



金纹细蛾飞行能力测定

侯国辉, 崔笑雄, 朱 悦, 熊仁次*, 姚永生*

(塔里木大学农学院, 新疆农业有害生物综合治理兵团重点实验室, 新疆阿拉尔 843300)

摘要:【目的】明确金纹细蛾 *Lithocolletis ringoniella* 自身生理状态下的飞行能力, 了解其飞行生物学的基础参数。【方法】利用昆虫飞行磨系统, 室内测定了金纹细蛾雌雄成虫不同日龄和性别以及 5 日龄雌雄成虫补充营养(5% 蜂蜜水)与交配状态下的飞行距离、飞行时间、飞行速度等参数。【结果】连续吊飞 12 h 的结果显示, 金纹细蛾 3–6 日龄成虫飞行能力较强, 5 日龄成虫飞行能力最强; 5 日龄雌成虫的平均飞行距离、飞行时间和飞行速度分别为 2.293 ± 0.254 km, 5.341 ± 0.617 h 和 0.711 ± 0.126 km/h, 5 日龄雄成虫的平均飞行距离、飞行时间和飞行速度分别为 2.142 ± 0.276 km, 5.132 ± 0.628 h 和 0.620 ± 0.132 km/h, 说明雌雄成虫间飞行能力差异不显著。金纹细蛾 5 日龄雌雄成虫取食 5% 蜂蜜水后其飞行能力较对照显著提高, 取食 5% 蜂蜜水后 5 日龄雌成虫的飞行距离、飞行时间和飞行速度较对照(取食清水)的分别提高 46.945%, 15.430% 和 15.978%; 5 日龄雄成虫的飞行距离、飞行时间和飞行速度较对照分别提高 42.610%, 13.590% 和 6.529%。交配后 5 日龄雌成虫的飞行距离、飞行时间和飞行速度较未交配雌成虫的分别提高 41.628%, 7.152% 和 39.925%, 而 5 日龄雄成虫交配后飞行能力则较未交配雄成虫的分别降低 35.823%, 17.888% 和 46.129%。【结论】金纹细蛾成虫具有一定的飞行能力, 补充营养和雌雄交配状态对飞行能力有重要影响。

关键词: 金纹细蛾; 性别; 补充营养; 交配状态; 飞行能力; 飞行磨

中图分类号: Q968 文献标识码: A 文章编号: 0454-6296(2022)05-0612-09

Determination of the flight capacity of *Lithocolletis ringoniella* (Lepidoptera: Gracillariidae)

HOU Guo-Hui, CUI Xiao-Xiong, ZHU Yue, XIONG Ren-Ci*, YAO Yong-Sheng* (Key Laboratory of Xinjiang Production and Construction Corps in Comprehensive Agricultural Pest Management in Southern Xinjiang, College of Agriculture, Tarim University, Alar, Xinjiang 843300, China)

Abstract: 【Aim】To determine the flight capacity of the Asiatic apple leafminer, *Lithocolletis ringoniella*, under its own physiological state and to understand the basic parameters of its flight biology. 【Methods】The flight distance, flight duration and flight speed of different day-old adults of both genders of *L. ringoniella*, and the 5-d-old female and male adults provided with complementary nutrition (5% honey water) and under different mating states were measured in the laboratory with insect flying mill system. 【Results】Subjected to continuous 12 h tethered flight, the 3–6-d-old adults of *L. ringoniella* had better flight capacity, and the 5-d-old adults had the best flight capacity. The average flight distance, flight duration and flight speed of the 5-d-old female adults were 2.293 ± 0.254 km, 5.341 ± 0.617 h and 0.711 ± 0.126 km/h, respectively, and those of males were 2.142 ± 0.276 km, $5.132 \pm$

基金项目: 兵团科技攻关项目“兵团林果业重大病虫害综合治理研究与示范”(2019AB023); 国家重点研发计划项目“阿瓦提水盐平衡治理模式及棉花林果产业示范”(2016YFC0501407)

作者简介: 侯国辉, 男, 1995 年 10 月生, 新疆阿拉尔人, 硕士研究生, 研究方向为有害生物综合治理, E-mail: 2659264905@qq.com

