



李秋荣, 祁全梅, 来有鹏. 十一星瓢虫对枸杞棉蚜的捕食作用研究 [J]. 环境昆虫学报, 2020, 42 (6): 1472–1481.

十一星瓢虫对枸杞棉蚜的捕食作用研究

李秋荣, 祁全梅, 来有鹏*

(青海大学农林科学院, 农业部西宁作物有害生物科学观测实验站, 青海省农业有害生物综合治理重点实验室, 西宁 810016)

摘要: 十一星瓢虫 *Coccinella undecimpunctata* Linnaeus 是青海省柴达木地区的一种重要捕食性天敌。为明确其对枸杞棉蚜 *Aphis gossypii* Glover 和枸杞木虱 *Poratrisia sinica* Yang et Li. 两种主要枸杞害虫的嗜好性, 开展了捕食选择性试验, 发现当两种害虫共存时, 瓢虫成虫更喜食棉蚜。为进一步探究十一星瓢虫对枸杞棉蚜的捕食能力, 测定了瓢虫各龄幼虫和成虫在不同棉蚜密度下的捕食量、寻找效应以及种内干扰、自身密度对捕食作用的影响。结果表明: 十一星瓢虫各虫态对棉蚜的捕食功能反应均符合 Holling-II 功能反应模型, 种内干扰、自身密度对捕食量的影响分别符合 Hassell 干扰效应模型和 Watt 模型。十一星瓢虫 1~4 龄幼虫及成虫对枸杞棉蚜的日最大理论捕食量分别为 18.94、44.29、81.57、145.27 和 126.48 头; 在一定空间、相同瓢蚜比条件下, 瓢虫同一虫态个体间存在种内干扰效应, 以 1 龄幼虫受干扰最大, 干扰常数为 1.1803。此外, 瓢虫自身密度对其捕食作用产生一定的影响, 4 龄幼虫和成虫影响更为明显, 竞争参数分别为 0.7948 和 0.6848。本研究可为今后更高效地利用青海高原本地十一星瓢虫资源提供理论依据。

关键词: 十一星瓢虫; 枸杞棉蚜; 枸杞木虱; 捕食功能反应; 选择性

中图分类号: Q968.1; S476

文献标识码: A

文章编号: 1674-0858 (2020) 06-1472-10

Study on predation of *Coccinella undecimpunctata* Linnaeus on *Aphis gossypii* Glover

LI Qiu-Rong, QI Quan-Mei, LAI You-Peng* (Academy of Agriculture and Forestry Science, Qinghai University; Scientific Observing and Experimental Station of Crop Pest in Xining, Ministry of Agriculture; Key Laboratory of Agricultural Integrated Pest Management, Xining 810016, Qinghai Province, China)

Abstract: *Coccinella undecimpunctata* Linnaeus is an important predatory natural enemy in Qaidam Region of Qinghai Province. In order to clarify the ladybug's prey preference to nymph of *Aphis gossypii* Glover and *Poratrisia sinica* Yang et Li. which severely jeopardized *Lycium barbarum* Linnaeus, experiment of prey selection was carried out, and the result showed that adult ladybugs preferred *A. gossypii* when the two kinds of insects coexisted. To understand the natural control ability of ladybugs to aphids, the predatory capacity of larvae and adults under different density of aphids, searching efficiency, the impact of intraspecific interference and density of ladybugs on their feeding effect were determined. Results showed that the predation functional responses of each stages all fitted as mathematical model of Holling-II, and the effect of intraspecific interference and density of ladybugs on predation was consistent with the Hassell interference effect model and Watt model, separately. Their maximum theoretical predation of 1st, 2nd, 3rd, 4th larvae and adults in one day were 18.94, 44.29, 81.57, 145.27 and 126.48 aphids, respectively. In a certain space and the same proportion of prey being conditions, there was influence of

基金项目: 青海省自然科学基金 (2017ZJ934Q); 国家重点研发计划子专题 (2017YFD0201001); 青海省创新平台建设专项 (2020ZJY11)

作者简介: 李秋荣, 女, 1981 年生, 山东聊城人, 博士, 副研究员, 研究方向为昆虫生态及害虫综合治理, E-mail: liqiu-rongkk@163.com

* 通讯作者 Author for correspondence: 来有鹏, 博士, 副研究员, E-mail: yplai@126.com

收稿日期 Received: 2019-11-24; 接受日期 Accepted: 2020-02-24

intraspecific interference between individuals. Among them, the 1st larvae were most disturbed, its interference constant was 1.1803. In addition, the ladybugs' population density made a difference to their feeding effect, especially the 4th instar larvae and adult, whose competition parameter was 0.7948, 0.6848. This study can provide a theoretical basis for more efficient utilization of native ladybug resources in Qinghai plateau.

Key words: *Coccinella undecimpunctata*; *Aphis gossypii*; *Poratrioza sinica*; predation functional response; selectivity

棉蚜 *Aphis gossypii* Glover 和枸杞木虱 *Poratrioza sinica* Yang et Li. 是青海省枸杞产区的两种主要害虫, 棉蚜属半翅目 Hemiptera 蚜科 Aphididae, 是一种世界范围的多食性害虫, 寄主种类已超过600种 (Lombaert *et al.*, 2009), 在枸杞上主要危害青果、嫩叶、嫩梢、花、红果及果柄, 目前已上升为枸杞生产中的成灾性害虫 (严林等, 2017)。枸杞木虱属半翅目 Hemiptera 木虱科 Psyllidae, 主要以成、若虫将口器刺入枸杞嫩叶、嫩枝、花及幼果造成危害 (马宝旭, 2018), 二者均可导致枸杞植株长势衰弱, 严重影响枸杞质量和产量。

