



齐国君, 马健, 胡高, 于永浩, 谌爱东, 高燕, 吕利华. 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.

首次入侵广东的草地贪夜蛾迁入路径及天气背景分析

齐国君¹, 马健^{2*}, 胡高², 于永浩³, 谌爱东⁴, 高燕¹, 吕利华^{1**}

(1. 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; 2. 南京农业大学植物保护学院, 南京 210095;
3. 广西壮族自治区农业科学院植物保护研究所/广西作物病虫害生物学重点实验室, 南宁 530007;
4. 云南省农业科学院农业环境资源研究所, 昆明 650205)

摘要: 草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) 是联合国粮农组织全球预警的超级害虫, 2019年1月入侵我国云南, 并随季风远距离迁飞扩散, 4月23日, 广东省广州市增城区首次发现并确认该虫幼虫发生为害, 对当地玉米等粮食作物构成严重威胁。本研究运用基于 WRF 模式的昆虫三维轨迹分析程序和 GrADS 气象图形软件, 模拟了入侵广东的草地贪夜蛾的迁飞路径及天气背景场。结果表明: 按照幼虫发育历期推算, 首批草地贪夜蛾成虫迁入广东的时间可能为4月8日~13日; 在此期间, 越南北部及华南地区的西南低空急流可为草地贪夜蛾的迁飞提供运载气流, 而风切变、降雨和下沉气流为草地贪夜蛾的迫降提供便利条件; 4月9–10日存在草地贪夜蛾的有效迁飞路径, 入侵广东省增城区草地贪夜蛾种群的有效虫源地分布在越南及老挝北部。本研究为华南地区草地贪夜蛾春季迁入种群的监测预警及防控提供了科学依据。

关键词: 草地贪夜蛾; 迁入路径; 轨迹分析; 虫源地

中图分类号: Q968.1; S433.4

文献标识码: A

文章编号: 1674-0858 (2019) 03-0488-09

Analysis of migratory routes and atmospheric features of the newly invaded fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) in Guangdong Province

QI Guo-Jun¹, MA Jian^{2*}, HU Gao², YU Yong-Hao³, CHEN Ai-Dong⁴, GAO Yan¹, LV Li-Hua^{1**}

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of High Technology for Plant Protection/Plant Protection Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, China; 2. College of Plant Protection, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 3. Guangxi Key Laboratory for Biology of Crop Diseases and Insect Pests/ Institute of Plant Protection, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China; 4. Institute of Agricultural Environment and Resource, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650205, China)

Abstract: The fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith), is an extremely destructive agricultural pest worldwide, which has been warned by the United Nations' Food and Agriculture Organization (FAO) since 2016. It first invaded the southwestern part of Yunnan Province, China in January 2019, and thereafter immigrated or spread to South China as the southwestern monsoon blows in

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFC1200600); 广东省现代农业产业共性关键技术研发创新团队“外来入侵物种风险评估和监测预警”; 广东省现代农业产业技术体系创新团队 (2017LM1078)

作者简介: 齐国君, 男, 副研究员, 主要从事昆虫生态学及入侵生物学研究, E-mail: super_qi@163.com

* 共同第一作者简介: 马健, 男, 博士研究生, 主要从事迁飞昆虫学研究, E-mail: 2017202026@njau.edu.cn

** 通讯作者 Author for corresponding: 吕利华, 博士, 研究员, 主要研究方向为昆虫生态学研究, E-mail: lhlu@gdppri.com

收稿日期 Received: 2019-05-13; 接受日期 Accepted: 2019-05-24

spring. It is reported for the first time that a great number of larvae of the fall armyworm were present in the corn field in Guangzhou City's Zengcheng district, Guangdong Province on April 23th, 2019. It will pose a serious threat and damage to crop production, especially to maize production in Guangdong Province. The migratory routes and weather fields for the case of the newly invaded fall armyworm in Guangdong Province were simulated by using Weather Research and Forecast (WRF) Model and Grid Analysis and Display System (GrADS), combined with reanalyzed meteorological data from the National Center of Environment Predicting (NCEP) of the USA. The results showed that according to the development period of larvae, the first invaded adult population of the fall armyworm might immigrate to Guangdong Province from April 8th to April 13th, 2019. During this period, southwest of strong low-level jet between northern Vietnam and South China carried migratory populations of the fall armyworm into Guangdong Province. The landing populations of the fall armyworm were caused by wind shear, rainfall and downward flow. The effective migratory of the fall armyworm took place on April 9th and April 10th, 2019. Simulations of migration trajectories indicated that the immigrants of the fall armyworm in Zengcheng district came from Northern Vietnam and Northern Laos. This study provided a scientific basis for monitoring, early warning and control of spring migratory populations of the fall armyworm in South China.

