亚致死浓度氟啶虫胺腈对柑橘全爪螨的发育和繁殖的影响

孔新研，杨　翠，刘雯琪，袁咏艺，邹志文，夏　斌，辛天蓉*

（南昌大学生命科学学院，南昌 330031）

摘要：本研究旨在探讨亚致死浓度氟啶虫胺腈对F_0（当代）及F_1（第1代）代柑橘全爪螨*Panonychus citri* (McGregor)生长发育和繁殖的影响，为柑橘全爪螨的综合防治及氟啶虫胺腈的合理应用提供科学指导。本试验采用叶片浸渍法，观察了亚致死浓度（LC_5和LC_{10}）氟啶虫胺腈和对照处理条件下F_0代柑橘全爪螨存活、繁殖情况和F_1代柑橘全爪螨的个体发育历期、寿命、存活和繁殖情况，组建F_1年龄-阶段两性生命表。结果显示，亚致死浓度（LC_5和LC_{10}）氟啶虫胺腈处理后，F_0代柑橘全爪螨的产卵历期由4.52 d缩短至3.67 d，产卵量由17.98粒减少至14.00粒，以上指标均差异显著。亚致死浓度氟啶虫胺腈对柑橘全爪螨的影响存在跨代效应，对F_1代柑橘全爪螨的生长发育、繁殖和种群生命表参数均产生影响。在生长发育方面，亚致死浓度氟啶虫胺腈缩短F_1代柑橘全爪螨未成熟发育历期，雄螨从10.09 d缩短至9.5 d，雌螨从10.21 d缩短至9.56 d，显著加快发育速率；在繁殖力方面，亚致死浓度氟啶虫胺腈缩短F_1代柑橘全爪螨雌成螨的总产卵前期（TPOP），繁殖期从6.62 d延长至7.79 d，繁殖量从28.48粒增加至35.31粒；从种群生命表参数来看，亚致死浓度氟啶虫胺腈处理后F_1代柑橘全爪螨的净增殖率R_0由18.51增加至26.06，内禀增值率r由0.2128增加至0.2430，周限增长率λ由1.237增加至1.275，总繁殖率GRR由34.37增加至44.25，而种群加倍时间t缩短了0.405。综上，低浓度的氟啶虫胺腈显著抑制F_0代柑橘全爪螨雌成螨的繁殖，但对F_1代柑橘全爪螨的生长发育和繁殖起刺激作用，并影响其种群生命表参数，可能会刺激害螨种群的的再猖獗。

关键词：氟啶虫胺腈；柑橘全爪螨；年龄-阶段两性生命表；生长发育；繁殖

中图分类号：Q965.9;S433　　文献标识码：A

Effects of sublethal concentrations of sulfoxaflor on the development and reproduction of *Panonychus citri* McGregor (Acari: Tetranychidae)

KONG Xin-Yan, YANG Cui, LIU Wen-Qi, YUAN Yong-Yi, ZOU Zhi-Wen, XIA Bin, XIN Tian-Rong*（College of Life Sciences, Nanchang University, Nanchang 330031, China）

Abstract: In this study, the effects of sublethal concentrations of sulfoxaflor on the growth, development and reproduction of F_0 (contemporary) and F_1 (first generation) *Panonychus citri* were determined, which provided a scientific basis for the effective control of *P. citri* and the rational application of sulfoxaflor. In this study, the survival and reproduction of F_0 generation of *P. citri* and the individual development period, life span, survival and reproduction of F_1 generation of *P. citri* were observed by leaf-dipping method, and the age-stage, two-sex life table was conducted. The results indicated that after the female adults of *P. citri* were fed with the citrus leaves exposed to different concentrations of sulfoxaflor, the oviposition duration were significantly decreased from 4.52 d to 3.67 d, and the number of eggs laid per female were decreased from 17.98 to 14.00. The effect of sublethal concentration of sulfoxaflor on *P. citri* had a transgenerational effect, which affects the growth and development, reproduction and population life table parameters of the F_1 generation. In terms of growth and development, the pre-adult period was significantly reduced. The male mites were reduced from 10.09 d to 9.50 d, and the

基金项目：江西省自然科学基金（20224BAB205015）；农业农村部重点项目“农业外来入侵物种发生危害及扩散风险等调查(13220141)；江西省重点研发计划（20212BBF63042，20203BBF63041）

作者简介：孔新研，女，硕士研究生，研究方向为农业昆虫与害虫防治，E-mail：kongxy@email.ncu.edu.cn

*通讯作者Author for correspondence：辛天蓉，女，博士，副教授，主要研究方向为害虫综合防治，E-mail：xintianrong@ncu.edu.cn

收稿日期Received：2023-09-10；接受日期Accepted：2024-04-09

female mites were reduced from 10.21 d to 9.56 d, while the development rates were accelerated significantly. In terms of fecundity of adult females, compared with the control, the total pre-oviposition period (TPOP) of F_1 generation of *P. citri* treated with the sublethal concentration (LC_5 and LC_{10}) of sulfoxaflor were shortened; The oviposition of F_1 generation were prolonged from 6.62 d to 7.79 d, and the fecundity of F_1 generation were increased from 28.48 to 35.31. From the population life table parameters, the net reproductive rate of the F_1 generation of *P. citri* after treatments with sublethal concentrations of sulfoxaflor was increased from 18.51 to 26.06, the intrinsic rate of increase was increased from 0.2128 to 0.2430, the finite rate of increase was increased from 1.237 to 1.275, the gross reproduction rate was increased from 34.37 to 44.25, and the population doubling time was shorted by 0.405. In summary, exposure of *P. citri* to sublethal concentrations of sulfoxaflor resulted in negative effects on F_0 generation. However, the sublethal concentrations of sulfoxaflor had positive effects on F_1 generation, including stimulating the growth, development and reproduction, and affecting the life table parameters of populations. These results could lead to a later increase of population, as a pesticide-induced 'secondary pest outbreak'.

