

新烟碱类杀虫剂对蜜蜂毒理作用的研究进展

史晶亮¹, 杨乐², 廖春华¹, 吴小波¹

(1.江西农业大学 蜜蜂研究所,南昌 330045;2.开化县畜牧兽医局,浙江 衢州 324300)

摘要:蜜蜂作为全球最经济的授粉昆虫,对农业生产和维持生态平衡具有重要的作用。然而,随着杀虫剂在农业生产中广泛使用,蜜蜂的生存能力受到严重影响,不仅危害蜜蜂的健康状况,还制约了养蜂业的发展,进而影响蜜蜂授粉效率。综合近些年来国内外有关新烟碱类杀虫剂对蜜蜂毒理作用的研究结果,从新烟碱类杀虫剂对蜜蜂接触毒性、经口毒性给蜜蜂造成寿命和学习记忆上的影响进行论述,并对同一杀虫剂的接触毒性和经口毒性作用比较以及不同杀虫剂对蜜蜂协同作用进行了探讨,以期该类杀虫剂对蜜蜂的安全评估和合理施药提供理论参考。

关键词:新烟碱类杀虫剂;蜜蜂;寿命;学习记忆;接触毒性;经口毒性

中图分类号:TQ450.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-0413(2019)01-0006-05

Research Progress on the Toxicological Effects of Neonicotinoid Insecticides on Honeybees

SHI Jing-liang¹, YANG Le², LIAO Chun-hua¹, WU Xiao-bo¹

(1.Honeybee Research Institute, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China;

2.Bureau of Animal Husbandry and Veterinary Medicine of Kaihua County, Quzhou 324300, Zhejiang, China)

Abstract: Honeybee is vital to agricultural production and ecological balance maintaining as the most economic pollination insect in the world. However, with the widespread use of pesticides in agricultural production, the survival ability of worker bees have been seriously affected, not only the health of bees are endangered, but also the development of beekeeping is restricted, which affect the efficiency of pollination. This article aims to synthesize the results of the toxicological effects of neonicotinoid insecticides on honeybees based on domestic and international research in recent years, and the effects of neonicotinoid insecticides on the lifespan, learning and memory abilities of bees caused by contact toxicity and oral toxicity are discussed. Furthermore, the comparison has been made between the effect on contact toxicity and oral toxicity of the same insecticide while the synergistic effects of different insecticides on bees are also discussed. We hope the overview would provide a theoretical reference for honeybee safety assessment and reasonable pesticide application of this kind of insecticides on bees.

Key words: neonicotinoid insecticide; honeybee; lifespan; learning and memory; contact toxicity; oral toxicity

DOI:10.16820/j.cnki.1006-0413.2019.01.002

蜜蜂作为一种重要的经济昆虫,不仅可以提供天然的蜂产品,还能作为异花植物授粉,大幅度提高农作物的产量和品质^[1]。近年来,随着杀虫剂的广泛使用,蜜蜂中毒事件屡见报道^[2-3],这在一定程度上严重影响了蜜蜂授粉带来的生态效益。而新烟碱类杀虫剂占据了全球杀虫剂市场的最大份额,具有更加高效、低毒的特点,被广泛应用于农业生产中^[4]。新烟碱类杀虫剂主要包括吡虫啉(imidacloprid)、啮虫脒(acetamiprid)、噻虫胺 clothianidin)、噻虫嗪(thiamethoxam)、噻虫啉(thiaeloprid)、呋虫胺(dinotefuran)、硝乙脲噻唑(nithiazine)和烯啶虫胺(nitenpyram)等^[5],种类繁多。新烟碱类杀虫剂可选择性地

与昆虫神经系统中的乙酰胆碱受体结合,从而导致昆虫兴奋过度死亡^[6]。新烟碱类杀虫剂在田间主要用来杀死作物上的害虫,即靶标物,但对非靶标物的昆虫也产生巨大的影响。一方面,在给作物喷洒农药时,周围的非靶标昆虫易接触到农药;另一方面,非靶标昆虫可能采食到含有农药残留的食物,如蜜蜂采集含有农药残留的花粉和花蜜等。新烟碱类杀虫剂的大量使用,也间接地对生态农业造成了巨大的威胁。

