

云南南部草地贪夜蛾发生动态及虫源分析*

陈辉^{1**} 王奕涵¹ 马诣博¹ 李新然¹ 余代宏²
杨学礼³ 鲁慧² 田卫东² 谌爱东⁴ 胡高^{1***}

(1. 南京农业大学植物保护学院昆虫系, 南京 210095; 2. 云南省元江县植保植检站, 元江 663300;
3. 云南省江城县植保植检站, 江城 665900; 4. 云南省农业科学院农业环境资源研究所, 昆明 650205)

摘要 【目的】明确云南南部周年繁殖区草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 常年发生动态和虫源组成。【方法】运用高空灯自动诱集装置对 2020 年云南南部江城和元江两地草地贪夜蛾种群的上灯行为节律进行逐时系统监测, 依据灯下种群动态和上灯行为节律, 并结合气象条件和昆虫轨迹分析模型推断虫源分布。【结果】云南南部周年繁殖区均可诱集到草地贪夜蛾成虫, 存在多个发生盛期 (3-4 月、6-10 月)。该区域草地贪夜蛾发生动态复杂, 不同季节灯下本地虫源和迁入虫源组成比例存在差异。1-2 月主要为本地迁出虫源且低温无法向北迁出; 3-4 月既有本地迁出又有境外迁入, 迁出可能降落地为贵州和广西等地, 境外迁入虫源则主要分布在缅甸东南部; 5-7 月江城后半夜上灯比例越来越高 (以境外迁入为主), 而元江以前半夜上灯为主, 表现为持续北迁, 北迁落点范围分布广; 8-10 月前半夜上灯比例逐渐持平 (既有本地迁出又有外地迁入), 回迁虫源主要来自国内贵州、四川等地, 本地虫源也向缅甸等境外区域迁出。【结论】结果明确了云南南部草地贪夜蛾常年上灯行为节律、迁入迁出以及迁飞大气背景场, 丰富了草地贪夜蛾周年繁殖区不同季节高空灯的灯下种群动态理论, 进而为云南省乃至我国其他地区草地贪夜蛾迁入的早期监测预警与灾变预警提供依据。

关键词 草地贪夜蛾; 高空灯; 终年繁殖区; 种群动态

Migration routes and source population of migratory *Spodoptera frugiperda* in southern Yunnan

CHEN Hui^{1**} WANG Yi-Han¹ MA Yi-Bo¹ LI Xin-Ran¹ YU Dai-Hong²
YANG Xue-Li³ LU Hui² TIAN Wei-Dong² CHEN Ai-Dong³ HU Gao^{1***}

(1. Department of Entomology, College of Plant Protection, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China;
2. Plant Protection and Plant Quarantine Station of Yuanjiang County, Yuanjiang 663300, China;
3. Plant Protection and Plant Quarantine Station of Jiangcheng County, Jiangcheng 665900, China;
4. Agricultural Environment and Resources Institute, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650205, China)

Abstract 【Objectives】 To investigate the migration of *Spodoptera frugiperda* in southern Yunnan and identify the source of migrating insects. 【Methods】 An automatic searchlight trap was used to systematically monitor the movements and population dynamics of *S. frugiperda* in southern Yunnan in 2020. We inferred the source population based on trapping data, and by integrating meteorological data with insect flight trajectory simulation. 【Results】 *S. frugiperda* moths were caught all year round, and there were multiple monthly peaks of abundance from March to April and June to October. The population dynamics of *S. frugiperda* in this region is complex, with populations comprised of varying proportions of local and migrating individuals in different seasons. From January to February, most moths were of local origin and are unable to migrate northward due to low temperatures. From March to April, captures consisted of a mix of locally bred and immigrant moths, with emigrating moths that reach Guizhou and Guangxi primarily originating from southeastern Myanmar. From May to July, a

*资助项目 Supported projects: 国家重点研发计划项目 (2021YFE0194800)

**第一作者 First author, E-mail: 2019202044@njau.edu.cn

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: hugao@njau.edu.cn

收稿日期 Received: 2023-05-04; 接受日期 Accepted: 2023-06-23

higher proportion of moths were captured in the latter half of the night in Jiangcheng, indicating immigration from outside China, whereas in Yuanjiang, most moths were captured in the first half of the night, indicating continuous northward migration. From August to October, the proportion of moths captured throughout the night stabilized, indicating a mixture of local and immigrant moths. Most immigrants came from locations within China such as Guizhou and Sichuan. Local moths are capable of migrating to other countries such as Myanmar. **[Conclusion]** These results provide sights into the population dynamics and migratory behavior of *S. frugiperda* in southern Yunnan, and also elucidate the immigration, emigration, and atmospheric factors that influence the migration of this species. These findings contribute to our understanding of *S. frugiperda* population dynamics in different seasons, thereby providing information to improve the monitoring of *S. frugiperda*, including providing early warning of outbreaks, not only in Yunnan, but also in other parts of China.

Key words *Spodoptera frugiperda*; searchlight trap; year-round breeding area; population dynamic

草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 是 2018 年年末入侵我国的重大迁飞性害虫 (Sun *et al.*, 2019; 陈辉等, 2020a, 2020b; Li *et al.*, 2020), 被农业农村部列入我国《一类农作物病虫害名录》(姜玉英等, 2019; 吴孔明, 2020; Zhou *et al.*, 2021)。玉米是我国第一大粮食作物, 各省均有种植, 尤其集中在我国黑河-腾冲线东南部; 而黑河-腾冲线东南部也是草地贪夜蛾北往南返的主要区域。草地贪夜蛾为害可造成 15%-73% 的玉米产量损失, 苗期严重为害甚至可造成绝收 (Hruska and Gould, 1997; Casmuz *et al.*, 2010; Overton *et al.*, 2021)。在 2019-2020 年间, 草地贪夜蛾在我国 24 省(市、自治区) 1 500 多个县市均发生为害, 年发生面积可超过 $1.07 \times 10^6 \text{ hm}^2$ (姜玉英等, 2019)。

