



杨霞, 王定美, 麦力文, 林蕊, 李勤奋. 不同含水率饲料对黑水虻生长发育的影响及其对饲料的转化特征研究 [J]. 环境昆虫学报, 2020, 42 (5): 1183–1190.

不同含水率饲料对黑水虻生长发育的影响及其对饲料的转化特征研究

杨霞^{1,2}, 王定美^{1,2}, 麦力文^{1,2}, 林蕊^{1,2}, 李勤奋^{1,2*}

(1. 中国热带农业科学院环境与植物保护研究所, 海口 571101; 2. 海南省热带生态循环农业重点实验室, 海口 571101)

摘要: 饲料的含水率是影响黑水虻生长发育及其对饲料养分转化的重要因素, 本研究旨在探究黑水虻生物转化过程中饲料最佳含水率。将 3 龄黑水虻幼虫接入含水率为 40%、50%、60%、70%、80% 的饲料中, 每隔 3 d 记录黑水虻的体重, 至预蛹数达总数的 50% 时结束试验, 计算预蛹历期、预蛹总产量及有效转化率, 测定黑水虻及饲料残渣养分及总能。结果发现: 1) 黑水虻预蛹总产量及其对饲料的有效转化率随水分含量升高而线性增加, 在 80% 水分下达到最大值。2) 黑水虻在 70% 水分下最先预蛹, 预蛹历期为 14 d。3) 黑水虻体内 CP 含量随水分含量增加而线性下降, EE、GE 含量随水分增加线性上升。4) 黑水虻对饲料 GE 的代谢消耗率在 60% 水分下最高, 而在 80% 水分下对饲料养分的累积量最高。因此, 生产中为了高效运转黑水虻生物转化体系, 应根据生产目的调节饲料水分以获取最大效益。

关键词: 黑水虻; 生长发育; 养分利用; 总能

中图分类号: Q968.1; S433

文献标识码: A

文章编号: 1674-0858 (2020) 05-1183-08

Growth and development and utilizing transformation characteristics with diet under different moisture content of black soldier fly (*Hermetia illucens*)

YANG Xia^{1,2}, WANG Ding-Mei^{1,2}, MAI Li-Wen^{1,2}, LIN Rui^{1,2}, LI Qin-Fen^{1,2*} (1. Institute of Environment and Plant Protection, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou 571101, China; 2. Hainan Key Laboratory of Tropical Eco-Circular Agriculture, Haikou 571101, China)

Abstract: The moisture content of diet is an important factor that affects the growth and development as well as their utilization for nutrients of larvae of black soldier fly. Studies were performed to determine the optimum moisture content of diet for larvae. The 3rd instar larvae were inoculated into diet with moisture of 40%, 50%, 60%, 70%, and 80%. The larvae were sampled to weight about every 3 days until the experiment were terminated. Once 50% of the larvae reached the prepupal stage, experiment ceased. The prepupal stage, yield and effective conversion rate were calculated, and nutrients and gross energy of the larvae and residues were determined. The results were showed as follow: 1) The yields and effective conversion rate of larvae affected by moisture content of diet, larvae at 80% moisture developed the fastest and had the greatest effective conversion rate to the prepupal stage. 2) Larvae at 70% moisture spent shortest time reaching prepupal stage (14 days). 3) The CP in larvae decreased linearly with the

基金项目: 中国热带农业科学院基本科研业务费专项 (1630042017001, 1630042018009, 1630042019020); 海南省自然科学基金青年基金项目 (419QN278)

作者简介: 杨霞, 女, 1989 年生, 湖南怀化人, 硕士, 研究实习员, 主要研究方向为废弃物资源化利用, E-mail: yangxia0820@qq.com

通信作者 Author for correspondence: 李勤奋, 女, 博士, 研究员, 主要研究方向为生态循环农业, E-mail: qinfenli2005@163.com

收稿日期 Received: 2019-10-22; 接受日期 Accepted: 2020-04-03

increasing of feed moisture, but the EE and GE increased linearly in the same situation. 4) The metabolism of larvae on GE of diet was highest at 60% moisture, while the accumulation of nutrients was highest at 80% moisture. In conclusion, moisture serves a role in black soldier fly rearing, in order to operate the black soldier fly biotransformation system efficiently, it is important to regulate the moisture of diet based on production purpose in industrialization.

