



## 杀菌剂暴露影响蜜蜂健康的研究进展

周珍珍<sup>1,2</sup>, 黄敏婕<sup>2</sup>, 王德前<sup>2\*</sup>, 董捷<sup>2\*</sup>

(1. 浙江师范大学生命科学学院, 浙江金华 321004; 2. 浙江省农业科学院畜牧兽医研究所, 杭州 310021)

**摘要:** 蜜蜂是自然界主要的传粉昆虫, 它们在农作物增产提质和维持生态系统平衡方面发挥十分重要的作用。近年来, 随着现代农业的快速发展, 杀菌剂这一类能够有效预防和控制农作物免受真菌等病原危害的低毒性农药在田间和设施农业中广泛应用, 但在使用过程中往往忽视了其对蜜蜂等非靶标生物生存和健康的威胁。本文综述了蜜蜂杀菌剂暴露及其亚致死效应的国内外相关研究进展, 内容主要涵盖杀菌剂的发展和作用机制、蜜蜂接触杀菌剂的途径、杀菌剂对蜜蜂的毒理效应及其与其他农药的协同效应, 分析了杀菌剂暴露对蜜蜂健康的负面影响及潜在威胁, 建议有关管理和研究单位进一步重视杀菌剂在农作物花期的使用规范, 尤其加强杀菌剂暴露对蜜蜂风险的科学评估, 为蜜蜂等野外传粉昆虫的生存健康提供保障。

**关键词:** 蜜蜂; 杀菌剂; 暴露风险评估; 毒理效应; 亚致死效应

中图分类号: Q965.9

文献标识码: A

### Research progress on the effects of fungicide exposure on honey bee

#### health

ZHOU Zhen-Zhen<sup>1,2</sup>, HUANG Min-Jie<sup>2</sup>, WANG De-Qian<sup>2\*</sup>, DONG Jie<sup>2\*</sup> (1. College of Life Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, Zhejiang Province, China; 2. Institute of Animal Husbandry and Veterinary Science, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China)

**Abstract:** Honey bees are the primary pollinators in nature, playing a crucial role in increasing crop yield, improving quality, and maintaining ecosystem balance. In recent years, with the rapid development of modern agriculture, fungicides, a class of low-toxicity pesticides effective in preventing and controlling fungal pathogens in crops, have been widely used in both field and facility agriculture. However, their potential threats to the survival and health of non-target organisms, such as honey bees, are often overlooked during application. This article reviewed the domestic and international research progress on honey bee exposure to fungicides and their sublethal effects. The content primarily covered the development and mechanisms of fungicides, the pathways through which honey bees were exposed to fungicides, the toxicological effects of fungicides on honey bees, and their synergistic effects with other pesticides. It analyzed the

基金项目: 浙江省农业科学院国际合作项目 (2023); 浙江省重点研发项目 (2022C02072); 杭州市重点研发项目 (2020ZDSJ0909)

作者简介: 周珍珍, 女, 硕士研究生, 研究方向为动物学, E-mail: zzhen0729@163.com

\*共同通讯作者 Author for correspondence: 王德前, 男, 博士, 研究员, 研究方向为特种经济动物研究, E-mail:

wangdq@zaas.ac.cn; 董捷, 女, 博士, 副研究员, 研究方向为蜜蜂保护与授粉应用, E-mail: dongj@zaas.ac.cn

收稿日期 Received: 2024-05-07; 修回日期 Revision received: 2024-11-27; 接受日期 Accepted: 2024-11-28

negative impacts and potential threats of fungicide exposure on honey bee health. The paper recommended that relevant management and research institutions place greater emphasis on the regulations governing fungicide use during crop flowering periods, particularly by strengthening scientific risk assessments of fungicide exposure to honey bees, in order to safeguard the survival and health of honey bees and other wild pollinators.

**Key words:** Honey bee; fungicide; exposure risk assessment; toxicological effect; sublethal effect

蜜蜂是植物传粉的重要媒介，在农作物增产提质和维持自然生态系统平衡中发挥重要作用（Hung *et al.*, 2018）。自 2006 年以来，蜂群消亡（Honey bee colony losses）现象在全世界多个国家爆发，引起美国、法国、瑞典、德国和加拿大等国家蜜蜂种群数量急剧下降，对农业生产和生态平衡造成严重威胁（Vanengelsdorp *et al.*, 2017; Bruckner *et al.*, 2023）。其中，各种类型农药（如杀虫剂、除草剂和杀菌剂）的广泛应用是导致蜂群消亡现象发生的主要原因之一（Hung and Yiin, 2023）。因此，如何避免蜜蜂受到农药危害，是蜂农和学者们共同关注的问题。

随着现代农业的快速发展，各类型农药的广泛应用成为保障农作物稳产的重要手段（Tudi *et al.*, 2021）。其中，杀菌剂是一类保护农作物免受各类病原微生物侵扰的化学制剂，通常用于预防和控制谷物、油料植物、水果和蔬菜等作物免受真菌病原危害（Lamichhane *et al.*, 2020）。近些年来，由于气候条件变化、真菌耐药性改变以及新型真菌入侵等因素的影响，田间杀菌剂的使用量与日俱增。在作物生长期，农民会在单个季节内频繁使用杀菌剂，甚至在作物开花传粉时也大量施用（Lehoczki Krsjak *et al.*, 2015）。目前杀菌剂已占全球农药市场的 35% 以上，预计未来的使用量还将继续增加（Zubrod *et al.*, 2019）。杀菌剂通常对蜜蜂等非靶标生物不具有急性致死毒性（Iwasaki and Hogendoorn, 2021），然而，其对蜜蜂行为和生理功能等方面的影响往往被忽视。因此，杀菌剂暴露对蜜蜂的健康是否构成威胁仍是值得深入研究的方向（Rondeau and Raine, 2022）。

本文通过对国内外科学文献数据库公开发表的与杀菌剂和蜜蜂相关的文献进行检索和查阅，从杀菌剂发展、蜜蜂接触杀菌剂的途径、杀菌剂暴露对蜜蜂的毒理效应及其与其他农药协同效应四个方面分析了杀菌剂对蜜蜂健康的影响，探讨杀菌剂暴露对蜜蜂的潜在安全风险，为优化田间杀菌剂使用规范，推动杀菌剂暴露对蜜蜂安全风险的科学评估，为更好地保护蜜蜂等传粉昆虫的健康提供参考。

