



张子良, 卢桦, 罗致迪, 等. 成虫期食物对花绒寄甲生殖适合度及后代生长发育的影响[J]. 江西农业大学学报, 2024, 46(6): 1456–1465.

ZHANG Z L, LU H, LUO Z D, et al. Effects of adult diet on reproductive fitness and offspring development of *Dastarcus helophoroides* (Fairmaire)[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2024, 46(6): 1456–1465.

成虫期食物对花绒寄甲生殖适合度 及后代生长发育的影响

张子良¹, 卢桦¹, 罗致迪², 罗惠文³, 杨彩柏⁴, 邹威¹, 张江涛¹, 刘兴平^{1*}

(1. 江西农业大学 林学院/保护生物学江西省重点实验室, 江西 南昌 330045; 2. 江西环境工程职业学院, 江西 赣州 341002; 3. 江西省赣州市林业局, 江西 赣州 341001; 4. 江西省赣州市林业科学研究所, 江西 赣州 341008)

摘要:【目的】以体外寄生性天敌昆虫花绒寄甲为研究对象, 探讨人工饲料和外源水分2种成虫期食物对该虫生殖适合度及后代发育的影响, 以期为天敌昆虫的大规模室内繁育提供理论基础。【方法】在室内恒定条件下对羽化后的成虫在20周观察期内通过设置仅饲喂人工饲料(20D), 仅饲喂外源水分(20W), 同时饲喂人工饲料和外源水分(20DW), 前10周仅饲喂人工饲料、后10周再饲喂人工饲料和外源水分(10D+10DW), 前10周仅饲喂外源水分、后10周再饲喂人工饲料和外源水分(10W+10DW), 以及不饲喂任何食物(20N)等6个成虫期食物处理, 对成虫的生殖适合度指标和后代生长发育参数进行测定。【结果】20D和20N处理下的成虫均不产卵且雌雄成虫的存活率最低。其余4个处理的生殖适合度同样明显受成虫期食物差异的影响, 其中20DW处理下成虫的每周产卵量和总产卵量最多, 卵的孵化率最高, 雌雄成虫寿命最长, 而以10D+10DW处理中的各项指标表现最低。此外, 后代的生长发育和形态发育也受成虫期食物差异的影响, 表现为20DW处理中的后代显示最高的幼虫寄生率, 最短的发育历期和最大的体型, 其次为10W+10DW处理的后代, 而同样以10D+10DW处理中后代的各项生长发育指标表现最低。【结论】花绒寄甲属收入生殖型昆虫, 成虫期食物是影响花绒寄甲生长发育和生殖的重要因素, 而外源水分是其中重要的限制因子。

关键词: 花绒寄甲; 成虫期食物; 外源水分; 生殖适合度; 后代发育

中图分类号: S476.3

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 1000-2286(2024)06-1456-10



Effects of adult diet on reproductive fitness and offspring development of *Dastarcus helophoroides* (Fairmaire)

ZHANG Ziliang¹, LU Hua¹, LUO Zhidi², LUO Huiwen³, YANG Caibai⁴,
ZOU Wei¹, ZHANG Jiangtao¹, LIU Xingping^{1*}

(1. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Conservation Biology, College of Forestry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 2. Jiangxi Environmental Engineering Vocational College, Ganzhou 341002, China; 3. Forestry Bureau of Ganzhou City, Ganzhou, Jiangxi 341001, China; 4. Institute of Forestry, Ganzhou City, Ganzhou, Jiangxi 341008, China)

收稿日期: 2024-04-25 修回日期: 2024-08-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(31760106)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (31760106)

作者简介: 张子良, 硕士生, orcid.org/0009-0001-6660-1170, z_ziliang@163.com; *通信作者: 刘兴平, 教授, 博士, 主要从事昆虫行为生态学研究, orcid.org/0000-0003-1831-9290, xpliu@jxau.edu.cn.

©《江西农业大学学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

Abstract: [Objective] In this study, the effects of artificial diet and exogenous water on the reproductive fitness and offspring development of *Dastarcus helophoroides*, an ectoparasitic natural enemy insect, were explored to provide a theoretical basis for large-scale indoor breeding of natural enemy insects. [Method] During 20 weeks observation, the following six different adult diets for newly emerged adult couples, namely artificial diet only (20D), exogenous water only (20W), artificial diet and exogenous water simultaneously (20DW), artificial diet for the first 10 weeks and then artificial diet and exogenous water simultaneously for the subsequent 10 weeks (10D+10DW), exogenous water for the first 10 weeks and then artificial diet and exogenous water simultaneously for the subsequent 10 weeks (10W+10DW), and no diet available (20N), were provided. Thereafter, the reproductive fitness of adults and the growth and development parameters of offspring were observed and measured under constant conditions. [Result] Adults in treatments of 20D and 20N did not lay eggs and had the lowest survival rate. The reproductive fitness of the other four treatments were significantly influenced by the adult diets, with adult in treatment of 20DW had the highest weekly and total fecundity, the highest egg fertility, and the longest lifespan. However, adults in treatment of 10D+10DW showed the lowest performance in all of measured fitness indicators. Furthermore, the developmental duration and morphological traits of offspring were also influenced by their parental diets. Offsprings in treatment of 20DW showed the highest larval parasitism rate, shortest developmental period, and largest adult body size, followed by the offsprings in treatment of 10W+10DW. Similarly, the offspring in treatment of 10D+10DW showed the lowest performance in various growth and development indicators. [Conclusion] *D. helophoroides* is a reproductive insect. Adult food is an important factor affecting the growth, development and reproduction of *D. helophoroides*, and exogenous water is an important limiting factor.

