

**特别关注**  
**Special Focus**

# 草地贪夜蛾缅甸虫源迁入中国的路径分析

吴秋琳<sup>1</sup>, 姜玉英<sup>2</sup>, 吴孔明<sup>1\*</sup>

(1. 中国农业科学院植物保护研究所, 植物病虫害生物学国家重点实验室, 北京 100193;  
2. 全国农业技术推广服务中心, 北京 100125)

**摘要** 草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) 对非洲和南亚国家的入侵已对全球粮食安全造成重大影响, 该虫 2018 年年底已在缅甸形成虫源基地, 并零星进入中国云南西南部地区。本文利用历史数据分析了缅甸和华南地区春、夏两季(3—8月)925 hPa 夜间平均风温场, 并模拟预测了缅甸地区草地贪夜蛾在此期间进入中国的迁飞轨迹以及主要降落和波及的地区。结果表明: 3—4 月盛行的微弱西风不利于远距离迁移, 但成虫的自主飞行可形成对云南和广西局部地区的近距离入侵; 进入 5 月份后, 随着西南夏季风的加强, 云南和广西全境成为缅甸虫源的主要迁入地, 并可能波及贵州、广东、海南和湖南等省。因此, 4 月份之前要重点监控云南和广西地区草地贪夜蛾的发生与为害, 此后, 应将监控区域扩大至中国中南部地区的各个省份。

**关键词** 草地贪夜蛾; 缅甸种群; 风温场; 迁飞轨迹; 监测预警

中图分类号: S 431.2 文献标识码: A DOI: 10.16688/j.zwhb.2019047

## Analysis of migration routes of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) from Myanmar to China

WU Qiulin<sup>1</sup>, JIANG Yuying<sup>2</sup>, WU Kongming<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China; 2. National Agro-Tech Extension and Service Center, Beijing 100125, China)

**Abstract** The invasion of *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) into African and South Asian countries has imposed a serious impact on global food security. By the end of 2018, the insect has formed a source base in Myanmar and sporadically entered southwestern Yunnan of China. In this study, the mean night wind and temperature fields of 925 hPa in spring and summer (March-August) in Myanmar and South China were analyzed by using historical data. The migration trajectory of the pest in Myanmar and its main landing and spreading areas were also simulated and predicted. The results showed that, because the weak westerly wind prevailed in Myanmar from March to April, the autonomous flight of adults could form a close-range invasion into local areas of Yunnan and Guangxi. After May, with the intensification of the southwest summer monsoon, Yunnan and Guangxi became the main places of migration of Myanmar's insect source, and even reached to Guizhou, Guangdong, Hainan and Hunan provinces. Therefore, the occurrence and damage of the pest in Yunnan and Guangxi should be monitored before April. After that, the monitoring area should be extended to all provinces in the south-central region of China.

**Key words** *Spodoptera frugiperda*; Myanmar population; wind and temperature fields; migration route; monitoring and forecasting

草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith), 隶属鳞翅目, 夜蛾科, 原产于美洲热带及亚热带地区, 是广泛分布在美洲各国的重大迁飞性害虫<sup>[1-2]</sup>,

其幼虫可以取食包括谷类粮食作物在内的 42 属 186 种植物<sup>[3]</sup>, 成虫通过季节性迁飞寻找适宜环境完成多个世代的繁殖<sup>[1-2]</sup>。草地贪夜蛾终年繁殖区

\* 收稿日期: 2019-01-27 修订日期: 2019-01-30

基金项目: 国家自然科学基金重大仪器项目(31727901)

致谢: 感谢云南省植保植检站、中国气象科学研究院以及 NCEP/NCAR 提供相关数据和资料; 南京农业大学植物保护学院胡高教授开发并提供昆虫轨迹计算程序, 马健博士、武明飞硕士协助气象数值模拟工作。

\* 通信作者 E-mail: wukongming@caas.cn

南至秘鲁的拉潘帕、阿根廷,北界可达美国佛罗里达州及德克萨斯州南部地区<sup>[1-2]</sup>,种内分化形成嗜食玉米和水稻两个型系<sup>[4]</sup>。在北美洲地区,春季热带终年繁殖区的成虫向北迁徙进入温带地区<sup>[1]</sup>,夏季末可在加拿大安大略省和魁北克地区发生为害<sup>[5-6]</sup>。由于适生区域广、迁移性强、繁殖力高、抗药性强和暴食为害的特点,生产上防治十分困难<sup>[5, 7-9]</sup>。

