环境昆虫学报 2021，43（4）：867－878
Journal of Environmental Entomology
http：//hjkcxb. alljournals. net
doi：10. 3969/j. issn. 1674－0858. 2021. 04. 7

陈辉，黄乐，格桑玉珍，德吉卓玛，朱军生，胡高，陈法军，赵婧妤，万贵钧. 2019 年山东省草地贪夜蛾迁飞过程及气象背景场分析[J]. 环境昆虫学报，2021，43（4）：867－878.

2019 年山东省草地贪夜蛾迁飞过程及气象背景场分析

陈　辉[1]，黄　乐[1]，格桑玉珍[1]，德吉卓玛[1]，朱军生[2]，胡　高[1]，陈法军[1]，赵婧妤[1]，万贵钧[1*]

（1. 南京农业大学植物保护学院，南京 210095；2. 山东省植物保护总站，济南 250100）

摘要： 草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 是玉米上重要的迁飞性害虫，草地贪夜蛾入侵山东对山东省玉米粮食生产构成重大威胁。因此，探明山东省早期入侵的草地贪夜蛾虫源地分布十分重要。本文根据 2019 年山东省虫情及有效积温模型，运用 HYSPLIT 模型结合气象资料，对 2019 年入侵山东省的草地贪夜蛾虫源地分布及迁入迁出气象背景场进行探索，结果表明：山东省草地贪夜蛾的入侵时间集中在 7 月 16 日至 31 日，且虫源地主要分布在山东南部邻省地区；副热带高压所产生的持续西南气流是草地贪夜蛾迁入山东省的关键因子；迁入山东省的草地贪夜蛾的当代羽化时间集中在 8 月份，其可向北迁飞至河北、辽宁，在迁入地再繁殖一代后的羽化时间集中在 9 月份，可向南回迁至江苏、安徽、湖北。本研究对山东省草地贪夜蛾的预警预报及采取对应科学防控措施具有重要指导意义。

关键词： 草地贪夜蛾；迁飞路径；轨迹分析；虫源地

中图分类号： Q968. 1；S433　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 1674－0858（2021）04－0867－12

Analysis of migration and meteorological background field for the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* found in Shandong Province in 2019

CHEN Hui[1], HUANG Le[1], GESANG Yu-Zhen[1], DEJI Zhuo-Ma[1], ZHU Jun-Sheng[2], HU Gao[1], CHEN Fa-Jun[1], ZHAO Jing-Yu[1], WAN Gui-Jun[1*]（1. College of Plant Protection, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. General Station of Plant Protection of Shandong Province, Jinan 250100, China）

Abstract: Fall armyworm*Spodoptera frugiperda* is an important migratory pest on maize. The invasion of *S. frugiperda* in Shandong Province poses a great threat to maize production. Therefore, it is very important to find out the source distribution of fall armyworm in Shandong Province. According to the occurrence of fall armyworm and effective accumulated temperature model in Shandong in 2019, the distribution of the source areas, as well as the meteorological background field of the immigration and emigration of fall armyworm in Shandong Province in 2019, were explored by using HYSPLIT model combined with meteorological data. The results showed that the invasion time of fall armyworm in Shandong Province was concentrated on July 16－31, and the source areas were mainly distributed in the southern neighboring provinces of Shandong Province; the results showed that the continuous southwest airflow due to the western pacific subtropical high pressure was the key factor for the migration of fall armyworm into

基金项目： 国家重点研发计划（2019YFD0300102）；国家自然科学基金项目（32072413，31701787）

作者简介： 陈辉，男，博士研究生，主要从事迁飞昆虫学研究，E－mail：2019202044@ njau. edu. cn

* **通信作者** Author for correspondence：万贵钧，博士，主要研究方向为昆虫迁飞与磁感应机制，E－mail：guijunwan@ njau. edu. cn

收稿日期 Received：2021－02－25；**接受日期** Accepted：2021－04－19

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Shandong Province; the eclosion time of immigrant generation in Shandong Province was concentrated in August, and it could migrate northward to Hebei and Liaoning, and the eclosion time of its younger generation in the immigrant areas was concentrated in September, and it could migrate southward to Jiangsu, Anhui, and Hubei. This study is of great significance for early warning and scientific control of fall armyworm in Shandong.

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

草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 原产于美洲热带亚热带地区，是联合国粮农组织全球预警的重大跨境迁飞性害虫，其迁飞扩散能力强(Luginbill，1928; Todd，1980)。自2016年首次在西非发现以来(Goergen *et al.*，2016)，已入侵非洲、亚洲及大洋洲多个国家并呈现快速扩张态势(Sharanabasappa *et al.*，2016; FAO，2017; IPPC，2018; FAO，2019a; FAO，2019b)，对全球粮食生产安全构成严重威胁。2019年1月，草地贪夜蛾首次入侵我国云南(陈辉等，2020a)，已被列入我国一类农作物病虫害名录(姜玉英等，2019; 吴孔明，2020; Wu *et al.*，2021)。

虽然草地贪夜蛾是杂食性动物，可以为害包括玉米、棉花等在内的353余种植物(Montezano *et al.*，2018)，但是玉米是草地贪夜蛾主要为害作物，严重时可造成玉米15%～73%的产量损失(Casmuz *et al.*，2010)。自2019年入侵我国后，草地贪夜蛾在我国的发生面积、发生量都呈现持续增加趋势。2019年，22个省份查实玉米上幼虫发生面积106.5万 hm^2，占其总粮食为害面积98.6%(姜玉英等，2019)。我国作为世界第二玉米生产大国，草地贪夜蛾在我国的发生势必会严重威胁我国农业生产安全和粮食作物安全。

草地贪夜蛾的入侵对山东省的玉米生产构成巨大的威胁。玉米是山东省三大主要粮食作物之一，山东省玉米产量每年约占全国玉米产量的10%，玉米生产很大程度上影响着山东省农业经济的发展。然而，山东同样也是许多迁飞性害虫北迁南回的重要通道(胡国文，1988; 姜玉英等，2018)，这其中包括草地贪夜蛾(Li *et al.*，2020)。目前已有研究表明草地贪夜蛾北迁的东线途经山东省(陈辉等，2020b)，并在2019年6月20日就发现其成虫(张晴晴等，2021)，这势必会对山东省玉米粮食生产造成影响。因此，明确迁入山东省草地贪夜蛾的虫源地、后续迁出路线和总体迁飞路径等科学问题对山东省玉米作物生产、草地贪夜蛾防控以及迁入的预测预报有重大意义。

为了明确山东省2019年迁入草地贪夜蛾的虫源地分布、迁入迁出路径及天气背景场，本研究根据拉格朗日混合单粒子轨道模型(HYSPLIT)模拟山东省草地贪夜蛾迁入迁出的迁飞路径，再用R软件对顺推落点概率和回推落点概率进行统计分析。并用GrADS气象图形软件，模拟山东省草地贪夜蛾迁入迁出时间段的天气背景场，进一步推测草地贪夜蛾可能迁入时间、迁入迁出路径以及关键的气象因子，以期为山东省草地贪夜蛾的监测预警及应急防控提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 草地贪夜蛾虫情数据

