

DOI: 10.20103/j.stxb.202503140580

邱荣洲, 陈韶萍, 陈宏, 黄月英, 池美香, 何玉仙, 翁启勇, 赵健. 福建省草地贪夜蛾秋季迁入虫源地分布及迁飞路径. 生态学报, 2025, 45(22):

Qiu R Z, Chen S P, Chen H, Huang Y Y, Chi M X, He Y X, Weng Q Y, Zhao J. Autumn migration path and source areas of fall armyworm *Spodoptera frugiperda* in Fujian Province. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(22): - .

福建省草地贪夜蛾秋季迁入虫源地分布及迁飞路径

邱荣洲^{1,4}, 陈韶萍^{1,4}, 陈宏^{2,4}, 黄月英³, 池美香^{1,4}, 何玉仙^{1,4}, 翁启勇⁴, 赵健^{2,4,*}

1 福建省农业科学院植物保护研究所, 福建省作物有害生物监测与治理重点实验室, 福州 350013

2 福建省农业科学院数字农业研究所, 福州 350003

3 福建省植保植检总站, 福州 350003

4 福建省农业科学院, 国家农业生物安全科学中心华东分中心, 福州 350003

摘要:本研究基于 2019—2022 年福建省南平、漳州草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 性诱智能监测点实测数据, 采用 HYSPLIT 轨迹模型反演迁飞路径, 结合 GrADS 软件解析迁飞期高空风场气象数据, 明确福建省草地贪夜蛾秋季迁入虫源地分布及其迁飞路径。结果表明, 迁飞过渡区南平监测点的迁入期在 9 月下旬—10 月中旬, 主要从浙江中北部、东部经西南部迁入福建北部地区; 周年繁殖区漳州监测点的主迁入期在 10 月上旬—11 月, 从江苏南部、浙江东部经福建东部迁入福建南部地区。福建省草地贪夜蛾秋季迁飞轨迹主要分东西两条迁飞路线迁入福建, 整体表现为由东北向西南, 迁入虫源地主要来自浙江省, 少部分来自江苏南部、上海西部。

关键词:草地贪夜蛾; 迁飞; 虫源分析; 智能监测设备; 性诱; 福建省

Autumn migration path and source areas of fall armyworm *Spodoptera frugiperda* in Fujian Province

QIU Rongzhou^{1,4}, CHEN Shaoping^{1,4}, CHEN Hong^{2,4}, HUANG Yueying³, CHI Meixiang^{1,4}, HE Yuxian^{1,4}, WENG Qiyong⁴, ZHAO Jian^{2,4,*}

1 Fujian Key Laboratory for Monitoring and Integrated Management of Crop Pests, Institute of Plant Protection, Fujian Academy of Agricultural Sciences, East China Branch of the National Center for Agricultural Biosafety Science, Fuzhou 350013, China

2 Institute of Digital Agriculture, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350003, China

3 Fujian Station of Plant Protection and Quarantine, Fuzhou 350003, China

4 East China Branch of the National Center for Agricultural Biosafety Science, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350003, China

Abstract: This study utilized field monitoring data collected from sex pheromone-based intelligent traps for *Spodoptera frugiperda* in Nanping and Zhangzhou, Fujian Province, during 2019—2022. The HYSPLIT trajectory model was employed to reconstruct migration pathways, while upper-level wind field meteorological data during migration periods were analyzed using GrADS software to identify the source regions and migratory routes of fall armyworm populations invading Fujian in autumn. The results demonstrated that in the transitional migration zone (Nanping), the primary immigration period occurred from late September to mid-October, with moths mainly migrating from central-northern and eastern Zhejiang into northern Fujian via the southwestern route. In the year-round breeding zone (Zhangzhou), the primary immigration period was from early-October to November, with moths entering southern Fujian from southern Jiangsu and eastern Zhejiang

基金项目:福建省自然科学基金(2022J01458); 福建省属公益类科研院所专项(2023R1022004); 福建省“5511”协同创新工程(XTCXGC2021011, XTCXGC2021017)

收稿日期:2025-03-14; **网络出版日期:**2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaojian@faas.cn

through eastern Fujian. Overall, two migration routes (eastern and western pathways) were identified, collectively displaying a northeast-to-southwest directional pattern. The main source region was Zhejiang Province, with minor contributions from southern Jiangsu and western Shanghai.

Key Words: *Spodoptera frugiperda*; migration; trajectory simulation; intelligent monitoring devices; sex pheromone; Fujian Province

草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 原产美洲^[1], 是一种重大的迁飞性农业入侵害虫, 可危害玉米、甘蔗、高粱等作物, 在适宜气象条件下可借助大气环流跨区域迁飞, 形成大爆发^[2]。2016 年 1 月入侵非洲西海岸的尼日利亚和加纳^[3], 随后 2 年时间便在撒哈拉以南的 40 多个非洲国家快速扩张^[4]。2018 年 7 月入侵也门和印度, 随后蔓延至孟加拉、缅甸、泰国、老挝、越南等亚洲国家^[4]。2019 年 1 月, 草地贪夜蛾侵入我国云南, 随后呈东、西两条迁飞路径迅速向北扩散分布^[5-6], 其中东线迁飞路径源于泰国、老挝和越南, 经黄淮海地区进入我国东北; 西线则始于缅甸和云南, 经由四川、贵州、陕西等地侵入黄河流域和黄淮海地区。草地贪夜蛾已在我国南方的热带、亚热带地区完成了定殖过程^[7], 并形成了迁飞扩散虫源地, 对我国玉米生产构成极大威胁, 于 2020 年 9 月被农业农村部列入一类农作物病虫害名录, 是我国重点防控的害虫。

福建地势依山傍海, 境内多山地、丘陵, 在西部和中部形成北(北)东向斜贯全省的闽西大山带和闽中大山带, 由于受海洋和地形地势的双重影响, 造就了其自成体系的昆虫迁飞环境。据 2024 年福建统计年鉴 (<https://tjj.fujian.gov.cn/tongjiniannian/dz2024/indexch.htm>), 2023 年玉米种植面积约为 3.6 万 hm^2 。福建省于 2019 年 5 月 6 日在南安市首次发现草地贪夜蛾, 随后全省多地陆续发现, 当年共有 53 个县(市、区)发生草地贪夜蛾, 累计发生面积达 646.23 hm^2 ^[8]。福建气候温暖湿润, 农业复种指数高, 是我国稻飞虱、斜纹夜蛾等季节性迁飞性害虫南北往返迁飞的重要通道^[9-11], 也是我国草地贪夜蛾春夏季北迁东线的虫源地之一^[5, 12]。因此, 明确草地贪夜蛾在福建省的迁入路径和虫源地, 对于福建本省乃至全国性的草地贪夜蛾迁飞及综合防控研究具有重要参考意义。目前国内外学者主要通过高空测报灯、黑光灯、性信息素或昆虫雷达监测草地贪夜蛾种群动态, 结合轨迹分析方法研究其远距离迁飞过程^[13-15]。

本研究根据 2019—2022 年福建省南平、漳州草地贪夜蛾性诱智能监测点获得的 9 月—11 月成虫种群动态, 利用气象再分析数据 (final operational global analysis, FNL)、拉格朗日混合单粒子轨道模型 (HYSPLIT)、ArcGIS 和 GrADS 软件, 模拟草地贪夜蛾秋季迁入福建省的迁飞路径, 分析迁入虫源地分布, 以期为福建省草地贪夜蛾的前期迁入监测与防控提供科学依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料