2016年1月,非洲尼日利亚和加纳首次发现草地贪夜蛾的入侵与暴发为害,很快蔓延至贝宁、圣多美和普林西比、多哥等国<sup>[10]</sup>。与许多昆虫一样,风携可导致长距离迁飞<sup>[11]</sup>,适宜风速下单晚迁移距离可达几百千米<sup>[8]</sup>,一夜或连续几个夜晚即可完成从非洲西部地区向撒哈拉南部的入侵<sup>[12]</sup>,给玉米生产造成毁灭性打击<sup>[13]</sup>。到2017年9月,撒哈拉以南的28个非洲国家证实了草地贪夜蛾的发生为害<sup>[13]</sup>。2018年5月,草地贪夜蛾入侵印度卡纳塔克邦<sup>[14]</sup>,10月扩散至泰米尔纳德邦、泰兰加纳、安得拉邦和西孟加拉邦地区<sup>[15]</sup>。2018年12月缅甸曼德勒省和掸邦玉米田发现高龄幼虫<sup>[16]</sup>,泰国亦报道了草地贪夜蛾的入侵<sup>[17]</sup>。

我国和缅甸有漫长的边境线,草地贪夜蛾入侵定殖缅甸已形成了迁入虫源基地。因此,厘清草地贪夜蛾缅甸虫源的迁飞路线对指导我国监测预警与控制工作有重大意义。我们利用GrADS气象绘图软件分析了缅甸草地贪夜蛾进入我国的天气背景场,并在Ubuntu18.04平台运用基于Weather Research and Forecasting model(WRF 3.6模式)的昆虫三维轨迹分析程序<sup>[18]</sup>,模拟了春夏两季(3—8月)缅甸起飞草地贪夜蛾迁入我国的路径和降落地区。

## 1 材料与方法

### 1.1 草地贪夜蛾迁飞的大气环流背景场分析

气象数据来源于美国国家环境预报中心(National Centers for Environment Prediction, NCEP)美国国家大气研究中心(The National Center for Atmospheric Research, NCAR)的全球再分析资料(Final Analysis, FNL)。此数据集时间分辨率为每6 h一次,空间分辨率为 $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ (约110 km×110 km),利用GrADS 2.0软件从中提取1999年至2018年3月至8月逐日18:00至06:00 925 hPa(距地面高度600~800 m)高度层的水平流场与温度要素,分析春季至夏季昆虫迁飞天气背景场。

### 1.2 基于WRF模式的三维轨迹分析

#### 1.2.1 WRF模式气象初始场与地形资料

全球再分析资料(FNL)为WRF模式<sup>[19]</sup>的初始

场数据和边界条件。气象模拟中地形数据分辨率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,作为驱动昆虫迁飞轨迹计算的背景条件。

#### 1.2.2 WRF模式模拟区域与参数设置

结合缅甸作物种植分布信息及当地地形,按照缅甸行政区共划分15个分析区域(包括伊洛瓦底省、勃固省、马圭省、曼德勒省、实皆省、德林达依省、仰光省、钦邦、克钦邦、克耶邦、克伦邦、孟邦、若开邦、掸邦以及内比都特区)。以每个区域作物种植地作为迁出起点,利用2017年与2018年3—8月逐日夜间气象数据模拟迁飞轨迹。在本次研究中,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 Scheme and parameters of the WRF model

	区域1 Domain 1
中心位置 Location	22.5°N, 100°E
水平网格 The number of grid points	188×186
格距/km Distance between grid points	30
垂直层 Layer	32
地图投影 Map projection	Lambert
微物理过程 Microphysics scheme	WSM3
长波辐射方案 Longwave radiation scheme	RRTM
短波辐射方案 Shortwave radiation scheme	Dudhia
近地面层方案 Surface layer scheme	Revised MM5 Monin-Obukhov
陆面过程方案 Land surface scheme	Noah
边界层方案 Planetary boundary layer scheme	YSU
积云参数化方案 Cumulus parameterization	Kain-Fritsch (new Eta)
模拟时长 Simulated time	72 h

#### 1.2.3 轨迹计算

结合草地贪夜蛾的迁飞生物学特征,顺推轨迹的模拟计算基于以下迁飞特征和参数:(1)草地贪夜蛾顺风迁飞,定向为向右偏角30°<sup>[20]</sup>;(2)自身飞行速度4.5 m/s<sup>[20-21]</sup>;(3)傍晚集中起飞始于当地时间18:00,结合起飞起点地形高度,缅甸中部与西部起

点迁飞高度为距海平面高度 500、750、1 000 m 与 1 250 m, 缅甸东部起点迁飞高度为 1 500、1 750、2 000 m 与 2 250 m<sup>[8, 22]</sup>; (4) 草地贪夜蛾飞行 1~3 个夜晚, 每个夜晚飞行持续时间不超过 12 h<sup>[8]</sup>。通过顺推轨迹计算可能迁飞路径时, 空中个体每一整点时间都可能降落, 且模拟的虫源降落在有寄主种植的区域为有效点。最后, 将得到的有效落点与地图叠加后成图显示。中国地图采用国家 1:400 万基础地理信息数据, 由国家基础地理信息中心提供。

