再下降。可能因为生长后期,黑水虻幼虫需要分解自身大量的糖原从而满足后期变态发育的营养需求。

2.2 黑水虻幼虫餐厨垃圾转化效率

餐厨垃圾经过黑水虻幼虫处理后,残渣中粗蛋白、粗脂肪与总糖含量分别为 31.03%、

13.15% 和 12.78% (表 2)。黑水虻幼虫对于原料中养分的转化率较低。蛋白质、油脂以及糖类的转化率分别为 38.41%、29.63% 和 24.48% (表 2)。幼虫对餐厨垃圾中养分利用率低的原因是可能转化过程中可释放出氨气,导致 N 元素流失,影响微生物的生理活动。通过黑水虻转化餐厨垃圾过程中物料的测定,幼虫对餐厨垃圾减量率为 78.13%,而生物转化率仅为 23.09% (表 3)。

表 2 黑水虻幼虫转化餐厨垃圾养分效率

Table 2 Transformation of protein and fat from kitchen waste by BSFL

组别 Groups	粗蛋白(%) Crude protein			粗脂肪(%) Crude fat			总糖(%) Total sugar		
	含量(%) Content	总量(g) Total	占比(%) Proportion	含量(%) Content	总量(g) Total	占比(%) Proportion	含量(%) Content	总量(g) Total	占比(%) Proportion
餐厨垃圾 Kitchen waste	36.79 ± 0.30	55.52 ± 0.31	—	28.34 ± 0.61	42.77 ± 0.69	—	23.72 ± 0.44	35.58 ± 0.48	—
预蛹 Prepupa	40.73 ± 0.33	11.09 ± 0.01	19.97 ± 0.97	30.58 ± 0.28	8.33 ± 0.14	19.49 ± 0.56	16.49 ± 0.84	4.49 ± 0.51	12.62 ± 0.34
残渣 Residue	31.03 ± 0.27	10.24 ± 0.27	18.44 ± 0.50	13.15 ± 0.24	4.34 ± 0.09	10.14 ± 0.14	12.78 ± 0.54	4.22 ± 0.63	11.86 ± 0.45

注:所有的结果均用干物质表示,每个处理均有 3 个重复,数据为平均值 ± 标准差 (Tukey HSD 测试, $n = 3$, $P < 0.05$)。
Note: All the results were calculated by dry mass. Each treatment had three replicates and data were means ± SE (Tukey HSD test, $n = 3$, $P < 0.05$).

表 3 黑水虻幼虫处理餐厨垃圾的生产性能

Table 3 Production performance of BSFL in the treatment of kitchen waste

	餐厨垃圾消耗量 (g) Consumption of kitchen waste	减量率 (%) Reduction rate	生物转化率 (%) Biotransformation rate
幼虫 Larvae	122. 13 ± 0. 79	78. 13 ± 0. 48	23. 09 ± 0. 19

2.3 黑水虻不同生长阶段消化酶活性变化的规律与相关性分析

对不同生长阶段黑水虻幼虫的消化酶活性进行测定。蛋白酶、淀粉酶以及脂肪酶均呈现不同的变化规律。第 0~6 天,黑水虻幼虫体内蛋白酶活性迅速上升至活性高峰 (202.36 U/mL)。随着黑水虻幼虫龄期增加,其体内蛋白活性逐渐降低 (图 1)。黑水虻幼虫在生长前期需要分解大量蛋白质满足自身生长发育的需求。随着龄期增加,黑水虻通过分解糖类、淀粉类物质为后期变态发育储备能量。因此,在第 0~5 天,幼虫体内淀粉酶

活性缓慢增加,而当第 5~8 天,淀粉酶活性迅速上升至 605.21 U/mL (图 2)。黑水虻幼虫脂肪酶活性在处理餐厨垃圾过程的前期保持增长趋势 (图 3)。而随着龄期增加,黑水虻幼虫停止取食,导致脂肪酶、淀粉酶活性后期开始降低。

通过对黑水虻幼虫体内养分组成与消化酶活性变化规律的相关性分析 (图 4~图 6),黑水虻体内蛋白含量与蛋白酶没有明显相关性,因为幼虫可通过分解其它物质而合成蛋白。而幼虫总糖含量、粗脂肪含量分别与淀粉酶,脂肪酶均存在相关性。

