亚致死剂量吡虫啉对麦二叉蚜生存和繁殖的影响*

谢佳燕** 吴 聪 林 佳 李 睿 蔡光华

（武汉轻工大学，生命科学与技术学院，武汉 430023）

摘 要 **【目的】** 为明确亚致死剂量的吡虫啉对麦二叉蚜 *Schizaphis graminum* (Rondani) 连续 3 个世代种群的生存和繁殖的影响。**【方法】** 采用浸叶法测定吡虫啉对麦二叉蚜的 LC_{50}，经吡虫啉亚致死剂量 LC_{40} 处理麦二叉蚜后，测定并分析其连续 3 个世代实验种群生存和繁殖的变化。**【结果】** 同一世代中，吡虫啉 LC_{40} 剂量处理麦二叉蚜后，可导致 F_0 世代麦二叉蚜种群的平均寿命、产蚜总数和繁殖期均显著低于对照组种群（P<0.05），但 F_1 和 F_2 世代 LC_{40} 组试虫的存活率和繁殖相关参数与对照组相比无显著差异（P>0.05）。方差分析结果表明，在不同世代间 LC_{40} 组试虫的产蚜总数随世代数的增加而显著增多（F=6.38，P=0.002），存活率、平均寿命、繁殖期随世代数的增加而逐渐增加。**【结论】** 吡虫啉的 LC_{40} 剂量可显著抑制 F_0 世代麦二叉蚜个体的存活率和繁殖力，但随着世代数增加，吡虫啉 LC_{40} 组麦二叉蚜的生存和繁殖力逐渐恢复，F_1 和 F_2 世代与对照组种群的生存和繁殖参数无显著差异。

关键词 麦二叉蚜；吡虫啉；亚致死效应；存活；繁殖期

Sublethal effects of imidacloprid on the survival and reproduction of *Schizaphis graminum* (Rondani)

XIE Jia-Yan** WU Cong LIN Jia LI Rui CAI Guang-Hua

(School of Life Science and Technology, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China)

Abstract **[Objectives]** The effects of sublethal concentrations of imidacloprid on the survival and reproduction of three successive generations of *Schizaphis graminum* (Rondani) were determined. **[Methods]** The LC_{50} of imidacloprid to *S. graminum* was tested using the leaf-dip method. The parental (F_0) generation was exposed to either the LC_{40} dose of imidacloprid (LC_{40} group), or distilled water (control group), and the survival and reproduction of this and two successive generations were measured and compared. **[Results]** All three LC_{40} groups had significantly lower longevity, fewer offspring per female, and a shorter reproductive period, than the F_0 control group. The survival and reproductive parameters of the F_1 and F_2 LC_{40} groups, were, however, no different to those of the control group. In addition, the number of offspring per female, and other reproductive parameters of LC_{40} groups significantly increased in successive generations. **[Conclusion]** Exposure to a sublethal dose of imidacloprid significantly reduces the survival and reproduction of the F_0 generation of *S. graminum* but the magnitude of these effects decreases in successive generations. The survival and reproductive parameters of the F_1 and F_2 LC_{40} groups were not significantly different to those of the control group.

Key words *Schizaphis graminum*; imidacloprid; sublethal effect; survival; reproductive period

随着农业的发展，对有害生物进行有效的综合治理已成为发展现代绿色农业的重要举措。由于制约有害生物防治的因素较多，化学防治仍然是当前防治有害生物的普遍措施，但化学农药的

*资助项目 Supported projects：国家自然科学基金（31201729）；武汉市青年科技晨光计划项目（200950431197）；武汉轻工大学教学研究资助项目（XM2020004）

