



李文婷, 杨韵, 刘明秀, 王燕, 张红梅, 李向永, 刘莹, 尹艳琼, 赵雪晴, 谌爱东, 陈福寿. 基于年龄-阶段两性生命表的大红犀猎蝽对草地贪夜蛾的非消耗性效应分析 [J]. 环境昆虫学报, 2026, 48 (2): 531–540. LI Wen-Ting, YANG Yun, LIU Ming-Xiu, WANG Yan, ZHANG Hong-Mei, LI Xiang-Yong, LIU Ying, YIN Yan-Qiong, ZHAO Xue-Qing, SHEN Ai-Dong, CHEN Fu-Shou. Non-consumptive effects of the predatory *Sycanus falleni* (Hemiptera: Reduviidae) on *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) based on age-stage two-sex life table [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2026, 48 (2): 531–540.

基于年龄-阶段两性生命表的大红犀猎蝽对草地贪夜蛾的非消耗性效应分析

李文婷^{1,2*}, 杨韵^{2*}, 刘明秀², 王燕², 张红梅², 李向永², 刘莹²,
尹艳琼², 赵雪晴², 谌爱东², 陈福寿^{2**}

(1. 昆明学院农学与生命科学院, 昆明 650214; 2. 云南省农业科学院农业环境资源研究所, 云南省农业跨境有害生物绿色防控重点实验室, 农业农村部外来入侵生物防控重点实验室, 昆明 650205)

摘要: 捕食者所引发的非消耗性效应在害虫管理中具有重要应用潜力, 大红犀猎蝽 *Sycanus falleni* 是一种重要的捕食性天敌昆虫, 具有生物防治价值。**【目的】** 为了明确大红犀猎蝽对重大入侵害虫草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 的潜在防控潜能。**【方法】** 本研究在室内进行了大红犀猎蝽对草地贪夜蛾整个发育历期的非消耗性胁迫试验, 并运用年龄-阶段两性生命表进行了系统评估。**【结果】** 结果表明, 在大红犀猎蝽的非消耗性胁迫下, 草地贪夜蛾卵期发育显著减缓, 2龄和5龄幼虫发育显著加快, 雌成虫的产卵前期显著延长、繁殖力降低、存活率下降, 但非消耗性胁迫下草地贪夜蛾的化蛹率、雌雄蛹重、性比不受影响。种群动态预测曲线表明, 在大红犀猎蝽的非消耗性胁迫下, 草地贪夜蛾种群数量的增长速率低于正常生长的种群。此外, 大红犀猎蝽胁迫下草地贪夜蛾的种群参数呈现负面影响, 但总体不显著。**【结论】** 综上, 大红犀猎蝽的非消耗性胁迫能在一定程度上抑制草地贪夜蛾的生长发育过程, 但对草地贪夜蛾的繁殖影响较小, 该研究为田间应用大红犀猎蝽防治草地贪夜蛾提供了理论依据。

关键词: 草地贪夜蛾; 大红犀猎蝽; 非消耗性胁迫; 年龄-阶段两性生命表

中图分类号: Q968.1; S476

文献标识码: A

文章编号: 1674-0858 (2026) 02-0531-10

Non-consumptive effects of the predatory *Sycanus falleni* (Hemiptera: Reduviidae) on *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) based on age-stage two-sex life table

LI Wen-Ting^{1,2*}, YANG Yun^{2*}, LIU Ming-Xiu², WANG Yan², ZHANG Hong-Mei², LI Xiang-Yong², LIU Ying², YIN Yan-Qiong², ZHAO Xue-Qing², SHEN Ai-Dong², CHEN Fu-Shou^{2**} (1. School of Agronomy and Life Sciences, Kunming University, Kunming 650214, China; 2. Yunnan Key Laboratory of Green Prevention and Control of Agricultural Transboundary Pests, Key Laboratory for Prevention and Control of Invasive Alien Species, Ministry of Agriculture and Rural Affairs Pests, Institute of Agriculture Environment and Resources, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650205, China)

Abstract: Non-consumptive effects induced by predators have significant potential applications in pest

基金项目: 云南省基础研究专项 (202201AS070067); 云南省农业联合专项 (202301BD070001-045); 云南省农业联合专项 (202301BD070001-056)

*共同第一作者: 李文婷, 女, 硕士研究生, 主要研究方向为天敌生防潜力研究, E-mail: ll010026wt@163.com; 杨韵, 女, 硕士, 研究实习员, 主要研究方向为害虫综合治理研究, E-mail: y_ici9@163.com

**通讯作者 Author for correspondence: 陈福寿, 男, 硕士, 研究员, 主要研究方向为害虫综合治理研究, E-mail: chenfs36@163.com

收稿日期 Received: 2025-07-19; 修回日期 Revision received: 2026-01-07; 接受日期 Accepted: 2026-01-13

management. *Sycanus falleni* is an important predatory natural enemy with biological control value. **【Aim】** This study aimed to elucidate the potential impacts of *S. falleni* on the major invasive pest *Spodoptera frugiperda*. **【Methods】** Laboratory experiments were conducted to investigate the non-consumptive effects of *S. falleni* on the whole developmental period of *S. frugiperda*. A systematic evaluation was performed using the age-stage two-sex life table. **【Results】** The results showed that the egg period of *S. frugiperda* was significantly prolonged, while the development of 2nd and 5th instar larvae was significantly accelerated under the non-consumptive stress of *S. falleni*. The preoviposition period of adult females was significantly prolonged, with reduced fecundity and survival rate, although the pupation rate, weight of male and female pupae, and sex ratio of *S. frugiperda* were not affected by the non-consumptive stress. Population prediction curves showed that the population growth rate of *S. frugiperda* under the non-consumptive stress of *S. falleni* was lower than that of the normal-growing population. In addition, the population parameters of *S. frugiperda* under the non-consumptive stress of *S. falleni* showed negative trends, although these were not significant overall. **【Conclusion】** In conclusion, the non-consumptive effects of *S. falleni* can inhibit the growth and development of *S. frugiperda* to some extent, but have a lesser impact on the fecundity of *S. frugiperda*. This study provides a theoretical basis for the field application of *S. falleni* to controlling *S. frugiperda*.

