2019—2023年草地贪夜蛾在中国的迁移规律及其对台风的响应

钱刘兵[1,2] 陆恩泽[1] 刘 杰[3] 吴秋琳[1,2*]

（1. 南京信息工程大学生态与应用气象学院，南京 210044；2. 南京信息工程大学，农业与生态气象江苏省高校重点实验室，南京 210044；3. 全国农业技术推广服务中心，北京 100125）

摘要：为中国草地贪夜蛾*Spodoptera frugiperda*的精细化监测预警、防控提供科学支撑，基于全国2019—2023年草地贪夜蛾成虫种群首次发现监测数据和同期台风记录资料，利用统计分析、地理信息系统等技术手段明确台风影响下草地贪夜蛾在中国的迁移方向、距离和规模，定量化解析草地贪夜蛾在中国的迁移规律。结果显示：1—3月草地贪夜蛾主要分布在华南北部及西南南部；4月下旬中国东部种群开始北侵，而西部种群迁移路线相对滞后；5—6月东部草地贪夜蛾主降区在长江中下游平原，西部种群则集中于四川—贵州一带；7月下旬东部种群迁移路线推进至华北地区，同时西部种群继续北进且最远可达内蒙古自治区中南部；8月中旬东部草地贪夜蛾开始陆续向南回迁，西部种群则延迟约半个月。2019—2023年，草地贪夜蛾在中国以北向迁移为主，而台风活动不仅可造成其迁飞方向更加集中，还可使其发生明显转向。在非台风期，草地贪夜蛾在中国东部的迁移距离显著大于西部；台风影响下西部种群的迁移距离明显增加，从而缩小了东、西部种群迁移距离差异。此外，2020—2023年中国草地贪夜蛾始见期虫量逐年递减，但东部始见期虫量总体大于西部，且台风期始见期虫量显著大于非台风期。表明通过5年的入侵进程，草地贪夜蛾在中国已形成了东、西两线并进、春夏北迁秋季南回的迁移规律，并且其迁移方向、距离和规模均受到台风的显著影响。

关键词：草地贪夜蛾；入侵；迁移格局；中国；台风

Migration patterns of fall armyworm *Spodoptera frugiperda* in China and its responses to typhoons from 2019 to 2023

Qian Liubing[1,2] Lu Enze[1] Liu Jie[3] Wu Qiulin[1,2*]

（1. School of Ecology and Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, Jiangsu Province, China; 2. Jiangsu Provincial University Key Laboratory of Agricultural and Ecological Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, Jiangsu Province, China; 3. National Agro-Tech Extension and Service Center, Beijing 100125, China）

Abstract: To provide scientific support for the refined monitoring, early warning, and management of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* in China, this study integrated nationwide first-detection data of *S. frugiperda* moths from 2019 to 2023 with concurrent typhoon records. Using statistical analyses, geographic information systems, and related techniques, we clarified the migration direction, distance and population scale of *S. frugiperda* under typhoon influence, and quantitatively elucidated its migration patterns across China. The results showed that *S. frugiperda* populations were predominantly dis-

基金项目：国家自然科学基金项目(42475203)，国家重点研发计划项目(2021YFD1400702)

* 通信作者（Author for correspondence），E-mail：wuqiulin@nuist.edu.cn

收稿日期：2025-05-25

tributed in northern South China and southern Southwest China from January to March. In late April, eastern populations began their northward migration, whereas the western migratory pathway lagged behind. From May to June, the main infestation areas in the east were located in the middle and lower reaches of Yangtze River Plain, while the western populations concentrated in the Sichuan-Guizhou region. By late July, eastern pathway had advanced into North China, and the western populations continued northward, with the northernmost detections reaching south-central Inner Mongolia. In mid-August, eastern populations began returning southward, whereas the western return migration was delayed by approximately half a month. From 2019 to 2023, *S. frugiperda* exhibited a predominantly northward migration pattern, and typhoon activity not only concentrated its migratory direction but also induced significant directional shifts in China. During non-typhoon period, eastern populations migrated over significantly longer distances than western populations; however, under typhoon influence, the migration distance of the western populations increased substantially, reducing the east-west disparity. In addition, although the initial-season population size of *S. frugiperda* declined annually from 2020 to 2023, the eastern population remained larger than the western population, and month catches during typhoon period were significantly higher than those during non-typhoon period. Overall, the five-year invasion process demonstrates that *S. frugiperda* has formed a characteristic migration pattern in China, with concurrent eastern and western migration routes, characterized by northward movement during spring and summer and southward return in autumn. Furthermore, its migration direction, distance, and population scale are all significantly influenced by typhoons.

Key words: *Spodoptera frugiperda*; invasion; migration pattern; China; typhoon

草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 属鳞翅目夜蛾科灰翅夜蛾属 *Spodoptera*，原生于美洲热带和亚热带地区（Todd & Poole，1980），广泛分布于美洲大陆（Sparks，1979）。2019年1月草地食夜蛾正式入侵我国云南省江城县（姜玉英等，2019；杨学礼等，2019）。由于缺乏滞育特性，草地贪夜蛾在中国的冬繁区分布在北纬28°以南，越冬区位于北纬28°~31°（姜玉英等，2021），但该害虫具有较强的远距离迁飞能力，其借助气流可连续飞行多个夜晚，迁移距离可达数百至上千公里（Rose et al.，1975）。自入侵中国以来，草地贪夜蛾扩散范围逐年扩大，沿途玉米主产区均损失严重（郭井菲等，2022），其不仅对玉米等重要粮食作物生产构成直接威胁，还对区域生态平衡造成深远影响，目前已被列入中国《一类农作物病虫害名录》（吴孔明，2020）。因此，揭示草地贪夜蛾在中国的迁飞规律对于其早期监测预警与科学防控具有重要意义。

中国东半部地区地势相对平坦，几乎没有阻碍昆虫自东南亚远距离迁入的天然地理屏障（张志涛，1992），且在东亚季风和印度季风的共同作用下，草地贪夜蛾在中国呈现典型的季节性往返迁飞特征（陈辉等，2020a，b）。例如，Li et al.（2020）利用轨迹模拟方法预测草地贪夜蛾在中国以东、西两条迁飞路线进行入侵，其中东线源自中南半岛，经华南进入黄淮海地区；西线始于缅甸和中国云南省，沿四川省可最终到达西北地区（吴秋琳等，2022）。李建春等（2023）通过分析历史气象数据和2019—2022年全国草地贪夜蛾虫情监测数据发现，春、夏两季中国存在3个草地贪夜蛾发生区并且有3次大规模的北迁过程，即2—4月该害虫在华南集中为害，4月下旬至5月中旬迁入长江以南（北纬25°~30°）；5—6月主要在长江以南发生，并陆续迁入江淮、黄淮地区（北纬30°~35°）；7—8月主要为害江淮、黄淮地区，并在8月上中旬向北迁移至北纬35°以北。目前，草地贪夜蛾在中国的区域性迁飞路径与中小尺度虫源地已基本明确，然而对于草地贪夜蛾在中国的大尺度迁移规律仍缺乏系统的认识，这严重影响该害虫的精细监测预警与高效防控。此外，中国地势西高东低且呈现阶梯状，草地贪夜蛾东、西两条迁移路线的高空天气条件及地面资源截然不同，但关于两条迁移路线及种群规模的定量化差异尚不明确。

大气环流特别是西太平洋副热带高压影响下的风场、降水等时空变化，是调控昆虫迁移过程以及落区的主要气象学影响机理（郭安红等，2022）。例如，东亚季风和印度季风主导白背飞虱 *Sogatella furcifera* 和褐飞虱 *Nilaparvata lugens*（Wu et al.，2018；

Hu et al.，2019）、稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis*（Wang et al.，2017）、草地贪夜蛾（吴秋琳等，2019a）等害虫的远距离迁移及周年季节性的南北往返。台风作为一种强大的低气压气旋系统，其伴随的强烈垂直气流、降雨、低温等直接影响昆虫迁飞、集聚以及迫降（包云轩，2002；齐国君等，2019；罗举等，2020）。例如，台风系统东侧的偏南气流和西侧的偏北气流分别促进了稻飞虱的南北迁飞，其涡旋区的上升气流也有利于褐飞虱的起飞迁出（丁文文，2013）；盛夏台风影响下的高空气流场和雨带分布严重阻碍了稻飞虱北迁为害的进程（史金剑等，2014）；2005年褐飞虱突增与台风关系密切（包云轩等，2008；姚德宏等，2007）；2015年8月1513号台风苏迪罗导致褐飞虱在台风后部聚集并落地成灾（Ma et al.，2018）；张丹等（2021）在分析2020年8月上旬草地贪夜蛾首次入侵辽宁省的迁入动态时发现，此时正逢台风黑格比在中国生成，推测台风可能是其入侵中国东北地区的触发条件。草地贪夜蛾在中国远距离、跨区域的大尺度迁移主要依赖高空风场的动力运载作用（Sparks，1979），但目前关于台风对草地贪夜蛾在中国迁移距离及种群规模的影响尚不明晰。因此，本研究利用2019—2023年北半球台风资料、全国草地贪夜蛾成虫始见站点资料、气象再分析资料等系统分析并定量化阐明全国尺度及中国东、西部草地贪夜蛾入侵为害的迁移规律，完善和细化迁移路线，解析极端天气台风对其迁移距离和迁入规模的影响，以期为中国草地贪夜蛾的精细化监测预警、防控提供科学支撑。

