



黑水虻幼虫的耐饥力及饥饿幼虫复食后的生物学特性

邓文辉, 吴家园, 陈天阳, 殷玉梦, 朱 芬*

(华中农业大学植物科学技术学院, 利用昆虫转化有机废弃物湖北省国际科技合作基地, 武汉 430070)

摘要:【目的】旨在明确黑水虻 *Hermetia illucens* 幼虫的耐饥力及饥饿幼虫复食后的发育、生殖力等生物学特性, 为评估饥饿对黑水虻后续发育的影响并指导生产实践提供依据。【方法】将不同日龄或不同体重黑水虻幼虫进行不同时间的饥饿处理, 测定和分析其耐饥力与日龄、百头重的关系; 对 7 日龄幼虫进行不同时间的饥饿处理后再复喂, 测定不同饥饿时间对其预蛹出现时间、总预蛹率、预蛹重、成虫繁殖等的影响。【结果】黑水虻幼虫饥饿后的半数致死时间 (LT_{50}) 与日龄成指数关系, 与体重呈线性相关。7 日龄幼虫的耐饥力较强, LT_{50} 超过了 50 d, 饥饿 30 d 时存活率仍然达到了 95%。百头重小于 0.5 g 的个体, 其 LT_{50} 小于 30 d; 百头重在 2~2.5 g 的个体, 其 LT_{50} 在 45~70 d。幼虫超过 8 日龄时或百头重超过 4.5 g 时, 多数个体在饥饿 5 d 时就提前进入了后续发育阶段。7 日龄幼虫饥饿 40 d 内复食, 其预蛹率未受到影响, 但预蛹重显著增加; 短期饥饿 (0~10 d) 对其成虫产卵量无显著影响, 长期饥饿 (30~40 d) 使其成虫产卵量显著下降; 饥饿长达 30 d 以上时, 卵孵化率也显著降低。【结论】本研究明确了不同体重或不同日龄的黑水虻幼虫都具有一定的耐饥力; 饥饿幼虫复食后预蛹重显著增加。

关键词: 黑水虻; 饲养; 幼虫; 耐饥力; 复食; 生物学特性

中图分类号: Q965 文献标识码: A 文章编号: 0454-6296(2019)04-0461-07

Starvation tolerance and biological characteristics after starvation and refeeding of *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae) larvae

DENG Wen-Hui, WU Jia-Yuan, CHEN Tian-Yang, YIN Yu-Meng, ZHU Fen* (Hubei International Scientific and Technological Cooperation Base of Waste Conversion by Insects, College of Plant Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: 【Aim】The aim of this study is to clarify the starvation tolerance of *Hermetia illucens* larvae and to examine the biological characteristics of development and fertility of starved larvae after refeeding, so as to provide a theoretical basis for assessing the effects of starvation on the subsequent development of *H. illucens* larvae and a guidance on production practices. 【Methods】*H. illucens* larvae of different day-old or with different body weights were subjected to starvation for different periods of time. The relationships of starvation tolerance of the larvae with their day-old and body weight were established. Biological characteristics of 7 day-old larvae after being starved for different time and refeeding, including the time of prepupal appearance, cumulative prepupal rate, prepupal weight, and adult reproduction, were assayed. 【Results】The median lethal time (LT_{50}) of *H. illucens* larvae after starvation was exponentially related to their age in days and linearly related to their body weight. The 7-day-old larvae

had relatively stronger starvation tolerance, with the LT_{50} value exceeding 50 d and the survival rate of 95% after 30 d starvation. As for the individuals with the body weight less than 0.5 g per hundred larvae, their LT_{50} value was less than 30 d. As for the individuals with body weights 2–2.5 g per hundred larvae, their LT_{50} value was 45–70 d. When the larvae over 8-day-old or heavier than 4.5 g per hundred individuals were subjected to starvation for 5 d, most of them entered the subsequent developmental stage ahead of time. During 0–40 d starvation, the prepupal rate had no obvious change, but the prepupal weight increased significantly. Short-term starvation (0–10 d) of larvae had no significant effect on the egg-laying amount of adults, but long-term starvation (30–40 d) of larvae had a significant effect on the egg-laying amount of adults. Moreover, the egg hatching rate decreased significantly when the larvae were subjected to starvation for more than 30 d. 【Conclusion】 The results suggest that *H. illucens* larvae of different day-old or with different body weights all show certain starvation tolerance, and the prepupal weight of starved larvae increases significantly after refeeding.

