烟盲蝽对丽蚜小蜂寄生效果的影响*

彭玉帛** 田艳丽 刘树生 刘银泉***

（浙江大学昆虫科学研究所，农业农村部作物病虫分子生物学重点实验室，
浙江省作物病虫生物学与生态调控重点实验室，杭州 310058）

摘 要 **【目的】** 了解捕食性天敌烟盲蝽 *Nesidiocoris tenuis* 和寄生性天敌丽蚜小蜂 *Encarsia formosa* 的种间互作关系，优化 2 种天敌联合应用方式以提高对烟粉虱 *Bemisia tabaci* 的防控效果。**【方法】** 通过不同的天敌释放方式进行捕食观察和 2 种烟粉虱密度的种群试验，测定烟盲蝽对被丽蚜小蜂寄生后不同发育时间的烟粉虱若虫的捕食作用和偏好性，并评估烟盲蝽对丽蚜小蜂寄生率及控害效果的影响。**【结果】** 烟盲蝽可以且偏好捕食被丽蚜小蜂寄生后寄生蜂处于卵期和幼虫期的烟粉虱若虫，而随着丽蚜小蜂发育至蛹期，烟盲蝽对丽蚜小蜂寄生的烟粉虱若虫的取食率从 85%急剧减少到 11%。在 2 种烟粉虱种群密度下，采取同时释放以及间隔 10 d 先后释放丽蚜小蜂和烟盲蝽 2 种释放方式，烟盲蝽对丽蚜小蜂寄生率和控害效果影响较小；间隔 3 d 先后释放丽蚜小蜂和烟盲蝽，烟盲蝽会明显降低丽蚜小蜂的寄生率和控害效果。**【结论】** 烟盲蝽对丽蚜小蜂的捕食量会随后者的发育阶段而变化，在联合应用这 2 种天敌对烟粉虱进行防控时，应避免丽蚜小蜂释放后 3 d 释放烟盲蝽，有助于减少烟盲蝽对丽蚜小蜂的捕食，增强对烟粉虱的联合控害效果。

关键词 烟盲蝽；丽蚜小蜂；烟粉虱；种间互作；集团内捕食

The effect of *Nesidiocoris tenuis* (Hemiptera: Miridae) on the parasitism of *Encarsia formosa* (Hymenoptera: Aphelinidae)

PENG Yu-Bo** TIAN Yan-Li LIU Shu-Sheng LIU Yin-Quan***

(Institute of Insect Sciences, Zhejiang University, Ministry of Agricultural and Rural Affairs Key Laboratory of Molecular Biology of Crop Pathogens and Insect Pests, Zhejiang Key Laboratory of Biology and Ecological Regulation of Crop Pathogens and Insects, Hangzhou 310058, China)

Abstract **[Aim]** The aim of this study is to investigate the interspecific interactions between the predator *Nesidiocoris tenuis* and the parasitoid *Encarsia formosa*, with the goal to optimize the combined use of these two natural enemies in controlling the whitefly *Bemisia tabaci*. **[Methods]** Through different release methods of natural enemies and two host density experimental design, tests were conducted to quantify the predation and preference of *N. tenuis* on unparasitized whitefly nymphs and parasitized whitefly nymphs at different developmental stages. Experimental populations were then observed to evaluate the effects of predation on the parasitism rate and control efficacy of *E. formosa*. **[Results]** Compared with unparasitized whitefly nymphs, *N. tenuis* displayed a preference for predating parasitized whitefly nymphs when the parasitoids inside the hosts were at the egg and larval stages. However, the predation rate decreased significantly from 85% to 11% once the parasitoids reached the pupal stage. When comparing the two whitefly population densities, the parasitism rate and control efficacy of *E. formosa* was not significantly affected by *N. tenuis* when *E. formosa* and *N. tenuis* were released simultaneously or when *E. formosa* was released 10 d in advance. However, there was a significant decrease in the parasitism rate and control efficacy of *E. formosa* when *E. formosa* was released only 3 d before *N. tenuis*. **[Conclusion]** The predation of *N. tenuis* on

*资助项目 Supported projects：国家重点研发计划项目（2021YFC2600104）；国家大宗蔬菜产业技术体系（CARS-23-C05）；浙江省科技计划（2021C02045）

**第一作者 First author，E-mail：pengyubo17@163.com

***通讯作者 Corresponding author，E-mail：yqliu@zju.edu.cn

收稿日期 Received：2023-06-25；接受日期 Accepted：2023-09-05

E. formosa varies depending on the developmental stage of the parasitoid. When attempting to use *E. formosa* and *N. tenuis* in combination for whitefly control, it should be avoided the release of *N. tenuis* 3 d after *E. formosa*, to reduce the predation of *N. tenuis* on *E. formosa*, and in turn enhance their joint control efficacy on the whitefly.

Key words　*Nesidiocoris tenuis*; *Encarsia formosa*; *Bemisia tabaci*; interspecific interaction; intraguild predation

烟粉虱 *Bemisia tabaci* 是蔬菜、花卉和棉花等经济作物上的重要害虫，是一个包括至少 44 个隐存种的物种复合体，其中 Middle East Asia Minor 1（MEAM1）和 Mediterranean 全球入侵隐存种在中国广泛分布（刘银泉和刘树生, 2012; Kanakala and Ghanim, 2019）。烟粉虱天敌昆虫种类丰富，我国已报道 168 种，其中捕食性 109 种，寄生性 59 种（窦文珺等, 2020）。在捕食性天敌中，多种盲蝽展现出较强的控害潜能（窦文珺等, 2020; 李星星等, 2021）。在寄生性天敌中，丽蚜小蜂 *Encarsia formosa* 是烟粉虱的一种优势天敌。该蜂孤雌生殖，通过寄生或取食寄主对烟粉虱有较好的控害效果，在国内外已开展了商业化生产和推广应用（程洪坤等, 1989; Hoddle *et al*., 1998; 郭义等, 2007; 张君明等, 2010; 陶笑等, 2018; 李星星等, 2021）。

