



我国最早发现为害地草地贪夜蛾的 入侵时间及其虫源分布*

陈 辉^{1**} 杨学礼^{2**} 谌爱东³ 李永川⁴
王德海⁴ 刘 杰⁵ 胡 高^{1***}

(1. 南京农业大学植物保护学院昆虫系, 南京 210095; 2. 云南省江城植保植检站, 江城 665900; 3. 云南省农业科学院农业环境资源研究所, 昆明 650205; 4. 云南省植保植检站, 昆明 650034; 5. 全国农业技术推广与服务中心, 北京 100125)

摘 要 【目的】2018 年 12 月 26 日本文作者在云南省江城宝藏乡玉米田中发现不明夜蛾类幼虫为害, 后经鉴定该虫为草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda*, 为我国首次发现草地贪夜蛾入侵为害。草地贪夜蛾将成为我国乃至亚洲东部地区的一种常发性迁飞性害虫, 而云南是境外虫源进入我国的第一站, 明确其入侵路径和来源, 对我国未来草地贪夜蛾的监测、预警和防控有重要意义。【方法】本文利用有效积温模型推算了草地贪夜蛾可能的迁入时间, 借助气象资料和昆虫轨迹模拟方法分析草地贪夜蛾迁入时的天气背景场, 并探究其潜在的虫源地分布。【结果】草地贪夜蛾迁入江城的时间为 11 月 21-23 日, 其虫源来自缅甸、泰国的交界区域。2018 年 11-12 月云南南部区域盛行东南风且风速较弱, 但 11 月 19-22 日期间出现的持续西南气流是草地贪夜蛾迁入我国的关键。【结论】本研究明确了草地贪夜蛾入侵我国的最早时间及其虫源分布, 为云南省乃至全国草地贪夜蛾监测预警和科学防控提供了一定的理论参考。

关键词 草地贪夜蛾; 虫源地; 轨迹分析; 入侵害虫

Immigration timing and origin of the first fall armyworms (*Spodoptera frugiperda*) detected in China

CHEN Hui^{1**} YANG Xue-Li^{2**} CHEN Ai-Dong³ LI Yong-Chuan⁴
WANG De-Hai⁴ LIU Jie⁵ HU Gao^{1***}

(1. Department of Entomology, College of Plant Protection, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. Plant Protection and Plant Quarantine Station of Jiangcheng County, Jiangcheng 665900, China; 3. Agricultural Environment and Resources Institute, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650205, China; 4. Plant Protection and Plant Quarantine Station of Yunnan Province, Kunming 650034, China; 5. China National Agro-Tech Extension and Service Center, Beijing 100125, China)

Abstract 【Objectives】Fall armyworm (FAW; *Spodoptera frugiperda*) caterpillars were first detected in China a corn field in Baozang Township, Jiangcheng County, Yunnan Province on December 26, 2018. This study aims to clarify the timing of this invasion and the origin of these first fall armyworm colonists. 【Methods】An effective accumulated temperature model was used to estimate the developmental period and time of migration of the first fall armyworm arrivals in China. Their potential origin was identified using a three-dimensional trajectory analytical approach, and the effect of weather conditions on their migration was also analyzed. 【Results】The first fall armyworms to arrive in China probably migrated from the border with Myanmar and Thailand to Jiangcheng between 21 and 23 November, 2018. The weak southeasterly winds that prevailed in southern Yunnan in November and December 2018 were unsuitable for windborne migration, but a continuous southwest

*资助项目 Supported projects: 国家重点研发计划 (2019YFD0300102); 云南省财政专项 (YAAS201902); 中央高校基本科研业务费专项 (KYZ201920); 国家自然科学基金资助项目 (31822043); 云南省重点研发计划 (2019IB007); 云南省创新团队 (202005AE160003)

**共同第一作者 Co-first authors, E-mail: 2019202044@njau.edu.cn; 993794968@qq.com

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

收稿日期 Received: 2020-03-13; 接受日期 Accepted: 2020-10-13

airflow between 19 and 22 November was conducive to migration from the border with Myanmar and Thailand to Jiangcheng.

[Conclusion] The estimated invasion time and origin of the first fall armyworms detected in China can inform integrated pest management strategies for this emerging pest.

Key words *Spodoptera frugiperda*; insect sources; trajectory analysis; invasive species

草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) 是原产于美洲热带及亚热带地区的重要农业害虫 (Johnson, 1987)。2016 年 1 月首次在非洲发现之后, 两年时间内便入侵了撒哈拉以南的几乎所有国家和地区 (Abrahams *et al.*, 2017; Stokstad, 2017; Early *et al.*, 2018); 2018 年 5 月进入印度后, 一路向东, 随后进入泰国、缅甸 (Ganiger *et al.*, 2018; IPPC, 2018, 2019)。同年 12 月 26 日, 本文作者在云南省普洱市江城宝藏乡的玉米田中发现不明夜蛾类幼虫。上报相关部门后, 经全国农业技术推广服务中心和中国农业科学院相关专家鉴定后, 2019 年 1 月 12 日, 我国正式确认草地贪夜蛾入侵我国 (全国农业技术推广服务中心, 2019; 杨学礼等, 2019)。随后不久, 云南省德宏、保山、临沧及普洱等地州的多个县市均发现草地贪夜蛾入侵 (Sun *et al.*, 2019; 赵雪晴等, 2019)。

