



台湾甲腹茧蜂寄生行为及寄生功能反应

陈晓菡¹, 何昌本¹, 唐良德², 蔡廷¹, 赵海燕^{1*}

(1. 贵州大学烟草学院, 贵州省烟草品质重点实验室, 贵阳 550025; 2. 贵州大学绿色农药全国重点实验室, 贵州大学绿色农药与农业生物工程教育部重点实验室, 贵阳 550025)

摘要: 台湾甲腹茧蜂 *Chelonus formosanus* 是鳞翅目多科害虫的一种重要卵-幼虫跨期寄生蜂。本团队以斜纹夜蛾 *Spodoptera litura* 卵为对象研究了台湾甲腹茧蜂的寄生行为, 并测试了其斜纹夜蛾和草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 卵的寄生功能反应。研究结果表明, 台湾甲腹茧蜂的寄生行为包括搜寻、检测、清理、刺探、产卵和产卵后清洁六个步骤, 平均每块寄主卵的寄生时间约为 186.1 min。台湾甲腹茧蜂对斜纹夜蛾和草地贪夜蛾卵的寄主数量达到 250 粒时, 其寄生量开始趋于稳定, 均符合 Holling II 功能反应类型。功能反应参数表明, 试验条件下台湾甲腹茧蜂对斜纹夜蛾和草地贪夜蛾卵都具有较高的瞬间攻击率 ($\alpha = 1.1846$ 和 $\alpha = 1.1855$) 和寄生上限 ($Na(max) = 538.45$ 和 $Na(max) = 564.52$) 及较短的处理时间 ($T_h = 0.0019$ d 和 $T_h = 0.0018$ d)。研究结果表明, 台湾甲腹茧蜂对斜纹夜蛾和草地贪夜蛾具有较高的生物防治潜能, 为今后规模化繁育该蜂用于防治这两种重要害虫提供了理论参考。

关键词: 台湾茧蜂茧蜂; 斜纹夜蛾; 草地贪夜蛾; 寄生行为; 功能反应

中图分类号: Q968.1; Q965

文献标识码: A

Parasitic behavior and functional responses of *Chelonus formosanus* (Hymenoptera: Braconidae)

CHEN Xiao-Han¹, HE Chang-Ben¹, TANG Liang-De², CAI Ting¹, ZHAO Hai-Yan^{1*} (1. College of Tobacco Science, Guizhou University, Key Laboratory of Tobacco Quality in Guizhou Province, Guiyang 550025, China; 2. National Key Laboratory of Green Pesticide, Key Laboratory of Green Pesticide and Agricultural Bioengineering, Ministry of Education, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: *Chelonus formosanus* Sonan (Braconidae) serves as a natural enemy of lepidopteran pests in agricultural ecosystems. This study investigated the parasitic behavior of *C. formosanus* on *Spodoptera litura* eggs under laboratory conditions (26±1°C, 75±5% RH, 14L:10D) and evaluated its response to varying densities of *S. litura* and *Spodoptera frugiperda* eggs. The observed parasitic behavior of *C. formosanus* comprised six distinct steps: searched, detected, cleaned, probed, oviposited, and post-oviposition cleaned. The mean duration was 186.1 min per egg mass. *C. formosanus* exhibited a Holling type II functional response model to the eggs of both

基金项目: 天敌昆虫资源发掘利用与新产品创制 (2023YFD1400600); 植保无人机精准防控烟草病虫害研究与应用 (2022XM10)

作者简介: 陈晓菡, 女, 硕士, 研究方向为生物防治, E-mail: chen.xiao.han@foxmail.com

*通讯作者 Author for correspondence: 赵海燕, 女, 博士, 副教授, 研究方向为作物害虫生物防治, E-mail: haitianyan7611@163.com

收稿日期 Received: 2024-07-26; 修回日期 Revision received: 2025-03-08; 接受日期 Accepted: 2025-03-10

pest species, with parasitism rates reaching a plateau at densities of up to 250 eggs. The functional response parameters indicated a high instantaneous attack rate ($\alpha = 1.1846$ vs. 1.1855 for *S. litura* and *S. frugiperda*, respectively), high parasitism efficiency ($Na(max)$: 538.45 and 564.52 , respectively), and short handling time (T_h : 0.0019 and 0.0018 , respectively). These findings demonstrate the remarkable biocontrol potential of *C. formosanus* against both noctuid pests, providing critical theoretical foundations for mass rearing programs and integrated pest management strategies.