自然条件下，常有多种天敌捕食或寄生同一种害虫的现象(马克争等, 2004; 邵越等, 2019)。在生物防治的实践中，需要考虑是否有必要以及如何联合利用多种天敌增强对害虫的控害效果。丽蚜小蜂偏好寄生 3-4 龄烟粉虱若虫（Enkegaard, 1993; 张世泽等, 2003），而捕食性天敌东亚小花蝽 *Orius sauteri* 偏好捕食烟粉虱卵和低龄若虫（刘爽, 2006），2 种天敌在温室条件下联合释放增强了对烟粉虱各个虫态的持续控害能力（李姝等, 2014）。另一种捕食性天敌日本刀角瓢虫 *Serangium japonicum* 和丽蚜小蜂的功能反应试验表明，二者共同作用比其单独作用时各自的最大捕食量或寄生量均显著增加，猎物处理时间也显著变短，表明二者共存时竞争者可能会刺激对方的捕食或寄生从而起到增效作用（马丽君等, 2018）。但也有研究表明，海氏桨角蚜小蜂 *Eretmocerus hayati* 与丽蚜小蜂在各自单独作用时，2 种寄生蜂对烟粉虱的寄生率和取食致死率差异不显著，在二者共存时对烟粉虱的控制作用没有明显的增效，但是海氏桨角蚜小蜂的寄生率显著高于丽蚜小蜂，前者对后者有一定干扰作用（邵越等, 2019）。由于天敌之间的互作关系复杂多样，多种天敌联合应用的效果是否优于单一天敌取决于不同天敌之间的具体组合（Ikegawa *et al*., 2015）。因此，联合应用多种天敌之前，有必要了解天敌间的互作关系以研发适当的天敌组合在生物防治的实践中应用。

烟盲蝽 *Nesidiocoris tenuis* 是一种杂食性的天敌昆虫，对粉虱和蓟马等小型害虫及一些鳞翅目害虫的卵和低龄幼虫有很好的捕食作用，近年来受到重视，也开始有商业化生产应用（Urbaneja *et al*., 2009; 胡月等, 2010; 侯峥嵘等, 2020; Owashi *et al*., 2020; Pérez-Hedo *et al*., 2022）。近期，李青超等（2022）开展了烟盲蝽和丽蚜小蜂联合防治温室白粉虱 *Trialeurodes vaporariorum* 的技术研究，结果表明 2 种天敌协同作用对温室白粉虱的防效达 90%以上，但该研究没有比较联合释放 2 种天敌与单独释放其中一种天敌的防效。田间调查也发现，烟盲蝽和丽蚜小蜂都是烟粉虱的优势天敌种类（李星星等, 2021; 李明江等, 2023），因此，研究烟盲蝽和丽蚜小蜂的互作关系有助于理解 2 种天敌在田间的发生动态及优化两者联合应用的技术。本研究通过行为学和种群生态学方法研究烟盲蝽对丽蚜小蜂的影响，旨在明确：（1）烟盲蝽是否捕食已被丽蚜小蜂寄生过的烟粉虱若虫以及捕食作用何时易发生；（2）与已被丽蚜小蜂寄生的烟粉虱若虫相比，烟盲蝽是否偏好捕食未被寄生的烟粉虱；（3）烟盲蝽对丽蚜小蜂寄生率及其控害效果的影响。

1　材料与方法

1.1　供试昆虫及植物

烟粉虱 MEAM1 隐存种（登录号：

KM821540）在 2012 年浙江杭州甘蓝上采集，以棉花（品种为浙棉 1793）为寄主植物室内继代饲养。烟盲蝽种群 2020 年采集于江西省高安市芝麻作物，室内以芝麻（品种为航丰 1 号）为寄主植物、MEAM1 烟粉虱为猎物饲养。丽蚜小蜂室内种群以棉花上的 MEAM1 烟粉虱为寄主继代饲养。供试昆虫饲养在温度为（26±1）℃，相对湿度为 50%-70%，光周期为 14 L：10 D 的人工气候室内（浙江求是人工环境有限公司，型号 MCGS）。供试棉花种植在玻璃温室内，生长至 5-6 片真叶时供试。玻璃温室条件为：自然光照，温度 22-28 ℃，相对湿度 50%-80%。

1.2 烟粉虱 3 龄若虫及不同发育阶段丽蚜小蜂的获取

把供试棉花植株由温室移到人工气候室内，在植株中部叶片固定夹叶笼（臧连生等, 2005），每个夹叶笼内接入烟粉虱雌雄成虫各 40 头左右，产卵 1 d 后移除，继续饲养 13 d 后烟粉虱发育至 3 龄若虫，用解剖针剔除多余个体，每个夹叶笼内保留约 40 头 3 龄若虫，然后在每个夹叶笼内接入 7 头羽化 3 d 内的丽蚜小蜂，产卵寄生 1 d 后移除，获得被寄生的烟粉虱若虫。依据试验设计，在不同时间点先后获得不同批次被寄生的烟粉虱 3 龄若虫继续饲养，即可在同一天获得被寄生后几批发育不同天数的烟粉虱若虫和处于不同发育阶段的丽蚜小蜂用于试验。

1.3 烟盲蝽对幼期丽蚜小蜂的捕食试验

根据丽蚜小蜂在烟粉虱若虫体内的发育情况及试验数据分析的需要，设置了 7 个处理（表 1）。鉴于本试验是为了测试烟盲蝽是否捕食已被丽蚜小蜂寄生的烟粉虱若虫并进而捕食幼期的丽蚜小蜂，首先需要保证在相关的试验处理中，提供给烟盲蝽捕食的烟粉虱若虫是已被丽蚜小蜂寄生的若虫。由于丽蚜小蜂寄生后幼蜂处于卵期和幼虫期时从外观难以判别烟粉虱若虫是否已被寄生，因此为了相关试验处理中在引入烟盲蝽前绝大部分烟粉虱若虫能被寄生，依据预试验结果每个夹叶笼接入了 7 头寄生蜂。同时因为丽蚜小蜂除产卵寄生寄主还有取食寄主的习性，提供给丽蚜小蜂产卵寄生的烟粉虱若虫的一些个体在处理过程中会被取食，因此在接入烟盲蝽之前，需再次观察计数每个夹叶笼内烟粉虱虫口数量。在 7 个处理中，对照 CK 不接入任何天敌，目的为确认烟粉虱若虫的发育状态与存活率。处理 N 只接入 1 头烟盲蝽雌虫测试其对未被寄生的烟粉虱若虫的取食率。处理 F 只接入 7 头丽蚜小蜂测试其对烟粉虱若虫的寄生率。处理 F1+N、

表 1 烟盲蝽对丽蚜小蜂捕食行为试验设置

Table 1 Description of treatments on predation of *Encarsia formosa* by *Nesidiocoris tenuis*

