

追踪天使——雷达昆虫学 30 年

翟保平

(南京农业大学植保系, 农业部病虫监测与治理重点开放实验室, 南京 210095)

摘要 雷达昆虫学是一门新的学科分支。从它诞生起的 30 年来, 英、美、澳、中四国的观测研究已初步阐明了昆虫在迁飞过程中的成层、定向、集聚等行为现象及其时空分布, 揭示了大气结构和运动对昆虫迁飞的影响, 为深化人们对昆虫迁飞行为机制的认识提供了许多令人耳目一新的画面; 昆虫雷达技术也逐渐从研究走向实用, 已经实现了对迁飞性害虫的长期、自动和实时监测。在全国建立 VLR 网并与 GIS 相结合, 可望实现对我国重大虫灾的及时预警。

关键词 雷达昆虫学, 昆虫雷达, 昆虫迁飞, 灾变预警

雷达在二战期间应运而生。人们在早期的雷达观测实践中就发现, 荧屏上经常能见到一些既非军事目标, 也非大气回波的亮点, 即所谓的“晴空回波”(clear-air echo)。战后很长一段时间内, 人们一直不清楚这些点状回波究竟是什么东西, 便给它们起了个非常动听的名字: 天使(angels)。在人们此后几十年对天使们的苦苦追踪中, 一个新的学科分支——雷达昆虫学诞生了^[1~28](表 1)。

1 发展简史

要把雷达和昆虫联系起来, 大多数人难以置信。其实, 水和金属一样, 也是良好的反射体。如雨滴、云滴、冰粒、雪花及各种大气凝结核等都能向雷达接收机返回可分辨的回波能量。飞行动物体内含有大量水分, 同样也可以成为可分辨的目标。在二战期间, 英、美科学家就开始了雷达气象学的研究^[29], 战后又出现了雷达鸟类学^[30]。

基于同样的考虑, 1950 年, 在东非沙漠蝗治理组织(DLCOEA, 即后来的英国治蝗研究中心 ALRC)任职的英国昆虫学家 R. C. Rainey 博士提出用雷达观测沙漠蝗迁飞的设想。在他不懈地努力下, DLCOEA 于 1965 年正式立项^[6], 委托 D. G. Smith 博士设计建造一部监测沙漠蝗的机载雷达, 但终因条件不成熟而中途夭折。Rainey 并未灰心。当他听了 G. W. Schaefer 教授关于用雷达观测鸟类迁飞的报告后, 便说服 ALRC 发起新的冲击, 邀请 Schaefer 教授建造了世界上第一部专用昆虫雷达(3.2 cm 波长, X 频带), 于 1968 年 9~10 月间由 Schaefer 领衔在尼日尔进行了首次对昆虫迁飞的雷达观测, 并取得了空前的成功, 观测到大量的沙漠蝗夜间迁飞的新图景^[7~9]。昆虫雷达从此成为昆虫迁飞研究中一种无可替代的重要工具, Schaefer 也成为雷达昆虫学当之无愧的奠基人。此后, 他又开展了一系列开创性的工作: 机载昆虫雷达^[13]、带多普勒测风系统的空中取样装置^[14]等的设计制造和应用以及其他

遥感技术在雷达昆虫学中的开发应用^[31,32]。

表 1 雷达昆虫学发展过程中的大事记		
Table 1 The chronicle of events in the development of radar entomology		
年份 Year	事件 Events	文献 Ref.
1949	A. B. Crawford 首次证实雷达可以检测到昆虫	[1]
1954	英国皇家海军舰载雷达在波斯湾首次检测到空中蝗群	[2]
1962	印度气象学家用气象雷达观测了沙漠蝗群	[3, 4]
1965	美国 NASA 在多波长雷达试验中再次证实, 绝大多数晴空回波 (dot angels) 源于昆虫。 东非沙漠蝗中心发起并资助建造第一台专用昆虫雷达。	[5] [6]
1968	G. W. Schaefer 建成第一台专用昆虫雷达并运到撒哈拉, 与英国治蝗中心 (AL-RC, 即 NRI 的前身) 合作观测, 得到许多新发现, 建立了雷达观测昆虫迁飞的技术规范, 雷达昆虫学诞生	[7~9]
1969	在美国新泽西州用 USAE1C 军用雷达检测到了蚊群	[10]
1971	G. W. Schaefer 与 CSIRO 合作, 第一次在澳大利亚进行了雷达昆虫学研究实践	[8, 11]
1972	J. R. Riley 领导的英国 CORP (现为 NRI) 昆虫雷达组在沙特阿拉伯进行了沙漠蝗迁飞的野外观测	[12]
1975	G. W. Schaefer 在加拿大首次应用机载昆虫雷达观测柞蚕卷蛾迁飞 COPR 研制的旋动垂直波束雷达 (VLR) 在马里投入使用, 首次观测到个体昆虫的定向行为	[13, 14] [15]
1978	W. W. Wolf 领导的美国农业部雷达昆虫学项目组在亚利桑那州进行了首次野外观测 V. A. Drake 入主 CSIRO 昆虫雷达组, 开始了雷达昆虫学与边界层气象学的交叉研究	[16] [17]
1982	美国农业部昆虫雷达组在墨西哥湾首次使用船载昆虫雷达观测蛾类的越海迁飞	[18]
1983	英国 TDRI (现 NRI) 研制成功毫米波昆虫雷达, 并在菲律宾投入使用	[19]
1984	陈瑞鹿领导的研究组用“公主岭雷达”在山西应县观测了草地螟的迁飞, 揭开了中国雷达昆虫学研究的序幕	[20]
1985	雷达在美国首次应用于蜜蜂飞行的观测研究 谐波雷达首次应用于甲虫爬行的研究	[21] [22]
1986	多普勒雷达在美国首次应用于测量昆虫自然飞行的速度	[23]
1983~1986	英国洛桑试验站的 G. A. Bent 研制用于自动监测蚜虫迁飞的章动+旋动垂直波束雷达 (ZLC 制式的 VLR) 未果, TDRI 则在同期制成了监测中、大型昆虫的样机, 并于 1985 年在印度进行了观测试验	[24, 25]
1990	美国农业部 APRMU 的 VLR 首次成功应用于迁飞昆虫的长期 (连续一年)、自动监测	[26]
1991	NRI 与 CSIRO 合作, 首次应用 ZLC 制式的 VLR 在澳大利亚成功测量了飞行个体的体长、定向、位移方向和飞行速度	[27]
1995	NRI 研制成功观测昆虫飞行的谐波雷达及其微型天线, 并观测了蜜蜂的飞行行为	[28]

