

2019 年海南省草地贪夜蛾迁入 路径及虫源分析初探*

卢 辉^{1**} 张浩文^{2,3} 吕宝乾^{1***} 唐继洪¹ 邱海燕¹ 张起恺¹

(1. 中国热带农业科学院环境与植物保护研究所, 农业农村部热带作物有害生物综合治理重点实验室,
海南省热带农业有害生物监测与控制重点实验室, 海口 571101; 2. 中国农业科学院植物
保护研究所, 北京 100193; 3. 中国农业科学院国家南繁研究院, 三亚 572000)

摘 要 【目的】明确草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 迁入海南省的虫源地和迁入路径, 旨在为海南省草地贪夜蛾的预测预报提供科学依据。【方法】基于 2019 年海口市草地贪夜蛾虫情数据, 采用 WRF 模式中昆虫三维轨迹分析程序, 结合草地贪夜蛾的飞行行为参数和气象数据, 模拟了海南草地贪夜蛾的迁飞路径, 并分析了气象背景场。【结果】2019 年, 草地贪夜蛾进入海南的迁飞时间集中在 4 月 15-20 日左右; 此时间段, 越南的西南风及华南对流层底层的急流为草地贪夜蛾的迁飞提供了携带气流, 强对流引发了降雨和风向切变, 高空的空气冷却后向下运动, 为草地贪夜蛾的下降提供了有利条件; 草地贪夜蛾在 4 月 15-17 日具备有效的迁飞路径, 海南省海口市的入侵虫源主要来自越南和广东北部, 副热带高压系统、降水和风的模式促使了草地贪夜蛾进入海南。【结论】本研究初步明确了 2019 年草地贪夜蛾入侵海南的最早时间及虫源分布, 为海南省草地贪夜蛾的监测、预警及综合防控提供了理论参考。

关键词 草地贪夜蛾; 海南省; 迁飞路径; 轨迹分析

Preliminary study of the migration path and source areas of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* in Hainan province in 2019

LU Hui^{1**} ZHANG Hao-Wen^{2,3} LÜ Bao-Qian^{1***} TANG Ji-Hong¹
QIU Hai-Yan¹ ZHANG Qi-Kai¹

(1. Environment and Plant Protection Institute, Chinese Academy of Tropical Agriculture Sciences, Key Laboratory of Integrated Pest Management on Tropical Crops, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Hainan Key Laboratory for Monitoring and Control of Tropical Agricultural Pests, Haikou 571101, China; 2. Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China; 3. National Nanfan Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Sanya 572000, China)

Abstract 【Objectives】To clarify the source population and migration pattern of *Spodoptera frugiperda* migrating into Hainan province, and provide a scientific basis for predicting the presence of *S. frugiperda* in Hainan. 【Methods】Using data on *S. frugiperda* collected in Haikou city in 2019, the WRF three-dimensional, trajectory-analysis program, combined with the flight behavior parameters *S. frugiperda* and relevant meteorological data, were used to analyze the migratory path of this species in Hainan. Weather parameters during the migration were also simulated and analyzed. 【Results】*S. frugiperda* migrated into Hainan in 2019 mainly from the 15th to the 20th April. During this period, southwesterly winds in Vietnam and a low-level jet-stream in southern China provided the carrier airflow for the migration, whereas strong convection rainfall, wind shear and downdraft forced the landing of migrating insects. There was an effective flight path of *S.*

*资助项目 Supported projects: 国家重点研发计划 (2021YFD1400700); 海南省国际科技合作研发项目 (GHYF2022002); 海南省重大科技计划项目 (ZDKJ202002)

**第一作者 First author, E-mail: aaluhui@163.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: lvbaoqian@hotmail.com

收稿日期 Received: 2022-09-21; 接受日期 Accepted: 2023-04-12

frugiperda from the 15th to the 17th of April, which allowed it to invade Haikou city, Hainan province. The source population was in Vietnam and northern Guangdong. Subtropical high pressure, precipitation and wind patterns led to the migration of this population to Hainan. **[Conclusion]** This preliminarily study has clarified the earliest migration of *S. frugiperda* in southern Hainan in 2019 and the source population for this migration.

