

花绒寄甲的交配能力及多次交配对生殖产量的影响

钟辉辉, 李超群, 冯寒松, 文新根, 黄金葵, 刘兴平*

(保护生物学江西省重点实验室, 江西农业大学林学院, 南昌 330045)

摘要: 花绒寄甲 *Dastarcus helophoroides* Fairmaire 为天牛类蛀干害虫的优势天敌昆虫, 为明确该成虫的交配能力和多次交配行为在该虫种群繁衍中的作用, 本文评估了该虫在室内恒定条件下的性成熟期、交配次数、交配持续期和交配间隔期, 以及通过设置交配 1、5、10 和自由交配等 4 个处理, 探讨了多次交配行为对成虫生殖产量的影响。结果表明, 花绒寄甲的性成熟期平均为 29.35 ± 0.34 d, 交配发生时间主要集中在 18:00 PM-2:00 AM。在观察期内该虫的平均交配次数为 4.49 ± 0.24 次, 其平均交配持续期为 9.27 ± 0.12 min, 平均交配间隔期为 8.60 ± 0.26 d, 且随交配次数的增加呈明显缩短趋势。此外, 该虫的产卵量随交配次数的增加从交配 1 次的 227.45 ± 15.32 粒/雌增加至自由交配的 1426.03 ± 113.71 粒/雌, 孵化率从交配 1 次的 $68.93\% \pm 1.47\%$ 增加至自由交配的 $94.98\% \pm 0.90\%$, 这些结果证实了花绒寄甲属典型的夜行性、收入型生殖的、多次交配的昆虫种类, 交配能力较弱, 但多次交配明显提高了该虫的生殖产量, 从而支持精子补充假说。

关键字: 花绒寄甲; 交配次数; 性成熟期; 交配能力; 生殖适合度

中图分类号: Q968.1;S433 文献标识码: A

The mating competency and the effect of multiple mating on reproductive fitness of *Dastarcus helophoroides* Fairmaire (Coleoptera: Bothrideridae)

ZHONG Hui-Hui, LI Chao-Qun, FENG Han-Song, WEN Xin-Gen, HUANG Jin-Kui, LIU Xing-Ping* (Provincial Key Laboratory of Conservation Biology, School of Forestry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China)

Abstract: The coleopteran parasitoid *Dastarcus helophoroides* Fairmaire (Coleoptera: Bothrideridae) is considered a dominant natural predator for controlling cerambycid borer pests. In order to clarify the mating competency and the role of multiple mating behavior in the population reproduction of this insect, the sexual maturity, mating frequency, copulation duration and copulation interval of this insect were estimated, then the effect of multiple mating on adult reproductive output were also explored by established four mating treatments of mated 1 time, 5 times, 10 times and free mating under constant conditions in this paper. The results showed that the average sexual maturity period of this insect was 29.35 ± 0.34 d, and the mating behavior was

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31760106)

作者简介: 钟辉辉, 男, 1998 年生, 江西赣州人, 硕士研究生, 研究方向为昆虫行为学, E-mail: zhh@stu.jxau.edu.cn

*通讯作者 Author for correspondence: 刘兴平, 男, 博士, 教授, 研究方向为昆虫行为生态学, E-mail: xpliu@jxau.edu.cn

收稿日期 Received: 2024-01-20; 接受日期 Accepted: 2024-04-23

mainly occurred from 18:00 PM to 2:00 AM. During the observation period, the average mating frequency of the insect was 4.49 ± 0.24 days, with an average copulation duration of 9.27 ± 0.12 min and copulation interval of 8.60 ± 0.26 d, which showed a significant shortening trend with increasing mating frequency. Furthermore, with increasing mating frequency, fecundity of this beetle increased from 227.45 ± 15.32 eggs/female for one mating to 1426.03 ± 113.71 eggs/female for free mating, and fertility increased from $68.93 \pm 1.47\%$ for one mating to $94.98 \pm 0.90\%$ for free mating. These results demonstrate that this beetle belongs to typical nocturnal, income breeding, and multiple mating insect species, and have weaker mating competency. Multiple mating significantly increases the reproductive fitness of this insect, supporting ejaculate replenishment hypothesis.

Key words: *Dastarcus helophoroides*; sexual maturity; mating frequency; mating competency; reproductive fitness

对于两性生殖的昆虫而言，两性交配过程是产生后代及维持种群繁衍的必要环节（Ide and Kondoh, 2000）。昆虫进入成虫期到达性成熟后，通过求偶、交配和产卵等行为过程完成后代的繁育（María *et al.*, 2013）。然而，昆虫的性成熟期因种而异，有些昆虫在羽化当天即可直接求偶和交配，有些则需经历补充营养后才能到达性成熟（黎海霖等，2019；李可琢等，2021）。此外，昆虫的交配能力同样因种而异，体现在交配率、交配次数和交配持续期等指标存在明显的差异（Nason and Kelly, 2020），这些差异导致在产卵量、卵孵化率和成虫寿命方面存在差异，进而影响昆虫的繁殖适合度（Arnqvist and Nilsson, 2000；Vahed, 2007；刘兴平等，2010；Worthington and Kelly, 2016；许冬等，2020；邹明民等，2022）。开展昆虫交配能力的研究有助于理解多次交配的功能和昆虫的性选择策略（Wang and Shi, 2004）。

花绒寄甲 *Dastarcus helophoroides* Fairmaire 属鞘翅目 Coleoptera 寄甲科 Bothrideridae 的一种体外寄生性甲虫，在国内分布极为广泛（黄大庄等，2008）。研究证实该虫是防治天牛类蛀干害虫的优势天敌种类（杨忠岐等，2018），目前已在室内成功扩繁并广泛应用于此类害虫的生物防治实践（唐艳龙等，2012；王志华等，2018；郑雅楠等，2022）。通过对该虫生物学的观察发现，羽化后的成虫需补充营养才能交尾，交尾时间可以达到 10 min 以上（魏建荣等，2008）。因成虫寿命达 3 年以上，甚至长达 6 年（魏建荣等，2007），因而从理论上推测该虫应具有多次交配的现象。然而，目前该虫的性成熟期尚不明确，其交配能力及交配次数对生殖产量的影响鲜有报道。本文以该虫的室内饲养种群为研究材料，在室内恒定条件下开展了成虫生殖行为学的观察，主要探讨了以下 3 个问题：（1）花绒寄甲性成熟期多长？（2）花绒寄甲是否具有多次交配现象？（3）交配次数对花绒寄甲的产卵量和卵的孵化有何影响？这些研究结果将进一步揭示花绒寄甲的生物学特性，同时为该虫的人工扩繁提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 供试虫源

