基于年龄-龄期两性生命表分析溴氰菊酯对叉角厉蝽的亚致死效应*

陈俊华[1, 2**] 雷 翔[3] 成泽艳[1] 王凯歌[1]
王国君[1, 2] 刘红敏[1, 2] 郭世保[1, 2***]

（1. 信阳农林学院，信阳 464000；2. 大别山实验室，信阳 464000；3. 信阳市种业发展中心，信阳 464000）

摘 要 **【目的】** 明确亚致死浓度溴氰菊酯对天敌昆虫叉角厉蝽 *Eocanthecona furcellata* 的影响。**【方法】** 采用点滴法测定溴氰菊酯对天敌昆虫叉角厉蝽的毒力反应，并用溴氰菊酯亚致死浓度 LC_{10}、LC_{15} 和 LC_{20} 处理叉角厉蝽成虫，测定其 F_1 代的发育历期、繁殖力、存活率及雌、雄成虫的寿命等参数，并组建 F_1 代年龄-龄期两性生命表。**【结果】** 在 F_1 代中，经溴氰菊酯亚致死浓度处理后叉角厉蝽若虫发育历期缩短；雌成虫的平均单雌产卵量较对照组显著降低（P = 0.009），LC_{10}、LC_{15} 和 LC_{20} 浓度分别降低了 24.68%、29.04%和 37.53%。此外，F_1 代种群参数结果表明，LC_{10}、LC_{15} 和 LC_{20} 浓度溴氰菊酯处理使叉角厉蝽平均世代周期（T）均显著缩短（P < 0.05），分别较空白对照组缩短 3.19%、9.70%和 9.40%，但内禀增长率（r）、周限增长率（λ）与净增殖率（R_0）各处理组较对照组无显著差异（P > 0.05）。**【结论】** 亚致死浓度溴氰菊酯会缩短叉角厉蝽后代的存活时间，同时也能显著抑制雌成虫的繁殖力，不利于叉角厉蝽后代种群发展。

关键词 叉角厉蝽；溴氰菊酯；亚致死效应；年龄-龄期两性生命表；繁殖力

Life table analysis of the sublethal effects of deltamethrin on both sexes and different age-stages of *Eocanthecona furcellata*

CHEN Jun-Hua[1, 2**] LEI Xiang[3] CHENG Ze-Yan[1] WANG Kai-Ge[1]
WANG Guo-Jun[1, 2] LIU Hong-Min[1, 2] GUO Shi-Bao[1, 2***]

(1. Xinyang Agriculture and Forestry University, Xinyang 464000, China; 2. Dabie Mountains Laboratory, Xinyang 464000, China; 3. Xinyang Seed Industry Development Center, Xinyang 464000, China)

Abstract **[Aim]** To clarify the effects of sublethal concentrations of deltamethrin on the predatory insect *Eocanthecona furcellata*. **[Methods]** The topical application method was used to determine the toxic response of *E. furcellata* to deltamethrin. Adults were treated with sublethal concentrations of deltamethrin (LC_{10}, LC_{15}, and LC_{20}), and the developmental duration, fecundity, survival rate, and the lifespan of female and male adults in the F_1 generation were measured. An age-stage life table was also constructed for each sex. **[Results]** Exposure to sublethal concentrations of deltamethrin generally shortened the developmental duration of nymphs. Treatment with LC_{10}, LC_{15}, and LC_{20} concentrations of deltamethrin significantly reduced female fecundity by 24.68%, 29.04%, and 37.53%, respectively, relative to the control group (P = 0.009). Treatment with the above concentrations of deltamethrin also significantly (P < 0.05) shortened the mean generation time (T), by 3.19%, 9.70%, and 9.40%, respectively, relative to the control group. However, deltamethrin did not cause any significant change to the intrinsic rate of increase (r), finite rate of increase (λ), and net reproductive rate (R_0), of treatment groups relative to the control (P > 0.05). **[Conclusion]** Sublethal concentrations of deltamethrin both shortened the survival time of the *E. furcellata* F_1 generation, and significantly inhibited female fecundity, thereby reducing population growth.

Key words *Eocanthecona furcellata*; deltamethrin; sublethal effect; age-stage two-sex life table; fecundity

---

*资助项目 Supported projects：河南省重点研发专项项目（261111114300）；大别山实验室 2024 年开放基金课题（DMLOF2024004）
**第一作者 First author，E-mail：junhua993@163.com
***通讯作者 Corresponding author，E-mail：sbguo510@163.com
收稿日期 Received：2025-06-19；接受日期 Accepted：2025-08-12

茶叶是一种高价值经济作物，全世界种植面积超过 500 万 hm^2（Chen and Luo，2025）。在茶树种植过程中，害虫防治是一个重要的环节，茶园常见防治对象有茶尺蠖 *Ectropis obliqua*、灰茶尺蠖 *Ectropis grisescens*、茶小绿叶蝉 *Empoasca* spp.等，严重影响茶叶的产量和质量。为控制茶园害虫，生产中已广泛应用多种防控策略，如灯光诱杀、色板、性诱剂和天敌昆虫等（蔡晓明等，2022）。然而，化学防治仍是很多茶园的主要防治手段，在化学农药中，溴氰菊酯（Deltamethrin）作为拟除虫菊酯类杀虫剂，是天然除虫菊酯的衍生物，与氨基甲酸酯类和有机磷类相比，此类杀虫剂对哺乳动物的毒性相对较低，残留期短，在茶园中可按照国家标准（GB/T 8321.1-2000）规定使用量、施药方法、施药次数和安全间隔期施用，成为一种应急防控茶园害虫的常见农药。溴氰菊酯接触虫体后，通过促进 Na^+通道开放，导致昆虫细胞膜电位的持续去极化，麻痹直至死亡，同时也会影响氯离子通道、ATP 酶和 γ-氨基甲酸（GABA）受体（Meunier *et al.*，2020；Shang *et al.*，2021；Qi *et al.*，2022；Li *et al.*，2025）。近年来，随着溴氰菊酯被普遍大量使用于农业和水产养殖业病虫害防治中，越来越多的研究关注其对生态环境和非靶标生物的影响，发现溴氰菊酯对水生生物（Zhou *et al.*，2021；Wang *et al.*，2024a）、授粉昆虫（Dong *et al.*，2022）和天敌昆虫（蒋正雄等，2022；Wang *et al.*，2024b；岳艳丽等，2025）等生态环境中的一些非靶生物同样具有较强的毒害作用。

叉角厉蝽 *Eocanthecona furcellata* 属半翅目 Hemiptera 蝽科 Pentatomidae 益蝽类昆虫，是一种在国内分布广泛的重要捕食性天敌昆虫。叉角厉蝽繁殖能力强，适应范围广，除 1 龄若虫外，其它龄期和成虫均有较强的捕食能力，猎物谱涉及半翅目、鞘翅目 Coleoptera、鳞翅目 Lepidoptera 等多个目的害虫（姚明勇，2019；折思怡，2023）。有研究表明，叉角厉蝽对茶园茶谷蛾 *Synchalara rhombota*（彩万志，2022；龚雪娜等，2023）、灰茶尺蠖 *Ectropis grisescens*（陈俊华等，2025a）、茶银尺蠖 *Scopula subpunctaria*（陈俊华等，2025b）等多种茶园鳞翅目害虫有较强的捕食能力，刘超等（2017）也发现益蝽类在野外茶园发挥着一定的生态控制作用。