## 2 结果与分析

### 2.1 缅甸和我国南部地区春季与夏季天气背景场变化动态

图 1 表明, 3 月份中南半岛的平均温度 20~23℃, 适宜草地贪夜蛾的生长繁殖。3—4 月份, 缅甸中北部地区 925 hPa 高空的风向为偏西-西北风, 平均

风速 2~4 m/s, 接近甚至低于草地贪夜蛾的自身飞行速度。从孟加拉湾输送的暖湿气流与西太平洋副热带高压控制的东南气流在我国西南地区汇合后, 在云南上空转向为西南-偏南气流。5 月份, 孟加拉湾暖湿气流不断加强, 整个中南半岛上空存在一致的西南风向, 缅甸中部和北部大部分地区的夜间平均风速较小(小于 4 m/s), 而中南半岛中部平均风速可达 4~8 m/s, 形成了缅甸南部地区草地贪夜蛾东迁的携载条件。同期, 在我国西南地区盛行西南风但风速偏小, 其中云南中部 925 hPa 高空的夜间平均风速小于 2 m/s。进入 6 月后, 来自孟加拉湾的西南季风不断加强, 整个中南半岛夜间盛行西南风。缅甸西部与南部地区夜间平均风速 4~8 m/s, 孟加拉湾地区平均风速可达 8 m/s 以上。因此, 6—8 月盛行的西南季风将形成缅甸草地贪夜蛾迁入中南半岛中部、北部以及我国南部地区的重要携载动力气候环境。

