应用昆虫学报 *Chinese Journal of Applied Entomology* 2016, 53(6): 1317−1333. DOI: 10.7679/j.issn.2095−1353.2016.162

武陵山区白背飞虱大发生种群的形成：2007 年个例分析*

曹书培[1**] 尹 丽[2] 陆明红[3] 翟保平[1**]

（1. 南京农业大学植物保护学院昆虫学系，昆虫信息生态研究室，南京 210095；2. 湖南省植保植检站，长沙 410005；3. 全国农业技术推广服务中心，北京 100125）

摘 要 **【目的】** 武陵山区白背飞虱 *Sogatella furcifera* (Horváth)的频繁暴发，给当地的水稻生产造成了极其严重的损失，明确其大发生的机制，对于实现精细化异地预测和综合治理至关重要。**【方法】** 用 WRF 模拟风温场，用 HYSPLIT 模拟迁飞轨迹，对武陵山区 2007 年白背飞虱多个灯诱高峰的虫源分布和降落机制进行不同尺度的模拟分析。**【结果】** （1）西南低空急流是武陵山区白背飞虱早期种群形成的首要条件，降水、低温屏障、下沉气流和地形阻隔是造成此次洪江早期种群大发生的主要原因。（2）2007 年主害期，我国南方的大面积高温干旱天气刺激了白背飞虱的大量外迁，为武陵山区提供了更加充足的虫源；连续多日的降水致使迁入种群大量聚集降落，同时也使得本地外迁种群迁出受阻，从而造成了武陵山区白背飞虱种群的大发生。（3）地形引起的垂直涡旋等小气候变化是造成不同站点间迁入虫量差异的主要原因。**【结论】** 西太平洋副热带高压所带来的西南暖湿气流与北方冷涡南下的冷气团常在武陵山区上空交汇，形成大范围长时间的强对流天气，加之该地区西南低涡的强辐合作用，从而造成了 2007 年武陵山区白背飞虱种群的大发生。

关键词 白背飞虱，西南低涡，轨迹分析，降落机制

The formation of outbreak populations of *Sogatella furcifera* (Horváth) in the Wuling Mountain area: A case study in 2007

CAO Shu-Pei[1**] YIN Li[2] LU Ming-Hong[3] ZHAI Bao-Ping[1***]

(1. Department of Entomology, College of Plant Protection, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. Hunan Plant Protection Station, Changsha 410005, China; 3. National Agricultural Technical Extension and Service Center, Beijing 100125, China)

Abstract **[Objectives]** Successive outbreaks of the white-backed planthopper, *Sogatella furcifera* (Horváth) (WBPH) in the Wuling Mountains have seriously damaged rice production. Better understanding of the outbreak mechanisms of this species is important to improving the accuracy of outbreak forecasting and the integrated management of this pest. [**Methods**] Wind and temperature fields were simulated by the mid-scale atmospheric models WRF and GrADS. The trajectories of immigrant WBPH were tracked by the NOAA atmospheric dispersion model, HYSPLIT. Source areas and landing mechanisms of immigrant WBPH in the Wuling Mountains in 2007 were studied by trajectory analysis and synoptic analysis. **[Results]** (1) Southwest low level jet streams were the primary conditions for the early formation of outbreak populations of WBPH in the Wuling Mountains. Precipitation, downdrafts, geographical obstacles such as mountain ranges, and low temperatures are barrier factors that impede early immigration events. (2) The main outbreak period coincides with prolonged periods of high temperature and dry weather in southern China which stimulate massive numbers of WBPH to migrate. Immigrant populations of WBPH are much more abundant than before in the Wuling Mountains. Prolonged precipitation over several days is thought to be the main factor causing large numbers of WBPH to land and preventing the migration of local populations. (3) Vertical

*资助项目 Supported projects：国家自然科学基金项目（31471763）；农业公益性行业科研专项（200903051）

**第一作者 First author，E-mail：2013102063@njau.edu.cn

***通讯作者 Corresponding author，E-mail：bpzhai@njau.edu.cn

收稿日期 Received：2016-06-23，接受日期 Accepted：2016-10-07

vortices and other microclimatic factors caused by topography are the reason for site-specific differences in migration. **[Conclusion]** A southwest, warm, moist air flow generated by subtropical high pressure systems over the Western Pacific frequently meets the cold air flow generated by the cold vortex over Northeast China in the Wuling Mountains causing long-term and large-scale convection. In addition, convergence of the southwest vortex caused outbreaks of WBPH in the Wuling Mountains in 2007.

Key words *Sogatella furcifera*, southwest vortex, trajectory analysis, landing mechanisms

白背飞虱 *Sogatella furcifera* (Horváth)是我国水稻生产上重要的迁飞性害虫，每年 3 月中下旬随西南气流从中南半岛迁入我国并逐步北迁，广泛分布于全国各个稻区（全国自背飞虱科研协作组，1981）。20 世纪 80 至 90 年代，伴随着高产籼型抗褐飞虱的杂交水稻在我国大面积推广，致使白背飞虱逐渐取代褐飞虱成为水稻上的优势种群。新世纪以来更是呈现出逐年暴发的势态，给我国的水稻生产造成了极其巨大的损失（沈慧梅，2010）。

武陵山区地处我国西南地区，为白背飞虱南北迁飞的必经之地（全国自背飞虱科研协作组，1981），其地理位置呈东北-西南走向，整体地势西高东低，北高南低。由于其西侧青藏高原的背风坡地形与大气环流的相互作用，常导致该地区形成中尺度的闭合低压系统——西南低涡（卢敬华，1986；刘红武和李国平，2008），该系统引起的降水和风切变等强对流天气对迁入此地的白背飞虱具有极强的聚集迫降作用（胡国文等，1995；陈忠明，2003；沈慧梅等，2011）。

武陵山区的水稻种植制度较为复杂，除东部湘西低地势地区为双季稻混栽区外，其他大部分地区为单季稻。由于其水稻面积较为集中于少部分丘陵地区，使得散布在较大面积上的迁入成虫集中危害相对较小面积的水稻，形成远高于东部稻区数倍的种群密度（胡国文等，1982）。此外，由于其东部的湘西地区位于湘桂走廊的末端，因而该区的白背飞虱早期迁入量要远大于同纬度的其他东部稻区。同时，由于该区白背飞虱的始见期和迁入主峰期均要早 20~30 d 左右，因此其往往比东部地区多发生一个世代。此外，武陵山区白背飞虱的主迁入峰次有 5~7 次左右，容易造成重叠危害，其主害代（6 月至 7 月）的峰期可达 20 d 左右，危害峰次之多、峰期之长，为全国稻区所罕见，灯诱虫量和田间虫量以及危害程度亦明显高于同纬度的其他稻区（胡国文等，1995）。以往对于武陵山区白背飞虱的研究多为虫情对比分析得出的较为宏观的规律结论，对于该地的中小尺度的降落机制尚不清楚。因此本文将通过对大发生的 2007 年几个较为典型的迁入峰进行详细分析，意在弄清武陵山区白背飞虱大发生种群形成的具体原因，以期为武陵山区白背飞虱的精细化异地预测和综合治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 资料来源

虫情资料：湖南省植保站和全国农业技术推广服务中心病虫测报处提供的 2000—2014 年武陵山区各个植保站的白背飞虱灯下诱捕资料和田间系统调查资料。

气象资料：NCEP/NCAR 所提供的每 6 h 一次的 1°×1°的全球再分析资料（http://rda.ucar.edu）和 ECMWF 的 0.5°×0.5°月平均全球再分析资料（http://www.ecmwf.int）。并对 FNL 再分析资料采用 WRF 模式进行数值模拟，具体方案和参数参见表 1。

降水资料：中国气象数据网所提供的中国地面月均降水量资料和的逐日降水资料（http://data.cma.cn）。

地形数据：包括 MODIS 和 GWD 数据，它覆盖 180°W~180°E，90°S~90°N 的所有区域（http://www.mmm.ucar.edu/wrf/OnLineTutorial/Basics/GEOGRID/ter_data.htm），分辨率为 30″、2′、5′和 10′。

表 1　WRF 模式方案与参数
Table 1　Selection of scheme and parameters of WRF

项目 Items	区域 1 Domain 1	区域 2 Domain 2
中心位置 Location	28°,108°	28°,108°
水平网格 Number of grid points	60×60	80×80
格距 (km) Distance (km) between grid points	60	20
起始位置 Star points	1,1	1,1
垂直层 Layers	33	33
地图投影 Map projection	Lambert	Lambert
嵌套方式 Nesting	One-way nest	One-way nest
微物理过程 Microphysics scheme	WSM3	WSM3
长波辐射方案 Longwave radiation scheme	RRTM	RRTM
短波辐射方案 Shortwave radiation scheme	Dudhia	Dudhia
近地面层方案 Surface layer scheme	Monin-Obukhov	Monin-Obukhov
陆面过程方案 Land/wave radiation scheme	Noah	Noah
边界方案 Planetary boundary layer scheme	YSU	YSU
积云参数化 Cumulus parameterization	Kain-Fritsch (new Eta)	Kain-Fritsch (new Eta)

1.2　研究方法

轨迹分析：采用美国国家大气海洋局 NOAA 与澳大利亚国家气象局（ABM）开发的大气质点轨迹分析平台 HYSPLIT 进行在线模拟（http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT_traj.php）。HYSPLIT 模型使用的数据为 NCEP 再分析全球格点数据，经纬网格为 2.5°×2.5°。

轨迹计算时的参数设置：（1）白背飞虱是顺风迁移的（邓望喜，1981；Riley *et al.*，1991）；（2）白背飞虱在日出前或日落后 1 h 内起飞（陈若篪和程遐年，1980；刘芹轩等，1982；翟保平等，1997）；（3）迁飞高度根据季节和各高度层温度不同而设，春、秋季白背飞虱的迁飞高度为 1 000~1 500 m，夏季迁飞高度为 1 500~2 000 m（邓望喜等，1980；邓望喜，1981；Riley *et al.*，1991，1994），飞行低温阈限为 16.5℃（邓望喜，1981）。（4）回推轨迹以降虫区为起点，以降落时间为起始时刻，回推至白背飞虱的起飞时刻（翟保平等，1997）。

有效轨迹判定标准：轨迹终点的时间必须符合白背飞虱降落的生物学节律（罗举等，2011）；顺推轨迹终点必须在水稻种植区。按以上标准剔除不合理轨迹后得到有效轨迹。

WRF 参数方案：WRF 模式是由美国 NCAR、NCEP 和 FSL/NOAA 等联合开发的新一代中尺度数值模式，水平方向采用 Arakawa C（荒川 C）网格点，垂直方向则采用地形跟随质量坐标。本文采用二重嵌套的网格设计，相关的参数方案见表 1。使用的 FNL 再分析资料作为模式的初始场和边界条件，二重嵌套网格的控制实验中边界层、辐射过程和微物理处理方案相同。资料经 WRF 进行数值模拟后输出每小时一次的 20 km×20 km 格距的气象要素场，并经 ARWpost 转换为 GrADS 格点数据。

