大豆蚜对不同浓度吡虫啉药剂胁迫的适应性*

张傲楠** 韩岚岚** 赵奎军*** 张雯林 肖建飞 陈 娟 高丽瞳

（东北农业大学农学院，哈尔滨 150030）

摘 要 **【目的】**本研究旨在探索大豆蚜对半致死浓度 LC_{50}、亚致死浓度 LC_{30} 吡虫啉的适应性，掌握吡虫啉对大豆蚜种群在田间发生趋势、进化及分布的影响，从而指导田间精准施药，为保护生态环境和推动可持续农业发展提供新思路。**【方法】**采用浸渍法，用大豆蚜初孵若虫亚致死浓度 LC_{30} 及半致死浓度 LC_{50} 的吡虫啉胁迫大豆蚜初孵若虫，监测大豆蚜实验种群的生长发育特性和繁殖力变化趋势，组建种群生命表。另用 4 龄若虫亚致死浓度 LC_{30} 及半致死浓度 LC_{50} 的吡虫啉胁迫大豆蚜，分析连续 5 代大豆蚜对吡虫啉的抗性。**【结果】** 受 LC_{50}、LC_{30} 吡虫啉药剂胁迫的大豆蚜种群的存活率均经历了急剧下降期、平缓下降期和次急速下降期 3 个时期，根据 Deevey 种群存活曲线两个处理均为凹曲线；日产蚜峰值出现顺序依次为：LC_{30}（处理组Ⅰ）、对照组、LC_{50}（处理组Ⅱ）；受 LC_{30}、LC_{50} 和对照组吡虫啉药剂胁迫的大豆蚜世代平均历期的比值是 0.929∶1.068∶1；净增值率（R_0）的比值是 0.297∶0.141∶1；周限增长率（λ）的比值是 0.892∶0.798∶1；倍增时间（T_d）的比值是 1.4∶2.35∶1；吡虫啉药剂胁迫大豆蚜种群产生的抗性在第 2-3 代差异显著，分别为 1.78 倍和 2.23 倍；LC_{30}（处理组Ⅰ）吡虫啉药剂胁迫大豆蚜种群产生的抗性在第 4-5 代差异显著，分别为 1.61 倍和 1.90 倍。**【结论】** 大豆蚜对不同浓度吡虫啉胁迫的适应性存在差异。应针对施药浓度、方法制定相应的防治方案，降低大豆蚜产生抗性风险。

关键词 大豆蚜；吡虫啉；生命表；抗性；精准施药

Effects of semilethal and sublethal doses of imidacloprid on *Aphis glycines* (Hemiptera: Aphididae)

ZHANG Ao-Nan** HAN Lan-Lan** ZHAO Kui-Jun*** ZHANG Wen-Lin
XIAO Jian-Fei CHEN Juan GAO Li-Tong

(College of Agriculture, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract **[Objectives]** To investigate the effects of LC_{50}(semi-lethal) and LC_{30}(sublethal) concentrations of imidacloprid on *Aphis glycines* in the field, and the effect of resistance to this pesticide on the occurrence, evolution and distribution of this pest. **[Methods]** The impregnation method, soaking leaves in imidacloprid, was used to expose newly-hatched *A. glycines* nymphs to LC_{30} and LC_{50} doses of imidacloprid, after which their growth, development and reproductive capacity were measured and used to compile a population life-table. In addition, we monitored changes in resistance to imidacloprid over five successive generations by exposing 4th instar larvae to either LC_{30} or LC_{50} doses of imidacloprid. **[Results]** The survival rate of nymphs exposed to both LC_{30} and LC_{50} doses of imidacloprid first sharply declined, then gently declined and finally once again sharply declined. Both doses produced concave survival curves according to the Deevey survival curve. The temporal order of the daily fecundity peak, from early to late, was: LC_{30} treatment group, control group, LC_{50} treatment group. Mean generation lengths were LC_{30}∶LC_{50} ∶control group = 0.929∶1.068∶1 and net appreciation rates (R_0) were LC_{30}∶LC_{50}∶control group = 0.297∶0.141∶1. Finite rates of increase (λ) were: LC_{30}∶LC_{50}∶control group = 0.892∶0.798∶ 1 and the doubling times (T_d) ∶ LC_{30}∶LC_{50}∶ control group = 1.4∶ 2.35∶1. Resistance of the LC_{50} treatment group was 1.78 times and 2.23 times higher than the control after 2 and 3 generations, respectively, whereas that of the LC_{30} treatment