十一星瓢虫 *Coccinella undecimpunctata* Linnaeus 属鞘翅目 Coleoptera 瓢虫科 Coccinellidae, 是一种重要的捕食性天敌昆虫, 可捕食蚜虫、木虱和蚧壳虫等害虫, 在青海省分布较普遍 (严林等, 2017; 李秋荣等, 2019)。近年来, 瓢虫对蚜虫捕食能力的研究逐渐受到重视, 其中, 报道较多的为异色瓢虫 *Harmonia axyrdis* 对各种蚜虫的捕食功能反应, 而关于十一星瓢虫, 主要开展了该虫对新疆棉区棉蚜的室内捕食功能、田间生态控制、瓢蚜数量关系的种群动力学研究 (王林霞等, 2003; 王林霞等, 2006; 冯宏祖等, 2007a, 2008; 王运松等, 2011) 及其生物学特性 (王林霞等, 2005)、鞘翅色斑变化 (王允华等, 1984; 罗志兵等, 1999)、温度和营养物质对生长发育的影响 (王林霞等, 2004; 冯宏祖等, 2007b, 冯宏祖等, 2007c), 以及种群发生消长动态和空间分布 (李进步等, 2007) 等。

长期以来, 防治枸杞棉蚜主要依赖化学农药, 不仅导致棉蚜产生抗药性, 而且杀伤大量天敌等非靶标生物, 致使天敌整体控制力下降, 田间生态系统失衡, 害虫频繁暴发, 因此, 保护并利用天敌、恢复枸杞田生态平衡迫在眉睫。为科学评价青海省枸杞种植区十一星瓢虫的捕食偏好性及对枸杞棉蚜的控制作用, 明确其对棉蚜的防治潜能, 本试验研究了十一星瓢虫对枸杞木虱和棉蚜

的捕食选择性、对棉蚜的捕食功能反应、寻找效应以及种内干扰和自身密度对捕食棉蚜的影响, 对今后利用十一星瓢虫防控枸杞棉蚜具有一定指导和借鉴意义。

1 材料与方法

1.1 供试虫源

十一星瓢虫、枸杞棉蚜、枸杞木虱均采自海西州德令哈市尕斯库勒二支队绿色枸杞种植基地, 麦二叉蚜 *Schizaphis graminum* 采自青海省农林科学院小麦试验田, 饲养于青海省农林科学院植物保护研究所养虫室 (温度 19 ~ 24℃, RH 45% ~ 65%, 光周期 L:D = 14:10)。

十一星瓢虫幼虫用培养皿 (直径 d = 9 cm) 以单头单皿的方式饲养, 再放入蚜虫及其寄主植物叶片, 用浸润的脱脂棉 (轻捏以不滴水为宜) 保湿 (1龄、2龄幼虫用保鲜膜封口, 用针在膜上扎 6~8 个小孔, 3~4 龄幼虫则无需保鲜膜), 扣紧上盖, 防止逃逸; 及时更换叶片, 补充无翅蚜虫。十一星瓢虫成虫用养虫笼 (长 × 宽 × 高 = 40 cm × 40 cm × 60 cm) 饲养, 羽化后雌雄配对, 每个养虫笼放入 10 对成虫, 第一和第四季度用麦二叉蚜饲养, 第二和第三季度用枸杞棉蚜饲养, 保证同一时期瓢虫的捕食对象相同, 大量繁殖备用。

枸杞棉蚜和麦二叉蚜分别用枸杞苗和小麦苗饲养, 先将枸杞和小麦置于温室条件下培育, 待枸杞叶片完全伸展开或小麦植株高于 10 cm 时, 转入实验室内分别接种棉蚜和麦二叉蚜, 作为十一星瓢虫的饲料。

1.2 试验方法

试验在智能人工气候培养箱 (杭州硕联仪器有限公司, 型号为 SRG-280A) 中进行, 试验条件为温度 25.0 ± 1.0℃, RH 70.0% ± 5.0%, 光周期 L:D = 14:10。

1.2.1 十一星瓢虫成虫对枸杞木虱、棉蚜的捕食选择性

在培养皿 (直径 $d=9.0\text{ cm}$) 中各放入 1 头瓢虫成虫和 100 头猎物, 猎物为棉蚜 (猎物 1) 和枸杞木虱 (猎物 2) 的 3~4 龄若虫。

将猎物按不同数量比设置 3 个处理 (猎物 1: 猎物 2 = 75:25, 50:50 和 25:75), 每皿放入 1 头十一星瓢虫成虫和固定比例的猎物, 每处理设 4 个重复。24 h 后检查各皿内枸杞木虱和棉蚜的活虫及死虫数, 分别统计两种猎物被捕食量。

1.2.2 十一星瓢虫各虫态对棉蚜的捕食功能反应及寻找效应

挑选枸杞棉蚜高龄若蚜或无翅成蚜作为供试猎物, 分别按这 5 个不同密度梯度接种在盛有新鲜枸杞叶的培养皿内, 1 龄、2 龄幼虫按 10、20、30、40、50 头/皿, 3 龄幼虫按 20、40、60、80、100 头/皿, 4 龄幼虫和成虫均按 30、60、90、120、150 头/皿接种。将饥饿 24 h 的瓢虫成虫、3 龄、4 龄幼虫以及饥饿 12 h 的 1 龄、2 龄幼虫分别接入上述培养皿中, 每皿 1 头, 每个处理 4 个重复。24 h 后检查每个培养皿中残余棉蚜数。

1.2.3 十一星瓢虫种内干扰对捕食率的作用

分别设置 20、40、60、80、100 头/皿枸杞棉蚜与 1、2、3、4、5 头同一虫态十一星瓢虫 1~3 龄幼虫组合, 设置 30、60、90、120、150 头/皿枸杞棉蚜分别与 1、2、3、4、5 头同一虫态十一星瓢虫 4 龄幼虫、成虫组合。24 h 后检查各组合下单头瓢虫的捕食量, 每组合 4 个重复。

1.2.4 十一星瓢虫自身密度对捕食量的影响

十一星瓢虫各龄幼虫及成虫的密度分别设置 5 个, 即 1、2、3、4、5 头/皿, 测定 1~3 龄幼虫对自身密度的干扰反应应用枸杞棉蚜 80 头/皿, 4 龄幼虫及成虫用 100 头/皿, 每个密度处理重复 4 次。24 h 后检查不同龄期十一星瓢虫幼虫及成虫的捕食量。

