

广东地区草地贪夜蛾春夏季迁出种群的降落区域分布

梁雅洁¹, 陈婷², 黄德超³, 陈皓阳³, 胡高^{1*}, 齐国君^{2*}

(1. 南京农业大学植物保护学院昆虫系, 南京 210095; 2. 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; 3. 广东省农业有害生物预警防控中心, 广州 510500)

摘要: 为明确广东省草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 春夏季迁出种群的降落区域, 根据 2020-2021 年广东省草地贪夜蛾虫情监测数据, 利用基于 WRF 4.0 模式的迁飞昆虫三维轨迹分析程序, 模拟了广东不同生态区草地贪夜蛾春夏季迁出虫源的迁飞轨迹及降落地。结果表明, 广东省草地贪夜蛾春夏季虫源主要向东北方向迁飞, 80%以上的虫源主要降落在华南和江南地区, 少量可波及江淮、黄淮、台湾、东南亚及日韩等地。3-4 月迁出虫源主要降落在华南地区, 5-6 月逐渐向北偏移, 福建、江西等地的轨迹落点明显增多, 7 月迁出虫源主要降落在江南地区。此外, 利用江西定南、福建周宁及浙江桐乡个例分析, 反向验证了迁飞轨迹模拟的准确性。本研究明确了广东省是江南及华南地区草地贪夜蛾重要的北迁虫源地之一。

关键词: 草地贪夜蛾; 迁出虫源; 降落区域; 轨迹分析

中图分类号: Q968.1;

文献标识码: A

文章编号: 1674-0858 (2024) 06-0000-00

Distribution of the landing area for spring and summer emigrants of the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* in Guangdong Province

LIANG Ya-Jie¹, CHEN Ting², HUANG De-Chao³, CHEN Hao-Yang³, HU Gao^{1**}, QI Guo-Jun^{2**} (1. Department of Entomology, College of Plant Protection, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of High Technology for Plant Protection; Plant Protection Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, China; 3. Agricultural Pest Precaution and Management Center of Guangdong Province, Guangzhou 510500, China)

Abstract: To determine the landing area of spring and summer emigrants of *Spodoptera frugiperda* in Guangdong Province, the migratory trajectory and landing area of the fall armyworm during spring and summer were simulated and analyzed using a three-dimensional trajectory analysis program supported by

基金项目: 国家重点研发计划 (2021YFD1400701); 广西自然科学基金粤桂联合基金 (2022GXNSFDA080003); 科技基础资源调查专项 (2023FY100500)

作者简介: 梁雅洁, 女, 硕士研究生, 主要从事昆虫生态学研究, E-mail: 2021102071@stu.njau.edu.cn

*通讯作者 Author for corresponding: 齐国君, 男, 研究员, 主要从事昆虫生态学研究, E-mail: qigj@gdppri.com; 胡高, 教授, 主要从事昆虫生态学研究, E-mail: hugao@njau.edu.cn

收稿日期 Received: 2024-04-16; 接受日期 Accepted: 2024-05-12

the WRF 4.0 model, utilizing monitoring data of the fall armyworm in various ecological regions of Guangdong Province from 2020 to 2021. The results indicated that the fall armyworm moths in Guangdong Province predominantly migrated northeastward during spring and summer. Over 80 percent of the fall armyworm emigrants from Guangdong Province landed in South China and the southern region of the Yangtze River. While a few moths could reach the Yangtze-Huaihe River Valley, Huang-Huaihe River Valley, Taiwan, Southeast Asia, Japan and South Korea. Most emigrants of the fall armyworm in Guangdong Province primarily landed in South China between March and April. The landing area of the fall armyworm gradually shifted northward from May to June, with a significant increase in trajectory landing points in Fujian and Jiangxi Province. The southern region of the Yangtze River became the primary landing area for fall armyworm emigrants from Guangdong Province during July. Furthermore, the accuracy of the migration trajectory simulation was validated through three case studies in Dingnan of Jiangxi, Zhouning of Fujian and Tongxiang of Zhejiang. This study identified Guangdong Province as one of the key source areas for fall armyworm in the southern region of the Yangtze River and South China during the northward migration period.

Key words: *Spodoptera frugiperda*; emigrant; landing area; trajectory analysis

草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) 起源于美洲热带和亚热带地区, 是联合国粮农组织全球预警的重大跨境迁飞性害虫 (FAO, 2018)。2016 年之前, 草地贪夜蛾仅局限在美洲地区为害 (Luginbill, 1928; Sparks, 1979), 自 2016 年 1 月首次入侵西非尼日利亚以来 (Goergen *et al.*, 2016), 短短几年时间草地贪夜蛾便在非洲、亚洲、大洋洲及欧洲等 80 多个国家和地区快速扩张 (Stokstad, 2017; Sharanabasappa *et al.*, 2018; Qi *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2023a), 给全球粮食生产造成严重的经济损失 (Stokstad, 2017; Early *et al.*, 2018; Tay *et al.*, 2022)。2019 年草地贪夜蛾首次入侵我国云南普洱, 凭借其极强的远距离迁飞能力在全国快速蔓延 (姜玉英等, 2019; Li *et al.*, 2020; Zhou *et al.*, 2021), 其突发性、暴发性和毁灭性的发生特点大大增加了监测预警和防控工作的难度 (吴秋琳等, 2019; 李建春等, 2023), 明确草地贪夜蛾的迁飞格局及虫源衔接关系对其精准监测及源头治理意义重大。

草地贪夜蛾具有极强的远距离迁飞能力, 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; 江幸福等, 2019)。草地贪夜蛾在我国大部分地区无法安全越冬, 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.*, 2021), 周年繁殖区是迁飞过渡区和重点防控区的虫源地 (杨普云等, 2019), 做好周年繁殖区的监测和有效治理对实现草地贪夜蛾分区治理尤为重要 (姜玉英等, 2021)。广东省是草地贪夜蛾重要的周年繁殖区和北迁虫源地之一 (齐国君等, 2019; 罗举等, 2020), 境外虫源的持续迁入

和本地虫源的不断繁殖为草地贪夜蛾持续北迁为害提供了充足的虫源基数 (Li *et al.*, 2020; 齐国君等, 2022), 虽然吴秋琳等 (2019) 利用历史气象数据模拟预测了我国热带和亚热带地区草地贪夜蛾春夏季的迁飞轨迹以及主降区和波及区, 但却缺乏实测虫情数据进行验证分析。

本研究根据 2020-2021 年广东省及周边省份草地贪夜蛾的虫情监测数据, 分析广东省不同生态区域草地贪夜蛾的迁飞动态, 采用基于 WRF 4.0 模式的昆虫三维轨迹分析程序 (胡高, 2015), 顺推模拟广东省不同生态区域草地贪夜蛾春夏季迁出虫源的降落地分布, 并挑选周边地区首见草地贪夜蛾的日期进行逆推轨迹模拟验证, 阐明广东省草地贪夜蛾春夏季迁出虫源的降落区域分布, 以期为我国草地贪夜蛾的异地测报和源头防控提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

虫情数据: 2020-2021 年广东省草地贪夜蛾的测报灯监测数据、高空灯监测数据、性诱监测数据和田间虫情调查数据, 来源于广东省农业有害生物预警防控中心; 福建、江西、浙江等周边省份草地贪夜蛾虫情监测数据, 来源于全国农业技术推广服务中心。

气象数据: 2020-2021 年全球再分析资料 (Final Operational Global Analysis data, FNL), 空间分辨率为 $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$, 时间间隔为 6 h, 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)。

