

核桃全斑蚜的发生与为害及其优势天敌 四斑裸瓢虫的捕食作用*

蒋 华^{1,2**} 杨晓霞¹ 李归林¹ 黄佳聪^{1,2***} 张 炜¹ 董章宏¹ 杨晏平¹

(1. 保山市林业和草原技术推广站, 保山 678000; 2. 保山市林业和草原科学研究所, 保山 678000)

摘 要 【目的】明确核桃全斑蚜 *Panaphis juglandis* 在云南省保山市泡核桃 *Juglans sigillata* 产区的发生为害、分布格局, 以及优势捕食性瓢虫的种类、捕食作用和生物防治潜能。【方法】林间调查 5 个泡核桃林分内核桃全斑蚜的种群密度、为害率和空间分布型, 以及捕食性瓢虫种类和数量; 室内测定优势瓢虫不同虫态对核桃全斑蚜的捕食功能反应、寻找效应、自身密度和种内干扰反应。【结果】核桃全斑蚜在保山市泡核桃栽培林内呈聚集分布, 为害率为 26.67%-93.33%, 虫口密度为 10.27-489.41 头/100 叶。泡核桃林分中, 捕食性瓢虫的优势种为四斑裸瓢虫 *Calvia muiri*, 其物种优势度为 44.34%。四斑裸瓢虫不同虫态对核桃全斑蚜的捕食功能反应均符合 Holling-Ⅱ 型功能反应类型, 日平均捕食量均随猎物密度增加而增大, 其中 4 龄幼虫对核桃全斑蚜的瞬时攻击率 (a') 和捕食能力 (a'/T_h) 最强, 分别为 1.321 5 和 197.24; 雌成虫的日最大理论捕食量 ($1/T_h$) 最高, 为 153.85 头, 单头处理时间 (T_h) 最短, 为 0.006 5 d; 1 龄幼虫的捕食能力 (a'/T_h) 最弱, 仅为 47.19。四斑裸瓢虫不同虫态对核桃全斑蚜的寻找效应均随猎物密度增加而减弱, 4 龄幼虫的寻找效应最强。四斑裸瓢虫不同虫态对核桃全斑蚜的捕食受自身密度与种内干扰较强, 在猎物密度一定的条件下, 自身密度干扰系数为 0.596 1-0.733 2; 在捕食者与猎物密度等比增大的条件下, 种内干扰系数为 0.337 3-0.509 8。【结论】四斑裸瓢虫是保山市泡核桃林内的优势瓢虫资源, 其对核桃全斑蚜具有较强的捕食能力和控害潜能, 应加强林间保护及生防利用。

关键词 核桃全斑蚜; 四斑裸瓢虫; 捕食作用; 生物防治; 泡核桃

Occurrence of *Panaphis juglandis*, the damage caused by this pest, and the potential for it to be controlled by its dominant natural enemy, *Calvia muiri*

JIANG Hua^{1,2**} YANG Xiao-Xia¹ LI Gui-Lin¹ HUANG Jia-Cong^{1,2***}
ZHANG Wei¹ DONG Zhang-Hong¹ YANG Yan-Ping¹

(1. Forestry and Grassland Technology Extension Station of Baoshan City, Baoshan 678000, China;

2. Forestry and Grassland Scientific Research Institute of Baoshan City, Baoshan 678000, China)

Abstract 【Aim】To clarify the occurrence and distribution of *Panaphis juglandis* in the *Juglans sigillata* producing area of Baoshan in Yunnan Province, to assess the damage caused by this pest, and identify potential biological control agents for it. 【Methods】Five stands of *J. sigillata* in Baoshan, Yunnan Province were surveyed to determine the population density, infestation rate and spatial distribution pattern of *P. juglandis*, and the number and species of predatory ladybugs. The predatory responses, search effort, density and intraspecific interference responses, of different developmental stages of the dominant ladybug species to *P. juglandis* were measured under laboratory conditions. 【Results】*P. juglandis* had an

*资助项目 Supported projects: 云南省技术创新人才培养项目 (202305AD350082); 保山市“兴保英才”青年人才培养计划项目 (2023QNRC03); 中央财政林业科技推广示范项目 (云[2024]TG31 号)

**第一作者 First author, E-mail: bssjh1989@163.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: bs_hjc@126.com

收稿日期 Received: 2023-12-27; 接受日期 Accepted: 2024-08-13

aggregated distribution with infestation rates ranging from 26.67% to 93.33%, and population densities ranging from 10.27 to 489.41 ind./100 leaves. The dominant predatory ladybug was *Calvia muiri*, with a species dominance index of 44.34%. The predatory functional responses of different developmental stages of *C. muiri* to *P. juglandis* conformed to the Holling-II functional response type; average daily predation increased with prey density. 4th instar *C. muiri* larvae had the highest instantaneous attack rate (a') and predation capacity (a'/T_h) (1.321 5 and 197.24, respectively), and female adults had the maximum theoretical daily predation ($1/T_h$) rate of 153.85. The shortest processing time (T_h) for a single prey was 0.006 5 d, and 1st instar larvae had the lowest predation capacity of 47.19. The search effort of different developmental stages of *C. muiri* decreased with increasing prey density, and was strongest in 4th instar larvae. The predation capacity of different developmental stages of *C. muiri* was strongly affected by its own density; at a given prey density, the intraspecific interference coefficient ranged from 0.596 1 to 0.733 2. When the predator-prey density increased in an equal ratio, the intraspecific disturbance coefficient ranged from 0.337 3 to 0.509 8. **[Conclusion]** *C. muiri* is the dominant ladybug in *J. sigillata* forests in Baoshan and an important predator of *P. juglandis*. It should therefore be protected and utilized as a biological control for this pest.

Key words *Panaphis juglandis*; *Calvia muiri*; predatory role; biological control; *Juglans sigillata*

核桃全斑蚜 *Panaphis juglandis* 隶属半翅目 Hemiptera 蚜科 Aphididae 全斑蚜属 *Panaphis*, 寄主以胡桃属 *Juglans* 植物为主 (Goeze, 1778), 广泛分布于欧洲 (Dixon, 1976; Karczmarz, 2012; Magnussen and Hansen, 2014; Aqaverdi and Inqilab, 2018)、美国西部 (Olson, 1974; Paulsen *et al.*, 2013)、印度 (Wani and Ahamad, 2014) 和亚洲中部 (Akköprü *et al.*, 2015) 等国家, 以及我国新疆伊犁 (邢海超等, 2018; 邵锦瑞等, 2021)、贵州贵阳市、毕节市和黔南州 (吴跃开等, 2018) 等地区。核桃全斑蚜以成蚜和若蚜排列于核桃叶片正面主脉两侧吸食危害, 可导致核桃叶片光合作用效率下降, 果实产量和出仁率降低 (张文佳等, 2023); 在波兰卢布林地区不同季节核桃全斑蚜雌蚜可产若蚜 61-88 头/雌, 种群密度可达 1 084-1 240 头/100 叶, 自然条件下种群繁殖率较高, 增长迅速 (Karczmarz, 2012)。核桃全斑蚜的潜在适生区较为广泛, 尤其适应我国核桃适生栽培区的气候环境, 在各核桃产区之间传播扩散的风险较高 (邢海超等, 2018; 王婷等, 2020)。本研究团队于 2023 年 5-6 月在云南省保山市高黎贡山周边泡核桃 *Juglans sigillata* 主产区开展病虫害调查时发现核桃全斑蚜危害, 种群数量多且分布广, 对保山市 23.3 万 hm^2 泡核桃产业的可持续发展构成威胁。结合高黎贡山资源优势开展核桃全斑蚜绿色防控, 对维护高黎贡山生态安全、保护生物多样性以及促进区域经济与

