

# 浙江武义 2009 年南方水稻黑条矮缩病的毒源地分析

赵悦<sup>1</sup>, 吴瑾猷<sup>2</sup>, 朱旭东<sup>2</sup>, 蒋学辉<sup>3</sup>, 张孝羲<sup>1</sup>, 翟保平<sup>1,\*</sup>

(1. 南京农业大学昆虫学系, 农业部/教育部农作物病虫害综合治理重点开放实验室, 南京 210095;

2. 武义县粮油技术推广站, 浙江武义 321200; 3. 浙江省植物保护检疫局, 杭州 310000)

**摘要:** 2009 年, 浙江省境内首次出现南方水稻黑条矮缩病毒(Southern rice black-streaked dwarf virus, SRBSDV), 且仅武义县有发病现象。因为该病毒病是一种虫媒病毒, 且白背飞虱 *Sogatella furcifera* (Horváth) 是主要传毒介体, 所以本文通过白背飞虱灯下诱虫情况调查、迁飞轨迹模拟、天气学背景分析以及毒源地分析, 阐释了 2009 年浙江省武义县发现的南方水稻黑条矮缩病的供毒源地分布情况, 以及白背飞虱携毒的传递路径, 并讨论了轨迹模拟中各生物学参数的设定方法, 从而为剖析该病毒的宏观流行规律奠定科学基础。结果显示: (1) 通过对白背飞虱迁入武义的主要虫源地与经鉴定的南方水稻黑条矮缩病发病区域的叠加分析, 明确了浙江武义的可能毒源地分布于两广、闽南、赣南四省区境内; (2) 西南低空急流及偏南气流是白背飞虱将我国南方的病毒远距离传送到武义县境内的动力源; (3) 白背飞虱随下沉气流和降雨在武义境内的集中降落是南方水稻黑条矮缩病在当地暴发的触发条件。

**关键词:** 南方水稻黑条矮缩病毒; 白背飞虱; 迁飞轨迹; 虫源地; 毒源地

中图分类号: Q968 文献标识码: A 文章编号: 0454-6296(2011)08-0949-11

## Tracking the source regions of Southern rice black-streaked dwarf virus (SRBSDV) occurred in Wuyi county, Zhejiang province, China in 2009, transmitted by *Sogatella furcifera* (Horváth) (Homoptera: Delphacidae)

ZHAO Yue<sup>1</sup>, WU Cui-Xian<sup>2</sup>, ZHU Xu-Dong<sup>2</sup>, JIANG Xue-Hui<sup>3</sup>, ZHANG Xiao-Xi<sup>1</sup>, ZHAI Bao-Ping<sup>1,\*</sup>

(1. Key Laboratory of Integrated Management of Crop Pests, the Ministry of Education/Ministry of Agriculture, Department of Entomology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. Wuyi Technology Spread Station of Grain and Oil, Wuyi, Zhejiang 321200, China; 3. Zhejiang Quarantine Bureau of Plant Protection, Hangzhou 310000, China)

**Abstract:** In 2009, Southern rice black-streaked dwarf virus (SRBSDV) appeared first time in Zhejiang province, while only in Wuyi county morbidity phenomenon occurred. Since this virus is a kind of arbovirus, and the white-backed planthopper, *Sogatella furcifera* (Horváth) (WBPH), is its main transmitted vector, we used light trap catch data, migration trajectory simulation, synoptic meteorological background and virus infection to study the pathways of WBPH in Wuyi, Zhejiang, 2009. In this way, the possible source regions of SRBSDV transmitted by its vector WBPH were analyzed, and the biological parameters for trajectory analysis were determined based on the numerical simulation. This research aims to establish scientific basis for the macro-epidemic researching of SRBSDV. The results illustrated that: (1) through the overlapping analysis of the virus incidence area and the main WBPH source regions of Wuyi imitated through backward trajectory simulations, the possible virus source areas of Wuyi were mainly distributed in Guangdong, Guangxi, southern Fujian and southern Jiangxi provinces or regions. (2) Riding on the prevailing southwest wind or south wind, WBPH transmitted this virus from southern China to Wuyi. (3) It was the immigration of concentrated airborne WBPH with downdraft and rainfall that triggered the epidemic outbreak of SRBSDV in Wuyi in 2009.

**Key words:** Southern rice black-streaked dwarf virus (SRBSDV); *Sogatella furcifera*; migration trajectory; source region of insect; source region of virus

基金项目: 国家重点基础研究规划(“973”计划)项目(2010CB126200); 农业公益性行业科研专项(200903051); 现代农业产业技术体系建设专项(nyeytx-001)

作者简介: 赵悦, 女, 1986 年生, 江苏东台人, 硕士研究生, 研究方向为害虫预测预报, E-mail: 2008102113@njau.edu.cn

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

收稿日期 Received: 2011-01-13; 接受日期 Accepted: 2011-07-07

南方水稻黑条矮缩病毒 (Southern rice black-streaked dwarf virus, SRBSDV) 属呼肠孤病毒科 (Reoviridae) 斐济病毒属 *Fijivirus*, 2001 年在广东阳西首次发现, 是近年来在越南和我国南方稻区危害严重的一种新型病毒。水稻各生育期均可感染该病, 染病后的共同症状表现为植株矮缩、叶色浓绿且基部有皱褶、叶背及茎秆出现条状乳白色或深褐色小突起、高位分蘖及茎节部倒生气生须根(周国辉等, 2008)。

通过田间调查及室内传毒实验发现, 白背飞虱 *Sogatella furcifera* 是 SRBSDV 的主要传递媒介(周国辉等, 2008)。该病害从 2001 年被发现到 2008 年间, 主要在华南局部地区零星为害(周国辉等, 2008)。但在 2009 年春, 越南义安省水稻上 SRBSDV 突然大面积流行。随着白背飞虱的向北迁飞, SRBSDV 扩散到越南北方 19 个省, 造成 4.2 万公顷水稻受害, 部分田块失收。越南北方病区的白背飞虱进一步北迁, SRBSDV 在我国的广东、广西、海南、福建、江西、湖南、湖北、浙江、安徽 9 省区也普遍发生, 全国发生面积约 40 万公顷, 基本失收面积 0.67 万公顷。越南有关专家认为, 义安省的 SRBSDV 毒源来自我国海南省, 海南南部稻区为白背飞虱终年繁殖区, 同时也是 SRBSDV 的发生地之一, 当地携毒白背飞虱被台风席卷到义安而使得 SRBSDV 流行并增殖扩散至我国东部稻区(Vien, 2009)。我国发病稻区的白背飞虱秋季南迁, 又将更多的携毒个体送返越南境内, 致使 2010 年 SRBSDV 在越南北部和中部稻区 29 个省大流行(6 万多公顷水稻受害, 许多田块失收), 进而又在我国南方 13 个省超过 130 万公顷水稻上大暴发。而截止到 2011 年 3 月上旬, 海南约 5 万公顷(周国辉, 私人通讯)、越南 38 个省(Vien, 私人通讯)冬春稻见病; 据测, 2011 年该病害将对我国南方稻区超过 200 万公顷水稻构成威胁(中国农技推广网资料, <http://www.natesc.gov.cn>)。

目前, 我国尚未发现明显抗病的水稻主栽品种, 而杂交籼稻又极易受到白背飞虱的危害, 我国和东南亚北部稻区田间已积累大量毒源, 且远距离迁飞性的传毒媒介白背飞虱在我国各稻区大范围发生, 这都使得该病毒病在我国的潜在流行风险极大。

