河南省草地贪夜蛾迁入路径及虫源地分析*

孙旭军[1**] 张国彦[2**] 刘 一[2] 王新媛[2] 胥付生[3] 杜桂枝[4]
冯贺奎[5] 耿丰华[6] 张秋红[7] 胡 高[1] 翟保平[1***]

（1. 南京农业大学植物保护学院，南京 210095；2. 河南省植物保护植物检疫站，郑州 450002；3. 漯河市郾城区植保植检站，漯河 462000；4. 周口市淮阳区植保植检站，淮阳 466700；5. 驻马店市平舆县植保植检站，平舆 463400；6. 南阳市镇平县植保植检站，镇平 474200；7. 许昌市长葛市植保植检站，长葛 461500）

摘 要 【**目的**】明确草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda*（J. E. Smith）迁入河南的路径和虫源地，为河南草地贪夜蛾的异地预测提供基础信息。【**方法**】根据 2019 和 2020 年河南省 88 个监测点的草地贪夜蛾高空灯诱蛾数据，借助基于 WRF 模式的昆虫轨迹分析方法，阐释河南草地贪夜蛾的迁入路径和虫源地。【**结果**】草地贪夜蛾经东、西两条迁飞路线迁入河南。东线主要从广东和江南丘陵区迁入河南，主迁入期在 6-8 月，8-9 月也会有少量来自安徽、江苏的虫群迁入；西线为主要虫源区，从云贵高原经西南山地玉米种植区（包括川东、重庆、桂西、湘西、鄂西山地和陕南山地）迁入到河南中西部，最早 4 月就有源自广西的成虫迁入，主迁入峰集中在 7-8 月。特定天气系统和天气过程影响草地贪夜蛾迁入期的年际变化，2020 年河南省草地贪夜蛾迁入峰期推迟，是因为当年 6 月中下旬江南长时间、大范围降水对迁出种群的阻滞作用。【**结论**】河南草地贪夜蛾的异地预测可用 3 月份广西、云南和 4-5 月份重庆、贵州、湖南的田间虫量作为迁入量的预测因子，用 5-6 月份湖南、湖北的发蛾期和 6 月份的降水作为迁入期的预测因子。

关键词 草地贪夜蛾；轨迹分析；迁入路径；虫源地

Tracking the migration path and source areas of the fall armyworm in Henan

SUN Xu-Jun[1**] ZHANG Guo-Yan[2**] LIU Yi[2] WHANG Xin-Yuan[2] XU Fu-Sheng[3] DU Gui-Zhi[4]
FENG He-Kui[5] GENG Feng-Hua[6] ZHANG Qiu-Hong[7] HU Gao[1] ZHAI Bao-Ping[1***]

(1. College of Plant Protection, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. Henan Plant Protection and Plant Quarantine Station, Zhengzhou 450002, China; 3. Yancheng Plant Protection and Plant Quarantine Station, Luohe 462000, China; 4. Huaiyang Plant Protection and Plant Quarantine Station, Huaiyang 466700, China; 5. Pingyu Plant Protection and Plant Quarantine Station, Pingyu 463400, China; 6. Zhenping Plant Protection and Plant Quarantine Station, Zhenping 474200, China; 7. Changge Plant Protection and Plant Quarantine Station, Changge 461500, China)

Abstract **[Objectives]** To clarify the immigration pattern and source population of the fall armyworm (FAW, *Spodoptera frugiperda*) in Henan province, and provide basic information for the allopatric forecasting of FAW. **[Methods]** Migration routes of FAW were tracked by trajectory analysis using the WRF4.0 (Weather Research and Forecasting Model) and source areas of immigrants analyzed based on searchlight trap catches at 88 monitoring stations in Henan province in 2019 and 2020. **[Results]** Immigrants fly north along two paths; east and west. The eastern route mainly runs from Guangdong and south of Yangtze River provinces from June to August, with a few immigrants from Anhui and Jiangsu from August to September. The western route is the main source of populations invading Henan province. These depart from the southwestern, mountainous, corn belt, including the Yunnan-Guizhou Plateau, eastern Sichuan, Chongqing, western Guangxi, western Hunan and Hubei and southern Shaanxi, and fly 1-3 nights to arrive in central and western Henan in July and August. Weather can cause annual

*资助项目 Supported projects：NSFC-河南联合基金（U1904201）；国家重点研发计划（2019YFD0300102）
**共同第一作者 Co-first authors，E-mail：1075368958@qq.com；zhangguoyanhns@163.com
***通讯作者 Corresponding author，E-mail：bpzhai@njau.edu.cn
收稿日期 Received：2021-04-20；接受日期 Accepted：2021-05-07

fluctuations in the timing of immigration of the FAW to Henan Province. A case study revealed that long-term and heavy precipitation south of the Yangtze River during mid-to-late June 2020 retarded the takeoff of source populations in southern China, postponing the arrival of immigrants in Henan. **[Conclusion]** The density of field populations of FAW in Guangxi and Yunnan in March, and in Chongqing, Guizhou and Hunan in April and May, can be used to predict the number of immigrants that will arrive in Henan. The emergence period in Hunan and Hubei during May and June, and the rainfall in June, are also predictive factors for the arrival of FAW in Henan province.

Key words *Spodoptera frugiperda*; trajectory analysis; migratory routes; source areas of immigrants

草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda*（J. E. Smith）原产于美洲热带和亚热带地区，具有强大的飞行能力、繁殖能力和适应能力，2016 年入侵非洲并迅速东进入侵亚洲各国和澳大利亚，被联合国粮农组织列为全球预警的重大迁飞性农业害虫（Sparks，1979；FAO，2018，2020 a，2020b；杨普云和常雪艳，2019）。2019 年 1 月 11 日在我国云南江城玉米田首次发现草地贪夜蛾为害，截至到 2020 年 9 月底，草地贪夜蛾已在我国 27 省（市、自治区）1 500 多个县市发生为害，年发生面积超过 106.5 万 hm^2（姜玉英等，2019；杨普云和常雪艳，2019；农业农村部，2020）。目前，草地贪夜蛾已在华南（北回归线以南）定殖形成周年繁殖区并成为最危险的季节性迁飞害虫（陈辉等，2020；齐国君等，2020；吴孔明，2020；姜玉英等，2021），因而被列入我国一类农作物病虫害名录（农业农村部种植业管理司, 2020）。

我国是世界玉米第二大生产消费国，玉米年种植面积在 4 000 万 hm^2 以上。而河南省地处黄淮海玉米主产区，玉米是省内的第二大粮食作物，年种植面积约 400 万 hm^2（河南省统计局，2020）。草地贪夜蛾于 2019 年 5 月 10 日在河南首次发现，当年发生面积 1 758 hm^2，2020 年发生 1 858 hm^2（待发表）。河南省地处中原，是我国各种迁飞性害虫季节性南北往返迁飞的主要通道，也是草地贪夜蛾定殖扩增并进一步北扩东进的中转站（陈辉等，2020；Li *et al.*，2020）。因此，亟需明确草地贪夜蛾在河南省的迁入路径和虫源地及种群数量的年际变化等关键问题，为河南本省和全国草地贪夜蛾的监测预警与绿色防控提供预测依据和基础信息。

