食蚜瘿蚊滞育对其子代捕食豌豆修尾蚜能力的影响*

朱笑笑[1**] 秦嘉雯[1] 王姿烨[1] 于晓飞[2] 杨茂发[2] 张 峰[1***] 吴慧子[3***]

（1. 南京农业大学植物保护学院，昆虫分类与水生昆虫学实验室，南京 210095；2. 贵州大学烟草学院，贵州省烟草提质增效全省重点实验室，贵阳 550025；3. 贵州省烟草公司遵义市公司，遵义 564200）

摘 要 **【目的】** 为评估食蚜瘿蚊 *Aphidoletes aphidimyza* 滞育对其子代捕食豌豆修尾蚜 *Megoura crassicauda* 能力的影响。**【方法】** 本研究在室内条件下，系统研究了食蚜瘿蚊滞育解除后与非滞育处理后的子代 3 龄幼虫，在饥饿 12 h 后对不同龄期豌豆修尾蚜的捕食功能反应、搜寻效应、种内干扰及捕食偏好性。**【结果】** 滞育解除后的食蚜瘿蚊子代 3 龄幼虫日捕食量略高于非滞育组，但差异不显著（P = 0.730）。两处理组对豌豆修尾蚜的捕食功能反应均符合 HollingⅡ型模型，且均表现对豌豆修尾蚜 1-2 龄若蚜捕食能力最强。随着豌豆修尾蚜密度的增加，食蚜瘿蚊子代 3 龄幼虫的搜寻效应降低，尽管滞育解除组的搜寻效应略高于非滞育组，但差异同样未达显著水平（1-2 龄：P = 0.577；3 龄：P = 0.665；4 龄：P = 0.678）。此外，两处理组食蚜瘿蚊的单头捕食量均随其自身密度增加而下降，而分摊竞争强度则均随其自身密度的增加而上升。滞育并未改变食蚜瘿蚊对豌豆修尾蚜的捕食偏好性，两者均偏好捕食 1-2 龄若蚜，选择系数 Q 分别为 1.35 和 1.39。**【结论】** 滞育在一定程度上增强了食蚜瘿蚊对豌豆修尾蚜的捕食能力，表明解除滞育后的食蚜瘿蚊在防治豌豆修尾蚜方面具有较高的应用潜力。本研究不仅为食蚜瘿蚊在生物防治中的实际应用提供了重要理论依据，同时也为深入研究食蚜瘿蚊的滞育机制奠定了研究基础。

关键词 滞育解除；食蚜瘿蚊；豌豆修尾蚜；捕食能力；生物防治

The effect of diapause on the ability of *Aphidoletes aphidimyza* larvae to prey on *Megoura japonica*

ZHU Xiao-Xiao[1**] QIN Jia-Wen[1] WANG Zi-Ye[1] YU Xiao-Fei[2]
YANG Mao-Fa[2] ZHANG Feng[1***] WU Hui-Zi[3***]

(1. Laboratory of Insect Taxonomy & Aquatic Insects, College of Plant Protection, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. Guizhou Provincial Key Laboratory for Tobacco Quality Improvement and Efficiency Enhancement, College of Tobacco Science, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 3. Zunyi Branch of Guizhou Tobacco Company, Zunyi 564200, China)

Abstract **[Aim]** To evaluate the effect of diapause in *Aphidoletes aphidimyza* on the ability of larvae to prey on *Megoura crassicauda*. **[Methods]** Third instar larvae were randomly assigned to either a diapause termination, or non-diapause treatment, groups, after which their functional response, search efficiency, intraspecific interference, and predation preferences were systematically investigated under laboratory conditions. Larvae were starved for 12 h before being exposed to different instars of *M. crassicauda*. **[Results]** The daily predation rate of 3rd instar larvae after diapause termination was slightly higher than that of the non-diapause group, but this difference was not significant (P = 0.730). The predation functional response of both treatment groups on *M. crassicauda* fitted the Holling TypeⅡmodel, and both exhibited the strongest predation on 1st and 2nd instar nymphs of *M. crassicauda*. As the density of *M. crassicauda* increased, the search efficiency of

*资助项目 Supported project：食蚜瘿蚊防治农林植物主要蚜虫的关键技术集成应用研究（2022XM11）

**第一作者 First author，E-mail：zxx2741142091@163.com

***共同通讯作者 Co-corresponding authors，E-mail：fzhang@njau.edu.cn；wu_huizi9596@163.com

收稿日期 Received：2024-11-18；接受日期 Accepted：2025-05-23

3rd instar larvae after diapause termination was slightly higher than that of non-diapause larvae, but this difference was not significant (1st and 2nd instar: P = 0.577; 3rd instar: P = 0.665; 4th instar: P = 0.678). Furthermore, the predation rate of larvae decreased with increasing density. The predation rate of the diapause termination group was slightly higher than that of the non-diapause group, but this difference was not significant. Diapause did not alter the prey preferences of larvae towards *M. crassicauda*, larvae from both treatment groups preferred to prey on 1st and 2nd instar nymphs with respective preference coefficients (Q) of 1.35 and 1.39. **[Conclusion]** Diapause somewhat enhanced the predatory capacity of *A. aphidimyza* larvae with respect to *M. crassicauda*, indicating that post-diapause larvae may be more effective predators of *M. crassicauda*. This study not only provides an important theoretical basis for using *A. aphidimyza* as biological control, but also lays a foundation for further exploration of its diapause mechanism.

Key words diapause termination; *Aphidoletes aphidimyza*; *Megoura crassicauda*; predatory ability; biological control

豌豆修尾蚜 *Megoura crassicauda* 隶属半翅目 Hemiptera 蚜科 Aphididae，常对蚕豆、豌豆及山黧豆等多种豆科作物构成严重威胁（程丽媛等，2014；吴慧子等，2024）。该蚜虫常以群集的方式刺吸植物汁液，导致幼嫩枝叶出现褪绿、黄化和卷缩等症状，严重破坏植株的正常生长发育，进而降低作物产量和质量（刘金平等，2005；Jin *et al.*，2014）。目前，化学防治是控制豌豆修尾蚜的主要手段，但长期依赖化学农药不仅影响农作物安全，还会污染环境、威胁人类健康（张海波等，2019；王海诺等，2020）。因此，生物防治因兼具安全、环保且可持续发展的优势，愈发受到重视（干华磊等，2024）。近年来，已有多种天敌昆虫被报道可用于防治豌豆修尾蚜，包括大草蛉 *Chrysopa pallens*（程丽媛等，2014）、异色瓢虫 *Harmonia axyridis*（杜军利等，2018）、七星瓢虫 *Coccinella septempunctata*（吴沐秀等，2022）以及南方小花蝽 *Orius strigicollis*（张晓媛等，2023）等。

食蚜瘿蚊 *Aphidoletes aphidimyza* 属于双翅目 Diptera 瘿蚊科 Cecidomyiidae，是专门捕食蚜虫的重要天敌昆虫。该昆虫能够有效捕食 80 多种蚜虫，如豌豆修尾蚜（吴慧子等，2024）、莴苣指管蚜 *Uroleucon formosanum*（朱绪立等，2024）、葱蚜 *Neotoxoptera formosana*（王雄等，2021）、玉米蚜 *Rhopalosiphum maidis*（林清彩等，2017）等。作为一种重要的生物防治工具，食蚜瘿蚊在有效控制蚜虫种群数量、减少植株损伤和降低化学农药使用方面发挥了关键作用（于翠娥和朱玉华，2011；叶俊杰，2022）。食蚜瘿蚊已被国内外广泛应用于蚜虫的生物防治，并已实现了工厂化生产（潘明真等，2022；Ouattara *et al.*，2024）。然而，在其商品化应用过程中仍面临诸多挑战，如难以长期储存和货架期短等问题，其中货架期短是限制其商业应用的主要问题之一（韩海斌等，2021；袁清婷等，2022）。针对这一问题，通过深入研究食蚜瘿蚊的滞育机制，包括分析其进入滞育阶段后的生理和生化方面的变化，并探索诱导其滞育及维持滞育状态的最佳条件（如适宜的温度、湿度和光照周期），有望开发出延长其货架期的有效技术手段，这将显著提升其市场稳定性和可用性，进一步满足农业生产中对天敌昆虫的需求（李玉艳，2011；贺冰心等，2023；Dai *et al.*，2024）。