Key words: Black soldier fly; growth and development; nutrient utilization; gross energy

黑水虻 *Hermetia illucens* (L.) 幼虫可将低价值的有机废弃物转化富含蛋白及脂肪的生物体, 可用于畜牧业及渔业生产中部分替代豆粕或鱼粉, 是解决全球“蛋白资源紧缺”及“废弃物资源化利用”这两个问题的有效手段 (Pinotti *et al.*, 2019), 因此, 探索黑水虻的高效饲养参数是目前的研究热点。黑水虻的生长发育及其对饲料养分的利用受多种因素影响。Cammack 等 (2017) 认为, 相较于饲料, 饲料含水率对黑水虻的生长、发育、繁殖影响更为突出。废弃物中如蔬果残渣、酒糟废弃物、餐厨垃圾、畜禽粪便等水分含量跨度较大, 在利用黑水虻进行生物转化时, 水分含量对黑水虻的影响尚不明晰。Fatchurochim 等 (1989) 研究了鸡粪中水分为 20% ~ 90% 时对黑水虻生长的影响, 发现当水分含量在 40% ~ 60% 下, 幼虫体重增重最大, 但在 20% 及 90% 时, 严重影响黑水虻存活。Cheng 等 (2017) 研究表明, 餐厨垃圾中水分为 70% ~ 80%, 黑水虻生物量及存活率最大。Sealey 等 (2011) 提出, 可根据人类需求针对性调配饲料参数改善黑水虻的养分累积及食料转化效率, 以进一步提高虫体蛋白或脂肪含量, 提高饲料转化效率, 进而提高黑水虻生物转化体系的经济效益。目前的研究多关注于水分对黑水虻生长发育及存活率的影响 (喻国辉等, 2014; Miranda *et al.*, 2019), 而水分对黑水虻养分累积及转化特征鲜见报道, 生产中缺乏指导依据。因此, 本研究拟确定饲料不同含水率对黑水虻生长发育、养分累积及转化的影响, 为生产中黑水虻生物转化体系的高效运转提供数据支撑。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

供试试虫为黑水虻 3 龄幼虫, 由海南省北科生态农业开发有限责任公司提供。麦麸、花生粕购自海南省海口市椰海粮油交易市场。苜蓿粉购自河北沧州粹金源牧业公司。

1.2 试验设计

在基础饲料的基础上, 分别添加蒸馏水, 调制初始含水率为 40%、50%、60%、70%、80% 的 5 种试验饲料, 记为 40%、50%、60%、70%、80% 处理组, 每个处理 3 个重复。幼虫基础饲料按照 Tomberlin 等 (2009) 推荐配方配制, 其组成及营养水平见表 1。

表 1 基础饲料的组成及营养水平
Table 1 Composition and nutritional level of basic diet for larva of black soldier fly

原料 Ingredient	含量 (%) Content
玉米 Corn	20.00
苜蓿 Alfalfa	30.00
麦麸 Wheat bran	50.00
干物质 (DM)	85.08
总能 (GE) Kcal/kg	4 247.25
粗蛋白质 (CP)	19.36
粗脂肪 (EE)	0.46
粗纤维 (CF)	32.75
粗灰分 (CA)	13.18

1.3 试验方法

分别取 220 g 基础饲料, 加入蒸馏水调节水分至含水率为 40%、50%、60%、70%、80%, 平铺于饲养盒中, 接入随机选取体尺及体重 (体重约 2.5 mg/头) 一致的 3 龄幼虫 500 头。在饲养盒顶部盖上 100 目滤布封住 (防止家蝇在其中产卵和幼虫逃走), 置于饲养室培养。饲养室温度为 27℃、环境湿度为 70%。每天观察幼虫生长情况, 每隔 3 d 于每个重复随机取 10 头幼虫, 称重, 当幼虫 50% 出现预蛹时停止试验, 记录试验时间。

1.4 测定指标及方法

试验开始和结束时分别记录虫料、虫体及虫粪的重量。幼虫用沸水灭活后在 60℃ 下烘干 48 h, 在烘干过程中多次翻动, 以保证受热均匀。干燥后虫体和风干后虫粪, 粉碎过 60 目筛, -20℃ 保存, 备用。虫体及虫粪干物质 (DM)、粗蛋白质

(CP)、粗脂肪(EE)、粗纤维(CF)、粗灰分(CA)及总能(GE)分别按照国标 GB/T 6284-2006、GB/T 6432-1994、GB/T 6433-2006、GB/T 6434-2006、GB/T 6438-2007、GB/T 32707-2016 测定。

1.5 数据计算及统计分析

采用 Excel 对基础数据进行处理, 采用 SAS 9.3 中 ANOVA 模块对数据进行方差显著性分析, 采用 LSD 法进行多重比较。通过 REG 模块的 Simple 选项对主要生长发育指标、体成分与饲料含水率进行一元线性回归, 建立黑水虻体成分及总能与饲料含水率的线性模型。数据以平均值 \pm 标准差表示。用 $P < 0.05$ 表示差异显著水平。