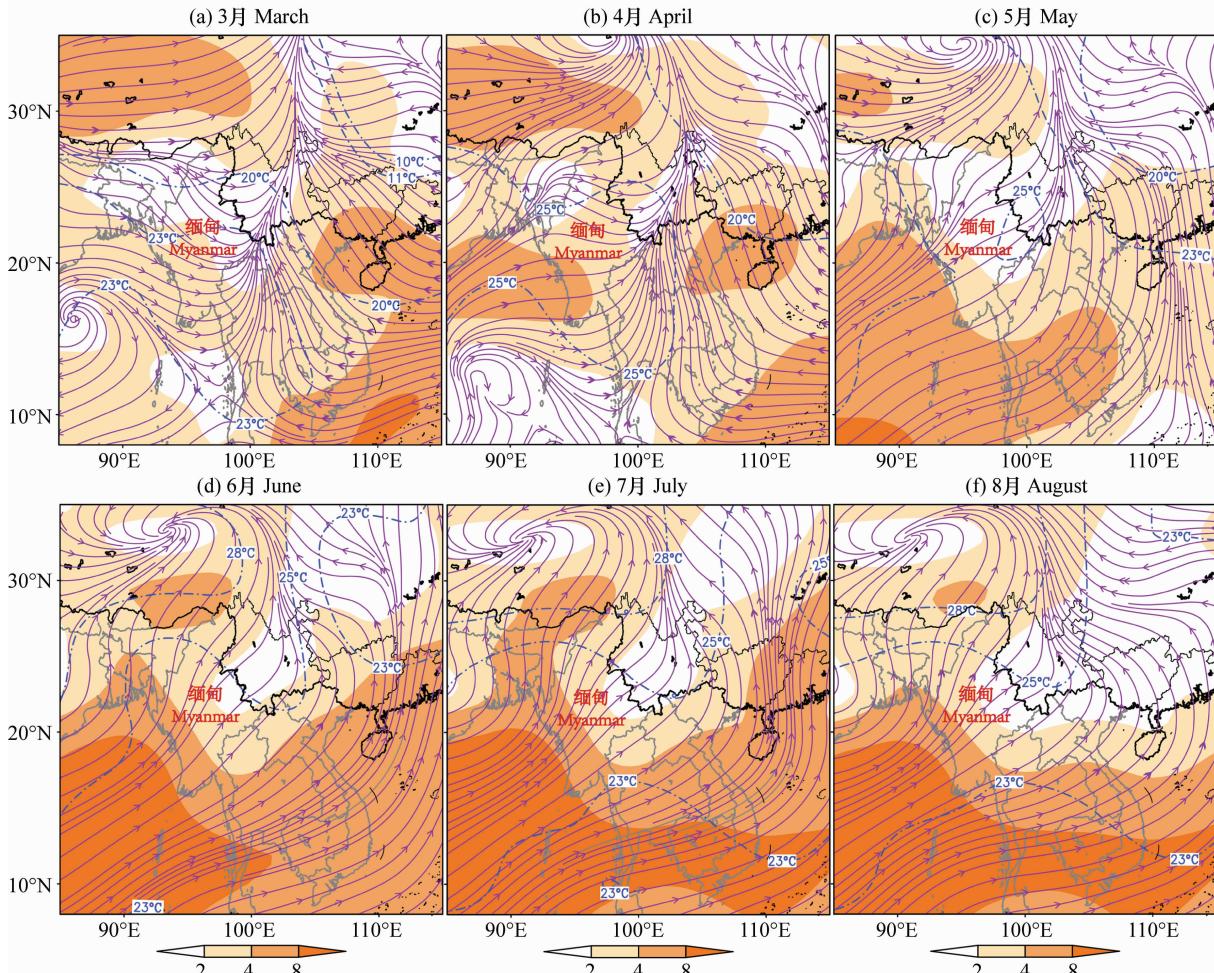


图 1 缅甸和我国华南地区春季(a–c)与夏季(d–f)925 hPa 夜间平均风温场(阴影为风速, 单位 m/s)

Fig. 1 Average night wind fields and temperatures at 925 hPa between Myanmar and southern China in spring (a–c) and summer (d–f) (Shaded area indicates wind speed, m/s)

## 2.2 缅甸草地贪夜蛾虫源的春、夏季迁飞轨迹与主要迁入区

对历史气象资料的分析表明,草地贪夜蛾从缅甸进入中国年际间的迁飞格局差异不大,入侵路径十分相似。春季(3—5月)入侵中国的虫源主要来自缅甸东部克耶邦和掸邦地区。入侵中国的草地贪夜蛾有93.4%的可能性将降落在云南省,2.3%的几率进入广西。但如遇合适风场条件,也有可能进入广西北部、贵州、四川乃至湖南地区(图2a~b)。进入5月份,缅甸草地贪夜蛾将整体朝东北方向迁

飞,云南中部和南部为其迁入中国的主要降落区,并可能波及贵州西南部、广西西北部和四川南部地区(图2c)。在6—8月,缅甸草地贪夜蛾将集中往东北方向迁移,进入中国的落点占所有迁飞落点的23.0%。其中,有77.9%和13.8%的可能性迁入云南和广西,贵州、广东、海南及湖南的入侵概率均在2.1%左右,也有可能通过连续迁飞入侵四川、江西与福建地区(图2d~f)。总体上,云南省是缅甸草地贪夜蛾迁入我国的必经之地和降落的主要地区(图3),应给予重点监测、阻截和控制。

