

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1787.2015.04.008

生物源农药在苹果蠹蛾防治中的应用

吴正伟¹, 杨雪清², 张雅林^{1*}

¹西北农林科技大学植物保护学院, 植保资源与病虫害治理教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

²沈阳农业大学植物保护学院, 辽宁 沈阳 110866

摘要: 苹果蠹蛾是世界性检疫害虫, 对我国苹果优势产区构成了巨大威胁。长期依赖化学防治使该虫抗性变得十分严峻。为了保障食品安全, 以环境友好的生物源农药替代化学农药已成为当前苹果蠹蛾防治的热点。本文对国内外现有的生物源农药, 如寄生蜂、不育昆虫、颗粒体病毒、病原线虫、*Bt*、病原真菌、微孢子虫、性信息素、斑蝥素、多杀菌素等, 在苹果蠹蛾防治中的最新应用及其存在的问题进行论述, 讨论了生物源农药凭借其种类多、来源广且在用药时期上选择性强等特点, 在该虫综合治理中的重要地位及面临的挑战。

关键词: 生物农药; 苹果蠹蛾; 生物防治; 杀虫剂

Application of biological pesticides in the control of codling moth, *Cydia pomonella* (L.)

Zheng-wei WU¹, Xue-qing YANG², Ya-lin ZHANG^{1*}

¹Key Laboratory of Plant Protection Resources & Pest Management of the Ministry of Education, College of Plant Protection, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; ²College of Plant Protection, Shenyang Agricultural University, Shenyang, Liaoning 110866, China

Abstract: The codling moth, *Cydia pomonella* (L.) (Lepidoptera: Tortricidae), a notorious quarantine fruit pest worldwide, poses a serious threat to the main apple producing areas in China. In terms of food safety, environmentally friendly biological pesticides are desirable substitutes for chemical pesticides; the long-term use of the latter have caused resistance, preventing its long term use for codling moth control. The present review summarized the use of biological pesticides, including parasitoids, sterilized insect, granulovirus, entomopathogenic nematodes, *Bacillus thuringiensis*, entomopathogenic fungi, microsporidia, sex pheromone, cantharidin, and spinosad that have been either applied or suggested to control codling moth. The challenges faced by biological pesticides are also discussed, and anyhow it will play an important role in the integrated pest management of codling moth due to its characteristics of infinite variety, wide source, good selectivity in application.

Key words: biological pesticide; codling moth; biological control; insecticide

苹果蠹蛾 *Cydia pomonella* (L.) 是全球重要的果树害虫, 也是我国重大检疫害虫之一。目前, 该虫在我国新疆全境、甘肃中西部、内蒙古西部、宁夏、黑龙江等局部地区均有发生和危害(张润志等, 2012), 对我国黄土高原及环渤海湾苹果优势产区的果业生产构成了严峻威胁。在新疆, 苹果蠹蛾危害严重, 平均蛀果率达 41.34% (10.6% ~ 72.28%), 严重时能达到 95% (巴哈提古丽, 2009)。化学农药的速效性使其成为传统果园防治该虫的主要手段。然而, 化学杀虫剂的频繁使用导致世界各地苹果蠹蛾种群对各类化学杀虫剂产生了严重的抗药性 (Reyes *et al.*, 2007; Rodríguez *et al.*, 2011; Yang *et al.*, 2013)。研究表明, 我国西北地区部分苹果蠹蛾种群对部分杀虫剂的敏感性下降 (Yang & Zhang, 2015b)。随着有机农业这一理念的提出, 环境友好的生物源农药或其他防治措施已成为新时期苹果蠹蛾防治的新手段。

生物源农药, 简称生物农药, 在我国《农药登记资料规定》中未给出明确的定义标准。目前, 学术上通常采用张兴(2010)的分类体系, 即生物农药包

收稿日期 (Received): 2015-06-08 接受日期 (Accepted): 2015-10-14
基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(200903042-03)
作者简介: 吴正伟, 男, 博士。研究方向: 农业昆虫与害虫防治。E-mail: zhengwei_wu@126.com
* 通讯作者 (Author for correspondence), E-mail: yalinzh@nwsuaf.edu.cn