黑水虻的生长参数和转化效率按下述公式计算:

$$\text{黑水虻总产量(Yield; } Y) = W_2 - W_1;$$

$$\text{黑水虻平均日增量(Average Daily Gain; ADG)} = (W_2 - W_1) / t;$$

$$\text{料虫比(Feed/Gain; } F/G) = W_3 / (W_6 - W_5) \times 100\%;$$

$$\text{饲料有效转化率(Efficiency of Feed Conversion; EFC)} = (W_6 - W_5) / (W_3 - W_4) \times 100\%;$$

$$\text{饲料减量率(Dry Mass Reduction; DMR)} = (W_3 - W_4) / W_3 \times 100\%;$$

$$\text{代谢消耗率(Metabolism; } M) = (I - F) - B$$

其中, W_1 为试验开始时黑水虻初始鲜重, W_2 为试验结束时黑水虻末重鲜重, W_3 为试验开始时饲料干重, W_4 为试验结束时残渣干重, t 为各个处

理实验天数, W_6 为试验结束时虫体干重, W_5 为试验开始时幼虫干重, B 为 500 头黑水虻虫体养分增量(绝干状态下), I 为初始 220 g 饲料中各个养分含量(绝干状态), F 为试验结束时残渣中各个养分含量, M 为养分代谢消耗含量。

2 结果与分析

2.1 不同初始含水率的饲料对黑水虻的生长特征及饲料利用效率的影响

研究发现, 随着饲料含水率增加, 黑水虻的末重鲜重(W_2)、总产量(Y)、平均日增重(ADG)及虫体干重均呈上升趋势, 且在 80% 水分下达到最大值, 具体见表 2。其中黑水虻鲜重 W_2 在 80% 水分下分别为 40%、50%、60%、70% 处理组的 2.52 倍、2.00 倍、2.09 倍、1.47 倍; ADG 分别为其他组的 3.3 倍、2.36 倍、2.21 倍、1.21 倍。黑水虻的料虫比(F/G)为黑水虻每增重 1 单位需要的饲料重量, 随饲料水分含量升高显著降低。生物转化过程中, 黑水虻对饲料的有效转化率(EFC)在 80% 水分含量下最高, 在 40%~60% 水分时, 无统计学差异。饲料减量率(DMR)在 50%~60% 处理下显著高于其他处理组, 且组间无显著差异。黑水虻在 70% 水分下最先预蛹, 历期 14 d(具体见图 1); 在 60% 及 80% 水分下, 预蛹周期分别为 17 d、18 d, 在水分为 40%~50% 时, 预蛹延长至 22 d。

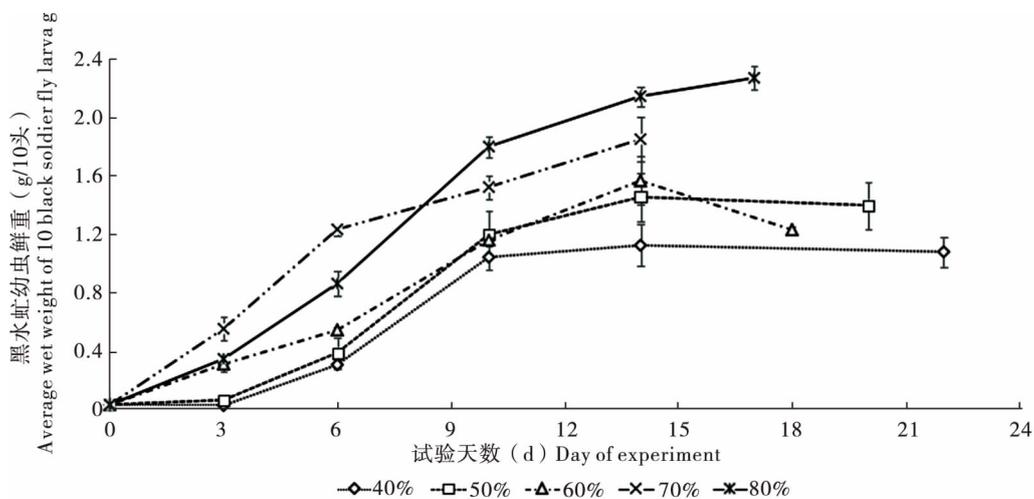


图 1 不同初始含水率的饲料对 10 头黑水虻的体增重随时间变化及其预蛹历期的影响

Fig. 1 Average fresh weight and prepupal period of 10 samples of larva feed by diet at 40%、50%、60%、70% and 80% moisture content

注: 误差线为各处理黑水虻个体的标准偏差。Note: Error bars represent the standard deviations of the individual larva weights.