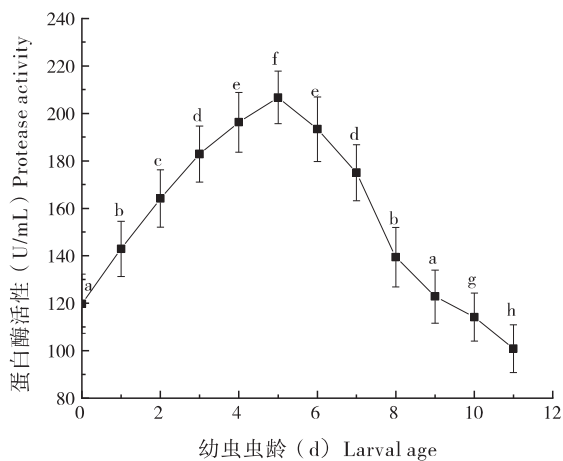


图1 黑水虻蛋白酶活性与处理餐厨垃圾时间的关系

Fig. 1 Relationship between the protease activity of BSFL and the time to dispose of kitchen waste

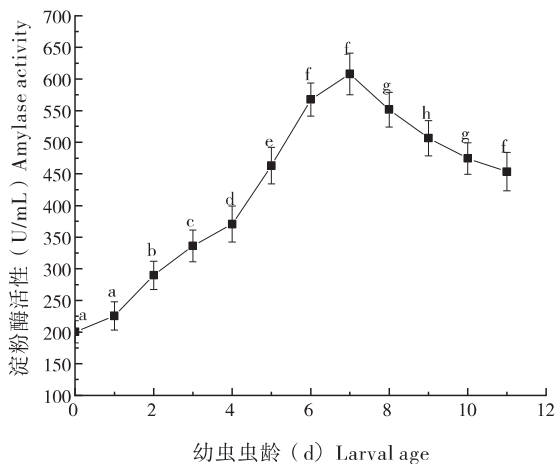


图2 黑水虻淀粉酶活性与处理餐厨垃圾时间的关系

Fig. 2 Relationship between the amylase activity of BSFL and the time to dispose of kitchen waste

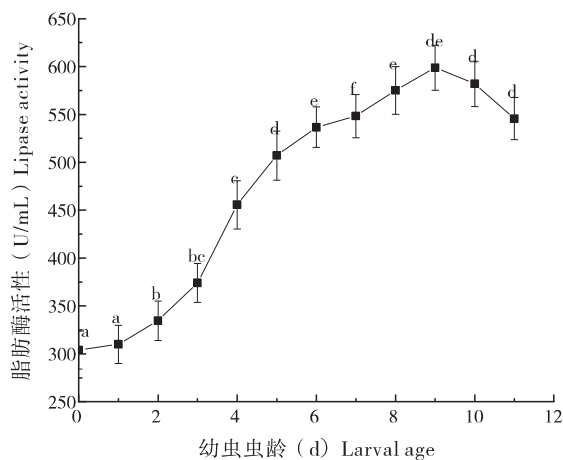


图3 黑水虻脂肪酶活性与处理餐厨垃圾时间的关系

Fig. 3 Relationship between the lipase activity of BSFL and the time to dispose of kitchen waste

