

花生-玉米间作田东亚小花蝽对花生蚜的控制作用

韦夕平^{1**} 曲明静² 陈瑶³ 鞠倩^{2***} 李伟^{1***}

(1. 长江大学生命科学学院, 荆州 434025; 2. 山东省花生研究所, 青岛 266100; 3. 南京农业大学生命科学学院, 南京 210095)

摘要 【目的】为明确花生-玉米间作种植模式东亚小花蝽 *Orius sauteri* 对花生蚜 *Aphis craccivora* 种群的控制作用。【方法】2017 年田间试验调查花生单作种植模式和花生-玉米间作种植模式下花生蚜及东亚小花蝽的种群动态, 计算东亚小花蝽和花生蚜的益害比, 并利用天敌肠道内含物分子检测方法对东亚小花蝽体内花生蚜 DNA 进行检测, 评估田间东亚小花蝽对花生蚜的捕食作用。【结果】花生-玉米间作种植模式下, 东亚小花蝽种群发生高峰期提前于花生蚜发生高峰期。在花生蚜定殖期 (6 月 10 日前), 花生-玉米间作种植模式下东亚小花蝽种群密度显著高于花生单作。在整个花生蚜发生期 (5 月 31 日-7 月 20 日), 花生-玉米间作种植模式下东亚小花蝽与花生蚜的益害比显著高于花生单作种植模式 ($t=2.981$, $df=10$, $P=0.014$)。且在花生蚜第一次发生高峰期 (6 月 10 日), 花生-玉米间作种植模式下东亚小花蝽与花生蚜的益害比显著高于花生单作种植模式 ($t=7.103$, $df=4$, $P=0.002$)。6 月 10 日, 田间东亚小花蝽 DNA 样本中花生蚜阳性检出率为 9.21%, 其他时间无花生蚜检出。【结论】花生-玉米间作种植模式能够先于花生蚜发生高峰期涵养东亚小花蝽, 且东亚小花蝽对花生蚜的捕食作用可显著降低花生苗期花生蚜的种群密度。**关键词** 东亚小花蝽; 花生蚜; 作物多样性; 种群动态; 肠道内含物; 细胞色素氧化酶 I 基因

Control of the peanut aphid (*Aphis craccivora*) by *Orius sauteri* in peanut-maize strip intercropped fields

WEI Xi-Ping^{1**} QU Ming-Jing² CHEN Yao³ JU Qian^{2***} LI Wei^{1***}

(1. College of Life Sciences, Yangtze University, Jingzhou 434025, China; 2. Shandong Peanut Research Institute, Qingdao 266100, China; 3. College of Life Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract [Aim] To investigate the impact of *Orius sauteri* on the population dynamics of peanut aphids in a peanut-maize strip intercropping system. [Methods] A comprehensive field experiment (peanut-maize strip intercropping system and peanut monoculture system) was conducted in 2017 to investigate the population dynamics of peanut aphids and their primary predator, *O. sauteri*. This involved calculating the ratio of beneficial natural enemies to pest insects in both monoculture and intercropped systems, and conducting a molecular gut-content analysis to assess the predation of peanut aphids by *O. sauteri* under realistic field conditions. [Results] The population peak of *O. sauteri* occurred earlier than that of peanut aphids in peanut-maize intercropped fields. During the colonization period of the peanut aphid (before June 10th), peanut-maize intercropping significantly increased the density of *O. sauteri* compared to monoculture systems. Throughout all sampling dates (from May 31th to July 20th), comparative analysis revealed that peanut-maize strip intercropped fields had a significantly higher predator-to-pest ratio compared to peanut monocultures ($t=2.981$, $df=10$, $P=0.014$). During the population peak of peanut aphids (on June 10th), peanut-maize strip intercropped fields had a significantly higher predator-to-pest ratio compared to peanut monoculture fields ($t=7.103$, $df=4$, $P=0.002$). On June 10th, 9.21% of predators tested positive for peanut aphid DNA, with nonpositive results obtained during other periods. [Conclusion] Our findings demonstrate that

*资助项目 Supported projects: 国家重点研发计划 (2023YFD1400800); 国家花生产业技术体系 (CARS-13)

**第一作者 First author, E-mail: 384908096@qq.com

***共同通讯作者 Co-corresponding authors, E-mail: juq2022@163.com; wetli@yangtzeu.edu.cn

收稿日期 Received: 2022-10-17; 接受日期 Accepted: 2023-11-20

intercropping strips of peanuts and maize substantially increases the predator-to-pest ratio compared to growing peanuts as a monoculture. Furthermore, early predation by *O. sauteri* on peanut aphids significantly reduces the population density of peanut aphids during the peanut seedling stage.

Key words *Orius sauteri*; *Aphis craccivora*; crop diversity; population dynamics; gut content; cytochrome oxidase subunit I gene

生物多样性对保障全球粮食安全和农业可持续发展至关重要。但现代农业生产中土地利用集约化程度不断加深,导致具有自然、半自然非农生境的生物多样性农业景观逐步转化为植被单一的农业景观(Robinson and Sutherland, 2002; 卢训令等, 2015; 刘雨芳等, 2019; 黄未末等, 2021)。这一转化使得农业景观中的生物多样性持续丧失,农田生态系统服务功能下降。因此,在保障粮食供给的同时,如何有效利用农田本底生态系统服务功能,探索有利于害虫自然控制的农田种植模式成为当下绿色农业发展的研究热点。