表 2 不同初始含水率的饲料对黑水虻生长特征及饲料利用效率的影响

Table 2 Growth performance and utilization efficiency of black soldier fly under different initial moisture contents of diet

含水率 (%) Moisture	初始 鲜重 (g) W ₁	末重 鲜重 (g) W ₂	总产量 (g) Y	平均日增重 ADG	黑水虻 干重 (g) Dry Biomass	料虫比 (%) F/G	有效转 化率 (%) EFC	饲料减 量率 (%) DMR
40	1.0014	45.06 ± 0.76 ^d	44.06 ± 0.76 ^d	2.00 ± 0.03 ^d	11.57 ± 0.46 ^d	20.07 ± 0.79 ^a	9.78 ± 0.41 ^c	51.00 ± 1.12 ^c
50	1.0018	56.64 ± 8.40 ^c	55.64 ± 8.40 ^c	2.78 ± 0.42 ^c	14.67 ± 1.97 ^c	15.90 ± 2.10 ^b	11.55 ± 1.73 ^c	55.16 ± 1.50 ^{ab}
60	1.0016	54.40 ± 2.43 ^c	53.40 ± 2.43 ^c	2.97 ± 0.13 ^c	15.61 ± 1.03 ^c	14.86 ± 0.99 ^b	11.77 ± 0.69 ^c	57.36 ± 0.57 ^a
70	1.0019	76.91 ± 4.08 ^b	75.91 ± 4.08 ^b	5.42 ± 0.29 ^b	23.35 ± 1.72 ^b	9.86 ± 0.74 ^c	19.24 ± 1.44 ^b	52.93 ± 0.59 ^c
80	1.0020	112.39 ± 9.41 ^a	111.38 ± 9.41 ^a	6.55 ± 0.55 ^a	33.66 ± 1.78 ^a	6.82 ± 0.35 ^d	29.32 ± 1.46 ^a	54.67 ± 0.85 ^{bc}
CV	0.06	8.74	8.87	8.68	7.59	8.56	7.61	3.90
MSE	0.01	4.62	6.04	0.34	1.50	1.16	1.26	2.08
P 值	0.7032	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.0098

注: 同行数据肩标相同字母或不标字母表示差异不显著 ($P > 0.05$), 肩标不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$); CV, 变异系数; MSE, 误差均方; 下同。Note: In columns, values followed by the same letter are not statistically different according to the Duncan test at $P < 0.05$; CV, Coefficient of Variation; MSE, Mean Square Error; The same as below.

2.2 不同初始含水率的饲料对黑水虻体成分及总能含量的变化特征影响

研究表明, 饲料初始含水率显著影响黑水虻体成分组成, 具体见表 3。虫体粗蛋白质 (CP) 含量在 40% 水分下显著高于其他组, 随水分增加显著下降, 而粗脂肪 (EE) 含量在 80% 水分时显

著高于其他组, 且随水分增加显著上升。虫体的粗纤维 (CF) 含量在 70%、80% 水分下, 含量显著低于其他组, 且组间无显著差异。虫体的粗灰分 (CA) 含量呈现先上升后下降的趋势, 在水分为 80% 时, CA 含量最低。

表 3 不同初始含水率的饲料对黑水虻体成分及能量的变化影响

Table 3 Changes in composition and gross energy of black soldier fly larva under different initial moisture contents of diet

项目 Item	40%	50%	60%	70%	80%	CV	MSE	P 值, P
粗蛋白质 (%) CP	49.72 ± 1.59 ^a	48.38 ± 0.47 ^{ab}	47.61 ± 0.31 ^b	47.21 ± 1.05 ^b	43.05 ± 0.56 ^c	1.95	0.92	<.0.001
粗脂肪 (%) EE	16.79 ± 1.45 ^d	20.48 ± 1.35 ^c	23.05 ± 3.26 ^c	29.79 ± 0.85 ^b	34.07 ± 1.62 ^a	7.62	1.89	<.0.001
粗纤维 (%) CF	11.13 ± 0.51 ^a	10.98 ± 0.71 ^a	10.91 ± 0.46 ^a	7.50 ± 0.80 ^b	6.60 ± 1.14 ^b	8.11	0.76	<.0.001
粗灰分 (%) CA	12.93 ± 0.19 ^b	15.47 ± 0.64 ^a	14.47 ± 1.38 ^a	11.21 ± 0.15 ^c	9.90 ± 0.02 ^d	5.37	0.69	<.0.001
总能 (Kcal/kg) GE	5 346 ± 60.65 ^d	5 346 ± 95.46 ^d	5 553 ± 170.52 ^c	5 992 ± 52.92 ^b	6 208 ± 14.24 ^a	1.16	94.73	<.0.001

2.3 初始含水率的饲料对黑水虻生长性能、主要体成分及总能的线性回归

利用一元线性回归以水分为自变量, 饲料不同水分下黑水虻干重、F/G、主要体成分 CP、EE 及 GE 为因变量, 建立一元线性回归模型, 结果见表 4。在饲料 40% ~ 80% 水分下, 黑水虻干重、EE 及 GE 与水分均呈正向线性关系 ($P < 0.05$)

且 R^2 均超过 85%, 模型相关性好。虫体 F/G、CP 则与饲料水分呈负向线性关系 ($P < 0.05$), R^2 值为 0.84、0.93, 模型可信度高。利用线性模型可估算在不同饲料含水率下黑水虻体成分含量, 因此, 生产中可根据生产目的, 调节黑水虻饲料水分以获得期望的体成分含量。