山东省草地贪夜蛾虫情调查数据，由山东省植物保护总站提供。该数据共由39个站点组成，结合草地贪夜蛾性诱装置以及大田普查的方法，每日分别对草地贪夜蛾成虫和幼虫进行相应的监测。

1.2 草地贪夜蛾轨迹模拟

为了探索及计算草地贪夜蛾可能的迁入时间及迁入迁出路径，本文采用了一种基于拉格朗日混合单粒子轨道模型(Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model，HYSPLIT)(https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php)的轨迹分析方法。相较于基于WRF模式的昆虫三维轨迹模型，该模型无需下载大量气象数据，可直接线上操作。进入参数设置页以后，确定以下参数即可：轨迹方向(trajectory direction)(回推/顺推(backward/forward))、起始时间(start time)、持续时间(duration)、经度(longitude)、纬度(latitude)、高度(height)。提交参数后便可得到轨迹计算的结果。该模型已成功应用于包括草地贪夜蛾在内的多种昆虫在各个地区的迁飞和扩散的研究中(宋国晶，2011; 郁振兴，2011; 陈燕婷，2015; Westbrook *et al.*，2016; 包云轩等，2016)。

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1.3　模型参数设定

1.3.1　草地贪夜蛾生物学特性参数设置

草地贪夜蛾飞行轨迹模拟中主要草地贪夜蛾迁飞行为参数与陈辉等人（2020a）和 Li *et al.*（2020）研究基本一致：1）草地贪夜蛾属夜蛾类，傍晚起飞，次日凌晨降落，根据 2019 年 6－9 月山东省日出日落时间，设置起飞时刻为 18∶00（BJT），降落时刻为 04∶00（BJT），飞行持续时间 10 h，飞 3 个夜晚（陈辉等，2020a），并以前一夜晚的轨迹终点作为次日起飞的起点（Li *et al.*，2020；陈辉等，2020a）；2）草地贪夜蛾在高空飞行定向行为尚未可知，本研究将设定草地贪夜蛾在高空顺风迁移；3）雷达观测表明蛾类昆虫的飞行高度通常在风速 > 10 m/s 的低空急流高度（Johnson，1987；Wolf，1990；Westbrook *et al.*，2016），并结合已有的草地贪夜蛾的轨迹分析结果，本研究设定了草地贪夜蛾飞行高度距海平面高度 1 500 m（齐国君等，2019；Li *et al.*，2020）；4）根据草地贪夜蛾成虫生存低温阈值 13.8℃（Hogg *et al.*，1982），本研究将去除计算高空温度低于该温度时的轨迹。

1.3.2　草地贪夜蛾模拟轨迹筛选及降落区概率统计

利用 ArcGIS（10.6 版）和 R 语言（3.6 版，https://www.r-project.org/）计算并绘制有效轨迹终点的空间频率分布，计算步骤如下：首先，将整个空间划分为 1°×1°的单元网格，在 ArcGIS 中计算位于每个单元网格中的轨迹终点数，去掉落于海面上的无效轨迹落点，并结合草地贪夜蛾的发生情况去除草地贪夜蛾未发生区域的轨迹落点（姜玉英等，2019）。其次，将单元格终点数从小到大排列，计算累计概率。最后，根据累计概率利用 R 语言绘制轨迹落点的空间分布。

1.4　草地贪夜蛾迁入迁出相关的大气环流背景场分析

本文利用全球再分析气象数据（分析所使用的气象数据为每 6 h1 次、1°×1°时空分辨率的 FNL 气象数据）。在 GrADS 2.1 中绘制 2019 年 6－8 月份每晚（18 时至次日 04 时时间段）850 hPa（大约距离地面 1 500 m）的候（每 5 日）平均风场、每晚 5 860 gpm 位势高度侯平均等位线、每晚 5 880 gpm 位势高度侯平均等位线；8－9 月份每晚 850 hPa 的旬（每 10 日）平均风场、每晚 5 860 gpm 位势高度旬平均等位线、每晚 5 880 gpm 位势高度旬平均等位线；结合轨迹落点，进一步分析草地贪夜蛾虫源地分布情况及可能迁入时间段，迁入迁出路径。

1.5　草地贪夜蛾有效积温模型

基于山东省各个发现地的日均温度，根据草地贪夜蛾幼虫各龄期所需的有效积温（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），结合草地贪夜蛾发现的时间、发现虫态（成虫、幼虫、卵块），计算各龄期的发生所需时间，进而推测草地贪夜蛾迁入迁出时间段。本研究从 FNL 气象数据中提取 2∶00、14∶00 两个时刻距地面 2 m 的温度，来代表地面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，由于为山东省首次发现草地贪夜蛾，并无本地虫源，因此本文将发现成虫地区的发现当日设为推测迁入时间。

另外，山东省草地贪夜蛾的迁出时间段推测分为两个部分：1）草地贪夜蛾迁入当代的迁出时间段推测。根据山东省各地区草地贪夜蛾迁入时所发现的幼虫龄期，结合有效积温模型推测其羽化为成虫的时间段，即为当代迁出时间段；2）草地贪夜蛾迁入再繁殖一代后的迁出时间推测。根据 1）中当代迁出时间段，再结合有效积温模型推测繁殖一代后，下一代的迁出时间段，即为繁殖一代后迁出时间段。

2　结果与分析

2.1　2019 年山东省虫情资料及迁入时间分析

2019 年山东省有 97.44% 草地贪夜蛾在玉米上发现，2.56% 在稻茬麦田上发现，表明玉米是山东省草地贪夜蛾的主要寄主作物（表 1）。此外，39 个草地贪夜蛾发生地区中有 4 个地区发现成虫（占 10.26%），其余地区发现均为幼虫（占 89.74%），意味着山东省草地贪夜蛾成虫迁入时间普遍要比发现时间早。各月份进一步分析发现，6 月 20 日，山东南部的临沂市郯城县最早发现草地贪夜蛾成虫。7 月份，山东省发现草地贪夜蛾区县有 8 个（占总发生地区个数 20.51%），主要分布于南部省界一带，多为 4～5 龄的高龄幼虫，其中 5 个地区推测迁入时间为 7 月 4－6 候（每 5 日为 1 候），3 个地区为 7 月 1－3 候。8 月份，发现草地贪夜蛾的地区数量急剧增多，新增地区 7 市

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

29 个区县（占总发生地区 74.36%），分布纬度范围更靠北，最远纬度地区可达 37.82°N，主要为 3～5 龄幼虫（图 1，表 1），推测其迁入时间主要为 7 月 4－6 候。

总的来说，草地贪夜蛾入侵山东的规律呈现“自西向东，从南到北”的发展趋势，且各地区草地贪夜蛾发生的时间集中在 8 月，推测其迁入时间主要为 7 月（占总发生地区个数 61.54%）。进一步分析发现，除了青岛市城阳区、日照市岚山区和枣庄市滕州市 3 个地区之外，其余迁入时间为 7 月的地区推测入侵时间均在 7 月 4－6 候（即 20190716－20190731）范围之内（表 1）。

