

DOI: 10.5846/stxb201407111415

崔建新,董钧锋,任向辉,吴利民,左文倩,王颖.日龄及性别对橘小实蝇实验种群飞行能力的影响.生态学报,2016,36(5): - .

Cui J X, Dong J F, Ren X H, Wu L M, Zuo W Q, Wang Y. Effects of gender and age (in days) on flight capacity of an experimental population of the oriental fruit fly, *Bactrocera dorsalis* (Hendel). Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(5): - .

日龄及性别对橘小实蝇实验种群飞行能力的影响

崔建新^{1,*}, 董钧锋², 任向辉¹, 吴利民¹, 左文倩¹, 王 颖¹

1 河南科技学院植保系, 新乡 453003

2 河南科技大学林学院, 洛阳 471003

摘要:利用飞行磨系统对实验种群橘小实蝇的 1、6、11、16、21、26、31 共 7 个日龄雌雄个体分别进行 22 小时连续吊飞试验,测定其累计飞行距离、累计飞行时间、平均飞行速度。橘小实蝇原始种群采自湖南长沙,经室内连续饲养约 30 代,成为试验种群。试验环境条件为连续光照条件,温度 25℃,RH 60—80%,光照强度为 990 lx。整个吊飞过程不补充食物和水份。共得到 179 组吊飞数据,其中雌虫 86 组,雄虫 93 组,每个日龄处理不少于 9 头。结果显示随着日龄的增加,橘小实蝇雌蝇和雄蝇的飞行能力均逐渐增加,到达 16 日龄后雌蝇飞行能力迅速下降,表现为单峰型;雄蝇的飞行能力在 16—31 日龄一般维持较高水平,但在 26 日龄有一定波动。16 日龄雌蝇和雄蝇的累计飞行距离分别是 2485.6 ± 2287.2 m 和 2152.3 ± 1773.3 m。其中 1 头 21 日龄雄性个体的累计飞行距离最大,完成了 8795.80 m 的飞行。雌蝇累计飞行距离最远的发生在 16 日龄,为 8116.6 m。日龄对橘小实蝇的累计飞行距离和平均飞行速度的影响都达到了显著水平(前者, $F = 2.88, P < 0.05$; 后者, $F = 4.98, P < 0.01$)。雌蝇和雄蝇的平均飞行速度的差异达到了显著水平($F = 4.10, P < 0.05$)。日龄和性别的互作对平均飞行速度的影响也达到了显著水平($F = 2.74, P < 0.05$)。尽管实验种群不能完全代表野生种群,本研究的结果对研究橘小实蝇扩散规律及综合防治,特别是改进橘小实蝇雄性不育技术仍有重要的参考价值。

关键词:橘小实蝇;吊飞;日龄;性别

Effects of gender and age (in days) on flight capacity of an experimental population of the oriental fruit fly, *Bactrocera dorsalis* (Hendel)

CUI Jianxin^{1,*}, DONG Junfeng², REN Xianghui¹, WU Limin¹, ZUO Wenqian¹, WANG Ying¹

1 Department of Plant Protection, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453003, China

2 College of Forestry, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China

Abstract: In this study, adult individuals of the oriental fruit fly, *Bactrocera dorsalis* (Hendel), from an experimental population of 7 age groups (1, 6, 11, 16, 21, 26, and 31 days of age) was subjected to the conditions of 25 °C, relative humidity 60—80%, and light intensity 990 lx. The flight test was finished after 22 h from the beginning, and no food or water was provided during this procedure. The original population of this experimental group was collected in Changsha, Hunan, China, and was reared in the laboratory for —30 generations. One set of data, including total flight distance (TFD), total flight duration, and average flight velocity (AFV), could be obtained when a fruit fly flew a distance >20 m. In total, 179 sets of data were collected from 86 females and 93 males. The results showed that females at 16 days of age reached the maximum of flight capacity after emergence, but males of 16—31 days of age generally kept the flight capacity at a high level with fluctuation at 26 days of age. TFD of 16-day-old female and male flies was 2485.6 ± 2287.2 and 2152.3 ± 1773.3 m, respectively. The farthest trip, 8795.80 m, was made by a male fly at 21 days of age. The farthest trip among female flies occurred at 16 days of age and TFD 8116.6 m. TFD and AFV significantly differed among fruit flies of different

收稿日期:2014-07-11; 网络出版日期:2015- -

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

ages (TFD, $F = 2.88$, $P < 0.05$; AFV, $F = 4.98$, $P < 0.01$). AFV was significantly different between male and female flies ($F = 4.10$, $P < 0.05$). There was a significant difference in the impact on AFV that was caused by an interaction between sex and age ($F = 2.74$, $P < 0.05$). Although the experimental population is not identical to the wild population in terms of flight capacity, the findings of this study are expected to advance the research on diffusion patterns, integrated pest management, and especially the studies on the improvement of the release methods based on the sterile insect technique for this dangerous quarantine pest.

Key Words: *Bactrocera dorsalis*; tethered flight; day age; gender

吊飞研究由于简便经济,成为多数昆虫学者研究昆虫飞行行为的主要手段。目前国内吊飞研究主要采用的飞行磨系统主要分为2类,一类是适用于小型昆虫(体长通常小于0.5cm)的飞行磨系统,成为“悬针式”飞行磨,利用这类飞行磨开展的有代表性的吊飞类群有麦红吸浆虫 *Sitodiplosis modellana*^[1],凹唇壁蜂 *Osmia excavata*^[2],椰子织蛾 *Opisina arenosella*^[3],麦长管蚜 *Sitobion avenae*^[4],淡色库蚊 *Culex pipiens pallens*^[5],斑痣悬茧蜂 *Meteorus pulchricornis*^[6],马铃薯甲虫 *Leptinotarsa decemlineata*^[7-11],白背飞虱 *Sogatella furcifera*^[12]等。另一类是“普通式”飞行磨,一般针对体型较大的昆虫(体长通常大于0.5 cm),已经开展吊飞研究的代表性种类如小地老虎 *Agrotis ypsilon*^[13-14],粘虫 *Mythimna separata*^[15-18],甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua*^[19-23],东亚飞蝗 *Locusta migratoria manilensis*^[24-25],家蝇 *Musca domestica*^[26-27],宽棘缘蝽 *Cletus rusticus*^[28-29],赤条蝽 *Graptostoma rubrolineata*^[30],茶翅蝽 *Halyomorpha halys*^[31],玉米螟等 *Ostrinia furnacalis*^[32-33]等。以上两类飞行磨在国内主要有3个来源渠道,分别是中国农科院植物保护研究所开发的32通道飞行磨系统,河南佳多科工贸有限责任公司(河南佳多)开发的12—24通道飞行磨系统,河南科技学院开发的26通道飞行磨系统。表1列出了自上世纪八十年代以来国内已经开展吊飞研究的主要昆虫类群以及所采用的飞行磨系统。

橘小实蝇 *Bactrocera dorsalis* (Hendel),隶属于双翅目实蝇科果实蝇属,是一种世界性检疫害虫。这种实蝇害虫原产热带和亚热带地区,现已成为危害中国、东南亚、印度次大陆和夏威夷群岛一带许多农产品的危险性害虫^[34-43]。橘小实蝇食性广泛,可危害芒果、柑橘、香蕉、番石榴等250多种热带和亚热带水果和蔬菜^[34, 44-49]。马兴莉等的研究证实橘小实蝇等3种实蝇对果蔬的为害率在5%—20%之间时,将对广东省造成33.67—129.87亿元的社会经济损失,其中直接经济损失达到23.32—110.78亿元^[50]。

