

邓环环, 杨俊杰, 郭安红, 等. 草地贪夜蛾迁飞气象预报方法探索及应用[J]. 华中农业大学学报, 2024, 43(1): 70-78.
DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2024.01.008

草地贪夜蛾迁飞气象预报方法探索及应用

邓环环¹, 杨俊杰², 郭安红³, 王纯枝³, 谢家旭¹, 钟敏⁴, 郭广芬¹

1. 武汉区域气候中心, 武汉 430074; 2. 湖北省植物保护总站, 武汉 430071;
3. 国家气象中心, 北京 100081; 4. 武汉中心气象台, 武汉 430074

摘要 为了准确预报害虫的迁飞轨迹, 将天气预报技术应用于迁飞性害虫的预测预报, 基于天气预报平台, 利用欧洲中心中短期气象数值预报产品以及大气环流形势及低层风动力对草地贪夜蛾(*Spodoptera frugiperda*)的迁飞路径、迁入时间(包括首见日及高峰日)、落区等进行预报, 并基于2021年草地贪夜蛾迁飞的2次典型预报案, 分析2021年草地贪夜蛾春季北迁至湖北(首见日)以及秋季南迁回湖北(高峰日)的典型天气过程以及迁飞层气象要素场, 运用HYSPLIT轨迹模型模拟迁飞后向轨迹, 再利用草地贪夜蛾田间监测数据、测报灯监测数据以及迁飞轨迹对预报结论进行验证。结果显示, 2次典型预报案例的预报结论与草地贪夜蛾田间监测数据及测报灯监测数据以及轨迹模拟的情景吻合度较好, 草地贪夜蛾迁入时间、落区及路径预报基本正确。研究表明, 将天气预报技术应用于迁飞性害虫的预报具有实际可行性。

关键词 迁飞性害虫; 草地贪夜蛾; 数值预报; HYSPLIT模型; 迁飞轨迹; 落区

中图分类号 S433.4 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2024)01-0070-09

草地贪夜蛾(*Spodoptera frugiperda*)是联合国粮农组织全球预警的跨境迁飞性重大农业害虫, 具备食性杂、繁殖能力强、迁飞扩散快、危害重等特点^[1], 防控难度较大。草地贪夜蛾寄主植物广泛, 包括玉米、水稻、大麦、棉花、花生、高粱等75科330多种植物^[2]。玉米苗期受害后一般可减产10%~25%, 严重地块可造成毁种绝收; 且3龄以上草地贪夜蛾幼虫对多种化学农药以及部分转基因玉米有抗性^[2-4]。2019年1月, 草地贪夜蛾从东南亚首次迁飞入侵我国云南省, 且快速向我国江南、江淮地区扩散蔓延, 并进一步向北方地区扩散, 对我国粮食生产及粮食安全构成严重威胁^[5]。秦誉嘉等^[6]利用MaxEnt模型预测草地贪夜蛾在我国的潜在地理分布, 结果表明我国海南、云南、广西、广东、福建、浙江、江西、湖南、贵州、四川、重庆、湖北、安徽、江苏等省(市、区)需对草地贪夜蛾进行全年监测及防控。农业农村部为开展全国草地贪夜蛾防控工作, 将我国草地贪夜蛾发生区分为“三区四带”。湖北省处于草地贪夜蛾的迁飞过渡区以及长江流域监测防控带^[7-8]。

2010年以来, 科研工作者利用混合单粒子拉格

朗日积分轨迹模型(single-particle Lagrangian integrated trajectory model, HYSPLIT)对麦蚜^[9]、稻飞虱^[10-11]、粘虫^[12]、稻纵卷叶螟^[13]等迁飞性害虫的迁飞轨迹以及虫源地信息进行了模拟研究, 但研究文献非常少, 仅包云轩等^[10]在开展WRF-FLEXPART耦合模式与WRF-HYSPLIT耦合模式2种轨迹模型模拟褐飞虱轨迹的比较研究时, 进行过简单验证, 认为2种模式均可作为业务工具在迁飞性害虫测报中推广应用。研究人员利用WRF昆虫三维轨迹模型或HYSPLIT对广东、四川、浙江、山东等地2019—2020年草地贪夜蛾迁飞路径、气候背景场以及虫源地开展了研究, 结果表明西南气流为草地贪夜蛾的迁飞提供运载气流, 降雨和下沉气流为草地贪夜蛾的迫降提供条件^[14-17]。孙旭军等^[18]在分析河南省草地贪夜蛾迁入路径及虫源地时, 发现草地贪夜蛾可以从东线和西线2条路径迁入河南。但上述研究几乎没有详细资料进行验证。

对草地贪夜蛾迁飞过渡区过境虫源迁入时间、路径、落区以及与气象条件的关系开展研究, 对减轻当地危害, 以及全面监测草地贪夜蛾发生动态, 遏制

收稿日期: 2022-09-04

基金项目: 中国气象局创新发展专项(CXFZ2021Z060)

邓环环, E-mail: cbhgg@163.com

通信作者: 郭安红, E-mail: guoah@cma.gov.cn

草地贪夜蛾迁飞过渡区迁出虫口数量,减轻北方玉米主产区防控压力有非常重要的意义。利用草地贪夜蛾气象预报方法模型开展草地贪夜蛾的迁入时间(包括首见日及高峰日)、迁入路径、落区预报工作,并提前采取预防性措施具有较高应用价值。笔者在前人研究的基础上建立了草地贪夜蛾气象预报方法概念模型,分别于2021年5月14日、9月3日与湖北省植物保护总站联合发布了湖北省草地贪夜蛾预警简报,并对2021年湖北省各县市草地贪夜蛾的首见日、高峰日、迁入路径、落区开展了预报,为全面监测草地贪夜蛾提供理论技术参考。