Key words: *Spodoptera frugiperda*; *Sycanus falleni*; non-consumptive effects; age-stage two-sex life table

草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 属鳞翅目 Lepidoptera 夜蛾科 Noctuidae 灰翅夜蛾属 *Spodoptera*, 是全球预警的跨国境重大迁飞性害虫 (吴孔明, 2020)。该虫于 2018 年 12 月 11 日从缅甸迁入中国, 到 2019 年 10 月已扩散至我国 26 个省 (市、自治区) (Sisodiya *et al.*, 2018; Sun *et al.*, 2019; 姜玉英等, 2019), 严重为害玉米、高粱、甘蔗等农作物, 对我国粮食生产和农业产业发展构成了巨大威胁 (岳阳等, 2025)。由于该虫长期持续侵入和大范围发生情况下多采用化学防治进行防控, 但长期不科学滥用农药, 使得该虫已对有机磷类、氨基甲酸酯类和菊酯类等多种传统化学药剂产生抗性, 且抗药种类和水平还在不断增加 (杨普云和常雪艳, 2019; 陈慧淋等, 2025)。为了降低草地贪夜蛾的抗药性和化学防治带来的环境污染问题, 采用天敌昆虫对草地贪夜蛾进行生物防治是一项有效的措施 (刘博等, 2022)。

捕食性天敌对猎物的作用往往是直接取食的消耗作用与捕食风险引起的非消耗作用的综合体现 (熊晓菲, 2015)。捕食性天敌对猎物的非消耗性作用主要是不与猎物直接接触, 仅通过其存在的信号诱使猎物发生防御反应 (李燕平和戈峰, 2010)。猎物自身具有嗅觉、视觉、听觉等多重感知系统, 特别是嗅觉能感应外部环境中的化学信号变化, 并据此调节其行为 (Leal, 2013; 蒋月丽

等, 2023)。当猎物感知到天敌存在时, 为躲避天敌捕食, 害虫行为和形态可能会发生变化 (Alomar and Alto, 2021; Lan *et al.*, 2022), 相应的, 天敌的存在也能对害虫自身的生活史、生理生化和适应性造成干扰 (Elliott *et al.*, 2016; Sheriff *et al.*, 2020; Sun and Bai, 2020)。在面临普通长翼蝠 *Miniopterus fuliginosus* 和中华菊头蝠 *Rhinolophus sinicus* 高捕食风险时, 棉铃虫 *Helicoverpa armigera* 整个生命周期活动均能受到影响, 具体表现为: 成虫昼夜活动显著减少、幼虫发育速率加快, 但其幼虫体重、成虫繁殖力、整体适应性均表现下降趋势, 其能量更多表现在应激反应而非生长 (Liu *et al.*, 2024)。草地贪夜蛾在受到入侵地蝙蝠超声胁迫后, 表现为飞行活动显著降低, 摄食减少, 在转录水平上, 与各种代谢过程和生物合成过程相关的基因表达显著降低 (石林云等, 2024)。由此可以看出, 害虫面对天敌的非消耗效应可能演化出某种补偿措施来应对。草地贪夜蛾主要取食玉米的叶片、茎秆和雌穗, 田间取食行为使其长期暴露于天敌的选择压力之下 (张雅倩等, 2024)。捕食性蟋作为防治草地贪夜蛾的重要天敌类群, 在我国广泛分布, 能通过口器快速麻痹猎物, 已成为生物防治的重要资源 (唐艺婷等, 2019; 孙滢琳等, 2025)。

大红犀猎蟋 *Sycanus falleni* 属半翅目 Hemiptera

猎蝽科 Reduviidae 犀猎蝽属 *Sycanus*，为不完全变态昆虫，发育阶段历经卵、若虫（1~5龄）和成虫3个时期，广泛分布于我国广西、广东、云南等省区（侯峥嵘等，2020；Truong *et al.*，2020）。研究表明大红犀猎蝽可捕食小菜蛾 *Plutella xylostella*、斜纹夜蛾 *Spodoptera litura*、甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua*、菜粉蝶 *Pieris rapae* 等鳞翅目害虫，也可捕食鞘翅目、双翅目等害虫，在害虫生物防治方面具有极大潜力（Sahayaraj and Balasubramanian，2016）。作为一种草地贪夜蛾的捕食性天敌昆虫，研究表明大红犀猎蝽3龄若虫、雌成虫和雄成虫对草地贪夜蛾3龄幼虫具有较好的捕食消耗作用，且其捕食功能反应均符合 Holling II 模型，其对草地贪夜蛾3龄幼虫的理论日最大捕食量分别为4.049头、47.619头和43.478头（侯峥嵘等，2020）。基于此，阐明大红犀猎蝽对草地贪夜蛾的非消耗性效应，对全面评价大红犀猎蝽的捕食能力至关重要。

本研究通过构建年龄-阶段两性生命表，研究大红犀猎蝽非消耗性胁迫对草地贪夜蛾生长发育及繁殖能力等生命表参数的影响，进一步全面评价大红犀猎蝽的控害潜能，为后续研究大红犀猎蝽在玉米田间的示范应用提供依据，也为草地贪夜蛾的可持续防控提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 供试虫源和植物

草地贪夜蛾：云南省农科院环资所昆虫研究室在室内连续培养20代以上。在室内条件（光周期14 L : 10 D，温度 $(25 \pm 3)^\circ\text{C}$ ，相对湿度 $(65 \pm 5)\%$ ）下进行饲养，幼虫饲养在塑料养虫盒（直径 \times 高=10 cm \times 8 cm）内，参考陶旋等（2024）的人工饲料配方饲喂幼虫。成虫饲养在120目养虫笼（长 \times 宽 \times 高=40 cm \times 40 cm \times 40 cm）内，笼中提供盆栽玉米苗供雌成虫产卵，小号塑料培养皿（直径 \times 高=9 cm \times 1.5 cm）内放入沾有10%蜂蜜水的脱脂棉做为成虫食物来源。

大红犀猎蝽：采集于云南省红河州金平县（N: 22.86；E: 103.635）的柑橘园中，在室内连续培养5代以上获得稳定种群。室内条件为：光周期14 L : 10 D，温度 $(25 \pm 3)^\circ\text{C}$ ，相对湿度 $(65 \pm 5)\%$ ，以大蜡螟 *Galleria mellonella* 幼虫进行饲

养，挑选羽化后3~5 d内的大红犀猎蝽雌、雄成虫进行试验。

玉米叶片：玉米品种为太阳花10号，采用盆栽在室内种植，种植土壤为基质：有机肥：土壤=1 : 1 : 1，待玉米发育到3叶期时取玉米叶片用以试验。

1.2 试验方法

草地贪夜蛾的非消耗效应试验参考侯峥嵘等（2020）和张雅倩等（2024）方法。将新鲜、无虫害的玉米苗放入1.1饲养条件下的养虫笼内，收集同一时间、大小相似的两块草地贪夜蛾卵块，分别放入塑料养虫盒（直径 \times 高=10 cm \times 8 cm）中，用120目纱布进行封口，保持良好透气性，并将养虫盒分别转移至处理组和对照组的养虫笼（长 \times 宽 \times 高=40 cm \times 40 cm \times 40 cm）中，每天早（8:00）晚（20:00）各观察1次，记录卵孵化历期及存活情况。待卵孵化后，将初孵幼虫接入盛放有新鲜玉米苗的灭菌玻璃试管（直径 \times 高=30 mm \times 100 mm），用120目纱网封口，每个试管接入草地贪夜蛾初孵幼虫1头，进行单头饲养，每个组共计60管。每日更换试管中的玉米苗和清理粪便，并记录草地贪夜蛾幼虫发育情况；待草地贪夜蛾幼虫化蛹后，记录化蛹率，在化蛹当天称量蛹重并记录性别；草地贪夜蛾羽化后将单头雌、雄成虫配对放入试管（直径 \times 高=30 mm \times 100 mm）中，用沾有10%蜂蜜水的脱脂棉球为成虫提供养分，用新鲜玉米叶供其产卵，每日更换脱脂棉球和叶片，并记录所有成虫的产卵量和存活情况，直至死亡。