在 Schaefer 的首次观测成功之后, ALRC 于 1971 年扩大为海外害虫研究中心 (COPR, 现为自然资源研究所, NRI), 随即任命 J. R. Riley 博士组建一个面向发展中国家害虫迁飞研究的昆虫雷达组, 并建成一部 3.2 cm 波长、X 频带的昆虫雷达, 于 1972 春赴沙特阿拉伯进行了蝗虫迁飞观测^[12]。此后, Riley 的昆虫雷达组 (即现在的 NRIRU) 对昆虫回波的物理属性、目标种类的辨识、空中种群的迁飞行为、观测数据的定量分析和昆虫雷达新机型的研制等做了大量研究、革新和发明^[25]。70 年代中期, 他们首先研制出垂直波束雷达 (VLR) 并应用于空中种群定向行为的研究^[15]。80 年代, 他们首次将毫米波技术应用于昆虫迁飞研究, 建成了目前仍是世界上唯一的一部 Q 频带 (8.8 mm 波长) 昆虫雷达^[19]; 他们还研制了观测昆虫近地飞行的收发分置雷达和谐波雷达^[17,28], 又建成了全自动的第二代 VLR (ZLC 制式)^[27]。目前世界上正在应用的昆虫雷达的大多数机型均为他们首创, 他们在亚非发展中国家进行的雷达观测也取得了许多开创性成果^[25], 为雷达昆虫学的发展做出了卓越贡献。

1978 年是雷达昆虫学发展史上一个重要年份。这一年, V. A. Drake 和 W. W. Wolf 分别被任命负责澳大利亚科工组织 (CSIRO) 和美国农业部 (USDA) 的昆虫雷达组, 陈瑞鹿先生开始筹建中国的昆虫雷达。

CSIRO 的昆虫雷达早在 1971 年就由 Schaefer 帮助建成并投入使用, 但直到 Drake 入主该组后, 澳大利亚的雷达昆虫学才有了长足的进展, 陆续发表了一系列重要结果。Drake 在雷达观测和结果分析的定量化理论和方法上做出了重要贡献^[33,34], 最突出的成就是关于大气结构和运动对昆虫迁飞的影响, 尤其是中小尺度环流对昆虫迁飞行为的影响的研究^[35]。Drake 还与陈瑞鹿先生领导的公主岭雷达组就中国东北粘虫迁飞开展了长达 10 年的合作研究^[36], 为推动雷达昆虫学在中国的发展发挥了积极的作用。1991 年, 他离开 CSIRO 入澳大利亚新南威尔士大学物理学院 (ASOP) 的低空大气研究组 (LARG), 建造了两部 ZLC 制式的 VLR^[37], 与 LARG 拥有的多普勒 UHF 雷达 (测风廓线), 多普勒声达 (测风廓线) 和无线电声探空系统 (测温度廓线) 联合使用, 通过连续自动监测和气象要素的实时采集研究昆虫迁飞的生物气象学^[38]。

美国在 60 年代和 70 年代就有不少用气象雷达或军用雷达观测昆虫的报道, 如 Wolf 在 1972~1973 年就曾与美国海军合作, 进行过空中昆虫飞行的雷达观测^[39]。1978 年, USDA 的昆虫雷达建成并在 Wolf 领导下进行了第一次野外观测^[16]。1982 年又制成船载昆虫雷达监测飞越墨西哥湾迁入美国南部的 *Helicoverpa zea*^[18]。1987 年, Wolf 与英国 Cranfield 大学的 S. E. Hobb 合作建成一部机载昆虫雷达^[40], 用它成功地跟踪了一个蛾群全夜数百公里的迁飞过程^[41], 这在雷达昆虫学研究中还是唯一的一次。

1983~1985 年, 美国伊州组织的一个“害虫与天气”的多学科综合研究项目中, 使用了一部 S 频带 (10 cm 波长) 多普勒雷达和一部 X 频带的跟踪雷达研究了蚜虫的迁飞, 发现了蚜虫空中种群的定向行为^[42]。1985 年, USDA 又成立了由 Beerwinkle 率领的第二支雷达昆虫学研究组。Beerwinkle 建造了一部计算机自动控制的 VLR, 于 1990~1991 年进行了连续两年的自动观测 (这也是雷达昆虫学研究中的第一次), 获得了大量关于边界层内昆虫种群动态和飞行行为及其与风温场的关系等珍贵的研究资料^[26,43]。

1991 年, USDA 的两支雷达队伍合并扩建为害虫区域治理研究组 (APMRU)。Wolf 又建造一部跟踪雷达, 于 1994 年投入使用^[44]。1996 年 Wolf 退休后, Beerwinkle 率领 APMRU 继