Key words: *Chelonus formosanus*; *Spodoptera litura*; *Spodoptera frugiperda*; parasitism behavior; functional response

草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* J. E. Smith 和斜纹夜蛾 *Spodoptera litura* Fabricius 隶属于鳞翅目 Lepidoptera 夜蛾科 Noctuidae, 为世界性分布的两种重要害虫, 均具有寄主植物广泛、暴食性强以及繁殖能力强等特点, 对我国的农作物生产和粮食安全造成了严重威胁(吴秋琳等, 2019)。目前, 化学防治是其主要的防控方法, 然而长期不合理使用化学农药易导致害虫产生抗药性, 并对生态环境造成破坏, 严重危害到人类健康。绿色可持续的生物防治技术是新形势下害虫防治的优先选项。

针对草地贪夜蛾和斜纹夜蛾的生物防治, 病原微生物、捕食性和寄生性天敌已有比较系统的研究(唐璞等, 2019)。多种捕食性天敌昆虫可以取食草地贪夜蛾和斜纹夜蛾的卵和幼虫。例如烟盲蝽 *Cyrtopeltis tenuis* Reuter、蠊蝽 *Arma chinensis* Fallou、叉角厉蝽 *Eocanthecona furcellata* Wolf 和小花蝽 *Orius insidiosus* Say、*Orius similis* Zheng 等(Ren *et al.*, 2022)。由于寄生性天敌控害的高效率和易于规模化扩繁, 寄生蜂比捕食者更受关注。寄生性天敌主要有夜蛾黑卵蜂 *Telenomus remus* Nixon、缘腹绒茧蜂 *Cotesia marginiventris* Cresson、螟蛉盘绒茧蜂 *Cotesia ruficrus* Haliday、棉铃虫齿唇姬蜂 *Camponotus chlorideae* Uchida、淡足侧沟茧蜂 *Microplitis pallidipes* Szépligeti 等, 对草地贪夜蛾和斜纹夜蛾均有一定的防控效果, 但防治效果受到不同的寄主种类、相同寄主不同大小或不同发育阶段等因素的影响(史子涵等, 2023)。但仍然需要发掘新的更高效的生物防治资源用于这两种害虫的防治, 确保粮食安全(Parra *et al.*, 2019)。

台湾甲腹茧蜂 *Chelonus formosanus* Sonan 属于膜翅目 Hymenoptera 茧蜂科 Braconidae, 是灰翅夜蛾属害虫重要的“卵-幼虫”跨期寄生蜂。该蜂首次报道于 1932 年(Sonan, 1932), 随后于 1971 年在印度被发现(Patel *et al.*, 1971), 我国于 1991 年在《中国水稻害虫天敌名录》中有记录(农业部全国植物保护总站, 1991)。台湾甲腹茧蜂是鳞翅目多科害虫的一种十分有效的卵寄生性天敌, 单头日寄生量高、寄生行为受覆毛影响小。海南省农业科学院的科研人员在海南发现台湾甲腹茧蜂并初步研究了该蜂的生物学特性(吉训聪等, 2013), 目前该蜂在我国的台湾、浙江、广东和海南等地有报道(唐继洪等, 2020)。王录超等(2023)研究了不同温度、营养、雌雄比、配对时间和空间大小对台湾甲腹茧蜂交配率的影响, 发现最佳因子(温度为 28°C , 营养为 10%蜂蜜水混 10%白糖水, 雌雄比为 $1:7$, 配对时间为 2 d、

空间大小为长 12 cm、宽 4 cm、高 8 cm) 下其交配率达到了 97.5%，在 13℃条件下贮藏台湾甲腹茧蜂 7 日龄蛹最长能够达到 15 d。台湾甲腹茧蜂在海南对甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua* Hübner 和斜纹夜蛾的寄生率较高，其中 4-12 月份的寄生率分别在 17%~43%和 18%~40%。关于台湾甲腹茧蜂对草地贪夜蛾和斜纹夜蛾的寄生功能反应报道较少，只有余姿蓉（2022）通过台湾甲腹茧蜂在不同温度下对草地贪夜蛾的寄生功能反应研究，但其采用卵粒数较多，为 300~3 100（草地贪夜蛾和斜纹夜蛾实验室种群雌成虫单头日产卵量 50~300），对斜纹夜蛾卵的寄生功能反应尚未报道。因此，本研究在实验室条件下系统观察了台湾甲腹茧蜂的寄生行为以及在不同数量条件下对草地贪夜蛾和斜纹夜蛾卵的寄生功能反应，为后续确定规模繁育中确定蜂卵比提供研究基础，以期明确台湾甲腹茧蜂对两种害虫的控害潜能，为进一步开发应用该蜂防治害虫提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试昆虫

台湾甲腹茧蜂采自海南省农业科学院区（海口市）的玉米田里（被寄生的草地贪夜蛾），经华南农业大学陆永跃教授鉴定为台湾甲腹茧蜂，并在贵州大学西校区烟草学院以斜纹夜蛾为寄主扩繁 30 代，用于试验（温度 26℃±1℃，相对湿度 75%±5%，光周期 L : D=14 h : 10 h）。

