

◆ 专论:杀虫剂(特约稿) ◆

# 害虫对杀虫剂抗性的发生与治理

朱斌,梁沛\*

(中国农业大学植物保护学院,北京 100193)

**摘要:**农业害虫的防治离不开杀虫剂,而杀虫剂的不合理使用往往导致害虫产生抗药性,使得杀虫剂的防治效果下降,并对食品安全和环境安全造成威胁。害虫抗药性目前已经成为全球范围内影响害虫可持续治理的重要因素。简要介绍了害虫对杀虫剂产生抗性的机理及我国主要害虫抗药性现状,并提出了害虫抗药性预防和治理策略,以期为抗药性害虫的治理提供参考。

**关键词:**害虫;杀虫剂;抗药性;预防;治理

中图分类号:TQ 450.1 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1671-5284.2024.04.001

## Occurrence and management of insecticides resistance

ZHU Bin, LIANG Pei\*

(College of Plant Protection, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

**Abstract:** Insecticides play an important role in the prevention and control of agricultural pests, and the unreasonable use of insecticides often leads to pest resistance, reducing the effectiveness of insecticides and posing a great threat to food and environmental safety. Insecticides resistance has become an important factor affecting sustainable pest management worldwide. The mechanism of pest resistance to insecticides and the current situation of major insect pests resistance in China were introduced briefly in this article. In order to provide references for the management of insecticide-resistant pests, the strategies for pest resistance prevention and management were proposed.

**Key words:** pest; insecticide; resistance; prevention; management

农作物在生长过程中常常会遭受许多害虫(包括害螨)的侵害或影响。据不完全统计,我国的农业害虫有700多种,其中,水稻害虫380多种,小麦害虫240多种,玉米害虫500多种,棉花害虫300多种,严重影响作物的产量和品质,防控不当,易造成重大的经济损失<sup>[1]</sup>。此外,生活中常见的一些卫生害虫,主要包括苍蝇、蟑螂、蚊子、跳蚤等,常携带致病的细菌、病毒、真菌,传播疾病,对人类健康造成威胁<sup>[2]</sup>。化学防治仍是目前控制这些害虫的最有效手段,但随着化学杀虫剂的大量、不合理使用,害虫对杀虫剂的抗性快速发展,导致杀虫剂防治效果显著下降,害虫的防治难度不断加大。而由于杀虫剂防治效果下降,为了达到预期防效,就势必加大药剂用量,导致杀虫剂超量使用,从而造成农产品中农药

残留超标,同时对传粉昆虫和天敌昆虫等非靶标生物的毒性增加,对食品安全和环境安全造成巨大威胁。因此,亟待加强对害虫抗药性产生机制、影响因素及抗性机制的理解,并在此基础上制订切实可行的害虫抗药性治理对策<sup>[3]</sup>。本文主要介绍了杀虫剂抗性的基本概念、影响抗药性发展的因素、害虫对杀虫剂的抗性机制、我国主要作物害虫的抗药性现状,并提出了害虫抗药性的预防与治理策略,以期为合理使用杀虫剂、有效治理害虫抗药性提供借鉴。

## 1 杀虫剂抗性的概念

杀虫剂抗性是指由于昆虫种群在遗传上的改变,当使用推荐剂量的杀虫剂时,不能达到预期效果而导致防治屡次失败的现象。即真正的抗药性只

收稿日期:2024-06-07

作者简介:朱斌(1987—),男,副教授,主要从事昆虫对杀虫剂抗性的分子机制及抗性治理研究。E-mail:zhubin1215@126.com

通信作者:梁沛(1970—),男,陕西凤翔人,教授,主要从事昆虫毒理学方面的研究。E-mail:liangcau@cau.edu.cn

有在基因发生可遗传的改变后才会出现。

害虫对杀虫剂的耐药性与抗药性不同。耐药性也叫天然抗性,是指昆虫固有的耐受某些杀虫剂的能力,即对某些药剂具有一种天然的低敏感性,当昆虫不再暴露于杀虫剂时,耐药性随即丧失。耐药性不是由于选择压或基因突变所致,是天然存在的。

多重抗性指害虫种群由于不同的抗性机制,对2种或2种以上作用机制不同的杀虫剂产生的抗性。多重抗性往往是在田间同时或连续使用多种杀虫剂造成,这种现象在田间褐飞虱、小菜蛾、棉蚜等多种害虫中普遍存在。

交互抗性(也叫正交互抗性)是指害虫种群由于相同的作用机制,对选择药剂以外的其他杀虫剂也产生了抗性。与之相对应的是负交互抗性,是指害虫种群对一种杀虫剂产生抗性后,对另一种杀虫剂的敏感性反而增强的现象<sup>[4]</sup>。筛选具有负交互抗性的药剂对于治理抗药性害虫具有重要意义。