1.3 数据统计分析

本试验统计数据分别采用 Holling II 圆盘方程、寻找效应模型、Hassell 方程和 Watt 方程进行拟合, 用卡方检验法比较理论值与实际值的差异显著性。

(1) 捕食选择性

Cain 指数: $D = (N_{p1} \cdot N_2) / (N_{p2} \cdot N_1)$

式中: D 为猎物选择性指数, N_{p1} 、 N_{p2} 分别为 2 种猎物 (猎物 1 为枸杞棉蚜、猎物 2 为枸杞木虱) 的被捕食量, N_1 、 N_2 为两种猎物的初始数量 (Holling, 1959)。计算结果 $D > 1$ 时, 捕食者对猎物 1 具有选择性捕食。

(2) 功能反应模型

Holling II 圆盘方程: $N_a = a \cdot T \cdot N / (1 + a \cdot T_h \cdot N)$

式中: a 为捕食者对猎物的瞬间攻击率, T 为试验的总时间, T_h 为处置猎物的时间, N 为猎物密度, N_a 为被捕食猎物数量 (Holling, 1959)。将方程线性化后, 用最小二乘法求直线回归方程。

(3) 寻找效应

寻找效应模型: $S = a / (1 + a \cdot T_h \cdot N)$

其中, S 为寻找效应, a 为瞬时攻击率, T_h 为处置时间, N 为猎物密度 (丁岩钦, 1983)。将方程进行线性化, 用最小二乘法拟合, 求直线回归方程, 获得各相应参数值。

(4) 种内干扰效应

Hassell 干扰效应模型: $E = Q \cdot P^{-m}$

式中: E 为捕食率; Q 为搜索常数; m 为干扰系数; P 为捕食者自身密度 (Hassell, 1959)。将方程取对数后进行线性化, 用最小二乘法求得 Q 、 m 值。

(5) 自身密度干扰反应

Watt 模型: $A = a \cdot P^{-b}$

其中, A 为竞争条件下的平均捕食量, a 为常数 (即无竞争条件下每头天敌的捕食量估计), P 为天敌密度, b 为竞争参数 (Watt, 1959)。将方程取对数后进行线性化, 用最小二乘法求得 a 、 b 值。

(6) 卡方检验

卡方检验计算公式: $\chi^2 = \sum [(O_i - T_i)^2 / T_i]$

式中 T_i 为理论值, O_i 为实测值。将理论值与实测值代入计算卡方值, 之后检索卡方分布位数表, 通过比较检验 2 个值之间的相关性。

2 结果与分析

2.1 十一星瓢虫成虫对棉蚜、枸杞木虱的捕食选择性

十一星瓢虫成虫对枸杞棉蚜和枸杞木虱的捕

食量及选择性指数（即 Cain 指数）统计结果见表 1，所得 Cain 指数为 2.02 – 2.55，均大于 1.0，说明在枸杞木虱、棉蚜两种猎物均存在的情况下，十一星瓢虫成虫更喜欢捕食枸杞棉蚜，而对枸杞木虱的选择性相对较弱。

2.2 十一星瓢虫在不同枸杞棉蚜密度下的的日捕食量

十一星瓢虫各虫态的日捕食量见表 2 和图 1，

结果表明：在设定的枸杞棉蚜密度范围内，十一星瓢虫各龄幼虫及成虫的日捕食量均随枸杞棉蚜密度增加而增大，捕食量增长速度呈逐渐减小趋势，与猎物密度间呈现较明显的逆密度制约关系；相同猎物密度下，十一星瓢虫 4 龄幼虫、成虫的捕食量高于 1 ~ 3 龄幼虫，说明 4 龄幼虫和成虫的捕食能力相对较强，其中，以 4 龄幼虫捕食能力最强。

表 1 十一星瓢虫成虫对棉蚜和枸杞木虱若虫的捕食选择

Table 1 Feeding choice of *Coccinella undecimpunctata* adults to nymphs of *Aphis gossypii* and *Poratrioza sinica*

处理 Treatment	枸杞棉蚜 <i>A. gossypii</i>		枸杞木虱 <i>P. sinica</i>		Cain 指数 Cain index
	投入量 (头) Number of individuals	被捕食量 (头) Number of prey consumption	投入量 (头) Number of individuals	被捕食量 (头) Number of prey consumption	
1	75	44.55	25	7.34	2.02
2	50	28.37	50	12.63	2.25
3	25	14.62	75	17.18	2.55

表 2 十一星瓢虫在不同枸杞棉蚜密度下的日捕食量

Table 2 Daily predation of *Coccinella undecimpunctata* to *Aphis gossypii* under different density of aphid

天敌虫态 Stage 猎物密度 (头/皿) Prey density	1 龄幼虫 1 st instar larva	2 龄幼虫 2 nd instar larva	3 龄幼虫 3 rd instar larva	4 龄幼虫 4 th instar larva	成虫 Adult
10	5.00 ± 0.00 c	6.00 ± 0.71 d	—	—	—
20	7.75 ± 0.83 b	10.75 ± 1.48 c	11.50 ± 1.12 e	—	—
30	10.00 ± 0.71 ab	14.00 ± 1.58 b	—	17.25 ± 0.83 e	16.75 ± 1.92 d
40	11.25 ± 0.83 a	17.50 ± 1.66 a	20.50 ± 1.12 d	—	—
50	12.00 ± 0.71 a	19.00 ± 2.24 a	—	—	—
60	—	—	26.75 ± 2.17 c	32.50 ± 1.80 d	29.75 ± 2.24 c
80	—	—	32.00 ± 1.87 b	—	—
90	—	—	—	42.75 ± 2.59 c	40.75 ± 3.03 b
100	—	—	37.00 ± 2.24 a	—	—
120	—	—	—	50.25 ± 3.27 b	48.25 ± 2.95 ab
150	—	—	—	56.25 ± 3.70 a	53.75 ± 3.49 a

注 “—” 表示对应的天敌虫态下，未设置该猎物密度。Note “—” means this prey density was not set for the corresponding stage of natural enemy insect.