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

收稿日期 Received：2021-04-07；接受日期 Accepted：2021-11-08

大量使用给环境带来了显著的影响。因此，合理有效控制农药的使用，将对发展现代绿色农业具有重要的实践意义。在田间施用杀虫剂的过程中，除可直接杀死大部分靶标害虫外，其在环境中的剂量水平可随着时间的延续和空间的差异会逐渐递减到亚致死剂量（Boina *et al.*，2009；Rix *et al.*，2016）。新迁入的害虫或原有未被杀死的害虫还将继续长期接触亚致死浓度的杀虫剂，这种接触将对害虫的生存、生殖、生理生化和行为等生物学特征产生一系列的影响（Haynes，1988；Ayyanath *et al.*，2013；McLuckie *et al.*，2020），而这些影响又可对害虫的抗药性、迁移、再猖獗等产生重要的作用（Cutler *et al.*，2009；Rix *et al.*，2016）。因此，杀虫剂的亚致死效应已成为近些年来广泛关注的研究热点之一（Santos *et al.*，2016；全林发等，2017）。昆虫种群的动态变化，可导致部分个体接触亚致死剂量后产生不同的效应。然而，不同的杀虫剂对不同生物产生的作用不同，不同生物应对杀虫剂胁迫产生的响应也不尽相同（Rix *et al.*，2016；Li *et al.*，2018；Cao *et al.*，2019）。一些研究表明，杀虫剂的亚致死剂量可对昆虫的生存与繁殖产生明显的不利性，从而达到对害虫持续控害的作用（Boina *et al.*，2009；Li *et al.*，2018）。此外，也有研究发现亚致死剂量的杀虫剂反而可刺激害虫的生殖力，导致田间害虫的再猖獗（Guedes and Cutler，2014；Cao *et al.*，2019）。同时，这种生殖刺激还可在继代间进行滞后产生，从而导致害虫猖獗的延迟（Cutler *et al.*，2009；Cutler，2013；Rix *et al.*，2016）。害虫对杀虫剂产生抗性是杀虫剂对其选择而出现的一种胁迫进化，经过长期低剂量杀虫剂的持续选择，也可诱导害虫代谢酶基因的表达，从而促进抗性个体的筛选和存活，有助于抗药性的积累和快速进化，增大害虫对杀虫剂产生抗药性的风险（唐振华，1993）。因此，深入理解害虫暴露在杀虫剂的亚致死剂量后，对其种群多个世代的影响，将对延缓杀虫剂抗药性的产生，以及协调害虫化学防治和生物防治具有重要的实践意义。

麦二叉蚜 *Schizaphis graminum*（Rondani）是一类世界性重要的农田作物害虫，其可直接造成麦类作物的大量减产（张广学和钟铁森，1983）。然而，由于麦蚜为 r-对策昆虫及具有孤雌生殖等生物学特征，田间长期的不合理用药，导致其对多种杀虫剂的抗药性增加（Siegfried and Ono，1993；Bass *et al.*，2015）。吡虫啉（Imidacloprid）是一类可有效防治刺吸式害虫的氯代烟酰类药剂，近年来新烟酰类农药已成为世界上使用量最大的农药之一，随着吡虫啉的频繁使用，已发现吡虫啉对农业害虫的防效下降（Bass *et al.*，2015）。因此，对于麦蚜的有效防控将对于保障国家粮食安全具有重要的实践意义。本研究采用吡虫啉 LC_{40} 剂量处理麦二叉蚜种群后，检测经吡虫啉处理对麦二叉蚜连续 3 个世代实验种群的作用，以揭示吡虫啉亚致死剂量对麦二叉蚜实验种群多个世代生存和繁殖的影响，为田间杀虫剂的合理使用以及对麦蚜种群的生态调控提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　供试昆虫

麦二叉蚜系本实验室内人工饲养多年的麦二叉蚜品系，饲养期间未接触任何药剂。采用盆栽普通小麦麦苗饲养于人工气候培养箱内，温度（24±1）℃，湿度 60%-70%，光照周期 L∶D=14∶10。10%吡虫啉可湿性粉剂为江苏丰山集团有限公司产品。

1.2　生物测定

室内毒力测定采用浸叶法。将无翅成蚜连同小麦叶段浸于预先稀释的系列浓度吡虫啉药液中，10 s 后取出，用滤纸吸去多余药液，晾干 30 min 后，放入垫有滤纸的培养皿中，置于人工气候培养箱内常规条件饲养 24 h 后检查和统计麦二叉蚜的存活及死亡个体数。以蒸馏水处理为对照，每个处理 30-50 头麦二叉蚜，每个浓度重复 3 次。