Key words: *Hermetia illucens*; rearing; larvae; starvation tolerance; refeeding; biological characteristics

食物短缺是自然界中各种生物都可能面临的问题,小到昆虫,大到人类本身,都可能面临饥饿的问题(Rion and Kawecki, 2007)。在不同温湿度条件下,苹果绵蚜 *Eriosoma lanigerum* 的4龄若蚜具有较强的耐饥饿能力,在温度为15~31℃时,温度越高,耐饥饿能力越弱;在湿度为40%~80%时,湿度越低,耐饥饿能力也越弱(陈建建等, 2013)。赤拟谷盗 *Tribolium castaneum* 幼虫的耐饥力在不同处理温度间差异不显著,但成虫的耐饥力显著大于幼虫,雌虫显著大于雄虫(史雅等, 2013)。关于昆虫耐饥力评估,常菊花提出了参照农药致死中量的计算方法,即将剂量这一变量替换为时间变量,计算出半数致死时间(fifty percent lethal time, LT_{50}),用于评估昆虫的耐饥力(常菊花, 2015)。

昆虫富含蛋白质,且具有较高的饲料转化效率和生长速率,使其成为高质量的潜在饲料(Veldkamp *et al.*, 2012; Van Huis *et al.*, 2013; Bosch *et al.*, 2014)。黑水虻 *Hermetia illucens* 属双翅目(Diptera)水虻科(Stratiomyidae),发育经历卵、幼虫、预蛹、蛹和成虫5个阶段,幼虫有5龄,体色为白色,预蛹体色为黑色(Tinder *et al.*, 2017)。幼虫和预蛹在作为动物饲料方面表现出了较好的应用前景。例如,用于养鸡时,能保证肉鸡的生产性能、胴体性状和整体肉质;增加蛋鸡饲料转化率,且产蛋率、饲料摄入量、平均鸡蛋重量和鸡蛋质量均较高(Marono *et al.*, 2017; Schiavone *et al.*, 2017)。用于水产养殖时,能使虹鳟鱼 *Oncorhynchus mykiss* 的生存率、生长性能等参数不受影响,也能使凡纳滨对虾 *Litopenaeus vannamei* 的最终体重、体重增加值、生长速率和食物转化率等指标达到对照的95%~100%

(Cummins *et al.*, 2017; Renna *et al.*, 2017)。

自20世纪70年代起,人们就已开展了利用黑水虻处理有机废弃物和资源化利用方面的研究(李天昊等, 2017)。实际生产中由于幼虫在适宜条件下的发育需要15 d左右,为避免食物发霉或板结,常采取多次补充食物的方式,补充不及时或食物营养不足时幼虫饥饿,易导致其继续发育受到影响。尤其是低龄时的幼虫若经历饥饿,要么死亡,要么始终保持幼虫状态,要么以较小的个体延迟进入预蛹阶段,但黑水虻幼虫经历饥饿及饥饿后复食对后续发育有哪些影响目前仍不清楚。耐饥力是昆虫重要的生物学特性之一,对其渡过饥饿环境、维持生存具有重要意义。了解黑水虻幼虫的耐饥力对资源化利用过程中的活体运输具有重要意义,明确饥饿幼虫复食后的发育和生殖力,还可用于预估幼虫经历饥饿对后续发育阶段的影响,从而指导生产实践。

1 材料与方法

1.1 供试虫源

黑水虻 *H. illucens* 来自华中农业大学昆虫资源研究所。种虫的饲养方法如下:成虫羽化4–5 d后用孔径约0.5 cm的瓦楞纸接卵;收集有卵的瓦楞纸放在28±2℃、RH 60%~70%的条件下待卵孵出;约3~4 d后,卵开始孵化;幼虫用含水量为60%的麦麸喂养,28±2℃条件下约15 d后幼虫变黑进入预蛹阶段且不再取食,收集预蛹置于木屑中待化蛹;把蛹放入30 cm×30 cm×30 cm的纱笼内,温度维持在28±2℃;约1周后成虫开始羽化,仅用湿润的海绵给成虫供水。

1.2 不同日龄或不同体重幼虫的耐饥力

幼虫按种虫的饲养方法用含水量为 60% 的麦麸饲养,室内温度维持在 $28 \pm 2^{\circ}\text{C}$,相对湿度维持在 60% ~ 70%。从 3 日龄起,每日上午 9 时随机选取相同日龄的 40 头幼虫,放入适宜大小的去盖离心管中,不提供任何食物,进行饥饿。去盖离心管的管口用 400 目滤布和皮筋封口(透气,并可防止幼虫逃逸),每日用注射器添加水分,温度维持在 $28 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 。每处理 4 次重复。当常规饲养的幼虫出现预蛹后,停止取样。每日上午 9:00 时统计各处理的存活情况,并移除死亡个体(死亡个体常体色灰白,非常软)。当各个处理中的死亡率达到 50% 时,终止饥饿处理。