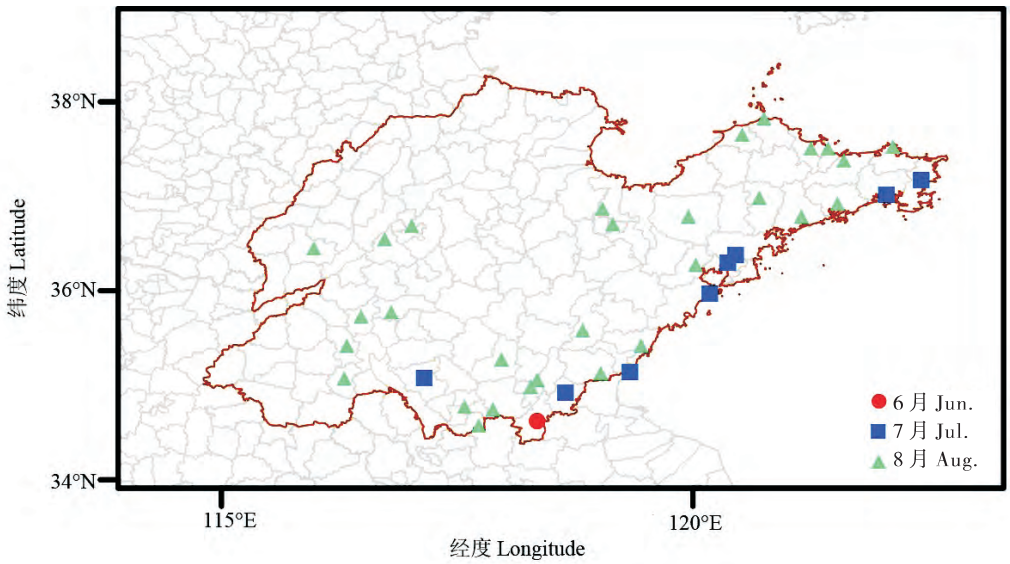


图 1 2019 年 6－8 月山东省草地贪夜蛾发生地区（县、市）汇总

Fig. 1 Summary of the areas (counties and cities) where *Spodoptera frugiperda* was found in Shandong Province from June to August, 2019

2.2 2019 年山东省草地贪夜蛾回推轨迹落点概率及气象分析

对回推轨迹进行分析，6 月山东省草地贪夜蛾迁入种群的回推轨迹落点分布在江苏北部、安徽北部及山东省周边地区（图 2）。山东省南部 850 hPa 高空平均风场在 6 月第 3 候时有合适的南风供江苏北部、安徽北部的草地贪夜蛾迁入山东南部（图 3）。7 月，山东省草地贪夜蛾迁入种群的回推轨迹落点涵盖了湖南北部、湖北省、河南省南部、安徽省、江苏省及山东省周边地区，主要分布在江苏北部、安徽北部、鲁苏皖交界处（图 2）。进一步分析发现，7 月第 1－3 候，有 2～3 个站点的草地贪夜蛾推测迁入时间在此时间段内，此时山东南部 850 hPa 高空有合适的西南风，但风速较小且不稳定（图 3）。值得注意的是 7 月第 4－6 候，5 860 gpm 和 5 880 gpm 等位线北跳，意味着西太平洋副热带高压（简称副高）北跳，控制山东省地区的风场，其 850 hPa 高空可形成持续稳定的西风或西南风，风速可达 8～16 m/s，并且该时间段也是山东省草地贪夜蛾的推测迁入高峰期（共有 22 个站）。这说明此时合适稳定的西南气流为山东省西南部各省市（如湖南省北部、湖北省、河南省南部、安徽省等）地区的草地贪夜蛾迁入山东省提供合适的气象条件（图 2、图 3）。相较于 7 月，8 月山东省草地贪夜蛾迁入种群的回推轨迹落点分布趋势较为分散，结合 2019 年草地贪夜蛾发生情况，去除了辽宁省、内蒙古东部、河北省等山东以北区域的轨迹落点，此时轨迹落点主要聚集在江浙一带（图 2、图 3）。8 月第 1－2 候，山东地区 850 hPa 高空的风场风向转为东南风或南风，风速较大且稳定（4～8 m/s）适合江浙一带虫源迁入山东省。8 月 3－6 候的风向不稳定且风速较小，不适合草地贪夜蛾迁入山东省。综上所述，江苏省、安徽省、河南省东南部、湖北省为山东省迁入草地贪夜蛾的主要虫源地；草地贪夜蛾推测入侵时间集中在 7 月第 4－6 候（表 1），而西太平洋副高北跳发生在 7 月下旬（图 3），两者时间也高度吻合。这意味着此时副高控制下产生稳定持续的西南气流，可为草地贪夜蛾入侵山东提供运载气流。

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1　山东省各地区草地贪夜蛾发现时间及其入侵时间推测

Table 1　First found date and forecasting invasion time of *Spodoptera frugiperda* in Shandong Province

市名 City	县(市区)名 County	首见日期 Date first found (yy-mm-dd)	首见虫态 Stage first found	幼虫虫龄 Stage of larvae	发生面积 (667 m^2) Occurrence area	主要被害作物 Main damaged crops	经度 Longitude	纬度 Latitude	推测迁入时间段 Estimated immigration period (yy-mm-dd)
济南市 Jinan	长清区 Changqing	2019-08-22	成虫 Adults	–	0	玉米 Maize	116.73°N	36.55°E	2019-08-22
济宁市 Jining	金乡县 Jinxiang	2019-08-30	幼虫 Larvae	1～6	30	玉米 Maize	116.30°N	35.07°E	2019-08-12 – 2019-08-27
济宁市 Jining	嘉祥县 Jiaxiang	2019-08-30	幼虫 Larvae	2～5	70	玉米 Maize	116.33°N	35.42°E	2019-08-12 – 2019-08-21
济宁市 Jining	汶上县 Wenshang	2019-08-30	幼虫 Larvae	2～5	120	玉米 Maize	116.48°N	35.73°E	2019-08-11 – 2019-08-21
聊城市 Liaocheng	东昌府区 Dongchangfu	2019-08-18	幼虫 Larvae	4～6	32	玉米 Maize	115.98°N	36.45°E	2019-08-01 – 2019-08-08
临沂市 Linyi	郯城县 Tancheng	2019-06-20	成虫 Adults	–	0	小麦 Wheat	118.35°N	34.62°E	2019-06-20
临沂市 Linyi	临沭县 Linshu	2019-07-30	幼虫 Larvae	4～5	65	玉米 Maize	118.65°N	34.92°E	2019-07-16 – 2019-07-24
临沂市 Linyi	罗庄区 Luozhuang	2019-08-01	幼虫 Larvae	4	4	玉米 Maize	118.28°N	34.98°E	2019-07-21 – 2019-07-24
临沂市 Linyi	兰陵县 Lanlin	2019-08-01	幼虫 Larvae	4～5	20	玉米 Maize	117.88°N	34.74°E	2019-07-19 – 2019-07-24
临沂市 Linyi	临港经济区 Lingang Economic Zone	2019-08-04	幼虫 Larvae	5～6	0.8	玉米 Maize	118.35°N	35.05°E	2019-08-21 – 2019-08-25
临沂市 Linyi	临沂经济开发区 Linyi Economic Development Zone	2019-08-09	幼虫 Larvae	3～5	2	玉米 Maize	118.35°N	35.05°E	2019-07-26 – 2019-08-02
临沂市 Linyi	费县 Feixian	2019-08-14	幼虫 Larvae	1～5	20	玉米 Maize	117.97°N	35.27°E	2019-07-29 – 2019-08-11
青岛市 Qingdao	城阳区 Chengyang	2019-07-18	幼虫 Larvae	4	15	玉米 Maize	120.37°N	36.30°E	2019-07-04 – 2019-07-08
青岛市 Qingdao	黄岛区 Huangdao	2019-07-29	幼虫 Larvae	5～6	5	玉米 Maize	120.18°N	35.97°E	2019-07-13 – 2019-07-18
青岛市 Qingdao	即墨区 Jimo	2019-07-30	幼虫 Larvae	5	0.1	玉米 Maize	120.45°N	36.38°E	2019-07-16 – 2019-07-21
青岛市 Qingdao	平度市 Pingdu	2019-08-19	幼虫 Larvae	3～6	100	玉米 Maize	119.95°N	36.78°E	2019-08-03 – 2019-08-10
青岛市 Qingdao	胶州市 Jiaozhou	2019-08-26	幼虫 Larvae	3～4	50	玉米 Maize	120.03°N	36.27°E	2019-08-11 – 2019-08-20
日照市 Rizhao	岚山区 Lanshan	2019-07-24	幼虫 Larvae	5～6	200	玉米 Maize	119.33°N	35.01°E	2019-07-06 – 2019-07-16
日照市 Rizhao	五莲县 Wulian	2019-08-01	幼虫 Larvae	3～4	3	玉米 Maize	119.02°N	35.01°E	2019-07-20 – 2019-07-25

