

北京多普勒天气雷达上的昆虫回波分析*

焦热光^{1, 4, 5**} 张 智^{2, 3**} 石广玉¹ 张云慧^{2***}

(1. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029; 2. 中国农业科学院植物保护研究所, 植物病虫害生物学国家重点实验室, 北京 100193; 3. 北京市植物保护站, 北京 100029; 4. 京津冀环境气象预报预警中心, 北京 100089; 5. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要 【目的】为了解北京多普勒天气雷达上的昆虫回波信息, 探索其在迁飞害虫监测预警中的应用。【方法】选取北京南郊观象台新一代天气雷达 CINRAD-SA 积累的晴空回波数据和风廓线雷达提供的风速风向数据, 基于有关软件分析了昆虫回波的特点, 讨论了降水等其他因素对昆虫迁飞的影响。【结果】新一代天气雷达可以探测到空中迁飞昆虫引发的后向散射回波, 晴空回波日节律符合夜行性昆虫的朦影起飞和日出降落的行为特点, 晴空回波出现的时期是 3 月至 11 月, 中间有 2 个高峰期; 晴空回波数量与风向关系密切, 当天气系统合适时, 晴空回波会出现成层和共同定向现象; 此外, 降水会中断昆虫迁飞。【结论】北京多普勒天气雷达可以探测昆虫迁飞, 在迁飞性害虫监测预警及其综合防控工作中具有重大的潜在应用价值, 今后农业部门在优先建立昆虫雷达网络的同时, 应加强与气象部门合作, 发挥天气雷达的补充作用, 共同提高迁飞性害虫的监测预警水平。

关键词 天气雷达, 晴空回波, 昆虫迁飞, 昆虫雷达

Analysis of the echoes of migrating insects detected by Beijing Doppler weather radar

JIAO Re-Guang^{1, 4, 5**} ZHANG Zhi^{2, 3**} SHI Guang-Yu¹ ZHANG Yun-Hui^{2***}

(1. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. State Key Laboratory for Biology of Plant Disease and Insect Pests, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China; 3. Beijing Plant Protection Station, Beijing 100029, China; 4. Beijing-Tianjin-Hebei Environmental Meteorological Forecasting and Warning Center, Beijing 100089, China; 5. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract 【Objectives】To determine the feasibility of using Beijing Doppler weather radar to observe migratory insect pests. 【Methods】the characteristics of clear air echoes and related factors were assessed from Beijing CINRAD-SA Doppler radar data and Wind profiler radar data with the related program in computer. 【Results】Beijing CINRAD-SA Doppler radar can detect clear air echoes caused by migratory insects. The number of clear air echoes detected accorded with the behavioral rhythm of nocturnal insects; taking off in dawn and landing sunrise. Clear air echoes of migratory insects appeared from March to November. There were 2 peaks during this period. The magnitude of echoes were closely related to wind direction. When the weather system was appropriate, layer and collective orientation behaviors were apparent on Beijing CINRAD-SA Doppler radar. Rain can interrupt insect migration. 【Conclusion】Beijing CINRAD-SA Doppler radar is of great potential in observing insect migration. To provide better forecasting information of migratory insect pests, agricultural departments should develop an entomological radar network in future. In additional, such networks can be augmented by weather radar systems.

Key words Doppler weather radar, clear air echo, migrating insects, entomological radar

*资助项目 Supported projects : 国家自然科学基金项目 (31571998); 北京市科技创新驱动发展投入项目 (PXM2016_036203_000049); 国家自然科学基金 (41475136)

**共同第一作者 Co-first authors, E-mail: jiaorg@bjmb.gov.cn; zhangzhicas@126.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: yhzhang@ippcaas.cn

收稿日期 Received: 2017-11-03, 接受日期 Accepted: 2017-12-27

中国是农业大国,气象灾害和病虫害发生频繁。研究表明,许多重大农业害虫都具有远距离迁飞习性。生产中提前准确预报迁飞性害虫的迁飞时间和路径对其综合防控具有非常重要的意义(翟保平,1999)。我国研究迁飞性害虫的历史比较悠久,20世纪60年代,李光博先生开创性地利用标记、释放和回收的方法,证实了黏虫 *Mythimna separata* (Walker) 在我国的迁移为害规律并提出了虫源地治理策略(李光博等,1964)。20世纪80年代起,我国开始建造昆虫雷达观测迁飞昆虫的空中参数,先后对草地螟 *Loxostege sticticalis* (L.)、黏虫、棉铃虫 *Helicoverpa armigera* (Hübner) 等害虫的迁飞行为进行了研究(陈瑞鹿等,1992;程登发等,2005;Feng et al., 2009)。2000年左右,程登发研究员提出利用“RGB三色图”计算监测目标飞行方向和飞行速度的方法,并开发了扫描昆虫雷达的数据采集与分析系统,初步实现了扫描昆虫雷达的数据采集与分析自动化(Cheng et al., 2002;程登发等,2005)。进入21世纪,中国又陆续建造了多部不同体制的昆虫雷达,但总体上已建制的昆虫雷达主要是服务于科学研究,未形成业务运行的昆虫雷达监测网(张智等,2012;张智等,2017a, 2017b)。

