



王超, 李新安, 刘恩良, 高海峰, 张云慧, 李祥瑞, 朱勋. 我国麦蚜抗药性及研究现状 [J]. 环境昆虫学报, 2022, 44 (3): 626–635.

## 我国麦蚜抗药性及研究现状

王超<sup>1\*</sup>, 李新安<sup>1 2\*</sup>, 刘恩良<sup>3</sup>, 高海峰<sup>4</sup>, 张云慧<sup>1</sup>, 李祥瑞<sup>1</sup>, 朱勋<sup>1\*\*</sup>

(1. 中国农业科学院植物保护研究所, 植物病虫害生物学国家重点实验室, 北京 100193; 2. 河南科技学院资源与环境学院, 河南新乡 453003; 3. 新疆农业科学院粮食作物研究所, 乌鲁木齐 830091; 4. 新疆农业科学院植物保护研究所/农业部西北荒漠绿洲作物有害生物综合治理重点实验室, 乌鲁木齐 830091)

**摘要:** 麦蚜是危害我国小麦 *Triticum aestivum* L. 生产的主要害虫, 具有分布广、数量大、繁殖力强以及远距离迁飞等特点, 不仅直接吸食小麦汁液, 还传播多种植物病毒, 每年造成小麦减产 10%~30%。目前对麦蚜的防控主要以化学防治为主, 但由于化学杀虫剂长期或不合理的使用, 多地麦蚜对常用杀虫剂产生了不同程度的抗性。本文从麦蚜抗药性测定方法、抗性水平及交互抗性、代谢和靶标抗性机制、以及麦蚜抗药性综合治理等方面进行了综述, 以期对麦蚜的防治及杀虫剂的持续合理使用提供理论参考和依据。

**关键词:** 麦蚜; 抗药性; 交互抗性; 抗性机制; 抗性综合治理

中图分类号: Q968.1; S433

文献标识码: A

文章编号: 1674-0858 (2022) 03-0626-10

### Research status of wheat aphid resistance to insecticides in China

WANG Chao<sup>1\*</sup>, LI Xin-An<sup>1 2\*</sup>, LIU En-Liang<sup>3</sup>, GAO Hai-Feng<sup>4</sup>, ZHANG Yun-Hui<sup>1</sup>, LI Xiang-Rui<sup>1</sup>, ZHU Xun<sup>1\*\*</sup> (1. State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China; 2. School of Resource and Environmental Sciences, Henan Institute of Science and Technology, Xinxian 453003, Henan Province, China; 3. Research Institute of Grain Crops, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830091, China; 4. Institute of Plant Protection, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Integrated Pest Management on Crop in Northwestern Oasis, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Urumqi 830091, China)

**Abstract:** Wheat aphid is the predominant pests of *Triticum aestivum* L. in China. It has the characteristics of wide distribution, large quantity, strong fertility, and long-distance migration. Wheat aphids cause damage by directly feeding on plants and by vectoring multiple plant pathogenic viruses, which causes 10%~30% yield reduction of wheat every year. At present, the management of wheat aphids relies primarily on the application of insecticides. However, wheat aphid in many areas has developed different level of resistance to insecticides due to long-term or unreasonable use. This review introduced current knowledge on bioassay method, resistance level dynamics, cross resistance, metabolic and target resistance mechanisms, and resistance management in wheat aphid and provided a valuable reference for the control of wheat aphid and the sustainable and rational use of insecticides.

**Key words:** Wheat aphid; resistance; cross resistance; resistance mechanism; resistance management

基金项目: 国家现代农业产业技术体系资助 (CARS-3); 天山青年计划优秀青年科技人才培养 (2019Q051)

\* 共同第一作者: 王超, 女, 在读硕士研究生, 主要从事昆虫抗药性研究, E-mail: 1875611798@163.com; 李新安, 男, 讲师, 主要从事农药毒理学研究, E-mail: lixinan112626@163.com

\*\* 通讯作者 Author for correspondence: 朱勋, 男, 博士, 副研究员, 主要从事昆虫分子生物学研究, E-mail: zhuxun@caas.cn

收稿日期 Received: 2021-02-05; 接受日期 Accepted: 2021-04-09

麦蚜属半翅目 Hemiptera 蚜科 Aphididae, 是危害小麦生产的主要害虫。我国麦蚜主要包括麦长管蚜 *Sitobion avenae* (Fabricius) (2019 年 Jiang *et al.* 通过基因组测序认为该麦蚜在我国应为荻草谷网蚜 *Sitobion miscanthi*, 由于在过去文献中普遍沿用, 本文仍以麦长管蚜进行综述)、禾谷缢管蚜 *Rhopalosiphum padi* (Linnaeus)、麦无网长管蚜 *Metopolophium dirhodum* (Walker) 和麦二叉蚜 *Schizaphis graminum* (Rondani)。其中, 麦长管蚜和禾谷缢管蚜是我国各麦区蚜虫的优势种群。麦蚜属刺吸式口器害虫, 具有分布广、数量大、繁殖力强的特点, 一般为无翅蚜虫, 但可受外界环境条件和生物因素调节生成有翅蚜和无翅蚜, 有翅型个体可远距离迁飞寻找寄主植物, 不仅直接吸食小麦汁液, 还能传播大麦黄矮病毒 (*Barley yellow dwarf virus*, BYDV)。此外, 蚜虫分泌的蜜露对小麦的光合作用也会产生干扰, 常年造成小麦减产 10% 以上, 大发生年份超过 30% (陈巨莲, 2014; 曲耀训, 2017; 朱英慧, 2018)。

化学防治具有见效快、效果好、易操作等优势, 适用于大面积防治, 是我国麦蚜防治的主要手段。截至 2020 年, 我国登记用于防治麦蚜的杀虫剂主要有新烟碱类、有机磷类、菊酯类、氨基甲酸酯类、大环内酯类及吡啶杂环类等, 施用方式主要有种子包衣和喷雾法 (王丹等, 2018; 张云慧, 2020)。长期的化学防治或重复使用同类型杀虫剂导致了麦蚜抗药性的发生, 据全国农业技术推广服务中心 (2020) 最新抗性监测结果显示, 我国部分地区麦蚜对常用杀虫剂产生了不同程度的抗性。本文从麦蚜抗药性测定方法、抗性水平及交互抗性、代谢和靶标抗性机制、以及麦蚜抗药性综合治理等方面进行了综述, 以期对麦蚜的防治及杀虫剂的持续合理使用提供理论参考和依据。