Key words: Sulfoxaflor; *Panonychus citri*; age-stage two-sex life table; fecundity; growth and development

柑橘全爪螨*Panonychus citri* McGregor，又名柑橘红蜘蛛、瘤皮红蜘蛛，属蛛形纲Arachnida蜱螨目Acarina叶螨科Tetranychidae全爪螨属*Panonychus*；被认为是为害柑橘和脐橙最严重且最顽固的世界性害螨，主要以成螨、若螨和幼螨刺吸叶片、绿色嫩梢及果实等的汁液，进而严重影响柑橘和脐橙等经济作物的产量和品质（冉春等，2013）。

氟啶虫胺腈（sulfoxaflor）是一种烟碱型乙酰胆碱受体激动剂（Zhu *et al.*，2011；Watson *et al.*，2021）。由于其在植物体内具有良好的渗透性和内吸性，同时对害虫有触杀作用，可有效防治柑橘木虱*Diaphorina citri*（Brar *et al.*，2017）、桃蚜*Myzus persicae*（王泽华等，2017）、点蜂缘蝽*Riptortus pedestris*（王自杰等，2023）等重要农业害虫。近年来，柑橘黄龙病严重危害柑橘类产量，其传媒昆虫主要以柑橘木虱为主。因此，利用新烟碱类杀虫剂防治柑橘木虱已经成为阻止黄龙病扩散的有效策略（Langdon *et al.*，2017）。然而，柑橘树上其他害虫（螨）也有可能因此接触到亚致死浓度新烟碱类杀虫剂。许多研究表明，新烟碱类杀虫剂可能对害螨有刺激作用，从而导致种群的再猖獗（Barati *et al.*，2015；Zanardi *et al.*，2018；Alimirzaee *et al.*，2023），但国内尚未见亚致死浓度氟啶虫胺腈对非靶标害虫柑橘全爪螨影响的相关报道。

研究发现，杀虫剂施于田间后，在环境中的毒力会随着时间延长逐渐递减到亚致死剂量，从而产生亚致死效应，对昆虫的生长发育、繁殖、生态行为和抗药性等产生不同程度的影响。亚致死效应可能抑制害虫的生长发育，从而有效进行害虫防治，如低剂量的氟啶虫胺腈会抑制桃蚜F_0、F_1代的生长发育和生殖（王泽华等，2017）。也有研究发现可能刺激害虫生殖，导致害虫的再猖獗（Morse.，1998；Cutler *et al.*，2022），如亚致死浓度的吡虫啉能够延长绿盲蝽*Apolygus lucorum*雌性寿命和产卵历期，缩短未成熟期（Tan *et al.*，2012）；三化螟*Scirpophaga incertulas*在低剂量吡虫啉处理后，每雌产卵量显著增加，保幼激素含量显著上升（Wang *et al.*，2005）。鉴于亚致死浓度新烟碱类杀虫剂氟啶虫胺腈对柑橘全爪螨的具体影响缺乏了解，本研究采用两性生命表技术探究亚致死浓度氟啶虫胺腈对F_0（当代）及F_1（第1代）代柑橘全爪螨生长发育及繁殖的影响，为柑橘全爪螨的综合防治及氟啶虫胺腈的合理应用提供理论依据。

1　材料与方法

1.1 供试虫源及药剂

供试柑橘全爪螨为实验室敏感品系，早期采自南昌大学生物园内，在实验室内不接触任何农药，用柑橘叶*Citrus reticulata* Blanco继代饲养至今。饲养条件为温度27℃±1℃，相对湿度70%~80%，光周期14 L∶10 D。氟啶虫胺腈标准品（100 mg/L，纯度≥99%）由北京百灵威科技有限公司提供。

1.2 试验方法

1.2.1 氟啶虫胺腈对F_0代柑橘全爪螨生物学特性的影响

根据本课题组前期开展的氟啶虫胺腈对柑橘全爪螨雌成螨的毒力测定结果，获得LC_5和LC_{10}分别是0.004 mg/L和0.006 mg/L（李珍珍，2023）。利用0.1%的Triton X-100溶液稀释氟啶虫胺腈标准品，制得LC_5和LC_{10}药液。

配制氟啶虫胺腈亚致死浓度LC_5和LC_{10}，以0.1% Triton X-100作为对照。采用叶片浸渍法将新鲜干净的柑橘叶于不同浓度的氟啶虫胺腈溶液中浸渍15 s，晾干后放入垫有吸水海绵的培养盒内，并用湿棉花将每片叶子及整个培养盒围住，防止柑橘全爪螨逃逸，随后将培养的生长发育一致的雌成螨和雄成螨转入到叶片上。药剂处理24 h后挑取65头雌成螨转移至新鲜未着药叶片，单头培养在小培养皿（直径2 cm）中，每天记录螨的存活及繁殖情况，至螨死亡，期间及时更换新鲜叶片，移去新产的卵。

1.2.2 氟啶虫胺腈对F_1代柑橘全爪螨的影响

采用建立两性生命表的方法评估氟啶虫胺腈亚致死浓度对F_1代柑橘全爪螨生长发育和繁殖的影响。亚致死浓度氟啶虫胺腈处理F_0代柑橘全爪螨24 h后，转移至新鲜叶片产卵24 h，每个处理组随机挑取80个F_0代产下的卵（F_1）单独饲养在小培养皿（直径2 cm）中，期间及时更换新鲜叶片并在发育成成螨后进行雌雄配对。每天记录F_1代柑橘全爪螨的发育、存活及繁殖情况，直至死亡。以0.1% Triton X-100处理作为对照。

1.3 数据分析

采用SPSS 26软件分析F_0代产卵量等各项参数的差异；运用Twosex-MSChart程序计算F_1代柑橘全爪螨生命表参数（Chi *et al.*，2006；Tuan *et al.*，2014），包括发育历期、成虫寿命、产卵前期（Pre-oviposition period，APOP）、总产卵前期（Total pre-oviposition period，TPOP）、产卵期、繁殖力以及种群的净增殖率（R_0）、周限增长率（λ）、内禀增长率（r）和平均世代周期（T）等；利用bootstrap技术计算生命表参数的平均值和标准误；利用Sigmaplot 14.0软件进行作图。具体计算公式如下：

期望寿命：$e_{xj} = \sum_{i=x}^{\infty}\sum_{v=i}^{m} s_{xj}$

特定年龄存活率：$l_x = \Sigma_{j=1}^{\beta} s_{xj}$

特定年龄生殖力：$m_x = \frac{\Sigma_{j=1}^{\beta} s_{xj} f_{xj}}{\Sigma_{j=1}^{\beta} s_{xj}}$

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

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

周限增长速率：$\lambda = \mathrm{e}^{\mathrm{r}}$

平均时代周期：$T = \frac{\ln R_0}{r}$

l_x，任何一个个体在X期间的存活概率；m_x，X期间平均每雌产卵数；e，为自然数；X，按天划分单位时间间距。

2 结果与分析

2.1 亚致死浓度氟啶虫胺腈对F_0代柑橘全爪螨雌成螨寿命、产卵量和存活率的影响

亚致死浓度氟啶虫胺腈对F_0代柑橘全爪螨雌成螨的寿命、产卵量和存活率有明显的影响（表1）。与对照组相比，两个药剂处理组F_0代柑橘全爪螨雌成螨的寿命均降低但差异不显著（$P>0.05$）。与对照组（4.52 d、17.98粒）相比，LC_5和LC_{10}杀虫剂处理组中雌成螨的产卵历期缩短、每雌产卵量降低，但LC_5处理组差异不显著（分别是3.90 d、15.75粒），LC_{10}处理组差异显著（分别是3.67 d、14粒）。另外，与对照组相比，随着时间的增加，LC_5和LC_{10}杀虫剂处理组雌成螨的存活率下降（图1）。这些实验结果表明亚致死浓度（LC_5和LC_{10}）氟啶虫胺腈缩短F_0代柑橘全爪螨产卵历期、产卵量和存活率。

