

三种轨迹模型对草地螟迁飞路径的模拟*

张 瑜^{1,2**} 汪丽军³ 李祥瑞² 张爱环^{1***} 张云慧^{2***}

(1. 北京农学院生物与资源环境学院, 农业农村部华北都市农业重点实验室, 北京 102206;

2. 中国农业科学院植物保护研究所植物病虫害生物学国家重点实验室, 北京 100193;

3. 科尔沁右翼前旗农业技术推广中心, 科尔沁 137713)

摘 要 【目的】草地螟 *Loxostege sticticalis* 是一种世界性害虫, 通过大范围的迁飞给我国北方农牧区带来巨大威胁。迁飞路径的轨迹模拟是追溯虫源、实现早期预警的有效措施。本文对比不同轨迹模型模拟草地螟迁飞路径, 筛选更加精准的轨迹模型, 以提高草地螟预测预报的准确度, 为其有效防控提供科学依据。【方法】分别应用 HYSPLIT、WRF-Trajectory、WRF-HYSPLIT 3 种轨迹分析模式, 选取 2021 年 6 月上中旬内蒙古科尔沁右翼前旗的一次典型迁飞过程, 并结合 ERA5 再分析数据输出的空中风场和各地虫情信息, 验证模型模拟结果的准确度和精确度。【结果】HYSPLIT 模型显示草地螟主要来自中蒙交界地带和蒙古国的中南部地区; WRF-Trajectory 模式显示草地螟主要来自华北越冬虫源区, 极少数来自蒙古国的东南部; WRF-HYSPLIT 模拟结果主要来自我国华北越冬虫源区及中蒙交界地带。【结论】综合草地螟的生存环境和取食条件, HYSPLIT、WRF-Trajectory 及 WRF-HYSPLIT 模拟的各高度迁入种群的虫源区、迁飞路径和降落均合理、准确。但综合草地螟的实测虫情与起飞、运转和降落所处的天气背景, WRF-Trajectory 和 WRF-HYSPLIT 模拟结果与各地虫情动态和迁飞高峰期盛行气流方向的吻合度高于 HYSPLIT 模式。

关键词 草地螟; 迁飞; 轨迹模拟; 虫源

Simulation of *Loxostege sticticalis* migratory flight paths with three trajectory models

ZHANG Yu^{1,2**} WANG Li-Jun³ LI Xiang-Rui²
ZHANG Ai-Huan^{1***} ZHANG Yun-Hui^{2***}

(1. College of Bioscience and Resource Environment/Key Laboratory of Urban Agriculture (North China),

Beijing University of Agriculture, Beijing 102206, China; 2. State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China;

3. Agricultural Technology Extension and Service Center, Keerqin 137713, China)

Abstract 【Objectives】To simulate the trajectory of the migration pathways of *Loxostege sticticalis*, a global pest that poses a major threat to agricultural and pastoral production in northern China. 【Methods】A typical *L. sticticalis* migration in Horqin Right Front Banner, Inner Mongolia, in the early and middle of June 2021 was selected for analysis and three trajectory models, HYSPLIT, WRF-Trajectory and WRF-HYSPLIT, were used to simulate the migration trajectory. Models were verified with reference to air, wind, and ground survey information on insect abundance. 【Results】The HYSPLIT model suggests that migratory *L. sticticalis* mainly come from the border of China and Mongolia and the central and southern regions of Mongolia. However, the WRF-Trajectory model suggests that most *L. sticticalis* come from an overwintering source area in North China, with only a few coming from the southeastern part of Mongolia. The WRF-HYSPLIT model suggests that most migratory *L. sticticalis* come from an overwintering source area in North China, and the border area between China and

*资助项目 Supported projects: 内蒙古科技计划项目 (2021GG0396); 国家重点研发计划 (2022YFD1400600)

**第一作者 First author, E-mail: 313989585@qq.com

***共同通讯作者 Co-corresponding authors, E-mail: zhangaiahuan@126.com; yhzhang@ippcaas.cn

收稿日期 Received: 2022-09-02; 接受日期 Accepted: 2022-11-11

Mongolia. **[Conclusion]** All three models provided reasonable and accurate predictions of the source areas, migration paths and landing areas of migrating populations of *L. sticticalis*. However, the predictions of the WRF-Trajectory and WRF-HYSPLIT models were more consistent with actual distribution of *L. sticticalis* and prevailing weather conditions of the migration being modelled.

Key words *Loxostege sticticalis*; migration; trajectory analysis; population source

草地螟 *Loxostege sticticalis* 是我国北方农牧业重要的迁飞性害虫, 自 2018 年在我国东北地区出现种群恢复性增长以来 (刘杰等, 2019), 2019-2021 年在华北和东北地区种群数量一直维持较高水平 (陈智勇等, 2022; 张蕾和江幸福, 2022)。由于草地螟的主要发生区位于东亚迁飞场的北端, 华北、东北地区与境内外存在虫源的频繁交流 (张云慧等, 2008; 张丽等, 2012; 陈晓等, 2022), 导致草地螟种群动态时空分布具有不连续性, 时间上, 草地螟种群具有间歇性暴发的特点, 空间上, 草地螟不同的世代很少在同一地区连续发生 (罗礼智等, 2018), 给我国草地螟的预测预报带来很大困难。近年来, 随着我国大豆产业振兴计划的推进, 华北北部和东北地区大豆的种植面积不断扩大, 为草地螟提供了充足的食物来源, 更有利于草地螟种群恢复性增长, 给大豆产业带来很大的威胁。因此, 迫切需要构建更科学、准确和实用的异地预测方法, 为草地螟的有效防控提供技术支持。

