

浙江入侵草地贪夜蛾的迁入虫源

罗举^{1, #} 马健^{2, #} 武明飞² 齐国君³ 刘杰⁴ 唐健¹ 胡高^{2, *}

(¹中国水稻研究所, 杭州 310006; ²南京农业大学 昆虫系, 南京 210095; ³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; ⁴全国农业技术推广服务中心测报处, 北京 100125; # 共同第一作者; *通信联系人, E-mail: hugao@njau.edu.cn)

Original Area of Fall Armyworm Individuals Newly Invaded in Zhejiang Province

LUO Ju^{1, #}, MA Jian^{2, #}, WU Mingfei², QI Guojun³, LIU Jie⁴, Tang Jian¹, HU Gao^{2, *}

(¹China National Rice Research Institute, Hangzhou 310006, China; ²Department of Entomology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; ³Guangdong Provincial Key Laboratory of High Technology for Plant Protection / Plant Protection Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, China; ⁴Division of Pest Forecasting, China National Agro-Tec Extension and Service Center, Beijing 100125, China; # These authors contributed equally to this work; *Corresponding author, E-mail: hugao@njau.edu.cn)

Abstract: 【Objective】The fall armyworm, [*Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith), FAW] is a significant migratory pest newly invaded China. It was discovered in Jiande City of Zhejiang Province on 8 May 2019, and thereafter spreaded rapidly throughout Zhejiang Province. A better understanding of the distribution of the source areas and the migration path of FAW populations will be beneficial for the monitoring, early warning and the source control of this pest in Zhejiang Province. **【Methods】**The migratory routes and weather fields for the newly invasive population in Zhejiang Province were analyzed by using a trajectory simulation approach, combined with flight behaviour and meteorological data. **【Result】**According to the larval developmental period, the first batch of FAW adults may immigrate into Zhejiang Province from 26 to 30 April. In late April, the southwesterly airflow passed through most part of southern and eastern China, providing a carrier airflow for the FAW migrants, while low temperature barriers, rainfall and sinking airflow can cause a forced landing of the FAW. The effective source of the FAW invasive population in Jiande City, Zhejiang Province is mainly distributed in eastern Guangxi. **【Conclusion】**This research results lay a basis for the monitoring, early warning, scientific prevention and control of the spring immigrants of FAW in Zhejiang Province.

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

摘要: 【目的】草地贪夜蛾是新入侵我国的重要迁飞性害虫, 2019年5月8日浙江省建德市发现草地贪夜蛾入侵为害, 已在全省迅速扩散蔓延。明确浙江省发现的草地贪夜蛾种群的虫源地分布及迁飞路径, 对浙江省草地贪夜蛾的监测预警及源头治理有重大意义。 **【方法】**利用基于 WRF 模式的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资料, 对入侵浙江的草地贪夜蛾的迁飞路径及天气背景场进行了模拟分析。 **【结果】**根据幼虫发育历期推算, 4月26日–30日可能有首批草地贪夜蛾成虫迁入浙江省。4月下旬, 西南低空急流贯穿华南及华东大部, 可为草地贪夜蛾迁飞提供运载气流, 而低温屏障、降雨和下沉气流可导致草地贪夜蛾的迫降。入侵浙江省建德市草地贪夜蛾种群的有效虫源地主要分布在广西东部。 **【结论】**本研究结果为浙江省草地贪夜蛾春季迁入种群的监测预警和科学防控提供了依据。

关键词: 草地贪夜蛾; 天气背景场; 迁入路径; 轨迹分析; 虫源地

中图分类号: S435.112⁺.9

文献标识码: A

文章编号: 1001-7216(2020)01-0080-08

草地贪夜蛾 [*Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith)] 是一种原分布于美洲热带和亚热带地区的重大迁飞性农业害虫^[1-3]。2016年以前草地贪夜蛾仅栖居

在美洲范围, 2016年1月因商贸货运传入非洲尼日利亚和加纳^[3-5], 凭借超强的飞行能力, 草地贪夜蛾迅速蔓延到整个撒哈拉以南地区, 给非洲粮食生产

收稿日期: 2019-07-05; 修改稿收到日期: 2019-08-08。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31822043); 浙江省自然科学基金资助项目(LY20C140008); 中央高校基本科研业务费专项(KYZ201920、KJJQ201803); 广东省现代农业产业共性关键技术研发创新团队建设项目(2017LM1078); 广西农业科学院基本科研业务专项(桂农科院 2019Z15)。

