日光蜂对不同龄期棉蚜寄生适宜性和选择性研究*

贾玉洁** 杨 杰 周明园 李林芝

（苏州农业职业技术学院，苏州 215008）

摘 要 **【目的】** 棉蚜 *Aphis gossypii* 是一种重要的农业害虫，日光蜂 *Aphelinus mali* 作为蚜虫的关键天敌，在生物防治中应用广泛。为评估日光蜂对棉蚜的防治潜能，本研究分析了不同龄期棉蚜对其的寄生适应性，并比较了 2 龄与 4 龄棉蚜混合种群中，该蜂对不同龄期个体的选择差异。**【方法】** 在实验室条件下，采用小叶碟饲养法评估寄生于不同龄期棉蚜的日光蜂子代发育历期、羽化率、性比、寿命和后足胫节长度；采用观察法评估并记录日光蜂雌蜂在 2 龄和 4 龄混合棉蚜小叶碟中 30 min 的行为；采用解剖法评估雌蜂在混合龄期棉蚜小叶碟中 24 h 内的产卵和取食数量。**【结果】** 寄生于所有龄期棉蚜若蚜的日光蜂子代均能完成生长发育，随寄生时棉蚜龄期的增加，寄生率显著降低（P<0.001），发育历期和后足胫节长度均显著增加（P<0.001），子代雌蜂比例随棉蚜龄期的增加而增加，但影响不显著（P=0.081），日光蜂成虫寿命无差异（雌蜂：P=0.074；雄蜂 P=0.411）。选择性试验中，日光蜂寄生 2 龄棉蚜的数量显著多于 4 龄（P<0.001），但取食不同龄期蚜虫数量并无明显的差异（P=0.468）。**【结论】** 寄生低龄期棉蚜，日光蜂发育历期更短，羽化率更高；寄生高龄期棉蚜，日光蜂个体更大，雌蜂比例更高。相较 4 龄棉蚜，日光蜂偏好寄生 2 龄棉蚜。本研究明确了日光蜂在以棉蚜为寄主时的寄生和取食龄期的适宜性及选择偏好，为日光蜂的人工饲养提供了依据，有利于日光蜂在蚜虫生物防治中的应用。

关键词 日光蜂；棉蚜；寄主龄期；产卵；寄主取食

Preference of *Aphelinus mali* for different *Aphis gossypii* instars

JIA Yu-Jie** YANG Jie ZHOU Ming-Yuan LI Lin-Zhi

(Suzhou Polytechnic Institute of Agriculture, Suzhou 215008, China)

Abstract **[Aim]** To investigate the potential of using the wasp *Aphelinus mali* as a biological control for *Aphis gossypii*, an important agricultural pest, more specifically, the relative preference of *Aphelinus mali* for different *Aphis gossypii* instars. **[Methods]** The leaf disc rearing method was used to determine the developmental duration, emergence rate, sex ratio, longevity, and hind tibia length of *Aphelinus mali* offspring parasitizing different *Aphis gossypii* instars in a laboratory. The behavior of female *Aphelinus mali* was observed and recorded for 30 min on leaf discs with 2nd and 4th instar *Aphis gossypii*. Dissection was employed to evaluate the number of eggs laid, and aphids consumed, by female wasps within 24 h. **[Results]** Offspring of *Aphelinus mali* were able to complete their development by parasitizing all *Aphis gossypii* instars. However, parasitism of older *Aphis gossypii* instars was significantly less than that of younger instars (P<0.001), and both the developmental duration and hind tibia length of *Aphelinus mali* that parasitized older instars were significantly longer (P<0.001). The proportion of female offspring produced tended to increase with host instar, but this difference was not statistically significant (P=0.081). No significant difference was found in the adult longevity of *Aphelinus mali* (females: P=0.074; males: P=0.411). In choice tests, although female *Aphelinus mali* parasitized significantly more 2nd than 4th-instar aphids(P<0.001), no such preference was apparent with respect to predation (P=0.468). **[Conclusion]** Parasitizing younger

*资助项目 Supported projects：江苏省高等学校基础科学（自然科学）面上项目（21KJB210014，22KJB210016）；江苏省自然科学基金青年基金项目（BK20220256）；苏州农业职业技术学院博士提升计划科研启动基金（BS2106，BS202205）

**第一作者和通讯作者 First author and corresponding author：E-mail：286373895@qq.com

收稿日期 Received：2024-10-29；接受日期 Accepted：2025-12-01

aphid instars resulted in shorter developmental duration and higher emergence rates for *Aphelinus mali*, whereas parasitizing older instars produced larger wasps with a higher proportion of females. *Aphelinus mali* preferred to parasitize 2nd over 4th instar *Aphis gossypii*. These results clarify the oviposition and feeding preferences of *Aphelinus mali* for different instars of *Aphis gossypii*, providing useful information for the mass rearing of *Aphelinus mali* and facilitating the application of this species as a biological control for aphids.

Key words　*Aphelinus mali*; *Aphis gossypii*; host instar; oviposition; host feeding

内寄生蜂幼虫的生长发育完全依赖于寄主所提供的营养，因此寄主质量是决定寄生蜂能否成功繁衍的关键因素（Vieira *et al.*，2019）。在生物防治实践中，深入理解寄生蜂与寄主之间的相互作用，是优化防控策略的重要基础。依据选择性-适合度假说（Preference-performance hypothesis），雌蜂理论上应优先选择能够最大化子代适合度的优质寄主（Chesnais *et al.*，2015）。然而，在野外环境中，寄主防卫反应或共生微生物的存在常会增加寄生蜂的产卵风险与时间成本，可能迫使其选择并非最优的寄主（Monticelli *et al.*，2019；Frago and Zytynska，2023）。因此，不同龄期寄主在营养资源与防御能力上的差异，共同决定了其作为寄主的综合质量。系统评估寄生蜂对不同龄期寄主的选择偏好及不同龄期寄主对后代的适宜性，对提高寄生蜂的大规模繁育效率与田间释放效果具有关键指导意义（Rasool *et al.*，2022）。

