

褐飞虱迁飞参数的数值模拟

包云轩, 翟保平*, 程遐年

(南京农业大学农业部病虫监测与治理重点开放实验室, 南京 210095)

摘要: 迁飞性害虫褐飞虱对中国和亚洲其它国家和地区的水稻有着十分严重的危害, 其迁飞参数的时空变化是种群迁飞这一生态行为的重要体现。应用目前国际上先进的中尺度数值预报模式 MM5(V3.2) 对我国褐飞虱北迁、南返的过程进行了数值模拟, 根据模拟结果对害虫的迁出虫源地、迁飞路径、降落区、空中迁飞速率、迁飞高度、迁飞历时和迁飞距离等迁飞参数进行了一系列的数值计算和客观分析, 得到了与实际虫情普查和雷达观测资料相当吻合的结果, 从而比较精确地阐明了褐飞虱迁出起飞、空中定向飞行、降落迁入等迁飞行为的动力学机制。

关键词: 褐飞虱; 迁飞; 数值模拟

文章编号: 1000-0933(2005)05-1107-08 **中图分类号:** Q968 **文献标识码:** A

Numerical simulation of the migration parameters of the Brown Planthopper, *Nilaparvata lugens* (Stål)

BAO Yun-Xuan, ZHAI Bao-Ping*, CHENG Xia-Nian (Key Laboratory of Monitoring and Management of Plant Diseases and Insects, Ministry of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing, 210095, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(5): 1107~1114.

Abstract: Based on the data of the insect trap catches, the entomological radar surveying, and the weather observations in the China, some processes by which the northward and southward migrations through China of the Brown Planthopper *Nilaparvata lugens* (BPH) occur during July and October in 1991 were picked out. These processes have been investigated with an advanced mesoscale numerical weather-forecasting model, MM5 (V3.2) and the 3D windborne trajectories of BPH's migration were simulated. Some parameters, such as the source areas of the migrants, the destination areas, the migrating speeds, the altitudes at which the migration occurred, the flight durations, the distance covered during the migrations and so on, were calculated. Consequently, the simulation outputs were verified by the BPH' ground investigations, the surveying echoes of two entomological radars (a Q band radar with 8.8mm wave length and a X band radar with 3.2cm wave length) and the aerial netting samplings.

From the results of these simulations, the following characteristics of BPH migration within China can be identified. (1) For northward migrations, the main source area of the migrants was between latitudes 22~27°N and longitudes 110~117°E. There were three destination areas; the most important extended from 29~36°N and from 115~122°E, while the minor ones were (i) from 31~35°N and 108~113°E and (ii) from 27~29°N and 117~121°E. For southward migrations, there were two main source areas (i) from 30~36°N and 116~122°E, and (ii) from 30~36°N and 107~115°E; and two main destination areas (i) from 23~28°N and 107~116°E, and (ii) from 24~28°N and 117~122°E. (2) The main direction of the northwards migrations was SSW→NNE (average bearing 032°), with minor directions of SSE→NNW (356°) and WSW→ENE (067°); for

基金项目: 国家“973”资助项目(TG20000016210)

收稿日期: 2004-05-26; **修订日期:** 2005-03-03

作者简介: 包云轩(1963~), 男, 江苏东台人博士, 副教授, 主要从事昆虫生态学、应用气象学和农业信息技术应用研究。E-mail: Byx@njau.edu.cn

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: bpzhai@njau.edu.cn

Foundation item: “973” National Research Program (No. TG20000016210)

Received date: 2004-05-26; **Accepted date:** 2005-03-03

Biography: BAO Yun-Xuan, Ph. D., Associate professor, mainly engaged in insect ecology, applied meteorology and agricultural information technology. E-mail: Byx@njau.edu.cn

the southward migrations, the main directions were NE→SW (221°) and NW→SE (132°), while the minor directions were NNE→SSW (184°) and NNW→SSE (173°). (3) The average speed of the northward migrations was 12 m/s (range 0~45 m/s), and for the southward migrations 9.02 m/s (1~31 m/s). (4) The average altitude at which the most intense migration occurred (the average altitude at which the densest trajectory lines occurred in the different moments) during the northward migrations was 1650 m (range 250~2 600 m), while for the southward migrations it was 1000 m (100~1 500 m). For both northward and southward migrations, the optimum altitude (the altitudes at which the densest layers of the trajectories occurred) was approximately the same as the altitude within the lower atmosphere (the zone affected by daytime convection) at which wind speeds were greatest. (5) For the northward migrations, flight durations were mainly in the range 24~32 h (extrema 7 and 49 h), while southward movements typically lasted 18~26 h (extrema 4 and 35 h). (6) The average distance covered during the northward migrations was 1 200 km (range 350~1 850 km), while for the southward ones it was 800 km (range 100~1 100 km). The greatest distances were achieved by flight at the altitude where winds were fastest, and the smallest by flight at the lowest simulated altitude. (7) These simulation results conform with field surveys of BPH populations during this period and the simultaneous observations with two entomological radars.

Key words: *Nilaparvata lugens*; migration parameters; numerical simulation

褐飞虱 *Nilaparvata lugens* (Stål) 是危害我国及亚洲其它国家和地区水稻的一种重要的迁飞性害虫,它每年都作周期性的南北迁飞和降落危害。在其南北往返的迁飞过程中,空中迁飞参数的时空变化直接决定了它的降落区域和时段,也间接决定了它对降落区水稻的危害程度。因此对其空中迁飞参数的研究显得十分重要。

