

亚致死浓度吡虫啉跨代抑制豌豆蚜的生长发育与繁殖力

李德军^{1,2} 朱凯辉² 郝浩阳^{1,2} 刘旭² 杨春媚² 牙森·沙力^{1*} 涂雄兵^{2*}

(1. 新疆农业大学农学院, 农林有害生物监测与安全防控重点实验室, 乌鲁木齐 830052;
2. 中国农业科学院植物保护研究所, 植物病虫害生物学国家重点实验室, 北京 100193)

摘要: 为阐明亚致死浓度吡虫啉对豌豆蚜 *Acyrtosiphon pisum* 产生的跨代效应, 通过毒力测定确定吡虫啉对豌豆蚜的亚致死浓度, 通过构建种群生命表系统解析豌豆蚜 F_0 代和 F_1 代暴露于亚致死浓度吡虫啉后对其 F_2 代生长发育与繁殖的跨代影响。结果显示: 0.1、0.5 和 1.0 mg/L 浓度吡虫啉对豌豆蚜 F_0 代的成虫存活率、单日产若蚜数以及各虫态发育历期均无显著影响; 而当浓度 ≥ 2.0 mg/L 时, 则对这些指标产生显著的抑制或致死效应。1.0 mg/L 浓度吡虫啉处理豌豆蚜 F_0 代和 F_1 代后, 其 F_2 代的成虫期缩短至 12.41 d, 繁殖期缩短至 11.86 d, 单雌总产仔量降低至 30.60 头, 均显著低于对照; 其 F_2 代 4 龄若虫和成虫的最高存活率分别降至 39.4% 和 58.2%, 种群半数死亡时间提前至 24~25 d, 净增殖率、内禀增长率和周限增长率均较对照显著下降。表明豌豆蚜暴露于亚致死浓度吡虫啉 (尤其是 1.0 mg/L) 后可对其 F_2 代的生长发育、繁殖力及种群增长潜力有明显的跨代抑制作用。

关键词: 豌豆蚜; 吡虫啉; 亚致死浓度; 生命表; 种群参数; 繁殖; 发育

Transgenerational inhibitory effects of sublethal imidacloprid concentrations on the growth, development, and reproduction of the pea aphid *Acyrtosiphon pisum*

Li Dejun^{1,2} Zhu Kaihui² Hao Haoyang^{1,2} Liu Xu² Yang Chunmei² Shali Yasen^{1*} Tu Xiongbing^{2*}

(1. Key Laboratory of Pest Monitoring and Safety Control of Crops and Forests, College of Agronomy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China; 2. State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

Abstract: To elucidate the transgenerational effects of sublethal imidacloprid concentrations on the pea aphid *Acyrtosiphon pisum*, toxicity bioassays were conducted to determine sublethal concentrations. A population life table approach was employed to systematically analyze the transgenerational impacts on growth, development, and reproduction in the F_2 generation following exposure of the parental (F_0) and first filial (F_1) generations to sublethal imidacloprid. The results showed that imidacloprid concentrations of 0.1, 0.5, and 1.0 mg/L had no significant effects on adult survival, daily nymph production, or developmental duration of various instars in the F_0 generation. However, concentrations ≥ 2.0 mg/L caused significant inhibitory or lethal effects on these parameters. After exposure of the F_0 and F_1 generations to 1.0 mg/L imidacloprid, the adult longevity, and reproductive period of the F_2 generation were significantly reduced to 12.41 d, 11.86 d, respectively, and total fecundity per female decreased to 30.60 offspring, all of which were significantly lower than those of the control. In addition, the peak survival rates of the 4th-instar nymphs and adults in the F_2 generation decreased to 39.4% and 58.2%, respec-

tively. Furthermore, the median survival time of the population advanced to 24–25 d, and key population parameters, including the net reproductive rate, intrinsic rate of increase, and finite rate of increase, were all significantly lower than those of the control. These findings indicate that exposure of pea aphids to sublethal concentrations of imidacloprid, particularly at 1.0 mg/L, can exert significant trans-generational inhibitory effects on growth, development, fecundity, and population growth potential in the F_2 generation.

Key words: *Acyrtosiphon pisum*; imidacloprid; sublethal concentration; life table; population parameter; reproduction; development

紫花苜蓿 *Medicago sativa* 是豆科苜蓿属多年生宿根草本植物,被称为牧草之王,是重要的饲料作物(Li et al., 2015; Tufarelli et al., 2018)。随着我国畜牧业的快速发展,紫花苜蓿种植面积持续扩大,目前已突破200万 hm^2 (王亭等, 2024)。规模化种植导致紫花苜蓿田景观单一化(Li et al., 2022),虫害日益严重,直接影响紫花苜蓿的产量和品质。豌豆蚜 *Acyrtosiphon pisum* 属半翅目蚜科无管网蚜属 *Acyrtosiphon*(Li et al., 2019; Huang et al., 2023),为全球性害虫,其刺吸式口器取食苜蓿韧皮部汁液引发叶片黄化,导致植株营养流失,粗蛋白和粗脂肪含量显著减少(Bos et al., 2010),同时分泌蜜露并传播病毒,严重影响苜蓿的生长发育及农艺性状(He & Zhang, 2006)。

目前蚜虫防治仍以化学杀虫剂为主。化学农药的使用不仅直接杀灭靶标害虫,而且其活性成分还会在环境中残留。随着时间推移,这些农药会通过漂移、挥发、降解等过程衰减,最终在田间形成普遍存在的亚致死剂量(Desneux et al., 2004)。现有研究多集中于亚致死剂量对靶标害虫当代的直接影响,其通过亲代暴露对后代种群如 F_2 代产生的跨代效应往往被忽视。这种效应可能导致害虫种群发生难以预测的长期变化,或隐性增强其适应性。因此,系统评估亚致死浓度吡虫啉对豌豆蚜的跨代影响,对于全面认识其生态风险、制订可持续治理策略具有关键意义。目前学术界对杀虫剂亚致死浓度尚未形成统一的定义。例如, Haynes(1988)将其定义为导致昆虫出现中毒反应但不会立即死亡,并能改变其行为或生理生化功能的剂量; Desneux et al.(2007)则将其界定为不会造成显著致死效应,但可影响昆虫正常行为、生长发育、繁殖力及后代存活率的药剂浓度。关于杀虫剂亚致死浓度对昆虫生长发育和繁殖影响的研究较多(Kerns & Stewart, 2000; Stark & Banks, 2003)。例如, Ullah et al.(2019)研究表明亚致死浓度吡虫啉处理可显著缩短桃蚜 *Myzus*

persicae 寿命并降低其繁殖力。Liu et al.(2022)研究也表明氟啶虫胺腈亚致死浓度处理会显著抑制桃蚜后代的繁殖力。因此,系统评估杀虫剂亚致死浓度对靶标害虫及其后代的影响对于理解害虫种群动态变化机制具有重要意义。吡虫啉是一种新型硝基亚甲基类内吸性杀虫剂,具有高效广谱的杀虫特性(Liu et al., 2023),被广泛用于苜蓿害虫的防治。罗兰等(2017)研究表明有效成分为 $35.7 \text{ g}/\text{hm}^2$ 的吡虫啉施用7 d后对苜蓿斑蚜 *Therioaphis trifolii* 的防效可达94.78%。虽然已有大量研究证实吡虫啉对多种害虫有显著的毒杀作用。例如,一次性施用吡虫啉制剂可将发生期麦蚜的种群数量控制在防治指标下,防效可达90.82%(徐维红等, 2020); 10%吡虫啉制剂施用对烟粉虱 *Bemisia tabaci* 的防治效果可达63.16%(武霖通等, 2018)。但关于亚致死浓度吡虫啉对豌豆蚜跨代效应的研究未见报道。