生态协调发展意义重大。

化学药剂防治核桃全斑蚜虽然见效快, 但极易造成防治区生物多样性降低、农药残留以及害虫产生抗药性等系列问题, 生物防治是核桃全斑蚜绿色防控的重要手段 (李鑫等, 2021)。国外研究表明寄生性天敌三叉蚜茧蜂 *Trioxys pallidus* 可寄生核桃全斑蚜 (Andersen and Mills, 2018), 捕食性天敌东亚小花蝽 *Orius sauteri*、普通草蛉 *Chrysopa* 和二星瓢虫 *Adalia fasciatopunctata revelierei* 对核桃全斑蚜均有一定的捕食作用 (Bhagat *et al.*, 1994; Atlihan *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2021)。国内研究表明异色瓢虫 *Harmonia axyridis* 作为新疆核桃产区的优势天敌, 对核桃全斑蚜具有较强的捕食能力 (邵锦瑞等, 2021); 此外, 菱斑巧瓢虫 *Oenopia conglobata*、七星瓢虫 *Coccinella septempunctata* 和多异瓢虫 *Hippodamia variegata* 对核桃全斑蚜及其近缘种核桃黑斑蚜 *Chromaphis juglandicola* 均有较强的捕食能力 (朱晓锋等, 2015; 刘思琪等, 2020; 王巧等, 2023)。由此可见, 捕食性瓢虫资源的发掘和利用在我国核桃全斑蚜的绿色防控中发挥着重要作用。本研究首次报道了核桃全斑蚜在云南省保山市泡核桃产区的发生为害, 迫切需要结合本地瓢虫资源开展捕食控害功能研究。

四斑裸瓢虫 *Calvia muiri* 隶属鞘翅目 Coleoptera 瓢虫科 Coccinellidae 裸瓢虫属 *Calvia* (任顺祥等, 2009), 是云南高黎贡山保护区及干

热河谷区重要的捕食性瓢虫资源(李巧等, 2008; 吴伟等, 2011), 也是苹果 *Malus pumila*、枇杷 *Eriobotrya japonica* 和柑橘 *Citrus reticulata* 等果园内常见的捕食性天敌(陈川等, 2003; 罗佳等, 2005; 郑朝武和虞国跃, 2013), 对橘蚜 *Toxoptera citricidus* 和绣线菊蚜 *Aphis citricola* 等蚜科害虫均有捕食性(郑朝武和虞国跃, 2013)。2023 年, 本研究团队在保山市高黎贡山周边调查发现, 四斑裸瓢虫是该地区泡核桃林内的优势瓢虫种群之一, 野外观察并采集到幼虫和成虫均对核桃全斑蚜具有捕食行为, 自然种群具备控蚜潜力。因此, 本研究采用样地调查法分析了核桃全斑蚜的林间发生、为害及分布格局。同时, 评估了四斑裸瓢虫对核桃全斑蚜的捕食功能反应、寻找效应、种内干扰和自身密度干扰反应, 以期对核桃全斑蚜的监测预报及四斑裸瓢虫的田间保护与利用提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试虫来源与试验条件

核桃全斑蚜: 于 2023 年 7 月采自云南省保山市 5 个泡核桃栽培林(表 1), 置于养虫笼(直

径 30 cm、高度 60 cm、120 目/cm²) 中带回实验室, 每 2 d 更换 1 次新鲜泡核桃复叶饲养, 选取体型大小相似的 3-4 龄若虫作为供试猎物。

四斑裸瓢虫: 于 2023 年 7 月采自云南省保山市 5 个泡核桃栽培林, 以野外容易识别的 4 龄幼虫和成虫作为虫源采集对象, 置于养虫笼(直径 30 cm、高度 60 cm、120 目/cm²) 中带回实验室, 投喂核桃全斑蚜和核桃黑斑蚜饲养, 选取单头 2 日龄内的 1、2、3 和 4 龄幼虫和雌成虫作为供试天敌。

新鲜泡核桃复叶: 于 2023 年 7-8 月采自保山市城区太保公园附近, 叶柄基部保湿后带回实验室作为试虫饲养植物。

试验条件: 在温度(26±1)℃, 相对湿度 65%±5%, 光周期 16 L: 8 D 的人工气候箱(HWS-158 智能型, 宁波科技园区新江南仪器有限公司)内进行; 使用 SZM45 型体视显微镜(舜宇光学科技有限公司)和佳能 EOS 60D 数码相机对试验过程进行观察拍照记录。

1.2 核桃全斑蚜及捕食性瓢虫的林间调查

2023 年 7 月在 5 个泡核桃林分内, 分别设置 3 块具有代表性样地, 每块样地面积 2 hm²,

表 1 云南省保山市泡核桃样地概况
Table 1 Sample plot overview of *Juglans sigillata* in Baoshan City, Yunnan Province, China

研究地点 Study site	经纬度 Longitude and latitude	海拔(m) Altitude (m)	气候类型 Climate type	年均气温(℃) Average annual temperature (°C)	年降雨量(mm) Average annual rainfall (mm)	种植面积 (hm ²) Planting area (hm ²)
瓦窑镇下麦庄村(WY) Xiamaihuang Village, Wayao Town	25°29'1" N 99°19'4" E,	1 850	亚热带高原季风气候 Subtropical highland monsoon climate	15.4	1 200	400
瓦渡乡哑口村(WD) Yakou Village, Wadu Town	25°13'24" N 99°23'2" E,	1 730	亚热带高原季风气候 Subtropical highland monsoon climate	16.4	1 040	900
鸡飞镇八甲村(JF) Bajia Village, Jifei Town	24°41'48" N 99°25'44" E,	1 940	亚热带高原季风气候 Subtropical highland monsoon climate	19.2	1 000	600
柯街镇仙岳村(KJ) Xianyue Village, Kejie Town	24°50'23" N 99°29'58" E,	1 650	亚热带高原季风气候 Subtropical highland monsoon climate	19.5	920	500
龙山镇核桃坪村(LS) Hetaoping Village, Longshan Town	24°35'52" N 98°34'5" E,	1 735	南亚热带季风气候 South Asian tropical monsoon climate	15.0	2 137	350

样地间距大于 1 km。采用五点取样法, 每样地调查 25 株泡核桃样株。每株中下部东、南、西和北 4 个方位各调查 25 片小叶, 记录每片小叶上核桃全斑蚜的若虫和成虫数量, 计算各林区内调查样株的平均虫口密度 (m) 和方差 (S^2), 应用聚集度指标法 (于新文和刘晓云, 2001) 分析测定空间分布型。

采用目测法 (王兴民等, 2014) 对每样株绕树冠仔细观察一圈, 详细记录树体中下部的瓢虫成虫种类和数量, 并采集标本带回实验室鉴定。根据鉴定结果, 结合野外记录数据, 整理归类各林区的瓢虫种类和数量, 以物种优势度最高的瓢虫种类判定为优势种, 物种优势度=物种个体数/所有物种个体总数 $\times 100\%$ 。

1.3 四斑裸瓢虫对核桃全斑蚜的捕食行为观察

在 5 个直径 9 cm 的培养皿中, 每皿放入 30 头核桃全斑蚜, 然后分别接入 1 头饥饿 24 h 的四斑裸瓢虫 1、2、3 和 4 龄幼虫及成虫, 观察并拍照记录捕食过程, 用秒表计量不同虫态取食完猎物所用时间, 每头重复计量 6 次。

1.4 四斑裸瓢虫对核桃全斑蚜的捕食功能反应及寻找效应

分别将 1 头经过 24 h 饥饿处理的四斑裸瓢虫 1、2、3 和 4 龄幼虫及雌成虫放入直径 9 cm 的培养皿中, 然后用毛笔挑取接入相应密度的核桃全斑蚜 3-4 龄若虫, 用保鲜膜封口, 昆虫针在膜面扎 10-20 个透气孔, 置于人工气候箱, 24 h 后检查记录培养皿中核桃全斑蚜被捕食的数量。四斑裸瓢虫不同虫态对应接入的猎物密度设置为 5 个处理, 分别为 1 龄幼虫 (10、20、30、40、50 和 60 头/皿), 2 龄幼虫 (20、40、60、80、100 和 120 头/皿), 3 龄幼虫 (30、60、90、120、150 和 180 头/皿), 4 龄幼虫 (50、100、150、200、250 和 300 头/皿) 和雌成虫 (50、100、150、200、250 和 300 头/皿), 每处理重复 5 次。所得数据采用 Holling- II 型圆盘方程 $N_a = NT / (1 + a'T_h N)$ 对捕食功能反应进行拟合, 式中, N_a 为日捕食数量, a' 为瞬时攻击率, N 为猎物密度, T 为试验总时间 (本试验 T 值为 1 d), T_h 为处理时间, 即捕食者取食 1 头猎物所需时间