花绒寄甲室内种群来源于江西省赣州市野外马尾松林中，于2019年将采集到的花绒寄甲成虫引入江西农业大学森林保护养虫室内后，随机将100头花绒寄甲放入塑料方形养虫盒内（长×宽×高=18 cm×14 cm×8 cm），并置于LED型顶置人工气候箱（RDN-400C-4型，浙江宁波东南仪器有限公司）中饲养，饲养环境设置为温度 $25\pm 1^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度 $60\%\pm 10\%$ ，光周期14 L:10 D（Shi *et al.*, 2020）。参考颜学武等（2015）的方法人工配置成虫饲料置于养虫盒内，每3 d更换水和饲料。同时，在养虫盒内放置一块双面绑有2~3张牛皮纸（长×宽=6.5 cm×3.5 cm）的实心方型木块（长×宽×高=6.5 cm×3.5 cm×2.5 cm）供花绒寄甲产卵，待成虫产卵后，每天收集带有卵块的牛皮纸放入新的培养皿中并置于相同环境的人工气候箱中。当幼虫孵化后，参考Shi *et al.*（2020）的方法，以大麦虫 *Zophobas morio* (Fabricius)新鲜虫蛹作为替代寄主（购于广东省广州市荔湾区大麦虫养殖基地），使用勾线笔将初孵幼虫按虫蛹比为3:1的比例人工接虫进行继代繁殖。在继代饲养时，将每年收集到的野外种群补充到室内种群中，以防止室内种群衰退带来的不利影响。2022年9月，随机选择该室内种群繁殖12代后新羽化的成虫个体后代用于以下试验。

1.2 试验方法

成虫羽化当日，参考唐桦等（2007）的方法区分雌、雄虫。为了精确记录花绒寄甲的性成熟期和交配能力等行为学特征，使用自行研制的新型无光照小型昆虫行为监控装置（专利号：ZL202021010480.7）进行行为监测。监控装置安装在与成虫饲养相同环境条件的行为监控室内，24小时循环录制，每日拷贝监控记录并利用软件potplayer播放视频，记录成虫交配次数、交配起始时间和交配结束时间，统计交配持续期和交配率。待雌虫产卵后，将附在牛皮纸上的卵块取出并利用手持式数码显微镜（Dino-Lite AM-3013，台湾安鹏科技股份有限公司）和软件DinoCapture 2.0进行产卵量的记录。随后将附有卵的牛皮纸放入干净的培养皿中并置于上述相同环境条件下的LED型顶置人工气候箱中用于观察卵的孵化率。

1.3 试验设计

1.3.1 花绒寄甲性成熟期的测定

随机选择生长健壮的刚羽化的雌、雄成虫各1头放入装有人工饲料和吸水绵球的塑料培养皿（ $d = 10\text{ cm}$ ， $h = 3\text{ cm}$ ）中，试验重复130次。将配好对的塑料培养皿放入监控装置下进行每日24 h的持续监测，直到所有成虫均发生交配或距离成虫羽化45 d时停止观察。监测时，每日在成虫不活跃的白天更换饲料和水。每日拷贝监控记录并回放观察雌雄成虫的活动情况，当雌雄成虫腹末相对并呈“一”字型时界定为发生交配行为（魏建荣等，2008），记录该虫的首次交配日期，统计该虫性成熟期。

1.3.2 花绒寄甲的交配能力观察

将刚羽化并区分好性别的成虫单头放入装有人工饲料和吸水绵球的塑料培养皿（规格

同上)中单独饲养,每日更换饲料和水。待饲养至成虫性成熟后,按 1.3.1 相同的方法选择生长健壮的个体进行雌雄配对并置于监控装置下观察 65 d。试验共配对 80 对,分成 4 组,每组 20 对,记录观察期内每个培养皿中花绒寄甲雌、雄成虫的交配次数、每次交配的占比、每次交配的交配持续期和交配间隔期。

1.3.3 多次交配对雌虫产卵量的影响

选取单独饲养至性成熟期的雌雄成虫作为材料,将一部分成虫在培养皿中配对后置于监控装置下,每日观察交配发生情况。当观察到成虫分别完成 1 次 (M1)、5 次 (M5)、10 次 (M10) 交配时,将雄虫从培养皿中移出,并将含不同交配次数的雌虫的培养皿置于与种群饲养相同环境条件的人工气候箱中饲养。此外,一部分雌雄成虫配对后直接置于人工气候箱中,试验期间雌雄成虫不分开并任其自由交配 (mating free, MF)。成虫饲养时,在培养皿中提供成虫配方饲料和吸水海绵以补充营养和水分,并将双面绑有 3~4 张牛皮纸 (长 × 宽 = 4 cm × 2 cm) 的小木块 (长 × 宽 × 高 = 4 cm × 2 cm × 0.3 cm) 置于培养皿中供成虫产卵。每日更换饲料和水并观察成虫在牛皮纸上的产卵情况,一旦成虫完成规定的交配次数后,记录每个培养皿中雌虫的每日产卵量,自由交配处理参考交配 10 次处理的时间记录每日产卵量。以雌虫交配次数作为处理,每一处理重复 30 次,成虫开始产卵后连续观察 6 周,统计在观察期内的成虫产卵量差异。

1.3.4 多次交配对卵孵化率的影响

当 1.3.3 各处理中的雌虫开始产卵后,每日收集各处理中雌虫产有卵的牛皮纸,并随机选取其中 3 张产卵量较多的牛皮纸放入新的培养皿 (规格同上) 中并置于相同环境条件下的人工气候箱中。每日观察卵的孵化情况,当卵开始孵化时,记录各处理中各培养皿内幼虫的孵出数量直到所有幼虫孵出或持续观察 1 周,统计各处理中的卵孵化率。试验共设 4 个处理,每个处理重复 3 次,直至 1.3.3 中各处理下成虫停止产卵观察后结束。

1.4 数据分析

所有数据分析均使用 SPSS 26.0 数据处理系统进行统计。文中所有数据在进行分析前使用 Shapiro-Wilk 检验数据正态性。百分率数据先进行反正弦平方根转换后再进行分析。性成熟期、交配发生时间和交配次数等数据采用描述统计并作频次分布图。进行不同交配次数下的交配占比、交配持续期和交配间隔期等行为学指标以及不同交配处理下的雌虫产卵量和卵孵化率等生活史参数等测定时,当数据呈正态分布时采用单因素方差分析, Tukey's HSD 检验;当数据呈非正态分布时则用非参数分析 Kruskal-Wallis 检验,显著水平均为 $P = 0.05$ 。不同交配处理的卵孵化率随观测周数的变化选用线性回归分析。文中数据以平均值 ± 标准误表示,文中作图均在 Origin 2023b 中操作完成。

