DOI: 10.5846/stxb201809131970
包云轩,王明飞,陈粲,陆明红,刘万才.东亚夏季风进退对我国南方水稻主产区稻纵卷叶螟发生的影响.生态学报,2019,39(24):9351-9364.
Bao Y X, Wang M F, Chen C, Lu M H, Liu W C. Impact of East Asian summer monsoon advancing and retreating on occurrence of *Cnaphalocrocis medinalis* Guenée in the main rice-growing regions of south China. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(24): 9351-9364.

东亚夏季风进退对我国南方水稻主产区稻纵卷叶螟发生的影响

包云轩[1,2,*],王明飞[1,2],陈 粲[1,2],陆明红[3],刘万才[3]
1 南京信息工程大学气象灾害预报和评估协同创新中心/南京信息工程大学, 南京 210044
2 江苏省农业气象重点实验室/南京信息工程大学, 南京 210044
3 农业部全国农业技术推广与服务中心, 北京 100125

摘要:为了探明东亚季风对我国南方水稻主产区稻纵卷叶螟迁飞的影响,为中短期预警提供科学依据,利用 2000—2016 年中国稻纵卷叶螟赶蛾量数据,结合 NECP 气象再分析资料,分析了东亚夏季风进退与我国南方水稻主产区稻纵卷叶螟迁飞的关系,结果表明:(1)稻纵卷叶螟的初始迁入与东亚夏季风的向北推进密切相关,除华南稻区稻纵卷叶螟迁入始期提前于东亚夏季风北界经过该区的时间外,在其他稻区两者基本同步;东亚夏季风北边界在不同稻区首次和二次出现的早晚对该稻区稻纵卷叶螟的向北迁入的始期具有一定的指示意义。(2)各稻区北迁的高峰期一般都发生在东亚夏季风控制范围内,其中 6 月中旬—8 月上旬东亚夏季风活动范围到达 30°N 以北地区,此时是我国南方稻区稻纵卷叶螟北迁峰次最多、迁入量最集中的时期;东亚夏季风北界在本 30°N 以北地区持续时间的长短与稻纵卷叶螟年发生程度呈显著的正相关。(3) 8 月中下旬是东亚冬、夏季风的转换期,也是稻纵卷叶螟种群的"混合迁"发生期,此时,西南稻区和江淮稻区北部迎来初次南迁峰;9 月后东亚夏季风开始南撤,东北冬季风快速南下,稻纵卷叶螟种群也随之不断向南迁飞。(4)2007 年稻纵卷叶螟在江淮稻区特大爆发的大气背景是:6 月末—7 月的强西南季风使沿江稻区迁入虫量比常年显著增加,也为 7 月下旬至 8 月下旬稻纵卷叶螟大规模向江淮稻区迁入奠定了虫源基础;7 月份江南、华南地区的降水异常偏少使喜湿的稻纵卷叶螟种群进一步向沿江和江淮地区聚集;8 月份东亚夏季风的回撤偏晚以及 9 月份华北地区和江淮地区北部的相对偏暖,使江淮稻区稻纵卷叶螟种群在当地滞留时间偏长、南迁起始期和高峰期异常偏晚。

关键词:稻纵卷叶螟;东亚夏季风;迁飞;始期;高峰期

Impact of East Asian summer monsoon advancing and retreating on occurrence of *Cnaphalocrocis medinalis* Guenée in the main rice-growing regions of south China

BAO Yunxuan[1,2,*], WANG Mingfei[1,2], CHEN Can[1,2], LU Minghong[3], LIU Wancai[3]
1 *Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing* 210044, *China*
2 *Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing* 210044, *China*
3 *National Agricultural Technology Extension and Service Center, Ministry of Agricultural, Beijing* 100125, *China*

Abstract: This paper aims to ascertain the impact of the East Asian summer monsoon (EASM) on immigration of rice leaf roller, *Cnaphalocrocis medinalis* Guenée, in the main rice-growing regions of south China and provide a scientific basis for the medium and short term warning of *C. medinalis*. The influence of the EASM advancing and retreating on the immigration of *C. medinalis* in China was analyzed using the pentadly moth catches of *C. medinalis* from 2000 to 2016 and the daily

基金项目:国家公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306053); 国家自然科学基金面上项目(41475106)
收稿日期:2018-09-13; **网络出版日期**:2019-09-17
* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: baoyunxuan@163.com

reanalyzed meteorological dataset from the National Center of Environment Predicting (NCEP) in USA. The results showed as follows: (1) The northward migration of *C. medinalis* was closely related to the northward advancement of EASM. Except for the immigration beginning dates of *C. medinalis* in the rice-growing region of South China which was earlier than the beginning dates of the northern margin of EASM, the two beginning dates were basically synchronized in other rice regions. The first appearance and second appearance of the northern margin of EASM in different rice-growing regions had certain indication significance for the beginning of *C. medinalis* northward immigration. (2) The peak events of northward immigration generally occured in the control areas of EASM. When the north margin of EASM moved to the north of 30°N from mid-June to early August, more peak events of northward immigration usually with large populations took place in the main rice-growing regions of southern China. The duration of EASM north of 30°N was positively correlated with the annual occurrence of *C. medinalis*. (3) The middle and late ten days in August was the period of monsoon transition in East Asia and was also a period combined the northward migration with southward migration of *C. medinalis* populations when the first batch of southward migration peaks occurred in southwest China and the north of the rice-growing regions between the Yangtze River and the Huaihe River. From the beginning of September, when EASM began to retreat and the prevailing northeast wind with the attribute of winter monsoon moved southward rapidly, the populations of *C. medinalis* moved southward simultaneously. (4) In this paper, the atmospheric background for the outbreak of *C. medinalis* in the rice-growing regions between the Yangtze River and the Huaihe River in 2007 were investigated. Firstly, the strong southwest monsoon from the end of June to July increased significantly the immigrating amount of *C. medinalis* in the rice-growing region along the valley of Yangtze River which laid a foundation for the large-scale migration of *C. medinalis* from the rice-growing region along the valley of Yangtze River to the rice-growing region between the Yangtze River and the Huaihe River. Secondly, the anomalous low precipitation in the south of the Yangtze River and South China in July led to the further accumulation of hygrophilous *C. medinalis* populations in the rice-growing region along the valley of the Yangtze River and the rice-growing region between the Yangtze River and the Huaihe River. Thirdly, the delaying of EASM retreating in August and the relative warm of the North China and the region between the Yangtze River and the Huaihe River in September detained *C. medinalis* populations in these areas. At last, the beginning dates and the peak dates of their migration southward were unusually late.

Key Words: *Cnaphalocrocis medinalis* Guenée; East Asian summer monsoon (EASM); migration; beginning date; peak date

稻纵卷叶螟(*Cnaphalocrocis medinalis* Guenée)是威胁我国水稻生产的重大农业害虫之一,稻纵卷叶螟的爆发具有间歇性、突发性,连年爆发等特点,20 世纪 60 年代末至 90 年代初,稻纵卷叶螟在我国出现了 3 个连续的大暴发期[1],进入本世纪以来大发生年有进一步增加的趋势[2-3],据统计,2005—2015 年稻纵卷叶螟年均发生面积 16.96×10^6 hm^2,占水稻种植面积的 66.3%,造成稻谷损失 70.27×10^8 kg[4],对水稻生产造成严重影响,因此,提高稻纵卷叶螟的测报、预报和防治水平具有重要的实践意义。

稻纵卷叶螟是一种典型的迁飞性害虫,且具有较强的再迁飞能力,能够进行连续几个夜晚的多次飞行,但其本身飞行能力弱,须借助盛行风实现远距离转移[5]。其迁飞活动受天气、气候条件影响明显[6]。不少学者对稻纵卷叶螟的迁飞行为及其气象影响因素开展了深入的研究。王翠花等[7]通过 MM5 中尺度预报模式对稻纵卷叶螟迁飞的大气动力场进行了数值模拟,认为高空水平流场和水汽输送对稻纵卷叶螟的迁入具有很好的指示意义。包云轩等[8]运用 WRF 中尺度预报模式对江淮地区一次稻纵卷叶螟北迁过程的大气背景场进行了模拟,分析表明:925hPa 上的偏南气流是稻纵卷叶螟实现远距离迁飞的运载动力,降水和气流的垂直扰动是稻纵卷叶螟降落为害的关键因子。轨迹分析法是基于小型风载昆虫受大气动力胁迫而远距离迁飞的前提下,推算出昆虫迁飞的虫源地、飞行路径和降落区,它为稻纵卷叶螟迁飞的源汇关系分析、短期异地预测提

供了思路[9-10]。在重大发生过程的研究方面,王凤英等[11]运用 HYSPLIT 轨迹模式分析了广西地区早期稻纵卷叶螟迁入的虫源地,剖析了 2003 年大爆发的原因,其中大气背景起了重要作用。高月波等[12]、蒋春先等[13]利用昆虫雷达分别对华东和华南地区稻纵卷叶螟迁飞活动进行了观测研究,并运用回推轨迹对迁入虫源进行了追溯,从理论模拟和观测验证两个方面探讨了稻纵卷叶螟的迁飞行为,同时也揭示了气象条件对稻纵卷叶螟迁飞的影响。在系统的季节性南、北往返迁飞研究方面,轨迹分析研究表明早期迁入我国的稻纵卷叶螟主要来自中南半岛和中国的海南岛[11,14],每年春夏季,稻纵卷叶螟借助西南暖湿气流由南向北经五次重大迁飞过程,迁至我国东部不同稻区,秋季在东北干冷气流的南下胁迫下向南迁往温暖湿润的南方地区,经三次重大南迁过程后迁出我国大陆地区[15]。

