

doi: 10.3969/j.issn.1674-0858.2016.03.10

# 昆虫谐波雷达在柑橘大实蝇行为学上的应用研究

罗杰<sup>1</sup>, 桂连友<sup>1\*</sup>, Gilles BOITEAU<sup>2</sup>, 华登科<sup>1</sup>

(1. 长江大学农学院, 湖北荆州 434025;

2. Agriculture and Agri-Food Canada, Potato Research Centre, Fredericton, NB, E3B 4Z7, New Brunswick, Canada)

**摘要:** 本试验分别在橘园中的单株橘树和在整个橘园及它附近森林中, 对昆虫谐波雷达的检测率和发现率进行研究, 评估昆虫谐波雷达在橘园和森林中对初羽化柑橘大实蝇成虫的扩散行为能否进行有效的跟踪。结果表明, 在2013年和2014年, 在柑橘园单株橘树试验中, 在5 m和3 m条件下, 昆虫谐波雷达对带标签的初羽化的柑橘大实蝇成虫的总平均检测率分别为99.1%和100%。按降落位置和释放位置计算, 带标签的柑橘大实蝇的总平均发现率分别为87.9%和71.6%。在2014年, 在橘园和森林试验中, 昆虫谐波雷达对带标签的初羽化的柑橘大实蝇成虫总平均检测率和总平均发现率分别为91.4%和77.8%。结果表明, 昆虫谐波雷达对在橘园和森林中初羽化的柑橘大实蝇扩散行为能够进行有效跟踪。

**关键词:** 柑橘大实蝇; 检测率; 有效性; 昆虫谐波雷达; 发现率

中图分类号: Q968.1; S436.66

文献标志码: A

文章编号: 1674-0858 (2016) 03-0514-08

## Study on the application of insect harmonic radar in the behavior of Chinese citrus fly

LUO Jie<sup>1</sup>, GUI Lian-You<sup>1\*</sup>, Gilles BOITEAU<sup>2</sup>, HUA Deng-Ke<sup>1</sup> (1. College of Agriculture, Yangtze University, Jingzhou 434025, Hubei Province, China; 2. Agriculture and Agri-Food Canada, Potato Research Centre, Fredericton, NB, E3B 4Z7, New Brunswick, Canada)

**Abstract:** This study investigated the suitability of portable harmonic radar at providing real-time detection and recovery of marked individuals on orange trees and in neighbouring shrubs and trees. In 2013 and 2014, tagged Chinese citrus flies were separately released in the citrus orchard and the efficacy of the portable harmonic radar assessed. At 5 m and 3 m, the two years average detection rate of tagged adult Chinese citrus fly were 99.1% and 100% respectively. The total two years average recovery rate of tagged adult Chinese citrus fly was at 71.6% for flies that remained at the release point and at 87.9% for flies that moved away from the release point to another location during the radar search. In 2014, tagged Chinese citrus flies were separately released in the citrus orchard and its surrounding vegetation, the average detection rate of and the average recovery rate of tagged adult Chinese citrus fly using the portable harmonic radar were 91.4% and 77.8% respectively. Results showed that the efficacy of this technology was sufficient to quantitatively document the dispersal phenology of the Chinese fruit fly population through orchards and surrounding vegetation.

**Key words:** Chinese citrus fly; detection rate; efficacy; harmonic radar; recovery rate

项目基金: 国家自然科学基金面上项目 (31370413)

作者简介: 罗杰, 男, 1990年生, 湖北仙桃人, 硕士研究生, 主要从事农业害虫综合治理研究, E-mail: 459257621@qq.com

\* 通讯作者 Author for correspondence, E-mail: guilianyou@126.com

收稿日期 Received: 2015-12-28; 接受日期 Accepted: 2016-03-25

目前, 柑橘大实蝇 *Bactrocera* (*Tetradacus*) *minax* Enderlein 是主要分布于我国的柑橘类重要害虫, 也是国家公布对外检疫对象之一 (黄秀琴等, 2012)。柑橘大实蝇成虫产卵于柑橘幼果中, 幼虫孵化后在果实内部取食瓢瓣, 常使果实未熟先黄, 使被害果提前脱落 (van Schoubroeck, 1999)。近几年来, 柑橘大实蝇对我国的柑橘产业造成巨大威胁 (Zhang and Zhang, 2005; Gui *et al.*, 2011b)。

扩散生态学和无脊椎动物的行为学在很大程度上依然依靠取样和有效的跟踪方法。由于昆虫个体小, 而且多数隐藏在茂密的植物中 (Price, 1997), 因此很难用肉眼发现它们 (Ruxton *et al.*, 2004; Boiteau *et al.*, 2011b)。

