

褐飞虱在中国东部秋季回迁的雷达观察*

程遐年¹ 张孝羲¹ 程极益¹

J. R. Riley² D. R. Reynolds²

(¹南京农业大学植物保护学系, 南京 210095; ²英国自然资源研究所)

摘要 1988和1990年秋季,在南京市郊江浦县用超高频雷达、气球拖带空中捕虫网及田间笼罩,对褐飞虱秋季回迁进行了研究。江浦县位于中国东部江淮稻区,以种植单季中、晚稻为主(中稻占70%),随着水稻的灌浆,成熟,褐飞虱长翅型成虫迁出从8月末到9月末逐渐增多。9月中旬,季风转为东北风占优势时,正待迁飞的虫群数量达到高峰,东北风被台风加强时,回迁尤为加快。9月间季风风向的这一转变,对褐飞虱后代的存续是重要的,它保证了迁飞虫群大部分被带到适宜冬春季繁衍的地方。

关键词 褐飞虱; 迁飞; 雷达观察; 轨迹分析

中图分类号 S431.21

RADAR OBSERVATIONS OF THE AUTUMN MIGRATION OF *NILAPARVATA LUGENS* (HOMOPTERA: DELPHACIDAE) IN THE EAST OF CHINA

Cheng Xianian¹, Zhang Xiaoxi¹, Cheng Jiyi¹,

J. R. Riley² and D. R. Reynolds²

(¹Dept of Plant Protection, Nanjing Agric Univ, Nanjing 210095;

²Natural Resources Institute, United Kingdom)

ABSTRACT Radar, aerial netting and ground sampling were used to study the autumn migration of *Nilaparvata lugens* (Stål) in Jiangpu County, suburb of Nanjing City, in 1988 and 1990. Jiangpu with single middle and late rice, as the main crop is located in Jiang-Huai Rice Area in the east of China. Emigration of macropterous adults increased from late August until late September as the rice crop milked and matured. By mid September displacements were predominantly to the south-west on the prevailing north-east monsoon winds. Migration was particularly rapid when the north-east winds were reinforced by typhoon. The number of flight-ready *N. lugens* approaches its peak at the advent of the north-east monsoon, which is essential for the survival of their progeny. This change of the monsoon direction normally ensures that a large proportion of the population will be carried to the suitable places for planthopper breeding in winter and spring.

Key words *Nilaparvata lugens* (Stål); migration; radar observation; trajectory analysis

褐飞虱春夏季自南向北的迁飞,70年代在中国已有较为广泛深入的研究,业已取得许多详实有力的证据^[1-3]。1988年9月中下旬,根据中英农业科技合作谅解备忘录合作计划,

* 国家自然科学基金资助项目;中英农业科学技术合作谅解备忘录项目
收稿日期:1994-04-09

两国专家进行了第一期合作观察, 研究结果有力地证实了褐飞虱在中国东部地区秋季自北向南的回迁^[4], 但当年雷达观察到的所有迁飞虫群都是顺东北风向南迁飞。褐飞虱秋季随季风转向, 由北向南回迁是否成为规律, 尚未获得充足的证据。因此, 又进行了第二期合作研究, 观察时间比 1988 年提早两周, 选在东亚季风由西南风向东北风转换时期, 以便在更广泛的风向条件下观察褐飞虱秋季迁飞的行为规律。

1 研究方法

1.1 观察地点

设在南京西南郊, 距城 15 km 的南京农业大学江浦实验农场。

1.2 设备

厘米波雷达(X-band, 波长 3.2 cm)和毫米波雷达(Q-band, 波长 8.8 mm)各一台。其中毫米波雷达, 能发现 1 km 范围内的褐飞虱个体。气球及其拖带的空中捕虫网, 田间简易气象站, 田间笼罩(由铁架和 40 目尼龙网罩构成, 每只占地 1 m²)。

