

害虫监测与预测技术专题

昆虫迁飞研究中的轨迹分析方法^{*}

芦芳 翟保平 胡高^{**}

(南京农业大学植物保护学院 教育部 & 农业部农作物生物灾害综合治理重点实验室 南京 210095)

摘要 轨迹分析是确定迁飞性昆虫虫源地和降落区常用、有效的方法之一。本文就目前研究中常用的轨迹分析方法,并结合稻飞虱实例做一个简单介绍。NOAA HYSPLIT 模型操作简单,但无法自定义相关参数。而结合中尺度数值模式(MM5、WRF)可得到更高时空分辨率的气象背景场,大大改进了轨迹的精度。

关键词 轨迹分析, 昆虫迁飞, HYSPLIT, MM5

Trajectory analysis methods for insect migration research

LU Fang ZHAI Bao-Ping HU Gao^{**}

(Key Laboratory of Integrated Management of Crop Diseases and Insect Pests, Ministry of Education and Ministry of Agriculture, College of Plant Protection, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract Trajectory analysis is a useful technique for defining the source and landing areas of migratory insects. Common trajectory analysis methods are introduced here using the migration of the rice planthopper as an example. NOAA HYSPLIT is very common because it is very easy to use, however, the custom parameters are difficult to define. Higher resolution meteorological information simulated from mesoscale models would significantly improve predicted migration trajectories.

Key words trajectory analysis, insect migration, HYSPLIT, MM5

1 引言

许多重要的农业害虫都具有迁飞性,如水稻两迁害虫(稻飞虱与稻纵卷叶螟)、粘虫、东亚飞蝗、草地螟。其迁飞距离少则数十公里,多则数百公里,甚至上千公里。这种大范围远距离的迁飞性往往使害虫发生具有突发性和暴发性,从而大大增加了其预测预报和防控的难度。特别是蝗虫、粘虫、白背飞虱等具有“落地成灾”的特性,常常防不胜防,危害触目惊心。因此,对于迁飞性害虫的预测预报,异地测报尤为重要。而异地测报的关键是确定迁飞昆虫的可能降落区和迁入量。同时,研究迁飞性昆虫的种群特征、迁飞规律以及暴发机制,明确虫源地以及虫源地的种群动态亦

非常重要。迁飞轨迹分析便是确定虫源地和降落区最常用、最有效的方法之一。

昆虫的迁飞距离之远,仅依靠自身飞行能力是不可能完成的。绝大多数昆虫的迁飞发生在其飞行边界层(风速低于昆虫自身飞行速度的近地层,昆虫在此高度可以做任何方向的自由飞行)以上,那里的风速远大于昆虫自身飞行速度。其迁飞方向与风向基本一致,其飞行速度通常为昆虫自身飞行速度和风速的矢量和,而对于个体较小的昆虫,其飞行速度等于风速。因此,可以运用气象动力学原理和有关数学模型顺推或回推出迁飞昆虫的运行轨迹,追溯虫源地和预测向外扩散的路径。

早在 20 世纪 60、70 年代, Rainey (1963)、

^{*} 资助项目: 国家 973 项目(2010CB126201); 公益性行业(农业)科研专项(200903051); 南京农业大学青年科技创新基金(Y0201100097)。

^{**} 通讯作者, E-mail: hugao@njau.edu.cn

收稿日期: 2013-04-21, 接受日期: 2013-04-30

Taylor(1979)便开始利用天气图推算沙漠蝗的迁飞轨迹。Rosenberg 和 Magor(1983)基于 6 h 一次的气象观测资料,采用流线-等风速线(streamline-isotach)方法以 BASIC 语言编程计算稻飞虱的迁飞轨迹,即流线表示飞行方向,等风速线表示飞行速度。Riley 等(1987,1991,1994)、程遐年等(1994)亦应用该办法建立褐飞虱可能的飞行路径。以上方法的计算原理和过程相对简单,轨迹的准确性亦较难保证。

由于轨迹分析是基于气象背景场计算。因此,如何得到较高时空分辨率的气象背景资料非常重要。大气边界层模型 TKE、大气分支模型 BAT、中尺度模式(MM2、MM4、MM5)等气象模型均曾用于轨迹分析,以提高气象背景场的时空分辨率。包云轩等(2005)、Otuka 等(2005a,2005b)应用中尺度数值模式 MM5 输出的气象背景场计算三维轨迹,其轨迹曲线更为平滑、更能全面反映迁飞特征,并通过输出结果与实测虫情资料的对比分析,验证了该方法具有较高的精度。

早期的轨迹计算是在固定高度进行的,得到的是简单的二维轨迹。虽然经不断改进,例如线性插值等,仍不能反应昆虫迁飞的三维动态。目前,主要使用拉格朗日插值计算三维轨迹。NOAA HYSPLIT(hybrid single-particle lagrangian integrated trajectory)便是其中之一。HYSPLIT 包括单粒子轨迹计算模型(trajecory model)和复杂粒子扩散沉降模型(dispersion model),最初由美国国家海洋大气总署(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)和澳大利亚气象局(Australia's Bureau of Meteorology)联合开发(Draxler and Hess,1998;Zhu *et al.*,2003)。该模型包括 WEB、PC 两个版本。WEB 版可以在线免费使用,但限制每日计算轨迹数。而 PC 版需要注册,没有每日计算次数的限制。由于该模型可以免费使用且操作简单,使用非常广泛。而 Otuka 等(2005b)等采用拉格朗日扩散模型建立 GEARN 模型,可以得到稻飞虱迁飞扩散的相对密度云,已开发出一套非常实用的稻飞虱实时预报系统。