1 材料与方法

1.1 草地贪夜蛾迁飞气象预报方法

草地贪夜蛾迁飞气象预报包括两个方面,一是综合大气低层动力场以及地面气象要素,开展迁入

(迁出)本地气象适宜度等级预报(表1)。草地贪夜蛾迁飞适宜温度为20~25℃,温度过高或过低对迁飞有不同程度影响,15℃以下成虫活动能力减弱不利于迁飞;迁飞适宜相对湿度为60%~90%,湿度过高或过低对其迁飞不利^[19-21]。根据以上条件,将草地贪夜蛾迁入(迁出)本地气象适宜度等级分为适宜、较适宜、不适宜3级。二是利用大气动力场条件,结合草地贪夜蛾迁飞习性及其迁飞轨迹模拟,开展迁入时间(包括首见日及高峰日)、迁入路径、落区的预报(图1)。草地贪夜蛾迁飞扩散主要指成虫在空中飞行和起飞、降落活动,迁飞过程与大气低层风场方向、风速以及气流垂直运动密切相关。在迁飞过程中,大气低层垂直上升气流有利于草地贪夜蛾成虫起飞,而下沉气流有利于其降落,垂直梯度越大越有利于起飞和降落,降水也利于草地贪夜蛾降落。

表1 草地贪夜蛾迁入(迁出)气象适宜度等级分级

气象适宜度 Meteorological suitability	迁入 Migrating into	迁出 Migrating out	等级 Grade
适宜 Suitable	(1)925 hPa下沉气流;(2)地面气温20~25℃;(3)地面空气相对湿度60%~90%(条件同时满足)	(1)近地面1 000 hPa上升气流;(2)925 hPa气温20~25℃;(3)925 hPa,空气相对湿度60%~90%(条件同时满足)	高 High
较适宜 Generally suitable	(1)925 hPa下沉气流;(2)地面气温15~20℃或25~30℃;(3)地面空气相对湿度60%~90%(条件同时满足)	(1)近地面1 000 hPa上升气流;(2)925 hPa气温15~20℃或25~30℃;(3)925 hPa,空气相对湿度60%~90%(条件同时满足)	较高 Generally high
不适宜 Unsuitable	(1)925 hPa上升气流或没有明显气流运动;(2)地面气温<15℃或>30℃;(3)地面空气相对湿度<60%或>90%(满足1个条件即可)	(1)近地面1 000 hPa下沉气流或没有明显气流运动;(2)925 hPa气温<15℃或>30℃;(3)925 hPa空气相对湿度<60%或>90%(满足1个条件即可)	低 Low

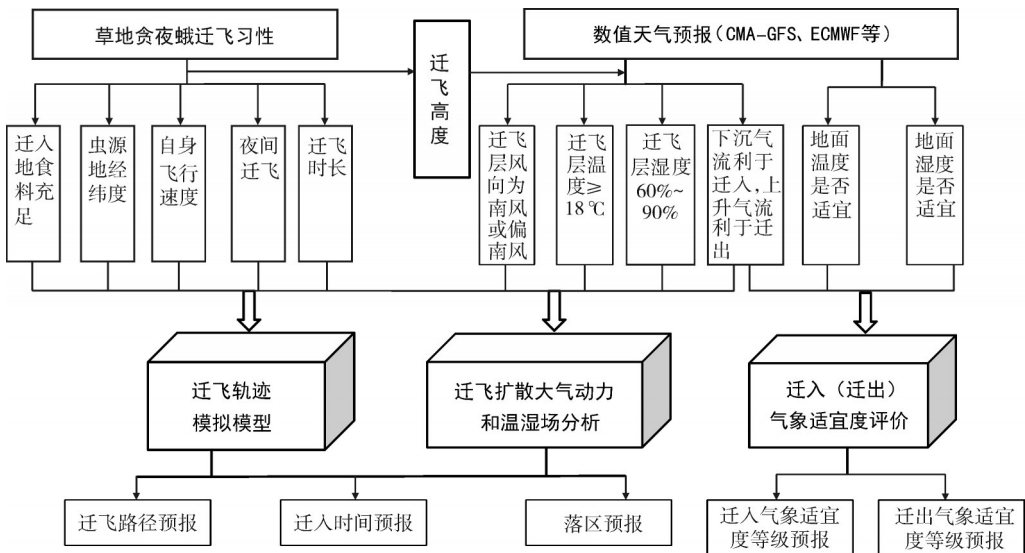


图1 草地贪夜蛾迁飞气象预报方法模型

Fig.1 Conception model of meteorological forecast for *Spodoptera frugiperda*'s migration

1.2 资料及来源

1) 气象资料。天气形势分析(500 hPa 位势高度)以及草地贪夜蛾迁飞高度层(距地面 800 m, 大约相当于 925 hPa 位势高度^[19,21])。气象要素场分析采用欧洲中期天气预报中心数值模式再分析场资料(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/hom>), 空间分辨率($0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$), 包括位势高度、风速风向、垂直速度、温度、湿度等资料。地面温度场和湿度场分析采用湖北省气象局国家观测站资料。

2) 草地贪夜蛾资料。包括迁飞虫源地信息、成虫及幼虫田间虫情调查资料、成虫灯诱及性诱资料(包括高空灯、常规测报灯及性诱捕器), 由湖北省植物保护总站提供。地图底图来源于国家地理信息公共服务平台“天地图”的标准地图服务系统(<http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/>)。

1.3 迁飞轨迹模拟

采用 HYSPLIT 轨迹分析模型, 该模型由美国国家海洋和大气管理局(NOAA)开发, 具有开放网络版: <https://locusts.arl.noaa.gov/>。主要参数设定包括: 迁飞方向(前向或后向)、飞行起止时间、起飞点经纬度、迁飞高度层等; 迁飞方向选择后向, 迁飞高度层选择 500、700、800 m 3 个高度层, 起飞时间设置为 20:00, 降落时间设置为 05:00。从南迁入湖北的地点选择植物保护部门监测资料中的首见地点, 从北回迁入湖北的地点选择资料中虫量较多的地点。

2 结果与分析

2.1 2021 年 5 月 13—15 日过程: 自南向北迁入湖北

据农业植保部门监测, 2021 年 5 月上旬湖南南部县市及中北部零星县市、江西南部县市及中部零星县市、贵州南部县市及东部西部部分县市、湖北枝江等个别县市监测到草地贪夜蛾成虫出现, 湖南南部县市及中部个别县市、江西南部县市、贵州南部县市及北部零星县市监测到草地贪夜蛾幼虫出现。此外, 湖北省春玉米常年种植面积在 433 333 hm^2 左右, 种植区域遍布全省, 5 月中旬大部地区处于拔节期, 虫源和食源条件均十分有利于草地贪夜蛾迁入湖北, 易造成危害。因此, 选择 5 月中旬有利于草地贪夜蛾迁入湖北省的有利天气过程即 5 月 13 至 15 日急流天气过程开展预报。5 月 14 日及 9 月 3 日发布预报简报时是利用欧洲中心模式动力场预报数据(可预