间作是指两种或两种以上作物空间混合种植在耕地上的种植模式,该种植模式通过作物多样性种植有效提高自然资源的利用率,增加农田天敌昆虫的数量,提升自然控害能力,被广泛应用于实际生产(李隆, 2016; Gurr et al., 2017)。田耀加等(2012)证实,与单作生境相比,甜玉米 *Zea mays* 间作生境显著提高主要天敌发生量,并且间作生境害虫总活虫数比单作生境减少 53.3%-76.7%,表明此间作种植模式显著增强自然天敌对亚洲玉米螟 *Ostrinia furnacalis* 的控制作用。李新民等(2014)发现大豆 *Glycine max* 间作其他作物可将益害比提高约 50%,显著提高农田自然天敌控害作用。夏宁等(2015)通过花椰菜 *Brassica oleracea* 间作番茄 *Lycopersicon esculentum* 试验证明,间作种植模式显著提高天敌个体数并有效降低害虫个体数,有效抑制农田害虫爆发。Samuel 等(2017)研究发现,玉米 *Zea mays* 间作大豆的种植模式增加玉米田内蜘蛛、瓢虫和草蛉等捕食性天敌以及寄生蜂的种群数量并抑制害虫的发生量。但一些研究表明,间作不仅不能实现物种多样性的生物控害,甚至可能会加重田间害虫发生(Risch, 1983; Tschamtket et al., 2016)。例如蔡志平等(2011)发现果棉间作种植模式加重螨类、蚜虫等虫害发生。姚凤銮

和尤民生(2017)认为玉米和大豆不能为稻田天敌提供促进其个体数量发展的营养物质或适宜生境。间作种植模式的控害功能受多种因素影响,其自然天敌的生态调控作用仍需进一步研究证实。

生产实践中,明确捕食性天敌对害虫的防治效果,既要探明天敌的猎物谱,又要对其捕食量进行估算。目前评价天敌控害作用的方法有室内捕食功能测定、田间捕食效果观察法、同位素与放射性同位素标记、单克隆抗体、酶联免疫吸附法、铷元素标记法以及分子标记技术(Mcdaniel et al., 1978; Munyaneza and Obrycki, 1998; Zaidi, 1999; Harper et al., 2005; Zaidi et al., 2010; 蔡志平等, 2019; 鞠倩等, 2020)。随着 DNA 条形码技术的发展,基于目标害虫线粒体 DNA 细胞色素 C 氧化酶亚基 I (mitochondrial DNA cytochrome c oxidase subunit I, mtDNA CO I) 特异引物,通过 PCR 检测天敌肠道内含物中目标害虫特异 CO I 基因的 DNA 分子标记技术逐步发展为量化评价天敌捕食作用的方法之一,成为判断田间天敌和猎物捕食关系的直接证据(刘冰和陆宴辉, 2022)。

花生 *Arachis hypogaea* 是我国重要油料作物之一,提高花生品质对保障国家食用油安全具有重要作用。花生蚜 *Aphis craccivora* 是花生主要地上害虫之一,其通过刺吸式口器吸食植物汁液,并作为媒介传播花生病毒,影响植株生长,严重时可能造成花生死亡,是花生产量和品质下降的重要因素之一(Ju et al., 2019)。东亚小花蝽 *Orius sauteri* 是我国北方地区常见捕食性天敌之一,是花生田和玉米田中蚜虫类害虫的共有天敌昆虫优势种(尹哲等, 2017)。团队前期已证实花生-玉米间作种植模式可有效涵养异色瓢虫 *Harmonia axyridis*、龟纹瓢虫 *Propylaea japonica* 和东亚小花蝽,并通过天敌肠道内含物分子标记

技术获得田间瓢虫-花生蚜捕食关系的直接证据 (Ju *et al.*, 2019; 鞠倩等, 2020, 2022)。但是, 当花生-玉米间作种植模式下多种捕食性天敌共存时, 东亚小花蝽对花生蚜的控制效果尚不清楚。因此, 本文基于花生单作和花生-玉米间作种植模式下东亚小花蝽和花生蚜的种群数量关系分析, 结合天敌肠道内含物分子标记技术检测东亚小花蝽体内花生蚜, 明确华北地区花生-玉米间作种植模式下东亚小花蝽对花生蚜的控制作用, 旨在为实现花生蚜的生态调控提供新思路以及参考依据。

1 材料与方法

1.1 供试作物品种及试虫

供试作物: 花生: 花育 36 号, 早熟普通型品种; 玉米: 郑单 958 号, 中熟品种。

东亚小花蝽: 室内所用东亚小花蝽购于山东省农业科学院植物保护研究所天敌中心; 田间样品采自山东省花生研究所试验站 (36.809°N, 120.498°E) 试验田的花生、玉米植株上。

花生蚜: 花生蚜采自山东省花生研究所试验站试验田的花生植株上, 转移至室内后, 以蚕豆

Vicia faba 作为寄主植物, 混合龄级约 30 头/株, 于人工气候箱 (Safe PRX-450C, 宁波, 中国) 饲养。人工气候箱温度 20 °C/22 °C, 光周期 L:D=16:8, 空气相对湿度 70%±10% (Fan *et al.*, 2018)。

1.2 小区试验景观布局设计

2017 年于山东省花生研究所试验站进行田间试验, 试验设花生单作种植模式和花生-玉米间作种植模式两种处理。每种处理 4 个重复, 小区随机区组。花生/玉米的种植面积为 3:2, 即 3 垄花生 2 行玉米的花生-玉米间作种植模式。试验田 120 m×20 m, 实验小区 15 m×5 m, 小区间设计 5 m 空白隔离带。两相邻花生带和玉米带组成花生-玉米间作带, 间作带的带宽为 330 cm; 花生带中, 垄距 85 cm, 垄宽 50 cm, 两花生垄间隔 35 cm; 每垄花生种两行花生, 每穴 2 粒花生种, 同一垄花生的穴距 14 cm; 玉米带中, 相邻两玉米行行距 40 cm, 株距 12 cm; 玉米与花生的行间距为 35 cm (图 1)。花生和玉米在 2017 年 5 月 1 日进行播种, 试验小区间土壤营养保持一致, 试验期试验田不使用任何杀虫剂和除草剂, 其他农事操作按照常规管理措施进行。

