

# 2013 年北京一代粘虫迁飞峰期的 多普勒天气雷达观测\*

柳 凡<sup>1,2\*\*</sup> 张 智<sup>2,3\*\*</sup> 林培炯<sup>1,4</sup> 李祥瑞<sup>2</sup> 焦热光<sup>5</sup> 胡 高<sup>1\*\*\*</sup> 张云慧<sup>2\*\*\*</sup>

(1. 南京农业大学植物保护学院, 南京 210095; 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. 温州市植物保护与土壤肥料管理站, 温州 325000; 5. 京津冀环境气象预报预警中心, 北京 100089)

**摘 要** 【目的】获取粘虫 *Mythimna separata* (Walker) 迁飞高峰期内的多普勒天气雷达回波特征, 探索天气雷达解算虫量与高空测报灯诱虫数据之间的关系, 奠定天气雷达监测昆虫迁飞的基础。【方法】选取粘虫迁飞高峰日北京 CINRAD-SA 天气雷达数据和延庆高空测报灯 2013 年一代粘虫分时段诱集数据, 采用 Python 和 R 语言对天气雷达数据进行提取、反演、计算、统计、分析及可视化。【结果】6 月 5 日至 9 日延庆监测点每晚灯诱粘虫数量占比均在 80% 以上, 监测点上空反射率因子 -15 dBZ 到 15 dBZ 的回波占比 90% 以上, 其中 0 到 15 dBZ 的雷达回波数量占比分别为 30.7%、42.0%、43.2%、37.2% 和 25.1%, 占比与灯诱粘虫数量占比的变化趋势相同。6 月 5 日至 8 日, 空中回波方向向北, 9 日回波方向以向南为主, 5 日至 9 日, 北向回波占比与灯下粘虫占比变化趋势相同, 两者间的相关系数为 0.95。6 月 5 日至 8 日北向回波的平均速度接近风速, 9 日北向回波速度为 1.36 m/s。天气雷达解算粘虫数量与灯下粘虫数量呈线性正相关, 粘虫迁飞盛期一个夜晚飞过北京上空雷达监测范围内(约 4 300 km<sup>2</sup>)可监测的粘虫虫量达 600 万头, 总生物量超过 0.8 吨。【结论】多普勒天气雷达可以观测粘虫迁飞高峰的空中特征, 这些参数有助于提高对粘虫迁飞规律的认识。

**关键词** 粘虫; 迁飞; 多普勒天气雷达; 回波; 反射率因子; 监测预警

## Using doppler weather radar to monitor the first generation of migrating *Mythimna separata* (Walker) in Beijing in 2013

LIU Fan<sup>1,2\*\*</sup> ZHANG Zhi<sup>2,3\*\*</sup> LIN Pei-Jiong<sup>1,4</sup> LI Xiang-Rui<sup>2</sup>  
JIAO Re-Guang<sup>5</sup> HU Gao<sup>1\*\*\*</sup> ZHANG Yun-Hui<sup>2\*\*\*</sup>

(1. College of Plant Protection, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China;  
3. Beijing Plant Protection Station, Beijing 100029, China; 4. Wenzhou Station of Plant Protection, Soil and Fertilizers, Wenzhou 325000, China; 5. Environmental Meteorology Forecast Center of Beijing-Tianjin-Hebei, Beijing 100089, China)

**Abstract** 【Objectives】To obtain the characteristics of the migrating *Mythimna separata* (Walker) during the peak migration episode in 2013 from the doppler weather radar echoes, and explore the relationship between the numbers resolved from radar echoes and the catch sizes from search light traps, which would provide a foundation to monitor insect migration with doppler weather radar. 【Methods】The CINRADSA weather radar data in Beijing and the interval catch sizes from searchlight trap during the migrating peak days of the first generation moths of *M. separata* in 2013 were selected, and the weather radar data were extracted, retrieved, calculated, counted, analyzed and visualized with some libraries in Python and R. 【Results】The number of the *M. separata* moths from searchlight trap at Yanqing accounted for more than 80% every night from 5th to 9th in June, and the reflectivity between 15 dBZ and 15 dBZ of the echoes from the insect swarms above the

\*资助项目 Supported projects: 国家小麦产业技术体系 (CARS-03); 北京市科技创新驱动发展投入项目 (PXM2016\_036203\_000049)。

\*\*共同第一作者 Co-first authors, E-mail: liufan@stu.njau.edu.cn; zhangzhicas@126.com

\*\*\*共同通讯作者 Co-corresponding authors, E-mail: hugao@njau.edu.cn; yhzhang@ippcaas.cn

收稿日期 Received: 2022-09-20; 接受日期 Accepted: 2022-10-19

monitoring site was more than 90%, of which the number of radar echoes from 0 to 15 dBZ accounted for 30.7%, 42.0%, 43.2%, 37.2% and 25.1%, respectively, the trend was similar with the proportion of the *M. separata* moths from searchlight trap. The direction of the target echoes was northward on average from 5th to 8th in June and southward on 9th. The proportion of echoes with northward direction has the similar trend with the proportion of the *M. separata* moths from searchlight trap, and the correlation coefficient between them is 0.95. The average speed of the northward echoes from 5th to 8th is close to the wind speed, however the displacement speed is 1.36 m/s on the 9th, which is close to its own flight speed. The number of the *M. separata* moths retrieved from weather radar data was positively linearly correlated with the number of the *M. separata* moths from searchlight trap. The maximum of *M. separata* moths flying over Beijing within the radar monitoring range (approximately 4 300 km<sup>2</sup>) in one night reached to 6 million heads, and the total mass was more than 0.8 tons. **[Conclusion]** Doppler weather radar can observe the characteristics of the migrating *M. separata* moths during the peak episode, and these parameters help in understand the migration of *M. separata*.

**Key words** *Mythimna separata*; migration; doppler weather radar; echoes; reflectivity; monitoring and forecasting

我国大多数暴发性、毁灭性害虫都属于迁飞性昆虫,《一类农作物病虫害名录》10 种一类害虫中有 7 种具有远距离迁飞能力,这 7 种迁飞性害虫基本上都是主要粮食作物害虫,年均发生面积 6 000 多万公顷,可造成损失 2 241 万吨,严重威胁我国“主粮”安全(胡高等, 2020; 姜玉英等, 2021; 张智等, 2021)。粘虫 *Mythimna separata* (Walker) 属鳞翅目 Lepidoptera 夜蛾科 Noctuidae, 是一种世界性的迁飞性害虫(Sharma and Davis, 1983)。在我国,除新疆未见发生为害报道外,其他地区均有暴发成灾记录(李光博, 1993; 江幸福等, 2014), 2020 年被列入《一类农作物病虫害名录》。粘虫幼虫喜食玉米、小麦、水稻等禾本科作物,对我国粮食安全威胁极大,及时准确的监测预警是开展粘虫等迁飞性害虫综合防控的重要依据(翟保平, 1999; 姜玉英等, 2016)。

由于粘虫等大多数迁飞性害虫在夜间迁飞,飞行高度超出人类目测范围之外,灯诱、性诱等手段很难对空中目标直接观测(张云慧等, 2012; 姜玉英等, 2014)。昆虫雷达的诞生为直接监测空中迁飞性害虫提供了一种强有力的手段,它可以快速获得迁飞昆虫的数量、高度、速度、方向等参数,以及成层和共同定向等其他监测工具难以获取的空中特征(Feng *et al.*, 2004; Chapman *et al.*, 2011; 张云慧等, 2013; 张智, 2013; 高月波等, 2014; 孙崑等, 2018; 张智等, 2021)。随着信息技术的发展,我国昆虫雷达得到快速发展,在迁飞性害虫监测预警中的作用正在日益显