2.3 十一星瓢虫对枸杞棉蚜的捕食功能反应

采用 Holling-II 圆盘方程模型对不同枸杞棉蚜密度下单头十一星瓢虫的日捕食量进行拟合，拟合方程及参数见表 3。结果表明：十一星瓢虫的瞬

时攻击率较高的为 1 龄幼虫、2 龄幼虫和 3 龄幼虫，分别为 0.6770、0.6962、0.6712；处理 1 头棉蚜，所需时间最短的是 4 龄幼虫，其次是成虫，分别为 9.91 min、11.39 min；十一星瓢虫 1 ~ 4 龄

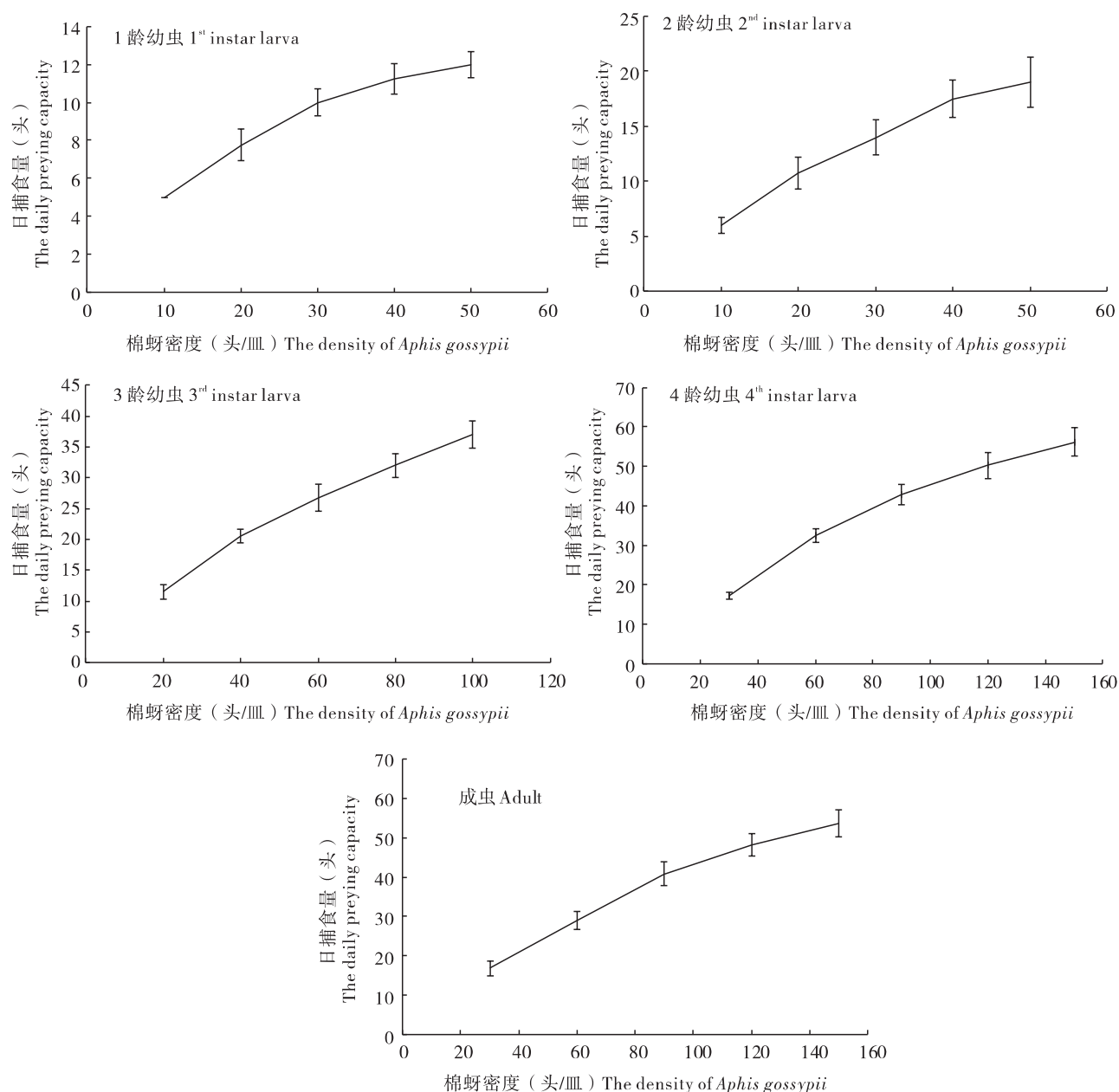


图1 十一星瓢虫对枸杞棉蚜的日捕食量

Fig. 1 The daily predation of *Coccinella undecimpunctata* to *Aphis gossypii*

幼虫及成虫对棉蚜的日最大理论捕食量分别为 18.94、44.29、81.57、145.27、126.48 头, a/T_h 值分别为 12.82、30.83、54.75、95.82 和 81.22, 日最大理论捕食量、 a/T_h 值大小排序相同, 均为 4 龄幼虫 > 成虫 > 3 龄幼虫 > 2 龄幼虫 > 1 龄幼虫, a/T_h 能更全面地反映天敌捕食能力大小, 由此说明十一星瓢虫 4 龄幼虫对枸杞棉蚜的捕食能力最强, 成虫仅次之。

经卡方检验, 十一星瓢虫 1~4 龄幼虫和成虫的 χ^2 值分别为 3.4531, 2.8104, 3.7290, 1.6473, 2.0578, 均小于 $\chi^2_{0.05, 5} = 11.07$, 表明上述功能反

应模型均能较好地描述十一星瓢虫在不同棉蚜密度下的捕食变化规律。

2.4 寻找效应

十一星瓢虫幼虫及成虫在不同枸杞棉蚜密度下的寻找效应及其方程见图 2、表 4。结果表明, 各虫态的寻找效应均随枸杞棉蚜密度增加而逐渐下降, 即枸杞棉蚜的密度越大, 十一星瓢虫的寻找效应就越低, 寻找效应与其捕食对象枸杞棉蚜的密度呈负相关关系。在相同棉蚜密度下, 十一星瓢虫不同虫态的寻找效应从高到低排列顺序为 4 龄幼虫 > 成虫 > 3 龄幼虫 > 2 龄幼虫 > 1 龄幼虫。