## 2 抗药性形成的学说

抗药性的发生,首先是昆虫基因型与杀虫剂相互作用的结果,本质上是一个种群遗传学的问题,这种进化现象至少包括变异、遗传、选择3个因素。关于害虫抗药性的形成有3种经典假说:(1)选择学说,即在害虫未接触杀虫剂之前,由于随机突变或环境中天然有毒物质的胁迫,其种群中就存在频率极低的带有抗性基因的个体;在杀虫剂不断选择下,种群中敏感个体的比例越来越低,抗性个体所占比例不断增加,最终形成抗性种群。这种学说认为,昆虫对杀虫剂的抗性实际上是一种预适应现象,即在杀虫剂使用之前,昆虫种群中就已经存在控制抗性的基因。(2)突变学说,即在杀虫剂胁迫下,昆虫种群某些个体的基因发生突变导致其产生抗药性,随之在杀虫剂的选择作用下抗性个体在种群中逐步增多,形成抗性种群。(3)基因复增学说,即在杀虫剂的选择压力下,昆虫基因组中的某些解毒酶基因发生复制,其拷贝数成几何级数增加,使其编码的解毒酶活性大幅度增加,对杀虫剂的代谢能力显著增强,从而产生抗性。每种假说均有相应的试验证据支持,但任何一种假说都无法单独解释所有抗药性现象的形成<sup>[9]</sup>。

## 3 影响抗药性发展的因素

影响害虫抗药性形成的主要因素包括遗传学因子、生物学因子和杀虫剂施用方面的因素。遗传

学因子主要包括抗性基因的数量、显/隐性、抗性基因频率、外显率和表现度等,一般抗性基因数量少、初始频率高、外显率和表现度高,则抗性发展快。生物学因子主要包括昆虫世代周期长短、繁殖率、活动能力等,一般世代周期短、繁殖率高且活动能力差的害虫,其抗药性发展更快。影响害虫抗药性发展最主要的因素是杀虫剂的不合理施用,最典型的是长期、大面积使用同一种有效成分或作用机制相同的杀虫剂,往往很快(1~2年)就会导致抗药性的产生;产生抗性后药剂防治效果下降,为达到预期防治效果而盲目加大药剂用量、增加施用次数又会进一步加剧害虫抗药性的发展<sup>[4,9]</sup>。

## 4 害虫对杀虫剂产生抗性的分子机制

杀虫剂发挥其杀虫作用,从药物动力学上可分为3个阶段:穿透表皮组织;在虫体组织中的分布、转运、储存和代谢;作用于靶标受体。根据昆虫对杀虫剂的反应,抗性机理主要分为:行为抗性、表皮穿透抗性、代谢抗性以及靶标抗性<sup>[7]</sup>。

### 4.1 行为抗性

行为抗性是昆虫对杀虫剂产生逃避或拒食等行为的反应。这些行为主要分成两类:(1)依赖刺激的行为回避,是昆虫受到刺激后做出对自身生存有利的行为反应;(2)非依赖刺激的行为回避,是指昆虫群体对某种环境或寄主的天然回避性<sup>[8]</sup>。

### 4.2 表皮穿透抗性

表皮穿透抗性是指杀虫剂对昆虫表皮的穿透效率下降,从而使进入虫体的药量减少,同时延长了杀虫剂到达靶标部位的时间,使昆虫获得一定水平的抗药性<sup>[9]</sup>。杀虫剂对表皮穿透能力下降的原因主要有3个方面:(1)表皮中存在某些蛋白质或脂库能够与杀虫剂结合并将其贮存在表皮中;(2)表皮中存在一些解毒酶,杀虫剂在穿通过程中被这些解毒酶代谢;(3)表皮厚度增加会使杀虫剂不易穿透。当杀虫剂对表皮穿透性降低单独存在时,其引起的抗性水平往往并不高,但当表皮穿透率下降与解毒酶活性增强引起代谢抗性结合在一起时,产生的互作效应非常显著,常引起高水平抗药性<sup>[4,10]</sup>。

### 4.3 代谢抗性

代谢抗性是指由于昆虫对杀虫剂解毒代谢能力增强而导致的抗药性。昆虫进化出了一套完善的解毒系统来保护自己免受包括杀虫剂在内的外源有毒化合物的伤害,主要涉及氧化作用、还原作用、水解作用、基团转移及耦合作用,通过这些生化过

