DOI: 10.5846/stxb201908191730
包云轩,苍薪竹,杨诗俊,陈粲,谢晓金,陆明红,刘万才.大气低温胁迫对中国褐飞虱年内初始迁入的影响.生态学报,2020,40(20):7519-7533.
Bao Y X, Cang X Z, Yang S J, Chen C, Xie X J, Lu M H, Liu W C.Impact of atmospheric low temperature stress on the initial immigration of *Nilaparvata lugens* (Stål) in a year in China.Acta Ecologica Sinica,2020,40(20):7519-7533.

大气低温胁迫对中国褐飞虱年内初始迁入的影响

包云轩[1,2,*],苍薪竹[1,2],杨诗俊[1,2],陈 粲[1,2],谢晓金[1,2],陆明红[3],刘万才[3]
1 气象灾害预报预警与评估协同创新中心/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 全国农业技术推广服务中心/农业农村部, 北京 100125

摘要:为了揭示大气低温胁迫对中国褐飞虱年内初始迁入的影响,更好地预警来自境外的褐飞虱早期迁入,通过统计 2000—2017 年中国华南、西南两个稻区褐飞虱年内的始见期和首次迁入峰日,逆推其迁飞轨迹和虫源区,分析大气温度场对迁飞过程产生的作用,比较了褐飞虱在我国不同稻区、不同年内初始迁入期受大气低温胁迫产生的作用差异。结果表明:(1)近年来褐飞虱初始迁入中国的时间提前,初始迁入华南稻区的时间比西南稻区早,华南稻区始见期提早可能与褐飞虱种群越冬北界北移有关。(2)西南稻区褐飞虱年内初始迁入的境外虫源主要来自缅甸,华南稻区年内初始迁入的境外虫源主要来自越南和老挝的中北部。(3)对盛行迁飞层的温场分布研究表明,在褐飞虱年内初始迁入过程中低温屏障发生的概率约为 54.4%,迁入当晚降虫地的平均低温强度为 13.45℃,平均降温幅度为 1.88℃。其中低温胁迫在华南稻区表现更为显著(发生概率为 58.3%,平均强度为 13.18℃),在始见期表现得更明显(发生概率为 70.6%,平均强度为 12.53℃)。

关键词:褐飞虱;初始迁入;轨迹模拟;虫源地;低温胁迫

Impact of atmospheric low temperature stress on the initial immigration of *Nilaparvata lugens* (Stål) in a year in China

BAO Yunxuan[1,2,*], CANG Xinzhu[1,2], YANG Shijun[1,2], CHEN Can[1,2], XIE Xiaojin[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 Agriculture and Rural Affairs, Beijing* 100125, *China*

Abstract: This paper aims to reveal the effect of atmospheric low temperature stress on the initial immigration of brown planthopper, *Nilaparvata lugens* (Stål) in China and conduct effectively warning of the early immigration of the populations from overseas. In this study, the migratory trajectories and source areas of *N. lugens* were deduced based on the statistics of the annual immigration beginning dates and first immigration peak dates of *N. lugens* during the period from 2000 to 2017 in the rice-growing regions of South and Southwest China. The influence of atmospheric temperature field on the migrating processes was analyzed and the difference of the impact of atmospheric low temperature stress on *N. lugens'* initial immigrations between the different rice areas in different years was compared. The results showed as follows: (1) in recent years, the immigration beginning dates of *N. lugens* into China were earlier than before. The immigration beginning dates into South China were earlier than those in Southwest China in general. The dates of early initial appearance in South China

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41975144)
收稿日期:2019-08-19; **网络出版日期**:2020-08-27
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: baoyx@nuist.edu.cn

might be related to the northward migrations of *N. lugens'* population over winter. (2) Initial overseas insect sources of *N. lugens in Southwest China were mainly from Myanmar. In South China, the main sources of the initial immigrations in the year came from the middle and northern parts of Vietnam and Laos.* (3) The temperature distribution in the prevalent migratory layers showed that the probability of low temperature barriers occurring during the initial immigrations of *N. lugens* was about 54.4%. The average low temperature stress intensity was 13.45 ℃ and the average cooling range was 1.88 ℃. Among them, the low temperature stress was more significant in South China (the occurrence probability was 58.3%, the average intensity was 13.18℃), and more obvious in the immigration beginning dates (the occurrence probability was 70.6%, the average intensity was 12.53℃).

Key Words: brown planthopper (*Nilaparvata lugens* (Stål)); initial immigration; trajectory simulation; insect source area; low temperature stress

稻飞虱是一类危害极重的专食性水稻害虫,褐飞虱(*Nilaparvata lugens*(Stål))是三种主要稻飞虱中产生危害最严重的一种,它们可借助高空气流实现种群大规模远距离的迁飞,由此产生毁灭级的灾害[1-2]。自 20 世纪 60 年代初期,东亚和东南亚热带和亚热带地区实行“绿色革命”以来,在感虫性水稻品种种植面积快速扩增、产量快速增长的同时,于 20 世纪 60 年代后期至 90 年代初出现了第一轮虫害爆发周期。之后这些地区滥用杀虫剂、过量施用氮肥等行为导致褐飞虱于 21 世纪 00 年代中期至今进入第二轮大爆发[3]。常年从东南亚地区频繁且大量迁入到中国境内的褐飞虱严重地影响了中国水稻的品质和产量[4-5],由此造成中国水稻年均减产可达数亿吨[6],严重威胁了中国的粮食安全。

褐飞虱年内初期迁入我国的情况往往可以决定整年虫害的发生程度[7]。华南稻区和西南稻区作为每年年初境外褐飞虱种群迁入我国的第一站,其褐飞虱的春季发生量与全国发生面积、发生程度有着至关重要的联系[8],迁入期早、迁入峰期提前也加大了我国南方稻区早稻上褐飞虱种群爆发的风险[9]。

大气温度对褐飞虱迁入期的早迟有着十分重要的影响,这是因为大气温度可以限制褐飞虱完整的迁飞行为[10]。例如,近地面温度在 13℃以下时大部分褐飞虱不会起飞,起飞后的褐飞虱种群也多集中在温度范围在 16—18℃的对流层大气中飞行[11-12],遇低温则出现集中降落的行为等。其中,促使褐飞虱发生降落行为的低温屏障往往是南北方的冷暖气团交汇形成的低温墙[13]。稳定的低温层结可迫使褐飞虱逐渐接近地面或向上遇冷停止振翅从而导致其直接降落。有研究表明,全球变暖引发的温度普遍升高间接使褐飞虱年内初期迁入我国的时间提前,其中一部分原因是虫源地温度的升高更利于褐飞虱种群的迁出[14];而另一部分原因则是我国西南、华南两稻区地处热带与亚热带的过渡地带,初春时节气温变化复杂,极易产生低温层结,而温度的升高极有可能弱化了低温屏障的限制作用。因此,研究大气低温胁迫对境外褐飞虱年内初始迁入中国的影响对我国褐飞虱种群早期入侵的预警具有重要的理论价值和实践意义。但目前相关的研究多以春季迁入个例为研究对象[13, 15],几乎没有对多年褐飞虱初始迁入我国过程中的低温胁迫发生特征进行过系统性、规律性的总结与讨论。

在现今全球变暖愈演愈烈、极端气候事件频发的大背景下,气候异常增加了温度对褐飞虱迁飞行为影响的不确定性,同时,大气温度对褐飞虱迁飞过程的影响程度和作用机理也趋于复杂化。因此,系统性地了解历史上褐飞虱年内初始迁入我国时的低温胁迫发生规律,明确当前发生特征,对预测未来气候变化情景下可能的发生趋势显得十分重要和迫切。本文拟利用中国多年褐飞虱迁入的虫情数据,结合 HYSPLIT 轨迹模式,对 2000—2017 年境外褐飞虱年内初始迁入中国华南和西南稻区的发生特征进行统计分析和迁入过程模拟,以探明大气低温对褐飞虱迁入的影响,揭示低温胁迫作用的时空差异。研究将有助于监测境外褐飞虱初始迁入我国的动态,为全球变暖趋势下褐飞虱迁入发生的准确预测奠定基础。

1　材料与方法

1.1　资料来源

(1)虫情资料:稻飞虱虫情资料由全国农业技术推广服务中心提供,文中主要使用了云南省、广西壮族自治区、广东省 2000—2017 年褐飞虱逐日灯诱数据。

(2)气象资料:本研究所用的气象资料为美国国家环境预报中心(National Center for Environmental Prediction,NCEP)发布的全球 6 h 一次(UTC 00、06、12 和 18 时),空间分辨率为 1°×1°的 FNL 气象再分析资料。

