

悬铃木方翅网蝽飞行能力测试及 远距离扩散轨迹分析

卢绍辉^{1,2}, 魏美才^{1,3,*}, 袁国军², 崔建新⁴, 梅象信²

(1. 中南林业科技大学昆虫系统和进化生物学实验室, 长沙 410004; 2. 河南省林业科学研究院, 郑州 450008;
3. 江西师范大学昆虫进化生物学实验室, 南昌 330022; 4. 河南科技学院, 河南新乡 453003)

摘要:【目的】摸清温度、日龄和性别对悬铃木方翅网蝽 *Corythucha ciliata* 成虫飞行能力的影响, 分析其远距离扩散轨迹。【方法】本研究通过飞行磨系统、高空系留气球和 HYSPLIT-4 模型相结合的方法测定了悬铃木方翅网蝽飞行能力及模拟其种群随气流远距离扩散轨迹。【结果】飞行磨研究结果表明, 随着悬铃木方翅网蝽日龄的增加其飞行距离和飞行时间逐渐增加, 10 日龄成虫飞行距离和飞行时间最长, 随后逐渐下降。不同测试温度(19℃, 22℃, 25℃, 29℃和 31℃)下, 10 日龄成虫飞行距离和飞行时间在 19℃时最小, 随着温度的升高飞行距离和飞行时间都逐渐增加, 在 25℃时两者都达到最大, 随后逐渐降低, 在 25℃时的飞行距离显著大于其他测试温度下; 28℃时平均飞行速度最快, 显著高于其他测试温度下。雌虫在飞行距离和飞行时间上显著高于雄虫。高空系留气球观测结果表明, 在 5 和 10 m 处悬铃木方翅网蝽种群密度较大, 随着高度的上升诱捕数量逐渐下降, 在 35 m 高度处种群数量最低, 随后又随着高度的升高诱捕数量逐渐增加, 65 m 以上高度未能诱捕到试虫。利用 HYSPLIT-4 模型模拟了 2015 年悬铃木方翅网蝽由南向北的扩散路线为: 河南省郑州市—山西省晋城市陵川县—长治市沁县—沂州市繁峙县—河北省张家口市。【结论】室内悬铃木方翅网蝽成虫在 10 日龄、25℃温度下飞行能力最强。田间悬铃木方翅网蝽成虫可随气流上升至 65 m 高度, 具备随气流进行低空扩散的能力。

关键词: 悬铃木方翅网蝽; 飞行能力; 飞行磨; HYSPLIT-4 模型; 扩散轨迹

中图分类号: Q968 文献标识码: A 文章编号: 0454-6296(2018)09-1097-09

Flight capacity test and trajectory analysis of long-distance dispersal of *Corythucha ciliata* (Hemiptera: Tingidae)

LU Shao-Hui^{1,2}, WEI Mei-Cai^{1,3,*}, YUAN Guo-Jun², CUI Jian-Xin⁴, MEI Xiang-Xin² (1. Laboratory of Insect Systematics and Evolutionary Biology, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China; 2. Henan Academy of Forestry, Zhengzhou 450008, China; 3. Laboratory of Insect Evolutionary Biology, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China; 4. Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang, Henan 453003, China)

Abstract: 【Aim】 This study aims to investigate the effects of temperature, age and sex on the flight capacity of the alien species *Corythucha ciliata*, and to analyze its long-distance diffusion trajectory.

【Methods】 The flight capacity of *C. ciliata* adults and the diffusion trajectory of the population with air flow were measured by using the flight mill system, the high altitude tethered balloon and the HYSPLIT-4 model.

【Results】 The results revealed that the flight distance and flight time of *C. ciliata* adults were

基金项目: 河南省林业科学研究院基本科研业务费“外来入侵生物方翅网蝽成灾机理及综合控制技术研究”(162102410033)

作者简介: 卢绍辉, 男, 1978 年 5 月生, 河南禹州人, 硕士, 副研究员, 研究方向为森林保护, E-mail: 563518244@qq.com

* 通讯作者 Corresponding author, E-mail: weime@126.com

收稿日期 Received: 2018-03-19; 接受日期 Accepted: 2018-06-28

age-dependent, reaching the peak at 10 d after emergence and then decreasing gradually. The flight distance and flight time of 10 day-old adults were the minimum at 19°C among the test temperatures (19, 22, 25, 29 and 31°C), gradually increased with the increase of temperature, reached the peak at 25°C, and then decreased gradually. The flight distance at 25°C significantly increased compared with that at the other test temperatures. The average flight speed reached the maximum at 28°C, which was significantly higher than that at the other temperatures. The flight distance and flight time of females were significantly higher than those of males; however, males had significantly higher flight speed than females. The results of the high altitude tethered balloon survey showed that the population density of *C. ciliata* reached the maximum at 5 and 10 m. With the increase of altitude, the number of insects caught by trap decreased gradually, the population density at 35 m reached the minimum, and no adults were trapped over 65 m. The southern-northern diffusion routes of *C. ciliata* in 2015 simulated using the HYSPLIT-4 model were from Zhengzhou city, Henan province to Lingchuan county of Jincheng city, and then to Qinxian county of Changzhi city, and then to Fanshi county of Yizhou city, Shanxi province, and finally to the Northeast of Zhangjiakou city, Hebei province. 【Conclusion】 In the laboratory the 10 day-old adults of *C. ciliata* at 25°C show the strongest flight capacity. In fields *C. ciliata* adults could rise up to the altitude of 65 m with air flow, and have the ability to diffuse at low altitude with air flow.

Key words: *Corythucha ciliata*; flight capacity; flight mill; HYSPLIT-4 model; diffusion trajectory

悬铃木方翅网蝽 *Corythucha ciliata* 属半翅目 (Hemiptera) 网蝽科 (Tingidae), 主要危害悬铃木属植物, 成虫和若虫群集在叶片背面刺吸汁液, 影响植株生长和观赏价值等, 严重时造成树木死亡 (Soria *et al.*, 1991; Mazzon and Girolami, 2000)。该虫原分布于美国中东部和加拿大东部地区 (Halbert and Meeker, 1998), 2002 年首次在我国湖南长沙发现 (Streito, 2006), 2006 年在武汉大发生 (李传仁等, 2007), 此后, 华东、华中、西南等地区的多个城市相继发现该虫的传入 (Ju *et al.*, 2009), 2012 年已扩散至北京市怀柔区 (虞国跃等, 2014)。

