

苹果蠹蛾不育昆虫释放技术研究进展*

刘伟^{1,2} 徐婧¹ 张润志^{1,3**}

(1. 中国科学院动物研究所 动物进化与系统学重点实验室 北京 100101; 2. 中国科学院研究生院 北京 100049;
3. 农业虫害鼠害综合治理技术国家重点实验室 北京 100101)

摘要 不育昆虫释放技术 (sterile insect technique, SIT) 是一种环境友好、可作为大面积害虫综合治理 (AW-IPM) 的防治技术, 是以压倒性比例释放不育昆虫来减少田间同种害虫繁殖量的害虫治理方法。苹果蠹蛾 *Cydia pomonella* (L.) 是世界重要的梨果类害虫, 现已入侵世界 5 洲 71 国。本文综述了苹果蠹蛾大规模饲养技术、辐射不育技术、释放技术 3 个关键环节的研究与技术进展, 主要包括: 苹果蠹蛾人工饲料、实验种群建立、饲养设备与条件、收集和质量评估、长距离运输、辐射源与设备、辐射剂量与敏感性、释放方法、释放标记和释放量等, 并介绍了各国采用 SIT 技术的应用效果。苹果蠹蛾在我国新疆、甘肃、宁夏、内蒙、黑龙江、吉林 6 个省区发现, 对我国苹果产业安全生产构成严重威胁, 我国很有必要引进并建立苹果蠹蛾 SIT 防治技术体系。

关键词 苹果蠹蛾, 雄性不育昆虫释放技术, 大规模饲养技术, 辐射不育技术, 释放技术

Advances in the sterile insect technique for controlling codling moth

LIU Wei^{1,2} XU Jing¹ ZHANG Run-Zhi^{1,3**}

(1. CAS Key Laboratory of Zoological Systematics and Evolution, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. State Key Laboratory of Integrated Management of Pest Insects and Rodents, Beijing 100101, China)

Abstract The sterile insect technique (SIT) involves the mass release of sterile insects to reduce fertility of wild populations of the same species. The codling moth is a major global pest of apple and pear crops that has invaded 71 countries and 5 continents. In this paper, advances in mass rearing, sterilization and the release of sterile insects for codling moth control are introduced, including artificial diet, population construction, rearing facilities and conditions, adult collection and quality control, long distance transport, sterilization source and equipment, radiation sensitivity, release method, marking and saturation rate. The effectiveness of SIT in countries that have used this technique is reviewed. The codling moth had now been found in Xinjiang, Gansu, Ningxia, Inner Mongolia, Heilongjiang, Jilin and poses a serious threat to China's fruit industry. The introduction of SIT's to China is therefore both timely and important.

Key words *Cydia pomonella*, sterile insect technique, mass rearing, radiation sterilization, releasing technique

1 概述

不育昆虫释放技术 (sterile insect technique, SIT) 是一种环境友好型, 可作为大面积害虫综合治理 (AW-IPM) 组分的防治技术, 它是指在大范围内应用, 以压倒性比例释放不育昆虫来减少田间同种害虫繁殖量的害虫治理方法。其核心内容包括: 大规模饲养害虫种群; 使用特定辐射源将害虫

辐射致不育, 或半不育致 (即 F_0 代可育, F_1 代完全不育, inherited sterility, IS); 将不育害虫释放到目标害虫种群阻止其有效的繁殖, 从而导致野生害虫种群下降。目前不育昆虫释放技术已广泛应用于以下几种昆虫的防治: 双翅目: 舌蝇 (采采蝇) *Glossina* spp., 葱蝇 *Delia antiqua*, 地中海实蝇 *Ceratitis capitata*, 新大陆螺旋蝇 *Cochliomyia hominivorax*, 旧大陆螺旋蝇 *Chrysomya bezziana*; 蚊类等。鞘翅目: 甘薯象甲 *Cylas formicarius*, *Euscepes*

* 资助项目: 公益性行业 (农业) 科研专项 (200903042)、973 计划课题 (2009CB119204)。

** 通讯作者, E-mail: zhangrz@ioz.ac.cn

收稿日期: 2011-12-15, 接受日期: 2012-12-23

postfasciatus, 棉籽象甲 *Anthonomus grandis*。鳞翅目: 苹果蠹蛾 *Cydia pomonella*, 伪苹果卷叶蛾 *Cryptophlebia leucotreta* 等。

