

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

马丽君 张世泽* 刘同先

(西北农林科技大学植物保护学院, 旱区作物逆境生物学国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 为明确烟粉虱 *Bemisia tabaci* 的 2 种天敌——日本刀角瓢虫 *Serangium japonicum* 和丽蚜小蜂 *Encarsia formosa* 共存时的种间竞争对其捕食/寄生作用的影响, 采用小叶蝶法在室内测定了 2 种天敌单独和共存条件下对 Q 型烟粉虱 3~4 龄若虫的捕食/寄生功能反应。结果表明: 日本刀角瓢虫和丽蚜小蜂的捕食/寄生功能反应均符合 Holling II 型方程。2 种天敌共存时, 日本刀角瓢虫成虫对烟粉虱 3~4 龄若虫的最大捕食量为 222.2 头, 显著高于其单独捕食时的 91.7 头, 平均处理时间为 0.005, 显著低于其单独捕食时的 0.011, 瞬间攻击率为 0.955, 与其单独捕食时的 1.055 差异不显著; 丽蚜小蜂对烟粉虱 3~4 龄若虫的最大寄生量为 24.4 头, 显著高于其单独寄生时的 18.5 头, 寄生烟粉虱 3~4 龄若虫时的瞬间攻击率和平均处理时间分别为 0.066 和 0.041, 均显著低于其单独寄生时的 0.522 和 0.054; 丽蚜小蜂对烟粉虱 3~4 龄若虫的最大取食量为 7.2 头, 显著高于其单独取食时的 4.3 头, 取食烟粉虱 3~4 龄若虫时的瞬间攻击率和平均处理时间分别为 0.101 和 0.139, 均显著低于其单独取食时的 0.986 和 0.231。表明 2 种天敌联合释放能够提高其对烟粉虱的控制效果, 天敌间可能存在增效作用。

关键词: 日本刀角瓢虫; 丽蚜小蜂; 烟粉虱; 种间竞争; 捕食功能反应; 生物防治

Influences of interspecific competition between ladybeetle *Serangium japonicum* and parasitoid *Encarsia formosa* on predation of tobacco whitefly *Bemisia tabaci*

Ma Lijun Zhang Shize* Liu Tong-Xian

(State Key Laboratory of Crop Stress Biology for Arid Areas, College of Plant Protection, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi Province, China)

Abstract: In order to study the effects of interspecific competition between the ladybeetle *Serangium japonicum* and the parasitoid *Encarsia formosa* on the predation/parasitization of tobacco whitefly *Bemisia tabaci* Q biotype 3rd–4th instar nymphs, the predation functional responses of *S. japonicum* and *E. formosa* were investigated respectively and simultaneously in the laboratory. The results showed that the predation/parasitization functional responses of *S. japonicum* and *E. formosa* could be fitted by Holling II model. When the two natural enemies coexisted, the daily maximum predation number of *S. japonicum* was 222.2, which was significantly higher than that of 91.7 of the ladybird alone; the average handling time was 0.005, which was significantly lower than that of 0.011 of the ladybird alone; the instantaneous attack rate was 0.955, which was not significantly different from the 1.055 of the ladybird alone. The daily maximum parasitization number of *E. formosa* was 24.4, which was significantly higher than that of 18.5 of the parasitoid alone; the instantaneous attack rate and the average handling time

基金项目: 国家自然科学基金(31470484), 国家重点研发计划(2017YFD0201006)

* 通信作者 (Author for correspondence), E-mail: shzzhang@nwfau.edu.cn

收稿日期: 2017-06-22

were 0.066 and 0.041, which were significantly lower than those of 0.522 and 0.054 of the parasitoid alone respectively; the daily maximum host-feeding number of *E. formosa* was 7.2, which was significantly higher than that of 4.3 of the parasitoid alone; the instantaneous attack rate and the average handling time were 0.101 and 0.139, respectively, which were significantly lower than those of 0.986 and 0.231 of the parasitoid alone. The results indicated that the combined release of *S. japonicum* and *E. formosa* may give rise to a synergistic effect, and improve control efficiency against *B. tabaci*.