供试害虫智能监测设备(光电传感型): 基于光电传感的害虫智能监测设备由福建省农业科学院植物保护研究所提供(图 1), 主要由害虫诱杀计数器、温湿度采集单元、数据传输单元、太阳能供电组件、数据查询软件等部件组成, 其工作原理是草地贪夜蛾通过性信息素引诱进入诱捕器触到高压电网被击落, 自由落体穿过红外传感器掉入集虫罐, 红外光幕感应触发计数系统计数, 数据传输单元将采集的计数结果通过 GPRS 通信模块实时发送到云服务器^[16]。设备性引诱剂为橡皮塞型诱芯, 由漳州英格尔农业科技有限公司生产。

供试害虫智能监测设备(机器视觉型): 基于机器视觉和图像识别的害虫智能监测设备由福建省农业科学院植物保护研究所提供(图 1), 主要由害虫诱捕单元、拍摄单元、温湿度采集单元、多功能控制终端、太阳能供应组件、数据查询软件等组成, 其工作原理是利用性信息素引诱草地贪夜蛾进入诱捕器, 通过双漏斗防返爬回结构, 掉入拍摄单元的白色背景集虫板, 多功能控制终端定时采集集虫板上诱捕到的昆虫图像, 并通过 4G 无线网络上传到云端 AI 识别计数引擎, 实现害虫图像自动采集、传输与智能识别计数。设备性引诱剂为毛细

管型诱芯,由北京中捷四方生物科技股份有限公司生产。



图1 害虫智能监测设备田间实物图

Fig.1 Field picture of intelligent pest monitoring equipment

供试气象数据:全球再分析数据,来源于美国国家环境预报中心(National Centers for Environment Prediction, NCEP)和美国国家大气研究中心(The National Centers for Atmospheric Research, NCAR),空间分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$,时间分辨率为每 6 h 一次。

供试基础地理数据:1:100 万国家基础地理信息数据,来源于国家基础地理信息中心的全国地理信息资源目录服务系统(<http://www.webmap.cn>)。

供试气温数据:950 hPa 高空气温数据,来源于 Ventusky 气象数据(<https://www.ventusky.com/>)。

1.2 方法

1.2.1 福建省草地贪夜蛾秋季迁入时间分析

试验监测点在迁飞过渡区和周年繁殖区各设置 1 个,其中迁飞过渡区设置在福建省南平市建瓯市东峰镇桂林村($27^{\circ}5'N$, $118^{\circ}28'E$,海拔 125 m),周年繁殖区设置在漳州市长泰区长巷镇古农村($24^{\circ}42'N$, $117^{\circ}46'E$,海拔 35 m),周边农田秋季主要种植玉米。2019 年在试验点设置智能监测设备(光电传感型)各 1 台,设备诱捕器进虫口离地面高度 1.5 m;2020 年将两台设备改造为机器视觉型智能监测设备。虫情数据均由智能监测设备每日自动诱集计数获取,其中机器视觉型智能监测设备设置为每天中午 11:00 采集 1 次数据,每次采集后,设备自动清理虫体,当日记录的虫量为上一日 10:00 至当日 09:59 的诱虫量。

根据害虫智能监测设备获取的田间监测种群动态数据,找出 2019 至 2022 年 9—11 月草地贪夜蛾虫量突增的开始时间,结合草地贪夜蛾成虫日活动节律^[17]和监测点的高空气温数据,推测迁入时间。

1.2.2 福建省草地贪夜蛾秋季迁飞轨迹模拟

为模拟秋季福建省草地贪夜蛾的迁入轨迹,本研究采用拉格朗日混合单粒子轨道模型进行轨迹分析。该模型已成功应用于草地贪夜蛾、粘虫等夜蛾类昆虫迁飞与扩散的研究^[18-19]。模型中草地贪夜蛾生物学特性参数设定如下:(1)飞行时间。根据福建省 9 月至 11 月日出日落时间及草地贪夜蛾日活动节律^[17],设置起飞时刻为 18:00(BJT),降落时刻为次日 04:00(BJT),每晚飞行持续时间 10 h,可连续飞行 1—3 个夜晚^[5,20],并以降落时刻的轨迹终点作为次日起飞的起点。(2)飞行高度。根据雷达观测蛾类昆虫的飞行高度在低空急流 300—500 m 之间^[18],设定草地贪夜蛾飞行高度为距地面高度 300 m、400 m、500 m。(3)飞行速度。高度顺风迁移,风速视为飞行速度^[21-22]。(4)当监测点高空气温低于 $13.8^{\circ}C$,停止轨迹回推^[23]。(5)当模拟的落点为海面时,草地贪夜蛾无法降落或降落后无法再次起飞,轨迹停止计算。

将模拟的迁飞路径坐标导入 ArcGIS 软件中,绘制草地贪夜蛾迁飞轨迹。使用 ArcGIS 软件将有效迁飞轨迹与地图叠加后输出结果,分析福建省草地贪夜蛾秋季迁飞路径和虫源地。

1.2.3 草地贪夜蛾迁飞水平风场分析

基于 1.2.1 迁入时间推测结果,利用 GrADS 2.2 软件提取降落时间前 3 d 夜间(18:00 至次日 04:00)位于 24°N—34°N、114°E—128°E 区域内 950 hpa 高度层的风速和风向,绘制水平风场图。

1.2.4 迁飞路径分析

筛选出符合起飞点位置为陆地(玉米种植区),且根据水平风场图分析迁飞区域内 950 hpa 高度层的风速 ≥ 6 m/s 的路径为有效路径^[19],然后使用 ArcGIS 将 2019—2022 年迁飞轨迹数据进行叠加,并在同一背景地图中显示。

2 结果与分析

2.1 2019—2022 年福建省草地贪夜蛾秋季迁入时间分析

2019 年 9 月至 11 月田间监测结果发现,南平监测点光电计数型智能监测设备监测到 3 个成虫突增时间:9 月 20 日 18 时 28 分、10 月 16 日 01 时 05 分和 11 月 4 日 22 时 21 分;漳州监测点因设备故障原因,有效监测日期为 2019 年 10 月 9 日至 10 月 26 日,仅监测到 1 个成虫突增时间:10 月 15 日 18 时 30 分。结果显示,10 月 15 日晚(18:00 至次日 4:00),南平监测点和漳州监测点均出现了成虫突增。

2020—2021 年 9 月至 11 月,南平监测点机器视觉智能监测设备因设备故障,2020—2021 年出现数据缺失,2022 年共监测到 3 个成虫突增时间:9 月 20 日、9 月 24 日、10 月 18 日;漳州监测点共监测到 9 个成虫突增时间:2020 年 10 月 8 日、10 月 27 日、11 月 5 日、2021 年 10 月 4 日、10 月 12 日、11 月 27 日、2022 年 9 月 20 日、9 月 24 日、10 月 6 日、10 月 10 日。结果显示,2022 年 9 月 24 日,两个监测点同时出现了成虫突增。

根据草地贪夜蛾的活动时间一般在 18:00—次日 4:00^[17]这一成虫日活动节律进行迁飞降落时间推算,突增时间在 18:00—23:59 区间的降落时间为当日 4:00;突增时间在 0:00—18:00 区间的降落时间为上一日的 4:00。迁入降落时间推测结果如下表 1 示。