(3)其他资料:全球行政区划底图(1:4000000),来源于中国国家基础地理信息中心;30 m 全球地表覆盖数据,来源于中国地理信息资源目录服务系统。

1.2　研究方法

1.2.1　调查方法

褐飞虱仅在我国华南南部和西南南部的少数地区存在越冬虫源,而在每年早春迁入我国南方稻区的虫源大多是从中南半岛等地越境迁入[16]。因此,选取紧邻中南半岛的西南稻区(以云南省为代表)、华南稻区(以广东省、广西壮族自治区为代表)为研究区,使用稻区内各植保站点的每日灯诱虫情数据进行大气低温胁迫对褐飞虱年内初始迁入行为影响的研究(图 1)。

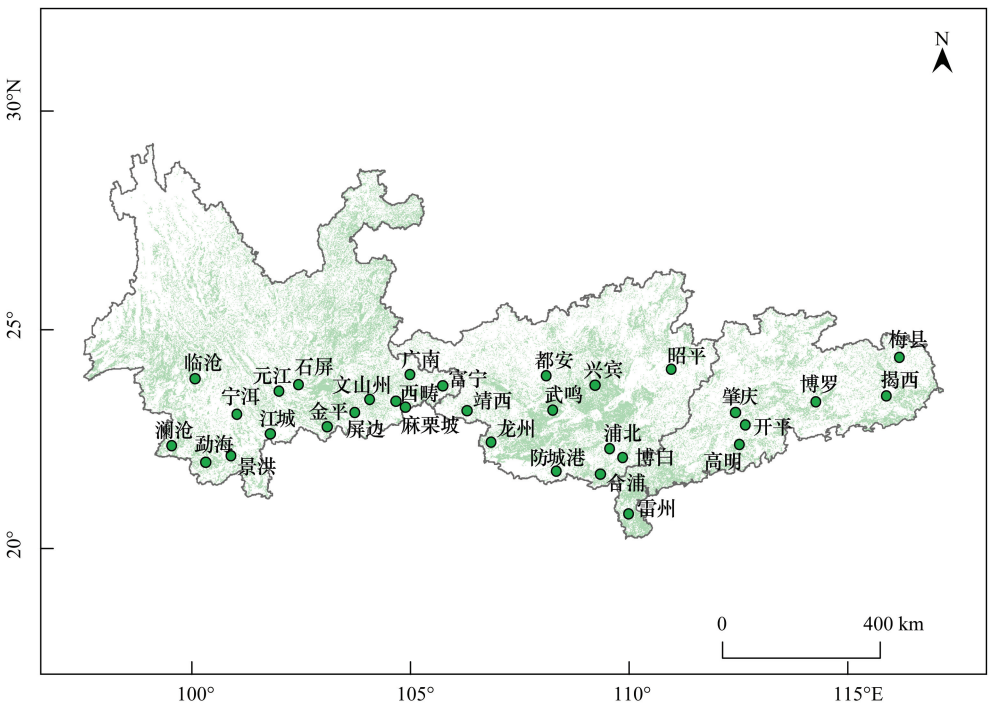

图 1　西南、华南稻区褐飞虱监测植保站点分布

Fig.1　Distribution of *N. lugens'* monitoring plant protection stations in the rice-growing regions of the southwest China and the south China

综合考虑年内初始迁入的虫情发生情况,并参考 2009 年发布的《稻飞虱测报调查规范》对始见期及高峰日的定义,将研究区年内褐飞虱首次单灯单日有虫的日期定为始见期,年内单灯单日虫量首次突增超过 100 头为首次迁入峰发生日,并以此统计出 2000—2017 年两个稻区的始见期和首次迁入峰日期的情况。

1.2.2　轨迹分析方法

轨迹回推分析采用的是美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration,

NOAA)与澳大利亚气象局(Bureau of Meteorology, BOM)开发的 HYSPLIT(Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory)模型。参数设置如下:(1)褐飞虱顺风迁飞,其主动飞行能力是可忽略项[17-18];(2)轨迹回推到的虫源附近曾存在理论上可提供虫源取食的稻区;(3)褐飞虱在日出前 1 h 和日落后 1 h 内起飞[19-20]。西南、华南两稻区 3—4 月份日出时刻在 BST 07:00 左右,日落时刻在 BST 19:00 左右。春季早晚气温较低,褐飞虱一般集中在较温暖的下午飞行,属于"日间单峰起飞"型[20]。故设定灯下见虫日当晚 20:00、灯下见虫第二日清晨 06:00 两个起始时刻,分别回推 24 h、10 h 至前一日晚 20:00。(4)褐飞虱的盛行迁飞高度位于海拔 1500 m 左右[21],特别说明:在模型中设置的起始高度为离地高度。西南稻区地势高且水稻种植区在海拔几百米至几千米的范围内均有所分布[22],在离地高度相同的条件下,大气温度远低于同纬度地区。而褐飞虱无法在环境温度过低的条件下飞行,因此,模型中设置的西南稻区的离地高度相对较低。可见,褐飞虱的迁飞高度因受到温度、地形等条件限制,需要根据季节及站点海拔的不同进行相应的调整,模型中两稻区迁飞轨迹起始高度设定如表 1。

表 1 基于 HYSPLIT 模型的西南、华南稻区迁飞轨迹起始高度设定

Table 1 Beginning height setting of migratory trajectories in the rice-growing regions of the southwest China and the south China based on HYSPLIT model

稻区 Rice-growing region	海拔高度/m* Altitude	模型离地高度/m Model height above ground	站点 Stations
西南 Southwest China	577.7±100.8	700、1000、1300	景洪、元江、富宁
	1294.7±44.8	500、800、1100	澜沧、勐海、广南、文山、石屏、临沧、金平、麻栗坡、宁洱、屏边、江城
华南 South China	97.4±39.8	1200、1500、1800	浦北、靖西**、武鸣、防城港、博白、龙州、合浦、兴宾、昭平、宜州、都安、高明、揭西、博罗、肇庆、雷州、开平、梅县

*海拔高度以平均值±标准误差表示;**华南稻区靖西市海拔 700 m 左右,故将其模型高度设定为 700、1000、1300 m

1.2.3 数据统计方法

为了解年内初始迁入过程中低温胁迫发生的整体情况,文中使用 Excel 等软件统计 2000—2017 年中低温屏障发生频率、低温屏障强度、低温屏障幅度、低温屏障出现时间分布等特征,并作相关描述。各特征具体判定方法如下:(1)低温屏障:假设褐飞虱所在飞行高度层环境温度低于 16℃时,褐飞虱即停止飞行[11];(2)假设降虫区整晚均有降虫。针对不同高度层,若降虫区在降虫当晚最低气温小于 16℃,即判定存在低温屏障。18 a 中出现低温屏障的次数除以总年数记为低温屏障发生频率。仅针对受低温胁迫的降虫过程计算低温强度和降温幅度。(3)低温强度:针对不同高度层,在降虫区降虫当晚 20:00、次日 02:00、次日 08:00(记虫)三个时刻中出现的最低温度记为低温强度;降温幅度:将盛行迁飞高度层(西南稻区 800 hPa,华南稻区 850 hPa)上降虫区降虫当晚的最大温差记为降温幅度。

2 结果与分析

2.1 初始迁入时期虫情统计结果

2.1.1 始见期统计结果

2000—2017 年间,褐飞虱在我国西南稻区最早于 3 月 10 日始见,华南稻区最早于 3 月 1 日始见(表 2)。在西南稻区内所有站点的平均始见期为 4 月 24 日±2.15 日(平均始见期平均值±标准误差),华南稻区所有站点的平均始见期为 4 月 10 日±2.72 日。在 18 a 间,褐飞虱始见于华南稻区的日期较同纬度的西南稻区整体早 9—14 d。2001—2008 年西南稻区内最早始见期出现在 4 月 10 日前后,2009—2014 年提前至 4 月初,到 2015—2017 年则稳定在 3 月 10 日。2000—2003 年华南稻区内最早始见期在 4 月初,2004—2009 年提前至 3 月上旬,到 2010—2017 年则稳定在 3 月 1 日。如图 2 中所示,在同一稻区的始见期,尽管年间存在波动,整体上仍呈显著提前的趋势(始见期与年份呈显著负相关,L1:$r1=-0.803$, $P<0.01$;L2:$r2=-0.801$, $P<0.01$)。相关研究表明,这种提前趋势可能与近 30 a 的全球气候变暖有关[14]。

