

2021 年南京稻纵卷叶螟后期大规模发生种群的虫源性质*

马诣博^{1**} 杨金熹^{1**} 黄乐¹ 陆珍珍² 朱凤³
张熠场⁴ 高博雅¹ 胡高^{1***}

(1. 南京农业大学植物保护学院昆虫系, 南京 210095; 2. 江苏省南京市江宁区植保植检站, 南京 211100;
3. 江苏省植物保护植物检疫站, 南京 210036; 4. 全国农业技术推广服务中心, 北京 100125)

摘要 【目的】21 世纪以来, 长江三角洲 8 月下旬-9 月上中旬第 4 代稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis* (Guenée) 上升成为主要害代之一。然而其虫源性质和暴发成灾机制仍不清楚。本研究通过解析 2021 年南京稻纵卷叶螟后期发生动态和迁飞过程, 为该区域稻纵卷叶螟准确测报和科学防控提供理论依据。【方法】基于田间系统赶蛾计数、性诱剂诱捕和雌成虫卵巢解剖数据, 结合基于 WRF 中尺度模式的轨迹分析方法, 阐释南京稻纵卷叶螟后期大规模发生的虫源及其大气背景场条件。【结果】2021 年 8 月下旬-9 月上中旬长江三角洲出现的大范围、长时间持续稻纵卷叶螟成虫高峰由两个阶段不同性质的虫源组成。8 月 24 日-9 月 2 日以外地迁入为主, 虫源主要来自安徽南部、江西北部、湖南北部以及湖北东部; 9 月 3-14 日以本地种群外迁为主, 主要降落在安徽南部、江西北部、浙江北部、湖南北部及湖北中部。与常年相比, 2021 年 8 月下旬西太平洋副热带高压 (简称副高) 异常偏强, 位置偏南, 持续控制在长江以南地区, 西南气流贯穿湖南、江西、安徽和江苏等地, 经向风风速大于常年; 盛行下沉气流期间性诱剂诱捕的虫量占总虫量的 87.29% (419/480), 表明副高控制下下沉气流为主要是稻纵卷叶螟聚集降落的关键因子。【结论】特定气候条件下大规模持续迁入是 2021 年长江下游第 4 代大规模发生种群的虫源。

关键词 稻纵卷叶螟; 西太平洋副热带高压; 轨迹分析; 卵巢解剖

Potential origin of mass rice leaf folder, *Cnaphalocrocis medinalis*, moths in Nanjing in the late rice season of 2021

MA Yi-Bo^{1**} YANG Jin-Xi^{1**} HUANG Le¹ LU Zhen-Zhen²
ZHU Feng³ ZHANG Yi-Yang⁴ GAO Bo-Ya¹ HU Gao^{1***}

(1. Department of Entomology, College of Plant Protection, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China;
2. Plant Protection and Plant Quarantine Station of Jiangning District, Nanjing 211100, China;
3. Plant Protection and Plant Quarantine Station of Jiangsu Province, Nanjing 210036, China;
4. China National Agro-Tech Extension and Service Center, Beijing 100125, China)

Abstract 【Objectives】To identify the origin of the mass irruption of rice leaf folder (RLF; *Cnaphalocrocis medinalis*) moths that appeared in late season (late August and early-mid September) rice crops in the Lower Yangtze River Valley (LYRV) in 2021. 【Methods】Monitoring data, including systematic field investigations, sex pheromone trap results, and female ovarian dissection, were used to identify the population characteristics of moths collected during the Nanjing outbreak. A trajectory analytical approach, and the effect of weather on likely migration routes was also analyzed. 【Results】The moths originated from two locations: (i) From 24 August to 2 September most moths were immigrants, and came from southern

*资助项目 Supported projects: 国家重点研发计划项目 (2021YFE0194800); 国家自然科学基金资助项目 (31822043)

**共同第一作者 Co-first authors, E-mail: 2022102060@stu.njau.edu.cn; 3174267524@qq.com

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

收稿日期 Received: 2022-10-18; 接受日期 Accepted: 2023-04-06

Anhui, northern Jiangxi, northern Hunan, and eastern Hubei. (ii) During 3-14 September, most moths were local and emigrated towards southern Anhui, northern Jiangxi, and northern Zhejiang. Compared to normal years, the western Pacific subtropical high-pressure system (WPSH) was much stronger, and its orientation was more southerly, covering a large area of Southern China to the Yangtze River. As result, strong southwesterly winds (towards the northeast) prevailed over much of Hunan, Jiangxi, Anhui, and Jiangsu. The wind speed was also stronger than in other years. 87.29% (419/480) of moths were caught by sex pheromone traps when the downward airstream was predominant, suggesting that the downward airstream induced by the WPSH was a key factor forcing RLF moths to concentrate and land. **[Conclusion]** Special weather conditions caused high numbers of RLF moths to immigrate into the LYRV in later August 2021. These findings can help develop better integrated pest management strategies for this pest.

Key words *Cnaphalocrocis medinalis*; western Pacific subtropical high; trajectory analysis; ovarian dissection

稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis* 是亚洲东部地区最重要的水稻害虫之一。该虫在我国年均发生面积 1 605 万 hm^2 , 每年可造成水稻产量损失 491 万吨, 严重威胁我国水稻生产安全, 是我国 10 种一类农作物害虫之一 (姜玉英等, 2021)。稻纵卷叶螟是一种典型的迁飞性害虫, 在我国大部分地区无法越冬存活 (张孝羲等, 1981; 罗举等, 2013)。每年春夏季, 该虫从中南半岛和我国华南南部的终年繁殖区 (1 月平均温度 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 等温线以南地区), 通过 5 次北迁过程由南向北逐代迁入我国主要水稻产区以及日本、朝鲜半岛等 (张孝羲等, 1979, 1981)。长江三角洲是我国最为重要的水稻主产区之一, 也是稻纵卷叶螟常年重发区域。该地区稻纵卷叶螟通常发生 4-5 代, 5 月中下旬初次迁入, 6 月中下旬至 7 月上旬为主要迁入期, 7 月下旬至 8 月上旬多为本地虫居留繁殖而来, 或者是本地繁殖与外地迁入的混合种群。7、8 月的第 2 和第 3 代为该地区主害代。8 月下旬至 9 月上中旬的第 4 代为迁出代, 一般情况下不会对水稻造成较大的危害 (张孝羲等, 1981; 陈晓等, 2013); 但 2000 年以后, 该地区第 4 代稻纵卷叶螟频繁暴发, 成为主害代 (高月波等, 2008; 陈晓等, 2013; 董红刚等, 2021)。不过, 多数研究仍认为, 第 4 代稻纵卷叶螟主要是迁出代 (韩志民等, 2012; 陈晓等, 2013; 董红刚等, 2021)。但 Guo 等 (2022) 根据田间雌成虫卵巢发育情况判断, 2019 年江苏姜堰地区 7 月下旬-9 月上旬是由本地繁殖与外地迁入构成的混合种群, 9 月 10 日以后才是迁出种群。总而言之, 随着耕作制度、栽培方式以及

气候变化, 长江三角洲稻纵卷叶螟的发生动态和迁飞规律发生了相应的变化 (陈晓等, 2013; 董红刚等, 2021), 然而该区域主害代第 4 代稻纵卷叶螟种群的虫源性质仍然缺乏深入研究, 其大规模暴发的成因仍然不清楚。

2021 年 8 月下旬-9 月上中旬, 长江三角洲再次出现大范围的稻纵卷叶螟成虫蛾峰, 尚无相关研究分析此次蛾峰的发生动态和形成原因。本研究结合 2021 年长江三角洲稻纵卷叶螟田间赶蛾数据及南京地区赶蛾、性诱剂所诱捕 (以下简称性诱)、卵巢解剖数据, 解析当年稻纵卷叶螟大发生种群的发生动态, 并通过轨迹分析方法以及气象背景场分析, 来明确稻纵卷叶螟在南京地区长江三角洲的迁飞过程及天气条件, 从而有助于阐明南京稻纵卷叶螟的灾变机理, 为稻纵卷叶螟的准确测报和科学防控提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 数据来源

