



我国草地贪夜蛾北迁格局及其虫源衔接关系*

李建春^{1**} 刘杰² 齐国君³ 张国彦⁴ 黄建荣⁵
张海波⁶ 王蓓蓓⁷ 姜玉英² 胡高^{1***}

- (1. 南京农业大学植物保护学院昆虫系, 南京 210095; 2. 全国农业技术推广服务中心, 北京 100125;
3. 广东省农业科学院植物保护研究所, 广东省植物保护新技术重点实验室, 广州 510640;
4. 河南省植物保护植物检疫站, 郑州 450002; 5. 河南省农业科学院植物保护研究所, 郑州 450002;
6. 江苏省植物保护植物检疫站, 南京 210036; 7. 安徽省植物保护植物检疫站, 合肥 230031)

摘要 【目的】草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 是新入侵我国的重大跨境迁飞性害虫, 探明该虫在我国的迁飞格局及虫源衔接关系, 对全国草地贪夜蛾预测预报及精准防控意义重大。【方法】基于2019-2022年全国草地贪夜蛾虫情监测数据, 结合历史气象资料, 采用有效积温模型和轨迹分析方法, 解析了草地贪夜蛾在我国的北迁过程及其虫源衔接关系。【结果】我国草地贪夜蛾春夏季迁飞格局主要包括3个主要发生区和3次大规模北迁过程, 其中2-4月主要发生在华南地区, 4月下旬-5月中旬大规模迁入长江以南地区(25°-30°N); 5-6月主要发生在长江以南地区, 6月迁入江淮、黄淮地区(30°-35°N); 7-8月主要发生在江淮、黄淮地区, 8月上中旬继续北迁至35°N以北地区。2019-2022年由于南向风速和降雨区域分布导致草地贪夜蛾北迁格局存在年度差异。【结论】探明了我国草地贪夜蛾的北迁格局及其虫源衔接关系, 为该虫的监测预警和源头防控提供理论依据。

关键词 草地贪夜蛾; 北迁格局; 轨迹分析; 虫源地

The northward migration pattern of the fall armyworm in China from 2019 to 2022

LI Jian-Chun^{1**} LIU Jie² QI Guo-Jun³ ZHANG Guo-Yan⁴ HUANG Jian-Rong⁵
ZHANG Hai-Bo⁶ WANG Bei-Bei⁷ JIANG Yu-Ying² HU Gao^{1***}

- (1. Department of Entomology, College of Plant Protection, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China;
2. China National Agro-Tech Extension and Service Center, Beijing 100125, China; 3. Guangdong Provincial Key Laboratory of High Technology for Plant Protection, Institute of Plant Protection, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, China; 4. Plant Protection and Quarantine Station of Henan Province, Zhengzhou 450002, China; 5. Institute of Plant Protection, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China; 6. Plant Protection and Quarantine Station of Jiangsu Province, Nanjing 210036, China; 7. Plant Protection and Quarantine Station of Anhui Province, Hefei 230031, China)

Abstract [Objectives] The fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) is a notorious migratory pest that has invaded China since late 2018. Better understanding of the northward migration patterns of the pest will greatly improve the monitoring, forecasting and control of this pest. [Methods] Based on monitoring data collected from 2019 to 2022 and historical meteorological data, the northward migration and source of migrating fall armyworm in China were analyzed using effective temperature and trajectory analysis models. [Results] The northward migration pattern of the fall armyworm in spring and summer consisted of three primary occurrence zones and three large-scale northward migrations. The fall armyworm mainly occurred in southern

*资助项目 Supported projects: 国家重点研发计划项目(2021YFD1400700); 江苏省现代农业项目(BE2020349); 广西自然科学基金粤桂联合基金项目(2022GXNSFDA080003)

**第一作者 First author, E-mail: 2020102076@stu.njau.edu.cn

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

收稿日期 Received: 2023-06-03; 接受日期 Accepted: 2023-07-01

China from February to April, then migrated in vast numbers into the southern regions of the Yangtze River (25°-30°N) from late April to middle May. It mainly remained in the southern regions of the Yangtze River from May to June, then migrated into the Jiang-Huai and Huang-Huai regions (30°-35°N) in June. Subsequently, it mainly remained in the Jiang-Huai and Huang-Huai regions between July and August, but continued to migrate northward of 35°N from early to middle August. There are significant annual differences in the migration patterns of the fall armyworm between 2019 and 2022 reflecting annual differences in the strength of the southward airflow and distribution of precipitation during this period. **[Conclusions]** The results reveal the northward migration patterns and source of migrating fall armyworm in China, which provides a basis for monitoring this pest, obtaining early warning of outbreaks, and preventing outbreaks by controlling source populations.

Key words *Spodoptera frugiperda*; northward migration pattern; trajectory analysis; insect source area

草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) 是 2018 年年末入侵我国的重大迁飞害虫 (陈辉等, 2020a; Sun *et al.*, 2021), 其凭借极强的远距离迁飞能力在全国快速蔓延。2019 年草地贪夜蛾在我国 26 省 (直辖市、自治区) 1 500 多个县市发生为害 (姜玉英等, 2019), 2020、2021 年再次北迁入侵 27 省 (直辖市、自治区) 1 400 多个县市, 年发生面积均超过 106.67 万 hm^2 , 严重威胁我国的粮食生产和玉米产业 (Zhou *et al.*, 2021)。2020 年 9 月该虫被列为我国《一类农作物病虫害名录》(吴孔明, 2020; Wu *et al.*, 2021)。草地贪夜蛾已成为我国一种常态化的重大迁飞性害虫, 其突发性、暴发性的特点导致难以实现精准预警和及时防控 (Wu *et al.*, 2021; Yang *et al.*, 2021b; Zhou *et al.*, 2021)。因此, 亟需探明该虫在我国的迁飞格局及其虫源衔接关系。

草地贪夜蛾在我国大部分地区无法越冬存活, 仅在热带和温暖的亚热带地区能够周年繁殖 (齐国君等, 2020; 姜玉英等, 2021; Yang *et al.*, 2021a)。该虫每年通过季节性迁飞寻找适宜的环境完成世代繁衍, 从而实现大范围的蔓延为害 (姜玉英等, 2019; 吴孔明, 2020)。Li 等 (2020) 利用轨迹分析方法模拟了该虫在我国及周边地区的迁飞过程, 提出草地贪夜蛾在我国存在东线、西线 2 条迁飞路径。陈辉等 (2020a) 结合有效积温模型和轨迹分析方法模拟了我国不同区域草地贪夜蛾的迁入时间和发生代数, 提出了该虫在我国的发生区划。上述研究结果主要是基于我国风场特征绘制的迁飞路径。虽然已有一些个例研究分析了长江三角洲地区、北京市、四川省、河南省、山东省、宁夏回族自治区以及广东省增城、浙江省建德、云南省江城、江苏省邳州

等地草地贪夜蛾的迁飞过程和虫源分布 (齐国君等, 2019; 罗举等, 2020; 林培炯等, 2020; 张雪艳等, 2020; 陈辉等, 2020a, 2021; 孙旭军等, 2021; 吴秋琳等, 2022; Zhang *et al.*, 2023), 但仍缺乏全国范围监测虫情数据的系统性分析加以验证, 我国草地贪夜蛾的迁飞路径和时空分布范围仍不明确。

本研究综合分析 2019-2022 年我国草地贪夜蛾的监测数据, 解析草地贪夜蛾在我国的春夏季迁飞动态, 通过轨迹分析以及气象背景场分析, 研究草地贪夜蛾在我国的迁飞过程、重要天气条件的影响及作用, 以期阐明我国草地贪夜蛾的北迁格局及其区域虫源衔接关系, 为我国草地贪夜蛾的精准测报和源头防控提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

虫情数据: 2019-2022 年全国草地贪夜蛾的田间虫情调查数据, 湖南江永、澧县、武冈和湘西以及江苏宜兴的高空测报灯灯诱数据, 安徽宿松的性诱数据, 由全国农业技术推广服务中心提供; 河南原阳、平桥和平舆的高空测报灯灯诱数据, 由河南省植物保护植物检疫站提供; 广东高州、坪山、饶平和增城的高空测报灯灯诱数据, 由广东省农业有害生物预警防控中心提供。

气象数据: 2019-2022 年气象要素分析采用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), 此数据水