括生物体农药和生物化学农药,根据来源的不同将其进一步划分为动物体农药、植物体农药、微生物体农药、动物源生物化学农药、植物源生物化学农药、微生物源生物化学农药。本文拟对目前生物源农药在苹果蠹蛾防治上的应用进行论述,并指出其未来的应用方向。

1 动物体农药

寄生蜂是害虫防治中重要的天敌生物,全世界报道的苹果蠹蛾寄生蜂达 50 种之多,且其寄生率在各地分布种中有明显不同(李保平和孟玲,2001; Mills,2005)。如欧洲东部的奥地利四齿革腹茧蜂 *Ascogaster quadridentata* Wesmal 卵寄生率为 42.6%,而哈萨克斯坦蠹蛾玛姬蜂 *Mastrus ridibundus* Gravenhorst 幼虫寄生率能达到 43.9% (Mills, 2005)。但多数寄生蜂的寄生率平均不超过 4.5% (Maalouly *et al.*, 2013),这与果园生物多样性的减弱及化学农药的频繁施用有关 (Jonsson *et al.*, 2012)。虽然目前尚无大面积使用寄生蜂防控苹果蠹蛾的报道,但对寄生蜂的应用研究仍在延续。研究表明,苹果蠹蛾 2 龄幼虫和结茧期老熟幼虫最易被寄生 (Mills, 2005),而老熟幼虫结茧化蛹时的聚集特性似乎不利于寄生蜂的寄生 (Jumeau *et al.*, 2009, 2011)。在我国,已经商品化的赤眼蜂 *Trichogramma* 也被尝试用于苹果蠹蛾的防治,放蜂后苹果蠹蛾幼虫蛀果率能减少一半 (许建军等, 2014; 岳朝阳等, 2010); 周氏啮小蜂 *Chouioia cunea* Yang 的释放甚至能达到 80% 的防治效果 (张新平等, 2012)。因此,利用寄生蜂防治苹果蠹蛾具有广阔的应用前景。

昆虫不育技术 (Sterile insect technique, SIT), 是一种通过辐射或杂交等手段使害虫丧失繁育能力而自行绝灭的害虫防治方法。自 1992 年起加拿大不列颠哥伦比亚开始实施昆虫不育技术防治苹果蠹蛾,截至 2003 年有 97.2% 的果园能够将危害控制在 0.5% 以下。但该技术成功应用的前提是实现苹果蠹蛾大规模饲养,加拿大实现了工厂化饲养该虫并保证每周有 1500 万~1600 万头成虫的产量,其还被空运至南非用于苹果蠹蛾的防治 (Bloem *et al.*, 2010)。然而,由于该虫大规模饲养技术在我国还未实现突破,利用苹果蠹蛾不育技术控制其种群数量还有待进一步发展。

2 微生物体农药

2.1 颗粒体病毒

苹果蠹蛾颗粒体病毒 (*Cydia pomonella* granulovirus, CpGV) 是一种高效、专一、安全的生物农药,在苹果蠹蛾防治中得到了广泛应用。欧美各国自 20 世纪 80 年代以来先后注册过 9 个 CpGV 制剂 (南宫自艳等, 2014), 其中在欧洲的使用面积估计超过 10 万 hm^2 (Eberle & Jehle, 2006)。然而,自 2004 年以来已发现有 35 个苹果蠹蛾种群对 CpGV 产生不同程度的抗性 (Speiser & Tamm, 2011)。因此,具有强侵染能力的颗粒体病毒株系的筛选成为目前研究的热点之一。研究表明,抗性基因位于苹果蠹蛾性染色体 Z 上,其出现频率的不同决定着抗性水平的变化 (Asser-Kaiser *et al.*, 2010)。Gebhardt *et al.* (2014) 通过对 5 个病毒分离株系的基因组比较及突变检测,发现病毒 *pe38* 基因中一段 24 个核苷酸序列的变异是害虫抗性形成的关键。可见,长期使用单一病毒株防治苹果蠹蛾存在抗性风险,这为制定害虫综合治理措施提出了考验。

病毒制剂在田间受紫外线照射后容易失活,影响其持久性。研究表明,通过木质素包埋将病毒制成微胶囊剂可明显提高其光稳定性;以 TiO_2 及 ZnO 作为反射剂的添加也可以提高病毒的紫外耐受性 (Arthurs *et al.*, 2008; Wu *et al.*, 2015a)。进一步提高田间持久性是研制病毒杀虫剂所面临的共性问题,也是今后研究的方向。

