稻纵卷叶螟(*Cnaphalocrocis medinalis*)迁飞的多普勒昆虫雷达观测及动态

高月波[1,3],陈 晓[1],陈钟荣[2],包云轩[1,2],杨荣明[4], 刘天龙[5], 翟保平[1,*]

1. 南京农业大学昆虫学系, 农业部病虫监测与治理重点开放实验室, 南京 210095; 2. 南京信息工程大学遥感学院,南京 210044;
3. 吉林省农业科学院植物保护研究所,公主岭 136100; 4. 江苏省植保站, 南京 210036;5. 南京市浦口区植保站, 南京 211800)

摘要:在 2007 年 7 ~ 9 月江淮稻区稻纵卷叶螟大发生期间,利用多普勒昆虫监测雷达在南京市浦口区对稻纵卷叶螟成虫的迁飞活动进行了监测,结合大气风温场的数值模拟,研究了稻纵卷叶螟成虫的空中飞行参数和种群迁飞动态。结果表明:稻纵卷叶螟多选择在黄昏 18:30 以后大规模起飞,空中虫群密度在 20:00 ~ 22:00 时最大,迁飞过程可持续到次日 5:00;稻纵卷叶螟主要选择在 500 m 以下高度飞行。空中虫群具有聚集成层的现象,虫层多在 100 ~ 500 m 高度之间形成,有时形成两个虫层,成层现象与低空急流关系密切,与温度没有直接关系。迁飞过程分析表明,浦口区的六(4)代稻纵卷叶螟在台风、副热带高压和江淮气旋的影响下,先后出现了多次迁入迁出过程。低压系统外围的下沉气流很可能是稻纵卷叶螟两次集中迁入的主要原因。

关键词:稻纵卷叶螟;多普勒雷达观测;数值模拟;迁飞动态

文章编号:1000-0933(2008)11-5238-10 **中图分类号**:Q968 **文献标识码**:A

Dynamic analysis on the migration of the rice leaf roller *Cnaphalocrocis medinalis* (Lepidoptera: Pyralidae) by Doppler Insect Monitoring Radar and numerical simulation

GAO Yue-Bo[1,3], CHEN Xiao[1], CHEN Zhong-Rong[2], BAO Yun-Xuan[1,2], YANG Rong-Ming[4], LIU Tian-Long[5], ZHAI Bao-Ping[1,*]

1 *Department of Entomology, Key Laboratory of Pest Monitoring and Management of Chinese Ministry of Agriculture, Nanjing Agricultural University; Nanjing* 210095, *China*

2 *College of Remote Sensing, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing* 210044, *China*

3 *Institute of Plant Protection, Jilin Academy of Agricultural Science, Gongzhuling* 136100, *China*

4 *Jiangsu Plant Protection Station, Nanjing* 210036, *China*

5 *Pukou Plant Protection Station, Nanjing* 211800, *China*

***Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(11): 5238 ~ 5247.**

Abstract: Doppler Insect Monitoring Radar (DIMR) observations of rice leaf roller *Cnaphalocrocis medinalis* migration were made at Pukou district of Nanjing from July to September 2007. Radar observations showed that large numbers of rice leaf roller moths migrated from dusk (18:00 h) until about 05:00 h the following morning. The maximum aerial density of

基金项目:国家 973 资助项目 (2006CB102007);国家科技支撑计划资助项目(2006BAD08A01);水稻产业技术体系资助项目(nyctx-001)

收稿日期:2008-02-20; **修订日期**:2008-09-16

作者简介:高月波(1974 ~),男,南京人, 博士生,主要从事害虫预测预报研究. E-mail: gaoyuebo8328@yahoo.com.cn

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: bpzhai@njau.edu.cn

Foundation item: The project was financially supported by State Key Development Program of Basic Research of China (No. 2006CB102007); National Key Technologies Research and Development Program of China (No. 2006BAD08A01); Rice Industrial Technology System Program (No. nyctx-001)

Received date: 2008-02-20; **Accepted date**: 2008-09-16

Biography: GAO Yue-Bo, Ph. D. candidate, mainly engaged in insect ecology and pest forecasting. E-mail: gaoyuebo8328@yahoo.com.cn

moths usually appeared between 20:00 and 22:00 every night. The moths mainly flew below 500 m. The majority of the migrating moths on any one night usually aggregated in layers between 100 m and 500 m above ground, and sometimes two moth layers were present simultaneously, one above the other. The stratification of moth density was closely related to the low-level nocturnal jet rather than air temperature.

We analyzed the migration dynamics and the temperature and wind profiles on the migration routes by numerical simulation using NCAR re-analysis meteorological data, the DIMR data and field survey data. The results showed that there were four migrations of the 4th generation of the moth in Pukou. (1) The moths immigrated from the southern area of Jiangsu on the peripheral wind field of a Typhoon on 18 — 19 August. (2) A large proportion of the moths in the local area emigrated to regions to the northwest on the low-level jet on the night of 24 August. (3) Another population immigrated from areas to the southeast of Nanjing on the following night, and (4) in early September, after one cyclone moving into the East China Sea, the rice leaf rollers in Pukou engaged in southwards 'return' migration on the northeast winds following the cyclone.

Results indicated that the two massive immigration peaks of the rice leaf roller on the night of 18 — 19 and 25 August were associated with the subsidence around the low pressure system.