表 2　2000—2017 年西南、华南稻区的褐飞虱迁入始见期

Table 2　*N. lugens'* immigration beginning dates in the rice-growing regions of the southwest China and the south China during 2000 to 2017

西南稻区* Rice-growing region of Southwest China			华南稻区 Rice-growing region of South China		
日期 Date	站点 Stations	虫量/头 Pest number	日期 Date	站点 Stations	虫量/头 Pest number
2000	—	—	2000-04-06	广东 雷州	2
2001-04-03	云南 屏边	55	2001-03-21	广东 雷州	5
2002-04-20	云南 金平	1	2002-03-25	广东 雷州	21
2003-04-11	云南 屏边	1	2003-04-06	广东 雷州	2
2004-04-25	云南 金平	12	2004-03-06	广东 雷州	1
2005	—	—	2005-03-08	广西 龙州	2
2006-04-07	云南 麻栗坡	2	2006-03-17	广东 肇庆	1
2007-04-10	云南 屏边	55	2007-03-01	广西 武鸣	6
2008-04-09	云南 文山	2	2008-03-08	广东 博罗	2
2009-03-21	云南 广南	2	2009-03-09	广西 龙州	2
2010-04-10	云南 勐海	1	2010-03-01	广西 防城	1
2011-04-01	云南 景洪	1	2011-03-01	广西 武鸣	1
2012-04-01	云南 景洪	4	2012-03-02	广西 武鸣	1
2013-04-01	云南 澜沧	4	2013-03-01	广西 武鸣	7
2014-04-01	云南 金平	1	2014-03-01	广西 武鸣	1
2015-03-10	云南 元江	1	2015-03-01	广西 靖西	1
2016-03-10	云南 元江	2	2016-03-01	广西 浦北	1
2017-03-10	云南 景洪	9	2017-03-01	广西 防城	1

* 西南稻区缺少 2000、2005 年虫情数据

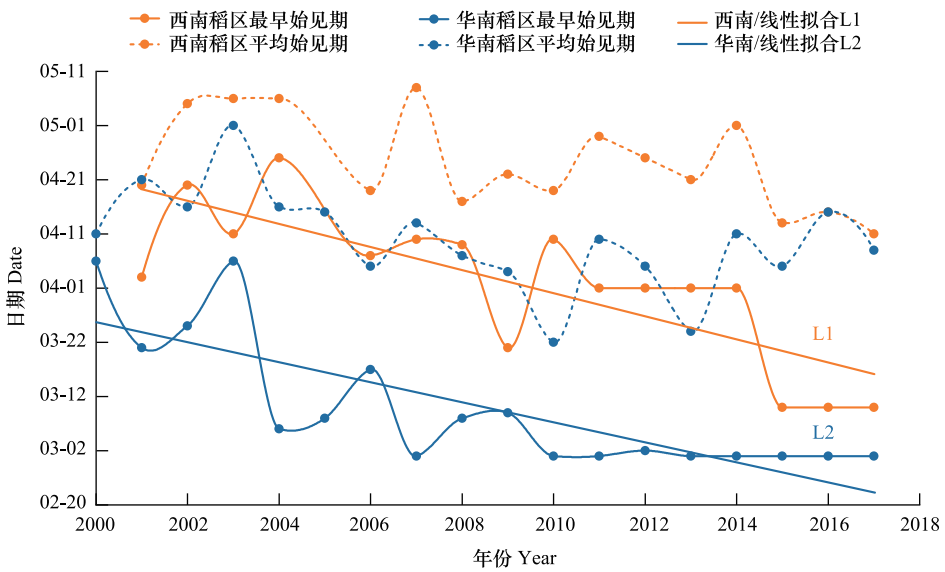

图 2　2000—2017 年西南、华南稻区褐飞虱始见期

Fig.2　Annual immigration beginning dates of *N. lugens* in the rice-growing regions of the southwest China and the south China during 2000 to 2017

2.1.2　首次迁入峰统计结果

2000—2017 年间,境外褐飞虱迁入峰首次出现在西南稻区的日期最早为 3 月 21 日,华南稻区最早为 3 月 6 日(表 3)。在西南稻区内全部站点的平均首迁峰日为 5 月 29 日±4.82 日,华南稻区全部站点的平均首迁峰

日为 6 月 12 日±3.96 日,结果表明春季褐飞虱首次迁入西南稻区站点的时间在平均水平上反而早于华南稻区。为了排除因两稻区站点分布差异对结果分析造成的影响,选取两稻区纬度在 22°N—24°N 内的所有站点,调查其平均首迁峰日,所得结果相同。这显示在每年的 4—7 月褐飞虱种群开始大量迁入我国境内时,若以百头虫量为准,则褐飞虱迁入西南稻区的时间更早。其原因一方面,在北半球南亚和东南亚低纬度地区,西南季风爆发早于南海季风,同时,在陆上越靠近印度低压的地区西南季风越强,就会越早出现有利于褐飞虱北迁的风场[23-24]。因此,从地理经度和纬度上讲,西南稻区在褐飞虱初始迁入风场上比华南稻区更有利;另一方面,在每年 4—5 月不仅从缅甸、泰国、越南等虫源区到中国的西南、华南稻区的空中温场条件都能适应于褐飞虱的北迁,且此时正为缅甸旱季稻的黄熟期,为西南稻区提供了大量虫源[13]。这说明相较于大气温度,此时虫源量大小与是否存在适宜携虫的风场已成为影响褐飞虱迁入时间的主要因素。

综合整个初始迁入期的统计结果来看,褐飞虱初始迁入我国华南稻区的日期整体上要早于西南稻区 14 d 左右。如图 3 中所示,首次迁入峰日有提前趋势但未形成明显的时间差异性,主要是年度间的差异(首次迁入峰日早迟与年份负相关但不显著,L3:r3 = −0.698,P<0.01;L4:r4 = −0.426,P>0.05)。例如,华南稻区 2000 和 2001 年、与 2016 和 2017 年几乎相同;西南稻区 2001 和 2002 年与 2011 和 2012 年也几乎相同(表 3)。与首迁峰日相比,始见期在不同年份间变动的幅度更小,出现的时间更稳定。

表 3 2000—2017 年西南、华南稻区的褐飞虱首次迁入峰日

Table 3 First immigration peaks of *N. lugens* in the rice-growing regions of the southwest China and the south China during 2000 to 2017

西南稻区* Rice-growing region of Southwest China			华南稻区 Rice-growing region of South China		
日期 Date	站点 Stations	虫量/头 Pest number	日期 Date	站点 Stations	虫量/头 Pest number
2000	—	—	2000-04-16	广东 开平	163
2001-05-05	云南 金平	590	2001-04-09	广东 雷州	148
2002-05-02	云南 屏边	1421	2002-05-01	广西 龙州	337
2003-05-26	云南 临沧	155	2003-04-11	广西 龙州	261
2004-05-26	云南 文山	578	2004-04-12	广东 揭西	116
2005	—	—	2005-05-01	广西 龙州	410
2006-05-06	云南 富宁	440	2006-04-03	广西 龙州	320
2007-04-23	云南 屏边	117	2007-04-01	广西 昭平	248
2008-05-16	云南 石屏	135	2008-05-13	广东 雷州	113
2009-04-16	云南 江城	355	2009-04-13	广西 龙州	430
2010-04-19	云南 富宁	737	2010-04-28	广西 宜州	512
2011-05-01	云南 江城	428	2011-04-14	广西 昭平	219
2012-05-05	云南 富宁	196	2012-03-06	广东 雷州	205
2013-04-24	云南 勐海	112	2013-04-01	广东 雷州	109
2014-05-02	云南 江城	153	2014-03-27	广东 雷州	154
2015-04-26	云南 江城	462	2015-03-15	广东 雷州	212
2016-04-02	云南 景洪	108	2016-04-10	广西 浦北	184
2017-03-21	云南 景洪	136	2017-04-08	广西 都安	138

* 西南稻区缺少 2000、2005 年虫情数据

2.2 年内初始迁入种群的虫源地分布及其迁飞轨迹模拟

为探明多年来年内初始迁入我国褐飞虱种群的境外虫源分布,本文对 18 a 中迁入中国西南、华南稻区的初始迁入过程进行了轨迹回推。按不同稻区、不同迁入期将有效回推轨迹叠加到全球地表稻田分布图上(30 m分辨率)(图 4)。以轨迹走向及虫源地分布为依据,将各年回推轨迹进行分类统计(表 4)。