续向世人展示着各种昆虫雷达新技术的组合应用,与英国的 NRIRU 在雷达昆虫学研究中各领风骚。

中国的雷达昆虫学研究起步较晚,且受制于经费不足与技术人才匮乏的双重困扰。公主岭雷达于 1982 年建成初试,经改进后于 1984 年正式投入使用,先后观测了草地螟^[20]、粘虫^[45]等蛾类的迁飞,取得了卓有成效的进展。南京农业大学曾与 NRIRU 合作,于 1988~1991 年观测了水稻迁飞性害虫(稻飞虱、稻纵卷叶螟等)的秋季回迁^[46~49]。目前,南京农业大学与农业部全国农技推广服务中心利用国家的专项资金,正在筹建一部 VLR 监测水稻害虫的迁飞;中国农科院植保所也新建一部 X 频带扫描雷达监测棉铃虫的迁飞,近期内可投入使用。

经过 30 年的发展,雷达昆虫学已日益成熟,逐步形成了一门新的学科分支,且逐渐从研究走向实用。感兴趣的读者可访问如下网址: The Radar Entomology Web Site (TREWS) (<http://www.adfa.oz.au/~vad/trews/>) 和 USDA-ARS-APMRU (<http://usda-apmrui.tamu.edu/>)。

2 技术进展

雷达的基本原理是根据无线电波从目标反射回来的能量来推断目标的位置。最常用于观测昆虫的雷达是脉冲雷达,即从天线发射足够能量、足够短的脉冲波束检测目标,且波长必须是厘米级的。但直到 60 年代,波长 10 cm (S 频带) 和 3cm (X 频带)、脉冲功率数 +kW、脉冲宽度不到 1 μ s 的雷达(主要是船用雷达)才大批生产,也正是这种雷达为 60 年代末期雷达昆虫学的诞生提供了物质和技术基础。另一类是调频连续波(FMCW)雷达,其距离分辨率很高(~ 2 km),可显示出大气结构的微尺度细节及在其内飞行的昆虫的动态;但这种雷达过于昂贵和复杂,文献报道的用 FMCW 雷达对昆虫的观测都是大气边界层研究的副产品^[39,50]。也有过用多普勒雷达观测昆虫的报道^[42,51,52],但其垂直分辨率和对目标的辨识能力都太差,故主要用于气象学研究。迄今为止的昆虫雷达都是脉冲雷达,主要有以下几种类型:

2.1 扫描雷达

将 3 cm 波长、X 频带船用雷达的水平天线改装成抛物面天线,使之产生一个可以不同仰角水平旋转的线性偏振的锥形波束,在发射功率为 20 kW、天线直径 1 m 时,可检测到 1~2 km 远处的空中个体昆虫,按距离和方位显示在平面显示器(PPI)上。目标的飞行高度可根据天线仰角的正弦与目标距离的乘积得到,飞行速度和方向直接从 PPI 上读出,观测期间的风温廓线可放小球和探空仪测得,Drake 曾详尽描述过扫描雷达的定量观测和分析方法^[34]。

扫描雷达的这种资料处理工作是相当费时费力的。若使其天线沿水平轴俯仰扫描,则可迅即得到飞行个体的垂直运动轨迹和密度廓线。Riley 的雷达组为此设计了俯仰天线,使其发射的扇形波束(水平宽 3.9°,垂直面宽 1.5°)在水平面上上下振荡(60°周期/3s),产生常规的距-高扫描(Range Height Indicator, RHI),故称 RHI 雷达。1978 年,他们在马里用此雷达非常清晰地记录了起飞昆虫形成的虫层^[25]。之后,他们又研制出可俯仰 180°的 RHI 雷达天线系统,在肯尼亚用于观测非洲粘虫从羽化场所的起飞^[53]。

2.2 垂直波束雷达 (VLR)

扫描雷达有两个重要缺陷。一是对目标昆虫种类的辨识能力不高, 二是操作和观测资料的处理都非常费时费力, 故无法应用于长期监测。为此, Riley 的雷达组研制了一部具有旋动偏振的 VLR, 于 1975 和 1978 年在马里的观测中成功地检测出迁飞个体的定向, 但提取目标昆虫的“体型因子”的努力未果。不过, 这部 VLR 可产生高质量的目标昆虫的翅频记录, 且能提供迁飞种群定向分布的微尺度细节^[15]。80 年代末, 美国的 Beerwinkle 移植了这种旋动偏振的设计思想, 建成了电脑控制的全自动 VLR^[26]。

旋动偏振的 VLR 投入使用后, Schaefer 又提出, 可采用跟踪雷达所用的章动原理来改进 VLR 的性能。英国洛桑试验站的 Bent 博士进一步发展了 Schaefer 的设想, 于 1984 年提出了 ZLC (Zenith-pointing Linearly-polarised Conical-scan) 制式^[24], 并通过室内模拟试验表明, 只要使 VLR 天线的旋动馈电稍作偏转, 即可很方便地将旋动和章动结合起来, 从而可测得飞行个体的速度、方向和定向, 以及与体型 (RCS) 有关的两个参数。但由于 Bent 的目的是应用 VLR 检测蚜虫, 目标个体太小而使其技术要求特别高, 他的信号分析程序在处理野外实测数据时没能成功, 其样机最终也未达到可操作的水平。然而, Bent 的工作使 NRIRU 深受启发。他们在 Bent 的基础上设计了信号分析的新算法, 并进一步改进了硬件系统, 于 1985 年制成了观测中、大型昆虫的第二代 VLR 样机, 并于 1985 年和 1986 年在印度、1990 年在澳大利亚进行试运行, 成功地测得了目标昆虫的飞行速度、方向和定向, 以及与体型 (大小和形状) 有关的 3 个 RCS 参数^[27]。1993 和 1994 年在毛里塔尼亚进行了第一次正式观测, 1995 年 7~9 月又在英国本土进行了连续 3 个月的长期监测试验^[54]。结果表明, 该雷达不仅目标辨识能力有所提高, 而且整机运行和数据分析全部实现计算机控制, 观测费用也大大降低, 从而使迁飞性害虫的长期自动监测成为可能。