现,昆虫雷达监测网络建设正在有序推进之中。气象学家很早就发现天气雷达也可以探测到生物回波(Hardy and Katz, 1969)。利用天气雷达先后监测到粘虫、禾谷缢管蚜 *Rhopalosiphum padi* (L.)、小菜蛾 *Plutella xylostella* (L.)、美洲棉铃虫 *Helicoverpa zea* (Boddie)、澳洲疫蝗 *Chortoicetes terminifera* (Walker)、甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua* (Hübner) 及云杉色卷蛾 *Choristoneura fumiferana* (Clem.) 等农林昆虫的迁飞过程(Leskinen *et al.*, 2011; Rennie *et al.*, 2014; Westbrook *et al.*, 2014; Boulanger *et al.*, 2017; Westbrook and Eyster, 2017; Cui *et al.*, 2019)。在美国和欧洲一些国家,天气雷达网也被用于监测鸟类空中迁徙(Nilsson *et al.*, 2018b; Van Doren and Horton, 2018)。我国新一代多普勒天气雷达从 1999 年开始布设,截至目前,其分布范围基本覆盖了我国的主要农业区域。多普勒天气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( $\text{mm}^6/\text{m}^3$ )。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<sup>3</sup> 的体积中有一个直径 0.76 mm 的球形水滴(俞小鼎等, 2006)。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,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(焦热光等, 2018)。前期的研究已经证实,我国的多普勒天气雷达图像特别是晴空

回波蕴含有大量的空中迁徙生物信息(冷亮, 2008; 焦热光等, 2018)。研究表明, 天气雷达反射率因子 dBZ 可以通过一系列算法转换为单位体积的目标数量(Chilson *et al.*, 2012; Cui *et al.*, 2019; 腾玉鹏等, 2020a)。如果从多普勒天气雷达回波中提取生物信息以后, 再利用高空测报灯诱集昆虫数据加以佐证, 可以充分发掘我国天气雷达网监测昆虫迁飞的应用价值。

2013 年, 一代粘虫迁入北京的数量创历史记录(Zhang *et al.*, 2018)。本研究计划选取 2013 年粘虫一代成虫迁飞高峰期的 CINRAD-SA 天气雷达数据, 结合气象数据和延庆监测点高空测报灯诱集的粘虫数据, 尝试解析天气雷达观测到的空中回波特征参数, 估算空中迁飞种群的规模, 并分析其与高空测报灯粘虫诱蛾数量的相关性, 以期建立天气雷达解译昆虫信息的方法, 为利用天气雷达开展全国性粘虫监测提供技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 观测地点

灯诱观测地点位于北京市延庆区旧县镇有机蔬菜研究所院内(40°31'N, 116°5'E)。北京市延庆区北东南三面环山, 西临官厅水库, 中间为延怀盆地。全区露地主要种植春玉米和冷凉蔬菜, 其中春玉米面积近 1 万  $\text{hm}^2$ , 播期为每年 4 月下旬至 5 月上旬, 收获时间为每年 9 月底至 10 月初。天气雷达观测地点位于北京南郊观象台(39°48'N, 116°28'E), 雷达距离地面高度 92.4 m。

### 1.2 虫情信息收集工具

高空测报灯诱虫器内置光源为 ZJD 1 000 W 金属卤化物灯泡, 用铁圈架在白铁皮制成的大漏斗内, 漏斗下端接以直径 10 cm 的集虫口, 集虫口外套尼龙纱网袋, 探照灯和白铁皮制成的大漏斗一起固定在金属支架上, 使用时控开关根据用户设定的时间自动打开和切断设备电源(张智, 2013)。北京 CINRAD-SA 多普勒天气雷达位置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(焦热光等, 2018)。

### 1.3 虫情及天气雷达等数据收集方法

灯诱监测点设置 9 盏高空测报灯诱虫器, 两盏之间间隔 5 m 以上, 使用时控开关控制每盏灯每晚开启(60±5) min, 每天日落后开启第一盏灯, 第 2 天 5:00 自动关闭最后 1 盏灯, 每盏灯对应安装编号 1#~9#的集虫网袋, 实现分时段取样。第 2 天摘取 1#~9#收集网袋, 投入冰柜将所收集的虫体冷冻致死, 然后分类识别, 记录粘虫数量。

CINRAD-SA 天气雷达全天候全自动不间断进行体扫, 探测范围 230 km, 最低仰角(0.5°)波束中心的高度随着距离增加而增加, 在 230 km 处其高度为 5 km, 每 6 min 完成一次, 存储格式为 Z\_RADR\_I\_Z9010\_20130605130000\_O\_DOR\_SA\_CAP.bin.bz2, 其中的时间为 UTC 时间, 每个文件提供反射率因子、径向速度和速度谱宽 3 种产品。

气象数据来源于欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的 ERA5 数据, ERA5 可提供逐小时的大气再分析数据, 水平空间分辨率为  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。

### 1.4 天气雷达数据昆虫信息提取

**1.4.1 天气雷达数据的初步筛选** 综合 2013 年延庆监测点 5 月至 9 月灯诱虫情, 按以下 3 个条件筛选天气雷达数据:(1)由于技术原因对混有降雨的回波无法做到很好的剔除, 因此选择当晚天气雷达以晴空回波为主的时段, 6 月 7 日 22:00-次日 1:00 有降水云团经过雷达站点附近, 6 月 8 日 23:00 后开始降雨, 导致部分晴空回波受到降水回波的污染而被剔除。(2)数据时段为 21:00 至次日 04:00, 避免晨昏粘虫起飞或降落对天气雷达回波参数的影响(Wainwright *et al.*, 2020)。(3)当日灯诱粘虫数量占总诱虫量的 70% 以上。

**1.4.2 天气雷达数据反演与提取** 采用 Python

模块 PyCWR (Zheng *et al.*, 2021) 和 PyDDA 对天气雷达数据进行提取和处理, 根据 Jackson 等 (2019) 对雷达径向速度数据的处理方法, 进行 3D 风场反演并输出为格点数据, 格点水平间隔为 1 km, 垂直间隔为 100 m, 每个格点数据包括经向风速、纬向风速、反射率因子、径向速度、速度谱宽以及对应格点的经纬度和海拔高度 (Shapiro *et al.*, 2009; Potvin *et al.*, 2012)。

**1.4.3 目标飞行速度和方向的计算** 使用 PyDDA 库处理得到的目标经向风速 ( $u$ ) 和纬向风速 ( $v$ ), 利用公式 1 得到目标对地的飞行速度 ( $S_t$ ), 用公式 (2) 得到目标飞行方向 ( $D_t$ )。从 ERA5 数据中提取到对应高度的经向风速 ( $u$ ) 和纬向风速 ( $v$ ), 利用公式 1 计算得到风速 ( $S_w$ ) 和风向 ( $D_w$ )。通过矢量比较得到风向和目标飞行方向的夹角 ( $\theta$ ) (公式 3), 最后利用公式 4 计算得到目标的空中飞行速度 ( $S_r$ ) (图 1)。

$$\text{公式 1 } S_t = \sqrt{u^2 + v^2}$$

公式 2

$$D_t = 180 + \text{mod}(270 - \arctan 2(v, u) \times 180 / \pi, 360)$$

$$\text{公式 3 } \theta = |D_w - D_t|$$

公式 4

$$S_r = \sqrt{S_w^2 + S_t^2 - 2 \times S_w \times S_t \times \cos(\theta \times 180 / \pi)}$$

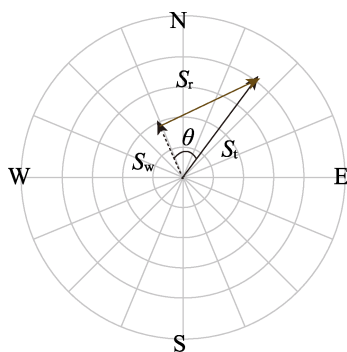


图 1 目标对地飞行速度 ( $S_t$ )、风速 ( $S_w$ ) 和目标空中速度 ( $S_r$ ) 三者间的示意图

Fig. 1 The schematic diagram of targets ground speed, wind speed and air speed

黑色实线  $S_t$  是目标对地飞行速度, 黑色虚线  $S_w$  是风速, 黑色实线  $S_r$  是目标空中速度。  
The black line is targets ground speed, the black dashed is wind speed, the brown line is targets air speed.