总结多年回推轨迹的虫源地,得出年内初始迁入我国西南稻区的虫源地主要分布在缅甸北部和中东部,华南稻区年内初始迁入虫源主要来自老挝、越南北部和中国的海南南部。在褐飞虱年内初始迁入西南稻区的

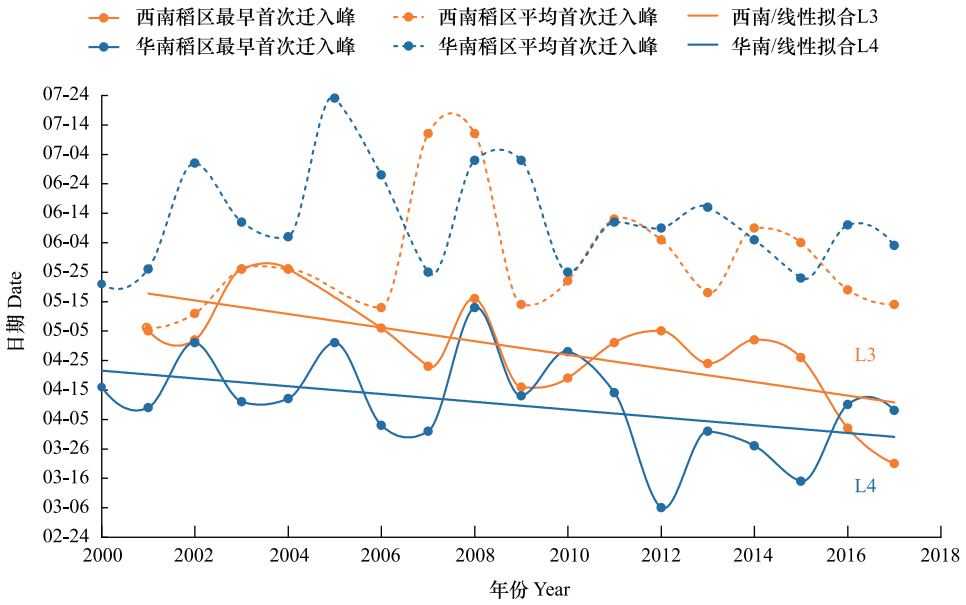

图 3　2000—2017 年西南、华南稻区褐飞虱首次迁入峰日

Fig.3　First immigration peak dates of *N. lugens* in the rice-growing regions of the southwest China and the south China during 2000 to 2017

过程中,共约有 87.5%迁入过程的虫源来自缅甸北部和中东部稻区,其余少部分虫源来自于老挝、越南。而在初始迁入华南稻区的过程中,共约有 66.7%迁入过程的虫源来自于老挝和越南的中部或北部稻区,22.2%迁入过程的虫源来自于缅甸、老挝交界边境以及海南岛。其余少量未归类回推轨迹的虫源地分布在雷州半岛和广西南部稻区,为区内的短途迁飞。如图 4,在整个初始迁入过程中回推轨迹多为东—西走向或西南—东北走向,只有个别过程取偏南至偏北走向。此外,褐飞虱在首次迁入峰时期较始见期相比迁入地范围更大,虫源地更广,轨迹聚合度更低。

表 4　2000—2017 年西南、华南稻区初始虫源地及其轨迹分类

Table 4　Trajectories classification and insect source areas of *N. lugens'* initial immigration in the rice-growing regions of the southwest China and the south China during 2000 to 2017

稻区 Rice-growing region	时期 Period	轨迹类 Trajectory type	占比 Proportion	虫源区 Insect source area	降虫区 Insect landing area
西南 Southwest China	始见期	路径Ⅰ	62.5%(20/32)	缅甸北部	云南中南部
		路径Ⅱ	31.3%(10/32)	缅甸中东部	云南南部
	首次迁入峰	路径Ⅰ	46.9%(15/32)	缅甸北部	云南南部
		路径Ⅱ	34.4%(11/32)	缅甸中东部	云南南部
		路径Ⅲ	12.5%(4/32)	越南、老挝北部	云南南部
华南 South China	始见期	路径Ⅰ	27.8%(10/36)	缅甸东部、泰国东北部	广西西南部
		路径Ⅱ	25.0%(9/36)	越南北部、老挝北部	广西西南部
		路径Ⅲ	11.1%(4/36)	海南南部	广东雷州半岛
		路径Ⅳ	8.3%(3/36)	越南中部	广东雷州半岛
	首次迁入峰	路径Ⅰ	38.9%(14/36)	越南北部、老挝中北部	广西西南部
		路径Ⅱ	13.9%(5/36)	缅甸东部、泰国东北部	广西南部
		路径Ⅲ	8.3%(3/36)	海南南部	广东雷州半岛

2.3　低温胁迫统计特征

使用 1.2.3 数据统计方法中介绍的方法得到低温胁迫统计特征值如下表(表 5、表 6、表 7)。为简明揭示

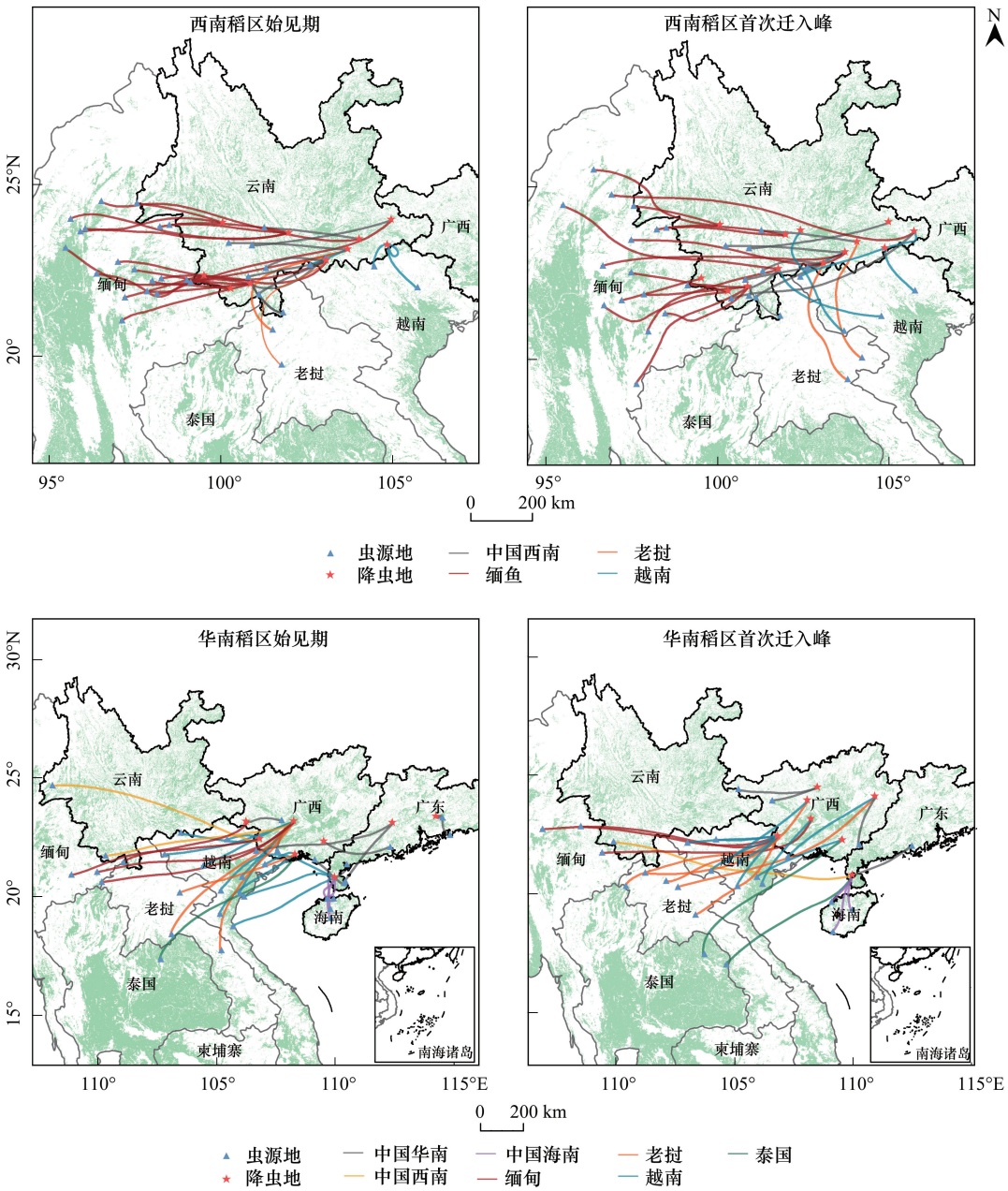

图 4 2000—2017 年西南、华南稻区褐飞虱初始虫源地及其轨迹分布

Fig.4 Distribution of source areas and trajectories for *N. lugens'* initial immigration in the rice-growing regions of the southwest China and the south China during 2000 to 2017

