应用昆虫学报 *Chinese Journal of Applied Entomology* 2020, 57(4): 767−780. DOI: 10.7679/j.issn.2095−1353.2020.078

前沿与综述

近二十年我国杀虫剂毒理学研究进展（I）——杀虫剂的毒性与环境安全性研究*

伍一军**

（中国科学院动物研究所，北京 100101）

摘　要　本文介绍了中国昆虫学家、杀虫剂毒理学研究者与植物保护专家及害虫防治工作者最近 20 年来在杀虫剂的毒性，尤其是杀虫剂对靶标害虫及非靶标昆虫的毒性方面的研究进展，并就杀虫剂对害虫的防控效果、杀虫剂对天敌昆虫的影响以及杀虫剂的环境安全性方面的研究内容进行了系统性综述。

关键词　杀虫剂毒性；非靶标毒性；天敌昆虫；杀虫剂残留；杀虫剂环境安全性

Advances in insecticide toxicology in China in the last two decades (Ⅰ): Insecticide toxicity and environmental safety

WU Yi-Jun**

(State Key Laboratory of Integrated Management of Pest Insects and Rodents, Institute of Zoology,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract　Advances in research on insecticide toxicity, especially with respect to target and non-target insects, by Chinese entomologists, insecticide toxicologists, plant protection specialists and pest control experts, in the last 20 years is introduced, and effects of insecticides on pest insects, the natural enemies of pest insects and the environment, systematically reviewed.

Key words　insecticide toxicity; non-target toxicity; enemy insect; insecticide residue; insecticide environmental safety

1　杀虫剂毒性

杀虫剂的使用历史悠久，长期以来，它在保护植物健康、提高农作物产量、促进农业发展方面都做出了巨大的贡献。近年来，化学杀虫剂在农业害虫与卫生害虫的防治中更是扮演极其重要的角色。但同时，绝大多数杀虫剂也会对非靶标生物产生毒害作用，此外，在目前的施用技术条件下，杀虫剂使用后大部分都散落于靶标作物以外的介质中，且容易造成其在环境中的残留，对生态系统平衡及环境安全乃至人类健康都构成威胁。因此，在使用杀虫剂时除了考虑目标害虫的针对性及对虫害的防控效果外，还必须充分考虑农业与公共卫生系统的可持续发展以及环境健康与生态系统的安全。

根据对最近 20 年来我国在昆虫科学及杀虫剂毒理学研究领域正式发表的研究论文分析，发现大部分的内容都是关于杀虫剂对非靶标生物毒性的研究，且多数是关于杀虫剂对靶标生物与其天敌的选择毒性研究，其原因很大可能是由于现在广泛使用的杀虫剂的靶标毒性及其机理已相对清楚，而随着杀虫剂的大量使用，人们对杀虫剂的非靶标毒性及杀虫剂生态环境安全性的担忧日益成为相关领域研究中更为关注的课题。

---

*资助项目 Supported projects：国家自然科学基金项目（31672366，31272365）；中国科学院战略先导专项 B（XDB14040203）

**通讯作者 Corresponding author，E-mail：wuyj@ioz.ac.cn

收稿日期 Received：2020-05-08；接受日期 Accepted：2020-06-10

1.1　杀虫剂对害虫的毒性

杀虫剂被发明研制的目的就是为了解决生产实际中害虫防治的问题。近 20 年来，我国有关杀虫剂对靶标生物毒性研究的害虫包括稻飞虱 *Nilaparvata lugens*、小菜蛾 *Plutella xylostella*、棉铃虫 *Helicoverpa armigera*、蚜虫 Aphidoidea 等常见的农作物害虫。多数研究从生产实际的需要出发进行杀虫剂对害虫的药效或防效研究，研究内容大多较为简单，例如：测定杀虫剂对某种（些）害虫的致死中浓度、半数致死量等基本参数或简单的田间试验测定防治效果。也有一些稍微“复杂”的研究，例如：同时测定多种杀虫剂对害虫的毒性，以比较不同的杀虫剂对所测昆虫的毒性大小，也有些研究从杀虫剂的化学结构及其性质的角度探讨杀虫剂的毒性问题，但研究大多还是限于单一的毒性比较（谌爱东等，2003；吕宝乾等，2005）。以下按照杀虫剂种类分述。

1.1.1　有机磷与氨基甲酸酯类杀虫剂　有机磷与氨基甲酸酯类杀虫剂一直以来都是我国农业生产上用量较大的一类杀虫剂。这类杀虫剂对害虫的毒杀机制已经比较清楚，所以相关毒性研究报道并不多见，主要的研究集中在某些特别的害虫上。例如：有研究者用有机磷杀虫剂敌敌畏和毒死蜱以及氨基甲酸酯类杀虫剂丁硫克百威作用于嗜卷书虱 *Liposcelis bostrychophila* 和嗜虫书虱 *Liposcelis entomophila*，发现能够抑制超氧化物歧化酶（Superoxide dismutase，SOD）的活性，此外，2 种书虱的谷胱甘肽巯基转移酶（Glutathione-*S*-transferase，GST）活力和动力学参数都存在着显著差异，表明 GST 在书虱的药剂敏感性中起着重要作用（程伟霞等，2006）。研究人员针对我国东亚飞蝗 *Locusta migratoria manilensis* 不同种群，研究其对有机磷和氨基甲酸酯类杀虫剂的敏感谱，分析不同种群乙酰胆碱酯酶（Acetylcholinesterase，AChE）的敏感性差异，建立分子技术用于对田间种群靶标不敏感性的筛查检测（Zheng *et al.*，2006；Wu *et al.*，2007；Yang *et al.*；2008）。

1.1.2　拟除虫菊酯类杀虫剂　对拟除虫菊酯类杀虫剂的毒性及防效研究较少。有报告认为氯氰菊酯可在椰心叶甲 *Brontispa longissima* 综合治理中发挥有效作用（许春霭等，2008）。用菊酯类杀虫剂处理蚜虫后发现，不同浓度高效氯氰菊酯和氯菊酯对枸杞蚜虫 *Aphis* sp. 的 GST 活性均有抑制作用，而不同浓度氰戊菊脂、溴氰菊酯、甲氰菊脂和氟氯氰菊酯处理的枸杞蚜虫的 GST 活性均升高（张丛等，2015）。比较深入的研究涉及新的分析技术的应用，例如：运用蛋白质组学技术，分析德国小蠊 *Blattella germanica* 在用氯氰菊酯处理不同时间后的蛋白质水平的变化，发现杀虫剂处理时间长短对所测指标有很大的影响（Yang *et al.*，2019）。基因组分析发现，斑痣悬茧蜂 *Meteorus pulchricornis* 体内的 GST 基因在氯氰菊酯（Cypermethrin）的解毒过程中起重要作用（Zhang *et al.*，2019）。

1.1.3　烟碱类类杀虫剂　有报告称亚致死量的吡虫啉对红火蚁 *Solenopsis invicta* 的摄食及挖掘行为有剂量依赖性的影响（Wang *et al.*，2015a）。对蝗虫的研究发现，吡虫啉的药物浓度对蝗虫中枢神经系统的影响不同：低浓度吡虫啉调节两个烟碱型乙酰胆碱受体（Nicotinic acetylcholine receptor，nAChR）亚基的基因，而高浓度吡虫啉只调节一个 nAChR 亚基基因（Wang *et al.*，2015b）。对棉蚜 *Aphis gossypii* 的毒性测定发现，即使给予亚致死量的环氧虫啶（Cycloxaprid），其成虫寿命及生殖力都会降低，且子代的发育也受影响（Yuan *et al.*，2017）。此外，通过对褐飞虱 *Nilaparvata lugens* 的研究发现，环氧虫啶、烯啶虫胺对褐飞虱的毒性随温度升高显著增加（Mao *et al.*，2019a）。

1.1.4　大环内酯类杀虫剂　对于大环内酯类杀虫剂的杀虫毒性，有研究测定多杀菌素对棉铃虫 *Helicoverpa armigera* 的半数致死量，发现在亚致死浓度下的多杀菌素可使存活幼虫的发育时间及蛹期延长，并导致蛹化率、破茧率和生殖力下降及成虫寿命缩短（Wang *et al.*，2009a）。也有用草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 细胞系 Sf-9 的培养细胞开展此类杀虫剂毒性的研究，发现甲氨基阿维菌素苯甲酸盐可以降低细胞的活力，且可诱导细胞单链 DNA 断裂（Wu *et al.*，2016）。同样用 Sf-9 细胞系开展研究发现，多

杀菌素可通过增强活性氧的产生、线粒体通透性转换孔的开放以及线粒体膜电位的失常引起细胞色素 C 的释放并最终导致程序性细胞死亡（Yang *et al.*，2017）。

1.1.5　酰胺类杀虫剂　采用饲料混毒法测定氯虫苯甲酰胺对甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua* 3 龄幼虫的致死剂量（LC_{25} 和 LC_{50}），发现经亚致死浓度的氯虫苯甲酰胺处理后的甜菜夜蛾幼虫历期和蛹期延长，体重和蛹重减轻，羽化率、产卵量均下降，此外，其体内的酯酶和多功能氧化酶（Mixed function oxidase，MFO）活性也显著降低，表明氯虫苯甲酰胺对甜菜夜蛾的种群增长和代谢酶活性都具有抑制作用（Lai *et al.*，2011）。

在小菜蛾 *Plutella xylostella* 上的测定也发现类似现象，氯虫苯甲酰胺在亚致死剂量下小菜蛾死亡率增高、幼虫生长受到抑制、幼虫至化蛹平均历期延长，蛹重和化蛹率均降低。表明亚致死剂量氯虫苯甲酰胺对小菜蛾种群增长有较强的抑制作用（Wang *et al.*，2013a）。

1.1.6　生物毒素类杀虫剂　用从苏云金芽孢杆菌菌株 BRC-HZP10 中分离出的 Cry2Ad 毒素蛋白，测定其对小菜蛾的毒性，结果显示该毒素有较好的杀虫效果，可导致小菜蛾产卵期与幼虫发育期缩短，种群繁殖力和卵孵化率均降低（Liao *et al.*，2015）。