近年来,为深入解析农药亚致死效应的内在机制,研究手段已从传统生命表向分子层面拓展。转录组测序技术为揭示其引起的基因表达变化提供了强大工具(Amezian et al., 2021)。同时,昆虫的免疫能力作为衡量其适应度与健康状态的关键指标也被用于评估环境压力的生理代价(Wu et al., 2010; Liu et al., 2015),其中 Janus 激酶(Janus kinase, JAK)/信号转导子和转录激活子免疫通路(signal transducer and activator of transcription, STAT)等核心免疫通路的激活水平可作为定量评估昆虫抗菌免疫反应的灵敏生物标志物(Ding et al., 2024)。因此,整合种群生命表分析与关键免疫指标测定,有望从个体发育与生理防御相结合的角度更全面地阐明亚致死浓度吡虫啉的跨代影响机制(王秀梅等, 2014; 贾筱沅等, 2023)。本研究拟通过毒力测定确定吡虫啉对豌豆蚜的亚致死浓度,通过构建种群生命表系统解析 F_0 和 F_1 代豌豆蚜暴露于亚致死浓度吡虫啉后对其 F_2 代豌豆蚜生长发育与繁殖的跨代影响,以期为全面评估吡虫啉的生态风险及制订可持续治理策略提供

科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试昆虫和植物:2024年6月中旬自河北省黄骅市紫花苜蓿田间采集豌豆蚜种群,置于长40 cm、宽30 cm、高30 cm的塑料养虫笼内,盒子顶层由孔径0.025 mm纱网代替,养虫笼置于温度22~24℃、相对湿度(60~75)%、光周期16 L:8 D、光照强度>1 000 lx的人工气候箱中,用紫花苜蓿植株继代饲养,取羽化后24 h成虫和6 h内孵化的1龄若虫供试。紫花苜蓿品种为WL343,种子购自北京克劳沃草业技术开发中心,将种子播种于盛有灭菌营养土(草炭与蛭石体积比为3:1)、直径15 cm、高12 cm的塑料花盆中,每盆播种10粒,出苗后间苗,每盆5株健壮幼苗;将花盆置于上述相同条件的人工气候箱中培养,待其生长至30 d时,选取健康、长势一致的顶部嫩枝叶片用于饲喂豌豆蚜及后续试验处理。

供试杀虫剂和仪器:纯度≥99.0%的吡虫啉(imidacloprid)标准品,上海源叶生物科技有限公司;丙酮标准品,安谱云实验用品(上海)有限公司。RXZ-380型人工气候箱,宁波江南仪器厂。

1.2 方法

1.2.1 吡虫啉对豌豆蚜 F_0 代存活率和繁殖力的影响

采用浸叶法测定不同浓度吡虫啉对豌豆蚜 F_0 代成虫存活率和繁殖力的影响。精确称取吡虫啉标准品0.5 g,用0.1%吐温水溶解并定容至50 mL,配制成浓度为10 g/L的母液。用0.1%吐温水将母液逐级稀释,配制成终体积均为500 mL的系列浓度溶液,其梯度浓度分别为0.1、0.5、1.0、2.0、4.0、6.0和8.0 mg/L。以500 mL 0.1%吐温水(含0.1%丙酮)溶液作为对照。从生长30 d的WL343紫花苜蓿中采摘新鲜顶部分枝叶片,每片叶长度超过2 cm,共采集150片,采收后6 h内用于试验。将不同浓度吡虫啉溶液分别置于1 000 mL玻璃烧杯中,将叶片置于不同浓度吡虫啉溶液中浸泡60 s,取出后平铺于无菌滤纸上自然晾干,随后转移至直径9.0 cm、高1.5 cm的塑料培养皿中,培养皿底部预先铺设3 mm厚、浓度为0.1 g/mL的水琼脂层,防止叶片萎蔫。每个培养皿中放入3片叶片,每个培养皿中接入50头豌豆蚜孤雌成虫(1个重复)。定殖后1 h开始计时,每日09:00点观察试虫的死亡情况,使用细毛刷精细清除所有新孵化的若虫,统计试虫的死亡数量及若虫数量,计算存活率及单日产若蚜数,持续10 d。培养皿中叶片每2 d更换1次,更换叶片时用细毛刷

将供试蚜虫小心转移至新鲜叶片上,不要损伤蚜虫的刺吸式口器。新更换的叶片采集时间不超过6 h,且已在相应浓度的吡虫啉溶液中充分浸泡。每个浓度5个重复。所有试验均在人工气候箱中进行,条件同上。

1.2.2 吡虫啉对豌豆蚜 F_0 代各虫态发育历期的影响

采用浸叶法测定不同浓度吡虫啉对豌豆蚜 F_0 代各虫态发育历期的影响。紫花苜蓿叶片选择及浸泡处理同1.2.1。取出后平铺于无菌滤纸上自然晾干,取1片紫花苜蓿叶片置于直径9.0 cm、高1.5 cm的培养皿中,底部预先铺设2 mm厚、浓度为0.1 g/mL的水琼脂层,取6 h内孵化的1龄若虫置于培养皿中,每皿1头(1个重复)。定殖1 h后开始计时,每日上午09:00观察并记录试虫的蜕皮情况及存活状态。待试虫发育至成虫并开始产仔后,每日使用细毛刷将新孵化的若蚜清除,以确保仅对原始供试个体进行持续观察。同时,每2 d更换1次苜蓿叶片,新更换的叶片采集时间不超过6 h,且已在相应浓度的吡虫啉溶液中充分浸泡。每个浓度20个重复。

1.2.3 豌豆蚜 F_2 代种群生命表数据的采集

综合1.2.1及1.2.2的结果,选取对 F_0 代豌豆蚜存活率、繁殖力及关键发育历期均无显著影响的最高浓度(1.0 mg/L)及1个较低浓度(0.1 mg/L)作为吡虫啉的亚致死浓度,用于后续跨代处理。采用浸叶法对豌豆蚜 F_0 代成虫持续施用亚致死浓度的吡虫啉,待其产下 F_1 代若蚜后继续用相同浓度的吡虫啉处理叶片饲喂 F_1 代至其成虫期,收集 F_1 代成虫产下的 F_2 代若蚜,在不含吡虫啉的环境中建立种群,用于构建生命表。

从1.2.1中经亚致死浓度(0.1 mg/L和1.0 mg/L)吡虫啉处理的 F_0 代成虫群体中收集其产后6 h内的新生若虫,作为 F_1 代起始种群。采用与1.2.1中 F_0 代相同的浸叶法,用相应浓度的吡虫啉处理的叶片持续饲喂 F_1 代个体,直至其发育至成虫。每2 d更换1次叶片,新更换的叶片采集时间不超过6 h,且已在相应浓度的吡虫啉溶液中充分浸泡。取羽化后6 h内的 F_1 代成虫,单头转移至不含吡虫啉的全新培养皿中,饲喂仅用0.1%吐温水溶液浸泡的叶片。待其产出 F_2 代若虫后,于若虫孵化6 h内,将其单头转移至不含吡虫啉的新培养皿中(1个重复)。以0.1%吐温水溶液作为对照,每个处理100个重复。每日上午09:00定时观察并记录每个 F_2 代个体的存活状态、蜕皮情况(以确定发育历期)、每日产仔量及最终寿命,直至所有个体死亡。根据所获的个体生活史数据,构建 F_2 代种群的生命表。

