



黄乐, 陈辉, 张海波, 朱凤, 胡高. 2020年邳州市草地贪夜蛾初迁虫源的迁入路径及气象背景 [J]. 环境昆虫学报, 2022, 44 (4): 775–783.

## 2020年邳州市草地贪夜蛾初迁虫源的 迁入路径及气象背景

黄乐<sup>1,2</sup>, 陈辉<sup>1,2</sup>, 张海波<sup>3</sup>, 朱凤<sup>3</sup>, 胡高<sup>1,2\*</sup>

(1. 南京农业大学昆虫系, 南京 210095; 2. 南京农业大学生物互作与有害生物绿色防控全国重点实验室(筹), 南京 210095;  
3. 江苏省植保植检站, 南京 210036)

**摘要:** 2020年江苏省邳州市于3月31日发现草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 成虫, 远早于该地区2019年草地贪夜蛾的始见期6月份。为明确该地区草地贪夜蛾种群性质, 利用昆虫轨迹分析方法, 模拟分析了2020年江苏省邳州市早期发现的草地贪夜蛾的迁飞路径及天气背景场。结果表明: 邳州市2019年12月–2020年2月温度低, 草地贪夜蛾无法在此地越冬存活, 2020年3月31日所诱捕的草地贪夜蛾为外地迁入, 其虫源来自广西和广东西部的周年繁殖区; 虽然邳州市3月份常年盛行北风和西北风, 西南风发生概率低导致草地贪夜蛾迁入邳州市概率较小, 但2020年3月底850 hPa的强西南气流为草地贪夜蛾从我国华南地区迁入邳州市提供了条件。本研究结果阐明了在极端条件下草地贪夜蛾从华南地区迁入江苏省的可能性, 丰富了江苏省草地贪夜蛾春季早期迁入的理论依据。

**关键词:** 草地贪夜蛾; 迁飞路径; 虫源地; 轨迹分析方法

中图分类号: Q968.1; S433

文献标识码: A

文章编号: 1674-0858 (2022) 04-0775-09

### Analysis of the source of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* invading Pizhou for the first time in 2020

HUANG Le<sup>1,2</sup>, CHEN Hui<sup>1,2</sup>, ZHANG Hai-Bo<sup>3</sup>, ZHU Feng<sup>3</sup>, HU Gao<sup>1,2\*</sup> (1. Department of Entomology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. State Key Laboratory of Biological Interactions and Crop Health, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 3. Plant Protection Station of Jiangsu Province, Nanjing 210036, China)

**Abstract:** The fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) was found in Pizhou City, Jiangsu Province, on 31 March 2020, well before the first *S. frugiperda* was found in this region in June 2019. To clarify the nature of the *S. frugiperda* population in the region, the migration paths and weather background fields of the early found *S. frugiperda* in Pizhou City, Jiangsu Province in 2020 were simulated using insect trajectory analysis. The moths trapped in Pizhou on 31 March 2020 were migrant insects from the annual breeding areas of Guangxi and western Guangdong, and from 25 March to 31 March 2020 there was a strong southwesterly airflow at 850 hPa, which was conducive to the long-distance migration of the moths to Pizhou. However, the prevailing northerly and northwesterly winds in Pizhou in March were low, with a low probability of southwesterly occurrence and low wind speed, making the migration of the *S.*

基金项目: 江苏省现代农业项目 (BE2020349)

作者简介: 黄乐, 硕士研究生, 研究方向为昆虫迁飞及其监测预警, E-mail: 2019102077@njau.edu.cn

\* 通讯作者 Author for correspondence: 胡高, 教授, 研究方向为昆虫迁飞及其监测预警, E-mail: hugao@njau.edu.cn

收稿日期 Received: 2022-02-05; 接受日期 Accepted: 2022-04-27

*frugiperda* into Pizhou a low probability event. The results clarified the possibility of the migration of *S. frugiperda* from South China to Jiangsu Province under extreme conditions, and enriched the theoretical basis of the migration of *S. frugiperda* in early spring in Jiangsu Province.

**Key words:** *Spodoptera frugiperda*; migratory route; insect source area; trajectory analytical approach

草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) 是源于美洲热带地区和亚热带地区的重大入侵性害虫, 并于 2018 年年末入侵我国 (Goergen *et al.*, 2016; Harrison *et al.*, 2019; 陈辉等, 2020a; Sun *et al.*, 2020)。该虫幼虫寄主植物范围广, 尤其喜食玉米 *Zea mays* L., 该虫为害可造成 15% ~ 73% 的玉米产量损失, 苗期为害甚至可造成绝收 (Hruska and Fred, 1997; Overton *et al.*, 2021)。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 年草地贪夜蛾在我国 26 省 (市、自治区) 1 500 多个县市发生为害, 2020 年、2021 年再次北迁入侵 27 省 (市、自治区) 1 400 多县, 年发生面积均超过 1 600 万亩, 严重威胁我国的粮食生产, 已被列入我国一类害虫名录 (姜玉英等, 2019; 吴孔明, 2020; Wu *et al.*, 2021a; Zhou *et al.*, 2021)。