2.2 昆虫病原线虫

昆虫病原线虫 (Entomopathogenic nematode, EPN) 可携带共生菌主动搜索寄主,通过昆虫口、肛门、气孔、节间膜及伤口进入体腔,其大量繁殖造成宿主组织损伤最终死亡 (Kaya & Gaugler, 1993), EPN 是近年来苹果蠹蛾生物防治的一大研究热点。多数线虫可以通过培养基生产,从而节省了寄主饲养的步骤,便于其开发利用。根据苹果蠹蛾老熟幼虫喜于树干裂缝或树皮皮下结茧越冬的习性,针对树干集中喷洒线虫杀虫剂可达到压制越冬虫数的目的。目前,最具应用潜力的是斯氏线虫 *Steinernema* 和异小杆线虫 *Heterorhabditis*。在南非,异小杆线虫 *H. zealandica* 和 *H. bacteriophora* 对苹果蠹蛾、苹果异胫小卷蛾 *Thaumetotibia leucotreta* (Meyrick)、暗色粉蚧 *Pseudococcus viburni* (Signoret)、庭园象甲

Phlyctinus callosus (Schönherr) 均有防效 (Van Zyl & Malan, 2014)。在所筛选的高效病原线虫品系中, 与 *S. feltiae* 和 *H. bacteriophora* 相比, *S. yirgalemense* 对寄主的田间致死率最高 (Odendaal *et al.*, 2014)。环境温度、湿度是线虫农药能否成功应用的两大因素, 为避免冬季低温造成线虫失活, 可选择春秋季节施用或选育抗寒线虫 (Nimkingrat *et al.*, 2013), 同时辅以覆盖物或保湿剂 (如高吸水性聚合物), 可以提高线虫对苹果蠹蛾的防治效果 (De Waal *et al.*, 2011, 2013)。然而, 昆虫病原线虫致病力较低是目前制约其广泛应用的主要因素。如何提高昆虫病原线虫在害虫防治过程中的致病力、保持其致病力的稳定性是未来亟待解决的问题。

2.3 病原细菌

苏云金芽孢杆菌 (*Bacillus thuringiensis*, *Bt*) 是植保领域开发利用最为广泛的微生物源农药, 在杀虫剂中占约 2% 的市场份额 (Adang *et al.*, 2014)。*Bt* 芽孢内会产生晶体, 有 70 个血清型、82 个亚种 (张兴, 2010), 其中 Cry 家族就包含约 300 个成员 (Crickmore *et al.*, 2014)。针对苹果蠹蛾, 研究人员已筛选出比商业 *Bt* 制剂活性高 24 倍的新 *Bt* 菌株 MPU B63, 并有望开发为新的生物源农药 (Konecka *et al.*, 2012)。*Bt* 在营养期生长阶段开始分泌的营养期杀虫蛋白 (Vegetative insecticidal protein, Vip) 虽然不形成蛋白晶体, 但为另一种重要的杀虫因子。Baranek *et al.* (2015) 研究表明, Vip3 家族蛋白对鳞翅目害虫苹果蠹蛾、欧洲松毛虫 *Dendrolimus pini* L.、甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua* Hübner 均具有很高毒性, 这将为 *Bt* 菌的筛选利用提供新的参考依据, 并为转基因作物提供新的抗虫基因。*Bt* 是以胃毒方式发挥作用且田间持久性低, 而苹果蠹蛾以幼虫蛀果危害, 因此, 在田间应用中 *Bt* 防效往往低于兼具触杀活性的其他农药。为此, 在苹果蠹蛾卵到幼虫蛀果前期喷施 *Bt* 将可最大限度发挥其防治效果。

2.4 病原真菌

昆虫病原真菌可以直接穿透寄主体壁进行感染并最终导致寄主死亡。在德国, 1955~2012 年对 20550 头苹果蠹蛾幼虫自然发病情况的调查表明, 白僵菌 *Beauveria bassiana* 是其最主要的病原真菌, 病死幼虫身体僵硬呈粉红或棕红色, 发病率达 32% (Zimmermann *et al.*, 2013)。而早期试验表明,