*资助项目 Supported projects：现代农业产业技术体系建设专项资金（CARS-04）；黑龙江省科学基金项目（C2018011）

**共同第一作者 Co-first authors，E-mail：2263880800@qq.com；hanll_neau@aliyun.com

***通讯作者 Corresponding author，E-mail：kjzhao@163.com

收稿日期 Received：2019-03-06；接受日期 Accepted：2019-05-10

group was 1.61 times and 1.90 times higer after 4 and 5 generations, respectively. **[Conclusion]** The development of resistance to imidacloprid by *A. glycines* varied with dosage. Control plans should take into account both the dosage and the method of application to minimize the development of resistance.

Key words *Aphis glycines*; imidacloprid; life table; resistance; precision applying pesticide

大豆蚜 *Aphis glycines* Matsumura 是一种通过刺吸危害栽培大豆的主要害虫之一，在我国大豆各产区均有分布，尤其在东北大豆产区发生较为严重（杨帅等，2010)。近年来，大豆蚜的分布已由亚洲扩散至欧美等地，给大豆生产造成了严重威胁（黄珊珊，2013）。一般年份，大豆蚜可使大豆减产 20%-30%，严重年份可达 50%以上（王素云等，1996；刘振勇和李唯实，2005）。

目前，大豆蚜的防治仍然是以化学药剂防治为主。其中，第 1 代新烟碱类杀虫剂吡虫啉是防治大豆蚜的主要药剂，它具有对刺吸口器类害虫选择性好、击倒性高（Tomizawa and Casida.，2003），杀虫谱广，对哺乳动物低毒等特点（须志平，2009；成四喜和雷筱娱，2012；郭婧怡等，2017），深受农户的青睐。吡虫啉是烟碱型乙酰胆碱受体（nAChR）的激动剂，它通过与昆虫的乙酰胆碱（ACh）结合，引起受体的构象发生变化，来打破膜电势平衡，刺激传递从而扰乱昆虫正常的神经活动（Tomizawa *et al.*，2000；Liu *et al.*，2005；Shimomura，2005；邓天福等，2010）。

随着吡虫啉在田间的广泛应用，已发现不少害虫对其产生了抗性（Devine *et al.*，1996；唐振华等，2006）。为了明确吡虫啉对大豆蚜种群在田间发生趋势、进化及分布的影响，我们开展了经不同浓度吡虫啉（LC_{50}、LC_{30}）胁迫后，大豆蚜种群特别是其后代种群的生长、发育、繁殖适应性的研究，为预测大豆蚜种群发生动态变化提供理论依据，并指导田间合理用药以减少农药对环境的污染，进而推动可持续农业的良性发展。

1　材料与方法

1.1　供试虫源

为避免田间种群可能存在的抗性的影响，试虫选用本实验室连续多年饲养，从未接触药剂的哈尔滨大豆蚜种群。用人工盆栽大豆苗饲养，置于温度（25 ± 1）℃，相对湿度 65%-70%，光周期的 14 L：10 D 的人工气候箱内，供试大豆品种为东农 52。

