应用昆虫学报 *Chinese Journal of Applied Entomology* 2016, 53(6): 1353−1360. DOI: 10.7679/j.issn.2095−1353.2016.165

多异瓢虫成虫对枸杞木虱的捕食作用*

巫鹏翔[1, 2**] 欧阳浩永[1, 2] 徐 婧[1] 张 蓉[3] 何 嘉[3] 张润志[1***]

（1. 中国科学院动物研究所，北京 100101；2. 中国科学院大学，北京 100049；
3. 宁夏农林科学院植物保护研究所，银川 750002）

摘 要 **【目的】** 为了测定多异瓢虫 *Hippodamia variegata* (Goeze)成虫对枸杞木虱 *Paratrioza sinica* Yang & Li 的捕食作用。**【方法】** 在室内测定了多异瓢虫的捕食功能反应、种内干扰、自身密度干扰、捕食偏好性，并通过罩笼试验研究多异瓢虫在田间对枸杞木虱的捕食效果。**【结果】** 结果表明，多异瓢虫对枸杞木虱的捕食功能反应符合 Holling Ⅱ型方程，对卵、1~2 龄若虫、3~5 龄若虫以及成虫的最大捕食量分别为 80.4 粒、410.0 头、350.8 头和 102.5 头。田间罩笼试验结果证明，在多异瓢虫成虫生长周期 30 d 内能使枸杞木虱总虫口密度下降 85.4%；多异瓢虫对枸杞木虱成虫的搜寻效率 a = 0.8252 为 4 种木虱虫态最佳，而对枸杞木虱卵处理时间 T_h = 0.002283 为 4 种木虱虫态中最佳；在 100 头/皿的猎物密度下多异瓢虫均能展现其最大捕食率，益害比参考值为 1∶100。多异瓢虫对枸杞木虱的捕食作用受自身密度的影响显著大于种内干扰；在 100 头/皿混合猎物密度下，多异瓢虫更偏好木虱成虫，在 300 头/皿下，多异瓢虫更偏向于木虱若虫。**【结论】** 研究表明，多异瓢虫是具有控制潜力的捕食性天敌，人工释放多异瓢虫成虫可有效防治枸杞木虱。

关键词 多异瓢虫，枸杞木虱，捕食作用

Predation of *Paratrioza sinica* Yang & Li by adult *Hippodamia variegata* (Goeze)

WU Peng-Xiang[1, 2**] OUYANG Hao-Yong[1, 2] XU Jing[1] ZHANG Rong[3]
HE Jia[3] ZHANG Run-Zhi[1***]

(1. Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Institute of Plant Protection, Ningxia Academy of Agro-Forestry Sciences, Yinchuan 750002, China)

Abstract **[Objectives]** To study predation by *Hippodamia variegata* (Goeze) adults on *Poratrioza sinica* Yang & Li. **[Methods]** The functional predation response, mutual interference, influence of prey density, and the prey preferences of *H. variegata* with respect to *P. sinica* were investigated under laboratory conditions and the effects of predation on *P. sinica* populations were studied in the field. **[Results]** The functional response of *H. variegata* adults to *P. sinica* approximated a Holling Ⅱ model. Daily maximum numbers of *P. sinica* eggs, 1st to 5th instar nymphs, and adults, preyed on by *H. variegata* adults were 80.4, 410.0, 350.8 and 102.5, respectively. The density of *P. sinica* in field enclosures decreased by 85.4% over the 30 day life-span of adult *H. variegate*. The search efficiency of *H. variegata* for *P. sinica* adults was 0.8252 and the processing time of *H. variegata* for *P. sinica* eggs was 0.002283, both of which were higher than for other *P. sinica* life stages. Prey density was more important than mutual interference on the predation efficiency of *H. variegata*. At a predator: prey density of 1∶100, *H. variegata* preferred *P. sinica* adults, but preferred *P. sinica* nymphs at a predator: prey density of 1∶300. **[Conclusion]** *H. variegata* has the potential to be an effective biological control agent for *P. sinica*.

Key words *Hippodamia variegata*, *Paratrioza sinica* Yang & Li, predation

*资助项目 Supported projects：宁夏自治区中宁县农业综合开发办公室项目（znnfkj2015）

**第一作者 First author，E-mail：wupengxiang@ioz.ac.cn

***通讯作者 Corresponding author，E-mail：zhangrz@ioz.ac.cn

收稿日期 Received：2016-03-04，接受日期 Accepted：2016-09-08

宁夏枸杞 *Lycium barbarum* L. 属茄科（Solanaceae）枸杞属（*Lycium*）多年生灌木，用于食用及药用的成熟果实被称为枸杞或枸杞子（薛立文和李以暖，2000）。枸杞营养生长与生殖生长同时进行，花果同期，是害虫多发的药食兼用中药材（段文杰，2013），据调查枸杞有 60 多种害虫为害，成灾害虫有 10 多种（赵紫华等，2009）。