国外对昆虫迁飞参数的数值化研究始于 20 世纪 70 年代中期, Rose 根据地面、850hpa 风温场资料及部分小球探空测风数据计算出了同翅目蚜虫和鳞翅目夜蛾的二维迁飞轨迹,并根据气象、昆虫资料推估出它们的迁飞历时、迁飞高度、续航时间及逆向虫情大发生的区域^[1]。对褐飞虱迁飞参数的研究始于 20 世纪 80 年代中后期, Rosenberg 等利用综合天气图、气象探空资料分析了褐飞虱随风迁移的平面轨迹,并对其迁飞路径和迁飞速度进行了研究^[2]。国内从 20 世纪 80 年代末开始研究昆虫的迁飞参数,张孝羲等用顺推轨迹计算了稻纵卷叶螟的北迁虫源地,并分析了迁飞历时等迁飞参数^[3]。Riley 和程遐年等对中国东部秋季回迁的褐飞虱的迁飞行为及其迁飞参数进行了系统的雷达观测和理论研究^[4]。程极益等应用大气输送与扩散模型对中国东部北迁褐飞虱的二维迁飞轨迹进行了数值模拟,并对迁飞方位角、迁飞距离、迁飞高度等迁飞参数进行了分析研究^[5,6]。翟保平等通过对雷达昆虫学和其它方法得到的研究成果的综合分析,提出了一套包括小型昆虫在内的风载昆虫迁飞行为的参数化方案^[7]。胡继超等利用中尺度气象数值预报模式 MM2 计算出了褐飞虱在我国东部地区秋季南迁的三维轨迹,并对迁飞高度、迁飞方位角、背景气象要素场的时空变化特征进行了分析^[8]。包云轩等应用时空分辨率较高的中尺度数值预报模式 MM4 对我国褐飞虱北迁大发生的四维迁飞轨迹进行了数值模拟,确定出了北迁大发生的虫源区、迁飞路径和降落为害区^[9],并对北迁大发生过程的实际气象背景作了客观分析^[10]。在上述研究的基础上,笔者为了更科学、更系统、更全面地揭示褐飞虱的起飞、空中飞行和降落机制,根据以往褐飞虱雷达观测、氦气球空中网捕采样、田间虫情普查分析和迁飞轨迹模拟等研究的经验^[11~14],选取 1991 年 5 月至 10 月期间有典型意义的北迁、南返个例各 2 个(与笔者 1999 年^[9]、2000 年^[10]的相关研究相对应),应用中尺度数值预报模式 MM5(V3.2)进行了全方位动态数值模拟,并根据模拟结果对褐飞虱迁飞参数进行了下列精通的数字化研究。

1 资料和方法

1.1 资料来源

褐飞虱虫情资料为农业部病虫监测与治理重点开放实验室提供的 1971~2000 年期间全国 100 多个植保站的褐飞虱灯下诱捕量资料和田间虫情普查资料,其中着重分析了 1991 年的虫情资料。

气象资料为国家气象中心提供的 1991 年 5 月 1 日~10 月 31 日期间逐日 00GMT 和 12GMT、10°N~60°N、50°E~180°E 范围内地面和高空 12 个层次的格点气象资料(T106)。

1.2 方法

1.2.1 虫情分析与个例筛选 在对 1991 年 5~10 月的褐飞虱虫情资料进行详细的分析与筛选后,选取了有典型意义的个例 4 个,其中北迁个例 2 个:7 月 12~14 日、7 月 20~22 日,南迁个例 2 个:10 月 3~5 日、10 月 9~11 日。

1.2.2 模式简介 由美国宾夕法尼亚州立大学(PSU)和美国国家大气研究中心(NCAR)于 1992 年联合研制的第 5 代中尺度数值预报模式 MM5(Mesoscale Model Version 5)^[15],是在先前广泛流行的静力预报模式 MM4^[16]基础上开发出来的非静力数值预报模式,也是目前国际上公认的最先进的中尺度模式之一。我国于 1996 年引进该模式^[17],1997 年在国家气象中心投入业务使用,经过我国气象专家 8 年多的摸索、改善和应用推广^[18~24],现已成为适合我国国情的、高分辨率的、多功能的中尺度数值

预报业务系统。

本研究采用该模式时,对模式主要参数作了如下选择:水平方向用双层嵌套网格,外层 101×101 个网格点,格距为 45km,内层 103×103 个网格点,格距为 15km,中心点的经纬度为 35°N , 115°E 。垂直方向为 23 层(σ 面),模式区域的水平网格是“Arakawa B 网格”,边界层参数化方案为高分辨率行星边界层方案,时间有限差分方案为二阶蛙跃时间差分方案,侧边界条件为松弛边界条件。模式运行输出后,先对海平面到 5 000 m 高度之间的各要素场按每 50m 一层进行拉格朗日垂直内插,再根据内插值和其它分析结果迭加计算出各条轨迹。

1.2.3 褐飞虱主要迁飞参数的确定 本研究应用天气学中常用的三维轨迹计算方法^[25],模拟计算出了 4 560 条轨迹,其中北迁轨迹为 2 280 条(包括顺推轨迹 570 条,逆推轨迹 1 710 条),南迁轨迹 2 280 条(顺、逆推轨迹各为 1 140 条)。根据这些轨迹的时空变化特征,先按下列规则确定迁飞参数:

(1)虫源地和降落区 通过害虫灯下诱捕量资料和田间虫情普查数据先确定出这 4 个迁飞过程的实查虫源地和降落区,再根据模式输出的气流场,确定出模拟虫源地和降落区(以利于褐飞虱迁出的水稻生长区内上升速度超过 0.2m/s 的强上升气流区作为害虫的虫源地或起飞区,以利于迁入的水稻生长区内下沉速度超过 0.2m/s 的强下沉气流区作为害虫降落区)。

(2)迁飞路径 以始于实查或模拟虫源地内的某一点作为迁飞起点,连结每小时迭代计算出的轨迹落点,直至轨迹落于实查或模拟降落区内的某一点为迁飞路径的终点。

(3)迁飞速率 假设褐飞虱种群在高空成层迁飞时各个体都逆向(或同向)随风而行,同时飞行期间速度变化与外界环境风场同步,则以模式输出内插的各小时风场和垂直气流场为初始值,以褐飞虱个体本身主动迁飞速度(分别取 $\pm 0.1\text{m/s}$ 、 $\pm 0.2\text{m/s}$ 、 $\pm 0.3\text{m/s}$ 、 $\pm 0.4\text{m/s}$ 为基值)为二阶扰动分量进行空间矢量合成,再迭代(迭代终止条件:第 $n+1$ 次迭代与第 n 次迭代求出的风速误差小于 10^{-10}m/s)并依次求出各小时三维合成的飞行速度矢量,最后取其绝对值作为迁飞速率。