报未来 10 d 不同高度层动力场), 本研究采用了欧洲中心模式实况再分析资料(下同)。

1) 典型天气形势。利用 era 5 h 再分析资料, 结果显示, 2021 年 5 月 13 至 15 日副高及低空西南急流较常年明显偏强, 位置偏北。500 hPa 高度场川东有低槽东移, 14 至 15 日 925 hPa 偏南气流显著增强, 急流核最大风速达 18 m/s, 贵州、湖南、江西一带由于 925 hPa 急流加强过程中有明显的风速辐合, 形成上升运动, 湖北中部等地区存在辐散区, 有明显的下沉运动, 有利于迁入。

2) 自南向北迁入湖北的气象要素场分析及预报。从 5 月 14 至 15 日 925 hPa 垂直速度及风场再分析数据看出(图 2), 湖南、江西以及湖北东部 925 hPa 风场出现西南风, 风速约 6~12 m/s, 同时江汉平原南部及鄂东南有垂直气流下沉运动, 特别是咸宁地区有持续下沉运动, 速度约为 0.02~0.06 m/s ($1 \text{ Pa/s} \approx -0.1 \text{ m/s}$, 下同), 风向风速以及垂直气流运动有利于草地贪夜蛾从湖南、江西向湖北省迁飞降落。从欧洲中心 5 月 14 至 15 日 925 hPa 温湿度场看出, 湖南、江西、湖北中南部 925 hPa 气温在 20 $^{\circ}\text{C}$ 以上(图 3), 空气相对湿度 70%~90%, 气温、空气相对湿度对草地贪夜蛾高空飞行有利。另外, 14 至 15 日湖北大部地区地面气温 20~27 $^{\circ}\text{C}$, 空气相对湿度 70%~90%, 根据草地贪夜蛾迁入(迁出)气象适宜度等级分级(表 1), 判断迁入本地的气象适宜度等级为高。基于以上分析, 预报 5 月 14 至 15 日草地贪夜蛾从江西、湖南随偏南风路径迁入到湖北, 降落在江汉平原南部及鄂东的可能性很大。

3) 预报结论检验。根据植保部门田间虫情调查数据以及测报灯监测资料, 鄂东通山县、蔡甸区、赤壁市 2021 年首见成虫的日期分别是 5 月 14 日、17 日、18 日, 江汉平原南部枝江市, 鄂东阳新县、英山县、武穴市、嘉鱼县、崇阳县、通山县 5 月下旬首见 1~3 龄幼虫。成虫到达迁入地之后 1 周左右产卵, 卵发育成幼虫, 5 月下旬鄂东南平均气温 22 $^{\circ}\text{C}$ 左右, 20 $^{\circ}\text{C}$ 条件下卵发育成 3 龄幼虫需 15 d 左右^[22-23], 说明预报的迁入时间及落区较正确。

从以上首见地点中选择蔡甸、通山、枝江作为代表站点模拟从南迁入的后向轨迹, 分为 2 种情况(图 4), 一是经过 1~2 d, 5 月 15 日早晨迁入蔡甸、通山、枝江; 二是经过 1 d, 5 月 14 日早晨迁入蔡甸、通山、枝江。从轨迹模拟看出, 以上 2 种情况都是从湖南或江

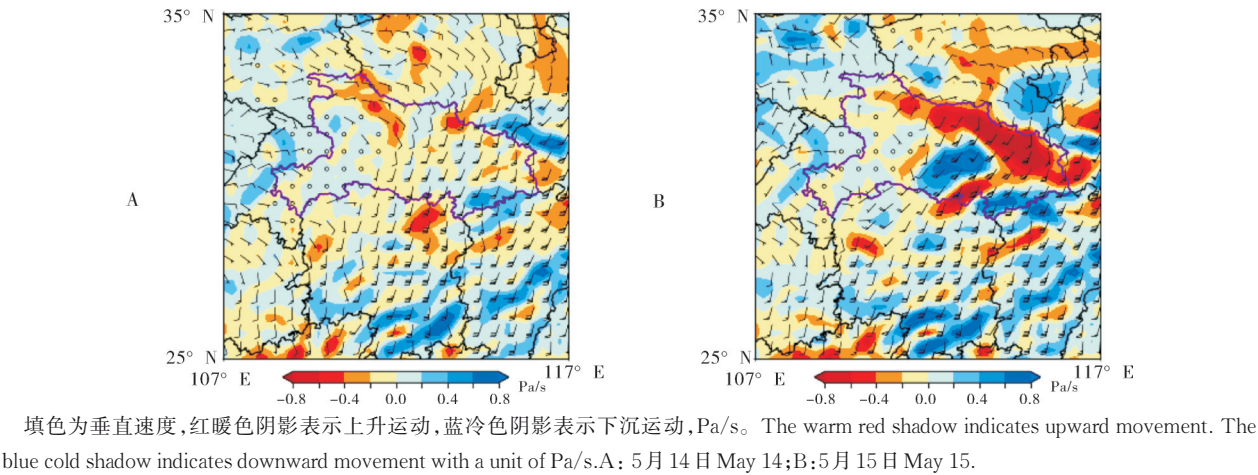


图 2 2021年5月14至15日05:00欧洲中心925 hPa垂直速度及风场

Fig.2 Vertical velocity with 925 hPa and wind field in European center at 05:00 on May 14 to May 15 in 2021