1.3　亚致死浓度试验处理

选择约 100 头麦二叉蚜成蚜接于新鲜麦苗上，置于人工气候培养箱内常规条件饲养，24 h

后弃成蚜留若蚜于麦苗上继续饲养。于饲养第 5 天依据毒力回归方程，按照生物测定方法用吡虫啉 LC_{40} 剂量处理该试虫（F_0 世代），处理 24 h 后，随机选取存活个体接于新鲜麦苗上并于人工气候培养箱内单头单株饲养，每日定时记录麦二叉蚜存活、死亡状态及产蚜数，并将每日新产子代蚜虫计数后挑离麦苗，至成蚜死亡。每个处理重复 45-50 头蚜虫，以蒸馏水处理为对照。F_1 世代和 F_2 世代试虫均为其前一世代试虫首次所产若蚜进行单头单株饲养，并按照相同的方法进行观察和记录。

1.4 数据分析

以机率值法计算毒力回归方程、致死中浓度 LC_{50} 和亚致死浓度 LC_{40}。毒力回归方程及统计分析采用 SPSS 14.0 软件。对照组和处理组间生存和繁殖参数的差异分析采用独立样本 *t*-检验，对同一处理不同世代间差异的比较进行单因素方差分析（One-way ANOVA），Duncan's test 进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 吡虫啉对麦二叉蚜的亚致死剂量

根据生物测定检测了吡虫啉对麦二叉蚜的毒力水平（表 1）。结果表明，吡虫啉对麦二叉蚜的致死中浓度 LC_{50} 为 15.45 mg/L，LC_{40} 值为 10.15 mg/L，以 LC_{40} 值作为处理组试虫的处理剂量。

2.2 吡虫啉 LC_{40} 剂量对麦二叉蚜存活曲线和寿命的影响

吡虫啉 LC_{40} 剂量处理亲代麦二叉蚜后，对其亲代和连续两代子代麦蚜存活曲线的影响见图 1。F_0 世代，LC_{40} 剂量处理组试虫的存活曲线随处理后时间的推移极速下降，对照组种群的存活率明显高于处理组；F_0 世代对照组种群于 9 d 时开始出现个体死亡，20 d 后存活率为 55%，32 d 后试虫全部死亡；LC_{40} 处理组于 8 d 时开始出现个体死亡，20 d 后存活率为 10%，32 d 后存活率为 2.5%。F_1 世代，对照组种群 21 d 后存活率为 53%，LC_{40} 组为 34%。F_2 世代，LC_{40} 组试虫的存活曲线随时间推移缓慢下降，对照组和 LC_{40} 组两组试虫均在 19-20 d 时约有一半个体死亡。

吡虫啉 LC_{40} 剂量处理对麦二叉蚜个体平均寿命的影响趋势与存活曲线结果一致（表 2，图 1）。同一世代中，F_0 世代 LC_{40} 组比对照组提前 5 d 死亡率达 50%，平均寿命极显著低于对照组（$P<0.01$），仅为对照组的 75%；F_1 世代，LC_{40} 组试虫的平均存活时间增长，与对照组相比平均

表 1 吡虫啉对麦二叉蚜的致死中浓度和亚致死浓度

Table 1 Median lethal concentration and sublethal dosage of imidacloprid to *Schizaphis graminum*

毒力回归方程 LC-P equation	相关系数 R^2 Correlation coefficient	卡方值 χ^2 Chi-square	LC_{50}（mg/L）(95% CL)	LC_{40}（mg/L）(95% CL)
y=3.35+1.39x	0.99	1.54	15.45 (12.26-17.93)	10.15 (7.84-12.78)