2　结果与分析

2.1　基本情况

武陵山区白背飞虱在 2007 年暴发，各主要站点的年诱虫总量均在 10 万头左右，危害程度之大历史罕见。湘西洪江 3 月下旬就始见灯诱白背飞虱，较常年提前了 10 多天（图 1）。4 月下旬始现较大迁入高峰，其中洪江 4 月 22 日灯

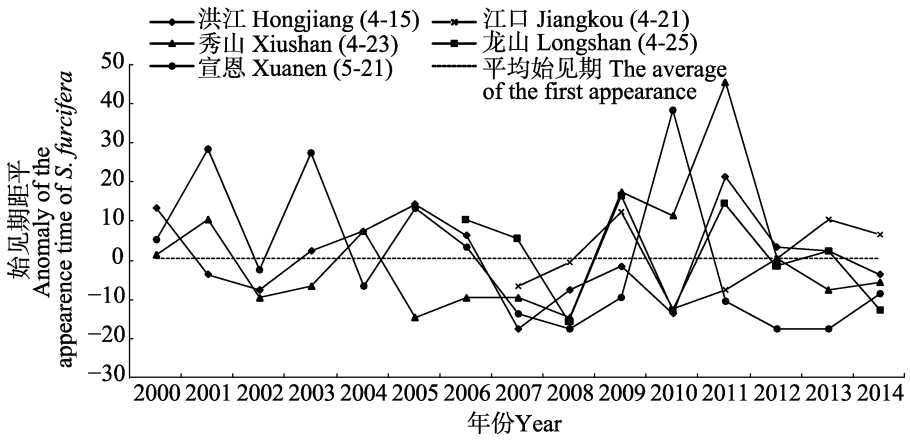

图 1　2000—2014 年武陵山区白背飞虱灯诱始见期逐年距平

Fig. 1　Annual anomalies from the year 2000 to 2014 for the first appearance time of *Sogatella furcifera* light-trap catches in Wuling mountainous area

括号内日期为各站点平均始见期。

The data in brackets is the average of the first appearance time from 2000 to 2014.

诱虫量达 2 420 头（图 2：A），远高于同纬度其它地区。7 月主害期，武陵山区多个站点出现万头以上高峰，且主要集中在 7 月中下旬（图 2）。中 7 月 11 至 15 日，秀山和江口 5 d 共诱虫其 15 万头左右（图 3：C）。

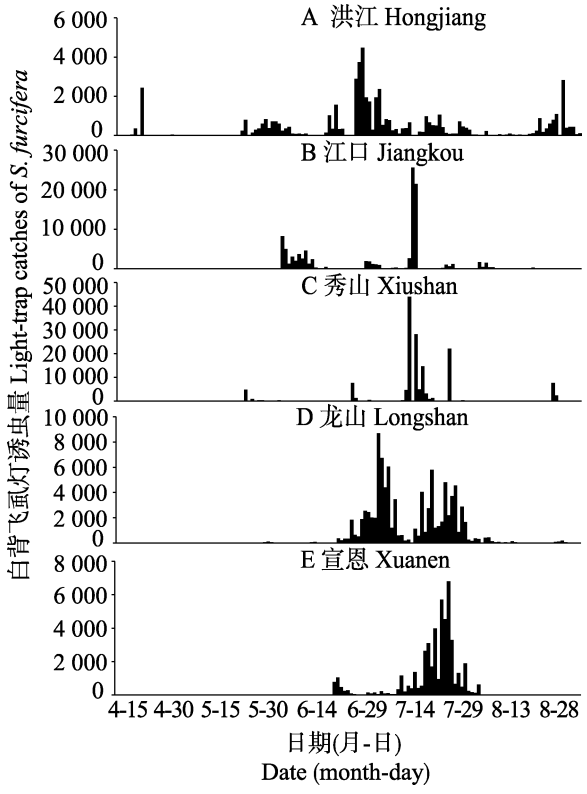

图 2　2007 武陵山区主要站点白背飞虱灯诱虫量

Fig. 2　Light-trap catches of *Sogatella furcifera* in Wuling mountainous area in 2007

2007 年我国各个季节均盛行纬向环流，致使影响我国的冷空气势力较弱且不易南下，使 2007 年成为我国近 50 多年里最暖的一年，各季气温均比常年偏高。这样异常的高温天气，使白背飞虱北迁种群的降落北界较其他年份明显偏北，这就是 2007 年出现此前 15 年里灯诱始见最早的原因所在。

2.2　早期迁入峰的降落机制

2.2.1　虫源分析　2007 年 4 月上中旬，我国南方没有较强的西南气流，直至 4 月 18—22 日，28°N 以南地区 850 hPa 上空为西南急流所控制（图 3），致使 4 月 22 日洪江出现单灯数千头的迁入峰。

通过轨迹回推可以看出，其飞行 36 h 的虫源主要来自于滇西南及越南红河三角洲；24 h 的虫源主要来自于滇东、桂西南和越南红河三角洲；12 h 的虫源主要来自于桂西和黔东南地区（图 4）。从田间虫情看，此间广西和云南田间白背飞虱主虫态为长翅型成虫（如屏边白背飞虱长翅型成虫百丛虫量达 618 头），存在大量白背飞虱外迁虫源。

2.2.2　大尺度环流背景　从 500 hPa 环流形势可以看出，4 月 21 日下午至 22 日凌晨，中高纬度

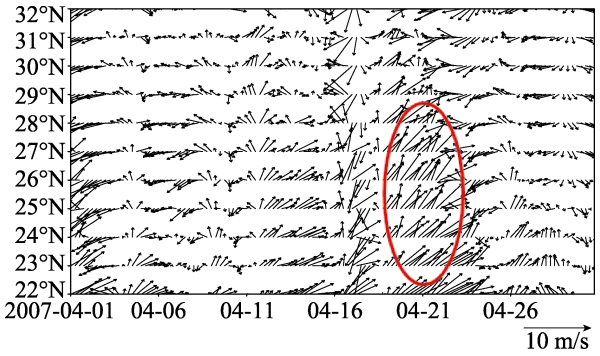

图 3　2007 年 4 月 106°~113°E 平均的 850 hPa 风场时间-纬度剖面图

Fig. 3　Time-latitude cross section of mean wind field in 106°-113°E at 850 hPa in April 2007

环流为两槽一脊型，其中东北地区为低值区，由极强的东北低涡所控制，21 日 14: 00 中心强度甚至低于 5 300 gpm（图 5）。此次中等强冷空气南下致使全国大部分地区先后降温达 7~10℃，其中北方部分地区还出现了 4~6 级偏北风。

21 日下午 14:00，在四川盆地和青藏高原地区生成了一个移动型西南低涡（图 6：A），22 日凌晨 2:00 已东移至武陵山区（图 6：C）。此时暖性西南低涡与冷性东北低涡在我国西南-华中-华东一带地区辐合明显，形成了一条中到大雨的降水带，局部地区甚至出现了暴雨、大暴雨等强对流天气，洪江地区也正处于暴雨区（图 7），使得南方由西南急流带来的大量白背飞虱在洪江地区大量聚集降落。

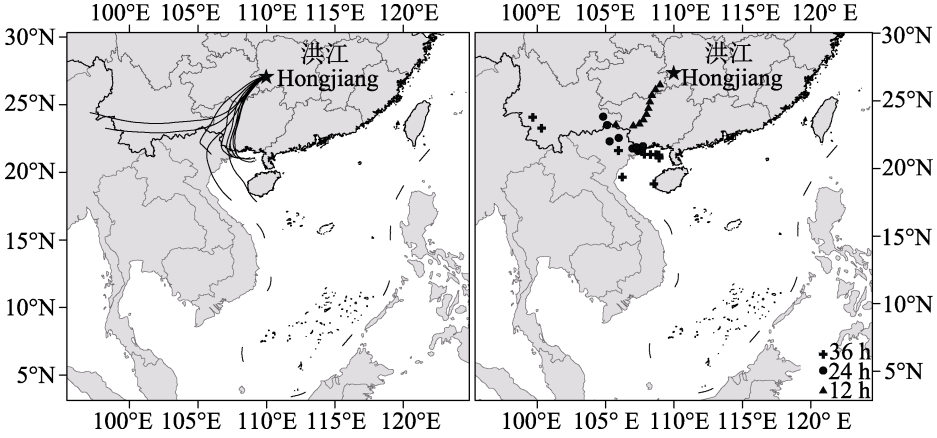

图 4　2007 年 4 月 22 日白背飞虱的回推轨迹

Fig. 4　Endpoints of backward trajectories for WBPH on April 22 in 2007

2.2.3　中小尺度降落机制

2.2.3.1　850 hPa 风温场及 1 h 累计降水　从 WRF 模拟后更加精细的风场和降水分布情况可以看出（图 8），4 月 22 日凌晨在武陵山区北方的重庆和湖北上空，由西南暖湿气流和东北冷涡两股气流交汇辐合而形成的两股气旋，在洪江附近形成静止锋，造成该地区大面积高强度降水，局部地区的最大降水甚至达到 20 mm/h。这样极端的强对流天气是致使迁飞至此的高空白背飞虱种群聚集迫降的主要因素。

2.2.3.2　下沉气流和低温屏障　4 月 22 日，洪江上空的垂直风速变化剧烈，有极强的下沉运动，其中 850 hPa 上空的下沉气流速度达到了 6 cm/s（图 9：A），对于经过该区域的白背飞虱具有极强的聚集下沉作用。同时，由于受到北方强冷空气的侵袭，洪江 850 hPa 上空的最低温度甚至不足 12℃（图 9：B），远低于白背飞虱高空飞行的低温阀值。加之后方 2 000 m 左右高的雪峰山的山体阻隔作用（图 10），从而使得洪江的迁入峰要远大于其它地区。

总之，强劲的西南低空急流与东北冷涡带来的南下强冷空气在武陵山区上空交汇辐合产生的强对流天气，是洪江形成此次白背飞虱较大迁入高峰的主要原因，而独特的地理地形条件也是必不可少的因素。

