低剂量 ^{60}Co-γ 射线辐照对梨小食心虫羽化、繁殖和成虫寿命的影响*

李 娜[1**] 崔智博[2] 李晓平[2] 王雅琪[1] 杨雪清[1***]

（1. 沈阳农业大学植物保护学院，沈阳 110866；2. 辽宁省农业科学院，沈阳 110161）

摘 要 【**目的**】本研究采用低剂量的 ^{60}Co-γ 射线辐照梨小食心虫 *Grapholita molesta* 雄蛹，分析辐照对梨小食心虫繁殖的影响，为利用 ^{60}Co-γ 射线防治梨小食心虫提供理论依据。【**方法**】设置辐照剂量为 0、25、50 和 75 Gy 的 ^{60}Co-γ 射线对梨小食心虫羽化前 1 d 的雄蛹进行辐照处理，分析辐照对其羽化率、繁殖能力及寿命的影响。【**结果**】不同辐照剂量处理的梨小食心虫羽化率均有下降，但与对照组相比无显著性差异，说明辐照对其羽化率影响较小。辐照组雄蛾与正常雌蛾的交配率与对照组无显著性差异。与对照组相比，经 25、50 和 75 Gy 辐照处理羽化的雄蛾与正常雌蛾交配后，其单雌产卵量无显著性差异。随着辐照剂量的升高，梨小食心虫的孵化率逐渐下降。与对照组孵化率 74.38%±6.15%相比，75 Gy 处理组的孵化率明显降低，仅为 22.68%±7.20%。与对照组相比，随着辐照剂量的升高，辐照组雄虫的平均寿命均有不同程度的下降。【**结论**】利用低剂量的 ^{60}Co-γ 射线辐照可影响梨小食心虫繁殖，为进一步优化辐照条件和利用 ^{60}Co-γ 射线防治梨小食心虫提供理论指导。

关键词 梨小食心虫；辐照不育技术；繁殖力；发育

Effects of low dosages of ^{60}Co-γ ray irradiation on the emergence, fecundity and adult life span of *Grapholita molesta*

LI Na[1**] CUI Zhi-Bo[2] LI Xiao-Ping[2] WANG Ya-Qi[1] YANG Xue-Qing[1***]

(1. College of Plant Protection, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China;
2. Liaoning Academy of Agricultural Sciences, Shenyang 110161, China)

Abstract **[Objectives]** To provide a theoretical basis for the use of ^{60}Co-γ ray irradiation to control *Grapholita molesta*. **[Methods]** Male *G. molesta* pupae were irradiated with 0, 25, 50, 75 Gy of ^{60}Co-γ rays one day before emergence and the effects on adult emergence rate, fertility and longevity, were analyzed. **[Results]** There was no significant difference in the adult emergence rate, or mating rate, of irradiated and control adults. The number of eggs laid by adult females mated with irradiated males was also not significantly different to that of females that mated with non-irradiated males. However, the hatching rate of eggs laid by females that mated with irradiated males decreased gradually as the level of irradiation increased and the hatching rate of the 75 Gy treatment group (22.68%±7.20%) was significantly lower than that of the control group (74.38%±6.15%). The average life span of males in irradiation treatment groups was also lower than that of control males. **[Conclusion]** Irradiation with low dosage of ^{60}Co-γ reduced reproductive parameters of *G. molesta*. These results provide a guide for further optimization of irradiation conditions and the use of ^{60}Co-γ radiation in the management of this pest.

Key words *Grapholita molesta*; sterility insect technique; fertility; development

---

*资助项目 Supported projects：兴辽英才计划（XLYC1907097）；辽宁省高等学校“创新人才支持计划”（LCR2018024）；沈阳市“中青年科技创新人才支持计划”（RC180001）

**第一作者 First author，E-mail：15765977013@163.com

***通讯作者 Corresponding author，E-mail：sling233@hotmail.com

收稿日期 Received：2020-07-05；接受日期 Accepted：2021-02-22

梨小食心虫 *Grapholita molesta* 又称“东方蛀果蛾”，属鳞翅目卷蛾科小卷蛾亚科，是一种世界性的果树害虫，在亚洲、欧洲、美洲和澳洲的许多国家和地区均有发生和危害（陈梅香等，2009）。在我国，除西藏尚未发现外，该虫在其它各省区均有发生，在东北、西北、华东和华北地区尤为严重（焦旭东等，2017）。梨小食心虫属于多食性害虫，为害的寄主植物有桃、李子、苹果、枇杷、樱桃和海棠等（迟全元等，2014）。该虫主要以幼虫危害果树，被害树梢蛀孔流出树胶直至中空，树梢会萎蔫下垂，形成“折梢”；被害果表面虫孔附近有粪便排出，虫孔周围变黑腐烂（又称“黑膏药”），造成脱果，严重影响果实的产量和品质（王苏林，2020）。在河北省衡水市，梨小食心虫在蜜桃种植区的蛀果率达30%-40%（刘英胜，2010）。石河子市 143 团的蟠桃园虽然利用化学防治加大对梨小食心虫防治力度，部分蟠桃蛀果率仍高于 30%（陈静等，2009）。近年来，在江苏、陕西、河南、新疆、山西、甘肃、河北、安徽及山东等省区的梨园蛀果率可达 20%-30%，严重时高达 50%，折梢率重者达 80%（张利军等，2013）。作为当前果树生产上的主要害虫之一，梨小食心虫防控技术的研究尤为重要。