其中，处理组：投放10头大红犀猎蝽成虫（雌雄比为1 : 1）于养虫笼中，并将草地贪夜蛾卵或接有单头草地贪夜蛾初孵幼虫的60管玻璃试管平铺在同一养虫笼底部，使其能从视觉、嗅觉感受天敌存在，形成非消耗性捕食胁迫作用环境，作为天敌胁迫处理组，在试验过程中，每3 d将5头大蜡螟幼虫饲喂给大红犀猎蝽。对照组：将草地贪夜蛾卵或接有单头草地贪夜蛾初孵幼虫的60管玻璃试管平铺在同一养虫笼底部，不投放大红犀猎蝽成虫，作为对照组。处理组和对照组的养虫笼分别放置于不同人工培养箱（光周期16 L : 8 D，温度 $(28 \pm 1)^\circ\text{C}$ ，相对湿度70%）内进行观察（熊晓菲，2015）。

1.3 种群生命表构建

利用年龄-阶段两性生命表软件 TWOSEX-

MSChart-2022分析室内条件下草地贪夜蛾种群生长发育、存活及产卵情况等原始数据 (Chi *et al.*, 2022a; Chi *et al.*, 2022b)。年龄-阶段特定存活率 (Age-stage specific rate, S_{xj}) 表示个体由卵发育到年龄 x 阶段 j 的概率, 由每日记录的存活数计算得到; 雌虫年龄阶段生殖力 (Age-stage fecundity, f_{xj}) 表示雌成虫在年龄 x 阶段 j 的产卵量, 由每日记录的产卵量计算得到; 其中 x 代表年龄, j 代表阶段, k 代表龄期数。按照下列公式计算种群生命表参数: 净增殖率 (R_0)、内禀增长率 (r)、世代时间 (T)、周限增长率 (λ)。

$$\text{净增殖率 } (R_0) = \sum_{x=0}^{\infty} l_x m_x$$

$$\text{内禀增长率 } (r): \sum_{x=0}^{\infty} e^{-r(x+1)} l_x m_x = 1$$

$$\text{平均世代时间 } (T) = \frac{\ln R_0}{r}$$

$$\text{周限增长率 } (\lambda) = e^r$$

上述公式中, l_x 为种群年龄-特征存活率, 指从卵发育至年龄 x 的概率, 由 $l_x = \sum_{j=1}^k e_{xj}$ 计算得到; m_x 为种群年龄-特征繁殖力, 指整个种群在年龄 x 时的平均产卵数量, 由 $m_x = \frac{\sum_{j=1}^k S_{xj} f_{xj}}{\sum_{j=1}^k S_{xj}}$ 计算得到; 种群年龄阶段-特征繁殖值 $l_x m_x$ 表示为 l_x 和 m_x 的乘积。利用TIMING-MSChart程序预测未来90 d内草地贪夜蛾在供试条件下的种群增长率和年龄阶段结构。

1.4 数据分析

通过Bootstrap方法将种群生命表参数进行重复取样100 000次, 计算各组中草地贪夜蛾各虫态发育历期、寿命、繁殖力、化蛹率、性比和种群参数的平均值和标准误, 应用TWOSEX-MSChart程序里的Paired bootstrap test对生命表数据进行差异显著性检验, 并用GraphPad Prism 9.3.1作图。草地贪夜蛾的雌、雄蛹重采用Excel 2019和SPSS 25.0进行数据处理分析, 利用独立样本 t -检验差异显著性进行分析 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 大红犀猎蝽非消耗性胁迫对草地贪夜蛾生长发育和繁殖的影响

在大红犀猎蝽非消耗性胁迫下草地贪夜蛾1龄

($P = 0.24$)、3龄 ($P = 0.09$)、4龄 ($P = 0.52$)、6龄 ($P = 0.29$) 幼虫和蛹期 ($P = 0.26$) 及雌成虫 ($P = 0.08$) 与雄成虫 ($P = 0.18$) 发育历期无显著差异, 卵期发育显著减缓 ($P = 0$), 2龄 ($P = 0.03$) 及5龄 ($P = 0.0002$) 幼虫发育历期显著延长, 大红犀猎蝽非消耗性胁迫下草地贪夜蛾的产卵前期显著长于对照组 ($P = 0.0076$), 胁迫下的平均单雌产卵量与对照组差异不显著 ($P = 0.13$) (表1)。不同处理下草地贪夜蛾雄蛹 ($P = 0.32$) 与雌蛹 ($P = 0.74$) 重量无显著性差异 (表2)。

表1 大红犀猎蝽非消耗性胁迫下草地贪夜蛾各发育阶段的历期

Table 1 Duration of each developmental stage of *Spodoptera frugiperda* under non-consumptive stress from *Sycanus falleni*

发育阶段 Development stage	发育历期 (d) Development duration	
	处理 Treatment	对照 CK
卵* Egg	3.00 ± 0.00	2.00 ± 0.00
1龄幼虫 1 st instar larva	2.05 ± 0.03	2.12 ± 0.04
2龄幼虫* 2 nd instar larva	2.65 ± 0.13	3.07 ± 0.14
3龄幼虫 3 rd instar larva	1.98 ± 0.02	2.10 ± 0.07
4龄幼虫 4 th instar larva	2.08 ± 0.40	2.16 ± 0.10
5龄幼虫* 5 th instar larva	2.16 ± 0.50	2.79 ± 0.15
6龄幼虫 6 th instar larva	3.75 ± 0.14	4.00 ± 0.20
蛹 Pupa	8.22 ± 0.12	8.40 ± 0.11
产卵前期* (d) Adult preoviposition period	5.53 ± 0.62	3.63 ± 0.29
总产卵前期 (d) Total preoviposition period	30.41 ± 0.72	29.58 ± 0.39
雄成虫 Male	11.52 ± 0.59	10.34 ± 0.65
雌成虫 Female	14.67 ± 0.77	12.83 ± 0.71
卵-成虫 Egg-adult	25.67 ± 20	26.76 ± 0.21
平均单雌产卵量 (粒) Fecundity (eggs)	1 112.54 ± 111.75	851.68 ± 131.22

注: 表中数据为平均数±标准误。同行*号表示经Paired bootstrap test检验在 $P < 0.05$ 水平差异显著。Note: Data were the mean ± SE. '*' in the same row indicated significant differences at the $P < 0.05$ level by the paired bootstrap test.