Key words *Spodoptera frugiperda*; Hainan province; migratory route; trajectory analysis

草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* (Smith) 属于鳞翅目夜蛾科昆虫, 又称秋粘虫, 原产于美洲亚热带及热带地区, 是全球重要的迁飞性害虫 (Nagoshi and Meagher, 2008; 吴孔明, 2020)。草地贪夜蛾具有强大的迁飞能力, 在适宜的气象条件下, 可以在 30 h 内飞行 1 600 km 的距离, 它可以从美国南部的繁殖地迁飞到加勒比地区, 对当地玉米和禾本科作物造成破坏 (Johnson, 1987; Ashley *et al.*, 1989)。草地贪夜蛾的幼虫可取食玉米、高粱、水稻等 350 多种植物 (Montezano *et al.*, 2018), 能够可导致玉米减产、甚至绝收 (Hruska and Gould, 1997)。2016 年 1 月, 草地贪夜蛾从美洲入侵到非洲的尼日利亚, 两年内已蔓延到非洲的 44 个国家, 对当地的玉米产业造成了严重破坏 (杨普云等, 2019); 2018 年 5 月, 草地贪夜蛾越海入侵到印度, 随后在亚洲多个国家确认了入侵 (Sharanabasappa *et al.*, 2018; CABI, 2019)。2019 年 1 月, 在我国云南被发现为害玉米后, 草地贪夜蛾迅速传播到多个省份, 对农业生产构成了严重威胁 (姜玉英等, 2019)。昆虫迁飞过程中, 受各种大气过程的影响, 大气环流也为其提供了远距离迁徙的手段和物理环境 (翟保平和张孝羲, 1993), 明确季节性环流背景场对其的影响、虫源地分布及迁飞模式等, 对指导预测、监测及防控工作至关重要, 国内外的研究者对草地贪夜蛾虫源地和迁飞路径进行了广泛研究 (Westbrook *et al.*, 2016; 吴秋琳等, 2019b; Li *et al.*, 2020; Wu *et al.*, 2022), 这些研究有助于了解草地贪夜蛾在不同地区的迁飞过程, 有效预测和解释其迁徙模式的年际变化, 包括对气候变化和栽培模式的响应, 这些研究为草地贪夜蛾发生的预测预报提供了理论依据。

海南省位于我国最南端, 被南海环绕, 年平均气温 24 °C, 其属于热带季风气候和热带海洋

气候 (吴胜安等, 2006)。海南拥有全国独一无二的冬季生产条件, 鲜食玉米是海南冬季出岛果蔬之一, 年种植面积超过 2 万 hm^2 (林乙明, 2019), 此外, 它还是我国重要的育种和科研基地, 海南南部的育种和制种已成为加快玉米种质创新、品质提升和种子繁育的关键措施 (卢辉等, 2020a)。上述信息表明, 草地贪夜蛾在海南岛可以周年繁殖, 在适宜的气象条件下, 它极有可能向北迁飞, 构成威胁, 同时, 草地贪夜蛾在东南亚国家可周年危害, 如越南、菲律宾等 (刘杰等, 2020), 这些国家距离我国海南较近, 海南很可能成为草地贪夜蛾迁飞的主要通道之一。草地贪夜蛾于 2019 年 4 月 30 日首次在海南发现, 并逐步蔓延, 对海南玉米种植和反季节蔬菜生产构成了威胁。为明确该虫入侵海南时的来源地及气候变化引起的迁飞路线, 本研究采用 WRF (Weather research and forecasting model) 气候模式 (张浩文等, 2022), 对草地贪夜蛾入侵海南的过程中气象数据进行模型运算, 旨在为该虫在海南的发生规律和溯源提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 草地贪夜蛾发生数据

海南省草地贪夜蛾监测数据来源于安装在海口市龙华区的高空测报灯采集的数据, 该信息还结合了海南省植物保护总站的调查监测数据 (张曼丽等, 2022), 其它区域草地贪夜蛾发生危害数据来自于全国农业技术推广服务中心 (姜玉英等, 2019; 杨普云等, 2019)。

1.2 气象数据

预测预报的风场数据来自美国国家环境预报中心 NCEP (National Centers for Environmental Prediction) 和美国国家大气研究中心 NCAR

(National Center for Atmospheric Research)提供的 FNL (Final operational global analysis) 资料。该数据的空间分辨率为 $1.0^{\circ}\times 1.0^{\circ}$, 时间间隔为 6 h。

1.3 WRF 模式及参数设定

本研究气象背景场为 NCAR 和 NCEP 的 FNL 数据, 经过模型模拟后, 气象要素场以 $30\text{ km}\times 30\text{ km}$ 分辨率每小时输出, 作为迁飞模型所需的气象背景场。在本研究的具体模式参数设置见表 1。