草地贪夜蛾幼虫寄主植物范围广, 已知可为害超过 300 种植物 (Montezano *et al.*, 2018)。而玉米是草地贪夜蛾首选寄主, 该虫可造成 15%-73% 的玉米产量损失 (Hruska and Gould, 1997; Casmuz *et al.*, 2010)。我国是世界上第二大玉米生产国, 而玉米是我国种植面积最大、产量最大的粮食作物, 各省均有种植。2019 年该虫就已遍及我国大陆从南到北 26 个省 (市、自治区), 玉米受害面积超过 107 万 hm^2 (姜玉英等, 2019)。因此, 草地贪夜蛾无疑将对我国农业生产和粮食安全上构成巨大的威胁。

频繁的国际贸易被认为是草地贪夜蛾快速扩张入侵的重要原因 (Early *et al.*, 2018)。但是草地贪夜蛾具有远距离迁飞能力, 其成虫借助高空气流, 经多晚连续飞行, 迁飞距离可达数百上千公里 (Johnson, 1987; Westbrook *et al.*, 2016, 2019)。尽管草地贪夜蛾跨越大西洋由美洲进入非洲, 自然迁飞造成这种洲际间扩散的可能性较小, 但是却和它在非洲范围内的快速蔓延以及由

印度东进东南亚的入侵密切相关 (Rwomushana *et al.*, 2018)。已有研究亦表明我国草地贪夜蛾是其凭借强大的迁飞能力由缅甸入侵我国的 (Sun *et al.*, 2019; 吴秋琳等, 2019)。目前该虫在我国已然形成了北迁南回的季节性迁飞格局。陈辉等 (2020) 利用轨迹分析方法和有效积温模型模拟草地贪夜蛾的迁飞过程和发育进度, 提出了该虫在我国的迁飞路径和发生区划。然而, 我国首批被发现的草地贪夜蛾是何时入侵我国, 其虫源地在哪, 目前尚未有深入分析和报道。

江城是草地贪夜蛾入侵我国的第一发现地, 与越南、老挝两国接壤, 因李仙江、曼老江、勐野江三江环绕故名江城。境内河谷纵横, 多种迁飞性害虫经由此地迁入我国, 是我国草地贪夜蛾、稻飞虱等多种迁飞性害虫监测预警的前哨。本文基于有效积温模型通过计算草地贪夜蛾发育历期, 推算了江城草地贪夜蛾成虫的迁入时间; 并根据全球气象再分析数据, 运用基于 WRF (Weather Research and Forecasting Model) 中尺度气象模式的昆虫轨迹分析程序 (Wang *et al.*, 2017; Wu *et al.*, 2018; Ma *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2020), 探讨了首批被发现草地贪夜蛾的虫源, 以期明确首次入侵我国草地贪夜蛾的迁入时间、虫源地分布以及迁入时相关时间段的天气背景场, 希望能够对云南省乃至全国的草地贪夜蛾监测预警及源头治理提供指导。

1 材料与方法

1.1 气象数据来源

本文采用美国国家环境预报中心 (National Centers for Environmental Prediction, NCEP) 全球最终分析数据 (Final Operational Global Analysis data, FNL), 该数据时间分辨率为每 6 h 一次, 空间分辨率为 $1.0^\circ \times 1.0^\circ$ 。

1.2 草地贪夜蛾入侵时间推测

根据草地贪夜蛾幼虫各龄期所需有效积温(卵期及幼虫各龄期分别为 35.72、47.14、26.86、21.58、24.78、28.53、32.57 日·度)(Schlemmer, 2018),并结合草地贪夜蛾发现地对应时间段的地面温度,推测其成虫迁入到达和产卵时间(杨学礼等, 2019)。本文从 FNL 气象数据中提取 2:00、14:00 两个时刻距地面 2 m 的温度,来代表每日最低温度和最高温度,进而计算每日和累计有效积温来模拟草地贪夜蛾的发育进度。此外,事实上并不清楚草地贪夜蛾羽化后什么时候开始迁出、什么时间迁入云南省江城县宝藏乡以及迁入后过多久开始产卵,并且草地贪夜蛾可以持续产卵。为了探究其最大的可能性,本研究将成虫存活天数(约为 14 d)(何莉梅等, 2019)视为草地贪夜蛾可能迁入产卵的时间段。对 2018 年 12 月 26 日、2019 年 1 月 12 日调查发现的最低龄期、最高龄期幼虫分别推算可能入侵时间,并推算可能入侵时间是否存在重叠期。若存在重叠期,表明宝藏乡所发现的草地贪夜蛾极可能来自同一批次的迁入。

1.3 草地贪夜蛾可能虫源地分析

为了明确云南省江城县宝藏乡草地贪夜蛾可能的虫源地,本文采用了一种基于 WRF 模式输出的高时空分辨率气象背景场的轨迹分析方法。该方法可以综合考虑昆虫自身飞行能力,在多种昆虫中均有成功应用,如草地贪夜蛾、褐飞虱 *Nilaparvata lugens*、美洲棉铃虫 *Helioverpa zea*、粘虫 *Mythimna separata* (Hu et al., 2013; 胡高等, 2014; Wu et al., 2018; 陈辉等, 2020; Li et al., 2020)。该轨迹程序基于 FORTRAN 语言设计 (Hu et al., 2013; Wu et al., 2018),并在 CentOS 7.4 服务器平台运行 (IBM system ×3500 M4)。

1.3.1 WRF 模式 WRF 3.8 模式 (<https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/>) 的初始数据如降雨数据、温度数据等,均采用 FNL 数据。将气象数据输入 WRF 模式经数值模拟后,输出每小时一次的 30 km×30 km 格距气象要素场作为昆虫三维轨