在生产中，长期依赖化学杀虫剂防治梨小食心虫，不但大量杀伤天敌且引发害虫产生抗药性的演化，还严重破坏了生态系统，造成果品安全问题（徐妍等，2009）。近年来，信息素诱杀雄蛾作为一种环境友好的防控策略，在一些地区逐步被推荐用于防治梨小食心虫。然而，该方法无法完全根除害虫，且更换诱芯费时费力（冉红凡等，2016）。同样是一种环境友好型的害虫防治手段，昆虫不育技术（Sterile insect technique，SIT）可作为区域害虫综合治理（Area-wide integrated pest management，AW-IPM）策略的核心防治技术进行应用（刘伟等，2012）。传统的 SIT 技术是利用高能射线对目标害虫进行辐照处理，使其生殖细胞内的染色体发生改变从而导致不育或亚不育，再将不育害虫释放至田间与野生害虫交配产生不育后代，达到逐步压低害虫种群密度的目的（Nikolouli *et al.*，2018）。

在 SIT 技术中，应用最广泛的辐射源为 ^{60}钴（^{60}Co-γ）射线，其穿透性能好，且剂量率稳定（詹国平和高美须，2013）。目前，已有许多国家成功地利用 SIT 技术有效控制了多种农林业害虫的发生和危害。例如，加拿大早在 1956 年就在利用 SIT 技术防治苹果蠹蛾 *Cydia pomonella* 中取得了良好的效果（Anisimov *et al.*，1989）。1989-1990 年，澳大利亚利用 SIT 技术根除了昆士兰果实蝇 *Bactrocera tryoni*（王华嵩，1998）。20 世纪 60 年代，我国便开始了利用 SIT 技术防治害虫的研究（苏远达，2011）。王华嵩等（1995）利用 90 Gy 的 ^{60}Co-γ 射线辐照柑桔大实蝇 *Bactrocera minax* 末龄蛹，此后在 7 个柑桔园共释放不育雄蝇 159.5 万头，柑桔平均为害率由 5.194%降至 0.098%。李咏军等（2008）利用 ^{60}Co-γ 射线辐照棉铃虫 *Helicoverpa armigera* 雄蛹，田间笼罩试验结果表明，在 200 Gy 剂量下的不育雄虫与正常雄虫的释放比为 5∶1 时可有效控制棉铃虫。张和琴等（1985）利用 2.5-3 万伦的 ^{60}Co-γ 射线辐照亚洲玉米螟 *Ostrinia furnacalis* 老熟蛹，以辐照虫与正常虫比例为 0.64∶1 连续释放 3 年后，百株玉米杆内玉米螟虫数下降了 34.2%。牟建军等（2005）研究表明，40 Gy 的 ^{60}Co-γ 是引起松墨天牛 *Monochamus alternatus* 辐照不育的最适剂量，且雄虫比雌虫对射线更为敏感。罗玲艳等（2018）利用 ^{60}Co-γ 射线辐照小菜蛾 *Plutella xylostella* 蛹，并验证了遗传小菜蛾不育技术的可行性。截止目前，我国已在上述这些害虫，以及橘小实蝇 *Bactrocera dorsalis*、烟青虫 *Heliothis assulta* 和刺桐姬小蜂 *Quadrastichus erythrinae* 等 30 余种害虫上开展了 SIT 技术的研究与应用（钟国华等，2012）。

Genchev（2002）利用辐照剂量范围在 100-500 Gy 的 ^{60}Co-γ 射线辐照梨小食心虫羽化前 1 d 的雄蛹后，子代卵不育率在 37.5%-96.2%。然而，该研究所用的辐照剂量范围在 100-500 Gy，较低剂量（100 Gy 以下）^{60}Co-γ 辐照是否会对梨小食心虫生长发育和繁殖造成影响不得而知，且缺乏辐照对成虫羽化率等重要生物学参数影响的分