本文将就目前研究中使用的轨迹分析方法并结合稻飞虱实例做一个简单介绍。

2 轨迹分析方法

2.1 昆虫飞行行为参数

轨迹分析首先要确定昆虫飞行行为参数,主要包括:飞行速度、起飞时间、飞行高度、飞行持续时间、持续低温阈值等。

飞行速度:对于稻飞虱而言,其个体较小,飞行能力有限,自身飞行速度仅有 0.3 m/s,因此,通常认为是随风飞行的,其自身飞行速度可以忽略不计(陈若簏等,1984;胡高等,2007;Hu *et al.*,2011,2013)。雷达观测结果表明大多数昆虫都存在共同定向行为,并不是完全随风飘移(翟保平等,1997;Drake and Farrow,1988;Chapman and Drake,2010;Chapman *et al.*,2011;翟保平,2005)。因此,则必须考虑其自身飞行速度。

起飞时间:大部分迁飞昆虫都是晨暮两峰型,但以黄昏时刻为主,如稻飞虱和其它鳞翅目蛾类。少数昆虫在白天起飞,如蚜虫、大斑蝶(翟保平等,1997;翟保平,2005;Chapman and Drake,2010)。

飞行高度:迁飞性昆虫的飞行高度不一。雷达观测和飞机网捕结果表明,稻飞虱夏季在 300 ~ 2 500 m,秋季在 100 ~ 1 500 m 的各高度层中均有分布,但最大密度一般出现 1 000 m 左右(邓望喜,1981;Riley *et al.*,1991,1994);草地螟、稻纵卷蛾等个体较大的昆虫飞行高度一般在 400 ~ 600 m(陈瑞鹿等,1992;Riley *et al.*,1995;Sun and Gao,2004;高月波等,2008)。

持续飞行时间:稻飞虱飞行持续时间一般认为不超过 36 h,通常不存在再迁飞(程遐年等,1979;封传红等,2001,2003)。大多数鳞翅目昆虫一般傍晚起飞,次日清晨降落,但可以连续飞行几个晚上(翟保平,2005)。在飞行磨吊飞试验中,稻纵卷叶蛾一般可进行 4 ~ 5 次(夜)再迁飞,最多可达 9 次(王凤英等,2010)。

持续飞行低温阈值:昆虫随风飞行,并不是完全的被动飞行。昆虫在高空停止振翅,由于重力作用,也会很快掉落至地面。因此,通常考虑昆虫飞行的低温阈值。若温度低于其飞行低温阈值,昆虫停止振翅,或者主动下降高度,或者停止继续飞行(翟保平,2005)。

确定以上飞行行为参数以后,以稻飞虱为例,回推轨迹以降虫区为起点,在上灯峰日逐时(当日 7:00 至次日 6:00)回推至至褐飞虱起飞时刻(约 18:00)。顺推轨迹以虫源地为起点,以起飞时刻为起始时间。若温度低于 16.5 ℃,则停止计算,回推和顺推轨迹持续时间均不超过 36 h(包云轩

等,2005;胡高等,2007;郝振华等,2011;齐国君等,2011;王丽等,2011;张海燕等,2011;郑大兵等,2011;Hu *et al.*, 2011, 2013;崔茂虎等,2013)。回推和顺推轨迹起始高度应选择多个高度,至少包含 1 000、1 500 m 2 个高度。

2.2 NOAA HYSPLIT 计算迁飞轨迹

进入 HYSPLIT 平台网站 (<http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>) 选择网络版轨迹计算模型后,根据需要选择合适的气象数据,预报数据或历史数据。不同的气象数据由不同的气象模式产生,覆盖范围、时间分辨率、空间分辨率均不相同。然后,根据提示和需要选择计算轨迹的起始点的数量和经纬度等。进入参数设置页以后,确定以下参数即可:轨迹方向 trajectory direction(回推/顺推 forward/backward)、起始时间 start time、持续时间 total run time、经度 longitude、纬度 latitude、高度 height。提交参数后便可得到轨迹计算的结果。

轨迹计算结果包括图形(.gif)、文本(trajectory endpoints file)。可保存文本结果以便进一步分析。若提交参数时选择输出 GIS 文件,Shapefile(.shp)或 Google Earth(.kmz),则输出结果还包括 GIS 输出结果。

2.3 结合中尺度数值模式计算迁飞轨迹

利用 NOAA HYSPLIT 计算轨迹非常方便,但局限性很大。首先,无法加入昆虫自身飞行速度等飞行行为参数,因此,只能计算一些个体较小、自身飞行速度可以忽略不计的昆虫;其次,气象数据的大多为 6 h 一次甚至 12 h 一次、 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 或 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 的格点数据,时间分辨率、空间分辨率都有限。利用中尺度模式可以提高时间、空间分辨率,提高轨迹计算的精度,而自行编写轨迹计算模型可以自定义相关参数。

中尺度数值模式,目前主要使用 MM5(The Fifth-Generation NCAR / Penn State Mesoscale Model, <http://www.mmm.ucar.edu/mm5/>) 和 WRF(Weather Research and Forecasting Model, <http://www.wrf-model.org>) 模式。这两个模式均可免费使用以及获得免费支持。现简单介绍以 MM5 模式为基础的迁飞轨迹分析。

MM5 模式由美国国家大气研究中心(NCAR)和宾夕法尼亚大学(Penn. State University)共同开发。MM5 模式水平分辨率可达 5 km,垂直分辨率

可达 40 层,网格嵌套层数最多可达 10 层,是一个适合于有限区域的、多功能的中尺度大气动力数值预报模式。目前已被广泛应用于气象、环境、生态、航空、水文、海洋等部门的业务。该模式包容海陆分布、地形、植被、水系、海温要素等方面的信息,兼顾大、中、小不同尺度的天气系统和各种各样的环境背景,对边界层物理过程也有较好的处理方案,在农业病虫测报上可为传播性病菌和迁飞性害虫的四维动态模拟和趋势预警提供气象背景场。