温度对褐飞虱整个迁飞过程的复杂影响,下面仅对褐飞虱在盛行迁飞层上的胁迫情况进行讨论。统计所有受低温胁迫影响的降落过程发现,在降虫当晚,降温过程有 21.9%出现在 20:00—次日 02:00 之间,25%出现在 02:00—08:00 之间,52.5%整晚降温。在 2000—2017 年褐飞虱年内初始迁入西南稻区的过程中,约有 50.0%的降落过程受到了低温影响,低温过程平均强度为 13.71℃(表 7);在初始迁入华南稻区的过程中,约有58.3%的降落过程受到了低温影响,低温过程平均强度为 13.18℃。可见,褐飞虱降落在华南稻区受低温胁迫影响相对更大。相比于华南稻区,西南稻区因纬度跨距大、海拔高度起伏明显而温度变化幅度大,但因云南稻区地形北高南低,受地形阻挡,一般冷空气难以侵入西南南部稻区(即云南中南部稻区),导致褐飞虱种群降落对低温胁迫的响应概率小;华南稻区因纬度跨距小、海拔高度差异小而温度变化幅度小,南岭山系虽呈东西带状分

布,但其五个山岭之间是间断的,且海拔高度明显低于云南北部山系,对冷空气的阻力也明显小于西南南部稻区,导致华南稻区受冷空影响范围广、发生概率高,褐飞虱种群降落对低温胁迫的响应概率和强度都大。综上,春季西南稻区日均温高,温度日较差大,褐飞虱种群降落对低温胁迫的响应小;华南稻区日均温低,温度日较差小,褐飞虱降落对低温胁迫的响应大。

不同迁入时期的降虫过程受低温胁迫影响的差异在两稻区表现不同,在华南稻区表现出明显差异,在西南稻区表现为无差异。华南稻区褐飞虱始见期受到低温胁迫影响的概率(88.9%)远高于西南稻区始见期(50%)。而在首次迁入峰期中,华南稻区受低温胁迫影响的概率(27.8%)明显低于西南稻区(50%)(表 7)。对不同迁入时期的低温胁迫发生情况统计得到,始见期约有 70.6% 的降落过程受低温影响,低温强度为 12.53℃,而在首次迁入峰时期仅有 38.2%的降落过程受到了低温影响,低温强度为 14.36℃。统计发现,一般情况下,华南稻区始见期较首次迁入峰日要早 2—3 个月,始见期日均温低于 16℃ 的频率要远高于首次迁入峰时期,所以在始见期低温胁迫对降虫过程产生的影响更显著。但是,在西南稻区的统计却显示:这种低温胁迫的时间差异性很小,一方面原因可能是北迁过程中地形阻挡因素会使部分褐飞虱迁入种群在遇到低温之前就遇到了地形动力胁迫而产生了降落,另一方面是因为云南春季气温变化幅度小,昼夜温差大,故在时间维度上西南地区上空大气温度低于褐飞虱种群 16℃ 飞行阈值的概率差异小,从而受到低温胁迫影响降虫过程的时间差异减小。因此,不同迁入期的降虫过程受低温胁迫影响的差异在西南稻区就很小。

综上,褐飞虱初始迁入我国受低温胁迫的降落过程在时间和空间分布上均存在差异,特别是在时间分布上的差异更加明显。就始见期而言,华南稻区的降温幅度小于西南稻区,但低温胁迫在华南稻区的影响频次比西南稻区高、发生时间早、强度大;而在首次迁入峰上,低温胁迫在西南稻区的影响频次比华南稻区高、发生时间早、强度大、降温幅度也大(表 7)。

表 5　2000—2017 年西南稻区逐年 800 hPa 低温胁迫特征值

Table 5　Characteristic variables of low temperature stress on 800 hPa in the rice-growing region of the southwest China during 2000 to 2017

年份 Year	始见期 First appearance date				首次迁入峰 First immigration peak date			
	低温胁迫* Low temperature stress	低温强度/℃ Low temperature strength	降温时间(时刻) Cooling period	降温幅度/℃/ Cooling range	低温胁迫* Low temperature stress	低温强度/℃ Low temperature strength	降温时间(时刻) Cooling period	降温幅度/℃/ Cooling range
2001	1	15.96	2:00—8:00	0.54	1	15.03	20:00—次日 2:00	0.50
2002	0	—	—	—	0	—	—	—
2003	0	—	—	—	1	14.76	20:00—次日 8:00	5.36
2004	0	—	—	—	1	15.27	20:00—次日 2:00	2.05
2006	1	13.08	20:00—次日 8:00	2.47	0	—	—	—
2007	1	8.52	20:00—次日 8:00	3.15	0	—	—	—
2008	0	—	—	—	1	13.50	2:00—8:00	0.82
2009	1	15.20	20:00—次日 8:00	4.82	0	—	—	—
2010	0	—	—	—	1	14.16	2:00—8:00	2.51
2011	1	12.82	20:00—次日 8:00	1.36	1	13.63	20:00—次日 8:00	1.21
2012	1	12.69	20:00—次日 8:00	2.81	0	—	—	—
2013	0	—	—	—	0	—	—	—
2014	0	—	—	—	0	—	—	—
2015	0	—	—	—	1	13.49	2:00—8:00	0.72
2016	1	13.51	20:00—次日 8:00	6.15	0	—	—	—
2017	1	13.85	20:00—次日 8:00	2.54	1	13.93	20:00—次日 8:00	3.98

* 1 代表存在低温胁迫,0 代表不存在低温胁迫

表 6 2000—2017 年华南稻区逐年 850 hPa 低温胁迫特征值

Table 6 Characteristic variables of low temperature stress on 850 hPa in the rice-growing region of the south China during 2000 to 2017

年份 Year	始见期 First appearance date				首次迁入峰 First immigration peak date			
	低温胁迫* Low temperature stress	低温强度/℃ Low temperature strength	降温时间(时刻) Cooling period	降温幅度/℃/ Cooling range	低温胁迫* Low temperature stress	低温强度/℃ Low temperature strength	降温时间(时刻) Cooling period	降温幅度/℃/ Cooling range
2000	1	15.63	20:00—次日 8:00	0.76	1	13.50	2:00—8:00	0.53
2001	0	—	—	—	0	—	—	—
2002	1	14.30	2:00—8:00	0.33	0	—	—	—
2003	1	15.96	20:00—次日 2:00	0.28	0	—	—	—
2004	1	9.65	20:00—次日 2:00	0.30	0	—	—	—
2005	1	10.94	—	−0.39	0	—	—	—
2006	1	13.04	—	−1.26	0	—	—	—
2007	1	12.90	20:00—次日 8:00	1.03	0	—	—	—
2008	1	9.29	20:00—次日 8:00	1.14	1	15.74	20:00—次日 8:00	0.80
2009	1	7.88	20:00—次日 2:00	2.77	0	—	—	—
2010	0	—	—	—	1	14.34	20:00—次日 2:00	0.37
2011	1	12.26	20:00—次日 8:00	2.47	1	13.30	20:00—次日 8:00	1.71
2012	1	12.95	20:00—次日 8:00	1.38	0	—	—	—
2013	1	15.24	2:00—8:00	2.12	1	15.67	20:00—次日 8:00	0.89
2014	1	12.99	2:00—8:00	1.23	0	—	—	—
2015	1	7.47	20:00—次日 8:00	9.83	0	—	—	—
2016	1	9.25	20:00—次日 8:00	1.71	0	—	—	—
2017	1	9.83	20:00—次日 8:00	1.11	0	—	—	—

* 1 代表存在低温胁迫,0 代表不存在低温胁迫

表 7 2000—2017 年西南、华南稻区不同高度层低温屏障统计

Table 7 Statistics of low temperature barrier on different levels in the rice-growing regions of the southwest China and the south China during 2000 to 2017