1.2.4 豌豆蚜F₂代种群生命表的构建

根据1.2.3豌豆蚜F₂代个体的生活史数据,采用TWOSEX-MSChart软件构建生命周期表(Chi & Liu, 1985; Chi, 1988),计算年龄-阶段特异性存活率 s_{xy} (新生若蚜存活到第 x 天且处于第 j 龄期的概率)、年龄特异性存活率 l_x (新生若蚜存活到第 x 天的概率)、年龄-阶段特异性繁殖力 f_{xy} (在第 x 天处于第 j 龄期的雌性成虫平均产仔数)、年龄特异性繁殖力 m_x (存活到第 x 天的所有个体平均产仔数)、年龄特异性净繁殖贡献 $l_x m_x$ 、年龄-阶段特异性生命期望 e_{xy} (已存活至第 x 天和第 j 龄期的个体预期还能存活的时长)以及年龄-阶段特异性生殖值 v_{xy} (已存活至第 x 天和第 j 龄期的个体未来预期繁殖的后代数量)。采用基于bootstrap重抽样(100 000次)的方法估计各生命表参数的方差及置信区间,并利用paired bootstrap检验法对不同处理组的生命表参数进行差异显著性分析(Chi, 1988; Chi & Su, 2006)。

基于上述年龄-阶段特异性参数,进一步计算净增殖率、内禀增长率、周限增长率以及平均世代周期等种群生命表参数。采用基于重采样的统计推断方法对各处理进行差异显著性检验,即将每个处理下的100个独立个体的完整生活史数据完全随机地划分为4个子样本组,每组25个独立个体。使用

TWOSEX-MSChart软件对每个子样本组独立构建年龄-阶段两性生命表,并计算其生命表参数。每个处理获得4个独立的参数估计值。

1.3 数据分析

采用SPSS 26.0软件对试验数据进行统计分析。利用单因素方差分析对不同浓度吡虫啉处理后豌豆蚜F₀代成虫死亡率、各虫态发育历期、繁殖力、净增殖率、内禀增长率、周限增长率以及平均世代周期等种群生命表参数进行分析,应用Tukey's HSD检验法进行多重比较。采用paired bootstrap检验法对其他生命表参数进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 吡虫啉对豌豆蚜的亚致死浓度确定

2.1.1 吡虫啉对豌豆蚜F₀代存活率的影响

在10 d的观测期内,低浓度(0.1、0.5、1.0 mg/L)吡虫啉处理后豌豆蚜F₀代的存活率均与对照差异不显著;中高浓度(≥ 2.0 mg/L)吡虫啉处理后豌豆蚜F₀代的存活率从第1天开始就与对照差异显著($P < 0.05$),并且随着浓度升高,豌豆蚜F₀代的存活率下降越明显,与对照的差异程度加剧(表1)。表明中高浓度吡虫啉对豌豆蚜F₀代产生了持续且显著的致死作用。

表1 不同浓度吡虫啉处理后豌豆蚜F₀代成虫的存活率

Table 1 Survival rates of F₀ generation adult of pea aphids after treatment with imidacloprid at different concentrations

吡虫啉浓度 Imidacloprid concentration/(g/mL)	不同处理时间下的存活率 Survival rate at different treatment times/%					
	0	1 d	2 d	3 d	4 d	5 d
0(CK)	100.0±0.0 a	100.0±0.0 a	99.3±0.7 a	98.4±1.6 a	96.3±2.2 a	94.2±2.8 a
0.1	100.0±0.0 a	100.0±0.0 a	99.4±0.6 a	95.4±3.3 a	92.3±2.8 ab	90.1±4.3 a
0.5	100.0±0.0 a	98.7±1.1 a	97.2±2.4 a	94.5±3.3 a	90.4±3.2 ab	88.2±3.0 a
1.0	100.0±0.0 a	98.6±1.3 a	97.2±1.1 a	92.9±2.1 a	89.6±3.4 ab	86.3±2.7 a
2.0	100.0±0.0 a	95.4±2.0 b	91.6±3.2 b	87.5±3.2 b	83.2±4.4 b	77.7±5.1 b
4.0	100.0±0.0 a	93.2±3.8 bc	90.0±4.2 b	84.2±3.4 b	80.1±4.0 bc	70.3±4.6 bc
6.0	100.0±0.0 a	82.0±10.0 c	73.8±7.6 c	66.8±6.3 c	56.6±7.2 c	51.2±5.3 cd
8.0	100.0±0.0 a	42.0±10.0 d	34.2±6.4 d	32.3±5.2 d	27.9±5.2 d	26.1±6.0 d

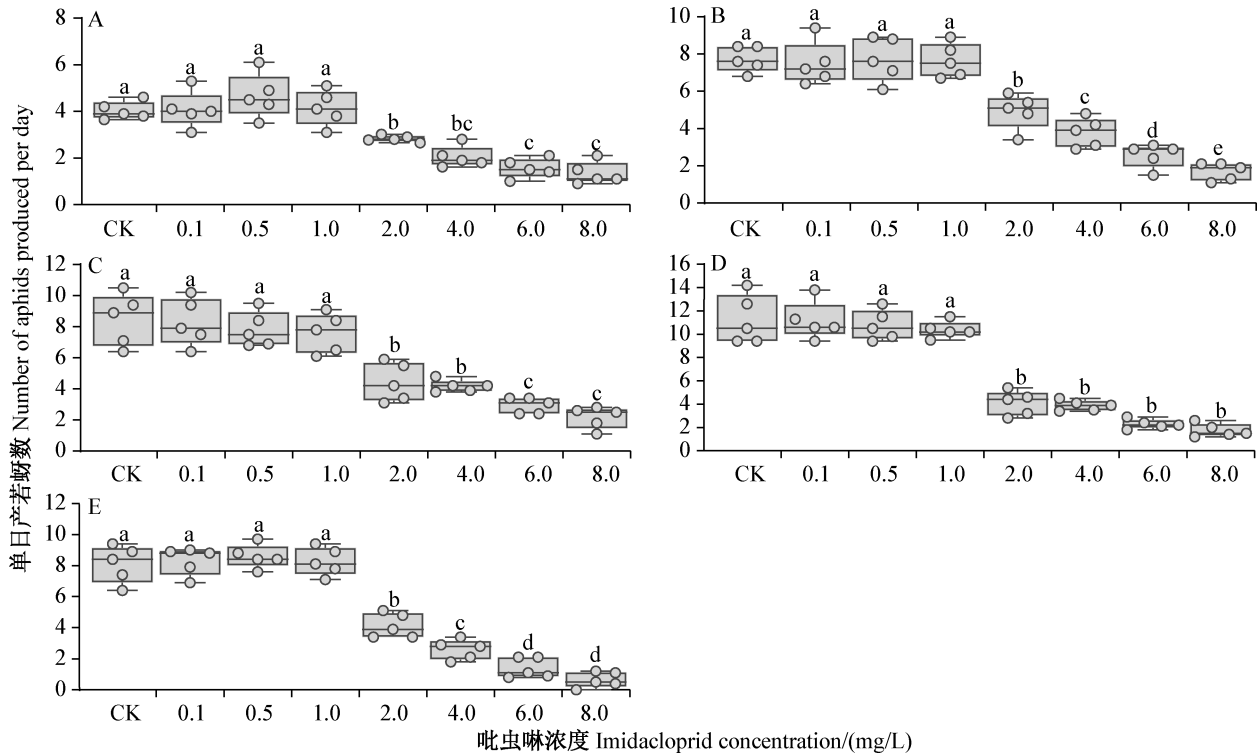
吡虫啉浓度 Imidacloprid concentration/(g/mL)	不同处理时间下的存活率 Survival rate at different treatment times/%				
	6 d	7 d	8 d	9 d	10 d
0(CK)	92.5±2.8 a	91.1±2.7 a	90.2±3.7 a	85.6±3.3 a	83.2±5.4 a
0.1	87.2±4.5 a	82.5±4.2 ab	82.3±4.1 a	79.4±4.8 a	75.3±3.8 ab
0.5	86.0±2.3 a	84.1±1.3 a	80.4±3.1 a	76.1±4.4 ab	75.2±4.4 ab
1.0	84.6±2.7 a	82.7±2.6 ab	81.7±3.2 a	78.9±3.4 a	75.1±5.4 ab
2.0	73.8±5.6 b	72.2±5.6 b	68.2±1.8 b	65.2±1.7 b	60.8±3.8 b
4.0	65.1±4.4 bc	57.1±4.0 c	49.2±6.4 c	45.2±6.8 c	37.4±7.3 c
6.0	43.0±5.8 c	35.4±6.7 d	25.6±10.4 d	16.1±7.3 d	12.1±6.4 d
8.0	20.3±4.2 d	13.8±5.3 e	11.3±4.8 e	6.4±3.8 e	3.2±2.1 e