2 结果与分析

2.1 花绒寄甲性成熟期和交配发生时间

本次试验共有 129 对成虫在室内恒定条件下连续 45 d 的行为观察期内成功交配,交配

成功率达 99.23%。其中，交配行为在成虫羽化后第 18 天开始出现，至第 38 天时所有成虫完成首次交配。对性成熟期的统计发现，该虫的首次交配主要发生在成虫羽化后第 26~33 天，占配对数的 75.97%，其性成熟期平均为 29.35 ± 0.34 d（图 1-a）。对首次交配发生的时间进行分析发现，该虫交配发生时间主要集中在 18:00 PM-02:00 AM，占配对数的 82.95%，表明该虫交配现象主要发生在夜间（图 1-b）。

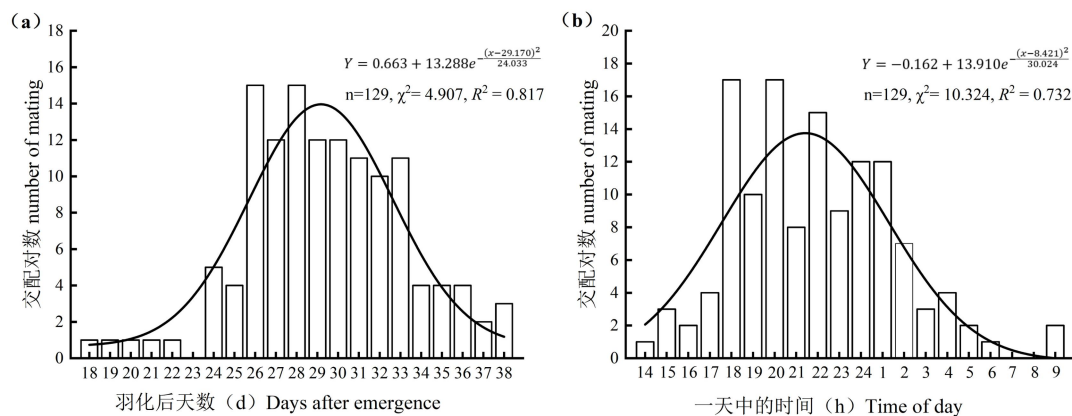


图 1 花绒寄甲的性成熟期和交配发生时间

Fig. 1 Sexual maturity (a) and time of mating occurrence (b) in *Dastarcus helophoroides*.

2.2 花绒寄甲成虫的交配能力

2.2.1 交配次数和交配占比

连续 65 d 对花绒寄甲的交配行为进行观察发现，100% 的个体均发生交配，交配次数在 1~7 次之间。其中，在观察期内有 10 对仅完成 1 次交配，占配对数的 12.5%；有 66 对完成 3 次以上交配，占配对数的 82.5%；观察期内的平均交配次数为 4.49 ± 0.24 次（图 2-a）。进一步分析不同交配次数间的占比发现，该虫发生一次交配的占比最高（100%），而发生 7 次交配的占比最低（23.75%）。统计分析表明随交配次数增加，其交配占比显著下降（ $H = 15.081$, $df = 6$, $P = 0.02$ ，图 2-b）。

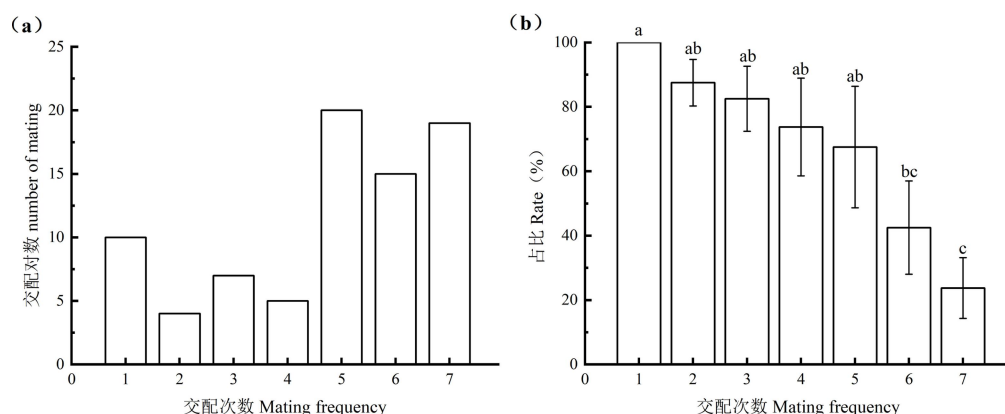


图 2 花绒寄甲的交配次数和交配占比

Fig. 2 Mating frequency (a) and mating rate (b) in *Dastarcus helophoroides*.

2.2.2 交配持续期

对花绒寄甲的交配持续期进行统计发现，该虫的平均交配持续期为 9.27 ± 0.12 min。然

而，不同交配次数下的交配持续期存在一定的规律性，即随着交配次数的增加，其交配持续期逐渐缩短。其中，第2次交配的持续期最高，达 9.82 ± 0.32 min，而第6次交配的持续期最短，只有 8.45 ± 0.34 min，两者相差1.37 min。统计分析表明，不同交配次数下的交配持续期存在显著差异（ $F = 3.51$ ， $df = 6, 381$ ， $P = 0.003$ ，表1）。

表1 花绒寄甲的交配能力

Table 1 The mating ability of *Dastarcus helophoroides*

交配处理 Treatment	交配持续期 (min) Mating duration	交配间隔期 (d) Mating interval
第1次交配 1 st mating	9.70 ± 0.23 ab	10.07 ± 0.53 a
第2次交配 2 nd mating	9.82 ± 0.32 a	9.68 ± 0.57 ab
第3次交配 3 rd mating	9.59 ± 0.29 ab	8.04 ± 0.59 abc
第4次交配 4 th mating	8.63 ± 0.28 ab	7.63 ± 0.60 bc
第5次交配 5 th mating	8.96 ± 0.29 ab	7.25 ± 0.62 bc
第6次交配 6 th mating	8.45 ± 0.34 b	6.33 ± 0.77 c
第7次交配 7 th mating	8.66 ± 0.54 ab	

注：表中数据为平均值±标准误，同一列中不同小写字母表示差异显著（ANOVA, Tukey's HSD 检验, $P < 0.05$ ）。Note: Means (\pm SE) followed by the different lowercase letters in the same row were significantly difference (ANOVA, Tukey's HSD, $P < 0.05$).