表 1 WRF 模式参数设置
Table 1 Setting parameters of the WRF model

项目 Item	区域或方案 Domain or scheme
中心点 Lat. lon.	19°N, 110°E
网格数 Grid numbers	100×100
水平分辨率 Horizontal resolution	30 km
垂直层 vertical layer	32
投影 projection	Lambert
微物理过程 Microphysics scheme	Thompson
长波辐射方案 Long-wave radiation scheme	RRTMG
短波辐射方案 Short-wave radiation scheme	RRTMG
近地面层方案 Surface layer scheme	Monin-Obukhov
陆面/水面过程方案 Land/water surface scheme	Noah
边界层方案 Boundary layer scheme	Mellor-Yamada-Janjic
积云参数 Cumulus parameterization	Tiedtke
模拟时间 Simulation duration	12 h

1.4 迁飞期气象背景场

结合害虫幼虫龄期和发育历期分析出成虫迁入时间范围可能为 4 月 15-20 日。基于气象模型, 选择 2019 年 4 月 15-20 日的气象数据, 包括海口市 850 hPa(地面以上约 1 500 m)从 19:00 至次日 5:00 的数据, 800-950 hPa 垂直风速和 850 hPa 温度、19:00 至次日 5:00 的夜间平均温度, , 数据使用 Python 3.9.2 分析害虫飞行阶段

的天气背景、创建温度和风场图, 。对 4 月 15-20 日海口市 850 hPa 高度上的风向和风速进行分析, 评估不同风力对草地贪夜蛾迁飞的影响。

1.5 害虫生物学参数设置

根据害虫发育历期和幼虫龄期, 分析成虫迁入的潜在降落时间, 从海口市发现成虫为起始点, 分析计算害虫初始降落时间, 使用 4 月下旬逐日气象数据模拟其迁飞路径。根据害虫迁飞的生物学习性, 在轨迹分析中设置以下参数和特征: (1) 草地贪夜蛾的飞行速度设定为 3.0 m/s (Westbrook, 2008); (2) 轨迹飞行高度设定为 100- 1 000 m, 共划分 10 个梯度, 每隔 100 m 为一个梯度 (胡高, 2005; 吴秋琳等, 2019a) (3) 夜蛾类夜间飞行傍晚起飞, 第二天清晨降落 (Wang *et al.*, 2017), 根据海南 4 月日落时间, 起飞时间设为 20:00 (BJT), 降落时间为 06:00 (BJT), 每晚连续飞行 10 h, (Li *et al.*, 2020); (4) 飞行的低温临界值为 13.8 °C (Hogg *et al.*, 1982), 轨迹回推时低于此数值将停止模拟。(5) 草地贪夜蛾在高空不考虑定向偏角, 默认为顺风迁移 (Nagoshi *et al.*, 2009); ; 根据上述基于草地贪夜蛾迁飞生物学特征的设置, 并使用基于昆虫雷达监测的害虫迁飞路径模拟方法 (张浩文等, 2022), 进行轨迹分析。

2 结果与分析

2.1 迁飞时间推算

2019 年 4 月 30 日, 草地贪夜蛾最初在海南省最北部的海口市秀英区石山镇石岩村玉米田发现, 田间调查以 3-5 龄幼虫为主, 该区域 4 月平均气温为 25-33 °C 适合草地贪夜蛾生长, 根据发育历期推测入侵种群繁殖时间是在 4 月中旬前后 (4 月 15 日-20 日); 在海南西部沿海区域如东方市、澄迈县、昌江县和乐东县, 发现草地贪夜蛾的时间晚于 2-3 d; 最南部的三亚市发现草地贪夜蛾时间最晚, 于 5 月 11 日在崖州区抱古村发现, , 发生面积 0.27 hm^2 , 以高龄幼虫为主, 三亚草地贪夜蛾发现时间较晚可能与玉米种植时间和面积有关, 此区域玉米种植主要是为了

繁育目的,大多数地区这个时候已完成育种和种子生产的任务,玉米种植分布零散,种植面积较小,可能导致该地区草地贪夜蛾发现较晚。此外,草地贪夜蛾的发生与每月气温有关,在海口草地贪夜蛾最初的发现区域,4 月平均气温为 25-33 °C,然而,在 4 月 15 日-17 日,受弱冷空气和低层切变线的影响,气温下降至 24-29 °C,随后,在 4 月 18 日-25 日,该地区经历了连续 8 d 的高温,气温在 27-37 °C 之间波动,温度波动诱发了水平或垂直气流的运动,为草地贪夜蛾的迁飞提供了运载气流。

2.2 草地贪夜蛾迁入期温度场分析

对海南省上空 850 hPa 高空温度场分析,2019 年 4 月 15-16 日,华南地区出现大范围的强对流天气,南下冷空气和西南暖湿气流在海南上空汇合,导致海南岛北部地区发生强烈的对流天气,并伴有短时强降水,在海南大部分地区的高空,出现 18 °C 等温线(图 1: A-F),这种天气

