

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1787.2015.01.001

# 苹果蠹蛾抗药性研究进展

段辛乐, 乔宪凤, 陈茂华\*

西北农林科技大学植物保护学院, 农业部西北黄土高原作物有害生物综合治理重点实验室, 陕西 杨凌 712100

**摘要:** 苹果蠹蛾是世界各国高度关注的严重危害苹果生产的外来有害生物。该虫于 20 世纪 50 年代在我国首次报道, 目前是我国一类进境检疫性有害生物, 正严重威胁我国苹果主产区的水果生产安全。苹果蠹蛾以幼虫钻蛀到果实内部为害, 防治难度高, 对其主要采用化学农药、交配干扰和苹果蠹蛾颗粒体病毒进行防治。由于农药的长期大量使用, 苹果蠹蛾已对有机磷、氨基甲酸酯、拟除虫菊酯、昆虫生长调节剂、阿维菌素和苹果蠹蛾颗粒体病毒等不同类型的杀虫剂产生了抗药性。本文总结了国内外有关苹果蠹蛾抗药性现状和抗药性机理方面的研究, 并分析了其对几种农药产生抗性的主要原因, 同时结合国外苹果蠹蛾防治和抗药性相关研究, 以及在我国发生与防治的现状, 提出该虫抗药性治理策略, 即及时对我国疫区苹果蠹蛾的抗药性现状进行监测, 在此基础上, 注意科学地使用化学农药, 并结合农业防治和生物防治等措施对该虫进行综合治理。

**关键词:** 苹果蠹蛾; 抗药性; 抗性机理; 抗性治理

## Research advances concerning insecticide resistance in the codling moth, *Cydia pomonella* (L.)

Xin-le DUAN, Xian-feng QIAO, Mao-hua CHEN\*

Key Laboratory of Crop Pest Integrated Pest Management on the Loess Plateau of Ministry of Agriculture,  
College of Plant Protection, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

**Abstract:** The codling moth, *Cydia pomonella*, is one of the most important pest insects in fruit orchards worldwide as well as an important invasive species in different regions of the world. In China, *C. pomonella* was first reported in the 1950s and was considered a serious invasive species, threatening the safety of fruit production. As the larvae of codling moth bore into the fruit, it is difficult to control this pest. Chemical insecticides, mating disruption and the virus CpGV were the main control methods. In different regions of the world, *C. pomonella* had developed resistance to different types of insecticides including organophosphates, carbamates, pyrethroids, insect growth regulators, abamectin and CpGV. In this paper, the status of insecticide resistance, knowledge on the development of insecticide resistance, the resistance mechanisms and the main reasons causing resistance in the codling moth to different types of insecticides throughout the world were reviewed. Additionally, we propose integrated management strategies for the control of this pest in China, which includes proper use of chemical insecticides, as well as the application of agricultural and biological control methods based on the resistance monitoring.

**Key words:** *Cydia pomonella*; insecticide resistance; resistance mechanism; resistance management

苹果蠹蛾 *Cydia pomonella* (L.), 又称苹果小卷蛾, 属鳞翅目 Lepidoptera 卷蛾科 Tortricidae, 是为害苹果、梨、桃等多种核果类和仁果类果树的重要蛀果害虫之一, 被我国和其他许多国家列为国际重点检疫对象(万方浩等, 2005)。苹果蠹蛾被认为起源于欧洲大陆中部地区(Shel'Deshova, 1967), 19 世纪

50 年代初首次在我国新疆的库尔勒地区被发现, 随后迅速扩散至整个新疆地区, 目前在甘肃、内蒙古、宁夏和黑龙江等地区均有苹果蠹蛾的发生危害, 并有逐渐向我国苹果优势产区扩散的趋势(秦晓辉等, 2006; 张润志等, 2012; 张学祖, 1957; 赵星民, 2011)。

收稿日期(Received): 2014-11-21 接受日期(Accepted): 2015-02-05

基金项目: 国家自然科学基金(31071687); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金(博导类)(20110204110001); 国家科技支撑计划课题(2012BAK11B03)

作者简介: 段辛乐, 男, 博士。研究方向: 分子生态学及毒理学。E-mail: xinleduan@gmail.com

\* 通讯作者(Author for correspondence), E-mail: maohua.chen@nwsuaf.edu.cn

苹果蠹蛾对环境的适应能力较强,其幼虫为蛀果危害,防治难度高(林伟丽等,2007;杨富银等,2009;翟小伟等,2009;张耀荣和蒋银荃,2001;周昭旭等,2008)。目前,化学防治是治理该虫的主要方法,但化学药剂的使用不仅造成果品品质下降,而且杀虫剂的长期大量使用会导致苹果蠹蛾的抗药性,同时抗性种群对其他不同类型的杀虫剂存在交互抗性,这可能是导致近年来苹果蠹蛾严重发生的主要原因之一。据国际杀虫剂抗性行动委员会(Insecticide Resistance Action Committee, IRAC)统计,苹果蠹蛾在全球范围内已经对有机磷、氨基甲酸酯和菊酯类等不同作用机理的 60 多种农药产生抗性(IRAC,2014)。苹果蠹蛾是我国的重要入侵害虫,目前在我国的局部地区发生,因此,我国关于苹果蠹蛾对杀虫剂的抗性报道相对较少。已有研究显示,我国苹果蠹蛾可能从中亚或俄罗斯远东地区传入(李玉婷,2013; Men *et al.*,2013),其入侵我国的种群可能带有一定的抗性基因(Yang *et al.*,2014)。因此,及时开展苹果蠹蛾抗性治理工作,延缓其抗药性产生,是该虫综合治理面临的重要问题。本文将介绍国内外有关苹果蠹蛾的抗药性现状、抗性机制和抗性治理等方面的研究进展,旨在为制定有效的苹果蠹蛾抗性治理策略提供依据。

