

# 雷达昆虫学 40 年研究的回顾与展望

封洪强

(河南省农业科学院 植物保护研究所, 河南 郑州 450002)

**摘要:** 介绍了昆虫雷达的工作原理, 回顾了雷达昆虫学发展历史, 并对雷达昆虫学的未来发展进行了展望。

**关键词:** 昆虫雷达; 遥感; 虫害预测

**中图分类号:** S431.9      **文献标识码:** B      **文章编号:** 1004-3268(2009)09-0121-06

雷达昆虫学是使用雷达研究昆虫运动的一门科学和技术<sup>[1]</sup>。长期的实践证明, 雷达用于研究昆虫迁飞, 尤其是为数众多的害虫的迁飞是非常有价值的。另外, 雷达也被用于研究昆虫的非迁飞运动<sup>[1,2]</sup>。自 Riley 1968 年成功地领导了第 1 次野外雷达观测作为雷达昆虫学的确立算起, 到 2008 年雷达昆虫学整整走过了 40 个年头<sup>[2]</sup>。经过不断的探索和努力, 昆虫雷达技术日臻成熟, 雷达昆虫学理论逐步完善, 昆虫雷达不但在昆虫迁飞理论研究上发挥着巨大的作用, 也早已走出实验室走向害虫监测预警的主战场。以下主要对以迁飞昆虫的监测研究为目的设计建造的昆虫雷达及相关研究和成果进行综述, 以便从中得到启示, 并对本学科未来的发展进行了展望。

## 1 昆虫雷达原理

雷达(radar)是无线电探测和测距(radio detection and ranging)的缩写, 是利用电磁波进行空中目标探测的一个无线电探测系统。电磁波在传播的过程中遇到物体会被反射, 如果反射回来的电磁波足够强, 能被接收系统接收, 就可以确定物体的存在, 而且可以根据电磁波传播的速度和传播时间计算出它的位置。令人惊讶的是, 这些“物体”不一定非得是大的金属物(如船或飞机等), 鸟、雨滴、昆虫甚至不均一的大气都能反射电磁波。根据这种原理, 雷达不但可以探测飞机等飞行物体, 而且也可以探测鸟、昆虫等生物体, 它是迄今为止最卓越的探测技术, 由于不会干扰生物的行为, 它的应用为观测鸟

及昆虫等生物的飞行行为提供了极大的方便<sup>[2,3]</sup>。

利用雷达监测昆虫的迁飞, 首先要把昆虫回波与降水、鸟或蝙蝠的回波区分开, 其次是鉴定昆虫的种类。当昆虫的密度较低(小于  $10^{-4}$  头/ $\text{m}^3$ )、距离较近(3km 以内)时, 中、大个体昆虫的回波是离散的, 这与由降水产生的半连续的回波容易区分。昆虫聚集时所产生的回波不太容易与降水区分, 尤其是在距离较远且又没有辅助证据(如地面上的降雨)的情况下就更难区分了; 但如果是在较高处, 此处的温度几乎不可能有昆虫, 就可以认定那是降水。虽然鸟或蝙蝠的雷达散射截面(RCS)通常比昆虫的大得多, 但大的昆虫与小鸟之间的雷达回波的区别是很小的, 甚至没有, 反应在扫描昆虫雷达的平面显示器上则没有明显的区别。然而报道过的鸟或蝙蝠的空中速度比昆虫的大, 振翅频率比昆虫小, 因此, 飞行速度低于  $6\sim 7\text{m/s}$  且产生持续的高于  $14\text{Hz}$  的振翅调制的空中目标几乎可以肯定是昆虫<sup>[3]</sup>。这里需要指出的是估计目标的飞行速度要通过位移速度与当时的风速做矢量差得到, 风速的测量越近、越精确越好。

通过雷达回波信号直接鉴定昆虫的种类是比较复杂和困难的, 因雷达的设计、目标昆虫的种类和使用的环境的不同而不同, 最可靠的办法还是通过空中取样来鉴定回波目标的种类。某种程度的“自动”区分总是用在那些大小有实质性区别的昆虫种类上, 大的昆虫比小的昆虫易于被探测到<sup>[4]</sup>。实际上雷达的探测阈值或灵敏度是可以调节的, 以保证在某个探测范围内小的昆虫(单个个体)不被探测到。