目前, 对柑橘大实蝇行为学和扩散生态学的研究主要依赖于取样、引诱剂和荧光素标记-释放-引诱剂回收等方法。王华嵩等 (1990) 采用荧光素标记-释放-引诱剂回收方法对柑橘大实蝇的扩散生态学进行研究。结果表明, 柑橘大实蝇成虫飞行多数在 50–100 m, 最远者达 1500 m。孙振洋等 (1958) 采用引诱剂方法研究柑橘大实蝇成虫扩散范围, 结果表明柑橘大实蝇释放 5 d 后飞行最远距离为 441.5 m。也有学者认为 (来源自经验数据), 只要不是橘树连橘树, 橘园连橘园或者橘园之间相隔一定的距离 (50 m), 其成虫就不会飞越山冈或者平原 (盆地) (王小蕾和张润杰, 2009)。但是以上研究在时间上不是实时的, 而且是最终的距离, 没有扩散运动过程的轨迹图分析和运动特征 (如停止、徘徊、随机、定向) 以及实时移动方向、速度和距离等参数。假如要测定其扩散行为, 则需要一种更有效的跟踪技术。

昆虫谐波雷达是一种良好的跟踪昆虫运动的技术, 具有“可在自然条件下进行”、“可以量化分析”、“可跟踪运动距离相对较远的单个昆虫”和“可实时跟踪”等优点。电子标签重量一般不超过昆虫体重 10% (桂连友等, 2011a)。

利用昆虫谐波雷达技术跟踪昆虫的运动已经成为一个研究热点, 被称为雷达昆虫学 (Drake and Reynolds, 2012)。2010 年, Boiteau 等 (2011b) 利用便携式谐波雷达 (HR2, HR3, Bruce) 在野外跟踪马铃薯甲虫、玉米螟、和象鼻虫, 结果表明: 在低矮成排的植物 (如马铃薯)、较高成排的植物 (如玉米) 或者间隔很远且高大的园林植物

(如苹果树) 中, 依据不同的植物结构调整扫描角度, 谐波雷达系统对带标签昆虫有足够高的检出率。其中在距离苹果树 5 m 时, 昆虫谐波雷达的检测率为 42.9%–76.2%, 在距离苹果树 3 m 时, 检测率为 61.9%–85.7%, 在苹果树上对象鼻虫的发现率为 28.6%–66.7%。到目前为止, 使用谐波雷达跟踪的昆虫种类涉及到鞘翅目、鳞翅目、双翅目 (基站式雷达)、膜翅目和直翅目 5 目 27 种 (Klempel, 1977; Mascanzoni and Wallin, 1986; Riley *et al.*, 1996; Roland *et al.*, 1996; Riley and Smith, 2002; Colpitts and Boiteau, 2004; O'Neal *et al.*, 2004; Boiteau *et al.*, 2010, 2011a, 2011b; 桂连友, 2011a; Gui *et al.*, 2011b, 2012; Machial *et al.*, 2012; Lee *et al.*, 2013; Lee *et al.*, 2014), 但是, 目前还未见使用便携式谐波雷达跟踪双翅目昆虫运动行为的研究报道。

柑橘大实蝇在湖北省一般一年发生 1 代。柑橘大实蝇成虫和幼虫的习性、食物来源和食物地点不同, 成虫必须经过补充营养, 生殖腺才能逐渐发育成熟, 幼虫取食柑橘类幼果能够满足营养生长需要 (汪兴鉴和罗禄怡, 1995)。在 5 月中旬, 柑橘大实蝇在橘园出土羽化后, 成虫并没有在橘园取食, 成虫羽化后 2–3 d 开始飞行离开羽化地点, 先羽化先离开, 间隔一段时间后, 再次回到橘园, 在幼果上产卵。在其成虫羽化高峰到橘园再次出现成虫在幼果上产卵高峰期, 相隔 30 d 左右 (汪兴鉴和罗禄怡, 1995)。由于缺乏有效研究手段如昆虫谐波雷达技术, 对其成虫在产卵前期阶段的生境和食物问题仅有零星且模糊的认识, 严重影响该害虫的预测预报和综合治理技术的开发和应用。

有学者认为, 柑橘大实蝇成虫在橘园羽化后可能飞到果园附近的低矮灌木或树木, 取食蚜虫的蜜汁或植物的花蜜和花粉 (汪兴鉴和罗禄怡, 1995)。为了验证和用数据证明这种观点, 本试验是分别在橘园中的单株橘树和在整个橘园及它附近森林中进行, 通过对昆虫谐波雷达的检测率和发现率研究, 评估昆虫谐波雷达技术在柑橘园和森林中追踪初羽化的柑橘大实蝇成虫的有效性。最终掌握柑橘大实蝇成虫在橘园内和在橘园与附近生境之间的迁移规律以及寻找该成虫的天然食物源的种类、性质和地点。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试昆虫

试验所用昆虫是野外采集室内饲养的初羽化的柑橘大实蝇成虫。于试验的前一年 10 月从湖北松滋市 (30°18'N, 111°77'E) 田间采回柑橘落果, 埋在厚度为 5–7 cm 沙层中, 11 月幼虫化蛹, 翌年取 4 级蛹连沙一起放在培养皿中 (蛹要埋于沙中), 每天喷清水 3–4 次进行培养。羽化后第 2 天, 不喂食, 确定性别后, 作为供试虫源 (陈世骧和谢蕴贞, 1955; 罗杰等, 2015)。