迹分析程序所需要的高时空分辨率背景场。在本研究中, WRF 模式模拟区域中心为 (105°E, 20°N), 大小为 110×90 格点, 水平分辨率为 30 km, 设置了 30 个垂直层, 方案其他模拟参数与前人的研究方案相同 (Ma et al., 2019; 齐国君等, 2019, Li et al., 2020; 罗举等, 2020)。

1.3.2 轨迹模拟的参数设置 本文轨迹模拟所采用的草地贪夜蛾迁飞行为参数与 Ma 等 (2019)、Li 等 (2020) 以往的研究一致。草地贪夜蛾迁飞行为主要参数包括:

(1) 草地贪夜蛾在亚洲的高空飞行定向行为尚未可知 (Li et al., 2020), 本文将设定草地贪夜蛾在高空顺风飞行 (Wolf et al., 1990, 1995; Nagoshi et al., 2009);

(2) 其他个体大小相似的夜蛾科迁飞性害虫自身飞行速度大约 2.5-4.0 m/s, 据此本文设定草地贪夜蛾自身飞行速度为 3.0 m/s (Ma et al., 2019; Li et al., 2020);

(3) 草地贪夜蛾属夜蛾类, 大部分夜蛾都有多次迁飞的特性, 日落时刻起飞, 次日凌晨降落, 多数研究认为可能连续飞行 3 个夜晚。因此, 本研究设定草地贪夜蛾连续飞行 3 个晚上。计算轨迹时, 以前一夜的轨迹终点作为次日起飞的起点 (吴秋琳等, 2019; Li et al., 2020); 此外, 根据 11 月云南地区日出日落时间, 设置起飞时刻为 20:00 (北京时间, BJT), 降落时刻为次日 6:00 (BJT);

(4) 本研究设定了距海平面高度 750、1 000、1 250、1 500、1 750、2 000、2 250、2 500 m 8 个飞行高度 (Ma et al., 2019; Li et al., 2020);

(5) 当空中温度低于飞行低温阈值时, 迁飞昆虫便会停止振翅。但目前草地贪夜蛾的飞行低温阈值尚未有报道。Ma 等 (2019) 和 Li 等 (2020) 假设 13.8 °C 为其飞行低温阈值。本文作者室内吊飞试验发现当室温 < 13.8 °C 时, 草地贪夜蛾成虫很快就会停止飞行 (未发表数据)。因此, 本文飞行低温阈值仍采用 13.8 °C。当所在飞行高度的温度低于该温度时, 终止轨迹计算。

1.4 草地贪夜蛾入侵过程大气环流背景场分析

基于 WRF 模式输出的高时空分辨率气象背

景场数据, 利用 GrADS 2.1 软件 (Grid Analysis and Display System, <http://cola.gmu.edu/grads/>) 对 2018 年 11 月 19-25 日的温度、风场等气象要素进行绘图。各要素包括: 1) 该时间段 18:00 至次日 6:00, 850 hPa (大约距离地面 1 500 m) 高度层的水平平均风场; 2) 该时间段江城宝藏乡上空 800-950 hPa 不同高度层垂直风速场; 3) 该时间段地表日平均温度及 13.8 °C 等温线(13.8 °C 为其飞行低温阈值)、850 hPa 高度层日平均温度及 13.8 °C 等温线。

2 结果与分析

2.1 草地贪夜蛾入侵时间推算

根据有效积温法则, 对 12 月 26 日、1 月 12

日所发现的草地贪夜蛾的最高龄期和最低龄期分别推算成虫可能迁入的时间(图 1)。按照 2018 年 12 月 26 日发现 1 龄幼虫推算的成虫可能迁入时间是 2018 年 11 月 23 日-12 月 6 日; 按照 2018 年 12 月 26 日发现 5 龄幼虫推算的成虫可能迁入时间是 2018 年 11 月 10-23 日; 按照 2019 年 1 月 12 日发现 3 龄幼虫推算的成虫迁入时间是 2018 年 11 月 24 日-12 月 7 日; 按照 2019 年 1 月 12 日发现 6 龄幼虫推算的成虫迁入时间是 2018 年 11 月 14-27 日。这四种方案所推算的时间在 11 月 23 日重叠或仅相差 1 d。据此, 可以初步判断江城宝藏乡所发现的草地贪夜蛾幼虫属于同一批迁入成虫的子代。若考虑可能存在 1-2 d 的误差, 可以推测出草地贪夜蛾迁入宝藏乡的具体时间段大致为 2018 年 11 月 21-25 日。