程把杀虫剂转变为无毒且易溶于水的极性分子,从而排出体外<sup>[11]</sup>。昆虫的解毒代谢过程依赖于细胞色素P450单加氧酶(cytochrome P450 monooxygenases, P450s)<sup>[12]</sup>、酯酶(esterases, ESTs)<sup>[13]</sup>、谷胱甘肽S-转移酶(glutathione S-transferases, GSTs)<sup>[14]</sup>、尿苷二磷酸葡萄糖醛酸转移酶(UDP-glucuronosyltransferases, UGTs)<sup>[15]</sup>和ABC转运蛋白(ATP-binding cassette transporters, ABC transporters)<sup>[16]</sup>等。昆虫对外源有毒化合物的代谢可以分为3个过程:Ⅰ相代谢,主要是以P450s、ESTs和GSTs为代表的酶类参与对外源化合物的氧化、还原、水解以及基团转移;Ⅱ相代谢,主要是由GSTs、UGTs和磺基转移酶等转移酶类通过基团转移,增强外源化合物或者Ⅰ相代谢产物的水溶性;Ⅲ相代谢,主要是利用细胞跨膜转运蛋

白(主要是ABC转运蛋白)将结合体泵出到胞外<sup>[17]</sup>。

#### 4.4 靶标抗性

杀虫剂进入虫体后,须与其作用靶标结合,影响靶标蛋白正常的生理功能,使昆虫产生中毒症状,最后引起死亡。杀虫剂的长期胁迫,往往会造成其靶标蛋白结构发生改变,导致其与杀虫剂的结合能力下降,即靶标对药剂不敏感,从而产生抗性,这种因靶标敏感度降低而产生的抗性称为靶标抗性<sup>[18]</sup>。引起靶标蛋白结构变异的因素主要包括靶标蛋白氨基酸突变、氨基酸缺失或选择性剪接等。杀虫剂在昆虫中的作用靶标主要有乙酰胆碱酯酶、神经轴突钠离子通道、 $\gamma$ -氨基丁酸受体、鱼尼丁受体等(表1),这些靶标对目标药剂的敏感性下降是害虫产生抗药性的重要原因<sup>[19]</sup>。

表1 主要杀虫剂类型及其作用机理

药剂类别	代表性杀虫剂品种	作用机理
双酰胺类	氟苯虫酰胺、氯虫苯甲酰胺、溴氰虫酰胺、硫虫酰胺等 溴虫氟苯双酰胺、异噁唑虫酰胺	鱼尼丁受体调节剂 $\gamma$ -氨基丁酸门控氯离子通道变构调节剂
拟除虫菊酯类	高效氯氟菊酯、高效氯氟菊酯、氯氟菊酯、甲氟菊酯、溴氟菊酯、醚菊酯、氯菊酯、顺式氯氟菊酯、联苯菊酯、氰戊菊酯等	钠离子通道调节剂
有机磷类 氨基甲酸酯类	丙溴磷、辛硫磷、敌敌畏、马拉硫磷、毒死蜱等 涕灭威、杀线威、灭多威、甲萘威、克百威等	乙酰胆碱酯酶抑制剂
环戊二烯有机氯类 苯基吡啶类	氯丹、硫丹 乙虫腈、氟虫腈	$\gamma$ -氨基丁酸门控氯离子通道拮抗剂
新烟碱类 砒亚胺类 介离子类 丁烯羟酸内酯类	吡虫啉、啶虫脒、烯啶虫胺、氯噻啉、噻虫啉、噻虫嗪、噻虫胺、呋虫胺等 氟啶虫胺腈 三氟苯嘧啶 氟吡呋喃酮	烟碱型乙酰胆碱受体竞争性调节剂
沙蚕毒素类 苯甲酰脲类 二氯丙烯醚类 仿生保幼激素类 蜕皮激素类似物(双酰胺类)	杀螟丹、杀虫单等 氟铃脲、杀铃脲、氟啶脲、氟酰脲、虱螨脲、除虫脲、灭幼脲等 三氟甲吡醚 吡丙醚、苯氧威、烯虫乙酯、烯虫酯等 虫酰肼、甲氧虫酰肼等	烟碱型乙酰胆碱受体阻断剂 几丁质生物合成抑制剂 未知 保幼激素类几丁质合成抑制剂 蜕皮激素受体激动剂
农用抗生素类	多杀霉素、乙基多杀菌素 阿维菌素、依维菌素、甲氨基阿维菌素苯甲酸盐	烟碱型乙酰胆碱受体变构调节剂 谷氨酸门控氯离子通道变构调节剂
植物源杀虫剂	印楝素、印楝籽提取物、印楝提取物	未知
	除虫菊素	钠离子通道调节剂
	苦参碱、苦参提取物	未知
	藜芦根茎提取物 鱼藤酮	未知 线粒体电子传递复合体(I)抑制剂
植物免疫诱导剂	酰氨基糖素醋酸盐	植物诱抗剂
矿物源类	矿物油	物理窒息和行为改变
微生物源活体杀虫剂	球孢白僵菌	未知
	短稳杆菌、苏云金杆菌G033A、苏云金杆菌、颗粒体病毒、核型多角体病毒等	昆虫中肠微生物干扰物
吡咯类	虫螨腈	干扰质子梯度影响氧化磷酸化的解偶联剂
噁二嗪类	茚虫威	电压依赖性钠离子通道阻断剂
缩氨基脲类	氰氟虫腈	