迁飞昆虫的轨迹模拟可以较为客观、科学地反映出迁飞昆虫的迁飞路径, 为时空动态提供依据 (包云轩等, 2016)。国内外不少学者利用轨迹分析方法对迁飞性昆虫的迁飞路径进行了探究, 并对迁飞性昆虫发生的大气背景作出理论探讨 (Riley *et al.*, 1991; Chapman *et al.*, 2010; 芦芳等, 2013; Zhang *et al.*, 2018), 为迁飞性昆虫的预测预报和有效防控提供了决策支持。目前应用较广的是 HYSPLIT (The hybrid single particle lagrangian integrated trajectory model for version) 和基于 WRF 模式 (The weather research and forecasting model) 输出的高时空分辨率气象背景场的轨迹分析方法 (Wu *et al.*, 2018)。HYSPLIT 是由美国国家海洋和大气管理局

(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 的空气资源实验室和澳大利亚气象局 (Bureau of Meteorology Australia, BOM) 共同研发的一种用于计算和分析大气污染物输送与扩散轨迹的专业模型。通过该模型, 可以追溯迁飞昆虫的迁出虫源地、迁飞路径和降落地, 了解各时空点的迁飞高度及地理位置, 在世界病虫测报学界得到广泛应用 (包云轩等, 2009; 吴秋琳等, 2022)。WRF 模式是美国国家环境预报中心 (National Centers for Environmental Prediction, NCEP) 和美国国家大气研究中心 (National Center for Atmospheric Research, NCAR) 联合多家大学和研究机构在 MM5 模式上发展起来的新一代高分辨率中尺度数值预报模式和同化系统 (Michalakes *et al.*, 1998)。通过利用高时空分辨率的气象背景并结合 FORTRAN 语言编写的三维质点轨迹分析程序, 加入昆虫迁飞速度、定向等参数计算迁飞昆虫的空中飞行轨迹, 近年来在我国迁飞性昆虫迁飞路径模拟中得到广泛应用 (林培炯等, 2020)。

在对草地螟迁飞路径的研究中, 张丽等 (2012) 利用 HYSPLIT_4 软件系统探究内蒙古锡林浩特牧区草地螟的迁飞虫源, 陈智勇等 (2022) 利用基于 WRF 模式输出的高时空分辨率气象背景场的轨迹方法对我国北方地区草地螟种群的虫源进行了分析。但不同的轨迹分析模式对草地螟迁飞路径研究的适应性均未见报道。本研究选取内蒙古科尔沁右翼前旗 2021 年 6 月 9-14 日出现的草地螟典型的迁飞过程, 利用 3 种轨迹模式分别分析模拟草地螟的迁飞路径和虫源区, 并综合迁飞过程的大气背景场分析、实测虫情, 验证 3 种模型的可行性, 旨在为草地螟的预测预报选择最优的轨迹分析模型。

1 材料与方法

1.1 虫情来源与当地概况

草地螟虫情数据来自内蒙古自治区科尔沁右翼前旗监测点(120.565°N, 46.12°E)。科尔沁右翼前旗地处大兴安岭向松嫩平原过渡地带,北部是大兴安岭山脉,海拔 300-900 m,由南向北升高。东北与吉林省相邻,东南与黑龙江接壤,西北与蒙古国相接。农作物播种面积为 71.75 万 hm^2 (2021 年),草原面积为 261.22 万 hm^2 ,为典型的农牧交错区,主要农作物为玉米、水稻、大豆、甜菜。

选取 2021 年 5 月 20 日至 6 月 20 日虫情测报灯和高空探照灯逐日监测数据,虫情测报灯位于科右前旗巴日嘎斯台乡良种场村,高空探照灯位于科右前旗阿力得尔苏木敖宝嘎查,两灯直线距离 53 km,记录每日诱虫量,出现种群突增时,挑选 50 头雌蛾进行卵巢解剖并及时进行田间普查,统计百步惊蛾量以辅助辨别迁入、迁出过程。

1.2 天气背景数据及分析方法

气象数据采用 ERA5 (ECMWF Reanalysis v5) 再分析数据,由欧洲中期天气预报中心的哥白尼气候变化服务中心(Copernicus Climate Change Service, 简称 C3S, <http://climate.copernicus.eu/>)

提供。FNL 数据来源于美国国家环境预报中心(NCEP)、美国国家大气研究中心(NCAR),此数据集时间分辨率为每 6 h 一次,空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 。

在 python3.8 平台上进行分析,采用 925 hPa 高度层 u 分量、v 分量数据整合为矢量风场图;利用近地面 2 m 气象数据分析整合降水图。

1.3 轨迹模拟

1.3.1 HYSPLIT 模型 HYSPLIT 模型是一种基于拉格朗日混合单粒子轨道模型的轨迹分析方法,该模型可以单机安装使用也可在线运行。初始资料采用美国国家环境预报中心(NCEP 提供的全球资料同化系统(Global data assimilation system, GDAS),时间分辨率为每 6 h 一次,空间分辨率为约 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 的再分析格点资料。

1.3.2 WRF-Trajectory 模型 WRF-Trajectory 模型中利用基于 WRF 模式输出的迁飞昆虫三维轨迹分析软件(胡高, 2015),基于 WRF4.0 中尺度数值模式(Skamarock *et al.*, 2008),以 FNL 为初始数据,输出每小时一次的 $30 \text{ km} \times 30 \text{ km}$ 的气象要素场,作为计算昆虫迁飞轨迹的背景条件。利用基于 WRF 模式输出的迁飞昆虫三维轨迹分析软件(胡高, 2015)计算草地螟的迁飞轨迹。模式的方案与参数设置参考齐国君等(2019),本文具体参数如表 1。

表 1 WRF 模式方案与参数
Table 1 Selection of cscheme and parameters of the WRF model

项目 Item	区域 1 Domain 1
中心位置 Location	23°N, 105°E
水平网格 The number of grid points	130×150
格距(km) Distance between grid points (km)	30
垂直层 Layers	30
地图投影 Map projection	Lambert
微物理过程 Microphysics scheme	WSM6
长辐射波方案 Longwave radiation scheme	RRTMG
短辐射波方案 Shortwave radiation scheme	RRTMG
近地面层方案 Surface layer scheme	Monin-Obukhov
陆地过程方案 Land/water surface scheme	Noah

续表 1 (Table 1 continued)

项目 Item	区域 1 Domain 1
边界层方案 Planetary boundary layer scheme	YSU
积云参数化方案 Cumulus parameterization	Tiedtke
模拟时长 (h) Forecast time (h)	72