## 1 麦蚜抗药性测定方法

### 1.1 生物测定法

生物测定法 (Bioassay) 是根据杀虫剂作用方式及昆虫种类建立的抗药性检测方法, 主要有点滴法、浸渍法、浸叶法和玻璃管药膜法。点滴法 (Topical application) 是指利用毛细管微量点滴器、微量注射器等进行测定的方法, 具有受药量准确、误差小、重复性好等优点; 浸渍法即浸虫法

(Impregnation), 指将带有麦蚜的植物叶片浸入药液数秒以测定药剂毒力的方法; 浸叶法 (Leaf dipping method) 是将植物叶片浸于待测药液, 晾干后接入试虫的方法; 药膜法 (Residual film method) 是利用丙酮将药液梯度稀释后在玻璃管内壁形成药膜进行测定的方法, 具有省时简单、便于基层植保人员操作等优点。

### 1.2 分子生物学检测法

分子生物学检测法是利用分子生物学技术检测杀虫剂的作用靶标位点或解毒酶基因表达的一种方法, 具有检测快、精度高、重复性好等特点, 目前研究方向主要集中在靶标抗性等方面 (潘志萍等, 2006; 马玉婷等, 2017)。用于室内抗药性检测的分子生物学技术主要有 PCR 限制性内切酶技术 (PCR-REN)、特异性等位基因 PCR 技术 (PASA)、随机扩增多态性 DNA 技术 (RAPD)、TaqMan 实时荧光定量 PCR 技术、KASP 技术 (KASP) 和 DNA 测序技术等, 如利用 DNA 测序技术检测大批量棉蚜 *Aphis gossypii* Glover 对菊酯类杀虫剂的抗性, 以及时准确地对某一区域的棉蚜抗性水平进行有效监控 (Benting *et al.*, 2014; 马玉婷等, 2017)。

### 1.3 其他检测方法

除上述两种方法外, 抗药性检测还有神经电生理检测法、生物化学检测法和免疫学检测法等其他方法, 但这些方法是建立在对昆虫抗药性生理生化及分子机理的研究基础之上, 而对于田间多种抗性机制共同导致的抗性情况难以解释。因此, 针对麦蚜抗药性机理的深入研究是开发和应用快速、准确的抗药性检测方法的重要前提 (潘志萍等, 2006)。

## 2 麦蚜抗药性现状

化学杀虫剂的连续或不当使用会导致麦蚜产生抗药性, 而抗药性的产生不仅增加了管理成本, 还会造成害虫再猖獗和农药残留等问题, 我国部分麦蚜抗药性现状见表 1。

### 2.1 对有机磷类杀虫剂的抗性

目前我国常用于防治麦蚜的有机磷类杀虫剂主要有氧乐果、乐果、毒死蜱等。研究表明, 甘肃张掖、高台和四川部分地区麦长管蚜对氧乐果产生了中等抗性水平, 其中四川浦江、绵阳等地麦长管蚜长期呈现极高抗水平, 四川各地及重庆

万县麦长管蚜种群对乐果也产生了极高水平抗性(魏岑等,1988;彭丽年等,2000);河南郑州地区麦长管蚜和禾谷缢管蚜对氧乐果均不敏感(刘爱芝等,2001),山东阳谷县及汶上县禾谷缢管蚜对氧乐果尚未产生明显抗药性,仍处于敏感水平(于晓庆,2018),这可能与不同地区农户用药习惯不同有关。2018-2019年,Gong等(2020b)监测了我国不同省份麦区麦蚜的抗性水平,其中内蒙古呼伦贝尔、青海贵德、湖北襄阳、云南昆明和河北廊坊地区麦长管蚜种群及河北廊坊地区的禾谷缢管蚜种群对氧乐果达到中抗水平,而新疆喀什、陕西临汾和内蒙古呼伦贝尔等9个禾谷缢管蚜种群及宁夏石嘴山、山西临汾和湖北襄阳4个麦长管蚜种群对毒死蜱达到了中抗水平(Gong *et al.*, 2020b);此外,有研究者同样发现山西临汾地区麦长管蚜种群对毒死蜱达到了中抗水平(武银玉等,2019)。

## 2.2 对新烟碱类杀虫剂的抗性

新烟碱类杀虫剂主要包括吡虫啉、啶虫脒、噻虫嗪等,据报道,河北辛集及江苏南京和建湖地区麦长管蚜和禾谷缢管蚜田间种群对吡虫啉的敏感性下降,表现出低水平抗性(潘文亮等,2000;邱高辉等,2007);安徽蚌埠麦长管蚜种群对吡虫啉、啶虫脒达到了中至高水平抗性,在该地区还发现了100倍以上高水平抗性的麦长管蚜田间种群(韩晓莉等,2005)。左亚运(2015)发现我国各麦区禾谷缢管蚜对啶虫脒、吡虫啉等杀虫剂的抗性水平处于敏感性下降阶段,其中吉林白城、山东泰安和山东淄博地区禾谷缢管蚜对啶虫脒、吡虫啉产生了低至中等水平抗性;2017年抗性监测结果表明,北京上庄、河北沧州、涿州和河南许昌地区禾谷缢管蚜对吡虫啉和啶虫脒产生了低至中等水平抗性(李晓倩等,2018);Gong等(2020b)最新监测结果表明,宁夏石嘴山、内蒙古呼伦贝尔、巴彦淖尔和陕西杨凌等多地区禾谷缢管蚜对吡虫啉和噻虫嗪呈中抗水平,青海贵德、陕西杨凌、湖北襄阳和山东青岛地区麦长管蚜对吡虫啉具有中抗水平,青海贵德、内蒙古呼伦贝尔、陕西杨凌、河南新乡、宁夏石嘴山、陕西杨凌、山西临汾、山东青岛、新疆喀什和河北廊坊等14个地区的麦长管蚜种群对噻虫嗪同样达到了中抗水平(Gong *et al.*, 2020b)。