**1.4.4 粘虫回波强度统计** 北京 CINRAD-SA 天气雷达波束以第一层仰角 ( $0.5^\circ$ ) 扫描到延庆监测点上空, 波束中心的海拔高度约为 1 466 m (733-2 199 m), 距地高度约为 966 m (233-1 699 m), 以第二层仰角 ( $1.4^\circ$ ) 扫描到监测点上空时, 波束中心的海拔高度约为 2 780 m (2 052-3 518 m), 距地高度约为 2 280 m (1 552-3 018 m)。昆虫雷达监测证实粘虫飞行高度多在 600 m 以下 (Chen *et al.*, 1989; 张云慧等, 2013), 因此, 本文选取第一层仰角统计反射率因子。昆虫迁飞规模宏大, 数十公里空中种群密度具有相似性 (Hu *et al.*, 2016), 本文定义统计范围以延庆监测点为中心点周边 10 km×10 km 的矩形区域, 统计参数为回波强度值 (图 2)。

## 1.5 目标数量及生物量的计算

针对鸟类、昆虫等可进行大范围迁飞的生物, 计算空中种群规模往往选取以雷达为中心一定范围内所有的回波数据进行统计 (Sivakumar *et al.*, 2021)。本文以反演回波进行空中种群计算, 筛选范围为 5-37.5 km, 确定格点为粘虫的标准包括海拔 1 500 m 以下、飞行速度 2-5 m/s、速度谱宽小于 2 m/s、飞行温度阈值为  $10^\circ\text{C}$  (张志涛和李光博, 1985; Feng *et al.*, 2008; Dokter *et al.*, 2011; 高月波等, 2014; 何莉梅, 2017)。通过上述筛选条件, 以尽可能消除其他生物的干扰。

使用方程  $\text{dB}\eta = \text{dBZ} + \beta$  以及  $\eta = 10^{\text{dB}\eta/10}$  对粘虫格点进行目标数量换算, 其中 dBZ 为反射率因子,  $\beta = 10 \log_{10} (10^3 \pi^5 |K_m|^2 / \lambda^4)$  (雷达波长  $\lambda$  为 10 cm, 液态水的折射率  $|K_m|^2$  为 0.93), 反射率  $\eta$  单位为  $\text{cm}^2 \cdot \text{km}^3$ 。反射率 ( $\eta$ ) 除以粘虫的雷达散射截面积  $\sigma$  就转换为相应格点的空中生物密度, 粘虫的雷达散射截面为  $0.0289 \text{ cm}^2$ , 每一格点的体积与对应密度相乘得到每一格点的数量, 并将同一时间的所有格点进行求和, 反射率因子 dBZ 就转换为格点内的生物数量 (Chilson *et al.*, 2012; Stepanian and Wainwright, 2018; Cui *et al.*, 2019)。为避免昆虫目标在每隔 6 min 一次的体

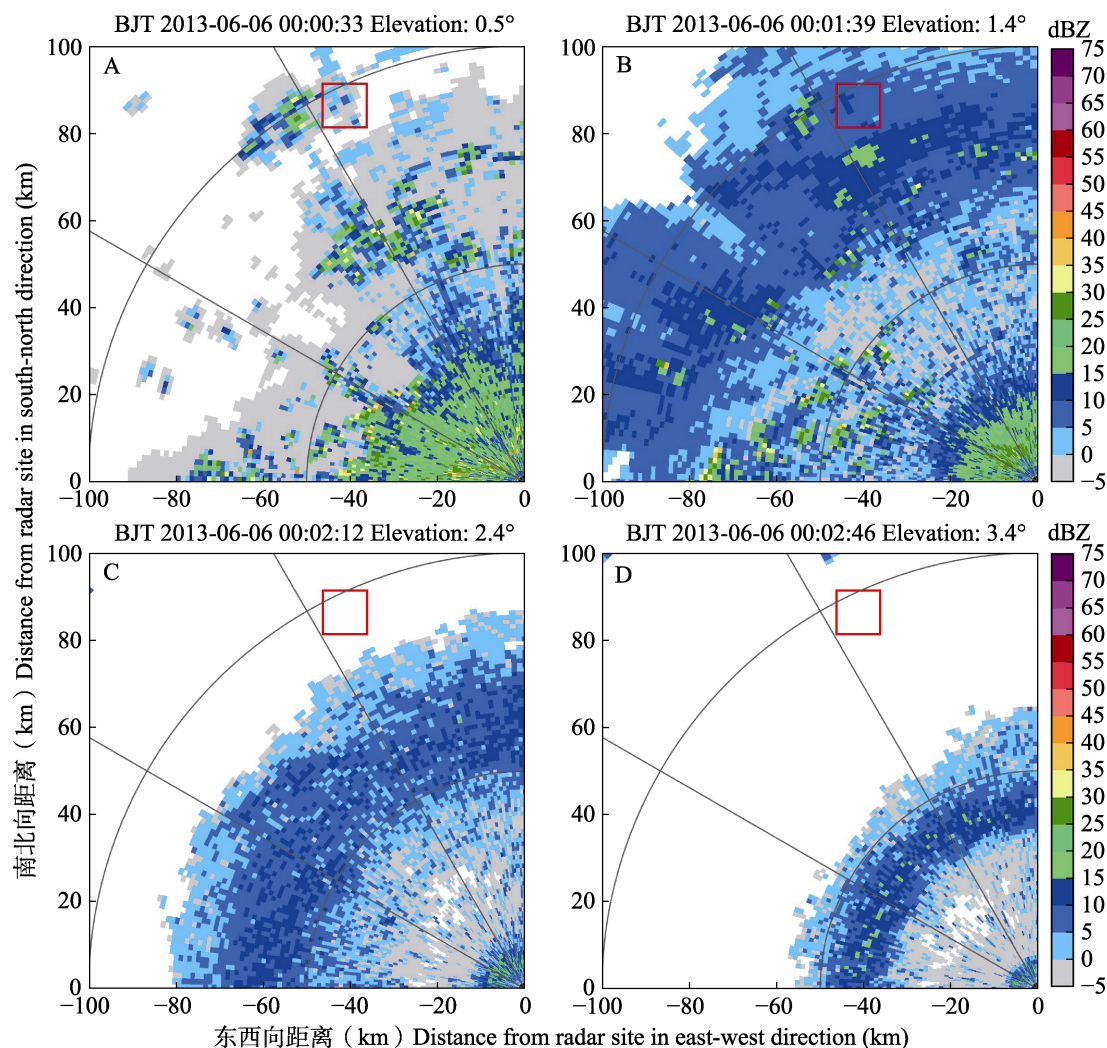


图 2 2013 年 6 月 6 日 0:00 第 1 层至第 4 层仰角半径 100 km 雷达反射率因子图

Fig. 2 Radius 100 km radar reflectivity factor at the first to the fourth elevation angle at 0:00 on June 6, 2013

A. 粘虫迁飞高峰时段半径 100 km 仰角 0.5°雷达反射率因子图; B. 粘虫迁飞高峰时段半径 100 km 仰角 1.4°雷达反射率因子图; C. 粘虫迁飞高峰时段半径 100 km 仰角 2.4°雷达反射率因子图; D. 粘虫迁飞高峰时段半径 100 km 仰角 3.4°雷达反射率因子图。红框表示迁飞性害虫监测点上空 10 km×10 km (dBZ)。

A. Radius 100 km radar reflectivity factor at 0.5° elevation during migration peak hours of *Mythimna separate*;

B. Radius 100 km radar reflectivity factor at 1.4° elevation during migration peak hours of *Mythimna separate*;

C. Radius 100 km radar reflectivity factor at 2.4° elevation during migration peak hours of *Mythimna separate*;

D. Radius 100 km radar reflectivity factor at 3.4° elevation during migration peak hours of *Mythimna separate*.

Red rectangle indicates 10 km×10 km above the migratory pest monitoring point (dBZ).