Key words: *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith); migratory route; trajectory analysis; insect source area

草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith), 又名秋黏虫, 英文名为 Fall armyworm, 隶属于鳞翅目 Lepidoptera 夜蛾科 Noctuidae, 是一种原产于美洲热带和亚热带地区的杂食性害虫 (Luginbill, 1928; Sparks, 1979)。草地贪夜蛾具有适生区域广、迁飞能力强、繁殖倍数高、暴食危害重、防治难度大等特点 (Johnson *et al.*, 1987; Early *et al.*, 2018; 姜玉英等, 2019), 且寄主范围十分广泛, 嗜食禾本科植物, 可危害玉米、水稻、小麦等农作物以及蔬菜、观赏植物、水果等 186 余种 (Pashley, 1986; Casmuze *et al.*, 2010)。该虫是联合国粮农组织全球预警的超级害虫 (FAO, 2018)。

随着国际贸易活动日趋频繁, 2016 年草地贪夜蛾首次入侵非洲尼日利亚和加纳 (Goergen *et al.*, 2016; Cock *et al.*, 2017), 随后两年时间内, 便席卷撒哈拉以南地区的 44 个国家 (Nagoshi *et al.*, 2018; Rwomushana *et al.*, 2018), 给非洲粮食生产造成重创 (Stokstad, 2017)。2018 年 5 月, 草地贪夜蛾又入侵亚洲印度的卡纳塔克邦州 (Sharanabasappa *et al.*, 2018), 之后迅速扩散蔓延到泰国、斯里兰卡、孟加拉、缅甸、越南、老挝、中国等亚洲国家 (郭井菲等, 2019; 吴秋琳等, 2019a; 全国农业技术推广服务中心, 2019)。

2019 年 1 月 11 日在我国云南省普洱市江城首次发现并确认草地贪夜蛾入侵 (姜玉英等, 2019), 截至 5 月 30 日, 草地贪夜蛾已在云南、广西、贵州、广东、湖南、海南、福建、浙江、湖北、四川、江西、重庆、河南、安徽、江苏、上海 16 省 (市、区) 的部分地区定殖为害 (全国农业技术推广服务中心, 2019; 王磊等, 2019; 杨普云等, 2019), 其远距离迁飞行为将极大增加扩散蔓延的风险, 并严重威胁我国的农业生产和粮食安全。

广东省地理位置、生态环境和气候条件十分特殊, 是我国检疫性有害生物截获量最大和外来入侵生物发生危害最严重的省份 (齐国君和吕利华, 2016), 也是水稻迁飞性害虫南北往返迁飞的必经之地及繁殖中转站 (王政等, 2011; 齐国君等, 2013), 其在入侵性、迁飞性跨境有害生物的预警防控方面具有重要战略地位。2019 年 4 月 23 日, 广东省广州市增城区首次确认发现草地贪夜蛾侵入危害玉米 (吴秋琳等, 2019b; Li *et al.*, 2019; 广东省农业有害生物预警防控中心, 2019), 其入侵已对当地玉米等农作物生产及粮食安全构成严重威胁。

为了明确首次入侵广东的草地贪夜蛾迁飞途径、虫源地分布及天气背景场, 本研究根据 NCEP 气象再分析数据, 运用基于 Weather Research and

Forecast model (WRF 3.9 模式) 的昆虫三维轨迹分析程序 (胡高, 2015) 和 GrADS 气象图形软件, 模拟草地贪夜蛾迁入增城区的迁飞路径及天气背景场, 以期为广东省草地贪夜蛾的监测预警及应急防控提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

虫情数据: 草地贪夜蛾虫情调查数据, 来源于广东省农业有害生物预警防控中心农作物病虫害情报 (广东省农业有害生物预警防控中心, 2019); 我国及周边国家草地贪夜蛾发生为害情况, 来源于全国农业技术推广服务中心植物病虫害情报 (全国农业技术推广服务中心, 2019)。

气象数据: 此数据集时间分辨率为每 6 h 一次, 空间分辨率为 $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$, 来源于美国国家环境预报中心 (National Centers for Environmental Prediction, NCEP)、美国国家大气研究中心 (National Center for Atmospheric Research, NCAR) 的全球再分析数据 (Final Operational Global Analysis, FNL)。

基础地理数据: 中国省级行政区图 (1:

4 000 000), 来源于国家基础地理信息中心 (<http://ngcc.sbsm.gov.cn/>)。

1.2 基于 WRF 模式的三维轨迹及大气环流背景场分析

1.2.1 WRF 模式气象初始场与地形资料

全球再分析数据 (FNL) 为 WRF 模式的初始场数据和边界条件。在气象数值模拟过程中, 采用的地形数据为分辨率 $2'$, 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。气象资料输入 WRF 模式经数值模拟后, 输出每小时一次的 $30 \text{ km} \times 30 \text{ km}$ 格距气象要素场, 作为计算昆虫迁飞轨迹的背景条件。

1.2.2 WRF 模式模拟区域与参数设置

根据草地贪夜蛾幼虫虫龄及发育历期, 推算迁入种群可能的降落日期, 并以增城区为回推轨迹起点, 以降落时刻作为回推轨迹的起始时刻, 利用 2019 年 4 月上中旬逐日夜间气象数据, 模拟迁飞轨迹至草地贪夜蛾虫源地的起飞时刻。采用单层嵌套的 WRF 模式的网格设计方法, 以及网格设计的控制试验边界层、辐射过程和微物理处理方案 (表 1)。

表 1 WRF 模式方案与参数

Table 1 Selection of scheme and parameters of the WRF model

项目 Item	区域 1 Domain 1
中心位置 Location	$23^{\circ}\text{N}, 105^{\circ}\text{E}$
水平网格 The number of grid points	130×150
格距 (km) Distance between grid points	30
垂直层 Layers	30
地图投影 Map projection	Lambert
微物理过程 Microphysics scheme	WSM6
长波辐射方案 Longwave radiation scheme	RRTMG
短波辐射方案 Shortwave radiation scheme	RRTMG
近地面层方案 Surface layer scheme	Monin-Obukhov
陆面过程方案 Land/water surface scheme	Noah
边界层方案 Planetary boundary layer scheme	YSU
积云参数化方案 Cumulus parameterization	Tiedtke
模拟时长 (h) Forecast time	72