MM5 模式系统主要有 5 个程序模块: TERRAIN、REGRID、RAWINS/LITTLE-R、INTERPF 和 MM5 程序模块。其中 TERRAIN 模块的功能是从各种分辨率的标准经纬网格地形高度资料和下垫面地表类型分类资料中插值求取模式直角坐标网格点上地形高度和地表类型,并提供陆面过程模式所需的参数。REGRID 模块的作用是以低分辨率的全球经纬网格分析场资料插值求得有限区域模式正方形网格点上的初始场,模块可利用的通用标准资料包括 NCEP 全球再分析资料、ECMWF 全球网格点资料、TOGA 资料等。RAWINS/LITTLE_R 模块将上一模块插值后的物理量场作为第一猜测场进行地面和高空客观分析,在模式积分过程中进行四维资料同化(Four-Dimensional Data Assimilation, FDDA)。INTERPF 模块将 RAWINS/LITTLE_R 输出的等压面模式网格点资料垂直插值到模式的层,从而产生模式初始场。MM5 是主预报模块。另外,模式系统还包括若干附加功能模块。GRAPH 模块可对主程序各模块输出结果进行处理和绘图。而 MM5toGrADS 模块可将 MM5 模式结果转换为 GrADS(Grid Analysis and Display System, <http://www.iges.org/grads/>) 所能使用的格点数据。

以中尺度数值模式 MM5 输出的气象背景场为基础,主要是风场数据(U、V、W),参照朱艳秋和廖洞贤(1992)的三维空气质点轨迹的计算方法,自编程序计算回推轨迹。这里简单介绍该轨迹计算方法。

假设(i, j, k)为空气质点在 t_1 时刻的位置,其位移可以通过以下方程进行计算:

$$\begin{aligned} D_x &= \frac{1}{2}(u_1 + u_2)(t_2 - t_1) \\ D_y &= \frac{1}{2}(v_1 + v_2)(t_2 - t_1) \end{aligned} \quad (1),$$

$$D_z = \frac{1}{2}(w_1 + w_2)(t_2 - t_1)$$

D_x 、 D_y 、 D_z 分别表示在 x 、 y 、 z 方向上的位移。 (u_1, v_1, w_1) 和 (u_2, v_2, w_2) 分别表示 t_1 、 t_2 时刻的风速。

首先, (u_2, v_2, w_2) 等于 (u_1, v_1, w_1) , 质点在 t_2 时刻的位置 $(i + \mu_x, j + \mu_y, k + \mu_z)$ 可通过方程 (1) 计算得到。则 t_2 时刻 $(i + \mu_x, j + \mu_y, k + \mu_z)$ 处的风速 $(u_{i+\mu_x}, v_{j+\mu_y}, w_{k+\mu_z})$ 可通过拉格朗日插值方法计算得到。然后用 $(u_{i+\mu_x}, v_{j+\mu_y}, w_{k+\mu_z})$ 代替 (u_2, v_2, w_2) , 即 $(u_{i+\mu_x}, v_{j+\mu_y}, w_{k+\mu_z})$ 为 (u_2, v_2, w_2) 的零级近似。依此类推, 利用方程 (1) 和拉格朗日内插值法进行迭代计算, 可以得到一系列 (u_2, v_2, w_2) 的近似值, 直到满足以下条件为止。

$$[(\Delta \overline{\mu_x})^{n+1} - (\Delta \overline{\mu_x})^n]^2 + [(\Delta \overline{\mu_y})^{n+1} - (\Delta \overline{\mu_y})^n]^2 + [(\Delta \overline{\mu_z})^{n+1} - (\Delta \overline{\mu_z})^n]^2 < \varepsilon$$

(2),

$\Delta \overline{\mu_x}$ 、 $\Delta \overline{\mu_y}$ 、 $\Delta \overline{\mu_z}$ 分别表示 x 、 y 、 z 方向上的无因次

位移, 分别等于 x 、 y 、 z 方向上位移除以格点距离。 n 、 $n + 1$ 分别表示 n 、 $n + 1$ 级近似。 ε 表示精度 (10^{-6} 或其它数字)。

笔者的 MM5 和轨迹计算程序均在 Fedora 13 (Fedora Project, <http://fedoraproject.org/>) 下运行。MM5 模式中, 初始场为 NCEP/NCAR 的每 3 h 一次的 $1^\circ \times 1^\circ$ 的全球最终分析资料 (FNL) (<ftp://ftp.iap.ac.cn/fnl/>)。MICAPS (Meteorological Information Comprehensive Analysis and Process System, 气象信息综合分析处理系统) 中的第 1 类、第 2 类数据, 即 3 h 一次的地面常规观测资料和 12 h 一次的高空探空资料, 通过格式转换后, 在 LITTLE_R 模块中进行客观分析, 以及在 MM5 模式积分过程中进行 FDDA。轨迹计算程序用 Fortran 语言编写。MM5 模式的具体方案和参数可参照表 1。

表 1 MM5 的方案和参数
Table 1 Selection of scheme and parameters for MM5

项目 Items	区域 1 Domain 1
中心位置 Location	30°N, 109°E
水平网格 The number of grid points	75 × 75
格距 Distance (km) between grid points	30 km
起始位置 Grid start point of nest relative to its mother	1, 1
垂直层 Layers	33
地图投影 Map projection	Lambert
显式方案 Explicit moisture schemes	Simple ice
嵌套方式 Nesting type	One-way nest
显式方案 Explicit moisture schemes	Schulz
积云参数化 Cumulus parameterization	Grell
行星边界层方案 Planetary boundary layer scheme	MRF PBL
大气辐射方案 Radiation scheme	RRTM
预报时长 Forecast time	72 h