Key Words: *Cnaphalocrocis medinalis*; Doppler Insect Monitoring Radar; numerical simulation, migration dynamics

稻纵卷叶螟(*Cnaphalocrocis medinalis* Guenée)是一种广泛分布于亚洲和东非的重要水稻害虫。在我国,除新疆和宁夏以外所有水稻产区该害虫均有分布,但在发生程度上存在明显的地域差别,主要危害区在泰沂山至秦岭一线以南地区[1,2]。稻纵卷叶螟属于间歇性爆发害虫,20 世纪 60 年代中期以来为害明显加重,但发生水平年度间波动很大,地域、田块间发生分布也极不均匀[3,4]。自 2003 年起,我国南方稻区稻纵卷叶螟再度猖獗,以特大发生年 2007 为例,全国发生面积近 2700 万 hm^2。

稻纵卷叶螟成虫具有远距离迁飞习性,在我国范围内每年有 5 次北迁和 3 次南迁过程[1],副热带高压和季风环流的季节性变化为其远距离往返迁飞提供了必要条件。大规模迁飞使稻纵卷叶螟的危害具有突发性,预测预报难度极大,往往猝不及防并造成惨重损失。因此,对高空迁飞害虫飞行行为和其种群数量长期系统地监测,是实现对迁飞害虫准确预警的前提,昆虫雷达无疑是最有力的监测工具。中国雷达昆虫学研究虽较英、美、澳等国起步晚,但发展迅速,先后利用扫描雷达和垂直雷达对粘虫、棉铃虫、草地螟、蜻蜓、叶甲及旋幽夜蛾等昆虫的迁飞进行了观测[5~11],在揭示昆虫迁飞时空动态和飞行行为方面做出重要贡献;国外昆虫雷达技术相对成熟,ZLC 制式垂直雷达已经实现了对空中迁飞个体质量、体型及翅振频率等参数的提取,自动化和网络化的长期雷达监测技术也已应用到生产和研究实践[12,13]。1988 ~ 1991 年,南京农业大学与英国自然资源研究所合作利用毫米波扫描雷达对华东地区稻纵卷叶螟秋季空中迁飞种群进行研究,获得了部分空中稻纵卷叶螟种群参数和个体行为参数,探讨了稻纵卷叶螟迁飞与大气因子的关系[14]。

稻纵卷叶螟属于小型迁飞蛾类,在高空迁飞过程中表现为自由定向、乘风飞行,其空中运行速度、高度和位移方向与各气象要素的时空分布关系密切,将昆虫雷达直接采集的数据与风温场等气象数据相结合进行分析,将有助于阐明迁飞昆虫对大气结构变化和运动方向选择的适应能力,同时可以模拟昆虫的迁飞轨迹,为确定虫源区和迁入区提供相关证据[15~17]。2007 年 7 月下旬至 9 月初,利用南京农业大学新组建的收发分置(双天线结构)多普勒昆虫监测雷达(doppler insect monitoring radar, DIMR)对稻纵卷叶螟大规模迁飞过程进行了观测。本研究利用雷达观测结果,结合地面虫情和大气风温场的数值模拟对稻纵卷叶螟迁飞种群时空动态及飞行行为进行分析,以期为稻纵卷叶螟为害的预测和防治提供科学依据。

1　材料和方法

1.1　多普勒昆虫监测雷达(DIMR)及观测场设置

南京农业大学多普勒昆虫监测雷达装配国产固态发射机并采用收发分置双天线结构,天线直径 1.5 m。

雷达电磁波的发射和接收分别由两个天线完成,最大限度地降低可观测高度,克服了以往单天线脉冲雷达无法对 150 m 以下迁飞昆虫取样的弊端。该雷达可以 9600 ± 80MHz (X 波段, 3.2cm 波长)的频率发射调频连续波或调频脉冲串两种波形,并将多普勒技术和调频连续波体制有机结合,大大提高了雷达的垂直方向距离分辨率。

雷达观测场位于南京市浦口区南京农业大学江浦农业试验场内(32°03′25″N, 118°37′38″E,海拔 14 m)。江浦地处长江下游平原,以种植单季晚稻为主,当地稻纵卷叶螟年发生 4 ~ 5 代,并属于稻纵卷叶螟迁飞事件频发地区。雷达架设点南侧是南京农业大学大面积的试验稻田,观测场附近无地物障碍易于稻纵卷叶螟迁飞的雷达观测。

1.2 资料来源

虫情资料采用江苏省南京市浦口区植保站提供的逐日田间稻纵卷叶螟赶蛾数据、卵量和幼虫调查数据。气象资料采用了美国国家环境预报中心(NCEP)的 FNL 分析数据(水平分辨率 1° × 1°,时间间隔为 6 h),中国气象局 9210 工程下发的每隔 12 h 和 3 h 的常规探空资料和地面观测资料(本实验室卫星数据接收处理系统 PCVSATTM 实时接收)。地图资料采用中国省级行政区图(1∶4000000),从国家基础地理信息中心网站(http://nfgis.nsdi.gov.cn)下载。

1.3 研究方法

自 2007 年 7 月 21 日至 9 月 3 日,除降雨或机械故障等情况外,每天 18:00 至翌日 05:30 为雷达观测时间,每次观测时间为 5 min,相邻两次观测之间间隔 22 min。雷达运行和数据记录由计算机自动控制,数据信号通过分析软件进行处理,获得目标个数、飞行高度等参数。

利用田间系统虫情观测资料,对雷达观测目标进行验证,并分析稻纵卷叶螟的种群消长动态。利用中尺度数值预报模式 MM5 对迁飞期间的大气动力场进行了模拟。将雷达观测结果与 MM5 所模拟的风温廓线相结合,分析稻纵卷叶螟迁飞种群的空间分布特点。同时,利用 MM5 输出的高分辨率风场,计算稻纵卷叶螟迁飞轨迹,以阐明其迁飞动态。

1.4 空中虫群高度、数量及密度提取

在不同高度飞行的昆虫会在昆虫雷达回波高度分布图上占据不同的位置,并且昆虫通过雷达照射区时,其飞行具有一定的时间间隔,具体的时间信息也会在雷达回波图具有明显的特征。因此根据昆虫的雷达回波的高度信息与经过雷达观测区的时间长短信息,就可以估计在一定高度和一定时间内上通过雷达照射区的昆虫数量。通过观测时间内的昆虫数量累积,则可以得到在一定时间段的昆虫个数的高度分布。由于雷达采用的是调频连续波体制,可以在观测高度以内进行连续取样,因此以 100 m 为单位将雷达的扫描锥体划分为 12 个垂直连续取样空间,即 12 个取样圆台,密度估算公式如下:

昆虫密度(头/m^3) = 昆虫个数(头)/ [取样圆台垂直截面积(m^2) × 对应高度层平均风速(m/s) × 取样时间(s)]

1.5 数值模拟方案设计

模拟区域采用两重双向作用嵌套网格,水平分辨率分别为 36 km 和 12 km,格点数分别为 75 × 75,55 × 55。粗网格中心区域位于 114°E,32°N。模式顶层气压取 100 hPa,垂直方向分为 39 个不等距 σ 层。粗细网格均选用 Grell 积云对流参数化方案,Reisner 霰显式水汽方案、MRF 边界层参数化方案、RRTM 长波方案以及 Noah LSM 陆面过程。粗细网格分别采用 USGA 全球 5 min、2 min 地形和地表分类资料。

模式采用 FNL 分析数据(水平分辨率 1° × 1°,时间间隔为 6h)作为背景场,再加入每隔 12h 的常规探空资料、每隔 3h 的地面观测资料对背景场再分析后,形成初值场及粗网格区域的侧边界条件。初始时间为每日北京时间 20h(下同),每次积分时间为 24h,积分步长 108s。为使模拟尽量准确,整个模拟过程对粗网格进行了四维同化(FDDA)。每 1h 输出 1 次模拟结果。

2　结果与分析

2.1　雷达观测稻纵卷叶螟种群时空动态

2.1.1　稻纵卷叶螟迁飞种群的时间动态

逐日田间赶蛾调查表明,稻纵卷叶螟成虫数量从 7 月下旬到 9 月初出现了 2 个高峰期(图 1)。五(3)代稻纵卷叶螟从 7 月 24 日开始进入成虫盛发期,而后田间蛾量持续增加,7 月 30 日至 8 月 8 日平均蛾量均维持在 15 头/ m^2左右。六(4)代稻纵卷叶螟在 8 月中旬末进入盛发期,8 月 19 ~ 21 日田间蛾量连续增加,9 月 1 日最高蛾量 38 头/ m^2,9 月 2 ~ 4 日田间蛾量则急剧回落。自 7 月 21 日至 9 月 3 日,雷达共观测到 2 次大规模迁飞高峰期,第一次为 7 月下旬至 8 月初,第二次为 8 月 18 日至 9 月初,这一结果与地面稻纵卷叶螟种群消长动态一致,基本可以断定雷达观测到的高密度空中目标主要是稻纵卷叶螟。

稻纵卷叶螟于黄昏时分(18:30 以后)起飞,此时雷达观测到的近地(100 m 以下)回波数量突增,近地回波高密度可维持 1h 左右。至 20:00 左右大规模起飞过程结束,近地回波数量明显减少,这期间虫群高度不断上升,100 m 以上高度回波数量不断增加。以 8 月 28 ~ 29 日夜间雷达观测数据计算,在起飞高峰19:00时,100 m 以下的昆虫密度高达 65 头/$10^4 m^3$;空中虫群密度通常在 20:00 ~ 22:00 之间达到最大值,23:00以后空中回波数量明显减少(图 2,图 3),直至翌日凌晨 5:00 以后回波逐渐消失,但少数观测日午夜以后的个别观测时次会出现空中回波数量的突增。

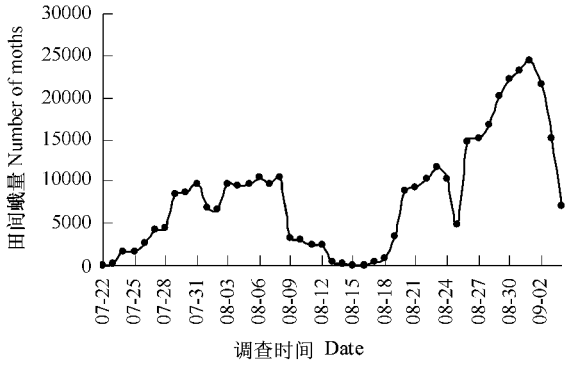

图 1　田间稻纵卷叶螟成虫数量动态

Fig. 2　The quantitative dynamic of rice leaf roller moths in field

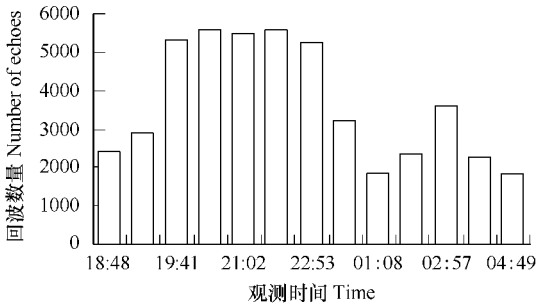

图 2　2007 年 8 月 25 ~ 26 日雷达观测昆虫数量时间动态

Fig. 2　The temporal variation in the number of insects on the night of 25 ~ 26 August 2007

2.1.2　稻纵卷叶螟迁飞种群的空间密度分布

稻纵卷叶螟的迁飞高度主要在 500 m 以下,500 m 以上昆虫回波数量较少,迁飞虫群在垂直高度上的密度分布不均匀,部分观测日发现空中迁飞种群具有聚集成层现象,8 月 25 ~ 28 日连续 4 个夜间观测都发现空中虫群的双虫层分布,虫层高度分别在 100 ~ 150 m 和 250 ~ 500 m(图 3)。将 8 月 27 日 23:00 的风速和温度与当时昆虫密度进行比较发现:在 250 ~ 350 m 高度昆虫密度为 17 头/$10^4 m^3$,此高度风速为 11.3 m/s,是当时的极值风速,8 月 25、26 和 28 日观测到 250 m 以上形成的虫层也在低空急流范围内,可见稻纵卷叶螟的成层现象与低空急流有直接关系(图 4)。