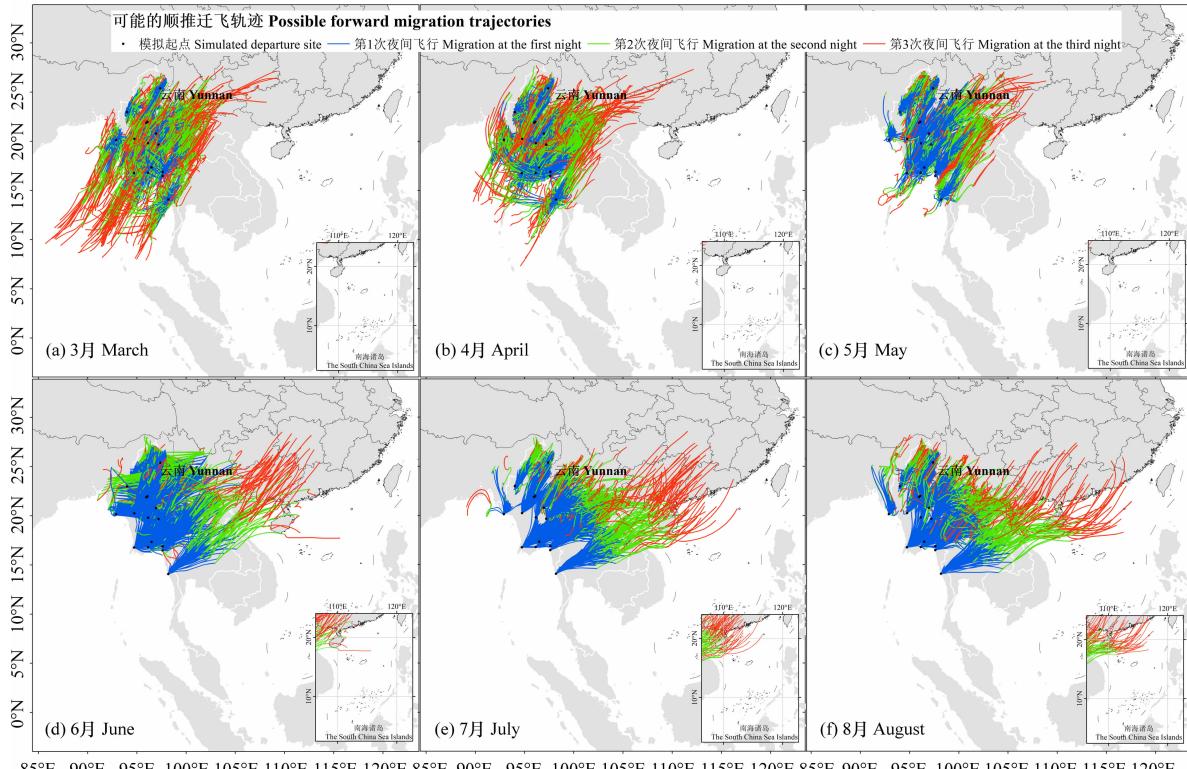


图2 春季(a~c)与夏季(d~f)缅甸草地贪夜蛾随东亚季风可能的迁飞路径

Fig. 2 Possible migration trajectories of the fall armyworm in Myanmar with East Asian monsoon in spring (a~c) and summer (d~f)

## 3 讨论

缅甸位于中南半岛西部,以山地和高原为主,地势北高南低,山脉河流均为南北走向,西朝孟加拉湾和安达曼海,东北与中国毗邻,西北部的钦邦与印度曼尼普尔邦和孟加拉国接壤,缅甸农业用地仅占整个国土面积的19.5%,约1 300万hm<sup>2</sup>。缅甸灌溉体系仅覆盖中部地区,也是农业种植(包括玉米、水稻、甘蔗、高粱等)的主要地带,其中掸邦北部和东部、曼德勒省、克钦邦、伊洛瓦底省、克耶邦以及克伦邦是缅甸主要的玉米产区,此外,每年旱季位于

锡当河谷的勃固省县区便在锡当河沿岸沙滩一带广泛种植玉米,玉米等谷类作物几乎全年都有种植。缅甸东部是草地贪夜蛾最为适宜的栖息地,环境适合度指数高于70%<sup>[12]</sup>。

对1999年至2018年3—8月夜间925 hPa平均温度场分析表明平均温度高于20℃,气候适宜草地贪夜蛾种群生长繁育。Nagoshi等<sup>[23]</sup>也通过历年1月份925 hPa的月平均风场对草地贪夜蛾从加勒比海南部特立尼达和多巴哥到南美洲玻利维亚的迁飞进行了分析。在温度适宜的条件下(11~30℃),草地贪夜蛾雌虫落地交配后产卵,卵在2~4 d即可

孵化,蛹期为7~37 d,成虫可存活2~3周<sup>[2,24]</sup>。根据草地贪夜蛾5龄幼虫在缅甸曼德勒被发现的时间(2018年12月19日),大致可推测上一代草地贪夜蛾成虫于半个月前已经出现,而下一代成虫可能最早在12月初便开始进行迁飞活动。据历年12—1月气象数据分析,该时期缅甸境内上空盛行北风,且平均风速低于2 m/s,此气流条件并不适合缅甸草

地贪夜蛾大规模地往东(中南半岛中部与东部)、往西北(我国南部)方向迁飞。2月盛行西北风-偏西风,风速持续较低,同本文中历年3月平均风场条件相似(未发表数据)。全国农业技术推广服务中心等证实我国云南省江城县于2018年12月26日发现草地贪夜蛾幼虫,推测缅甸草地贪夜蛾“首次”迁入我国境内为12月中旬。

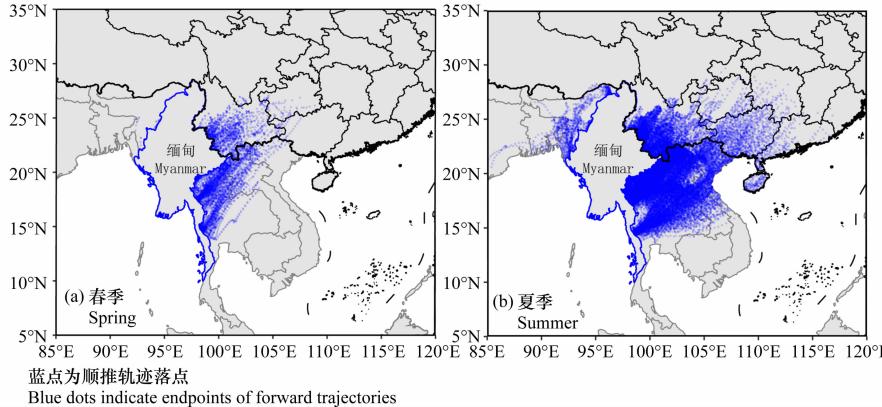


图3 缅甸草地贪夜蛾春季(a)和夏季(b)迁飞落点与主要分布区

Fig. 3 Landing sites and main distribution regions of the fall armyworm from Myanmar in spring (a) and summer (b)