悬铃木方翅网蝽具有扩散速度快、危害程度严重等特性, 传入新发生区后, 能很快形成相当稳定的高密度种群 (Maceljski and Balarin, 1972, 1974)。在日本, 自 2001 年首次为名古屋发现该虫传入, 随后的 2 年内, 其分布区迅速扩张到东京、横滨、清水、松山和北九州等多个城市 (Tokihiro *et al.*, 2003); 在土耳其, 从 2007 年首次发现该虫后的 2 年里, 在北部地区扩散了 120 km² (Mutun, 2009)。悬铃木方翅网蝽因成虫翅很脆弱, 一般不作长距离飞行 (Halbert and Meeker, 1998), 但借助风力单次则可以迁移数千米, 这可能是该虫传入到一个新的地区以后, 在局部范围快速扩散的主要原因之一 (Ju *et al.*, 2009)。目前, 国内外对于悬铃木方翅网蝽扩散方式的研究文献极少, 多数对其扩散方式的判断属于推测, 缺乏试验性数据的支撑。

昆虫飞行磨系统, 是研究昆虫飞行能力和飞行规律的重要技术手段, 自 Hocking (1953) 研制出第一部飞行磨以来, 已用于多种昆虫飞行行为的研究。我国科研工作者利用飞行磨系统对我国重要的农林害虫, 例如粘虫 *Leucania separata*、小地老虎 *Agrotis ypsilon*、棉铃虫 *Helicoverpa armigera*、亚洲玉米螟 *Ostrinia furnacalis* 等的飞行能力进行了测定 (张志涛和李光博, 1985; 翟保平和陈瑞鹿, 1989; 贾佩华和曹雅忠, 1992; 王振营等, 1994; 吴孔明和郭予元, 1996), 为研究其种群扩散规律和区域防治提供了重要依据。美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 与澳大利亚气象局联合开发的 HYSPLIT 平台是研究病原体、污染物随气流传播应用的一种轨迹分析模型, 国内外也应用其对风载迁飞昆虫的虫源地及迁出虫源可能的降落区域进行分析 (Duan *et al.*, 1998; María *et al.*, 2006; Challa *et al.*, 2008; Veriankaite *et al.*, 2010)。有关学者应用该模型分析了主要农田害虫, 例如麦蚜 (郁振兴等, 2011)、褐飞虱 *Nilaparvata lugens* (包云轩等, 2016)、麦红吸浆虫 *Sitodiplosis mosellana* (苗进等, 2011)、草地螟 *Loxostege sticticalis* (陈晓等, 2008)、稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis* (周立阳等, 1995)、稻飞虱 *Sogatella furcifera* (王政等, 2011) 等远程传播规律, 并利用传播特点和飞行能力预防和减轻在主要粮食产区的危害。

本研究利用飞行磨系统测定悬铃木方翅网蝽成

虫的飞行能力,利用高空系留气球诱捕的方法明确了悬铃木方翅网蝽的飞行高度,应用 HYSPLIT-4 模型模拟其种群随气流远距离扩散轨迹,以期阐明悬铃木方翅网蝽种群是否具有远距离迁飞的能力,摸清远距离扩散的规律和区域扩散的路径,为悬铃木方翅网蝽的动态监测和综合治理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验供试昆虫于 2015 年 6 月采自河南省郑州市惠济区,在河南省林业科学研究院实验室饲养。把采集到的悬铃木方翅网蝽幼虫放在塑料昆虫饲养盒中,放置悬铃木的新鲜叶片,叶柄用湿润脱脂棉包裹,使叶片保持足够水分,每隔 2 d 更换一次新鲜叶片,直至成虫羽化。测定仪器为河南科技学院提供的昆虫飞行磨微机采集系统,该系统由飞行磨采集控制主机、飞行磨和 PC 机软件组成。系留气球由中国科学院光电研究院提供;氦气由河南源正科技发展有限公司提供;黄板由佳多科工贸公司提供;迁入和迁出轨迹分析使用 HYSPLIT 软件,软件来自 www.arl.noaa.gov/hysplit.php。

1.2 飞行能力测试

1.2.1 不同日龄成虫飞行能力:测定 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 和 12 日龄共计 12 个日龄的悬铃木方翅网蝽成虫的飞行参数,每个龄期测定成虫为 25 头,测试在 $25 \pm 1^\circ\text{C}$,相对湿度 70% 左右,光周期为 12L: 12D 的密闭条件下进行。试验时间为 2015 年 7 月。

1.2.2 不同温度条件下 10 日龄成虫飞行能力:供试虫源为 10 日龄成虫,吊飞温度设定 19, 22, 25, 29 和 31°C 共 5 个温度,每个温度条件下测定成虫 25 头,测试在相对湿度 70% 左右,光周期为 12L: 12D 的密闭条件下进行。试验时间为 2015 年 7 月。

1.2.3 不同性别 10 日龄成虫飞行能力:选择羽化 10 日的雌雄虫各一组,每组数量均为 25 头。测试在 $25 \pm 1^\circ\text{C}$,相对湿度 70% 左右,光周期为 12L: 12D 的密闭条件下进行。试验时间为 2015 年 8 月。测试前,先用乙醚将试虫轻度麻醉,然后用毛笔将胸腹部连接处背面的毛除去,再用 502 胶粘接于小铜丝,测试时将小铜丝连接于飞行磨的吊臂上,连续测试 24 h。出现意外死亡或者因操作失误造成无法飞行的个体及时剔除,直至完成 25 头吊飞。记录并统

计飞行距离、速度、时间等数据。

1.3 远距离扩散轨迹分析

试验地点为郑州市惠济区黄河滩 (34.55°N , 113.36°E),海拔 92 m。试验时间为 2015 年 7 月 24 日-9 月 21 日。释放 1 个系留气球,释放高度 100 m,绳子上每隔 5 m 设置黄色长方形粘虫板(长 30 cm,宽 20 cm)。每天下午 17:00 时回收气球,统计各高度黄板上悬铃木方翅网蝽的数量。

1.4 数据统计与分析

使用 SPSS Statistics 20 对数据进行分析。不同温度、不同日龄悬铃木方翅网蝽成虫飞行能力测试数据经方差分析统计差异显著后,用 Duncan 氏新复极差法进行多重比较。不同性别成虫飞行能力测试数据分析用独立样本 *t* 检验法进行差异显著性测定。将粘有悬铃木方翅网蝽黄板的高度数据导入 HYSPLIT 软件,利用 HYSPLIT-4 前向(迁入)和后向(迁出)轨迹模式及当日的气象数据,以试验基地作为起始点,模拟悬铃木方翅网蝽种群的扩散路线。文中所用地图底图来源于 GoogleEarth 免费软件。

2 结果

2.1 不同日龄悬铃木方翅网蝽成虫的飞行能力

由表 1 可知,随着日龄的增加,悬铃木方翅网蝽成虫的飞行距离呈逐渐上升趋势,10 日龄以后,随着日龄继续增加,飞行距离逐渐下降。10 日龄成虫飞行距离最长,24 h 平均飞行距离可达到 1 361.75 m,与其他日龄成虫的飞行距离均存在显著差异。而 1, 2, 3 日龄成虫的飞行距离仅分别为 45.0, 88.42 和 130.64 m,不到 10 日龄成虫飞行距离的 1/10,说明日龄较低的成虫飞行能力也相对较差。