1 材料与方法

1.1 材料

草地贪夜蛾始见期数据：2019—2023年草地贪夜蛾虫情数据由全国农业技术推广服务中心提供，包括田间目测、性信息素诱捕、地面测报灯和高空探照灯诱集数据，其中田间目测调查和性信息素诱捕数据每周收集1次，地面测报灯和高空探照灯诱捕数据逐日收集，系统记录了历年来各县级草地贪夜蛾成虫的始见日、见虫数量和被调查作物种类及生育期。由于2019年为草地贪夜蛾首次入侵定殖年份，当年未完整记录始见期成虫虫量数据，因此本研究对始见期虫量的分析仅包括2020—2023年。

气象数据：气象场数据来源于欧洲中期天气预报中心（European Centre for Medium-Range Weather Forecasts，ECMWF）开发的全球陆地再分析数据集ERA5-Land的月平均再分析资料，数据空间分辨率为0.25°×0.25°。台风数据资料取自中国台风网（www.typhoon.org.cn）CMA-STI西北太平洋热带气旋最佳路径数据集。

1.2 方法

1.2.1 草地贪夜蛾成虫入侵中国的始见期数据筛选

本研究以2011—2020年1月距地面2 m平均气温≥10 ℃的地区作为草地贪夜蛾的冬繁区（Westbrook et al.，2016；2019；姜玉英等，2021）。利用GrADS（Grid Analysis and Display System）2.1软件提取2019—2023年中国草地贪夜蛾成虫始见站点上空2011—2020年1月距地面2 m温度数据，剔除温度≥10 ℃的冬繁区站点，所得站点均视为草地贪夜蛾成虫迁飞后降落的站点数据。按照草地贪夜蛾入侵中国的东、西两条迁移路径的大致分界线将站点分为东、西两部分，东部站点包括华南、华中、华东、华北、东北地区；西部站点包括西南、西北地区（陈辉等，2020a；李建春等，2023），其中2019—2023年非冬繁区东部站点共1 579个，西部站点共909个。

1.2.2 影响中国的台风筛选

风速大于12 m/s是造成稻飞虱大发生的原因之一，而风速小于12 m/s的影响程度很小（Wu et al.，2018）。因此，本研究不考虑较弱热带气旋的影响，重点探讨可能导致草地贪夜蛾大规模迁移且对其灾变预警指示明显的强热带气旋。按照台风强度的定义，从中国台风网CMA-STI西北太平洋热带气旋最佳路径数据集中筛选出风速大于10.8 m/s、影响范围广、程度大的热带气旋；对整个台风生成及行进轨迹进行进一步筛选，其中处于东经135°以东、北纬15°以南的台风对中国无影响，而处于东经135°以西、北纬15°以北的台风对中国有影响（曹钢锋等，1992）。

1.2.3 草地贪夜蛾始见期划分及迁移方向的计算

根据台风生命史以及《草地贪夜蛾监测技术规范》（NY/T3866—2021）中草地贪夜蛾始见期资料收集方法，将全年草地贪夜蛾始见期数据自1月1日起每5 d为1组进行划分，其中2020年为闰年，最后1组数据为6 d，并计算每组草地贪夜蛾种群的地理平均中心点，即每组草地贪夜蛾始见站点位置的平均经纬度。利用ArcGIS®10.3软件中空间统计工具，绘制2019—2023年草地贪夜蛾在中国东、西部的地理平均中心点的时空分布图。

根据台风发生时期划分台风期与非台风期，在Origin 2021软件中，以日序为x轴，分别以地理平均中心点的经度和纬度为y轴绘制折线图，并标注北

向迁移时间以及台风期，以更清晰显示草地贪夜蛾种群地理平均中心点的迁移进程与台风活动的关系。取分组后相邻两组的地理平均中心点A、B，点A日序小于点B，A_{lat}、B_{lat}分别为地理平均中心点A、B的纬度，若$A_{lat}-B_{lat}<0$，计为北向迁移，反之则为南迁，并计算北迁比率、台风影响比率和台风影响转向比率。北迁比率=$N_n/(N_n+N_s)\times100\%$，台风影响比率=$N_t/N\times100\%$，台风影响转向比率=$N_{shift}/N_{total}\times100\%$，式中，$N_n$为北迁组数，$N_s$为南迁组数，$N_t$为南迁或北迁过程中受台风影响的组数，$N$为南迁总组数或北迁总组数，$N_{shift}$为受台风影响而发生转向的地理平均中心点数，$N_{total}$为受台风影响的地理平均中心点总数。

根据公式计算迁移方向θ，$\theta=\arctan((B_{lon}-A_{lon})/(B_{lat}-A_{lat}))$，式中，$A_{lont}$分别为地理平均中心点$A$的经度，$B_{lon}$为地理平均中心点$B$的经度。平均迁移方向采用圆形分布统计方法计算获得，并采用Rayleigh检验（Fisher，1993）进行统计分析（吴秋琳等，2022）。对于迁移方向的分布，上述统计方法可输出平均迁移方向、每个迁移方向分布的平均向量长度r和迁移方向分布的概率3个参数。$r=\sqrt{(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\cos\theta_i)^2+(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\sin\theta_i)^2}$，式中，$r$表示迁移方向的聚合度，范围为[0, 1]，$r$值越大，说明迁移方向越集中；若Rayleigh检验中$P<0.05$，表示迁移方向分布明显呈单峰分布，则表明迁移方向显著集中于某一方向。将所得结果绘制为迁移方向方位图，平均迁移方向0°~90°或270°~360°判定为北向迁移。以上迁移方向的计算、统计以及Rayleigh检验均使用R 4.4.3语言中circular包（Gu et al.，2014）与CircStats包完成（Rao Jammalamadaka & SenGupa，2001）。

1.2.4 草地贪夜蛾迁移距离和始见期虫量的计算

为定量草地贪夜蛾在中国的北扩入侵进程，本研究采用各组中最南与最北两个始见站点之间的纬度方向距离代表该害虫在各组的迁移距离，即取各组最南、最北站点的纬度，利用球面余弦定理（Gellert et al.，1989）来计算草地贪夜蛾各组的迁移距离E，$E=\sin C_{lat}\times\sin D_{lat}\times\cos(C_{lon}-D_{lon})+\cos C_{lat}\times\cos D_{lat}$，$d=R\times\arccos C\times\arccos E\times\pi/180$，式中，$C_{lon}$、$C_{lat}$分别为最北站点$C$的经度和纬度，$D_{lon}$、$D_{lat}$分别为最南站点$D$的经度和纬度，$d$为迁移距离，$R$为地球半径。由于本研究中不考虑经度方向距离，因此$\cos(C_{lon}-D_{lon})$为1。始见期虫量为各组站点始见日见虫数量的总和，未记录具体数量的站点见虫数计为1。

1.3 数据分析

使用SPSS 21.0软件对迁移距离和始见期虫量进行统计分析，并使用Origin 2021软件绘制柱状图或箱线图。采用Shapiro-Wilk test及Levene's test对迁移距离和始见期虫量进行正态性检验和方差齐性检验。采用独立样本t检验法对台风期与非台风期草地贪夜蛾的迁移距离进行差异显著性检验；采用配对样本t检验法对东、西部草地贪夜蛾的迁移距离进行差异显著性检验；全国尺度下年际间草地贪夜蛾迁移距离采用单因素方差分析，并采用最小显著差数（least-significant difference，LSD）法进行差异显著性检验。采用Kruskal-Wallis H秩和检验法对全国尺度下年际间草地贪夜蛾始见期虫量进行差异显著性检验，若存在显著差异，则使用Mann-Whitney U检验法进一步检验每两年数据间的差异显著性；采用Mann-Whitney U检验法对台风期与非台风期和东部与西部的草地贪夜蛾始见期虫量进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 草地贪夜蛾在中国的季节性迁移规律

