应用昆虫学报 *Chinese Journal of Applied Entomology* 2018, 55(2): 186–193. DOI: 10.7679/j.issn.2095–1353.2018.027

基于便携式谐波雷达技术跟踪昆虫运动行为的应用方法*

杜田华** 桂连友*** 黄秀琴 罗 杰 何章章 华登科 王福莲

（长江大学农学院昆虫研究所，荆州 434025）

摘 要 昆虫谐波雷达是一种良好的跟踪昆虫运动的技术。本文从成虫负载的电子标签确定、电子标签的制作、在环境中成虫的检测率和发现率测定、以及田间跟踪昆虫的运动轨迹的方法 4 个方面，介绍昆虫谐波雷达技术跟踪昆虫运动行为的应用方法。目的是希望我国更多学者参与昆虫谐波雷达应用，为农林业害虫综合治理研究服务。

关键词 谐波雷达，电子标签，昆虫跟踪，运动轨迹

Application of portable harmonic radar technology to tracking insect movements

DU Tain-Hua** GUI Lian-You*** HUANG Xiu-Qin LUO Jie
HE Zhang-Zhang HUA Deng-Ke WANG Fu-Lian

(Institute of Insect, College of Agriculture, Yangtze University, Jingzhou 434025, China)

Abstract Harmonic radar is becoming a useful technology for tracking the movements of insects. This paper introduces the application of harmonic radar technology, including assessing the feasibility of attaching electronic tags to insects, the fabrication of electronic tags, estimating rates of detecting and finding adult insects, and estimating the movement trajectory of adult insects in the field. The purpose of this paper is to encourage more entomologists to use this technology in integrated pest management research in agriculture and forestry in China.

Key words harmonic radar，electronic tag，insect tracking，movement trajectory

我们研究昆虫扩散行为时主要采用取样和跟踪方法。由于昆虫个体小，而且多数隐藏在茂密的植物中，因此我们很难用肉眼发现他们。

昆虫谐波雷达原理是在待检测目标上固定一只微小电子装置（Electronic tag 电子标签，又称转发器 Transponder），通过昆虫谐波雷达系统的发射天线发射高功率的脉冲电磁波，目标身上的电子标签吸收雷达波束中的能量并将输入信号调制为 2 倍于原始频率的谐波后再发射回去；昆虫谐波雷达系统的接收天线即可屏蔽地物回波而从其中将该反射回来的另一种脉冲电磁谐波检测出来（图 1，图 2）。便携式昆虫谐波雷达将脉冲电磁谐波转换为声音号，通过耳机听到的信号强弱来判断是否检测到粘有电子标签的昆虫位置（Colpitts and Boiteau，2004）。基站式昆虫谐波雷达以在荧光屏上显示粘有电子标签的昆虫位置（Riley *et al.*，1996）。电子标签不需要电池，可以做得很轻很小（翟保平，1999；桂连友等，2011）。

昆虫谐波雷达是一种良好的跟踪昆虫运动的工具，具有可在自然条件下进行、可以定量化分析、可跟踪运动距离相对较远的单个昆虫和可

*资助项目 Supported projects：国家自然科学基金面上项目（31370413；31772206）

**第一作者 First author，E-mail：1055272621@qq.com

***通讯作者 Corresponding author，E-mail：guilianyou@126.com

收稿日期 Received：2017-02-03，接受日期 Accepted：2017-06-15

实时跟踪等优点（黄秀琴等，2012a；罗杰等，2016）。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、膜翅目和直翅目 5 目 27 种（Klempel，1977；桂连友等，2011；Gui *et al.*，2011，2012；黄秀琴，2012a，2012b；Lee *et al.*，2013，2014；Jung *et al.*，2016；Kim *et al.*，2016；罗杰等，2016）。基站式雷达体积大，移动不方便，造价高，昆虫飞入树丛后无法跟踪，仅适用于草地等无遮挡环境。Riley 研究小组（英国）于 1996 年在《Nuture》发表论文，利用基站式谐波昆虫雷达跟踪了蜜蜂的飞行轨迹，发现蜜蜂确实能够迅速解读舞蹈提供的信息，然后快速飞抵所指示的地点，证实了奥地利生物学家弗里施等 1915 年提出的蜜蜂利用舞蹈传递蜜源信息的学说（Riley *et al.*，1996）。便携式谐波雷达重量轻，结果简单，便于携带，使用方便，造价较低，适用于茂密的环境跟踪昆虫。Boiteau 和 Colpitts（2001）研究小组（加拿大）于 1999 年研制出便携式昆虫谐波雷达，并成功跟踪马铃薯甲虫 *Leptinotarsa decemlineata* 从森林转移到马铃薯大田的运动过程，该设备现已发展到第 4 代，先后被中国、美国、巴西、韩国科学家引进，主要研究柑橘大实蝇和茶翅蝽 *Halyomorpha halys* 等昆虫的扩散行为。