与鸟类、蝙蝠等大型动物的迁飞相比,昆虫体型较小,无法仅依靠自身的飞行能力来实现长距离迁飞,需要借助于合适的气流来完成<sup>[8,11]</sup>。2016年首次入侵非洲的草地贪夜蛾源自美国东部地区、加勒比海岸和小安的列斯群岛<sup>[23]</sup>,研究表明此次入侵可能由美洲与非洲大陆之间的贸易往来或国际交通运输所致<sup>[25]</sup>,该种群入侵时期盛行季风为东风,风场总体不适合,但从非洲2年内快速大范围蔓延的情形来看,某些时段的合适风场起到了输送虫源的作用。本研究发现3—4月份缅甸上空盛行微弱的西风,草地贪夜蛾自身强定向迁飞能力是其迁飞、扩散的主要因素;进入5月份,缅甸夏季风不断加强将形成草地贪夜蛾远距离迁飞的决定性条件。因此,通过分析缅甸等境外国家虫情演化和季风进退,可为预测我国草地贪夜蛾的发生提供依据。

草地贪夜蛾的夜间远距离迁飞特性给其监测和防治带来了很大难度,而明确虫源地的种群动态、确定迁飞性昆虫的可能降落区和迁入量是异地测报的关键。迁飞轨迹分析方法便是确定虫源地或降落区最普遍、有效的方法之一<sup>[26]</sup>。基于WRF模式的昆虫迁飞轨迹分析方法已经广泛应用于黏虫、稻纵卷叶螟、稻飞虱、美洲棉铃虫等昆虫空中运行轨迹研究<sup>[18, 27-29]</sup>,本研究通过轨迹模拟,并结合3—4月平均风温场分析,表明在3—4月从缅甸起飞的草地贪

夜蛾主要依靠自身飞行能力通过连续多个夜晚进入我国云南西南部(包括西双版纳傣族自治州、普洱市、临沧市、红河哈尼彝族自治州以及玉溪市)。对美洲棉铃虫、欧洲银纹夜蛾等夜蛾科成虫迁飞策略的研究表明,具有自主迁飞能力的昆虫较空中惰性粒子可随风完成更远距离的迁飞,这是昆虫对大气边界层风温场的一种适应性迁飞策略<sup>[29-30]</sup>。草地贪夜蛾自身具有的强迁飞能力,加上连续几个夜晚的飞行,不但是其在缅甸扩散至邻国的主要因素,也是其在非洲、印度迅速蔓延为害的主要因素<sup>[5,7,12]</sup>。以玉米种植为主的缅甸东部是我国云南地区春季最主要的人侵虫源地,应当加强对该虫源地种群动态的实时监测。5月开始我国云南地区仍是缅甸草地贪夜蛾重点人侵地区,而我国南部省份(包括广西、广东、贵州与湖南)乃至海南为主要的人侵区,应加大防控,充分利用迁飞性害虫监控技术,如黑光灯、高空探照灯、性诱剂与昆虫扫描雷达等同时做好我国整个南部地区的监测预警工作。此外,云贵高原主要受低空气流的影响<sup>[31]</sup>,山体走势影响运载气流的方向<sup>[32]</sup>,在缅甸至云南整个区域上空盛行微风的条件下,地形也是直接影响草地贪夜蛾在几百米高空迁飞的天气背景场的主要影响因素之一。从缅甸迁出的草地贪夜蛾往东或北上的过程中,受云南北部横断山脉的阻挡,加上来自孟加拉湾的西南空气被

迫在云南中部形成绕流,草地贪夜蛾便可进入云南东部后抵达贵州等我国中部地区。因此,也要通过增加田间调查区域,警惕我国四川、重庆、江西与福建4个入侵波及区的草地贪夜蛾发生与为害。

玉米品系与水稻品系的草地贪夜蛾均已经在非洲定殖为害<sup>[25]</sup>,但关于同时被发现的这两种品系的草地贪夜蛾是否是一同引进非洲还是从同一个虫源地多次入侵后种群建立成灾尚无答案<sup>[12]</sup>。此外,与其他重大迁飞性农业害虫一样,草地贪夜蛾也具有“国际性、迁飞性、暴发性、毁灭性”的特点,需要通过更多的个例分析,定性定量地揭示大气动力场对草地贪夜蛾大规模迁飞的影响机制,进一步明确其迁飞规律,为异地预测与田间防控提供重要依据。

