

刘维,蔡雪薇,刘垚,等,2017. 基于 FLEXPART 的稻纵卷叶螟迁飞路径及大气背景研究[J]. 气象,43(4):460-467.

基于 FLEXPART 的稻纵卷叶螟迁飞路径 及大气背景研究^{*1}

刘 维¹ 蔡雪薇¹ 刘 垚² 郭安红¹ 王纯枝¹ 陆明红³ 包云轩²

1 国家气象中心,北京 100081

2 南京信息工程大学,南京 210044

3 全国农业技术推广服务中心,北京 100125

提 要: 在分析 2008 年我国稻纵卷叶螟时空发生规律特点的基础上,选取典型迁飞过程并对迁飞的大气背景进行分析,利用 FLEXPART-WRF 模式,对典型迁飞过程的路径进行逆推,以此明确大气背景对迁飞路径的影响。结果表明:(1)2008 年稻纵卷叶螟发生峰型主要以双峰型为主,发生范围最广、程度最严重的北迁过程是 7 月 15—18 日过程。(2)通过 FLEXPART 计算逆推代表站,江苏淮阴的迁飞虫源来源于浙江中部至安徽中西部一线。(3)气压场上天气系统的分布、移动和强度变化对稻纵卷叶螟的迁飞和降落有重要作用;850 hPa 风场上的盛行偏南风对稻纵卷叶螟的北迁有利;该高度上的反气旋环流对稻纵卷叶螟的迁入和降落十分有利;气旋性切变对稻纵卷叶螟的迁出有利。(4)稻纵卷叶螟迁飞路径上的降水对稻纵卷叶螟的降落有动力迫降作用。

关键词: 稻纵卷叶螟, FLEXPART 模型, 大气背景, 迁飞路径

中图分类号: S161, P49

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.04.008

Study on Immigration Path of Rice Leaf Roller Based on FLEXPART and Atmospheric Background

LIU Wei¹ CAI Xuewei¹ LIU Yao² GUO Anhong¹ WANG Chunzhi¹
LU Minghong³ BAO Yunxuan²

1 National Meteorological Centre, Beijing 100081

2 Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

3 National Agricultural Technology Extension and Service Centre, Beijing 100125

Abstract: The spatio-temporal distribution pattern of the rice leaf rollers was analyzed and the atmospheric circulation background in which the typical immigration process happened were studied. The model of FLEXPART-WRF was used to speculate the immigration path in order to illustrate the influence of atmospheric background on the path. The research results showed that (1) the bimodal type was the major type of the rice leaf rollers in 2008 and the most extensive serious immigration process was during the period from 15 to 18 July. (2) The representative station Huaiyin in Jiangsu Province was chosen to simulate the source by FLEXPART, and the immigration of the rice leaf rollers was from the middle of Jiangsu and the midwest of Anhui Province. (3) The synoptic situation including the distribution, movement and strength changes of weather system at 850 hPa isobaric surface played important transferring and controlling roles on the migration and landing of the rice leaf roller. The prevailing deflected-northward wind at 850 hPa isobaric surface was favorable for the northward migration of rice leaf roller. However, the prevailing

* 国家气象中心青年基金项目(Q201610)和公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306053)共同资助

2016 年 6 月 12 日收稿; 2016 年 12 月 7 日收修定稿

第一作者:刘维,主要从事农业气象业务与科研工作, Email:rainvswindvs@163.com

deflected-southward wind at this height had no obvious influence on the southward migration. The zones with anticyclonic circulation in the wind field at 850 hPa isobaric surface were beneficial to the immigration and landing of the pest, and the cyclonic shear was beneficial to the emigrating of the pest. (4) The rainfall in the migrating paths of the rice leaf rollers played a critical role in the intensive landings of the pest.

Key words: rice leaf rollers, the FLEXPART model, atmospheric situation, immigration path

引言

稻纵卷叶螟是一种远距离、季节性往返迁飞的水稻害虫,具有较强的再迁飞能力,一般能经过1~4次飞行,迁飞高度在500~1000 m左右,以此实现远距离迁飞,这给现阶段的监测预报工作带来了较大的困难(包云轩等,2015)。目前对稻纵卷叶螟监测预报的研究方法比较多,主要集中在统计回归模型(周立阳和张孝羲,1995;石根生等,1998),基于未来天气预报的统计模型(白先达等,2010),神经网络预报(汪四水和张孝羲,2000;汪四水等,2003;梁章桢等,2011),基于GIS的预测系统(汪四水等,2001;张谷丰等,2014),基于物候模型的预测(张谷丰等,2013),以及基于大气环流的迁飞模型等(王翠花等,2006a;2006b;包云轩等,2008;2015;Sivasundaram et al,2008;Akira et al,2005)。经过国内外学者多年研究,已经明确影响迁飞性害虫远距离迁飞和成灾的重要因素除了害虫本身的生理生态特性之外,大气环流背景则是最重要的一环,因此,基于大气环流的迁飞模型成为研究的一个热点方向。芦芳等(2010;2013)、齐国君等(2011)、万素琴等(2012)、包云轩等(2015)利用NOAA研发的大气质点轨迹分析平台HYSPLIT,对水稻迁飞性害虫进行轨迹逆推,均取得较好的结果。作为与HYSPLIT平台类似的污染源排放模式FLEXPART,则较少在病虫害蔓延和迁飞分析中试用。FLEXPART模式是由挪威大气研究所研发的一种基于拉格朗日计算方法的粒子扩散模式,可以通过时间的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,尤其当研究区域内观测站点数量少于排放源数量时,后向运算更具有优势(陈斌等,2010;2011;刘钊等,2015;Stohl et al,1998)。目前FLEXPART模式被广泛应用于空气污染与大气传输相结合的领域,国内FLEXPART模式研究主要集中在大气污染物的扩散与输送以及反演卤代温室