处理代码 Code	处理内容描述 Description of treatments	重复数 Number of repeats
CK	仅烟粉虱若虫，没有天敌接入 Only nymphs of *B. tabaci*, natural enemies were not introduced	6
N	只接入 1 头烟盲蝽雌成虫 Only 1 female adult of *N. tenuis* was introduced	9
F	只接入 7 头丽蚜小蜂成蜂 Only 7 adults of *E. formosa* were introduced	13
F1+N	丽蚜小蜂寄生后发育 1 d 接入 1 头烟盲蝽雌成虫 *B. tabaci* nymphs were parasitized and 1 d later a female *N. tenuis* was introduced	19
F6+N	丽蚜小蜂寄生后发育 6 d 接入 1 头烟盲蝽雌成虫 *B. tabaci* nymphs were parasitized and 6 d later a female *N. tenuis* was introduced	20
F8+N	丽蚜小蜂寄生后发育 8 d 接入 1 头烟盲蝽雌成虫 *B. tabaci* nymphs were parasitized and 8 d later a female *N. tenuis* was introduced	15
F12+N	丽蚜小蜂寄生后发育 12 d 接入 1 头烟盲蝽雌成虫 *B. tabaci* nymphs were parasitized and 12 d later a female *N. tenuis* was introduced	16

F6+N、F8+N 和 F12+N 分别在接入 7 头丽蚜小蜂寄生 1 d 后不同时间再接 1 头烟盲蝽雌虫，测试烟盲蝽对被丽蚜小蜂寄生后发育 1、6、8 和 12 d 的烟粉虱若虫的取食率，这 4 个处理依次对应于烟粉虱体内丽蚜小蜂的卵期、幼虫期、预蛹期和蛹期。具体方法为按照 1.2 节操作步骤，在同一天获得未被寄生的烟粉虱 3 龄若虫及被丽蚜小蜂寄生后发育 1、6、8 和 12 d 的若虫，先计数每个夹叶笼内的虫数（由于部分个体已被丽蚜小蜂取食，每个夹叶笼内留存若虫约 30 头），然后在 N、F1+N、F6+N、F8+N 和 F12+N 中，将同一批羽化 5 d 内已饥饿处理 16 h 的烟盲蝽雌成虫单头接入各个夹叶笼，取食 7-8 h 后取出烟盲蝽，蔡氏体视镜（Carl Zeiss Stemi 305）下观察记录未被取食的烟粉虱数量，计算烟盲蝽对不同处理中的烟粉虱的取食率。本试验在上述人工气候室内进行。

1.4　丽蚜小蜂寄生对烟盲蝽捕食偏好性影响试验

按照 1.2 节方法准备烟粉虱 3 龄若虫（每个夹叶笼 40 头）及被丽蚜小蜂寄生后发育 1 和 6 d 的若虫。本试验中在供试棉花植株的每片叶上分左右固定 2 个夹叶笼，同一片叶的每个夹叶笼按试验设计（表 2）分配为不同的处理，即一片叶上的 2 个夹叶笼内为表 2 中的同一个处理组合的一个重复。最后把 2 个夹叶笼移走，用 80 目的抽绳网袋罩住棉花叶片，在网袋内接入饥饿处理 16 h 后的单头烟盲蝽雌虫，取食 7-8 h 后移除烟盲蝽成虫，并分别计数同一叶片左右两处存活的烟粉虱若虫数量，比较烟盲蝽对不同状态的烟粉虱若虫取食偏好性。本试验在人工气候室内完成。

表 2　丽蚜小蜂对烟盲蝽取食偏好性影响试验设置

Table 2　Experimental design for testing the feeding preference of *Nesidiocoris tenuis* effected by *Encarsia formosa*

代码 Code	处理内容 Treatment	重复数 Number of repeats
F6 *vs*. F1	被寄生后发育 6 d 的烟粉虱若虫 *vs*. 被寄生后发育 1 d 烟粉虱若虫 *B. tabaci* nymphs developing for 6 d after parasitism *vs. B. tabaci* nymphs developing for 1 d after parasitism	14
F6 *vs*. B	被寄生后发育 6 d 的烟粉虱若虫 *vs*. 未被寄生的烟粉虱若虫 *B. tabaci* nymphs developing for 6 d after parasitism *vs.* unparasitized *B. tabaci* nymphs	14
F1 *vs*. B	被寄生后发育 1 d 烟粉虱若虫 *vs*. 未被寄生的烟粉虱若虫 *B. tabaci* nymphs developing for 1 d after parasitism *vs.* unparasitized *B. tabaci* nymphs	15

1.5　烟盲蝽对丽蚜小蜂寄生率及控害效果的影响试验

按照 1.2 节方法准备烟粉虱 3 龄若虫，在每株棉花植株中部留 4 片真叶，每片叶固定 1 个夹叶笼。将夹叶笼内的烟粉虱若虫保留数量分为高、低 2 种种群密度，高密度和低密度种群中，每夹叶笼内 3 龄烟粉虱若虫分别为 110-120 和 30-40 头，使得每株棉花上若虫总数分别为 440-480 和 120-140 头。烟粉虱 3 龄若虫数量确定好后，把夹叶笼移去，整株棉花放置于 100 目的纱网笼内（50 cm × 40 cm × 50 cm），按设定的 4 个处理向纱网笼内释放相应的天敌并及时移除（表 3）：对照 F 仅接丽蚜小蜂 10 头，不接烟盲蝽；处理 FN、f+N 和 F+N 中丽蚜小蜂和烟盲蝽的释放时间分别间隔 0、3 和 10 d。在处理 F+N 中的烟盲蝽移除 3 d 后，计数 4 个处理中每株棉花上（即每个重复）烟粉虱蛹壳、处于蛹期的丽蚜小蜂和丽蚜小蜂羽化后留下的蛹壳。烟粉虱蛹壳透明，体视镜下可见 T 形羽化孔；丽蚜小蜂蛹壳有色素沉积，羽化孔为圆形，预蛹期和蛹期丽蚜小蜂有明显色素沉积，称为黑蛹。根据上述统计数据计算丽蚜小蜂的寄生率和烟粉虱种群数量的变化。本试验在玻璃温室内完成。

1.6　数据分析

对 1.3 节中烟盲蝽取食率和 1.5 节中丽蚜小蜂寄生率做平方根反正弦变换后，进行单因素方

表 3 烟盲蝽对丽蚜小蜂寄生率及控害效果的影响试验设置

Table 3 Description of treatments on parasitim rate and control effect of *Encarsia formosa* influenced by different releasing methods of *Nesidiocoris tenuis*