* 通讯作者 Corresponding authors, E-mail: xrcqwb@qq.com; yyszky@163.com

收稿日期 Received: 2021-06-15; 接受日期 Accepted: 2021-09-18

0.628 h and 0.620 ± 0.132 km/h, respectively, suggesting that the flight capacity is not significantly different between male and female adults. The flight capacities of the 5-d-old male and female adults were significantly improved after being fed with 5% honey water. The flight distance, flight duration and flight speed of the 5-d-old female adults fed with 5% honey water were increased by 46.945%, 15.430% and 15.978%, respectively, and those of the 5-d-old male adults were increased by 42.610%, 13.590% and 6.529%, respectively, as compared with those in the control (fed with water). After mating, the flight distance, flight duration and flight speed of the 5-d-old female adults were increased by 41.628%, 7.152% and 39.925%, respectively, as compared with unmated females, while those of the 5-d-old male adults were decreased by 35.823%, 17.888% and 46.129%, respectively, as compared with unmated males. 【Conclusion】 *L. ringoniella* adults have a certain flight capacity, which is affected by complementary nutrition and their own mating states.

Key words: *Litocolletis ringoniella*; gender; complementary nutrition; mating status; flight capacity; flying mill

金纹细蛾 *Lithocolletis ringoniella* 属鳞翅目 (Lepidoptera) 细蛾科 (Gracillariidae), 是果树一种常见的潜叶性害虫, 主要寄主为苹果, 其次是海棠、沙果、山定子、山楂、梨、李、桃、樱桃、槟子等果树 (石勇强等, 2003; 于江南, 2010; 虞国跃等, 2014)。成虫将卵单粒散产于果树叶片背面, 幼虫孵化后潜入叶肉内为害, 呈“泡囊”状虫斑, 影响叶片的光合作用。发生严重时每片叶上有 10~20 个虫斑, 致使叶片皱缩提前脱落, 果实生长受阻或脱落, 还可能出现二次开花, 影响翌年花芽的生长与结果, 造成严重的经济损失 (Fan *et al.*, 2015)。2013 年在新疆伊犁地区特克斯县首次报道金纹细蛾为害, 发生盛期对苹果园为害率达到 25%~55% (翟浩等, 2013; 陈川等, 2016; 陈卫民等, 2016)。近年来新疆大力发展特色林果业, 苹果在南疆环塔里木盆地种植面积逐年扩大, 栽培品种以红富士为主 (新疆生产建设兵团统计局, 2013; 姜云斌等, 2019)。红富士品种对金纹细蛾表现为高感, 加上气候变暖、栽培管理等诸多因素, 为其提供了良好的生存环境, 金纹细蛾在苹果园的危害日趋严重 (秦玉川和杨书林, 2002), 制约了新疆苹果产业的健康可持续发展。

金纹细蛾为东亚特有种, 主要分布于日本、韩国、朝鲜及我国北部、中部和西北部地区 (Yamada *et al.*, 1971; Lee *et al.*, 1985; 王春蕾, 2016), 国内包括黑龙江、吉林、辽宁、河北、河南、山东、山西、陕西、甘肃、四川、安徽、江苏、新疆等省 (自治区), 并有逐年扩散的趋势。近年来国内外学者对金纹细蛾形态特征、发生规律、生活习性、生物学特性及防治技术开展了大量研究 (石永强等, 2003; 李进, 2012; 张