表2 大红犀猎蝽非消耗性胁迫下草地贪夜蛾蛹的相关参数

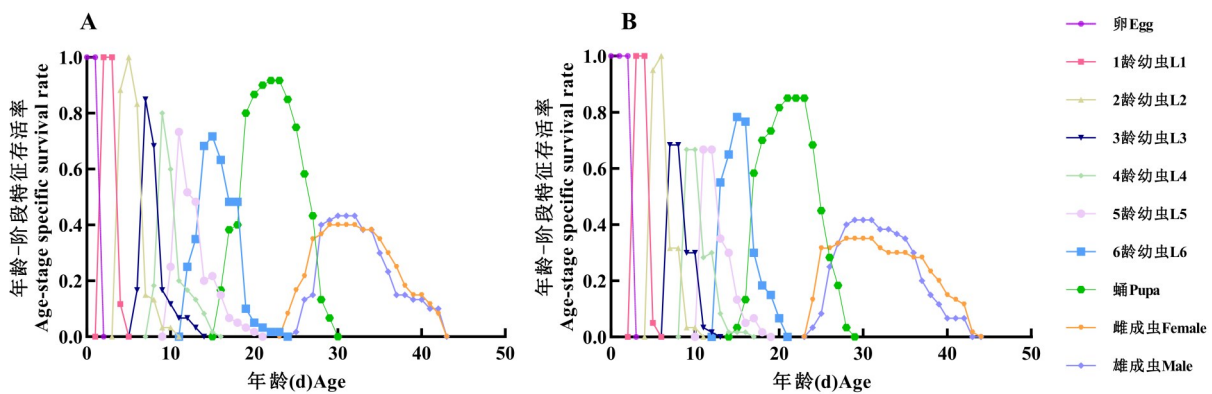
Table 2 Parameters of *Spodoptera frugiperda* pupae under non-consumptive stress from *Sycanus falleni*

组 Group	蛹重 (mg) Weight of pupa		化蛹率 (%) Pupation rate	性比 Sex ratio
	雌 Female	雄 Male		
处理 Treatment	158.78 ± 19.04	158.51 ± 18.80	90.19	0.46
对照 CK	160.93 ± 23.64	162.71 ± 23.51	89.29	0.48

注：表中数据为平均数±标准误。表中性比为雌成虫数目占成虫总数目的比值。Note: Data were mean ± SE. The sex ratio in the table was the ratio of the number of female adults to the total number of adults.

2.2 大红犀猎蝽非消耗性胁迫对草地贪夜蛾各阶段存活率的影响

年龄-阶段特征存活率 (S_{xj}) 表示个体从卵发育至年龄 x 和阶段 j 的概率，大红犀猎蝽非消耗性胁迫下草地贪夜蛾的年龄-阶段特征存活率曲线如图1，大红犀猎蝽非消耗性胁迫下个体发育至成虫的比例为0.76 (图1-B)，低于对照组的0.83 (图1-A)。存活率曲线存在重叠，表明草地贪夜蛾各个阶段发育速率存在差异，且在同一时期会出现不同虫态，虽然大红犀猎蝽不会对草地贪夜蛾的龄期重叠现象产生干扰，但会对各阶段的存活率造成影响，大红犀猎蝽非消耗性胁迫下草地贪夜蛾雌成虫前期的存活率为0.35 (图1-B)，低于对照组的0.40 (图1-A)。

图1 大红犀猎蝽非消耗性胁迫下草地贪夜蛾的年龄-阶段特征存活率 (S_{xj})Fig. 1 Age-stage specific survival rate (S_{xj}) of *Spodoptera frugiperda* under non-consumptive stress from *Sycanus falleni*

注：A，对照组；B，处理组。下同。Note: A, Control group; B, Treatment group. The same as below.

2.3 大红犀猎蝽非消耗性胁迫对草地贪夜蛾种群存活率和繁殖力的影响

年龄-阶段特征繁殖力曲线由种群年龄-特征存活率 (l_x)、种群年龄-特征繁殖力 (m_x)、雌成虫年龄-阶段特征繁殖力 (f_x) 和年龄-特征净生育价值 ($l_x m_x$) 组成 (图2)。通过 l_x 曲线发现：对照组曲线下降比较平缓，而处理组下降幅度较大，处理组 (图2-B) 和对照组 (图2-A) 的种群年龄-特征存活率分别在第17天和第27天开始大幅下降，分别到第44天和第43天存活率为0。通过 m_x 曲线发现：大红犀猎蝽非消耗性胁迫下种群年龄-特征繁殖力峰值最高为78.98，低于对照组的107.44。雌成虫繁殖力曲线的峰值出现在第30天，为173.00，低于对照组的223.83。此外，大红犀猎蝽非消耗性胁迫下雌成虫的繁殖力曲线出现5个高

峰，这表明该处理中雌成虫的产卵分布并不集中，成虫个体之间差异较大。

2.4 大红犀猎蝽非消耗性胁迫对草地贪夜蛾寿命期望值的影响

年龄-阶段特征期望寿命 (e_{xj}) 表示个体年龄 x 和阶段 j 时的预期存活时间，大红犀猎蝽非消耗性胁迫下草地贪夜蛾的年龄-阶段特征期望寿命如图3，草地贪夜蛾寿命期望随着年龄的增长逐渐下降。在大红犀猎蝽胁迫下草地贪夜蛾4龄和5龄幼虫的寿命期望值 (图3-B) 相比于对照组 (图3-A) 有提前下降的趋势。

2.5 大红犀猎蝽非消耗性胁迫对草地贪夜蛾繁殖值的影响

种群年龄-阶段特征繁殖值 (v_{xj}) 表示个体在年龄 x 和阶段 j 时对未来种群繁殖的贡献，卵期草

地贪夜蛾的年龄-阶段特征繁殖值如图4, 不同处理下种群的年龄-阶段特征繁殖值在雌成虫开始产卵后均出现显著的增加。草地贪夜蛾种群繁殖值

分别在 24~30 d、24~38 d 出现增长, 大红犀猎蝽非消耗性胁迫下草地贪夜蛾的最大繁殖值为 495.84 (图4-B), 低于对照组的 657.03 (图4-A)。