长江大学桂连友研究小组于 2012 年 1 月从加拿大引进了中国的第 1 台昆虫谐波雷达（Gen Ⅳ），通过使用昆虫谐波雷达技术手段，采用电子标记-释放-跟踪方法，研究证实在柑橘园柑橘大实蝇成虫羽化后，离开柑橘园迁移到柑橘园的周边丛林的迁移规律、同时发现了其成虫取食的食物和地点。

在总结 5 年的应用昆虫谐波雷达技术跟踪柑橘大实蝇成虫试验研究的基础上，将昆虫谐波雷达跟踪昆虫运动行为的方法作如下介绍，目的是为了我国更多学者参与昆虫谐波雷达研制和应用，为农林业害虫综合治理研究服务。

1　电子标签确定

一只理想的昆虫电子标签应该满足如下的特性：便宜、粘胶无毒、足够时间不脱落、操作简单和不影响昆虫的正常行为（Hagler and Jackson，2001）。因此在选择合适的昆虫电子标签时，首先选择合适的粘胶，测试成虫的体重、翅载能力、额外负载能力、电子标签对成虫取食行为的影响、电子标签对成虫垂直方向和水平方向爬行以及向上飞行运动的影响等，最终确定可用的适合追踪成虫的电子标签（Gui *et al.*，2011；黄秀琴，2012a）。

1.1　粘胶选择

将一小团脱脂棉放入试管，然后滴入无水乙醚 1-2 滴将其成虫麻醉。然后将供试的不同种类的粘胶（如 502 胶）滴在铝箔上，用镊子夹住电子标签的一端，将垂直弯曲一端蘸上一点粘胶，

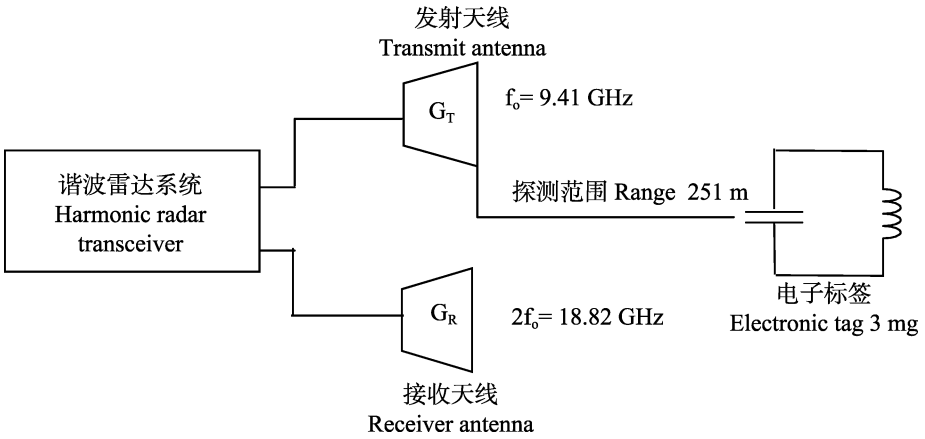

图 1　昆虫谐波雷达系统和电子标签

Fig. 1　Insect harmonic radar system and electronic tag

图来自 Colpitts 和 Boiteau（2004）。Figure is from Colpitts and Boiteau (2004).

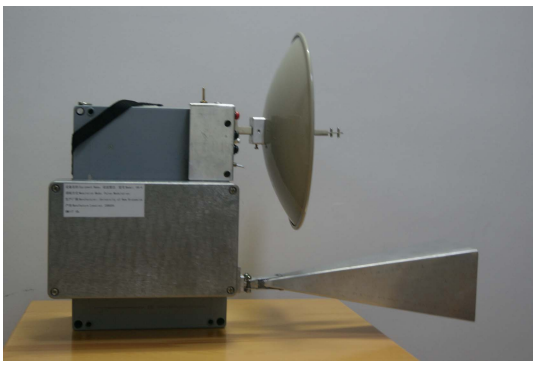

图 2 便携式昆虫谐波雷达（**Gen IV**）
Fig. 2 Potable insect harmonic radar

将电子标签粘在被麻醉的成虫前胸背板上。待胶水干后松开镊子，成虫苏醒后（能正常爬行或起飞）将其放入养虫笼中饲养。连续观察 5-7 d（Gui *et al.*，2011）。以未负载电子标签的成虫为对照，依据实验获得的成虫存活率、电子标签保持不脱落的时间及电子标签脱落率，选择最合适的粘胶。