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

续表 1 Continued table 1

市名 City	县(市区)名 County	首见日期 Date first found (yy-mm-dd)	首见虫态 Stage first found	幼虫虫龄 Stage of larvae	发生面积 (667 m^2) Occurrence area	主要被害作物 Main damaged crops	经度 Longitude	纬度 Latitude	推测迁入时间段 Estimated immigration period (yy-mm-dd)
日照市 Rizhao	莒县 Juxian	2019-08-01	幼虫 Larvae	3 ~ 5	3	玉米 Maize	118.83°N	35.58°E	2019-07-18 – 2019-07-25
日照市 Rizhao	东港区 Donggang	2019-08-08	幼虫 Larvae	3 ~ 4	2.5	玉米 Maize	119.45°N	35.42°E	2019-07-26 – 2019-07-31
泰安市 Taian	宁阳县 Ningyang	2019-08-15	成虫 Adults	–	0	玉米 Maize	116.80°N	35.77°E	2019-08-15
威海市 Weihai	文登区 Wendeng	2019-07-29	幼虫 Larvae	3 ~ 4	0.7	玉米 Maize	122.05°N	37.02°E	2019-07-16 – 2019-07-22
威海市 Weihai	荣成市 Rongcheng	2019-07-30	幼虫 Larvae	2 ~ 3	9	玉米 Maize	122.42°N	37.17°E	2019-07-19 – 2019-07-25
威海市 Weihai	乳山市 Rushan	2019-08-01	幼虫 Larvae	2 ~ 4	0.9	玉米 Maize	121.53°N	36.92°E	2019-07-20 – 2019-07-27
威海市 Weihai	南海新区 Nanhai	2019-08-02	幼虫 Larvae	3 ~ 4	15	玉米 Maize	117.02°N	36.68°E	2019-07-21 – 2019-07-26
威海市 Weihai	威海新区 Weihai	2019-08-30	幼虫 Larvae	2 ~ 5	1.3	玉米 Maize	122.12°N	37.52°E	2019-08-11 – 2019-08-23
潍坊市 Weifang	昌邑市 Changyi	2019-08-13	成虫 Larvae	–	50	玉米 Maize	119.04°N	36.87°E	2019-08-13
潍坊市 Weifang	峡山 Xiashan	2019-08-15	幼虫 Larvae	3 ~ 5	5	玉米 Maize	119.15°N	36.70°E	2019-07-30 – 2019-08-07
烟台市 Yantai	海阳市 Haiyang	2019-08-01	幼虫 Larvae	3 ~ 5	4.2	玉米 Maize	121.15°N	36.78°E	2019-07-18 – 2019-07-25
烟台市 Yantai	福山区 Fushan	2019-08-03	幼虫 Larvae	3 ~ 5	1.5	玉米 Maize	121.25°N	37.50°E	2019-07-21 – 2019-07-28
烟台市 Yantai	牟平区 Muping	2019-08-04	幼虫 Larvae	3 ~ 5	3.1	玉米 Maize	121.60°N	37.38°E	2019-07-21 – 2019-07-28
烟台市 Yantai	莱阳市 Laiyang	2019-08-07	幼虫 Larvae	3 ~ 5	1.5	玉米 Maize	120.70°N	36.98°E	2019-07-23 – 2019-07-30
烟台市 Yantai	莱山区 Laishan	2019-08-17	幼虫 Larvae	3 ~ 5	3	玉米 Maize	121.43°N	37.50°E	2019-08-01 – 2019-08-09
烟台市 Yantai	龙口市 Longkou	2019-08-20	幼虫 Larvae	3 ~ 4	3	玉米 Maize	120.52°N	37.65°E	2019-08-06 – 2019-08-11
烟台市 Yantai	蓬莱市 Penglai	2019-08-29	幼虫 Larvae	3 ~ 5	2.5	玉米 Maize	120.75°N	37.82°E	2019-08-10 – 2019-08-22
枣庄市 Zaozhuang	滕州市 Tengzhou	2019-07-16	幼虫 Larvae	4 ~ 5	2.5	玉米 Maize	117.15°N	35.08°E	2019-06-30 – 2019-07-06
枣庄市 Zaozhuang	台儿庄区 Taierzhuang	2019-08-03	幼虫 Larvae	4 ~ 5	3	玉米 Maize	117.73°N	34.57°E	2019-07-21 – 2019-07-26
枣庄市 Zaozhuang	峄城区 Yicheng	2019-08-04	幼虫 Larvae	6	70	玉米 Maize	117.58°N	34.77°E	2019-07-22 – 2019-07-23