滞育是指昆虫在面对特定环境条件，尤其是不利环境因素时，其生长发育暂时停滞的一种生理状态（董传磊，2024）。利用这一机制，可以在特定的环境条件下暂停昆虫的发育，从而有效延长其货架期（元晓艳等，2024）。这一策略不仅为人工调节天敌昆虫的发育进程提供了新的思路和方法，还能够增加产品的储备量，促进其防控效果，同时实现天敌昆虫的全年规模化扩繁（王曼姿等，2020）。已有研究表明，食蚜瘿蚊能在温度[25 ℃（光照 8 L）/10 ℃（黑暗 16 D）]交替循环，相对湿度 60%-80%的条件下进入滞育状态，并以老熟幼虫或预蛹形式滞育（方美娟等，2023）。然而，当前有关食蚜瘿蚊滞育特性的研究主要集中在诱导其滞育的条件、滞育期间生理生化物质的变化以及相关生物学的探讨（Gilkeson and Hill，1986a，1986b；Miles and

Bale，1995；Koštál and Havelka，2000；Koštál *et al.*，2001；王秀琴等，2019），而对于解除滞育后的食蚜瘿蚊的捕食能力是否受到滞育状态的影响，目前尚缺少系统研究。捕食能力是捕食性天敌昆虫的重要指标，其高低直接决定了它们对农林作物害虫生物防治中的实际效果（于文博，2018）。由于食蚜瘿蚊以预蛹形式进入滞育状态，解除滞育后进入蛹期，无法直接评估亲代的捕食能力。因此，本研究以其子代 3 龄幼虫为研究对象，探讨其子代 3 龄幼虫对豌豆修尾蚜的捕食功能、搜寻效应、种内干扰及捕食偏好，旨在为商业化生产及田间高效利用策略的制定提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 供试昆虫

豌豆修尾蚜采集于南京农业大学白马实验基地（31.594784°N，119.179862°E）的蚕豆植株，并在人工气候室内，以盆栽蚕豆 *Vicia faba* 为寄主植物多代饲养，建立稳定种群。食蚜瘿蚊由贵州大学杨茂发教授惠赠，进行多代扩繁后用于本试验。人工气候室条件为（24±1）℃、光周期 16 L∶8 D、相对湿度 70%±5%。

1.2 试虫处理

将羽化后 24 h 内已交配的食蚜瘿蚊雌成虫（100-200 头）放入纱网笼（30 cm×30 cm×30 cm）中，笼内放置有 7 cm 高的载有豌豆修尾蚜的蚕豆植株，供其产卵。24 h 后，将载有食蚜瘿蚊卵的蚕豆苗分别转移至两种不同条件的人工气候培养箱（宁波江南仪器厂，型号 DRXM-358A）中进行饲养。非滞育诱导条件为：温度（24±1）℃、光周期 16 L∶8 D、相对湿度 70%±5%。滞育诱导条件为：温度[25 ℃（光照 8 L）/10 ℃（黑暗 16 D）]交替循环，相对湿度 60%-80%。

选取羽化后 24 h 内已交配的非滞育食蚜瘿蚊雌成虫（100-200 头），放入纱网笼中载有豌豆修尾蚜的 7 cm 高的蚕豆植株上进行产卵，最终选取 3 龄幼虫用于后续试验。在滞育条件下诱导的食蚜瘿蚊在结茧后第 2 天即以预蛹状态进入滞育（方美娟等，2023）。为确保滞育稳定性，将滞育虫体在滞育条件下继续处理 10 d。随后，将滞育虫体取出，转移至温度 24 ℃、光周期 16 L∶8 D、相对湿度 70%±5%的恒温培养箱（宁波江南仪器厂，型号 DRXM-358A）中解除滞育，挑取羽化后 24 h 内已交配的食蚜瘿蚊雌成虫（100-200 头），放入纱网笼中载有豌豆修尾蚜的 7 cm 高的蚕豆植株上进行产卵，最终选取 3 龄幼虫（后简称滞育子代 3 龄幼虫）用于后续试验。

1.3 实验方法

1.3.1 食蚜瘿蚊 3 龄幼虫对不同龄期豌豆修尾蚜的捕食功能反应 实验开始前，将滞育食蚜瘿蚊子代 3 龄幼虫置于培养皿（直径 90 mm，高 45 mm）中饥饿 12 h，以备后续实验。实验在相同规格的培养皿中进行，培养皿底部铺有直径 80 mm 的湿润滤纸。选取大小基本一致的蚕豆叶，将其叶背朝上，平铺于湿润滤纸上。随后，用细毛刷挑取豌豆修尾蚜 1-2、3 和 4 龄豌豆修尾蚜若虫分别移至培养皿内，并将不同龄期豌豆修尾蚜的密度梯度均设置为 8、16、24、32 和 40 头/皿，每皿接入 1 头饥饿处理 12 h 的滞育子代 3 龄幼虫。上述培养皿均用保鲜膜密封，并用 0 号昆虫针在膜上均匀扎 20 个通气孔。所有处理均置于人工气候室中。24 h 后于体视镜（深圳奥斯微光学仪器有限公司，型号 AO-HK830-0318）下统计豌豆修尾蚜的存活个数。每个处理 10 次重复。用细毛刷轻触豌豆修尾蚜，若虫体无反应即确认为死亡。非滞育处理同 1.2 节。

1.3.2 食蚜瘿蚊 3 龄幼虫捕食豌豆修尾蚜的种内干扰反应 将饥饿 12 h 的食蚜瘿蚊滞育子代 3 龄幼虫与不同龄期（1-2 龄、3 龄、4 龄）的豌豆修尾蚜以不同密度比（1∶50、2∶50、3∶50、4∶50、5∶50）共同接入含有蚕豆叶的培养皿，随后移入人工气候室。24 h 后于体视镜下统计豌豆修尾蚜的存活个数。每个处理重复 10 次。非滞育处理同 1.2 节。

1.3.3 食蚜瘿蚊 3 龄幼虫对豌豆修尾蚜的捕食选择性 试验条件与 1.3.1 节相同，挑取 1-2、3 和 4 龄的豌豆修尾蚜各 15 头，共计 45 头，置于含有蚕豆叶的培养皿中。随即引入 1 头饥饿 12 h 的食蚜瘿蚊子代 3 龄幼虫。24 h 后于体视镜下统

计豌豆修尾蚜的存活个数。每个处理重复 10 次。非滞育处理同 1.2 节。

1.3.4　数据分析　捕食功能反应：用 HollingⅡ圆盘方程 $N_a = aTN/(1+aT_hN)$ 拟合分析（吴坤君等，2004）。N_a：被捕食猎物数；N：猎物密度；a：瞬时攻击率；T：试验持续时间，本试验持续时间 $T = 1$ d (24 h)；T_h：处理单头猎物所需时间；a/T_h：捕食者的捕食能力；$1/T_h$：日最大捕食量。

搜寻效应：用方程 $S = a/(1+aT_hN)$ 拟合分析。S：搜寻效应（丁岩钦，1994）。

种内干扰密度：用方程 $E = AP^{-m} = N_a/NP$ 拟合分析（Hassell and Varley，1969）；E：捕食作用率；A：搜寻常数；P：捕食者密度；m：干扰系数。

分摊竞争强度：分摊竞争强度 $I = (E_1 - E_p)/E_1$（邱海燕等，2020）。I：分摊竞争强度；E_1：单头天敌的捕食作用率；E_P：P 头天敌的捕食作用率。

捕食选择性：Q = 某虫态被捕食数占总捕食数的百分比 / 某虫态占总猎物总数的百分比（王庆森等，2014；黄婕等，2020；崔晓宁等，2023）。Q 表示选择系数，$Q > 1$ 表示捕食者对该虫态猎物嗜食；$Q = 1$ 表示捕食者对该虫态猎物随机捕食；$Q < 1$ 表示捕食者对该虫态猎物非嗜食。