Drake 转到 ASOP 后引入该项技术, 建造了两部 ZLC 制式的 VLR, 用于澳洲蝗虫和棉铃虫的长期监测^[37], 并于 1996 年 1~7 月携至美国与 APMRU 合作研究 *H. zea* 的迁飞。美国的大气生物学联盟 (Alliance for Aerobiology Research, AFAR) 与美国国家气象局的 NEXRAD 多普勒天气雷达网合作, 正在筹建 VLR 网以实现全美低层大气 (2 km 以下) 中多种生物的生物流量长期监测。我国的 VLR 也在筹建之中。

与扫描雷达比较, VLR 的不足之处是取样空间太小 (波束直径 30 m), 只能检测飞越雷达正上方的个体, 而且灵敏度低, 只在空中昆虫密度较高时才能得到有关参数。

2.3 机载雷达

虽然没有任何其它方法能象雷达那样扫描如此巨大的空间 (数千万立方米), 但就昆虫的迁飞距离而言, 这还仅仅是一个点。为此, Schaefer 将旋动偏振的 VLR 装在飞机上, 其波束下指, 可测得飞机航线下方飞行昆虫的空间分布和从地面到飞机之间各规定高度上的定向方位以及集聚的持续时间, 还可识别可能的降落带等, 因此适于大范围内监测飞行的昆虫^[13]。同时配合使用机载多普勒测风系统, 可得有关大气运动对昆虫迁飞行为的影响的信息。Schaefer 的机载雷达于 1975~1976 年在加拿大对枫色卷蛾 *Choristoneura fumiferana* 迁飞的大规模综合研究中首次投入使用^[14]。USDA 也装备了一部机载雷达, 于 1987 年投入使用^[40]。

机载雷达虽功能强大,但其高昂的操作和维修费用使其应用受到极大的限制。此外,机载雷达无法测定飞行个体的轨迹和速度。

2.4 毫米波雷达

X 频带雷达只适于观测体长在 1 cm 以上的昆虫,对小型昆虫则只能在很近的距离看到,如飞虱和叶蝉,最远只能达 200~300 m。在一般的野外条件下,近地空间往往被地物回波所覆盖,所以用常规雷达无法观测小型昆虫的迁飞。因缩短波长可大大增加小型目标的雷达截面(RCS),利用毫米波技术可望解决这个问题。NRIRU 设计建造了一部波长 8.8 mm 的 Q 频带扫描雷达,可检测到 1 km 高处的个体飞虱。用这部雷达 1984 年在菲律宾^[19]、1988~1991 在我国成功地观测了稻飞虱的迁飞^[47~49]。

2.5 谐波雷达

低空扩散飞行的昆虫(包括所有的非迁飞性种类和到达近地层的迁飞性种类)主要集中在作物冠层以上至几十米以下的高度层,但这里却是常规扫描雷达的盲区。因常规雷达信号的收发用的是同一天线,故在这样短的距离内,到达接收机的信号被发射机发射的信号所抵消;同时,强大的地物回波也淹没了来自近地空间的昆虫回波。为了观测低空飞行的昆虫, NRIRU 将接收天线和发射天线分置,同时又引入谐波技术以解决地物回波问题。其原理是将目标用一很小的电子装置标定,该装置吸收雷达波束中的能量并将输入信号调制为谐波后再发射回去;接收天线即可屏蔽地物回波而从其中将该谐波检测出来。由于目标标定装置不需自带电源,故可做得很小。基于这一原理, NRIRU 于 1994 年建成了世界上第一部谐波昆虫雷达:在 X 频带扫描雷达的天线(3.2 cm 波长, 1.5 m 直径,发射功率 25 kW,脉冲宽度 0.1 μ s)上方增设一个谐波信号的接收天线(1.6 cm 波长, 0.7 m 直径),二者同时以 20 r/min 的转速旋转,可检测 700 m 高度以下的目标昆虫。在同年的首次野外观测试验中,目标标定装置是一个总重不到 3 mg、高度 16 mm 的微型天线。将其粘在蜜蜂的背部,成功地跟踪了蜜蜂在蜂巢与蜜源之间的飞行^[28]。目前,他们正在研制适于监测采采蝇的、重量低于 1 mg 的微型天线。这种雷达也可应用于鳞翅目成虫的飞行行为研究,他们在瑞典对黄地老虎 *Agrotis segetum* 的观测已获初步成功^[25]。

2.6 跟踪雷达

这种雷达每次选定一个目标,通过天线波束的章动保持天线指向该目标,连续跟踪其运行轨迹。60 年代,美国的 Glover 等曾用一部大功率的 10.7 cm 跟踪雷达研究了从飞机上投下的供试蛾的飞行^[55],但其目的是为了证实个体昆虫可以产生所谓的“angels”。唯有 APMRU 的 3.2 cm 跟踪雷达在真正用于昆虫学研究,他们曾跟踪定容气球测定不同高度的风向和风速以确定迁飞种群的运行轨迹^[44]。