Key words: *Serangium japonicum*; *Encarsia formosa*; *Bemisia tabaci*; interspecific competition; predation functional response; biological control

烟粉虱 *Bemisia tabaci* 属半翅目粉虱科小粉虱属,是广泛分布于世界各地的重要害虫,为害蔬菜、棉花及园林花卉等 600 余种植物,是世界上危害最严重的入侵物种之一(Naranjo et al., 2010)。烟粉虱 B 型和 Q 型 2 种生物型自 20 世纪末先后入侵我国以来,相继在许多地区暴发成灾并造成重大经济损失,对我国农作物和园林花卉生产构成了严重威胁(Pan et al., 2011)。目前化学防治仍然是防治烟粉虱的主要手段,但烟粉虱抗药性发展迅速,对常用的大多数化学农药甚至是昆虫生长调节剂已产生高水平的抗性和交互抗性,且大量滥用化学农药不但杀伤天敌、污染环境,而且严重影响人类的身体健康(Castle et al., 2010)。面对烟粉虱猖獗为害而化学防治很难发挥作用的现状,生物防治技术已成为国内外研究的重点(Stansly & Natwick, 2010)。

捕食性天敌和寄生性天敌昆虫是自然界中控制有害生物发生发展的重要生物因子,近年来对其研究利用日益受到关注(Raffel et al., 2008)。自然界中,对一种害虫发挥控制作用的天敌往往不止一种,目前多种天敌的联合应用已引起国内外学者的广泛关注(Schellekens & van Kooten, 2012; Assaneo et al., 2013; 彭勇强等, 2013)。多种天敌联合释放时,不同天敌间可能会发生种间竞争,进而对害虫的生物防治效果产生增效或拮抗等不同作用(Colfer & Rosenheim, 2001; Kalinkat et al., 2013)。不同天敌的种间竞争可能是导致天敌联合释放控制害虫效果不同的主要原因。捕食功能反应是评价天敌捕食作用的有效工具,应用捕食功能反应评价不同天敌共存时其控害能力的变化,可为不同天敌的联合应用提供理论依据。

日本刀角瓢虫 *Serangium japonicum* 和丽蚜小蜂 *Encarsia formosa* 是烟粉虱的 2 种重要天敌昆虫。日本刀角瓢虫分布于中国和日本,目前国内外学者对其生物学特性(Yao et al., 2011)、捕食行为(姚松林等, 2005)及对烟粉虱卵的捕食作用(荆英等,

2004)等研究较多,另外也有关于生长调节剂吡丙醚(Li et al., 2015)、烟碱类农药吡虫啉(He et al., 2012)以及蜡蚧轮枝菌 *Verticillium lecanii* 对其生长发育的影响(Fatiha et al., 2008)的研究报道。丽蚜小蜂主要分布于热带和亚热带地区,自利用丽蚜小蜂控制温室白粉虱 *Trialeurodes vaporariorum* 取得巨大成功以来(Hoddle et al., 1998),利用其控制烟粉虱的研究也引起了国内外学者的普遍关注,生产实践证明丽蚜小蜂对烟粉虱具有良好的控制作用(Liu et al., 2015)。由于日本刀角瓢虫对烟粉虱卵和低龄若虫的捕食量远大于高龄若虫,并且明显偏好未被丽蚜小蜂寄生的烟粉虱若虫(未发表资料),而丽蚜小蜂偏好寄生烟粉虱 3~4 龄若虫(张世泽等, 2003),因此推测联合应用日本刀角瓢虫和丽蚜小蜂控制烟粉虱,其效果可能优于释放单种天敌。基于此,本试验通过研究日本刀角瓢虫和丽蚜小蜂共存时对烟粉虱的捕食/寄生功能、寻找效率、处理时间,并建立相关数学模型,明确二者共存对烟粉虱的控制效果,以期 2 种天敌联合应用控制烟粉虱提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试寄主植物:甘蓝品种为秦甘 80,购买于陕西省蔬菜花卉研究所。温室育苗,待幼苗长到 3~4 片叶时,选取大小基本一致、长势良好的甘蓝苗,单株移栽至口径 15 cm×高 15 cm×底径 10 cm 花盆中,营养土为草炭:珍珠岩:蛭石=3:1:1,然后放入长 60 cm×宽 60 cm×高 60 cm 养虫笼内,每笼 6 盆。每隔 3 d 浇水 1 次。生长 1 周后接入烟粉虱成虫,建立饲养种群。

供试昆虫:Q 型烟粉虱、日本刀角瓢虫、丽蚜小蜂均为西北农林科技大学应用昆虫学重点实验室以甘蓝饲养的实验种群。利用 mtDNA *COI* 基因片段作标记,对烟粉虱生物型进行鉴定(刘晓娜等, 2016)。选取日本刀角瓢虫羽化 7 d 后的成虫和刚蜕皮进入 4 龄的幼虫用于试验,日本刀角瓢虫成虫及