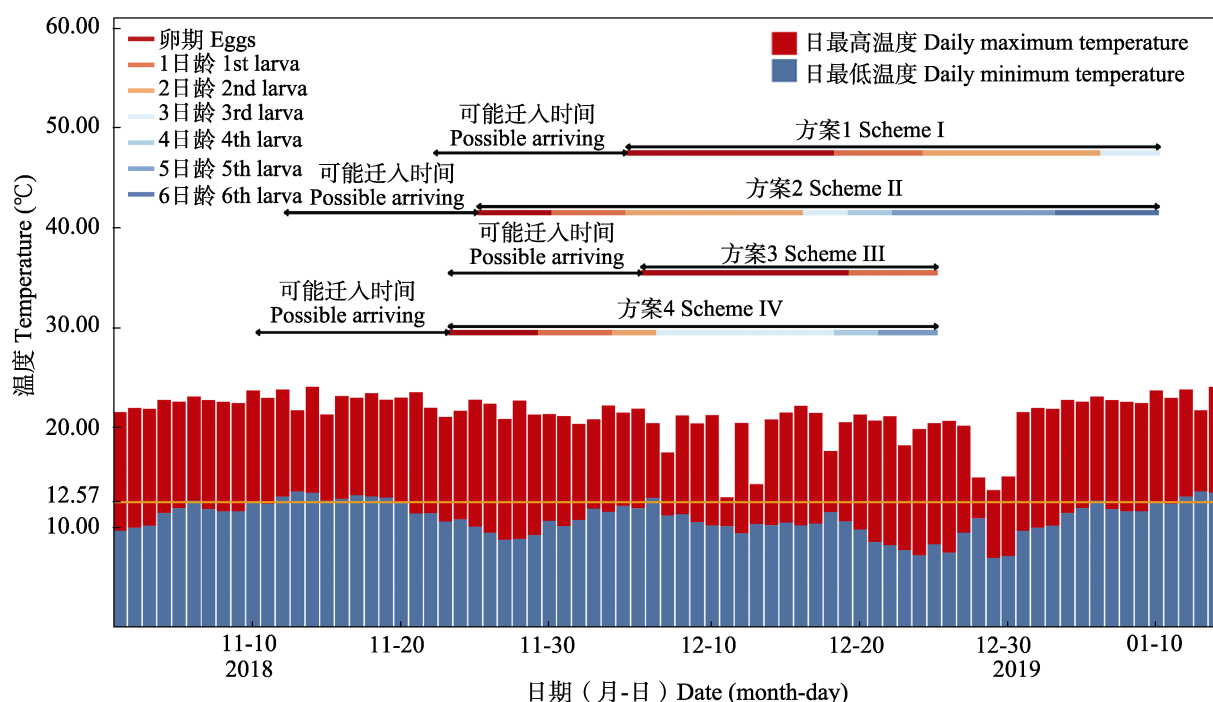


图 1 我国云南地区首次发现的草地贪夜蛾迁入时间推测

Fig. 1 Prediction of the migration time of the first spotted fall armyworm in Yunnan, China

方案 1 按照 1 月 12 日发现 3 龄幼虫的时间推算; 方案 2 按照 1 月 12 日发现 6 龄幼虫的时间推算; 方案 3 按照 12 月 26 日发现 1 龄幼虫的时间推算; 方案 4 按照 12 月 26 日发现 5 龄幼虫的时间推算。

图中红线虚线为幼虫发育起点温度 12.57 °C。

Scheme I is based on the time of 3rd instar larva found on Jan. 12; scheme II is based on the time of 6th instar larva found on Jan. 12; scheme III is based on the time of 1st instar larva found on Dec. 26; scheme IV is based on the time of 5th instar larva found on Dec. 26. The red dotted line in the figure shows the starting development temperature of larva 12.57 °C.

2.2 2018 年 11 月-12 月天气变化动态

江城地区 11-12 月期间, 850 hPa 高空盛行东南风, 其次为南风 and 西南风; 该时段内风速较

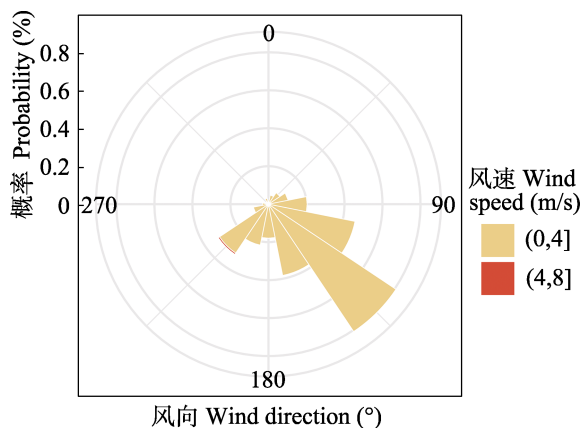


图 2 2018 年 11-12 月份江城地区 850 hPa 风玫瑰图

Fig. 2 Circular histograms of wind directions at 850 hPa in Jiangcheng during November and December, 2018

颜色部分的面积与落在每个 22.5° 风向的数量成正比。

The area of the color segments is proportional to the number of occasions when wind directions fell within each 22.5° bin.

低 ($1.65 \pm 0.1 \text{ m/s}$, $n=61$) (图 2)。在 2018 年 11 月 19-23 日内, 江城地区 850 hPa 高空有来自缅甸、泰国等地持续的西南风。因此, 推测该时间段草地贪夜蛾可以从缅甸、泰国等地迁入。又由于风速较小, 推测该时段草地贪夜蛾迁飞的距离较短。

在 2018 年 11 月 21-23 日, 江城县宝藏乡始终处于接近温度 13.8°C 等温线附近, 形成了草地贪夜蛾迁飞的低温屏障, 导致草地贪夜蛾无法进一步向北迁飞 (图 3)。此外, 11 月 22 日凌晨以及 11 月 22 日前半夜至 11 月 23 日凌晨 800-950 hPa 高度范围内的垂直风场都有较强的下沉气流, 这也促使草地贪夜蛾在该区域降落。

2.3 草地贪夜蛾虫源分析

基于有效积温和气象分析所推测的草地贪夜蛾可能入侵时间段 21-25 日进行轨迹回推, 结果显示: 11 月 21-23 日期间草地贪夜蛾可能侵入我国江城县宝藏乡 (图 5), 其中 2018 年 11 月 21-22 日迁飞轨迹较长; 而 24、25 日回推轨迹非