白背飞虱作为 SRBSDV 的主要携毒害虫, 东亚季风是其夏季北迁和秋季南迁的主要运载气流。在高速水平运载气流的作用下, 白背飞虱可从华南如广东、广西向北输送到江浙地区以及更远的北方

(汪毓才等, 1982; 刘芹轩和张桂芬, 1984)。此外, 垂直速度和降水对白背飞虱的起飞和降落有一定的影响。其中, 下沉气流和降水可以迫使迁飞过境中的白背飞虱大量集中降落, 从而形成虫峰。就白背飞虱在我国稻区从南向北主要危害时期的时序而言, 广东、广西、云南南部为 5 月中、下旬; 广西北部、江西南部、贵州和福建中南部为 6 月中、下旬; 湖南中南部和西部、福建北部、浙江南部、江西中部等地为 7 月上、中旬; 湖南、江西、浙江等省的中北部稻区为 7 月中、下旬(全国白背飞虱科研协作组, 1981)。

2009 年, 浙江省境内首次出现 SRBSDV 病毒病, 且仅武义县局部地区有 SRBSDV 发病现象。SRBSDV 仅可以通过白背飞虱成虫和若虫取食水稻传毒(周国辉等, 2008), 而武义县位于浙江省中部, 白背飞虱无法在当地越冬(胡国文等, 1988), 因此 2009 年武义县的 SRBSDV 应为当年外地迁入的白背飞虱携带而来。当地植保站调查资料显示, 该病毒病仅感染当地连作晚稻奥两优 28, 且集中统一育秧的水稻病情远远高于农户自己分散育秧(集中育秧丛发病率 30%~60%, 发病面积 233.33 公顷; 分散育秧丛发病率 6%~10%, 发病面积 100 公顷), 说明该地晚稻秧苗期是感染 SRBSDV 的关键时段。而武义县植保站的诱虫灯恰恰设在一片染病最重的秧田旁边, 因此其灯下虫量的消长真实反映了携毒虫源的迁入动态, 为分析 SRBSDV 的毒源地提供了可靠的基础数据。关于 SRBSDV 病毒本身的研究已有若干报道(Zhang *et al.*, 2008; Cuong *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2010), 但其宏观层面的研究目前仅有零星的报道, 尚未涉及 SRBSDV 的流行规律(周国辉等, 2010)。为此, 本文根据 2009 年 6 月 25 日至 7 月 17 日武义县晚稻育秧时期白背飞虱的灯下虫量(即白背飞虱在该地主要迁入时段的上灯量), 应用美国国家大气海洋局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)开发的大气质点轨迹分析平台 HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) 来分析媒介昆虫白背飞虱的迁飞轨迹和可能的虫源地, 再与 SRBSDV 在全国 9 省区的发病区域做叠加分析, 以期从宏观角度揭示该病毒病的传毒规律, 为 SRBSDV 的防控提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据来源

虫情资料: 浙江省植物保护检疫局提供武义县

2009 年白背飞虱灯诱资料。

病情资料:江苏省农业科学院植物保护研究所周益军研究员和华南农业大学周国辉教授提供 2009 年有关南方水稻黑条矮缩病发病区域的资料。

气象资料:美国国家环境预报中心(The National Center for Environmental Prediction, NCEP)和国家大气研究中心(The National Center for Atmospheric Research, NCAR)的全球再分析数据(全球 6 h 一次,  $1^\circ \times 1^\circ$ , 26 个高度层, GRIB 格式)以及广西气象数据共享系统(GMISS)的地面台站 6 h 降水数据。

地图资料:中国省级行政区图(1:4 000 000)从国家基础地理信息中心网站(<http://ngcc.sbsm.gov.cn>)下载。

## 1.2 轨迹分析方法及主要生物学参数

对白背飞虱这类微小昆虫,在空中飞行时可视为随气流漂浮的粒子。但作为一个生物活体,白背飞虱在整个迁飞过程中仍具有一系列的生物学性状,所以在利用美国国家大气海洋局(NOAA)开发的大气质点轨迹分析平台 HYSPLIT 来模拟分析其迁飞轨迹的同时,还必须设置必要的生物学参数来加以限定,从而有效地追踪迁入种群的虫源地。

**1.2.1 迁飞的高度和温度:**白背飞虱迁飞的下限温度是  $12^\circ\text{C}$ , 最高温度是  $30^\circ\text{C}$ (邓望喜, 1981)。白背飞虱一般在 500 ~ 2 500 m 高度范围内迁飞, 2009 年 6、7 月份该高度范围内的等压面温度皆在可迁飞温度范围内(图 1: a), 因此本研究不考虑温度对白背飞虱迁飞的影响。仅需要进一步设定最合理的迁飞高度。

以 7 月 6 日迁入武义县的白背飞虱为例,在其他参数不变的情况下比较不同迁飞高度的轨迹差异,即回推起始时刻 04:00 (7 月 7 日凌晨 04:00 进虫仍记为 7 月 6 日上灯虫量), 续航时间 23 h, 设 500, 700, 1 000, 1 200, 1 500, 1 700, 2 000, 2 200 和 2 500 m 共 9 个高度模拟分析合适的高度参数, 模拟出的轨迹随高度的增大, 终点的分布呈纬度上略偏北、经度上偏西的扇形分布, 且在 05:00 和 19:00 的各点(即不同起飞时间的虫源地)存在差异(图 1: b)。白背飞虱夏季北迁的最适高度在 1 500 ~ 2 000 m 左右, 但也存在 1 000 m 北迁的现象(邓望喜, 1981), 又由于高度间隔 200 m 的轨迹重合度较高, 所以取最有代表性的 1 000 m, 1 500 m 和 2 000 m 的高度作本试验的回推高度参数, 来模拟分析可能虫源地范围情况。

**1.2.2 起始时刻和续航时间:**白背飞虱成虫起飞活动与褐飞虱相似, 为晨暮双峰型, 其迁出高峰出现在日出前和日落后, 根据日出日落时间计算软件(翟保平, 2004)推算 6、7 月份大致为北京时间 05:00 和 19:00。白背飞虱和褐飞虱 *Nilaparvata lugens* (Stål) 常在空中混合迁飞, 其续航时间与褐飞虱相近, 一般在 30 h 以内(Rosenberg and Magor, 1983), 所以根据其起飞时刻和续航时间可以推算出可能的降虫时间, 即回推轨迹中的起始时刻。

**1.2.2.1 续航时间:**虫源地 19:00 起飞的白背飞虱经过最长 30 h 的飞行, 到达降虫点的时刻为第 3 天凌晨 01:00; 05:00 起飞的白背飞虱在飞行 30 h 后, 到达降虫点的时刻为第 2 天 11:00, 但诱虫灯 06:00 熄灭, 此后直至当日 19:00 才会再次亮起, 所以从虫源地傍晚和凌晨起飞的 WBPH 的续航时间分别设为 30 h 和 25 h 较为合理。

**1.2.2.2 回推起始时刻:**由于在诱虫灯亮灯时间(19:00 - 次日 06:00)内均有降虫诱捕的可能, 所以结合续航时间的设定, 虫源地傍晚起飞的 WBPH 其回推轨迹的起始时刻范围为 19:00 - 次日 01:00, 凌晨起飞的 WBPH 其回推轨迹的起始时刻范围为 19:00 - 次日 06:00。