当杀虫剂施用后，会扩散至周围环境并在植物、动物、土壤和水体等多种介质中降解。随着时间推移和环境变化，生物与非生物因素会影响其浓度或剂量，形成低致死或亚致死暴露水平（Li *et al.*，2025）。尽管杀虫剂的亚致死浓度不会立即导致昆虫死亡，但通常会改变昆虫的行为和生理，对其生存状态产生深远影响，且随全球温度持续升高，这种负面影响可能会更大（Gandara *et al.*，2024）。如 Wang 等（2024b）研究表明亚致死浓度高效氯氟氰聚酯胁迫致中华通草蛉 *Chrysoperla sinica* 胰岛素样肽（Insulin-like peptides，ILPs）表达下调，进而导致胰岛素含量降低和信号途径紊乱，抑制了保幼激素（Juvenile hormone）和 20-羟基蜕皮激素（20-Hydroxyecdysone）的合成及信号转导，导致中华通草蛉严重的生殖毒性；Li 等（2024）研究表明亚致死浓度高效氯氰菊酯可抑制棉铃虫 *Helicoverpa armigera* 雌虫性信息素的生物合成，进而降低交配率，影响后代种群发展。岳艳丽等（2025）研究也表明亚致死浓度溴氰菊酯对麦蛾茧蜂 *Habrobracon hebetor* 存在一定的潜在影响。

溴氰菊酯作为茶园害虫防治中常用的杀虫剂之一，是否会对叉角厉蝽造成负面影响目前尚不清楚。因此，本研究采用亚致死浓度的溴氰菊酯处理叉角厉蝽，组建其 F_1 代年龄-龄期两性生命表，评估溴氰菊酯胁迫对叉角厉蝽生长发育、繁殖力、存活率及寿命等的影响，以期为使用溴氰菊酯进行茶园害虫综合防治提供研究基础。

1　材料与方法

1.1　试验材料

供试虫源：叉角厉蝽第一代卵购于韶关市露珠农业科技有限公司，1 龄和 2 龄若虫以蜂蜜水、3 龄及以后各龄若虫和成虫以黄粉虫 *Tenebrio molito* 幼虫为饲料在人工气候箱中饲养，取第二

代叉角厉蝽雌雄成虫为供试昆虫。试验条件为：温度（26±2）℃、湿度为 70%±5%，光周期 12L：12D。饲养用培养皿直径为 200 mm，皿底放滤纸。

仪器：RXZ-160 型人工气候箱（浙江托普云农科技股份有限公司）。

供试药剂：溴氰菊酯（Deltamethrin，DM），有效成分及其含量：溴氰菊酯乳油 25 g/L（拜尔作物科学有限公司）。

1.2 溴氰菊酯对叉角厉蝽的毒力测定

本研究采用点滴法，分量取 25g/L 溴氰菊酯乳油药剂 1、1.3、1.5、2.0 和 2.5 mL，分别加入 3 000 mL 无菌水稀释，用移液枪分别吸取不同浓度药液 0.1 μL，滴在雌成虫的中胸背板小盾片处，每个处理重复处理 40 头。试虫于药剂处理 24 h 后转移至洁净培养盒，并用毛笔刺激法（成虫无自主活动即判定死亡）进行死亡个体统计。将存活的雌成虫单头转移至未经药剂处理的养虫盒中，并配对 1 头未经药剂处理的健康雄成虫。饲养条件同 1.1 节。根据上述试验结果建立毒力回归方程确定 LC_{10}、LC_{15} 和 LC_{20} 浓度，并以此为试验浓度。

1.3 溴氰菊酯对叉角厉蝽 F_1 代种群的影响

根据 1.2 节毒力测定结果将溴氰菊酯分别配制成 LC_{10}、LC_{15}、LC_{20} 3 个亚致死浓度梯度。点滴法处理叉角厉蝽初羽化雌成虫（羽化 24 h 内），处理后的叉角厉蝽按照雌：雄：黄粉虫为 1：1：10 比例配对放入养虫盒中（每盒 1 对），置于人工气候箱中饲养，每个亚致死浓度分别设置 20 个重复，再分别设置以无菌水处理的空白对照组（CK）。每天 09:00 和 17:00 双时点定时观察记录叉角厉蝽的存活和产卵情况，及时移除死亡个体（雄成虫死亡后 12 h 内补充同龄健康个体）；产卵后记录产卵情况，同时观察记录卵期发育进程、若虫蜕皮间隔、成虫产卵周期（单雌产卵次数、产卵间隔期）等生物学参数。孵化后的若虫作为 F_1 代虫源。F_1 代采用单头单独饲养方式，记录各虫龄、虫态的发育历期和死亡情况，成虫期的产卵情况等。

1.4 两性生命表构建

根据 1.3 节获得的叉角厉蝽 F_1 代各阶段发育历期、存活率、雌成虫产卵量和雌、雄成虫寿命等参数，利用两性生命表软件 TWOSEX-MSChart 建立叉角厉蝽的两性生命表。参数包括：年龄-阶段特征存活率（s_{xj}）、种群年龄-特征存活率（l_x）、雌成虫年龄-龄期-特征繁殖力（f_{xj}）、种群年龄-特征繁殖力（m_x）、种群净增殖力（l_xm_x）、年龄-龄期-特征寿命期望值（e_{xj}）、年龄-龄期-特征繁殖值（v_{xj}）、总生殖率（*GRR*）、净增殖率（R_0）、内禀增长率（r_m）、周限增长率（λ）和平均世代周期（T）（Tuan *et al.*，2014；史梦竹等，2023）。

$$l_x = \sum_{j=1}^{\beta} s_{xj} \quad (1)$$

$$m_x = \frac{\sum_{j=1}^{\beta} s_{xj} f_{xj}}{\sum_{j=1}^{\beta} s_{xj}} \quad (2)$$

$$\sum_{x=0}^{\infty} e^{-r(x+1)} l_x m_x = 1 \quad (3)$$

$$R_0 = \sum l_x m_x \quad (4)$$

$$T = \frac{\ln R_0}{r} \quad (5)$$

$$r_m = \frac{\ln R_0}{T} \quad (6)$$

$$\lambda = \exp^{(r)} \quad (7)$$

1.5 数据分析

试验所得数据采用 WPS Office 2019 统计记录，两性生命表数据采用生命表软件 TWOSEX-MSChart 进行处理分析，总生殖率（*GRR*）、净增殖率（R_0）、内禀增长率（r）、周限增长率（λ）和平均世代周期（T）的平均值和标准误差使用配对 Bootstrap 检验（Paired bootstrap test）方法估算。用 IBM SPSS Statistics 27.0.1 软件处理试验中发育历期和生殖力参数等的平均值和标准误差，各亚致死浓度之间的差异显著性分析采用的方法为 Duncan 氏新复极差法，并使用 Origin 2024 软件绘制图表。

2　结果与分析

2.1　溴氰菊酯对叉角厉蝽雌成虫的毒力测定

溴氰菊酯对叉角厉蝽雌成虫的毒力回归方程为 y= - 2.792+4.863x，相关系数为 0.929，LC_{10} 的浓度为 0.243 mg/L、LC_{15} 的浓度为 0.288 mg/L、LC_{20} 的浓度为 0.328 mg/L。