造成毁灭性打击^[6]。2018年5月在亚洲印度的卡纳塔克邦州首次发现，此后在南亚、东南亚及东亚地区迅速扩散^[7-9]，并有进一步蔓延之势。2019年1月11日在中国云南省普洱市江城首次发现草地贪夜蛾为害玉米^[9,10]。截至2019年6月底，已扩散蔓延至云南、广西、贵州、广东、湖南、海南、福建、浙江、湖北、四川、江西、重庆、浙江、河南、西藏、安徽、江苏、上海、台湾、山东等20省(市、区)，并抵达我国黄淮玉米主产区。随着西南季风加强，7月草地贪夜蛾可能继续北迁进入东北玉米主产区^[11-14]，这将对我国农业生产和粮食安全构成严重威胁。

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^[3]。但是草地贪夜蛾具有极强的远距离迁飞能力，其成虫借助高空风力，经多晚连续飞行，其迁飞距离可达数百上千公里^[15-16]。尽管草地贪夜蛾跨越大西洋由美洲进入非洲，然后跨印度洋进入印度，自然迁飞造成其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入东南亚密切相关^[16]。草地贪夜蛾的迁飞习性、大范围的迁移为害给监测、预警与防控工作带来了很大难度，而明确其虫源地分布、迁飞路径对指导草地贪夜蛾的异地精细化测报及源头治理具有重要意义。

草地贪夜蛾仅在我国云南、广西、广东、福建、海南、台湾等部分省份可周年繁殖，其他地区为季节性适宜生境，需每年通过迁飞入侵才能造成暴发为害^[2,12]。浙江省地处草地贪夜蛾迁飞过渡区，由华南地区迁入的草地贪夜蛾在此繁殖一代后，其子代继续向北迁飞，进入北方玉米主产区^[12]。因此，该地区是草地贪夜蛾南北往返迁飞的桥梁地带，防控战略地位相当重要^[12]。2019年5月8日，浙江省建德市发现草地贪夜蛾入侵为害，并且很快在全省扩散蔓延，为害范围不断扩大。为了明确草地贪夜蛾入侵浙江的迁飞途径、虫源地分布及天气背景场，本研究运用基于WRF模式(Weather Research and Forecasting Model)的昆虫三维轨迹分析程序^[11-14,17-18]，对草地贪夜蛾迁入浙江建德的迁飞过程进行了数值模拟和分析，以期对浙江省草地贪夜蛾的监测预警及源头治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 WRF模式气象资料处理

WRF模式为新一代中尺度预测预报模式，本研

究利用该模式生成高时空分辨率的气象背景场。本研究初始气象背景场数据为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)的全球再分析数据(Final Analysis, FNL, 6 h一次，空间分辨率1.0°×1.0°)。资料输入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模拟区域大小为150×160格点，水平分辨率为30 km，设置了30个垂直层，具体方案选择和模型参数见表1。

1.2 草地贪夜蛾迁飞的大气环流背景场分析

结合田间调查草地贪夜蛾幼虫虫龄及发育历期，推算迁入成虫种群可能的降落时间范围为4月26—30日。根据WRF模式模拟结果，选取2019年4月26—30日19:00至次日5:00 850 hPa(大约距离地面1 500 m)高度层的水平平均流场、19:00至次日5:00的夜间累计降雨量、19:00至次日5:00的夜间平均温度、建德市800—950 hPa垂直风速、建德市850 hPa和900 hPa温度，利用GrADS 2.1和R语言绘制高空水平流场、降雨、温度、垂直速度场及温度的时间-高度剖面，分析草地贪夜蛾迁飞期间的天气背景场。

对2019年4月26—29日，4月30日—5月7日建德市850 hPa和900 hPa，925 hPa和950 hPa高度上的风速和风向频次进行统计，分析不同时间段、不同高度层的风速和风向频次对草地贪夜蛾迁飞降落的影响。

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	26°N, 105°E
水平网格 The number of grid points	150×160
格距 Distance between grid points	30 km
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 Forecast time	72 h

1.3 轨迹分析生物学参数的设置

结合田间调查草地贪夜蛾幼虫虫龄及发育历期,推算迁入成虫种群可能的降落日期,轨迹回推以降虫区(建德市)为起点,以推算的成虫降落日期作为回推起始日期,利用2019年4月下旬逐日夜间气象数据模拟其迁飞轨迹。