## 1 杀菌剂

### 1.1 杀菌剂的种类及作用原理

杀菌剂是一类用于防治植物或种子真菌感染的化学制剂，在农业生产中用途广泛，常

用于保护水果、蔬菜、坚果等小型经济作物，也可直接应用于观赏植物、树木、大田作物和草坪草（Thind, 2017）。根据杀菌剂在植物病原体生物合成途径中的不同生化作用方式，杀菌剂耐药性行动委员会（FRAC）将其分为 14 种类型（FRAC, 2024）。其中，甾醇生物合成抑制剂（Sterol biosynthesis inhibitors, SBIs）、化学多位点抑制剂（Chemical multi-site inhibitors）、喹啉氧化抑制剂（Quinol oxydation inhibitors, QoIs）和琥珀酸脱氢酶抑制剂（Succinate dehydrogenase inhibitor, SDHIs）这 4 种类型的杀菌剂销售额占全球杀菌剂市场的 74.2%，处于主导地位（Hermann and Stenzel, 2019）。最常见的是 SBI 杀菌剂，主要包括去甲基化抑制剂、胺类、3-酮还原酶 C4-去甲基化抑制剂以及角鲨烯环氧化酶抑制剂四种类型，通过抑制病原真菌中的特定甾醇发挥抗真菌作用（Kuck *et al.*, 2012）。多位点杀菌剂具有多个生化作用位点，能够有效对抗多种真菌疾病，但也因此会对土壤中其他微生物产生负面影响，从而对环境造成伤害（Yang *et al.*, 2011）。QoI 杀菌剂是通过结合细胞色素 bc 1 复合体的 Qo 位点，阻断电子转移并停止 ATP 合成，进而抑制真菌线粒体的呼吸作用来达到抑菌效果（Fernández-Ortuño *et al.*, 2008），但由于这类杀菌剂高度特异性的作用方式，使得许多目标病原体对其产生了耐药性。SDHI 杀菌剂是通过阻断线粒体复合体 II 中的泛素结合位点，特异性抑制真菌呼吸作用（Liang *et al.*, 2023）。与 QoI 杀菌剂相同，SDHI 杀菌剂同样会导致病原体产生耐药性。

杀菌剂的作用机制主要是通过影响真菌细胞结构和功能以及抑制真菌呼吸作用达到抑菌或杀菌的效果，此外，杀菌剂还能抑制真菌核酸和蛋白质的合成、阻碍有丝分裂和细胞分裂，间接对细胞代谢物质合成产生影响（Hermann and Stenzel, 2019）。随着杀菌剂广泛使用，其在田间残留不断累积是否对蜜蜂行为、生长繁殖、免疫和学习记忆产生影响，已逐渐成为人们关注的热点问题（熊曼琼等, 2022）。

## 1.2 杀菌剂对蜜蜂的安全性评价

杀菌剂作为一类商用农药，必须保证其使用安全性，欧洲和地中海植物保护组织于 2010 年提出了农药对蜜蜂新的风险评估体系（EPPO, 2010）：根据受试农药的推荐田间使用量 AR ( $\text{g}/\text{hm}^2$ ) 与其对蜜蜂的试验急性毒性所得值  $\text{LD}_{50}$  ( $\mu\text{g}$  (a.i.)  $\cdot$  蜂<sup>-1</sup>) 的比值，即风险商 ( $\text{HQ} = \text{AR}/\text{LD}_{50}$ ) 来评价该农药使用对蜜蜂的风险值。当  $\text{HQ} < 50$  时，农药对蜜蜂为低风险； $\text{HQ}$  在  $50 \sim 2\,500$  时为中风险； $\text{HQ} > 2\,500$  时为高风险（左晓霞等, 2012）。随之其他国家也陆续提出了相应的安全使用标准，欧盟是通过农药最大使用量与致死中量的比值来表征风险的大小。美国环境保护局通过检测农药对蜜蜂急性口服或接触  $\text{LD}_{50}$  的大小来评价农药对蜜蜂的安全性。2016 年我国在 EPPO 制定的风险评估流程的基础上颁布了

《NY/T 2882.4-2016 农药登记环境风险评估指南第 4 部分：蜜蜂》，为我国评估农药对蜜蜂的风险提供了依据。

## 2 蜜蜂接触杀菌剂的途径

### 2.1 杀菌剂暴露途径

蜜蜂接触农药残留物与农药的使用方式、使用时间、农药相互作用、农药理化性质和在环境中的持久性密切相关 (Boyle *et al.*, 2019)。蜜蜂可以通过口服、接触或通过吸入空气中的挥发颗粒而暴露于杀菌剂中。

杀菌剂的施用方式主要有 3 种，一是作为叶面喷雾剂使用，二是作为土壤喷雾剂或颗粒施用于土壤中，三是作为种子包衣作用于作物。喷雾式杀菌剂喷洒到作物的同时，会与附近觅食或正在飞行的蜜蜂接触；土壤喷雾式杀菌剂会污染附近的野花、土壤和水源 (Zubrod *et al.*, 2019)；而加入在种子包衣中的杀菌剂大多数具有高度水溶性，可以被作物植株吸收，并在植物生长过程中通过茎、叶、花粉或花蜜以及灌溉水之间进行转运，最终被蜜蜂吸食 (Sanchez-Bayo and Goka, 2016)。此外，作为种子包衣的杀菌剂可以在植物组织中以低浓度存在数月，在土壤中甚至可以存在多年 (Lewis *et al.*, 2016)。杀菌剂在蜜蜂采集环境中不断累积，蜜蜂则通过采集花蜜、池塘水、露水或潮湿土壤的地表水，长期暴露在杀菌剂污染的环境中 (Cutler *et al.*, 2014)。

### 2.2 杀菌剂的残留

蜜蜂将花蜜和水带回蜂巢的同时，杀菌剂也被带入蜂巢，在蜂蜜、蜂粮、花粉和蜂蜡中均检测到杀菌剂及其代谢物的残留 (Dong *et al.*, 2023)。Wiest 等 (2011) 采用液相色谱串联质谱法 (LC-MS/MS) 和气相色谱与飞行时间质谱联用法 (GC-TOF-MS) 建立了蜜蜂、蜂蜜及花粉中 80 种环境污染物的残留分析方法，检测发现杀菌剂多菌灵在蜜蜂、蜂蜜及花粉 3 种基质中均具有较高的检出率，分别达到 64%、44% 及 34%。Daniele 等 (2018) 分析了蜜蜂、蜂粮及巢脾中一共 488 组样品中的农药残留情况，发现啉酰菌胺在 3 类基质中均具有较高的检出率。目前，大量研究表明杀菌剂及其残留在蜜蜂相关基质的检出水平已经超过杀虫剂，Pohorecka 等 (2017) 通过分析 123 份蜂粮样品，发现 60.2% 的蜂粮受到污染，而污染的蜂粮中杀菌剂占比最大，达到 45.3%。Bokšová 等 (2021) 也报道了类似结果，通过分析 3 年内 25 个蜜蜂养殖地的农药残留发现，每年杀菌剂残留量的检出率都是最高的，这说明杀菌剂在蜂群内残留的时间可能远超花期。