棉蚜 *Aphis gossypii*，又名瓜蚜，是一种世界性分布的重大农业害虫，寄主范围广泛，目前已知能够危害 46 科超过 300 种植物。除直接刺吸植物汁液外，蚜虫还能传播植物病毒，对棉花、瓜类等作物生产带来严重经济损失（Hullé *et al.*，2020）。日光蜂 *Aphelinus mali* 是蚜小蜂科 Aphelinidae 的一种内寄生蜂，因其对苹果绵蚜 *Eriosoma lanigerum* 的良好控制效果而闻名（Bangels *et al.*，2021）。早期研究已明确，日光蜂可寄生各龄期苹果绵蚜，但更偏好 3 龄及以上若虫，并能依据寄主龄期调节后代性比，即在低龄期寄主中倾向于产雄性子代，而在高龄期寄主中则多产生雌性子代（Mueller *et al.*，1992；Asante and Danthanarayana，1993）。近 10 年来，相关研究进一步聚焦于遗传支系的比较。研究表明，中国的日光蜂存在山东和辽宁品系，两者在生物学特性、形态特征、基因及共生菌组成上存在显著分化，但未形成生殖隔离（Su *et al.*，2018，2023；Du *et al.*，2020），辽宁品系抗寒能力更强而山东品系在田间出现时间更早。此外，蜜露可作为日光蜂的食物来源，并在有水的情况下显著延长其寿命，提升其对苹果绵蚜的防治效果（Peñalver-Cruz *et al.*，2023）。然而，这些研究均集中于苹果绵蚜与日光蜂这一专化性系统，目前尚未见以其他蚜虫为寄主的系统性研究。此外，作为寄生蜂另一类致死寄主的重要行为，寄主取食在日光蜂中尚未得到充分研究。寄主取食是指寄生蜂直接取食寄主体液或组织的营养补充行为，对于卵育型（Synovigenic）寄生蜂的卵成熟具有关键作用（Jervis and Kidd，1986）。在蚜小蜂属中，多种类群如短翅蚜小蜂 *Aphelinus asychis* 和白足蚜小蜂 *Aphelinus albipodus* 已被证实可通过取食寄主血淋巴以获取营养（Jia and Liu，2018；赵艳丽等，2022）。尽管有研究提及日光蜂能够借助产卵器穿刺造成的伤口取食寄主血淋巴，然而其取食寄主的规律及其对蚜虫的影响等目前尚不明确（Peñalver- Cruz *et al.*，2023）。

本研究以棉蚜为寄主，系统评估不同龄期棉蚜对日光蜂影响。通过测定寄生于不同龄期棉蚜日光蜂子代的发育历期、羽化率、性比及后足胫节长度等关键参数，明确各龄期棉蚜对其的寄生适宜性；通过行为学观察，研究日光蜂对不同龄期棉蚜的寄生与取食偏好。根据上述结果，综合分析日光蜂的寄主选择策略。研究结果将为规模化繁育日光蜂，以及其在田间防治棉蚜提供数据支撑。

1　材料与方法

1.1　试验材料

1.1.1　供试寄主植物　黄瓜种子（品种“津耘

401”）购买于天津耕耘种业公司，为杂交一代油亮型、强雌型黄瓜品种。黄瓜种子种植在日光温室穴盘内，待黄瓜长出 2-3 片真叶后，移入小花盆（直径 8 cm），并放入人工气候箱（江南 RXZ-500）内待用，环境条件为（20±1）℃，相对湿度 60%±7%，光周期为 16 L：8 D。

1.1.2 供试虫源 试验用寄主蚜虫为棉蚜，于 2022 年 9-10 月采自河南省焦作市郊（35.140 6° N，113.215 8° E）瓜类植株上，移至人工气候箱（环境条件同 1.1.1 节）养虫笼（40 cm×40 cm×40 cm）内的黄瓜苗上饲养 5 代以上，用于扩繁日光蜂。该环境条件基于预实验设定，能有效维持棉蚜种群的稳定生长。

日光蜂种群来源于上述棉蚜种群中的僵蚜，在人工气候箱内（环境条件同 1.1.1 节）的棉蚜上饲养 5 代以上备用，具备一致的遗传背景、稳定的生物学特征以及良好的健康状况。

1.1.3 小叶碟的制作 寄生于不同龄期棉蚜的日光蜂饲养与棉蚜龄期选择性试验均在小叶碟中进行。小叶碟由浓度 1%的水琼脂和黄瓜叶片组成。制作方法如下：将水琼脂倒入直径 3.5 cm 的培养皿中，深度约为 3-4 mm，剪一片直径略小于 3.5 cm 的黄瓜叶圆片放入水琼脂完全冷却后的培养皿中。培养皿盖中央用电烙铁烫出直径约 1.5 cm 的圆孔，覆盖上略大于圆孔的 120 目尼龙纱网，并用热熔胶将纱网边缘固定在培养皿盖上（图 1）。在观察试验中直接使用未加工的培养皿盖，在持续时间较长的非观察性试验中，使用有孔的培养皿盖，避免小叶碟内湿度过大。所有试验中小叶碟每 2 d 更换一次。

1.1.4 供试棉蚜和日光蜂的获取 为获得不同龄期的若蚜，先将健康的 5-6 头成蚜放入一个小叶碟中，约 12 h 后将成蚜移出至新的小叶碟，该时间段内出生的若蚜留在原培养皿内，每天观察记录蜕皮情况，移除发育过快或过慢的个体，保持小叶碟内若蚜龄期的一致性，直至达到特定龄期。