气体排放源清单,并扩展到与其他模式中尺度的联合应用上来(An et al,2013;李岩等,2010)。

纵观国内外的研究,较少把FLEXPART模式应用在模拟迁飞性害虫轨迹中,由于全国植物保护站点相对稻纵卷叶螟迁飞数量来说偏少,更适合进行后向逆推,因此本文采用FLEXPART模式的后向运算功能,利用地面观测资料与中尺度模型WRF(Brioude et al,2013),结合NCEP再分析资料,模拟稻纵卷叶螟迁飞中的大气背景场,推算稻纵卷叶螟迁飞轨迹,旨在揭示稻纵卷叶螟在时间空间上的迁飞路径,尝试结合气象模型进行预测预报的新方法。

1 资料与方法

1.1 资料

自2000年以来,水稻稻纵卷叶螟每年发生的面积大多都占当年水稻播种面积的50%以上,严重危害水稻安全生产,其中2008年稻纵卷叶螟发生面积为历年最大,利用农业部全国农业技术推广服务中心提供的2008年3月31日至10月31日全国103个植物保护站的稻纵卷叶螟资料作为虫情资料。气象资料由国家气象中心提供的2008年7月地面要素场资料,同时下载NCEP网站的2008年7月15—19日的 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的气象再分析数据,用来运行WRF模式。以WRF模式模拟的区域作为FLEXPART的边界,以此进行轨迹逆推。

1.2 FLEXPART 模式简介

FLEXPART模式是通过计算点、线、面或体积分源释放的大量粒子的轨迹,来描述示踪物在大气中长距离、中尺度的传输、扩散、干湿沉降和辐射衰减等过程(陈斌等,2010;2011;李岩等,2010;刘钊等,2015)。该模型的核心内容是研究大气污染的源-受体关系,污染排放物为源,观测站为受体,通过研究污染物水平输送、扩散、对流、干湿沉降、辐射衰减和一阶化学反应等过程,可以得到随时间序列变化的格点

污染浓度或格点驻留时间(蔡旭辉,2008),通过源-受体关系转换 τ_i ,计算格点驻留时间的公式为:

$$\tau_i = \frac{T}{NJ} \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^J f_{ijn}$$

式中, τ_i 为格点驻留时间(单位:s); i 为第 i 个格点; T 为时间分辨率(单位:s); N 为 T 时间范围内采样的数量(单位:个); J 为释放的粒子总数(单位:个); f_{ijn} 是一个函数,它决定了对于指定格点有“贡献”的粒子的多少(安兴琴等,2014)。FLEXPART 模式总共有 28 种粒子模拟方式,包括 tracer、O₃、NO 等众多方式,本研究采用第 12 种粒子模拟方式,即 SO₄-aero 模拟。

1.3 方法

1.3.1 迁飞个例选择

处理 2008 年全国 103 个植物保护站的稻纵卷叶螟资料,选用灯诱蛾量作为指标,对 2008 年全国稻纵卷叶螟虫情资料进行了时间序列分析,以后一天对应于前一天我国水稻主要生长区内有最大虫量突变为前提,分析后筛选了典型的北迁降落过程为 7 月 15—18 日,将对应过程的虫情资料导入 ArcGIS 中进行空间分析。

1.3.2 大气背景数值模拟

本文中把稻纵卷叶螟成虫迁飞当做排放源,虫情观测站作为受体。采用 NECP 1°×1°气象再分析资料作为初始场,利用中尺度模式 WRF 对 2008 年 7 月 15—18 日大气背景进行数值模拟,并根据 FLEXPART 模拟结果进行绘图,描述逆推的迁飞轨迹。WRF 模拟的物理参数化分别为:Monin-Obukhov 陆面方案,Kain-Fritsch(new Eta)积云参数化方案,Morrison 2-moment 微物理方案,长波辐射 RRTM 方案,短波辐射 Dudhia 方案,YSU 边界层方案,Noah 的土壤方案(王明欢等,2012;何建军等,2013;王坤等,2014;宝兴华和杨舒楠,2015)。