云南是我国草地贪夜蛾西线迁飞路径的起始点及虫源地, 可为我国大部分非周年繁殖区提供虫源, 很大程度上影响着我国其他省(市、自治区)的草地贪夜蛾监测预警工作; 同时云南也是我国草地贪夜蛾发生最为严重的区域 (Wu *et al.*, 2021), 其虫源基数大且发生面积广, 2019-2020 年云南地区草地贪夜蛾发生面积均超过全国总发生面积的 50% (姜玉英等, 2019; Wu *et al.*, 2021)。此外, 云南还是草地贪夜蛾境外虫源的前哨站, 尤其是云南南部, 每年都有大量境外(中南半岛各国)虫源输入。综上, 在云南南部(玉溪市、普洱市、西双版纳和红河州)建立草地贪夜蛾监测点来明确该地虫情发生动态和虫源组成对云南乃至全国的草地贪夜蛾早期监测预警都有重大意义。

云南南部的元江县和江城县是我国最早一批发现草地贪夜蛾的地区, 其中江城县还是我国草地贪夜蛾第一发现地(杨学礼等, 2019; 陈辉等, 2020b)。两地均紧邻边境, 与东南亚缅甸、泰国、老挝、越南各邻国相距不远, 亦为草地贪夜蛾境外虫源主要降落区, 是我国草地贪夜蛾境外虫源监测的重要据点(姜玉英等, 2019)。此外, 由于两县城区及周边地区终年种植玉米, 因此草地贪夜蛾在两县均可终年繁殖; 并且常年种植玉米也导致两地同一时期不同生育期玉米并存的情况, 引发田间草地贪夜蛾多虫态、世代重叠特征严重等情况(赵雪晴等, 2021)。综上, 境外虫源输入加上本地虫源世代重叠, 故两地发生动态复杂亟待明确。

灯光诱捕是监测草地贪夜蛾(包括其他夜行性昆虫)种群动态最常用的手段之一, 也是最早监测到草地贪夜蛾到入侵我国的方法(刘杰等, 2019; 姜玉英等, 2020)。灯光诱捕通过昆虫实际种群动态与灯下捕获到的昆虫数量动态之间存在的高度相关性, 依据上灯规律对昆虫的迁飞行为规律进行判断, 如迁出种群、迁入种群等, 并在许多迁飞性昆虫上成功应用(焦桂华等, 2017; Guo *et al.*, 2019; 唐继红等, 2022)。本研究针对云南南部草地贪夜蛾发生动态这一复杂情况, 在元江县、江城县设置 3 个逐时高空灯装置, 利用草地贪夜蛾在黄昏起飞和黎明降落的行为特征 (Sparks, 1979), 对其夜晚上灯时间进行逐时收集分析, 以期能够准确掌握草地贪夜蛾的上灯节律、种群季节性变化和虫源性质; 再结合昆虫三维轨迹模型和大气背景场分析对上灯

时段的虫源进行逐时推导进而阐明该地草地贪夜蛾迁出迁出动态及其相关影响因素, 最终为云南本地乃至全国的草地贪夜蛾的防控提供指导并且丰富我国周年繁殖区草地贪夜蛾的预测预报理论依据。

1 材料与方法

1.1 高空灯监测地点

本研究中 3 个逐时自动诱集高空灯分别位于云南省玉溪市元江县植保植检站(101.978 9°N, 23.600 4°E), 海拔 430 m, 监测时间为 2020 年 4 月 13 日-2020 年 12 月 31 日; 云南省普洱市江城县整老寨子(101.367 7°N, 22.685 0°E, 江城 1 号监测点), 海拔 913 m, 监测时间为 2020 年 1 月 1 日-2020 年 12 月 31 日。因设备原因, 该点 11-12 月无逐时数据; 云南省普洱市江城县牛洛河 13 队(101.924 8°N, 22.447 7°E, 江城 2 号监测点), 海拔 975 m, 监测时间为 2020 年 3 月 15 日-2020 年 12 月 31 日。因设备原因, 该点 11-12 月无逐时数据。

1.2 灯诱装置及收集

元江县所用高空灯是由陈法军等(2016) 改良过的配备分时段自动诱虫装置的高空监测灯, 该灯由 GT75 型探照灯改进而成, 内置型号为 ZJD1000W 的金属卤化物灯泡(上海亚明); 江城县所用 2 个分时段高空灯均为佳多公司生产(JDGK-2, 佳多), 同样内置 1 000 W 的金属卤化物灯泡。3 个高空灯可以诱捕空中距诱虫灯 300-500 m 的昆虫种群(Feng *et al.*, 2003)。本研究将高空灯的运行时间设置为 12 个时段(19:30-次日 07:30), 在设定时间内高空灯逐时自动诱集昆虫落入不同的落虫袋中。每天早晨取下并更换落虫袋, 对收集到的昆虫进行 -20 °C 低温冷冻处理后, 在室内直接分类鉴定并计数, 统计筛选出草地贪夜蛾。本研究中将 1-6 号袋收集的草地贪夜蛾视为前半晚上灯的草地贪夜蛾, 后 7-12 号袋收集的草地贪夜蛾视为后半晚上灯的草地贪夜蛾。

1.3 草地贪夜蛾成虫迁入迁出分析

为了明确云南南部地区草地贪夜蛾可能的虫源地及迁入迁出的落点范围, 本研究采用基于 WRF 模式输出的高时空分辨率气象背景场的轨迹分析方法, 对不同时段上灯的虫源进行逐时回推或顺推的轨迹分析。首先, 将整个空间划分为 1°×1°的单元网格, 在 QGIS 3.4 软件中统计每个单元网格中的轨迹终点数; 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 4.2 软件绘制轨迹落点的空间分布(Hu *et al.*, 2013; 陈辉等, 2020a)。该轨迹程序基于 FORTRAN 语言设计, 并在 CentOS 7.4 服务器平台运行(IBM system×3500 M4)。