**1.2.2.3 间隔时间:**由图 2 可知, 不论是回推到 19:00 起飞的虫源地, 还是回推到 05:00 起飞的虫源地, 随着回推轨迹起始时刻每隔 1 小时向前推移, 其虫源地在纬距上逐渐北偏, 但相差不大。所以轨迹回推中, 如以 2 h 的起飞间隔时间所覆盖的虫源地和轨迹范围完全可以代表所有 1 h 起飞间隔时间的情况(图 2), 所以在本研究中, 采用 2 h 起飞间隔时间作回推轨迹, 即可查明所有可能虫源地的分布范围。

**1.2.3 回推轨迹模拟与有效毒源地的判定:**以上述最适生物参数对武义 2009 年 6 月 25 日到 7 月 17 日分 6 个时段进行回推轨迹模拟, 模拟结束后, 还需要根据白背飞虱食性、起飞的日节律特性、与风速的关系等生物学特性, 剔除其中的无效迹线。先删除起飞时间内近地面风速  $> 3 \text{ m/s}$  以及运行过程中各高度层风速  $< 1.64 \text{ m/s}$  的轨迹, 因为近地面风速  $> 3 \text{ m/s}$  时, 白背飞虱不起飞, 而在风速  $< 1.64 \text{ m/s}$  的情况下, 白背飞虱会在空中作短暂的主动飞行, 出现“洄游”和“乱迁”现象, 故都视为无效轨迹(Rosenberg and Magor, 1987)。此外, 还需确定回推轨迹的终点时刻均为当地白背飞虱的起飞时刻, 即轨迹终点(虫源地)正处于傍晚 19 时和凌晨 5 时;

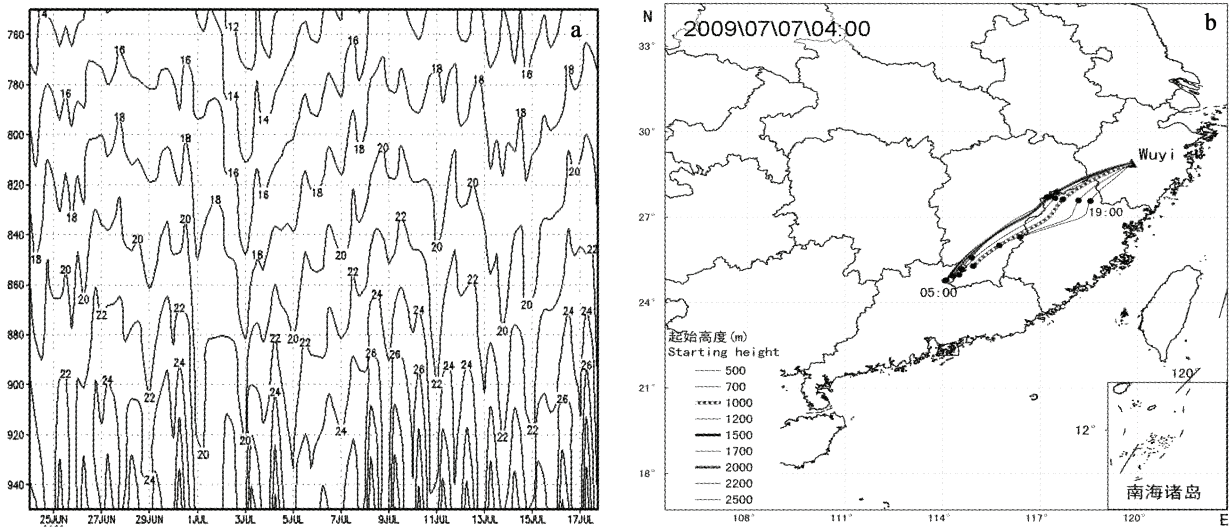


图 1 2009 年夏季浙江武义地区白背飞虱适迁高度范围内的温度日变化 (a) 及各起始高度上的回推轨迹 (b)

Fig. 1 The daily changes of air temperature at the altitudes of migration pathways of white-backed planthoppers (WBPH) in summer, 2009 (a) and the backward trajectories of the immigration population of WBPH starting at different heights (b) in Wuyi, Zhejiang in 2009

图 b 中各轨迹的起始高度由南向北依次升序排列, 19:00 和 05:00 处的圆点示傍晚和凌晨起飞的白背飞虱的轨迹终点, 即虫源地范围。The starting height of each trajectory is arrayed ascending from south to north successively, and the dots show the source regions of WBPH which take-off during dusk or dawn.

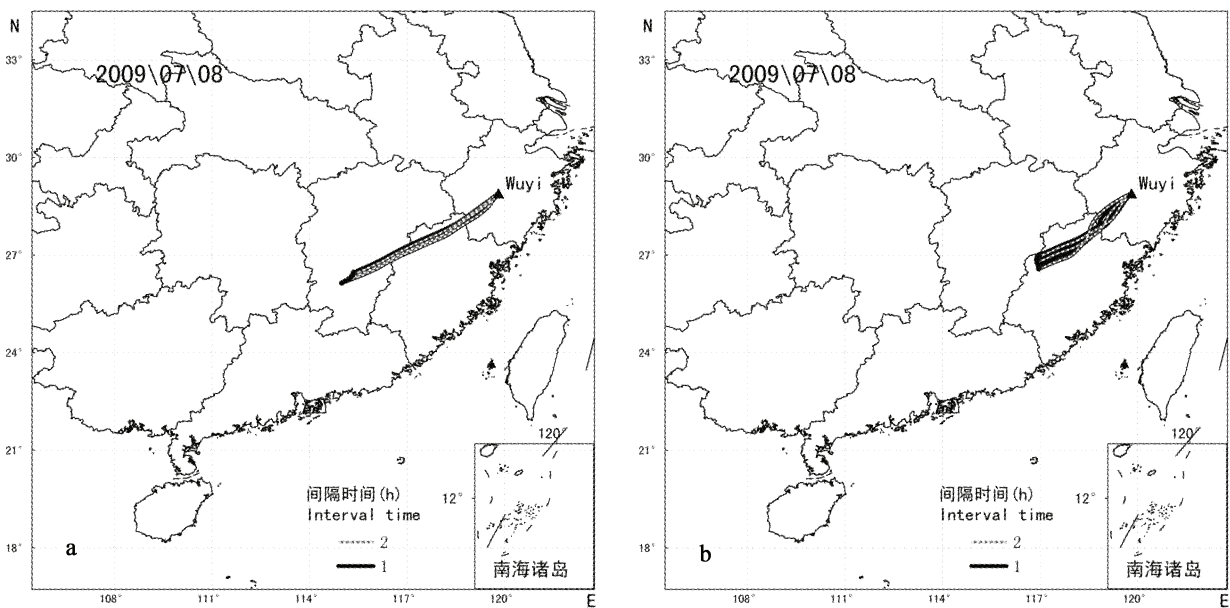


图 2 武义县 2009 年 7 月 8 日 850 hPa 高度上不同间隔时间回推轨迹

Fig. 2 The backward trajectories of immigrated WBPH in Wuyi on 850 hPa with different interval hours between each starting times on July 8, 2009

a: 虫源地 19:00 起飞的回推轨迹 Take-off at 19:00; b: 虫源地 05:00 起飞的回推轨迹 Take-off at 05:00 in the source regions. 图中黑点为可能的虫源区域。The dots are the possible source regions.