时期 Period	低温屏障次数(发生概率%) Number of low temperature barriers (Incidence probability%)			低温强度/℃ Low temperature strength			降温幅度/℃ Cooling range
	750/800 hPa	800/850 hPa	850/925 hPa	750/800hPa	800/850 hPa	850/925 hPa	
西南始见期 First appearance date in southwest China	16(100)	8(50)	5(31.3)	12.04	13.20	14.42	2.98
西南首迁峰 First immigration peak in southwest China	16(100)	8(50)	2(12.5)	12.36	14.22	15.49	2.14
华南始见期 First appearance date in south China	18(100)	16(88.9)	12(66.7)	11.04	11.85	13.38	1.55
华南首迁峰 First immigration peak date in south China	13(72.2)	5(27.8)	2(11.1)	13.55	14.51	14.99	0.86
西南稻区总计 Southwest China	32(100)	16(50)	7(21.9)	12.20	13.71	14.96	2.56
华南稻区总计 South China	31(86.1)	21(58.3)	14(38.9)	12.30	13.18	14.19	1.21
始见期总计 First appearance date	34(100)	24(70.6)	17(50)	11.54	12.53	13.90	2.26
首迁峰总计 First immigration peak date	29(85.3)	13(38.2)	4(11.8)	12.96	14.36	15.24	1.50
初始迁入总计 Initial immigration	63(92.6)	37(54.4)	21(30.9)	12.25	13.45	14.57	1.88

2.4　迁入地温度分析

为能更全面地了解褐飞虱迁入与低温胁迫的关系,本文统计了在整个初始迁入时期降虫地盛行迁飞层的日均温,迁入日用黑色横粗线覆盖。从图 5 可见,西南稻区整个初始迁入期日均温低于 16℃的频次在整体趋势上逐年减少,始见期、首次迁入峰逐年提前,这表明西南稻区褐飞虱提早迁入可能与降虫地盛行迁飞层的温度升高有关。图中显示并非在温度符合条件后(大于 16℃温度阈值)褐飞虱立即迁入降虫区,而是迁入时的温度基本都符合大于 16℃的条件(如图 5 中 2010 年)。这说明温度仅是限制携虫气流迁入某地的一个重要因素,而不是影响初始迁入时期早晚的决定性因素。

为进一步了解始见期出现早迟与近年来降虫区盛行迁飞层温度变化间的关系,我们通过调查华南、西南稻区迁入频率最高的六个站点(西南稻区:景洪 JH、金平 JP、屏边 PB,华南稻区:雷州 LZ、武鸣 WM、防城 FC)2000—2017 年 3 月份盛行迁飞层的月均温,首先分析 18 年来月均温的年度间变化得出:近年来西南稻区的站点温度有升高的趋势(图 6),而华南稻区的站点温度几乎没有变化(图 6)。其次,分析月均温与始见期出现时间的相关性得出:西南稻区 3 月份的站点温度与始见期早迟具有较弱的负相关性,即盛行迁飞层温度越高,始见期越早。这说明西南稻区褐飞虱始见期提前可能与其盛行迁飞层上大气温度升高有关,而华南稻区的始见期提前与其盛行迁飞层上的大气温度变化无关。

在华南稻区初始迁入期,特别是始见期(图 5)的迁入地盛行迁飞层温度低于 16℃的频次逐年增多,初始迁入期却仍有提前,甚至 83.3%迁入日的日均温都低于 16℃,个别年份远低于 16℃(最低温 9.75℃)。但众所周知,褐飞虱在低于 16℃的环境下是无法继续飞行的。由此推测,华南稻区始见期虫源的飞行高度一定低于 1500 m(850 hPa),同时回推虫源地与降虫地的距离相对缩短,故可能为越南北部稻区或海南、华南南部稻区存在的少量越冬虫源随偏南风短途低空迁飞后降落本站的,而境内越冬虫源的活动期提前导致华南稻区褐飞虱灯下始见期提前与近年来气候变暖使褐飞虱越冬虫源分布北界北移有关。

3　结论与讨论

3.1　褐飞虱初始迁入我国时间提前,华南稻区始见期提早可能与越冬北界的北移有关

近年来,我国褐飞虱年内初始迁入期有所提前。有研究发现在气候变暖背景下,广西、云南等地稻飞虱的迁入始见期、首次迁入高峰期均呈逐年提早的趋势[25-26, 9]。稻飞虱迁入始见期的出现早迟在我国东、西部间存在着差异,在相同纬度上我国东部始见期要早于西部地区[26]。本文统计多年褐飞虱迁入虫情得到,褐飞虱初始迁入华南稻区时间较西南稻区要早 9—14 d。褐飞虱初始迁入我国东、西部稻区上的时间差异不仅与降虫区的地形、温湿度条件、水稻种植等情况有关,虫源地的虫源情况以及距离降虫地的远近也与之密切相关。华南稻区西连越南,南临南海,尽管地貌类型多样,但整体海拔较低,与老挝、越南等虫源地距离近且无阻挡,能为两广稻区常年提供稳定虫源,因此,褐飞虱年内初始迁入期更早。而西南地区地处青藏高原东南侧,不仅受到东亚季风和印度季风及中高纬度天气系统的交叉影响[27],而且西南地区海拔高、地形地势多变,褐飞虱迁入受地理因素阻碍较大,褐飞虱迁入的降虫机制相比东部其他省份要更加复杂,多种因素综合导致褐飞虱年内迁入我国西部始见期要晚于东部地区。

本研究中发现,华南稻区在盛行迁飞层上的大气温度无升高的趋势,但初始迁入期仍然提前了。特别是在华南稻区始见期,约有 83.3%褐飞虱迁入过程的降虫区最适迁飞层的大气温度低于 16℃,在这种情况下褐飞虱是无法飞行的,但实际情况却是有虫迁入。这说明褐飞虱在 3 月份迁入华南稻区时的迁飞高度远低于 1500 m,同时,近年来研究表明气候变暖使褐飞虱越冬北界北移,在华南南部稻区存在少量的越冬虫源[28],在华南北部稻区则存在低空短途迁飞的现象[29]。Hu 等[30]在研究 2008 年广西北部湾稻区初始迁入的过程中模拟 500 m 高度下的虫源,结果显示低空短途迁入华南的虫源可能来自于海南岛。上述情况可以说明存在少量越冬虫源在年内早期低空短途迁入华南稻区的可能性。它的迁飞机制为褐飞虱主动起飞升空后,一般如无直达 16℃低温层的强上升气流,就会逐渐主动适应环境温度在适温层内飞行;但若遇到直达 16℃以下低温层

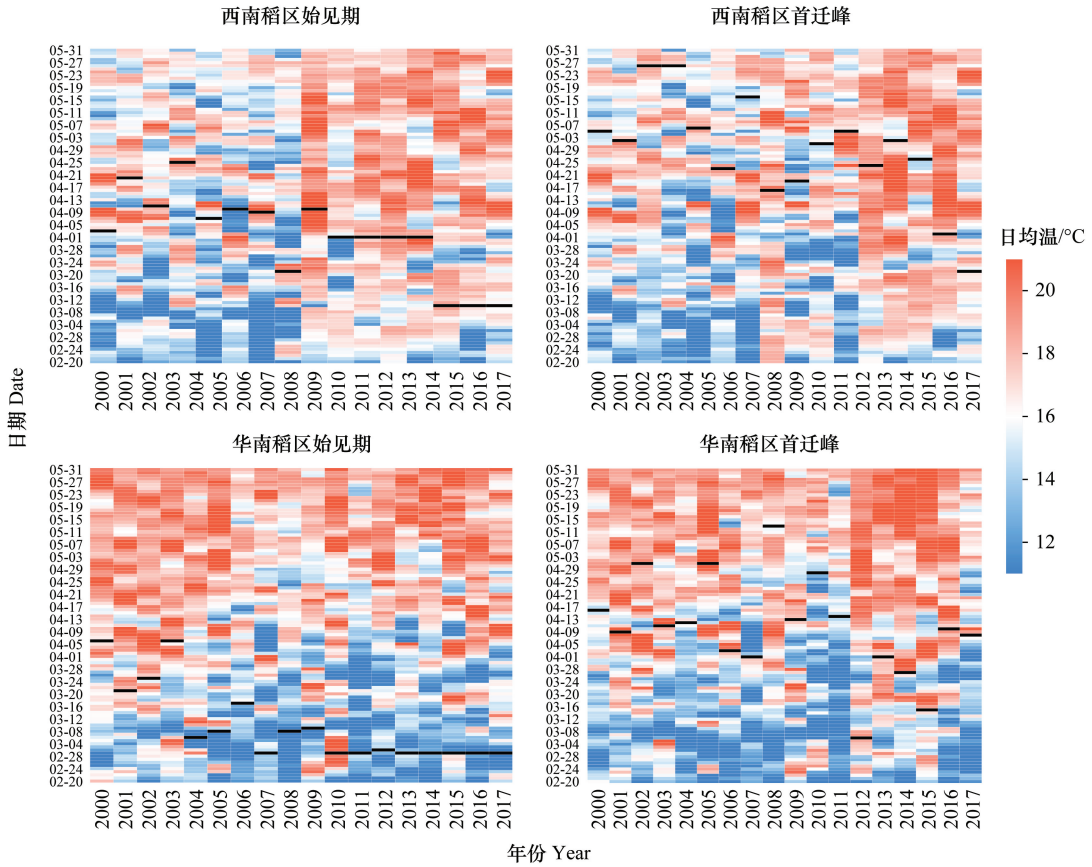

图 5 2000—2017 年西南、华南稻区初始迁入期降虫地盛行迁飞高度层(西南稻区 800 hPa/华南稻区 850 hPa)**日均温**(℃)