扫描中被重复计数,统计间隔设定为 30 min (Hu *et al.*, 2020; Stepanian *et al.*, 2020)。粘虫质量参考 Cui 等 (2019) 选取了 130 mg, 当晚飞越北京上空的粘虫生物量等于解算出的粘虫种群数量与粘虫质量的乘积。

## 1.6 数据分析与可视化

数据的提取、筛选以及可视化均使用 R (4.02 版本, <https://www.rproject.org/>) 和 Python (3.8.5 版本, <https://www.python.org/>), 使用 R 的 Circular

包(<https://cran.rproject.org/web/packages/circular/>)对回波方向进行统计,使用瑞利检验来评估每一回波的平均方向是否具有显著性。计算粘虫迁飞高峰期内每日的特定反射率因子范围的回波占比与每日粘虫数量占比的相关系数。使用线性回归分析天气雷达计算得到的粘虫数量与灯下诱集粘虫数量之间的关系。利用 GrADS 2.1 软件解析 ERA5 气象数据并绘制 950 hPa 的平均风场。

## 2 结果与分析

### 2.1 粘虫迁飞动态及高峰日反射率因子特征

2013 年北京市延庆区昆虫雷达监测点高空测报灯虫情监测从 5 月 2 日持续至 9 月 30 日,累计诱集粘虫成虫为 291 784 头,其中 33 d 未诱集到粘虫。6 月 5 日晚粘虫诱蛾量由前一晚的 580 头突增至 23 973 头,6 日出现全年单日粘虫最大诱蛾量,为 86 000 头,7 日和 8 日诱蛾量分别为 62 400 头和 48 000 头,至 9 日回落至 4 081 头。6 月 5 日至 9 日,迁飞经过监测点上方的虫群以粘虫为主,每晚灯下粘虫量占总虫量的比率分别为 89.1%、97.4%、97.1%、92.1%和 80.1%。雷达回波分析,延庆监测点上方反射率因子 - 15-15 dBZ 的雷达回波占比为 91.0%-94.9%,其中 0-15 dBZ 的回波占比与粘虫占比的相关系数  $r$  最高(表 1),主要介于 0-15 dBZ 之间回波占比变化趋势与粘虫种群变化趋势相同。从 6 月 5 日至 9 日,每晚第一层仰角监测点上空 10 km×10 km 范围内,反射率因子在 0-15 dBZ 的雷达回波数量分别占当晚同区域内雷达回波总数的 30.7%、42.0%、43.2%、37.2%和 25.1%(图 3),灯下粘虫的占比与 0-15 dBZ 的雷达回波占比变化趋势相同,相关系数  $r=0.98$ ;灯下粘虫的数量与 0-15 dBZ 的雷达回波数量之间的相关系数  $r=0.90$ 。在粘虫迁飞高峰日,延庆监测点上空的虫群以粘虫为主,其反射率因子范围介于 0-15 dBZ 之间。

### 2.2 粘虫回波的方向和速度

天气雷达数据经过反演和筛选得到粘虫回波。瑞利检验结果显示,粘虫回波方向定向显著

表 1 不同反射率因子范围占比与粘虫数量占比的相关系数

Table 1 The coefficient between the ratios of specific range of the radar reflectivity and the catch number of armyworm moths

| 反射率因子范围<br>(dBZ)<br>Radar reflectivity<br>range (dBZ) | 占总回波的百分<br>率范围<br>Percentage range<br>of total echoes | 与粘虫数量占比<br>的相关系数<br>Coefficient of the<br>catch number of<br>armyworm moths<br>proportion |
|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| - 15-15                                               | 91.0%-94.9%                                           | 0.76                                                                                      |
| - 10-10                                               | 82.3%-90.7%                                           | 0.64                                                                                      |
| - 5-5                                                 | 65.4%-76.6%                                           | 0.41                                                                                      |
| 0-5                                                   | 17.3%-36.5%                                           | 0.90                                                                                      |
| 0-10                                                  | 22.4%-41.3%                                           | 0.97                                                                                      |
| 0-15                                                  | 25.1%-43.2%                                           | 0.98                                                                                      |
| - 5-10                                                | 70.8%-81.4%                                           | 0.65                                                                                      |
| - 10-5                                                | 77.2%-85.9%                                           | 0.38                                                                                      |
| - 15-0                                                | 54.9%-68.4%                                           | 0.89                                                                                      |

( $P<0.001$ ); 6 月 5 日至 8 日大部分回波方向向北,平均方向分别为 324.6°、11.4°、332.3°和 348.6°;9 日回波方向以向南为主,平均方向 210°(图 4)。根据历史资料,6 月粘虫应向北迁飞,对应的回波方向也应向北。6 月 5 日至 9 日,北向回波比例分别为 80.4%、99.8%、99.6%、92.1%和 15.2%,平均方向角度分别是 334.5°、11.3°、332.5°、347.2°和 319.7°(图 5),与灯下粘虫占比相比,5 日、6 日、7 日和 8 日北向回波占比与灯下粘虫占比一致,9 日北向回波占比降幅明显,低于粘虫占比。北向回波占比与灯下粘虫占比变化趋势相同,两者间的相关系数  $r=0.95$ ;北向回波数量与灯下粘虫数量两者间的相关系数  $r=0.86$ 。

风场与回波分析显示,6 月 5 日至 8 日,北京延庆 950 hPa 上空盛行偏东南气流,河北南部、山东西部、天津大部风速较大,粘虫平均位移速度分别为(4.70±0.05)、(6.66±0.02)、(5.52±0.02)和(3.95±0.05) m/s,9 日观测区域上空盛行北风,致使 9 日北向回波的速度骤降,平均位移速度仅有(1.36±0.02) m/s(图 6)。根据平均速度,按每晚累计飞行 7 h 计算,6 月 5 日至 9 日,每

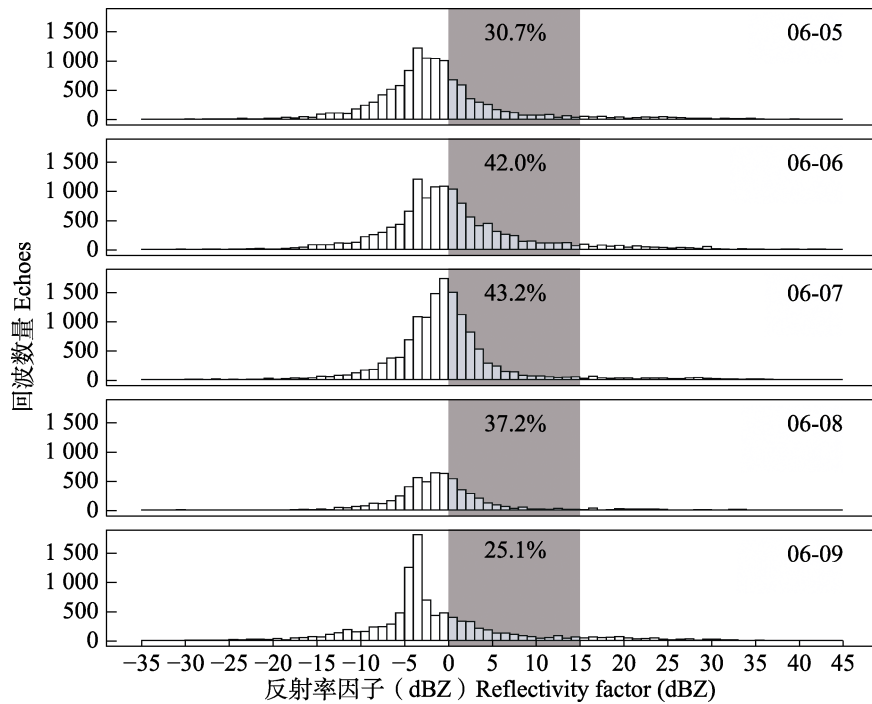


图 3 粘虫迁飞高峰日夜间回波分布图

Fig. 3 Histogram of reflectivity factor of radar echoes of migrating *Mythimna separata* moths at the peak night

阴影部分表示反射率因子位于 0-15 dBZ 的区间, 百分数表示阴影部分占总体的百分比。

The shaded part indicates that the reflectivity factor lies in the interval of 0-15 dBZ, the percentage is the shaded part to the total.