(4)迁飞高度 以虫情分析或理论模拟确定的虫源地中某一点为水平起点,以该点褐飞虱空中迁飞最适温度(18°C)所在的高度为迁飞密集层起点高度,以该点飞行低温阈限(15°C)所在的高度为迁飞层顶起点高度,以成层飞行的最低高度为迁飞层底起点高度(若有低空逆温层存在时,则以逆温层顶为成层远距离飞行的最低高度),顺序迭代推算出这 3 个层次各小时轨迹终点的空间位置,这些终点所在的高度即为迁飞高度,轨迹计算的最后一个点应终止于实查或模拟降虫区内某一点。

(5)迁飞历时 无论是顺推还是逆推的轨迹计算,都取轨迹起点到终点之间所经历的时段为迁飞历时。

(6)迁飞距离 取轨迹起点到终点之间所经历的路程长度为迁飞距离。

2 结果分析

2.1 虫源地和降落区

根据 1991 年全国 100 多个植保站的褐飞虱灯下诱捕量资料和田间虫情普查资料初步分析确定:北迁两个个例的虫源地大致在($22^{\circ}\text{N} \sim 26^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ} \sim 116^{\circ}\text{E}$)之间,主降区在($30^{\circ}\text{N} \sim 36^{\circ}\text{N}$, $115^{\circ}\text{E} \sim 122^{\circ}\text{E}$)之间,第 1 副降区在($31^{\circ}\text{N} \sim 35^{\circ}\text{N}$, $108^{\circ}\text{E} \sim 113^{\circ}\text{E}$)之间,第 2 副降区在($27^{\circ}\text{N} \sim 29^{\circ}\text{N}$, $117^{\circ}\text{E} \sim 121^{\circ}\text{E}$)之间。南迁两个个例的虫源地大致在($31^{\circ}\text{N} \sim 36^{\circ}\text{N}$, $116^{\circ}\text{E} \sim 121^{\circ}\text{E}$)之间和($30^{\circ}\text{N} \sim 35^{\circ}\text{N}$, $108^{\circ}\text{E} \sim 115^{\circ}\text{E}$)之间,主要降落区在($23^{\circ}\text{N} \sim 28^{\circ}\text{N}$, $109^{\circ}\text{E} \sim 116^{\circ}\text{E}$)之间和($24^{\circ}\text{N} \sim 28^{\circ}\text{N}$, $117^{\circ}\text{E} \sim 120^{\circ}\text{E}$)之间。对轨迹模拟结果分析计算后发现:褐飞虱北迁的虫源地在($22^{\circ}12'\text{N} \sim 27^{\circ}02'\text{N}$, $110^{\circ}18'\text{E} \sim 116^{\circ}19'\text{E}$)之间,主要降落区在($29^{\circ}36'\text{N} \sim 35^{\circ}52'\text{N}$, $115^{\circ}19'\text{E} \sim 121^{\circ}27'\text{E}$)之间,第 1 副降区在($31^{\circ}30'\text{N} \sim 35^{\circ}10'\text{N}$, $108^{\circ}08'\text{E} \sim 113^{\circ}06'\text{E}$)之间,第 2 副降区在($26^{\circ}55'\text{N} \sim 29^{\circ}05'\text{N}$, $116^{\circ}59'\text{E} \sim 122^{\circ}07'\text{E}$)之间(见表 1)。北迁单一轨迹可达的最北点为($43^{\circ}47'\text{N}$, $123^{\circ}45'\text{E}$),最东点为($42^{\circ}01'\text{N}$, $127^{\circ}57'\text{E}$),最西点为($34^{\circ}46'\text{N}$, $107^{\circ}01'\text{E}$)。南迁的主要虫源地在($30^{\circ}26'\text{N} \sim 36^{\circ}01'\text{N}$, $115^{\circ}56'\text{E} \sim 121^{\circ}55'\text{E}$)和($29^{\circ}58'\text{N} \sim 35^{\circ}57'\text{N}$, $107^{\circ}34'\text{E} \sim 114^{\circ}27'\text{E}$)之间,主要降落区在($23^{\circ}45'\text{N} \sim 28^{\circ}03'\text{N}$, $106^{\circ}58'\text{E} \sim 115^{\circ}43'\text{E}$)和($23^{\circ}46'\text{N} \sim 27^{\circ}51'\text{N}$, $116^{\circ}52'\text{E} \sim 121^{\circ}18'\text{E}$)之间(见表 1)。南迁可达的最西点和最南点均为($21^{\circ}37'\text{N}$, $105^{\circ}03'\text{E}$),最东点为($22^{\circ}50'\text{N}$, $121^{\circ}37'\text{E}$)。

将上述实际调查分析与模式输出结果(表 1)对比后发现:两者的虫源地和降落区基本吻合。

2.2 迁飞路径

迁飞性害虫的空中飞行路径通常用虫源地、迁飞方向(起点指向终点矢量线的方向)、迁飞方位角(起点指向终点矢量线与正北方向的夹角)和降落区 4 个特征量来描述。迁飞方向和迁飞方位角见表 2。研究实查资料分析和数值模拟的结果均表明:褐飞虱北迁的路径有 3 条,其中 1 条为主径,迁飞方向是东北偏北,迁飞方位角为 $32^{\circ}02'$;2 条为副径,第 1 副径迁飞方向为西北偏北,方位角为 $355^{\circ}38'$,第 2 副径为东北偏东,方位角为 $66^{\circ}43'$ 。南迁的路径有 4 条,其中 2 条为主径,迁飞方向为西南(方位角为 $220^{\circ}50'$)和东南(方位角为 $132^{\circ}22'$),2 条为副径,迁飞方向为西南偏南(方位角为 $183^{\circ}48'$)和东南偏南(迁飞方位角为 $172^{\circ}32'$)。

2.3 迁飞速率

对北迁 2 280 条轨迹在各时次的迁飞速率作统计分析后发现:北迁平均迁飞速率为 12.27m/s ,瞬时最大迁飞速率为 45.19m/s ,最小仅为 0.35m/s ;南迁平均迁飞速率为 9.02m/s ,瞬时最大迁飞速率为 31.03m/s ,最小仅为 0.76m/s (见表 3)。