表1 亚致死浓度氟啶虫胺腈对F_0代柑橘全爪螨雌成螨生物学特性的影响

Table1 Effect of sublethal concentrations of sulfoxaflor on biological traits of F_0 *Panonychus citri* adult females

药剂浓度 Concentration	雌成螨寿命（d） Adult longevity	产卵历期（d） Reproductive period	每雌产卵量(eggs/female) Number of egg laid per female
LC_{10}	7.83 ± 2.34 a	3.67 ± 2.30 b	14.00 ± 9.27 b
LC_5	8.16 ± 2.42 a	3.90 ± 2.07 ab	15.75 ± 9.69 ab
Control	8.45 ± 2.16 a	4.52 ± 1.83 a	17.98 ± 11.08 a

注：同一列数据后不同字母表示差异显著（$P<0.05$）。Note：Different letters in the same column indicated significant difference ($P<0.05$).

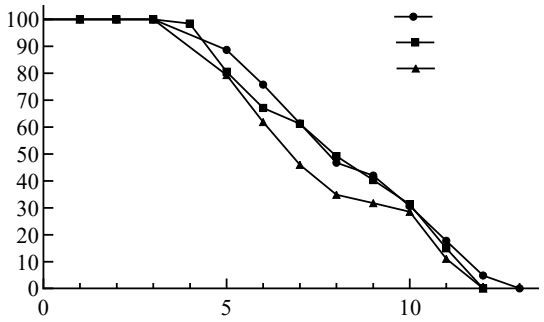

图1 柑橘全爪螨雌成螨取食亚致死浓度氟啶虫胺腈浸渍处理柑橘叶后其F_0代种群的存活率

Fig. 1 Survival rate of F_0 populations after the feeding of *Panonychus citri* adult females on citrus leaves treated with sulfoxaflor at sublethal concentrations by leaf-dipping method

2.2 亚致死浓度氟啶虫胺腈对F_1代柑橘全爪螨生长发育的影响

LC_5和LC_{10}氟啶虫胺腈对柑橘全爪螨F_1代各阶段的发育历期均有一定的影响（表2）。雄螨个体中，与对照相比，LC_5处理组和LC_{10}处理组卵期、前若螨期、成螨期和寿命无显著差异；对照组的幼螨期为1.68 d，LC_5处理组幼螨期显著缩短（1.33 d），LC_{10}处理组幼螨期缩短但差异不显著（1.40 d）；LC_5和LC_{10}杀虫剂处理组后若螨期、成熟前期均缩短，其中成熟前期分别缩短了0.24、0.59 d，LC_5处理组差异不显著（分别是1.48 d、9.85 d），LC_{10}处理组差异显著（分别是1.10 d、9.5 d）。对于雌性，与对照相比，LC_5处理组和LC_{10}处理组的卵期、前若螨期、后若螨期、成螨期、寿命均无显著性差异；LC_5和LC_{10}杀虫剂处理组幼螨期、成熟前期均缩短，其中成熟前期分别缩短了0.16 d、0.65 d，LC_5处理组差异不显著（分别是1.62 d、10.05 d），LC_{10}处理组差异显著（分别是1.35 d、9.56 d）；此外，雌成螨寿命均长于雄成螨。

表2　柑橘全爪螨雌成螨取食亚致死浓度氟啶虫胺腈浸渍处理柑橘叶后其F_1代种群的发育历期

Table 2　Developmental duration of F_0 populations after the feeding of *Panonychus citri* adult females on citrus leaves treated with sulfoxaflor at sublethal concentrations by leaf-dipping method

性别 Sex	发育阶段 Developmental stage	Control	LC_5	LC_{10}
		发育历期（d） Developmental duration	发育历期（d） Developmental duration	发育历期（d） Developmental duration
雄性 Male	卵期 Egg	5.55 ± 0.12 a	5.70 ± 0.11 a	5.6 ± 0.13 a
	幼螨期 Larva	1.68 ± 0.12 a	1.33 ± 0.09 b	1.40 ± 0.12 ab
	前若螨期 Protonymph	1.36 ± 0.10 a	1.33 ± 0.10 a	1.13 ± 0.07 a
	后若螨期 Deutonymph	1.50 ± 0.11 a	1.48 ± 0.10 ab	1.10 ± 0.07 b
	成熟前期 Pre-adult	10.09 ± 0.14 a	9.85 ± 0.13 ab	9.50 ± 0.14 b
	成螨期 Adult longevity	4.32 ± 0.54 a	5.67 ± 0.54 a	4.10 ± 0.70 a
	总寿命 Total life span	14.41 ± 0.51 ab	15.52 ± 0.50 a	13.6 ± 0.76 b
雌性 Female	卵期 Egg	5.50 ± 0.11 a	5.48 ± 0.09 a	5.26 ± 0.07 a
	幼螨期 Larva	1.63 ± 0.08 a	1.62 ± 0.07 a	1.35 ± 0.05 b
	前若螨期 Protonymph	1.37 ± 0.07 a	1.27 ± 0.06 a	1.26 ± 0.08 a
	后若螨期 Deutonymph	1.71 ± 0.07 a	1.69 ± 0.07 a	1.68 ± 0.06 a
	成熟前期 Pre-adult	10.21 ± 0.12 a	10.05 ± 0.14 a	9.56 ± 0.07 b
	成螨期 Adult longevity	7.81 ± 0.45 a	8.38 ± 0.47 a	9.03 ± 0.53 a
	总寿命 Total life span	18.02 ± 0.45 a	18.43 ± 0.51 a	18.60 ± 0.51 a

注：同一行数据后不同字母表示差异显著（$P<0.05$）。Note：Different letters in the same row indicated significant difference ($P<0.05$).