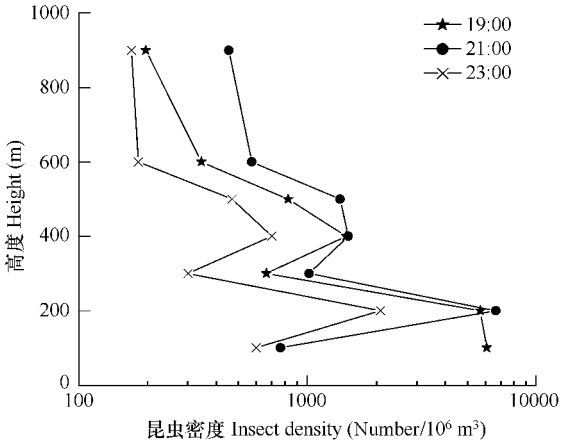

图 3　8 月 28 日稻纵卷叶螟空中种群密度时空变化

Fig. 3　The spatio-temporal variation in moth density at three times on the night of 28 ~ 29 August 2007

2.2　江淮稻区 2007 年六(4)代稻纵卷叶螟迁飞动态分析

进入8月中旬以后,雷达观测到的昆虫数量很少,而从8月18日到9月初,雷达多数夜晚都能观测到大量的昆虫目标,这对应着江淮地区六(4)代稻纵卷叶螟成虫盛发期。结合雷达监测结果和田间蛾量综合分析,浦口区在六(4)代稻纵卷叶螟成虫发生期间,先后于8月18~19日、8月24日、8月25日、9月1~3日出现较大规模的迁入、迁出过程。

2.2.1 8月18~20日的迁入峰分析

2007年第9号热带风暴"圣帕"于8月18日夜间在福建省沿海登陆。受"圣帕"外围气流影响,江浙地区在此期间出现了持续的东风和东南风,风速较强(图5)。江浙地区各地虫情监测结果表明,8月18日苏南地区最先进入六(4)代稻纵卷叶螟发蛾盛期。8月18日夜间,位于南京市浦口区的昆虫雷达所监测到的回波较前一时期显著增加,强烈的回波从黄昏持续到凌晨2点以后。浦口区田间逐日赶蛾量在8月19~20日连续激增,根据系统调查和发育历期推算,此时当地虫源尚未进入羽化高峰。因此8月18~19日夜间雷达观测到的昆虫目标多数从异地迁入。逆推轨迹分析显示,8月18日、19日夜间雷达观测到的过境蛾群均是从雷达观测站附近向东南延伸200 km的范围之内迁出的(图6),这与成虫盛发区域相吻合。沿海地区黄昏时分迁出的蛾群可于2:00抵达雷达观测场的上空,而更远的区域不再有虫源,这也许是2:00以后雷达昆虫目标数量急剧下降的原因。

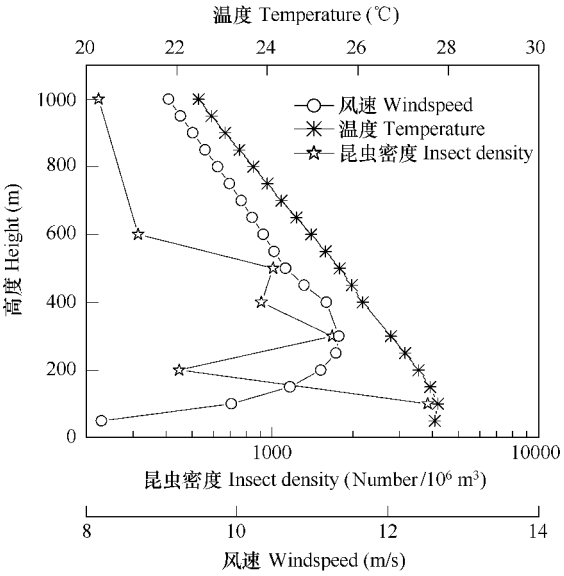

图4 8月27日23:00温度、风速和昆虫密度在垂直高度上的变化

Fig.4 The variation with height of air temperature, wind speed and the aerial density of insects on the night of 27 August 2007

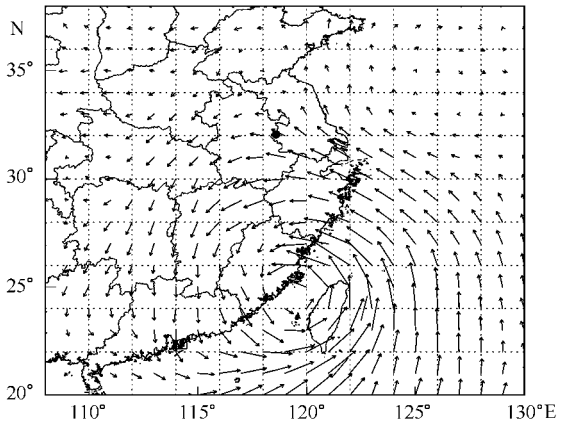

图5 2007年8月18日20时925hPa风场

Fig.5 Wind field on 925 hPa at 20:00 on 18 August 2007

图中黑点为雷达观测点 The black dot in above the map shows the radar station in Jiangpu

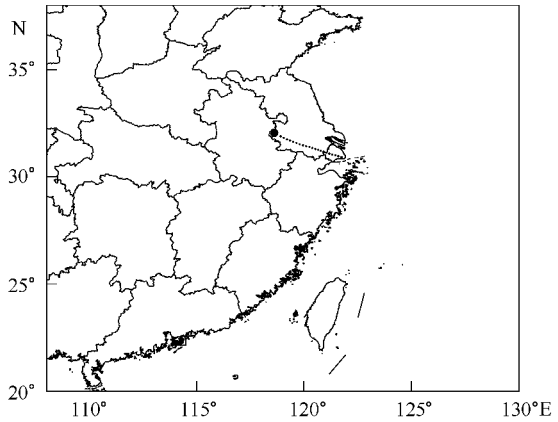

图6 2007年8月18日夜间飞越雷达上空的稻纵卷叶螟蛾群的逆推轨迹(400m)

Fig.6 Backward trajectory of rice leaf roller flying over the radar site at Pukou, Nanjing on the night of 18 August 2007 (at 400 m)