(Holling, 1959); $1/T_h$ 为最大理论捕食量, a'/T_h 为捕食能力 (李善光等, 2020)。将 Holling- II 型圆盘方程拟合所得参数 a' 和 T_h , 代入寻找效应 (S) 方程 $S = a' / (1 + a'T_h N)$, 计算各虫态四斑裸瓢虫捕食核桃全斑蚜的寻找效应 (Holling, 1959; 丁岩钦, 1994)。

1.5 自身密度与种内干扰对四斑裸瓢虫捕食作用的影响

将饥饿 24 h 的四斑裸瓢虫 1、2、3 和 4 龄幼虫及雌成虫分别按 1、2、3、4 和 5 头/皿的密度接入培养皿中, 每皿接入 200 头核桃全斑蚜 3-4 龄若虫, 24 h 后检查记录核桃全斑蚜被捕食数量, 每处理重复 5 次。采用 Watt 模型 $A = QP^{-m}$ 拟合计算四斑裸瓢虫受到的自身密度干扰系数, 式中, A 为单头捕食者平均捕食量, P 为捕食者密度, Q 为捕食者密度 $P=1$ 头时的最大捕食量, m 为自身密度干扰系数 (Watt, 1959)。

将饥饿 24 h 的四斑裸瓢虫 1、2、3 和 4 龄幼虫及雌成虫分别按 1、2、3、4 和 5 头/皿的密度接入培养皿中, 按密度比 1:100、2:200、3:300、4:400 和 5:500 接入相应密度的核桃全斑蚜 3-4 龄若虫, 24 h 后检查记录核桃全斑蚜被捕食数量, 每处理重复 5 次。采用 Hassell 模型 $E = qP^{-m}$ 拟合计算四斑裸瓢虫受到的种内干扰系数。式中, E 为平均捕食率 ($E = N_a / NP$), P 为捕食者密度, q 为捕食者密度 $P=1$ 头时的最大捕食率, m 为种内干扰系数 (Hassell and Verley, 1969)。

1.6 数据统计与分析

采用 Origin 2021 软件对试验数据与相关模型进行非线性曲线自定义模型拟合, 采用 SPSS 26.0 软件对试验实测值和拟合模型所得理论值进行卡方检验分析。采用 Graphpad Prism 8.0 软件制作统计图, Adobe Illustrator CS6 软件对相关图片进行编辑。

2 结果与分析

2.1 核桃全斑蚜的发生为害及空间分布型

核桃全斑蚜在云南保山泡核桃栽培林分中的为害率为 26.67%-93.33%, 虫口密度为 10.27-

489.41 头/100 叶,二者具有显著相关性($r=0.889\ 7$ 、 $P=0.016\ 1$)。调查的 5 个泡核桃林分中,瓦窑镇下麦庄村的虫口密度和植株受害率最高,分别为 489.41 头/100 叶和 93.33%,其次是鸡飞镇八甲村,分别为 108.51 头/100 叶和 61.33%,龙山镇核桃坪村的虫口密度和植株受害率最低,分别为 10.27 头/100 叶和 26.67%(图 1)。空间分布型分析结果表明,核桃全斑蚜在所有调查林区内的聚集度指标 $C>1$, $I>0$, $C_a>0$, $m^*>1$, $m^*/m>1$, 且 $0\leq k<8$, 表明种群整体上呈聚集分布;聚集均数 $\lambda>2$, 表明聚集是由自身密度、行为习性和环境因素综合作用引起(表 2)。

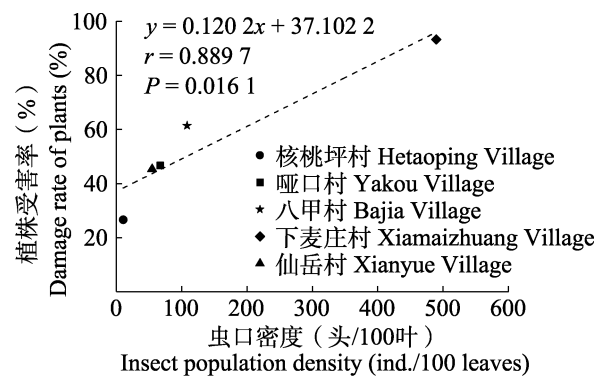


图 1 核桃全斑蚜的发生为害情况
(云南保山, 2023)

Fig. 1 The occurrence and damage of *Panaphis juglandis* (Baoshan, Yunnan, 2023)

表 2 核桃全斑蚜的空间分布型(云南保山, 2023)

Table 2 Spatial distribution pattern of *Panaphis juglandis* (Baoshan, Yunnan, 2023)

研究地点 Study site	平均密度 m Average density	方差 S^2 Variance	聚集度指标 Aggregation index							空间分布型 Spatial distribution type
			C	I	C_a	k	m^*	m^*/m	聚集均数 λ Aggregation mean	
瓦窑镇下麦庄村 Ximaizhuang Village, Wayao Town	489.41	33 244.975	67.928 7	66.928 7	0.136 8	7.312 4	556.338 7	1.136 8	479.845 2	聚集分布 Aggregated distribution
瓦渡乡哑口村 Yakou Village, Wadu Town	67.24	5 720.428	85.074 8	84.074 8	1.250 4	0.799 8	151.314 8	2.250 4	58.263 8	聚集分布 Aggregated distribution
鸡飞镇八甲村 Bajia Village, Jifei Town	108.51	9 015.524	83.084 7	82.084 7	0.756 5	1.321 9	190.594 7	1.756 5	97.350 2	聚集分布 Aggregated distribution
柯街镇仙岳村 Xianyue Village, Kejie Town	54.92	4 810.723	87.595 1	86.595 1	1.576 7	0.634 2	141.515 1	2.576 7	19.700 4	聚集分布 Aggregated distribution
龙山镇核桃坪村 Hetaoping Village, Longshan Town	10.27	326.387	31.780 6	30.780 6	2.997 1	0.333 7	41.050 6	3.997 1	7.002 6	聚集分布 Aggregated distribution

2.2 捕食性瓢虫的种类及优势物种

在 5 个泡核桃林内,共采集到 10 种捕食性瓢虫成虫,分别为四斑裸瓢虫、华裸瓢虫 *Calvia chinensis*、七星瓢虫、六斑月瓢虫 *Menochilus sexmaculata*、异色瓢虫、泸水盘瓢虫 *Lemnialushuiensis*、黄缘巧瓢虫 *Oenopiasauzeti*、二斑唇瓢虫 *Chilocorusbijugus*、纤丽瓢虫 *Harmoniasedecimnotata* 和奇斑瓢虫 *Haemoniaeucharis*(图 2)。其中,四斑裸瓢虫采集到的个体数量最多,

共有 227 头,物种优势度最高,为 44.34%(图 3),故四斑裸瓢虫为研究地泡核桃林分中的捕食性瓢虫优势种。

2.3 优势天敌四斑裸瓢虫对核桃全斑蚜的捕食作用

2.3.1 四斑裸瓢虫对核桃全斑蚜的捕食行为
四斑裸瓢虫 1-4 龄幼虫和雌成虫捕食核桃全斑蚜时,会在活动空间中不断地四处爬行,这个过程会接触多个不同的猎物,静止片刻后瞬间攻击其