2.2　亚致死浓度溴氰菊酯对叉角厉蝽卵和若虫期发育历期的影响

叉角厉蝽在不同浓度条件下的发育历期见表 1。LC_{10}、LC_{15} 和 LC_{20} 处理中的卵孵化时长明显短于对照组（df = 3，F = 124.668，P < 0.001），其中以 LC_{15} 孵化时长最短。各亚致死浓度处理 1 龄若虫发育历期与对照组无显著差异（df = 3，F = 0.738，P =0.531）。2 龄若虫时 LC_{15} 处理组较对照组、LC_{10} 和 LC_{20} 处理组发育历期显著缩短（df = 3，F = 4.249，P = 0.007），而 3 龄期则呈现为 LC_{15} 处理较对照组、LC_{10} 和 LC_{20} 处理组显著延长（df = 3，F = 26.172，P < 0.001）。对于 4 龄若虫，LC_{15} 和 LC_{20} 处理组的发育历期与 LC_{10} 处理组和对照组差异显著（df = 3，F = 54.266，P < 0.001）。5 龄若虫期以 LC_{15} 和 LC_{20} 处理组显著短于对照组和 LC_{10} 处理组（df = 3，F = 55.531，P < 0.001）。若虫历期以 LC_{15} 处理组最短，显著短于对照组和 LC_{10} 处理组（df = 3，F = 45.066，P < 0.001）。试验结果表明经亚致死浓度处理的叉角厉蝽 F_1 代卵期和若虫历期普遍缩短，若虫期发育速率呈现不同程度加快趋势。

表 1　不同亚致死浓度下叉角厉蝽卵和若虫的发育历期

Table 1　The developmental durations of egg stage and nymph stage of *Eocanthecona furcellata* under different sublethal concentrations

发育阶段 Developmental stage	发育历期（d）Developmental durations (d)			
	CK	LC_{10}	LC_{15}	LC_{20}
卵 Egg	8.00 ± 0.00 a	7.00 ± 0.00 b	6.00 ± 0.00 d	6.48 ± 0.14 c
1 龄 1st instar	2.97 ± 0.03 a	2.97 ± 0.03 a	2.96 ± 0.03 a	2.92 ± 0.02 a
2 龄 2nd instar	4.40 ± 0.10 a	4.28 ± 0.20 a	4.00 ±0.00 b	4.26 ± 0.10 a
3 龄 3rd instar	4.06 ± 0.11 b	4.09 ± 0.10 b	5.00 ± 0.00 a	4.21 ± 0.07 b
4 龄 4th instar	5.53 ± 0.12 a	5.50 ± 0.12 a	4.00 ± 0.00 c	4.88 ± 0.06 b
5 龄 5th instar	6.09 ± 0.14 a	5.85 ± 0.09 a	4.62 ± 0.09 b	4.63 ± 0.09 b
若虫 Nymph	23.06 ± 0.22 a	22.71 ± 0.19 a	20.59 ± 0.09 b	20.83 ± 0.21 b

CK 为无菌水处理的空白对照组。下表和下图同。表中数据均为平均值±标准误。同行数据后不同小写字母表示显著差异（P < 0.05，Duncan 氏新复极差法）。表 2 同。

CK represents the blank control group treated with sterile water. The same below. Data in the table are mean± SE. Different lowercase letters after the data in the same row indicate significant difference (P < 0.05, Duncan's multiple rang test). The same for Table 2.

2.3　亚致死浓度溴氰菊酯对叉角厉蝽成虫期相关参数的影响

各亚致死浓度溴氰菊酯处理后雄成虫的寿命与对照组无显著差异（df = 3，F = 0.086，P = 0.968）；雌成虫的寿命 LC_{10}、LC_{15} 处理组与对照、LC_{20} 处理组差异显著（df = 3，F = 6.182，P < 0.001）。从产卵前期看，LC_{10}、LC_{15} 和 LC_{20} 处理间产卵前期差异不显著，其中以对照组的产卵前期最长，与 LC_{10}、LC_{20} 处理组差异显著（df = 3，F = 2.835，P = 0.045），表明不同亚致死浓度对叉角厉蝽产卵前期影响不大。各亚致死浓度处理的总产卵前期均显著短于对照组（df = 3，F = 39.040，P < 0.001）。在产卵期，对照组与 LC_{20} 差异不显著，与 LC_{10} 和 LC_{15} 处理组存在显著差异（df = 3，F = 2.824，P = 0.045），溴氰菊酯经亚致死处理可不同程度的延长叉角厉蝽的产卵期。从单雌产卵量来看，各亚致死浓度与对照

组均存在显著差异($df = 3, F = 4.194, P = 0.009$), 且随着处理浓度的升高整体产卵量呈现下降趋势, LC_{10}、LC_{15} 和 LC_{20} 分别较对照组降低了 24.68%、29.04%和 37.53%（表 2）。

表 2 不同亚致死浓度下叉角厉蝽成虫期的相关参数

Table 2 Related parameters of adult stage of *Eocanthecona furcellata* under different sublethal concentrations

处理 Treatment	成虫寿命（d） Adult longevity (d)		产卵前期（d） Adult preoviposition period (APOP) (d)	总产卵前期（d） Total preoviposition period (TPOP) (d)	产卵期（d） Oviposition period (d)	单雌产卵量（粒） Eggs laid by per female (grain)
	雄 Male	雌 Female				
CK	13.53 ± 1.58 a	20.32 ± 0.82 b	8.47 ± 0.39 a	39.47 ± 0.49 a	9.53 ± 0.93 b	156.26 ± 18.54 a
LC_{10}	13.75 ± 1.73 a	24.00 ± 0.47 a	7.45 ± 0.33 b	37.27 ± 0.35 b	12.41 ± 0.54 a	117.70 ± 6.85 b
LC_{15}	12.75 ± 1.67 a	22.76 ± 0.68 a	7.76 ± 0.26 ab	34.24 ± 0.26 c	12.06 ± 1.00 a	110.88 ± 11.10 b
LC_{20}	12.91 ± 1.45 a	19.79 ± 1.08 b	7.30 ± 0.21 b	34.61 ± 0.40 c	10.44 ± 0.84 ab	97.61 ± 9.72 b

2.4 溴氰菊酯对叉角厉蝽年龄-阶段特征存活率的影响

从图 1（A-D）中可以看出，不同浓度处理条件下叉角厉蝽各虫态的存活率也不一样。整体表现为随着浓度的增加，叉角厉蝽的各龄若虫存活率略有下降。LC_{15} 处理组中 4 龄和 5 龄若虫的存活率分别为 80.00%和 72.50%，LC_{20} 处理组 4 龄和 5 龄若虫的存活率均为 80.00%，明显低于对照组（85.00%）（$P < 0.05$）（图 1：A，C-D）。同时，各龄若虫 s_{xj} 曲线之间存在相互交叉重叠，LC_{15} 处理组各龄期均维持 3- 5 d 存活率不变，然后急剧下降（图 1：C）。溴氰菊酯处理对叉角厉蝽成虫存活情况也存在着影响，LC_{15} 处理雌雄成虫存活率分别为 42.5%和 30.0%，均低于对照组的 47.5%和 35.0%。