本研究团队在国家自然科学基金项目资助下，2019 和 2020 年在河南全省设置了 88 个高空灯和性诱监测站点，开展了草地贪夜蛾虫情的系统监测和田间调查，并利用 NCEP 再分析数据和基于大气中尺度数值模式（Weather Research and Forecast Model，WRF4.0）的昆虫迁飞轨迹分析方法（胡高，2015），对入侵河南省的草地贪夜蛾的迁飞过程进行模拟和分析，以期阐明草地贪夜蛾的迁飞路径和虫源地，为草地贪夜蛾的异地预测和源头治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

虫情数据：河南本省草地贪夜蛾的虫情监测数据取自河南省植保植检站组建的 88 个高空灯和性诱监测站点，其他省份草地贪夜蛾田间虫情调查数据由全国农业技术推广服务中心植物病虫情报提供。

气象数据：2019-2020 年气象要素采用 NCEP、NCAR 全球再分析数据（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；2019-2020 年我国地面降水日值来源于中国气象数据网（http://data.cma.cn/）。

基础地理数据：中国省级行政区图（1∶4 000 000）来自国家基础地理信息中心（http://www.ngcc.cn/ngcc/html/1/index.html）。

1.2 WRF 模式方案和参数设定

本文使用 WRF4.0 中尺度数值模式，以 FNL 全球再分析数据为初始场数据和边界条件，利用 MODIS 和 GWD 地形数据（分辨率 2′），采用单层嵌套的 WRF 模式，参数设置参考吴秋琳等（2019），模拟网格区域为 130×150 个格点，

经模拟计算后输出逐时 30 km×30 km 格距的气象要素场，作为后续轨迹分析的高时空分辨率气象背景场。

1.3　草地贪夜蛾迁飞轨迹分析参数设置

根据草地贪夜蛾的迁飞生物学特征设定其迁飞轨迹计算参数。

1.3.1　飞行时间设定　夜行性昆虫仅夜间迁飞且连续多个夜晚飞行，每天傍晚日落后起飞，次日黎明降落（翟保平，2004；Wang *et al.*，2017）。草地贪夜蛾雌蛾 4 日龄卵巢发育成熟（赵胜园等，2019），且飞行能促其卵巢发育（Ge *et al.*，2021），故 3 个夜晚飞行后迁飞终止。据此设定其起飞时间为当天 19:00（BJT），降落时间为次日清晨 5:00（BJT），每晚连续飞行 10 h，连续飞行 3 个夜晚，每个夜晚结束的轨迹终点作为第 2 天傍晚起飞的起点（Li *et al.*，2020；Wu *et al.*，2021）。

1.3.2　自主飞行速度　多数夜蛾科昆虫自主飞行速度约 2.5-4.3 m/s（Chapman *et al.*，2010，2012；Westbrook *et al.*，2016）。本研究取其中值，设定草地贪夜蛾的自主飞行速度为 3 m/s。关于草地贪夜蛾种群的飞行定向问题目前尚无定论，所以暂不考虑定向偏角的设定，默认其为顺风飞行。

1.3.3　飞行高度设定　为了确定草地贪夜蛾可能的飞行高度，设定 8 个不同的模拟高度，分别是距海平面高度 500、750、1 000、1 250、1 500、1 750、2 000、2 250 m（Li *et al.*，2020）。

1.3.4　飞行低温阈值　设定草地贪夜蛾的低温阈值为 13.8 ℃（Hogg *et al.*，1982），当模拟高度的气温低于该阈值时就终止轨迹计算。

1.3.5　草地贪夜蛾顺推迁飞轨迹　将湖南和湖北两省按照 1°×1°经纬度格点划分，以每个格点作为顺推迁飞轨迹起点，其他参数设置同上。

1.4　草地贪夜蛾的有效积温模型和发育进度

从 FNL 再分析数据中提取 2:00、14:00 距地面 2 m 高处的气温作为每个地区日最低和最高温度，计算有效积温，确定草地贪夜蛾幼虫各个龄期发育进度。草地贪夜蛾卵、幼虫、蛹和卵到蛹的发育起点温度分别是 10.27、11.10、11.92 和 11.34 ℃，有效积温分别是 44.57、211.93、135.69 和 390.55 日·度（何莉梅等，2019）。根据各站点首见草地贪夜蛾的时间和有效积温，推算各站点草地贪夜蛾成虫首次迁入时间和迁出时间。

1.5　草地贪夜蛾模拟轨迹筛选和有效虫源落点概率统计

有效轨迹筛选：先用 ArcGIS 将整个区域划分为 1°×1°的单元网格，去除落在海面上的无效轨迹落点，并计算出每个单元网格内的轨迹终点数；然后将单元网格内的终点数，按照从小到大的顺序排列，并计算其累计概率；最后用 R 语言绘制轨迹落点空间分布。

有效虫源概率：结合全国各省县草地贪夜蛾的实际发生情况（姜玉英等，2019，卢辉等，2020），用 ArcGIS 提取能够提供有效虫源的各省份的轨迹落点，再用 R 语言按照省份和月份进行分类、计算。

2　结果与分析

2.1　2019 和 2020 年河南省草地贪夜蛾迁入动态

田间调查结果表明（图 1），2019 和 2020 年河南省各地主要在夏玉米上（5 月底 6 月初播种）首见草地贪夜蛾幼虫为害。2019 年，5 月 10 日在信阳浉河首次发现草地贪夜蛾幼虫入侵河南，6 月草地贪夜蛾幼虫的为害已扩散至 10 市 36 县，主要集中在河南中东部，最北是开封祥符；7 月洛阳、三门峡、平顶山等市县首次发现草地贪夜蛾，8 月份黄河两岸 33 个县首见为害，最北端已达濮阳清丰（35.90°N）。2020 年，6 月在信阳商桥首次发现草地贪夜蛾为害，7 月在南阳、三门峡等各市县发现其为害，8 月全省 16 市 57 县见虫，最北端在濮阳台前（35.96°N）；10 月安阳发现草地贪夜蛾成虫，但是两年间都未见幼虫为害。根据 2019 年和 2020 年河南各地首见草地贪夜蛾的虫态和时间，将幼虫时间转换为成虫，对成虫迁入时间逐旬分类（图 2），可见 2019 年在

6 月上旬和 8 月上旬有两个迁入峰期，而 2020 年只有 7 月下旬到 8 月中旬一个峰期。全省草地贪夜蛾总体呈现从南至北、由东向西逐步迁入，其中信阳最早见虫，7 月达黄河以北，8 月覆盖全省。

2.2 河南省草地贪夜蛾迁入路径及虫源地

回推轨迹分析结果表明，2019 年 4 月轨迹落点集中在广西、湖南、湖北、江西等地，但是湖南、湖北、江西在 4 月并无有效虫源（湖南 4 月 26 日、湖北 5 月 8 日、江西 5 月 7 日发现草地贪夜蛾幼虫），只有广西才能提供有效虫源；5 月迁入河南的草地贪夜蛾主要来自湖南、湖北，6 月还有贵州、江西、广东的迁入虫源；7-8 月除了湖北、江苏、安徽外，四川、重庆和陕西也会有成虫陆续迁入河南；9 月主要是河南本地羽化的成虫迁出和周边回迁个体迁入（图 3）。2020 年入侵河南草地贪夜蛾种群的迁入路径和虫源分布与 2019 年情况基本一致，但能够提供有效虫源的地区分布更广泛，在 6-8 月东亚季风最盛期间，云南东部和越南、老挝、泰国北部的草地贪夜蛾飞行 3 个夜晚也可达到黄河以北。