### 1.2 谐波雷达和电子标签

实验所用的昆虫谐波雷达是加拿大 Colpitts 研究小组开发的第 4 代谐波雷达 (HR4 型) (Lee *et al.*, 2014)。参照 Boiteau 等 (2011b) 的方法, 在实验室进行电子标签的制作, 电子标签长度 21 mm、重量 3.8 mg (Gui *et al.*, 2011b; Boiteau *et al.*, 2010)。在试验前, 用胶水将电子标签粘到成虫中胸板上。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 单株橘树试验

研究在 2013 年 5 月和 2014 年 4–5 月进行, 试验地点是湖北省长江大学西校区内的柑橘园 (约 1 ha) (30°21'N, 112°8'E)。柑橘园内的柑橘采用常规栽培方法, 且喷施农药很少。在靠近柑橘园的中心选一株柑橘树 (树高约 2.08 m, 树冠高约 1.71 m, 宽约 2.66 m, 树下无杂草但有枯死的落叶), 并以这株柑橘树为中心, 搭建一个塑料网室 (长×宽×高, 4 m×4 m×4 m, 网孔直径 2 mm)。2013 年和 2014 年所试验橘树为同一株, 修剪后, 树冠相似。参照 Boiteau 等 (2011b) 的实验方法, 并作修改。在柑橘树的上、中、下部 (叶片正面、背面、枝干) 9 个位置随机释放柑橘大实蝇成虫, 每个位置雌雄成虫各释放 10 头。然后再以柑橘树为中心, 在其正北、东北、正东、东南、正南、西南、正西、西北, 八个方位的 3 m 和 5 m 处做上标记。检测时按照这个方位顺序在 5 m 和 3 m 处依次检测。由 1 位释放者在网室的柑橘树上的 9 个位置随机释放已安装天线的柑橘大实蝇, 另 1 位检测者在释放者释放成虫时背对释放者, 避免直接看到被释放的成虫位置 (Boiteau

*et al.*, 2011b), 成虫释放后, 再由检测者使用昆虫谐波雷达在 5 m 正北处开始检测信号确定方向, 若无信号再顺时针移动至东北方向检测, 直到找到信号。在 5 m 处检测完后再在 3 m 处进行相同的检测步骤。如果八个方位都检测不到信号, 记为检测失败。若测到信号, 再由检测者和另一名寻找者共同寻找带标签的柑桔大实蝇成虫, 3 min 内找到成虫, 即搜索成功, 记为发现; 检测到信号但在 3 min 内未找到带天线的柑桔大实蝇, 则表示搜索失败, 记为未发现。在下一组试验开始前, 由更多的寻找者参与, 必须寻找到电子标签 (标签脱落时) 或带标签的柑橘大实蝇成虫, 避免干扰下一组试验。

每组试验记录昆虫性别、释放位置、开始检测的时间、检测到的时间、检测到时检测者所在位置、天线是否和地面垂直、天线好坏、开始寻找的时间、肉眼发现时的时间、是否成功搜索到和肉眼发现时柑橘大实蝇所在位置 (如果释放点和发现点不是同一个位置, 记为移动; 在同一位置的记为未移动, 包括停留或移动距离不超过体长的徘徊) 及温度、湿度和风速等气候情况 (Kestrel 4500 Pocket Weather Tracker), 光照强度由湖北省荆州市荆州区气象局提供 (距试验地点 0.5 km)。气候情况每 0.5 h 记录一次。每头成虫只参加 1 次试验。为了避免搜索失败后不能回收的电子标签对下一组产生影响, 在开始下一组实验前, 要先用昆虫谐波雷达进行全方位的扫描。每天试验时间是从当天上午植物上无露水时开始。

试验所有的数据采用 SAS 数据处理系统进行分析 (SAS, 2001)。检测率 = 被检测到的昆虫数量/释放的昆虫数量; 发现率 a = 被发现的昆虫数量/降落的昆虫数量; 总发现率 a = 被发现的昆虫总数/所有降落位置的昆虫总数, 降落位置不包括地面和纱网上; 发现率 b = 被发现的昆虫数量/释放的昆虫数量; 总发现率 b = 被发现的昆虫总数/所有释放位置的昆虫总数, 在本次试验中飞到网室上的柑橘大实蝇成虫被认为是未发现的昆虫。

在柑橘大实蝇成虫降落在橘树的叶正面、叶背面和枝干的成虫数量之间差异显著性比较和在橘树的上部、中部、下部、地面和网上的成虫数量之间差异显著性比较采用  $\chi^2$  (Pearson) 检验。