## 2.3 对菊酯类杀虫剂的抗性

菊酯类杀虫剂是从天然除虫菊素衍生而来的

一类广谱性新型杀虫剂,具有高效、低毒、低残留、安全等特点,是传统高毒杀虫剂理想的替代品。菊酯类杀虫剂对病媒昆虫抗药性的相关研究较多,如在非洲和东南亚地区,冈比亚按蚊 *Anopheles gambiae*、埃及伊蚊 *Aedes aegypti* 和中华按蚊 *Anopheles sinensis* 等对拟除虫菊酯类杀虫剂的抗性已十分严重(Ranson *et al.*, 2000; Tikar *et al.*, 2008; Koou *et al.*, 2014; Yunta *et al.*, 2016)。在麦蚜的相关报道中,英国麦长管蚜从2011年左右开始对拟除虫菊酯类杀虫剂敏感性逐渐降低,田间采集的麦长管蚜检测到了与高效氯氟菊酯抗性相关的突变(Foster *et al.*, 2014)。彭丽年等(2000)发现四川浦江麦长管蚜对高效氯氟菊酯产生了低水平抗性;我国2013-2019年各个麦区抗性监测结果显示,大部分麦长管蚜和禾谷缢管蚜田间种群对菊酯类杀虫剂处于敏感性下降水平,其中陕西泾阳和凤翔、宁夏石嘴山和陕西杨凌禾谷缢管蚜及河南新乡麦长管蚜对高效氯氟菊酯达到高抗水平;宁夏石嘴山麦无网长管蚜种群对高效氯氟菊酯达中抗水平;陕西杨凌和江苏扬州禾谷缢管蚜及云南昆明麦长管蚜对联苯菊酯表现出高水平抗性,山西太谷、河北保定禾谷缢管蚜对联苯菊酯产生了中等水平抗性,甘肃兰州禾谷缢管蚜对溴氰菊酯表现出中等水平抗性(左亚运,2015;刘燕承,2016;黄彦娜,2018;李晓倩等,2018;于晓庆,2018;Gong *et al.*, 2020b)。

## 2.4 对氨基甲酸酯类杀虫剂的抗性

氨基甲酸酯类杀虫剂具有低毒、高效、易分解等特点,代表药剂是抗蚜威(又名辟蚜雾),对蚜虫天敌较为安全,是防治麦蚜的理想药剂。2000年研究发现四川多数地区麦长管蚜对抗蚜威仍较敏感,而浦江麦长管蚜产生了低水平抗性(彭丽年等,2000),次年河南郑州地区监测结果显示抗蚜威对麦长管蚜的防治效果有所降低(刘爱芝等,2001);而2007年有研究表明全国各麦区麦长管蚜对抗蚜威已达中等抗性水平(邱高辉等,2007)。此外,山东阳谷及汶上地区禾谷缢管蚜对抗蚜威尚未产生明显抗药性,仍处于敏感水平阶段,而河南许昌和山西临汾麦长管蚜对抗蚜威分别产生中等和高水平抗性,建议禁用抗蚜威(李晓倩等,2018;于晓庆,2018;武银玉等,2019)。据报道,青海湟中麦长管蚜对抗蚜威敏感性下降,应减少使用该类杀虫剂(董文阳等,2020)。值得注意的是,北非突尼斯地区禾谷缢管蚜 F368L 点

突变使其对氨基甲酸酯类杀虫剂产生了高水平抗性 (Bettaibi *et al.*, 2016)。

## 2.5 对其他杀虫剂的抗性

用于防治麦蚜的大环内酯类杀虫剂主要有阿维菌素等, Gong 等 (2020b) 对全国麦蚜抗药性监测结果显示, 内蒙古呼伦贝尔、陕西杨凌、河南新乡、驻马店和湖北襄阳等多个地区麦长管蚜

及禾谷缢管蚜对阿维菌素表现出中等抗性。吡啶杂环类杀虫剂吡蚜酮作用方式独特, 具有高效低毒和对非靶标动物安全等特性, 目前在水稻使用较多, 麦田应用则相对较少, 通过研究吡蚜酮对田间麦蚜的防治试验, 发现其具有较为理想的防治效果, 对穗期蚜虫的防治效果接近吡虫啉、啶虫脒等常用杀虫剂 (冯成玉等, 2008)。

表 1 我国部分麦蚜抗药性现状

Table 1 Current status of insecticide resistance of wheat aphids in China

农药类型 Types	杀虫剂 Insecticide	地理位置 Location	种群 Populations	抗性水平 Resistant levels	参考文献 References
有机磷类 Organophosphates	氧乐果 Omethoate	甘肃张掖 Zhangye Gansu	麦长管蚜 <i>S. avenae</i>	中抗 Medium resistance	魏岑等, 1988
		甘肃高台 Gaotai Gansu	麦长管蚜 <i>S. avenae</i>	中抗 Medium resistance	魏岑等, 1988
		四川 Sichuan	麦长管蚜 <i>S. avenae</i>	中抗 Medium resistance	彭丽年等, 2000
	乐果 Dimethoate	四川浦江 Pujiang Sichuan	麦长管蚜 <i>S. avenae</i>	极高抗 Very high resistance	彭丽年等, 2000
		四川绵阳 Mianyang Sichuan	麦长管蚜 <i>S. avenae</i>	极高抗 Very high resistance	彭丽年等, 2000
		四川 Sichuan	麦长管蚜 <i>S. avenae</i>	极高抗 Very high resistance	彭丽年等, 2000
		重庆万县 Wanxian Chongqing	麦长管蚜 <i>S. avenae</i>	极高抗 Very high resistance	彭丽年等, 2000
新烟碱类 Neonicotinoids	毒死蜱 Chlorpyrifos	山西临汾 Linfen Shanxi	麦长管蚜 <i>S. avenae</i>	中抗 Medium resistance	武银玉等, 2019
		河北辛集 Xinji Hebei	麦长管蚜 <i>S. avenae</i>	低抗 Low resistance	潘文亮等, 2000
	吡虫啉 Imidacloprid	河北辛集 Xinji Hebei	禾谷缢管蚜 <i>R. padi</i>	低抗 Low resistance	潘文亮等, 2000
		江苏南京 Nanjing Jiangsu	麦长管蚜 <i>S. avenae</i>	低抗 Low resistance	邱高辉等, 2007
		江苏南京 Nanjing Jiangsu	禾谷缢管蚜 <i>R. padi</i>	低抗 Low resistance	邱高辉等, 2007
		江苏建湖 Jianhu Jiangsu	麦长管蚜 <i>S. avenae</i>	低抗 Low resistance	邱高辉等, 2007
		江苏建湖 Jianhu Jiangsu	禾谷缢管蚜 <i>R. padi</i>	低抗 Low resistance	邱高辉等, 2007