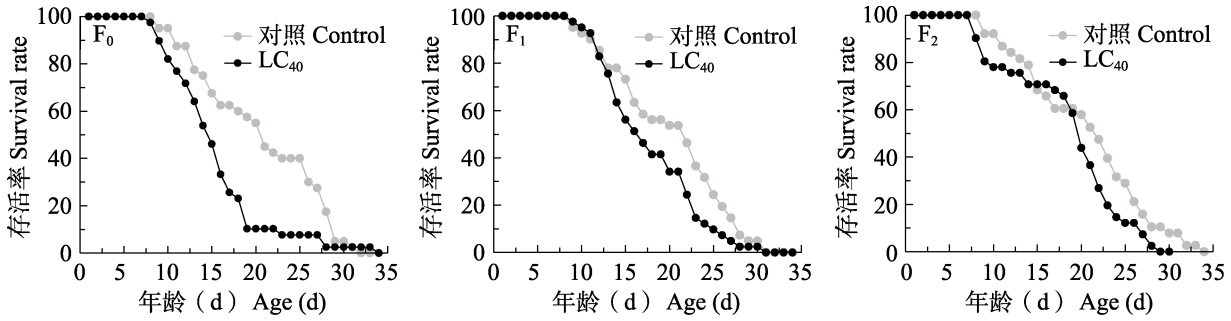

图 1 吡虫啉 LC_{40} 剂量处理亲代后对亲代和子代麦二叉蚜存活率的影响

Fig. 1 The survival rate of parental aphids and their offsprings of *Schizaphis graminum* after parental aphids exposed to imidacloprid at LC_{40} dose

寿命无显著差异（P>0.05）；F_2 世代，LC_{40} 组试虫与对照组平均寿命无明显差异（P>0.05）。不同世代间，对照组试虫个体平均寿命在连续 3 个世代之间无显著差异（F=0.24，P=0.79）；LC_{40} 组试虫的平均寿命在连续 3 个世代之间无显著差异（F=2.46，P=0.09），但 F_0 世代试虫的平均寿命显著低于 F_2 世代（P<0.05），仅为 F_2 世代的 84%。

2.3　吡虫啉 LC_{40} 剂量对麦二叉蚜繁殖的影响

吡虫啉 LC_{40} 剂量对麦二叉蚜亲代和子代繁殖的影响见表 2 和图 2。结果表明，同一世代中，F_0 世代 LC_{40} 组试虫每雌产蚜总数极显著低于对照组（P<0.01），仅为对照组的 64%，繁殖期也极显著短于对照组（P<0.01）；F_1 世代，LC_{40} 组试虫产蚜总数和繁殖期均增加，统计分析表明与对照组无显著差异（P>0.05）；F_2 世代，LC_{40} 组和对照组的产蚜总数及繁殖期均无明显差异（P>0.05）。不同世代间，对照组试虫产蚜总数（F=0.26，P=0.77）和繁殖期（F=0.32，P=0.73）在连续 3 个世代之间无显著差异；LC_{40} 组试虫的产蚜总数在连续 3 个世代之间存在极显著差异（F=6.38，P=0.002）；LC_{40} 组的繁殖期在连续 3 个世代之间无显著差异（F=2.94，P=0.06），但 F_0 世代试虫的繁殖期显著短于 F_1 世代试虫（P< 0.05）。

吡虫啉 LC_{40} 剂量处理亲代麦二叉蚜后，其产蚜节律与对照组类似（图 2），均表现为平均

表 2　LC_{40} 剂量吡虫啉处理亲代后对亲代及不同子代麦二叉蚜寿命和繁殖的影响

Table 2　Effect imidacloprid at LC_{40} dose on longevity and fecundity of *Schizaphis graminum*

世代 Generation	处理 Treatment	平均寿命（d） Mean longevity (d)	产蚜总数（头） Number of offspring (ind.)	繁殖期（d） Reproductive period (d)
F_0	对照 Control	19.78±1.12A	56.13±3.42A	10.10±0.56A
	LC_{40}	14.79±0.88a**	36.03±3.36a**	7.45±0.56a**
F_1	对照 Control	19.24±1.01A	59.00±3.17A	10.20±0.58a
	LC_{40}	16.90±0.86ab	52.59±3.48b	9.27±0.53b
F_2	对照 Control	18.71±1.14A	55.92±3.65A	9.58±0.59a
	LC_{40}	17.59±1.00b	50.78±3.77b	9.02±0.61ab

表中数据为平均值±标准误。**表明同一世代中，对照组与处理组的数据之间经 t-检验差异极显著；同一列数据后标有不同大写字母表示不同世代间的对照组差异显著（P<0.05，Duncan's test）；同一列数据后标有不同小写字母表示不同世代间的处理组差异显著（P<0.05，Duncan's test）。

Data are means±SE. ** represents significant differences at the 0.01 level between the control and treatment groups by t- test. Data are followed by different uppercase letters in the same column indicate significant differences among generations of the control groups at the 0.05 level by Duncan's test, and followed by different lowercase letters in the same column indicate significant differences among generations of the treatment groups at the 0.05 level by Duncan's test.