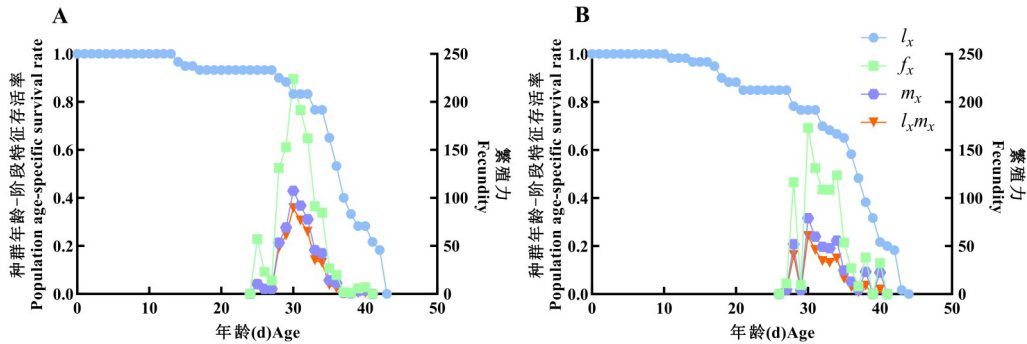


图2 大红犀猎蝽非消耗性胁迫下草地贪夜蛾的种群年龄-特征存活率 (l_x)、雌虫年龄-特征繁殖力 (f_x)、种群年龄-特征繁殖力 (m_x) 和种群年龄-特征繁殖值 ($l_x m_x$)

Fig. 2 Age-specific survival rate (l_x), female age-specific fecundity (f_x), age-specific fecundity of total population (m_x), and age-specific maternity ($l_x m_x$) of *Spodoptera frugiperda* under non-consumptive stress from *Sycanus falleni*

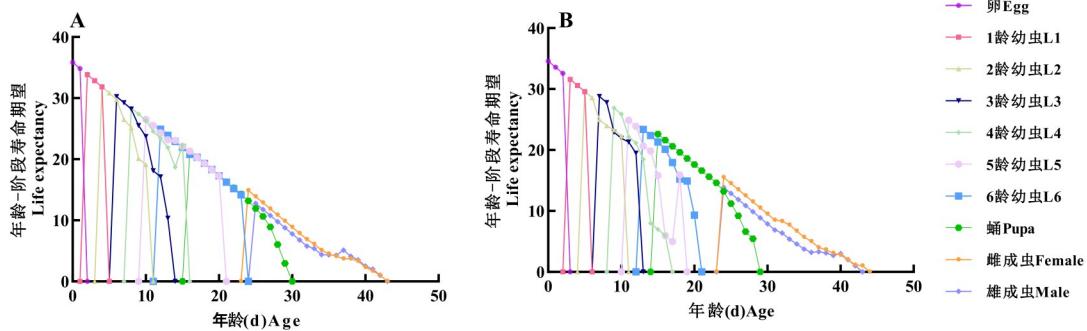


图3 大红犀猎蝽非消耗性胁迫下草地贪夜蛾的年龄-阶段特征寿命期望 (e_{xj})

Fig. 3 Age-stage specific life expectancy (e_{xj}) of *Spodoptera frugiperda* under non-consumptive stress from *Sycanus falleni*

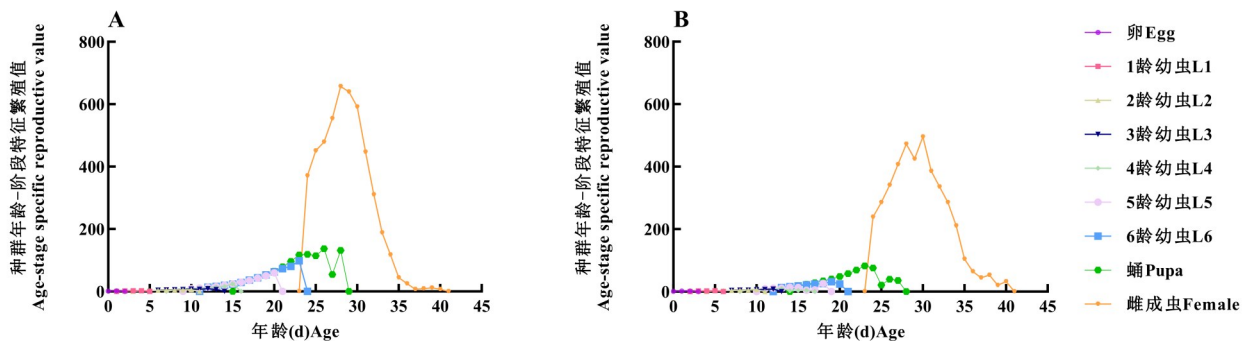


图4 大红犀猎蝽非消耗性胁迫下草地贪夜蛾的种群年龄-阶段特征繁殖值 (v_{xj})

Fig. 4 Age-stage specific reproductive value (v_{xj}) of *Spodoptera frugiperda* under non-consumptive stress from *Sycanus falleni*

2.6 大红犀猎蝽非消耗性胁迫下草地贪夜蛾种群动态预测

本试验在大红犀猎蝽非消耗性胁迫下以草地贪夜蛾个体的生长发育和繁殖参数构建年龄-阶段两性生命表, 以此预测了草地贪夜蛾在未来 90 d

种群的增长情况 (图5), 揭示大红犀猎蝽非消耗性胁迫对草地贪夜蛾种群生长过程中种群数量和阶段结构的影响。预测结果表明, 大红犀猎蝽的非消耗性胁迫下种群第4代卵粒数量约为 6.2 个数量单位 (图5-B), 对照组种群第4代卵粒数量约

为7.8个数量单位（图5-A），表明大红犀猎蝽的非消耗性胁迫对草地贪夜蛾种群未来90天的增长起

到减缓作用。

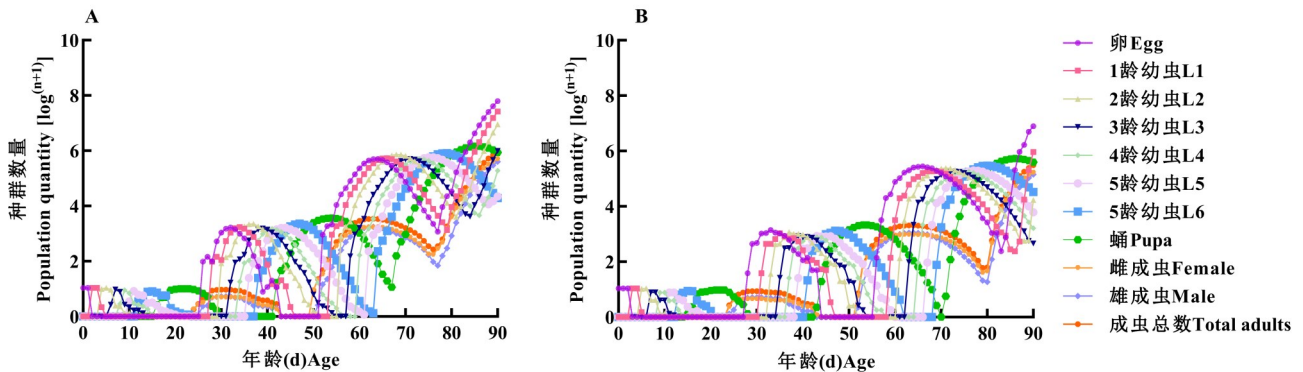


图5 大红犀猎蝽非消耗性胁迫下未来90 d草地贪夜蛾种群增长潜力预测

Fig. 5 Projection of population growth potential of *Spodoptera frugiperda* pupa under non-consumptive stress from *Sycanus falleni* over 90 d