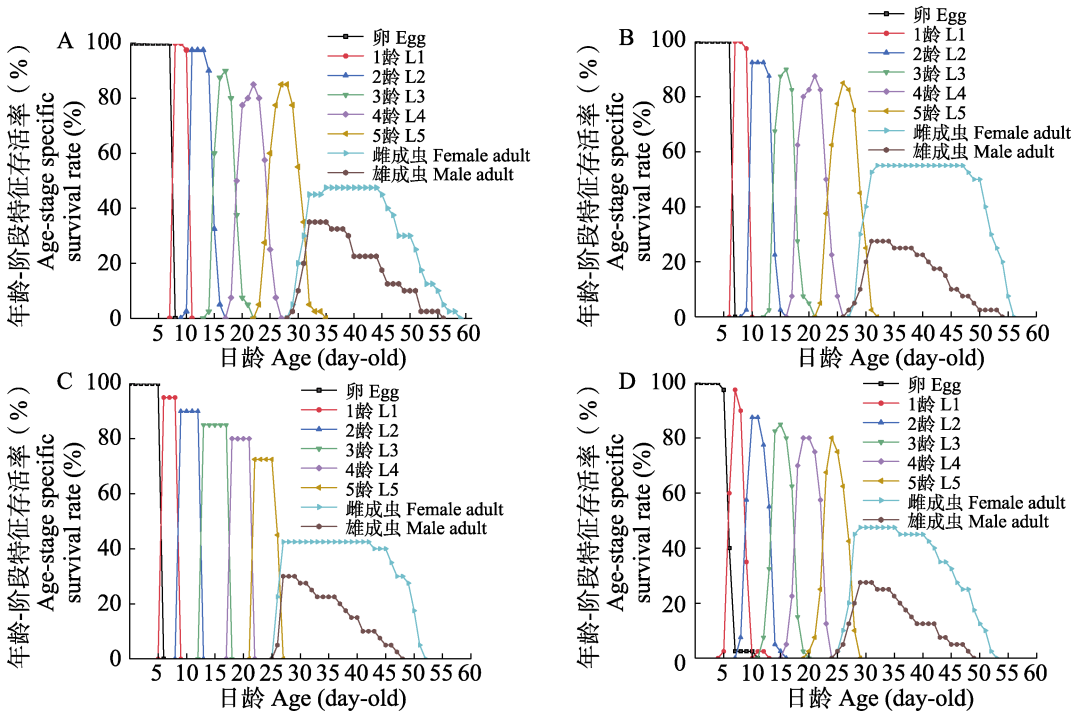

图 1 不同亚致死浓度叉角厉蝽的年龄-阶段特征存活率（s_{xj}）

Fig. 1 Age-stage specific survival rates of *Eocanthecona furcellata* under different sublethal concentration (s_{xj})

A. CK; B. LC_{10}; C. LC_{15}; D. LC_{20}.

L1-L5 分别为 1-5 龄幼虫。下图同。L1-L5 represent 1st-5th instar larvae, respectively. The same below.

2.5　溴氰菊酯对叉角厉蝽种群年龄-特征存活率和成虫繁殖力的影响

各浓度处理下的特定种群年龄-特征存活率（l_x）存在差异。对照组下的 l_x 在 44 d 开始急剧加速下降，LC_{10} 浓度处理下在 41 d 开始下降，LC_{15} 浓度处理下在 38 d 开始急剧下降，LC_{20} 浓度处理下在第 39 天急剧下降。f_x 曲线达到峰值时间对照组为 44 d，随着处理浓度的升高，处理组峰值时间依次为 41、38 和 39 d。m_x 曲线在不同浓度条件下都呈现出多峰现象，表明叉角厉蝽呈现多次产卵现象，对照组、LC_{10}、LC_{15} 和 LC_{20} 开始产卵时间分别为第 35、34、32 和 29 天，随着处理浓度的升高，成虫羽化到第一次产卵时间逐步缩短。对照组在 55 d 后，LC_{10} 处理组在 54 d 后，LC_{15} 处理组在 48 d 后，LC_{20} 处理组在 46 d 后，f_x 和 m_x 曲线出现重叠，表明雌成虫年龄-龄期-特征繁殖力（f_x）与种群年龄-特征繁殖力（m_x）相等。对照组和不同亚致死浓度处理下 l_xm_x 峰值呈现为对照组（9.50）> LC_{10}（7.05）> LC_{20}（5.52）> LC_{15}（5.30）（图 2：A-D）。

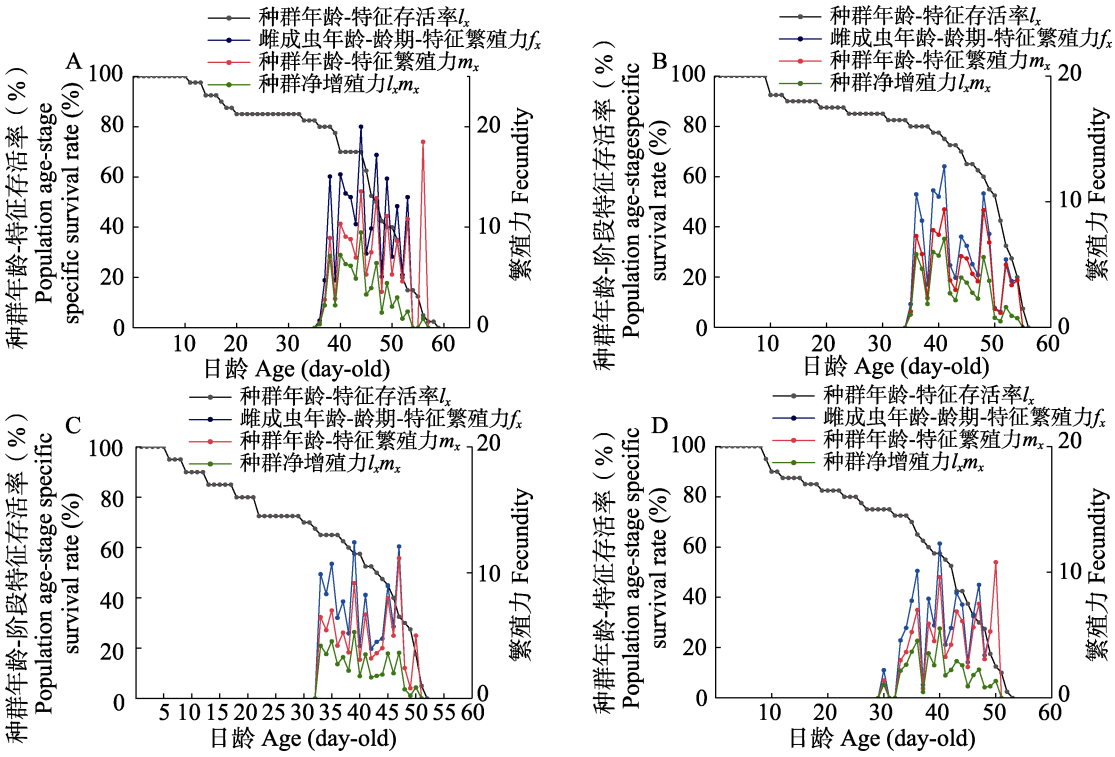

图 2　不同亚致死浓度下叉角厉蝽种群年龄-特征存活率（l_x）和繁殖力（f_x、m_x、l_xm_x）

Fig. 2　Population age specific survival rates (l_x) and fecundity of *Eocanthecona furcellata* under different sublethal concentrations (f_x, m_x, l_xm_x)