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

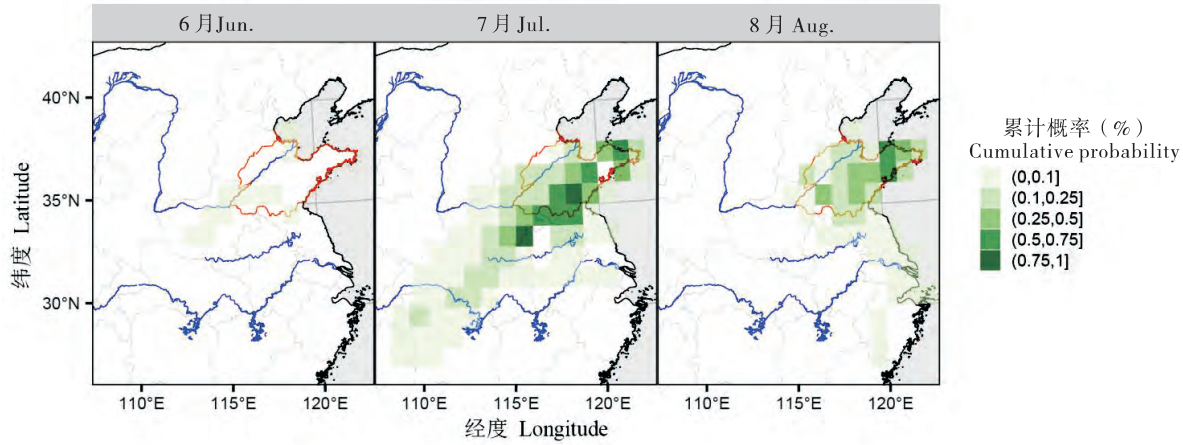


图 2　2019 年 6－8 月山东省草地贪夜蛾回推轨迹落点分布

Fig. 2　Distribution of endpoints of FAW backward migration trajectories in Shandong and its surrounding areas from June to August

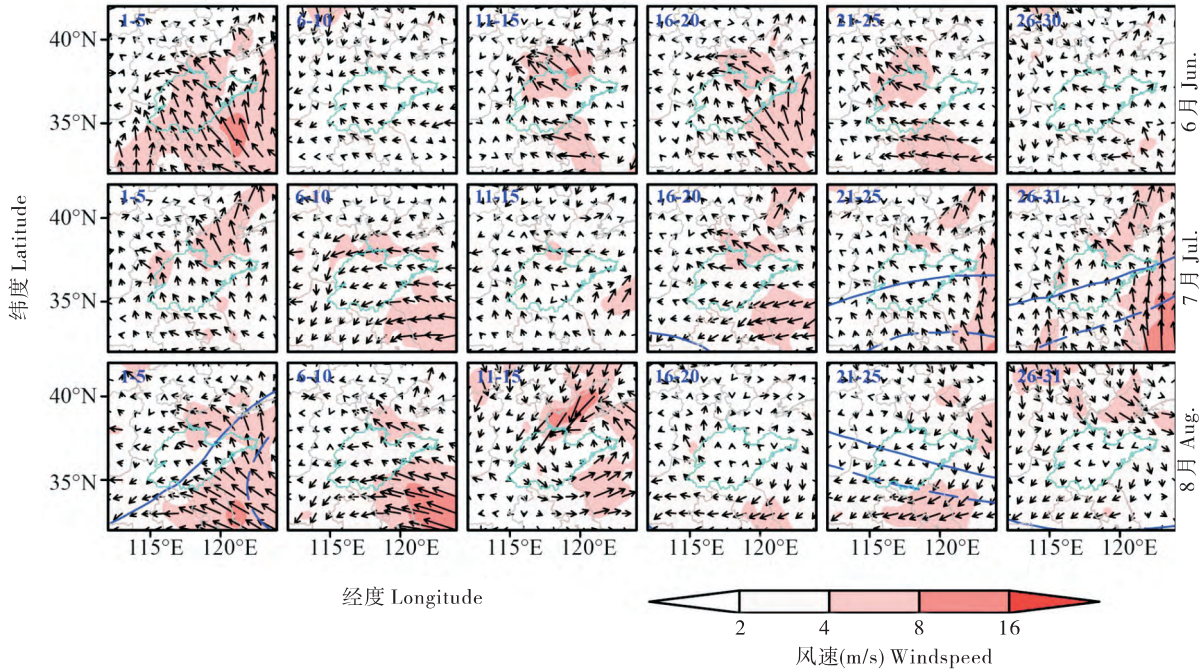


图 3　2019 年 6－8 月 850 hPa 高空每 5 日夜间平均风场

Fig. 3　Average wind field of every 5 night at 850 hPa from June to August，2019

注：青色实线为山东省省界；蓝色实线代表 5 860 gpm 位势高度等位线，蓝色虚线代表 5 880 gpm 位势高度等位线。

Note：Cyan solid line was the provincial boundary of Shandong Province；Blue solid line represented the 5 860 gpm，Blue dotted line represented the 5 880 gpm.

2.3　2019 年山东省草地贪夜蛾顺推轨迹概率及气象分析

针对山东省草地贪夜蛾的迁出预测，本文分为两个部分预测，即草地贪夜蛾迁入当代的迁出时间和草地贪夜蛾迁入再繁殖一代后的迁出时间。发现有 24 个区市草地贪夜蛾迁入当代羽化时间在 8 月，意味着草地贪夜蛾迁入当代的迁出时间集中在 8 月。顺推落点概率进一步表明，8 月上旬，由于副高东移的影响，山东南部的风场方向主要为东北风（图 6－A），3 个地区（青岛市黄岛区、日照市东港区、日照市岚山区）的顺推落点位于山东省西南方向，包括河南省东部、安徽省西南部、

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

江苏南部、上海北部，且落点概率都小于 25%（图 4）。共有 17 个站点的草地贪夜蛾迁入当代的迁出时间在 8 月中旬，此时山东省 850 hPa 高空出现气旋（图 6 – B），不但可提供南风供山东省草地贪夜蛾向北迁入河北、天津、辽宁北部（落点概率都小于 25%）（图 4），而且可以提供北风使草地贪夜蛾的大部分落点落在山东与江西交界处（大于 50%）以及江苏中北部（<25%）。随着风场转为北风（图 6 – C），8 月下旬共 13 个站点的草地贪夜蛾开始回迁，落点概率表明草地贪夜蛾可向南回迁至河南（<50%）、安徽北部（<50%）、江苏北部（<75%）。

草地贪夜蛾繁殖一代后迁出时间段集中羽化时间为 9 月，有 20 个区市，另外 11 个市区由于气温太低无法继续繁殖一代并羽化。9 月份风场较为统一，盛行北风和东北风（图 6 – D、E、F），有利于山东省草地贪夜蛾向南迁飞。并且 9 月份上、中、下三旬的落点分布较为简单，轨迹落点主要位于山东省西南方向，范围覆盖河南中东部、安徽北部、江苏北部、湖北北部等地区（图 5）。