## 3 杀菌剂对蜜蜂健康的影响

### 3.1 杀菌剂对蜜蜂急性致死毒性

近年来，由于蜜蜂长期暴露在杀菌剂环境中，在蜜蜂体内、蜂巢中检测到大量杀菌剂残留，其对蜜蜂的急性致死毒性引起业界广泛关注。杀菌剂对蜜蜂的急性毒性是指在单剂量试验物质施用 48 h 内蜜蜂的中毒症状及死亡数，包括经口和接触毒性（童舟，2022）。根据我国现行的《化学农药环境安全评价试验准则 第 10 部分：蜜蜂急性毒性试验》中的急性毒性等级划分：48 h 内 LD<sub>50</sub> 大于 11 μg (a.i.)·蜂<sup>-1</sup>，则认为是低毒，LD<sub>50</sub> 在 2 ~ 11 μg (a.i.)·蜂<sup>-1</sup> 之间，则认为是中毒，小于 2 μg (a.i.)·蜂<sup>-1</sup> 认为是高毒。同时，我国农药对蜜蜂的急性毒性浓度 LC<sub>50</sub> 值的大小划分为 4 个等级：LC<sub>50</sub> ≤ 0.5 mg/L 为剧毒，0.5 mg/L < LC<sub>50</sub> ≤ 20 mg/L 为高毒，20 mg/L < LC<sub>50</sub> ≤ 200 mg/L 为中毒，LC<sub>50</sub> > 200 mg/L 为低毒。且当 LC<sub>50</sub> > 2 000 mg/L 时表示该农药对蜜蜂无影响。目前不同类型杀菌剂对蜜蜂的急性毒性已取得一定的进展（表 1）。

表 1 不同种类杀菌剂 48 h 内对蜜蜂的急性致死毒性

Table 1 Acute lethal toxicity of different fungicides to bees within 48 h

杀菌剂及有效成分含量 (%) Fungicides and technical grade	实验对象 Experimental subject	LD <sub>50</sub> (μg (a.i.) /蜂)	LC <sub>50</sub> (mg/L)	风险等级 Risk grade	参考文献 References
25%苯醚甲环唑 Difenoconazole	意大利蜜蜂 <i>Apis mellifera ligustica</i>	27.36		低风险性 Low risk	贾变桃等, 2015
30%氟菌唑 Triflumizole	意大利蜜蜂 <i>Apis mellifera ligustica</i>	>100		低风险性 Low risk	贾变桃等, 2015
50%烯唑醇 Diniconazole	意大利蜜蜂 <i>Apis mellifera ligustica</i>		3 901.8	低风险性 Low risk	贾变桃等, 2015
甾醇生物合成抑制剂 Sterol biosynthesis inhibitors	97%丙硫菌唑 Prothioconazole			低风险性 Low risk	金磊, 2020
	97%戊唑醇 Tebuconazole			中风险性 Moderate risk	金磊, 2020
	12.5%腈菌唑 Myclobutanil	2.154		中风险性 Moderate risk	王雅珺等, 2017
	45%丙环唑 Propiconazole	3.8		中风险性 Moderate risk	贾变桃等, 2015
	98%环酰胺 Fenhexamid	9.12		中风险性 Moderate risk	杨石有等, 2022
	10%氟硅唑	1.55		高风险性	贾变桃等, 2015

	Flusilazole	<i>Apis mellifera ligustica</i> 意大利蜜蜂		High risk	
	50%氟环唑 Epoxiconazole	<i>Apis mellifera ligustica</i> 中华蜜蜂	0.858	高风险性 High risk	张勇等, 2016
	15%咪鲜胺 Prochloraz	<i>Apis cerana cerana</i> 中华蜜蜂	1.817	高风险性 High risk	王雅璐等, 2017
	10%氧霜唑 Cyazofamid	<i>Apis cerana cerana</i> 中华蜜蜂	> 11.0	低风险性 Low risk	王雅璐等, 2017
	15%吡唑醚菌酯 Pyraclostrobin	<i>Apis mellifera ligustica</i> 意大利蜜蜂	> 100	低风险性 Low risk	谭丽超等, 2021
喹啉氧化抑制剂 Quinol oxydation inhibitors	22.5%啉氧菌酯 Picoxystrobin	<i>Apis mellifera ligustica</i> 意大利蜜蜂	> 100	低风险性 Low risk	谭丽超等, 2021
	25%啉菌酯 Azoxystrobin	<i>Apis mellifera ligustica</i> 意大利蜜蜂	> 100	低风险性 Low risk	谭丽超等, 2021
	50%醚菌酯 Kresoxim-methyl	<i>Apis mellifera ligustica</i> 意大利蜜蜂	> 100	低风险性 Low risk	谭丽超等, 2021
琥珀酸脱氢酶抑制剂 Succinate dehydrogenase inhibitor	50%啉酰菌胺 Boscalid	中华蜜蜂 <i>Apis cerana cerana</i>	> 11.0	低风险性 Low risk	王雅璐等, 2017
	29%石硫合剂 Lime sulfur	意大利蜜蜂 <i>Apis mellifera ligustica</i>	> 100	低风险性 Low risk	贾变桃等, 2015
	80%丙森锌 Propineb	意大利蜜蜂 <i>Apis mellifera ligustica</i>	25.64	低风险性 Low risk	贾变桃等, 2015
多位点抑制剂 Multi-site inhibitors	48.9%克菌丹 Captan	蓝果园蜂 <i>Osmia lignaria</i>	100.45	低风险性 Low risk	Ladurner <i>et al.</i> , 2005
	80%代森锰锌 Mancozeb	中华蜜蜂 <i>Apis cerana cerana</i>	> 11.0	低风险性 Low risk	王雅璐等, 2017
	75%百菌清 Chlorothalonil	意大利蜜蜂 <i>Apis mellifera ligustica</i>	> 2 000	低风险性 Low risk	苍涛等, 2012
细胞壁生物合成抑制剂 Cell wall biosynthesis inhibitors	40%烯酰吗啉 Dimethomorph	意大利蜜蜂 <i>Apis mellifera ligustica</i>	> 100	低风险性 Low risk	贾变桃等, 2015
	96%噻呋酰胺 Thifluzamide	意大利蜜蜂 <i>Apis mellifera ligustica</i>	6.51	中风险性 Moderate risk	杨石有等, 2022
信号转导抑制剂 Signal	50%腐霉利 Procymidon	意大利蜜蜂 <i>Apis mellifera ligustica</i>	> 11.0	低风险性 Low risk	王雅璐等, 2017