体型较大的和上颚发达的昆虫如天牛，避免因其相互撕咬后造成电子标签脱落。可采用牙线（医用）将电子标签缠绕在其颈部（Williams *et al.*，2004）。

1.2 翅载能力的测定

成虫起飞测试。在室外网室进行，将单个粘有电子标签的或未负载电子标签的成虫置于离地面高 1 m、顶部面积 9 cm^2（3 cm×3 cm）木桩上释放，测试起飞时间为 1 min，成虫降落的落点离地面等于或高于 1 m 的位置，则被判定该成虫能够起飞。若成虫在 1 min 之内起飞，但落点离地面低于 1 m 的位置，则定为起飞未成功；若成虫在 1 min 之内不能起飞，在用毛笔尖挑拨刺激 1 min 之内仍不能起飞，则定其为不能起飞（黄秀琴等，2012a）。

成虫的翅载能力测定。翅载试验采用饥饿方法进行（Boiteau and Colpitts，2001）。测试时分别两次正常喂食和两次剥夺取食，测试总共 4 次，顺序是：将供试成虫饥饿 24 h 后第 1 次测试，取食 24 h 后第 2 次测试，又饥饿 24 h 第 3 次测试，再取食 24 h 后第 4 次测试，然后将一对前翅剪下，并编号装入小瓶中；成虫单个翅面积是采用坐标纸法测定并记录。每次测试后，不能起飞成虫被淘汰，能够起飞的成虫进行称重并记录，然后置于原来瓶中，接着继续饲养或者饥饿处理。雌雄成虫的最高和最低重量分别是该成虫 4 次称重中最高值和最低值。成虫翅载能力为重量最高值和最低值之差的平均值除以成虫翅的面积，成虫最大净载重量为其重量最高值和最低值之差中最大值。实验最后获得其成虫翅载能力和成虫最大净载重量（黄秀琴等，2012b）。

1.3 额外负载能力测定

使用不同长度或重量（可参考其成虫 10%体重进行测试）的回形针代替电子标签测定成虫额外负载能力。额外负载电子标签成虫（处理）与相对应未额外负载的成虫（对照）成对随机取出，同批次进行起飞测定试验（同 1.3 中的成虫起飞测试）。当额外负载电子标签成虫的正常起飞与未起飞成虫数之间无显著差异时，表明成虫能够负载这一重量的电子标签。当额外负载电子标签成虫的正常起飞与未起飞成虫数之间差异显著，这表明成虫不能够负载这一重量的电子标签。其中成虫最大负载重量为其最大额外负载能力（黄秀琴等，2012b）。

假如成虫不取食，不需要进行翅载能力的测定。额外负载能力测定参照重量可参考其成虫 10%体重进行测试。

1.4 电子标签对成虫取食行为的影响

假如成虫需要取食，需要进行电子标签对成虫取食行为的影响的测试。将背负标签的和未背负电子标签供试成虫饥饿 24 h，然后饲喂食物，观察 60 s 内每头成虫的取食时间，采用秒表计时。成虫的取食时间为从成虫口器接触食物开始取食到离开食物为止的累计值（Gui *et al.*，2011）。假如负载与未负载电子标签的成虫取食时间无显著差异，则表明电子标签对成虫取食行为不受影响。

1.5 电子标签对成虫垂直方向和水平方向爬行运动的影响

分负载与未负载电子标签、不同虫龄（2 个

级别)、和不同性别（雌雄）3 个因子（Gui *et al.*，2011）。

垂直方向爬行运动　将一只广口瓶垂直倒立在实验室桌子上，每次试验将供试成虫 1 头释放在广口瓶上中间壁上，从成虫开始爬行时，开始记录其爬行距离，观察时间为 5 min，每只广口瓶在试验后，用餐巾纸反复擦洗晾干后再使用，每只广口瓶使用不超过 3 次。避免成虫留下遗迹影响其他成虫试验。开始时偶有成虫不动，用毛笔刺激或用手敲击瓶壁，直至所有成虫都开始爬行（Gui *et al.*，2011）。测试不同大小的昆虫时应要把昆虫大小选用合适的广口瓶或透明的圆柱筒（Jung *et al.*，2016）。