日龄对飞行时间的影响与飞行距离相似。随着日龄的增加,飞行时间也越来越长,10 日龄以后飞行时间开始逐渐下降。10 日龄成虫的飞行时间最长,24 h 平均飞行时间为 4 580.36 s。10 日龄成虫的飞行时间与 1, 2, 3, 7 日龄相比存在显著差异,与其他日龄无显著差异。

不同日龄成虫间的飞行速度无显著差异,说明日龄对悬铃木方翅网蝽成虫的飞行速度无影响。

2.2 不同温度下悬铃木方翅网蝽成虫的飞行能力

由表 2 可知,测试温度条件下,悬铃木方翅网蝽 10 日龄成虫的飞行距离在 19°C 时较小,随着温度的升高飞行距离逐渐增加,在 25°C 时达到最大,然后随着温度升高又逐渐下降。不同温度条件下成虫的

表 1 不同日龄悬铃木方翅网蝽成虫的飞行能力
Table 1 Flight capacity of *Corythucha ciliata* adults as a function of age

成虫日龄 Day-old of adult	试虫数量 Number of adults tested	平均飞行距离 Mean flight distance (m)	最大飞行距离 Maximal flight distance (m)	平均飞行时间 Mean flight time (s)	最大飞行时间 Maximal flight time (s)	平均飞行速度 Mean flight speed (m/s)	最大飞行速度 Maximal flight speed (m/s)
1	25	45.00 ± 8.96 a	102.42	438.41 ± 174.49 a	734.79	0.15 ± 0.02 a	0.25
2	25	88.42 ± 14.51 a	167.64	722.72 ± 235.17 a	1 303.27	0.17 ± 0.03 a	0.32
3	25	130.64 ± 68.92 a	843.83	864.94 ± 266.50 a	2 852.35	0.13 ± 0.03 a	0.33
4	25	417.47 ± 182.77 a	3 502.88	2 177.46 ± 969.91 ab	19 484.35	0.20 ± 0.03 a	0.50
5	25	515.74 ± 187.87 a	3 681.32	2 403.76 ± 854.13 ab	15 017.54	0.20 ± 0.03 a	0.58
6	25	537.65 ± 159.06 a	2 475.58	3 551.10 ± 1 209.69 ab	22 931.62	0.20 ± 0.03 a	0.57
7	25	230.83 ± 92.73 a	1 847.26	1 299.53 ± 344.95 a	6 031.19	0.17 ± 0.03 a	0.51
8	25	599.99 ± 248.06 a	1 886.84	3 272.96 ± 1 235.40 ab	9 699.05	0.16 ± 0.03 a	0.46
9	25	651.03 ± 368.04 a	5 527.95	2 120.95 ± 899.10 ab	14 234.85	0.22 ± 0.03 a	0.56
10	25	1 361.75 ± 538.86 b	6 060.76	4 580.36 ± 1 560.47 b	18 589.21	0.20 ± 0.04 a	0.46
11	25	783.63 ± 277.14 a	4 057.20	3 548.42 ± 1 484.54 ab	15 332.89	0.21 ± 0.03 a	0.48
12	25	513.87 ± 213.39 a	2 587.19	3 275.52 ± 743.07 ab	13 309.43	0.23 ± 0.02 a	0.52

表中数据为平均值 ± 标准差; 同列数据后不同字母示差异显著 ($P < 0.05$) (Duncan 氏新复极差法)。表 2 同。Data in the table are mean ± SD, and those followed by different letters are significantly different ($P < 0.05$) (Duncan's new multiple range test). The same for Table 2.

表 2 不同温度下悬铃木方翅网蝽成虫的飞行能力
Table 2 Flight capacity of *Corythucha ciliata* adults at different temperatures

温度(°C) Temperature	试虫数量 Number of adults tested	平均飞行距离 Mean flight distance (m)	最大飞行距离 Maximal flight distance (m)	平均飞行时间 Mean flight time (s)	最大飞行时间 Maximal flight time (s)	平均飞行速度 Mean flight speed (m/s)	最大飞行速度 Maximal flight speed (m/s)
19	25	242.90 ± 81.44 a	1 499.80	2 736.61 ± 1 307.86 a	26 137.24	0.15 ± 0.02 a	0.37
22	25	739.04 ± 252.85 ab	4 025.01	5 155.67 ± 2 033.34 a	43 418.01	0.19 ± 0.03 ab	0.43
25	25	1 160.53 ± 380.53 b	6 060.76	6 518.92 ± 2 588.25 a	54 706.80	0.18 ± 0.04 ab	0.81
28	25	748.84 ± 179.58 ab	3 249.66	3 231.84 ± 823.52 a	14 980.43	0.25 ± 0.04 b	0.69
31	25	351.96 ± 122.71 a	2 383.84	2 631.24 ± 965.09 a	19 088.32	0.16 ± 0.02 ab	0.43

平均飞行距离存在显著差异。25°C 温度条件下, 飞行距离最长, 平均累计飞行距离为 1 160.53 m, 最大飞行距离可达到 6 060.76 m; 19°C 温度条件下飞行距离与 25°C 相比存在极显著差异 ($P < 0.001$); 31°C 温度条件下飞行距离与 25°C 相比存在显著差异 ($P < 0.05$)。结果说明温度过低或过高均会在一定程度上影响悬铃木方翅网蝽的飞行能力。

不同温度条件下悬铃木方翅网蝽的平均飞行时间无显著差异 ($P > 0.05$), 说明在测试温度下, 温度对于悬铃木方翅网蝽的飞行时间没有影响。其中在 25°C 时, 24 h 内累计最长飞行时间可达到 54 706 s (约为 15 h), 说明悬铃木方翅网蝽具备较强的持续飞行能力。

19°C 时平均飞行速度最慢, 为 0.15 m/s, 温度为 28°C 时, 平均飞行速度最快, 可达到 0.25 m/s, 两者存在显著差异 ($P < 0.05$); 温度上升到 31°C, 飞行速度又降为 0.16 m/s, 但与 25°C 相比无显著差异

($P > 0.05$)。结果说明温度过低或过高均可影响悬铃木方翅网蝽的飞行速度。

2.3 不同性别悬铃木方翅网蝽成虫的飞行能力

由表 3 可以看出, 雌性成虫在平均飞行距离 ($t = 2.191$, $df = 141$, $P = 0.03$) 和平均飞行时间 ($t = 2.919$, $df = 141$, $P = 0.004$) 上显著高于雄虫, 雌虫的平均飞行距离和时间均为雄虫的 2 倍以上; 而雄虫的平均飞行速度 ($t = 2.014$, $df = 141$, $P = 0.04$) 显著高于雌虫。