1.2.3 草地贪夜蛾迁飞的大气环流背景场分析

根据 WRF 模式模拟结果, 选取 2019 年 4 月 8-13 日 20:00 至 06:00 850 hPa (大约距离地面 1 500 m) 高度层的水平平均流场的大气背景场、20:00 至 06:00 的夜间累计降雨量、增城区 800~950 hPa 垂直风速, 利用 GrADS 2.1 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。

1.2.4 轨迹分析生物学参数的设置

根据草地贪夜蛾的迁飞生物学特征, 迁飞轨迹计算基于以下迁飞特征和参数: (1) 草地贪夜蛾在高空顺风迁飞 (Wolf *et al.*, 1995; Nagoshi *et al.*, 2009), 暂不考虑定向偏角 (Li *et al.*, 2019); (2) 自身飞行速度设置为 3.0 m/s (Westbrook, 2008; Li *et al.*, 2019); (3) 夜蛾类昆虫夜间飞行, 傍晚起飞, 次日黎明降落 (齐国君等, 2013; Wang *et al.*, 2017), 根据 4 月华南地区日出日落时间, 设置起飞时刻为 20:00 (BJT), 降落时刻为 06:00 (BJT), 每夜连续飞行 10 h; (4) 雷达观测表明蛾类昆虫的飞行高度通常在风速 > 10 m/s 的低空急流高度 (Johnson *et al.*, 1987; Wolf *et al.*, 1990; Westbrook *et al.*, 2016), 本研究设置 8 个飞行高度, 分别为距海平面高度 500、750、1 000、1 250、1 500、1 750、2 000、2 250 m (Li *et al.*, 2019); (5) 飞行低温阈值为 13.8℃ (Hogg *et al.*, 1982), 当高空气温低于该值时轨迹停止计算; (6) 草地贪夜蛾可飞行 1~3 个夜晚, 连续多个夜晚飞行时, 以前一夜的轨迹终点作为次日起飞的起点 (吴秋琳等, 2019a; Li *et al.*, 2019)。

根据高空的温度、气流场和上述生物学参数进行轨迹分析, 获得迁飞轨迹后, 还要根据生物学特性、地形或寄主等因子进行筛选, 才能得到有效的迁飞轨迹 (齐国君等, 2013)。有效迁飞轨迹的判定标准如下: (1) 轨迹终止点的时刻必须符合草地贪夜蛾的起飞节律; (2) 轨迹终止点必须在农作物种植区; (3) 该区域有草地贪夜蛾的发生, 且能提供迁出虫源。

2 结果与分析

2.1 虫情资料分析及迁入时间推算

2019 年 4 月 23 日, 广东省广州市增城区首次

确认发现草地贪夜蛾侵入, 在棠厦村和蔡村玉米地发现其危害玉米, 发生面积约为 100 亩。田间调查数据表明, 入侵草地贪夜蛾的幼虫龄期为 2 龄~5 龄, 以高龄幼虫为主, 未发现成虫、卵和蛹, 发生地百株虫量为 2.3 头, 为害株率为 8.3% (广东省农业有害生物预警防控中心, 2019)。按幼虫发育历期推算, 前推 10~15 天较为合理, 推测增城区 4 月 23 日发现的草地贪夜蛾幼虫可能是 4 月上中旬 (4 月 8 日-13 日) 迁入的成虫种群所繁育。

2.2 东南亚与华南地区 4 月上旬天气背景场变化动态

4 月 8 日 850 hPa 高度上, 受西太平洋副热带高压的控制, 8 m/s 以上的强西南气流一直维系并贯穿越南北部、华南地区, 广西及广东大部分地区风速达 12 m/s 以上, 部分地区西南低空急流十分强势, 最大风速甚至超过了 16 m/s (图 1 A-a); 4 月 9 日, 来自南海的偏南气流与北风辐合形成辐合带, 在广东中部位置形成风切变 (图 1 A-b), 且南海、西太平洋上空出现反气旋天气, 导致增城区 950~800 hPa 高度上出现大量下沉气流 (图 1 C-b), 这对草地贪夜蛾的降落十分有利; 4 月 10 日, 8 m/s 以上西南气流继续覆盖越南及华南大部 (图 1 A-c), 南部暖湿气流与北部冷空气在此交汇, 形成强烈的对流天气, 在两广中南部地区出现一条狭长的降雨带, 其中增城区夜间累计降雨量达 13.61 mm, 这种天气条件有利于草地贪夜蛾的降落 (图 1 B-c); 4 月 11-13 日, 华南地区上空偏南气流盛行, 大部分地区风速达 8 m/s 以上 (图 1 A-d; A-e; A-f), 4 月 11 日广东省出现较大范围的降雨, 其中增城区夜间累计降雨量为 11.06 mm (图 1 B-d), 且 4 月 12 日和 13 日增城区 950~800 hPa 高度上出现大量下沉气流 (图 1 C-e; C-f), 也有利于草地贪夜蛾的降落, 同时, 这些天气也不利于草地贪夜蛾再次外迁, 可能会导致草地贪夜蛾迁入种群滞留在本地为害。

由此可见, 4 月 8-13 日, 越南北部及华南地区上空存在草地贪夜蛾远距离迁飞降落的大气动力学环境, 西南方向的低空急流为草地贪夜蛾的远距离迁飞提供了运载气流, 而风切变、降雨和下沉气流也为草地贪夜蛾的迫降提供了便利条件。