草地贪夜蛾卵块在 2019 年采集于贵州省安龙县（25°05'N，105°41'E）的玉米田，并繁育建立实验种群。将卵块放置在培养皿中（直径 10.5 cm，高度 2.5 cm），卵孵化后用人工饲料（主要成分为黄豆粉、麦麸粉、酵母粉、干酪素、琼脂粉等）饲养。将 3~6 龄幼虫单独饲养于 12 孔塑料培养板中。每天检查幼虫的发育情况。待其化蛹后，用镊子将蛹放入培养皿中，并置于养虫笼（长 35.0 cm、宽 35.0 cm、高 35.0 cm）内，笼内壁覆以塑料纸作为成虫产卵基质。新羽化的成虫为其提供浸泡 20%蜂蜜水的棉球，作为补充营养。每天早上收集产在塑料纸上的卵块，备用。

斜纹夜蛾由吉林省农业科学院提供，在 3 龄幼虫时开始群体饲养在 PP 盒（长 30.0 cm、宽 20.0 cm、高 10.0 cm）中直至化蛹，除了人工饲料配方不同，其它处理均与草地贪夜蛾的饲养方法一致（人工饲料主要成分为黄豆粉、麦麸粉、玉米叶粉、酵母粉、干酪素、琼脂粉等）。两种寄主饲养的条件均为温度 26℃±1℃，相对湿度 75%±5%，光周期 L : D=14 h : 10 h 的人工气候室。

1.2 台湾甲腹茧蜂寄生行为观察

将一块斜纹夜蛾卵块放入 500 mL 的玻璃烧杯中，瓶壁滴入一滴 20%蜂蜜水作为营养补充。将一头已交配过无寄生经历的台湾甲腹茧蜂 2 日龄雌蜂引入烧杯中，烧杯中放置当天产下的卵粒数约 200 粒的单层有鳞毛卵块，持续观察并用手机录像记录台湾甲腹茧蜂的寄生过程，从雌蜂开始搜寻寄主直至产卵结束，分别记录产卵行为各步骤所需时间，试验重复 15 次。试验在温度为 27℃±1℃，RH 75%±5%，光周期 14 L : 10 D 的人工气候箱中进行。

1.3 台湾甲腹茧蜂对不同数量寄主卵的寄生功能反应

将 1 头 2 日龄已交配无寄生经历的台湾甲腹茧蜂雌蜂引入烧杯（500 mL），在烧杯壁滴一滴 20% 蜂蜜水作为补充营养，用黑色滤布封口，以保证空气流通。取当天产下的斜纹夜蛾或草地贪夜蛾单层无鳞毛卵块，选取不同粒数的卵块（50、100、150、200、250、300 粒），多余卵粒用毛笔轻拂去，分别放入烧杯中，24 h 后将寄生蜂移出，将卵块取出并放入饲养盒进行饲养。待幼虫不再孵化后，将其置于解剖镜下解剖，对没有孵化的卵和被台湾甲腹茧蜂寄生后导致死亡的卵进行观察并统计被寄生卵的数量。每个处理重复 10 次。试验在温度为 $27^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ ，RH $75\%\pm 5\%$ ，光周期 14 L : 10 D 的人工气候箱中进行。

1.4 数据分析处理

功能反应实验的数据分两个步骤进行分析。首先，利用寄生比例（ N_e/N_0 ）作为初始密度（ N_0 ）的函数的逻辑回归来确定功能响应的形状。通过将数据拟合到模型中确定功能反应的类型：

$$N_e/N_0 = \exp (P_0 + P_1 N_0 + P_2 N_0^2 + P_3 N_0^3) / [1 + \exp (P_0 + P_1 N_0 + P_2 N_0^2 + P_3 N_0^3)] \quad (1)$$

式中（ N_e/N_0 ）为猎物将被消耗的比例， P_0 、 P_1 、 P_2 和 P_3 分别为 SAS 中 CATMOD 程序估计的截距系数、线性系数、二次系数和三次系数的最大似然估计。 P_1 和 P_2 的符号被用来区分曲线的形状。当 $P_1 < 0$ 时，寄生蜂符合 Holling II 功能反应，表明被捕/寄生量随着寄主数量的增加而下降。当 $P_1 > 0$ 和 $P_2 < 0$ 时，寄生蜂拟合 III 型功能反应（Song *et al.*, 2016）。采用 SAS 软件（SAS Institute, 2014）进行分析。

其次，使用寄生者方程估计 Holling II 的处理时间和攻击率系数：

$$N_e = \alpha T N_0 / (1 + \alpha T_h N_0) \quad (2)$$

其中， N_e 是寄生量； N_0 为初始寄主数； T_h 是台湾甲腹茧蜂处理 1 粒卵所花时间； T 为试验时间（d）； α 为瞬间攻击速率。数据采用 SigmaPlot 12.5 软件估计瞬间攻击率（ α ）和处理时间（ T_h ）参数，以及图形的制作。

