

DOI: 10.5846/stxb201704160675

刘焱, 魏巍, 刘维, 王健, 包云轩, 杨若子. FLEXPART 模式模拟褐飞虱回迁的适用性. 生态学报, 2018, 38(8): - .

Liu Y, Wei W, Liu W, Wang J, Bao Y X, Yang R Z. Applicability of the FLEXPART model in simulating the return migration of *Nilaparvata lugens*. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(8): - .

## FLEXPART 模式模拟褐飞虱回迁的适用性

刘 焱<sup>1, 2, 3</sup>, 魏 巍<sup>1, 2</sup>, 刘 维<sup>4</sup>, 王 健<sup>5</sup>, 包云轩<sup>3</sup>, 杨若子<sup>6, \*</sup>

1 中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室, 银川 750002

2 宁夏气象防灾减灾重点实验室, 银川 750002

3 南京信息工程大学江苏省农业气象重点实验室, 南京 210044

4 国家气象中心, 北京 100081

5 中国农业科学院植物保护研究所, 北京 100193

6 北京市气候中心, 北京 100089

**摘要:**褐飞虱是威胁我国水稻生产安全的主要害虫之一, 已经严重地威胁到我国南方地区水稻的安全生产。褐飞虱作为一种风媒迁飞性昆虫, 与大气气溶胶粒子的运动相似。采用褐飞虱迁飞相关参数, 利用 WRF-FLEXPART 模式模拟分析两次褐飞虱秋季回迁过程。通过模拟 2013 年 9 月 20—24 日褐飞虱迁入兴安县的迁飞过程, 发现褐飞虱虫量的模拟结果与实验观测到的褐飞虱高空灯诱数据相近, 变化趋势一致, 相关性达到 0.49 ( $P < 0.01$ )。褐飞虱迁飞峰的模拟值平均早于观测值 1.5h, 这可能与褐飞虱起飞迁飞的主动性及其生理特性等有关。模拟 2008 年 10 月 5—7 日一次冷锋无降水天气过程中的褐飞虱迁飞过程, 发现此次冷锋南下和降温过程对褐飞虱的回迁影响显著, 主要表现在: ①在迁飞轨迹上, 受热带气旋影响, 广西、贵州、湖南和广东西部地区以东北风为主, 有利于褐飞虱向西南方向的迁飞; ②在虫量密度分布上, 广东中部地区同时具备了较好的动力和温湿条件, 促使大量褐飞虱向着该地区(较温暖)迁入, 而湖北地区虽以西北—东北风为主, 但地面气温较低(低于广东地区), 不利于褐飞虱的大量迁入。综上所述, WRF-FLEXPART 模式适用于褐飞虱的迁飞模拟且有较好的模拟能力, 该研究对我国褐飞虱灾变的准确预警、病虫测报水平的提高具有重要的参考价值。

**关键词:**褐飞虱; WRF-FLEXPART 模式; 适用性; 模式验证

## Applicability of the FLEXPART model in simulating the return migration of *Nilaparvata lugens*

LIU Yao<sup>1, 2, 3</sup>, WEI Wei<sup>1, 2</sup>, LIU Wei<sup>4</sup>, WANG Jian<sup>5</sup>, BAO Yunxuan<sup>3</sup>, YANG Ruozhi<sup>6, \*</sup>

1 Key Laboratory for Meteorological Disaster Monitoring and Early Warning and Risk Management of Characteristic Agriculture in Arid Regions, China Meteorological Administration, Yinchuan 750002, China

2 Ningxia Key Lab of Meteorological Disaster Prevention and reduction, Yinchuan 750002, China

3 Key Laboratory of Agricultural Meteorology in Jiangsu Province, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

4 National Meteorological Center, Beijing 100081, China

5 Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China

6 Beijing Municipal Climate Center, Beijing 100089, China

**Abstract:** *Nilaparvata lugens* (Stål) is an agricultural pest that has been a serious threat to rice production in Southern China. As a migratory insect, the migration of *N. lugens* is similar to aerosol particle motion in the atmosphere. In this study, we used the WRF-FLEXPART model to simulate two migration processes of *N. lugens*, by adopting specific migratory

**基金项目:**中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室指令性项目; 国家自然科学基金(41475106, 41075086)

**收稿日期:**2017-04-16; **网络出版日期:**2017-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ruoziyang@163.com

parameters of *N. lugens*. The first case was conducted to simulate the migration of *N. lugens* to Xing'an, during the period Sep. 20<sup>th</sup> - 24<sup>th</sup>, 2013. The population of *N. lugens* simulated using WRF-FLEXPART was consistent with the population observed in the field, and the correlation coefficient was 0.49 ( $P < 0.01$ ). Further, the simulated peak of *N. lugens* take-off time was approximately 1.5 hours earlier than the observed value. This may be related to the initiation of *N. lugens* flight and take-off and their physiological properties. The second case was in a cold front process without precipitation during the period Oct. 5<sup>th</sup> - 7<sup>th</sup>, 2008. The results showed that the southward front and the decrease in air temperature had a considerable influence on the migration of *N. lugens*. The details are as follows: ① For trajectory, tropical cyclones generate a northeast wind in Guangxi, Guizhou, Hunan, and the west of Guangdong, which provides advantages for *N. lugens* to migrate from northeast to southwest. ② For density distribution, due to good dynamic (wind direction and wind speed), temperature (warm), and humidity (wet) conditions, large numbers of *N. lugens* migrate into the central part of Guangdong. Compared with Guangdong, the lower surface temperature in Hubei was not favorable to a mass migration of *N. lugens*, although Hubei has suitable dynamic conditions (the northwest-northeast wind). In conclusion, the modeling results indicate that WRF-FLEXPART is applicable for simulating the migration of *N. lugens* and shows good performance in simulating the migration process of *N. lugens*. This research can provide an important reference for *N. lugens* disaster forecasting and warning in China.