表 4 不同初始含水率的饲料对黑水虻生长发育、主要体成分及总能的一元线性回归方程
 Table 4 A linear regression model for the growth performance and composition of larva with different initial moisture content of diet

项目 Item	斜率 (标准误)	截距 (标准误)	P 值	R ²
	Slope standard error	Intercept standard error		
黑水虻干重 (g/kg) Dry biomass of larva	5.29 (1.11)	-119.40 (68.30)	<0.0001	0.8835
料虫比 (%) G/F	-0.33 (0.02)	33.04 (1.45)	<0.0001	0.9364
粗蛋白 (g/kg) CP	-1.45 (0.37)	559.02 (22.71)	0.0291	0.8380
粗脂肪 (g/kg) EE	4.39 (0.38)	-14.86 (23.22)	0.0014	0.9783
总能 (Kcal/kg) GE	22.87 (4.96)	4026.87 (305.99)	0.0192	0.8761

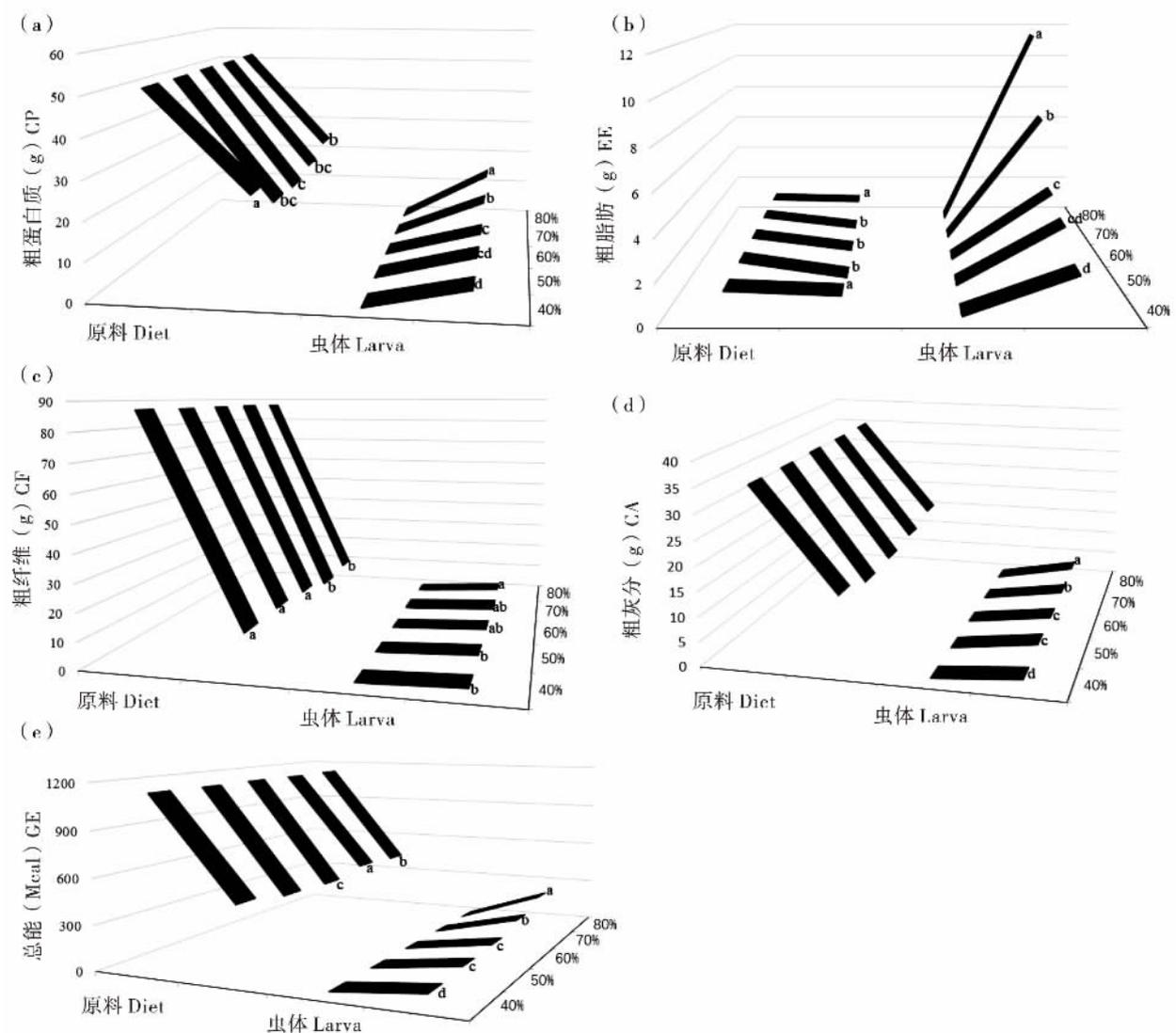


图 2 不同水分的饲料对黑水虻生物转化对的养分转化及累积变化特征的影响
 Table 2 Change characteristics and accumulation of nutrient utilization in larva of black soldier fly under different moisture contents of diet