根据草地贪夜蛾的迁飞生物学特征,在回推轨迹分析中设定以下迁飞特征和参数:1)夜蛾类昆虫夜间飞行,傍晚起飞,次日黎明降落^[19-20],根据4月浙江地区日出和华南地区日落时间,设置起飞时刻为19:00(BJT),降落时刻为05:00(BJT),飞行持续时间10 h,可连续飞行1~3个夜晚^[11-14];2)与草地贪夜蛾体型类似的夜蛾类昆虫自主飞行速度约为2.5~4 m/s,本研究设置草地贪夜蛾自身飞行速度为3.0 m/s^[11,12,23];3)草地贪夜蛾在高空顺风迁移^[21-22],暂不考虑定向偏角^[11,12];4)设定轨迹起始高度为距海平面500、750、1 000、1 250、1 500、1 750、2 000、2 250 m共计8个飞行高度^[11,12];5)草地贪夜蛾飞行的低温阈值为13.8℃^[24],当高空气温低于13.8℃时,当晚回推轨迹计算终止。

2 结果与分析

2.1 虫情资料分析及迁入时间推算

2019年5月8日,浙江省建德市发现草地贪夜蛾入侵为害,幼虫龄期以2~4龄为主。按幼虫发育历期推算,前推8~13 d较为合理,推测建德市5月8日发现的草地贪夜蛾幼虫可能是4月底(4月26日~30日)迁入的成虫种群所繁育。

2.2 我国南方地区4月下旬天气背景场变化动态

4月26日我国南方地区出现8 m/s以上的南风(图1-A),华南北部、江西大部分地区出现较大范围降雨(图1-F),且浙江省大部分(包括建德市)850 hPa高度的温度较低,建德市850 hPa夜间平均温度仅为11.50℃(图1-K)。4月27日受西太平洋副热带高压的控制,华南直至江西、浙江贯穿了12 m/s的强西南气流,最大风速甚至超过了16 m/s(图1-B)。南部暖湿气流与北部冷空气在赣北、浙江中部一带交汇,形成强对流天气(图1-B),建德市夜间降雨累计降雨达到55.03 mm(图1-G),而降水往往导致空中虫群停止迁飞而迫降。4月28日,12 m/s以上的西南风继续覆盖华南、江西、浙江一带,此时这一带并无降雨(图1-C),且温度适宜(图1-H),但建德市950~850 hPa高度上出现大量下沉气流(图1-R),而下沉气流也是昆虫集中降落的重要因子。4

月29日,华南、福建、浙江再次出现降雨,建德市夜间累计降雨2.65 mm,且此时华南地区形成了一片雨带(图1-B~F),同时建德市850 hPa高度正好处于13.8℃的临界处(图1-D),形成了一道低温屏障,终止草地贪夜蛾继续迁飞。4月30日,中国南部850 hPa高度上风向转为北风(图1-E),北方广大地区不可能作为浙江草地贪夜蛾合适的虫源地。