表中数据为平均数±标准差。同列不同小写字母表示不同浓度之间经Tukey's HSD检验法检验差异显著($P < 0.05$)。Data are mean±SD. Different lowercase letters within the same column indicate significant differences among concentrations according to Tukey's HSD test ($P < 0.05$).

2.1.2 吡虫啉对豌豆蚜 F_0 代繁殖力的影响

0.1、0.5和1.0 mg/L吡虫啉处理1~10 d后,豌豆蚜单头单日产若蚜数均与对照差异不显著;而2.0、

4.0、6.0及8.0 mg/L浓度吡虫啉处理1~10 d后,豌豆蚜的单头单日产若蚜数均显著低于对照($P < 0.05$,图1)。



A~E:吡虫啉分别处理2、4、6、8和10 d。 A~E: Imidacloprid treatment for 2, 4, 6, 8 and 10 d, respectively.

图1 不同浓度吡虫啉对豌豆蚜单日产若蚜数的影响

Fig. 1 Effects of different concentrations of imidacloprid on the daily nymph production of *Acyrthosiphon pisum*

图中数据为平均数±标准差。不同小写字母表示不同浓度之间经Tukey's HSD检验法检验差异显著($P < 0.05$)。Data are mean±SD. Different lowercase letters indicate significant differences among concentrations according to Tukey's HSD test ($P < 0.05$).

2.1.3 吡虫啉对豌豆蚜 F_0 代各虫态发育历期的影响

吡虫啉7个浓度处理后,豌豆蚜1龄幼虫的发育历期均与对照差异不显著。0.1、0.5、1.0、2.0、4.0和6.0 mg/L浓度吡虫啉处理后,豌豆蚜2龄若虫和3龄若虫的发育历期均与对照差异不显著;而8.0 mg/L浓度吡虫啉处理后,豌豆蚜2龄若虫和3龄若虫的发育历期均显著低于对照($P < 0.05$)。0.1、0.5、1.0和2.0 mg/L浓度吡虫啉处理后,豌豆蚜4龄若虫的发育历期与对照差异不显著;而其他浓度处理后4龄若虫的发育历期均显著低于对照($P < 0.05$)。6.0 mg/L和8.0 mg/L浓度吡虫啉处理后,豌豆蚜成虫的发育历期分别为12.56 d和11.65 d,均显著低于对照($P < 0.05$);其他浓度处理后,豌豆蚜成虫的发育历期均与对照差异不显著(表2)。

综上所述,当吡虫啉浓度为0.1、0.5和1.0 mg/L

时,豌豆蚜 F_0 代的存活率、繁殖力及各虫态发育历期均与对照差异不显著。因此,本研究选取1个较低浓度(0.1 mg/L)和1个相对较高浓度(1.0 mg/L)作为代表探究吡虫啉亚致死浓度对豌豆蚜的跨代效应。

2.2 亚致死浓度对豌豆蚜 F_2 代发育及繁殖的影响

1.0 mg/L浓度吡虫啉处理豌豆蚜 F_0 代和 F_1 代后,其 F_2 代豌豆蚜的成虫期为12.41 d,雌成虫的繁殖期缩短至11.86 d,单雌总产仔量降低至30.60头,均显著低于对照($P < 0.05$);其 F_2 代豌豆蚜的1龄~4龄若虫的发育历期、全若虫期、总产卵前期、成虫产卵前期及平均寿命均与对照差异不显著(表3)。而0.1 mg/L亚致死浓度吡虫啉处理豌豆蚜 F_0 代和 F_1 代后,其 F_2 代豌豆蚜的发育历期和繁殖力均与对照差异不显著(表3)。

表2 不同浓度吡虫啉对F₀代豌豆蚜各虫态发育历期的影响Table 2 Effects of different concentrations of imidacloprid on the developmental durations of different life stages in F₀ generation *Acyrtosiphon pisum*

吡虫啉浓度 Imidacloprid concentration/ (mg/L)	发育历期 Developmental duration/d				
	1龄 1st instar	2龄 2nd instar	3龄 3rd instar	4龄 4th instar	成虫 Adult
对照CK	1.70±0.68 a	2.45±0.79 a	2.32±0.93 a	2.90±1.15 a	15.33±3.07 a
0.1	1.72±0.64 a	2.51±0.83 a	2.41±0.84 a	2.87±1.11 a	15.64±3.04 a
0.5	1.77±0.59 a	2.49±0.76 a	2.43±0.75 a	2.95±1.07 a	15.39±3.15 a
1.0	1.79±0.68 a	2.58±0.44 a	2.51±0.68 a	3.04±1.21 ab	14.94±3.91 a
2.0	1.84±0.57 a	2.61±0.57 a	2.69±0.71 ab	3.15±1.28 ab	13.85±3.47 ab
4.0	1.86±0.51 a	2.73±0.59 ab	2.77±0.61 ab	3.34±1.23 b	12.94±3.15 ab
6.0	1.94±0.75 a	2.76±0.58 ab	2.78±0.66 ab	3.44±1.34 b	12.56±3.94 b
8.0	1.92±0.68 a	2.97±0.49 b	2.84±0.79 b	3.56±1.28 b	11.65±5.16 b

表中数据为平均数±标准误。同列不同小写字母表示经 Tukey's HSD 检验法检验差异显著 ($P<0.05$)。Data are mean±SE. Different lowercase letters within the same column indicate significant differences according to Tukey's HSD test ($P<0.05$).