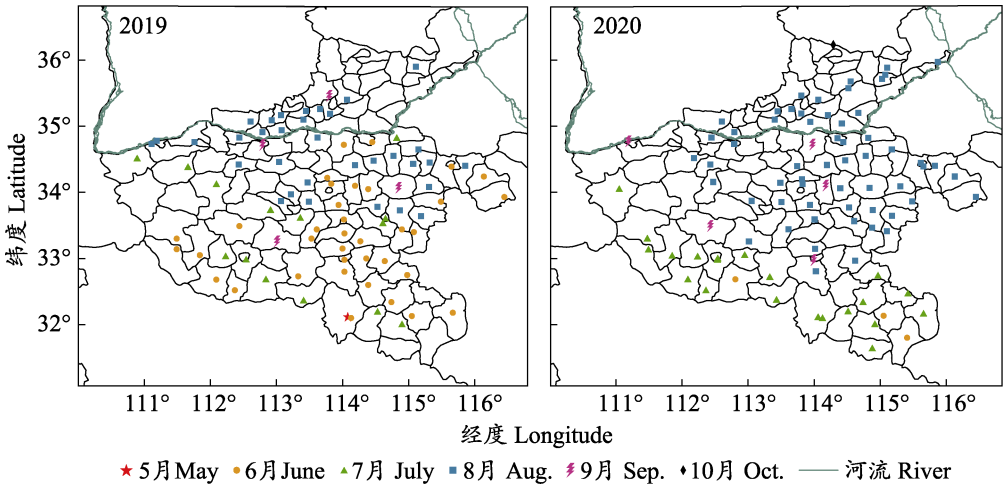

图 1 2019 和 2020 年河南草地贪夜蛾发生区分布

Fig. 1 Spatial distribution of the immigrant *Spodoptera frugiperda* in Henan in 2019 and 2020

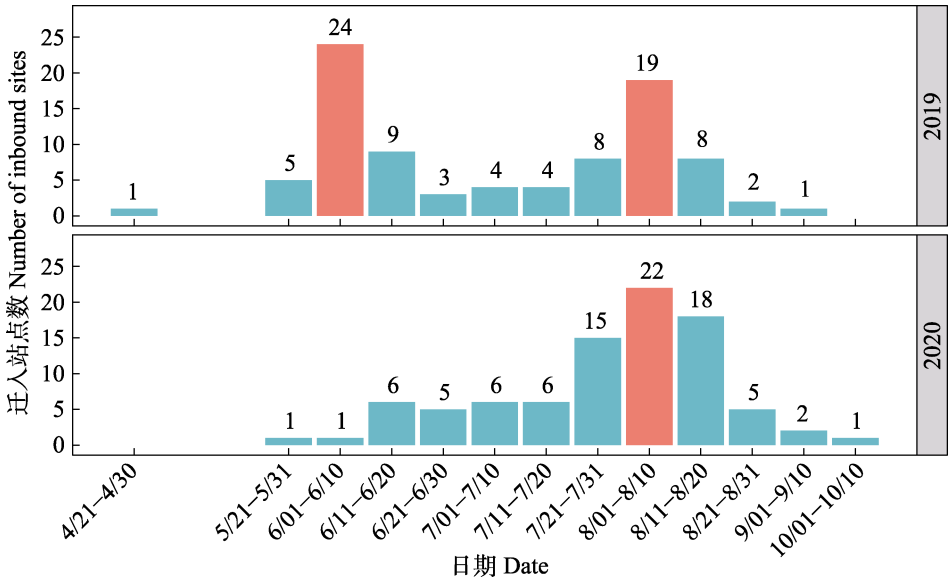

图 2 2019 和 2020 年草地贪夜蛾成虫首次入侵河南的时间动态

Fig. 2 Spatio-temperal trends of the first immigration of *Spodoptera frugiperda* in Henan in 2019 and 2020

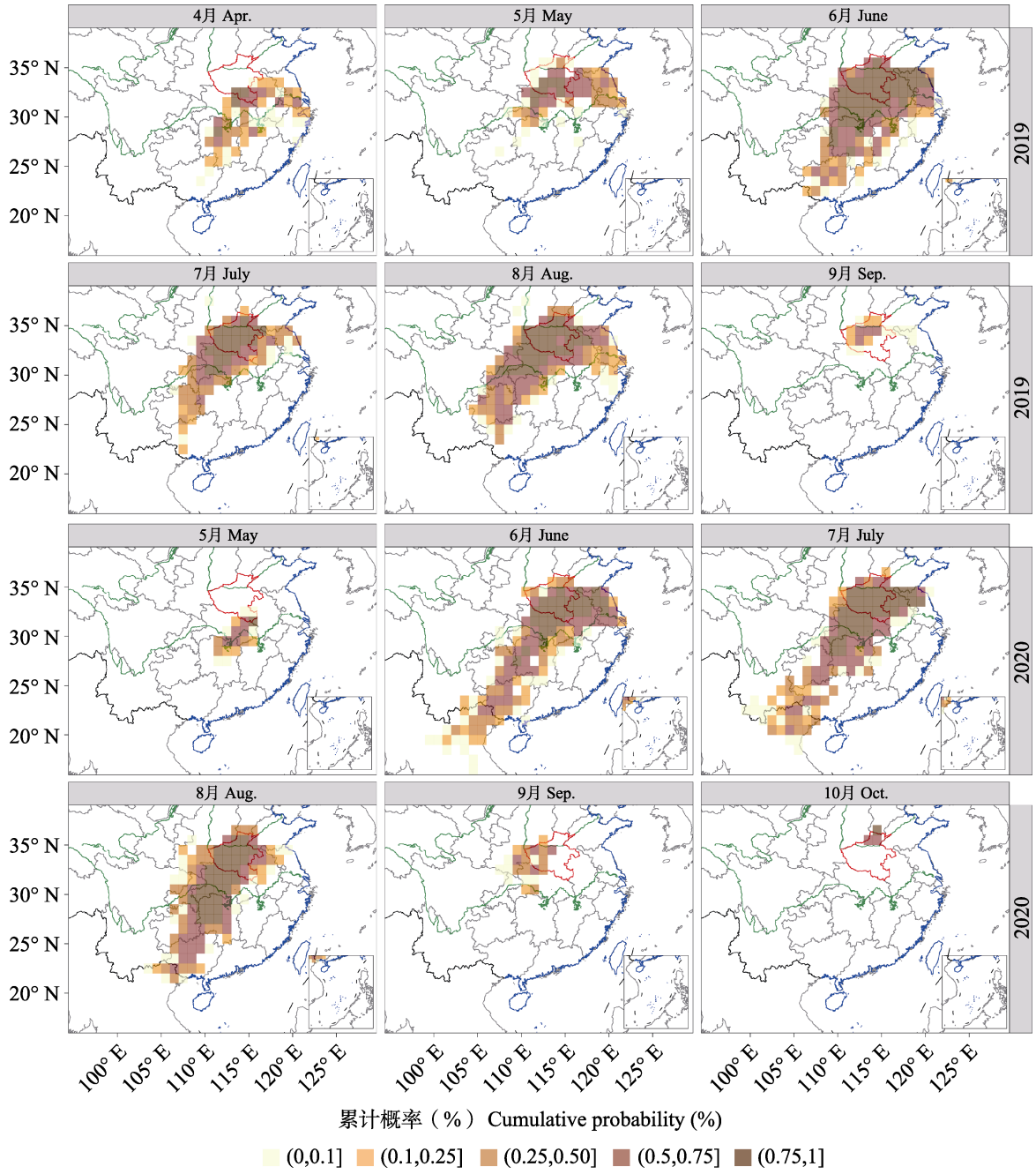

图 3　2019 和 2020 年首次迁入河南的草地贪夜蛾的回推轨迹落点分布

Fig. 3　Patterns of the backward trajectory endpoints of the first immigration of *Spodoptera frugiperda* in Henan in 2019 and 2020