2019年，草地贪夜蛾首次入侵中国，尚未进行大规模北扩。4—5月草地贪夜蛾成虫主要在中国西南南部、华南和江南等地区活动；6月中下旬草地贪夜蛾借助夏季的东南风及偏南风气流带迅速开始向江汉、黄淮和华北等地区北迁，直到9月中旬开始往南回迁。2019年草地贪夜蛾东部迁移路线初步形成，而西部尚未形成一条完整的迁移路线（图1）。

2020—2023年，草地贪夜蛾形成东、西两条明显的迁移线路，且这两条迁移路线的草地贪夜蛾种群迁移距离差异明显。1—3月东、西部草地贪夜蛾分别集中在华南北部和西南南部；4月下旬东部草地贪夜蛾开始向湖南、江西等省进行北向迁移，而西部草地贪夜蛾仍主要集中于西南南部，迁移速度比东部草地贪夜蛾慢；5—6月东部草地贪夜蛾主要在长江中下游平原降落，西部草地贪夜蛾北迁至四川、贵州等省；7月下旬—8月中上旬东部草地贪夜蛾主要在黄淮海地区活动，西部草地贪夜蛾则北进至西北南部，8月中旬东部草地贪夜蛾种群已开始往南回迁，而西部草地贪夜蛾的回迁则到8月下旬才开始；9月东部草地贪夜蛾仍有部分成虫继续北迁，迁入地区主要集中在华北东部，最远至华北北部，而西部草地贪夜蛾已基本停止北迁，开始大规模往南回

迁至四川等省，部分草地贪夜蛾种群最远能到达内蒙古自治区南部；10月初东部草地贪夜蛾停止北迁，开始大规模往南回迁，主要集中在黄淮海地区；11—12月东部草地贪夜蛾在较少地区仍在回迁（图1）。与2020—2022年相比，2023年西部草地贪夜蛾种群北迁最远只到达华北及西北一带，而未能迁移至内蒙古自治区，且东部草地贪夜蛾北迁最远只到达黄淮北部一带，未到达华北一带。

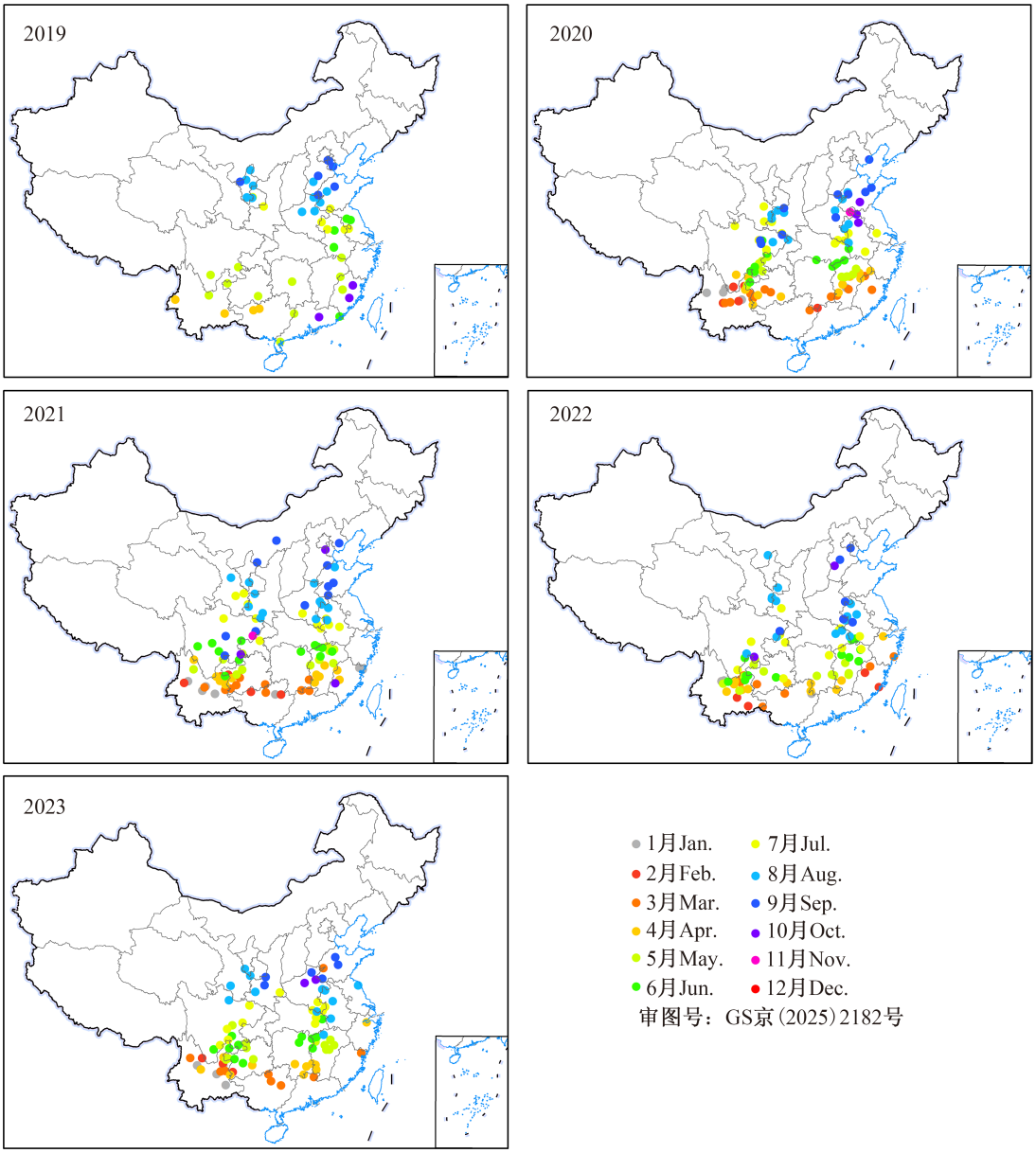


图1　2019—2023年草地贪夜蛾在中国东、西部的地理平均中心点的时空分布

Fig. 1　Spatiotemporal distribution of the geographic mean centers of *Spodoptera frugiperda* in the eastern and western regions of China from 2019 to 2023

2.2　台风影响下草地贪夜蛾在中国的迁移方向

2.2.1　草地贪夜蛾种群迁移进程与台风活动的关系

2019—2023年草地贪夜蛾在中国的北迁率分别为57.14%、48.53%、51.51%、60.34%和58.93%，可见草地贪夜蛾在中国的入侵活动以北向迁移为主，其地理平均中心点随日序逐渐北移。2019—2023年每年9月中下旬草地贪夜蛾种群均迁移至中国华北、东北一带，最远分别迁移至北纬39.60°、39.57°、39.88°、39.47°和37.00°（图2）。此外，2019年、2022年草地贪夜蛾北迁最远地理平均中心点均在台风发生时期，而2020年、2021年与2023年草地贪夜蛾北迁最远地理平均中心点均在当年台风发生时期前后（图2），表明台风可影响草地贪夜蛾在中国的北迁进程。2019—2023年在中国草地贪夜蛾的北迁过

程中，台风影响比率平均为27.67%；在南迁过程中，台风影响比率平均为25.95%，其中2019—2023年台风影响下草地贪夜蛾种群迁移方向发生转向的比率（即台风影响转向比率）分别为76.92%、70.00%、66.67%、70.00%和66.67%，表明台风活动显著影响草地贪夜蛾的迁移方向。