析。因此，本研究通过利用 ^{60}Co-γ 射线，对羽化前 1 d 的梨小食心虫雄蛹进行低辐照剂量（25-75 Gy）处理，分析 ^{60}Co-γ 射线辐照对梨小食心虫羽化率、繁殖能力及寿命生命参数的影响，从而为田间利用 SIT 技术防治梨小食心虫提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 虫源 供试昆虫梨小食心虫已在本实验室研制的人工饲料（专利申请号：201910839547.3）上连续繁育 30 余代。具体饲养方法如下：幼虫期在离心管（5 mL）中饲喂本实验室内人工饲料，每隔一周更换一次饲料。当梨小食心虫 5 龄幼虫准备化蛹时，将其转移至平铺有卫生纸的饲养盒（25 cm×12 cm×15 cm）内供其钻入纸内化蛹。成虫期饲喂浓度为 10%的蜂蜜水，并令其产卵于保鲜膜上。收集的卵置于人工气候箱内孵化，人工气候箱条件设置为：光周期 16L∶8D，温度（26±1）℃，相对湿度 60%-70%。辐照处理前，将雌、雄蛹分别放置于不同的培养皿中。

1.1.2 辐照源 辐照处理在辽宁省农业科学院辐照中心进行。辐照室内温度为 24 ℃，辐照源（^{60}Co-γ）与试虫距离为 80 cm，在标准大气压（101.325 kPa）下以 5 Gy/min 的剂量率分别辐照 5、10 和 15 min（对应辐照剂量为 25、50 和 75 Gy），以未经辐照的雄蛹作为对照。每组 10 头，重复 3 次。

1.2 试验方法

1.2.1 不同辐照剂量对梨小食心虫成虫羽化率的影响 梨小食心虫蛹期约为 9-10 d。记录化蛹日期，将第 8 天（即羽化前 1 d）的雄蛹置于一次性培养皿中，采用不同剂量（25、50 和 75 Gy）对羽化前 1 d 的雄蛹进行辐照。每个处理辐照 10 头雄蛹，重复 3 次。以未经辐照处理的雄蛹为对照。将辐照后的雄蛹与正常雄蛹分别置于相同条件下的不同饲养盒内，保证其蛹发育需要条件。待其羽化后，记录羽化率。

1.2.2 不同辐照剂量对梨小食心虫繁殖力的影响 将辐照后的雄蛹置于饲养盒内，待其羽化后令其与同一龄期未经辐照的雌蛾置于饲养盒中配对（性比为 1∶1）。用保鲜膜封住，令雌虫在保鲜膜上产卵，每日更换保鲜膜，并统计单日产卵量。以未经辐照的同一日龄雄蛾为对照。每个处理配对 5 组，重复 3 次。成虫用滴有蜂蜜水的脱脂棉球进行饲喂，每天补充蜂蜜水。每日观察并记录成虫产卵及存活情况，直至成虫死亡。雌成虫死亡后，解剖并检测精苞，以明确其是否成功交配。记录总产卵量、总卵孵化率、交配率及雄蛾寿命。

1.3 数据统计分析

利用 SPSS 19（IBM）软件对辐照组和对照组梨小食心虫的羽化率、单雌产卵量、孵化率、交配率及雄蛾寿命实验数据进行处理，利用 Duncan’s 检验法进行差异显著性分析，实验结果均以平均值±标准差表示。

2 结果与分析

2.1 不同辐照剂量对梨小食心虫成虫羽化率的影响

对照组梨小食心虫羽化率为 96.67%±5.77%，经 25、50 和 75 Gy 辐照剂量处理的雄蛹羽化率均为 93.33%±5.77%，且与对照组无显著性差异（$P > 0.05$），说明不同辐照剂量对梨小食心虫羽化率无明显影响（图 1）。

2.2 不同辐照剂量对梨小食心虫繁殖力的影响

与对照组相比，经 25、50 和 75 Gy 辐照处理组羽化的雄蛾与正常雌蛾交配后，雌蛾单雌产卵量无显著性差异（$P > 0.05$）。对照组单雌产卵量为（121.13±9.42）粒，25、50 和 75 Gy 辐照组单雌产卵量分别为（98.60±37.85）、（124.13±12.20）和（110.80±24.83）粒。对照组的孵化率为 74.38%±6.15%，随辐照剂量的升高，辐照组的卵孵化率逐渐下降（$P < 0.05$），25、50 和 75 Gy 辐照组卵孵化率分别为 54.89%±8.96%、40.20%±16.60%和 22.68%±7.20%。25 Gy 与 50 Gy 辐照

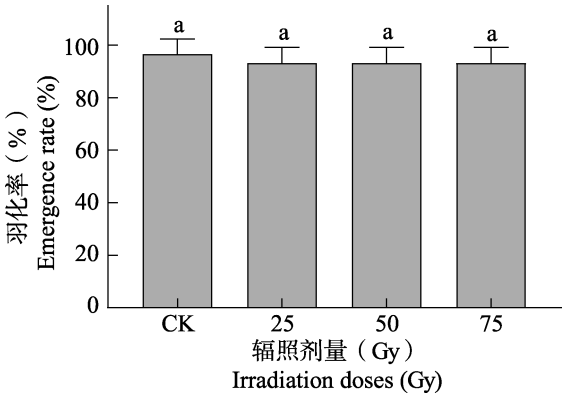

图 1　不同辐照剂量对梨小食心虫羽化率的影响

Fig. 1　Effects of different irradiation doses on the emergence rate of *Grapholita molesta*