Keywords: *Dastarcus helophoroides* (Fairmaire); adult diet; exogenous water; reproductive fitness; offspring development

【研究意义】利用捕食性或寄生性天敌昆虫来控制农林害虫的生物防治技术是害虫综合治理的关键组成部分^[1]。生物防治技术为农林害虫提供了一种既环保又有效的管理策略,近年来已受到全球的广泛关注^[2]。然而,绝大多数天敌昆虫的自然种群数量相对较低,目前增加天敌昆虫的自然种群数量以达到预期防治效果的主要方式是开展人工大规模室内饲养^[3]。因此,探讨如何扩大天敌昆虫室内饲养的产量和质量,对于提高生物防治的效果具有重要的意义,这也是当前生产上迫切需要解决的关键问题^[4]。【前人研究进展】花绒寄甲 *Dastarcus helophoroides* (Fairmaire) 属于鞘翅目 (Coleoptera) 寄甲科 (Bothrididae)^[5]。该虫是控制天牛类蛀干害虫的优势天敌昆虫之一,目前已在我国和东亚国家得到广泛应用^[6-7]。近年来,众多学者对该虫开展了大量的研究,发现该虫的成虫期寿命较长且具有补充营养^[8]和趋远红外光的习性^[9],交配行为主要发生在夜间^[10],且受众多因素影响^[11]。在该虫的室内饲养技术方面,众多学者成功开发了成虫的人工饲料^[12]、幼虫的替代寄主^[13]以及人工接虫技术^[3,14]。这些研究为花绒寄甲的室内繁育提供了重要的参考,保障了该虫的工厂化生产。

【本研究切入点】众多研究证实食物的可利用性对昆虫的生活史和繁殖至关重要,是影响收入生殖型 (income breeding) 昆虫性腺发育、生殖产量以及后代生长发育的关键因素之一^[15-16]。此外,水在昆虫的消化和代谢过程中发挥着重要的作用,水胁迫在一定程度上决定了昆虫的存活^[17]。对于寿命较长的花绒寄甲成虫而言,通常使用人工饲料和水作为成虫期食物进行饲喂。然而,食物和水的胁迫对该成虫的生殖产量以及后代的发育和寄生效能是否有影响,目前尚无相关报道,这也是天敌昆虫人工饲养时需要探索和解决的主要问题^[18]。【拟解决的关键问题】本研究在室内恒定条件下通过设置人工饲料和外源水分的不同组合饲养刚羽化的成虫,通过分析其生殖产量和后代发育等参数,进而定量评估人工饲料和外源水分在花绒寄甲生殖产量和后代发育中的作用,以期在花绒寄甲的室内繁殖技术提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 供试虫源与饲养

试验所用花绒寄甲成虫种群于2016年10月中旬从江西环境工程职业学院花绒寄甲种群繁育基地引进并置于江西农业大学林学院森林保护实验室中。饲养环境设置为温度 $(25\pm 1)^{\circ}\text{C}$,相对湿度 $(65\pm 5)\%$,光照周期14L:10D。参考颜学武等^[12]的方法,将蟋蟀粉、大麦虫粉、松树皮粉和植物油等混合配制人工饲料供成虫取食;并参考Shi等^[13]的饲养模式进行人工饲养,每日更换新鲜人工饲料和水,清理养虫盒(长 $\times$ 宽 $\times$ 高=20 cm $\times$ 15 cm $\times$ 7 cm)并检查养虫盒内牛皮纸片上的卵。若牛皮纸卡上有卵,则更换牛皮纸并将产有卵的牛皮纸转移至相同规格的空养虫盒内,置于上述相同环境条件下的人工气候箱中待孵化。幼虫孵出后,采取人工接虫的方法将3头初孵幼虫接入1头新鲜大麦虫蛹(购自广东省广州市荔湾区大麦虫养殖基地)中进行花绒寄甲的继代饲养。同时,为了减小室内种群由于近亲繁殖导致种群衰退的影响,每年3—5月份采集一定数量的花绒寄甲野外种群置于室内种群中混养。2020年11月初选择新羽化的雌雄成虫开展以下试验。

1.2 试验设计

成虫自羽化当日,参考唐桦等^[9]的方法区分雌雄虫,之后进行雌雄配对并置于垫有干燥滤纸的塑料培养皿中(规格:直径=10 cm,高=3 cm),并将培养皿置于 $(25\pm 1)^{\circ}\text{C}$,RH $(65\pm 5)\%$ 的人工气候箱中。将绑有牛皮纸的小木块(长 $\times$ 宽 $\times$ 高=5 cm $\times$ 3 cm $\times$ 2 cm)同时置于培养皿中供成虫产卵。试验持续观察20周,以人工饲料和外源水分作为成虫期食物并设置如下6个处理:1)20周仅饲喂人工饲料(artificial diet, 20D);2)20周仅饲喂外源水分(exogenous water, 20W);3)20周同时饲喂人工饲料和外源水分(20DW);4)20周成虫期不饲喂任何食物(no food, 20N);5)羽化配对后前10周仅饲喂食物,后10周饲喂食物和外源水分(10D+10DW);6)羽化配对后前10周仅饲喂外源水分,后10周饲喂食物和外源水分(10W+10DW)。每一处理各重复50次,每日按设置好的处理分别对试验成虫投喂食物,并清洁培养皿卫生直至试验结束。

1.2.1 成虫期食物对花绒寄甲成虫生殖产量的影响

每日观察各处理间成虫的产卵和死亡情况,待成虫开始产卵后,记录各重复中雌虫的产卵日期和产卵量,以及雌、雄成虫的死亡日期。观察期结束后,统计各处理中雌虫的每周产卵量和总产卵量以及雌雄虫的寿命。当各处理中有成虫开始产卵后,每周随机从各处理中抽取4~5张产有卵的牛皮纸,放入相同规格的培养皿中并置于相同温湿度条件下的人工气候箱中孵化,每周每一处理重复3次。每日观察卵的孵化情况,记录每一培养皿中卵的孵化数量,统计每周卵的孵化率和平均孵化率。