那么,什么原因促使了稻纵卷叶螟的集中降落?从降水情况来看,8月18日夜间天空晴朗,8月19日夜间阴天,因此降水不是集中降落的原因。考察大气垂直运动状况可见,8月18~19日夜间,有一个下沉气流中心位于南京的上空(图7,左)。下沉气流是由台风引起的,空气在台风中心强烈地辐合上升,在台风外围出现下沉运动。从沿119°E的纬向环流和垂直速度剖面图中,可以看到空气垂直运动的过程(图8,左)。8月

19 日夜间,在 24° ~34°N 的区域内有强对流天气出现并形成了垂直环流圈,南京市浦口区位于垂直环流圈的下沉支内。可见,浦口区 8 月 19 日夜间的迁入峰与下沉气流有关。

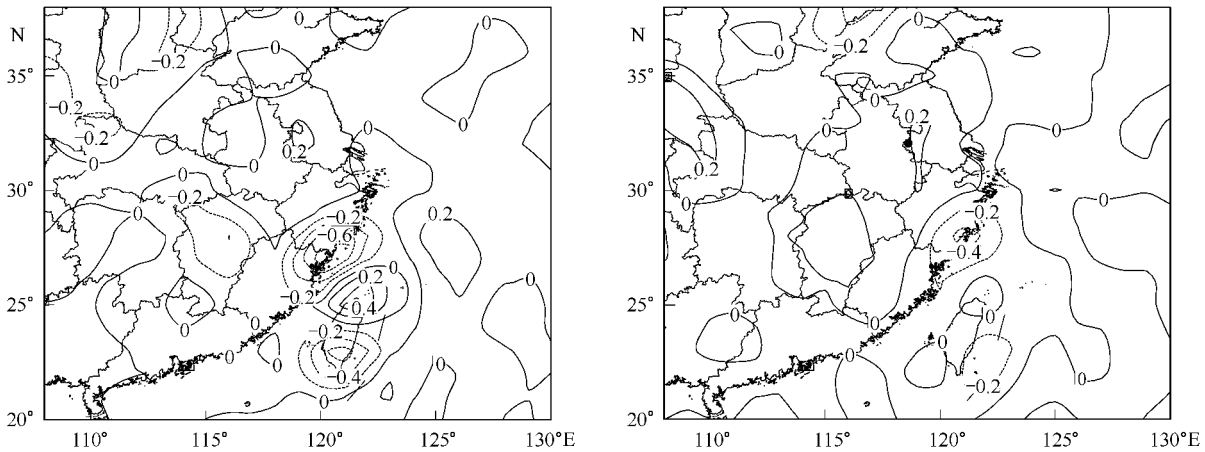

图 7　2007 年 8 月 19 日 20:00(左)和 26 日 02:00(右)925hPa 垂直速度场(Pa/s)

Fig. 7　Vertical speed field (pa/s) on 925hPa level at 20:00 on 19 August (left) and 02:00 on 26 August 2007 (right)

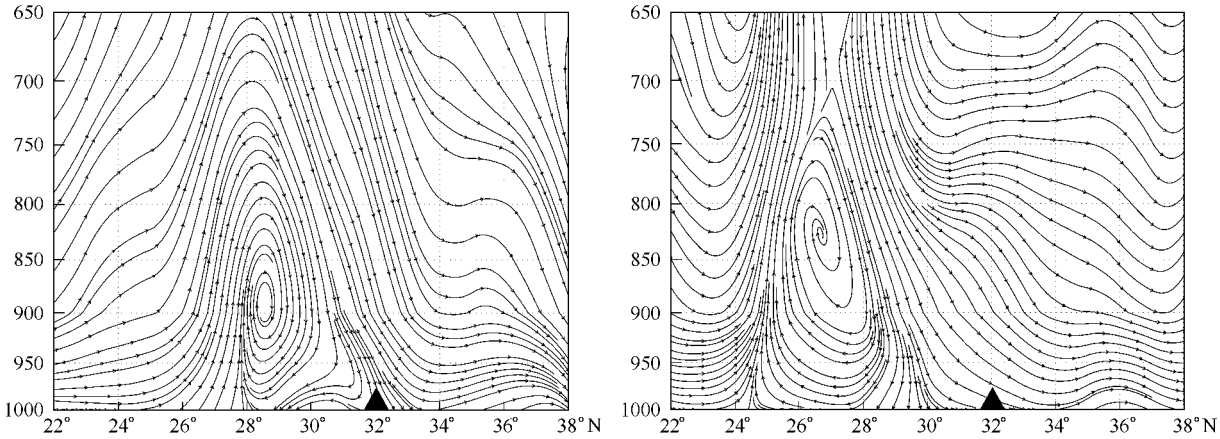

图 8　2007 年 8 月 19 日 20:00(左)和 8 月 26 日 02:00(右)沿 119°E 经向垂直环流(ω 扩大 50 倍)

Fig. 8　Longitudinal vertical circulation along 119°E at 20: 00 on 19 August 2007 (left) and 02: 00 on 26 August 2007 (right) ω has been amplified by a factor of 50

三角形指示雷达所在纬度　The triangle shows the latitude that the radar is situated

8 月 18 ~19 日夜间飞越雷达上空的稻纵卷叶螟成虫部分降落,形成了浦口区的迁入峰,部分成虫继续向西北方向迁飞。顺推轨迹分析显示,过境蛾群最远可迁飞至安徽中部。另外,8 月 20 ~21 日赣北、皖南地区部分站点也监测到了明显的迁入峰,如江西万年县 8 月 20 日田间蛾量骤增,亩蛾量高达 2 万头以上,虫源来自浙江。可见,江浙地区新羽化的六(4)代稻纵卷叶螟成虫在"圣帕"台风外围风场的作用下出现了一次大规模向西迁飞的过程。

2.2.2　8 月 24 ~26 日的迁入、迁出过程

副热带高压从 8 月 22 日开始,出现了一次西伸的过程。同时,有一热带气旋于 8 月 24 日移至台湾以东洋面。在副热带高压与热带低压共同作用下,8 月 24 ~26 日,我国东海上空出现大尺度东南低空急流,低空急流贯穿江苏,其前缘直抵山东省南部(图 9)。