表3 亚致死浓度吡虫啉处理豌豆蚜F₀代和F₁代对其F₂代发育历期及繁殖力的影响Table 3 Transgenerational effects of sublethal imidacloprid exposure in the F₀ and F₁ generations on developmental durations and reproduction of the F₂ generation in *Acyrtosiphon pisum*

吡虫啉浓度 Imidacloprid concentration/(mg/L)	发育历期 Developmental duration/d					
	1龄若虫 1st instar nymph	2龄若虫 2nd instar nymph	3龄若虫 3rd instar nymph	4龄若虫 4th instar nymph	若虫 Pre-adult/d	成虫 Adult
对照CK	1.70±0.69 a	2.45±0.80 a	2.33±0.94 a	2.90±1.15 a	8.35±3.08 a	15.33±6.07 a
0.1	1.61±0.63 a	2.26±0.81 a	2.38±0.98 a	2.92±1.14 a	8.19±3.01 a	15.45±5.22 a
1.0	1.70±0.67 a	2.51±0.86 a	2.85±1.15 a	3.01±1.16 a	8.24±3.27 a	12.41±3.92 b
吡虫啉浓度 Imidacloprid concentration/(mg/L)	总产卵前期 Adult pre-oviposition period/d	成虫产卵前期 Total pre-oviposition period/d	繁殖期 Reproductive period/d	若虫存活率 Pre-adult survival rate/%	单雌总产仔量 Total fecundity per female	平均寿命 Mean total longevity/d
对照CK	0.34±0.08 a	8.71±2.18 a	14.86±3.61 a	80.02±9.84 a	51.70±24.85 a	20.61±7.58 a
0.1	0.39±0.15 a	8.58±2.11 a	12.68±2.97 a	76.86±8.66 a	48.58±17.94 a	20.58±9.15 a
1.0	0.41±0.11 a	8.94±2.34 a	11.86±2.79 b	58.34±5.67 b	30.60±19.81 b	18.46±9.46 a

表中数据为平均数±标准误。同列不同小写字母表示经 Tukey's HSD 检验法检验差异显著 ($P<0.05$)。Data are mean±SE. Different lowercase letters within the same column indicate significant differences according to Tukey's HSD test ($P<0.05$).

2.3 亚致死浓度对豌豆蚜F₂代生命表参数的影响

2.3.1 亚致死浓度对豌豆蚜F₂代种群存活率的影响

0.1 mg/L 和 1.0 mg/L 吡虫啉处理豌豆蚜F₀代和F₁代后,其F₂代1~3龄若虫的存活率曲线与对照重叠,并且与对照差异不明显;然而其F₂代4龄若虫的最高存活率分别为46.6%和39.4%,均低于对照(51.2%),其F₂代成虫的最高存活率分别为77.5%和58.2%,亦低于对照(78.6%,图2)。

2.3.2 对豌豆蚜F₂代种群繁殖力的影响

1.0 mg/L 亚致死浓度吡虫啉处理豌豆蚜F₀代和F₁代后,其F₂代豌豆蚜种群存活率降至50%的时间缩短至24~25 d,而对照则需27~28 d;0.1 mg/L 或

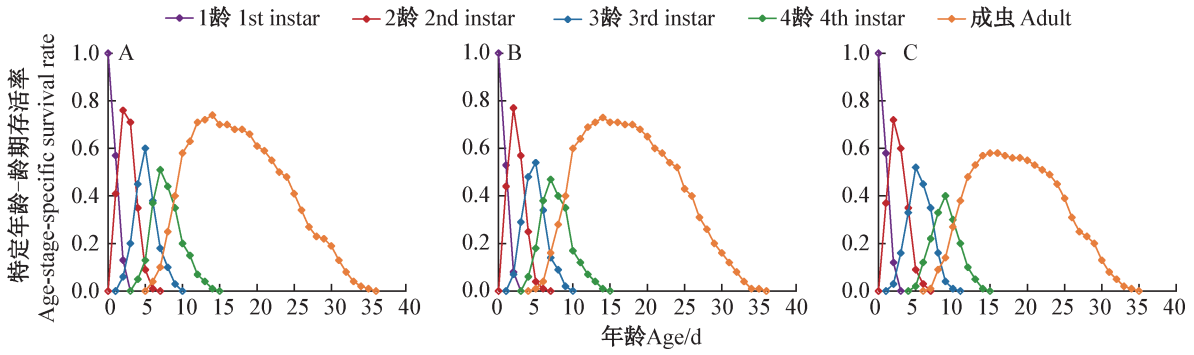
1.0 mg/L 亚致死浓度吡虫啉处理豌豆蚜F₀代和F₁代后,其F₂代豌豆蚜的特定年龄繁殖力与对照无明显差异(图3)。

2.3.3 对豌豆蚜F₂代种群寿命期望值的影响

0.1 mg/L 和 1.0 mg/L 亚致死浓度吡虫啉处理豌豆蚜F₀代和F₁代后,其F₂代豌豆蚜1~4龄若虫以及成虫的寿命期望值曲线与对照重叠,无明显差异(图4)。

2.3.4 对豌豆蚜F₂代繁殖值的影响

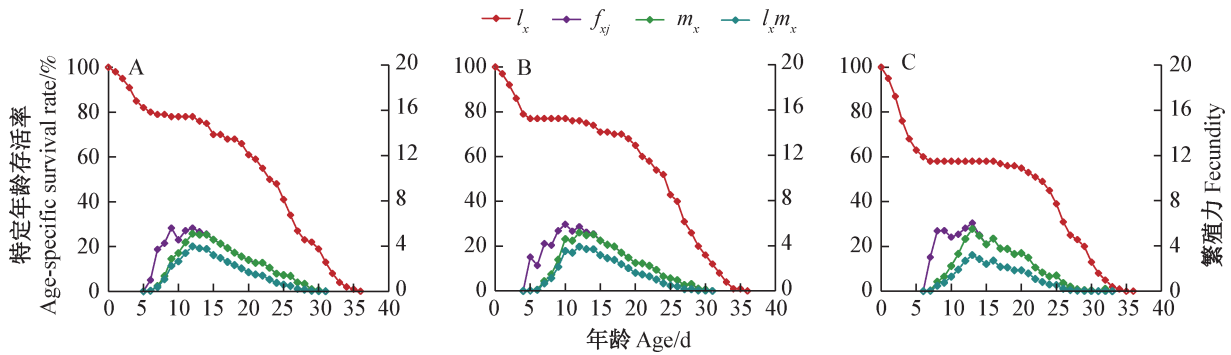
0.1 mg/L 和 1.0 mg/L 亚致死浓度吡虫啉处理F₀代和F₁代豌豆蚜后,其F₂代豌豆蚜1~4龄若虫以及成虫的繁殖值曲线与对照重叠,无明显差异(图5)。



A: 对照; B~C: 0.1 mg/L 和 1.0 mg/L 浓度吡虫啉。A: CK; B and C: imidacloprid treatments at concentrations of 0.1 mg/L and 1.0 mg/L, respectively.