幼虫饱食1 d后,再饥饿处理24 h后进行试验;羽化3 d后的丽蚜小蜂饥饿处理24 h后用于试验。

仪器:RXZ-300B人工气候箱,浙江宁波江南仪器厂;徕卡M205A体视显微镜,德国徕卡仪器有限公司。

1.2 方法

1.2.1 日本刀角瓢虫对烟粉虱的捕食反应测定

将烟粉虱成虫接入温室盆栽的甘蓝植株上,产卵24~48 h后将着卵甘蓝苗上的烟粉虱成虫去除,置于干净纱笼内培养,待其发育至所需龄期时备用。分别选取有烟粉虱低龄若虫(1~2龄)和高龄若虫(3~4龄)的甘蓝叶片若干,用解剖针在体视显微镜下仔细去除多余的烟粉虱后,将叶片放入直径2.5 cm培养皿中的0.5%琼脂层上,然后把饥饿处理24 h的1头日本刀角瓢虫移到培养皿中,盖上培养皿盖,盖中央开1个直径为1.5 cm的孔,用纱网封住孔口以便于空气交换;然后置于温度为 $25\pm 1^{\circ}\text{C}$ 、光照为14 L:8 D、相对湿度为60%~65%的人工气候箱中饲养,24 h后移除天敌,体视显微镜下统计烟粉虱若虫被取食数量和剩余数量。被日本刀角瓢虫取食的粉虱若虫只剩空壳或留下不完整残骸,统计时均计入被日本刀角瓢虫取食数量。

日本刀角瓢虫成虫捕食反应试验中,烟粉虱低龄若虫密度设为5、10、25、50、80、120、200和400头/叶,高龄若虫密度设为5、10、25、50、80、120和200头/叶。日本刀角瓢虫4龄幼虫捕食反应试验中,烟粉虱低龄若虫密度设为5、10、25、50、80、120、200、400和500头/叶,高龄若虫密度设为5、10、25、50、80、120、200和400头/叶。每个密度重复5次。对不同处理进行Holling II型功能反应模型拟合,方程为 $N_a=a'TN/(1+a'T_hN)$,式中: N_a 为被捕食猎物数, a' 为捕食者的瞬间攻击率(攻击系数), N 为猎物密度, T 为用于搜寻的总时间(本试验中, $T=1$), T_h 为处理一头猎物所需的时间,即处理时间。将此方程线性化为直线方程,用最小二乘法估算参数 a' 和 T_h 的值。

1.2.2 丽蚜小蜂对烟粉虱若虫的取食和寄生反应

由于丽蚜小蜂偏好寄生烟粉虱3~4龄若虫(张世泽等,2003),因此选取1.2.1中所得烟粉虱高龄若虫(3~4龄)用于丽蚜小蜂的寄生和取食功能反应拟合。烟粉虱高龄若虫密度设置为1、2、4、8、16、32和64头/叶,采用1.2.1方法进行试验,24 h后移除天敌,体视显微镜下统计取食量,烟粉虱被丽蚜小蜂取食后,有吸食孔并且体型明显变扁平,统计时均计入被丽蚜小蜂取食;然后将其放入温度为 $25\pm 1^{\circ}\text{C}$ 、光照

为14 L:8 D、相对湿度为60%~65%的人工气候箱内饲养,7 d后统计烟粉虱的褐蛹数,被寄生的烟粉虱若虫随着其体内丽蚜小蜂的发育,体色明显变成黑褐色。每个密度重复5次。采用1.2.1方法进行功能反应拟合。

1.2.3 2种天敌组合时对烟粉虱的捕食反应

为明确2种天敌共存时对单种天敌捕食作用的影响,研究了天敌组合对烟粉虱高龄若虫的捕食反应。烟粉虱3~4龄若虫密度设置为5、10、25、50、80、120和200头/叶,将饥饿处理24 h的丽蚜小蜂和日本刀角瓢虫成虫各1头同时放入培养皿中,置于温度为 $25\pm 1^{\circ}\text{C}$ 、光照为14 L:8 D、相对湿度为60%~65%的人工气候箱中饲养,24 h后移除天敌,体视显微镜下分别统计日本刀角瓢虫和丽蚜小蜂的取食量,取食的判断标准同1.2.1和1.2.2,然后将装有烟粉虱的培养皿放回人工气候箱内,7 d后统计丽蚜小蜂的寄生量。每个密度重复5次。采用1.2.1方法进行功能反应拟合。

1.3 数据分析

使用SPSS 19.0软件对试验数据进行统计分析,利用 t 测验法对种间捕食反应参数进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 日本刀角瓢虫对烟粉虱的捕食功能反应

日本刀角瓢虫成虫和4龄幼虫在不同猎物密度下的日捕食量曲线(图1)符合Holling II型功能反应模型,因此利用Holling圆盘方程分别对日本刀角瓢虫成虫和4龄幼虫捕食烟粉虱若虫的功能反应进行曲线拟合。日本刀角瓢虫成虫对烟粉虱低龄若虫的最大捕食量为476.2头,显著大于捕食高龄若虫的91.7头($t=56.202$, $df=8$, $P<0.001$);捕食烟粉虱低龄和高龄若虫的瞬间攻击率分别为0.962和1.055,差异不显著($t=-1.232$, $df=8$, $P=0.253$);捕食烟粉虱低龄若虫的平均处理时间为0.002,显著低于捕食高龄若虫的平均处理时间0.011($t=-8.908$, $df=8$, $P<0.001$)(表1)。