该方法已成功应用于粘虫 *Mythimna separata* (Walker) (胡高等, 2014)、白背飞虱 *Sogatella furcifera* (Horvath) 和褐飞虱 *Nilaparvata lugens* (Stål) (吴秋琳, 2018)、亚洲小车蝗 *Oedaleus asiaticus* (Wang et al., 2022) 等多种昆虫迁飞的模拟。

1.3.3 WRF-HYSPLIT 模型 WRF-HYSPLIT 中应用以 WRF 4.0 中尺度数值模式下输出的每小时 1 次的格距为 30 km×30 km 的气象要素场, 作为计算昆虫迁飞轨迹的背景条件, 利用 HYSPLIT 模型对迁飞轨迹进行模拟耦合。

1.3.4 草地螟轨迹分析生物学参数设置 根据草地螟傍晚起飞黎明降落的习性、迁飞高度集中在距地面高度 300-600 m 等生物学特性 (陈瑞鹿等, 1992; 张云慧等, 2008; 陈阳等, 2012), 轨迹模拟回推设定起始时间为北京时间 06:00, 终止时间为前一天的 20:00, 其余参数设定参照陈智勇等 (2022), 飞行高度根据当地地势特征设定为海拔高度 750、1 000、1 250、1 500、1 750 和 2 000 m 为轨迹模拟参数。

虫源有效性的条件包括 (1) 虫源地在地理分布上属于草地螟的发生区; (2) 根据前期及当前联合监测数据及田间诱虫量可确定该地区可提供草地螟迁出虫源; (3) 该地区的天气背景对

草地螟的迁出条件有利。

2 结果与分析

2.1 草地螟迁飞种群动态

2021 年 5 月 20 日科尔沁右翼前旗地面虫情测报灯首次诱集到草地螟 5 头, 一直到 6 月 6 日, 虫情测报灯零星见虫, 数量几头至几十头。6 月 7 日地面灯草地螟成虫突增至 512 头, 高峰期为 6 月 13 日, 当日诱虫量 2 243 头, 6 月 18 日以后, 灯下未见草地螟成虫。高空探照灯诱虫器 5 月 24 日首次诱集到草地螟为 4 636 头, 此后零星见虫, 6 月 6 日突增为 805 头, 此后数量急剧上升为几万至几十万头, 其中 6 月 12 日达到 836 989 头, 13 日数量下降到 271 000 头, 15、17 日当地普降中雨, 未诱集到草地螟, 18 日以后草地螟成虫基本消失 (图 1)。高峰期内雌蛾卵巢发育级别以Ⅲ级为主, 6 月 10 日-11 日, 高空灯探照灯诱集草地螟成虫卵巢发育以Ⅱ-Ⅲ级为主, 6 月 14 日高空灯诱集草地螟越冬代成虫卵巢发育均为Ⅲ-Ⅳ级, 虫情测报灯雌蛾的卵巢解剖结果显示 (表 2), 6 月 8 日-10 日, 雌蛾卵巢发育以Ⅱ-Ⅲ级为主, 其中Ⅲ级占比较高。田间调查全旗 15 个乡镇均有成虫发生, 其中 6 月 12-13 日

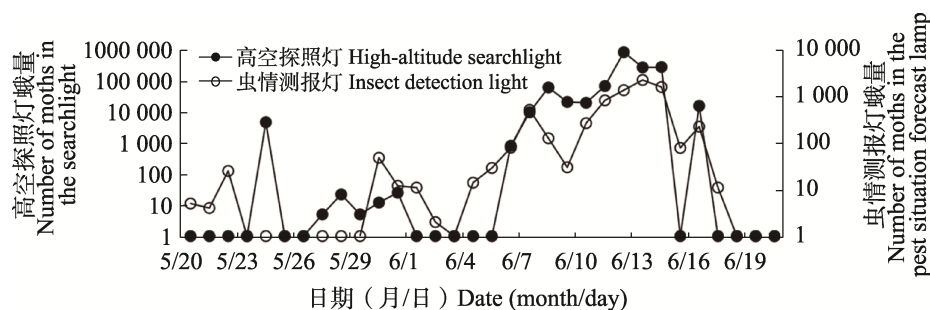


图 1 2021 年科尔沁右翼前旗越冬代草地螟灯下种群动态
Fig. 1 Population dynamics of overwintering meadow moth from light traps in Horqin Right Front Banner in 2021

表 2 2021 年科尔沁右旗前旗高空灯诱集草地螟卵巢发育级别
Table 2 The high-altitude light induce the meadow moth level of ovarian development in Horqin Right Front Banner in 2021

日期 Date	卵巢发育级别 The level of ovarian development	百步惊蛾量 100-step moth volume
6 月 9 日		科尔沁右翼前旗地区 0-20 头
6 月 10 日		科尔沁右翼前旗地区 0-20 头
6 月 11 日	33.3%Ⅱ级, 46.7%Ⅲ级	科尔沁右翼前旗地区 0-1 000 头
6 月 12 日	36.7%Ⅱ级, 46.7%Ⅲ级	阿尔山市天池镇、明水河镇 3 000-5 000 头, 高空灯周边 8 000 多头
6 月 13 日		科尔沁右翼前旗地区 0-1 000 头
6 月 14 日	80%Ⅲ级, 20%Ⅳ级	科尔沁右翼前旗地区 0-1 000 头

科右前旗阿力得尔测报点周边最高达 8 000 多头, 其他旗县市田间百步惊蛾在 500-1 500 头, 6 月 12 日田间调查发现雌蛾的卵巢发育级别较高, 属于典型的迁入虫源。

2.2 草地螟迁飞高峰期天气背景场

从时间纬度天气背景场剖面图来看, 2021 年 6 月 1-20 日东北和华北地区草地螟的发生区主要盛行偏西气流, 并伴随多次强降水过程 (图 2)。6 月 2 日, 内蒙古兴安盟附近形成气旋中心, 并逐渐向东移动, 造成 6 月 2-5 日华北地区盛行西北风、东北地区主要东北风 (图 3)。6-9 日在