1.3.1 气象数据 本研究采用美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP) 全球最终分析数据(Final operational global analysis data, FNL), 该数据时间分辨率为每 6 h 一次, 空间分辨率为 1.0°×1.0°。

1.3.2 WRF 模式设置 WRF 4.0 模式(<https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/>) 的初始数据如降雨数据、温度数据等, 均采用 FNL 数据。将气象数据输入 WRF 模式经数值模拟后, 输出每小时一次的 30 km×30 km 格距气象要素场作为昆虫三维轨迹分析程序所需要的高时空分辨率背景场。在本研究中, WRF 模式模拟区域中心(105°E, 20°N), 大小为 110×90 格点, 水平分辨率为 30 km, 设置了 30 个垂直层, 方案其他模拟参数与前人的研究方案相同(Li *et al.*, 2020)。

1.3.3 轨迹模拟的参数设置 本研究轨迹模拟采用的草地贪夜蛾迁飞行为参数与以往研究一致(陈辉等, 2020a)。草地贪夜蛾迁飞行为主要参数包括

(1) 本研究设定草地贪夜蛾(其在亚洲地区空中定向行为未知) 在高空顺风飞行(Wolf *et al.*, 1990);

(2) 本研究设定草地贪夜蛾自身飞行速度为 3.0 m/s(Li *et al.*, 2020);

(3) 草地贪夜蛾属夜蛾类, 大部分夜蛾都有多次迁飞的特性, 日落时刻起飞, 次日凌晨降落,

多数研究认为可能连续飞行 3 个夜晚。因此, 本研究设定草地贪夜蛾连续飞行 3 个夜晚。计算轨迹时, 以前一夜的轨迹终点作为次日起飞的起点 (陈辉等, 2020a; Li *et al.*, 2020); 设置草地贪夜蛾上灯时间为起飞时刻或降落时刻用于顺推或回推轨迹模拟; 此外, 本研究设定了距海平面高度 750、1 000、1 250、1 500、1 750、2 000、2 250、2 500 m 8 个飞行高度 (陈辉等, 2020a);

(4) 当空中温度低于飞行低温阈值时, 迁飞昆虫便会停止振翅。室内吊飞实验表明草地贪夜蛾遇到变温温度下降时, 其飞行低温阈值为 13.9 °C (Chen *et al.*, 2022)。因此, 本文飞行低温阈值采用 13.9 °C。当所在飞行高度的温度低于该温度时, 终止轨迹计算。

1.4 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, 通过统计并绘制 2020 年 1-10 月夜晚 850 hPa 月平均风场图以及云南南部监测点 2020 年 1-10 月的 850 hPa 夜晚风速风向的频次图, 最后综合分析草地贪夜蛾迁飞的大气环流背景场。

1.5 数据分析

将 2020 年云南南部各点高空灯诱集数据均按照逐日整理并进行柱状图绘制。采用卡方检验或者 Wilcoxon 非参数检验对每月夜晚上灯节律是否有差异进行检测。统计分析每月各个风向的频次及不同方向的平均风速, 并采用 Rayleigh 检验

对每月平均风向进行分析得到平均风向去向, 最终绘制风向风速。此外, 为了探索各站点各月诱集趋势相关性大小, 本文采用正态性分析对数据正态性进行判断后, 再用 Spearman 或 Pearson 相关性检验方法对其相关性进行检验。所有数据分析、整理画图都在 R 语言中进行 (version 4.2, <https://www.r-project.org/>)。

2 结果与分析

2.1 云南南部高空灯下草地贪夜蛾种群动态分析

云南南部草地贪夜蛾的高空灯诱集结果表明, 3-10 月云南南部每月均有一个发生盛期, 且江城 2 个高空灯上灯情况存在显著正相关关系 (图 1; $t=2.31$, $df=8$, $P=0.0495$)。进一步分析发现, 江城 1 号高空灯全年共诱集草地贪夜蛾 7 271 头, 占 3 个高空灯草地贪夜蛾诱集总量的 54.45%, 其分别在 4 月、6-10 月每个月各有 1 个发生盛期 (图 1)。该灯单晚最高诱虫量 444 头 (6 月 21 日), 占全年 6.11%, 也是 3 个高空灯中单晚诱集量最多的一晚。此外, 江城 1 号高空灯也是 3 个高空灯中唯一一个在 1-2 月诱集到草地贪夜蛾成虫的高空灯, 始见期较其他 2 个高空灯要早。江城 2 号高空灯全年共诱集草地贪夜蛾 5 644 头, 占草地贪夜蛾高空灯诱集总量 42.26%, 同样在 3-4 月、6-10 月期间每月各有一个发生盛期; 在 7 月诱集量达到最高峰, 7 月 13 日单晚诱虫量 230 头。相较江城两点而言, 元江站点高空灯

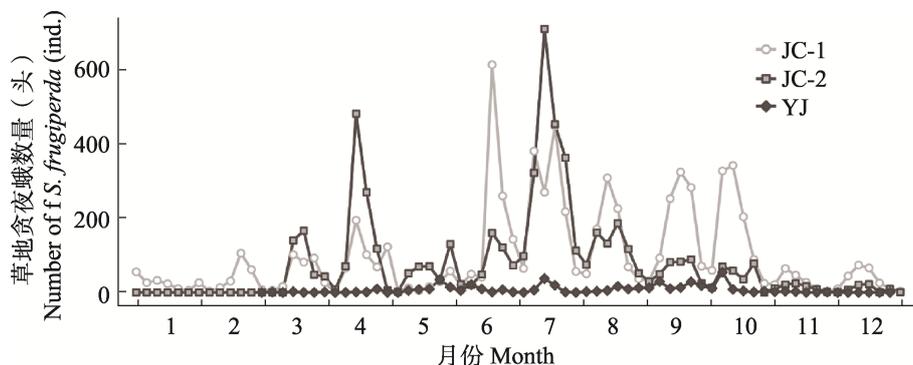


图 1 2020 年云南南部 3 个高空灯草地贪夜蛾每 5 日诱集虫量

Fig. 1 Trapping amount of *Spodoptera frugiperda* in a five-day period in 3 searchlight traps in southern Yunnan in 2020

JC-1: 江城 1 号高空灯监测点; JC-2: 江城 2 号高空灯监测点; YJ: 元江高空灯监测点。

JC-1: No.1 searchlight trap in Jiangcheng; JC-2: No.2 searchlight trap in Jiangcheng; YJ: The searchlight trap in Yuanjiang.