天气雷达很早就被证实可以观测到昆虫回波(Crawford, 1949;张智,2013)。随着研究的逐步开展,天气雷达在害虫监测预警中的应用已经初见成效,例如英国成功利用3.2 mm和8.6 mm波段的测云雷达观察了昆虫迁飞(Wood et al., 2009),芬兰成功利用气象雷达对禾谷缢管蚜 *Rhopalosiphum padi* (L.) 和小菜蛾 *Plutella xylostella* (L.) 开展了监测预警(Leskinen et al., 2011)。近年来,天气雷达在天气预报的应用更加广泛。中国为了加强局地降水和强对流天气的监测预报,中国气象局参照美国WSR-88D多普勒天气雷达标准,从1998年起,逐步构建了新一代天气雷达网。新一代天气雷达具有灵敏度高,动态范围大,能自动标校等特点。截至2011年6月底,我国已完成156部新一代天气雷达的部署,并投入业务运行。新一代天气雷达网每

6 min完成1次体扫,全天24 h不间断运行,探测范围基本覆盖全国。

2006年,北京市南郊观象台也安装了1部CINRAD-SA新一代多普勒天气雷达,运行至今已积累大量高质量探测数据。本文以北京南郊多普勒天气雷达数据为基础,初步研究分析了北京地区昆虫回波特征、变化规律及其影响因素,以期为今后昆虫雷达组网提供有益的补充。

1 材料与方法

1.1 新一代多普勒天气雷达

北京CINRAD-SA新一代多普勒天气雷达,建于2006年,安放在北京南郊观象台院内(39°48'N 116°28'E)。雷达技术指标借鉴美国WSR-88D标准,波长10 cm,波束宽度为1°,峰值发射功率大于650 kW,采用全相干脉冲多普勒体制,接收机系统动态范围大于89 dB。雷达运行模式是全天候全自动不间断进行体积扫,每6 min可以完成1次,相邻2次体积扫描之间,雷达会进行主要性能参数的监控和定标,确保测量精度稳定。自运行以来,已经积累了大量高质天气探测数据。由于其具有很高的灵敏度,也积累了昆虫等生物回波资料。

1.2 风廓线雷达

北京南郊观象台风廓线雷达(CFL-06型)的功能是通过接收大气湍流造成的微弱后向散射能量来反演高空风速、风向信息。该雷达工作频率为VHF波段,相控阵天线,同时向上发射5个波束。由于波长较长,信号微弱,需要长时间的积分才能提取出有用信息,因此,低空探测能力不足,探测高度范围为0.15-9 km。目前,每6 min输出一组实时高空风向和风速信息。

1.3 研究方法

多普勒气象雷达采用等效反射率因子 Z 的对数值来表示回波强度,记为dBZ, Z 定义为单位体积内所有散射粒子直径6次方的和(单位: mm^6/m^3)。当采样体积内粒子发生复杂的相对运动时,雷达接收到的气象回波会产生明显起伏。

为了得到更准确的 dBZ, 天气雷达通常采用较慢的转速, 然后以采样信号积分平均值来估算 dBZ 的数值。中国新一代天气雷达系统性能要求书规定, S 波段天气雷达必须在距雷达 50 km 处, 能探测到最小不大于 -7 dBZ 的回波, 换算成目标大小即相当于 50 km 处在 1 m^3 的体积中有一个直径 0.76 mm 的球形水滴 (葛文忠和蒋培杰, 1987; 石广玉, 2007)。昆虫体内含有大量水分, 被电磁波照射时, 也会产生散射。假设昆虫直径 1 cm, 翅展 2 cm, 在北京新一代多普勒天气雷达的散射尺度因子约为 0.7 左右 (俞小鼎等, 2006)。根据电磁波散射理论, 应适用米散射计算方法 (Martin and Shapiro, 2007)。由于昆虫的后向散射截面比雨滴大, 在同样灵敏度的情况下, 新一代多普勒天气雷达能够探测到昆虫目标产生的后向散射回波。加之, 迁飞昆虫的数量较大, 有时成群飞行, 理论上, 新一代天气雷达可以探测到空中迁飞昆虫引发的后向散射回波, 这一预期已经得到许多国外研究资料的证实 (Wood *et al.*, 2009; Leskinen *et al.*, 2011)。

北京多普勒天气雷达系统配备有 RDASC、RPG 和 PUP 软件, 基数据在 RPG 中生成并存储, 气象应用产品在 PUP 中生成。我们使用 java 语言开发了雷达基数据解码和显示程序, 利用此软件可以读取数据、查看回波、分析数量变化等, 然后用 Excel 软件可以对数量进行统计分析。由

于昆虫大多在边界层内活动, 天气雷达平面扫描的仰角为 1.5° 时, 距离雷达 50 km 处的波束高度约 1.5 km, 因此, 昆虫回波主要出现在雷达低仰角图像上。在判定雷达回波由昆虫引发时, 雷达数据必须满足晴空回波且回波强度不大于 25 dBZ 的这一条件。此外, 回波高度也是辅助判断条件之一 (Martin and Shapiro, 2007)。在分析昆虫回波与风速、风向的关系时, 风速、风向数据来自风廓线雷达。