A. CK; B. LC_{10}; C. LC_{15}; D. LC_{20}.

2.6　溴氰菊酯对叉角厉蝽年龄-龄期特征寿命期望值的影响

从图 3（A-D）可以看出，亚致死浓度影响叉角厉蝽各虫龄、虫态的期望寿命值。LC_{10} 浓度处理的叉角厉蝽的期望寿命值为 44.35 d，大于对照组的寿命期望值 43.50 d；LC_{15} 浓度处理组的期望寿命值为 36.75 d，LC_{20} 处理组的期望寿命值为 37.55 d，均小于对照组期望寿命值。亚致死浓度也显著影响叉角厉蝽雌、雄成虫的期望寿命值（$P < 0.05$），LC_{10} 处理组 e_{xj} 最大，雌雄成虫的寿命值分别为 26.00 和 15.93 d，LC_{20} 浓度处理组雌雄成虫的期望寿命值最小，分别为 22.16 和 15.45 d，各亚致死浓度处理均表现为雌成虫大于雄成虫的期望寿命值。

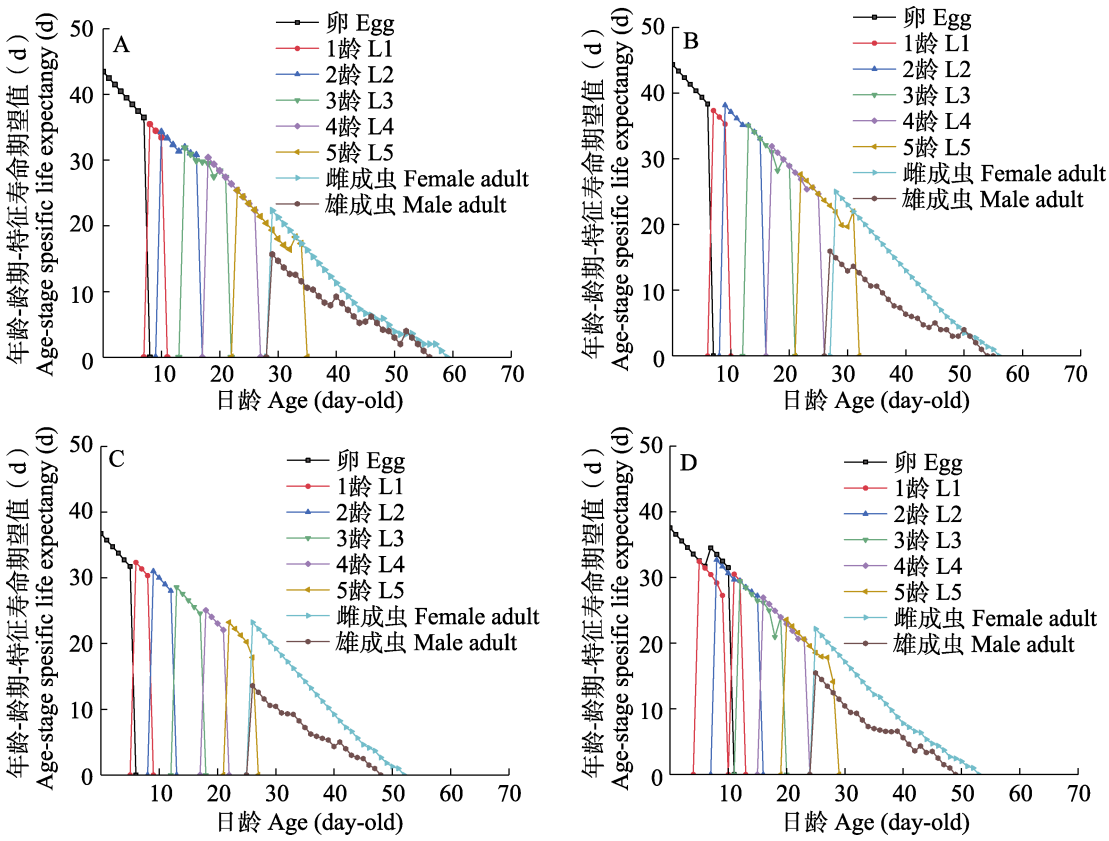

图 3　不同亚致死浓度下叉角厉蝽的年龄-龄期特征寿命期望值（e_{xj}）

Fig. 3　Age-stage specific life expectancies of *Eocanthecona furcellata* under different sublethal concentrations (e_{xj})

A. CK; B. LC_{10}; C. LC_{15}; D. LC_{20}.

2.7　溴氰菊酯对叉角厉蝽年龄-龄期-特征繁殖值的影响

不同浓度下叉角厉蝽各阶段繁殖值均随年龄 x 增加而增大，且在成虫期贡献度达到最大值，这表明成虫对未来种群的贡献最大。亚致死浓度影响叉角厉蝽产卵峰值时间和产卵峰值数。在对照组，叉角厉蝽历时 38 d 繁殖值达到 90.17；LC_{10} 浓度处理组中历时 36 d 繁殖值达到 65.08，在 LC_{15} 浓度处理组中历时 33 d 繁殖值达到 64.07，在 LC_{20} 处理组中历时 35 d 繁殖值达到 50.16（图 4：A-D）。结果表明，药剂处理浓度对叉角厉蝽的产卵历期及产卵量峰值有重要影响，随着处理浓度升高，到达产卵高峰时长先缩短后延长，同时产卵量也逐步减少。

2.8　溴氰菊酯对叉角厉蝽种群动态参数的影响

叉角厉蝽在不同条件下的总生殖率 *GRR*、内禀增长率 r_m、周限增长率 λ、净增殖率 R_0 和平均世代周期 T 见表 3。LC_{15} 处理组的总生殖率显著低于对照组（$P = 0.048$）。各亚致死浓度处理的内禀增长率、周限增长率和净增值率与对照差异均不显著（$P > 0.05$）。在平均世代周期中，对照组与各亚致死浓度处理组间存在显著差异（$P < 0.05$），LC_{10}、LC_{15} 和 LC_{20} 处理组较对照组的平均世代周期分别缩短了 3.12%、9.70% 和 9.40%。

3　讨论

农药会破坏生态系统，通过诱导害虫再猖獗和产生抗药性来间接危及粮食安全（Wan *et al.*，2025）；同时，农药亦会影响捕食性天敌的生长发育、生殖力、捕食能力等（杨慧等，2020）。溴氰菊酯属拟除虫菊酯类杀虫活性最高的杀虫剂，对多种害虫具有触杀、胃毒、驱避和拒食