代码 Code	处理内容描述 Description of treatments	重复数 Number of repeats	
		低密度 Low density	高密度 High density
F	单独接入 10 头丽蚜小蜂 2 d Only 10 *E. formosa* were introduced for 2 d	7	9
FN	丽蚜小蜂 10 头和烟盲蝽 1 雌 1 雄同时接入 2 d 10 *E. formosa* adults and 1 male and 1 female adult of *N. tenuis* were introduced at the same time for 2 d	7	9
f+N	丽蚜小蜂 10 头接入 2 d 后移除，3 d 后再释放烟盲蝽 1 雌 1 雄保留 2 d 10 *E. formosa* adults were introduced for 2 d and 1 male and 1 female adult of *N. tenuis* were introduced 3 d later for 2 days	8	9
F+N	丽蚜小蜂 10 头接入 2 d 后移除，10 d 后再释放烟盲蝽 1 雌 1 雄保留 2 d 10 *E. formosa* adults were introduced for 2 d and 1 male and 1 female adult of *N. tenuis* were introduced 10 d later for 2 days	8	8

差分析（One-way ANOVA）并用 LSD 检验比较不同处理间的差异显著性；对不同烟粉虱种群密度下丽蚜小蜂寄生率做平方根反正弦变换，使用 Levene 方差齐性检验后进行独立样本 *t* 检验；对 2 种不同烟粉虱种群密度各处理天敌释放前后的烟粉虱种群数量进行成对 *t* 检验。

对 1.4 节中烟盲蝽对被寄生与未被寄生的烟粉虱若虫的取食偏好比较利用 Cain 指数进行评价（丁岩钦, 1994）。Cain 指数计算方法为：$C=(Np1\times N2)/(Np2\times N1)$。其中 *C* 为猎物选择性指数（即 Cain 指数），*Np1*、*Np2* 分别代表猎物 1 和猎物 2 的被捕食量；*N1*、*N2* 为 2 种供试猎物昆虫的初始数量，本研究中指烟粉虱若虫的不同处理的初始数量。当计算结果 $C>1$ 时，捕食者对猎物 1 具有捕食偏好性；当 $C=1$ 时，无选择偏好性；当 $0<C<1$ 时，则为对猎物 2 具有偏好性。

以上所有数据分析采用 Excel 2016 和 SPSS 20.0 软件，作图采用 Excel 2016 软件。

2 结果与分析

2.1 烟盲蝽对丽蚜小蜂的捕食行为

对照 CK 中烟粉虱羽化率为 95%，表明供试烟粉虱若虫能正常发育羽化。处理 F 中丽蚜小蜂对 3 龄烟粉虱若虫的平均取食量为 13 头，对于未被其取食的烟粉虱的寄生率为 85%。因此推测其他后续接入烟盲蝽的处理中，其寄生率也在 85%左右，表明烟盲蝽取食的烟粉虱若虫中大部分是已被寄生的个体。试验结果表明，烟盲蝽对于未被寄生和被寄生后不同天数的烟粉虱若虫取食率差异显著（$F=126.15$, $df=4,78$, $P<0.05$）（图 1）。其中，烟盲蝽对未被寄生的烟粉虱若虫（处理 N）取食率最高，达到近 90%。对于被寄生后发育 1 d 的烟粉虱若虫（处理 F1+N，此时丽蚜小蜂处于卵期）的取食率为 85%，与对未被寄生的烟粉虱若虫（处理 N）的取食率无显著差异（$P>0.05$）。随后，对于被寄生后发育 6、8 和 12 d 的烟粉虱若虫（处理 F6+N、F8+N 和 F12+N），取食率分别下降至 78%、27%和 11%。值得关注的是，烟盲蝽对于被寄生后发育 6 d 的烟粉虱若虫（此时丽蚜小蜂处于高龄幼虫期），与对于未被寄生或被寄生后发育 1 d 的烟粉虱若虫相比，取食率虽下降达显著水平，但幅度不大；而对于被寄生后发育 8 和 12 d 的烟粉虱若虫（此时丽蚜小蜂分别处于预蛹期和蛹期），取食率则大幅度下降。观察表明，烟盲蝽即使被饥饿处理后，也很少取食被丽蚜小蜂寄生后且发育到蛹期的烟粉虱若虫（处理 F12+N），但是烟盲蝽有尝试取食行为，该行为对蜂蛹造成损害而不能羽化出成蜂，这些被损伤的个体统计时也计入了烟盲蝽取食量。

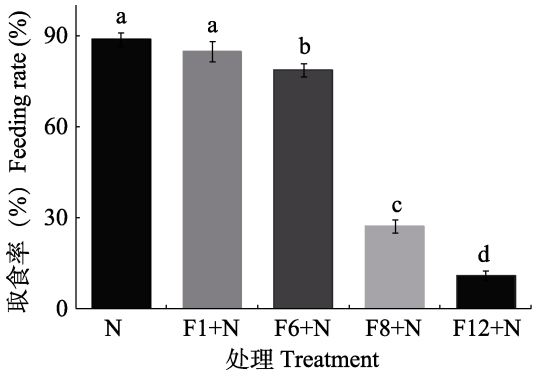

图 1　烟盲蝽对不同发育时间的被寄生烟粉虱若虫的取食率

Fig. 1　Feeding rate of *Nesidiocoris tenuis* on parasitized *Bemisia tabaci* at different developmental stages

图中数据为平均数±标准误。柱上标有不同字母表示有显著差异（P<0.05，LSD 多重比较）。5 个处理 N、F1+N、F6+N、F8+N 和 F12+N 的具体内容同表 1。

Data in the figure are mean±SE. Different letters above bars indicate significant difference (P<0.05, LSD multiple test). For details of the 5 treatments: N, F1+N, F6+N, F8+N and F12+N, see Table 1.