B. bassiana 对苹果蠹蛾的防效并不理想, 每树喷雾 6×10^9 个孢子才能达到 50% 的防效 (Ferron *et al.*, 1978)。因此, 目前很少有直接用白僵菌防治苹果蠹蛾的报道。

2.5 微孢子虫

微孢子虫 (Microsporida) 是一类在专性细胞内寄生的单细胞真核生物, 系统发育研究表明, 其进化上应归于真菌界 (Hirt *et al.*, 1999)。在苹果蠹蛾幼虫、蛹及成虫体内均发现有微孢子虫 *Nosema carpocapsae* 的寄生, 其发生率能达到 57.3%, 还会影响虫体产卵量及孵化率 (Zimmermann *et al.*, 2013)。对于微孢子虫杀虫剂, 我国仅在蝗虫防治中有所应用 (洪军等, 2014)。实现微孢子虫广泛应用还需解决其寄主饲养、扩繁效率、杀虫效率、环境适应性问题。

3 植物体农药

植物体农药是具有防治农业有害生物功能的活体植物, 特指抗有害生物或抗除草剂的转基因作物 (张兴, 2010)。早在 1986 年, 孟山都公司的抗虫棉、抗虫玉米、抗虫大豆和抗草甘膦玉米就获得美国 EPA 批准进行环境释放试验, 1994 年批准商品化生产并将转基因生物列入农药范畴 (张兴等, 2002)。截至 2013 年, 全球转基因作物种植面积已经达到 1.75 亿 hm^2 , 并且以每年 3% 的比例增长 (James, 2013)。另外, 转基因树木也有至少 15 种进行了田间试验, 其中转 *Bt* 欧洲黑杨 *Populus nigra* 种植面积就达 450 hm^2 (胡建军等, 2010)。目前, 导入苹果的外源抗虫基因有 *CpTI*、*Bt*、生物素绑定蛋白基因等 (李玉生等, 2011), 但尚无抗虫转基因苹果进入市场。虽然转基因植物仍然存在诸多争议, 但相信随着科技的发展, 转基因抗虫果树研究将会取得新的进展。

4 动物源生物化学农药

性信息素是目前应用最多的生物化学农药。利用苹果蠹蛾雌虫释放的性信息素对雄虫有引诱作用的原理, 把合成的性信息素通过载体 (诱芯、发散器) 施于田间, 用于诱捕或迷向干扰成虫正常交配, 进而达到控制害虫的目的。我国自 20 世纪 60 年代以来已合成超过 40 种性信息素, 包括苹果蠹蛾性信息素, (E8, E10)-十二碳二烯醇 (Zhou *et al.*, 2014)。王安勇等 (2009) 研究了诱捕器的类

型、颜色和悬挂高度对苹果蠹蛾诱捕效果的影响,结果表明,三角式和飞翼式诱捕器的诱捕效果显著优于水盆式和圆筒式,绿色显著优于粉红色和黑色,但与红色、白色、黄色和蓝色之间差异不显著,诱蛾量随诱捕器悬挂高度的增加而增大。而将其作为生物农药通过迷向(交配干扰)技术防治苹果蠹蛾到 20 世纪 90 年代才得以实现,截至 2012 年,世界范围针对苹果蠹蛾的交配干扰防治面积达 22 万 hm^2 (Miller & Gut, 2015)。研究表明,在大面积果园(100 hm^2 以上)且苹果蠹蛾越冬幼虫密度低于 1000 头 $\cdot \text{hm}^{-2}$ 时才适合使用该技术,同时需防止邻近果园苹果蠹蛾的迁入(Witzgall *et al.*, 2008)。近几年,在我国新疆开始尝试用性信息素诱捕和迷向技术防治苹果蠹蛾,其中迷向防控能降低近一半的蛀果率,但核心示范区蛀果率仍有 2.88% (王同仁等, 2014; 张煜等, 2014)。在田间应用中发现,“吸引并移除(Attract-and-remove)”技术比交配干扰技术更能有效控制苹果蠹蛾种群(Reinke *et al.*, 2012)。而性信息素与其他引诱物质(植物利它素、醋酸)的混合使用效果反而不如其单独使用(Knight *et al.*, 2014)。目前的迷向防控技术还有待改进,特别是性信息素的释放量,同时有必要与诱捕监测、选择性使用杀虫剂或其他措施相结合。