苹果蠹蛾是世界重要的梨果类害虫, 原产于欧洲中南部, 现在已经入侵世界 5 洲 71 国 (EPPO, 2007)。苹果蠹蛾于 1953 年首次在中国新疆发现, 目前已经扩散到我国新疆、甘肃、宁夏、内蒙、黑龙江、吉林 6 个省份及自治区, 对我国水果产业造成严重威胁。1976—1978 年, 不育昆虫释放技术首次在加拿大用于防治苹果蠹蛾。1992—2004 年, 该技术在加拿大进行了大规模的应用, 取得了较为理想的防效, 并且引起了美国、南非、阿根廷等国家的重视, 并陆续在上述国家开展研究与实践。不育昆虫释放技术由大规模饲养技术、辐射不育技术、释放技术这 3 项关键技术组成。在苹果蠹蛾不育昆虫释放技术研究的 50 年中 (1960—2010 年), 以上 3 项关键技术均取得了关键性的进展, 具体包括: 低成本的人工饲料的开发研制 (Bloem *et al.*, 2007), 大规模饲养设施的建立 (Dyck *et al.*, 1993; Bloem *et al.*, 2007), 完全不育剂量和亚不育剂量的致不育效果验证 (Bloemfield *et al.*, 2010; Botto and Glaz 2010), 可遗传不育的发现与应用 (Bloem *et al.*, 1999), 释放技术的改进 (Mcmechan and Proverbs, 1972), 滞育饲养的应用以及与可遗传不育的结合 (Bloem *et al.*, 2004, 2006, 2007), 基因区性品系的建立 (Marec *et al.*, 2007) 及长距离运输等等 (Blomefield *et al.*, 2011)。

2 大规模饲养技术

苹果蠹蛾的大规模饲养技术开始于 1969 年, Brinton 等 (1969) 研制的用于苹果蠹蛾大规模饲养的人工饲料是该技术的开端, 经过近 30 年左右的摸索, 1994 年, 加拿大建成了世界上第 1 个大规模饲养设施, 标志着该技术的成熟。

2.1 苹果蠹蛾人工饲料

人工饲料首次应用于苹果蠹蛾饲养是在 1947 年 (Theron, 1947)。苹果蠹蛾人工饲料可分为两类, 潮湿柔软饲料和干燥坚硬饲料, 两者的区别在于凝胶物质的使用及其最终形态。第 1 份正式的潮湿柔软饲料由 Redfern (1964) 研制, 而第 1 份干燥坚硬饲料由 Brinton 等 (1969) 研制。由于琼脂

成本很高, 用木屑代替减少了饲料成本, 同时, 坚硬干燥的饲料使得幼虫直接在饲料内化蛹羽化, 省去了幼虫收集的繁琐步骤。因此干燥坚硬饲料在大规模饲养中得到了广泛应用。

世界已报道的用于饲养苹果蠹蛾的潮湿柔软饲料配方共 31 种, 共使用成分 54 种, 其中主要的固定成分有 15 种, 为琼脂、蔗糖、大豆、纤维素类、酪蛋白、酵母类、小麦胚芽、韦氏盐或其他矿物质盐、维生素 c、复合维生素、甲基 - p - 羟基苯甲酸、甲醛、山梨酸、氢氧化钠、蒸馏水。已报道的干燥坚硬饲料配方共 13 种, 共使用成分 37 种, 其中固定成分 14 种, 为蒸馏水、木屑、纸浆、蔗糖、小麦胚芽、麸皮、全麦面粉、酪蛋白、维生素 c、氯化胆碱、山梨酸、甲基 - p - 羟基苯甲酸、韦氏盐或其他矿物质盐、柠檬酸 (Dyck, 2010)。

Howell (1970) 的饲料配方在 YARL (Yakima Agricultural Research Laboratory) 实验室应用时间约 40 年, 该实验室已经连续饲养了 480 代以上的苹果蠹蛾种群, 从而为其他研究提供实验种群 (Hansen and Anderson, 2006)。Brinton 等 (1969) 研制的饲料配方在 OKSIR (Okanagan-Kootenay Sterile Insect Release Program) 项目饲养设施内应用 18 年, 生产量可达到 1 600 万头苹果蠹蛾/周 (Bloem *et al.*, 2007), 为加拿大、南非、美国的不育释放项目提供了实验虫源。

2.2 苹果蠹蛾实验种群

用于建立实验室种群的虫态有 3 种: 滞育幼虫、非滞育幼虫和成虫。滞育幼虫和非滞育幼虫是常用的用于建立实验室种群的材料, 而成虫则不经常使用, 因为其在被捕获时容易遭受损害。在苹果收获前 1 到 2 个月于苹果树干中央捆绑瓦楞纸诱集带 (corrugated cardboard bands), 吸引滞育幼虫结茧, 从而获取大量滞育幼虫 (Taret *et al.*, 2007)。非滞育幼虫的收集一般在春季进行, 从未成熟果树上收集受害果, 将其放于实验室等待幼虫脱果; 将脱果幼虫收集, 并使其结茧化蛹, 待成虫羽化后便可建立实验室种群 (Dyck, 2010)。