2.3　亚致死浓度氟啶虫胺腈对F_1代柑橘全爪螨繁殖的影响

与对照组相比，LC_5和LC_{10}杀虫剂处理组中柑橘全爪螨雌成螨的产卵前期（APOP）均无显著差异；总产卵前期（TPOP）均缩短，并且LC_{10}处理组与LC_5处理组之间差异显著（分别是10.17 d、9.76 d）。LC_5处理组的繁殖期和繁殖量分别是7.40 d、33.21粒；LC_{10}处理组的繁殖期和繁殖量分别是7.79 d、35.31粒，相较于对照组的6.62 d、28.48粒均增加（表3）。这些结果说明，亚致死浓度氟啶虫胺腈有利于缩短F_1代柑橘全爪螨的总产卵前期（TPOP），并延长繁殖期，增加繁殖量。

表3　柑橘全爪螨雌成螨取食亚致死浓度氟啶虫胺腈浸渍处理柑橘叶后其F_1代种群的繁殖相关参数

Table 3　Reproductive parameters of F_1 populations after the feeding of *Panonychus citri* adult females on citrus leaves treated with sulfoxaflor at sublethal concentrations by leaf-dipping method

参数Parameters	Control	LC_5	LC_{10}
成螨产卵前期（d）APOP	0.12 ± 0.05 a	0.12 ± 0.05 a	0.19 ± 0.05 a
总产卵前期（d）TPOP	10.33 ± 0.11 a	10.17 ± 0.15 a	9.76 ± 0.09 b
繁殖期（d）Oviposition	6.62 ± 0.37 b	7.40 ± 0.40 ab	7.79 ± 0.44 a
繁殖量（eggs/female）Fecundity	28.48 ± 1.68 b	33.21 ± 1.74 a	35.31 ± 1.77 a

注：同一行数据后不同字母表示差异显著（$P<0.05$）。Note：Difference letters in the same row indicated significant difference($P<0.05$).

2.4　亚致死浓度氟啶虫胺腈对F_1代柑橘全爪螨存活率和繁殖力的影响

年龄-阶段特征存活率（S_{xj}）曲线（图2-A）表示柑橘全爪螨从卵到年龄x和阶段j的可能性，各个体之间生长发育阶段存在大量的时间重叠。3个处理组间存活率无显著差异。雌螨年龄-阶段繁殖力（f_{x5}）总体趋势为先升后降，指的是各处理组F_1代柑橘全爪螨在年龄x和阶段j的平均产卵量。2个杀虫剂处理组F_1代的f_{x5}，m_x，l_xm_x最大值均高于对照。特定年龄-阶段寿命期望值（e_{xj}）曲线（图3-A）表示年龄x阶段j的个体预期能存活的总时间，随着年龄的增长，寿命期望值会随之降低。对照组、LC_5处理组和LC_{10}处理组寿命期望最高值依次升高，分别是16.30 d，17.15 d，17.29 d。年龄-阶段生殖值（V_{xj}）曲线（图3-B）表示年龄x阶段j的个体对未来种群的贡献，随着柑橘全爪螨的发育进入繁殖期，雌成螨开始产卵，V_{xj}值显著升高，各处理组雌成螨的V_{xj}值都呈现先升高后降低的趋势。对照组在第11天达到生殖力高峰，为17.06粒，LC_5在第10天达到生殖高峰，为18.68粒，LC_{10}在第11天时达到最高峰为18.50粒。这些结果说明低浓度氟啶虫胺腈对柑橘全爪螨F_1代的生殖具有一定的刺激作用。

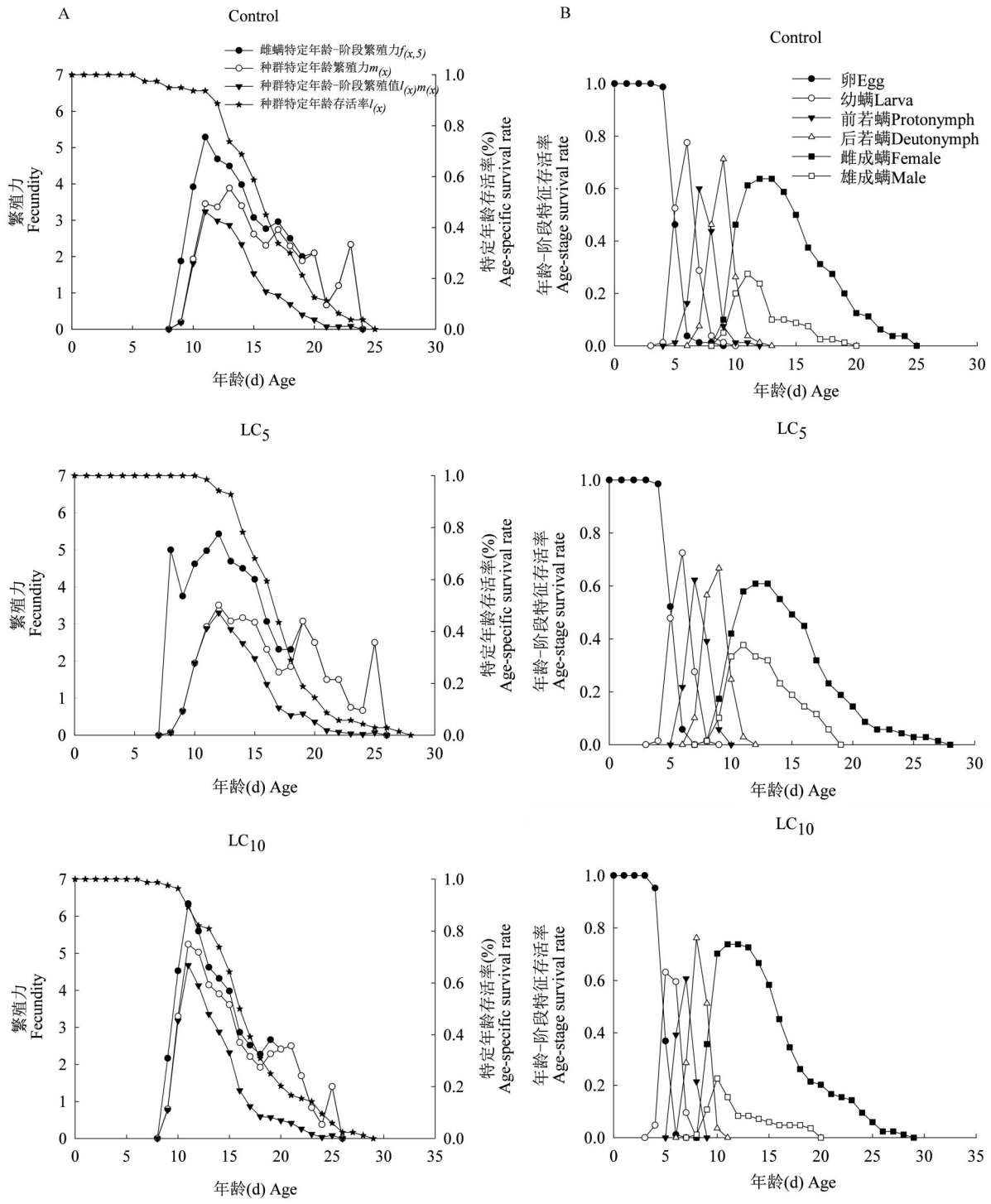

图2　柑橘全爪螨雌成螨取食亚致死浓度氟啶虫胺腈浸渍处理柑橘叶后其F_1代种群的特定年龄存活率（A）和雌成螨生殖力（B）

Fig. 2 Age-specific survival rate (l_x), female age-specific fecundity (f_x), age-specific fecundity of the total population (m_x), age-specific maternity (l_xm_x) (A) and age-stage-specific survival rate (S_{xj}) (B) of F_1 populations after the feeding of *Panonychus citri* adult females on citrus leaves treated with sulfoxaflor at sublethal concentrations by leaf-dipping method