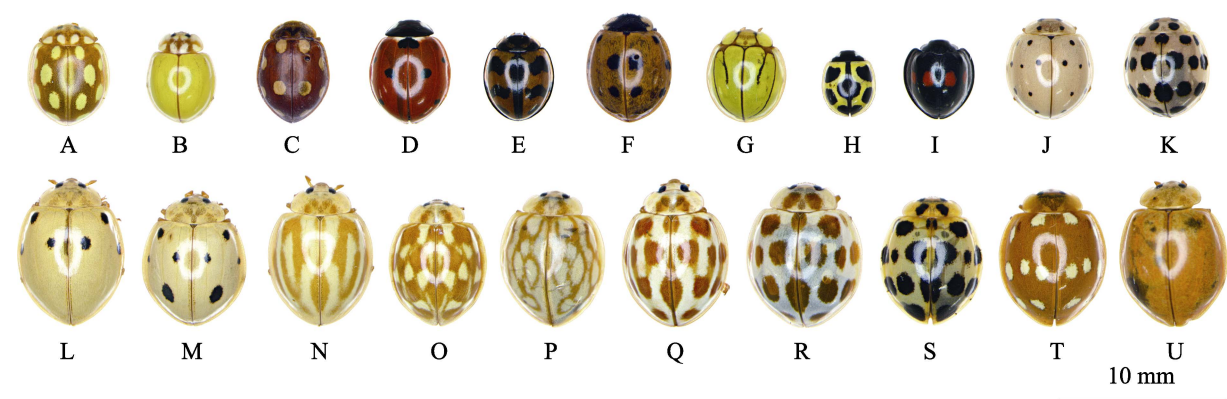


图 2 泡核桃林分中的捕食性瓢虫种类

Fig. 2 Predatory ladybug species in *Juglans sigillata* stands

A. 四斑裸瓢虫 *Ca. muiri* (♀); B. 四斑裸瓢虫 *Ca. muiri* (♂) ; C. 华裸瓢虫 *Ca. chinensis*; D. 七星瓢虫 *Co. septempunctata*; E. 六斑月瓢虫 *M. sexmaculata*; F. 异色瓢虫 *H. axyridis*; G. 泸水盘瓢虫 *L. lushuiensis*; H. 黄缘巧瓢虫 *O. sauzeti*; I. 二双斑唇瓢虫 *Ch. bijugus*; J-K. 纤丽瓢虫 *H. sedecimnotata*; L-U. 奇斑瓢虫 *H. eucharis*.

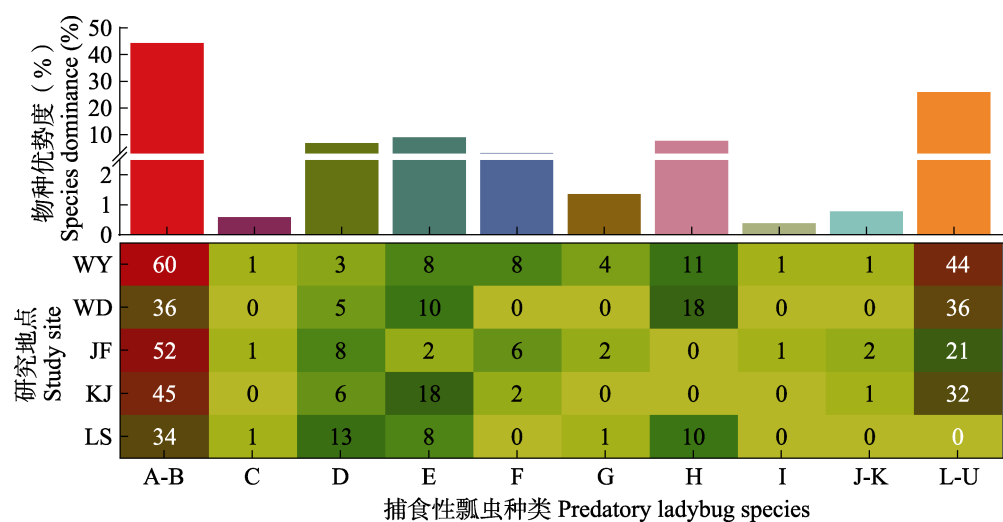


图 3 捕食性瓢虫的个体数量及物种优势度

Fig. 3 Individual numbers and species dominance of predatory ladybugs

研究地全称见表 1，捕食性瓢虫种类名称见图 2。方格颜色表示物种多度，由低到高为黄色-绿色-红色。
The study sites are listed in Table 1. The names of predatory ladybird species are listed in Fig. 2. The color of the squares represents species abundance, ranging from low to high as yellow-green-red.

中 1 头并开始咀嚼。各虫态均偏好从核桃全斑蚜的腹部开始取食，取食过程中会多次调整姿势和移动位置（图 4：A-F）。1-4 龄幼虫取食过程持续 8-42 min，随龄期增长取食时间显著缩短（ $P<0.01$ ）；成虫取食过程持续 11-27 min，取食时间显著长于 4 龄幼虫（ $P<0.01$ ）（图 5）。
2.3.2 四斑裸瓢虫对核桃全斑蚜的捕食功能反应 不同虫态四斑裸瓢虫对核桃全斑蚜的捕食量均随供试猎物密度增加而增大，并趋于平缓，其捕食功能反应均属于 Holling-Ⅱ型（图 6：

A-E）。用 Holling-Ⅱ圆盘方程拟合得到四斑裸瓢虫对核桃全斑蚜的捕食功能反应参数，由表 3 可知，四斑裸瓢虫 1、2、3 和 4 龄幼虫对核桃全斑蚜的瞬时攻击率、日最大捕食量和捕食能力均随龄期增加而增大，瞬时攻击率分别为 0.783 3、1.028 2、1.260 6 和 1.321 5，日最大捕食量分别为 60.24、62.50、81.30 和 149.25 头，捕食能力分别为 47.19、64.26、102.49 和 197.24。处理时间随龄期增加而缩短，分别为 0.016 6、0.016 0、0.012 3 和 0.006 7 d。成虫对核桃全斑蚜的瞬时

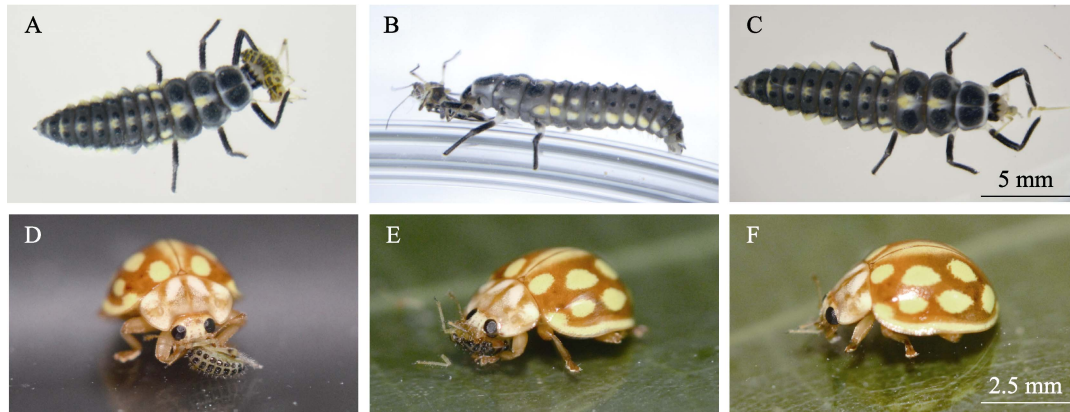


图 4 四斑裸瓢虫对核桃全斑蚜的捕食行为

Fig. 4 Predatory behavior of *Calvia muiri* to *Panaphis juglandis*

A. 四斑裸瓢虫 4 龄幼虫开始取食核桃全斑蚜；B. 四斑裸瓢虫 4 龄幼虫的取食过程；C. 四斑裸瓢虫 4 龄幼虫完成对核桃全斑蚜的取食；D. 四斑裸瓢虫雌成虫开始取食核桃全斑蚜；E. 四斑裸瓢虫雌成虫的取食过程；

F. 四斑裸瓢虫雌成虫完成对核桃全斑蚜的取食。

A. 4th instar larva of the *C. muiri* begin feeding on the *P. juglandis*; B. Feeding process of the 4th instar larva of the *C. muiri*; C. 4th instar larva of the *C. muiri* finish feeding on the *P. juglandis*; D. Adult female *C. muiri* start feeding on the *P. juglandis*; E. Feeding process of the *C. muiri* adult female; F. Adult female *C. muiri* finish feeding on the *P. juglandis*.

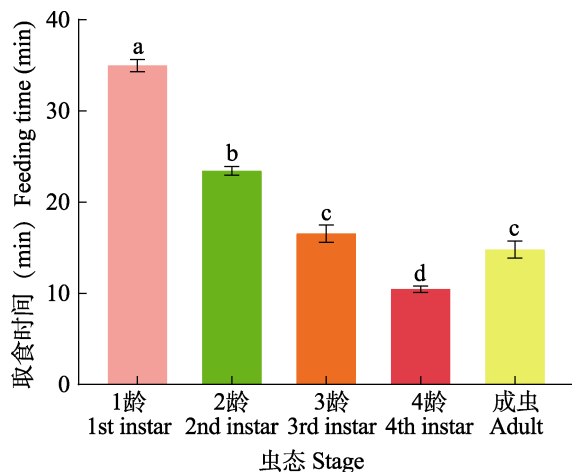


图 5 四斑裸瓢虫不同虫态对核桃全斑蚜的取食时间

Fig. 5 Feeding time of different insect states of the *Calvia muiri* to *Panaphis juglandis*

图中数据为平均值±标准误。不同小写字母表示经

Duncan's 新复极差法检验在 $P < 0.01$ 水平差异显著。

Data in the figure are mean±SE. Different lowercase letters above bars indicate significant difference at $P < 0.01$ level by Duncan's multiple test.