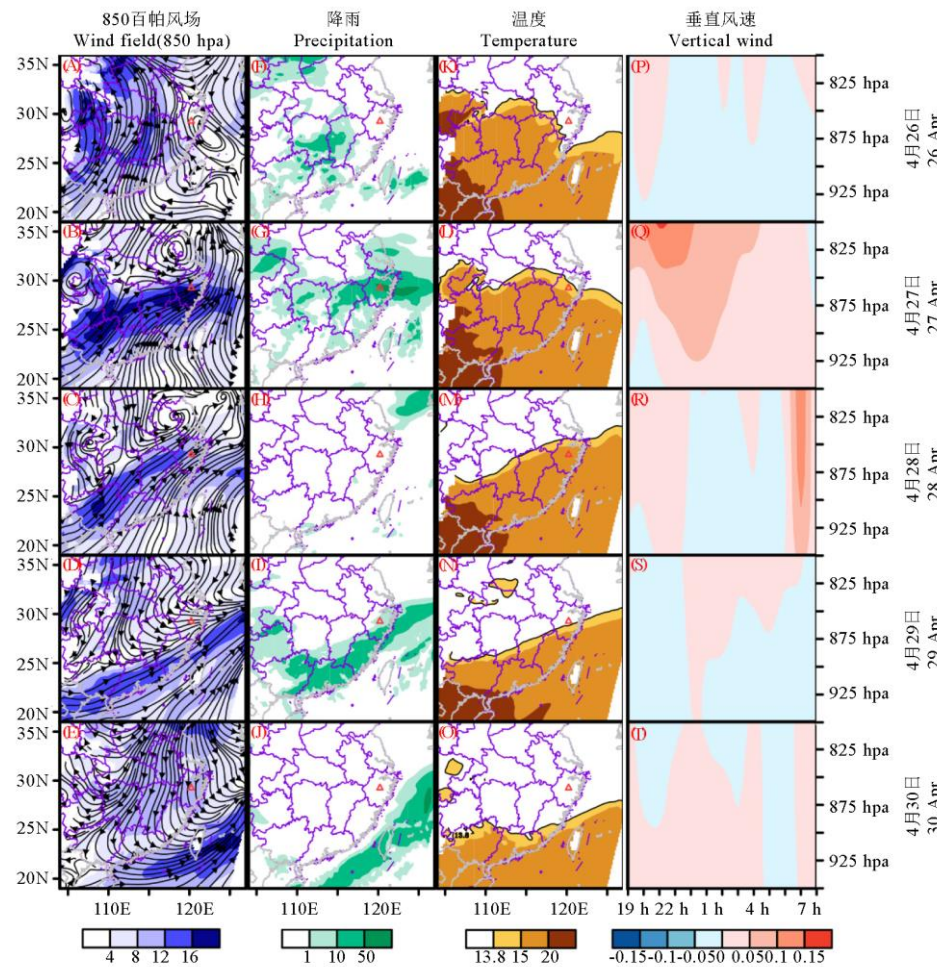
风向玫瑰图亦表明,4月26~29日期间,850和900 hPa的高度上存在强西南风(图2-A),可以为草地贪夜蛾远距离迁飞提供运载气流,而925和950 hPa高度上的风向主要为东风(图2-B),不适宜草地贪夜蛾向北迁飞。4月30日~5月7日期间,850和900 hPa,925和950 hPa高度上主要为东北风和偏东风(图2-C, D),显然无法为南方地区草地贪夜蛾虫源北迁提供运载气流。此外,4月30日持续到5月7日,北方广大地区出现大范围降温,此段时间建德市850 hPa和900 hPa高度的温度基本低于13.8℃(图3),因此,4月30日~5月7日草地贪夜蛾不具备远距离迁飞的气象条件。

综上所述,4月26~29日,华南、江西及浙江省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迁飞提供了运载气流,而低温屏障、降雨和下沉气流十分有利于草地贪夜蛾的迫降。

2.3 建德市草地贪夜蛾的回推轨迹分析

对回推轨迹结果进行分析,4月26日、27日、30日草地贪夜蛾的回推轨迹终点位于江西附近或福建部分地区,该虫源地尚未有草地贪夜蛾发生为害的报道,故不能提供有效虫源,为无效迁飞轨迹(图4-A, B, E),而5月1~7日的回推落点分布在浙江东部及海上,也为无效迁飞轨迹(图4-F),这也验证了大气环流背景场的分析。

4月28日、29日轨迹分析结果表明,有效虫源地主要分布在华南地区,草地贪夜蛾迁入的有效轨迹是4月29日和4月30日清晨的回推轨迹。具体迁飞路径如下:4月27日傍晚,广西东部草地贪夜蛾虫源起飞,在1 250~1 750 m高度上随强西南风向东北方向迁飞;次日清晨降落于江西中部;4月28日傍晚,该种群再次起飞继续向北迁飞;28日夜间的低温屏障及下沉气流可能会导致草地贪夜蛾迫降于建德地区(图2-M, R, 4-C)。而4月30日清晨的回推轨迹与之前基本类似,4月29日傍晚,浙江西部地区的草地贪夜蛾种群再次起飞,伴随着降雨、低温屏障和下沉气流,草地贪夜蛾短距离迁飞迫降至建德地区(图2-I, N, S, 4-D)。综上所述,