日本刀角瓢虫4龄幼虫对烟粉虱低龄若虫的最大捕食量为833.3头,显著高于其捕食烟粉虱高龄若虫的232.6头($t=52.955$, $df=8$, $P<0.001$)。4龄幼虫捕食1头烟粉虱低龄和高龄若虫的瞬间攻击率分别为1.002和1.021,差异不显著($t=-0.449$, $df=8$, $P=0.665$);捕食烟粉虱低龄若虫的平均处理时间为0.001,显著低于捕食高龄若虫的平均处理时间0.004($t=-14.957$, $df=8$, $P<0.001$)(表1)。

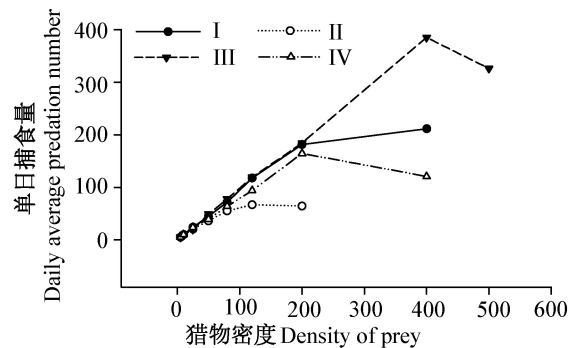


图1 不同猎物密度下日本刀角瓢虫成虫和4龄幼虫对烟粉虱的单日捕食量

Fig. 1 Daily average predation number of *Serangium japonicum* adults and fourth instar larvae on *Bemisia tabaci* under different prey densities

I: 日本刀角瓢虫成虫对烟粉虱1~2龄若虫的捕食量; II: 日本刀角瓢虫成虫对烟粉虱3~4龄若虫的捕食量; III: 日本刀角瓢虫4龄幼虫对烟粉虱1~2龄若虫的捕食量; IV: 日本刀角瓢虫4龄幼虫对烟粉虱3~4龄若虫的捕食量。I: Number of 1st-2nd instar nymphs of *B. tabaci* preyed by *S. japonicum* adults; II: number of 3rd-4th instar nymphs of *B. tabaci* preyed by *S. japonicum* adults; III: number of 1st-2nd instar nymphs of *B. tabaci* preyed by *S. japonicum* 4th instar larvae; IV: number of 3rd-4th instar nymphs of *B. tabaci* preyed by *S. japonicum* 4th instar larvae.

表1 日本刀角瓢虫成虫和4龄幼虫捕食烟粉虱的功能反应

Table 1 Functional response of *Serangium japonicum* adult and fourth instar to *Bemisia tabaci*

日本刀角瓢虫 <i>Serangium japonicum</i>	烟粉虱 <i>Bemisia tabaci</i>	Holling II 圆盘方程 Holling II disc equation	瞬间攻击率 a' Instantaneous attack rate	处理时间 T_h Handling time	R^2
成虫 Adult	1~2 龄若虫 1st-2nd instar nymph	$N_a=0.962N/(1+0.002N)$	0.962	0.002	0.961
	3~4 龄若虫 3rd-4th instar nymph	$N_a=1.055N/(1+0.012N)$	1.055	0.011	0.976
4 龄幼虫	1~2 龄若虫 1st-2nd instar nymph	$N_a=1.002N/(1+0.001N)$	1.002	0.001	0.992
4th instar larva	3~4 龄若虫 3rd-4th instar nymph	$N_a=1.021N/(1+0.004N)$	1.021	0.004	0.973

N_a : 被捕食猎物数; N : 猎物密度。 N_a : Predation number; N : density of prey.

2.2 丽蚜小蜂寄生和取食烟粉虱的功能反应

丽蚜小蜂对不同密度烟粉虱高龄若虫的单日取食量和寄生量曲线(图2)符合Holling II型功能反应模型,因此利用Holling圆盘方程进行功能反应曲线的拟合。丽蚜小蜂对烟粉虱高龄若虫的最大寄生量

为18.5头,最大取食量为4.3头;寄生烟粉虱高龄若虫时的瞬间攻击率和平均处理时间分别为0.522和0.054,取食烟粉虱高龄若虫时的瞬间攻击率和平均处理时间分别为0.986和0.231(表2)。