3 研究进展

昆虫的迁飞过程过去一直作为迁飞研究中的“黑箱”处理。30 年来,英、澳、美、中的雷达昆虫学家利用各种类型的昆虫雷达在许多地区开展了多次不同规模的观测研究,揭示了

昆虫在迁飞过程中的各种行为特征及其与大气结构和运动的关系，而这些正是用其它研究手段所无法得到的。翟保平等对此有过系统综述^[56-58]，这里简述如下。

3.1 起飞与降落

大多数迁飞性昆虫都是夜行性的，其起飞始于日落，于昏影终时达到起飞峰期并很快终止。白天迁飞的昆虫则在晨光始时开始起飞，日出后终止。在一般天气条件下，垂直气流对昆虫的起降没有决定性影响或影响极微，主动起降正是迁飞性种类典型的行为特征。锋面天气及强降水过程使迁飞种群的迫降并非降落的必要条件。起飞后的个体主动爬升到巡航高度，其爬升率可达 $0.4 \text{ m/s} \sim 0.5 \text{ m/s}$ 。即使象飞虱、蚜虫那样的微小个体，其爬升率也可以达到 0.2 m/s 左右。整个起飞过程在 PPI 上表现为回波的烟流状分布 (plume)。

迄今为止，还没有直接观测到迁飞种群完整的降落过程。这是因为迁飞种群的降落不象起飞那样发生在一定的时间且规模很大，降落地点也不确定，所以很难用雷达直接观测到成批的、明显的降落过程，只能看到空中种群的密度随时间的推移而渐降，其递减率又因地面虫源分布和气象条件的不同而有所变化。故目前仅有的几次关于降落的记载都是间接证据。

3.2 成层与边界层顶现象

昆虫迁飞过程中频繁出现的现象之一是持续数小时甚至整个夜间的空中虫层（层厚 $50 \sim 450 \text{ m}$ ），而虫层出现的高度恰在大气边界层顶（或附近），这里的低空逆温和低空急流（或极值风速带）为迁飞种群提供了最适宜的运行环境。迁飞种群通过对风温场的主动选择实现对迁飞高度的持续控制而在边界层顶集聚成层，此称边界层顶现象。

一些小型昆虫（如飞虱）的成层高度往往不在温度廓线的最暖部分，但层顶与其飞翔适温下限所在的高度一致，并随着夜间温度的不断降低而逐渐下移。经常观测到蛾类等大、中型昆虫层与飞虱类小型昆虫层同时出现在不同高度上，反映出它们对风温场不同的选择方式。在整个迁飞过程中，空中种群绝非处于“休止”态，也不仅仅在滑翔，而是一直在振翅运行，且对运行高度上的温度变化有主动反应能力，其运行速度 (ground speed) 是风速与其自身飞行速度 (air speed) 的矢量和。

3.3 定向

迁飞种群另一个普遍的、显著的行为特征是共同定向，即空中虫群保持一致的飞行方向。不仅大型昆虫有定向，小型昆虫（如蚜虫）也如此。它们或顺风定向（定向方位与风向一致），或侧风定向（定向方位与风向呈一定夹角），或不论风向如何都朝向某一固定的地理方位定向。尚未发现稻飞虱和稻纵卷叶螟有定向行为。目前对迁飞昆虫的定向机制还不清楚。但在风力不太大时，定向对飞行速度较快的大型昆虫的迁飞轨迹有显著的影响，其结果是迁飞种群对具有生态意义的迁飞方向一致的非随机性选择。虽然小型昆虫（尤其象蚜虫）的定向并不会对运行轨迹有什么影响，但这种行为却清楚地表明，即使是小型昆虫，也绝不象尘粒或孢子那样在随风飘荡，而是主动乘风运行。

3.4 集聚

迁飞种群起飞时的密度一般较高，但在运行过程中却迅速扩散 (dissipation，不同于地面

种群的 dispersion), 密度随迁出距离增加而逐渐减少。造成这种现象的原因, 一是昆虫自身的飞行行为: 空中种群中个体的定向不尽一致, 飞行速度和个体间持续飞行的能力也不一样, 使虫群的分布越来越分散; 同时在迁飞过程中不断有一些个体终止飞行而降落。二是大气扩散的物理过程: 即风场中的湍流扩散作用和风向风速 随高度的分布 (埃克曼螺线) 使空中种群趋于扩散。显然, 如果不存在任何使迁飞个体重新集聚的机制, 上述各种因素的联合作用将使迁飞种群的密度随迁出距离的增加而极度稀释, 因而不可能达到大发生时的虫量水平。

成层就是迁飞种群主动响应特定大气结构而形成的一种集聚, 即层状集聚。而这里所谓的集聚, 指大气中出现各种尺度的大气辐合时, 尤其是中小尺度环流 (如海风锋、雨暴外流等不同类型的重力波及地形涡旋等) 中强烈的水平辐合, 使得迁飞种群在不到 1h 内密度增加一个数量级而出现的大规模的集聚, 形成半径 1~2 km 的虫群。这些中小尺度环流的前端往往具有强烈的涡旋运动 (转子气流), 将大气中的迁飞昆虫扫成“大堆”而集聚起来。此外, 迁飞昆虫自身的行为也使风辐合的集聚效应增大许多, 这表现为昆虫在水平辐合产生的上升气流中对升力的抵抗, 即通过主动下落或停止振翅而重新降到较暖的气流中, 以避免升入温度低于其飞翔低温阈限的高度。显然, 如果没有这种抵抗, 风辐合处的昆虫密度就不会增加, 尤其在气流直线上升, 不存在使昆虫返回辐合带的环流 (如转子气流) 时更是如此。这种集聚使空中虫群的密度达到了足以在某种条件下引起局地暴发的程度, 从而对迁飞种群的空中动态和地面分布有着重要的行为学和生态学意义。但一般而言, 只有与降雨相关的集聚才可能造成短时间内的集中降落而引发害虫暴发。因为一些无雨的辐合虽能使迁飞种群迅速集聚, 但在这些辐合系统过境或消失后, 集聚起来的虫群还会重新扩散。而且, 还需考虑集聚的虫群降落后是否会再迁出, 即过境飞行。