分辨率率为 $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$, 时间间隔为 6 h 一次。

1.2 分析方法

1.2.1 草地贪夜蛾北迁动态分析 基于 2019-2022 年全国各地区草地贪夜蛾始见期及始见虫态, 利用有效积温模型, 计算出全国各地区草地贪夜蛾首次迁入时间以及迁出时间。本研究从 FNL 再分析数据中分别提取全国各站点每天 2:00 和 14:00 两个时刻的距离地面 2 m 的温度, 以此作为各站点每日最低温度和最高温度, 进而计算每日和累计有效积温, 模拟草地贪夜蛾发育进度。草地贪夜蛾卵、幼虫、蛹和卵到蛹的发育起点温度分别为 10.27、11.10、12.20 和 11.34 $^{\circ}\text{C}$, 有效积温分别为 44.57、211.93、135.69 和 390.55 日·度 (何莉梅等, 2019)。

将计算出的各地草地贪夜蛾成虫首次迁入时间进行汇总, 以 10 d 为一个周期进行分类, 统计不同时间段内新增站点数量; 同时按照草地贪夜蛾北迁进程, 分东、西两线比较不同时间段内新增站点数量。东线省份包括海南、广西、广东、福建、湖南、江西、湖北、浙江、安徽、江苏、上海、河南、山东、河北、天津、北京、辽宁等省 (直辖市、自治区); 西线省份包括云南、贵州、四川、西藏、重庆、陕西、甘肃、山西、宁夏、内蒙古等省 (直辖市、自治区) (Li *et al.*, 2020)。

根据广东、江苏、安徽、湖南、河南等 13 个站点的逐日诱蛾数据, 绘制各地草地贪夜蛾全年种群发生动态图, 确定草地贪夜蛾在不同地区的发生峰期, 并与新增站点数量峰期进行比较。

1.2.2 草地贪夜蛾迁飞过程模拟 本研究采用基于 WRF 中尺度模式 (Weather research and forecasting model) 的昆虫三维轨迹分析模型对草地贪夜蛾主要迁飞峰期的迁飞路径和虫源分布进行模拟分析。该轨迹分析模型基于 FORTRAN 语言设计 (Hu *et al.*, 2013; Wu *et al.*, 2018)。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 125×115 个格点, 经模拟计算后, 输出每小时一次的 $60 \text{ km} \times 60 \text{ km}$ 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 (30°N , 90°E), 方案其他模拟参数与前人的研究方案相同 (齐国君等, 2019; 陈辉等, 2020b)。

根据草地贪夜蛾的迁飞生物学特征, 对迁飞轨迹计算参数进行设定。主要包括

(1) 飞行时间。夜蛾科昆虫的迁飞通常能够持续 3-5 个夜晚, 即每天傍晚时刻起飞, 次日黎明降落。本研究设置起飞时间为当天 19:00 (BJT), 降落时间为次日 05:00 (BJT), 连续飞行 3 个夜晚, 每晚飞行 10 h, 并且每个夜晚结束的轨迹终点作为第二天傍晚起飞的起点 (Li *et al.*, 2020)。

(2) 自主飞行速度。大多数夜蛾科昆虫夜间自主飞行速度约 2.5-4.3 m/s (Chapman *et al.*, 2010; Westbrook *et al.*, 2016)。因此, 本研究设定草地贪夜蛾的自主飞行速度为 3 m/s。目前关于草地贪夜蛾的定向行为研究尚未有明确结论, 参考以往研究, 迁飞模拟中默认其为顺风飞行 (陈辉等, 2020a, 2020b), 暂不考虑定向偏角。

(3) 飞行高度。设定 8 个不同的模拟飞行高度, 分别为距海平面高度 500、750、1 000、1 250、1 500、1 750、2 000 和 2 250 m (Li *et al.*, 2020)。西部高原地区 (云南、贵州、四川和西藏等) 平均海拔都在 1 000 m 以上, 迁飞路径模拟时设定高度分别为距海平面高度 1 000、1 250、1 500、1 750、2 000、2 250、2 500 和 2 750 m。

(4) 飞行低温阈值。迁飞昆虫在飞行过程中, 如果空气温度低于其飞行的低温阈值, 昆虫振翅就会减缓甚至停止, 最后降落到某一地区 (翟保平和张孝羲, 1993)。在室内环境下, 测得草地贪夜蛾在降温、升温条件下的飞行低温阈值分别为 13.1 和 14.9 $^{\circ}\text{C}$ (Chen *et al.*, 2022)。本研究所设定的飞行低温阈值为草地贪夜蛾发育起点温度 (13.8 $^{\circ}\text{C}$) (Ma *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2020)。

1.2.3 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 2019-2022 年 3-8 月份 850 hPa (距地面大约 1 500 m) 高度场的风向、风速、大气温度和夜间平均累计

12 h 降雨量, 东线迁飞区域为 110°-120 °E, 西线迁飞区域为 100°-110°E, 分析风场、降雨和温度对草地贪夜蛾北迁过程(新增站点的峰期和数量等)以及东、西两线迁飞区域差异的具体影响。

2 结果与分析

2.1 草地贪夜蛾北迁动态分析

根据各站点的始见虫日及始见虫态, 利用有

效积温模型计算各站点草地贪夜蛾成虫的迁入时间, 结果表明 1-9 月均会出现草地贪夜蛾迁入的新增站点, 有 5 个较为明显的新增站点数量高峰, 分别是 3 月中下旬、4 月下旬至 5 月中旬、6 月上旬、6 月下旬以及 7 月下旬至 8 月中旬(图 1: A), 占有新增站点数的比例分别为 7.4%、31.3%、6.0%、5.7%和 13.2%。其中以 4 月下旬至 5 月中旬新增站点数量最多, 每年平均新增站点 343.5 个, 这意味着 4 月下旬至 5 月中旬是草