将试验数据汇总至 Microsoft Excel 2016 进行初步计算，并使用 R 语言（版本 4.0.3）进行统计分析。数据以平均值±标准误（Mean±SE）的形式呈现并利用 ggplot2 包可视化。首先，利用 Shapiro-Wilk 检验和 Levene 检验（agricolae 包）分别检验数据的正态性与方差齐性。符合正态分布与方差齐性的数据采用单因素方差分析（One-way ANOVA）（agricolae 包）分析组间差异，若存在显著差异，进一步采用最小显著差异法（LSD）进行多重比较。对于两组间的比较，若数据符合正态分布与方差齐性，采用独立样本 t 检验（Independent samples t-test）；不符合正态分布或方差齐性的数据，采用 Wilcoxon 秩和检验（Mann-Whitney U 检验）。

2　结果与分析

2.1　食蚜瘿蚊 3 龄幼虫对不同龄期豌豆修尾蚜的捕食功能反应

两种处理的食蚜瘿蚊子代 3 龄幼虫对 1-2、3 和 4 龄豌豆修尾蚜的捕食量均随猎物密度的增加而上升，当猎物密度达到一定阈值后，捕食量趋于平缓，两种处理的食蚜瘿蚊子代 3 龄幼虫对各龄期豌豆修尾蚜的捕食功能反应均符合 HollingⅡ型模型（图 1：A-C）。在相同猎物密度条件下，滞育解除后的食蚜瘿蚊子代 3 龄幼虫的日捕食量略高于非滞育的食蚜瘿蚊，但两者之间的差异未达到显著水平（$P = 0.730$）。

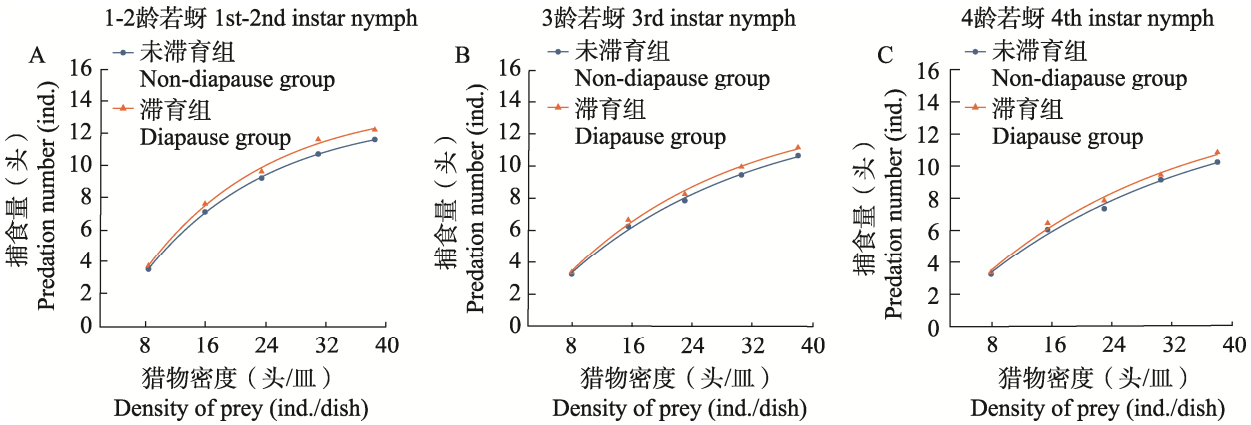

图 1　非滞育与滞育解除后的食蚜瘿蚊子代 3 龄幼虫对 1-2 龄（A）、3 龄（B）及 4 龄（C）豌豆修尾蚜的捕食功能反应拟合曲线

Fig. 1　Functional response fitting curves of 3rd instar larvae from non-diapause and post-diapause offspring of *Aphidoletes aphidimyza* against 1st-2nd instar (A), 3rd instar (B), 4th instar (C) of *Megoura crassicauda*

表 1 非滞育与滞育解除后的食蚜瘿蚊子代 3 龄幼虫对不同龄期豌豆修尾蚜的捕食功能反应

Table 1 Predatory functional response of 3rd instar larvae from non-diapause and post-diapause offspring of *Aphidoletes aphidimyza* to different instars of *Megoura crassicauda*

猎物龄期 Prey instar	处理 Treatment	Holling Ⅱ 圆盘方程 Holling Ⅱ disc equation	瞬时攻击率 a Attacking efficiency	处置时间 T_h（d） Handling time (d)	捕食能力 a/T_h Predation capacity	日最大捕食量 $1/T_h$（头/d） Maximum daily predation (ind./d)	相关系数 R^2 Correlation coefficient
1-2 龄 1st-2nd instar	Ⅰ	$N_a = 0.529\ 6N/(1 + 0.018\ 0N)$	0.529 6	0.034 0	15.6	29.38	0.936
	Ⅱ	$N_a = 0.559\ 0N/(1 + 0.017\ 7N)$	0.559 0	0.031 6	17.7	31.63	0.931
3 龄 3rd instar	Ⅰ	$N_a = 0.477\ 9N/(1 + 0.019\ 3N)$	0.477 9	0.040 4	11.8	24.75	0.968
	Ⅱ	$N_a = 0.494\ 7N/(1 + 0.018\ 4N)$	0.494 7	0.037 2	13.3	26.86	0.962
4 龄 4th instar	Ⅰ	$N_a = 0.478\ 5N/(1 + 0.021\ 6N)$	0.478 5	0.045 2	10.6	22.14	0.973
	Ⅱ	$N_a = 0.496\ 8N/(1 + 0.020\ 8N)$	0.496 8	0.041 8	11.9	23.93	0.969

Ⅰ：非滞育的食蚜瘿蚊子代 3 龄幼虫；Ⅱ：滞育解除后的食蚜瘿蚊子代 3 龄幼虫。

Ⅰ: Non-diapausing 3rd instar larvae of *A. aphidimyza*; Ⅱ: Post-diapausing 3rd instar larvae of *A. aphidimyza.*

两种处理的食蚜瘿蚊子代 3 龄幼虫对不同龄期豌豆修尾蚜的捕食功能反应采用 Holling Ⅱ 型圆盘方程拟合，结果表明，非滞育的食蚜瘿蚊子代 3 龄幼虫对 1-2、3 和 4 龄豌豆修尾蚜的瞬时攻击率（a）分别为 0.529 6、0.477 9 和 0.478 5；而滞育解除后的食蚜瘿蚊子代 3 龄幼虫分别为 0.559 0、0.494 7 和 0.496 8。非滞育的食蚜瘿蚊子代 3 龄幼虫对 1-2、3 和 4 龄蚜虫的日最大捕食量（$1/T_h$）分别为 29.38、24.75 和 22.14 头；而滞育解除后的食蚜瘿蚊子代 3 龄幼虫分别为 31.63、26.86 和 23.93 头（表 1）。

2.2 食蚜瘿蚊 3 龄幼虫对豌豆修尾蚜的搜寻效应

两种处理的食蚜瘿蚊子代 3 龄幼虫对各龄期豌豆修尾蚜的搜寻效应均随猎物密度的增加而下降（图 2：A-C）。非滞育的食蚜瘿蚊子代 3 龄幼虫对 1-2、3 和 4 龄豌豆修尾蚜的搜寻方程分别为 $S_{1\text{-}2} = 0.529\ 6/(1+0.018\ 0N)$、$S_3 = 0.477\ 9/(1+0.019\ 3N)$和 $S_4 = 0.478\ 5/(1+0.021\ 6N)$；解除滞育后的食蚜瘿蚊的子代 3 龄幼虫对应的搜寻方程分别为 $S_{1\text{-}2} = 0.559\ 0/(1+0.017\ 7N)$、$S_3 = 0.494\ 7/(1+0.018\ 4N)$和 $S_4 = 0.496\ 8/(1+0.020\ 8N)$。根据搜寻方程可知，在相同猎物密度下，滞育解除后食蚜瘿蚊子代 3 龄幼虫的搜寻效应高于非滞育的幼虫，但差异不显著（1-2 龄：$P = 0.577$；3 龄：$P = 0.665$；4 龄：$P = 0.678$）。