2 结果与分析

2.1 稻纵卷叶螟时空变化规律

2.1.1 始见期与终现期

2008 年稻纵卷叶螟于 3 月 30 日迁入我国境内,始见我国华南的桂西南稻区,4 月底、5 月初在两广及两湖地区大面积爆发,5 月底、6 月中旬北迁到

江南稻区及长江中下游稻区,8 月底、9 月初开始回迁,10 月下旬迁出我国境内。在整体分析 2008 年全国各站虫情发生状况后,可以了解到 2008 年我国稻纵卷叶螟发生的时间变化规律。始见期:全国范围内稻纵卷叶螟始见期为 3 月 30 日至 8 月 1 日,其中广西柳江最早,为 3 月 30 日;最迟为江西余干,为 8 月 1 日;普遍的始见期在 5 月 3 日左右。终现期:全国范围内稻纵卷叶螟终见期为 8 月 2 日至 10 月 31 日,其中云南丘北最早,为 8 月 2 日;贵州思南最迟,为 10 月 31 日;普遍的终现期在 9 月 15 日左右。

2.1.2 降落峰型

对各站灯诱蛾量进行时间序列分析,寻找对应峰次,然后筛选出当日全国有两个单站降落虫量大于 500 头且次日有明显虫量突变的迁入过程作典型个例分析。结果表明:①2008 年我国各地稻纵卷叶螟的发生峰型主要以双峰型为主;②严重发生期集中在 7 月中旬至 8 月下旬,其中 7 月中旬和 8 月中旬为大暴发期;③分析全国 103 个植物保护站的虫情数据发现,28 个站的降落峰型为单峰型,44 个站为双峰型,31 个站为多峰型。单峰型主要发生在云南、重庆、湖南的部分地区;双峰型集中在江苏、湖南、安徽等地,贵州、云南两省也有少量分布;多峰型主要集中在安徽、湖南、浙江以及江苏四省,该四省也是虫情大爆发的地区。

2.1.3 空间变化规律

应用 ArcGIS 对 2008 年我国稻纵卷叶螟的空间分布状况进行分析,全国发生范围最广、程度最严重的北迁过程在 7 月 17 日左右,最严重的南迁过程是 9 月 6 日左右。始见期开始至 6 月中旬,稻纵卷叶螟主要降落在云南、湖南、贵州等稻区;6 月中旬至 7 月上旬降落在安徽、江苏和浙江三省的稻区,在此期间,稻纵卷叶螟呈现大发生趋势。8 月下旬开始南迁,集中南迁期在 9 月上中旬,主要降落在安徽、江苏和浙江等地;9 月下旬主要降落在湖南和云南等省。到 10 月下旬,稻纵卷叶螟基本迁出我国。

北迁迁入虫量最多、降落面最广、危害程度最严重的过程是 2008 年 7 月 15—18 日发生在安徽、江苏、湖南和贵州等省的一次稻纵卷叶螟大迁入(图 1)。对其平均灯诱蛾量进行的 GIS 空间分析发现:这次北迁的主降区在我国黔、湘、皖、苏等地,日灯诱蛾量极大值出现在 18 日的江苏省淮阴县。因此,选取此次北迁最严重的过程进行大气背景的数值模拟。

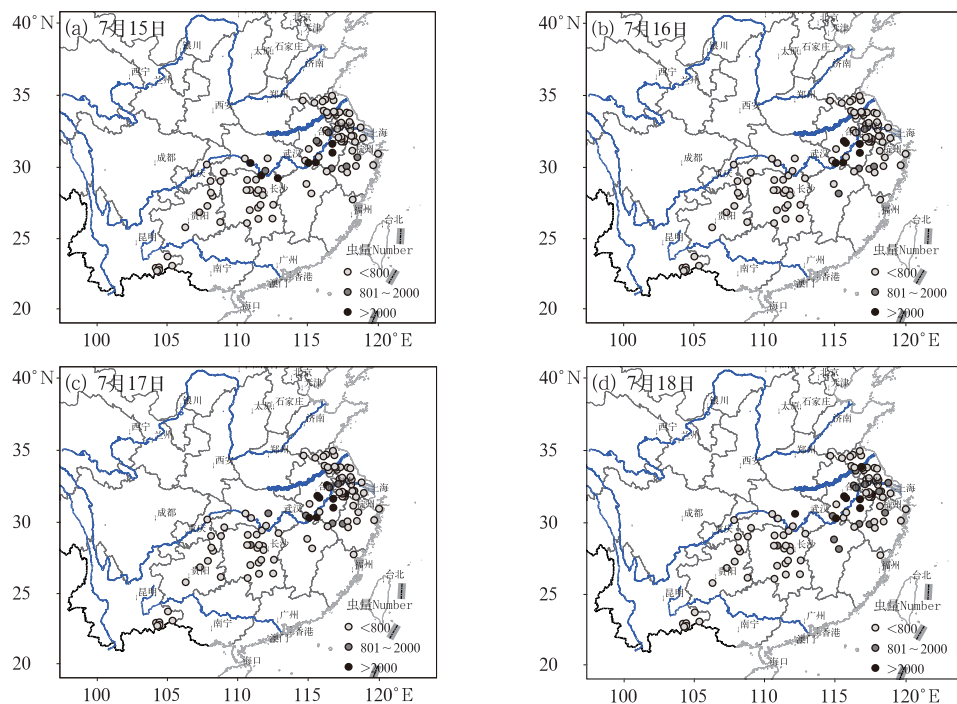


图 1 2008 年 7 月 15—18 日稻纵卷叶螟数量的空间分布(单位:头)