**Key Words:** *Nilaparvata lugens* (Stål); WRF-FLEXPART model; applicability; model validation

褐飞虱, *Nilaparvata lugens* (Stål), 是我国主要的水稻害虫之一<sup>[1]</sup>。水稻一旦遭到褐飞虱侵害, 其生长会受到严重影响, 稻谷减产甚至绝收<sup>[2-3]</sup>。褐飞虱体型和质量很小, 具有随风迁飞的特性<sup>[4-5]</sup>, 与大气气溶胶粒子运动相似, 因此, 褐飞虱迁飞模拟假设其为不会自发运动、只随气流运动的粒子, 利用风温场推算褐飞虱迁飞轨迹。早在 1987 年, Rosenberg 和 Magor<sup>[6]</sup> 采用等风速流线法分析了褐飞虱顺风迁飞的特征。国内, 早期也有采用固定高度上的水平风场<sup>[7]</sup> 和三维空气质点<sup>[8]</sup> 等方法计算褐飞虱的迁飞轨迹。受褐飞虱迁飞理论知识和观测技术的限制, 虽然风场运动在一定程度上能够反映褐飞虱的迁飞情况, 但随着对褐飞虱扩散机制和参数研究的逐渐深入, 专家学者认识到单一风场的运动并不能完全地解释褐飞虱的迁飞扩散状况, 其迁飞还受气温、湿度以及褐飞虱生理参数的影响<sup>[9]</sup>, 故而逐渐引入褐飞虱的迁飞参数和大气扩散模式等以改进迁飞轨迹运算方法, 以更好地模拟褐飞虱迁飞。比如, Turner 等<sup>[10]</sup> 和 Zhu 等<sup>[11]</sup> 引用 BLAYER 模型模拟褐飞虱的远距离迁飞特征, 并分析了褐飞虱起飞、降落、迁飞历时和飞行高度等参数以及褐飞虱种群密度分布情况。Furuno 等<sup>[12-13]</sup> 利用 GEARN 模型对日本 10 个站的褐飞虱虫情数据做后向模拟, 分析了从中国迁飞至日本西部的褐飞虱的可能虫源地及其与气象因子的关系。封传红等<sup>[14-15]</sup> 采用订正的 850hPa 等压面上的气象数据, 引入褐飞虱自主飞行速度和飞行成层高度参数模拟并分析了我国北方稻区稻飞虱的迁飞动态及大发生的虫源地。

众多数值预报模式在褐飞虱迁飞模拟研究中也具有其各自的局限性, 较早的褐飞虱迁飞模拟是根据数值模式模拟的风温场, 利用轨迹分析法推算褐飞虱迁飞轨迹, 考虑的气象要素和物理过程较少。而 WRF 模式较之以前模式考虑的物理过程更为复杂、计算的精度更高, 能够更精确地反映大气动力场、温度场和湿度场。FLEXPART 模式既可以通过前向运算来模拟示踪物由源区向周围的扩散, 也可以通过后向运算来确定对于固定站点有影响的潜在源区的分布<sup>[16]</sup>。该模式能够处理多种气象要素输入场和多种物理过程, 丰富了不同类型排放源的输送、扩散和沉降计算。较之前的研究, WRF-FLEXPART 模式<sup>[17-21]</sup> 提高了时空分辨率的精度、全面的考虑了大气传输和沉降的物理过程, 能反映大气条件对褐飞虱迁飞轨迹及其密度的影响, 更符合褐飞虱的实际迁飞情况。

褐飞虱迁飞参数的变化直接影响其降落时间和地域分布估算, 也间接影响对其危害程度的评估。Pender<sup>[22]</sup> 总结了众多实验和田间观测结果, 归纳出褐飞虱迁飞参数, 包括起飞时间、飞行低温阈值、飞行持续

时间和飞行高度等,该参数得到了普遍的认可。本文将依据 Pender 归纳的褐飞虱迁飞参数,利用 WRF-FLEXPART 模式对褐飞虱迁飞进行模拟,通过实验观测检验 WRF-FLEXPART 模式模拟褐飞虱迁飞的适用性,并基于该模式模拟一次特定天气过程中褐飞虱的迁飞特征。以期该研究能对中国褐飞虱的测报与防治、农业防灾减灾及粮食安全具有重要的参考价值。

## 1 资料与数据

### 1.1 研究区域

本研究的研究区域为广西省桂林市兴安县(25.30—26.92°N, 110.23—110.93°E),该地区中间地势低,东南和西北两侧较高,分别分布着都庞山脉和越城岭山脉。两大山脉之间的狭长地带为适宜农业耕作和水果生产的丘陵及河谷平原,种植业比较发达。

### 1.2 气象数据与地理信息数据

气象再分析资料由美国国家环境预测中心提供,空间分辨率为  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ ,时间间隔为 6h;基础地理信息数据包括 STRM 90m 高程和水系数据,均由国家基础地理信息中心提供。

### 1.3 褐飞虱数据

2012—2015 年,在农业部桂林野外科学观测试验站(25.60°N, 110.70°E, 海拔 210m)进行迁飞害虫(包括褐飞虱、白背飞虱等)的监测工作,基地内主要种植水稻。利用昆虫趋光的生理特点,根据 Feng<sup>[23]</sup>设计的姊妹灯中的高空灯的设置方法,组装了一套适宜广西本地使用的探照灯诱虫器,探照灯为 GT75 型,装备灯泡为 ZJD1000W 的金属卤化物灯泡,诱集高度可达 500m 左右。将组装的多个漏斗形高空灯放于山上,将塑料桶置于漏斗下方,桶内装有深 10cm 浓度为 5% 的洗衣粉溶液以高效捕捉落入桶内的虫体。