虫情数据: 2021 年长江中下游地区 115 个植保站的虫情赶蛾资料由全国农业技术推广服务中心提供。各植保站每日清晨在当地具有代表性水稻田块中横置长约 1 m 的竹竿, 逆风行进扫动水稻丛并用计数器记录稻纵卷叶螟起飞虫数。通过赶蛾面积, 将起飞虫数记为每 667 m^2 赶蛾量。

本研究所涉及的南京地区稻纵卷叶螟赶蛾数据、卵巢等级及其他相关虫情数据, 主要来自两个方面。南京农业大学白马教学科研基地 (即白马站点) 的赶蛾数据及卵巢解剖数据由本研究

调查所得。淳化和湖熟两个站点的赶蛾数据以及智能性诱装置所获取的逐日和逐小时数据由江宁区植保站提供。所有数据的采集时间段为2021年7月1日至9月15日,其中卵巢解剖等级的数据记录是2021年8月16日至9月15日。

气象数据:来源于美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)和美国国家大气研究中心(National Center for Atmospheric Research, NCAR)的全球再分析资料(Final operational global analysis data, FNL),其水平分辨率为 $1.0^{\circ}\times 1.0^{\circ}$,时间间隔为6 h 一次的全球气象数据。

基础地理数据:本研究涉及的江苏省地图源自中国各省县行政区划图(1:4 000 000),来自于国家基础地理信息中心网站(<http://www.ngcc.cn/ngcc/html/1/index.html>)。

1.2 虫情调查方法

赶蛾方法:2021年7月1日-9月15日,每天清晨手持长1 m 竹竿,顺着水稻行间逆风行进,缓慢拨动稻丛中上部(水稻分蘖中期前同时调查周边杂草),用计数器计飞起稻纵卷叶螟的数量,隔天上午9:00以前进行下一次调查。

卵巢解剖方法:2021年8月16日-9月15日,逐日用捕虫网在田间网捕稻纵卷叶螟,每日解剖雌蛾30头左右,解剖时先将蛾体表面的鳞片用清水洗净,将蛾体背面向上,用昆虫针固定在盛有薄层清水的蜡盘中。用镊子镊住虫体,同时用昆虫针从虫体腹末轻轻刺入,并沿背腹交界线向前划开,露出内部各器官。在实体解剖镜(Motic公司生产的SMZ-161体视镜)下,用昆虫针拨动,观察稻纵卷叶螟卵巢发育级别并记录,逐日记录并计算出各级卵巢所占百分比,再按世代平均判定出各代虫源性质。卵巢分级标准按张孝羲等(1979)标准判定。

1.3 迁飞轨迹模拟

本研究采用基于WRF模式并加入昆虫自主飞行参数的三维轨迹分析模型对稻纵卷叶螟迁飞路径进行模拟分析,该轨迹的计算模型是基于

FORTRAN语言设计(Hu *et al.*, 2013)。本研究使用WRF 4.0数值模式(<https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/>),以FNL为初始场数据和边界条件,采用的地形数据空间分辨率为 $2'$ 。采用单层嵌套的WRF模式,模拟网格区域为 130×150 个格点,经模拟计算后,输出每小时一次的 $30\text{ km}\times 30\text{ km}$ 格距的气象要素场,作为后续轨迹分析程序的高时空分辨率气象背景场。在本研究中,WRF模式模拟区域中心为(32.07°N , 118.78°E),其他模拟参数与齐国君等(2019)相同。

根据稻纵卷叶螟的迁飞生物学特征,对迁飞轨迹计算参数进行设定。主要包括:

(1)飞行时间的设定:在迁飞昆虫中,选择夜间飞行的蛾类如稻纵卷叶螟等可以连续飞行多个晚上,且在夜间开始起飞并在凌晨进行降落(Riley *et al.*, 1995; 翟保平和张孝羲, 1998; Chapman *et al.*, 2010)。因此,本研究以北京时间为标准,设置起飞时间为当天20:00,降落时间为次日02:00,且连续飞行3个夜晚(周立阳等, 1995),每晚飞行6 h,并且把每个夜晚结束的轨迹终点作为第2天夜间起飞的起点(齐国君等, 2019)。

(2)自主飞行速度:本研究设定稻纵卷叶螟的自主飞行速度为 0.8 m/s (翟保平和张孝羲, 1998),目前关于稻纵卷叶螟的飞行定向偏角的设定暂不考虑,默认其为顺风飞行。

(3)飞行高度的设定:本研究设定4个不同的模拟飞行高度,分别是距海平面高度500、750、1 000、1 250 m(翟保平和张孝羲, 1998)。

(4)飞行的低温阈值:在高空中飞行的昆虫,如果空气温度低于其飞行的低温阈值,昆虫振翅频率就会降低甚至停止,最后降落到某一地区。本研究设定稻纵卷叶螟的飞行低温阈值为 12.9°C (翟保平和张孝羲, 1998),当环境低于该温度时,模拟轨迹计算运行就会停止。

在通过WRF三维昆虫轨迹分析计算后,得到一系列的迁飞轨迹数据,还需要根据稻纵卷叶螟的生物学特性、寄主植物分布和生育期等不同因素进行筛选,得到有效的迁飞轨迹数据关于有效轨迹的判定:(1)回推轨迹的终点在农业种植

地区内, 必须要有合适的寄主植物, 并且寄主植物正处于合适的生育期; (2)回推轨迹的终点, 必须有稻纵卷叶螟发生危害, 并且要有羽化的成虫可以作为提供迁出的虫源; (3)迁飞轨迹起止点时刻需要符合稻纵卷叶螟迁飞的时间节律。

1.4 大气环流背景场分析

本研究利用 GrADS 2.1 软件 (Grid analysis and display system, <http://cola.gmu.edu/grads/>) 提取 FNL 中 2017 - 2021 年 7-9 月份 20:00-次日 08:00 的 850 hPa (距海平面约 1 500 m) 高度场的水平平均风场、下沉气流等信息, 并分析以上各种气象因素可能对稻纵卷叶螟种群迁入降落的具体影响。

2 结果与分析

2.1 2021 年 8-9 月南京稻纵卷叶螟发生动态

南京江宁区江宁街道 (江宁)、淳化街道 (淳化) 以及溧水区白马镇 (白马) 3 个监测点逐日赶蛾数据显示, 2021 年 7-9 月 15 日期间主要有 3 个稻纵卷叶螟成虫蛾峰: 7 月底、8 月上中旬以及 8 月下旬-9 月上旬 (图 1: A)。其中前 2 个蛾峰虫量较低, 而且淳化、白马的数据由于受新冠疫情影响导致虫情记录不完整。相比较而言, 第 3 个蛾峰不仅虫量大, 而且持续时间长。3 个监测点都从 8 月 23 日前后开始, 一直持续到 9 月 10 日, 连续多日 667 m² 蛾量超过 1 000 头, 甚至 2 000 头 (图 1: A)。同时, 江宁区