Fig. 1 The distribution of moths during 15—18 July 2008 (unit: number)

2.2 稻纵卷叶螟迁飞轨迹分析

为了解本次稻纵卷叶螟突增的迁飞过程,选取江苏淮阴站作为代表性站点进行轨迹逆推(图 2),淮阴站首次出现虫量情况是 7 月 16 日,在 7 月 18 日即达到全年的峰值,说明该站虫量全部为外地迁入,没有本地虫源,因此选取江苏淮阴($33^{\circ}4'N$ 、 $119^{\circ}2'E$)进行轨迹逆推。以淮阴站 7 月 18 日观测点虫量 7785 头作为释放粒子进行逆推,逆推采用 17 日 17 时至 18 日 17 时 24 h 内释放,利用 WRF 模拟大气背景,得到逆推点轨迹(图 3)。由图 3 可知,淮阴站 7 月 18 日虫子大部分来自与浙江和安徽,可以看成是两条路径;17 日 15—21 时大部分虫

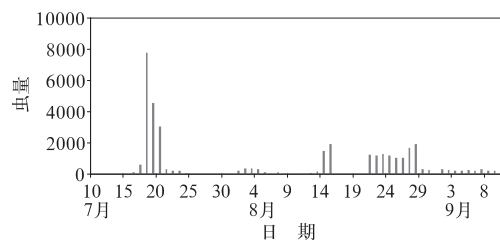


图 2 2008 年 7 月 10 日至 9 月 10 日
淮阴站稻纵卷叶螟数量逐日变化情况

Fig. 2 Daily dynamics of moths in Huaiyin Station
from 10 July to 10 September 2008

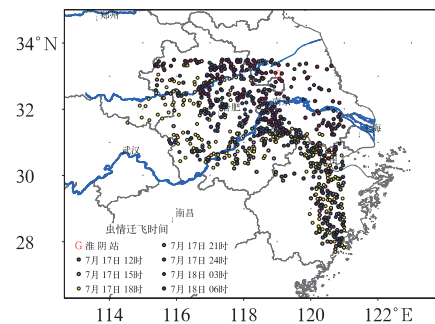


图 3 淮阴站稻纵卷叶螟迁飞轨迹逆推图

Fig. 3 Backward trajectories of rice
leaf rollers in Huaiyin Station

子集中在浙江中部至安徽中西部一线;17 日 24 时至 18 日 06 时则集中在安徽西部和江苏西南部,在江淮之间尤其突出,由于白天稻纵卷叶螟一般不进行迁飞,因此 18 日 06 时的虫子准备沉降迁入,恰好大部分虫子集中在淮阴站西侧和南侧,这也为淮阴站大爆发提供了虫情基础。由图 1c 和 1d 可以看出,18 日相比于 17 日江淮虫量有增多趋势,这也符合模拟逆推的轨迹效果。

2.3 大气环流形势分析

控制和影响稻纵卷叶螟起飞、空中飞行、降落和

为害的主要环境因素是大气背景,而构成大气背景的是大气环流形势、大气动力场和气象要素场。其中特定高度的大气环流形势、迁飞高度所对应的风场、降水分布等对稻纵卷叶螟的迁入和降落起着决定性的作用。

2.3.1 850 hPa 等压面天气形势

气压分布的不均匀是大气运动的根本动力,也是风载迁飞性害虫高空飞行的动力。分析 850 hPa 等压面天气形势图(图 4)后可以发现:在 2008 年 7 月 17 日 20 时 850 hPa 高度上,我国华南西部、云贵高原大部为低压控制,有上升气流,有利于稻纵卷叶螟的迁出和起飞,低压前部及东北侧盛行强劲西南暖湿气流,对西南虫源地迁出的稻纵卷叶螟有重要的输送作用。菲律宾群岛以北、我国台湾和大陆东南沿海为一台风系统控制,台风控制区内有强上升气流,对区内北部的虫源有抬升、北送作用。华东沿海、黄海南部、东海北部为西太平洋副热带高压所控制,副热带高压控制区内有强下沉气流,对从西南方向输送来的虫源有截留沉降作用;而其西北侧有大面积的、较强的降水区,降水对南方来的虫源有动力迫降作用。实际上该降水区是三股气流的汇合区,即从华南西部、云贵高原来的西南暖湿气流、从西北高纬地区来的西北干冷空气和从东南海区来的东南暖湿气流汇合于此。在 2008 年 7 月 18 日 08 时 850 hPa 等压面(图 4b)上,台风北上,并在我国福建沿海登陆;西北冷高压增强南下并控制四川盆地,其东南前沿南下的西北干冷空气增强、扩展、南下直逼两湖地区;西南低压稍有减弱南撤,副热带高压出现短期振荡型北移;山东半岛低压区引导西南暖湿气