续表 1 Continued table 1

农药类型 Types	杀虫剂 Insecticide	地理位置 Location	种群 Populations	抗性水平 Resistant levels	参考文献 References		
新烟碱类 Neonicotinoids	吡虫啉 Imidacloprid	河北沧州 Cangzhou Hebei	禾谷缢管蚜 <i>R. padi</i>	低至中抗 Low to medium resistance	李晓倩等, 2018		
		河北涿州 Zhuozhou Hebei	禾谷缢管蚜 <i>R. padi</i>	低至中抗 Low to medium resistance	李晓倩等, 2018		
		北京上庄 Shangzhuang Beijing	禾谷缢管蚜 <i>R. padi</i>	低至中抗 Low to medium resistance	李晓倩等, 2018		
		河南许昌 Xuchang Henan	禾谷缢管蚜 <i>R. padi</i>	低至中抗 Low to medium resistance	李晓倩等, 2018		
		吉林白城 Baicheng Jilin	禾谷缢管蚜 <i>R. padi</i>	低至中抗 Low to medium resistance	左亚运, 2015		
		山东泰安 Taian Shandong	禾谷缢管蚜 <i>R. padi</i>	低至中抗 Low to medium resistance	左亚运, 2015		
		山东淄博 Zibo Shandong	禾谷缢管蚜 <i>R. padi</i>	低至中抗 Low to medium resistance	左亚运, 2015		
		安徽蚌埠 Bangfu Anhui	麦长管蚜 <i>S. avenae</i>	中到高抗 Medium to high resistance	韩晓莉等, 2005		
		山东泰安、淄博 Taian and Zibo Shandong	禾谷缢管蚜 <i>R. padi</i>	低至中抗 Low to medium resistance	左亚运, 2015		
		吉林白城 Baicheng Jilin	禾谷缢管蚜 <i>R. padi</i>	低至中抗 Low to medium resistance	左亚运, 2015		
菊酯类 Pyrethroids	高效氯氟菊酯 Beta- cypermethrin	安徽蚌埠 Bangfu Anhui	麦长管蚜 <i>S. avenae</i>	中到高抗 Medium to high resistance	韩晓莉等, 2005		
		陕西泾阳 Jingyang Shanxi	禾谷缢管蚜 <i>R. padi</i>	高抗 High resistance	黄彦娜, 2018		
		陕西凤翔 Fengxiang Shanxi	禾谷缢管蚜 <i>R. padi</i>	高抗 High resistance	黄彦娜, 2018		
		宁夏石嘴山 Shizuishan Ningxia	禾谷缢管蚜 <i>R. padi</i>	高抗 High resistance	Gong <i>et al.</i> , 2020b		
		陕西杨凌 Yangling Shanxi	禾谷缢管蚜 <i>R. padi</i>	高抗 High resistance	Gong <i>et al.</i> , 2020b		
		河南新乡 Xinxiang Henan	麦长管蚜 <i>S. avenae</i>	高抗 High resistance	Gong <i>et al.</i> , 2020b		
		四川浦江 Pujiang Sichuan	麦长管蚜 <i>S. avenae</i>	低抗 Low resistance	彭丽年等, 2000		
		山西太谷 Taigu Shanxi	禾谷缢管蚜 <i>R. padi</i>	中抗 Medium resistance	左亚运, 2015		
			联苯菊酯 Bifenthrin				

续表 1 Continued table 1

农药类型 Types	杀虫剂 Insecticide	地理位置 Location	种群 Populations	抗性水平 Resistant levels	参考文献 References
		河北保定 Baoding Hebei	禾谷缢管蚜 <i>R. padi</i>	中抗 Medium resistance	左亚运, 2015
		陕西杨凌 Yangling Shanxi	禾谷缢管蚜 <i>R. padi</i>	高抗 High resistance	Gong <i>et al.</i> , 2020b
		江苏扬州 Yangzhou Jiangsu	禾谷缢管蚜 <i>R. padi</i>	高抗 High resistance	Gong <i>et al.</i> , 2020b
		云南昆明 Kunming Yunnan	麦长管蚜 <i>S. avenae</i>	高抗 High resistance	Gong <i>et al.</i> , 2020b
	溴氰菊酯 Deltamethrin	甘肃兰州 Lanzhou Gansu	禾谷缢管蚜 <i>R. padi</i>	中抗 Medium resistance	左亚运, 2015
氨基甲酸酯类 Carbamates	抗蚜威 Pirimicarb	四川浦江 Pujiang Sichuan	麦长管蚜 <i>S. avenae</i>	低抗 Low resistance	彭丽年等, 2000
		山西临汾 Linfen Shanxi	麦长管蚜 <i>S. avenae</i>	高抗 High resistance	武银玉等, 2019
		河南许昌 Xuchang Henan	麦长管蚜 <i>S. avenae</i>	中抗 Medium resistance	李晓倩等, 2018

### 3 麦蚜对杀虫剂的交互抗性

交互抗性是指昆虫由于相同的抗性机制、作用机理或具有类似的化学结构等原因而对选择药剂以外、从未使用过的药剂也产生了抗性, 是害虫抗药性监测中的常见情况。尽管 1991 年有报道表明吡虫啉和有机磷、氨基甲酸酯及拟除虫菊酯没有交互抗性, 但 1996 年研究发现一个高抗有机磷和氨基甲酸酯的桃蚜 *Myzus persicae* (Sulzer) 种群对吡虫啉存在一定的交互抗性 (Elbert *et al.*, 1991; Nauen *et al.*, 1996)。

室内选育禾谷缢管蚜抗吡虫啉品系对噻虫嗪、啶虫脒和灭扑威产生了高水平交互抗性, 对毒死蜱和马拉硫磷产生了低水平交互抗性, 与高效氯氰菊酯和氟啶虫胺腈之间则无交互抗性; 从化学结构来看, 吡虫啉、噻虫嗪和啶虫脒均为 N-硝基胍基团的新烟碱类杀虫剂, 相互之间易产生交互抗性 (Wang *et al.*, 2018)。研究者发现部分杀虫剂致死中浓度 (LC<sub>50</sub>) 之间存在相关性, 如毒死蜱、高效氯氰菊酯和啶虫脒 3 种杀虫剂之间具有

极显著相关性, 毒死蜱与溴氰菊酯、阿维菌素、噻虫嗪、溴氰菊酯及高效氯氰菊酯之间同样具有显著相关性, 此外, 研究发现禾谷缢管蚜对高效氯氰菊酯的抗性与对阿维菌素和联苯菊酯的抗性显著相关, 麦长管蚜对高效氯氰菊酯与对联苯菊酯的抗性显著相关, 且两种蚜虫对联苯菊酯与对氧化乐果的抗性显著相关。这表明麦蚜在不同杀虫剂之间存在不同水平的交互抗性 (Zuo *et al.*, 2016; Gong *et al.*, 2020b)。

### 4 麦蚜抗药性机制

昆虫对杀虫剂产生抗性的机制主要有 4 种, 分别为代谢解毒酶活性增强、靶标敏感性降低、表皮穿透性降低以及逃避杀虫剂的行为抗性 (高希武, 2012)。现有报道中, 靶标抗性和代谢抗性是昆虫对杀虫剂主要的抗性机制。