橘小实蝇通常一年3—6代,世代重叠现象严重,5—9月种群密度最高,不同地区的种群动态有明显差异^[51]。在西双版纳橘小实蝇的种群高峰出现在5月底至7月初,9月份种群数量迅速下降,10月至次年4月种群数量处于较低水平^[52]。广州地区橘小实蝇5月份种群数量迅速上升,6—9月到达高峰,10月份种群密度逐渐下降,11月至次年3月种群数量很低^[42]。浙江杭州地区8—11月为橘小实蝇种群成虫盛发期^[47]。湖南长沙地区橘小实蝇的种群成虫始发期出现在5月中旬,结束期为10月底,期间共出现5个种群峰值,最大峰值出现在8月上中旬^[53]。北京房山地区部分果园2012年的监测数据显示,橘小实蝇在7月下旬始见成虫,9月上旬达到最高峰,9月下旬出现第2个高峰,11月上旬为成虫终见期^[35]。关于飞行节律方面,橘小实蝇仅在白天有光照的情况下进行飞行活动,夏季活动高峰出现在上午7:00,秋季为上午9:00,冬季则为下午15:00;橘小实蝇飞行活动最为活跃的环境条件为气温在20—30℃,RH大于60%的条件^[54]。

橘小实蝇的基础生物学研究有较多开展。Prokopy等发现25—26℃条件下,橘小实蝇的产卵前期为9—12 d;在22℃及RH80%条件下,产卵前期为52—53 d^[55]。王波等发现橘小实蝇雌虫的产卵活动最早发生在11日龄^[56]。而任荔荔等对橘小实蝇的交配行为研究时发现14日龄后橘小实蝇达到性成熟^[46]。许志刚则认同橘小实蝇的产卵前期夏季约为20 d,秋季约为25—60 d,冬季需3—4个月,但没有给出数据来源^[51]。总之,目前对橘小实蝇产卵活动等基础生物学还需要进一步的澄清。

对橘小实蝇的飞行能力的研究同样很不充分。据梁帆等的研究,广州地区番木瓜果实上的橘小实蝇经室

内繁育第3代7—8日龄成虫在实验室吊飞条件下可以飞行46.5km^[57]。Steiner等的观测发现此虫在太平洋马里亚纳群岛可以完成65.0 km的跨海飞行^[58-59]。另据梁广勤等记载橘小实蝇雄虫可以飞行6.5—8.0 km,甚至可以横跨14.5 km的海面^[60]。橘小实蝇不同来源的飞行数据有比较明显的差异,为了进一步了解日龄因素对其飞行行为的影响,我们开展了本次试验,现将试验结果进行报道。

表1 近三十年昆虫吊飞研究开展的主要类群及飞行磨系统来源比较

Table 1 Comparison of insect taxa chosen in tethered flight researches and types of flight mills in the past 30 years

研究类群 Taxon	所属目科 Order and family	飞行磨类型 Type of flight mill	飞行磨系统来源 Source of flight mill	文献来源 Reference
宽棘缘蝽 <i>Cletus rusticus</i>	半翅目缘蝽科	26 通道普通式	中国农业大学	[28-29]
赤条蝽 <i>Graposoma rubrolineata</i>	半翅目蝽科	26 通道普通式	中国农业大学	[30]
茶翅蝽 <i>Halyomorpha halys</i>	半翅目蝽科	26 通道普通式	河南科技学院	[31]
绿盲蝽 <i>Lygocoris lucorum</i>	半翅目盲蝽科	32 通道悬针式	中国农科院	[61]
苜蓿盲蝽 <i>Adelphocoris lineolatus</i>	半翅目盲蝽科	32 通道悬针式	中国农科院	[62]
中黑苜蓿盲蝽 <i>A. suturalis</i>	半翅目盲蝽科	32 通道悬针式	中国农科院	[62]
三点苜蓿盲蝽 <i>A. fasciaticollis</i>	半翅目盲蝽科	32 通道悬针式	中国农科院	[62]
麦长管蚜 <i>Sitobion avenae</i>	半翅目蚜科	32 通道悬针式	中国农科院	[4]
禾缢管蚜 <i>Rhopalosiphum padi</i>	半翅目蚜科	32 通道悬针式	中国农科院	[63]
白背飞虱 <i>Sogatella furcifera</i>	半翅目飞虱科	32 通道悬针式	中国农科院	[12]
家蝇 <i>Musca domestica</i>	双翅目蝇科	26 通道普通式	河南科技学院	[26, 27]
淡色库蚊 <i>Culex pipiens pallens</i>	双翅目蚊科	26 通道悬针式	河南科技学院	[5, 64]
麦红吸浆虫 <i>Sitodiplosis modellana</i>	双翅目瘿蚊科	26 通道悬针式	河南科技学院	[1]
橘小实蝇 <i>Bactrocera dorsalis</i>	双翅目实蝇科	32 通道普通式	中国农科院	[57]
玉米螟 <i>Ostrinia furnacalis</i>	鳞翅目螟蛾科	26 通道普通式	河南科技学院	[32]
玉米螟 <i>O. furnacalis</i>	鳞翅目螟蛾科	双支点式	吉林省农科院	[33]
稻纵卷叶螟 <i>Cnaphalocrocis medinalis</i>	鳞翅目螟蛾科	32 通道普通式	中国农科院	[65]
椰子织蛾 <i>Opisina arenosella</i>	鳞翅目织蛾科	12 通道悬针式	河南佳多	[3]
棉铃虫 <i>Helicoverpa armigera</i>	鳞翅目夜蛾科	32 通道普通式	中国农科院	[66-68]
棉铃虫 <i>H. armigera</i>	鳞翅目夜蛾科	8 通道普通式	南京农业大学	[69-70]
粘虫 <i>Mythimna separata</i>	鳞翅目夜蛾科	32 通道普通式	中国农科院	[15-18]
甜菜夜蛾 <i>Spodoptera exigua</i>	鳞翅目夜蛾科	32 通道普通式	中国农科院	[19-23]
小地老虎 <i>Agrotis ypsilon</i>	鳞翅目夜蛾科	32 通道普通式	中国农科院	[13-14]
东亚飞蝗 <i>Locusta migratoria manilensis</i>	直翅目蝗科	32 通道普通式	中国农科院	[24-25]
泛长角绒毛金龟 <i>Toxocerus fairmairei</i>	鞘翅目鳃金龟科	26 通道普通式	[71]	
异色瓢虫 <i>Harmonia axyridis</i>	鞘翅目瓢甲科	双支点式	吉林省农科院	[72]
七星瓢虫 <i>Coccinella septempunctata</i>	鞘翅目瓢甲科	双支点式	吉林省农科院	[72]
马铃薯甲虫 <i>Leptinotarsa decemlineata</i>	鞘翅目叶甲科	24 通道悬针式	河南佳多	[7-11]
中华草蛉 <i>Chrysoperla sinica</i>	脉翅目草蛉科	32 通道悬针式	河南佳多	[73]
斑痣悬茧蜂 <i>Meteorus pulchricornis</i>	膜翅目茧蜂科	32 通道悬针式	中国农科院	[6]
凹唇壁蜂 <i>Osmia excavata</i>	膜翅目壁蜂科	12 通道悬针式	河南佳多	[2]