目前,关于新烟碱类杀虫剂对蜜蜂的毒理性试验研究较多,学者们纷纷采用接触法和饲喂法来模拟蜜蜂野外接触农药或采食含有农药的食物等情形,分析新烟碱

收稿日期:2018-07-01,修返日期:2018-08-03

基金项目:江西省杰出青年人才资助项目(20162BCB23029);江西省自然科学基金项目(20171BAB204012)

作者简介:史晶亮(1996—),男,江西吉安人,硕士,主要从事养蜂学研究工作。E-mail: sjl_net@163.com。

通讯作者:吴小波(1983—),男,江西进贤人,副教授,硕士生导师,主要从事养蜂学教学与研究工作。E-mail: wuxiaobo21@163.com。

类杀虫剂对蜜蜂生存能力的影响,也有将蜂群饲养在已喷洒农药的田间附近,检测给作物喷洒农药后,对蜂群产生的影响^[7-8]。另外,新烟碱类杀虫剂作为一种神经毒性杀虫剂,长期残留在蜜蜂体内会严重干扰蜜蜂脑内的神经通路,从而影响蜜蜂的学习记忆能力,并且会给蜜蜂的采集活动带来不利影响,降低蜜蜂的存活能力,使蜜蜂寿命缩短。鉴于此,综述了新烟碱类杀虫剂对蜜蜂的寿命和学习记忆能力等方面的影响,以便进一步了解新烟碱中各种杀虫剂对蜜蜂健康状况的影响程度,同时也为田间合理施药提供理论依据。

1 新烟碱类杀虫剂对蜜蜂的接触毒性

由于蜜蜂在采集过程中,很容易接触到喷洒的农药和临时残留在树叶或花朵中的农药。研究人员在实验室条件下常采用“点滴法”测试杀虫剂对蜜蜂的接触毒性,并成为一种标准化的方法^[9],即模拟野外杀虫剂对蜜蜂的触杀作用。

1.1 新烟碱类杀虫剂点滴法对蜜蜂寿命的影响

杀虫剂对蜜蜂生存能力的影响主要体现在蜜蜂寿命方面,而半数致死剂量 LD_{50} 可作为衡量杀虫剂毒性大小的指标,即在一定条件下受试蜜蜂死亡半数所需要的杀虫剂剂量, LD_{50} 值越小,表明该杀虫剂对蜜蜂的毒性越大。Iwasa等^[10]研究了新烟碱类杀虫剂对蜜蜂的毒性作用,通过点滴法检测发现:硝基取代化合物类烟碱杀虫剂对蜜蜂的毒性最强,如吡虫啉、噻虫胺、噻虫嗪、呋虫胺和烯啶虫胺的 LD_{50} 值分别为18、22、30、75、138 ng/蜂;氰基取代化合物类烟碱杀虫剂则对蜜蜂表现出很低的毒性,其中啶虫脒和噻虫啉对蜜蜂的 LD_{50} 值分别为7.1、14.6 μ g/蜂。2014年,巴西学者Costa等^[11]在实验室条件下,开展了在蜜蜂身上直接喷洒杀虫剂、饲喂杀虫剂污染的食物和接触喷洒过杀虫剂的瓜作物叶子这3种暴露方式对西方蜜蜂采集蜂的影响,研究发现,无论在哪种暴露方式下,噻虫嗪处理组对采集蜂表现为剧毒,而啶虫脒处理组仅在直接喷洒于蜜蜂身上时表现为高毒。以上研究不仅揭示了不同新烟碱类杀虫剂对蜜蜂的毒性作用大小,同时说明了杀虫剂对蜜蜂的危害程度应结合其暴露途径来具体分析。

1.2 新烟碱类杀虫剂点滴法对蜜蜂学习记忆的影响

蜜蜂接触了新烟碱类杀虫剂之后,新烟碱类杀虫剂会通过渗透等方式与蜜蜂体内中枢神经系统的乙酰胆碱受体结合,使神经元受到影响,导致蜜蜂学习记忆能力下降。目前,检测蜜蜂学习能力的方法主要为喙伸反应(proboscis extension reflex, PER)^[12]。研究者利用PER来观察蜜蜂嗅觉学习能力。研究发现:经过吡虫啉处理的