1.2.2 成虫期食物对花绒寄甲后代生长发育和寄生率的影响

各处理下的成虫在饲养10周后,随机选择各处理中的卵按上述相同的方法进行孵化观察。当有幼虫孵出时,统计花绒寄甲的卵期。同时,参照Shi等^[13]的方法,以新鲜的大麦虫蛹作为替代寄主,将3头初孵幼虫使用勾线笔接入1头新鲜的替代寄主上,并将接好幼虫的替代寄主放入塑料指形管中(规格:直径=1 cm,高=5 cm)并置于相同温湿度条件下的人工气候箱中饲养,每一处理人工接虫50管。每日观察不同处理中花绒寄甲幼虫的取食情况以及替代寄主的存活情况,当明显观察到花绒寄甲幼虫长大并成功结茧且替代寄主身体变黑腐烂时,则界定为寄生成功。当各处理中有花绒寄甲幼虫开始结茧化蛹时,记录每一指形管中幼虫的化蛹时间。待指形管中有成虫羽化时,记录每一指形管中成虫羽化日期。试验结束后,统计各处理中花绒寄甲后代的卵期、幼虫期和蛹期等生活史参数以及幼虫寄生率的差异。

1.2.3 成虫期食物对花绒寄甲后代形态发育的影响

当上述各处理中的后代成虫羽化后,于羽化当日参考唐桦等^[9]的方法区分雌雄虫,之后再选取生长健康、无明显残疾或损伤的雌雄个体进行形态测定。测定时,使用电子天平(精确至0.000 1 g)对刚羽化的成虫进行称量,用游标卡尺或在有刻度的显微镜下测量雌、雄虫的体长和体宽,每一处理随机测定雌雄成虫各50头以上,分析比较成虫期食物的差异对羽化出的花绒寄甲后代成虫形态特征的影响。

1.3 数据统计

所有数据均采用SPSS 24.0进行分析。使用Shapiro-Wilk检验对当前数据进行正态性检验,同时百

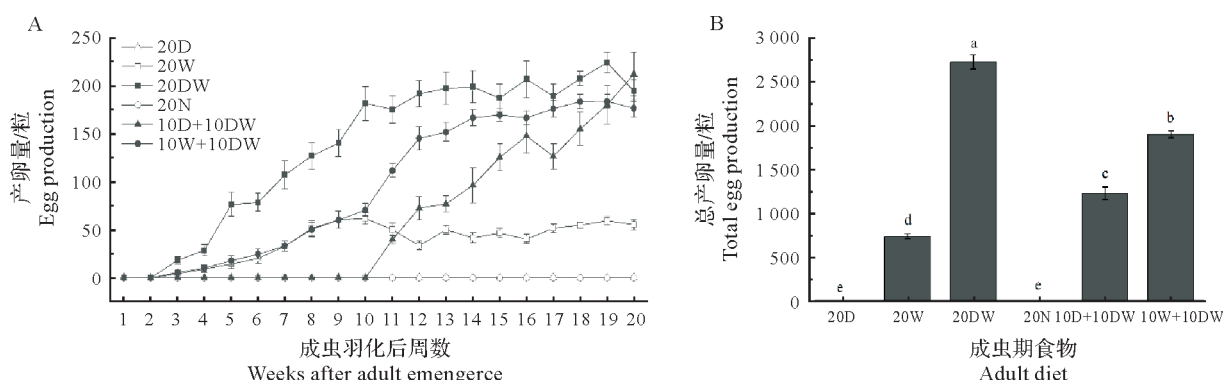
分率数据(幼虫寄生率和卵孵化率等)在分析前采用反正弦平方根转换。产卵量、卵孵化率等生殖适合度指标和卵期、幼虫期、蛹期等生长发育参数以及体质量、体长和体宽等形态发育指标等均采用单因素方差分析(one-way ANOVA), Tukey 多重比较。不同成虫期食物处理下的成虫寿命采用 Kaplan-Meier 生存分析。试验中数据均采用平均数 $\pm$ 标准误表示,采用 OriginPro 18.0 绘制图形。

2 结果与分析

2.1 成虫期食物对花绒寄甲成虫生殖产量的影响

2.1.1 产卵量

对观察期前10周内的每周产卵量进行分析发现,除20D、20N和10D+10DW 3个处理的雌虫未见产卵外,其他处理中均有雌虫产卵,其中,20DW处理中每周产卵量均最高,其次为20W和10W+10DW 2个处理。对观察期后10周的每周产卵量进行分析发现,20D和20N处理中的雌虫仍未产卵,20DW处理中的雌虫每周产卵量仍为最高,20W处理中的雌虫能产卵但平均产卵量仍维持较低水平。而10W+10DW和10D+10DW处理的每周产卵量迅速增加且接近20DW处理(图1A)。进一步对20周观察期内各处理间的总产卵量进行比较发现,20DW处理中雌虫总产卵量最多,达 $(2\,727.06 \pm 81.57)$ 粒/雌,其次为10W+10DW和10D+10DW处理,总产卵量分别为 $(1\,901.68 \pm 40.15)$ 粒/雌和 $(1\,231.12 \pm 73.34)$ 粒/雌,而20W的总产卵量仅为 (738.24 ± 27.61) 粒/雌,20D和20N处理中的雌虫产卵量为0,统计分析表明,成虫期食物的差异明显影响雌虫的产卵量($F=659.98$, $df=5\,230$, $P<0.001$;图1B)。



柱状图中不同小写字母代表差异显著, one-way ANOVA, Tukey 多重比较, $P<0.05$ 。

The different lowercase letter above the bar represents differ significantly, one-way ANOVA, Tukey HSD test, $P<0.05$.