吉林省农科院和南京农业大学研发的飞行磨系统近年逐渐被其他飞行磨系统替代

1 材料与方法

1.1 试虫

试验实蝇原始种群采自湖南长沙,室内繁育约30代,成为试验种群(河南科技大学昆虫实验室,洛阳),化蛹后妥善包装后安全运送到河南科技学院(新乡),放入吊飞试验室,在温度25℃,RH 60—80%条件下等待羽化。试虫羽化后,逐日放置于不同养虫笼(0.2m * 0.2m * 0.2m),密度为每笼150头左右,雌雄混合饲养,记录羽化日期,补充饲料(成分为酵母膏:蔗糖=3:1)与清水,待日龄符合要求后进行吊飞试验。根据王波等的

研究结果,34 日龄后人工饲养的实蝇将大量死亡^[56],所以本次试验将实蝇日龄设置分 7 组,分别为 1、6、11、16、21、26、31 日龄。试虫的性别判断在吊飞结束后进行。

1.2 吊飞试验

本研究采用的飞行磨系统(新乡,建松仪表)为 26 路,此系统各项设备参数同河南科技学院前期开发的飞行磨系统,适合中等大小昆虫吊飞试验,吊飞方法参考刘吉起等(2011)方法^[27],并做部分调整。麻醉时,将橘小实蝇置于 75 mL 广口瓶,用加 50—100 μ l 乙醚的布条麻醉 15—20 s,待试虫不动后,立刻取出进行吊飞试验。飞行磨吊臂为不锈钢细丝,直径 0.8 mm,长 0.10 m,试虫完成一圈飞行距离为 0.63 m,另一侧有适当配重以平衡吊臂。实验室温度 $25\pm 1^{\circ}\text{C}$,相对湿度 $50\pm 5\%$,光照强度为 800 lx。整个吊飞过程不补充水分和营养。每天吊飞实蝇在 10:00—11:00 开始,以试虫消耗殆尽累死结束或在开始飞行计时 22 h 后(次日 8:00—9:00)人工干预停止。

1.3 数据统计

根据飞行记录用 Matlab 软件计算试虫在测试时间内完成吊飞个体的累计飞行距离、累计飞行时间、平均飞行速度,然后进行统计分析。累计飞行时间算法为开始记录飞行数据后,如果连续 60 s 没有数据被采集,则认为此段时间发生了 1 次停顿,扣除所有停顿后的整个飞行时间为累计飞行时间。对累计飞行距离在 10 m 以下数据作为不可靠数据,予以排除。每个日龄组最少有效数据为 9 个。

采用 Matlab 软件的 ANOVAN 函数分析不同性别、日龄、性别和日龄交互因子对其飞行能力的影响,采用 Matlab 软件 Tukey HSD(图凯多重极差检验法)进行各因子平均数多重比较。 $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果与分析

整个吊飞试验共获得有效飞行数据 179 组,其中雌虫 86 组,雄虫 93 组。橘小实蝇的各个吊飞飞行参数如表 2 和表 3。

2.1 累计飞行距离

在 22 小时连续吊飞条件下,不同日龄橘小实蝇雌虫的累计飞行距离表现出单峰型(图 1, A)。羽化后,雌蝇的飞行能力迅速增加,到 11 日龄时累计飞行距离均值为 2004.70 m(标准差 $\text{STD}=2066.40$),在 16 日龄达到最高峰,累计飞行距离均值为 2485.60 m(标准差 $\text{STD}=2287.20$)。16 日龄雌蝇累计飞行距离的 95% 置信区间 $\text{CI}=[727.53 \text{ m}, 4243.73 \text{ m}]$ 。随后,雌蝇的飞行能力快速下降,至 21 日龄时,其累计飞行距离不足高峰时的一半,至 31 日龄时,仅有高峰时的 1/4。对雌蝇不同日龄累计飞行距离分别进行单因子方差分析,结果显示各日龄雌虫累计飞行距离均值间的差异均未达到显著水平($F=1.90$, $P=0.0906$)。雄蝇在羽化后,飞行能力较弱,在 22 小时连续吊飞条件下平均累计飞行距离不足雌蝇的 1/3,此后快速增加,至 6 日龄达到雌蝇 1 日龄水平,11 日龄时平均累计飞行距离有小幅下降,至 16 日龄迅速回升至最高峰值(图 1, D),此时累计飞行距离均值为 2152.30 m(标准差 $\text{STD}=1773.30$)。16 日龄雄蝇累计飞行距离的 95% 置信区间 $\text{CI}=[1128.41 \text{ m}, 3176.11 \text{ m}]$ 。雄蝇的飞行高峰期维持至 21 日龄,仅有小幅下降,累计飞行距离均值为 2004.50 m(标准差 $\text{STD}=2674.90$)。此后,至 26 日龄有 1 明显下降,降幅达到高峰期的 1/2 左右,然后再次回升,到 31 日龄,达到第 2 峰值,这时的累计飞行距离均值为 2061.00 m(标准差 $\text{STD}=2006.10$)。与雌蝇比较,雄蝇 16 日龄后的飞行能力仍维持较高水平,没有表现出明显的下降。各日龄雄蝇累计飞行距离均值间的差异已达到统计学意义上的显著水平($F=2.71$, $P=0.0184$)。雄虫 16 日龄飞行能力达到最高峰,和 1 日龄间的累计飞行距离均值之差为 1893.79m,两均值差的 95% 置信区间 $\text{CI}=[41.91, 3745.66]$,已经达到显著水平(Tukey-Kramer 法)。雌雄蝇其他日龄的累计飞行距离统计值参见表 1 和表 2。对累计飞行距离进行双因子方差分析,统计结果显示,日龄因素对橘小实蝇累计飞行距离的影响达到显著水平($F=2.88$, $P=0.0108$),性别因素对累计飞行距离的影响没有达到显著水平($F=0$, $P=0.9743$),日龄和性别的互作对累计飞行距离的影响没有达到显著水平($F=1.79$, $P=0.1041$)。

表 2 3 个代表日龄橘小实蝇成虫吊飞飞行参数

Table 2 Flight parameters of the oriental fruit fly in tethered for 3 different day ages

日龄 Day age	性别 Gender	描述统计量 Discriptive statistic	累计飞行距离 Total flight distance/ (m)	累计飞行时间 Total flight duration/ (s)	平均飞行速度 Average velocity/ (m/s)
1	雌虫 n = 12	均值	925.67	5440.00	0.18
		标准差	1238.60	7559.30	0.10
		中值	508.94	2456.20	0.19
		极差	82.31—4523.90	964.31—27750.00	0.06—0.42
	雄虫 n = 16	均值	258.47	2263.40	0.13
		标准差	325.32	3402.00	0.09
		中值	90.48	1038.80	0.09
		极差	22.00—1134.10	285.30—13385.00	0.05—0.30
6	雌虫 n = 14	均值	1164.00	3800.20	0.27
		标准差	1212.90	3568.90	0.12
		中值	886.38	3190.10	0.26
		极差	30.16—4504.40	302.31—14114.00	0.06—0.46
	雄虫 n = 14	均值	973.26	4627.70	0.18
		标准差	1319.70	5078.40	0.08
		中值	362.23	2272.6	0.18
		极差	30.79—4465.50	203.28—17010.00	0.05—0.36
11	雌虫 n = 12	均值	2004.70	7181.70	0.26
		标准差	2066.40	5530.60	0.08
		中值	1546.90	6023.70	0.26
		极差	99.27—7294.10	601.89—17305.00	0.14—0.42
	雄虫 n = 10	均值	768.87	4029.00	0.23
		标准差	1139.50	5123.90	0.10
		中值	248.19	1359.40	0.20
		极差	45.24—3511.00	412.05—15555.00	0.10—0.37