建立种群的苹果蠹蛾一般情况下需要 500 至 1 000 头已交配雌蛾 (Singh, 1977)。从野外收集来的昆虫在初期死亡率极高 (Parker, 2005), 在繁殖 5 代之后逐渐适应实验室条件, 稳定下来。实验室种群一旦建立, 就面临着病毒感染以及品种

退化的风险。为了克服这些因素所造成的不利影响,要严防苹果蠹蛾专性病毒 CPGV (*Cydia pomonella granulovirus*) (苹果蠹蛾颗粒体病毒) 感染,以及定期引入野生型个体复壮种群。每年需引入 500 至 1 000 头雄性野生个体 (Bloem *et al.*, 1999, 2004)。只引入雄性可以使 CpGv 的感染率降至最低 (Moore, 2003)。

2.3 苹果蠹蛾饲养设备与条件

OKSIR 大规模饲养设施为每个饲养室和羽化室设计了独立环境控制系统,并建造许多小的饲养室,只存留 1 d 的饲料,同时还建立了 3 个依据环境需要和工作类型确定的区域 (Dyck, 2010)。最好的温控系统是将加热或冷却空气通过加热或冷却线圈 (使用制冷系统),并用风扇将其送入每个区域,这种系统可以快速改变区域内的温度 (Dyck, 2010)。在 OKSIR 饲养设施中,湿度保持 55% (Oborny, 1998)。光照的目的是诱导或打破滞育,光源应覆盖饲养室内所有的饲养托盘,须在两侧安装垂直悬挂的荧光灯。(Dyck, 2010)。

在饲养规模较小时,常使用塑料盘、塑料杯、小管进行单独饲养 (Keil *et al.*, 2001; Gu *et al.*, 2006),其优点是存活率高,避免种内相残,但是操作十分繁琐。在大规模饲养中应用的饲养器具为托盘 (Bloem and Bloem, 2000),将其垂直叠放在架子之上可节省空间。旋转式蜡纸产卵笼最为先进,在使用时只需每天更换里面产有卵的蜡纸,而不用移除苹果蠹蛾。OKSIR 饲养设施也使用了类似的产卵笼,为全金属质地,在一边的中心装有保持湿度的水瓶 (Dyck, 2010)。

在实验室饲养条件下,苹果蠹蛾卵的发育时间为 5~7 d,幼虫的发育时间为 15~25 d,蛹的发育时间为 8~10 d。在 27℃ 下,从初孵幼虫到成虫的发育时间为 32 d 左右。卵的孵化温度为 24~28℃,幼虫饲养温度为 25~28℃,蛹饲养温度为 24~28℃。卵的孵化湿度为 50%~70%;幼虫饲养湿度为 50%~80%,一般为 60%~70%;蛹饲养湿度为 20%~70%,一般为 50%~60%。Dyck (2010) 的研究发现,18L:6D 的光周期能抑制所有地理品系的滞育。

2.4 苹果蠹蛾的收集和质量评估

潮湿柔软饲料可通过使用皱纹纸 (Toba and Howell, 1991) 和聚乙烯纸带 (Bathon *et al.*, 1991)

等材料诱集老熟幼虫结茧化蛹的方式收集虫蛹。在干燥坚硬饲料中,幼虫倾向于滞留于饲料内部结茧和化蛹;成虫直接在饲料内羽化。由于苹果蠹蛾成虫翅膀上的鳞片对工作人员的呼吸不利,因此直接对成虫进行收集比较困难。收集成虫的方法主要有以下几种:1) 通过光将羽化的成虫直接引入塑料瓶或透明笼中 (Guennelon *et al.*, 1981);2) 通过将饲养托盘放在与塑料瓶和透明笼相连的大木箱内,用灯光吸引其到容器内 (Brinton *et al.*, 1969);3) 将饲料托盘放入底部透明并投射紫外灯的木箱中,通过灯光将成虫吸引到箱内 (PARC, 2007);4) 将包含有虫蛹的皱纹纸袋放置于羽化盒上,箱子的顶部装有蜡纸袋以捕获羽化的成虫 (Howell and Clift, 1972);5) 使用低温室收集苹果蠹蛾成虫 (Toba and Howell, 1991)。相对前几种方法,低温法有 2 个优点,一是避免鳞片造成的呼吸风险;二是只收集可以起飞的成虫,从而保证其具有良好飞行能力,并可以在下一代种群中保持这种优良性状 (Bloem and Bloem, 2000)。