枸杞木虱 *Paratrioza sinica* Yang & Li 是严重危害枸杞的四大害虫之一（张长海和马玉玲，1982；吴福桢和高兆宁，1984），属同翅目（Homoptera）个木虱科（Triozidae），分布于宁夏、甘肃、新疆、内蒙古、山西等地。枸杞木虱成虫和若虫均刺吸危害嫩叶、嫩枝、花及幼果，严重时导致新叶畸形，提早干枯落叶（张长海和马玉玲，1982）。若虫还会排泄一种白色分泌物黏附于叶片上，招致煤污病的发生（谭大凤和陈阿兰，2006）。枸杞木虱在宁夏地区一年发生 4 代，以成虫在土块、树皮缝、枝叉、枯枝落叶层等处越冬；第 2 年 4 月下旬、5 月上旬开始活动；若虫找到合适的取食部位后便固定取食直至羽化。成虫善跳易飞，主要在白天取食（刘晓丽等，2013）。目前枸杞害虫的防治依然以化学防治为主（段立清等，2004；任月萍和胡忠庆，2004；刘爱萍等，2007），辅以生物防治（段立清等，2005）。进而导致了枸杞子农药残留超标严重，出口退货频繁发生，严重威胁枸杞产业的健康持续发展（徐常青等，2013）。鉴于此，利用生物防治代替化学防治来控制枸杞害虫是解决农残问题的突破口。利用宁夏枸杞种植区捕食性优势天敌多异瓢虫对枸杞木虱进行有效控制，可为枸杞木虱的防治开辟一条新的途径。

多异瓢虫（又名小十三星瓢虫）*Hippodamia variegata*（Goeze）属鞘翅目（Coleoptera）瓢虫科（Coccinellidae），对棉蚜、枸杞蚜虫等重要害虫具有很强的捕食能力，为宁夏枸杞种植区捕食性优势天敌（冯宏祖等，2000；白小军等，2008）。通过调查在枸杞田间发现有大量多异瓢虫存在，表明多异瓢虫有可能是枸杞木虱潜在的捕食性天敌。国内外对于枸杞木虱捕食性天敌的研究较少，天敌昆虫对枸杞木虱的捕食作用李海平等（2002），刘爱萍等（2007）有过报道，有关多异瓢虫对枸杞木虱的捕食作用研究尚未见报道。本实验研究了多异瓢虫对枸杞木虱的捕食功能、寻找效率、处理时间、干扰作用以及捕食偏好性，并建立了相关数学模型，以期科学评价多异瓢虫成为枸杞木虱捕食性天敌的潜能及其控制效果，为更好地保护利用枸杞木虱天敌资源提供科学依据。

本研究对多异瓢虫对枸杞木虱的捕食功能、寻找效率、处理时间、干扰作用以及捕食偏好性进行了探索，并建立了相关数学模型，以期科学地评价多异瓢虫成为枸杞木虱捕食性天敌的潜能及其控制效果，为更好地保护与利用枸杞木虱天敌资源提供科学依据，通过合理利用自然天敌防治枸杞木虱，从而更有效的降低化学药剂对环境及植株的污染。

1 材料与方法

1.1 材料

供试昆虫：枸杞木虱卵、若虫、成虫于 2015 年 7—9 月采自宁夏中宁县大地枸杞试验基地，将田间带有枸杞木虱成虫的枝条或叶片摘下装入带有保湿脱脂棉的保鲜盒中，带回室内备用；多异瓢虫成虫同样采自大地枸杞试验基地，将多异瓢虫放入 30 mm×160 mm×150 mm 培养皿中，每个培养皿 5 头，置于室温下饲养，饲喂枸杞木虱若虫和成虫，选取饥饿 24 h 的成虫备用。

1.2 方法

1.2.1 多异瓢虫对枸杞木虱的捕食功能反应

枸杞木虱每个虫态均设 100、150、200、250、300 头 5 个密度梯度，将不同密度的枸杞木虱卵、1~2 龄若虫、3~5 龄若虫、成虫分别与 1 头经过 24 h 饥饿处理的多异瓢虫成虫组合，共 20 个处理，放入 30 mm×160 mm×150 mm 培养皿中并置于室温下，24 h 后记录被捕食量。每个处理重复 5 次。并进行 Holling II 功能反应型拟合，方程为 $N_a = a N_t T /(1 + a T_h N_t)$，式中：$N_t$ 为供试猎物密度，N_a 为被捕食猎物数量，T 为猎物

暴露于捕食者的时间，T = 1，a 为猎物搜寻效率，T_h 为捕食 1 头猎物所需要的时间。

1.2.2 田间释放多异瓢虫对枸杞木虱的防治效果　在宁夏中宁县大地枸杞试验基地随机选取 1 株自然生长的枸杞植株进行整株罩笼，于植株上、中、下层的东、南、西、北分别选取 5 片叶子，记录每片叶子上的木虱卵、若虫、成虫数量，分别计算单片叶子上各种虫态木虱的平均量，然后上、中、下层分别选 3 条分枝，计算单个分枝上的平均叶片数，并记录单株分枝数，则罩笼单株植物上的枸杞木虱总数=单叶平均木虱数×单枝平均叶片数×单株分枝数。参考试验 1.2.1 所得结果，按照多异瓢虫：木虱为 1∶150 头的比例释放多异瓢虫成虫，不放多异瓢虫的笼子作空白对照。由于多异瓢虫成虫在温度为 35℃左右的枸杞田地中生命周期在 30~35 d 之间，因此选择治理周期为 30 d。试验处理重复 3 次，分别在释放后的第 15、30 天记录笼内枸杞木虱数，并计算 30 d 后的枸杞木虱虫口下降率。枸杞木虱虫口下降率 = 1 – [(1–30 d 内木虱下降率)/30 d 内对照组木虱上升率]。