利用昆虫或其他节肢动物产生的毒素或防卫毒素进行苹果蠹蛾的防治并不多见。最近研究表明,芜菁科昆虫产生的斑螫素对苹果蠹蛾具有杀虫活性($LC_{50} = 0.057 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$),并具有一定的田间防效(Wu *et al.*, 2015b)。活体试验表明,斑螫素可明显提升苹果蠹蛾幼虫谷胱甘肽转移酶活性,抑制其多功能氧化酶和羧酸酯酶活性(Wu *et al.*, 2015b)。研究还发现,斑螫素可明显抑制异源表达的谷胱甘肽转移酶 CpGSTd1 活性,其抑制中浓度 LC_{50} 大于 $2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (Yang & Zhang, 2015a)。但斑螫素对苹果蠹蛾的杀虫效果还有待提高,且目前尚无法实现斑螫素的大量生产,因此制约了其推广应用(Wu *et al.*, 2015b)。

5 微生物源生物化学农药

微生物源生物化学农药包括抗生素类、毒蛋白类、糖类等。研究表明,一种植物内生真菌 *Muscodor albus* (Ascomycota: Xylariales) 产生的挥发性混合物可以用作熏蒸剂,对苹果蠹蛾幼虫及成虫都有杀伤作用(Lacey *et al.*, 2009)。抗生素产品已成

为我国生物农药产业又一主体,其中具有杀虫活性的农用抗生素如多杀菌素已用于苹果蠹蛾的防治(Arthurs *et al.*, 2007)。但抗生素的使用同样面临抗性问题,已发现苹果蠹蛾对多杀菌素与谷硫磷可以产生交互抗性(Reyes *et al.*, 2007)。因此,如何高效利用微生物源生物化学农药且延长其使用寿命是其用于害虫防治的关键性问题。

6 植物源生物化学农药

在植食性昆虫和植物协同进化过程中,植物通过合成许多对植食昆虫具有毒性的次生代谢物质,达到防御或降低植食性昆虫取食的目的。目前,人们基于植物毒素已经开发出众多植物源生物化学农药,常见的有除虫菊素、苦参碱、苦皮藤素、鱼藤酮、印楝素、黎芦碱、烟碱、雷公藤等。这些化合物已被注册并商品化,丰富了用于苹果蠹蛾防治的生物农药种类。已有植物源生物化学农药防治蛀果害虫的报道,如 0.6% 苦参碱 AS 及 1.5% 除虫菊素 EW 对于桃小食心虫 *Carpocapsa niponensis* Walsingham 的防治效果为 60% ~ 70% (赵楠等, 2014)。而最近,在对菊科蒿属 5 种植物的驱虫活性研究中发现,藜蒿 *Artemisia arborescens* L. 叶片粗提物对苹果蠹蛾初孵幼虫的最低拒食浓度为 $1 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$, 是 α -侧柏酮的 1/10 (Creed *et al.*, 2015)。但由于其效果还不够理想,在苹果蠹蛾防治中的应用仍属少见。

7 结语

苹果蠹蛾是世界性重要果树害虫,对全球林果产业造成了巨大的经济损失(万方浩等, 2009)。随着人们对绿色植保、食品安全、生态调控治理等认识 and 要求的不断提升,环境友好的防治方法将在苹果蠹蛾综合治理中发挥越来越大的作用。可用于苹果蠹蛾防治的生物农药来源广泛、种类丰富且在使用策略及防治时期上选择性强;但是,许多生物源农药在实际应用中仍存在一些不足。因此,只有坚持综合防治的方针才能有效控制该虫的危害和扩散。例如,在密切跟踪苹果蠹蛾田间发生情况的同时,可在越冬代幼虫羽化时期进行交配干扰或不育昆虫释放,在产卵期释放卵寄生蜂并喷雾病毒制剂,之后交替喷雾病毒、多杀菌素、除虫菊素、昆虫激素、Bt 等生物农药;对于老熟幼虫和越冬幼虫,可结合果园灌水,喷洒病原线虫、白僵菌或释放幼虫寄生蜂等加以防治。

目前,由于生物源农药的缓效性和持久性差,加之成本投入高等问题,在一定程度上限制了其大面积使用。然而,随着有机农业的兴起、有机食品需求的不断增加、新的生物杀虫剂的不断研发和科学合理的运用,以生物农药为主,结合物理防治和农业措施,适当使用化学杀虫剂的防治策略将会在苹果蠹蛾治理中成为必然。

参考文献

巴哈提古丽. 2009. 苹果蠹蛾在新疆地区的危害情况与防治措施. 防护林科技, (4): 118-120.