对于其他植物源性杀虫剂的靶标毒性，有研究者曾测定植物提取物对舞毒蛾 *Lymantria dispar* 的毒性，认为 0.6%氧苦内酯和 5%桉油精这 2 种植物提取成分可作为防治舞毒蛾的植物源杀虫剂推广应用（丁吉同等，2013）。研究测定黑藜芦提取物对德国小蠊的毒性，认为黑藜芦生物碱可作为德国小蠊的天然潜在杀虫剂（Cai *et al.*，2018）。而对木酚素（Lignan）的杀虫活性测定发现，提取自透骨草 *P. leptostachya* 的木酚素具有较强的杀虫活性，可用于开发新植物源杀虫剂（Li *et al.*，2019d）。

1.1.7　其他杀虫剂　研究发现，卟啉杀虫剂 5-氨基乙酰丙酸（ALA）对稻蝗 *Oxya chinensis* 的作用效果与稻蝗体内原卟啉含量有关，后者能诱导激活蝗虫体内 GST、过氧化氢酶（Catalase，CAT）、谷胱甘肽过氧化物酶（Glutathione peroxidase，GSH-Px）的活性，抑制谷胱甘肽还原酶（Glutathione reductase）的活性，而 ALA 可使 AChE 和 GSH-Px 失活（阴琨等，2008）。

对新型季酮酸类杀虫剂的毒性测定发现，螺虫乙酯对棉蚜的毒性呈时间依赖性，不仅降低棉蚜的繁殖力，还可增加体内羧酸酯酶（Carboxylesterase，CarE）的活性（Gong *et al.*，2016）。

而有机氯杀虫剂目前在生产实际中已很少使用。研究发现，五氯酚可影响土壤跳虫 *Folsomia candida* 体内包括细胞色素 P450 在内的多种基因的表达，该杀虫剂对土壤跳虫的生殖毒性的主要作用是它可以导致化学物诱导的蜕皮周期延迟（Qiao *et al.*，2015）。

1.1.8　杀虫剂与其他化学物对害虫的联合毒性　目前针对杀虫剂与其他化学物的联合杀虫毒性的研究较少。在摇蚊 *Chironomus dilutes* 上的研究发现，苄氯菊酯与镉的联合毒性具有拮抗作用，镉加速了摇蚊对苄氯菊酯的解毒过程（Chen *et al.*，2015），此外，还测定了酶活力和相关基因的表达，发现镉对苄氯菊酯的代谢动力学没有明显影响，但能增加代谢相关基因的表达量，导致摇蚊体内的苄氯菊酯向低毒代谢物的转化加速（Chen *et al.*，2016）。

1.1.9　手性杀虫剂对害虫的毒性作用问题　一些杀虫剂由于具有手性结构，其不同对映体和消旋体的毒性及在环境中的消解速率都可能有很大的不同。例如：联苯菊酯（Bifenthrin）S 对映体要比其 R 对映体对靶标害虫菜青虫的毒性大 300 倍（Liu *et al.*，2008）。通过对广谱杀虫剂弗克迈酰胺（Fluxametamide）对小菜蛾等害虫的测试发现，其消旋体比对映体更具毒性，而 S 对映体比 R 对映体的急性毒性高出 30 倍（Li *et al.*，2019b）。有机磷杀虫剂甲基异柳磷（Isofenphos methyl）的 S 对映体也比 R 对映体对南方根结线虫等靶标害虫的毒性要大很多（最多高出近 150 倍），而 S 对映体对非靶标生物的毒性平均只比 R 对映体高出 2 倍（Gao *et al.*，2019）。这些研究结果为如何选择这类杀虫剂有效防控虫害而又不会对非靶标昆虫形成太大的威胁提供指导。

1.2 杀虫剂对非靶标昆虫的毒性

对于非靶标昆虫毒性的研究，呈现出相对集中的研究对象，以家蚕和蜜蜂占有最高比例；此外，寄生蜂也常被作为杀虫剂的非靶标毒性的研究对象（对天敌昆虫的毒性研究综述详见本文第 2.1 节）。

1.2.1 杀虫剂对家蚕的毒性 通过饲叶法测定，阿维菌素对家蚕的毒性为高毒，认为应禁止阿维菌素在桑园及附近农田使用（吴声敢等，2004）。生长调节剂与双酰胺类杀虫剂对家蚕的毒性研究比较多。例如：对昆虫生长调节剂类苯甲酰尿杀虫剂氟呤脲的毒性试验显示，施药剂量为其急性毒性 LC_{50} 值的 1/800 对家蚕较为安全（池艳艳等，2014）。双酰胺类杀虫剂氯虫苯甲酰胺影响家蚕体内解毒酶活性及相关基因的表达，导致 P450 与 GST、CarE 活性升高，且氯虫苯甲酰胺可通过影响家蚕脂肪组织中 P13K 信号通路调节下游解毒酶的表达量，增强解毒能力（Mao *et al.*，2019b）。基因表达谱分析揭示，氯虫苯甲酰胺抑制中肠的氧化磷酸化路径及抗氧化防御系统相关基因的表达，引起中肠氧化损伤导致家蚕生长抑制（Hu *et al.*，2019）。对氯代烟碱类杀虫剂测定发现，啶虫脒（Acetamiprid）可致家蚕中肠损伤，引起生长发育异常（Wang *et al.*，2019a），而且也可以通过影响内分泌相关基因的表达导致家蚕生殖紊乱（Cheng *et al.*，2019）。最近的研究发现，啶虫脒可以抑制家蚕 CarE 的转录，通过 FoxO/CncC/Keap1 信号通路上调 *GST* 基因的转录水平及增加 GST 酶活性（Wang *et al.*，2020a）。

有机磷杀虫剂对非靶标昆虫毒性的研究对象主要以家蚕为主，令人惊奇的是，研究者几乎只选择辛硫磷（Phoxim）研究其对家蚕的毒性。研究发现，辛硫磷可导致氧化应激（Yu *et al.*，2011）、丝腺细胞凋亡（Ma *et al.*，2013）、GST 和酯酶的基因转录水平增加（Gu *et al.*，2013；Wang *et al.*，2013c），家蚕可通过过氧化物酶基因的表达调节改变氧化还原平衡状态以减少辛硫磷引起的氧化损伤（Shi *et al.*，2014）。接触辛硫磷后家蚕中肠组织线粒体肿胀、细胞色素 C 释放到胞质中，Toll 及免疫信号被抑制（Gu *et al.*，2014）。通过基因分析发现，辛硫磷可诱导多个 P450 基因的表达及线粒体电子转移链平衡改变（Li *et al.*，2015，2016）。此外，辛硫磷可在家蚕丝腺中累积引起丝腺损伤（Cheng *et al.*，2018），并引起免疫应答抑制，导致家蚕肠道中微生物群落及结构改变，影响包括免疫功能在内的肠道正常功能，最终导致对病原微生物感染的敏感性增加及蚕体的损伤（Gu *et al.*，2017；Li *et al.*，2020a，2020b）。

通过比较 5 种 Bt 蛋白对家蚕的毒性发现，Cry2Fa 和 Cry1Aa 对家蚕幼虫毒性较大，而对靶标害虫二化螟的活性较低，不适合水稻鳞翅目害虫的防治（Jiao *et al.*，2016）。

1.2.2 杀虫剂对蜜蜂的毒性 有研究者测定苯基吡唑类杀虫剂氟虫腈（Fipronil）对蜜蜂的经口毒性，发现其对蜜蜂工蜂属剧毒（杨艳霞等，2008），研究发现，手性氟虫腈对意大利蜂 *Apis mellifera ligustica* 的毒性无对映体选择差异（Li *et al.*，2010）。有机磷与氨基甲酸酯类杀虫剂对蜜蜂毒性的研究比较少，有报道马拉硫磷 R 对映体对蜜蜂毒性最大，其次是消旋体，再其次是 S 对映体（R 型比 S 型有更高的毒性）（Sun *et al.*，2012）。

摄入亚致死剂量的吡虫啉可诱导成年意大利蜂脑神经细胞出现 caspase 依赖性细胞凋亡（吴艳艳等，2014；Wu *et al.*，2015）。亚致死浓度噻虫嗪可明显降低工蜂的平均寿命（岳孟等，2017），在防治棉蚜时使用吡虫啉和噻虫嗪会增加对意大利蜂的毒性风险（Jiang *et al.*，2018），而低浓度噻虫嗪对中华蜜蜂 *Apis cerana cerana* 的回巢时间、飞行能力等都有不利影响（Ma *et al.*，2019）。此外，噻虫啉可引起蜜蜂肠道微生物紊乱，导致存活率降低（Liu *et al.*，2020）。在半野外和实验室条件下测试，杀虫剂助剂也可加剧啶虫脒对蜜蜂的毒性（Chen *et al.*，2019a）。研究发现，呋虫胺（Dinotefuran）对意大利蜜蜂的毒性具有对映体选择性，其 S 对映体比 R 对映体的毒性平均高出 85 倍，而 R 对映体对棉蚜和绿盲蝽 *Lygus lucorum* 的毒性比消旋体的毒性平均只高出 2 倍（Chen *et al.*，2019b）。通过高通量测序发现，R 对映体比 S 对映体引起

更大的基因调控变化（Liu *et al.*，2019a），对其分子机理研究显示，S 对映体结合到蜜蜂的 nAChR 的 α8 亚单位上产生更大的毒性，施用 R 对映体对蜜蜂的危害最小。故防治棉蚜和绿盲蝽时推荐施用纯的呋虫胺（R 对映体）以获得良好防效的同时降低对蜜蜂种群的威胁（Chen *et al.*，2019b）。