探照灯通过定时开关分时段进行昆虫诱捕取样<sup>[24]</sup>,每天 19:30 时(北京时间,下同)自动开启,翌日 06:00 时自动关闭。共设置了 7 台高空探照灯,分时段取样:1 号灯(19:30—21:00)、2 号灯(21:00—22:30)、3 号灯(22:30—00:00)、4 号灯(00:00—01:30)、5 号灯(01:30—03:00)、6 号灯(03:00—04:30)、7 号灯(04:30—06:00)。昆虫取样后直接在室内分类统计,在稻飞虱发生盛期,每晚诱集的种群数量巨大,此时可将收集的昆虫中个体较大的样本先行取出,将剩余样本平均分割,取一块进行统计,最后乘以均分的次数。地面灯诱虫器使用由佳多科工贸有限公司生产的佳多自动虫情测报灯,该灯专门用于低空虫情监测工作<sup>[25]</sup>。地面灯诱数据的当日记录为前一日 08:00 时至当日 08:00 时的实际迁入虫量,每天装换一次接虫袋,因此模拟时间应从前一日开始。

模拟个例的褐飞虱虫情资料来源于各地(包括广东、贵州、湖南、湖北、江西和福建等地)植保站的逐日褐飞虱灯诱数据汇总表。

## 2 WRF-FLEXPART 模式简介

### 2.1 WRF-FLEXPART 模式

WRF-FLEXPART 模式是由 WRF 和 FLEXPART 两种模式组成,主要包括前处理、扩散模式和后处理 3 个部分。前处理包括气象数据和初始参数,为褐飞虱迁飞模拟研究提供气象背景场;扩散模式主要是计算释放源轨迹和浓度等,通过模拟褐飞虱迁飞过程,得到褐飞虱的位置数据;后处理通过统计分析、地理信息系统(Geographic Information System, GIS)和验证方法对模拟结果进行统计分析和验证,对褐飞虱的位置数据及气象要素进行加工处理,获得研究所需的褐飞虱迁飞特征量。WRF-FLEXPART 模式主要运行流程见图 1。

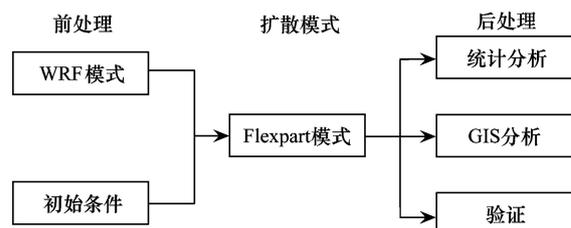


图 1 WRF-FLEXPART 模式运行流程图

Fig.1 WRF-FLEXPART model operation flow chart

## 2.2 参数设置

使用 WRF Version 3.6, 双向三重嵌套, 模式初始场采用空间分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$  的气象再分析资料, 时间间隔为 6h。模拟积分初始时间为 2013 年 9 月 20 日 08 时, 结束时间为 9 月 25 日 08 时, 垂直 27 层, 积分时间步长 180s, 每小时输出一次结果, 以最内层嵌套区域输出的气象背景场来驱动 FLEXPART 模式, WRF 模式参数化方案见表 1。

表 1 WRF 模式参数化方案

Table 1 Parameterization schemes of WRF model

参数化方案 Parameterization scheme	第一层 First layer	第二层 Second layer	第三层 Third layer
陆面过程 Continental process	Noah	Noah	Noah
近地面层 Near-surface layer	Monin-Obukhov	Monin-Obukhov	Monin-Obukhov
边界层方案 Boundary layer scheme	YSU	YSU	YSU
微物理过程 Microphysical process	WSM3	WSM3	WSM3
积云对流 Cumulus convection	Kain-Fritsch	Kain-Fritsch	—
短波辐射 Short-wave radiation	Dudhia	Dudhia	Dudhia
长波辐射 Long-wave radiation	RRTM	RRTM	RRTM

采用 FLEXPART 模式对 2013 年 9 月 20—24 日湖南、湖北和江西等地褐飞虱的迁飞状况模拟, 利用该时间段地面灯诱数据进行后向模拟, 以确定褐飞虱虫源地的范围, 再利用虫源地的灯诱数据(即实际虫量)进行前向模拟, 对模拟的各时刻达到兴安县的褐飞虱虫量的统计结果与观测的褐飞虱高空灯诱数据进行对比验证。

褐飞虱起飞大多发生在日落前后, 晚秋温度较低时, 褐飞虱迁出高峰多出现在下午温度较高时刻<sup>[26]</sup>, 且褐飞虱夜间降落的情况多于白天。故本文的后向模拟设置以降虫地为起点, 后推开始时间为每日 19:00, 后推结束时间为前一日 07:30, 即假设前一日 7:30 至当日 18:30 之间均有褐飞虱降落。由于秋季褐飞虱迁飞的最长时长约为 35h, 故设置最大模拟时长为 35h(即后推 35h 后褐飞虱的落点位置为轨迹的最远起点), 将这些轨迹群的后推终点位置导入 GIS 中制成空间分布图。