草地贪夜蛾各阶段发育起始温度均在 10℃ 以上 (何莉梅, 2019)。当温度低于 15℃, 该虫不能完成生活史 (Barfield *et al.*, 1978)。因此, 该虫在我国大部分地区以及日本、朝鲜半岛均无法越冬存活。在亚洲东部该虫的周年繁殖区仅限于 1 月月平均温度 10℃ 等温线以南区域 (28°N 以南), 包括云南南部地区、广西中南部、广东中南部、海南、福建南部和台湾的部分地区以及中南半岛诸国 (Li *et al.*, 2020; 姜玉英等, 2021)。草地贪夜蛾为典型的迁飞性害虫, 周年繁殖区以北区域 (包括我国北方玉米主要生产区) 每年都能够通过远距离迁飞经东、西两条路径再次入侵为害。西线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; 其东线迁飞源于泰国、老挝、越南以及我国华南越冬区, 逐步北迁进入长江流域、黄淮地区以及黄河以北地区, 甚至进入东北地区 (陈辉等, 2020b; Li *et al.*, 2020; Wu *et al.*, 2021b)。

江苏省位于草地贪夜蛾东线路径上的迁飞过渡区, 由境外虫源地及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, 进入黄淮海夏玉米产区及东北春玉米产区, 严重威胁我国玉米生产。邳州市位于江苏省北部, 其境内

水系属淮河流域。根据陈辉等 (2020b) 预测模型结果, 该地区属黄淮海 3 ~ 5 代区, 主迁入期为 7 月, 极端情况下 3 月份即可出现成虫迁入。针对邳州市 3 月 31 日诱到草地贪夜蛾这一极端情况, 结合草地贪夜蛾成虫存活时间及生物学特性, 故本文对 2020 年 3 月 27 日 - 3 月 31 日时段进行轨迹模拟及大气背景场分析, 旨在明确江苏省邳州市春季早期草地贪夜蛾的虫源性质, 阐述极端条件下草地贪夜蛾从华南地区迁入邳州市的可能性, 以期丰富我国草地贪夜蛾早期的监测预警理论。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据来源

气象数据: 文中 2019 年冬季温度采用邳州基本气象站的气象数据, 该数据包括 2019 年 12 月 - 2020 年 3 月每天每 2 h 实时温度数据; 此外, 文中 2010 - 2020 年气象要素分析采用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), 此数据集为逐日更新的每 6 h 一次、全球 1° × 1° 的网格数据。

虫情数据: 邳州市 3 月 31 日诱集到草地贪夜蛾成虫的数据由邳州市植保植检站提供。2019 年底至 2020 年初的草地贪夜蛾越冬调查数据以及各地区草地贪夜蛾始见日期的数据由全国农业技术推广服务中心提供。

地图数据: 来自国家基础地理信息中心 (<http://www.ngcc.cn/ngcc/html/1/index.html>)。

### 1.2 草地贪夜蛾迁入虫源分析

#### 1.2.1 草地贪夜蛾 3 月下旬可能的迁出地分布

基于 2020 年全国各地区草地贪夜蛾始见期以及始见虫态, 利用有效积温模型, 计算邳州市以南地区草地贪夜蛾的羽化迁出时间。本研究从每 6 h 一次的、1° × 1° 的 FNL 气象数据中提取 02:00、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,

基于这两个指标模拟草地贪夜蛾的发育进度。草地贪夜蛾卵、幼虫、蛹和卵到蛹的发育起点温度分别为 10.27℃、11.10℃、12.20℃和 11.34℃,有效积温分别为 44.57、211.93、135.69 和 390.55 日·度(何莉梅等,2019)。根据草地贪夜蛾发育情况,确定各地区草地贪夜蛾成虫羽化时间。

### 1.2.2 WRF 中尺度模式的模拟方案

草地贪夜蛾迁入虫源分析采用一种基于 WRF (The Weather Research and Forecasting, WRF; 4.0 版本, www.wrf-model.org) 模式输出的高时空分辨率气象背景场的轨迹分析方法。在本研究中, WRF 模式的模拟方案和参数与本课题组以往的研究基本一致 (Ma *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2020), 其中部分主要参数如下: 模型区域网格数为 140 × 150 个网格点, 分辨率 30 km 提供 29 个垂直层且最高层边界为 100 hPa。美国国家环境预报中心的最终分析数据 (FNL, <https://www.ncep.noaa.gov/>) 被用作 WRF 模型输入的气象数据。模型预测时间为 72 h, 数据输出间隔 1 h/次, 数据包含水平和垂直风速、温度和降雨量等。

### 1.2.3 昆虫飞行轨迹模拟方案

本文中研究模拟的草地贪夜蛾迁飞行为参数与 Ma *et al.* (2019)、Li *et al.* (2020)、陈辉等 (2020ab) 等以往研究一致, 主要为:

(1) 草地贪夜蛾在空中的定向行为尚未有明确的研究结果, 根据以往的研究内容, 在此次模拟中设定草地贪夜蛾顺风飞行 (陈辉等, 2020a), 暂不考虑定向偏角。

(2) 蛾类昆虫迁飞通常是连续飞行 3~5 个夜晚, 即日落黄昏时刻起飞, 次日凌晨日出之前降落, 次日黄昏再次起飞迁出。根据邳州市日出日落时间设定其起飞时间为 18:00, 降落时间为 04:00。草地贪夜蛾成虫可存活 10~15 d (何莉梅等, 2019), 因此, 邳州市 3 月 31 日所诱集的草地贪夜蛾可能是前几日迁入的, 本文将回推轨迹的模拟时间设定为 3 月 27 日-31 日, 并回推 5 个夜晚。也就是说, 草地贪夜蛾最早可能是 3 月 22 日迁出, 经 5 个夜晚的迁飞到达邳州, 至 3 月 31 日被诱集, 时间跨度长达 10 d。

(3) 相关研究表明夜蛾类迁飞害虫在迁飞时自身飞行速度约为 2.5~4.0 m/s, 因此在本文中设定草地贪夜蛾的飞行速度为 3.0 m/s (Chapman *et al.*, 2010; Minter *et al.*, 2018)。