可通过检视雌蛾交配囊中精包的大小和数量来判断种群的交配能力与精包传递。具体方法为:将初羽化的雄蛾与处女雌蛾配对放入 200 mL 塑料杯中,每 48 h 更换一头处女雌蛾,检视雌蛾体内的精包数量和大小 (Bloem *et al.*, 1997)。检测雄蛾回应雌蛾性信息素的仪器为嗅觉测定器,风管 (Moore *et al.*, 1985) 以及触角电位仪 (Dyck, 2010)。运动能力可以通过先将蛹放入壁上有无味滑石粉的广口杯中羽化 (FAO/IAEA/USDA, 2003),然后将成虫密封在圆柱体 (高 8 cm, 直径 16 cm) 内 48 h 的方法来进行测定 (Carpenter and Blomefield, 2007);也可以使用飞行磨 (Schumacher *et al.*, 1997) 或者飞行隧道 (Suckling *et al.*, 2007) 等仪器来测定。

Dyck (2010) 的研究发现,在 25℃ 时,雌蛾平均寿命为 12.4 d,雄蛾为 12.9 d;26℃ 时,雌蛾平均寿命为 9.1 d,雄蛾为 10.9 d;27℃ 时,雌蛾平均寿命为 8.1 d,雄蛾为 7.7 d。野生苹果蠹蛾的单雌产卵量在 20~249 粒之间,大部分在 34~135 粒之间;大规模饲养条件下的苹果蠹蛾单雌产卵量一般在 43~130 粒之间。

2.5 长距离运输

2005—2006 年,加拿大向南非长距离运输了

苹果蠹蛾的蛹和幼虫,通过检测发现,运送到南非的苹果蠹蛾成虫寿命(9.09 ± 1.67) d 与加拿大本地的成虫寿命(8.92 ± 1.52) d 并无显著差异;接受辐射的苹果蠹蛾成虫寿命(9.36 ± 1.66) d 与未接受辐射的成虫寿命(8.66 ± 1.45) d 也无显著差别;检测同时发现,雌蛾寿命(10.2 ± 1.25) d 稍长于雄蛾(7.82 ± 0.74) d (Blomefield *et al.*, 2011)。将从加拿大运来的苹果蠹蛾释放后发现,在距离最近释放点达 246 m 处的诱捕器也诱捕到了少量的不育雄蛾;且在离释放点较近的信息素诱捕器中,不育雄蛾的数量等于或大于野生雄蛾的数量。这一调查结果表明,不育雄蛾可从释放点扩散,甚至可以穿越果园间的开阔地带,证明这些从加拿大经过长距离运送到南非的不育雄蛾在释放果园内十分活跃,并且具有较强的竞争力 (Blomefield and Carpenter, 未发表数据)。

3 辐射不育技术

3.1 辐射源与设备

苹果蠹蛾辐射不育技术中所用的辐射源多为 ^{60}Co (Azizyan and Ter-Hovhannesian, 2010; Carpenter *et al.*, 2010)。苹果蠹蛾辐射不育技术使用的辐射设备为干储型-体式辐照器,设备型号为 Gamacell 220,生产公司为 Nordion。该设备包括一个用铅或其他适宜的高原子序数材料作为保护屏幕的辐射源,且通常含有一个能够旋转或将昆虫承载罐放置在辐射位置的装置。承载罐是可重复使用的,通常用钢,铝或者塑料制成,用于在辐照过程中放置昆虫;承载罐根据辐照器的剂量率放置在辐照室的合适位置,并根据所需的剂量设定辐照时间 (Bakri *et al.*, 2005)。

3.2 辐射剂量与敏感性

对于雄蛾,在 400 gy 的辐射剂量处理下,其不育率在 93.5% ~ 98.5% (Fossati *et al.*, 1971; Proverbs *et al.*, 1978), 可视为完全不育。对雄性常用的亚不育剂量有 3 种,100 gy 可使苹果蠹蛾种群中 35.6% ~ 50.9% 的个体不育,200 gy 可使 59.7% ~ 75.8% 的个体不育,250 gy 可使 74.5% ~ 85% 的个体不育 (Bloemfield *et al.*, 2010)。OKSIR 项目中在 Okanagan 山谷开展的防治,其释放苹果蠹蛾所接受的辐射剂量均为 350 gy (Proverbs *et al.*, 1982; Bloem *et al.*, 1999)。