选择 3 ~ 7 日龄幼虫进行饥饿处理,每处理 4 次重复,一个重复内取 40 头随机挑选的大小相似的幼虫,幼虫称重后进行饥饿处理,方法同上。每日上午 9:00 时统计各处理的存活情况及体重变化情况,并移除死亡个体。称重时先用干燥的吸水纸吸干体表再称重。当各个处理中的死亡率达到 50% 时,终止饥饿处理。

1.3 幼虫饥饿后复食对其生物学特性的影响

正常饲养的黑水虻幼虫期有 15 d 左右,但后续实验只测定了 7 日龄幼虫的耐饥力,原因是当幼虫大于 7 日龄时,部分幼虫会在饥饿中进入预蛹。因此后续研究以 7 日龄幼虫为研究材料。取 7 日龄幼虫 100 头,称重后进行饥饿处理,饥饿时间分别为 0 d(对照,下同),5, 10, 15, 20, 25 和 30 d,温湿度条件同 1.2 节。对至饥饿处理结束时仍存活的幼虫称重,然后放入养虫盒内按种虫的饲养方法饲养。开始出现预蛹后,统计每日预蛹数并称重。其中饥饿 0 d 为对照。幼虫都进入预蛹后放入木屑中待化蛹。收集蛹于成虫笼内待羽化,由于从开始羽化的两天内羽化出的个体多为雄虫,因此移除掉,第 3 天时收集羽化 24 h 内的 40 对成虫放入 $15\text{ cm} \times 15\text{ cm} \times 15\text{ cm}$ 的纱笼内。3 d 后,放入诱卵物质和瓦楞纸接卵。每日收集卵块并称重,然后观察孵化情况。记录未孵化卵块重量并计算有效卵率。每处理 4 次重复。

1.4 数据处理及统计分析

计算半数致死时间(fifty percent lethal time, LT_{50}),使用 SPSS19.0,参考宋旭红等(2012)进行 probit 回归分析,饥饿时长为协变量(C),总头数为观测值汇总(I),死亡数为响应频率(s),设定对数底数为 10,结果 0.5 对应的值即为 LT_{50} 。饥饿不同

时间时所检测的各参数值间的差异显著性用单因素方差分析;多重比较时,显著性水平为 0.05,采用 LSD(最小显著差数)法进行。

2 结果

2.1 黑水虻不同大小幼虫的耐饥力

2.1.1 不同日龄幼虫的耐饥力:不同日龄幼虫的耐饥力不同,半数致死时间 LT_{50} 与日龄的关系如图 1。3 ~ 4 日龄幼虫的耐饥力很弱, LT_{50} 短于 10 d; 5 ~ 6 日龄幼虫的耐饥力较弱, LT_{50} 在 20 ~ 30 d 之间; 7 日龄幼虫的耐饥力较强, LT_{50} 超过了 50 d。尽管部分 8 日龄幼虫的耐饥力很强, LT_{50} 达到 70 d 以上,但多数 8 日龄幼虫常在饥饿 5 d 时就进入了预蛹阶段。对幼虫 LT_{50} 与饥饿时的日龄进行了相关性分析,其相关系数为 0.843 ($P < 0.01$)。同时还对不同批次幼虫 LT_{50} 和日龄做了曲线拟合,发现拟合度很好,从图 1 可以看出,其中有 3 组幼虫的 R^2 约为 0.99,成指数关系。

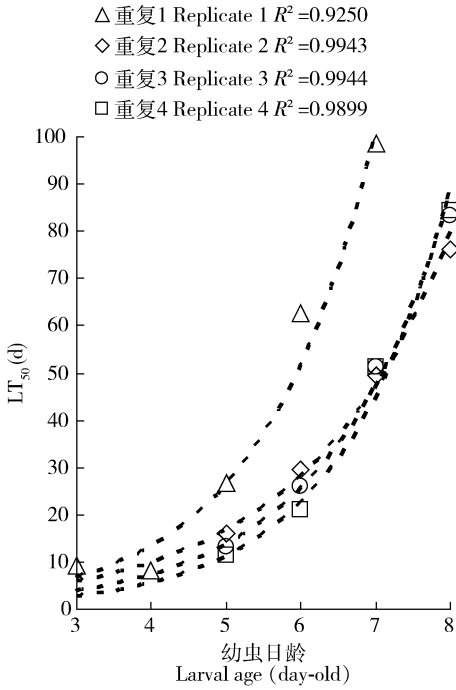


图1 不同日龄黑水虻幼虫在饥饿条件下的半数致死时间(LT_{50})

Fig. 1 Median lethal time (LT_{50}) of *Hermetia illucens* larvae of different day-old under starvation