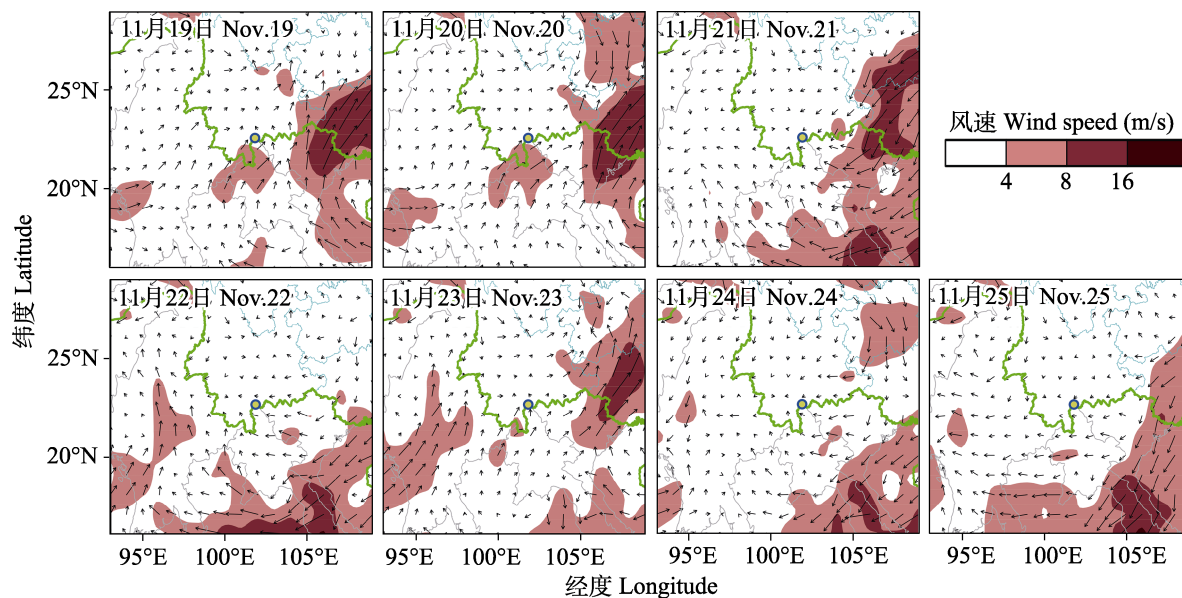


图 3 2018 年 11 月 19-25 日我国云南地区大气环流背景场

Fig. 3 Atmospheric circulation over Yunnan, China, November 19-25, 2018

黄色圆圈表示江城的位置; 蓝色实线代表 850 hPa 高空 13.8°C 等温线。

The yellow circle indicates the location of Jiangcheng; The solid blue line represents the 13.8°C isotherm at 850 hPa.

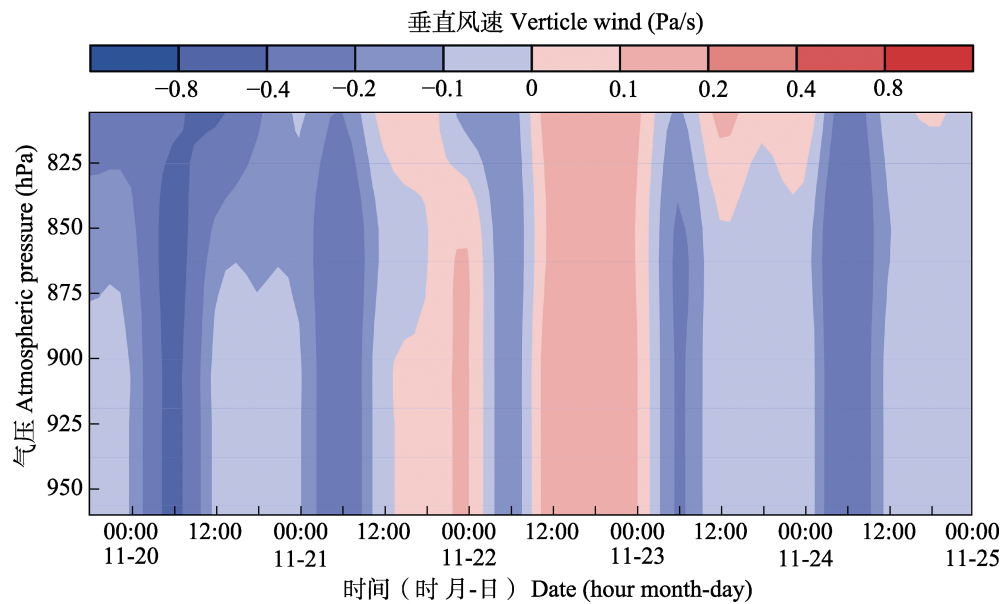


图 4 2018 年 11 月 19-25 日江城地区 800-950 hPa 垂直风场的时间-高度剖面图

Fig. 4 Time-height profile of vertical wind in 800-950 hPa in Jiangcheng, November 19-25, 2018

正值 (红色区域) 为下沉气流, 负值 (蓝色区域) 为上升气流。

Red refers to the downward wind; blue refers to the upward wind.