(续表 1)

药剂类别	代表性杀虫剂品种	作用机理
吡唑等杂环类	唑虫酰胺、啶虫醚、啶虫灵、啶虫酯等	线粒体电子传递复合体(I)抑制剂
吡啶甲亚胺衍生物等	双丙环虫酯、吡蚜酮	弦音器 TRPV 通道调节剂
吡啶酰胺类	氟啶虫酰胺	烟酰胺酶
有机锡杀螨剂	三唑锡、三环锡等	
有机氯类杀螨剂	三氯杀螨砜	
有机硫类杀螨剂	炔螨特	线粒体三磷酸腺苷(ATP)合成酶抑制剂
硫脲类	丁醚脲	

## 5 害虫的抗药性现状

截至2024年3月,节肢动物抗性数据库(arthropod pesticide resistance database, APRD; www.pesticideresistance.org)共记录了607种害虫在田间发生的抗药性事件。报道最多的前10位抗药性害虫分别是:小菜蛾、斜纹夜蛾、甜菜夜蛾、烟粉虱、微小牛蒡、埃及伊蚊、油菜露尾甲、褐飞虱、桃蚜和二斑叶螨。其中,报道的小菜蛾田间抗药性事件高达854次,对85种具有杀虫活性的有效成分产生了抗性;斜纹夜蛾报道659次,对44种具有杀虫活性的有效成分产生了抗性;甜菜夜蛾618次,对43种具有杀虫活性的有效成分产生了抗性;烟粉虱599次,对69种具有杀虫活性的有效成分产生了抗性;微小牛蒡500次,对50种具有杀虫活性的有效成分产生了抗性(表2)。

表 2 报道抗药性案例最多的 10 种害虫

害虫名称	拉丁名	产生抗药性的杀虫剂种类/种	报道案例/次
小菜蛾	<i>Plutella xylostella</i>	85	854
斜纹夜蛾	<i>Spodoptera litura</i>	44	659
甜菜夜蛾	<i>Spodoptera exigua</i>	43	618
烟粉虱	<i>Bemisia tabaci</i>	69	599
微小牛蒡	<i>Boophilus microplus</i>	50	500
埃及伊蚊	<i>Aedes aegypti</i>	36	473
油菜花露尾甲	<i>Meligethes aeneus</i>	27	470
褐飞虱	<i>Nilaparvata lugens</i>	32	435
桃蚜	<i>Myzus persicae</i>	82	430
二斑叶螨	<i>Tetranychus urticae</i>	86	396

在国内,全国农技推广服务中心联合各级植物保护机构、有关科研教学单位,每年都会对全国范围内水稻、小麦、玉米、棉花、蔬菜上的重要病虫害进行抗药性监测评估<sup>[20-23]</sup>。

2023年的监测结果表明:上海、江苏、浙江、安徽、福建、江西、湖北、湖南、广东、广西南、重庆等地

的水稻褐飞虱田间种群对吡虫啉(>2 000倍)、噻虫嗪(>800倍)、噻虫酮(>1 000倍)均处于高水平抗性,对呋虫胺(72~532倍)和吡蚜酮(75~701倍)均处于中等至高水平抗性。浙江、安徽、江西、湖南、广西、湖北等省区大部分稻区二化螟种群对双酰胺类药剂氯虫苯甲酰胺均处于高水平抗性(抗性倍数112~2 706倍),稻纵卷叶螟种群对氯虫苯甲酰胺为中等至高水平抗性(抗性倍数39~124倍),氯虫苯甲酰胺喷施后的防治效果已降低到80%以下。

北京、河北、山西、江苏、山东、河南、湖北和陕西等地的小麦麦长管蚜种群对氟啶虫胺腈均处于中等至高水平抗性(抗性倍数12~328倍)。北京、河北、湖北、山西麦长管蚜种群对吡虫啉、啶虫脒均为中等水平抗性。

棉花棉铃虫的抗药性具有明显的地域性,华北棉区棉铃虫种群对高效氯氟氰菊酯处于高水平抗性(抗性倍数106~430倍),对氯虫苯甲酰胺、茚虫威、辛硫磷处于中等水平抗性(抗性倍数分别为35~63倍、19~44倍、11~38倍),对氨基阿维菌素苯甲酸盐处于低至中等水平抗性(抗性倍数5.4~22倍);新疆棉区和长江流域棉区棉铃虫种群对监测的杀虫剂相对敏感。河北、山东、湖北和新疆等地的棉蚜种群对高效氯氟氰菊酯(>10 000倍)、溴氰菊酯(>4 500倍)、吡虫啉(>200倍)均处于高水平抗性,对氨基甲酸酯类药剂丁硫克百威处于中等至高水平抗性(抗性倍数22~122倍)。