收稿日期: 2009-06-09

基金项目: 河南省杰出青年基金项目

作者简介: 封洪强(1973-), 男, 河北吴桥人, 副研究员, 博士, 主要从事雷达昆虫学研究。

但是对于传统的扫描昆虫雷达来说, 根据平均雷达回波振幅来判断种类是没有效果的。这是因为回波大小不但与昆虫身体方位(即身体的哪一面正对雷达)有关而且还与昆虫在波束中的位置(在波束的中间还是边缘)有关。这两点通常是无法知道的。

在某些情况下(只有很少的几种), 利用雷达测量的昆虫的振翅频率可以进行空中昆虫的有效鉴定, 尤其是那些大型种类, 如蝗虫(acridoidea)。一般来说, 长翅的种类通常产生较低的振翅频率, 而短翅的则相反, Schaefer 发现蝗虫的翅长与振翅频率呈负指数关系; 因而利用谱分析可以估计不同翅长的蝗虫在整个虫群中的比例, 如果这个虫群中只有几种个体差别明显的昆虫, 就可以区分种类, 甚至区分雌雄<sup>[5,6]</sup>。其他类群昆虫的这种规律的信息还非常少, 而且某些情况(相似大小的昆虫种类很丰富, 如夜蛾)下, 就只能根据振翅频率做出较含糊的鉴定<sup>[2,4]</sup>。通过振翅频率鉴定昆虫只能用于较简单的昆虫学环境, 这将其成功使用严格限制在那些所要观测目标是当地(数量)优势种的地区。

目前旋转极化的昆虫雷达可以综合昆虫回波的几个特征参数进行种类的鉴定, 但尽管某些情况下雷达目标可以自动识别, 一些其他的辅助识别方法仍是必不可少的。这些方法包括: 暴发地区的地面虫情调查, 飞机、系留气球或风筝拖带的空中捕虫网网捕、姊妹灯诱虫等。系留气球或风筝拖带的空中捕虫网是一种低廉易于操作的方法, 虽说对于密度低、飞行高的大昆虫(如蝗虫或夜蛾)来说, 捕到的机率较小, 但对于密度大、飞行低的小个体昆虫(如蚜虫或飞虱)来说, 是一个很好的辅助鉴定方法, 因为这些小昆虫无法用雷达测得其振翅频率。姊妹灯诱虫法是封洪强博士等在观测华北昆虫迁飞实践中探索出来的一种简便易行的方法, 这种方法同时使用 1kW 金属卤化物探照灯和地面灯诱集昆虫来判断高空飞行的昆虫的种类<sup>[7]</sup>。

## 2 传统扫描昆虫雷达

上世纪 60 年代, 当昆虫学家 Rainey 准备开始建造专门用于昆虫学研究的昆虫雷达时, 曾用雷达观测鸟类活动的 Schaefer 帮助设计建造了传统的扫描昆虫雷达, 此后 30 多年这种设计一直被沿用下来。当 Schaefer 建造第 1 部扫描昆虫雷达时, 航海雷达的收发机是当时的最佳选择。它的工作波长是 3.2cm(x 波段), 峰值发射功率是 20~25kW, 脉冲宽度可以下调至 0.1 $\mu$ s(相当于 15m 的空间解析

度), 安装上适当的天线可以在 1~2km 范围内探测到单个的中大型昆虫。尽管这个探测距离相对于正常的雷达标准是非常短的, 但对于研究单个昆虫来说已经远远超出了其他的方法, 另外一个原因是航海雷达非常经济且易于购得<sup>[3]</sup>。