根据轨迹模拟结果，筛选出能够提供有效虫源并迁入河南的完整轨迹，按照月份和省份进行概率统计（表 1），可见 5-8 月落入湖北、湖南（主要是鄂西湘西）的有效迹点占比分别为 96.51%、46.70%、57.72%和 69.16%，说明迁入河南的草地贪夜蛾虫源主要来自湘鄂两省。而从两省 1°×1°经纬度格点出发做 2020 年 6 月上旬草地贪夜蛾迁出种群的逐日轨迹顺推（图 4），发现湖南的迁出虫源大多迁入湖北、江西、浙江和安徽等地，只有极少数迹点达河南南端，而湖北的迁出虫源多数直入河南。

总体而言，河南省草地贪夜蛾的迁入路径可分为东、西两条线路：东线，6-8 月从江西、广东等江南华南各地迁入，而 7-8 月安徽、江苏也

会有少量种群迁入；西线，广西 4 月就能提供有效虫源迁入河南南部，5-8 月主要从云贵高原经西南山地玉米种植区（包括广西大部、贵州、川东、重庆、湘西鄂西山地和陕南山地）迁入到河南中西部（图 5），可见西线迁入时间更早、虫源量占比更高。

表 1　2019-2020 年迁入河南的草地贪夜蛾有效虫源落点分布概率

Table 1　Distribution probability of source population of immigrant *Spodoptera frugiperda* in Henan province from 2019 to 2020

月份 Month	省份 Province	有效轨迹落点总数 Total endpoints of valid trajectory	有效落点概率（%） Probability of valid endpoints
4	广西 Guangxi	4	100.00
5	湖北 Hubei	201	83.08
	湖南 Hunan		13.43
	安徽 Anhui		0.50
	江西 Jiangxi		1.49
	贵州 Guizhou		0.50
	重庆 Chongqing		1.00
6	湖北 Hubei	2 587	33.05
	湖南 Hunan		13.65
	安徽 Anhui		29.34
	江苏 Jiangsu		12.72
	广西 Guangxi		4.10
	陕西 Shaanxi		0.46
	江西 Jiangxi		1.39
	贵州 Guizhou		1.93
	浙江 Zhejiang		0.15
	云南 Yunnan		0.15
	重庆 Chongqing		0.81
	广东 Guangdong		0.19
	福建 Fujian		0.04
	上海 Shanghai		0.04
	越南 Vietnam		1.20
	老挝 Laos		0.58
	泰国 Thailand		0.19
7	湖北 Hubei	1 620	45.62
	湖南 Hunan		12.10
	安徽 Anhui		16.36
	江苏 Jiangsu		9.14
	广西 Guangxi		2.47
	陕西 Shaanxi		2.10

续表 1（Table 1 continued）

月份 Month	省份 Province	有效轨迹落点总数 Total endpoints of valid trajectory	有效落点概率（%） Probability of valid endpoints
7	江西 Jiangxi		0.31
	贵州 Guizhou		5.68
	云南 Yunnan		1.05
	重庆 Chongqing		1.98
	四川 Sichuan		0.12
	越南 Vietnam		2.53
	老挝 Laos		0.56
8	湖北 Hubei	3 674	47.06
	湖南 Hunan		22.10
	安徽 Anhui		6.23
	江苏 Jiangsu		2.91
	广西 Guangxi		6.59
	陕西 Shaanxi		2.12
	江西 Jiangxi		0.33
	贵州 Guizhou		5.80
	浙江 Zhejiang		0.19
	云南 Yunnan		0.14
	重庆 Chongqing		5.47
	广东 Guangdong		0.03
	上海 Shanghai		0.05
	四川 Sichuan		0.19
	越南 Vietnam		0.79
9	河南 Henan	1 358	61.70
	湖北 Hubei		6.26
	安徽 Anhui		21.50
	江苏 Jiangsu		3.76
	陕西 Shaanxi		1.62
	山东 Shandong		5.01
	四川 Sichuan		0.15
10	河南 Henan	2 056	88.86
	湖北 Hubei		0.39
	安徽 Anhui		6.18
	江苏 Jiangsu		1.51
	山东 Shandong		2.77
	河北 Hebei		0.29

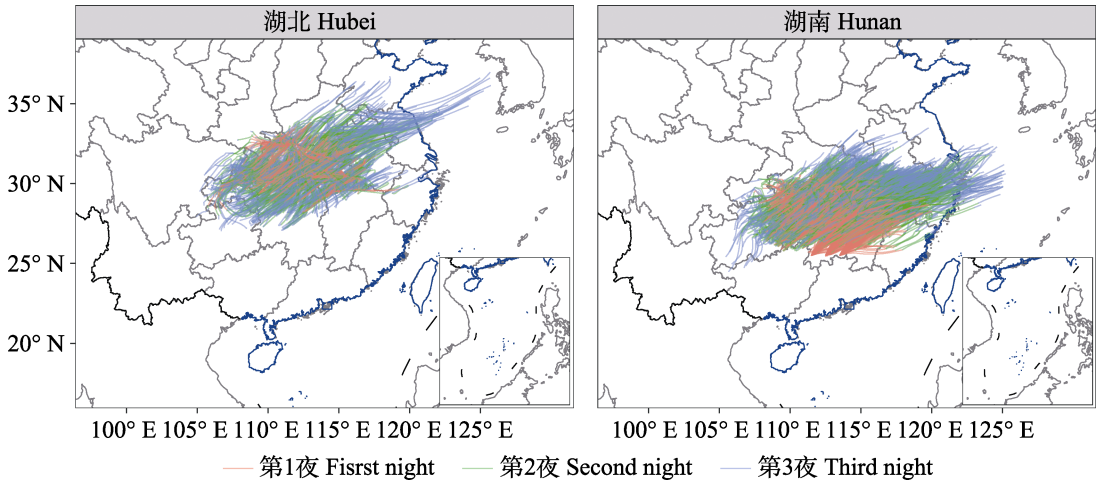

图 4　2020 年 6 月上旬湖南、湖北逐日顺推轨迹

Fig. 4　The daily forward trajectories of emigrant *Spodoptera frugiperda* from Hunan and Hubei during June 1-10, 2020