1.3 观察时间和方法

1990 年观察在 8 月 23 日~9 月 20 日间进行, 雷达在每天 17:00~00:00, 04:00~11:00 时开机, 记录黎明、黄昏、夜晚和白天的昆虫飞行。这是因为在一天中的其它时间, 尤其是 00:00~04:00 空中迁飞昆虫的密度很低。同雷达一起使用的空中捕虫网, 由气球拖带到 140~700 m 的空中, 张网捕捉随气流迁飞过网的昆虫。与上述观测同时进行的田间笼罩观察是在每天 17:00~21:00, 每间隔 1 h 把飞上笼罩网上的褐飞虱计数移走, 次日清晨 05:00~08:00 重复进行, 以估测当地稻田内长翅型成虫起飞迁出实况。

1.4 空中迁飞虫量的计算

雷达观察是由 16 mm 电影胶片定格拍摄记录雷达荧光屏的回波图像, 荧光屏设置在标准天线 5°, 9°, 19°, 29°和 45°的仰角上。观察时间的间隔是根据不同时段空中迁飞昆虫实况变化, 每间隔 15 或 30 min 重复进行一次, 空中迁飞虫群变化小时, 间隔时间则长些。当空中虫口密度高时, 就会引起荧光屏上回波连续变白成片, 此时, 雷达信号则需减弱, 以便日后从照相记录上获得回波的计数。回波计数代表空中 600~780 m 高度范围。用 1992 年 Riley 描述的方法^[5], 根据这些回波的计数及信号的变弱情况计算虫口密度。计算考虑到雷达显示的不同类型的回波, 而这些回波在高空网捕的数据上体现出来。在个体计数方面, 获得空中密度是假定每一种类的昆虫是一结构相互联系的横切面。但是横切面的边缘以及末端向前符合每一种类、每一性别昆虫的平均数量。用 Cross-Section 方程计算每种由空气传送的且随意定位的有效昆虫数量, 所获结果可反映观测期间每一种类所占总数的%、雷达探测和高空网捕虫量的比例。在变弱(信号)计数方面, 用于计算空气传送的褐飞虱个体的 Cross-Section 方程也可计算每一种类各横切面的平均值, 同时根据各组成来求平均值。

1.5 风的资料搜集与轨迹分析

通过地面气象设备, 释放实验气象气球, 收听广播, 获得了南京、上海、淮阴、徐州、富阳、安庆、南昌等地在当地时间 19:00, 01:00, 07:00 时风的主要数据。因为小型昆虫的迁飞飞行是在 600 m 和 900 m 的高度, 所以使用 Stream-Vsotach 方法来分析这两个高度的风场^[6], 然后建立轨迹来表示褐飞虱可能的飞行路径^[7]。

1.6 田间迁出笼罩观察

田间长翅型褐飞虱的迁飞测定采用6个田间笼罩,每个占地1 m²(约栽植有20~25穴稻株)。其中5个笼罩置于9月底10月初收获的中稻田,另一个置于晚稻田。

2 结果

2.1 飞行活动的雷达显示

在1990年8月23日~9月20日雷达观察期间,通常傍晚空中昆虫密度从很低到中等(每万立方米<1~10头)。两台雷达记录的小型昆虫起飞都在17:45~18:00,常常观察到羽毛状物从雷达站这一位置周围升起,厘米波雷达观察到的较大目标常在18:20~18:35出现。

到晚上,垂直面上昆虫密度有时重叠成层,如1990年9月19日黄昏昆虫起飞后,也观察到了随意定位小昆虫的清楚的层次。高空网捕表明,这天晚上,褐飞虱占雷达探测到黄昏起飞昆虫总数的65%,因此,可以断言褐飞虱就是雷达荧光屏上观察到的昆虫层的虫种。在午夜前后,空中昆虫密度降低,也没有发现大量的小型昆虫在下半夜飞越雷达站上空。大约在凌晨05:15,小型昆虫的迁飞最先被毫米波雷达观测到,那时,光照度为10 lx,05:30前后,为100~700 lx,即光亮度足以使人眼看清地面的所有特征,看来,褐飞虱黎明迁飞常发生在比大昆虫迁飞(如非洲粘虫蛾)高得多的光亮情况下。大约05:50,低空昆虫密度下降,表明大量起飞结束,但迁飞仍在继续。在1990年雷达观察期间的一些早上,昆虫层在06:00~06:30形成,有时一直延续到08:00。9月14日是一个在黎明形成的、层次清楚的昆虫层的例子,一些昆虫正在昆虫层的下面飞,但几乎不能超越此层,昆虫层的顶部略呈波浪状(这是由于空中气流波动的缘故)。这时,褐飞虱占高空网捕到的昆虫总数有54%。有时上午07:00~12:00的雷达观察也反映出空中很低的昆虫密度,这时高空网捕的结果是中等密度,每万立方米0.3头褐飞虱。