不同地域苹果蠹蛾种群的辐射敏感性也不同。加拿大,南非,阿根廷 3 个地区的苹果蠹蛾种群辐射敏感性不同,在以 100 gy 的辐射剂量处理时,加拿大种群的不育率为 50.9% (Bloem *et al.*, 1999), 南非种群的为 35.6% (Blomefield *et al.*, 2010), 阿根廷种群的为 53% (Botto and Glaz, 2010)。在同一地域发生的不同种群,其辐射敏感性也存在差异。在 150 gy 的辐射处理之下,亚美尼亚高海拔地区的苹果蠹蛾雌蛾不育率为 43.1%, 而低海拔地区的雌蛾不育率达 71.3%, 表明低海拔地区的苹果蠹蛾种群对辐射更加敏感 (Azizyan and Ter-Hovhannesian, 2010)。

4 释放技术

4.1 释放方法

典型的静态释放装置是一个放置不育蛹或成虫的容器 (Koyama *et al.*, 2004; Sutantawong *et al.*, 2004)。将蛹放在里面以后,其可以根据当地的光照和温度周期与野生种群同步羽化,并且成虫可随白天温度的升高而扩散出去。静态释放要求释放点在目标区域的分布要均一,并且对释放面积有精确要求以容纳增加的不育昆虫数量,因此这种方式只适合在面积较小且易于进出的区域使用。

不育昆虫成品可通过慢速移动或者静止的卡车或者全地貌汽车 (ATVs) 来进行扩散。不育昆虫通过人工或者机器直接释放到环境中去,或者将其放在开口的袋子中自然飞出 (Koyama *et al.*, 2004)。为了让最多的昆虫从释放汽车或者袋子中扩散出来,在释放过程中昆虫应该始终在环境温度下保存。与静态释放相比,地面释放能够在更大的区域内进行。

空中释放就是从飞行器上直接释放制冷的成虫或者盛有不育昆虫的袋子 (Rendón *et al.*, 2004)。直接释放不育成虫需要将其从羽化容器或者房间中取出,冷却后再放到大的冷盒中,然后装到一个有特殊装置的飞行器中,通过飞行器中马达驱动的传送带将这些昆虫送入释放管中,然后放出。释放速度由传送带或飞行器的速度来控制。

4.2 释放标记和释放量

释放的不育苹果蠹蛾需要与野生种群区分才

可以进行防效的评估。标记的方式有以下 2 种:第 1 种为释放前使用荧光染料(如 Day Glo®)对不育苹果蠹蛾进行染色,这样在紫外灯下,被染色个体可以与非染色个体区分开来,已有的实验结果证明使用这些染料不会对苹果蠹蛾飞行,以及雄性对于雌性的性信息素反应产生影响(Mcmechan and Proverbs, 1972);第 2 种为在大规模饲养时在饲料内添加染料(如 Calco Red)(Dyck, 2010)。

释放比率指不育昆虫种群数量与目标昆虫种群数量的比率,该比例的确定与目标种群的生态学特性密切相关,随着种群内禀增长率的提升,释放比率也需要相应的提升。通过每周释放 100 万头不育苹果蠹蛾,最终使得释放比率达到 40:1 (Proverbs *et al.*, 1982)。

5 SIT 防治效果

1976 年至 1978 年,加拿大在英属哥伦比亚 Similkameen 山谷中开展了不育苹果蠹蛾释放,使用化学防治措施对山谷中的苹果蠹蛾种群进行初步抑制后,在 320 ~ 526 hm^2 的实验区域内,每周释放 100 万头不育苹果蠹蛾,释放比率达 40:1。3 年中在实验区内分别有 98.9%、96.9%、100% 的果园没有受到经济损害(Proverbs *et al.*, 1982)。

1995 年,美国在 160 hm^2 的果园中开展 SIT 防治,苹果蠹蛾种群密度下降了 99.49%,同时由其造成的果品损失也从 0.3% 下降到 0.06% (Calkins *et al.*, 2000)。

1995 年至今,加拿大在 Osoyoos 地区进行 SIT 不育苹果蠹蛾释放,1995—2000 年,3 200 hm^2 的实验区内第 1 代种群数量下降 99.4%、第 2 代种群数量下降 96.8%,未受损害的果园从 42% 增加到了 95%;1998—2004 年,2 600 hm^2 的实验区内,未受损害的果园保持在 81% ~ 95% (Bloem *et al.*, 2005, 2007);2004—2010 年,由于果园内的苹果蠹蛾种群较低,在 3 个实验区内(2 600, 1 800, 1 000 hm^2),分别有 90%、88% 和 84% 的只需要喷洒一遍杀虫剂即可完成防治(FAQs, 2011)。