## 1 苹果蠹蛾的抗药性现状

### 1.1 对有机磷等常规农药的抗性

最早用于苹果蠹蛾防治的药剂是砷酸盐,但其很快对该类药剂产生了抗性(Hough,1928)。20 世纪 40 年代,DDT 被用于苹果蠹蛾的防治中,但其在短时间内对 DDT 也产生了抗性(Cutwright,1954)。Barnes & Moffitt (1963)对美国加利福尼亚州不同地区的苹果蠹蛾田间种群抗药性检测发现,该地区田间种群对 DDT 已经产生 4 倍左右的抗性,且该虫对 DDT 的抗性种群在之后的 10 年间快速扩散。随后谷硫磷、伏杀硫磷和对硫磷等有机磷农药被广泛用于该虫的防治之中。Welter *et al.*(1991)在加利福尼亚州调查发现,苹果蠹蛾成虫和幼虫对谷硫磷产生了 4~7 倍的抗药性。Bush *et al.*(1993)研究发现,在加州北部地区果园的苹果蠹蛾对对硫磷产生 8 倍抗性。同时,苹果蠹蛾对有机磷农药的抗性先后在美国、澳大利亚、南非、法国、以色列、智利、西班牙、瑞士和捷克(Blomefield,1994; Croft & Riedl,

1991; Reuveny *et al.*,2001; Reyes *et al.*,2004; Sauphanor *et al.*,1998; Stará & Kocourek,2007; Thwaite *et al.*,1993)等国家被报道,且这些抗性种群与部分药剂之间存在一定的交互抗性,这加大了苹果蠹蛾的防治难度。Dunley & Welter (2000)报道,苹果蠹蛾抗谷硫磷种群对二嗪农、亚胺硫磷和 DDT 存在交互抗性;Reyes & Sauphanor (2008)发现,谷硫磷抗性种群对甲基阿维菌素、多杀菌素、噻虫啉和毒死蜱存在交互抗性。Bouvier (1998)报道了苹果蠹蛾对溴氰菊酯的抗药性;Sauphanor *et al.*(2000)监测发现,法国地区的苹果蠹蛾对溴氰菊酯的抗性倍数高达 139 倍,且该种群对除虫脲具有 23.5 倍的抗性。在美国加利福尼亚地区,苹果蠹蛾 2 个抗谷硫磷田间种群 R-LO 和 R-CL 分别对甲氰菊酯、高氰戊菊酯具有 1.42、4.82 和 1.94、8.64 倍的抗性(Dunley & Welter,2000)。Mota-Sanchez *et al.*(2008)研究发现,在美国的密歇根州,苹果蠹蛾对高效氯氟氰菊酯和啉虫威已经产生 6~10 倍的抗性,且对谷硫磷、亚胺硫磷和虫酰肼均有一定的抗性;Grigg-McGuffin *et al.*(2014)对加拿大安大略和魁北克的 27 个苹果蠹蛾田间种群连续 3 年的监测发现,其对谷硫磷、噻虫啉和甲氧虫酰肼已产生抗性。

### 1.2 对生物农药的抗性

阿维菌素、多杀菌素、苹果蠹蛾颗粒体病毒(CpGV)及昆虫生长调节和抑制剂作为高效安全的生物农药,也被广泛应用到苹果蠹蛾的防治中。Cox *et al.*(1995)发现,阿维菌素对苹果蠹蛾具有较好的防治效果;但 Reyes & Sauphanor (2008)研究表明,苹果蠹蛾室内抗性种群的不同虫态对阿维菌素均有不同程度的抗性;Charmillot *et al.*(2002)研究发现,瑞士苏黎世地区的苹果蠹蛾已对多杀菌素产生低倍抗性;Huber (1974)通过室内汰选,使苹果蠹蛾室内种群对 CpGV 产生 10 倍左右的抗性;2005 年,法国和德国发现了对 CpGV 高达 1000 倍抗性的苹果蠹蛾田间种群(Fritsch *et al.*,2005; Sauphanor *et al.*,2006)。苹果蠹蛾在很多欧洲国家对 CpGV 产生了高水平抗性(Asser-Kaiser *et al.*,2007; Schmitt *et al.*,2013)。2003~2008 年,对德国 7 个经济果园中苹果蠹蛾的 CpGV 抗性水平监测发现,在持续用 CpGV-M 汰选 1~3 年后,苹果蠹蛾种群的抗性水平平均提高了 20 多倍,并且发现一个抗性水平高达 1 百万倍的抗性种群;在没有病毒的选

择压力下,苹果蠹蛾对 CpGV 的抗性能够稳定遗传,且与敏感种群相比,抗性种群在繁殖力和生殖力方面不存在适合度代价 (Undorf-Spahn *et al.*, 2012)。除虫脲作为常用杀虫剂的替代品,在 20 世纪中期运用到苹果蠹蛾的综合防治中,但之后在意大利 (Riedl & Zenger, 1994; Waldner, 1993)、法国 (Sauphanor *et al.*, 1997) 以及瑞士 Charmillot *et al.* (1999) 监测到苹果蠹蛾抗除虫脲田间种群; Reuveny & Cohen (2004) 发现,以色列的苹果蠹蛾抗性种群对几丁质合成抑制剂 (除虫脲、双苯氟脲和伏虫隆)、保幼激素类药剂 (吡丙醚和苯氧威) 和蜕皮激素类杀虫剂 (甲氧虫酰) 具有抗性。Ioriatti *et al.* (2007) 发现,意大利北部地区的苹果蠹蛾田间种群对虫酰肼表现出一定的抗药性。Stará & Kocourek (2007) 研究显示,捷克地区的苹果蠹蛾田间种群对除虫脲、伏虫隆以及苯氧威产生 3.38 ~ 14.21 倍的抗性,且各抗性种群对不同药剂存在交互抗性。