1.2.3 种内干扰及自身密度的影响　枸杞木虱卵、1~2 龄若虫、3~5 龄若虫、成虫共 4 种木虱虫态与 24 h 饥饿处理的多异瓢虫成虫分别以 100∶1、200∶2、300∶3、400∶4、500∶5 共 5 种比例的组合放入培养皿中，共 20 个处理，24 h 后检查各处理的被捕食数量。每个处理重复 5 次。捕食量根据 Hassell 等(1969)的模型 $E = qP^{-m}$ 模拟出多异瓢虫受到的种内干扰系数，式中：E 为平均捕食率，P 为天敌密度，m 为种内干扰系数，q 为天敌密度 P = 1 头时的最大捕食率。

枸杞木虱卵、1~2 龄若虫、3~5 龄若虫、成虫 4 种木虱虫态与 24 h 饥饿处理的多异瓢虫成虫分别以 500∶1、500∶2、500∶3、500∶4、500∶5 比例的组合放入培养皿中，共 20 个处理，24 h 后检查被捕食数量。每个处理重复 5 次。根据捕食量利用 Watt（1959）模型 $A = QP^{-m}$ 计算出多异瓢虫受到自身密度干扰系数，式中：A 为单头捕食者平均捕食量，P 为捕食者密度，m 为互相干扰系数，Q 为捕食者密度 P = 1 头时的最大捕食量。

1.2.4 多异瓢虫对枸杞木虱的选择捕食作用　1 头多异瓢虫与 4 种木虱虫态（卵，1~2 龄若虫，3~5 龄若虫，成虫）等量放置于培养皿中（30 mm×160 mm×150 mm），设置 100、200、300 头/皿共 3 个总密度梯度，共 12 个处理，24 h 后检查各种虫态枸杞木虱被捕食量。每个处理重复 5 次。

利用周集中和陈常铭（1987）方法分析，多种猎物共存时，捕食者对各种猎物的偏好性用方程 $Q_N = (1+C_N)/(1-C_N)\times F_N$ 计算，式中：Q_N 指捕食者对第 N 种猎物捕食的捕食比例；F_N 指环境中第 N 种猎物所占的比例；C_N 指捕食者对第 N 种猎物的偏好性，C_N=0 指捕食者对第 N 种猎物没有偏好性，$0<C_N<1$ 表明捕食者对第 N 种猎物存在正偏好性，$-1<C_N<0$ 表示捕食者对第 N 种猎物具有负的偏好性。方程中，对偏好性 C_N 的统计值采用单样本 t -检验法，与零假设（C_N = 0）比较，验证其差异是否显著。

1.3　数据分析

使用 SPSS 20.0 软件进行统计分析，参数均采用最小二乘法估计，并利用 t-检验法对种内干扰与自身密度干扰系数的比较、偏好度进行显著性检验。

2　结果与分析

2.1　多异瓢虫对枸杞木虱捕食功能反应研究

2.1.1 最大捕食量、搜寻时间、猎物处理时间

根据多异瓢虫在 5 种密度下对枸杞木虱卵、1~2 龄若虫、3~5 龄若虫、成虫单日捕食量可知，多异瓢虫单日捕食量随猎物密度的升高而成比例增加，当增加到一定程度时，单日捕食量不会随着猎物密成比例增加，且枸杞木虱密度在 250~300 头/皿时开始出现缓慢增加的趋势并将会达到一定阈值（图 1）。捕食量符合 Holling Ⅱ (1959) 型圆盘方程，根据拟合方程的阈值即可确定多异瓢虫对 4 种虫态枸杞木虱的最大捕食量。

枸杞木虱密度趋近无穷大时，多异瓢虫对枸杞木虱卵、1~2 龄若虫、3~5 龄若虫、成虫的最大捕食量分别为 80.4 粒、410.1 头、350.6 头、

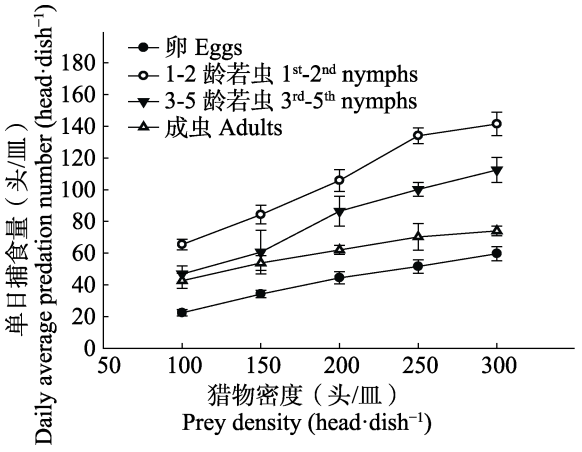

图 **1** 多异瓢虫对 **4** 种虫态枸杞木虱单日捕食量

Fig. 1 Daily preying amounts of *Hippodamia variegata* adults on *Poratrioza sinica* of 4 stages

102.5 头。多异瓢虫对枸杞木虱平均搜寻效率参数为 0.6418，其中对 4 种虫态枸杞木虱的搜寻效率顺序为成虫>3~5 龄若虫>1~2 龄若虫>卵。多异瓢虫对枸杞木虱平均处理时间参数为 0.0043，对 4 种虫态枸杞木虱的处理时间顺序同样为成虫>3~5 龄若虫>1~2 龄若虫>卵。多异瓢虫对活跃度较高的木虱成虫搜寻效率高，但处理时间长（表 1）。