地形数据: 覆盖全球的中分辨率空间遥感仪 (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS) 和地形重力波阻力 (Gravity Wave Drag by Orography, GWDO) 数据, 空间分辨率为 2', 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)。

基础地理数据: 中国省级行政区图 (1:7 400 000), 审图号为 GS (2023) 2766 号, 来源于自然资源部标准地图服务系统 (<http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/index.html>)。

1.2 分析方法

1.2.1 草地贪夜蛾监测站点选择及高峰期确定

2020-2021 年在粤西、珠三角、粤东、粤北 4 个不同区域, 分别选取 2~4 个草地贪夜蛾监测站点。为保证不同区域草地贪夜蛾虫情监测数据的完整性和代表性, 2020 年选择高州、化州代表粤西, 白云、惠东、增城区代表珠三角, 揭东、饶平代表粤东, 连南、阳山代表粤北; 2021 年选择霞山、高州、遂溪、吴川代表粤西, 开平、惠东、增城代表珠三角, 海丰、饶平、陆丰代表粤东, 英德、新兴代表粤北。其中, 2020 年化州、白云、连南和 2021 年英德、新兴为性诱监测数据, 2020 年揭东为地面测报灯监测数据, 其余站点为高空灯监测数据。根据陈辉等 (2020) 和李建春等 (2023) 研究, 本研究选择 3-7 月作为广东省草地贪夜蛾春夏季迁出种群的监测期, 将草地贪夜蛾突增日到高

峰后突减日为止，作为一个峰期，峰期中虫量最多的日期为高峰日，为了提高轨迹分析的准确性，选择每个峰期内的突增日、高峰日以及虫量较高的日期均作为迁出高峰期。

此外，为了验证轨迹分析方法的可靠性，根据 2020 年全国草地贪夜蛾幼虫及成虫首见日数据，选取成虫首见日期与广东省草地贪夜蛾迁出高峰期相近的周边省份站点。本研究挑选江西定南、福建周宁及浙江桐乡 3 个监测站点，以当地成虫首见日期进行分析。

1.2.2 WRF 模式及参数设置

本研究使用 WRF (Weather Research and Forecast model) 4.0 数值模式，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 km × 60 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。本研究中 WRF 模式模拟区域中心为 (30°N, 90°E)，方案和具体参数的选择与齐国君等 (2019) 研究方案相同。

1.2.3 迁飞轨迹模拟生物学参数设置

根据草地贪夜蛾的迁飞生物学特征，设定其迁飞轨迹计算参数，主要包括：(1) 飞行时间。夜蛾科昆虫可连续多个夜晚迁飞，黄昏时刻起飞，次日黎明降落 (翟保平, 2004; Wang *et al.*, 2017)。本研究设置起飞时间为 19:00 (BJT)，降落时间为次日 05:00 (BJT)，飞行持续时间 10 h，持续飞行 3 个夜晚 (Li *et al.*, 2020; Wu *et al.*, 2021)。(2) 飞行高度。本研究设置 8 个模拟迁飞高度，分别为距海平面高度 500、750、1 000、1 250、1 500、1 750、2 000、2 250 m (Li *et al.*, 2020)。(3) 飞行速度。大多数夜蛾科昆虫的夜间自主飞行速度约为 2.5~4.3 m/s (Chapman *et al.*, 2010; Minter *et al.*, 2018)，本研究中设定草地贪夜蛾的飞行速度为 3.0 m/s。(4) 飞行低温阈值。迁飞昆虫在空中迁飞过程中，当空气温度低于其飞行低温阈值时，迁飞昆虫就会停止飞行 (翟保平和张孝羲, 1993)。本研究设定草地贪夜蛾的飞行低温阈值为 13.8°C (李建春等, 2023)，低于此温度便会终止轨迹计算。(5) 飞行角度。目前关于草地贪夜蛾的定向行为尚不明确，本研究暂不考虑定向偏角，设置草地贪夜蛾在高空顺风飞行 (Li *et al.*, 2020)。

1.2.4 草地贪夜蛾春夏季迁出虫源的降落地分析

以选择的广东省草地贪夜蛾监测站点为轨迹起点，对草地贪夜蛾迁出虫源的降落地进行轨迹顺推，黄昏起飞时间为轨迹顺推的起始时刻，以第一次的轨迹终点作为第二天黄昏起飞的起点，以此类推，顺推至迁出虫源的降落时刻，轨迹落点要根据地形或寄主因子进行筛选，删除落在海面上的无效轨迹落点 (齐国君等, 2019)，将有效轨迹落点数据导入 ArcMap 与地图叠加，计算在不同地区的有效轨迹落点个数和概率，利用 R 语言绘制广东省草地贪夜蛾春夏季迁出虫源降落地的空间分布图 (陈辉等, 2020)。

1.2.5 草地贪夜蛾迁飞轨迹模拟的准确性验证

选取草地贪夜蛾成虫首见日期与广东省草地贪夜蛾迁出高峰期相近的周边省份站点，根据江西定南、福建周宁及浙江桐乡3个监测站点草地贪夜蛾成虫首见日数据，以站点为轨迹起点，对草地贪夜蛾的虫源地进行轨迹逆推，黎明降落时间为轨迹逆推的起始时刻，以第一次的轨迹终点作为前一天黎明降落的起点，以此类推，逆推至虫源地的起飞时刻，在轨迹落点附近选择草地贪夜蛾监测站点，根据草地贪夜蛾成虫及田间幼虫发生情况，确定广东省草地贪夜蛾虫源地为周边省份提供迁出虫源的可能性。

根据 WRF 模式模拟结果和 NCEP 和 NCAR 的全球再分析数据，选取 2020 年 5-7 月江西定南、福建周宁及浙江桐乡3个监测站点轨迹模拟起始时间前一天或前两天夜间 20:00 至当天或前一天 8:00 之间的 850 hPa 高度层水平平均风场，江西定南、福建周宁及浙江桐乡3个监测站点轨迹模拟起始时间前一天夜间 20:00 至当天 8:00 之间的 12 h 累计降雨量及各站点 800~950 hPa 的垂直风速（李建春等，2023；卢辉等，2023），绘制草地贪夜蛾迁飞期间的天气背景场，分析高空水平流场、垂直速度场及降雨对草地贪夜蛾种群迁飞降落的影响，从气象条件方面反向验证迁飞轨迹模拟的准确性。

2 结果与分析

2.1 广东省草地贪夜蛾春夏季迁出虫源的降落地分析

2.1.1 粤西地区草地贪夜蛾春夏季迁出虫源的降落地分析

顺推轨迹分析结果表明，3-4 月，草地贪夜蛾迁出虫源 85.54%的轨迹落点分布在华南地区，第 1、2、3 晚的落点概率分别为 36.45%、27.41%、21.69%，其次 8.73%的轨迹落点分布在江南地区，少量可波及贵州、安徽以及东南亚地区。5-6 月，草地贪夜蛾迁出虫源 60.99%的轨迹落点分布在华南地区，第 1、2、3 晚的落点概率分别为 35.17%、15.72%、10.10%，其次 35.27%的轨迹落点分布在江南地区，其中福建、江西为主降区，轨迹落点概率分别为 16.28%、12.07%，少量虫源可以到达湖北、安徽、台湾及日本。7 月，草地贪夜蛾迁出虫源 51.11%的轨迹落点分布在江南地区，第 1、2、3 晚的落点概率分别为 11.85%、30.62%、8.64%，其中江西、福建为主降区，轨迹落点概率分别为 19.01%、17.53%，其次 39.01%的轨迹落点分布在华南地区，第 1、2、3 晚的落点概率分别为 31.11%、3.95%、4.20%，少量虫源可到达江淮、黄淮地区，也可波及越南及日本（图 1）。可见，粤西地区草地贪夜蛾的迁出虫源向东北方向迁飞为主，60.63%的虫源主要降落在华南地区，33.94%的虫源降落在江南地区，少量可波及江淮、黄淮地区、东南亚及日本，降落地的时空分布存在季节性的差异，随着时间的推移，虫源降落地的分布逐渐由南向北偏移。