尽管对这种集聚和降落的机制尚不完全清楚, FAO 已建立了利用卫星监测热带辐合带 (ITCZ) 的移动预报沙漠蝗迁入区的预警系统^[59], NRI 也根据卫星图片确定对流风暴的位置预报非洲粘虫可能暴发的地区^[60]。人们还设想对沙漠蝗实行“空对空”防治^[61], 不过还有许多理论问题和技术细节尚待解决和完善。其中最主要的问题是, 首先要能预测和确定辐合带出现与集聚发生的时空频率和强度, 并在技术上确保在辐合带存在的寿命内搜索到其位置所在。其次, 要能确定被集聚的昆虫确实是目标害虫。目前, 虽然形成集聚的各种大气现象的物理意义很清楚, 但实际观测却比较困难; 对目标种类的鉴别至今仍是雷达昆虫学中一大难题。

总之, 从起飞、扩散、集聚、降落到定殖, 作为一个连续的生态过程, 最终起决定作用的是定殖, 即迁飞种群能否在新的栖地形成大发生种群。这里, 迁飞种群的降落机制和再起飞机制是地面大发生种群最终形成的关键所在。

4 应用前景

我国农作物的几种主要大害虫, 如稻飞虱 (*Nilaparvata lugens*, *Sogatella furcifera*)、稻纵卷叶螟 (*Cnaphalocrocis medinalis*)、粘虫 (*Mythimna separata*)、草地螟 (*Loxostege sticticalis*) 等, 都具有大区域迁飞性、暴发性和毁灭性的特点。迁飞性害虫的突发性给预测预报带来了很大的难度, 在防治决策上往往处于被动地位, 每每造成惨重损失。因其行为上的特殊性 (飞行高度远在人目力之外), 如果没有专门的设备就无法对其迁飞过程进行直接

监测和定量分析; 因此, 采用有效的监测手段和技术, 对迁飞性害虫进行长期、系统的监测, 是灾变预警的首要条件。昆虫雷达就是一种无可替代的强有力的监测工具。

30 年来, 昆虫雷达已从纯研究工具发展为长期监测的实用设备。ZLC 制式的问世使雷达昆虫学的发展方向出现重大转折: 往常对昆虫迁出活动的短期、集中的观测研究将被对迁入事件的长期监测所取代, 全自动运行、雷达信号的即时分析与处理使得迁飞性害虫的灾变预警可望实现。我国近期内将有一部 VLR 和一部扫描雷达投入使用, 条件成熟时还将建立全国 VLR 监测网。应用 VLR, 可对我国东部迁飞性害虫进行逐日连续观测, 确定稻飞虱(褐飞虱和白背飞虱)和稻纵卷叶螟的行为参数及空中种群参数; 同时利用农业部全国农业技术推广服务中心的病虫情报网络 PestNet 将雷达实时信号从观测场区远程传递到国家病虫测报中心, 该中心再综合高空和地面风温场、作物信息及相关地理信息, 用 GIS 对全国东半部稻区逐日虫情做大区域的空间分析和三维轨迹分析; 并与雷达实测数据相结合, 计算迁出区和迁入区的动态分布及其影响因子, 阐明特定天气系统与不同立地条件下空中迁飞种群的降落分布规律, 据此得出主降区和迁入量及迁入种群的发育期距等灾变预警参数。这样, 将 VLR 的实时监测与全国地面虫情的综合分析结合起来, 即可建成以 GIS 为平台的迁飞性害虫灾变预警系统。用 VLR 和扫描雷达联合观测, 则可为昆虫迁飞行为机制研究提供更多有价值的信息。其中, 降落机制和再迁飞机制将是今后研究中亟需突破的重点。

参 考 文 献 (References)

- 1 Crawford A B. Radar reflections in the lower atmosphere. Proc. I. R. E., 1949, 37: 404~405
- 2 Rainey R C. Observation of desert locust swarms by radar. Nature, 1955, 175: 77
- 3 Ramana-Murty B V, Roy A K, Biswas K R *et al.* Observations on flying locusts by radar. J. Sci. and Industrial Res., 1964, 23: 289~296
- 4 Mazumdar S, Bhaskara N S, Gupta G R. Radar and synoptic study of locust swarms over Delhi. Tech. Notes World Met. Org., 1965, 69: 162~187
- 5 Glover K M, Hardy K R. Dot angels: insects and birds. In: Proc. 12 th Conf. on Radar Meteorology, Boston: Am. Met. Soc., 1966, 264~268
- 6 Taylor D. Radar in desert locust survey and control. DLCOEA Annual Report, 1966, 3: 54~60
- 7 Schaefer G W. Radar studies of locust, moth and butterfly migration in the Sahara. Proc. Roy. Ent. Soc. Lond., 1969, C34: 39~40
- 8 Schaefer G W. Radar observations of insect flight. In: Rainey R C (ed.). Insect Flight. Oxford: Blackwell Scientific, 1976, 157~197
- 9 Roffey J. Radar studies on the desert locust, Niger, September-October 1968. Anti-Locust Research Centre Occasional Report, 1969, No. 17
- 10 Frost E L. Tracking insect swarms by radar: a feasibility study. Proc. New Jersey Mosquito Extermination Association, 1970, 57: 38~42
- 11 Roffey J. Radar studies of insects. Pest. Artic. News Summs., 1972, 18: 303~309
- 12 Riley J R. Radar observations of individual desert locusts (*Schistocerca gregaria* (Forsk.) (Orthoptera: Locustidae)). Bull. Ent. Res., 1974, 64: 19~32
- 13 Schaefer G W. An airborne radar technique for the investigation and control of migrating pest insects. Phil. Trans. R. Soc. Lond., 1979, B287: 459~465
- 14 Greenbank D O, Schaefer G W, Rainey R C. Spruce budworm (Lepidoptera: Tortricidae) moth flight and dispersal: new understanding from canopy observations, radar, and aircraft. Mem. Ent. Soc. Canada, 1980, No. 110, 49