蜜蜂,其嗅觉学习技能明显下降^[13]。农药对蜜蜂学习记忆方面的影响是一个慢性过程,农药在蜜蜂体内的残留达到一定程度后,才会显著影响蜜蜂的学习记忆能力。Aliouane等^[14]对刚出巢的蜜蜂连续11 d点滴一定剂量的杀虫剂,于第12天测试蜜蜂的学习记忆能力。结果显示:点滴0.1 ng/蜂剂量噻虫嗪的蜜蜂,其嗅觉记忆能力显著下降,点滴1 ng/蜂剂量噻虫嗪后,蜜蜂学习能力严重受损。

2 新烟碱类杀虫剂对蜜蜂的经口毒性

蜜蜂也经常吸入农药或采食含有农药残留的花蜜和花粉,Rundlöf等^[15]研究发现,用农药浸泡的种子发芽成长后,其花蜜中仍含有农药残留。科研人员也探索了蜜蜂急性经口毒性测试方法^[16],即采用笼养饲喂的方法,也称之为“饲喂法”。通过比较吡虫啉和噻虫胺2种新烟碱类杀虫剂对意大利蜜蜂和中华蜜蜂的经口毒性时发现,中华蜜蜂比意大利蜜蜂对吡虫啉和噻虫胺更为敏感,其中意大利蜜蜂对于吡虫啉和噻虫胺的急性经口 LD_{50} 值分别为8.6、2.0 ng/蜂,而中华蜜蜂对应的值是2.7、0.5 ng/蜂,2种蜜蜂对新烟碱类杀虫剂具有不同的先天性免疫应答能力^[17]。该类杀虫剂除了对蜜蜂的急性毒性外,其对蜜蜂的慢性亚致死效应也成为了当下研究的热点问题。

2.1 新烟碱类杀虫剂饲喂法对蜜蜂寿命的影响

成年采集蜂出巢采集的过程中难免会摄入一些农残的花蜜或花粉,评价各类常见农用杀虫剂对蜜蜂生理健康的影响就显得尤为重要。研究人员使用吡虫啉及其代谢物5-羟基-吡虫啉对蜜蜂进行急性和慢性经口测试发现,其代谢物在摄入后48 h的经口 LD_{50} 值为153 ng/蜂,约为吡虫啉(LD_{50} 值为30 ng/蜂)的5倍^[18],说明烟碱代谢物仍然可对蜜蜂造成毒性危害。此外,蜜蜂采集回巢的花粉、花蜜等饲料中难免会有农药残留,进而给整个蜂群带来不利影响。有证据显示,饲喂亚致死剂量新烟碱类杀虫剂的蜂群,群势无显著变化,但蜂王产卵量、幼虫和蛹的数量明显减少^[19]。杀虫剂不仅影响着成年蜂,对蜜蜂幼虫的风险评估则更加复杂,尤其是涉及慢性或亚致死效应。Grillone等^[20]在幼虫食物中添加噻虫嗪,对蜜蜂幼虫进行饲喂,发现从幼虫到成年蜜蜂的发育过程中出现不同阶段的亚致死效应,如褐色的幼虫,发育迟缓和出现畸形成年工蜂等现象。在杀虫剂对蜜蜂毒理作用的众多研究中发现,延长蜜蜂暴露于杀虫剂的时间,可以降低杀虫剂对蜜蜂致死效应的使用剂量^[21-22],即长期暴露于杀虫剂,对蜜蜂的危害更大。Rondeau等^[23]通过延长杀虫剂对蜜蜂的暴露时间,尤其是对寿命较长的冬季蜜