水平方向爬行运动　除了将培养皿（底部放置一张坐标纸）替代广口瓶外，其他方法同垂直方向爬行运动。开始记录其爬行距离。测试不同大小的昆虫时应要把昆虫大小选用合适的培养皿、圆形平台（平台周围一定高度围栏）（Boiteau *et al.*，2010，马铃薯叶甲 *Leptinotarsa decemlineata*，西方玉米根虫 *Diabrotica virgifera virgifera*，李子象鼻虫 *Plum curculios* 或房间地板（Jung *et al.*，2016）。

假如负载与未负载电子标签的成虫爬行距离差异不明显，则表明电子标签对成虫爬行运动不受影响（Gui *et al.*，2011）。

1.6　电子标签对成虫向上飞行运动的影响

试验在室外的网室（下同）中进行。试验设计。分负载（2-3 种重量）与未负载电子标签、不同虫龄（2 个级别）和不同性别（雌雄）3 个因子（Gui *et al.*，2011）。

实验方法同成虫起飞测试方法。记录不同处理的成虫起飞频率，飞行持续时间和飞行高度（只记录＞1 m 的高度）。假如负载与未负载电子标签的起飞频率，飞行持续时间和飞行高度差异不明显，则表明电子标签对成虫向上运动不受影响（Gui *et al.*，2011）。

电子标签重量一般不超过昆虫体重 10%，但也有昆虫（如马铃薯叶甲）电子标签占昆虫体重的 14.7%（Boiteau *et al.*，2011，2014）。

2　电子标签的制作

电子标签主要由无感超细金属丝和肖特二极管（Schottky diode）两部分组成。制作电子标签需要使用导电胶将肖特二极管粘贴在无感金属丝上。制作电子标签的金属丝可采用铜、银、镀铜-锡、镀铜-钢心、镀银-铜等材料组成（Riley *et al.*，1996）。导电胶一般使用导电银胶或含锡铅导电胶（如疯狂胶、乐泰胶）。

在实验室进行电子标签的制作，取一段镀铜-钢（AWG#34）金属丝，首先将金属丝中间绕成一个直径 1.0 mm 的圆环，圆环上端 6.0 mm，下端 4.0 mm，其中下端底部 1.0 mm 绕成缺环，电子标签重 2.1 mg（Boiteau *et al.*，2011）。使用导电胶将肖特二极管（M/A-COM Technology Solutions Inc.，MA4E2502L-1246）粘在圆环两侧。粘结好后，放入 190 ℃干燥箱里干燥 10 min，冷却后再用昆虫谐波雷达在特定的空旷处检测电子标签的信号，判断是否合格。在试验前，用一滴万能胶水（502 胶）将电子标签粘到成虫的背板上（图 3）。

3　在环境中成虫的检测率和发现率测定

评价昆虫谐波雷达技术在野外追踪成虫的是否有效，必须在笼罩单株植物和在自然环境中测试其检测率和发现率（Boiteau *et al.*，2011；罗杰等，2016）。自然环境的选择与将来跟踪试验环境应该相类似，如柑橘园。

3.1　笼罩单株植物

试验在笼罩单株植物（如橘树）中进行。在靠近自然环境试验点的中心选择一棵植株（树冠高约 2.0-2.5 m，树冠最宽处宽约 2.0-2.5 m），并以这株植物为中心，搭建一个塑料网室。试验参照经过了修改的 Boiteau 等（2011）方法进行，在该植株的上、中、下部（叶片正面、背面、枝干）9 个位置随机释放测试成虫（图 4），每个位置带电子标签的雌雄成虫各释放 10 头。然后再以该植株为中心，在其正北，东北，正东，