2.2 褐飞虱的迁出量与迁出时间

在整个实验期间,根据田间笼罩定时观察的结果,褐飞虱最后升到每晚20头/m²(图1)。尽管在9月10日~20日期间,1990年与1988年田间笼罩观察的情况相似,但1990年的迁飞率仅为1988年的1/8,高空网捕所获得的褐飞虱密度两年间差距更大。图1中的密度值表明在8月底~9月中旬,褐飞虱迁飞数量的上升情况。

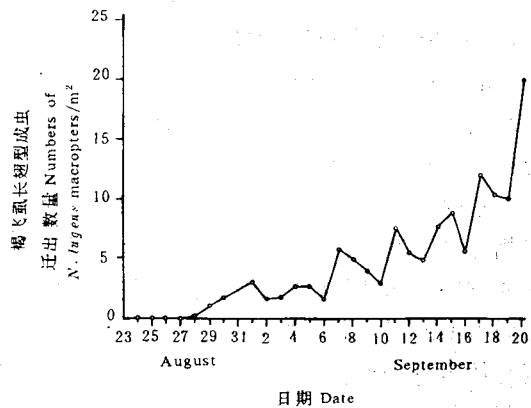


图1 黄昏前后迁出的褐飞虱长翅型成虫量的每晚变化(1990,6只笼罩总数)

Fig. 1 The nightly quantitative variation of adult macropterous *N. lugens* emigrating before or after dusk (estimated from the numbers taken in 6 canopy traps)

附表 昼夜不同时间空中网捕褐飞虱的平均密度

Table Mean aerial densities of *N. lugens*, as determined by aerial netting at different times in the day or at night

取样时段 Sampling period	空中密度 Aerial density/Nos. 10^4 m^3			取样次数 Number of samples	取样量(m^3) Volume sampled
	平均 Mean	中值 Median	范围 Range		
	黄昏 (17:00~19:00) Dusk	3.89	1.62		
上半夜 (19:00~00:00) Fore part of night	0.83	0.36	0~2.99	15	696 256
下半夜 (00:00~04:00) Rear part of night	0.35	0.50	0~0.53	3	111 936
黎明 (04:00~07:00) Dawn	3.32	1.81	0.55~10.76	5	250 432
白天 (07:00~17:00) Daytime	0.62	0.18	0~2.26	12	374 070

除了最后几个上午,褐飞虱的迁出受阻于 $11\sim 15^\circ\text{C}$ 的低温外,其余的黎明迁出和黄昏迁出很一致。

2.2.1 褐飞虱黄昏迁飞的季节性变化 随着实验的进行,褐飞虱黄昏起飞的高峰时间也提前了,从8月底的 18:00~19:00 提前至9月中旬的 17:00~18:00,有时更早一些。另外,雷达探测到的大量迁飞时间也从 18:30 提前到 17:45。尽管这时日落提前了 24 min(从 18:26 提前至 18:02),但仅为起飞提前的一部分,这个结果同 1988 年的非常相符。9月17日褐飞虱起飞开始尤其早,这与当时傍晚气温在 18:00 前迅速下降至 17°C 有关。大久保与岸本良一认为,这一温度为该虫起飞的临界值^[8]。