2.4 不同初始含水率的饲料对黑水虻养分的转化及累积特征的影响

黑水虻对饲料养分的高效利用及转化是黑水虻生物转化体系健康运转的前提条件。本研究计算了 220 g 饲料中 CP、EE、CF、CA 及 GE 的含量及其在 500 头黑水虻生物转化过程中的消耗量和虫体累积量,发现 40% 水分下饲料 CP 消耗量最低 (25.14 g) (见图 2-a), 60% 水分下 CP 消耗量 (32.85 g) 显著高于其他组; 虫体 CP 累积量在 80% 水分下最大 (13.85 g), 显著高于其他组 (10.37 g、6.79 g、6.64 g、5.60 g)。水分在 50% ~ 70% 时, 黑水虻对饲料中 EE 消耗量 (0.63 g ~ 0.79 g) 显著高于 40%、80% 水分组 (0.22 g、0.12 g) (图 2-b); 虫体内 EE 累积量随水分含量增加显著上升, 其中 80% 处理组累积量 (11.46 g) 相较于 40% ~ 70% 处理组的累积量 (1.93 g、3.01 g、3.61 g、6.95 g) 分别增加了 494%、280%、217%、65%。饲料 CF 在 70% 及 80% 水分下消耗量 (78.26 g、77.52 g) 显著高于 40% ~ 60% 水分组 (73.20 ~ 75.11 g) (图 2-c); 虫体内 CF 在 80% 处理下累积量 (2.22 g) 显著高于 40% 及 50% 处理组 (1.27 g、1.60 g)。水分对饲料 CA 消耗量无显著影响 (图 2-d); 虫体 CA 的累积量随水分增加而显著上升 (1.49 g、2.26 g、2.25 g、2.61 g、3.33 g), 其中 50% 及 60% 处理

组无显著差异。饲料 60% 水分下, GE 的消耗量 (721.58 Mcal) 最高 (图 2-e), 而 40% 及 70% 水分下 GE 消耗量 (659.20 Mcal、672.18 Mcal) 显著低于 50% (704.62 Mcal) 及 80% 组 (695.73 Mcal) 且组间无显著差异; 虫体 GE 累积量随饲料水分含量的增加显著上升, 分别为 60.66 Mcal、77.33 Mcal、85.59 Mcal、138.74 Mcal、206.50 Mcal, 其中 80% 处理组相较于其他组分别增加 235%、164%、139%、48%。

2.5 不同初始含水率的饲料对黑水虻总能代谢特征的影响

总能是指饲料中有机物质完全氧化燃烧时释放的全部能量, 主要为碳水化合物、粗蛋白质和粗脂肪热量的总和, 可为机体的生命维持及生长发育提供能量。根据能量守恒原理, 饲料中的 GE 应为虫体累积量、残渣残留量及代谢消耗量的总和 (图 3)。黑水虻生物转化过程中, 饲料不同水分下, 虫体累积的 GE 为 5.47% ~ 20.69%, 随水分增加而依次增加, 至 80% 含水率时达到最大。残渣中的残留的 GE 占总的 36.15% ~ 45.46%, 其中 50% 及 60% 处理组残渣残留 GE 最少。代谢消耗的 GE 为 35.97% ~ 55.45%, 其中水分含量为 70% ~ 80% 时, 转化过程中代谢的能量低于 41%, 而 40% ~ 60% 水分条件下代谢的能量均超过 52%。

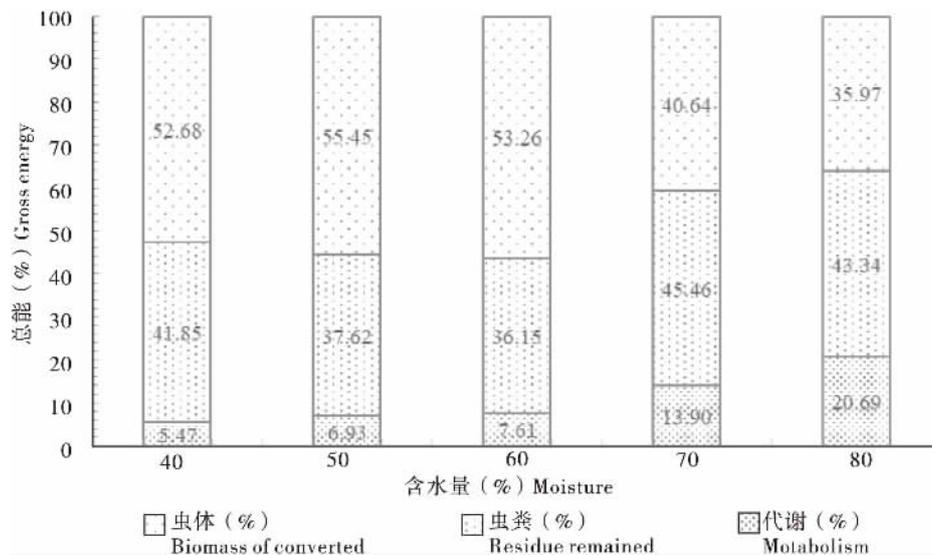


图 3 不同水分下黑水虻对饲料总能代谢特征

Fig. 3 Relative proportion of gross energy converted into larva, used for metabolism, and remains as residuals during the biotransformation process under different moisture content of diet