蜂,其所需杀虫剂剂量更低。Alkassab等^[24]采用冬天的蜂群作为试验生物材料,研究噻虫胺对其慢性亚致死效应,先得出了48、72、96 h的急性LD₅₀值分别是26.9、18.0、15.1 ng/蜂,随后经过了长达10 d的慢性经口LD₅₀测试,发现其对蜜蜂的毒性接近48 h的3倍,LD₅₀值仅为9.5 ng/蜂。以上研究结果再次表明硝基取代化合物类烟碱杀虫剂对蜜蜂的毒性很强,若在农业生产中大范围地使用该种杀虫剂,将会严重威胁蜜蜂的健康,进而影响蜜蜂授粉活动。而欧盟早在2013年就颁布了新烟碱类农药的限用政策,首批对吡虫啉、噻虫胺和噻虫嗪3个品种农药进行了限用措施。Iwasa等^[10]和Laurino等^[25]先后通过蜜蜂急性毒性吸入实验发现,啉虫脒和噻虫啉对蜜蜂无明显危害,只有当蜜蜂处于饥饿状态时影响才较大。Siede等^[26]通过一项为期3年的蜂群重复喂养试验发现:噻虫啉对蜂群群势无显著影响,且蜜蜂死亡数统计、感染蜂螨和病毒方面,试验组和对照组没有差别。这些研究则进一步证明了氰基取代类烟碱对蜜蜂的低毒性,说明了这类杀虫剂在农业应用上可以被考虑。

2.2 新烟碱类杀虫剂饲喂法对蜜蜂学习记忆的影响

Aliouane等^[14]发现新烟碱类啉虫脒和噻虫嗪(分别饲喂各自LD₅₀的1/10和1/5)对蜜蜂的运动、感觉和认知功能都有影响。2012年,Henry等^[27]开展的一项研究发现,在蜜蜂饲料中添加亚致死剂量的杀虫剂噻虫嗪,可导致大约1/3以上的蜜蜂迷失方向,最终无法归巢。Dechaume等^[21]利用PER检测方法分析了冬季和夏季2个时期时,吡虫啉及其代谢物5-羟基-吡虫啉对蜜蜂行为的影响,结果发现,吡虫啉和5-羟基-吡虫啉长期慢性处理蜜蜂后,存活下来的冬季蜜蜂显著降低了学习能力,其中吡虫啉对夏季蜜蜂(12 μg/kg)的LOEC值(最低影响浓度)比冬季蜜蜂(48 μg/kg)更低,这表明与冬季蜜蜂相比,夏季蜜蜂行为对吡虫啉的高度敏感性。后来又通过研究证实了低剂量的吡虫啉虽然不会造成蜜蜂直接死亡,但会伤害蜜蜂神经系统,从而导致蜜蜂迷失方向,最终无法归巢而死在野外^[28]。Yang等^[29]进行了不同亚致死浓度的吡虫啉对蜜蜂采集工蜂2次出现在采集点的时间间隔进行测定,发现有延时效应的最低效应浓度为50 μg/L,当高于1200 μg/L时,一些蜜蜂会迷失方向,还有一些蜜蜂需要隔天才找到原采集点。这些研究说明亚致死剂量的吡虫啉可在一定程度上严重影响蜜蜂的记忆能力,这对蜜蜂的采集行为是极其不利的,进而影响到整个蜂群的正常繁殖。2014年,在亚洲进行了亚致死剂量吡虫啉对本土品种中蜂嗅觉学习的影响研究,结果表明,成年工蜂在单独摄入0.1 ng/蜂剂量的吡虫啉也会显著降低其嗅觉学习

能力,影响程度是对照组的1.6倍^[30]。亚致死剂量的吡虫啉、噻虫嗪等新烟碱类杀虫剂均会影响蜜蜂的学习记忆能力。

3 同一杀虫剂的接触毒性和经口毒性作用比较

不同杀虫剂或同种杀虫剂不同剂型对蜜蜂的毒性效应不一样,而且蜜蜂以不同形式接触或吸入同种杀虫剂,其对蜜蜂的影响程度也不一样。El-Hassani等^[12]按0.1 μg/蜂啉虫脒剂量饲喂蜜蜂后,蜜蜂对于嗅觉学习的长期记忆受损。蜜蜂胸部点滴0.1、0.5 μg/蜂剂量时,蜜蜂的学习记忆能力不受影响,但促进了蜜蜂的自主活动。此外,点滴1 μg/蜂与点滴0.1、0.5 μg/蜂啉虫脒剂量对蜜蜂自主活动能力的影响均无显著性差异,说明了同一杀虫剂使用剂量的不同对蜜蜂造成的伤害程度也不是简单的线性关系。不仅如此,同一杀虫剂不同剂型的接触毒性和经口毒性也会有所差异。吴凌云等^[31]测试了2种啉虫脒制剂和3种吡虫啉制剂对成年意大利工蜂的急性接触毒性和摄入毒性,研究发现:3%啉虫脒水剂、5%啉虫脒可湿性粉剂、2.5%高渗吡虫啉可湿性粉剂、5%吡虫啉可湿性粉剂和6%吡虫啉微乳剂,对蜜蜂摄入LC₅₀值分别为4.25×10²、1.35×10²、11.2、9.33、8.25 mg/L,接触LD₅₀值分别为4.21、1.84、4.49×10⁻²、3.22×10⁻²、1.43×10⁻² μg/蜂。所以,在农业生产上可以根据需要,选择合理的剂型和使用剂量以减少农药对蜜蜂的毒性危害。