2.2　丽蚜小蜂对烟盲蝽的捕食偏好性影响

试验结果如表 4 所示，与未被寄生的烟粉虱若虫相比，烟盲蝽偏好取食被丽蚜小蜂寄生后发育 1 和 6 d 的烟粉虱若虫（Cain 指数<1），其取食量均为前者的 4 倍左右，而对于被丽蚜小蜂寄生后发育 1 和 6 d 的烟粉虱若虫，烟盲蝽无取食偏好（Cain 指数≈1）。与未被寄生的烟粉虱若虫相比，丽蚜小蜂处于卵至幼虫期的被寄生的烟粉虱若虫是烟盲蝽更加偏好的猎物，不利于丽蚜小蜂种群的增长。

2.3　烟盲蝽对丽蚜小蜂寄生率及控害效果的影响

试验结果表明，在 2 种烟粉虱种群密度和不同的天敌释放方式下，丽蚜小蜂的寄生率差异显著（图 2：A 低密度: F=124.18, df=3,29, P<0.001; 图 2：B 高密度: F=16.06, df=3,34, P<0.001）。2 种天敌同时释放（处理 FN）会对丽蚜小蜂的寄生率产生不利影响，在 2 种寄主密度下其寄生率均略低于单独释放丽蚜小蜂的处理（处理 F）。其中，低密度下，2 个处理组的寄生率差异不显著（图 2：A）；高密度下，差异显著（图 2：B）。在丽蚜小蜂发育至幼虫期时释放烟盲蝽（处理 f+N），在 2 种烟粉虱种群密度下丽蚜小蜂寄生率均显著低于单独释放丽蚜小蜂（处理 F）的寄生率（图 2：A，B）。在丽蚜小蜂发育至蛹期时释放烟盲蝽的处理中（处理 F+N），在 2 种烟粉虱寄主密度下丽蚜小蜂寄生率均略低于单独释放丽蚜小蜂处理（处理 F）。其中，低密度下，2 个处理的寄生率之间差异显著（图 2：A）；高密度下，其差异未达显著水平（图 2：B）。这些结果表明，在植株空间尺度下，被寄生不久的烟粉虱若虫会被烟盲蝽较多的捕食从而降低丽蚜小蜂的寄生效果，而在丽蚜小蜂发育至蛹期时释放烟盲蝽不会对丽蚜小蜂的寄生效果产生明显的不利影响。

比较同一天敌释放方式下，丽蚜小蜂对不同密度的烟粉虱的寄生率的差异显著性，结果显示，单独释放丽蚜小蜂（F 处理：t=10.28, df=14, P<0.001）、同时释放 2 种天敌（FN 处理：t=12.51,

表 4　烟盲蝽对被寄生与未被寄生的烟粉虱若虫的捕食偏好

Table 4　Feeding preference of *Nesidiocoris tenuis* to parasitized and unparasitized *Bemisia tabaci* nymphs

猎物 1 Prey 1			猎物 2 Prey 2			Cain 指数 Cain index
烟粉虱若虫 *B. tabaci* nymphs	初始数量（头） Initial number of prey (ind.)	被捕食量（头） Number of prey consumed (ind.)	烟粉虱若虫 *B. tabaci* nymphs	初始数量（头） Initial number of prey (ind.)	被捕食量（头） Number of prey consumed (ind.)	
未被寄生 Unparasitized	42	9.4±0.8	被寄生 1 d Parasitized 1 d	43	32.1±1.5	0.299 8
未被寄生 Unparasitized	42	5.3±0.6	被寄生 6 d Parasitized 6 d	42	24.0±1.1	0.220 8
被寄生 6 d Parasitized 6 d	42	16.3±1.1	被寄生 1 d Parasitized 1 d	41	17.5±2.0	0.909 2

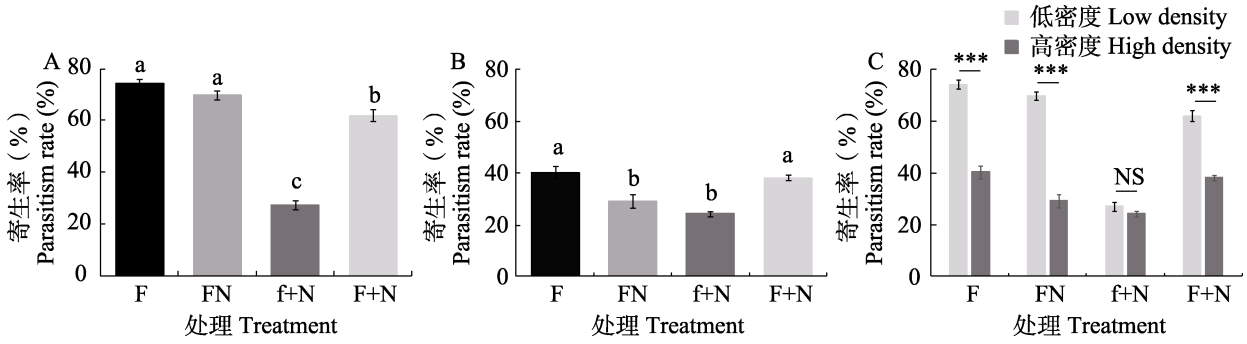

图 2　不同烟粉虱种群密度条件下烟盲蝽对丽蚜小蜂寄生率的影响

Fig. 2　The effects on parasitism rate of *Encarsia formosa* by *Nesidiocoris tenuis* under different population densities of *Bemisia tabaci*

A. 烟粉虱低密度种群；B. 烟粉虱高密度种群；C. 相同释放模式下，烟粉虱低密度和高密度种群 2 种条件下烟盲蝽对丽蚜小蜂寄生率影响的比较。图中的数据均为平均数±标准误。图 A 和图 B 中柱上不同字母表示差异显著（P<0.05，LSD 多重比较），图 C 中星号表示极显著差异（P<0.001，独立样本 t 检验），NS 表示没有显著差异（P>0.05）。4 个处理 F、FN、f+N 和 F+N 的具体内容同表 3。图 3 同。

A. *B. tabaci* with low population density; B. *B. tabaci* with high population density; C. The effects of *N. tenuis* on parasitism rate of *E. formosa* at low or high density of *B. tabaci* with the same method of introduction of natural enemy. Data in the figure are mean±SE. Different letters above bars indicate significant difference (P<0.05, LSD multiple test); Asterisks indicate statistically significant difference (***P<0.001, independent sample t- test) and NS indicates no significant difference (P > 0.05). For details of the 4 treatments: F, FN, f+N, and F+N, see Table 3. The same for Fig. 3.

df=14, P<0.001）以及寄生蜂释放后发育到蛹期再释放烟盲蝽（F+N 处理：t=9.60, df=14, P<0.001），丽蚜小蜂对低密度烟粉虱种群的寄生效率均显著高于对高密度烟粉虱种群（图 2：C）。而发育到幼虫期再释放烟盲蝽处理中（f+N 处理），2 种烟粉虱种群密度下丽蚜小蜂的寄生率无显著差异（t=1.39, df=15, P>0.05）。这表明，在烟粉虱低密度种群水平，烟盲蝽对丽蚜小蜂寄生效果的不利影响更大。