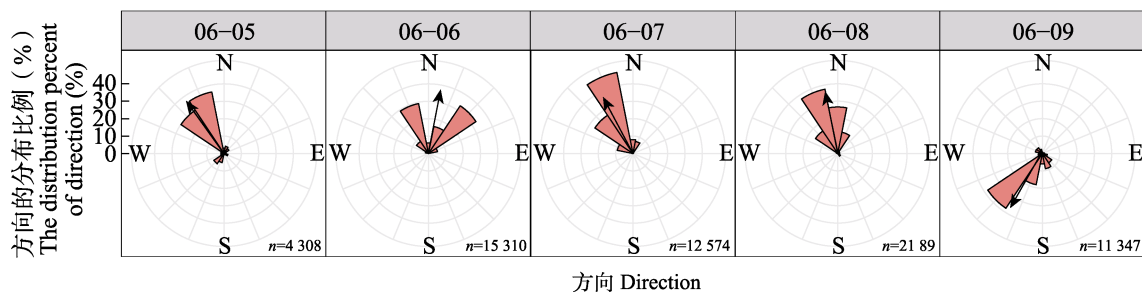


图 4 粘虫迁飞高峰日回波方向分布

Fig. 4 The distribution of percent of echoes direction on the peak day of *Mythimna separata*

黑色箭头表示所有回波的平均方向。Black arrows mean directions of all echoes.

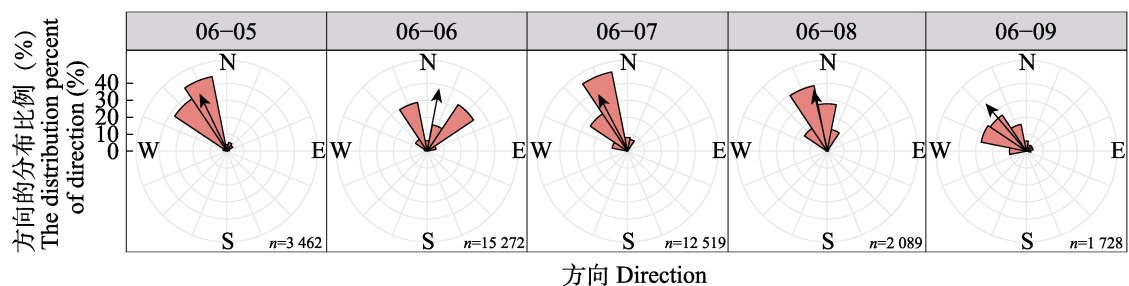


图 5 粘虫迁飞高峰日北向回波方向分布

Fig. 5 The distribution percent of northward echoes direction on the peak day of *Mythimna separate*

黑色箭头是北向回波的平均方向。Black arrows mean directions of northward echoes.

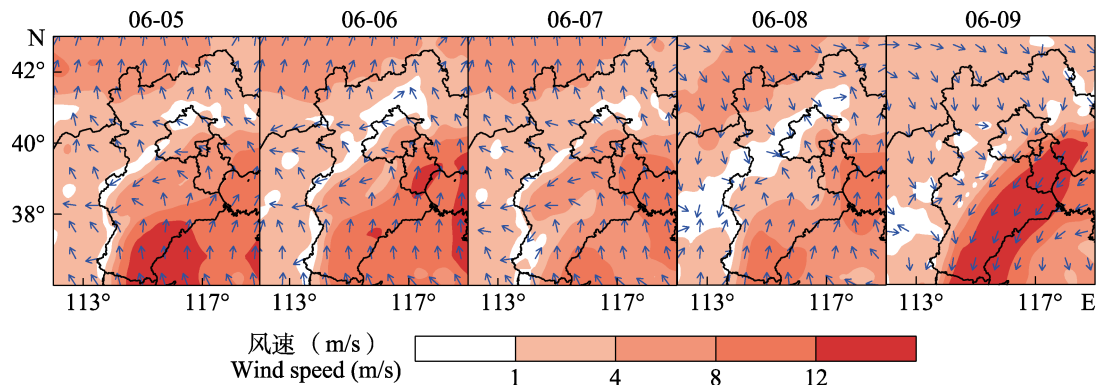


图 6 粘虫迁飞高峰日我国北方地区上空 950 hPa 平均风场(6 月 5 日-9 日)

Fig. 6 Mean wind fields at the level of 950 hPa over northern China during migration peak days of *Mythimna separate* (5-9 June)

晚累计飞行距离分别为 (118.4±1.26)、(167.8±0.50)、(139.1±0.50)、(99.5±1.26) 和 (34.2±0.50) km, 经过一个夜晚可从延庆监测点, 飞至河北承德、张家口等地区。

### 2.3 天气雷达解算的粘虫量与高空测报灯诱数据的关

6 月 5 日至 8 日晚, 5-37.5 km 范围内夜间每小时雷达回波的解算虫量平均为 586 370 头, 9 日晚雷达回波解算虫量为 171 737 头, 前后两个阶段的解算虫量存在显著差异 (Mann-Whitney  $U=112.000$ ,  $P=0.019<0.05$ )。解算虫量与灯下粘虫数量之间存在极显著正线性相关 ( $y = 65.1x + 105\,000$ ,  $R^2=0.64$ ,  $P<0.001$ ), 雷达解算虫量与粘虫灯下虫量之间比值平均为 188.8±48.2。6 月 5 日 22:00-23:00 粘虫灯下虫量最少, 灯下虫量为 241 头, 雷达解算虫量为 101 900 头; 6 月 7 日 2:00-3:00 粘虫灯下虫量最多, 灯下虫量为 21 420 头, 雷达解算虫量为 1 504 400 头 (图 7)。在 6 月 6 日出现粘虫诱蛾最高峰时, 高空测报灯诱粘虫 86 000 头, 基于雷达回波解算, 当晚飞跃北京上空的以粘虫为主的虫群规模达 620 万头, 总生物量超过 0.8 吨。

## 3 讨论

利用天气雷达对生物雷达回波进行研究, 往往需要结合热成像数量估计和地面实际观测提供佐证 (Horton *et al.*, 2018; Nilsson *et al.*, 2018a;

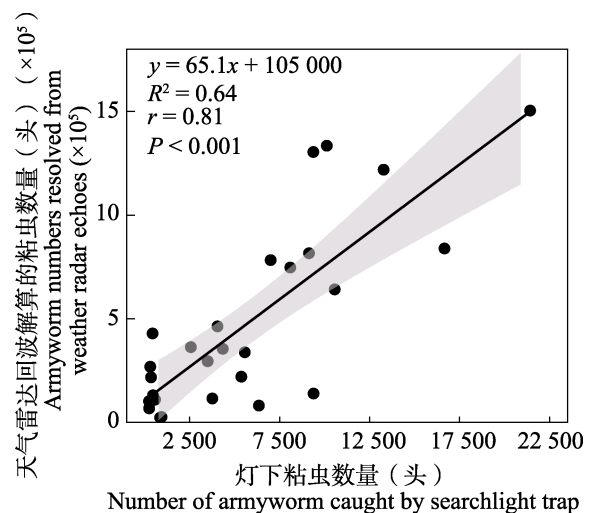


图 7 2013 年 6 月 5 日至 9 日天气雷达回波解算的粘虫数量和灯下粘虫数量

Fig. 7 The number of armyworm resolved by the weather radar and caught by light trap from June 5 to 9, 2013

黑线是对数据的线性拟合, 阴影部分是 95% 的置信区间。Black line is a linear trend fit to the data. The shading band indicates the 95% confidence intervals.