轨迹终点(虫源地)为水稻种植区, 且存在迁出虫源(长翅型成虫)。

根据以上的依据, 删除所有的无效轨迹, 所得

到的回推轨迹终点范围即为可靠性较大的有效的虫源地分布范围。根据江苏省农业科学院植物保护研究所周益军研究员提供的经室内鉴定的 2009

年南方水稻黑条矮缩病发病区域的资料及部分官方网站的发病资料, 利用 ArcGIS 地理信息系统软件将有效虫源地与发病区域进行叠加, 两者重合部分即为浙江武义 2009 年 SRBSDV 的毒源地。

**1.2.4 虫源地顺推轨迹模拟验证回推结果的正确性:**白背飞虱在随风运行时, 通过对适宜风温场的选择来调节其水平运行的高度(翟保平和张孝羲, 1993), 此后在迁飞过程中随气压和风场等的变化可不断改变其水平运行的高度。所以回推轨迹分析中的迁飞高度、起飞或降落所用时间或具体的续航时间上都有可能存在一定的误差。因此还需要

从回推虫源地和发病区域叠加分析后所得的毒源地范围内选择若干地点, 用相应的起始时刻、巡航高度和续航时间, 进行顺推轨迹模拟, 来验证回推结果中毒源地区域的正确性。

## 2 结果与分析

### 2.1 浙江省武义县灯下诱虫情况

2009 年从 6 月 25 日至 7 月 17 日, 浙江省武义县早期诱虫灯下共出现 7 次明显灯下虫峰, 其中 6 月 30 日灯下虫量高达 269 头, 但 7 月 11 日, 12 日和 14 日, 灯下诱虫量均为 0(图 3)。

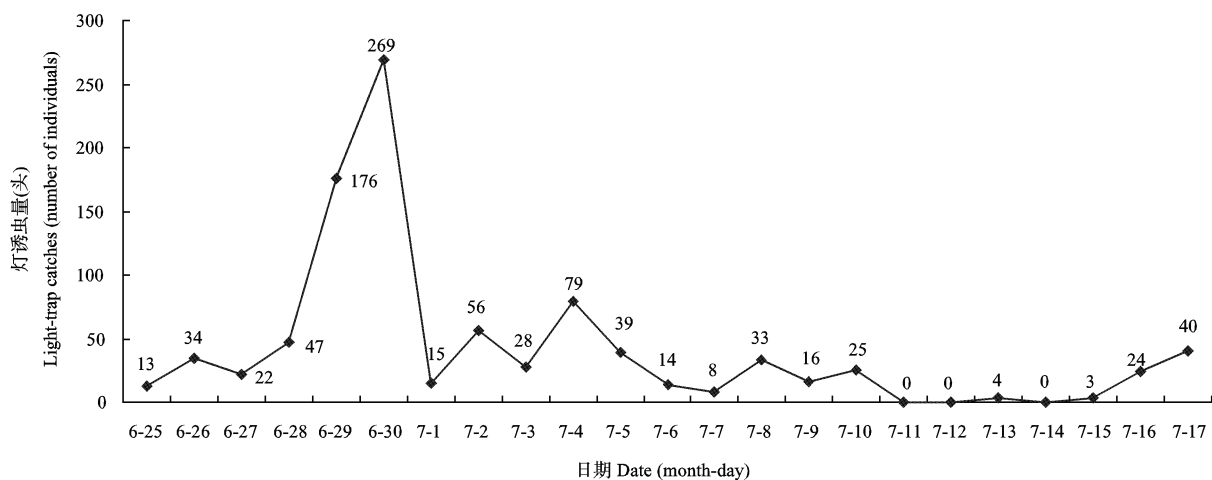


图 3 武义县 2009 年 6 月 25 日至 7 月 17 日白背飞虱灯下诱虫量

Fig. 3 Light-trap catches of white-backed planthoppers in Wuyi, Zhejiang from June 25 to July 17, 2009

### 2.2 白背飞虱虫源地和毒源地范围分析

本研究对各主要降虫时段的水平气流、垂直速度和降水情况进行分析, 以期阐明各迁入时期的天气背景, 为南方水稻黑条矮缩病毒的传播提供天气学方面的依据。

回推轨迹分析结果表明, 福建、江西南部、广东和广西东北部均可作为浙江武义提供白背飞虱虫源(表 1), 且这四省区都在 2009 年全国南方水稻黑条矮缩病发病区域范围之内, 因此浙江省武义县发现的南方水稻黑条矮缩病毒极有可能是这些区域迁出的白背飞虱携带并传递到当地水稻上的。

6 月 28 - 30 日: 6 月 30 日灯诱结果显示有 269 头的白背飞虱灯下最高虫峰, 本时段内, 江西南部、广东、广西东北部地区均有白背飞虱迁入浙江武义, 其中广东省的虫源概率较其他省区偏高(表 1, 图 4: a)。广东和广西在 6 月底至 7 月初早稻田处于蜡熟至黄熟期, 有利于这些区域的白背飞虱迁

出。江西省 6 月 26 日的田间调查结果显示该地区早稻田白背飞虱成虫达到百丛 200 ~ 300 头, 保证了江西白背飞虱迁出虫源的存在。这些显著的白背飞虱虫源地中, 有 SRBSDV 发病记录的广东西南部稻区为本时段内武义县的主要供毒源地(图 4: a)。

6 月 29 - 30 日, 中心位于内蒙古东部地区高空的强低涡系统缓慢东移, 低涡后部不断有冷空气南下, 同时副高西伸北抬, 西南低空急流加强北上, 850 hPa 的风速达到 1216 m/s(图 5: a), 使得广东西南部发病地区, 如阳江市、湛江市、汕尾市等地的 SRBSDV 随当地迁出的白背飞虱顺风北上到达长江中下游地区。同时, 6 月 30 日 08:00 浙江武义上空 850 hPa 高度上的垂直速度值达到 0.3 Pa/s(图 6: a)。此外, 西南低空急流带来的暖湿气流与北方冷空气汇合, 造成长江中下游地区至西南地区东部一带出现强降水过程(图 7)。白背飞虱由于自身飞行能力有限, 无法穿越这一强降雨带, 因此降

表 1 回推轨迹分析得到的白背飞虱虫源地的可能范围及其概率分布

Table 1 The possible source regions of WBPH and its distribution probability from backward trajectory analysis

时段(月/日) Date (month/day)	主气流型 Main airflow	起飞时间 Departure time	区域 Region	虫源地分布概率 Distribution probability (%)
06/25 - 06/27	偏南气流型 Southerly	19:00	闽南 Southern Fujian	75.0
			粤北 Northern Guangdong	25.0
		05:00	闽中南 Southern-central Fujian	100.0
		19:00	粤中 Middle Guangdong	42.9
06/28 - 06/30	西南气流型 Southwest		粤西南 Southwest Guangdong	57.1
		05:00	赣南 Southern Jiangxi	9.3
			广东 Guangdong	81.4
			桂东 Eastern Guangxi	9.3
07/04 - 07/05	偏南气流型 Southerly	19:00	闽中 Middle Fujian	25.0
			闽西 Western Fujian	75.0
		05:00	闽西 Western Fujian	83.3
		19:00	赣南 Southern Jiangxi	33.3
07/06 - 07/07	西南气流型 Southwest		粤北 Northern Guangdong	66.7
		05:00	赣南 Southern Jiangxi	84.8
			粤北 Northern Guangdong	15.2
		19:00	闽西 Western Fujian	21.4
07/08 - 07/09	西南气流型 Southwest		赣西南 Southwest Jiangxi	78.6
		05:00	赣东 Eastern Jiangxi	100.0
07/16 - 07/17	偏南气流型 Southerly	19:00	闽中南 Southern-central Fujian	100.0