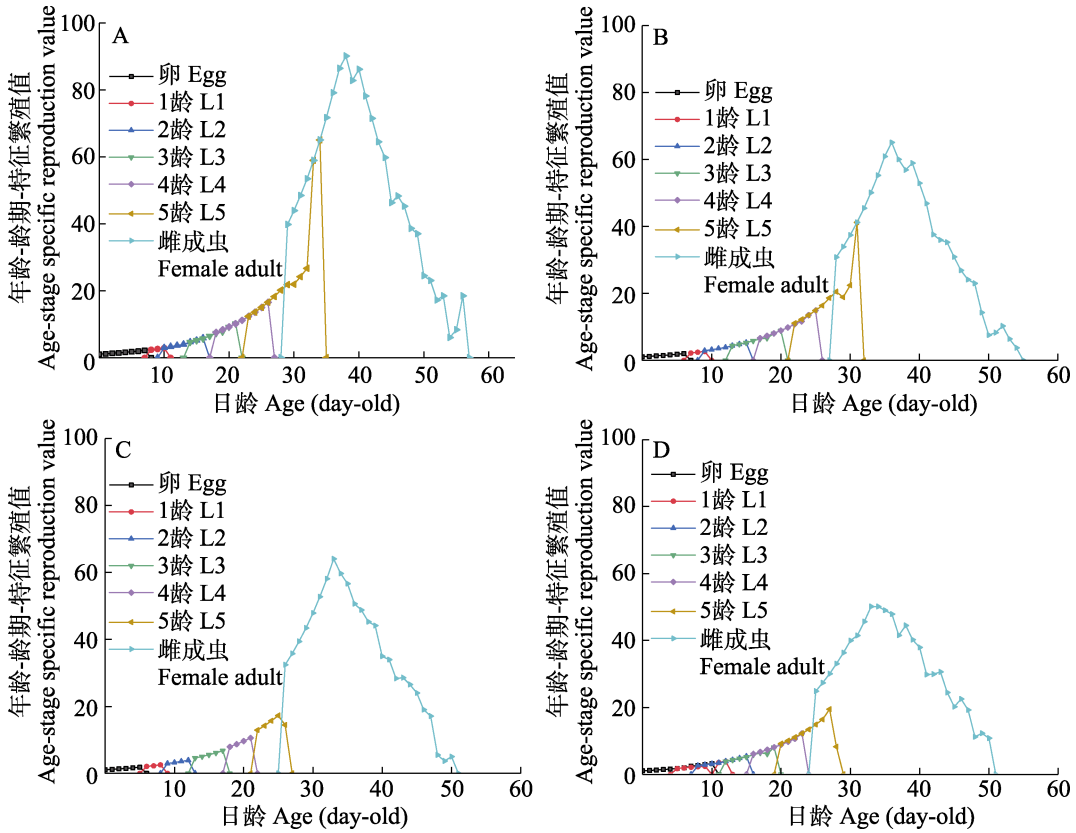

图 4　不同亚致死浓度下叉角厉螨的年龄-龄期-特征繁殖值（v_{xj}）

Fig. 4　Age-stage specific reproductive value of *Eocanthecona furcellata* under different sublethal concentrations (v_{xj})

A. CK; B. LC_{10}; C. LC_{15}; D. LC_{20}.

表 3　不同亚致死浓度下叉角厉螨的生命表参数

Table 3　Life table parameters of *Eocanthecona furcellata* under different sublethal concentrations

处理 Treatment	总生殖率 *GRR* Gross reproductive rate	内禀增长率 r_m Intrinsic rate of increase	周限增长率 λ Finite rate of increase	净增殖率 R_0 Net reproductive rate	平均世代周期 *T* Mean generation time
CK	152.283 ± 26.305 a	0.098 ± 0.005 a	1.103 ± 0.006 a	74.50 ± 15.06 a	43.977 ± 0.485 a
LC_{10}	96.440 ± 10.697 ab	0.097 ± 0.005 a	1.102 ± 0.004 a	63.60 ± 9.694 a	42.575 ± 0.431 b
LC_{15}	94.035 ± 11.561 b	0.097 ± 0.005 a	1.102 ± 0.006 a	47.43 ± 9.754 a	39.709 ± 0.619 c
LC_{20}	96.382 ± 11.660 ab	0.095 ± 0.005 a	1.100 ± 0.006 a	43.93 ± 8.767 a	39.843 ± 0.346 c

表中数据均为平均值±标准误。同列数据后不同小写字母表示经 Paired bootstrap test 法检验在 $P < 0.05$ 水平差异显著。
Data in the table are mean±SE. Different lowercase letters in the same column indicate significant difference at $P < 0.05$ level by the paired bootstrap test.

作用，具杀虫谱广、安全性强、稳定性高、易降解和对哺乳动物低毒等特点（岳艳丽等，2025）。半致死浓度常用于评估杀虫剂对靶标害虫的毒力，在田间施用药剂后，随着时间的迁移和环境的变化，药剂残留量会逐渐降低，当害虫接触到的药剂浓度不足以致死会产生亚致死效应，使害虫的生理和行为发生变化（郭文丽等，2024）。本研究结果表明叉角厉螨经溴氰菊酯亚致死浓度处理后，一些个体表现出中毒症状（如口器伸长，腹部朝上，六足蜷缩，进而无法活动、取食），并于次日开始出现死亡情况，一些中毒较轻个体 3 d 后略有缓解。本试

验结果表明溴氰菊酯对叉角厉蝽存在较强的毒性，茶园中应谨慎施用。

在 F_1 代中，叉角厉蝽卵期和若虫历期在亚致死浓度处理下均呈现不同程度的缩短，但幼期发育进度的加快并未促成叉角厉蝽的生殖优势，各亚致死浓度处理下叉角厉蝽繁殖力显著下降。Liu 等（2025）探讨了氯虫苯甲酰胺对草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 的亚致死效应及其跨代影响，结果表明草地贪夜蛾幼虫持续暴露于亚致死浓度氯虫苯甲酰胺会延长幼虫和蛹的发育历期，同时显著降低各发育阶段的体重；徐淑（2024）测定了亚致死浓度毒死蜱（LC_{30}）对叉角厉蝽的接触毒性，结果表明若虫发育历期长于对照组，但产卵情况与对照组无显著差异，这些研究结果与本研究结果存在一定差异。杀虫剂亚致死效应是一个复杂的过程，会因杀虫剂的种类、浓度、作用时间和方式及作用靶标的变化而表现出一定程度的差异，对昆虫生物学特性的影响也是变化的。此外，本研究中亚致死浓度的溴氰菊酯处理后叉角厉蝽 F_1 代的净增殖率（R_0）、内禀增长率（r）和周限增长率（λ）均低于对照组，LC_{15} 处理组的总生殖率显著低于对照组，亚致死浓度处理阻碍 F_1 代种群的增长，此结果与 Liu 等（2025）研究草地贪夜蛾受亚致死浓度氯虫苯甲酰胺处理结果类似，亚致死浓度对后代的不利影响可能与 F_0 代营养缺乏，耗竭储存能量等有关；此外，Zhang 等（2025）研究亚致死浓度茚虫威对桃蛀螟 *Dichocrocis punctiferalis* 成虫具有抑制性信息素生物合成与阻碍卵巢发育的双重调控效应。

王秀琴（2023）研究了亚致死浓度溴氰菊酯对麦蛾茧蜂 F_0 代生殖适合度和 F_1 代生长发育、繁殖以及种群增长潜力等的影响，发现不同虫态天敌昆虫受亚致死效应的影响不同，因此生产中可以选择影响较低的虫态开展农药的应急防控。本研究仅探讨了叉角厉蝽成虫期受亚致死浓度的影响，关于溴氰菊酯对叉角厉蝽其他虫态的影响需后续进一步的试验；此外，皇甫佳一等（2024）研究表明氯虫苯甲酰胺对异色瓢虫 *Harmonia axyridis* 不仅具有较强毒力作用，同时显著影响其对猎物的捕食能力，降低其捕食量；袁伟宁等（2015）也发现龟纹瓢虫 *Propylaea japonica* 经高效氯氰菊酯处理后捕食率下降。在自然界中，捕食性昆虫可通过较大的雾滴、被污染的花粉或花蜜、与植物组织或捕食被污染的猎物接触而接触农药（Cloyd and Bethke，2011；苏悦，2022），从而对天敌昆虫引起亚致死暴露影响。