## 2 苹果蠹蛾抗药性机理

昆虫抗药性的产生是农药选择的结果,而昆虫行为和生理生化的改变是抗性产生的直接原因,昆虫抗药性机理大致可分为行为抗性、代谢抗性和靶标抗性 (唐振华, 1993)。已有研究表明,苹果蠹蛾的抗性机理主要与代谢抗性和靶标抗性有关 (Brun-Barale *et al.*, 2005; Cassanelli *et al.*, 2006; Reyes *et al.*, 2009)。代谢抗性是指由于解毒酶活性增高或酶量增加而导致的抗性,如羧酸酯酶 (Carboxylesterase, CarE)、谷胱甘肽转移酶 (Glutathione transferase, GST) 和多功能氧化酶 (Multifunctional oxidase, MFO) 等代谢酶的变化导致的抗药性;靶标抗性是由于杀虫剂作用靶标敏感度降低而产生的抗性,包括乙酰胆碱酯酶 (Acetylcholinesterase, AChE) 和钠离子通道 (Sodium ion channel, SC) 等靶标位点的改变。昆虫抗药性的产生可能是多个因子共同作用的结果,不同抗性种群由于用药种类、次数、频率以及种群生物学背景的差异,可能产生不同的抗药性机制,在很多情况下,多种抗药性机制可能同时存在于一些抗药性种群中。

### 2.1 解毒酶代谢增强

酯酶 (Esterase, EST) 是昆虫体内一类能催化酯键水解的重要代谢酶,具有代谢有机磷和氨基甲酸酯类药剂中酯键的能力。Bush *et al.* (1993) 发现,

美国北卡罗来纳州果园内苹果蠹蛾对对硫磷产生抗性与其酯酶活性变化有关;Bouvier *et al.* (1998) 指出,法国东南部果园的苹果蠹蛾田间种群对溴氰菊酯产生一定的抗药性,但该种群的酯酶活性却与相对敏感种群无差异;而在美洲和欧洲其他地区发现,苹果蠹蛾有机磷抗性种群的酯酶活性增强 (Sauphanor *et al.*, 2000; Soleño *et al.*, 2004); Soleño *et al.* (2008) 通过诊断剂量研究发现,阿根廷 4 个地区的苹果蠹蛾对谷硫磷有不同程度抗性,且 4 个地区所有苹果蠹蛾幼虫的酯酶活性是室内敏感种群的 3.5、4.5、3.25 和 5 倍,表明酯酶活性与苹果蠹蛾对谷硫磷的抗性有关。Rodríguez *et al.* (2010) 研究发现,西班牙不同地区 11 个苹果蠹蛾田间种群对谷硫磷、毒死蜱和伏杀硫磷都有抗性,各田间种群内酯酶的活性均高于室内敏感种群。Reyes *et al.* (2011) 采用聚丙烯酰胺凝胶电泳对 2 个室内苹果蠹蛾抗性种群的酯酶同工酶分析,发现抗性种群存在同工酶 EST1 和 EST4,且同工酶 EST2 的量均高于敏感种群,而 Raz 抗性种群中同工酶 EST6 的含量均高于其他种群,酯酶表达量上升导致苹果蠹蛾对谷硫磷和除虫脲的抗药性,且各同工酶表达量的变化与药剂种类相关。Yang *et al.* (2014) 发现,在欧洲苹果蠹蛾种群中 CarE 的 CpCE-1 存在 N232A 和 W233L 突变位点,并推测这 2 个位点都可能与苹果蠹蛾对有机磷的抗性相关。

GST 在昆虫外源化合物生物转化、药物代谢和保护昆虫免受过氧化作用损害中具有极其重要的作用,是昆虫体内主要的杀虫剂解毒酶。Bush *et al.* (1993) 报道,苹果蠹蛾抗药性与 GST 相关;Bouvier *et al.* (1998) 发现,苹果蠹蛾对溴氰菊酯抗性水平与其体内 GST 的活性成正比;Reyes *et al.* (2009) 对全世界不同地区苹果蠹蛾抗性种群的酶活测定发现,希腊、阿根廷和厄瓜多尔种群对杀虫剂的抗性水平与 GST 含量有关,且与用药水平呈正相关;Voudouris *et al.* (2011) 通过测定希腊不同地区 38 个苹果蠹蛾抗性种群的酶活发现,所有种群的 GST 活性平均为敏感种群的 1.8 倍;Liu *et al.* (2014) 研究发现,经过毒死蜱和高效氯氟氰菊酯诱导后,苹果蠹蛾体内 CpGSTd1 的表达量上调,说明 CpGSTd1 能够有效降解高效氯氟氰菊酯。

MFO 是参与昆虫体内杀虫剂和其他内、外源化合物代谢的主要解毒酶系。Sauphanor *et al.* (1997)

报道了法国不同地区苹果蠹蛾对溴氰菊酯的抗性  
与 MFO 有关,其中增效剂 PBO 对溴氰菊酯的增  
效倍数为 7.0 倍,且抗性种群的 MFO 活性均高  
于敏感种群;在法国、瑞士、西班牙、葡萄牙  
和捷克的苹果蠹蛾抗除虫脲种群中,也发现  
MFO 的活性增强与其抗药性相关(Reyes *et al.*,  
2009; Sauphanor *et al.*, 1998);希腊的苹果  
蠹蛾田间抗性种群的 MFO 活性为敏感种群的  
6.3 倍(Voudouris *et al.*, 2011);Reyes *et al.*  
(2009)对法国苹果蠹蛾田间种群和室内选  
育种群研究发现,各抗性种群的 MFO 活性均  
高于敏感种群,并且部分田间种群的 MFO 活  
性远高于室内选育种群;Rodríguez *et al.*  
(2011)利用诊断剂量研究发现,苹果蠹蛾  
7 个田间种群的幼虫对氟虫脲、谷硫磷和亚  
胺硫磷的抗性与 MFO 活性上升相关,并认为  
 $LC_{90}$  和 MFO 活性可以作为检测苹果蠹蛾  
幼虫对这 3 种药剂抗性水平的指标;Yang *et al.*  
(2013)研究发现,经过毒死蜱和高效氯氟  
氰菊酯诱导,苹果蠹蛾 3 龄幼虫体内的总  
P450 酶活性显著增强,且 P450 基因  
*CYP9A61* 上调 2.2 和 3.47 倍,推断该基因  
在苹果蠹蛾抗性产生过程中可能会起一定  
作用。