图1 成虫期食物对观察期内花绒寄甲每周产卵量(A)和总平均产卵量(B)的影响

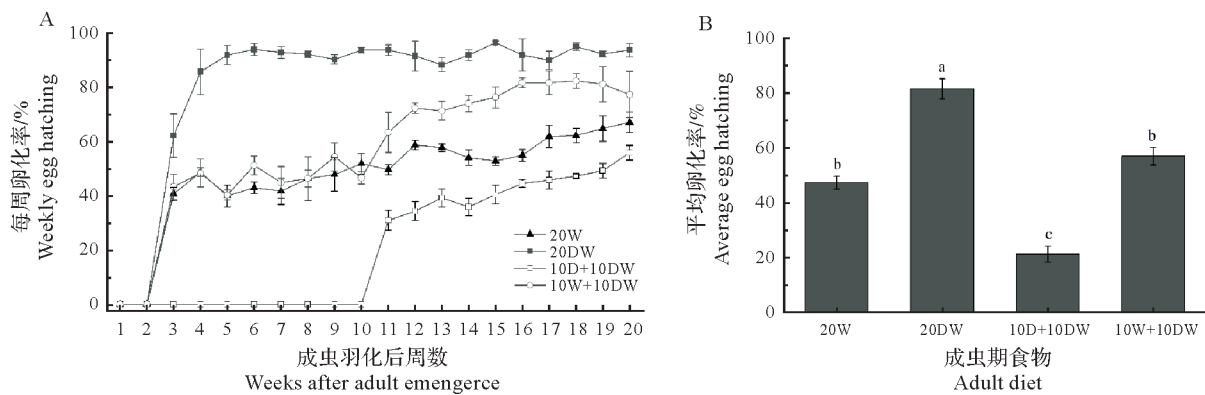
Fig.1 Effect of adult diets on the weekly fecundity(A) and total fecundity(B) in *D. helophoroides* during observation duration

2.1.2 孵化率

在观察期内,20D和20N 2个处理中因雌虫均未产卵因而未纳入孵化率分析。对其他饲喂不同成虫期食物的成虫所产的卵进行孵化率观察,发现20DW处理下卵的孵化率在同一周均较其他处理更高,其次为20W和10W+10DW处理,而10D+10DW处理在10周前雌虫不产卵,10周后通过添加外源水份,其开始产卵且卵的孵化率从30.93%上升到55.81%(图2A)。比较各处理下的平均孵化率发现,20DW的孵化率最高,达 $(81.28 \pm 3.70)\%$,明显高于其他处理,是10W+10DW和20W处理下卵孵化率的1.43倍和1.72倍,是10D+10DW处理下卵孵化率的3.84倍($F=65.33$, $df=3\,239$, $P<0.001$;图2B)。

2.1.3 成虫寿命

花绒寄甲成虫期食物的差异对其寿命具有显著的影响。其中就雌虫而言,20N处理中从羽化后第11周开始陆续死亡,至第20周其存活率仅6%;其次为20D处理,在观察期结束有28%的个体存活,而20DW处理的存活率最高,达98%,其次为10W+10DW和20W处理,存活率分别为88%和80%。Kaplan-Meier生存分析表明,各处理间的雌虫存活率存在显著差异($\chi^2=75.45$, $df=5$, $P<0.001$;图3A)。对雄虫的分析同样发现,在观察期内20DW的存活率为98%,明显高于20D(28%)和20N(2%),且各处理间的雄虫存活率存在显著差异($\chi^2=75.54$, $df=5$, $P<0.001$;图3B)。



柱状图中不同小写字母代表差异显著,one-way ANOVA,Tukey 多重比较, $P<0.05$ 。

The different lowercase letter above the bar represents differ significantly, one-way ANOVA, Tukey HSD test, $P<0.05$.

图2 成虫期食物对观察期内花绒寄甲每周孵化率(A)和平均孵化率(B)的影响

Fig.2 Effect of adult diets on the weekly fertility(A)and average fertility(B)in *D. helophoroides* during observation duration

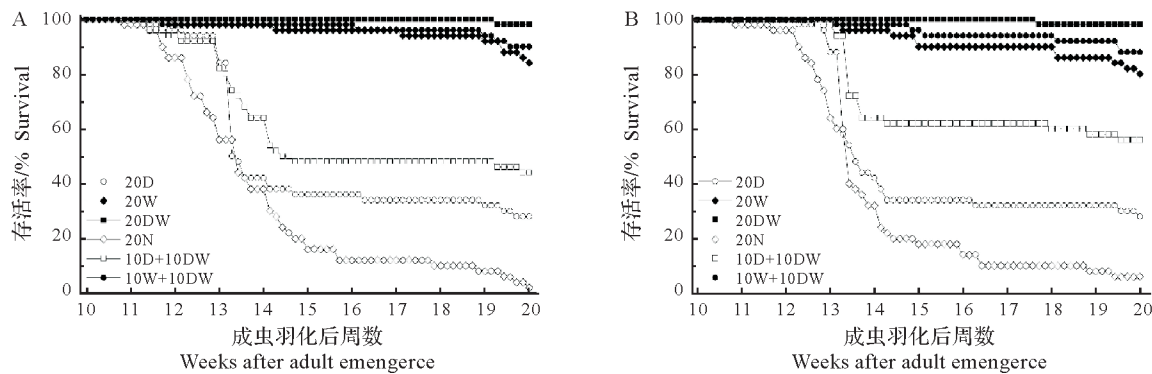


图3 成虫期食物对花绒寄甲雌虫(A)和雄虫(B)寿命的影响

Fig.3 Effect of adult diets on the longevity of female(A)and male(B)in *D. helophoroides*

2.2 成虫期食物对花绒寄甲后代寄生率的影响

对不同成虫期食物处理下花绒寄甲后代幼虫的寄生能力进行分析发现,20DW 处理下后代幼虫的寄生能力最强,寄生率达(96.00±2.80)%。其次为10W+10DW 和20W 2个处理,寄生率分别为(84.00±5.24)%和(72.00±6.41)%,而10D+10DW 处理下后代幼虫的寄生率最低,仅(66.28±6.71)%。统计分析表明,成虫食物明显影响后代幼虫的寄生率($F=5.75,df=3\ 199,P=0.001$;表1)。

表1 成虫期食物对花绒寄甲后代的寄生率和发育历期的影响

Tab.1 Effect of adult diets on the parasitism and development duration of offspring in *D. helophoroides*

测定指标 Measurement parameters	20W	20DW	10D+10DW	10W+10DW
寄生率 Parasitism	72.00±6.41 ^b	96.00±2.80 ^a	66.28±6.71 ^b	84.00±5.24 ^{ab}
卵期 Egg stage	4.76±0.14 ^{ab}	4.42±0.13 ^b	5.16±0.17 ^a	4.56±0.14 ^b
幼虫期 Larval stage	10.73±0.16 ^{ab}	10.19±0.14 ^b	11.05±0.19 ^a	10.42±0.16 ^b
蛹期 Pupal stage	33.23±0.36 ^{ab}	32.72±0.27 ^b	34.03±0.31 ^a	32.99±0.33 ^{ab}

表中数据为平均值±标准误,同一行中不同小写字母表示差异显著(one-way ANOVA, $P<0.05$)。

Means ±SE followed by the different lowercase letters within the same row are significantly different (one-way ANOVA, $P<0.05$).