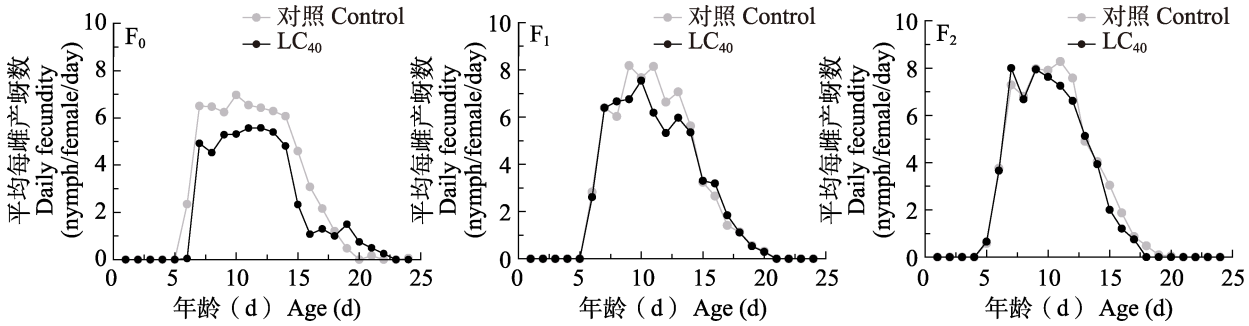

图 2　吡虫啉 LC_{40} 剂量处理亲代后对亲代和子代麦二叉蚜种群繁殖的影响

Fig. 2　The amount of nymphs produced by parental aphids and their offsprings of *Schizaphis graminum* after parental aphids exposed to imidacloprid at LC_{40} dose

每雌产蚜数随时间延长而逐渐上升，于 7 d 时达峰值，13-14 d 之后逐渐下降为零，至全部个体死亡。F_0 世代，暴露在吡虫啉 LC_{40} 剂量的麦二叉蚜的平均每雌产蚜数明显少于对照组。F_1 世代，LC_{40} 组在 9-14 d 的平均每雌产蚜数仍低于对照组，但每雌产蚜总数与对照组已无显著差异（P>0.05）。F_2 世代，LC_{40} 组和对照组试虫的产蚜数无明显差异（P>0.05）。

3 讨论

田间杀虫剂的施用，可快速对靶标害虫产生致死效应，但随着时间延续和空间差异，杀虫剂的杀虫效果会逐渐递减到亚致死浓度（Boina *et al.*，2009；Rix *et al.*，2016），从而导致亚致死剂量的杀虫剂持续存在于农业生态系统中。亚致死剂量的杀虫剂仍可对昆虫的行为、生理和生态特征产生影响（Haynes，1988；Koo *et al.*，2015），甚至还可持续影响到昆虫的多个世代（Ayyanath *et al.*，2013）；通过对昆虫生理和生态胁迫的应对调节，杀虫剂的亚致死剂量还可导致害虫的再猖獗（Guedes and Cutler，2014）。一些研究表明，经杀虫剂亚致死剂量处理可对昆虫的存活产生影响（Li *et al.*，2018；Skouras *et al.*，2019）。接触吡虫啉 LC_{10} 和 LC_{30} 剂量后可显著缩短棉蚜 *Aphis gossypii* 的寿命和净生殖力，同时通过棉蚜的拒食改变其取食行为（Koo *et al.*，2015）。禾谷缢管蚜 *Rhopalosiphum padi* 在取食亚致死剂量吡虫啉处理的植物后，对蚜虫的存活产生负面影响，其幼虫存活率降低，部分龄期的发育历期延长，延缓了种群的增长率（Li *et al.*，2018）。接触吡虫啉亚致死剂量后可显著降低多异瓢虫 *Hippodamia variegata* 的生命表参数，从而对其种群的存活和寿命产生抑制作用（Skouras *et al.*，2019）。本研究发现吡虫啉 LC_{40} 剂量对麦二叉蚜的存活率具有明显的抑制作用。在同一世代中，F_0 世代处理组试虫的存活曲线随时间推移极速下降，比对照组种群提前 5 d 个体数目死亡减半，且其平均寿命极显著低于对照组。这表明吡虫啉的 LC_{40} 剂量对麦二叉蚜仍具有显著的毒力效应，能够持续进行田间防控。但这种显著的抑制作用并未延续到后续的 F_1 和 F_2 世代中。在不同世代间，LC_{40} 组试虫的平均寿命在连续 3 个世代之间虽无显著差异，但平均寿命随世代数增加而逐渐增长，F_2 世代试虫的平均寿命显著高于 F_0 世代，表明 LC_{40} 组试虫在随后的世代中正逐渐恢复其生存能力，以降低杀虫剂对其的毒效作用。