北京、河北、河南和云南等地的蔬菜西花蓟马种群对乙基多杀菌素(>100倍)、虫螨腈(102~1 689倍)产生高水平抗性,对噻虫嗪(11~1 000倍)、多杀霉素(13~166倍)、氨基阿维菌素苯甲酸盐(11~219倍)处于中等至高水平抗性。华北和华东蔬菜产区小菜蛾种群对高效氯氟氰菊酯处于中等至高水平抗性(抗性倍数58~115倍),对氟啶脲处于中等水平抗性(抗性倍数11~97倍)<sup>[23]</sup>。

综上,我国主要粮食作物、经济作物和蔬菜作

物害虫的抗药性普遍发生,形势严峻,解决抗药性害虫治理问题迫在眉睫。

## 6 害虫抗药性的预防与治理

结合当前倡导绿色植保,减少农药使用的大背景,害虫抗药性的预防与治理应从生态系统总体出发,因地制宜,尽可能地协调应用各种措施。

### 6.1 加强害虫的预测预报

同一种害虫生长发育的不同阶段,其对杀虫剂的敏感性不同。一般来说,幼虫比卵、蛹和成虫敏感,而低龄幼虫(1~3龄)比高龄幼虫(4龄及以后)敏感。因此,加强害虫种群发生动态的预测预报,在害虫卵孵化高峰期集中用药,只需要较低浓度即可达到很好的防治效果。对于水稻螟虫、潜叶蝇等钻蛀性害虫,则需要在其孵化后尚未钻入茎秆或叶片的关键窗口期施药。错过该窗口期,则不仅防效差,还会诱导抗药性的产生和发展。因此,加强害虫的预测预报对于有效控制害虫,预防害虫抗药性产生具有重要意义<sup>[24]</sup>。

### 6.2 加强害虫抗药性监测及抗药性风险评估

抗药性监测综合利用各种抗药性检测技术,系统测定昆虫抗药性个体(或抗性基因)频率和抗药性水平的时空变化动态,明确害虫对常用杀虫剂的抗性谱和抗性程度,即对哪些药剂产生了高水平抗性,对哪些为中等或低水平抗性,对哪些药剂未产生抗性。根据监测结果,精准选药。停止使用已经产生高水平抗性的药剂品种;限制使用已经产生了中等水平抗性的药剂,每个生长季最多使用1次;对产生低水平抗性和尚未产生抗性的药剂要科学轮用或混用,选择作用机制不同(最好具有负交互抗性)的药剂品种进行轮换使用或混合使用,以最大程度延缓害虫抗药性的发生发展<sup>[4,25]</sup>。同时,要加强监测害虫种群中抗性基因频率的变化动态,对于未检测到明显抗药性水平,但抗性基因频率快速增加的杀虫剂品种,应及时调整用药方案,采取预防性抗性治理策略,延缓其抗性基因频率的继续上升,避免其产生明显的抗药性。有效的抗性监测可以降低农药的用量,增加化学防治和生物防治的协调能力<sup>[26]</sup>。

对于新上市的杀虫剂品种,或申请登记在新防治对象上的杀虫剂老品种,应通过室内抗性筛选或采集用药量较大地区的田间抗性种群,评估新防治对象对其产生抗药性的风险。对于具有中等及高风险的药剂,应在标签上注明相应的抗性治理对策,

从使用之初就注意延缓其抗药性发生和发展<sup>[4]</sup>。

### 6.3 真正重视和应用害虫综合治理措施

我国早在20世纪70年代就提出了“预防为主、综合治理”的植保方针,强调害虫的治理应该因地制宜,综合应用农业、物理、生物和化学防治措施,压低害虫种群数量,使其保持在经济阈值以下,减少其对农业生产造成的损失。其中的化学防治是害虫综合防治的“压舱石”,不到万不得已不应轻易应用。但由于化学杀虫剂应用简便,且高效、低成本,因此,一直以来化学防治反而成为害虫防治的首选措施,害虫发生后不考虑其他措施,直接使用化学农药。而对化学防治的过度依赖必然导致害虫对杀虫剂产生抗性。因此,真正重视害虫综合治理,充分应用非化学防治措施,才能从根本上延缓害虫抗药性的产生和发展。

#### 6.3.1 农业防治

根据农业生态系统中害虫、作物、环境条件三者之间的关系,结合农作物整个生产过程中一系列耕作栽培管理技术措施,有目的地改变害虫生活条件和环境条件,使之不利于害虫的发生发展,而有利于农作物的生长发育<sup>[1]</sup>。

农业防治措施主要包括:合理轮作,合理间作套种,可抑制甚至直接消灭食性专一、活动能力弱的害虫;土地深耕,适时灭茬,将土壤深层的害虫翻至地表,日光暴晒或冷冻致死;科学播种,适时播种,合理密植;合理施肥和灌溉,改善作物营养条件,提高作物抗虫能力;加强田间管理,田间的枯枝、落叶、落果等作物残余物往往潜藏着大量害虫,清洁田园可有效防止害虫发生;种植抗虫品种,例如种植转基因*Bt*作物,可直接控制鳞翅目害虫的为害<sup>[27]</sup>。