东亚季风是东亚地区昆虫季节性往返迁飞的重要气候背景,我国的秦岭淮河以南水稻主产区受东亚季风环流的影响,同时也是水稻迁飞性害虫每年的主要为害区。包云轩等[16]运用季风指数分析了东亚季风进退对中国褐飞虱迁飞的影响。陈晓等[17]认为季风异常是 2003 年稻纵卷叶螟大爆发的主要原因之一。目前稻纵卷叶螟迁飞规律的研究多集中在某一地区、某一迁飞过程或某一年份,迄今为止,国内外在稻纵卷叶螟迁飞与季风的关系方面尚缺乏宏观的系统研究。东亚夏季风的进退对能够引起短期天气过程和长期气候变化,在夏季风盛行期内影响区内的温度、湿度、风场和降水都会发生显著变化[18],不同尺度、不同时效的天气和气候过程对稻纵卷叶螟迁飞都具有重要的影响,因此,探明东亚夏季风夏进退与我国不同季节、不同稻区稻纵卷叶螟迁飞的关系,对稻纵卷叶螟迁入的中短期预警预报具有重要的理论价值。

东亚夏季风(EASM)和东亚冬季风(EAWM)对我国以及整个东亚地区的天气和气候有直接作用,夏季风指数能够较全面地反映稻纵卷叶螟发生期内季风环流系统的热力、动力和水分属性,特别是在对降水、天气、气候的影响上反映的更直观、更实时、更全面[19]。东亚夏季风北界是反映东亚夏季风随时间、空间变化而变化的最重要的指标之一,为了定量描述东亚夏季风进退,大气科学领域的学者们定义了不同的夏季风北边界,大致可分为四类(1)气团类:汤明敏等[20]使用候平均假相当位温资料定义了副热带夏季风进退的指标;(2)降雨类:黄菲等[21]采用过程透雨量标准作为东亚夏季风区;(3)风场类:李春等[22]利用夏季 850hPa 上 20°N 以北 105°—125°E 之间平均南风风速 2m/s 所在的纬度为东亚季风边界;(4)综合类:吴长刚等[23]、胡豪然和钱维宏[24]用 850hPa 西南风、假相当位温和地面降水定义了东北、华北、西北地区季风边界。鉴于稻纵卷叶螟迁飞的动力学机制和生物学特性,本研究选取胡豪然和钱维宏提出的综合类夏季风北边界来描述东亚季风的时空变化特征,着重探讨东亚夏季风进退与稻纵卷叶螟迁飞时间和发生量的关系,并以 2007 年为例分析了夏季风对典型的大发生年的影响机理,旨在为我国稻纵卷叶螟的中短期预警提供理论参考。

1　资料与方法

1.1　资料来源

1.1.1　虫情资料

由农业部全国农业技术推广服务中心提供,时间为 2000—2016 年 17 年间的稻纵卷叶螟赶蛾数据。

1.1.2　气象资料

由美国国家环境预测中心(National Centers for Environmental Prediction NCEP :https://rda.ucar.edu/)、美国国家大气研究中心(National Center for Atmospheric Research, NCAR)提供的水平分辨率为 2.5°×2.5°的 NCAR/NCEP 逐日气象再分析资料,包括格点式风场、温度、湿度数据;以及中国国家气象信息中心(National Meteorological Information Center:http://data.cma.cn/)提供的全国 679 个气象台站逐日降水量观测资料。

1.1.3　地图资料

基础地理信息数据由国家基础地理信息中心(http://www.ngcc.cn/)提供的 1:4000000 中国电子地图。

1.2　主要方法

1.2.1　虫情资料处理

筛选 17a 间观测数据较完整的植保站 38 个,主要位于我国秦岭、淮河以南的水稻主产区,其分布如图 1

所示,其中西南稻区观测资料较少,选取秀山、惠水作为代表站。由于农业部病虫测报规范中常以候为时间单位,且东亚夏季风的进退属于中长期的过程,故将虫情资料整理成逐候累积虫量,每月前 25d 每 5d 为 1 候,每月末候可以有 3,4,5d 或 6d。在 SAS 中作时间序列图,统计稻纵卷叶螟迁入的始期、北迁高峰期、南迁高峰期、终期、偏重发生年。

1.2.2 气象资料处理

运用 Cressman 客观插值法将降水站点资料处理成 2.5°×2.5°空间分辨率的格点式数据,所有气象数据应用前均经过候平均处理。运用气象专业制图软件 Grads 作图,对气象背景场进行客观分析。

1.2.3 季风指数的计算方法

根据胡豪然等[24]定义的夏季风北边界描述东亚夏季风的进退,该指数规定在 110—120°E 经度范围内格点化的气象资料在同一格点上同时满足下列 3 个条件即属于东亚夏季风区:① 850hPa 候平均风场为西南风,即纬向风速 $U > 0$,经向风速 $V > 0$;②850hPa 候平均假相当位温 $\theta_{se} \geq 335K$;③候平均降水量≥4 mm/d。该区域最北边界即为东亚夏季风北界。假相当位温由 David Bolton 在 1980 年讨论过[25],计算公式如下:

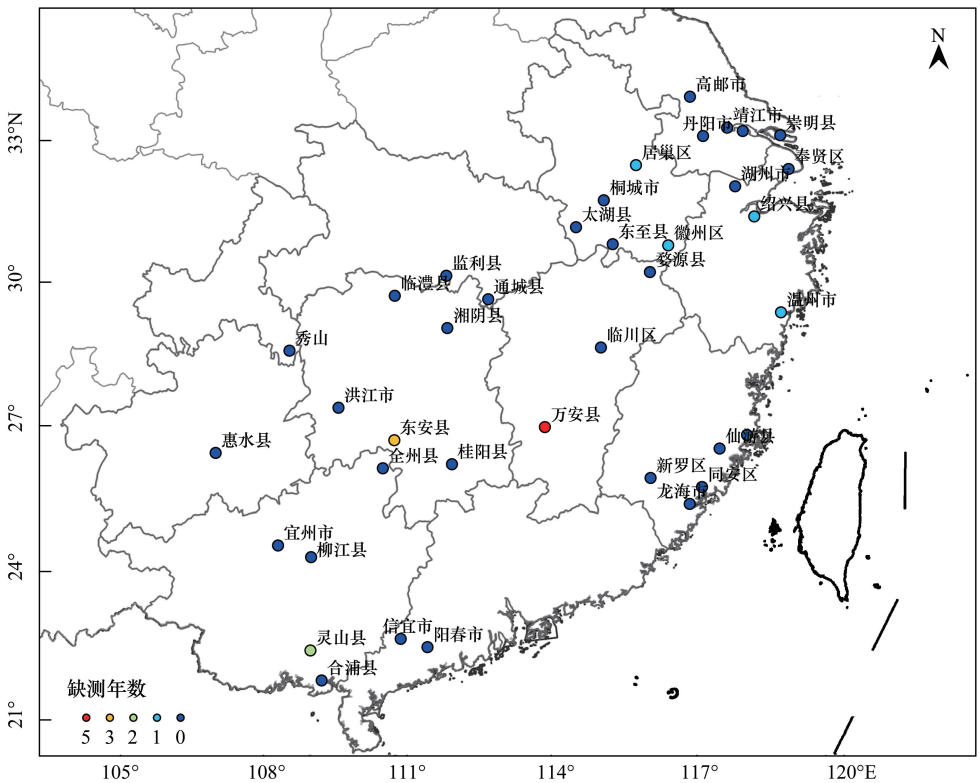


图 1 稻纵卷叶螟监测站点分布

Fig.1 Distribution of the plant protection stations monitoring *C. medinalis*

$$\theta se = \theta \cdot \exp\left[\left(\frac{3.376}{T_{LCL}} - 0.00254\right) \cdot r \cdot (1 + 0.81 \times 10^{-3} r)\right] \quad (1)$$

其中 r 表示混合比(g/kg),θ 为湿空气位温(K),T_{LCL}为抬升凝结高度的温度(K)。其中 θ 和 T_{LCL}可以表示为:

$$\theta = T_K \cdot \left(\frac{1000}{p}\right)^{0.2854 \times (1 - 0.28 \times 10^{-3} r)} \quad (2)$$

$$T_{LCL} = \frac{2840}{3.5 \times \ln T_K - \ln e - 4.805} + 55 \quad (3)$$

式中,T_K表示绝对温度(K),p 表示气压(hPa),e 表示水汽压(hPa)。该指数能够较好的反映长江中下游地区

以及华北地区的降雨特征。

1.2.4　夏季风北边界与稻纵卷叶螟迁飞的时间关系

在 ArcGIS 中客观分析夏季风北边界 17a 平均位置变化与各植保站稻纵卷叶螟平均始期、北迁高峰期、南迁高峰期、终期的对应时空关系。在 Origin 中作出二者关系图,分稻区分析历年稻纵卷叶螟迁入始期与夏季风北界进入该地区的时间同步性。