2.2.2 高空网捕所测的褐飞虱空中密度

空中网捕取样自 1990 年 8 月 22 日~9 月 20 日,网捕总时数为 175 h,取样高度为地面上 160 m 左右。空中网捕所测的褐飞虱空中密度变化(附表)同雷达所观测的结果一致,即黎明、黄昏时分密度高,而在其它时间密度低。比较 1990 年和 1988 年 9 月份平均密度数据,结果 1990 年的密度只有 1988 年的 1/5,这与田间笼罩观察的低数量相一致。在黄昏迁出之后的一段时间(19:30~24:00),平均虫口密度甚至相差 9 倍($P < 0.01$),这反映了 1990 年的雷达观察中未出现高密度回迁的原因。

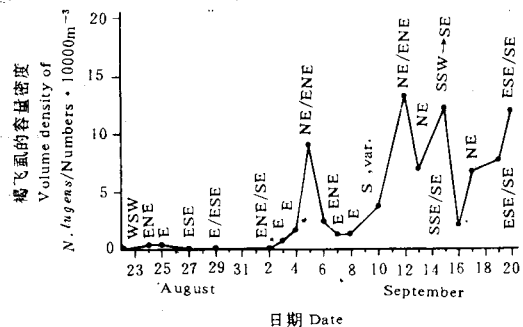


图2 褐飞虱迁出期黄昏时空中容量密度每晚的变化(1990)

Fig. 2 The nightly variation in the aerial volume density of *N. lugens* during the dusk emigration period

2.3 风向与迁飞数量

观察期间,在褐飞虱的迁飞高度,风向是变化着的,但主要是东风和东南风。东北风和北风很少,与东北季风相联系的好的天气、凉爽的东北气流直到观察结束时才形成(网捕高度:地面上 150 m,每晚风向标明在图 2 中)。

根据黄昏高空网捕的数据,分析风向和空中虫口密度的关系,发现褐飞虱似有在北风条件下迁飞的倾向,即朝着能越冬的方向飞。由图 2 可见,一些有北风的夜晚,如 1990 年 9 月 5 日,9 月 12 日,褐飞虱的密度特别高,但是有时同其它风向的邻近夜晚相比却不高,如 9 月 17 日。

2.4 逆风轨迹分析

2.4.1 过雷达站上空的褐飞虱逆风轨迹的建立 傍晚,观察到飞越雷达站的褐飞虱虫源。假设褐飞虱随风而发生位移,并用气象资料和飞行时间数据建立了逆风轨迹。当高空网捕显示大量褐飞虱正在飞行时,就选择这一时机进行轨迹分析。

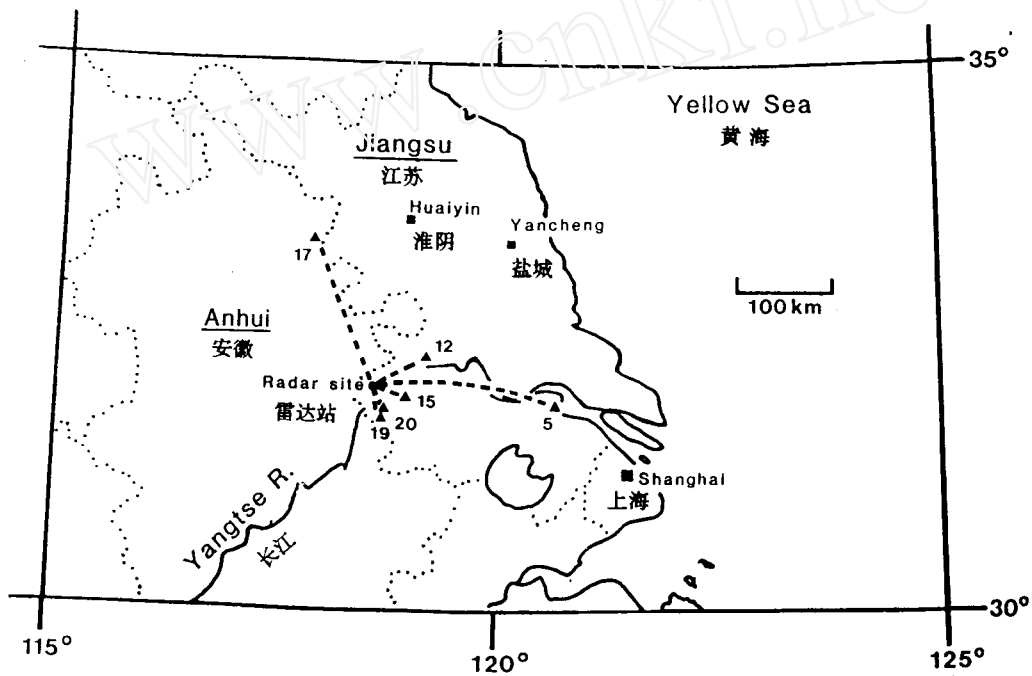


图 3 褐飞虱回迁的逆风轨迹(1990 年 9 月)