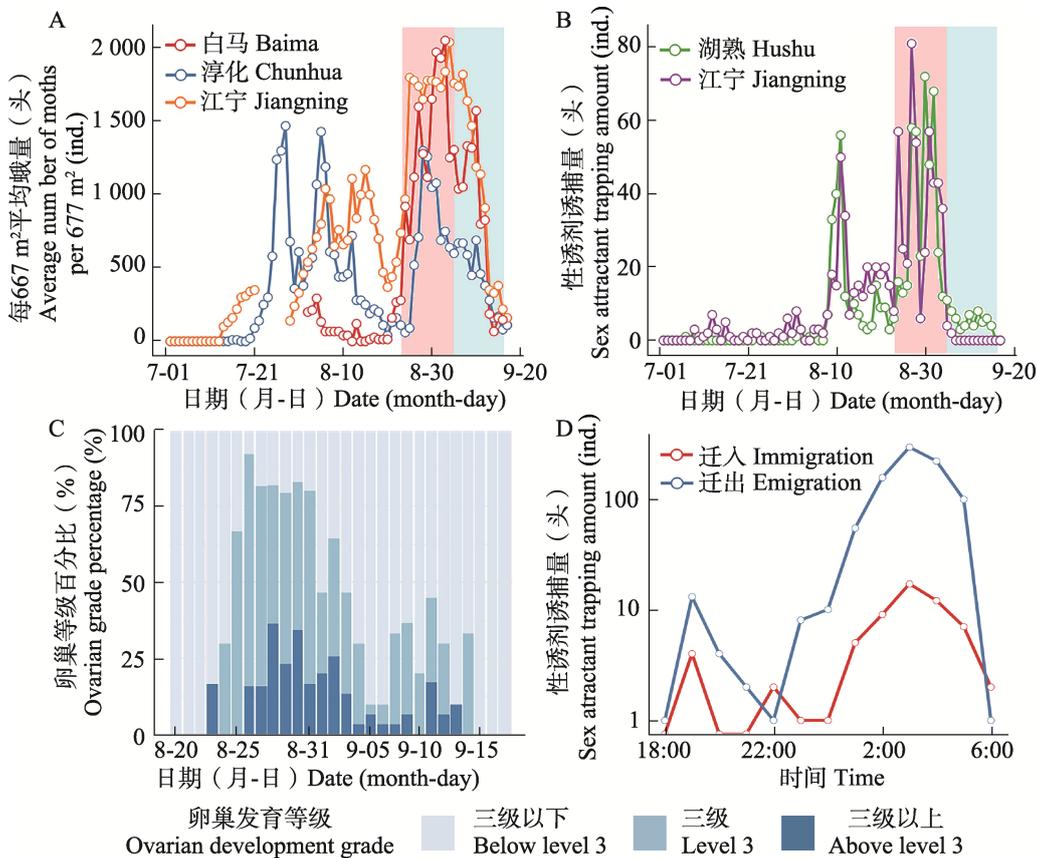


图 1 2021 年 7-9 月南京稻纵卷叶螟发生动态

Fig. 1 Dynamics of moth driving and sexual induction of rice leaf roller in Nanjing from July to September 2021

A. 田间赶蛾数据; B. 智能性诱装置诱捕蛾量; C. 性诱剂诱捕节律; D. 雌蛾卵巢发育级别。

红色区域为 8 月下旬迁入期, 蓝色为迁出期。

A. Dynamics of average moth population per 667 m² of rice leaf roller in Nanjing from July to September 2021; B. Dynamics of the trapping amount of sex attractants of rice leaf roller in Nanjing from July to September 2021;

C. Rhythm of pheromone trapping; D. Ovarian development stages of female moths;

The red area is the immigration period, and the blue area is the emigration period in late September.

湖熟街道、江宁街道 2 个监测点的智能性诱监测设备也同时诱集到了大量稻纵卷叶螟雄蛾。但诱捕高峰仅出现在 8 月 24 日-9 月 2 日, 日诱捕量 50 头甚至上百头, 随后诱捕量低于 10 头(图 1: B)。性诱剂所诱捕的雄蛾主要集中在下半夜(1:00-5:00), 即主要诱捕外地迁入的雄蛾(图 1: C), 这表明 8 月 24 日-9 月 2 日该区域出现了大规模的迁入。田间稻纵卷叶螟雌蛾逐日卵巢解剖数据显示, 8 月 24 日-9 月 2 日卵巢发育级别 III 级及以上的性成熟雌蛾占 70.89% (207/292); 9 月 3-14 日期间以低级别卵巢为主, 卵巢 I、II 级的未性成熟雌蛾占 71.58% (204/285) (图 1: D)。以上结果表明, 南京地区第 3 个稻纵卷叶螟发蛾高峰期可以划为 2 个阶段, 即 8 月 24 日-9 月 2 日以外地迁入种群为主, 田间赶蛾和性诱剂均监测到发蛾高峰; 9 月 3-14 日以本地种群迁出为主, 田间仍能发现大量稻纵卷叶螟成虫, 但性诱剂诱捕量极少。

长江中下游流域湖南、湖北、江西、安徽、福建、浙江、江苏和上海等省(直辖市) 115 个监测站点的数据表明, 8 月 15 日至 9 月 15 日该

区域普遍出现稻纵卷叶螟发蛾高峰, 整个发生动态可以分为 3 个阶段(图 2)。(1) 8 月 15 日-25 日: 发蛾高峰主要出现湖南北部、江西北部、湖北以及安徽南部等区域, 平均 667 m^2 蛾量达 5 000-7 500 头; 同期长江三角洲稻纵卷叶螟发生量相对较少。(2) 8 月 26 日-9 月 4 日: 安徽和江苏淮河以南区域、浙江北部以及上海出现极大规模的稻纵卷叶螟蛾峰, 平均 667 m^2 蛾量 10 000 头以上, 苏南地区和上海甚至超过 20 000 头。同时, 湖南北部、湖北东部、江西北部、浙江南部稻纵卷叶螟蛾量依然比较高, 667 m^2 蛾量 5 000-7 500 头。(3) 9 月 4 日-9 月 15 日, 长江中下游地区稻纵卷叶螟成虫数量明显下降, 大部分地区平均 667 m^2 蛾量在 5 000 头以下, 但安徽、江西、浙江三省交界区域平均 667 m^2 蛾量仍维持在 10 000 头以上。

综合上述结果可见, 8 月 24 日-9 月 15 日长江三角洲出现了大范围、大规模的稻纵卷叶螟成虫峰。结合南京本地田间卵巢发育情况, 初步判断 8 月 24 日-9 月 2 日以外地迁入为主, 9 月 3 日-15 日以本地种群迁出为主。

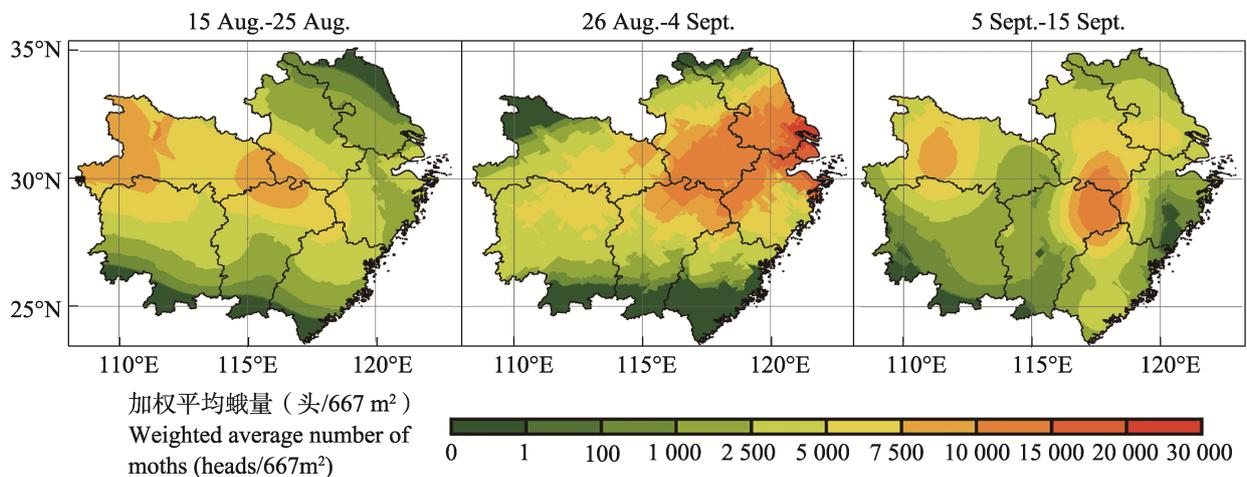


图 2 2021 年 8 月 15 日-9 月 15 日期间我国长江中下游流域稻纵卷叶螟田间数量

[审图号: 京审字(2024)G第0500号]

Fig. 2 The number of rice leaf roller in the Yangtze Plain watershed of China during 2021 August 15-September 15