草地贪夜蛾诱虫量很少，全年仅诱集到 438 头，只占全部草地贪夜蛾诱集量的 3.28%。然而，发生盛期与江城两点相似，5 月、7-10 月每月各有一个峰期。总而言之，三地草地贪夜蛾的高空灯监测结果均表明，云南南部全年在 3-4 月、6-10 月间有发生盛期。

2.2 云南南部高空灯下草地贪夜蛾夜晚上灯节律及虫源分析

总体上，3 个高空灯 1-10 月草地贪夜蛾诱集量共 11 034 头，其中前半夜（即 1-6 号袋）共诱集到 4 172 头，占 37.81%，后半夜（7-12 号袋）共诱集 6 862 头，占总量 62.19%，表明该地区是以后半夜迁入虫源为主（图 2）。此外，研究进一步发现每月草地贪夜蛾高峰日前后半夜上灯数量分布存在差异。1 月高峰日前半夜诱集到的草地贪夜蛾占该月 68.18%，后半夜 31.82%（Wilcoxon 检验： $w=8, P=0.103$ ），表明 1 月高峰日草地贪夜蛾既有迁入也有迁出，但此时由于低温原因，无迁出落点（图 3）。回推轨迹落点也表明此时后半夜迁入虫源来自境外缅甸等国。2 月高峰日前半夜诱集到的草地贪夜蛾占 66.67%，后半夜占 33.33%，与 1 月高峰日前后

半夜上灯情况基本相同（ $w=2, P=1$ ），云南南部地区草地贪夜蛾同样没有迁出落点，无法继续北迁（图 3）。3-4 月高峰日后半夜上灯虫量占比上升（3 月 62.07%，4 月 72.12%），稍大于前半夜（3 月 37.93%，4 月 27.88%）。此时迁出落点位于云南中部、贵州南部和广西西北部。5-6 月高峰日草地贪夜蛾后半夜上灯比例达到峰值（5 月 90.91%，6 月 90.74%），显著大于前半夜（ $w=22, P=0.003$ ），直到 7 月高峰日后半夜上灯比例依旧占 81.3%，大于前半夜 18.7%（ $w = 6.5, P = 0.078$ ），表现为以外地迁入为主。轨迹结果表明，5-7 月高峰日迁出落点分布更广，逐步向北延伸至重庆市、湖南省、湖北省、江西省、江苏省、安徽省。虽然 8 月草地贪夜蛾前半夜上灯虫量开始增多（35%），但此时后半夜上灯虫量占比依然较高（65%）。轨迹模拟结果显示 8 月高峰日迁出落点位于泰国北部、老挝北部及越南北部，这表明该月已有草地贪夜蛾向南回迁。9-10 月高峰日草地贪夜蛾前半夜上灯占比分别为 16.67% 和 45.45%。从轨迹模拟结果可看出此时云南南部高峰日草地贪夜蛾主要迁出到缅甸东部、缅甸东南部等境外地区，而迁入虫源则主要来自于云南周边地区。

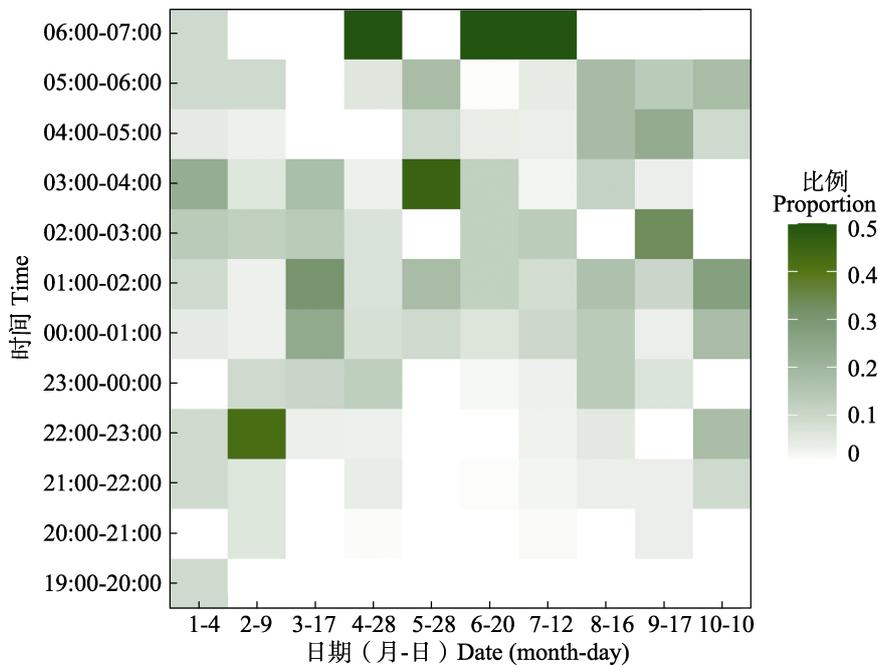


图 2 云南南部 3 个高空灯每月逐小时草地贪夜蛾灯诱比例

Fig. 2 Hourly trapping ratio of *Spodoptera frugiperda* in the 3 searchlight traps in Southern Yunnan