transduction inhibitors	50%异菌脲 Iprodione	意大利蜜蜂 <i>Apis mellifera ligustica</i>	>2 000	低风险性 Low risk	苍涛等, 2012
有丝分裂和细胞分裂抑制剂	75%多菌灵 Carbendazim	意大利蜜蜂 <i>Apis mellifera ligustica</i>	>2 000	低风险性 Low risk	苍涛等, 2012
Mitosis and cell division inhibitors	80%甲基硫菌灵 Thiophanate-Methyl	意大利蜜蜂 <i>Apis mellifera ligustica</i>	>100	低风险性 Low risk	贾变桃等, 2015
	97%氟吡菌胺 Fluopicolide	意大利蜜蜂 <i>Apis mellifera ligustica</i>	>100	低风险性 Low risk	林璉等, 2016
氨基酸和蛋白质合成抑制剂	2%春雷霉素 Kasugamycin	意大利蜜蜂 <i>Apis mellifera ligustica</i>	843.95	低风险性 Low risk	贾变桃等, 2015
Amino acids and protein synthesis inhibitors	80%啮霉胺 Pyrimethanil	意大利蜜蜂 <i>Apis mellifera ligustica</i>	2 370.33	低风险性 Low risk	贾变桃等, 2015
细胞壁内黑色素合成抑制剂	80%三环唑 Tricyclazole	意大利蜜蜂 <i>Apis mellifera ligustica</i>	>100	低风险性 Low risk	贾变桃等, 2015
Melanin synthesis inhibitors					

值得注意的是, 虽然杀菌剂在 48 h 内对蜜蜂的急性毒性普遍较低, 但是杀菌剂对蜜蜂的急性毒性具有迟发性, 其毒性可能在超过 10 d 后才会出现较高水平, 这种经长时间接触而在生物体内积累的毒性称为“累积毒性” (Simon-Delso *et al.*, 2018)。Ladurner 等 (2005) 在啮酰菌胺暴露实验中将时间从标准的 10 d 延长至 33 d 后, 发现杀菌剂在 24 h 和 48 h 内对西方蜜蜂无明显的急性毒性, 但在 10 ~ 17 d 时出现累积毒性, 且其急性致死浓度  $LC_{50}$  随着暴露时间的延长而显著降低。在实际杀菌剂使用标准中, 推荐田间施用量仅评估了不超过 72 h 内杀菌剂对蜜蜂的急性致死毒性, 而忽视了杀菌剂的延迟毒性, 这说明大量杀菌剂的实际毒性可能都被低估了 (Almasri *et al.*, 2021)。

### 3.2 杀菌剂对蜜蜂的亚致死效应

杀菌剂对蜜蜂的亚致死效应是指在亚致死剂量  $X \cdot LC_{50}$  (如  $0.1 LC_{50}$ 、 $0.5 LC_{50}$ ) 条件下处理蜜蜂后, 引起蜜蜂生理和行为等方面的异常变化 (全林发等, 2016), 包括卫生和觅食行为改变、行动和导航能力受损、沟通障碍、免疫功能降低、繁殖能力降低等 (Wu-Smart and Spivak, 2016)。杀菌剂对蜜蜂的亚致死效应会削弱蜜蜂的健康, 并随着时间的推移导致蜂群灭亡 (Long and Krupke, 2016)。

#### 3.2.1 杀菌剂对蜜蜂行为的影响

杀菌剂对蜜蜂行为的亚致死效应包括学习记忆能力下降、觅食能力下降、飞行能力下降等 (张志伟等, 2024)。Decourtye 等 (2005) 通过观测蜜蜂的喙延伸反射 (Proboscis

extension reflex, PER) 发现, 在不同浓度咪鲜胺处理下的西方蜜蜂 *Apis mellifera* 对糖水反应的灵敏度与对照组无差异, 但其学习记忆能力下降。DesJardins 等 (2021) 使用高浓度杀菌剂混合剂 Pristine® (25.2%啶酰菌胺和 12.8%吡唑醚菌酯) 处理后的西方蜜蜂的觅食能力降低。同时, 杀菌剂啶酰菌胺可使西方蜜蜂振翅时间延长、振动次数减少, 导致飞行和采集能力下降 (Liao *et al.*, 2019)。甚至有些杀菌剂会使蜜蜂做出异常行为, 使用丙环唑喂养西方蜜蜂会使其出现过度兴奋和腹部弯曲等异常行为, 但随着处理时间延长, 症状会逐渐消失 (Tosi and Nieh, 2019)。

除室内试验外, 大量的田间试验也证实了杀菌剂对蜜蜂访花、摄食、归巢等行为具有负面影响。Tschoeke 等 (2019) 将甲基硫菌灵和百菌清的田间使用次数增加, 发现西方蜜蜂访花频率会随之下降, 而施用啶菌酯、腈苯唑和丙硫菌唑后的作物, 会让蜜蜂出现不同程度的驱避行为。Rovral 4F (异丙二酮) 和 Pristine® 杀菌剂的混合剂甚至会使蓝果园蜂和苜蓿切叶蜂的摄食行为和巢识别能力中断 (Artz and Pitts-Singer, 2015)。蜜蜂为了应对复杂的外界环境, 形成了完善的劳动分工体系, 包括筑巢、访花、采集、舞蹈、防御、卫生、学习和记忆等行为, 对蜂群的发展至关重要, 而目前因杀菌剂引起的蜜蜂行为异常现象还有待深入研究 (李振芳等, 2019)。