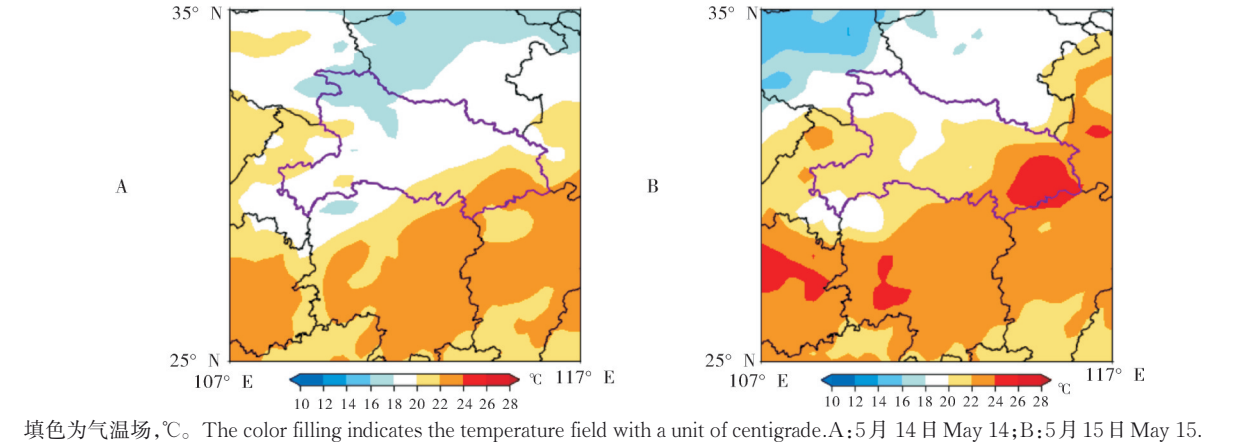


图 3 2021年5月14至15日05:00时欧洲中心925 hPa气温场

Fig.3 Temperature field with 925 hPa in European center at 05:00 on May 14 to May 15 in 2021

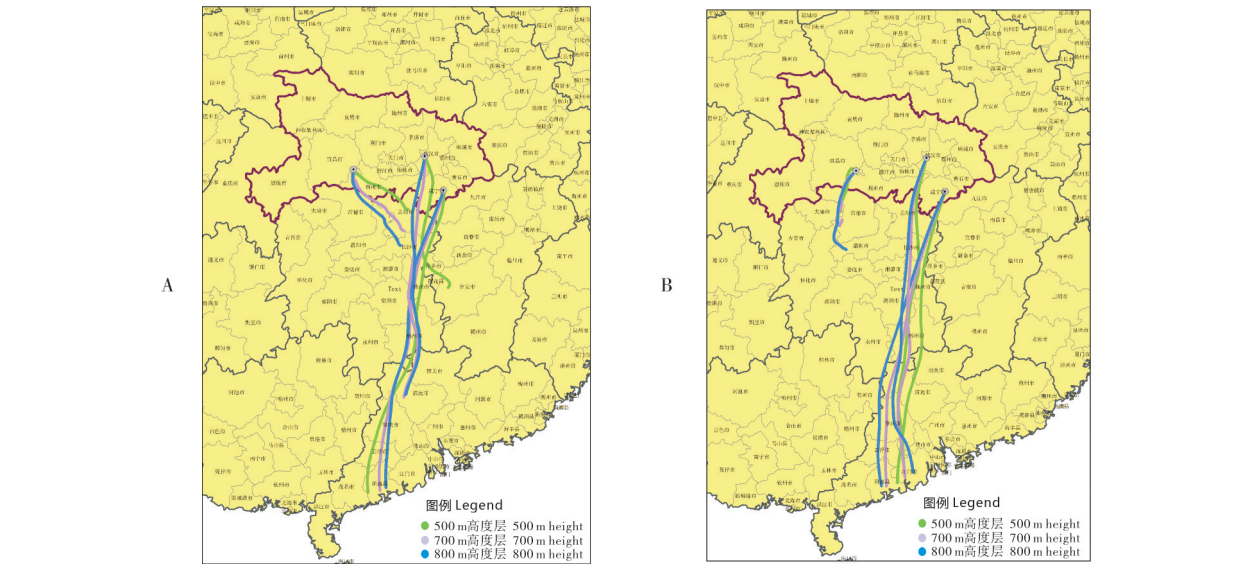


图 4 2021年5月14(A)至15日(B)从南迁入蔡甸、通山、枝江的后向迁飞轨迹

Fig.4 Backward route of *Spodoptera frugiperda* migrating into Caidian District, Tongshan and Zhijiang County of Hubei Province from south on May 14(A) to May 15(B) in 2021

西方向随南风或东南风路径迁入湖北,说明预报路径正确。

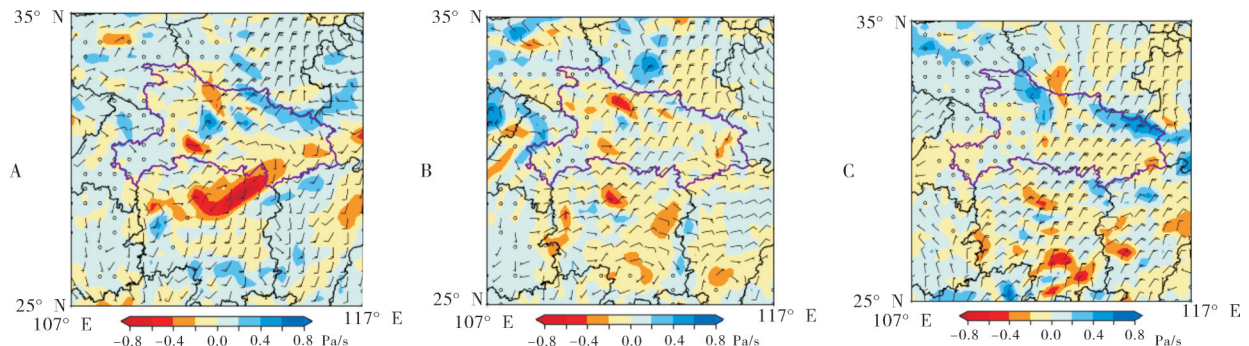
2.2 2021年9月4—7日过程:自北向南迁入湖北

据农业植保部门监测,8月下旬草地贪夜蛾成虫迁飞的最北端已到达北京、天津、河北一带。受季风影响,我国常年8月下旬至9月上旬,中东部地区925 hPa风向由偏南风开始逐渐转成偏北风,草地贪夜蛾开始向南回迁。此外,8月下旬至9月上旬湖北省秋玉米为苗期至大喇叭口期,处于草地贪夜蛾嗜食阶段,主要在鄂东及江汉平原分散种植,天气条件和食源条件均有利于中高纬度地区的草地贪夜蛾回迁进入湖北省。因此,从8月下旬开始监测并选择有利于草地贪夜蛾回迁入湖北省的天气过程开展预报。