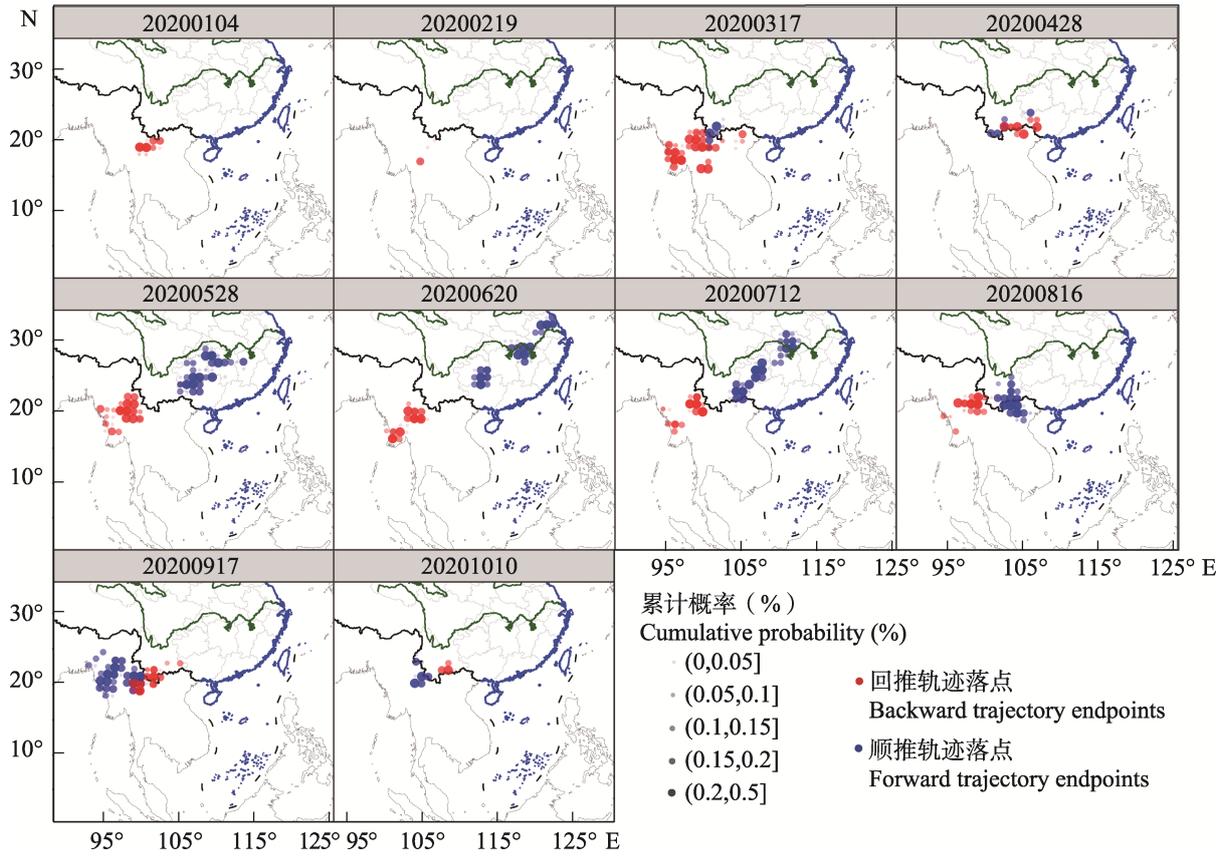


图 3 2020 年 1-10 月云南南部草地贪夜蛾顺推轨迹及回推轨迹落点分布
(审图号: 京审字(2023)G 第 2574 号)

Fig. 3 Distribution of endpoints of *Spodoptera frugiperda* forward trajectories and backward trajectories in southern Yunnan from January to October in 2020

总之,云南南部高空灯诱集虫源 1 月主要为本地迁出虫源但 1-2 月均由于低温无法迁出;3-4 月既有本地迁出虫源又有境外迁入虫源,此时主要迁出地分布在云南、贵州和广西,迁入虫源则主要分布在缅甸、泰国和老挝等地;5-7 月后半夜上灯比例越来越高(以迁入虫源为主),北迁落点范围分布广,此时境外虫源及本地虫源皆可向北大范围迁出。8-10 月前后半夜上灯比例逐渐持平(既有迁出虫源又有迁入虫源),回迁虫源主要来自国内云南和境外老挝北部等;同时本地虫源也向缅甸等境外区域迁出。

2.3 云南南部草地贪夜蛾迁入迁出大气背景场分析

分析 2020 年 1-10 月夜晚的 850 hPa 月平均风场数据后发现,1-2 月 3 个监测点周边并未形成大范围持续气流(图 4),其平均风向主要为

南风(图 5),1 月平均风向来向 $183.5^{\circ} \pm 20.6^{\circ}$ (Rayleigh 检验: $n=31, r=0.77, P<0.001$); 2 月平均风向 $170.5^{\circ} \pm 14.8^{\circ}$ ($n=28, r=0.87, P<0.001$)。3 月西南风发生频次增多,占 65.59%,平均风向来向 $201.8^{\circ} \pm 15.8^{\circ}$ ($n=31, r=0.86, P<0.001$); 4 月除西北风发生频次较少外,其他风向的风均有发生,风向分布与前 3 个月相比较为分散($n=30, r=0.67, P<0.001$)。5 月云南南边开始形成大范围持续西南气流(图 4)。5-7 月 3 个监测点的西南风发生频率分别为 77.06%、73.70% 和 61.29%,可见云南南部此时主要为西南风(图 5),5 月平均风向来向 $204.8^{\circ} \pm 10.6^{\circ}$ ($n=31, r=0.93, P<0.001$); 6 月平均风向来向 $194.3^{\circ} \pm 6.15^{\circ}$ ($n=30, r=0.98, P<0.001$); 7 月平均风向来向 $186.8^{\circ} \pm 7.16^{\circ}$ ($n=31, r=0.96, P<0.001$),北风极少(发生频率仅为 2.87%、0.37% 和 2.87%),监测点 850 hPa 风场最大风速可达 10.5m/s; 此