## 2.2 靶标敏感性下降

昆虫体内的 AChE 是有机磷和氨基甲酸  
酯类药剂的作用靶标。昆虫的 AChE 基因发  
生突变,不仅能够引起其产物结构的变化,而  
且可以造成其表达量的变化,从而导致抗药  
性的产生。Reuveny & Cohen (2004)研究发  
现,苹果蠹蛾田间种群 AChE 对底物的亲和  
力下降,但对有机磷和氨基甲酸酯类药剂的  
敏感性未发生改变;Cassanelli *et al.* (2006)  
研究发现,与室内相对敏感种群相比,苹果  
蠹蛾 Raz 抗性种群对谷硫磷和西维因具有  
6.67 和 130.28 倍的抗性,酶活测定表明,  
Raz 种群 AChE 对 2 种药剂的敏感性下降  
1.7 和 14 倍,并在该种群的 AChE *cydpom-  
ace1* 内检测到一个 F399V 单核苷酸突变,  
该突变位点位于 *cydpom-ace1* 的活性区域,  
其可能导致 AChE 敏感性下降;Reyes *et al.*  
(2011)研究发现,苹果蠹蛾谷硫磷抗性种  
群的 AChE 对谷硫磷和对氧磷的敏感性下  
降 3.2 和 21.2 倍,而该种群 AChE 对毒死  
蜱的敏感性增强,导致其对毒死蜱产生负  
交互抗性,这说明 AChE 敏感性改变是导  
致苹果蠹蛾对不同药剂产生抗性的原因之  
一。

SC 是 DDT、茚虫威以及拟除虫菊酯类

药剂的主要作用靶标位点。研究表明,昆虫  
对拟除虫菊酯、茚虫威等药剂的高抗性与  
SC 基因突变密切相关,这类抗性被称为击  
倒抗性(knockdown resistance, kdr)。Brun-  
Barale *et al.* (2005)以基因组 DNA 为模  
板,通过 PCR 扩增,获得了苹果蠹蛾 4 个  
种群的 SC 1752 bp 的同源基因片段,通过  
序列比对发现,苹果蠹蛾溴氰菊酯抗性种  
群的 SC 存在 *kdr* 突变位点 L1014F;对法  
国阿维尼翁地区苹果蠹蛾 *kdr* 突变频率  
检测发现,该地区所有种群中均存在该抗  
性基因型,而采用化学防治果园的抗性基  
因型纯合子比例为 56%,表明 SC 突变与  
苹果蠹蛾对菊酯类药剂的抗性产生密切相  
关。Reyes *et al.* (2009)对不同地区苹果  
蠹蛾田间种群抗药性的检测发现,大多  
数种群中都存在 *kdr* 突变位点 L1014F,  
在美国威尔克斯种群中,该突变位点的检  
测率达到 100%。

Asser-Kaiser *et al.* (2011)将 CpGV-M  
注射到苹果蠹蛾 CpGV 抗性个体体内后,  
运用定量 PCR 的方法在抗性种群体内未  
检测到 CpGV 病毒;但通过对 CpGV 进行  
荧光标记发现,导致苹果蠹蛾对 CpGV 产  
生抗性的原因是 CpGV 虽能够侵入抗性个  
体,但其在抗性个体的细胞内不能复制。  
Gebhardt *et al.* (2014)发现,苹果蠹蛾对  
CpGV 的抗性与病毒毒株中某些基因的变  
异相关,对 CpGV-M 毒株具有高抗性的  
苹果蠹蛾 CpRR1 抗性种群,能够被其他  
CpGV 毒株(I12、S、E2 和 I07)所侵染;  
通过比较 CpGV 不同毒株的基因组发现,  
CpGV-M 毒株在 *pe38* 基因上有 24 bp 核  
苷酸的 repeat,该 repeat 导致在 CpGV-  
M 的 *pe38* 基因中 8 个氨基酸的插入;当  
敲除 *pe38* 基因上插入的 8 个氨基酸后,  
CpGV-M 不能感染苹果蠹蛾的任何种群;  
而将 CpGV-S 毒株的 *pe38* 基因敲入  
CpGV-M 中替代其 *pe38* 基因后,CpGV-  
M 能够感染 CpRR1 种群。但是,目前  
苹果蠹蛾对不同毒株响应存在差异的具  
体分子机制还不明确。

## 3 苹果蠹蛾抗性治理

### 3.1 加强苹果蠹蛾的抗性监测、抗性机理及分子生态学方面的研究

抗性监测是制定抗性治理方案的依据,  
也是评估整个抗性治理效果的有效手段  
(赵善欢,2000)。现阶段我国对苹果蠹  
蛾的研究主要集中于其动态监测、防控,  
遏制其疫情发展等方面,而关于苹果蠹  
蛾的抗性监测、抗性机理和综合治理的研  
究较少。

由于苹果蠹蛾在世界各地都对不同类型的农药产生抗性,其在入侵我国时可能携带一定的抗性基因频率。因此,通过对我国疫区苹果蠹蛾抗性水平的监测,能够推测其抗性动态变化和分布。此外,应该加强苹果蠹蛾对新使用药剂的抗性监测及抗性风险评估,以及苹果蠹蛾对常用药剂的抗性机理和抗性遗传方式等的研究;同时,昆虫对杀虫剂的敏感性是一种不可更新的资源,因此应当尽早建立我国苹果蠹蛾敏感种群和敏感毒力基线。通过苹果蠹蛾分子生态学研究可以明确不同地区苹果蠹蛾种群之间的基因流动情况,这对于明确抗性基因在种群中的扩散与交流具有重要意义,而且对于苹果蠹蛾的抗性治理和综合防治也具有重要作用。