2.3 成虫期食物对花绒寄甲后代发育历期的影响

成虫期食物的差异同样明显影响花绒寄甲的发育历期,其中卵期、幼虫期和蛹期以同时饲喂人工饲料和外源水分的处理(20DW)最短,分别为(4.42±0.13)d、(10.19±0.14)d和(32.72±0.27)d,以10D+10DW处理最长,两者的卵期、幼虫期和蛹期分别相差0.74,0.86,1.30 d,而10W+10DW和20W处理居中。统计分析表明,成虫期食物各处理间的卵期、幼虫期和蛹期存在明显差异(卵期: $F=4.78$, $df=3\ 199$, $P=0.003$;幼虫期: $F=5.19$, $df=3\ 315$, $P=0.003$;蛹期: $F=3.10$, $df=3\ 315$, $P=0.027$;表1)。

2.4 成虫期食物对花绒寄甲后代形态发育的影响

对取食不同成虫期食物后繁殖的后代成虫进行形态学观察,发现雌雄虫的体质量、体长和体宽的形态学指标因亲代成虫期食物的不同而造成一定的差异。其中以亲代同时饲喂人工饲料和外源水分的处理(20DW)的个体最大,其雌、雄虫体质量分别为(32.38±0.70)mg和(30.48±0.5)mg,体长分别为(8.41±0.07)mm和(7.89±0.1)mm,体宽分别为(3.25±0.03)mm和(3.04±0.04)mm。而以10D+10DW处理下的后代成虫个体最小,其雌虫体质量、体长和体宽分别比20DW处理减少5.20 mg、1.55 mm和0.34 mm,雄虫体质量、体长和体宽分别比20DW处理减少3.83 mg、1.45 mm和0.37 mm。统计分析表明,成虫期食物差异明显导致后代成虫形态发育的不一致(雌虫:体质量 $F=11.49$, $df=3\ 256$, $P<0.001$,体长 $F=51.98$, $df=3\ 256$, $P<0.001$,体宽 $F=12.05$, $df=3\ 256$, $P<0.001$;雄虫:体质量 $F=6.63$, $df=3\ 256$, $P<0.001$,体长 $F=39.98$, $df=3\ 256$, $P<0.001$,体宽 $F=10.63$, $df=3\ 256$, $P<0.001$;表2)。

表 2 成虫期食物对花绒寄甲后代形态发育的影响

Tab.2 Effect of adult diets on the morphological development of offspring in *D. helophoroides*

性别 Sex	形态指标 Morphological parameters	20W	20DW	10D+10DW	10W+10DW
雌虫 Female	体质量/mg	29.12±0.78 ^{bc}	32.38±0.70 ^a	27.17±0.71 ^c	31.04±0.37 ^{ab}
	体长/mm	7.56±0.12 ^b	8.41±0.07 ^a	6.86±0.11 ^c	7.49±0.08 ^b
	体宽/mm	2.98±0.05 ^b	3.25±0.03 ^a	2.91±0.06 ^b	3.05±0.05 ^b
雄虫 Male	体质量/mg	27.66±0.10 ^b	30.48±0.50 ^a	26.65±0.61 ^b	28.13±0.69 ^{ab}
	体长/mm	7.62±0.13 ^a	7.89±0.10 ^a	6.44±0.10 ^b	6.68±0.13 ^b
	体宽/mm	2.97±0.05 ^{ab}	3.04±0.04 ^a	2.67±0.05 ^c	2.81±0.07 ^{bc}

表中数据为平均值±标准误,同一行中不同小写字母表示差异显著(one-way ANOVA, $P<0.05$)。
Means ±SE followed by the different lowercase letters within the same row are significantly different (one-way ANOVA, $P<0.05$).

3 结论与讨论

本试验以花绒寄甲为研究对象,在室内恒定条件下测定了成虫期食物和外源水分对该虫生殖适合度和后代发育的影响。结果表明,在成虫期20周的观察期内,未饲喂任何食物(20N)和仅饲喂人工饲料(20D)2个处理中的雌虫不产卵且雌、雄虫的存活率最低。其余4个食物处理同样影响成虫的生殖适合度及后代发育,表现为同时饲喂人工饲料和外源水分(20DW)处理下的成虫产卵量最多,卵的孵化率最高,成虫存活率最高,后代发育显示最高的幼虫寄生率,最短的发育历期和最大的体型,而10D+10DW因前10周末产卵导致成虫生殖适合度指标和生长发育参数最低。

食物资源在昆虫的生长和繁殖中具有至关重要的作用^[20],其中幼虫期的食物资源限制经常导致发育迟缓和成熟时体型缩小,而成虫期的食物限制则会影响寿命和生殖能力^[21-22]。对于寿命较长的收入生殖型昆虫而言,羽化后的成虫需要从体外摄取大量的食物以满足生存和性器官发育的需要,因而成虫期的食物供给也是影响性成熟的关键因子^[23-24]。通过对花绒寄甲成虫20周的观察后发现,成虫羽化后并未立即进行生殖,而是在取食第3周后才陆续开始产卵,说明该虫属于收入生殖型昆虫。该虫与其他收入生殖型昆虫一样,通过利用成虫期提供的食物资源进行补充营养以满足性器官的发育,从而达到性成熟和生殖的目的^[24-25]。