#### 6.3.2 生物防治

生物防治主要是利用活体生物来控制害虫种群数,包括天敌昆虫和活体微生物。天敌昆虫主要有捕食性天敌(应用较多的有瓢虫、草蛉、食蚜蝇等)<sup>[28]</sup>和寄生性天敌(主要是膜翅目和双翅目的寄生蜂和寄生蝇)两大类<sup>[29]</sup>。在害虫发生前期或害虫种群数量较低时,根据天敌昆虫和害虫的种类,按一定的益害比释放天敌可有效控制害虫种群数量;也可在田间种植有利于天敌昆虫繁育的“银行植物”,吸引和利用野外的天敌昆虫。

昆虫病原微生物主要包括细菌(如芽孢杆菌、球杆菌等),昆虫病原真菌(白僵菌、绿僵菌等)<sup>[30]</sup>,昆虫病毒(核型多角体病毒、颗粒体病毒等)<sup>[31]</sup>,昆虫病

原线虫(斯氏线虫、异小杆线虫等)<sup>[32]</sup>和其他的一些病原微生物(如微孢子虫等)<sup>[33]</sup>。可针对性选择和使用对靶标害虫有效的生防菌。由于昆虫病原微生物的速效性差,一般需要4~7 d甚至更长时间才能发挥作用。因此,需要根据预测预报情况,在害虫种群数量较低时就开始使用。

### 6.3.3 物理防治

物理防治是指利用各种物理因子、人工或者器械防治有害生物的方法。应用较多的主要包括:阻隔分离技术,例如利用防虫网可以阻止害虫的扩散蔓延和为害;树干刷白,可防止果树害虫上树为害和产卵;物理诱杀,主要是利用害虫的趋光性和趋化性防治害虫,如应用黑光灯诱杀成虫,利用糖醋液诱杀小地老虎和黏虫,利用昆虫性信息素诱杀成虫,利用黄板诱集蚜虫、粉虱等<sup>[34]</sup>。需要注意的是,物理防治措施单独使用一般无法完全控制害虫,往往需要与其他措施配套使用。

### 6.3.4 化学防治

化学防治的核心是精准选药、合理用药。首先要根据抗性监测的结果做到精准选药,即选择未产生或只有低水平抗性的杀虫剂。其次要合理使用所选择的杀虫剂,即选择最佳的窗口期施药,同时要注意轮换使用或混合使用作用机制不同的杀虫剂,尽可能延缓害虫抗药性的发生和发展。对于蚜虫、粉虱、飞虱等刺吸式口器害虫,尽量选择和使用内吸性杀虫剂。

## 7 展望

害虫抗药性是一个需要长期关注的重要问题,其治理不可能一蹴而就。未来有关害虫抗药性的研究和治理需要关注以下几个方面:(1) 加强害虫抗药性分子机制研究,特别是害虫对杀虫剂多重抗性的机制研究,在此基础上建立害虫多药抗性快速分子检测技术。(2) 加强害虫抗药性监测,尤其是害虫抗药性基因频率的监测,明确其时空变化动态,指导预防性抗性治理措施的制订和实施,在害虫产生明显抗药性之前及时调整防治策略,避免其产生可检测的抗性。(3) 研发新型害虫防治技术,如基于RNA干扰(RNAi)技术的双链RNA(dsRNA)杀虫剂,通过抑制害虫的特定基因的表达干扰其正常的生理功能,引起害虫生长发育缺陷或死亡。DsRNA杀虫剂可以和普通化学杀虫剂一样喷雾使用,也可以构建转基因作物,使其表达害虫的特定dsRNA来防治害虫。需要注意的是,害虫对dsRNA同样具有

产生抗性的风险,因此,在使用时最好同时使用2种或2种以上的靶向不同目的基因的dsRNA,以降低害虫对单一dsRNA产生抗性风险。与dsRNA相比,微小RNA(miRNA)在害虫防治中具有更大的应用潜力。通过喷雾使用或构建表达害虫特定miRNA的转基因作物,可显著干扰害虫特定基因的表达,有效控制害虫种群数量。由于miRNA是害虫内源性的小RNA,害虫很难对其产生抗药性,而且miRNA在不同害虫中往往具有高度保守性,一种miRNA可能同时防治多种害虫,大大提高害虫防治效率。(4) 加强高效、精准施药器械研发,提升农药的利用效率。