## 2.3 迁飞轨迹和虫量密度分布的计算方法

对褐飞虱迁飞相关数据的有效数据判定: 前向模拟起始点为褐飞虱虫源地, 终止点为有水稻生长的落区; 后向模拟起始点为植保站测点, 终止点为褐飞虱的可能虫源地且有水稻生长的地区; 空中飞行期间, 其飞行高度不低于  $16^\circ\text{C}$  温度层的高度; 其迁飞过程中不能通过强降水区域或大范围降水区域。

由 WRF-FLEXPART 模式得到褐飞虱迁飞的相关数据(经度、纬度和高度等)。首先, 分别统计模式模拟的不同起始地点、不同时刻的褐飞虱位置数据, 利用 GIS 空间分析法<sup>[27]</sup>分别对各时间段褐飞虱迁飞位置数据进行曲线拟合, 即可得到不同时间段褐飞虱的迁飞轨迹。其次, 把褐飞虱的位置数据转化为点图层, 并且将模拟区域划分成  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  网格, 通过把褐飞虱点图层和模拟区域的网格关联来统计每个网格单元的褐飞虱数量, 从而得出褐飞虱降落的密度分布。

## 3 模拟验证

### 3.1 迁飞范围的确定

褐飞虱一次南迁过程最长持续 35h 左右。采用 WRF-FLEXPART 模式对 2013 年 9 月 20—24 日广西兴安县地面灯诱虫量(表 2)进行后向模拟, 模拟时长 35h, 研究表明褐飞虱迁飞落区普遍在 700km 左右<sup>[28-29]</sup>, 以此确定兴安县褐飞虱虫源地的大致范围(图 2, 大圆区域)。由模拟结果可以看出, 到达兴安县的褐飞虱主要来自其东北方向, 包括湖南省东部、湖北省和江西省西北部。

表 2 兴安县褐飞虱地面灯诱观测/头

Table 2 Light trap catches of *N. lugens* on the ground at Xing'an

日期 Date	9/20	9/21	9/22	9/23	9/24
地面灯诱虫量 Light trap catches of <i>N. lugens</i> on the ground	128	223	724	179	191

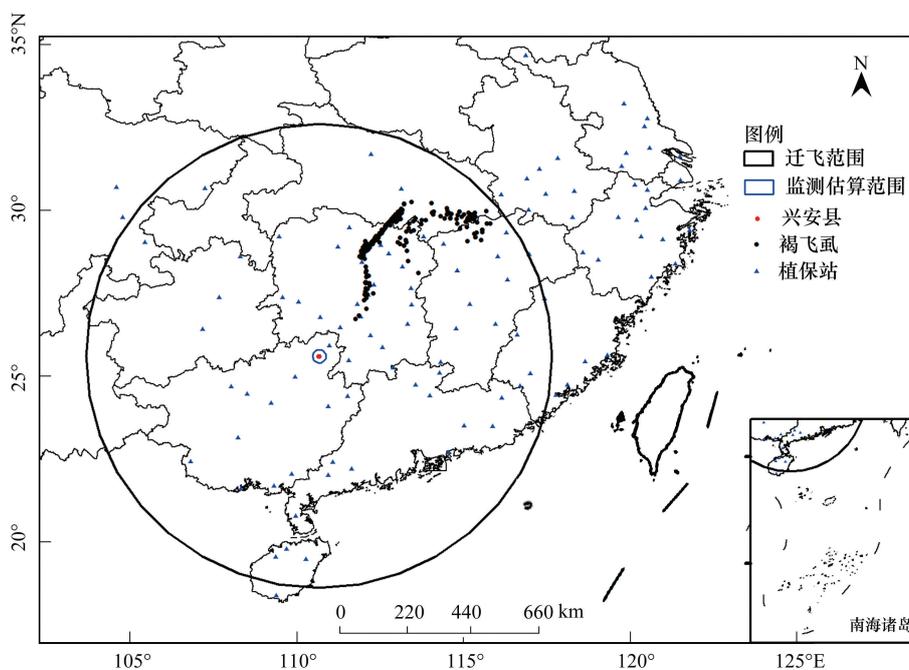


图 2 可能到达兴安县的褐飞虱分布范围

Fig.2 Distribution range of *N. lugens* arrived in Xing'an

### 3.2 褐飞虱迁飞的模拟

根据兴安县褐飞虱虫源地的范围和南迁迁飞方向,选取 2013 年 9 月 20—24 日湖南、湖北和江西 3 个省的各植保站地面灯诱数据作为褐飞虱虫源(表 3)。褐飞虱起飞一般是在日落之后至日出之前,模拟设置以当地日出日落时间为准。褐飞虱前向模拟起始点时间应以该时间段为准,因此模拟设置起始时间为 19:00 时。

表 3 褐飞虱地面灯诱观测虫量/头

Table 3 Light trap catches of *N. lugens* on the ground

站名 Station	9/20	9/21	9/22	9/23	9/24	站名 Station	9/20	9/21	9/22	9/23	9/24
湘阴县	76	45	20	14	32	双峰县	0	1	1	3	2
长沙县	718	315	164	32	494	桃源县	2368	2754	0	0	0
安仁县	1650	1880	120	1750	200	通城县	6	4	3	5	4
道县	28	57	28	1285	87	万安县	544	384	1296	152	96
东安县	6	24	16	17	0	万年县	5	2	3	3	0
桂阳县	9	14	13	10	14	武冈市	696	288	344	480	4
洪江市	691	0	1356	39	6	修水县	3	7	3	4	0
醴陵市	105	27	60	0	0	宜章县	86	112	48	35	26
临澧县	310	175	110	66	20	攸县	34	56	231	0	8
龙山县	299	228	814	2920	120	沅江市	202	230	45	0	0
祁东县	4	3	8	12	13	芷江县	215	169	62	2564	2
邵东县	96	240	448	4	5						