2.1.2 不同体重幼虫的耐饥力:黑水虻幼虫龄期的形态区分非常困难,因此考察了不同体重幼虫的耐饥力不同, LT_{50} 与体重的关系见图 2。个体越小、体重越轻的个体,其 LT_{50} 越短。百头重小于 0.5 g 的

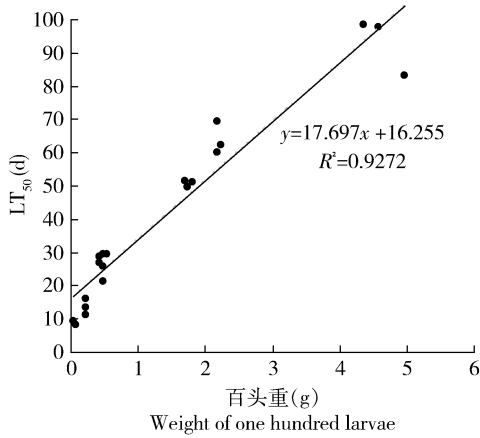


图2 不同体重黑水虻幼虫在饥饿条件下的半数致死时间(LT₅₀)
Fig. 2 Median lethal time (LT₅₀) of *Hermetia illucens* larvae with different body weight under starvation

个体,其LT₅₀小于30 d;百头重在2~2.5 g的个体,其LT₅₀为45~70 d;百头重大于4.5 g的个体,其LT₅₀大于80 d,但存在多数个体饥饿5 d就会进入预蛹阶段的现象。对耐饥力和幼虫体重进行线性相关分析, $R^2=0.9272$ 。

2.2 黑水虻7日龄幼虫饥饿不同时间后的存活率及体重变化

7日龄幼虫饥饿不同天数后的存活率结果见图3。从图3可以看出,7日龄幼虫饥饿0~15 d,其存活率差异不显著($P>0.05$);饥饿20~30 d,其存活率差异也不显著($P>0.05$);饥饿30 d时存活率仍然达到了95%。

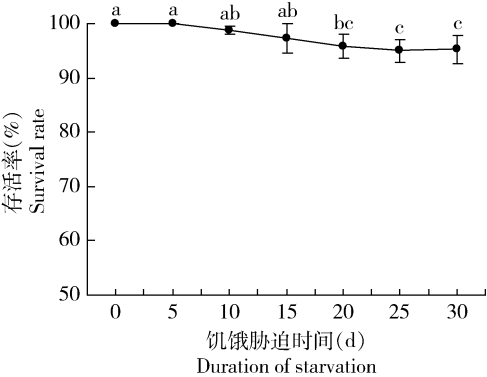


图3 黑水虻7日龄幼虫饥饿不同天数后的存活率
Fig. 3 Survival rate of the 7 d-old larvae of *Hermetia illucens* subjected to starvation for different days

数值经单因素方差分析,采用最小显著差数法(LSD)进行多重比较,结果标注不同字母的即为差异显著($P<0.05$)。图4, 6~8同。The data were analyzed by one-way ANOVA followed by LSD (least significant difference) test for assaying statistical differences between multiple incubations. Different letters indicate significant difference ($P<0.05$). The same for Figs. 4, 6~8.

7日龄幼虫饥饿不同天数后的体重减少率结果见图4。从图4可以看出,7日龄幼虫饥饿5~30 d过程中,体重减少有两个显著的阶段。第1阶段在15 d内,第5~15天体重减少率差异不显著($P>0.05$)。第2阶段出现在20 d后,饥饿20, 25和30 d的幼虫体重减少率差异不显著($P>0.05$)。即在饥饿5~15 d和饥饿20~30 d幼虫可能处于一种平衡状态。饥饿30 d时,体重减少率接近30%。

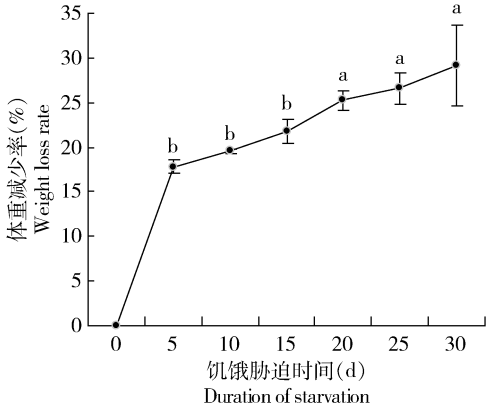


图4 黑水虻7日龄幼虫饥饿不同天数后的体重减少率
Fig. 4 Weight loss rate of the 7 d-old larvae of *Hermetia illucens* subjected to starvation for different days