2.4 确定有效轨迹

通过以上方法得到的回推或顺推轨迹, 只是依据大气背景场所获得的, 不一定具有生物学意义, 必须依据一定的条件进一步删除无效轨迹。

首先, 回推轨迹仅起飞时刻的轨迹点为可能

虫源地, 其余中间轨迹点必须排除; 其次, 水面等明显无效的虫源地和降落区必须删除; 再次, 若温度低于持续飞行温度阈值时, 昆虫停止飞行, 则轨迹中断。利用 NOAA HYSPLIT 模型无法在计算过程中考虑该条件。但可以在设置参数时, 设置在

输出结果中增加温度项的输出,然后在文本结果中删除无效的轨迹。而自行设计轨迹计算模型,可以将此条件直接在程序中实现,无需进一步处理。

在计算回推轨迹时,可能虫源地还必须满足以下两个条件:1)具有虫源;2)满足起飞的条件。计算所获得的可能虫源地最好有田间调查数据进行验证。若缺乏田间调查数据,亦可以寄主植物的空间分布或其他条件进行排查。以褐飞虱为例,它是仅取食水稻的单食性害虫,并且迁出基本上与水稻黄熟期同步。因此,虫源地必须有水稻种植,且生育期必须处于生长后期。褐飞虱的起飞条件,必须无风或微风,风速低于 4 m/s,且温度高于其持续飞行温度阈值。

为了方便处理,可以将计算得到的迁飞轨迹结果导入数据库软件,如:Visual FoxPro、Microsoft Office Access 等简单的数据库软件,利用 SQL 语言进行删除和选择的操作,转换为数据库格式文件(.dbf)。该文件亦可进一步导入 GIS 软件中,利用 GIS 软件强大的空间分析能力进行进一步的筛选和分析。此外,ArcGIS 的 Tracking Analyst 扩展可以展示最终的迁飞轨迹。

3 应用实例

轨迹分析方法已在昆虫迁飞应用非常广泛。现仅摘引部分图片,说明其具体应用情况。

3.1 应用 NOAA HYSPLIT 分析云南白背飞虱早期迁入虫源地

崔茂虎等(2013)对云南师宗 1990—2012 年 4—5 月间白背飞虱 45 个迁入高峰日利用 NOAA HYSPLIT 模型进行了轨迹分析。利用 Visual FoxPro 软件将回推轨迹的终点、风向、风速分别组建数据库,并采用 ArcGIS 通过样条插值(spline interpolation)计算了各虫源区的概率。轨迹分析结果表明,4—5 月师宗白背飞虱虫源地主要分布在越南老挝北部、云南南部和西南部以及缅甸东北部,越老中部、泰国北部和东北部、缅甸中部、印度东部和孟加拉国可提供部分虫源(图 1)。

3.2 应用 NOAA HYSPLIT 分析稻纵卷叶螟早期迁入虫源地

王凤英等(2009)应用 NOAA HYSPLIT 对南宁 2007 年 5 月 6 日和 21 日稻纵卷叶螟迁入高峰日

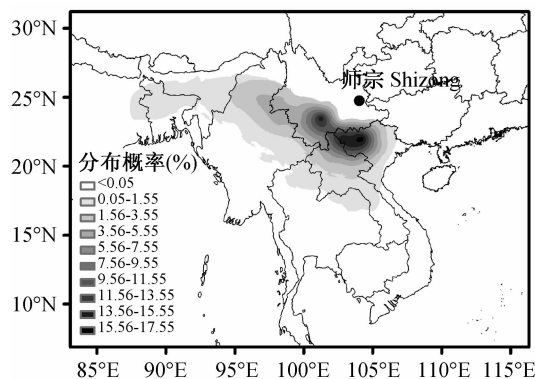


图 1 师宗白背飞虱虫源区分布(崔茂虎等,2013)

Fig. 1 The distribution of source areas of *Sogatella furcifera* in Shizong (from Cui et al., 2013)

进行了回推轨迹分析。结果表明:南宁 5 月 4—6 日虫源来自广西北部的河池地区,而河池地区的虫源最终来自 5 月 1、2 日越南北部红河三角洲(图 2 左)。5 月 21 日南宁迁入稻纵卷叶螟的迁飞路径为:泰国中部[再迁飞 4 次(d)]→泰国北部、老挝中北部[再迁飞 3 次(d)]→老挝北部、越南中北部[再迁飞 2 次(d)]→越南北部[再迁飞 1 次(d)]→广西南宁(图 2 右)。

3.3 结合 MM5 分析台风对褐飞虱秋季回迁的影响

Hu 等(2013)结合 MM5 模式,参照朱艳秋和廖洞贤(1992)的三维空气质点轨迹的计算方法,计算了 2005 年 9 月台风卡努过境期间,长江三角洲地区天台、奉贤和宜兴 3 个站点的回推轨迹。FNL 数据为初始场,并应用 MICAPS 数据进行客观分析和 FDDA,MM5 很好地模拟了台风过程。长江三角洲地区在台风卡努过境以后,9 月 12、13 日出现灯诱高峰。综合考虑回推轨迹结果(图 3)和起飞时刻的天气条件(图 4,图 5),9 月 12 日天台的虫源来自站点附近,而奉贤和宜兴的虫源来自站点附近和安徽南部;9 月 13 日天台的虫源地位于浙江和安徽南部,而奉贤和宜兴的虫源地位于江苏南部。