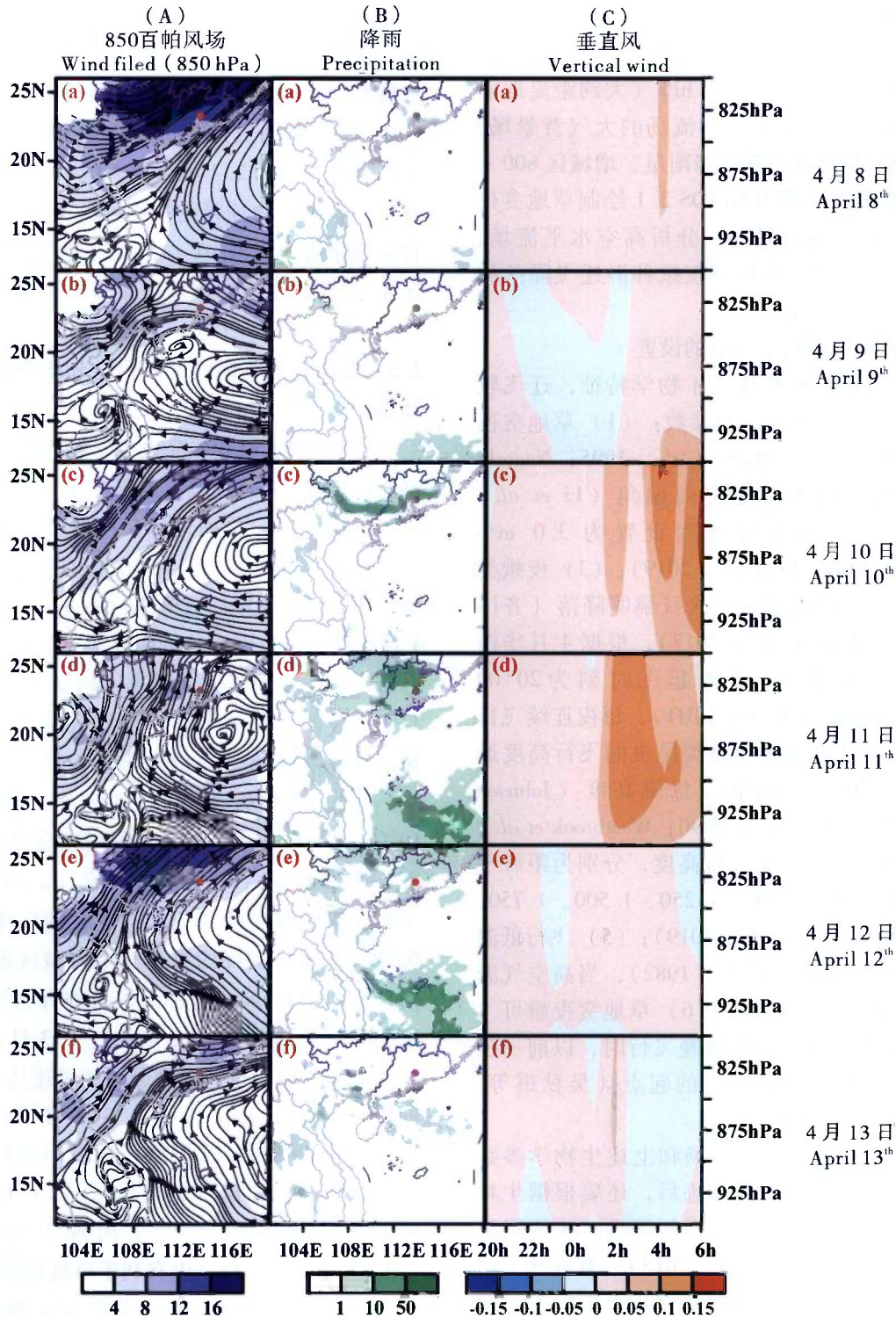


图 1 2019 年 4 月 8 - 13 日 20:00 - 06:00 东南亚与华南地区的大气环流背景场

ig.1 Atmospheric circulation field during 20:00 to 06:00 between South China and Southeast Asia from April 8th to April 13th, 2019
 注: (A) 850 hPa 水平平均风场的模拟流线和等值线 (阴影为风速, 单位 m/s); (B) 模拟累计降雨量 (单位 mm); (C) 增城区 800 - 950 hPa 垂直风速 (单位 m/s)。红色圆形表示增城区。Note: (A) The simulated streamline and isotach of horizontal average wind fields at 850 hPa (The shade area represents wind speed, m/s); (B) The simulated accumulated precipitation (mm); (C) Vertical velocity (m/s) from 800 to 950 hPa in Zengcheng district (m/s). Red circle indicates Zengcheng District.

2.3 增城区草地贪夜蛾的回推轨迹分析

根据有效迁飞轨迹的判定标准, 4月8日、11日、12日、13日草地贪夜蛾的回推轨迹终点大部分位于南海或海南省, 为无效迁飞轨迹(图2 a; d; e; f)。回推轨迹分析结果表明, 增城区草地贪夜蛾迁入种群的有效虫源地主要分布在越南及老挝北部(图2 b; c), 具体迁飞路径为: 一是4月7日傍晚, 老挝及越南北部地区的草地贪夜蛾迁出种群起飞后, 在1 500–2 250 m高度上随西南气流向东北方向迁飞, 4月8日清晨降落于越南北部, 4月8日傍晚, 该种群再次起飞, 随西南气流向东北方向迁飞, 于4月9日清晨降落于广西东部, 傍晚再次起飞, 顺风飞行至广东中部, 此时广东省中部高空出现风切变(图1 A–b), 且反气