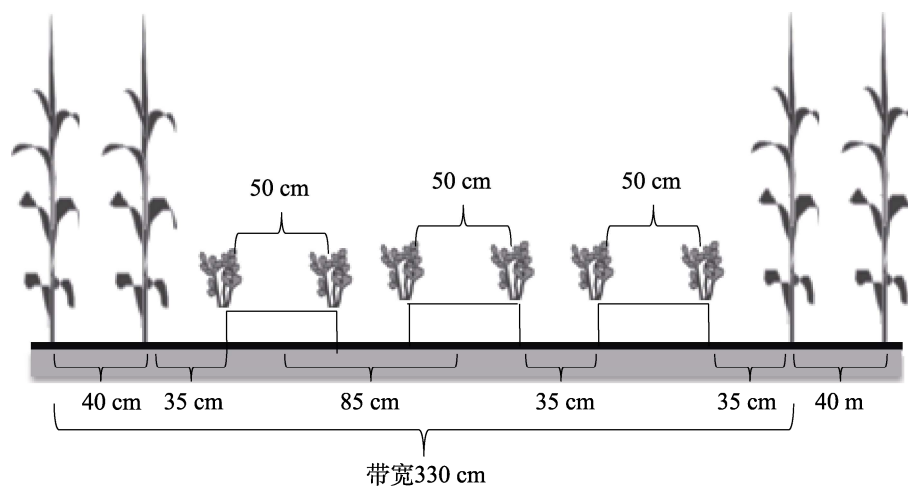


图 1 花生-玉米间作带布局

Fig. 1 Spatial layout of peanut-maize intercropping

1.3 东亚小花蝽及花生蚜种群动态田间调查方法

田间调查从 2017 年 5 月上旬开始, 8 月底结束, 每 10 d 调查 1 次。采用五点法调查方式,

记录每次调查日期、景观小区编号、行号和株号, 以及计数每调查点花生或玉米植株上花生蚜、东亚小花蝽的数量。

1.4 东亚小花蝽全基因组 DNA 提取方法以及模板验证

东亚小花蝽 DNA 提取: 昆虫样品经 75%酒精冲洗后按照 DNA 提取试剂盒的说明书进行 DNA 提取 (TIANamp Micro DNA Kit)。DNA 经 Nano Drop 测定浓度和纯度, -20°C 保存备用。

东亚小花蝽 DNA 模板验证: NCBI 下载东亚小花蝽 16s DNA 序列 (GenBank: AB019142.1), 设计东亚小花蝽 16s DNA 特异性引物 16s-F: AATTACGCTGTTATCCCTAAGGT, 16s-R: GTGCAAAGGTAGCATAATCATTT (扩增片段长度为 329 bp)。PCR 体系: 2x Taq Mix (Takara) 12.5 μL , 16s-F/R (生工生物工程股份有限公司合成) 各 0.5 μL ($10\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$), DNA 模板 1 μL , ddH₂O 10.5 μL 。空白对照反应体系中 ddH₂O 代替 DNA 模板。PCR 程序: 94°C 预变性 3 min, 98°C 变性 10 s, 55°C 退火 30 s, 72°C 延伸 25 s, 扩增 35 个循环; 72°C 后延伸 10 min。取 5 μL PCR 产物进行 1.2% 琼脂糖凝胶电泳检测。PCR 阳性扩增产物送华大基因进行 Sanger 测序, 进行物种鉴定。

1.5 东亚小花蝽对花生蚜消化半衰期测定及田间捕食作用分析

东亚小花蝽对花生蚜消化半衰期测定: 取羽化 2-3 d、未接触花生蚜的东亚小花蝽 2 龄若虫 (共计 200 头, 即每个时间处理 20 头成虫), 单头放入 35 mm 培养皿, 饥饿处理 24 h 后喂食单头 2 龄花生蚜。东亚小花蝽取食完毕的时刻计为 $t=0$ (舍弃 2 h 内未取食完毕的东亚小花蝽), 分别于 0、1、2、4、6、8、16、20、24 和 48 h 取样东亚小花蝽, 样本浸泡于无水乙醇中, -20°C 保存。提取室内收集东亚小花蝽样品的基因组, 验证模板质量后利用 PCR 技术检测并计算东亚小花蝽不同消化时间肠道内花生蚜阳性检出率, 计算东亚小花蝽对花生蚜的消化半衰期。东亚小花蝽样本基因组提取方法如上所述, 花生蚜特异性引物序列及特异检测方法参考鞠倩等 (2020)。

东亚小花蝽对花生蚜的田间捕食作用分析: 田间种群调查结束后, 在花生单作田和花生-玉

米间作田内对东亚小花蝽进行取样, 每个小区田间样本数量 15 头以上, 采集样品数依据天敌发生数量而定。样品采集后立即浸泡于置于冰上的无水乙醇 (分析纯, 99.7%) 中, 带回实验室后 -20°C 冰箱保存, 用于肠道内含物的分子检测。验证 DNA 模板质量后, 利用 PCR 技术检测并计算田间东亚小花蝽样本体内花生蚜阳性检出率, 经过消化半衰期以及田间东亚小花蝽种群数量加权值校正田间花生蚜阳性检出率, 比较不同天敌 (异色瓢虫、龟纹瓢虫和东亚小花蝽) 对花生蚜的捕食作用, 评价田间东亚小花蝽对花生蚜的捕食作用。