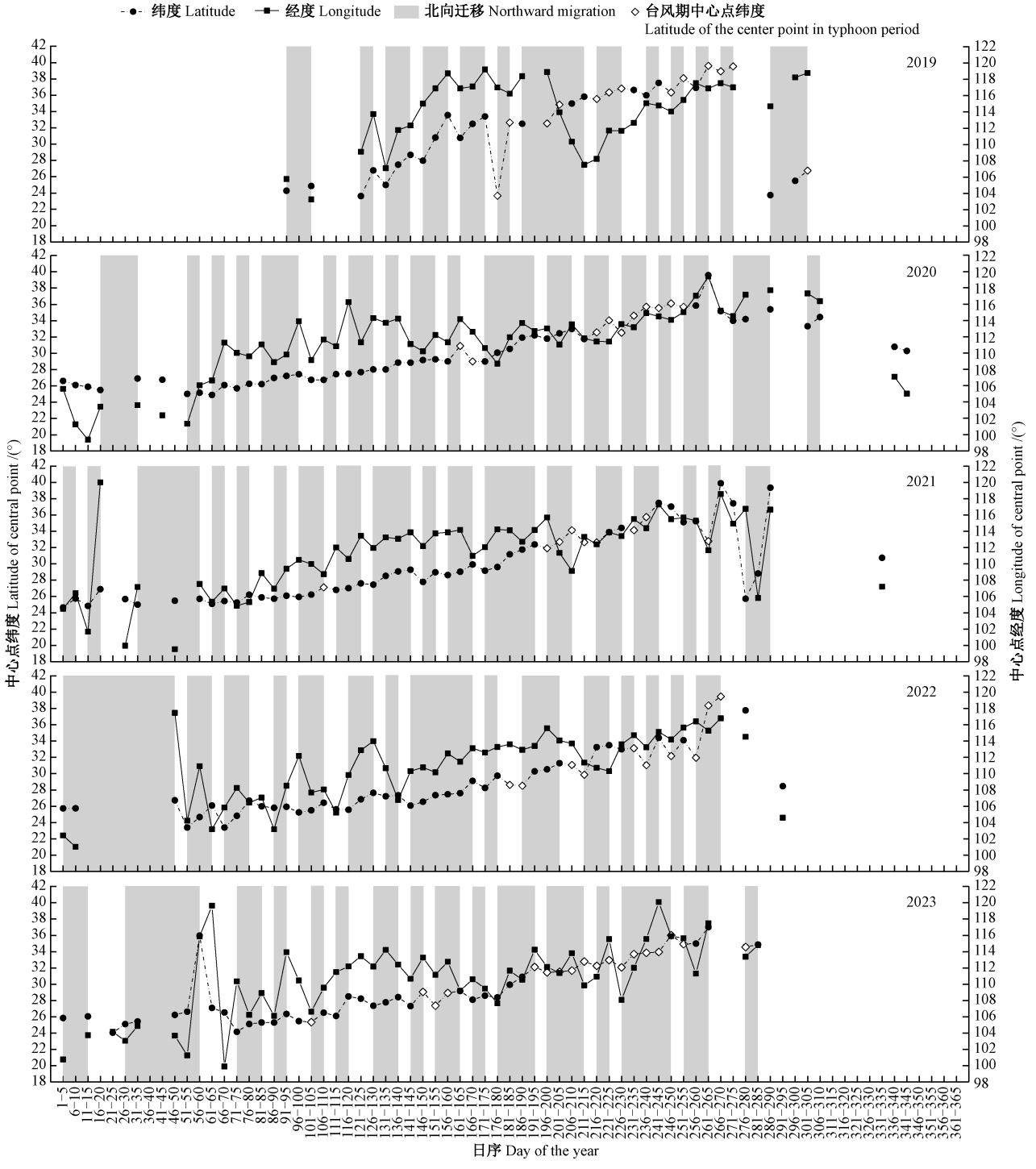


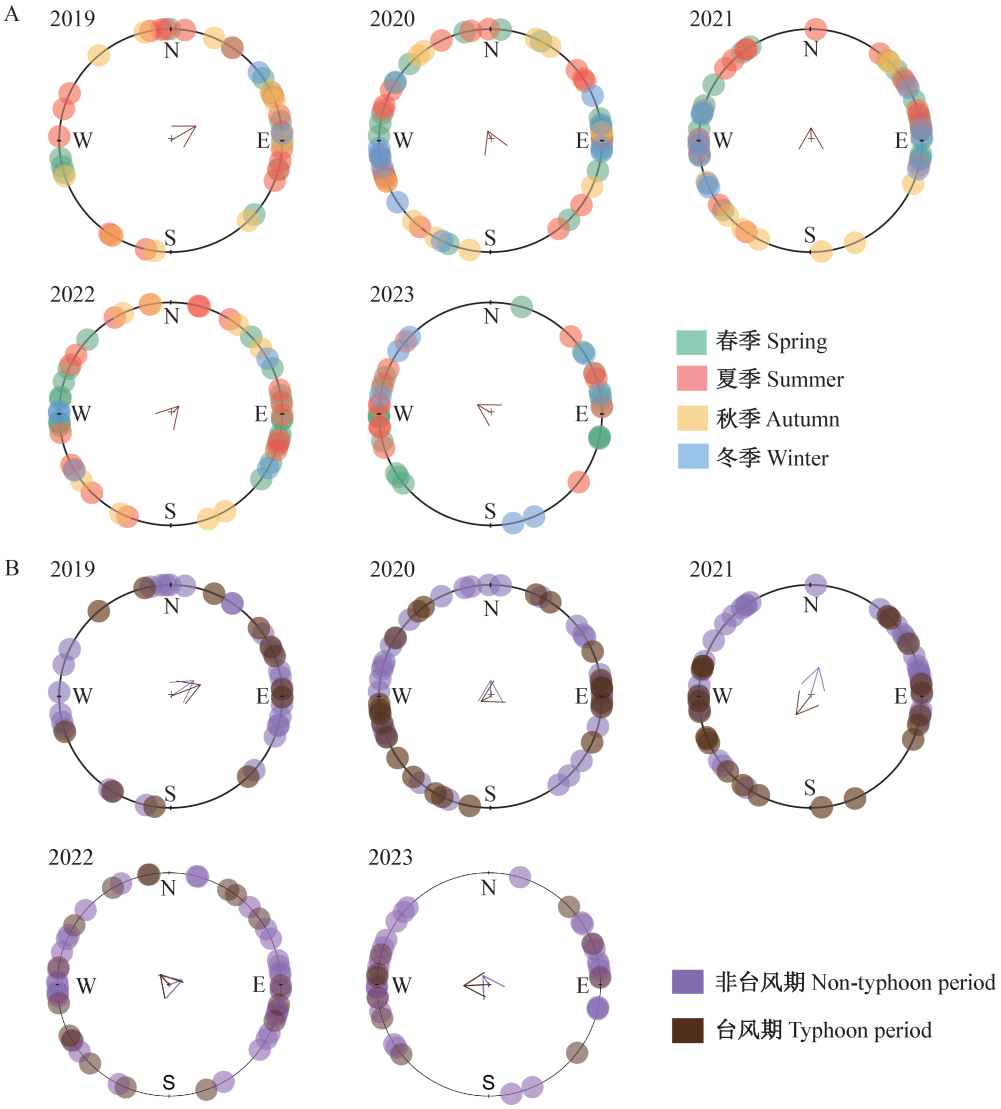
图2 2019—2023年草地贪夜蛾种群地理平均中心点的迁移进程

Fig. 2 Migration trajectory of the geographic mean center of *Spodoptera frugiperda* populations from 2019 to 2023

2.2.2 草地贪夜蛾在中国迁移方向的季节差异

2019年草地贪夜蛾在中国的入侵就已呈现北向迁移态势，其地理平均中心点迁移方向为59.93°（r=0.26，P=0.06）；2020—2023年草地贪夜蛾在中国的迁移方向主要集中在东北与西北方向，其地理平均中心点迁移方向分别为336.72°（r=0.08，P=0.70）、359.74°（r=0.10，P=0.57）、42.13°（r=0.08，P=0.75）、300.60°（r=0.11，P=0.62），均为北向迁移。2020—

2023年春、夏季草地贪夜蛾种群地理平均中心点迁移方向分别为0.73°（r=0.14，P=0.48）、16.41°（r=0.27，P=0.07）、44.83°（r=0.13，P=0.56）、298.63°（r=0.13，P=0.60），秋、冬季的平均迁移方向分别为241.83°（r=0.10，P=0.82）、217.65°（r=0.21，P=0.39）、236.37°（r=0.07，P=0.94）、333.56°（r=0.04，P=0.10）（图3-A）。表明除2023年，其余年份春、夏季草地贪夜蛾的迁移方向均为北向迁移，而秋、冬季则为南向迁移。



A：不同季节草地贪夜蛾的迁移方向；B：台风期与非台风期草地贪夜蛾的迁移方向。圆上的圆点表示草地贪夜蛾种群迁移方向。红色箭头表示总体的平均迁移方向；紫色箭头表示非台风期平均方向；棕色箭头表示台风期平均方向。箭头长度表示迁移方向的平均向量长度r，r值越大，箭头越长。A: Migration directions of *S. frugiperda* in different seasons; B: migration directions of *S. frugiperda* during typhoon and non-typhoon periods. Dots on the circular plot indicate the migration directions of *S. frugiperda* populations. The red arrow represents the overall mean migration; the purple arrow represents the mean direction during non-typhoon period, and the brown arrow represents the mean direction during typhoon period. Arrow length corresponds to the mean vector length (r value) of the migration direction, with larger r values indicating longer arrows.