2.7 大红犀猎蝽非消耗性胁迫对草地贪夜蛾后代种群参数的影响

大红犀猎蝽非消耗性胁迫下草地贪夜蛾的净

增殖率 ($P = 0.18$)、内禀增长率 ($P = 0.09$)、平均世代周期 ($P = 0.13$) 和周限增长率 ($P = 0.09$) 与对照组均无显著性差异 (表3)。

表3 大红犀猎蝽非消耗性胁迫下草地贪夜蛾的种群参数

Table 3 Population parameters of *Spodoptera frugiperda* under non-consumptive stress from *Sycanus falleni*

组 Group	净增殖率 R_0 Net reproductive rate	内禀增长率 r (d^{-1}) Intrinsic rate of increase	平均世代周期 T (d) Mean generation time	周限增长率 λ (d^{-1}) Finite rate of increase
处理 Treatment	298.23 ± 69.32	0.18 ± 0.01	32.18 ± 0.47	1.19 ± 0.01
对照 CK	445.02 ± 83.22	0.20 ± 0.01	31.21 ± 0.43	1.22 ± 0.01

注：表中数据为平均数±标准误。同列数据经 Paired bootstrap test 检验无显著性差异 ($P < 0.05$)。Note: Data were the mean ± SE. Data in the same column indicated no significant differences by the paired bootstrap test ($P < 0.05$).

3 结论与讨论

天敌昆虫对害虫的控制作用不仅局限于捕食或寄生作用，在天敌捕食或寄生的过程中，其他未被捕食或寄生的害虫同样会受到天敌的威慑而被胁迫，从而在生长、发育、繁殖等方面受到影响，产生天敌昆虫对害虫的非消耗性胁迫作用（李姣等，2014）。本研究结果表明，在大红犀猎蝽非消耗性胁迫下，草地贪夜蛾卵期发育时间延长。天敌的非消耗效应可能对卵、幼虫和成虫阶段的猎物性状产生不同影响，该效应能对猎物的卵发育时间产生显著影响，并且这种影响会延续到幼虫和成虫阶段（Supekar and Gramapurohit, 2024; Sniegula *et al.*, 2025）。豆娘 *Ischnura elegans* 卵暴露于入侵性天敌螯虾 *Pacifastacus leniusculus* 的捕食风险时，发育明显延迟，且在慢性暴露（干

扰卵和幼虫阶段）下比急性暴露（仅干扰卵阶段）更明显（Amer *et al.*, 2024）。由此推测，草地贪夜蛾卵可能会被天敌的非消耗性胁迫所影响。

在大红犀猎蝽非消耗性胁迫下，草地贪夜蛾2龄和5龄幼虫发育历期明显缩短，表明草地贪夜蛾幼虫在大红犀猎蝽非消耗性胁迫下采取的防御策略为：加快幼虫发育速度，避免处在天敌易捕食的虫态，以应对被天敌捕食的风险（张雅倩等，2024）。这种防御机制在烟草天蛾 *Manduca sexta* 上也有所体现，有研究发现烟草天蛾幼虫在捕食风险胁迫下，幼虫完成第2龄期的时间从对照组的7.5 d缩短到4.5 d（Thaler *et al.*, 2012）。还有研究发现，在与本研究试验设计的相同胁迫方法下，棉铃虫在被异色瓢虫 *Harmonia axyridis* 的非消耗性胁迫后，棉铃虫幼虫的发育历期比对照组显著缩短（熊晓菲，2015）。草地贪夜蛾2龄幼虫属于该

虫通过吐丝扩散到其他植株后的取食阶段，而5龄幼虫则是进入暴食期的阶段，故这两个重要龄期受到胁迫的影响相比于其他龄期可能会更大。Fan等(2024a)研究发现，在异色瓢虫的非消耗性胁迫下，草地贪夜蛾1~3龄幼虫和蛹发育历期显著延长(Fan *et al.*, 2024a)，与本试验的研究结果相反。本试验胁迫的是草地贪夜蛾的整个发育历期，而上述试验仅胁迫草地贪夜蛾1~3龄幼虫，可能是因为天敌胁迫时间不同而对猎物的干扰程度不同，尽管草地贪夜蛾幼虫嗅觉系统和嗅觉受体相对于成虫来说较为简单，幼虫仍能利用嗅觉受体应对生存挑战(Wang *et al.*, 2024)，两个试验中草地贪夜蛾均能从视觉、嗅觉两方面受到胁迫，但干扰程度不同，且两个试验所采用的胁迫方法不同，上述试验的方法是将天敌和猎物放入一个双层笼的装置中，用尼龙网将天敌和猎物隔开避免直接接触，与本试验的将猎物放入玻璃管中与天敌隔开的方法不一样，故草地贪夜蛾的发育历期在不同天敌非消耗性胁迫下得出的结果不一致。

大红犀猎蝽非消耗性胁迫下，草地贪夜蛾成虫产卵前期显著延长，种群动态预测结果显示草地贪夜蛾种群年龄-特征繁殖力峰值和繁殖力曲线的峰值以及繁殖值下降，种群数量的增长要低于正常生长的种群，个体发育至成虫的比例和雌成虫的存活率下降，表明成虫也受到非消耗性胁迫的影响。Fan等(2024b)研究发现草地贪夜蛾成虫在异色瓢虫的非消耗性胁迫下产卵量减少，蜕皮激素(ECR)、保幼激素(JH)和卵黄原蛋白(VTG)的含量显著降低，这些激素的变化直接影响了草地贪夜蛾的繁殖过程，导致其繁殖能力下降，说明天敌昆虫的非消耗性胁迫可以通过使害虫繁殖力降低从而起到对害虫的抑制作用。还有研究表明，黄足肥螋 *Doru luteipes* 的存在对草地贪夜蛾在玉米植株上的产卵行为产生负面影响，导致产下的卵粒数显著减少(Rodrigues *et al.*, 2024)。由此推断，面对大红犀猎蝽非消耗性胁迫，草地贪夜蛾成虫采取的防御策略为：通过延迟繁殖和降低成虫的繁殖力减少其后代数量，后续可结合转录组学和代谢组学分析草地贪夜蛾在天敌非消耗效应下的生理变化。

然而，本试验仅研究了天敌的非消耗性胁迫这一单一影响因素对草地贪夜蛾的生长发育影响，在田间环境中，影响草地贪夜蛾生长发育繁殖的

因素往往还包括温度(万鹏等, 2023)，湿度(闫三强等, 2022；张翠翠等, 2023)及光照(孟令贺等, 2022)的变化、作物的品种抗性(周晓娟等, 2022)以及其他天敌(魏蕾等, 2025)的存在等。后续可结合非消耗性胁迫下草地贪夜蛾的取食量来进一步研究在消耗性胁迫下草地贪夜蛾的防御策略和机制。