2.3 黑水虻7日龄幼虫饥饿后复食对其生物学特性的影响

2.3.1 出现预蛹的时间:7日龄幼虫饥饿后复食,其预蛹出现的动态结果见图5。图中显示,各处理出现预蛹的时间不受饥饿时长影响,饥饿30 d的处理组预蛹出现时间总体延迟1 d。各处理在复食后第7天均开始出现预蛹。对照在第8天有20%个体进入预蛹,第9天有50%个体进入预蛹,80%进入预蛹的时间在第11天。饥饿5 d的处理组,20%进入预蛹的时间在复食后第7天,50%进入预蛹的时间在第9天,80%进入预蛹的时间在第11天。饥饿15 d的处理组,20%进入预蛹的时间在复食后第8天,50%进入预蛹的时间在第9天,80%预蛹出现的时间在复食后第10天。饥饿30 d的处理组,20%预蛹出现的时间在复食后第9天,50%预蛹出现的时间在复食后第10天,80%预蛹出现的时间在复食后第12天。与对照相比,饥饿5 d的处理组,20%预蛹出现的时间早1 d;饥饿15 d的处理组,80%预蛹出现的时间早1 d;饥饿30 d的处理组各时间点均比对照晚1 d。

2.3.2 总预蛹率:7日龄幼虫饥饿后复食,其预蛹

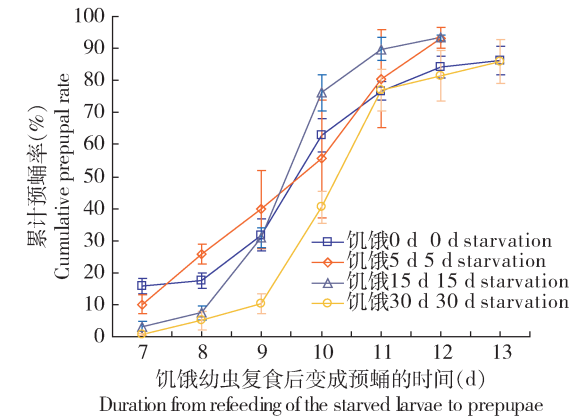


图5 黑水虻7日龄幼虫饥饿及复食后的累计预蛹率

Fig. 5 Cumulative prepupal rate of the 7 d-old larvae of *Hermetia illucens* after starvation and refeeding

累计预蛹率为累计出现的预蛹数之和占初始处理幼虫数的百分比。Cumulative prepupal rate represents the proportion of the number of all the prepupae accounting for the initial number of treated larvae.

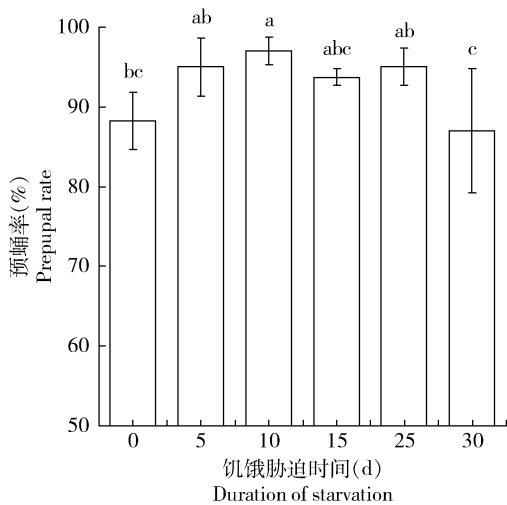


图6 黑水虻7日龄幼虫饥饿及复食后的预蛹率

Fig. 6 Prepupal rate of the 7 d-old larvae of *Hermetia illucens* after starvation and refeeding

率结果见图6。从图6可以看出,饥饿10 d的处理组预蛹率最高,显著高于对照(0 d)和饥饿30 d的处理($P < 0.05$)。饥饿5, 15和25 d的处理组预蛹率与对照相比略高,但差异不显著($P > 0.05$)。饥饿30 d的处理组预蛹率为 $87.0\% \pm 7.8\%$,与对照相比无显著差异($P > 0.05$)。饥饿5, 10和15 d的处理组中未发现幼虫死亡现象;饥饿25 d的处理组中观察到了2头死亡;但饥饿30 d的处理组中观察到了5头死亡。

2.3.3 预蛹重:7日龄幼虫饥饿后复食,其预蛹重结果见图7。从图7可以看出,对照的百头预蛹重

为 14.3 ± 0.4 g。饥饿5 d时预蛹重与对照的预蛹重差异不显著($P > 0.05$)。饥饿10~30 d时,预蛹重显著高于对照($P < 0.05$)。饥饿15 d的处理组预蛹最重,百头预蛹重约为 19.2 ± 0.3 g,比对照增加了34.27%。饥饿25 d与饥饿15 d的处理组,预蛹重差异不显著($P > 0.05$)。饥饿30 d的预蛹重显著小于饥饿15和25 d的处理组,但仍显著大于饥饿10 d的处理组($P < 0.05$)。