3.4 结合 MM5 和 GEARN 的稻飞虱实时预报系统

Otuka 等(2005b)应用 MM5 和 GEARN 模式开发了稻飞虱实时预报系统(<http://agri.narc.affrc.go.jp/sea/>)。该系统中 MM5 的初始场数据

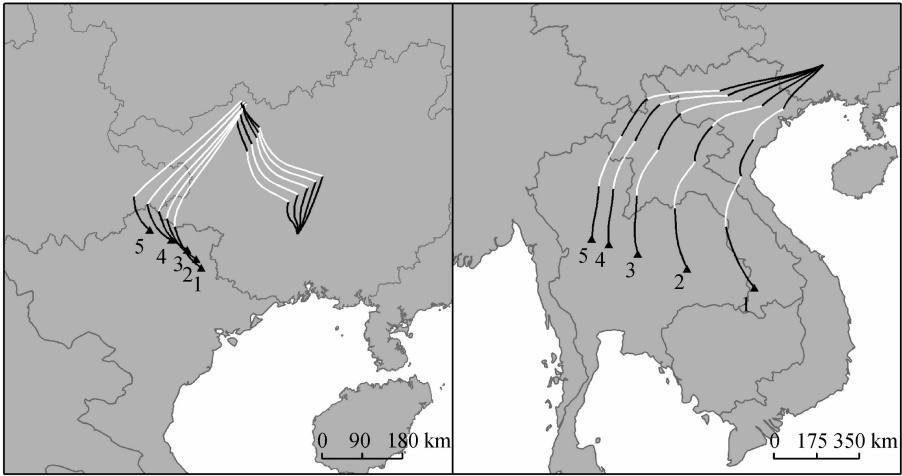


图 2 5 月 6 日 (左) 与 5 月 21 日 (右) 南宁稻纵卷叶螟迁入种群的回推虫源地轨迹 (王凤英等, 2009)

Fig. 2 The backward trajectories of the immigratory population of rice leaf roller in Nanning on May 6 (left) and May 21 (right) (from Wang *et al.*, 2009)

图中自右到左的数码 1 ~ 5 分别代表蛾的飞行高度 700、900、1 100、1 300、1 500 m; 每条轨迹线条的黑白相间的段落, 分别代表自南宁开始的回推第 1 ~ 5 天。

The numbers 1 – 5 of the trajectory represent the moth flight height 700, 900, 1 100, 1 300, 1 500 m, respectively.

Every trajectory alternated with black and white lines represents the backward computation on the 1st to 5th days beginning from Nanning.

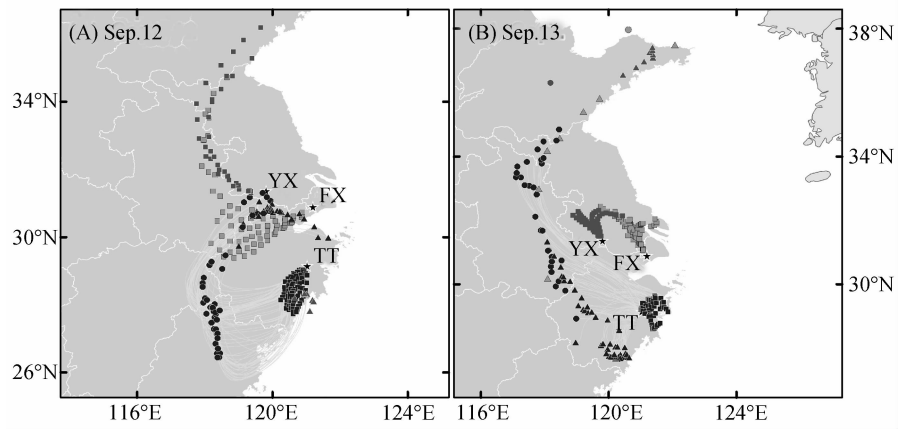


图 3 天台 (TT)、奉贤 (FX) 和宜兴 (YX) 褐飞虱 2005 年 9 月 12 (A)、13 日 (B) 的回推轨迹终点 (Hu *et al.*, 2013)

Fig. 3 Endpoints of backward trajectories of *Nilaparvate lugens* starting from Tiantai (TT), Fengxian (FX) and Yixing (YX) during Sept. 12 (A) and 13 (B)

注: 天台、奉贤、宜兴的轨迹终点分别以蓝、绿、红表示。■、▲、● 分别表示迁飞持续时间小于 13 h、13 ~ 24 h 和 24 h 以上, 起飞时刻分别为当天 18:00、前一天 18:00 和前一天 18:00。

- (i) The endpoints with blue fill color started from Tiantai, those with green fill color started from Fengxian and those with red border color started from Yixing.
- (ii) The endpoints in square ■: the migration duration was less than 13 h, and takes off at 18:00 h on the same day; in triangle ▲: the migration duration was 13 – 24 h, and takes off at 18:00 h on the previous day. ●: the migration duration was above 24 h, and takes off at 18:00 h on the previous day.

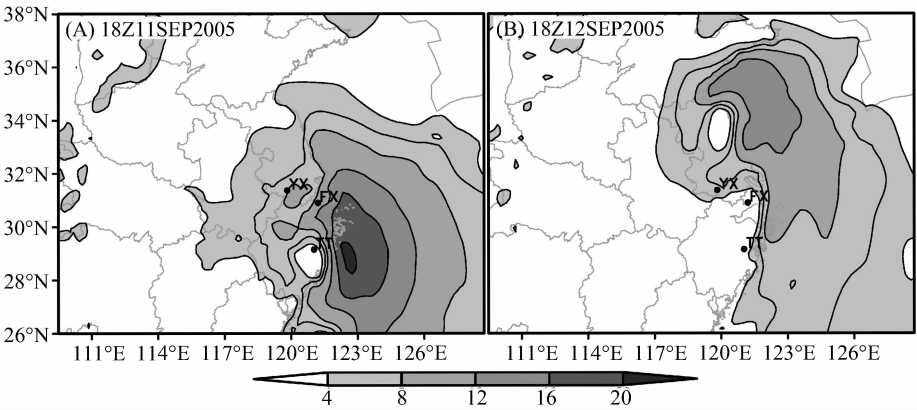


图 4 模拟褐飞虱起飞时刻(18:00)近地面 10 m 的水平风速 (Hu *et al.* , 2013)

Fig.4 The simulated horizontal wind speed at 10 m above ground at 18:00 (shaded, m/s)

TT:天台 Tiantai;FX:奉贤 Fengxian;YX:宜兴 Yixing.