表 3 4 个代表日龄橘小实蝇成虫吊飞飞行参数

Table 3 Flight parameters of the oriental fruit fly in tethered for 4 different day ages

日龄 Day age	性别 Gender	描述统计量 Discriptive statistic	累计飞行距离 Total flight distance (m)	累计飞行时间 Total flight duration (s)	平均飞行速度 Average velocity (m/s)
16	雌虫 n = 9	均值	2485.60	6387.40	0.39
		标准差	2287.20	5594.60	0.08
		中值	2050.80	4916.10	0.36
		极差	596.90—8116.60	1960.60—19947.00	0.28—0.51
	雄虫 n = 14	均值	2152.30	7699.10	0.26
		标准差	1773.30	7604.20	0.10
		中值	1231.20	4521.60	0.27
		极差	45.87—5859.70	1001.70—28177.00	0.04—0.41
21	雌虫 n = 15	均值	1168.70	4082.70	0.29
		标准差	954.52	3056.20	0.13
		中值	978.29	3822.90	0.28

续表

日龄 Day age	性别 Gender	描述统计量 Discriptive statistic	累计飞行距离 Total flight distance (m)	累计飞行时间 Total flight duration (s)	平均飞行速度 Average velocity (m/s)
26	雄虫 n = 17	极差	126.30—2843.10	514.21—10253.00	0.10—0.64
		均值	2004.50	6046.60	0.24
		标准差	2674.90	6546.20	0.12
		中值	544.75	3499.60	0.20
	雌虫 n = 14	极差	23.88—8795.80	140.85—23966.00	0.05—0.46
		均值	953.70	2766.80	0.19
		标准差	1812.40	3660.90	0.15
		中值	252.90	1246.00	0.13
	雄虫 n = 13	极差	15.71—6161.90	197.50—12954.00	0.04—0.54
		均值	1150.60	4261.40	0.30
		标准差	1228.50	4199.20	0.11
		中值	1218.90	4574.20	0.27
31	雌虫 n = 10	极差	59.70—4517.60	124.34—15001.00	0.15—0.56
		均值	618.01	2089.80	0.28
		标准差	908.60	2888.00	0.18
		中值	139.49	691.42	0.25
	雄虫 n = 9	极差	25.76—2369.40	224.55—8622.40	0.06—0.66
		均值	2061.00	6525.30	0.28
		标准差	2006.10	6116.70	0.06
		中值	2141.30	6743.00	0.31
		极差	11.31—6540.20	63.91—20339.00	0.18—0.35

2.2 累计飞行时间

在 22 小时连续吊飞条件下,橘小实蝇雌蝇的累计飞行时间走势和累计飞行距离有明显差异(图 1, A, B)。与累计飞行距离不同,雌蝇 1 日龄的持续飞行能力仅低于 11 日龄和 16 日龄,处于较高水平,此时的累计飞行时间均值为 5440.00 s (标准差 STD=7559.30),在 6 日龄前表现为下降趋势;6 日龄后,雌蝇的持续飞行能力迅速提升,至 11 日龄达到最高值,这时累计飞行时间均值为 7181.70 s (标准差 STD=5530.60);此后持续飞行能力连续下降,至 31 日龄达到最低值,雌蝇的累计飞行时间均值为 2089.80 s (标准差 STD=2888.00)。对雌蝇不同日龄的累计飞行时间进行单因子方差分析,结果显示日龄因素对累计飞行距离的影响未达到显著水平($F=1.78$, $P=0.1134$)。橘小实蝇雄蝇的累计飞行时间走势和累计飞行距离基本一致(图 1, D, E)。雄蝇累计飞行时间的峰值出现在 16 日龄,此日龄的累计飞行时间均值为 7699.10 s (标准差 STD=7604.20),此后缓慢下降,至 26 日龄,这时的累计飞行时间均值为 4261.40 s (标准差 STD=4199.20),大约等同于 11 日龄水平;此后持续飞行能力再次增加,至 31 日龄达到第 2 峰值,其累计飞行时间均值为 6525.30 s (标准差 STD=6116.70)。对雄蝇不同日龄的累计飞行时间进行单因子方差分析,结果显示各日龄雄蝇累计飞行距离均值间的差异未达到显著水平($F=1.49$, $P=0.1915$)。对累计飞行时间进行双因子方差分析,统计结果显示,日龄因素对橘小实蝇累计飞行时间的影响没有达到显著水平($F=1.55$, $P=0.1645$),性别因素对累计飞行时间的影响也没有达到显著水平($F=0.36$, $P=0.5494$),日龄和性别的互作对累计飞行时间的影响同样没有达到显著水平($F=1.65$, $P=0.1371$)。

2.3 平均飞行速度

在 22 小时连续吊飞条件下,橘小实蝇雌蝇的平均飞行速度峰值出现在 16 日龄,此时的平均飞行速度均值为 0.39 m/s (标准差 STD=0.08)。6、11、21、31 日龄的平均飞行速度均值在 0.26—0.29 m/s 之间,1 日龄和 26 日的平均飞行速度均值在 0.18—0.19m/s 之间,雌蝇各个日龄平均飞行速度的变化趋势参见图 1-C。对雌

蝇不同日龄的平均飞行速度进行单因子方差分析,结果显示日龄因素对平均飞行速度的影响达到极其显著水平($F=3.12$, $P=0.0085$)。橘小实蝇雄蝇的平均飞行速度羽化后从 1 日龄至 16 日龄持续增加,16 日龄的平均飞行速度均值为 0.26m/s (标准差 $STD=0.10$),经 21 日龄的小幅下降调整后,在 26 日龄出现最高峰值,此时的平均飞行速度均值为 0.30 m/s (标准差 $STD=0.11$)。雄蝇 31 日龄的平均飞行速度均值维持在高水平,平均飞行速度均值为 0.28 m/s (标准差 $STD=0.06$)。对雄蝇不同日龄的平均飞行速度进行单因子方差分析,结果显示日龄因素对平均飞行速度的影响达到极其显著水平($F=5.02$, $P=0.0002$)。对平均飞行速度进行双因子方差分析,统计结果显示,日龄因素对橘小实蝇平均飞行速度的影响达到极其显著水平($F=4.98$, $P=0.0001$),性别因素对平均飞行速度的影响达到了显著水平($F=4.10$, $P=0.0444$),日龄和性别的互作对平均飞行速度的影响也达到显著水平($F=2.74$, $P=0.0144$)。