- 15 Reynolds D R, Riley J R. Radar observations of concentrations of insects above a river in Mali, West Africa. *Ecol. Ent.*, 1979, 4: 161~174
- 16 Wolf W W. Entomological radar studies in the United States. In: Rabb R L, Kennedy G G (eds). *Movement of Highly Mobile Insects*. N. Carolina: University Graphics, 1979, 263~266
- 17 Reynolds D R. Twenty years of radar entomology. *Antenna*, 1988, 12: 44~49
- 18 Wolf W W, Sparks A N, Pair S D *et al.* Radar observations and collections of insects in the Gulf of Mexico. In: Dantharayan W (ED.). *Insect Flight: Dispersal and Migration*. Berlin: Springer-Verlag, 1986, 221~234
- 19 Riley J R, Reynolds D R, Farrow R A. The migration of *Nilaparvata lugens* (Stal) (Delphacidae) and other Hemiptera associated with rice during the dry season in the Philippines: a study using radar, visual observations, aerial netting and ground trapping. *Bull. Ent. Res.*, 1987, 77: 145~169
- 20 陈瑞鹿, 暴祥致, 王素云等. 草地螟迁飞的雷达观测. *植物保护学报*, 1992, 19 (2): 171~174
- 21 Loper G M, Wolf W W, Taylor O R. Detection and monitoring of honeybee drone congregation areas by radar. *Apidologie*, 1987, 18: 163~172
- 22 Mascanzoni D, Wallin H. The harmonic radar: a new method of tracing insects in the field. *Ecol. Ent.*, 1986, 11: 387~390
- 23 Wolf W W, Loper G M, Grenaker G. Doppler radar for detecting insects. In: *Proc. 1987 Summer Meeting Amer. Soc. of Agric. Engineers*. MI: A. S. A. E., 1987, 30~33
- 24 Bent G A. Developments in detection of airborne aphids with radar. In: *Proc. 1984 British Crop Protection Conference-Pests and Diseases*. Croydon: BCPC, 1984, 665~674
- 25 Reynolds D R, Riley J R. Flight behaviour and migration of insect pests: radar studies in developing countries. *NRI Bulletin*, 1997, No. 71. Chatham Maritime: NRI, 114pp.
- 26 Beerwinkle K R, Witz J A, Schleider P G. An automated, vertical looking, X-band radar system for continuously monitoring aerial insect activity. *Trans. Amer. Soc. Agric. Engineers*, 1993, 36: 965~970
- 27 Riley J R, Reynolds D R. Radar monitoring of locusts and other migratory insects. In: Cartwright A (ed.), *World Agriculture 1993*, London: Sterling Publications, 1993, 51~53
- 28 Riley J R, Smith A D, Reynolds D R *et al.* Tracking bees with harmonic radar. *Nature*, 1996, 379: 29~30
- 29 Battan L J. *Radar Meteorology*. Chicago: Uni. Chicago Press. 1959
- 30 Eastwood E. *Radar Ornithology*. London: Methuen. 1967
- 31 Schaefer G W, Bent G A. An infra-red remote sensing system for the active detection and automatic determination of insect flight trajectories (IRADIT). *Bull. Ent. Res.*, 1984, 74: 261~278
- 32 Schaefer G W, Bent G A, Allsopp K. Radar and opto-electronic measurements of the effectiveness of Rothamsted Insect Survey suction traps. *Bull. ent. Res.*, 1985 75: 701~715
- 33 Drake V A. Target density estimation in radar biology. *J. Theor. Biol.*, 1981, 90: 545~571
- 34 Drake V A. Quantitative observation and analysis procedures for a manually operated entomological radar. *CSIRO Div. Ent. Tech. Paper*, 1981, No. 19. 41
- 35 Drake V A, Farrow R A. The influence of atmospheric structure and motions on insect migration. *Ann. Rev. Ent.*, 1988, 33: 183~210
- 36 Chen R L, Bao X Z, Drake V A *et al.* Radar observations of the spring migration into northeastern China of the oriental armyworm moth, *Mythimna separata*, and other insects. *Ecol. Ent.*, 1989, 14: 149~162
- 37 Drake V A. Insect-monitoring radar: a new source of information for migration research and operational pest monitoring. In: Corey S A, Dall D J, Milen W M (eds). *Pest Control and Sustainable Agriculture*. Melbourne: CSIRO Publications, 1993, 452~455
- 38 Drake V A, Harman I T, Bourne I A *et al.* Simultaneous entomological and atmospheric profiling: A novel technique for studying the biometeorology of insect migration. In: *Proc. 21 st Conf. Agric. For. Meteorol. & 11th Conf. Biometeorol. and Aerobiol.*, Boston: Am. Met. Soc., 1994, 444~447