研究发现，亚致死剂量的联苯菊酯可降低蜜蜂的生殖力、减少成蜂量（Dai *et al.*，2010）。氟氯苯菊酯（Flumethrin）对蜜蜂的 LD_{50} 值高于大部分拟除虫菊酯类杀虫剂，可影响中华蜜蜂的嗅觉及学习记忆（Tan *et al.*，2013）。在体外培养条件下，溴氰菊酯可以作用于蜜蜂成年工蜂脑细胞的 T 型电压门控钙离子通道，导致其学习、信息获取的行为异常（Wang *et al.*，2017a）。高效氯氟氰菊酯（λ-cyhalothrin）和溴氰菊酯都对蜜蜂的记忆产生影响，亚致死剂量即可缩短其生命周期、影响学习记忆行为及相关基因表达或导致认知功能紊乱（Liao *et al.*，2018；Zhang *et al.*，2020a）。体外试验发现，氟氯苯菊酯通过改变 SOD 和 CAT 活性、脂质过氧化物（如：MDA）的量和解毒酶（如：GST）活性而对蜜蜂幼虫产生毒性（Qi *et al.*，2020）。

田间测试发现，含 Bt 蛋白 Cry1Ah 的转基因玉米对蜜蜂生存、发育及行为无影响（Dai *et al.*，2012）。通过毒理学、生物化学与组织学分析证明 Bt 晶体蛋白 Cry1C 与 Cry2A 对蜜蜂幼虫无毒（Wang *et al.*，2015c）。含 Bt 蛋白 Cry1Ba3 转基因甘蓝对蜜蜂的存活、解毒酶活性等都没有明显影响（Yi *et al.*, 2018）。上述结果表明 Bt 蛋白类杀虫剂对蜜蜂较为安全。

1.2.3　杀虫剂联合使用及施用方式对非靶标昆虫毒性的影响　有机磷和菊酯类杀虫剂联合使用对家蚕的急性毒性主要表现为加成效应（Zhang *et al.*，2008）。测试多种杀虫剂联合使用对家蚕的毒性，发现毒死蜱和溴氰菊酯联合产生拮抗作用，而其他两两结合则产生加成毒性效应（Yu *et al.*，2016）。

有研究通过改变施药方式来降低对非靶标昆虫益虫的风险，在新疆棉区的大面积试验发现，滴灌（Drip irrigation）施用氟啶虫胺腈可以有效控制棉蚜并将该药剂对蜜蜂的风险降到最低（Jiang *et al.*，2020）。

2　杀虫剂的生态环境安全性

近 20 年来，国内有关杀虫剂环境安全性的研究工作进展较快，且大部分研究与杀虫剂毒性、抗性研究方向重合。所做工作与生产实际结合较为紧密，大部分为单纯测定靶标生物毒性与非靶标生物（如：害虫天敌）的抗药性，为农业生产、疾病防控工作提供科学施药用药指导。此外，关于杀虫剂在环境中的残留以及对环境生态安全与人类健康威胁的研究也有大量报道。

2.1　杀虫剂对害虫天敌的影响

杀虫剂对非靶标昆虫的影响详见第 1.3 节的描述。植物保护工作者更为关注的是杀虫剂对害虫天敌的安全性问题。但到目前为止，杀虫剂对天敌昆虫的研究多数还是以一般的毒性测定为主或是与靶标害虫与其天敌昆虫的毒性的选择性比较研究为主。例如：测定啶虫脒对椰心叶甲与椰心叶甲啮小蜂 *Tetrastichus brontispae*、橡副珠蜡蚧 *Parasaissetia nigra* 与班翅食蚜蚧小蜂 *Coccophagus ceroplastae* 的选择毒性，发现选择效应不明显，不推荐在农业生产中使用（许春霭等，2008；张方平等，2008）。除此之外，有测定赤眼蜂对常见的烟碱类杀虫剂的急性毒性的反应，结果发现，噻虫嗪对拟澳洲赤眼蜂 *Trichogramma confusum* 和稻螟赤眼蜂 *Trichogramma japonicum* 的急性毒性最高；其次为烯啶虫胺；而吡虫啉对亚洲玉米螟赤眼蜂 *Trichogramma ostriniae* 和拟澳洲赤眼蜂的毒性最低（王彦华等，2012）。测定阿维菌素类、拟除虫菊酯类、新烟碱类、昆虫生长调节剂和吡唑类杀虫剂对上述 4 种赤眼蜂的安全性，发现除有机磷和氨基甲酸酯具有中等至高毒性风险外，其他杀虫剂大多（个别例外）都比较安全（Zhao *et al.*，2012；Wang *et al.*，2012，2013b，2014）。研究发现，防治小菜蛾的常用杀虫剂高效氯氰菊酯、多杀菌素、阿维菌素、溴虫腈和杀螟丹对拟

澳洲赤眼蜂成蜂有明显的触杀毒性（王德森等，2012），多杀菌素对小菜蛾天敌寄生蜂 *Diadegma insulare* 及捕食瓢虫 *Coleomegilla maculate* 无明显毒性，有利于小菜蛾的防控，但氯氟氰菊酯对这 2 个天敌都有较强毒性（Liu *et al.*，2012）。新烟碱杀虫剂中啶虫脒和噻虫啉对赤眼蜂的毒性较小（Jiang *et al.*，2019）。最近的研究发现，用于防控稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis* 的 4 种常用杀虫剂中氯虫苯甲酰胺对寄生蜂的毒性最低（Yang *et al.*，2020）。

为明确吡蚜酮（Pymetrozine）等杀虫剂对水稻田天敌蜘蛛的安全性，有学者采用浸渍法测定了杀虫剂对水稻田优势蜘蛛草间钻头蛛 *Hylyphantes graminicola* 和八斑鞘腹蛛 *Theridion octomacutatum* 的毒性，结果显示吡蚜酮等 5 种杀虫剂对这两种蜘蛛都是低风险性，而阿维菌素则为高或极高风险性杀虫剂（王玺等，2013），此外，阿维菌素对烟芽茧蜂也具有很强的毒性作用，在寄生蜂卵期与幼虫期用药，可显著降低当代成蜂羽化率，但蛹期用药无影响（陈德锟等，2014），这为避免伤及寄生蜂对阿维菌素的用药时间提供了重要的指导。类似的研究也显示生长调节剂类杀虫剂对丽蚜小蜂 *Encarsia formosa* 的不同发育阶段的毒性不同，对幼虫有轻中度毒性，但对蛹无毒性作用（Wang and Liu，2016）。研究发现，环氧虫啶具有较好的毒性选择性，对棉蚜天敌异色瓢虫 *Harmonia axyridis* 和中华草蛉 *Chrysoperla sinica* 毒性较低，但对棉蚜的毒性较高，可用于抗药性棉蚜的防控（Cui *et al.*，2016）。亚致死量的吡虫啉可导致七星瓢虫 *Coccinella septempunctata* 生殖率降低（Xiao *et al.*，2016）。有研究测定联苯菊酯与氟氯氰菊酯对七星瓢虫的毒性，发现这两种杀虫剂都对七星瓢虫表现为高毒（Liu *et al.*，2019b）。高效氯氰菊酯和多杀菌素即使在很低的浓度下对螟黄赤眼蜂 *Trichogramma chilonis* 的产卵和寄主识别以及雄性交配选择都会产生不利影响（Wang *et al.*，2016；2017b）。关于杀虫剂对天敌昆虫的手性选择性毒性研究较少，有文献报道，丁烯氟虫腈（Flufiprole）R 对映体要比 S 对映体对稻螟赤眼蜂的急性毒性高出 5 倍左右（Tian *et al.*，2016）。

生物杀虫剂 Bt 蛋白的残效期较短，对广赤眼蜂 *Trichogramma evanescens* 雌蜂的存活能力和寄生能力影响较小（朱九生等，2009）。研究显示，转基因玉米对非靶标天敌瓢虫无生态风险（Chang *et al.*，2017），转基因水稻及其中的 Bt 蛋白 Cry1C 和 Cry2A 对稻虱缨小蜂 *Anagrus nilaparvatae* 无毒性风险（Gao *et al.*，2010；Tian *et al.*，2018）。2 种 Bt 蛋白 Cry1Ah 和 Cry2Ab 对棉蚜及瓢虫无明显毒性（Zhao *et al.*，2016），更为详细的研究则是通过毒理学、组织病理学、生化与分子生物学的分析，表明 Bt 蛋白 Vip3Aa 对瓢虫无毒性作用（Zhao *et al.*，2020）。上述结果提示，生物杀虫剂 Bt 对天敌昆虫比较安全。

2.2　杀虫剂在环境中的残留

关于杀虫剂在施用对象、农作物植株、籽实、叶片以及环境介质（包括土壤、水体等）中的残留有大量的研究报道。本文只选择其中几例做简单介绍。研究发现，在水稻和甘蓝上按规定使用推荐剂量的毒死蜱不会造成残留超标（Chen *et al.*，2012）。在甘蔗田中施用毒死蜱在植株和土壤中的半寿期只有 6 d 左右，间隔 60 d 采收，无论以标准剂量或高剂量施用毒死蜱在甘蔗中的残留量都难以检出，对人类健康不构成威胁（Wang *et al.*，2019b）。由于蔬菜和水果在目前膳食结构中占有较高比例，而有关蔬果中农药残留超标引发的事件屡有发生（Wu *et al.*，2017），农药残留已成为农产品质量安全的重要问题。以丁硫克百威为对象，研究在不同施药条件及不同种植模式下在喷施对象作物中的残留行为，并对该杀虫剂进行膳食风险评估（He *et al.*，2016；Yu *et al.*，2017）。根据施用后的消解动态变化，提出在大棚种植的黄瓜上施用丁硫克百威至少要有 27 d 的采收间隔期（Geng *et al.*，2018）。也有研究者就如何提高膳食样品中新烟碱类化合物检测的敏感性进行分析并提出有效的清除策略（Li *et al.*，2019c）。