航海雷达不适合昆虫观测的是它的横杆形天线, 这种天线可以产生一个 1 或 2 度宽, 高 30 度的“扇形”扫描波束, 这对于保证船在起浮摇摆时也能发现目标是很有用的, 但研究昆虫需要有选择性地观测不同的高度。Schaefer 改进的方案就是将横杆形天线改为抛物面天线, 可以以不同仰角作 360°旋转, 监视空中昆虫的迁飞情况。其显示器为平面位置指示器(PPI, plan position indicator), 与气象雷达的屏幕相似, 可以显示昆虫目标的方向、距离和高度等。一些昆虫学家和雷达专家还对此类雷达的天线进行了控制方面的改进, 使其能朝任一方向上下摆动, 对同一方向不同高度作扇形的扫描, 从而获得昆虫的“迁飞层”。其相应的扫描图像为距离—高度扫描图像, 显示方式为距—高显示(RHI, range height indicator)。当昆虫密度较低时, 一个重约 200mg 的蛾类昆虫可以在距扫描雷达 2km 左右被检测到, 高密度的昆虫曾经在距雷达 10km 的地方被检测到。

由 Riley 领导的英国的海外害虫控制中心(后来的自然资源研究所)的雷达昆虫学队伍 1973 和 1974 年在相关国际组织和当地机构的协助下, 在马里的尼日尔河三角洲使用扫描昆虫雷达研究了非洲飞蝗 *Locusta migratoria migratorioides* 的迁飞活动。后来发现非洲飞蝗只是其中的一小部分, 要想把它从其他种类中区分出来是不现实的, 但这次观测树立了观测夜间几百米高空蝗虫聚集成层迁飞的典范。这次观测发现, 在地面风很小的情况下头顶上都有大量的蝗虫迁飞, 迁飞的距离可达 300~400km, 这在没有使用雷达之前是不可想象的。这次观测还发现了蝗虫的共同定向, 并试验了新的垂直昆虫雷达, 后来关于夜间昆虫共同定向这一研究成果发表在 Nature 上<sup>[8]</sup>。之后他们对当地代表性种类塞内加尔蝗虫 *Oedaleus Senegalensis* 的迁飞进行了研究, 并且于 1978 年动用了两部雷达联合观测, 详细研究了塞内加尔蝗的起飞、上升和飞行高度, 持续飞行时间和迁飞的范围, 在辐合风里的聚集, 蝗虫的定向和共同定向的机制, 并探讨了迁飞的后果及在预测和防治中的应用<sup>[9]</sup>。

1979—1982 年, 这支雷达昆虫学队伍在许多昆

虫学家的帮助下,在非洲的多个地点使用昆虫雷达对非洲黏虫(*Spodoptera exempta*)的迁飞进行了详细研究,发现了非洲黏虫的暴发与降雨的关系,后来发展成为用卫星遥感图像预测降雨从而预测非洲黏虫暴发的新技术。这些研究的结果也可以用于建立一个预测非洲蝗虫暴发的模型,但遗憾的是这个模型目前还没有实现。由于注意到棉铃虫(*Helicoverpa armigera*)的危害的严重和迁飞可能性,他们于1985—1987年在印度对棉铃虫的迁飞进行了研究,但遗憾的是发现只有约5%的棉铃虫迁飞<sup>[9]</sup>。

这些成功的观测激励各国争相建立扫描昆虫雷达,使用扫描昆虫雷达及雷达观测在上世纪80、90年代达到顶峰。在Drake的领导下,澳大利亚对沙漠蝗和棉铃虫等的迁飞进行了观测,美国更不惜运用军方雷达并建立了机载雷达对美洲棉铃虫*H. zea*的迁飞进行了观测,加拿大也在Schaefer的帮助下对纵色卷蛾进行了研究,我国的第1部昆虫雷达也是在上世纪80年代由陈瑞鹿领导建造的<sup>[3]</sup>。

### 3 毫米波昆虫雷达

传统扫描昆虫雷达如此成功,但它只限于观测中大型昆虫。许多小型昆虫如稻飞虱和蚜虫都是迁飞性害虫,这些害虫的迁飞就无法用上面所说的传统扫描昆虫雷达进行观测。对于3cm雷达,昆虫的RCS与昆虫质量的大小成正比,飞虱和蚜虫由于质量非常小,它们的RCS只有 $10^{-4} \sim 10^{-6} \text{ cm}^2$ ,因此无法被探测到。然而RCS也与波长的4次方成反比,所以用短波长可以增加小型昆虫的RCS,从而可以被探测到,这就是后来出现的毫米波昆虫雷达。