### 3.2 科学合理用药

在化学防治过程中,要综合考虑苹果蠹蛾的田间抗性水平、用药历史及用药量等因素,同时结合田间抗性监测结果,确定防治指标,选择最佳的施药时间和方法,做到有目的性和针对性的用药,从而降低药剂的选择压力。例如,通过采用历期预测法和物候预测法,对历年果园内苹果蠹蛾各虫态发育历期的调查,并结合当地的实际气候条件,预测当年苹果蠹蛾各代成虫的发生高峰期,同时结合苹果、梨等寄主的开花、结果等生物学特征,推算苹果蠹蛾幼虫的蛀果高峰期,确定最佳的防治适期(何树文等,2014)。对于苹果蠹蛾已经产生抗性的药剂,应当限制或停止使用,并结合苹果蠹蛾的发生规律和药剂的持效期,选择无公害的农药进行防治;采用不同作用机理的药剂交替或混和使用,从而降低杀虫剂选择压力,延缓或避免害虫抗药性产生。在农药轮用和混用时,需要考虑不同类型农药的联合作用效果以及交互抗性的问题。如有机磷和氨基甲酸酯类与生长调节类药剂交替使用或混用,可以起到很好的防治效果。研究发现,利用苹果蠹蛾对不同药剂之间的负交互抗性,可以进行抗性治理(Reyes & Sauphanor,2008)。生物农药如甲氨基阿维菌素苯甲酸盐、苏云金芽孢杆菌、CpGV与化学药剂合理轮用或混用,以及增效剂和昆虫引诱剂与杀虫剂混用,也能够起到很好的防治效果(李北兴等,2013;杨建强等,2011;Lacey *et al.*,2004)。此外,某些植物的粗提物对苹果蠹蛾的取食具有一定的抑制作用,如银杏粗提物中的银杏酸、银杏内酯B、白果内酯、黄花蒿粗提物、青蒿素和桉油素对

苹果蠹蛾幼虫的取食具有抑制作用(Durden *et al.*,2011;Pszczolkowski *et al.*,2011)。今后要加快新型药剂的筛选、开发研制以及示范推广,为制定农药科学的轮用方案以及相关农药企业的生产提供理想药剂品种。

### 3.3 综合防治措施

在苹果蠹蛾综合防治中,可采取农业措施与其他防治措施相结合。如加强果园田间管理,及时清理蛀果和果树老翘皮,可以减少苹果蠹蛾的越冬、越夏场所以及虫源;还可以利用束草、布环等营造适合苹果蠹蛾化蛹和越夏、越冬的场所,并结合化学防治,诱杀苹果蠹蛾老熟幼虫。在苹果蠹蛾越冬代成虫的产卵盛期前,可以通过果实套袋阻止该虫蛀果为害,同时防止幼虫随蛀果越冬。此外,可以采用性信息素、黑光灯和诱捕器诱杀苹果蠹蛾成虫(石磊等,2009;朱虹昱等,2012a);利用迷向防治技术,可以提高苹果园中苹果蠹蛾雄虫的诱捕量,且蛀果率和树干结茧量显著下降(朱虹昱等,2012b)。昆虫不育技术(SIT)已被加拿大和美国(Calkins *et al.*,2000)等国家应用于苹果蠹蛾的防治中,并取得了理想的防治效果(Vreysen *et al.*,2010);同时,充分利用和保护苹果蠹蛾天敌,如鸟类、蜘蛛、寄生蜂、真菌以及线虫等,能够显著降低果园中苹果蠹蛾的蛀果率(王兰等,2011)。这些农业防治和物理防治措施都能够减少田间农药的使用量,从而降低田间农药对苹果蠹蛾的抗性选择压力,起到延缓抗性产生和发展的目的。此外,CpGV对苹果蠹蛾有很高的毒力(Eberle *et al.*,2008),我国发现2种CpGV(CypoGV-zy和CpGV-CJ01),对苹果蠹蛾均有较好的防治效果(申建茹等,2012;郑春寒等,2011);昆虫病原线虫(EPNs)能够很好地防治苹果蠹蛾越冬幼虫(Lacey & Unruh,2005)。在实际生产中,应该结合当地苹果蠹蛾发生规律以及抗性水平,制定详细的综合防治策略。

## 4 总结

苹果蠹蛾抗药性的产生,除了与大面积长期频繁地使用化学农药有关外,还与所用化学药剂类型或种类单一有关。由于各类药剂的作用方式和作用机理各不相同,苹果蠹蛾抗性产生的原因也不尽相同,但解毒酶代谢作用增强和靶标敏感性降低是苹果蠹蛾对化学农药产生抗性的主要机制(IRAC,

2014)。在苹果蠹蛾疫区,应建立准确有效的抗性监测体系,对我国苹果蠹蛾的抗性现状进行评估;在防治适期采用以化学防治为主,农业防治、生物防治多种手段相结合的方法,降低药剂的选择压力,同时注意药剂的合理轮用和混用;此外,应加强苹果蠹蛾抗性机理的研究,及时提出科学的抗性治理与综合防治策略。