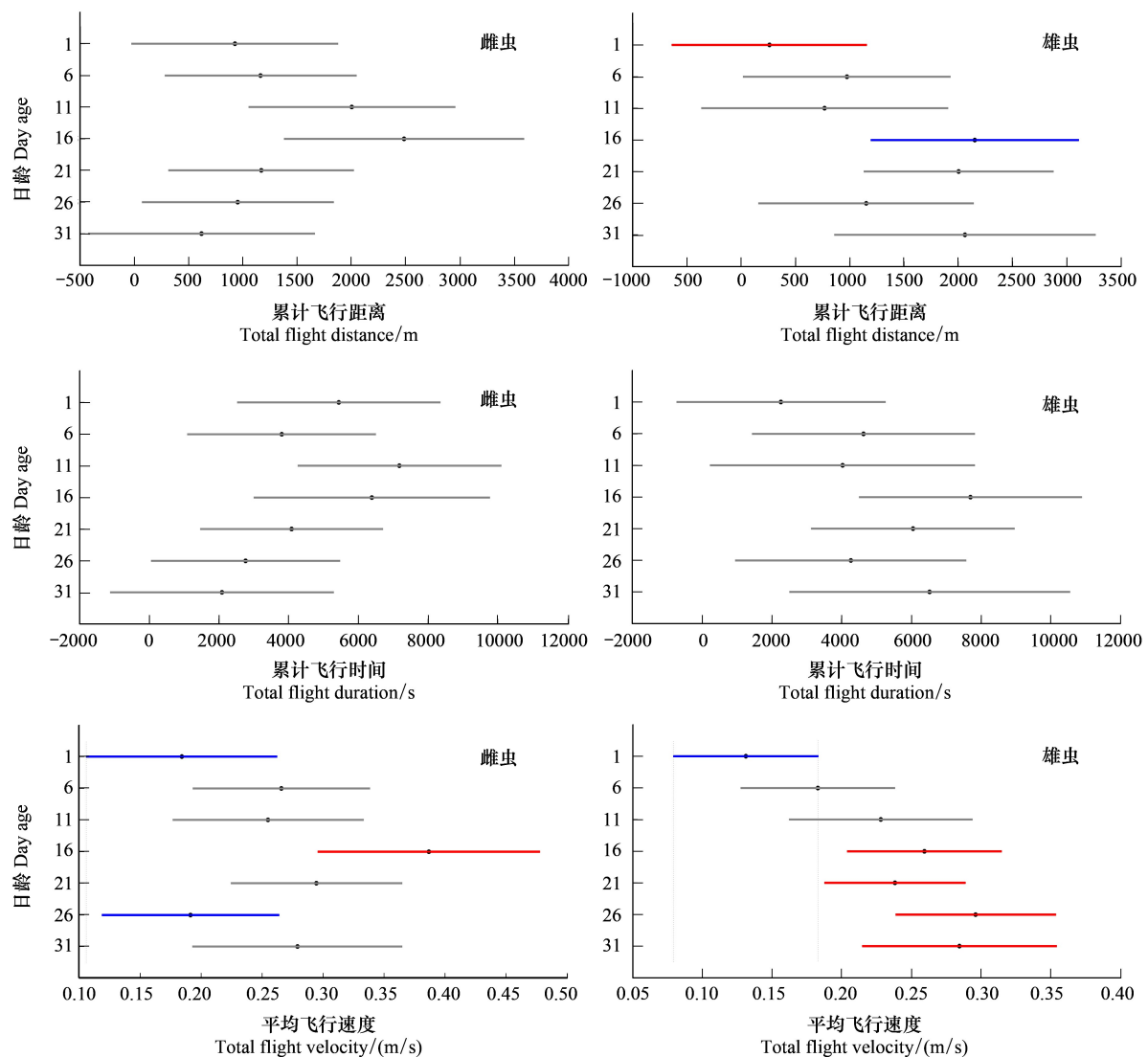


图 1 吊飞条件下日龄对橘小实蝇飞行的影响

Fig. 1 Impact of day age on flight capacity of the oriental fruit fly, *Bactrocera dorsalis* in tethered

A, D, 日龄对累计飞行距离的影响,横坐标单位为 m; B, E, 日龄对累计飞行时间的影响,横坐标单位为 s; C, F, 日龄对平均飞行速度的影响,横坐标单位为 m/s。A, B, C, 雌虫; D, E, F, 雄虫。圆点表示均值,横线表示 95% 置信区间。

2.4 雌雄蝇极限飞行能力比较

橘小实蝇雌蝇的累计飞行距离最大值出现在 16 日龄,其中 1 头在连续 22 小时吊飞试验中完成了

8116.60 m 的飞行。雄蝇的累计飞行距离最大值出现在 21 日龄,其中 1 头在连续 22 小时吊飞试验中完成了 8795.80 m 的飞行。

3 讨论

一般而言,昆虫在成虫期的各种生命活动都围绕生殖活动展开,雌虫和雄虫共同完成的行为主要是求偶和交配,雌虫独立完成的是产卵。日龄对昆虫成虫飞行能力有明显的影响^[5, 26, 27, 32-33, 64, 66],这一结论在本试验中再次得到印证。总体来说橘小实蝇的飞行能力雌虫略强于雄虫,雌虫和雄虫均在 16 日龄的飞行能力达到峰值。就飞行能力高峰期的持续时间来看,雌虫在 16 日龄前的 11 日龄,飞行能力也达到较高水平;雄虫在 16 日龄后的 21、26、31 日龄,仍然处于较高水平。根据本试验研究结果可以初步判断,橘小实蝇的雄虫完成交配活动的最佳日龄为 16—31 日龄。雌虫完成交配、产卵等生殖活动的最佳日龄为 11—16 日龄。

关于橘小实蝇的交配与产卵习性,根据作者在试验过程的观察,夏秋季节最早交配时间发生在 7—8 日龄,冬季节交配高峰期推迟到 15—16 日龄,雌虫最早在 11 日龄开始产卵。本次吊飞研究发现雌虫的飞行能力在羽化初期就明显高于雄虫,在 1 日龄累计飞行距离均值达到 925.67 m,然后迅速增加,至 11 日龄累计飞行距离均值达到第 2 峰值的 2004.70 m,此时和雌虫的产卵开始日龄基本吻合。雌虫飞行能力的高峰日龄出现在 16 日龄,累计飞行距离均值达到 2485.60 m,此期和雌虫的产卵高峰日龄基本吻合。雌蝇 21 日龄和 26 日龄时累计飞行距离由 1168.70 m 下降至 953.70 m,在 31 日龄进一步下降至 618.01 m,这一阶段和产卵后期基本吻合。任荔荔等的研究发现 14 日龄后橘小实蝇达到性成熟,雌蝇对雄蝇的交配活动有一定选择性,拒绝雄蝇交配的比例很高^[46]。在本研究中发现,雌虫 11 日龄的各项飞行参数和雄虫 16 日龄前(不包括 16 日龄)的各个日龄相应指标相比,飞行能力具有明显的优势,具备拒绝低龄雄蝇交配的生理基础。而朱家颖等在室内饲养条件下观察到橘小实蝇成虫在羽化后 20 多天开始交尾,交尾后 2—4 d 开始产卵,产卵开始 20 d 后达到高峰^[74],产卵高峰出现在 42—44 日龄,但没有指明饲养温度条件,估计是由于试验温度偏低造成的。根据本试验中雄虫各个日龄的飞行行为表现,似乎可以初步判断雄虫适宜交配的日龄应该在 16—31 日龄,以 16—21 日龄最为适宜,这一结论还有待进一步的研究来证实。26 日龄雄蝇在累计飞行距离和累计飞行时间两个飞行参数上处于较低水平,而在平均飞行速度这一参数上表现为最大峰值,这种差异形成的原因还不清楚,作者推测是第 1 次交配高峰过后的调整阶段,待补充营养及精巢精小管再次发育后,再次进入第 2 次交配期。另外,31 日龄后雄蝇的飞行能力变化还需扩大试验种群规模开展进一步研究。