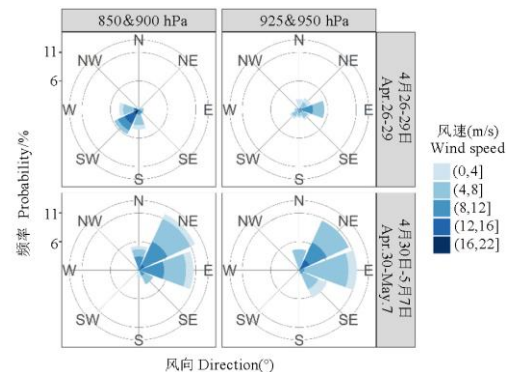
A~E—850 hPa 水平平均风场的模拟流线和等值线(阴影为风速, 单位 m/s); F~J—模拟累计降雨量(单位 mm); K~O—850 hPa 温度的模拟等值线(阴影为温度, 单位 °C); P~T—建德市 800—950 hPa 垂直风速的时间-高度剖面图(单位 m/s)。三角形表示建德市位置。
A~E, The simulated streamline and isotach of horizontal average wind fields at 850 hPa (The shade area represents wind speed, m/s); F~J, The simulated accumulated precipitation (mm); K~O, The simulated isotach of horizontal average temperature at 850 hPa (The shade area represents temperature (°C); P~T, Time-height profile of vertical velocity (m/s) from 800 to 950 hPa in Jiande City (m/s). The triangle represents Jiande City.

图 1 2019 年 4 月 26—30 日 19:00-05:00 我国南方地区大气环流背景场
Fig. 1. Atmospheric circulation field during 19:00 to 05:00 in Guangdong, Jiangxi and Zhejiang provinces from April 26th to April 30th, 2019.

4 月 28 日傍晚—30 日清晨, 可能为草地贪夜蛾迁入建德市的有效时期, 其虫源地主要分布在广西东部, 1 250—1 750m 为草地贪夜蛾适宜的飞行高度, 经过 2~3 晚的飞行可以降落于浙江省建德市。

3 讨论

轨迹分析是确定迁飞性昆虫虫源地和降落区常用、有效的方法之一。草地贪夜蛾为小型迁飞蛾类, 在高空迁飞过程中可视为一个空气质点, 运用气象动力学原理和有关数学模型可模拟其运行轨迹, 追溯其虫源地和预测向外扩散的路径^[17,18]。本研究根据高空的温度和气流场, 并设置了起飞降落时间、续航时间、飞行高度、迁飞次数等生物学参



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.

图 2 2019 年 4 月 26 日-5 月 7 日 19:00—05:00 建德市 850~950 hPa 风玫瑰图
Fig. 2. Circular histograms of wind directions at 850~950 hPa during 20:00 to 06:00 in Jiande City from April 26th to May 7th.

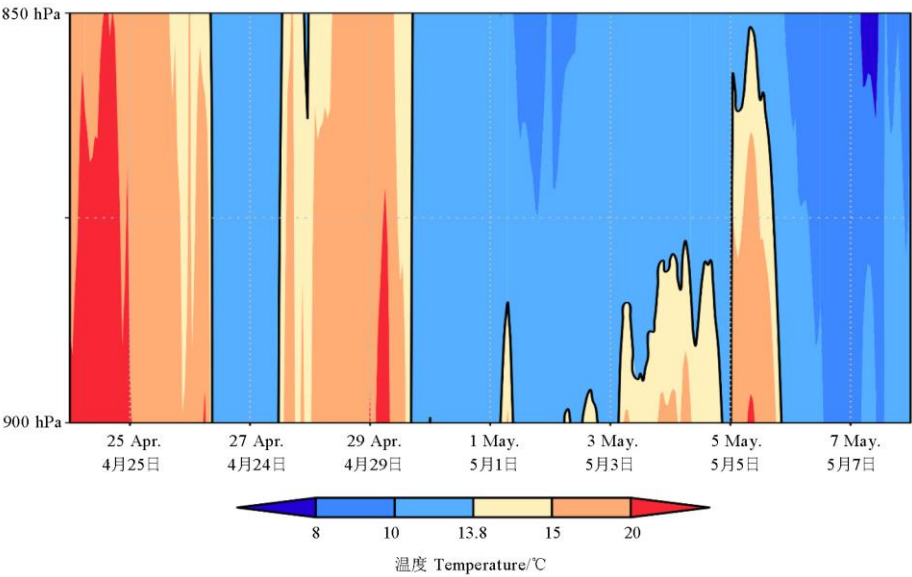


图 3 2019 年 4 月 26 日–5 月 7 日建德市 850 和 900 hPa 温度的时间-高度剖面图。
Fig. 3. Time-height profile of temperature at 850 and 900 hPa in Jiande City from April 26th to May 7th, 2019.