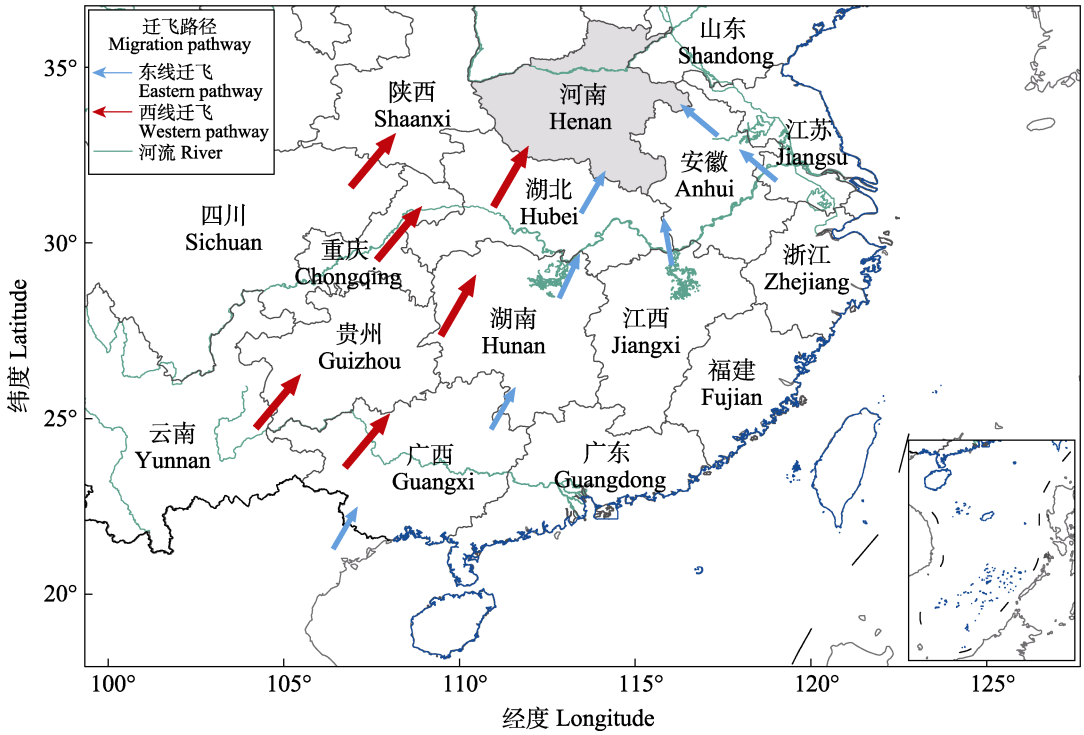

图 5　河南草地贪夜蛾迁入路径示意图

Fig. 5　Conceptual immigration pathways of *Spodoptera frugiperda* invading into Henan

2.3　河南草地贪夜蛾迁入期的年际变化

比较 2019 年和 2020 年河南、湖北各市县首见草地贪夜蛾的时间，统计两省草地贪夜蛾首次迁入和迁出时间（图 6，图 7），可见两年间河南草地贪夜蛾首次迁入时间、湖北草地贪夜蛾首次迁出时间均显出极显著差异。2020 年湖北草地贪夜蛾迁出峰集中在 6 月中下旬，较 2019 年晚 10 多天；而河南草地贪夜蛾的首见迁入期则比 2019 年晚了一个月。

检视 2020 年 4-5 月的风温场（图 8），可知 4 月低温、5 月中下旬无合适的风向风速运送草

地贪夜蛾虫源北上，而 5 月上旬的温度和风向虽都比较适合，但 5-10 日在 30°N 以南地区持续降水（图 9），阻滞了江南草地贪夜蛾迁出种群的起飞。一个月后，江南、华南草地贪夜蛾迁出种群再次受 6 月中下旬长江以南出现大范围持续降水影响（图 10），其中湖北全省在 6 月 13-14 日累计日降雨量分别为 2 944.1 和 2 007.7 mm，16-23 日日均累计降雨均在 1 500 mm 以上，27-28 日累计降雨量分别为 2 718.4mm 和 5 042.5 mm，其中 6 月 13、23、27、28 日 4 d 中，湖北省单站日降雨量最高达到 130.6 mm。此外，在 6 月 21-25 日在贵州、重庆、湖南、江西、安徽、江苏呈现一条持续雨带。由此可见，6 月长江以南持续大范围的降雨是导致湖北以及其以南各省草地贪夜蛾迁出种群无法北上而滞留当地的主要原因。

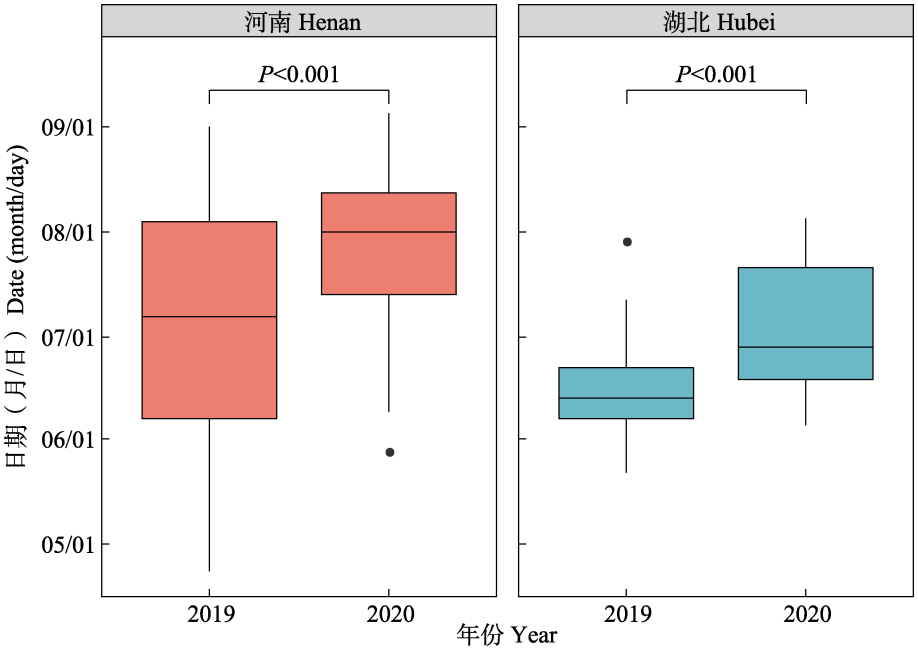

图 6　2019 和 2020 年河南草地贪夜蛾首次迁入时间和湖北草地贪夜蛾首次迁出时间

Fig. 6　Time box of the first immigration of *Spodoptera frugiperda* in Henan and Hubei in 2019 and 2020