中蒙、中俄交界地区形成气旋, 并自西向东向小兴安岭方向移动。在气旋后部气流的作用下, 我国东北、华北草地螟的主要发生区盛行西南风, 而蒙古国东部地区盛行西北风。8-9 日在兴安盟及周边地区存在较强降雨, 与当地 6 月 8-9 日的首次诱蛾高峰日吻合。6 月 10-20 日华北地区西南气流持续增强, 并以上升气流为主, 进入东北地区以后风力减弱, 影响了草地螟的进一步北迁。6 月 12 日在内蒙古中部及华北地区存在较大范围降水, 造成草地螟的聚集降落, 当日诱虫量达到 836 989 头。13-15 日华北和东北地区草地螟的主要发生区风力较小, 风向变化较大, 不利

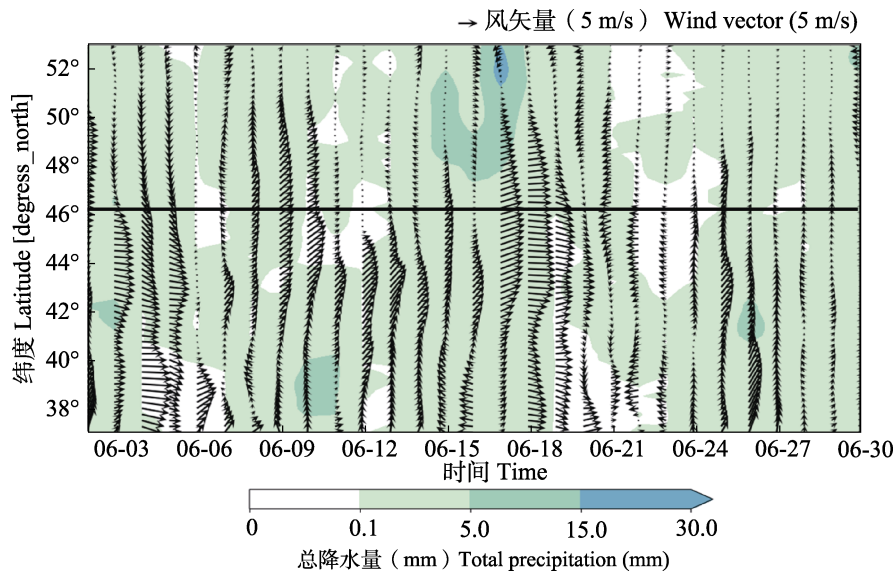


图 2 草地螟迁飞高峰期时间-纬度天气背景场剖面图

Fig. 2 Time-latitude cross sections averaged daily night-time mean surface precipitation and mean winds at 925 hPa, between 106°-127°E in North China during migration period of *Loxostege sticticalis*

粗黑线代表科尔沁右翼前旗纬度。Bold black line represents the latitude of Horqin Right Front Banner.

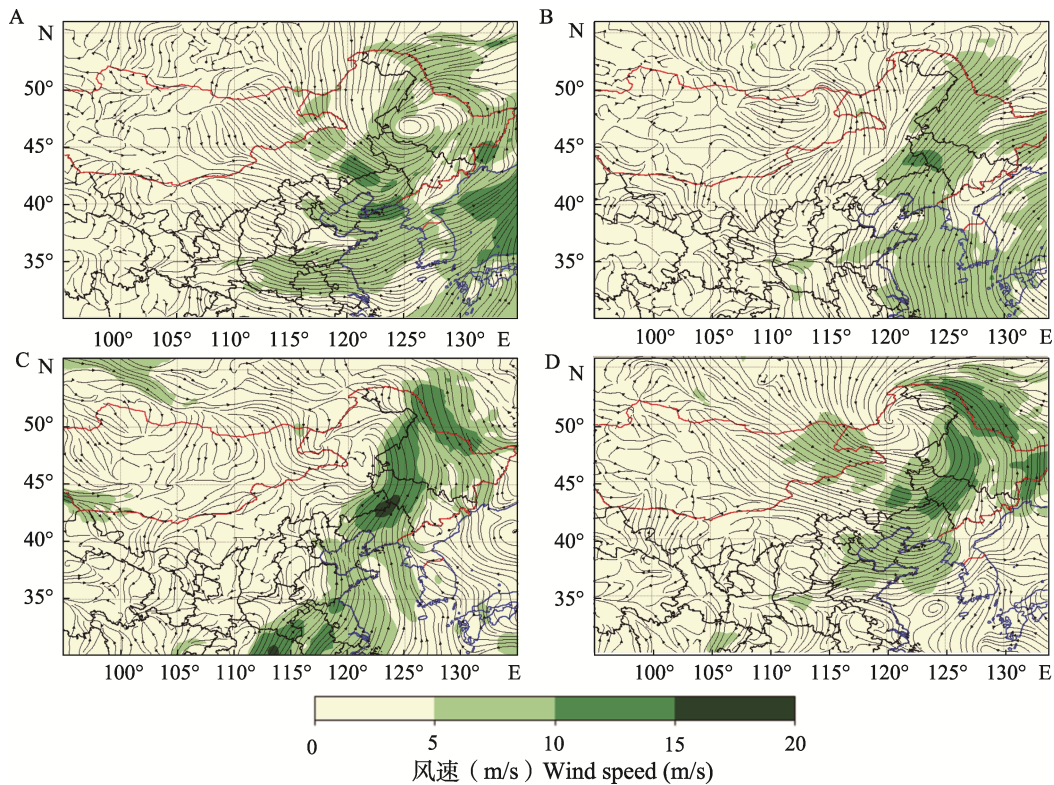


图3 草地螟迁飞高峰期水平风场图

Fig. 3 Wind field on 925 hPa during the peak migration period of *Loxostege sticticalis*