图 3 柑橘大实蝇成虫的电子标签

Fig. 3 Electronic tag attachment on Chinese citrus fly *Bactrocera minax*

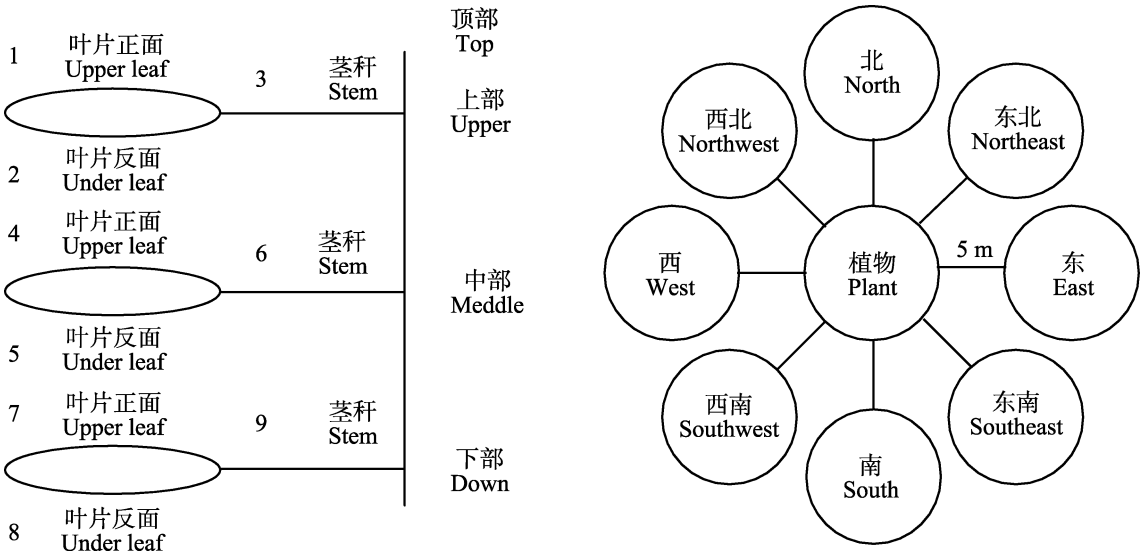

图 4 在植物上昆虫释放点（左）和操作者检测位置（右）

Fig. 4 Released location of insect attached with electronic tag on plant (left) and position of user detection (right)

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（图 4）。由 1 位释放者在网室的该植株上的 9 个位置随机释放已安装电子标签的成虫，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，成虫释放后，再由检测者使用昆虫谐波雷达在 5 m 正北处开始检测声音信号确定方向，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测试成虫，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 内未找到带电子标签的测试成虫，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）或带标签的测试成虫，避免干扰下一组试验（罗杰等，2016）。

每组试验测试记录昆虫性别，成虫释放、成虫降落和检测者所在位置，检测的时间，电子标签是否和地面垂直，天线好坏，如果释放点和降落点不是同一个位置，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，每只成虫只能参加 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（Boiteau *et al.*，2011；罗杰等，2016）。

通过在成虫降落在植物的叶正面、叶背面和枝干的成虫数量之间差异显著性比较，最后获得在笼罩单株植物中的检测率和发现率（Boiteau *et al.*，2011；罗杰等，2016）。假如昆虫回收率较高或者不考虑电子标签的耗费成本，可以不设置网室。假如测定的对象是农作物如马铃薯、玉米，直接使用盆栽植物（Boiteau *et al.*，2011）。

3.2　自然环境

试验在自然环境进行。在试验点固定一株植物（如橘树）作为测试成虫的开始释放点。除了将上一次该成虫降落位置记为下次试验的释放位置外，检测方法同笼罩单株植物。记录每次移动的释放点或降落点的植物种类。在跟踪试验前，所有的粘在测试成虫背面的电子标签必须检测其可靠性，将信号弱或无信号的负载电子标签成虫剔除（Boiteau *et al.*，2011；罗杰等，2016）。

假如测定环境是大田农作物，如成排种植的马铃薯、玉米，选定一段距离，在该农作物植株的上、中、下部（叶片正面、背面、茎干）9 个位置随机释放昆虫，检测方法同笼罩单株植物（Boiteau *et al.*，2011）。

假如通过在单株植物和在野外环境中试验获得植物上成虫的检测率和发现率均超过 50%，则被认为昆虫谐波雷达技术能够有效地追踪野外成虫运动行为，最终适合在自然环境中的应用。假如单株植物试验的成虫的检测率和发现率均没有超过 50%，认为不适合使用这项技术；假如仅野外环境中的成虫的检测率和发现率均没有超过 50%，需要更换植物密度相对较小环境重新测试。

4　田间跟踪昆虫的运动轨迹的方法

试验地点的选择，除了考虑在不同地点（至少 3 个）和不同年份试验外，也要考虑在不同地点的风向、太阳的方位和地形等必须存在一定的差异，避免这些因子对测试昆虫迁移行为的干扰。