4 不同杀虫剂对蜜蜂的协同作用

蜜蜂在采集花粉或花蜜时,经常会以接触、摄入以及吸入等方式受到一种或多种杀虫剂的影响,有时还会接触到蜂群中使用的杀螨剂,导致蜜蜂面临着多种杀虫剂的协同作用。不同杀虫剂对蜜蜂的毒力不同,吡虫啉、噻虫胺和噻虫嗪是新烟碱中应用较多的3种杀虫剂,对蜜蜂的毒性较强,而啉虫脒和噻虫啉则相对低毒。其次,多种杀虫剂的协同作用对蜜蜂的影响已有众多研究,如Gill等^[32]发现新烟碱类和拟除虫菊酯类杀虫剂的组合作用会提高蜂群的损失。严清平^[33]通过一项研究得出:3种常用农药助剂N-甲基吡咯烷酮(NMP)、有机硅表面活性剂(Silwet L-77)、聚乙二醇辛基苯基醚(Triton X-100)可以显著提高啉虫脒对蜜蜂的急性接触毒性。Tsvetkov等^[34]通过研究新烟碱类杀虫剂噻虫胺和噻虫嗪分别与2种杀真菌剂利谷隆和啉酰菌胺对蜜蜂毒性的混合效果发现:2种杀真菌剂的实际田间剂量对蜜蜂单独作用时不足以产生危害,但噻虫胺和噻虫嗪的实际田间剂量分别和啉酰菌胺可产生协同作用,混合使用后,对蜜蜂造成了近双倍的毒性,而添加利谷隆组,对蜜蜂毒性影响不显著。

目前,已经发现与新烟碱类杀虫剂混合后协同作用最大的是氟菌唑,其能将噻虫啉对蜜蜂的急性毒性提升到原来的1141倍^[10]。以上例子说明杀虫剂在使用过程中产生的协同作用对蜜蜂危害更大,此类研究将有助于指导人们对农作物施药,尽量避免因农药间的协同效应而对蜜蜂产生更严重的影响。

5 小结与展望

主要综述了新烟碱类杀虫剂对蜜蜂的接触毒性和经口毒性,然而关于新烟碱类杀虫剂对蜜蜂的影响研究远不止这些。有研究表明:蜜蜂更喜欢含新烟碱类农药的花蜜,而新烟碱类农药对蜜蜂大脑的影响与尼古丁对人类大脑的影响机制一样,其似乎具有毒品般的作用,蜜蜂采食后会会上瘾^[35]。如果蜜蜂真的都倾向于采集带有新烟碱类农药的花蜜,那么这将对整个养蜂业带来巨大的负面影响,不仅危害蜜蜂的健康,也能通过蜂产品中农药残留影响消费者的健康。最近报道了几项有关蜂群暴露于实际田间剂量的野外研究,旨在测试蜜蜂接触新烟碱类杀虫剂处理过的作物后对蜜蜂的影响,结果大部分都表现出不利影响,此类研究突破了实验室条件的局限性,但还是受到业内人士的质疑,因为蜜蜂对杀虫剂的敏感性随着测试蜜蜂的年龄、亚种、季节、营养、生理条件和人为操作的不同而变化^[36]。