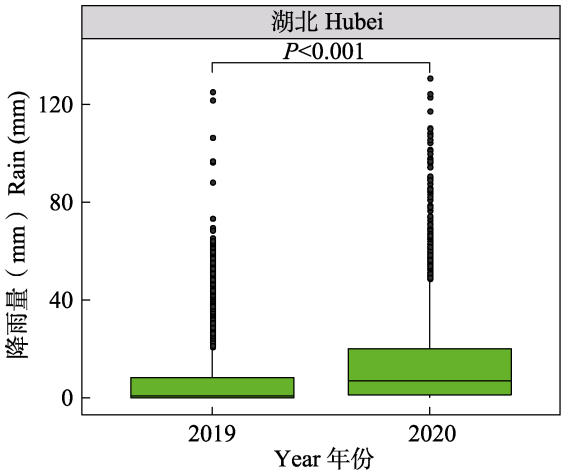

图 7　2019 和 2020 年湖北全省 6 月中下旬降雨量

Fig. 7　Total rainfall from June 11th to 30th in Hubei province in 2019 and 2020

3　讨论与结论

从全国范围看，我国草地贪夜蛾的北进有东线、西线 2 条路径：东线从“广东广西”周年繁殖区经江南丘陵区各省进而覆盖黄淮海平原区，西线则从的滇南周年繁殖区经云贵高原北进整个西南山地玉米种植区，包括云贵川黔、湘西鄂西山地和陇南陕南山地（陈辉等，2020；Li *et al.*，2020）。本文研究结果表明，河南 5-8 月迁入的草地贪夜蛾主要是从广西、湖南、湖北三省经过 1-3 个夜晚迁飞而来（表 1），且轨迹落点集中在桂西和鄂西湘西，即西南山地玉米种植区的桂西山地和鄂西湘西山地，为河南提供了半数以上

的虫源。就玉米种植区域的生态区划而言，鄂西湘西山地玉米种植区是河南最主要的虫源区，玉米种植面积分别占湖北、湖南全省玉米种植面积的 70%和 80%。与全国草地贪夜蛾的北进有东西

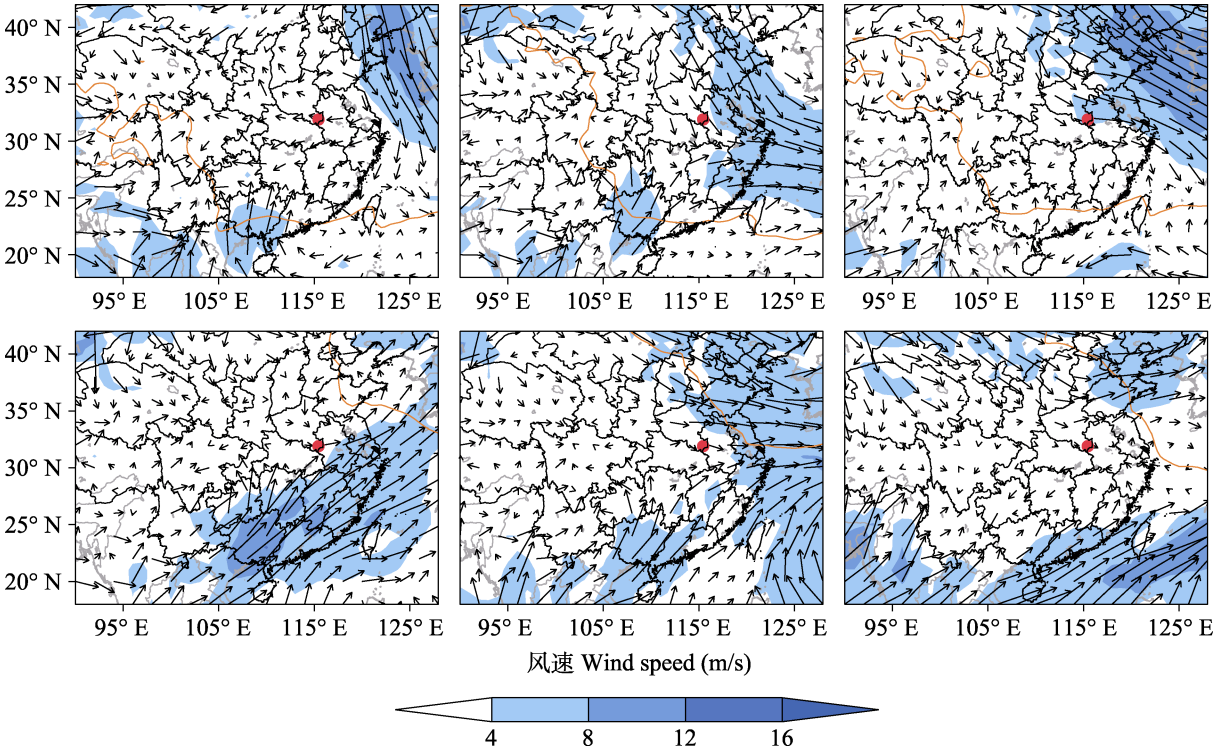

图 8　2020 年 4-5 月 850 hPa 平均风场（m/s，以风矢和色块示之）和草地贪夜蛾飞行低温阈值 13.8 ℃等温线

Fig. 8　Mean winds (m/s, show by color bar) and isotherm of 13.8 ℃ (the low temperature threshold for flight of *Spodoptera frugiperda*) on 850 hPa from April to May in 2020

A. 4 月上旬；B. 4 月中旬；C. 4 月下旬；D. 5 月上旬；E. 5 月中旬；F. 5 月下旬。

A. The first ten days of April; B. The middle of ten days of April; C. The last ten days of April; D. The first ten days of May; E. The middle of ten days of May; F. The last ten days of May.

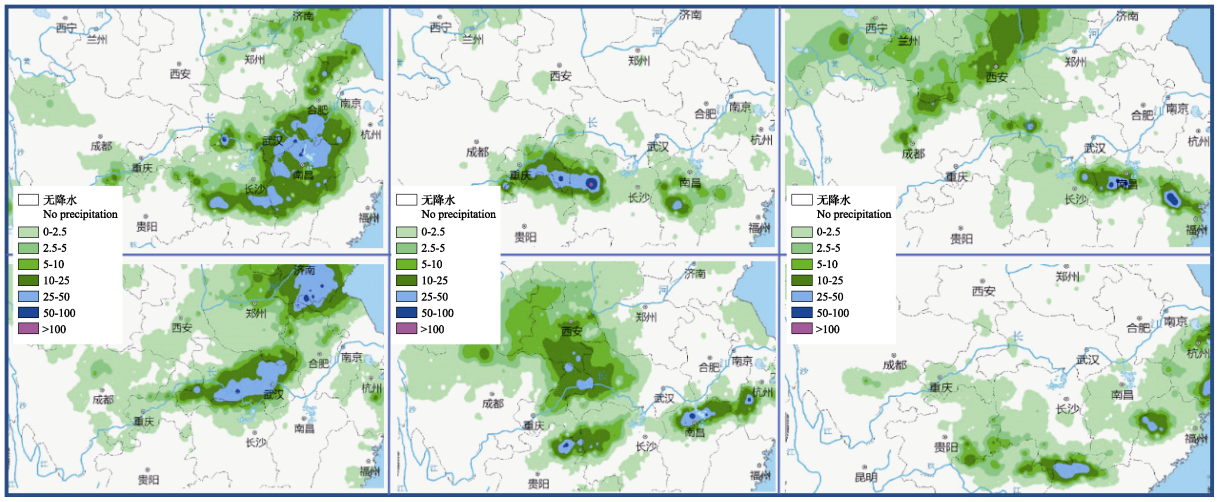

图 9　2020 年 5 月上旬江南持续降雨量

Fig. 9　The rainfall in south of Yangtze River during May 5-10, 2020

上排从左至右：5 月 5-7 日；下排从左至右：5 月 8-10 日。

Top from left to right: May 5-7, 2020; Bottom from left to right: May 8-10, 2020.