表 1 褐飞虱迁飞虫源区和降落区模拟

Table 1 Simulations for BPH's emigrated regions and immigrated regions

模拟参数 Simulated parameters	北迁 Migrating northward		南迁 Migrating southward	
	7 月 12~14 日 Jul. 12~Jul. 14	7 月 20~22 日 Jul. 20~Jul. 22	10 月 3~5 日 Oct. 3~Oct. 5	10 月 9~11 日 Oct. 9~Oct. 11
虫源地 Emigrated regions	I (22°12'N~27°02'N, 110°18'E~116°19'E)	I (22°31'N~25°58'N, 111°32'E~115°34'E)	I (29°58'~34°26'N, 107°34'E~112°58'E) II (30°51'~35°44'N, 115°56'E~121°47'E)	I (30°26'N~36°01'N, 116°05'E~121°55'E) II (30°05'N~35°57'N, 109°14'E~114°27'E)
降落区 Immigrated regions	I (29°36'N~35°52'N, 115°19'E~121°27'E) II (32°17'N~35°10'N, 108°08'E~112°52'E) III (27°24'N~29°05'N, 117°08'E~121°32'E)	I (30°12'N~34°57'N, 116°03'E~120°51'E) II (31°30'N~34°56'N, 108°21'E~113°06'E) III (26°55'N~28°57'N, 116°59'E~122°07'E)	I (23°46'N~27°38'N, 116°52'E~121°18'E) II (24°07'N~28°03'N, 109°15'E~115°43'E)	I (23°45'N~27°59'N, 106°58'E~114°15'E) II (24°55'N~27°51'N, 117°19'E~120°54'E)

* I 主要虫源地或主要降落区 Main emigrated regions or main immigrated regions; II、III 副源地或副降区 Minor emigrated regions or minor immigrated regions

表 2 褐飞虱迁飞路径的分析和模拟

Table 2 Analysis and simulations for BPH's migrating paths

模拟参数 Simulated parameters	北迁 Migrating northward		南迁 Migrating southward	
	7 月 12~14 日 Jul. 12~14	7 月 20~22 日 Jul. 20~22	10 月 3~5 日 Oct. 3~5	10 月 9~11 日 Oct. 9~11
迁飞方向 Migrating directions	I 东北偏北(NNE) II 西北偏北(NNW) III 东北偏东(ENE)	I 东北偏北(NNE) II 西北偏北(NNW) III 东北偏东(ENE)	I 东南(SE) II 西南偏南(SSW) III 西南(SW) IV 东南偏南(SSE)	I 西南(SW) II 东南偏南(SSE) III 东南(SE) IV 西南偏南(SSW)
迁飞方位角 Migrating azimuths	I 31°31' II 353°37' III 67°02'	I 33°33' II 357°39' III 66°24'	I 132°22' II 186°59' III 222°31' IV 168°23'	I 220°50' II 174°41' III 139°44' IV 180°36'

* I 主要迁飞方向或主要迁飞方位角 Main migrating directions or main migrating azimuths; II、III、IV 次要迁飞方向或次要迁飞方位角 Minor migrating directions or minor migrating azimuths

北迁各轨迹中平均迁飞速率在 8~16m/s 之间的占总轨迹数的 100%,在 9~15 m/s 之间的占总轨迹数的 97.22%,在 10~14 m/s 之间的占总轨迹数的 81.24%,在 11~13 m/s 之间的占总轨迹数的 52.78%,总体曲线呈正态分布(见图 1 实线)。就整条轨迹而言,北迁最大平均迁飞速率为 15.92m/s,最小平均为 8.47 m/s。水平方向上,同一层次上各轨迹中以从虫源区内强上升气流中心迁出到达主降区内强下沉气流中心的轨迹运行最快;以虫源区东南角迁出在第 1 副降区西北角降落的轨迹运行最慢。垂直方向上,以对流层低层中水平风速最大层(当该层风速达 12 m/s 以上时则形成常说的“低空急流”,这种急流在褐飞虱常年北迁季节内出现较频繁。)附近的单体运行最快,该层以下褐飞虱单体随高度下降迁飞速率变慢,该层以上则随高度上升迁飞速率也变慢。从这一点看,褐飞虱北迁的空中飞行速度与环境气流场速度的时空分布有着极为密切的关系。

南迁轨迹中平均迁飞速率在 5~13 m/s 之间的占总样本数的 100%,在 6~12 m/s 之间的占总样本数的 98.01%,在 7~11 m/s 之间的占总样本数的 78.84%,在 8~10 m/s 之间的占总样本数的 49.26%,其曲线也近乎正态分布(见图 1 虚线)。南迁轨迹的最大平均迁飞速率为 12.96 m/s,最小平均为 5.38 m/s。其飞行速度的水平分布以虫源区内强上升气流中心迁出到达虫汇区内强下沉气流中心的轨迹运行最快;迁飞最慢的却是虫源区西北角迁出在虫汇区西南角降落的单体;垂直方向也以在对流层

表 3 褐飞虱迁飞速率模拟

Table 3 Simulations for BPH's migrating speeds

迁飞过程 Migrating processes		最大迁飞 速率(m/s) Maximum migrating speed	平均迁飞 速率(m/s) Average migrating speed	最小迁飞 速率(m/s) Minimum migrating speed
7 月 12~14 日	顺推 ^①	42.83	12.64	0.67
Jul. 12~14	逆推 ^②	41.88	12.19	0.35
7 月 20~22 日	顺推	45.19	11.98	0.83
Jul. 20~22	逆推	43.75	12.27	1.02
10 月 3~5 日	顺推	29.35	9.03	1.12
Oct. 3~5	逆推	28.66	8.96	1.41
10 月 9~11 日	顺推	31.03	8.97	0.76
Oct. 9~11	逆推	29.95	9.12	0.93

① Calculations forward;② Calculations backward

低层最大风速层附近的褐飞虱单体回迁最快,迁飞速率随高度的变化与北迁相似。

由此可见:在褐飞虱北迁、南返过程中,平均迁飞速率的变化都呈正态分布,垂直方向都有水平气流最强处飞行最快的共同特征。

2.4 迁飞高度

通过对覆盖 4 个迁飞个例各发生过程的每小时迁飞高度进行客观分析后,得到这样一个结论:褐飞虱北迁的轨迹密集层平均高度为 1 650m 左右,迁飞顶层平均高度在 2 080 m 左右,迁飞底层平均高度在 1 125 m 左右,瞬时最大高度可达 2 602m,瞬时最低高度为 237m;而南迁的平均高度为 1 000m 左右,迁飞顶层平均高度在 1 160 m 左右,迁飞底层平均高度在 370 m 左右,瞬时最大高度为 1 520m,瞬时最低高度为 119m(主要模拟计算结果见表 4)。