另外,新烟碱类杀虫剂较菊酯类杀虫剂等其他大部分杀虫剂对昆虫和哺乳动物有着很高的选择性因素^[37],新烟碱类杀虫剂暂时不能被替代。迄今为止,总共诞生了3代新烟碱类杀虫剂,第1代是以吡虫啉和啉虫脒为主要代表的氯代烟碱型;第2代是以噻虫嗪和噻虫胺为主要代表的硫代烟碱型,内吸效果好;第3代研制了呋虫胺等呋喃型烟碱,其广谱性强,内吸效果好。这3代杀虫剂中,一代比一代杀虫更彻底且高效、快速,几乎对害虫“斩尽杀绝”。虽然有研究表明这类杀虫剂在喷洒过程中对人和哺乳动物是低毒甚至是无毒的^[38],但是,蜜蜂是无脊椎动物昆虫^[21],各类杀虫剂对蜜蜂的伤害无法幸免。相对于其他昆虫基因组,蜜蜂基因组在编码解毒酶的数量上显著不足,包括细胞色素P450单氧酶(P450s)、谷胱甘肽-S-转移酶和羧酸酯酶^[39-40]。高毒、低效农药严重威胁着生物安全、生态平衡以及人类健康;而低毒、高效农药对生态环境和非靶标生物的安全成为了现代农药发展的主流和趋势^[41]。

随着人们生活水平的提高,人们逐渐意识到蜜蜂对于整个生态系统的重要性^[2],致使杀虫剂的开发研制更具有挑战性,研制专门针对有害昆虫而对非靶标昆虫无害的杀虫剂是未来的一个研发方向。同时,市场上正在

销售的杀虫剂在长期的使用过程中,一定会使某些昆虫产生耐药性,直至这种杀虫剂对这类昆虫不起作用。所以,杀虫剂也需要不定期地更新,人类对这个领域的探索也将不息不止。

参考文献:

- [1] 曾志将. 养蜂学[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2017: 1-3.
- [2] 高新云, 蔡继红. 农药中毒事件应引起各方重视[J]. 中国蜂业, 2007, 58(2): 41.
- [3] 褚忠桥, 谢鹤, 王彪. 关于宁夏境内2013年蜜蜂农药中毒事件的调查与思考[J]. 中国蜂业, 2014, 65(10): 47-51.
- [4] 林雨佳, 华乃震. 新烟碱类杀虫剂的市场、剂型和应用[J]. 农药市场信息, 2013(7): 4-7.
- [5] FAIRBROTHER A, PURDY J, ANDERSON T, *et al.* Risks of Neonicotinoid Insecticides to Honeybees[J]. *Environmental Toxicology & Chemistry*, 2014, 33(4): 719-731.
- [6] 季守民. 新烟碱类杀虫剂对蜜蜂的毒性评价及亚致死效应(学位论文)[D]. 泰安: 山东农业大学, 2015.
- [7] WOODCOCK B A, BULLOCK J M, SHORE R F, *et al.* Country-specific Effects of Neonicotinoid Pesticides on Honey Bees and Wild Bees[J]. *Science*, 2017, 356(6345): 1393-1395.
- [8] TSVETKOV N, SAMSON-ROBERT O, SOOD K, *et al.* Chronic Exposure to Neonicotinoids Reduces Honey Bee Health Near Corn Crops[J]. *Science*, 2017, 356(6345): 1396-1397.
- [9] DIETEMANN V, ELLIS J D, NEUMANN P. The COLOSS BEEBOOK Volume I, Standard Methods for *Apis mellifera* Research: Introduction[J]. *Journal of Apicultural Research*, 2013, 52(4): 1-4.
- [10] IWASA T, MOTOYAMA N, AMBROSE J T, *et al.* Mechanism for the Differential Toxicity of Neonicotinoid Insecticides in the Honey Bee, *Apis mellifera*[J]. *Crop Protection*, 2004, 23(5): 371-378.
- [11] COSTA E M, ARAUJO E L, MAIA A V P, *et al.* Toxicity of Insecticides Used in the Brazilian Melon Crop to the Honey Bee *Apis mellifera*, Under Laboratory Conditions [J]. *Apidologie*, 2014, 45(1): 34-44.
- [12] EL HASSANI A K, DACHER M, GARY V, *et al.* Effects of Sublethal Doses of Acetamiprid and Thiamethoxam on the Behavior of the Honeybee (*Apis mellifera*) [J]. *Archives of Environmental Contamination & Toxicology*, 2008, 54(4): 653-661.
- [13] 庄育祯, 杨恩诚. 低剂量益达胺对蜜蜂采蜜行为之影响[C]. 海峡两岸蜜蜂与蜂产品研讨会, 2007.
- [14] ALIOUANE Y, ARMENGAUD C, LAMBIN M, *et al.* Subchronic Exposure of Honeybees to Sublethal Doses of Pesticides: Effects on Behavior[J]. *Environmental Toxicology & Chemistry*, 2009, 28(1): 113-122.
- [15] RUNDLÖF M, ANDERSSON G K, BOMMARCO R, *et al.* Seed Coating with a Neonicotinoid Insecticide Negatively Affects Wild Bees[J]. *Nature*, 2015, 521(7550): 77.
- [16] LAURINO D, MANINO A, PATETTA A, *et al.* Acute Oral Toxicity of Neonicotinoids on Different Bee Strains[J]. *Journal of Zoology*, 2010, 93: 99-102.
- [17] LI Zhi-guo, LI Meng, HE Jing-fang, *et al.* Differential Physiological Effects of Neonicotinoid Insecticides on Honey Bees: A Comparison between *Apis mellifera* and *Apis cerana*[J]. *Pesticide Biochemistry & Physiology*, 2017, 140: 1-8.