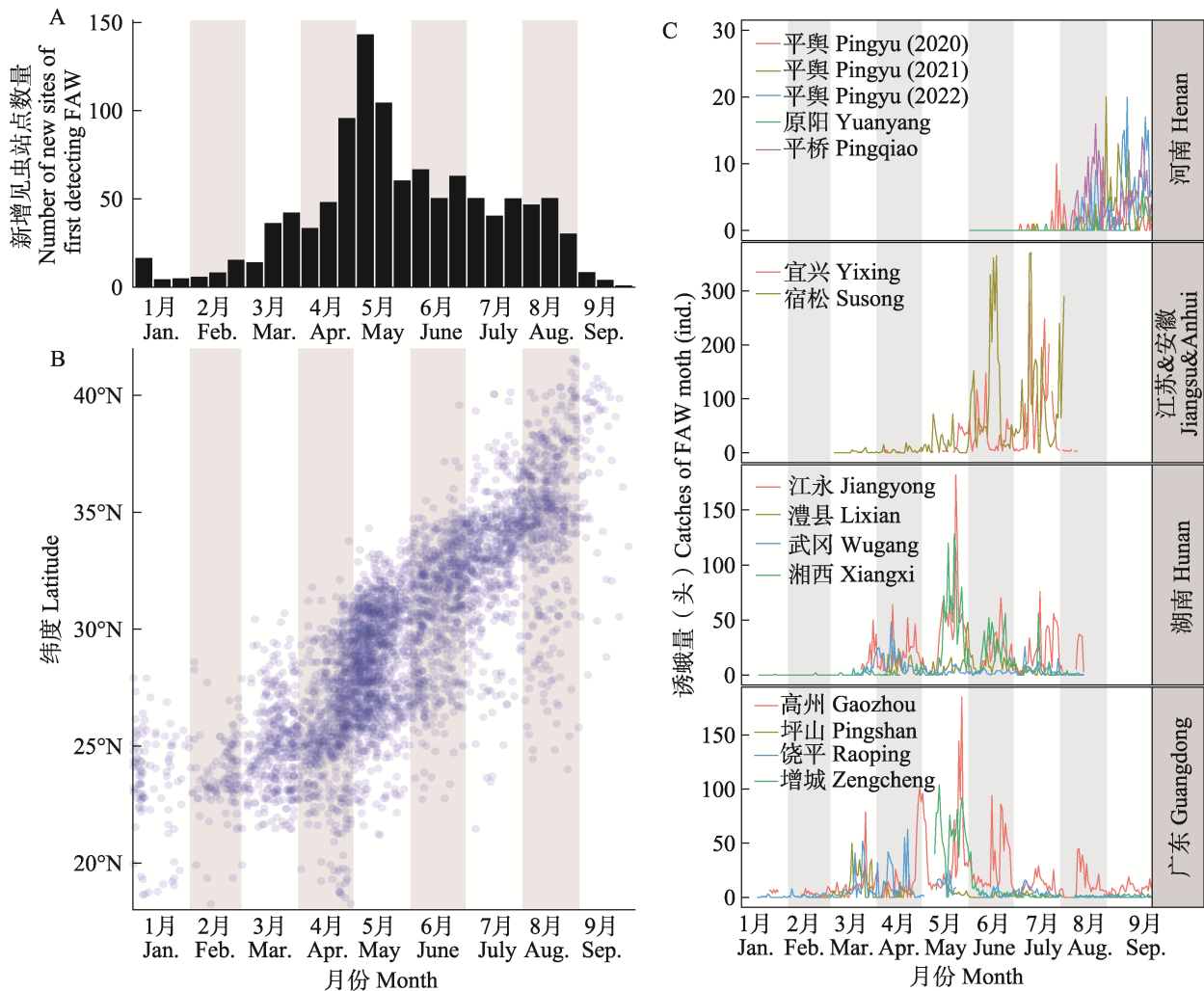


图 1 2019-2022 年草地贪夜蛾迁飞动态

Fig. 1 The migration dynamics of the fall armyworm from 2019 to 2021

A. 不同迁入时间段新增见虫站点的数量, 为 2019-2022 年 4 年的平均值; B. 不同迁入时间站点的纬度分布;

C. 不同站点的诱蛾量, 其中河南平舆为 2020-2022 年数据; 广东增城、安徽宿松、

江苏宜兴为 2021 年数据; 其他站点均为 2020 年的数据。FAW: 草地贪夜蛾, 下图同。

A. Number of new sites where the pest was first detected during different immigration periods, averaged for the four-year period from 2019 to 2022; B. Latitude distribution of monitoring sites during different immigration times;

C. Daily catches of fall armyworm moth at different monitoring sites. The data of Henan (Pingyu) were collected from 2020 to 2022, the data of Guangdong (Zengcheng), Anhui (Susong), and Jiangsu (Yixing)

were collected in 2021, whereas the data of other sites were collected in 2020. FAW: Fall armyworm, the same below.

地贪夜蛾向北迁飞的快速扩张期, 迁入范围最大。

不同新增见虫站点的迁入时间随纬度升高而推迟(图 1: B)。3 月中下旬 71.3% 新增见虫站点主要集中在 25°N 以南区域; 4 月下旬至 5 月中旬 66.3% 新增见虫站点主要位于 25°-32°N 区域; 6 月上旬 61.7% 新增见虫站点主要位于 28°-33°N 区域; 6 月下旬 78.9% 新增见虫站点主要位于 30°-35°N 区域; 7 月下旬至 8 月中旬 66.6% 新增见虫站点主要位于 35°N 以北区域。考虑到迁飞距离以及种群扩散范围, 草地贪夜蛾迁入区域的纬度位置有 3 次明显的“北跳”, 即 3 次大规模的迁飞过程, 分别发生在 4 月下旬-5 月中旬、6 月以及 8 月上中旬(图 1: B), 其中以 4 月下旬-5 月中旬纬度跨度范围最大, 新增见虫站点数量最多; 而 8 月上中旬新增见虫站点数量较少(图 1: A, B)。

逐日诱蛾虫量数据分析结果表明, 诱蛾高峰出现时间随着纬度升高而推迟。广东省各站点 3-9 月期间每个月都会出现诱蛾高峰(图 1: C), 3、4 月诱蛾峰主要发生在广东和湖南的站点; 5 月诱蛾峰除了广东、湖南外, 还发生在安徽宿松和江苏宜兴, 但虫量较少; 6、7 月安徽宿松、江苏宜兴也会出现明显的诱蛾高峰; 8、9 月河南平桥、原阳出现明显的诱蛾高峰(图 1: C)。

对比新增见虫站点数量高峰的迁入时间(图 1: A)与虫源地的诱蛾高峰(图 1: C)发现, 4 月下旬至 5 月中旬长江以南(25°-32°N)迁入站点数量出现高峰, 与华南地区 4 月中旬和 5 月中旬草地贪夜蛾的成虫数量激增有关; 6 月新增见虫站点的数量高峰主要出现在江淮-黄淮区域(30°-35°N), 与该区域前沿的安徽宿松和江苏宜兴诱蛾高峰有密切关系; 8 月以后新增见虫站点主要位于 35°N 以北区域, 与河南地区的诱蛾高峰有关。迁入站点新增数量高峰与虫源地草地贪夜蛾成虫发生的高峰期存在明显关系。

综上所述, 我国草地贪夜蛾春夏季会出现 3 次大规模迁飞过程, 分别是 4 月下旬-5 月中旬大规模迁入长江以南地区(25°-30°N)、6 月迁入江淮、黄淮地区(30°-35°N)以及 8 月上中旬继续北迁至 35°N 以北地区。

2.2 草地贪夜蛾东、西线迁飞高峰及大气背景场分析

2019-2022 年, 东线迁飞路径上发现草地贪夜蛾站点总计 2 722 个, 西线迁飞路径上发现草地贪夜蛾站点总计 1 663 个, 东、西线迁飞路径上见虫站点的数量均明显呈逐年下降趋势。东、西线迁飞路径新增见虫站点数量的高峰时间基本一致, 主要是 3 月中下旬、5 月上旬前后、6 月以及 8 月上旬前后。相比较而言, 在东线迁飞路径上, 5 月上旬前后新增见虫站点数量年均 228.3 个, 占总站点数的 33.5%, 显著高于其他时间段。而西线迁飞路径上各峰期新增见虫站点数量基本一致(图 2)。

从 850 hPa 风场来看, 东线迁飞区域(110°-120°E)南向风随时间推移而不断向北发展(图 3: E-H)。3-4 月由于温度限制(13.8 °C 等温线仍位于 25°N 附近), 草地贪夜蛾迁入站点主要集中于 25°N 以南区域; 4 月下旬之后随着温度升高, 草地贪夜蛾能够随南风大规模北迁; 5-7 月较强的南向风主要集中在 25°-30°N 内, 6-7 月逐步扩展至 35°N 区域; 8 月南向风可以到达 35°N 以北区域。而西线迁飞区域(100°-110°E)较强的南向风主要集中在 25°N 以南区域, 25°-35°N 范围内风速较弱, 平均风速普遍低于 4 m/s(图 3: A-D)。

东线迁飞区域 5-8 月南向风向北扩展的速度和时间存在明显的年度间差异, 也导致东线迁飞新增站点的峰期和数量年度间存在较大的差异。2020 年南向风长期稳定于 30°N 区域, 6、7 月新增站点数量没有出现明显新增(图 3: F)。2021 年南向风在 7 月明显加强并向北扩展甚至到达 35°N 以北区域, 7 月新增站点数量显著增加(图 3: G)。而 2022 年 5 月南向风相对较弱, 6 月中下旬风速增强, 南向风范围增加, 新增站点数也显著增加(图 3: H)。

2019-2022 年, 各迁入站点峰期时均存在明显降雨, 这对草地贪夜蛾降落十分有利。东、西两线各峰期站点分布与雨带的位置及降雨强度密切相关, 新增站点的位置基本位于主要降雨区