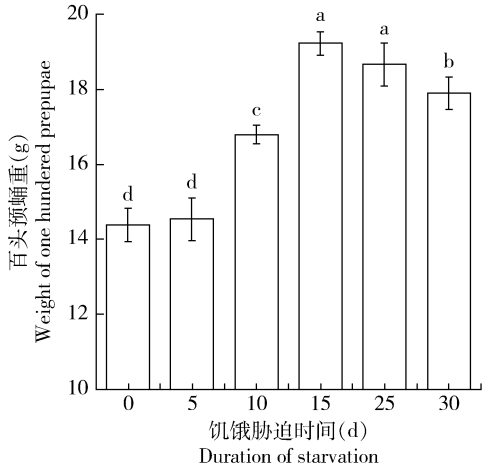


图7 黑水虻7日龄幼虫饥饿及复食后的预蛹重

Fig. 7 Prepupal weight of the 7 d-old larvae of *Hermetia illucens* after starvation and refeeding

2.3.4 成虫繁殖:7日龄幼虫饥饿后复食,其发育至成虫阶段时成虫的产卵量结果见图8。从图8可以看出,幼虫经历短时间饥饿(0~10 d)对成虫的产卵量没有显著影响($P > 0.05$),40头雌成虫的总产卵量约为1 g。但长时间饥饿(30~40 d)对成虫的产卵量有显著影响($P < 0.05$)。在幼虫期饥饿0, 10, 30和40 d的成虫所产卵的孵化率分别为 $93.38\% \pm 2.53\%$, $83.31\% \pm 3.95\%$, $61.47\% \pm 16.13\%$ 和 $49.09\% \pm 9.14\%$ 。短期的幼虫饥饿经历对其成虫所产卵的卵孵化率无显著影响($P > 0.05$),但饥饿经历长达30 d以上时,卵孵化率显著降低($P < 0.05$);饥饿经历40 d时,卵孵化率仅为对照的52.57%。

3 讨论

本试验证明,不同日龄的黑水虻幼虫都具有一定的耐饥力,且个体越小耐饥力越弱。生产中可以根据日龄判断幼虫的耐饥力,半数致死时间(LT_{50})与幼虫日龄成指数关系。7日龄幼虫的耐饥力较强, LT_{50} 超过了50 d,饥饿30 d时存活率仍然达到了

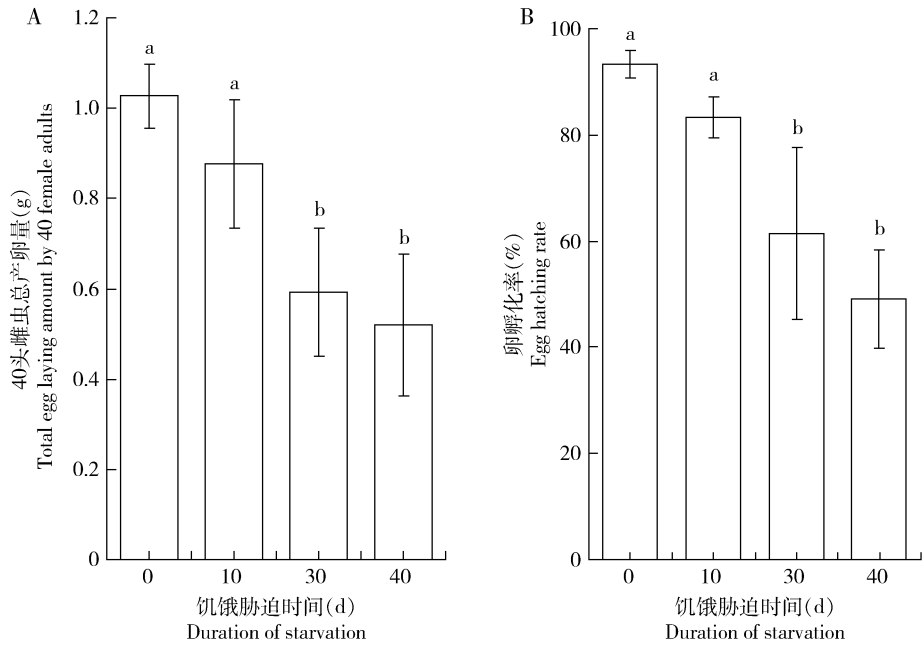


图 8 黑水虻 7 日龄幼虫饥饿不同时间后复食发育至成虫对其产卵量(40 头雌虫总产卵量)(A)及卵孵化率(B)的影响
Fig. 8 Total egg laying amount by 40 female adults (A) and egg hatching rate (B) of the adults of *Hermetia illucens* developed from the 7 d-old larvae subjected to starvation for different days before refeeding