在检测技术方面，有不断改进的报道，包括样品中的单一杀虫剂残留的测定以及多个杀虫剂残留的同时测定等。从应用单克隆抗体技术检

测多种菊酯类杀虫剂残留（Wang *et al.*，2011）和间接免疫荧光法测定氯虫苯甲酰胺（Cui *et al.*，2014）到 ELISA 法检测和筛查农产品中的氟啶虫酰胺残留（Liu *et al.*，2016）和用碳糊电极检测环境中的甲基对硫磷残留（Li *et al.*，2018）以及采用 QuEChERS-气相色谱-串联质谱法检测黄瓜中 10 种杀虫剂的残留（白国涛等，2019）。越来越多更加新颖的方法用于多种杀虫剂残留的检测，例如：表面等离子共振技术检测环境中毒死蜱的残留（Li *et al.*，2019a）；表面增强拉曼散射传感器快速检测果蔬等农产品中的甲基对硫磷的残留（Wu *et al.*，2019）；用结合纳米技术的电化学感受器监测食品样品中的 DDT 残留（Miao *et al.*，2020）等。

2.3　杀虫剂对生态环境及人类健康的威胁

越来越多的研究关注手性杀虫剂对环境生态系统的影响。早期通过体外细胞系和整体实验发现，联苯菊脂 S 对映体比 R 对映体对细胞增殖的影响高出 10 倍，而对卵黄蛋白诱导能力也相差 100 倍以上（Wang *et al.*，2007），用人羊膜上皮细胞测定也显示联苯菊脂 S 对映体比 R 对映体的毒性更大（Liu *et al.*，2008）。调查发现，氟虫腈在蜜蜂采蜜的植物上的降解并没有对映体选择性（Li *et al.*，2010）。马拉硫磷在大白菜和油菜上的降解其 S 对映体比 R 对映体更快，相反，R 对映体在甜菜上优先降解，而在水稻和小麦上的降解则无这种对映体选择性（Sun *et al.*，2012）。研究发现，丁烯氟虫腈 S 对映体在大白菜和菠菜上的分解更快，而 R 对映体则在黄瓜和番茄上优先分解。这些结果提示在考察手性杀虫剂的环境毒性时应该考虑到其对映体的立体选择性（Tian *et al.*，2016）。水胺硫磷（Isocarbophos）S 对映体在同等效果下用量要比其消旋体用量减少 35%，实际使用可减少对环境的污染（Di *et al.*，2019）。

在杀虫剂残留所导致的环境生态风险方面，对江苏农村地区一千多名孕妇尿液分析发现，菊酯类杀虫剂代谢物的水平较高，提示胎儿可能曾接触此类杀虫剂（Qi *et al.*，2012）。2007 年的一项全国性调查显示，居民日常食品样品中可不同比例检出多种有机氯杀虫剂（Zhou *et al.*，2012），而在长江流域附近的城市海鲜中检测出六氯环己烷（HCH）和 DDT（Jin *et al.*，2015）。另一项调查显示，在 75%的日常膳食样品中检出至少一种新烟碱类杀虫剂（Li *et al.*，2019b）。上述这些都反映出环境中杀虫剂残留的普遍性，且对我们日常生活和身体健康构成威胁。

通过生态风险评价分析，发现在我国东海岸某些地区，烟碱类杀虫剂的使用已从旧类型转变为新类型（如：呋虫胺和烯啶虫胺）；估计每年释放到邻近海域的新烟碱类总量超过千吨，其中大部分进入东海（Chen *et al.*，2019c）。调查发现，广州珠江开发地区地表水和底泥中都有新烟碱类杀虫剂的污染（Yi *et al.*，2019；Zhang *et al.*，2020b）。虽然蜂蜜中也能检出新烟碱类杀虫剂，但其残留水平对人类健康尚不构成风险（Wang *et al.*，2020b）。然而，也有研究认为，尽管吡虫啉的日常接触量比较低，但人群的日常接触风险不应被忽视（Chen *et al.*，2020）。

杀虫剂的副作用给人类的生活带来很大的负面影响。一项小样本流行病学调查显示，婴儿出生体重降低可能与其出生前接触 DDT、灭蚁灵等杀虫剂有关（Guo *et al.*，2014）。研究发现，长期接触有机磷杀虫剂氧乐果的工人其外周淋巴细胞端粒长度明显高于对照组，且 p53、p21 表达水平明显降低，该发现为氧乐果中毒诱发癌变的机制提供有力证据（Duan *et al.*，2017）。孕妇或胎儿出生前接触克百威将会对胎儿发育产生不利影响（Zhang *et al.*，2018）。最近的研究揭示，DDT 代谢物 DDE 影响人类健康，导致体重和脂肪含量增加、肠道营养不良且改变血浆脂质代谢组谱，引起脂质代谢平衡紊乱（Han *et al.*，2020；Liang *et al.*，2020）。

有研究者将与多种有机磷杀虫剂累积接触后的受害特征与膳食摄入量相结合，探讨通过膳食累积接触有机磷的风险评估方法。该研究对提升我国食品安全风险评估水平具有现实意义（何贤松等，2013；赵敏娴等，2013）。研究者通过依托于早期建立的“出生队列”研究计划，探索孕期不同阶段接触农药的特征及其影响因素（Ding *et al.*，2015a；2017），并采用婴儿发育

量表评价宫内接触杀虫剂对儿童神经发育的影响，发现儿童的低发育商数与出生前接触多溴联苯醚有关（Ding *et al.*，2015b）。最近的研究显示，神经系统发育不良与儿童早期接触环境中的毒死蜱有关，但与产前接触此种杀虫剂无关（Guo *et al.*，2019）。此外，还有大量关于杀虫剂对健康影响的实验研究和流行病学调查的研究报道，限于篇幅，恕不详细综述。

3 总结与展望

本综述介绍了国内近 20 年在杀虫剂对靶标害虫及非靶标昆虫（尤其是天敌昆虫）的毒性研究以及杀虫剂的环境安全性方面的研究及进展。因篇幅限制，只介绍了一些代表性工作。总体上，近 20 年来，中国杀虫剂毒理学的研究有了长足的进展，研究水平也有了相应的提高，但是，距离国际前沿尚有一定的差距，例如，很多关于杀虫剂毒性机理的研究还只是限于对表达水平发生改变的基因的筛选以及基因组分析的研究，较少涉及真正的功能基因调节在杀虫剂毒性中的机制的深入分析和探索。此外，近年来流行低剂量毒性作用研究，部分研究者感兴趣于杀虫剂的“亚致死剂量”和“亚致死效应”，但是，究竟什么是“亚致死剂量”和“亚致死效应”？文献中并没有确切的答案。今后杀虫剂毒理学应进一步加强基础研究，深入揭示杀虫剂毒性的分子机制，为害虫防控提供科学依据。

致谢：文献检索得到研究生姜涵清和厚蕊燕的帮助，特此致谢！

参考文献 (References)

Bai GT, Liu LJ, Sheng WL, Chen LM, Zhang H, 2019. Determination of ten pesticide residues in cucumber using QuEChERS-gas chromatography-tandem mass spectrometry. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 21(1): 89–96. [白国涛, 刘来俊, 盛万里, 陈丽梅, 张慧, 2019. QuEChERS-气相色谱-串联质谱法测定黄瓜中 10 种农药残留. 农药学学报, 21(1): 89–96.]

Cai XH, Li QF, Xiao L, Lu HL, Tang J, Huang JB, Yuan JZ, 2018. Insecticidal and acetylcholinesterase inhibition activity of *Veratrum nigrum* alkaloidal extract against the *German cockroach* (*Blattella germanica*). *Journal of Arthropod-Borne Diseases*, 12(4): 414–420.

Chang X, Lu ZB, Shen ZC, Peng YF, Ye GY, 2017. Bitrophic and tritrophic effects of transgenic cry1ab/cry2aj maize on the beneficial, nontarget *Harmonia axyridis* (Coleoptera: Coccinellidae). *Environmental Entomology*, 46(5): 1171–1176.

Chen C, Qian YZ, Liu XJ, Tao CJ, Liang Y, Li Y, 2012. Risk assessment of chlorpyrifos on rice and cabbage in China. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 62(1): 125–130.

Chen DW, Zhang YP, Lv B, Liu ZB, Han JJ, Li JG, Zhao YF, Wu YN, 2020. Dietary exposure to neonicotinoid insecticides and health risks in the Chinese general population through two consecutive total diet studies. *Environment International*, 135: e105399.

Chen DK, Chen ZZ, Liu CM, 2014. The toxicity of insecticides to *Aphidius gifuensis* Ashmead in different developmental stages. *Journal of Biosafety*, 23(3): 191–195. [陈德锟, 陈珍珍, 刘长明, 2014. 杀虫剂对烟蚜茧蜂不同发育阶段的毒性. 生物安全学报, 23(3): 191–195.]

Chen L, Yan QP, Zhang JZ, Yuan SK, Liu XG, 2019a. Joint toxicity of acetamiprid and co-applied pesticide adjuvants on honeybees under semifield and laboratory conditions. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 38(9): 1940–1946.

Chen X, Li H, You J, 2015. Joint toxicity of sediment-associated permethrin and cadmium to *Chironomus dilutus*: The role of bioavailability and enzymatic activities. *Environmental Pollution*, 207: 138–144.

Chen X, Li HZ, Zhang JJ, Ding YP, You J, 2016. Does cadmium affect the toxicokinetics of permethrin in *Chironomus dilutus* at sublethal level? Evidence of enzymatic activity and gene expression. *Environmental Pollution*, 218: 1005–1013.

Chen YC, Zang L, Liu MD, Zhang CL, Shen GF, Du W, Sun Z, Fei J, Yang YL, Wang YH, Wang XJ, Zhao MR, 2019c. Ecological risk assessment of the increasing use of the neonicotinoid insecticides along the east coast of China. *Environment International*, 127: 550–557.

Chen ZL, Yao XM, Dong FS, Duan HX, Shao XS, Chen X, Yang T, Wang GR, Zheng YQ, 2019b. Ecological toxicity reduction of dinotefuran to honeybee: New perspective from an enantiomeric level. *Environment International*, 130: e104854.