Stepanian and Wainwright, 2018)。本文开展天气雷达回波分析时, 天气雷达图像选取标准除了原有的晴空回波筛选依据以外, 还重点参考了 2013 年延庆监测点高空测报灯分时段粘虫诱集数据, 确保晴空回波的目标主要为粘虫。

雷达反射率因子是表征目标回波强度的单位, 它与观测目标的大小、数量和姿态等有关。研究资料表明, 天气雷达晴空生物回波的反射率因子最低为 -20 dBZ, 最高可达 30 dBZ (Leskinen *et al.*, 2011; 焦热光等, 2018;

Gauthreaux and Diehl, 2020)。在同一区域, 夜晚晴空回波的反射率因子高于白天晴空回波 (Jatau and Melnikov, 2019), 虫群的反射率因子要远大于单体昆虫的反射率因子, 前者的中位数可达后者的 11.75 倍 (Gauthreaux and Diehl, 2020)。2017 年 5 月 30 日夜间接大量粘虫迁飞经过渤海海峡, 烟台雷达和大连雷达观察到了持续向北的生物回波, 在这一迁飞过程中昆虫回波的强度约为 14 dBZ (滕玉鹏等, 2020a)。2013 年一代粘虫灯诱集量创历史之最 (Zhang *et al.*, 2018), 虽然空中粘虫群体密度不能与蝗虫群相比, 但是从灯诱数量证实空中密度较高, 加之单个粘虫的体积较大, 因此雷达回波的反射率因子更高。

粘虫具有远距离迁飞的习性。标记试验、雷达监测和轨迹分析表明, 我国一代粘虫大部分个体向北迁飞 (李光博等, 1964; Chen *et al.*, 1989; Zhang *et al.*, 2018)。2013 年 6 月 5 日至 8 日夜间接盛行偏南风, 利于粘虫向北迁飞, 但 9 日我国北方大部地区以偏北风为主, 不适合粘虫北迁, 粘虫数量也从前一晚的 48 000 头骤降至 4 081 头。天气雷达回波分析表明, 6 月 5 日至 8 日夜间接粘虫可以借助空中气流向北迁飞, 每小时的雷达解算虫量平均为 586 370 头, 北向回波占比超过 80%, 但平均飞行方向存在差异; 9 日晚每小时的雷达解算虫量平均为 171 737 头, 北向回波占 15.2% (图 5)。6 月 9 日晚的北向回波应该是北迁粘虫造成的, 研究表明在风速  $\leq 4$  m/s 条件下, 90% 以上粘虫个体头部逆风飞行, 或头部朝向与风向成一定夹角侧逆风飞行 (尹姣等, 2003), 9 日晚各个时间段北京地区上空主要盛行北风, 大部风速均在 4 m/s 以下, 平均为 2.5 m/s; 同时 9 日晚上半夜诱到的粘虫量占比为 61.5%, 整晚属本地迁出型。上半夜迁出的粘虫种群可能是之前迁入降落在北京周边的粘虫再次起飞形成的, 在风场不利的情况下, 后半夜种群数量急剧减少。6 月 9 日晚, 除北向回波以外, 其他南向回波可能是非生物回波或粘虫外的其他昆虫造成的 (Larkin, 1991; 滕玉鹏等, 2020b)。6 月 9 日晚灯诱数据显示除粘虫外还有旋幽夜

蛾 *Scotogramma trifolii* Rottemberg、小菜蛾等迁飞性害虫, 灯诱数量均大于 100 头, 它们的飞行能力弱于粘虫, 风速可能超过其自身可逆飞临界风速导致其倒飞, 造成南向回波 (尹姣等, 2003)。

昆虫在空中的飞行速度是风速和自身速度的矢量和, 大多数迁飞昆虫的飞行速度取决于风速。研究结果表明, 迁飞昆虫的飞行速度差异较大, 澳大利亚垂直监测昆虫雷达发现多种夜蛾跨越巴斯海峡的平均飞行速度是 3.1 m/s (Drake *et al.*, 1981), 扫描昆虫雷达观测草地螟 *Loxostege sticticalis* 的目标速度多集中在 1-3 m/s 之间, 而天气雷达发现禾谷缢管蚜 *Rhopalosiphum padi* (Linnaeus) 和小菜蛾的飞行速度多为 7-12 m/s, 最大可达 17 m/s (Feng *et al.*, 2004; Leskinen *et al.*, 2011)。本文利用天气雷达计算出这 5 d 粘虫的平均自身速度为  $(3.58 \pm 0.85)$  m/s, 在适宜的温湿度条件下使用室内飞行磨测得粘虫的自身速度为  $(2.18 \pm 0.12)$  m/s (江幸福等, 2003), 自然条件下飞行的粘虫速度可能略快于室内测得的粘虫飞行速度。本文利用天气雷达计算出粘虫每日平均位移速度分别为  $(4.70 \pm 0.05)$ 、 $(6.66 \pm 0.02)$ 、 $(5.52 \pm 0.02)$ 、 $(3.95 \pm 0.05)$  和  $(1.36 \pm 0.02)$  m/s, 6 月 5 日至 8 日顺风飞行时, 粘虫的位移速度会大于自身速度, 接近风速; 6 月 9 日盛行北风但风速较小时, 粘虫此时可能逆风飞行, 位移速度小于自身速度。6 月 9 日向北迁飞或许是粘虫自主向北迁飞的一个例证, 今后需要借助昆虫雷达进一步加以证实。

高空测报灯监测范围多为 500 m 以下的区域 (封洪强, 2003), 利用高空测报灯很难估测空中密度, 而雷达观测可以估算空中昆虫密度。已往的雷达观测表明, 空中的生物量非常巨大, 例如一晚飞越渤海湾的昆虫数量 4 000 万头 (Cui *et al.*, 2019), 每年飞过英国南部的昆虫约有 3.5 万亿头, 生物量约 3 200 吨 (Hu *et al.*, 2016)。利用天气雷达估算, 在全年粘虫灯诱数量最多的一天, 空中约有 600 多万头以粘虫为主的虫群飞过北京上空, 总质量超过 0.8 吨。进一步研究表明, 天气雷达解算虫量与高空测报灯灯诱粘虫数量存在明显的线性相关, 雷达解算虫量与粘虫灯

下虫量之间比值平均为  $188.8 \pm 48.2$ 。值得注意的有两点, 一个是由于天气雷达取样范围非常大, 一头昆虫从进入天气雷达监测范围到飞离天气雷达监测范围被重复记录了很多次, 到时雷达解算虫量存在一定的误差; 另外天气雷达解算虫量与粘虫数量的线性关系存在截距项, 可能的原因是灯下未诱集到粘虫时, 空中存在有其他体型、速度与粘虫相似的昆虫、飞行较慢的候鸟、蝙蝠以及大气湍流等形成的回波被误认为粘虫回波。今后, 需要结合昆虫的生物学特性、昆虫雷达回波特征等进一步优化相关算法, 提高天气雷达的解算数量精度。