Riley领导的自然资源研究所雷达昆虫团队设计建造了第1部波长8.8mm的Q频带扫描雷达,可检测到1km高处的单个飞虱。用这部雷达于1984年在菲律宾、1988—1991年在我国成功地观测了稻飞虱的迁飞<sup>[9]</sup>。在程登发博士的领导下,2006年中国农科院自主建成了我国第1部8.8mm的毫米波昆虫雷达用于观测稻飞虱的迁飞,目前这部雷达在桂林设立了专门的观测站。

### 4 扫描昆虫雷达的数字化及其贡献

上世纪90年代末为了研究棉铃虫在华北的迁飞行为,现任中国农科院植保所所长的吴孔明博士在郭予元院士的大力支持下,经多方努力建成了我国第2部扫描昆虫雷达。雷达建成后经过2年的实践观测证明,这部雷达可以满足观测棉铃虫等中大

型昆虫迁飞的需要<sup>[10,11]</sup>,但大量数据处理工作的困扰使昆虫学家无法专注于昆虫学研究。传统的扫描昆虫雷达的数据采集是通过摄影机将PPI图像记录下来,数据处理时用电影片放映机放映,人工进行计数统计,然后手工计算完成,数据处理复杂繁琐且枯燥。这种方法在20世纪80年代初由澳大利亚和英国学者完善并建立了计算标准,澳大利亚的Drake还为这一计算系统设计了标准的系列雷达观测仰角。由于其监测技术不被一般技术人员所掌握,严重限制了扫描昆虫雷达的推广应用<sup>[3]</sup>。

在吴孔明博士的建议下,程登发等于2000年完成了传统扫描雷达的数字化,使昆虫雷达回波数据的采集、处理和分析实现了自动化和智能化,解决了扫描昆虫雷达存在了近30年的“数据处理费时费力,无法应用于长期监测”这一国际难题,推动了扫描昆虫雷达技术的发展,为扫描昆虫雷达的推广应用提供了强有力的技术支持<sup>[3,12]</sup>。在扫描昆虫雷达完成数字化后,由正在中国农科院攻读博士学位的封洪强带领着一支由研究生和临时人员组成的雷达观测小组继续使用这部雷达进行昆虫学研究<sup>[7]</sup>。这支队伍先后在河北的廊坊和山东的长岛对华北地区空中昆虫群落、主要迁飞害虫及天敌的迁飞活动进行了系统研究,获得了棉铃虫、草地螟、黏虫、黄蜻、步甲等多种迁飞昆虫的迁飞行为参数<sup>[13~21]</sup>,为深入揭示其迁飞规律和机制以及了解我国华北地区空中昆虫群落结构动态提供了科学依据,为深入迁飞昆虫在气流场中的飞行行为特征奠定了基础。

建设这部数字化昆虫雷达的最初目标是搞清楚棉铃虫在华北地区的迁飞行为,但出人意料的是甜菜夜蛾(*Spodoptera exigua*)在2001年秋季异常的多,草地螟(*Loxostege sticticalis*)也常在春夏秋季的某些夜晚成为雷达的主要目标。由于甜菜夜蛾也被认为是迁飞性害虫,在我国广大棉区和蔬菜上暴发,相关的生物研究表明,它具有迁飞习性,但一直没有证据,这次的雷达观测结果首次直接证明了甜菜夜蛾在我国的迁飞习性<sup>[13]</sup>。

草地螟是一种世界范围内广泛分布的取食多种作物和杂草的昆虫,在北美洲、欧洲和亚洲被认为是农业害虫。草地螟在我国华北、东北和西北地区间歇性暴发,在过去的50多年里已出现过3个暴发周期。在我国,草地螟以幼虫在内蒙南部、山西北部 and 河北西部越冬,第2年成虫迁往东北,造成农田大面积受害。我们的雷达观测证明了以前关于草地螟迁飞的假说并测定了其飞行高度、持续飞行时间、定向