为获取供试日光蜂雌蜂，首先收集黄瓜植株和花盆上的僵蚜，单头装入 0.2 mL 的 PCR 管中，定期观察获得刚羽化的蜂。同一时段新羽化的日光蜂雌雄蜂放入 5.0 mL 离心管内 12 h 进行交配，后将雌蜂分别取出放入 PCR 管中，即获得新羽化饥饿 12 h 的雌蜂。将已交配雌蜂转移至有充足棉蚜的小叶碟中，36 h 后取出，即获得 2 日龄有产卵经验且已交配的雌蜂。

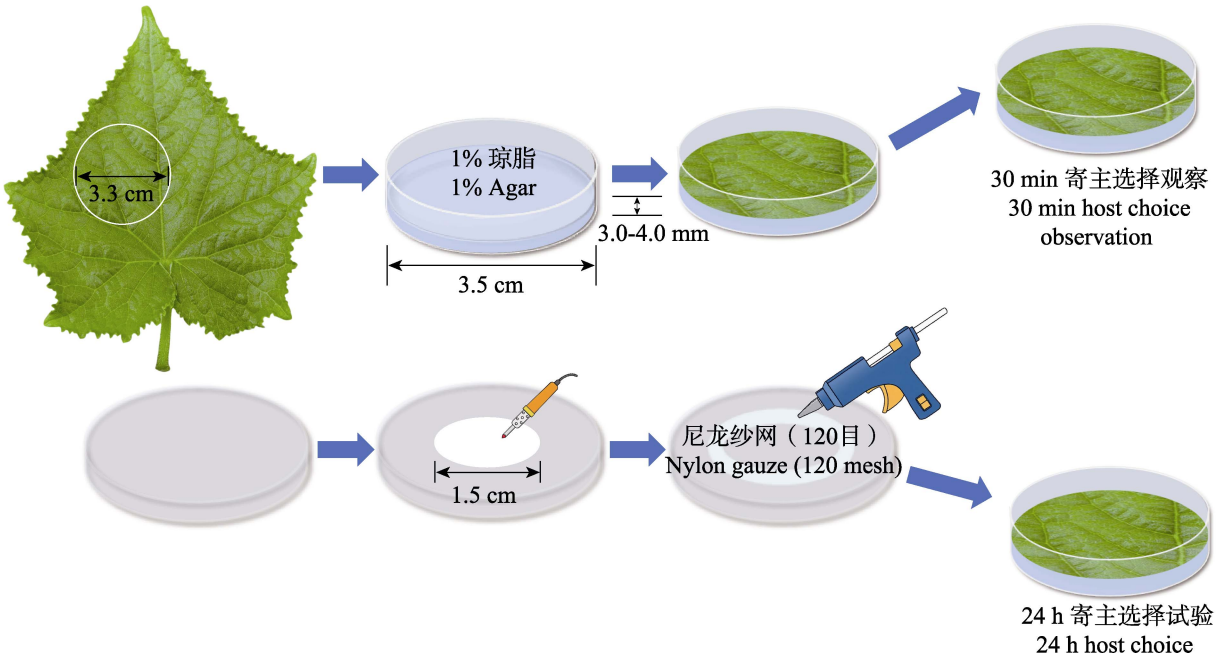


图 1 小叶碟的制作及使用

Fig. 1 Preparation and use of leaf discs

1.2　试验方法

1.2.1　棉蚜龄期对日光蜂生长发育的影响　在小叶碟中放入 20 头特定龄期的棉蚜若蚜，然后将 4 头有产卵经验已交配的 2 日龄日光蜂雌蜂放入小叶碟，6 h 后移除寄生蜂，将小叶碟内的棉蚜继续饲养直至其变为僵蚜，记录寄生率，再将每头僵蚜放入 PCR 管内直至羽化，记录羽化时间和羽化率。在解剖镜下鉴定日光蜂的雌雄，继续将日光蜂放在 PCR 管中，记录饥饿状态下的存活时间。本试验中，使用后足胫节长度作为衡量日光蜂大小的指标（Rohner *et al.*，2018），待其死亡后测定后足胫节长度，分别对雌蜂和雄蜂进行分析。试验设置 4 个处理，分别对应 4 个棉蚜若蚜龄期，每个处理均包含 10 次独立的生物学重复。

1.2.2　寄主龄期选择试验　在小叶碟中放入 10 头 2 龄若蚜和 10 头 4 龄若蚜，待蚜虫稳定后放入 1 头已交配饥饿 12 h 的雌蜂，记录雌蜂触角首次触碰第 1 头棉蚜后 30 min 内的行为。蚜虫的防卫反应包括触角摆动、身体摇动和逃离原取食位置等。雌蜂的行为包括触角接触、产卵器穿刺、取食、爬行、休息和清理体表等，记录每项活动的顺序和持续的时间。待日光蜂离开蚜虫后挑取被产卵器穿刺过的蚜虫，解剖观察其是否被产卵。共选取 20 头雌蜂进行观察。

取 1 头已交配饥饿 12 h 的雌蜂放入有 10 头 2 龄若蚜和 10 头 4 龄若蚜的小叶碟中，用封口膜封住小叶碟后放入气候箱中，24 h 后解剖小叶碟内所有棉蚜以确定期间雌蜂取食和产卵的数量。该试验所用到的雌蜂与 30 min 雌蜂行为观察试验不重复，共选取 20 头雌蜂进行处理。

1.2.3　数据分析　使用单因素方差分析（One-way ANOVA）探究棉蚜龄期对日光蜂发育历期、寿命和后足胫节长度产生的影响，使用 Tukey 多重比较法检验组间的差异；雌雄蜂发育历期和寿命的差异使用独立样本 *t* 检验分析。棉蚜龄期对日光蜂寄生率、羽化率和子代性比的影响均使用二项分布和 Logit 连接函数的广义线性模型（Generalized linear model）分析，使用 LSD 方法分析组间差异。使用独立样本 *t* 检验分析寄主取食和产卵行为的产卵器穿刺时间的差异，使用 Mann-Whitney *U* 检验分析 30 min 内寄生蜂接触 2 龄和 4 龄棉蚜各类行为次数的差异，日光蜂对不同龄期的棉蚜寄生率和寄主取食率差异用二项分布的广义线性模型分析。所有的数据分析均在 SPSS 22.0 软件中完成。