根据上述所得的瞬间攻击率（ α ），处理时间（ T_h ）和 N_0 的值拟合 Holling 提出的寻找效应（ S ）与寄主数量的模型方程： $S = \alpha / (1 + \alpha T_h N_0)$ （Holling, 1959）。

试验数据使用 SPSS27.0 及 Excel 2020 软件进行统计分析，用 Excel 2020 软件作图。

2 结果与分析

2.1 台湾甲腹茧蜂的寄生行为

台湾甲腹茧蜂寄生产卵行为包括：搜寻、检测、清理、刺探、产卵、产卵后清洁六个部分。（1）搜寻：寄生蜂雌蜂围绕卵块盘旋爬行，触角不断摆动，平均盘旋 2.35 圈，以确定寄主位置，搜索时间介于 5~92 s（图 1-I）；（2）检测：当雌蜂靠近寄主时，爬行速度减慢。在卵块周围不停地用触角拍打卵块，试探确定寄主，检测时间约为 10~97 s，平均 42.5 s（图 1-II）；（3）清理：确认寄主后，如果寄主卵上有杂物（如鳞毛），雌蜂会爬到卵块上，先在卵块上转圈或来回走动，使后足和腹部沾满鳞毛，移动到卵块外约 2~3 cm 处，清理鳞毛

等杂物，如此反复几次，直至卵块上的鳞毛基本清理完毕（图 1-III），此行为花费时间与寄主卵上杂物量成正比；（4）刺探：雌蜂会爬行至清理过的寄主卵块上停下，用后足支撑身体，中足稍微弯曲向两侧稳定身体，前足直立，腹部下垂，伸出产卵器，刺探卵块以寻找适合产卵位置。若不合适，雌蜂会移动并用触角敲打卵块表面后再次刺探，刺探时间平均为 34.6 s，找到合适的产卵位置后会再次用后足清理产卵器，准备开始产卵（图 1-IV）；（5）产卵：在产卵过程中，触角偶尔摆动，后足间断性扒动，产卵时间大约 5 min 左右，偶尔会转动方向，触角向前伸直，腹部做产卵动作，平均产卵时间约为 186.1 min/卵块（图 1-V）；（6）产卵后清洁：产卵结束后，雌蜂会爬离或飞离寄生后的卵块，用前足清理头部鳞毛，中足清理腹部鳞毛，用后足清理腹部和产卵器上的鳞毛（图 1-VI）。

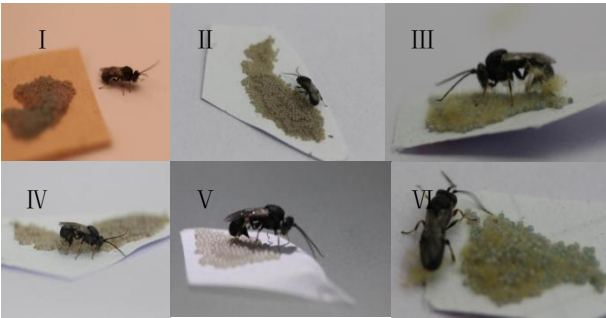


图 1 台湾甲腹茧蜂的寄生行为

Fig. 1 The oviposition behavior of *Chelonus formosanus*

注：I，搜寻；II，检测；III，清理；IV，刺探；V，产卵；VI，产卵后清洁。Note: I, Searched; II, Detected; III, Cleaned; IV, Probed; V, Oviposited; VI, Post-oviposition cleaned.

2.2 台湾甲腹茧蜂对不同数量寄主卵的寄生功能反应

最大似然估计结果表明，台湾甲腹茧蜂寄生斜纹夜蛾和草地贪夜蛾的拟合方程中线性系数（ P_1 ）均呈负值（表 1），寄生蜂的寄生量随寄主卵数量的增加而增加，但达到一定量时（300 粒卵）趋于稳定（图 2），尽管结果中斜纹夜蛾二次系数和三次系数未达到显著水平（ $P>0.05$ ），但截距系数和线性系数的显著性表明寄主数量对寄生蜂的寄生量具有显著影响，类似地，草地贪夜蛾截距系数显著，表明寄主数量对其寄生量的影响具有统计学意义，符合 Holling II 型功能反应曲线。针对寄主卵为 300 粒时尚未呈现稳定状态，将在后续试验中尝试提供更多寄主卵，以观察寄生蜂的寄生行为是否达到饱和状态。

表 1 台湾甲腹茧蜂寄生斜纹夜蛾和草地贪夜蛾 logistic 回归的最大似然估计

Table 1 Maximum-likelihood estimates were obtained from logistic regressions of the proportion of *Spodoptera litura* and *Spodoptera frugiperda* eggs parasitized by *Chelonus formosanus*