### 3.2.2 杀菌剂对蜜蜂幼虫和蜂王生理的影响

采集蜂通过将采集的花粉和花蜜转化成蜂粮来喂食蜂巢中的幼虫和蜂王, 而携带杀菌剂残留的蜂粮会对蜂巢中未成熟期蜜蜂的寿命、发育历期、化蛹率和羽化率等产生负面影响 (段辛乐等, 2020), 已有研究表明杀菌剂克菌丹、百菌清、异菌脲、吡虫酯会使群居蜜蜂和独居蜜蜂的幼虫死亡率增加 (Fisher *et al.*, 2017)。Dai 等 (2018) 使用百菌清处理西方蜜蜂幼虫, 无可见效应浓度 (NOAEC) 为 10 mg/L; 杀菌剂多菌灵胁迫会导致西方蜜蜂幼虫的保幼激素滴度上升, 蜕皮激素滴度显著下降, 进而影响幼虫生长发育, 造成幼虫化蛹发育迟缓 (王康等, 2017)。此外, 蜂巢中的杀菌剂残留也会对蜂王的寿命、产卵量、蜂群控制力等方面造成威胁。Traynor 等 (2021) 将杀菌剂丙环唑作用于西方蜜蜂幼虫和蜂王, 各处理组的蜂王产卵量下降, 且随着处理浓度的升高, 蜜蜂的存活率和寿命显著下降。Walsh 等 (2020) 调查证明蜂蜡中的百菌清残留可使西方蜜蜂蜂王下颚腺分泌的信息素下降, 导致其对工蜂的吸引力和蜂群控制力下降, 最终会阻碍蜂群的长期信息交流。由此可知, 杀菌剂残留对蜜蜂幼虫和蜂王的亚致死效应不容忽视。

### 3.2.3 杀菌剂亚致死效应的作用机制

关于杀菌剂残留导致的亚致死效应, 从机制上已经有一定的研究进展, Yoder 等



(2017)认为杀菌剂在阻碍植物病原真菌的同时也会对蜂群内的有益真菌造成负面影响,有益真菌有助于将花粉转化为蜂粮,并且还能够抑制白垩病、黄曲霉病等病原菌,蜂箱中的有益真菌被杀菌剂破坏后会对蜜蜂造成不利影响。Avenot等(2010)认为杀菌剂在破坏植物真菌呼吸链的同时也会破坏蜜蜂的呼吸链,导致供给蜜蜂各种活动的能量不足,从而引发各种亚致死效应。Huang等(2023)将噻菌酯、吡唑醚菌酯和啶酰菌胺3种常用杀菌剂暴露于中华蜜蜂后,发现其中肠中甘油磷脂、丙氨酸、天冬氨酸和谷氨酸代谢受到影响,肠道内的有益菌属乳酸杆菌的相对组成减少,其微生物平衡遭到破坏,说明杀菌剂可能会通过影响蜜蜂体内微生物群,进而影响它们的免疫系统(Jin *et al.*, 2018)。目前,杀菌剂导致蜜蜂出现的多种亚致死效应,其具体的作用机理仍然有待探索。

## 4 杀菌剂与其他农药的协同效应

目前,在蜜蜂周围环境中如花粉、花蜜、蜂蜜、蜂蜡、土壤中均检测出了多种杀菌剂和其他农药的混合物(David *et al.*, 2016)。其中,Silva等(2019)在欧洲农田的土壤样本中观察到总共166种不同的农药组合。甚至在“蜜蜂友好型”观赏植物的叶子中也检测到多达10种不同杀虫剂和杀菌剂的混合物(Lentola *et al.*, 2017)。这些研究表明,野生蜜蜂极有可能在其整个生命周期中长期接触杀菌剂、杀虫剂、除草剂等混合物(陈亚南等, 2021)。对于栖息在集中管理的农业景观中的蜜蜂来说,接触多种农药混合物的情况甚至更加频繁(Willis *et al.*, 2019)。

虽然多数杀菌剂单独使用对蜜蜂低毒或无毒,但杀菌剂可以通过影响蜜蜂解毒酶活性、能量代谢等正常的生理代谢,从而提高其他农药对蜜蜂毒性,其中杀菌剂对杀虫剂的增效作用的研究较多,二者联合暴露后会提高杀虫剂的毒性,导致蜜蜂死亡率增加(Biddinger *et al.*, 2013)。最为典型的是,SBI杀菌剂可以通过抑制细胞色素P450单加氧酶的活性来提高新烟碱类和拟除虫菊酯类杀虫剂的毒性(Johnson *et al.*, 2013)。在实验室条件下也证实了新烟碱类杀虫剂与广泛使用的杀菌剂啶酰菌胺联合使用对蜜蜂的急性毒性增加了一倍(Tsvetkov *et al.*, 2017)。

多种农药混合使用不仅会使急性毒性增强,还会加强农药对蜜蜂的生理危害(韩文素等, 2020)。Almasri等(2020)将杀虫剂吡虫啉、杀菌剂异丙康唑和除草剂草甘膦3种农药单独和联合饲喂西方蜜蜂,结果表明饲喂混合农药的蜜蜂存活率显著低于饲喂单一农药的蜜蜂。杀菌剂吡氯菌酯和杀虫剂氟虫腈单独和联合使用都会使哺育蜂的下颌腺分泌细胞高度降低,下颌腺储液体积减小,且二者联合使用的影响大于单独暴露的影响,并存在累

加效应 (Zaluski *et al.*, 2017)。多项研究均证明了在多种农药联合作用下扩大了对蜜蜂的不利影响。

总的来说,蜜蜂接触各种混合农药的情况成为常态,人们不能单一地关注某一种杀菌剂,需要综合考虑农药的联合影响。且由于农药种类繁多,联合作用的农药有许多可能的组合,这使得选择用于测定相互作用的相关农药组合极具挑战性。

## 5 展望

在农业生产中,杀菌剂的广泛使用可以有效预防和控制植物病害,是农作物稳产高产的重要保障 (He *et al.*, 2021),然而,很多研究表明杀菌剂对微生物、植物、无脊椎动物和脊椎动物都有直接或间接的负面影响,甚至已经通过水源影响到水生环境 (Zubrod *et al.*, 2019)。故此,如何平衡农业生产和生态环境保护的关系,减少杀菌剂的负面作用已成为人们关注的焦点问题。本文重点关注杀菌剂暴露对蜜蜂的影响,大量调查已证实蜜蜂等传粉昆虫正处于杀菌剂的高暴露风险中 (Belsky and Joshi, 2020),各类杀菌剂对蜜蜂虽不具有急性致死毒性,但其对蜜蜂的慢性毒性和亚致死效应仍需引起重视。目前,全球范围内各种类型的杀菌剂市场占有率正逐年增加 (Zhang, 2018),因此,研究杀菌剂暴露对蜜蜂生长发育、行为和生理的影响是长期的重要课题。加强杀菌剂对蜜蜂安全风险评估及其亚致死效应相关机理研究,有利于科学指导农作物病害防控用药策略的制定,降低杀菌剂对蜜蜂健康的负面作用,保障蜜蜂等传粉昆虫的福利,促进我国养蜂业和农业的健康可持续发展。