柱上标有相同小写字母表示差异不显著（$P > 0.05$），标有不同小写字母表示差异显著（$P < 0.05$，Duncan's 检验法）。下图同。

Histograms with the same lowercase letters indicate no significant difference at the 0.05 level, while with the difference lowercase letters indicate significant differences at the 0.05 level by Duncan's test. The same as below.

组（$P > 0.05$），以及 50 Gy 与 75 Gy 辐照组（$P > 0.05$）间卵孵化率无显著性差异（图 2）。对照组与辐照组的雄蛾与正常雌蛾的交配率均为 100%。

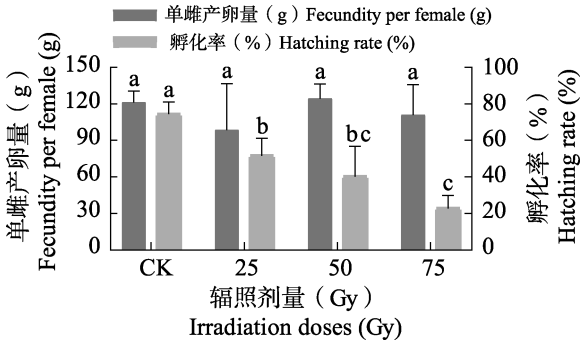

图 2　不同辐照剂量对梨小食心虫单雌产卵量与孵化率的影响

Fig. 2　Effects of different irradiation doses on the oviposition and hatching rate of single female of *Grapholita molesta*

2.3　不同辐照剂量对梨小食心虫寿命的影响

经 25、50 和 75 Gy 辐照后的雄蛾寿命分别为（12.60±3.49）、（15.27±4.11）和（17.47±3.72）d，显著低于对照组的雄蛾寿命（25.00±0.60）d。与对照组相比，辐照组雄蛾的平均寿命均明显缩短（$P < 0.05$），辐照组之间雄蛾寿命无显著性差异（$P > 0.05$）（图 3）。

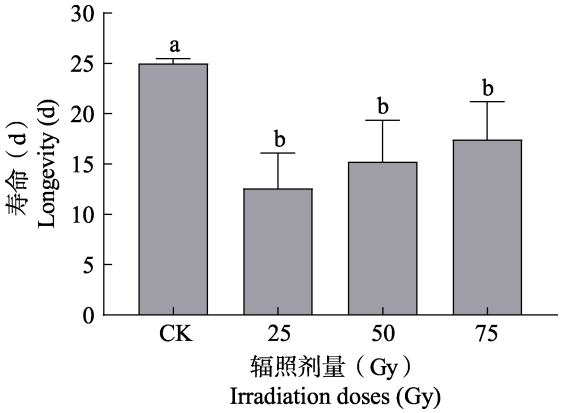

图 3　不同辐照剂量对梨小食心虫寿命的影响

Fig. 3　Effects of different irradiation doses on the longevity rate of *Grapholita molesta*

3　讨论

近年来，由于果树种植种类增多、种植面积日益扩大、农业产业结构的调整以及气候等因素的影响，梨小食心虫的危害范围逐步扩大，对我国果业的发展造成严重威胁（范仁俊等，2013）。在我国，过去防治梨小食心虫主要依靠套袋技术和化学防治，但这两种方法在一定程度上降低了果实品质，造成农药和面源污染，害虫易产生抗药性等问题（范仁俊等，2010）。而 SIT 技术具有无污染、防治效果持久及专一性强等优点,是害虫综合治理的重要组成部分，可克服上述手段的不足（Parker and Mehta，2007；李娜等，2021）。

SIT 技术的成功应用主要取决于三方面的因素，包括人工繁育技术、不育技术和不育昆虫释放技术。首先，SIT 技术需要对大量目标害虫进行辐照处理，而从野外采集大量目标害虫难度较大，因此需要在室内建立害虫大规模饲养的人工繁育技术（王建斌，2010）。建立适合的辐照不育技术是决定 SIT 成功应用的第二个主要因素，使昆虫不育的辐照剂量过高，往往会影响昆虫的生物特性和交配竞争力，因此需要选择合适的辐照阶段和辐照剂量以降低对昆虫生理的影响（Dyck *et al.*，2005）。SIT 技术成功的另一保障是不育昆虫释放技术，其主要包括释放量、释