#### 4.1 靶标抗性

导致靶标位点敏感性降低的原因主要有两点, 一是部分靶标位点突变引起蛋白三维结构发生变化, 其功能特性发生改变, 致使杀虫剂与靶标的

结合能力下降; 二是靶标本身的表达量增加或下降, 影响了杀虫剂与靶标结合的亲和力 (张懿熙和刘泽文, 2020)。电压门控钠离子通道上单个或多个位点突变, 引起的击倒抗性 (*kdr*) 和超击倒抗性 (*super-kdr*) 是昆虫对拟除虫菊酯类杀虫剂的主要抗性机制, 如麦长管蚜钠离子通道 IIS6 片段中携带 (L1014F) 点突变的蚜虫对高效氯氟菊酯的敏感性显著降低 (Foster *et al.*, 2014); 在对我国南阳地区禾谷缢管蚜田间抗性种群的研究中发现, 位于禾谷缢管蚜钠离子通道 IIS4 ~ IIS6 区域的 *super-kdr* M918L 突变 (ATG 突变成 TTG) 以及 P450 基因上调表达, 两者共同作用是导致田间禾谷缢管蚜对氯氟菊酯产生抗性的重要原因 (Wang *et al.*, 2020)。新烟碱类杀虫剂作用于昆虫的烟碱型乙酰胆碱受体 (nAChR), 在禾谷缢管蚜对吡虫啉的抗性研究中发现, 与敏感品系相比, 抗性品系中虽然不存在对吡虫啉的靶标突变, 但其 nAChR 的  $\alpha 1$ 、 $\alpha 2$ 、 $\alpha 3$ 、 $\alpha 7-2$  和  $\beta 1$  亚基的表达水平却显著降低, 表明 nAChR 5 个亚基的下调表达参与了禾谷缢管蚜对吡虫啉的抗性 (Wang *et al.*, 2018)。

#### 4.2 代谢抗性

与杀虫剂靶标抗性相比, 解毒酶介导的代谢抗性则更为普遍, 特别是在中低水平的抗性机制中。多项研究表明, 谷胱甘肽-S-转移酶 (GST)、羧酸酯酶 (CarE) 和细胞色素 P450 (CYP450) 等解毒酶系, 通过基因扩增、上调表达等方式介导害虫对杀虫剂的抗性。谷胱甘肽 S-转移酶活性升高是棉蚜和桃蚜对吡虫啉抗性增加的主要因素, 另外, 桃蚜酯酶含量及活性变化与其对高效氯氟菊酯的抗性存在显著相关性 (潘文亮, 2003; 陈亮等, 2005; 帅霞和王进军, 2005), 麦无网长管蚜细胞色素 P450 与其对吡虫啉的代谢抗性有关 (Gong *et al.*, 2020a)。综合增效剂和解毒酶活性测定结果显示, 细胞色素 P450 单加氧酶和羧酸酯酶活力的增强是禾谷缢管蚜对吡虫啉产生抗性的重要因素, 而在麦长管蚜对吡虫啉抗性机制的研究中, 发现羧酸酯酶活性升高是其对吡虫啉抗性增加的主要因素之一 (邱高辉等, 2008; 张蒙, 2016)。禾谷缢管蚜对吡虫啉的抗性品系中 *CYP6CY3-1* 和 *CYP6CY3-2* 基因以及 Unigene 10092 (CYP4 家族基因) 基因相对表达量分别上升了 2.24 倍、2.23 倍和 2.91 倍, 显著高于敏感品系, 由此可推测, 禾谷缢管蚜 *CYP6CY3-1* 和 *CYP6CY3-2* 基因及 Unigene

基因的表达量上调与其对吡虫啉抗性的产生有关; 通过注射 dsRNA 抑制 *CYP4CJ1* 基因的表达, 提高了禾谷缢管蚜对氨基甲酸酯类杀虫剂的敏感性, 这表明禾谷缢管蚜 *CYP4CJ1* 基因与对抗吡虫啉具有相关性 (张蒙等, 2016; 王康, 2019)。

## 5 麦蚜抗药性治理

化学防治是控制麦蚜的重要手段, 对麦蚜进行抗性治理的最终目的是保持田间麦蚜对杀虫剂的敏感性从而保持在使用低剂量药剂的情况下控制虫害 (张懿熙和刘泽文, 2020)。近年来麦蚜对杀虫剂抗性逐渐增加, 给防控治理带来了很大的挑战, 结合害虫抗性治理方法以及文献报道, 麦蚜抗药性综合治理可采取如下措施。

### 5.1 加强麦蚜抗药性监测, 开展新型杀虫剂抗性风险评估

加强麦蚜对杀虫剂的抗性监测, 明确其抗性水平, 结合麦蚜田间发生规律, 因地制宜为各麦区制定更为合理的抗性治理对策; 对市场推出的新型杀虫剂进行抗性风险评估, 合理发挥新型杀虫剂的防控作用, 根据风险评估与其他杀虫剂抗性监测数据, 合理搭配使用不同杀虫剂, 延缓麦蚜抗药性的发展。

### 5.2 杀虫剂的合理选择及使用

不同杀虫剂由于不同的作用方式, 对麦蚜的毒力也不同, 各麦区可以通过减少施药次数、采用较低剂量药剂使蚜虫保持一定比例的敏感基因, 以及限制使用已经产生明显抗性的杀虫剂等方法来延缓抗性的发展。例如在 2017 年全国农业有害生物抗性监测中, 发现各监测点的禾谷缢管蚜对氟啶虫胺胍均处于敏感状态, 但 2018 - 2019 年抗性监测中则报告了禾谷缢管蚜抗性倍数呈逐渐增加的趋势, 建议在麦蚜产生抗药性的地区严格限制氟啶虫胺胍的使用次数, 以延缓麦蚜的抗药性发展 (张帅, 2017; 2018; 2019)。值得注意的是, 杀虫剂的合理使用应在麦蚜发生早期就开始实施, 且各麦区应根据当地麦蚜不同的抗性现状因地制宜科学合理的选用杀虫剂 (张云慧, 2020)。

### 5.3 协同增效延缓抗药性

不同作用机制的杀虫剂混用有助于形成多作用位点机制, 具有明显的增效作用, 是延缓麦蚜抗药性最佳的治理方法。有研究表明, 氟啶虫胺

脞与吡蚜酮 1:3、与高效氯氟氰菊酯 1:5 等组合对瓜蚜的防治上效果显著 (王欢欢等, 2019)。此外, 增效剂也以其安全有效的特性备受关注, 将 22% 氟啶虫胺脞和激健助剂按一定比例混合施用后, 对棉蚜的防效更高、持效期更长, 与两倍剂量的 22% 氟啶虫胺脞防效相当, 效果显著 (王映山等, 2018)。增效剂的使用能够很大程度上在维持单剂药效的同时延缓抗性发展, 是抗性治理的重要方向, 但目前尚未见到田间使用增效剂与农药混配防治麦蚜的相关报道。