1.6 数据统计分析

采用 SPSS 21.0 软件对试验数据进行统计分析。用单因素方差分析法 (One-way ANOVA)、 t 检验法 (t -test) 以及双因素方差分析法 (Two-way ANOVA) 分析不同种植模式、不同取样时间对东亚小花蝽和花生蚜种群密度的影响以及不同时间下东亚小花蝽和花生蚜的益害比。利用 probit 模型得出捕食性天敌肠道内含物猎物 DNA 的消化半衰期曲线, 并用 t 检验法比较分析不同天敌对花生蚜的捕食作用大小。

2 结果与分析

2.1 不同种植模式对东亚小花蝽和花生蚜种群发生动态及其益害比的影响

结合东亚小花蝽和花生蚜两者种群动态分析得知, 花生单作种植模式下, 在整个花生蚜发生期东亚小花蝽与花生蚜的种群密度变化趋势一致 (图 2: A); 花生-玉米间作种植模式下, 东亚小花蝽发生高峰期 (6 月 20 日) 早于花生蚜发生高峰期 (7 月 10 日) (图 2: B)。并且在花生蚜第一次发生高峰期期间 (6 月 20 日前), 与花生单作种植模式相比, 花生-玉米间作种植模式显著提高了东亚小花蝽种群密度。其中, 在花生蚜定殖期 (6 月 10 日前), 相比于花生单作种植模式, 花生-玉米间作种植模式显著提高东亚小花蝽种群密度, 且显著降低花生蚜种群密度 (图 2: B)。

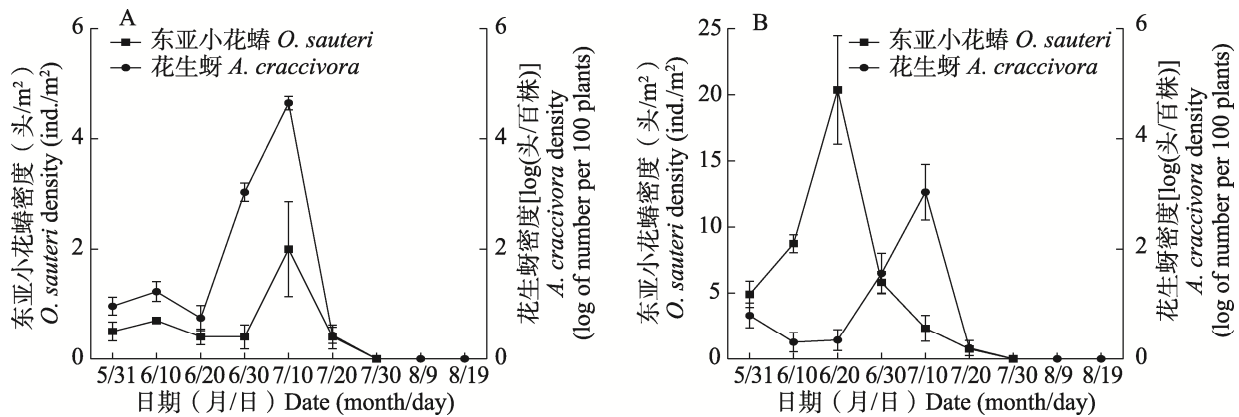


图2 不同种植模式下东亚小花蝽和花生蚜的发生动态

Fig. 2 Population dynamics of *Orius sauteri* and *Aphis craccivora* in different planting patterns

A. 花生单作种植模式; B. 花生-玉米间作种植模式。

A. Peanut monoculture; B. Peanut-maize intercropping.

在整个花生蚜发生期,花生-玉米间作种植模式下益害比显著高于花生单作种植模式 ($t=2.981$, $df=10$, $P=0.014$)。其中,在花生蚜第一次发生高峰期(6月10日)以及东亚小花蝽第一次发生高峰期(6月20日),花生-玉米间作种植模式益害比显著高于花生单作种植模式 ($t=7.103$, $df=4$, $P=0.002$; $t=3.908$, $df=4$, $P=0.017$)。而在其他时间点花生-玉米间作种植模式益害比高于花生单作种植模式,但无显著差异(图3)。

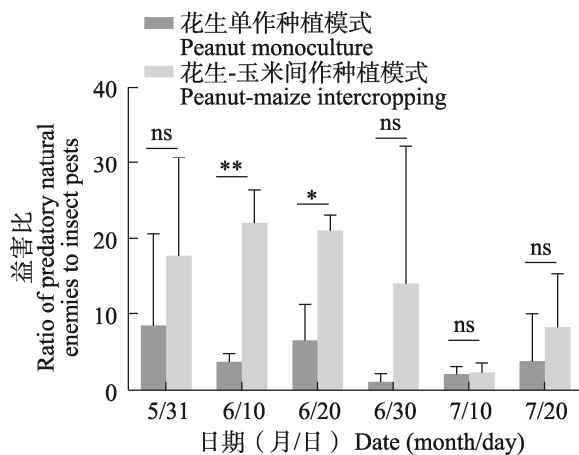


图3 不同种植模式下东亚小花蝽与花生蚜的益害比

Fig. 3 Ratio of predatory natural enemies to insect pests in different planting patterns

ns 表示无显著差异 ($P > 0.05$, 配对 t 检验); 星号表示存在显著差异 (* $P \leq 0.05$, ** $P < 0.01$, 配对 t 检验)。

ns indicates no significant difference ($P > 0.05$, paired t -test); asterisk indicates significant difference

(* $P \leq 0.05$, ** $P < 0.01$, paired t -test).