1.2.5　相关性分析

在 SPSS 中采用 Pearson 相关性分析探讨稻纵卷叶螟年迁入量与季风北边界在 30°N 以北持续时间的相关关系以及候迁入量与夏季风推进的相关关系,用于衡量相关性的显著性水平分别设定为 $P \leqslant 0.01$ 和 $P \leqslant 0.05$。

1.2.6　异常年的剖析

以 2011 年东亚季风异常年为例,剖析了 2011 年 EASM 北界在华南地区出现异常偏晚但稻纵卷叶螟迁入始期正常的主要原因,讨论了东亚夏季风影响下的风场、温度场、相对湿度场、假相当位温场和降水分布对稻纵卷叶螟迁入的影响。稻纵卷叶螟自 2003 年以来在我国几乎每年都有局部大爆发,以 2007 年尤为严重[2]。本文以 2007 年我国稻纵卷叶螟大发生为例,分析了东亚夏季风北界位移及其产生的 925hPa 流场、925hPa 和地面温场、地面降水分布对稻纵卷叶螟迁飞和降落的影响。

2　结果与分析

2.1　东亚夏季风的季节变化

每年的第 15 候前后(3 月中旬),东亚副热带地区海陆热力差异开始逆转[26],华南、西南地区气温开始升高。由 17a 平均的年内 EASM 北界时间变化曲线(图 2)可以看出,从第 17 候 EASM 开始出现并登陆我国大陆南部;4 月上旬—5 月初(第 20—25 候)主要活动在 25°N 以南地区;第 26—32 候(5 月上旬—6 月上旬)推进至 28°N 左右;第 33—34 候(6 月中旬),随着西太平洋副高北跳,夏季风向北推进至 30° N 以北地区;第 39—40 候(7 月中旬)副高再次北跳, EASM 到达最北位置。夏季风一般在 37—43 候(7 月—8 月初)到达华北地区,控制整个南方稻区(图 3)。8 月中旬,冬季风增强,夏季风开始持续向南撤退,第 46—48 候,夏季风回撤到长江中下游地区;进入 9 月份以后,东北冬季风携带冷空气快速南下,EASM 会快速回撤至华南(图 3)。

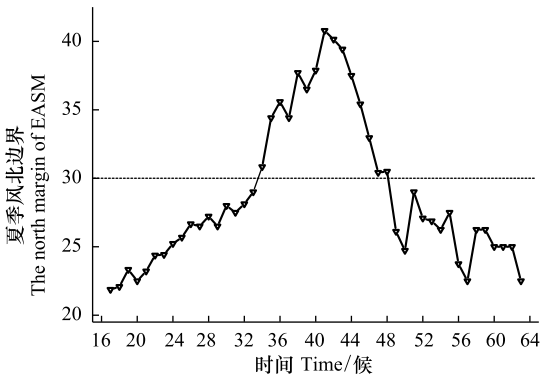


图 2　2000—2016 年东亚夏季风北界平均位置的季节变化

Fig. 2　Seasonal variation of average situation for the northern margin of EASM from 2000 to 2016

2.2　夏季风进退与稻纵卷叶螟迁入的时空关系

从稻纵卷叶螟迁入与夏季风北边界时空分布图上可以看出,每年第 14—46 候(3 上旬—8 月中旬)主要是稻纵卷叶螟的北迁季节,共有四次大型北迁过程:14—26 候(3 月上旬—5 月上旬)稻纵卷叶螟种群主要迁入我国华南南部、西南南部稻区;第 27—32 候(5 月中旬—6 月上旬)迁入华南北部、西南和江岭稻区;第 33—39 候(6 月中旬—7 月上旬)种群主要迁入沿江稻区和江淮稻区;第 39—46 候(7 月中旬—8 月中旬)种群从江岭北部和沿江稻区迁入江淮稻区或境外的朝鲜半岛和日本列岛南部[27]。

就北迁过程而言,华南稻区第 14—20 候稻纵卷叶螟的迁入始期普遍提前于 EASM 北边界经过当地的时间;第 27—32 候江岭稻区东南部稻纵卷叶螟的迁入与夏季风推进同步性较好,江岭稻区西北部以及西南稻区迁入始期普遍早于夏季风;第 33—39 候二者在长江中下游地区同步性较好,在江淮稻区北部稻纵卷叶螟始期

滞后于夏季风北边界出现时间。每次大型北迁过程的高峰期均发生在 EASM 控制范围之内(图 3)。

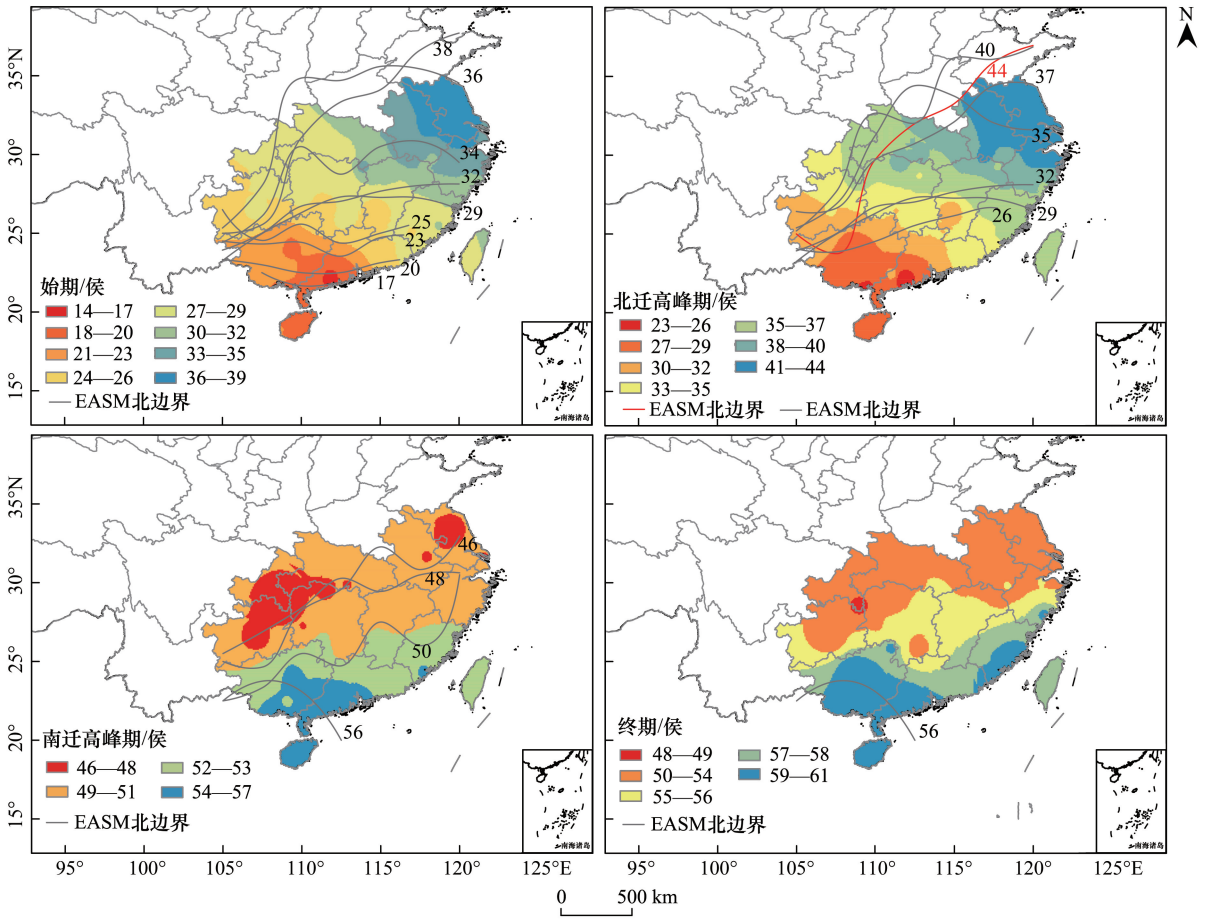


图 3 2000—2016 年 17a 平均的稻纵卷叶螟始期、北迁高峰期、南迁高峰期、终期与不同稻区季风北界(图中黑线或红线,线右端数字为候序)**的时空分布**

Fig.3 Temporal-spatial distribution of immigration beginning dates, peak dates of immigration northward, peak dates of immigration southward and immigration ending dates of *C. medinalis* and the northern margin of EASM (the black line or red line, the number on the right side of the line is the preorder of pentad) **on the average of 17 years from 2000 to 2016**