1.2　药剂及试剂

70%吡虫啉水分散粒剂，华北制药集团。

1.3　室内毒力测定

参照刘树生（1987）叶子圆片法和刘刚（2015）叶片浸渍法。将吡虫啉药剂设置 7 个浓度梯度，取大小相近、新鲜无污染的大豆叶片浸在系列浓度的药液中 10 s，以清水处理为对照。在室内自然晾干后分别接入大豆蚜初孵若蚜和 4 龄若蚜，并置于人工气候箱内饲喂。人工气候箱设置条件为：温度（25 ± 1）℃，相对湿度 65% - 70%，光周期 14 L：10 D。在药剂处理 24 h 后统计死亡情况，以毛笔轻触虫体，附肢无任何反应视为死亡，并进行毒力分析。每个浓度 3 次重复，每个重复 20 头大豆蚜。

1.4　生命表组建与分析

大豆蚜种群生命表的建立参照贾彦霞等（2004）及陈应武和窦彩虹（2008）的方法。配置 1%的琼脂培养基于直径 6 cm 的小培养皿中，将新鲜大豆叶片贴于培养基表面（背面向上），接入无翅成蚜，24 h 后挑取所产若蚜接入新灭过菌的培养皿中，单头饲养。将带蚜虫叶片浸渍于对初孵若蚜亚致死的 LC_{30} 及半致死的 LC_{50} 的吡虫啉药液 10 s，取出并吸干多余药液，以清水处理为对照。每处理 100 头初孵若蚜，重复 3 次。24 h 后更换新鲜叶片，每天观察统计若蚜生长发育、存活情况和成蚜后产蚜量，直至所有个体死亡。成蚜新产若蚜每次观察时移除。LC_{30} 浓度吡虫啉药剂处理初孵幼虫的大豆蚜种群记为处理组Ⅰ，LC_{50} 浓度吡虫啉药剂处理初孵幼虫的大豆蚜种群记为处理组Ⅱ，以下同。

生命表各参数计算公式：

净生殖力：（R_0）$=\sum l_x m_x$，在一定实验条件下，平均每雌虫每代所产生的雌后代数。

世代平均历期：（T）$=\frac{\sum x l_x m_x}{\sum l_x m_x}$，在一定实验条件下，一个世代所需的平均历期。

内禀增长率：（r_m）$=\frac{I_n R_0}{T}$，在一定实验条件下，具有稳定年龄组配的种群的最大瞬时增长速率。

周限增长率：（λ）$=e r_m$，在一定实验条件下，每一雌虫经过单位时间后的增翻倍数。

种群倍增时间：（T_d）$=\frac{I_n 2}{r_m}$，为种群数量增长一倍所需要的时间。

x 表示以日为单位的时间间隔；l_x 表示任何个体在 x 期间得以存活概率；m_x 表示在 x 期间内存活的成蚜当日平均每雌虫产若蚜数。

1.5 药剂抗性测定

用 LC_{50} 浓度以及 LC_{30} 浓度的吡虫啉药剂分别连续 5 代处理大豆蚜 4 龄若蚜，以清水处理为对照，再进行毒力测定（方法同 1.3）。

1.6 数据分析

数据采用 SPSS23.0 和 Excel2010 数据分析软件处理，差异显著性检验采用 Duncan's 新复极差检验。

2 结果与分析

2.1 吡虫啉药剂对大豆蚜生物活性分析

通过生物测定，得到 LC_{50}、LC_{30} 吡虫啉药剂对大豆蚜初孵若蚜及 4 龄若蚜的毒力（表 1，表 2）。

表 1 LC_{50}、LC_{30} 吡虫啉药剂对大豆蚜初孵若蚜的毒力

Table 1 The toxicity of LC_{50} and LC_{30} concentration of imidacloprid on newly-hatched nymphs of soybean aphids

农药 Pesticide	毒力回归方程 Toxicity regression equation	处理组Ⅰ Treatment group Ⅰ	处理组Ⅱ Treatment group Ⅱ
		$LC_{50}(CI_{95})$ (mg/L)	$LC_{50}(CI_{95})$ (mg/L)
70%吡虫啉 70% imidacloprid	y=3.417x–2.212 R^2=0.991	3.119 (1.946-4.086)	4.44 (3.217-5.534)

CI_{95}: 95%的置信限。下表同。
95% confidence interval. The same below.