1)典型天气形势。利用era 5 h再分析资料,结果显示,2021年9月4至7日副高气压明显西伸加强,控制我国中东部大部地区,贝加尔湖冷涡明显加强,925 hPa风场9月4日20:00开始华北及长江中游一带转受偏北气流影响,渤海湾附近有一低涡系统,最大风速达18 m/s,此低涡系统辐合上升,偏北气流在

湖北中部增强,且湖北中部等地区存在辐散区,有明显的下沉运动,有利于从北回迁。

2)自北向南回迁入湖北的气象要素场分析及预报。从9月5至7日欧洲中心925 hPa垂直速度及风场再分析场看出,河南大部、湖北中东部有北风,风速约4~12 m/s,同时江汉平原西部、鄂东北大部、鄂西北大部有垂直气流下沉运动,其中鄂东北有持续下沉运动,速度约为0.02~0.08 m/s(图5)。风向风速以及垂直气流运动有利于草地贪夜蛾从河南向湖北回迁降落。从9月5至7日欧洲中心925 hPa温湿度再分析场看出,河南、湖北大部地区气温18~24℃(图6),相对湿度60%~90%,气温及湿度条件对草地贪夜蛾回迁降落有利。另外,9月5至7日湖北大部地区地面气温20~27℃,地面相对湿度85%~95%,根据草地贪夜蛾迁入(迁出)气象适宜度等级分级表(表1),判断迁入本地的气象适宜度等级为高。基于以上分析,预计9月5日至7日草地贪夜蛾从河南随北风回迁入湖北,可能出现回迁高峰,降落在鄂东北、江汉平原西部的可能性很大。



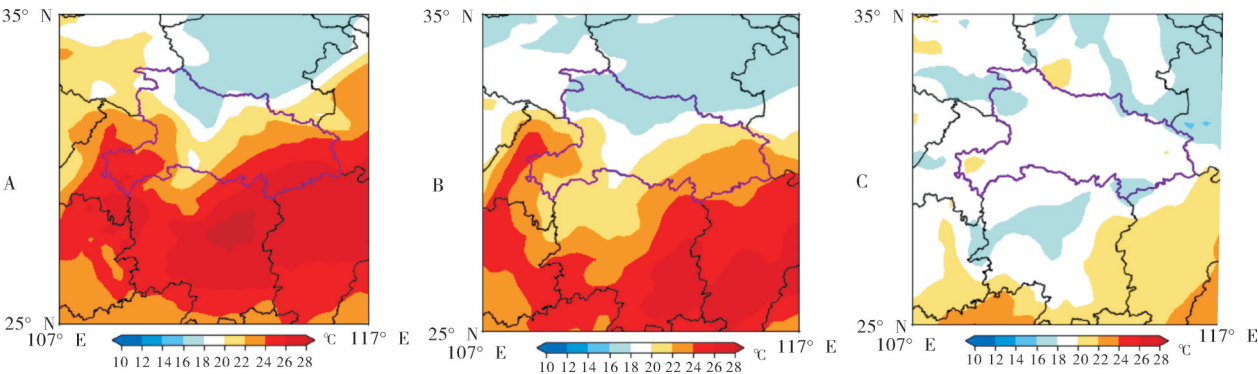
填色为垂直速度,红暖色阴影表示上升运动,蓝冷色阴影表示下沉运动,Pa/s。The color filling means vertical velocity. The warm red shadow indicates upward movement. The blue cold shadow indicates downward movement with a unit of Pa/s. A:9月5日 September 5; B:9月6日 September 6; C:9月7日 September 7.

图5 2021年9月5至7日05:00时欧洲中心925 hPa垂直速度及风场

Fig.5 Vertical velocity with 925 hPa in European center at 05:00 on September 5 to September 7 in 2021

3)预报结论检验。回迁预报结论中的高峰日利用测报灯监测数据进行检验。高空灯数据一般用来检验迁入虫量,常规灯及性诱捕器数据一般用来检验整体虫量^[24]。根据植保部门高空测报灯数据显示:江汉平原西部松滋9月5日为迁入高峰日,9月6日为迁入小高峰日;常规测报灯及性诱捕器数据显示:鄂东北云梦、英山9月9日为当地高峰日,黄陂9月9日为当地小高峰日(图7)。9月6日、9月9日性诱捕器当日诱蛾量江汉平原西部、鄂东北部分

地区、鄂东南部、鄂西北局部大于其他地区(图8)。数据检验说明预报的迁入时间及落区较正确。从以上高峰日地点中选择松滋、云梦、英山作为代表站点模拟从北回迁的后向轨迹,分为3种情况(图9),一是经过1~3 d,9月7日早晨迁入松滋、云梦、英山;二是经过1~2 d,9月6日早晨迁入松滋、云梦、英山;三是经过1 d,9月5日早晨迁入松滋、云梦、英山。从轨迹模拟看出,以上3种情况都是从河南方向随北风或东北风路径迁入,说明预报路径较正确。



填色为气温场,℃。The color filling indicates the temperature field with a unit of centigrade.A:9月5日 September 5;B:9月6日 September 6;C:9月7日 September 7.

图6 2021年9月5至7日05:00时欧洲中心925 hPa气温场

Fig.6 Temperature field with 925 hPa in European center at 05:00 on September 5 to September 7 in 2021

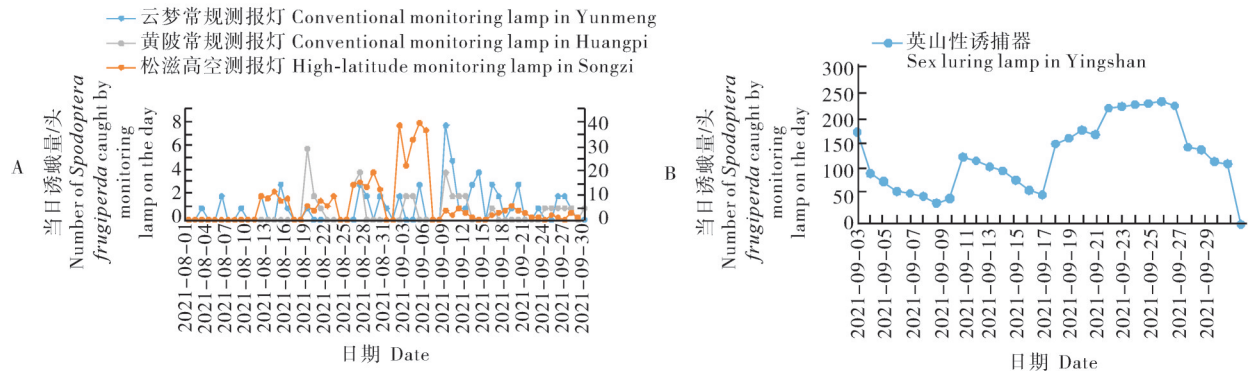


图7 2021年云梦、黄陂、松滋、英山草地贪夜蛾测报灯诱蛾量

Fig.7 Number of *Spodoptera frugiperda* caught by monitoring lamp in Yunmeng, Huangpi, Songzi and Yingshan County in 2021