2　结果与分析

2.1　不同棉蚜龄期对日光蜂的寄生适宜性

日光蜂寄生所有龄期的棉蚜若蚜均能完成生长发育，棉蚜龄期对日光蜂寄生率有极显著影响（Wald χ^2=49.688，*df*=3，*P*<0.001），寄生率随寄主棉蚜龄期的增加而降低。子代雄蜂的比例随寄主棉蚜龄期的增加而降低，但性比受龄期影响不显著（Wald χ^2=6.732，*df*=3，*P*=0.081）。寄主龄期显著影响子代日光蜂羽化率（Wald χ^2=16.146，*df*=3，*P*=0.001），其中，寄生于 2 龄的日光蜂羽化率最高（表 1）。

测量与分析日光蜂后足胫节长度的结果表明，寄生时的棉蚜龄期对雌蜂和雄蜂的个体大小均有极显著影响（雌蜂：$F_{3,127}$=9.927，*P*<0.001；雄蜂：$F_{3,103}$=12.117，*P*<0.001），日光蜂的个体随着寄生时的棉蚜龄期增大而增大（图 2：A，B）。寄生 1 龄棉蚜的雌雄蜂均显著小于其他龄期，寄生 2-4 龄棉蚜的雌蜂个体大小无显著差异（图 2：A），寄生 3 龄和 4 龄棉蚜的雄蜂显著大于寄生 2 龄棉蚜的个体（图 2：B）。

日光蜂羽化前的发育历期受寄生时寄主龄期的影响（雌蜂：$F_{3,127}$=19.493，*P*<0.001；雄蜂：$F_{3,103}$=11.409，*P*<0.001），雌蜂[（21.59±0.13）d]的发育历期显著长于雄蜂[（21.05±0.14）d]（*T*=2.716，*df*=236，*P*=0.007）。寄生 1 龄棉蚜的雌蜂和雄蜂发育历期显著低于其他组，寄生 2-4 龄棉蚜的雄蜂发育历期差异不显著，寄生 3 龄和 4 龄棉蚜的雌蜂发育历期显著高于寄生 2 龄棉蚜的个体（图 3：A，B）。寄生龄期对日光蜂成虫寿命无显著影响（雌蜂：$F_{3,127}$=2.362，*P*=0.074；雄蜂：$F_{3,103}$=0.972，*P*=0.411），雌蜂和雄蜂寿命也无显著差异（*T*=0.336，*df*=236，*P*=0.737）。

表 1 日光蜂寄生不同龄期棉蚜的寄生率、羽化率和性比

Table 1 Parasitism rate, emergence rate and sex ratio of *Aphelinus mali* parasitizing the cotton aphids at different instars

龄期 Instars	寄生率（%） Parasitism rate (%)	羽化率（%） Emergence rate (%)	性比（雄蜂/总数）（%） Sex ratio (male/total) (%)
N1	48.50±3.54 a	91.75±2.81 ab	51.68±5.33 a
N2	40.00±3.47 a	95.00±2.45 ab	47.37±5.77 ab
N3	29.50±3.23 b	83.05±4.93 bc	36.73±6.96 ab
N4	19.00±2.78 c	65.79±7.80 c	28.00±9.17 b

N1：1 龄若蚜；N2：2 龄若蚜；N3：3 龄若蚜；N4：4 龄若蚜。表中数值为平均值±标准误，同一列数据后不同字母表示显著差异（$P < 0.05$，LSD 多重比较法检验）。

N1: 1st instar aphid nymphs; N2: 2nd instar aphid nymphs; N3: 3rd instar aphid nymphs; N4: 4th instar aphid nymphs. Data in the table are mean±SE, and followed by the different letters within the same column indicate significant difference ($P < 0.05$, LSD multiple comparison test).

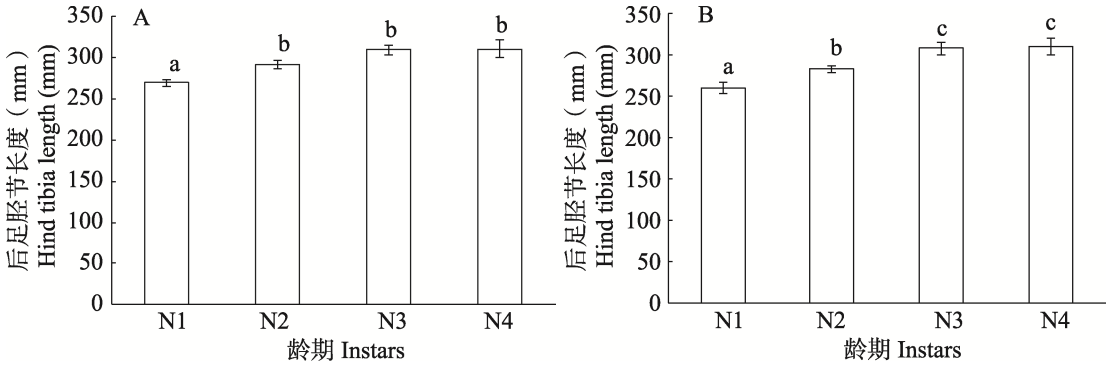


图 2 寄生于不同龄期棉蚜的日光蜂雌蜂（A）和雄蜂（B）的后足胫节长度

Fig. 2 Hind tibia length of females (A) and males (B) of *Aphelinus mali* parasitizing the cotton aphids at different instars

N1：1 龄若蚜；N2：2 龄若蚜；N3：3 龄若蚜；N4：4 龄若蚜。图中数值为平均值±标准误，柱上不同字母表示差异显著（$P < 0.05$, Tukey's 多重比较检验）。图 3 同。

N1: 1st instar aphid nymphs; N2: 2nd instar aphid nymphs; N3: 3rd instar aphid nymphs; N4: 4th instar aphid nymphs. Data in the figure are mean±SE. Different letters above bars mean significant difference ($P < 0.05$, Tukey's multiple range test). The same for Fig. 3.