攻击率、处理时间、日最大捕食量和捕食能力分别为 1.041 7、0.006 5 d、153.85 头和 160.26，处理时间和日最大捕食量略高于 4 龄幼虫，瞬时攻击率和捕食能力均低于 4 龄幼虫。

2.3.3 四斑裸瓢虫的寻找效应 四斑裸瓢虫 1-4

龄幼虫和成虫对核桃全斑蚜的寻找效应均随猎物密度增加而降低，猎物密度越高，四斑裸瓢虫寻找猎物所需时间越少。在相同猎物密度下，四斑裸瓢虫 4 龄幼虫的寻找效应最高，成虫的寻找效应次之，1 龄幼虫的寻找效应最低（图 7）。

2.3.4 自身密度干扰对四斑裸瓢虫捕食作用的影响 经 Watt 模型拟合得到自身密度对四斑裸瓢虫捕食核桃全斑蚜的干扰反应模型方程及相关参数，由表 4 可知，在核桃全斑蚜密度和活动空间一定的条件下，四斑裸瓢虫 1、2、3 和 4 龄幼虫及雌成虫的自身密度干扰系数分别为 0.733 2、0.670 4、0.666 3、0.666 0 和 0.596 1，说明四斑裸瓢虫不同虫态捕食核桃全斑蚜均存在自身密度干扰反应，其自身密度增加可引起个体间的干扰效应增强，从而导致其对核桃全斑蚜的平均捕食量降低。

2.3.5 种内干扰对四斑裸瓢虫捕食作用的影响 经 Hassell 模型拟合得到四斑裸瓢虫捕食核桃全斑蚜的种内干扰反应模型方程及相关参数，由表 5 可知，在四斑裸瓢虫和核桃全斑蚜密度等比增大的条件下，四斑裸瓢虫 1、2、3 和 4 龄幼虫

及雌成虫捕食核桃全斑蚜的种内干扰系数分别为 0.427 9、0.337 3、0.509 8、0.432 8 和 0.396 3, 说明四斑裸瓢虫不同虫态捕食核桃全斑蚜均存在种内干扰反应, 二者密度等比增大可引起捕食者个体间相互干扰效应增强, 从而导致四斑裸瓢虫的平均捕食率降低。

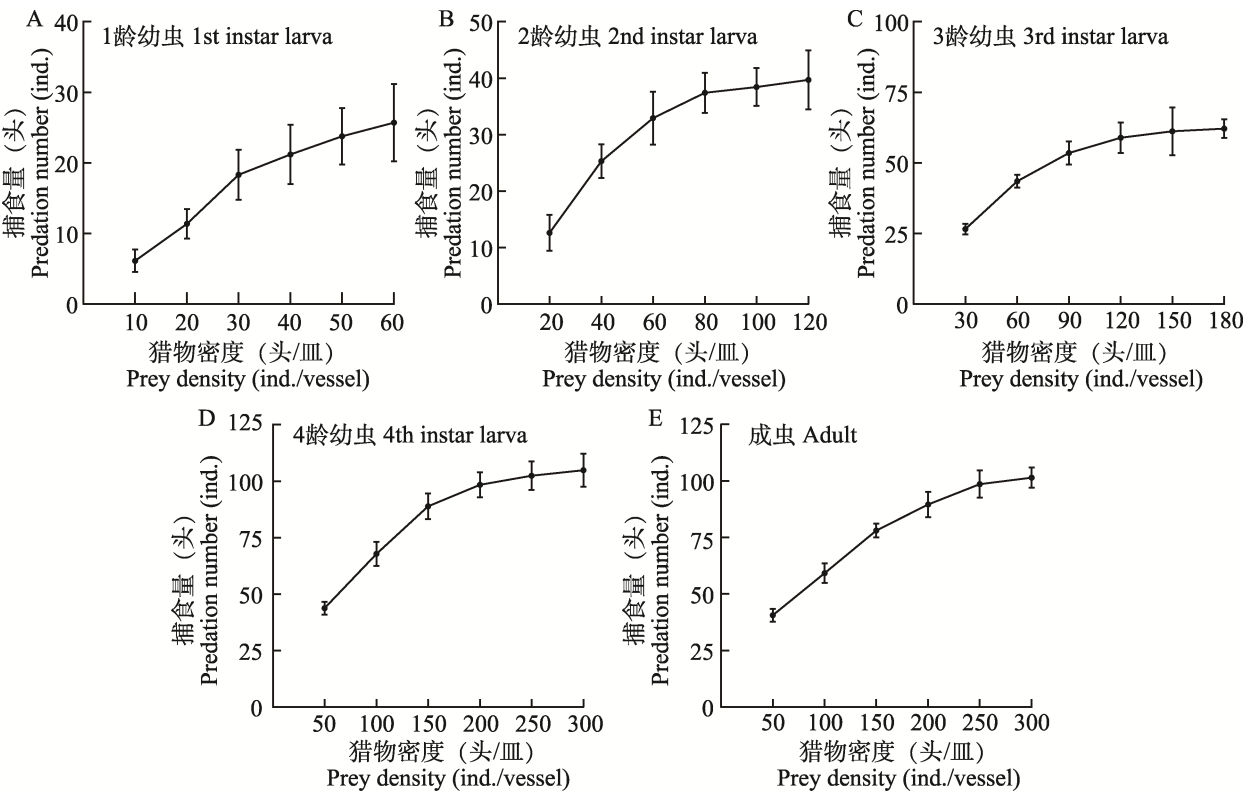


图 6 不同虫态四斑裸瓢虫对核桃全斑蚜的捕食量曲线
Fig. 6 Average daily predation curves of *Calvia muiri* of different insect states on *Panaphis juglandis*

A. 1 龄幼虫; B. 2 龄幼虫; C. 3 龄幼虫; D. 4 龄幼虫; E. 成虫。A. 1st instar larva; B. 2nd instar larva; C. 3rd instar larva; D. 4th instar larva; E. Adult.

表 3 不同虫态四斑裸瓢虫对核桃全斑蚜的捕食功能反应

Table 3 Predatory functional response of <i>Calvia muiri</i> of different insect states on <i>Panaphis juglandis</i>						
虫态 Stage	捕食功能反应方程 Predatory functional response equation	相关系数 <i>r</i> Correlation coefficient	瞬时攻击率 <i>a'</i> Instantaneous attack rate	处理时间 <i>T_h</i> Handling time	日最大捕食量 1/ <i>T_h</i> Daily maximum prey consumed	捕食能力 <i>a'/T_h</i> Predation capacity
1 龄幼虫 1st instar larva	$N_a=0.783\ 3N/(1+0.013\ 0N)$	0.983 9	0.783 3	0.016 6	60.24	47.19
2 龄幼虫 2nd instar larva	$N_a=1.028\ 2N/(1+0.016\ 5N)$	0.965 4	1.028 2	0.016 0	62.50	64.26
3 龄幼虫 3rd instar larva	$N_a=1.260\ 6N/(1+0.015\ 5N)$	0.927 3	1.260 6	0.012 3	81.30	102.49
4 龄幼虫 4th instar larva	$N_a=1.321\ 5N/(1+0.008\ 9N)$	0.984 2	1.321 5	0.006 7	149.25	197.24
成虫 Adult	$N_a=1.041\ 7N/(1+0.006\ 8N)$	0.993 4	1.041 7	0.006 5	153.85	160.26

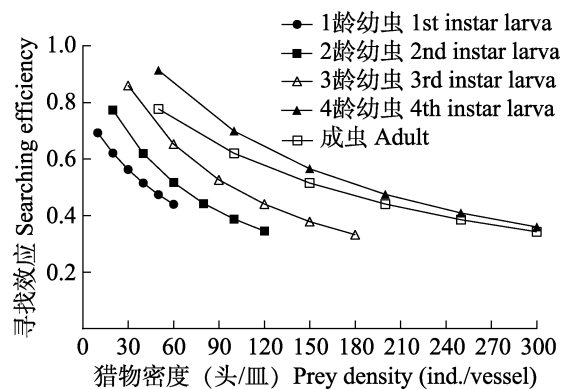


图 7 不同虫态四斑裸瓢虫对核桃全斑蚜的寻找效应
Fig. 7 Searching efficiency of *Calvia muiri* of different insect states on *Panaphis juglandis*