寄主 Host	参数 Parameters	估计值 Estimate	标准误 Standard error	卡方值 Chi-square*	P 值 P value
斜纹夜蛾 <i>S. litura</i>	P_0	3.8971	0.5225	55.64	<0.0001
	P_1	-0.0206	0.0093	4.93	0.0264
	P_2	0.000083	0.000051	2.67	0.1021
	P_3	-1.64E-07	8.59E-08	3.66	0.0557

草地贪夜蛾 <i>S. frugiperda</i>	P_0	3.0499	0.5088	35.94	<0.0001
	P_1	-0.00089	0.00921	0.01	0.923
	P_2	-0.00003	0.000051	0.41	0.5232
	P_3	3.58E-08	8.64E-08	0.17	0.6788

注：P0、P1、P2 和 P3 分别是截距系数、线性系数、二次系数和三次系数的最大似然估计。*卡方值为似然比检验的值，用于确定方程系数是否与零有显著差异。Note: P0, P1, P2, and P3 were the maximum likelihood estimates of the intercept, linear, quadratic, and cubic coefficients, respectively. *The chi-square was the test statistic for the likelihood ratio test to determine whether the coefficients differ significantly from zero.

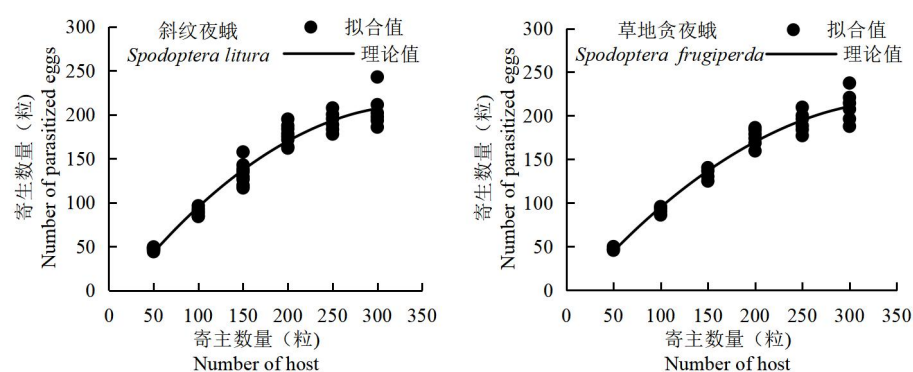


图 2 台湾甲腹茧蜂寄生斜纹夜蛾和草地贪夜蛾的寄生功能反应曲线

Fig. 2 Parasitic functional response curves of *Chelonus formosanus* parasitizing on *Spodoptera litura* and *Spodoptera frugiperda*

台湾甲腹茧蜂对两种夜蛾均具有较强寄生效能（表 2），对斜纹夜蛾和草地贪夜蛾的瞬间攻击率、处理时间以及寄生效能接近。由于台湾甲腹茧蜂处理草地贪夜蛾（ $T_h = 0.0018 \pm 0.0007$ d）的时间略短于斜纹夜蛾（ $T_h = 0.0019 \pm 0.0004$ d），单位时间（1 d）内表现出台湾甲腹茧蜂对草地贪夜蛾有更高寄生上限（ $Na(max) = 564.52$ ）。

表 2 台湾甲腹茧蜂寄生斜纹夜蛾和草地贪夜蛾的功能反应参数

Table 2 Parasitic functional response parameters of *Chelonus formosanus* were studied on *Spodoptera litura* and *Spodoptera frugiperda*

寄主 Host	功能反应曲线 Holling's Disc Equation of functional response	瞬间攻击率（ α ） Instantaneous attack rate	处理时间（ T_h ） Handling time	寄生上限 $Na(max)$ Maximum number of parasitized hosts	决定系数（ R^2 ） Coefficient of determination
斜纹夜蛾 <i>S. litura</i>	$N_e=1.1846N_0/(1+0.0022N_0)$	1.1846 ± 0.1307	0.0019 ± 0.0007	538.45	0.9919
草地贪夜蛾 <i>S. frugiperda</i>	$N_e=1.1855N_0/(1+0.0021N_0)$	1.1855 ± 0.1124	0.0018 ± 0.0004	564.52	0.9940

相同条件下，台湾甲腹茧蜂对斜纹夜蛾和草地贪夜蛾的搜寻效应均随着寄主数量的增加而降低。台湾甲腹茧蜂对斜纹夜蛾的搜寻效应要低于对草地贪夜蛾的搜寻效应（图 3）。

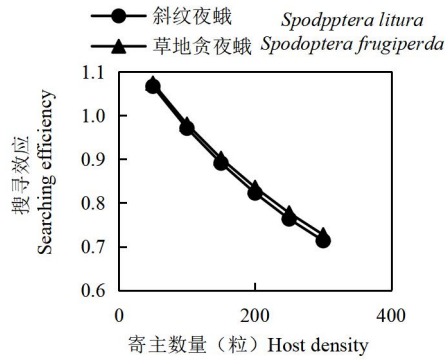


图3 台湾甲腹茧蜂在不同数量寄主卵下的搜寻效应

Fig. 3 Relationship between the searching efficiency of *Chelonus formosanus* and the egg density of *Spodoptera litura* and *Spodoptera frugiperda* was studied