2.4 悬铃木方翅网蝽远距离扩散轨迹分析

2.4.1 不同高度粘板捕获的悬铃木方翅网蝽数量:

由图 1 可见, 悬铃木方翅网蝽在 5 m 和 10 m 高度处种群密度较大, 平均每板可诱捕 20 头以上。随着高度的上升诱捕数量逐渐下降, 在 35 m 高度诱捕数量最低, 随后诱捕数量又随着高度上升逐渐增加, 65 m 以上高度未能诱捕到悬铃木方翅网蝽。

表 3 不同性别悬铃木方翅网蝽成虫的飞行能力
Table 3 Flight capacity of *Corythucha ciliata* adults as a function of sex

性别 Sex	试虫数量 Number of adults tested	平均飞行距离(m) Mean flight distance	最大飞行距离(m) Maximal flight distance	平均飞行时间(s) Mean flight time	最大飞行时间(s) Maximal flight time	平均飞行速度(m/s) Mean flight speed	最大飞行速度(m/s) Maximal flight speed
雌 Female	25	728.25 ± 145.36	6 060.76	3 428.18 ± 570.25	22 931.62	0.18 ± 0.01	0.57
雄 Male	25	329.11 ± 104.33	5 527.95	1 434.43 ± 344.84	14 498.80	0.21 ± 0.02	0.58

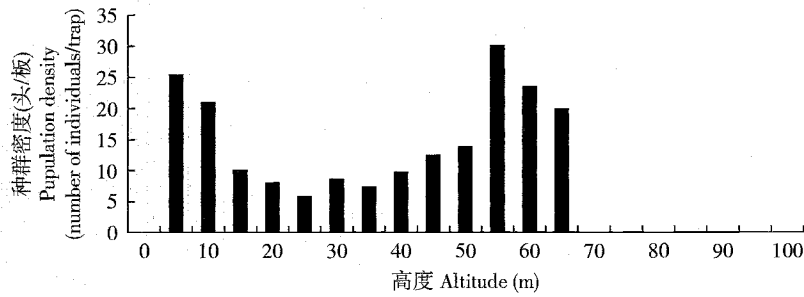


图 1 2015 年不同海拔高度层悬铃木方翅网蝽的种群密度(郑州)

Fig. 1 Population density of *Corythucha ciliata* in airborne at different altitudes in Zhengzhou in 2015

2.4.2 不同时期粘板诱捕的悬铃木方翅网蝽数量: 由图 2 可见,7 月中下旬低空可以诱捕到的成虫较少,到 8 月中下旬诱捕到的成虫数量急剧增加。8 月 22 日,平均单板诱捕数量为 24.54 头,之后诱捕数量逐渐减少。9 月中旬之后数量趋近为零。

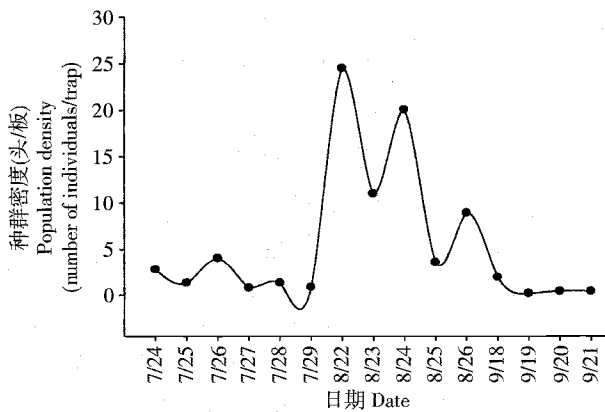


图 2 2015 年不同时期悬铃木方翅网蝽的种群动态(郑州)

Fig. 2 Population dynamics of *Corythucha ciliata* in Zhengzhou in different periods of 2015

2.4.3 随气流扩散路线分析:利用 HYSPLIT-4 后向(迁入)轨迹模型,模拟郑州市黄河滩试验点 7 月 24 日 8:00 时之前 24 h 内悬铃木方翅网蝽的迁入轨迹表明,虫源可能来自郑州地区西南部的登封市。在虫源地以 65 m 高度起始扩散,直线距离约为 92 km(图 3)。

利用 HYSPLIT-4 前向(迁出)轨迹模型,分析 7 月 24 日之后 24 h 郑州黄河滩试验点悬铃木方翅网蝽的迁出轨迹表明,虫源向北向迁飞进入山西省晋城市陵川县境内。直线距离约为 171 km(图 4)。

利用 HYSPLIT-4 软件模型和 2015 年 7 月下旬的气象数据,以郑州黄河滩试验点为起点,模拟了悬铃木方翅网蝽由南向北的扩散路线(图 5)。结果表明,7 月 24 日,悬铃木方翅网蝽第 2 代成虫 24 h 可扩散至山西省晋城市陵川县;48 h 后向西北方向扩散至长治市沁县境内;72 h 向北经太原市至沂州地区繁峙县,最后向东北方向扩散于 7 月 28 日至河北省张家口市境内。

3 讨论

研究结果表明悬铃木方翅网蝽成虫的飞行能力与日龄相关,随着日龄的增加,成虫的飞行距离和飞行时间均呈先上升再下降的趋势,10 日龄的成虫飞行能力最强。但不同日龄成虫的飞行速度无显著差异,说明飞行速度与成虫日龄无关。枣实蝇 *Carpomya vesuviana* 的飞行能力与日龄相关,随着日龄增加飞行能力逐渐增强(丁吉同等, 2014)。对绿盲蝽 *Apolygus lucorum* 飞行能力研究结果显示,1 日龄成虫飞行能力最弱,10 日龄飞行能力最强,随日龄增加而增加(Lu *et al.*, 2009)。悬铃木方翅网蝽的飞行能力随着日龄而增强,这可能是因为悬铃木