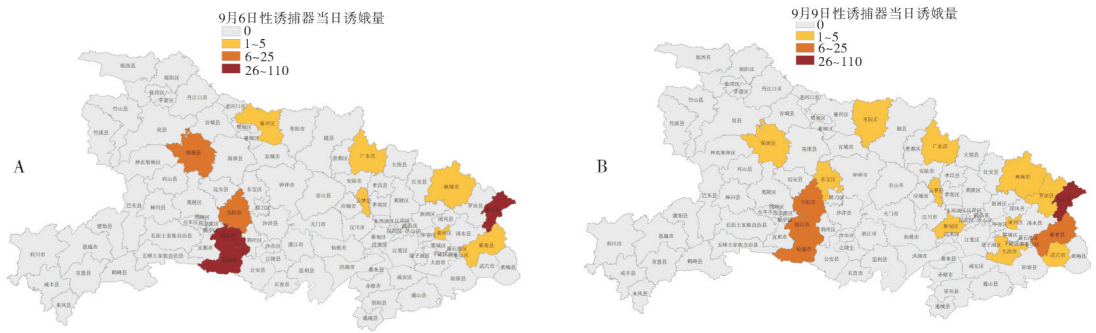


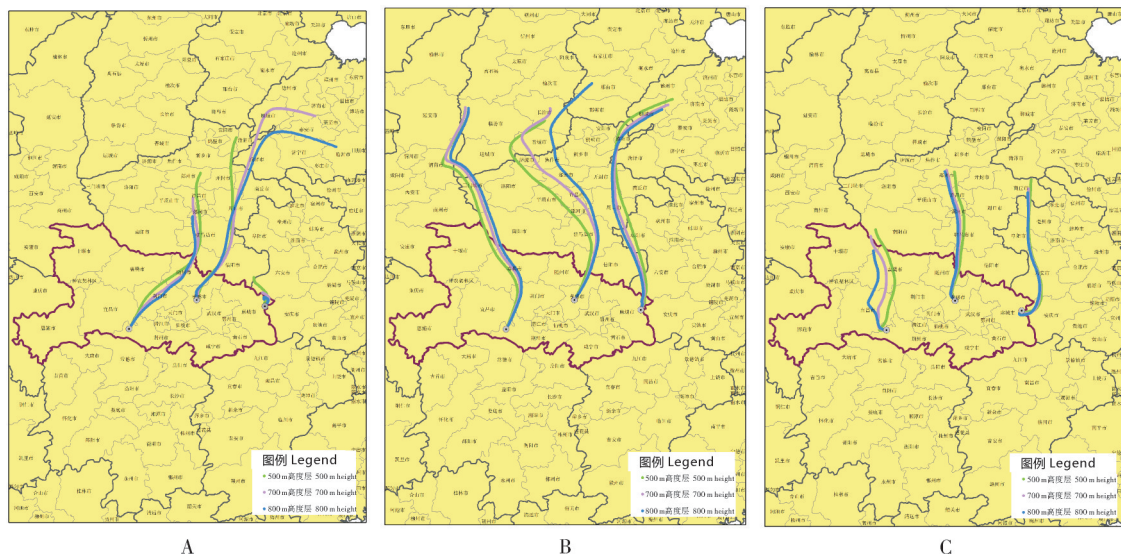
图8 湖北省2021年9月6日(A)和9月9日(B)性诱捕器当日诱蛾量

Fig.8 Number of *Spodoptera frugiperda* caught by sex luring lamp in Hubei Province on September 6(A) and September 9(B) in 2021

3 讨 论

本研究利用2021年草地贪夜蛾春季北迁至湖北(首见日)以及秋季南迁回湖北(高峰日)的2次预报案例,开展了迁入的典型天气形势以及迁飞层气象要素场分析,较准确预报了草地贪夜蛾迁入湖北的时间(包括首见日及高峰日)、路径、落区,说明草地

贪夜蛾迁飞气象预报方法的技术路线是可行的^[25],对草地贪夜蛾迁飞的气象预报具有较好的应用价值,同时对于草地贪夜蛾迁飞过渡区的其他省份开展服务有一定的借鉴意义。以往植保部门多采用气象部门提供的当地气象数据以及长期预报结论来进行迁飞性害虫的预报,一般因长期预报多为趋势性的结论,较模糊,难以得到更具体的气象信息,故只



A: 9月5日 September 5; B: 9月6日 September 6; C: 9月7日 September 7.

图9 2021年9月5至7日回迁入松滋、云梦、英山的后向迁飞轨迹

Fig.9 Route of *Spodoptera frugiperda* migrating back into Songzi, Yunmeng and Yingshan County of Hubei Province on September 5 to September 7 in 2021

能开展发生程度等定性的预报工作。本研究的技术方法首次将天气预报平台中的数值预报模型应用于迁飞性害虫的预报,可以对虫害的发生时间以及落区进行更精确的预报。

目前多种气象数值预报模式的气象要素场在天气过程预报中略有不同,且均有优缺点,会导致采用不同数值预报模式预报的迁飞路径略有不同。为提高预报准确率,综合多种数值预报模式对迁飞轨迹预报模型进行改进,采用集合预报或者概率预报判定草地贪夜蛾迁飞轨迹和落区是未来发展方向。本研究利用环流资料、风场、温湿场资料开展草地贪夜蛾迁飞的气象预报,是基于相关研究文献中草地贪夜蛾适生的气象条件进行分析推论,多来源于草地贪夜蛾室内饲养或吊飞试验获取。由于缺乏草地贪夜蛾迁飞过程中详尽的观测资料,迁飞气象预报方法及轨迹模拟还需要进一步结合草地贪夜蛾迁飞的生物学特征(例如迁飞高度、自身迁飞速度、迁飞迫降的生物学机制和地理、气象机制)进行验证和订正。

参考文献 References

[1] 吕亮,陈娇,郭志敏,等.苜蓿银纹夜蛾核型多角体病毒对草地贪夜蛾幼虫的杀虫活性及生防效果[J].华中农业大学学报,2021,40(5):46-53.LÜ L, CHEN J, GUO Z M, et al. Insecticidal activity and bio-control effect of *Autographa californica* multiple nucleopolyhedrovirus on larvae of *Spodoptera frugiperda* [J]. Journal of Huazhong Agricultural University,

2021,40(5):46-53(in Chinese with English abstract).