表 1 草地贪夜蛾迁入降落时间推测

Table 1 Prediction of the arrival and landing time of *Spodoptera frugiperda*

年份 Year	监测地点 Monitoring site	设备类型 Device type	高峰日 Peak day	高峰日诱蛾量/头 Number of moths caught on the peak day	成虫数量突增起始时间 The onset of the sudden increase in moth population	推测降落时间 Estimation of moth landing time	温度/℃ * Temperature
2019	南平市	光电传感	9 月 20 日	33	9 月 20 日 18:28	9 月 20 日 04:00	18
	南平市	光电传感	10 月 17 日	57	10 月 16 日 1:05	10 月 15 日 04:00	15
	南平市	光电传感	11 月 5 日	16	11 月 4 日 22:21	11 月 4 日 04:00	15
	漳州市	光电传感	10 月 15 日	61	10 月 15 日 18:30	10 月 15 日 04:00	19
2020	南平市	机器视觉	/	/	/	/	/
	漳州市	机器视觉	10 月 9 日	113	10 月 8 日 10:00	10 月 7 日 04:00	20
	漳州市	机器视觉	10 月 28 日	14	10 月 27 日 10:00	10 月 26 日 04:00	18
	漳州市	机器视觉	11 月 5 日	11	11 月 5 日 10:00	11 月 4 日 04:00	14
2021	南平市	机器视觉	/	/	/	/	/
	漳州市	机器视觉	10 月 4 日	10	10 月 4 日 10:00	10 月 3 日 04:00	22
	漳州市	机器视觉	10 月 12 日	11	10 月 12 日 10:00	10 月 11 日 04:00	25
	漳州市	机器视觉	11 月 27 日	42	11 月 27 日 10:00	11 月 26 日 04:00	15
2022	南平市	机器视觉	9 月 21 日	17	9 月 20 日 10:00	9 月 19 日 04:00	24
	南平市	机器视觉	9 月 26 日	10	9 月 24 日 10:00	9 月 23 日 04:00	24
	南平市	机器视觉	10 月 18 日	9	10 月 18 日 10:00	10 月 17 日 04:00	18
	漳州市	机器视觉	9 月 25 日	28	9 月 24 日 10:00	9 月 23 日 04:00	21
	漳州市	机器视觉	10 月 6 日	10	10 月 6 日 10:00	10 月 5 日 04:00	23
	漳州市	机器视觉	10 月 10 日	34	10 月 10 日 10:00	10 月 9 日 04:00	20
	漳州市	机器视觉	10 月 10 日	34	10 月 10 日 10:00	10 月 9 日 04:00	20

* 表示监测点推测降落日 5:00 时刻 950pa 高空的气温;/表示设备异常,没有相关数据

2.2 2019—2022 年福建省草地贪夜蛾迁飞水平风场分析

2019 年秋季,在南平、漳州监测点诱集到的草地贪夜蛾出现突增前 3 d 的 9 月 17—19 日、10 月 12—14 日、11 月 1—3 日夜间均盛行偏北风(图 2)。9 月 17 日晚 950 hpa 高度上,江苏省南部、上海市大部、浙江省北部的偏北风速在 8 m/s 以上(图 2),有利于草地贪夜蛾向南迁飞;9 月 18 日、19 日晚,浙江省西南部盛行偏北风,风速在 6 m/s 以上,为浙江虫源迁飞至福建北部提供了运载气流(图 2)。10 月 12 日、13 日晚,浙江省盛行由太平洋而来的东北风,北部风速在 6 m/s 以上,14 日晚,经由浙江省北部、西南部进入福建北部,或经由浙江省东部进入福建省东北部及南部,这两股风向均为迁入福建的草地贪夜蛾提供了运载气流(图 2)。11 月 2 日、3 日晚,浙江省西南部、福建省北部的风速在 4 m/s 以下(图 2),不具备草地贪夜蛾远距离迁飞的风场条件要求^[15],推测 11 月 4 日的突增虫量为本地虫源。

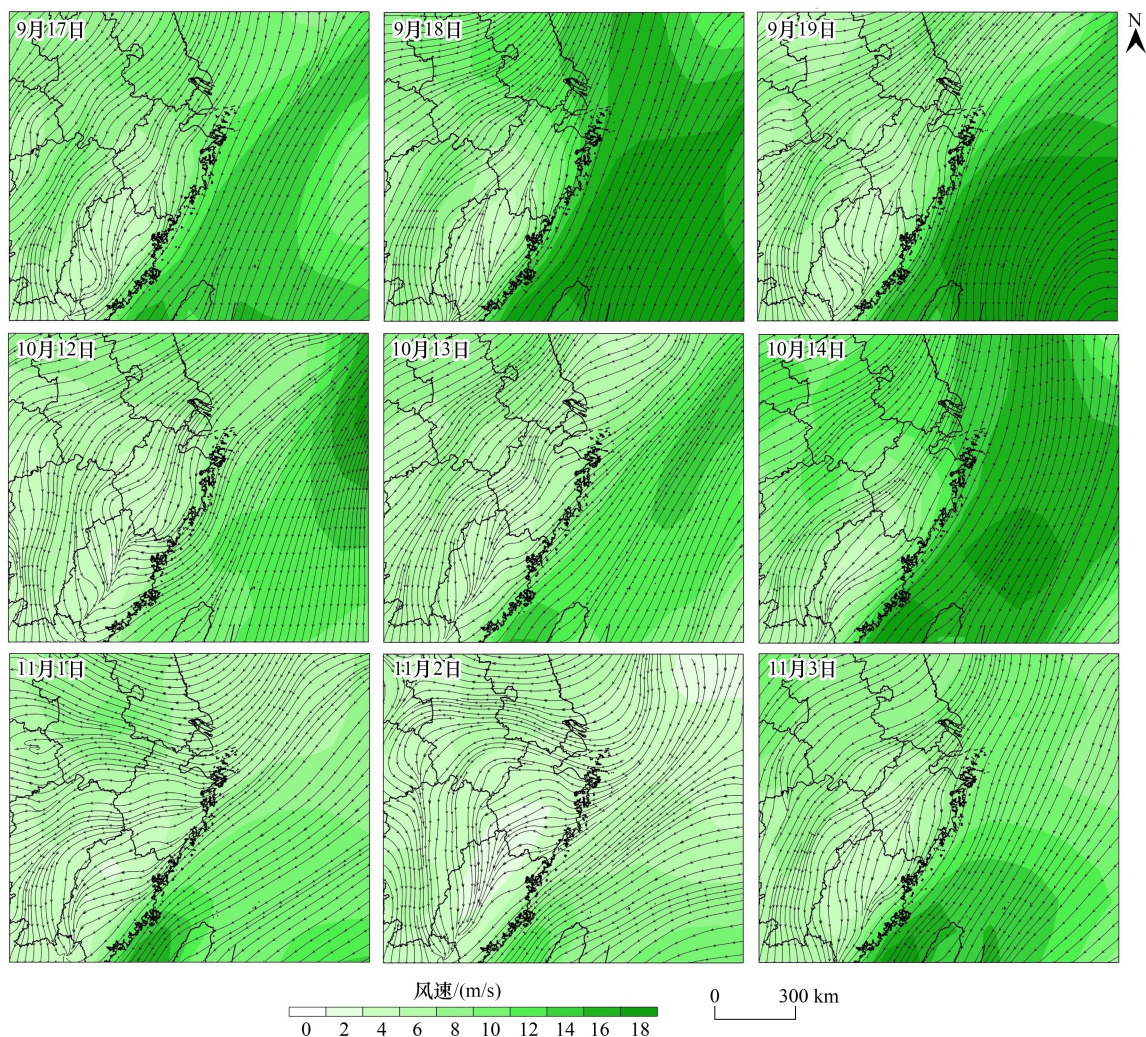


图 2 福建省 2019 年草地贪夜蛾秋季迁入期 950 hpa 水平的平均风场

Fig.2 The average wind field at 950 hpa level during autumn migration of *Spodoptera frugiperda* in Fujian Province in 2019