(4) 尚不清楚草地贪夜蛾飞行高度, 本文参

考以往研究设定草地贪夜蛾迁飞时的飞行高度为 500、750、1 000、1 250、1 500、1 750、2 000、2 250 m 8 个高度 (Ma *et al.*, 2019; Wu *et al.*, 2021b)。

(5) 迁飞昆虫在迁飞时, 一旦环境温度低于其飞行低温阈值, 便会停止振翅。目前尚未有明确的草地贪夜蛾飞行低温阈值。以往研究将草地贪夜蛾的飞行低温阈值设定为该虫的发育起点温 13.8℃ (Ma *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2020)。室内应用飞行磨进行草地贪夜蛾吊飞测定在降温、升温处理下的飞行低温阈值分别为 13.1℃、14.9℃ (Chen *et al.*, 2022)。因此, 以往研究所设定飞行低温阈值为 13.8℃ 基本合理, 本文继续采用该数值。

(6) 由于 3 月份温度较低, 草地贪夜蛾夜间迁飞可能会因温度低于飞行低温阈值而随时迫降。因此, 轨迹回推时进行逐小时回推, 轨迹计算开始时刻 (即草地贪夜蛾迁飞的降落时刻) 为当日 04:00、03:00、02:00、01:00 以及前 1 日 24:00、23:00、22:00、21:00、20:00、19:00。每晚轨迹计算的终止时刻为前 1 日 18:00, 即草地贪夜蛾起飞时刻。只有能够从降落时刻回推至起飞时刻 (18:00) 的轨迹, 才被视为有效轨迹, 其轨迹终点为可能的虫源迁出地。第 2 晚回推将以第 1 晚有效轨迹的终点为轨迹回推的起点, 以此类推, 共回推 5 个夜晚。根据每晚回推有效轨迹的终点分布, 结合草地贪夜蛾越冬分布情况 (姜玉英等, 2021) 和南方虫源区各地草地贪夜蛾羽化迁出时间, 综合判断邳州市此次草地贪夜蛾迁入的可能虫源地。

## 1.3 草地贪夜蛾迁入的大气环流背景场分析

根据轨迹模拟结果, 选取相关气象数据, 通过分析 2019-2020 年冬季温度变化动态来判断邳州市草地贪夜蛾能否越冬存活; 分析 2020 年 3 月 24-31 日 20:00、02:00 2 个时刻的 850 hPa 高度层的每日平均风场、2011-2020 年 3 月份的 10 年 850 hPa 平均风场以及邳州市 2011-2020 年 3 月份的 10 年 850 hPa 平均风玫瑰图, 来综合分析草地贪夜蛾迁飞的天气背景场。

## 2 结果与分析

### 2.1 邳州市草地贪夜蛾种群性质

邳州市 2019 年 12 月-2020 年 2 月期间的温度不适合草地贪夜蛾越冬。2019 年 12 月 (月均温

为  $6.79^{\circ}\text{C} \pm 2.62^{\circ}\text{C}$ ) 以及 2020 年 1 月 (月均温  $4.33^{\circ}\text{C} \pm 2.82^{\circ}\text{C}$ ) 平均温度均低于  $10^{\circ}\text{C}$ 。其中 2020 年 2 月份 (月均温为  $7.82^{\circ}\text{C} \pm 4.42^{\circ}\text{C}$ ) 平均温度大都低于  $10^{\circ}\text{C}$ , 并且有连续 1 周的温度 (平均温度  $2.16^{\circ}\text{C} \pm 1.11^{\circ}\text{C}$ ) 甚至低于  $5^{\circ}\text{C}$  (图 1)。因此, 草地贪夜蛾在邳州市不能越冬, 3 月 31 日

诱到的草地贪夜蛾成虫为迁入虫源。根据全国各地草地贪夜蛾始见期推算, 3 月下旬, 我国南方各省出现了一次草地贪夜蛾迁入峰。江西北部、浙江北部均出现了草地贪夜蛾迁入 (图 2-A)。邳州 3 月 31 日所诱集成虫极可能是此次北迁峰期由南方迁入的。