2.1.2 多异瓢虫对枸杞木虱最大捕食率 在枸杞木虱密度为 100 头/皿的情况下，多异瓢虫成虫对其 1~2 龄若虫、3~5 龄若虫、成虫的捕食率均达最大，分别为 65.4%、46.8%、42.6%。通过比较多异瓢虫成虫对枸杞木虱 4 种虫态最大捕食率，多异瓢虫成虫对 1~2 龄木虱若虫的捕食效果最好，最大捕食率能达到 65.4%，此时枸杞木虱 1~2 龄木虱若虫密度为 100 头/皿（图 2）。

表 **1** 多异瓢虫对枸杞木虱捕食功能反应

Table 1 Predation functional response of *Hippodamia variegata* adults on *Poratrioza sinica*

虫态 Stage	R^2	F	P	Holling Ⅱ 圆盘方程 Holling Ⅱ disc equation	a	T_h
卵 Egg	0.996	718.292	<0.001	N_a=0.4393N/(1+0.001003N)	0.4393	0.002283
1~2 龄若虫 1st-2nd nymphs	0.983	171.243	0.001	N_a=0.5167N/(1+0.001260N)	0.5167	0.002439
3~5 龄若虫 3rd-5th nymphs	0.986	208.164	0.001	N_a=0.7860N/(1+0.002242N)	0.7860	0.002852
成虫 Adult	0.976	119.543	0.002	N_a=0.8252N/(1+0.008053N)	0.8252	0.009759

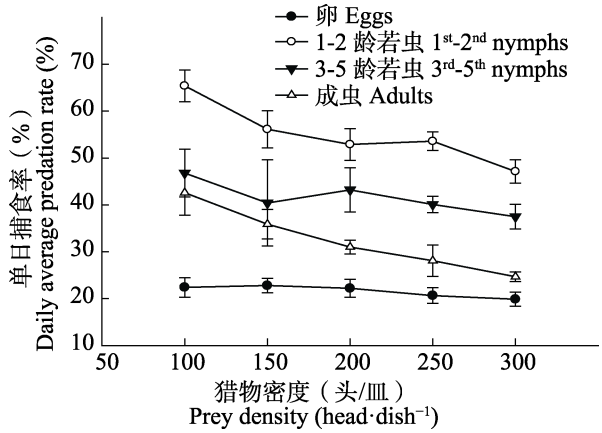

图 **2** 多异瓢虫对 **4** 种虫态枸杞木虱单日捕食率

Fig. 2 Daily average preying rate of *Hippodamia variegata* on *Poratrioza sinica* of 4 stages

2.2 田间释放多异瓢虫对枸杞木虱的防治效果

根据笼内取样统计算得的结果，分别在 3 个笼内释放 24、17、24 头多异瓢虫。根据 2.1.1 的结果，多异瓢虫对木虱卵的捕食效果极低，因此只选择对 1~2 龄若虫、3~5 龄若虫和成虫进行调查研究。多异瓢虫释放后第 15 天笼内木虱总量下降率为 53.1%，第 30 天笼内木虱总量下降率为 84.8%，且枸杞木虱 1~2 龄若虫、3~5 龄若虫、成虫的下降率分别为 83.8%、86.4%和 81.2%均有明显效果（表 2）。而第 30 天后对照组单叶木虱量上升率为 104.3%，根据枸杞木虱虫口下降率公式算出释放后第 30 天单叶木虱量下降率为 85.4%，说明释放多异瓢虫能够有效控制枸杞木虱田间虫口量。

2.3 种内干扰及自身密度对多异瓢虫捕食枸杞木虱的影响

2.3.1 种内干扰的影响 生存空间一定，当多异瓢虫密度随木虱密度同比例递增时，总捕食量也相应增加。由于个体间的相互影响，多异瓢虫成

虫间存在着种内干扰作用，随着总体密度的增加，多异瓢虫成虫相互干扰作用逐渐加强。根据拟合方程中多异瓢虫成虫捕食 4 种虫态枸杞木虱时受到种内干扰系数 m，多异瓢虫捕食枸杞木虱受到种内干扰系数的平均值为 0.5123，且捕食不同虫态枸杞木虱受到的种内干扰也有差别，顺序为卵>3~5 龄若虫>成虫>1~2 龄若虫（表 3）。

2.3.2　自身密度的影响　枸杞木虱密度不变，多异瓢虫成虫对枸杞木虱平均捕食量随自身密度的增加而下降。枸杞木虱总量一定，随着多异瓢虫成虫密度增加，其个体间对猎物资源存在较强的争夺，导致猎物处理时间过长，搜寻效率下降进而捕食量下降。根据拟合方程中多异瓢虫成虫捕食 4 种虫态枸杞木虱时受到自身密度干扰系数 m，多异瓢虫成虫捕食枸杞木虱受到自身密度干扰系数的平均值为 1.0222，且捕食 4 种虫态枸杞木虱受到的自身密度干扰也有差别，顺序为卵>3~5 龄若虫>1~2 龄若虫>成虫（表 4）。

2.3.3　种内干扰与自身密度干扰的比较　种内干扰下空间一定，多异瓢虫成虫与枸杞木虱的比例为定值 1∶100，整体数量增加时空间资源逐步压缩。自身密度干扰状态下枸杞木虱量不变为 500 头/皿，多异瓢虫成虫个体增加时分配到单头多异瓢虫成虫的枸杞木虱量逐渐下降。通过对种