图2 豌豆蚜 F_0 代和 F_1 代经不同浓度吡虫啉处理后其 F_2 代种群的特定年龄-期段存活率曲线

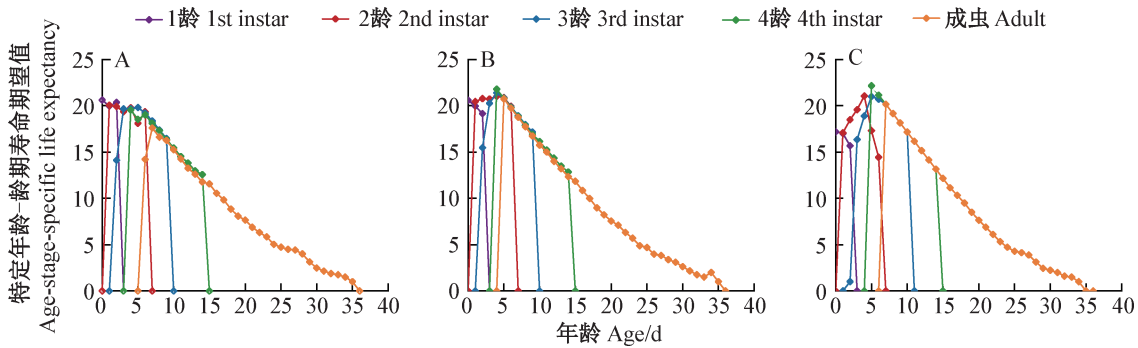
Fig. 2 Age-stage-specific survival rate curves of the F_2 generation of *Acyrthosiphon pisum* following different imidacloprid concentration treatments of the F_0 and F_1 generations



A: 对照; B~C: 0.1 mg/L 和 1.0 mg/L 浓度吡虫啉。 l_x : 年龄特异性存活率; f_{xy} : 年龄-阶段特异性繁殖力; m_x : 年龄特异性繁殖力; $l_x m_x$: 年龄特异性净繁殖贡献。A: CK; B~C: imidacloprid treatments at concentrations of 0.1 mg/L and 1.0 mg/L, respectively. l_x : age-specific survival rate; f_{xy} : age-stage-specific fecundity; m_x : age-specific fecundity; $l_x m_x$: age-specific net reproductive contribution.

图3 豌豆蚜 F_0 代和 F_1 代经不同吡虫啉处理后其 F_2 代种群的特定年龄存活率及特定年龄繁殖力曲线

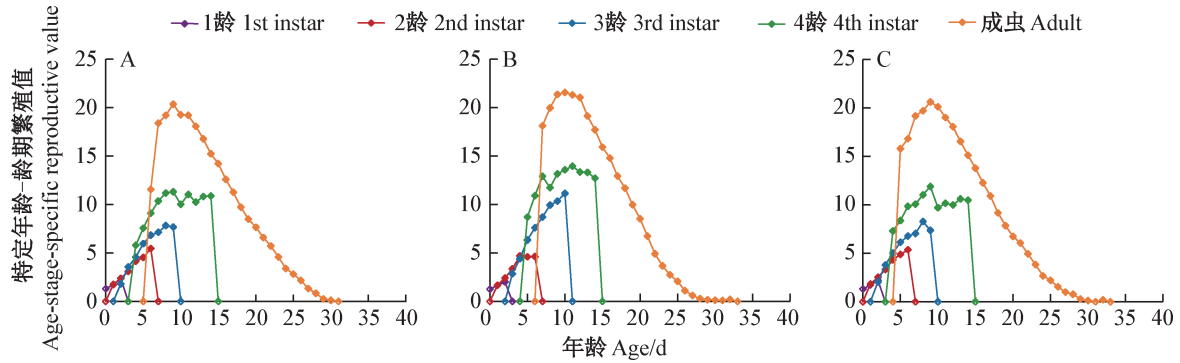
Fig. 3 Age-specific survival rate and fecundity curves of the F_2 generation of *Acyrthosiphon pisum* following different imidacloprid concentration treatments of the F_0 and F_1 generations



A: 对照; B~C: 0.1 mg/L 和 1.0 mg/L 浓度吡虫啉。A: CK; B and C: imidacloprid treatments at concentrations of 0.1 mg/L and 1.0 mg/L, respectively.

图4 豌豆蚜 F_0 代和 F_1 代经不同浓度吡虫啉处理后其 F_2 代种群的特定年龄-龄期寿命期望值曲线

Fig. 4 Age-stage-specific life expectancy curves of the F_2 generation of *Acyrthosiphon pisum* following different imidacloprid concentration treatments of the F_0 and F_1 generations



A: 对照; B~C: 0.1 mg/L 和 1.0 mg/L 浓度吡虫啉。A: CK; B and C: imidacloprid treatments at concentrations of 0.1 mg/L and 1.0 mg/L, respectively.

图5 豌豆蚜 F_0 和 F_1 代经不同浓度吡虫啉处理后其 F_2 代种群的特定年龄-龄期繁殖值曲线

Fig. 5 Age-stage-specific reproductive value curves of the F_2 generation of *Acyrthosiphon pisum* following different imidacloprid concentration treatments of the F_0 and F_1 generations

2.4 亚致死浓度对 F_2 代种群生命表参数的影响

1.0 mg/L 亚致死浓度吡虫啉处理豌豆蚜 F_0 和 F_1 代后, 其 F_2 代种群的净增殖率为 31.15, 显著低于对照和 0.1 mg/L 浓度处理 ($P < 0.05$); 同样, 其 F_2 代种群的内禀增长率和周限增长率也显著低于对照和 0.1 mg/L 浓度处理 ($P < 0.05$, 表 4), 表明豌豆蚜 F_0 和 F_1 代持续暴露于 1.0 mg/L 吡虫啉可显著抑制其 F_2 代种群的净增殖率、周限增长率和内禀增长率。

0.1 mg/L 和 1.0 mg/L 亚致死浓度吡虫啉处理豌豆蚜 F_0 和 F_1 代后, 其 F_2 代种群的平均世代周期分别为 14.70 d 和 15.21 d, 前者与对照差异不显著, 但后者显著长于对照 ($P < 0.05$, 表 4), 表明亚致死浓度吡虫啉处理后豌豆蚜种群更新速度减缓; 然而亚致死浓度吡虫啉处理后, 其 F_2 代种群的平均繁殖力与对照组差异不显著 (表 4)。

表 4 豌豆蚜 F_0 和 F_1 代经不同浓度吡虫啉处理后其 F_2 代种群的生命表参数

Table 4 Life table parameters of the F_2 generation of *Acyrthosiphon pisum* following different imidacloprid concentration treatments of the F_0 and F_1 generations

吡虫啉浓度 Imidacloprid concentration/(mg/L)	平均繁殖力 Mean fecundity	净增殖率 Net reproductive rate	周限增长率 Finite rate of increase/ d^{-1}	内禀增长率 Intrinsic rate of increase/ d^{-1}	平均世代周期 Mean generation time/d
对照 CK	51.52±1.25 a	42.20±0.51 a	1.31±0.01 a	0.27±0.01 a	14.02±0.15 a
0.1	51.13±1.12 a	42.70±0.39 a	1.30±0.01 a	0.27±0.01 a	14.70±0.20 ab
1.0	50.06±1.34 a	31.15±0.62 b	1.25±0.02 b	0.23±0.01 b	15.21±0.18 b

表中数据为平均数±标准误。同列不同小写字母表示经 Tukey's HSD 检验法检验差异显著 ($P < 0.05$)。Data are mean±SE. Different lowercase letters within the same column indicate significant differences according to Tukey's HSD test ($P < 0.05$).