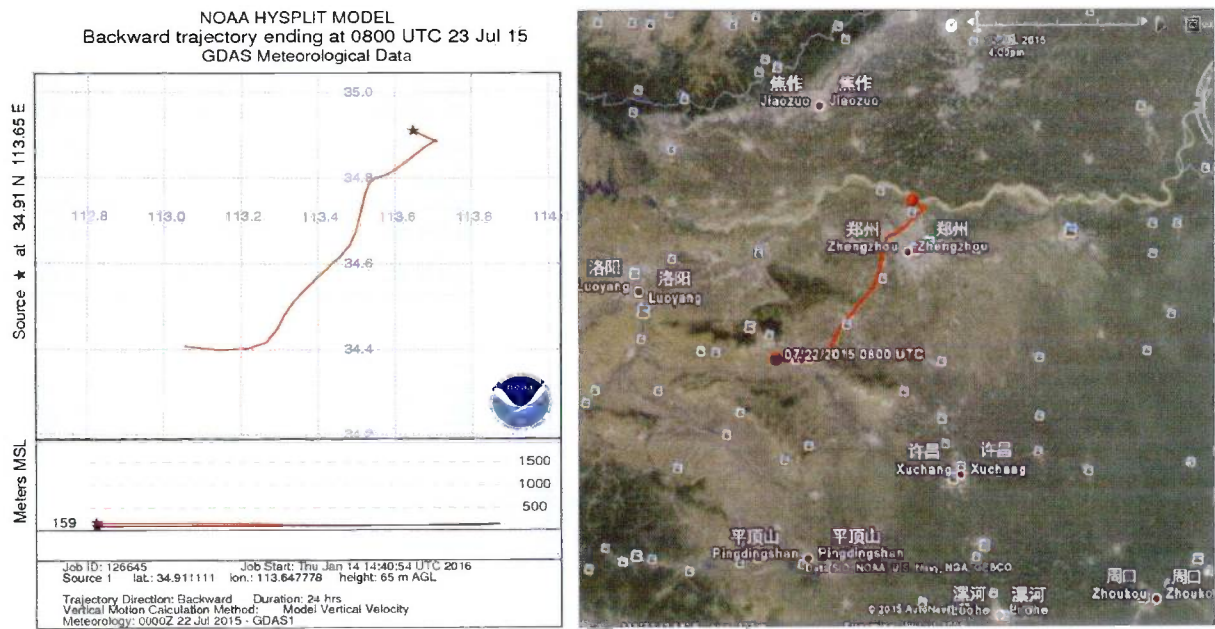


图3 2015年7月24日郑州试验点悬铃木方翅网蝽成虫模拟迁入路径

Fig. 3 Simulated trajectory of the immigration route of *Corythucha ciliata* adults in Zhengzhou on July 24, 2015

左图 Left figure: 经纬度标识 Identification of longitude and latitude; 右图 Right figure: 地理位置 Geographical location. 地图底图来源于 GoogleEarth 免费软件。Basal map originates from GoogleEarth. 下图同 The same for the following figures.

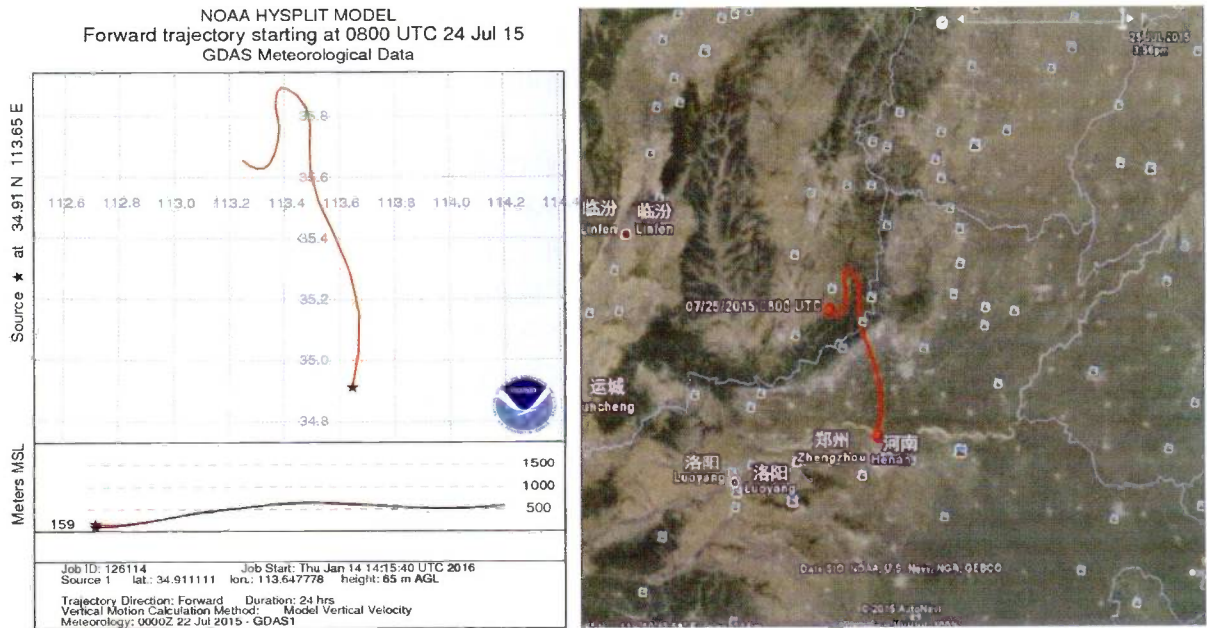


图4 2015年7月24日郑州试验点悬铃木方翅网蝽成虫模拟迁出路径

Fig. 4 Simulated trajectory of the emigration route of *Corythucha ciliata* adults from Zhengzhou on July 24, 2015

方翅网蝽在低龄成虫期,其体内飞行物质的积累不足,飞行肌的发育也不够完善,而随着日龄增加,营养的不断补充,飞行能力逐渐得以增强。

温度是一个重要的影响昆虫飞行行为的因素 (Duan *et al.*, 1998)。本研究发现温度的高低对于悬铃木方翅网蝽的飞行时间并无影响,温度对于其

飞行能力的影响主要体现在速度上,温度过低或过高均可影响其飞行速度。这可能与不同种类的昆虫在不同温度条件下对于体内能源物质的利用机理有所不同有关。24℃时甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua* 成虫的飞行能力最强,昆虫对飞行的主要能源物质(甘油三酯)利用效率的不同是导致其在不同温度

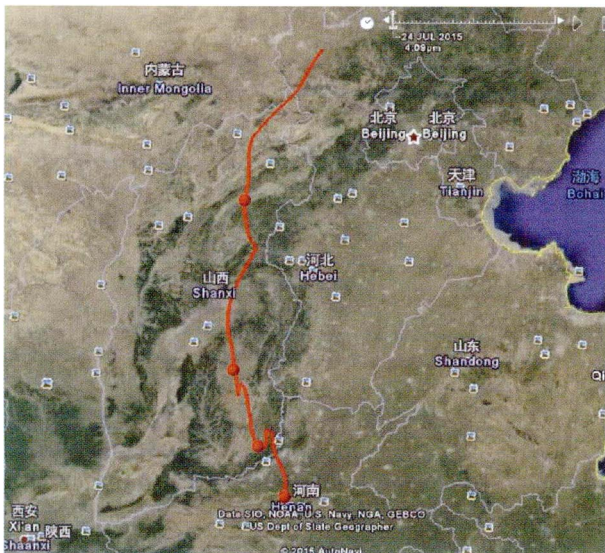


图5 2015年7月24-28日郑州试验点悬铃木方翅网蝽成虫在我国北方模拟扩散路径

Fig. 5 Simulated trajectory of the dispersal route of *Corythucha ciliata* adults from Zhengzhou Experimental Station in northern China from July 24 - 28, 2015