### 参考文献 (References)

- Almasri H, Tavares DA, Pioz M, *et al.* Mixtures of an insecticide, a fungicide and a herbicide induce high toxicities and systemic physiological disturbances in winter *Apis mellifera* honey bees [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 203: 111013.
- Almasri H, Tavares DA, Tehamitchian S, *et al.* Toxicological status changes the susceptibility of the honey bee *Apis mellifera* to a single fungicidal spray application [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28: 42807-2820.
- Artz DR, Pitts-Singer TL. Effects of fungicide and adjuvant sprays on nesting behavior in two managed solitary bees, *Osmia lignaria* and *Megachile rotundata* [J]. *PLoS ONE*, 2015, 10 (8): e0135688.
- Avenot HF, Michailides TJ. Progress in understanding molecular mechanisms and evolution of resistance to succinate dehydrogenase inhibiting (SDHI) fungicides in phytopathogenic fungi [J]. *Crop Protection*, 2010, 29 (7): 643-651.
- Belsky J, Joshi NK. Effects of fungicide and herbicide chemical exposure on *Apis* and non-*Apis* bees in agricultural landscape [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2020, 8: 522888.
- Biddinger DJ, Robertson JL, Mullin C, *et al.* Comparative toxicities and synergism of apple orchard pesticides to *Apis mellifera* (L.) and *Osmia cornifrons* (Radoszkowski) [J]. *PLoS ONE*, 2013, 8 (9): e72587.
- Bokšová A, Kazda J, Stejskalová M, *et al.* Findings of herbicide and fungicide residues in bee bread [J]. *Plant, Soil and Environment*, 2021, 67 (6): 343-352.
- Boyle NK, Pitts-Singer TL, Abbott J, *et al.* Workshop on pesticide exposure assessment paradigm for non-*Apis* bees: Foundation and summaries [J]. *Environmental Entomology*, 2019, 48 (1): 4-11.

- Bruckner S, Wilson M, Aurell D, *et al.* A national survey of managed honey bee colony losses in the USA: Results from the bee informed partnership for 2017-18, 2018-19, and 2019-20 [J]. *Journal of Apicultural Research*, 2023, 62 (3): 429-443.
- Cang T, Wang YH, Yu RX, *et al.* The acute toxicity and risk assessment of 25 pesticides used in nectar plant to *Apis mellifera* L. [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2012, 24 (5): 853-859. [苍涛, 王彦华, 俞瑞鲜, 等. 蜜源植物常用农药对蜜蜂急性毒性及风险评估 [J]. 浙江农业学报, 2012, 24 (5): 853-859]
- Chen YN, Wu YQ, Zheng HQ, *et al.* Research advances in the effects of herbicides on honey bee health [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2021, 43 (5): 1162-1167. [陈亚南, 吴雨祺, 郑火青, 等. 除草剂对蜜蜂健康影响的研究进展 [J]. 环境昆虫学报, 2021, 43 (5): 1162-1167]
- Cutler GC, Scott Dupree CD, Drexler DM. Honey bees, neonicotinoids and bee incident reports: the Canadian situation [J]. *Pest Management Science*, 2014, 70 (5): 779-783.
- Dai PL, Jack CJ, Mortensen AN, *et al.* The impacts of chlorothalonil and diflubenzuron on *Apis mellifera* L. larvae reared *in vitro* [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 164: 283-288.
- Daniele G, Giroud B, Jabot C, *et al.* Exposure assessment of honeybees through study of hive matrices: Analysis of selected pesticide residues in honeybees, beebread, and beeswax from French beehives by LC-MS/MS [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25: 6145-6153.
- David A, Botias C, Abdul-Sada A, *et al.* Widespread contamination of wildflower and bee-collected pollen with complex mixtures of neonicotinoids and fungicides commonly applied to crops [J]. *Environment International*, 2016, 88: 169-178.
- Decourtye A, Devillers J, Genecque E, *et al.* Comparative sublethal toxicity of nine pesticides on olfactory learning performances of the honeybee *Apis mellifera* [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2005, 48 (2): 242-250.
- DesJardins NS, Fisher II A, Ozturk C, *et al.* A common fungicide, Pristine<sup>®</sup>, impairs olfactory associative learning performance in honey bees (*Apis mellifera*) [J]. *Environmental Pollution*, 2021, 288: 117720.
- Dong J, Huang M, Guo H, *et al.* Ternary mixture of azoxystrobin, boscalid and pyraclostrobin disrupts the gut microbiota and metabolic balance of honeybees (*Apis cerana cerana*) [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2023, 24 (6): 5354.
- Duan XL, Xiong MQ, Liu WB, *et al.* Effects of three fungicides on the activities of protective enzymes and detoxifying enzymes in *Apis mellifera* [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29 (11): 74-82. [段辛乐, 熊曼琼, 刘文斌, 等. 苜蓿花期三种杀菌剂对意大利蜜蜂保护酶和解毒酶的影响 [J]. 草业学报, 2020, 29 (11): 74-82]
- EPPO. PP 3/10 (3): Chapter 10: Honeybees [J]. *Bulletin OEPP/EPPO Bulletin*, 2010, 40 (3): 323-331.
- Fernández-Ortuño D, Torés JA, De Vicente A, *et al.* Mechanisms of resistance to QoI fungicides in phytopathogenic fungi [J]. *International Microbiology*, 2008, 11 (1): 1.
- Fisher A, Coleman C, Hoffmann C, *et al.* The synergistic effects of almond protection fungicides on honey bee (Hymenoptera: Apidae) forager survival [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2017, 110 (3): 802-808.
- Fungicide Resistance Action Committee (FRAC). FRAC Code List 2024: Fungal control agents sorted by cross resistance pattern and mode of action (including FRAC Code numbering) [EB/OL]. 2024.
- Han WS, Yuan ZH, Gao JL, *et al.* Survival risk analysis of Chinese honeybee worker (*Apis cerana cerana*) exposed to thiamethoxam and its mixtures [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2020, 42 (3): 746-752. [韩文素, 袁忠华, 高景林, 等. 常用杀虫剂噻虫嗪及其4种混配制剂对中华蜜蜂的生存风险分析 [J]. 环境昆虫学报, 2020, 42 (3): 746-752]
- He D, He M, Amalin DM, *et al.* Biological control of plant diseases: An evolutionary and eco-economic consideration [J]. *Pathogens*, 2021, 10 (10): 1311.
- Hermann D, Stenzel K. FRAC mode-of-action classification and resistance risk of fungicides [J]. *Modern Crop Protection Compounds*, 2019, 2: 589-608.
- Huang M, Dong J, Yang S, *et al.* Ecotoxicological effects of common fungicides on the eastern honeybee *Apis cerana cerana* (Hymenoptera) [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 868: 161637.
- Hung C, Yiin L. Availability of using honeybees as bioindicators of pesticide exposure in the vicinity of agricultural environments in Taiwan [J]. *Toxics*, 2023, 11 (8): 703.