2020 年秋季,在漳州监测点诱集到的草地贪夜蛾出现突增前 3 d 的 10 月 4—6 日、23—25 日、11 月 1—3 日夜间主要盛行偏北风(图 3)。10 月 4 日晚,浙江省东北部风速在 12 m/s 以上(图 3),有利于草地贪夜蛾向南迁飞;5 日、6 日晚,浙江省东部沿海风速在 10 m/s 以上,为浙江东部虫源迁飞至福建东部及南部提供了运载气流(图 3)。10 月 24 日、25 日晚,福建省东南部盛行由太平洋洋面而来的东北风(图 3),不具备草地贪夜蛾迁飞虫源地为农作物种植区的要求,推测 10 月 27 日的突增虫量为本地虫源。11 月 1 日晚,江苏省南部风

速在 4 m/s 以下(图 3), 不具备草地贪夜蛾远距离迁飞的风场条件要求, 2 日、3 日晚, 浙江省东北部、东南部及福建东部风速在 6 m/s 以上, 为浙江东北部虫源迁飞至福建东部及南部提供了运载气流(图 3)。

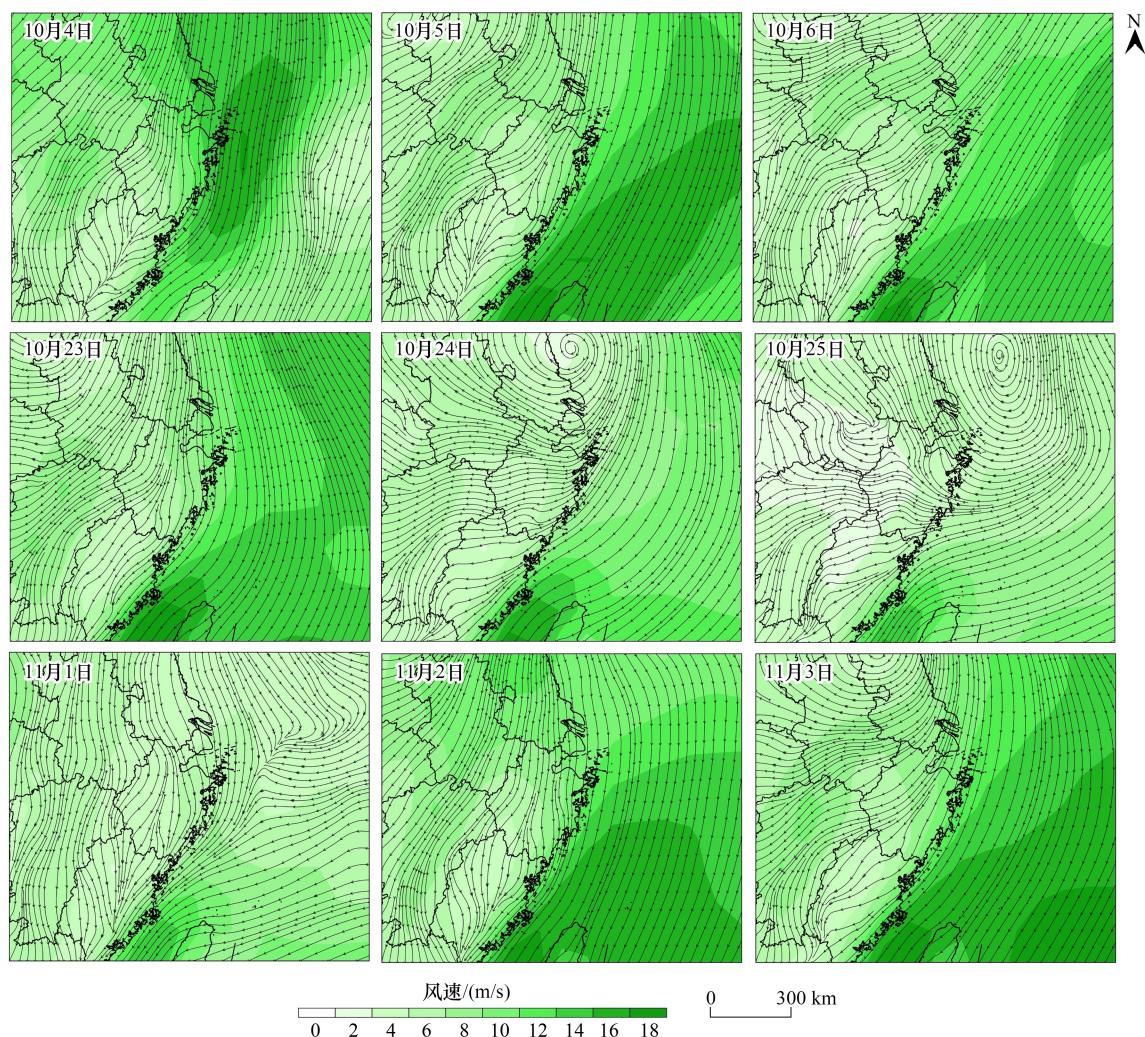


图 3 福建省 2020 年草地贪夜蛾秋季迁入期 950 hpa 水平的平均风场

Fig.3 The average wind field at 950 hpa level during autumn migration of *Spodoptera frugiperda* in Fujian Province in 2020

2021 年秋季, 在漳州监测点诱集到的草地贪夜蛾出现突增前 3 d 的 9 月 30 日—10 月 2 日、10 月 8—10 日夜间主要盛行由太平洋洋面而来的东北风(图 4), 不具备草地贪夜蛾迁飞虫源地为农作物种植区的要求, 推测 10 月 4 日、12 日的突增虫量为本地虫源。11 月 23—24 日夜间浙江南部、福建北部风速在 4 m/s 以下(图 4), 不具备草地贪夜蛾远距离迁飞的风场条件要求, 25 日晚福建东北部盛行东北风, 风速在 6 m/s 以上, 为福建东北部虫源迁飞至福建南部提供了运载气流(图 4)。

2022 年秋季, 在南平监测点诱集到的草地贪夜蛾出现突增前 3 d 的 9 月 16—18 日、20—22 日、10 月 14—16 日夜间, 主要盛行偏北风(图 5)。9 月 17 日、18 日、21 日、22 日晚, 浙江省西南部风速在 4 m/s 以下(图 5), 不具备草地贪夜蛾远距离迁飞的风场条件要求, 推测 9 月 20 日、24 日的突增虫量为本地虫源; 10 月 14—16 日晚, 浙江省东北部(14 日)、中部(15 日)、西南部(16 日)风速在 6 m/s 以上, 为浙江东北部、中部、西南部的虫源迁飞至福建北部提供了运载气流(图 5)。在漳州监测点诱集到的草地贪夜蛾出现突增前 3 d 的 9 月 20—22 日、10 月 2—4 日、10 月 6—8 日夜间, 主要盛行偏北风, 小部分则为从太平洋而来的东南风(图 5)。9 月 20—22 日、10 月 2—4 日晚, 漳州监测点盛行由太平洋洋面而来的东南风或东北风(图 5), 不具备草地贪夜