等行参数<sup>[14]</sup>。

棉铃虫是东半球最重要的农业害虫之一,近年来频繁暴发,造成惨重损失<sup>[15]</sup>,特别是上世纪 90 年代的大暴发令人心有余悸。在澳大利亚、印度、苏丹、欧洲、以色列和中国已认识到棉铃虫有很强的迁移能力,季节性迁飞和兼性滞育特性是它在热带和亚热带成为重要害虫的原因。通过雷达观测证明了棉铃虫春季和初夏由华北地区迁往东北,夏季可在各个地区间迁飞,秋季棉铃虫由东北返回华北越冬,跨越渤海迁飞是一条捷径<sup>[16~19]</sup>。棉铃虫虽然总是顺风迁飞,但在秋季头总是指向西南,这表明尽管它顺风迁飞但也有识别地理方向的能力<sup>[19]</sup>。抗虫棉大面积推广以来,棉铃虫的危害得到了有效控制<sup>[20]</sup>,但正如对化学农药产生抗性一样,长期单一使用抗虫棉会使棉铃虫产生抗性。如何合理布局棉花品种使其能达到对棉铃虫的可持续控制,将是我们首先面临的新挑战。对棉铃虫的迁飞扩散行为与轨迹分析研究将明确其迁飞路径,为抗虫棉品种的合理布局提供理论依据。

2003 年以来,为了证明棉铃虫的越海迁飞,我们选择位于渤海海峡内的一个小岛进行观测,却意外地发现了蜻蜓的越海迁飞和毛茛步甲的迁飞。传统的认识认为蜻蜓是在白天迁飞,而且飞行的高度只有几十米,当蜻蜓遇到广阔的水域时,它从不跨越水体,而是沿着海岸飞行。我们通过雷达观测发现,黄蜻可以跨越渤海迁飞,这种迁飞不是发生在白天而是发生在夜间,夜间迁飞时黄蜻主要集中在几百米高度飞行,这大大出乎人们的想象,该发现在世界上尚属首次<sup>[21]</sup>,文章一发表立刻引起了世界上研究蜻蜓学者们的高度重视,被多家蜻蜓研究网站引用。毛茛步甲是一种天敌昆虫,可以捕食多种害虫,但也有报告称它可以取食谷物。步甲一向被认为是一种只靠步行来扩散的种类,它的扩散距离有限,因此,步甲的多样性常被作为生物多样性的指示昆虫来加以研究。我们的观测发现毛茛步甲可以在夜间飞升到几百米高度乘风远距离迁飞<sup>[22]</sup>,这与此前英国发现步甲迁飞一起有力地证明步甲具有远距离迁飞的能力。

经过持续多年的观测,我们还发现了昆虫成层与风温场的关系。在传统的研究中昆虫的聚集成层一直被认为是由逆温层导致的,的确在很多研究中二者具有高度的相关性。但当我们分析了大量的时实风温数据后发现,在昆虫迁飞高峰期逆温层和风速极值或风切变常常出现在同一个高度,在没有足

够多风廓线资料的前提下只能得出成层与逆温相关的结论。综合几种昆虫观测的结果,我们发现昆虫的成层与风速极值相关,即昆虫成层往往出现在风速最大的高度上,在秋季成层还与风向有关,即昆虫选择在出现北风的高度上或夜晚进行迁飞,以实现秋季回迁。此新观点也正逐渐被国际雷达昆虫学界承认<sup>[24]</sup>。我们在研究草地螟、黏虫、棉铃虫和蜻蜓的夜间迁飞中还发现昆虫的自主定向能力<sup>[14, 19, 21, 23]</sup>,即昆虫可以识别方向,这种能力已在鸟、海龟、龙虾等生物中被证实。最近英国洛桑实验站对银 Y 夜蛾定向的研究结果与我们一致,证明夜间高空迁飞的昆虫同样具有定向能力<sup>[25, 26]</sup>。