6 中国开展 SIT 的需求前景

苹果蠹蛾目前在中国已经扩散到新疆、甘肃、内蒙古、宁夏、黑龙江和吉林 6 省区,但最大的黄土高原苹果产区 and 渤海湾苹果产区尚未发现苹果

蠹蛾疫情。为保护我国最具优势的苹果安全生产,国家正在实施检疫性有害生物(包括苹果蠹蛾)阻截带控制工程和苹果非疫区建设工程(苹果蠹蛾为主要防控对象)。在上述工程建设中,苹果蠹蛾的大范围无公害防控技术成为急需,因此 SIT 技术的引入与应用非常必要。美国、加拿大、阿根廷、南非等应用的结果证明,SIT 将为占世界产量第 1 位的我国苹果安全生产提供重要技术支撑。

参考文献 (References)

- Azizyan A, Ter-Hovhannesian AR, 2010. Radiosensitivity of two strains of the codling moth *Cydia pomonella* (Linnaeus) (Lepidoptera: Tortricidae) originating from different elevations in Armenia. *J. Appl. Entomol.*, 134(3):227—233.
- Bakri A, Mehta K, Lance DR, 2005. Sterilizing insects with ionizing radiation//Dyck VA, Hendrichs JH, Robinson AS (eds.). *Sterile Insect Technique: Principles and Practice in Area-wide Integrated Pest Management*. Joint FAO/IAEA Programme. Vienna Austria. 233—268.
- Bathon H, Singh P, Clare GK, 1991. Rearing methods//Van der Geest LPS, Evenhuis HH (eds.). *Tortricid Pests: Their Biology, Natural Enemies and Control*. Vol. 5 of *World Crop Pests*, W. Helle, ed. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands. 283—293.
- Bloem KA, Bloem S, 2000. SIT for codling moth eradication in British Columbia, Canada//Tan KH (eds.). *Area-Wide Control of Fruit Flies and Other Insect Pests*. International Conference on Area-Wide Control of Insect Pests, and the 5th International Symposium on Fruit Flies of Economic Importance, 28 May-5 June 1998, Penang, Malaysia. Penerbit Universiti Sains Malaysia, Pulau Pinang, Malaysia. 207—214.
- Bloem KA, Bloem S, Carpenter JE, 2005. Impact of moth suppression/eradication programmes using the sterile insect technique or inherited sterility //Dyck VA, Hendrichs J, Robinson AS (eds.). *Sterile Insect Technique. Principles and Practice in Area-wide Integrated Pest Management*. Springer, Dordrecht. 677—700.
- Bloem S, Bloem KA, Calkins CO, 2000. Incorporation of diapause into codling moth mass rearing: production advantages and insect quality issues //Tan KH (ed.). *Area-Wide Control of Fruit Flies and Other Insect Pests*. International Conference on Area-Wide Control of Insect Pests, the 5th International Symposium on Fruit Flies of Economic Importance, 28 May-5 June 1998, Penang, Malaysia. Penerbit Universiti Sains Malaysia, Pulau