玉琴, 2013; 陈川等, 2016; 刘雪莹等, 2021), 但未见有关其飞行能力的相关报道。飞行是昆虫长期进化过程中对生存环境的适应, 保持其种群繁衍的一种生存对策, 也是昆虫进行短距离扩散、扩大种群危害范围的重要方式, 而具有一定飞行能力的昆虫可以在特定的季节借助风力向较远距离的寄主扩散危害, 因此昆虫的短距离扩散逐渐被人们重视 (Dingle and Drake, 2007; 周国磊等, 2018)。测定昆虫飞行能力是研究昆虫飞行生物学的基础 (Campose *et al.*, 2004), 对探讨昆虫飞行扩散机制十分必要, 目前普遍采用的方法是利用昆虫飞行磨吊飞 (Riley *et al.*, 1995; 崔建新等, 2016; Kees *et al.*, 2017), 准确获取昆虫飞行能力参数。昆虫的飞行能力受多种因素的影响, 包括日龄、性别、营养状态、交配状态、生殖、温度、湿度、光照等 (袁瑞玲等, 2016; 刘莎等, 2018)。近年来金纹细蛾的为害程度愈加严重, 对防治工作带来了诸多困难, 为了减少其造成的灾害损失及防治投入的成本, 探究金纹细蛾为害范围逐年扩大是否与其飞行能力有关, 明确自身生理状态对其飞行能力的影响, 对理解金纹细蛾的扩散蔓延、综合防治具有重要指导意义。因此, 本研究利用昆虫飞行磨系统, 测定了金纹细蛾成虫不同日龄、性别、补充营养与交配状态下的飞行能力参数, 旨在了解金纹细蛾的飞行生物学, 为阐明其扩散机制和规律、开展预测预报与防控提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试虫源及饲养

在金纹细蛾越冬代成虫发生高峰期 (5 月下

旬),于阿拉尔市周边及塔里木大学苹果园采集带有金纹细蛾老熟幼虫的虫疤枝叶,带回实验室插入营养液中保湿培养,待老熟幼虫化蛹后将其从虫疤叶中剥离出来,置于培养皿内人工饲养建立实验室种群,每培养皿饲养5头蛹,皿底垫入定性滤纸喷水保湿。饲养过程中,持续到苹果园进行虫疤枝叶的采集,补充室内饲养虫源。待实验室种群羽化后,区别雌雄分别放入相同规格的养虫笼(长 $\times$ 宽 $\times$ 高=75 cm $\times$ 75 cm $\times$ 75 cm)中,贴上标签注明羽化日期和性别供试验使用,每日适量添加5%的蜂蜜水为成虫补充营养。金纹细蛾饲养温度为 $25 \pm 1^\circ\text{C}$ 、相对湿度为 $70\% \pm 5\%$ 、光周期为14L:10D。

1.2 试验仪器

仪器设备:昆虫飞行磨信息系统(FXMD-24-USB型,河南佳多科工贸股份有限公司)、智能人工气候箱(RXZ-280B,宁波江南仪器厂)、加湿器(Bear JSQ-C50X5)、空调(美的)、温湿度计(HTC-1)、体视显微镜(蔡司V20,北京普瑞赛司仪器有限公司)。

1.3 飞行能力测定

吊飞试验参考郭江龙等(2016)方法并做部分调整,从实验室种群中随机捕获金纹细蛾不同日龄的成虫,保证试虫健康且能正常飞行,置于离心管内并编号。用脱脂棉蘸取少量乙醚将试虫轻微麻醉,然后放于有凹槽的泡沫板上展翅,用毛笔将胸腹连接处的鳞毛除去。取下悬吊在飞行磨上的吊臂,吊臂为直径0.5 mm,长30 cm的细钢丝。蘸取少许502胶将自制吊环与试虫胸腹交界处连接,吊环与试虫虫体保持垂直,静置1 min使胶完全凝固。将吊环套接于飞行磨吊臂末端,待试虫完全苏醒后观察其是否能振翅飞行,若能振翅飞行,将吊臂放回飞行磨上进行测试,保持吊环垂直于吊臂向下,使试虫绕飞行磨中心轴在水平方向上做切线旋转。吊飞试验于每日21:00时开始,吊飞时间为12 h,次日9:00时结束。吊飞试验于温度 $25 \pm 1^\circ\text{C}$ 、相对湿度 $70\% \pm 5\%$ 、完全黑暗的室内进行。

1.3.1 不同日龄成虫飞行能力:金纹细蛾羽化后,将雌、雄成虫分别放入相同规格的养虫笼中,饲喂5%蜂蜜水,选取1–10日龄健康的未交配成虫进行测试,连续吊飞12 h,确保每个日龄雌雄成虫分别测试15头。测定未交配成虫最大飞行参数,连续吊飞12 h,每个日龄雌雄成虫分别测试10头,重复3次。