95%。幼虫超过 8 日龄时耐饥力很强,LT₅₀ 达到 70 d 以上,但多数个体常在饥饿 5 d 时就进入了预蛹阶段。本研究发现还可以根据百头重判断幼虫的耐饥力,百头重小于 0.5 g 的个体,其 LT₅₀ 小于 30 d;百头重在 2~2.5 g 的个体,其 LT₅₀ 为 45~70 d;百头重大于 4.5 g 的个体,尽管其 LT₅₀ 大于 80 d,但也存在多数个体饥饿 5 d 就会进入预蛹阶段的现象。这与文献报道的很多昆虫都具有一定的耐饥力相符。例如半翅目扶桑粉蚧 *Phenacoccus solenopsis* 雌成虫在饥饿的情况下可以存活 9.1 d,短时间饥饿对雌成虫产卵量也没有影响(王艳艳, 2013)。黑肩绿盲蝽 *Cyrtorhinus lividipennis* 在饥饿条件下,3 龄若虫、5 龄若虫和成虫的平均存活时间分别为 2.10、2.22 和 4.25 d(郑许松等, 2014);苹果绵蚜在饥饿条件下,4 龄若蚜的存活时间最长(160 h)(陈建建等, 2013)。赤拟谷盗在 25~30℃ 范围内,成虫的耐饥力随温度升高而下降,但显著大于幼虫,雌虫耐饥力显著大于雄虫;25℃ 时雌虫平均耐饥时间为 40.47 d,雄虫平均为 33.10 d,幼虫平均为 6.50 d(史雅等, 2013)。椰心叶甲 *Brontispa longissima* 在完全不取食状态下各虫态可存活 1~6 d,并且在饥饿状态下仍有一定的化蛹率和羽化率(许春霁等, 2007)。本研究还发现黑水虻幼虫的耐饥力与幼虫的大小特别是初始体重显著相关。黑水虻幼虫生长到 5 龄

后,就有在饥饿中提前预蛹的可能,这也是黑水虻 5 龄幼虫耐饥的一种方式。

黑水虻 7 日龄幼虫经历饥饿 0~30 d 后复食,预蛹的出现时间未受到显著影响。因此,可预测幼虫饥饿及复食后的生长发育历期。幼虫前期饥饿经历 5~25 d,增加了复食后的预蛹重和预蛹率。在生产中通过对幼虫进行一定时长的饥饿并再喂食可以提高预蛹产量。本研究还发现,幼虫饥饿经历 30 d 或 40 d 后复食,饥饿对其成虫产卵量影响显著,且显著降低了卵孵化率。因此,在生产中繁种用幼虫不能进行长时间的饥饿。

本研究明确了不同日龄黑水虻幼虫都具有较强的耐饥力,揭示了在生产实践中如何根据幼虫的日龄和百头重判断其耐饥力。7 日龄幼虫的耐饥力较强,LT₅₀ 达 50 d,且饥饿 30 d 内复食其预蛹率未受到影响,但预蛹重显著增加,因此生产中也可通过短时间的饥饿再复喂,以增加预蛹重,进而增加产量。这些研究结果为黑水虻生产提供了丰富的基础资料。

参考文献 (References)

Bosch G, Zhang S, Oonincx DGAB, Hendriks WH, 2014. Protein quality of insects as potential ingredients for dog and cat foods. *J. Nutr. Sci.*, 3 (e29): 1-4.

Chang JH, 2015. Calculation and comparison of evaluation index of insect starvation endurance - Based on an example to calculate