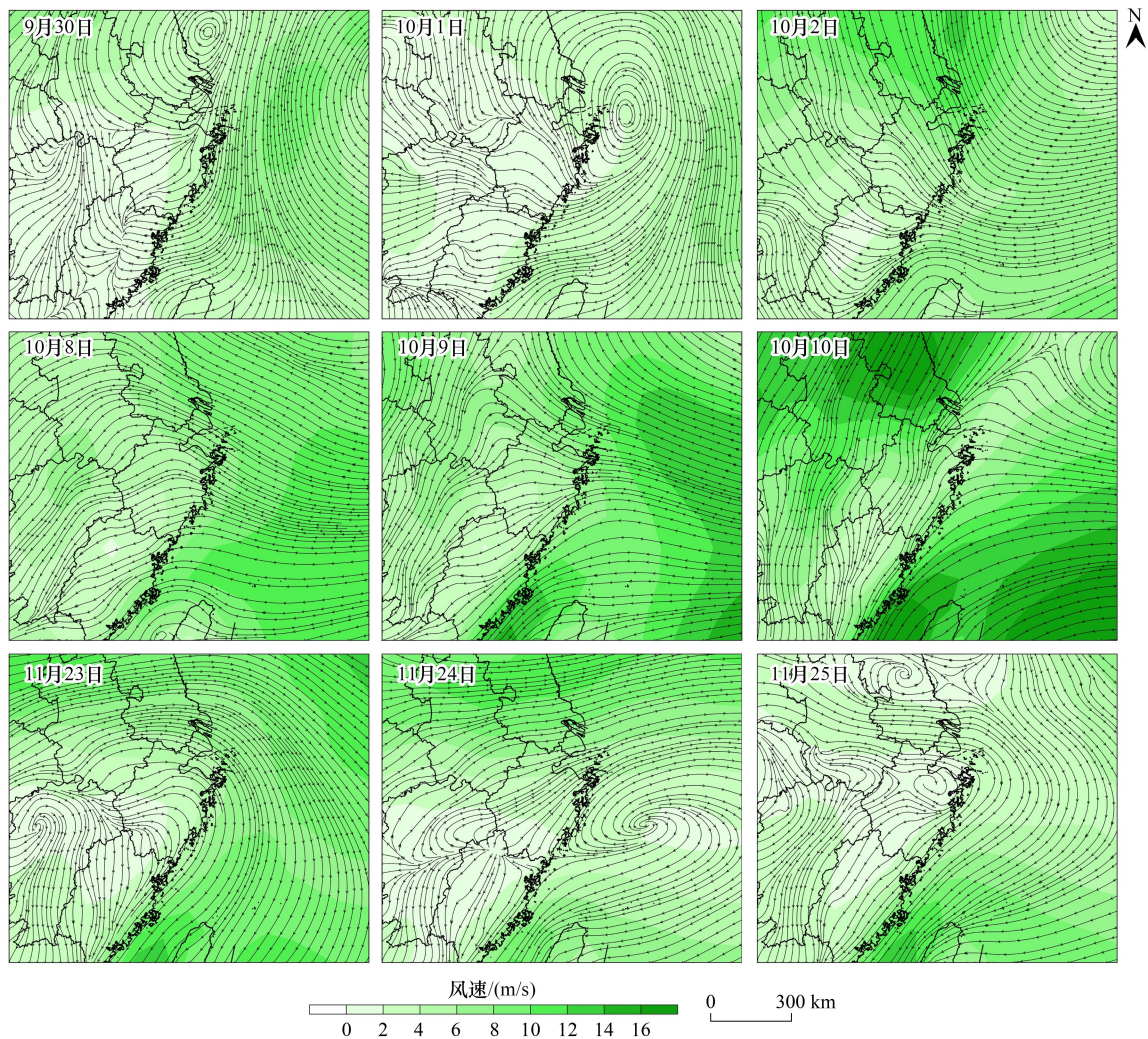


图4 福建省2021年草地贪夜蛾秋季迁入期950 hpa水平的平均风场

Fig.4 The average wind field at 950 hpa level during autumn migration of *Spodoptera frugiperda* in Fujian Province in 2021

蛾迁飞虫源地为农作物种植区的要求,推测9月24日、10月6日的突增虫量为本地虫源;10月6—8日晚,主要盛行由太平洋洋面而来经福建省东部沿海的东北风,风速在6 m/s以上(图5),为福建省东北部虫源迁飞至福建南部提供了运载气流;小部分则为从浙江省西南部、江西省东北部途经福建省北部或中西部的西北风,风速在4 m/s以下(图5),不具备草地贪夜蛾远距离迁飞的风场条件要求,推测10日的突增虫量为福建省本地虫源。

2.3 2019—2022年福建省草地贪夜蛾秋季迁飞轨迹模拟

2019年,9月20日南平监测点草地贪夜蛾迁入回推轨迹显示,第1晚的落点位于浙江省西南部,第2晚落点位于浙江省北部,而第3晚落点位于海面上,为无效轨迹,推测本次迁入的虫源可能主要来源于浙江省北部(图6),连续迁飞2晚。10月15日南平监测点和漳州监测点同时出现迁入虫源,其中南平监测点迁入回推轨迹显示,第1晚、第2晚和第3晚落点均位于浙江省;漳州监测点迁入回推轨迹显示,草地贪夜蛾在300—500 m高度上的轨迹趋势相同,其中第2晚在400 m高度上轨迹落点位于海面上,为无效轨迹,推测本次迁入的虫源主要来源于浙江省东部(图6),连续迁飞2晚或3晚,飞行高度300 m或500 m。11月4日迁入回推轨迹显示,第1晚、第2晚和第3晚落点均位于浙江省中部(图6)。