Fig.5 Daily mean temperature on the prevailing migratory layers (on 800 hPa in the southwest China or 850 hPa in the south China) **of *N. lugens'* landing areas during the initial immigration dates in the rice-growing regions of the southwest China and the south China during 2000 to 2017**

的强上升气流或在随气流水平飞行时突遇高空大气低温层(即低于 16℃的水平气流层)时,如其不能及时反应并主动调节翅振频率和飞行高度,并快速进入适温区,则会致死或骤停振翅,掉下地面。褐飞虱属小型风载迁飞性昆虫,其在高空强气流影响下对适宜温度层主动选择的能力有限,而对流层却有"边界层顶效应"[31],因此,在空中飞行时,三维空间的气流速度绝大多数情况下是远超其主动迁飞的速度的,褐飞虱在这样的环境流场和温场条件下是被动的。由此可以推测,这可能是分布在越南北部稻区或海南、华南南部稻区的越冬虫源在远低于 1500 m 的飞行高度下短途迁入华南中部或北部稻区后而导致其他地区测报站在灯下见虫了。然而,尽管仅有 10%左右的概率,仍不排除有虫源自越南中部跨海迁入的可能性[32]。

3.2 缅甸是西南稻区多年稻飞虱初始迁入过程的稳定虫源区,越南、老挝、海南是华南稻区多年稻飞虱初始迁入过程的稳定虫源区。

云南、两广是地处我国南端边陲的省份,也是稻飞虱迁入我国的第一站。关于云南以及两广地区的虫源问题,许多科研工作者已经做出了较为完整的研究。如沈慧梅[15]对 2009 年云南百背飞虱的虫源地分析得出云南早期虫源主要来自于缅甸和金三角地区,而我国华南稻区的早期迁入虫源则主要来自越南中部。包云轩[13]等对云南省 4、5 月份早期褐飞虱迁入虫源地研究发现,褐飞虱迁入的主要虫源区是缅甸,部分来自老挝和泰国,少量来自越南,还有极少数来自孟加拉国。Hu 等[30]等对 2008 年广西早期迁入稻飞虱的虫源进行分析后得出:广西早期迁入虫源主要来自越南中部及老挝南部。王政等[33]对广东白背飞虱多年早期迁入的虫源地进行分析得出:虫源主要分布在越南中北部、老挝中南部、海南以及两广南部稻区。

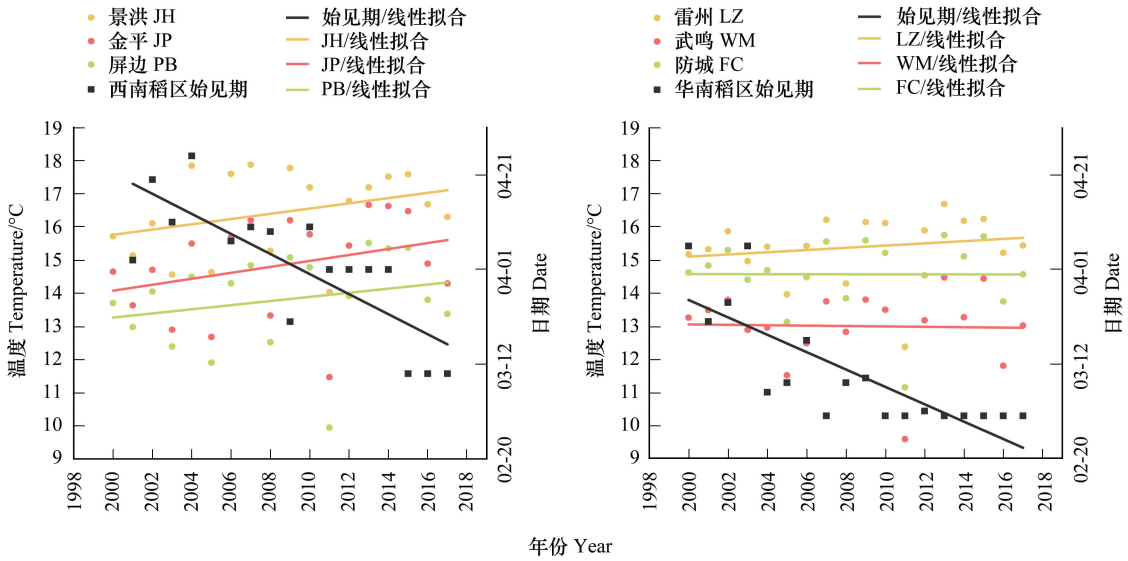

图 6　2000—2017 年西南稻区站点(JH 景洪、JP 金平、PB 屏边),**华南稻区站点**(LZ 雷州、WM 武鸣、FC 防城)**盛行迁飞高度层**(西南稻区 800 hPa/华南稻区 850 hPa)**3 月份月均温**(℃)**与始见期**

Fig.6　Monthly mean temperature in March of the prevalent migration layers (on 800 hPa in the southwest China or 850 hPa in the south China) **of the stations in the rice-growing regions of the southwest China** (JH, JP, and PB) **and the south China** (LZ, WM, and FC), **and *N. lugens'* immigration beginning dates during 2000 to 2017**

本文对西南、华南两稻区多年褐飞虱迁入始见期、首次迁入峰虫源地分布进行逆推后发现:多年褐飞虱初始迁入过程的虫源地分布总是稳定在固定区域内。2000—2017 年西南稻区褐飞虱始见期虫源均来自于缅甸,首次迁入高峰期虫源区大部分在缅甸,少量分布在老挝和越南。这是由于近年来缅甸政府在农业政策上作了的改革,增加了水稻的种植面积和产量。在每年的 4 月上中旬,缅甸中北部稻区所种植的水稻处于抽穗、灌浆期,5 月初水稻收获。同时 4 月份缅甸中北部的高空存在明显的盛行西风,形成了褐飞虱虫源远距离迁飞的输送通道,为我国云南省褐飞虱的早期迁入提供了虫源[34]。而华南稻区褐飞虱始见期虫源主要分布在越南中北部及老挝北部,少量虫源来自缅甸和海南。越南中北部的红河三角洲平原以盛产水稻著称,冬春稻在每年 2 月份播种,同年 4 月份水稻抽穗杨花,此时有大量褐飞虱种群开始外迁。同样由于老挝、越南等地在 3、4 月份盛行的西南风、西南偏南风为褐飞虱种群迁入我国华南稻区提供了可能[32]。由此可见,华南稻区虫源地分布更为复杂。

3.3　始见期的低温胁迫在华南稻区影响频次比西南稻区高、发生时间早、强度大;首次迁入峰的低温胁迫在西南稻区的影响频次比华南稻区高、发生时间早、强度大、降温幅度也大。