旋天气形成下沉气流(图1 C–b), 草地贪夜蛾迁飞种群受风切变和下沉气流的影响降落于增城区(图2 b); 二是4月8日傍晚, 越南北部地区的草地贪夜蛾迁出种群起飞后, 在2 000–2 250 m高度上随西南气流向东北方向迁飞, 4月9日清晨降落于广西南部沿海地区, 4月9日傍晚, 该迁出种群再次起飞随西南气流迁飞, 于4月10日清晨降落于广东西南部地区, 傍晚再次起飞, 顺风飞行, 受大范围降雨影响(图1 B–c), 草地贪夜蛾随之降落于增城区(图2 c)。经筛选, 仅4月9–10日存在草地贪夜蛾迁入的有效轨迹, 有效虫源地分布在越南及老挝北部, 虫源地草地贪夜蛾种群起飞后经过3晚飞行可降落于增城区(图2 b; c)。

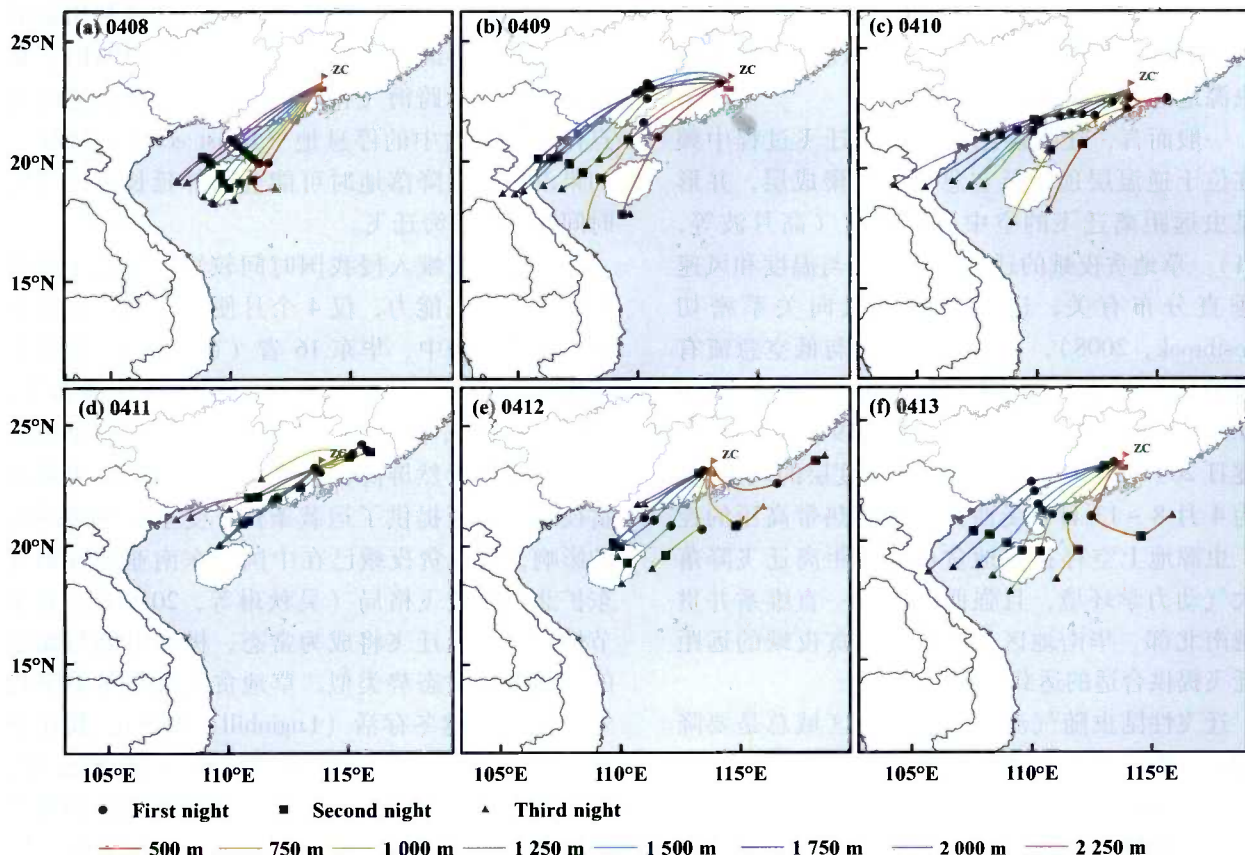


图2 2019年4月8–13日增城区草地贪夜蛾的回推轨迹分析

Fig. 2 The backward trajectories of *Spodoptera frugiperda* in Zengcheng district from April 8th to April 13th, 2019

3 结论与讨论

草地贪夜蛾的远距离迁飞特性、区域性大范围的迁移为害给其监测、预警与防控工作带来了很大难度, 而明确其虫源地分布、迁飞格局及季

节性环流背景场对指导其测报及防控具有重要意义。轨迹分析法(trajjectory analysis)是目前研究昆虫迁飞行之有效的一种工具, 基于WRF模式的昆虫迁飞轨迹分析法已广泛应用于黏虫 *Mythimna separata*、稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis*、褐飞虱 *Nilaparvata lugens* 等多种迁飞性害虫的迁飞轨