### 3.3 模式适用性验证

以 2013 年 9 月 20—24 日湖南、湖北和江西三个省的植保站地面灯诱数据作为褐飞虱虫源进行前推模拟,布灯点(25.60°N,110.69°E)周围 0.5°×0.5°范围且地面至 500m 高空范围内的虫量即代表该地区的褐飞虱虫量。兴安县褐飞虱高空灯诱观测如表 4,9 月 20—24 日五天整夜均有褐飞虱迁入兴安县。9 月 20—21 日褐飞虱夜间迁入各时刻分布较为均匀,22 日夜间褐飞虱突增,各时刻褐飞虱的迁入量均高于前 2 日;23—24 日褐飞虱迁入逐渐较少,但褐飞虱 23 日集中于后半夜(4:30),24 日集中于前半夜(19:30)迁入,迁入量分别为 908 头、2356 头。

表 4 兴安县褐飞虱高空灯诱虫量/头

Table 4 Light trap catches of *N. lugens* in the sky at Xing'an

时间 Time	高空(5—500m)灯诱虫量 Light trap catches of <i>N. lugens</i> in the sky (5—500m)						
	19:30	21:00	22:30	0:00	1:30	3:00	4:30
9/20 Sep. 20 <sup>th</sup>	384	885	856	330	319	343	319
9/21 Sep. 21 <sup>st</sup>	357	216	112	131	258	547	537
9/22 Sep. 22 <sup>nd</sup>	1504	352	668	748	1912	1396	1000
9/23 Sep. 23 <sup>rd</sup>	33	24	42	150	222	860	908
9/24 Sep. 24 <sup>th</sup>	2356	54	47	37	29	40	31

对比褐飞虱模拟虫量与观测值(图 3)可以看出,褐飞虱虫量模拟值与虫量观测值的相近、变化趋势一致,相关关系达到 0.49(样本量  $N = 35$ )并且通过了  $P < 0.01$  的信度检验。并且 WRF-FLEXPART 模式能够很好地模拟出褐飞虱的迁入峰,如图 4 可以发现,褐飞虱的模拟峰值与观测峰值相近,平均早于观测峰值 1.5h。研究结果表明 WRF-FLEXPART 模式适用于褐飞虱迁飞模拟,且模拟精度较好。

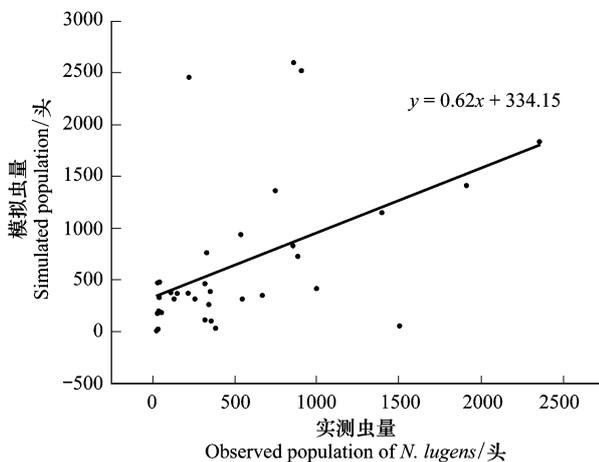


图 3 兴安县褐飞虱实测虫量与模拟虫量的关系

Fig.3 Relationship between the observed and simulated population of *N. lugens* at Xing'an

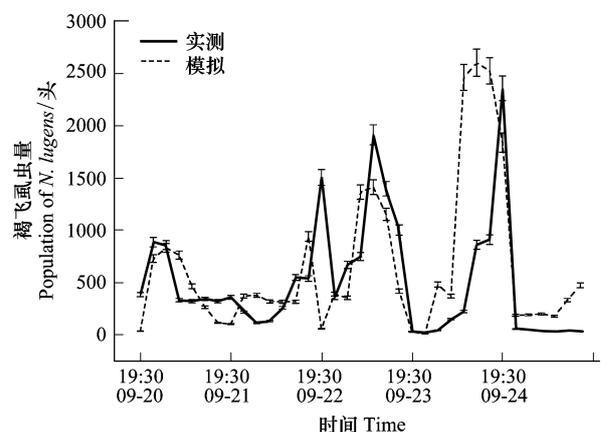


图 4 兴安县褐飞虱实测虫量与模拟虫量的对比

Fig.4 Comparison of the observed and simulated population of *N. lugens* at Xing'an

## 4 个例分析

2008 年 10 月 5 日—10 月 7 日,我国南方地区出现一次冷锋无降水过程,模拟此次天气过程中褐飞虱迁飞特征。褐飞虱虫情资料包括广东、贵州、湖南、湖北、江西和福建等地植保站的逐日褐飞虱灯诱数据,其中江西、福建和广西境内各植保站在研究时间段内未测得有褐飞虱迁入,其余各地区植保站均有褐飞虱迁入。

#### 4.1 大气背景

从 2008 年 10 月 5 日 06 时起,冷空气从北向南分股渗透,同时,有热带气旋自南向北影响两广地区,广东地区气温略高,周边地区如广西、湖北、湖南和贵州气温较低,均低于 15℃。广东省西南部地区的相对湿度高于中北部地区。在 850hPa 高度上,广西、贵州、湖南、湖北和广东西部地区大部分时间段风向以东北风为主且风速较大,近地面附近以偏东风为主,风速较小。至 6 日 06 时,冷空气开始影响我国南方大部分地区;7 日 06 时,冷高压逐渐东移出海。