释放天敌前后烟粉虱的种群数量变化如图 3（A，B）所示，在烟粉虱低密度种群的 4 个处理中，释放天敌后，烟粉虱种群数量都有显著下降（F 处理：t=17.74, df=6, P<0.001; FN 处理：t=16.20, df=6, P<0.001; f+N 处理：t=6.69, df=7,

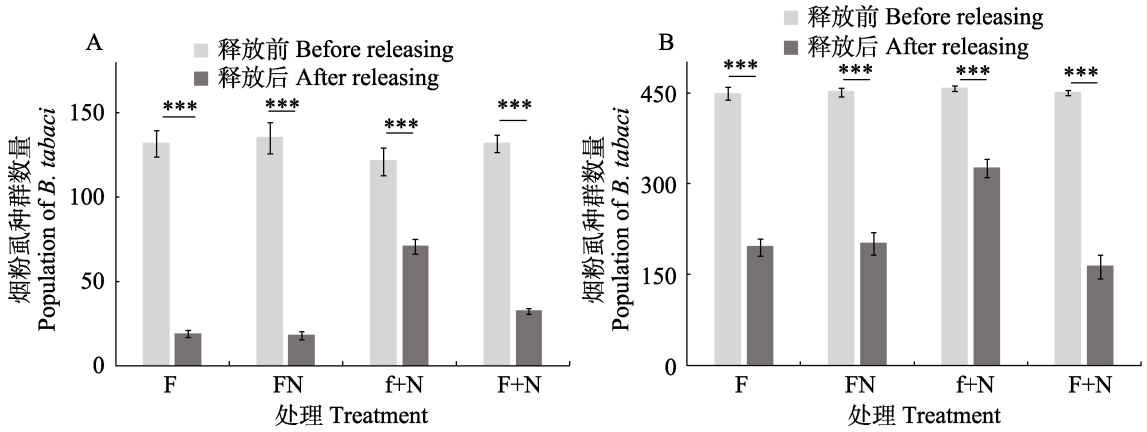

图 3　不同烟粉虱种群密度条件下，不同天敌释放模式对烟粉虱种群数量的影响

Fig. 3 The effects on whitefly population by different release methods of natural enemies under different population density of *Bemisia tabaci*

A. 烟粉虱低密度种群；B. 烟粉虱高密度种群。

A. Low population density; B. High population density.

P<0.001; F+N 处理：t=22.87, df=7, P<0.001），但处理间下降的幅度有明显不同，下降幅度最大的是 F 和 FN 处理（烟粉虱种群下降幅度均达 85%），其次是处理 F+N，下降幅度约为 75%，下降幅度最小的是处理 f+N，仅为 40%（图 3：A）。

在烟粉虱高密度的各个处理中，释放天敌前后烟粉虱的数量也均有显著差异（F 处理：t=14.79, df=8, P<0.001; FN 处理：t=14.62, df=8, P<0.001; f+N 处理：t=7.38, df=8, P<0.001; F+N 处理：t=12.37, df=7, P<0.001），但烟粉虱的数量下降幅度不如低密度大。高密度的 4 个处理中（图 3：B），烟粉虱种群数量下降幅度最小的是处理 f+N，为 28%；处理 F+N、F 和 FN 的烟粉虱种群下降幅度分别为 63%、56%和 55%。

3　讨论

集团内捕食（Intraguild predation）是一种较为复杂但广泛存在的天敌捕食和竞争的种间关系（Polis *et al*., 1989），其强度大小会对群落中各天敌昆虫种群的数量动态以及它们对有害生物的生物防治效果产生重要影响（马克争等, 2004）。本研究中，烟盲蝽为集团内捕食者，丽蚜小蜂为集团内猎物，烟粉虱为集团外猎物，试验结果显示，烟盲蝽可以捕食被丽蚜小蜂寄生的烟粉虱若虫，导致丽蚜小蜂对烟粉虱的寄生成功率降低，对烟粉虱种群的控制作用下降（图 1-图 3）。烟盲蝽对丽蚜小蜂的不利影响与丽蚜小蜂在烟粉虱体内的发育阶段有关。在丽蚜小蜂的寄生初期，即丽蚜小蜂的卵期和幼虫期，其被捕食的概率较高，受到的不利影响明显，但在丽蚜小蜂发育到蛹期后，其被捕食的概率明显降低，受到的不利影响大幅度减弱（图 1，图 2），推测与丽蚜小蜂发育到蛹期时被寄生的烟粉虱若虫有色素沉积和虫体变硬等因素有关。集团内捕食的发生强度与天敌的发育阶段相关这一现象在其他天敌种间关系中也有报道（Lucas *et al*., 1998; Mohammadpour *et al*., 2019）。此外，本研究表明，作为集团外的猎物，烟粉虱的种群密度对烟盲蝽与丽蚜小蜂的互作效应也有显著影响。当烟粉虱种群密度较低时，烟盲蝽对丽蚜小蜂的寄生效果的不利作用更明显（图 2：C）。

本研究中，在观察烟盲蝽对被寄生后 1 或 6 d，即寄主体内丽蚜小蜂分别处于卵或幼虫期的烟粉虱若虫时（表 1，图 1 中的 F1+N 和 F6+N 处理），由于难以通过外观判别烟粉虱若虫是否已被寄生，只能加大寄生蜂成虫的释放量来提高供试若虫的被寄生率，并依据仅释放丽蚜小蜂的处理（处理 F）中的寄生率来推测供试烟粉虱若虫的被寄生率在 85%左右。因此，在 F1+N 和 F6+N 处理中，提供给烟盲蝽取食的烟粉虱若虫中肯定有部分未被寄生的个体。表 4 的数据表明，当未被寄生的烟粉虱若虫与已被寄生后发育 1 或 6 d 的若虫同时提供，烟盲蝽偏好取食已被寄生的个体。所以在 F1+N 和 F6+N 处理中，存在少量未被寄生的烟粉虱若虫不会导致过高估算烟盲蝽对被丽蚜小蜂寄生的烟粉虱若虫的捕食率，反而有可能导致对该捕食率估算略有偏低。因此，图 1 中 F1+N 和 F6+N 处理的高捕食率是可信的。