虫区集中在雨带的南缘。从而携毒白背飞虱在武义县集中降落,形成该地区晚稻育秧期的最大降虫量及传染病毒的主要时段。

7月6-7日:轨迹回推分析显示本时段的可能虫源地在江西南部 and 广东北部地区,有效毒源地如江西省的上犹县、永新县、万安县等均在该区域内(图4:b),但是该时段内并没有明显有利于白背飞虱远距离迁飞和集中降落的天气条件,因此,从有效毒源地迁入的白背飞虱仅为主动零散降落,且为次要传毒时段。

7月8-9日:7月8日灯诱虫量出现33头的小高峰,可能的虫源地为江西中南部地区以及福建的中西部地区,两省的发病区域和该虫源区部分吻合(图4:c),但与上一时段相似的是本时段仍没有明显有利的天气条件,因此,本时段的毒源区迁入虫量仍为主动零散降落,并为次要传毒时段。

7月16-17日:回推轨迹显示,本时段的可能虫源地为福建中南部地区,据江苏省农业科学院检

验的送检资料显示福建确实存在SRBSDV,虽然还没有具体的发病地点资料(图4:d)。

由福建农业信息网的水稻种植制度相关资料可知,2009年福建的双季稻和单季中稻的种植比例为1:1,且7月中旬当地早稻已处于黄熟期,中稻也到达孕穗期,此外,6月下旬为福建中南部地区稻飞虱的主要迁入峰期,因此,本时段恰好是福建中南部地区白背飞虱大量迁出的时期。

水平风场图显示,从7月16日02:00至7月17日02:00,850 hPa高度上持续的8~10 m/s的偏南风转东南风,可将福建中部地区的白背飞虱携带到浙江武义(图5:b),并且7月17日20:00武义上空850 hPa高度出现0.3 Pa/s的下沉气流(图6:b),促使迁飞到这一区域的白背飞虱携毒集中降落,7月17日的灯诱虫量达到40头的高峰。这也是白背飞虱携带南方水稻黑条矮缩病毒进入浙江武义的又一主要时期。

### 2.3 毒源地分布情况可信度的验证

顺推结果表明：从 6 个时段中已知的毒源区域（虫源地与发病区相叠加区域）选择 7 个代表性地

点作顺推轨迹分析，其迁飞方向均指向浙江武义稻区(图 8)。从而说明所有回推轨迹模拟所得的可能毒源地区域分布情况是可信的。

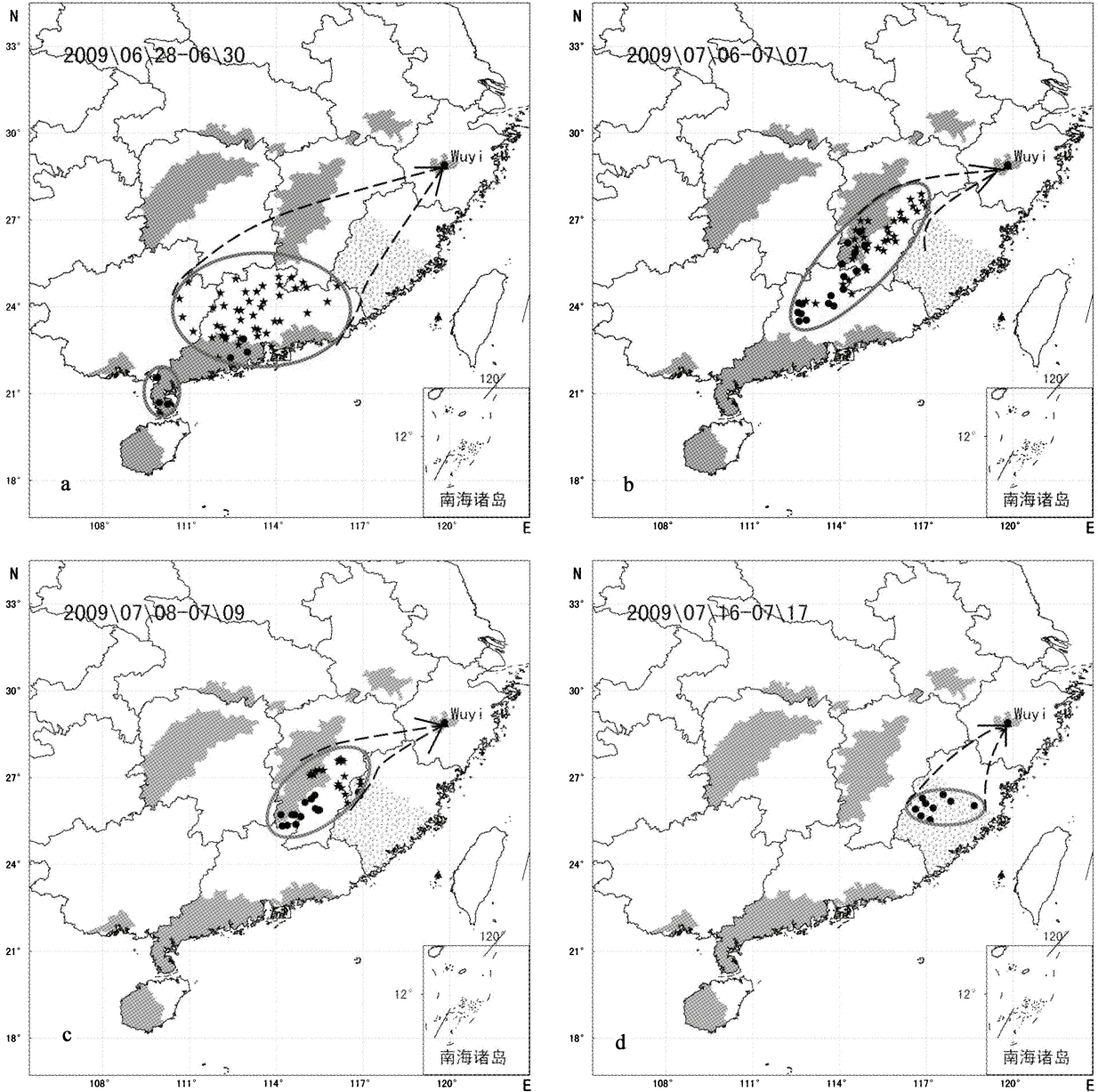


图 4 白背飞虱可能虫源地区域与发病地区的叠加

Fig. 4 Overlapping of the virus infected area and the possible source regions of WBPH through backward trajectory simulations ★为 05:00 起飞，• 为 19:00 起飞的白背飞虱虫源地分布区域。其中圈起的区域为各时段可能的虫源地范围，阴影区域示 2009 年有具体发病资料的地区，虚点区域表示有 SRBSDV 发病资料，但尚不知具体发病地点的地区。Five-pointed stars represent the WBPH source regions take-off at dawn, while dots represent the source regions take-off at dusk. The circled regions are the probable source regions during different time periods. The shadowed regions are the specific places with SRBSDV data, and the virtual point region represents the area with SRBSDV data, but no specific places.