在茶园中叉角厉蝽是鳞翅目害虫的关键捕食者，其种群衰退可能加剧害虫暴发的风险。尽管溴氰菊酯对靶标害虫高效，但对天敌昆虫产生的负面影响需要持续关注。为克服传统的 DM 制剂如乳油（Emulsifiable concentrate，EC）表现出持效期短，杀虫效果差，环境污染严重等缺点，Wan 等（2023）研究开发了一种溴氰菊酯的纳米制剂，用于持续释放 DM，可增强害虫防治效果，同时又减少农药的环境释放量。Wu 等（2024）研究发现，星形阳离子聚合物 SPc 纳米农药与捕食性天敌蠋蝽 *Arma chinensis* 共同使用时纳米农药不会对蠋蝽表现出不良影响，为化学防治与生物防治的协同利用提供了研究前提。

本试验在人工气候箱中展开，虽控制了温度和湿度等变量，但未模拟出田间的复杂环境（如雨水的冲刷、紫外线降解），可能高估了农药的残留性。此外，叉角厉蝽与其它天敌昆虫的相互作用未被引入，后续需构建多物种模型以全面评估生态风险。

综上，溴氰菊酯对叉角厉蝽的发育、繁殖及种群增长均产生显著抑制作用。卵期和若虫历期均较对照组缩短，尤其是 4-5 龄若虫在 LC_{15} 和 LC_{20} 浓度处理下的发育历期显著短于对照组，同时溴氰菊酯处理也显著降低了叉角厉蝽的生殖力参数。两性生命表分析得出，溴氰菊酯处理组的总生殖率 *GRR* 和内禀增长率 r_m 均比对照组低，表明高浓度的溴氰菊酯严重抑制了叉角厉蝽的种群扩张潜力。对照组种群净繁殖率 l_xm_x 的峰值最高为 9.50，处理组 LC_{15} 已降至 5.30，表明溴氰菊酯的毒性削弱了叉角厉蝽对后代种群的贡献能力。研究结果表明溴氰菊酯对叉角厉蝽的安全性较低，可通过抑制天敌种群增长间接威胁

茶园生态稳定性。在茶园害虫防治中，应通过协调各种防治措施的应用，优化农药使用策略，以实现害虫高效防治和生态安全保护的双重目标。

参考文献 (References)

Cai WZ, 2022. Latin-English-Chinese Dictionary of Entomology. Zhengzhou: Henan Science and Technology Press. 2608. [彩万志, 2022. 拉英汉昆虫学词典. 郑州: 河南科学技术出版社. 2608.]

Cai XM, Bian L, Luo ZX, Li ZQ, Xiu CL, Fu NX, Chen ZM, 2022. Integration and application of the green and precise control technologies for tea pest. *China Tea*, 44(10): 1–7. [蔡晓明, 边磊, 罗宗秀, 李兆群, 修春丽, 付楠霞, 陈宗懋, 2022. 茶园有害生物绿色精准防控技术集成应用. 中国茶叶, 44(10): 1–7.]

Chen JH, Zhang TH, Liu HM, Yang S, Xu MF, Guo SB, 2025a. Predation ability and behavior of *Eocanthecona furcellata* to *Ectropis grisescens* larvae. *Plant Protection*, 51(2): 165–171. [陈俊华, 张天海, 刘红敏, 杨森, 徐孟飞, 郭世保, 2025a. 叉角厉蝽对灰茶尺蠖幼虫的捕食能力及捕食行为. 植物保护, 51(2): 165–171.]

Chen JH, Wen XR, Wang CX, Zhang QQ, Liu HM, Ning WG, Guo SB, 2025b. Predation and predilection of *Eocanthecona furcellata* to larvae of *Scopula subpunctaria* (Lepidoptera: Geometridae). *Journal of Tea Science*, 45(1): 87–98. [陈俊华, 闻鑫茹, 王晨旭, 张俏俏, 刘红敏, 宁万光, 郭世保, 2025b. 叉角厉蝽对茶银尺蠖幼虫的捕食作用及捕食偏好性. 茶叶科学, 45(1): 87–98.]

Chen ZM, Luo ZX, 2025. Management of insect pests on tea plantations: Safety, sustainability, and efficiency. *Annual Review of Entomology*, 70: 359–377.

Cloyd RA, Bethke JA, 2011. Impact of neonicotinoid insecticides on natural enemies in greenhouse and interiorscape environments. *Pest Management Science*, 67(1): 3–9.

Dong ZX, Tang QH, Li WL, Wang ZW, Li XJ, Fu CM, Li D, Qian K, Tian WL, Guo J, 2022. Honeybee (*Apis mellifera*) resistance to deltamethrin exposure by modulating the gut microbiota and improving immunity. *Environmental Pollution*, 314: e120340.

Gandara L, Jacoby R, Laurent F, Spatuzzi M, Vlachopoulos N, Borst NO, Ekmen G, Potel CM, Garrido-Rodriguez M, Böhmert AL, Misunou N, Bartmanski BJ, Li XC, Kutra D, Hérichié JK, Tischer C, Zimmermann-Kogadeeva M, Ingham VA, Savitski MM, Masson JB, Zimmermann M, Crocker J, 2024. Pervasive sublethal effects of agrochemicals on insects at environmentally relevant concentrations. *Science*, 386(6720): 446–453.

Gong XN, Yu XS, Wang XS, Long LX, Li XX, Long YQ, 2023. A preliminary study on predation behavior of *Eocanthecona furcellata* on the larvae of *Agriophara rhombata*. *Hubei Agricultural Sciences*, 62(5): 73–76. [龚雪娜, 玉香甩, 王雪松, 龙丽雪, 李晓霞, 龙亚芹, 2023. 叉角厉蝽对茶谷蛾幼虫捕食行为的初步研究. 湖北农业科学, 62(5): 73–76.]

Guo WL, Yang H, Duan MM, Xu H, Zhao WT, Wang CJ, 2024. Sublethal effects of tolfenpyrad and its impact on detoxifying enzymes to *Spodoptera exigua*. *Plant Protection*, 50(4): 168–175. [郭文丽, 杨慧, 段慢慢, 徐昊, 赵文甜, 王成菊, 2024. 唑虫酰胺对甜菜夜蛾亚致死效应及解毒酶活性的影响. 植物保护, 50(4): 168–175.]

Huangpu JY, Li P, Gao DM, Guo X, 2024. Sub-lethal effect of chlorantraniliprole on predation function of *Harmonia axyridis*. *Chinese Journal of Biological Control*, 40(6): 1398–1405. [皇甫佳一, 李平, 高冬梅, 郭萧, 2024. 氯虫苯甲酰胺亚致死浓度对异色瓢虫捕食功能的影响. 中国生物防治学报, 40(6): 1398–1405.]

Jiang ZX, Wu DH, Yang SW, Li YR, Yang ZX, Yang MX, Chen YH, Chen H, Chen GH, Zhang XM, 2022. Effects of deltamethrin on the predatory ability of *Orius similis* against *Tuta absoluta*. *Plant Protection*, 48(6):127–132. [蒋正雄, 吴道慧, 羊绍武, 李宜儒, 杨智雄, 杨茂兴, 陈永虹, 陈恒, 陈国华, 张晓明, 2022. 溴氰菊酯对南方小花蝽捕食番茄潜叶蛾能力的影响. 植物保护, 48(6):127–132.]

Li Z, Li K, Xi YQ, Li ZY, Li X, Wei JZ, An SH, Yin XM, 2024. Sublethal concentration of beta-cypermethrin results in the mating failure of *Helicoverpa armigera* by inhibiting sex pheromone biosynthesis. *Entomologia Generalis*, 44(3): 653–662.