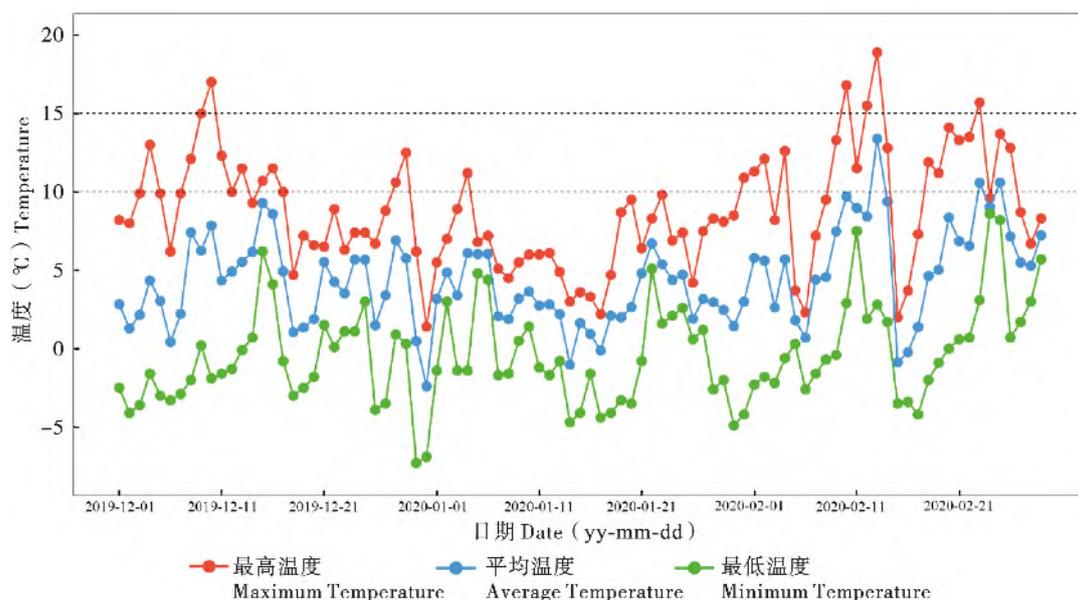


图 1 2019 年 12 月 -2020 年 2 月邳州市温度变化图

Fig. 1 Daily temperature at Pizhou City from December 2019 to February 2020

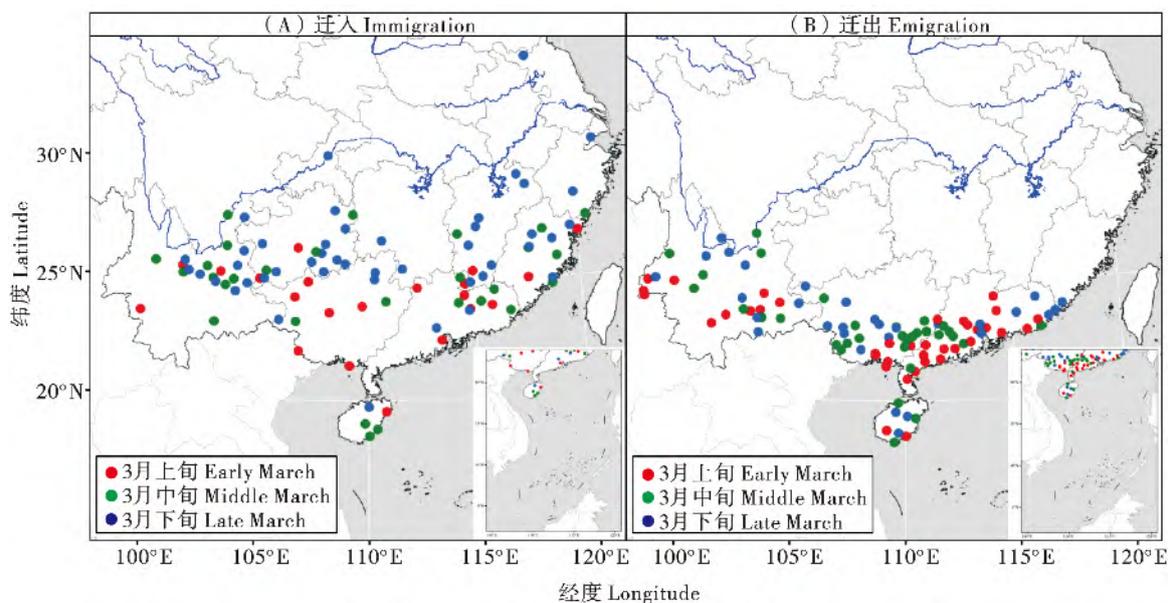


图 2 2020 年 3 月我国草地贪夜蛾发生情况

Fig. 2 Occurrence area of fall armyworm in China in March 2020

注: A, 草地贪夜蛾 3 月份出现草地贪夜蛾迁入的站点; B, 草地贪夜蛾 3 月份存在成虫羽化迁出的站点。各站点草地贪夜蛾的迁入期和羽化迁出期均依据当地草地贪夜蛾始见的时间和虫态利用有效积温模型推算获得。Note: A, Location of sites where fall armyworm was observed to immigrate in March; B, Location of sites where fall armyworm adults would emerge and emigrate in March. Both the date of immigration and emigration were calculated by the day-degree model.

## 2.2 邳州市草地贪夜蛾虫源分析

根据我国 3 月草地贪夜蛾发生情况来看, 仅华南草地贪夜蛾周年繁殖区可提供迁出虫源 (图 2-B)。不过, 3 月下旬我国长江以南各省区均出现草地贪夜蛾迁入, 这意味着华南终年繁殖区的草地贪夜蛾极可能在此时间段向北迁出, 主要迁入长江以南区域, 但不能排除极个别草地贪夜蛾个体继续向北迁飞, 从而迁入邳州以及其他区域。

对邳州市草地贪夜蛾回推轨迹进行分析, 其虫源地主要分布在广西和广东西部 (图 3)。回推 1 d 75% 以上的有效落点在邳州市周围, 22% 的有效落点分布在安徽省北部。回推 2 d 的有效落点

55% 以上集中在安徽南部, 最南可至湖南北部。回推 3 d 约 21% 的有效落点可至湖南及江西中部。回推 4 d 后, 约 8% 有效落点可至广西、广东。广西、广东作为周年繁殖区可一直提供虫源。因此在 3 月底, 只有广西和广东可提供有效虫源 (图 2-B)。在 3 月 27 日 - 3 月 31 日期间, 每日向前回推 5 d, 计算有效落点后, 只有 3 月 25 日 - 3 月 29 日的迁飞过程有完整轨迹。因此, 草地贪夜蛾应是 3 月 25 日从广西和广东西部出发, 向西南方向迁飞, 途经湖南、江西、安徽, 经过 4 d 到达江苏省邳州市。