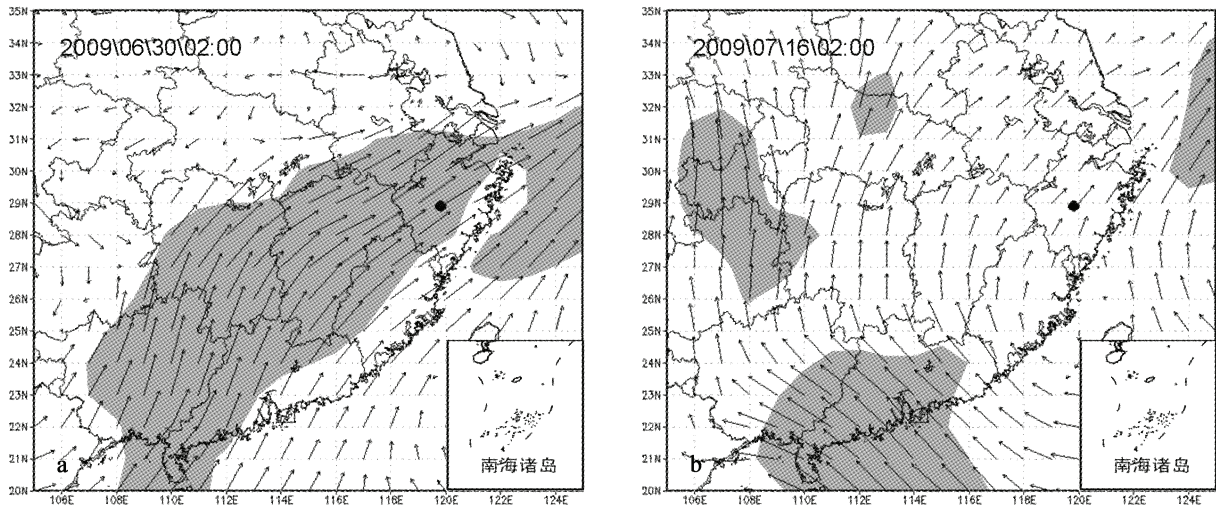


图5 2009年武义县主要迁入峰期02:00时850 hPa上的水平风场(m/s)

Fig. 5 Horizontal wind field (m/s) on 850 hPa at 02:00 (BJT) during the main immigration peaks in Wuyi, Zhejiang in 2009. 阴影部分为风速大于12 m/s(低空急流盛行)的区域。黑点表示武义县(下同)。The shadowed areas are the distribution of low level jet (wind speeds greater than 12 m/s). The black spot is Wuyi (the same below).

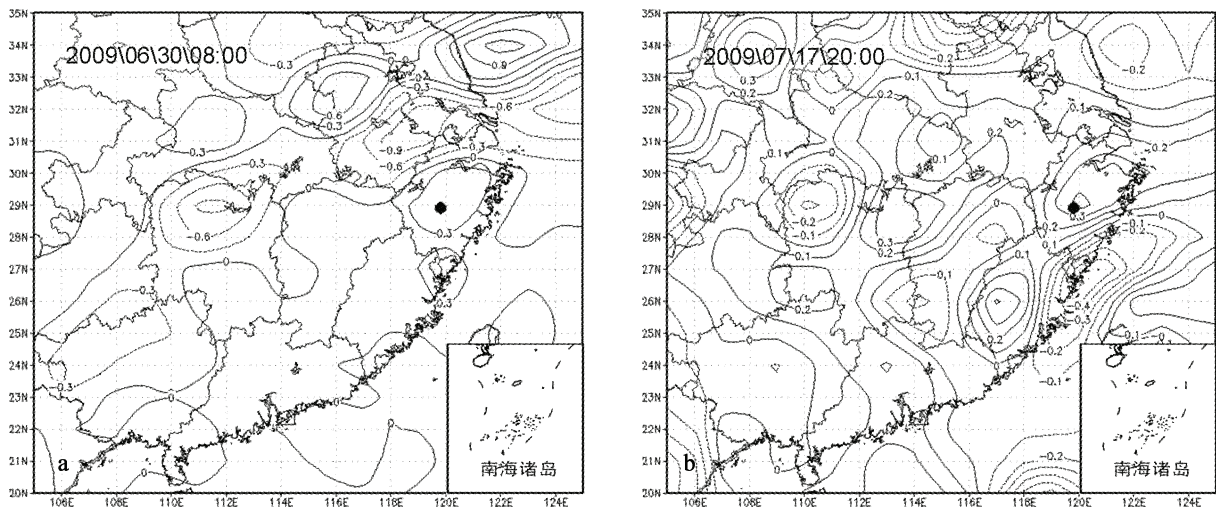


图6 2009年武义县主要迁入峰期850 hPa高度上的垂直速度(Pa/s)

Fig. 6 Vertical velocity (Pa/s) on 850 hPa during the major immigration peaks in Wuyi, Zhejiang in 2009

### 3 讨论

昆虫是少数几种把大气作为其生存空间重要组分的动物之一,昆虫迁飞是发生在大气圈最低层的一种复杂的现象和行为过程。对于昆虫而言,尤其像白背飞虱这类微小昆虫,由于其自身的飞行力不强,能用于飞行的时间很短,因此可将其在空中的运行过程视为空气质点的位移,从而可根据气流的运动来模拟其迁飞轨迹。

本文试验所用的轨迹分析模型 HYSPLIT 是美国 NOAA 的大气扩散模型的网络平台,是目前世界

上最权威的轨迹分析工具。但另一方面,昆虫的迁飞并非完全被动的随风漂流,而在很大程度上是主动的乘风远行,具有主动选择最适风温场的能力(翟保平和张孝羲,1993)。因此在轨迹分析时必须充分考虑白背飞虱自身的飞行行为和生物学特性,才可能得到合理有效的迁飞路径。为此,本研究通过设置尽可能合理的生物学参数,剔除各种无效轨迹,使得武义白背飞虱迁入种群的虫源地分布和发病区 SRBSDV 毒源地分布的模拟结果尽可能接近真实而具有相当的可信度。

文中诸多参数的设定并非“假设”,而是以充分的实验依据和野外观测为支撑的。如对迁飞高度



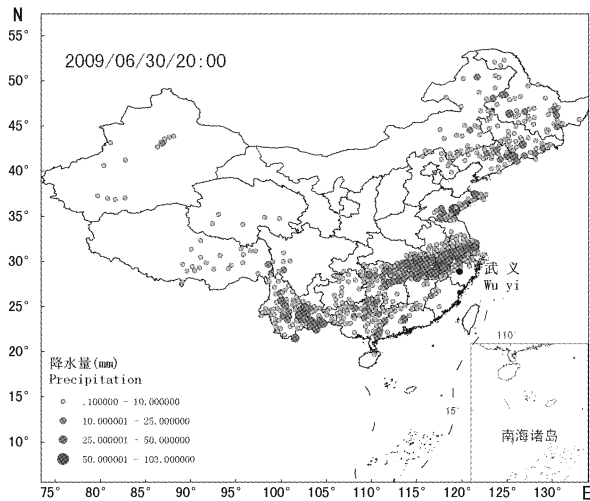


图 7 2009 年 6 月 30 日 20:00 地面降水分布  
 Fig. 7 Surface rainfall distribution at 20:00 (BJT) on June 30, 2009

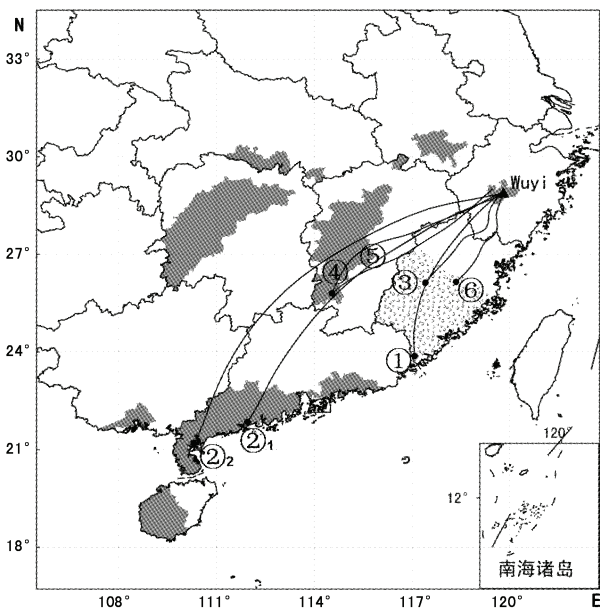


图 8 已知毒源区内各地的顺推轨迹分析  
 Fig. 8 The forward trajectories from each identified SRBSDV source region

各编号对应于武义县的 6 个迁入时段，图中的圆点示各顺推轨迹的起点。The number of each trajectory corresponds to the six immigration periods in Wuyi. Each dot represents the starting point of each trajectory.