2.3　7 月份主害代的迁入峰分析

2.3.1　基本情况　2007 年 7 月份副热带高压面积比常年明显扩大，强度偏强，副热带高压西脊

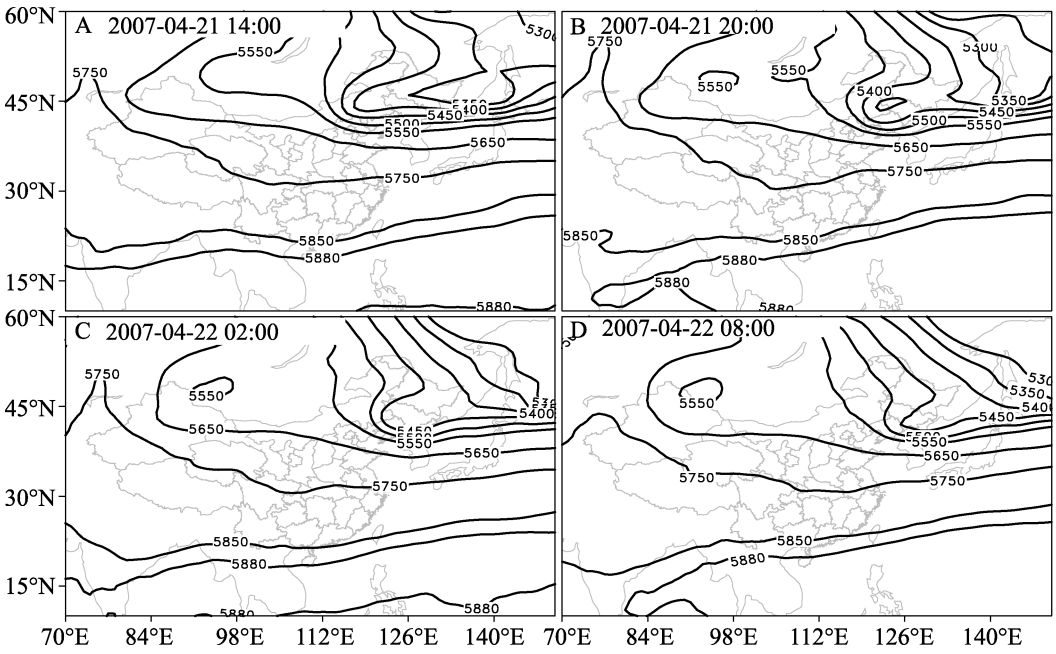

图 5　2007 年 4 月 21 日至 22 日 500 hPa 高度场（gpm）

Fig. 5　The height field (gpm) at 500 hPa during April 21 and 22, 2007

A. 2007 年 4 月 21 日 14:00；B. 2007 年 4 月 21 日 20:00；C. 2007 年 4 月 22 日 02:00；D. 2007 年 4 月 22 日 08:00。

A. 14:00 on April 21, 2007; B. 20:00 on April 21, 2007; C. 02:00 on April 22, 2007; D. 08:00 on April 22, 2007.

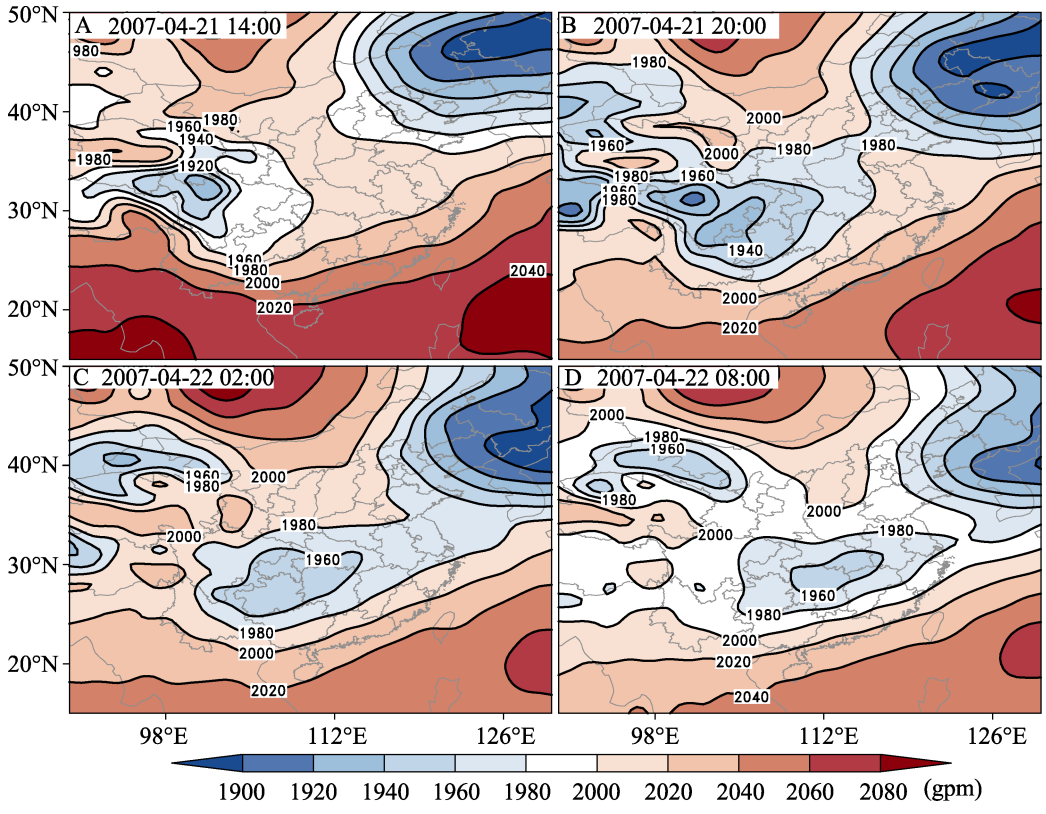

图 6　2007 年 4 月 21 至 22 日 800 hPa 高度场

Fig. 6　The height field at 800 hPa during April 21 and 22, 2007

A. 2007 年 4 月 21 日 14:00；B. 2007 年 4 月 21 日 20:00；C. 2007 年 4 月 22 日 02:00；D. 2007 年 4 月 22 日 08:00。

A. 14:00 on April 21, 2007; B. 20:00 on April 21, 2007; C. 02:00 on April 22, 2007; D. 08:00 on April 22, 2007.

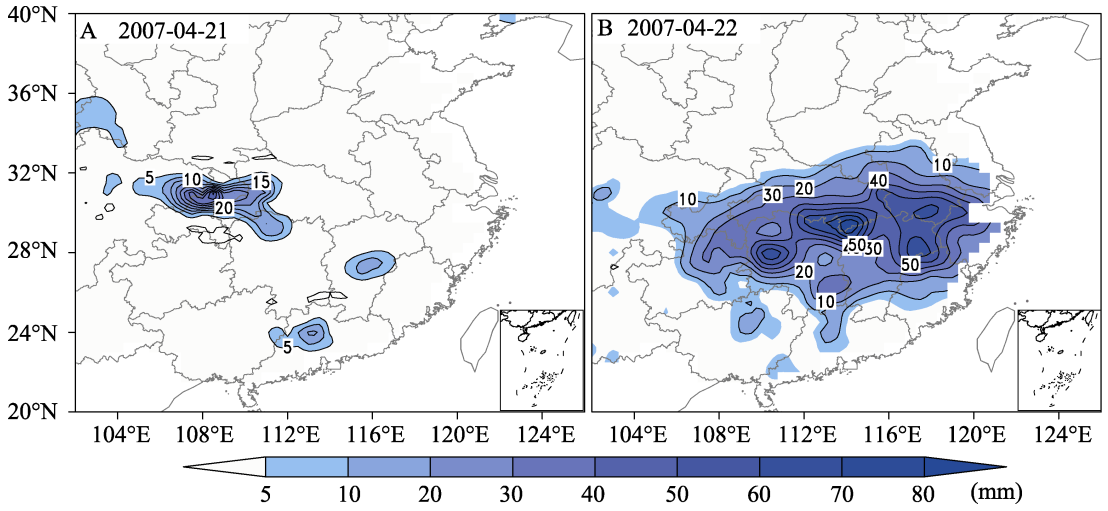

图 7　2007 年 4 月 21 日和 22 日的降雨量

Fig. 7　The precipitation on April 21 and 22 in 2007

A：2007 年 4 月 21；B：2007 年 4 月 22。

A: April 21 in 2007; B: April 22 in 2007.

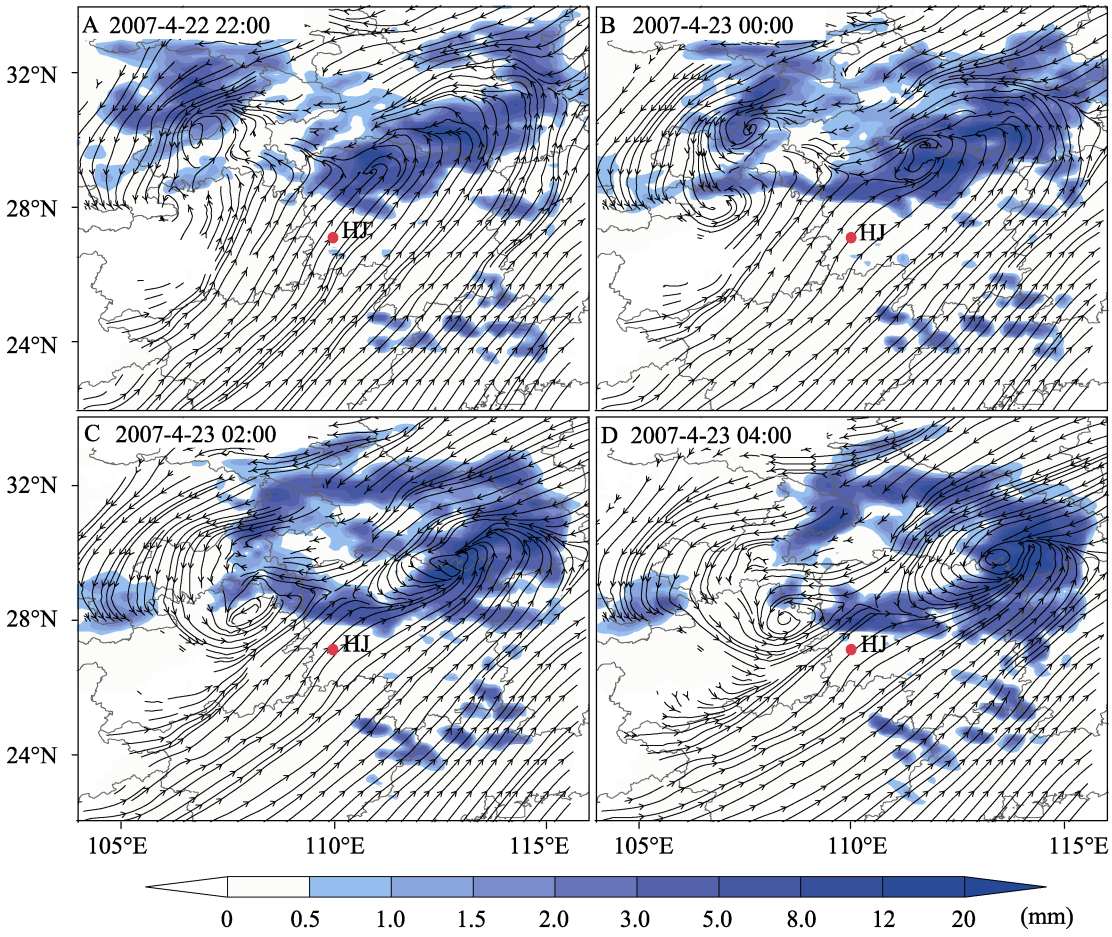

图 8　2007 年 4 月 22 日武陵山区 850 hPa 风场与 1 h 累积降水

Fig. 8　Winds field at 850 hPa and one hour accumulated rain on April 22, 2007

A：2007 年 4 月 22 日 22:00；B：2007 年 4 月 23 日 00:00；C：2007 年 4 月 23 日 02:00；D：2007 年 4 月 23 日 04:00。

A: 22:00 on April 22, 2007; B: 00:00 on April 23, 2007; C: 02:00 on April 23, 2007; D: 04:00 on April 23, 2007.