时 850 hPa 风场的西南气流大范围相连并覆盖中国东南部，形成“空中廊道”（图 4）。8 月云南南部 850 hPa 风场的风向较分散，各个方向均有发生（图 5, $n=31, r=0.59, P<0.001$ ），“空中廊道”消失，北风发生频率增加至 19.35%，且此时监测点周边 850 hPa 风场平均风速小于 2 m/s（图 4）。9 月云南南部 850 hPa 风场主要为东南风（发生频率 49.26%），平均风向来向为 $157.1^\circ \pm 19.5^\circ$ ($n=30, r=0.79, P<0.001$)，但此时监测点周边 850hPa 风场平均风速同样小于 2 m/s（图 4）。10 月 850 hPa 风场呈现出持续相连的

东南气流场（气流中心平均风速可达 12 m/s），覆盖中国东南部（图 4）。此时监测点 850 hPa 风场盛行东风（发生频率为 93.33%），平均风向 $104.4^\circ \pm 16.6^\circ$ ($n=31, r=0.84, P<0.001$)。

综上所述，1-4 月监测点西南侧 850 hPa 风场有小范围西南气流，为境外虫源进入云南南部提供有利条件，但无法供本地虫源或境外虫源进行更高纬度和更大范围的北迁活动。5 月云南南部的 850 hPa 风场开始形成持续连通的西南气流，为本地虫源及境外虫源提供相应的空中廊道进而大范围北迁，一直持续至 7 月。8-10 月覆盖

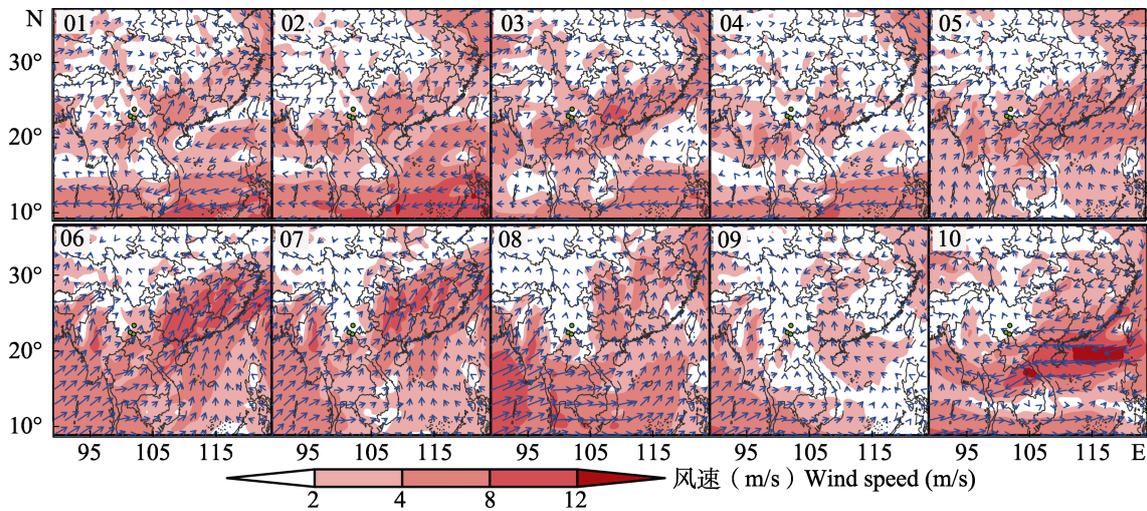


图 4 2020 年云南南部 1-10 月 850 hPa 平均风场

Fig. 4 Mean wind fields on 850 hPa level in southern Yunnan from January to October in 2020

阴影为风速(m/s)。图上的数字 01-10 分别代表 1-10 月份。

The shade area represents wind speed (m/s). The number of 01-10 indicates Jan. to Oct., respectively.

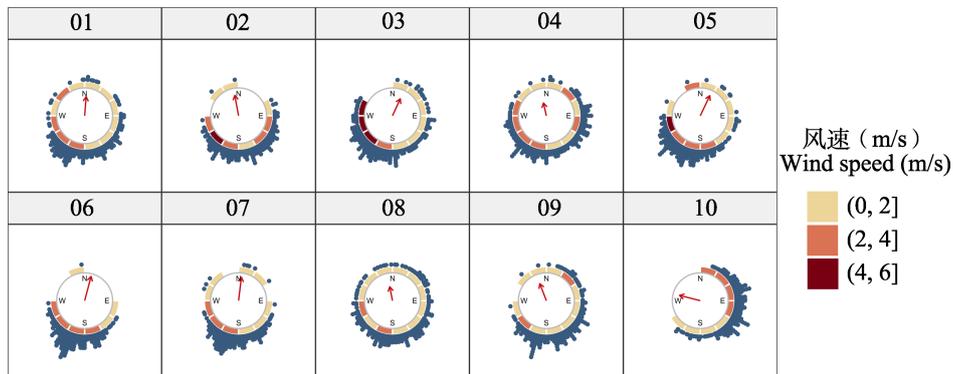


图 5 2020 年云南监测点 1-10 月 850 hPa 风向风速频次图

Fig. 5 Mean wind fields on 850 hPa level above monitoring sites from January to October in 2020

红色箭头为风向去向。图上的数字 01-10 分别代表 1-10 月份。

The red arrow indicates downwind direction. The number of 01-10 indicates Jan. to Oct., respectively.

云南南部持续且连通西南气流不再, 北风及东南风发生频次开始增多, 为草地贪夜蛾南迁提供大气环流条件。

3 讨论

云南南部高空灯下草地贪夜蛾发生期复杂, 存在多个发生盛期。云南南部复杂的发生期可能是玉米生育期不统一和常年境外虫源迁入导致。首先, 元江县和江城县玉米种植模式特殊, 周边坝区和城区成阶梯式的玉米种植, 在城区不同时期均能见到零星且不同生育期的玉米田块, 不同于其他地区统一生育期的种植模式(齐国君等, 2022)。因此, 云南南部草地贪夜蛾发生盛期及高峰日更多, 田间种群世代重叠现象更为严重, 表明草地贪夜蛾发生动态与玉米种植模式息息相关, 与已有研究结果相吻合(Johnson, 1987; 杨菊琼等, 2020; 赵雪晴等, 2021)。其次, 境外虫源的常年迁入也是云南南部的草地贪夜蛾发生规律复杂的原因之一。本研究发现在云南南部 1-10 月均有境外虫源迁入。根据 2019 年已有的田间调查结果发现, 缅甸、老挝、泰国等国家常年种植玉米, 其玉米种植面积和草地贪夜蛾发生面积较大, 相邻四国草地贪夜蛾玉米为害面积共约 100 万 hm^2 (刘杰等, 2020)。这说明缅甸等境外国家可以为云南南部常年提供虫源, 甚至在 5-7 月可为我国北部部分地区提供大量虫源。