致谢：感谢中国农业大学彩万志教授对大红犀猎蝽种类鉴定提供的帮助。

参考文献 (References)

- Alomar AA, Alto BW. Mosquito responses to lethal and nonlethal effects of predation and an insect growth regulator [J]. *Ecosphere*, 2021, 12 (3): e03452.
- Amer NR, Stoks R, Antol A, *et al.* Microgeographic differentiation in thermal and antipredator responses and their carry-over effects across life stages in a damselfly [J]. *PLoS ONE*, 2024, 19 (2): e0295707.
- Chen H, Wang YH, MA Yb, *et al.* Migration routes and source population of migratory *Spodoptera frugiperda* in southern Yunnan [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2023, 60 (4): 1052-1061. [陈辉, 王奕涵, 马诣博, 等. 云南南部草地贪夜蛾发生动态及虫源分析 [J]. *应用昆虫学报*, 2023, 60 (4): 1052-1061]
- Chen HL, Wu YT, Gao J, *et al.* Determination of resistance of *Spodoptera frugiperda* population in Sichuan to beta cypermethrin and metabolic pathway analysis [J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2025, 46 (4): 488-498. [陈慧淋, 吴玉童, 高节, 等. 四川草地贪夜蛾种群对高效氯氰菊酯的抗性测定及代谢途径分析 [J]. *华南农业大学学报*, 2025, 46 (4): 488-498]
- Chi H, Günçan A, Kavousi A, *et al.* Twosex-m-schart: the key tool for life table research and education [J]. *Entomologia Generalis*, 2022a, 42 (6): 845-849.
- Chi H, Kara H, Özgökçe MS, *et al.* Innovative application of set theory, cartesian product, and multinomial theorem in demographic research [J]. *Entomologia Generalis*, 2022b, 42 (6): 863-874.
- Elliott KH, Betini GS, Dworkin I, *et al.* Experimental evidence for within and cross seasonal effects of fear on survival and reproduction [J]. *Journal of Animal Ecology*, 2016, 85 (2): 507-515.
- Fan Z, Kong W, Ran X, *et al.* Biological and physiological changes in *Spodoptera frugiperda* larvae induced by non-consumptive effects of the predator *Harmonia axyridis* [J]. *Agriculture*, 2024a, 14 (9): 1566.
- Fan Z, Lv X, Huang Y, *et al.* Non-consumptive effects of *Harmonia axyridis* on the reproduction and metabolism of *Spodoptera frugiperda* [J]. *Insects*, 2024b, 15 (6): 395.
- Hou ZR, Sun BB, Liu XJ, *et al.* Predatory functional response of

- assassin bug *Sycanus falleni* to the larvae of fall armyworm *Spodoptera frugiperda* [J]. *Journal of Plant Protection*, 2020, 47 (4): 852-858. [侯峥嵘, 孙贝贝, 刘先建, 等. 大红犀猎蝽对草地贪夜蛾3龄幼虫捕食功能反应 [J]. 植物保护学报, 2020, 47 (4): 852-858]
- Jiang YL, Yang XF, Huang QY, *et al.* Color visual behavior response of *Spodoptera frugiperda* under dim-light context [J]. *Plant Protection*, 2023, 49 (1): 291-296. [蒋月丽, 杨小凡, 黄求应, 等. 微光环境下草地贪夜蛾的颜色视觉行为反应 [J]. 植物保护, 2023, 49 (1): 291-296]
- Jiang YY, Liu J, Xie MC, *et al.* Observation on law of diffusion damage of *Spodoptera frugiperda* in China in 2019 [J]. *Plant Protection*, 2019, 45 (6): 10-19. [姜玉英, 刘杰, 谢茂昌, 等. 2019年我国草地贪夜蛾扩散为害规律观测 [J]. 植物保护, 2019, 45 (6): 10-19]
- Lan P, Zhiguo L, Jiani C, *et al.* Search performance and octopamine neuronal signaling mediate parasitoid induced changes in *Drosophila* oviposition behavior [J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 4476.
- Leal WS. Odorant reception in insects: roles of receptors, binding proteins, and degrading enzymes [J]. *Annual Review of Entomology*, 2013, 58 (1): 373-391.
- Li J, Jing CZ, Long DB, *et al.* Non-lethal effects of a natural enemy on herbivore insect population [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2014, 51 (4): 863-870. [李姣, 金晨钟, 龙大彬, 等. 天敌昆虫对害虫的非直接致死效应 [J]. 应用昆虫学报, 2014, 51 (4): 863-870]
- Li YP, Ge F. Effects of predatory stress imposed by *Harmonia axyridis* on the development and fecundity of *Drosophila melanogaster* [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 39 (3): 554-559. [李燕平, 戈峰. 异色瓢虫捕食胁迫对黑腹果蝇繁殖与后代发育的影响 [J]. 生态学杂志, 2010, 29 (3): 554-559]
- Liu B, Li ZG, Guo YK. Overview of the invasion mechanism of fall armyworm *Spodoptera frugiperda* [J]. *Journal of Plant Protection*, 2022, 49: 1313-1328. [刘博, 李志红, 郭韶堃. 草地贪夜蛾入侵机制概述 [J]. 植物保护学报, 2022, 49 (5): 1313-1328]
- Liu Y, Geng Y, Si M, *et al.* Trait responses, nonconsumptive effects, and the physiological basis of *Helicoverpa armigera* to bat predation risk [J]. *Communications Biology*, 2024, 7 (1): 1436.
- Meng LH, Jiang XF, Li P, *et al.* Comparison of bisexual life tables of *Spodoptera frugiperda* in different photoperiods [J]. *Plant Protection*, 2022, 48 (3): 63-73. [孟令贺, 江幸福, 李平, 等. 不同光周期下草地贪夜蛾两性生命表的比较 [J]. 植物保护, 2022, 48 (3): 63-73]
- Rodrigues - Silva AL, Lopes Gualberto P, Simão SD, *et al.* New perspective on the role of *Doru luteipes* as a predator of the fall armyworm: Non - consumptive effects, predatory preference and functional response [J]. *Journal of Applied Entomology*, 2024, 148 (9): 1049-1059.
- Sahayaraj K, Balasubramanian R. Artificial Rearing of Reduviid Predators for Pest Management [M]. Singapore: Springer, 2016: 1-28.
- Sheriff MJ, Peacor SD, Hawlena D, *et al.* Non-consumptive predator effects on prey population size: a dearth of evidence [J]. *Journal of Animal Ecology*, 2020, 89 (6): 1302-1316.
- Shi LY, Zhang YN, Jiang TL, *et al.* Behavioral response and transcriptome analysis of *Spodoptera frugiperda* to ultrasonic stress from bats in newly invaded areas [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44 (20): 8984-8995. [石林云, 张亚宁, 江廷磊, 等. 草地贪夜蛾对新入侵地区蝙蝠超声波胁迫的行为反应和转录组分析 [J]. 生态学报, 2024, 44 (20): 8984-8995]
- Sisodiya DB, Raghunandan BL, Bhatt NA, *et al.* The fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (JE Smith) (Lepidoptera: Noctuidae); first report of new invasive pest in maize fields of Gujarat, India [J]. *Journal of Entomology and Zoology Studies*, 2018, 6 (5): 2089-2091.
- Sniegula S, Konczarek D, Bonk M, *et al.* Non-consumptive effects of native, alien and invasive alien crayfish on damselfly egg life history and carry-over effects on larval physiology [J]. *Neo Biota*, 2025, 97: 215-235.
- Sun GL, Cai HS, Yang Y, *et al.* Predation by *Sycanus croceovittatus* on higher instar larvae of *Spodoptera frugiperda* and *Helicoverpa armigera* [J]. *Plant Protection*, 2025, 51 (2): 118-125. [孙淦琳, 蔡浩升, 杨韵, 等. 黄带犀猎蝽对草地贪夜蛾和棉铃虫高龄幼虫的捕食作用 [J]. 植物保护, 2025, 51 (2): 118-125]
- Sun J, Bai Y. Predator-induced stress influences fall armyworm immune response to inoculating bacteria [J]. *Journal of Invertebrate Pathology*, 2020, 172: 107352.
- Sun XX, Hu CX, Jia HR, *et al.* Case study on the first immigration of fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* invading into China [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2019, 18: 2-10.
- Tang YT, Wang MQ, Li YY, *et al.* Research advances of predatory bugs to *Spodoptera frugiperda* [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2019, 35 (5): 682-690. [唐艺婷, 王孟卿, 李玉艳, 等. 捕食性蝽防治草地贪夜蛾的研究进展 [J]. 中国生物防治学报, 2019, 35 (5): 682-690]
- Tao X, Lu ZH, He W, *et al.* Effects of elevated CO₂ concentration on interspecific competition of larvae of *Spodoptera frugiperda* and *Spodoptera litura* on wheat and artificial diets [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2024, 46 (2): 418-430. [陶旋, 鲁智慧, 何文, 等. 高CO₂浓度对草地贪夜蛾和斜纹夜蛾幼虫在小麦和人工饲料上种间竞争的影响 [J]. 环境昆虫学报, 2024, 46 (2): 418-430]
- Thaler JS, McArt SH, Kaplan I. Compensatory mechanisms for ameliorating the fundamental trade-off between predator avoidance and foraging [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012, 109 (30): 12075-12080.
- Truong XL, Pham HP, Thai TNL. Biology and predatory ability of the reduviid *Sycanus falleni* Stål (Heteroptera: Reduviidae: Harpactorinae) fed on four different preys in laboratory conditions [J]. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 2020, 23 (4): 1188-1193.
- Wan P, Lv BQ, Lu H, *et al.* Comparison of the life table of *Spodoptera frugiperda* populations kept under either a constant indoor, or a