表 2　多异瓢虫成虫释放第 15、30 天的枸杞木虱量

Table 2　Amount of *Poratrioza sinica* on the 15th day, 30th day after *Hippodamia variegata* adult release

虫态 Stage	初始单叶木虱量 Initial amount per leaf	释放瓢虫第 15 天 The 15th day after *Hippodamia variegata* release		释放瓢虫第 30 天 The 30th day after *Hippodamia variegata* release	
		单叶木虱量 Amount per leaf	下降率（%） Descent rate	单叶木虱量 Amount per leaf	下降率（%） Descent rate
1~2 龄若虫 1st-2nd nymphs	27.1±3.6	16.3±2.3	39.9	4.4±0.1	83.8
3~5 龄若虫 3rd-5th nymphs	21.3±1.8	6.3±1.4	70.4	2.9±0.5	86.4
成虫 Adult	4.8±0.7	2.4±0.7	50.0	0.9±0.1	81.2
总数 Sum	53.3±6.5	25.0±2.8	53.1	8.1±0.4	84.8

表中数据为平均数±标准误。Data in the table are mean ± SE.

表 3　多异瓢虫捕食枸杞木虱受到的种内干扰系数

Table 3　The coefficient of mutual interference impacting the predation of *Hippodamia variegata* adults on *Poratrioza sinica*

虫态 Stage	R^2	F	P	Hassell 模型方程 Hassell model equation	q	m
卵 Egg	0.898	26.539	0.014	$E = 0.244402P^{-0.8069}$	0.244402	0.8069
1~2 龄若虫 1st-2nd nymphs	0.792	11.392	0.043	$E = 0.701178P^{-0.3515}$	0.701178	0.3515
3~5 龄若虫 3rd-5th nymphs	0.805	12.372	0.039	$E = 0.504395P^{-0.4765}$	0.504395	0.4765
成虫 Adult	0.81	12.831	0.037	$E = 0.525835P^{-0.4141}$	0.525835	0.4141

表 4　多异瓢虫捕食枸杞木虱受到自身密度的干扰系数

Table 4　The influence coefficient of densities impacting the predation of *Hippodamia variegata* adults on *Poratrioza sinica*

虫态 Stage	R^2	F	P	Watt 模型方程 Watt model equation	q	m
卵 Egg	0.981	157.390	0.001	$A = 67.4418P^{-1.3239}$	67.4418	1.3239
1~2 龄若虫 1st-2nd nymphs	0.989	270.655	<0.001	$A = 153.7694P^{-0.9197}$	153.7694	0.9197
3~5 龄若虫 3rd-5th nymphs	0.964	81.325	0.003	$A = 137.8624P^{-1.1717}$	137.8624	1.1717
成虫 Adult	0.899	26.727	0.014	$A = 88.77139P^{-0.6737}$	88.7714	0.6737

内干扰系数与自身密度干扰系数进行比较，找出空间资源与猎物资源哪种制约对多异瓢虫成虫捕食影响更大。通过显著性分析，多异瓢虫成虫受到自身密度干扰系数 m 为 1.0222，显著大于干扰系数 m 为 0.5123 的种内干扰（$t_6 = 2.909$, $P = 0.027$；图 3）。

2.4 多异瓢虫对枸杞木虱的选择捕食作用

多异瓢虫成虫在枸杞木虱 3 种混合密度下对枸杞木虱卵的偏好系数分别为 - 0.387、- 0.440 和 - 0.396，均为显著负偏好性；对 1~2 龄枸杞木虱若虫的偏好系数随着枸杞木虱密度升高由 - 0.104 到 0.353 逐渐产生显著正偏好性；对 3~5 龄枸杞木虱若虫没有展现出显著的偏好性；随着枸杞木虱密度增大，多异瓢虫成虫对枸杞木虱成虫偏好系数由 100 头/皿混合密度下的 0.308 表现明显正偏好性，逐渐转变为 300 头/皿混合密度下的 - 0.088 表现明显负偏好性（表 5）。

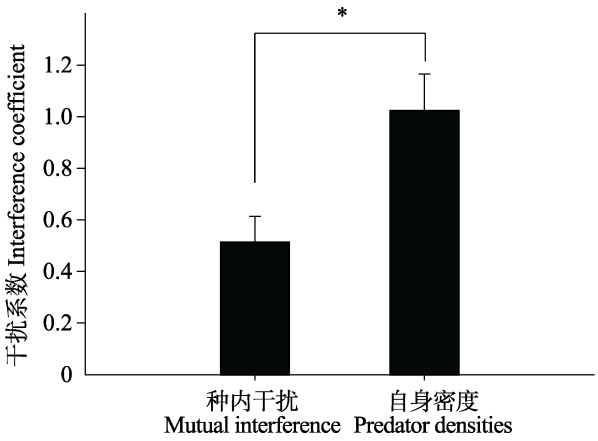

图 3 多异瓢虫受到种内干扰与自身密度干扰系数的比较

Fig. 3 Comparison between mutual interference coefficient and predators density interference coefficient when *Hippodamia variegata* adults hunt *Poratrioza sinica*

图中数据为平均数±标准误。*表示经独立样本 t-检验方法检验在 $P<0.05$ 水平差异显著。

Data are mean±SE. * indicates significant difference at $P<0.05$ level by Student's t- test.