表 2 LC_{50}、LC_{30} 吡虫啉药剂对大豆蚜 4 龄若蚜的毒力

Table 2 The toxicity of LC_{50} and LC_{30} concentration of imidacloprid on 4th instar larva of soybean aphids

农药 Pesticide	毒力回归方程 Toxicity regression equation	$LC_{30}(CI_{95})$ (mg/L)	$LC_{50}(CI_{95})$ (mg/L)
70%吡虫啉 70% imidacloprid	y=2.489x–1.869 R^2=0.994	3.469 (0.115-6.985)	5.636 (0.513-9.590)

2.2 大豆蚜种群受 LC_{50}、LC_{30} 吡虫啉药剂胁迫后生长发育特性分析

根据 Deevey 种群存活曲线，对照组大豆蚜种群存活率曲线接近凸曲线（图 1）。表明对照组多数大豆蚜能够达到平均生理年龄水平。而处理组Ⅰ、处理组Ⅱ的大豆蚜，其种群在 48 h 内的存活率急剧下降，且受处理组Ⅱ胁迫的大豆蚜种群的存活率明显低于受处理组Ⅰ胁迫的大豆蚜种群的存活率，二者均属凹曲线。其中受胁迫后的 2 - 14 d 期间，受处理组Ⅱ胁迫的大豆蚜种群日存活率均低于受处理组Ⅰ胁迫的大豆蚜种群日存活率；胁迫后 15 - 18 d，受处理组Ⅱ胁迫的大豆蚜种群日存活率均高于受处理组Ⅰ胁迫的大豆蚜种群日存活率；受处理组Ⅰ、处理组Ⅱ胁迫的大豆蚜种群日存活率分别于胁迫后 20 d 和 19 d 降至 0，二者在整个世代过程中存活率均

明显低于对照。

由图 2 知，对照组与处理组Ⅰ在第 4 - 5 d 时开始产蚜，而处理组Ⅱ在第 5 - 6 d 开始产蚜，晚于处理组Ⅰ；对照组与处理组Ⅰ、处理组Ⅱ分别于第 8、7、10 d 达到日产蚜的峰值；其中 4 - 17 d 的日产蚜率由高到低依次为对照组>处理组Ⅰ>处理组Ⅱ，而第 17 d 时，处理组Ⅱ日产蚜率>处理组Ⅰ日产蚜率，处理组Ⅰ和Ⅱ在从 18 d 起日产蚜率为 0，对照组在第 22 d 日产蚜率为 0，且比处理组Ⅰ和Ⅱ延长了 4 d。

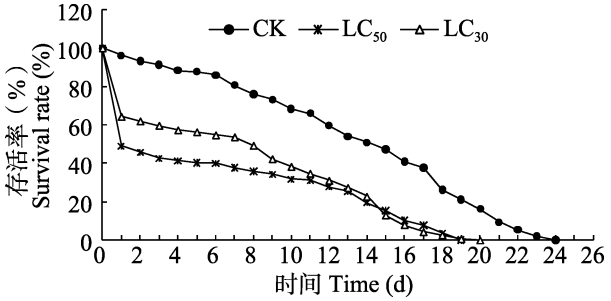

图 1　大豆蚜分别受 LC_{50}、LC_{30} 吡虫啉药剂胁迫后逐日存活率

Fig. 1　The daily survival rate of soybean aphids stressed by imidacloprid with the concentration of LC_{50} and LC_{30}

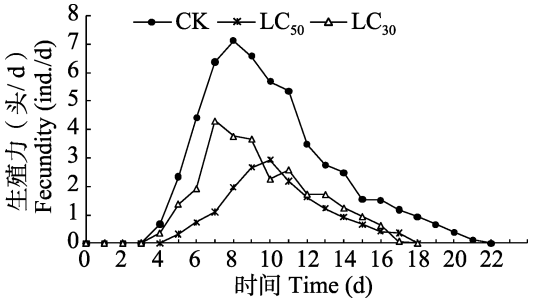

图 2　大豆蚜分别受 LC_{50}、LC_{30} 吡虫啉药剂胁迫后其生殖力

Fig. 2　The fecundity of soybean aphids stressed by imidacloprid with the concentrations of LC_{50} and LC_{30}