- Hung KJ, Kingston JM, Albrecht M, *et al.* The worldwide importance of honey bees as pollinators in natural habitats [J]. *Proceedings of the Royal Society B-biological Sciences*, 2018, 285 (1870): 20172140.
- Iwasaki JM, Hogendoorn K. Non-insecticide pesticide impacts on bees: A review of methods and reported outcomes [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2021, 314: 107423.
- Jia BT, Zou YF, Dong FS, *et al.* Acute toxicity and safety evaluation of several fungicides to *Apis mellifera* L. [J]. *Apiculture of China*, 2015, 66 (4): 13-16. [贾变桃, 邹亚飞, 董丰收, 等. 几种杀菌剂对意大利蜜蜂的安全性评价 [J]. *中国蜂业*, 2015, 66 (4): 13-16]
- Jin CY, Xia JZ, Wu SS, *et al.* Insights into a possible influence on gut microbiota and intestinal barrier function during chronic exposure of mice to imazalil [J]. *Toxicological Sciences*, 2018, 162 (1): 113-123.
- Jin L. Effects of Six Kinds of Fungicides Commonly Used in Rice Fields on the Toxicity and Growth of *Trichogramma chilonis* [D]. Hangzhou: Zhejiang Agriculture and Forestry University Master Thesis, 2020. [金磊. 稻田常用六种杀菌剂对螟黄赤眼蜂 (*Trichogramma chilonis*) 的毒性和生长发育的影响 [D]. 杭州: 浙江农林大学硕士学位论文, 2020]
- Johnson RM, Lizette D, Siegfried BD, *et al.* Acaricide, fungicide and drug interactions in honey bees (*Apis mellifera*) [J]. *PLoS ONE*, 2013, 8 (1): e54092.
- Kuck KH, Stenzel K, Vors JP. Sterol biosynthesis inhibitors [J]. *Modern Crop Protection Compounds*, 2012, 2: 761-805.
- Ladurner E, Bosch J, Kemp WP, *et al.* Assessing delayed and acute toxicity of five formulated fungicides to *Osmia lignaria* Say and *Apis mellifera* [J]. *Apidologie*, 2005, 36 (3): 449-460.
- Lamichhane JR, You MP, Laudinot V, *et al.* Revisiting sustainability of fungicide seed treatments for field crops [J]. *Plant Disease*, 2020, 104 (3): 610-623.
- Lehoczki Krsjak S, Varga M, Mesterházy Á. Distribution of prothioconazole and tebuconazole between wheat ears and flag leaves following fungicide spraying with different nozzle types at flowering [J]. *Pest Management Science*, 2015, 71 (1): 105-113.
- Lentola A, David A, Abdul-Sada A, *et al.* Ornamental plants on sale to the public are a significant source of pesticide residues with implications for the health of pollinating insects [J]. *Environmental Pollution*, 2017, 228: 297-304.
- Lewis KA, Tzilivakis J, Warner DJ, *et al.* An international database for pesticide risk assessments and management [J]. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2016, 22 (4): 1050-1064.
- Li ZF, Liu ZG, Xu BH, *et al.* Advances in behavioral researches of honeybee [J]. *Journal of Bee*, 2019, 39 (10): 5-11. [李振芳, 刘振国, 胥保华, 等. 蜜蜂行为学研究概述 [J]. *蜜蜂杂志*, 2019, 39 (10): 5-11]
- Liang Z, Rong Z, Cong H, *et al.* Design, synthesis and antifungal activity of novel pyrazole amides derivatives [J]. *Journal of Molecular Structure*, 2023, 1277: 134881.
- Liao LH, Wu WY, Dad A, *et al.* Fungicide suppression of flight performance in the honeybee (*Apis mellifera*) and its amelioration by quercetin [J]. *Proceedings of the Royal Society B-Biological Sciences*, 2019, 286 (1917): 20192041.
- Lin J, Gao Y, Mu W, *et al.* Acute toxicity of fluopicolide to 9 kinds of environmental organisms and its bioaccumulation in zebrafish [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2016, 11 (6): 296-305. [林璉, 高云, 慕卫, 等. 新型杀菌剂氟吡菌胺对9种环境生物急性毒性及其在斑马鱼体内的生物富集 [J]. *生态毒理学报*, 2016, 11 (6): 296-305]
- Long EY, Krupke CH. Non-cultivated plants present a season-long route of pesticide exposure for honey bees [J]. *Nature Communications*, 2016, 7 (1): 11629.
- Pohorecka K, Szczęsna T, Witek M, *et al.* The exposure of honey bees to pesticide residues in the hive environment with regard to winter colony losses [J]. *Journal of Apicultural Science*, 2017, 61 (1): 105-125.
- Quan LF, Zhang HJ, Sun LN, *et al.* Research advances in sublethal effect of pesticide [J]. *Journal of Agriculture*, 2016, 6 (5): 33-38. [全林发, 张怀江, 孙丽娜, 等. 杀虫剂对害虫的亚致死效应研究进展 [J]. *农学学报*, 2016, 6 (5): 33-38]
- Rondeau S, Raine NE. Fungicides and bees: A review of exposure and risk [J]. *Environment International*, 2022, 165: 107311.
- Sanchez-Bayo F, Goka K. Impacts of pesticides on honey bees [J]. *Beekeeping and Bee Conservation-Advances in Research*, 2016, 4: 77-97.
- Silva V, Mol H, Zomer P, *et al.* Pesticide residues in European agricultural soils-a hidden reality unfolded [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 653: 1532-1545.