表 3 十一星瓢虫捕食枸杞棉蚜的功能反应方程及相关参数

Table 3 Predation functional response model of *Coccinella undecimpunctata* to *Aphis gossypii*

十一星 瓢虫虫态 Stage	Holling II 圆盘方程 Holling equation	瞬时攻击率 (<i>a</i>) Instantaneous attack rate	处理时间 (<i>T_h</i> / min) Treating time	<i>a</i> / <i>T_h</i>	日最大理论捕食量 (<i>N_{a max}</i> / 头) Maximum predation no.	相关系数 (<i>R</i>) Relate coefficient
1 龄幼虫 1 st instar	$N_a = 0.6770N / (1 + 0.0528N)$	0.6770	76.03	12.82	18.94	0.9445
2 龄幼虫 2 nd instar	$N_a = 0.6962N / (1 + 0.0157N)$	0.6962	32.52	30.83	44.29	0.9742
3 龄幼虫 3 rd instar	$N_a = 0.6712N / (1 + 0.0082N)$	0.6712	19.01	54.75	81.57	0.9891
4 龄幼虫 4 th instar	$N_a = 0.6596N / (1 + 0.0069N)$	0.6596	9.91	95.82	145.27	0.9648
成虫 Adult	$N_a = 0.6422N / (1 + 0.0079N)$	0.6422	11.39	81.22	126.48	0.9895

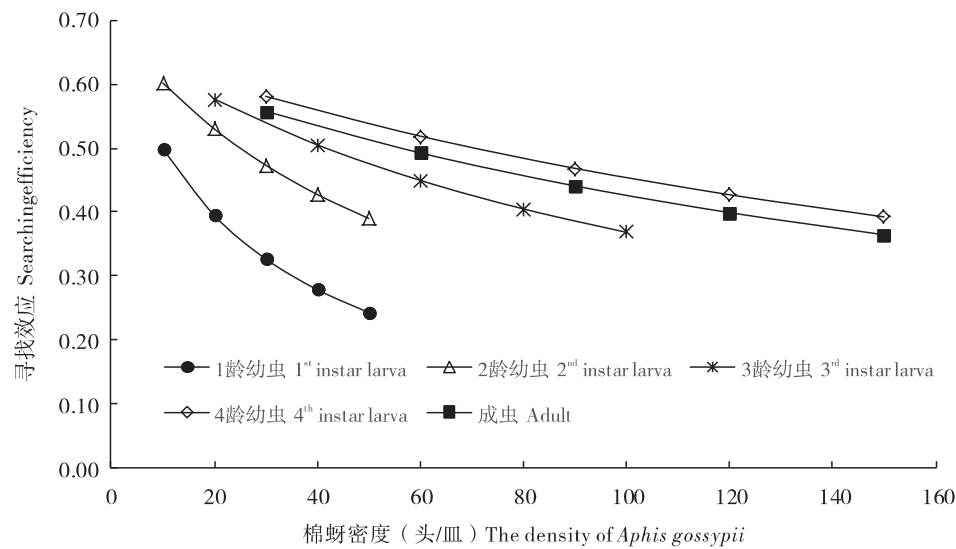


图 2 十一星瓢虫寻找效应 (*S*) 与枸杞棉蚜密度的关系

The relationship between searching efficiency of *Coccinella undecimpunctata* and density of *Aphis gossypii*

表 4 十一星瓢虫捕食枸杞棉蚜的寻找效应方程

Table 4 Search effect equation of *Coccinella undecimpunctata* to *Aphis gossypii*

十一星瓢虫虫态 Stage	寻找效应方程 Search effect equation	相关系数 (<i>R</i>) Relate coefficient
1 龄幼虫 1 st instar larva	$S = 0.6770 / (1 + 0.0528N)$	0.9445
2 龄幼虫 2 nd instar larva	$S = 0.6962 / (1 + 0.0157N)$	0.9742
3 龄幼虫 3 rd instar larva	$S = 0.6712 / (1 + 0.0082N)$	0.9891
4 龄幼虫 4 th instar larva	$S = 0.6596 / (1 + 0.0069N)$	0.9648
成虫 Adult	$S = 0.6422 / (1 + 0.0079N)$	0.9895

2.5 种内干扰作用对十一星瓢虫捕食率的影响

十一星瓢虫种内干扰对其各龄幼虫及成虫捕食率产生影响的拟合方程、常数及系数见表5。结果表明: 十一星瓢虫1~4龄幼虫及成虫的干扰常数分别为1.1803、1.0497、1.0793、1.0316和1.0725, 在一定空间和相同比例猎物存在的条件下, 随十一星瓢虫密度不断增大, 其平均捕食率呈下降趋势。说明无论十一星瓢虫的幼虫还是成

虫, 它们在该试验限定的空间内都存在干扰反应, 导致其捕食作用率下降。

经卡方检验, 各龄幼虫及成虫的 χ^2 值分别为4.1406、2.4827、4.0255、3.2814、2.5739, 均小于 $\chi_{0.05, 5}^2 = 11.07$, 说明该模型可较好的反映种内干扰对十一星瓢虫不同龄期幼虫及成虫捕食量的影响情况。

表5 种内干扰作用对十一星瓢虫不同虫态捕食率影响的数学模型及其参数

Table 5 Equation and parameter of the influence of intraspecific interference to its preying capacity at different stage of *Coccinella undecimpunctata*

十一星瓢虫虫态 Stage	搜索常数 (Q) Seek coefficient	干扰系数 (m) Interfere coefficient	Hassell 模型 Equation	相关系数 (R) Relate coefficient
1 龄幼虫 1 st instar larva	0.1518	1.1803	$E = 0.1518 P^{-1.1803}$	-0.9647
2 龄幼虫 2 nd instar larva	0.3224	1.0497	$E = 0.3224 P^{-1.0497}$	-0.9894
3 龄幼虫 3 rd instar larva	0.5831	1.0793	$E = 0.5831 P^{-1.0793}$	-0.9723
4 龄幼虫 4 th instar larva	0.8776	1.0316	$E = 0.8776 P^{-1.0316}$	-0.9556
成虫 Adult	0.8213	1.0725	$E = 0.8213 P^{-1.0725}$	-0.9680