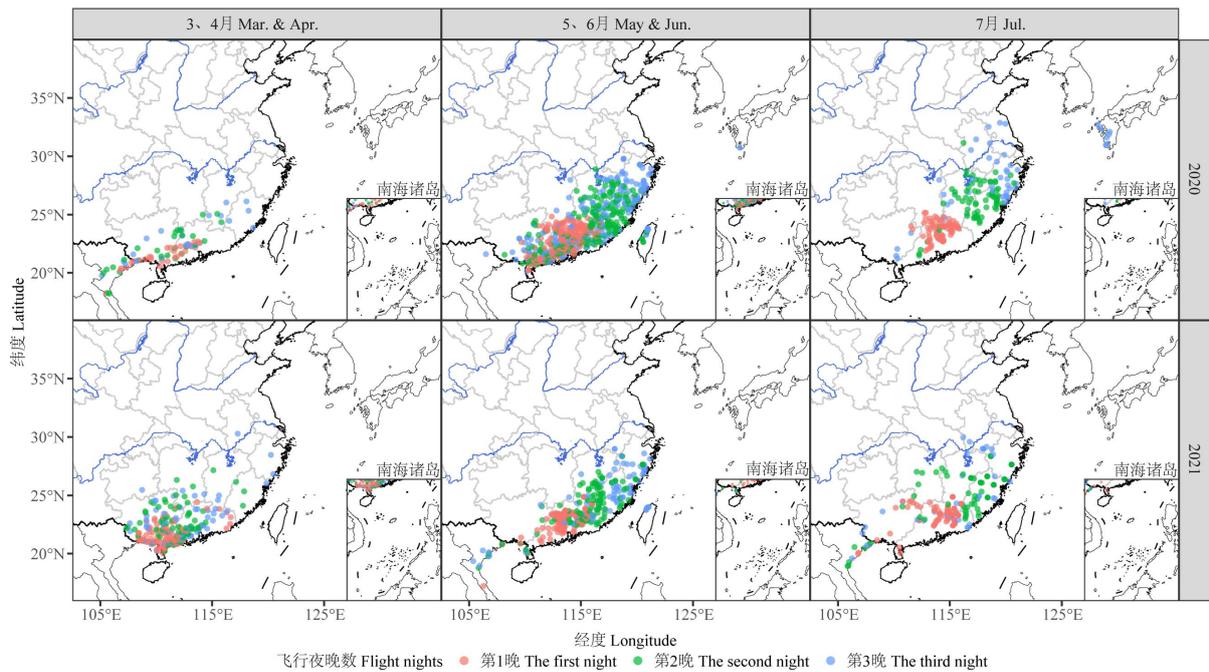


图 1 2020-2021 年粤西地区草地贪夜蛾迁出虫源的降落区域

Fig. 1 Landing area of emigrants of *Spodoptera frugiperda* in western Guangdong Province from 2020 to 2021

注：该图基于自然资源部标准地图服务系统下载的标准地图号为 GS (2023) 2766 号的标准地图制作，底图无修改，下同。Note: This map was based on the standard map with the review number GS (2023) 2766 downloaded from the Standard Map Service System of the Ministry of Natural Resources. The base map had not been modified. The same below.

2.1.2 珠三角地区草地贪夜蛾春夏季迁出虫源的降落地分析

顺推轨迹分析结果表明，3-4 月，草地贪夜蛾迁出虫源 64.11% 的轨迹落点分布在华南地区，第 1、2、3 晚的落点概率分别为 31.84%、18.42%、14.35%，其次 30.86% 的轨迹落点分布在江南地区，其中福建、江西为主降区，轨迹落点概率分别为 18.90%、10.05%，少量可波及台湾、安徽、日本及东南亚地区。5-6 月，草地贪夜蛾迁出虫源 57.89% 的轨迹落点分布在华南地区，第 1、2、3 晚的落点概率分别为 25.56%、18.78%、13.56%，其次 34.00% 的轨迹落点分布在为江南地区，其中福建为主降区，轨迹落点概率为 20.67%，少量虫源可以到达台湾、江淮、东南亚及日本。7 月，草地贪夜蛾迁出虫源 73.72% 的轨迹落点分布在江南地区，第 1、2、3 晚的落点概率分别为 34.31%、26.28%、13.14%，其中福建、江西、浙江为主降区，轨迹落点概率分别为 40.39%、19.59%、12.04%，其次 18.49% 的轨迹落点分布在华南地区，少量虫源可到达江淮、黄淮及日韩（图 2）。可见，珠三角地区草地贪夜蛾迁出虫源以向东北方向迁飞为主，92.62% 的虫源主要降落在华南、江南地区，少量可波及江淮、黄淮地区、东南亚及日韩等地，降落地的时空分布存在季节性的差异，随着时间的推移，虫源降落地的分布逐渐由南向北偏移。

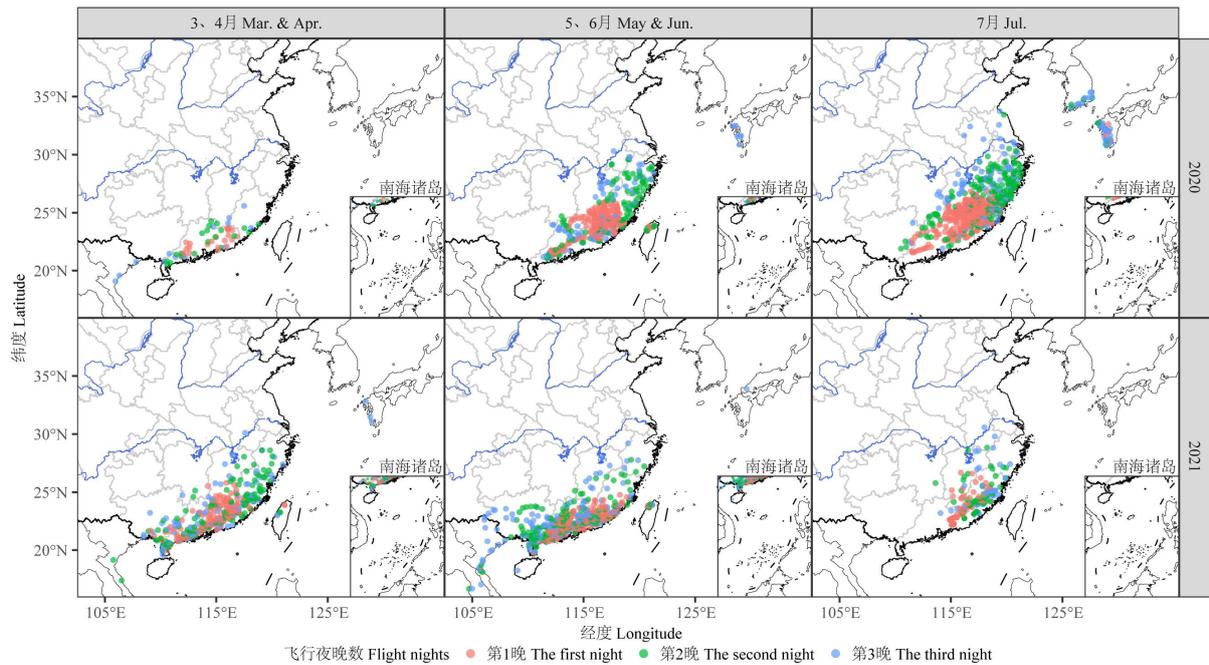


图2 2020-2021年珠三角地区草地贪夜蛾迁出虫源的降落区域

Fig. 2 Landing area of emigrants of *Spodoptera frugiperda* in Pearl River Delta region from 2020 to 2021