## 参考文献 (References)

- Boulanger Y, Fabry F, Kilambi A, Pureswaran DS, Sturtevant BR, Saintamant R, 2017. The use of weather surveillance radar and high-resolution three dimensional weather data to monitor a spruce budworm mass exodus flight. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017(234/235): 127–135.
- Chapman JW, Drake VA, Reynolds DR, 2011. Recent insights from radar studies of insect flight. *Annual Review of Entomology*, 56: 337–356.
- Chen RL, Bao XZ, Drake VA, Farrow RA, Wang SY, Sun YJ, Zhai BP, 1989. Radar observations of the spring migration into northeastern China of the oriental armyworm moth, *Mythimna separata*, and other insects. *Ecological Entomology*, 14(2): 149–162.
- Chilson PB, Frick WF, Stepanian PM, Shipley JR, Kunz TH, Kelly JF, 2012. Estimating animal densities in the aerosphere using weather radar: To Z or not to Z? *Ecosphere*, 3(8): 72.
- Cui K, Hu C, Wang R, Li S, Wu D, Ma S, 2019. Quantifying insect migration across Bohai strait using weather radar. *The Journal of Engineering*, 2019(19): 6095–6098.
- Dokter AM, Liechti F, Stark H, Delobbe L, Tabary P, Holleman I, 2011. Bird migration flight altitudes studied by a network of operational weather radars. *Journal of the Royal Society Interface*, 8(54): 3043.
- Drake VA, Helm KF, Readshaw JL, Reid DG, 1981. Insect migration across Bass Strait during spring: A radar study. *Bulletin of Entomological Research*, 71(3): 449–466.
- Feng HQ, 2003. Community aloft and radar observations of seasonal migration of insects in northern China. Doctor dissertation. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences. [封洪强, 2003. 华北地区空中昆虫群落及昆虫季节性迁移的雷达观测. 博士学位论文. 北京: 中国农业科学院.]
- Feng HQ, Wu KM, Cheng DF, Guo YY, 2004. Spring migration and summer dispersal of *Loxostege sticticalis* (Lepidoptera: Pyralidae) and other insects observed with radar in northern China. *Environmental Entomology*, 33(5): 1253–1265.
- Feng HQ, Zhao XC, Wu XF, Wu B, Wu KM, Cheng DF, Guo YY, 2008. Autumn migration of *Mythimna separata* (Lepidoptera: Noctuidae) over the Bohai Sea in northern China. *Environmental Entomology*, 37(3): 774–781.
- Gao YB, Sun YJ, Zhang Q, Sun W, Zhou JC, 2014. The spring migration behavior of the oriental armyworm, *Mythimna separata*, in northeastern China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 51(4): 906–913. [高月波, 孙雅杰, 张强, 孙崑, 周佳春, 2014. 东北粘虫春季空中虫群的迁飞行为. 应用昆虫学报, 51(4): 906–913.]
- Gauthreaux S, Diehl R, 2020. Discrimination of biological scatterers in polarimetric weather radar data: Opportunities and challenges. *Remote Sensing*, 12(3): 545.
- Hardy KR, Katz I, 1969. Probing the clear atmosphere with high power, high resolution radars. *Proceedings of the IEEE*, 57(4): 468–480.
- He LM, 2017. Study on the migratory behavior of *Scotogramma trifolii* (Lepidoptera: Noctuidae) across the Bohai Strait. Master dissertation. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences. [何莉梅, 2017. 旋幽夜蛾跨海迁飞行为研究. 硕士学位论文. 北京: 中国农业科学院.]
- Horton KG, Van Doren BM, La Sorte FA, Fink D, Sheldon D, Farnsworth A, Kelly JF, 2018. Navigating north: How body mass and winds shape avian flight behaviours across a North American migratory flyway. *Ecol. Lett.*, 21(7): 1055–1064.
- Hu C, Cui K, Wang R, Long T, Ma S, Wu K, 2020. A retrieval method of vertical profiles of reflectivity for migratory animals using weather radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 58(2): 1030–1040.
- Hu G, Gao BY, Feng HQ, Jiang XF, Zhai BP, Wu KM, 2020. Insect migration: Individual behaviour, population dynamics and ecological consequences. *National Natural Science Foundation of China*, 34(4): 456–463. [胡高, 高博雅, 封洪强, 江幸福, 翟保平, 吴孔明, 2020. 迁飞昆虫的个体行为、种群动态及生态效应. 中国科学基金, 34(4): 456–463.]
- Hu G, Lim KS, Horvitz N, Clark SJ, Reynolds DR, Sapir N, Chapman JW, 2016. Mass seasonal bioflows of highflying insect migrants. *Science*, 354(6319): 1584–1587.
- Jackson R, Collis S, Lang T, Potvin C, Munson T, 2019. PyDDA: A new Pythonic wind retrieval package. Proceedings of the 18th Python in Science Conference. Austin, Texas: 111–117.

- Jatau P, Melnikov V, 2019. Classifying bird and insect radar echoes at S band. 35th Conference on Environmental Information Processing Technologies. Amer. Meteor. Soc. Phoenix. AZ: 830.
- Jiang XF, Cai B, Luo LZ, Cao YZ, Liu YQ, 2003. Influences of temperature and humidity synthesis on flight capacity in the moths of Oriental armyworm, *Mythimna separate* (Walker). *Acta Ecologica Sinica*, 23(4): 738–743. [江幸福, 蔡彬, 罗礼智, 曹雅忠, 刘悦秋, 2003. 温、湿度综合效应对粘虫蛾飞行能力的影响. *生态学报*, 23(4): 738–743.]
- Jiang XF, Zhang L, Cheng YX, Luo LZ, 2014. Current status and trends in research on the oriental armyworm, *Mythimna separata* (Walker) in China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 51(4): 881–889. [江幸福, 张蕾, 程云霞, 罗礼智, 2014. 我国粘虫研究现状及发展趋势. *应用昆虫学报*, 51(4): 881–889.]
- Jiang YY, Li CG, Zeng J, Liu J, 2014. Population dynamics of the armyworm in China: A review of the past 60 years' research. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 51(4): 890–898. [姜玉英, 李春广, 曾娟, 刘杰, 2014. 我国粘虫发生概况: 60 年回顾. *应用昆虫学报*, 51(4): 890–898.]
- Jiang YY, Liu J, Zeng J, 2016. Using vertical pointing searchlight traps to monitor population dynamics of the armyworm *Mythimna separate* (Walker) in China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 53(1): 191–199. [姜玉英, 刘杰, 曾娟, 2016. 高空测报灯监测粘虫区域性发生动态规律探索. *应用昆虫学报*, 53(1): 191–199.]
- Jiang YY, Liu J, Zeng J, Huang C, Zhang T, 2021. Occurrence of, and damage caused by, major migratory pests and techniques for monitoring and forecasting these in China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 58(3): 542–551. 姜玉英, 刘杰, 曾娟, 黄冲, 张涛, 2021. 我国农作物重大迁飞性害虫发生为害及监测预报技术. *应用昆虫学报*, 58(3): 542–551.
- Jiao RG, Zhang Z, Shi GY, Zhang YH, 2018. Analysis of the echoes of migrating insects detected by Beijing doppler weather radar. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 55(2): 177–185. [焦热光, 张智, 石广玉, 张云慧, 2018. 北京多普勒天气雷达上的昆虫回波分析. *应用昆虫学报*, 55(2): 177–185.]
- Larkin RP, 1991. Flight speeds observed with radar, a correction: Slow "birds" are insects. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 29(3): 221–224.
- Leng L, 2008. Study on precipitation echo and nonprecipitation echo recognition of weather radar. Master dissertation. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology. [冷亮, 2008. 天气雷达降水回波与非降水回波识别研究. 硕士学位论文. 南京: 南京信息工程大学.]
- Leskinen M, Markkula I, Koistinen J, Pylkkö P, Ooperi S, Siljamo P, Ojanen H, Raiskio S, Tiilikka 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, 1993. Current status and progress in research on the oriental armyworm, *Mythimna separata* (Walker) in China. *Plant Protection*, 19(4): 2–4. [李光博, 1993. 我国粘虫研究概况及主要进展. *植物保护*, 19(4): 2–4.]
- Li GB, Wang HX, Hu WX, 1964. Route of the seasonal migration of the oriental armyworm moth in the eastern part of China as indicated by a three year result of releasing and recapturing of marked moths. *Journal of Plant Protection*, 3(2): 101–109. [李光博, 王恒祥, 胡文绣, 1964. 粘虫季节性迁飞为害假说及标记回收试验. *植物保护学报*, 3(2): 101–109.]
- Nilsson C, Dokter AM, Schmid B, Scacco M, Verlinden L, Bäckman J, Haase G, Dell' Omo G, Chapman JW, Leijnse H, Liechti F, Siriwardena G, 2018a. Field validation of radar systems for monitoring bird migration. *Journal of Applied Ecology*, 55(6): 2552–2564.
- Nilsson C, Dokter AM, Verlinden L, Shamoun - Baranes J, Schmid B, Desmet P, Bauer S, Chapman J, Alves JA, Stepanian PM, Sapir N, Wainwright C, Boos M, Górka A, Menz MHM, Rodrigues P, Leijnse H, Zehtindjiev P, Brabant R, Haase G, Weisshaupt N, Ciach M, Liechti F, 2018b. Revealing patterns of nocturnal migration using the European weather radar network. *Ecography*, 42(5): 876–886.
- Potvin CK, Shapiro A, Xue M, 2012. Impact of a vertical vorticity constraint in variational dual doppler wind analysis: Tests with real and simulated supercell data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 29(1): 32–49.
- Rennie SJ, 2014. Common orientation and layering of migrating insects in southeastern Australia observed with a doppler weather radar. *Meteorological Applications*, 21(2): 218–229.
- Shapiro A, Potvin CK, Gao J, 2009. Use of a vertical vorticity equation in variational dual doppler wind analysis. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 26(10): 2089–2106.
- Sharma HC, Davies JC, 1983. The oriental armyworm, *Mythimna separata* (Wal.) distribution, biology and control: A literature review. Center for Oversea Pest Research, ODA Miscellaneous Report 59. London, Center for Oversea Pest Research.
- Sivakumar AH, Sheldon D, Winner K, Burt CS, Horton KG, 2021. A weather surveillance radar view of Alaskan avian migration. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 288(1950): 20210232.
- Stepanian PM, Entekhabi SA, Wainwright CE, Mirkovic D, Tank JL,