A. 2021.6.2-6.5; B. 2021.6.7-6.12; C. 2021.6.13-6.15; D. 2021.6.16-6.20.

于降落当地的草地螟进一步远距离迁飞,草地螟主要在当地进行短距离扩散,探照灯每天诱虫在几十万头。16-20日受中俄边界气旋天气的影响,华北和东北地区的中北部继续盛行偏北气流,并出现强降雨过程,草地螟诱虫数量锐减。20日以后,华北和东北地区以偏南风为主,风力较弱。

2.3 3种迁飞轨迹模型的草地螟迁飞轨迹计算结果及其比较

2.3.1 HYSPLIT 模型模拟结果 模拟结果表明,6月9日科尔沁右翼前旗草地螟主要来自蒙古国中南部地区,借助强劲的西北气流,经内蒙古锡林郭勒盟的草原区1d后到达。6月10-11日科尔沁右翼前旗草地螟主要来自蒙古国与俄罗斯接壤的东北部地区,经内蒙古东北部地区后1d到达。6月12日科尔沁右翼前旗草地螟主要来自内蒙古锡林郭勒盟的西部及与蒙古国交界处,经内蒙古中部地区迁入。6月13日科尔沁右翼前旗草地螟为附近虫源,6月14日科尔沁

右翼前旗草地螟大部分为当地附近虫源,少数来自内蒙古锡林郭勒盟附近虫源。

2.3.2 WRF-T 模型模拟结果 6月9日科尔沁右翼前旗草地螟主要来自内蒙古锡林浩特市、赤峰市以及承德市围场附近地区,借助强劲的西南气流1-2d到达。6月10日科尔沁右翼前旗草地螟虫源主要来自于内蒙古鄂尔多斯市,部分来自山西北部地区,经3d迁入至科尔沁右翼前旗,与6月7日山西代县出现诱蛾高峰的虫情信息一致。6月11日科尔沁右翼前旗草地螟主要来自内蒙古鄂尔多斯市,山西大同市及河北张家口市的西北部附近地区,与6月8日山西阳高县出现诱蛾高峰的虫情信息一致。6月12日草地螟由蒙古国的东南部地区迁飞3d迁入至科右地区。6月13日科尔沁右翼前旗草地螟主要来自内蒙古锡林郭勒盟及呼伦贝尔市的西北部地区,部分来自中蒙交界区。6月14日科尔沁右翼前旗草地螟主要来自内蒙古兴安盟及周边地区,少数来自内蒙古中部地区。

2.3.3 WRF-HYSPLIT 模型模拟结果 6 月 9 日科尔沁右翼前旗草地螟主要来自内蒙古锡林郭勒盟及承德市围场附近, 借助强劲的西南气流, 经 1-2 d 到达。6 月 10 日主要来自山西的西北部地区。6 月 11 日主要来自蒙古国的东北部及与内蒙古接壤地区, 少数来自俄罗斯的中南部与蒙古国相接地区, 飞行 2-3 d 达到科尔沁右翼

前旗。6 月 12-13 日科尔沁右翼前旗草地螟主要来自内蒙古锡林郭勒盟的西北部地区, 借助西南风气流迁飞 1-2 d 到达, 少数来自蒙古国与中蒙相接壤的南部地区。6 月 14 日科尔沁右翼前旗的草地螟与华北北部同期突增的草地螟虫源一部分来自内蒙古锡林郭勒盟及蒙古国东南部地区, 一部分为前期迁入当地的虫源受降水影响未迁出。

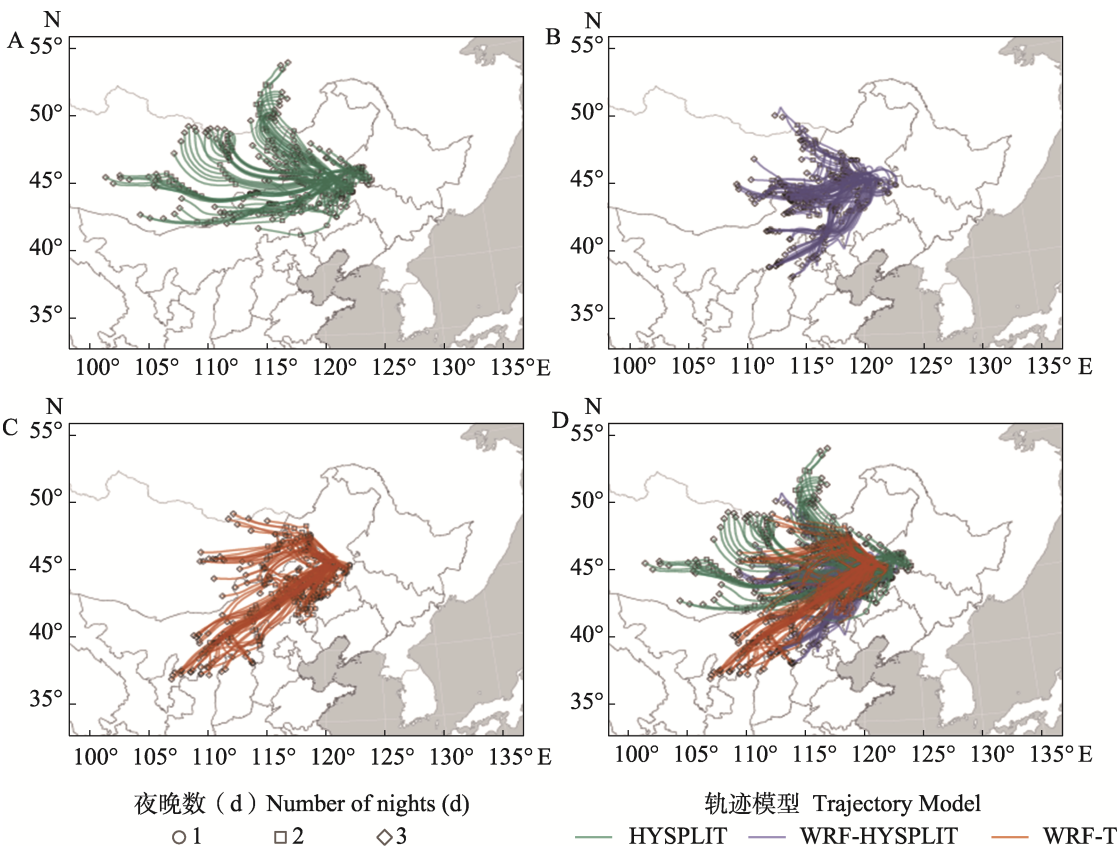


图 4 不同轨迹模型对草地螟迁飞轨迹模拟
Fig. 4 Migration trajectories based on different trajectory models for *Loxostege sticticalis*
A. HYSPLIT; B. WRF-HYSPLIT; C. WRF-T; D. 轨迹重叠 Tracks overlap.