由 1 位释放者将已绑定的电子标签的测试成虫释放在对应的释放点的植物的叶片正面，该位释放者就近观察，当释放成虫起飞后，检测者开始利用谐波雷达检测电子标签的声音信号，当从耳机中听到声音信号后，沿着信号由强变弱方向确定成虫位置，同样也可以在另外一个方向跟踪，最后能够定在 0.2 m^2 区域内。这时多名观察者同时肉眼搜索该成虫。将上一次该成虫降落点记为下次跟踪试验的起飞点，并用不同颜色的塑料绳分别标记，由该位释放者和观察者继续就近观察，重复上述的步骤，如此循环，直到找不到或者回收该成虫。每只成虫跟踪结束后，使用人工皮尺或 GPS 测量释放点 A 和降落点 B、C、D 之间的距离 L_{AB}，L_{AC} 和 L_{AD}（图 5）和每次飞行的起飞点到降落点之间的距离 L_{AB}，L_{BC} 和 L_{CD} 以及每一次飞行的方向 α，β 和 γ（以 *N* 为基准），成虫降落植物的名称。每 0.5 h 记录一次温度、湿度、风速和光照强度等气象要素值。

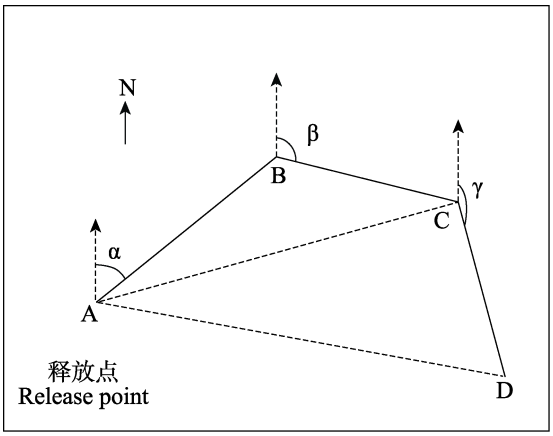

图 5　测试成虫迁移路线示意图

Fig.5　Migration path diagram of test adult

A：释放点；B: 第 1 次降落点；C：第 2 次降落点；D：第 3 次降落点。

A: Release point; B: The first landing point; C: The second landing point; D: The third landing point.

通过 Excel 绘出测试成虫的移动轨迹图（图 6），在不同地点和年份之间的测试成虫的平均飞行步长和直线指数的差异显著性比较采用方差分析，测试成虫（步数≥3）的连续平均步长之间和连续平均角度之间的相关性采用线性相关分析，成虫飞行的角度分布采用雷氏检验（Rayleigh tests）（Gui *et al.*，2012）。通过相关随机活动位移（The correlated random walk，R_n^2）预测模型