流进入苏皖地区。湘、赣、皖、苏处四大天气系统交汇区,也是偏南气流、西北气流、东北气流的交汇区,淮阴站正好处于该区域内,降大到暴雨,导致这一地区稻纵卷叶螟的大规模迁入(图 6d)。由此可见,天气系统分布、移动和强度变化对稻纵卷叶螟的迁飞和降落有重要的调控作用。

2.3.2 850 hPa 风场

7 月 17—18 日 850 hPa 风场对稻纵卷叶螟北迁也十分有利(图 5)。云贵高原以东,秦岭、淮河以南的我国大部地区水平风场为偏南气流,福建沿海受台风影响为气旋式风向切变区,对这一地区虫源的迁出十分有利,台风北侧为偏南气流,为东南虫源向北输送至浙、沪、苏提供了良好的条件。安徽西南部、湖北东南部、湖南东北部和江西西北部反气旋环流表明该地区盛行下沉气流,江苏中南部垂直风场向下,对害虫降落有利。18 日受苏皖北部风场辐合上升运动,有利于虫子迁出,但受到强降水影响,大部分虫源仍处于地面,等待迁飞。

2.3.3 降水场分析

降水是影响稻纵卷叶螟降落的一个重要动力胁迫机制,尤其是在水稻生长旺季,稻纵卷叶螟迁飞经过的特定区域一定强度(通常日降水量 10 mm 以上)的降水分布(芦芳等,2010;2013;齐国君等,2011)在很大程度上对稻纵卷叶螟降虫区的分布起着重要的定位作用。这一点可以从图 6 的降水区与降虫区的耦合上得到验证。从 2008 年 7 月 15—16 日 24 h 降水量分布图(图 6a 和 6b)可以看出,强降水主要分布在云贵高原、四川盆地、秦岭淮河以北至

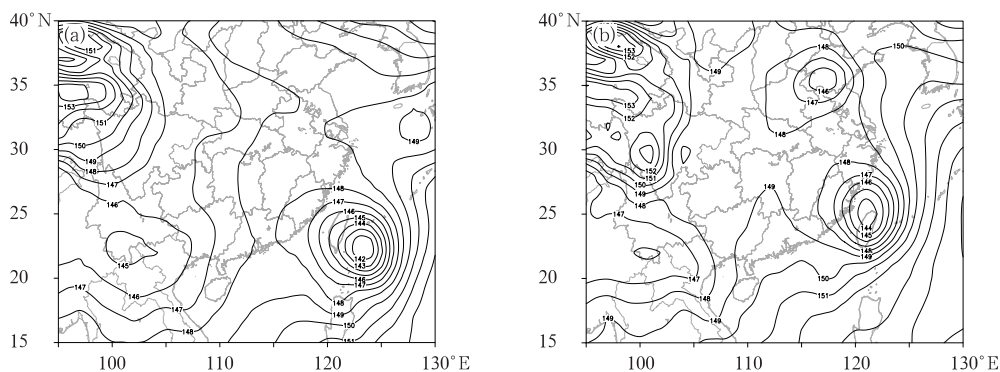


图 4 2008 年 7 月 17 日 20:00(a)与 18 日 08:00(b)850 hPa 等压面位势高度场(单位: dagpm)

Fig. 4 The 850 hPa geopotential height field at 20:00 BT 17 (a) and 08:00 BT 18 (b) July 2008 (unit: dagpm)