Fig. 3 Back-trajectories for *N. lugens* (Sept. 1990)

2.4.2 1990 年 9 月的逆风轨迹 1990 年 9 月 5,12,17 和 19 日晚在 900 m 高度,15,20 日晚在 600 m 高度,观察到飞过雷达站的褐飞虱的集中虫源区域。图 3 中三角形表明组成集中虫源区后部估计的褐飞虱虫源地。1990 年没有 1988 年那种来自远处连续的高密度的回迁。空中密度在黄昏之后的一段时间内却趋向于连续性,过了这段时间就急剧下降至很低水平。这个结论最简单地解释了观察到的小型昆虫的虫源是相对连续的,但是有一个逆风的界限,其范围取决于间歇的产生和昆虫位移的矢量。图 3 为迁飞过的虫源的逆风转迹,褐飞虱占雷

达所探测昆虫的很大比例。如 9 月 5 日晚, 在 10 m/s 的东风下, 小型昆虫的混合种群(也包括褐飞虱在内)经过雷达站大约 4.5 h 之久。相似的轨迹也表明虫源从雷达站到 200 km 以东的江苏南通地区。

9 月 17 日下午, 在寒冷到来之前, 有一股凉爽、干燥的北风(这天气与 1988 年 9 月底遇到的相似), 笼罩观察表明, 褐飞虱起飞时间比其它晚上早(在 17:00 以前), 雷达所观测到的高密度也提前(也在 17:00 以前)。在这之后的晚上, 当大型和小型昆虫成层飞过雷达时, 观察到微小昆虫主要在高空捕虫网上方飞。

相比之下, 在东南风或南风的几个晚上, 逆风轨迹短, 因为风弱(3~4 m/s, 9 月 19~20 日), 迁飞只持续了一小段时间(图 4)。

2.5 褐飞虱从江浦迁出的顺风轨迹

建立顺风轨迹是为了推测在黄昏从江浦起飞的褐飞虱的可能降落区。假定飞行持续 12 h, 那么分析只能局限于高空网捕显示有大量褐飞虱迁飞的时候及风力足以产生明显位移的情况下。

2.5.1 1990 年 9 月的顺风轨迹 1990 年 9 月上中旬, 在黄昏时分, 从南京迁出的褐飞虱的轨迹见图 5。因为东北季风还未形成, 所以在飞行高度上主要是东风。从图 5 中可见相类似的轨迹范围从西北到西南, 表明从江浦雷达站附近迁出的褐飞虱如果整夜飞行, 可能仅到达河南省和湖北省, 飞行较近的将在安徽省境内降落。9 月 17 日晚, 有一股北风或东北风, 其轨迹表明褐飞虱有向南、西南位移的潜力, 即迁移至江西北部。图 5 的 1990 年秋褐飞虱顺风轨迹是 9 月 5, 12, 13, 17 和 19 日 900 m 高度, 15 日 600 m 高度, 褐飞虱每日黄昏 18:00 飞离江浦雷达站上空, 12 h 飞行的前推轨迹。1990 年雷达观察中, 有 5 个晚上, 飞行高度上为南风或东南风时, 没有获得雷达站上空有褐飞虱延长飞行的证据。这表明在南风或东南风的条件下, 迁飞的持续时间短。