2 结果与分析

2.1 昆虫回波的日节律

已有研究结果表明, 迁飞昆虫常在傍晚朦影时分起飞 (翟保平等, 1997)。天气雷达观测到了类似现象, 在傍晚朦影时分, 在很短的时间内, 北京南郊多普勒天气雷达中心附近会突然出现大量的弱回波, 30 min 后回波强度可达到比较稳定的状态, 例如 2016 年 5 月 7 日夜, 天气晴朗, 晚 19:00 天气雷达上只有一些地物弱回波, 19:30 左右近地面开始出现回波, 至 20:00 较强回波已充满距地面高度 2.4 km 以下的空间 (图 1)。在日出前后, 夜间的晴空回波迅速消失。除降水等天气外, 暖季北京南郊天气雷达上每天都出现类似的晴空回波日变化, 这种变化与昆虫的朦影起飞和日出降落现象密切相关。

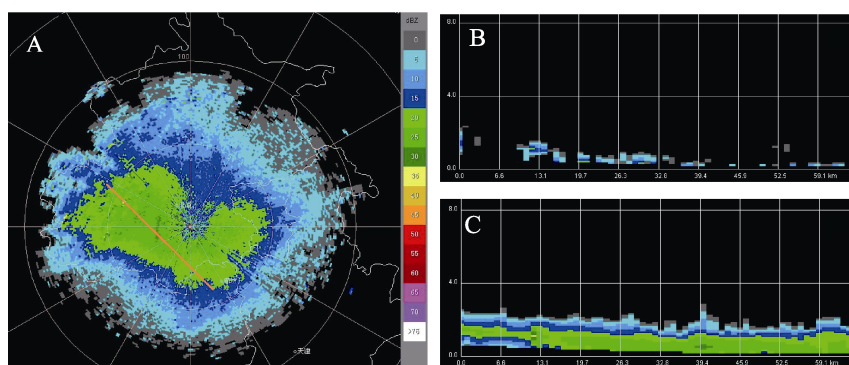


图 1 北京南郊新一代天气雷达 2016 年 5 月 7 日晚上的反射率图 (仰角 1.5°)

Fig.1 The image of reflectivity at night of 7 May 2016 from Beijing CINRAD-SA radar (1.5° elevation)

A. 20:00 PPI 图像; B. 19:00 反射率剖面图; C. 20:00 反射率剖面图。A 图红线表示剖面位置。

A. PPI image at 20:00; B. Profile images at 19:00; C. Profile images at 20:00.

Red line on A indicates the location where profiles are done.

2.2 北京地区昆虫回波的季节性变化

2012-2016 年的北京南郊多普勒天气雷达资料分析显示,北京地区最早在 3 月中旬就开始出现夜间昆虫活动,11 月中旬前后昆虫夜间活动消失,夜间昆虫回波的最大高度可达 2.4 km 以上,一般前半夜的活动性强于后半夜。回波强度呈现明显的季节变化,3 月中旬至 4 月上旬昆虫活动回波强度较弱,4 月中旬开始至 5 月底,北京地区夜间昆虫回波强度显著增强,当夜间低空有较强西南风时昆虫回波也随之增强。进入 6 月,北京地区降雨开始增多,6 月上旬至 7 月中旬昆虫回波的活动又处于较弱阶段,在夜间有较强降水时,昆虫回波很少出现,但雨后第 2 天夜间常常出现较强的昆虫活动。7 月下旬至 10 月上旬的夜晚是北京地区第 2 个昆虫回波活动较强的阶段,和春季相反,这段时间较强的昆虫回波是和夜间低空东北急流同步出现的,反映了昆虫向南迁飞的活动情况。10 月中旬至 11 月中旬,北京地区的夜间昆虫回波逐渐减弱,最终消失。

2.3 昆虫回波与风速的关系

对回波反射率的初步统计表明,新一代天气雷达的晴空回波数量与风向关系密切。2016 年 5 月 6 日至 7 日天气晴朗,6 日 00:00,回波反射率在 10 dBZ 处有一个峰值,7 日 19:00 昆虫尚未起飞,晴空回波集中于 -10 dBZ 处,至 21:00,雷达回波除 10 dBZ 处出现峰值之外,在 20 dBZ 处也出现了一个更高的峰值(图 2)。南郊观象台风廓线雷达探测资料显示,7-8 日夜間,地面 1.5 km 高度附近有 16 m/s 左右的西南急流,而 5-6 日夜間北京低空没有西南急流(图 3)。结合这两天北京南郊新一代天气雷达的 PPI 图像(2.4°),可以推断 6 日凌晨,出现 10 dBZ 峰值可能是本地活动的小型昆虫群引发,而 7 日夜間,出现 20 dBZ 的峰值是 1.5 km 高度附近自西南向东北的迁飞昆虫群引发,且这群昆虫的密度或体型要比 6 日凌晨的昆虫目标大(图 4)。