通过比较不同成虫期营养对花绒寄甲生殖产量的影响发现,同时饲喂人工饲料和外源水分的处理中雌虫的产卵量和卵的孵化率最高,且存活率也最高,而不饲喂任何食物和仅饲喂人工饲料2个处理中的雌虫不产卵且存活率最低。这一结果充分说明,成虫期的人工饲料和外源水分对提高该虫的生殖产量缺一不可。两者不仅对该虫性器官发育起着关键作用,而且在提高该虫的生殖产量和延长寿命等方面具有重要的意义。本试验提供的人工饲料中主要成分为蟋蟀粉、大麦虫粉、松树皮粉和植物油按一定比例混合而成^[12],因而不含有水分。若仅饲喂不含水分的人工饲料,该虫可观察到交尾现象但仍不产卵,而添加外源水分后该虫开始陆续产卵,说明外源水分是花绒寄甲成虫生殖的一个重要的限制因子。若仅饲喂外源水分时,花绒寄甲可交尾亦有卵产出,但产卵量较低,而添加人工饲料后,其生殖产量迅速提高,说明人工饲料在提高生殖产量方面同样不可或缺。成虫期食物的不同影响昆虫的生殖产量和寿命在众多的昆虫中得到证实,如家蟋 *Acheta domesticus*^[20] 和西花蓟马 *Frankliniella occidentalis* 等^[26] 昆虫的研究中发现,成虫期食物的类型和质量影响昆虫的生殖适合度。水作为食物的来源之一,对昆虫的存活和生殖有明显影响。在冬型梨木虱 *Psylla chinensis* 中,外源水明显延长了木虱的寿命^[17]。在自然界中,昆虫在生长和繁殖过程中可利用的食物资源相当有限,因而对食物资源的获取、分配和利用模式也各不相同。对多数昆虫而言,昆虫获取的食物资源首先需要满足维持自身的生存,剩余的能量则用于生殖^[27]。对50种节肢动物和脊椎动物的Meta分析表明,当成虫营养状况不佳时,代价高昂的性特征和性行为明显减少,表现为雌雄虫的性器官发育延缓,精子和卵子的形成受阻或质量明显下降,从而导致成虫生殖产量的下降^[28]。另外,在本研究中还发现,对仅饲喂外源水分或仅饲喂人工饲料的处理在第10周同时补充外源水分和人工饲料后,其产卵量和卵的孵化率将明显提高,但依然低于羽化初期就提供良好营养的成虫生殖产量。这一结果说明羽化初期的营养胁迫将对花绒寄甲的生殖产量产生较长时间的不利影响,即使后期恢复了良好的营养也不能达到最大的生殖产量。这一现象在对蜡蛾 *Narnia femorata*^[29] 的研究中具有相似的结果。

已有大量的研究证实,昆虫在幼虫期的营养差异将显著影响幼虫的生长发育历期和成虫的繁殖能力^[30-31]。近年来越来越多的研究显示,亲代的营养状况也可能导致下一代的生活史参数发生变化,如在舞毒蛾 *Lymantria dispar* 中,高质量的食物资源可以导致后代更快速的发育^[32]。本研究同样发现,在对亲代成虫同时提供人工饲料和外源水分的处理中,花绒寄甲后代的卵期、幼虫期和蛹期均最短,而成虫期仅提供外源水分或早期受到食物限制的处理中产生的后代相应的发育历期明显延长。同时,亲代营养状况也影响该虫的寄生率,表现为亲代营养良好产生的后代的寄生率明显高于亲代营养限制的后代。这些结果同样说明成虫期提供的食物营养和外源水分也影响其后代的发育。产生这一结果的主要原因可能是营养不良的亲代产生的后代需要花费更长的时间进行取食或者幼虫对寄主的寄生能力下降。发育时间延长对自然条件下的昆虫将产生相当大的影响,首先在秋冬季低温到来之前,性成熟较晚的雌性不太可能有足够的时间进行交配和产卵,其次发育迟缓可能意味着配偶选择的机会下降^[22]。此外,本试验结果也进一步证实了食物营养具有对后代发育的跨代影响^[33]。这一结果在对隐翅虫 *Tachyporus hypnorum* 的研究中同样发现,亲代的营养影响子一代的个体发育历期,表现出在低营养条件下的发育历期明显延长^[34]。然而在黑腹果蝇 *Drosophila melanogaster* 中,尽管没有发现亲代对子一代发育历期的影响,但明显影响子二代的个体发育特性^[35]。在对昆士兰果蝇 *Bactrocera tryoni* 的研究中发现,亲代的营养质量并不影响后代的个体发育如孵化率、化蛹率和羽化率等参数^[36]。然而本研究并未测定这些指标,也未持续观察亲代对连续多个后代的影响,因此这些研究有待今后继续补充和完善。

昆虫的体型大小与其生长发育、生殖和存活等密切相关,同时体型大小也是评价昆虫质量的一个重要指标,通常认为体型更大的昆虫具有明显更强的竞争力和生殖成功率^[37-38]。在昆虫中,成虫体型大小取决于可获得营养的数量和质量,通常认为幼虫期或若虫期的营养状况影响成虫体型大小^[39-40]。然而,在对黑腹果蝇 *D. melanogaster* 的研究中发现,翅和股节大小受幼虫食物营养的影响,而丰富的成虫期营养可减轻幼虫营养不足造成的体质量变化^[41]。通过对花绒寄甲的研究发现,在羽化初期对亲

代同时提供人工饲料和外源水分时,其产生的后代成虫在体质量、体长和体宽等指标上均优于其他处理的后代成虫。另外,后代成虫的体型也受成虫早期营养胁迫的影响,尤其缺水影响最大。这一结果说明,亲代成虫期的营养供给同样影响后代的形态发育。实际上,对花绒寄甲而言,该虫属体外寄生性昆虫,成虫体型的差异不仅与幼虫获得的营养有关,还与自身的寄生能力相关。本试验所提供的幼虫营养是一致的,因而,造成成虫体型差异的主要原因可能是因成虫期营养差异导致幼虫寄生能力不同所致。