2.1.3 粤东地区草地贪夜蛾春夏季迁出虫源的降落地分析

顺推轨迹分析结果表明, 3-4月, 草地贪夜蛾迁出虫源 64.91%的轨迹落点分布在华南地区, 第1、2、3晚的落点概率分别为 21.05%、21.05%、22.81%, 其次 22.81%的轨迹落点分布在江南地区, 10.53%的轨迹落点分布在台湾地区, 少量可波及越南。5-6月, 草地贪夜蛾迁出虫源 49.12%的轨迹落点分布在江南地区, 第1、2、3晚的落点概率分别为 30.97%、11.50%、6.64%, 其中福建为主降区, 轨迹落点概率为 35.40%, 其次 30.53%的轨迹落点分布在华南地区, 15.49%的轨迹落点分布在台湾地区, 少量虫源可以到达日本和韩国。7月, 草地贪夜蛾迁出虫源 57.59%的轨迹落点分布在华南地区, 第1、2、3晚的落点概率分别为 19.37%、20.94%、17.28%, 其次 27.75%的轨迹落点分布在江南地区, 其中福建为主降区, 轨迹落点概率为 26.18%, 9.95%的轨迹落点分布在日本, 少量可波及台湾及越南。可见, 粤东地区草地贪夜蛾迁出虫源以向东北方向迁飞为主, 82.91%的虫源主要降落在江南、华南地区, 9.49%的虫源降落在台湾地区, 少量波及日韩地区, 降落地的时空分布未表现出明显的季节性差异。

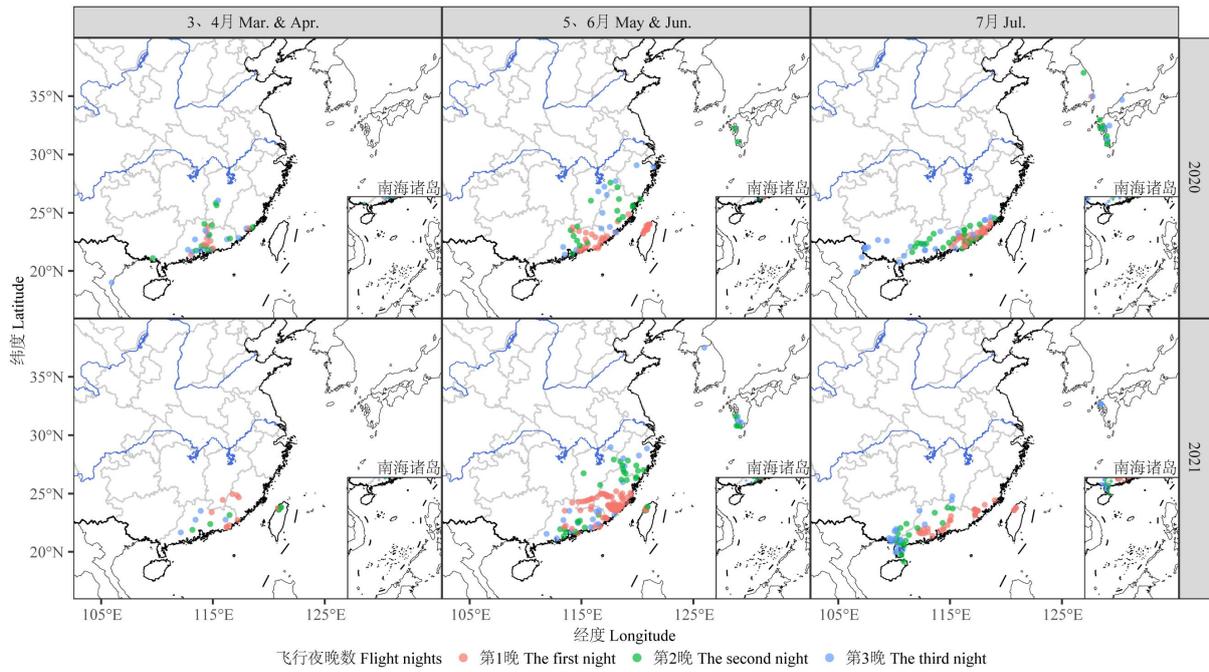


图3 2020-2021年粤东地区草地贪夜蛾迁出虫源的降落区域

Fig. 3 Landing area of emigrants of *Spodoptera frugiperda* in eastern Guangdong Province from 2020 to 2021

2.1.4 粤北地区草地贪夜蛾春夏季迁出虫源的降落地分析

顺推轨迹分析结果表明，5月草地贪夜蛾迁出虫源83.49%的轨迹落点分布在江南地区，第1、2、3晚的落点概率分别为51.38%、25.69%、6.42%，其中江西、福建为主降区，轨迹落点概率分别为44.95%、26.61%，其次8.26%的轨迹落点分布在华南地区，少量虫源可以到达江苏、安徽以及越南地区。6月草地贪夜蛾迁出虫源68.95%的轨迹落点分布在江南地区，第1、2、3晚的落点概率分别为26.21%、24.19%、18.55%，其中江西、福建为主降区，轨迹落点概率分别为35.89%、14.92%，其次24.19%的轨迹落点分布在华南地区，少量虫源可以到达江淮、黄淮、越南及日本。7月草地贪夜蛾迁出虫源71.90%的轨迹落点分布在江南地区，第1、2、3晚的落点概率分别为43.39%、26.86%、1.65%，其中江西、浙江为主降区，轨迹落点概率分别为42.56%、23.14%，其次8.68%、7.02%的轨迹落点分布在日本和华南地区，少量虫源可到达江淮、黄淮地区（图4）。粤北地区草地贪夜蛾迁出虫源以向东北方向迁飞为主，72.79%的虫源主要降落在江南地区，14.36%的虫源降落在华南地区，少量可波及江淮、黄淮及日韩等地，降落地的时空分布存在季节性的差异，随着时间的推移，虫源降落地的分布逐渐由南向北偏移。