2.5.2 1990 年与 1988 年顺风轨迹的比较 1988 年秋季由于雷达观察时间晚, 9 月中下旬从南京附近稻田迁出的褐飞虱随着稳定的东北风向西南方向位移(图 6), 1988 年 9 月 5, 17, 20, 23, 24, 25 日为 900 m 高度, 26 日为 600 m 高度, 褐飞虱在每天黄昏 18:00 起飞, 迁离江浦附近, 12 h 飞行顺风轨迹, 飞行距离在 350~600 km, 飞行至江西北部、湖北东部、飞行距离短一点的在安徽西南部降落。9 月 23~24 日南京的风速达 21 m/s, 是因为受太平洋南中国海上台风的影响。只有 9 月 17 日晚, 在迁飞高度上为东南风, 发生位移的昆虫的顺风轨迹是朝向安徽北部的。对比 1990 年和 1988 年相应的顺风轨迹图(图 5, 6), 清楚地表明 1988 年秋季雷达观察时间晚, 褐飞虱虫群则更明显随深秋稳定的东北季风向其冬春繁殖栖

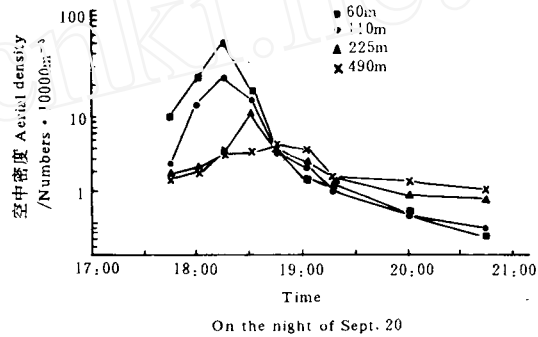


图 4 毫米波雷达观测到不同空中高度迁飞昆虫容量密度的变化(9 月 20 日夜)

Fig. 4 The variation in volume density of insects in flight at different altitude above ground, as detected on the Q-band radar (on the night of Sept. 20)

息地位移。

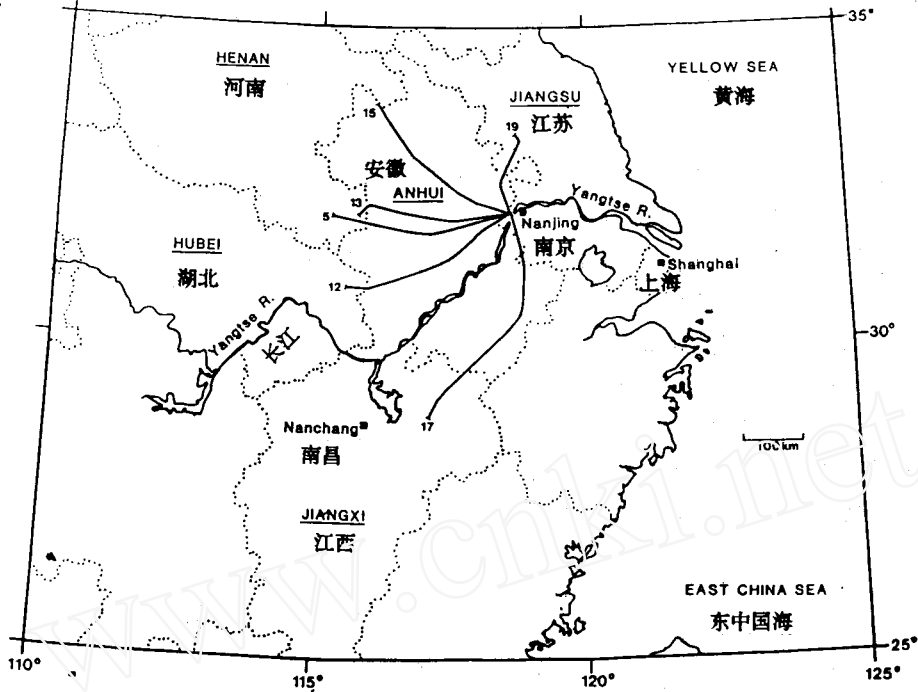


图 5 褐飞虱前推顺风轨迹 (1990年9月)

Fig. 5 Forward trajectories for *N. lugens* (Sept. 1990)