2020年,10月7日漳州监测点草地贪夜蛾迁入回推轨迹显示,第1晚的落点位于福建省中部,第2晚在

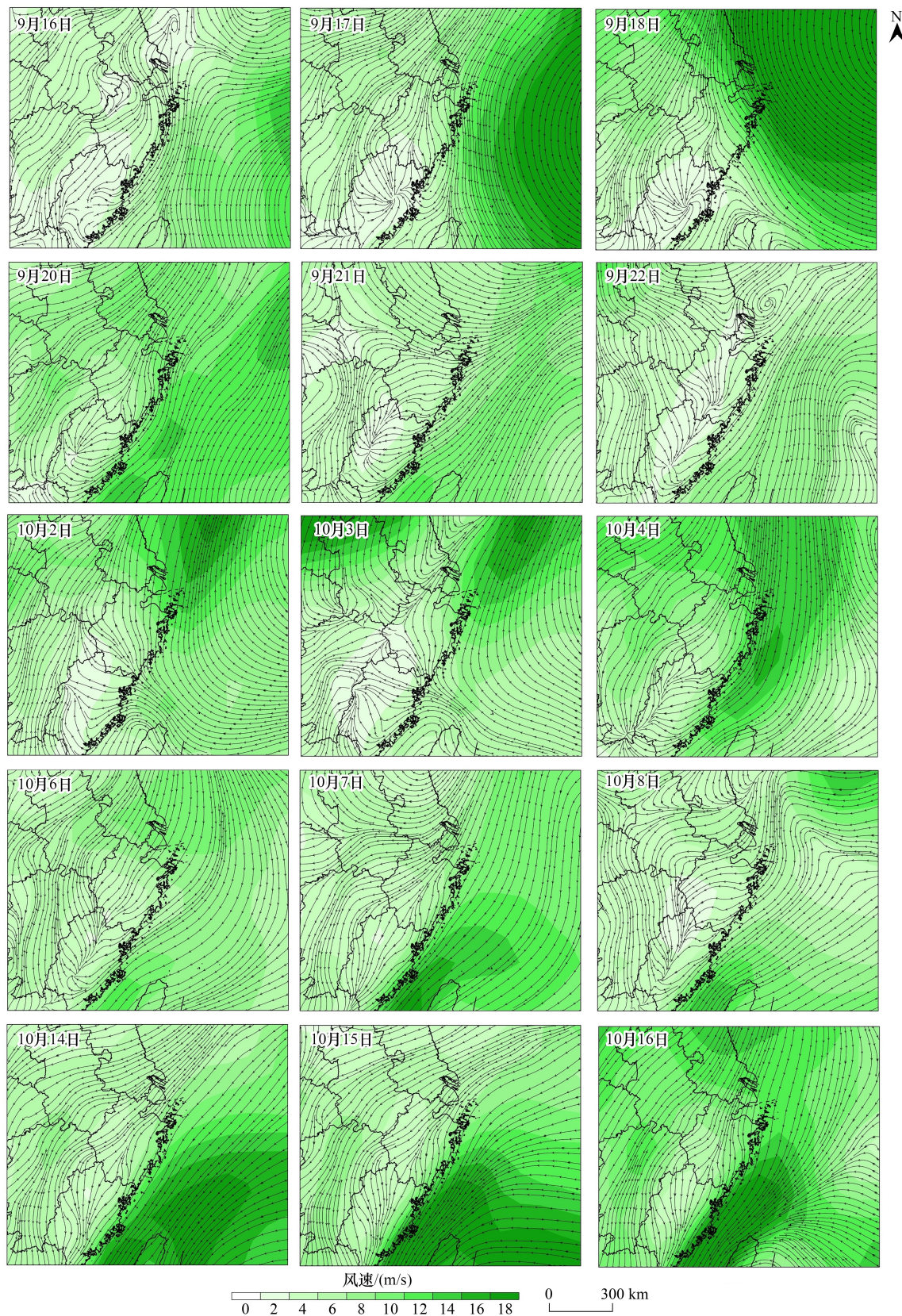


图 5 福建省 2022 年草地贪夜蛾秋季迁入期 950 hpa 水平的平均风场

Fig.5 The average wind field at 950 hpa level during autumn migration of *Spodoptera frugiperda* in Fujian Province in 2022

300 m 高度上轨迹落点位于福建省北部,400 m、500 m 高度上轨迹落点位于浙江省南部,第3晚在300 m 高度上轨迹落点位于浙江省东部,而400 m、500 m 高度上轨迹落点位于海面上,为无效轨迹,推测本次迁入的虫源主要来源于浙江省东部、南部(图6)。10月26日迁入回推轨迹显示,第1晚的落点位于福建省中部,而第2晚落点位于海面上,为无效轨迹(图6)。11月5日迁入回推轨迹显示,第1晚在300 m、400 m 高度上轨迹落点位于福建省北部,而500 m 高度上落点位于海面上,为无效轨迹,第2晚的落点位于浙江省中北部,第3晚的落点位于江苏南部,推测本次迁入的虫源来源于江苏南部(图6),连续迁飞3晚,飞行高度300 m 或400 m。

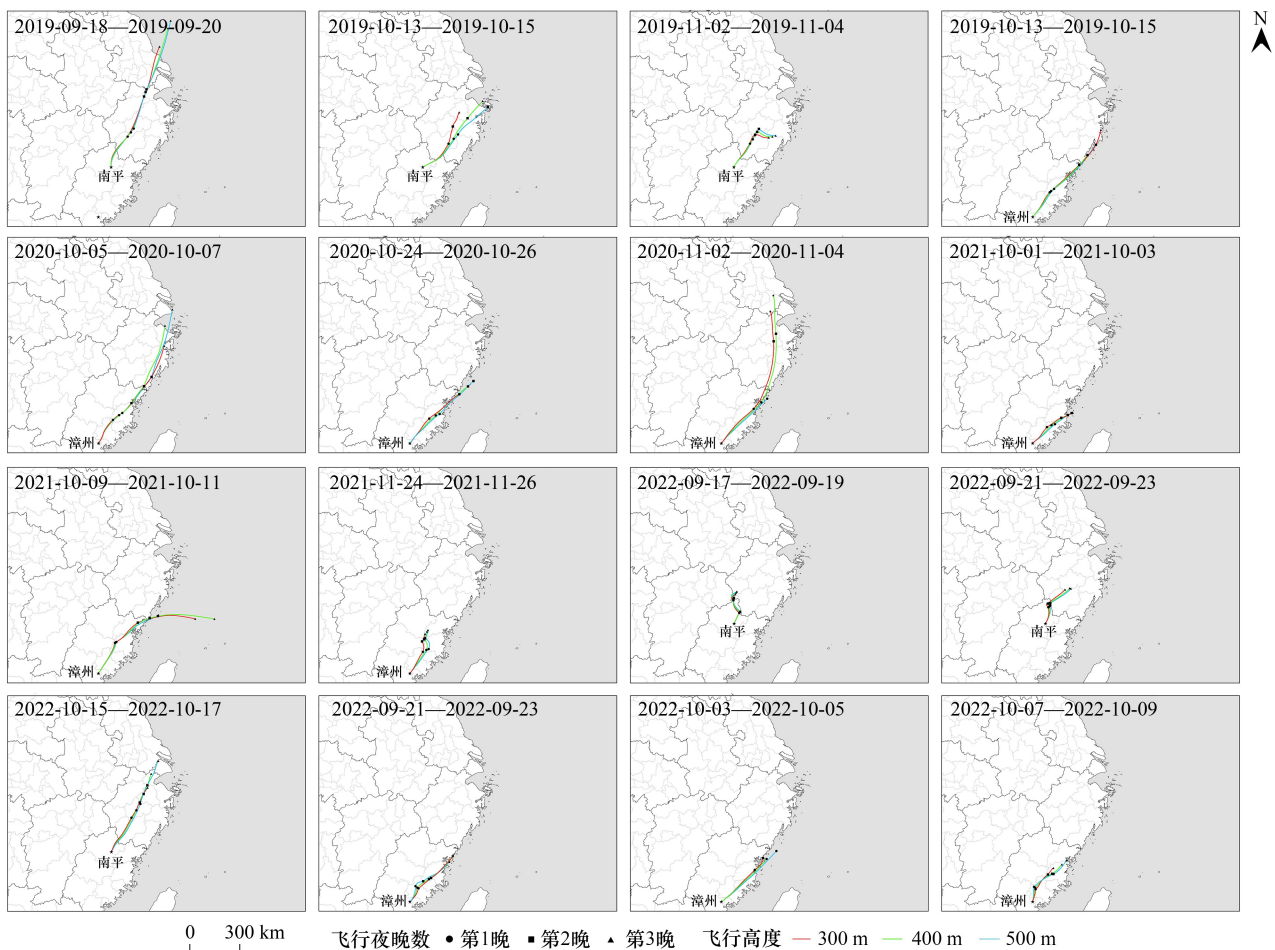


图6 福建省2019—2022年草地贪夜蛾秋季不同迁入时间回推轨迹

Fig.6. Push-back tracks of *Spodoptera frugiperda* at different migration times in autumn from 2019 to 2022 in Fujian Province