3 结论与讨论

寄主定位是寄生蜂生活史中的核心过程,因为寻找合适的寄主对其是否繁殖成功至关重要 (Vinson, 1998)。寄生蜂寻找寄主的策略是利用寄主相关的化学线索,包括性信息素和聚集信息素 (Xu *et al.*, 2014),或者利用寄主成虫残留物,如性腺分泌物。已有研究表明,雌性 *Chelonus insularis* Cresson 被受到草地贪夜蛾幼虫为害的玉米植株所吸引,并确定两种烯类物质 α -蒎烯和 α -香根烯是引诱 *C. insularis* 定向至玉米寄主植物的关键化合物 (Ortiz-Carreón *et al.*, 2019)。除此之外,雌性 *C. insularis* 能够被寄主卵散发的挥发性物质所吸引 (Roque-Romero *et al.*, 2020)。本研究结果发现,已交配未产卵的台湾甲腹茧蜂 2 日龄雌蜂在 500 mL 烧杯中对草地贪夜蛾和斜纹夜蛾的 200 粒单层无鳞毛卵块均具有较强的搜寻能力,平均时长仅为 48.5 s,表明寄主卵表存在吸引寄生蜂的信息挥发物,其确切的化合物还有待鉴定。发现寄主是雌蜂产卵的第一步,也是极为重要的一步。然后,雌蜂借其触角快速精准地找到寄主和合适的产卵部位。我们通过对台湾甲腹茧蜂寄生行为的系统观察,定性描述了该蜂的寄生行为由 6 个步骤组成,这与枯叶蛾短角平腹小蜂 *Mesocorybus trabealis* 寄生行为基本一致 (Wang *et al.*, 2024)。某些寄生蜂能够进行产卵标记,避免在同一个卵上进行多次产卵,导致过寄生现象和影响繁殖效率 (李国清等, 2006)。

一些鳞翅目昆虫在产卵时会在卵块表面覆上一层毛作为物理防御措施,这些覆毛可以影响天敌的寄生或捕食行为,卵层数的增加也会带来天敌的寄生或捕食行为的难度及所需时间。例如, *Trichogramma embryophagum* 只能寄生没有覆毛的寄主卵块或没有覆盖到的卵粒 (Tsankov, 1990)。根据覆毛程度的不同,灰翅夜蛾 *Spodoptera mauritia* 属害虫卵块覆毛可以分为不同级别。例如,松毛虫赤眼蜂 *Trichogramma dendrolimi* Matsumura 对覆毛最厚的 III 级草地贪夜蛾卵的卵块寄生率为 23.1%,卵粒寄生率甚至不到 2% (Hou *et al.*, 2022)。螟黄赤眼蜂 *Trichogramma chilonis* Ishii 对甜菜夜蛾卵的寄生行为也表现出类似地覆毛效应。夜蛾黑卵蜂是能够有效防治灰翅夜蛾属害虫的寄生蜂种类 (Pomari *et al.*, 2012),最近研究表明,夜蛾黑卵蜂在不同覆毛程度的灰翅夜蛾属卵上表现出非常稳定和优异的性能,寄生率不受卵

块覆毛的影响,在不同级别的卵上,卵粒寄生率约为 50%,而卵块寄生率可以达到 100%。而在本文的行为学研究中发现,台湾甲腹茧蜂一旦确认了寄主,雌蜂会爬到寄主卵块上,利用后足和腹部清理卵块覆毛。寄生结束后,几乎看不到卵块上的覆毛。这一行为使得寄主卵表覆毛不对台湾甲腹茧蜂的寄生能力产生影响,这一行为背后的机制还有待深入地解析。

功能反应已被广泛用于评估捕食/寄生性天敌的控害潜能,并被作为筛选害虫生物防治候选天敌的重要方法 (Zheng *et al.*, 2017)。处理时间是消耗率和捕食效能的良好指标,因为它反映了捕获和杀死猎物所需的累积时间 (Ali *et al.*, 2011)。相同条件下夜蛾黑卵蜂每处理一粒斜纹夜蛾卵需要花费 57.0 s,而每处理一粒草地贪夜蛾卵只需要 40.6 s (Shen *et al.*, 2023)。本研究结果表明,台湾甲腹茧蜂处理一粒斜纹夜蛾卵只需 6.8 s,而处理一粒草地贪夜蛾卵则仅需 6.5 s。与夜蛾黑卵蜂相比,台湾甲腹茧蜂所花费的时间更短,这表明其在单位时间内能够寄生更多的寄主卵,而且台湾甲腹茧蜂一生可寄生超过 2000 粒以上的草地贪夜蛾卵,因而有更大的开发应用潜能。此外,随着卵数量的增加(从 50 到 300 粒),一头雌性夜蛾黑卵蜂每天可寄生的草地贪夜蛾卵数量介于 43.2~119.2 粒之间 (Laminou *et al.*, 2023)。而在相同的卵粒数条件下,台湾甲腹茧蜂每天可寄生 48.0~210.0 粒草地贪夜蛾卵。考虑到处理时间和产卵量的差异,台湾甲腹茧蜂可能是适合防治斜纹夜蛾和草地贪夜蛾的候选优势寄生蜂。同时在田间释放台湾甲腹茧蜂控制斜纹夜蛾和草地贪夜蛾时,应该根据寄主的密度合理的释放台湾甲腹茧蜂,在节约成本的同时达到最好的控害效果。