#### 5.4 综合运用其他各项措施, 延缓抗药性

在麦蚜的防治中, 综合运用其他措施, 将麦蚜防控在经济允许水平之下, 如农业防治、生物防治、物理防治等。农业防治包括加强麦区水肥管理, 选育抗蚜品种, 及时清除田间杂草以及 4-5 月份时灌溉农田, 缓解干旱和抑制土温升高, 来有效抑制当地麦蚜的发生; 生物防治主要包括昆虫病原微生物侵染、寄生性天敌寄生以及捕食性天敌捕食, 其中捕食性天敌昆虫数量、种类均较多, 必要时可人工繁殖释放以控制蚜虫; 物理防治则主要是在麦蚜危害盛期前, 采用黄板对蚜虫进行诱杀, 以降低其迁入基数, 应注意尽量不要误伤天敌 (张云慧, 2020)。

## 6 展望

麦蚜是小麦上的主要害虫, 每年对小麦的生产造成重大经济损失, 目前已针对多种常用杀虫剂在麦蚜的抗药性机制开展了系列研究, 取得了一定的成果, 但其内在的调控机制是什么, 如何将这些调控机制与新技术相结合, 应用到害虫的防治与抗性治理中, 这一系列问题仍待进一步深入研究。nAChR 和 AChE 等作为昆虫中枢神经系统中重要的神经递质受体, 一直是国内外研究的热点, 靶标抗性将成为麦蚜抗性研究的重要方向, 阐明麦蚜抗药性深层机理, 不但能够为麦蚜的科学防治及新型药剂的研发提供理论依据, 还能对其他害虫抗药性研究提供有力参考。在麦蚜防治过程中, 除化学防控外, 还要与绿色防控相结合, 注意减量控害, 使麦蚜抗药性得到有效控制, 确保小麦产量和品质安全, 实现化学防控的可持续发展。在实践中, 当地政府应进行有效的法律法规干涉, 加强农药生产和农药市场的管理, 以保障抗药性治理行动的顺利实施。

## 参考文献 (References)

- Bass C, Carvalho RA, Oliphant L, et al. Overexpression of a cytochrome P450 monooxygenase, *CYP6ER1*, is associated with resistance to imidacloprid in the brown planthopper *Nilaparvata lugens* [J]. *Insect Molecular Biology*, 2011, 20 (6): 763-773.
- Benting J, Hauser H I, Nauen R. Molecular diagnosis of resistance [J]. *Pflanzenschutz Nachrichten Bayer*, 2014, 57 (1): 78-86.
- Bettaibi K, Mezghani K, Bouktila D, et al. A novel method for molecular targeting of insecticide resistance in *Rhopalosiphum padi* L. (Homoptera: Aphididae) [J]. *International Journal of Pest Management*, 2016, 62 (4): 284-287.
- Chen JL. Wheat Aphids and Their Control [M]. Beijing: Jin Dun Press, 2014. [陈巨蓬. 小麦蚜虫及其防治 [M]. 北京: 金盾出版社, 2014]
- Ding Z, Wen Y, Yang B, et al. Biochemical mechanisms of imidacloprid resistance in *Nilaparvata lugens*: Over-expression of cytochrome P450 *CYP6AY1* [J]. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 2013, 43 (11): 1021-1027.
- Dong WY, Zhang HH, Chen AQ, et al. Resistance levels to five insecticides of wheat aphid field populations from some regions of Gansu and Qinghai Province of China [J]. *Agrochemicals*, 2020, 59 (7): 532-536. [董文阳, 张慧慧, 陈安琪, 等. 我国甘肃和青海地区麦蚜田间种群对 5 种杀虫剂的抗性监测 [J]. 农药, 2020, 59 (7): 532-536]
- Elbert A, Becker B, Hartwig J, et al. Imidacloprid a new systemic insecticide [J]. *Pflanzenschutz - Nachrichten Bayer (Germany, F. R.)*, 1991, 44 (2): 113-136.
- Feng CY, Yang HW, Lu XF, et al. Control effect of pymetrozine on *Laodelphax striatellus* and wheat aphid at wheat ear stage [J]. *Plant Protection*, 2008, 34 (3): 142-144. [冯成玉, 杨和文, 陆晓峰, 等. 吡蚜酮对小麦穗期灰飞虱与麦蚜的防治效果 [J]. 植物保护, 2008, 34 (3): 142-144]
- Foster SP, Paul VL, Slater R, et al. A mutation (L1014F) in the voltage-gated sodium channel of the grain aphid, *Sitobion avenae*, is associated with resistance to pyrethroid insecticides [J]. *Pest Management Science*, 2014, 70 (8): 1249-1253.
- Gao XW. Molecular Mechanism and Management Strategy of Pest Resistance [M]. Beijing: Science Press, 2012. [高希武. 害虫抗药性分子机制与治理策略 [M]. 北京: 科学出版社, 2012]
- Gong P, Chen D, Wang C, et al. Susceptibility of four species of aphids in wheat to seven insecticides and its relationship to detoxifying enzymes [J]. *Frontiers in Physiology*, 2020a, 11: 623612.
- Gong P, Li X, Gao H, et al. Field evolved resistance to pyrethroids, neonicotinoids, organophosphates and macrolides in *Rhopalosiphum padi* (Linnaeus) and *Sitobion avenae* (Fabricius) from China [J]. *Chemosphere*, 2020b, 269: 128747.
- Han XL, Gao ZL, Dang ZH, et al. Studies on sensitivity of chloronicotinyl insecticides in the grain aphid, *Sitobion avenae* (Fab.) from different areas [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2007, 22 (5): 157-160. [韩晓莉, 高占林, 党志红, 等. 不同地区麦长管蚜对氯代烟酰胺类杀虫剂的敏感性 [J]. 华北农业