#### 4.2 迁飞轨迹特征

由褐飞虱迁飞轨迹结果(图 5)可以看出,此时间段褐飞虱主要由我国长江流域地区向南迁入,该结果符合褐飞虱秋季向南迁飞的基本规律。贵州、湖北、湖南和广东其他植保站迁入的褐飞虱受南下冷空气输送的影响,皆以东北向西南方向为主要迁入方向。此时,广东中南部地区各植保站测得褐飞虱降落的虫量增加,而其他地区的褐飞虱虫量较少。此次迁飞过程中,大气条件对褐飞虱迁飞的影响分析结果与褐飞虱迁飞轨迹模拟结果相吻合。

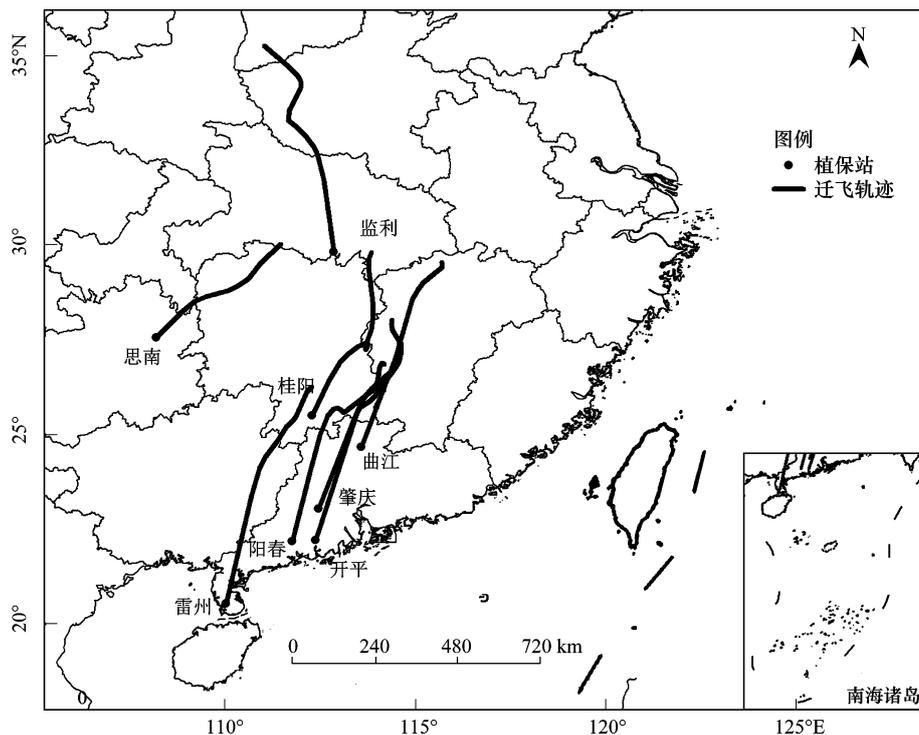


图 5 2008 年 10 月 5—7 日褐飞虱迁飞轨迹

Fig.5 Simulated migration trajectory of *N. lugens* on Oct. 5<sup>th</sup>—Oct. 7<sup>th</sup> 2008

#### 4.3 迁入虫量密度特征

利用 GIS 空间分析法对 10 月 5—7 日褐飞虱迁入虫量密度(图 6)统计分析发现,湖南、湖北、江西和广东西部地区虫量密度较大,最大地区可达到 5000 头/(0.5°×0.5°)。湖南、江西、两广地区虫量密度的空间分布为东北—西南走向,该时段两广、两湖地区盛行东北风且风速较大,且广东中部温度较高并伴随着下沉气流,有利于褐飞虱种群的迁入;贵州东北部和湖南西北部地区的褐飞虱虫量密度较大,在研究时段内该区域的盛行风向由东北向东风转变,且温度约在 20℃,生存条件的适宜,有利于褐飞虱的降落和迁入。受我国中部地区槽线影响,湖北地区以西北—东北风为主,气温在迁飞过程中低于 20℃,不利于褐飞虱的迁入和降落,该地区褐飞虱迁入虫量的密度较小约为 1000 头/(0.5°×0.5°),呈西北—东南方向分布。