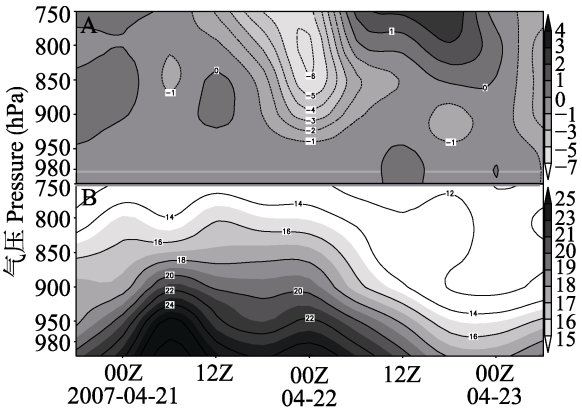

图 9　洪江上空（A）垂直速度（cm/s）和（B）温度分布（℃）

Fig. 9　The vertical wind speed (cm/s) (A) and temperature (℃) (B) at Hongjiang

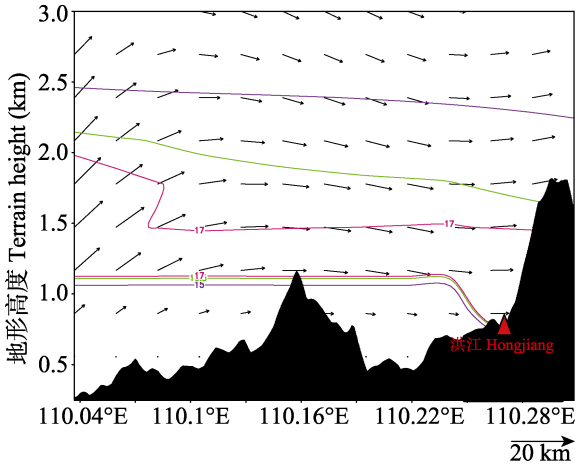

图 10　2007 年 4 月 22 日洪江上空沿风向的地形剖面图

Fig. 10　Topography along wind direction in Hongjiang on April 22, 2007

点较常年偏西，非常有利于南海季风和西南季风水汽沿着副热带高压西北侧的西南气流输送至西南地区，从而形成大范围长时间的降水，而江南和华南大部由于长期受到副热带高压控制而出现了持续的高温干旱天气。2007 年 7 月 10—15 日，位于 90°E 附近的阻塞高压发生崩溃，乌拉尔山东部的低槽加深东移动，从而致使冷空气沿西北方向南下。加之副热带高压东移，极强的西南暖湿气流与北方冷空气交汇辐合造成了西南地区产生了大面积降水。正是这样独特的强对流天气才形成了该年主害代虫量比常年偏多的现象。

7 月我国南方地区出现了大范围高温干旱天气，其中华南、江南等地出现大范围持续≥35℃的高温日数长达 10~25 d，普遍比常年同期偏多 5~12 d，而广东地区的月平均降水量更是达到了历史最低值。南方大部分地区的近地面温度比常年偏高了约 2℃以上（图 11），且多数地区降水量较往年减少幅度多达 6 成以上（图 12），正是这样的高温干旱天气刺激了南方稻区白背飞虱成虫随西南气流的大量外迁，大量虫源进入了气温适宜、降雨充足的武陵山区，造成了种群的大暴发。

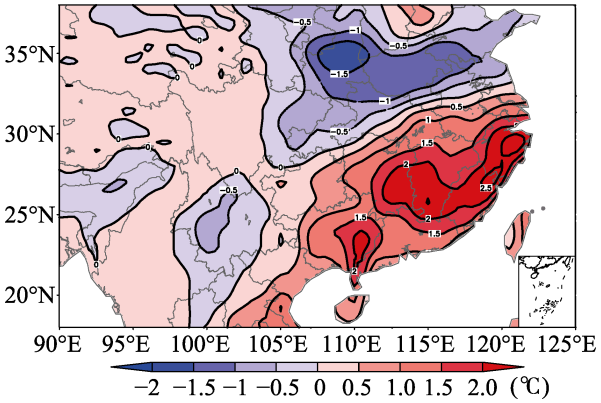

图 11　2007 年 7 月我国南方地面温度距平（温度平均值取 1979—2014）

(℃) in July, 2007 in Southern China (from the mean between 1979-2014)

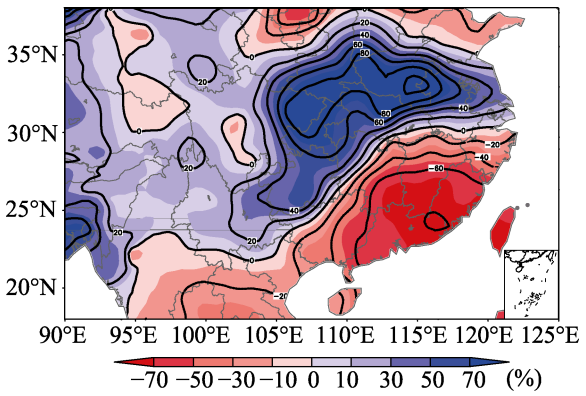

图 12　2007 年 7 月我国南方降水距平百分率(降水平均值取 1948—2014 年）

Fig. 12　Percentage anomalies of precipitation in July, 2007 in Southern China (from the mean between 1948-2014)

从我国 7 月份风场分布（图 13）可以看出，期间武陵山区主要受西南气流的影响，但在 12

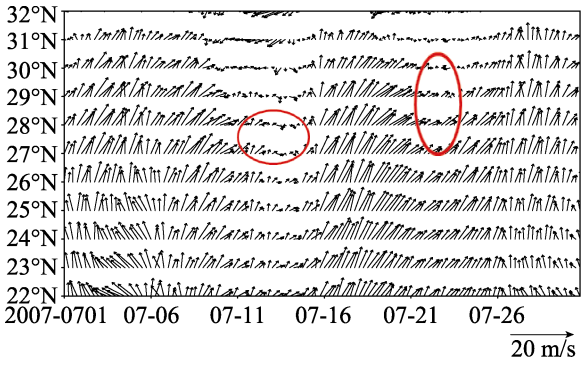

图 13　2007 年 7 月 106°~113°E 平均的 850 hPa 风场时间-纬度剖面图

Fig. 13　Time-latitude cross section of mean wind field in 106°-113°E at 850 hPa in July, 2007

日至 16 日和 22 日至 24 日期间，南下冷空气与北上的西南气流在武陵山区上空相遇辐合，对流明显，这正与本月的几个特大降虫高峰日时间相吻合（图 3）。

2.3.2　7 月 11 日和 13 日迁入事件

2.3.2.1　虫源地分析　11 日和 13 日重庆秀山白背飞虱单灯上灯虫量分别高达 44 032 头和 28 160 头，贵州江口则分别为 2 688 头和 21 504 头。从当日的回推轨迹可以看出，7 月 11 日两地白背飞虱虫源主要由西南急流从我国南方带来。其中秀山 36 h 轨迹落点主要分布在滇东南和滇桂交界地区；24 h 轨迹落点分布在贵州中西部；12 h 轨迹落点则主要分布在贵州东部（图 14），江口的虫源分布情况与之相似（图 15）。

而与之相邻的灯诱高峰日——7 月 13 日两地飞虱迁入种群的虫源分布差异极大。其中秀山的虫源来源于附近的武陵山区，其 36、24、12 h 回推轨迹落点均分布在武陵山区（图 15）；而江口的回推轨迹表明：其 36 h 轨迹落点主要分布在广西西部，少部分散落于贵州中北部；24 h 轨迹落点则全部位于贵州境内；12 h 轨迹落点则全部分布于江口附近的贵州东北部地区（图 15）。

2.3.2.2　850 hPa 风温场及 1 h 累计降水　11 日我国南方处于副热带高压边缘，受静止锋控制，阴雨连绵多日不见阳光，气温较低；而北方地区受大陆高压控制，天气晴朗，温度较高。因此 850 hPa 上空南方温度要低于北方（图 16）。此次正是由于西南低空冷湿急流与北方暖气团在

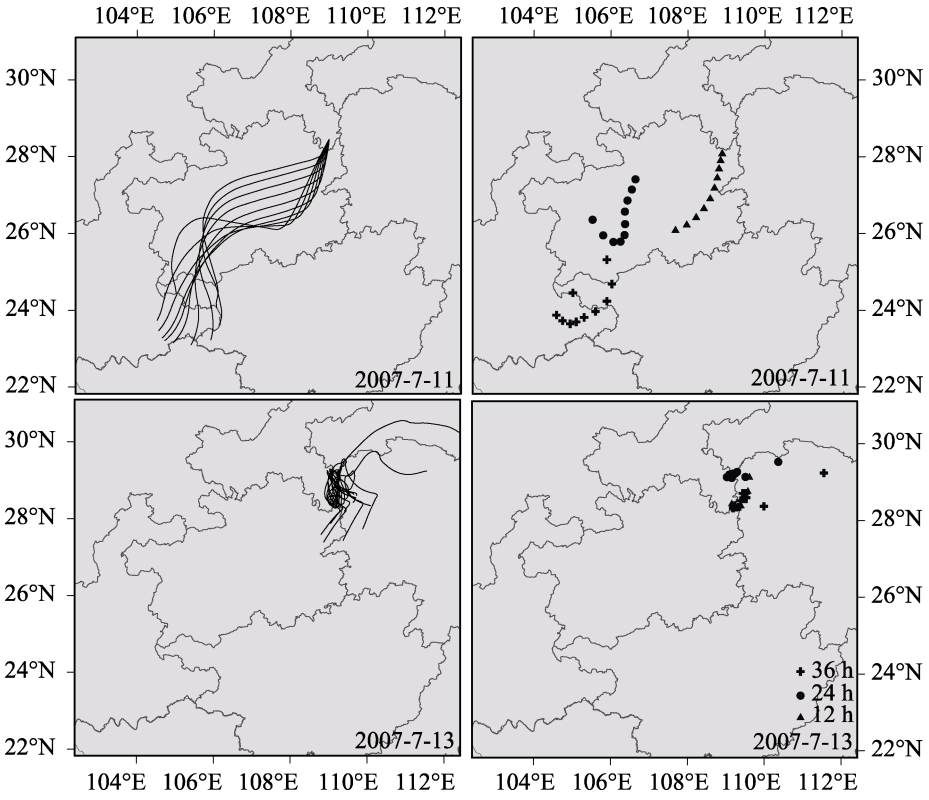

图 14　2007 年 7 月 11 日和 13 日秀山白背飞虱的回推轨迹

Fig. 14　Endpoints of backward trajectories for *Sogatella furcifera* in Xiushan on July 11 and 13 in 2007