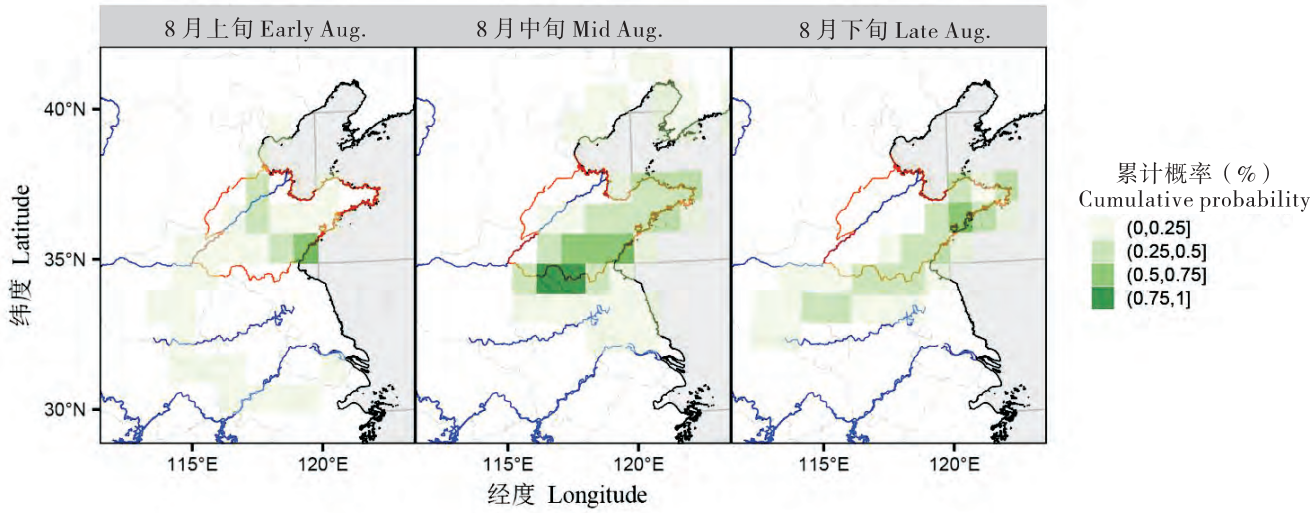


图 4　2019 年 8 月山东省当代草地贪夜蛾顺推轨迹落点分布

Fig. 4　Distribution of endpoints of FAW forward migration trajectories in Shandong and its surrounding area in August, 2019

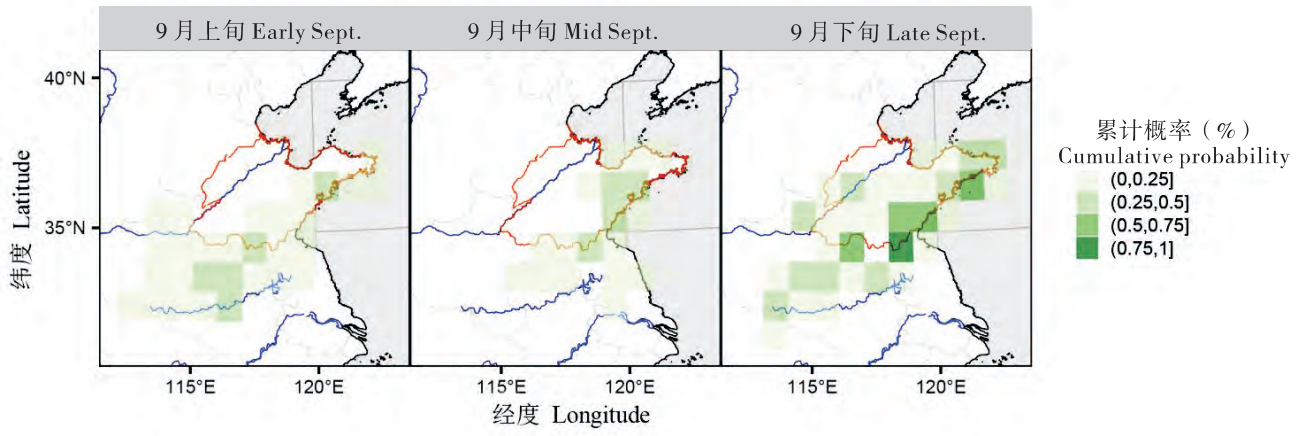


图 5　2019 年 9 月山东省繁殖一代草地贪夜蛾顺推轨迹落点分布

Fig. 5　Distribution of endpoints of the first generation FAW forward migration trajectories in Shandong and its surrounding area in September 2019

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

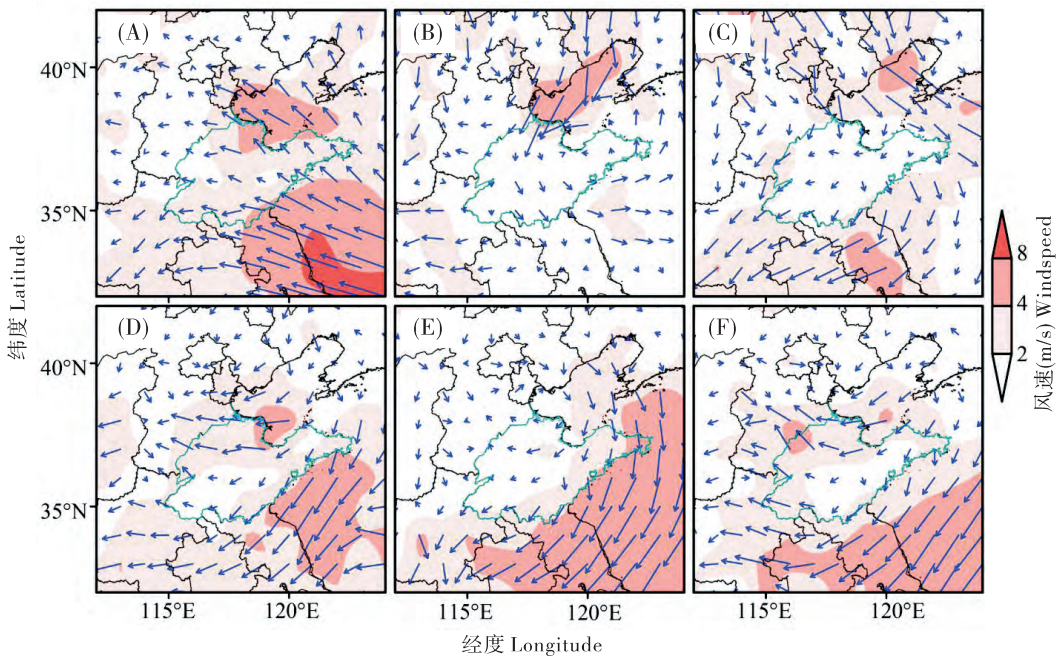


图 6　2019 年 8 – 9 月 850 hPa 高空夜间平均风场

Fig. 6　Average wind field of night at 850 hPa in August and September, 2019

注：（A）**表示 8 月上旬**（8 月 1 – 10 日）；（B）**表示 8 月中旬**（8 月 11 – 20 日）；（C）**表示 8 月下旬**（8 月 21 – 31 日）；（D）**表示 9 月上旬**（9 月 1 – 10 日）；（E）**表示 9 月中旬**（9 月 11 – 20 日）；（F）**表示 9 月下旬**（9 月 21 – 30 日）。Note:（A）represented the first ten days of August（Aug 1 – Aug 10）;（B）represented the middle of August（Aug 11 – Aug 20）;（C）represented the last ten days of August（Aug 21 – Aug 31）;（D）represented the first ten days of September（Sep 1 – Sep 10）;（E）represented the middle of September（Sep 11 – Sep 20）;（F）represented the last ten days of September（Sep 21 – Sep 30）.