#### 1.3.2 橘园和附近森林试验

试验在 2014 年 5 月 16–20 日进行, 试验地点是宜都市姚家店镇张家冲村 (N 30° 21′ 30″, E111° 23′ 57″) 柑橘园附近的森林, 橘园中有少量蚕豆和杂草, 橘园的北面是一个池塘和一个水田, 橘园南面是一条东西走向的公路, 公路宽 3 m, 公路的另一边是一个山丘, 橘园西面是水田和油菜田, 东面是一条由小石子铺垫的小路, 小路宽 2.5 m, 小路的另一边是森林, 森林里主要包含栓皮栎、短柄枹栎、中国板栗等 12 种植物。在试验点东侧小路的两边的环境中分别固定一株植物 (森林, 黄荆条; 橘园, 橘树) 作为初羽化柑橘大实蝇成虫 (2–3 日龄) 的开始释放点, 电子标签垂直粘贴在成虫的中胸背板上。供试成虫总计 24 头 (♀ 9 头, ♂ 15 头), 在橘树上释放成虫总计 14 头 (♀ 5 头, ♂ 9 头), 在黄荆条上释放成虫总计 10 头 (♀ 4 头, ♂ 6 头)。试验在植物上没有露水的条件下进行, 由 1 位释放者将已绑定的电子标签的柑橘大实蝇成虫释放在对应释放点的植物叶片正面。该位释放者就近观察, 另外 1 位检测者在释放者释放成虫时必须背对释放者, 当释放成虫起飞后, 检测者开始用谐波雷达检测电子标签的信号, 若 3 min 内检测不到信号, 记为检测失败; 若信号被检测到, 多名观察者参加搜索该成虫, 直到找到该成虫为止。将上一次该成虫降落位置记为下次试验的释放位置, 由该位释放者继续就近观察, 重复上述的步骤, 如此循环, 进行下一次实验。若检测不到信号或检测到信号但找不到成虫, 选择另一株植物重复上述的步骤。在橘园中释放的成虫, 假如迁移到森林中后, 仍然在森林中继续迁移, 从迁移到森林开始记为在森林中的迁移次数。同样, 在森林中释放的成虫, 假如迁移到橘园中后, 仍然在橘园中继续迁移, 从迁移到橘园开始记为橘园中的迁移次数。总检测次数等于总迁移次数。

记录释放点和降落点植物种类, 并用小型气象站 (Kestrel 4500 Pocket Weather Tracker) 记录温度、湿度、风速, 用光照计 (ZDS-10, 中国上海市嘉定学联仪表厂) 记录光照强度, 气象数据每半小时记录一次。检测率 = 成功被检测到的昆虫次数 / 总检测次数。

柑橘大实蝇成虫雌雄的平均检测率、在橘园

和森林中的平均检测率之间差异显著性比较和柑橘大实蝇成虫雌雄的平均发现率、在橘园和森林中的平均发现率之间差异显著性比较采用  $\chi^2$  (Pearson) 检验。

## 2 结果与分析

### 2.1 单株橘树试验结果

#### 2.1.1 试验气候条件

2013 年和 2014 年试验期间, 平均温度为  $25.77^{\circ}\text{C} \pm 0.54^{\circ}\text{C}$ , 平均湿度为  $52.40\% \pm 2.40\%$ , 平均风速为  $0.04 \pm 0.02 \text{ m/s}$ , 平均光照强度为  $3.97 \times 10^4 \pm 0.27 \times 10^4 \text{ lux}$ 。

#### 2.1.2 柑橘大实蝇检测率

在 2013 年和 2014 年单株橘树试验中, 除了 2013 年试验中, 在距离橘树 5 m 检测条件下, 橘树的上部的叶片正面的初羽化的柑橘大实蝇成虫检测率为 83.3% 以外, 在距离橘树 3 m 或 5 m 检测条件下, 橘树上、中、下部的叶片正面、叶片背面、枝干的初羽化柑橘大实蝇成虫检测率均为 100%。结果表明, 在 2013 年和 2014 年, 距离橘树 3 m 或 5 m 检测条件下, 初羽化柑橘大实蝇成虫的总平均检测率分别为 100% 和 99.1%。

#### 2.1.3 柑橘大实蝇的发现率

利用昆虫谐波雷达, 依据降落位置统计发现率 a, 2013 年和 2014 年带标签的初羽化柑橘大实蝇成虫的平均发现率 a 由高到低的顺序为: 上部 (96.4%) > 中部 (81.5%) > 下部 (74.7%); 依据橘树树冠不同结构, 带标签的初羽化的柑橘大实蝇成虫的平均发现率 a 由高到低的顺序为: 枝干 (95.6%) > 叶背面 (86.9%) > 叶正面 (81.2%)。总平均发现率 a 为 87.9% (表 1)。

依据释放位置统计发现率 b, 2013 年和 2014 年带标签的初羽化的柑橘大实蝇成虫的平均发现率 b 由高到低的顺序为: 中部 (89.2%) > 下部 (67.2%) > 上部 (61.4%); 依据橘树树冠不同结构, 带标签的初羽化柑橘大实蝇成虫的发现率 b 由高到低的顺序为: 枝干 (81.3%) > 叶背面 (71.9%) > 叶正面 (68.8%)。总平均发现率 b 为 71.6% (表 2)。