亚致死剂量的杀虫剂还对昆虫的繁殖能力产生不同的效应。杀虫剂亚致死剂量的施用，可对昆虫的生殖力产生抑制作用，降低害虫的繁殖，从而可达到田间持续控害的作用（Boina *et al.*，2009；Li *et al.*，2018）。如溴虫腈和毒死蜱亚致死浓度对等钳螨蛛 *Blattisocius dentriticus* 亲代处理后，2 种杀虫剂均可显著缩短 F_0 代雌成螨的寿命和产卵期（杨娟生等，2020）。萝卜蚜 *Lipaphis erysimi* 取食 LD_{10} 剂量的吡虫啉后可显著抑制其的生殖力并延长其发育历期（李昭等，2018）。溴氰虫酰胺的 LC_{40} 和 LC_{25} 剂量可显著抑制甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua* 的繁殖，并表现出明显的剂量效应（余慧灵等，2015）。然而，一些研究也发现，害虫暴露在杀虫剂的亚致死剂量后，虽降低了当代雌虫的存活率，但却显著提高雌虫的繁殖率，从而导致田间害虫的大暴发（Santos *et al.*，2016）。此外，一些研究还发现昆虫暴露在低剂量的杀虫剂后，还可增强不同昆虫的繁殖力和生育力（Guedes and Cutler，2014）。将玉米象 *Sitophilus zeamais* 的抗拟除虫菊酯品系暴露于 0.05 μg·g^{-1} 氰菊酯后可刺激玉米象的净生殖率达到峰值（Guedes *et al.*，2010）。同时，低剂量杀虫剂的这种繁殖刺激还可滞后体现，从而导致害虫猖獗的延迟（Cutler *et al.*，2009；Rix *et al.*，2016）。桃蚜 *Myzus persicae* 经低浓度的吡虫啉处理后，发现处理当代的繁殖率与对照组无明显差异，但对其后代的繁殖率具有一定的刺激效应（Cutler *et al.*，2009）。Ayyanath 等（2013）发现采用亚致死剂量吡虫啉可刺激桃蚜的繁殖，同时采用低剂量吡虫啉连续胁迫桃蚜 4 代后，其适合度增加。此外，杀虫剂不同剂量诱导的繁殖应激还伴随着解毒酶基因表达量的改变，有助于昆虫应对后续选择压力的改变（Rix *et al.*，2016）。本研究发现麦二叉蚜种群经吡虫

啉亚致死剂量处理后, 并未刺激其当代繁殖率的增加, 相反, 吡虫啉的 LC_{40} 剂量显著降低了当代麦二叉蚜的繁殖率, 表明 LC_{40} 剂量的吡虫啉对麦二叉蚜实验种群的繁殖仍具有显著的抑制效应。然而这种抑制作用在后续的两个世代中与生存率一样并未得到体现, F_1 和 F_2 世代 LC_{40} 组试虫的产蚜总数和繁殖期与对照组无明显差异。在不同世代间, LC_{40} 组试虫的产蚜总数随世代数的增加而显著增多, 繁殖期随世代数的增加而明显增长, 表明 LC_{40} 组种群随世代数增加而逐渐恢复其生殖能力, 以减缓种群的衰退进程。这与采用高效氯氰菊酯亚致死浓度处理亲代桃小食心虫 *Carposina sasakii* 后, 对其亲代和子代成虫产卵量及后代幼虫孵化率产生的效应一致(全林发等, 2017)。