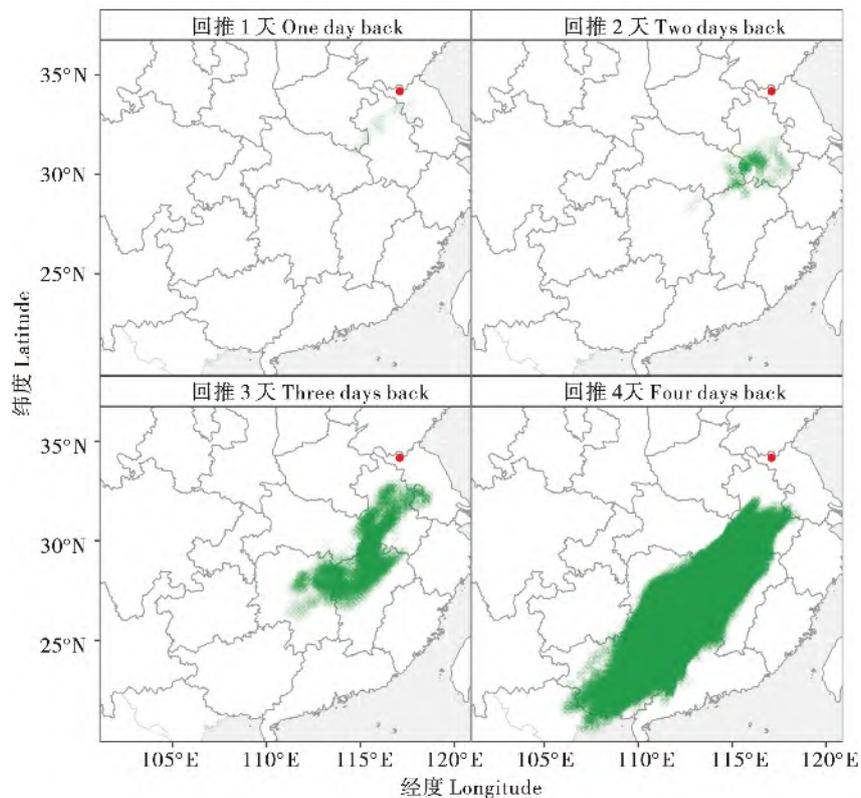


图 3 2020 年 3 月 27 日 - 3 月 31 日邳州市草地贪夜蛾的回推轨迹分析

Fig. 3 Backward trajectories of *Spodoptera frugiperda* in Pizhou from 27 March to 31 March, 2020

注: 红色点为邳州市, 绿色点为每日回推轨迹的有效落点。Note: Red point showed Pizhou City, and the green points presented the effective endpoints of the daily backward trajectories.

## 2.3 邳州市草地贪夜蛾迁入大气背景场分析

2020 年 3 月 25 日 - 3 月 26 日, 850 hPa 高度层有很强的西南急流, 贯穿了华北、华中、华东、华南等大片区域, 核心区风速可达 16 m/s 以上 (图 4), 有利于周年繁殖区的草地贪夜蛾向北迁飞。27 日、28 日邳州市虽被北风控制, 可此时风场图是整晚的平均风场, 根据轨迹回推结果应该在短时刻内有合适的南风使草地贪夜蛾北迁,

29 日时, 邳州南部盛行东南风, 也有利于草地贪夜蛾北迁。

根据 2011 - 2020 年我国东南部 850 hPa 风场可发现 (图 5-A, C), 我国南部 3 月份 850 hPa 高度的风场风向多变, 且风速较小 (风速最大不超过 4 m/s), 且 3 月中下旬风速都小于 2 m/s。期间邳州市 850 hPa 高度层夜间盛行风为西风 and 西北风, 发生频率分别为 18.23% 和 20.48%, 南向风

(包括东南风、南风 and 西南风) 的发生频率为 29.67%，其中西南风发生频率为 13.06% (图 5-D, F)。进一步统计发现: 2011 - 2020 年期间邳州市 3 月夜间出现风速大于 4 m/s 以上南向风、并且 850 hPa 高度层大气温度高于飞行低温阈值

(13.8℃) 的概率仅为 4.35%，3 月上、中、下旬分别为 2.01%、7.24%、3.50%。因此，邳州市与我国南部草地贪夜蛾周年繁殖区 850 hPa 高空风场连通性小 (图 5-A, C)，无法为周年繁殖区草地贪夜蛾向北迁飞及迁入邳州市提供合适的运载气流。

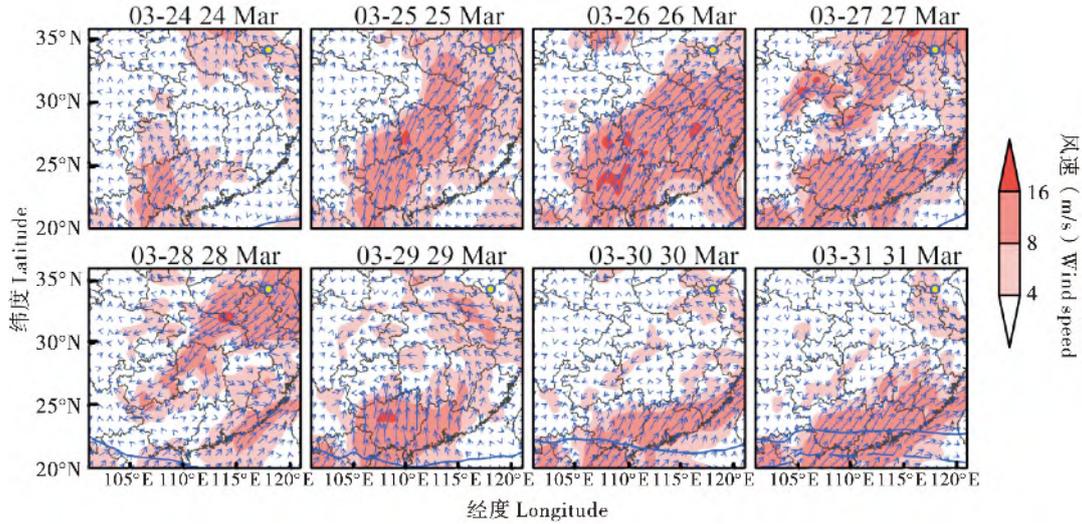


图 4 邳州市 2020 年 3 月 24 - 31 日 850 hPa 平均风场 (阴影为风速, 单位 m/s)