- variable outdoor, temperature [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2023, 60 (4): 1141–1147. [万鹏, 吕宝乾, 卢辉, 等. 在室内恒温和室外变温下的草地贪夜蛾种群生命表比较 [J]. 应用昆虫学报, 2023, 60 (4): 1141–1147]
- Wang Z, Wang X, Liu W, *et al.* Functional characterization of an odorant receptor expressed in newly hatched larvae of fall armyworm *Spodoptera frugiperda* [J]. *Insects*, 2024, 15 (8): 564.
- Wei L, Nie Y, Li YJ. Research progress on green and sustainable management technologies for *Spodoptera frugiperda* [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2025, 41 (1): 207–219. [魏蕾, 聂莹, 李咏军. 草地贪夜蛾绿色可持续防控技术研究进展 [J]. 中国生物防治学报, 2025, 41 (1): 207–219]
- Wu KM. Management strategies of fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) in China [J]. *Plant Protection*, 2020, 46 (2): 1–5. [吴孔明. 中国草地贪夜蛾的防控策略 [J]. 植物保护, 2020, 46 (2): 1–5]
- Xiong XF. Non-consumptive Effects of Predator on Developmental, Behavioural and Physiological Performance of *Helicoverpa armigera* [D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. [熊晓菲. 捕食性天敌胁迫对棉铃虫发育、行为及生理的影响研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2015]
- Yan SQ, Lv BQ, Tang JH, *et al.* Influence of simulated rainfall on the emergence of *Spodoptera frugiperda* [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2022, 44 (1): 18–26. [闫三强, 吕宝乾, 唐继洪, 等. 模拟降雨对草地贪夜蛾羽化出土的影响 [J]. 环境昆虫学报, 2022, 44 (1): 18–26]
- Yang PY, Chang XY. Occurrence and impacts of *Spodoptera frugiperda* in Asia and Africa and its prevention and control strategies [J]. *China Plant Protection*, 2019, 39 (6): 88–90. [杨普云, 常雪艳. 草地贪夜蛾在亚洲、非洲发生和影响及其防控策略 [J]. 中国植保导刊, 2019, 39 (6): 88–90]
- Yue Y, Jiang JX, Zhang TY, *et al.* Effects of different maize varieties on the growth and development of *Spodoptera frugiperda* and the parasitization of *Microplitis pallidipes* [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2025, 47 (3): 671–680. [岳阳, 蒋杰贤, 张彤瑶, 等. 不同玉米品种对草地贪夜蛾生长发育和淡足侧沟茧蜂寄生的影响 [J]. 环境昆虫学报, 2025, 47 (3): 671–680]
- Zhang CC, Chen QD, Chen S, *et al.* Effects of soil depth and soil water content on the emergence of *Spodoptera frugiperda* [J]. *China Plant Protection*, 2023, 43 (3): 41–45. [张翠翠, 陈庆东, 陈松, 等. 入土深度和土壤含水量对草地贪夜蛾羽化的影响 [J]. 中国植保导刊, 2023, 43 (3): 41–45]
- Zhang YQ, Qu YL, Li BP. Non-consumptive effects of the predatory stinkbug *Arma custos* adults on growth, development and reproduction of the oriental armyworm *Mythimna separata* [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2024, 40 (2): 248–256. [张雅倩, 曲毓立, 李保平. 蠨蛸成虫对黏虫生长发育和繁殖的非取食效应 [J]. 中国生物防治学报, 2024, 40 (2): 248–256]
- Zhou XJ, Lv BQ, Lu H, *et al.* Comparison of damage grades in laboratory and population fitness of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) on different maize varieties [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2022, 43 (4): 862–869. [周晓娟, 吕宝乾, 卢辉, 等. 草地贪夜蛾对不同品种玉米室内危害级别及种群适合度比较 [J]. 热带作物学报, 2022, 43 (4): 862–869]