杀虫剂的亚致死剂量能够干扰昆虫的生存、寿命和繁殖, 同时, 长期持续性的接触亚致死剂量的杀虫剂, 将为害虫抗药性的进化提供持续的选择压(Chaton *et al.*, 2001; Ayyanath *et al.*, 2013)。已经发现采用亚致死剂量的吡虫啉处理麦二叉蚜后, 可显著诱导麦蚜启动酯酶蛋白的表达, 以应对杀虫剂的胁迫(谢佳燕和林佳, 2015)。亚致死剂量吡虫啉还可显著诱导麦二叉蚜 CYP4 家族多个 P450 相关基因的上调表达, 而这些基因的表达产物在蚜虫适应外源化合物的生理代谢过程中发挥着重要的作用(张百重等, 2018)。因此, 在田间综合治理过程中, 除考虑麦蚜的抗药性水平外, 还应考虑杀虫剂的剂量水平, 在进行田间害虫防控前需进行更全面的实验和具体分析, 避免过低剂量吡虫啉的使用, 以延长杀虫剂的使用寿命。

参考文献 (References)

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

Bass C, Denholm I, Williamson MS, Nauen R, 2015. The global status of insect resistance to neonicotinoid insecticides. *Pestic. Biochem. Physiol.*, 121: 78–87.

Boina DR, Onagbola EO, Salyani M, Stelinski LL, 2009. Antifeedant and sublethal effects of imidacloprid on Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri*. *Pest Management Science*, 65(8): 870–877.

Cao Y, Yang H, Li J, Wang C, Li C, Gao Y, 2019. Sublethal effects of imidacloprid on the population development of western flower thrips *Frankliniella occidentalis* (Thysanoptera: Thripidae). *Insects*, DOI: 10. 3390/insects10010003.

Chaton PF, Ravanel P, Meyran JC, Tissut M, 2001. The toxicological effects and bioaccumulation of fipronil in larvae of the mosquito *Aedes aegypti* in aqueous medium. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 69(3): 183–188.

Cutler GC, 2013. Insects, insecticides and hormesis: Evidence and considerations for study. *Dose Response*, 11(2): 154–177.

Cutler GC, Ramanaidu K, Astatkie T, Isman MB, 2009. Green peach aphid, *Myzus persicae* (Hemiptera: Aphididae), reproduction during exposure to sublethal concentrations of imidacloprid and azadirachtin. *Pest Management Science*, 65(2): 205–209.

Guedes NMP, Tolledo J, Corrêa AS, Guedes RNC, 2010. Insecticide-induced hormesis in an insecticide-resistant strain of the maize weevil, *Sitophilus zeamais*. *Journal of Applied Entomology*, 134(2): 142–148.

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

Haynes KF, 1988. Sublethal effects of neurotoxic insecticides on insect behavior. *Annual Review of Entomology*, 33: 149–168.

Koo H, Lee S, Yun S, Kim HK, Kim G, 2015. Feeding response of the cotton aphid, *Aphis gossypii*, to sublethal rates of flonicamid and imidacloprid. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 154(2): 110–119.

Li W, Lu Z, Li L, Yu Y, Dong S, Men X, Ye B, 2018. Sublethal effects of imidacloprid on the performance of the bird cherry-oat aphid *Rhopalosiphum padi*. *PLoS ONE*, 13(9): e0204097.

Li Z, Guo Y, Liu Y, Wang XP, Zhu ZH, 2018. The effects of sublethal levels of insecticide on the wing dimorphism, development and reproduction of two aphid species. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 55(5): 896–903. [李昭, 郭圆, 刘勇, 王小平, 朱智慧, 2018. 亚致死剂量杀虫剂对两种蚜虫翅型、发育和生殖的影响. 应用昆虫学报, 55(5): 896–903.]

McLuckie C, Moltschaniwskyj N, Gaston T, Dunstan RH, Crompton M, Butcherine P, Benkendorff K, Taylor MD, 2020. Lethal and sub-lethal effects of environmentally relevant levels of imidacloprid pesticide to Eastern School Prawn, *Metapenaeus macleayi*. *Science of the Total Environment*, 742: 140449.