洪军, 负旭疆, 杜桂林, 齐晓. 2014. 我国草原虫害生物防治技术应用现状. 草原与草坪, 34(3): 90-96.

胡建军, 杨敏生, 卢孟柱. 2010. 我国抗虫转基因杨树生态安全性研究进展. 生物多样性, 18(4): 336-345.

李保平, 孟玲. 2001. 苹果蠹蛾幼虫和蛹寄生蜂种类. 昆虫天敌, 23(4): 185-187.

李玉生, 吴永杰, 程和禾, 吴雅琴, 赵艳华. 2011. 转基因苹果研究现状与展望. 安徽农业科学, 39(12): 6965-6967, 6970.

南官自艳, 宋萍, 王秀娟, 王勤英. 2014. 苹果蠹蛾生物防治技术的研究和应用进展. 中国生物防治学报, 30(2): 260-265.

万方浩, 郭建英, 张峰. 2009. 中国生物入侵研究. 北京: 科学出版社.

王安勇, 张雅林, 罗进仓, 冯纪年. 2009. 不同类型诱捕器对苹果蠹蛾的诱捕效果. 植物保护学报, 36(4): 383-384.

王同仁, 艾买尔江·尼亚孜, 艾山江·吐尔逊, 刘学梅, 王红艳, 古丽白克热木, 钟仕荣, 孙晓, 刘正兴. 2014. 苹果蠹蛾发生规律监测及防效试验. 农村科技, (10): 36-37.

许建军, 冯宏祖, 李翠梅, 吐尔逊, 王兰, 李志刚, 何江, 郭文超. 2014. 释放赤眼蜂防治苹果蠹蛾、梨小食心虫效果研究. 中国生物防治学报, 30(5): 690-695.

岳朝阳, 张新平, 杨森, 刘爱华, 张静文, 徐兵强. 2010. 喀什地区杏园内食心虫消长动态及赤眼蜂防治初探. 新疆农业科学, 47(12): 2376-2380.

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, 等. 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.

张新平, 王成祥, 岳朝阳, 张静文, 王玉兰, 刘爱华, 阿里木·阿衣夏木. 2012. 利用周氏啉小蜂防治苹果蠹蛾的研究. 江苏农药科学, 40(10): 128-129.

张兴. 2010. 生物农药概览. 北京: 中国农业出版社.

张兴, 马志卿, 李广泽, 冯俊涛. 2002. 生物农药评述. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 30(2): 142-148.

张煜, 艾尼瓦尔·木沙, 阿力亚·阿布拉, 艾克然木, 李晶. 2014. 新疆苹果蠹蛾性信息素迷向防控技术的示范应用. 中国植保导刊, 34(4): 66-68.

赵楠, 于毅, 张安盛, 门兴元, 周仙红, 庄乾营, 张思聪, 许永玉, 李丽莉. 2014. 莱芜地区桃小食心虫发生规律及药剂防治效果. 植物保护, 40(1): 169-172.

Adang M J, Crickmore N and Jurat-Fuentes J L. 2014. Diversity of *Bacillus thuringiensis* crystal toxins and mechanism of action. *Insect Midgut and Insecticidal Proteins*, 47: 39-87.

Arthurs S P, Lacey L A and Behle R W. 2008. Evaluation of lignins and particle films as solar protectants for the granulovirus of the codling moth, *Cydia pomonella*. *Biocontrol Science and Technology*, 18: 829-839.

Arthurs S P, Lacey L A and Miliczky E R. 2007. Evaluation of the codling moth granulovirus and spinosad for codling moth control and impact on non-target species in pear orchards. *Biological Control*, 41(1): 99-109.

Asser-Kaiser S, Heckel D G and Jehle J A. 2010. Sex linkage of CpGV resistance in a heterogeneous field strain of the codling moth *Cydia pomonella* (L.). *Journal of Invertebrate Pathology*, 103: 59-64.