综上所述,台湾甲腹茧蜂对斜纹夜蛾和草地贪夜蛾均较强的控害潜能。台湾甲腹茧蜂的清理寄主卵表覆毛行为可帮其成功寄生。由于野外环境的复杂性,可能对寄生蜂的寄生效果产生不同程度的影响,因此在利用该蜂防治靶标害虫时,还需要通过田间放蜂试验来检验其实际控害能力。

参考文献 (References)

- Ali M, Naif AA, Huang D. Prey consumption and functional response of a phytoseiid predator, *Neoseiulus womersleyi*, feeding on spider mite, *Tetranychus macfarlanei* [J]. *Journal of Insect Science*, 2011, 11 (1): 167.
- Holling CS. Some characteristics of simple types of predation and parasitism [J]. *The Canadian Entomologist*, 1959, 91 (7): 385-398.
- Hou YY, Xu W, Desneux N, *et al.* *Spodoptera frugiperda* egg mass scale thickness modulates *Trichogramma* parasitoid performance [J]. *Entomologia Generalis*, 2022, 42 (4): 589-596.
- Ji XC, Yue JJ, Qin S, *et al.* Biological characteristics of the Taiwanese parasitoid wasp, *Telenomus taiwanensis* [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2013, 29 (1): 153-156. [吉训聪, 岳建军, 秦双, 等. 台湾甲腹茧蜂的生物学特性 [J]. 中国生物防治学报, 2013, 29 (1): 153-156]
- Laminou SA, Ba MN, Karimoune L, *et al.* Parasitism of *Telenomus remus* Nixon on *Spodoptera frugiperda* JE Smith and acceptability of *Spodoptera littoralis* Boisduval as factitious host [J]. *Biological Control*, 2023, 183: 105242.
- Li GQ, Mu LL. Competition among parasitoids during the searching and oviposition process on hosts [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 4: 1261-1269. [李国清, 慕莉莉. 拟寄生蜂搜索产卵过程中对寄主的竞争 [J]. 生态学报, 2006, 4: 1261-1269]
- National General Station of Plant Protection, Ministry of Agriculture, China. Rice Pest List [M]. Beijing: Science Press, 1991. [农业部全国植物保护总站. 中国水稻害虫名录 [M]. 北京: 科学出版社, 1991]
- Ortiz-Carreón FR, Rojas JC, Cisneros J, *et al.* Herbivore-induced volatiles from maize plants attract *Chelonus insularis*, an egg-larval parasitoid of the fall armyworm [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2019, 45 (3): 326-337.
- Parra PJR, Junior CA. Applied biological control in Brazil: from laboratory assays to field application [J]. *Journal of Insect Science*, 2019, 19 (2): 5-5.
- Patel RC, Patel JC, Patel JK. New records of parasites of *Heliothis armigera* (Hbn.) and *Heliothis peltigera* Schiff. from Gujarat [J].