的设置，依据是 20 世纪 80 年代的飞机航捕试验的实测数据(邓望喜, 1981)以及 1988 - 1991 年我们自己的雷达观测结果(Riley *et al.*, 1991, 1994, 1995)和本项研究中的数值实验。而时间参数的设置，依据是国内外多年来的室内试验、田间试验和雷达观测(陈若簾和程遐年, 1980; Padgham, 1983;

Rosenberg and Magor, 1983; Riley *et al.*, 1991, 1994; 张建新等, 1992; 汪远昆, 2003), 知其起飞时间在日没时刻到昏影终时之间及晨光始时到日出之间, 其续航时间一般不超过 30 h, 降落时间则是一个随机过程。因此除有特殊天气原因(强降水)外, 我们设定虫源地傍晚起飞的白背飞虱其回推轨迹的起始时刻范围为 19:00 到次日 01:00, 凌晨起飞的白背飞虱其回推轨迹的起始时刻范围为 19:00 到次日 06:00, 且以 2 h 或逐时起飞间隔时间作回推轨迹。此外, 我们还对轨迹的有效性设定了 3 个判据:(1) 回推轨迹的终止时刻必须是当地白背飞虱的起飞时刻, 即轨迹终点处(虫源地)正处于傍晚日落之后和凌晨日出之前;(2) 回推轨迹终点处(虫源地)必须是水稻种植区;(3) 必须存在迁出虫源(长翅型成虫)。据此剔除所有的无效轨迹, 所得回推轨迹的落点范围即为比较可靠的有效虫源地分布范围。再将此虫源地范围与发病区域(资料来自农业部制定实验室检测的权威数据)在 ArcGIS 上叠加, 两者重合部分即为浙江武义 2009 年 SRBSDV 的毒源地。可见, 通过上述生物学参数和有效性判据的合理设定, 本研所得结果虽然只是可能的虫源地和毒源地分布, 但却具有足够的可信度。

严格地讲, 要明确毒源地的确切分布, 应该具备可能的源、汇区之间白背飞虱毒源标记鉴定或至少带毒率的测定结果。但实际上, 虽然标放回收试验可以明确 SRBSDV 随白背飞虱迁飞个体在各稻区间传递的源汇关系, 且国内 20 世纪 60 年代和 70 年代的标放回收试验已成经典之作(李光博等, 1964; 南京农学院植保系等, 1981), 但这种跨区域的大规模标放回收试验在国内目前的社会背景下不具备可操作性。而 SRBSDV 虽然在 2001 年就已发现, 但 2001 - 2008 年间, 该病毒仅在我国华南局部地区零星危害(周国辉等, 2008), 因此一直未受到重视。直到 2009 年, SRBSDV 在我国和越南北部稻区突然大面积流行, 并造成水稻减产和失收(周国辉等, 2010)。目前传毒媒介白背飞虱的发生与 SRBSDV 的存续循环间的互动机制尚不清楚, 对白背飞虱带毒率的检测也仅限于室内的样本分析, 目前尚无有效的白背飞虱田间种群带毒率的检测技术, 因而无法明确白背飞虱迁飞种群的具体带毒率情况。但根据周国辉教授 2010 年的室内试验结果(私人通讯), 白背飞虱可高效率带毒(水稻病株上扩繁的二代群体带毒率超过 80%)和高效率传毒

(超过 90% 带毒白背飞虱若虫或成虫具传毒能力), 因此, 发病稻区起飞迁出的白背飞虱应该具有较高的带毒率从而将病区的 SRBSDV 携带到新稻区。本文所用的发病地区分布资料系由江苏省农业科学院周益军研究员的实验室和华南农业大学周国辉教授的实验室对全国送检样本带毒率测定的结果, 是目前所能得到的最全面、最具体、最系统的数据。将此发病区域与可能的虫源地范围叠加, 即可得到武义 2009 年 SRBSDV 的毒源地分布。

还应该指出的是, 白背飞虱迁入地与虫源地之间不仅仅是一对一的关系, 更多的时候是“多对多”的关系, 只分析武义一个地方的虫源地和毒源地似有不足。但 2009 年浙江省是首次出现 SRBSDV 显症和危害, 且仅发生在武义县局部地区。传毒媒介白背飞虱在此地并无本地越冬种群, 因此, 武义的 SRBSDV 必然由当年毒源地的白背飞虱携毒迁入所致。而且极其幸运的是, 在武义最先显症也是病情最重的那片秧田旁边恰有一盏诱虫灯, 其上灯虫量真实反映了当时携毒虫源的迁入动态, 为本文的回推轨迹模拟和天气学背景分析及虫源地与发病区的叠加分析提供了绝佳的虫情数据。据此, 我们模拟确定了武义 SRBSDV 毒源地分布范围, 并随机抽取毒源区中数个地点进行顺推轨迹模拟, 验证了回推结果的可靠性。作者已利用同样的方法分析了江西 4 个县和安徽 1 个区 2009、2010 年的 SRBSDV 毒源地分布情况, 但由于它们分属不同稻区或白背飞虱发生区, 白背飞虱传毒的时空条件均不相同, 要在同一篇文章中阐述显得篇幅过大, 故将另文发表。

水稻感染 SRBSDV 后一般经过 10 d 左右就会逐渐显症, 且发病症状因染病时期不同而异。武义县在晚稻育秧期感病, 症状显示为稻株严重矮缩, 不能拔节, 重病株早枯死亡, 且在插秧一周后迟迟不发棵起苗。但当地农民误以为是水稻秧龄过长, 机插伤根所致, 直至 9 月上旬才因水稻明显矮化和不能抽穗而引起重视, 这与当地初发此病、人们对水稻染病后显症情况不了解有关。另外, 白背飞虱在当地 7 月第 6 候和 8 月中旬还有迁入高峰, 而此时晚稻已进入分蘖拔节期, 即使感病也没有明显症状。但可以作为白背飞虱秋季回迁的毒源稻株, 进而导致我国华南稻区的病毒蓄积量增加。