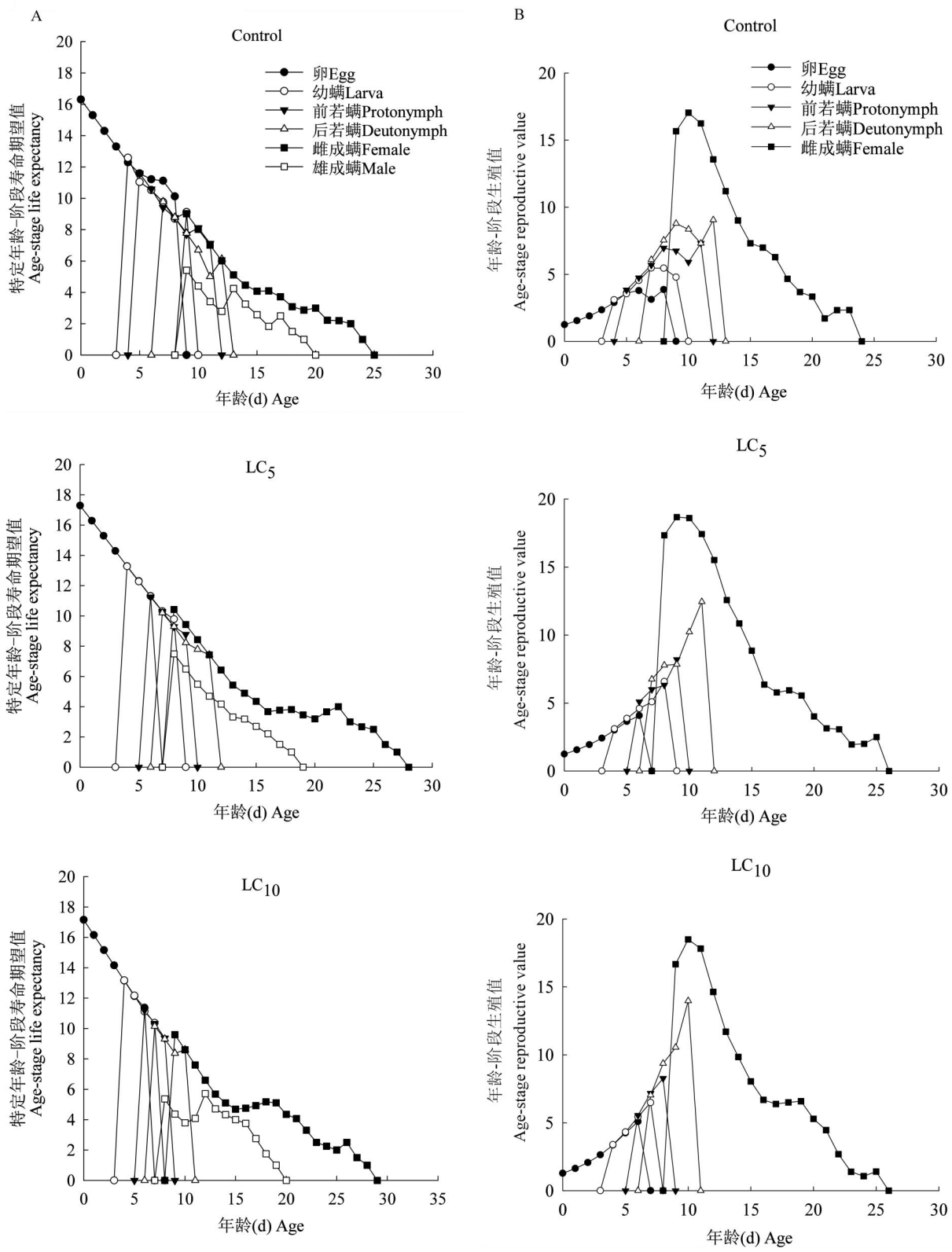

图3　柑橘全爪螨雌成螨取食亚致死浓度氟啶虫胺腈浸渍处理柑橘叶后其F_1代种群的年龄-龄期期望寿命（A）和年龄-阶段生殖价值（B）

Fig. 3　Age-stage life expectancy (e_{xj}) (A) and age-stage specific reproductive value (V_{xj}) (B) of F_1 populations after the feeding of *Panonychus citri* adult females on citrus leaves treated with sulfoxaflor at sublethal concentrations by leaf-dipping method

2.5 亚致死浓度氟啶虫胺腈对F_1代柑橘全爪螨种群生命表参数的影响

与对照相比，LC_5和LC_{10}杀虫剂处理组的内禀增值率r、周限增长率λ、净增殖率R_0、总繁殖率GRR均增加，但LC_5处理组差异不显著（分别是0.2201、1.246、20.22、36.75），LC_{10}处理组差异显著（分别是0.2430、1.275、26.06、44.25）；LC_5处理组和LC_{10}处理组种群加倍时间t与对照相比均缩短，但LC_5差异不显著（3.149），LC_{10}差异显著（2.853）；平均世代周期差异不显著（表4）。这些结果表明亚致死浓度氟啶虫胺腈增加F_1代柑橘全爪螨的净增殖率R_0、内禀增值率r、周限增长率λ、总繁殖率GRR，缩短种群加倍时间t。

表4 柑橘全爪螨雌成螨取食亚致死浓度氟啶虫胺腈浸渍处理柑橘叶后其F_1代种群的种群生命表参数

Table 4 Life table parameters of F_1 populations after the feeding of *Panonychus citri* adult females on citrus leaves treated with sulfoxaflor at sublethal concentrations by leaf-dipping method

参数Parameters	Control	LC_5	LC_{10}
内禀增长率r（d^{-1}） Intrinsic rate of increase	0.2128 ± 0.0075 b	0.2201 ± 0.0084 b	0.2430 ± 0.0056 a
周限增长率λ（d^{-1}） Finite rate of increase	1.237 ± 0.009 b	1.246 ± 0.011 b	1.275 ± 0.007 a
净增值率R_0 Net reproduction	18.51 ± 1.90 b	20.22 ± 2.21 ab	26.06 ± 2.08 a
总繁殖率GRR Gross reproduction rate	34.37 ± 2.68 b	36.75 ± 3.61 ab	44.25 ± 2.67 a
平均世代周期T（d） Mean generation time	13.72 ± 0.17 a	13.66 ± 0.20 a	13.42 ± 0.12 a
种群加倍时间t（d） Population doubling time	3.258 ± 0.116 a	3.149 ± 0.123 a	2.853 ± 0.066 b

注：同一行数据后不同字母表示差异显著（$P<0.05$）。Note：Different letters in the same row indicated significant difference($P<0.05$).