Fig. 4 Mean wind fields on 850 hPa level in Pizhou from March 24 to March 31 in 2020 (The shade area represents wind speed, m/s)

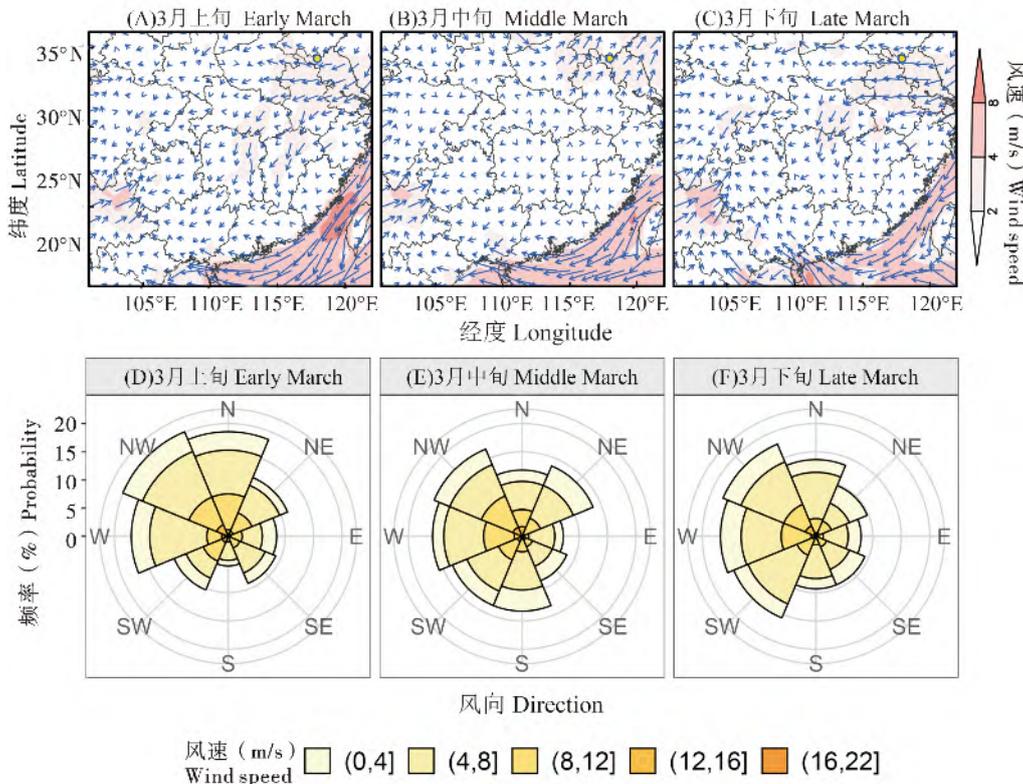


图 5 2011 - 2020 年 3 月份高空 850 hPa 平均风场 (阴影为风速, 单位 m/s)

Fig. 5 Mean wind fields at 850 hPa in March, 2011 - 2020 (The shade area represents wind speed, m/s)

注: A ~ C, 我国东部 3 月 850 hPa 平均风场图; D ~ F, 邳州市 850 hPa 风向风速分布图。Note: A ~ C, Mean wind field at 850 hPa in eastern China in March 2010 - 2020; D ~ F, Circular histograms of wind directions at 850 hPa at Pizhou in March 2010 - 2020.

综上所述,我国南部终年繁殖区的草地贪夜蛾在正常的气候条件下,直接迁入邳州市的可能性很小,而2020年3月份受南支槽影响产生的风场可以为终年繁殖区草地贪夜蛾迁入邳州市提供有利条件,这也表明极端条件下草地贪夜蛾能在3月份迁入邳州市,为小概率事件。

### 3 结论与讨论

本文结合实时气象数据和昆虫轨迹分析模型,明确了邳州市3月31日诱到的草地贪夜蛾为外地迁入,其虫源地分布在周年繁殖区广西、广东西部。相关研究表明草地贪夜蛾生长发育最适温度为 $20^{\circ}\text{C} \sim 25^{\circ}\text{C}$ ,卵、幼虫、蛹的发育起点温度分别为 $10.27^{\circ}\text{C}$ 、 $11.10^{\circ}\text{C}$ 、 $12.20^{\circ}\text{C}$ (何莉梅等,2019),然而 $17^{\circ}\text{C}$ 条件下,草地贪夜蛾生长发育迟缓,世代周期延长(鲁智慧等,2019)。通过我国草地贪夜蛾越冬种群数量的实地调查,证实了我国草地贪夜蛾冬繁区即周年繁殖区位于 $28^{\circ}\text{N}$ 以南,即1月平均温度 $10^{\circ}\text{C}$ 等温线以南区域,包括云南南部地区、广西中南部、广东中南部、海南、福建南部和台湾的部分地区;越冬区在 $28^{\circ}\text{N} \sim 31^{\circ}\text{N}$ 之间,即1月平均温度 $6^{\circ}\text{C}$ 等温线到 $10^{\circ}\text{C}$ 等温线之间(姜玉英等,2021)。而邳州市冬季温度较低,月均温大都低于 $10^{\circ}\text{C}$ ,故草地贪夜蛾不能在此地越冬。因此,2020年3月31日诱到的草地贪夜蛾成虫为迁入虫源。