3 结论与讨论

核桃全斑蚜是近年来国内核桃产区新发现的主要害虫，对我国核桃产业造成较大危害（吴跃开等, 2018; 邢海超等, 2018; 邵锦瑞等, 2021）。该虫在云南省保山市泡核桃主产区为害率为 26.67%-93.33%，虫口密度为 10.27-489.41 头/100 叶，种群呈聚集分布，与其在波兰和阿塞拜疆的

发生分布结果类似（Karczmarz, 2012; Aqaverdi and Inqilab, 2018）。虽然该虫在保山市的最高种群密度为 489.41 头/100 叶，仅是波兰卢布林地区 1 240 头/100 叶（Karczmarz, 2012）的 39.47%，但其最高密度发生林分的植株受害率达到了 93.33%，相比而言，保山市泡核桃林内发生的核桃全斑蚜种群具有一定的增长空间，其定殖扩散后将对整个泡核桃产业增收及生态安全造成影响，需引起农林部门重视。

充分发挥本土瓢虫优势资源作用，是构建蚜类害虫绿色防控体系的重要环节（王红托等, 2012; 夏莹莹等, 2014）。不同地区核桃林内的瓢虫优势资源分布可能不同，比如新疆伊利地区巩留县核桃园内的瓢虫优势种群为异色瓢虫（邵锦瑞等, 2021），新疆阿克苏地区温宿县核桃园的瓢虫优势种群为多异瓢虫（王巧等, 2023），山东济宁汶上县薄壳山核桃林内的瓢虫优势种群为龟纹瓢虫（祝令顺, 2021）。本研究在保山市泡核桃林内共调查到四斑裸瓢虫、奇斑瓢虫和七星瓢虫等 10 种瓢虫资源，其中以四斑裸瓢虫分布最广

表 4 四斑裸瓢虫捕食核桃全斑蚜受到的自身密度干扰系数					
Table 4 The influence coefficient of densities impacting the predation of <i>Calvia muiri</i> on <i>Panaphis juglandis</i>					
虫态 Stage	Watt 模型方程 Watt model equation	最大捕食量 Q Maximum amount of predation	自身密度干扰系数 m Interference coefficient of density	相关系数 r Correlation coefficient	
1 龄幼虫 1st instar larva	$A=47.652\ 4\times P^{-0.733\ 2}$	47.652 4	0.733 2	0.974 1	
2 龄幼虫 2nd instar larva	$A=57.358\ 7\times P^{-0.670\ 4}$	57.358 7	0.670 4	0.998 8	
3 龄幼虫 3rd instar larva	$A=66.143\ 9\times P^{-0.666\ 3}$	66.143 9	0.666 3	0.998 7	
4 龄幼虫 4th instar larva	$A=101.998\ 9\times P^{-0.666\ 0}$	101.999 3	0.666 0	0.998 9	
成虫 Adult	$A=73.572\ 0\times P^{-0.596\ 1}$	73.572 1	0.596 1	0.998 4	

表 5 四斑裸瓢虫捕食核桃全斑蚜受到的种内干扰系数					
Table 5 The coefficient of mutual interference impacting the predation of <i>Calvia muiri</i> on <i>Panaphis juglandis</i>					
虫态 Stage	Hassell 模型方程 Hassell model equation	最大捕食率 q Maximum amount of predation	种内干扰系数 m Coefficient of mutual interference	相关系数 r Correlation coefficient	
1 龄幼虫 1st instar larva	$E=0.363\ 1\times P^{-0.427\ 9}$	0.363 1	0.427 9	0.902 2	
2 龄幼虫 2nd instar larva	$E=0.390\ 8\times P^{-0.337\ 3}$	0.390 8	0.337 3	0.864 8	
3 龄幼虫 3rd instar larva	$E=0.574\ 4\times P^{-0.509\ 8}$	0.574 4	0.509 8	0.993 5	
4 龄幼虫 4th instar larva	$E=0.747\ 4\times P^{-0.432\ 8}$	0.747 4	0.432 8	0.917 7	
成虫 Adult	$E=0.942\ 5\times P^{-0.396\ 3}$	0.594 5	0.396 3	0.942 5	

泛, 种群数量最多, 说明四斑裸瓢虫在泡核桃林分中具有较好的适应性和种群建立能力, 在泡核桃蚜类害虫防控方面有一定的利用潜能, 可以作为主要天敌资源加以利用。

在捕食性天敌利用过程中, 已广泛应用 Holling- II 型圆盘方程进行天敌捕食功能评价, 同时 Holling (1959) 认为随猎物密度增加, 天敌寻找猎物的时间将会逐渐减少。本研究表明, 四斑裸瓢虫不同虫态对核桃全斑蚜的捕食功能反应均符合 Holling- II 模型, 其各虫态捕食量均随核桃全斑蚜密度增加而逐渐增大, 寻找效应均随核桃全斑蚜密度增加而降低。这与多异瓢虫对核桃黑斑蚜 (王巧等, 2023) 和枸杞木虱 *Paratrioza sinica* (巫鹏翔等, 2016)、异色瓢虫对雪松长足大蚜 *Cinara cedri* (王倩倩等, 2019)、龟纹瓢虫 *Propylea japonica* 对棉蚜 *Aphis gossypii* (谢修庆等, 2012) 和柑橘木虱 *Diaphorina citri* (周军辉等, 2020), 及南方小花蝽 *Orius similis* 对蚕豆蚜 *A. craccivora* 和西花蓟马 *Frankliniella occidentalis* (郅军锐等, 2011) 的捕食功能研究结果一致, 说明四斑裸瓢虫对核桃全斑蚜具有较强的捕食作用。四斑裸瓢虫不同虫态的捕食能力和寻找效应由高到低均表现为 4 龄幼虫 > 成虫 > 3 龄幼虫 > 2 龄幼虫 > 1 龄幼虫, 这与异色瓢虫对核桃全斑蚜的捕食功能研究结果一致 (郅锦瑞等, 2021), 但从各虫态的捕食量值看, 四斑裸瓢虫对核桃全斑蚜的捕食能力逊色于异色瓢虫, 这可能与捕食者的生理状态、猎物的体型大小和密度及试验环境条件等因素对捕食功能反应的影响有关 (王倩倩等, 2019)。

在空间一定的条件下, 同种捕食者个体间会存在干扰反应, 自身密度和种内干扰对其捕食能力会产生较为明显的影响 (巫鹏翔等, 2016; 黄振东等, 2019)。本研究表明, 在捕食空间和猎物密度一定时, 四斑裸瓢虫不同虫态对核桃全斑蚜的单头平均捕食量均随其自身密度增加而降低; 在天敌和猎物密度等比增大时, 四斑裸瓢虫不同虫态的平均捕食率均随密度增加而降低。李秋荣等 (2020) 利用 Watt 模型和 Hassell 模型进行十一星瓢虫 *C. undecimpunctata* 捕食枸杞棉蚜的干

扰反应研究也有类似结果, 说明四斑裸瓢虫捕食核桃全斑蚜时存在较强的自身密度和种内干扰反应。因此, 在开展林间释放利用时需进一步明确释放比例, 以正常发挥四斑裸瓢虫的捕食功效, 使防治效果达到最佳。

自然条件下地理位置、立地条件、气候类型以及物种竞争等因素均会影响天敌的野外捕食效果 (Lester and Harmsen, 2002; Schenk and Bacher, 2002; Rocca *et al.*, 2017), 泡核桃林内的瓢虫和蚜虫种类多样, 且分散于核桃树冠多个方位和部位, 因此四斑裸瓢虫在野外对核桃全斑蚜的捕食控害能力和田间释放效果还需深入研究。

致谢: 感谢华南农业大学王兴民教授在瓢虫物种鉴定过程中给予的帮助。

参考文献 (References)