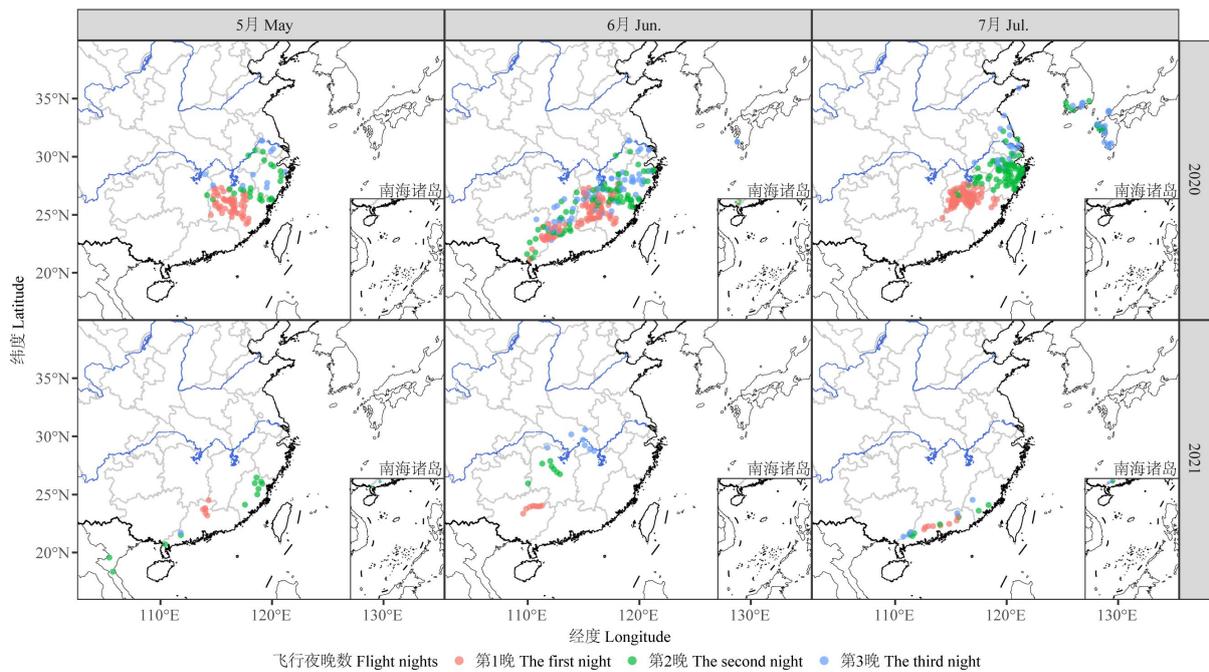


图 4 2020-2021 年粤北地区草地贪夜蛾迁出虫源的降落区域

Fig. 4 Landing area of emigrants of *Spodoptera frugiperda* in northern Guangdong Province from 2020 to 2021

2.2 草地贪夜蛾迁飞轨迹逆推模拟的个例分析

2.2.1 江西定南草地贪夜蛾的迁飞轨迹分析

逆推轨迹分析结果表明，5月14日江西定南首次出现的草地贪夜蛾虫源主要来自清远、广州地区（图 5-A）。根据逆推轨迹落点选取佛冈、从化、花都、清新等监测点作为虫源地的代表，4月中旬以来该区域田间平均幼虫最高密度可达 26~45 头/百株之间，5月11-13日，花都、从化田间均出现 10 头以上的草地贪夜蛾成虫性诱高峰，该区域存在为江西定南提供迁出虫源的可能。从气象条件看，5月13日华南及江南地区高空存在风速 8~12 m/s 以上的西南气流（图 6-A），可以为草地贪夜蛾向东北方向迁飞提供合适的运载气流，5月13日夜间接江西定南地区未出现降雨（图 6-D），高空却出现大量下沉气流（图 6-G），这对草地贪夜蛾降落十分有利。可见，虫源和气象条件方面均满足广东省的草地贪夜蛾虫源向江西定南迁飞和降落。

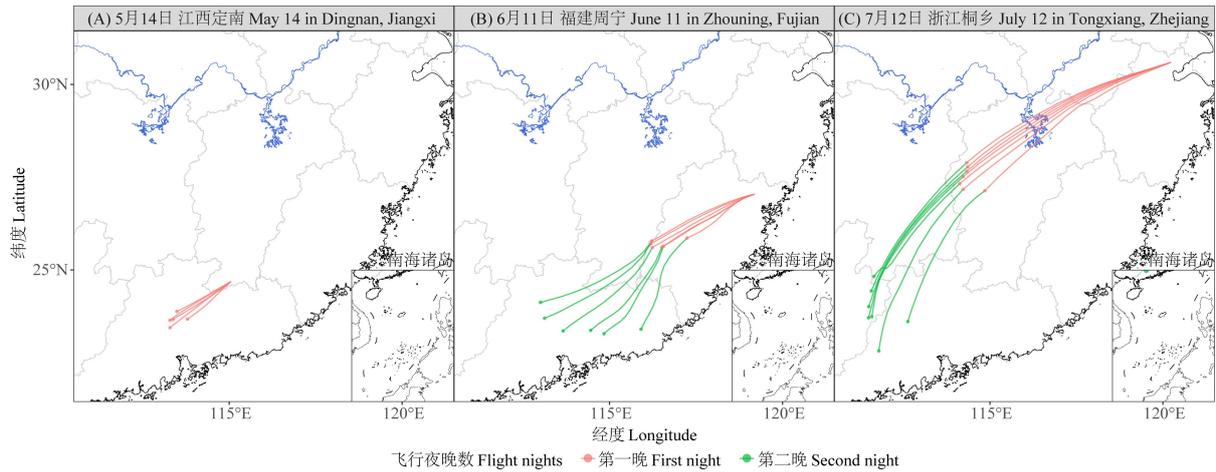


图5 2020年江西定南、福建周宁及浙江桐乡草地贪夜蛾的逆推轨迹

Fig. 5 The backward trajectories of *Spodoptera frugiperda* in Dingnan of Jiangxi, Zhouning of Fujian and Tongxiang of Zhejiang in 2020

2.2.2 福建周宁草地贪夜蛾的迁飞轨迹分析

逆推轨迹分析结果表明,6月11日福建周宁首次出现的草地贪夜蛾虫源主要来自珠三角地区(图5-B)。根据逆推轨迹落点选取惠城、增城、白云、花都等监测站点作为虫源地的代表,5月中旬以来该区域田间平均幼虫最高密度达46.7~110头/百株之间,6月8-9日,花都田间出现9~14头的草地贪夜蛾成虫性诱高峰,该区域存在为福建周宁提供迁出虫源的可能。从气象条件看,6月9日华南及江南地区高空存在风速8~12 m/s以上的西南气流(图6-B),可以为草地贪夜蛾向东北方向迁飞提供合适的运载气流,6月10日夜间福建周宁地区未出现降雨情况(图6-E),高空却存在大量的下沉气流(图6-H),这对草地贪夜蛾降落十分有利。可见,虫源和气象条件方面均满足广东省的草地贪夜蛾虫源向福建周宁迁飞和降落。