2.2 2021 年南京地区稻纵卷叶螟后期迁入过程分析

2021 年 8 月下旬南京地区大规模迁入过程分为两个主要阶段(图 3)。

第一阶段为 8 月 24 日-27 日, 回推轨迹分析结果表明, 此时稻纵卷叶螟虫源地主要为湖南北部、湖北东部、江西北部、安徽南部等。此时, 西太平洋副热带高压(简称副高)处于长江以南,

副高北界 (500 hPa 等压面 5 880 等位势线沿 118°E 的位置) 为 30°N, 西南气流横贯湖南、江西、安徽等省, 大部分区域风速达到 6 m/s 以上, 为稻纵卷叶螟由西南向东北方向远距离迁飞至长江三角洲提供了运载气流 (图 3: A, B)。

第二阶段为 8 月 28 日-9 月 1 日, 回推轨迹分析结果表明, 该时间段稻纵卷叶螟虫源地主要

为安徽南部、浙江北部, 部分来自江西北部。此时副高北移, 副高北界北移至 33°N, 盛行西南风的区域同时北移。长江以南大部分区域受副高控制, 风速较低, 不利于稻纵卷叶螟远距离迁飞。因此, 迁入南京的稻纵卷叶螟主要来自安徽南部, 迁飞距离较短 (图 3: C, D)。

将回推轨迹所示的虫源地 (图 3) 与 8 月下

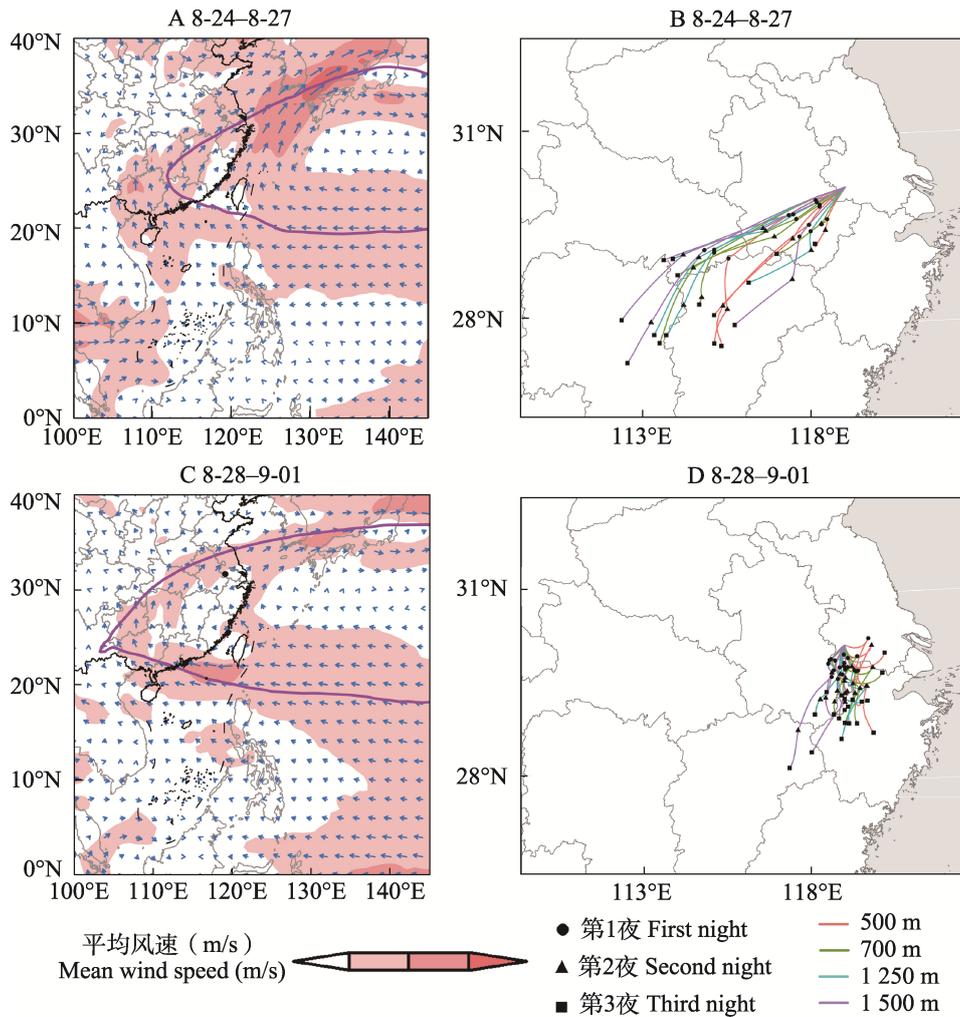


图 3 2021 年迁入期南京稻纵卷叶螟迁飞轨迹及对应 850 hPa 水平气流场图

[审图号: 京审字 (2024) G 第 0500 号]

Fig. 3 The migratory track of the 2021 rice leaf roller during the immigration period, and the corresponding horizontal air flow field at 850 hPa

A. 8 月 24 日-8 月 27 日 850 hPa 水平气流场图; B. 8 月 24 日-8 月 27 日顺推轨迹图;

C. 8 月 28 日-9 月 1 日 850 hPa 水平气流场图; D. 8 月 28 日-9 月 1 日顺推轨迹图。

淡紫色实线 500 hPa 等压面 5 880 等位势线, 表示西太平洋副热带高压的北界。黑色圆点表示南京地区。

A. Horizontal air flow field at 850 hPa from August 24th to August 27th; B. Forward trajectory chart from August 24th to August 27th; C. Horizontal air flow field at 850 hPa from August 28th to September 1st;

D. Forward trajectory chart from August 28th to September 1st.

The light purple solid line at the 500 hPa pressure level with 5880 geopotential meters represents the northern boundary of the western Pacific subtropical high. The black dotted points indicate the area of Nanjing.

半旬-9月上半旬长江中下游地区赶蛾量(图2)进行对比,发现可能为虫源地的安徽南部、江西西北部呈现橘红色,该地区赶蛾量处于15 000头以上。湖南北部及湖北东部呈现黄色,赶蛾量达到5 000-7 500头。因此回推轨迹显示的虫源地与虫情数据基本吻合;且长江下游地区蛾量分布并不均匀,虫源地(即安徽南部、江西西北部、湖南北部以及湖北东部)的赶蛾量是分别明显多于其他地区。因此回推轨迹显示的虫源地可以得到当地稻纵卷叶螟虫情数据的支持。

与2009-2021年8月下旬850 hPa平均气象背景场进行比较可以发现,2021年8月下旬长江三角洲经向风明显偏强(图4:A),并且是2009年以来经向风最强的年份(图4:B)。与其他年份相比较,2021年8月副高特征参数与其他年份也显著不同,不仅是2009年以来最强的副高(2021年8月副高强度指数为447.971,其他年份平均值254.74),而且位置偏南(2021年8月副高北界指数为32.52,2009-2021年平均值34.63)(图4:B)。