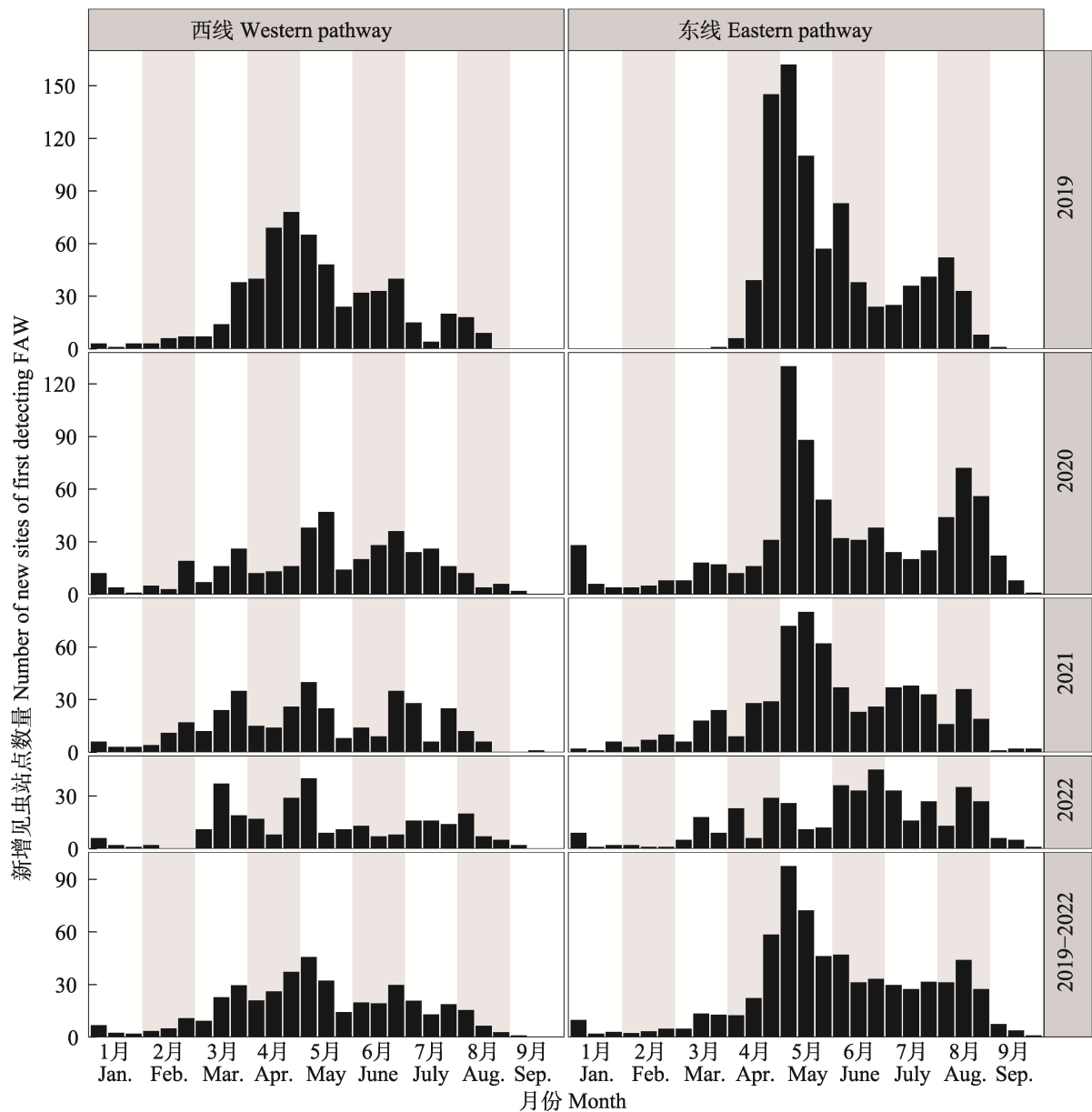


图 2 2019-2022 年东线、西线迁飞路径上草地贪夜蛾见虫站点的数量

Fig. 2 Number of monitoring sites where the fall armyworm was first detected along the eastern and western migratory pathway from 2019 to 2022

最后一行 2019-2022 不同时间段新增见虫站点的数量是 2019-2022 年 4 年的平均值。

The mean number of monitoring sites where the fall armyworm was first detected during different periods in four years (2019-2022) was shown in the last row.

或者雨区南沿(图 4, 图 5)。2019-2022 年东、西两条迁飞路径上, 随着时间推移, 1-10 mm 雨带位置不断北移, 促进草地贪夜蛾北迁进程, 导致草地贪夜蛾迁入区域北移(图 4, 图 5)。雨带位置及降雨强度年度间存在差异亦使草地贪夜蛾存在年度差异。2019 年 6 月上旬, 东线夜间日均降雨量为 10 mm 及以上的雨带与其他 3

年同期峰期相比, 位置偏北, 站点分布也偏北(图 4, 图 5)。2020 年 6 月至 7 月上旬我国南方出现多次较强降雨过程, 阻滞了草地贪夜蛾进一步北迁, 因此东线迁飞路线上 6、7 月新增站点仍集中在长江流域及以南地区(33°N 以南区域)(图 4); 相反, 西线迁飞路线上新增站点纬度更高, 到达 35°N 甚至更北(图 5)。

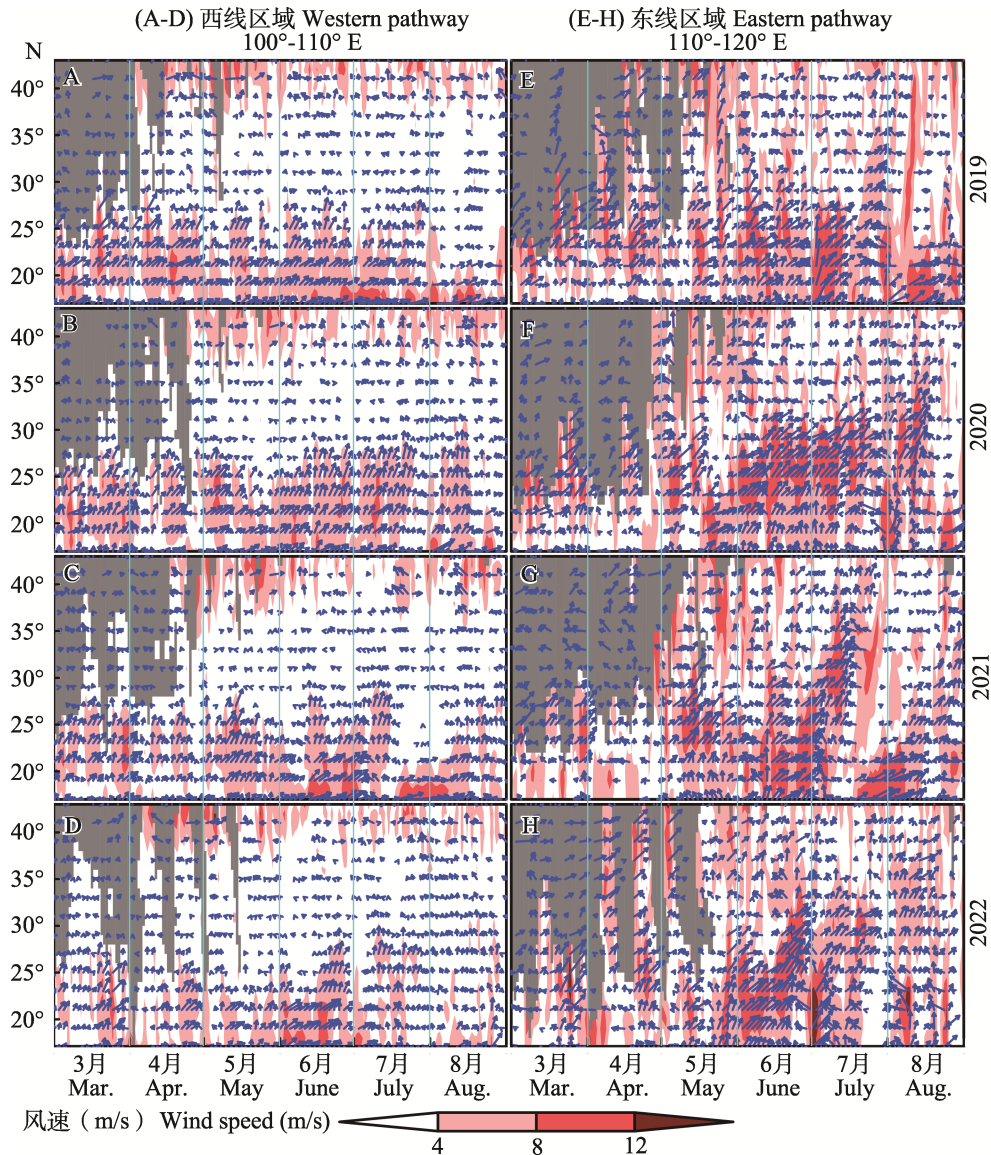


图3 2019-2022年东、西线迁飞路径上850 hPa风场时间-纬度剖面

Fig. 3 Time-latitude cross-section of wind fields at the level of 850 hPa along the eastern and western migration pathways from 2019 to 2022

A-D. 西线区域; E-H. 东线区域。图中阴影部分表示该区域850 hPa的大气温度低于13.8 °C。

A-D. Western pathway; E-H. Eastern pathway. The shaded areas represent atmospheric temperatures below 13.8 °C at the level of 850 hPa.