图3　2019—2023年中国草地贪夜蛾种群地理平均中心点的迁移方向

Fig. 3　Migration direction of the geographic mean center of *Spodoptera frugiperda* populations in China from 2019 to 2023

2.2.3　草地贪夜蛾在中国迁移方向的台风差异

2020年与2023年非台风期草地贪夜蛾地理平均中心点迁移方向分别为261.00°（r=0.07，P=0.85）和327.63°（r=0.10，P=0.77），台风期草地贪夜蛾地理平均中心点迁移方向分别为8.59°（r=0.23，P=0.36）和267.47°（r=0.23，P=0.62）（图3-B），表明在台风期草地贪夜蛾迁移方向更聚集。此外，在非台风期，草地贪夜蛾呈稳定的北向迁飞，而在2020年和2021年，

在台风影响下该害虫有明显的南向迁移活动，这也表明台风带来的特定风场条件可显著调控草地贪夜蛾的迁移方向。

2.3 台风影响下中国草地贪夜蛾的迁移距离

2.3.1 全国尺度下草地贪夜蛾的迁移距离

2019—2022年在非台风期全国草地贪夜蛾的迁移距离稳定增长，但4年之间差异不显著，而2023年全国草地贪夜蛾的迁移距离显著缩短，仅为269.08 km，显著低于2020—2022年（P<0.05）。2020年与2021年在台风期全国草地贪夜蛾的迁移距离最大，2022年在台风期全国草地贪夜蛾的迁移距离次之，2019年与2023年在台风期全国草地贪夜蛾的迁移距离最小，显著低于其他年份（P<0.05，图4）。2019年和2022年在非台风期草地贪夜蛾的迁移距离大于台风期，2023年在非台风期草地贪夜蛾的迁移距离小于台风期，但这3年台风期与非台风期之间均差异不显著；2020年与2021年在台风期草地贪夜蛾的迁移距离分别为1 162.35 km与1 082.26 km，均显著大于非台风期的迁移距离（662.79 km和669.14 km）（P<0.05，图4）。

2.3.2 中国东、西部草地贪夜蛾的迁移距离

2019—2022年在非台风期中国东部草地贪夜蛾的迁移距离分别为438.19、651.68、596.75和757.18 km，均显著高于西部草地贪夜蛾（121.49、472.37、381.96、387.18 km）（P<0.05），而在台风期中国东、西部草地贪夜蛾的迁移距离之间均差异不显著；2023年无论是台风期还是非台风期中国东、西部草地贪夜蛾的迁移距离之间均差异不显著（图5）。2020年、2021年和2023年在台风期中国东部草地贪夜蛾的迁移距离分别为932.32、1 063.95和209.77 km，显著大于其非台风期（P<0.05）；2019—2023年中国西部草地贪夜蛾台风期迁移距离分别为414.72、712.96、690.23、610.34和293.74 km，均大于非台风期，但仅在2020年与2021年间差异显著（P<0.05，图5）。

2.4 台风影响下中国草地贪夜蛾的始见期虫量

2.4.1 全国尺度下草地贪夜蛾的始见期虫量

在非台风期，2021年全国草地贪夜蛾始见期虫量最多，为39.55头，2022年次之，为22.58头，两者之间差异不显著，但均显著高于2020年与2023年（P<0.05）。在台风期，2020—2023年全国草地贪夜蛾始见期虫量逐年递减，分别为141.40、64.18、38.11和26.00头，且2020年与2021年全国始见期虫量之间差异不显著，但均显著大于2022年与2023年（P<0.05，图6）。2020—2023年在台风期全国草地贪夜蛾始见期虫量均大于非台风期，且除2022年外，其他3年在台风期全国草地贪夜蛾始见期虫量均显著大于非台风期（P<0.05，图6）。

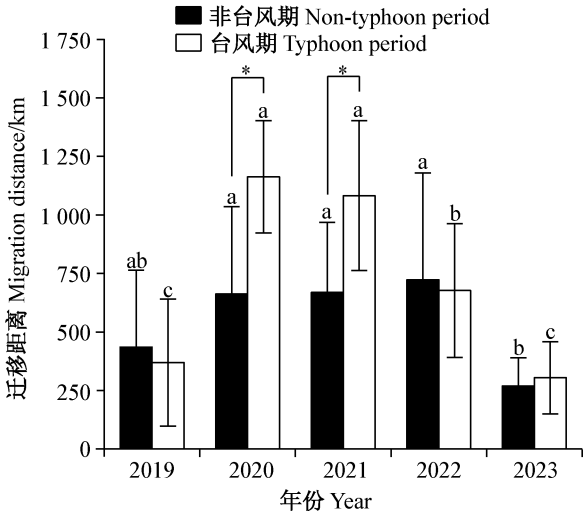


图4 2019—2023年全国尺度下草地贪夜蛾的迁移距离

Fig. 4 Migration distances of *Spodoptera frugiperda* at the national scale during 2019—2023

图中数据为平均数±标准差。*表示相同年份台风期与非台风期间迁移距离经独立样本t检验法检验差异显著（P<0.05）。同色柱不同小写字母表示不同年份迁移距离经LSD法检验差异显著（P<0.05）。Data are mean±SD. * indicates a significant difference between migration distances during typhoon and non-typhoon periods in the same year according to an independent samples t test (P<0.05). Different lowercase letters on bars of the same color indicate significant differences in migration distances among different years based on LSD tests (P<0.05).

2.4.2 中国东、西部草地贪夜蛾的始见期虫量

2020—2023年在台风期中国东部草地贪夜蛾始见期虫量分别为87.18、43.10、30.00和26.95头，均显著大于非台风期（9.83、25.11、13.58、10.73头）（P<0.05）；2020年与2023年在台风期中国西部草地贪夜蛾始见期虫量分别为26.44头和12.58头，均显著大于非台风期（5.03头和5.53头）（P<0.05），2021年和2022年在台风期中国西部草地贪夜蛾始见期虫量与非台风期差异不显著（图7），与全国尺度下草地贪夜蛾始见期虫量规律基本一致。2020—2023年在台风期和非台风期中国东部草地贪夜蛾始见期虫量均大于西部草地贪夜蛾，且2020年与2021年差异显著（P<0.05），而其他年份均差异不显著（图7）。

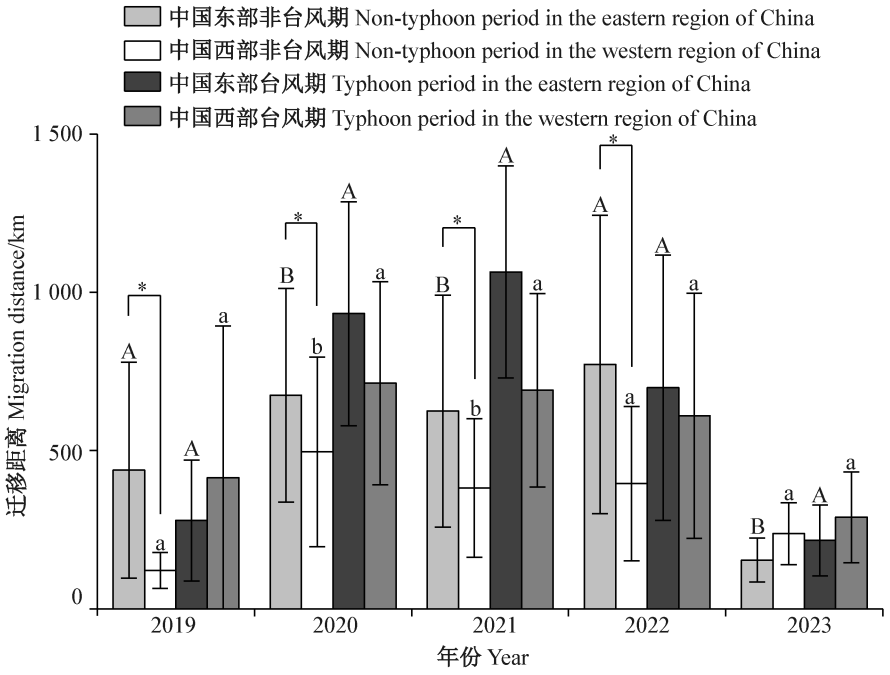


图5　2019—2023年草地贪夜蛾在中国东、西部的迁移距离

Fig. 5　Migration distances of *Spodoptera frugiperda* in the eastern and western regions of China during 2019—2023

图中数据为平均数±标准差。*表示相同年份相同时期东部或西部迁移距离之间经配对样本*t*检验法检验差异显著（*P*<0.05）。不同大写字母表示相同年份东部台风期与非台风期迁移距离经配对样本*t*检验法检验差异显著（*P*<0.05）。不同小写字母表示相同年份西部台风期与非台风期迁移距离经配对样本*t*检验法检验差异显著（*P*<0.05）。 Data are mean±SD. * indicates a significant difference in migration distances between the eastern and western regions during the same period in the same year according to paired-samples *t* test (*P*<0.05). Different uppercase letters indicate significant differences between migration distances during typhoon and non-typhoon periods in the eastern region in the same year based on paired-samples *t* test(*P*<0.05). Different lowercase letters indicate significant differences between migration distances during typhoon and non-typhoon periods in the western region in the same year based on paired samples *t* test (*P*<0.05).