- starvation endurance ability of *Nilaparvata lugens* nymphs at different instars. *Jiangsu Agric. Sci.*, 43(4): 129–131. [常菊花, 2015. 昆虫耐饥饿能力评估指标的计算与比较——以计算褐飞虱各龄若虫耐饥力为例. 江苏农业科学, 43(4): 129–131]
- Chen JJ, Li X, Xue ZG, 2013. Starvation endurance ability of *Eriosoma lanigerum*. *J. Northwest A&F Univ. (Nat. Sci. Ed.)*, 41(11): 80–92. [陈建建, 李鑫, 薛振国, 2013. 苹果绵蚜耐饥饿能力研究. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 41(11): 80–92]
- Cummins VC, Rawles SD, Thompson KR, Velasquez A, Kobayashi Y, Hager J, Webster CD, 2017. Evaluation of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae meal as partial or total replacement of marine fish meal in practical diets for Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*). *Aquaculture*, 473: 337–344.
- Li TH, Li MS, Zhang CR, Che PF, Zang LS, 2017. Bibliometric analysis on research and application of black soldier fly (*Hermetia illucens* L.). *J. Anhui Agric. Sci.*, 45(33): 230–234. [李天昊, 李茂盛, 张超然, 车鹏飞, 臧连生, 2017. 黑水虻研究与应用的文献计量分析. 安徽农业科学, 45(33): 230–234]
- Marono S, Loponte R, Lombardi P, Vassalotti G, Pero ME, Russo F, Gasco L, Parisi G, Piccolo G, Nizza S, Di Meo C, Attia YA, Bovera F, 2017. Productive performance and blood profiles of laying hens fed *Hermetia illucens* larvae meal as total replacement of soybean meal from 24 to 45 weeks of age. *Poult. Sci.*, 96(6): 1783–1790.
- Renna M, Schiavone A, Gai F, Dabbou S, Lussiana C, Malfatto V, Prearo M, Capucchio MT, Biasato I, Biasibetti E, De Marco M, Brugiapaglia A, Zoccarato I, Gasco L, 2017. Evaluation of the suitability of a partially defatted black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) larvae meal as ingredient for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss* Walbaum) diets. *J. Anim. Sci. Biotech.*, 8(4): 957–969.
- Rion S, Kawecky TJ, 2007. Evolutionary biology of starvation resistance; what we have learned from *Drosophila*. *J. Evol. Biol.*, 20(5): 1655–1664.
- Schiavone A, Cullere M, De Marco M, Meneguz M, Biasato I, Bergagna S, Dezzutto D, Gai F, Dabbou S, Gasco L, Zotte AD, 2017. Partial or total replacement of soybean oil by black soldier fly larvae (*Hermetia illucens* L.) fat in broiler diets; effect on growth performances, feed-choice, blood traits, carcass characteristics and meat quality. *Ital. J. Anim. Sci.*, 16(1): 93–100.
- Shi Y, Lv JH, Bai XG, 2013. Effects of temperature on starvation tolerance of *Tribolium castaneum* (Herbst). *J. Henan Univ. Technol. (Nat. Sci. Ed.)*, 34(6): 37–42. [史雅, 吕建华, 白旭光, 2013. 温度对赤拟谷盗耐饥性的影响. 河南工业大学学报(自然科学版), 34(6): 37–42]
- Song XH, Wang PP, Yang DY, He W, Zhang HY, 2012. Effect of phosphine on three protective enzymes in the lesser grain borer in different geographical populations. *J. Chin. Cereals Oils Assoc.*, 27(8): 73–78. [宋旭红, 王平平, 杨道玉, 何威, 张宏宇, 2012. 磷化氢对不同地理种群谷蠹成虫体内3种保护酶的影响. 中国粮油学报, 27(8): 73–78]
- Tinder AC, Puckett R, Turner N, Cammack J, Tomberlin J, 2017. Bioconversion of sorghum and cowpea by black soldier fly (*Hermetia illucens* (L.)) larvae for alternative protein production. *J. Insects Food Feed*, 3(2): 121–130.
- Van Huis A, Van Isterbeeck J, Klunder H, Mertens E, Halloran A, Muir G, Vantomme P, 2013. Edible Insects; Future Prospects for Food and Feed Security. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy. 171–201.
- Veldkamp T, van Duinkerken G, van Huis A, Lakemond CMM, Ottevanger E, Boekel MAJS, 2012. Insects as A Sustainable Feed Ingredient in Pig and Poultry Diets – A Feasibility Study. Report 638. Wageningen UR Livestock Research. Wageningen, The Netherlands. 1–48.
- Wang YY, 2013. The Tolerance of *Phenacoccus solenopsis* Tinsley to the Stress of High Temperature and Starvation. MSc Thesis, China Jiliang University, Hangzhou. [王艳艳, 2013. 扶桑绵粉蚧对高温和饥饿的耐受性研究. 杭州: 中国计量学院硕士学位论文]
- Xu CA, Peng ZQ, Tang C, Jin QA, Wan FH, 2007. Study on the survival time of *Brontispa longissima*. *Plant Quar.*, 21(4): 205–207. [许春露, 彭正强, 唐超, 金启安, 万方浩, 2007. 椰心叶甲饥饿耐受性研究. 植物检疫, 21(4): 205–207]
- Zheng XS, He JJ, Xu HX, Yang YJ, Tian JC, Lv ZX, 2014. Hunger tolerance of *Cyrtorhinus lividipennis*. *Chin. J. Appl. Entomol.*, 51(1): 67–72. [郑许松, 何晶晶, 徐红星, 杨亚军, 田俊策, 吕仲贤, 2014. 黑肩绿盲蝽耐饥饿能力的研究. 应用昆虫学报, 51(1): 67–72]

(责任编辑: 赵利辉)