表 1 昆虫谐波雷达对不同降落位置上的带标签的柑橘大实蝇成虫的平均发现率 (%)

Table 1 The average recovery rate of tagged adult Chinese citrus fly landing on different position by using harmonic radar (%)

位置 Position	年份 Years	树结构 Tree section	上部 Upper	中部 Middle	下部 Lower	总计 Total
叶片正面 Upperside of leaf	2013	降落数量 Landing quantity	2	3	2	7
		发现率 ( %) Recovery rate	100	66.7	50	71.4
	2014	降落数量 Landing quantity	5	10	7	22
		发现率 ( %) Recovery rate	100	80	100	90.9
	平均发现率 ( %) Average recovery rate		100	73.4	75	81.2
叶片背面 Underside of leaf	2013	降落数量 Landing quantity	11	8	11	30
		发现率 ( %) Recovery rate	100	87.5	72.7	86.7
	2014	降落数量 Landing quantity	20	36	29	85
		发现率 ( %) Recovery rate	95	91.7	75.9	87.1
	平均发现率 ( %) Average recovery rate		97.5	89.6	74.3	86.9
枝干 Twig	2013	降落数量 Landing quantity	1	0	0	1
		发现率 ( %) Recovery rate	100	—	—	100
	2014	降落数量 Landing quantity	6	16	12	34
		发现率 ( %) Recovery rate	83.3	93.8	91.7	91.2
	平均发现率 ( %) Average recovery rate		91.7	93.8	91.7	95.6
总平均发现率 ( %) The total average recovery rate			96.4	85.6	80.3	87.9

注: 发现率  $a = \text{被发现的昆虫数量} / \text{降落的昆虫数量}$ ; 总发现率  $a = \text{被发现的昆虫总数} / \text{所有降落位置的昆虫总数}$ , 降落位置不包括地面和纱网上。Note: Recovery rate (a) (%) = recovery insects quantity / landing insects quantity; The total average recovery rate (a) (%) = the total recovery insects quantity / the total landing insects quantity, the total recovery insects quantity not including the insects landing on the ground and the web.

表 2 昆虫谐波雷达对不同释放位置上的带标签的柑橘大实蝇成虫的平均发现率 (%)

Table 2 The average recovery rate of tagged adult Chinese citrus fly released on different position by using harmonic radar (%)

位置 Position	年份 Years	树结构 Tree section	上部 Upper	中部 Middle	下部 Lower	总计 Total
叶片正面 Upperside of leaf	2013	释放数量 Release quantity	6	4	6	16
		发现率 (%) Recovery rate	16.7	100	50	50
	2014	释放数量 Release quantity	20	20	20	60
		发现率 (%) Recovery rate	65	85	70	73.3
	平均发现率 (%) Average recovery rate		40.9	92.5	60	61.7
叶片背面 Underside of leaf	2013	释放数量 Release quantity	6	5	5	16
		发现率 (%) Recovery rate	66.7	80	60	68.8
	2014	释放数量 Release quantity	20	20	20	60
		发现率 (%) Recovery rate	60	100	65	75
	平均发现率 (%) Average recovery rate		63.4	90	62.5	71.9

续上表

位置 Position	年份 Years	树结构 Tree section	上部 Upper	中部 Middle	下部 Lower	总计 Total
枝干 Twig	2013	释放数量 Release quantity	5	5	6	16
		发现率 ( % ) Recovery rate	80	100	83.3	87.5
	2014	释放数量 Release quantity	20	20	20	60
		发现率 ( % ) Recovery rate	80	70	75	75
	平均发现率 ( % ) Average recovery rate		80	85	79.2	81.3
	总平均发现率 ( % ) The total average recovery rate ( % )		61.4	89.2	67.2	71.6

注: 发现率  $b = \frac{\text{被发现的昆虫数量}}{\text{释放的昆虫数量}}$ ; 总发现率  $b = \frac{\text{被发现的昆虫总数}}{\text{所有释放位置的昆虫总数}}$ , 在本次试验中飞到网室上的柑橘大实蝇成虫被认为是未发现的昆虫。Note: Recovery rate ( b ) ( % ) = recovery insects quantity/ release insects quantity; The total average recovery rate ( b ) ( % ) = the total recovery insects quantity/ the total release insects quantity, the insects landing on the web were regarded as no recovery.