2.4 昆虫回波的成层现象

北京地区春季夜间低空盛行西南急流,昆虫

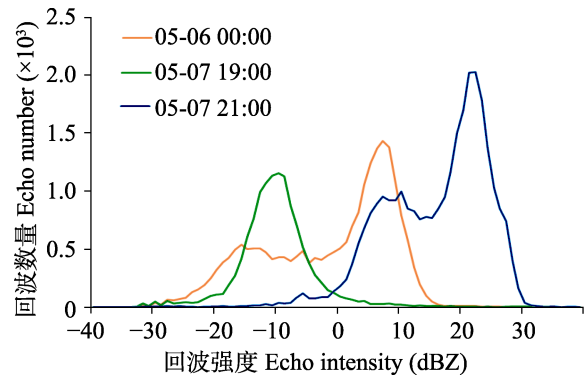


图 2 2016 年 5 月北京南郊新一代天气雷达 PPI 图像的 dBZ 分布图(2.4°仰角)

Fig. 2 The dynamic of reflectivity from Beijing CINRAD-SA radar in May 2016 (2.4° elevation)

借助夜间低空急流向北迁飞时,会在天气雷达图上形成明显的成层现象。2016 年 5 月 20 日 00:30,北京南郊新一代天气雷达观测到迁飞昆虫的成层现象,成层高度约在 2 km(图 5:A)。速度分析表明,回波层高度有很强的西南风,且低空风向随高度不变(图 5:B)。秋季,北京低空出现东北急流的频率较高,昆虫由北向南迁飞时,也常常出现成层现象。2016 年 8 月 28 日 21:42,北京南郊新一代天气雷达再次观测到更为明显的昆虫成层现象,成层高度在 2.4 km 附近(图 5:C),速度分析表明,在此高度存在非常强的东北急流(图 5:D)。

2.5 昆虫回波的共同定向现象

昆虫雷达研究发现,迁飞昆虫存在共同定向行为。发生共同定向行为时,雷达回波呈哑铃形。北京夜间低空风速较小时,北京南郊新一代天气雷达观测到的昆虫回波形状常常呈圆形。当夜间低空风速较大时,且风向随高度变化不大的情况下,观测到的昆虫回波常常呈现为椭圆形甚至哑铃形,其长轴和风向垂直,昆虫借助低空急流一夜之间可以迁移几百公里。2016 年 5 月 18 日 01:36,北京南郊新一代天气雷达 2.4°仰角 PPI 图像明显呈哑铃形,方向是西北-东南方向,两侧各有一个强中心,图像分析和速度场都表明此时发生了西南至东北方向