下飞行能力产生差异的主要原因之一(江幸福等, 2012)。可以推测出,悬铃木方翅网蝽应该在 25℃ 时,对甘油三酯的利用率最高,进而具备最强的飞行能力。温度对美洲斑潜蝇 *Liriomyza sativae* 的飞行时间和飞行速度均有一定影响(雷仲仁等, 2002), 麦长管蚜 *Sitobion avenae* 虽然在高温下飞行速度较快,但由于飞行时间很短,在低温时,虽然飞行时间相对高温要长,但飞行速度较慢,其飞行距离也较短(程登发等, 2002)。

悬铃木方翅网蝽雌雄成虫的飞行能力也存在一定差异,雌虫的飞行距离和飞行时间均强于雄虫,而雄虫的飞行速度要高于雌虫。许多昆虫的雌雄虫的飞行能力均存在差异。绿盲蝽雌虫的飞行能力强于雄虫(Lu *et al.*, 2009)。花曲柳窄吉丁 *Agrilus marcopoli* 雌虫的飞行距离、飞行速度大于雄虫,但在飞行时间上雌雄虫之间无显著差异(王辉等, 2005)。昆虫的飞行能力与其个体的大小也有关,许多昆虫的雌虫的飞行能力强于雄虫也与雌性个体大于雄性有关。昆虫的飞行能力很大程度上取决于其飞行肌结构的发育情况,而飞行肌的降解产物一部分可能会参与到卵巢发育等生殖行为中,因此迁飞类昆虫达到一定飞行量有助于性成熟(Nair and Prabhu, 1985)。悬铃木方翅网蝽雌虫飞行能力强于雄虫可能与其个体大小以及内部生理有关,但雄虫飞行速度大于雌虫的原因有待进一步研究。

悬铃木方翅网蝽成虫在最理想的条件下(10 日龄, 25℃), 24 h 平均飞行距离 1 361.75 m, 平均飞行时间 4 580.36 s, 最远飞行距离 6 060.76 m, 最长飞行时间为 18 589.21 s。麦红吸浆虫 *Sitodiplosis mosellana* 平均飞行距离和飞行时间均在 16℃ 时达到最大, 雌虫分别为 735.10 m 和 6 804.6 s, 雄虫分别为 437.54 m 和 4 197.6 s。单头试虫最远飞行距离均出现在 16℃, 雌虫可达 2 181 m, 雄虫可达 2 444.16 m(郝亚楠, 2014)。崔建新和冯玉浩(2011)研究发现,茶翅蝽 *Halyomorpha halys* 成虫在实验室环境下(温度 28 ~ 30℃, 相对湿度 60% ~ 80%) 24 h 平均飞行距离 425.37 m, 平均飞行时间 987.06 s, 最远飞行距离 1 866.73 m, 最长飞行时间 4 058.67 s。与虫体大小相近的麦红吸浆虫和茶翅蝽相比,悬铃木方翅网蝽成虫具备较强的飞行能力; 但与小地老虎(吊飞 11 h 平均飞行距离 99 800 m) 等典型的远距离迁飞害虫相比,其飞行能力较弱。

不同高度诱捕的悬铃木方翅网蝽数量在 0 ~ 35 m 范围内越接近地面,诱捕数量越多, 35 ~ 55 m 高度范围内随着高度的升高诱捕数量逐渐增加, 55 ~ 65 m 诱捕数量又逐渐减少。这可能是由于在 35 m 以下高度,悬铃木方翅网蝽成虫主要依靠自身的飞行能力上升到一定的飞行高度,因此随着高度的升高诱捕数量逐渐减少; 当成虫上升至 35 m 以上高度时,可能借助气流力量上升,但由于其自身飞行能力有限,因此在 65 m 以上高度未能捕捉到成虫。研究发现,麦红吸浆虫(苗进等, 2011)、麦蚜(郁振兴等, 2011)可随气流远距离扩散的特性。本项研究在 65 m 高空捕捉到悬铃木方翅网蝽成虫,可以推断悬铃木方翅网蝽可随气流进行低空扩散。

不同时期悬铃木方翅网蝽低空诱捕数量结果表明,7 月中下旬开始诱捕到的成虫较少,到 8 月中下旬诱捕到的成虫数量急剧增加,8 月 22 日之后又诱捕数量逐渐减少,9 月中旬之后数量趋近为零,这可能与郑州市同期的地面种群发生动态相关。7 月中下旬为郑州市悬铃木方翅网蝽第 1 代成虫发生期,地面种群数量相对较少,种群内竞争压力较小,无需通过低空扩散来寻找新的寄主。而到 8 月中下旬第 2 代成虫发生期,地面种群数量增加非常快,种群密度过大,种群内竞争压力也很大,需要通过低空扩散来寻找新的寄主植物。9 月中下旬,郑州地区雨水较多,地面种群数量受到一定的抑制,通过低空扩散寻找新的寄主的成虫数量也相对较少。悬铃木方翅网蝽低空扩散与地面种群数量和种群竞争压力密切

相关,郑州地区低空扩散的高峰期为8月中下旬,是第2代成虫的发生高峰期。

研究发现,自40 m, 70 m, 100 m 高空起始迁飞的麦蚜,迁飞轨迹大体相同,迁飞距离差异不明显(郁振兴等, 2011)。因此本研究模拟了在65 m 起始扩散高度上的扩散轨迹,在不同的起始扩散高度可能只影响悬铃木方翅网蝽扩散的距离,而对其扩散路径影响不大。本文利用 HYSPLIT-4 模型分析了在65 m 的起始扩散高度上,郑州市悬铃木方翅网蝽随气流的迁入和迁出轨迹。明确了郑州市黄河滩试验点悬铃木方翅网蝽在2015年7月下旬,迁入虫源可能来自郑州西南的登封市,24 h 内可随气流向北扩散至山西省晋城市陵川县,随后72 h 可随气流扩散至河北省张家口市境内,可见悬铃木方翅网蝽随气流具有很强的扩散能力,扩散轨迹和气流方向大致相同。昆虫的迁飞方向和距离受风向、风速影响较大(刘向东等, 2004)。华北地区在7月中下旬主要盛行西南季风,受风向影响,其从郑州地区迁出方向主要为北向,这与悬铃木方翅网蝽在我国从南往北的扩散方向大体一致。根据轨迹分析发现,可能扩散到北京等地区,接下来将有可能往内蒙古及东北三省扩散。