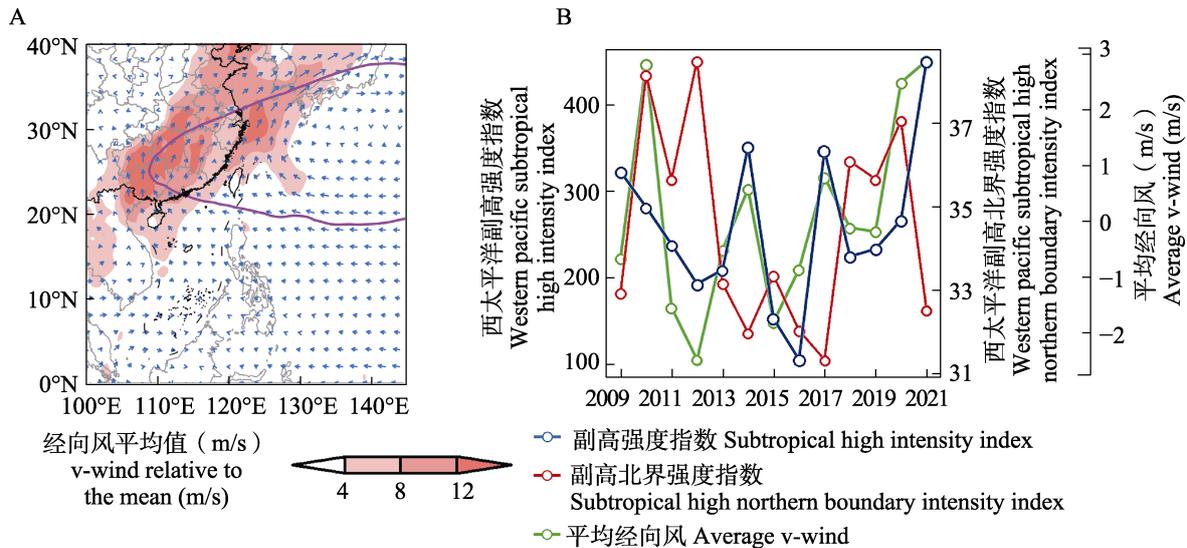


图4 2021年8月下旬850 hPa水平气流场距平均图 [审图号:京审字(2024)G第0500号]

Fig. 4 Deviation chart of 850 hPa horizontal airflow field in late August 2021

A. 2021年8月下旬850 hPa水平气流距平均图; B. 2008-2021年副热带高压指数及长江中下游流域平均经向风强度。
A. Deviation map of the 850 hPa horizontal airflow field in late August 2021; B. Subtropical high-pressure index and average meridional wind strength in the Yangtze River middle and lower reaches from 2008 to 2021.

矢量箭头为2021年8月下旬850 hPa平均风向,红色区域为2021年经向风较2008-2020年同期平均值偏强的区域,淡紫色实线500 hPa等压面588位势米等高线用来表示西太平洋副热带高压的位置。

The vector arrow is the average wind direction of 850 hPa in late August 2021, and the red area is the northward area of the v-direction wind in 2021 compared with the mean value of the same period in 2008-2020. The light line is the 588 potential meter contour at the level 500 hPa and present the location of the western Pacific subtropical high-pressure system.

通过分析南京稻纵卷叶螟迁入期间性诱剂逐时诱捕虫量与当地当时垂直速度场发现,8月24、25、27日和9月1日夜间高空下沉气流在下半夜逐渐取代上升气流后,性诱剂诱捕到大量稻纵卷叶螟成虫,高峰时段虫量均达到10-20头(图5:A-C, I)。其中8月24和27日在后半夜高峰时段诱捕量达到20头以上。8月26日上半夜高空由强烈的下沉气流主导,凌晨1:00开始,高层上升气流逐渐增强,且逐渐取代上升气

流,至3:00已经主导925 hPa高度以上的区域。但底部气流仍以下沉气流占主导(图5:C)。8月28、29、30和31日(图5:E-H)凌晨,上空始终以下沉气流占主导,在后半夜都持续诱捕到稻纵卷叶螟成虫,其中8月28和31日诱捕虫量较大,分别诱捕到54头和57头。迁入期间性诱剂共诱捕到480只稻纵卷叶螟,其中近地层受下沉气流控制下被诱捕到的成虫419只,占总诱捕量的87.29%。这意味着,在迁移过程中,稻

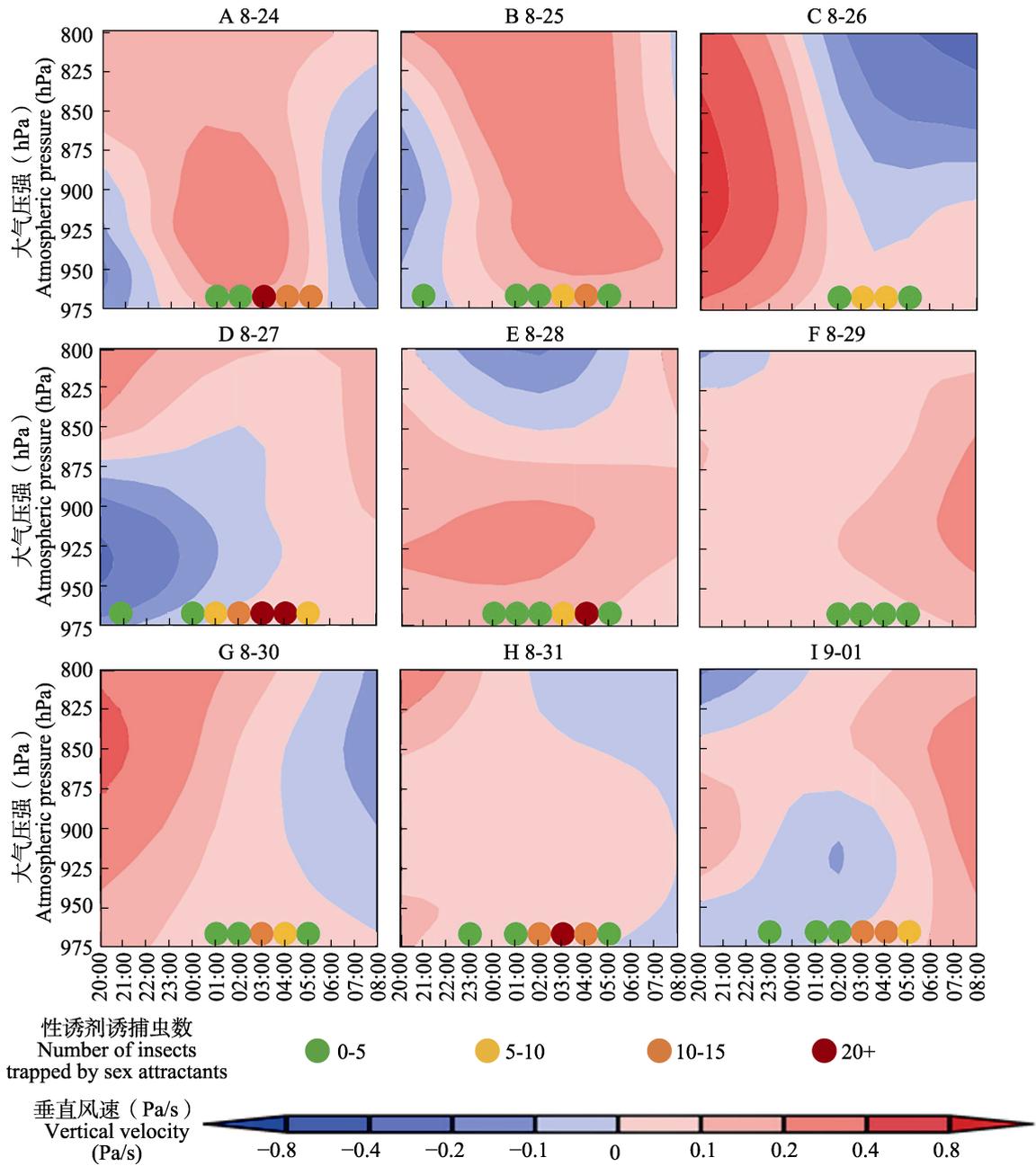


图 5 2021 年稻纵卷叶螟迁飞期间南京 800-975 hPa 20:00-8:00 垂直风速

Fig. 5 800-975 hPa vertical wind speed at 20:00-8:00 in Nanjing during the migration of rice leaf roller in 2021

A-I. 本图显示了 2021 年 8 月 24 日至 9 月 1 日, 在南京地区, 从每晚 20:00 至次日凌晨 8:00 之间, 800-975 hPa 气压高度范围内的垂直风速情况。红色表示下降气流, 蓝色表示上升气流, 垂直风速的具体大小可以从图例中查看。纵坐标表示大气压强, 随着海拔高度的升高, 大气压强减小。横坐标是时间轴, 展示了从当日晚上 20:00 到次日凌晨 8:00 的时间段。每个小图上方的日期对应该时间段内的观测数据。圆点为该时段性诱剂诱捕到稻纵卷叶螟虫量。

A-I 分别代表从 8 月 24 日至 9 月 1 日的日期。

A-I. This figure covers the vertical wind speed in the Nanjing area from 20:00 to 08:00 the next day, between August 24 and September 1, 2021, at 800-975 hPa. Red represents downdrafts, while blue indicates updrafts, with the magnitude of vertical wind speed seen in the legend. The y-axis represents atmospheric pressure, which decreases with increasing altitude. The x-axis is the time axis, covering from 20:00 on the current day to 08:00 the next morning. The dates above each small figure correspond to the observation times. The dot color indicates the number of moths trapped by sexual attractants.