3 讨论

本研究结果显示 0.1、0.5 和 1.0 mg/L 浓度吡虫啉处理后豌豆蚜 F_0 代成虫的存活率和单日产若蚜数以及各虫态发育历期均与对照无显著差异, 故将其作为亚致死浓度, 与 Desneux et al. (2007) 提出的不造成显著致死效应但可能影响昆虫生物学参数的浓度的定义相吻合。本研究结果显示吡虫啉对豌豆蚜 F_0 代的毒力作用呈明显的浓度依赖性, 其阈值约为 2.0 mg/L; 当浓度低于此阈值时, 对豌豆蚜 F_0 代的存活率、繁殖力及发育历期均无显著影响; 而浓度超

过此阈值时, 则引发显著的急性致死与繁殖抑制。此阈值效应模式与多种害虫对吡虫啉的响应规律相似, 但具体阈值因物种、生态型及试验条件而异。例如, 低浓度吡虫啉 (LC_{10}) 处理即可显著降低桃蚜 *Myzus persicae* 的繁殖力 (Ullah et al., 2019), 与本研究观察到的更高浓度 (≥ 2.0 mg/L) 吡虫啉才对豌豆蚜繁殖有抑制作用有所不同, 这可能反映了豌豆蚜与桃蚜在解毒代谢或靶标敏感性上的差异。Kerns & Stewart (2000) 研究结果虽然也显示亚致死剂量吡虫啉主要影响棉蚜 *Aphis gossypii* 种群增长率而非急性死亡率, 但本研究结果显示大于 2.0 mg/L

浓度的吡虫啉对豌豆蚜的快速致死效应更突出,这既印证了吡虫啉强效的触杀与内吸作用(Elbert et al., 2008),也表明其对于同翅目害虫不同种间的毒力差异。

新烟碱类杀虫剂的亚致死效应具有跨代传递的潜力。例如,Lashkari et al.(2007)研究表明亚致死浓度 LC_{30} 吡虫啉处理甘蓝蚜 *Brevicoryne brassicae* 亲代 48 h 后,其子代 F_1 种群的净增殖率从对照的 32.0 下降至 19.5 左右,内禀增长率亦显著降低;Wang et al.(2017)研究进一步证实棉蚜暴露于亚致死浓度烯啶虫胺 24 h 导致其 F_2 代单雌总产仔量从对照的 49.6 头降至 32.8 头左右,慢性暴露下其 F_2 代单雌总产仔量甚至降至 24.7 头左右,同时净增殖率显著下降,成虫寿命相应缩短。本研究结果显示豌豆蚜 F_0 代和 F_1 代持续暴露于 1.0 mg/L 吡虫啉后其 F_2 代的各虫态发育历期较对照无显著变化,其 F_2 代成虫期和雌成虫繁殖期显著缩短,单雌总产仔量大幅降低。这可能意味着亚致死吡虫啉的跨代效应更倾向于影响昆虫的生殖生理而非基础发育过程,究其原因可能是,药剂或其代谢产物通过亲代传递至卵或早期胚胎,干扰了与成虫发育和卵黄蛋白合成相关的基因表达或激素调控(Rix et al., 2016; Amezian et al., 2021),这为后续从分子生理学层面揭示其机制提供了明确方向。

本研究结果表明 1.0 mg/L 浓度吡虫啉处理豌豆蚜 F_0 代和 F_1 代后,其 F_2 代的净增殖率较对照显著下降。净增殖率是反映种群世代更替能力的主要参数,其下降意味着种群增长的内在潜力被实质性削弱。Liu et al.(2022)研究发现氟啶虫胺腈处理对桃蚜 *Myzus persicae* 跨代也有影响,净增殖率也下降,与本研究结果吻合。此外,本研究结果显示 1.0 mg/L 浓度吡虫啉处理豌豆蚜 F_0 代和 F_1 代后,其 F_2 代种群的内禀增长率显著低于对照和 0.1 mg/L 浓度处理,再结合特定年龄存活率曲线中不同浓度吡虫啉处理的豌豆蚜 F_2 代的存活率峰值降低和半数死亡时间提前的现象,表明长期暴露亚致死浓度吡虫啉可导致豌豆蚜种群生理与生存能力衰退,其风险主要体现在对种群恢复与增长基础的长期侵蚀,而非立即消灭种群,这也支持了 Stark & Banks(2003)关于种群水平风险评估的观点。

尽管本研究明确了吡虫啉亚致死浓度的跨代负面效应,但其存在局限性。首先,本研究在可控实验室条件下进行,未能涵盖田间温度波动、天敌互动、植物抗性等复杂因子,这些因子可能影响实际效应

(邢鲲等,2025)。其次,结论基于表型数据,缺乏对潜在分子机制(如表观遗传修饰、关键基因表达调控)的解析。最后,本研究未探讨这种跨代胁迫是否会改变豌豆蚜的行为(如翅型分化、寄主选择)或其对其他生物(如天敌)及非生物胁迫(如其他农药)的敏感性。未来研究可利用多组学技术,系统阐明跨代效应的遗传与表观遗传基础,在更接近田间的微宇宙或半田间系统中验证跨代效应并评估其对天敌-害虫-植物三级营养关系的影响,进行多代连续暴露试验探究种群是走向衰退还是可能通过快速进化(如抗性发展)产生适应性响应,这对于预测田间种群长期动态及制订抗性治理策略至关重要。

参 考 文 献 (References)

- Amezian D, Nauen R, Le Goff G. 2021. Transcriptional regulation of xenobiotic detoxification genes in insects: an overview. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 174: 104822
- Bos JIB, Prince D, Pitino M, Maffei ME, Win J, Hogenhout SA. 2010. A functional genomics approach identifies candidate effectors from the aphid species *Myzus persicae* (green peach aphid). *PLoS Genetics*, 6(11): e1001216
- Chi H. 1988. Life-table analysis incorporating both sexes and variable development rates among individuals. *Environmental Entomology*, 17(1): 26-34
- Chi H, Liu H. 1985. Two new methods for the study of insect population ecology. *Bulletin of the Institute of Zoology, Academia Sinica*, 24(2): 225-240
- Chi H, Su HY. 2006. Age-stage, two-sex life tables of *Aphidius gifuensis* (Ashmead) (Hymenoptera: Braconidae) and its host *Myzus persicae* (Sulzer) (Homoptera: Aphididae) with mathematical proof of the relationship between female fecundity and the net reproductive rate. *Environmental Entomology*, 35(1): 10-21
- Desneux N, Decourtye A, Delpuech JM. 2007. The sublethal effects of pesticides on beneficial arthropods. *Annual Review of Entomology*, 52: 81-106
- Desneux N, Pham-Delègue MH, Kaiser L. 2004. Effects of sub-lethal and lethal doses of lambda-cyhalothrin on oviposition experience and host-searching behaviour of a parasitic wasp, *Aphidius ervi*. *Pest Management Science*, 60(4): 381-389
- Ding B, Zhang C, He L, Zeng QH, Zhang SW, Yang HZ, Yang H. 2024. JAK/STAT signaling pathway is involved in antibacterial immunity in the green peach aphid *Myzus persicae* (Sulzer). *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 205: 106168
- Elbert A, Haas M, Springer B, Thielert W, Nauen R. 2008. Applied aspects of neonicotinoid uses in crop protection. *Pest Management Science*, 64(11): 1099-1105
- Haynes KF. 1988. Sublethal effects of neurotoxic insecticides on insect behavior. *Annual Review of Entomology*, 33: 149-168
- He CG, Zhang XG. 2006. Field evaluation of lucerne (*Medicago sativa*