8 月 25 日,苏南地区的宜兴、浦口、丹阳、张家港、太仓等地田间蛾量锐减,而江苏中北部的高邮、东台、淮安、新沂,山东济宁等地则出现不同程度的迁入峰,两地的蛾群消长动态相吻合。可见,苏南地区的六(4)代

稻纵卷叶螟伴随着副热带高压西伸,出现的一次外迁过程。顺推轨迹分析显示,8 月 24 日夜间从浦口区迁出的蛾群可迁飞至安徽北部(图 10)。

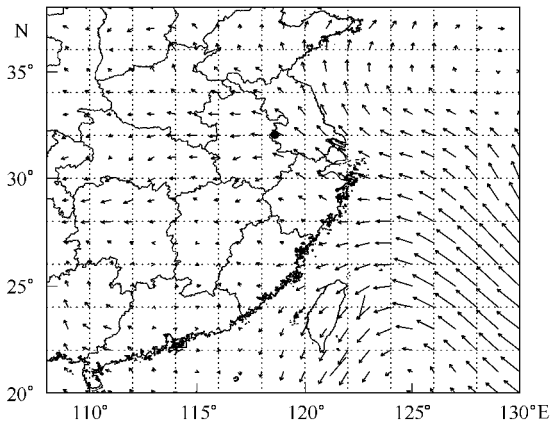

图 9 2007 年 8 月 24 日 20 时 925hPa 风场

Fig. 9 Wind field on 925 hPa at 20: 00 on 24 August 2007

图中黑点为雷达观测点 The black dot in above the map shows the radar station in Jiangpu

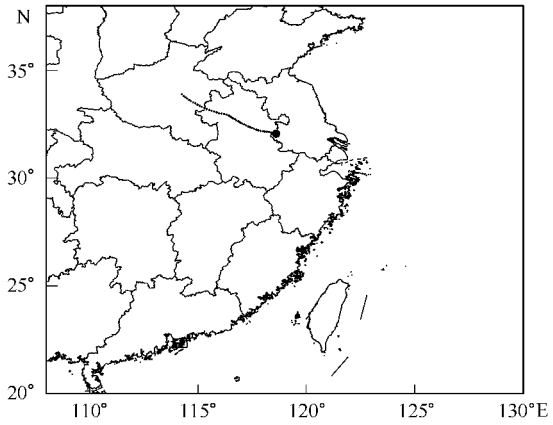

图 10 2007 年 8 月 24 日南京市浦口区稻纵卷叶螟蛾群迁出种群的顺推轨迹(400m)

Fig. 10 Forward trajectory of rice leaf roller leaving Pukou, Nanjing at 19:00 on 24 August 2007 (at 400 m)

8 月 25 日夜间,雷达在 150m 以下监测到了强烈的回波,说明有空中目标集中起降。从浦口区田间赶蛾情况来看,8 月 25 日/666.7m^2 蛾量为 4 800 头/666.7m^2,8 月 26 日激增至 14 700 头/666.7m^2(图 1),可见稻纵卷叶螟在当夜有一个大规模的迁入峰,雷达监测到的低空回波多数为昆虫降落所致。逆推轨迹分析显示,虫源来自苏南或浙北地区。

从江苏各地逐日虫情监测记录中可知,8 月 26 日蛾量如此大幅度增加的现象仅在南京市浦口区一个站点出现。这说明此次蛾峰尽管蛾量大,但是范围很小,应和小尺度天气系统的活动有关。8 月 25 日夜间,南京上空天气晴朗,没有降水,却有一个下沉气流中心出现(图 7,右),空气下沉运动与东南沿海热带气旋造成的空气辐合上升运动相关联(图 8,右)。可见,浦口区 8 月 25 日夜间的迁入峰与下沉气流有关。

2.2.3 9 月 1 ~ 3 日的回迁过程分析

9 月 1 ~ 3 日,雷达观测场附近田间稻纵卷叶螟蛾量的锐减,此期间雷达监测到大量的回波信号,这表明当地六(4)代稻纵卷叶螟开始回迁。9 月 1 日随着江淮气旋东移入海,华东地区转为持续的强东北风所控制(图 11)。顺推轨迹分析显示,浦口区的迁出蛾群经 2 日迁飞,可抵达皖南地区及江西北部,然而此时长江以南大范围区域出现降水过程(图 12),迁出种群将会受阻于雨带边缘。皖南地区部分站点在 9 月初监测到稻纵卷叶螟的大量迁入,如青阳县 9 月 4 ~ 5 日调查,双晚田最高蛾量达 2 ~ 3 万头/666.7m^2,形成当地第二次蛾峰。这说明江淮地区 2007 年 9 月初的回迁种群主要迁飞至皖南地区。

3 讨论

3.1 稻纵卷叶螟的成层现象

空中迁飞虫群成层现象已被大量雷达观测证实,虫层出现的高度多在大气边界层顶或附近,这里的低空逆温和低空急流可以为迁飞虫群提供最适宜运行环境[18]。但虫群成层机制尚不明确,即温度和风谁对成层作用更大? DIMR 观测发现空中稻纵卷叶螟虫群也具有成层现象,在迁飞盛期有时会形成上、下两个虫层,上部虫层总是在极值风速高度(250 ~ 500 m)形成,虫层与风关系密切;对下部(100 ~ 150 m)虫层成因进行分析发现,8 月 27、28 日虫层高度与近地逆温层顶高度相吻合,而 25、26 日无明显逆温现象时此高度亦有高密度虫层,几个观测日虫层形成时刻的温度—高度廓线显示:在 1000 m 以下温度都在 20℃以上,远远高于稻纵卷叶螟迁飞的最低阈值温度 13℃[19],因此高温季节温度是否是稻纵卷叶螟成层的关键以及在 100 ~ 150 m 成层