A-I correspond to August 24 to September 1, respectively.

纵卷叶螟很可能因为下沉气流的影响而被迫降落，并因此被性诱剂吸引并捕获。

2.3 2021 年南京地区稻纵卷叶螟后期迁出过程分析

2021 年 9 月上旬南京稻纵卷叶螟种群迁出过程可分为三个主要阶段（图 3：A、C、E）。第一阶段为 9 月 3 日-8 日，稻纵卷叶螟同时存在南迁和北迁，但主要以北迁为主，顺推轨迹显示降落区主要为江苏大部、安徽大部及浙江部分地区。其中，9 月 3 日-5 日偏南风占优势，控制长江三角洲，9 月 6 日-8 日东北冷空气短暂南移，而后又逐渐被偏南风取代（图 6：A）。此阶段南北风向发生交替变化，致使稻纵卷叶螟轨迹出现南迁北迁并存的情况（图 6：B）。第二阶段为 9 月 9 日-11 日顺推轨迹显示稻纵卷叶螟向由东向西远距离迁飞，主降安徽中部和湖北东部，部分可到达湖南北部（图 6：D）。第三阶段为 9 月 12 日-14 日，顺推轨迹显示稻纵卷叶螟由东北向西南远距离迁飞主降安徽南部、江西北部 and 浙江西部，部分可到达湖南东北部、湖北东部、福建北部（图 6：F）。9 月 9 日开始副高急速南撤，长江三角洲受到台风“灿都”的影响，长江三角洲盛行东风，逐渐向东北风转变，有利于稻纵卷叶螟向南回迁（图 6：C、E）。

将顺推模拟结果显示的降落区与长江中下游 9 月中上旬稻纵卷叶螟赶蛾量进行对比发现，稻纵卷叶螟迁出期间，可能为降落区的安徽南部、江西北部赶蛾虫量达到 10 000-15 000 头，明显多于周边地区。浙江北部赶蛾虫量达 1 000-5 000 头明显多于浙江南部赶蛾量。本研究在迁出期对南京稻纵卷叶螟进行迁飞顺推轨迹模拟（图 6），发现由于台风过境，迁出阶段二可能会致使稻纵卷叶螟进行向西迁徙到达湖北省及湖南省北部，后向南迁徙。对照虫情数据（图 2）发现湖北西北部及湖南省北部虫量确实显著增加，这与迁飞预测的迁飞阶段二降落区一致。迁飞阶段三的降落区并未发现诱捕虫量增加。这可能是由于此时南京地区虫量已经逐渐减少（图 1），南迁的虫量少于北迁成虫造成的。

3 讨论

本研究对 2021 年 8 月下旬-9 月上旬长江三角洲稻纵卷叶螟大范围出现的成虫峰进行了虫源性质判断，结果表明，8 月下旬以外地迁入为主，而 9 月上旬以本地种群外迁为主。而以往研究通常认为，8 月下旬-9 月上旬第 4 代稻纵卷叶螟主要是迁出代（韩志民等, 2012; 陈晓等, 2013; 包云轩等, 2019; 董红刚等, 2021），与本文研究结果并不一致。Guo 等（2022）根据田间雌成虫卵巢发育情况判断，2019 年江苏姜堰地区 7 月下旬-9 月上旬是由本地繁殖与外地迁入构成的混合种群，9 月 10 日以后才是迁出种群，也与本研究结果有出入。鉴于 2021 年是稻纵卷叶螟大发生的特殊年份，8 月下旬迁入虫源主要分布在长江中下游地区的湖南北部、江西北部、湖北东南部和安徽南部等地，以及 9 月上旬亦存在本地种群大量迁出，这意味着该时期长江中下游地区稻纵卷叶螟种群普遍规模大，存在大范围的迁出。2021 年因特殊的气象条件（副高极度偏高，位置偏南）导致西南风强于往年，稻纵卷叶螟进而能够持续迁入长江三角洲。由此可见，平常年份长江下游主害代第 4 代主要是由本地繁殖与外迁构成的混合种群。该时间段长江中下游地区褐飞虱 *Nilaparvata lugens* 也同样普遍存在发生峰，相关研究表明，若以长江中下游为整体，该时间段主要为种群内部交流，迁飞交流方向主要取决于盛行风向（Hu *et al.*, 2011, 2014）。同理，稻纵卷叶螟成虫峰也可认为是长江中下游地区整个区域内部的种群交流。

通常 8 月下旬-9 月上旬是我国季风发生转换的季节，南向风和北向风发生频率基本一致，也就意味着该时间段昆虫迁飞方向为南北混合迁飞（Hu *et al.*, 2011, 2014）。长江三角洲 8 月下旬-9 月上旬褐飞虱发生大规模迁入峰时，通常盛行西风或西北风，长江中游地区的褐飞虱能够顺风由西向东迁飞（Hu *et al.*, 2014）。本研究结果也表明，稻纵卷叶螟大规模迁入时，其虫源也主要来自长江中游地区，也同样主要通过借助副高