表 3　LC_{50}、LC_{30} 吡虫啉药剂处理下大豆蚜种群生命表参数

Table 3　Life table parameters of soybean aphids treated with imidacloprid with LC_{50} and LC_{30} concentrations

参数 Parameter	CK	LC_{30}（处理组Ⅰ）(Treatment group Ⅰ)	LC_{50}（处理组Ⅱ）(Treatment group Ⅱ)
净增值率 R_0 Net appreciation rate	37.021±0.481	10.997±0.390	5.206±0.330
世代平均历期 T Generation mean duration	9.186±0.670	8.530±0.157	9.812±0.691
内禀增长率 r_m Intrinsic growth rate	0.395±0.028	0.281±0.001	0.168±0.014
周限增长率 λ Peripheral growth rate lambda	1.484±0.041	1.324±0.002	1.184±0.017
倍增时间 T_d Doubling time	1.762±0.126	2.467±0.009	4.137±0.338

由表 3 可知，大豆蚜受 LC_{50} 吡虫啉药剂胁迫程度较受 LC_{30} 药剂胁迫程度重。处理组Ⅱ大豆蚜种群净增值率（R_0）比对照组降低 85.94%；内禀增长率（r_m）比对照组降低 57.47%；种群倍增时间（T_d）延长为对照组的 2.35 倍；世代平均历期（T）略有延长，为对照组的 1.07 倍；周限增长率（λ）比对照组降低 20.22%。处理组Ⅰ大豆蚜种群净增值率（R_0）比对照组降低 70.30%；内禀增长率（r_m）比对照降低 28.86%；种群倍增时间（T_d）延长为对照的 1.40 倍；世代平均历期（T）略有缩短，比对照组缩短 7.14%；周限增长率（λ）比对照组降低 10.78%。处理组Ⅰ大豆蚜种群净增值率（R_0）为处理组Ⅱ大豆蚜种群的净增值率（R_0）的 2.11 倍；内禀增长率（r_m）为处理组Ⅱ大豆蚜种群的 1.67 倍；周限增长率（λ）为处理组Ⅱ大豆蚜种群的 1.12 倍；种群倍增时间（T_d）比处理组Ⅱ大豆蚜种群的倍增时间缩短 40.37%；世代平均历期（T）比处理组Ⅱ大

豆蚜种群的缩短 13.07%。

2.3 LC_{50}、LC_{30} 吡虫啉药剂处理后大豆蚜种群抗性变化

由图 3 可知，受 LC_{50} 吡虫啉药剂胁迫的大豆蚜种群的第 1 - 5 代抗性增长分别为 1.64、1.78、2.23、2.27 和 2.40 倍，其中第 1 - 2 代抗性增长差异不显著（$P > 0.05$），3 - 5 代抗性增长差异不显著（$P > 0.05$），而第 1 代和第 2 代与第 3、4、5 代之间抗性增长差异是显著（$P < 0.05$）。

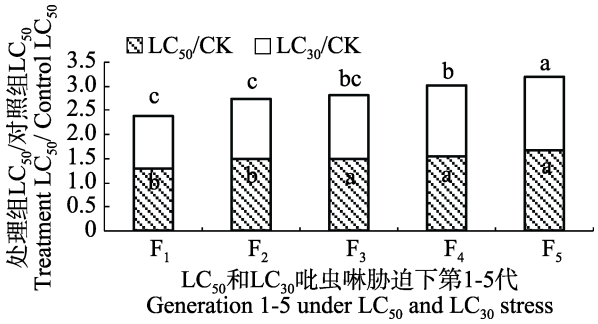

图 3 LC_{50} 和 LC_{30} 吡虫啉连续处理下大豆蚜对该药剂的抗性变化

Fig. 3 The resistance variation of soybean aphids treated with imidacloprid with LC_{50} and LC_{30} concentrations continuously

标记相同字母的条带间差异不显著（$P > 0.05$）。
Bars labeled with the same letters are not significantly different ($P > 0.05$).