3 讨论

科尔沁右翼前旗隶属兴安盟, 位于内蒙古自治区东北部, 地处大兴安岭向松嫩平原过渡地带, 地势北高南低, 其独特的地形使得草地螟容易在此大面积集中降落(陈智勇等, 2022)。2021 年越冬代草地螟在我国宁夏、内蒙古的中西部 4 月下旬始见成虫, 5 月中下旬出现诱虫高峰期, 卵巢发育级别 I - II 级为主(巴彦淖尔市植保植

检站, 2022; 宁夏农技推广总站, 2022)。6 月上中旬山西、河北北部, 内蒙古中西部乌兰察布等多地出现蛾峰, 表现出蛾峰持续时间长、卵巢级别低的特征(大同市农业农村局, 2021; 乌兰察布市农牧局, 2021), 上述结果表明华北地区聚集了一定的越冬虫源。而东北地区除了兴安盟出现蛾峰, 辽宁、吉林、黑龙江越冬代草地螟发生较轻, 科尔沁右翼前旗分别于 5 月 24 日和 6 月 6-16 日出现 2 次迁入高峰期。从时间和空间

上都与华北地区虫源具有延续性,在远距离迁飞过程中受到特殊天气和地形的双重影响聚集降落,本项研究的3种轨迹模型分析虫源的结果也主要来自华北及中蒙交界地带,与华北和东北地区草地螟发生情况基本一致。

以往雷达和气象背景分析研究表明,草地螟的迁飞过程与冷锋的影响进程相对应,气流的垂直上升以及适宜的温度有利于草地螟的远距离迁飞;迁入区的降雨会使后部强劲的下沉气流更加显著,促成草地螟的聚集降落,东北冷涡的时空分布与草地螟降落区域、成虫密度呈显著相关(陈瑞鹿等,1992;韩经纬等,2013;孙虹雨,2014;陈智勇等,2022)。本研究空中风场显示,6月2-5日,我国华北主要盛行西北气流,东北地区主要盛行东北气流,科尔沁右翼前旗灯下零星见虫,表明兴安盟的东北区地区中俄交界地带并不能为当地提供虫源;6月7-12日,华北和东北草地螟的主要发生区与中蒙边界盛行西南气流,7日草地螟数量开始突增,12日达到诱集高峰,推测草地螟的主要来源为我国华北地区,而13-15日当地风力较弱,风向变化较大,草地螟主要在当地徘徊,连续几天诱虫量居高不下。16-20日当地主要受西北气流控制,风力较强,风向稳定,但未诱集到草地螟成虫,再次印证蒙古、俄罗斯及我国的东北地区为当地提供虫源的几率比较低,科尔沁右翼前旗的虫源主要来自我国华北及中蒙边界地区。

3种不同的轨迹分析模式显示,HYSPLIT模拟虫源主要来自内蒙古的中西部地区、中蒙交界处及蒙古国的中南部地区;WRF-Trajectory模拟虫源主要来自华北虫源区,少数来自我国内蒙古部分地区及蒙古国附近;WRF-HYSPLIT模型的模拟虫源主要来自我国华北地区与中蒙交界区,同WRF-Trajectory模型的模拟结果较为相似。综合华北和东北地区草地螟发生情况和空中风场分析结果,2021年科尔沁右翼前旗草地螟的虫源主要来自华北北部和中蒙边界地区,WRF-Trajectory和WRF-HYSPLIT 2种轨迹模型的模拟效果相对较好。HYSPLIT模式单机安装使用也可在线运行,实用方便,在模拟大气污染和病虫害流行方面得到了广泛的影响,时间分辨率为

6 h,空间分辨率为111.1 km×111.1 km,在一定程度上能够描述天气系统的普遍特征,但粗分辨率气象数据会导致轨迹模拟的不确定性增加。WRF-Trajectory和WRF-HYSPLIT两种轨迹模型,以FNL为初始数据,每小时输出一次30 km×30 km的高分辨率气象数据,作为计算昆虫迁飞轨迹的背景条件,然后再用Trajectory和HYSPLIT进行轨迹模拟,综合了2种轨迹模型的优点。WRF输出数据与HYSPLIT模型的耦合联用已经在大气污染和甲虫迁飞研究中得到成功应用,其模拟结果的准确性优于直接使用低分辨率气象场数据HYSPLIT(Ainslie and Jackson, 2011; Su *et al.*, 2016; Yerramilli *et al.*, 2009)。综上所述,在草地螟迁飞轨迹模拟时,利用WRF-Trajectory和WRF-HYSPLIT 2种模式进行模拟效果更好。

本文分别运用HYSPLIT、WRF-T及WRF-HYSPLIT 3种轨迹模式对草地螟的迁飞轨迹进行了计算耦合,但仍未全面考虑草地螟迁飞过程中的地形、植被等其他参数。随草地螟的第4个爆发周期的来临,除了加强国内越冬虫源区和发生危害区的联合监测外,更应加强与蒙古国、俄罗斯的虫情信息交流,在更大范围内开展草地螟的联合监测,精准建立草地螟联合监测机制,提高轨迹模型的精准度,建立准确的异地预测预报技术,及时发布虫情信息,有效指导田间防控。

参考文献 (References)

- Ainslie B, Jackson PL, 2011. Investigation into mountain pine beetle above-canopy dispersion using weather radar and an atmospheric dispersion model. *Aerobiologia*, 27(1): 51–65.
- Bao YX, Sun MQ, Yan ML, Lu MH, Liu WC, 2016. Comparative study of migration trajectories of the brown planthopper, *Nilaparvata lugens* (Stål), in China based on two trajectory models. *Acta Ecologica Sinica*, 36(19): 6122–6138. [包云轩, 孙梦秋, 严明良, 陆明红, 刘万才, 2016. 基于两种轨迹模型的褐飞虱迁飞轨迹比较研究. *生态学报*, 36(19): 6122–6138.]
- Bao YX, Xie J, Xiang Y, Xu XY, Liu Y, 2009. Influence of low-level jets on the great events of BPH's migration northward in China. *Acta Ecologica Sinica*, 29(11): 5773–5782. [包云轩, 谢杰, 向勇, 徐希燕, 刘宇, 2009. 低空急流对中国褐飞虱重大北迁过程的影响. *生态学报*, 29(11): 5773–5782.]