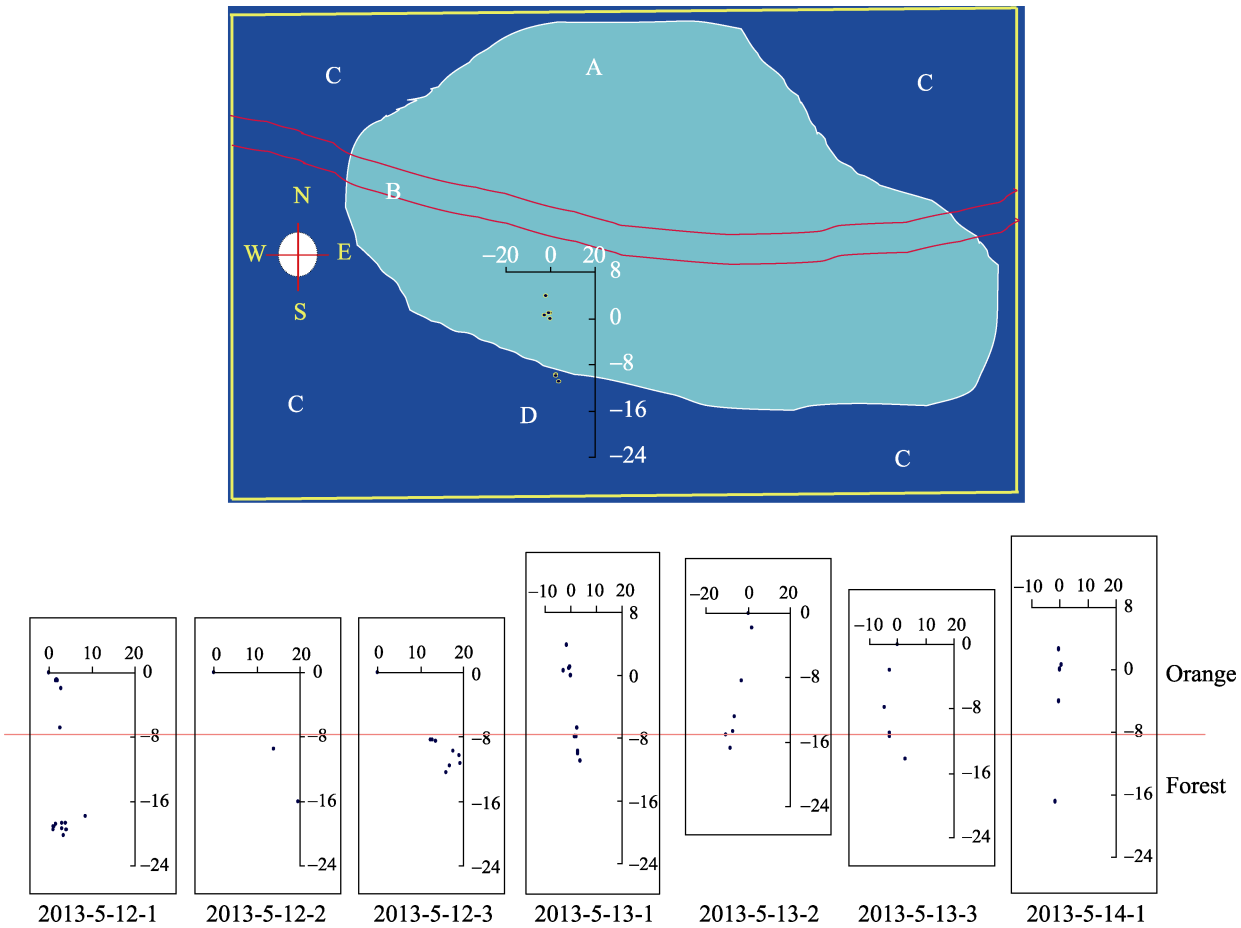

图 6　实验环境（上）和初羽化柑橘大实蝇成虫在橘园释放后的迁移过程路线图（下）（2013）

Fig. 6　Test environment (upper) and the migration path diagram of early emerged adult Chinese citrus fly released in the citrus orchard (down) (2013)

上图 A：柑橘园，套种有少量玉米；B：小路；C：森林；D：其中 1 头成虫移动轨迹，下图是 7 头成虫的迁移过程路线图。图中单位为 cm。

Upper: A: Citrus orchard, there is sporadic corn in them, B: Path, C: Forest, D: Migration path of one adult Chinese citrus fly. Down: Migration path of all seven adults Chinese citrus fly. Affiliated unit: cm.

分析其扩散运动过程轨迹（Halstead *et al.*，2007；Gui *et al.*，2012），最后获得测试成虫运动特征：停止、徘徊（琐飞 Trivial fight）、随机和定向行为（定向、随机和横向）。

5　小结

电子标签是昆虫谐波雷达系统中最重要的元件。其制造技术难度较大。目前每只电子标签价格大约在 100-150 元（人民币）。在开放的田间应用时，回收率在 20%-30%之间（Gui *et al.*，2012），试验成本较高。因此，在跟踪试验过程中，一般 1 次跟踪 1 只昆虫，通常需要 5-7 人员参与试验，试验的植物高度最好在 5 m 以下。

参考文献（References）

Boiteau G, Colpitts B, 2001. Electronic tags for the tracking of insects in flight: effect of weight on flight performance of adult Colorado potato beetles. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 100(2): 187–193.

Boiteau G, Vincent C, Meloche F, Leskey TC, Colpitts BG, 2011. Harmonic radar: Efficacy at detecting and recovering insects on agricultural host plants. *Pest Management Science*, 67(2): 213–219.

Boiteau G, Vincent C, Meloche F, Leskey TC, Colpitts BG, 2014. Evaluation of tag entanglement as a factor in harmonic radar studies of insect dispersal. *Environmental Entomology*, 40 (1): 94–102.

Colpitts BG, Boiteau G, 2004. Harmonic radar transceiver design: miniature tags for insect tracking. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 52(11): 2825–2832.