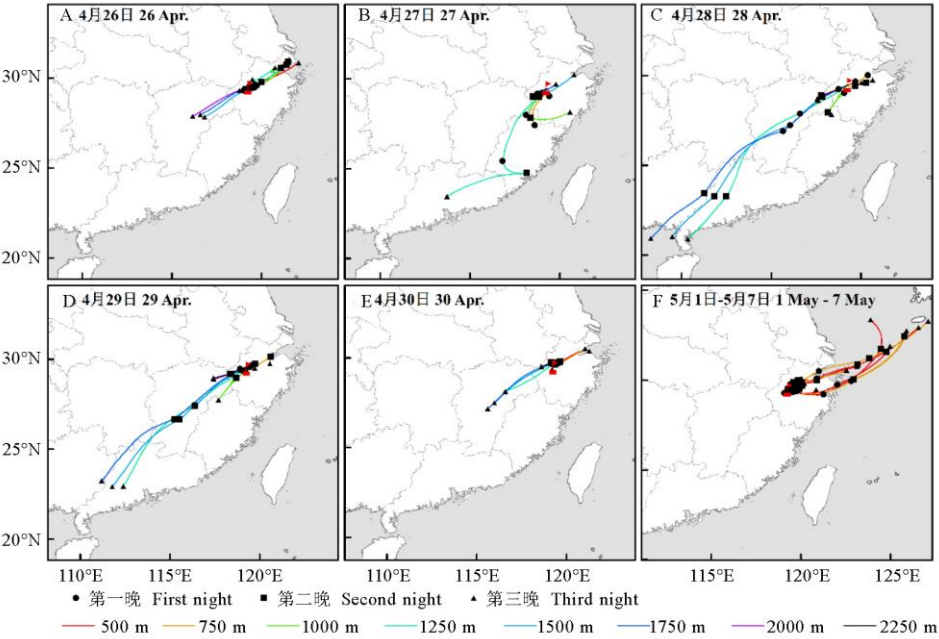


图 4 2019 年 4 月 26 日–5 月 7 日建德市草地贪夜蛾的回推轨迹分析
Fig. 4. Backward trajectories of *Spodoptera frugiperda* in Jiande City form 26 April to 7 May, 2019.

数，进一步优化了昆虫三维轨迹分析模型，通过轨迹分析明确了浙江省草地贪夜蛾迁入种群的有效虫源地分布在广西东部。根据广西梧州市植保站的调查结果，4 月中旬以来，以广西梧州市为代表的广西东部地区草地贪夜蛾已经有不同程度的发生，至 4 月下旬应可完成一代繁殖，有可能为浙江省建德市的迁入提供有效虫源，这也与推算的幼虫发育历期吻合，一定程度上说明本研究虫源地的分布结果较为可靠。广东地区虽也有少量有效落点，但广

东报道发现草地贪夜蛾的时间为 4 月 23 日，田间调查龄期以高龄为主，按照幼虫及蛹的发育历期，可能无法提供 4 月 28–30 日的有效迁出虫源，但如果有更早期的迁入虫源定殖繁殖，完全有可能为浙江提供有效虫源。

由于昆虫飞行能力的限制，必须要借助外力因素。迁飞性昆虫为了完成每年的季节性迁飞，必须适应并利用这种周期性的大气特点，充分利用不同季节和时刻的盛行气流^[25,26]，其迁飞模式主要与温

度和风速的垂直分布有关, 迁飞方向与风向关系密切^[23]。我国东半部地处典型的东亚迁飞场^[27], 受东亚季风环流的影响, 春夏季的偏南气流和秋季的偏北气流为昆虫远距离迁飞提供了运载条件。本研究通过分析 2019 年 4 月下旬逐日 19:00 至 5:00 850 hPa 高度层的风温场, 认为 4 月 26—29 日, 受西太平洋副热带高压的控制, 我国南方大部分地区的高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华南、江西、浙江一带, 可为草地贪夜蛾的远距离迁飞提供合适的运载气流。

一些特定的天气系统和天气过程等会迫使空中虫群集聚, 进而中途迫降, 形成局地大发生的种群^[25,28,29], 其中下沉气流和雨水冲刷是导致空中虫群大规模集中降落的主要原因^[29]。本研究通过分析 4 月下旬天气背景场变化动态, 认为低温屏障、降雨和下沉气流均可能是导致草地贪夜蛾迫降的天气条件, 其中低温屏障和下沉气流主要影响了 4 月 28 日夜间降虫, 下沉气流、低温屏障和降雨主要影响了 4 月 29 日夜间降虫。而 5 月 1 日—7 日持续低温以及不适宜的风向对草地贪夜蛾继续向北迁飞不利, 从而导致草地贪夜蛾迁入种群滞留当地、定殖为害。