## 参考文献

- [1] LUGINBILL P. The fall army worm [M]. USDA Technology Bulletin, 1928, 34: 91.
- [2] SPARKS A N. A review of the biology of the fall armyworm [J]. The Florida Entomologist, 1979, 62(2): 82–86.
- [3] CASMUZ A, JUÁREZ M L, SOCÍAS M G, 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.
- [4] DUMAS P, LEGEAI F, LEMAITRE C, et al. *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) host-plant variants: two host strains or two distinct species? [J]. Genetica, 2015, 143(3): 305–316.
- [5] ROSE A H, SILVERSIDES R H, LINDQUIST O H. Migration flight by an aphid, *Rhopalosiphum maidis* (Hemiptera: Aphididae), and a noctuid, *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) [J]. The Canadian Entomologist, 1975, 107(6): 567–576.
- [6] MITCHELL E R, MCNEIL J N, WESTBROOK J K, et al. Seasonal periodicity of fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) in the Caribbean basin and northward to Canada [J]. Journal of Entomological Science, 1991, 26(1): 39–50.
- [7] DAY R, ABRAHAMS P, BATEMAN M, et al. Fall armyworm: impacts and implications for Africa [J]. Outlooks on Pest Management, 2017, 28(5): 196–201.
- [8] WESTBROOK J K, NAGOSHI R N, MEAGHER R L, et al. Modeling seasonal migration of fall armyworm moths [J]. International Journal of Biometeorology, 2016, 60(2): 255–267.
- [9] JOHNSON S J. 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.
- [10] GOERGEN G, KUMAR P L, SANKUNG S B, et al. First report of outbreaks of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* (JE Smith) (Lepidoptera, Noctuidae), a new alien invasive pest in West and Central Africa [J/OL]. PLoS ONE, 2016, 11(10): e0165632.
- [11] DRAKE V A, GATEHOUSE A G. Insect migration: tracking resources through space and time [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1995: 478.
- [12] EARLY R, GONZÁLEZ-MORENO P, MURPHY S T, et al. Forecasting the global extent of invasion of the cereal pest *Spodoptera frugiperda*, the fall armyworm [J]. NeoBiota, 2018, 40: 25–50.
- [13] ABRAHAMS P, BEALE T, COCK M, et al. Fall armyworm status impacts and control options in Africa: preliminary evidence note (April 2017) [R]. UK: CABI, 2017.
- [14] NAKWETA G. Global actions needed to combat fall armyworm [EB/OL]. (2018-09-28)[2018-10-05]. <https://www.scidev.net/sub-saharan-africa/farming/news/global-actions-combat-fall-armyworm.html>.
- [15] BHOSALE J. Fall Armyworm spreads to five states in India [EB/OL]. (2018-10-09)[2018-12-10]. <https://economictimes.indiatimes.com/markets/commodities/news/fall-armyworm-spreads-to-five-states-in-india/articleshow/66128598.cms>.
- [16] 缅甸农业部植保司. 缅甸部分地区冬玉米首次记录草地贪夜蛾的入侵 [EB/OL]. (2018-12-19)[2019-01-05]. <http://ppdmyanmar.org/>.
- [17] First detection of fall army worm on the border of Thailand [R]. FAO of the United Nations, 2018.
- [18] 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.
- [19] MICHALAKES J, CHEN S, DUDHIA J, et al. Development of a next-generation regional weather research and forecast model [C]// ZWIEFLHOFER W, KREITZ N, eds. Developments in Teracomputing: Proceedings of the Ninth ECMWF Workshop on the Use of High Performance Computing in Meteorology. World Scientific, Singapore, 2001: 269–276.
- [20] WOLF W W, WESTBROOK J K, RAULSTON J R, 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.
- [21] WESTBROOK J K, EYSTER R S, WOLF W W, et al. Migration pathways of corn earworm (Lepidoptera: Noctuidae) indicated by tetroon trajectories [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1995, 73(1/2): 67–87.
- [22] BEERWINKLE K R, LOPEZ JR J D, SCHLEIDER P G, et al. Annual patterns of aerial insect densities at altitudes from 500 to 2400 meters in east-central Texas indicated by continuously-operating vertically-oriented radar [J]. Southwestern Entomologist Supplement (USA), 1995, 18: 63–80.
- [23] NAGOSHI R N, FLEISCHER S, MEAGHER R L, et al. Fall armyworm migration across the Lesser Antilles and the potential for genetic exchanges between North and South American populations [J/OL]. PLoS ONE, 2017, 12(2): e0171743.
- [24] VICKERY R A. Studies on the fall army worm in the gulf coast district of Texas [M]. USDA Technical Bulletin No. 138. Washington: US Government Printing Office, 1929: 1–64.