长期的观测数据结合大区气流和轨迹分析能更准确、有效地对迁飞性昆虫进行早期预警(Cheng *et al.*, 2002; 程登发等, 2005)。本项研究根据 HYSPLIT-4 模型对悬铃木方翅网蝽的远距离扩散轨迹进行初步分析,因为经费有限只购买了一个冲氮气球,只进行了一个地点一年度的观测分析,所以 HYSPLIT-4 模型模拟的结果仅属于推测,还需根据多时间段模拟分析与多地点实地调查方法相结合的方法来确定悬铃木方翅网蝽准确的远距离扩散路径。

参考文献 (References)

- Bao YX, Sun MQ, Yan ML, Lu MH, Liu WC, 2016. Comparative study of migration trajectories of the brown planthopper, *Nilaparvata lugens* (Stål), in China based on two trajectory models. *Acta Ecol. Sin.*, 36(19): 6122–6138. [包云轩, 孙梦秋, 严明良, 陆明红, 刘万才, 2016. 基于两种轨迹模型的褐飞虱迁飞轨迹比较研究. *生态学报*, 36(19): 6122–6138]
- Challa VS, Indreanti J, Baham JM, Patrick C, Rabarison MK, Young JH, Hughes RL, Swanier SJ, Hardy MG, Yerramilli A, 2008. Sensitivity of atmospheric dispersion simulations by HYSPLIT to the meteorological predictions from a meso-scale model. *Environ. Fluid. Mech.*, 8(4): 367–387.
- Chen X, Zhai BP, Gong RJ, Yin MH, Zhang Y, Zhao KJ, 2008. The source area of spring populations of meadow moth, *Loxostege sticticalis* L. (Lepidoptera: Pyralidae) in northeastern China. *Acta Ecol. Sin.*, 28(4): 1521–1535. [陈晓, 翟保平, 宫瑞杰, 尹明浩, 张友, 赵奎军, 2008. 东北地区草地螟(*Loxostege sticticalis*)越冬代成虫虫源地轨迹分析. *生态学报*, 28(4): 1521–1535]
- Cheng DF, Feng HQ, Wu KM, 2005. Scanning Entomological Radar and Radar Observation for Insect Migration. Science Press, Beijing. 12–15. [程登发, 封洪强, 吴孔明, 2005. 扫描昆虫雷达与昆虫迁飞监测. 北京: 科学出版社. 12–15]
- Cheng DF, Tian Z, Li HM, Sun JR, Chen JL, 2002. Influence of temperature and humidity on the flight capacity of *Sitobion avenae*. *Acta Entomol. Sin.*, 45(1): 80–85. [程登发, 田喆, 李红梅, 孙京瑞, 陈巨莲, 2002. 温度和湿度对麦长管蚜飞行能力的影响. *昆虫学报*, 45(1): 80–85]
- Cheng DF, Wu KM, Tian Z, Shen ZR, Wen LP, 2002. Acquisition and analysis of migration data from the digitized display of a scanning entomological radar. *Comput. Electron. Agr.*, 35: 63–75.
- Cui JX, Feng YH, 2011. Flight behaviors of tethered *Halyomorpha halys* (Heteroptera: Pentatomidae). *Entomol. Centr. China*, 7(1): 8–13. [崔建新, 冯玉浩, 2011. 茶翅蝽(半翅目: 蝽科)吊飞飞行行为. *华中昆虫研究*, 7(1): 8–13]
- Ding JT, Adil S, Zhu HF, Yu F, Alimasi, Luo L, 2014. Flight capacity of adults of the ber fruit fly, *Carpomya vesuviana* (Diptera: Tephritidae). *Acta Entomol. Sin.*, 57(11): 1315–1320. [丁吉同, 阿地力·沙塔尔, 主海峰, 喻峰, 阿里玛斯, 罗浪, 2014. 枣实蝇成虫飞行能力的测定. *昆虫学报*, 57(11): 1315–1320]
- Duan JJ, Donald C, Weber, Dorn S, 1998. Flight behavior of pre- and postdiapause apple blossom weevils in relation to ambient temperature. *Entomol. Exp. Appl.*, 88(1): 97–99.
- Halbert SE, Meeker JR, 1998. The sycamore lace bug, *Corythucha ciliata* (Say) (Hemiptera: Tingidae). *Entomol. Circul.*, 387: 2–9.
- Hao YN, 2014. Flight Activity of Adult Orange Wheat Blossom Midge, *Sitodiplosis mosellana* (Diptera: Cecidomyiidae) and the Influence Factors. MSc Thesis, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi. [郝亚楠, 2014. 麦红吸浆虫飞行能力及其影响因素研究. 陕西杨凌: 西北农林科技大学硕士学位论文]
- Hocking B, 1953. The intrinsic range and speed of flight of insects. *Trans. R. Entomol. Soc. Lond.*, 104: 223–345.
- Jia PH, Cao YZ, 1992. The flight activity of the black cutworm moth. *Acta Entomol. Sin.*, 35(1): 59–65. [贾佩华, 曹雅忠, 1992. 小地老虎成虫的飞翔活动. *昆虫学报*, 35(1): 59–65]
- Jiang XF, Luo LZ, Li KB, Cao YZ, Hu Y, Liu YQ, 2002. Influence of temperature on flight capacity of the beet armyworm, *Spodoptera exigua*. *Acta Entomol. Sin.*, 45(2): 275–278. [江幸福, 罗礼智, 李克斌, 曹雅忠, 胡毅, 刘悦秋, 2002. 温度对甜菜夜蛾飞行能力的影响. *昆虫学报*, 45(2): 275–278]
- Ju RT, Li YZ, Wang F, 2009. Spread of an exotic species, *Corythucha ciliata* (Say, 1832), in China (Hemiptera: Tingidae). *Entomol. News*, 120: 409–414.
- Lei ZR, Wang Y, Huang DR, Cheng DF, 2002. Influence of temperature on flight potential of *Liriomyza sativae* Blanchard. *Acta*