Cheng WX, Chai YX, Wang JJ, 2006. Effects of insecticides on glutathione-S-transferase and superoxide dismutase in *Liposcelis bostrychophila* Badonnel and *L. entomophila* (Enderlein). *Acta Phytophylacica Sinica*, 26(3): 333–334. [程伟霞, 柴玉鑫, 王进军, 2006. 四种杀虫剂对两种书虱谷胱甘肽-*S*-转移酶和超氧化物歧化酶的影响. 植物保护学报, 26(3): 333–334.]

Cheng XY, Hu JH, Li JX, Chen J, Wang H, Mao TT, Xue B, Li B,

2018. The silk gland damage and the transcriptional response to detoxifying enzymes-related genes of *Bombyx mori* under phoxim exposure. *Chemosphere*, 209: 964–971.

Cheng XY, Li FC, Chen J, Wang H, Mao TT, Li J, Hu J, Li B, 2019. Mechanism of trace acetamiprid-caused reproductive disorders in silkworm, *Bombyx mori*. *Pest Management Science*, 75(10): 2672–2681.

Chi YY, Cui XQ, Jiang H, Lin RH, Wang KY, 2014. Test and evaluation method of chronic toxicity of three different insecticides to silkworm. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 16(5): 548–558. [池艳艳, 崔新倩, 姜辉, 林荣华, 王开运, 2014. 三种不同类型杀虫剂对家蚕的慢性毒性试验及评价方法初探. 农药学学报, 16(5): 548–558.]

Cui L, Qi HL, Yang DB, Yuan HZ, Rui CH, 2016. Cycloxaprid: A novel cis-nitromethylene neonicotinoid insecticide to control imidacloprid-resistant cotton aphid (*Aphis gossypii*). *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 132: 96–101.

Cui YL, Liu KC, Xu C, Liu F, Li Q, Liu SZ, Wang BM, 2014. Development of a sensitive monoclonal antibody-based indirect competitive enzyme-linked immunosorbent assay for analysing chlorantraniliprole residues. *Food Chemistry*, 143: 293–299.

Dai PL, Wang Q, Sun JH, Liu F, Wang X, Wu YY, Zhou T, 2010. Effects of sublethal concentrations of bifenthrin and deltamethrin on fecundity, growth, and development of the honeybee *Apis mellifera ligustica*. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 29(3): 644–649.

Dai PL, Zhou W, Zhang J, Cui HJ, Wang Q, Jiang WY, Sun JH, Wu YY, Zhou T, 2012. Field assessment of Bt cry1Ah corn pollen on the survival, development and behavior of *Apis mellifera ligustica*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 79: 232–237.

Di SS, Cang T, Qi PP, Wang ZW, Wang XY, Xu MF, Wang XQ, Xu H, Wang Q, 2019. Comprehensive study of isocarbophos to various terrestrial organisms: Enantioselective bioactivity, acute toxicity, and environmental behaviors. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 67(40): 10997–11004.

Ding GD, Cui C, Chen LM, Gao Y, Zhou YJ, Shi R, Tian Y, 2015a. Prenatal exposure to pyrethroid insecticides and birth outcomes in rural northern China. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 25(3): 264–270.

Ding GD, Wang CF, Vinturache A, Zhao SS, Pan R, Han WC, Chen LM, Wang WY, Yuan T, Gao Y, Tian Y, 2017. Prenatal low-level phenol exposures and birth outcomes in China. *Science of the Total Environment*, 607/608: 1400–1407.

Ding GD, Yu J, Cui C, Chen LM, Gao Y, Wang CF, Zhou YJ, Tian Y, 2015b. Association between prenatal exposure to polybrominated diphenyl ethers and young children's neurodevelopment in China. *Environmental Research*, 142: 104–111.

Ding JT, Tang H, Adili S, Wang YZ, 2013. Comparison of the toxicities and antifeedant effects of four botanical insecticides against the larvae of *Lymantria dispar asiatica* Vnukovskij. *Journal of Nanjing Forestry University* (*Natural Sciences Edition*), 37(4): 80–84. [丁吉同, 唐桦, 阿地力·沙塔尔, 王玉珠, 2013. 4 种植物源杀虫剂对亚洲型舞毒蛾幼虫的毒性与拒食作用. 南京林业大学学报(自然科学版), 37(4): 80–84.]

Duan XR, Yang YL, Wang SH, Feng XL, Wang TW, Wang PP, Liu SX, Li L, Yao WJ, Cui LX, Wang W, 2017. Changes in the expression of genes involved in cell cycle regulation and the relative telomere length in the process of canceration induced by omethoate. *Tumour Biology*, 39(7): e1010428317719782.

Gao BB, Zhang ZX, Li LS, Kaziem AE, He ZZ, Yang QW, Qing PY, Zhang Q, Wang MH, 2019. Stereoselective environmental behavior and biological effect of the chiral organophosphorus insecticide isofenphos methyl. *Science of the Total Environment*, 648: 703–710.

Gao MQ, Hou SP, Pu DQ, Shi M, Ye GY, Chen XX, 2010. Multi-generation effects of Bt rice on *Anagrus nilaparvatae*, a parasitoid of the nontarget pest *Nilapavarta lugens*. *Environmental Entomology*, 39(6): 2039–2044.

Geng Y, Jiang LJ, Zhang YW, He ZY, Wang L, Peng Y, Wang YH, Liu XW, Xu YP, 2018. Assessment of the dissipation, pre-harvest interval and dietary risk of carbosulfan, dimethoate, and their relevant metabolites in greenhouse cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Pest Management Science*, 74(7): 1654–1663.

Gong YH, Shi XY, Desneux N, Gao XW, 2016. Effects of spirotetramat treatments on fecundity and carboxylesterase expression of *Aphis gossypii* Glover. *Ecotoxicology*, 25(4): 655–663.

Gu ZY, Li FC, Hu JS, Ding C, Wang ZQ, Tian JH, Xue B, Xu KZ, Shen WD, Li B, 2017. Sublethal dose of phoxim and *Bombyx mori* nucleopolyhedrovirus interact to elevate silkworm mortality. *Pest Management Science*, 73(3): 554–561.

Gu ZY, Zhou YJ, Xie Y, Li FC, Ma L, Sun SS, Wu Y, Wang BB, Wang JM, Hong FS, Shen WD, Li B, 2014. The adverse effects of phoxim exposure in the midgut of silkworm, *Bombyx mori*. *Chemosphere*, 96: 33–38.

Gu ZY, Sun SS, Wang YH, Wang BB, Xie Y, Ma L, Wang JM, Shen WD, Li B, 2013. Transcriptional characteristics of gene expressi on in the midgut of domestic silkworms (*Bombyx mori*) exposed to phoxim. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 105(1): 36–43.

Guo H, Jin YL, Cheng YB, Leaderer B, Lin SB, Holford TR, Qiu J, Zhang YW, Shi KC, Zhu Y, Niu JJ, Bassig BA, Xu SQ, Zhang B, Li YH, Hu XB, Chen Q, Zheng TZ, 2014. Prenatal exposure to organochlorine pesticides and infant birth weight in China. *Chemosphere*, 110: 1–7.

Guo JQ, Zhang JM, Wu CH, Lv LS, Lu DS, Qi XJ, Jiang S, Feng C, Yu HX, Liang WJ, Chang XL, Zhang YB, Xu H, Cao Y, Wang GQ, Zhou ZJ, 2019. Associations of prenatal and childhood chlorpyrifos exposure with neurodevelopment of 3-year-old children. *Environmental Pollution*, 251: 538–546.

Han X, Zhang F, Meng LL, Xu YD, Li YM, Li A, Turyk ME, Yang RQ, Wang P, Zhang JQ, Zhang QH, Jiang GB, 2020. Exposure to organochlorine pesticides and the risk of type 2 diabetes in the population of east China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 190: e110125.

He M, Yu PZ, Jia CH, Zhao EC, Chen L, Jing JJ, Zheng YQ, 2016. Simultaneous determination of tebufenozide and phoxim in Chinese cabbage and soil using ultrahigh-performance liquid chromatography tandem mass spectrometry. *Food Analytical Methods*, 9(11): 3107–3116.

He XS, Li TT, Yi NN, Wu H, Wang X, Zhao MX, Wang CN, 2013. Determination of reference dose of chlorpyrifos by benchmark dose method. *Chinese Journal of Pharmacology and Toxicology*, 27(2): 289–293. [何贤松, 李亭亭, 乙楠楠, 吴惠, 王霞, 赵敏娴, 王灿楠, 2013. 应用基准剂量法探讨氯蜱硫磷的参考剂量. 中国药理学与毒理学杂志, 27(2): 289–293.]

Hu JH, Li MX, Lu ZT, Mao TT, Chen J, Wang H, Qu JW, Fang YL, Cheng XY, Li JX, Li FC, Li B, 2019. The mechanism of damage in the midgut of *Bombyx mori* after chlorantraniliprole exposure. *Ecotoxicology*, 28(8): 903–912.

Jiang H, Chen JJ, Zhao C, Tian YQ, Zhang ZX, Xu HH, 2020. Sulfoxaflor residues in pollen and nectar of cotton applied through drip irrigation and their potential exposure to *Apis mellifera* L. *Insects*, 11(2): e114.

Jiang JG, Liu X, Huang XP, Yu X, Zhang WW, Zhang XX, Mu W, 2019. Comparative ecotoxicity of neonicotinoid insecticides to three species of *Trichogramma parasitoid* wasps (Hymenoptera: Trichogrammatidae). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 183: e109587.

Jiang JG, Ma DC, Zou N, Yu X, Zhang ZQ, Liu F, Mu W, 2018. Concentrations of imidacloprid and thiamethoxam in pollen, nectar and leaves from seed-dressed cotton crops and their potential risk to honeybees (*Apis mellifera* L.). *Chemosphere*, 201: 159–167.