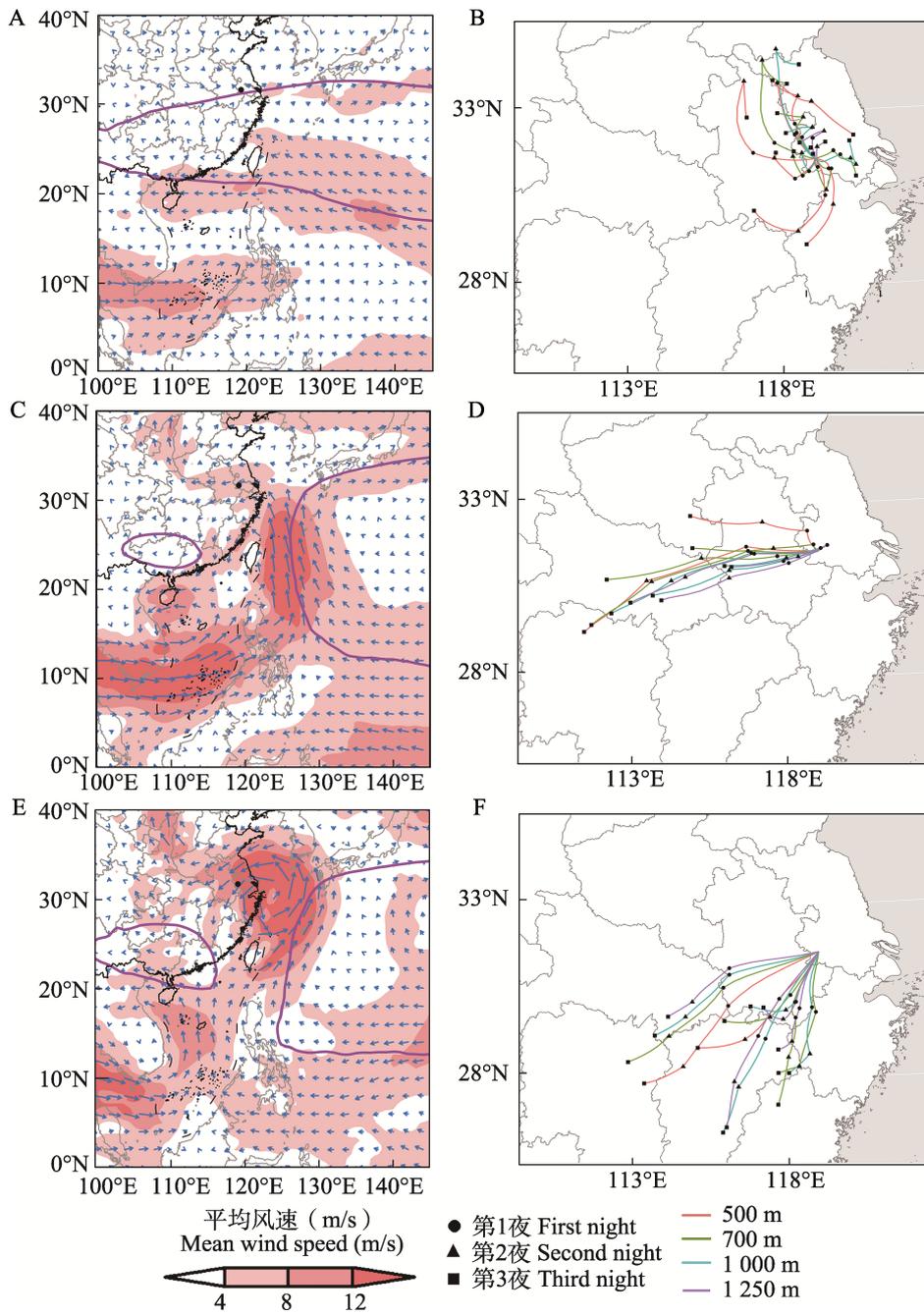


图 6 2021 年迁出期南京稻纵卷叶螟迁飞轨迹及对应 850 hPa 水平气流场图

[审图号: 京审字 (2024) G 第 0500 号]

Fig. 6 The migratory track of the 2021 rice leaf roller during the emigration period, and the corresponding horizontal air flow field at 850 hPa

A. 9 月 3 日-9 月 8 日 850 hPa 水平气流场图; B. 9 月 3 日-9 月 8 日顺推轨迹图; C. 9 月 9 日-9 月 11 日 850 hPa 水平气流场图; D. 9 月 9 日-9 月 11 日顺推轨迹图; E. 9 月 12 日-9 月 14 日 850 hPa 水平气流场图; F. 9 月 9 日-9 月 11 日顺推轨迹图。淡紫色虚线为 500 hPa 等压面 5 880 等位势线, 表示西太平洋副热带高压的北界。黑色圆点表示南京地区。

A. Horizontal air flow field at 850 hPa from September 3rd to September 8th; B. Forward trajectory chart from September 3rd to September 8th; C. Horizontal air flow field at 850 hPa from September 9th to September 11th; D. Forward trajectory chart from September 9th to September 11th; E. Horizontal air flow field at 850 hPa from September 12th to September 14th; F. Forward trajectory chart from September 9th to September 11th. The light purple line showed the 5 880 potential meter contour at the level of 500 hPa to present the location of the western Pacific subtropical high. The black dotted points indicate the area of Nanjing.

西北侧盛行的西南风迁飞而来。2021 年长江三角洲之所以能够出现大规模迁入,与当时的大气环流形势相关。2021 年 8 月下旬-9 月上旬欧亚大陆为“两槽一脊”的环流型,位于西西伯利亚地区的长波槽对应 -2 dagpm 距平,表明槽后冷空气偏弱。西太平洋副热带高压明显西伸,强度也较同期明显偏强(周冠博和高拴柱,2021)。长江三角洲由于长期接近副高北界,由西南风占主。这为稻纵卷叶螟进一步北迁提供了运载气流条件。9 月 9 日受 14 号台风“灿都”登陆影响,长江中下游地区盛行强劲的东北风开始为稻纵卷叶螟南迁提供了有利的气象条件,但此时南京地区虫量已经逐渐减少,因此南迁的虫量可能少于北迁成虫(柳龙生和高拴柱,2021)。

迁飞昆虫往往由于降水、下沉气流和低温等天气条件而迫降(Westbrook and Isard, 1999; 胡高等, 2007)。本研究发现 8 月下旬长江三角洲稻纵卷叶螟大规模迁入主要受下沉气流影响。迁入期间性诱剂共诱捕到 480 只稻纵卷叶螟,其中近地层受下沉气流控制情况下被诱捕到的成虫有 419 只,占总诱捕量的 87.29%。副高作为高压系统,在其控制下,天气以晴天为主,水平风速较弱,垂直方向以下沉气流为主。长江三角洲 9 月份褐飞虱上灯虫量与同期的副高强度呈显著正相关,也表明在副高控制下下沉气流也导致褐飞虱聚集降落(Lu *et al.*, 2017)。

用高空探照灯灯诱时,通常迁出期集中在上半夜,迁入期主要集中在下半夜,能够较好的反映种群的迁入、迁出动态(齐会会等, 2014)。本研究中逐时性诱数据结果表明稻纵卷叶螟主要是后半夜被性诱剂诱捕到,这表明性诱装置可能主要诱集外地迁入的个体,而对迁出个体诱捕效果不好。因此,田间出现迁出蛾峰时,性诱装置的诱集量远低于田间赶蛾的数量。这可能是由于性诱剂只能诱捕到性发育成熟的雄蛾。迁出期稻纵卷叶螟成虫往往处于生殖滞育阶段,仍处于性未成熟阶段,可能对性诱剂趋性较弱。待其在迁飞期间完成性成熟,从高空降落至监测站附近才能被性诱剂诱捕到。不过,冯波等(2017)研究却认为,迁出期性诱装置诱虫量与网捕虫量发

生趋势一致。因此,性诱装置能够很好地反映种群迁入动态,但是否能够准确反映迁出过程,仍需要进一步研究。

综上所述,本研究对 2021 年以南京地区为代表的长江三角洲稻纵卷叶螟大规模迁飞过程进行了个例分析,初步明确了该区域 8 月下旬-9 月上旬主害代第 4 代的虫源性质,即由本地繁殖与外地迁入构成的混合种群。当持续盛行西南气流时长江中游地区(湖南北部、江西北部、湖北东南部等地)以及安徽南部的稻纵卷叶螟种群将大规模迁入该区域。上述结果将为指导该区域稻纵卷叶螟的科学防控提供重要理论参考。

参考文献 (References)

- Bao YX, Wang MF, Chen C, Lu MH, Liu WC, 2019. Impact of East Asian summer monsoon advancing and retreating on occurrence of *Cnaphalocrocis medinalis* Guenée in the main rice-growing regions of south China. *Acta Ecologica Sinica*, 39(24): 9351–9364. [包云轩, 王明飞, 陈燊, 陆明星, 刘万才, 2019. 东亚夏季季风进退对我国南方水稻主产区稻纵卷叶螟发生的影响. 生态学报, 39(24): 9351–9364.]
- Chapman JW, Nesbit RL, Burgin LE, Reynolds DR, Smith AD, Middleton DR, Hill JK, 2010. Flight orientation behaviors promote optimal migration trajectories in high-flying insects. *Science*, 327(5966): 682–685.
- Chen X, Liu WC, Zhu JS, Zhang XX, Zhai BP, 2013. Climatic factors influencing the 2003 outbreak of *Cnaphalocrocis medinalis* in China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 50(3): 615–621. [陈晓, 刘万才, 朱建生, 张孝羲, 翟保平, 2013. 2003 年我国稻纵卷叶螟特大发生的气候背景. 应用昆虫学报, 50(3): 615–621.]
- Dong HG, Geng Y, Zuo X, Chen F, Mei AP, Lu MX, 2021. Occurrence dynamics and influencing factors of *Cnaphalocrocis medinalis* Guenée in Hanjiang district, Yangzhou city. *Journal of Environmental Entomology*, 43(4): 850–857. [董红刚, 耿跃, 左希, 陈凤, 梅爱萍, 陆明星, 2021. 扬州邗江地区稻纵卷叶螟发生动态及影响因素分析. 环境昆虫学报, 43(4): 850–857.]
- Feng B, Guo QS, Zhu F, Wang X, Liu WC, Jiang YY, Zhong L, Du YJ, 2017. Ovarian development and synthetic sex pheromone lure trapping of adults of the rice leaf folder, *Cnaphalocrocis medinalis* (Lepidoptera: Pyralidae). *Acta Entomologica Sinica*, 60(2): 211–221. [冯波, 郭前爽, 朱凤, 王笑, 刘万才, 姜玉英, 钟玲, 杜永均, 2017. 迁飞性害虫稻纵卷叶螟成虫的卵巢发育与性诱剂诱捕. 昆虫学报, 60(2): 211–221.]
- Gao YB, Chen X, Chen ZR, Bao YX, Yang RM, Liu TL, Zhai BP, 2008. Dynamic analysis on the migration of the rice leaf roller *Cnaphalocrocis medinalis* (Lepidoptera: Pyralidae) by Doppler