迹模拟 (齐国君等, 2013; 胡高等, 2014; Wang *et al.*, 2017; Ma *et al.*, 2017)。昆虫体型较小, 无法依靠自身飞行能力来实现远距离迁飞 (Drake & Gatehouse, 1995), 但又不同于惰性粒子, 昆虫具有主动乘风飞行行为和主动选择最适风温场的能力 (翟保平和张孝羲, 1993), 较空中惰性粒子可随风完成更远距离的迁飞。本研究在模拟草地贪夜蛾的迁飞轨迹时考虑了其自身飞行能力, 设置为 3.0 m/s (Li *et al.*, 2019), 并设置了起飞降落时间、续航时间、飞行高度、迁飞次数等参数, 明确了广东省草地贪夜蛾迁入种群的有效虫源地分布在越南及老挝北部, 而越南和老挝在 3 月初已经发现草地贪夜蛾 (全国农业技术推广服务中心, 2019), 经过一代繁殖, 完全可以在 4 月上旬为广东省增城区的迁入提供有效虫源, 这也与推算的幼虫发育历期相吻合, 一定程度上说明本研究虫源地的分布结果较为可靠。

一般而言, 迁飞性昆虫在高空迁飞过程中频频在位于逆温层顶的低空急流中集聚成层, 并形成昆虫远距离迁飞的空中高速通道 (高月波等, 2011)。草地贪夜蛾的迁飞模式主要与温度和风速的垂直分布有关, 迁飞方向与风向关系密切 (Westbrook, 2008), 其远距离迁飞与低空急流有着极其密切的联系 (Johnson *et al.*, 1987; Wolf *et al.*, 1990)。本研究通过分析 2019 年 4 月上中旬逐日 20:00 至 06:00 850 hPa 高度层的风温场, 认为 4 月 8-13 日, 受西太平洋副热带高压的控制, 虫源地上空存在草地贪夜蛾远距离迁飞降落的大气动力学环境, 且强西南气流一直维系并贯穿越南北部、华南地区, 可为草地贪夜蛾的远距离迁飞提供合适的运载气流。

迁飞性昆虫随气流迁移到一定区域总是要降落的, 一类是昆虫个体间飞行力的差异使其飞行持续时间参差不齐, 运行过程中不断有一些个体终止飞行而降落, 从而表现为空中种群的密度随着迁出距离的增加而渐减 (翟保平和张孝羲, 1993), 如程遐年等 (1979) 将褐飞虱的降落区依次划分为主降区、突增区、波及区; 另一类是外界环境因素, 一些特定的天气系统和天气过程会迫使空中虫群集聚, 进而中途迫降, 形成局地大发生种群 (胡高等, 2007), 其中下沉气流的迫降和雨水的冲击是促使空中虫群大规模集中降落的主要原因 (齐国君等, 2011)。本研究通过分析 4 月上旬天气背景场变化动态, 认为风切变、降雨

和下沉气流均十分有利于草地贪夜蛾的迫降, 其中风切变和下沉气流主要影响了 4 月 9 日夜间降虫, 大范围降雨主要影响了 4 月 10 日夜间降虫, 而持续的降雨不利于草地贪夜蛾再次外迁, 导致草地贪夜蛾迁入种群滞留在当地定殖为害。

本研究设置了距海平面 500、750、1 000、1 250、1 500、1 750、2 000、2 250 m 共计 8 个飞行高度参数, 通过有效轨迹筛选认为飞行高度参数设在 1 500 m 以上的轨迹落点较为合理, 这是由于草地贪夜蛾在空中的运行高度不仅与高空的风温场有直接的关系, 也与迁飞季节、地形地貌等密切相关 (Wolf *et al.*, 1990; Westbrook *et al.*, 2016)。此外, 海捕试验证实了草地贪夜蛾具有跨越墨西哥湾迁飞的能力 (Sparks *et al.*, 1986; Johnson *et al.*, 1987), 在跨海迁飞时可利用石油平台休息后再继续飞行 (Baust *et al.*, 1981), 草地贪夜蛾实际跨海飞行时, 可能会选择合适的地点作为迁飞途中的停息地 (Baust *et al.*, 1981), 如果没有合适降落地时可能会选择延长单次飞行时间以完成跨海迁飞。

草地贪夜蛾入侵我国时间较短, 但由于其具有远距离迁飞能力, 仅 4 个月便已迁飞扩散到华南、西南、华中、华东 16 省 (市、区)。亚洲东部地处季风带, 是一个典型的迁飞场 (潘蕾等, 2014; 张志涛, 1992), 沿途没有足以阻挡草地贪夜蛾迁飞的天然屏障, 春夏季的偏南气流为草地贪夜蛾的北迁提供了运载条件, 受东亚季风环流的影响, 草地贪夜蛾已在中国及东南亚地区形成东扩北进的迁飞格局 (吴秋琳等, 2019b), 其季节性南北往返迁飞将成为常态, 极有可能与黏虫的迁飞及发生态势类似。草地贪夜蛾在冬季平均气温 10℃ 可越冬存活 (Luginbill, 1928), 其在华南及云南地区可终年越冬繁殖 (杨普云等, 2019), 次年北迁为害, 此外, 东南亚地区的越冬虫源也会源源不断的迁入 (Li *et al.*, 2019)。因此, 东亚季风环流对大尺度迁飞扩散的草地贪夜蛾的预警与防控十分重要, 华南及云南越冬区应成为我国草地贪夜蛾防控的主战场。

草地贪夜蛾入侵后, 其远距离迁飞性受到了广泛关注, 已有研究预测了东南亚及华南地区草地贪夜蛾虫源的季节性迁飞路径 (吴秋琳等, 2019a; 2019b; Li *et al.*, 2019), 且与目前的发生趋势基本一致。本研究仅就广东省增城区草地贪夜蛾的迁飞路径及气象背景场进行了个例分析,