2.6 十一星瓢虫对自身密度的功能反应

十一星瓢虫各虫态在不同猎物密度下的捕食量用Watt模型进行拟合, 拟合方程、日最大捕食量及相关系数见表6。十一星瓢虫各龄幼虫及成虫的干扰常数分别为0.4135、0.2822、0.5256、0.7948和0.6848, 通过Watt模型可知, 该虫的捕食量与枸杞棉蚜密度呈负相关关系, 在该虫取食过程中, 随自身密度增加, 其平均捕食量下降, 说明不同虫态的十一星瓢虫个体间存在相互影响,

自身密度的增加会对其捕食量产生一定干扰作用, 其中, 以4龄幼虫受自身密度影响最大, 成虫次之。

经卡方检验, 不同十一星瓢虫密度条件下各龄幼虫及成虫的 χ^2 值分别为3.0496、3.0231、2.6276、4.0153、2.1827, 均小于 $\chi_{0.05, 5}^2 = 11.07$, 表明该数学模型能较好的反映十一星瓢虫幼虫及成虫自身密度对捕食枸杞棉蚜的影响情况。

表6 十一星瓢虫不同虫态自身密度对捕食量的干扰效应数学模型

Table 6 Model of interference effect of the population density at different stage of *Coccinella undecimpunctata* to the preying capacity

十一星瓢虫虫态 Stage	猎物密度 Prey density	日最大捕食量 The daily preying capacity	Watt 模型 Equation	相关系数 (R) Relate coefficient
1 龄幼虫 1 st instar larva	80	6.1506	$A = 6.1506 P^{-0.4135}$	-0.9710
2 龄幼虫 2 nd instar larva	80	15.1195	$A = 15.1195 P^{-0.2822}$	-0.9818
3 龄幼虫 3 rd instar larva	80	36.2121	$A = 36.2121 P^{-0.5256}$	-0.9726
4 龄幼虫 4 th instar larva	100	57.9909	$A = 57.9909 P^{-0.7948}$	-0.9592
成虫 Adult	100	48.1773	$A = 48.1773 P^{-0.6848}$	-0.9766

3 结论与讨论

本试验明确了十一星瓢虫成虫对枸杞棉蚜、枸杞木虱的捕食偏好性, 在只有这两种猎物的情况下, 十一星瓢虫成虫对枸杞棉蚜具有更明显的捕食选择性, 该试验结果与异色瓢虫对枸杞蚜虫和枸杞木虱的嗜食性结果一致 (关晓庆, 2011)。

十一星瓢虫各虫态的捕食量均随枸杞棉蚜密度增加而增大, 但捕食量增长的速率则随密度增加而逐渐减小, 拟合功能反应符合 Holling II 模型 ($N_a = a \cdot T \cdot N / (1 + a \cdot T_h \cdot N)$), 该试验结果与冯宏祖等 (2008) 统计的十一星瓢虫对棉花棉蚜的捕食量变化趋势一致。本研究采用的十一星瓢虫青海种群 1~4 龄幼虫及成虫对枸杞棉蚜的日最大理论捕食量分别为 18.94, 44.29, 81.57, 145.27 和 126.08 头, 而冯宏祖等 (2008) 报道十一星瓢虫新疆种群对棉田棉蚜的日最大理论捕食量分别为 17.42, 46.73, 96.15, 151.52 和 144.93 头, 两个地理种群均以十一星瓢虫 4 龄幼虫的日最大理论捕食量最高, 而成虫次之, 因此, 在枸杞棉蚜生物防治过程中, 可通过释放十一星瓢虫 4 龄幼虫和成虫来达到控制效果。青海、新疆这两个地理种群的十一星瓢虫 1 龄、2 龄幼虫对棉蚜的日最大理论捕食量相近, 但青海种群 3 龄、4 龄幼虫及成虫的日最大理论捕食量均低于相同虫态的新疆种群, 出现这一结果的原因, 一方面, 与不同寄主专化型的棉蚜自身及其生存环境有关, 另一方面, 还可能与近年来化学农药用量不断增加而对天敌的捕食能力造成一定影响有关。在前人开展的瓢虫对蚜虫的捕食功能研究中, 瓢虫的 4 龄幼虫对蚜虫的日最大理论捕食量一般大于成虫 (邓建华等, 2002; 冯宏祖等, 2008; Seko *et al.*, 2008; 关晓庆, 2011; 张文秋等, 2014; 李英梅等, 2015; 王媛, 2015; 喻会平等, 2018), 但也有少量研究发现瓢虫成虫捕食量大于 4 龄幼虫, 如异色瓢虫对枫杨刻蚜 *Kurisia onigurumi* 的捕食能力表现为: 成虫 > 4 龄幼虫 > 3 龄幼虫 > 2 龄幼虫 > 1 龄幼虫 (张伟等, 2018), 异色瓢虫的法国种群雌、雄成虫的捕食量均大于 4 龄幼虫 (王魁, 2012)。这可能与成虫、4 龄幼虫分别所处的具体发育阶段 (如成虫羽化初期、产卵前、产卵后、

交尾前或交尾后, 4 龄幼虫刚孵化、中期及后期) 对营养的实际需求不同有一定关系。

十一星瓢虫的寻找效应随枸杞棉蚜密度增加而逐渐减弱, 当棉蚜数量相同时, 高龄幼虫的寻找效应大于低龄幼虫, 成虫仅次于 4 龄幼虫, 按高低排序为: 4 龄幼虫 > 成虫 > 3 龄幼虫 > 2 龄幼虫 > 1 龄幼虫, 不同虫态瓢虫的生物学特性有所不同, 可能是引起差异的主要原因。十一星瓢虫各虫态对枸杞棉蚜的捕食量均随十一星瓢虫密度增加而下降, 该种瓢虫个体间的干扰作用随天敌自身密度增加而增强, 说明相同虫态的十一星瓢虫个体间存在较强的种内干扰作用。在空间和枸杞棉蚜密度均固定不变的情况下, 随十一星瓢虫自身密度增加, 单头瓢虫的捕食量下降, 表明十一星瓢虫自身密度会对其捕食作用产生影响。目前尚无关于十一星瓢虫寻找效应、种内干扰和自身密度方面的研究报道。