### 参考文献

- [1] 仵均祥. 农业昆虫学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2013: 3-4.
- [2] 尤春梅, 王晓军, 高希武. 公共卫生害虫对新烟碱类杀虫剂抗性现状及合理使用策略[J]. 现代农药, 2021, 20(5): 1-10.
- [3] 杨眉, 褚晋, 田春晖, 等. 二化螟抗药性研究进展[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(20): 15-20.
- [4] 高希武, 梁沛. 昆虫毒理学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2022.
- [5] 纪明山. 植物有害生物抗药性及治理对策[J]. 新农业, 2017(2): 33-34.
- [6] 吴有刚, 金京, 杨胜祥, 等. 昆虫抗药性产生机制[J]. 生物安全学报, 2019, 28(3): 159-169.
- [7] PU J, CHUNG H. New and emerging mechanisms of insecticide resistance [J]. Curr Opin Insect Sci, 2024, 63: 101184.
- [8] 李显春, 王荫长. 昆虫抗药性靶标不敏感机制的研究进展[J]. 昆虫学报, 1998, 41(4): 417-423.
- [9] CAI T, WANG X, LIU B, et al. A cuticular protein, BgCPLCP1, contributes to insecticide resistance by thickening the cockroach endocuticle [J]. Int J Biol Macromol, 2024, 254(1): 127642.
- [10] 沈晋良, 吴益东. 棉铃虫抗药性及其治理[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995: 5-10.
- [11] LIU N, LI M, GONG Y, et al. Cytochrome P450s--their expression, regulation, and role in insecticide resistance[J]. Pestic Biochem Physiol, 2015, 120: 77-81.
- [12] NAUEN R, BASS C, FEYEREISEN R, et al. The role of cytochrome P450s in insect toxicology and resistance[J]. Annu Rev Entomol, 2022, 67: 105-124.
- [13] LI R, ZHU B, SHAN J, et al. Functional analysis of a carboxylesterase gene involved in beta-cypermethrin and phoxim resistance in *Plutella xylostella* (L.) [J]. Pest Manag Sci, 2021, 77(4): 2097-2105.
- [14] ZHU B, LI L, WEI R, et al. Regulation of GSTu1-mediated insecticide resistance in *Plutella xylostella* by miRNA and lncRNA [J]. PLoS Genet, 2021, 17(10): e1009888.

(下转第37页)

- [7] XIAO Y M, YANG X L, LI B, et al. Design, synthesis and antifungal/insecticidal evaluation of novel cinnamide derivatives[J]. *Molecules*, 2011, 16(11): 8945-8957.
- [8] 高亚强, 马俊豪, 周蒲, 等. 4-(吩嗪-1-酰氧基)肉桂酸酯和*N*-吩嗪-1-甲酰基-*N'*-肉桂酰基乙二胺的合成及生物活性[J]. *农药学报*, 2022, 24(1): 49-58.
- [9] 赵斌, 陈来, 张乃楼, 等. 新型杀菌化合物靶标识别及其靶向候选药剂设计概述[J]. *农药学报*, 2018, 20(4): 397-407.
- [10] 万昆. 三唑类新化合物的设计合成及抗真菌和抗细菌活性研究[D]. 重庆: 西南大学, 2010.
- [11] ZOUPOULAKIS P, CAMOUTSIS C, PAIRAS G, et al. Synthesis of novel sulfonamide-1,2,4-triazoles, 1,3,4-thiadiazoles and 1,3,4-oxadiazoles, as potential antibacterial and antifungal agents. Biological evaluation and conformational analysis studies[J]. *Bioorganic & Medicinal Chemistry*, 2012, 20(4): 1569-1583.
- [12] JIANG Y W, ZHANG J, CAO Y B, et al. Synthesis, in vitro evaluation and molecular docking studies of new triazole derivatives as antifungal agents[J]. *Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters*, 2011, 21(15): 4471-4475.
- [13] NELSON G L, WILLIAMS M J, JONNALAGADDA S, et al. Synthesis and evaluation of Baylis-Hillman reaction derived imidazole and triazole cinnamates as antifungal agents[J]. *International Journal of Medicinal Chemistry*, 2018(1): 1-8.
- [14] 张敏, 张立孔, 孟振国, 等. 1-[2-吡氧基-(2,4-二氟苯基)乙基]-1*H*-1,2,4-三唑衍生物的合成及杀菌活性[J]. *农药学报*, 2020, 22(3): 413-422.
- [15] 邓坤钊, 李旭军, 朱祥, 等. 新型三唑哌嗪类衍生物的合成及生物活性[J]. *农药学报*, 2021, 23(2): 269-278.
- [16] 吴春丽, 李幸, 施秀芳, 等. 氟康唑的合成工艺研究及优化[J]. *中国药物化学杂志*, 2011, 21(4): 304-307.
- [17] 游江, 高亚强, 周蒲, 等. *N*-取代苯基-1-(2,4-二氟苯基)-2-(1*H*-1,2,4-三唑-1-基)乙基氨基甲酸酯的合成及生物活性[J]. *农药学报*, 2022, 24(4): 723-731.
- [18] LU X L, QIN C, CAI J L, et al. Study on the selectivity and phloem mobility of fenoxaprop-P amino acid ester conjugates on rice and barnyard grass[J]. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 2022, 183: 105086.
- [19] 中华人民共和国农业部. 农药室内生物测定实验准则 杀菌剂 第2部分: 抑制病原真菌菌丝生长实验 平皿法: NY/T 1156.2—2006[S]. 北京: 中国农业大学出版社, 2006.
- [20] 中华人民共和国农业部. 农药室内生物测定实验准则 杀菌剂 第16部分: 抑制细菌生长量试验 浑浊度法: NY/T 1156.16—2008[S]. 北京: 中国农业大学出版社, 2006.