(下转 18 页)

- pattern of animal population [J]. *Researches on Population Ecology*, 1968, 10(1): 1–20.
- [23] TAYLOR L R. Aggregation, variance and the mean [J]. *Nature*, 1961, 189: 7325.
- [24] 丁岩钦. 昆虫数学生态学[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [25] 徐汝梅. 昆虫种群生态学[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 1987.
- [26] CROPLIFE AFRICA MIDDLE EAST. Controlling fall armyworm handbook for SSPs, feed the future Ethiopia value chain activity [M]. USA; The U. S Government's Global Hunger & Food Security Initiative, 2018.
- [27] FERNANDES M G, BUSOLI A C, BARBOSA J C. Spatial distribution of *Alabama argillacea* (Hübner) (Lepidoptera: Noctuidae) on cotton crop [J]. *Neotropical Entomology*, 2003, 32(1): 107–115.
- [28] MELO E P, DEGRANDE P E, LIMA JUNIOR I S, et al. Spatial arrangement and damage by the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) on maize [J]. *Revista Ceres*, 2014, 61(3): 343–349.
- [29] GARCIA A G, GODOY W A C. A theoretical approach to analyze the parametric influence on spatial patterns of *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) populations [J]. *Neotropical Entomology*, 2017, 46(3): 283–288.
- [30] MITCHELL F L, FUXA J R. Distribution, abundance, and sampling of fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) in south-central Louisiana cornfields [J]. *Environmental Entomology*, 1987, 16: 453–458.
- [31] MELO E P, FERNANDES M G, DEGRANDE P E, et al. Spatial distribution of plants infested with *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) on corn crop [J]. *Neotropical Entomology*, 2006, 35(5): 689–697.
- [32] FARIAS PAULO R S, BARBOSA J C, BUSOLI A C. Spatial distribution of the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae), on corn crop [J]. *Neotropical Entomology*, 2001, 30(4): 681–689.
- [33] FARIAS PAULO R S, BARBOSA J C, BUSOLI A C, et al. Spatial analysis of the distribution of *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) and losses in maize crop productivity using geostatistics [J]. *Neotropical Entomology*, 2008, 37(3): 321–327.
- [34] SERRA G V, TRUMPER E V. Sequential sampling protocols for *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae), on *Zea mays* fields: influence of sampling unit size [J]. *Bulletin of Entomological Research*, 2006, 96: 471–477.
- [35] HERNANDEZ J L, LÓPEZ-BARBOSA E C, GARZA-GONZÁLEZ E, et al. Spatial distribution of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in maize landraces grown in Colima, Mexico [J]. *International Journal of Tropical Insect Science*, 2008, 28(3): 126–129.
- [36] 郭松景, 李世民, 马林平, 等. 劳氏粘虫幼虫在玉米田的空间分布及抽样技术研究[J]. 河南农业大学学报, 2001, 35(3): 245–248.
- [37] 龙玲, 刘红梅, 莫纯碧. 二代粘虫幼虫空间分布型及抽样技术研究[J]. 山地农业生物学报, 2003, 22(5): 391–392.
- [38] 汪恩国, 陈克松, 李达林, 等. 玉米田斜纹夜蛾空间分布型及抽样技术[J]. 应用昆虫学报, 2004, 41(6): 585–588.
- [39] 陈浩, 赵文路, 门兴元, 等. 玉米灌浆期3种鳞翅目害虫的空间分布[J]. 玉米科学, 2016(1): 160–165.
- [40] COCK M J W, BESEH P K, BUDDIE A G, 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.
- [41] JUÁREZ M L, MURUA M G, GARCÍA M G, et al. Host association of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) corn and rice strains in Argentina, Brazil and Paraguay [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2012, 105(2): 573–582.
- [42] GROOT A T, MARR M, SCHOFELG, et al. Host strain specific sex pheromone variation in *Spodoptera frugiperda* [J]. *Frontiers in Zoology*, 2008, 5(1): 20.

(责任编辑: 田 谳)

(上接6页)

- [25] COCK M J, BESEH P K, BUDDIE A G, 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.
- [26] 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.
- [27] WANG Fengying, YANG Fan, LU Minghong, 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.
- [28] WU Qiulin, HU Gao, TUAN H A, et al. Migration patterns and winter population dynamics of rice planthoppers in Indochina: New perspectives from field surveys and atmospheric trajectories [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 265: 99–109.
- [29] WU Qiulin, HU Gao, WESTBROOK J K, et al. An advanced

numerical trajectory model tracks a corn earworm moth migration event in Texas, USA [J/OL]. *Insects*, 2018, 9(3): 115. DOI: 10.3390/insects9030115.

- [30] CHAPMAN J W, NESBIT R L, BURGIN L E, et al. Flight orientation behaviors promote optimal migration trajectories in high-flying insects [J]. *Science*, 2010, 327: 682–685.
- [31] 朱坚. 长江以南地区春季降水的气候特征及其与青藏高原动力作用的联系[D]. 南京: 南京大学, 2011.
- [32] WU Qiulin, WESTBROOK J K, HU Gao, 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.

(责任编辑: 田 谳)