3 讨论

本研究结果表明2019—2023年春、夏两季草地贪夜蛾在中国主要向东北和西北方向迁移，而秋、冬则以向南回迁为主。吴秋琳等（2019b）通过大气动力条件分析发现，草地贪夜蛾迁飞的春夏北迁和秋季南回主要受两种季风系统控制，其中来自孟加拉湾的西南暖湿气流主要输送西南地区草地贪夜蛾虫源（张雪艳等，2020；谭泗桥等，2024）；而东亚季风主要影响中国东部地区草地贪夜蛾虫源（Hu et al.，2025）。南亚季风与东亚季风在成因和活动规律上有很大差异（李晓东等，1991），这可能是中国东、西部草地贪夜蛾迁移进程差异的主要原因。除了季风条件，地形环境也是影响草地贪夜蛾迁移路线的重要因素（叶辉等，2022），东部迁移路线上几乎无地理屏障，这使得草地贪夜蛾在东部能顺利地远距离北迁，而西部路线上的四川盆地、秦岭山脉等则可能成为草地贪夜蛾迁移路线上较大的阻碍，从而限制草地贪夜蛾北迁（Wu et al.，2021）。

本研究结果显示2019—2022年在非台风期全国草地贪夜蛾的迁移距离之间差异不显著，而在台风期全国草地贪夜蛾的迁移距离在年际间呈现显著差异，尤其在2020年和2021年全国草地贪夜蛾的迁移距离明显增加。台风这种极端天气系统本身复杂多变且类型多样，主要包括非北上型台风（活动范围在北纬15°~30°）、东部沿海登陆向西延伸型台风（行进区域可到达北纬25°~30°）、北上型台风（北上至北纬30°以北，其中，西进至东经120°以西的台风则为登陆型台风）、沿海型台风（其活动范围在东经120°~125°）和远海型台风（东经125°~135°，其影响区域主要为日本一带）；然而有些类型的台风可能会促进迁飞性昆虫的迁飞进程，有些类型的台风可能会阻碍迁飞性昆虫的迁飞进程（姚德宏等，2007；Ma et al.，2018；张丹等，2021）。此外，台风范围通

常以其系统最外围近似圆形的等压线为准，直径一般为600~1 000 km，最大直径可达2 000 km，最小直径只有100 km左右。根据台风的发生路径及范围来看，上述五类台风均可能对中国东部草地贪夜蛾的迁飞过程产生直接影响，而沿海型台风和远海型台风对其在西部的迁飞影响较小。另外，郝振华等(2011)研究证实台风莫兰蒂过境后浙江省龙游稻区褐飞虱的虫源地由过境前的浙江省东南部(包括缙云县、永康市等地)南移至福建省中北部和南部(包括建阳市、建瓯专区等地)；而史金剑等(2014)研究证实2012年盛夏的多台风天气严重阻滞了褐飞虱的第5次北迁进程。因此，推测台风的数量以及强度可能是草地贪夜蛾迁移距离在年际间存在显著差异的主要原因之一，但后续仍需结合不同类型台风过程开展系统的个例分析。此外，本研究通过比较中国东、西部草地贪夜蛾的迁移距离发现，2019—2022年中国东部草地贪夜蛾在非台风期的迁移距离显著高于西部草地贪夜蛾，而在台风期中国西部草地贪夜蛾各组的迁移距离明显增加，且东、西部草地贪夜蛾的迁移距离差异减小，2019年与2023年在台风期中国西部草地贪夜蛾的迁移距离甚至高于东部草地贪夜蛾，由此可知，台风对于中国西部草地贪夜蛾迁移距离整体上为促进作用，而台风对于中国东部草地贪夜蛾迁移距离的促进作用则相对较小，2019年和2022年甚至抑制了草地贪夜蛾的迁移活动，究其原因可能也与台风强度及影响范围有关，但仍需结合长期资料和统计检验进一步验证。此外，其具体的影响机理也有待深入探讨。

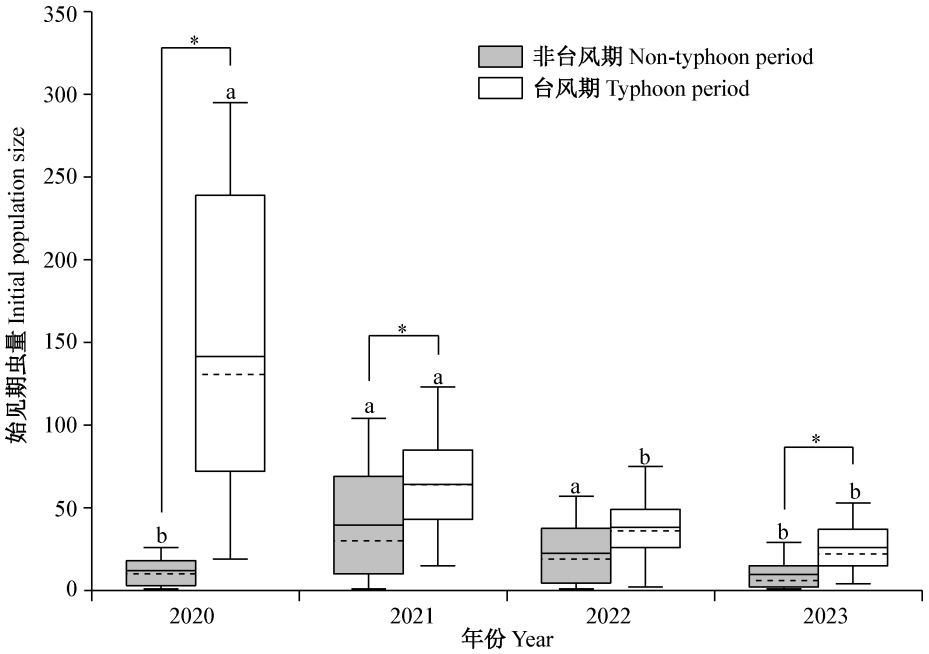


图6 2020—2023年全国尺度下草地贪夜蛾的始见期虫量

Fig. 6 Initial population size of *Spodoptera frugiperda* at the national scale during 2020—2023

图中数据为中值和上下四分位数，虚线为中值，实线为均值，箱体的上下界分别为第75百分位数和第25百分位数，须线表示第5百分位数和第95百分位数。*表示相同年份台风期与非台风期的始见期虫量经Mann-Whitney *U*秩和检验法检验差异显著(*P*<0.05)。同色箱体不同小写字母表示不同年份始见期虫量经Mann-Whitney *U*秩和检验法检验差异显著(*P*<0.05)。Data represent the median and interquartile range. The dotted line indicates the median, and the solid line indicates the mean. The upper and lower boundaries of the box correspond to the 75th and 25th percentiles, and the whiskers indicate the 5th and 95th percentiles. * indicates a significant difference between the initial population size during typhoon and non-typhoon period in the same year according to Mann-Whitney *U* test (*P*<0.05). Different lowercase letters on boxes of the same color indicate significant differences in initial population size among years based on the Mann-Whitney *U* test (*P*<0.05).

在台风系统中，涡旋区的上升气流对草地贪夜蛾的起飞活动有重要影响，其外围大风区的强下沉气流或伴随的降水是该害虫大规模迫降的主要动力因素(齐国君等，2019；罗举等，2020)。王翠花等(2009)研究表明2005年在台风海棠的衰亡时期，大量褐飞虱在台风东南部的西南暖湿气流切变区降落。害虫的大量迁入需同时满足充足的虫源和合适的风场这两个条件(丁文文，2013)。因此2020—

2023年草地贪夜蛾入侵始见期虫量具有明显的年际波动。随着中国对草地贪夜蛾的研究不断深入，防控措施的持续推进，防控力度的不断加大，其北迁种群的数量逐年下降。所以，2023年草地贪夜蛾种群入侵规模较往年显著减少，也从侧面证实了近年来中国在草地贪夜蛾综合防控工作中取得的显著成效，保障了粮食生产安全。