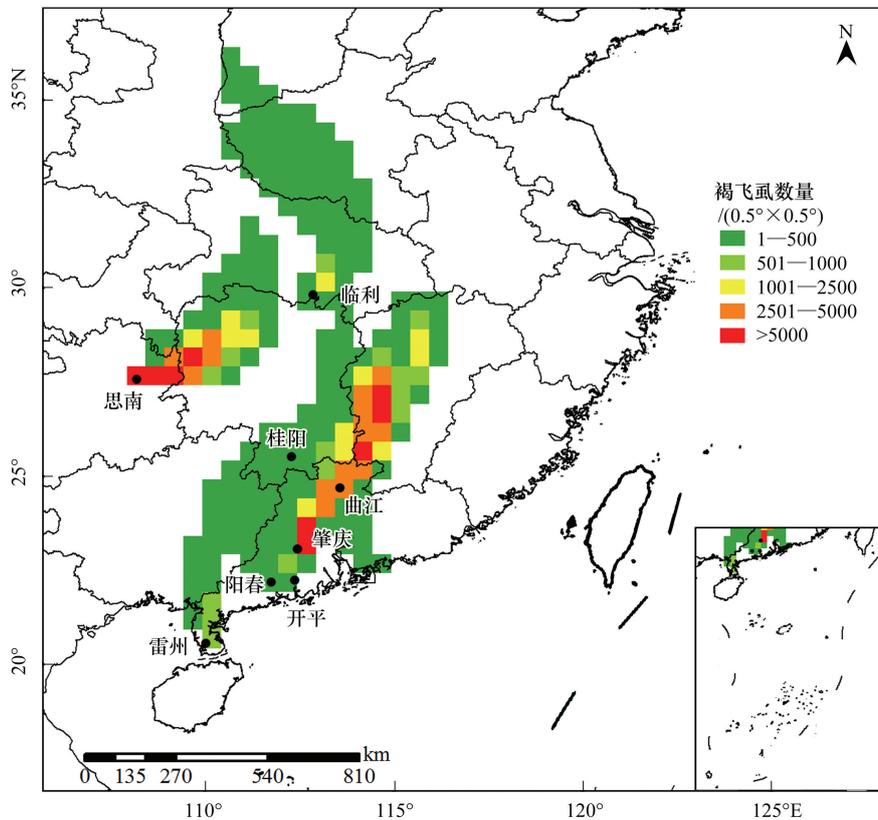


图 6 2008 年 10 月 5—7 日褐飞虱迁入虫量密度分布图

Fig.6 Simulated density of *N. lugens* on Oct. 5<sup>th</sup>—Oct. 7<sup>th</sup> 2008

## 5 结论与讨论

研究之所以选用 WRF-FLEXPART 模式,是因为:①FLEXPART 模式将每头褐飞虱视作一个粒子来模拟,而非如 HYSPLIT、BLAYER 等模型是把褐飞虱种群视作一个空气块。②FLEXPART 模式的气象背景场支持多种数据格式输入,如 ECMWF(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)、WRF 等数值天气预报模式结果。而 WRF 模式是目前我国业务应用较为广泛且输出精度较高的模式,其能够很好地与 FLEXPART 模式耦合。③FLEXPART 模式可以输出每头褐飞虱的位置,从而能够得到褐飞虱的迁飞轨迹和迁飞密度(即单位面积上褐飞虱的虫量)。这一点对于褐飞虱迁飞的相关研究非常重要,相比过去“把褐飞虱种群视作一个空气块”而得到的褐飞虱迁飞轨迹和类似于空气污染物的浓度分布,FLEXPART 模式的结果更加精确且更符合褐飞虱迁飞的实际。

本文利用 WRF-FLEXPART 模式模拟 2013 年 9 月 20—24 日褐飞虱迁入广西兴安县的迁飞过程,并通过实验观测检验 WRF-FLEXPART 模式是否可用于褐飞虱迁飞的模拟研究。各时刻褐飞虱虫量的模拟结果与兴安县实验观测的高空灯诱数据相符、变化趋势一致,相关性达到 0.49( $P < 0.01$ )。迁飞峰的模拟值平均早于观测值 1.5h,而造成这 1.5h 的误差可能与以下两个方面有关:①假设“褐飞虱为不会自发运动、只随气流运动的粒子”,而实际上,褐飞虱起飞、空中迁飞均具有一定的主动性,因而模式对其起飞、迁飞的微小主动性模拟存在一定的误差。②褐飞虱起飞时间与其生理特性有关,日落之后至日出之前均有起飞,并且褐飞虱一般会成群的、大量的起飞时,这也给设定褐飞虱起飞初始时间和虫量带来了很大的困难。个例模拟选取一次冷锋无降水天气过程中褐飞虱种群的迁飞过程。通过 WRF-FLEXPART 模式后处理(迁飞轨迹和迁入虫量密度分析),可以直观且较精确地呈现褐飞虱的迁飞特征。结合天气学分析可知,风为此次褐飞虱南迁提供了必要

的动力条件,降温引起褐飞虱飞行高度下降直至降落地面是此次降虫的主要诱因,褐飞虱具有向温暖地区迁飞的习性,因此冷锋南下使得我国由北至南逐渐降温,导致褐飞虱逐渐向南方温暖地区迁飞,最终接近适温层迫降地面,而地面降虫区此时恰好具有良好的大气环境和限食条件;再者,由于冷锋南下,冷暖空气交汇,局部地区出现下沉气流,有助于褐飞虱种群降落。