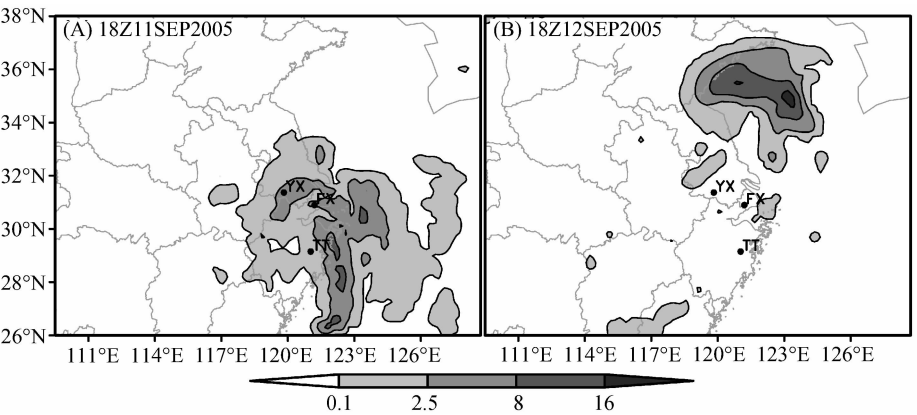


图 5 模拟褐飞虱起飞时刻(18:00)的降雨量 (Hu *et al.* , 2013)

Fig.5 The simulated precipitation (mm) at 18:00 (Hu *et al.* , 2013)

TT:天台 Tiantai;FX:奉贤 Fengxian;YX:宜兴 Yixing.

A:2005 年 9 月 11 日 Sept. 11, 2005; B:2005 年 9 月 12 日 Sept. 12, 2005.

为日本气象厅 (Japan Meteorological Agency, JMA) 全球谱模式 (Global Spectral Model, GSM) 的输出数据,该数据由日本农林水产省计算机中心 (Computer Center (CC) for Agriculture, Forestry and Fisheries Research, MAFF) 在线提供。GEARN 基于 MM5 的风预报场数据,计算稻飞虱的迁飞轨迹 (Furuno *et al.* , 2005)。每日模拟两次稻飞虱迁飞,包括早晨和黄昏两次起飞过程。输出结果以图片形式 (.gif) 和 PDF 文档经网络发布。所在程序均由 CC/MAFF 的超级计算机自动完成。

4 讨论

轨迹分析经过长期的改进,其结果已十分可靠。2012 年,云南省农业科学院谌爱东团队在勐海进行稻飞虱标放试验之前,先应用 NOAA HYSPLIT 模型预测了稻飞虱的可能降落区,结果标记的白背飞虱果然在这些区域上灯而被捕获 (沈慧梅,私人交流,未发表数据)。该试验进一步验证了 NOAA HYSPLIT 的准确度。对比 NOAA HYSPLIT 模型,使用中尺度数值模式能得到更高时空分辨率的气象背景场,并且可以自定义昆虫飞行行为参数,具有更高的精确度。但是中尺度

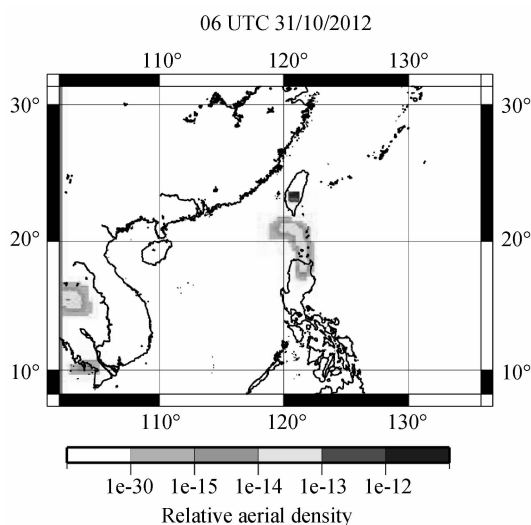


图 6 基于 MM5 和 GEARN 模型的
稻飞虱实时预报系统输出结果

**Fig. 6 The output from the real-time prediction
system for migration of rice planthopper based on
MM5 and GEARN models**

注:起始时刻为 2012 年 10 月 30 日 12:00(UTC)。

图片来源: <http://agri.narc.affrc.go.jp>.

The start time was 12:00 on Oct. 30, 2012. This figure
was downloaded from <http://agri.narc.affrc.go.jp>.