- [18] DECOURTYE A, LACASSIE E, PHAM-DELÈGUE M H. Learning Performances of Honeybees (*Apis mellifera* L) are Differentially Affected by Imidacloprid According to the Season[J]. Pest Management Science, 2003, 59(3): 269.
- [19] 宋怀磊, 周婷, 王强, 等. 杀虫剂对蜜蜂的亚致死效应[J]. 中国蜂业, 2010, 61(6): 8-10.
- [20] GRILLONE G, LAURINO D, MANINO A, et al. Toxicity of Thiametoxam on *in vitro* Reared Honey Bee Brood [J]. Apidologie, 2017, 48(5): 1-9.
- [21] DECHAUME MONCHARMONT F X, DECOURTYE A, HENNEQUET-HANTIER C, et al. Statistical Analysis of Honeybee Survival after Chronic Exposure to Insecticides [J]. Environmental Toxicology & Chemistry, 2003, 22(12): 3088-3094.
- [22] SUCHAIL S, GUEZ D, BELZUNCES L P. Discrepancy between Acute and Chronic Toxicity Induced by Imidacloprid and Its Metabolites in *Apis mellifera*[J]. Environmental Toxicology & Chemistry, 2010, 20(11): 2482-2486.
- [23] RONDEAU G, SÁNCHEZ-BAYO F, TENNEKES H A, et al. Delayed and Time-cumulative Toxicity of Imidacloprid in Bees, Ants and Termites[J]. Scientific Reports, 2014, 4(5566): 8.
- [24] ALKASSAB A T, KIRCHNER W H. Impacts of Chronic Sublethal Exposure to Clothianidin on Winter Honeybees [J]. Ecotoxicology, 2016, 25(5): 1000-1010.
- [25] LAURINO D, PORPORATO M, PATETTA A, et al. Toxicity of Neonicotinoid Insecticides to Honey Bees: Laboratory Tests[J]. Bulletin of Insectology, 2011, 64(1): 107-113.
- [26] SIEDE R, FAUST L, MEIXNER M D, et al. Performance of Honey Bee Colonies under a Long-lasting Dietary Exposure to Sublethal Concentrations of the Neonicotinoid Insecticide Thiacloprid[J]. Pest Management Science, 2017, 73(7): 1334-1344.
- [27] HENRY M I, BEGUIN M, REQUIER F, et al. 2012. A Common Pesticide Decreases Foraging Success and Survival in Honey Bees[J]. Science, 2012, 336(6079): 348.
- [28] DECOURTYE A, DEVILLERS J, CLUZEAU S, et al. Effects of Imidacloprid and Deltamethrin on Associative Learning in Honeybees under Semi-field and Laboratory Conditions [J]. Ecotoxicology & Environmental Safety, 2004, 57(3): 410-419.
- [29] YANG E C, CHUANG Y C, CHEN Y L, et al. Abnormal Foraging Behavior Induced by Sublethal Dosage of Imidacloprid in the Honey Bee (Hymenoptera: Apidae) [J]. Journal of Economic Entomology, 2008, 101(6): 1743.
- [30] TAN K, CHEN W, DONG S, et al. A Neonicotinoid Impairs Olfactory Learning in Asian Honey Bees (*Apis cerana*) Exposed as Larvae or as Adults[J]. Sci Rep, 2015, 7(1): 17772.
- [31] 吴凌云, 李学锋, 邱立红, 等. 几种吡虫啉和啉虫脒制剂对蜜蜂的急性毒性[C]//农药与环境安全国际会议论文集. 2005.
- [32] GILL R J, RAMOSRODRIGUEZ O, RAINE N E. Combined Pesticide Exposure Severely Affects Individual and Colony-level Traits in Bees[J]. Nature, 2012, 491(7422): 105.
- [33] 严清平. 不同助剂啉虫脒对蜜蜂风险影响的研究(硕士论文)[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2015.
- [34] TSVETKOV N, SAMSON-ROBERT O, SOOD K, et al. Chronic Exposure to Neonicotinoids Reduces Honey Bee Health near Corn Crops[J]. Science, 2017, 356(6345): 1395-1397.
- [35] KESSLER S C, TIEDEKEN E J, SIMCOCK K L, et al. Bees Prefer Foods Containing Neonicotinoid Pesticides [J]. Nature, 2015, 521(7550): 74-76.
- [36] CRESSWELL J E. A Meta-analysis of Experiments Testing the Effects of a Neonicotinoid Insecticide (Imidacloprid) on Honey Bees[J]. Ecotoxicology, 2011, 20(1): 149-157.
- [37] TOMIZAWA M, CASIDA J E. Neonicotinoid Insecticide Toxicology: Mechanisms of Selective Action [J]. Annu Rev Pharmacol Toxicol, 2005, 45(45): 247-268.
- [38] 季守民, 程传英, 袁传卫, 等. 7种新烟碱类杀虫剂对意大利蜜蜂的急性毒性及风险评价[J]. 农药, 2015, 54(4): 282-285.
- [39] CLAUDIANOS C, RANSON H, JOHNSON R M, et al. A Deficit of Detoxification Enzymes: Pesticide Sensitivity and Environmental Response in the Honeybee [J]. Insect Molecular Biology, 2006, 15(5): 615.
- [40] JOHNSON R M, ELLIS M D, MULLIN C A, et al. Pesticides and Honey Bee Toxicity-USA [J]. Apidologie, 2010, 41(3): 312-331.
- [41] 庾琴, 周华, 王静, 等. 啉虫脒在环境中的降解代谢及其安全性的研究进展[J]. 农药, 2007, 46(4): 223-226.