2.3 食蚜瘿蚊 3 龄幼虫捕食豌豆修尾蚜的种内干扰反应

两种处理的食蚜瘿蚊子代 3 龄幼虫对各龄期豌豆修尾蚜的单头日均捕食量均随食蚜瘿蚊幼虫密度的增加而减少（表 2，表 3）。在猎物密度和捕食空间恒定时，非滞育的食蚜瘿蚊子代 3 龄幼虫对豌豆修尾蚜 1-2、3 和 4 龄的种内干扰方程分别为：$E_{1\text{-}2} = 0.228\ 5P^{-1.487\ 6}$、$E_3 = 0.204\ 7P^{-1.467\ 7}$ 和 $E_4 = 0.189\ 3P^{-1.383\ 4}$，干扰系数（$m$）分别为 1.487 6、1.467 7 和 1.383 4。解除滞育后的食蚜瘿蚊子代 3 龄幼虫对各龄期豌豆修尾蚜的种内干扰方程分别为：$E_{1\text{-}2} = 0.240\ 7P^{-1.486\ 6}$、$E_3 = 0.212\ 7P^{-1.502\ 3}$ 和 $E_4 = 0.193\ 2P^{-1.399\ 9}$；干扰系数（$m$）分别为 1.486 6、1.502 3 和 1.399 9。随着自身密度的增加，两处理组的食蚜瘿蚊子代 3 龄幼虫的单头捕食量与分摊竞争强度呈现出相反的变化趋势——前者下降，后者上升。表明在猎物密度固定的条件下，其种群内部存在明显的干扰效应。

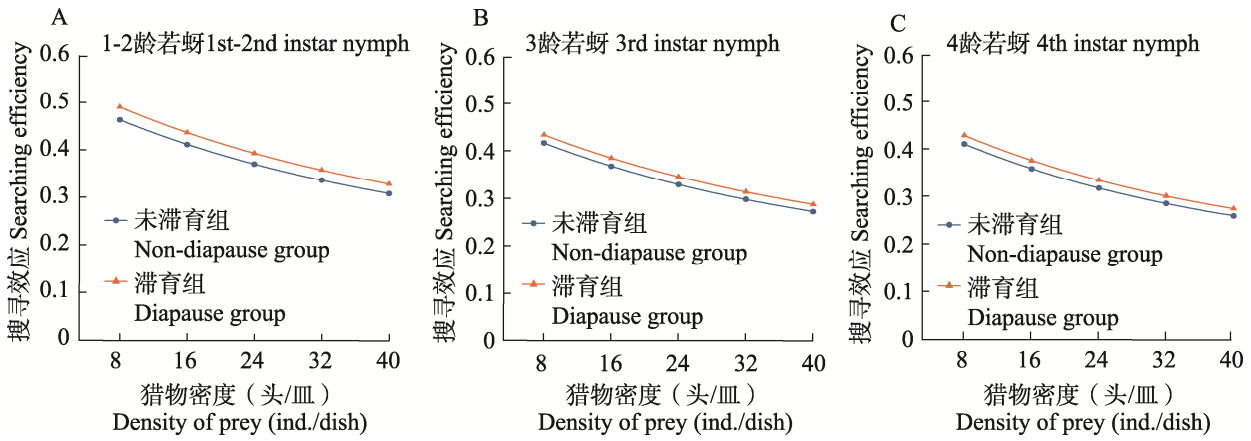

图 2　非滞育与滞育解除后的食蚜瘿蚊子代 3 龄幼虫对 1-2 龄（A）、3 龄（B）及 4 龄（C）豌豆修尾蚜的搜寻效应

Fig. 2　Searching efficiency of 3rd instar larvae from non-diapause and post-diapause offspring of *Aphidoletes aphidimyza* against 1st-2nd instar (A), 3rd instar (B), and 4th instar (C) of *Megoura crassicauda*

表 2　非滞育的食蚜瘿蚊子代 3 龄幼虫自身密度对其捕食的干扰反应

Table 2　Interference response of non-diapause offspring of 3rd instar larvae of *Aphidoletes aphidimyza* to varying densities of their own population

蚜虫龄期 Stage of aphid	猎物密度（头/皿） Prey density (ind./dish)	捕食者密度（头/皿） Predator density (ind./dish)	日均捕食量（头/d） Daily average consumption (ind./d)	捕食作用率 E Predation ratio	种内干扰方程 Intraspecific interference equation	分摊竞争强度 I Intensity of scramble competition
1-2 龄 1st-2nd instar	50	1	11.40 ± 0.58 e	0.228 0	$E_{1\text{-}2} = 0.228\ 5P^{-1.487\ 6}$	0.00
	50	2	8.50 ± 0.56 d	0.085 0	$R^2 = 0.999\ 2$	0.63
	50	3	6.30 ± 0.48 c	0.042 0		0.82
	50	4	5.60 ± 0.45 b	0.028 0		0.88
	50	5	5.00 ± 0.52 a	0.020 0		0.91
3 龄 3rd instar	50	1	10.20 ± 0.59 d	0.204 0	$E_3 = 0.204\ 7P^{-1.467\ 7}$	0.00
	50	2	7.80 ± 0.54 c	0.078 0	$R^2 = 0.998\ 8$	0.62
	50	3	6.00 ± 0.47 b	0.040 0		0.80
	50	4	4.80 ± 0.61 b	0.024 0		0.88
	50	5	4.30 ± 0.43 a	0.017 2		0.92
4 龄 4th instar	50	1	9.40 ± 0.62 d	0.188 0	$E_4 = 0.189\ 3P^{-1.383\ 4}$	0.00
	50	2	8.00 ± 0.37 c	0.080 0	$R^2 = 0.995\ 6$	0.57
	50	3	5.73 ± 0.55 b	0.038 2		0.80
	50	4	5.00 ± 0.54 b	0.025 0		0.87
	50	5	4.20 ± 0.45 a	0.016 8		0.91

日均捕食量为平均值±标准误。同列数据后标有不同小写字母表示经 LSD 法检验在 $P < 0.05$ 水平差异显著。下表同。

Data are means ± SE, and followed by the different lowercase letters within the same column indicate significant difference at the $P < 0.05$ level, as determined by LSD test. The same below.

表 3 滞育解除后的食蚜瘿蚊子代 3 龄幼虫自身密度对其捕食的干扰反应

Table 3 Interference response of post-diapause offspring of 3rd instar larvae of *Aphidoletes aphidimyza* to varying densities of their own population

蚜虫龄期 Stage of aphid	猎物密度（头/皿） Prey density (ind./dish)	捕食者密度（头/皿） Predator density (ind./dish)	日均捕食量（头/d） Daily average consumption (ind./d)	捕食作用率 *E* Predation ratio	种内干扰方程 Intraspecific interference equation	分摊竞争强度 *I* Intensity of scramble competition
1-2 龄 1st-2nd instar	50	1	12.00 ± 0.33 e	0.240 0	$E_{1\text{-}2} = 0.240\ 7P^{-1.486\ 6}$	0.00
	50	2	9.05 ± 0.31 d	0.090 5	$R^2 = 0.998\ 9$	0.62
	50	3	6.70 ± 0.35 c	0.044 7		0.81
	50	4	5.70 ± 0.25 b	0.028 5		0.88
	50	5	5.08 ± 0.34 a	0.020 3		0.92
3 龄 3rd instar	50	1	10.60 ± 0.43 e	0.212 0	$E_3 = 0.212\ 7P^{-1.502\ 3}$	0.00
	50	2	7.90 ± 0.47 d	0.079 0	$R^2 = 0.999\ 0$	0.63
	50	3	5.93 ± 0.42 c	0.039 6		0.81
	50	4	4.80 ± 0.49 b	0.024 0		0.89
	50	5	4.28 ± 0.31 a	0.017 1		0.92
4 龄 4th instar	50	1	9.60 ± 0.40 e	0.192 0	$E_4 = 0.193\ 2P^{-1.399\ 9}$	0.00
	50	2	8.00 ± 0.33 d	0.080 0	$R^2 = 0.996\ 4$	0.58
	50	3	5.80 ± 0.37 c	0.038 7		0.80
	50	4	5.00 ± 0.42 b	0.025 0		0.87
	50	5	4.24 ± 0.47 a	0.017 0		0.91