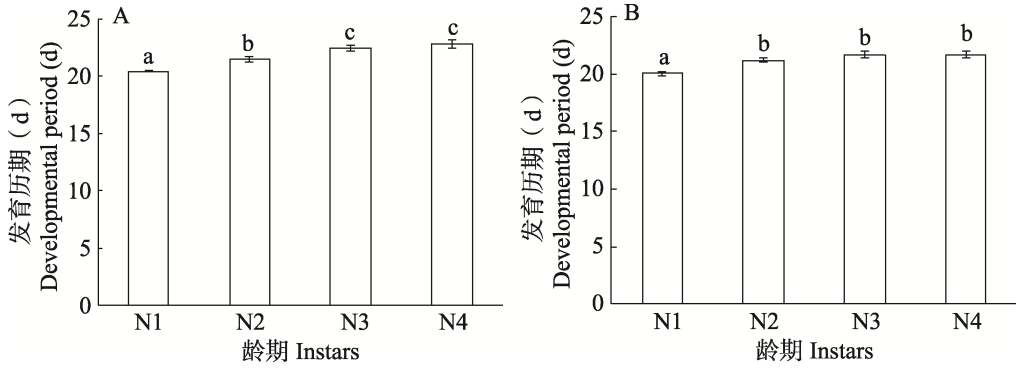


图 3 寄生于不同龄期棉蚜的日光蜂雌蜂（A）和雄蜂（B）的发育历期

Fig. 3 Developmental period of females (A) and males (B) of *Aphelinus mali* parasitizing the cotton aphids at different instars

2.2　日光蜂的寄主取食行为

饥饿状态下的日光蜂雌蜂除了取食蜜露和水外，也会直接取食蚜虫的血淋巴。雌蜂先将产卵器刺入蚜虫体内，穿刺持续时间为（503.29±13.10）s，高于产卵时的穿刺时间（76.91±2.32）s，两者间的差异极显著（T=47.719，df=125，P<0.001）。雌蜂取食持续时间为（811.46±64.74）s。在多数情况下，日光蜂雌蜂于产卵器穿刺结束后能够成功寻找到穿刺孔并进行取食，但仍有 8.3%的日光蜂完成穿刺过程最终未取食。行为观察显示，日光蜂取食前的产卵器穿刺对棉蚜具有致死作用，无论取食是否发生，在穿刺过程中棉蚜已全部死亡。

2.3　日光蜂的寄主选择行为

新羽化且饥饿 12 h 的日光蜂，在置于装有 2 龄和 4 龄棉蚜小叶碟后，首先尝试取食其遇到的第 1 头棉蚜。然而，由于 4 龄若蚜具有较强的防卫反应，致使日光蜂对 4 龄棉蚜触角触碰和产卵器穿刺次数较多，而实际寄生和取食数量较少（表 2）。低龄期棉蚜虽也具备防卫反应，但由于个体较小，多数情况下难以成功干扰日光蜂的穿刺过程。除与寄主接触的行为之外，雌蜂还会耗费一定时间用于爬行[（111.35±17.49）s]、休息[（409.6±88.16）s]以及整理体表[（78.25±11.81）s]等活动。

表 2　日光蜂对不同龄期棉蚜的选择行为

Table 2　Host choice behavior of *Apheminus mali* towards different instars of the cotton aphids

寄生蜂行为次数 Number of parasitoid behavior	龄期 Instars	
	2 龄 2nd instar	4 龄 4th instar
触角触碰 Antenna touch	1.85±0.20 a	4.25±0.30 b
寄主防卫 Host defense	1.35±0.26 a	4.10±0.34 b
产卵器穿刺 Ovipositor sting	1.75±0.28 a	3.70±0.36 b
产卵 Oviposition	0.75±0.16 a	0.10±0.07 b
寄主取食 Host feeding	0.70±0.10 a	0.20±0.09 b

表中数值为平均值±标准误，同行数据后不同字母表示显著差异（P < 0.05，Mann-Whitney U 检验）。

Data in the table are mean±SE, and followed by the different letters in the same row indicate significant difference (P < 0.05, Mann-Whitney U-test).

日光蜂对 2 龄和 4 龄若蚜的寄生选择有显著差异（Wald χ^2=157.819，df=1，P<0.001），2 龄若蚜的寄生率显著高于 4 龄。但雌蜂在取食寄主时并无明显的龄期偏好（Wald χ^2=0.527，df=1，P=0.468），对 2 龄和 4 龄棉蚜的寄主取食率较为接近（图 4）。

3　结论与讨论

棉蚜是日光蜂的适宜寄主，尽管寄生在各龄期若蚜的日光蜂均可羽化，但其在发育历期、个体大小、寄生率和羽化率等方面存在显著差异，这表明棉蚜的龄期直接影响日光蜂寄生的适宜性。通常认为，较大或较高龄期的寄主能够为寄生蜂提供更多的营养资源，而低龄期寄主因其体内资源有限，寄生适宜性相对较低（Ueno，2015）。日光蜂是一种容性寄生蜂（Koinobiont），其寄主蚜虫在被寄生后仍能够继续生长，直至寄生蜂临近化蛹时寄主才僵化死亡（Kök *et al.*，2023）。因此，寄主蚜虫僵化龄期或个体大小决定了其可为寄生蜂提供的总营养。寄生蜂的个体大小通常与僵蚜大小正相关，而后者则受被寄生时龄期的制约（Vieira *et al.*，2019；Hall *et al.*，2021）。例如，被茶足柄瘤蚜茧蜂 *Lysiphlebus testaceipes* 寄生的麦二叉蚜 *Schizaphis graminum*，其僵蚜大小随龄期递增，但 1 龄与 2 龄若蚜间差异不显著（Vieira *et al.*，2019）。本试验同样观察到日光蜂个体大小随棉蚜龄期递增，寄生于 3 龄和 4 龄棉蚜的日光蜂大小无显著差异。