2.2.3 交配间隔期

对相邻两次交配的交配间隔期进行比较发现，第1次交配与第2次交配的间隔期最长，达 10.07 ± 0.53 d，随着交配次数的增加，其交配间隔逐渐缩短，其中第6次交配与第7次交配的间隔期仅 6.33 ± 0.77 d，两者相差3.74 d。统计分析表明，花绒寄甲的交配间隔期随交配次数的增多呈明显缩短的趋势（ $F = 4.70$ ， $df = 5, 301$ ， $P = 0.000 < 0.001$ ，表1），其平均交配间隔期为 8.60 ± 0.26 d。

2.3 多次交配对花绒寄甲雌虫产卵量的影响

通过比较不同交配次数的花绒寄甲雌虫产卵情况发现，交配次数的差异明显影响雌虫产卵量。其中，在80 d的观察期内随着交配次数的增加，平均产卵次数从交配1次的 9.36 ± 0.71 次/雌显著上升至自由交配的 24.55 ± 1.51 次/雌，增幅达162.29%（ $F = 30.94$ ； $df = 3, 81$ ； $P < 0.001$ ）；平均每次的产卵量从交配1次的 27.88 ± 0.82 粒/雌增加到自由交配的 58.93 ± 2.80 粒/雌，增加了2.11倍（ $F = 41.46$ ； $df = 3, 81$ ； $P < 0.001$ ）；平均每周产卵量从交配1次的 37.91 ± 2.55 粒/雌增加至自由交配的 237.67 ± 18.95 粒/雌，每周产卵量随交配次数增长了6.27倍（ $F = 50.45$ ； $df = 3, 81$ ； $P < 0.001$ ）；总产卵量具有同样的趋势，即随交配次数的增加从交配1次的 227.45 ± 15.32 粒/雌上升至自由交配的 1426.03 ± 113.71 粒/雌，增长了6.27倍（ $F = 50.45$ ； $df = 3, 81$ ； $P < 0.001$ ）。

表 2 多次交配对花绒寄甲雌虫产卵量的影响

Table 2 Effects of multiple mating on the oviposition in *Dastarcus helophoroides*.

处理 Treatments	平均每雌产卵次数 Average oviposition frequency per female	平均每次产卵量 (粒/雌) Average fecundity per time (eggs/female)	平均每周产卵量 (粒/雌) Average fecundity per week (eggs/female)	总产卵量 (粒/雌) Total fecundity (eggs/female)
M1	9.36 ± 0.71 c (5, 15)	27.88 ± 0.82 c	37.91 ± 2.55 d	227.45 ± 15.32 d
M5	12.75 ± 1.30 c (3, 23)	40.90 ± 1.89 b	87.23 ± 9.67 c	523.40 ± 58.00 c
M10	18.78 ± 1.30 b (6, 24)	47.37 ± 2.28 b	142.42 ± 11.84 b	854.50 ± 71.06 b
MF	24.55 ± 1.51 a (11, 36)	58.93 ± 2.80 a	237.67 ± 18.95 a	1 426.03 ± 113.71 a

注：表中数据为平均值±标准误，括号中的数据分别代表最小值和最大值，同一列中不同小写字母表示差异显著（ANOVA，Tukey’s HSD 检验， $P < 0.05$ ）。Note: Data in the table represented mean ± SE. Data in parentheses represented the minimum and maximum, respectively. Different lowercase letters in the same column indicated significant differences (ANOVA, Tukey’s HSD, $P < 0.05$)

进一步对 6 周观察期内花绒寄甲在经历不同交配次数后的每周的平均产卵量进行分析，结果如图 3 所示。从图中可以看出，交配 1 次的每周平均产卵量最低，其次为 5 次和 10 次，而自由交配的产卵量最大。此外，在交配 1~10 次的处理中，雌虫每周平均产卵量随观察周数呈先升后降的趋势且存在显著差异（M1: $F = 11.35$, $df = 5, 93$, $P < 0.001$; M5: $F = 6.91$, $df = 5, 88$, $P < 0.001$; M10: $F = 10.342$, $df = 5, 75$, $P < 0.001$; 图 3-a~c），然而，自由交配处理的雌虫每周平均产卵量变化较平稳且不存在显著差异（ $F = 0.75$, $df = 5, 100$, $P = 0.58$, 图 3-d）。

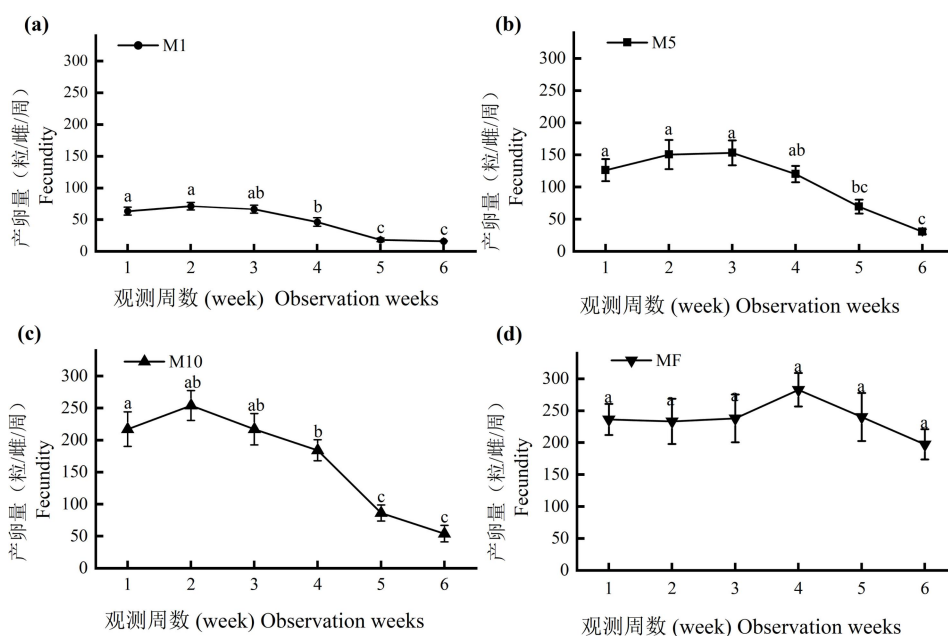


图 3 多次交配对花绒寄甲每周产卵量的影响

Fig. 3 Effect of multiple mating on female weekly fecundity in *Dastarcus helophoroides*

注：不同小写字母代表差异显著，单因素方差分析，Turkey’ HSD 检验， $P < 0.05$ 。Note: Different lowercase letters represented significant difference, ANOVA, Tukey’ HSD test, $P < 0.05$.