放方法和释放标记方法（刘伟等，2012）。在防治区域释放不育雄虫前需要对其进行标记，目的是监测野外昆虫与释放的不育昆虫的种群密度，以便确定进一步释放的比例，在数量上对野生种群进行压制，提高不育昆虫的竞争优势（李咏军，2006）。然而，不育昆虫的竞争能力通常会在大量饲养、辐照处理和释放过程中发生下降（Orozco-Dávila *et al.*，2017）。因此，理想的辐照技术应在不影响目标昆虫正常生命活动的前提下，不影响其与野生的竞争力（张和琴，1982）。

昆虫在不同发育时期对射线的敏感性不同，卵和幼虫对辐射的敏感性极强，辐照处理不易操作，而蛹是最适宜的辐射虫态（季清娥等，2007）。在棉铃虫（顾伟平等，2000）和柑桔大实蝇（刘琼茹等，1992）上的辐照研究结果显示，羽化前 1-2 d 的蛹是最适辐照虫态。因此，本研究中选用羽化前 1 d 的梨小食心虫雄蛹进行辐照处理，结果表明 25-75 Gy 的辐照剂量对梨小食心虫成虫羽化率无明显影响。这一结果与李咏军等（2008）利用 ^{60}Co-γ 射线辐照棉铃虫老熟蛹（羽化前 1 d）结果一致，说明所用剂量未对供试昆虫的体细胞造成损伤。Genchev（2002）虽然明确了 100-500 Gy 的 ^{60}Co-γ 射线辐照雄蛹对子代卵的不育率，但其所用的辐照剂量是否对梨小食心虫成虫的羽化率造成影响仍悬而未决。若高剂量对成虫羽化率产生了明显的影响，这将在很大程度上制约 SIT 技术的田间应用效果。

在本研究中，经 25、50 和 75 Gy 辐照雄蛹后，雌蛾单雌产卵量与对照组无显著性差异。这一研究结果与马沛沛（2008）利用 ^{60}Co-γ 射线辐照松墨天牛雄虫结果一致。进一步研究发现，75 Gy 辐照组梨小食心虫的不育率达 77.32%±7.20%。经剂量为 50 Gy 的 ^{60}Co-γ 射线辐照处理的梨小食心虫卵均不能正常孵化（Silva *et al.*，2010）。上述研究结果表明，不同虫态对同种射线的敏感性不同。一般情况下，卵和幼虫对辐射的敏感性极强，辐照处理不易操作，而蛹是最适宜的辐射虫态（季清娥等，2007）。此外，研究结果表明 100 Gy 辐照梨小食心虫雄蛹后，其羽化的成虫与正常雌蛾交配后不育率仅为 37.5%±2.2%（Genchev，2002）。而本研究采用较低的辐射剂量却获得了更高的不育效果，说明除了辐照剂量外，供试昆虫品系对辐照的敏感性、人工饲养技术、辐照条件和环境等因素也可能会影响辐照不育的效果（张和琴，1982）。长期在室内人工饲养会影响昆虫寿命、飞行能力、交配竞争力及对环境的适应力等，这是因为多代近亲繁殖从而导致其交配竞争力和生活力发生衰退（钟国华等，2012）；此时，可通过引入野外种群进行复壮以提高种群的活力（张和琴，1982）。此外，辐照条件如辐照源与昆虫距离的远近、照射面积的大小及辐照处理的环境的不同，其产生的生物学效应也会有所差异（张秀华，1995）。Hallman（2004）利用剂量为 200 Gy 的 ^{137}Cs 射线在正常大气环境与低氧环境下分别辐照梨小食心虫 5 龄幼虫，发现低氧环境条件下辐射对虫体的影响小于正常大气环境下辐射造成的影响。在本研究中，由于处理组不育率较高，难以获得足够数量的试虫建立种群，这制约了辐照对子代种群生物学参数影响的系统评估。

此外，辐照组雄蛾与正常雌蛾的交配率与对照组无显著性差异，说明辐照并未对其交配能力产生影响。辐照昆虫与正常雌蛾的交配能力在一定程度上会对 SIT 技术的应用产生重要影响。与我们的研究结果不同的是，Genchev（2002）未分析辐照是否对交配率产生影响。

本研究还发现，与对照组相比，辐照组雄虫寿命均明显缩短，这与 Genchev（2002）的研究结果吻合。在大豆食心虫 *Leguminivora glycinivorella* 上也发现了类似但不完全一致的现象：超过 120 Gy 剂量的 ^{60}Co-γ 射线辐照老熟蛹，羽化蛾的寿命明显缩短，而在 80-120 Gy 范围内辐照处理并未显著影响其羽化蛾的寿命（杜俊岭和赵晓丽，1994）。刘琼茹等（1992）研究表明，90 Gy 的辐照剂量对柑桔大实蝇的羽化率、寿命和交尾时间均无影响。上述研究结果表明，辐照对昆虫寿命的影响因种而异，且与辐照剂量的高低有关。因此，在 SIT 技术的实践应用中应摸索出合适的辐照剂量。