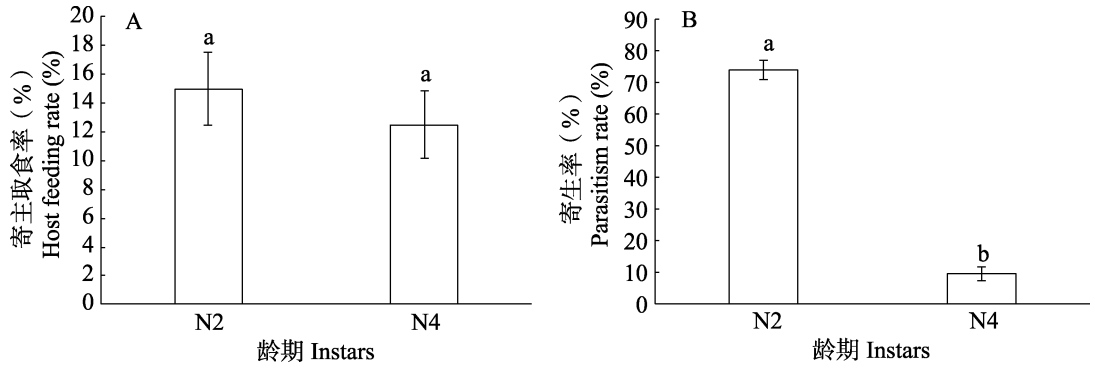


图 4　日光蜂对混合龄期棉蚜种群中 2 龄和 4 龄棉蚜的寄主取食率（A）和寄生率（B）

Fig. 4　Host feeding rate (A) and parasitism rate (B) of *Aphelinus mali* on the 2nd and 4th instar of cotton aphids in a mixed instar population

N2：2 龄若蚜；N4：4 龄若蚜。图中数值均为平均值±标准误，柱上不同字母表示差异显著（$P < 0.05$，广义线性模型）。

N2: 2nd instar aphid nymphs; N4: 4th instar aphid nymphs. Data in the figure are mean±SE. Different letters above bars mean significant difference ($P < 0.05$, generalized linear model).

一般而言，寄生蜂的个体大小与其生存和繁衍能力表现为正相关。体型较大的雌蜂通常寿命更长、繁殖力更高；而体型较大的雄蜂则在交配中具有更大的优势，表现在其产生的子代数量更多，且子代中雌蜂的比例也更高（Abram *et al.*，2016；Wang and Keller，2020；Ou *et al.*，2023）。此外，较大的雌蜂在田间表现出更强的扩散能力，其预期的终生产卵量也更高（Segoli and Rosenheim，2015；Quicray *et al.*，2023）。寄生高龄期棉蚜的日光蜂个体较大，应具有更强的繁殖力和更好的防效，但仍需进一步验证。日光蜂幼虫需完全吸收寄主体内营养后方可化蛹，若寄主体型较小，子代发育历期会缩短，这可能是寄生蜂在营养相对缺乏的环境下为优先保障存活而采取的生存策略（Martínez-Ramírez *et al.*，2016；吴晓霜等，2018）。然而，较大寄主内的寄生蜂发育历期延长，可能增加寄生蜂的死亡率（Harvey and Malcicka，2016）。本研究中，寄生高龄期棉蚜的日光蜂死亡率较高，且随棉蚜龄期的增加而上升，可能与高龄期的棉蚜免疫反应增强有关（Kohyama *et al.*，2017; Vorburger，2022）。较高的寄生率、羽化率和较短的发育历期是评估寄生蜂大规模饲养潜力的重要指标（Cherif *et al.*，2021）。本研究表明，以低龄若蚜为寄主时，日光蜂表现出更优的发育效率与种群增长潜力，因此在规模化繁育中，优化寄主龄期结构有助于提升种群扩增速率（Li *et al.*，2019）。

寄生蜂的性比由雌蜂产卵时控制卵是否受精来决定，受精卵发育为雌蜂，未受精卵发育为雄蜂，多数寄生蜂中，子代雄蜂的比例随寄主适宜性的降低而升高，有利于寄生蜂获得最大化的繁殖收益（Ueno，2015）。在本试验中，日光蜂子代雌性比随寄主龄期的增大而增大；其中，被寄生的 4 龄棉蚜羽化出更多的雌蜂。该结果同莴苣蚜 *Nasonovia ribisnigri* 与短矩蚜小蜂 *Aphelinus abdominalis* 的研究结论相符，寄生于 4 龄若蚜或无翅成蚜的子代雌性比高于低龄期若蚜（Shrestha *et al.*，2015）。

在日光蜂产卵偏好方面，日光蜂偏好寄生低龄期棉蚜，该结论与其他蚜小蜂属的寄生蜂类似，如短距蚜小蜂和短翅蚜小蜂等都偏好在较低龄期的寄主体内产卵（Ameri *et al.*，2014；Shrestha *et al.*，2015；Jia and Liu，2018）。低龄期蚜虫外部防卫能力较弱可能为主要原因（Raymond *et al.*，2016；Chen *et al.*，2024）。尽管 2 龄和 4 龄棉蚜均对寄生蜂有明显的防卫反应，但 2 龄棉蚜个体较小，自身的外部防卫反应无法有效干扰日光蜂的产卵，因此产生寄生蜂产卵率更高的结果。

在取食行为方面，饥饿状态的日光蜂雌蜂会尝试取食其遇到的第一头蚜虫，该行为与其他寄生蜂在生存压力下的应急策略相符，如饥饿的亮腹釉小蜂 *Tamarixia radiata* 在遇到寄主时，取食