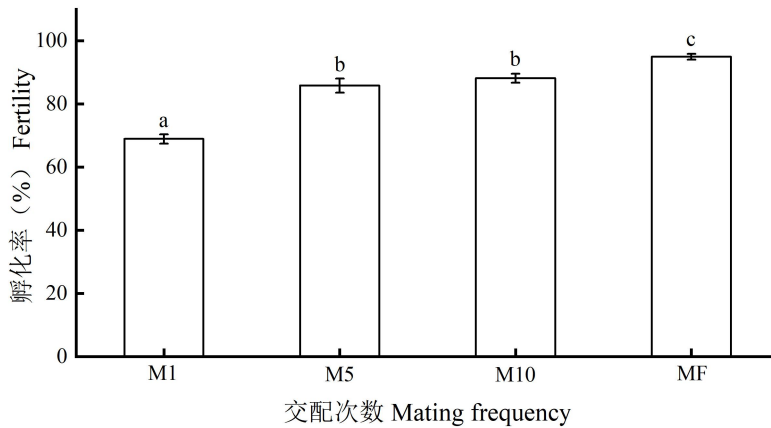


图 4 多次交配对花绒寄甲卵的平均孵化率的影响

Fig. 4 Effects of multiple mating on mean fertility in *Dastarcus helophoroides*

注：不同小写字母代表差异显著，单因素方差分析，Turkey's HSD 检验， $P < 0.05$ 。Note: Different lowercase letters represented significant difference, ANOVA, Tukey' HSD test, $P < 0.05$.

2.4 多次交配对花绒寄甲卵孵化率的影响

对经历不同交配次数的雌虫所产的卵的平均孵化率进行比较，发现随着交配次数的增加花绒寄甲卵的孵化率依次增加，其中，交配 1 次处理下的卵孵化率最低，仅 $68.93\% \pm 1.47\%$ ，而自由交配处理下卵的孵化率最高，达 $94.98\% \pm 0.90\%$ ，孵化率增加 26.05%。统计分析表明花绒寄甲雌虫在经历不同的交配次数后，卵的孵化率呈明显升高的趋势 ($F = 19.61$, $df = 3, 81$, $P < 0.001$, 图 4)。

进一步分析花绒寄甲雌虫经历不同交配次数后卵的孵化率随观测周数的变化情况，结果表明，在自由交配处理中，卵的孵化率在观察期内稳定在 91.02%~97.59%之间且不存在差异 ($F = 2.15$, $df = 5, 131$, $P = 0.06$, 图 5-d)，然而在雌虫交配 1、5、10 次时，卵的孵化率随观测周数呈不同程度的下降，其中交配 10 次处理的卵孵化率从第一周的 95.71% 下降至第六周的 75.07%，降幅为 20.64%；交配 5 次处理的卵孵化率从第一周的 91.31% 下降至第六周的 70.38%，降幅达 20.93%；而交配 1 次处理的卵孵化率从第一周的 91.24% 急剧下降至第六周的 39.82%，下降幅度达 51.42%。统计分析表明，各交配处理间的卵孵化率随观测周数呈显著下降趋势 (M1: $F = 70.33$, $df = 5, 131$, $P = 0.001$; M5: $F = 5.02$, $df = 5, 119$, $P < 0.05$; M10: $F = 3.62$, $df = 5, 107$, $P < 0.01$; 图 5-a~c)。线性回归分析表明，交配 1 次、5 次和 10 次的卵孵化率随观测周数呈负相关 ($P \leq 0.01$)，而自由交配处理中的卵孵化率与观测周数不相关 ($P > 0.05$, 图 5)。

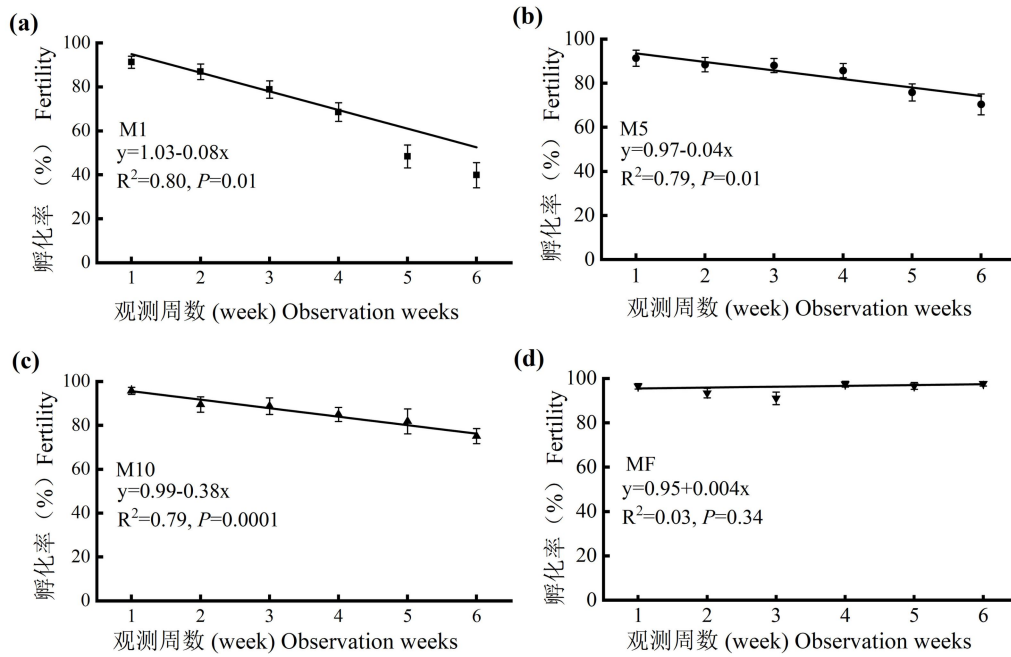


图 5 多次交配对花绒寄甲卵孵化率的影响

Fig. 5 Effects of multiple mating on fertility in *Dastarcus helophoroides*

3 结论与讨论

本文在室内条件下对体外寄生性花绒寄甲成虫的生殖行为进行观察，得到 3 个明显的结果：1) 花绒寄甲的性成熟期在 29.35 ± 0.34 d，交尾时间集中在夜间 18:00 PM-02:00 AM。2) 在 65 d 的观察期内，该虫交配 1~7 次，平均可交配 4.49 ± 0.24 次；其交配持续期平均在 9.27 ± 0.12 min，相邻两次交配的间隔期平均在 8.60 ± 0.26 d，交配率随交配次数的增加而下降。3) 随着交配次数的增加，花绒寄甲的雌虫平均产卵量增加了 6.27 倍，卵的平均孵化率增加了 26.05%。这些结果为揭示花绒寄甲的繁殖生物学提供了重要的基础资料，同时对该虫的人工繁育技术具有重要的指导意义。