表 5 多异瓢虫在 3 种混合猎物密度下对 4 种虫态枸杞木虱的偏好性

Table 5 The preference coefficient of *Hippodamia variegata* when *Poratrioza sinica* of 4 stages co-existed equally under 3 densities.

虫态 Stage	偏好度 C_N Preference coefficient C_N					
	100 头/皿 100 head·dish^{-1}		200 头/皿 200 head·dish^{-1}		300 头/皿 300 head·dish^{-1}	
卵 Egg	- 0.387±0.109	*	- 0.440±0.069	**	- 0.396±0.053	**
1~2 龄若虫 1st-2nd nymphs	- 0.104±0.104		0.287±0.053	**	0.353±0.017	**
3~5 龄若虫 3rd-5th nymphs	0.077±0.053		0.074±0.045		- 0.034±0.073	
成虫 Adult	0.308±0.017	**	0.071±0.041		- 0.088±0.059	

表中数据为平均数±标准误。*, **表示经偏好度 C_N 经 t-测验在 $P< 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平上差异显著。

Data are mean±SE. *, ** indicates significant difference in the preference coefficient at $P<0.01$ and $P<0.05$ levels by t- test, respectively.

3 讨论

多异瓢虫成虫在初期对枸杞木虱捕食量随着猎物密度的增加而上升，之后捕食量维稳在某一阈值范围内，该阈值即为最大捕食量。枸杞木虱密度对多异瓢虫成虫捕食量的影响可用 Holling Ⅱ（1959）圆盘方程拟合。在研究多异瓢虫对枸杞蚜虫（白小军等，2008）、桃粉蚜（古丽加马丽·吐尔汗等，2011）、豌豆蚜（杜军利等，2015）、苜蓿斑蚜（贾彪，2007）、绣线菊蚜（陈川，2003）以及三叶草彩斑蚜（刘乾，2009）的捕食功能研究中均发现猎物密度对多异瓢虫捕食量的影响可用 Holling Ⅱ圆盘方程拟合，表明 Holling Ⅱ圆盘方程是分析多异瓢虫捕食功能的最佳方法。作为枸杞木虱捕食性天敌的食虫齿爪盲蝽捕食最大量为 180 头（刘爱萍等，2008），而多异瓢虫成虫对枸杞木虱最大捕食量在 80.4~410 头之间，且田间研究发现多异瓢虫成虫在以枸杞木虱为猎物期间能够完成生活史且繁育后代，说明多异瓢虫也是控制枸杞木虱很有潜力的捕食性天敌。

通过田间罩笼实验验证，多异瓢虫成虫在其生命周期的 30 d 内能使枸杞木虱总密度下降 85.4%且对枸杞木虱若虫及成虫防治效果均十分显著。多异瓢虫成虫对 4 种虫态枸杞木虱的搜寻效率与处理时间顺序均为成虫>3~5 龄若虫>1~2 龄若虫>卵。说明活跃度大的枸杞木虱成虫易被多异瓢虫成虫发现导致其搜寻效率高，但也同样导致其在枸杞木虱成虫处理上花的时间长。而静止的枸杞木虱卵由于卵柄的干扰不易被发现，一旦被多异瓢虫成虫发现则处理起来就相对容易。多异瓢虫成虫对枸杞木虱 1~2 龄若虫、3~5 龄若虫、成虫的最大捕食率分别为 65.4%、46.8%、42.6%且均发生在枸杞木虱密度为 100 头/皿时，因此人工释放多异瓢虫成虫应按照其与枸杞木虱 1∶100 的比例使其表现出最大捕食率。生物防治善跳易飞的枸杞木虱成虫在效果上不如若虫，因此利用枸杞木虱成虫在田间迁移大的特点，4 月上旬枸杞木虱发生第一代前，利用枸杞木虱成虫对黄色光的趋光性（王平等，2006）在枸杞地里放上黄板诱成虫作为预警，将越冬归来的成虫阻挡在黄板上。一旦在黄板上发现有大量木虱成虫被黏住，则开始释放多异瓢虫成虫来进行防治，进而将枸杞木虱危害控制在虫害发生初期。

随着多异瓢虫成虫和枸杞木虱密度同比例增加，空间上产生了压缩，多异瓢虫成虫捕食率呈现下降趋势，说明多异瓢虫成虫种内之间存在干扰作用且干扰系数为 0.5123，该结果与多异瓢虫成虫在捕食枸杞蚜虫时会受到种内干扰（白小军等，2008）的研究结果一致。在枸杞木虱密度不变的情况下，多异瓢虫成虫捕食量随自身密度的增加而下降，猎物资源上产生了压缩，说明自身密度增加也会干扰多异瓢虫成虫的捕食率，干扰系数为 1.0222，所得结果与贾彪（2007）关于多异瓢虫在捕食苜蓿斑蚜时会受到自身密度干扰的研究一致。无论是空间还是猎物资源的制约，多异瓢虫成虫捕食率均会受到影响，猎物的活跃度越大，影响程度越大。通过对两种制约的比较，相对于空间资源，猎物资源制约对于多异瓢虫成虫捕食效果影响更大。