3　结论与讨论

HYSPLIT 作为主流的轨迹分析平台之一，已运用在多种昆虫上，包括研究草地贪夜蛾在北美洲的迁飞（Westbrook *et al.*，2016）。本文结合草地贪夜蛾有效积温模型和 HYSPLIT 轨迹分析模型，探索草地贪夜蛾的落点轨迹概率。关于草地贪夜蛾的迁飞轨迹，亦有较多研究基于 WRF 模式下的昆虫三维轨迹分析（陈辉等，2020a；Li *et al.*，2020）。两种轨迹方法各有优势：HYSPLIT 方法简单快速，可以高效便捷地通过交互界面生成顺推轨迹或者回推轨迹，无需下载大量的气象资料，十分适用于基层预测预报；基于 WRF 模式的轨迹方法有高时空分辨率，轨迹较为精确，但需一定的计算机专业基础且设备要求较高。另外，相较于 HYSPLIT 轨迹方法，基于 WRF 模式的昆虫三维轨迹模型还可以添加昆虫自身的飞行速度（Ma *et al.*，2019；陈辉等，2020b），然而草地贪夜蛾的自身飞行速度为 2.69 km/h（~0.75 m/s）（葛世帅等，2019），远小于同体型其他昆虫（如东方黏虫 *Mythimna separata*（Walker）约为 3.5 m/s；棉铃虫 *Helicoverpa armigera*（Hübner）约为 2.5 m/s）（Minter *et al.*，2018），且本文采用 1° × 1° 的经纬度进行落点概率统计，故 HYSPLIT 轨迹方法同样适合对草地贪夜蛾迁飞轨迹的分析研究。对于利用两种轨迹分析模型模拟草地贪夜蛾迁飞轨迹的差异情况仍需开展进一步研究。

本文明确了 2019 年山东省草地贪夜蛾迁入的时间主要在 7 月，其虫源地分布在江苏省、安徽省、湖北省等山东南部邻省及山东周边地区。已有研究表明草地贪夜蛾在我国的东线路径为：两广地区 – 长江中下游地区 – 华北平原 – 东北平原（Li *et al.*，2020），意味着长江中下游地区是华北平原前一站，与本文长江中下游省市是山东省草地贪夜蛾的虫源地相呼应。并且长江中下游部分地区早在 5 月已有发现草地贪夜蛾入侵的报道（姜玉英，2019b），按照其发育积温推算，极有可能在繁殖一代后，为山东省提供草地贪夜蛾入侵虫源。另外，本文也初步推测了山东省草地贪夜

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

蛾的回迁时空特征，8 月下旬开始回迁，9 月为大规模的回迁过程，可向南回迁至河南、安徽、江苏、湖北。回迁时间与褐飞虱 *Nilaparvata lugens*（Stål）（谢家楠等，2011）和白背飞虱 *Sogatella furcifera*（Horváth）（胡国文等，1988）回迁时间相似，这可能意味着草地贪夜蛾迁飞规律与褐飞虱、白背飞虱相似。但本文结果只是基于 2019 年的推论，还需收集更多年份的草地贪夜蛾发生数据和气象数据进行深入分析。

迁飞性昆虫主要为风载迁飞，西太平洋副高影响下产生的风场对草地贪夜蛾的迁飞影响显著（Wainwright *et al.*，2016；Chen *et al.*，2019）。本研究发现 2019 年副高北跳发生时间与山东省草地贪夜蛾推测的集中入侵时间相吻合，都为 7 月下旬。因此本文判断由副高控制下，山东省 850 hPa 高空产生持续稳定的西南气流是草地贪夜蛾迁入山东省的关键因子。该结果与 Chen 等人（Chen *et al.*，2019）发现白背飞虱以及 Lu 等人（Lu *et al.*，2019）发现褐飞虱都在 7 月下旬副高第二次北跳之后迁入江淮流域的结果相似，这同时表明副高很有可能是我国华北平原地区迁飞性昆虫迁入的关键因子。但是副高如何对草地贪夜蛾迁入山东省进行调控（副高各指数如副高强度、副高脊线等如何调控）还需进一步研究。另外，本研究在模拟草地贪夜蛾迁飞高度时，选择了 1 500 m 高度作为草地贪夜蛾的迁飞高度。罗举等人（2020）对首次入侵浙江省的草地贪夜蛾轨迹分析后最终筛选得到的有效轨迹飞行高度在 1 250 ~ 1 750 m 之间；齐国君等人（齐国君等，2020）对首次入侵广东省的草地贪夜蛾轨迹分析后认为 1 500 m 高度是草地贪夜蛾迁飞较为合理的飞行高度，并且浙江、广东、山东各地区地势较为相似。据此，本文设定该高度为草地贪夜蛾飞行模拟高度较为合理。

草地贪夜蛾已在亚洲东部地区形成季节性往返的迁飞态势，其在中南半岛及我国南部地区终年繁殖，每年春季随西南气流向北迁飞，并且秋季向南回迁（姜玉英等，2019；江幸福等，2019）。山东省作为我国玉米粮食主要生产大省，也是草地贪夜蛾“北迁南往”过程中重要的“中转站”，对我国草地贪夜蛾监测预警及玉米粮食生产有重大的战略意义。据此，本文初步阐明了首次入侵山东的草地贪夜蛾的虫源地分布和迁入迁出时间，并发现西太平洋副高可能是草地贪夜蛾迁入山东省的关键因子，其结果为山东省玉米粮食生产的监测预警和科学防控提供了依据，也进一步厘清了草地贪夜蛾在我国华北地区的迁飞规律。

参考文献（References）

Abrahams P，Bateman M，Beale T，*et al.* Fall armyworm：Impacts and implications for Africa. September 2017 [R]. Report to DFID. Wallingford，UK：CAB International，2017.

Bao YX，Sun MQ，Yan ML，*et al.* Comparative study of migration trajectories of the brown planthopper，*Nilaparvata lugens*（Stål），in China based on two trajectory models [J]. *Acta Ecologica Sinica*，2016，36（19）：6122 - 6138. [包云轩，孙梦秋，严明良，等. 基于两种轨迹模型的褐飞虱迁飞轨迹比较研究 [J]. 生态学报，2016，36（19）：6122 - 6138]

CABI. *Spodoptera frugiperda*（fall armyworm）[R]. Wallingford，UK：CAB International，2016.

Casmuz A，Juárez ML，Socías MG，*et al.* Review of the host plants of fall armyworm，*Spodoptera frugiperda*（Lepidoptera：Noctuidae）[J]. *Revista de la Sociedad Entomológica Argentina*，2010，69：209 - 231.

Chen H，Chang XL，Wang YP，*et al.* The early northward migration of the white-backed planthopper（*Sogatella furcifera*）is often hindered by heavy precipitation in southern China during the preflood season in May and June [J]. *Insects*，2019，10（6）：158.

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. 我国最早发现为害地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，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]

ChenYT. Potential Climate and Host Plant - suitable Distribution and Spread Trend of *Oracella acuta* in China [D]. Fujian：Fujian Agriculture and Forestry University Master Thesis，2015. [陈燕婷. 湿地松粉蚧在中国的潜在适生区预测及扩散预警 [D]. 福建：福建农林大学硕士论文，2015]

FAO. FAO statement on fall armyworm in Sri Lanka [R]. Rome：Food and Agriculture Organization of the United Nations，2019a.