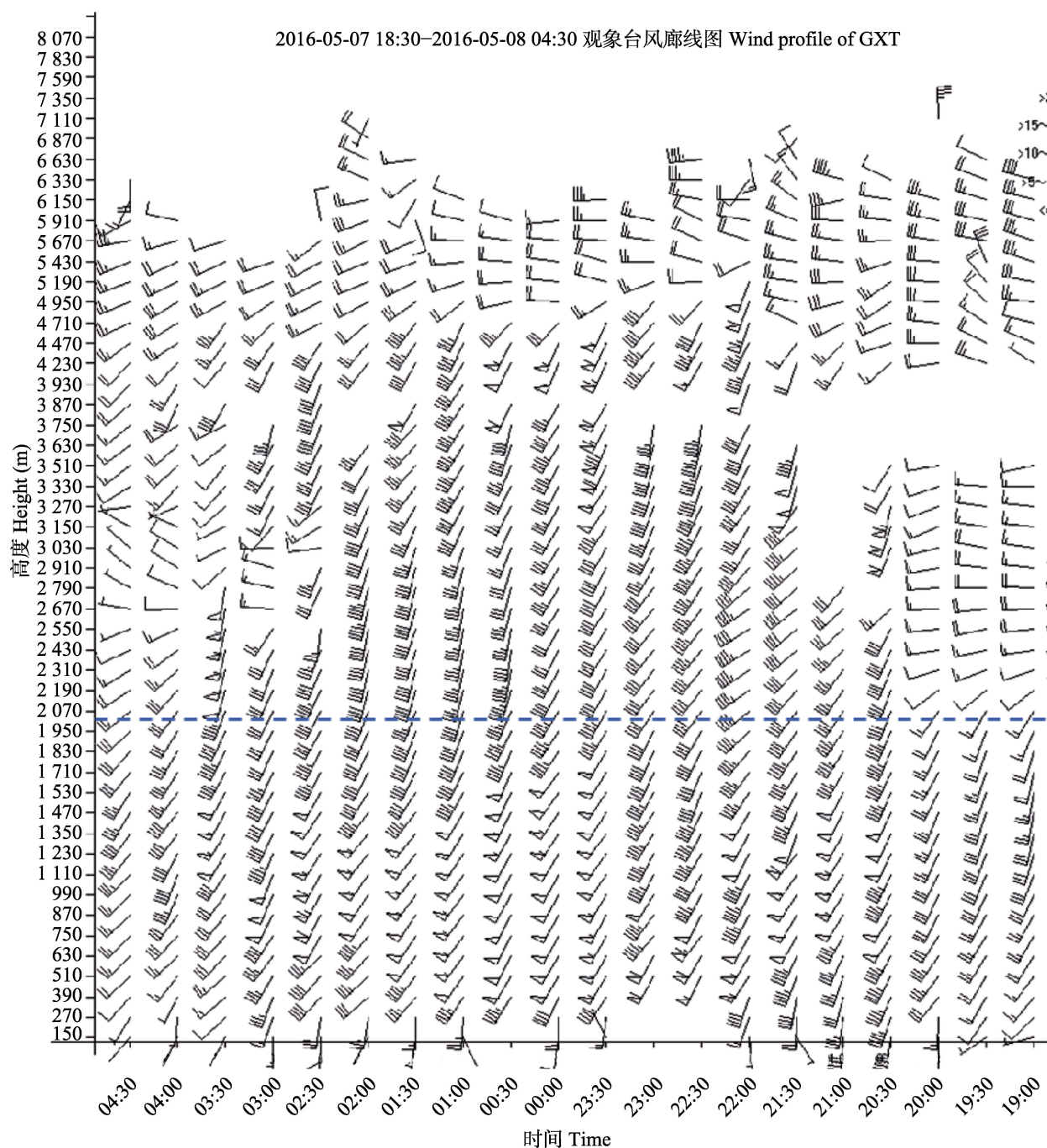


图3 北京南郊 2016 年 5 月 7 日夜间风廓线雷达图

Fig. 3 The wind profile at the night of 7 May 2016 at the radar station

虚线表示较强回波伸展的高度。Dash line indicates the relative strong echo height.

2.6 降水对昆虫回波的影响

降水是影响昆虫迁飞的重要因子。在昆虫迁飞季节, 如果北京地区傍晚前后出现较强降水, 当天夜间基本没有昆虫回波。如果入夜后降水系统尚未来临, 则昆虫可在黄昏正常起飞, 随着降

水系统的临近, 在多普勒天气雷达上可以看到昆虫回波和降水回波并存的现象。2010 年 8 月 30 日晚上, 低空吹弱的北风, 雷达图像上 (2.4°仰角) 的昆虫回波呈圆形。在西北方向 60 km 外有雷雨回波, 为一个孤立的多单体雷暴, 在雷暴附

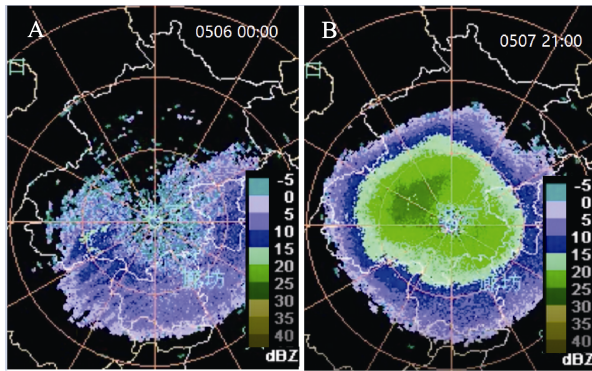


图4 2016年5月北京南郊新一代天气雷达
PPI 反射率强度 (2.4°仰角)

Fig. 4 PPI image of reflectivity from Beijing
CINRAD-SA radar in May 2016 (2.4° elevation)

A. 5月6日 00:00; B. 5月7日 21:00.

A. 00:00 6th May; B. 21:00 7th May.

近昆虫回波存在明显的缺失,表明此处昆虫活动被抑制(图7:A)。随着雷暴向东南方向移动,至31日00:30,雷雨系统逐渐发展成为短的弧状对流单体群(图7:B),其南段为新生单体,中段为成熟单体,北段为消亡单体,弧状对流单体群向东南方移动,其前缘附近为上升气流区,此处昆虫回波消失,原因可能是昆虫已感知到强降雨即将来临,采取了主动躲避。弧状对流单体群中段以北为下沉气流区,该区域出现了短时强降雨,在此区域边缘昆虫回波也消失了,表明强降雨和下沉气流使得昆虫被迫降落于地面。值得注意的是在距离降水回波不远处,昆虫飞行没有受到干扰。降水回波经过以后,如果雨量不大,经过一段时间,昆虫还可以重新起飞开始活动。