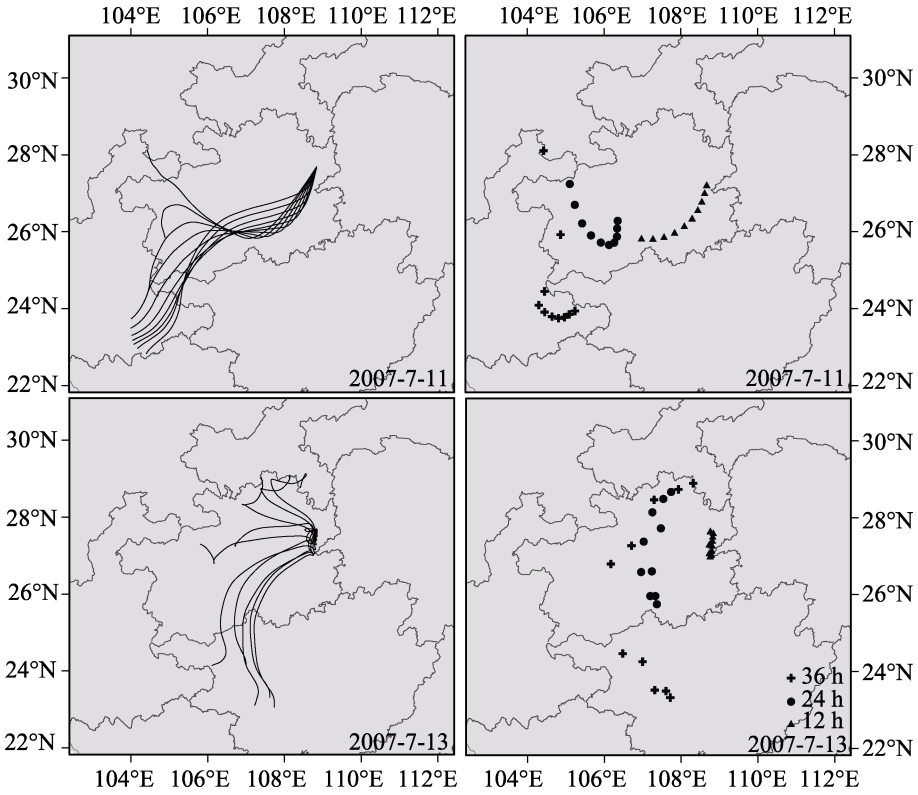

图 **15** **2007** 年 **7** 月 **11** 日和 **13** 日江口白背飞虱的回推轨迹

Fig. 15 Endpoints of backward trajectories for *Sogatella furcifera* in Jiangkou on July 11 and 13 in 2007

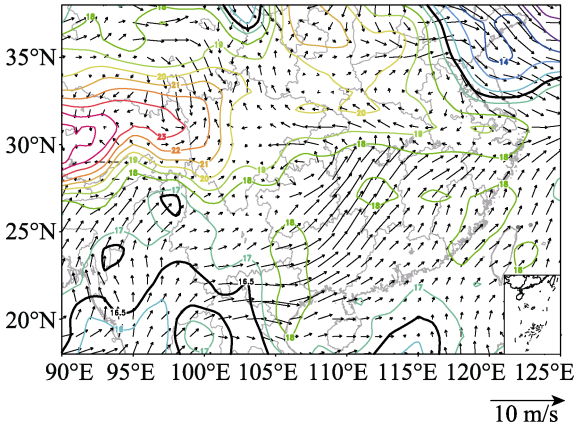

图 **16** **2007** 年 **7** 月 **11** 日 **850 hpa** 风温场

Fig. 16 Winds and temperature fields at 850 hPa on July 11, 2007

武陵山区相遇对峙，加之西南低涡影响，从而造成了武陵山区的大面积降水，局部地区最大降水量甚至高达 20 mm/h 左右（图 17）。因此，强降水是形成此次降虫高峰的主要因素。而 13 日的天气情况则明显与 11 日不同。4 日西太平洋上空生成的热带气旋（2007 年 4 月万宜）于 13 日到达我国东海海域并逐渐增强为强台风，将大量水汽带入我国华东、华北及华中地区，与北方南下冷空气辐合形成强冷湿气流直插南方腹地，850 hPa 上空的 16.5℃等温线部分已到达云贵地区（图 18）；加之西南低涡的强辐合影响，形成了长时间维持的静止峰，导致武陵山区及我国南方地区发生了大面积长时间的超强降水。且 20 mm/h 以上的强降水区基本滞留在低涡中心的秀山上空（图 19），与 11 日相比要更加猛烈。因此，13 日的迁入峰与降水也密切相关。

2.3.2.3 下沉气流和地形气候 7月11日秀山和江口两地 850 hPa 上空水平风速均超过 10 m/s（图 20：A；图 21：A），而且垂直方向风速较小，无明显下沉气流（图 20：B；图 21：B），江口上空甚至还有 4 cm/s 的较强上升气流（图 21：B），但是强降水和西南低涡的高空辐合作用致使迁飞至此的白背飞虱聚集降落，形成上灯峰日。同时两地由于所处地区的地形影响导致两地当日降虫量存在巨大差异（其中秀山当日单灯诱虫量为 40 000 多头，而江口只有 2 000 多头）。

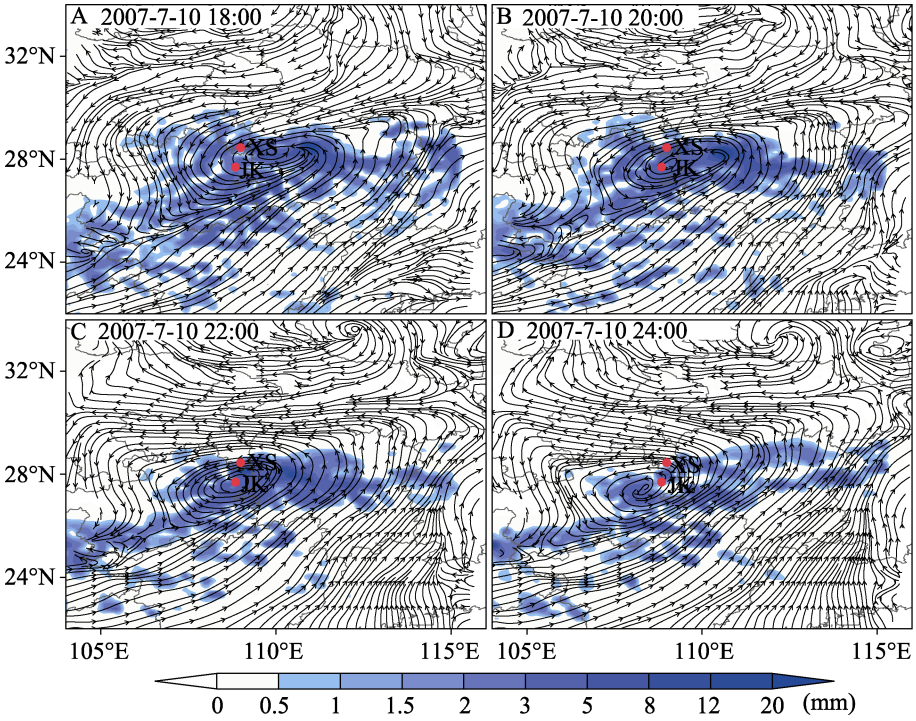

图 17　2007 年 7 月 11 日武陵山区 850 hPa 风场与 1 h 累积降水

Fig. 17　Winds field at 850 hPa and one hour accumulated rain on July 11, 2007

A. 2007 年 7 月 10 日 18:00；B. 2007 年 7 月 10 日 20:00；C. 2007 年 7 月 10 日 22:00；D. 2007 年 7 月 10 日 24:00。

A. 18:00 on July 10, 2007; B. 20:00 on July 10, 2007; C. 22:00 on July 10, 2007; D. 24:00 on July 10, 2007.

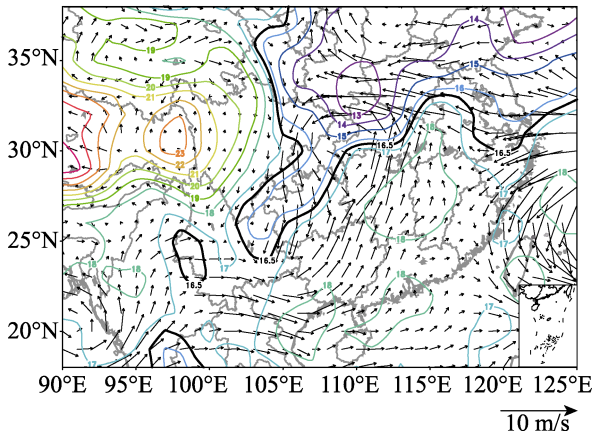

图 18　2007 年 7 月 13 日 850 hpa 风温场

Fig. 18　Winds and temperature fields at 850 hPa on July 13, 2007

其主要原因是江口境内海拔 2 500 多米的凤凰山对于西南低空急流有一定的阻隔作用，使得西南急流经过江口上空时会有一定抬升作用（图 21：B；图 22），致使经过此地的白背飞虱在无雨的条件下基本不能降落。而凤凰山以南（包括江口）的西南风与凤凰山以北（包括秀山）的东北风，在秀山上空交汇，气流活动十分活跃。绕过凤凰山的西南气流沿着背风坡做下沉运动，在秀山上空与从北方来的东北气流相遇交汇，形成小型垂直涡旋（图 22），更加有利于空中白背飞虱种群的聚集迫降，因此虫量更大。