2.4 食蚜瘿蚊 3 龄幼虫对豌豆修尾蚜的捕食偏好性

两种处理的食蚜瘿蚊子代 3 龄幼虫对不同龄期豌豆修尾蚜 1-2、3 和 4 龄均表现出显著的选择性差异，具体捕食量与选择系数见表 4 和表 5。非滞育的食蚜瘿蚊子代 3 龄幼虫对豌豆修尾蚜 1-2、3 和 4 龄若虫的捕食选择率分别为 45%、32%和 23%，选择系数分别为 1.35、0.95 和 0.70，表明其对 1-2 龄若虫具有明显的嗜食性，而对 3 和 4 龄若虫则表现为非嗜食性（表 4）。滞育解除后的食蚜瘿蚊子代 3 龄幼虫对豌豆修尾蚜 1-2、3 和 4 龄若虫的捕食选择率分别为 46%、32%和 21%，选择系数分别为 1.39、0.96 和 0.64，同样显示出对 1-2 龄若虫具嗜食性，而对 3 和 4 龄若虫为非嗜食性（表 5）。

3 讨论

本研究旨在评估滞育解除后的食蚜瘿蚊子代 3 龄幼虫对不同龄期豌豆修尾蚜的捕食作用。通过室内试验，系统地比较了非滞育与滞育解除后的食蚜瘿蚊子代 3 龄幼虫对不同龄期豌豆修尾蚜的捕食功能反应、搜寻效应、种内干扰及捕食偏好。

本研究结果显示，滞育解除后的食蚜瘿蚊子代 3 龄幼虫对各龄期豌豆修尾蚜的捕食功能反应，呈现出典型的 Holling Ⅱ型特征。这一捕食模式与先前关于该天敌捕食高粱蚜 *Melanaphis sacchari*（任鹏等，2023）、茶蚜 *Toxoptera aurantii*（李梦莎等，2024）等蚜虫的捕食功能反应一致，表明滞育并未改变食蚜瘿蚊子代 3 龄幼虫对豌

表 4　非滞育的食蚜瘿蚊子代 3 龄幼虫对不同龄期豌豆修尾蚜的捕食偏好性

Table 4　Predatory preferences of non-diapause offspring of 3rd instar larvae of *Aphidoletes aphidimyza* toward various instars of *Megoura crassicauda*

蚜虫龄期 Stage of aphid	捕食者密度（头/皿） Predator density (ind./dish)	日均捕食量（头/d） Daily average consumption (ind./d)	捕食选择率（%） Predatory choice rate (%)	选择系数 *Q* Selectivity coefficient
1-2 龄 1st-2nd instar	15	4.8 ± 0.25 a	45	1.35
3 龄 3rd instar	15	3.4 ± 0.31 b	32	0.95
4 龄 4th instar	15	2.5 ± 0.22 c	23	0.70

表 5　滞育解除后的食蚜瘿蚊子代 3 龄幼虫对不同龄期豌豆修尾蚜的捕食偏好性

Table 5　Predatory preferences of post-diapause offspring of 3rd instar larvae of *Aphidoletes aphidimyza* toward various instars of *Megoura crassicauda*

蚜虫龄期 Stage of aphid	捕食者密度（头/皿） Predator density (ind./dish)	日均捕食量（头/d） Daily average consumption (ind./d)	捕食选择率（%） Prodatory choice rate (%)	选择系数 *Q* Selectivity coefficient
1-2 龄 1st-2nd instar	15	5.2 ± 0.20 a	46	1.39
3 龄 3rd instar	15	3.6 ± 0.16 b	32	0.96
4 龄 4th instar	15	2.4 ± 0.22 c	21	0.64

豆修尾蚜的捕食功能反应。类似现象在其他天敌昆虫中也有报道，例如，滞育的巴氏新小绥螨 *Neoseiulus barkeri* 对替代猎物腐食酪螨 *Tyrophagus putrescentiae* 的捕食功能反应与非滞育个体相同，均符合 HollingⅡ型模型（李晓萌等，2022）。同样，东亚小花蝽 *Orius sauteri* 在滞育态及滞育解除后，其捕食功能反应也与非滞育个体一致，均符合 HollingⅡ型模型（吕兵等，2018）。从日捕食量来看，在相同猎物密度条件下，滞育解除后的食蚜瘿蚊子代 3 龄幼虫的日捕食量略高于非滞育个体，尽管这种差异未达到显著性水平，但这一结果仍表明滞育对食蚜瘿蚊的捕食能力具有积极影响，这一结果也与巴氏新小绥螨 *Neoseiulus barkeri* 在解除滞育后，对害螨的捕食能力不仅没有降低，反而更强于未滞育个体的结果一致（李晓萌等，2022）。原因可能与解除滞育后昆虫生理状态的改善有关，解除滞育后的食蚜瘿蚊可能通过取食来弥补滞育期间的代谢储备损耗，从而增强了其捕食能力（李贝，2023）。

本研究还发现非滞育及滞育解除后的食蚜瘿蚊子代 3 龄幼虫对各龄期豌豆修尾蚜的搜寻效应均随着猎物密度的增加而逐渐下降。这与食蚜瘿蚊捕食竹舞蚜 *Astegopteryx bambusifoliae*（袁进敏等，2025）、花椒棉蚜 *Aphis gossypii*（任鹏等，2025）以及黄玛草蛉 *Mallada basalis* 捕食甘蓝蚜 *Brevicoryne brassicae* 与玉米蚜 *Rhopalosiphum maidis*（周娟等，2020）、六斑月瓢虫 *Menochilus sexmaculatus* 捕食柑橘木虱 *Diaphorina citri*（何万财等，2023）、异色瓢虫 *Harmonia axyridis* 捕食豌豆蚜 *Acyrthosiphon pisum*（崔亚琴等，2022）等的搜寻效应基本一致。然而，滞育解除后的食蚜瘿蚊在猎物密度增加时，其搜寻效应略有提升。这一发现表明，解除滞育对食蚜瘿蚊子代 3 龄幼虫的搜寻效应产生了积极影响。原因可能是解除滞育促进了昆虫体内能量物质的再分配和新陈代谢的恢复，从而提高了它们的活动能力（于洪春等，2018）。这也进一步说明了昆虫在解除滞育后可能更加活跃，对食物的需求和获取能力都有所增强。例如，七星瓢虫 *Coccinella septempunctata* 在解除滞育后，活动能力会得到提升，尽管其生殖活动尚未完全恢复（任小云，2016）。此外，棉铃虫 *Helicoverpa armigera* 在解除滞育后，其代谢活动会增加，进而增强了对食物的需求和搜寻能力（Jia and Li，2023）。

在固定的猎物密度和捕食空间条件下，非滞育和滞育解除后的食蚜瘿蚊子代 3 龄幼虫的捕食作用率均与自身密度呈现负相关关系。这与淡翅小花蝽 *Orius tantillus* 捕食黄胸蓟马 *Thrips hawaiiensis*（邱海燕等，2020），以及龟纹瓢虫 *Propylaea japonica* 捕食柑橘木虱 *Diaphorina citri*（周军辉等，2020）等的干扰反应的研究结果一致，这表明在自然生态系统中，捕食者密度的增加并不一定会导致猎物数量的持续减少，因为捕食者之间的干扰反应会限制捕食效率的提升（文霞等，2023）。因此，要将解除滞育的食蚜瘿蚊成功应用于田间，关键在于其释放策略必须依据豌豆修尾蚜的种群动态与益害比进行精准优化，从而实现成本效益最大化。通过比较非滞育和解除滞育后的食蚜瘿蚊子代 3 龄幼虫对各龄期豌豆修尾蚜的捕食选择性进一步发现，滞育并未改变食蚜瘿蚊对豌豆修尾蚜的捕食偏好性，滞育解除后的食蚜瘿蚊同样对 1-2 龄豌豆修尾蚜表现出嗜食性（选择系数 $Q > 1$），而对 3 和 4 龄若虫则表现为非嗜食性（选择系数 $Q < 1$）。从选择系数的高低来看，两者对豌豆修尾蚜的选择顺序为：1-2、3 和 4 龄。这与吴慧子等（2024）研究食蚜瘿蚊对不同龄期豌豆修尾蚜的捕食偏好性结果相同。