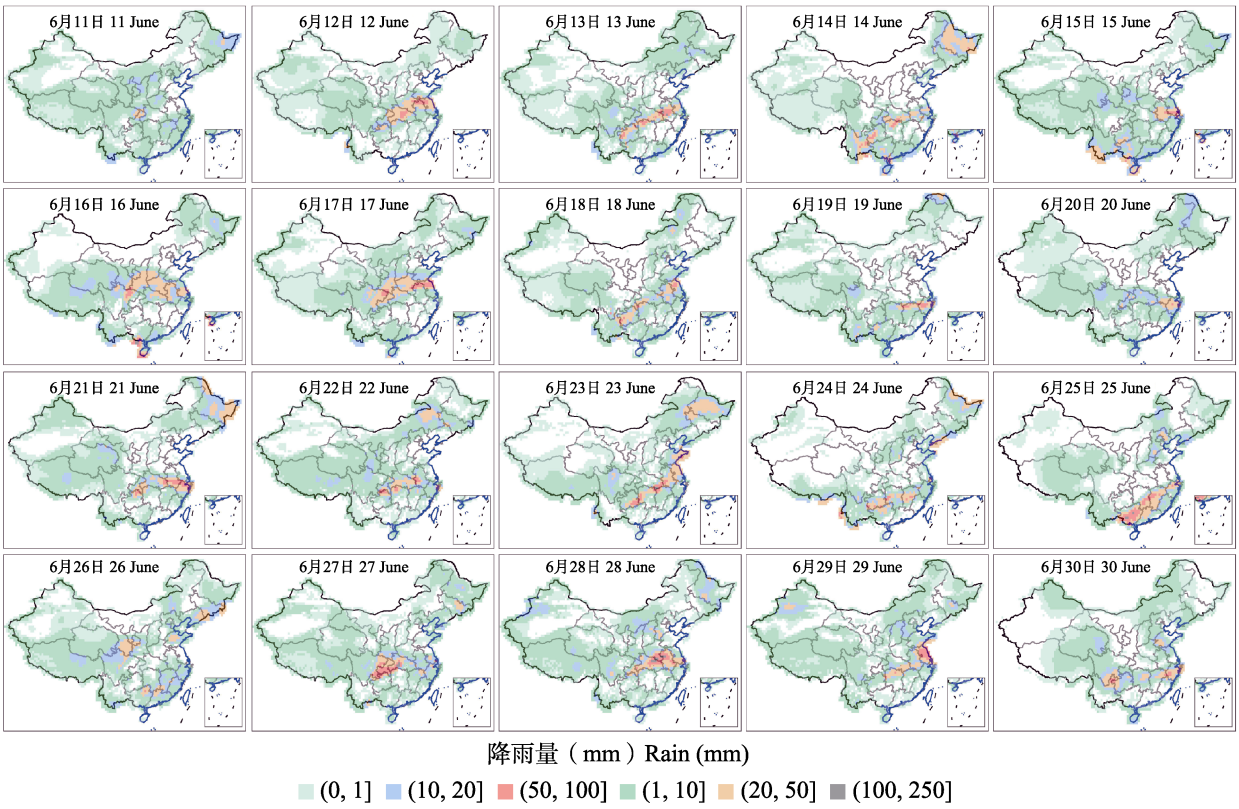

图 10　2020 年 6 月 11-30 日全国逐日降雨量

Fig. 10　The daily rainfall in China from June-11 to 30, 2020

两线相似，草地贪夜蛾迁入河南的路径也是东、西两线，且以西线（桂西湘西鄂西、黔东川东重庆）为主，即我国地势三级阶梯中的第二阶梯与第三阶梯的过渡地带的山地玉米区，是草地贪夜蛾出入中原的主要虫源区（表 1，图 3-图 5）。我国南方丘陵玉米区也是水稻主产区，玉米种植面积仅占全国玉米总面积的 5%左右，其不多的虫源在季风气候的盛行西南风场中也很难进入河南（如湘东和浙赣闽粤等省），只能在特定天气过程中随东南风迁入（如皖南苏南）（表 1）。

我国玉米主产区有三大块：最大的是黄淮海夏播玉米区，其次是北方春播玉米区，第三是西南山地玉米区，构成了我国西南东北走向的玉米带（佟屏亚，1992；王磊，2015；陈泽辉，2016）。北方春玉米 4 月底 5 月初播种，黄淮海主产区春玉米谷雨前后播种、夏玉米麦收后播种，两个主产区的玉米生育期基本一致。从这两年草地贪夜蛾的发生情况看，2019 年河南省草地贪夜蛾迁入峰出现在 6 月上旬和 8 月上旬，2020 年因江南持续降水而集中在 7 月下旬到 8 月中旬；而 2020 年黄淮海玉米主产区的迁入峰出现在 8 月上旬至 9 月上旬，主迁入峰在 8 月中下旬。可见，迁入黄淮海主产区的草地贪夜蛾繁殖一代后若继续北上，此期北方玉米植株已老，食料资源已不足以维持其种群发展，且温度渐降而难以完成世代发育（辽宁 8 月底到 9 月中旬首见成虫），此外，风向渐变也无法进一步北迁。这可能也是辽宁省朝阳市以北的东北大部地区至今尚未见虫的主要原因。故总体而言，草地贪夜蛾对北方玉米主产区的威胁不大，而黄淮海玉米主产区则成草地贪夜蛾北迁的终点和回迁的起点，也是受害风险和防控压力最大的区域。

河南地处黄淮海玉米主产区的最南端，也是国内草地贪夜蛾东、西两条北迁路径的交汇处，承接了最大量的主迁入虫源和回迁虫源。因此，对河南草地贪夜蛾发生动态的长期监测和及时预警对全国的监测防控都有重要意义。根据上述研究结果，可用 3 月份广西、云南和 4-5 月份重

庆、贵州、湖南的田间虫量作为河南草地贪夜蛾迁入量的预测因子，用 5-6 月份湖南湖北的发蛾期和 6 月份的降水作为河南草地贪夜蛾迁入期的预测因子。本研究目前只有两年的监测数据，尚不足以完全反映草地贪夜蛾在河南全省的发生动态和规律，有待今后长期监测数据的积累和进一步的系统研究，以阐明草地贪夜蛾的迁飞规律和暴发机制，为草地贪夜蛾的异地预测和源头治理提供科学依据和技术支撑。

4 致谢

本项研究中，河南全省草地贪夜蛾虫情监测工作还有诸多植保同仁参加：兰考县植保植检站徐竹莲，驿城区植保植检站曹然，民权县植保植检站郭学治，浚县植保植检站唐俊峰，偃师市植保植检站张飞跃，郾城区植保植检站李奇，夏邑县植保植检站张如意，卫辉市植保植检站孙志刚，唐河县植保植检站胡小丽，延津县植保植检站张云强，临颍县植保植检站龚乔，辉县市植保植检站吴乾坤，博爱县植保站王守宝，滑县植保植检站陈一品，清丰县植保植检站马志超，孟州市植保站刘发科，固始县植保站刘庭洋，西平县植保站汪军，安阳县植保站张迎彩，祥符区植保植检站闫劝劝，永城市植保植检站韩海军，平桥区植保植检站吕峰顺，渑池县植保植检站张建民，项城市植保植检站韩景红，在此一并致谢！全国农业技术推广服务中心病虫测报处提供国内草地贪夜蛾相关数据，国家气象局气候中心提供相关气象数据，美国 NCEP/NCAR 提供全球再分析数据，谨致谢忱！

参考文献 (References)

Chapman JW, Bell JR, Burgin LE, Reynolds DR, Pettersson LB, Hill JK, Bonsall MB, Thomas JA, 2012. Seasonal migration to high latitudes results in major reproductive benefits in an insect. *PNAS*, 109(37): 14924–14929.