山东半岛、渤海湾的带状区域,上述区域中并没有明显的稻纵卷叶螟迁入,表明稻纵卷叶螟受气流引导

往长江中下游方向迁飞。7月17日24h降水量减少,分布区域零散,长江中下游湖北、安徽分别

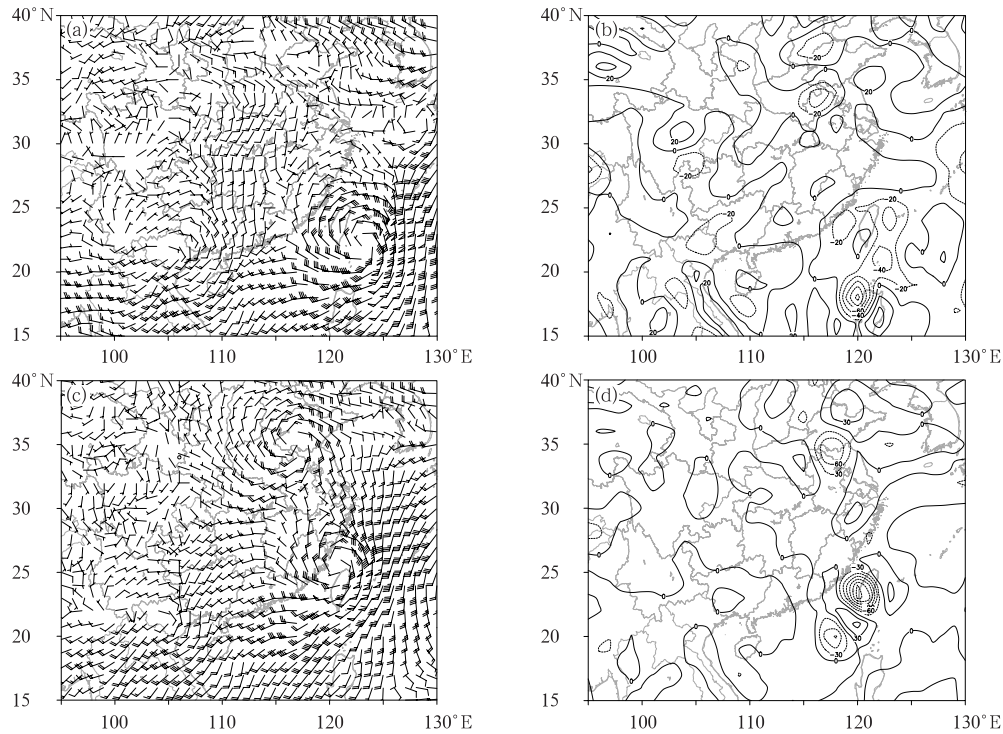


图5 2008年7月17日20:00(a, b)与18日08:00(c, d)850 hPa水平风场(a, c)与垂直风场(b, d)

Fig. 5 The simulated horizontal wind field (a, c) and vertical speed field (b, d) at 850 hPa at 20:00 BT 17 (a, b) and 08:00 BT 18 (c, d) July 2008

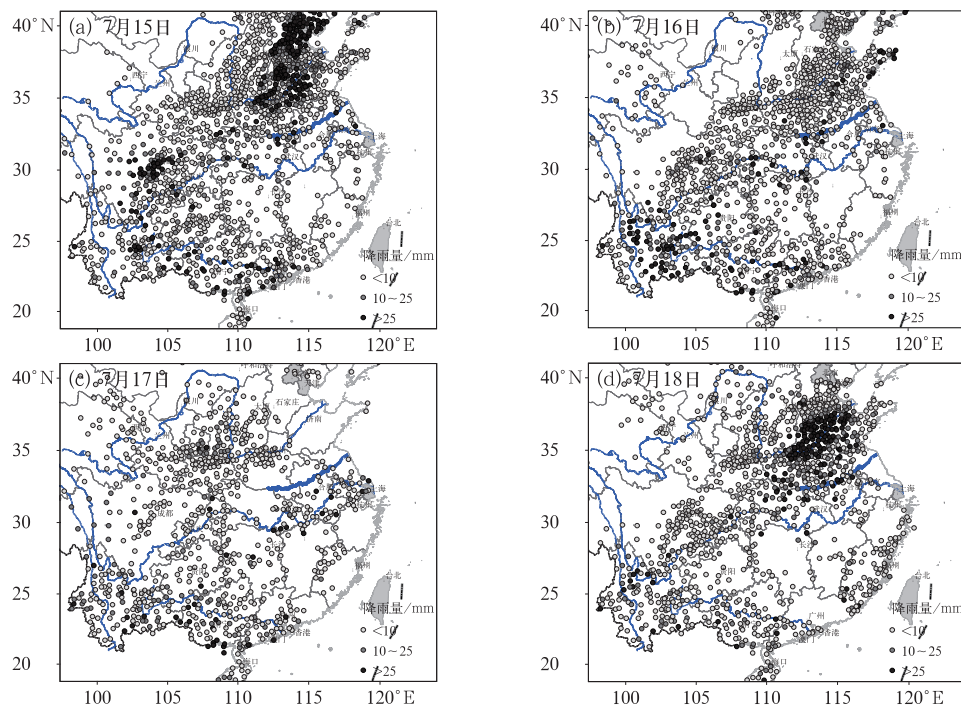


图6 2008年7月15—18日24h地面降水量分布(单位:mm)

Fig. 6 The distribution of 24 h precipitation (unit: mm) during 15—18 July 2008

有大片强降水区,后者对应着 7 月 17 日的主降虫区(图 6c)。7 月 18 日 24 h 降水量出现较大幅度的变化,强降水高度集中地出现在黄淮南部和江淮大部(图 6d),而当日主降虫区出现在降水区南部和南侧边缘地区,表明降水区对降虫有一定程度的影响,但强降水区与主降水区并不完全吻合,而是有一定程度的偏离,绝大多数稻纵卷叶螟受雨墙阻挡降落在中等偏弱的南侧降水带内(Domino et al, 1983; 巫国瑞等, 1997)。淮阴站恰好处于强降水南侧,从淮阴继续往北的稻纵卷叶螟受降水影响只能下沉迁入当地,导致 18 日淮阴站日虫量突增。