无论何种混合密度下，多异瓢虫成虫对枸杞木虱卵均表现出负偏好性（C_N = - 0.387 ~ - 0.44）。低混合密度下空间较为宽松，枸杞木虱成虫不活跃而且无背板保护，多异瓢虫成虫捕食枸杞木虱成虫成功率高，因此更愿意选择营养更好的枸杞木虱成虫成虫作为猎物（C_N = 0.308）。当混合猎物密度增加时，善跳易飞的枸杞木虱成虫开始活跃起来，多异瓢虫成虫捕捉枸杞木虱成虫的成功率下降，因而开始产生负偏好趋势（C_N = - 0.088)。在高混合密度下多异瓢虫成虫转而对体型小、不活跃、捕食成功率更高的 1~2 龄木虱若虫（C_N = 0.353）产生显著正偏好趋势。杜军利等（2015）对多异瓢虫捕食红绿两种豌豆蚜的研究同样也证明了多异瓢虫具有捕食偏好性。通过对多异瓢虫成虫捕食偏好性进行研究，能够更好的利用天敌对枸杞木虱目标虫态进行防治。在枸杞木虱发生较轻、分布较散的枸杞植株或区域，利用多异瓢虫成虫防治枸杞木虱成虫会更有效。而在枸杞木虱发生较严重、分布较集中的枸杞植株或区域，释放多异瓢虫成虫防治枸杞木虱初孵若虫的效果会更好。

致谢：感谢中国科学院动物进化与系统学重点实验室刘宁博士、闻慧博士在数据汇总过程中的帮助，感谢博士生刘伟、姜春燕在研究过程中提出的宝贵意见。感谢宁夏中宁县大地生态公司给予试验场地提供。感谢宁夏大学学生刘红勋在实验中给予的辅助。感谢宁夏自治区中宁县农业综合开发办提供项目和研究经费支持。感谢中国科学院科技促进发展局段子渊副局长、宁夏农业综合开发办公室主任陈延主任、中国科学院华南植物园王瑛研究员和中国科学院西北生物农业中心刘立超主任在项目安排和组织实施过程中给与的帮助和指导。

参考文献 (References)

Bai XJ，Wu HL，Zhang LR，Kang ZZ，Sheng RQ, 2008. Study on the predatory functional response of *Adonia variegate* to *Aphis* sp. *China Plant Protection*, 28(11): 13–15. [白小军, 吴惠玲, 张丽荣, 康振中, 沈瑞清, 2008. 多异瓢虫对枸杞蚜虫的捕食功能反应. 中国植保导刊, 28(11): 13–15.]

Chen C, Hui W, Shi XH, Shi YQ, 2003. Studies on the predatory function of *Hippodamia (Adonia) variegata* (Goeze) to *Aphis*

citricola Van der Goot. *Journal of Northwest Forestry University*, 18(4): 79–80. [陈川, 唐周怀, 惠伟, 石晓红, 石勇强, 2003. 多异瓢虫对绣线菊蚜捕食作用的初步研究. 西北林学院学报, 18(4): 79–80.]

Du JL, Wu DG, Liu CZ, 2015. Study on predation preference of *Hippodamia variegata* (Pallas) and *Adonia variegata* (Goeze) on red and green color morph pea aphids. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 23(1): 102–109. [杜军利, 武德功, 刘长仲, 2015. 异色瓢虫和多异瓢虫对两种色型豌豆蚜的捕食偏好研究. 中国生态农业学报, 23(1): 102–109.]

Duan LQ, Liu KY, Imre S. OTVOS, Feng SJ, Li HP, Shan YM, 2005. Behavior responses of *Tetrastichus* sp., an ectoparasitiod wasp, to its host, *Paratrioza sinica* Yang &Li and host plant, *Lycium barbarum* L. *Acta Entomologica Sinica*, 48(5): 725–730. [段立清, 刘宽余, Imre S. OTVOS, 冯淑军, 李海平, 单艳敏, 2005. 木虱啮小蜂对枸杞、枸杞木虱的行为反应. 昆虫学报, 48(5): 725–730.]

Duan LQ, Zou LQ, Feng SJ, Li HP, Yuan QC, 2015. Study on pest integrated management of wolfberry. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University*, 23(4): 51–54. [段立清, 邹晓林, 冯淑军, 李海平, 元沁春, 2004. 枸杞上的主要害虫、天敌及其综合管理. 内蒙古农业大学学报, 自然科学版, 23(4): 51–54.]

Duan WJ, 2013. Pharmacological function and value in medlar. *Heilongjiang Medicine Journal*, 26(1): 127–128. [段文杰, 2013. 枸杞子的药理作用及价值. 黑龙江医学, 26(1): 127–128.]

Feng HZ, Wang L, Xiong RC, Wang B, Ji CS, 2000. A study on the population dynamics and predacious function of *Hippodamia* (*Adonia*) *variegata* (Goeze). *Chinese Bulletin of Entomology*, 37(4): 223–226. [冯宏祖, 王兰, 熊仁慈, 王兵, 纪昌盛, 2000. 多异瓢虫种群动态及捕食功能的研究. 应用昆虫学报, 37(4): 223–226.]

Gulijiamali T, Yu JN, Chen JX, Hai RL, 2011. Study on the responses of *Coccinella septempunctata* and *Adonia variegata* to predacious Function of *Hyalopterus amygdali*. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 34(1): 40–42. [古丽加马丽·吐尔汗, 于江南, 陈金霞, 海如拉, 2011. 七星瓢虫和多异瓢虫对桃粉蚜的捕食功能反应研究. 新疆农业大学学报, 34(1): 40–42.]

Hassell MPA, 1969. Population model for the interaction between *Cyzenis albicans* (Fall.) (Tachinidae) and *Operophtera brumata* (L.) (Geometridae) at Wytham, Berkshire. *Journal of Animal Ecology*, 38(3): 567–576.