条件有利于草地贪夜蛾降落;从 17 日开始,850 hPa 的温度开始上升,达到 20 °C;4 月 18-20 日,由于西南暖湿气流向北移动和受西太平洋副热带高压控制的东南气流汇合,温度持续升高,在此期间,等压面温度一直保持在 22 °C 以上,在此期间,海口市经历了 19 日和 20 日的高温天气。

2.3 草地贪夜蛾迁入期水平风场分析

4 月 15 日,850 hPa 高度上海口地区以偏南风为主,风速为 10-12 m/s(图 2: A),16 日起,海南北部受到偏西风影响(图 2: B),17 日,风向转为西南,海口上空风速增加到 12-14 m/s,偏南风有助于将暖湿空气输送到海口地区,从 15-17 日,受低空切变线和西南急流影响,海南经历了连续 3 次降雨过程,部分地区遭遇大雨和冰雹,为草地贪夜蛾种群从广东迁入到海南提供了运载气流(图 2: C);18-19 日早晨,受强西南气流影响,形成了一支低空强风带,海南大部

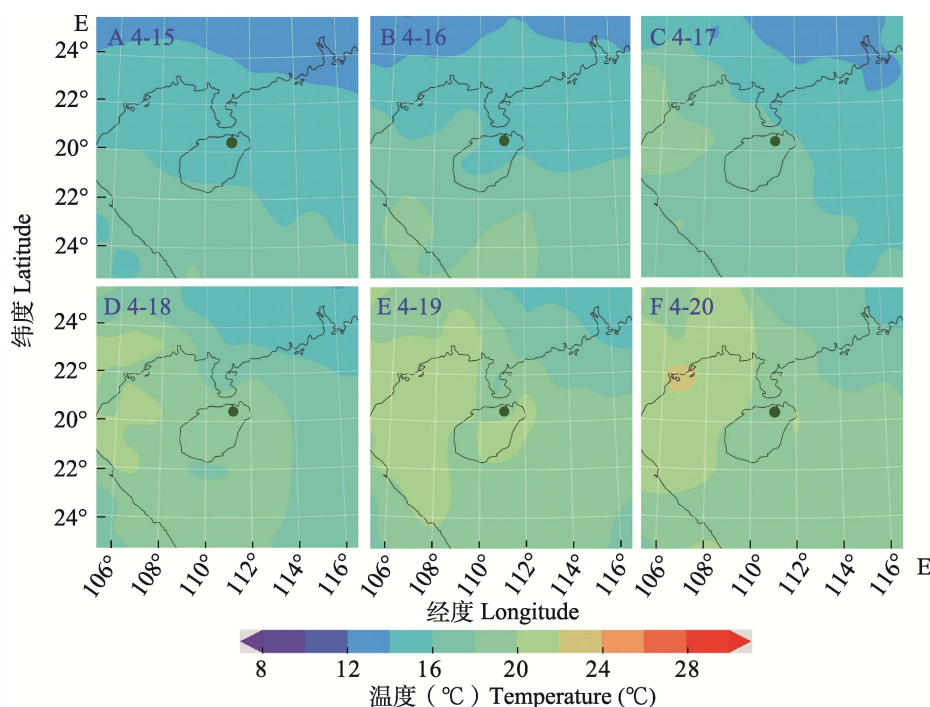


图 1 2019 年 4 月 15 日-20 日海南 850 hPa 温度场

Fig. 1 Temperature fields at 850 hPa in Hainan from April 15th-20th, 2019

A-F 分别代表 4 月 15 日-20 日。彩色阴影为温度(°C),绿色圆形表示海口市。

A-F indicate from the 15th to the 20th of April, respectively. The colored shading is the temperature (°C). The green circle represents Haikou city.