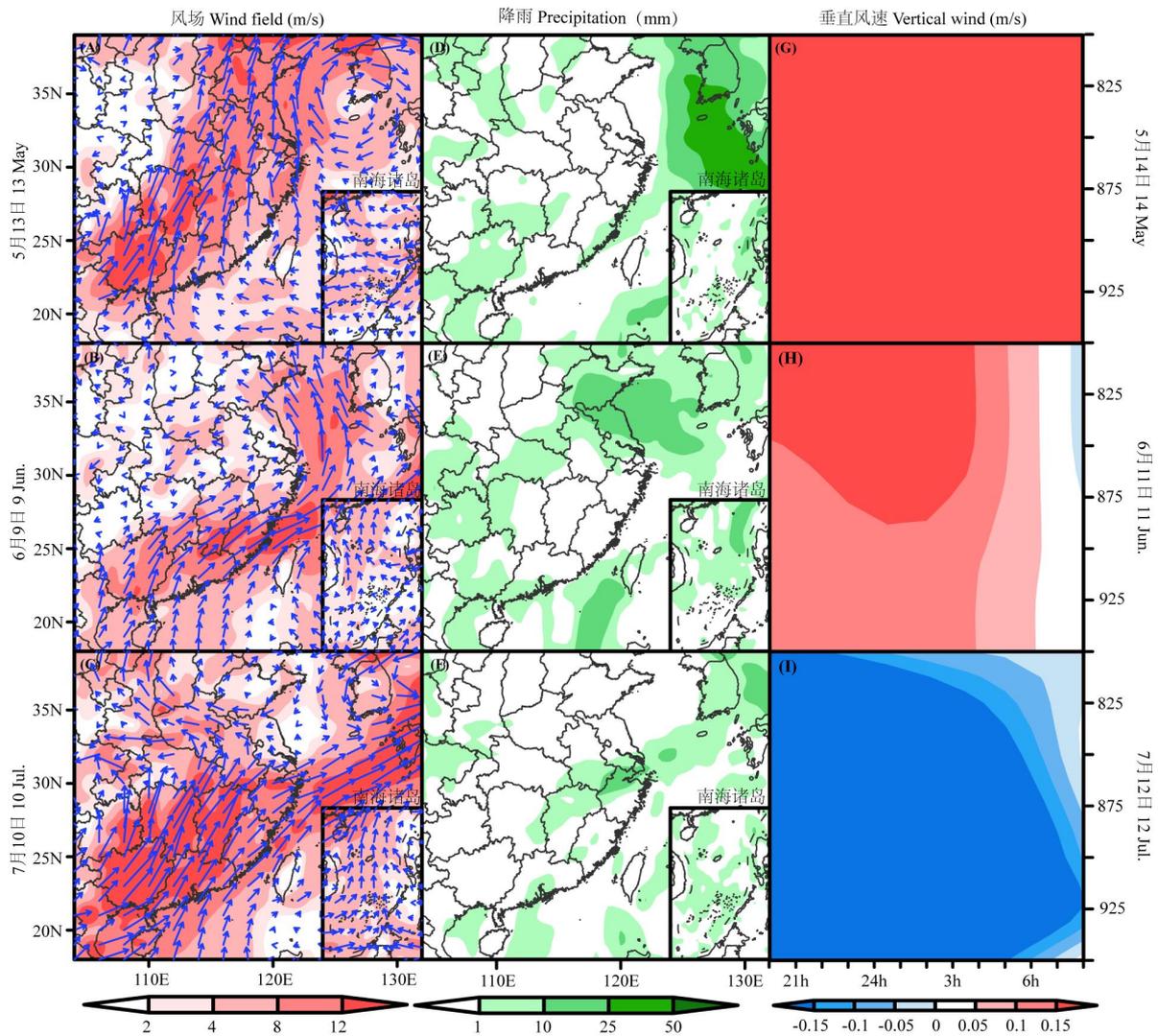


图 6 2020 年 5~7 月代表站点轨迹模拟期间的天气背景场

Fig. 6 The weather background field during the trajectory simulation of the representative stations from May to July in 2020

注：A~C，850 hPa 水平平均风场（阴影部分为风速）；D~F，12 h 累计降雨量；G~I，代表站点 800~950 hPa 垂直风速的时间-高度剖面图。
 Note: A~C, Horizontal mean wind field at 850 hPa (shaded part is wind speed); D~F, Cumulative rainfall of 12 h; G~I, The time-height profile of 800~950 hPa vertical wind speed of the representative stations.

2.2.3 浙江桐乡草地贪夜蛾的迁飞轨迹分析

逆推轨迹分析结果表明，7月12日浙江桐乡首次出现的草地贪夜蛾虫源来自肇庆、清远及广西贺州地区（图 5-C）。根据逆推轨迹落点选取高要、清城、德庆、英德等监测站点作为虫源地的代表，6月中旬以来高要、清城田间平均幼虫最高密度介于 20~24.7 头/百株之间，7月10日德庆、英德田间出现 25 头和 12 头草地贪夜蛾成虫灯诱和性诱高峰，该区域存在为浙江桐乡提供迁出虫源的可能。从气象条件看，7月10日受西太平洋副热带高压的控制，华南、江南及黄淮地区一带贯穿了风速 12 m/s 以上的西南气流（图 6-C），可以为草地贪夜蛾向东北方向迁飞提供合适的运载气流，7月11日

夜间浙江北部地区出现 10~25 mm 降雨 (图 6-F), 可迫使草地贪夜蛾虫源降落, 但未出现下沉气流 (图 6-I)。可见, 虫源和气象条件方面均满足广东省的草地贪夜蛾虫源向浙江桐乡迁飞和降落。

3 结论与讨论

草地贪夜蛾在我国可通过东线、西线两条迁飞路径进入北方玉米主产区 (Li *et al.*, 2020; 李建春等, 2023), 广东省作为我国草地贪夜蛾虫源东线入侵我国的“桥头堡”和重要的周年繁殖区 (齐国君等, 2019, 2020), 在全国草地贪夜蛾监测与防控中占据重要地位。本研究证实了广东省是江南及华南地区草地贪夜蛾重要的北迁虫源地, 与吴秋琳等 (2019) 的研究结果基本吻合, 但在主要降落区域存在一定差异, 本研究结果除了可覆盖华南地区之外, 为福建、江西及浙江等地提供虫源的概率分别为 21.26%、15.12%和 6.97%, 江西并非为第一主降区, 且进入湖南概率仅为 1.81%, 这与 2021 年湖南省草地贪夜蛾少量虫源来自广东省的结果是吻合的 (谭泗桥等, 2024), 但远低于吴秋琳等 (2019) 的春夏季轨迹落点概率。此外, 广东省草地贪夜蛾迁出后可跨海迁飞为日本、韩国提供虫源, 这与 Ma *et al.* (2019) 和 Wu *et al.* (2022) 的研究结果基本一致。

我国地处典型的东亚迁飞场 (张志涛, 1992), 受东亚季风的影响, 草地贪夜蛾已成为我国南北往返迁飞的重大迁飞性害虫 (陆永跃等, 2020; Chen *et al.*, 2023), 其季节性迁飞活动体现了对高空风温场及天气背景变化的适应性 (翟保平和张孝羲, 1993; Li *et al.*, 2020)。中国东部春夏季盛行的偏南风或西南季风为草地贪夜蛾的远距离迁飞提供了运载气流 (吴秋琳等, 2019), 本研究证实了广东省草地贪夜蛾春夏季虫源主要向东北方向迁飞, 与热带和南亚热带草地贪夜蛾虫源的迁飞方向是一致的 (吴秋琳等, 2019), 但与其降落地分布无季节性差异存在明显不同。本研究通过对比分析不同月份的轨迹落点, 发现 3-4 月草地贪夜蛾迁出虫源主要降落在华南地区, 5-6 月逐渐向北偏移, 福建、江西等地的轨迹落点明显增多, 7 月迁出虫源则主要降落在江南地区, 虫源降落地的分布随着时间的推移由南向北偏移, 存在明显的季节性时空分布差异, 这与李建春等 (2023) 分析的草地贪夜蛾春夏季北迁格局及虫源衔接关系相吻合。