1.3.2 不同性别成虫飞行能力:根据1.3.1节测试结果确定未交配成虫的飞行能力最佳日龄,金纹细蛾羽化后,将雌、雄成虫分别放入相同规格的养虫笼

中,饲喂5%蜂蜜水,雌、雄成虫各测定有效数量15头(实测20头左右,剔除偏差较大的个体),连续吊飞12 h,记录飞行参数。

1.3.3 补充营养的成虫飞行能力:根据1.3.1节测试结果确定未交配成虫的飞行能力最佳日龄,金纹细蛾羽化后,将雌、雄成虫分别放入相同规格的养虫笼中,设置饲喂5%蜂蜜水和清水两个处理,分别测定不同处理雌、雄成虫各15头的飞行参数,连续吊飞12 h。

1.3.4 交配与否成虫的飞行能力:根据1.3.1节测试结果确定未交配成虫的飞行能力最佳日龄,金纹细蛾羽化后,设置交配和未交配两个处理。一处理将雌雄成虫放入养虫笼中,任其自由交配;另一处理区分雌雄成虫放入不同养虫笼中,不进行交配。选取未交配雌、雄成虫和已交配雌、雄成虫,饲喂5%蜂蜜水,不同交配状态雌、雄成虫各测定有效数量15头,连续吊飞12 h,记录飞行参数。测试完并对雌虫进行卵巢解剖,通过有无精包来确定雌虫是否交配。如有精包则为交配雌虫,与其配对的则为交配雄虫,反之亦然,剔除未交配雌虫的飞行参数。

1.4 数据分析

采用Excel 2010, SigmaPlot 和 SPSS 20.0 软件进行数据处理与分析及图表制作。不同因素对金纹细蛾成虫飞行能力的影响采用单因素方差分析,不同日龄成虫的采用Duncan氏新复极差法比较差异显著性;不同性别、补充营养和交配状态下成虫的飞行能力采用 t 检验比较差异显著性。数据分析前对平均飞行时间、平均飞行距离、平均飞行速度的原始数据进行正态性检验,如不符合正态分布,则对数据进行平方根转换后再做统计分析,差异显著水平为 $P < 0.05$ 。

2 结果

2.1 不同日龄及不同性别金纹细蛾成虫的飞行能力

金纹细蛾雌雄成虫的飞行能力与日龄之间关系密切,随着日龄增加呈先升高后降低的变化趋势(表1)。连续12 h成虫吊飞结果表明:不同日龄雌雄成虫飞行能力存在明显差异。不同日龄雌成虫的飞行距离($F = 4.624$, $df_1 = 9$, $df_2 = 140$, $P < 0.05$)、飞行时间($F = 7.731$, $df_1 = 9$, $df_2 = 140$, $P < 0.05$)、飞行速度($F = 2.635$, $df_1 = 9$, $df_2 = 140$, $P < 0.05$)存在显著差异;不同日龄雄成虫的飞行距离($F = 5.145$, $df_1 = 9$, $df_2 = 140$, $P < 0.05$)、飞行

时间($F = 8.465$, $df1 = 9$, $df2 = 140$, $P < 0.05$)、飞行速度($F = 3.242$, $df1 = 9$, $df2 = 140$, $P < 0.05$)也存在显著差异。3–6 日龄成虫飞行能力相对较强,此后随着日龄增加飞行能力逐渐减弱,到 10 日龄成虫飞行能力最弱,雌雄成虫的飞行能力均在 5 日龄达到峰值,雌成虫平均飞行距离 2.293 ± 0.254 km,平均飞行时间 5.341 ± 0.617 h,平均飞行速度 0.711 ± 0.126 km/h;雄成虫平均飞行距离 2.142 ± 0.276 km,平均飞行时间 5.132 ± 0.628 h,平均飞行速度 0.620 ± 0.132 km/h。虽然金纹细蛾雌成虫的平均飞行距离、飞行时间和飞行速度均大于雄成虫,

但雌雄个体间平均飞行距离($t = 0.40$, $df = 28$, $P = 0.69$)、飞行时间($t = 0.24$, $df = 28$, $P = 0.81$)和飞行速度($t = 0.50$, $df = 28$, $P = 0.62$)均不存在显著差异($P > 0.05$)。