在季风进退上,我国夏季风的北上是一个缓慢的过程,但其南撤和冬季风的南下是一个快速的过程。同一地区,东亚夏季风与冬季风的转换过程每年迟早不同,持续时间也不同。平均第 46—48 候(8 月中旬—8 月底)EASM 北界回撤到长江中下游地区,江淮稻区和西南稻区北部偏南风转变为偏北风,在此期间偏北风与偏南风交替出现,该区域既有北迁过程又有南迁过程,会维持 2—3 候的“混合迁”局面,并且江淮稻区北部和西南稻区迎来最早的南迁迁入峰。进入 9 月份以后,东北冬季风携带冷空气快速南下,随着 EASM 的迅速向南撤退,我国南方稻区从北到南陆续出现南迁高峰期(图 3)。常年随着 EASM 北界南撤,EASM 覆盖区面积不断向南缩小,但有些年份 EASM 北界在第 49—60 候(9—10 月)间会随西北太平洋副高在长江流域以南地区呈南北拉锯式徘徊,形成秋季连阴雨天气,使得南迁季延长,发生程度加重。随着气温下降各稻区由北向南依次出现终期,第 62 候(11 月上旬)以后,绝大多数稻纵卷叶螟种群会随 EASM 北界在中国大陆上的消失而迁向境外(图 3)。

分析不同稻区 2000—2016 年间稻纵卷叶螟迁入始期与相应区域 EASM 北界出现时间的关系发现:华南稻区稻纵卷叶螟迁入始期普遍提前于 EASM 北边界始期(图 4),其中,2011 年 EASM 北界在华南地区出现异常偏晚(第 24 候),而稻纵卷叶螟迁入始期正常(第 15 候)的主要原因是:(1)经冬前田间剥查显示,华南稻区有一定数量的稻纵卷叶螟个体滞留在当地收获后的田间稻桩或田头稗草上越冬,为冬后田间活动或迁入田间

奠定了基础;(2)2011 年第 15 候华南地区近地层的温度和湿度、925hPa 高度的湿度都较好地满足了稻纵卷叶螟个体迁入早稻田或在田间活动的温湿度要求,925hPa 高度的温度在海南岛南部、华南东部沿海和华南西南部等地区也适宜稻纵卷叶螟种群的生存和迁入,但高空 850hPa 高度的假相当位温场达不到 EASM 登陆的条件(图 5);(3)第 24 候,华南稻区无论是地面和 925hPa 高度风场、温度场和湿度场,还是 850hPa 高度的风场、位温场及地面降水都同时满足了稻纵卷叶螟迁入和 EASM 北界登陆的条件(图 6)。

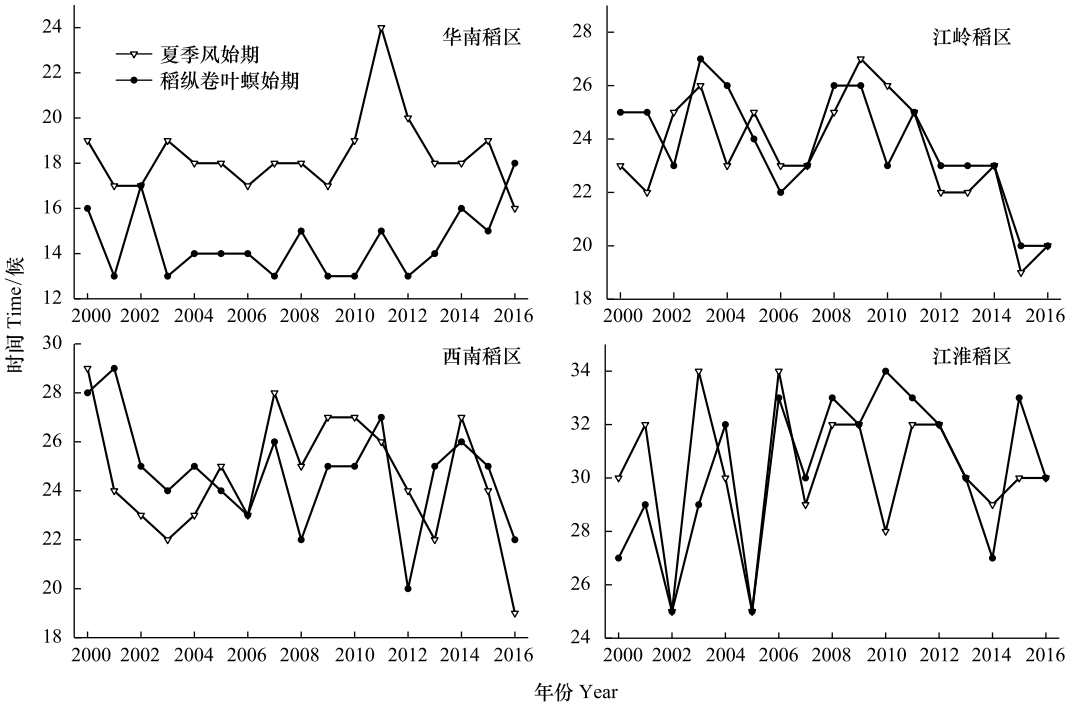


图 4　2000—2016 年不同稻区稻纵卷叶螟迁入始期与夏季风北界始期的关系

Fig.4　Relationship between the immigration beginning dates of *C. medinalis* and the beginning dates of northern margin of EASM in the different rice-growing regions during the period from 2000 to 2016

统计发现:在这 17a 间,江淮稻区、江岭稻区和西南稻区稻纵卷叶螟始期提前或滞后季风北边界始期 1—2 候的概率为 70%;提前或滞后 1 候的概率为 54.9%。分析这三个稻区稻纵卷叶螟迁入始期前后的风温场可以发现,925hPa 高度均盛行偏南气流,同高度候平均气温在江岭稻区为 25℃,在西南稻区为 16℃,在江淮稻区为 18℃,均高于稻纵卷叶螟迁飞的下限温度[28]。

2.3　东亚夏季风进退与稻纵卷叶螟迁入量的关系

气象因子与稻纵卷叶螟的发生和蔓延关系密切[29],EASM 北界和中国南方稻区稻纵卷叶螟迁入量均呈显著的年变化和季节变化,常年 EASM 北界在 30°N 以北活动的时间也是稻纵卷叶螟迁入峰次多、降落虫量大的时期,不同年份东亚夏季风强弱不同。以 EASM 北界在 30°N 以北持续的时间来表示该年年内东亚夏季风强度,结果表明,稻纵卷叶螟年迁入量与 EASM 强度变化趋势一致,相关系数为 0.71,通过了 $P<0.01$ 的显著性检验(图 7)。

在季节变化上,整个南方稻区稻纵卷叶螟的年内迁入累积量与 EASM 的推进速度相关密切,两者相关系数达 0.67,通过了 $P<0.01$ 的显著性检验(图 7)。常年第 25 候以后,随着季风向北推进,稻纵卷叶螟发生量同步增加,发生面积向北扩展;EASM 北界于 7 月中下旬达到最北纬度,8 月中旬向南回撤到 30°N 左右(沿江地区),7 月中旬—8 月中旬,我国南方稻区基本上处于 EASM 的控制范围内,在此期间各稻区气候条件适宜,有利于稻纵卷叶螟的迁飞和繁殖。