- Indian Journal of Entomology*, 1971, 33 (2): 223-224.
- Pomari AF, Bueno ADF, Bueno RCODE, *et al.* Biological characteristics and thermal requirements of the biological control agent *Telenomus remus* (Hymenoptera: Platygasteridae) reared on eggs of different species of the genus *Spodoptera* (Lepidoptera: Noctuidae) [J]. *Annals of the Entomological Society of America*, 2012, 105 (1): 73-81.
- Ren XY, Huang J, Li XW, *et al.* Frozen lepidopteran larvae as promising alternative factitious prey for rearing of *Orius* species [J]. *Entomologia Generalis*, 2022, 42 (6): 959-966.
- Roque-Romero L, Cisneros J, Rojas JC, *et al.* Attraction of *Chelonus insularis* to host and host habitat volatiles during the search of *Spodoptera frugiperda* eggs [J]. *Biological Control*, 2020, 140: 104100.
- Shen Z, Liu LH, Zang LS, *et al.* Evaluation of *Telenomus remus* (Hymenoptera: Platygasteridae) as a biocontrol agent of *Spodoptera litura* (Lepidoptera: Noctuidae) based on two-sex life table and functional response analyses [J]. *Cabi Agriculture and Bioscience*, 2023, 4 (1): 48.
- Shi ZH, Yang YS, Wang YS, *et al.* Preliminary study on the indoor parasitism effect of *Chelonus munakatae* on *Spodoptera frugiperda* larvae [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2023, 45 (6): 1645-1652. [史子涵, 杨艺帅, 王玉生, 等. 棉铃虫齿唇姬蜂对草地贪夜蛾幼虫的室内寄生效果初探 [J]. 环境昆虫学报, 2023, 45 (6): 1645-1652]
- Sonan J. Notes on some Braconidae and Ichneumonidae from Formosa, with Descriptions of 18 new Species [J]. 1932.
- Song ZW, Zheng Y, Zhang BX, *et al.* Prey consumption and functional response of *Neoseiulus californicus* and *Neoseiulus longispinosus* (Acari: Phytoseiidae) on *Tetranychus urticae* and *Tetranychus kanzawai* (Acari: Tetranychidae) [J]. *Systematic and Applied Acarology*, 2016, 21 (7): 936-946.
- Tang JH, Lv BQ, Lu H, *et al.* Survey and basic biological observations of parasitoids of *Spodoptera frugiperda* in Hainan [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2020, 41 (6): 1189-1195. [唐继洪, 吕宝乾, 卢辉, 等. 海南草地贪夜蛾寄生蜂调查与基础生物学观察 [J]. 热带作物学报, 2020, 41 (6): 1189-1195]
- Tang P, WangZZ, Wu Q, *et al.* Natural enemies of *Spodoptera frugiperda* and their application in biological control [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2019, 56 (3): 370-381. [唐璞, 王知知, 吴琼, 等. 草地贪夜蛾的天敌资源及其生物防治中的应用 [J]. 应用昆虫学报, 2019, 56 (3): 370-381]
- Tsankov G. Egg parasitoids of the pine processionary moth, *Thaumetopoea pityocampa* (Den. & Schiff.) (Lep., Thaumetopeidae) in Bulgaria: Species, importance, biology and behaviour [J]. *Journal of Applied Entomology*, 1990, 110 (1-5): 7-13.
- Vinson SB. The general host selection behavior of parasitoid Hymenoptera and a comparison of initial strategies utilized by larvaphagous and oophagous species [J]. *Biological control*, 1998, 11 (2): 79-96.
- Wang LC, Lin ZF, Jia JJ, *et al.* Effects of different factors on the mating of the Taiwanese parasitoid wasp, *Telenomus taiwanensis* [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2023, 39 (4): 774-781. [王录超, 林珠凤, 贾静静, 等. 不同因子对台湾甲腹茧蜂交配的影响 [J]. 中国生物防治学报, 2023, 39 (4): 774-781]
- Wang LC, Lin ZF, Jia JJ, *et al.* Effects of low temperature storage on the biological characteristics of 7-day-old pupae of the Taiwanese parasitoid wasp, *Telenomus taiwanensis* [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2023, 66 (6): 797-804. [王录超, 林珠凤, 贾静静, 等. 低温贮藏 7 日龄蛹对台湾甲腹茧蜂生物学特性的影响 [J]. 昆虫学报, 2023, 66 (6): 797-804]
- Wang RZ, Chen X, Zhou H, *et al.* Parasitic behavior and developmental morphology of *Mesocormys trabalae* (Hymenoptera: Eupelmidae), a promising parasitoid of the Japanese giant silkworm *Caligula japonica* (Lepidoptera: Saturniidae) [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2024, 117 (4): 1447-1458.
- Wu QL, Jiang YY, Wu KM. Pathway analysis of *Spodoptera frugiperda* migrating from Myanmar to China [J]. *Plant Protection*, 2019, 45 (2): 1-6, 18. [吴秋琳, 姜玉英, 吴孔明. 草地贪夜蛾缅甸虫源迁入中国的路径分析 [J]. 植物保护, 2019, 45 (2): 1-6, 18]
- Xu J, Huigens ME, Orr D, *et al.* Differential response of *Trichogramma* wasps to extreme sex pheromone types of the noctuid moth *Heliothis virescens* [J]. *Ecological Entomology*, 2014, 39 (5): 627-636.
- Yu ZR. A Preliminary Evaluation on Basic Biology and Control Potential of *Spodoptera frugiperda* Parasitized by *Chelonus formosanus* Sonan [D]. Haikou: Hainan University, 2022. [余姿蓉. 台湾甲腹茧蜂寄生草地贪夜蛾基础生物学及防控潜能初步评价 [D]. 海口: 海南大学, 2022]
- Zheng Y, De Clercq P, Song ZW, *et al.* Functional response of two *Neoseiulus* species preying on *Tetranychus urticae* Koch [J]. *Systematic and Applied Acarology*, 2017, 22 (7): 1059-1068.