金纹细蛾雌雄成虫的最长飞行距离、最长飞行时间和最大飞行速度均在 5 日龄达到峰值(表 2)。最长飞行距离分别为 4.272 ± 0.201 和 4.223 ± 0.219 km,最长飞行时间分别为 8.733 ± 0.243 和 8.671 ± 0.179 h,最大飞行速度分别为 1.725 ± 0.199 和 1.632 ± 0.164 km/h。

表 1 金纹细蛾不同日龄成虫平均飞行距离、飞行时间和飞行速度

Table 1 Average flight distance, flight duration and flight speed of different day-old adults of <i>Lithocolletis ringoniella</i>						
日龄 Age in days	平均飞行距离 (km) Average flight distance		平均飞行时间 (h) Average flight duration		平均飞行速度 (km/h) Average flight speed	
	♀	♂	♀	♂	♀	♂
1	0.975 ± 0.199 cd	0.952 ± 0.197 cd	1.991 ± 0.364 d	1.983 ± 0.363 c	0.229 ± 0.051 c	0.223 ± 0.053 b
2	1.029 ± 0.204 cd	1.011 ± 0.201 cd	2.848 ± 0.403 cd	2.835 ± 0.397 bc	0.279 ± 0.061 c	0.251 ± 0.057 b
3	1.639 ± 0.230 abc	1.623 ± 0.223 abc	3.942 ± 0.498 bc	3.924 ± 0.497 ab	0.435 ± 0.084 bc	0.433 ± 0.087 ab
4	1.948 ± 0.240 ab	1.961 ± 0.246 ab	4.720 ± 0.601 ab	4.710 ± 0.601 a	0.592 ± 0.123 ab	0.589 ± 0.124 a
5	2.293 ± 0.254 a	2.142 ± 0.276 a	5.341 ± 0.617 a	5.132 ± 0.628 a	0.711 ± 0.126 a	0.620 ± 0.132 a
6	1.794 ± 0.234 ab	1.771 ± 0.238 ab	4.335 ± 0.553 ab	4.321 ± 0.556 a	0.423 ± 0.107 bc	0.415 ± 0.106 ab
7	1.458 ± 0.217 bcd	1.440 ± 0.212 bcd	3.857 ± 0.515 bc	3.781 ± 0.516 ab	0.405 ± 0.103 bc	0.399 ± 0.102 ab
8	1.335 ± 0.213 bcd	1.321 ± 0.211 bcd	2.618 ± 0.347 cd	2.610 ± 0.347 bc	0.399 ± 0.102 bc	0.395 ± 0.102 ab
9	0.971 ± 0.201 cd	0.962 ± 0.203 cd	1.919 ± 0.307 d	1.915 ± 0.317 c	0.235 ± 0.049 c	0.229 ± 0.048 b
10	0.785 ± 0.176 d	0.768 ± 0.171 d	1.572 ± 0.141 d	1.569 ± 0.270 c	0.221 ± 0.048 c	0.218 ± 0.046 b

室内采用飞行磨系统,测定成虫连续吊飞 12 h 时的飞行能力。下同。表中数据为平均值 ± 标准误;同一列数据后标有不同字母的为经 Duncan 氏多重比较差异显著($P < 0.05$)。表 2 同。The flight capacity of adults subjected to continuous 12 h tethered flight was measured in the laboratory with insect flying mill system. The same below. Data in the table are presented as mean ± SE, and those followed by different letters in the same column are significantly different by Duncan's multiple range test ($P < 0.05$). The same for Table 2.