受 LC_{30} 吡虫啉药剂胁迫的大豆蚜种群的第 1、2 和 3 代大豆蚜抗性倍数分别为 1.36、1.35 和 1.57 倍，增长不显著（$P > 0.05$），第 4 代大豆蚜抗性倍数为 1.61 倍，与第 3 代相比增长不显著（$P > 0.05$），但与第 1 代和第 2 代大豆蚜相比，抗性倍数增长显著（$P < 0.05$）。第 5 代大豆蚜抗性倍数为 1.90 倍，抗性倍数增长显著（$P < 0.05$）。

比较分析发现，经 LC_{50}、LC_{30} 吡虫啉药剂处理后，大豆蚜种群在第 1 代时坑性增长的速率差异不明显（$P > 0.05$）；第 2 - 3 代时，LC_{50} 吡虫啉药剂处理的大豆蚜种群坑性增长的速率明显高于 LC_{30} 吡虫啉药剂处理的增长的速率；在第 3 - 4 代时，LC_{50} 和 LC_{30} 吡虫啉药剂分别处理后，大豆蚜种群坑性增长的速率差异不明显（$P > 0.05$）；第 4 - 5 代时，LC_{50} 吡虫啉药剂处理的大豆蚜种群大豆蚜种群坑性增长的速率明显低于 LC_{30} 吡虫啉药剂处理的（图 3）。

3 讨论

本文针对大豆蚜受 LC_{50} 和 LC_{30} 吡虫啉药剂胁迫后，其种群的存活率、繁殖率、抗性产生速率、生殖生命表进行了研究。结果表明大豆蚜经 LC_{50} 和 LC_{30} 吡虫啉药剂胁迫后存活率的变化均经历了 3 个阶段：第 1 个阶段为存活率急剧下降期，这个阶段历时不超过 48 h，存活率下降主要是由吡虫啉药剂作用的结果；第 2 个阶段是存活率平缓下降期，受 LC_{30} 吡虫啉药剂胁迫的大豆蚜这个阶段约 7 d，受 LC_{50} 吡虫啉药剂胁迫的大豆蚜这个阶段约 13 d，该阶段是昆虫通过一系列代谢调节来降低农药毒性的时期，也是促进大豆蚜产生抗药性的时期；第 3 个阶段是存活率次急速下降期，为昆虫自身的衰老占主导作用的时期。

研究发现，经 LC_{50} 和 LC_{30} 的吡虫啉药剂胁迫后，大豆蚜产生的抗性速率增长快慢出现的世代不同。LC_{50} 吡虫啉药剂处理过的大豆蚜，第 2 - 3 代种群抗性速率增长较快，而 LC_{30} 吡虫啉药剂处理过的大豆蚜，在第 4 - 5 代种群抗性速率增长较快。因此，建议施用吡虫啉防治大豆蚜时，在第 2 次用药时，不要连续施用吡虫啉；若在某些情况下施用低浓度的药剂来防治大豆蚜，至少在第 4 次施用时，选择换用其它药剂。这可能与大豆蚜的乙酰胆碱（ACh）结合程度受其它因素的作用，导致大豆蚜解毒能力提高、靶标部位对毒素敏感性降低，进而使害虫形成抗性（Devine *et al.*，1996）。