本研究在室内评估了滞育解除后的食蚜瘿蚊对各龄期豌豆修尾蚜的捕食能力，该研究结果为其制定田间释放策略奠定了基础。然而，室内的单一环境无法完全模拟大田的复杂生态条件，诸如气候波动、寄主植物生理状况及其他生物因子等，均可能影响其控害效果。因此，为确证其在真实农业生态系统中的防治效能，还需进一步通过田间试验来验证。

参考文献 (References)

Cheng LY, Liao XJ, Xu LX, Sun L, Chen ZZ, Xu YY, 2014. Two-sex life table and predation of *Chrysopa pallens* (Rambur) feeding on *Megoura japonica* (Matsumura). *Journal of Plant Protection*, 41(6): 680–686. [程丽媛, 廖先骏, 徐龙祥, 孙蕾, 陈珍珍, 许永玉, 2014. 以豌豆修尾蚜为猎物的大草蛉两性生命表和捕食率. 植物保护学报, 41(6): 680–686.]

Cui XN, Xi BX, Zhang BH, Sun YX, Hu GX, Liu YJ, Hao YN, 2023. Predatory functional response and predation preference of ladybeetle *Harmonia axyridis* to *Acyrthosiphon pisum* and *Odontothrips loti* on alfalfa. *Chinese Journal of Biological Control*, 39(1): 38–45. [崔晓宁, 席驳鑫, 张博鸿, 孙元星, 胡桂馨, 刘艳君, 郝亚楠, 2023. 异色瓢虫对苜蓿上豌豆蚜和牛角花齿蓟马的捕食效能及捕食偏好性. 中国生物防治学报, 39(1): 38–45.]

Cui YQ, Wang T, Gao J, 2022. Predatory response of *Harmonia axyridis* to *Acyrthosiphon pisum*. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 50(1): 130–134. [崔亚琴, 王拓, 高洁, 2022. 异色瓢虫对豌豆蚜的捕食效应. 山西农业科学, 50(1): 130–134.]

Dai XY, Wang Y, Liu Y, Wang RJ, Su L, Yin ZJ, Zhao S, Chen H, Zheng L, Dong XL, Zhai YF, 2024. Molecular correlates of diapause in *Aphidoletes aphidimyza*. *Insects*, 15(5): 299.

Ding YQ, 1994. Mathematical Ecology of Insects. Beijing: Science Press. 257–258, 303–304. [丁岩钦, 1994. 昆虫数学生态学. 北京: 科学出版社. 257–258, 303–304.]

Dong CL, 2024. The studies of the molecular mechanisms of *Chilo suppressalis* response to temperature and *Cotesia chilonis* parasitism stresses. Doctor dissertation. Yangzhou: Yangzhou University. [董传磊, 2024. 二化螟应对温度与二化螟盘绒茧蜂寄生胁迫的分子机制研究. 博士学位论文. 扬州: 扬州大学.]

Du JL, Wu DG, Huang BH, Huang WD, Wang ZX, 2018. Predatory functional response of *Harmonias axyridis* on *Megoura japonica*. *Pratcultural Science*, 35(7): 1772–1779. [杜军利, 武德功, 黄保宏, 黄伟东, 王增霞, 2018. 异色瓢虫对豌豆修尾蚜的捕食功能反应. 草业科学, 35(7): 1772–1779.]

Fang MJ, He XQ, Liu D, Song K, Zhang H, Zhao Y, Li YY, Wang YB, 2023. Changes in biochemical substances during the diapause of *Aphidoletes aphidimyza*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 60(3): 842–850. [方美娟, 何晓庆, 刘冬, 宋凯, 张恒, 赵颖, 李玉艳, 王玉波, 2023. 滞育食蚜瘿蚊主要生化物质变化规律研究. 应用昆虫学报, 60(3): 842–850.]

Gan HL, Huang XW, Li DY, Liu J, Sang S, 2024. Application of composite microbial agents to the control of tomato fusarium wilt. *Biological Disaster Science*, 47(4): 588–594. [干华磊, 黄小威, 李东阳, 刘军, 桑松, 2024. 复合微生物菌剂在防治番茄枯萎病上的应用. 生物灾害科学, 47(4): 588–594.]

Gilkeson LA, Hill SB, 1986a. Diapause prevention in *Aphidoletes aphidimyza* (Diptera: Cecidomyiidae) by low-intensity light. *Environmental Entomology*, 15(5): 1067–1069.

Gilkeson LA, Hill SB, 1986b. Genetic selection for and evaluation of non-diapause lines of predatory midge, *Aphidoletes aphidimyza* (Rondani) (Diptera: Cecidomyiidae). *Canadian Entomologist*, 118(9): 869–879.

Han HB, Jiang S, Lin KJ, Xu LB, Zhang B, Liu CZ, Liu AP, Gao SJ, 2021. Proteomic analysis of diapause proteins in the dominant parasitoid tachinid fly *Exorista civilis*. *Journal of Plant Protection*, 48(6): 1359–1369. [韩海斌, 姜珊, 林克剑, 徐林波, 张博, 刘长仲, 刘爱萍, 高书晶, 2021. 牧草优势寄生性天敌伞裙追寄蝇滞育相关蛋白分析. 植物保护学报, 48(6): 1359–1369.]

Hassell MP, Varley GC, 1969. New inductive population model for insect parasites and its bearing on biological control. *Nature*, 223(5211): 1133–1137.

He BX, Zhang X, Zhang JJ, Zheng MX, Li H, 2023. Cloning and expression profiles of fatty acid synthase gene from *Trichogramma dendrolimi* (Hymenoptera: Trichogrammatidae) and its functional analysis in diapause. *Acta Entomologica Sinica*, 66(4): 459–468. [贺冰心, 张雪, 张俊杰, 郑美鑫, 李蕙, 2023. 松毛虫赤眼蜂脂肪酸合酶基因的克隆、表达谱及其在滞育中的功能分析. 昆虫学报, 66(4): 459–468.]

He WC, Ye QQ, Wang FF, Hu YW, Liu JH, Mao XX, Zhang RF, Wang XM, Qiu BL, Liu YT, Sang W, 2023. Predatory responses of *Cheilomenes sexmaculata* to *Diaphorina citri*. *Chinese Journal of Biological Control*, 39(3): 514–522. [何万财, 叶青青, 王飞凤, 胡玉伟, 刘金华, 毛熊兴, 张瑞峰, 王兴民, 邱宝利, 刘玉涛, 桑文, 2023. 六斑月瓢虫对柑橘木虱的捕食作用. 中国生物防治学报, 39(3): 514–522.]

Huang J, Wang M, Men XY, Ji J, Liu YJ, Yin SY, 2020. Predation of European red mite *Panonychus ulmi* by predatory mite *Neoseiulus californicus* at different stages. *Journal of Plant Protection*, 47(1): 46–52. [黄婕, 王蔓, 门兴元, 季洁, 刘永杰, 尹淑艳, 2020. 加州新小绥螨对苹果全爪螨各螨态的捕食作用. 植物保护学报, 47(1): 46–52.]

Jia Q, Li S, 2023. Mmp-induced fat body cell dissociation promotes pupal development and moderately averts pupal diapause by activating lipid metabolism. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 120(1): e2215214120.

Jin DJ, Zeng FR, Dong SL, Zhang HQ, 2014. Effects of a protease inhibitor protein from *Xenorhabdus bovienii* on physiology of pea aphid (*Acyrthosiphon pisum*). *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 108: 86–91.