2.3 草地贪夜蛾主要迁飞峰次的虫源分析

2.3.1 草地贪夜蛾迁出时间及提供虫源地分析

利用有效积温计算出全国各站点迁入草地贪夜蛾下一代的成虫羽化时间,从而推算出各地的最早迁出时间以及4-8月期间可提供虫源的站点分布(图6)。结果表明,4月下旬至5月中旬,东线可提供虫源站点为广东、广西、江西、福建及

湖南等地,西线可提供虫源站点为云南和四川。但2019年是草地贪夜蛾入侵后开始大范围北迁的第一年,东线可提供虫源的地点主要限于广西、广东两省区。6月,东线长江以南地区均可提供虫源,包括湖南、湖北、江西、福建及浙江等地。西线可提供虫源站点主要位于贵州、四川东南部以及更南区域。但2020、2022年新增站点数量高峰在6月下旬,东线可提供虫源区涵

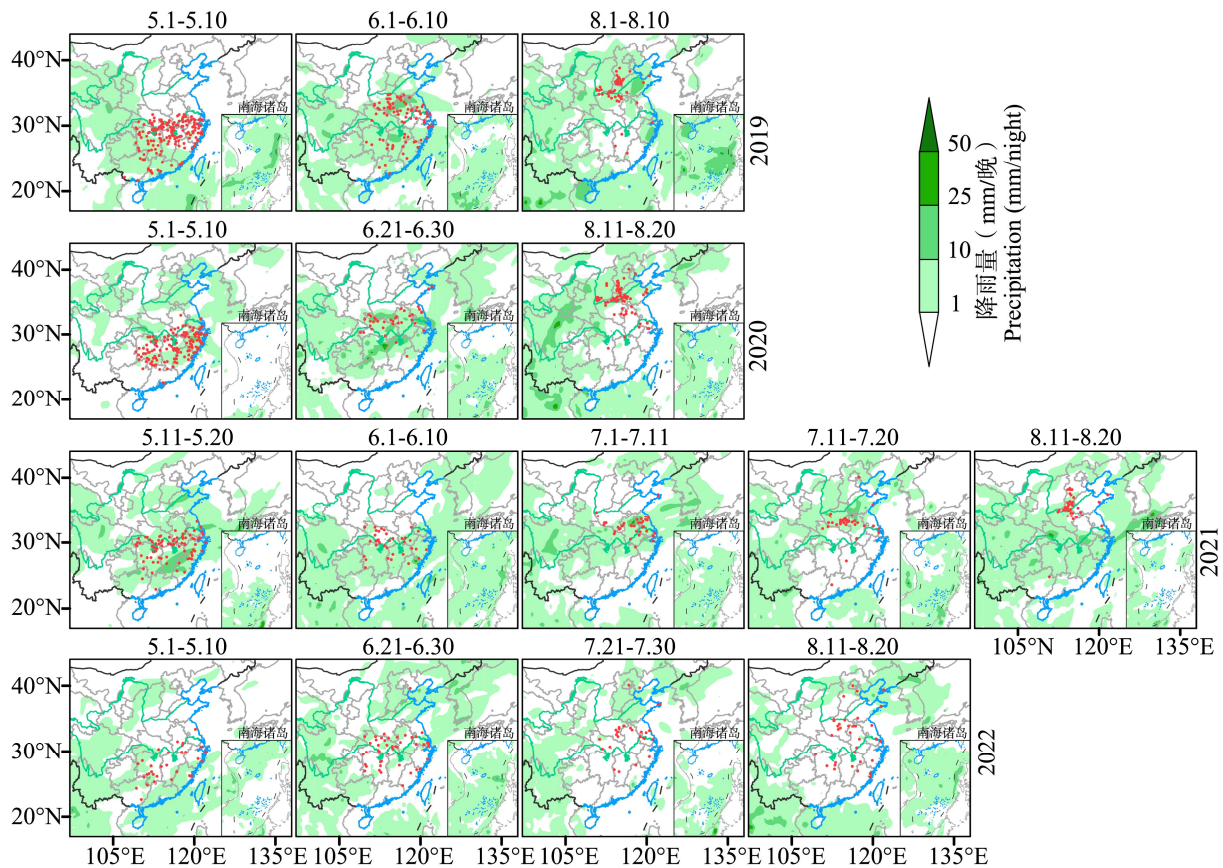


图 4 2019-2022 年东线迁飞峰期降雨情况[审图号：京审字（2023）G 第 2868 号]

Fig. 4 Precipitation during the peak period of the eastern migration pathway from 2019 to 2022

红点代表该时期内草地贪夜蛾成虫首次迁入的位置。

The red dots represent the location where fall armyworm adults first immigrated during this period.

盖江淮地区；2019、2021 年新增站点数量高峰在 6 月上旬，东线可提供虫源区仅限于长江以南区域。7 月中下旬及 8 月中旬，东线可提供虫源站点主要位于黄河以南区域，西线可提供虫源站点主要位于陕西南部、甘肃东部和四川东北部。

2.3.2 草地贪夜蛾主要迁飞峰次的轨迹分析
对 2019-2022 年 4-9 月草地贪夜蛾迁入新增站点数量高峰期间的各个站点进行回推轨迹分析(图 7)。结果表明，4 月下旬至 5 月中旬期间，东线迁飞路径上新增迁入站点主要位于长江流域以及长江以南区域，其可能虫源地主要分布在海南、广西、广东以及福建等华南地区。2021 年 5 月中旬才出现峰期，此时江西也能够提供虫源，也是可能虫源地之一。西线迁飞路径上新增迁入

站点主要位于贵州以及四川东南部，2019 年其虫源地主要位于云南以及广西西部地区，其他年份其虫源主要分布在云南东部及广西西部等区域(图 7)。6 月东线迁飞路径上新增站点主要位于江淮、黄淮区域，其虫源主要来自江淮以及长江以南区域。西线迁飞路径上新增站点主要位于甘肃东部和陕西南部，其虫源主要来自四川东部和重庆，部分来自贵州，但 2022 年其虫源主要来自湖南和江西等地。8 月新增草地贪夜蛾迁入站点到达黄河以北区域。东线迁飞路径上其虫源分布非常广泛，从江南到黄河流域都有可能为其提供虫源。西线迁飞路径上各新增站点的虫源主要来自四川东部和重庆。2020 年 8 月，新增站点的虫源除四川东部和重庆外，河南、安徽和江苏也提供了大部分虫源。