- Bayannur Plant Protection and Inspection Station, 2022. Pest information in 2021-Recently, the number of meadow moths has increased sharply, and all regions are alert to the harm of the first generation larvae. <http://nmj.bynr.gov.cn/JGDJ/Show/122704> [巴彦淖尔市植保植检站, 2022. 2021 年病虫害情报—近期草地螟蛾量突增各地警惕一代幼虫发生危害. <http://nmj.bynr.gov.cn/JGDJ/Show/122704>.]
- Chapman JW, Nesbit RL, Burgin LE, Reynolds DR, Smith AD, Middleton DR, Hill JK, 2010. Flight orientation behaviors promote optimal migration trajectories in high-flying insects. *Science*, 327(5966): 682–685.
- Chen RL, Bao XZ, Wang SY, Sun YJ, Li LQ, Liu JR, 1992. An observation on the migration of meadow moth by radar. *Journal of Plant Protection*, 19(2): 171–174. [陈瑞鹿, 暴祥致, 王素云, 孙雅杰, 李立群, 刘继荣, 1992. 草地螟迁飞活动的雷达观测. 植物保护学报, 19(2): 171–174.]
- Chen X, Hao LP, Jiang YY, Zhai BP, 2022. Spatio-temporal dynamics of outbreaks of meadow moth in Eurasia over the past 100 years. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 59(2): 375–385. [陈晓, 郝丽萍, 姜玉英, 翟保平, 2022. 近百年来欧亚大陆草地螟发生的时空动态. 应用昆虫学报, 59(2): 375–385.]
- Chen Y, Jiang YY, Liu JX, Lv Y, Meng ZP, Chen J, Tang JH, 2012. Mark-release-recapture validation of the migration of the beet webworm, *Loxostege sticticalis* (Lepidoptera: Pyralidae), in northern China. *Acta Entomologica Sinica*, 55(2): 176–182. [陈阳, 姜玉英, 刘家骧, 吕英, 孟正平, 陈静, 唐继洪, 2012. 标记回收法确认我国北方地区草地螟的迁飞. 昆虫学报, 55(2): 176–182.]
- Chen ZY, Zhang Z, Liu J, Kang AG, Zhao SM, Yin XJ, Li ZQ, Xie AT, Zhang YH, 2022. Spatiotemporal dynamics and source of *Loxostege sticticalis* in Northern China in 2020. *Scientia Agricultura Sinica*, 55(5): 907–919. [陈智勇, 张智, 刘杰, 康爱国, 赵素梅, 尹祥杰, 李占清, 谢爱婷, 张云慧, 2022. 2020 年我国北方地区草地螟种群的时空动态与虫源分析. 中国农业科学, 55(5): 907–919.]
- Datong Rural Agriculture Bureau, 2021. Occurrence trend prediction of the first generation meadow moth in Datong city. <http://www.dt.gov.cn/dtszf/bumdt/202106/f9d2f62f458e4c92b67556b42f2223e1.shtml>. [大同市农业农村局, 2021. 大同市一代草地螟发生趋势预报. <http://www.dt.gov.cn/dtszf/bumdt/202106/f9d2f62f458e4c92b67556b42f2223e1.shtml>]
- Han JW, Chen SH, Yan WX, Chen Y, 2013. Meteorological conditions for migration of over-winter *Loxostege sticticalis* imago. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 34(3): 332–337. [韩经纬, 陈素华, 闫伟兄, 陈阳, 2013. 草地螟越冬代成虫迁飞的气象条件分析. 中国农业气象, 34(3): 332–337.]
- 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.
- Hu G, Wu QL, Wu XW, Jiang YY, Zeng J, Zhai BP, 2014. Outbreak mechanism of second generation armyworms in northeastern China: A case study in 1978. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 51(4): 927–942. [胡高, 吴秋琳, 武向文, 姜玉英, 曾娟, 翟保平, 2014. 东北二代粘虫大发生机制: 1978 年个案分析. 应用昆虫学报, 51(4): 927–942.]
- Li XJ, Wu MF, Ma J, Gao BY, Wu QL, Chen AD, Liu J, Jiang YY, Zhai BP, Early R, Chapman JW, Hu G, 2020. Prediction of migratory routes of the invasive fall armyworm in eastern China using a trajectory analytical approach. *Pest Management Science*, 76(2): 454–463.
- Lin PJ, Zhang Z, Wang XL, Liu DX, Hu G, Zhang YH, 2020. Population dynamics and trajectory simulation of migratory moths of *Spodoptera frugiperda* in Yanqing of Beijing in 2019. *Journal of Plant Protection*, 47(4): 758–769. [林培炯, 张智, 王旭龙, 刘冬雪, 胡高, 张云慧, 2020. 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, 47(4): 758–769.]
- Liu J, Jiang YY, Zeng J, Chen Y, Wang CR, Zhang YH, Tao YL, 2019. Meadow moth *Loxostege sticticalis* occurred severely in partial area of northeast of China in 2018. *China Plant Protection*, 39(5): 36–41. [刘杰, 姜玉英, 曾娟, 陈阳, 王春荣, 张云慧, 陶元林, 2019. 2018 年我国东北局部草地螟重发. 中国植保导刊, 39(5): 36–41.]
- Lu F, Zhai BP, Gao H, 2013. Trajectory analysis method in insect migration research. *Acta Entomologica Sinica*, 50(3): 853–862. [芦芳, 翟保平, 胡高, 2013. 昆虫迁飞研究中的轨迹分析方法. 昆虫学报, 50(3): 853–862.]
- Luo LZ, Cheng YX, Tang JH, Jiang XF, Zhang L, 2018. The causes, targets and strategies of migration in the beet webworm, *Loxostege sticticalis* (Lepidoptera: Crambidae). *Plant Protection*, 44(5): 34–41. [罗礼智, 程云霞, 唐继洪, 江幸福, 张蕾, 2018. 草地螟迁飞的原因、目标与对策. 植物保护, 44(5): 34–41.]
- Michalakes J, Dudhia J, Gill D, Klemp JB, Skamarock W, 1998. Design of a next-generation regional weather research and forecast model. Towards Teracomputing. United States: 117–124.
- Ningxia Agricultural Technology Extension Station, 2022. The eighth issue of Ningxia plant protection information in 2021: The overwintering generation of meadow moth has a peak of trapping moths, so be alert to the outbreak of the first generation of larvae. http://nynct.nx.gov.cn/xwzx/zwdt/202105/t20210519_2843862.html. [宁夏农技推广总站, 2022. 2021 年第八期宁夏植保情报:

- 草地螟越冬代成虫出现诱蛾高峰警惕一代幼虫暴发危害. http://nynct.nx.gov.cn/xwzx/zwdt/202105/t20210519_2843862.html.
- 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. [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.]
- Riley JR, Cheng XN, Zhang XX, Reynolds DR, Xu GM, Smith AD, Cheng JY, Bao AD, Zhai BP, 1991. The longdistance migration of *Nilaparvata lugens* (Stål) (Delphacidae) in China: Radar observations of mass return flight in the autumn. *Ecology Entomology*, 16(4): 471–489.
- Skamarock WC, Klemp JB, Dudhia J, Gill DO, Barker DM, Duda MG, Huang XY, Wang W, Powers JG, 2008. A description of the advanced research WRF version 3. NCAR Technical Note NCAR/TN-475+STR, Colorado, USA: National Center for Atmospheric Research.
- Sun HY, 2014. Relationship of northeast cold vortex with migration and landing of *Loxostege sticticalis* (L.). *Journal of Meteorology and Environment*, 30(6): 85–91. [孙虹雨, 2014. 草地螟迁飞、降落与东北冷涡的关系. 气象与环境学报, 30(6): 85–91.]
- Su L, Yuan ZB, Jimmy CH, Deng XJ, Alexis KH, Deng T, Wang N, Yin CQ, 2016. Sensitivity of HYSPLIT back-trajectories to the horizontal and vertical resolution of the meteorological input data. *Journal of Tropical Meteorology*, 32(6): 864–877.
- Wang YP, S Li S, Du GL, Hu G, Zhang YH, Tu XB, Zhang ZH, 2022. An analysis of the possible migration routes of *Oedaleus decorus asiaticus* Bey-Bienko (Orthoptera: Acrididae) from Mongolia to China. *Insects*, 13(1): 72.
- Wu QL, 2018. Migration of rice planthoppers in East Asia: Patterns, processes and meteorological backgrounds. Doctoral dissertation. Nanjing: Nanjing Agricultural University. [吴秋琳, 2018. 东亚稻飞虱的迁飞: 格局、过程及气象背景. 博士学位论文. 南京: 南京农业大学.]
- Wu QL, Hu G, Westbrook JK, Sword GA, Zhai BP, 2018. An advanced numerical trajectory model tracks a corn earworm moth migration event in Texas. *Insects*, 9(3): 15.
- 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. [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.]
- Wulanchabu Agriculture and Animal Husbandry Bureau, 2021. Pest situation in agriculture and animal husbandry, issue 47. <http://nmj.wulanchabu.gov.cn/a/nongmuyexinxi/2021/0621/24059.html>. [乌兰察布市农牧局, 2021. 农牧虫情, 第47期. <http://nmj.wulanchabu.gov.cn/a/nongmuyexinxi/2021/0621/24059.html>]
- Yerramilli A, Srinivas CV, Dasari HP, Tuluri F, White LD, Baham JM, Young JH, Hughes R, Patrick C, Hardy MG, Swanier SJ, 2009. Simulation of atmospheric dispersion of elevated releases from point sources in Mississippi Gulf Coast with different meteorological data. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 6(3): 1055–1074.
- Zhang L, Jiang XF, 2022. Occurrence tendency and management strategies of the beet webworm, *Loxostege sticticalis* in China. *Plant Protection*, 48(4): 68–72. [张蕾, 江幸福, 2022. 我国草地螟发生趋势与防控策略. 植物保护, 48(4): 68–72.]
- Zhang L, Zhang YH, Zeng J, Jiang YY, Cheng DF, 2012. Analysis of the sources of second generation meadow moth populations that immigrated into Chinese pastoral areas in 2010. *Acta Ecologica Sinica*, 32(8): 2371–2380. [张丽, 张云慧, 曾娟, 姜玉英, 程登发, 2012. 2010年牧区2代草地螟成虫迁飞的虫源分析. 生态学报, 32(8): 2371–2380.]
- Zhang YH, Chen L, Cheng DF, Jiang YY, Lv Y, 2008. The migratory behaviour and population source of the first generation of the meadow moth, *Loxostege sticticalis* L. (Lepidoptera: Pyralidae) in 2007. *Acta Entomologica Sinica*, 51(7): 720–727. [张云慧, 陈林, 程登发, 姜玉英, 吕英, 2008. 草地螟2007年越冬代成虫迁飞行为研究与虫源分析. 昆虫学报, 51(7): 720–727.]
- Zhang Z, Zhang YH, Wang J, Liu J, Tang QB, Li XR, Cheng DF, Zhu X, 2018. Analysis on the migration of first-generation *Mythimna separata* (Walker) in China in 2013. *Journal of Integrative Agriculture*, 17(7): 1527–1537.