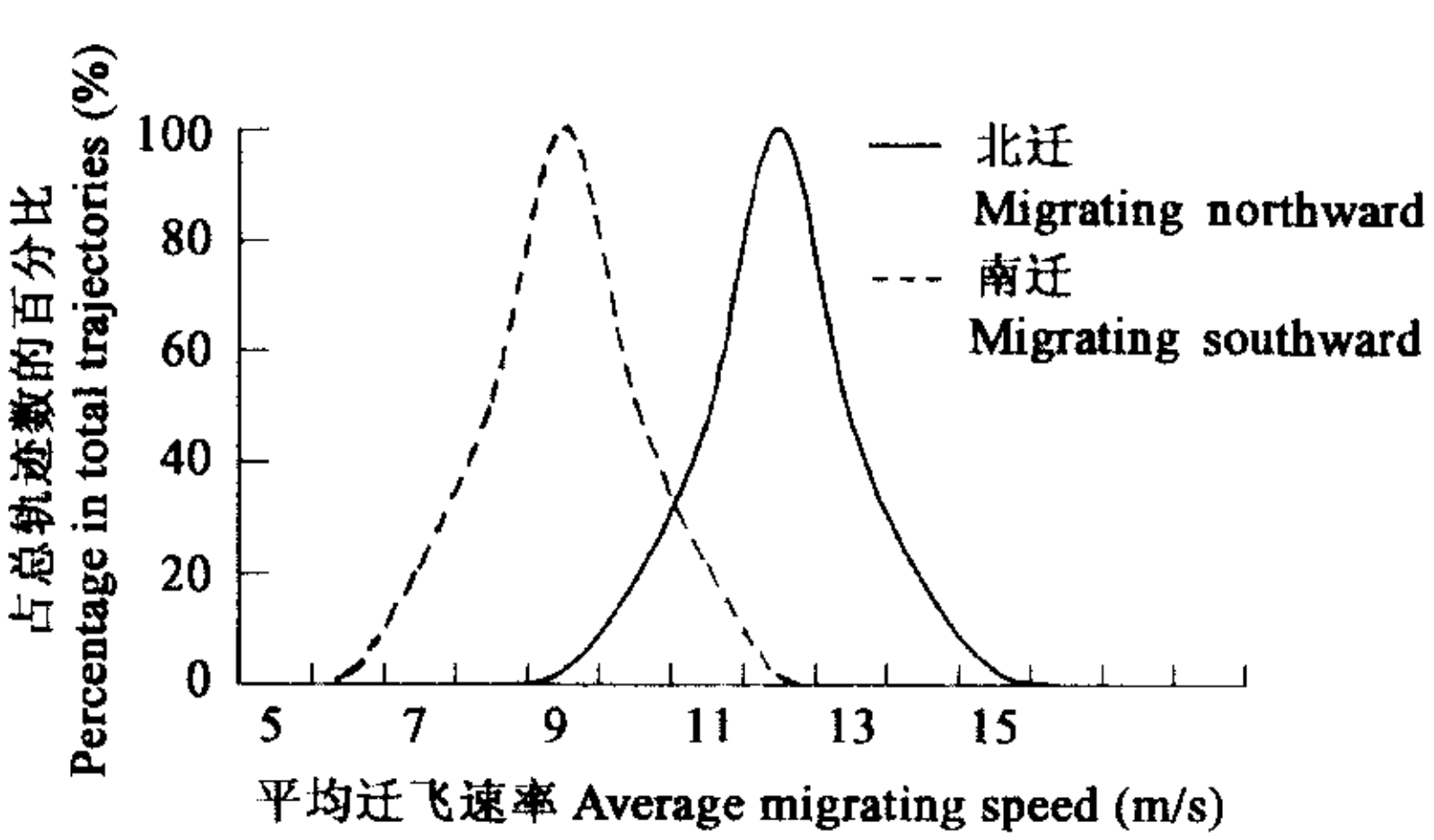


图 1 褐飞虱平均迁飞速率统计分布
Fig. 1 Statistics of BPH's average migrating speeds

表 4 褐飞虱迁飞高度模拟
Table 4 Simulations for BPH's migrating heights

模拟参数 Simulated parameters			迁飞顶层平均高度(m) Average height of upper migrating layers	迁飞密集层平均高度(m) Average height of dense migrating layers	迁飞底层平均高度(m) Average height of lower migrating layers
北迁 Migrating northward	顺推 Calculations forward	最大值 Maximum	2309	1900	1580
		平均值 Average	2100	1656	1140
		最小值 Minimum	1890	1410	550
	逆推 Calculations backward	最大值 Maximum	2367	1950	1280
		平均值 Average	2063	1648	1110
		最小值 Minimum	1880	1510	430
南迁 Migrating southward	顺推 Calculations forward	最大值 Maximum	1509	1075	691
		平均值 Average	1158	967	383
		最小值 Minimum	1076	421	263
	逆推 Calculations backward	最大值 Maximum	1528	1139	634
		平均值 Average	1165	1032	356
		最小值 Minimum	1014	380	238

在轨迹分析的同时,根据实测探空资料对对流层中低层(3 000m 以下)的四维气流场进行了内插计算,得到了每 2 h 间隔的对流低层风速最大层的高度变化曲线(图 2)。比较表 4 和图 2 发现:褐飞虱北迁、南返的空中迁飞密集层都有与对流低层风速最大层相吻合的趋势。

2.5 迁飞历时

如果不考虑褐飞虱的迁飞速率和迁飞距离,只统计其空中的迁飞历时,则发现:褐飞虱北迁的历时一般为 24~32 h(占总轨迹数的 91.67%),南迁历时则大多为 18~26 h(占总轨迹数的 92.68%)(见表 5)。北迁历时最长的可达 49.36 h、最短的只有 6.82 h,南迁最长历时为 35.10 h、最短历时仅 3.98 h。