本研究在模拟草地贪夜蛾迁飞高度时, 设置了距海平面 500、750、1 000、1 250、1 500、1 750、2 000、2 250m 共计 8 个飞行高度参数。最终筛选得到的有效轨迹中, 飞行高度在 1 250—1 750m 之间。风玫瑰图分析结果也表明, 4 月下旬 850 和 900 hPa 高度上存在较为强劲的西南低空急流(图 2-A), 而 925 和 950 hPa 高度上的风向主要为东风(图 2-B), 不适合草地贪夜蛾虫源向北迁飞。事实上, 草地贪夜蛾在空中的飞行高度不仅与高空的风温场有直接的关系, 还与迁飞季节、地形地貌环境等密切相关^[21,30-32]。

自 2019 年 1 月草地贪夜蛾入侵我国云南后蔓延速度极快, 仅 5 个月便已迁飞至我国 20 省, 并已抵达我国黄淮玉米主产区, 随着西南季风加强, 可继续北迁进入东北玉米主产区^[11]。已有研究分析了东南亚及华南地区草地贪夜蛾虫源的季节性迁飞路径及迁飞规律^[11-14,33], 浙江省地处草地贪夜蛾的迁飞过渡区, 本研究以浙江省建德市为例, 分析探讨了草地贪夜蛾迁入浙江的路径及气象背景场。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^[11-14], 其季节性南北往返迁飞将成为常态, 应基于迁飞路径加强监

测、测报工作, 对虫源集中降落区和重发区实施统防统治, 防止较大面积成灾现象发生。

参考文献:

- [1] 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): 534-549.
- [2] Sparks A N. A review of the biology of the fall armyworm[J]. *The Florida Entomologist*, 1979, 62(2): 82-87.
- [3] Early R, González-Moreno P, Murphy S T, Day R. Forecasting the global extent of invasion of the cereal pest *Spodoptera frugiperda*, the fall armyworm[J]. *NeoBiota*, 2018, 40: 25-50.
- [4] Goergen G, Kumar P L, Sankung S B, Togola A, Tamò Manuele, Luthe D S. 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.
- [5] Feldmann F, Rieckmann U, Winter S. The spread of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* in Africa—What should be done next[J]? *Journal of Plant Diseases and Protection*, 2019, 126(5): 97-101.
- [6] Stokstad E. New crop pest takes Africa at lightning speed[J]. *Science*, 2017, 356(6337): 473-474.
- [7] Ganiger P C, Yeshwanth H M, Muralimohan K. Occurrence of the new invasive pest, fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (Smith J E) (Lepidoptera: Noctuidae), in the maize fields of Karnataka, India[J]. *Current Science*, 2018, 115(4): 621-623.
- [8] 郭井菲, 赵建周, 何康来, 张峰, 王振营. 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.
Guo J F, Zhao J Z, He K L, Zhang F, Wang Z Y. Potential invasion of the crop-devastating insect pest fall armyworm *Spodoptera frugiperda* to China[J]. *Plant Protection*, 2018, 44(6): 1-10. (in Chinese with English abstract)
- [9] 杨普云, 朱晓明, 郭井菲, 王振营. 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 P Y, Zhu X M, Guo J F, Wang Z Y. Strategy and advice for managing the fall armyworm in China[J]. *Plant Protection*, 2019, 45(4): 1-6. (in Chinese with English abstract)
- [10] 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.
Jiang Y Y, Liu J, Zhu X M. 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. (in Chinese with English abstract)
- [11] Li X J, Wu M F, Ma J, Gao B Y, Wu Q L, Chen A D, Liu J, Jiang Y Y, Zhai B P, Early R, Chapman J W, Hu G. Prediction of migratory routes of the invasive fall armyworm in eastern China using a trajectory analytical approach[J]. *Pest Management Science*, 2019.(in press) doi: <https://doi.org/10.1002/ps.5530>
- [12] Ma J, Wang Y P, Wu M F, Gao B Y, Liu J, Lee G S, Otuka A, Hu G. High risk of the Fall Armyworm invading into Japan and the Korean Peninsula via overseas migration[J]. *Journal of Applied Entomology*, 2019, 143(9): 911-920 doi: <https://doi.org/10.1111/jen.12679>
- [13] 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, 2019, 45(2): 1-6.
Wu Q L, Jiang Y Y, Wu K M. Analysis of migration routes of fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) from Myanmar to China[J]. *Plant Protection*, 2019, 45(2): 1-6. (in Chinese with English abstract)
- [14] 吴秋琳, 姜玉英, 胡高, 吴孔明. 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. (in Chinese with English abstract)
Wu Q L, Jiang Y Y, Hu G, Wu K M. 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.(in Chinese with English abstract)
- [15] 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.
- [16] 江幸福, 张蕾, 程云霞, 宋琳琳. 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 X F, Zhang L, Cheng Y X, Song L L. Advances in migration and monitoring techniques of the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda*[J]. *Plant Protection*, 2019, 45(1): 12-18. (in Chinese with English abstract)
- [17] Wu Q L, Hu G, Westbrook J K, Sword G A, Zhai B P. An advanced numerical trajectory model tracks a Corn Earworm Moth migration event in Texas, USA[J]. *Insects*, 2018, 9(3): 115.
- [18] 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 F, Zhai B P, Hu G. Trajectory analysis methods for insect migration research[J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2013, 50(3): 853-862. (in Chinese with English abstract)
- [19] Wang F Y, Yang F, Lu M H, Luo S Y, Zhai B P, Lim K S, McInerney C E, Hu G. Determining the migration duration of rice leaf folder (*Cnaphalocrocis medinalis* (Guenée)) moths using a trajectory analytical approach[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 39853.
- [20] 齐国君, 吕利华, 蓝日青, 谢金宏, 张伟群. 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.
Qi G J, Lv L H, Lan R Q, Xie J H, Zhang W Q. 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. (in Chinese with English abstract)
- [21] Wolf W W, Westbrook J K, Raulston J R, Pair S D, Hobbs S E, Riley J R, Mason P J, Joyce R J V. Radar observations of orientation of noctuids migrating from corn fields in the Lower Rio Grande Valley[J]. *Southwestern Entomologist* 1995, 18(Suppl): 45-61.
- [22] Nagoshi R N, Meagher R L, 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.
- [23] Westbrook J K. Noctuid migration in Texas within the nocturnal aeroecological boundary layer[J]. *Integrative and Comparative Biology*, 2008, 48(1): 99-106.
- [24] Hogg D B, Pitre H N, Anderson R E. Assessment of early-season phenology of the fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) in Mississippi[J]. *Environmental Entomology*, 1982, 11(3): 705-710.
- [25] Hu G, Lu F, Lu M H, Liu W C, Xu W G, Jiang X H, Zhai B P. The influence of typhoon Khanun on the return migration of *Nilaparvata lugens* (Stål) in eastern China[J]. *PLoS ONE*, 2013, 8(2): e57277.
- [26] Wainwright C.E, Stepanian P.M, Horton K G. The role of the US Great Plains low-level jet in nocturnal migrant behavior[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2016, 60(10): 1531-1542.
- [27] 张志涛. 昆虫迁飞与昆虫迁飞场. 植物保护, 1992, 18(1): 48-50.
Zhang Z T. Insect migration and insect migration arena[J]. *Plant Protection*, 1992, 18(1): 48-50. (in Chinese with English abstract)
- [28] 胡高, 包云轩, 王建强, 翟保平. 褐飞虱的降落机制[J]. 生态学报, 2007, 27(12): 5068-5075.
Hu G, Bao Y X, Wang J Q, Zhai B P. Case studies on the landing mechanisms of the brown planthoppers *Nilaparvata lugens* (Stål) [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(12): 5068-5075. (in Chinese with English abstract)
- [29] Westbrook J K, Isard S A. Atmospheric scales of biotic dispersal[J]. *Agricultural and Forest Entomology*. 1999, 97(4): 263- 274.

- [30] Westbrook J K, Nagoshi R N, Meagher R L, Fleischer S J, Jairam S. Modeling seasonal migration of fall armyworm moths[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2016, 60(2): 255-267.
- [31] Wolf W W, Westbrook J K, Raulston J, Pair S D, Hobbs S E, Riley J R. 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.
- [32] 潘蕾, 武向文, 陈晓, 姜玉英, 曾娟. 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.
Pan L, Wu X W, Chen X, Jiang Y Y, Zeng J. 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. (in Chinese with English abstract)
- [33] 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): 487-496.
Qi GJ, Ma J, Hu G, Yu Y H, Zhen A D, Gao Y, Lü L H. Analysis of migratory routes and atmospheric features of newly invaded the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) in Guangdong Province[J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2019, 41(3): 487-496. (in Chinese with English abstract)