的真正原因还需进一步研究。Wood 等人对夜间迁飞蛾类高空成层现象的研究结果已经证明,在温度相对低的条件下,虫层多在温度最高的高度上形成,而在较高温度条件下虫层形成与低空急流关系更密切[20];由于边界层最大风速值通常出现在逆温层顶高度,因此很难区分温度和风速对虫群成层的影响,Renolds 等人也认为当所有迁飞高度上温度条件都能满足迁飞个体持续飞行时,迁飞个体会选择其它因素更适合的飞行高度,例如最高风速值高度[21]。

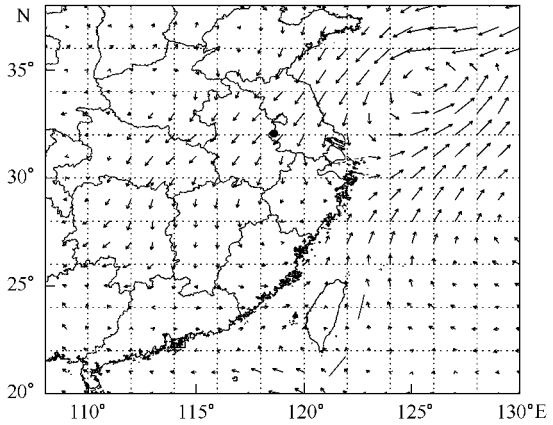

图 11　2007 年 9 月 1 日 20 时 925hPa 风场

Fig. 11　Wind field on 925 hPa at 20: 00 on 1 September 2007

图中黑点为雷达观测点　The black dot in above the map shows the radar station in Jiangpu

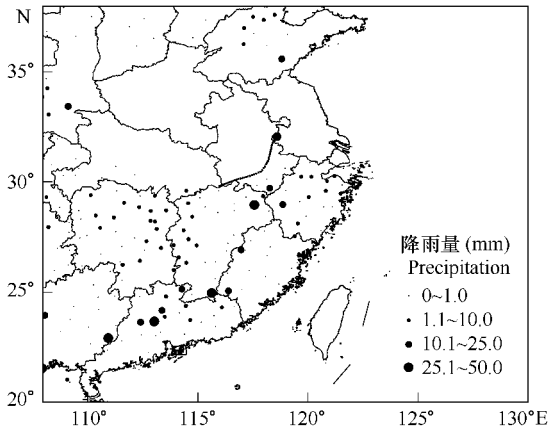

图 12　2007 年 9 月 1 日稻纵卷叶螟迁出种群 2d 顺推轨迹及 9 月 2 日夜间降水分布

Fig. 12　2d forward trajectory of rice leaf roller leaving Jiangpu at 19:00 on 1 September 2007 (at 400 m) and the precipitation in the evening of 2 September 2007

3.2　低空回波数量与迁入、迁出过程的对应关系

DIMR 观测到的 150 m 以下昆虫回波数量与稻纵卷叶螟的迁入和迁出过程有明显的对应关系,五(3)代和六(4)代雷达监测结果说明了这一点。7 月中旬 ~8 月上旬为五(3)代发生时期,此时田间蛾量高达万头以上,整夜空中回波数量也相当大,但是在傍晚(起飞峰时)雷达监测到的 150 m 以下的回波却很少,这是因为江淮地区五(3)代稻纵卷叶螟以异地迁入为主,迁入蛾群往往卵巢已经发育成熟,迁入后即开始交配、产卵,从当地起飞迁出的数量很少。而在 8 月中旬末 ~9 月初,六(4)代稻纵卷叶螟成虫发生期内,在起飞峰时 150 m高度以下雷达回波数量极大,这是当地新羽化的蛾子不断向外地迁出形成的。因此利用起飞峰时低空雷达回波数量来判断虫群的迁入和迁出过程是可行的。

3.3　下沉气流与降落的关系

前文分析表明,南京市浦口区在 8 月 18 ~19 日和 8 月 25 日夜间,先后出现了两次大规模的迁入高峰,这两次迁入峰的出现均与低压系统外围的下沉气流有关。为了进一步明确两者之间的联系进一步比较了其它夜晚大气垂直运动的状况。图 13 是从 FNL 分析资料中提取的,8 月 15 日 ~31 日距离雷达观测场最近的格点(119°E,32°N)上,925hPa 大气垂直速度的逐 6h 分布。从图中可见,下沉气流最强时次出现在 8 月 19 日和 25 日夜间,和两次迁入峰完全对应。8 月 15 日 ~17 日夜间虽然也有下沉气流出现,但此时各地六(4)代稻纵卷

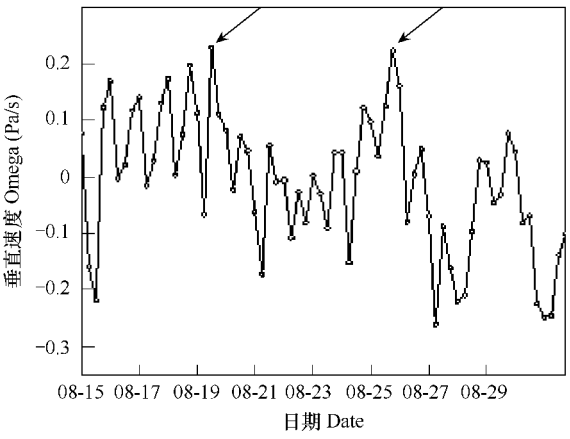

图 13　2007 年 8 月 15 ~31 日 119°E,32°N 格点上 925hPa 逐 6h 垂直速度分布(Pa/s)

Fig. 13　The every 6 hourly vertical speed (Pa/s) in the grid point (119°E, 32°N) on 925hPa from 15 to 31 August, 2007

箭头指示最强下沉气流 the arrow shows the max subsidence

叶螟均尚未进入发蛾盛期,没有异地虫源,所以没有出现迁入现象。因此可以推测,这两次稻纵卷叶螟迁入峰很可能是由下沉气流引起的。

然而令人不解的是,从这两晚大气垂直运动速度来看,其数值很微弱,每秒只有几个厘米,似乎不应该对稻纵卷叶螟的迁飞过程产生这样大的影响。研究垂直气流对昆虫起降的影响首先要获得起降行为参数,借助DIMR的高垂直分辨率有望提取昆虫的上升和下降速度,另外DIMR能对150 m以下的昆虫进行监测,为研究昆虫起降行为提供了空间条件,因此DIMR必将在揭示迁飞昆虫起降机制方面发挥作用。