责任编辑: 李新

(上接第5页)

- [12] 袁善奎, 曹兵伟, 周艳明, 等. FAO/WHO用于植物保护和公共卫生的生物农药登记指南(一)——植物源农药[J]. 世界农药, 2018, 40(4): 1-6, 26.
- [13] 曹兵伟, 周艳明, 袁善奎, 等. FAO/WHO用于植物保护和公共卫生的生物农药登记指南(一)——化学信息素[J]. 世界农药, 2018, 40(4): 1-6, 26.
- [14] 顾宝根, 季颖, 张薇. 美国农药登记资料要求[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 北京: 2015.12.
- [15] 刘庆华, 宋永平, 戴航星. 澳大利亚生物农药登记概况[J]. 农药科学与管理, 2018, 39(1): 32-35.
- [16] CONSULT D K. 哥斯达黎加生物农药登记现状及要求 [EB/OL]6.16.2018, [Http://www.sohu.com/a/236183932_267487](http://www.sohu.com/a/236183932_267487).
- [17] 王以燕, 袁善奎, 姜辉, 等. 我国与境外生物农药登记管理的差异分析[J]. 农药, 2013, 52(5): 323-327.
- [18] 王以燕, 郑尊涛, 袁善奎. 美国登记农药名单(3)——早期的化学有效成分农药名单[J]. 世界农药, 2013, 35(1): 51-59.
- [19] 邱德文. 国内外生物农药发展现状与趋势[EB/OL]. 2018, [Http://www.docin.com/p-2119958872.html](http://www.docin.com/p-2119958872.html).

责任编辑: 赵平