自然条件下, 瓢虫的捕食行为除了与其自身特性有关外, 还与温度、湿度、光照、雨雪、冰雹和风力等环境因子、天敌的集团间竞争、其他生物 (如蚂蚁等) 的干扰以及活动空间大小等有很大关系 (杨帆等, 2016)。本试验是在智能人工气候培养箱内进行的, 属于恒温恒湿的半封闭条件, 因此, 室内统计的瓢虫捕食量很可能与其在外界复杂多变环境下的捕食量存在一定差异, 但本研究仍可为采用枸杞棉蚜饲养十一星瓢虫以及利用该瓢虫防控枸杞棉蚜提供借鉴与参考。鉴于十一星瓢虫对棉蚜有较大的捕食潜力, 具有较广阔的应用前景, 因此, 应对其加以保护、开发和利用, 充分发挥其对棉蚜的控制潜能, 有助于枸杞和棉花产业实现安全、绿色、可持续发展。

致谢: 感谢中国科学院动物研究所乔格侠研究员、北京市农林科学院植物保护环境保护研究所张帆研究员分别在蚜虫鉴定、瓢虫饲养工作中的指导与帮助。

参考文献 (References)

- Ding YQ. A mathematical model of the searching efficiency in natural enemy - pest system [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1983, 3 (2): 141 - 147. [丁岩钦. 天敌-害虫作用系统中的数学模型及其主要参数的估计 [J]. *生态学报*, 1983, 3 (2): 141 - 147]
- Feng HZ, Wang L, Dong HQ, *et al.* Population dynamics and predatory

- function of *Coccinella undecimpunctata* to *Aphis gossypii* [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2007a, 23 (3): 209–213. [冯宏祖, 王兰, 董红强, 等. 十一星瓢虫种群动态及其对棉蚜的捕食功能 [J]. 中国生物防治, 2007a, 23 (3): 209–213]
- Feng HZ, Wang L. Evaluation of *Coccinella undecimpunctata* control effects on *Aphis gossypii* [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008, 24 (1): 375–378. [冯宏祖, 王兰. 十一星瓢虫对棉蚜的控制作用的评估 [J]. 中国农学通报, 2008, 24 (1): 375–378]
- Feng HZ, Wang L, Dong HQ, et al. Developmental threshold temperature and effective accumulated temperature of *Coccinella undecimpunctata* L [J]. *Xinjiang Agricultural Science*, 2007b, 44 (2): 173–175. [冯宏祖, 王兰, 董红强. 十一星瓢虫发育起点温度与有效积温的研究 [J]. 新疆农业科学, 2007b, 44 (2): 173–175]
- Feng HZ, Wang L, Dong HQ, et al. Life tables of the laboratory population of *Coccinella undecimpunctata* L. at different temperatures [J]. *Acta Entomology Sinica*, 2007c, 50 (3): 259–263. [冯宏祖, 王兰, 董红强. 十一星瓢虫在不同温度下的实验种群生命表 [J]. 昆虫学报, 2007c, 50 (3): 259–263]
- Guan XQ. The predation functional response and selection of *Leis axyridis* against aphid [J]. *Hubei Agricultural Science*, 2011, 50 (12): 2442–2445. [关晓庆. 异色瓢虫对枸杞蚜虫的捕食功能反应及选择 [J]. 湖北农业科学, 2011, 50 (12): 2442–2445]
- Hassell MJ. Population model for the interaction between *Cyzenis albicans* and *Operophtera brumata* at Wytham Berks hire [J]. *Anim. Ecol.*, 1959, 38: 567–576.
- Holling CS. The components of predatory as revealed by a study of small mammal predatory of the European pine sawfly [J]. *Canad. Entomol.*, 1959, 91: 385–398.
- Li JB, Fang LP, Lv ZZ. The population dynamics and the spatial distribution of *Coccinella undecimpunctata* in cotton field [J]. *Chinese Bulletin of Entomology*, 2007, 44 (1): 86–88. [李进步, 方丽平, 吕昭智. 棉田十一星瓢虫种群动态及空间分布 [J]. 昆虫知识, 2007, 44 (1): 86–88]
- Li QR, Li FG, Wei YH, et al. Checklist of insect pests, their enemies and description of five species of pests in *Chenopodium quinoa* Willd in arid area of Qinghai Plateau [J]. *Plant Protection*, 2019, 45 (1): 190–198. [李秋荣, 李富刚, 魏有海, 等. 青海高原干旱地区藜麦害虫与天敌名录及 5 种害虫记述 [J]. 植物保护, 2019, 45 (1): 190–198]
- Liu XD, Zhai BP, Zhang XX, et al. Differentiation in morphometrics and ecological adaptability of cotton and cucumber biotypes of the cotton aphid, *Aphis gossypii* (Homoptera: Aphididae) [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2004, 47 (6): 768–773. [刘向东, 翟保平, 张孝羲, 等. 棉花型和瓜型棉蚜形态和生态适应力的分化 [J]. 昆虫学报, 2004, 47 (6): 768–773]
- Lombaert E, Carletto J, Piotte C, et al. Response of the melon aphid, *Aphis gossypii*, to host plant resistance: Evidence for high adaptive potential despite low genetic variability [J]. *Entomol. Exp. Appl.*, 2009, 133: 46–56.
- Luo ZB, Lu CZ, Cao XC, et al. A study on the proala crustacea macula variation of *Coccinella Undecimpunctata* [J]. *Journal of Talim University of Agricultural Reclamation*, 1999, 11 (1): 9–12. [罗志兵, 陆承志, 曹新川. 十一星瓢虫鞘翅色斑变异的研究 [J]. 塔里木农垦大学学报, 1999, 11 (1): 9–12]
- Ma BX, Wu PX, Xu J, et al. Predatory function and field suppression to *Poratrisia sinica* Yang et Li (Lycium) by *Harmonia axyridis* Pallas [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2018, 40 (1): 70–81. [马宝旭, 巫鹏翔, 徐婧, 等. 异色瓢虫对枸杞木虱捕食功能及田间捕食效果 [J]. 环境昆虫学报, 2018, 40 (1): 70–81]
- Mao SS, Wang JL, Pu XL, et al. Advanced Mathematical Statistics (Second Edition) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. [茆诗松, 王静龙, 濮晓龙, 等. 高等数理统计 (第二版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006]
- Seko T, Miura K. Functional response of the lady beetle *Harmonia axyridis* (Pallas) (Coleoptera: Coccinellidae) on the aphid *Myzus persicae* (Sulzer) (Homoptera: Aphididae) [J]. *Applied Entomology & Zoology*, 2008, 43 (3): 341–345.
- Wang LX, Tian CY, Ma YJ, et al. The population dynamics of *Coccinella undecimpunctata* in the cotton fields [J]. *Arid Zone Research*, 2002, 19 (4): 72–74. [王林霞, 田长彦, 马英杰, 等. 棉田十一星瓢虫的种群动态 [J]. 干旱区研究, 2002, 19 (4): 72–74]
- Wang LX, Tian CY, Lv ZZ. The ecological control of *Coccinella undecimpunctata* Linnaeus over *Aphis gossypii* in the cotton fields in south Xinjiang [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2006, 24 (4): 222–226. [王林霞, 田长彦, 吕昭智. 南疆棉田十一星瓢虫对棉蚜的生态控制 [J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24 (4): 222–226]
- Wang LX, Tian CY, Ma YJ, et al. Biological characters of *Coccinella undecimpunctata* Linnaeus [J]. *Arid Zone Research*, 2005, 22 (3): 405–408. [王林霞, 田长彦, 马英杰, 等. 十一星瓢虫的生物学特性 [J]. 干旱区研究, 2005, 22 (3): 405–408]
- Wang LX, Tian CY, Ma YJ, et al. Effect of *Coccinella undecimpunctata* on population dynamics of *Aphis gossypii* in Xinjiang cotton area [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2003, 19 (3): 139–141. [王林霞, 田长彦, 马英杰, 等. 新疆棉田十一星瓢虫对棉蚜种群动态的影响 [J]. 中国生物防治, 2003, 19 (3): 139–141]
- Wang LX, Tian CY, Zhang H, et al. Effect of temperature and nutrition on overwintering of *Coccinella undecimpunctata* [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2004, 20 (2): 135–137. [王林霞, 田长彦, 张慧. 温度和营养食物对十一星瓢虫越冬的影响 [J]. 中国生物防治, 2004, 20 (2): 135–137]
- Wang YS, Peng N, Xu SY, et al. Population dynamics research in quantity relationship of *Coccinella undecimpunctata* Linnaeus and *Aphis Gossypii* [J]. *Journal of Natural Sciences Edition*, 2001, 20 (3): 65–68. [王运松, 彭娜, 徐世英. 十一星瓢虫与蚜虫