2.1.4 柑橘大实蝇的降落位置分析

2013 年和 2014 年初羽化柑橘大实蝇成虫降落在橘树叶正面、叶背面和枝干的成虫数量之间存在极显著的差异 ( $\chi^2 = 77.2737, df = 2, P < 0.001$ )。其中叶背面 ( $n = 115$ ) > 枝干 ( $n = 35$ ) > 叶正面 ( $n = 29$ )。同样, 在橘树的上部、中部、下部、地面和网上的成虫数量之间也存在极显著的差异 ( $\chi^2 = 48.66.8, df = 4, P < 0.001$ )。其中中部 ( $n = 73$ ) > 下部 ( $n = 61$ ) > 上部 ( $n = 45$ ) > 网上 ( $n = 36$ ) > 地面 ( $n = 12$ )。

2.2 橘园和附近森林试验结果

2.2.1 试验气候条件

2014 年在橘园和森林试验期间, 平均温度为  $25.04^{\circ}\text{C} \pm 0.36^{\circ}\text{C}$ , 平均湿度为  $70.12\% \pm 1.33\%$ , 平均风速为  $0.05 \pm 0.02 \text{ m/s}$ , 平均光照强度为  $2.38 \times 10^4 \pm 0.29 \times 10^4 \text{ lux}$ 。

2.2.2 柑橘大实蝇检测率和发现率

结果表明, 利用昆虫谐波雷达, 对初羽化柑

橘大实蝇成虫总平均检测率为 91.4%。对初羽化柑橘大实蝇成虫 (雌性 91.4%, 雄性 91.3%) 之间的平均检测率没明显差异 ( $\chi^2 = 0.4989, df = 1, P = 0.480$ ), 对初羽化柑橘大实蝇成虫在橘园 (90.0%) 和在森林 (92.2%) 之间的平均检测率也没有明显差异 ( $\chi^2 = 0.4762, df = 1, P = 0.490$ ) (表 3)。

初羽化的柑橘大实蝇成虫总平均发现率为 77.8%。初羽化的柑橘大实蝇的雌成虫 (80.0%) 和雄成虫 (76.1%) 之间的平均发现率之间没明显差异 ( $\chi^2 = 0.4516, df = 1, P = 0.502$ ), 初羽化的柑橘大实蝇成虫在橘园 (83.3%) 和在森林 (74.5%) 之间的平均发现率也没有明显差异 ( $\chi^2 = 0.3959, df = 1, P = 0.529$ ) (表 3)。

平均释放高度为  $1.87 \pm 0.14 \text{ m}$ , 释放成虫共在 12 种植物上停留过, 即: 橘树、牵牛花、乌敛梅、艾草、栓皮栎、短柄枹栎、中国板栗、金银花、黄荆条、蔷薇、小飞蓬、茶。

表 3 2014 年昆虫谐波雷达对释放在不同环境中的带标签的柑橘大实蝇成虫的检测率和发现率 ( % )  
Table 3 The detection rate and recovery rate of tagged adult Chinese citrus fly released on different vegetation by using harmonic radar in 2014 ( % )

		释放点平均 高度 ( m ) The average height of release point	释放数量 Release quantity	总检测 ( 迁移 ) 次数 Total number of migration or detection	检测成功的 次数 The number of successful detection	检测率 ( % ) Detection rate	发现的次数 The number of recovery	发现率 ( % ) Recovery rate
附近森林	雄 Male	$1.80 \pm 0.26$	12	29	27	93.1	21	72.4
Surrounding	雌 Female	$2.45 \pm 0.33$	7	22	20	90.9	17	77.3
vegetation	总计 Total	$2.08 \pm 0.21$	19	51	47	92.2	38	74.5

续上表

		释放点平均 高度 ( m ) The average height of release point	释放数量 Release quantity	总检测 ( 迁移 ) 次数 Total number of migration or detection	检测成功的 次数 The number of successful detection	检测率 ( % ) Detection rate	发现的次数 The number of recovery	发现率 ( % ) Recovery rate
橘园 Citrus orchard	雄 Male	1. 51 ±0. 13	9	17	15	88. 2	14	82. 4
	雌 Female	1. 56 ±0. 12	5	13	12	92. 3	11	84. 6
	总计 Total	1. 53 ±0. 09	14	30	27	90. 0	25	83. 3
性别 Sex	雄 Male	1. 69 ±0. 17	15	46	42	91. 3	35	76. 1
	雌 Female	2. 12 ±0. 22	9	35	32	91. 4	28	80. 0
	总计 Total	1. 87 ±0. 14	24	81	74	91. 4	63	77. 8

### 3 结论与讨论

研究表明昆虫谐波雷达系统对带标签昆虫的检测率足够高, 能在橘园和森林中对携带电子标签的柑橘大实蝇成虫进行有效跟踪。

在 2013 年和 2014 年单株橘树试验中, 除了 2013 年试验中, 在距离橘树 5 m 检测条件下, 橘树上部的叶片正面的初羽化的柑橘大实蝇成虫检测率为 83.3% 以外, 在距离橘树 3 m 或 5 m 检测条件下, 橘树上、中、下部的叶片正面、叶片背面、枝干的初羽化柑橘大实蝇成虫检测率均为 100%, 这表明昆虫谐波雷达的检测率与释放位置无关。用雷达检测柑橘树时, 63% 以上能在初始位置检测到, 绕柑橘树半周就能检测到 91% 以上的带标签的昆虫的信号。