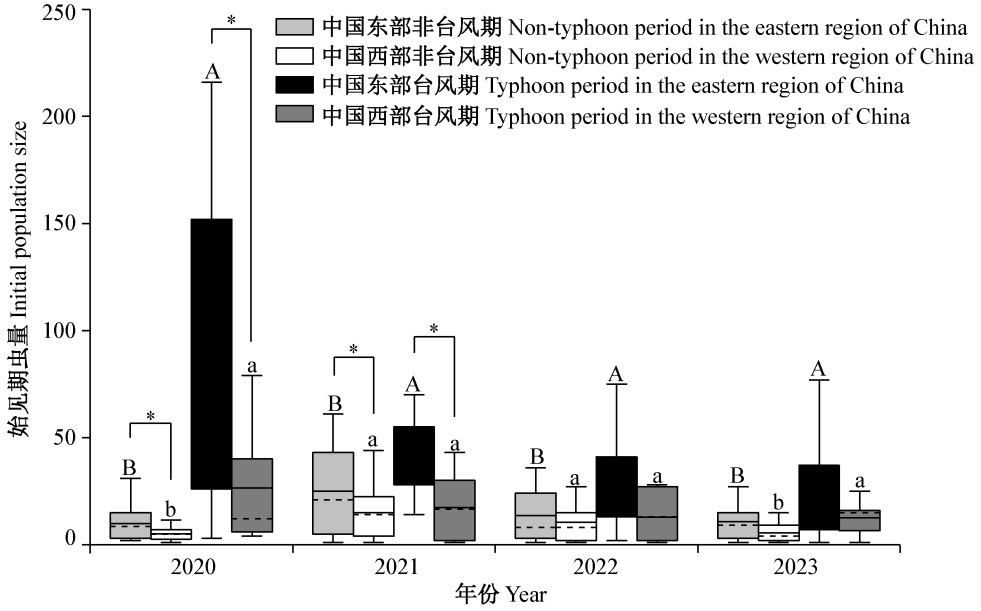


图7 2020—2023年中国东、西部草地贪夜蛾的始见期虫量

Fig. 7 Initial population size of *Spodoptera frugiperda* in the eastern and western regions of China during 2020—2023

图中数据为中值和上下四分位数，虚线为中值，实线为均值，箱体的上下界分别为第75百分位数和第25百分位数，须线表示第5百分位数和第95百分位数。*表示相同年份相同时期东部和西部始见期虫量经Mann-Whitney *U*秩和检验法检验差异显著（$P<0.05$）。不同大写字母表示相同年份东部台风期和非台风期始见期虫量经Mann-Whitney *U*秩和检验法检验差异显著（$P<0.05$）。不同小写字母表示相同年份西部台风期和非台风期始见期虫量经Mann-Whitney *U*秩和检验法检验差异显著（$P<0.05$）。Data represent the median and interquartile range. The dotted line indicates the median, and the solid line indicates the mean value. The upper and lower boundaries of the box correspond to the 75th and 25th percentiles, and the whiskers indicate the 5th and 95th percentiles. * indicates a significant difference in initial population size between the eastern and western regions during the same period in the same year according to Mann-Whitney *U* test ($P<0.05$). Different uppercase letters indicate significant differences between initial population size during typhoon and non-typhoon periods in the eastern region in the same year based on Mann-Whitney *U* test ($P<0.05$). Different lowercase letters indicate significant differences between initial population size during typhoon and non-typhoon periods in the western region in the same year based on Mann-Whitney *U* test ($P<0.05$).

综上所述，本研究从不同尺度明确了草地贪夜蛾在中国的迁飞进程及差异，以及台风对其迁移距离及规模的影响。全球气候变化背景下极端天气发生频率，强度增强，且时空分布更加复杂，中国各主要作物种植区尤其是东部地区，应继续加强常态化防治工作，并密切关注各季节台风动态，结合草地贪夜蛾的迁移特性及生态习性，及时开展极端天气下草地贪夜蛾异地入侵的预警与防控工作。

参 考 文 献（References）

Bao YX. 2002. Meteorology. Southern edition. Beijing: China Agriculture Press (in Chinese) [包云轩. 2002. 气象学. 南方本. 北京: 中国农业出版社]

Bao YX, Yan ML, Yuan CS, Li JJ. 2008. Case studies of the influence of Haitang typhoon (0505) on the catastrophic immigrations of *Nilaparvata lugens* (Stål). Scientia Meteorologica Sinica, 28(4): 450−455 (in Chinese) [包云轩, 严明良, 袁成松, 李金建. 2008. “海棠”台风对褐飞虱灾变性迁入影响的个例研究. 气象科学, 28(4): 450−455]

Cao GF, Zhu GZ, Zhu JJ. 1992. Typhoon path classification and precipitation characteristics affecting northern China. Meteorological Monthly, 18(7): 12−16 (in Chinese) [曹钢锋, 朱官忠, 朱君鉴. 1992. 影响我国北方的台风路径分类及降水特征. 气象, 18(7): 12−16]

Chen H, Wu MF, Liu J, Chen AD, Jiang YY, Hu G. 2020a. Migratory routes and occurrence divisions of the fall armyworm *Spodoptera*

frugiperda in China. Journal of Plant Protection, 47(4): 747−757 (in Chinese) [陈辉, 武明飞, 刘杰, 谌爱东, 姜玉英, 胡高. 2020a. 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 H, Yang XL, Chen AD, Li YC, Wang DH, Liu J, Hu G. 2020b. Immigration timing and origin of the first fall armyworms (*Spodoptera frugiperda*) detected in China. Chinese Journal of Applied Entomology, 57(6): 1270−1278 (in Chinese) [陈辉, 杨学礼, 谌爱东, 李永川, 王德海, 刘杰, 胡高. 2020b. 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. 应用昆虫学报, 57(6): 1270−1278]

Ding WW. 2013. Analysis on the Influence of the landfalling typhoon in the catastrophic immigrations of *Nilaparvata lugens* (Stål). Master thesis. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology (in Chinese) [丁文文. 2013. 登陆台风影响褐飞虱灾变性迁入的规律研究. 硕士学位论文. 南京: 南京信息工程大学]

Fisher NI. 1993. Statistical analysis of circular data. Cambridge: Cambridge university press

Gellert W, Gottwald S, Hellwich M, Kästner H, Küstner H. 1989. The VNR concise encyclopedia of mathematics. 2nd edition. New York: Van Nostrand Reinhold

Gu ZG, Gu L, Eils R, Schlesner M, Brors B. 2014. Circlize implements and enhances circular visualization in R. Bioinformatics, 30(19): 2811−2812

Guo AH, Wang CZ, Deng HH, Yuan FX, He L, Zhang L. 2022. Atmospheric dynamics analysis and simulation of the migration of fall armyworm. Journal of Applied Meteorological Science, 33(5): 541−554 (in Chinese) [郭安红, 王纯枝, 邓环环, 袁福香, 何亮, 张蕾. 2022. 草地贪夜蛾迁飞大气动力条件分析及过程模拟. 应用气象学报, 33(5): 541−554]

Guo JF, Zhang YJ, Wang ZY. 2022. Research progress in managing the invasive fall armyworm, *Spodoptera frugiperda*, in China. Plant Protection, 48(4): 79−87 (in Chinese) [郭井菲, 张永军, 王振营. 2022. 中国应对草地贪夜蛾入侵研究的主要进展. 植物保护, 48(4): 79−87]

Hao ZH, Yang HB, Zhang HY, Wu W, Fang YS, Sheng XJ, Zhang FC, Chen YF, Zhang XX, Zhai BP. 2011. The influence of typhoon Meranti (1010) on migration of *Nilaparvata lugens*. Chinese Journal of Applied Entomology, 48(5): 1278−1287 (in Chinese) [郝振华, 杨海博, 张海燕, 吴蔚, 方源松, 盛仙娇, 张发成, 陈燕芳, 张孝羲, 翟保平. 2011. 台风莫兰蒂对褐飞虱迁飞的影响. 应用昆虫学报, 48(5): 1278−1287]

Hu G, Feng HQ, Otuka A, Reynolds DR, Drake VA, Chapman JW. 2025. The East Asian insect flyway: geographical and climatic factors driving migration among diverse crop pests. Annual Review of Entomology, 70(1): 1−22

Hu G, Lu MH, Reynolds DR, Wang HK, Chen X, Liu WC, Zhu F, Wu XW, Xia F, Xie MC, et al. 2019. Long-term seasonal forecasting of a major migrant insect pest: the brown planthopper in the Lower Yangtze River Valley. Journal of Pest Science, 92(2): 417−428

Jiang YY, Liu J, Wu QL, Cirenzhuoga, Zeng J. 2021. Investigation on winter breeding and overwintering areas of *Spodoptera frugiperda* in China. Plant Protection, 47(1): 212−217 (in Chinese) [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, Zhu XM. 2019. Analysis on the occurrence dynamics and future trend of *Spodoptera exigua* invading China. China Plant Protection, 39(2): 33−35 (in Chinese) [姜玉英, 刘杰, 朱晓明. 2019. 草地贪夜蛾侵入我国的发生动态和未来趋势分析. 中国植保导刊, 39(2): 33−35]