模式的运行需要一定的气象学背景知识和计算机水平。

大多数迁飞昆虫的宏观迁飞规律早已基本摸清,特别重大农业害虫,如稻飞虱、稻纵卷叶螟、粘虫等。但中小尺度上的迁飞路线仍然存疑,难以实现精细化异地预测。而轨迹分析着眼于中小尺度,若结合迁飞昆虫的飞行行为特征,利用轨迹分析便可以开发出迁飞性害虫的实时预报系统,如日本的稻飞虱实时预报系统。不过,该系统由于缺乏中国和中南半岛等虫源地的数据对应,实用性大打折扣。此外,轨迹分析方法亦可应用在病害流行、鸟类迁飞方面的研究,如荣飞等(2008)应用 NOAA HYSPLIT 模型对小麦诱病孢子的扩散传播进行了研究。

不过,昆虫空中的飞行行为不同于惰性粒子。个体再微小的昆虫都不是完全随风逐流的,都具有一定的主动适应性,包括主动起飞、成层现象、主动降落等。个体较大的昆虫还存在共同定向行为。Chapman 等(2010)模拟了惰性粒子和丫形银

纹夜蛾 *Autographa gamma*(共同定向,假定恒定飞行速度为 5 m/s)的空中运行轨迹,发现丫形银纹夜蛾的飞行距离远大于惰性粒子,并且迁飞方向更接近其实际方向。相反,不少情况下惰性粒子无法在 8 h 以内从英国南部穿越英吉利海峡到达欧洲大陆。因此,确定昆虫在空中的飞行行为参数能有效的提高轨迹的准确性和精度。但是昆虫高空飞行远远超过人类的目力范围,虽然雷达观测结果揭示了许多迁飞昆虫的奥秘,但仍然非常有限。例如,昆虫在空中飞行对风温场如何响应,如何实现共同定向和成层,有待进一步的研究。而迁飞昆虫的降落机制亦知之甚少。本文中假设稻飞虱随时都可能降落,对迁入峰日逐时回推,而顺推时每个轨迹点都可能是其降落地。因此,经过删除明显无效的轨迹之后,仍然包含些许无效的轨迹。而稻纵卷叶螟、草地螟等存在再迁飞,但究竟能飞多少个夜晚因而其迁飞轨迹何时终止,也仍待进一步研究。张蕾等根据对其飞行与生殖的关系的研究结果初步认为,稻纵卷叶螟存在 3 ~ 4 次再迁飞可能是最合理的(私人交流,未发表数据)。

此外,MM5 模式是比较成熟的中尺度数值模式,但目前已停止开发。美国国家大气研究中心(National Center for Atmospheric Research, NCAR)、NOAA 国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)和国家天气预报系统实验室(Forecast Systems Laboratory, FSL)、空军气象局(Air Force Weather Agency, AFWA)、海军科学研究实验所(Naval Research Laboratory)、俄克拉荷马大学(University of Oklahoma)以及联邦航空管理局(Federal Aviation Administration, FAA)联合开发了新一代中尺度模式 WRF,用以取代 MM5 模式。该模式满足气象研究和预报的要求,适用于米级至千公里级的不同尺度范围。因此,昆虫迁飞轨迹分析中也应考虑采用 WRF 模式。

参考文献 (References)

- Chapman JW, Drake VA, 2010. Insect migration//Breed MD, Moore J (eds.). Encyclopedia of Animal Behavior, volume 2, Oxford: Academic Press. 161 – 166.
- Chapman JW, Drake VA, Reynolds DR, 2011. Recent insights from radar studies of insect flight. *Annu. Rev. Entomol.*, 56:337 – 356.