2.2 花生蚜在东亚小花蝽体内的检测以及消化半衰期测定

以东亚小花蝽样本 DNA 为模板,用东亚小花蝽 16s 特异性引物 PCR 扩增检验 DNA 模板质量。PCR 产物经 1.2% 琼脂糖凝胶电泳检测,结果显示所有样本均可检测到 329 bp 特异性目标片段。将阳性扩增产物送公司测序,测序结果比对均显示为东亚小花蝽 16s DNA,表明基因组提取质量良好,可用于后续肠道内容物检测实验(图4:A)。

以室内各喂养单头花生蚜、且消化时间 $t=0$ h 的东亚小花蝽样本 DNA 为模板,用花生蚜特异性 CO I 引物 PCR 扩增检测东亚小花蝽体内花生蚜 DNA,结果显示所有样本均可检测到 299 bp 特异性目标片段。将阳性扩增产物送公司测序,测序结果比对均显示为花生蚜 CO I 基因。结果表明该分子检测技术可用于直接判断东亚小花蝽对花生蚜的捕食作用(图4:B)。

对东亚小花蝽体内花生蚜随消化时间的阳性检出率分析可知,取食 $t=0$ h,所有试虫体内均能检测到花生蚜 DNA,阳性检出率为 100.0%。其体内花生蚜阳性检出率随消化时间延长而降低。由东亚小花蝽对花生蚜捕食作用的阳性检出率和消化时间的拟合曲线得知,花生蚜在东亚小花蝽体内的消化半衰期为 3.839 h ($R^2=0.971$) (图5)。

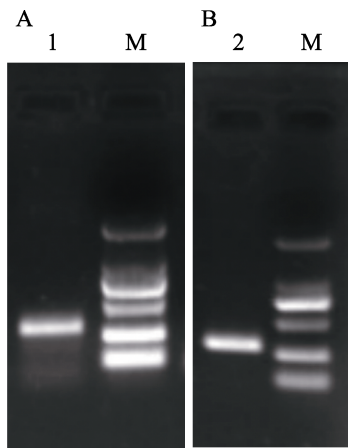


图 4 PCR 扩增产物

Fig. 4 PCR amplification products

A. 东亚小花蝽基因组提取质量验证; B. 东亚小花蝽肠道内含物花生蚜分子检测。M. DL2000 DNA marker;

1-2. 东亚小花蝽 DNA 样本。

A. Quality verification of *O. sauteri* genome; B. The detection of peanut aphid positive for peanut aphid DNA in *O. sauteri* gut content. M: DL2000 DNA marker;

1-2: DNA samples of *O. sauteri*.

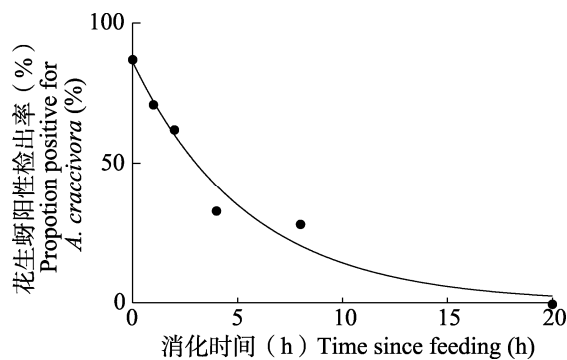


图 5 东亚小花蝽对花生蚜捕食作用的阳性检出率和消化时间的拟合曲线

Fig. 5 The fitted curve of *Aphis craccivora* DNA half-life experiments

2.3 田间东亚小花蝽对花生蚜捕食作用的直接证据及捕食作用评价

田间收集东亚小花蝽样本, 利用花生蚜 *CO I* 特异性引物检测东亚小花蝽体内花生蚜 DNA, 计算不同花生生长期东亚小花蝽对花生蚜的捕食作用。结果表明, 在花生蚜第一次发生高峰期 6 月 10 日, 东亚小花蝽体内花生蚜的阳性检出率为 9.21%, 其他时间花生蚜阳性检出率为 0 (图 6)。

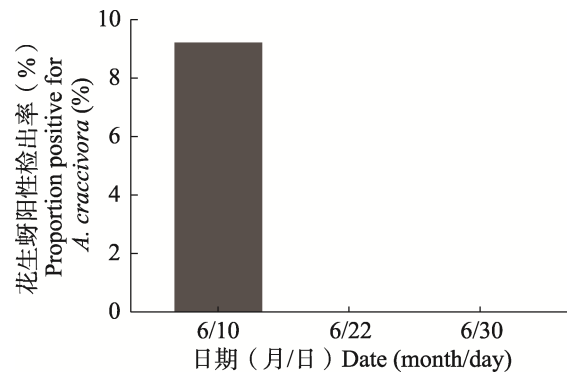


图 6 田间实际条件下东亚小花蝽样本体内花生蚜阳性检出率

Fig. 6 Temporal changes in the frequency of the detection of *Aphis craccivora* adjusted proportion positive for *Aphis craccivora* DNA in *Orius sauteri* gut contents in field

3 讨论

3.1 东亚小花蝽对花生蚜种群动态的控制作用

增加农田植被多样性, 有利于加快自然天敌群落重建速度, 增强天敌对害虫的控制作用 (张文庆等, 1998; 陈学新等, 2014)。同时有研究认为, 在天敌与目标害虫种群初建阶段, 农业生态系统中食物网络构成相对其它时期更为简单, 天敌与目标害虫种群数量呈现出有利于捕食者的较高益害比值 (Landis *et al.*, 2000), 因此, 目标害虫发生初期被认为是抑制害虫爆发的关键时期 (Athey *et al.*, 2016)。针对蚜虫生物防治的这一关键时期进行的研究发现, 采取适当的农场生态系统管理策略, 可在低丰度害虫发生期增加捕食者数量, 从而有效提高害虫的生物防治 (Roubinet *et al.*, 2017; Verschut *et al.*, 2019)。本文中我们通过改变农田景观布局来增加捕食者种群数量, 并在蚜虫定殖期前维持捕食者种群数量, 以实现捕食性天敌对目标害虫的早期捕食控制作用。