- insect monitoring radar and numerical simulation. *Acta Ecologica Sinica*, 28(11): 5238–5247. [高月波, 陈晓, 陈钟荣, 包云轩, 杨荣明, 刘天龙, 翟保平, 2008. 稻纵卷叶螟 (*Cnaphalocrocis medinalis*) 迁飞的多普勒昆虫雷达观测及动态. *生态学报*, 28(11): 5238–5247.]
- Guo JW, Yang F, Zhang HY, Lin PJ, Zhai BP, Lu ZX, Hu G, Liu PC, 2022. Reproduction does not impede the stopover departure to ensure a potent migration in *Cnaphalocrocis medinalis* moths. *Insect Science*, 29(6): 1672–1684.
- Han ZM, Zhang L, Pan P, Tang JH, Luo LZ, Jiang XF, 2012. Dynamics and population characteristics of the third and fourth generations of *Cnaphalocrocis medinalis* in Yizheng county of Jiangsu province in 2010. *Plant Protection*, 38(3): 44–49. [韩志民, 张蕾, 潘攀, 唐继洪, 罗礼智, 江幸福, 2012. 2010 年仪征市稻纵卷叶螟第三、四代发生动态及虫源性质. *植物保护*, 38(3): 44–49.]
- Hu G, Lu F, Zhai BP, Lu MH, Liu WC, Zhu F, Wu XW, Chen GH, Zhang XX, 2014. Outbreaks of the brown planthopper *Nilaparvata lugens* (Stål) in the Yangtze River Delta: immigration or local reproduction. *PLoS ONE*, 9(2): e88973.
- Hu G, Lu F, Lu MH, Liu WC, Xu WG, Jiang XH, Zhai BP, 2013. The influence of typhoon Khanun on the return migration of *Nilaparvata lugens* (Stål) in Eastern China. *PLoS ONE*, 8(2): e57277.
- Hu G, Cheng XN, Qi GJ, Wang FY, Lu F, Zhang XX, Zhai BP, 2011. Rice planting systems, global warming and outbreaks of *Nilaparvata lugens* (Stål). *Bulletin of Entomological Research*, 101(2): 187–199.
- Hu G, Bao YX, Wang JQ, Zhai BP, 2007. Case studies on the landing mechanisms of the brown planthoppers *Nilaparvata lugens* Stål. *Acta Ecologica Sinica*, 27(12): 5068–5075. [胡高, 包云轩, 王建强, 翟保平, 2007. 褐飞虱的降落机制. *生态学报*, 27(12): 5068–5075.]
- 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. *Chinses 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.]
- Liu LS, Gao SZ, 2021. Analysis of the September 2021 atmospheric circulation and weather. *Meteorological Monthly*, 47(12): 1555–1560. [柳龙生, 高拴柱, 2021. 2021 年 9 月大气环流和天气分析. *气象*, 47(12): 1555–1560.]
- Lu MH, Chen X, Liu WC, Zhu F, Lim KS, McInerney CE, Hu G, 2017. Swarms of brown planthopper migrate into the lower Yangtze River Valley under strong western Pacific subtropical highs. *Ecosphere*, 8(10): e01967.
- Luo J, Liu Y, Gong YF, Cheng XN, Fu Q, Hu G, 2013. Investigation of the overwintering of three species of rice pest, *Nilaparvata lugens*, *Sogatella furcifera* and *Cnaphalocrocis medinalis* in China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 50(1): 253–260. [罗举, 刘宇, 龚一飞, 程遐年, 傅强, 胡高, 2013. 我国水稻“两迁”害虫越冬情况调查. *应用昆虫学报*, 50(1): 253–260.]
- Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China, 2020. Announcement No. 333 of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. (2020-11-30). http://www.moa.gov.cn/nybg/2020/202010/202011/t20201130_6357326.htm. [中华人民共和国农业农村部, 2020. 中华人民共和国农业农村部公告第 333 号. (2020-11-30), http://www.moa.gov.cn/nybg/2020/202010/202011/t20201130_6357326.htm.]
- Qi GJ, Ma J, Hu G, Yu YH, Chen AD, Gao Y, Lv LH, 2019. Analysis of migratory routes and atmospheric features of the newly invaded fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) in Guangdong province. *Journal of Environmental Entomology*, 41(3): 488–496. [齐国君, 马健, 胡高, 于永浩, 湛爱东, 高燕, 吕利华, 2019. 首次入侵广东的草地贪夜蛾迁入路径及天气背景分析. *环境昆虫学报*, 41(3): 488–496.]
- Qi HH, Zhang YH, Wang J, Peng H, Zhang Z, Cheng DF, 2014. Rhythm of rice leaf folder (*Cnaphalocrocis medinalis*) to the searchlight trap. *Scientia Agricultura Sinica*, 47(22): 4436–4444. [齐会会, 张云慧, 王健, 彭赫, 张智, 程登发, 2014. 稻纵卷叶螟在探照灯下的扑灯节律. *中国农业科学*, 47(22): 4436–4444.]
- Riley JR, Reynolds DR, Smith AD, Edwards AS, Zhang XX, Cheng XN, Wang HK, Cheng JY, Zhai BP, 1995. Observations of the autumn migration of the rice leaf roller *Cnaphalocrocis medinalis* (Lepidoptera: Pyralidae) and other moths in eastern China. *Bulletin Entomological Research*, 85(3): 397–414.
- Zhai BP, Zhang XX, 1998. Numerical simulation of the trajectory of marked moth of rice leaf roller (*Cnaphalocrocis medinalis*). *Journal of Southwest University*, 20(5): 156–163. [翟保平, 张孝羲, 1998. 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*, 20(5): 156–163.]
- Zhang XX, Lu ZQ, Geng JG, 1979. Application of female anatomy of *Cnaphalocrocis medinalis* in forecasting. *Insect Knowledge*, 25(3): 97–99. [张孝羲, 陆自强, 耿济国, 1979. 稻纵卷叶螟雌蛾解剖在测报上的应用. *昆虫知识*, 25(3): 97–99.]
- Zhang XX, Geng JG, Zhou WJ, 1981. Migration of rice leaf roller *Cnaphalocrocis medinalis* Guenée in China. *Journal of Nanjing Agricultural College*, 1981(3): 43–54. [张孝羲, 耿济国, 周威君, 1981. 我国稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis* Guenée 迁飞规律的研究. *南京农学院学报*, 1981(3): 43–54.]
- Zhou GB, Gao SZ, 2021. Analysis of the August 2021 atmospheric circulation and weather. *Meteorological Monthly*, 47(11): 1426–1432. [周冠博, 高拴柱, 2021. 2021 年 8 月大气环流和天气分析. *气象*, 47(11): 1426–1432.]
- Zhou LY, Zhang XX, Cheng JY, 1995. Trajectory analysis of *Cnaphalocrocis medinalis* Guenée for Huaihe and Yangtze River rice area. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 18(2): 53–58. [周立阳, 张孝羲, 程极益, 1995. 江淮稻区稻纵卷叶螟的轨迹分析. *南京农业大学学报*, 18(2): 53–58.]
- Westbrook JK, Isard SA, 1999. Atmospheric scales of biotic dispersal. *Agricultural and Forest Meteorology*, 97: 263–274.