影响检测率的因素有多种, 如标签的信号和雷达的“视线”被植物遮挡; 定向垂直的标签; 植物叶片上的露水 (Boiteau *et al.*, 2011b) 等。该雷达传送和接收是垂直极化的微波信号, 为了获得最高灵敏度, 电子标签还应当定向垂直。电子标签轻微倾斜的对信号影响是不大, 但如果该电子标签旋转到水平位置时, 它就无法被雷达检测到。在试验过程中, 回收的电子标签中只有 16.1% 的电子标签是非垂直于地面的。

使得发现率低于检测率的因素有很多, 比如在雷达检测到信号开始到昆虫被肉眼发现期间, 成虫的位置也有可能发生变化; 植物遮挡; 类似昆虫 (如食蚜蝇) 混淆识别; 网室的纱网限制了柑橘大实蝇的活动范围, 可能对其运动存在一定的影响等。在本次试验中计算发现率  $b$  时, 飞到

网室上的柑橘大实蝇成虫被认为是未发现的昆虫。在野外, 飞到网上的这类昆虫被认为是离开被扫描的橘树。按降落点和释放点计算, 柑橘大实蝇的发现率分别是 87.9% 和 71.6%。

在试验中, 仅有 1 头成虫在释放后能检测到信号, 但发现标签脱落在地面上, 3 h 后在网上发现不带天线的昆虫。只有 2 个电子标签在回收的过程中被碰掉了二极管, 其余电子标签都正常。有 50.4% 成虫降落在叶片背面, 这可能是由于温度高, 光照强, 柑橘大实蝇的一种避光行为 (罗杰等, 2015)。

在整个橘园和森林试验中, 除了橘园试验中的影响检测率的因素外, 影响检测率的因素还有植物高度、森林密度、地形和岩石对信号的影响。昆虫停留在植物上的位置过高或者森林的密度过大, 给操作者检测信号和观察者搜索成虫带来困难; 地形和岩石对信号的干扰容易造成操作者对检测信号的误判。

操作员需要反复定位, 田间应用时需要更多的观察员从不同的角度肉眼观察定位点, 应选择橘树株行距较宽, 树结构开放, 树冠密度较低的橘园做试验点 (Boiteau *et al.*, 2011b)。在单株橘园试验中, 柑橘大实蝇偏好降落在橘树中、下部, 因此搜索者应该花更多的时间在中、下部寻找柑橘大实蝇。

### 参考文献 (References)

- Boiteau G, Vincent C, Meloche F, *et al.* Harmonic radar: Assessing the impact of tag weight on walking activity of Colorado potato beetle, plum curculio and corn rootworm [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2010, 103: 63–69.