周年繁殖区的冬季温度偏高会促使迁飞昆虫提早北迁。邳州市2019年6月15日首次发现草地贪夜蛾侵入,而2020年3月31日就诱到草地贪夜蛾成虫,始见日期远早于2019年,其原因可能是2019年草地贪夜蛾首次侵入我国,虫源基数小,而2020年草地贪夜蛾已在我国定殖,华南地区大部分区域为其周年繁殖区,印度、老挝、缅甸、泰国等周边国家也普遍发生。2019-2020年冬季草地贪夜蛾周年繁殖区冬季温度较往年偏高 $0.5^{\circ}\text{C} \sim 2^{\circ}\text{C}$ ,有利于草地贪夜蛾的越冬代繁殖(江琪等,2020;全国农业技术推广服务中心,2020;徐冉等,2020);而其他研究结果亦表明,暖冬年迁飞昆虫褐飞虱 *Nilaparvata lugens* 越冬北界会较冷冬年北移2~3个纬度(卢小凤等,2012),故草地贪夜蛾在暖冬季节冬季繁殖区范围也可能

北移并增大。综上,2020年草地贪夜蛾虫源基数大,且周年繁殖区范围增大,如遇合适天气背景,可能会导致周年繁殖区草地贪夜蛾提早迁飞。

迁飞性昆虫在迁飞过程中往往要借助低空急流来完成迁飞。齐国君等(2019)对首次入侵我国广东的草地贪夜蛾虫源进行分析时,越南、老挝地区北上的低空急流为草地贪夜蛾迁飞提供了合适的运载气流;Wu *et al.* (2021b)对草地贪夜蛾入侵韩国、日本时,认为西太平洋副热带高压控制的西南气流为其迁飞提供合适的运载气流。罗举等(2020)对浙江省草地贪夜蛾迁入路径及气象原因分析,认为从华南地区至江西、浙江的强西南低空急流使广西虫源迁入浙江。因此,我们认为草地贪夜蛾的长距离的迁飞活动与低空急流有关。本文对2020年3月24日-3月31日夜间风场进行分析,我国南部出现有利于北迁的西南风,且风速较大,非常有利于草地贪夜蛾北迁,提早进入江淮地区。然而,对2010-2020年东线迁飞路径的风场进行分析后发现,3月份风向多变,且风速较小,邳州市也主要为北风和西北风,两地850 hPa高度层风场连通性较小,无法为南部终年繁殖区的草地贪夜蛾迁入邳州市提供合适的运载气流。陈辉等(2020b)在模拟草地贪夜蛾在我国的发生区划,模拟了2014-2018年的发生情况,将这5年间早期迁入时间的最小值定义为极端情况,而江淮地区在极端情况下3月份就有草地贪夜蛾迁入,与本文结果相呼应,故邳州市3月31日诱到草地贪夜蛾为特例。

江苏省作为草地贪夜蛾南北往返迁飞的桥梁地带,是连接北方玉米产区和南方草地贪夜蛾繁殖区的重要地区。虽然邳州市3月诱到草地贪夜蛾成虫为极端情况,但鉴于其较强的生存能力和广泛的寄主植物,对其不能掉以轻心。值得注意的是,邳州市位于江苏省北部,与山东省黄淮海夏玉米产区接壤,一旦草地贪夜蛾为害严重,将对我国玉米生产构成严重威胁。本研究探讨了邳州市春季早期迁入草地贪夜蛾的虫源性质,初步确定了该地区春季早期迁入的虫源地分布在广西、广东西部,并分析了其迁入时间和迁入路径,其结果为我国春季早期草地贪夜蛾的监测预警和科学防控提供依据。