- 数量关系的种群动力学研究 [J]. 中央民族大学学报, 2001, 20 (3): 65 - 68]
- Wang YH, Liu BS. Initial observation for changes of spots on *Coccinella undecimpunctata* adults' elytra [J]. *Entomological Knowledge*, 1984, 2: 89 - 90, 73. [王允华, 刘宝森. 十一星瓢虫成虫鞘翅上斑点变化的初步观察 [J]. 昆虫知识, 1984, 2: 89 - 90, 73]
- Watt KEF. A mathematical model for the effect of densities of attacked and attacking species on the number attack [J]. *Can. Ent.*, 1959, 91 (3): 129 - 144.
- Wu CG, Wei YM. Population dynamical model and numerical simulation of the predatism of *Coccinella undecimpunctata* on cotton aphid *Aphis gossypii* [J]. *Science Technology and Engineering*, 2009, 9 (2): 402 - 412. [吴春光, 魏玉敏. 十一星瓢虫捕食棉蚜的种群动力学模型及其数值模拟 [J]. 科学技术与工程, 2009, 9 (2): 402 - 412]
- Yan L, Guo R, Li LL, *et al.* Investigation of Lycium diseases and insect pests and their natural enemies on Lycium woods in Qinghai Province [J]. *Plant Protection*, 2017, 43 (5): 189 - 197. [严林, 郭蕊, 李琳琳, 等. 青海省枸杞林病虫害及其天敌昆虫种类调查 [J]. 植物保护, 2017, 43 (5): 189 - 197]
- Yan L, Guo R, Li YJ, *et al.* Morphology and bionomics of *Aphis gossypii* (Hemiptera: Aphididae) on Chinese wolfberry (*Lycium barbarum*) [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2017, 60 (6): 666 - 680. [严林, 郭蕊, 李亚娟, 等. 枸杞棉蚜形态和生物学特性研究 [J]. 昆虫学报, 2017, 60 (6): 666 - 680]
- Yang F, Lu YH, Xu JX. Effects of cotton aphid density on the intraguild predation among three ladybeetles (Coleoptera: Coccinellidae) [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2016, 32 (3): 299 - 304. [杨帆, 陆宴辉, 徐建祥. 棉蚜密度对瓢虫集团内捕食作用的影响 [J]. 中国生物防治学报, 2016, 32 (3): 299 - 304]
- Yu HP, Wang Z, Long GY, *et al.* The predation functional response of *Harmonia axyridis* at different stages to three kinds of aphids [J]. *Jiangsu Agricultural Science*, 2018, 46 (18): 86 - 90. [喻会平, 王召, 龙贵云, 等. 不同虫态异色瓢虫对 3 种蚜虫的捕食功能反应 [J]. 江苏农业科学, 2018, 46 (18): 86 - 90]