本研究在室内条件下系统揭示了成虫期食物中人工饲料和外源水分在花绒寄甲成虫适合度和后代生长发育以及形态发育等方面的作用,明确了人工饲料和外源水分是影响花绒寄甲生长发育和生殖的重要因素,而外源水分是其中重要的限制因子。因此,在该虫的大规模饲料中,在成虫羽化后需要及时提供充足的人工饲料和外源水分,以获得最大的生殖产量。当前对昆虫的成虫期和幼虫期营养的研究还发现,成虫期或幼虫期的营养不仅影响昆虫的个体发育、形态发育和生殖成功,还将影响后代的免疫力和抗疾病能力^[42-43]。因而在今后的研究中,可以继续探讨成虫期营养或幼虫期营养对当代或连续多代后代的生活史参数、生殖适合度以及群体免疫的影响,以更好地揭示该虫对恶劣营养条件的适应和跨代效应。

参考文献 References:

- [1] BAKER B P, GREEN T A, LOKER A J. Biological control and integrated pest management in organic and conventional systems[J]. *Biological control*, 2020, 140: 104095.
- [2] HAJEK A E, EILENBERG J. Natural enemies: an introduction to biological control[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2018.
- [3] HAN M J, WANG S B, DANG Y Q, et al. An efficient method for mass rearing *Dastarcus helophoroides* (Coleoptera: Bothrideridae), an important natural enemy of longhorned beetles[J]. *Biological control*, 2023, 184: 105289.
- [4] GRENIER S, CLERCQ P D. Comparison of artificially vs. naturally reared natural enemies and their potential for use in biological control. In quality control and production of biological control agents: theory and testing procedures[M]. Wallingford: CABI publishing, 2003: 115-131.
- [5] 王志华, 于静亚, 沈锦, 等. 花绒寄甲人工繁育及应用研究[J]. *中国生物防治学报*, 2018, 34(2): 226-233.
WANG Z H, YU J Y, SHEN J, et al. Artificial rearing technology of *Dastarcus helophoroides* and application[J]. *Chinese journal of biological control*, 2018, 34(2): 226-233.
- [6] 杨忠岐, 王小艺, 张翌楠, 等. 以生物防治为主的综合控制我国重大林木病虫害研究进展[J]. *中国生物防治学报*, 2018, 34(2): 163-183.
YANG Z Q, WANG X Y, ZHANG Y N, et al. Research advances of Chinese major forest pests by integrated management based on biological control[J]. *Chinese journal of biological control*, 2018, 34(2): 163-183.
- [7] LEE S, PARK D Y, WANG X, et al. Exploration for Asian longhorned beetle parasitoids in Korea using an improved sentinel log trap[J]. *Parasite*, 2023, 30: 57.
- [8] 魏建荣, 杨忠岐, 牛艳玲, 等. 花绒寄甲的分布与生态学习性补充调查[J]. *中国森林病虫*, 2009, 28(1): 16-18.
WEI J R, YANG Z Q, NIU Y L, et al. Distribution and ecological biology of *Dastarcus helophoroides*[J]. *Forest pest and disease*, 2009, 28(1): 16-18.
- [9] WANG Q Z, GUO Z, ZHANG J T, et al. Phototactic behavioral response of the ectoparasitoid beetle *Dastarcus helophoroides* (Coleoptera: Bothrideridae): evidence for attraction by near-infrared light[J]. *Journal of economic entomology*, 2021, 114(4): 1549-1556.
- [10] 魏建荣, 杨忠岐, 唐桦, 等. 花绒寄甲成虫的行为观察[J]. *林业科学*, 2008, 44(7): 50-55.
WEI J R, YANG Z Q, TANG H, et al. Behavior of a cerambycid parasitoid beetle (*Dastarcus helophoroides*) [J]. *Scientia silvae sinicae*, 2008, 44(7): 50-55.
- [11] ZHONG H H, LI C Q, ZHANG J T, et al. Factors influencing copulation duration in *Dastarcus helophoroides* (Fairmaire) (Coleoptera: Bothrideridae)[J]. *Insects*, 2024, 15(2): 104.