Li Z, Li ZY, Xi YQ, Su LJ, An SH, Yin XM, 2025. Sublethal and lethal concentrations of deltamethrin suppresses the population growth of *Bactrocera dorsalis*. *Entomologia Generalis*, 45(1): 239–251.

Liu C, Zhao LC, Pan PL, 2017. Development and utilization of two newly discovered natural enemies of tea geometrid. *Agricultural Technology Services*, 34(23): 1–2. [刘超, 赵琳超, 潘鹏亮. 两种新发现的茶尺蠖天敌的开发与利用. 农技服务, 34(23): 1–2.]

Liu XG, Wang QG, Liu XM, Li X, Du MF, Tian CH, Zhang YH, An SH, 2025. Chronic sublethal exposure to chlorantraniliprole inhibits growth and development by disrupting the sugar and fatty acid metabolism in *Spodoptera frugiperda*. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 208: e106302.

Meunier J, Dufour J, Meyel SV, Rault M, Lécureuil C, 2020. Sublethal exposure to deltamethrin impairs maternal egg care in the European earwig *Forficula auricularia*. *Chemosphere*, 258: e127383.

Qi ZX, Lin J, Gao RC, Wu WZ, Zhang Y, Wei XY, Xiao X, Wang HL, Peng Y, Clark JM, Park Y, Sun QC, 2022. Transcriptome analysis provides insight into deltamethrin-induced fat accumulation in 3T3-L1 adipocytes. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 184: 105114.

Shang J, Yao YS, Chen LL, Zhu XZ, Niu L, Gao XK, Luo JY, Ji JC, Cui JJ, 2021. Sublethal exposure to deltamethrin stimulates reproduction and alters symbiotic bacteria in *Aphis gossypii*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 69(50): 15097–15107.

Shi MZ, Fu JW, Li JY, Qi X, You MS, 2023. Projection of insect population dynamics with age-stage，two-sex life tableand its application in pest management. *Acta Entomologica Sinica*, 66(2): 255–266. [史梦竹, 傅建炜, 李建宇, 齐心, 尤民生, 2023. 运用年龄-龄期两性生命表模拟昆虫种群动态及其在害虫治理中的应用. 昆虫学报, 66(2): 255–266.]

Su Y, 2022. Sublethal effect of neonicotinoid insecticides on non-target insects, *Chrysopa pallens* (Rambur). Doctor dissertation. Alaer: Tarim University. [苏悦, 2022. 新烟碱杀虫剂对非靶标昆虫大草蛉的亚致死效应. 硕士学位论文. 阿拉尔: 塔里木大学.]

Tuan SJ, Lee CC, Chi H, 2014. Population and damage projection of *Spodoptera litura* (F.) on peanuts (*Arachis hypogaea* L.) under different conditions using the age-stage, two-sex life table. *Pest Management Science*, 70(12): 1936.

Wan MH, Song SJ, Feng WL, Wang XY, Shen J, 2023. Metal-organic framework (UiO-66)-based pesticide delivery system for effective deltamethrin loading and sustained pesticide release. *ACS Applied Engineering Materials*, 1(4): 1079–1085.

Wan NF, Woodcock BA, Scherber C, Wyckhuys KAG, Li Z, Qian XH, 2025. Leaving synthetic pesticides behind. *Science*, 388(6748): 712–713.

Wang J, Liu YY, Yan YJ, Wang AX, Jiang YY, Wen ZX, Qiao K, Li HQ, Hu TT, Ma YF, Zhou SL, Gui WJ, Li SY, 2024a. miR-29b-triggered epigenetic regulation of cardiotoxicity following exposure to deltamethrin in zebrafish. *Journal of Hazardous Materials*, 476: 135213.

Wang NM, Wang ZJ, Gong SY, Zhang YS, Xue CB, 2024b. Sublethal concentration of λ-cyhalothrin inhibits insulin-like peptides and leads to reproductive toxicity in *Chrysoperla sinica*. *Insect Science*, 32(4): 1351–1364.

Wang XQ, 2023. Sublethal effect of deltamethrin on *Habrobracon hebetor* and the function of reproductive related genes. Doctor dissertation. Guiyang: Guizhou University. [王秀琴, 2023. 溴氰菊酯对麦蛾茧蜂的亚致死效应及其生殖相关基因功能研究. 博士学位论文. 贵阳: 贵州大学.]

Wu SY, Jiang QH, Huang CY, Yang HL, Zhang CH, Yin MZ, Shen J, Yan S, Li H, 2024. Construction of a nontoxic nano-pesticide and its co-application with natural predators for perfect cooperative pest management: An innovative strategy for pesticide reduction. *Environmental Science*: *Nano*, 11(5): 1902–1914.

Xu S, 2024. Study on the sublethal effect of chlorpyrifos on the predatory natural enemy, *Eocanthecona furcellata*, in litchi orchards. Doctor dissertation. Nanning: Guangxi University. [徐淑, 2024. 毒死蜱对荔枝园捕食性天敌叉角厉蝽的亚致死效应研究. 博士学位论文. 南宁: 广西大学.]

Yang H, Jiang HT, He HG, 2020. Progress on the effects of pesticides on the predatory natural enemies. *Journal of Biosafety*, 29(1): 1–7. [杨慧, 蒋皓天, 何恒果, 2020. 农药对捕食性天敌的影响研究进展. 生物安全学报, 29(1): 1–7.]

Yao MY, 2019. Studies on biology and predacious function of *Eocanthecona furcellata*. Master dissertation. Guiyang: Guizhou University. [姚明勇, 2019. 叉角厉蝽生物学及捕食作用研究. 硕士学位论文. 贵阳: 贵州大学.]

Yuan WN, Chen W, Fang Y, Liu CZ, 2015. Effects of sublethal doses of two insecticides on predation of *Propylaea japonica*. *Grassland and Turf*, 35(6): 65–70. [袁伟宁, 陈威, 方圆, 刘长仲, 2015. 两种杀虫剂亚致死剂量对龟纹瓢虫捕食功能反应的影响. 草原与草坪, 35(6): 65–70.]

Yue YL, Lü JH, Hao Z, Bai CQ, Guo YF, 2025. Study on potential impact of deltamethrin on *Habrobracon hebetor* Say. *Journal of Henan University of Technology* (*Natural Science Edition*), Doi: 10.16433/j. 1673-2383. 202501250001. [岳艳丽, 吕建华, 郝琢, 白春启, 郭亚飞, 2025. 溴氰菊酯对麦蛾茧蜂的潜在影响. 河南工业大学学报(自然科学版), Doi: 10.16433/j. 1673-2383. 202501250001.]

Zhang YH, Zhang Y, Li Z, Liu XG, Liu XM, Yao SY, Du MF, An SH, 2025. Sublethal indoxacarb exposure alters pheromone production and ovarian development in the yellow peach moth, *Conogethes punctiferalis*. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 210: e106368.

Zhe SY, 2023. Studies on predatory characteristics, starvation tolerance and control efficiency of *Eocanthecona furcellata* (Wolff). Master dissertation. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University. [折思怡, 2023. 叉角厉蝽捕食特性、耐饥能力及防效研究. 硕士学位论文. 福州: 福建农林大学.]

Zhou S, Dong J, Liu YT, Yang QH, Xu N, Yang YB, Ai XH, 2021. Effects of acute deltamethrin exposure on kidney transcriptome and intestinal microbiota in goldfish (*Carassius auratus*). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 225: e112716.