### 参考文献

- 何树文, 达世彩, 高宜明, 伍东, 王泽浩. 2014. 苹果蠹蛾测报与防治适期确定方法研究. *现代农业科技*, (5): 169.
- 李北兴, 王凯, 管磊. 2013. 在杀虫剂中添加梨酯微胶囊防治苹果蠹蛾. *世界农药*, (4): 40-45.
- 李玉婷. 2013. 基于线粒体基因标记的我国苹果蠹蛾遗传多样性与入侵来源分析. 杨陵: 西北农林科技大学.
- 林伟丽, 于江南, 薛光华. 2007. 苹果蠹蛾空间分布型及数学消长模型研究. *新疆农业大学学报*, 30(1): 40-43.
- 秦晓辉, 马德成, 张煜, 李广华, 王培. 2006. 苹果蠹蛾在我国西北发生危害情况. *植物检疫*, 20(2): 95-96.
- 申建茹, 刘万学, 万方浩, 张芬琴. 2012. 苹果蠹蛾颗粒体病毒 CpGV-CJ01 的分离和鉴定. *应用昆虫学报*, 49(1): 96-103.
- 石磊, 陈明, 罗进仓. 2009. 3 种性诱捕器诱捕苹果蠹蛾效果比较及成虫的时序动态变化. *甘肃农业大学学报*, 44(2): 115-117.
- 唐振华. 1993. 昆虫抗药性及其治理. 北京: 农业出版社.
- 万方浩, 郑小波, 郭建英. 2005. 重要农林外来入侵物种的生物学与控制. 北京: 科学出版社.
- 王兰, 冯宏祖, 郭文超, 张辉, 杨力, 许建军. 2011. 苹果蠹蛾消长动态及果园中赤眼蜂释放技术研究. *新疆农业科学*, 48(2): 261-265.
- 杨富银, 陈明, 罗进仓, 周昭旭. 2009. 不同食料对苹果蠹蛾生长发育和繁殖的影响. *植物保护*, 35(5): 62-64.
- 杨建强, 赵骁, 严勇敢, 张雅林, 冯纪年. 2011. 7 种药剂对苹果蠹蛾的防治效果. *西北农业学报*, 20(9): 194-196.
- 翟小伟, 刘万学, 徐洪富, 万方浩, 蒲崇建. 2009. 苹果蠹蛾卵在梨园中的分布特性和空间格局. *植物保护学报*, 36(4): 343-348.
- 张耀荣, 蒋银荃. 2001. 苹果蠹蛾生物学特性及综合防治. *中国森林病虫*, (1): 21-23.
- 张学祖. 1957. 苹果蠹蛾 (*Carpocapsa pomonella* L.) 在我国的新发现. *昆虫学报*, 7(4): 467-472.
- 赵善欢. 2000. 植物化学保护. 3 版. 北京: 中国农业出版社.
- 赵星民. 2011. 北方寒地苹果蠹蛾发生规律及综合防治研究. *植物检疫*, 25(1): 87-88.
- 郑春寒, 刘强, 李坚, 董昆, 冯纪年, 张雅林, 王敦. 2011. 苹果蠹蛾颗粒体病毒毒株 (CypoGV-zy) 的室内毒力测定. *西北林学院学报*, 26(3): 121-123.
- 周昭旭, 罗进仓, 陈明. 2008. 苹果蠹蛾的生物学特性及消长动态. *植物保护*, 34(4): 111-114.
- 张润志, 王福祥, 张雅林, 陈汉杰, 罗进仓, 王勤英, 刘万学, 艾尼瓦尔·木沙, 蒲崇建, 严勇敢, 郭静敏, 刘星月, 陈继光, 张增幅, 杨森, 许建军, 崔良中, 徐婧. 2012. 入侵生物苹果蠹蛾监测与防控技术研究——公益性行业(农业)科研专项(200903042) 进展. *应用昆虫学报*, 49(1): 37-42.
- 朱虹昱, 杜磊, 徐婧, 刘伟, 张润志. 2012a. 苹果蠹蛾诱芯性信息素含量变化及其有效时间. *应用昆虫学报*, 49(1): 114-120.
- 朱虹昱, 刘伟, 崔良中, 张增福, 张润志. 2012b. 苹果蠹蛾迷向防治技术效果初报. *应用昆虫学报*, 49(1): 121-129.
- Asser-Kaiser S, Fritsch E, Undorf-Spahn K, Kienzle J, Eberle K E, Gund N A, Reineke A, Zebitz C P W, Heckel D G, Huber J and Jehle J A. 2007. Rapid emergence of baculovirus resistance in codling moth due to dominant, sex-linked inheritance. *Science*, 317: 1916-1918.
- Asser-Kaiser S, Radtke P, El-Salamouny S, Winstanley D and Jehle J A. 2011. Baculovirus resistance in codling moth (*Cydia pomonella* L.) caused by early block of virus replication. *Virology*, 410: 360-367.
- Barnes M M and Moffitt H R. 1963. Technique for testing insecticide deposits with newly hatched codling moth larvae. *Journal of Economic Entomology*, 56: 722-725.
- Blomefield T. 1994. Codling moth resistance; is it here, and how do we manage it? *Deciduous Fruit Grower*, 44: 130-132.
- Bouvier J C, Cuany A, Monier C, Brosse V and Sauphanor B. 1998. Enzymatic diagnosis of resistance to deltamethrin in diapausing larvae of the codling moth, *Cydia pomonella* (L.). *Archives of Insect Biochemistry and Physiology*, 39(2): 55-64.
- Brun-Barale A, Bouvier J C, Pauron D, Bergé J B and Sauphanor B. 2005. Involvement of a sodium channel mutation in pyrethroid resistance in *Cydia pomonella* L., and development of a diagnostic test. *Pest Management Science*, 61: 549-554.
- Bush M, Abdel-Aal Y and Rock G. 1993. Parathion resistance and esterase activity in codling moth (Lepidoptera: Tortricidae) from North Carolina. *Journal of Economic Entomology*, 86: 660-666.
- Calkins C O, Knight A L, Richardson G and Bloem K A. 2000. Area-wide population suppression of codling moth//Tan K H. *Area-wide Control of Fruit Flies and Other Insect Pests*. Penerbit Universiti Sains Malaysia, Pulau Pinang, 215-219.
- Cassanelli S, Reyes M, Rault M, Manicardi G C and Sauphanor B. 2006. Acetylcholinesterase mutation in an insecticide-resistant population of the codling moth (*Cydia pomonella* L.). *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 36: 642-653.
- Charmillot P J, Parsquier D, Sauphanor B, Bourvier J C and Oliver R. 1999. Carpopapse des pommes; premier cas de résistance au diubenzuron en Suisse. *Revue suisse de Viticul-*