前期对花绒寄甲成虫的观察发现，该虫寿命长且需补充营养后才能交尾（魏建荣等，2008），本试验观察同样发现，在羽化初期该虫并无交尾行为发生，而是需要经历一段时间的大量进食，之后才陆续开始交尾，其性成熟期平均在 29.35 ± 0.34 d，从而进一步明确了该虫属收入型生殖的昆虫（income breeding insect），即成虫羽化后需不断摄食营养以满足性器官的发育从而完成后代繁衍（Stephens *et al.*, 2014）。该虫的交尾主要发生在夜间 18:00 PM-02:00 AM，这与该虫昼伏夜出的习性密切相关，属夜行性昆虫种类，也与之前的观察一致（魏建荣等，2008）。

在昆虫种类中，交配次数、交配持续期和交配间隔期等指标反映了成虫的交配能力（Wang *et al.*, 2016; Nason and Kelly, 2020; Kyogoku *et al.*, 2023）。对花绒寄甲交配能力的观察中发现，在 65 d 的观察期内，成虫平均交配 4.49 ± 0.24 次，其中 82.5% 以上的个体能发生 3 次以上的多次交配。因该虫寿命长达 3~6 年（魏建荣等，2007），本试验并未测定该虫一生的交配次数，但本试验的结果足以证实花绒寄甲属多次交配的昆虫种类。此外，

该虫的平均交配持续期为 9.27 ± 0.12 min, 平均交配间隔期 8.60 ± 0.26 d。这一结果也与前人对该虫的研究基本一致 (魏建荣等, 2008)。研究表明昆虫的交配能力与寿命密切相关, 通常认为寿命短的昆虫交配能力较强, 寿命长的交配能力较弱 (Shelly, 2019)。如韭菜迟眼蕈蚊 *Bradysia odoriphaga* 的雄虫平均寿命为 4.5 d, 最多交配至 13 次, 表现出较强的交配能力 (梁玲等, 2018)。相比之下, 花绒寄甲在 65 d 的观察期内最多仅交配了 7 次, 显示出较弱的交配能力。同时, 交配能力的下降还体现在交配持续期的缩短和交配率的下降 (Kumano *et al.*, 2016)。在本试验的观察中发现, 花绒寄甲的交配持续期和交配占比同样表现为随交配次数的增加而下降, 这一结果与西印度甘薯象甲 *Euscepes postfasciatus* 的研究结果一致。然而, 昆虫的交配持续期受许多生理生态因素如日龄、交配经历、温度等因素的影响, 进而影响昆虫的交配能力 (Kumano *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2016; Shelly, 2019), 这些因素是否同样影响花绒寄甲交配能力还需进一步验证。

多次交配现象广泛存在于各种昆虫种类中, 特别是在鞘翅目昆虫中非常普遍 (Arnqvist and Nilsson, 2000; 刘兴平等, 2008)。大量研究表明, 昆虫的多次交配行为可以提高雌虫的产卵量 (Papach *et al.*, 2022)。在鞘翅目昆虫中如黄粉虫 *Tenebrio molitor* (Drnevich *et al.*, 2001)、赤拟谷盗 *Tribolium castaneum* (Lewis, 2004)、埋葬甲 *Nicorhorus vespilloides* (House *et al.*, 2009)、蜂巢小甲虫 *Aethina tumida* (Papach *et al.*, 2022) 等均显示雌虫产卵量随交配次数的增加而增加。然而也有一些昆虫表明交配次数与产卵量不相关, 如马铃薯甲虫 *Leptinotarsa decemlineata* (Orsetti *et al.*, 2003)、粉斑螟 *Cadra cautella* (McNamara *et al.*, 2008)、小菜蛾 *Plutella xylostella* (邹明民等, 2022)、二化螟 *Chilo suppressalis* (冯波等, 2020) 等。在对花绒寄甲的研究中同样发现雌虫的产卵量随交配次数的增加而增加, 此外, 从每周产卵量的分析中可以看出, 自由交配处理的雌虫每周产卵量均保持较高水平, 而随着交配次数的降低, 雌虫产卵量低且随产卵周数而明显下降。可能的原因是花绒寄甲需要通过不断的交配, 雌虫获得足够的精子, 才能维持正常的产卵量, 这一现象在其它昆虫中同样存在 (Arnqvist and Nilsson, 2000; 邹明民等, 2022)。本试验的试验还发现, 自由交配处理的产卵量要显著高于交配 10 次处理的产卵量。这一结果充分说明自由交配处理中的交配次数要高于 10 次, 且对于寿命较长的花绒寄甲而言, 更多的交配还可能刺激雌虫产生更多的卵子, 而且在雌虫获得更多精子的同时, 也可能获得与生殖密切相关的其它营养性物质, 从而增加产卵量 (Arnqvist and Nilsson, 2000; Liu *et al.*, 2013)。下一步可通过解剖不同交配次数的雌虫卵巢, 观察卵巢内精子数量变化, 明确不同交配次数的雌虫是否与所储存的精子数量和其它营养性物质有关。

在一些蛾类昆虫中如粉斑螟 (McNamara *et al.*, 2008)、梨小食心虫 *Grapholita molesta* (Morais *et al.*, 2012) 和二化螟 (冯波等, 2020) 的研究中发现, 成虫的交配次数对卵孵化率没有显著影响。在对花绒寄甲的观察中, 发现雌虫的卵孵化率随交配次数增加而增加, 进一步说明雌虫需要通过不断与雄虫交配以补充精子保障卵的受精, 从而提高卵的孵化率。