注: 代谢消耗率为试验过程中饲料中的总量扣除虫体累积量及虫粪残留量。Note: Metabolism is calculated as the difference between residue and larval weight and the total amount of feed provided during the entire experiment time.

3 结论与讨论

3.1 饲料水分含量对虻虫生物转化过程中生长发育的影响

饲料中的水分直接影响昆虫对水分的获取、吸收及利用, 从而影响昆虫的新陈代谢, 进一步表现为影响昆虫的生长发育 (Bertinetti *et al.*, 2019)。本研究结果表明黑水虻生物转化过程中体增重随饲料水分含量升高显著增加, 在 80% 水分下料虫比及有效转化率可达 6.32% 及 29.32%; 幼虫在 70% 水分下预蛹历期缩短为 14 d, 而在 40% 水分下预蛹历期延长为 22 d。此结果与 Cammack 等 (2017)、Cheng 等 (2017)、申高林 (2016) 等研究结果相同。饲料水分过低, 对幼虫的生长发育形成缺水应激, 阻碍黑水虻幼虫的正常生长发育 (Spranghers *et al.*, 2016); 饲料水分含量过高, 稀释单位体积饲料的养分浓度, 因而幼虫会通过增加采食量及延长预蛹期以储备足够养分用于机体发育繁殖 (Palma *et al.*, 2018)。黑水虻幼虫为食腐性昆虫, 其特殊的口器更易取食浸润软化后的饲料 (Bruno *et al.*, 2019), 因而高水分饲料更易于幼虫采食。再者当水分低于 60%, 饲料上层水分挥发, 表面结块、干裂甚至发霉, 减少幼虫取食空间, 饲料可利用率减少。因此, 饲料中水分通过影响黑水虻幼虫的采食进而影响其生长发育。

生产中, 常将黑水虻作为鱼粉的替代品配制动物饲料, 其高粗蛋白质含量符合生产期望, 而高粗脂肪含量易导致饲料氧化酸败, 降低生产效益 (Pimentel *et al.*, 2017)。本研究测结果表明, 幼虫体内粗蛋白质含量随饲料水分升高而线性降低, 粗脂肪含量随水分升高而线性升高, 与 Gao 等 (2019) 研究结果相似。低水分对虫体造成应激, 虫体优先动用体内糖类及脂肪来提供更多能量以对抗外界不利影响; 高水分下幼虫采食量增加, 并将多余碳水化合物转化为脂质, 而脂质相较于蛋白及糖类具有更高的能值, 因而总能、粗脂肪含量呈线性上升。因此, 在生产中可调控饲料水分, 以获得期望的虫体成分含量。

3.2 饲料水分含量对黑水虻养分累积及转化的影响

黑水虻对饲料养分的高效利用及累积是黑水虻生物转化体系运转的前提条件。本研究表明,

黑水虻生物转化体系对饲料的消耗量在水分为 60% 最高, 对饲料养分的累积量在水分为 80% 下最高。各水分下虫体粗蛋白质累积量最大, 但粗脂肪累积量受水分影响最大。这是由于脂质不仅可作为黑水虻成虫阶段的能量储备, 还与幼虫体内的水分保持有关。幼虫的机体为开放的血液系统且具有较高的相对表面积, 导致机体水分易于流失, 脂质可帮助虫体降低蒸腾作用并存储未吸收的水 (Barragan *et al.*, 2018), 因此, 在适宜条件下, 幼虫优先将养分转化为脂肪储存。

黑水虻对饲料的消耗是微生物与幼虫共同作用的结果 (Jiang *et al.*, 2019)。水分为 40% ~ 60% 时, 微生物活跃 (Diener *et al.*, 2009), 与黑水虻竞食, 降低饲料的可利用养分含量, 不利于虫体养分累积。水分为 70% ~ 80%, 由于饲料水分大, 溶氧量降低, 微生物代谢受阻; 同时, 高分水分下利于幼虫采食, 因此虫体养分累积高。值得注意的是, 水分可通过影响饲料的温度进而影响黑水虻的生长及养分累积。微生物分解饲料释放大量热量, 升高饲料温度至 35℃ 以上, 超过幼虫的最佳生长温度 (27 ~ 35℃), 对幼虫造成高温应激 (姬越等, 2017; Shumo *et al.*, 2019)。当水分含量较高 (70% ~ 80%) 时, 饲料的热容量较大, 可以减缓饲料温度的上升, 降低高温对虫体的刺激。因此水分影响幼虫的生长发育及其对饲料的转化效率, 生产中, 水分与微生物及温度的互作对幼虫生物转化的影响需要进一步探究。