2021年,10月3日漳州监测点草地贪夜蛾迁入回推轨迹显示,第1晚的落点位于福建省中部,第2晚在300 m 高度上落点位于福建省中东部,而400 m、500 m 高度上落点位于海面上,为无效轨迹(图6)。10月11日迁入回推轨迹显示,第1晚的落点位于福建省中部,第2晚300 m 高度上落点位于福建省北部,400 m 高度上落点位于浙江省南部,而500 m 高度上落点位于海面上,为无效轨迹,第3晚300 m、400 m 高度上落点位于海面上,为无效轨迹(图6)。11月26日迁入回推轨迹显示,第1晚、第2晚和第3晚落点均位于福建省中部(图6)。

2022年,9月19日南平监测点草地贪夜蛾迁入回推轨迹显示,第1晚、第2晚落点位于福建省北部,第3晚落点位于浙江省西南部(图6)。9月23日南平监测点和漳州监测点同时出现迁入虫源,其中建瓯监测点迁入回推轨迹显示,第1晚、第2晚落点位于福建省北部,第3晚落点位于浙江省中部(图6);漳州监测点迁入回推轨迹显示,第1晚、第2晚落点位于福建省中部,第3晚落点位于福建省东部沿海(图6)。10月5日漳

州监测点迁入回推轨迹显示,第1晚300 m高度落点位于福建省中部沿海,而400 m、500 m高度落点位于海面上,第2晚300 m高度落点也位于海面上,为无效轨迹(图6)。10月9日漳州监测点迁入回推轨迹显示,第1晚落点位于福建省南部,第2晚落点位于福建省中部,第3晚落点位于福建省北部(图6)。10月17日南平监测点迁入回推轨迹显示,第1晚落点位于浙江省中部,第2晚落点位于浙江省北部,第3晚在300 m、400 m高度落点位于浙江省北部,500 m高度位于上海市西部(图6)。

2.4 2019—2022年福建省迁飞路径分析

从漳州、南平2个智能监测点的2019—2022年秋季迁飞轨迹模拟分析结果看,草地贪夜蛾在福建省的迁飞路径为东北—西南走向,分东线(沿海)和西线(山区)2条路径,东线主要为来自浙江省东部,少部分来自浙江省北部、江苏省南部的草地贪夜蛾随气流途径福建东部玉米种植区,随后迁入福建省闽南地区;西线主要为来自浙江省中部、北部,少部分可能来自江苏省南部、上海市西部的草地贪夜蛾途径浙江省西南部玉米种植区,随后迁入福建省闽北地区(图7)。

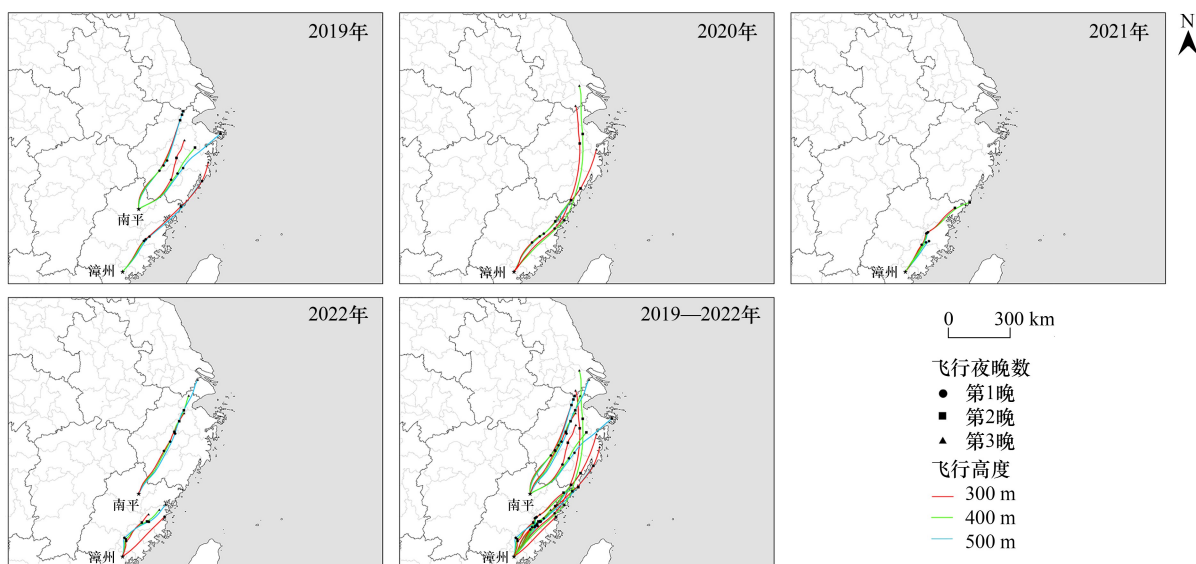


图7 福建省2019—2022年草地贪夜蛾秋季回迁迁飞路径

Fig.7 Migratory flight path of *Spodoptera frugiperda* from 2019 to 2022 in Fujian Province

3 讨论

草地贪夜蛾在我国的迁飞过程受东亚季风环流影响,形成了季节性北迁南返迁飞格局^[6,24–26]。秋季来临,副热带高压减弱东退,华东地区逐步转为东北气流控制,迁飞性昆虫随着气流往南回迁^[27]。本研究首次利用性诱智能设备的监测数据在中小尺度上分析了草地贪夜蛾秋季南返迁入福建的迁飞过程,初步明确了迁入虫源地主要来自浙江省,少部分来自江苏南部、上海西部,迁飞轨迹主要通过东西两条迁飞路线迁入福建。东线主要从江苏南部、浙江东部经过1—3个夜晚迁入福建东部、南部地区;西线主要从浙江中北部、东部、西南部经过1—3个夜晚迁入福建北部地区。西线的草地贪夜蛾迁入时间及来源地与刘垚等^[28]模拟的福建稻区褐飞虱回迁过程一致。从虫源地来看,闽西北武夷山脉主峰黄冈山海拔高度2158 m,形成了天然的气候屏障,降低了江西省虫源迁入福建的风险,对昆虫迁飞具有显著阻隔作用。

草地贪夜蛾无滞育行为,不能在结冰的温带区存活,必须每年北迁南回以躲避不良环境^[14]。福建省为草地贪夜蛾冬季繁殖区^[25],也是重要的迁飞过渡区^[29]。害虫智能监测设备(福建省南平、漳州监测点)的监测结果显示,2019—2022年9至11月份间共出现16个草地贪夜蛾成虫蛾量突增时间。根据上节迁飞轨迹模拟结果,共有10个突增时间回推的迁飞轨迹为有效轨迹,迁入时间主要集中在10月上中旬(占比70%),其中,迁飞过渡区南平监测点的迁入期在9月下旬—10月中旬,周年繁殖区漳州监测点的主迁入期在10月上旬—