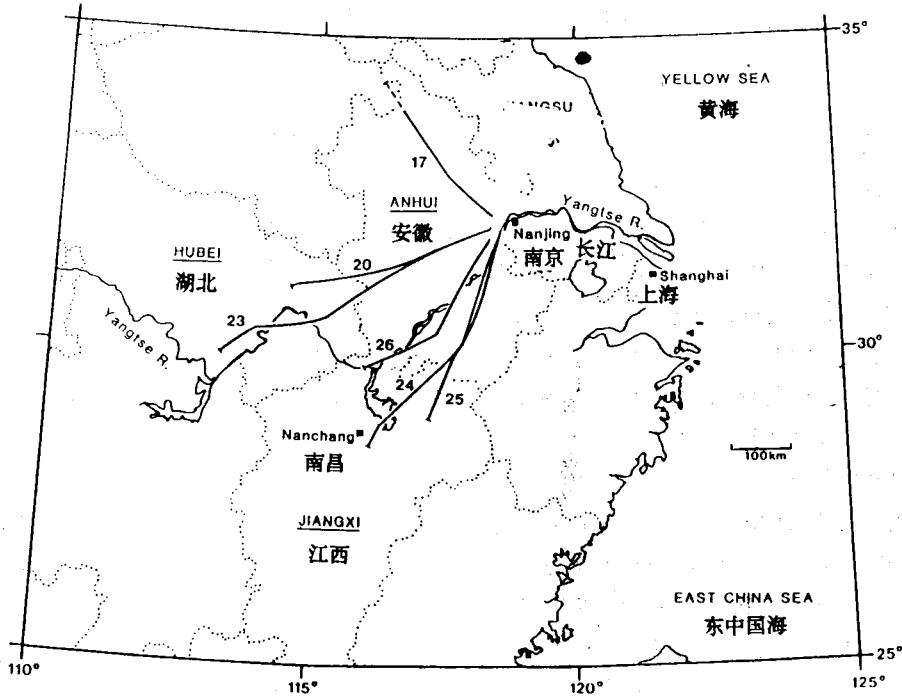


图 6 褐飞虱前推顺风轨迹 (1988年9月)

Fig. 6 Forward trajectories for *N. lugens* (Sept. 1988)

3 讨 论

3.1 雷达观测的可靠性

雷达荧屏观测与照相记录空中迁飞虫量的统计结果,与空中网捕、田间笼罩观察结果相符合。空中网捕虫量与田间笼罩系统观测结果一致表明,1990年江浦雷达观测站附近稻田内褐飞虱种群数量比1988年明显减少。在夜间稍晚些时候,雷达荧屏上没有主要由褐飞虱形成的高密度虫层飞过雷达站上空,这表明在观测点的逆风方向的远处江苏北部迁飞来的褐飞虱虫量少,当年也没有像1988年在苏北有关于褐飞虱大发生的虫情报道。

3.2 雷达观测年度间的重复性

尽管1990年褐飞虱的密度低于1988年,但这两年中,褐飞虱每天飞行活动的日节律非常相似,也同以往其他研究者在温带稻区观察结果相一致^[4],即大多数的长距离迁飞是在黄昏时分开始,这是对不断降低的光照度的反应。入秋以后,傍晚的迁飞提早,这似乎是一种适应性,使得褐飞虱在黄昏气温下降至起飞阈值前迁出。黎明是回迁的又一段时期,但有些早晨的起飞受低温所阻。

3.3 风与迁飞方向

1990年秋季雷达观测时间提前是期望监测褐飞虱迁飞与风向变化的关系,而有别于1988年观测中所经历的主要是东北风条件。东风和东南风是南京地区夏季的典型风向,这时对于短时间飞行的褐飞虱来说,风的传送运动常引起在当地的扩散,或者导致向西部稍远处的位移。9月上旬在南京所在的纬度,褐飞虱产的卵,孵出若虫,能在晚稻收获前发育成熟,而至9月下旬,在南京或稍北的地区产的卵虽可以孵化,但若虫在水稻收获时,低于18℃的低温下,不能完成发育。因为向北的位移同样不利于褐飞虱秋季回迁,所以,作者试图寻找证据来证明当地迁飞可能趋向一定的气象条件,即趋向于飞行高度上为北风的条件。虽然黄昏网捕的数据表明在一些北风的夜晚,迁飞高度相对高些,但不能提供选择北风方向上迁飞的有力证据。