- Pinang, Malaysia. 329—335.
- Bloem S, Bloem KA, Carpenter JE, Calkins CO, 1999. Inherited sterility in codling moth (Lepidoptera: Tortricidae): Effect of substerilizing doses of radiation on field competitiveness. *Environ. Entomol.*, 28(4):669—674.
- Bloem S, Bloem KA, Fielding LS, 1997. Mass-rearing and storing codling moth larvae in diapause; a novel approach to increase production for sterile insect release. *J. Entomol. Soc. British Columb.*, 94:75—81.
- Bloem S, Carpenter JE, Bloem KA, Tomlin L, Taggart S, 2004. Effect of rearing strategy and gamma radiation on field competitiveness of mass-reared codling moths (Lepidoptera: Tortricidae). *J. Econ. Entomol.*, 97(6):1891—1898.
- Bloem S, Carpenter JE, Dorn S, 2006. Mobility of mass-reared diapaused and nondiapaused *Cydia pomonella* (Lepidoptera: Tortricidae): effect of mating status and treatment with gamma radiation. *J. Econ. Entomol.*, 99(3):699—706.
- Bloem S, McCluskey A, Fugger R, Arthur S, Wood S, Carpenter JE, 2007. Suppression of the codling moth *Cydia pomonella* in British Columbia, Canada using an area-wide integrated approach with an SIT component//Vreysen MJB, Robinson AS, Hendrichs J (eds.). *Area-wide Control of Insect Pests. From research to field implementation.* Springer, Dordrecht, The Netherlands. 591—601.
- Blomefield T, Carpenter JE, Vreysen MJB, 2011. Quality of mass-reared codling moth (Lepidoptera: Tortricidae) after long-distance transportation; 1. logistics of shipping procedures and quality parameters as measured in the laboratory. *J. Econ. Entomol.*, 104(3):814—822.
- Blomefield TL, Bloem S, Carpenter JE, 2010. Effect of radiation on fecundity and fertility of codling moth *Cydia pomonella* (Linnaeus) (Lepidoptera: Tortricidae) from South Africa. *J. Appl. Entomol.*, 134(3):216—220.
- Botto E, Glaz P, 2010. Potential for controlling codling moth *Cydia pomonella* (Linnaeus) (Lepidoptera: Tortricidae) in Argentina using the sterile insect technique and egg parasitoids. *J. Appl. Entomol.*, 134(3):251—260.
- Brinton FE, Proverbs MD, Carty BE, 1969. Artificial diet for mass production of the codling moth, *Carpocapsa pomonella* (Lepidoptera: Olethreutidae). *Can. Entomol.*, 101(6):577—584.
- Calkins CO, Knight AL, Richardson G, Bloem KA, 2000. Area-wide population suppression of codling moth//Tan KH (ed.). *Area-wide Control of Fruit Flies and Other Insect Pests. International Conference on Area-Wide Control of Insect Pests, and the 5th International Symposium on Fruit Flies of Economic Importance*, 28 May—5 June 1998, Penang, Malaysia. Penerbit Universiti Sains Malaysia, Pulau Pinang. 215—219.
- Carpenter JE, Bloem S, Taggart S, 2010. Effect of rearing strategy and gamma radiation on fecundity and fertility of codling moth *Cydia pomonella* (Linnaeus) (Lepidoptera: Tortricidae). *J. Appl. Entomol.*, 134(3):221—226.
- Carpenter JE, Blomefield TL, 2007. Flight ability as a quality control parameter for the codling moth *Cydia pomonella*. Improvement of codling moth SIT to facilitate expansion of field application. Final Research Coordination Meeting within the FAO/IAEA Coordinated Research Programme, 19—23 March 2007, Vacaria, Brazil IAEA-314-D4-876. 4. IAEA, Vienna, Austria.
- Dyck VA, 2010. Rearing codling moth for the sterile insect technique. FAO Plant Production and Protection. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- Dyck VA, Graham SH, Bloem KA, 1993. Implementation of the sterile insect release programme to eradicate the codling moth, *Cydia pomonella* (L.) (Lepidoptera: Olethreutidae), in British Columbia, Canada. *Proc. Management of Insect Pests: Nuclear and Related Molecular and Genetic Techniques. IAEA/FAO International Symposium, 19-23 October 1992, Vienna, Austria. STI/PUB/909.* IAEA, Vienna, Austria. 285—297.
- EPP0. EPP0 database on geographical distribution and host plants of quarantine pests. 2007, Source from: <http://www.eppo.org/DATABASES/pqr/pqr.htm>
- FAO/IAEA/USDA, 2003. Product quality control and shipping procedures for sterile mass-reared tephritid fruit flies. Manual, Version 5.0. IAEA, Vienna, Austria.
- FAQs, 2011, Understanding your codling moth area-wide control program, <http://www.oksir.org/docs/2011program/FAQsForUnderstandingSIRin2011.pdf>.
- Fossati A, Stahl J, Granges J, 1971. Effect of gamma irradiation dose on the reproductive performance of the P and F1 generations of the codling moth *Laspeyresia pomonella*. Application of induced sterility for control of lepidopterous populations, IAEA-S11/PUB/281. International Atomic Energy Agency, Vienna. 41—47.
- Gu H, Hughes J, Dorn S, 2006. Trade-off between mobility and fitness in *Cydia pomonella* (L.) (Lepidoptera: Tortricidae). *Ecol. Entomol.*, 31(1):68—74.
- Guennelon G, Audemard H, Fremont JC, El Idrissi Ammari MA, 1981. Progrès réalisés dans l'élévage permanent du *Carpocapse* (*Laspeyresia pomonella* L.) sur milieu artificiel. *Agronomie*, 1:59—64.
- Hansen JD, Anderson PA, 2006. Mass rearing codling