草地贪夜蛾在冬季平均气温 10°C 以上可越冬存活 (Luginbill, 1928), 在热带和温暖的亚热带地区能够周年繁殖 (姜玉英等, 2021; Yang *et al.*, 2021), 研究表明, 草地贪夜蛾在广东省大部分冬种玉米区可以周年繁殖, 仅清远、韶关、河源等地为季节发生区 (齐国君等, 2020, 2022), 本研究将广东划分为粤西、珠三角、粤东、粤北 4 个不同生态区域, 轨迹分析结果表明广东省草地贪夜蛾春夏季迁出虫源的降落区域存在明显的地域性差异。粤西和珠三角草地贪夜蛾虫源迁出降落地基本一致, 90% 以上的落点分布在华南、江南地区, 但粤西虫源有较大概率迁飞降落至华南地区。同为周年繁殖区的粤东地区, 其迁出虫源降落多集中分布在广东和福建, 也有 10% 左右的迁出虫源降落在台湾。而处于季节发生区的粤北地区, 一般年份 3~4 月才零星始见草地贪夜蛾 (齐国君等, 2022), 不会存在迁出虫源, 5~7 月其虫源的主降区集中分布在江南地区, 概率达 72.79%, 这与周年繁殖区

的降落地时空分布表现出明显的不同。

轨迹分析法 (trajectory analysis) 是目前研究昆虫迁飞行之有效的一种工具 (芦芳等, 2013), 基于 WRF 模式的昆虫三维轨迹分析方法已被广泛应用于稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis* (Guenée)、褐飞虱 *Nilaparvata lugens* (Stål)、白背飞虱 *Sogatella furcifera* (Horváth)、小红蛱蝶 *Vanessa cardui* L.、黏虫 *Mythimna separata* (Walker)、草地贪夜蛾、亚洲小车蝗 *Oedaleus decorus asiaticus* (Bey-Bienko) 等多种迁飞性害虫的轨迹模拟 (Wang *et al.*, 2017; Wu *et al.*, 2018; Hu *et al.*, 2021; Sun *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2022; Wu *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2023b), 该模型考虑了草地贪夜蛾自身的飞行能力, 并设置了起飞降落时间、飞行持续时间、飞行高度、迁飞次数、低温阈值等重要参数, 提高了迁飞轨迹模拟的精确性。本研究利用江西定南、福建周宁及浙江桐乡 3 个个例分析, 明确了西南气流为广东省草地贪夜蛾虫源的迁飞提供运载气流, 而降雨和下沉气流均有利于草地贪夜蛾的降落, 从虫源地的虫情数据和天气背景场两方面, 反向验证了迁飞轨迹模拟的可靠性。

本研究利用 2020-2021 年两年实测虫情数据, 明确了广东省是江南及华南地区草地贪夜蛾重要的北迁虫源地, 证实了之前基于历史气象数据模拟预测的迁飞轨迹路径结果基本可靠, 但尚不足以精准反映广东省不同生态区域草地贪夜蛾的南北往返迁飞格局, 今后还需要持续多年监测, 开展不同年份、不同月份及不同生态区域的迁飞路径模拟, 以阐明广东省草地贪夜蛾的迁飞格局及虫源衔接关系, 为草地贪夜蛾的源头治理和精准测报提供技术支持。

参考文献 (References)

- Chapman JW, Nesbit RL, Burgin LE, *et al.* Flight orientation behaviors promote optimal migration trajectories in high-flying insects [J]. *Science*, 2010, 327 (5966): 682-685.
- Chen H, Wan GJ, Li JC, *et al.* Adaptive migratory orientation of an invasive pest on a new continent [J]. *iScience*, 2023, 26 (12): 108281.
- Chen H, Wu MF, Liu J, *et al.* Migratory routes and occurrence divisions of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* in China [J]. *Journal of Plant Protection*, 2020, 47 (4): 747-757. [陈辉, 武明飞, 刘杰, 等. 我国草地贪夜蛾迁飞路径及其发生区划 [J]. 植物保护学报, 2020, 47 (4): 747-757]
- Early R, González-Moreno P, Murphy ST, *et al.* Forecasting the global extent of invasion of the cereal pest *Spodoptera frugiperda*, the fall armyworm [J]. *NeoBiota*, 2018, 40: 25-50.
- FAO. Fall armyworm keeps spreading and becomes more destructive [EB/OL]. 2018. <http://www.fao.org/news/story/en/item/1142085/icode/>.
- Goergen G, Kumar PL, Sankung SB, *et al.* First report of outbreaks of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith) (Lepidoptera, Noctuidae), a new alien invasive pest in West and Central Africa [J]. *PLoS ONE*, 2016, 11 (10): e0165632.
- Hu G, Stefanescu C, Oliver TH, *et al.* Environmental drivers of annual population fluctuations in a trans-Saharan insect migrant [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2021, 118 (26): e2102762118.
- Hu G. Three-dimensional trajectory calculation software for migratory insects based on Weather Research Forecasting (WRF) model: 2015SR090706

- [P]. 2015-05-26. [胡高. 基于 WRF 模式输出的迁飞昆虫三维轨迹计算软件: 2015SR090706 [P]. 2015-05-26]
- Jiang XF, Zhang L, Cheng YX, *et al.* Advances in migration and monitoring techniques of the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) [J]. *Plant Protection*, 2019, 45 (1): 12-18. [江幸福, 张蕾, 程云霞, 等. 草地贪夜蛾迁飞行为与监测技术研究进展 [J]. 植物保护, 2019, 45 (1): 12-18]
- Jiang YY, Liu J, Zeng J, *et al.* Occurrence of, and damage caused by, major migratory pests and techniques for monitoring and forecasting these in China [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2021, 58 (3): 542-551. [姜玉英, 刘杰, 曾娟, 等. 我国农作物重大迁飞性害虫发生为害及监测预报技术 [J]. 应用昆虫学报, 2021, 58 (3): 542-551]
- Jiang YY, Liu J, Zhu XM. Analysis on the occurrence and future trend of the fall armyworm encroachment into China [J]. *China Plant Protection*, 2019, 39 (2): 33-35. [姜玉英, 刘杰, 朱晓明. 草地贪夜蛾侵入我国的发生动态和未来趋势分析 [J]. 中国植保导刊, 2019, 39 (2): 33-35]
- Li JC, Liu J, Qi GJ, *et al.* The northward migration pattern of the fall armyworm in China from 2019 to 2022 [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2023, 60 (4): 1039-1051. [李建春, 刘杰, 齐国君, 等. 我国草地贪夜蛾北迁格局及其虫源衔接关系 [J]. 应用昆虫学报, 2023, 60 (4): 1039-1051]
- Li XJ, Wu MF, Ma J, *et al.* Prediction of migratory routes of the invasive fall armyworm in eastern China using a trajectory analytical approach [J]. *Pest Management Science*, 2020, 76 (2): 454-463.
- Lu F, Zhai BP, Hu G. Trajectory analysis methods for insect migration research [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2013, 50 (3): 853-862. [芦芳, 翟保平, 胡高. 昆虫迁飞研究中的轨迹分析方法 [J]. 应用昆虫学报, 2013, 50 (3): 853-862]
- Lu H, Zhang HW, Lv BQ, *et al.* Preliminary study of the migration path and source areas of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* in Hainan Province in 2019 [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2023, 60 (4): 1062-1069. [卢辉, 张浩文, 吕宝乾, 等. 2019 年海南省草地贪夜蛾迁入路径及虫源分析初探 [J]. 应用昆虫学报, 2023, 60 (4): 1062-1069]
- Lu YY, Huang DC, Zhang YP. Technical Manual for Monitoring and Control of *Spodoptera frugiperda* [M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2020. [陆永跃, 黄德超, 章玉苹. 草地贪夜蛾监测与防治技术手册 [M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2020]
- Luginbill P. The fall armyworm [R]. *USDA Technology Bulletin*, 1928, 34: 91.
- Luo J, Ma J, Wu MF, *et al.* Original area of fall armyworm individuals newly invaded in Zhejiang Province [J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2020, 34 (1): 80-87. [罗举, 马健, 武明飞, 等. 浙江入侵草地贪夜蛾的迁入虫源 [J]. 中国水稻科学, 2020, 34 (1): 80-87]
- Ma J, Wang YP, Wu MF, *et al.* High risk of the fall armyworm invading Japan and the Korean Peninsula via overseas migration [J]. *Journal of Applied Entomology*, 2019, 143 (9): 911-920.
- Minter M, Pearson A, Lim KS, *et al.* The tethered flight technique as a tool for studying life-history strategies associated with migration in insects [J]. *Ecological Entomology*, 2018, 43 (4): 397-411.
- Qi GJ, Huang DC, Wang L, *et al.* The occurrence characteristic in winter and year-round breeding region of the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) in Guangdong Province [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2020, 42 (3): 573-582. [齐国君, 黄德超, 王磊, 等. 广东省草地贪夜蛾冬季发生特征及周年繁殖区域研究 [J]. 环境昆虫学报, 2020, 42 (3): 573-582]