- [12] 颜学武, 嵇保中, 周刚. 一种花绒寄甲幼虫人工饲料的饲养效果评价[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2015, 39(1): 39-43.
- YAN X W, JI B Z, ZHOU G. Evaluation of an artificial diet of *Dastarcus helophoroides* (Coleoptera: Bothrideridae) larvae[J]. Journal of Nanjing forestry university (natural sciences edition), 2015, 39(1): 39-43.
- [13] SHI H N, ZHOU J Y, CHEN Y S, et al. A comparison of fitness-related traits in the Coleopteran parasitoid *Dastarcus helophoroides* (Coleoptera: Bothrideridae) reared on two factitious hosts[J]. Journal of economic entomology, 2020, 113(6): 2634-2640.
- [14] GAO S K, GENG C C, JI Y C, et al. Density-dependent growth and fitness in *Dastarcus helophoroides* (Coleoptera: Bothrideridae)[J]. Insects, 2019, 10(11): 386.
- [15] SASAKAWA K. Diet affects male gonad maturation, female fecundity, and larval development in the granivorous ground beetle *Anisodactylus punctatipennis*[J]. Ecological entomology, 2009, 34(3): 406-411.
- [16] MOLLEMAN F, GRANADOS-TELLO J, CHAPMAN C A, et al. Fruit-feeding butterflies depend on adult food for reproduction: evidence from longitudinal body mass and abundance data[J]. Functional ecology, 2022, 36(8): 1961-1972.
- [17] 刘朝红, 胡增丽, 张未仲, 等. 外源水分和温度对冬型梨木虱存活的影响[J]. 环境昆虫学报, 2020, 42(6): 1409-1414.
- LIU C H, HU Z L, ZHANG W Z, et al. Effects of external water and temperature on survival of winter-form pear psylla[J]. Journal of environmental entomology, 2020, 42(6): 1409-1414.
- [18] STRASER R K, WILSON H. Food deprivation alters reproductive performance of biocontrol agent *Hadronotus pennsylvanicus* [J]. Scientific reports, 2022, 12(1): 7129.
- [19] 唐桦, 杨忠岐, 张翌楠, 等. 天牛主要寄生性天敌花绒寄甲活体雌雄性成虫的无损鉴别[J]. 动物分类学报, 2007, 32(3): 649-654.
- TANG H, YANG Z Q, ZHANG Y N, et al. Technical researches on distinguishing female and male alive adults of the main parasite of longhorn beetles *Dastarcus helophoroides* (Coleoptera: Bothrideridae) without injuring[J]. Acta zootaxonomica Sinica, 2007, 32(3): 649-654.
- [20] GUTIÉRREZ Y, FRESCH M, OTT D, et al. Diet composition and social environment determine food consumption, phenotype and fecundity in an omnivorous insect[J]. Royal society open science, 2020, 7(4): 200100.
- [21] LEE K P, SIMPSON S J, CLISSOLD F J, et al. Lifespan and reproduction in *Drosophila*: new insights from nutritional geometry[J]. Proceedings of the national academy of sciences of the United States of America, 2008, 105(7): 2498-2503.
- [22] BARRY K L. You are what you eat: food limitation affects reproductive fitness in a sexually cannibalistic praying mantid[J]. PLoS one, 2013, 8(10): e78164.
- [23] DAVID G, GIFFARD B, VAN HALDER I, et al. Energy allocation during the maturation of adults in a long-lived insect: implications for dispersal and reproduction[J]. Bulletin of entomological research, 2015, 105(5): 629-636.
- [24] CORRÊA C P, CAPIZZANI B C, BEIJO L A, et al. Adult feeding and host type modulate the life history traits of the capital breeder *Zabrotes subfasciatus* [J]. Physiological entomology, 2020, 45(2/3): 120-128.
- [25] DAVIS R B, JAVOIS J, KAASIK A, et al. An ordination of life histories using morphological proxies: capital vs. income breeding in insects[J]. Ecology, 2016, 97(8): 2112-2124.
- [26] RAD F, ALEOSFOOR M, FEKRAT L, et al. Water stress decreases the demographic performance of western flower thrips, *Frankliniella occidentalis* (Thysanoptera: Thripidae), on tomato[J]. Arthropod-plant interactions, 2024, 18(1): 105-116.
- [27] KNAPP M, UHNAVÁ K. Body size and nutrition intake effects on fecundity and overwintering success in *Anchomenus dorsalis* (Coleoptera: Carabidae)[J]. Journal of insect science, 2014, 14(1): 240.
- [28] MACARTNEY E L, CREAN A J, NAKAGAWA S, et al. Effects of nutrient limitation on sperm and seminal fluid: a systematic review and meta-analysis[J]. Biological reviews, 2019, 94(5): 1722-1739.
- [29] WILNER D, GREENWAY E G, CIRINO L A, et al. Long-term reproductive success is predicted by sexual behavior and impaired by temporary nutritional stress during sexual maturation[J]. Behavioural processes, 2020, 175: 104-122.
- [30] JIMÉNEZ-CORTÉS J G, SERRANO-MENESES M A, CÓRDOBA-AGUILAR A. The effects of food shortage during larval development on adult body size, body mass, physiology and developmental time in a tropical damselfly[J]. Journal of insect physiology, 2012, 58(3): 318-326.

- [31] LUO D, LAI M, XU C F, et al. Life history traits in a capital breeding pine caterpillar: effect of host species and needle age [J]. BMC ecology, 2018, 18(1): 24.
- [32] TRIGGS A M, KNELL R J. Parental diet has strong transgenerational effects on offspring immunity [J]. Functional ecology, 2012, 26(6): 1409-1417.
- [33] COLOMBO V, PETTIGROVE V J, GOLDING L A, et al. Transgenerational effects of parental nutritional status on offspring development time, survival, fecundity, and sensitivity to zinc in *Chironomus tepperi* midges [J]. Ecotoxicology and environmental safety, 2014, 110: 1-7.
- [34] KYNEB A, TOFT S. Effects of maternal diet quality on offspring performance in the rove beetle *Tachyporus hypnorum* [J]. Ecological entomology, 2006, 31(4): 322-330.
- [35] DEAS J B, BLONDEL L, EXTAVOUR C G. Ancestral and offspring nutrition interact to affect life-history traits in *Drosophila melanogaster* [J]. Proceedings of the royal society B-biological sciences, 2019, 286: 488809.
- [36] DINH H, NGUYEN B, MORIMOTO J, et al. Transgenerational effects of parental diet on offspring development and disease resistance in flies [J]. Frontiers in ecology and evolution, 2021, 9: 606993.
- [37] 黄韵姗, 张静宇, 蒋明星. 昆虫个体大小对其种群生物学的影响 [J]. 生态学报, 2017, 37(7): 2158-2168.
HUANG Y S, ZHANG J Y, JIANG M X. Effects of body size on the population biology of insects [J]. Acta ecologica Sinica, 2017, 37(7): 2158-2168.
- [38] ZHANG Y, ZHAO C C, MA W H, et al. Larger males facilitate population expansion in *Ophraella communa* [J]. Journal of animal ecology, 2021, 90(12): 2782-2792.
- [39] NIJHOUT H J, RIDDIFORD L M, MIRTH C K, et al. The developmental control of size in insects [J]. Wiley interdisciplinary reviews: developmental biology, 2014, 3(1): 113-134.
- [40] 刘伟, 徐强, 黄丽莉, 等. 草地贪夜蛾不同季节取食玉米叶和大豆叶生活史特性比较 [J]. 江西农业大学学报, 2021, 43(5): 1032-1043.
LIU W, XU Q, HUANG L L, et al. A comparison of life-history traits of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* feeding on the corn leaves and the soybean leaves in different seasons [J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2021, 43(5): 1032-1043.
- [41] POÇAS G M, CROSBIE A E, MIRTH C K. When does diet matter? The roles of larval and adult nutrition in regulating adult size traits in *Drosophila melanogaster* [J]. Journal of insect physiology, 2022, 139: 104051.
- [42] TRIGGS A M, KNELL R J. Parental diet has strong transgenerational effects on offspring immunity [J]. Functional ecology, 2012, 26(6): 1409-1417.
- [43] CSATA E, PÉREZ-ESCUADERO A, LAURY E, et al. Fungal infection alters collective nutritional intake of ant colonies [J]. Current biology, 2024, 34(4): 902-909.