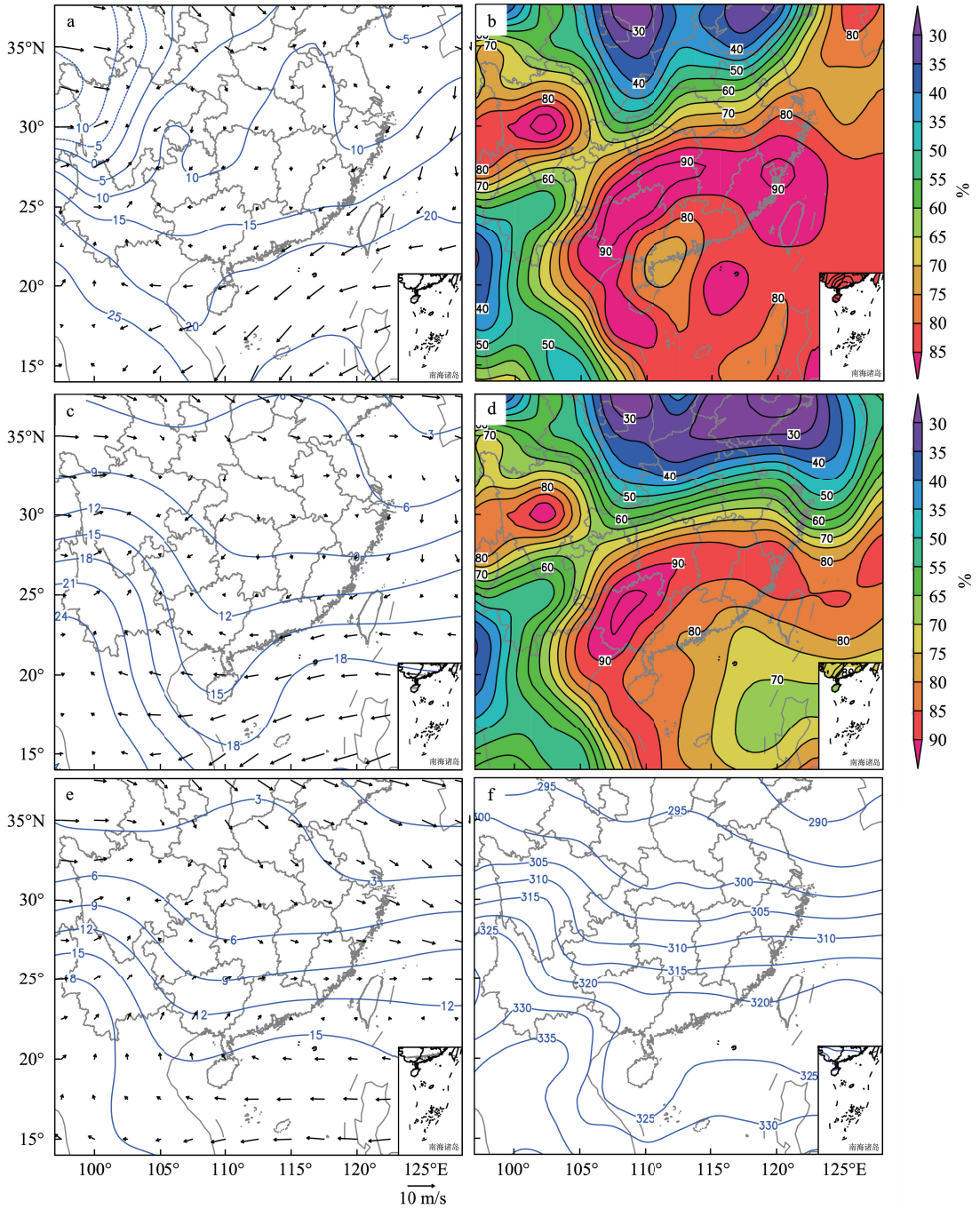


图 5 2011 年第 15 候地面、925hPa 和 850hPa 的风场(m/s)、温度场(℃)、相对湿度场(%)和假相当位温场(K)

Fig.5 Wind field (m/s), temperature field (℃), relative humidity field (%) and pseudo equivalent potential temperature field (K) on the average in 15th pentad, 2011

(a)地面风场和温度场;(b)地面相对湿度场;(c)925hPa 风场和温度场;(d)925hPa 相对湿度场;(e)850hPa 风场和温度场;(f)850hPa 假相当位温场

2.4 东亚夏季风对 2007 年中国南方稻区稻纵卷叶螟大发生的影响

2.4.1 2007 年稻纵卷叶螟发生概况

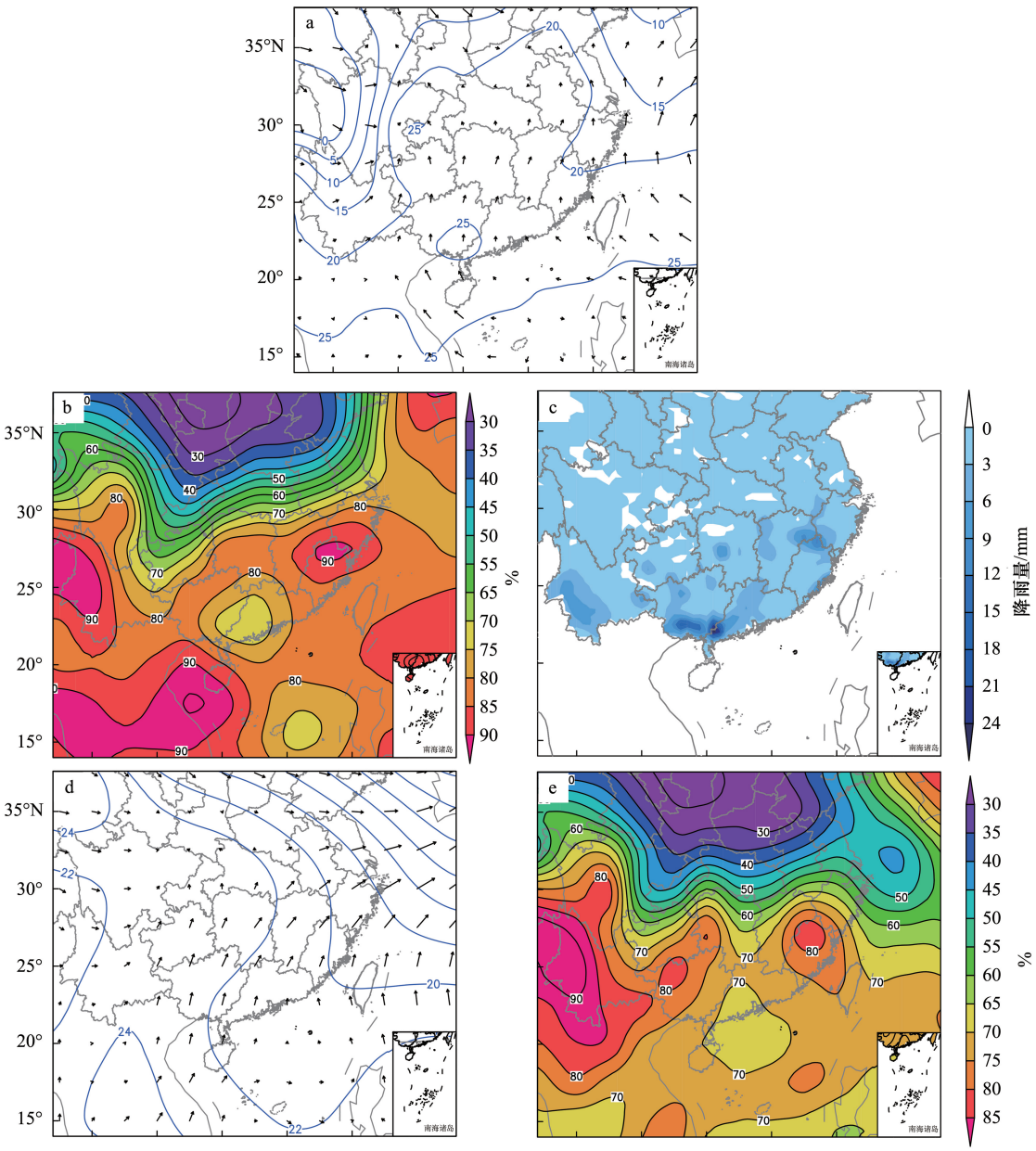
2007 年,华南地区稻纵卷叶螟迁入峰出现的早、虫量大、峰次多,相较于常年北迁虫源基数大幅增加,其中龙州站 5 月份出现 3 次迁入峰,最高迁入量达 600 头;6 月末—7 月初稻纵卷叶螟由华南稻区大规模迁入西

南稻区东部、江岭稻区南部和长江中下游稻区,使沿江稻区四(2)代成虫迁入高峰期比常年提早约 2 候。7 月下旬,五(3)代成虫大规模从江岭稻区迁入江苏、安徽和湖北等省份,第 42 候丹阳站累积虫量达 8000 头。8 月中旬(45—46 候)稻纵卷叶螟南迁至西南稻区,江淮稻区虫量迅速回落,8 月下旬—9 月上旬(47—50 候),江淮稻区和江岭稻区北部稻纵卷叶螟再次大爆发,六(4)代成虫在江淮地区滞留至 9 月中旬,9 月下旬至 10 月下旬种群陆续向南回迁至江岭稻区南部和华南稻区(图 8)。

2.4.2　夏季风及气象背景场分析

2007 年 6—8 月份夏季风在 30°N 以北地区持续了 13 候,从推进过程上看 5 月份夏季风有一次增强过程,最北达到了 29°N 地区,6 月末 7 月初夏季风又有一次推进过程,到达 37°N,8 月中旬有一次急速南撤过程,随后又有所加强(图 9),其进退动态与不同地区迁入虫量相符合。

925hPa 风场上,2007 年 6 月末—7 月初(第 36—37 候)东亚夏季风覆盖整个中国南方稻区,30°N 以南地区平均西南风风速接近 10m/s,有利于稻纵卷叶螟种群的北迁;第 45—46 候(8 月中旬)东北风从华北地区经江淮地区南下侵入长江以南至南岭(25°N)以北的大部分地区,有利于稻纵卷叶螟的南迁;第 47—48 候(8 月



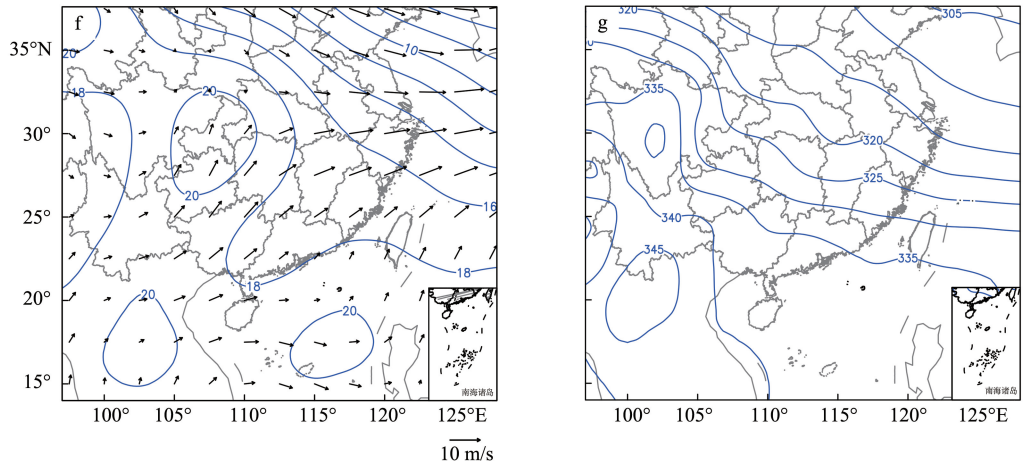


图 6 2011 年第 24 候地面、925hPa 和 850hPa 的风场(m/s)、温度场(℃)、相对湿度场(%)、降水量场(mm/d)和假相当位温场(K)