Jiao YY, Yang Y, Meissle M, Peng YF, Li YH, 2016. Comparison of susceptibility of *Chilo suppressalis* and *Bombyx mori* to five *Bacillus thuringiensis* proteins. *Journal of Invertebrate Pathology*, 136: 95–99.

Jin MQ, Zhou SS, Liu WP, Zhang D, Lu XT, 2015. Residues and potential health risks of DDTs and HCHs in commercial seafoods from two coastal cities near Yangtze River Estuary. *Journal of Environmental Science and Health B*, 50(3): 163–174.

Lai TC, Li J, Su JY, 2011. Monitoring of beet armyworm *Spodoptera exigua* (Lepidoptera: Noctuidae) resistance to chlorantraniliprole in China. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 101(3): 198–205.

Li FC, Hu JS, Tian JH, Xu KZ, Ni M, Wang BB, Shen WD, Li B, 2016. Effects of phoxim on nutrient metabolism and insulin signaling pathway in silkworm midgut. *Chemosphere*, 146: 478–485.

Li FC, Li MX, Mao TT, Wang H, Chen J, Lu ZT, Qu JW, Fang YL, Gu ZY, Li B, 2020a. Effects of phoxim exposure on gut microbial composition in the silkworm, *Bombyx mori*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 189: e110011.

Li FC, Li MX, Wang H, Mao TT, Chen J, Lu ZT, Qu JW, Fang YL, Li B, 2020b. Effects of phoxim pesticide on the immune system of silkworm midgut. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 164: 58–64.

Li FC, Ni M, Zhang H, Wang BB, Xu KZ, Tian JH, Hu JH, Shen WD, Li B, 2015. Expression profile analysis of silkworm P450 family genes after phoxim induction. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 122: 103–109.

Li Q, Dou XW, Zhang L, Zhao XS, Luo JY, Yang MH, 2019a. Oriented assembly of surface plasmon resonance biosensor through staphylococcal protein A for the chlorpyrifos detection. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 411(23): 6057–6066.

Li R, Pan X, Wang Q, Tao Y, Chen Z, Jiang D, Wu C, Dong F, Xu J, Liu X, Wu X, Zheng Y, 2019b. Development of s-fluxametamide for bioactivity improvement and risk reduction: Systemic evaluation of the novel insecticide fluxametamide at the enantiomeric level. *Environmental Science and Technology*, 53(23): 13657–13665.

Li SH, Chen DW, Lv B, Li JG, Zhao YF, Wu YN, 2019c. Enhanced sensitivity and effective cleanup strategy for analysis of neonicotinoids in complex dietary samples and the application in the total diet study. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 67(9): 2732–2740.

Li XQ, Bao C, Yang DB, Zheng MQ, Li XF, Tao S, 2010. Toxicities of fipronil enantiomers to the honeybee *Apis mellifera* L. and enantiomeric compositions of fipronil in honey plant flowers. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 29(1): 127–132.

Li YG, Liu J, Zhang Y, Gu M, Wang DY, Dang YY, Ye BC, Li YC, 2018. A robust electrochemical sensing platform using carbon paste electrode modified with molecularly imprinted microsphere and its application on methyl parathion detection. *Biosensors & Bioelectronics*, 106: 71–77.

Li Y, Wei J, Fang J, Lv W, Ji Y, Aioub AAA, Zhang J, Hu Z, 2019d. Insecticidal activity of four lignans isolated from *Phryma leptostachya*. *Molecules*, 24(10): e1976.

Liang YR, Liu DH, Zhan J, Luo M, Han JJ, Wang P, Zhou ZQ, 2020. New insight into the mechanism of POP-induced obesity: Evidence from DDE-altered microbiota. *Chemosphere*, 244: e125123.

Liao CH, He XJ, Wang ZL, Barron AB, Zhang B, Zeng ZJ, Wu XB,

2018. Short-term exposure to lambda-cyhalothrin negatively affects the survival and memory-related characteristics of worker bees *Apis mellifera*. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 75(1): 59–65.

Liao JY, Gao YQ, Wu QY, Zhu YC, You MS, 2015. Purification of the insecticidal Cry2Ad protein from a Bt-isolated BRC-HZP10 strain and toxin assay to the diamondback moth, *Plutella xylostella* (L.). *Genetic Molecular Research*, 14(3): 7661–7670.

Liu HG, Zhao MR, Zhang C, Ma Y, Liu WP, 2008. Enantioselective cytotoxicity of the insecticide bifenthrin on a human amnion epithelial (FL) cell line. *Toxicology*, 253(1/3): 89–96.

Liu S, Liu Y, He F, Zhang H, Li X, Tan H, 2019a. Enantioselective olfactory effects of the neonicotinoid dinotefuran on honey bees (*Apis mellifera* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 67(43): 12105–12116.

Liu TF, Wang Y, Zhang LX, Xu YY, Zhang ZQ, Mu W, 2019b. Sublethal effects of four insecticides on the seven-spotted lady beetle (Coleoptera: Coccinellidae). *Journal of Economic Entomology*, 112(5): 2177–2185.

Liu XX, Chen M, Collins HL, Onstad D, Roush R, Zhang QW, Shelton AM, 2012. Effect of insecticides and *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae) genotype on a predator and parasitoid and implications for the evolution of insecticide resistance. *Journal of Economic Entomology*, 105(2): 354–362.

Liu YJ, Qiao NH, Diao QY, Jing Z, Vukanti R, Dai PL, Ge Y, 2020. Thiacloprid exposure perturbs the gut microbiota and reduces the survival status in honeybees. *Journal of Hazardous Materials*, 389: e121818.

Liu YM, Liu SH, Zhang H, Gu YP, Li XS, He MY, Tan HH, 2017. Application of the combination index (CI)-isobologram equation to research the toxicological interactions of clothianidin, thiamethoxam, and dinotefuran in honeybee, *Apis mellifera*. *Chemosphere*, 184: 806–811.

Liu ZJ, Zhang Z, Zhu GB, Sun JF, Zou B, Li M, Wang JG, 2016. Rapid screening of flonicamid residues in environmental and agricultural samples by a sensitive enzyme immunoassay. *Science of the Total Environment*, 551/552: 484–488.

Lü BQ, Peng ZQ, Jin QA, Wen HB, Fu YG, 2005. Toxicity of 15 insecticides to *Brontispa longissima* (Gestro) and *Asecodes hispinarum* Bou(c)ek, a parasitoid of *B. Longissima*. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 26(1): 47–51. [吕宝乾, 彭正强, 金启安, 温海波, 符悦冠, 2005. 15 种杀虫剂对椰心叶甲幼虫及椰甲截脉姬小蜂的毒性. 热带作物学报, 26(1): 47–51.]

Ma CS, Zhang YK, Sun J, Imran M, Yang HP, Wu J, Zou Y, Li-Byarlay HM, Luo SD, 2019. Impact of acute oral exposure to thiamethoxam on the homing, flight, learning acquisition and short-term retention of *Apis cerana*. *Pest Management Science*, 75(11): 2975–2980.

Ma L, Xie Y, Gu ZY, Wang BB, Li FC, Xu KZ, Shen WD, Li B, 2013. Characteristics of phoxim-exposed gene transcription in the silk gland of silkworms. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 107(3): 391–397.

Mao KK, Jin RH, Li WH, Ren ZJ, Qin XY, He S, Li JH, Wan H, 2019a. The influence of temperature on the toxicity of insecticides to *Nilaparvata lugens* (Stål). *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 156: 80–86.

Mao TT, Li FC, Fang YL, Wang H, Chen J, Li MX, Lu ZT, Qu JW, Li JX, Hu JH, Cheng XY, Ni M, Li B, 2019b. Effects of chlorantraniliprole exposure on detoxification enzyme activities and detoxification-related gene expression in the fat body of the silkworm, *Bombyx mori*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 176: 58–63.

Miao JN, Liu AR, Wu LN, Yu MZ, Wei W, Liu SQ, 2020. Magnetic ferroferric oxide and polydopamine molecularly imprinted polymer nanocomposites based electrochemical impedance sensor for the selective separation and sensitive determination of dichlorodiphenyltrichloroethane (DDT). *Analytica Chimica Acta*, 1095: 82–92.

Qi S, Zhu L, Wang D, Wang C, Chen X, Xue X, Wu L, 2020. Flumethrin at honey-relevant levels induces physiological stresses to honey bee larvae (*Apis mellifera* L.) *in vitro*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 190: e110101.

Qi XJ, Zheng ML, Wu CH, Wang GQ, Feng C, Zhou ZJ, 2012. Urinary pyrethroid metabolites among pregnant women in an agricultural area of the province of Jiangsu, China. *International Journal of Hygiene Environmental Health*, 215(5): 487–495.

Qiao M, Wang GP, Zhang C, Roelofs D, van Straalen NM, Zhu YG, 2015. Transcriptional profiling of the soil invertebrate *Folsomia candida* in pentachlorophenol-contaminated soil. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 34(6): 1362–1368.

Shen AD, Chen ZQ, Luo KJ, Miu S, Yan YH, 2003. Toxicity of several insecticides to the larvae, eggs, pupae of the leafminer parasitoid, *Diglyphus isaea* (Hymenoptera: Eulophidae). *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 16 (4): 69–72. [谌爱东, 陈宗麒, 罗开珺, 缪森, 严毓骅, 2003. 杀虫剂对潜蝇姬小蜂幼虫、蛹和卵的毒性. 西南农业学报, 16(4): 69–72.]

Shi GQ, Zhang Z, Jia KL, Zhang K, An DX, Wang G, Zhang BL, Yin HN, 2014. Characterization and expression analysis of peroxiredox in family genes from the silkworm *Bombyx mori* in response to phoxim and chlorpyrifos. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 114: 24–31.

Sun MQ, Liu DH, Dang ZH, Li RH, Zhou ZQ, Wang ZP, 2012. Enantioselective behavior of malathion enantiomers in toxicity to beneficial organisms and their dissipation in vegetables and crops. *Journal of Hazardous Materials*, 237/238: 140–146.