Drake VA, Reynolds DR, 2012. Radar Entomology: Observing Insect Flight and Migration. Wallingford: CABI Publishing, Oxfordshire, England. 1–489.

Gui LY, Boiteau G, Colpitts BG, MacKinley P, McCarthy PC, 2012. Random movement pattern of fed and unfed adult Colorado potato beetles in bare-ground habitat. *Agricultural and Forest Entomology*, 14(1): 59–68.

Gui LY, Huang XQ, Li CR, 2011.The development and the use of insect harmonic radar. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 48 (3): 732–738. [桂连友, 黄秀琴, 李传仁, 2011. 昆虫谐波雷达的发展和利用. 应用昆虫学报, 48(3): 732–738.]

Gui LY, Huang XQ, Li CR, Boiteau G, 2011. Validation of harmonic radar tags to study movement of Chinese citrus fly. *The Canadian Entomologist*, 143(4): 415–422.

Hagler JR, Jackson CG, 2001. Methods for marking insects: Current techniques and future prospects. *Annual Review of Entomology*, 46: 511–543.

Halstead BJ, Mccoye E, Stilson TA, Mushinsky HR, 2007. Alternative foraging tactics of *Juvenile gopher* Tortoises (*Gopherus Polyphemus*) examined using correlated random walk models. *Herpetologica*, 63(4): 472–481.

Huang XQ, Li CR, Wang FL, Gui LY, 2012a. Advances in insect harmonic radar tags. *Journal of Environmental Entomology*, 34(4): 510–514. [黄秀琴, 李传仁, 王福莲, 桂连友, 2012a. 昆虫谐波雷达的电子标签研究进展. 环境昆虫学报, 34(4): 510–514.]

Huang XQ, Li ZY, Li CR, Boiteau G, Gui LY, 2012b. Effects of extra loading on flight performance of adult Chinese citrus fly. *Acta Entomologica Sinica*, 55(5): 606–611. [黄秀琴, 李正跃, 李传仁, Boiteau G, 桂连友, 2012b. 额外负载重量对柑橘大实蝇飞行能力的影响. 昆虫学报, 55(5): 606–661.]

Jung M, Kim J, Kim HG, Lee DH, 2016. Effect of harmonic radar tagging on *Lycorma delicatula* (Hemiptera: Fulgoridae) nymphal mobility and survivorship. *Florida Entomologist*, 99(1): 47–51.

Kim J, Jung M, Kim HG, Lee DH, 2016. Potential of harmonic radar system for use on five economically important insects: Radar tag attachment on insects and its impact on flight capacity. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 19(2): 371–375.

Klempel DD, 1977. A Harmonic Radar for Tracking Individual Insects. Fargo: Master Thesis. State University of North Dakota.

Lee DH, Park CG, Seo BY, Boiteau G, 2014. Detectability of *Halyomorpha* halys (Hemiptera: Pentatomidae) by portable harmonic radar in agricultural landscapes. *Florida Entomologist*, 97(3): 1131–1138.

Lee DH, Wright SE, Boiteau G, Vincent C, Leskey TC, 2013. Effectiveness of glues for harmonic radar tag attachment on *Halyomorpha halys* (Hemiptera: Pentatomidae) and their impact on adult survivorship and mobility. *Environmental Entomology*, 42(3): 515–523.

Luo J, Gui LY, Gilles B, Hua DK, 2016. Study on the application of insect harmonic radar in the behavior of Chinese citrus fly. *Journal of Environmental Entomology*, 38(3): 514–521. [罗杰, 桂连友, Boiteau G, 华登科, 2016. 昆虫谐波雷达在柑橘大实蝇行为学上的应用研究. 环境昆虫学报, 38(3): 514–521.]

Riley JR, Smith AD, Reynolds DR, Edwards AS, Osborne JL, Williams IH, Carreck NL, Poppy GM, 1996. Tracking bees with harmonic radar. *Nature*, 379 (6560): 29–30.

Williams DW, Li GH, Gao RT, 2004. Tracking movements of individual *Anoplophora glabripennis* (Coleoptera: Cerambycidae) adults: application of harmonic radar. *Journal of Environmental Entomology*, 33(3): 644–649.

Zhai BP, 1999. Tracking angles: 30 years of radar entomology. *Acta Entomologica Sinica*, 42(3): 315–326. [翟保平, 1999. 追踪天使—雷达昆虫学 30 年. 昆虫学报, 42(3): 315–326.]