FAO. First detection report of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda*（Lepidoptera：Noctuidae）on maize in Myanmar [EB/OL]. 2019b（2019 - 01 - 11）[2021 - 04 - 09]. http：//www.fao.org/news/story/en/item/1142085/icode/.

FAO. Integrated management of the fall armyworm on maize [R]. Rome：Food and Agriculture Organization of the United Nations，

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2017.

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.

Ge SS，He LM，He W，*et al*. Determination on moth flight capacity of *Spodoptera frugiperda* [J]. *Plant Protection*，2019，45（4）：28－33. [葛世帅，何莉梅，和伟，等. 草地贪夜蛾的飞行能力测定 [J]. 植物保护，2019，45（4）：28－33]

Hogg DB，Pitre HN，Anderson RE. Assessment of early-season phenology of the fall armyworm（Lepidoptera：Noctuidae）in Mississippi [J]. *Environmental Entomology*，1982，11（3）：705－710.

Hu GW，Xie MX，Wang SC. A suggestion for delimitation of the incidence areas of white-backed planthopper in China [J]. *Acta Entomologica Sinica*，1988，1：42－49. [胡国文，谢明霞，汪毓才. 对我国白背飞虱的区划意见 [J]. 昆虫学报，1988，1：42－49]

IPPC. First detection of fall armyworm on the border of Thailand [R]. Rome：Food and Agriculture Organization of the United Nations，2018.

Jiang XF，Zhang L，Cheng YX，*et al*. Advances in migration and monitoring techniques of the fall armyworm，*Spodoptera frugiperda* [J]. *Plant Protection*，2019，45（1）：12－18. [江幸福，张蕾，程云霞，等. 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 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]

Jiang YY，Liu J，Zeng J. Using a national searchlight trap network to monitoring the annual dynamics of the oriental armyworm in China [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*，2018，55（5）：778－793. [姜玉英，刘杰，曾娟. 我国粘虫周年区域动态规律的监测 [J]. 应用昆虫学报，2018，55（5）：778－793]

Johnson SJ. 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.

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*，2020，76（2）：454－463.

Lu M，Chen X，Liu W，*et al*. Swarms of brown planthopper migrate into the lower Yangtze River Valley under strong western pacific subtropical highs [J]. *Ecosphere*，2017，8（10）：e01967.

Luginbill P. The fall army worm [R]. USDA Technology Bulletin，1928，34：91.

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 into Japan and the Korean Peninsula via overseas migration [J]. *Journal of Applied Entomology*，2019，143（9）：911－920.

Montezano DG，Specht A，Sosa－Gómez DR，*et al*. Host plants of *Spodoptera frugiperda*（Lepidoptera：Noctuidae）in the Americas [J]. *African Entomology*，2018，26，286－300.

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*，2018，43：397－411.

National Bureau of Statistics. China Statistical Yearbook [M]. Beijing：China Statistics Press，2019：383－385. [中华人民共和国统计局. 中国统计年鉴 [M]. 北京：中国统计出版社，2019：383－385]

National Agricultural Technology Extension Service Center. Notification of the occurrence and damage of fall armyworm，*Spodoptera frugiperda* in China and surrounding countries [R]. Plant Disease and Pest Information，2019，13，2019－04－04. [全国农业技术推广服务中心. 我国及周边国家草地贪夜蛾发生为害情况通报 [R]. 植物病虫情报，2019，13，2019－04－04]

Qi GJ，Ma J，Hu G，*et al*. 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. [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）：487－496]

Schlemmer M. Effect of Temperature on Development and Reproduction of *Spodoptera frugiperda*（Lepidoptera：Noctuidae）[D]. Evanston：North－West University Master Thesis，2018.

Sharanabasappa D，Kalleshwarsway CM，Asokan R，*et al*. First report of the fall armyworm，*Spodoptera frugiperda*（J. E. Smith）（Lepidoptera：Noctuidae），an alien invasive pest on maize in India [J]. *Post Management in Horticultural Ecosystems*，2018，24（1）：23－29.

Song GJ. Seasonal Migration of *Apolygus lucorum*（Meyer－Dür）and *Adelphocoris suturalis* Jakovlev（Hemiptera：Miridae）among Host Plants and Their Predatory Natural Enemies [D]. Huhhot：Inner Mongolia Agricultural University Master Thesis，2011. [宋国晶. 绿盲蝽和中黑盲蝽的季节性寄主转移规律及捕食性天敌种类研究 [D]. 呼和浩特：内蒙古农业大学硕士论文，2011]

Stokstad E. New crop pest takes Africa at lightning speed [J]. *Science*，2017，356（6337）：473－474.

Todd EL，Pooler W. Keys and illustrations for the armyworm moths of the noctuid genus *Spodoptera Guenée* from the Weatern Hemisphere [J]. *Annals of the Entomological Society of America*，1980，73（6）：722－738.

Wainwright CE，Stepanian PM，Horton KG. The role of the US Great Plains low-level jet in nocturnal migrant behavior [J]. *International*

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Journal of Biometeorology, 2016, 60 (10): 1531 – 1542.

Westbrook JK, Nagoshi RN, Meagher RL, *et al*. Modeling seasonal migration of fall armyworm moths [J]. *International Journal of Biometeorology*, 2016, 60 (2): 255 – 267.

Wolf WW, Westbrook JK, Raulston JR, *et al*. Recent airborne radar observations of migrant pests in the United States [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 1990, 328: 619 – 629.

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 PX, Wu FM, Fan JY, *et al*. Potential economic impact of invasive fall armyworm on mainly affected crops in China [J/OL]. *Pest Management Science*. (2021 – 01 – 24) [2021 – 04 – 09]. https://doi.org/10.1007/s10340 – 021 – 01336 – 9.

Xie JN, Miao QR, Guo JJ. Research progress in migration route of *Nilaparvata lugens* [J]. *Guizhou Agricultural Sicences*, 2011, 39 (1): 114 – 117. [谢家楠, 廖启荣, 郭建军. 褐飞虱迁飞路线研究进展 [J]. 贵州农业科学, 2011, 39 (1): 114 – 117]

Yu ZX. Trajectory Analysis of Wheat Aphids during Long – Distance Migration Using HYSPLIT Model [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University Master Thesis, 2011. [郁振兴. 利用 HYSPLIT 模型分析麦蚜远距离迁飞轨迹 [D]. 郑州: 河南农业大学硕士论文, 2011]

Zhang QQ, Li LL, Qu MJ, *et al*. Monitoring the distribution and population dynamics of fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) by pheromone trapping in Shandong Province in 2019 [J]. *Plant Protection*, 2021, 47 (1): 222 – 226. [张晴晴, 李丽莉, 曲明静, 等. 2019 年性诱监测草地贪夜蛾在山东省的分布与发生动态 [J]. 植物保护, 2021, 47 (1): 222 – 226]

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net