Tian JC, Wang GW, Han HL, Romeis J, Zhang FC, Ye GY, Xie MC, Wang GY, Lu ZX, 2018. The rice planthopper parasitoid *Anagrus nilaparvatae* is not at risk when feeding on honeydew derived from *Bacillus thuringiensis* (Bt) rice. *Pest Management Science*, 74(8): 1854–1860.

Tian MM, Zhang Q, Hua XD, Tang BW, Gao BB, Wang MH, 2016. Systemic stereoselectivity study of flufiprole: Stereoselective bioactivity, acute toxicity and environmental fate. *Journal of Hazardous Materials*, 320: 487–494.

Wang DS, Lü L, He YR, 2017b. Effects of two conventional insecticides on male-specific sex pheromone discrimination and mate choice in *Trichogramma chilonis* (Hymenoptera: Trichogrammatidae). *Environmental Entomology*, 46(2): 328–334.

Wang D, Gong P, Li M, Qiu X, Wang K, 2009a. Sublethal effects of spinosad on survival, growth and reproduction of *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae). *Pest Management Science,* 65(2): 223–227.

Wang DS, Lü L, He YR, Shi QX, Wang GH, 2016. Effects of insecticides on oviposition and host discrimination behavior in *Trichogramma chilonis* (Hymenoptera: Trichogrammatidae). *Journal of Economic Entomology*, 109(6): 2380–2387.

Wang DS, He YR, Guo XL, Luo YL, Xie MQ, 2012. Safety of ten insecticides to different developmental stages of *Trichogramma confusum* Viggiani (Hymenoptera: Trichogrammatidae). *Chinese Journal of Biological Control,* 28(3): 314–319. [王德森, 何余容, 郭祥令, 罗永丽, 谢梅琼, 2012. 杀虫剂对不同发育阶段拟澳洲赤眼蜂的安全性评估. 中国生物防治学报, 28(3): 314–319.]

Wang H, Li FC, Qu JW, Mao TT, Chen J, Li MX, Lu ZT, Fang YL, Shi GF, Li B, 2019a. The mechanism of damage by trace amounts of acetamiprid to the midgut of the silkworm, *Bombyx mori*. *Environmental Toxicology*, 34(9): 1043–1051.

Wang H, Lu ZT, Li MX, Fang YL, Qu JW, Mao TT, Chen J, Li FC, Sun HN, Li B, 2020a. Responses of detoxification enzymes in the midgut of *Bombyx mori* after exposure to low-dose of acetamiprid. *Chemosphere*, 251: e126438.

Wang HP, Zheng LG, Yu WT, Cao XM, Yang RB, 2019b. Dissipation behavior of chlorpyrifos residues and risk assessment in sugarcane fields. *Biomedical Chromatography*, 33(3): e4424.

Wang JP, Yu GC, Sheng W, Shi M, Guo BX, Wang S, 2011. Development of an enzyme-linked immunosorbent assay based a monoclonal antibody for the detection of pyrethroids with phenoxybenzene multiresidue in river water. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(7): 2997–3003.

Wang LM, Liu WP, Yang CX, Pan ZY, Gan JY, Xu C, Zhao MR, Schlenk D, 2007. Enantioselectivity in estrogenic potential and uptake of bifenthrin. *Environmental Science and Technology*, 41(17): 6124–6128.

Wang L, Zeng L, Chen J, 2015a. Sublethal effect of imidacloprid on *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae) feeding, digging, and foraging behavior. *Environmental Entomology*, 44(6): 1544–1552.

Wang Q, Diao QY, Dai PL, Chu YN, Wu YY, Zhou T, Cai QN, 2017a. Exploring poisonous mechanism of honeybee, *Apis mellifera* ligustica Spinola, caused by pyrethroids. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 135: 1–8.

Wang QL, Liu TX, 2016. Effects of three insect growth regulators on *Encarsia formosa* (Hymenoptera: Aphelinidae), an endoparasitoid of *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae). *Journal of Economic Entomology*, 109(6): 2290–2297.

Wang XR, Goulson D, Chen LZ, Zhang JZ, Zhao W, Jin Y, Yang SP, Li Y, Zhou JH, 2020b. Occurrence of neonicotinoids in Chinese apiculture and a corresponding risk exposure assessment. *Environmental Science and Technology*, 54(8): 5021–5030.

Wang X, Jia JJ, Zhang YF, Zhou Q, Gao CF, 2013. Laboratory safety evaluation of eight insecticides to two predating natural enemies, *Hylyphantes graminicola* and *Coleosoma octomaculatum*. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 36(3): 53–58. [王玺, 贾京京, 张一帆, 周钦, 高聪芬, 2013. 8 种水稻田常用杀虫剂对 2 种天敌蜘蛛的室内安全性评价. 南京农业大学学报, 36(3): 53–58.]

Wang X, Khakame SK, Ye C, Yang Y, Wu Y, 2013a. Characterisation of field-evolved resistance to chlorantraniliprole in the diamondback moth, *Plutella xylostella*, from China. *Pest Management Science*, 69(5): 661–665.

Wang X, Sun H, Zhang Y, Liu C, Liu Z, 2015b. Transcriptional changes in nachrs, interactive proteins and P450s in *Locusta migratoria* manilensis (Orthoptera: Acrididae) CNS in response to high and low oral doses of imidacloprid. *Journal of Insect Science*, 15 (1): e102.

Wang YH, Chen LP, An XH, Jiang JH, Wang Q, Cai LM, Zhao XP, 2013b. Susceptibility to selected insecticides and risk assessment in the insect egg parasitoid *Trichogramma confusum* (Hymenoptera: Trichogrammatidae). *Journal of Economic Entomology*, 106(1): 142–149.

Wang YH, Chen LP, Yu RX, Zhao XP, Wu CX, Cang T, Wang Q, 2012. Insecticide toxic effects on *Trichogramma ostriniae* (Hymenoptera: Trichogrammatidae). *Pest Management Science*, 68(12): 1564–1571.

Wang YH, Wu CX, Cang T, Yang LZ, Yu WH, Zhao XP, Wang Q, Cai LM, 2014. Toxicity risk of insecticides to the insect egg parasitoid *Trichogramma evanescens* Westwood (Hymenoptera: Trichogrammatidae). *Pest Management Science*, 70(3): 398–404.

Wang YH, Gu ZY, Wang JM, Sun SS, Wang BB, Jin YQ, Shen WD, Li B, 2013c. Changes in the activity and the expression of detoxification enzymes in silkworms (*Bombyx mori*) after phoxim feeding. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 105(1): 13–17.

Wang YH, Yu YX, Zhao XP, An XH, Chen LP, Wu CX, Wang Q,

2012. Acute toxicity and safety evaluation of neonicotinoids and macrocyclic lactiones to adult wasps of four *Trichogramma* species (Hymenoptera: Trichogrammidae). *Acta Entomplogica Sinica*, 55(1): 36–45. [王彦华, 俞瑞鲜, 赵学平, 安雪花, 陈丽萍, 吴长兴, 王强, 2012. 新烟碱类和大环内酯类杀虫剂对四种赤眼蜂成蜂急性毒性和安全性评价. 昆虫学报, 55(1): 36–45.]

Wang YY, Li YH, Huang ZY, Chen XP, Romeis J, Dai PL, Peng YF, 2015c. Toxicological, biochemical, and histopathological analyses demonstrating that Cry1C and Cry2A are not toxic to larvae of the honeybee, *Apis mellifera*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 63(27): 6126–6132.

Wu H, Luo Y, Hou C, Huo D, Wang W, Zhao J, Lei Y, 2019. Rapid and fingerprinted monitoring of pesticide methyl parathion on the surface of fruits/leaves as well as in surface water enabled by gold nanorods based casting-and-sensing SERS platform. *Talanta*, 200: 84–90.

Wu H, Yang M, Guo Y, Xie Z, Ma E, 2007. Comparisons of malathion susceptibility, target sensitivity, and detoxification enzyme activity in nine field populations of *Oxya chinensis* (Orthoptera: Acrididae). *Journal of Economic Entomology*, 100(4): 1409–1415.

Wu LP, Zhou XL, Zhao DY, Feng T, Zhou J, Sun T, Wang JM, Wang C, 2017. Seasonal variation and exposure risk assessment of pesticide residues in vegetables from Xinjiang Uygur autonomous region of china during 2010–2014. *Journal of Food Composition and Analysis*, 58: 1–9.

Wu SG, Wang Q, Zhao XP, Wu CX, Chen LP, Xu H, Zhang H, 2004. Study on toxicity of abamectin and fipronil to silkworm (*Bombyx mori* L.) and safety evaluation. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 16(5): 309–312. [吴声敢, 王强, 赵学平, 吴长兴, 陈丽萍, 徐浩, 章虎, 2004. 阿维菌素和氟虫腈对家蚕毒性与安全性评价研究. 浙江农业学报, 16(5): 309–312.]

Wu X, Zhang L, Yang C, Zong M, Huang Q, Tao L, 2016. Detection on emamectin benzoate-induced apoptosis and DNA damage in *Spodoptera frugiperda* Sf-9 cell line. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 126: 6–12.

Wu YY, Zhou T, Wang Q, Dai PL, Xu SF, Jia HR, Wang X, 2015. Programmed cell death in the honey bee (*Apis mellifera*) (Hymenoptera: apidae) worker brain induced by imidacloprid. *Journal of Economic Entomology*, 108(4): 1486–1494.

Wu YY, Zhou T, Wubie AJ, Wang Q, Dai PL, Jia HR, 2014. Apoptosis in the nerve cells of adult honeybee (*Apis mellifera* ligustica) brain induced by imidacloprid. *Acta Entomplogica Sinica*, 57(2): 194–203. [吴艳艳, 周婷, Abebe Jenberie Wubie, 王强, 代平礼, 贾慧茹, 2014. 吡虫啉对成年意大利蜜蜂脑神经细胞致凋亡作用. 昆虫学报, 57(2): 194–203.]