Fig.6 Wind field (m/s), temperature field (℃), relative humidity field (%), precipitation field (mm/d) and pseudo equivalent potential temperature field (K) on the average in 24th pentad, 2011

(a)地面风场和温度场;(b)地面相对湿度场;(c)地面降水量场;(d)925hPa 风场和温度场;(e)925hPa 相对湿度场;(f)850hPa 风场和温度场;(g)850hPa 假相当位温场

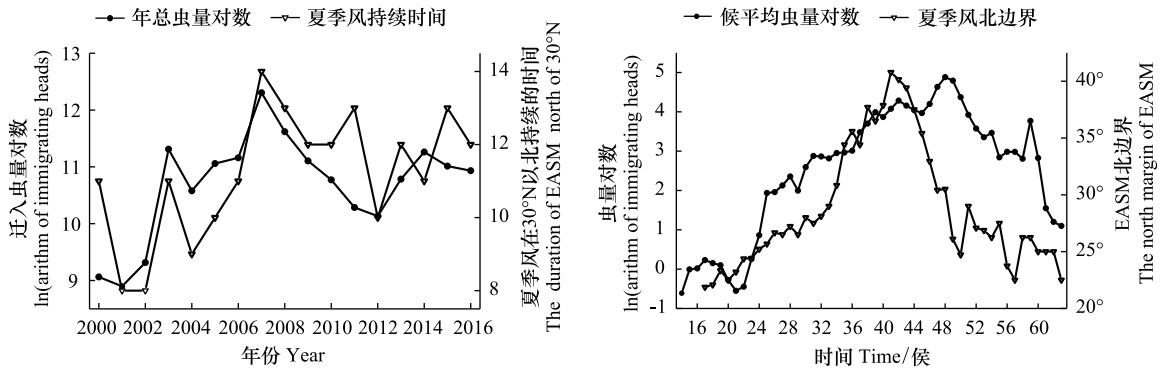


图 7 中国南方稻区稻纵卷叶螟年总迁入量对数和东亚夏季风北界在 30°N 以北地区持续时间

Fig.7 Inter-annual variation of the logarithm of annual total *C. medinalis* immigrating amount

下旬)西南风突然增强与东北风在江淮稻区南部、西南稻区北部辐合(30°N),此时南迁和北迁种群交汇,江淮稻区和沿江稻区迁入虫量再次迅速增加;第 50 候,全区盛行东北风(20—32.5°N)(图 10)。

在降雨分布上,华南稻区和江岭稻区南部 7 月份降水量偏少,比同期减少了 50%,而西南稻区北部、沿江稻区和江淮稻区降水量高于历史平均值,达到了 10 mm/d 以上,干旱引起的生存环境恶化迫使稻纵卷叶螟从华南稻区和江岭稻区南部随西南气流向北迁飞,而西南北部稻区、沿江稻区和江淮稻区的降水有利于稻纵卷叶螟种群降落(图 11)。

温度场上,稻纵卷叶螟种群在江淮稻区滞留到了第 50 候,从第 51 候开始南迁,分析第 47—51 候温度场,925hPa 高度上江淮地区平均温度达到了 21—22℃(地面平均气温达 24℃以上),华北地区、江江淮地区 9 月份温度比历史同期高出 1—2℃,秋季高温是江淮地区稻纵卷叶螟大量滞留的重要原因之一(图 12)。10 月初开始,随着田间气温的下降,稻纵卷叶螟种群纷纷南迁(图 13)。

3 结论与讨论

本文利用 2000—2016 年全国稻纵卷叶螟赶蛾量数据,结合 NECP 气象再分析资料分析了东亚夏季风进

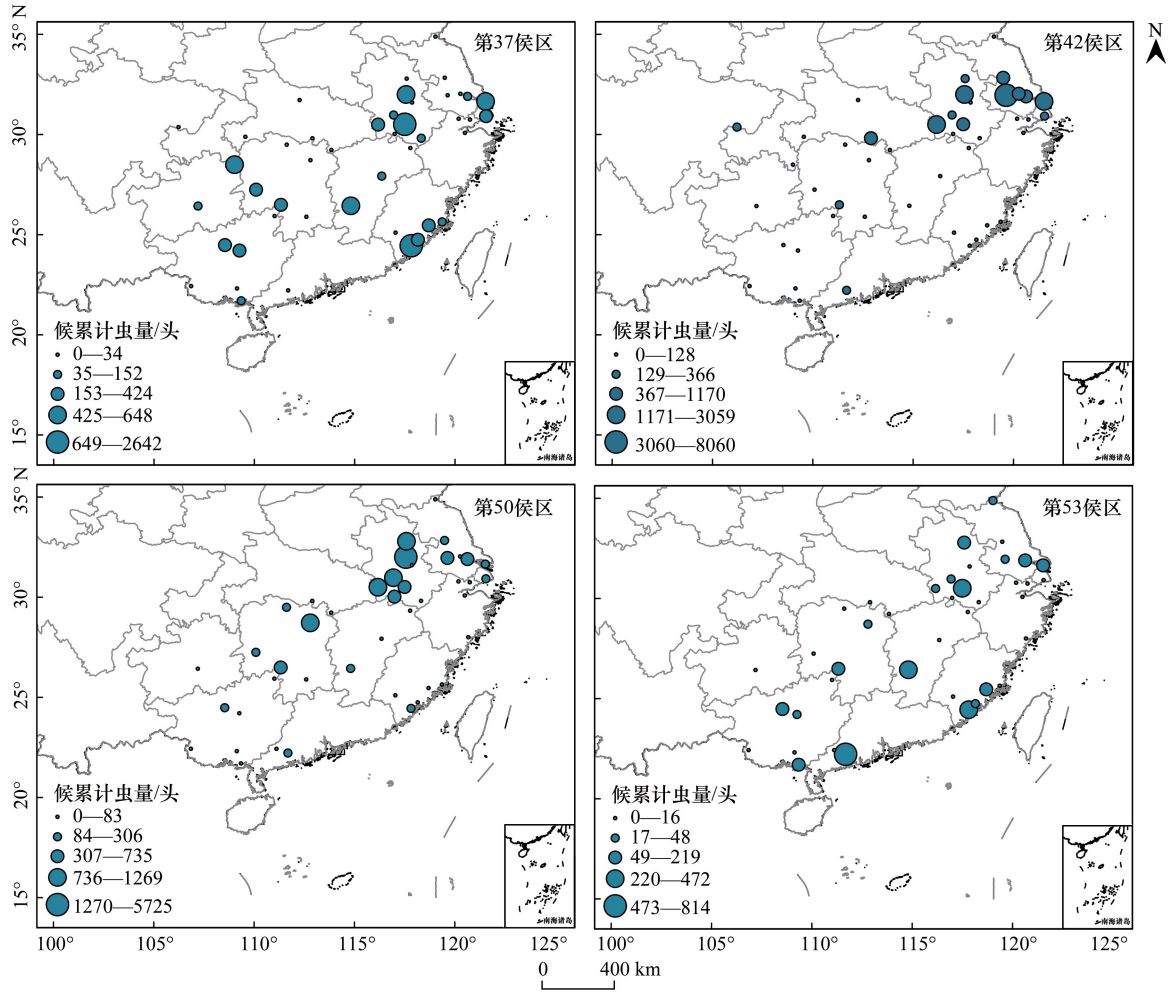


图 8　2007 年各侯 稻纵卷叶螟虫量(头)分布

Fig.8　Distribution of the immigrating amount (head) of *C. medinalis* pentad in 2007

退对中国南方稻区稻纵卷叶螟迁飞的影响,主要得到以下结论:

(1)稻纵卷叶螟种群的向北迁飞与东亚夏季风在我国大陆上的向北推进过程密切相关。华南稻区稻纵卷叶螟迁入始期在时间上普遍提前于 EASM 北界 3—5 候;江岭稻区、西南稻区东部和江淮稻区两个始期基本同步,时差大多为 2 候以内。因此,EASM 北界在不同稻区首次和二次出现的早晚对该稻区稻纵卷叶螟的北迁的始期具有一定的指示意义。

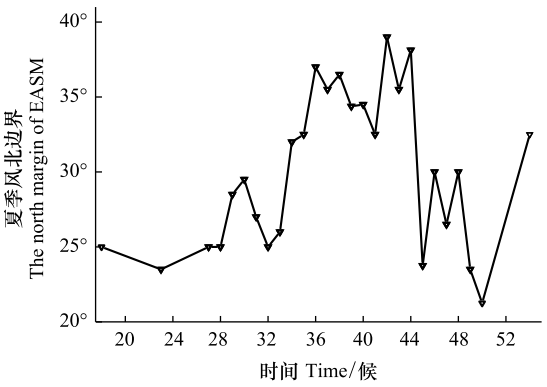


图 9　2007 年东亚夏季风北界位置的季节变化

Fig.9　Seasonal variation of situation for the northern margin of EASM of 2007

(2)各稻区代表性病虫测报站的北迁高峰期发生时,该站均处于东亚夏季风控制区域内;而江淮、江岭稻区南迁高峰期发生时,该站点处于夏季风北边缘或北边缘以北。每年 6 月中旬—8 月上旬东亚夏季风的北界大多位于 30°N 以北地区,此时也是我国南方水稻主产区稻纵卷叶螟向北迁入的峰次最多、迁入量最集中的时期,且东亚夏季风北界在 30°N 以北地区持续时间的长短与稻纵卷叶螟年发生程度呈显著的正相关,这与