橘小实蝇尽管已经从最新的我国 2009 年版的《全国农业植物检疫性有害生物名单》中去掉,仍然是我国《进境检疫性有害名录》中列出的需要管控的检疫性有害生物(我们认为此蝇应归入外来物种)。根据联合国粮农组织发布的《第 26 号国际植物检疫措施标准》的规定,建立实蝇非疫区的前提条件是需要满足在 12 个月的连续监测中,不得检出任何 1 头幼期标本、2 头或更多头可育的成虫、或 1 头已经成功授精的雌虫标本。本次研究发现 22 h 连续吊飞条件下,16 日龄橘小实蝇雄蝇的平均累计飞行距离为 2152 m(标准差 STD=1773.30),而 21 日龄雄蝇的平均累计飞行距离为 2004.50 m(标准差 STD=2674.90),累计飞行距离的最大值出现在 21 日龄,为 8795.80 m。在建立橘小实蝇非疫区时我们认为用于监测的诱捕器放置距离可以控制在 2000 m,完全可以达到监测实蝇种群动态的目的。在缓冲区边界的设置上,最窄范围不应低于 4500 m(雌蝇 16 日龄累计飞行距离 95%置信区间上限为 4243.73 m),如果根据雌蝇累计飞行最大距离 8116.60 m 设定缓冲区边界的宽度,可以考虑 8500 m。同时在以上缓冲区内保持高强度的监测活动,可以保证缓冲区内部的非疫区不受外来实蝇传入的影响。本研究对缓冲区范围设置的建议同样适用于此种害虫治理的其他实践,包括生物防控技术、抗性治理等。

不育昆虫释放技术是可持续现代农业重要基础技术之一,在实蝇害虫防治上已有许多成功的经验。胡建峰等发现橘小实蝇不育雄虫田间释放后,第 6 天最远扩散距离为 208 m^[75]。梁广勤等测定橘小实蝇不育雄虫在杨桃园内的高密度扩散区域为 140 m 以内,最远回捕个体可达 340 m^[76]。根据我们的研究结果,橘小实

雌雄蝇飞行能力的高峰日龄在 16—31 日龄,以 16 日龄为最强。如果在 16 日龄进行不育雄蝇的释放,和野外雌蝇的交配适期相重合,很有可能取得最佳的防治效果。下一步的研究应该针对辐射后的雄蝇和未辐射雄蝇的飞行行为的差异开展,筛选最佳的不育雄蝇释放时期,改进橘小实蝇的雄性不育的野外释放技术。胡建峰等发现蛹末期释放的橘小实蝇不育雄虫田间释放后最长存活期为 15 d,似乎反映不育处理对雄蝇的寿命有较大的影响,相关的研究还需要进一步开展。

不同地理种群对橘小实蝇飞行能力的影响还没有明确的报道。梁帆等曾经报道了 2 头来自广州地区的橘小实蝇室内驯化第 3 代 7—8 日龄成虫在吊飞条件的的极限飞行距离分别是 44.8 km 和 46.5 km。这一结果和我们的研究结果(最大累计飞行距离为 8795.80 m,由 21 日龄雄虫完成,见表 3)出入较大,估计是由于仪器误差造成。飞行磨的吊臂的长度、材质、吊臂中轴的差异对飞行阻力的影响较大。自由飞行和吊飞飞行参数的换算,涉及不同仪器条件下试虫的流体力学计算分析,这也是未来开展的吊飞研究必需尽早解决的问题。

利用飞行磨系统获得的飞行能力等运动参数和自由飞行时的运动参数一般不做对等的横向比较。这是因为吊飞过程仅仅是飞行过程在实验室内的模拟,由于吊臂对试虫的悬挂,引起空气阻力的增大,引起试虫飞行能力指标值的偏低;同时试虫在吊臂上的粘接又使试虫在飞行过程不用承担体重,引起试虫飞行能力指标值的增高。以上两种因素混合影响后,导致吊飞研究得到的飞行行为参数和真实飞行参数的关系比较复杂,即便在不同昆虫行为学家之间也没有统一的意见。不同飞行磨系统之间的飞行行为参数比较存在类似的问题,由于吊臂的材质、粗细、以及飞行磨加工工艺不同引起的摩擦阻力的差异,以及麻醉方法、试虫的粘接方法和姿态差异,使得不同研究人员利用不同飞行磨系统获得的昆虫飞行行为参数也无法精确地进行横向比较。尽管有诸多缺点,但是吊飞研究由于其简便易行,仍然是昆虫飞行行为研究不可或缺的基础手段。由此获得的飞行参数尽管不能精确的反映昆虫的飞行能力,对害虫的防控及益虫的利用仍然具有的重要的参考价值。

致谢:感谢新乡市农作物重大有害生物防控重点实验室的技术支持。

参考文献(References):

- [1] Hao Y N, Miao J, Wu Y Q, Gong Z J, Jiang Y L, Duan Y, Li T, Cheng W N, Cui J X. Flight performance of the orange wheat blossom midge (Diptera: Cecidomyiidae). *Journal of Economic Entomology*, 2013, 106(5): 2043-2047.
- [2] 丁楠, 辛星光, 周仙红, 门兴元, 于毅, 张安盛, 李丽莉, 庄乾营. 凹唇壁蜂成蜂体重与取食对其飞行能力的影响. *昆虫学报*, 2013, 56(8): 884-889.
- [3] 刘向蕊, 吕宝乾, 金启安, 温海波, 李朝绪, 阎伟, 彭正强, 冯雨艳, 李晓飞. 新入侵害虫椰子织蛾飞行能力测定. *热带作物学报*, 2014, 35(8): 1610-1614.
- [4] 程登发, 田喆, 李红梅, 孙京瑞, 陈巨莲. 温度和湿度对麦长管蚜飞行能力的影响. *昆虫学报*, 2002, 45(1): 80-85.
- [5] Cui J X, Li S J, Zhao P, Zou F M. Flight capacity of adult *Culex pipiens pallens* (Diptera: Culicidae) in relation to gender and day-age. *Journal of Medical Entomology*, 2013, 50(5): 1055-1058.
- [6] 黄露, 杨德松, 李保平, 孟玲. 斑痣悬茧蜂的飞行能力和野外扩散行为. *生态学杂志*, 2011, 30(7): 1327-1331.
- [7] 岳荣强, 郭文超, 吐尔逊, 何江. 马铃薯甲虫卵巢发育及产卵状况与飞行能力的关系研究. *新疆农业科学*, 2013, 50(5): 829-838.
- [8] 郭文超, 吐尔逊, 郭利娜, 何江, 许建军. 营养对马铃薯甲虫迁飞能力的影响. *新疆农业科学*, 2012, 49(3): 461-469.
- [9] 郭利娜, 郭文超, 吐尔逊, 何江, 许建军. 温度与取食对越冬后马铃薯甲虫飞行能力的影响. *植物保护*, 2011, 37(5): 56-61.
- [10] 郭利娜, 郭文超, 刘曼双, 吐尔逊, 何江, 许建军. 拥挤度对马铃薯甲虫飞行能力的影响. *新疆农业科学*, 2011, 48(2): 320-327.
- [11] 郭利娜, 郭文超, 吐尔逊, 何江, 许建军. 寄主对马铃薯甲虫飞行能力的影响. *新疆农业科学*, 2011, 48(5): 853-858.
- [12] 汪远昆, 翟保平. 白背飞虱的再迁飞能力. *昆虫学报*, 2004, 47(4): 467-473.
- [13] 贾佩华, 曹雅忠. 小地老虎成虫的飞翔活动. *昆虫学报*, 1992, 35(1): 59-65.
- [14] 曹雅忠. 小地老虎飞翔行为的观察. *昆虫知识*, 1994, 31(2): 71-73.
- [15] 吕伟祥, 江幸福, 张蕾, 罗礼智. 一日龄粘虫不同时长吊飞对生殖及寿命的影响. *应用昆虫学报*, 2014, 51(4): 914-921.
- [16] 罗礼智, 李光博, 曹雅忠, 胡毅. 粘虫幼虫密度对成虫飞行与生殖的影响. *昆虫学报*, 1995, 38(1): 38-45.
- [17] 李克斌, 罗礼智. 粘虫飞行肌中与能量代谢有关的酶活性研究. *昆虫学报*, 1999, 42(1): 37-43.
- [18] 尹姣, 封洪强, 程登发, 曹雅忠. 粘虫成虫在气流场中飞行行为的观察研究. *昆虫学报*, 2003, 46(6): 732-738.