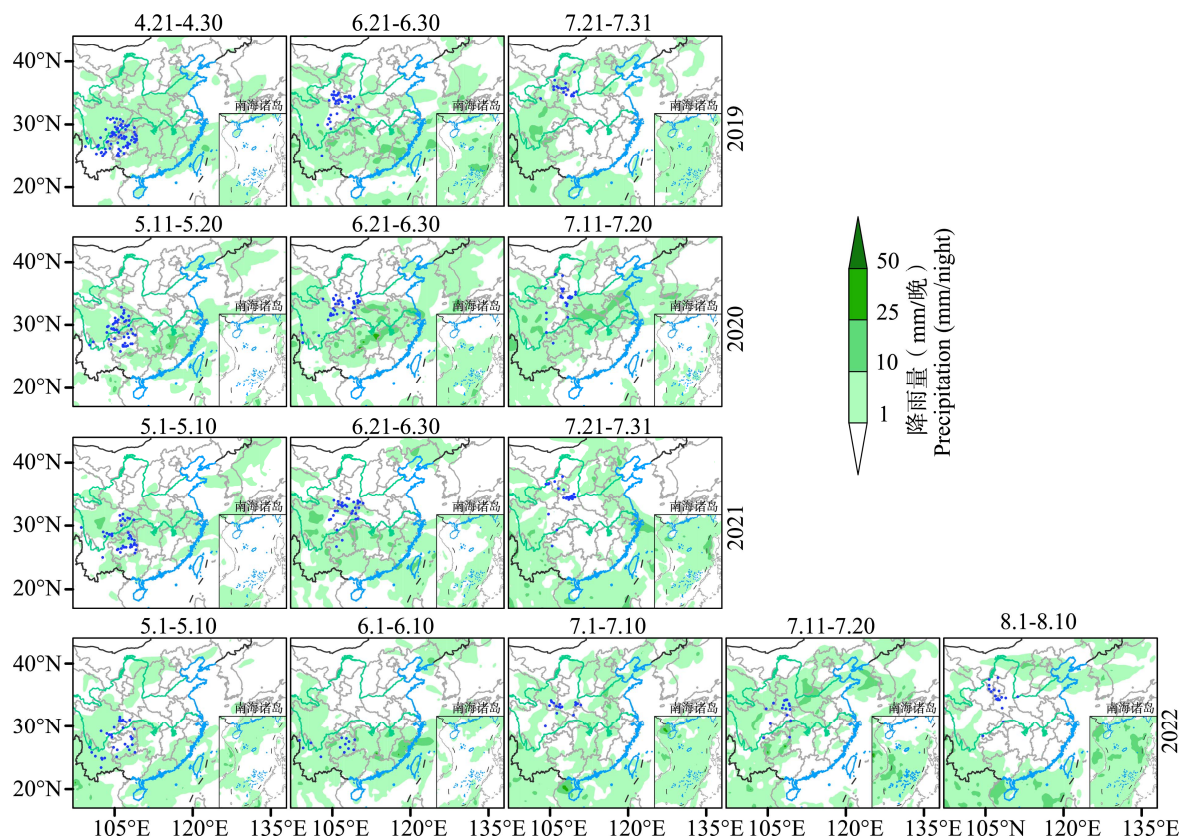


图5 2019-2022年西线迁飞峰期降雨情况[审图号：京审字（2023）G第2868号]
Fig. 5 Precipitation during the peak period of the western migration pathway from 2019 to 2022

蓝点代表该时期内草地贪夜蛾成虫首次迁入的位置。
The blue dots represent the location where fall armyworm adults first immigrated during this period.

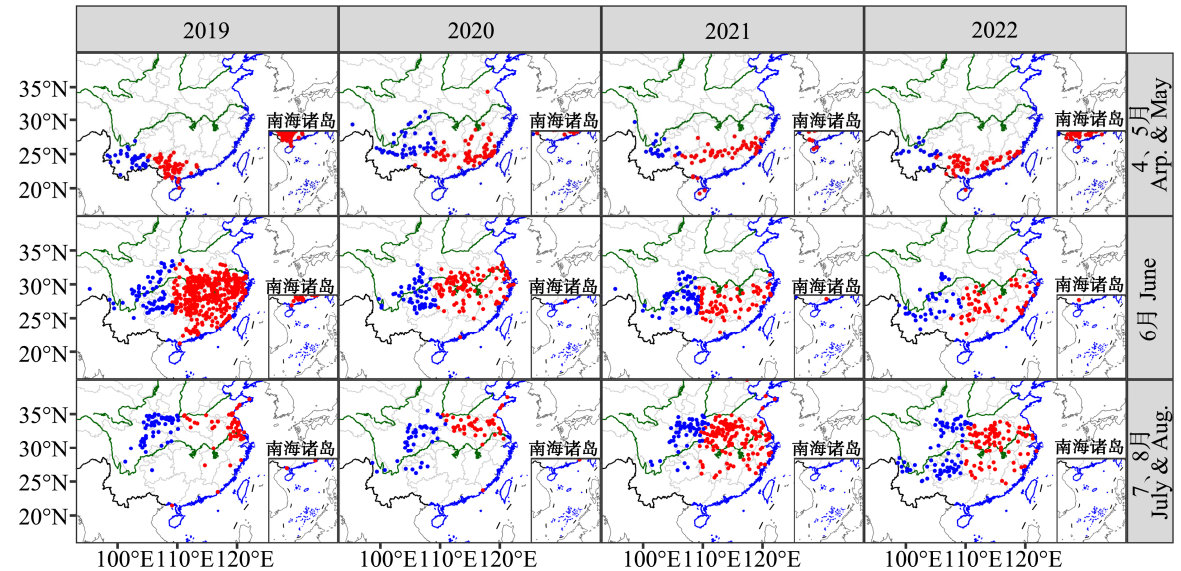


图6 2019-2022年各关键迁飞峰期可提供虫源的站点分布[审图号：京审字（2023）G第2868号]
Fig. 6 The distribution of sites that can provide insect sources during the key migration peak periods from 2019 to 2022

红点代表东线虫源站点分布位置，蓝点代表西线虫源站点分布位置。
Red dots represents the insect source distribution site of the eastern migration pathway, and blue dots represents the insect source distribution site of the western migration pathway.

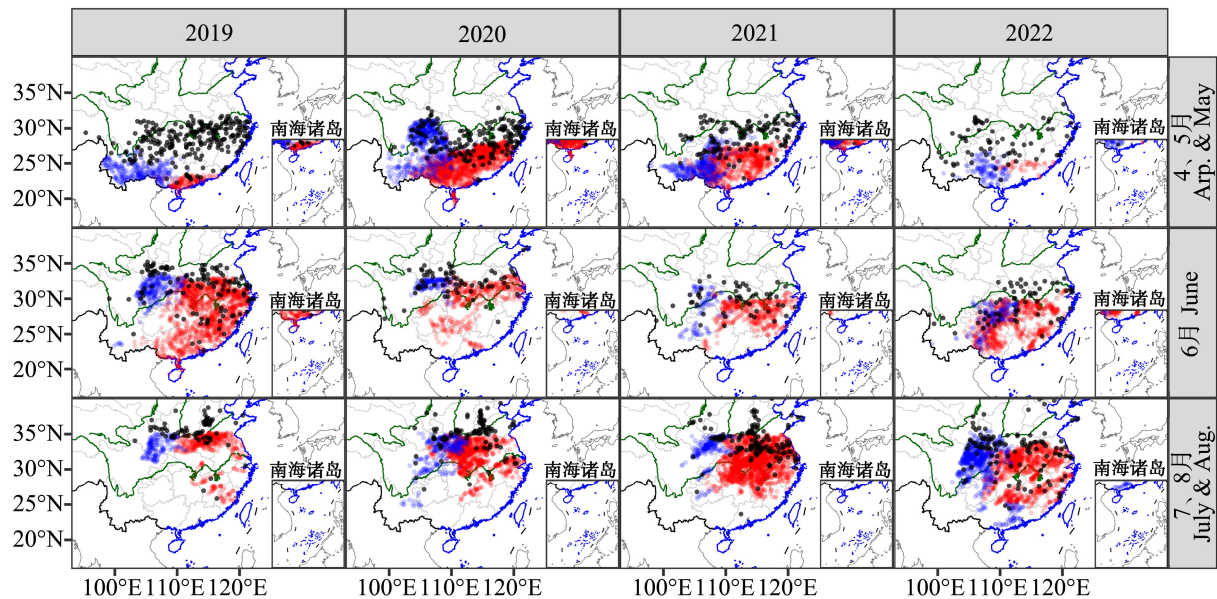


图7 2019-2022年各关键迁飞峰期的回推轨迹落点分布[审图号:京审字(2023)G第2868号]

Fig. 7 Backward trajectory endpoints distribution of key migration peak periods from 2019 to 2022

黑点代表各迁飞峰次轨迹回推起点分布位置;红点代表东线轨迹回推落点分布位置;
蓝点代表西线轨迹回推落点分布位置。

The black dots represent the backward trajectory startpoints distribution of each migration peak. The red dots represent the backward trajectory endpoints distribution of the eastern migration pathway. The blue dots represent the backward trajectory endpoints distribution of the western migration pathway.