笔者对褐飞虱的相关研究结论基本一致[16,30]。

(3) 8 月中下旬是东亚冬、夏季风的转换期,也是稻纵卷叶螟种群的“混合迁”发生期,此时,西南稻区东北部和江淮稻区迎来初次南迁峰;9 月后东亚夏季风开始不断南撤,东北风快速南下,稻纵卷叶螟种群也随之不断南迁。南北向混合迁的情形在褐飞虱迁飞行为中也有体现[31],只不过因为稻纵卷叶螟迁飞高度低,“混合迁”发生期来的早,南迁期开始的也早;而褐飞虱迁飞高度高,“混合迁”期发生的迟,南迁期也来的迟。

(4)从大气背景上来看,2007 年稻纵卷叶螟在江淮稻区特大爆发的原因是:6 月末—7 月的强西南季风使江岭稻区和沿江稻区早期迁入虫量比常年显著增加,也为 7 月下旬至 8 月下旬稻纵卷叶螟从江岭稻区北部大规模向江淮稻区迁入提供了良好的虫源条件;7 月份江南、华南地区的降水异常偏少使喜湿的稻纵卷叶螟种群

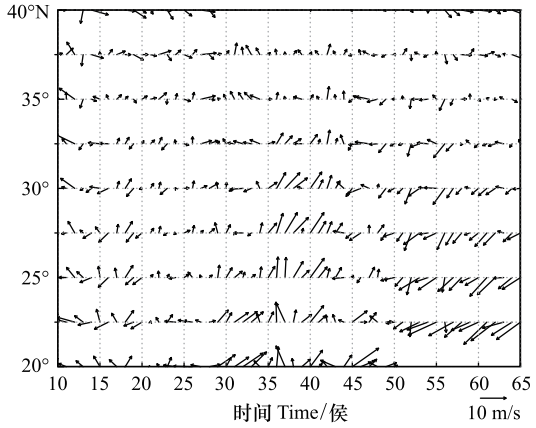


图 10 2007 年 925hPa 高度 110—120°E 区域候平均风速(m/s)**的时间-纬度剖面图**

Fig.10 Time-latitude profiles of pentadly average wind speed (m/s) **on 925hPa between 110°E to 120°E in 2007**

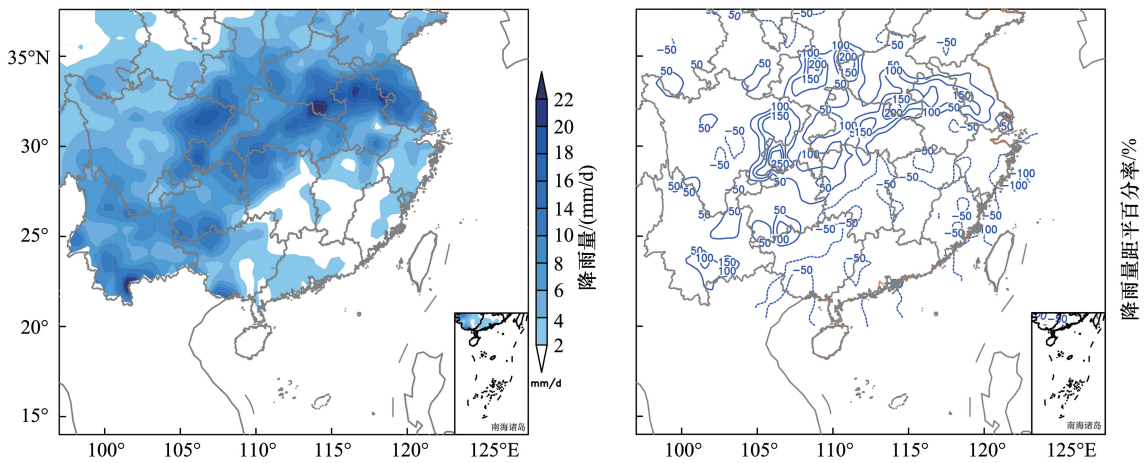


图 11 2007 年 7 月日平均降水量分布和降雨量距平百分率(气候平均为 2000—2016 年)

Fig.11 Daily average precipitation distribution and the percentage of rainfall anomaly in July 2007 (on the average during 2000—2016)

随偏南季风进一步向沿江和江淮地区聚集;8 月份东亚夏季风的回撤偏晚以及 9 月份华北地区和江淮地区北部的相对偏暖,使江淮稻区稻纵卷叶螟种群在当地滞留时间偏长、南迁起始期和高峰期异常偏晚。但是,大气背景只是稻纵卷叶螟迁入大发生的外因之一,更重要的是内因:2007 年 3—5 月,我国华南和西南稻区稻纵卷叶螟迁入始期早、迁入峰次多、迁入量大,这奠定了极好的虫源基础。

昆虫迁飞活动受多种大气过程的综合影响,既表现出对大气热力和水汽条件的主动选择能力,又受水平和垂直方向上大气动力场的胁迫[32-33]。华南稻区稻纵卷叶螟因早春 EASM 登陆前的地面温湿条件较好而导致迁入始期普遍提前,江岭稻区、西南稻区东部和江淮稻区因稻纵卷叶螟迁入条件主要依赖于东亚夏季风北上带来的温湿环境和动力条件,但因 850hPa 以下不同高度适宜稻纵卷叶螟迁入的大气条件不一样,这些稻区的稻纵卷叶螟迁入始期或提前于、或相遇、或滞后于 EASM 北界在该地区的时间, EASM 北界虽然反映的是 850hPa 高度的风温场条件,通常如果 850hPa 高度没有较强的暖平流或 925hPa 高度以下没有强冷平流,850hPa 高度的温度总是明显低于 925hPa 高度以下的温度,对 925hPa 高度以下的风温场有一定的指示作用。因此,它在宏观尺度上对稻纵卷叶螟的迁入始期具有一定的指示性和预警意义。但这种指示性作用不如东亚

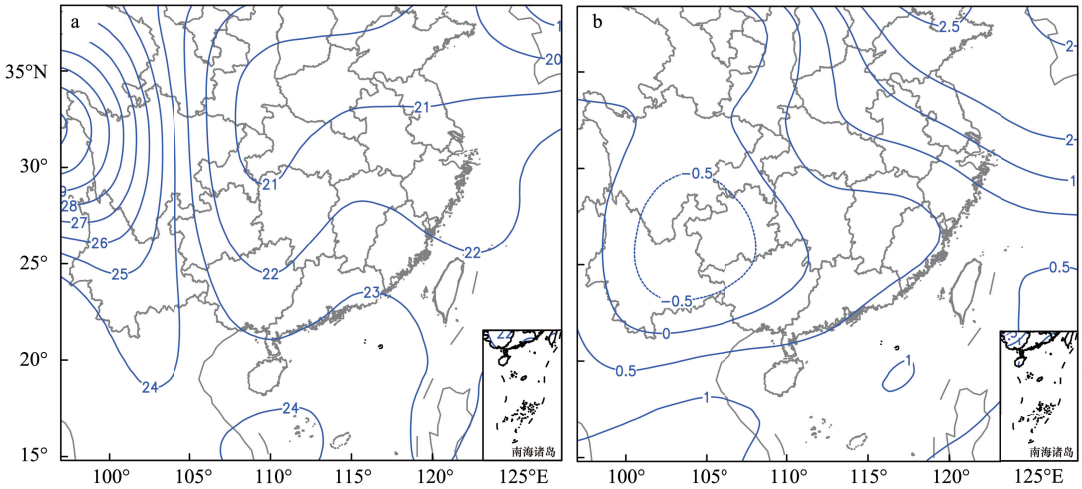


图 12　2007 年第 47—51 候 925hPa 平均温度(℃)(a)和 9 月份温度距平(℃,气候平均为 2000—2016 年)(b)

Fig.12　Average temperature (℃) during 47th to 51th pentad (a) and temperature anomaly (℃, on the average from 2000 to 2016) of September (b) on 925hPa during the period from 47th to 51th pentad in 2007