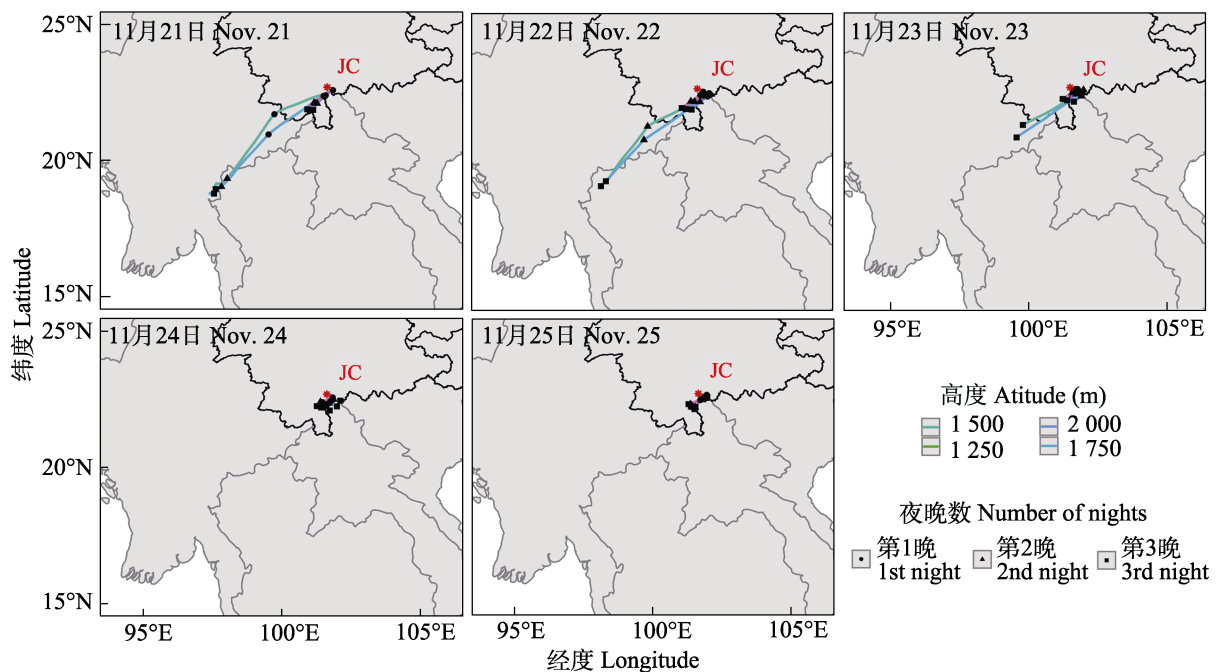


图 5 2018 年 11 月 21-25 日云南省江城县草地贪夜蛾回推轨迹分析

Fig. 5 Simulated backward trajectories of *Spodoptera frugiperda* in Jiangcheng, November 21-25, 2018

常短, 落点仍在云南境内。回推轨迹落点主要位于江城县宝藏乡的西南方向, 表明其虫源地主要分布在泰国北部区域、缅甸东南区域以及泰缅两国交界处。其迁飞轨迹高度主要在 1 250-1 750

m, 在其他高度层没有迁飞轨迹或迁飞轨迹较短。综上, 并结合前文天气背景场分析结果可推测: 首次迁入云南省江城县的草地贪夜蛾是在 11 月 19-20 日从泰国北部、缅甸东部以及泰缅两

国交界处起飞(图 5),随着持续的西南风顺风飞行,在 1 500 m 左右的海拔高度经过 1-3 晚的飞行后(图 3,图 5),在 11 月 22 号凌晨及 11 月 22 号前半夜至 11 月 23 日凌晨遇到较强的下沉气流,从而聚集降落至云南省江城县宝藏乡区域(图 3-图 5)。

3 讨论

本文根据有效积温和迁飞轨迹模拟结果推测,草地贪夜蛾成虫侵入云南江城的时间为 11 月 21-23 日。该时间要远早于云南省澜沧县利用探照灯最早捕获到草地贪夜蛾成虫的时间(2018 年 12 月 11 日)(Sun *et al.*, 2019)。本文轨迹分析结果表明江城首次发现的草地贪夜蛾迁入虫源地为泰缅两国边界处。缅甸于 2018 年 12 月 19-20 日在其中部曼德勒省首次发现草地贪夜蛾幼虫为害,泰国于 2018 年 12 月 14 日在其与缅甸接壤的来兴府、北碧府首次发现草地贪夜蛾幼虫为害(IPPC, 2018, 2019)。缅甸、泰国首次发现时间均晚于本研究所确定的草地贪夜蛾入侵我国的时间,但发现地与本研究所推测的虫源地位置在纬度上相近。这可能是由于前期草地贪夜蛾数量较少,其迁出成虫很难被发现。此外,亦有研究声称缅甸曼德勒省敏建县 2018 年 9 月在高粱上就已发现草地贪夜蛾幼虫为害(李向永等, 2019)。因此,泰缅交界处完全有可能在此时间段为我国提供草地贪夜蛾虫源。

2019 年 1 月 12 日我国正式确认草地贪夜蛾入侵之后不久,云南省德宏州芒市(1 月 14 日)、瑞丽(1 月 16 日)、保山市龙陵县(1 月 18 日)、施甸县(1 月 18 日)、昌宁县(1 月 18 日)以及普洱市澜沧(1 月 22 日)等多个县市均发现了草地贪夜蛾高龄幼虫为害(赵雪晴等, 2019)。从时间上来说,这些地区的草地贪夜蛾成虫极有可能是与江城同一时期内由缅甸迁入的。例如, Sun 等(2019)基于轨迹分析方法,推测瑞丽、澜沧的草地贪夜蛾成虫是 12 月份从缅甸由西南方向迁入,其具体虫源不存在重叠,亦与本文中江城的虫源亦基本上不重叠,这表明云南不同地区迁入虫源的具体位置可能存在一定差异。同