- Entomol. Sin.*, 45(3): 413–415. [雷仲仁, 王音, 黄冬如, 程登发, 2002. 美洲斑潜蝇在不同温度下的飞行能力. 昆虫学报, 45(3): 413–415]
- Li CR, Xia WS, Wang FL, 2007. First records of *Corythucha ciliata* (Say) in China (Hemiptera, Tingidae). *Acta Pharmacol. Sin.*, 32(4): 944–946. [李传仁, 夏文胜, 王福莲, 2007. 悬铃木方翅网蝽在中国的首次发现. 动物分类学报, 32(4): 944–946]
- Liu XD, Zhai BP, Zhang XX, 2004. Advance in the studies of migration of aphids. *Entomol. Knowl.*, 41(4): 301–307. [刘向东, 翟保平, 张孝羲, 2004. 蚜虫迁飞的研究进展. 昆虫知识, 41(4): 301–307]
- Lu YH, Wu KM, Wyckhuys KA, Guo YY, 2009. Comparative flight performance of three important pest *Adelphocoris* species of Bt cotton in China. *Bull. Entomol. Res.*, 99(6): 543–550.
- Maceljski M, Balarin I, 1972. A new member of the infurius entomofauna of Yugoslavia – *Corythucha ciliata* (Say), Tingidae, Heteroptera. *Zastita Biljia*, 23: 193–205.
- Maceljski M, Balarin I, 1974. Studies of *Corythucha ciliata*, a new pest in Europe. *Anz. Schadl. Pflanz. Umwelt.*, 47: 165–170.
- María I, Gassmann, Claudio FP, 2006. Trajectories associated to regional- and extra-regional pollen transport in the southeast of Buenos Aires Province, Mar del Plata (Argentina). *Int. J. Biometeorol.*, 50(5): 280–291.
- Mazzon L, Girolami V, 2000. The sycamore lace bug. *Sher-Wood-For. Alberi Oggi*, 6: 27–28.
- Miao J, Wu YQ, Yu ZX, Chen HS, Liu ST, Jiang YL, Duan Y, 2011. Trajectory analysis of long-distance dispersal of the wheat midge, *Sitodiplosis mosellana* (Géhin) (Diptera: Cecidomyiidae), with air current. *Acta Entomol. Sin.*, 54(4): 432–436. [苗进, 武予清, 郁振兴, 陈华爽, 刘顺通, 蒋月丽, 段云, 2011. 麦红吸浆虫随气流远距离扩散的轨迹分析. 昆虫学报, 54(4): 432–436]
- Mutun S, 2009. *Corythucha ciliata*, a new *Platanus* pest in Turkey. *Phytoparasitica*, 37: 65–66.
- Nair CNM, Prabhu KK, 1985. Entry of protein from degenerating flight muscles into oocytes in *Dysdercus cingulatus*. *J. Insect Physiol.*, 31(2): 353–355.
- Soria S, Munoz A, Torre R, 1991. *Corythucha ciliata* (Say, 1832) (Heteroptera: Tingidae) in the Madrid community. *Bol. Sanid. Veget.*, 17: 440.
- Streito JC, 2006. Note sur quelques espèces envahissantes de Tingidae: *Corythucha ciliata* (Say, 1932), *Stephanitis pyrioides* (Scott, 1874) et *Stephanitis takeyai* Drake & Maa, 1955 (Hemiptera Tingidae). *Entomologiste*, 62: 31–36.
- Tokihiko G, Tanaka K, Kondo K, 2003. Occurrence of the sycamore lace bug, *Corythucha ciliata* (Say) (Heteroptera: Tingidae) in Japan. *Res. Bull. Plant Prot. Serv. Japan*, 39: 85–87.
- Veriankaite L, Siljamo P, Sofiev M, Sauliené I, Kukkonen J, 2010. Modelling analysis of source regions of long-range transported birch pollen that influences allergenic seasons in Lithuania. *Aerobiologia*, 26(1): 47–62.
- Wang H, Xu ZC, Wang BD, Luo YQ, 2005. Potential flight capability of the emerald ash borer, *Agrilus planipennis* Fairmaire (Coleoptera: Buprestidae). *J. Beijing For. Univ.*, 37(1): 92–97. [王辉, 许志春, Baode Wang, 骆有庆, 2015. 花曲柳窄吉丁潜在飞行能力初步研究. 北京林业大学学报, 37(1): 92–97]
- Wang Z, Qi GJ, Lü LH, Hu Q, Yuan WX, 2011. Analysis of the source areas of early immigrant white-backed planthopper *Sogatella furcifera* (Horváth) in Guangdong Province. *Chin. J. Appl. Entomol.*, 48(5): 1253–1259. [王政, 齐国君, 吕利华, 胡芊, 袁维熙, 2011. 广东白背飞虱早期迁入种群的虫源地分析. 应用昆虫学报, 48(5): 1253–1259]
- Wang ZY, Zhou DR, Song YY, Li BX, Zhang GY, Gao SL, Liu Y, Zheng L, Wang YS, Xie WM, Li WD, Pan YC, 1994. Studies on behaviour of dispersal and possibility of migration in adult overwintering generation Asian corn borer by using release-and-recapture technique. *Acta Phytophy. Sin.*, 21(1): 25–30. [王振营, 周大荣, 宋彦英, 李璧铤, 张广义, 高书兰, 刘勇, 郑礼, 王蕴生, 谢为民, 李文德, 潘永成, 1994. 亚洲玉米螟越冬代成虫扩散行为予迁飞可能性研究. 植物保护学报, 21(1): 25–30]
- Wu KM, Guo YY, 1996. Flight activity in *Helicoverpa armigera*. *Acta Ecol. Sin.*, 16(6): 612–617. [吴孔明, 郭予元, 1996. 棉铃虫的飞翔活动. 生态学报, 16(6): 612–617]
- Yu GY, Wang H, Zhu XQ, Feng SK, Lu XL, 2014. The first discovery of the sycamore lace bug *Corythucha ciliata* in Beijing, China. *Plant Prot.*, 40(5): 200–202. [虞国跃, 王合, 朱晓清, 冯术快, 卢绪利, 2014. 北京发现悬铃木方翅网蝽为害. 植物保护, 40(5): 200–202]
- Yu ZX, Wu YQ, Jiang YL, Feng HQ, Liu ST, Cao YZ, 2011. Forward trajectory analysis of wheat aphids during long-distance migration using HYSPLIT model. *Acta Ecol. Sin.*, 31(3): 889–894. [郁振兴, 武予清, 蒋月丽, 封洪强, 刘顺通, 曹雅忠, 2011. 利用 HYSPLIT 模型分析麦蚜远距离迁飞前向轨迹. 生态学报, 31(3): 889–894]
- Zhai BP, Chen RL, 1989. Flight capacity of Asian corn borer (*Ostrinia furnacaris* Guenee). *J. Jilin Agric. Sci.*, 14(1): 40–46. [翟保平, 陈瑞鹿, 1989. 亚洲玉米螟飞翔能力的初步研究. 吉林农业科学, 14(1): 40–46]
- Zhang ZT, Li GB, 1985. A study on the biological characteristics of the flight of the oriental armyworm *Mythimna separata* (Walker) moth. *J. Plant. Prot.*, 12(2): 93–100. [张志涛, 李光博, 1985. 粘虫飞翔生物学特性初步研究. 植物保护学报, 12(2): 93–100]
- Zhou LY, Zhang XX, Cheng JY, 1995. Trajectory analysis of *Cnaphalocrocis medinalis* Guenee for Huaihe and Yangtze River rice areas. *J. Nanjing Agric. Univ.*, 8(2): 53–58. [周立阳, 张孝羲, 程极益, 1995. 江淮稻区稻纵卷叶螟的轨迹分析. 南京农业大学学报, 8(2): 53–58]

(责任编辑: 赵利辉)