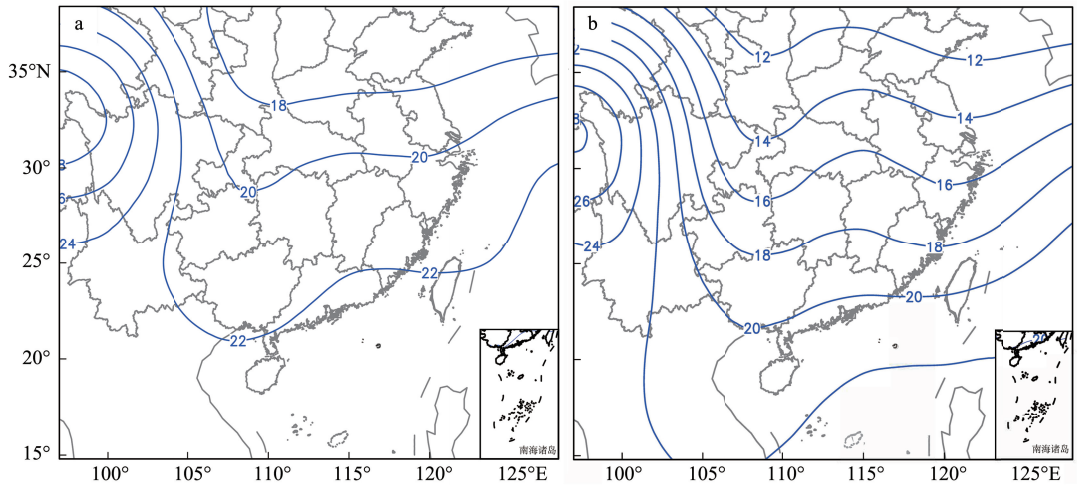


图 13　2007 年第 52—54 候(a)和 55—58 候(b)925hPa 平均温度(℃)

Fig.13　Average temperatures (℃) during 52th to 54th pentad (a) and during 55th to 58th pentad (b) on 925 hPa in 2007

季风对中国褐飞虱的南北迁飞[16,30]。原因是褐飞虱的集中迁飞高度主要在 1500 m 上下,与季风指数所代表的动力、温度和湿度条件直接相关,而稻纵卷叶螟的集中迁飞高度在 500—1000 m,与季风指数所代表的动力、温度和湿度条件直接关联度远不如褐飞虱。

由于稻纵卷叶螟具有喜暖湿、趋嫩绿的习性[6,8],6—8 月在东亚夏季风覆盖区内,水稻生长面积最广、长势最好(嫩绿度最佳),同时温湿条件对迁入和为害最适宜。东亚夏季风能到达的最北纬度能够表明温度、湿度、降水等因素在季风覆盖区域的综合状态,其对稻纵卷叶螟生存和迁飞的适宜程度决定着稻纵卷叶螟可迁移的潜在范围,夏季风的持续时间对稻纵卷叶螟的繁殖代数和危害时长有重要影响,最终将影响着稻纵卷叶螟的年发生总量。2007 年夏季风转换偏迟,为稻纵卷叶螟秋季在江淮地区为害提供了有利条件,也是该年稻纵卷叶螟大发生的原因之一。

本文虽然定性分析了东亚夏季风进退和转换对我国南方水稻主产区稻纵卷叶螟迁入的影响,但没有定量分析其对不同测站或区域稻纵卷叶螟发生程度或迁入量的影响,也未提取季风指数对不同稻区稻纵卷叶螟迁入的预警预报指标,下一步我们将进行定量影响和预警预报指标研究,为科学预测和防御我国稻纵卷叶螟的

危害提供科学依据。

参考文献(References):

[1] 翟保平, 张孝羲. 水稻重大害虫的灾变规律及其预警: 回顾与展望. 昆虫知识, 2000, 37(1): 41-45.

[2] 刘宇, 王建强, 冯晓东, 蒋学辉. 2007 年全国稻纵卷叶螟发生实况分析与 2008 年发生趋势预测. 中国植保导刊, 2008, 28(7): 33-35.

[3] 翟保平, 程家安. 2006 年水稻两迁害虫研讨会纪要. 昆虫知识, 2006, 43(4): 585-588.

[4] 陆明红, 刘万才, 胡高, 翟保平, Tuan H A, Khanh D H. 中越水稻迁飞性害虫稻飞虱、稻纵卷叶螟发生关系分析. 植物保护, 2018, 44(3): 31-36, 60-60.

[5] 王凤英, 张孝羲, 翟保平. 稻纵卷叶螟的飞行和再迁飞能力. 昆虫学报, 2010, 53(11): 1265-1272.

[6] 白先达, 黄超艳, 唐广田, 李国刚, 邹丽霞, 贾方罡. 气象条件对稻纵卷叶螟迁飞的影响分析. 中国农学通报, 2010, 26(21): 262-267.

[7] 王翠花, 包云轩, 王建强, 向勇, 翟保平. 2003 年稻纵卷叶螟重大迁入过程的大气动力机制分析. 昆虫学报, 2006, 49(4): 604-612.

[8] 包云轩, 曹云, 谢晓金, 陆明红, 李轩, 王纯枝, 刘万才. 中国稻纵卷叶螟发生特点及北迁的大气背景. 生态学报, 2015, 35(11): 3519-3533.

[9] 张孝羲, 周立阳, 程极益. 江淮稻区稻纵卷叶螟轨迹分析参数的推算. 南京农业大学学报, 1994, 17(1): 32-38.

[10] 周立阳, 张孝羲, 程极益. 江淮稻区稻纵卷叶螟的轨迹分析. 南京农业大学学报, 1995, 18(2): 53-58.

[11] 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. 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, 2009, 23(5): 537-545.

[12] 高月波, 陈晓, 陈钟荣, 包云轩, 杨荣明, 刘天龙, 翟保平. 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, 2008, 28(11): 5238-5247.

[13] 蒋春先, 杨秀丽, 齐会会, 张云慧, 程登发. 中国华南地区稻纵卷叶螟迁飞的一次雷达观测. 中国农业科学, 2012, 45(23): 4808-4817.

[14] 蒋春先, 孙健, 齐会会, 张云慧, 程登发. 广西兴安地区稻纵卷叶螟早期迁入虫源分析. 植物保护学报, 2014, 41(3): 270-276.

[15] 全国稻纵卷叶螟研究协作组. 我国稻纵卷叶螟迁飞规律研究进展. 中国农业科学, 1981, 14(5): 1-8.

[16] 包云轩, 黄金颖, 谢晓金, 陆明红. 季风进退和转换对中国褐飞虱迁飞的影响. 生态学报, 2013, 33(16): 4864-4877.

[17] 陈晓, 刘万才, 朱建生, 张孝羲, 翟保平. 2003 年我国稻纵卷叶螟特大发生的气候背景. 应用昆虫学报, 2013, 50(3): 615-621.

[18] Fu C, Jiang Z, Guan Z, He J, Xu Z. Regional Climate Studies of China. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008: 1-43.

[19] 陈海山, 陈健康. 东亚夏季风指数的分类及物理特征分析. 大气科学学报, 2017, 40(3): 299-309.

[20] 黄士松, 汤明敏. 我国南方初夏汛期和东亚夏季风环流. 热带气象学报, 1995, 11(3): 203-213.

[21] 黄菲, 李栋梁, 汤绪, 王式功, 王慧. 用过程透雨量确定的东亚夏季风北边缘特征. 应用气象学报, 2009, 20(5): 530-538.

[22] 李春, 韩笑. 东亚夏季风北界与我国夏季降水关系的研究. 高原气象, 2008, 27(2): 325-330.

[23] 吴长刚, 刘鸿升, 谢安. 夏季风北推和强度对我国北方夏季降水影响的年代际特征. 高原气象, 2005, 24(5): 656-665.

[24] 胡豪然, 钱维宏. 东亚夏季风北边缘的确认. 自然科学进展, 2007, 17(1): 57-65.

[25] Bolton D. The computation of equivalent potential temperature. Monthly Weather Review, 1980, 108(7): 1046-1053.

[26] 祁莉, 何金海, 张祖强, 宋金暖. 纬向海陆热力差异的季节转换与东亚副热带季风环流. 科学通报, 2007, 52(24): 2895-2899.

[27] Fu X W, Li C, Feng H Q, Liu Z F, Chapman J W, Reynolds D R, Wu K M. Seasonal migration of *Cnaphalocrocis medinalis* (Lepidoptera: Crambidae) over the Bohai Sea in northern China. Bulletin of Entomological Research, 2014, 104(5): 601-609.

[28] 陈永年. 稻纵卷叶螟飞翔特性的初步观察——Ⅰ.飞翔前期、飞翔起始温度及起飞蛾龄. 湖南农学院学报, 1979, (4): 17-25.

[29] Supawan J, Chongrattanameteekul W. Influence of humidity, rainfall, and fipronil toxicity on rice leaffolder (*Cnaphalocrocis medinalis*). Science Asia, 2017, 43(2): 82-87.

[30] Liu Y, Bao Y X, Sun S S, Zheng T F, Lu M H, Xie X J, Liu W C. Influence of the Asian summer monsoon on the migration phenology and population dynamics of *Nilaparvata lugens* (STÅL) in China. Journal of Tropical Meteorology, 2018, 24(1): 71-81.

[31] Bao Y X, Ding W W, Xie X J, Lan P, Lu M H. Statistical analysis on the influence of the landfalling strong tropical cyclones in the catastrophic migrations of *Nilaparvata lugens* (STÅL) in China. Journal of Tropical Meteorology, 2014, 20(1): 8-16.

[32] 翟保平, 张孝羲, 程遐年. 昆虫迁飞行为的参数化Ⅰ.行为分析. 生态学报, 1997, 17(1): 7-17.

[33] 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.