但由于草地贪夜蛾的迁入动态及虫源分布是极随机的, 今后仍需要通过更长时间跨度、更大空间尺度的个例分析, 以便从中提取可预测的信息来阐明其迁飞规律, 为异地测报与综合防控提供依据。

致谢: 中国农业科学院植物保护研究所吴秋琳博士为本文提出宝贵意见, 在此深表谢意。

参考文献 (References)

- Baust JG, Benton AH, Aumann GD. The influence of off-shore platforms on insect dispersal and migration [J]. *Bulletin of the Entomological Society of America*, 1981, 27 (1): 23-25.
- Casmuze A, Juárez ML, Socías MG, et al. Revisión de los hospederos del gusano cogollero del maíz, *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) [J]. *Revista de la Sociedad Entomológica Argentina*, 2010, 69 (3-4): 209-231.
- Cheng XN, Chen RC, Xi X, et al. Studies on the migrations of brown planthopper *Nilaparvata lugens* Stål [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 1979, 22 (1): 1-21. [程遐年, 陈若麓, 习学, 等. 稻褐飞虱迁飞规律的研究 [J]. 昆虫学报, 1979, 22 (1): 1-21]
- Cock MJW, Beseh P K, Buddie AG, et al. Molecular methods to detect *Spodoptera frugiperda* in Ghana, and implications for monitoring the spread of invasive species in developing countries [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7 (1): 4103.
- Drake VA, Gatehouse AG. Insect Migration: Tracking Resources Through Space and Time [M]. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 1995, 478.
- 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]. (2018-06-28) [2019-05-07]. <http://www.fao.org/news/story/en/item/1142085/icode/>.
- Gao YB, Lei YH, Hu G, et al. Stratification mechanism of migratory insects during flying at high altitude [EB/OL]. Beijing: China Science and Technology Papers Online, (2011-03-14) [2019-05-07]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201103-543>. [高月波, 雷勇辉, 胡高, 等. 迁飞过程中空中虫群的成层机制 [EB/OL]. 北京: 中国科技论文在线, (2011-03-14) [2019-05-07]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201103-543>]
- 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.
- Guangdong Forecasting and Control Center of Agricultural Pests. Warning of the occurrence and damage of Fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* [R]. *Crop Disease and Pest Information*, 2019, 8, 2019-04-26. [广东省农业有害生物预警防控中心. 警惕草地贪夜蛾发生危害 [R]. 农作物病虫害情报, 2019, 8, 2019-4-26]
- Guo JF, Zhao JZ, He KL, et al. Potential invasion of the crop-devastating insect pest fall armyworm *Spodoptera frugiperda* to China [J]. *Plant Protection*, 2018, 44 (6): 1-10. [郭井菲, 赵建周, 何康来, 等. 警惕危险性害虫草地贪夜蛾入侵中国 [J]. 植物保护, 2018, 44 (6): 1-10]
- Hogg DB, Pitre HN, Anderson RE. Assessment of early-season phenology of the fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) in Mississippi [J]. *Environmental Entomology*, 1982, 11 (3): 705-710.
- Hu G, Wu QL, Wu XW, et al. Outbreak mechanism of second generation armyworms in northeastern China: A case study in 1978 [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2014, 51 (4): 927-942. [胡高, 吴秋琳, 武向文, 等. 东北二代粘虫大发生机制: 1978 年个例分析 [J]. 应用昆虫学报, 2014, 51 (4): 927-942]
- Hu G, Bao YX, Wang JQ, et al. Case studies on the landing mechanisms of the brown planthoppers *Nilaparvata lugens* (Stål) [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27 (12): 5068-5075. [胡高, 包云轩, 王建强, 等. 褐飞虱的降落机制 [J]. 生态学报, 2007, 27 (12): 5068-5075]
- Hu G. Three-dimensional trajectory calculation software of migratory insects based on Weather Research and Forecasting (WRF) model [P]. 2015SR090706, 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 [P]. 2015SR090706, 2015-05-26]
- IITA. Fall armyworm has reached the Indian subcontinent. [EB/OL]. (2018-08-04) [2019-05-07]. <http://www.iita.org/news-item/fall-armyworm-has-reached-the-indian-subcontinent/>.
- Jiang YY, Liu J, Zhu XM. Analysis on the occurrence dynamics of invasion and future trend of fall armyworm *Spodoptera frugiperda* in 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]
- Johnson SJ. Migration and the life history strategy of the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* in the western hemisphere [J]. *International Journal of Tropical Insect Science*, 1987, 8 (4-5-6): 543-549.
- 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/OL]. bioRxiv, (2019-05-02) [2019-05-07]. <https://www.biorxiv.org/content/10.1101/625632v1>.
- Luginbill P. The fall armyworm [R]. *USDA Technology Bulletin*, 1928, 34: 91.
- Ma J, Wang YC, Hu YY, et al. Brown planthopper *Nilaparvata lugens* (Stål) was concentrated at the rear of the typhoon Soudelor in Eastern China in August 2015 [J]. *Insect Science*, 2017, 25 (5): 916-926.
- Nagoshi RN, Goergen G, Tounou KA, et al. Analysis of strain distribution, migratory potential, and invasion history of fall armyworm populations in northern Sub-Saharan Africa [J]. *Scientific reports*, 2018, 8 (1): 3710.
- Nagoshi RN, Meagher RL, Fleischer S. Texas is the overwintering source of fall armyworm in central Pennsylvania; Implications for migration into the northeastern United States [J]. *Environmental Entomology*,