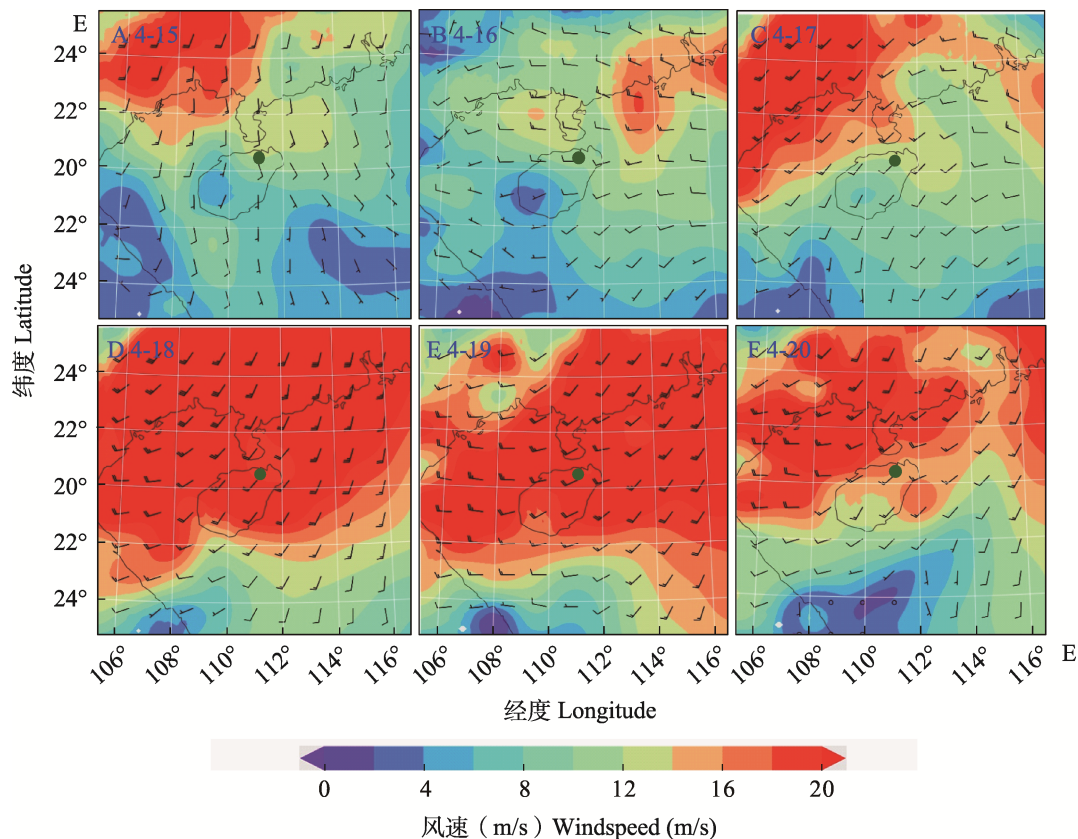


图 2 2019 年 4 月 15 日-20 日海南 850 hPa 高空夜间平均风场

Fig. 2 Average wind fields at 850 hPa in Hainan from April 15th-20th, 2019

A-F 分别代表 4 月 15 日-20 日。彩色阴影为风速 (m/s)，绿色圆形表示海口市。

A-F indicate from the 15th to the 20th of April, respectively. The colored shading is the wind speed (m/s), The green circle represents Haikou city.

分地区风速达 18 m/s 以上，甚至在一些地区超过了 20 m/s (图 2: D, E)；4 月 20 日，受西南海域偏西南气流的影响，海口区域风力减弱至 14-16 m/s (图 2: F)。由此可见，4 月 18-20 日，西南风非常强劲，为草地贪夜蛾种群从越南北迁至海南提供了有利的支持。

2.4 海南迁入虫源分析

草地贪夜蛾的回推轨迹表明迁入海口的种群主要来自越南及广东北部，包括 2 条路径，路径 1 代表海南的北部路径，4 月 15 日，草地贪夜蛾随偏南气流从广东北部迁出，经过广东南部地区，4 月 16，随着华南地区的冷暖空气相互作用，受东移高空槽和低层切变系统的影响，海南发生了强对流天气，反气旋天气形成下沉气流，导致了草地贪夜蛾种群向海南北部降落；路

径 2 代表海南的西部路径，4 月 16-17 日，草地贪夜蛾随越南西南的西南气流向东北方向迁飞，4 月 18-20 日，迁飞种群顺风飞行至海南，并在下沉气流和风切变的影响下降落在海口市周边 (图 1: E, F)。

根据海南省虫情动态分析，2019 年 5 月初为海南草地贪夜蛾大规模迁入期，结合草地贪夜蛾迁飞特征参数，对 2019 年 4 月中旬的迁飞进行顺推轨迹分析。结果表明，迁入海口的草地贪夜蛾繁殖 1 代后可向西北迁飞至越南北部，向南迁飞之海南中西部区域，为该地区其他位置提供虫源；迁入海南的草地贪夜蛾可为广西和云南提供虫源；而一部分草地贪夜蛾可向东北迁飞，为广东提供虫源。因此，4 月中旬迁入海口的草地贪夜蛾可继续南迁、北迁和西迁，为其他地区提供虫源。