## 5 旋转极化的昆虫雷达与昆虫雷达网

扫描昆虫雷达尽管在研究昆虫迁飞中发挥了巨大的作用,而且在以往的研究中已被广泛采用,但这种雷达有 2 个缺点:(1)目标识别能力有限;(2)工作量大、劳动密集,无法实现长期自动化监测。虽然程登发博士在回波信号的采集与分析上做出了大量工作,但目标的自动识别仍是其不可克服的缺陷。为了克服这些缺陷,英国雷达昆虫学家发明了一种垂直昆虫雷达,并在 1975 和 1978 年进行了试验,成功地测到了昆虫定向的分布,但是体形信息却未能提取出来。用旋转极化设计垂直雷达的想法后来被美国的 Beerwinkle 继承,并发展了能用于长期自动监测的雷达,上世纪 90 年代以来,英、澳两国也相继采用了这种设计的雷达<sup>[3]</sup>。旋转极化的垂直昆虫雷达的主要设计思想是雷达波束垂直射向空中,并以很小的偏角旋转同时极化平面也在旋转,这样所有飞过雷达波束的昆虫都以同样的姿势对准雷达波,使取样标准趋于一致。用这种设计的雷达可以提取出昆虫的振翅频率、体形参数、质量大小等多种特征参数<sup>[27]</sup>,数据可以自动由计算机处理,可以实现昆虫监测的自动化和长期无人值守<sup>[28]</sup>。Drake 用 2 部这样的雷达实现了澳洲蝗虫的实时监测,并建立了网站,对外实时发布预警信息<sup>[29]</sup>,后来政府发现这一网站非常有用,现在已成为政府支持的常规业务。澳大利亚的昆虫雷达网在 Drake 退休后将由在澳洲治蝗工作委员会工作的他的学生华人科学家王海扣博士接管。

我国昆虫学家经过近 30 年的努力,建立了多种类型的昆虫雷达 6 部,分属于吉林省农科院、中国农科院、南京农大和河南省农科院,曾“转战”于我国的多个省市。目前正在工作的还有 5 部(图 1),但这

些雷达由于建造于不同年代,且技术标准不一,难以建立统一的网络。河南省农科院于2006年在省政府的支持下按照国际上通用的设计标准建造了旋转极化的垂直昆虫雷达,目前正在新基地筹建固定的雷达观测站。中国农科院植保所也正在建立同样设计标准的垂直昆虫雷达。封洪强博士2004年来到河南省农科院工作,并组建了一支新的雷达观测队

伍,已主持完成了国家自然科学基金1项,目前正以河南省农科院第二基地建设为契机准备建造更多的昆虫雷达。这些软件和硬件建设为建立中原昆虫雷达网奠定了基础。曾为雷达昆虫学做出重要贡献的澳大利亚专家 Drake 博士将于2009年7月退休,他对我国的昆虫雷达网建设有浓厚的兴趣,并同意在退休后到河南来指导我国昆虫雷达网的建设。