- ture, *Arboriculture, Horticulture*, 31: 129–132.
- Charmillot P J, Pasquier D, Dessimoz S, Genini M and Olivier R. 2002. Résistance du carpocapse *Cydia pomonella* aux insecticides: tests par application topique sur des larves diapauses collectées en automne 2001. *Revue suisse de Viticulture, Arboriculture, Horticulture*, 34: 247–251.
- Cox D L, Knight A L, Biddinger D J, Lasota J A, Pikounis B, Hull L A and Dybas R A. 1995. Toxicity and field efficacy of avermectins against codling moth (Lepidoptera: Tortricidae) on apples. *Journal of Economic Entomology*, 88: 708–715.
- Croft B A and Riedl H W. 1991. Chemical control and resistance to pesticides of the codling moth//Van Der Geest L P S and Evenhuis H H. *Tortricid Pests: Their Biology, Natural Enemies and Control*. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, 371–387.
- Cutwright C R. 1954. A codling moth population resistant to DDT. *Journal of Economic Entomology*, 47: 189–190.
- Dunley E D and Welter S C. 2000. Correlated insecticide cross-resistance in azinphosmethyl resistant codling moth (Lepidoptera: Tortricidae). *Journal of Economic Entomology*, 93: 955–962.
- Durden K, Sellars S, Cowell B, Brown J J and Pszczolkowski M A. 2011. Artemisia annua extracts, artemisinin and 1, 8-cineole, prevent fruit infestation by a major, cosmopolitan pest of apples. *Pharmaceutical Biology*, 49: 563–568.
- Eberle K E, Asser-Kaiser S, Sayed S M, Nguyen H T and Jehle J A. 2008. Overcoming the resistance of codling moth against conventional *Cydia pomonella* granulovirus (CpGV-M) by a new isolate CpGV-I12. *Journal of Invertebrate Pathology*, 98: 293–298.
- Fritsch E, Undorf-Spahn K, Kienzle J, Zebitz C P W and Huber J. 2005. Apfelwickler granulovirus: erste hinweise auf unterschiede in der empfindlichkeit lokaler apfelwickler-populationen. *Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes*, 57: 29–34.
- Gebhardt M M, Eberle K E, Radtke P and Jehle J A. 2014. Baculovirus resistance in codling moth is virus isolate-dependent and the consequence of a mutation in viral gene pe38. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111: 15711–15716.
- Grigg-McGuffin K, Scott I M, Bellerose S, Chouinard G, Cormier D and Scott-Dupree C. 2014. Susceptibility in field populations of codling moth, *Cydia pomonella* (L.) (Lepidoptera: Tortricidae), in Ontario and Quebec apple orchards to a selection of insecticides. *Pest Management Science*, 71: 234–242.
- Hough W S. 1928. Relative resistance to arsenical poisoning of two codling moth strains. *Journal of Economic Entomology*, 21: 325–329.
- Huber J. 1974. *Selektion einer Resistenz gegen perorale Infektion mit einem Granulovirus bei einem Laborstamm des Apfelwicklers, Laspeyresia pomonella L.* ETH Zürich, Dissertation no. 5044.
- IRAC (Insecticide Resistance Action Committee). 2014. *The Database of Pests for Information on Biology, Distribution, Resistance Status and Available Resource on IRAC and Third-party Websites*. <http://www.ircac-online.org/pests/cydia-pomonella/>.
- Ioriatti C, Tasin M, Charmillot P J, Reyes M and Sauphanor B. 2007. Early detection of resistance to tebufenozide in field populations of *Cydia pomonella* L.: methods and mechanisms. *Journal of Applied Entomology*, 131: 453–459.
- Lacey L A, Arthurs S P, Thomson D, Fritts R J and Granatstein D. 2004. Codling moth granulovirus and insect specific nematodes for control of codling moth in the Pacific Northwest. *Tilth Producers Quarterly*, 13: 10–12.
- Lacey L A and Unruh T R. 2005. Biological control of codling moth (*Cydia pomonella*, Lepidoptera: Tortricidae) and its role in integrated pest management, with emphasis on entomopathogens. *Vedalia*, 12(1): 33–60.
- Liu J, Yang X Q and Zhang Y L. 2014. Characterization of a lambda-cyhalothrin metabolizing glutathione S-transferase CpGSTd1 from *Cydia pomonella* (L.). *Applied Microbiology and Biotechnology*, 98: 8947–8962.
- Men Q L, Chen M H, Zhang Y L and Feng J N. 2013. Genetic structure and diversity of a newly invasive species, the codling moth, *Cydia pomonella* (L.) (Lepidoptera: Tortricidae) in China. *Biological Invasions*, 15: 447–458.
- Mota-Sanchez D, Wise J C, Poppen R V, Gut L J and Hollingworth R M. 2008. Resistance of codling moth, *Cydia pomonella* (L.) (Lepidoptera: Tortricidae), larvae in Michigan to insecticides with different modes of action and the impact on field residual activity. *Pest Management Science*, 64: 881–890.
- Pszczolkowski M A, Durden K, Sellars S, Cowell B and Brown J J. 2011. Effects of Ginkgo biloba constituents on fruit-infesting behavior of codling moth (*Cydia pomonella*) in apples. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59: 10879–10886.
- Reuveny H, Oppenheim D, Dunkelblum E and Akunis O. 2001. Control of codling moth (*Cydia pomonella*) by mating disruption and monitoring the pest population levels under these conditions. *Alon Hanotea*, 55: 143–147.
- Reuveny H and Cohen E. 2004. Resistance of the codling moth *Cydia pomonella* (L.) (Lep: Tortricidae) to pesticides in Israel. *Journal of Applied Entomology*, 128: 645–651.
- Reyes M, Bouvier J C, Boivin T, Sauphanor B and Fuentes-Contreras E. 2004. Susceptibilidad a insecticidas y actividad enzimática de *Cydia pomonella* L. (Lepidoptera: Tortricidae) proveniente de tres huertos de manzano de la región del Maule, Chile. *Agricultura Técnica*, 64: 229–237.
- Reyes M and Sauphanor B. 2008. Resistance monitoring in codling moth: a need for standardization. *Pest Management Science*, 64: 945–953.
- Reyes M, Franck P, Olivares J, Margaritopoulos J, Knight A and Sauphanor B. 2009. Worldwide variability of insecticide