- 39 Richter J H, Jensen D R, Noonkester V R *et al.* Remote radar sensing: atmospheric structure and insects. *Science*, 1973, 180: 1176~1178
- 40 Hobbs S E, Wolf W W. An airborne radar for studying insect migration. *Bull. Ent. Res.*, 1989, 79: 693~704
- 41 Wolf W W, Westbrook J K, Raulston J *et al.* Recent airborne radar observations of migrant pests in the United States. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, 1990, B328: 619~630
- 42 Hendrie L K, Irwin M E, Liquido N J *et al.* Conceptual approach to modeling aphid migration. In: MacKenzie D R, Barfield C S, Kennedy G C *et al.* (eds). *The Movement and Dispersal of Agriculturally Important Biotic Agents*. Louisiana: Claiborne's Publ. Div., 1985, 541~582
- 43 Beerwinkle K R, Lopez J D, Schleider P G *et al.* Annual patterns of aerial insect densities at altitudes from 500 to 2400 metres in east-central Texas indicated by continuously-operating vertically-oriented radar. *Southwest. Ent.*, 1995, Suppl. (18): 63~79
- 44 Westbrook J K, Eyster R S, Wolf W W *et al.* Migration pathways of corn earworm (Lepidoptera: Noctuidae) indicated by tetraon trajectories. *Agric. Forest Met.*, 1995, 73: 67~87
- 45 Chen R L, Sun Y J, Wang S Y *et al.* Migration of the oriental armyworm *Mythimna separata* in East Asia in relation to weather and climate. I. Northeastern China. In: Drake V A, Gatehouse A G (ed). *Insect Migration: Tracking Resources through Space and Time*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1995, 93~104
- 46 Riley J R. A millimetric radar to study the flight of small insects. *ECEJ.*, 1992, 4: 43~48
- 47 Riley J R, Cheng X N, Zhang X X *et al.* The long-distance migration of *Nilaparvata lugens* (Stål) (Delphacidae) in China: radar observations of mass return flight in autumn. *Ecol. Ent.*, 1991, 16: 471~489
- 48 Riley J R, Reynolds D R, Smith A D *et al.* Observations on the autumn migration of *Nilaparvata lugens* (Homoptera: Delphacidae) and other pests in east central China. *Bull. Ent. Res.*, 1994, 84: 389~402
- 49 Riley J R, Reynolds D R, Smith A D *et al.* Observations of the autumn migration of the rice leaf roller *Cnaphalocrocis medinalis* (Lepidoptera: Pyralidae) and other moths in eastern China. *Bull. Ent. Res.*, 1995, 85: 397~414
- 50 Gossard E E, Chadwick R B. Studies of insects by high resolution radar. In: Proc. 14 th Conf. on Agric. and Forest Met. and 4 th Conf. on Biomet., Boston: American Meteorol. Society, 1979, 268~271
- 51 Irwin M E, Thresh J M. Long-range aerial dispersal of cereal aphids as virus vectors in North America. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, 1988, B321: 421~446
- 52 Achtemeier G L. Grasshopper response to rapid vertical displacements within a "clear air" boundary layer as observed by Doppler radar. *Environ. Ent.*, 1992, 21: 921~938
- 53 Riley J R, Reynolds D R, Farnery M J. Observations of the flight behaviour of the armyworm moth, *Spodoptera exempta*, at an emergence site using radar and infra-red optical techniques. *Ecol. Ent.*, 1983, 8: 395~418
- 54 Riley J R, Reynolds D R. Vertical-looking radar as a means to improve forecasting and control of desert locusts. In: Krall S, Peveling R, Diallo B D (eds). *New Strategies in Locust Control*. Basel: Birkhauser Verlag, 1997, 47~54
- 55 Glover K M, Hardy K R, Konrad T G *et al.* Radar observations of insects in free flight. *Science*, 1966, 154: 967~972
- 56 翟保平, 张孝羲. 迁飞过程中昆虫的行为. *应用生态学报*, 1993, 4 (4): 440~446
- 57 翟保平, 张孝羲. 迁飞过程中昆虫的行为: 对风温场的适应与选择. *生态学报*, 1993, 13 (4): 356~363
- 58 翟保平, 张孝羲, 程週年. 昆虫迁飞行为的参数化. I 行为分析. *生态学报*, 1997, 17: (1): 7~17
- 59 Tucker C J, Hiekkema J U, Roffey J. The potential of satellite remote sensing of ecological conditions for survey and forecasting desert locust activity. *Int. J. Remote Sensing*, 1985, 6: 127~138
- 60 Tucker M R. Satellite-derived rainstorm distribution: an aid to forecasting African armyworm outbreaks. *Weather*, 1997, 52: 204~212
- 61 Riley J R, Reynolds D R. Nocturnal grasshopper migration in West Africa: transport and concentration by the wind, and implications for air-to-air control. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* 1990, B328: 655~672

TRACKING ANGELS: 30 YEARS OF RADAR ENTOMOLOGY

Zhai Baoping

(Department of Plant Protection, Nanjing Agricultural University; The Key Laboratory of Pest
Monitoring and Management of Chinese Ministry of Agriculture, Nanjing 210095)

Abstract Radar entomology was born as a new discipline in 1968. Comprehensive and intensive studies have been performed in UK, USA, Australia and China ever since. Radar entomologists have discovered many new phenomena in process of insect migration (e. g. layering, orientation, concentration etc.) and revealed the influence of atmospheric structure and motions on them. These data would undoubtedly deepen our understanding on behaviour mechanism of insect migration. The technique's utility for insect migration research by radar has clearly been established and is approaching practical and operational applications. It seems that the fully automatic, season-long and real time monitoring will be feasible with the development of the vertical-looking radar (VLR). Developing a VLR network in combination with GIS technique in China would produce an operational surveillance system for migratory pest outbreaks.

Key words radar entomology, entomological radar, insect migration, outbreak surveillance