3 结论与讨论

分析 2008 年我国稻纵卷叶螟的时空变化规律后发现,2008 年我国稻纵卷叶螟的发生情况比往年重。全国范围内稻纵卷叶螟迁入始见期普遍出现在 5 月 3 日前后,但是各地区初见期极不一致,最多相差 123 d。全国范围内普遍的稻纵卷叶螟迁入终见期为 9 月 15 日前后,但各地区终见期也极不一致,最多相差 90 d。稻纵卷叶螟种群迁入峰有单峰型、双峰型和多峰型三种,其中以双峰型发生的地区最多。在不同时期迁飞的稻纵卷叶螟降落在不同的地区,而且降落的时间空间分布极不均匀。2008 年 7 月 15—18 日是北迁入虫量最多、降落面最广、危害程度最严重的一次稻纵卷叶螟大迁入过程。江苏淮阴站在 7 月 18 日出现迁入虫量的突增,用来作为逆推的虫源地。

在明确 2008 年我国稻纵卷叶螟降落时空变化特征的基础上,利用中尺度 WRF 模式对大气背景场的模拟,结合 FLEXPART 模型能够描述稻纵卷叶螟的迁飞轨迹,在此基础上对北迁过程中大气背景进行了分析,结果表明:江苏淮阴的稻纵卷叶螟来源于浙江中部至安徽中西部一线。850 hPa 大气环流形势对稻纵卷叶螟的北迁降落起着重要作用。不同背景下大尺度天气系统的分布、移动和强度变化对稻纵卷叶螟迁入有重要的影响。当 850 hPa 风场上盛行强而一致的偏南风时,对稻纵卷叶螟的北迁有利,同时风场切变也对稻纵卷叶螟的迁入有较大的影响,在迁飞路径上也能够反映出来。风场上的反气旋环流形势,盛行下沉气流,对稻纵卷叶螟的迁入和降落有利;气旋式切变区,盛行上升气流,对稻纵卷叶螟的起飞和迁出有利。降水是稻纵卷叶螟大

量迁入和降落的一个重要动力胁迫机制,稻纵卷叶螟迁入极易出现在一定强度的降水区内。

由于能提供逐日虫情的全国病虫测报站点有限,所用数据也不齐全,因此,要全面反映害虫迁入和危害特征势必受到一定程度的限制。除了稻纵卷叶螟本身生理特性的内在因素外,气象条件是众多环境因素中影响最大、关系最密切的因子。FLEXPART-WRF 模型能够用来进行迁飞性害虫的正向或逆向迁飞推断,单一站点的迁飞轨迹受大气背景场的控制,与实际稻纵卷叶螟的迁飞路径存在一定误差,但依靠气象模式还不能完全模拟迁飞过程,还应该结合地面观测取样、多普勒雷达监测、生物标定等方法共同对稻纵卷叶螟的迁飞降落进行研究。需要注意的是本文在使用 FLEXPART 模式模拟时并未考虑本地繁殖的虫源对迁飞虫源的影响,这也一定程度上影响了逆推的准确性。此外还受到地形因素、下垫面成分的影响,这些因素共同构成了稻纵卷叶螟的迁飞过程。因此,在农业生产中,还需系统地掌握害虫生存、活动所处地面与气象背景的变化规律,密切关注害虫发生、迁飞和降落动态,以便适时做出合理的防治对策,避免或减轻水稻虫灾损失。

参考文献

- 安兴琴,姚波,李岩,等,2014. 利用 FLEXPART 模式反演中国区域 SF6 排放量[J]. 环境科学学报,34(5):1133-1140.
- 白先达,唐广田,张雅昕,等,2010. 稻纵卷叶螟发生的气象条件等级预报[J]. 中国农业气象,31(4):607-611.
- 包云轩,曹云,谢晓金,等,2015. 中国稻纵卷叶螟发生特点及北迁的大气背景[J]. 生态学报,35(11):3519-3533.
- 包云轩,王永平,严明良,等,2008. 2003 年我国稻纵卷叶螟发生特征及其灾变大气背景的研究[J]. 气象科学,28(2):184-189.
- 宝兴华,杨舒楠,2015. WRF-EnKF 系统对中国南方一次暴雨过程确定性预报的试验[J]. 气象,41(5):566-576.
- 蔡旭辉,2008. 湍流微气象观测的印痕分析方法及其应用拓展[J]. 大气科学,32(1):123-132.
- 陈斌,徐祥德,卞建春,等,2010. 夏季亚洲季风区对流层向平流层输送的源区、路径及其时间尺度的模拟研究[J]. 大气科学,34(3):495-505.
- 陈斌,徐祥德,施晓晖,2011. 拉格朗日方法诊断 2007 年 7 月中国东部系列极端降水的水汽输送路径及其可能蒸发源区[J]. 气象学报,69(5):810-818.
- 何建军,余晔,刘娜,等,2013. 基于 WRF 模式的兰州秋冬季大气污染预报模型研究[J]. 气象,39(10):1293-1303.
- 李岩,安兴琴,姚波,等,2010. 北京地区 FLEXPART 模式适用性初步研究[J]. 环境科学学报,30(8):1674-1681.
- 梁章校,陈先文,魏正英,等,2011. 环境气象因素对稻纵卷叶螟影响的通径分析及预测[J]. 中国植保导刊,31(8):39-41.