3 讨论

我国地处东亚迁飞场,沿途没有足以阻挡昆虫迁飞的天然屏障(张志涛,1992),受东亚季风环流影响,草地贪夜蛾已在我国形成季节性南北往返迁飞的格局(陈辉等,2020a,2020b;姜玉英等,2021;Zhou *et al.*, 2021;Chen *et al.*, 2023)。本研究探明了草地贪夜蛾在我国的春夏季迁飞过程及虫源衔接关系,华南、长江以南及江淮、黄淮地区为3个主要发生区,3次大规模北迁过程分别为4月下旬-5月上旬迁入长江以南地区(25°-30°N)、6月迁入江淮、黄淮地区(30°-35°N)、8月上中旬迁入35°N以北地区。草地贪夜蛾的主要发生区与Huang等(2022)模拟的草地贪夜蛾时空分布图基本一致,然而大规模北迁过程,却与之前研究的褐飞虱 *Nilaparvata lugens* 及稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis* 的5次北迁过程存在一定差异(程遐年等,1979;张孝羲等,1980)。

Li等(2020)和陈辉等(2020a)提出草地贪夜蛾在我国北迁进程分东、西两条路径。本研究在此基础上,进一步比较了东、西迁飞路径上迁入时间、新增见虫站点、高峰期站点的虫源地分布等方面的差异。结果表明东、西线迁飞路径上新增站点数量的高峰时间基本一致,均出现在3月中下旬、5月上旬前后、6月以及8月上旬前后。相比较而言,西线迁飞路径上各峰期新增站点的数量基本一致,而东线迁飞路径上5月上旬前后新增点数量最多,是由于5月上旬的西南低空气流强劲,为华南地区草地贪夜蛾迁入长江中下游区域提供了合适的运载气流。这也与Li等(2020)和陈辉等(2020a)的4、5月东线迁飞显著快于西线迁飞的结论相吻合。西线区域海拔较高,以山区为主,850 hPa高度层上风速明显弱于东部区域,尤其是25°-35°N纬度范围内风速较弱,平均风速普遍低于4 m/s(图3)。因此,造成东、西线上迁飞进程差异的主要原因是空中大气风温场的差异(Li *et al.*, 2020)。

同样由于年度间气候条件的差异,造成了年

度间草地贪夜蛾迁飞进程的差异,这在以往研究的个例分析中也有相同报道。如 2020 年 6 月中下旬江南地区长时间、大范围降雨对迁出种群造成阻滞作用,使得当年草地贪夜蛾迁入河南的时间要晚于 2019 年(孙旭军等, 2021)。2022 年 7 月自甘肃、陕西和四川等地至宁夏一带的偏南风出现频率及持续时间均高于 2019 年 7 月,是导致草地贪夜蛾成虫始见期比 2019 年早 22 d 的关键因素(吴秋琳等, 2022)。

此外,草地贪夜蛾在我国的东、西两条迁飞路径上迁飞种群之间相对分离,西线迁飞的草地贪夜蛾仅有少量个体会迁飞到湖北、湖南、河南等东线省份(陈辉等, 2020b; Li *et al.*, 2020)。本研究发现 2019-2022 年,东、西线迁飞种群的混合程度因为大气环流形势不同而存在年度间的差异。比如,6 月西线迁飞路径上新增站点主要位于甘肃东部和陕西南部,其虫源主要来自四川东部和重庆,部分来自贵州,但 2022 年其虫源主要来自湖南及江西等地。8 月西线迁飞路径上各新增站点的虫源主要来自四川东部和重庆,但是 2020 年 8 月,新增站点的虫源除四川东部和重庆外,河南、安徽、江苏也提供了大量虫源。这与之前研究认为的西线、东线迁飞路径上的迁飞种群相对分离有所不同,湖南、江西、安徽、江苏等东线迁飞路径省份也可为山西、陕西、甘肃等省提供虫源。

草地贪夜蛾仅在热带和温暖的亚热带地区周年繁殖(Yang *et al.*, 2021a),每年通过季节性迁飞寻找适宜的环境完成世代繁衍,从而实现大范围的快速扩张蔓延(Westbrook *et al.*, 2016)。本研究分析草地贪夜蛾灯诱或性诱监测数据发现,从 3 月开始草地贪夜蛾在我国每月均有一次迁飞扩散过程,但是仅 4 月下旬-5 月上旬、6 月上中旬以及 8 月上中旬 3 次迁飞过程向北推进的纬度范围最为明显。毋庸置疑,每次迁飞扩散过程推进距离的差异均与空中大气风温场、降雨分布等气象因素密切相关。Li 等(2020)和陈辉等(2020a)认为我国东线 6、7 月北迁推进的范围较小,这显然与该时间段内江淮、黄淮地区西南气流相对较弱有关,此时副热带高压主要控制长

江以南地区,强劲的西南气流主要局限在长江流域及以南,雨带主要位于长江中下游地区(Hu *et al.*, 2019)。不过,与 Li 等(2020)和陈辉等(2020a)的模拟结果相比,本研究结果表明草地贪夜蛾 7 月发生范围仍局限于 35°N 以南区域,与 6 月发生范围基本相同,几乎没有向北扩展(图 1)。这可能是该时期我国黄淮海区域玉米生育期处于大喇叭口期,营养生长条件十分适宜草地贪夜蛾生长发育,从而导致田间种群迁飞意愿较低,居留型个体为主(Chen *et al.*, 2022)。

本研究明确了草地贪夜蛾在我国的北迁格局及其虫源衔接关系,也证实了前期基于历史气象资料所预测的迁飞路径和发生区划等研究结果基本可靠,为我国草地贪夜蛾的精准测报和源头防控提供一定的科学依据。

参考文献 (References)

- 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 H, Huang L, Gesang YZ, Deji ZM, Zhu JS, Hu G, Chen FJ, Zhao JY, Wan GJ, 2021. Analysis of migration and meteorological background field for the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* found in Shandong province in 2019. *Journal of Environmental Entomology*, 43(4): 867–878. [陈辉, 黄乐, 格桑玉珍, 德吉卓玛, 朱军生, 胡高, 陈法军, 赵婧妍, 万贵钧, 2021. 2019 年山东省草地贪夜蛾迁飞过程及气象背景场分析. 环境昆虫学报, 43(4): 867–878.]
- Chen H, Wan GJ, Li JC, Ma YB, Reynolds DR, Dreyer D, Warrant EJ, Chapman JW, Hu G, 2023. Adaptive migratory orientation of an invasive pest on a new continent. *iScience*, 26: 108281.
- Chen H, Wang Y, Huang L, Xu CF, Li JH, Wang FY, Cheng W, Gao BY, Chapman JW, Hu G, 2022. Flight capability and the low temperature threshold of a Chinese field population of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda*. *Insects*, 13(5): 422.
- Chen H, Wu MF, Liu J, Chen AD, Jiang YY, Hu G, 2020a. Migratory routes and occurrence divisions of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* in China. *Journal of Plant Protection*, 47(4): 747–757. [陈辉, 武明飞, 刘杰, 谌爱东, 姜玉英, 胡高, 2020b. 我国草地贪夜蛾迁飞路径及其发生区划. 植物保护学报, 47(4): 747–757.]