时,这也意味着草地贪夜蛾可能在缅甸中部地区已广泛存在。不过,缅甸 12 月份中旬仅在中部的曼德勒省、南部的伊洛瓦底省发现了草地贪夜蛾为害(IPPC, 2019),但这可能是由于前期田间种群密度太低而难以发现。除此之外,本文模拟的草地贪夜蛾迁飞轨迹大多数距离较短,第一晚落点与起点的直线距离从 19-292 km 不等,都分布在云南境内或中缅边境处。若是由云南境内其他地区迁入江城地区,这意味着草地贪夜蛾在此繁殖了一代,为 10 月份甚至更早时间迁入,但这种可能性应该比较小。但是回推轨迹经过江城以南的云南区域(如西双版纳),这意味着这些区域在此时间段可能也有草地贪夜蛾迁入。

迁飞性昆虫主要为风载迁飞,风场对其迁飞影响显著(Wainwright *et al.*, 2016; Lu *et al.*, 2017; Chen *et al.*, 2019)。11-12 月份江城地区的风向主要为东南风并且风速较小(图 2),其中 11 月 19-22 日时间段内的西南风场覆盖了缅甸、泰国以及我国云南等区域,为草地贪夜蛾从境外虫源地迁入江城县宝藏乡提供合适的运载气流,形成其空中廊道。同样,瑞丽、澜沧的草地贪夜蛾成虫也是由西南方向迁入(Sun *et al.*, 2019)。这表明,西南风可能是草地贪夜蛾由缅甸迁入我国的重要运载气流。特定天气条件可以迫使昆虫降落(胡高等, 2014)。已有大量的研究表明:下沉辐合气流和低温屏障可导致迁飞性昆虫迫降(Westbrook and Isard, 1999; 胡高等, 2014; Chen *et al.*, 2019)。在本研究中,2018 年 11 月 19-25 日,在 800-950 hPa 高度范围内,只有 11 月 22 日凌晨、11 月 22 日夜里至 11 月 23 日凌晨有明显的下沉气流,从而导致草地贪夜蛾迫降,进而定殖为害。

草地贪夜蛾已在亚洲东部地区形成了季节性往返迁飞,将成为一种常发性重要害虫(陈辉等, 2020; Li *et al.*, 2020)。草地贪夜蛾在我国南部(云南、广西、广东、福建等省南部以及海南岛)和中南半岛诸国周年繁殖,每年通过东、西两条迁飞路径由南向北进入我国北方玉米主产区(陈辉等, 2020; Li *et al.*, 2020)。其中西线是源于缅甸和我国云南省越冬区,经贵州、四川 2 省,进入山西、陕西、甘肃等省区,所经省

份玉米种植面积均超过百万公顷,远大于东线迁飞所经我国东部水稻种植区的玉米种植面积(中国农业年鉴编辑委员会,2018;陈辉等,2020)。在西线路径上,云南是草地贪夜蛾境外迁入我国的第一站,也是周年繁殖区。这里冬春玉米种植面积占全国60%以上,将成为我国草地贪夜蛾最主要的境内虫源区(陈辉等,2020;姜玉英等,2019)。因此,有效防控云南草地贪夜蛾,是保障北方玉米主产区粮食安全的关键。本文研究发现草地贪夜蛾最早可能是2018年11月21-23日由缅甸迁入我国云南,11-12月份期间,云南南部和缅甸上空盛行较弱的东南气流,但偶尔出现的持续西南气流是该虫迁入我国的关键。这些结果可为云南省乃至全国草地贪夜蛾的监测预警和科学防控提供一定的理论参考。

参考文献 (References)

- Abrahams P, Bateman M, Beale T, Colotey V, Cock M, Colmenarez Y, Corniani N, Day R, Early R, Godwin J, Gomez J, Moreno PG, Murphy ST, Oppong-Mensah B, Phiri N, Pratt C, Richards G, Silvestri S, Witt A, 2017. Fall armyworm: Impacts and implications for Africa, evidence note (2), September 2017. report to DFID. Wallingford, UK: CAB International. 144.
- Casmuz A, Juárez ML, Socías MG, Murúa MG, Prieto S, Medina S, Willink E, Gastaminza G, 2010. Review of the host plants of fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae). *Rev. Soc. Entomol. Argent.*, 69(3/4): 209–231.
- China Agriculture Yearbook Editing Committee, 2018. China Agriculture Yearbook. Beijing: China Agriculture Press. 176–180. [中国农业年鉴编辑委员会, 2018. 中国农业年鉴. 北京: 中国农业出版社. 176–180.]
- Chen H, Chang XL, Wang YP, Lu MH, Liu WC, Zhai BP, Hu G, 2019. The early northward migration of the white-backed planthopper (*Sogatella furcifera*) is often hindered by heavy precipitation in southern China during the pre-flood season in May and June. *Insects*, 10(6): 158.
- 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.]
- Early R, Gonzalez-Moreno P, Murphy ST, Day R, 2018. Forecasting the global extent of invasion of the cereal pest *Spodoptera frugiperda*, the fall armyworm. *NeoBiota*, 40: 25–50.
- Ganiger PC, Yeshwanth HM, Muralimohan K, 2018. Occurrence of the new invasive pest, fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae), in the maize fields of Karnataka, India. *Current Science*, 115(4): 621–623.
- 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.]
- 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 Economic Entomology*, 90(2): 611–622.
- 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, Wu QL, Wu XW, Jiang YY, Zeng J, Zhai BP, 2014. Outbreak mechanism of second-generation armyworms in northeastern China: A case study in 1978. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 51(4): 927–942. [胡高, 吴秋琳, 武向文, 姜玉英, 曾娟, 翟保平, 2014. 东北二代粘虫大发生机制: 1978年个案分析. 应用昆虫学报, 51(4): 927–942.]
- IPPC, 2018. First detection of fall armyworm on the border of Thailand. IPPC Official Pest Report, No. THA-03/1. FAO: Rome, Italy. <https://www.ippc.int/>
- IPPC, 2019. First detection report of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) on maize in Myanmar. IPPC Official Pest Report, No. MMR-19/2. Rome, Italy: FAO. <https://www.ippc.int/>
- 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(4/5/6): 534–549.
- 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.
- Li XY, Yin YQ, Wu K, Nyunt KT, Chan KN, Zhao XQ, Chen AD, 2019. Investigation report of the fall armyworm (*Spodoptera*