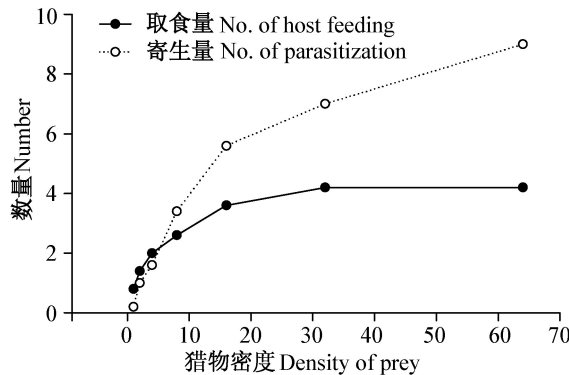


图2 不同猎物密度下丽蚜小蜂对烟粉虱3~4龄若虫的单日取食量和寄生量

Fig. 2 Daily average parasitization and host-feeding number of *Encarsia formosa* on 3rd-4th instar nymphs of *Bemisia tabaci* under different prey densities

表2 丽蚜小蜂寄生和取食烟粉虱3~4龄若虫的功能反应

Table 2 Functional response of *Encarsia formosa* on 3rd-4th instar nymphs to *Bemisia tabaci*

丽蚜小蜂 <i>Encarsia formosa</i>	Holling II 圆盘方程 Holling II disc equation	瞬间攻击率 a' Instantaneous attack rate	处理时间 T_h Handling time	R^2
寄生 Parasitization	$N_a=0.522N/(1+0.028N)$	0.522	0.054	0.991
取食 Host-feeding	$N_a=0.986N/(1+0.228N)$	0.986	0.231	0.995

N_a : 被捕食猎物数; N : 猎物密度。 N_a : Predation number; N : density of prey.

2.3 2种天敌组合时对烟粉虱的功能反应

2种天敌组合条件下,日本刀角瓢虫和丽蚜小蜂对不同密度烟粉虱高龄若虫的单日取食量和寄生量曲线(图3)符合Holling II型功能反应模型,因此利用Holling圆盘方程进行功能反应曲线的拟合。2种天敌组合条件下,日本刀角瓢虫对烟粉虱3~4龄

若虫的最大捕食量为222.2头,显著高于其单独存在时的捕食量($t=19.844, df=8, P<0.001$);瞬间攻击率为0.955,与其单独存在时差异不显著($t=-1.762, df=8, P=0.116$);平均处理时间为0.005,显著低于其单独存在时的处理时间($t=-6.536, df=8, P<0.001$)。

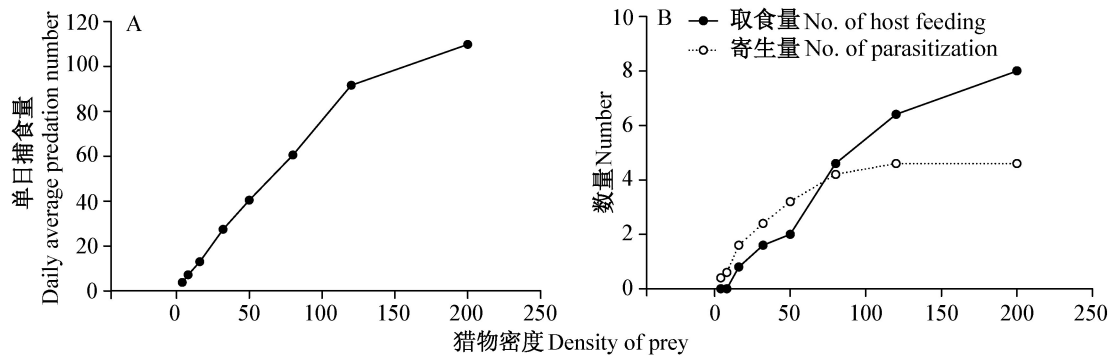


图3 不同猎物密度下天敌组合时日本刀角瓢虫(A)和丽蚜小蜂(B)对烟粉虱3~4龄若虫的单日取食量和寄生量

Fig. 3 Daily average predation number of *Serangium japonicum* (A) and parasitization and host-feeding number of *Encarsia formosa* (B) on 3rd-4th instar nymphs of *Bemisia tabaci* by natural enemy combination under different prey densities

丽蚜小蜂对烟粉虱高龄若虫的最大寄生量为24.4头,显著高于其单独存在时的寄生量($t=3.842, df=8, P<0.005$);寄生烟粉虱高龄若虫时的瞬间攻击率为0.066,显著低于其单独存在时的瞬间攻击率($t=-35.916, df=8, P<0.001$);寄生烟粉虱高龄若虫时的平均处理时间为0.041,显著低于其单独存在时的平均处理时间($t=-5.526, df=8, P<0.001$)。丽蚜小蜂