2.6 迁飞距离

迁飞昆虫的降落区实际上是由其空中迁飞历时、迁飞速率、迁飞距离和末端路径的迁飞高度所决定的,而其中最关键的因素是迁飞距离。对这 4 个迁飞过程的轨迹参数计算后发现(见表 6):褐飞虱北迁的最远距离可达 1 851km,最近的仅为 344km,平均为 1 210km;而南迁最远迁飞距离为 1 086km,最近的仅为 119km,平均为 790km。另外,统计分析后还发现(见表 6):在迁飞中层(最适迁飞层)飞行的褐飞虱因贴近对流低层的风速最大层而迁飞最远,上层的次之,底层的最近。因此,褐飞虱在空中一定高度上迁飞时,其迁飞距离的大小基本上受高空风场所控制的。

3 讨论

(1)本研究应用目前世界上较先进的中尺度非静力数值预报模式 MM5 对一种重要的水稻迁飞性害虫——褐飞虱的南北迁飞过程作全方位的四维动态数值模拟,这在国际上尚属首次。该模式的先进之处在于它包容了海陆分布、地形、植被、海温、气象条件等多方面的信息,兼顾了大、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,适合于作天气预报、风传性病菌和迁飞性害虫的四维动态模拟、风载污染物的轨迹分析、各种气象要素场的诊断。与以往的中尺度静力模式 MM2^[8]、MM4^[10]相比,所考虑的环境更接近实际一些、对各种系统和过程的分辨率更高一些、模拟所得的结果也更准确一些(特别是虫源地、降落地、迁飞路径和迁飞高度等)。但是,该模式运行的软硬件配置要求高、所需资料多、运行时间长、与目前我国病虫测报部门的日常业务无法接轨。近两年我国 30km×30km 自动气象站网络系统正在普及、县级 PCVSATTM 气象卫星广播接收系统(设有 MM5 专用数据通道)和 MICAPS 气象信息综合分析处理系统(可直接导入数据作轨迹分析)也正在全面推广应用,该难题将迎刃而解。

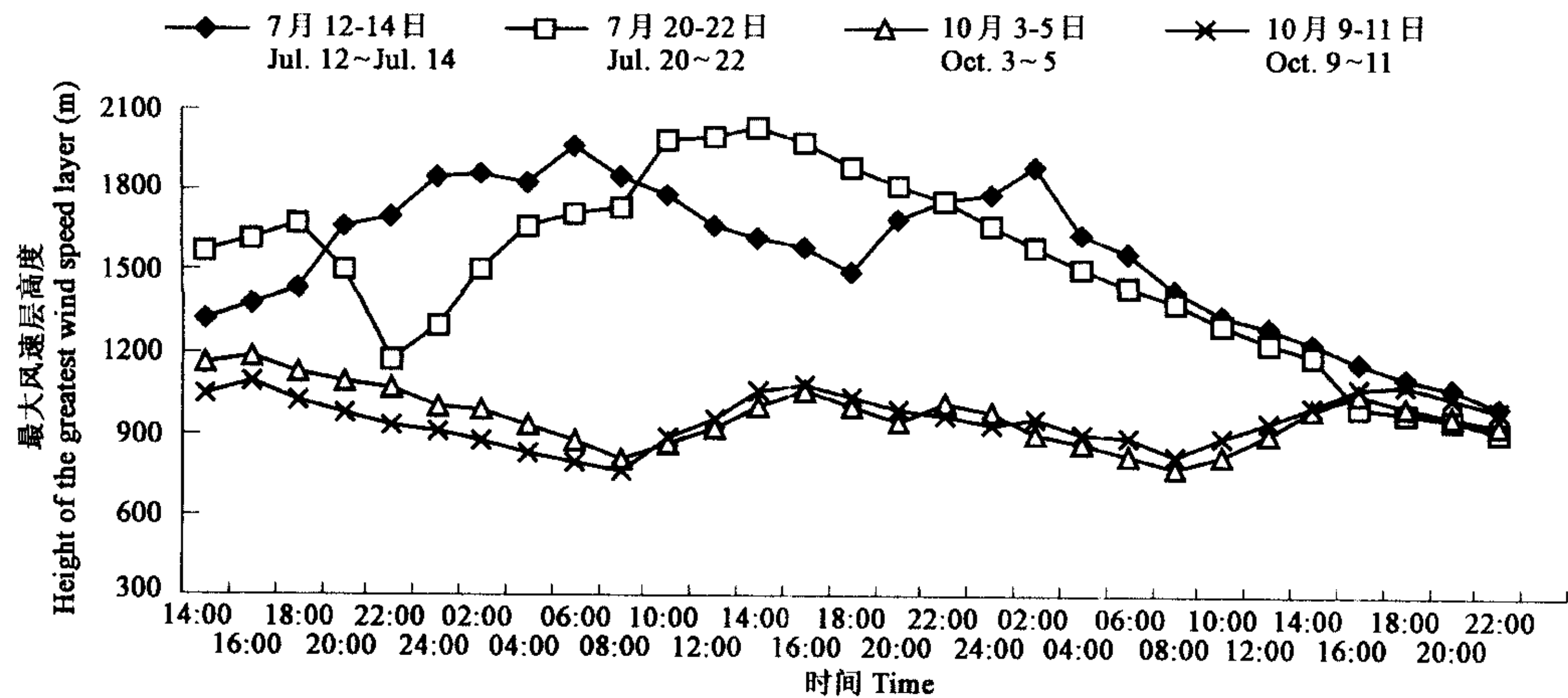


图 2 褐飞虱各迁飞时段内不同时段所对应的对流下层最大风速层高度
Fig. 2 The height of the largest wind speed level in the lower convective layer during different BPH migrations periods

表 5 褐飞虱迁飞历时统计													
Table 5 Statistics for the migrating durations of BPH													
北迁 Northward migration	迁飞历时 Migrating durations	≤8	14	19	21	24	28	30	32	35	40	≥48	总轨迹数 Sum of trajectories
	轨迹数 Number of trajectories	11	15	19	31	386	606	670	428	56	42	16	2280
南迁 Southward migration	迁飞历时 Migrating duration	≤5	9	12	15	18	20	21	24	26	28	≥30	总轨迹数 Sum of trajectories
	轨迹数 Number of trajectories	31	25	27	57	302	876	455	316	134	36	21	2280