3 结论与讨论

海南省属于草地贪夜蛾重要的繁殖区域和越冬害虫迁飞通道, 同时, 也是我国玉米反季节种植和育种制种地区, 明确草地贪夜蛾在海南的迁飞轨迹具有重要意义。本研究表明, 2019 年, 草地贪夜蛾于 4 月中下旬开始向海口市及海南北部地区迁入, 5 月初扩散至全省, 整体迁飞路径呈现两条轨迹, 一条由西南向北, 另一条由南向北, 均由西北向北部和西部扩散。这一模式与吴秋琳等 (2019a) 研究结果一致, 4 月, 随着气温开始回升, 来自孟加拉湾的西南暖湿气流向北输送进入我国, 这种气候条件使我国华南大部分地区高空盛行偏南风, 风速 (2-8) m/s, 超过了该虫自身的飞行速度, 这为其北迁提供了有利条件。本研究结果表明, 4 月中下旬强对流天气形成的环流场可将华南地区的草地贪夜蛾携带至海南北部地区, 鉴于广东省的草地贪夜蛾发生记录早于海南省 (齐国君等, 2019), 2019 年海南北部地区的部分虫源种群可能来源于广东; 此外, 从越南北上的低空急流引起了水平或垂直的气流运动, 为草地贪夜蛾入侵海南提供了运载气流, 而越南在 3 月初已经发现草地贪夜蛾, 经过一代繁殖后, 它可以在 4 月中下旬有效地成为草地贪夜蛾向海南迁飞的源头, 分析结果与实际虫害发生时间一致, 说明分析方法有效可行。作为海南草地贪夜蛾的主要来源地区, 广东在 2019 年 5 月初 (5 月 5 日-9 日) 调查到百株虫量为 (46-222) 头 (廖永林等, 2019), 2019 年 9 月中旬 (9 月 15 日-21 日), 越南的调查发现百株虫量为 (16-201) 头 (卢辉等, 2020b), 这两个密度均超过防治指标, 如果迁飞条件充分, 越南和广东都能为海南提供充足的草地贪夜蛾虫源。

草地贪夜蛾的迁飞过程和短时期内的大气因素密切相关 (Johnson, 1987; 陈辉等, 2020)。在本研究中, 对 4 月 15-17 日气流场的分析表明, 海南上空的副热带高压系统加强, 暖湿气流占主导地位, 导致海南地区的能量条件和水汽条件持续有利, 加上低层切变系统的影响, 海南连续出

现了 3 次强降雨过程, 降水形成了拖拽下沉气流, 为成虫在空中下降提供了有利条件 (Hu *et al.*, 2014); 在温场方面, 昆虫下降区东北侧 850 hPa 高度出现了低温屏障, 降雨和低温的结合有利于昆虫下降 (徐兰珍等, 2016; 包云轩等, 2018)。因此, 热力、大气动力和水分条件都有利于越南和广东的草地贪夜蛾种群迁入和下降, 华南地区自 4 月 15-17 日以来的特定天气系统和降雨过程可能导致了草地贪夜蛾种群的聚集, 随后, 它们可能被迫中途降落到海南北部地区 (海口), 而海南西部沿海地区 (东方、昌江、澄迈、乐东等地) 发现草地贪夜蛾的时间和海口相差 2-3 d, 从气流形成的条件来看有可能是从越南的强西南气流为草地贪夜蛾提供了远距离迁飞。

海南是我国和东南亚各国之间昆虫迁徙的中转站, 是连接南海诸多岛屿和草地贪夜蛾周年繁殖区的重要区域, 草地贪夜蛾的入侵和蔓延对海南农业生产造成威胁。海南草地贪夜蛾入侵后, 部分虫源继续向北、向西迁飞, 本研究用 2019 年的数据远不足以全面反映其迁飞路径。本课题组随后的调查发现, 海南省不同市县的草地贪夜蛾发生动态存在差异 (卢辉等, 2021; 唐继洪等, 2022)。根据我国农业农村部发布的《全国草地贪夜蛾防控方案》(2019 年 6 月), 海南省作为草地贪夜蛾周年繁殖区的最南端省份, 该虫的有效监测尤为重要今后对该虫的迁入迁出情况、发生动态、来源等要持续调查和分析验证, 才能更准确地掌握其在海南的发生规律。

致谢: 文章数据分析得到吴孔明院士团队的指导, 特此感谢。

参考文献 (References)

- Ashley TR, Wiseman BR, Davis FM, Andrews KL, 1989. The fall armyworm: A bibliography. *Florida Entomologist*, 72(1): 152-202.
- Bao YX, Shang J, Sun SS, Xie XJ, Lu MH, Liu WC, 2018. Source identification and meteorological analyses of the early immigration of *Nilaparvata lugens* into Yunnan province, China. *Acta Ecologica Sinica*, 38(16): 5621-5635. [包云轩, 尚洁, 孙思思, 谢晓金, 陆明红, 刘万才, 2018. 云南省褐飞虱早期迁