致谢: 感谢全国农业技术推广服务中心提供全国草地贪夜蛾始见日期的调查数据; 感谢江苏省邳州市植保站提供调查数据。

### 参考文献 (References)

- Barfield CS, Mitchell ER, Poe SL. A temperature - dependent model for fall armyworm development [J]. *Annals of the Entomological Society of America*, 1978, 71 (1): 70 - 74.
- Chapman JW, Nesbit RL, Burgin LE, et al. Flight orientation behaviors promote optimal migration trajectories in high - flying insects [J]. *Science*, 2010, 327 (5966): 682 - 685.
- Chen H, Yang XL, Chen AD, et al. Immigration timing and origin of the first fall armyworms (*Spodoptera frugiperda*) detected in China [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2020a, 57 (6): 1270 - 1278. [陈辉, 杨学礼, 谌爱东, 等. 我国最早发现为害草地贪夜蛾的入侵时间及其虫源分布 [J]. 应用昆虫学报, 2020a, 57 (6): 1270 - 1278]
- Chen H, Wang Y, Huang L, et al. Flight capability and the low temperature threshold of a Chinese field population of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* [J]. *Insects*, 2022, 13 (5): 422.
- Chen H, Wu MF, Liu J, et al. Migratory routes and occurrence divisions of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* in China [J]. *Journal of Plant Protection*, 2020b, 47 (4): 747 - 757. [陈辉, 武明飞, 刘杰, 等. 我国草地贪夜蛾迁飞路径及其发生区划 [J]. 植物保护学报, 2020b, 47 (4): 747 - 757]
- 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.
- Harrison RD, Thierfelder C, Baudron F, et al. Agro-ecological options for fall armyworm (*Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith)) management: Providing low-cost, smallholder friendly solutions to an invasive pest [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 243: 318 - 330.
- He LM, Ge SS, Chen YC, et al. The development threshold temperature, effective accumulated temperature and prediction model of the developmental duration of fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* [J]. *Plant Protection*, 2019, 45 (5): 18 - 26. [何莉梅, 葛世帅, 陈玉超, 等. 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 [J]. 植物保护, 2019, 45 (5): 18 - 26]
- Hruska AJ, Fred G. Fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) and *Diatraea lineolata* (Lepidoptera: Pyralidae): Impact of larval population level and temporal occurrence on maize yield in Nicaragua [J]. *Journal of Economic Entomology*, 1997, 2 (90): 611 - 622.
- Jiang Q, Xu R, Gui HL. Analysis of the January 2020 atmosphere circulation and weather [J]. *Meteorological Monthly*, 2020, 46 (4): 575 - 580. [江琪, 徐冉, 桂海林. 2020年1月大气环流和天气分析 [J]. 气象, 2020, 46 (4): 575 - 580]
- Jiang YY, Liu J, Wu QL, et al. Investigation on winter breeding and overwintering areas of *Spodoptera frugiperda* in China [J]. *Plant Protection*, 2021, 47 (1): 212 - 217. [姜玉英, 刘杰, 吴秋琳, 等. 我国草地贪夜蛾冬繁区和越冬区调查 [J]. 植物保护, 2021, 47 (1): 212 - 217]
- Jiang YY, Liu J, Xie MC, et al. Observation on law of diffusion damage of *Spodoptera frugiperda* in China in 2019 [J]. *Plant Protection*, 2019, 45 (6): 10 - 19. [姜玉英, 刘杰, 谢茂昌, 等. 2019年我国草地贪夜蛾扩散为害规律观测 [J]. 植物保护, 2019, 45 (6): 10 - 19]
- 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]. *Pest Management Science*, 2020, 2 (76): 454 - 463.
- Lu ZH, He SQ, Yan NS, et al. Effects of temperatures on the development and reproduction of fall armyworm (*Spodoptera frugiperda* (Smith)) [J]. *Plant Protection*, 2019, 45 (5): 27 - 31. [鲁智慧, 和淑琪, 严乃胜, 等. 温度对草地贪夜蛾生长发育及繁殖的影响 [J]. 植物保护, 2019, 45 (5): 27 - 31]
- Lu XF, Huo GZ, Shen SH, et al. Effects of climate warming on the northern distribution boundary of brown planthopper (*Nilaparvata lugens* (Stål)) overwintering in China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31 (8): 1977 - 1983. [卢小凤, 霍治国, 申双和, 等. 气候变暖对中国褐飞虱越冬北界的影响 [J]. 生态学杂志, 2012, 31 (8): 1977 - 1983]
- Luo J, Ma J, Wu MF, et al. Original area of fall armyworm individuals newly invaded in Zhejiang Province [J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2020, 34 (1): 80 - 87. [罗举, 马健, 武明飞, 等. 浙江入侵草地贪夜蛾的迁入虫源 [J]. 中国水稻科学, 2020, 34 (1): 80 - 87]
- Ma J, Wang YP, Wu MF, et al. High risk of the fall armyworm invading Japan and the Korean Peninsula via overseas migration [J]. *Journal of Applied Entomology*, 2019, 9 (143): 911 - 920.
- Minter M, Pearson A, Lim KS, et al. The tethered flight technique as a tool for studying life - history strategies associated with migration in insects [J]. *Ecological Entomology*, 2018, 43 (4): 397 - 411.
- National Agro - Tech Extension and Service Center. Pest forecasting division: Occurrence and trend of *Spodoptera frugiperda* in winter [R]. Beijing: National Agro - Tech Extension and Service Center, 2020. [全国农业技术推广服务中心. 病虫害测报处: 草地贪夜蛾冬季发生情况及趋势 [R]. 北京: 全国农业技术推广中心, 2020]
- Overton K, Maino JL, Day R, et al. Global crop impacts, yield losses and action thresholds for fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*): A review [J]. *Crop Protection*, 2021, 145: 105641.
- Qi GJ, Ma J, Hu G, et al. Analysis of migratory routes and atmospheric features of the newly invaded fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) in Guangdong Province [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2019, 41 (3): 488 - 496.

- [齐国君,马健,胡高,等. 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]
- Sun XX, Hu CX, Jia HR, *et al.* Case study of the first immigration of fall armyworm *Spodoptera frugiperda* invading into China [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2019, 18: 2-10.
- Wu KM. Management strategies of fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) in China [J]. *Plant Protection*, 2020, 46(2): 1-5. [吴孔明. 中国草地贪夜蛾的防控策略 [J]. 植物保护, 2020, 46(2): 1-5]
- Wu P, Wu F, Fan J, *et al.* Potential economic impact of invasive fall armyworm on mainly affected crops in China [J]. *Journal of Pest Science*, 2021a, 94: 1065-1073.
- Wu MF, Qi GJ, Chen H, *et al.* Overseas immigration of fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* [J]. *Insect Science*, 2021b, 29(2): 505-520.
- Xu R, Gui HL, Jiang Q, *et al.* Analysis of the December 2019 atmospheric circulation and weather [J]. *Meteorological Monthly*, 2020, 46(3): 441-448. [徐冉, 桂海林, 江琪, 等. 2019年12月大气环流和天气分析 [J]. 气象, 2020, 46(3): 441-448]
- Zhou Y, Wu QL, Zhang HW, *et al.* Spread of invasive migratory pest *Spodoptera frugiperda* and management practices throughout China [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2021, 20(3): 637-645.