Baranek J, Kaznowski A, Konecka E and Naimov S. 2015. Activity of vegetative insecticidal proteins Vip3Aa58 and Vip3Aa59 of *Bacillus thuringiensis* against lepidopteran pests. *Journal of Invertebrate Pathology*, 130: 72-81.

Bloem S, Carpenter J, Blomefield T and Harrison C. 2010. Compatibility of codling moths *Cydia pomonella* (Linnaeus) (Lepidoptera: Tortricidae) from South Africa with codling moths shipped from Canada. *Journal of Applied Entomology*, 134: 201-206.

Creed C, Mollhagen A, Mollhagen N and Pszczolkowski M A. 2015. *Artemisia arborescens* "Powis Castle" extracts and α -thujone prevent fruit infestation by codling moth neonates. *Pharmaceutical Biology*, 53: 1458-1464.

Crickmore N, Baum J, Bravo A, Lereclus D, Narva K, Sampson K, Schnepf E, Sun M and Zeigler D R. 2014. *Bacillus thuringiensis* Toxin Nomenclature. http://www.lifesci.sussex.ac.uk/home/Neil_Crickmore/Bt/.

De Waal J Y, Malan A P and Addison M F. 2011. Evaluating mulches together with *Heterorhabditis zealandica* (Rhabditi-da: Heterorhabditidae) for the control of diapausing codling moth larvae, *Cydia pomonella* (L.) (Lepidoptera: Tortrici-

- dae). *Biocontrol Science and Technology*, 21: 255–270.
- De Waal J Y, Malan A P and Addison M F. 2013. Effect of humidity and a superabsorbent polymer formulation on the efficacy of *Heterorhabditis zealandica* (Rhabditida: Heterorhabditidae) to control codling moth, *Cydia pomonella* (L.) (Lepidoptera: Tortricidae). *Biocontrol Science and Technology*, 23: 62–78.
- Eberle K E and Jehle J A. 2006. Field resistance of codling moth against *Cydia pomonella* granulovirus (CpGV) is autosomal and incompletely dominant inherited. *Journal of Invertebrate Pathology*, 93: 201–206.
- Ferron P, Vincent J and Dickler E. 1978. Preliminary experiments on the use of *Beauveria bassiana* against *Carpocapsa pomonella*. *Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land-und Forstwirtschaft Berlin-Dahlem*, 84–87.
- 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 of the United States of America*, 11: 15711–15716.
- Hirt R P, Logsdon J M, Healy B, Dorey M W, Doolittle W F and Embley T M. 1999. Microsporidia are related to fungi: evidence from the largest subunit of RNA polymerase II and other proteins. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 96: 580–585.
- James C. 2013. *Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops*; 2013. ISAAA Brief No. 46. Ithaca, NY, USA; International Service for the Acquisition Agri-biotech Applications (ISAAA).
- Jonsson M, Buckley H L, Case B S, Wratten S D, Hale R J and Didham R K. 2012. Agricultural intensification drives landscape-context effects on host-parasitoid interactions in agroecosystems. *Journal of Applied Ecology*, 49: 706–714.
- Jumean Z, Jones E and Gries G. 2009. Does aggregation behavior of codling moth larvae, *Cydia pomonella*, increase the risk of parasitism by *Mastrus ridibundus*? *Biological Control*, 49: 254–258.
- Jumean Z, Ma B O, Chubaty A M, Ellenor C W, Roitberg B D and Gries G. 2011. A theoretical approach to study the evolution of aggregation behavior by larval codling moth, *Cydia pomonella* (Lepidoptera: Tortricidae). *Journal of Insect Behavior*, 24: 249–263.
- Kaya H K and Gaugler R. 1993. Entomopathogenic nematodes. *Annual Review of Entomology*, 38: 181–206.
- Knight A, Cichon L, Lago J, Fuentes-Contreras E, Barros-Parada W, Hull L, Krawczyk G, Zoller B, *et al.* 2014. Monitoring oriental fruit moth and codling moth (Lepidoptera: Tortricidae) with combinations of pheromones and kairomones. *Journal of Applied Entomology*, 138: 783–794.
- Konecka E, Baranek J, Hrycak A and Kaznowski A. 2012. Insecticidal activity of *Bacillus thuringiensis* strains isolated from soil and water. *The Scientific World Journal*, DOI: <http://dx.doi.org/10.1100/2012/710501>.
- Lacey L A, Horton D R, Jones D C, Headrick H L and Neven L G. 2009. Efficacy of the biofumigant fungus *Muscodor albus* (Ascomycota: Xylariales) for control of codling moth (Lepidoptera: Tortricidae) in simulated storage conditions. *Journal of Economic Entomology*, 102: 43–49.
- Maaloul M, Franck P, Bouvier J C, Toubon J F and Lavigne C. 2013. Codling moth parasitism is affected by semi-natural habitats and agricultural practices at orchard and landscape levels. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 169: 33–42.
- Miller J R and Gut L J. 2015. Mating disruption for the 21st century: matching technology with mechanism. *Environmental Entomology*, DOI: 10.1093/ee/nvv052.
- Mills N. 2005. Selecting effective parasitoids for biological control introductions: codling moth as a case study. *Biological Control*, 34: 274–282.
- Nimkingrat P, Khanam S, Strauch O and Ehlers R U. 2013. Hybridisation and selective breeding for improvement of low temperature activity of the entomopathogenic nematode *Steinernema feltiae*. *Biocontrol*, 58: 417–426.
- Odendaal D, Addison M F and Malan A P. 2014. Field application of entomopathogenic nematodes for the control of codling moth (*Cydia pomonella*) in apple and pear orchards. *Journal of Nematology*, 46: 213–214.
- Reinke M D, Miller J R and Gut L J. 2012. Potential of high-density pheromone-releasing microtraps for control of codling moth *Cydia pomonella* and obliquebanded leafroller *Choristoneura rosaceana*. *Physiological Entomology*, 37(1): 53–59.
- Reyes M, Franck P, Charmillot P J, Ioriatti C, Olivares J, Pasqualini E and Sauphanor B. 2007. Diversity of insecticide resistance mechanisms and spectrum in European populations of the codling moth, *Cydia pomonella*. *Pest Management Science*, 63: 890–902.
- Rodríguez M A, Marques T, Bosch D and Avilla J. 2011. Assessment of insecticide resistance in eggs and neonate larvae of *Cydia pomonella* (Lepidoptera: Tortricidae). *Pesticide Bi-*