- moths; improvements and modifications. *J. Entomol. Soc. B. C.*, 103:33—36.
- Howell JF, 1970. Rearing the codling moth on an artificial diet. *J. Econ. Entomol.*, 63(4):1148—1150.
- Howell JF, Clift AE, 1972. Rearing codling moths on an artificial diet in trays. *J. Econ. Entomol.*, 65(3):888—890.
- Keil S, Gu H, Dorn S, 2001. Response of *Cydia pomonella* to selection on mobility: laboratory evaluation and field verification. *Ecol. Entomol.*, 26:495—501.
- Koyama J, Kakinohana H, Miyatake T, 2004. Eradication of the melon fly, *Bactrocera cucurbitae*, in Japan: importance of behavior, ecology, genetics, and evolution. *Annu. Rev. Entomol.*, 49:331—349.
- Marec F, Neven LG, Fukova I, 2007. Developing transgenic sexing strains for the release of non-transgenic sterile male codling moths *Cydia pomonella* // Vreysen MJB, Robinson AS, Hendrichs J (eds.). Area-wide Control of Insect Pests. From research to field implementation. Springer, Dordrecht. 103—111.
- McMechan AD, Proverbs MD, 1972. Equipment and procedures for release of sterile codling moths. *Can. Agr. Eng.*, 14(1):42—45.
- Moore RF, 1985. Artificial diets: development and improvement // Singh P, Moore RF (eds.). Handbook of Insect Rearing. Vol. I. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands. 67—83.
- Moore S, 2003. Report on: IAEA sponsored scientific visit to Canada (OKSIR codling moth mass-rearing facility, Osoyoos, British Columbia). 4.
- Oborny J, 1998. Design concept of HVAC-system for fruit fly mass rearing facilities (includes report on visit to OKSIR codling moth facility in Canada). Report to the IAEA. IAEA, Vienna, Austria.
- Pacific Agri-food Research Centre, Summerland, British Columbia, Canada (PARC). 2007. http://res2.agr.ca/parc-crapac/summerland/index_e.htm.
- Parker AG, 2005. Mass-rearing for sterile insect release // Dyck VA, Hendrichs J, Robinson AS (eds.). Sterile Insect Technique. Principles and Practice in Area-wide Integrated Pest Management. Springer, Dordrecht, The Netherlands. 209—232.
- Proverbs MD, Newton JR, Campbell CJ, 1982. Codling moth: a pilot program of control by sterile insect release in British Columbia. *Can. Entomol.*, 114(4):363—376.
- Proverbs MD, Newton JR, Logan DM, 1978. Suppression of codling moth, *Laspeyresia pomonella* (Lepidoptera Oleutidae), by release of sterile and partially sterile moths. *Can. Entomol.*, 110(10):1095—1102.
- Redfern RE, 1964. Concentrate medium for rearing the codling moth. *J. Econ. Entomol.*, 57(4):607—608.
- Rendón P, McInnis D, Lance D, Stewart J, 2004. Medfly (Diptera: Tephritidae) genetic sexing: large-scale field comparison of males-only and bisexual sterile fly releases in Guatemala. *J. Econ. Entomol.*, 97(5):1547—1553.
- Schumacher P, Weyeneth A, Weber DC, Dorn S, 1997. Long flights in *Cydia pomonella* L. (Lepidoptera: Tortricidae) measured by a flight mill: influence of sex, mated status and age. *Physiol. Entomol.*, 22(2):149—160.
- Singh P, 1977. Artificial diets for insects, mites, and spiders. IFI/Plenum, New York, USA.
- Suckling DM, Barrington AM, Chhagan A, Stephens AEA, Burnip GM, Charles JG, Wee SL, 2007. Eradication of the Australian painted apple moth *Teia anartoides* in New Zealand: trapping, inherited sterility, and male competitiveness // Vreysen MJB, Robinson AS, Hendrichs J (eds.). Area-wide Control of Insect Pests. From research to field implementation. Springer, Dordrecht, The Netherlands. 603—615.
- Sutantawong M, Orankanok W, Enkerlin WR, Wornoyaporn V, Caceres C, 2004. The sterile insect technique for control of the oriental fruit fly, *Bactrocera dorsalis* (Hendel), in mango orchards in Ratchaburi Province, Thailand // Barnes BN (eds.). Proceedings, Symposium: 6th International Symposium on Fruit Flies of Economic Importance, 6-10 May 2002, Stellenbosch, South Africa. Isteg Scientific Publications, Irene, South Africa. 223—232.
- Taret G, Sevilla M, Flores C, Van Cauwlaert AM, Colombo A, Sarda A, 2007. Compatibility study of wild populations and competitiveness tests between wild codling moths and sterile codling moths under field conditions. In Working material. Improvement of codling moth SIT to facilitate expansion of field application. Final Research Coordination Meeting within the FAO/IAEA Coordinated Research Programme, 19—23 March 2007, Vacaria, Brazil. IAEA-314-D4-876. 4. IAEA, Vienna, Austria.
- Theron PPA, 1947. Studies on the provision of hosts for the mass-rearing of codling moth parasites. Union of South Africa, Department of Agriculture. Fruit Research (Technical Series No. 4). *Sci. Bull.*, 262:1—45.
- Toba HH, Howell JF, 1991. An improved system for mass-rearing codling moths. *J. Entomol. Soc. B. C.*, 88:22—27.