同时，施用吡虫啉药剂后，对大豆蚜种群的繁殖率也产生了明显的影响。LC_{30} 吡虫啉药剂能缩短大豆蚜世代平均历期，这与杨洪等（2013）用亚致死剂量处理褐飞虱后导致其世代平均历期延长的结果相反。大豆蚜种群表现出世代平均历期缩短的亚致死效应，可能是因为亚致死剂量药剂不足以快速杀死大豆蚜，而表现为大豆蚜与药剂的相互对抗阶段，本阶段大豆蚜通过调节自身代谢，缩短发育时间以应对杀虫剂的伤害；经这两个浓度的吡虫啉农药的胁迫后，其大豆蚜种群的生殖参数均发生了相应的变化，LC_{50} 能有效地降低大豆蚜种群的数量，延长世代平均历期、

降低净增值率和周限增长率，延长倍增时间。

通过本研究明确了吡虫啉胁迫后的大豆蚜发育历期、抗性、生命表参数变化趋势，初步阐明了大豆蚜种群受不同浓度吡虫啉药剂干扰的程度及相应抗逆变化。但本研究试虫选用从未接触过药剂的种群，排除了因田间种群抗药性的不确定性对试验结果的影响而未对田间种群进行研究（杨帅，2012）。因此关于田间种群受吡虫啉干扰后的变化，还应考虑田间种群实际抗药性水平的影响（邱高辉等，2008），以预测大豆蚜种群抗药性发生趋势，并制定有效的防治措施，从而达到精准施药的目的。

参考文献 (References)

Cheng SX, Lei XY, 2012. Analysis of neonicotinoid insecticides patent in China. *Pesticide*, 51(9): 632–633, 661. [成四喜, 雷筱娱, 2012. 新烟碱类杀虫剂在华专利分析. 农药, 51(9): 632–633, 661.]

Chen YW, Dou CH, 2008. Study on the life table of *Therioaphis trifolii* under 5 kinds of constant temperature. *Henan Agricultural Science*, (4): 78–82. [陈应武, 窦彩虹, 2008. 5 种恒定温度下苜蓿斑蚜实验种群生命表的研究. 河南农业科学, (4): 78–82.]

Deng TF, Gao YF, Chen XL, 2010. Selective toxicity mechanism of neonicotinoid insecticides. *Journal of Henan Institute of Science and Technology*, 38(4): 23–26. [邓天福, 高扬帆, 陈锡岭, 2010. 新烟碱类杀虫剂的选择毒性机理. 河南科技学院学报(自然科学版), 38(4): 23–26.]

Devine GJ, Harling ZK, Scarr AW, Devonshire AL, 1996. Lethal and sublethal effects of imidacloprid on nicotine-tolerant *Myzus nicotianae* and *Myzus persicae. Pestic. Sci.*, (48): 57–62.

Guo JY, Gao Y, Tian Y, 2017. Research progress on imidacloprid exposure and genotoxity. *Environmental and Occupational Medicine*, 34(11): 1013–1018. [郭婧怡, 高宇, 田英, 2017. 吡虫啉暴露及其遗传毒性研究进展. 环境与职业医学, 34(11): 1013–1018.]

Huang SS, 2013. Determination of key enzyme activity, inheritance and QTL analysis of resistance to soybean aphid (*Aphis glycines* Matsumura) in spring soybean of northeast China. Doctoral dissertation. Heilongjiang Northeast Agricultural University. [黄珊珊, 2013. 东北春大豆抗蚜关键酶活性测定、遗传分析及 QTL 定位. 博士学位论文. 黑龙江: 东北农业大学.]

Jia YX, He DH, Ha XJ, Han SL, 2004. Life table of *Ephedraphis gobica* population in laboratory. *Chinese Bulletin of Entomology*, 50(5): 434–436. [贾彦霞, 贺达汉, 哈学娟, 韩树立, 2004. 麻黄蚜实验种群的生命表. 昆虫知识, 50(5): 434–436.]

Liu G, 2015. Hunan institute of chemical industry has successfully developed a new acaricidal quaternary ketonic acid compound. *Pesticide Market Information*, (25): 50. [刘刚, 2015. 湖南化工研究院成功创制一具有杀螨活性的季酮酸类化合物. 农药市场信息, (25): 50.]