田间花生蚜和东亚小花蝽种群数据分析表明, 花生单作种植模式下东亚小花蝽和花生蚜种群密度动态变化均呈双峰型 (6 月 10 日和 7 月 10 日) (Ju *et al.*, 2019; 鞠倩等, 2022), 东亚小花蝽与花生蚜的种群消长趋势相同, 两者之间存在动态跟随现象。而花生-玉米间作种植模式则

在早期控害方面凸显优势,表现为东亚小花蝽的种群发生高峰期(6月20日)提前于花生蚜发生高峰期(7月10日)。与花生单作种植模式相比,在花生蚜第一次发生高峰期期间(6月20日前),花生-玉米间作种植模式显著提高东亚小花蝽种群密度($F_{2,6}=10.07$, $P=0.012$)。在花生蚜定殖期(6月10日前),5月31日和6月10日花生-玉米间作种植模式下东亚小花蝽的种群密度显著高于花生单作种植模式($t=4.387$, $df=6$, $P=0.005$; $t=11.76$, $df=6$, $P<0.0001$),且花生-玉米间作种植模式显著降低花生蚜种群密度($F_{1,20}=3.994$, $P=0.0495$)(Ju *et al.*, 2019; 鞠倩等, 2022)。在第二次花生蚜发生高峰期(7月10日),花生-玉米间作种植模式下花生蚜种群密度相比于花生单作种植模式显著降低(Ju *et al.*, 2019)。我们推测,一方面,由于花生-玉米间作种植模式中功能植物玉米对东亚小花蝽的早期涵养作用,在花生蚜定殖期前吸引并促进东亚小花蝽在花生田旁建立种群。当花生蚜发生时,由于东亚小花蝽在两种生境间的转移扩散作用从而迅速提高相邻花生田中东亚小花蝽的种群密度,并降低花生蚜定殖期花生蚜种群密度;另一方面,由于东亚小花蝽对花生蚜的早期捕食控制作用,相比于花生单作田,显著降低间作田中花生蚜在定殖期的虫口基数,对抑制花生蚜后期的繁殖有重要作用,是花生蚜第二次发生高峰期花生-玉米间作田中花生蚜种群密度显著低于花生单作的重要原因之一。以上结果表明花生-玉米间作种植模式下东亚小花蝽对花生蚜种群的爆发有潜在抑制作用。

3.2 东亚小花蝽与其他天敌瓢虫对花生蚜的协同控害作用

农业集约化生产使得农作物和昆虫生物多样性降低,破坏了农田生态系统的稳定性,导致自然天敌种群下降,农田作物害虫时有爆发(周海波等, 2009)。通过花生-玉米间作种植模式构建无遮蔽的开放农田与高秆作物相嵌的区域性农田景观,使得区域性农田具有一定空间异质性与植物多样性,促进了农田的物种多样性和农田

生态系统的稳定性,提高了自然天敌的控害能力(刘雨芳等, 2019)。但通过作物多样性提高生物多样性以增强农田中自然天敌对害虫的生物防控作用过程是复杂的。故本文进一步利用天敌肠道内含物DNA分子检测的方法获得东亚小花蝽对花生蚜捕食作用的直接证据。结果表明在花生蚜定殖期(6月10日)东亚小花蝽对花生蚜表现出较强的捕食作用,6月10日花生-玉米间作种植模式下花生蚜种群密度显著低于花生单作种植模式(Ju *et al.*, 2019)。以上结果表明东亚小花蝽对花生蚜有早期捕食作用。

在几种捕食性天敌同时存在的农田生态系统中,不同天敌间的捕食控害作用具有较强的互补性(董文霞等, 2013, 2016)。研究表明花生-玉米间作种植模式显著增加3种天敌(异色瓢虫、龟纹瓢虫和东亚小花蝽)的种群数量,并且利用天敌肠道内含物分子标记方法证明3种天敌对花生蚜均有捕食控制作用(Ju *et al.*, 2019; 鞠倩等, 2022)。本研究进一步比较了田间实际条件下不同天敌(异色瓢虫、龟纹瓢虫和东亚小花蝽)对花生蚜的捕食作用大小,并明确三者的控害作用在时间上的互补性。

研究首先利用消化半衰期测定值计算捕食者的重要度加权值,分析3种天敌对花生蚜的消化速率。经试验及数据计算得知,东亚小花蝽的重要度加权值为0.86,小于异色瓢虫(1.00),但大于龟纹瓢虫(0.75),即3种天敌对花生蚜的消化能力为:异色瓢虫>东亚小花蝽>龟纹瓢虫。在后续分析中通过DNA消化半衰期加权值评估捕食者对猎物的消化速率,用以校正田间捕食作用检测结果。在整个花生蚜发生期,东亚小花蝽、异色瓢虫和龟纹瓢虫对花生蚜的捕食存在显著差异($F_{2,45}=16.620$, $P<0.0001$),花生蚜第一次发生高峰期6月10日仅东亚小花蝽体内有花生蚜阳性检出,在此时间之后,天敌瓢虫体内有花生蚜阳性检出(Ju *et al.*, 2019)。在整个花生蚜发生期,东亚小花蝽对花生蚜的捕食作用显著小于异色瓢虫($t=5.002$, $df=30$, $P<0.001$),与龟纹瓢虫无显著差异($t=1.948$, $df=30$, $P=0.061$)。表明在该系统中,东亚小花蝽对花生蚜