褐飞虱完整的迁飞过程并非像模型模拟的那样,其中还存在着褐飞虱主动选择的行为。迁飞的褐飞虱个体在遇到降雨、下沉气流、风向幅合等外力作用时会集中迫降,或在飞行能源物质耗尽或温度骤变低于其飞行温度阈值时也会选择主动降落[35]。在不考虑食料条件的影响下,一次完整的降落过程是降虫地地形及多种气象因素交互作用的结果。尽管降水、下沉气流是影响褐飞虱大规模降落的两大主要气象因子[33, 36],但在初始迁入的过程中,时值早春,大气温度低,降雨少,低温对稻飞虱降落的影响更加明显[7]。如沈慧梅[15]在对 2009 年云南白背飞虱降落机制分析中指出,白背飞虱早期迁入云南时,风切变与低温屏障几乎存在于每一次降落过程中。本文重点研究了低温对褐飞虱初始迁入我国的胁迫作用,且初始迁入虫量较少,故不考虑降水以及下沉气流对褐飞虱降落的影响。徐兰珍等[37]在研究滇东南白背飞虱早期迁入过程中得到,影响白背飞虱的降落因子中低温屏障占 56.5%,与本文中得到的西南稻区早期迁入过程中影响褐飞虱的降落因子中低温屏障占 50%相近。本文通过统计两稻区 18 a 中共 68 次初始迁入过程发现,约有 54.4%的迁入过程受到了低

温影响,且在不同稻区、不同时期(始见期、首次迁入峰期)的发生情况均有差异。正是因为在空间尺度上不同地理位置独有的地形特征与气候特点和时间尺度上气候变化的特点综合作用,使华南稻区始见期的迁入过程受低温影响更大。

尽管本文对有关褐飞虱年内初始迁入过程中低温胁迫的特征进行了相关的统计分析,但研究中还存在一些不足,如两稻区 2005—2017 年为每日灯诱虫情数据,2000—2004 年为每候灯诱虫情数据且开灯日期较晚(开灯日期:2000-04-06,2001-03-06,2002-03-10,2003-04-06,2004-03-06,2005—2017 年均为 3 月 1 日),同时西南稻区缺少 2000 年和 2005 年的虫情数据。这些部分虫情数据不完整的问题会对本文研究结果产生一定的影响,且本文仅对低温屏障及其特征进行了初步的定量统计分析,而没有涉及到低温是如何在飞行过程中胁迫褐飞虱产生降落行为的以及种群对低温胁迫的响应是否会在不同时空条件下存在差异,这些机理性问题需要结合个例进行更加详细深入的阐释与剖析。

参考文献(References):

[1] Heong K L, Cheng J, Escalada M M. Rice Planthoppers. Dordrecht: Springer, 2016.

[2] Hu G, Lu M H, Tuan H A, Liu W C, Xie M C, McInerney C E, Zhai B P. Population dynamics of rice planthoppers, *Nilaparvata lugens* and *Sogatella furcifera* (Hemiptera, Delphacidae) in Central Vietnam and its effects on their spring migration to China. Bulletin of Entomological Research, 2017, 107(3): 369-381.

[3] Bottrell D G, Schoenly K G. Resurrecting the ghost of green revolutions past: the brown planthopper as a recurring threat to high-yielding rice production in tropical Asia. Journal of Asia-Pacific Entomology, 2012, 15(1): 122-140.

[4] 刘万才, 刘振东, 黄冲, 陆明红, 刘杰, 杨清坡. 近 10 年农作物主要病虫害发生危害情况的统计和分析. 植物保护, 2016, 42(5): 1-9, 46-46.

[5] 吴利红, 娄伟平, 姚益平, 毛裕定, 苏高利. 水稻农业气象指数保险产品设计——以浙江省为例. 中国农业科学, 2010, 43(23): 4942-4950.

[6] Hu G, Cheng X N, Qi G J, Wang F Y, Lu F, Zhang X X, Zhai B P. Rice planting systems, global warming and outbreaks of *Nilaparvata lugens* (Stål). Bulletin of Entomological Research, 2011, 101(2): 187-199.

[7] 翟保平. 稻飞虱: 国际视野下的中国问题. 应用昆虫学报, 2011, 48(5): 1184-1193.

[8] 张文庆, 张古忍, 古德祥. 保护利用农田天敌的群落问题探讨. 植物保护学报, 1996, 23(4): 363-368.

[9] 霍治国, 李茂松, 李娜, 王丽, 黄大鹏, 王春艳. 季节性变暖对中国农作物病虫害的影响. 中国农业科学, 2012, 45(11): 2168-2179.

[10] Pender J. Migration of the brown planthopper, *Nilaparvata lugens* (Stal.) with special reference to synoptic meteorology. Grana, 1994, 33(2): 112-115.

[11] Riley J R, Reynolds D R, Smith D, 程遐年, 张孝羲, 徐国民, 程极益, 包爱东, 翟保平. 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.

[12] 程极益, 包云轩, 樊多琦, 王海扣, 程遐年. 褐飞虱迁飞轨迹研究. 南京农业大学学报, 1995, 18(3): 60-67.

[13] 包云轩, 尚洁, 孙思思, 谢晓金, 陆明红, 刘万才. 云南省褐飞虱早期迁入虫源及其发生大气背景分析. 生态学报, 2018, 38(16): 5621-5635.

[14] Hu G, Xie M C, Lin Z X, Xin D Y, Huang C Y, Chen W, Zhang X X, Zhai B P. Are outbreaks of *Nilaparvata lugens* (Stål) associated with global warming? Environmental Entomology, 2010, 39(6): 1705-1714.

[15] 沈慧梅, 吕建平, 周金玉, 张孝羲, 程遐年, 翟保平. 2009 年云南省白背飞虱早期迁入种群的虫源地范围与降落机制. 生态学报, 2011, 31(15): 4350-4364.

[16] 程遐年, 陈若篪, 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.

[17] 邓望喜. 褐飞虱及白背飞虱空中迁飞规律的研究. 植物保护学报, 1981, 8(2): 73-82.

[18] 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.

[19] 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.

[20] 陈若篪, 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. 南京农业大学学报, 1980, 3(2): 42-49.

[21] 邓望喜, 许克进, 荣秀兰, 许甲柱. 飞机网捕褐稻虱及白背飞虱的研究初报. 昆虫知识, 1980, 17(3): 97-102.

[22] 张晓梅, 张巫军, 丁艳锋, 王绍华, 李刚华. 云南单季水稻立体生态区划及安全成熟期时空演变研究. 西南农业学报, 2016, 29(5): 998-1005.

[23] 潘静, 李崇银. 夏季南海季风槽与印度季风槽的气候特征之比较. 大气科学, 2006, 30(3): 377-390.
[24] 赵平, 周秀骥, 陈隆勋, 何金海. 中国东部—西太平洋副热带季风和降水的气候特征及成因分析. 气象学报, 2008, 66(6): 940-954.
[25] 唐广田, 邹丽霞. 广西褐飞虱发生气候背景分析. 科学技术与工程, 2015, 15(5): 191-196.
[26] 李干金. 温度对稻飞虱迁入始见期和种群消长的影响[D]. 杭州: 中国计量学院, 2015.
[27] 党建涛. 西南天气. 北京: 国防工业出版社, 2007: 17-17, 343-343.
[28] 卢小凤, 霍治国, 申双和, 黄大鹏, 王丽, 肖晶晶, 于彩霞. 气候变暖对中国褐飞虱越冬北界的影响. 生态学杂志, 2012, 31(8): 1977-1983.
[29] 刘垚, 包云轩, 魏巍, 陆明红, 刘万才. 复杂地形下褐飞虱迁飞的数值模拟: 个例研究. 生态学报, 2016, 36(16): 5263-5275.
[30] 沈慧梅, 陈晓, 胡高, 程遐年, 张孝羲, 翟保平. 2008 年广西北部湾稻区稻飞虱初迁入过程分析. 应用昆虫学报, 2011, 48(5): 1268-1277.
[31] 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.
[32] 范文孝. 越南稻区褐飞虱和白背飞虱迁飞动态[D]. 南京: 南京农业大学, 2014.
[33] 王政, 齐国君, 吕利华, 胡芊, 袁维熙. 广东白背飞虱早期迁入种群的虫源地分析. 应用昆虫学报, 2011, 48(5): 1253-1259.
[34] 沈慧梅. 我国褐飞虱与白背飞虱的境外虫源研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2010.
[35] Xu Z H, Wei H J, Fan W G, Wang X C, Zhang P, Ren J H, Lu N C, Gao Z C, Dong X B, Kong W D. Relationships between ecosystem services and human well-being changes based on carbon flow—A case study of the Manas River Basin, Xinjiang, China. Ecosystem Services, 2019, 37: 100934.
[36] 包云轩. 褐飞虱降落过程的动力气象学研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2005.
[37] 徐兰珍, 谌爱东, 赵雪晴, 翟保平. 滇东南地区白背飞虱早期迁入种群的虫源地与降落机制. 应用昆虫学报, 2016, 53(6): 1301-1316.