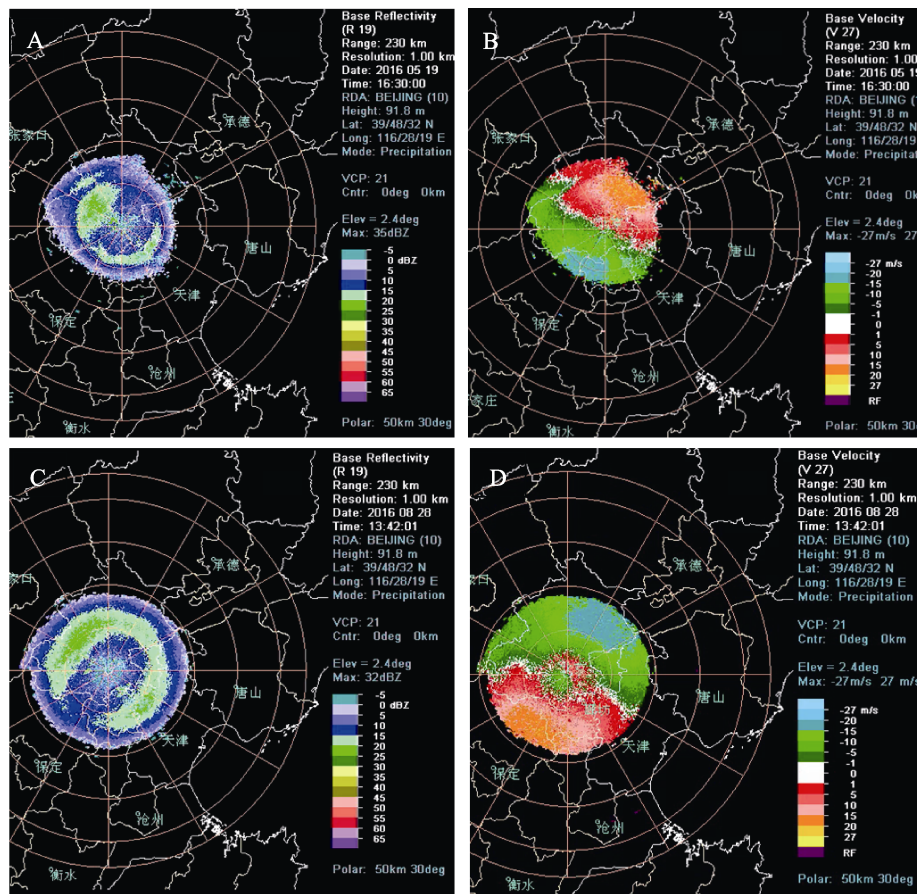


图5 北京南郊新一代天气雷达上春季和秋季昆虫回波成层现象

Fig. 5 Layering of migrating insects in spring and autumn represented in Beijing Doppler weather radar

A. 2016年5月20日00:30的强度图; B. 2016年5月20日00:30的径向速度; C. 2016年8月28日21:42的强度图; D. 2016年8月28日21:42的径向速度。图中显示的时间为世界时。

A. Reflectivity of 00:30 20th May 2016; B. Radial velocity of 00:30 20th May 2016; C. Reflectivity of 21:42 28th August 2016; D. Radial velocity of 21:42 28th August 2016. UTC time labeled in images.

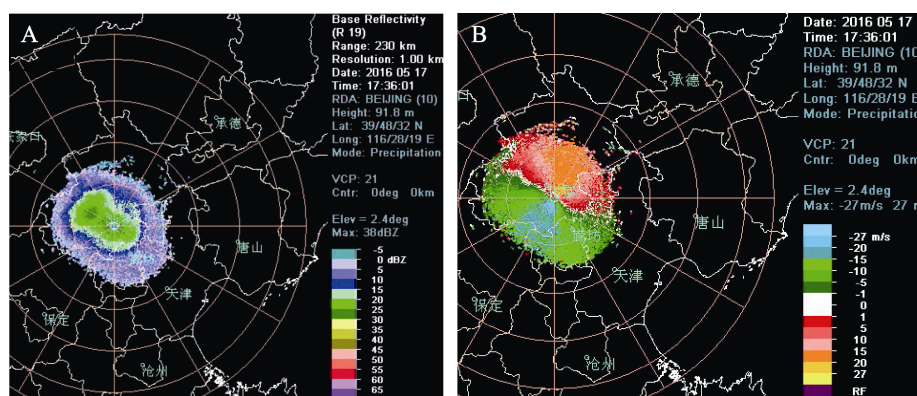


图 6 北京南郊新一代天气雷达上昆虫回波定向现象

Fig. 6 Orientation of migrating insects at 0136 LST 18th May 2016 represented in Beijing Doppler weather radar (2.4° elevation)

A. 2016 年 5 月 18 日 01:36 回波强度图; B. 径向速度场。A. Reflectivity; B. Radial velocity.

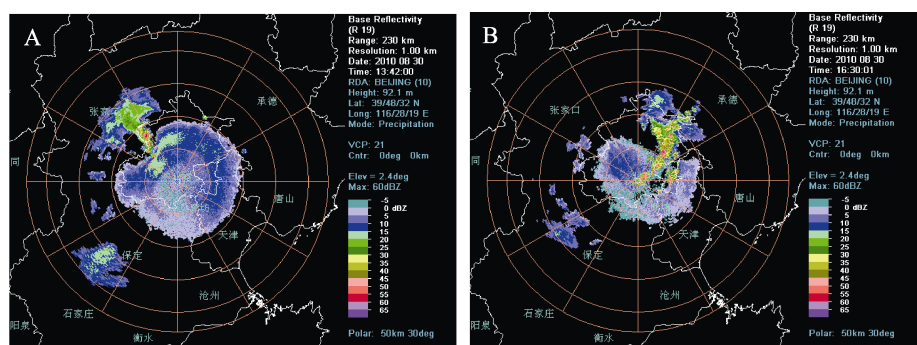


图 7 北京南郊新一代天气雷达观测到的雷雨与昆虫回波的关系 (2.4°仰角)

Fig. 7 The 2.4° elevation reflectivity from Beijing CINRAD-SA radar (2.4° elevation)

A. 2010 年 8 月 30 日 21:42 BJT; B. 2010 年 8 月 31 日 00:30 BJT.

A. 21:42 BJT 30 Aug. 2010; B. 00:30 BJT 31 Aug. 2010.

3 讨论

我国地处东亚季风区,多种重要的农业害虫都具有远距离迁飞习性。由于迁飞性害虫具有突发性、暴发性和毁灭性的发生特点,因此,制定迁飞性害虫的防治决策往往处于被动地位(翟保平, 1999; 张智等, 2012)。及时准确的监测预警是开展迁飞性害虫综合防控的重要依据,2008 年草地螟成虫大暴发和 2012 年 3 代黏虫灾害的成功应对都是基于准确的监测预警(张云慧等, 2009, 2012)。