草地贪夜蛾的迁飞活动与地形地貌和大气环流有关。本研究高空灯诱数据结果表明 5-7 月云南南部以迁入虫源为主, 然而元江地区草地贪夜蛾上灯虫量远小于江城地区草地贪夜蛾上灯虫量, 意味着境外虫源迁入元江受到了阻碍; 同时元江该时间段以前半夜上灯为主, 表现为以本地外迁为主。这可能与该时段两地地形地貌和大气环流差异有关。首先, 本研究中元江县虽然与江城县相隔不远, 但其位于红河谷低热河谷地带, 为典型的河谷地形地貌。故推测河谷地形对草地贪夜蛾迁飞活动存在阻隔或阻滞作用, 这一推测与叶辉等(2022)的结论相似。其次, 大气环流背景场是影响草地贪夜蛾迁飞的主要气象条件之一(陈辉等, 2020b)。本研究发现 5-7 月

的风场风速大于 4 m/s 的 850 hPa 阴影部分只覆盖到了江城县, 未覆盖到元江县。这表明此时大气流背景场不能为草地贪夜蛾迁入元江县提供有利的气流条件。综上, 可推测草地贪夜蛾的迁飞活动与地形地貌和大气环流相关, 但其具体的影响还需更多数据进一步研究。

云南南部大量草地贪夜蛾 5 月远距离北迁或与南海季风爆发时间相关。本研究发现云南南部草地贪夜蛾虫源及境外虫源 5 月迁出的落点范围相较 4 月迅速扩大, 即云南南部草地贪夜蛾本地虫源及境外虫源 5 月开始远距离大范围北迁。值得注意的是, 南海季风爆发的时间也是 5 月, 此前已有研究表明南海季风爆发进而形成大范围持续的西南气流可为昆虫远距离北迁提供有利条件(Chen *et al.*, 2019), 故推测南海季风爆发时间与草地贪夜蛾远距离北迁的时间相关, 或可作为云南南部及境外虫源北迁活动的早期监测预警指标之一。然而, 本研究 3 个监测点目前只有一年的高空灯逐时监测数据, 南海季风爆发时间与云南南部草地贪夜蛾大量远距离北迁的时间节点的相关性还需获取更多的高空灯虫情监测数据和气象数据进行下一步分析。

云南南部既是我国草地贪夜蛾的周年繁殖区, 也是境外虫源进入我国重要的前哨站, 对于我国草地贪夜蛾防控的重要性不言而喻。然而, 既有本地虫源的世代重叠发生又有境外虫源的频繁迁入也导致云南南部草地贪夜蛾的发生情况极为复杂。因此, 弄清草地贪夜蛾在云南南部的发生发展动态对于我国草地贪夜蛾的早期监测预警具有十分重要的意义。本研究厘清了云南南部草地贪夜蛾常年夜晚上灯行为节律和种群动态发生规律, 丰富了草地贪夜蛾在周年繁殖区不同季节高空灯下的种群动态理论, 并初步明确了不同月份云南南部草地贪夜蛾与境外虫源迁入迁出的动态关系及天气背景场, 进而为云南省乃至全国的草地贪夜蛾迁入种群发生预测与灾变预警提供理论依据。

参考文献 (References)