第一头寄主的概率显著高于未饥饿处理的个体（Tena *et al.*，2017）。寄主取食前，雌蜂的产卵器穿刺时间较产卵前更长，因而更易受寄主防卫行为的干扰（Sugiura，2020；Chen *et al.*，2024）。本试验中，雌蜂对防卫能力更强的 4 龄棉蚜有更多触角与产卵器的触碰，正是源于其产卵和取食被多次打断所致。这与茶足柄瘤蚜茧蜂在选择性试验中更多穿刺和寄生 4 龄麦二叉蚜的结果一致（Vieira *et al.*，2019）。尽管 24 h 内取食蚜虫数量在 2 龄和 4 龄间无显著差异，但综合产卵数据，日光蜂更多在 2 龄棉蚜体内产卵而非取食。这种选择可获得更多的后代数量，与多种具有寄主取食行为的寄生蜂繁殖策略一致（Jia and Liu，2018；Damien *et al.*，2019）。

综上所述，本研究系统揭示了棉蚜龄期对日光蜂寄生适宜性和寄主选择偏好的影响。明确了寄生低龄期寄主可使日光蜂发育历期更短，羽化率更高，这为人工饲养条件下日光蜂种群的快速扩繁提供了依据；而寄生高龄期寄主时子代个体更大，雌蜂比例更高，这对于提升田间防治效果更有价值。该研究填补了日光蜂和棉蚜这一害虫天敌系统的基础生物学数据，为利用日光蜂防治棉蚜奠定了理论基础。未来应重点评估该日光蜂种群的田间实际防治效果，并深入探索该种群与其常见寄主苹果绵蚜的互作关系。

参考文献 (References)

Abram PK, Parent JP, Brodeur J, Boivin G, 2016. Size-induced phenotypic reaction norms in a parasitoid wasp: An examination of life-history and behavioral traits. *Biological Journal of the Linnean Society*, 117(3): 620–632.

Ameri M, Rasekh A, Michaud JP, 2014. Body size effects host defensive behavior and progeny fitness in a parasitoid wasp, *Lysiphlebus fabarum*. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 150(3): 259–268.

Asante SK, Danthanarayana W, 1993. Sex ratios in natural populations of *Aphelinus mali* (Hym.: Aphelinidae) in relation to host size and host density. *Entomophaga*, 38(3): 391–403.

Bangels E, Alhmedi A, Akkermans W, Bylemans D, Belien T, 2021. Towards a knowledge-based decision support system for integrated control of woolly apple aphid, *Eriosoma lanigerum*, with maximal biological suppression by the parasitoid *Aphelinus mali*. *Insects*, 12(6): 479.

Chen C, He XZ, Zhou P, Wang Q, 2024. Parasitoid-host interaction behaviors in relation to host stages in the *Tamarixia triozae* (Hymenoptera: Eulophidae)-*Bactericera cockerell*i (Hemiptera: Triozidae) system. *Journal of Insect Science*, 24(1): 15.

Cherif A, Mansour R, Grissa-Lebdi K, 2021. The egg parasitoids Trichogramma: From laboratory mass rearing to biological control of lepidopteran pests. *Biocontrol Science and Technology*, 31(7): 661–693.

Chesnais Q, Ameline A, Doury G, Le Roux V, Couty A, 2015. Aphid parasitoid mothers don't always know best through the whole host selection process. *PLoS ONE*, 10(8): e0135661.

Damien M, Barascou L, Ridel A, Van Baaren J, Le Lann C, 2019. Food or host: Do physiological state and flower type affect foraging decisions of parasitoids? *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 73(11): 156.

Du M, Yu JN, Zhou YJ, Wang XY, Ma TT, Tan XM, Wan FH, Zhou HX, 2020. Differentiation of symbiotic bacteria is a new evidence for two genetic clades of *Aphelinus mali* (Hymenoptera: Aphelinidae) in China. *Oriental Insects*, 54(4): 447–464.

Frago E, Zytynska S, 2023. Impact of herbivore symbionts on parasitoid foraging behavior. *Current Opinion in Insect Science*, 57: 101027.

Hall CR, Rowe RC, Mikhael M, Read E, Hartley SE, Johnson SN, 2021. Plant silicon application alters leaf alkaloid concentrations and impacts parasitoids more adversely than their aphid hosts. *Oecologia*, 196(1): 145–154.

Harvey JA, Malcicka M, 2016. Nutritional integration between insect hosts and koinobiont parasitoids in an evolutionary framework. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 159(2): 181–188.

Hullé M, Chaubet B, Turpeau E, Simon JC, 2020. Encyclop'aphid: A website on aphids and their natural enemies. *Entomologia Generalis*, 40(1): 97–101.

Jervis MA, Kidd NAC, 1986. Host-feeding strategies in hymenopteran parasitoids. *Biological Reviews*, 61(4): 395–434.

Jia YJ, Liu TX, 2018. Dynamic host-feeding and oviposition behavior of an aphid parasitoid *Aphelinus asychis*. *BioControl*, 63(4): 533–542.

Kohyama TI, Onizawa K, Kimura MT, 2017. Growth rate adjustment of two *Drosophila* parasitoids in response to the developmental stage of hosts. *Ecological Entomology*, 42(6): 785–792.

Kök Ş, Tomanović Ž, Karabacak E, Kasap İ, 2023. Do primary and secondary host plants affect aphid-parasitoid interactions in fruit orchards? *Bulletin of Entomological Research*, 113(3): 326–334.

Li TH, Che PF, Yang XB, Song LW, Zhang CR, Benelli G, Desneux N, Zang LS, 2019. Optimized pupal age of *Tenebrio molitor* L. (Coleoptera: Tenebrionidae) enhanced mass rearing efficiency of

Chouioia cunea Yang (Hymenoptera: Eulophidae). *Scientific Reports*, 9(1): 3229.