由于迁飞昆虫的体形相对较小,加之多种昆虫在夜间迁飞,它们的飞行高度超出了人类的视力范围之外,传统手段很难直接对迁飞个体进行

实时监测,且获得数据的时效性也较差,导致迁飞性害虫的预测预报水平整体不高(翟保平, 2010)。生产中急需像昆虫雷达这样的先进手段,在无干扰的情况下,直接对空中迁飞目标快速大范围开展监测,获取丰富的预警参数。但是受各种因素的影响,我们昆虫雷达网建设仍处于研讨阶段。

在昆虫雷达网建立之前,天气雷达数据或许为迁飞性害虫传统监测手段提供必要的支撑作用。国外研究表明,天气雷达已经在芬兰国家的监测预警中得到了初步应用(Nieminen *et al.*, 2000; Leskinen *et al.*, 2011)。多普勒天气雷达可以获得等效反射率因子、径向速度和谱宽 3 种基本数据,在回波分析时,可以获得回波强度、

昆虫迁移方向和速度等参数,也可以观察昆虫的共同定向行为(Lang *et al.*, 2004)。采用双偏振技术的天气雷达除获得多普勒天气雷达的 3 种基本数据外,还可以获得差分反射率因子、双程差分传播相位变化值、双程差分传播相位常数、退极化因子和相关系数等参数,这些参数有助于将昆虫与鸟类、其它非生物目标区分开(Zrnic and Ryzhkov, 1998; Bachmann and Zrnic, 2007)。本文通过雷达资料分析,发现北京新一代天气雷达上昆虫回波强度可以达到 20 dBZ,远大于雷达最小可测功率,因此,利用天气雷达开展迁飞昆虫监测具有一定的可行性。初步分析表明,天气雷达上昆虫回波的日规律、季节性变化与探照灯诱集的相应节律具有较好的一致性,回波强度和气流方向密切相关,同时,北京的天气雷达也可以观测到迁飞昆虫的成层和定向现象。此外,北京的天气雷达还观测到降水对昆虫迁飞的影响。今后,随着研究的进一步深入,或许可以利用气象雷达,结合气象资料,对昆虫的运转轨迹、聚集降落等进行综合判断,从而为迁飞性害虫的预测预报提供重要的信息。

虽然天气雷达在迁飞性害虫监测中具有一定的价值,但是由于天气雷达的空间分辨率差,在通常情况下,天气雷达观测不到单个昆虫(Contreras and Frasier, 2008),而且在通常情况下,利用气象雷达很难将鸟和昆虫的回波区分开(Rennie *et al.*, 2010; 封洪强, 2011)。因此,在今后的工作中,为了适应迁飞性害虫监测预警的需要,应优先建立专业的昆虫雷达网络,与气象部门合作,发挥天气雷达的补充作用,共同提高迁飞性害虫的监测预警水平。

参考文献 (References)

- Bachmann S, Zrnic D, 2007. Spectral density of polarimetric variables separating biological scatterers in the VAD display. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 24(7): 1186–1198.
- Chen DF, Feng HQ, Wu KM, 2005. Scanning Entomological Radar and Insect Migration. Beijing: Science Press. 1–20. [程登发, 封洪强, 吴孔明, 2005. 扫描昆虫雷达与昆虫迁飞监测. 北京: 科学出版社. 1–20.]
- Chen RL, Bao XZ, Wang SY, Sun YJ, Li LQ, Liu JR, 1992. An Observation on the migration of meadow moth by radar. *Journal of Plant Protection*, 19(2): 171–174. [陈瑞鹿, 暴祥致, 王素云, 孙雅杰, 李立群, 刘继荣, 1992. 草地螟迁飞活动的雷达观测. 植物保护学报, 19(2): 171–174.]
- Cheng DF, Wu KM, Tian Z, Wen LP, Shen ZR, 2002. Acquisition and analysis of migration data from the digitised display of a scanning entomological radar. *Computers and Electronics in Agriculture*, 35(2/3): 63–75.
- Contreras RF, Frasier SJ, 2008. High-resolution observations of insects in the atmospheric boundary layer. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 25(12): 2176–2187.
- Crawford A, 1949. Radar reflections in the lower atmosphere. *Proceedings of Institute of Radio Engineers*, 37: 404–405.
- Feng HQ, 2011. Applications of radar in entomological research. *Plant Protection*, 37(5): 1–13. [封洪强, 2011. 雷达在昆虫学研究中的应用. 植物保护, 37(5): 1–13.]
- Feng HQ, Wu XF, Wu B, Wu KM, 2009. Seasonal migration of *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae) over the bohai sea. *Journal of Economic Entomology*, 102(1): 95–104.
- Ge WZ, Jiang PJ, 1987. Radar Detection of Atmospheres and Oceans. Beijing: China Ocean Press. 122–157. [葛文忠, 蒋培杰, 1987. 雷达探测大气和海洋. 北京: 海洋出版社. 122–157.]
- Lang TJ, Rutledge SA, Stith JL, 2004. Observations of quasi-symmetric echo patterns in clear air with the CSU-CHILL polarimetric radar. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 21(8): 1182–1189.
- Leskinen M, Markkula I, Koistinen J, Pylkkö P, Ooperi S, Siljamo P, Ojanen H, Raiskio S, Tiilikkala K, 2011. Pest insect immigration warning by an atmospheric dispersion model, weather radars and traps. *Journal of Applied Entomology*, 135(1/2): 55–67.
- Li GB, Wang HX, Hu WX, 1964. The hazard hypothesis of seasonal migration of *Mythimna separata* (Walker) and the test of mark recovery. *Journal of Plant Protection*, 3(2): 101–109. [李光博, 王恒祥, 胡文绣, 1964. 粘虫季节性迁飞危害假说及标记回收试验. 植物保护学报, 3(2): 101–109.]
- Martin W, Shapiro A, 2007. Discrimination of bird and insect radar echoes in clear air using high-resolution radars. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 24(7): 1215–1230.
- Nieminen M, Leskinen M, Helenius J, 2000. Doppler radar detection of exceptional mass-migration of aphids into Finland. *International Journal of Biometeorology*, 44(4): 172–181.
- Rennie SJ, Illingworth A, Dance SL, Ballard SP, 2010. The accuracy of Doppler radar wind retrievals using insects as targets.