3 结论与讨论

生命表技术是研究种群动态的有效方法。传统生命表只考虑到了雌性，忽略了雄性对种群的贡献、阶段分化和个体间发育速率的不同（Huang *et al.*，2012）。两性生命表弥补了传统生命表的不足，充分考虑到雄性个体对种群的贡献（Chi *et al.*，2006）。目前两性生命表已广泛应用到点蜂缘蝽（王自杰等，2023）、东方钝绥螨*Amblyseius brientalis*（Pan *et al.*，2022）、草地贪夜蛾*Spodoptera frugiperda*（孟令贺等，2022）等的生长发育和繁殖能力的研究。本研究运用年龄-龄期两性生命表技术，通过不同浓度的氟啶虫胺腈处理柑橘全爪螨F_0代生长发育一致的成螨，对其F_1代种群动态及主要生命表参数进行分析。

化学防治目前仍是田间防治害虫的重要措施，而新烟碱类杀虫剂防治柑橘木虱后，不可避免的会对非靶标生物产生影响。本文中亚致死浓度氟啶虫胺腈处理柑橘全爪螨后，F_0代雌成螨的繁殖力降低，这一结果与其他药剂处理后抑制F_0代害虫的生殖的结果相同（Zhang *et al.*，2014；Majidpour *et al.*，2020）。而田间喷洒的杀虫剂会随着时间的延长而逐渐递减至亚致死浓度，从而对害虫产生亚致死效应（James *et al.*，2002；Cordeiro *et al.*，2013；Guedes *et al.*，2014；Cutler *et al.*，2022）。亚致死浓度氟啶虫胺腈对柑橘全爪螨的影响存在跨代效应，对F_1代柑橘全爪螨的生长发育、繁殖和种群生命表参数产生影响。在生长发育方面，本研究结果表明，亚致死浓度氟啶虫胺腈促进了F_1代柑橘全爪螨的生长发育，表现为无论是雄性个体还是雌性个体，与对照相比，LC_5和LC_{10}杀虫剂处理组未成熟期均缩短，从而缩短其发育历期，这一结果与其他亚致死研究中亚致死浓度杀虫剂能显著缩短害虫的发育历期的结果相同，在烟草粉螟*Ephestia elutella*（袁敏等，2020）等害虫中均有发现。研究发现LC_{30}和

LC_{50}的氟啶虫胺腈对柑橘全爪螨的影响，结果发现，LC_{30}处理组和LC_{50}处理组氟啶虫胺腈都显著缩短了F_1代柑橘全爪螨的发育历期，对其生长发育有促进作用（李珍珍，2023），与本研究结果一致。同时研究发现，雌螨的寿命随亚致死浓度的升高而增加；而与对照相比，LC_5处理组雄螨的寿命延长，LC_{10}处理组雄螨的寿命缩短，且LC_5和LC_{10}之间差异显著。这一现象在其他害虫中也有相似发现。Tan等发现亚致死浓度的吡虫啉能够延长绿盲蝽雌成虫寿命，但缩短了雄成虫寿命（Tan *et al.*，2012）。这一现象可能因为雌雄之间存在体型差异，而农药的敏感性可能与体型大小、重量有关（Desneux *et al.*，2006）。而在先前的研究发现，LC_{30}和LC_{50}的氟啶虫胺腈均显著缩短F_1代柑橘全爪螨的寿命，这一现象可能因为氟啶虫胺腈刺激柑橘全爪螨寿命的药剂浓度很低，其最大兴奋效应所对应的药剂浓度在LC_5与LC_{30}之间。

亚致死浓度杀虫剂也可能刺激或抑制害虫的生殖，从而影响种群生命表参数，导致种群的数量波动。在繁殖方面，本研究发现亚致死浓度氟啶虫胺腈对F_1代柑橘全爪螨的生殖具有一定的作用，表现为总产卵前期（TPOP）显著缩短，繁殖期显著延长以及产卵量显著增加，这一现象与课题组之前的LC_{30}氟啶虫胺腈处理组结果相似。在桃蚜、大豆蚜虫*Aphis glycines*中，也均有研究发现低剂量吡虫啉处理后，其总产卵前期（TPOP）显著缩短，繁殖量显著增加（Qu *et al.*，2015；Zeng *et al.*，2016）。在种群生命表参数方面，研究发现亚致死浓度氟啶虫胺腈对柑橘全爪螨的种群有刺激作用，表现为内禀增长率r_m、总繁殖率GRR、周限增长率λ、净增殖率R_0显著增加，种群加倍时间t显著缩短，有利于F_1代柑橘全爪螨的繁殖和种群数量的增长。这一现象在亚致死浓度氟啶虫胺腈处理后的桃蚜、棉蚜*Aphis gossypii*中均有相似发现（Tang *et al.*，2015；Wang *et al.*，2023）。而当绿盲蝽在亚致死浓度氟啶虫胺腈处理下，观察到不同的结果（Zhen *et al.*，2018）。这些不同的现象可能是杀虫剂的浓度不同、昆虫种类不同和杀虫剂施用条件的不同所致。