- 2009, 38 (6): 1546–1554.
- National Agricultural Technology Extension Service Center. Notification of the occurrence and damage of fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* in China and surrounding countries [R]. *Plant Disease and Pest Information*, 2019, 13, 2019–04–04. [全国农业技术推广服务中心. 我国及周边国家草地贪夜蛾发生为害情况通报 [R]. 植物病虫害情报, 2019, 13, 2019–04–04]
- Pan L, Wu XW, Chen X, et al. Pied piper effect of the migration arena in northeastern China on *Mythimna separata* (Walker) [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2014, 51 (4): 974–986. [潘蕾, 武向文, 陈晓, 等. 东北迁飞场对粘虫的 Pied piper 效应 [J]. 应用昆虫学报, 2014, 51 (4): 974–986]
- Pashley DP. Host-associated genetic differentiation in fall army worm (Lepidoptera: Noctuidae): A sibling species complex? [J]. *Annals of the Entomological Society of America*, 1986, 79 (6): 898–904.
- Qi GJ, Lv F, Gao Y, et al. Analysis of a migration process and the source population of *Cnaphalocrocis medinalis* (Guenée) (Lepidoptera: Pyralidae) in 2010 [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2011, 54 (10): 1194–1203. [齐国君, 芦芳, 高燕, 等. 稻纵卷叶螟 2010 年的一次迁飞过程及其虫源分析 [J]. 昆虫学报, 2011, 54 (10): 1194–1203]
- Qi GJ, Lu LH. Invasion status and geographic distribution patterns of major alien harmful insects of farmlands and forests in Guangdong Province, China [J]. *Journal of Biosafety*, 2016, 25 (3): 161–170. [齐国君, 吕利华. 广东省农林重要外来有害昆虫的入侵现状及地理分布格局 [J]. 生物安全学报, 2016, 25 (3): 161–170]
- Qi GJ, Lv LH, Lan RQ, et al. Tracking the source regions of *Cnaphalocrocis medinalis* in the rice growing region of northern Guangdong Province [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2013, 50 (3): 601–607. [齐国君, 吕利华, 蓝日青, 等. 粤北稻区稻纵卷叶螟的虫源地分析 [J]. 应用昆虫学报, 2013, 50 (3): 601–607]
- Rwomushana I, Bateman M, Beale T, et al. Fall armyworm: Impacts and Implications for Africa [R]. *Evidence Note Update*, October 2018. Report to DFID. Wallingford, UK: CAB International, 2018.
- Sharanabasappa, Kalleshwaraswamy 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, Jackson RD, Carpenter JE, et al. Insects captured in light traps in the gulf of Mexico [J]. *Annals of the Entomological Society of America*, 1986, 79 (1): 132–139.
- Sparks AN. A review of the biology of the fall Armyworm [J]. *The Florida Entomologist*, 1979, 62 (2): 82–87.
- Stokstad E. New crop pest takes Africa at lightning speed [J]. *Science*, 2017, 356 (6337): 473–474.
- 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 L, Chen KW, Zhong GH, et al. Progress for occurrence and management and the strategy of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* (Smith) [J/OL]. *Journal of Environmental Entomology*. (2019–05–20) [2019–05–24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1640.Q.20190523.1748.004.html>. [王磊, 陈科伟, 钟国华, 等. 重大入侵害虫草地贪夜蛾发生危害、防控研究进展及防控策略探讨 [J/OL]. 环境昆虫学报. (2019–05–20) [2019–05–24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1640.Q.20190523.1748.004.html>]
- Wang Z, Qi GJ, Lv LH, et al. Analysis of the source areas of early immigrant white-backed planthopper *Sogatella furcifera* (Horváth) in Guangdong Province [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2011, 48 (5): 1253–1259. [王政, 齐国君, 吕利华, 等. 广东白背飞虱早期迁入种群的虫源地分析 [J]. 应用昆虫学报, 2011, 48 (5): 1253–1259]
- 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.
- Westbrook JK. Noctuid migration in Texas within the nocturnal aerocological boundary layer [J]. *Integrative and Comparative Biology*, 2008, 48 (1): 99–106.
- Wolf WW, Westbrook JK, Raulston J, et al. Recent airborne radar observations of migrant pests in the United States [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 1990, 328 (1251): 619–630.
- Wolf WW, Westbrook JK, Raulston JR, et al. Radar observations of orientation of noctuids migrating from corn fields in the Lower Rio Grande Valley [J]. *Southwestern Entomologist Supplement* (USA), 1995, 18: 45–61.
- 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*, 2019b, 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, 2019b, 45 (3): 1–9]
- Wu QL, Jiang YY, Wu KM. Analysis of migration routes of fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) from Myanmar to China [J]. *Plant Protection*, 2019a, 45 (2): 1–9. [吴秋琳, 姜玉英, 吴孔明. 草地贪夜蛾缅甸虫源迁入中国的路径分析 [J]. 植物保护, 2019a, 45 (2): 1–9.]
- Yang PY, Zhu XM, Guo JF, et al. Strategy and advice for managing the fall armyworm in China [J/OL]. *Plant Protection*. (2019–05–25) [2019–05–29]. <https://doi.org/10.16688/j.zwbh.2019260>. [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/OL]. 植物保护. (2019–05–25) [2019–05–29]. <https://doi.org/10.16688/j.zwbh.2019260>]
- 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]
- 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]