表 6 褐飞虱迁飞距离统计				
Table 6 Statistics for the migrating distances of BPH				
迁飞距离 Migrating distance(km)	迁飞过程 Migrating processes			
	北 迁 Migrating northward (月/日) (month/day)		南 迁 Migrating southward (月/日) (month/day)	
	7/12~7/14	7/20~7/22	10/3~10/5	10/9~10/11
最长迁飞距离 Longest migrating distance(km)	1851	1783	1053	1086
平均迁飞距离 Average migrating distance(km)	1228	1191	796	784
最短迁飞距离 Shortest migrating distance(km)	406	344	119	176
迁飞层顶平均迁飞距离 Average migrating distance in upper migrating level(km)	1231	1229	830	846
迁飞密集层平均迁飞距离 Average migrating distance in dense migrating level(km)	1357	1315	903	983
迁飞底层平均迁飞距离 Average migrating distance in lower migrating level(km)	999	926	738	709

(2)应用全国褐飞虱田间虫情普查资料、双昆虫雷达(一部为波长 8.8mm 的 Q 频带雷达,另一部为波长 3.2cm 的 X 频带雷达)定点观察回波处理图像、氦气球空中网捕昆虫采样数据等实测资料与笔者所作的数值模拟结果进行对比分析后发现:两者相当吻合。以虫源地和降落区模拟为例,模拟虫源地中心与实测中心最大直线偏差为 74.17km,最小只有 31.82 km;模拟降落

区中心与实测中心最大直线偏差为 76.49km,最小只有 51.83 km(见表 7)。再如迁飞高度,模拟的南迁最大密集层高度变化于 380~1 139m,而笔者 1989 年 9 月~1991 年 11 月参与的中国东部秋季回迁昆虫的雷达观测和氦气球空中网捕采样研究表明:褐飞虱南迁的高度变化于 400~1 100m,可见理论模拟与实测结果相当吻合。

表 7 虫源地、降落区数值模拟与实测分析比较

Table 7 Comparisons between the investigations and simulations of BPH's emigrated regions and immigrated regions

迁飞过程 Migrating processes	北 迁 Migrating northward			南 迁 Migrating southward		
	实 测 Observed	模拟 Simulated	偏差距离 (km) Deviation	实测 Observed	模拟 Simulated	偏差距离 (km) Deviation
虫源地中心 Centers of emigrated regions	I (24°N,113°E)	I (24°37'N,113°18'E)	74.17	I (33°30'N,118°30'E) II (32°30'N,112°E)	I (33°14'N,118°56'E) II (32°58'N,112°01'E)	52.12 51.83
降落区中心 Centers of immigrated regions	I (33°N,118°30'E)	I (32°44'N,118°23'E)	31.82	I (25°30'N,112°30'E)	I (25°54'N,111°51'E)	76.49
	II (33°N,110°30'E)	II (33°20'N,110°37'E)	38.80	II (26°N,118°30'E)	II (25°49'N,119°05'E)	61.17
	III (28°N,119°E)	III (28°N,119°33'E)	55.00			

(3)褐飞虱南、北迁的飞行参数有着明显的差异。具体表现在:(1)北迁的平均迁飞速率为 12.27m/s,南迁为 9.02m/s,北迁飞行速度明显比南迁快;(2)北迁平均迁飞高度为 1 650m 左右,南迁为 1 000m 左右,北迁的高度比南迁高;(3)北迁一般历时 24~32h,南迁为 18~26 h,北迁空中历时比南迁长;(4)北迁平均迁飞距离为 1 210km 左右,南迁为 790 km 左右,北迁距离比南迁远。究其原因:不同季节、不同气候区和不同地形地貌的外界风场、温场和垂直气流场对褐飞虱的空中飞行速度、飞行高度、迁飞历时和迁飞距离起着决定性的作用。首先,北迁的适宜温场高度变化于 1 200~2 100m,此间风速一般为 8~16m/s,而南迁的适宜温场高度在 500~1 500m,其间风速为 6~12m/s。其次,北迁因成层飞行的高度高、飞行速度快、运动惯性大,起飞、降落过程所需时间长,飞行距离也远。

(4)对数值模拟的各种背景场进行客观分析后发现:南、北迁的气象背景左右了整个迁飞过程,特定的天气型、气候型是迁飞实现的必要前提,有利的大气环流配置为远距离迁飞奠定了动力基础,而最关键的是风、温、压、湿等气象要素场的四维分布决定了迁飞参数的时空变化。

References:

[1] Rose A H, Silversides R H & Lindquist O H. Migration flight by an aphid, *Rhopalosiphum maidis* (Hemiptera: Aphididae), and a noctuid, *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae). *Canadian Entomologist*, 1975, **107**:567~575.

[2] 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*, **56**:39~51.

[3] Zhang X X, Zhang J X, et al. Study on the models for the life system of rice leaf roller's population. *Acta Ecologica Sinica*, 1988, **8**(1):18~26.

[4] Riley J R, Cheng X N, et al. The long-distance migration of *Nilaparvata lugens*(Stål) (Delphacidae) in China: radar observations of mass return flight in the autumn. *Ecological Entomology*, 1991, **16**:471~480.

[5] Cheng J Y, Fan D Q, Bao Y X, et al. Trajectories analysis on the rice planthoppers what brought out in eastern Hebei Province. *Sinica Agri-meteorologica*, 1994, **15**(1):2~5.

[6] Cheng J Y, Bao Y X, Fan D Q, et al. Study on the trajectories of brown planthopper migrations. *Journal of Nanjing Agrcultural Univisity*, 1995, **18**(3):60~67.

[7] Zhai B P, Zhang X X, Cheng X N. Parameterize on the behavior of insect migration. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, **17**(1):7~17.

[8] Hu J C, Cheng J Y, Chu C S. Study on 3D trajectories of brown planthopper migrations in the eastern China: return flight in the autumn *Sinica Agri-meteorologica*, 1997, **18**(5):1~6.

[9] Bao Y X, Cheng J Y, Cheng X N. Analysis on the meteorological backgrounds for the great events of *Nilaparvata lugens*' long-distance migration northward during midsummers in China. *Journal of Nanjing Agricultural Univisity*, 1999, **22**(4):35~40.

[10] Bao Y X, Cheng J Y, Cheng X N, et al. Dynamical and numerical simulations on the processes of *Nilaparvata lugens*' long-distance migration northward during midsummers in China. *Acta Entomologica Sinica*, **43**(2):176~183.