研究发现，毒物兴奋效应受多种因素影响，暴露时间（暴露世代）亦是影响因素之一（Agathokleous *et al.*，2021）。研究发现低剂量吡虫啉刺激桃蚜后，子二代较子一代甲基化水平更高，这可能与低剂量胁迫引起的遗传适应性有关（Ayyanath *et al.*，2014）；研究发现亚致死浓度噻虫嗪处理下，F_0代棉蚜的寿命和繁殖力显著降低，而F_1代棉蚜的生长发育、寿命、生殖力被明显刺激（Ullah *et al.*，2020）。本研究表明亚致死浓度的氟啶虫胺腈对柑橘全爪螨存在跨代效应，表现为对F_0代柑橘全爪螨有显著抑制作用，但对F_1代柑橘全爪螨具有刺激作用。这种延迟生殖现象可能与毒物兴奋效应的过度补偿机制有关。根据毒物兴奋效应机理，当细胞受到外界刺激时，机体稳态被破坏，细胞会启动一系列抗氧化通路，进而维持细胞内环境稳定（Arumugam *et al.*，2006；曹雪等，2019）。而在此过程中，可能产生刺激效应，如抗氧化酶活性增加（郑书梅等，2018）、生殖基因表达量上调（Wang *et al.*，2023）等，从而导致自身免疫力提高、繁殖力显著增加（Ayyanath *et al.*，2013）等现象。本研究中F_1代柑橘全爪螨在氟啶虫胺腈亚致死剂量刺激下表现为毒物兴奋效应，具体体现在繁殖力显著增加、种群生命表参数增加。也有研究发现，施用烟碱类药剂对于螨类具有种群刺激作用。Alimirzaee等（2023）发现，亚致死浓度的吡虫啉对罗宾根螨*Rhizoglyphus robini*的生殖起刺激作用；Barati和Hejazi（2015）发现新烟碱类杀虫剂噻虫啉、啶虫脒和噻虫嗪均刺激了二斑叶螨*Tetranychus cinnabarinus*的种群繁衍；Zanardi等（2018）研究新烟碱类杀虫剂对柑橘全爪螨的影响，发现吡虫啉显著增加其繁殖力。这可能是因为在亚致死剂量药剂刺激下，卵黄原蛋白及其受体合成相关基因表达量上调，如保幼激素合成基因表达量上调，从而导致保幼激素含量增加（Xu *et al.*，2017）；卵黄原蛋白和卵黄原蛋白受体基因表达量上调，从而导致其含量增加（Wang *et al.*，2023）。氟啶虫胺腈亚致死剂量刺激F_1代柑橘全爪螨过度补偿，优化体内能量分配到生殖等方面，从而可以尽快恢复种群动态平衡。不过环境胁迫导

致的生殖过度补偿往往会引起寿命缩短、体型缩小等现象。但在本研究中表型并不明确，可能是因为影响的表型仅在特殊环境（如饥饿、低温）中起重要作用（Jager *et al.*，2013）。

本研究结果表明亚致死浓度的氟啶虫胺腈显著抑制F_0代柑橘全爪螨雌成螨的繁殖，但对F_1代柑橘全爪螨的寿命和繁殖力起刺激作用，可能会刺激种群的爆发再猖獗，这一实验结果提示人们，在新烟碱类杀虫剂氟啶虫胺腈施用区域，应格外注重对柑橘全爪螨的防治，对柑橘全爪螨成灾及防治有一定的警示意义。但害虫的种群动态不仅受到农药残留的影响，还受到许多因素的影响，如温度、天敌等。本研究仅在室内条件下对柑橘全爪螨进行研究，获得稳定可靠的生命表资料，但在自然条件下柑橘全爪螨的生长发育和繁殖还受到许多因素的影响，会和室内试验结果存在差异，因此需要进一步研究田间防治效果。如果田间试验得到的相应的结论，建议在害螨常发生区域，尽量避免新烟碱类杀虫剂的使用。

参考文献（References）

Agathokleous E, Brown PH, Calabrese EJ. A gift from parent to offspring: Transgenerational hormesis [J]. *Trends in Plant Science*, 2021, 26 (11): 1098-1100.

Alimirzaee S, Khajehali J, Van Leeuwen T. Hormetic effects of neonicotinoid insecticides on *Rhizoglyphus robini* (Acari: Acaridae) [J]. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 2023, 192: 105396.

Arumugam TV, Gleichmann M, Tang SC, *et al*. Hormesis/preconditioning mechanisms, the nervous system and aging [J]. *Ageing Research Reviews*, 2006, 5 (2): 165-178.

Ayyanath MM, Cutler GC, Scott-Dupree CD, *et al*. Gene expression during imidacloprid-induced hormesis in green peach aphid [J]. *Dose-Response: A Publication of International Hormesis Society*, 2014, 12 (3): 480-497.

Ayyanath MM, Cutler GC, Scott-Dupree CD, *et al*. Transgenerational shifts in reproduction hormesis in green peach aphid exposed to low concentrations of imidacloprid [J]. *PLoS ONE*, 2013, 8 (9): e74532.

Barati R, Hejazi MJ. Reproductive parameters of *Tetranychus urticae* (Acari: Tetranychidae) affected by neonicotinoid insecticides [J]. *Experimental and Applied Acarology*, 2015, 66 (4): 481-489.

Brar GS, Martini X, Stelinski LL. Lethal and sub-lethal effects of a novel sulfoximine insecticide, sulfoxaflor, against Asian citrus psyllid and its primary parasitoid under laboratory and field conditions [J]. *International Journal of Pest Management*, 2017, 63 (4): 299-308.

Cao X, Li H, Xiu GL. Time-dependent hormetic effect of nonylphenol on *Caenorhabditis elegans* under environmental concentrations [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2019, 14 (2): 187-194. [曹雪, 李辉, 修光利. 环境浓度下壬基酚对秀丽隐杆线虫时间依赖性的毒性兴奋效应 [J]. 生态毒理学报, 2019, 14 (2): 187-194]

Chi H, Su HY. 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 [J]. *Environmental Entomology*, 2006, 35 (1): 10-21.

Cordeiro EMG, De Moura ILT, Fadini MAM, *et al*. Beyond selectivity: Are behavioral avoidance and hormesis likely causes of pyrethroid-induced outbreaks of the southern red mite *Oligonychus ilicis*? [J]. *Chemosphere*, 2013, 93 (6): 1111-1116.

Cutler GC, Amichot M, Benelli G, *et al*. Hormesis and insects: Effects and interactions in agroecosystems [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 825: 153899.

Desneux N, Denoyelle R, Kaiser L. A multi-step bioassay to assess the effect of the deltamethrin on the parasitic wasp *Aphidius ervi* [J]. *Chemosphere*, 2006, 65 (10): 1697-1706.

Guedes RNC, Cutler GC. Insecticide-induced hormesis and arthropod pest management: Insecticide-induced hormesis [J]. *Pest Management Science*, 2014, 70 (5): 690-697.

Huang YB, Chi H. Age-stage, two-sex life tables of *Bactrocera cucurbitae* (Coquillett) (Diptera: Tephritidae) with a discussion on the problem of applying female age-specific life tables to insect populations: Life table of *Bactrocera cucurbitae* [J]. *Insect Science*, 2012, 19 (2): 263-273.

Jager T, Barsi A, Ducrot V. Hormesis on life-history traits: Is there such thing as a free lunch? [J]. *Ecotoxicology*, 2013, 22 (2): 263-270.

James DG, Price TS. Fecundity in twospotted spider mite (Acari: Tetranychidae) is increased by direct and systemic exposure to imidacloprid [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2002, 95 (4): 729-732.