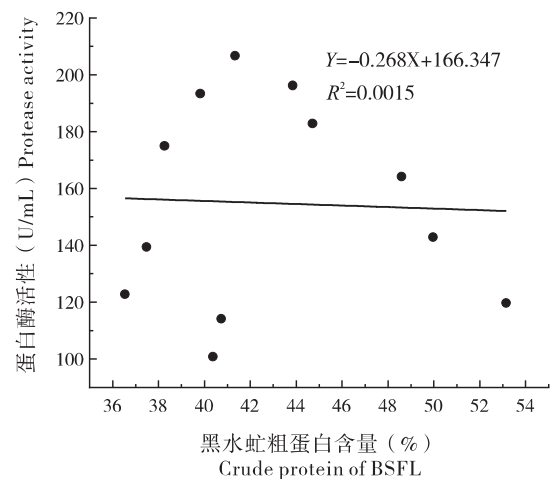


图4 黑水虻蛋白酶与粗蛋白含量变化相关性分析

Fig. 4 Correlation analysis of protease and crude protein content of BSFL

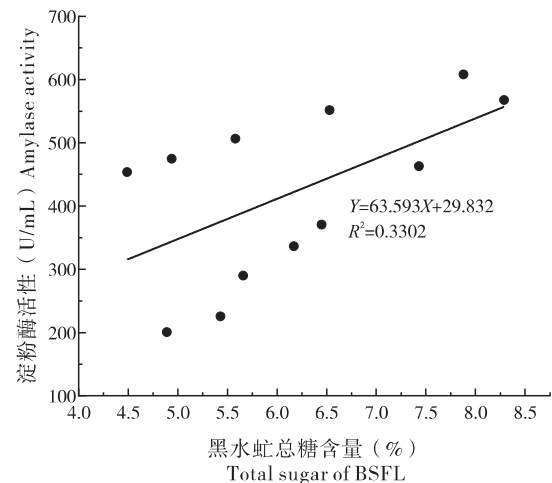


图5 黑水虻淀粉酶与总糖含量变化相关性分析

Fig. 5 Correlation analysis of amylase and total sugar content of BSFL

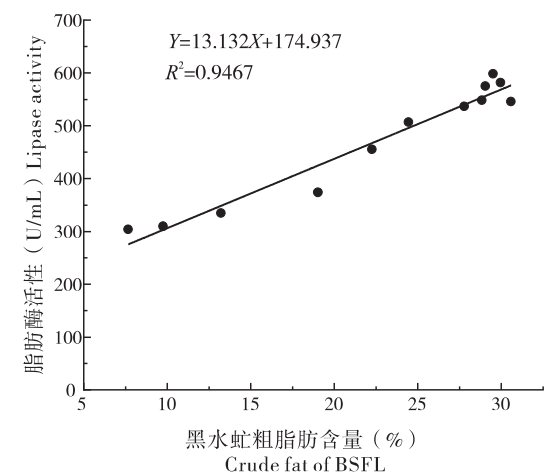


图6 黑水虻脂肪酶与粗脂肪含量变化相关性分析

Fig. 6 Correlation analysis of lipase and crude fat content of BSFL

3 结论与讨论

黑水虻幼虫是一种杂食性昆虫,可以处理餐厨垃圾、畜禽粪便等有机废弃物,因此利用黑水虻处理有机废弃物是一种新型绿色处理方式 (Borel *et al.*, 2021)。研究表明,中肠是黑水虻消化吸收的主要场所,其中主要的消化酶为蛋白酶、淀粉酶和脂肪酶等 (Chen *et al.*, 2010; Schiavone *et al.*, 2019)。研究表明消化酶活性变化的规律是昆虫对于不同营养需求的直接反应 (Lee *et al.*, 2014)。目前对黑水虻体内消化酶变化规律与其养分需求之间的联系的研究较少 (Chen *et al.*, 2010; Oonincx *et al.*, 2015)。因此,本研究主要通过幼虫饲喂实验,明确黑水虻幼虫养分组成与消化酶活性变化的关系。

通过对实验样品测定,幼虫粗蛋白在第 15 天时约占 40.73%。本研究结果与前人研究黑水虻幼虫饲喂实验的研究结果一致,黑水虻幼虫阶段的粗蛋白在 34% ~ 42% 之间 (Diener *et al.*, 2009; Mazza *et al.*, 2020)。用猪粪和家禽粪便饲养的黑水虻的蛋白质含量分别约为 43.2% 和 41% (Nguyen *et al.*, 2015; Ragossnig & Ragossnig, 2021),利用食品加工的副产物饲养黑水虻幼虫,可获得 38% ~ 46.3% 的粗蛋白 (Ritika, 2019; Tan *et al.*, 2021)。蛋白质是昆虫主要营养物质之一,饲料中蛋白质含量不足会导致昆虫前期发育异常。蛋白酶广泛存在于生物体内,参与昆虫主要的生理生化过程,有助于促进对食物的分解和吸收 (Santana *et al.*, 2017)。黑水虻幼虫处理餐厨垃圾过程中,蛋白酶活性迅速上升,在生长初期时达到高峰,然后逐渐下降。黑水虻在发育前期通过蛋白酶将蛋白质水解成氨基酸,由虫体吸收,循环并再次合成蛋白质,并且蛋白质有助于提高幼虫生长前期的免疫力 (Santana *et al.*, 2017; Zheng *et al.*, 2021)。

本研究结果显示淀粉酶呈现先缓慢上升再迅速上升,最后下降的变化规律。淀粉酶能促进黑水虻幼虫对能源性物质的分解与储存,并且当物料中的蛋白质或者氨基酸含量不足时,淀粉可以通过一系列代谢反应,合成饲料中所缺乏的蛋白质或者氨基酸 (Guerreiro *et al.*, 2020)。本研究结果与已报道文献相似,即黑水虻生长中后期的淀粉酶活性高于生长前期 (Santana *et al.*, 2017)。

昆虫幼虫在中后期增加淀粉的摄入主要作为变态发育期的能量来源,而幼虫阶段对淀粉的摄取也对成虫的繁殖起着至关重要的作用 (Gregg *et al.*, 1990)。