通过连续40余天的雷达观测试验证明:南京农业大学多普勒昆虫监测雷达运行在物理性能和目标参数提取方面实现了预期目标,对稻纵卷叶螟迁飞的成功观测证明了该雷达在长期监测迁飞害虫方面完全可行;利用雷达观测结果结合气象数据对迁飞稻纵卷叶螟的时空动态及迁飞轨迹进行了分析,为阐明稻纵卷叶螟迁飞规律和飞行行为机制提供了依据。下一步将配套雷达观测场辅助试验和完善信号分析软件,在实现低空取样的基础上对迁飞昆虫的起飞和降落过程进行深入研究,并以实现雷达高分辨率和迁飞害虫长期监测为目标开展后续研究工作。

References:

[1] Zhang X X, Lu Z Q, Geng J G, *et al*. Studies on the migration of rice leaf roller *Cnaphalocrocis medinalis* (Guenée). Acta Entomologica Sinica, 1980, 23 (2): 130－140.

[2] Zhang X X, Geng J G, Zhou W J. Advance in studies on the migration of rice leaf roller *Cnaphalocrocis medinalis* (Guenée). Plant Protection, 1981, (6): 2－7.

[3] National Cooperate Research Team on Rice Leaf Roller. Advance in studies on the migration of rice leaf roller *Cnaphalocrocis medinalis* in China. Scientia Agricultura Sinica, 1981, (5):1－8.

[4] Shi S B, Li S S, Hu B H. Rice leaf roller, In: Hu B H. Long-term dynamic rules and forecasting of plant diseases and insect pests. Beijing: Agriculture Press of China, 1997, 13－16.

[5] 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. Ecological Entomology, 1989, 14 (2): 149－162.

[6] 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. Bulletin of Entomological Research, 2003, 93: 115－124.

[7] 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. Environmental Entomology, 2004, 33: 1253－1265.

[8] 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. Journal of Economic Entomology, 2004, 97: 1874－1883.

[9] Feng H Q, Wu K M, Ni Y X, *et al*. Nocturnal migration of dragonflies over the Bohai Sea in northern China. Ecological Entomology, 2006, 31: 511－520.

[10] Feng H Q, Zhang Y H, Wu K M, *et al*. Nocturnal windborne migration of ground beetles particularly *Pseudoophonus griseus* (Coleoptera: Carabidae), in China. Agricultural and Forest Entomology, 2007, 9: 103－113.

[11] Zhang Y H, Chen L, Cheng D F, *et al*. Radar observation and population analysis on the migration of the clover cutworm, *Scotogramma trifolii* Rottemberg (Lepidoptera: Pyralidae). Acta Entomologica Sinica, 2007, 50 (5): 494－500.

[12] Chapman J W, Reynolds D R, Simth A D. Vertical-looking radar: a new tool for monitoring high-altitude insect migration. Bioscience, 2003, 53 (5): 503－511.

[13] Drake V A, Wang H K, Harman I T. Insect monitoring radar: remote and network operation. Computers and Electronics in Agriculture, 2002, 35: 77－94.

[14] 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. Bulletin of Entomological Research, 1995, 85: 397－414.

[15] Zhai B P, Zhang X X. Numerical simulation of the trajectory of marked moth of rice Leaf roller (*Cnaphalocrocis medinalis*). Journal of Southwest

Agricultural University, 1998, 20 (5): 528 −535.

[16] Drake V A, Farrow R A. The influence of atmospheric structure and motions on insect migration. Annual Review Entomology, 1988, 33: 183 −210.

[17] Drake V A. Insect Migration: tracking resources through space and time. New York: Cambridge University Press, 1995.

[18] Zhai B P. Tracking angels: 30 years of radar entomology. Acta Entomologica Sinica, 1999, 42 (3): 315 −326.

[19] Geng J G, Zhang J X, Zhang X X. Trajectory analysis on ship-captures of rice leaf roller southward migration. Journal of Nanjing Agricultural University, 1990, 13 (3): 48 −53.

[20] Wood C R, Chapman J W, Reynolds D R, *et al*. The influence of the atmospheric boundary layer on nocturnal layers of noctuids and other moths migrating over southern Britain. International Journal of Biometeorology, 2006, 50: 193 −204.

[21] 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. Bulletin of Entomological Research, 2008, 98: 35 −52.

参考文献:

[1] 张孝羲, 陆自强, 耿济国, 等. 稻纵卷叶螟迁飞途径的研究. 昆虫学报, 1980, 23 (2): 130 ~ 140.

[2] 张孝羲, 耿济国, 周威君. 稻纵卷叶螟迁飞规律的研究进展. 植物保护, 1981, (6): 2 ~ 7.

[3] 全国稻纵卷叶螟研究协作组. 我国稻纵卷叶螟迁飞规律研究进展. 中国农业科学, 1981, (5): 1 ~ 8.

[4] 石尚柏,李绍石,胡伯海. 稻纵卷叶螟. 农作物病虫长期运动规律与预测. 胡伯海,姜瑞中主编. 北京: 中国农业出版社, 1997: 13 ~ 16.

[11] 张云慧, 陈林, 程登发, 等. 旋幽夜蛾迁飞的雷达观测和虫源分析. 昆虫学报, 2007, 50 (5): 494 ~ 500.

[15] 翟保平, 张孝羲. 稻纵卷叶螟标记蛾迁飞轨迹的数值模拟. 西南农业大学学报, 1998, 20 (5): 528 ~ 535.

[18] 翟保平. 追踪天使——雷达昆虫学 30 年. 昆虫学报, 1999, 42 (3): 315 ~ 326.

[19] 耿济国, 张建新, 张孝羲. 海捕回迁稻纵卷叶螟轨迹分析. 南京农业大学学报, 1990, 13 (3): 48 ~ 53.