- resistance mechanisms in the codling moth, *Cydia pomonella* L. (Lepidoptera: Tortricidae). *Bulletin of Entomological Research*, 99: 359–369.
- Reyes M, Collange B, Rault M, Casanelli S and Sauphanor B. 2011. Combined detoxification mechanisms and target mutation fail to confer a high level of resistance to organophosphates in *Cydia pomonella* (L.) (Lepidoptera: Tortricidae). *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 99: 25–32.
- Riedl H and Zelger R. 1994. Erste ergebnisse der untersuchungen zur resistenz des apfelwicklers gegenüber diflubenzuron. *Obstbau-Weinbau*, 94: 107–109.
- Rodríguez M A, Bosch D, Sauphanor B and Avilla J. 2010. Susceptibility to organophosphate insecticides and activity of detoxifying enzymes in Spanish populations of *Cydia pomonella* (Lepidoptera: Tortricidae). *Journal of Economic Entomology*, 103: 482–491.
- Rodríguez M A, Bosch D and Avilla J. 2011. Resistance of Spanish codling moth (*Cydia pomonella*) populations to insecticides and activity of detoxifying enzymatic systems. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 138: 184–192.
- Sauphanor B, Cuany A, Bouvier J C, Brosse V, Amichot M and Bergé J B. 1997. Mechanism of resistance to deltamethrin in *Cydia pomonella* (L.) (Lepidoptera: Tortricidae). *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 58: 109–117.
- Sauphanor B, Bouvier J C and Brosse V. 1998. Spectrum of insecticide resistance in *Cydia pomonella* (Lepidoptera: Tortricidae) in south-eastern France. *Journal of Economic Entomology*, 91: 1225–1231.
- Sauphanor B, Bouvier J C, Beslay D, Bosch D and Avilla J. 2000. *Mechanisms of Azinphos-methyl Resistance in A Strain of Cydia pomonella from Southern Europe*. CR 21st Internat Cong Entomol, Iguassu, Brazil.
- Sauphanor B, Berling M, Toubon J F, Reyes M, Delnatte J and Allez P. 2006. Carpcapsc des pommes. Cas de résistance au virus de la granulose en verges biologique. *Phytoma-La Défense des Végétaux*, 590: 24–27.
- Schmitt A, Bisutti I L, Ladurner E, Benuzzi M, Sauphanor B, Kienzle J and Jehle J A. 2013. The occurrence and distribution of resistance of codling moth to *Cydia pomonella* granulovirus in Europe. *Journal of Applied Entomology*, 137: 641–649.
- Shel'Deshova G G. 1967. Ecological factors determining distribution of the codling moth *Laspeyresia pomonella* L. (Lepidoptera, Tortricidae) in the northern and southern hemispheres. *Entomological Review*, 46: 349–361.
- Soleño J, Anguiano O, de D' Angelo A P and Montagna C. 2004. Tolerancia a Metilazinfos en una poblacion de larvas diapausantes de *Cydia pomonella* en el alto valle de Río Negro y Neuquén 8. *Resúmenes XXVI Congreso Nacional de Entomología*, 8–12.
- Soleño J, Anguiano L, de D' Angelo A P, Chichón L, Fernández D and Montagna C. 2008. Toxicological and biochemical response to azinphos-methyl in *Cydia pomonella* L. (Lepidoptera: Tortricidae) among orchards from the Argentinian Patagonia. *Pest Management Science*, 64: 964–970.
- Stará J and Kocourek F. 2007. Insecticidal resistance and cross-resistance in populations of *Cydia pomonella* (Lepidoptera: Tortricidae) in Central Europe. *Journal of Economic Entomology*, 100: 1587–1595.
- Thwaitte W G, Williams D G and Hatley A M. 1993. Extent and significance of azinphos-methyl resistance in codling moth in Australia. *Pest Control and Sustainable Agriculture*, 93: 166–168.
- Undorf-Spahn K, Fritsch E, Huber J, Kienzle J, Zebitz C P and Jehle J A. 2012. High stability and no fitness costs of the resistance of codling moth to *Cydia pomonella* granulovirus (CpGV-M). *Journal of Invertebrate Pathology*, 111: 136–142.
- Voudouris C C, Sauphanor B, Franck P, Reyes M, Mamuris Z, Tsitsipis J A and Margaritopoulos J T. 2011. Insecticide resistance status of the codling moth *Cydia pomonella* (Lepidoptera: Tortricidae) from Greece. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 100: 229–238.
- Vreysen M J B, Carpenter J E and Marec F. 2010. Improvement of the sterile insect technique for codling moth *Cydia pomonella* (Linnaeus) (Lepidoptera Tortricidae) to facilitate expansion of field application. *Journal of Applied Entomology*, 134: 165–181.
- Waldner W. 1993. Rückblick und vorschau auf die bekämpfung des apfelwicklers. *Obstbau-Weinbau*, 12: 355–357.
- Welter S C, Varela L and Freeman R. 1991. Codling moth resistance to azinphos-methyl in California. *Resistant Pest Management Newsletter*, 3: 12.
- Yang X Q, Li X C and Zhang Y L. 2013. Molecular cloning and expression of CYP9A61: a chlorpyrifos-ethyl and lambda-cyhalothrin-inducible cytochrome P450 cDNA from *Cydia pomonella*. *International Journal of Molecular Sciences*, 14: 24211–24229.
- Yang X Q, Liu J Y, Li X C, Chen M H and Zhang Y L. 2014. A key amino acid associated with acephate detoxification by *Cydia pomonella* carboxylesterase based on molecular dynamics with alanine scanning and site-directed mutagenesis. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 54: 1356–1370.