Chapman JW, Nesbit RL, Burgin LE, Reynolds DR, Smith AD, Middleton DR, Hill JK, 2010. Flight orientation behaviors promote optimal migration trajectories in high-flying insects. *Science*, 327(5966): 682–685.

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.]

Chen ZH, 2016. Ecological regions and variety requirements of the southwest corn. *Journal of Mountain Agriculture and Biology*, 35(3): 1–9. [陈泽辉, 2016. 西南玉米生态区域划分及品种需求. 山地农业生物学报, 35(3): 1–9.]

Department of Plantation Management, Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People is Republic of China, 2020. http://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/202009/t20200917_6352227.htm. [农业农村部种植管理司, 2020. http://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/202009/t20200917_6352227.htm.]

FAO, 2018. Reduction of human health and environmental risks of pesticides used for control of fall armyworm. External factsheets, Food and Agriculture Organization. http://www.fao.org/3/I8320EN/i8320en.pdf.

FAO, 2020a. Global action for fall armyworm control. http://www.fao.org/fall-armyworm/en/.

FAO, 2020b. The global action for fall armyworm control: Action framework (2020-2022). Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. http://www.fao.org/family-farming/detail/en/c/1288020/.

Ge SS, He W, He LM, Yan R, Zhang HW, Wu KM, 2021. Flight activity promotes reproductive processes in the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda*. *Journal of Integrative Agriculture*, 20(3): 727–735.

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.]

Henan Province Bureau of Statistics, 2020. http://www.ha.stats.gov.cn/. [河南省统计局, 2020. http://www.ha.stats.gov.cn/.]

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

Hu G, 2015. Three-dimensional trajectory calculation software of migratory insects based on Weather Research and Forecasting (WRF) model: 2015SR090706. 2020-04-19 (in Chinese) [胡高, 2015. 基于 WRF 模式输出的迁飞昆虫三维轨迹计算软件. 2015SR090706. 2015-05-26.]

Jiang YY, Liu J, Wu QL, CiRen ZG, Zeng J, 2021. Investigation on

winter breeding and overwintering areas of *Spodoptera frugiperda* in China. *Plant Protection*, 47(1): 212–217. [姜玉英, 刘杰, 吴秋琳, 次仁卓嘎, 曾娟, 2021. 我国草地贪夜蛾冬繁区和越冬区调查. 植物保护, 47(1): 212–217.]

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.]

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.

Lu H, Tang JH, Lv BQ, He X, Chen Q, Su H, 2020. Investigation on the occurrence of *Spodoptera frugiperda* in the north of Vietnam. *Plant Protection*, 46(2): 222–225. [卢辉, 唐继洪, 吕宝乾, 何杏, 陈琪, 苏豪, 2020. 越南北部草地贪夜蛾发生情况调查. 植物保护, 46(2): 222–225.]

Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People is Republic of China, 2020. http://www.moa.gov.cn/xw/qg/202008/t20200831_6351208.htm. [农业农村部种植业管理司, 2020. http://www.moa.gov.cn/xw/qg/202008/t20200831_6351208.htm.]

Qi GJ, Huang DC, Wang L, Zhang YP, Xiao HX, Shi QX, Xiao Y, Su XN, Huang SH, Zou SF, Chen KW, Zhou ZB, Zhong BY, Zheng JJ, Zhang ZX, Jiang TH, Lv LH, Lu YY, Zhang ZF, 2020. The occurrence characteristic in winter and year-round breeding region of the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) in Guangdong province. *Journal of Environmental Entomology*, 42(3): 573–582. [齐国君, 黄德超, 王磊, 章玉苹, 肖汉祥, 石庆型, 肖勇, 苏湘宁, 黄少华, 邹寿发, 陈科伟, 周振标, 钟宝玉, 郑静君, 张志祥, 江腾辉, 吕利华, 陆永跃, 张振飞, 2020. 广东省草地贪夜蛾冬季发生特征及周年繁殖区域研究. 环境昆虫学报, 42(3): 573–582.]

Sparks AN, 1979. A review of the biology of the fall armyworm. *Florida Entomologist*, 62(2): 82–86.

Tong PY, 1992. China Corn Planting Regionalization. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press. 2–18. [佟屏亚, 1992. 中国玉米种植区划. 北京: 中国农业科技出版社. 2–18.]

Wang FY, Yang F, Lu MH, Luo SY, Zhai BP, Lim KS, Mclnerney 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.

Wang L, 2015. Impacts of climate change to area division of maize plating in China. Master dissertation. Nanjing: Nanjing University. [王磊, 2015. 气候变化对我国玉米种植区域划分的影响. 硕士学位论文. 南京: 南京大学.]

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.

Wu KM, 2020. Management strategies of fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) in China. *Plant Protection*, 46(2): 1–5. [吴孔明, 2020. 中国草地贪夜蛾的防控策略. 植物保护, 46(2): 1–5.]

Wu QL, Jiang YY, Hu G, Wu KM, 2019. Analysis on spring and summer migration routes of fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) from tropical and southern subtropical zones of China. *Journal of Plant Protection*, 45(3): 1–9. [吴秋琳, 姜玉英, 胡高, 吴孔明, 2019. 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. 植物保护, 45(3): 1–9.]

Wu QL, Shen XJ, He LM, Jiang YY, Liu J, Hu G, Wu KM, 2021. Windborne migration routes of newly-emerged fall armyworm from Qinling Mountains-Huaihe River region, China. *Journal of Integrative Agriculture*, 20(3): 694–706.

Yang PY, Chang XY, 2019. The occurrence and impact of *Spodoptera frugiperda* in Asia and Africa and its prevention and control strategies. *China Plant Protection*, 39(6): 88–90. [杨普云, 常雪艳, 2019. 草地贪夜蛾在亚洲、非洲发生和影响及其防控策略. 中国植保导刊, 39(6): 88–90.]

Zhai BP, 2004. Computing the day length for programming insect behavior. *Entomological Knowledge*, 41(2): 178–184. [翟保平, 2004. 昆虫行为研究中日长的计算. 昆虫知识, 41(2): 178–184.]

Zhao SY, Yang XM, He W, Zhang HW, Jiang YY, Wu KM, 2019. Ovarian development gradation and reproduction potential prediction in *Spodoptera frugiperda*. *Plant Protection*, 45(6): 28–34. [赵胜园, 杨现明, 和伟, 张浩文, 姜玉英, 吴孔明, 2019. 草地贪夜蛾卵巢发育分级与繁殖潜力预测方法. 植物保护, 45(6): 28–34.]