表 2 金纹细蛾不同日龄成虫最长飞行距离和飞行时间以及最大飞行速度

Table 2 Maximum flight distance, flight duration and flight speed of different day-old adults of <i>Lithocolletis ringoniella</i>						
日龄 Age in days	最长飞行距离 (km) Maximum flight distance		最长飞行时间 (h) Maximum flight duration		最大飞行速度 (km/h) Maximum flight speed	
	♀	♂	♀	♂	♀	♂
1	2.762 ± 0.108 c	2.788 ± 0.167 cde	4.371 ± 0.109 f	4.317 ± 0.213 f	0.678 ± 0.148 d	0.651 ± 0.149 d
2	2.861 ± 0.135 c	3.014 ± 0.189 cd	6.059 ± 0.125 d	5.963 ± 0.167 d	0.814 ± 0.132 cd	0.743 ± 0.172 cd
3	3.506 ± 0.169 b	3.308 ± 0.124 bcd	6.578 ± 0.226 cd	6.523 ± 0.211 cd	1.163 ± 0.115 bc	1.122 ± 0.141 bc
4	3.823 ± 0.224 ab	3.762 ± 0.187 ab	8.262 ± 0.208 ab	8.234 ± 0.212 ab	1.594 ± 0.150 ab	1.564 ± 0.155 ab
5	4.272 ± 0.201 a	4.223 ± 0.219 a	8.733 ± 0.243 a	8.671 ± 0.179 a	1.725 ± 0.199 a	1.632 ± 0.164 a
6	3.431 ± 0.155 b	3.383 ± 0.180 bc	7.889 ± 0.187 b	7.815 ± 0.262 b	1.393 ± 0.151 ab	1.419 ± 0.105 ab
7	2.864 ± 0.175 c	2.869 ± 0.178 cde	7.054 ± 0.253 c	7.016 ± 0.182 c	1.382 ± 0.113 ab	1.348 ± 0.146 ab
8	2.807 ± 0.155 c	2.792 ± 0.209 cde	5.312 ± 0.254 e	5.284 ± 0.212 e	1.351 ± 0.149 ab	1.314 ± 0.139 ab
9	2.713 ± 0.146 c	2.684 ± 0.190 de	2.292 ± 0.177 g	2.312 ± 0.164 g	0.718 ± 0.139 d	0.682 ± 0.154 cd
10	2.454 ± 0.153 c	2.353 ± 0.242 e	2.464 ± 0.181 g	2.257 ± 0.157 g	0.671 ± 0.105 d	0.408 ± 0.105 d

2.2 补充营养对金纹细蛾成虫飞行能力的影响

金纹细蛾未交配雌雄成虫的飞行能力均在 5 日龄达到峰值,分别测定不同营养状态的未交配 5 日龄雌雄成虫连续吊飞 12 h 的飞行能力,结果表明:取食 5% 蜂蜜水金纹细蛾雌雄成虫的飞行距离、飞行时间、飞行速度均大于对照(取食清水),取食 5% 蜂蜜水雌成虫的飞行距离($t = 2.62, df = 28, P < 0.05$)和飞行速度($t = 0.71, df = 28, P < 0.05$)与对照存在显著差异,飞行时间($t = 1.07, df = 28, P > 0.05$)与对照比无显著差异;取食 5% 蜂蜜水雄成虫的飞行距离显著高于对照($t = 2.09, df = 28, P < 0.05$),飞行时间($t = 0.87, df = 28, P > 0.05$)和飞行速度($t = 0.24, df = 28, P > 0.05$)与对照比差异

不显著。金纹细蛾成虫在不同营养状态下飞行能力存在差异,雌雄成虫取食补充营养后飞行能力均有提高(图 1)。取食后雌成虫的飞行距离(2.293 ± 0.254 km)、飞行时间(5.341 ± 0.617 h)和飞行速度(0.711 ± 0.126 km/h)较未取食雌成虫的飞行距离(1.561 ± 0.117 km)、飞行时间(4.627 ± 0.252 h)和飞行速度(0.613 ± 0.057 km/h)分别提高 46.945%, 15.430% 和 15.978%;取食后雄成虫的飞行距离(2.142 ± 0.276 km)、飞行时间(5.132 ± 0.628 h)和飞行速度(0.620 ± 0.132 km/h)较未取食雄成虫的飞行距离(1.502 ± 0.132 km)、飞行时间(4.518 ± 0.317 h)和飞行速度(0.582 ± 0.084 km/h)分别提高 42.610%, 13.590% 和 6.529%。