Langdon KW, Rogers ME. Neonicotinoid-induced mortality of *Diaphorina Citri* (Hemiptera: Liviidae) is affected by route of exposure [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2017, 110 (5): 2229-2234.

Li ZZ. Reproductive and Detoxifying Enzyme Responses and Their Molecular Mechanisms of *Panonychus citri* (Acari: Tetranychidae) to Sulfoxaflor Stress [D]. Nanchang: Nanchang University Master Thesis, 2023. [李珍珍. 柑橘全爪螨对氟啶虫胺腈胁迫的生殖和解毒酶响应及分子机制 [D]. 南昌：南昌大学硕士论文, 2023]

Majidpour M, Maroofpour N, Ghane-Jahromi M, *et al*. Thiacloprid + deltamethrin on the life-table parameters of the cotton aphid, *Aphis gossypii* (Hemiptera: Aphididae), and the parasitoid, *Aphidius flaviventris* (Hymenoptera: Aphelinidae) [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2020, 113 (6): 2723-2731.

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]

Morse JG. Agricultural implications of pesticide-induced hormesis of insects and mites [J]. *Human & Experimental Toxicology*, 1998, 17 (5): 266-269.

Pan KY, Xin TR, Chen YB, *et al*. Age-stage, two-sex life table and functional response of *Amblyseius orientalis* (Acari: Phytoseiidae) feeding on different nutrient sources [J]. *Insects*, 2022, 13 (11): 983.

Qu YY, Xiao D, Li J, *et al*. Sublethal and hormesis effects of imidacloprid on the soybean aphid *Aphis glycines* [J]. *Ecotoxicology*, 2015, 24 (3): 479-487.

Ran C, Zhang YF, Chen F, *et al*. Analysis of expression difference of metabolism genes in *Panonychus citri* [J]. *Journal of Fruit Science*, 2013, 50 (3):496-503. [冉春, 张云飞, 陈飞, 等. 柑橘全爪螨代谢抗性相关基因表达差异分析 [J]. 果树学报, 2013, 30 (1): 22-27]

Tan Y, Biondi A, Desneux N, *et al*. Assessment of physiological sublethal effects of imidacloprid on the mirid bug *Apolygus lucorum* (Meyer-Dür) [J]. *Ecotoxicology*, 2012, 21 (7): 1989-1997.

Tang QL, Xiang M, Hu HM, *et al*. Evaluation of sublethal effects of sulfoxaflor on the green peach aphid (Hemiptera: Aphididae) using life table parameters [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2015, 108 (6): 2720-2728.

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

Ullah F, Gul H, Tariq K, *et al*. Thiamethoxam induces transgenerational hormesis effects and alteration of genes expression in *Aphis gossypii* [J]. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 2020, 165: 104557.

Wang AH, Wu JC, Yu YS, *et al*. Selective insecticide-induced stimulation on fecundity and biochemical changes in *Tryporyza incertulas* (Lepidoptera: Pyralidae) [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2005, 98 (4): 1144-1149.

Wang L, Zhu JS, Wang QQ, *et al*. Hormesis effects of sulfoxaflor on *Aphis gossypii* feeding, growth, reproduction behavior and the related mechanisms [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 872: 162240.

Wang ZH, Fan JM, Chen JC, *et al*. Sublethal effects of sulfoxaflor on the growth and reproduction of the green peach *Myzus persicae* [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50 (3): 496-503. [王泽华, 范佳敏, 陈金翠, 等. 氟啶虫胺腈亚致死浓度对桃蚜生长和繁殖的影响 [J]. 中国农业科学, 2017, 50 (3): 496-503]

Wang ZJ, Li ZX, Li XH, *et al*. Cross-generational effects of different concentrations of thiamethoxam on *Riptortus pedestris* (Hemiptera: Alydidea) populations [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2023, 66 (3): 1-14. [王自杰, 李丽霞, 李小花, 等. 不同浓度噻虫嗪对点蜂缘蝽种群的跨代效应 [J]. 昆虫学报, 2023, 66 (3): 1-14]

Watson GB, Siebert MW, Wang NX, *et al*. Sulfoxaflor - A sulfoximine insecticide: Review and analysis of mode of action, resistance and cross-resistance [J]. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 2021, 178: 104924.

Xu BB, Qian K, Zhang N, *et al*. Sublethal effects of chlorantraniliprole on juvenile hormone levels and mRNA expression of *JHAMT* and *FPPS* genes in the rice stem borer, *Chilo suppressalis*: Sublethal effects of chlorantraniliprole [J]. *Pest Management Science*, 2017, 73 (10): 2111-2117.

Yuan M, Wei ZY, Yang H, *et al*. Effects of sublethal concentration of deltamethrin on the biological characteristics of *Ephestia elutella* Hubner [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2020, 42 (2): 459-470. [袁敏, 韦治艳, 杨洪, 等. 溴氰菊酯亚致死浓度对烟草粉螟生物学特性的影响 [J]. 环境昆虫学报, 2020, 42 (2): 459-470]

Zanardi OZ, Bordini GP, Franco AA, *et al*. Spraying pyrethroid and neonicotinoid insecticides can induce outbreaks of *Panonychus citri* (Trombidiformes: Tetranychidae) in citrus groves [J]. *Experimental and Applied Acarology*, 2018, 76 (3): 339-354.

Zeng XY, He YQ, Wu JX, *et al*. Sublethal effects of cyantraniliprole and imidacloprid on feeding behavior and life table parameters of *Myzus persicae* (Hemiptera: Aphididae) [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2016, 109 (4): 1595-1602.

Zhang P, Liu F, Mu W, *et al*. Life table study of the effects of sublethal concentrations of thiamethoxam on *Bradysia odoriphaga* Yang and Zhang [J]. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 2014, 111: 31-37.

Zhen CA, Miao L, Gao XW. Sublethal effects of sulfoxaflor on biological characteristics and vitellogenin gene (*AlVg*) expression in the mirid bug, *Apolygus lucorum* (Meyer-Dür) [J]. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 2018, 144: 57-63.

Zheng SM, Chen JJ, Zhang QJ, *et al*. Acute toxicity of pymetrozine and adverse effects on antioxidant system activities of *Rana zhenhaiensis* Tadpoles [J]. *Journal of Fujian Normal University* (Natural Science Edition), 2018, 34 (6): 72-77. [郑书梅, 陈姣姣, 张秋金, 等. 吡蚜酮对镇海林蛙蝌蚪的急性毒性及抗氧化系统的影响 [J]. 福建师范大学学报 (自然科学版), 2018, 34 (6): 72-77]

Zhu YM, Loso MR, Watson GeraldB, *et al*. Discovery and characterization of sulfoxaflor, a novel insecticide targeting sap-feeding pests [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2011, 59 (7): 2950-2957.