7 月 13 日与 11 日相比则情况明显不同，13 日秀山正处于两股气流交汇以及西南低涡的中心地带（图 19；图 23），因此 12 至 13 日 850 hPa 上空水平风速较弱，基本维持在 1~2 m/s 左右（图 20：A），致使秀山及其附近地区外迁白背飞虱种群难以进行远距离迁飞，虫源多来自武陵山区及其附近地区（图 14）。由于强降水的作用，12 日晚间 16:00 至 20:00（UTC 时间）秀山上空形成了极强的下沉气流，最大速度高达了 9 cm/s（图 20：B）。使得长时间近距离迁飞至此以及本地将要外迁的种群在秀山上空聚集降落，致使当日灯下形成了万头以上上灯高峰。

江口与秀山相比有一定的相似之处，但却存在一定的差异。江口稍微偏离低涡系统的中心，受西南气流影响更大。因此，江口基本只在 12 日

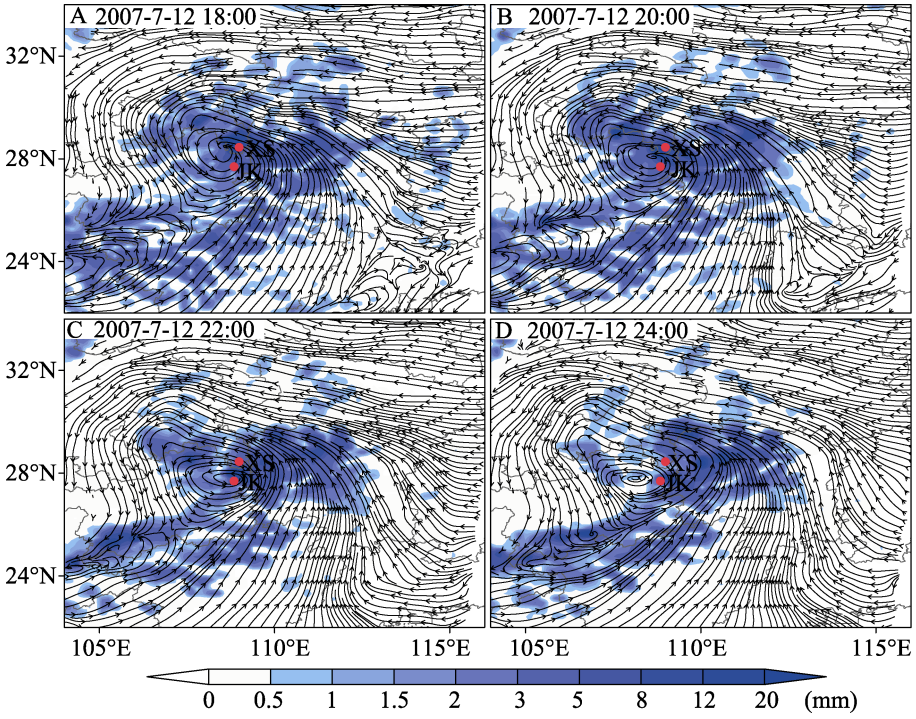

图 19　2007 年 7 月 13 日武陵山区 850 hPa 风场与 1 h 累积降水

Fig. 19　Winds field at 850 hPa and one hour accumulated rain on July 13, 2007

A. 2007 年 7 月 12 日 18:00；B. 2007 年 7 月 12 日 20:00；C. 2007 年 7 月 12 日 22:00；D. 2007 年 7 月 12 日 24:00。

A. 18:00 on July 12, 2007; B. 20:00 on July 12, 2007; C. 22:00 on July 12, 2007; D. 24:00 on July 12, 2007.

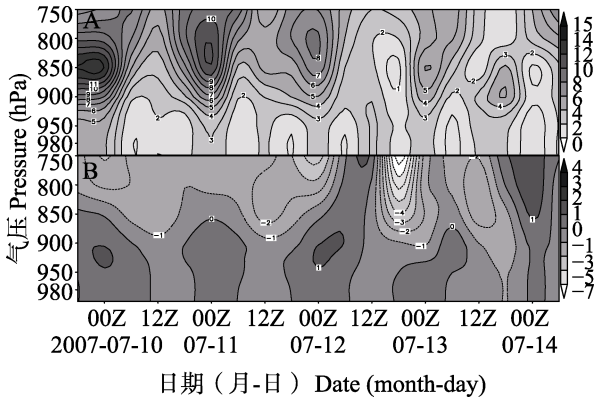

图 20　秀山水平风速（m/s）（A）和垂直速度（cm/s）分布（B）

Fig. 20　The horizontal wind speed (m/s) (A) and vertical wind speed (cm/s) (B) at Xiushan

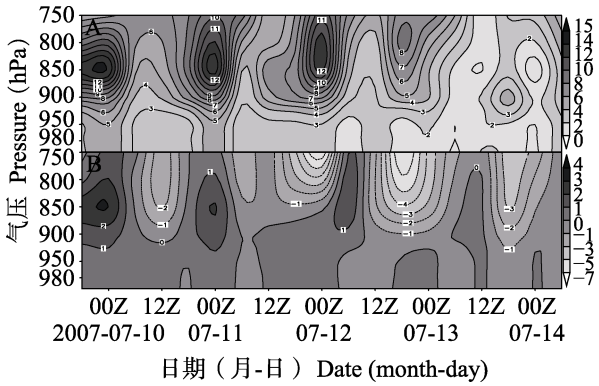

图 21　江口水平风速（m/s）（A）和垂直速度（cm/s）分布（B）

Fig. 21　The horizontal wind speed (m/s) (A) and vertical wind speed (cm/s) (B) at Jiangkou

6:00 至 12:00（UTC 时间）风速较低，约为 4 m/s（图 21：A）。这也解释了为什么江口只有 12 h 的回推轨迹落点落在附近地区（图 15）。此外，长时间的强降水致使江口在 12 日 15:00 至 24:00（UTC 时间）形成了极强的下沉气流，速度高达 7 cm/s 左右（图 21：B），使得江口当日灯下同样也聚集了数万头的白背飞虱，但虫源的性质却与秀山完全不同。

2.3.3　7 月 23 日迁入事件

2.3.3.1　虫源地分析　23 日重庆秀山白背飞虱单灯上灯虫量为 22 144 头，湖南龙山和湖北宣恩的灯诱虫量分别为 2 208 和 6 800 头。从当日的轨迹回推可以发现，其中秀山白背飞虱虫源主要来自我国的南方地区，12 h 轨迹落点主要分布

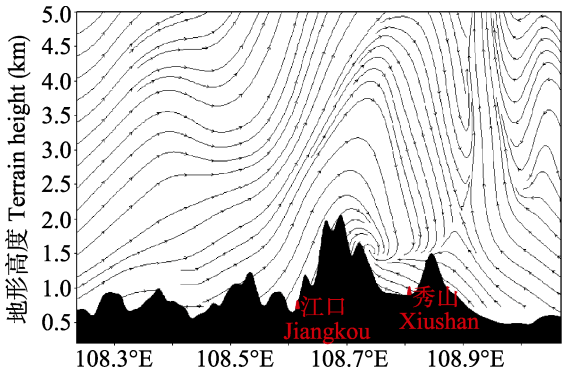

图 22　2007 年 7 月 11 日 1300（UTC）秀山江口上空沿风向的地形剖面图（w 扩大 30 倍）

Fig. 22　Topography along wind direction in Xiushan and Jiangkou at 1300 UTC on July 11, 2007 (w has been amplified by a factor of 30)

在贵州中东部地区；24 h 轨迹落点主要分布在贵州西南部地区；36 h 轨迹落点主要分布在云南的东部地区。龙山回推轨迹落点分布则较为集中，其中 12 h 轨迹落点分布在重庆东南部地区；24 h 和 36 h 的轨迹落点基本落在重庆中部地区。而宣恩的回推轨迹落点大多分布在宣恩以北地区，其中 12 h 轨迹落点分布在湖北西南部地区；24 h 轨迹落点分布在重庆东北部和陕西南部地区；36 h 轨迹落点分布在陕西中南部地区（图 23）。为何同一天相隔不远的三地虫源分布会产生如此大的差异呢？

2.3.3.2　大尺度环流背景　从 22 日至 23 日我国 500 hPa 高空环流形势可以看出，我国的北方地区为高空槽区，长江以北地区由冷涡长时间控制（图 24）。随着副热带高压的西伸北抬，其外围的暖气流及西南水汽不断向北输送与高空冷涡南下的冷空气交汇，在我国的西南-华中-华东一带形成了一条西南-东北走向的长条形雨带，其中武陵山区日降水量基本维持在 50 mm 左右（图 25），对于高空迁飞的白背飞虱种群具有极强的聚集降落作用。

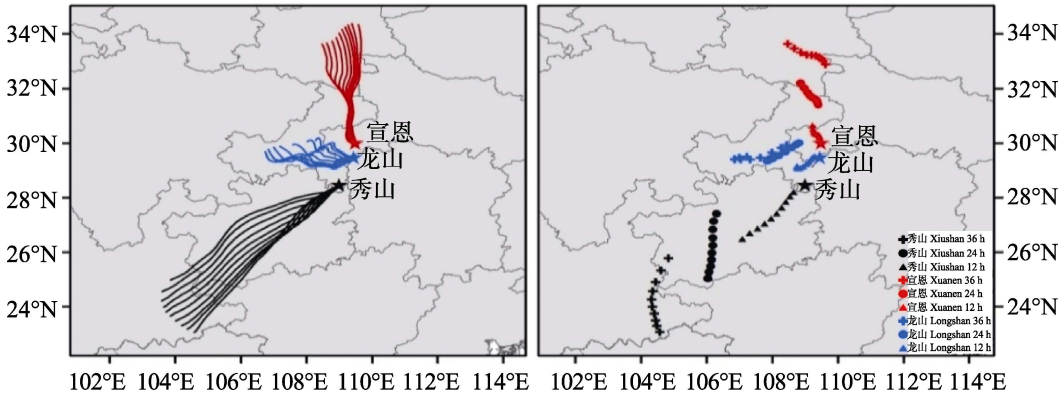

图 23　2007 年 7 月 23 日秀山、龙山和宣恩白背飞虱的回推轨迹

Fig. 23　Endpoints of backward trajectories for *Sogatella furcifera* in Xiushan, Longshan and Xuanen on July 23, 2007

2.3.3.3　中小尺度降落机制　从 7 月 22 至 23 日 800 hPa 流场分布可以看出，北方多股冷气流在武陵山区上空与西南暖湿气流交汇辐合产生风向切变，加之移出型西南低涡东移，从而造成了西南地区大范围长时间的降水（图 26；图 27）。宣恩、龙山和秀山三地由于微小地理位置的差异而受到不同降水和风场影响，因而虫源地分布也存在一定差别。