- Simon-Delso N, San MG, Bruneau E, *et al.* Time-to-death approach to reveal chronic and cumulative toxicity of a fungicide for honeybees not revealed with the standard ten-day test [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8 (1): 7241.
- Tan LC, Ge F, Cheng Y, *et al.* Acute toxicity of four commonly used strobilurin fungicides [J]. *Pesticide Science and Administration*, 2021, 42 (1): 33-38. [谭丽超, 葛峰, 程燕, 等. 4种常用甲氧基丙烯酸酯类杀菌剂的急性毒性评价 [J]. 农药科学与管理, 2021, 42 (1): 33-38]
- Thind TS. Role of fungicides in crop health management: prospects and challenges [J]. *Developments in Fungal Biology and Applied Mycology*, 2017: 433-447.
- Tong Z. Monitoring of Pesticides in Pollen, Beebread and Honey and Exposure Risk Assessment on *Apis mellifera* L. [D]. Hefei: Anhui Agricultural University Philosophic Doctor Thesis, 2022. [童舟. 花粉、蜂粮和蜂蜜中农药残留监测及其对意大利蜜蜂暴露风险评估 [D]. 合肥: 安徽农业大学博士学位论文, 2022]
- Tosi S, Nieh JC. Lethal and sublethal synergistic effects of a new systemic pesticide, flupyradifurone (Sivanto®), on honeybees [J]. *Proceedings of the Royal Society B-biological Sciences*, 2019, 286 (1900): 20190433.
- Traynor KS, VanEngelsdorp D, Lamas ZS. Social disruption: sublethal pesticides in pollen lead to *Apis mellifera* queen events and brood loss [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, 214: 112105.
- Tschoeke PH, Oliveira EE, Dalcin MS, *et al.* Botanical and synthetic pesticides alter the flower visitation rates of pollinator bees in neotropical melon fields [J]. *Environmental Pollution*, 2019, 251: 591-599.
- 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.
- Tudi M, Ruan HD, Wang L, *et al.* Agriculture development, pesticide application and its impact on the environment [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18 (3): 1112.
- Vanengelsdorp D, Traynor KS, Andree M, *et al.* Colony Collapse Disorder (CCD) and bee age impact honey bee pathophysiology [J]. *PLoS ONE*, 2017, 12 (7): e0179535.
- Walsh EM, Sweet S, Knap A, *et al.* Queen honey bee (*Apis mellifera*) pheromone and reproductive behavior are affected by pesticide exposure during development [J]. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 2020, 74 (3): 1-14.
- Wang K, Pang Q, Zhang WW, *et al.* Effects of sublethal doses of carbendazim on the growth and detoxifying enzyme activities of honeybee (*Apis mellifera ligustica*) larvae [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2017, 60 (6): 642-649. [王康, 庞倩, 张文文, 等. 多菌灵亚致死剂量对意大利蜜蜂幼虫生长发育和解毒酶系活性的影响 [J]. 昆虫学报, 2017, 60 (6): 642-649]
- Wang YJ, Gao JL, Han WS, *et al.* Acute toxicity and hazard assessment of 10 fungicides on *Apis cerana cerana* [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2017, 39 (1): 126-133. [王雅璐, 高景林, 韩文素, 等. 10种杀菌剂对中华蜜蜂的急性毒性测定及风险评估 [J]. 环境昆虫学报, 2017, 39 (1): 126-133]
- Wiest L, Buleté A, Giroud B, *et al.* Multi-residue analysis of 80 environmental contaminants in honeys, honeybees and pollens by one extraction procedure followed by liquid and gas chromatography coupled with mass spectrometric detection [J]. *Journal of Chromatography A*, 2011, 1218 (34): 5743-5756.
- Willis CD, Prosser RS, Rodriguez-Gil JL, *et al.* Assessment of risk to hoary squash bees (*Peponapis pruinosa*) and other ground-nesting bees from systemic insecticides in agricultural soil [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9 (1): 11870.
- Wu-Smart J, Spivak M. Sub-lethal effects of dietary neonicotinoid insecticide exposure on honey bee queen fecundity and colony development [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6 (1): 32108.
- Xiong MQ, Qin G, Wang LZ, *et al.* Toxic effects of fungicides on physiology and behavior of honeybee [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2022, 17 (6): 163-175. [熊曼琼, 覃淦, 王梨竹, 等. 杀菌剂对蜜蜂生理和行为的毒性效应研究 [J]. 生态毒理学报, 2022, 17 (6): 163-175]
- Yang C, Hamel C, Vujanovic V, *et al.* Fungicide: Modes of action and possible impact on nontarget microorganisms [J]. *ISRN Ecology*, 2011, 2011 (1):130289.
- Yang SY, Zhang R, Kong Q, *et al.* Acute toxicity of two carboxamide fungicides to four non-target organisms [J]. *Modern Agrochemicals*, 2022, 21 (6): 42-46. [杨石有, 张蕊, 孔琼, 等. 2种酰胺类杀菌剂对4种非靶标生物的急性毒性 [J]. 现代农药, 2022, 21 (6): 42-46]

- Yoder JA, Nelson BW, Jajack AJ, *et al.* Fungi and the effects of fungicides on the honey bee colony [J]. *Beekeeping-From Science to Practice*, 2017: 73-90.
- Zaluski R, Jr JL, Orsi RO. Field-relevant doses of the systemic insecticide fipronil and fungicide pyraclostrobin impair mandibular and hypopharyngeal glands in nurse honeybees (*Apis mellifera*) [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7 (1): 15217.
- Zhang W. Global pesticide use: Profile, trend, cost/benefit and more [J]. *Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences*, 2018, 8 (1): 1.
- Zhang Y, Li PM, Zhou FY, *et al.* Acute toxicity and risk assessment of triazole fungicides on honeybees [J]. *Agrochemicals*, 2016, 55 (4): 269-271. [张勇, 李沛明, 周凤艳, 等. 三唑类杀菌剂对蜜蜂的急性毒性及风险性评价 [J]. 农药, 2016, 55 (4): 269-271]
- Zhang ZW, Zhang Y, Lin ZG, *et al.* Progress in research on the effects of thiamethoxam on honeybee health [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2024, 46 (1): 32-42. [张志伟, 张易, 蔺哲广, 等. 噻虫嗪对蜜蜂健康影响研究进展 [J]. 环境昆虫学报, 2024, 46 (1): 32-42]
- Zubrod JP, Bundschuh M, Arts G, *et al.* Fungicides: An overlooked pesticide class? [J]. *Environmental Science and Technology*, 2019, 53 (7): 3347-3365.
- Zuo XX, Wei FL, Li SN, *et al.* Research Methods and Progress of Safety Assessment of Pesticides on Honeybees [C]. Shanghai: China Pesticide Industry Association, Proceedings of the 12<sup>th</sup> National Pesticide Exchange Meeting, 2012: 36-41. [左晓霞, 魏方林, 李少南, 等. 农药对蜜蜂的安全性评价研究方法及其进展 [C]. 上海: 中国农药工业协会, 第十二届全国农药交流会论文集, 2012: 36-41]