对烟粉虱高龄若虫的最大取食量为7.2头,显著高于其单独存在时的取食量($t=6.274, df=8, P<0.001$);取食烟粉虱高龄若虫时的瞬间攻击率为0.101,显著低于其单独存在时的瞬间攻击率($t=-26.025, df=8, P<0.001$);取食烟粉虱高龄若虫时的平均处理时间为0.139,显著低于其单独存在时的平均处理时间($t=-10.994, df=8, P<0.001$)(表3)。

表3 天敌组合时日本刀角瓢虫和丽蚜小蜂对烟粉虱3~4龄若虫的功能反应

Table 3 Functional response of *Serangium japonicum* and *Encarsia formosa* to 3rd-4th instar nymphs of *Bemisia tabaci* under natural enemy combination

天敌昆虫 Natural enemy	Holling II 圆盘方程 Holling II disc equation	瞬间攻击率 a' Instantaneous attack rate	处理时间 T_h Handling time	R^2
日本刀角瓢虫 <i>Serangium japonicum</i>	$N_a=0.955N/(1+0.004N)$	0.955	0.005	0.992
丽蚜小蜂 取食 Host-feeding	$N_a=0.101N/(1+0.014N)$	0.101	0.139	0.982
<i>Encarsia formosa</i> 寄生 Parasitization	$N_a=0.066N/(1+0.003N)$	0.066	0.041	0.998

N_a : 被捕食猎物数; N : 猎物密度。 N_a : Predation number; N : density of prey.

3 讨论

天敌对害虫密度变化在捕食量方面做出的反应称为功能反应,其可用于天敌控害能力的动态评估(Holling, 1959)。本研究结果表明,日本刀角瓢虫对甘蓝上烟粉虱若虫的捕食量随烟粉虱虫龄增大而减少,这一结果与荆英等(2004)报道一致。同样,本试验中,日本刀角瓢虫成虫和4龄幼虫及丽蚜小蜂对烟粉虱若虫的捕食功能反应均属Holling II型,日本刀角瓢虫成虫和4龄幼虫均对烟粉虱若虫具有较好的控制潜力,并且对低龄烟粉虱若虫的捕食量明显高于对烟粉虱高龄若虫的捕食量。功能反应模型的瞬时攻击率和处理时间是反映天敌昆虫控害能力大小的重要参数(Holling, 1959)。本研究结果表明,当日本刀角瓢虫捕食低龄烟粉虱若虫时,其成虫的瞬时攻击率小于4龄幼虫的瞬时攻击率,而处理时间大于4龄幼虫的处理时间;当日本刀角瓢虫捕食烟粉虱高龄若虫时,其成虫的瞬时攻击率和处理时间均大于4龄幼虫。其原因可能与日本刀角瓢虫4龄幼虫比成虫具有更强的活动能力有关,小黑瓢虫 *Delphastus catalinae* 也表现出类似行为(Liu & Stansly, 1999)。丽蚜小蜂是粉虱类害虫的优势寄生蜂,已有报道表明丽蚜小蜂寄生温室白粉虱(瞬时攻击率和处理时间分别为1.760和0.059)(Fransen & van Montfort, 1987)、蓖麻蜡粉虱 *Trialeurodes ricini* (分别为1.430和0.077)(Shishehbor & Brennan, 1996)和烟粉虱(分别为0.031和0.096)(Enkegaard, 1994)的功能反应均属于Holling II型,但是功能反应参数——瞬时攻击率和处理时间差异很大。本研究结果表明,丽蚜小蜂寄生甘蓝烟粉虱高龄若虫的瞬时攻击率和处理时间分别为0.522和0.054。不同研究结果差异较大的原因可能与粉虱种类、试验条件(如培养皿大小、温度等)、寄主植物种类以及丽蚜小蜂地理种群不同有关。

已有研究表明当联合释放不同天敌种类时,其对害虫的控制效果可能因天敌种类而异。如Colfer & Rosenheim(2001)报道联合释放茶足柄瘤蚜茧蜂 *Lysiphlebus testaceipes* 和锚斑长足瓢虫 *Hippodamia convergens* 控制棉蚜 *Aphis gossypii* 的效果优于单独使用蚜茧蜂的效果;小黑瓢虫与橘黄恩蚜小蜂 *Encarsia luteola* 适当组合,在笼罩条件下会提高对烟粉虱的防控效果(Heinz & Parrella, 1994);但Zang & Liu(2007)发现在笼罩条件下同时释放小黑瓢虫和浅黄恩蚜小蜂 *Encarsia sophia* 时会降低对烟粉虱的