- Akköprü EP, Atlihan R, Okut H, Chi H, 2015. Demographic assessment of plant cultivar resistance to insect pests: A case study of the dusky-veined walnut aphid (Hemiptera: Callaphididae) on five walnut cultivars. *Journal of Economic Entomology*, 108(2): 378–387.
- Andersen JC, Mills NJ, 2018. Comparative genetics of invasive populations of walnut aphid, *Chromaphis juglandicola*, and its introduced parasitoid, *Trioxys pallidus*, in California. *Ecology and Evolution*, 8(1): 801–811.
- Aqaverdi NI, Inqilab NG, 2018. Some bioecological peculiarities of *Panaphis juglandis* (Goeze, 1778) and *Chromaphis juglandicola* (Kaltenbach, 1843) (Hemiptera, Aphididae) the pests of persian walnut (*Juglans regia* L.) in Azerbaijan. *Journal of Entomology and Zoology Studies*, 6(2): 800–803.
- Atlihan R, Kaydan MB, Yarimbatman A, Okut H, 2010. Functional response of the coccinellid predator *Adalia fasciatopunctata revelierei* to walnut aphid (*Callaphis juglandis*). *Phytoparasitica*, 38(1): 23–29.
- Bhagat KC, Koul VK, Masoodi MA, 1994. Biology and predatory potential of *Chrysoperla carnea* (Stephens) on *Callaphis juglandis* Kaltenbach. *Journal of Biological Control*, 8(2): 124–125.
- Chen C, Tang ZH, Qu JT, Jing HF, 2003. Natural resources and application of natural enemy insects in apple orchard in Shaanxi. *Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition)*, 31(S2): 36–40. [陈川, 唐周怀, 屈军涛, 荆惠峰, 2003. 陕西苹果园的天敌昆虫资源及利用. 陕西师范大学学报(自然科学版), 31(S2): 36–40.]

- Ding YQ, 1994. Insect Mathematical Ecology. Beijing: Science Press. 257–258, 303–304. [丁岩钦, 1994. 昆虫数学生态学. 北京: 科学出版社. 257–258, 303–304.]
- Dixon AFG, 1976. Reproductive strategies of the alate morphs of the bird cherry-oat aphid *Rhopalosiphum padi*. *Journal of Animal Ecology*, 45(3): 817–830.
- Goeze JAE, 1778. Entomologische Beytrage Zu Des Ritter Linne Zwölften Ausgabe Des Natursystems. II. Leipzig: Weidmanns Erben und Reich. 352.
- Hassell MP, Verley GC, 1969. New inductive population model for insect parasite and its bearing on biological control. *Nature*, 223(1): 1113–1117.
- Holling CS, 1959. Some characteristics of simple types of predation and parasitism. *The Canadian Entomologist*, 91(7): 385–398.
- Huang ZD, Zhou XM, Pu ZX, Hu XR, Du DC, Chen GQ, Zhang HY, 2019. Effect of spatial scale and prey density on predation of the adult Asian citrus psyllid *Diaphorina citri* Kuwayama (Hemiptera: Liviidae) by adult *Harmonia axyridis* (Pallas) (Coleoptera: Coccinellidae). *Chinese Journal of Applied Entomology*, 56(1): 85–90. [黄振东, 周新苗, 蒲占涓, 胡秀荣, 杜丹超, 陈国庆, 张宏宇, 2019. 空间和猎物密度对异色瓢虫取食柑橘木虱的影响. 应用昆虫学报, 56(1): 85–90.]
- Karczmarz K, 2012. Dynamics of population and bionomics of *Panaphis juglandis* (Goeze, 1778) (Homoptera, Phyllaphididae) on common walnut (*Juglans regia* L.) in Lublin's parks and gardens. *Acta Scientiarum Polonorum-Hortorum Cultus*, 11(2): 53–70.
- Lester PJ, Harmsen R, 2002. Functional and numerical responses do not always indicate the most effective predator for biological control: An analysis of two predators in a two-prey system. *Journal of Applied Ecology*, 39(3): 455–468.
- Li Q, Chen YQ, Zhou XY, Kang HY, Chen YL, Wu J, Guo WJ, 2008. Diversity of predatory insect in Yuanmou arid-hot valley, Yunnan. *Scientia Silvae Sinicae*, 44(10): 82–87. [李巧, 陈又清, 周兴银, 康海艳, 陈彦林, 吴俊, 郭文俊, 2008. 云南元谋干热河谷捕食性昆虫多样性. 林业科学, 44(10): 82–87.]
- Li QR, Qi QM, Lai YP, 2020. Study on predation of *Coccinella undecimpunctata* Linnaeus on *Aphis gossypii* Glover. *Journal of Environmental Entomology*, 42(6): 1472–1481. [李秋荣, 祁全梅, 来有鹏, 2020. 十一星瓢虫对枸杞棉蚜的捕食作用研究. 环境昆虫学报, 42(6): 1472–1481.]
- Li SG, Fu BL, Qiu HY, Yang SY, Ma XT, Zhou SH, Tang LD, Zhang FP, Liu K, 2020. The predation of *Menochilus sexmaculata* (Coleoptera: Coccinellidae) to *Thrips hawaiiensis* (Thysanoptera: Thripidae) in the laboratory. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 57(5): 1173–1180. [李善光, 付步礼, 邱海燕, 杨石有, 马晓彤, 周世豪, 唐良德, 张方平, 刘奎, 2020. 六斑月瓢虫对黄胸蓟马若虫的室内捕食作用研究. 应用昆虫学报, 57(5): 1173–1180.]
- Li X, Tai JR, Ling HW, Gao GZ, 2021. Field control efficacy of five insecticides against *Chromaphis juglandicola*. *China Plant Protection*, 41(10): 73–75. [李鑫, 邵锦瑞, 令狐伟, 高桂珍, 2021. 5 种杀虫剂对核桃黑斑蚜的田间防效. 中国植保导刊, 41(10): 73–75.]
- Liu SQ, Wang Q, Gao GZ, 2020. *Harmonia axyridis* and *Coccinella septempunctata*: Predation comparison to *Chromaphis juglandicola*. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 36(17): 118–122. [刘思琪, 王强, 高桂珍, 2020. 异色瓢虫和七星瓢虫对核桃黑斑蚜捕食能力比较. 中国农学通报, 36(17): 118–122.]
- Luo J, Cai ZJ, Xie C, 2005. Primary investigations of natural enemy resources in loquat orchard. *Entomological Journal of East China*, 14(4): 358–361. [罗佳, 蔡子坚, 谢嫦, 2005. 枇杷园害虫天敌资源调查初报. 华东昆虫学报, 14(4): 358–361.]
- Magnussen T, Hansen LO, 2014. *Panaphis juglandis* (Goeze, 1778) and *Chromaphis juglandicola* (Kaltenbach, 1843) (Hemiptera, Aphididae) in Norway-two aphid species associated with common walnut (*Juglans regia* L.). *Norwegian Journal of Entomology*, 61: 186–189.
- Olson WH, 1974. Dusky-veined walnut aphid studies. *California Agriculture*, 6: 18–19.
- Paulsen CM, Cottrell TE, Ruberson JR, 2013. Distribution of the black pecan aphid, *Melanocallis caryaefoliae*, on the upper and lower surface of pecan foliage. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 146(2): 252–260.
- Ren SX, Wang XM, Pang H, Peng ZQ, Zeng T, 2009. Colored Pictorial Handbook of Ladybird Beetles in China. Beijing: Science Press. 182–183. [任顺祥, 王兴民, 庞虹, 彭正强, 曾涛, 2009. 中国瓢虫原色图鉴. 北京: 科学出版社. 182–183.]
- Rocca M, Rizzo E, Greco N, Sanchez N, 2017. Intra-and interspecific interactions between aphidophagous ladybirds: The role of prey in predator coexistence. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 162(3): 284–292.
- Schenk D, Bacher S, 2002. Functional response of a generalist insect predator to one of its prey species in the field. *Journal of Animal Ecology*, 71: 524–531.
- Tai JR, Liu SQ, Gao GZ, 2021. Predatory functional response of different stages of *Harmonia axyridis* Pallas on *Panaphis juglandis* Goeze. *Chinese Journal of Biological Control*, 37(6): 1338–1343. [邵锦瑞, 刘思琪, 高桂珍, 2021. 不同龄期异色瓢虫对核桃全斑蚜的捕食功能反应. 中国生物防治学报, 37(6): 1338–1343.]
- Wang HT, Zhang WD, Chen XZ, Zheng JF, Miao L, Qin QL, 2012. Mass rearing the multicolored Asian lady beetle on beet armyworm larvae. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 49(6): 1726–1731. [王红托, 张伟东, 陈新中, 郑建峰, 苗麟, 秦启联, 2012. 异色瓢虫规模化生产技术与瓢虫工厂的建立. 应用昆虫学报, 49(6): 1726–1731.]
- Wang Q, Yang L, Pan YF, Li HQ, Lu YH, 2023. Predation of ladybeetle *Hippodamia variegata* on walnut aphid *Chromaphis juglandicola*. *Chinese Journal of Biological Control*, 39(6): 1289–1294. [王巧, 杨龙, 潘云飞, 李海强, 陆宴辉, 2023. 多