- Boiteau G , Vincent C , Meloche F , *et al.* Evaluation of tag entanglement as a factor in harmonic radar studies of insect dispersal [J]. *Environmental Entomology* , 2011a , 40 ( 1 ) : 94 – 102.
- Boiteau G , Vincent C , Meloche F , *et al.* Harmonic radar: Efficacy at detecting and recovering insects on agricultural host plants [J]. *Pest Management Science* , 2011b , 67 ( 02 ) : 213 – 219.
- Colpitts BG , Boiteau G. Harmonic radar transceiver design: Miniature tags for insect tracking [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* , 2004 , 52: 2825 – 2832.
- Chen SX , Xie YZ. The formal and specific name of *Bactrocera* ( *Tetradacus* ) *minax* [J]. *Journal of Entomology* , 1955 , 1: 123 – 126. [陈世骧, 谢蕴贞. 关于桔大实蝇的学名及其种征 [J]. 昆虫学报, 1955 , 1: 123 – 126]
- Drake VA , Reynolds DR. Radar Entomology: Observing Insect Flight and Migration [M]. Wallingford: CABI , 2012 , 1 – 489.
- Gui LY , Boiteau G , Colpitts BG , *et al.* Random movement pattern of fed and unfed adult Colorado potato beetles in bare – ground habitat [J]. *Agricultural and Forest Entomology* , 2012 , 14 ( 1 ) : 59 – 68.
- Gui LY , Huang XQ , Li CR. The development and the use of insect harmonic radar [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology* , 2011a , 48 ( 3 ) : 732 – 738. [桂连友, 黄秀琴, 李传仁. 昆虫谐波雷达的发展和利用 [J]. 应用昆虫学报, 2011a , 48 ( 3 ) : 732 – 738]
- Gui LY , Huang XQ , Li CR , *et al.* Validation of harmonic radar tags to study movement of Chinese citrus fly [J]. *The Canadian Entomologist* , 2011b , 143 ( 4 ) : 415 – 422.
- Huang XQ , Li ZY , Li CR , *et al.* Effects of extra loading on flight performance of adult Chinese citrus fly [J]. *Acta Entomologica Sinica* , 2012 , 55 ( 5 ) : 606 – 611. [黄秀琴, 李正跃, 李传仁, 等. 柑橘大实蝇成虫的翅载和额外负载能力 [J]. 昆虫学报, 2012 , 55 ( 5 ) : 606 – 611]
- Klempel DD. A Harmonic Radar for Tracking Individual Insects [M]. Fargo: M. Sc. Thesis , State University of North Dakota , 1977.
- Luo J , Gui LY , Wang FL. Daily rhythm of flight takeoff by early emerged adult Chinese citrus fly and their landing locations [J]. *Journal of Environmental Entomology* , 2015 , 37 ( 1 ) : 36 – 43. [罗杰, 桂连友, 王福莲. 初羽化的柑橘大实蝇成虫起飞日节律和降落位置 [J]. 环境昆虫学报, 2015 , 37 ( 1 ) : 36 – 43]
- Lee DH , Park CG , Seo BY , *et al.* Detectability of *Halyomorpha halys* ( Hemiptera: Pentatomidae ) by portable harmonic radar in agricultural landscapes [J]. *The Florida Entomologist* , 2014 , 97 ( 3 ) : 1131 – 1138.
- Lee DH , Wright SE , Boiteau G , *et al.* Effectiveness of glues for harmonic radar tag attachment on *Halyomorpha halys* ( Hemiptera: Pentatomidae ) and their impact on adult survivorship and mobility [J]. *Environmental Entomology* , 2013 , 42: 515 – 523.
- Machial LA , Lindgren BS , Steenweg RW , *et al.* Dispersal of warren root collar weevils ( Coleoptera: Curculionidae ) in three types of habitat [J]. *Environmental Entomology* , 2012 , 41 ( 3 ) : 578 – 586.
- Mascanzoni D , Wallin H. The harmonic radar: A new method of tracing insects in the field [J]. *Ecological Entomology* , 1986 , 11: 387 – 390.
- O' Neal ME , Landis DA , Rothwell E , *et al.* Tracking insects with harmonic radar: A case study [J]. *American Entomologist* , 2004 , 50 ( 4 ) : 212 – 218.
- Price PW. Insect Ecology ( 3<sup>rd</sup> Edition ) [M]. New York: John Wiley & Sons , Inc. , 1997.
- Roland J , McKinnon G , Backhouse C , *et al.* Even smaller radar tags on insects [J]. *Nature* , 1996 , 381: 120.
- Riley JR , Smith AD. Design considerations for an harmonic radar to investigate the flight of insects at low altitude [J]. *Computers and Electronics in Agriculture* , 2002 , 35: 151 – 169.
- Riley JR , Smith AD , Reynolds DR , *et al.* Tracking bees with harmonic radar [J]. *Nature* , 1996 , 379: 29 – 30.
- Ruxton GD , Sherratt TN , Speed MP. Avoiding Attack: The Evolutionary Ecology of Crypsis , Warning Signals and Mimicry [M]. Oxford: Oxford University Press , 2004.
- SAS Institute Inc. SAS/STAT User's Guide ( version 8 ) [M]. Cary , North Carolina: SAS Institute , 2001.
- Sun ZY , Du YL and Liao YM. The Preliminary analysis report on Chinese citrus fly [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology* , 1958 , 1 ( 2 ) : 175 – 187. [孙振洋, 杜义隆, 廖与模. 柑橘大实蝇研究初报 [J]. 应用昆虫学报, 1958 , 1 ( 2 ) : 175 – 187]
- van Schoubroeck F. Learning to Fight a Fly: Developing citrus IPM in Bhutan [D]. PhD Thesis of Wageningen University and Research Centre , 1999 , 200.
- Wang XJ , Luo LY. Research progress in the Chinese citrus fruit fly [J]. *Entomological Knowledge* , 1995 , 32 ( 5 ) : 310 – 315. [汪兴鉴, 罗禄怡. 桔大实蝇的研究进展 [J]. 昆虫知识, 1995 , 32 ( 5 ) : 310 – 315]
- Wang XL , Zhang RJ. Review on biology , ecology and control of *Bactrocera* ( *Tetradacus* ) *minax* Enderlein [J]. *Journal of Environmental Entomology* , 2009 , 31 ( 1 ) : 73 – 79. [王小蕾, 张润杰. 桔大实蝇生物学、生态学及其防治研究概述 [J]. 环境昆虫学报, 2009 , 31 ( 1 ) : 73 – 79]
- Wang HS , Zhao CD , Li HX , *et al.* Control of Chinese citrus fly *Dacus citri* by male sterile technique [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences* , 1990 , 4 ( 3 ) : 135 – 138. [王华嵩, 赵才道, 等. 辐射不育技术防治柑橘大实蝇的效果 [J]. 核农学报, 1990 , 4 ( 3 ) : 135 – 138]
- Zhang Y , Zhang ZM. Occurrence and integrated control methods of Chinese citrus fly *Bactrocera minax* [J]. *Bulletin of Agricultural Science and Technology* , 2005 , 2: 22 – 23.