Liu SS, 1987. Introduce a new method of feeding aphids-new leaf wafer method. *Chinese Bulletin of Entomology*, 33(2): 113–115, 98. [刘树生, 1987. 介绍一种饲养蚜虫的方法——新的叶子圆片法. 昆虫知识, 33(2): 113–115, 98.]

Liu ZW, Williamson MS, Lansdell SJ, Denholm I, Han ZJ, Millar NS, 2005. A nicotinic acetylcholine receptor mutation conferring target-site resistance to imidacloprid in *Nilaparvata lugens* (brown planthopper). *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 102(24): 8420–8425.

Liu ZY, Li WS, 2005. Causes and control measures of *Aphis glycines* Matsumura. *Journal of Crops*, (2): 40. [刘振勇, 李唯实, 2005. 大豆蚜虫发生原因及防治措施. 作物杂志, (2): 40.]

Qiu ZH, Yao Y, Han ZJ, 2008. Resistance mechanism of *Macrosiphum granarium* Kirby to imidacloprid. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 53(2): 67–70. [邱高辉, 姚远, 韩召军, 2008. 麦长管蚜对吡虫啉的抗性机理研究. 南京农业大学学报, 53(2): 67–70.]

Shimomura M, 2005. Molecular mechanism of selective toxicity of neonicotinoids. *J. Pestic. Sci.*, 30(3): 230–231.

Tang ZH, Tao LM, Li Z, 2006. Molecular mechanism of selective action of neonicotinoid insecticides. *Journal of Pesticide Science*, 8(4): 291–298. [唐振华, 陶黎明, 李忠, 2006. 新烟碱类杀虫剂选择作用的分子机理. 农药学学报, 8(4): 291–298.]

Tomizawa M, Casida JE, 2003. Selective toxicity of neonicotinoids attributable to specifi city of insect and mammalian nicotinic receptors. *Annu. Rev. Entomol.*, 48: 339–364.

Tomizawa M, Lee DL, Casida JE, 2000. Neonicotinoid insecticides: Molecular features conferring selectivity for insect versus mammalian nicotinic receptors. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48(12): 6016–6024.

Wang SY, Bao XZ, Sun YJ, Chen RL, Zhai BP, 1996. Experiment of effects of *Aphis glycines* Matsumura to growth and yield of soybean. *Soybean Science*, 15(3): 243–247. [王素云, 暴祥致, 孙雅杰, 陈瑞鹿, 翟保平, 1996. 大豆蚜虫对大豆生长和产量影响的试验. 大豆科学, 15(3): 243–247.]

Xu ZP, 2009. Application of neonicotinoid insecticides in crop protection field. *World Pesticides*, 31(1): 18–21. [须志平, 2009. 新烟碱类杀虫剂在作物保护方面的应用. 世界农药, 31(1): 18–21.]

Yang H, Wang Z, Jin DC, 2013. Sublethal effect of chlorantraniliprole on the experimental population of non-target insect *Nilaparvata lugens* (Stål), *Chin. J. Appl. Ecol.*, 24(2): 549–555. [杨洪, 王召, 金道超, 2013. 氯虫苯甲酰胺对非靶标害虫褐飞虱实验种群的亚致死效. 应用生态学报, 24(2): 549–555.]

Yang S, Liu J, Dai CC, Zhao KJ, 2010. Morphological variation for growth and development of *Aphis glycines* Matsumura collected from different geographical zones. *Chinese Bulletin of Entomology*, 47(1): 67–71. [杨帅, 刘健, 戴长春, 赵奎军, 2010. 不同地理种群大豆蚜生长发育的形态指标. 昆虫知识, 47(1): 67–71.]

Yang S, 2012. Monitoring and mechanism of soybean aphid resistance to imidacloprid. Doctoral dissertation. Heilongjiang: Northeast Agricultural University. [杨帅, 2012. 大豆蚜对吡虫啉的抗性监测及抗性机理研究. 博士学位论文. 黑龙江: 东北农业大学.]