Holling CS, 2003. Principles of insect predation. *Annual Review of Entomology*, 6: 163–182.

Jia B, He CG, Yang SW, Qian J, 2007. Effect of *Hippodamia tredecimpunctata* and *Hippodamia vaviegata* predation on *Therioaphis trifolii*. *Bayin Vocational Education*, (1): 56–59. [贾彪, 贺春贵, 钱瑾, 2007. 十三星瓢虫和多异瓢虫对苜蓿斑蚜的捕食作用研究. 巴音郭楞职业技术学院学报, (1): 56–59.]

Li HP, Duan LQ, Feng SJ, Xu JK, 2002. Investigation of predatory bug in wolfberry woods and the function response of the dominant specice. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University* (*Natural Science*), 23(3): 69–71. [李海平, 段立清, 冯淑军, 许继科, 2002. 枸杞林内捕食性蝽类生物学特性及主要种的功能反应. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 23(3): 69–71.]

Liu Q, Liu CZ, Sun L, Dou XQ, 2009. Functional responses of *Coccinella septempunctata* and *Hippodamia variegata* to *Therioaphis trifolii*. *Plant Protection*, 35(2): 78–81. [刘乾, 刘长仲, 孙鹭, 窦晓青, 2009. 七星瓢虫和多异瓢虫对三叶草彩斑蚜的功能反应研究. 植物保护, 35(2): 78–81.]

Liu XL, Li F, Li XL, Ma JG, Liu CG, 2013. Study on population dynamics and vertical activity habits of *Paratrioza sinica* Yang&Li. *Northern Horticulture*, (12): 122–124. [刘晓丽, 李锋, 李晓龙, 马建国,刘春光, 2013. 枸杞木虱种群动态及其垂直分布特征研究. 北方园艺, (12): 122–124.]

Liu AP, Wang JQ, Xu LB, Gao SJ, Tian Q, 2008. Studies on predation of *Deraeocoris punctulatus* on *Paratrioza sinica*. *Plant Protection*, 34(4): 85–89. [刘爱萍, 王俊清, 徐林波, 高书晶, 田庆, 2008. 食虫齿爪盲蝽对枸杞木虱的捕食作用研究. 植物保护, 34(4): 85–89.]

Liu AP, Xu LB, Wang H, 2007. The occurrence regularity and control measures of the insect pests in Chinese wolfberry. *Protection Forest Science and Technology*, 11(6): 64–66. [刘爱萍, 徐林波, 王慧, 2007. 枸杞害虫发生规律及防治对策. 防护林科技, 11(6): 64–66.]

Tan DF, Chen AL, 2006. Bionomics of *Paratrioza sinica* and its control. *Journal of Qinghai Normal University* (*Natural Science*), (4): 91–94. [谭大凤, 陈阿兰, 2006. 枸杞木虱的生物学特性及其防治. 青海师范大学学报 (自然科学版), (4): 91–94.]

Wang P, Tong DY, Wang Y, Li WY, 2006. Study on the lure function of colors to the *Paratrioza Sinica* Yang & Li. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University* (*Natural Science*), 27(4): 102–104. [王平, 佟德艳, 王艳, 李文英, 2006. 颜色对枸杞木虱成虫引诱作用的研究. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 27(4): 102–104.]

Watt KEF, 1959. A mathematical model for the effect of densities of attacked and attacking species on the number of attacked. *Canadian Entomologist*, 91: 129–144.

Wu FZ, Gao ZN, 1984. Analysis and description of the fauna and species of *Chinese wolfberry* in Ningxia. *Ningxia Agricultural Science and Technology*, (5): 22–26. [吴福桢, 高兆宁, 1984. 宁夏枸杞害虫区系分析及种类记述. 宁夏农业科技, (5): 22–26.]

Xu CQ, Liu S, Qiao HL, Chen J, Guo K, Yu J, Yu LY, 2013. Effects of bionic glue on experimental population dynamics of *Paratrioza sinica* and its natural enemies. *Chinese Journal of Chinese Materia Medica*, 38(5): 666–669. [徐常青，刘赛，乔海莉，陈君, 郭昆，于晶，余柳英, 2013. 仿生胶对枸杞木虱及其天敌种群动态的影响. 中国中药杂志, 38(5): 666–669.]

Xue LW, Li YN, 2000. Nutrition and health functions of *Lucium bararum* L. *Guangdong Trace Elements Science*, 7(6): 1–4. [薛立文, 李以暖, 2000. 枸杞子的营养和保健功能. 广东微量元素科学, 7 (6): 1–4.]

Zhang CH, Ma YL, 1982. Preliminary observation of *Paratrioza sinica* in Hami. *Xinjiang Agricultural Sciences*, (5): 13–14. [张长海, 马玉铃, 1982. 哈密枸杞木虱的初步观察. 新疆农业科学, (5): 13–14.]

Zhou JZ, Chen CM, 1987. Predation of wolf spider *lycosao pseudoannulata* to Brown planthopper *nilaparvata lugens* and simulation models there of Ⅲ: selective predation. *Acta Ecologica Sinica*, 7(3): 228–237. [周集中, 陈常铭, 1987. 拟环纹狼蛛对褐飞虱的捕食作用及其模拟模型的研究Ⅲ选择捕食作用. 生态学报, 7(3): 228–237.]