- 入虫源及其发生大气背景分析. 生态学报, 38(16): 5621–5635.]
- CABI, 2019. Fall armyworm portal. 2019-3-26. <https://www.cabi.org/isc/fallarmyworm>.
- Chen H, Wu MF, Liu J, Chen AD, Jiang YY, Hu G, 2020. 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, 2020. 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.]
- Hogg DB, Pitre HN, Anderson RE, 1982. Assessment of early-season phenology of the fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) in Mississippi. *Environmental Entomology*, 11(3): 705–710.
- Hruska AJ, Gould F, 1997. Fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) and *Diatraea lineolata* (Lepidoptera: Pyralidae): Impact of larval population level and temporal occurrence on maize yield in Nicaragua. *Journal of Economics Entomology*, 90(2): 611–622.
- Hu G, 2015. Three-dimensional trajectory calculation software of migratory insects based on Weather Research and Forecasting (WRF) model: 2015SR090706. 2015-05-26. [胡高, 2015. 基于WRF模式输出的迁飞昆虫三维轨迹计算软件. 2015SR090706. 2015-05-26.]
- 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.
- 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.]
- Johnson SJ, 1987. Migration and the life history strategy of the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* in the western hemisphere. *International Journal of Tropical Insect Science*, 8(4): 543–549.
- 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.
- Liao YL, Li CY, Huang SH, Pan ZP, Yang B, Chen JR, Wang LJ, Liu WL, Zhang YP, 2019. Survey on the prevalence and damage of *Spodoptera frugiperda* first invasive in Guangdong. *Journal of Environmental Entomology*, 41(3): 497–502. [廖永林, 李传瑛, 黄少华, 潘志萍, 杨斌, 陈嘉瑞, 王龙江, 刘伟玲, 章玉苹, 2019. 草地贪夜蛾首次入侵广东地区发生为害调查. 环境昆虫学报, 41(3): 497–502.]
- Lin YM, 2019. Discussion on green and high-yield cultivation techniques of fresh sweet corn in Hainan. *Bulletin of Agricultural Science and Technology*, 2019(7): 342–344. [林乙明, 2019. 海南鲜食甜玉米绿色高产栽培技术探讨. 农业科技通讯, 2019(7): 342–344.]
- Liu J, Jiang YY, Liu WC, Wu QL, Zeng J, Li XN, Ren BY, Jiang P, Zhao ZH, Wei QW, 2020. Overview of the prevention and control situation and strategies of *Spodoptera frugiperda* in eleven Asian countries. *China Plant Protection*, 40(2): 86–91. [刘杰, 姜玉英, 刘万才, 吴秋琳, 曾娟, 李潇楠, 任彬元, 姜培, 赵中华, 魏启文, 2020. 亚洲十一国草地贪夜蛾发生防控情况与对策概述. 中国植保导刊, 40(2): 86–91.]
- Lu H, Lv BQ, Liu H, Guo AP, Tang JH, Su H, 2020a. Risk analysis of regional pests in Hainan. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 40(S1): 38–42. [卢辉, 吕宝乾, 刘慧, 郭安平, 唐继洪, 苏豪, 2020a. 海南区域性有害生物的风险分析. 热带农业科学, 40(S1): 38–42.]
- Lu H, Tang JH, Lv BQ, He X, Chen Q, Su H, 2020b. Investigation on the occurrence of *Spodoptera frugiperda* in the north of Vietnam. *Plant Protection*, 46(2): 222–225. [卢辉, 唐继洪, 吕宝乾, 何杏, 陈琪, 苏豪, 2020b. 越南北部草地贪夜蛾发生情况调查. 植物保护, 46(2): 222–225.]
- Lu H, Tang JH, Lv BQ, He X, Su H, 2021. Investigation on the population dynamics of *Spodoptera frugiperda* in winter corn planting areas of Hainan. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 42(6): 1764–1769. [卢辉, 唐继洪, 吕宝乾, 何杏, 苏豪, 2021. 海南冬季玉米种植区草地贪夜蛾种群动态调查初报. 热带作物学报, 42(6): 1764–1769.]
- Montezano DG, Specht A, Sosa-gómez DR, Roquespecht VF, Sousa-silva JC, Paula-moraes SV, Peterson JA, Hunt TE, 2018. Host plants of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in the Americas. *African Entomology*, 26(2): 286–300.
- Nagoshi RN, Meagher RL, 2008. Review of fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) genetic complexity and migration. *Florida Entomologist*, 91(4): 546–554.