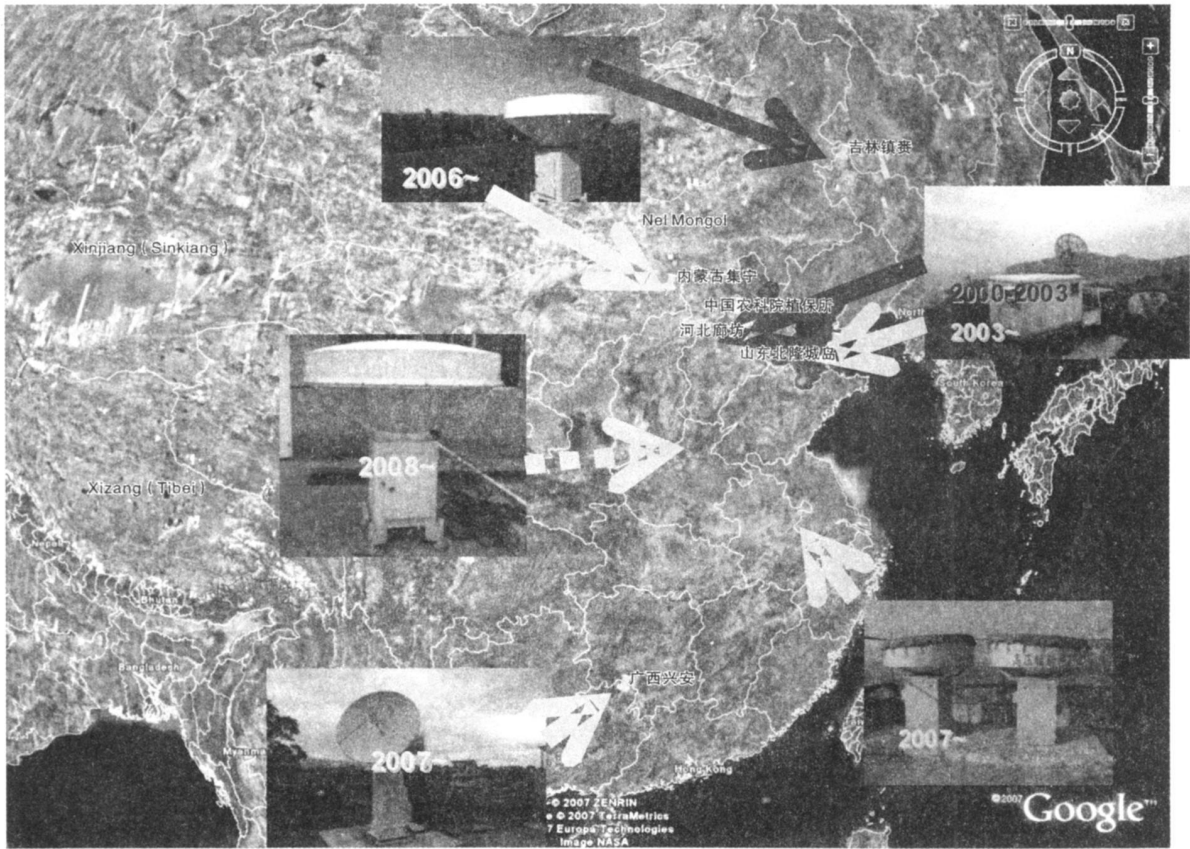


图1 我国的昆虫雷达分布情况

经过多年的努力,目前我国无论雷达数量还是从事雷达昆虫学研究的人员都远远超过了英国、美国和澳大利亚。在未来的发展中如果政府投入足够的经费支持,雷达昆虫学研究的中心将会在不久的将来向我国转移。我们相信,依托雷达网并借助日益成熟和普及的卫星遥感技术建立空中昆虫群落自动监测网和虫害监测预警信息服务平台<sup>[29]</sup>,实现虫害的自动监测与预警直接服务于农业生产将不会是很久远的梦想。

参考文献:

[1] Drake V A. The radar entomology website[EB/OL]. (2008-12-18)[2009-06-09]. [http://www.pems.adfa.edu.au/~s9104004/trewns/ww\\_re\\_hp.htm](http://www.pems.adfa.edu.au/~s9104004/trewns/ww_re_hp.htm)

[2] Riley J R. Riding on the wind: a radar perspective of insect flight[M]. London: University of Greenwich, 1999.

[3] 程登发,封洪强,吴孔明.扫描昆虫雷达与昆虫迁飞监测[M].北京:科学出版社,2005.

[4] Riley J R. Quantitative analysis of radar returns from insects[Q]//Vaughn C R, Wolf W W, Klassen W. Radar, insect population ecology, and pest management. Virginia: NASA Wallops Flight Center, Wallops Island 1979; 131-158.

[5] Schaefer G W. Radar observations of insect flight[Q]//Rainey R C. Insect Flight: Symposia of the Royal Entomological Society No. 7. Oxford: Blackwell, 1976; 157-197.

[6] Riley J R, Reynolds D R. Radar-based studies of the migratory flight of grasshoppers in the middle Niger