- Kelly JF, 2020. Declines in an abundant aquatic insect, the burrowing mayfly, across major North American waterways. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(6): 2987–2992.
- Stepanian PM, Wainwright CE, 2018. Ongoing changes in migration phenology and winter residency at Bracken Bat Cave. *Global Change Biology*, 24(7): 3266–3275.
- Sun W, Cheng ZJ, Gao YB, Su QF, Zhou JC, Wang JS, Zhang JJ, 2018. The autumn migration of the third generation armyworm *Mythimna separata* (Walker): Radar observations and trajectory analysis. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 55(2): 160–167. [孙崑, 程志加, 高月波, 苏前富, 周佳春, 王金生, 张娇娇, 2018. 三代粘虫成虫迁飞的雷达观测与分析. 应用昆虫学报, 55(2): 160–167.]
- Teng YP, Chen HB, Ma SQ, Wu DL, Zhou Y, Cui K, 2020a. Weather radar identification of directional biological migrations across the sea. *Meteorological Monthly*, 46(7): 938–947. [滕玉鹏, 陈洪滨, 马舒庆, 吴东丽, 周燕, 崔铠, 2020a. 天气雷达监测生物跨海迁飞方法. 气象, 46(7): 938–947.]
- Teng YP, Chen HB, Ma SQ, Li ST, Wu DL, Zhou Y, 2020b. The cause of night clear air echo of sband weather radar in Beijing. *Journal of Applied Meteorological Science*, 31(5): 595–607. [滕玉鹏, 陈洪滨, 马舒庆, 李思腾, 吴东丽, 周燕, 2020b. 北京 S 波段天气雷达夜间晴空回波产生原因. 应用气象学报, 31(5): 595–607.]
- Van Doren BM, Horton KG, 2018. A continental system for forecasting bird migration. *Science*, 361(6407): 1115–1118.
- Wainwright CE, Reynolds DR, Reynolds AM, 2020. Linking smallscale flight manoeuvres and density profiles to the vertical movement of insects in the nocturnal stable boundary layer. *Sci. Rep.*, 10(1): 10–19.
- Westbrook JK, Eyster RS, 2017. Doppler weather radar detects emigratory flights of noctuids during a major pest outbreak. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2017(8): 64–70.
- Westbrook JK, Eyster RS, Wolf WW, 2014. WSR88D doppler radar detection of corn earworm moth migration. *International Journal of Biometeorology*, 58(5): 931–940.
- Yin J, Feng HQ, Cheng DF, Cao YZ, 2003. Observations on the flight behavior of the oriental armyworm, *Mythimna separate* (Walker) in airflow. *Acta Entomologica Sinica*, 46(6): 732–738. [尹姣, 封洪强, 程登发, 曹雅忠, 2003. 粘虫成虫在气流场中飞行行为的观察研究. 昆虫学报, 2003(6): 732–738.]
- 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.]
- Zhang YH, Zhang Z, Jiang YY, Zeng J, Gao YB, Cheng DF, 2012. Preliminary analysis of the outbreak of the third generation armyworm *Mythimna separate* in China in 2012. *Plant Protection*, 38(5): 18. [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): 18.]
- Zhang YH, Zhang Z, Li C, Jiang YY, Zeng J, Cheng DF, 2013. Seasonal migratory behavior of *Mythimna separate* (Lepidoptera: Noctuidae) in Northeast China. *Acta Entomologica Sinica*, 56(12): 1418–1429. [张云慧, 张智, 李超, 姜玉英, 曾娟, 程登发, 2013. 东北地区粘虫的季节性迁飞行为 (英文). 昆虫学报, 56(12): 1418–1429.]
- Zhang Z, 2013. Monitoring and population dynamics analyses of important migratory pest insects in northern China. Doctor 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. 博士学位论文. 北京: 中国农业科学院.]
- Zhang Z, Qi JF, Zhang Y, Lin PJ, Zhang YH, 2021. Development of monitoring and forecasting technologies for migratory insect pests and suggestions for their future application. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 58(3): 530–541. [张智, 祁俊锋, 张瑜, 林培炯, 张云慧, 2021. 迁飞性害虫监测预警技术发展概况与应用展望. 应用昆虫学报, 58(3): 530–541.]
- Zhang Z, Zhang YH, Wang J, Liu J, Tang QB, Li XR, Cheng DF, Zhu X, 2018. Analysis on the migration of first generation *Mythimna separate* (Walker) in China in 2013. *Journal of Integrative Agriculture*, 17(7): 1527–1537.
- Zhang ZT, Li GB, 1985. A study on the biological characteristics of the flight of the oriental armyworm *Mythimna separate* (Walker) moth. *Journal of Plant Protection*, 12(2): 93–100. [张志涛, 李光博, 1985. 粘虫飞翔生物学特性初步研究. 植物保护学报, 12(2): 93–100.]
- Zheng Y, Li N, Ming W, Chu ZG, Fan SH, Jia PC, Li Y, Zhang X, Lv XC, 2021. PyCWR, version:0.3.1. <https://github.com/YvZheng/pycwr>.