- 刘钊,姚波,安兴琴,等,2015. 中国区域 HCFC-142b 排放量模式反演研究[J]. 中国环境科学,35(4):1040-1046.
- 芦芳,齐国君,陈晓,等,2010. 上海地区 2007 年褐飞虱的后期迁入和虫源地的个例分析[J]. 生态学报,30(12):3215-3225.
- 芦芳,翟保平,胡高,2013. 昆虫迁飞研究中的轨迹分析方法[J]. 应用昆虫学报,50(3):853-862.
- 齐国君,芦芳,高燕,等,2011. 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,54(10):1194-1203.
- 石根生,周立阳,张孝羲,1998. 稻纵卷叶螟种群动态的地统计学分析[J]. 农业大学学报,21(3):26-31.
- 万素琴,任永健,刘志雄,等,2012. 湖北省稻飞虱迁入高峰日后向轨迹模拟分析[J]. 气象,38(12):1538-1545.
- 汪四水,张孝羲,2000. 基于神经网络的稻纵卷叶螟长期预测[J]. 植物保护学报,27(4):313-316.
- 汪四水,张孝羲,汤金仪,2001. 基于地理信息系统的稻纵卷叶螟的灾变动态显示系统[J]. 昆虫学报,44(2):252-256.
- 汪四水,张孝羲,张夕林,2003. 稻纵卷叶螟发生程度的神经网络预警[J]. 生物数学学报,18(1):93-97.
- 王翠花,包云轩,王建强,等,2006a. 2003 年稻纵卷叶螟大发生的水汽条件分析[J]. 应用生态学报,17(9):1693-1698.
- 王翠花,包云轩,王建强,等,2006b. 2003 年稻纵卷叶螟重大迁入过程的大气动力机制分析[J]. 昆虫学报,49(4):604-612.
- 王坤,张飞名,孙超,等,2014. WRF-WSM3 微物理方案在青藏高原地区暴雪模拟中的改进及试验[J]. 大气科学,38(1):101-109.
- 王明欢,赖安伟,陈正洪,等,2012. WRF 模式模拟的地表短波辐射与实况对比分析[J]. 气象,38(5):585-592.
- 巫国瑞,俞晓平,陶林勇,1997. 褐飞虱和白背飞虱灾害的长期预测[J]. 中国农业科学,30(4):25-29.
- 张谷丰,孙雪梅,张志春,等,2013. 物候模型预测稻纵卷叶螟发生期的应用研究[J]. 福建农业学报,28(2):148-153.
- 张谷丰,朱凤,张志春,等,2014. 基于 Web GIS 的江苏省稻纵卷叶螟发生期自动预警系统[J]. 西南农业学报,27(4):1472-1477.
- 周立阳,张孝羲,1995. 江淮稻区稻纵卷叶螟异地预测预报[J]. 南京农业大学学报,18(4):39-45.
- Akira O, Jimmy D, Tomonari W, et al, 2005. A new trajectory analysis method for migratory plant hoppers, *Sogatella furcifera* (Horváth) (Homoptera: Delphacidae) and *Nilaparvata lugens* (Stål), using an advanced weather forecast model[J]. *Agri Forest Entomol*, 7(1):1-9.
- An Xingqin, Yao Bo, Li Yan, et al, 2013. Tracking source area of Shangdianzi station using Lagrangian particle dispersion model of FLEXPART[J]. *Meteor Appl*, 21(3):466-473.
- Brioude J, Arnold D, Stohl A, et al, 2013. The Lagrangian particle dispersion model FLEXPART-WRF version3. 1[J]. *Geosci Model Develop*, 6(3):1889-1904.
- Domino R P, Showers W B, Tayler S E, et al, 1983. Spring weather pattern associated with suspected black cutworm (*Lepidoptera: Noctuidae*) introduction to Iowa[J]. *Environ Entomol*, 12(6):1863-1872.
- Sivasundaram V, Rajendran L, Muthumeena R, et al, 2008. Effect of talc-formulated entomopathogenic fungus *Beauveria* against leafhopper (*Cnaphalocrosis medinalis*) in rice world[J]. *Microbiol Biotechnol*, 24(7):1123-1132.
- Stohl A, Hittenberger M, Wotawa G, 1998. Validation of the Lagrangian particle dispersion model Flexpart against large-scale tracer experiment data[J]. *Atmos Environ*, 32(24):4245-4264.