- 报, 2007, 22 (5): 157 – 160]
- Han X. Dow AgroSciences plans to expand new insect pesticides sulfoxaflor production [J]. *Pesticide Market News*, 2013, 13: 33. [韩翔. 美国陶氏益农公司计划扩大新型杀虫剂氟啉虫腈 (sulfoxaflor) 的生产 [J]. 农药市场信息, 2013, 13: 33]
- Huang YN. Insecticide Resistance Monitoring and Symbionts Detection in *Rhopalosiphum padi* Field Populations from Guanzhong Area of Shaanxi Province [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2018. [黄彦娜. 陕西关中地区禾谷缢管蚜抗性监测及共生菌检测 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018]
- Jiang X, Zhang Q, Qin Y, et al. A chromosome-level draft genome of the grain aphid *Sitobion miscanthi* [J]. *Gigascience*, 2019, 8 (8): 1 – 8.
- Koou SY, Chong CS, Vythilingam I, et al. Insecticide resistance and its underlying mechanisms in field populations of *Aedes aegypti* adults (Diptera: Culicidae) in Singapore [J]. *Parasites Vectors*, 2014, 7 (1): 471.
- Liao X, Jin R, Zhang X, et al. Characterization of sulfoxaflor resistance in the brown planthopper, *Nilaparvata lugens* (Stål) [J]. *Pest Management Science*, 2019, 75 (6): 1646 – 1654.
- Liu AZ, Ru TQ, Wang XJ, et al. Sensitivity test of two wheat aphids to insecticides [J]. *Plant Protection*, 2001, 27 (5): 20 – 21. [刘爱芝, 茹桃勤, 王晓军, 等. 两种麦蚜对杀虫剂的敏感性测定 [J]. 植物保护, 2001, 27 (5): 20 – 21]
- Liu YC. Insecticide Resistance and Studies on Sublethal Effects of Dinotefuran on *Rhopalosiphum padi* [D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2016. [刘燕承. 禾谷缢管蚜抗性性及呋虫胺对其亚致死效应研究 [D]. 雅安: 四川农业大学, 2016]
- Li XQ, Zhang XX, Xie XP, et al. Monitoring the resistance of two wheat aphids to insecticides [J]. *Barley and Cereal Sciences*, 2018, 35 (4): 61. [李晓倩, 张亚鑫, 解晓平, 等. 两种麦蚜对杀虫药剂的抗性监测 [J]. 大麦与谷类科学, 2018, 35 (4): 61]
- Ma K, Tang Q, Xia J, et al. Fitness costs of sulfoxaflor resistance in the cotton aphid, *Aphis gossypii* Glover [J]. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 2019, 158: 40 – 46.
- Ma YT, Wei J, Li XG. Advance on detection method of insecticide resistance [J]. *Current Biotechnology*, 2017, 7 (4): 272 – 278, 353. [马玉婷, 魏娟, 李相敢. 昆虫抗性检测方法研究进展 [J]. 生物技术进展, 2017, 7 (4): 272 – 278, 353]
- Nauen R, Strobel J, Tietjen K, et al. Aphicidal activity of imidacloprid against a tobacco feeding strain of *Myzus persicae* (Homoptera: Aphididae) from Japan closely related to *Myzus nicotianae* and highly resistant to carbamates and organophosphates [J]. *Bulletin of Entomological Research*, 1996, 86 (2): 165 – 171.
- Pan WL, Dang ZH, Gao ZL. Studies on resistance of three species of aphids to imidacloprid [J]. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 2000, 2 (4): 85 – 87. [潘文亮, 党志红, 高占林. 几种蚜虫对吡虫啉抗药性的研究 [J]. 农药学报, 2000, 2 (4): 85 – 87]
- Pan ZP, Li DS. Research advances in monitoring and detecting insect pesticide-resistance [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17 (8): 1539 – 1543. [潘志萍, 李敦松. 昆虫抗性监测与检测技术研究进展 [J]. 应用生态学报, 2006, 17 (8): 1539 – 1543]
- Pavlidis N, Khalighi M, Myridakis A, et al. A glutathione-S-transferase (*TuGSTd05*) associated with acaricide resistance in *Tetranychus urticae* directly metabolizes the complex II inhibitor cyflumetofen [J]. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 2017, 80: 101 – 115.
- Peng LN, Zhang XP, Ye JS, et al. Study of resistance to insecticides in *Macrosiphum avenae* F. in Sichuan Province [J]. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 2000, 2 (3): 13 – 18. [彭丽年, 张小平, 叶建生, 等. 四川省麦长管蚜 (*Macrosiphum avenae* F.) 的抗性研究 [J]. 农药学报, 2000, 2 (3): 13 – 18]
- Puinean AM, Foster SP, Oliphant L, et al. Amplification of a cytochrome P450 gene is associated with resistance to neonicotinoid insecticides in the aphid *Myzus persicae* [J]. *PLoS Genetics*, 2010, 6 (6): e1000999.
- Qiu GH. Imidacloprid Resistance in *Sitobion avenae* (Fabricius) and the Mechanisms [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2007. [邱高辉. 麦长管蚜对吡虫啉的抗性及其机理研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2007]
- Qiu GH, Yao Y, Han ZJ. Mechanism for imidacloprid resistance in *Sitobion avenae* [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2008, 31 (2): 67 – 70. [邱高辉, 姚远, 韩召军. 麦长管蚜对吡虫啉的抗性机理研究 [J]. 南京农业大学学报, 2008, 31 (2): 67 – 70]
- Qiu XH. Advances in insecticide resistance mediated by Cytochrome P450 [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2014, 57 (4): 477 – 482. [邱星辉. 细胞色素 P450 介导的昆虫抗药性的分子机制 [J]. 昆虫学报, 2014, 57 (4): 477 – 482]
- Qu YX. Occurrence and chemical control of wheat aphid [J]. *Agrochemicals Today*, 2017, 5: 22 – 25. [曲耀训. 麦蚜发生危害与药剂防治 [J]. 今日农药, 2017, 5: 22 – 25]
- Ranson H, Jensen B, Vulule JM, et al. Identification of a point mutation in the voltage-gated sodium channel gene of Kenyan *Anopheles gambiae* associated with resistance to DDT and pyrethroids [J]. *Insect Molecular Biology*, 2000, 9 (5): 491 – 497.
- Shuai X, Wang JJ. Change in esterase activity and content during the selection of resistance to Alphamethrin in *Myzus persicae* [J]. *Zoological Research*, 2005, 26 (1): 101 – 105. [帅霞, 王进军. 桃蚜高效氯氟菊酯抗性选育过程中酯酶含量和活性变化 [J]. 动物学研究, 2005, 26 (1): 101 – 105]
- Sparks TC, Deboer GJ, Wang NX, et al. Differential metabolism of sulfoximine and neonicotinoid insecticides by *Drosophila melanogaster* monooxygenase CYP6G1 [J]. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 2012, 103 (3): 159 – 165.
- The National Agro – Tech Extension and Service Center. The agricultural pest resistance monitoring report [EB/OL]. (2020 – 02 – 25) [2020 – 04 – 03 (7)]. <http://www.jsppa.com.cn/news/zhibao/2249.html>. [全国农业技术推广服务中心. 全国农业有害生物抗性监测报告 [EB/OL]. (2020 – 02 – 25) [2020 – 04 – 03(7)]. <http://www.jsppa.com.cn/news/zhibao/2249.html>]
- Tikar SN, Mendki MJ, Chandel K, et al. Susceptibility of immature