- [2] 卢增斌,李丽莉,张晴晴,等.草地贪夜蛾对山东省玉米的危害风险及其监测防控研究进展[J].山东农业科学,2019,51(6):160-168.LU Z B, LI L L, ZHANG Q Q, et al. Potential damage of *Spodoptera frugiperda* to maize in Shandong Province and research progress on its monitoring and control [J]. Shandong agricultural sciences, 2019, 51(6): 160-168(in Chinese with English abstract).
- [3] 郭井非,何康来,王振营.草地贪夜蛾的生物学特性、发展趋势及防控对策[J].应用昆虫学报,2019,56(3):361-369. GUO J F, HE K L, WANG Z Y. Biological characteristics, trend of fall armyworm *Spodoptera frugiperda*, and the strategy for management of the pest [J]. Chinese journal of applied entomology, 2019, 56(3): 361-369 (in Chinese with English abstract).
- [4] 齐国君,苏湘宁,章玉苹,等.草地贪夜蛾监测预警与防控研究进展[J].广东农业科学,2020,47(12):109-121. QI G J, SU X N, ZHANG Y P, et al. Research progress in monitoring and early warning, prevention and control of *Spodoptera frugiperda* [J]. Guangdong agricultural sciences, 2020, 47(12): 109-121(in Chinese with English abstract).
- [5] 姜玉英,刘杰,谢茂昌,等.2019年我国草地贪夜蛾扩散为害规律观测[J].植物保护,2019,45(6):10-19. JIANG Y Y, LIU J, XIE M C, et al. Observation on law of diffusion damage of *Spodoptera frugiperda* in China in 2019 [J]. Plant protection, 2019, 45(6): 10-19(in Chinese with English abstract).
- [6] 秦誉嘉,蓝帅,赵紫华,等.迁飞性害虫草地贪夜蛾在我国的潜在地理分布[J].植物保护,2019,45(4):43-47. QIN Y J, LAN S, ZHAO Z H, et al. Potential geographical distribution of the fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) in China [J].

- Plant protection, 2019, 45(4): 43-47 (in Chinese with English abstract).
- [7] 陈辉, 武明飞, 刘杰, 等. 我国草地贪夜蛾迁飞路径及其发生区划[J]. 植物保护学报, 2020, 47(4): 747-757. CHEN H, WU M F, LIU J, et al. Migratory routes and occurrence divisions of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* in China[J]. Journal of plant protection, 2020, 47(4): 747-757 (in Chinese with English abstract).
- [8] 谢殿杰, 唐继洪, 张蕾, 等. 我国草地贪夜蛾年发生世代区划分[J]. 植物保护, 2021, 47(1): 61-67. XIE D J, TANG J H, ZHANG L, et al. Annual generation numbers prediction and division of fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* in China[J]. Plant protection, 2021, 47(1): 61-67 (in Chinese with English abstract).
- [9] 郁振兴, 武予清, 蒋月丽, 等. 利用HYSPLIT模型分析麦蚜远距离迁飞前向轨迹[J]. 生态学报, 2011, 31(3): 889-896. YU Z X, WU Y Q, JIANG Y L, et al. Forward trajectory analysis of wheat aphids during long-distance migration using HYSPLIT model[J]. Acta ecologica sinica, 2011, 31(3): 889-896 (in Chinese with English abstract).
- [10] 包云轩, 孙梦秋, 严明良, 等. 基于两种轨迹模型的褐飞虱迁飞轨迹比较研究[J]. 生态学报, 2016, 36(19): 6122-6138. BAO Y X, SUN M Q, YAN M L, et al. Comparative study of migration trajectories of the brown planthopper, *Nilaparvata lugens* (Stål), in China based on two trajectory models[J]. Acta ecologica sinica, 2016, 36(19): 6122-6138 (in Chinese with English abstract).
- [11] 万素琴, 任永建, 刘志雄, 等. 湖北省稻飞虱迁入高峰日后向轨迹模拟分析[J]. 气象, 2012, 38(12): 1538-1545. WAN S Q, REN Y J, LIU Z X, et al. The backward trajectory simulation of the planthopper during migratory peak in Hubei Province[J]. Meteorological monthly, 2012, 38(12): 1538-1545 (in Chinese with English abstract).
- [12] 王宁, 马梁臣, 姚瑶. 2012年东北地区玉米粘虫爆发的气象成因分析[J]. 气象灾害防御, 2014, 21(4): 33-36. WANG N, MA L C, YAO Y. Analysis of meteorological causes of the outbreak of corn myxomycetes in northeast China in 2012[J]. Meteorological disaster prevention, 2014, 21(4): 33-36 (in Chinese).
- [13] 齐国君, 芦芳, 高燕, 等. 稻纵卷叶螟2010年的一次迁飞过程及其虫源分析[J]. 昆虫学报, 2011, 54(10): 1194-1203. QI G J, LU F, GAO Y, et al. Analysis of a migration process and the source population of *Cnaphalocrocis medinalis* (Guenée) (Lepidoptera: Pyralidae) in 2010[J]. Acta entomologica sinica, 2011, 54(10): 1194-1203 (in Chinese with English abstract).
- [14] 齐国君, 马健, 胡高, 等. 首次入侵广东的草地贪夜蛾迁入路径及天气背景分析[J]. 环境昆虫学报, 2019, 41(3): 488-496. QI G J, MA J, HU G, et al. Analysis of migratory routes and atmospheric features of the newly invaded fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) in Guangdong Province [J]. Journal of environmental entomology, 2019, 41(3): 488-496 (in Chinese with English abstract).
- [15] 邓晓悦, 张雪艳, 蒋春先, 等. 入侵川西高原的草地贪夜蛾虫源分析[J]. 植物保护, 2020, 46(2): 78-84. DENG X Y, ZHANG X Y, JIANG C X, et al. Source analysis of fall armyworm *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) invaded Western Sichuan Plateau [J]. Plant protection, 2020, 46(2): 78-84 (in Chinese with English abstract).
- [16] 罗举, 马健, 武明飞, 等. 浙江入侵草地贪夜蛾的迁入虫源[J]. 中国水稻科学, 2020, 34(1): 80-87. LUO J, MA J, WU M F, et al. Original area of fall armyworm individuals newly invaded in Zhejiang Province [J]. Chinese journal of rice science, 2020, 34(1): 80-87 (in Chinese with English abstract).
- [17] 陈辉, 黄乐, 格桑玉珍, 等. 2019年山东省草地贪夜蛾迁飞过程及气象背景场分析[J]. 环境昆虫学报, 2021, 43(4): 867-878. CHEN H, HUANG L, GE S, et al. Analysis of migration and meteorological background field for the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* found in Shandong Province in 2019 [J]. Journal of environmental entomology, 2021, 43(4): 867-878 (in Chinese with English abstract).
- [18] 孙旭军, 张国彦, 刘一, 等. 河南省草地贪夜蛾迁入路径及虫源地分析[J]. 应用昆虫学报, 2021, 58(3): 579-591. SUN X J, ZHANG G Y, LIU Y, et al. Tracking the migration path and source areas of the fall armyworm in Henan [J]. Chinese journal of applied entomology, 2021, 58(3): 579-591 (in Chinese with English abstract).
- [19] 吴秋琳, 姜玉英, 胡高, 等. 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[J]. 植物保护, 2019, 45(3): 1-9. WU Q L, JIANG Y Y, HU G, et al. Analysis on spring and summer migration routes of fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) from tropical and southern subtropical zones of China [J]. Plant protection, 2019, 45(3): 1-9 (in Chinese with English abstract).
- [20] 吴孔明. 草地贪夜蛾防控手册[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2020. WU K M. Handbook of prevention and control of meadow moth [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2020 (in Chinese).
- [21] 郭安红, 王纯枝, 邓环环, 等. 草地贪夜蛾迁飞大气动力条件分析及过程模拟[J]. 应用气象学报, 2022, 33(5): 541-554. GUO A H, WANG C Z, DENG H H, et al. Atmospheric dynamics analysis and simulation of the migration of fall armyworm [J]. Journal of applied meteorological science, 2022, 33(5): 541-554 (in Chinese with English abstract).
- [22] 何莉梅, 葛世帅, 陈玉超, 等. 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[J]. 植物保护, 2019, 45(5): 18-26. HE L M, GE S S, CHEN Y C, et al. The developmental threshold temperature, effective accumulated temperature and prediction model of developmental duration of fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* [J]. Plant protection, 2019, 45(5): 18-