控制效果;Sohrabi et al.(2013)报道当同时释放美洲小花蝽 *Orius majusculus* 和丽蚜小蜂时,对烟粉虱的控制效果明显下降。本研究结果显示,当日本刀角瓢虫和丽蚜小蜂联合释放时,其瞬间攻击率和处理时间较单独释放时呈现下降趋势,但其捕食量和寄生量显著增加,控害效果显著提高,可能是当与丽蚜小蜂共存时,日本刀角瓢虫面临种间竞争时以减少对寄主烟粉虱的处理时间来追求占有量,从而在短时间内获得较多的猎物;对寄生蜂丽蚜小蜂而言,当其面临种间竞争时,可能采取减少对寄主的处理时间从而寄生更多烟粉虱若虫的生存策略,以保证种群繁衍。但是,当寄生蜂的寄主处理时间减少,是否导致丽蚜小蜂重寄生率增加进而影响生物防治效果尚需进一步研究。

总之,本研究结果表明当日本刀角瓢虫和丽蚜小蜂联合释放时,日本刀角瓢虫的捕食能力和丽蚜小蜂的寄生能力均优于释放单种天敌昆虫,从而直接提高了对烟粉虱的控制效果。当然,该结果仅是在室内条件下得出,其实际控制效果仍需要在温室或田间进一步验证。

参考文献 (References)

- Assaneo F, Coutinho RM, Lin YC, Mantilla C, Lutscher F. 2013. Dynamics and coexistence in a system with intraguild mutualism. *Ecological Complexity*, 14: 64–74
- Castle SJ, Palumbo JC, Prabhaker N, Horowitz AR, Denholm I. 2010. Ecological determinants of *Bemisia tabaci* resistance to insecticides.//Stansly PA, Naranjo SE. *Bemisia: bionomics and management of a global pest*. Dordrecht: Springer, pp. 423–467
- Colfer RG, Rosenheim JA. 2001. Predation on immature parasitoids and its impact on aphid suppression. *Oecologia*, 126(2): 292–304
- Enkegaard A. 1994. Temperature dependent functional response of *Encarsia formosa* parasitizing the Poinsettia-strain of the cotton whitefly, *Bemisia tabaci*, on Poinsettia. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 73(1): 19–29
- Fatiha L, Huang Z, Ren SX, Ali S. 2008. Effect of *Verticillium lecanii* on biological characteristics and life table of *Serangium japonicum* (Coleoptera: Coccinellidae), a predator of whiteflies under laboratory conditions. *Insect Science*, 15(4): 327–333
- Fransen JJ, van Montfort MAJ. 1987. Functional response and host preference of *Encarsia formosa* Gahan (Hym., Aphelinidae), a parasitoid of the greenhouse whitefly, *T. vaporariorum* (Westwood) (Hom., Aleyrodidae). *Journal of Applied Entomology*, 103(1/2/3/4/5): 55–69
- He YX, Zhao JW, Zheng Y, Desneux N, Wu KM. 2012. Lethal effect of imidacloprid on the coccinellid predator *Serangium japonicum* and sublethal effects on predator voracity and on functional response to the whitefly *Bemisia tabaci*. *Ecotoxicology*, 21(5): 55–69