这一结果在其它昆虫如黄粉虫 (Drnevich *et al.*, 2001)、昆士兰实蝇 *Bactrocera tryoni* (Radhakrishnan *et al.*, 2009) 和蟋蟀 *Gryllus texensis* (Worthington *et al.*, 2016) 等已得到验证。Ridley (1988) 对 48 种昆虫的统计发现, 如果雌虫不进行多次交配, 则有一半以上的雌虫将精子消耗殆尽, 从而导致卵的孵化率下降。通过观察花绒寄甲在不同交配次数下卵的孵化率随产卵周数的变化情况发现, 交配次数越少, 卵孵化率下降越迅速。这一结果进一步说明, 在花绒寄甲中, 一次交配不足以保证所有雌虫所产的卵均能孵化, 只有通过不断的交配才能使卵的孵化率保持在较高水平, 从而证实该虫的多次交配行为支持精子补充假说 (Ejaculate replenishment hypothesis) (Worthington *et al.*, 2016), 精子补充可能是花绒寄甲通过不断的交配而获得的最大生殖利益。

本试验结果明确了花绒寄甲的性成熟期和交配能力, 证实了多次交配能够提升该虫的生殖产量。这些研究结果为花绒寄甲繁殖行为的研究及室内规模化繁殖技术的改进提供理论依据。交配行为是利益和代价共存的行为 (Arnqvist and Nilsson, 2000; 刘兴平等, 2008), 尽管花绒寄甲在多次交配行为中获得了产卵量和孵化率方面的生殖利益, 但多次交配是否导致寿命的缩短还需进一步研究。同时, 天敌的室内规模化繁殖容易引起近交衰退现象, 花绒寄甲是否能够通过多次交配行为避免近亲衰退, 这一科学问题更值得我们深入研究。

参考文献(References)

- Arnqvist G, Nilsson T. The evolution of polyandry: Multiple mating and female fitness in insects [J]. *Animal Behaviour*, 2000, 60 (2): 145-164.
- De Lima CHM, Nbregra RL, Ferraz ML, *et al.* Mating duration and spermatophore transfer in *Cryptolaemus montrouzieri* (Coccinellidae) [J]. *Biologia*, 2022, 77 (1): 149-155.
- Drnevich JM, Papke R S, Rauser CL, *et al.* Material benefits from multiple mating in female mealworm beetles (*Tenebrio molitor* L) [J]. *Journal of Insect Behavior*, 2001, 14 (2): 215-230.
- Feng B, Liu TW, Lu MH, *et al.* Multiple mating of *Chilo suppressalis* (Lepidoptera: Pyralidae) and its effect on the oviposition of female moths [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2020, 63 (6): 759-768. [冯波, 刘天伟, 陆明红, 等. 二化螟的多次交配及其对雌蛾产卵量的影响 [J]. 昆虫学报, 2020, 63 (6): 759-768]
- House CM, Walling CA, Stamper CE, *et al.* Females benefit from multiple mating but not multiple mates in the burying beetle *Nicrophorus vespilloides* [J]. *Journal of Evolutionary Biology*, 2009, 22 (9): 1961-1966.
- Huang DZ, Yang ZQ, Bei B, *et al.* Geographical Distribution of *Dastarcus helophoroides* in China [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008, 44 (6): 171-175. [黄大庄, 杨忠岐, 贝蓓, 等. 花绒寄甲在中国的地理分布区 [J]. 林业科学, 2008, 44 (6): 171-175]
- Ide JY, Kondoh M. Male-female evolutionary game on mate-locating behaviour and evolution of mating systems in insects [J]. *Ecology Letters*, 2000, 3 (5): 433-440.
- Kumano N, Haraguchi D, Kohama T. Effect of irradiation on mating performance and mating ability in the West Indian sweetpotato weevil, *Euscepes postfasciatus* [J]. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 2008, 127 (3): 229-236.
- Kyogoku D, Daisuke S, Takashima R, *et al.* Female-limited responses in remating rate and mating duration in the experimental evolution of a beetle *Callosobruchus chinensis* [J]. *Journal of Evolutionary Biology*, 2023, 36 (1): 309-314.
- Lewis SM. Multiple mating and repeated copulations: Effects on male reproductive success in red flour beetles [J]. *Animal Behaviour*, 2004, 67 (4): 799-804.
- Li HL, Zheng XL, Wang XY, *et al.* Prophase of reproductive behavior and activity rhythm in adults of *Diaphorina citri* (Kuwayama) [J]. *Journal of Southern Agricultural*, 2019, 50 (9): 2009-2014. [黎海霖, 郑霞林, 王小云, 等. 柑橘木虱成虫繁殖行为前期及活动规律研究 [J]. 南方农业学报, 2019, 50 (9): 2009-2014]
- Li KZ, Feng SJ, Zhao YL, *et al.* Biological characteristics of adult *Aphelinus maculatus* (Hymenoptera: Aphelinidae) [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2021, 64 (2): 240-249. [李可琢, 冯淑军, 赵艳丽, 等. 褐带蚜小蜂成虫生物学特性 [J]. 昆虫学报, 2021, 64

(2): 240-249]