- ochemistry and Physiology*, 100: 151–159.
- Speiser B and Tamm L. 2011. Regulation of plant protection in organic farming// Ehlers R U. *Regulation of Biological Control Agents*. Dordrecht, the Netherlands: Springer, 113–125.
- Van Zyl C and Malan A P. 2014. The role of entomopathogenic nematodes as biological control agents of insect pests, with emphasis on the history of their mass culturing and in vivo production. *African Entomology*, 22: 235–249.
- Witzgall P, Stelinski L, Gut L and Thomson D. 2008. Codling moth management and chemical ecology. *Annual Review of Entomology*, 53: 503–522.
- Wu Z W, Fan J B, Yu H, Wang D and Zhang Y L. 2015a. Ultraviolet protection of the *Cydia pomonella* granulovirus using zinc oxide and titanium dioxide. *Biocontrol Science and Technology*, 25: 97–107.
- Wu Z W, Yang X Q and Zhang Y L. 2015b. The toxicology and biochemical characterization of cantharidin on *Cydia pomonella*. *Journal of Economic Entomology*, 108: 237–244.
- 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 and Zhang Y L. 2015a. Characterization of glutathione S-transferases from *Sus scrofa*, *Cydia pomonella* and *Triticum aestivum*: their responses to cantharidin. *Enzyme and Microbial Technology*, 69: 1–9.
- Yang X Q and Zhang Y L. 2015b. Investigation of insecticide-resistance status of *Cydia pomonella* in Chinese populations. *Bulletin of Entomological Research*, DOI: <http://dx.doi.org/10.1017/S0007485315000115>.
- Zhou H, Yu Y, Tan X, Chen A and Feng J. 2014. Biological control of insect pests in apple orchards in China. *Biological Control*, 68: 47–56.
- Zimmermann G, Huger A M and Kleespies R G. 2013. Occurrence and prevalence of insect pathogens in populations of the codling moth, *Cydia pomonella* L.: a long-term diagnostic survey. *Insects*, 4: 425–446.

(责任编辑:杨郁霞)