- 1291–1300
- Heinz KM, Parrella MP. 1994. Poinsettia (*Euphorbia pulcherrima* Willd. ex Koltz.) cultivar-mediated differences in performance of five natural enemies of *Bemisia argentifolii* Bellows and Perring, n. sp. (Homoptera: Aleyrodidae). *Biological Control*, 4(4): 305–318
- Hoddle MS, van Driesche RG, Sanderson JP. 1998. Biology and use of the whitefly parasitoid *Encarsia formosa*. *Annual Review of Entomology*, 43: 645–669
- Holling CS. 1959. Some characteristics of simple types of predation and parasitism. *Canadian Entomologist*, 91: 385–398
- Jing Y, Huang J, Han JC, Ma RY. 2004. Predation of *Serangium japonicum* on *Bemisia tabaci*. *Journal of Plant Protection*, 31(3): 225–229 (in Chinese) [荆英, 黄建, 韩巨才, 马瑞燕. 2004. 刀角瓢虫对烟粉虱的捕食作用. *植物保护学报*, 31(3): 225–229]
- Kalinkat G, Schneider FD, Digel C, Guill C, Rall BC, Brose U. 2013. Body masses, functional responses and predator-prey stability. *Ecology Letters*, 16(9): 1126–1134
- Li P, Chen QZ, Liu TX. 2015. Effects of a juvenile hormone analog, pyriproxyfen, on *Serangium japonicum* (Coleoptera: Coccinellidae), a predator of *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae). *Biological Control*, 86: 7–13
- Liu TX, Stansly PA. 1999. Searching and feeding behavior of *Nephaspis oculatus* and *Delphastus catalinae* (Coleoptera: Coccinellidae), predators of *Bemisia argentifolii* (Homoptera: Aleyrodidae). *Environmental Entomology*, 28(5): 901–906
- Liu TX, Stansly PA, Gerling D. 2015. Whitefly parasitoids: distribution, life history, bionomics, and utilization. *Annual Review of Entomology*, 60: 273–292
- Liu XN, Xu LL, Cai L, Du YM, Du YZ. 2016. Haplotype analysis of *Bemisia tabaci* biotype Q in Jiangsu Province, China. *Journal of Plant Protection*, 43(1): 70–77 (in Chinese) [刘晓娜, 许丽丽, 蔡力, 杜以梅, 杜予州. 2016. 江苏地区Q型烟粉虱的单倍型分析. *植物保护学报*, 43(1): 70–77]
- Naranjo SE, Castle SJ, de Barro PJ, Liu SS. 2010. Population dynamics, demography, dispersal and spread of *Bemisia tabaci*.//Stansly PA, Naranjo SE. *Bemisia: bionomics and management of a global pest*. Dordrecht: Springer, pp. 185–226
- Pan HP, Chu D, Ge DQ, Wang SL, Wu QJ, Xie W, Jiao XG, Liu BM, Yang X, Yang NN, et al. 2011. Further spread of and domination by *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae) biotype Q on field crops in China. *Journal of Economic Entomology*, 104(9): 978–985
- Peng YQ, Meng RX, Zhang DX, Zhang PF, Han YH. 2013. Cannibalism and intraguild predation of phytoseiid mites *Neoseiulus barkeri* and *Neoseiulus cucumeris*. *Chinese Journal of Ecology*, 32(7): 1825–1831 (in Chinese) [彭勇强, 孟瑞霞, 张东旭, 张鹏飞, 韩玉花. 2013. 两种植绥螨的同类相残和集团内捕食作用. *生态学杂志*, 32(7): 1825–1831]
- Raffel TR, Martin LB, Rohr JR. 2008. Parasites as predators: unifying natural enemy ecology. *Trends in Ecology and Evolution*, 23(11): 610–618
- Schellekens T, van Kooten T. 2012. Coexistence of two stage-structured intraguild predators. *Journal of Theoretical Biology*, 308: 36–44
- Shishhebor P, Brennan PA. 1996. Functional response of *Encarsia formosa* (Gahan) parasitizing castor whitefly, *Trialeurodes ricini* Misra (Hom., Aleyrodidae). *Journal of Applied Entomology*, 120: 297–99
- Sohrabi F, Enkegaard A, Shishhebor P, Saber M, Mosaddegh MS. 2013. Intraguild predation by the generalist predator *Orius majusculus* on the parasitoid *Encarsia formosa*. *BioControl*, 58(1): 65–72
- Stansly PA, Natwick ET. 2010. Integrated systems for managing *Bemisia tabaci* in protected and open field agriculture.//Stansly PA, Naranjo SE. *Bemisia: bionomics and management of a global pest*. Dordrech: Springer, pp. 467–497
- Yao SL, Huang Z, Ren SX, Mandour N, Ali S. 2011. Effects of temperature on development, survival, longevity, and fecundity of *Serangium japonicum* (Coleoptera: Coccinellidae), a predator of *Bemisia tabaci* Gennadius (Homoptera: Aleyrodidae). *Biocontrol Science and Technology*, 21(1): 23–34
- Yao SL, Ren SX, Huang Z. 2005. Feeding behavior of *Serangium japonicum* (Coleoptera: Coccinellidae), a predator of *Bemisia tabaci* (Homoptera: Aleyrodidae). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 16(3): 509–513 (in Chinese) [姚松林, 任顺祥, 黄振. 2005. 烟粉虱天敌日本刀角瓢虫的捕食行为. *应用生态学报*, 16(3): 509–513]
- Zang LS, Liu TX. 2007. Intraguild interactions between an oligophagous predator, *Delphastus catalinae* (Coleoptera: Coccinellidae), and a parasitoid, *Encarsia sophia* (Hymenoptera: Aphelinidae), of *Bemisia tabaci* (Homoptera: Aleyrodidae). *Biological Control*, 41(1): 142–150
- Zhang SZ, Wan FH, Zhang F, Hua BZ. 2003. Parasitic suitability of two strains of *Encarsia formosa* on *Bemisia tabaci*. *Chinese Journal of Biological Control*, 19(4): 149–153 (in Chinese) [张世泽, 万方浩, 张帆, 花保祯. 2003. 丽蚜小蜂两个品系对烟粉虱若虫的寄生适宜性. *中国生物防治学报*, 19(4): 149–153]

(责任编辑:李美娟)