的捕食控制作用在时间上与其它两种天敌瓢虫形成时间上的互补, 接力控害。

参考文献 (References)

- Athey KJ, Dreyer J, Kowles KA, Penn HJ, Sitvarin MI, Harwood JD, 2016. Spring forward: Molecular detection of early season predation in agroecosystems. *Food Webs*, 9: 25–31.
- Cai ZP, Zhang DH, Li KF, Peng Y, 2011. Effect of intercropping with cotton and fruit on pest population. *China Cotton*, 38(4): 32–33. [蔡志平, 张栋海, 李克福, 彭延, 2011. 果棉间作对害虫种群数量的影响. 中国棉花, 38(4): 32–33.]
- Cai ZP, Xiao YL, Ouyang F, Ge F, Zhang JP, 2019. Quantitative evaluation of the biological control efficiency of predatory insects based on rubidium marking method. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 56(2): 348–353. [蔡志平, 肖云丽, 欧阳芳, 戈峰, 张建萍, 2019. 定量评价天敌昆虫控害功能的铷元素标记技术. 应用昆虫学报, 56(2): 348–353.]
- Chen XX, Liu YQ, Ren SX, Zhang F, Zhang WQ, Ge F, 2014. Plant-mediated support system for natural enemies of insect pests. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 51(1): 1–12. [陈学新, 刘银泉, 任顺祥, 张帆, 张文庆, 戈峰, 2014. 害虫天敌的植物支持系统. 应用昆虫学报, 51(1): 1–12.]
- Dong WX, Xiao C, Li CY, 2016. Effect of diversified cropping on insect pests and natural enemies in agroecosystems. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 24(4): 435–442. [董文霞, 肖春, 李成云, 2016. 作物多样性种植对农田害虫及天敌的影响. 中国生态农业学报, 24(4): 435–442.]
- Dong WX, Xu N, Xiao C, 2013. The effect of diversified cropping on phytophagous insect behavior. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 50(4): 1133–1140. [董文霞, 徐宁, 肖春, 2013. 作物多样性种植对植食性昆虫行为的影响. 应用昆虫学报, 50(4): 1133–1140.]
- Fan LP, Ouyang F, Su JW, Ge F, 2018. Adaptation of defensive strategies by the pea aphid mediates predation risk from the predatory lady beetle. *Journal of Chemical Ecology*, 44(1): 40–50.
- Gurr GM, Wratten SD, Landis DA, You MS, 2017. Habitat management to suppress pest populations: Progress and prospects. *Annual Review of Entomology*, 62: 91–109.
- Harper GL, King RA, Dodd CS, Harwood JD, Glen DM, Bruford MW, Symondson WOC, 2005. Rapid screening of invertebrate predators for multiple prey DNA targets. *Molecular Ecology*, 14(3): 819–827.
- Huang WM, Zhou XJ, Li C, Liu J, Liao JH, 2021. Effect of intercropping corn on Colorado potato beetle population and natural enemies. *Journal of Environmental Entomology*, 43(3): 723–730. [黄未未, 周晓静, 李超, 刘娟, 廖江花, 2021. 间作玉米对马铃薯甲虫种群及天敌昆虫的影响. 环境昆虫学报, 43(3): 723–730.]
- Ju Q, Ouyang F, Gu SM, Qiao F, Yang QF, Qu MJ, Ge F, 2019. Strip intercropping peanut with maize for peanut aphid biological control and yield enhancement. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 286: 106682.
- Ju Q, Ouyang F, Qiao F, Ge F, 2020. Quantitative evaluation of predation based on molecular analysis of gut-content. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 57(1): 218–225. [鞠倩, 欧阳芳, 乔飞, 戈峰, 2020. 应用肠道内含物定量评价天敌捕食作用的方法. 应用昆虫学报, 57(1): 218–225.]
- Ju Q, Ouyang F, Zhang Q, Ge F, Qu MJ, 2022. Biological control of thrips by peanut-maize strip intercropping. *Journal of Plant Protection*, 49(4): 1194–1200. [鞠倩, 欧阳芳, 张群, 戈峰, 曲明静, 2022. 花生-玉米间作种植模式对蓟马类害虫的控制效果. 植物保护学报, 49(4): 1194–1200.]
- Landis DA, Wratten SD, Gurr GM, 2000. Habitat manipulation to conserve natural enemies of arthropod pests in agriculture. *Annual Review of Entomology*, 45: 175–201.
- Liu B, Lu YH, 2022. Arthropod food web structure and the biocontrol services of natural enemies in agro-ecosystems. *Journal of Plant Protection*, 49(1): 97–109. [刘冰, 陆宴辉, 2022. 农田节肢动物食物网结构与天敌控害功能. 植物保护学报, 49(1): 97–109.]
- Li L, 2016. Intercropping enhances agroecosystem services and functioning: Current knowledge and perspectives. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 24(4): 403–415. [李隆, 2016. 间套作强化农田生态系统服务功能的研究进展与应用展望. 中国生态农业学报, 24(4): 403–415.]
- Li XM, Liu CL, Liu XL, Wang KQ, Wang S, Xia JX, Liu Y, Yang F, Shao TY, Ding JJ, Shi XR, Xu WJ, 2014. Crop diversification as a method of managing the soybean aphid, *Aphis glycines* Matsumura. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 51(2): 406–411. [李新民, 刘春来, 刘兴龙, 王克勤, 王爽, 夏吉星, 刘宇, 杨帆, 邵天玉, 丁俊杰, 时新瑞, 徐伟钧, 2014. 作物多样性对大豆蚜的控蚜效应. 应用昆虫学报, 51(2): 406–411.]
- Liu YF, Yang H, Yang F, Xie MQ, 2019. Ecological regulation effectiveness of habitat heterogeneity on predatory natural enemies and rice pests in rice paddy fields. *Acta Entomologica Sinica*, 62(7): 857–867. [刘雨芳, 杨荷, 阳菲, 谢美琦, 2019. 生境异质度对稻田捕食性天敌及水稻害虫的生态调节有效性. 昆虫学报, 62(7): 857–867.]
- Lu XL, Tang Q, Liang GF, Ding SY, 2015. Plant species diversity of non-agricultural habitats in the lower reaches of the Yellow River