黑水虻体内粗脂肪的积累与饲养物料类型有关系。黑水虻幼虫取食猪粪后,其粗脂肪含量为 28%,利用家禽粪便饲养的幼虫粗脂肪含量为 34.8% (Beskin *et al.*, 2018; Chen *et al.*, 2019),利用食品加工副产物饲养的粗脂肪含量约为 42% (Cheng *et al.*, 2017)。脂肪作为昆虫体内重要储能形式之一,也是虫体细胞膜重要构成物质,以及激素合成的前体物质。餐厨垃圾转化过程中,因为物料中油脂含量过高,所以黑水虻幼虫生长前期脂肪酶保持较高的活性 (Giannetto *et al.*, 2020),并且黑水虻幼虫发育中后期,脂肪酶将脂质分解成脂肪酸,为变态发育以及成虫羽化提供能量基础 (Colman *et al.*, 2012)。餐厨垃圾转化过程中,黑水虻幼虫分解过量淀粉物质转化为脂肪等物质储存于体内,为后期变态发育提供能量。因此通过对不同生长阶段幼虫养分含量测定,其粗脂肪含量一直保持上升规律。而黑水虻预蛹阶段,幼虫停止取食从而导致脂肪酶活性下降。

由于废物种类不同,黑水虻幼虫消化有机废物的生理过程也不同。因此,本研究可以为黑水虻工厂化养殖提供理论指导,以及明确 15 日龄黑水虻幼虫可以作为水产饲料的最佳收获时间。

参考文献 (References)

- Barragan-Fonseca KB, Gort G, Dicke M, *et al.* Effects of dietary protein and carbohydrate on life-history traits and body protein and fat contents of the black soldier fly *Hermetia illucens* [J]. *Physiological Entomology*, 2019, 44 (6): 148–159.
- Beskin KV, Holcomb CD, Cammack JA, *et al.* Larval digestion of different manure types by the black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) impacts associated volatile emissions [J]. *Waste Management*, 2018, 74 (13): 213–220.
- Bonelli M, Bruno D, Caccia S, *et al.* *Hermetia illucens* structural and functional characterization of larval midgut [J]. *Frontiers in Physiology*, 2019, 10 (4): 204.
- Borel P, Hammaz F, Morand-Laffargue L, *et al.* Using black soldier fly larvae reared on fruits and vegetables waste as a sustainable dietary source of provitamin A carotenoids [J]. *Food Chemistry*, 2021, 359 (12): 129911.
- Chen J, Hou D, Pang W, *et al.* Effect of moisture content on greenhouse gas and NH₃ emissions from pig manure converted by black soldier fly [J]. *Sci. Total. Environ.*, 2019, 697 (1): 133840.
- Chen J, Tang B, Chen H, *et al.* Different functions of the insect soluble