- 26(in Chinese with English abstract).
- [23] 张红梅,尹艳琼,赵雪晴,等.草地贪夜蛾在不同温度条件下的生长发育特性[J].环境昆虫学报,2020,42(1):52-59. ZHANG H M, YIN Y Q, ZHAO X Q, et al. The growth and development characteristics of *Spodoptera frugiperda* under different temperature conditions [J]. Journal of environmental entomology, 2020, 42(1): 52-59 (in Chinese with English abstract).
- [24] 姜玉英,刘杰,杨俊杰,等.2019年草地贪夜蛾灯诱监测应用效果[J].植物保护,2020,46(3):118-122. JIANG Y Y, LIU J, YANG J J, et al. Trapping effect of searchlight-trap and light trap for the moth of *Spodoptera frugiperda* in 2019 [J]. Plant protection, 2020, 46(3): 118-122 (in Chinese with English abstract).
- [25] 杨俊杰,郭子平,罗汉钢,等.2019年湖北省草地贪夜蛾发生为害规律和监测技术探索[J].植物保护,2020,46(3):247-253. YANG J J, GUO Z P, LUO H G, et al. Research on the law of infestation and monitoring technology of *Spodoptera frugiperda* in Hubei Province in 2019 [J]. Plant protection, 2020, 46(3): 247-253 (in Chinese with English abstract).

Exploration and application of meteorological forecasting model for migration of *Spodoptera frugiperda*

DENG Huanhuan¹, YANG Junjie², GUO Anhong³, WANG Chunzhi³,
XIE Jiaxu¹, ZHONG Min⁴, GUO Guangfen¹

1. Wuhan Regional Climate Center, Wuhan 430074, China;

2. The General Station of Plant Protection of Hubei Province, Wuhan 430071, China;

3. National Meteorological Center, Beijing 100081, China;

4. Wuhan Central Meteorological Observatory, Wuhan 430074, China

Abstract A meteorological forecasting model for the migration of *Spodoptera frugiperda* was preliminarily established based on the weather forecast platform and the medium-short term numerical forecast of European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) to accurately predict the migration routes of pests and use weather forecasting technology to predict migratory pests. The atmospheric circulation situation and low-level wind dynamic were used to accurately forecast the migration routes, migration time including the first day of emergence and the day with a peak number and falling zone of *Spodoptera frugiperda*. A detailed review of two typical forecasting cases of the migration of *Spodoptera frugiperda* in 2021 was conducted. The typical weather processes and meteorological factor fields of the migratory layer of *Spodoptera frugiperda*, which migrated northward to Hubei Province in spring (first day of sighting) and southward to Hubei Province in autumn (peak day) in 2021, were analyzed. The HYSPLIT route model was used to simulate the backward routes of migration. The prediction conclusion was validated using data from monitoring *Spodoptera frugiperda* in the field and from monitoring lamp and migration routes. The results showed that the forecasting conclusions of two typical prediction cases were in good agreement with data from monitoring *Spodoptera frugiperda* in the field and from monitoring lamp, and the scenario simulation of migration routes. The forecasting of the migration time, falling fields and routes was basically correct, which verified the feasibility of using the weather forecast technologies to predict migratory pests.

Keywords migratory pests; *Spodoptera frugiperda*; numerical forecast; hybrid single-particle lagrangian integrated trajectory model; migration routes; falling zone

(责任编辑:陆文昌)