在1990年的研究中,9月份的几个晚上(如图3中9月19日,20日)在飞行高度上为南风,由于江浦以东及东南部方向远处的虫源缺乏,雷达荧屏上仅见到几次短距离飞行。而1988年9月17日一次在东南风方向上的迁飞一直持续到夜间22:00以后,因为那一年苏南等地田间虫量也偏多。

3.4 “迁飞窗”

正如1988年研究中空中网捕和田间笼罩观察数据所表明的那样,在整个试验期间,江浦县褐飞虱迁飞的比率在上升,直到9月底达到高峰,这与江浦县水稻栽培制度相符合。江浦县主要种植单季中稻,在9月底到10月中旬,当中稻接近成熟收获期,褐飞虱产生大量长翅型成虫,9月底为中稻上迁出的高峰时间,这是苏、皖江淮稻区的特征。干燥寒冷的东北风通常在9月中下旬伸延到中国东部,此时南京开始盛行东北风^[9]。似乎当褐飞虱可获得的食料减少时,东北风就开始了。这一季风转换将使褐飞虱向西南方向——一个有利于继续生存和繁殖的方向迁飞。换言之,就是在东北季风形成和水稻成熟季节存在一个成功迁飞的“窗口”或“通道”。1988年第一期研究表明大量的向西南方向回迁出现在9月底和10月上中旬,迁飞到安徽南部和江西中北部的双季晚稻上发生危害。必须指出,从迁飞12h的顺风轨

迹分析结果表明,迁飞到达最南处的褐飞虱,仍然离可能的越冬地很远,需要进一步研究从江南双季晚稻田如何继续向热带冬春繁殖地迁移。也就是说,褐飞虱在东亚是否形成一个“闭合循环”。

(参加本项研究工作的还有南京农业大学徐国民、王海扣、包爱东、翟保平和英国自然资源研究所 A. D. Smith 先生, L. J. Rosenberg 博士。对江浦农业试验站孙长贵站长的热情帮助,深表谢忱!)

参 考 文 献

- 1 全国褐飞虱科研协作组. 我国褐飞虱迁飞规律研究的进展. 中国农业科学, 1981, (2): 52~59
- 2 程週年, 陈若箴, 习学等. 稻褐飞虱迁飞规律研究. 昆虫学报, 1979, 22: 1~21
- 3 Zhou B H, Wang H K, Cheng X N. Forecasting systems for migrant pests. I. The brown planthopper in China. In: Drake V A, Gatehouse A G ed. Insect migration: Physical factors and physiological mechanisms. U K: Cambridge University Press, 1994 (in press)
- 4 Riley J R, Cheng X N, Zhang X X, et al. The long distance migration of *Nilaparvata lugens* (Stål) in China: radar observation of mass return flight in the autumn. Ecology, 1991, 16: 471~489
- 5 Riley J R. A millimetric radar to study the flight of small insects. Electronics and Communication Engineering Journal, 1992, 4: 43~48
- 6 Palmer C E, Wise C W, Stempson L J, et al. The practical aspect of tropical meteorology. Bedford, Massachusetts: Air Force Cambridge Research Center, Air Force Surveys in Geophysics, 1955, No. 76
- 7 Rosenberg L J, Magor J I. Predicting windborne displacements of the brown planthopper, *Nilaparvata lugens* from dynoptic weather data. 1. Long-distance displacements in the north-east monsoon. Journal of Animal Ecology, 1987, 56: 39~51
- 8 Ohkubo N, Kisimoto R. Diurnal periodicity of flight behaviour of the brown planthopper, *Nilaparvata lugens* Stål, in the 4th and 5th emergence periods in Japanese. Japanese Journal of Applied Entomology and Zoology, 1971, 15: 8~16
- 9 中央气象局. 中华人民共和国气候图. 北京: 中央气象局出版社: 1979

(责任编辑 谢福祥)