- Plain. *Acta Ecologica Sinica*, 35(5): 1527–1536. [卢训令, 汤茜, 梁国付, 丁圣彦, 2015. 黄河下游平原不同非农生境中植物多样性. *生态学报*, 35(5): 1527–1536.]
- McDaniel SG, Keeley LL, Sterling WL, 1978. Radiolabeling *Heliothis virescens* eggs by ³²P injection of adult females. *Annals of the Entomological Society of America*, 71(3): 432–434.
- Munyanze J, Obrycki JJ, 1998. Searching behavior of *Coleomegilla maculata* larvae feeding on Colorado potato beetle eggs. *Biological Control*, 13(2): 85–90.
- Samuel MAN, Luiz EMR, Frederico SN, 2017. Predatory beetles in cacao agroforestry systems in Brazilian Atlantic forest: A test of the natural enemy hypothesis. *Agroforestry Systems*, 91(1): 201–209.
- Robinson RA, Sutherland WJ, 2002. Post-war changes in arable farming and biodiversity in Great Britain. *Journal of Applied Ecology*, 39(1): 157–176.
- Roubinet E, Birkhofer K, Malsher G, Staudacher K, Ekbom B, Traugott M, Jonsson M, 2017. Diet of generalist predators reflects effects of cropping period and farming system on extra- and intraguild prey. *Ecological Applications*, 27(4): 1167–1177.
- Risch SJ, 1983. Intercropping as cultural pest control: Prospects and limitations. *Environmental Management*, 7(1): 9–14.
- Tscharntke T, Karp DS, Chaplin-Kramer R, Batáry P, DeClerck F, Gratton C, Hunt L, Ives A, Jonsson M, Larsen A, 2016. When natural habitat fails to enhance biological pest control-Five hypotheses. *Biological Conservation*, 204: 449–458.
- Tian YJ, Liang GW, Zeng L, Lu YY, 2012. Influence of intercropping on dynamics of insect pests, natural enemies and the damage of *Ostrinia furnacalis* in sweet corn field. *Journal of Plant Protection*, 39(1): 1–6. [田耀加, 梁广文, 曾玲, 陆永跃, 2012. 间作对甜玉米田主要害虫与天敌动态的影响. *植物保护学报*, 39(1): 1–6.]
- Verschut V, Strandmark A, Esparza-Salas R, Hambäck PA, 2019. Seasonally varying marine influences on the coastal ecosystem detected through molecular gut analysis. *Molecular Ecology*, 28(2): 307–317.
- Xia N, Yang G, You MS, 2015. Regulation of dominant insect pests and natural enemies by intercropping tomato in cauliflower-based fields. *Acta Entomologica Sinica*, 58(4): 391–399. [夏宁, 杨广, 尤民生, 2015. 间作番茄对花椰菜田主要害虫和天敌的调控作用. *昆虫学报*, 58(4): 391–399.]
- Yao FL, You MS, 2017. Regulation of the movements of natural enemy guilds between different habitats in rice-based ecosystems by polycultural manipulation. *Journal of Plant Protection*, 44(6): 958–967. [姚凤奎, 尤民生, 2017. 多样化种植调控稻田天敌功能团在生境间的移动. *植物保护学报*, 44(6): 958–967.]
- Yin Z, Li JP, Dong M, Hou ZR, Sun BB, Guo XH, 2017. Research on predation capacity and preference of *Orius sauteri* against western flower thrips (*Frankliniella occidentalis*), two-spotted spider mite (*Tetranychus urticae*) and peach aphid (*Myzus persicae*). *China Plant Protection*, 37(8): 17–19. [尹哲, 李金萍, 董民, 侯峥嵘, 孙贝贝, 郭喜红, 2017. 东亚小花蝽对西花蓟马、二斑叶螨和桃蚜的捕食能力及捕食选择性研究. *中国植保导刊*, 37(8): 17–19.]
- Zaidi RH, 1999. Can the detection of prey DNA amongst the gut contents of invertebrate predators provide a new technique for quantifying predation in the field? *Molecular Ecology*, 8: 2081–2088.
- Zaidi RH, Jaal Z, Hawkes NJ, Hemingway J, Symondson WO, 2010. Can multiple-copy sequences of prey DNA be detected amongst the gut contents of invertebrate predators? *Molecular Ecology*, 19(12): 2081–2087.
- Zhang WQ, Zhang GR, Gu DX, 1998. Biological control of rice planthopper by habitat manipulation and arthropod predators in dasha township. *Acta Ecologica Sinica*, 18(3): 283–288. [张文庆, 张古忍, 古德祥, 1998. 稻田生境调节和捕食性天敌对稻飞虱的控制作用. *生态学报*, 18(3): 283–288.]
- Zhou HB, Chen JL, Cheng DF, Liu Y, Sun JR, 2009. Effects of wheat-pea intercropping on the population dynamics of *Sitobion avenae* (Homoptera: Aphididae) and its main natural enemies. *Acta Entomologica Sinica*, 52(7): 775–782. [周海波, 陈巨莲, 程登发, 刘勇, 孙京瑞, 2009. 小麦间作豌豆对麦长管蚜及其主要天敌种群动态的影响. *昆虫学报*, 52(7): 775–782.]