与未被寄生的烟粉虱若虫相比，烟盲蝽偏好捕食被丽蚜小蜂寄生后 1 或 6 d 的烟粉虱若虫（表 4），此结果与近年来的一些研究结果不同。例如，Cabello 等（2015）表明，烟盲蝽在以下三类猎物，即未被暖突赤眼蜂 *Trichogramma achaeae* 寄生的、寄生后发育 4 d 内的以及寄生后发育 4 d 以上的番茄潜叶蛾 *Tuta absoluta* 卵的选择性和非选择性试验中，对未被寄生的番茄潜叶蛾卵的取食量均为最大。Mohammadpour 等（2019）报道，拟原姬蝽 *Nabis pseudoferus* 偏好捕食未被甘蓝夜蛾赤眼蜂 *T. brassicae* 寄生的番茄潜叶蛾的卵，而不是被寄生的卵。类似的，Fu 等（2017）表明，与被蚜小蜂 *Aphelinus asychis* 寄生的桃蚜 *Myzus persicae* 相比，异色瓢虫 *Harmonia axyridis* 偏好捕食未被寄生的桃蚜。本研究中烟盲蝽偏好捕食被丽蚜小蜂寄生后寄生蜂处在卵至幼虫期的烟粉虱若虫，其原因尚不清楚。

烟盲蝽和丽蚜小蜂是烟粉虱的 2 种重要天敌，充分发挥它们的控害潜能可以促进烟粉虱的

生物防治以及烟粉虱综合治理技术体系的建立。本研究结果表明，虽然烟盲蝽和丽蚜小蜂之间存在集团内捕食现象，但这种集团内捕食对控害作用的不利影响与丽蚜小蜂的发育阶段密切相关，可以通过对 2 种天敌联合应用方法的设计，避免或减少这种不利影响，更好地发挥它们联合应用的控害作用。

参考文献 (References)

Cabello T, Bonfil F, Gallego JR, Fernandez FJ, Gamez M, Garay J, 2015. Can interactions between an omnivorous hemipteran and an egg parasitoid limit the level of biological control for the tomato pinworm? *Environmental Entomology*, 44(1): 12–26.

Cheng HK, Tian YQ, Wei BC, Zhao JH, Ye CQ, Wei SX, Wang JZ, Wang RJ, 1989. Commercial production technology of *Encarsia formosa*. *Chinese Journal of Biological Control*, 5(4): 178–181. [程洪坤, 田毓起, 魏炳传, 赵军华, 叶长青, 魏淑贤, 王锦祯, 王若静, 1989. 丽蚜小蜂商品化生产技术. 生物防治通报, 5(4): 178–181.]

Ding YQ, 1994. Insect Mathematical Ecology. Beijing: Science Press. 310. [丁岩钦, 1994. 昆虫数学生态学. 北京: 科学出版社. 310.]

Dou WJ, Yang SW, Liu Q, Chen GH, Zhang XM, 2020. Progress in the control of predatory and parasitic natural enemies of *Bemisia tabaci* in China. *Journal of Environmental Entomology*, 42(2): 342–354. [窦文珺, 羊绍武, 柳青, 陈国华, 张晓明, 2020. 我国烟粉虱主要捕食和寄生性天敌控制能力研究进展. 环境昆虫学报, 42(2): 342–354.]

Enkegaard A, 1993. *Encarsia formosa* parasitizing the *Poinsettia*-strain of the cotton whitefly, *Bemisia tabaci*, on *Poinsettia*: Bionomics in relation to temperature. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 69(3): 251–261.

Fu WY, Yu XL, Ahmed N, Zhang SZ, Liu TX, 2017. Intraguild predation on the aphid parasitoid *Aphelinus asychis* by the ladybird *Harmonia axyridis*. *BioControl*, 62(1): 61–70.

Guo Y, Liu WX, Wan FH, Wang JJ, 2007. Parasitism behaviors of *Encarsia formosa* and influence factors. *Chinese Journal of Biological Control*, 23(2): 180–183. [郭义, 刘万学, 万方浩, 王进军, 2007. 丽蚜小蜂寄生过程中的行为学研究进展. 中国生物防治, 23(2): 180–183.]

Hoddle MS, Van Driesche RG, Sanderson JP, 1998. Biology and use of the whitefly parasitoid *Encarsia formosa*. *Annual Review of Entomology*, 43: 645–669.

Hou ZR, Li JP, Sun BB, Yin Z, Wang JX, Guo XH, Zheng SH, 2020. Preliminary report on the experiment of releasing the mirid bug *Nesidiocoris tenuis* to control greenhouse whitefly. *China Plant Protection*, 40(1): 75–77, 81. [侯峥嵘, 李金萍, 孙贝贝, 尹哲, 王俊侠, 郭喜红, 郑书恒, 2020. 释放烟盲蝽防治温室白粉虱试验初报. 中国植保导刊, 40(1): 75–77, 81.]

Hu Y, Wang MQ, Zhang LS, Chen HY, 2010. Rearing techniques and applications of the omnivorous mirids. *Plant Protection*, 36(5): 22–27. [胡月, 王孟卿, 张礼生, 陈红印, 2010. 杂食性盲蝽的饲养技术及应用研究. 植物保护, 36(5): 22–27.]

Ikegawa Y, Ezoe H, Namba T, 2015. Adaptive defense of pests and switching predation can improve biological control by multiple natural enemies. *Population Ecology*, 57(2): 381–395.

Kanakala S, Ghanim M, 2019. Global genetic diversity and geographical distribution of *Bemisia tabaci* and its bacterial endosymbionts. *PLoS ONE*, 14(3): e0213946.

Li MJ, Yang SW, Shang HP, Zhou SW, Liu JH, Li GT, Chen GH, Zhang XM, 2023. Population dynamics of *Bemisia tabaci* and its dominant natural enemies on summer tomato under different planting environments. *Chinese Journal of Biological Control*, 39(1): 18–28. [李明江, 羊绍武, 尚昊培, 周顺文, 刘纪欢, 李贵涛, 陈国华, 张晓明, 2023. 不同种植环境夏番茄上烟粉虱及其优势天敌的种群动态. 中国生物防治学报, 39(1): 18–28.]

Li QC, Wang LD, Zhao XM, Liu Y, Lan Y, Han YH, Liu Y, 2022. Study on cooperative control of whitefly in protected vegetable greenhouse by *Nesidiocoris tenuis*, *Encarsia formosa* Gahan. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 50(4): 144–145, 152. [李青超, 王立达, 赵秀梅, 刘悦, 兰英, 韩业辉, 刘洋, 2022. 烟盲蝽和丽蚜小蜂协同防治设施蔬菜温室白粉虱技术研究. 安徽农业科学, 50(4): 144–145, 152.]