- Liang L, Zhang S, Han HH, *et al.* Effects of male age on its mating ability and female reproduction in *Bradysia odoriphaga* [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2019, 41 (3): 657-663. [梁玲, 张森, 韩昊霖, 等. 韭菜迟眼蕈蚊雄虫日龄对其交配能力和雌虫生殖力的影响 [J]. 环境昆虫学报, 2019, 41 (3): 657-663]
- Liu XP, He HM, Kuang XJ, *et al.* Factors influencing mating duration in the cabbage beetle, *Colaphellus bowringi* Baly (Coleoptera: Cerambycidae) [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2010, 53 (5): 549-554. [刘兴平, 何海敏, 匡先钜, 等. 影响大猿叶虫交配持续时间的因素 [J]. 昆虫学报, 2010, 53 (5): 549-554]
- Liu XP, Peng JH, He HM, *et al.* The effect of multiple mating on fitness in insects [J]. *Acta Agricultural Universitatis Jiangxiensis*, 2008, 30 (4): 592-600. [刘兴平, 彭接辉, 何海敏, 等. 多次交配昆虫适应性的影响 [J]. 江西农业大学学报, 2008, 30 (4): 592-600]
- María MC, Patricia V, Federico C, *et al.* Effect of age, body weight and multiple mating on *Copitarsia decolora* (Lepidoptera: Noctuidae) reproductive potential and longevity [J]. *Journal of Insect Behavior*, 2013, 26 (6): 860-872.
- Liu XP, He HM, Xue FS. The effect of mating frequency and mating pattern on female reproductive fitness in cabbage beetle, *Colaphellus bowringi* [J]. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 2013, 146 (3): 379-385.
- McNamara KB, Elgar MA, Jones TM. A longevity cost of re-mating but no benefits of polyandry in the almond moth, *Cadra cautella* [J]. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 2008, 62 (9): 1433-1440.
- Morais RM, Redaelli LR, Sant J. Age and multiple mating effects on reproductive success of *Grapholita molesta* (Busck) (Lepidoptera, Tortricidae) [J]. *Revista Brasileira de Entomologia*, 2012, 56 (3): 319-324.
- Nason SE, Kelly CD. Benefits of multiple mating in a sexually dimorphic polygynandrous insect [J]. *Animal Behaviour*, 2020, 164: 65-72.
- Orsetti DM, Rutowski RL. No material benefits, and a fertilization cost, for multiple mating by female leaf beetles [J]. *Animal Behaviour*, 2003, 66 (3): 477-484.
- Papach A, Beaurepaire A, Yañez O, *et al.* Multiple mating by both sexes in an invasive insect species, *Aethina tumida* (Coleoptera: Nitidulidae) [J]. *Insect Science*, 2022, 30 (2): 517-529.
- Radhakrishnan P, Perez-Staples D, Weldon CW, *et al.* Multiple mating and sperm depletion in male Queensland fruit flies: Effects on female remating behaviour [J]. *Animal Behaviour*, 2009, 78 (4): 839-846.
- Ridley M. Mating frequency and fecundity in insects [J]. *Biological Reviews*, 1988, 63 (4): 509-549.
- Sara L, Adam S. The evolution of animal nuptial gifts [J]. *Advances in the Study of Behavior*, 2012, 44: 53-97.
- Sara ML. Multiple mating and repeated copulations: Effects on male reproductive success in red flour beetles [J]. *Animal Behaviour*, 2003, 67 (4): 799-804.
- Shelly TE. Male lures and male mating competitiveness in a genetic sexing strain of the melon fly (Diptera: Tephritidae) [J]. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 2019, 22 (2): 393-397.
- Shi HN, Zhou JY, Chen YS, *et al.* A comparison of fitness-related traits in the Coleopteran parasitoid *Dastarcus helophoroides* (Coleoptera: Bothriideridae) reared on two factitious hosts [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2020, 113 (6): 2634-2640.
- Stephens PA, Houston AI, Harding KC, *et al.* Capital and income breeding: the role of food supply [J]. *Ecology*, 2014, 95 (4): 882-896.
- Tang H, Yang ZQ, Zhang YN, *et al.* Technical researches on distinguishing female and male alive adults of the main parasite of longhorn beetles, *Dastarcus helophoroides* (Coleoptera: Bethriideridae), without injuring [J]. *Acta Zootaxonomica Sinica*, 2007, 32 (3): 649-654. [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 YL, Yang ZQ, Wang XY, *et al.* Biocontrol of oak longhorn beetle, *Massicus raddei* by releasing parasitoid *Dastarcus helophoroides* (Coleoptera: Bothriideridae) adults and eggs [J]. *Scientia Silvae Sinica*, 2012, 48 (7): 186-191. [唐艳龙, 杨忠岐, 王小艺, 等. 释放花绒寄甲成虫和卵防治栗山天牛 [J]. 林业科学, 2012, 48 (7): 186-191]
- Vahed K. The function of nuptial feeding in insects: A review of empirical studies [J]. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 1998, 73 (1): 43-78.
- Wang D, Wang C, Singh N, *et al.* Effect of mating status and age on the male mate choice and mating competency in the common bed bug, *Cimex lectularius* (Hemiptera: Cimicidae) [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2016, 109 (3): 1333-1340.
- Wang Q, Shi GL. Mating frequency, duration, and circadian mating rhythm of New Zealand wheat bug *Nysius huttoni* White (Heteroptera: Lygaeidae) [J]. *New Zealand Entomologist*, 2004, 27 (1): 113-117.
- Wang ZH, Yu JG, Shen J, *et al.* Artificial rearing technology of *Dastarcus helophoroides* and application [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2018, 34 (2): 226-233. [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]
- Wei JR, Yang ZQ, Tang H, *et al.* Behavior of a cerambycid parasitoid beetle (*Dastarcus helophoroides*) [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008, 7: 50-55. [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, 7: 50-55]
- Wei JR, Yang ZQ, Ma JH, *et al.* Progress on the research of *Dastarcus helophoroides* [J]. *Forest Pests and Diseases*, 2007, 26 (3): 23-25.

- [魏建荣, 杨忠岐, 马建海, 等. 花绒寄甲研究进展 [J]. 中国森林病虫, 2007, 26 (3): 23-25]
- Worthington AM, Kelly CD. Direct costs and benefits of multiple mating: Are high female mating rates due to ejaculate replenishment [J]. *Behavioural Processes*, 2016, 124: 115-122.
- Xu D, Cong SB, Li WJ, *et al.* Effects of age and mating time on the courtship behavior and longevity of adult female *Pectinophora gossypiella* (Lepidoptera: Gelechiidae) [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2020, 57 (6): 1394-1401. [许冬, 丛胜波, 李文静, 等. 红铃虫日龄及交配经历对雌蛾求偶行为与寿命的影响 [J]. 应用昆虫学报, 2020, 57 (6): 1394-1401]
- Yan XW, Ji BZ, Zhou G. Evaluation of a artificial died of *Dastarcus helophoroides* (Coleoptera: Bothriideridae) larvae [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition)*, 2015, 39 (1): 39-43. [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]
- Yang ZQ, Wang XY, Zhang YN, *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. [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]
- Zheng YN, Wang J, Wang WT, *et al.* Parasitic Effect of *Dastarcus helophoroides* of *Monochamus alternatus* Biotype on *Monochamus saltuarius* [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2022, 38 (3): 587-594. [郑雅楠, 王珏, 王伟韬, 等. 花绒寄甲松褐天牛生物型对云杉花墨天牛的寄生效果 [J]. 中国生物防治学报, 2022, 38 (3): 587-594]
- Zou MM, Liu LL, Dong SJ, *et al.* Effects of multiple mating on the spermatophore formation and fecundity of *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae) [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2022, 65 (12): 1678-1686. [邹明民, 刘莉莉, 董诗杰, 等. 多次交配对小菜蛾精包形成与生殖力的影响 [J]. 昆虫学报, 2022, 65 (12): 1678-1686]