Li JC, Liu J, Qi GJ, Zhang GY, Huang JR, Zhang HB, Wang BB, Jiang YY, Hu G. 2023. The northward migration pattern of the fall armyworm in China from 2019 to 2022. Chinese Journal of Applied Entomology, 60(4): 1039−1051 (in Chinese) [李建春, 刘杰, 齐国君, 张国彦, 黄建荣, 张海波, 王蓓蓓, 姜玉英, 胡高. 2023. 我国草地贪夜蛾北迁格局及其虫源衔接关系. 应用昆虫学报, 60(4): 1039−1051]

Li XD, Dong HN, Wu W, Yan JP. 1991. The characteristics of East Asia monsoon and the difference between East Asia and South Asia monsoon. Journal of Northwest Normal University, 27(4): 78−82 (in Chinese) [李晓东, 董恒年, 武伟, 严江平. 1991. 东亚季风的活动规律及其与南亚季风的区别. 西北师范大学学报(自然科学版), 27(4): 78−82]

Li XJ, Wu MF, Ma J, Gao BY, Wu QL, Chen AD, Liu J, Jiang YY, Zhai BP, Early R, et al. 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

Luo J, Ma J, Wu MF, Qi GJ, Liu J, Tang J, Hu G. 2020. Original area of fall armyworm individuals newly invaded in Zhejiang Province. Chinese Journal of Rice Science, 34(1): 80−87 (in Chinese) [罗举, 马健, 武明飞, 齐国君, 刘杰, 唐健, 胡高. 2020. 浙江入侵草地贪夜蛾的迁入虫源. 中国水稻科学, 34(1): 80−87]

Ma J, Wang YC, Hu YY, Lu MH, Wan GJ, Chen FJ, Liu WC, Zhai BP, Hu G. 2018. Brown planthopper *Nilaparvata lugens* was concentrated at the rear of the typhoon Soudelor in eastern China in August 2015. Insect Science, 25(5): 916−926

Qi GJ, Ma J, Hu G, Yu YH, Chen AD, Gao Y, Lv LH. 2019. Analysis of migratory routes and atmospheric features of the newly invaded fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) in Guangdong Province. Journal of Environmental Entomology, 41(3): 488−496 (in Chinese) [齐国君, 马健, 胡高, 于永浩, 谌爱东, 高燕, 吕利华. 2019. 首次入侵广东的草地贪夜蛾迁入路径及天气背景分析. 环境昆虫学报, 41(3): 488−496]

Rao Jammalamadaka S, SenGupa S. 2001. Series on multivariate analysis, volume 5: topics in circular statistics. Singapore: World Scientific Publishing Company

Rose AH, Silversides RH, Lindquist OH. 1975. Migration flight by an aphid, *Rhopalosiphum maidis* (Hemiptera: Aphididae), and a noctuid, *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae). Canadian Entomologist, 107(6): 567−576

Shi JJ, Chen X, Lu MH, Zhang G, Yang HB, Hu G, Zhai BP. 2014. The effect of typhoons on the migration patterns of the brown plan-

thopper in the summer of 2012. Chinese Journal of Applied Entomology, 51(3): 757−771 (in Chinese) [史金剑, 陈晓, 陆明红, 张国, 杨海博, 胡高, 翟保平. 2014. 2012年盛夏多台风发生对褐飞虱迁飞动态的影响. 应用昆虫学报, 51(3): 757−771]

Sparks AN. 1979. A review of the biology of the fall armyworm. Florida Entomologist, 62(2): 82−87

Tan SQ, Wang ZX, He JX, Ma ZN, Yin L, Zhang ZB, Zhang YS. 2024. Analysis of the migration path and source areas of fall armyworm *Spodoptera frugiperda* in Hunan Province in 2021. Journal of Plant Protection, 51(1): 132−140 (in Chinese) [谭泗桥, 王梓轩, 何健璇, 马智能, 尹丽, 张政兵, 张永生. 2024. 2021年湖南省草地贪夜蛾迁飞路径及虫源地分析. 植物保护学报, 51(1): 132−140]

Todd EL, Poole RW. 1980. Keys and illustrations for the armyworm moths of the noctuid genus *Spodoptera* Guenée from the western hemisphere. Annals of the Entomological Society of America, 73(6): 722−738

Wang CH, Zhai BP, Bao YX. 2009. Effects of typhoon 'Haitang' airflow field on the northward migration route of rice brown planthopper. Chinese Journal of Applied Ecology, 20(10): 2506−2512 (in Chinese) [王翠花, 翟保平, 包云轩. 2009. "海棠"台风气流场对褐飞虱北迁路径的影响. 应用生态学报, 20(10): 2506−2512]

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

Westbrook J, Fleischer S, Jairam S, Meagher R, Nagoshi R. 2019. Multigenerational migration of fall armyworm, a pest insect. Ecosphere, 10(11): e02919

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 (in Chinese) [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. 2019b. Analysis on spring and summer migration routes of fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) from tropical and southern subtropical zones of China. Plant Protection, 45(3): 1−9 (in Chinese) [吴秋琳, 姜玉英, 胡高, 吴孔明. 2019b. 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, Jiang YY, Liu Y, Liu J, Ma J, Hu G, Yang MJ, Wu KM. 2022. Migration pathway of *Spodoptera frugiperda* in northwestern China. Scientia Agricultura Sinica, 55(10): 1949−1960 (in Chinese) [吴秋琳, 姜玉英, 刘媛, 刘杰, 马景, 胡高, 杨明进, 吴孔明. 2022. 草地贪夜蛾在中国西北地区的迁飞路径. 中国农业科学, 55(10): 1949−1960]

Wu QL, Jiang YY, Wu KM. 2019a. Analysis of migration routes of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) from Myanmar to China. Plant Protection, 45(2): 1−6, 18 (in Chinese) [吴秋琳, 姜玉英, 吴孔明. 2019a. 草地贪夜蛾缅甸虫源迁入中国的路径分析. 植物保护, 45(2): 1−6, 18]

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

Wu QL, Westbrook JK, Hu G, Lu MH, Liu WC, Sword GA, Zhai BP. 2018. Multiscale analyses on a massive immigration process of *Sogatella furcifera* (Horváth) in South-Central China: influences of synoptic-scale meteorological conditions and topography. International Journal of Biometeorology, 62(8): 1389−1406

Yang XL, Liu YC, Luo MZ, Li Y, Wang WH, Wan F, Jiang H. 2019. The first discovery of *Spodoptera frugiperda* in Jiangcheng County, Yunnan Province, which moved to southwest China. Yunnan Agriculture, (1): 72 (in Chinese) [杨学礼, 刘永昌, 罗茗钟, 李依, 王文辉, 万飞, 姜虹. 2019. 云南省江城县首次发现迁入我国西南地区的草地贪夜蛾. 云南农业, (1): 72]

Yao DH, Chen XF, Yao ST, Chen QH. 2007. Analysis of effects of typhoon Kanu (2005) on the sudden increase of *Nilaparvata lugens*. Chinese Journal of Agrometeorology, 28(3): 347−349, 353 (in Chinese) [姚德宏, 陈雄飞, 姚士桐, 陈勤海. 2007. "卡努"(0515)台风在褐飞虱突增中的作用探析. 中国农业气象, 28(3): 347−349, 353]

Ye H, Li YP, Feng D, Xu QY. 2022. Ecological effects of river valley topography on the migration of *Spodoptera frugiperda*. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition), 44(1): 188−194 (in Chinese) [叶辉, 李永萍, 冯丹, 徐全元. 2022. 河谷地形对草地贪夜蛾种群迁移的生态学效应. 云南大学学报(自然科学版), 44(1): 188−194]

Zhang D, Dong QJ, Huo LX, Ning SF, Zhao Q, Zhang WM, Qu LL, Meng W, Zhou JC, Dong H. 2021. The first report of the invasive pest, *Spodoptera frugiperda* J. E. Smith, in Liaoning Province. Journal of Shenyang Agricultural University, 52(3): 343−348 (in Chinese) [张丹, 董前进, 霍梁霄, 宁素芳, 赵倩, 张万民, 屈丽莉, 孟威, 周金成, 董辉. 2021. 辽宁省发现入侵性草地贪夜蛾. 沈阳农业大学学报, 52(3): 343−348]

Zhang XY, Feng CH, Wan XW, Hu G, Li Q, Jiang CX. 2020. The source areas and migration routes of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* in Sichuan Province in 2019. Journal of Plant Protection, 47(4): 770−779 (in Chinese) [张雪艳, 封传红, 万宣伍, 胡高, 李庆, 蒋春先. 2020. 2019年四川省草地贪夜蛾迁入虫源地分布及迁飞路径. 植物保护学报, 47(4): 770−779]

Zhang ZT. 1992. Insect migration and insect migration field. Plant Protection, 18(1): 48-50 (in Chinese) [张志涛. 1992. 昆虫迁飞与昆虫迁飞场. 植物保护, 18(1): 48−50]

（责任编辑：张俊芳）