- stages of *Aedes (Stegomyia) aegypti*; vector of dengue and chikungunya to insecticides from India [J]. *Parasitology Research*, 2008, 102 (5): 907–913.
- Wang DL, Liu XJ, Zhang CZ. Monitoring the sensitivity of wheat aphids to imidacloprid in Jiangsu Province [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2003, 6: 64–65. [王冬兰, 刘贤进, 张存政. 江苏地区麦蚜对吡虫啉敏感性监测 [J]. 江苏农业科学, 2003, 6: 64–65]
- Wang D, MA YJ, Jiang WL, et al. Study on the technology of pesticide reduction preventing wheat aphids [J]. *Journal of Seed Industry Guide*, 2018, 5: 16–19. [王丹, 马亚杰, 姜伟丽, 等. 麦蚜减药防控技术研究 [J]. 种业导刊, 2018, 5: 16–19]
- Wang HH, Zhang CJ, Liu MM, et al. Toxicities and synergy effects of sulfoxaflor and other ten insecticides against *Aphis gossypii* Glover [J]. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 2019, 21 (2): 181–186. [王欢欢, 张春皎, 刘梦铭, 等. 氟啶虫腈等 11 种杀虫剂对瓜蚜的毒力及协同增效作用 [J]. 农药学报, 2019, 21 (2): 181–186]
- Wang K, Bai J, Zhao J, et al. Super - *kdr* mutation M918L and multiple cytochrome P450s associated with the resistance of *Rhopalosiphum padi* to pyrethroid [J]. *Pest Management Science*, 2020, 76 (8): 2809–2817.
- Wang K, Zhang M, Huang YN, et al. Characterization of imidacloprid resistance in the bird cherry-oat aphid, *Rhopalosiphum padi*, a serious pest on wheat crops [J]. *Pest Management Science*, 2018, 74 (6): 1457–1465.
- Wang YS, Zheng XH. Study on the efficacy of Jijian synergist on reducing the dosage of two insecticides against cotton aphid [J]. *Modern Agrochemicals*, 2018, 17 (5): 55–56, 60. [王映山, 郑小寒. 激健助剂对减少 2 种药剂防治棉花蚜虫用量的作用研究 [J]. 现代农药, 2018, 17 (5): 55–56, 60]
- Wei C, Huang SN, Fan XL, et al. Study on resistance of *Sitobion avenae* [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 1988, 2: 148–156. [魏岑, 黄绍宁, 范贤林, 等. 麦长管蚜的抗药性研究 [J]. 昆虫学报, 1988, 2: 148–156]
- Wu XY, Cao YP, Zhao F, et al. Resistance risk of *Sitobion avenae* to common insecticides in Linfen wheat area [J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2019, 47 (6): 1061–1064. [武银玉, 曹亚萍, 赵飞, 等. 临汾麦区麦长管蚜对常用杀虫剂的抗药性风险 [J]. 山西农业科学, 2019, 47 (6): 1061–1064]
- Yunta C, Grisales N, Nász S, et al. Pyriproxyfen is metabolized by P450s associated with pyrethroid resistance in *An. gambiae* [J]. *Insect Biochemistry Molecular Biology*, 2016, 78: 50–57.
- Yu XQ. Efficient drug for controlling aphids in wheat fields [J]. *Pesticide Market News*, 2018, 5: 52. [于晓庆. 防治小麦田蚜虫高效药种 [J]. 农药市场信息, 2018, 5: 52]
- Zhang M. Resistance of Bird Cherry - oat Aphid *Rhopalosiphum padi* (L) to Imidacloprid and its Mechanisms [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2016. [张蒙. 禾谷缢管蚜对吡虫啉的抗性及其机理研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016]
- Zhang S. 2016 national agricultural pest resistance monitoring results and scientific drug recommendations [J]. *China Plant Protection*, 2017, 37 (3): 56–59. [张帅. 2016 年全国农业有害生物抗药性监测结果及科学用药建议 [J]. 中国植保导刊, 2017, 37 (3): 56–59.]
- Zhang S. 2017 national agricultural pest resistance monitoring results and scientific drug recommendations [J]. *China Plant Protection*, 2018, 38 (4): 52–56. [张帅. 2017 年全国农业有害生物抗药性监测结果及科学用药建议 [J]. 中国植保导刊, 2018, 38 (4): 52–56]
- Zhang S. 2018 national agricultural pest resistance monitoring results and scientific drug recommendations [J]. *China Plant Protection*, 2019, 39 (3): 63–67, 72. [张帅. 2018 年全国农业有害生物抗药性监测结果及科学用药建议 [J]. 中国植保导刊, 2019, 39 (3): 63–67, 72]
- Zhang S. 2019 national agricultural pest resistance monitoring results and scientific drug recommendations [J]. *China Plant Protection*, 2020, 40 (3): 64–69. [张帅. 2019 年全国农业有害生物抗药性监测结果及科学用药建议 [J]. 中国植保导刊, 2020, 40 (3): 64–69.]
- Zhang YH. Small aphid “good” crime prevention and control of early arrangements [N]. *Henan Science and Technology News*, 2020–4–14 (B7). [张云慧. 小蚜虫“大能耐”重防控早安排 [N]. 河南科技报, 2020–4–14 (B7)]
- Zhang YX, Liu ZW. Mechanisms of insecticide resistance and selectivity [J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2020, 34 (4): 511–518. [张懿熙, 刘泽文. 杀虫剂的选择性与害虫抗药性 [J]. 中国科学基金, 2020, 34 (4): 511–518]
- Zhu YH. Resistant Mechanism of Cytochrome P450 Mediated *Schizaphis graminum* on Insecticides [D]. Xixiang: Henan Institute of Science and Technology, 2018. [朱英慧. 细胞色素 P450 介导的麦二叉蚜对杀虫剂的抗性机制 [D]. 新乡: 河南科技学院, 2018]
- Zuo YY. Resistance Monitoring and Resistance Mechanism of *Rhopalosiphum padi* (Linnaeus) to Beta - cypermethrin [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2015. [左亚运. 禾谷缢管蚜抗药性监测及其对高效氯氰菊酯的抗药性机理初步研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015]
- Zuo YY, Wang K, Zhang M, et al. Regional susceptibilities of *Rhopalosiphum padi* (Hemiptera: Aphididae) to ten insecticides [J]. *Florida Entomologist*, 2016, 99 (2): 269–275.