从 WRF 模拟的降水分布情况可以看出（图 27），武陵山区的雨区随着时间推移逐渐北移。其中秀山处于雨区边界，而龙山和宣恩则处于雨区中央，产生了长时间不间断的持续降水。因此，由西南气流所带来的大量白背飞虱在到达秀山上空时则遭遇强降水被迫聚集降落，形成了上万头的灯诱高峰；而龙山和宣恩两地长时间位于雨区中央且其上空水平风速较小，基本维持在 2 m/s 以下（图 26），因此，这两个地区的白背飞虱灯诱虫源均是来自武陵山区及周边省份迫于天气而未能进行远距离外迁的种群。

总之，主害期副热带高压面积扩大致使我国

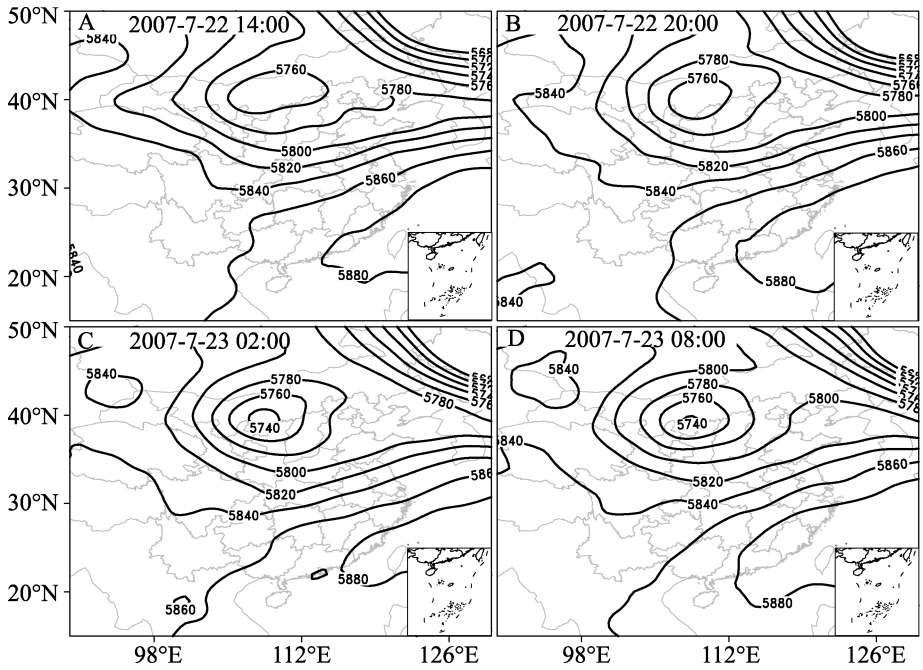

图 24　2007 年 7 月 22 日至 23 日 500 hPa 高度场（gpm）

Fig. 24　The height field at 500 hPa (gpm) during July 22 and 23, 2007

A. 2007 年 7 月 22 日 14:00；B. 2007 年 7 月 22 日 20:00；C. 2007 年 7 月 23 日 02:00；D. 2007 年 7 月 23 日 08:00。

A. 14:00 on July 22, 2007; B. 20:00 on July 22, 2007; C. 02:00 on July 23, 2007; D. 08:00 on July 23, 2007.

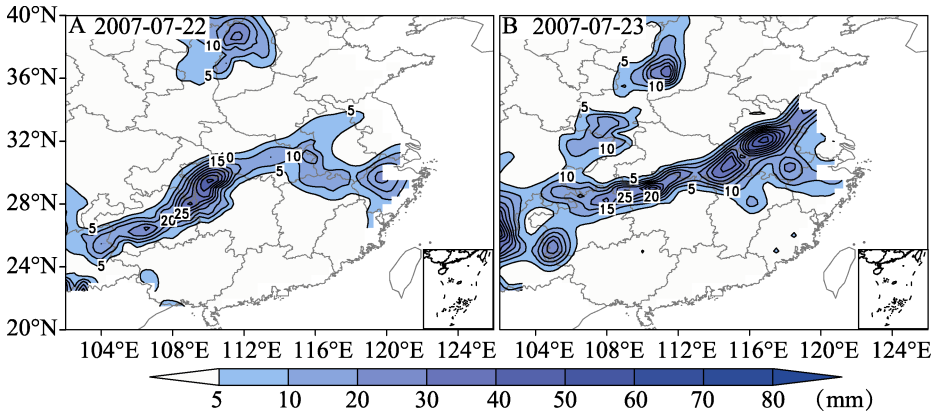

图 25　2007 年 7 月 22 日和 23 日的降雨量

Fig. 25　The precipitation on July 22 and 23 in 2007

A. 2007 年 7 月 22；B. 2007 年 7 月 23。

A. July 22 in 2007; B. July 23 in 2007.

南方地区出现了长时间的高温干旱天气，刺激了白背飞虱种群大量外迁，从而为武陵山区提供了更加充足的虫源。西南低涡和静止锋引起的长时间大范围的降水，是致使迁入种群大量聚集降落和本地外迁种群迁出受阻的主要原因。同时不同站点所处雨区位置和地形差异，是造成其迁入虫量存在差别的主要原因。

3　结论与讨论

本文通过对武陵山区 2007 特大发生年几个典型灯诱高峰的虫源分布、天气学背景和降落机制进行详细探讨和比较分析，从不同尺度上阐释

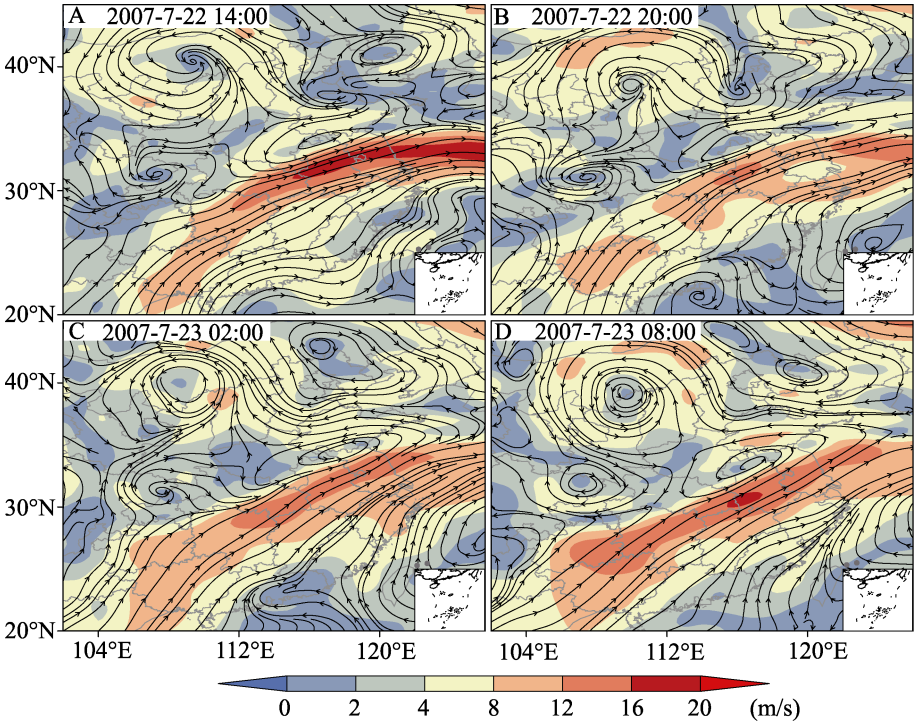

图 26　2007 年 7 月 22 至 23 日 800 hPa 水平流场与风速

Fig. 26　Winds field at 800 hPa during July 22 and 23, 2007

A. 2007 年 7 月 22 日 14:00；B. 2007 年 7 月 22 日 20:00；C. 2007 年 7 月 23 日 02:00；D. 2007 年 7 月 23 日 08:00。

A. 14:00 on July 22, 2007; B. 20:00 on July 22, 2007; C. 02:00 on July 23, 2007; D. 08:00 on July 23, 2007.

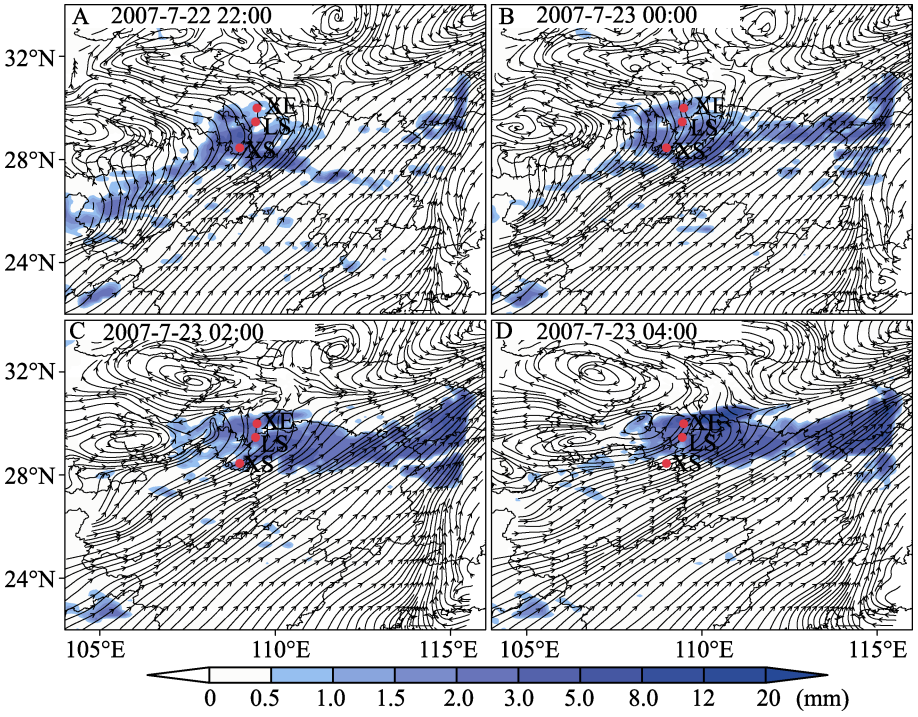

图 27　2007 年 7 月 23 日武陵山区 800 hPa 风场与 1 h 累积降水

Fig. 27　Winds field at 800 hPa and one hour accumulated rain on July 23, 2007

A：2007 年 7 月 22 日 22:00；B：2007 年 7 月 23 日 00: 00；C：2007 年 7 月 23 日 02:00；D：2007 年 7 月 23 日 04:00。

A: 22:00 on July 22, 2007; B: 00:00 on July 23, 2007; C: 02:00 on July 23, 2007; D: 04:00 on July 23, 2007.