- frugiperda*) occurrence in Myanmar in 2019. *Plant Protection*, 45(4): 69–73. [李向永, 尹艳琼, 吴阔, Nyunt KT, Chan KN, 赵雪晴, 谌爱东, 2019. 2019 年缅甸草地贪夜蛾发生情况考察报告. 植物保护, 45(4): 69–73.]
- Lu MH, Chen X, Liu WC, Zhu F, Lim KS, McInerney C, Hu G, 2017. Swarms of brown planthopper migrate into the lower Yangtze River Valley under strong western Pacific subtropical highs. *Ecosphere*, 8(10): e01967.
- Luo J, 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.
- Montezano D, Specht A, Sosa-Gómez DR, Roque-Specht4 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, 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.
- National Agricultural Technology Extension Service Center (NATESC), 2019. Major pest *Spodoptera frugiperda* have invaded in Yunnan, and all areas should immediately strengthen investigation and monitoring. <https://www.natesc.org.cn/> (2019-1-18) [全国农业技术推广服务中心, 2019. 重大害虫草地贪夜蛾已入侵云南, 各地要立即开展调查监测. <https://www.natesc.org.cn/>, 2019-01-18.]
- 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.]
- Rwomushana I, Bateman M, Beale T, Beale T, Cameron K, Chiluba M, Clotey V, Davis V, Day R, Early R, Godwin J, Gonzalez-Moreno P, Kansiime M, Kenis M, Makale F, Mugambi I, Murphy S, Nunda W, Phiri N, Pratt C, Tambo J, 2018. Fall armyworm: Impacts and implications for Africa evidence note update, October 2018. Report to DFID. Wallingford, UK: CAB International. 51.
- Schlemmer M, 2018. Effect of temperature on development and reproduction of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae). Master's dissertation. Evanston: North-West University.
- Stokstad E, 2017. New crop pest takes Africa at lightning speed. *Science*, 356(6337): 473–474.
- Sun XX, Hu CX, Jia HR, Wu QL, Shen XJ, Jiang YY, Wu KM, 2019. Case study of the first immigration of fall armyworm *Spodoptera frugiperda* invading into China. *Journal of Integrative Agriculture*, 18: 2–10.
- Wainwright CE, Stepanian PM, Horton KG, 2016. The role of the US Great Plains low-level jet in nocturnal migrant behavior. *International Journal of Biometeorology*, 60(10): 1531–1542.
- 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, Fleischer SJ, Jairam S, Meagher RL, Nagoshi RN, 2019. Multigenerational migration of fall armyworm, a pest insect. *Ecosphere*, 10(11): e02919.
- Westbrook JK, Isard SA, 1999. Atmospheric scales of biotic dispersal. *Agricultural and Forest Meteorology*, 97(4): 263–274.
- 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.
- Wolf WW, Westbrook JK, Raulston JR, Pair SD, Hobbs SE, Riley JR, Mason PJ, Joyce RJV, 1995. Radar observation of orientation of noctuids migrating from corn fields in the Lower Rio Grande Valley. *Southwest Entomologist*, 18 (Suppl.): 45–61.
- Wolf WW, Westbrook JK, Raulston JR, Pair SD, Hobbs SE, 1990. Recent airborne radar observations of migrant pests in the United States. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 328(1251): 619–630.
- 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, Wu KM, 2019. Analysis of migration routes of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith) from Myanmar to China. *Plant Protection*, 45(2): 1–9. [吴秋琳, 姜玉英, 吴孔明, 2019. 草地贪夜蛾缅甸虫源迁入中国的路径分析. 植物保护, 45(2): 1–9.]
- Yang XL, Liu YC, Luo MZ, Li Y, Wang WH, Wang F, Jiang H, 2019. Fall armyworm was firstly detected in Jiangcheng County, Yunnan, China. *Yunnan Agriculture*, (1): 72. [杨学礼, 刘永昌, 罗茗钟, 李依, 王文辉, 万飞, 姜虹, 2019. 云南省江城县首次发现迁入我国西南地区的草地贪夜蛾. 云南农业, (1): 72.]
- Zhao XQ, Qu TY, Li YH, Yin YQ, Zhang HH, Wang Y, Li XY, Chen FS, Li YC, Chen AD, 2019. Seasonal occurrence characteristics of the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda*, in Yunnan in 2019 spring and summer. *Plant Protection*, 45(5): 84–90. [赵雪晴, 屈天尧, 李亚红, 尹艳琼, 张红梅, 王燕, 李向永, 陈福寿, 李永川, 谌爱东, 2019. 2019 年云南省草地贪夜蛾春夏季发生特征. 植物保护, 45(5): 84–90.]