- Chen H, Yang XL, Chen AD, Li YC, Wang DH, Liu J, Hu G, 2020b. Immigration timing and origin of the first fall armyworms (*Spodoptera frugiperda*) detected in China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 57(6): 1270–1278. [陈辉, 杨学礼, 谌爱东, 李永川, 王德海, 刘杰, 胡高, 2020a. 我国最早发现为害草地贪夜蛾的入侵时间及其虫源分布. 应用昆虫学报, 57(6): 1270–1278.]
- Cheng XN, Chen RC, Xi X, Yang LM, Zhu ZL, Wu JC, Qian RG, Yang JS, 1979. Studies on the migrations of brown planthopper *Nilaparvata lugens* Stål. *Acta Entomologica Sinica*, 22(1): 1–21. [程遐年, 陈若簾, 习学, 杨联民, 朱子龙, 吴进才, 钱仁贵, 杨金生, 1979. 稻褐飞虱迁飞规律的研究. 昆虫学报, 22(1): 1–21.]
- He LM, Ge SS, Chen YC, Wu QL, Jiang YY, Wu KM, 2019. The developmental threshold temperature, effective accumulated temperature and prediction model of developmental duration of fall armyworm, *Spodoptera frugiperda*. *Plant Protection*, 45(5): 18–26. [何莉梅, 葛世帅, 陈玉超, 吴秋琳, 姜玉英, 吴孔明, 2019. 草地贪夜蛾的发育起点温度、有效积温和发育历期预测模型. 植物保护, 45(5): 18–26.]
- 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, Lu MH, Reynolds DR, Wang HK, Chen X, Liu WC, Zhu F, Wu XW, Xia F, Xie MC, Cheng XN, SingLim K, Zhai BP, Chapman JW, 2019. Long-term seasonal forecasting of a major migrant insect pest: The brown planthopper in the Lower Yangtze River Valley. *Journal of Pest Science*, 92(2): 417–428.
- Huang YR, Lv H, Dong YY, Huang WJ, Hu G, Liu Y, Chen H, Geng Y, Bai J, Guo P, Cui YF, 2022. Mapping the spatio-temporal distribution of fall armyworm in China by coupling multi-factors. *Remote Sensing*, 14(17): 4415.
- Jiang YY, Liu J, Wu QL, Ciren ZG, Zeng J, 2021. Investigation on winter breeding and overwintering areas of *Spodoptera frugiperda* in China. *Plant Protection*, 47(1): 212–217. [姜玉英, 刘杰, 吴秋琳, 次仁卓嘎, 曾娟, 2021. 我国草地贪夜蛾冬繁区和越冬区调查. 植物保护, 47(1): 212–217.]
- Jiang YY, Liu J, Xie MC, Li YH, Yang JJ, Zhang ML, Qiu K, 2019. Observation on law of diffusion damage of *Spodoptera frugiperda* in China in 2019. *Plant Protection*, 45(6): 10–19. [姜玉英, 刘杰, 谢茂昌, 李亚红, 杨俊杰, 张曼丽, 邱坤, 2019. 2019 年我国草地贪夜蛾扩散为害规律观测. 植物保护, 45(6): 10–19.]
- Li XJ, Wu MF, Ma J, Gao BY, Wu QL, Chen AD, Liu J, Jiang YY, Zhai BP, Early R, Chapman JW, Hu G, 2020. Prediction of migratory routes of the invasive fall armyworm in eastern China using a trajectory analytical approach. *Pest Management Science*, 76(2): 454–463.
- Lin PJ, Zhang Z, Wang XL, Liu DX, Hu G, Zhang YH, 2020. Population dynamics and trajectory simulation of migratory moths of fall armyworm *Spodoptera frugiperda* in Yanqing of Beijing in 2019. *Journal of Plant Protection*, 47(4): 758–769. [林培炯, 张智, 王旭龙, 刘冬雪, 胡高, 张云慧, 2020. 2019 年北京市延庆区草地贪夜蛾种群动态与虫源分析. 植物保护学报, 47(4): 758–769.]
- Luo J, Ma J, Wu MF, Qi GJ, Liu J, Tang J, Hu G, 2020. Original area of fall armyworm individuals newly invaded in Zhejiang province. *Chinese Journal of Rice Science*, 34(1): 80–87. [罗举, 马健, 武明飞, 齐国君, 刘杰, 唐健, 胡高, 2020. 浙江入侵草地贪夜蛾的迁入虫源. 中国水稻科学, 34(1): 80–87.]
- Ma J, Wang YP, Wu MF, Gao BY, Liu J, Lee GS, Otuka A, Hu G, 2019. High risk of the fall armyworm invading into Japan and the Korean Peninsula via overseas migration. *Journal of Applied Entomology*, 143(9): 911–920.
- 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): 487–496. [齐国君, 马健, 胡高, 于永浩, 谌爱东, 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): 487–496.]
- Qi GJ, Huang DC, Wang L, Zhang YP, Xiao HX, Shi QX, Xiao Y, Su XN, Huang SH, Zou SF, Chen KW, Zhou ZB, Zhong BY, Zheng JJ, Zhang ZX, Jiang TH, Lu LH, Lu YY, Zhang ZF, 2020. The occurrence characteristic in winter and year-round breeding region of the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) in Guangdong province. *Journal of Environmental Entomology*, 42(3): 573–582. [齐国君, 黄德超, 王磊, 章玉苹, 肖汉祥, 石庆型, 肖勇, 苏湘宁, 黄少华, 邹寿发, 陈科伟, 周振标, 钟宝玉, 郑静君, 张志祥, 江腾辉, 吕利华, 陆永跃, 张振飞, 2020. 广东省草地贪夜蛾冬季发生特征及周年繁殖区域研究. 环境昆虫学报, 42(3): 573–582.]
- Sun XJ, Zhang GY, Liu Y, Wang XY, Xu FS, Du GZ, Feng HK, Geng FH, Zhang QH, Hu G, Zhai BP, 2021. Tracking the migration path and source areas of the fall armyworm in Henan. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 58(3): 579–591. [孙旭军, 张国彦, 刘一, 王新媛, 胥付生, 杜桂枝, 冯贺奎, 耿丰华, 张秋红, 胡高, 翟保平, 2021. 河南省草地贪夜蛾迁入路径及虫源地分析. 应用昆虫学报, 58(3): 579–591.]
- Sun XX, Hu CX, Jia HR, Wu QL, Shen XJ, Zhao SY, Jiang YY, Wu

- KM, 2021. Case study on the first immigration of fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* invading into China. *Journal of Integrative Agriculture*, 20(3): 664–672.
- Westbrook JK, Nagoshi RN, Meagher RL, Fleischer SJ, Jairam S, 2016. Modeling seasonal migration of fall armyworm moths. *International Journal of Biometeorology*, 60(2): 255–267.
- Wu KM, 2020. Management strategies of fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) in China. *Plant Protection*, 46(2): 1–5. [吴孔明, 2020. 中国草地贪夜蛾的防控策略. 植物保护, 46(2): 1–5.]
- Wu PX, Wu FM, Fan JY, Zhang RZ, 2021. Potential economic impact of invasive fall armyworm on mainly affected crops in China. *Journal of Pest Science*, 94(4): 1065–1073.
- Wu QL, Hu G, Westbrook JK, Sword GA, Zhai BP, 2018. An advanced numerical trajectory model tracks a corn earworm moth migration event in Texas, USA. *Insects*, 9(3): 115.
- Wu QL, Jiang YY, Liu Y, Liu J, Ma J, Hu G, Yang MJ, Wu KM, 2022. Migration pathway of *Spodoptera frugiperda* in northwestern China. *Scientia Agricultura Sinica*, 55(10): 1949–1960. [吴秋琳, 姜玉英, 刘媛, 刘杰, 马景, 胡高, 杨明进, 吴孔明, 2022. 草地贪夜蛾在中国西北地区的迁飞路径. 中国农业科学, 55(10): 1949–1960.]
- Yang XM, Song YF, Sun XX, Shen XJ, Wu QL, Zhang HW, Zhang DD, Zhao SY, 2021a. Population occurrence of the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae), in the winter season of China. *Journal of Integrative Agriculture*, 20(3): 772–782.
- Yang XM, Wyckhuys K, Jia XP, Nie FY, Wu KM, 2021b. Fall armyworm invasion heightens pesticide expenditure among Chinese smallholder farmers. *Journal of Environmental Management*, 282: 111949.
- Zhai BP, Zhang XX, 1993. Behavior of migrating insects: Adaptation and selection to atmospheric environment. *Acta Ecologica Sinica*, 13(4): 356–363. [翟保平, 张孝羲, 1993. 迁飞过程中昆虫的行为: 对风温场的适应与选择. 生态学报, 13(4): 356–363.]
- Zhang XX, Lu ZQ, Geng JG, Li GZ, Chen XL, Wu XW, 1980. Studies on the migrating of rice leaf roller *Cnaphalocrocis medinalis* Guenée. *Acta Entomologica Sinica*, 23(2): 130–139. [张孝羲, 陆自强, 耿济国, 李国柱, 陈学礼, 吴学文, 1980. 稻纵卷叶螟迁飞途径的研究. 昆虫学报, 23(2): 130–139.]
- Zhang XY, Feng CH, Wan XW, Hu G, Li Q, Jiang CX, 2020. The source areas and migration routes of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* in Sichuan Province in 2019. *Journal of Plant Protection*, 47(4): 770–779. [张雪艳, 封传红, 万宣伍, 胡高, 李庆, 蒋春先, 2020. 2019年四川省草地贪夜蛾迁入虫源地分布及迁飞路径. 植物保护学报, 47(4): 770–779.]
- Zhang XY, Huang L, Liu J, Zhang HB, Qiu K, Lu F, Hu G, 2023. Migration dynamics of fall armyworm *Spodoptera frugiperda* (Smith) in the Yangtze River Delta. *Insects*, 14(2): 127.
- Zhang ZT, 1992. Insect migration and insect migration arena. *Plant Protection*, 18(1): 48–50. [张志涛, 1992. 昆虫迁飞与昆虫迁飞场. 植物保护, 18(1): 48–50.]
- Zhou Y, Wu QL, Zhang HW, Wu KM, 2021. Spread of invasive migratory pest *Spodoptera frugiperda* and management practices throughout China. *Journal of Integrative Agriculture*, 20(3): 637–645.