(编辑: 顾林玲)

(上接第6页)

- [15] LI X, SHI H, GAO X, et al. Characterization of UDP-glucuronosyltransferase genes and their possible roles in multi-insecticide resistance in *Plutella xylostella* (L.)[J]. *Pest Manag Sci*, 2018, 74(3): 695-704.
- [16] SHAN J, SUN X, LI R, et al. Identification of ABCG transporter genes associated with chlorantraniliprole resistance in *Plutella xylostella* (L.)[J]. *Pest Manag Sci*, 2021, 77(7): 3491-3499.
- [17] 王志超, 康志娇, 史雪岩, 等. 有机磷类杀虫剂代谢机制研究进展[J]. *农药学报*, 2015, 17(1): 1-14.
- [18] 封云涛, 徐宝云, 吴青君, 等. 杀虫剂分子靶标烟碱型乙酰胆碱受体研究进展[J]. *农药学报*, 2009, 11(2): 149-158.
- [19] 舒玥, HADIATULLLAH H, 王纹岚, 等. 昆虫鱼尼丁受体结构功能及抗性机制研究进展[J]. *农药学报*, 2024, 26(2): 1-14.
- [20] 任宗杰, 郭永旺, 秦萌, 等. 2022年全国农业有害生物抗性监测评估与治理对策[J]. *中国植保导刊*, 2023, 43(3): 62-71.
- [21] 任宗杰, 秦萌, 郭永旺, 等. 2021年全国农业有害生物抗性监测报告与治理对策(水稻、玉米部分)[J]. *中国植保导刊*, 2022, 42(3): 54-60.
- [22] 任宗杰, 秦萌, 郭永旺, 等. 2021年全国农业有害生物抗性监测报告与治理对策(小麦、棉花、蔬菜部分)[J]. *中国植保导刊*, 2022, 42(4): 68-73.
- [23] 任宗杰, 郭永旺, 王云鹏, 等. 2023年全国农业有害生物抗性监测结果与治理对策[J]. *中国植保导刊*, 2024, 44(5): 69-76.
- [24] 姜玉英, 刘杰, 曾娟, 等. 中国棉花害虫测报: 70年回顾[J]. *植物保护学报*, 2021, 48(5): 940-946.
- [25] 吴益东, 沈慧雯, 张正, 等. 草地贪夜蛾抗性概况及其治理对策[J]. *应用昆虫学报*, 2019, 56(4): 599-604.
- [26] SUN X, WEI R, LI L, et al. Resistance and fitness costs in diamondback moths after selection using broflanilide, a novel meta-diamide insecticide[J]. *Insect Sci*, 2022, 29(1): 188-198.
- [27] 张志刚, 梅正鼎, 杨晓萍. 我国转基因*Bt*抗虫棉的进展分析与生态风险评估[J]. *生物技术通报*, 2006(增刊): 75-78; 82.
- [28] 米莹莹, 杨亚洁, 王甦, 等. 基于捕食性天敌及害虫种群动态筛选功能植物的研究[J]. *环境昆虫学报*, 2024, 46(2): 1-16.
- [29] 陈学新, 杜永均, 黄健华, 等. 我国作物病虫害生物防治研究与应用最新进展[J]. *植物保护*, 2023, 49(5): 340-347.
- [30] 邹春华, 刘继辉, 吴伟, 等. 草地贪夜蛾病原白僵菌的分离鉴定及其致病力研究[J]. *植物保护*, 2023, 49(6): 242-246.
- [31] 秦启联, 程清泉, 张继红, 等. 昆虫病毒生物杀虫剂产业化及其展望[J]. *中国生物防治学报*, 2012, 28(2): 157-164.
- [32] 李而涛, 鲁祺晗, 张丹凤, 等. 小卷蛾斯氏线虫侵染对草地贪夜蛾幼虫天然免疫反应的影响[J]. *昆虫学报*, 2022, 65(12): 1623-1635.
- [33] 张海剑, 孙雪莲, 郝浩阳, 等. 草地贪夜蛾病原微孢子虫的鉴定及其致病力分析[J]. *植物保护学报*, 2022, 49(5): 1513-1520.
- [34] 冯帆. 浙西北梨瘿蚊、梨小食心虫的发生规律与物理防治技术研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2014.

(编辑: 顾林玲)