综上所述，本研究表明低剂量的 ^{60}Co-γ 射线降低了梨小食心虫繁殖相关参数，这一研究结果为进一步优化辐照条件和利用 ^{60}Co-γ 射线防治梨小食心虫提供理论指导。然而，本研究暂未明确梨小食心虫雄虫绝育剂量。且辐照不育雄蛾释放至果园后，其环境适应性以及与野生雄蛾竞争与雌蛾交配能力如何尚未进行评估。因此，下一阶段应将辐照后的雄蛾释放于田间，进一步评估 ^{60}Co-γ 射线辐照不育技术对梨小食心虫的田间防治效果。

参考文献 (References)

Anisimov AI, Lazurkina NV, Shvedov AN, 1989. Influence of radiation-Induced genetic damage on the suppressive effect of inherited sterility in the codling moth (Lepidoptera: Tortricidae). *Annals of the Entomological Society of America*, 82(6): 769–777.

Chen J, Yang WH, Ma TW, Yang XH, Zhang JP, 2009. Preliminary study on the damage and occurrence dynamic of *Grapholita molesta* in flat peach garden. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 37(30): 14745, 14751. [陈静, 杨祎红, 马天文, 杨晓红, 张建萍, 2009. 梨小食心虫在蟠桃园的危害和发生动态初探. 安徽农业科学, 37(30): 14745, 14751.]

Chen MX, Luo YQ, Zhao CJ, Tao WQ, Ma WE, Wang H, 2009. Research advance on *Grapholita molesta* Busck. *Northern Horticulture*, 33(8): 144–147. [陈梅香, 骆有庆, 赵春江, 陶万强, 马万娥, 王合, 2009. 梨小食心虫研究进展. 北方园艺, 33(8): 144–147.]

Chi QY, Hu ZR, Han ZQ, He S, Duan YL, 2014. Effect of different bio-control measures against *Grapholita molesta* (Busck). *Forest Pest and Disease*, 33(6): 38–40. [迟全元, 胡尊瑞, 韩振芹, 何笙, 段彦丽, 2014.不同生物措施防治梨小食心虫效果. 中国森林病虫, 33(6): 38–40.]

Du JL, Zhao XL, 1994. Irradiation treatment of sterility of *Leguminivora glycinivorella*. *Journal of Nuclear Agriculture Sciences*, 8(4): 201–208. [杜俊岭, 赵晓丽, 1994. 辐照处理大豆食心虫不育的研究. 核农学报, 8(4): 201–208.]

Dyck VA, Hendrichs J, Robinson AS, 2005. Sterile insect technique: Principles and practice in area-wide integrated pest management. The Netherlands: Springer. 787.

Fan RJ, Li J, Ma CS, 2010. Research and demonstration on innovative technologies to monitor prevent and control of fruit borers in northern China. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 38(5): 32–35. [范仁俊, 李捷, 马春森, 2010. 北方果树食心虫监测和防控新技术研究与示范. 山西农业科学, 38(5): 32–35.]

Fan RJ, Liu ZF, Lu JJ, Feng YT, Yu Q, Gao Y, Zhang RX, 2013. Research progress on integrated control of *Grapholita molesta* in China. *Journal of Applied Entomology*, 50(6): 1509–1513. [范仁俊, 刘中芳, 陆俊姣, 封云涛, 庾琴, 高越, 张润祥, 2013. 我国梨小食心虫综合防治研究进展. 应用昆虫学报, 50(6): 1509–1513.]

Genchev N, 2002. Suppression of oriental fruit moth (*Grapholita molesta*, Lepidoptera: Tortricidae) populations using the sterile insect technique. No. IAEA–TECDOC–1283.

Gu WP, Yang RX, Xia DR, Zhang YJ, 2000. Study on radiation sterility of *Helicoverpa armigera*. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 14(1): 40–43. [顾伟平, 杨荣新, 夏大荣, 张严峻, 2000. 棉铃虫辐射不育效应研究. 核农学报, 14(1): 40–43.]

Hallman GJ, 2004. Ionizing irradiation quarantine treatment against oriental fruit moth (Lepidoptera: Tortricidae) in ambient and hypoxic atmospheres. *Journal of Economic Entomology*, 97 (3): 824–827.

Ji QE, Hou WR, Chen JH, 2007. Sterile insect technique of oriental fruitfly, *Bactrocera dorsalis*-Optimal pupal age and dose of irradiation treatment for male pupae. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 21(5): 523–526. [季清娥, 侯伟荣, 陈家骅, 2007. 橘小实蝇雄性不育技术-雄蛹辐照最佳时期和剂量. 核农学报, 21 (5): 523–526.]