本文研究结果表明 WRF-FLEXPART 模式适用于褐飞虱的迁飞模拟,并且对其迁入峰和迁飞虫量都有较好的模拟性能。但由于模式初始设计是应用于非生物粒子扩散,并未考虑褐飞虱迁飞过程中的主动性和有限的生命周期,因此模拟结果与褐飞虱实际的迁飞情况还存在一定的误差。而褐飞虱测报业务中,缺乏连续的、小时间尺度和密集的虫情数据,且没有可行的动态监测方法和工具,因此,今后的研究方向应向两个方向发展。一是, WRF-FLEXPART 模式模拟褐飞虱迁飞过程的误差校正;二是,通过大量个例的综合分析和实验观测的验证来归纳褐飞虱迁飞的普遍规律,继而提取褐飞虱迁飞的预警预报指标。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 程遐年, 吴进才, 马飞. 褐飞虱研究与防治. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- [ 2 ] Pathak M D. Ecology of common insect pests of rice. Annual Review of Entomology, 1968, 13(2): 257-294.
- [ 3 ] International Rice Research Institute. Brown Planthopper: Threat to Rice Production in Asia. Los Baños, Philippines: IRRI, 1979.
- [ 4 ] Kennedy J S. A turning point in the study of insect migration. Nature, 1961, 189(4767): 785-791.
- [ 5 ] Hu G, Lim K S, Horvitz N, Clark S J, Reynolds D R, Sapir N, Chapman J W. Mass seasonal bioflows of high-flying insect migrants. Science, 2016, 354(6319): 1584-1587.
- [ 6 ] Rosenberg L J, Magor J I. Predicting windborne displacements of the brown planthopper, *Nilaparvata lugens* from synoptic weather data. 1. Long-distance displacements in the North-East Monsoon. Journal of Animal Ecology, 1987, 56(1): 39-51.
- [ 7 ] 程极益, 樊多琦, 包云轩, 费惠新. 冀东稻飞虱暴发的轨迹分析. 中国农业气象, 1994, 15(1): 2-5.
- [ 8 ] 胡继超, 程极益, 储长树, 沈桐立. 褐飞虱在我国东部地区秋季回迁的三维轨迹研究. 中国农业气象, 1997, 18(5): 1-6.
- [ 9 ] 翟保平, 张孝羲. 迁飞过程中昆虫的行为: 对风温场的适应与选择. 生态学报, 1993, 13(4): 356-363.
- [ 10 ] Turner R, Song Y H, Uhm K B. Numerical model simulations of brown planthopper *Nilaparvata lugens* and white-backed planthopper *Sogatella furcifera* (Hemiptera: Delphacidae) migration. Bulletin of Entomological Research, 1999, 89(6): 557-568.
- [ 11 ] Zhu M, Song Y H, Uhm K B, Turner R W, Lee J H, Roderick G K. Simulation of the long range migration of brown planthopper, *Nilaparvata lugens* (Stål), by using boundary layer atmospheric model and the Geographic Information System. Journal of Asia-Pacific Entomology, 2000, 3(1): 25-32.
- [ 12 ] Furuno A, Terada H, Chino M, Yamazawa H. Experimental verification for real-time environmental emergency response system: WSPEEDI by European tracer experiment. Atmospheric Environment, 2004, 38(40): 6989-6998.
- [ 13 ] Furuno A, Chino M, Otuka A, Watanabe T, Matsumura M, Suzuki Y. Development of a numerical simulation model for long-range migration of rice planthoppers. Agricultural and Forest Meteorology, 2005, 133(1/4): 197-209.
- [ 14 ] 封传红, 翟保平, 张孝羲, 汤金仪. 我国北方稻区 1991 年稻飞虱大发生虫源形成. 生态学报, 2002, 22(8): 1302-1314.
- [ 15 ] 封传红, 翟保平, 陈庆华, 汤金仪. 利用 850 hPa 气流资料分析稻飞虱迁飞路径. 中国农业气象, 2003, 24(3): 31-35.
- [ 16 ] Stohl A, Forster C, Frank A, Seibert P, Wotawa G. Technical Note: the Lagrangian particle dispersion model FLEXPART version 6.2. Atmospheric Chemistry and Physics, 2005, 5(9): 2461-2474.
- [ 17 ] Fast J D, Easter R C E. A Lagrangian particle dispersion model compatible with WRF//Proceedings of the 7<sup>th</sup> Annual WRF User's Workshop. Boulder, CO: NCAR, 2006.
- [ 18 ] Pagano L E, Sims A P, Boyles R P. A Comparative Study Between FLEXPART-WRF and HYSPLIT in An Operational Setting: Analysis of Fire Emissions Across Complex Geography Using WRF [D]. Raleigh, NC: North Carolina State University, 2010.
- [ 19 ] Wang W, Bruyère C, Duda M, Dudhia J, Gill D, Kavulich M, Keene K, Chen M, Lin H C, Michalakes J, Rizvi S, Zhang X, Berner J, Ha S, Fossell K. ARW Version 3 Modeling System User's Guide. NCAR Tech. Note, 2017. [http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user\\_guide\\_V3/ARWUsersGuideV3.pdf](http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3/ARWUsersGuideV3.pdf)
- [ 20 ] Stohl A, Seibert P. Accuracy of trajectories as determined from the conservation of meteorological tracers. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1998, 124(549): 1465-1484.
- [ 21 ] Stohl A, Wotawa G. A method for computing single trajectories representing boundary layer transport. Atmospheric Environment, 1995, 29(22): 3235-3238.

- [22] Pender J. Migration of the brown planthopper, *Nilaparvata lugens* (Stål.) with special reference to synoptic meteorology. *Grana*, 1994, 33(2): 112-115.
- [23] Feng H Q, Wu K M, Cheng D F, Guo Y Y. Radar observations of the autumn migration of the beet armyworm *Spodoptera exigua* (Lepidoptera: Noctuidae) and other moths in northern China. *Bulletin of Entomological Research*, 2003, 93(2): 115-124.
- [24] 齐会会, 张云慧, 蒋春先, 孙明阳, 杨秀丽, 程登发. 广西东北部稻区白背飞虱早期迁入虫源分析. *中国农业科学*, 2011, 44(16): 3333-3342.
- [25] 刘万才, 陆明红, 翟保平, 王建强, 高小丽, Tuan H A, Cu H D. 越南水稻生产及其迁飞性害虫发生情况. *中国植保导刊*, 2014, 34(10): 91-95.
- [26] 陈若簾, 程遐年. 褐飞虱起飞行为与自身生物学节律、环境因素同步关系的初步研究. *南京农学院学报*, 1980, (2): 42-49.
- [27] 汤国安, 杨昕. *ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程(第二版)*. 北京: 科学出版社, 2012.
- [28] 程遐年, 陈若簾, 习学, 杨联民, 朱子龙, 吴进才, 钱仁贵, 杨金生. 稻褐飞虱迁飞规律的研究. *昆虫学报*, 1979, 22(1): 1-21.
- [29] 翟保平. 也谈褐飞虱的再迁飞问题. *中国植保导刊*, 1992, 12(3): 36-40.