- and membrane-bound trehalase genes in chitin biosynthesis revealed by RNA interference [J]. *PLoS ONE*, 2010, 5 (1): e10133.
- Cheng J, Chiu S, Lo I. Effects of moisture content of food waste on residue separation, larval growth and larval survival in black soldier fly bioconversion [J]. *Waste Management*, 2017, 67 (4): 315 – 323.
- Cheng Z, Yu L, Li H, Xu X, et al. Use of housefly (*Musca domestica* L.) larvae to bioconversion food waste for animal nutrition and organic fertilizer [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2021, 35 (10): 548 – 555.
- Colman D, Toolson E, Takacs-Vesbach C. Do diet and taxonomy influence insect gut bacterial communities [J]. *Molecular Ecology*, 2012, 21 (6): 5124 – 5137.
- Diener S, Zurbrugg C, Tockner K. Conversion of organic material by black soldier fly larvae: Establishing optimal feeding rates [J]. *Waste Management*, 2009, 27 (5): 603 – 610.
- Giannetto A, Oliva S, Ceccon Lanes CF, et al. *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae) larvae and prepupae: Biomass production, fatty acid profile and expression of key genes involved in lipid metabolism [J]. *Biotechnol.*, 2020, 307 (1): 44 – 54.
- Gregg T, McCrate A, Reveal G, et al. Insectivory and social digestion in *Drosophila* [J]. *Biochemical Genetics*, 1990, 28 (4): 197 – 207.
- Guerreiro I, Serra CR, Coutinho F, et al. Digestive enzyme activity and nutrient digestibility in meagre (*Argyrosomus regius*) fed increasing levels of black soldier fly meal (*Hermetia illucens*) [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2020, 27 (6): 142 – 152.
- Hoc B, Noël G, Carpentier J, et al. Optimization of black soldier fly (*Hermetia illucens*) artificial reproduction [J]. *PLoS ONE*, 2019, 14 (4): e0216160.
- Huang S, Ma Q, Hou Q, et al. Identification and quantitative chemical analysis of betaines in different organic wastes and their bioconversion composts [J]. *Bioresour. Technol.*, 2021, 44 (6): 56 – 59.
- Kawasaki K, Hashimoto Y, Hori A, et al. Evaluation of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae and pre – pupae raised on household organic waste, as potential ingredients for poultry Feed [J]. *Animals (Basel)*, 2019, 6 (9): 222 – 226.
- Lee C, Lee Y, Seo S, et al. Screening and characterization of a novel cellulase gene from the gut microflora of *Hermetia illucens* using metagenomic library [J]. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2014, 24 (2): 1196 – 1206.
- Lee S, Choi K, Osako M, et al. Evaluation of environmental burdens caused by changes of food waste management systems in Seoul, Korea [J]. *The Science of the Total Environment*, 2014, 387 (8): 42 – 53.
- Li W, Li Q, Wang Y, et al. Efficient bioconversion of organic wastes to value – added chemicals by soaking, black soldier fly (*Hermetia illucens* (L.)) and anaerobic fermentation [J]. *J Environ Manage*, 2018, 227 (1): 267 – 276.
- Liu C, Wang C, Yao H. Comprehensive resource utilization of waste using the black soldier fly (*Hermetia illucens* (L.)) (Diptera: Stratiomyidae) [J]. *Animals (Basel)*, 2019, 9 (1): 145 – 149.
- Liu X, Chen X, Wang H, et al. Dynamic changes of nutrient composition throughout the entire life cycle of black soldier fly [J]. *PLoS ONE*, 2017, 12 (3): e0182601.
- Matos J, de Araújo L, Allaman, et al. Evaluation of the reduction of methane emission in swine and bovine manure treated with black soldier fly larvae (*Hermetia illucens* L.) [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2021, 193 (8): 480 – 482.
- Mazza L, Xiao X, Ur Rehman K, et al. Management of chicken manure using black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) larvae assisted by companion bacteria [J]. *Waste Manag*, 2020, 102 (3): 312 – 318.
- Nguyen T, Tomberlin J, Vanlaerhoven S. Ability of black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) larvae to recycle food waste [J]. *Environmental Entomology*, 2015, 44 (8): 406 – 410.
- Nikkhah A, Van Haute S, Jovanovic V, et al. Life cycle assessment of edible insects (*Protaetia brevitarsis seoulensis* larvae) as a future protein and fat source [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11 (11): 14030.
- Ooninx D, van Broekhoven S, van Huis A, et al. Feed conversion, survival and development, and composition of four insect species on diets composed of food by-products [J]. *PLoS ONE*, 2015, 10 (2): e0144601.
- Rehman KU, Ur Rehman R, Somroo AA, et al. Enhanced bioconversion of dairy and chicken manure by the interaction of exogenous bacteria and black soldier fly larvae [J]. *J Environ Manage*, 2019, 237 (2): 75 – 83.
- Ritika P. Study on occurrence of black soldier fly larvae in composting of kitchen waste [J]. *Insects*, 2019, 23 (3): 334 – 337.
- Santana C, Barbosa L, Júnior I, et al. Lipase activity in the larval midgut of *Rhynchophorus palmarum*: Biochemical characterization and the effects of reducing agents [J]. *Insects*, 2019, 8 (5): 223 – 224.
- Schiavone A, Dabbou S, Petracci M, et al. Black soldier fly defatted meal as a dietary protein source for broiler chickens: Effects on carcass traits, breast meat quality and safety [J]. *Animal*, 2019, 13 (7): 2397 – 2405.
- Tan J, Lee J, Chiam Z, et al. Applications of food waste – derived black soldier fly larval frass as incorporated compost, side – dress fertilizer and frass – tea drench for soilless cultivation of leafy vegetables in biochar – based growing media [J]. *Waste Management*, 2021, 130 (5): 155 – 166.
- Winkler U, Stuckmann M. Glycogen, hyaluronate, and some other polysaccharides greatly enhance the formation of exolipase by *Serratia marcescens* [J]. *Journal of Bacteriology*, 1979, 138 (10): 663 – 670.
- Zhang Z, Wang H, Zhu J, et al. Swine manure vermicomposting via housefly larvae (*Musca domestica*): The dynamics of biochemical and microbial features [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 118 (8): 563 – 571.
- Zheng X, Zhu Q, Zhou Z, et al. Gut bacterial communities across 12 *Ensifera* (Orthoptera) at different feeding habits and its prediction for the insect with contrasting feeding habits [J]. *PLoS ONE*, 2021, 16 (5): e0250675.