- area of Mali [ J ]. Proceedings of Royal Society of London Series B B, 1979, 204: 67—82.
- [ 7 ] 封洪强. 华北地区空中昆虫群落及昆虫季节性迁移的雷达观测[ J ]. 北京: 中国农业科学院研究生院, 2003.
- [ 8 ] Riley J R. Collective orientation in night-flying insects [ J ]. Nature, 1975, 253(5487): 113—114.
- [ 9 ] Reynolds D R, Riley J R. The flight behaviour and migration of insect pests: radar studies in developing countries[ M ]. Chatham: Natural Resources Institute, 1997.
- [ 10 ] 吴孔明, 程登发, 徐广, 等. 华北地区昆虫秋季迁飞的雷达观测[ J ]. 生态学报, 2001, 21(11): 1833—1838.
- [ 11 ] 吴孔明, 翟保平, 封洪强, 等. 华北北部地区二代棉铃虫成虫迁飞行为的雷达观测[ J ]. 植物保护学报, 2006, 33(2): 163—167.
- [ 12 ] Cheng D F, Wu K M, Tian Z, *et al.* Acquisition and analysis of migration data from the digitised display of a scanning entomological radar[ J ]. Computers and Electronics in Agriculture, 2002, 35(2—3): 63—75.
- [ 13 ] Feng H Q, Wu K M, Cheng D F, *et al.* Radar observations of the autumn migration of the beet armyworm *Spodoptera exigua* (Lepidoptera: Noctuidae) and other moths in northern China[ J ]. Bulletin of Entomological Research, 2003, 93(2): 115—124.
- [ 14 ] Feng H Q, Wu K M, Cheng D F, *et al.* Spring migration and summer dispersal of *Loxostege sticticalis* (Lepidoptera: Pyralidae) and other insects observed with radar in northern China[ J ]. Environmental Entomology, 2004, 33(5): 1253—1265.
- [ 15 ] 郭予元. 棉铃虫的研究[ M ]. 北京: 中国农业出版社, 1998.
- [ 16 ] Feng H Q, Wu K M, Cheng D F, *et al.* Northward migration of *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae) and other moths in early summer observed with radar in northern China[ J ]. Journal of Economic Entomology, 2004, 97(6): 1874—1883.
- [ 17 ] Feng H Q, Wu K M, Ni Y X, *et al.* Return migration of *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae) during autumn in northern China[ J ]. Bulletin of Entomological Research, 2005, 95(4): 361—370.
- [ 18 ] Feng H Q, Wu K M, Ni Y X, *et al.* High-altitude windborne transport of *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae) and other moths in mid-summer in northern China[ J ]. Journal of Insect Behavior, 2005, 18(3): 335—350.
- [ 19 ] Feng H Q, Wu X F, Wu B, *et al.* Seasonal migration of *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae) over the Bohai Sea[ J ]. Journal of Economic Entomology, 2009, 102(1): 95—104.
- [ 20 ] Wu K, Lu Y, Feng H, *et al.* Suppression of cotton bollworm in multiple crops in China in areas with Bt toxin-containing cotton[ J ]. Science, 2008, 321(5896): 1676—1678.
- [ 21 ] Feng H Q, Wu K M, Ni Y X, *et al.* Nocturnal migration of dragonflies over the Bohai Sea in northern China [ J ]. Ecological Entomology, 2006, 31(5): 511—520.
- [ 22 ] Feng H Q, Zhang Y H, Wu K M, *et al.* Nocturnal windborne migration of ground beetles, particularly *Pseudoophonus griseus* (Coleoptera: Carabidae), in China [ J ]. Agricultural and Forest Entomology, 2007, 9(2): 103—113.
- [ 23 ] Feng H Q, Zhao X C, Wu X F, *et al.* Autumn migration of *Mythimna separata* (Lepidoptera: Noctuidae) over the Bohai Sea in northern China [ J ]. Environmental Entomology, 2008, 37(3): 774—781.
- [ 24 ] Reynolds D R, Smith A D, Chapman J W. A radar study of emigratory flight and layer formation by insects at dawn over southern Britain [ J ]. Bulletin of Entomological Research, 2008, 98: 35—52.
- [ 25 ] Chapman J W, Reynolds D R, Mouritsen H, *et al.* Wind selection and drift compensation optimize migratory pathways in a high-flying moth [ J ]. Current Biology, 2008, 18: 514—518.
- [ 26 ] Chapman J W, Reynolds D R, Hill J K, *et al.* A seasonal switch in compass orientation in a high-flying migrant moth [ J ]. Current Biology, 2008, 18: 908—909.
- [ 27 ] Harman I T, Drake V A. Insect monitoring radar: analytical time-domain algorithm for retrieving trajectory and target parameters[ J ]. Computers and Electronics in Agriculture, 2004, 43: 23—41.
- [ 28 ] Drake V A, Wang H K, Harman I T. Insect monitoring radar: remote and network operation [ J ]. Computers and Electronics in Agriculture, 2002, 35: 77—94.
- [ 29 ] 翟保平. 追踪天使——雷达昆虫学 30 年[ J ]. 昆虫学报, 1999, 42(3): 315—326.