**致谢** 江苏省农业科学院植物保护研究所周益军研究员和华南农业大学周国辉教授提供了相关病

情资料, 审改本文并提出宝贵建议, 在此一并致谢。

## 参 考 文 献 (References)

- Chen RC, Cheng XN, 1980. The take-off behavior of brown planthopper *Nilaparata lugens* (Stål) and its synchronous relations to the biological rhythm and environmental factors. *Journal of Nanjing Agricultural College*, (2): 42–49. [陈若簾, 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]
- Cuong HV, Hai NV, Man VT, Matsumoto M, 2009. Rice dwarf disease in North Vietnam in 2009 is caused by Southern rice black-streaked dwarf virus (SRBSDV). *Bulletin of the Institute of Tropical Agriculture*, Kyushu University, 32(1): 85–92.
- Deng WX, 1981. A general survey on seasonal migration of *Nilaparata lugens* (Stål) and *Sogatella furcifera* (Horváth) (Hemiptera: Delphacidae) by means of airplane collections. *Acta Phytophylacica Sinica*, 8(2): 73–80. [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): 73–80]
- Department of Plant Protection, Nanjing Agricultural College, Institute of Protection, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Chenzhou Prefecture Institute of Agriculture, Hunan Province, Bureau of Agriculture Guilin Prefecture Guangxi Zhuangzu Autonomous Region, 1981. Test on the releasing and recapturing of marked planthoppers, *Nilaparata lugens* and *Sogatella furcifera*. *Acta Ecologica Sinica*, 1(1): 49–53. [南京农学院植保系, 广东农科院植保所, 湖南郴州地区农科院, 广西桂林地区农业局, 1981. 褐飞虱、白背飞虱的标记回收试验. 生态学报, 1(1): 49–53]
- Hu GW, Xie MX, Wang YC, 1988. A suggestion for delimitation of the incidence areas of white-backed planthopper of China. *Acta Entomologica Sinica*, 31(1): 42–49. [胡国文, 谢明霞, 汪毓才, 1988. 对我国白背飞虱的区划意见. 昆虫学报, 31(1): 42–49]
- Li KP, Wong HS, Woo WS, 1964. Route of the seasonal migration of the oriental armyworm moth in the eastern part of China as indicated by a three-year result of releasing and recapturing of marked moths. *Acta Phytophylacica Sinica*, 8(2): 101–110. [李光博, 王恒祥, 胡文绣, 1964. 粘虫季节性危害假说及标记回收试验. 植物保护学报, 8(2): 101–110]
- Liu QX, Zhang GF, 1984. Studies on flight behavior of white-backed planthopper, *Sogatella furcifera*. *Entomological Knowledge*, 21(6): 241–243. [刘芹轩, 张桂芬, 1984. 白背飞虱飞翔活动研究. 昆虫知识, 21(6): 241–243]
- National Coordinated Research Group for White Back Planthoppers, 1981. Studies on the migration of white back planthoppers (*Sogatella furcifera* Horváth). *Scientia Agricultura Sinica*, 5: 25–31. [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: 25–31]
- Padgham DE, 1983. Flight fuels in the brown planthopper *Nilaparata lugens* (Stål). *Journal of Insect Physiology*, 29(1): 95–99.

- Riley JR, Cheng XN, Zhang XX, Reynolds DR, Xu GM, Smith AD, Cheng JY, Bao AD, Zhai BP, 1991. The long-distance migration of *Nilaparvata lugens* (Stål) (Delphacidae) in China: radar observations of mass return flight in the autumn. *Ecological Entomology*, 16: 471–489.
- Riley JR, Reynolds DR, Smith AD, Edwards AS, Zhang XX, Cheng XN, Wang HK, Cheng JY, Zhai BP, 1995. Observations of the autumn migration of the rice leaf roller *Cnaphalocrocis medinalis* and other moths in eastern China. *Bulletin of Entomological Research*, 85: 397–414.
- Riley JR, Reynolds DR, Smith AD, Rosenberg LJ, Cheng XN, Zhang XX, Xu GM, Cheng JY, Bao AD, Zhai BP, Wang HK, 1994. Observations of the autumn migration of *Nilaparvata lugens* and other pests in east central China. *Bulletin of Entomological Research*, 84: 389–402.
- Rosenberg LJ, Magor JI, 1983. Flight duration of the brown planthopper *Nilaparvata lugens* (Homoptera: Delphacidae). *Ecological Entomology*, 8: 341–350.
- Rosenberg LJ, Magor JI, 1987. Prediction windborne displacements of the brown planthopper, *Nilaparvata lugens* from synoptic weather data. *Journal of Animal Ecology*, 56: 39–51.
- Vien NV, 2009. The Occurrence of new rice virus disease in Northern Vietnam. International Workshop on Rice Virus and Vector Insects, Hanoi-Vietnam, 28 November, 2009.
- Wang Q, Yang J, Zhou GH, Zhang HM, Chen JP, Adams MJ, 2010. The complete genome sequence of two isolates of Southern rice black-streaked dwarf virus, a new member of the genus *Fijivirus*. *Journal of Phytopathology*, 158: 733–737.
- Wang YC, Hu GW, Xie MX, 1982. A study of upper winds analysis for the migratory path of the white-back planthopper and the brown planthopper in China. *Acta Phytophylacica Sinica*, 9(2): 73–82. [汪毓才, 胡国文, 谢明霞, 1982. 我国白背飞虱和褐稻虱迁飞路径的气流分析. 植物保护学报, 9(2): 73–82]
- Wang YK, 2003. Migration Biology and Population Dynamics of *Sogatella furcifera* (Horváth). MSc Thesis, Nanjing Agricultural University, Nanjing. 28–56. [汪远昆, 2003. 白背飞虱的迁飞生物学和田间种群动态. 南京: 南京农业大学硕士学位论文. 28–56]
- Zhai BP, 2004. Computing the day length for programming insect behavior. *Entomological Knowledge*, 41(2): 178–184. [翟保平, 2004. 昆虫行为研究中日长的计算. 昆虫知识, 41(2): 178–184]
- Zhai BP, Zhang XX, 1993. Behavior of migrating insects: adaptation and selection to atmospheric environment. *Acta Ecologica Sinica*, 13(4): 356–363. [翟保平, 张孝羲, 1993. 迁飞过程中昆虫的行为: 对风温场的适应与选择. 生态学报, 13(4): 356–363]
- Zhang HM, Yang J, Chen JP, Adams MJ, 2008. A black-streaked dwarf disease on rice in China is caused by a novel fijivirus. *Archives of Virology*, 153: 1893–1898.
- Zhang JX, Zhang XX, Luo WH, 1992. The flight capacity of white-backed planthopper, *Sogatella furcifera*. *Entomological Knowledge*, 29(2): 65–69. [张建新, 张孝羲, 罗卫华, 1992. 白背飞虱飞行能力的研究. 昆虫知识, 29(2): 65–69]
- Zhou GH, Wen JJ, Cai DJ, Li P, Xu DL, Zhang SG, 2008. Southern rice black-streaked dwarf virus: a new proposed *Fijivirus* species in the family Reoviridae. *Chinese Science Bulletin*, 58(20): 2500–2508. [周国辉, 温锦君, 蔡德江, 李鹏, 许东林, 张曙光, 2008. 呼肠孤病毒科斐济病毒属一新种: 南方水稻黑条矮缩病毒. 科学通报, 58(20): 2500–2508]
- Zhou GH, Zhang SG, Zou SF, Xu ZW, Zhou ZQ, 2010. Occurrence and damage analysis of a new rice dwarf disease caused by Southern rice black-streaked dwarf virus. *Plant Protection*, 36(2): 144–146. [周国辉, 张曙光, 邹寿发, 许兆伟, 周志强, 2010. 水稻新病害南方水稻黑条矮缩病发生特点及危害趋势分析. 植物保护, 36(2): 144–146]

(责任编辑: 袁德成)