- Nagoshi RN, Meagher RL, Fleischer S, 2009. Texas is the overwintering source of fall armyworm in central Pennsylvania: Implications for migration into the northeastern United States. *Environmental Entomology*, 38 (6): 1546–1554.
- Qi GJ, Ma J, Hu G, Yu YH, Chen AD, Gao Y, Lv LH, 2019. Analysis of migratory routes and atmospheric features of newly invaded the 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, 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): 488–496.]
- Sharanabasappa D, Kalleshwaraswamy CM, Asokan R, Mahadeva Swamy HM, Maruthi M, Pavithra HB, Hegde K, Shivaray N, Prabhu ST, Goergen G, 2018. First report of the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae), an alien invasive pest on maize in India. *Pest Management in Horticultural Ecosystems*, 24(1): 23–29.
- Tang JH, Lu H, Lv BQ, 2022. Dynamic monitoring and analysis of *Spodoptera frugiperda* trapped by searchlight in Hainan. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 42(1): 51–55. [唐继洪, 卢辉, 吕宝乾, 2022. 海南草地贪夜蛾高空诱虫灯诱虫动态监测与分析. 热带农业科学, 42(1): 51–55.]
- Wang FY, Yang F, Lu MH, Luo SY, Zhai BP, Lim KS, McInerney CE, Hu G, 2017. Determining the migration duration of rice leaf folder (*Cnaphalocrocis medinalis* (Guenée)) moths using a trajectory analytical approach. *Scientific Reports*, 7: 39853.
- Westbrook JK, 2008. Noctuid migration in Texas within the nocturnal aeroecological boundary layer. *Integrative and Comparative Biology*, 48(1): 99–106.
- 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 MF, Qi GJ, Chen H, Ma J, Liu J, Jiang YY, Lee GS, Otuka A, Hu G, 2022. Overseas immigration of fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae), invading Korea and Japan in 2019. *Insect Science*, 29(2): 505–520.
- Wu QL, Jiang YY, Hu G, Wu KM, 2019a. Analysis on spring and summer migration routes of fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) from tropical and southern subtropical zones of China. *Plant Protection*, 45(3): 1–9. [吴秋琳, 姜玉英, 胡高, 吴孔明, 2019a. 中国热带和亚热带地区草地贪夜蛾春夏两季迁飞轨迹的分析. 植物保护, 45(3): 1–9.]
- Wu QL, Jiang YY, Wu KM, 2019b. Analysis of migration routes of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) from Myanmar to China. *Plant Protection*, 45(2): 1–6, 18. [吴秋琳, 姜玉英, 吴孔明, 2019b. 草地贪夜蛾缅甸虫源迁入中国的路径分析. 植物保护, 45(2): 1–6, 18.]
- Wu SA, Zhang YL, Yang JH, 2006. Asymmetric trend of maximum and minimum temperatures change in Hainan island. *Journal of Tropical Meteorology*, 22(6): 667–671. [吴胜安, 张永领, 杨金虎, 2006. 海南岛最高和最低气温的非对称变化. 热带气象学报, 22(6): 667–671.]
- Xu LZ, Chen AD, Zhao XQ, Zhai BP, 2016. Source areas and landing mechanisms of early immigrating white-backed planthoppers *Sogatella furcifera* (Horváth) in southeastern Yunnan. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 53(6): 1301–1316. [徐兰珍, 谌爱东, 赵雪晴, 翟保平, 2016. 滇东南地区白背飞虱早期迁入种群的虫源地与降落机制. 应用昆虫学报, 53(6): 1301–1316.]
- Yang PY, Zhu XM, Guo JF, Wang ZY, 2019. Strategy and advice for managing the fall armyworm in China. *Plant Protection*, 45(4): 1–6. [杨普云, 朱晓明, 郭井菲, 王振营, 2019. 我国草地贪夜蛾的防控对策与建议. 植物保护, 45(4): 1–6.]
- Zhai BP, Zhang XX, 1993. Behaviour 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 HW, Wu KM, Yang XM, 2022. A method for simulating pest migration paths based on insect radar monitoring. ZL202210757207.8. 2022-09-6. [张浩文, 吴孔明, 杨现明, 2022. 一种基于昆虫雷达监测的害虫迁飞路径模拟方法. ZL202210757207.8. 2022-09-6.]
- Zhang ML, Zeng QC, Zhou Y, Jiang YY, Li YX, 2022. Occurrence pattern and management strategies of *Spodoptera frugiperda* in Hainan province. *Plant Protection*, 48(1): 234–239. [张曼丽, 曾庆朝, 周洋, 姜玉英, 李元喜, 2022. 海南省草地贪夜蛾发生规律和防控策略初探. 植物保护, 48(1): 234–239.]