- [19] Jiang X F, Luo L Z, Thomas W Sappington. Relationship of flight and reproduction in beet armyworm, *Spodoptera exigua* (Lepidoptera: Noctuidae), a migrant lacking the oogenesis-flight syndrome. *Journal of Insect Physiology*, 2010, 56(4): 1631-1637.
- [20] 江幸福, 罗礼智, 胡毅. 甜菜夜蛾飞行能力及其与蛾龄的关系//程登发. 植物保护二十一世纪展望. 北京: 中国科学技术出版社, 1998: 568-571.
- [21] 江幸福, 罗礼智, 胡毅. 成虫期营养对甜菜夜蛾生殖和飞行的影响. *植物保护学报*, 2000, 27(4): 327-332.
- [22] 江幸福, 罗礼智, 李克斌, 曹雅忠, 胡毅, 刘悦秋. 温度对甜菜夜蛾飞行能力的影响. *昆虫学报*, 2002, 45(2): 275-278.
- [23] 韩兰芝, 翟保平, 张孝羲, 刘培磊. 甜菜夜蛾飞行肌中与能量代谢有关的酶活性. *生态学报*, 2005, 25(5): 1101-1106.
- [24] 刘辉, 李克斌, 尹姣, 杜桂林, 赵萱, 曹雅忠. 群居型与散居型东亚飞蝗飞行能力的比较研究. *植物保护*, 2007, 33(2): 34-37.
- [25] 张龙, 严毓骅, 李光博, 曹雅忠. 蝗虫微孢子虫病对东亚飞蝗飞翔能力的影响. *草地学报*, 1995, 3(4): 324-327.
- [26] 崔建新, 张玉勤, 刘吉起, 冯玉洁, 赵旭东. 吊飞条件下日龄及性别对家蝇成虫飞行能力的影响. *寄生虫与医学昆虫学报*, 2011, 18(2): 103-110.
- [27] 刘吉起, 崔建新, 张玉勤, 邓天福, 赵旭东. 不同性别家蝇吊飞行为研究. *中国媒介生物学及控制杂志*, 2011, 22(3): 212-214, 222-222.
- [28] Cui J X, Cai W Z. Diversity of flight performance of tethered *Cletus rusticus* Stål (Hemiptera: Coreidae) // Sheng X C, Zhang R Z, Ren Y D, eds. *Classification and Distribution of Insect in China*. Beijing: China Agricultural and Technical Press, 2008: 539-551.
- [29] Cui J X, Cai W Z. Flight patterns of *Cletus rusticus* (Stål) (Hemiptera: Coreidae) // Burgin M et al, eds. *Proceedings of the 2009 WRI World Congress on Computer Science and Information Engineering*. Los Angeles: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2009: 617-621.
- [30] Cui J, Cai W. Flight performance of a tethered stink bug, *Grapsoma rubrolineata* (Westwood) (Hemiptera: Pentatomidae). *Journal of Life Sciences*, 2008, 2(12): 5-11.
- [31] 崔建新, 冯玉洁. 茶翅蝽(半翅目: 蝽科)吊飞飞行行为 // 原国辉, 郭线茹, 王高平, 李为争. *华中昆虫研究(第七卷)*. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2011: 8-13.
- [32] 徐艳聆, 于艳敏, 张肖霞, 崔建新. 玉米螟成虫羽化早期飞行能力研究. *河南科技学院学报*, 2011, 39(4): 36-41.
- [33] 翟保平, 陈瑞鹿. 亚洲玉米螟飞翔能力的初步研究. *吉林农业科学*, 1989, 14(1): 40-46.
- [34] 林明光, 汪兴鉴, 曾玲, 张艳, 蔡波. 海南果蔬实蝇种类、地理分布及危害调查. *植物检疫*, 2013, 27(5): 85-89.
- [35] 屈海学, 孙静双. 北京地区橘小实蝇的生活习性观察. *中国园艺文摘*, 2013, 29(2): 51-51, 62-62.
- [36] Wan X W, Liu Y H, Zhang B. Invasion history of the oriental fruit fly, *Bactrocera dorsalis*, in the Pacific-Asia region: two main invasion routes. *PLoS One*, 2012, 7(5): e36176.
- [37] 陈景芸, 蔡平, 张国彪, 孙振军. 橘小实蝇发生与综合防治研究进展. *安徽农业科学*, 2011, 39(28): 17324-17326, 17336-17336.
- [38] 李鸿筠, 刘浩强, 姚廷山, 胡军华, 冉春, 雷慧德, 黄良炉, 张萍. 橘小实蝇发生期及发生量预测模型研究. *果树学报*, 2010, 27(2): 275-280.
- [39] 郑重禄, 陈国庆. 橘小实蝇生物学特性研究(综述). *浙江柑橘*, 2010, 27(1): 26-31.
- [40] 刘年喜, 周社文, 肖铁光, 王伏强, 何建云, 郑先敏, 吴昌奇, 李姣. 不同性诱剂对橘小实蝇的监测作用. *作物研究*, 2009, 23(3): 201-202.
- [41] 孔令斌, 林伟, 李志红, 黄冠胜, 梁忆冰. 气候因子对橘小实蝇生长发育及地理分布的影响. *昆虫知识*, 2008, 45(4): 528-531.
- [42] 吕欣, 韩诗畴, 徐洁莲, 黄鸿, 吴华, 欧剑峰, 孙力. 广州橘小实蝇(*Bactrocera dorsalis* (Hendel))发生动态及气象因子. *生态学报*, 2008, 28(4): 1850-1856.
- [43] 侯柏华, 张润杰. 基于 CLIMEX 的桔小实蝇在中国适生区的预测. *生态学报*, 2005, 25(7): 1569-1574.
- [44] Rick Drew, Allwood A J, Chinajariyawong A, Hamacek E L, Hancock D L, Hengsawad, C, Jinapin J C, Jirasurat M, Kong K C, Kritsaneeapiboon S, Leong C T S, Vijaysegaran S. Host plant records for fruit flies (Diptera: Tephritidae) in South East Asia. *The Raffles Bulletin of Zoology*, 1999, (Supplement 7): 1-92.
- [45] Anthony R Clarke, Karen F Armstrong, Amy E Carmichael, John R Milne, Raghu S, George K Roderick, David K Yeates. Invasive phytophagous pests arising through a recent tropical evolutionary radiation: the *Bactrocera dorsalis* complex of fruit flies. *Annual Review of Entomology*, 2005, 50: 293-319.
- [46] 任荔荔, 祁力言, 蒋巧根, 周曙东, 戴华国. 植物果实、颜色和形状对橘小实蝇产卵选择的影响. *昆虫知识*, 2008, 45(4): 593-597.
- [47] 周湾, 王建欣, 胡盛根, 邱志刚, 许凤仙, 施祖华. 浙江省橘小实蝇发生动态调查. *植物保护*, 2010, 36(3): 179-180.
- [48] 张清源, 林振基, 刘金耀, 陈华忠, 高泉准, 孙国坤, 洪赞侨, 孙德华, 陈加福. 桔小实蝇生物学特性. *华东昆虫学报*, 1998, 7(2): 65-68.
- [49] Christenson L D, Foote R H. Biology of fruit flies. *Annual Review of Entomology*, 1960, 5: 171-192.
- [50] 马兴莉, 李志红, 胡学难, 吴佳教. 橘小实蝇、瓜实蝇和南亚果实蝇对广东省造成的经济损失评估. *植物检疫*, 2013, 27(3): 50-56.
- [51] 许志刚. *植物检疫学(第三版)*. 北京: 高等教育出版社, 2008: 250-251.