- Qi GJ, Ma J, Hu G, *et al.* Analysis of migratory routes and atmospheric features of the newly invaded fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) in Guangdong Province [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2019, 41 (3): 487-496. [齐国君, 马健, 胡高, 等. 首次入侵广东的草地贪夜蛾迁入路径及天气背景分析 [J]. 环境昆虫学报, 2019, 41 (3): 488-496]
- Qi GJ, Ma J, Wan J, *et al.* Source regions of the first immigration of fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) invading Australia [J]. *Insects*, 2021, 12 (12): 1104.
- Qi GJ, Zhong WD, Chen T, *et al.* Seasonal population dynamics and occurrence characteristic of the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in Guangdong Province [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2022, 44 (4): 792-799. [齐国君, 钟文东, 陈婷, 等. 广东省草地贪夜蛾种群周年动态及发生特征 [J]. 环境昆虫学报, 2022, 44 (4): 792-799]
- Sharanabasappa, Kallelshwaraswamy CM, Asokan R, *et al.* First report of the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae), an alien invasive pest on maize in India [J]. *Pest Management: In Horticultural Ecosystems*, 2018, 24 (1): 23-29.
- Sparks AN. A review of the biology of the fall armyworm [J]. *Florida Entomologist*, 1979, 62 (2): 82-86.
- Stokstad E. New crop pest takes Africa at lightning speed [J]. *Science*, 2017, 356 (6337): 473-474.
- Sun W, Hu G, Su QF, *et al.* Population source of third-generation oriental armyworm in Jilin, China, determined by entomology radar, trajectory analysis, and mitochondrial COI sequences [J]. *Environmental Entomology*, 2022, 51 (3): 621-632.
- Tan SQ, Wang ZX, He JX, *et al.* Analysis of the migration path and source areas of fall armyworm *Spodoptera frugiperda* in Hunan Province in 2021 [J]. *Journal of Plant Protection*, 2024, 51 (1): 132-140. [谭泗桥, 王梓轩, 何健璇, 等. 2021年湖南省草地贪夜蛾迁飞路径及虫源地分析 [J]. 植物保护学报, 2024, 51 (1): 132-140]
- Tay WT, Rane RV, Padovan A, *et al.* Global population genomic signature of *Spodoptera frugiperda* (fall armyworm) supports complex introduction events across the Old World [J]. *Communications Biology*, 2022, 5 (1): 297.
- Wang FY, Yang F, Lu MH, *et al.* Determining the migration duration of rice leaf folder (*Cnaphalocrocis medinalis* (Guenée)) moths using a trajectory analytical approach [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 39853.
- Wang YP, Li S, Du GL, *et al.* An analysis of the possible migration routes of *Oedaleus decorus asiaticus* Bey-Bienko (Orthoptera: Acrididae) from Mongolia to China [J]. *Insects*, 2022, 13 (1): 72.
- Westbrook JK, Nagoshi RN, Meagher RL, *et al.* Modeling seasonal migration of fall armyworm moths [J]. *International Journal of Biometeorology*, 2016, 60 (2): 255-267.
- Wu MF, Qi GJ, Chen H, *et al.* Overseas immigration of fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae), invading Korea and Japan in 2019 [J]. *Insect Science*, 2022, 29 (2): 505-520.
- Wu QL, Jiang YY, Hu G, *et al.* Analysis on spring and summer migration routes of fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) from tropical and southern subtropical zones of China [J]. *Plant Protection*, 2019, 45 (3): 1-9. [吴秋琳, 姜玉英, 胡高, 等. 中国热带和南亚热带地区草地贪夜蛾春夏两季迁飞轨迹的分析 [J]. 植物保护, 2019, 45 (3): 1-9]
- Wu QL, Shen XJ, He LM, *et al.* Windborne migration routes of newly-emerged fall armyworm from Qinling Mountains-Huaihe River region, China

- [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2021, 20 (3): 694-706.
- Wu QL, Westbrook JK, Hu G, *et al.* Multiscale analyses on a massive immigration process of *Sogatella furcifera* (Horváth) in south-central China: Influences of synoptic-scale meteorological conditions and topography [J]. *International Journal of Biometeorology*, 2018, 62 (8): 1389-1406.
- Yang PY, Zhu XM, Guo JF, *et al.* Strategy and advice for managing the fall armyworm in China [J]. *Plant Protection*, 2019, 45 (4): 1-6. [杨普云, 朱晓明, 郭井菲, 等. 我国草地贪夜蛾的防控对策与建议 [J]. 植物保护, 2019, 45 (4): 1-6]
- Yang XM, Song YF, Sun XX, *et al.* Population occurrence of the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in the winter season of China [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2021, 20 (3): 772-782.
- Zhai BP, Zhang XX. Behavior of migrating insects: Adaptation and selection to atmospheric environment [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1993, 13 (4): 356-363. [翟保平, 张孝羲. 迁飞过程中昆虫的行为: 对风温场的适应与选择 [J]. 生态学报, 1993, 13 (4): 356-363]
- Zhai BP. Computing the day length for programming insect behavior [J]. *Entomological Knowledge*, 2004, 41 (2): 178-184. [翟保平. 昆虫行为研究中日长的计算 [J]. 昆虫知识, 2004, 41 (2): 178-184]
- Zhang L, Li ZY, Peng Y, *et al.* Global genomic signature reveals the evolution of fall armyworm in the Eastern hemisphere [J]. *Molecular Ecology*, 2023a, 32 (20): 5463-5478.
- Zhang XY, Huang L, Liu J, *et al.* Migration dynamics of fall armyworm *Spodoptera frugiperda* (Smith) in the Yangtze River Delta [J]. *Insects*, 2023b, 14 (2): 127.
- Zhang ZT. Insect migration and insect migration arena [J]. *Plant Protection*, 1992, 18 (1): 48-50. [张志涛. 昆虫迁飞与昆虫迁飞场 [J]. 植物保护, 1992, 18 (1): 48-50]
- Zhou Y, Wu QL, Zhang HW, *et al.* Spread of invasive migratory pest *Spodoptera frugiperda* and management practices throughout China [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2021, 20 (3): 637-645.