Koštál V, Havelka J, 2000. Diapausing larvae of the midge *Aphidoletes aphidimyza* (Diptera: Cecidomyiidae) survive at subzero temperatures in a supercooled state but tolerate freezing if inoculated by external ice. *European Journal of Entomology*, 97(3): 433–436.

Koštál V, Havelka J, Šimek P, 2001. Low-temperature storage and cold hardiness in two populations of the predatory midge *Aphidoletes aphidimyza*, differing in diapause intensity. *Physiological Entomology*, 26(4): 320–328.

Li B, 2023. Diapause induction and post-diapause life-history traits for artificial rearing predator *Harmonia axyridis* (Coleoptera: Coccinellidae). Master dissertation. Wuhan: Huazhong Agricultural University. [李贝, 2023. 人工繁育异色瓢虫的滞育诱导及滞育后生物学特性研究. 硕士学位论文. 武汉: 华中农业大学.]

Li MS, Wang X, Li S, Yang MF, Huang CY, Yu XF, Wu HZ, 2024. The predation functional responses of *Aphidoletes aphidimyza* to *Toxoptera aurantii*. *Journal of Mountain Agriculture and Biology*, 43(3): 63–68. [李梦莎, 王雄, 李帅, 杨茂发, 黄纯杨, 于晓飞, 吴慧子, 2024. 食蚜瘿蚊对茶蚜的捕食功能反应. 山地农业生物学报, 43(3): 63–68.]

Li XM, Li L, Gao C, Tang QF, 2022. Evaluation of predation capacity in post-diapause predatory mite, *Neoseiulus barkeri*. *Chinese Journal of Biological Control*, 38(5): 1149–1155. [李晓萌, 李玲, 高超, 唐庆峰, 2022. 解除生殖滞育的巴氏新小绥螨捕食能力. 中国生物防治学报, 38(5): 1149–1155.]

Li YY, 2011. Functional analysis of fatty acid synthase gene in diapause and reproduction of *Trichogramma dendrolim*. Master dissertation. Changchun: Jilin Agricultural University. [李玉艳, 2011. 脂肪酸合酶基因在松毛虫赤眼蜂滞育和生殖中的功能分析. 硕士学位论文. 长春: 吉林农业大学.]

Lin QC, Zhai YF, Chen H, Yin YY, Sun M, Yu Y, Zheng L, 2017. Predatory capacity of *Aphidoletes aphidimyza* (Rondani). *Chinese Journal of Biological Control*, 33(2): 171–175. [林清彩, 翟一凡, 陈浩, 尹园园, 孙猛, 于毅, 郑礼, 2017. 食蚜瘿蚊捕食能力研究. 中国生物防治学报, 33(2): 171–175.]

Liu JP, Zhang XQ, Liu J, Zhang XQ, 2005. Study on the control method of aphids in alfalfa industrial production. *Pratcultural Science*, 22(10): 74–77. [刘金平, 张新全, 刘瑾, 张晓琴, 2005. 苜蓿产业化生产中蚜虫危害及防治方法研究. 草业科学, 22(10): 74–77.]

Lü B, Sun M, Zheng L, Yu Y, 2018. Effects of diapause and diapause termination on predatory functional response of *Orius sauteri*. *Journal of Plant Protection*, 45(6): 1423–1424. [吕兵, 孙猛, 郑礼, 于毅, 2018. 滞育及解除滞育对东亚小花蝽捕食功能反应的影响. 植物保护学报, 45(6): 1423–1424.]

Miles JE, Bale JS, 1995. Analysis of chilling injury in the biological control agent *Aphidoletes aphidimyza*. *Cryobiology*, 32(5): 436–443.

Ouattara TY, Fournier M, Gonzalez N, Rojo S, Lucas E, 2024. Reproductive parameters of a new biocontrol agent, *Eupeodes americanus* (Diptera: Syrphidae) and comparison with the commercialized *Aphidoletes aphidimyza* (Diptera: Cecidomyiidae).

Journal of Economic Entomology, 117(5): 1760–1768.

Pan MZ, Zhang Y, Cao HH, Wang XX, Liu TX, 2022. Research progresses, application, and prospects in aphid biological control on main crops in China. *Journal of Plant Protection*, 49(1): 146–172. [潘明真, 张毅, 曹贺贺, 王杏杏, 刘同先, 2022. 我国主要农作物蚜虫生物防治的研究进展、应用与展望. 植物保护学报, 49(1): 146–172.]

Qiu HY, Fu BL, Ma XT, Li MJ, Qin T, Tang LD, Liu K, 2020. Functional response and searching efficiency of *Orius tantillus* against *Thrips hawaiiensis*. *Plant Protection*, 46(6): 84–89. [邱海燕, 付步礼, 马晓彤, 李曼交, 覃婷, 唐良德, 刘奎, 2020. 淡翅小花蝽对黄胸蓟马的捕食功能反应与搜寻效应. 植物保护, 46(6): 84–89.]

Ren P, Li ZM, Shen XX, Wang X, Yu XF, Liu JF, Huang CY, Yang MF, 2023. Control potential of *Aphidoletes aphidimyza* (Rondani) on *Melanaphis sacchari* (Zehntner). *Chinese Journal of Biological Control*, 39(6): 1327–1333. [任鹏, 李治模, 申修贤, 王雄, 于晓飞, 刘健锋, 黄纯杨, 杨茂发, 2023. 食蚜瘿蚊对高粱蚜的控制潜能. 中国生物防治学报, 39(6): 1327–1333.]

Ren P, Di XY, Li JJ, Yu XF, Wu HZ, Yang MF, 2025. Predation effect of *Aphidoletes aphidimyza* (Diptera: Cecidomyiidae) to *Aphis gossypii* (Hemiptera: Aphididae) of *Zanthoxylum bungeanum*. *Journal of Mountain Agriculture and Biology*, 44(1): 59–64. [任鹏, 狄雪塬, 李静静, 于晓飞, 吴慧子, 杨茂发, 2025. 食蚜瘿蚊对花椒棉蚜的捕食作用. 山地农业生物学报, 44(1): 59–64.]

Ren XY, 2016. Studies on the metabolic adaptation and transcriptomics mechanism of lipid metabolism in diapause *Coccinella septempunctata* L.. Master dissertation. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences. [任小云, 2016. 七星瓢虫滞育的代谢适应及脂代谢的转录组学机理研究. 硕士学位论文. 北京: 中国农业科学院.]

Wang HN, Geng S, Yi CQ, Chen JJ, Wu YL, Liu TH, 2020. Predation of *Harmonia axyridis* Pallas adults to *Megoura japonica* Matsumura. *Hubei Agricultural Sciences*, 59(10): 81–83. [王海诺, 耿硕, 羿超群, 陈佳杰, 吴雨伦, 刘廷辉, 2020. 异色瓢虫成虫对豌豆修尾蚜的捕食作用. 湖北农业科学, 59(10): 81–83.]

Wang MZ, Li YY, Gao F, Liu MY, Zhang HZ, Xu C, Zang LS, Zhang LS, 2020. Physiochemical changes in diapause prepupae of the green lacewing *Chrysopa formosa*. *Chinese Journal of Biological Control*, 36(1): 31–39. [王曼姿, 李玉艳, 高飞, 刘梦姚, 张洪志, 徐珵, 臧连生, 张礼生, 2020. 丽草蛉滞育预蛹的重要生化物质变化分析. 中国生物防治学报, 36(1): 31–39.]

Wang QS, Ju XL, Huang J, 2014. Predation functional responses of *Coccinella septempunctata Linnaeus* to *Toxoptera aurantii* (Boyer) and security evaluation of several botanical biopesticides. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 36(6): 1247–1252. [王庆森, 鞠晓蕾, 黄建, 2014. 七星瓢虫对茶蚜的捕食功能反应及生物农药的安全性评价. 江西农业大学学报, 36(6): 1247–1252.]

Wang X, Zhang H, Zeng C, Huang CY, Ye S, Yu XF, Liu JF, Yang MF, 2021. Predatory responses of *Aphidoletes aphidimyza* to *Neotoxoptera formosana*. *Plant Protection*, 47(6): 128–133. [王雄, 张慧, 曾琛, 黄纯杨, 叶帅, 于晓飞, 刘健锋, 杨茂发, 2021. 食蚜瘿蚊对葱蚜的捕食作用. 植物保护, 47(6): 128–133.]