11 月。郭安红等^[30]研究认为,草地贪夜蛾从温带区到迁飞过渡区南回时间为 8 月下旬—9 月中旬,比本研究结果早 1 个月;从迁飞过渡区至周年繁殖区南回时间为 10 月下旬—11 月,与本研究结果一致。

基于 HYSPLIT 的迁飞轨迹分析方式是确定昆虫迁飞格局、迁飞过程常用方式,在迁飞性害虫的测报研究中得到广泛应用^[31]。目前还没有利用智能监测设备监测从北向南迁飞进入福建的草地贪夜蛾迁飞路径的报道,本研究利用 2019—2022 年四年的智能监测设备实测虫情数据,采用 HYSPLIT 模型进行轨迹分析,明确了福建省草地贪夜蛾秋季迁入虫源地分布,并基于全球再分析数据模拟预测了迁飞路径,但由于本研究只有两个监测点的数据,尚不足完全反映草地贪夜蛾在福建全省的发生动态和规律,有待今后更多监测点、更长时间的监测数据积累,以及更小空间尺度的轨迹分析,以达到精准测报目的。

参考文献 (References):

- [1] Sparks A N. A review of the biology of the fall armyworm. The Florida Entomologist, 1979, 62(2): 82.
- [2] Johnson S J. Migration and the life history strategy of the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* in the western hemisphere. International Journal of Tropical Insect Science, 1987, 8(4-5-6): 543-549.
- [3] Goergen G, Kumar P L, Sankung S B, Togola A, Tamò M. 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. PLoS One, 2016, 11(10): e0165632.
- [4] 刘杰,姜玉英,吴秋琳,赵胜园,李虎.我国草地贪夜蛾冬春季发生为害特点及下半年发生趋势分析.中国植保导刊,2019,39(7): 36-38.
- [5] Li X J, Wu M F, Ma J, Gao B Y, Wu Q L, Chen A D, Liu J, Jiang Y Y, Zhai B P, Early R, Chapman J W, Hu G. Prediction of migratory routes of the invasive fall armyworm in eastern China using a trajectory analytical approach. Pest Management Science, 2020, 76(2): 454-463.
- [6] 陈辉,武明飞,刘杰,湛爱东,姜玉英,胡高.我国草地贪夜蛾迁飞路径及其发生区划.植物保护学报,2020,47(4): 747-757.
- [7] 吴孔明.中国草地贪夜蛾的防控策略.植物保护,2020,46(2): 1-5.
- [8] 邱良妙,黄晓燕,杨秀娟,关瑞峰,刘其全,卢学松,刘必炮,何玉仙.福建省草地贪夜蛾入侵动态监测与药剂防治技术研究.福建农业学报,2019,34(12): 1426-1432.
- [9] 方帆,陈晓,陈玉托,陆明红,翟保平.粤北晚稻褐飞虱发生动态.应用昆虫学报,2015,52(4): 804-814.
- [10] 沈慧梅,孔丽萍,章霜红,张孝羲,翟保平.福建省白背飞虱前期迁入虫源分析.昆虫学报,2011,54(6): 701-713.
- [11] 周先涌.重要农业害虫的跨南海迁飞研究[D].重庆:西南大学,2023.
- [12] 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.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,2023,60(4): 1039-1051.
- [13] Wolf W W, Westbrook J K, Raulston J R, Pair S D, Lingren P D. Radar observations of orientation of noctuids migrating from corn fields in the Lower Rio Grande Valley. Southwestern Entomologist, 1995, 20(S): 45-61.
- [14] Westbrook J K, Nagoshi R N, Meagher R L, Fleischer S J, Jairam S. Modeling seasonal migration of fall armyworm moths. International Journal of Biometeorology, 2016, 60(2): 255-267.
- [15] 林培炯,张智,王旭龙,刘冬雪,胡高,张云慧.2019 年北京市延庆区草地贪夜蛾种群动态与虫源分析.植物保护学报,2020,47(4): 758-769.
- [16] 邱荣洲,赵健,池美香,梁勇,陈世雄,翁启勇.基于物联网的害虫智能监测系统设计与实现.福建农业学报,2020,35(2): 235-242.
- [17] 陈韶萍,赵健,何玉仙,翁启勇,黄美玲,池美香,梁勇,邱荣洲.基于性诱和物联网的草地贪夜蛾成虫种群动态智能化监测.植物保护,2022,48(4): 94-99.
- [18] 张云慧.东北与华北地区迁飞昆虫的垂直昆虫雷达监测与虫源分析[D].北京:中国农业科学院,2008.
- [19] 谭泗桥,王梓轩,何健璇,马智能,尹丽,张政兵,张永生.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,2024,51(1): 132-140.
- [20] Wang F Y, Yang F, Lu M H, Luo S Y, Zhai B P, Lim K S, McInerney C E, Hu G. Determining the migration duration of rice leaf folder (*Cnaphalocrocis medinalis* (Guenée)) moths using a trajectory analytical approach. Scientific Reports, 2017, 7: 39853.
- [21] Chapman J W, Bell J R, Burgin L E, Reynolds D R, Pettersson L B, Hill J K, Bonsall M B, Thomas J A. Seasonal migration to high latitudes results in major reproductive benefits in an insect. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2012, 109(37): 14924-14929.
- [22] Chapman J W, Nesbit R L, Burgin L E, Reynolds D R, Smith A D, Middleton D R, Hill J K. Flight orientation behaviors promote optimal migration trajectories in high-flying insects. Science, 2010, 327(5966): 682-685.
- [23] Hogg D B, Pitre H N, Anderson R E. Assessment of early-season phenology of the fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) in Mississippi. Environmental Entomology, 1982, 11(3): 705-710.
- [24] 陈辉,杨学礼,湛爱东,李永川,王德海,刘杰,胡高.我国最早发现为害草地贪夜蛾的入侵时间及其虫源分布.应用昆虫学报,2020,57(6): 1270-1278.
- [25] 姜玉英,刘杰,吴秋琳,次仁卓嘎,曾娟.我国草地贪夜蛾冬繁区和越冬区调查.植物保护,2021,47(1): 212-217.
- [26] Chen H, Wan G J, Li J C, Ma Y B, Reynolds D R, Dreyer D, Warrant E J, Chapman J W, Hu G. Adaptive migratory orientation of an invasive pest on a new continent. iScience, 2023, 26(12): 108281.
- [27] 赵圣菊.东亚地区低层大气环流季节性变化与粘虫远距离迁飞.生态学报,1981,1(4): 315-326.
- [28] 刘垚,包云轩,陆明红,刘万才.基于 WRF-Flexpart 的一次褐飞虱回迁过程模拟研究.生态学报,2017,37(13): 4466-4475.
- [29] 吴秋琳,姜玉英,胡高,吴孔明.中国热带和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,2019,45(3): 1-9.
- [30] 郭安红,王纯枝,邓环环,袁福香,何亮,张蕾.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,2022,33(5): 541-554.
- [31] 芦芳,翟保平,胡高.昆虫迁飞研究中的轨迹分析方法.应用昆虫学报,2013,50(3): 853-862.