了武陵山区白背飞虱大发生种群形成的具体原因，为白背飞虱的异地测报和综合防治提供了一定的理论依据。

武陵山区的地理位置和地形地貌十分独特。从大尺度上来说，西太平洋副热带高压所带来的西南暖湿气流与东北冷涡南下的冷气团，经常在武陵山区上空形成沿西南-东北走向的强对流天气（周宁芳，2007；宗志平，2007；高辉和王永广，2008），造成该地区气候温和湿润，十分有利于南北迁飞的白背飞虱种群在此生长繁殖。从中尺度上来说，由于武陵山区独特地理位置和高纬环流的影响，该地区经常会有西南低涡的生成（卢敬华，1986）。在西南低涡的强辐合作用下，可在很短时间内将空中迁飞的白背飞虱集聚起来（翟保平，2005）。同时，在有利的大尺度环流形势配合下，移动型东移西南低涡往往能引发下游地区大范围的暴雨（潘昄，2011），而造成武陵山区经常出现较大的迁入高峰。尤其是该地区移动型东移西南低涡出现频率最高的 7 月份（谌贵珣和何光碧，2008），南方和本地的白背飞虱大规模北迁，从而造成了该地区不断有白背飞虱迁入的同时，本地将要迁出的种群也迫于天气情况而滞留造成重叠危害。从小尺度上来说，由于武陵山区各站点的地形差异，从而导致各自的迁入情况和降落机制也存在较大差异。早期迁入：位于湘西的洪江地处湘桂走廊的末端，其东北侧的雪峰山是我国第二与第三地势阶梯的分界线，向南延伸与南岭相连直至广西。同时雪峰山山顶气温较低和山体阻隔的作用，使得早期随西南急流迁飞至此的白背飞虱种群无法越过，迫降造成危害，形成了洪江白背飞虱始见期早，连续性迁入高峰早，迁入虫量大的现象。而武陵山区的其他地区由于云贵高原和武陵山的阻隔，导致前期迁入虫量相对较少。主害时期：同属湘西的芷江情况与洪江较为相似，地势较低，水稻种植较其他地区偏早，白背飞虱主害时期为 6 月份。而其他地区的主害时期多为 7 月份，与湘西地区相比迁入虫量要更大、高峰次数更多、峰期也更长，同时，不同站点由于地形和地理位置的悬殊其发生情况也存在一定的差别。例如，江口和秀山之间有重山阻隔，江口境内 2 500 多米的凤凰山对于西南低空急流有一定的阻隔抬升作用，这就使得经过此地的白背飞虱在无雨的条件下基本不能迫降。当出现西南暖湿急流与东北冷气团在此处交汇的类似天气情况时，绕过凤凰山的西南气流沿着背风坡做下沉运动，在秀山上空与北方来的东北气流相遇交汇，极易形成小型的垂直涡旋，从而更加有利于空中白背飞虱种群的聚集迫降，致使秀山要比江口迁入量更大。同时，由于地理位置差异，各站点所受气流影响也有所不同，因而虫源分布也存在较大差异。特别当西南低涡、蒙古气旋等多种天气系统在武陵山区形成辐合型强对流天气时，长时间位于雨区的站点常会出现附近外迁种群滞留造成重叠危害的现象，这与雨区边缘地区的虫源性质有着明显不同。

因此，2007 年武陵山区白背飞虱大发生种群的形成总是与该地区的西南低涡及其引起的降水有关，其中早期还常常包括西南低空急流、地形阻隔和低温屏障等因素的共同作用；主害期则有可能受到副热带高压位置、蒙古气旋及热带气旋等因素的综合影响。对小尺度地形引起的不同站点间的降水差异，有待后续的进一步研究，从而能够更加细致地阐明不同站点间的降虫规律。

致谢：全国农业技术推广服务中心病虫测报处和湖南省植保站提供灯下诱虫资料和田间系统调查资料；NCEP/NCAR 提供了全球再分析资料；ECMWF 提供了月平均全球再分析资料；国家气象信息中心提供了月均和逐日的降水资料，在此一并致谢。

参考文献 (References)

Chen RC, Cheng XN, 1980. The take-off behavior of the brown planthopper *Nilaparvata lugens* (Stål) and its synchronous relations to the biological rhythm and environmental factors. *Journal of Nanjing Agricultural College*, (2): 42–49. [陈若篪, 程遐年, 1980, 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. 南京农学院学报, (2): 42–49.]

Chen ZM, Xu ML, Min WB, Miao Q, 2003. Relationship between abnormal activities of southwest vortex and heavy rain the upper reach of Yangtze River during summer of 1998. *Plateau Meteorology*, 22(2): 162–167 [陈忠明, 徐茂良, 闵文彬, 缪强,

2003. 1998 年夏季西南低涡活动与长江上游暴雨. 高原气象, 22(2): 162–167.]

Deng WX, 1981. A general survey on seasonal migrations of *Nilaparvata lugens* (Stål) and *Sogatella furcifera* (Horváth) (Homoptera: Delphacidae) by means of airplane collections. *Acta Phytophylacica Sinica*, 8(2): 73–81. [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.]

Deng WX, Xu GJ, Rong XL, Xu JZ, 1980. A preliminary survey of *Nilaparvata lugens* (Stål) and *Sogatella furcifera* (Horváth) (Homoptera: Delphacidae) by aircraft nets captured. *Entomological Knowledge*, 36(3): 97–102. [邓望喜, 许克进, 荣秀兰, 许甲柱, 1980. 飞机网捕褐稻虱及白背飞虱的研究初报. 昆虫知识, 36(3): 97–102.]

Gao H, Wang YG, 2008. Sea surface temperature and the general circulation in 2007 and their influences on the climate of China. *Meteorological Monthly*, 34(4): 107–112. [高辉, 王永光, 2008. 2007 年海温和大气环流异常及对我国气候的影响. 气象, 34(4): 107–112.]

Hu GW, Wang MC, Xie MX, 1982. Migration and occurrence of white-backed planthoppers and brown planthoppers in southwest China. *Acta Phytophylacica Sinca*, 9(3): 179–186. [胡国文, 汪毓才, 谢明霞, 1982. 我国西南稻区白背飞虱, 褐稻虱的迁飞和发生特点. 植物保护学报, 9(3): 179–186.]

Hu GW, Zhu M, Tang J, Pan QW, Ren ZJ, Yang KM, 1995. Potential causal factors for the outbreak of the rice planthoppers in Wuling Mountainous area. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 8(2): 53–60. [胡国文, 朱敏, 唐健, 潘群威, 任泽君, 杨克明, 1995. 武陵山区稻飞虱常年大发生的特点及原因剖析. 西南农业学报, 8(2): 53–60.]

Liu HW, Li GP, 2008. The review and prospect of research on the southwest vortex in recent 30 years. *Plateau and Mountain Meteorology Research*, 28(2): 68–73. [刘红武, 李国平, 2008. 近三十年西南低涡研究的回顾与展望. 高原山地气象研究, 28(2): 68–73.]

Liu QX, Lü WM, Zhang GF, 1982. Biology and ecology of the white back planthopper in Henan province. *Scientia Agricultura Sinica*, 15(3): 59–66. [刘芹轩, 吕万明, 张桂芬, 1982. 白背飞虱的生物学和生态学研究. 中国农业科学, 15(3): 59–66.]

Lu JH, 1986. The Introduction of Southwest Vortex. Beijing: China Meteorological Press. 58. [卢敬华, 1986. 西南低涡概论. 北京: 气象出版社. 58.]

Luo J, Wang YK, Zhang XX, Zhai BP, 2011. Migratory biology of the white backed planthopper: Take-off and emigration. *Chinese Bulletin Entomology*, 48(5): 1202–1212. [罗举, 汪远昆, 张孝羲, 翟保平, 2011. 白背飞虱的迁飞生物学: 起飞与迁出. 应用昆虫学报, 48(5): 1202–1212.]

National Coordinated Research Group for White Back Planthoppers, 1981. Studies on the migration of white back planthoppers (*Sogatella furcifera* Horváth). *Scientia Agricultura Sinica*, (5): 25–30. [全国白背飞虱科研协作组, 1981. 白背飞虱迁飞规律的初步研究. 中国农业科学, (5): 25–30.]

Pan Y, Li J, Yu RC, 2011. Climatic characteristics of the spatial structure of the eastward-moving southwest vortex. *Climatic and Environmental Research*, 16(1): 60–70. [潘旸, 李建, 宇如聪, 2011. 东移西南低涡空间结构的气候学特征. 气候与环境研究, 16(1): 60–70.]

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*in China: radar observations of mass return flight in the autumn. *Ecological Entomology*, 16(4): 471–489.

Riley JR, Reynolds DR, Smith AD, Rosenberg LJ, Cheng XN, Zhang XX, Xu GM, Cheng JY, Bao AD, Zhai BP, Wang HK, 1994. Observations on the autumn migration of *Nilaparvata lugens* (Homoptera: Delphacidae) and other pests in East Central China. *Bulletin of Entomological Research*, 84(3): 389–402.

Shen HM, 2010. The study on oversea source area of *Nilaparvata lugens* (Stål) and *Sogatella furcifera* (Horváth) in China. Nanjing: Nanjing Agricultural University. [沈慧梅, 2010. 我国褐飞虱与白背飞虱的境外虫源研究. 南京: 南京农业大学.]

Shen HM, Lü JP, Zhou JY, Zhang XX, Cheng XN, Zhai BP, 2011. Source areas and landing mechanism of early immigration of white-backed planthoppers, *Sogatella furcifera* (Horváth) in Yunnan, 2009. *Acta Ecologica Sinica*, 31(15): 4350–4364. [沈慧梅, 吕建平, 周金玉, 周金玉, 张孝羲, 程遐年, 翟保平, 2011. 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, 31(15): 4350–4364.]

Shen GX, He GB, 2008. The observed facts analysis of southwest vortex from 2000 to 2007. *Plateau and Mountain Meteorology Research*, 28(4): 59–65. [谌贵珣, 何光碧, 2008. 2000~2007 年西南低涡活动的观测事实分析. 高原山地气象研究, 28(4): 59–65.]

Zhai BP, Zhang XX, Chen XN, 1997. Parameterizing the migratory behaviour of insects Ⅰ. Behavioural analysis. *Act Ecologica Sinica*, 17(1): 7–17. [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.]

Zhai BP, 2005. What have we seen by entomological radar. *Entomological Knowledge*, 42(2): 217–226. [翟保平, 2005. 昆虫雷达让我们看到了什么? 昆虫知识, 42(2): 217–226.]

Zhou NF, 2007. National warmer and some areas in southern China emerge strong convective frequently. *Meteorological Monthly*, 33(7): 119–123. [周宁芳, 2007. 全国大部气温偏高南方局地强对流频繁. 气象, 33(7): 119–123.]

Zong ZP, 2007. The Huaihe River basin flood occurred Meanwhile Jiangnan, South China and other places sustained high temperature and drought in July, 2007. *Meteorological Monthly*, 33(10): 118–123. [宗志平, 2007. 淮河流域出现流域性大洪水江南华南等地持续高温干旱——2007 年 7 月. 气象, 33(10): 118–123.]