Martínez-Ramírez A, Cicero L, Guillén L, Sivinski J, Aluja M, 2016. Nutrient uptake and allocation capacity during immature development determine reproductive capacity in *Diachasmimorpha longicaudata* (Hymenoptera: Braconidae: Opiinae), a parasitoid of tephritid flies. *Biological Control*, 100: 37–45.

Monticelli LS, Nguyen LTH, Amiens-Desneux E, Luo C, Lavoir AV, Gatti JL, Desneux N, 2019. The preference-performance relationship as a means of classifying parasitoids according to their specialization degree. *Evolutionary Applications*, 12(8): 1626–1640.

Mueller TF, Blommers LHM, Mols PJM, 1992. Woolly apple aphid (*Eriosoma lanigerum* Hausm., Hom., Aphidae) parasitism by *Aphelinus mali* Hal. (Hym., Aphelinidae) in relation to host stage and host colony size, shape and location. *Journal of Applied Entomology*, 114(1/5): 143–154.

Ou H, Wang X, Yu J, Huang Y, Yu X, Wei L, Yang M, 2023. Asymmetric sex body size and reproductive fitness relation and offspring population parameters of *Habrobracon hebetor* (Say) (Hymenoptera: Braconidae). *Journal of Stored Products Research*, 102: 102123.

Peñalver-Cruz A, Satour P, Jaloux B, Lavandero B, 2023. Honeydew is a food source and a contact kairomone for *Aphelinus mali*. *Insects*, 14(5): 426.

Quicray M, Wilhelm L, Enriquez T, He SL, Scheifler M, Visser B, 2023. The Drosophila-parasitizing wasp *Leptopilina heterotoma*: A comprehensive model system in ecology and evolution. *Ecology and Evolution*, 13(1): e9625.

Rasool B, Mehmood Z, Ahmad MF, Iqbal J, Younis T, Munir R, 2022. Host instars preference, density-dependent parasitism and behavioral perspective of parasitoids (*Aphidius colemani*, *Aphidius matricariae* and *Aphelinus abdominalis*) in *Aphis glycines* and *Aphis gossypii*. *Revista Brasileira de Entomologia*, 66: e20210045.

Raymond L, Plantegenest M, Gagic V, Navasse Y, Lavandero B, 2016. Aphid parasitoid generalism: Development, assessment, and implications for biocontrol. *Journal of Pest Science*, 89(1): 7–20.

Rohner PT, Teder T, Esperk T, L ü pold S, Blanckenhorn WU, 2018. The evolution of male-biased sexual size dimorphism is associated with increased body size plasticity in males. *Functional Ecology*, 32(2): 581–591.

Segoli M, Rosenheim JA, 2015. The effect of body size on oviposition success of a minute parasitoid in nature. *Ecological Entomology*, 40(4): 483–485.

Shrestha G, Skovgård H, Steenberg T, Enkegaard A, 2015. Preference and life history traits of *Aphelinus abdominalis* (Hymenoptera: Aphelinidae) when offered different development stages of the lettuce aphid *Nasonovia ribisnigri* (Hemiptera: Aphididae). *BioControl*, 60(4): 463–471.

Su M, Tan XM, Yang QM, Wan FH, Zhou HX, 2018. Temperature adaptability of two clades of *Aphelinus mali* (Hymenoptera: Aphelinidae) in China. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 28(1): 16.

Su M, Du LJ, Ali MY, Yu JN, Chi MY, Teng ZW, Fan YJ, Tan XM, Zhou HX, 2023. Differences in morphology, mitochondrial genomes, and reproductive compatibility between two clades of parasitic wasps *Aphelinus mali* (Hymenoptera: Aphelinidae) in China. *PLoS ONE*, 18(2): e0279663.

Sugiura S, 2020. Predators as drivers of insect defenses. *Entomological Science*, 23(3): 316–337.

Tena A, Stouthamer R, Hoddle MS, 2017. Effect of host deprivation on the foraging behavior of the Asian citrus psyllid parasitoid *Tamarixia radiata*: Observations from the laboratory and the field. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 163(1): 51–59.

Ueno T, 2015. Effects of host size and laboratory rearing on offspring development and sex ratio in the solitary parasitoid *Agrothereutes lanceolatus* (Hymenoptera: Ichneumonidae). *European Journal of Entomology*, 112(2): 281–287.

Vieira LJP, Franco GM, Sampaio MV, 2019. Host preference and fitness of *Lysiphlebus testaceipes* (Hymenoptera: Braconidae) in different instars of the aphid *Schizaphis graminum*. *Neotropical Entomology*, 48(3): 391–398.

Vorburger C, 2022. Defensive symbionts and the evolution of parasitoid host specialization. *Annual Review of Entomology*, 67: 329–346.

Wang T, Keller MA, 2020. Larger is better in the parasitoid *Eretmocerus warrae* (Hymenoptera: Aphelinidae). *Insects*, 11(1): 39.

Wu XS, Zhang FP, Fu YG, Niu LM, Chen JY, Wu QQ, Zhu JH, 2018. Host instar preference of *Coccophagus japonicus* Compere. *Journal of Environmental Entomology*, 40(6): 1375–1379. [吴晓霜, 张方平, 符悦冠, 牛黎明, 陈俊谕, 吴琦琦, 朱俊洪, 2018. 日本食蚧蚜小蜂对寄主的龄期选择性. 环境昆虫学报, 40(6): 1375–1379.]

Zhao YL, Han L, Tian XF, Liu QX, Sa CL, Duan LQ, 2022. Functional response and searching effect of *Aphelinus albipodus* on *Myzus persicae*. *Forest Pest and Disease*, 41(1): 27–32. [赵艳丽, 韩丽, 田秀峰, 刘青娴, 萨出拉, 段立清, 2022. 白足蚜小蜂对桃蚜的取食和寄生功能反应及搜寻效应. 中国森林病虫, 41(1): 27–32.]