Li S, Lao SB, Wang S, Guo XJ, Zhang F, 2014. Control effect of *Orius sauteri* collaborated with *Encarsia formosa* on *Bemisia tabaci* in the greenhouse. *Journal of Environmental Entomology*, 36(6): 978–982. [李姝, 劳水兵, 王甦, 郭晓军, 张帆, 2014. 东亚小花蝽和丽蚜小蜂对烟粉虱的协同控制效果研究. 环境昆虫学报, 36(6): 978–982.]

Li XX, Yang SW, Li MJ, Jiang ZX, Liu YH, Chen GH, Zhang XM, 2021. Population dynamics and temporal niches of *Bemisia tabaci* and its dominant natural enemies on cucumber and tomato cultivated under greenhouse planting. *Journal of Southern Agriculture*, 52(2): 518–526. [李星星, 羊绍武, 李明江, 蒋正雄, 刘予涵, 陈国华, 张晓明, 2021. 设施黄瓜和番茄田间烟粉虱及其优势天敌消长动态和时间生态位分析. 南方农业学报, 52(2): 518–526.]

Liu S, 2006. The functional response and behavior observational analysis of prey in three natural enemies to whitefly *Bemisia*

tabaci and interaction of disturbing among three species. Master dissertation. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University. [刘爽, 2006. 烟粉虱 3 种天敌捕食功能反应、行为学及其天敌间竞争干扰研究. 硕士学位论文. 福州: 福建农林大学.]

Liu YQ, Liu SS, 2012. Species status of *Bemisia tabaci* complex and their distributions in China. *Journal of Biosafety*, 21(4): 247–255. [刘银泉, 刘树生, 2012. 烟粉虱的分类地位及在中国的分布. 生物安全学报, 21(4): 247–255.]

Lucas E, Coderre D, Brodeur J, 1998. Intraguild predation among aphid predators: Characterization and influence of extraguild prey density. *Ecology*, 79(3): 1084–1092.

Ma KZ, Hao SG, Zhao HY, Kang L, 2004. Intraguild predation in the insect communities. *Entomological Knowledge*, 41(3): 191–197. [马克争, 郝树广, 赵惠燕, 康乐, 2004. 昆虫群落中的集团内捕食作用. 昆虫知识, 41(3): 191–197.]

Ma LJ, Zhang SZ, Liu TX, 2018. Influences of interspecific competition between ladybeetle *Serangium japonicum* and parasitoid *Encarsia formosa* on predation of tobacco whitefly *Bemisia tabaci*. *Journal of Plant Protection*, 45(6): 1289–1295. [马丽君, 张世泽, 刘同先, 2018. 种间竞争对烟粉虱天敌日本刀角瓢虫和丽蚜小蜂捕食功能反应的影响. 植物保护学报, 45(6): 1289–1295.]

Mohammadpour M, Hosseini M, Karimi J, Hosseininaveh V, 2019. Effect of age-dependent parasitism in eggs of *Tuta absoluta* (Lepidoptera: Gelechiidae) on intraguild predation between *Nabis pseudoferus* (Hemiptera: Nabidae) and *Trichogramma brassicae* (Hymenoptera: Trichogrammatidae). *Journal of Insect Science*, 19(3): 27.

Owashi Y, Hayashi M, Abe J, Miura K, 2020. Effects of an alternative diet of *Artemia cysts* on the development and reproduction of *Nesidiocoris tenuis* (Hemiptera: Miridae). *Applied Entomology and Zoology*, 55(1): 121–127.

Pérez-Hedo M, Bouagga S, Zhang NX, Moerkens R, Messelink G, Jaques JA, Flors V, Broufas G, Urbaneja A, Pappas ML, 2022. Induction of plant defenses: The added value of zoophytophagous predators. *Journal of Pest Science*, 95(4): 1501–1517.

Polis GA, Myers CA, Holt RD, 1989. The ecology and evolution of intraguild predation: Potential competitors that eat each other. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 20: 297–330.

Shao Y, Zhong YW, Li G, Liu SS, Liu YQ, 2019. Competition of two whitefly parasitoids under microhabitat in plastic houses. *Journal of Environmental Entomology*, 41(2): 253–258. [邵越, 钟宇巍, 李刚, 刘树生, 刘银泉, 2019. 大棚微生境下两种烟粉虱寄生蜂的竞争作用. 环境昆虫学报, 41(2): 253–258.]

Tao X, Zhang CY, Fu WY, Xu Y, Liu TX, 2018. Study on the control effect of *Encarsia formosa* on tomato whitefly in greenhouse. *Journal of Changjiang Vegetable*, 2018(6): 78–82. [陶笑, 张晨阳, 付文燕, 徐媛, 刘同先, 2018. 丽蚜小蜂防治设施番茄烟粉虱的效果研究. 长江蔬菜, 2018(6): 78–82.]

Urbaneja A, Montón H, Mollá O, 2009. Suitability of the tomato borer *Tuta absoluta* as prey for *Macrolophus pygmaeus* and *Nesidiocoris tenuis*. *Journal of Applied Entomology*, 133(4): 292–296.

Zang LS, Liu YQ, Liu SS, 2005. A new clip-cage for whitefly experimental studies. *Chinese Bulletin of Entomology*, 42(3): 329–331. [臧连生, 刘银泉, 刘树生, 2005. 一种适合粉虱实验观察的新型微虫笼. 昆虫知识, 42(3): 329–331.]

Zhang JM, Zhang F, Wang B, 2010. Control technology of tomato greenhouse whitefly based on releasing *Encarsia formosa* in protected field. *Vegetable*, 2010(7): 34–35. [张君明, 张帆, 王兵, 2010. 以释放丽蚜小蜂为主的保护地番茄温室粉虱的控制技术. 蔬菜, 2010(7): 34–35.]

Zhang SZ, Wan FH, Zhang F, Hua BZ, 2003. Parasitic suitability of two strains of *Encarsia formosa* to *Bemisia tabaci* nymphs. *Chinese Journal of Biological Control*, 19(4): 149–153. [张世泽, 万方浩, 张帆, 花保桢, 2003. 丽蚜小蜂两个品系对烟粉虱若虫的寄生适宜性. 中国生物防治, 19(4): 149–153.]