参考文献 (References)

- Barragan-Fonseca KB, Dicke M, van Loon JJA. Influence of larval density and dietary nutrient concentration on performance, body protein, and fat contents of black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) [J]. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 2018, 166 (9): 761 - 770.
- Bertinetti C, Samayoa AC, Hwang SY. Effects of feeding adults of *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae) on longevity, oviposition, and egg hatchability: Insights into optimizing egg production [J]. *Journal of Insect Science*, 2019, 19 (1): 19.
- Bruno D, Bonelli M, Cadamuro AG, *et al.* The digestive system of the adult *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae): Morphological features and functional properties [J]. *Cell and Tissue Research*, 2019: 1 - 18.
- Cammack J, Tomberlin J. 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.
- Cheng JYK, Chiu SLH, Lo IMC. 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: 315 – 323.
- Diener S, Zurbrugg C, Tockner K. Conversion of organic material by black soldier fly larvae: Establishing optimal feeding rates [J]. *Waste Management & Research*, 2009, 27 (6): 603 – 610.
- Fatchurochim S, Geden CJ, Axtell RC. Filth fly (Diptera) oviposition and larval development in poultry manure of various moisture levels [J]. *Journal of Entomological Science*, 1989, 24 (2): 224 – 231.
- Gao Z, Wang W, Lu X, *et al.* Bioconversion performance and life table of black soldier fly (*Hermetia illucens*) on fermented maize straw [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 230: 974 – 980.
- Ji Y, Ren DZ, Ye MQ, *et al.* Studies on optimum temperature for rearing black soldier fly, *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae) [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2017, 39 (2): 390 – 395. [姬越, 任德珠, 叶明强, 等. 亮斑扁角水虻人工饲养条件下适宜温度的研究 [J]. 环境昆虫学报, 2017, 39 (2): 390 – 395]
- Jiang CL, Jin WZ, Tao XH, *et al.* Black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) strengthen the metabolic function of food waste biodegradation by gut microbiome [J]. *Microbial Biotechnology*, 2019, 12 (3): 528 – 543.
- Miranda CD, Cammack JA, Tomberlin JK. Life-history traits of the black soldier fly, *Hermetia illucens* (L.) (Diptera: Stratiomyidae), reared on three manure types [J]. *Animals*, 2019, 9 (5): 281.
- Palma L, Ceballos SJ, Johnson PC, *et al.* Cultivation of black soldier fly larvae on almond byproducts: Impacts of aeration and moisture on larvae growth and composition [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2018, 98 (15): 5893 – 5900.
- Pimentel AC, Montali A, Bruno D, *et al.* Metabolic adjustment of the larval fat body in *Hermetia illucens* to dietary conditions [J]. *Journal of Asia – Pacific Entomology*, 2017, 20 (4): 1307 – 1313.
- Pinotti L, Giromini C, Ottoboni M, *et al.* Insects and former foodstuffs for upgrading food waste biomasses / streams to feed ingredients for farm animals [J]. *Animal*, 2019: 1 – 11.
- Sealey WM, Gaylord TG, Barrows FT, *et al.* Sensory analysis of rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*, fed enriched black soldier fly prepupae, *Hermetia illucens* [J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2011, 42 (1): 34 – 45.
- Shen GL. Study on the Optimization of Feeding Condition and Selenium-rich Technology of Black Soldier Fly [D]. Nanchang: Nanchang University, 2016. [申高林. 黑水虻饲养条件优化及其富硒研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2016]
- Shumo M, Khamis FM, Tanga CM, *et al.* Influence of temperature on selected life-history traits of black soldier fly (*Hermetia illucens*) reared on two common urban organic waste streams in Kenya [J]. *Animals*, 2019, 9 (3): 79.
- Spranghers T, Ottoboni M, Klootwijk C, *et al.* Nutritional composition of black soldier fly (*Hermetia illucens*) prepupae reared on different organic waste substrates [J]. *Journal of the Science of Food & Agriculture*, 2016, 97 (5): 2594 – 2600.
- Tomberlin JK, Sheppard DC, Joyce JA. Selected life – history traits of black soldier flies (Diptera: Stratiomyidae) reared on three artificial diets [J]. *Annals of the Entomological Society of America*, 2009, 95 (May 2002): 379 – 386.
- Yu GH, Li YP, Yang YH, *et al.* Effects of the artificial diet with low water content on the growth and development of the black soldier fly, *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae) [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2014, 57 (8): 943 – 950. [喻国辉, 李一平, 杨玉环, 等. 低含水量饲料对黑水虻生长发育的影响 [J]. 昆虫学报, 2014, 57 (8): 943 – 950]