Quan LF, Chou GS, Sun LN, Li YY, Yan WT, Yue Q, Zhang HJ, 2017. Effects of sublethal concentrations of beta-cypermethrin on the biological characteristics of *Carposina sasakii* (Lepidoptera:

Carposinidae). *Acta Entomologica Sinica*, 60(7): 799–808. [全林发, 仇贵生, 孙丽娜, 李艳艳, 闫文涛, 岳强, 张怀江, 2017. 高效氯氰菊酯亚致死浓度对桃小食心虫生物学特性的影响. 昆虫学报 60(7): 799–808.]

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.

Santos MF, Santos RL, Tomé HVV, Barbosa WF, Martins GF, Guedes RNC, Oliveira EE, 2016. Imidacloprid-mediated effects on survival and fertility of the Neotropical brown stink bug *Euschistus heros*. *Journal of Pest Science*, 89(1): 231–240.

Siegfried BD, Ono M, 1993. Mechanisms of parathion resistance in the greenbug, *Schizaphis graminum* (Rondani). *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 45(1): 24–33.

Skouras PJ, Brokaki M, Stathas GJ, Demopoulos V, Louloudakis G, Margaritopoulos JT, 2019. Lethal and sub-lethal effects of imidacloprid on the aphidophagous coccinellid *Hippodamia variegata*. *Chemosphere*, 229: 392–400.

Tang ZH, 1993. Insect Resistance and Its management. Beijing: Agricultural Press. 383–403. [唐振华, 1993. 昆虫抗药性及其治理. 北京: 农业出版社. 383–403.]

Xie JY, Lin J, 2015. Time and dose effects of imidacloprid on the esterase activity of *Schizaphis graminum*. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 43(3): 116–118. [谢佳燕, 林佳, 2015. 吡虫啉胁迫时间和剂量对麦二叉蚜酯酶活性的影响. 江苏农业科学, 43(3): 116–118.]

Yang JS, Cong L, Wang CL, Hou DY, Zhou HN, Yu SJ, Cheng LY, Lei S, Fu YM, Cheng MM, Ran C, 2020. Effects of sublethal doses of chlorpyrifos and chlorfenapyr on the growth, reproduction and detoxification enzymes of *Blattisocius dentriticus* (Acari: Ascidae). *Acta Entomologica Sinica*, 63(1): 36–45. [杨娟生, 丛林, 王翠伦, 侯栋元, 周浩楠, 于士将, 成禄艳, 雷双, 傅云梅, 程明明, 冉春, 2020. 亚致死浓度溴虫腈和毒死蜱对等钳螨螨生长繁殖和解毒酶的影响. 昆虫学报, 63(1): 36–45.]

Yu HL, Xiang X, Yuan GX, Chen YQ, Wang XG, 2015. Effects of sublethal doses of cyantraniliprole on the growth and development and the activities of detoxifying enzymes in *Spodoptera exigua* (Lepidoptera: Noctuidae). *Acta Entomologica Sinica*, 58(6): 634–641. [余慧灵, 向兴, 袁贵鑫, 陈羿渠, 王学贵, 2015. 溴氰虫酰胺亚致死剂量对甜菜夜蛾生长发育及体内解毒酶活性的影响. 昆虫学报, 58(6): 634–641.]

Zhang BZ, Ma KS, Liu JJ, Lu Ly, Xie LF, Kong FB, Chen XL, Gao XW, 2018. Effects of imidacloprid or sulfoxaflor on the expression of cytochrome P450 genes in greenbug (*Schizaphis graminum* Rondan) based on RNA sequencing. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 20(6): 749–757. [张百重, 马康生, 刘俊杰, 卢留洋, 谢兰芬, 孔凡彬, 陈锡岭, 高希武, 2018. 基于转录组测序技术分析吡虫啉或氟啶虫胺腈对麦二叉蚜细胞色素 P450 基因表达的影响. 农药学学报, 20(6): 749–757.]

Zhang GX, Zhong TS, 1983. Economic Insect Fauna of China. Homoptera: Aphididae. Vol. 25. Beijing: Sciences Press. 1–61. [张广学, 钟铁森, 1983. 中国经济昆虫志: 第二十五册 同翅目 蚜虫类(一). 北京: 科学出版社. 1–61.]