- 异瓢虫对核桃黑斑蚜的捕食作用. 中国生物防治学报, 39(6): 1289–1294.]
- Wang QQ, Zhang WG, Tian T, Wang XY, Zhou CG, Yin SY, 2019. Predation of *Cinara cedri* by *Harmonia axyridis*. *Journal of Plant Protection*, 46(2): 458–464. [王倩倩, 张卫光, 田恬, 王晓艺, 周成刚, 尹淑艳, 2019. 异色瓢虫对雪松长足大蚜的捕食作用. 植物保护学报, 46(2): 458–464.]
- Wang T, Ma DY, Liu XX, Zhang P, Gao GZ, Lu ZZ, 2020. Analysis of potential suitable areas of two walnut aphids based on CLIMEX. *Journal of Biosafety*, 29(2): 115–122. [王婷, 马德英, 刘孝贤, 张苹, 高桂珍, 吕昭智, 2020. 基于 CLIMEX 的 2 种核桃蚜虫潜在适生区分析. 生物安全学报, 29(2): 115–122.]
- Wang T, Zhang P, Ma CY, Yasir AM, Gao GZ, Lu ZZ, Zalucki MP, 2021. Is *Orius sauteri* Poppius a promising biological control agent for walnut aphids? An assessment from the laboratory to field. *Insects*, 12(1): 25.
- Wang XM, Chen XS, Qiu BL, Ren SX, 2014. Methods and technologies for collecting, surveying and sampling predatory ladybirds (Coleoptera: Coccinellidae). *Chinese Journal of Applied Entomology*, 51(5): 1362–1366. [王兴民, 陈晓胜, 邱宝利, 任顺祥, 2014. 捕食性瓢虫采集与调查取样技术. 应用昆虫学报, 51(5): 1362–1366.]
- Wani SA, Ahamad ST, 2014. Laboratory study of parthenogenesis and fecundity in *Panaphis juglandis* Geoeze (Hemiptera: Aphididae). *Researcher*, 6(6): 1–4.
- Watt KE, 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 PX, Ouyang HY, Xu J, Zhang R, He J, Zhang RZ, 2016. Predation of *Paratrioza sinica* Yang & Li by adult *Hippodamia variegata* (Goeze). *Chinese Journal of Applied Entomology*, 53(6): 1353–1360. [巫鹏翔, 欧阳浩永, 徐婧, 张蓉, 何嘉, 张润志, 2016. 多异瓢虫成虫对枸杞木虱的捕食作用. 应用昆虫学报, 53(6): 1353–1360.]
- Wu W, Liu DB, Zhang PY, Zhang Z, 2011. Community structure and diversity of ladybugs in Baihualing of Gaoligong mountain I. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 39(31): 19151–19153. [吴伟, 刘德波, 张培毅, 张真, 2011. 高黎贡山百花岭瓢虫群落结构及多样性研究 I. 安徽农业科学, 39(31): 19151–19153.]
- Wu YK, Yang X, Fu L, 2018. First record of *Panaphis juglandis* (Goetze) on walnut plantation in Guizhou, China. *Plant Quarantine*, 32(5): 50–53. [吴跃开, 杨霞, 付莉, 2018. 贵州首次发现核桃上的新害虫——核桃全斑蚜. 植物检疫, 32(5): 50–53.]
- Xia YY, Li XJ, Zheng G, Guo YJ, 2014. Predation by *Coccinula quatuordecimpustulata* on aphids. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 51(2): 400–405. [夏莹莹, 李学军, 郑国, 郭亚静, 2014. 双七瓢虫对蚜虫捕食作用. 应用昆虫学报, 51(2): 400–405.]
- Xie XQ, Lu MM, Su HH, Yang YZ, 2012. Effect of cotton aphids feeding on transgenic cotton varieties on the behavior of *Propylaea japonica*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 49(4): 911–916. [谢修庆, 陆佩玲, 胡蒙蒙, 苏宏华, 杨益众, 2012. 取食不同品种棉花的棉蚜对龟纹瓢虫功能反应的影响. 应用昆虫学报, 49(4): 911–916.]
- Xing HC, Lu ZZ, Zhao L, Zhang X, Gao GZ, Luo ZH, 2018. Potential risks of dusky-veined walnut aphid, *Panaphis juglandis* (Goeze) (Hemiptera: Aphididae) in China. *Journal of Environmental Entomology*, 40(4): 769–774. [邢海超, 吕昭智, 赵莉, 张鑫, 高桂珍, 罗朝辉, 2018. 警惕核桃全斑蚜的潜在危害风险. 环境昆虫学报, 40(4): 769–774.]
- Yu XW, Liu XY, 2001. Review of research methods on spatial pattern of insect population. *Journal Northwest Forestry University*, 16(3): 83–87, 90. [于新文, 刘晓云, 2001. 昆虫种群空间格局的研究方法评述. 西北林学院学报, 16(3): 83–87, 90.]
- Zhang WJ, Ma GL, Gao GZ, 2023. Effects of two walnut aphids on photosynthetic characteristics of walnut. *Forest Research*, 37(1): 130–139. [张文佳, 马贵龙, 高桂珍, 2023. 两种核桃蚜虫危害对核桃光合特征的影响. 林业科学研究, 37(1): 130–139.]
- Zheng ZW, Yu GY, 2013. Survey and preys of lady beetles (Coccinellidae) in citrus groves in Qujiang, Guangdong. *Journal of Environmental Entomology*, 35(1): 77–84. [郑朝武, 虞国跃, 2013. 广东曲江柑橘园天敌瓢虫种类调查及食性观察(鞘翅目: 瓢虫科). 环境昆虫学报, 35(1): 77–84.]
- Zhi JR, Zheng SS, Zhang CR, Liu FJ, 2011. The predation of *Orius similis* to *Frankliniella occidentalis* and *Aphis craccivora*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 48(3): 573–578. [郑军锐, 郑珊珊, 张昌容, 刘丰蛟, 南方小花蝽对西花蓟马和蚕豆蚜的捕食作用. 应用昆虫学报, 48(3): 573–578.]
- Zhou JH, Li PL, Naiwuzhati ZN, Zheng HN, Huang J, Wang ZH, 2020. Functional response and predation preference of ladybeetle *Propylaea japonica* to Asian citrus psyllid *Diaphorina citri*. *Journal of Plant Protection*, 47(5): 1062–1070. [周军辉, 李鹏雷, 乃吾扎提·祖农, 郑卉娜, 黄建, 王竹红, 2020. 龟纹瓢虫对柑橘木虱的捕食功能反应即猎物偏好性. 植物保护学报, 47(5): 1062–1070.]
- Zhu LX, 2021. Population dynamics and community characteristics of the main pests and natural enemies on *Carya illinoensis* in Wenshang County. Master dissertation. Tai'an: Shandong Agricultural University. [祝令顺, 2021. 汶上县薄壳山核桃主要害虫及天敌种群动态与群落特征研究. 硕士学位论文. 泰安: 山东农业大学.]
- Zhu XF, Abudukeyimu K, Xu BQ, Song B, Li H, Yang S, 2015. Study on the predation functional response of *Oenopia conglobata* (Linnaeus) to *Chromaphis juglandicola* (Kaltenbach). *Xinjiang Agricultural Sciences*, 52(9): 1654–1658. [朱晓峰, 阿布都克尤木·卡德尔, 徐兵强, 宋博, 李宏, 杨森, 2015. 菱斑巧瓢虫对核桃黑斑蚜捕食功能反应研究. 新疆农业科学, 52(9): 1654–1658.]