- 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.
- Drake VA, Farrow RA, 1988. The influence of atmospheric structure and motions on insect migration. *Annu. Rev. Entomol.*, 33(1):183–210.
- Draxler RR, Hess GD, 1998. An overview of the Hysplit_4 modeling system for trajectories, dispersion and deposition. *Aust. Meteorol. Mag.*, 47:295–308.
- Furuno A, Chino M, Otuka A, Matsumura TM, Suzuki Y, 2005. Development of a numerical simulation model for long-range migration of rice planthoppers. *Agr. Forest Entomol.*, 133(1/4):197–209.
- Hu G, Cheng XN, Qi GJ, Wang FY, Lu F, Zhang XX, Zhai BP, 2011. Rice planting systems, global warming and outbreaks of *Nilaparvata lugens* (Stål). *B. Entomol. Res.*, 101:187–199.
- 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. doi:10.1371/journal.pone.0057277.
- Otuka A, Dudhia J, Watanabe T, Furuno A, 2005a. A new trajectory analysis method for migratory planthoppers, *Sogatella furcifera* (Horváth) (Homoptera: Delphacidae) and *Nilaparvata lugens* (Stål), using an advanced weather forecast model. *Agr. Forest Entomol.*, 7:1–9.
- Otuka A, Watanabe T, Suzuki Y, Matsumura M, Furuno A, Chino M, 2005b. Real-time prediction system for migration of rice planthoppers *Sogatella furcifera* (Horváth) and *Nilaparvata lugens* (Stål) (Homoptera: Delphacidae). *Appl. Entomol. Zool.*, 40(2):221–229.
- Rainey RC, 1963. Meteorology and the Migration of Desert Locusts: Applications of Synoptic Meteorology in Locust Control. World Meteorological Organization, Anti-Locust Research Centre, London, United Kingdom. 1–15.
- Riley JR, Cheng XN, Zhang XX, Reynolds DR, Xu GM, Smith AD, Cheng JY, Bao AD, Zhai BP, 1991. The long-distance migration of *Nilaparvata lugens* (Stål) (Delphacidae) in China: radar observations of mass return flight in the autumn. *Ecol. Entomol.*, 16(4):471–489.
- Riley JR, Reynolds DR, Farrow RA, 1987. The migration of *Nilaparvata lugens* (Stål) (Delphacidae) and other Hemiptera associated with rice during the dry season in the Philippines: a study using radar, visual observations, aerial netting and ground trapping. *Bull. Entomol. Res.*, 77(1): 145–169.
- Riley JR, Reynolds DR, Smith AD, Edwards AS, Zhang XX, Cheng XN, Wang HK, Cheng JY, Zhai BP, 1995. Observations of the autumn migration of the rice leaf roller *Cnaphalocrocis medinalis* (Lepidoptera: Pyralidae) and other moths in eastern China. *Bull. Entomol. Res.*, 85(3): 397–414.
- Riley JR, Reynolds DR, Smith AD, Rosenberg LJ, Cheng XN, Zhang XX, Xu GM, Cheng JY, Bao AD, Zhai BP, Wang HK, 1994. Observation on the autumn migration of *Nilaparvata lugens* (Homoptera: Delphacidae) and other pests in east central China. *Bull. Entomol. Res.*, 84(3): 389–402.
- Rosenberg LJ, Magor JI, 1983. Flight duration of the brown planthopper, *Nilaparvata lugens* (Hemiptera: Delphacidae). *Ecol. Ent.*, 8:341–350.
- Sun YJ, Gao YB, 2004. The migratory activity of meadow moth *Loxostege sticticalis* in northern China. Plant Protection Towards the 21st Century (Abstracts). Proceedings of the 15th international plant protection congress. Beijing: Foreign language Press, China. 304.
- Taylor RAJ, 1979. A simulation model of locust migratory behaviour. *J. Anim. Ecol.*, 48(2):577–602.
- Zhu M, Edward BR, David WR, Ian VM, Mark WS, 2005. Low-level jet streams associated with spring aphid migration and current season spread of potato viruses in the U. S. northern Great Plains. *Agr. Forest Entomol.*, 138(1/4): 192–202.
- 包云轩, 翟保平, 程遐年, 2005. 褐飞虱迁飞参数的数值模拟. *生态学报*, 25(5):1107–1114.
- 陈瑞鹿, 暴施祥, 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.
- 陈若麓, 吴家荣, 祝树德, 张建新, 1984. 褐飞虱的飞翔能力. *昆虫学报*, 27(2):121–127.
- 程遐年, 陈若麓, 习学, 杨联民, 朱子龙, 吴进才, 钱仁贵, 杨金生, 1979. 稻褐飞虱迁飞规律的研究. *昆虫学报*, 22(1):1–20.
- 程遐年, 张孝羲, 程极益, Riley JR, Reynolds DR, 1994. 褐飞虱在中国东部秋季回迁的雷达观察. *南京农业大学学报*, 17(3):24–32.
- 崔茂虎, 郑大兵, 何洪平, 沈慧梅, 胡高, 陈晓, 翟保平, 2013. 云南师宗白背飞虱前期迁入种群的虫源地分布与降落机制. *生态学报* (印刷中).
- 邓望喜, 1981. 褐飞虱及白背飞虱空中迁飞规律的研究. *植物保护学报*, 8(2):73–81.
- 封传红, 翟保平, 陈庆华, 汤金仪, 2003. 利用 850hPa 气

- 流资料分析稻飞虱迁飞路径. 中国农业气象, 24(3):31-35.
- 封传红, 翟保平, 张孝羲, 2001. 褐飞虱的再迁飞能力. 中国水稻科学, 15(2):125-130.
- 高月波, 陈晓, 陈钟荣, 包云轩, 杨荣明, 刘天龙, 翟保平, 2008. 稻纵卷叶螟 (*Cnaphalocrocis medinalis*) 迁飞的多普勒昆虫雷达观测及动态. 生态学报, 28(11):5238-5247.
- 郝振华, 杨海博, 张海燕, 吴蔚, 方源松, 盛仙娇, 张发成, 陈燕芳, 张孝羲, 翟保平, 2011. 台风莫兰蒂对褐飞虱迁飞的影响. 应用昆虫学报, 48(5):1278-1287.
- 胡高, 包云轩, 王建强, 翟保平, 2007. 褐飞虱的降落机制. 生态学报, 27(12):5068-5075.
- 齐国君, 谢茂昌, 梁载林, 张孝羲, 程遐年, 翟保平, 2011. 2008 年桂北地区稻飞虱特大迁入事件分析. 应用昆虫学报, 48(5):1260-1267.
- 荣飞, 翟保平, 姜玉英, 2009. 小麦条锈病原孢子远距离传输数值模拟. 生态学报, 29(7):3952-3959.
- 王凤英, 胡高, 陈晓, 沈慧梅, 罗善煜, 辛德育, 徐盛刚, 张孝羲, 翟保平, 2009. 近年来广西南宁稻纵卷叶螟大发生原因分析. 中国水稻科学, 23(5):537-545.
- 王凤英, 张孝羲, 翟保平, 2010. 稻纵卷叶螟的飞行和再迁飞能力. 昆虫学报, 53(11):1265-1272.
- 王丽, 韩超, 徐艳博, 蔡广成, 孙友武, 胡学友, 张孝羲, 翟保平, 2011. 安徽江淮地区灰飞虱的春季迁飞与扩散. 应用昆虫学报, 48(5):1288-1297.
- 翟保平, 2005. 昆虫雷达让我们看到了什么? 昆虫知识, 42(2):217-226.
- 翟保平, 张孝羲, 程遐年, 1997. 昆虫迁飞行为的参数化 I:行为分析. 生态学报, 17(1):7-17.
- 张海燕, 刁永刚, 杨海博, 赵悦, 张孝羲, 翟保平, 2011. 山东济宁灰飞虱春季种群动态及迁飞特性. 应用昆虫学报, 48(5):1298-1308.
- 郑大兵, 杨帆, 赵运, 徐劲峰, 吴彩玲, 张孝羲, 翟保平, 2011. 白背飞虱回迁种群的形成:2009 年安徽潜山的个例分析. 应用昆虫学报, 48(5):1242-1252.
- 朱艳秋, 廖洞贤, 1992. 三维空气质点轨迹的计算. 应用气象学报, 3(3):328-333.