Wang XQ, Wang XY, Yu XF, Huang CY, Shen XX, Yang XC, Yang MF, 2019. Morphological ontogeny of *Aphidoletes aphidimyza* (Rondani). *Chinese Journal of Applied Entomology*, 56(4): 832–839. [王秀琴, 王小彦, 于晓飞, 黄纯杨, 申修贤, 杨先才, 杨茂发, 2019. 食蚜瘿蚊全虫态形态记述. 应用昆虫学报, 56(4): 832–839.]

Wen X, Tian LC, Gao GZ, 2023. Functional response of *Chilomenes quadriplagiata* to *Tinocallis kahawaluokalani*. *Xinjiang Academy of Agricultural Sciences*, 60(9): 2266–2272. [文霞, 田立超, 高桂珍, 2023. 四斑月瓢虫对紫薇长斑蚜的捕食功能反应. 新疆农业科学, 60(9): 2266–2272.]

Wu HZ, Huang CY, Wen MX, Zhang WY, Yu XF, Yang MF, Zhang F, 2024. Predation of *Aphidoletes aphidimyza* on *Megoura crassicauda*. *Chinese Journal of Biological Control*, 40(6): 1221–1227. [吴慧子, 黄纯杨, 温明霞, 张伟业, 于晓飞, 杨茂发, 张峰, 2024. 食蚜瘿蚊对豌豆修尾蚜的捕食作用. 中国生物防治学报, 40(6): 1221–1227.]

Wu KJ, Sheng CF, Gong PY, 2004. Equation of predator functional response and estimation of the parameters in it. *Entomological Knowledge*, 41(3): 267–269. [吴坤君, 盛承发, 龚佩瑜, 2004. 捕食性昆虫的功能反应方程及其参数的估算. 昆虫知识, 41(3): 267–269.]

Wu MX, Zhang XY, Zan QA, Zhang HR, 2022. Predatory functional response of *Coccinella septempunctata* to *Megoura crassicauda*. *Journal of Southern Agriculture*, 53(11): 3128–3136. [吴沐秀, 张晓媛, 昝庆安, 张宏瑞, 2022. 七星瓢虫对豌豆修尾蚜的捕食功能反应. 南方农业学报, 53(11): 3128–3136.]

Ye JJ, 2022. Tomato planting and disease and insect pest control methods. *Journal of Seed Industry Guide*, 2022(1): 38–41. [叶俊杰, 2022. 番茄种植及病虫害防治方法. 种业导刊, 2022(1): 38–41.]

Yu CE, Zhu YH, 2011. Comprehensive biological control technologies for greenhouse tomatoes. *China Vegetables*,

2011(11): 28–29. [于翠娥, 朱玉华, 2011. 设施番茄生物防治综合配套技术. 中国蔬菜, 2011(11): 28–29.]

Yu HC, Zhao W, Hou YM, Song XD, Wang CR, Pei HY, Wang Z, Zhuang BL, Sun LF, 2018. Study on diapause of *Ostrinia furnacalis* Guenée population in Harbin. *Journal of Northeast Agricultural University*, 49(12): 1–8. [于洪春, 赵薇, 侯月敏, 宋显东, 王春荣, 裴海英, 王振, 庄宝龙, 孙苓芙, 2018. 亚洲玉米螟哈尔滨种群滞育研究. 东北农业大学学报, 49(12): 1–8.]

Yu WB, 2018. Population characteristics and predation of *Aphidoletes aphidimyza* reared on *Rhopalosiphum maidis* at different temperature. Master dissertation. Yangling: Northwest A&F University. [于文博, 2018. 不同温度下食蚜瘿蚊的生命表与其对玉米蚜的捕食能力研究. 硕士学位论文. 杨凌: 西北农林科技大学.]

Yuan JM, Zhu XL, Zou G, Gou JY, Huang CY, Yang MF, Wu HZ, Yu XF, 2025. Predation functional responses of *Aphidoletes aphidimyza* to *Astegopteryx bambusifoliae*. *Plant Protection*, 51(1): 174–180. [袁进敏, 朱绪立, 邹广, 苟剑渝, 黄纯杨, 杨茂发, 吴慧子, 于晓飞, 2025. 食蚜瘿蚊对竹舞蚜的捕食功能反应. 植物保护, 51(1): 174–180.]

Yuan QT, Gou JY, Huang CY, Shen XX, Wang X, Yang MF, Yu XF, 2022. Effects of different cold storage temperature conditions on the supercooling points and freezing points of *Aphidoletes aphidimyza* (Rondani). *Chinese Journal of Applied Entomology*, 59(2): 399–405. [袁清婷, 苟剑渝, 黄纯杨, 申修贤, 王雄, 杨茂发, 于晓飞, 2022. 不同冷藏条件对食蚜瘿蚊过冷却点和冰点的影响. 应用昆虫学报, 59(2): 399–405.]

Yuan XY, Li HG, Wang YS, Wu SL, Deng YL, Li J, Zhao ZY, Xiao YS, Tan L, 2024. Developmental dynamics of the ovary of *Arma chinensis* and its relationship with photoperiod. *Plant Protection*, 50(4): 118–125, 153. [元晓艳, 李宏光, 王玉生, 伍绍龙, 邓玉莲, 李靖, 赵泽影, 肖艳松, 谭琳, 2024. 蠋蝽卵巢发育动态及其与光周期的关系. 植物保护, 50(4): 118–125, 153.]

Zhang HB, Zhou FC, Gu AX, Zhang F, Wu YH, Han DB, 2019. The control effect of planting *Chrysanthemum coronarium* around broad bean on *Aphis craccivora*. *Journal of Biosafety*, 28(4): 254–258. [张海波, 周福才, 顾爱祥, 张芳, 邬亚红, 韩杜斌, 2019. 种植茼蒿对蚕豆苜蓿蚜的田间控制作用. 生物安全学报, 28(4): 254–258.]

Zhang XY, Wang T, Zha XR, Zan QA, Zhang HR, 2023. Predation of three aphid species on faba bean by *Orius strigicollis*. *Chinese Journal of Biological Control*, 39(1): 29–37. [张晓媛, 王葶, 查旭榕, 昝庆安, 张宏瑞, 2023. 南方小花蝽对为害蚕豆的三种蚜虫的捕食作用. 中国生物防治学报, 39(1): 29–37.]

Zhou J, Sheng HY, Li ZY, Guan YX, Chen KW, 2020. Function response of *Mallada basalis* (Walker) on *Brevicoryne brassicae* (L.) and *Rhopalosiphum maidis* (Fitch). *Journal of Environmental Entomology*, 42(1): 152–156. [周娟, 生惠宇, 李子园, 关迎雪, 陈科伟, 2020. 黄玛草蛉对两种蚜虫的捕食效能. 环境昆虫学报, 42(1): 152–156.]

Zhou JH, Li PL, Naiwuzhati·Zunong, Zheng HN, Huang J, Wang ZH, 2020. Functional response and predation preference of ladybeetle *Propylea japonica* to Asian citrus psyllid *Diaphorina citri*. *Journal of Plant Protection*, 47(5): 1062–1070. [周军辉, 李鹏雷, 乃吾扎提·祖农, 郑卉娜, 黄建, 王竹红, 2020. 龟纹瓢虫对柑橘木虱的捕食功能反应及猎物偏好性. 植物保护学报, 47(5): 1062–1070.]

Zhu XL, Gou JY, Wu HZ, Huang CY, Yang MF, Yang X, Yu XF, 2024. Predation effect of *Aphidoletes aphidimyza* on *Uroleucan formosanum*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 61(1): 109–119. [朱绪立, 苟剑渝, 吴慧子, 黄纯杨, 杨茂发, 杨相, 于晓飞, 2024. 食蚜瘿蚊对莴苣指管蚜的捕食作用. 应用昆虫学报, 61(1): 109–119.]