Casmuz A, Juárez ML, Socías MG, Murúa MG, Silvina P, Santiago

- M, Eduardo W, Gerardo G, 2010. Review of the host plants of fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae). *Revista de la Sociedad Entomológica Argentina*, 69(3/4): 209–231.
- Chen H, Chang XL, Wang YP, Lu MH, Liu WC, Zhai BP, Hu G, 2019. The early northward migration of the white-backed planthopper (*Sogatella furcifera*) is often hindered by heavy precipitation in southern China during the pre-flood season in May and June. *Insects*, 10(6): 158.
- Chen H, Wang Y, Huang L, Xu CF, Li JH, Wang FY, Cheng W, Gao BY, Chapman JW, Hu G, 2022. Flight capability and the low temperature threshold of a Chinese field population of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda*. *Insects*, 13(5): 422.
- 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. [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 armyworm (*Spodoptera frugiperda*) detected in China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 57(6): 1270–1278. [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.]
- Feng HQ, Wu KM, Cheng DF, Gao YY, 2003. Radar observations of the autumn migration of the beet armyworm *Spodoptera exigua* (Lepidoptera: Noctuidae) and other moths in northern China. *Bulletin of Entomological Research*, 93(2): 115–124.
- Guo JW, Yang F, Li P, Liu XD, Wu QL, Gao H, Zhai BP, 2019. Female bias in an immigratory population of *Cnaphalocrocis medinalis* moths based on field surveys and laboratory tests. *Scientific Reports*, 9(1): 18388.
- Hruska AJ, Gould F, 1997. Fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) and *Diatraea lineolata* (Lepidoptera: Pyralidae): Impact of larval population level and temporal occurrence on maize yield in Nicaragua. *Journal of Economic Entomology*, 90: 611–622.
- Hu G, Lu F, Lu MH, Liu WC, Xu WG, Jiang XH, Zhai BP, 2013. The influence of typhoon Khanun on the return migration of *Nilaparvata lugens* (Stål) in eastern China. *PLoS ONE*, 8(2): e57277.
- 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.]
- Jiang YY, Liu J, Yang JJ, Zhao WX, Yin L, Liu Y, Ye SF, Qin BQ, Song LD, 2020. Trapping effect of searchlight-trap and light trap for the moth of *Spodoptera frugiperda* in 2019. *Plant Protection*, 46(3): 118–122. [姜玉英, 刘杰, 杨俊杰, 赵文新, 尹丽, 刘媛, 叶少锋, 覃宝勤, 宋梁栋, 2020. 2019年草地贪夜蛾灯诱监测应用效果. 植物保护, 46(3): 118–122.]
- Jiao GH, Zeng J, Shang XM, Liu J, 2017. Comparative test of monitoring slime insects with high altitude and automatic insect situation monitoring lamps. *China Plant Protection*, 37(8): 41–44. [焦桂华, 曾娟, 尚秀梅, 刘杰, 2017. 高空测报灯与自动虫情测报灯监测黏虫的比较试验. 中国植保导刊, 37(8): 41–44.]
- Johnson SJ, 1987. Migration and the life history strategy of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* in the western hemisphere. *International Journal of Tropical Insect Science*, <https://doi.org/10.1017/S1742758400022591>.
- Li XJ, Wu MF, Ma J, Gao BY, Hu G, Wu QL, Chen AD, Liu J, Jiang YY, Zhai BP, Early R, Chapman JW, 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.
- Liu J, Jiang YY, Liu WC, Wu QL, Zeng J, Li XN, Ren BY, Jiang P, Zhao ZH, Wei QW, 2020. Overview of occurrence and control of *Spodoptera frugiperda* in 11 Asian countries. *China Plant Protection*, 40(2): 86–91. [刘杰, 姜玉英, 刘万才, 吴秋琳, 曾娟, 李潇楠, 任彬元, 姜培, 赵中华, 魏启文, 2020. 亚洲十一国草地贪夜蛾发生防控情况与对策概述. 中国植保导刊, 40(2): 86–91.]
- Liu J, Jiang YY, Liu WC, Zeng J, Li YH, Yang QP, 2019. Investigation and forecast techniques of *Spodoptera frugiperda*. *China Plant Protection*, 39(4): 44–47. [刘杰, 姜玉英, 刘万才, 李亚红, 曾娟, 杨清坡, 2019. 草地贪夜蛾测报调查技术初探. 中国植保导刊, 39(4): 44–47.]
- Overton K, Maino J, Day R, Umina P, Bett B, Carnovale D, Ekesi S, Meagher R, Reynolds O, 2021. Global crop impacts, yield losses and action thresholds for fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*): Are view. *Crop Protection*, 145: 105641.
- Qi GJ, Zhong WD, Chen T, Shi QX, Chen J, Huang DC, Zhang ZF, 2022. Seasonal population dynamics and occurrence characteristic of the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in Guangdong province. *Journal of Environmental Entomology*, 44(4): 792–799. [齐国君, 钟文东, 陈婷, 石庆型, 陈洁, 黄德超, 张振飞, 2022. 广东省草地贪夜蛾种群周年动

- 态及发生特征. 环境昆虫学报, 44(4): 792-799.]
- Sparks AN, 1979. A review of the biology of the fall armyworm. *Florida Entomology*, 62(2): 82-87.
- Sun XX, Hu CX, Jia HR, Wu QL, Shen XJ, Zhao SY, Jiang YY, Wu KM, 2019. Case study of the first immigration of fall armyworm *Spodoptera frugiperda* invading into China. *Journal of Integrative Agriculture*, 20(3): 664-672.
- Tang JH, Lu H, Lv BQ, 2022. Dynamic monitoring and analysis of *Spodoptera frugiperda* trapped by searchlight in Hainan. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 42(1): 51-55. [唐继红, 卢辉, 吕宝乾, 2022. 海南草地贪夜蛾高空诱虫灯诱虫动态监测与分析. 热带农业科学, 42(1): 51-55.]
- Wolf WW, Westbrook JK, Raulston JR, Pair SD, Hobbs SE, 1990. Recent airborne radar observations of migrant pests in the United States. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 328(1251): 619-630.
- 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 PX, Wu FM, Fan JY, Zhang RZ, 2021. Potential economic impact of invasive fall armyworm on mainly affected crops in China. *Journal of Pest Science*, 94(4): 1065-1073.
- Yang JQ, Wang WY, Hu BS, 2020. Present situation and measures of corn industry development in Yuanjiang county, Yunnan province. *Agriculture Engineering Technology*, 40(14): 18. [杨菊琼, 王文英, 胡百生, 2020. 云南元江县玉米产业发展现状与措施. 农业工程技术, 40(14): 18.]
- Yang XL, Liu YC, Luo MZ, Li Y, Wang WH, Wang F, Jiang H, 2019. Fall armyworm was firstly detected in Jiangcheng county, Yunnan, China. *Yunnan Agriculture*, 2019(1): 72. [杨学礼, 刘永昌, 罗茗钟, 李依, 王文辉, 万飞, 姜虹, 2019. 云南省江城首次发现迁入我国西南地区的草地贪夜蛾. 云南农业, 2019(1): 72.]
- Ye H, Li YP, Feng D, Xu QY, 2021. Ecological effects of river valley topography on the migration of *Spodoptera frugiperda*. *Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition)*, 44(1): 188-194. [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.]
- Zhao XQ, Zhang HM, Liu Y, Yin YQ, Li XY, Chen SF, Chen AD, Shen YF, Li QY, Yang YJ, An ZY, Ma J, 2021. Distribution of *Spodoptera frugiperda* during winter to spring and the main influential factors analysis in Yunnan province. *Plant Protection*, 47(6): 223-230. [赵雪晴, 张红梅, 刘莹, 尹艳琼, 李向永, 陈福寿, 谌爱东, 沈云峰, 李秋阳, 杨毅娟, 安智燕, 马娇, 2021. 云南草地贪夜蛾冬春季虫源分布及其主要影响因素分析. 植物保护, 47(6): 223-230.]
- Zhou Y, Wu QL, Zhang HW, Wu KM, 2021. Spread of invasive migratory pest *Spodoptera frugiperda* and management practices throughout China. *Journal of Integrative Agriculture*, 20(3): 637-645.