[11] Riley J R, Cheng X N, et al. Using radar to observe brown planthoppers (BPH)' migration in China. *International Rice Research*

- Newsletters (IRRN)*, 1990, **2**:29~30.
- [12] Bao Y X. Study on the radar observations of brown planthoppers (BPH)' migration in China. *Sinica Agri-meteorologica*, 1991, **12**(4):55~56.
- [13] Bao Y X. Preliminary exploration on the use of insect radar. Dissertation collections on the first annual academic meeting of Jiangsu Province youth. Beijing: Chinese Science and Technology Press, 1992. 347~352.
- [14] Cheng X N, Zhang X X, Cheng J Y, et al. Study on the radar observations for the autumn return migrations of *Nilaparvata lugens* (Stål) (Delphacidae) in China. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 1994, **17**(3):24~32.
- [15] Grell G A J, Dudhia and Stauffer D R. A Description of the Fifth-Generation Penn. /NCAR Mesoscale Model Version5 (MM5). NCAR/TN-398+STR. NCAR Tech., 1992. Note: 1~67.
- [16] Anthes R A, Hsie E Y, Kuo Y H. NCAR/TN-282+STR-1987, Description of the Penn. /NCAR Mesoscale Model Version4 (MM4). Washington: NCAR Tech., 1987. Note, 1~65.
- [17] Cui B, Guo X R, et al. Transplanting and development of mesoscale model MM5 in NMC. *Annual Report on Science and Technology(A), Meteorology Branch* (National Meteorological Center), 1996. 240~249.
- [18] Cui B, Li Z C, Guo X R, et al. Numerical simulation and analysis on a process of torrential rainfall in the Beijing region. *Annual Report on Science and Technology(A), Meteorology Branch* (National Meteorological Center), 1997. 170~180.
- [19] Wang J J, Wang Y C, Cui B, et al. Development of nonhydrostatic mesoscale numerical forecasting system and its use in the on-time forecasting in the Beijing region. *Journal of Applied Meteorology*, 1999, **10**(4):385~393.
- [20] Liang F, Wang Y. The forecast of 2 m temperature and 10m wind with nonhydrostatic mesoscale numerical forecasting system. *Meteorological Monthly*, 2000, **26**(6):33~39.
- [21] Ma Y, Zhang Q H. Evaluation on a mesoscale numerical forecasting model MM5V2. *Meteorological monthly*, 2000, **26**(11):52~55.
- [22] Feng W H, Cheng L S, Cheng M H. "96.8" catastrophic torrential rainfall and nonhydrostatic simulations on the development structure of its mesoscale system. *Acta Meteorologica Sinica*, 2001, **59**(3):294~306.
- [23] Zhou B, Xu H M, Wu G X, et al. Numerical simulation of CMWDA with it's impacting on torrential rain forecast. *Acta Meteorologica Sinica*, 2002, **60**(3):309~317.
- [24] Chen J, Xue J S, Yan H. The impact of physics parameterization schemes on mesoscale heavy rainfall simulation. *Acta Meteorologica Sinica*, 2003, **61**(2):203~218.
- [25] Zuo Y C, Liao D X. Computation on 3D trajectories of air mass point. *Journal of Applied Meteorology*, 1992, **3**(3):328~333.

参考文献:

- [3] 张孝羲, 张建新, 等. 稻纵卷叶螟种群生命系统的模型研究. *生态学报*, 1988, **8**(1):18~26.
- [5] 程极益, 樊多琦, 包云轩, 等. 冀东稻飞虱暴发的轨迹分析. *中国农业气象*, 1994, **15**(1):2~5.
- [6] 程极益, 包云轩, 樊多琦, 等. 褐飞虱迁飞轨迹研究. *南京农业大学学报*, 1995, **18**(3):60~67.
- [7] 翟保平, 张孝羲, 程遐年. 昆虫迁飞行为的参数化. *生态学报*, 1997, **17**(1):7~17.
- [8] 胡继超, 程极益, 储长树, 等. 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] 包云轩, 程极益, 程遐年, 等. 盛夏褐飞虱北迁大发生的气象背景: 个例分析. *南京农业大学学报*, 1999, **22**(4):35~40.
- [10] 包云轩, 程极益, 程遐年, 等. 中国盛夏褐飞虱北迁过程的动态数值模拟. *昆虫学报*, **43**(2):176~183.
- [12] 包云轩. 中国褐飞虱迁飞的雷达观测研究. *中国农业气象*, 1991, **12**(4):55~56.
- [13] 包爱东. 昆虫雷达应用初探. 江苏省首届青年学术年会论文集. 北京: 中国科学技术出版社, 1992. 347~352.
- [14] 程遐年, 张孝羲, 程极益, 等. 褐飞虱在我国东部秋季回迁的雷达观察. *南京农业大学学报*, 1994, **17**(3):24~32.
- [17] 崔波, 郭肖容, 等. 中尺度模式 MM5 在国家气象中心的移植与开发研究. *科技年报, A 册, 气象类(国家气象中心)*, 1996. 240~249.
- [18] 崔波, 李泽椿, 郭肖容, 等. 对北京地区一次暴雨过程的数值模拟分析. *科技年报, A 册, 气象类(国家气象中心)*, 1997. 170~180.
- [19] 王建捷, 王迎春, 崔波, 等. 北京地区中尺度非静力数值预报系统的开发与实时预报应用. *应用气象学报*, 1999, **10**(4):385~393.
- [20] 梁丰, 王迎春. 用中尺度非静力模式制作北京气温和风预报. *气象*, 2000, **26**(6):33~39.
- [21] 马艳, 张庆华. 中尺度数值模式 MM5V2 评价. *气象*, 2000, **26**(11):52~55.
- [22] 冯伍虎, 程麟生, 程明虎. "96.8"特大暴雨和中尺度系统发展结构的非静力数值模拟. *气象学报*, 2001, **59**(3):294~306.
- [23] 周兵, 徐海明, 吴国雄, 等. 云迹风资料同化对暴雨预报影响的数值模拟. *气象学报*, 2002, **60**(3):309~317.
- [24] 陈静, 薛纪善, 颜宏. 物理过程参数化方案对中尺度暴雨数值模拟影响的研究. *气象学报*, 2003, **61**(2):203~218.
- [25] 朱艳秋, 廖洞贤. 三维空气质点轨迹的计算. *应用气象学报*, 1992, **3**(3):328~333.