- Meteorological Applications*, 17(4): 419–432.
- Shi GY, 2007. Atmospheric Radiation. Beijing: Science Press. 119–130. [石广玉, 2007. 大气辐射学. 北京: 科学出版社. 119–130.]
- Wood CR, O'Connor EJ, Hurley RA, Reynolds DR, Illingworth AJ, 2009. Cloud - radar observations of insects in the UK convective boundary layer. *Meteorological Applications*, 16(4): 491–500.
- Yu XD, Yao XP, Xiong TN, Zhou XG, Wu H, 2006. Principle and Application of Doppler Weather Radar. Beijing: China Meteorological Press. 17–45. [俞小鼎, 姚秀萍, 熊廷南, 周小刚, 吴洪, 2006. 多普勒天气雷达原理与业务应用. 北京: 气象出版社. 17–45]
- Zhai BP, 1999. Tracking angels: 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.]
- Zhai BP, 2010. Progress and perspectives of crop pest forecasting in China. *Plant Protection*, 36(4): 10–14. [翟保平, 2010. 农作物病虫测报学的发展与展望. 植物保护, 36(4): 10–14.]
- Zhai BP, Zhang XX, Cheng XN, 1997. Parameterizing the migratory behaviour of insects I. Behavioural analysis. *Acta Ecologica Sinica*, 17(1): 190–199. [翟保平, 张孝羲, 程邈年, 1997. 昆虫迁飞行为的参数化 I. 行为分析. 生态学报, 17(1): 190–199.]
- Zhang YH, Yang JG, Jin XH, Cheng DF, Tian Z, Li YL, 2009. Aerial band barrier formed by vertical-pointing searchlight-traps against the migrating *Loxostege sticticalis*. *Plant Protection*, 35(6): 104–107. [张云慧, 杨建国, 金晓华, 程登发, 田喆, 李云龙, 2009. 探照灯诱虫带对迁飞草地螟的空中阻截作用. 植物保护, 35(6): 104–107.]
- Zhang YH, Zhang Z, Jiang YY, Zeng J, Gao YB, Cheng DF, 2012. Preliminary analysis of the outbreak of the third-generation armyworm *Mythimna separata* in China in 2012. *Plant Protection*, 38(5): 1–8. [张云慧, 张智, 姜玉英, 曾娟, 高月波, 程登发, 2012. 2012 年三代黏虫大发生原因初步分析. 植物保护, 38(5): 1–8.]
- Zhang Z, 2013. Monitoring and population dynamics analyses of important migratory pest insects in northern China. Doctoral dissertation. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences. [张智, 2013. 北方地区重大迁飞性害虫的监测与种群动态分析. 北京: 中国农业科学院.]
- Zhang Z, Zhang YH, Jiang YY, Zhang LP, Cheng DF, 2017b. Development of radar entomology and related prospects for future application. *Plant Protection*, 43(5): 18–26. [张智, 张云慧, 姜玉英, 张鹿平, 程登发, 2017b. 雷达昆虫学研究进展及应用前景, 植物保护, 43(5): 18–26]
- Zhang Z, Zhang YH, Jiang YY, Shi BC, Cheng DF, Jiao RG, 2012. Progress in vertical-looking insect monitoring radar. *Acta Entomologica Sinica*, 55(7): 849–859. [张智, 张云慧, 姜玉英, 石宝才, 程登发, 焦热光, 2012. 垂直监测昆虫雷达研究进展. 昆虫学报, 55(7): 849–859.]
- Zhang Z, Zhang YH, Jiang YY, Wang J, Xie AT, Yang JG, 2017a. Development of entomological radar in China and prospects for future application. *China Plant Protection*, 37(4): 27–32. [张智, 张云慧, 姜玉英, 王健, 谢爱婷, 杨建国, 2017a. 我国昆虫雷达发展现状与应用展望. 中国植保导刊, 37(4): 27–32.]
- Zrníc DS, Ryzhkov AV, 1998. Observations of insects and birds with a polarimetric radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(2): 661–668.