Jiao XD, Guo YL, He C, Lai XF, Wang LD, 2017. Study on the occurrence regularity and control technology of *Grapholita molesta* in different orchards in Wuwei, Gansu. *China Fruits*, 2017(3): 67–70. [焦旭东, 郭艳兰, 何彩, 来锡福, 王林德, 2017. 甘肃武威不同果园梨小食心虫发生规律及防治技术研究. 中国果树, 2017(3): 67–70.]

Li N, Zhao HY, Chen GM, Ju D, Wei ZH, Yang XQ, 2021. Effects of X-ray irradiation on the adult longevity and reproduction-related parameters of oriental fruit moth oriental fruit moth *Grapholita molesta*. *Journal of Plant Protection*, 48(3): 570–576. [李娜, 赵慧媛, 陈高满, 鞠迪, 魏子涵, 杨雪清, 2021. X 射线辐照对梨小食心虫成虫寿命和生殖相关参数的影响. 植物保护学报, 48(3): 570–576.]

Li YJ, 2006. Integration of sterile insect technology and egg parasitization (*Trichogramma chilonis*) for the eco-friendly management of *Heliothis assulta* (Lepidoptera: Noctuidae). Master dissertation. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences. [李咏军, 2006. 辐射不育结合赤眼蜂释放防治烟青虫的技术研究. 硕士学位论文. 北京: 中国农业科学院.]

Li YJ, Wei L, Wang ED, Liu XH, Lu DQ, 2008. Effect of irradiation on the mating ability of male bollworm of *Helicoverpa armigera*. *Journal of Nuclear Agriculture*, 22(4): 539–543. [李咏军, 魏蕾, 王恩东, 刘晓辉, 路大光, 2008. 辐照对棉铃虫雄虫交配能力的影响. 核农学报, 22(4): 539–543.]

Liu QR, Zhao CD, Li HX, Hu ZH, Chu JM, Xia DR, Yang RX, 1992. Study on the radiation effect of *Bactrocera minax*. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 6(1): 45–50. [刘琼茹, 赵才道, 黎怀燮, 胡朝晖, 储吉明, 夏大荣, 杨荣新, 1992. 柑桔大实蝇 *Dacus citri*(Chen)辐射效应的研究. 核农学报, 6(1):45–50.]

Liu W, Xu J, Zhang RZ, 2012. Advance in the sterile insect technique for controlling codling moth. *Chinese Journal of*

Applied Entomology, 49(1): 268–274. [刘伟, 徐婧, 张润志, 2012. 苹果蠹蛾不育昆虫释放技术研究进展. 应用昆虫学报, 49(1): 268–274.]

Liu YS, 2010. The occurrence of pest and its control measures in Hengshui area. *Agricultural Science and Technology Bulletin*, 2010(5): 238–239. [刘英胜, 2010. 梨小食心虫在衡水地区的发生危害与防治措施. 农业科技通讯, 2010(5): 238–239.]

Luo LY, Zhang XF, Wei XQ, Zhang K, Weng QF, 2018. The effect of ^{60}Co-γ rays on the genetic sterility of *Plutella xylostella*. *Journal of Northwest A & F University* (*Natural Science Edition*), 46(5): 149–154. [罗玲艳, 张晓锋, 魏香琴, 张珂, 翁群芳, 2018. ^{60}Co-γ 射线对小菜蛾遗传不育的影响. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 46(5): 149–154.]

Ma PP, 2008. Studies on the sterile technique of *Monochamus alternatus* and *Hyphantria cunea*. Master dissertation. Urumqi: Xinjiang Agricultural University. [马沛沛, 2008. 松褐天牛及美国白蛾不育技术的研究. 硕士学位论文. 乌鲁木齐: 新疆农业大学.]

Mu JJ, Zhang YG, Li ML, Jiang P, Wang YZ, 2005. Study on the sterility of *Monochamus alternatus*. *Forestry Science*, 41(5): 207–210. [牟建军, 张永安, 李孟楼, 蒋平, 王玉珠, 2005. 松墨天牛辐射不育的研究. 林业科学, 41(5): 207–210.]

Nikolouli K, Colinet H, Renault D, Enriquez T, Mouton L, Gibert P, Sassu F, Cáceres C, Staufer C, Pereira R, Bourtzis K, 2018. Sterile insect technique and *Wolbachia* symbiosis as potential tools for the control of the invasive species *Drosophila suzukii*. *Journal of Pest Science*, 91(2): 489–503.

Orozco-Dávila D, Quintero L, Hernández E, Solís E, Artiaga T, Hernandez R, Ortega C, Hernández R, Montoya P, 2017. Mass rearing and sterile insect releases for the control of *Anastrepha* spp. pests in Mexico- a review. *Entomologia Experimentaliset Applicata*, 164(3): 176–187.