Xiao D, Zhao J, Guo XJ, Chen HY, Qu MM, Zhai WG, Desneux N, Biondi A, Zhang F, Wang S, 2016. Sublethal effects of imidacloprid on the predatory seven-spot ladybird beetle *Coccinella septempunctata*. *Ecotoxicology*, 25(10): 1782–1793.

Xu CA, Peng J, Peng ZQ, Jin QA, Wan FH, 2008. Selective toxicity of four insecticides on *Brontispa longissima* and *Tetrastichus brontispae*. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 29(1): 68–72. [许春霭, 彭劲, 彭正强, 金启安, 万方浩, 2008. 大田常用杀虫剂对椰心叶甲及椰心叶甲啮小蜂的选择毒性. 热带作物学报, 29(1): 68–72.]

Yang CL, Zhu HY, Zhang F, 2019. Comparative proteomics analysis between the short-term stress and long-term adaptation of the *Blattella germanica* (Blattodea: Blattellidae) in response to beta-cypermethrin. *Journal of Economic Entomology*, 112(3): 1396–1402.

Yang M, Wang B, Gao J, Zhang Y, Xu W, Tao L, 2017. Spinosad induces programmed cell death involves mitochondrial dysfunction and cytochrome C release in *Spodoptera frugiperda* Sf9 cells. *Chemosphere*, 169: 155–161.

Yang M, Zhang J, Zhu KY, Xuan T, Liu X, Guo Y, Ma E, 2008. Increased activity and reduced sensitivity of acetylcholinesterase associated with malathion resistance in a field population of the oriental migratory locust, *Locusta migratoria manilensis* (Meyen). *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 91(1): 32–38.

Yang YJ, Wang CY, Xu HX, Tian JC, Lu ZX, 2020. Response of *Trichogramma spp*. (Hymenoptera: Trichogrammatidae) to insecticides at concentrations sublethal to *Cnaphalocrocis medinalis* (Lepidoptera: Pyralidae). *Journal of Economic Entomology*, 113(2): 646–653.

Yang YX, Jin SQ, Li SN, Wei FL, Zhu GN, 2008. Oral toxicity and risk of five insecticides to honeybees. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 10(2): 226–231. [杨艳霞, 金绍强, 李少南, 魏方林, 朱国念, 2008. 五种杀虫剂对蜜蜂的经口毒性及风险评价. 农药学学报, 10(2): 226–231.]

Yi D, Fang Z, Yang L, 2018. Effects of Bt cabbage pollen on the honeybee *Apis mellifera* L. *Scientific Reports*, 8(1): e482.

Yi XH, Zhang C, Liu HB, Wu RR, Tian D, Ruan JJ, Zhang T, Huang MZ, Ying GG, 2019. Occurrence and distribution of neonicotinoid insecticides in surface water and sediment of the Guangzhou section of the Pearl River, South China. *Environmental Pollution*, 251: 892–900.

Yin K, Ma EB, Xue CR, Wu HH, Guo YP, Zhang JZ, 2008. Insecticidal activities of 5-aminolevulinic acid on *Oxya chinensis* and effect on three kinds of enzymes. *Scientia Agricultura Sinica*, 41(7): 2003–2007. [阴琨, 马恩波, 薛春荣, 吴海花, 郭亚平, 张建珍, 2008. 5-氨基乙酰丙酸对中华稻蝗（*Oxya chinensis*）的杀虫活性及对 3 种酶活性的影响. 中国农业科学, 41(7): 2003–2007.]

Yu PZ, Jia CH, Zhao EC, Chen L, He HJ, Jing JJ, He M, 2017. Determination of oxathiapiprolin concentration and dissipation in grapes and soil by ultrahigh-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97(10): 3294–3299.

Yu QY, Fang SM, Zuo WD, Dai FY, Zhang Z, Lu C, 2011. Effect of organophosphate phoxim exposure on certain oxidative stress biomarkers in the silkworm. *Journal of Economic Entomology*, 104(1): 101–106.

Yu RX, Wang YH, Hu XQ, Wu SG, Cai LM, Zhao XP, 2016. Individual and joint acute toxicities of selected insecticides against *Bombyx mori* (Lepidoptera: Bombycidae). *Journal of Economic Entomology*, 109(1): 327–333.

Yuan HB, Li JH, Liu YQ, Cui L, Lu YH, Xu XY, Li Z, Wu KM, Desneux N, 2017. Lethal, sublethal and transgenerational effects of the novel chiral neonicotinoid pesticide cycloxaprid on demographic and behavioral traits of *Aphis gossypii* (Hemiptera: Aphididae). *Insect Science*, 24(5): 743–752.

Yue M, Zong FL, Ma CS, Wu J, Luo SD, 2017. Survival risk analysis honey bee workers (*Apis mellifera* L., Hymenoptera) exposed to sub-lethal concentration of thiamethoxam. *Chinese Journal of Biological Control,* 33(5): 638–43. [岳孟, 宗伏霖, 马昌盛, 吴杰, 罗术东, 2017. 亚致死浓度噻虫嗪对意大利蜜蜂工蜂的生存风险分析. 中国生物防治学报, 33(5): 638–643.]

Zhang C, Yi XH, Chen C, Tian D, Liu HB, Xie LT, Zhu XP, Huang MZ, Ying GG, 2020b. Contamination of neonicotinoid insecticides in soil-water-sediment systems of the urban and rural areas in a rapidly developing region: Guangzhou, South China. *Environment International*, 139: e105719.

Zhang C, Zhang HZ, Chang J, Li HP, 2015. Toxicity and the effects of four pyrethroid insceticides on the activity of ATPase and GSTs in *Aphis* sp. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 17(2): 235–40. [张丛, 张海珠, 常静, 李海平, 2015. 四种拟除虫菊酯类杀虫剂对枸杞蚜虫的毒力及对三磷酸腺苷酶和谷胱甘肽S-转移酶活性的影响. 农药学学报, 17(2): 235–240.]

Zhang FP, Fu YG, Peng ZQ, Zhang JB, Jin QA, 2008. Selective toxicity of insecticides on the *Parasaissetia nigra* and *Coccophagus ceroplastae*. *Agrochemicals*, 47(4): 282–283. [张方平, 符悦冠, 彭正强, 张敬宝, 金启安, 2008. 杀虫剂对橡副珠蜡蚧和斑翅食蚧蚜小蜂的选择毒性. 农药, 47(4): 282–283.]

Zhang JM, Guo JQ, Lu DS, Qi XJ, Chang XL, Wu CH, Zhang YB, Liang WJ, Fang X, Cao Y, Zhou ZJ, 2018. Maternal urinary carbofuranphenol levels before delivery and birth outcomes in Sheyang Birth Cohort. *Science of the Total Environment*, 625: 1667–1672.

Zhang XR, Zhang JQ, Shao YY, Xing XR, Wang J, Liu ZX, Li YJ, Ofori AD, Tu QB, Wang J, Sheng S, Wu FA, 2019. Identification of glutathione-*S*-transferase genes by transcriptome analysis in *Meteorus pulchricornis* (Hymenoptera: Braconidae) and their expression patterns under stress of phoxim and cypermethrin. *Comparative Biochemistry and Physiology Part D Genomics Proteomics*, 31: e100607.

Zhang ZY, Li Z, Huang Q, Zhang XW, Ke L, Yan WY, Zhang LZ, Zeng ZJ, 2020a. Deltamethrin impairs honeybees (*Apis mellifera*) dancing communication. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 78(1): 117–123.

Zhang ZY, Wang DL, Chi ZJ, Liu XJ, Hong XY, 2008. Acute toxicity of organophosphorus and pyrethroid insecticides to *Bombyx mori*. *Journal of Economic Entomology*, 101(2): 360–364.

Zhao MX, Wang CN, Li TT, He SX, Wu H, Yao XY, 2013. Acute risk assessment of cumulative dietary exposure to organophosphorus pesticide among people in Jiangsu province. *Journal of Hygiene Research*, 42(5): 844–848. [赵敏娴, 王灿楠, 李亭亭, 乙楠楠, 何贤松, 吴惠, 姚欣雅, 2013. 江苏居民有机磷农药膳食累积暴露急性风险评估. 卫生研究, 42(5): 844–848.]

Zhao XP, Wu CX, Wang YH, Cang T, Chen LP, Yu RX, Wang Q, 2012. Assessment of toxicity risk of insecticides used in rice ecosystem on *Trichogramma japonicum*, an egg parasitoid of rice lepidopterans. *Journal of Economic Entomology*, 105(1): 92–101.

Zhao Y, Yun YL, Peng Y, 2020. Bacillus thuringiensis protein Vip3Aa does not harm the predator *Propylea japonica*: A toxicological, histopathological, biochemical and molecular analysis. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 192: e110292.

Zhao Y, Zhang S, Luo JY, Wang CY, Lü LM, Wang XP, Cui JJ, Lei CL, 2016. Bt proteins Cry1Ah and Cry2Ab do not affect cotton aphid *Aphis gossypii* and ladybeetle *Propylea japonica*. *Scientific Reports*, 6: e20368.

Zheng X, Zhong Y, Duan Y, Li C, Dang L, Guo Y, Ma E, 2006. Genetic variation and population structure of oriental migratory locust, *Locusta migratoria manilensis*, in China by allozyme, SSRP-PCR, and AFLP Markers. *Biochemical Genetics*, 44(7/8): 332–346.

Zhou PP, Zhao YF, Li JG, Wu GH, Zhang L, Liu Q, Fan S, Yang X, Li XW, Wu YN, 2012. Dietary exposure to persistent organochlorine pesticides in 2007 Chinese total diet study. *Environment International*, 42: 152–159.

Zhu JS, Lian ML, Wang J, Qin S, 2009. Toxicity and safety evaluation of five insecticides on egg parasitoid, *Trichogramma evanescens* Westwood. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 17(4): 715–720. [朱九生, 连梅力, 王静, 秦曙, 2009. 五种杀虫剂对卵寄生性天敌广赤眼蜂室内安全性评价. 中国生态农业学报, 17(4): 715–720.]