- [52] 邓裕亮, 李正跃, 张宏瑞. 西双版纳州桔小实蝇、瓜实蝇和南瓜实蝇种群动态监测. 西南农业学报, 2006, 19(4): 643-648.
- [53] 王穗, 吴昌奇, 肖铁光. 长沙地区实蝇监测研究. 作物研究, 2010, 24(1): 122-124.
- [54] 黄居昌, 郑思宁, 叶光禄, 陈家骅. 不同季节与气象因素对橘小实蝇日飞翔活动节律的影响. 热带作物学报, 2011, 32(10): 1926-1930.
- [55] Ronald J Prokopy, Thomas A Green, Wavel A Olson, Roger I Vargas, Dale Kanehisa, Tim T Y Wong. Discrimination by *Dacus dorsalis* females (Diptera: Tephritidae) against larval-infested fruit. Florida Entomologist, 1989, 72(2): 319-323.
- [56] 王波, 季清娥, 陈家骅, 韩英. 不同营养条件对橘小实蝇实验种群生殖力及生命表的影响. 热带作物学报, 2012, 33(3): 551-555.
- [57] 梁帆, 吴佳教, 梁广勤. 桔小实蝇飞行能力测定试验初报. 江西农业大学学报, 2001, 23(2): 259-260.
- [58] Steiner L F, Mitchell W C, Baumhover A H. Progress of fruit-fly control by irradiation sterilization in Hawaii and the Marianas Islands. The International Journal of Applied Radiation and Isotopes, 1962, 13(7-8): 427-434.
- [59] Fletcher B S. The biology of dacine fruit flies. Annual Review of Entomology, 1987, 32: 115-144.
- [60] 梁广勤, 梁国真, 林明, 梁帆. 实蝇及其防除. 广州: 广东科技出版社, 1993: 93-104.
- [61] Lu Y H, Wu K M, Guo Y Y. Flight potential of *Lygus lucorum* (Meyer-Dür) (Heteroptera: Miridae). Environmental Entomology, 2007, 36(5): 1007-1013.
- [62] Lu Y H, Wu K M, Wyckhuys K A G, Guo Y Y. Comparative flight performance of three important pest *Adelphocoris* species of Bt cotton in China. Bulletin of Entomological Research, 2009, 99(6): 543-550.
- [63] 程登发, 田喆, 孙京瑞, 倪汉祥, 李光博. 适用于蚜虫等微小昆虫的飞行磨系统. 昆虫学报, 1997, 40(增刊): 172-179.
- [64] 宋宣宣, 左现刚, 邹富民, 崔建新. 淡色库蚊潜在的飞行能力. 中国媒介生物学及控制杂志, 2013, 24(1): 50-54.
- [65] 王凤英, 张孝羲, 翟保平. 稻纵卷叶螟的飞行和再迁飞能力. 昆虫学报, 2010, 53(11): 1265-1272.
- [66] 吴孔明, 郭予元. 棉铃虫的飞翔活动. 生态学报, 1996, 16(6): 612-617.
- [67] 李咏军, 魏蕾, 王恩东, 刘晓辉, 路大光. 辐照对棉铃虫雌虫交配能力的影响. 核农学报, 2008, 22(4): 539-543.
- [68] 蒋月丽, 曹雅忠, 李克斌, 尹姣, 武予清, 段云. 不同波长光对棉铃虫飞翔活动影响的初步研究. 植物保护, 2008, 34(6): 36-39.
- [69] 郑祖强, 张孝羲, 谢俊英, 密秀云. 棉铃虫飞行能力和兼性迁飞的初步研究. 应用生态学报, 2000, 11(4): 603-608.
- [70] 张孝羲, 郑祖强, 谢俊英, 密秀云. 棉铃虫兼性迁飞的初步研究. 植物保护与推广, 1998, 18(3): 3-5.
- [71] 崔建新, 王丹. 泛长角绒毛金龟(*Toxocerus fairmairei*)吊飞行为初步研究 // 原国辉, 郭线茹, 王高平, 李为争. 华中昆虫研究(第七卷). 北京: 中国农业科学技术出版社, 2011: 8-13.
- [72] 翟保平. 越冬代七星瓢虫和异色瓢虫的飞翔能力. 应用生态学报, 1990, 1(3): 214-220.
- [73] Liu Z F. Migratory adaptations in *Chrysoperla sinica* (Neuroptera: Chrysopidae). Environmental Entomology, 2011, 40(2): 449-454.
- [74] 朱家颖, 肖春, 严乃胜, 袁盛勇. 橘小实蝇生物学特性研究. 山地农业生物学报, 2004, 23(1): 46-49.
- [75] 胡建峰, 杨建全, 陈家骅, 黄居昌, 季清娥, 何榕宾. 橘小实蝇不育雄虫田间释放效果. 福建农林大学学报: 自然科学版, 2011, 40(6): 582-584.
- [76] 梁广勤, 梁帆, 赵菊鹏, 邹伟权, 周庆贤, 伍伟亮, 吴佳教, 胡学难. 桔小实蝇不育技术及应用研究. 广东农业科学, 2008, 35(5): 60-63.