Parker A, Mehta K, 2007. Sterile insect technique: A model for dose optimization for improved sterile insect quality. *Florida Entomologist*, 90(1): 88–95.

Ran HF, Lu ZY, Liu WX, Ma AH, Liu XX, Sun HP, Li JC, Zhang QW, 2016. Advances in research on the biological control of the oriental fruit moth. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 53(5): 931–941. [冉红凡, 路子云, 刘文旭, 马爱红, 刘小侠, 孙海鹏, 李建成, 张青文, 2016. 梨小食心虫生物防治研究进展. 应用昆虫学报, 53(5): 931–941.]

Silva WD, Arthur V, Mastrangelo T, 2010. Response of oriental fruit moth, *Grapholita molesta* (Busck) (Lepidoptera: Tortricidae), eggs to gamma radiation. *Radiation Physics and Chemistry*, 79(10): 1063–1066.

Su YD, 2011. Study on male sterility of *Monochamus alternatus* and *Apriona germari* by irradiation of different doses of ^{60}Co. Master dissertation. Hefei: Anhui Agricultural University. [苏远达, 2011. ^{60}Co 不同剂量辐照松墨天牛及桑天牛雄性不育研究. 硕士学位论文. 合肥: 安徽农业大学.]

Wang HS, 1998. Advances in the control of radiation sterility pests. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 12(2): 58–65. [王华嵩, 1998. 辐射不育防治害虫的进展. 核农学报, 12(2): 121–128.]

Wang HS, Hu JG, Lu DG, Kang W, Zhang HQ, 1995. Demonstration experiment of using radiation-sterility technology to control *Bactrocera minax*. *Chinese Journal of Biological Control*, 11(4): 156–159. [王华嵩, 胡建国, 路大光, 康文, 张和琴, 1995. 利用辐射不育技术防治柑桔大实蝇的示范试验. 中国生物防治, 11(4): 156–159.]

Wang JB, 2010. Application of radiation sterility technology in pest control. *Journal of Southwest Forestry University*, 30(S1): 33–35. [王建斌, 2010. 辐射不育技术在害虫防治中的应用. 西南林学院学报, 30(S1): 33–35.]

Wang SL, 2020. Occurrence and green prevention and control of *Grapholita molesta* in Weiyuan county. *Modern Agricultural Technology*, 2020(2): 94, 99. [王苏林, 2020. 渭源县梨小食心虫的发生及绿色防控. 现代农业科技, 2020(2): 94, 99.]

Xu Y, Wu GL, Wu XM, Qin YC, 2009. Advances in research and application of sex pheromone of *Grapholita molesta*. *Modern Pesticide*, 8(3): 40–44, 54. [徐妍, 吴国林, 吴学民, 秦玉川, 2009. 梨小食心虫性信息素研究及应用进展.现代农药, 8(3): 40–44, 54.]

Zhan GP, Gao MS, 2013. Current status and progress for the application of irradiation as a phytosanitary treatment measure. *Plant Quarantine*, 27(6): 1–12. [詹国平, 高美须, 2013. 辐照技术在检疫处理中的应用与发展. 植物检疫, 27(6): 1–12.]

Zhang HQ, 1982. Several problems in the research of insect radiation sterility. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 1982(2): 1–5. [张和琴, 1982. 昆虫辐射不育研究中的若干问题. 核农学报, 1982(2): 1–5.]

Zhang HQ, Zhao CD, Wang HS, Huang XZ, Wang S, 1985. Experimental effect of using radiation sub-sterility technology to control *Pyrausta nubilalis* on Mopanshan Island. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 1985(2): 5–9, 43. [张和琴, 赵才道, 王华嵩, 黄新治, 王树, 1985. 在磨盘山岛利用辐射亚不育技术防治玉米螟试验效果. 核农学报, 1985(2): 5–9, 43.]

Zhang LJ, Zhao ZG, LI YY, Wang Y, Ma RY, 2013. Research on the oriental fruit moth in cultivated pear orchards. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 50(6): 1532–1537. [张利军, 赵志国, 李丫丫, 王怡, 马瑞燕, 2013. 不同栽培管理梨园梨小食心虫发生程度研究. 应用昆虫学报, 50(6): 1532–1537.]

Zhang XH, 1995. Mechanism biological effect of ionizing radiation and its application in agriculture. *Anhui Agricultural Science*, 23(2): 187–188. [张秀华, 1995. 电离辐射生物学效应及其在农业上的应用. 安徽农业科学, 23(2): 187–188.]

Zhong GH, Chen Y, Yang HX, Hu MY, 2012. Advances in research and application of sterile insect irradiation techniques. *Plant Protection*, 38(2): 12–17. [钟国华, 陈永, 杨红霞, 胡美英, 2012. 昆虫辐照不育技术研究与应用进展. 植物保护, 38(2): 12–17.]