- L.) for resistance to aphids in northern China. Australian Journal of Agricultural Research, 57(4): 471–475
- Huang TY, Liu Y, He K, Francis F, Wang B, Wang GR. 2023. Chromosome-level genome assembly of the spotted alfalfa aphid *Therioaphis trifolii*. Scientific Data, 10: 274
- Jia XY, Wang YD, Zhao ZH. 2023. Estimation of the invasiveness of alien fruit flies with life table. Journal of Plant Protection, 50(3): 839–840 (in Chinese) [贾筱沅, 王祎丹, 赵紫华. 2023. 应用昆虫生命表定量评价外来实蝇入侵力. 植物保护学报, 50(3): 839–840]
- Kerns DL, Stewart SD. 2000. Sublethal effects of insecticides on the intrinsic rate of increase of cotton aphid. Entomologia Experimentalis et Applicata, 94(1): 41–49
- Lashkari MR, Sahragard A, Ghadamyari M. 2007. Sublethal effects of imidacloprid and pymetrozine on population growth parameters of cabbage aphid, *Brevicoryne brassicae* on rapeseed, *Brassica napus* L. Insect Science, 14(3): 207–212
- Li J, Shang QX, Liu YQ, Dai WT, Li X, Wei SH, Hu GX, McNeill MR, Ban LP. 2022. Occurrence, distribution, and transmission of alfalfa viruses in China. Viruses, 14(7): 1519
- Li XH, Wei YL, Acharya A, Hansen JL, Crawford JL, Viands DR, Michaud R, Claessens A, Brummer EC. 2015. Genomic prediction of biomass yield in two selection cycles of a tetraploid alfalfa breeding population. Plant Genome, 8(2): 1–10
- Li YY, Park H, Smith TE, Moran NA. 2019. Gene family evolution in the pea aphid based on chromosome-level genome assembly. Molecular Biology and Evolution, 36(10): 2143–2156
- Liu JY, Zheng YQ, Dong FS, Li YB, Wu XH, Pan XL, Zhang YH, Xu J. 2023. Insight into the long-lasting control efficacy of neonicotinoid imidacloprid against wheat aphids during the entire growth period. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 71(32): 12167–12176
- Liu W, Liu JB, Lu YH, Gong YC, Zhu M, Chen F, Liang Z, Zhu LY, Kuang SL, Hu XL, et al. 2015. Immune signaling pathways activated in response to different pathogenic micro-organisms in *Bombyx mori*. Molecular Immunology, 65(2): 391–397
- Liu XL, Fu ZX, Zhu YF, Gao XW, Liu TX, Liang P. 2022. Sublethal and transgenerational effects of afidopyropen on biological traits of the green peach aphid *Myzus persicae* (Sluzer). Pesticide Biochemistry and Physiology, 180: 104981
- Luo L, Yuan ZL, Sun J. 2017. Effectiveness of different insecticides for control of aphids and thrips on alfalfa. Acta Prataculturae Sinica, 26(1): 160–167 (in Chinese) [罗兰, 袁忠林, 孙娟. 2017. 3种杀虫剂对苜蓿蚜虫和蓟马的防效及其在苜蓿中的残留. 草业学报, 26(1): 160–167]
- Rix RR, Ayyanath MM, Christopher Cutler G. 2016. Sublethal concentrations of imidacloprid increase reproduction, alter expression of detoxification genes, and prime *Myzus persicae* for subsequent stress. Journal of Pest Science, 89(2): 581–589
- Stark JD, Banks JE. 2003. Population-level effects of pesticides and other toxicants on arthropods. Annual Review of Entomology, 48: 505–519
- Tufarelli V, Ragni M, Laudadio V. 2018. Feeding forage in poultry: a promising alternative for the future of production systems. Agriculture, 8(6): 81
- Ullah F, Gul H, Desneux N, Tariq K, Ali A, Gao XW, Song DL. 2019. Clothianidin-induced sublethal effects and expression changes of vitellogenin and ecdysone receptors genes in the melon aphid, *Aphis gossypii*. Entomologia Generalis, 39(2): 137–149
- Wang SY, Qi YF, Desneux N, Shi XY, Biondi A, Gao XW. 2017. Sublethal and transgenerational effects of short-term and chronic exposures to the neonicotinoid nitenpyram on the cotton aphid *Aphis gossypii*. Journal of Pest Science, 90(1): 389–396
- Wang T, Liu SQ, Bai GW, Li YZ, Ye P, Zhang XY. 2024. Key points of alfalfa seed production technology. Inner Mongolia Forestry, (5): 35–37 (in Chinese) [王亭, 刘思琦, 白高娃, 李懿洲, 叶鹏, 张晓英. 2024. 紫花苜蓿种子生产技术要点. 内蒙古林业, (5): 35–37]
- Wang XM, Chen P, Zang LS, Qu SX, Ruan CC. 2014. Efficacy estimation of aphid parasitoid *Lysiphlebus fabarum* against cowpea aphid *Aphis craccivora* with life table technique. Journal of Plant Protection, 41(6): 687–691 (in Chinese) [王秀梅, 陈鹏, 臧连生, 曲淑贤, 阮长春. 2014. 基于生命表技术评价豆柄瘤蚜茧蜂对豆蚜的控害潜能. 植物保护学报, 41(6): 687–691]
- Wu LT, Ding W, Yu XW, Yu JM, Zeng QB, Zhang RP, Yan FF. 2018. Control effect of synergist Beichuang mixed with 10% imidacloprid on *Bemisia tabaci*. Plant Doctor, 31(4): 52–53 (in Chinese) [武霖通, 丁伟, 余祥文, 余佳敏, 曾庆宾, 张瑞平, 闫芳芳. 2018. 增效剂倍创与10%吡虫啉混用对烟粉虱的防治效果. 植物医生, 31(4): 52–53]
- Wu S, Zhang XF, He YQ, Shuai JB, Chen XM, Ling EJ. 2010. Expression of antimicrobial peptide genes in *Bombyx mori* gut modulated by oral bacterial infection and development. Developmental & Comparative Immunology, 34(11): 1191–1198
- Xing K, Yan YL, Wei N, Zhao F. 2025. The impact of diurnal temperature fluctuations and sublethal insecticide exposure on the life history traits and population parameters of the English grain aphid *Sitobion miscanthi*. Journal of Plant Protection, 52(1): 113–122 (in Chinese) [邢鲲, 闫奕龙, 韦娜, 赵飞. 2025. 昼夜温度波动与亚致死浓度杀虫剂对荻草谷网蚜生活史性状和种群参数的影响. 植物保护学报, 52(1): 113–122]
- Xu WH, Xu JY, Zou DY, Gao W. 2020. Effects of different application methods of imidacloprid on wheat aphid control and wheat yield. Agriculture and Technology, 40(18): 18–20 (in Chinese) [徐维红, 许静杨, 邹德玉, 高伟. 2020. 吡虫啉不同施药方式对麦蚜防治效果及小麦产量的影响. 农业与技术, 40(18): 18–20]

(责任编辑:张俊芳)