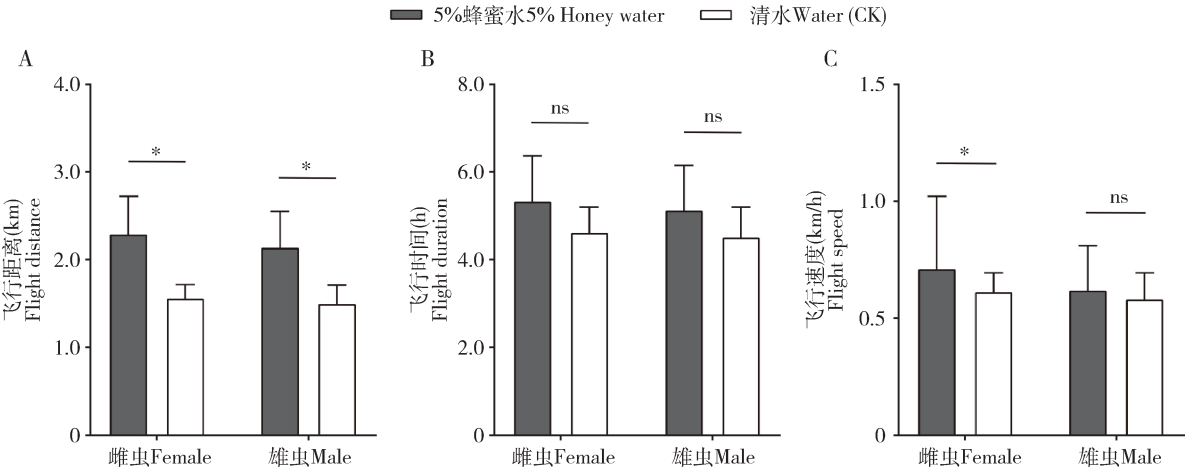


图 1 补充营养时金纹细蛾 5 日龄雌雄成虫间飞行能力的比较
Fig. 1 Comparison of flight capacity between the 5-d-old female and male adults of *Lithocolletis ringoniella* provided with complementary nutrition

A: 飞行距离 Flight distance; B: 飞行时间 Flight duration; C: 飞行速度 Flight speed. 图中数值为平均值 ± 标准误; 柱上星号和 ns 分别表示差异显著 ($P < 0.05$) 和不显著 ($P > 0.05$) (t 检验)。图 2 同。Data in the figure are mean ± SE. Asterisk and ns above bars indicate significant difference ($P < 0.05$) and no significant difference ($P > 0.05$) (t -test), respectively. The same for Fig. 2.

2.3 交配状态对金纹细蛾成虫飞行能力的影响

金纹细蛾未交配雌雄成虫的飞行能力均在 5 日龄时达到峰值,分别测定不同交配状态的 5 日龄雌雄成虫连续吊飞 12 h 的飞行能力,结果表明:金纹细蛾雌成虫交配后飞行能力提高,雄成虫交配后飞行能力降低(图 2)。金纹细蛾雌成虫交配后飞行距离($t = 3.02, df = 28, P < 0.05$)和飞行速度($t = 2.14, df = 28, P < 0.05$)显著大于未交配雌成虫,雄成虫交配后飞行距离($t = 2.58, df = 28, P < 0.05$)和飞行速度($t = 2.14, df = 28, P < 0.05$)显著小于未交配雄成虫;交配与未交配雌雄成虫飞行时间无显著差异($t = 0.54, df = 28, P > 0.05$; $t = 1.36, df = 28, P > 0.05$),雌成虫交配后飞行时间延长,雄

成虫交配后飞行时间缩短。交配后雌成虫的飞行距离(3.248 ± 0.188 km)、飞行时间(5.723 ± 0.340 h)和飞行速度(0.995 ± 0.041 km/h)较未交配雌成虫的飞行距离(2.293 ± 0.254 km)、飞行时间(5.341 ± 0.617 h)和飞行速度(0.711 ± 0.126 km/h)分别提高 41.628%, 7.152% 和 39.925%;而交配后雄成虫的飞行距离(1.375 ± 0.111 km)、飞行时间(4.214 ± 0.254 h)和飞行速度(0.334 ± 0.022 km/h)较未交配雄成虫的飞行距离(2.142 ± 0.276 km)、飞行时间(5.132 ± 0.328 h)和飞行速度(0.620 ± 0.132 km/h)分别降低 35.823%, 17.888% 和 46.129%。

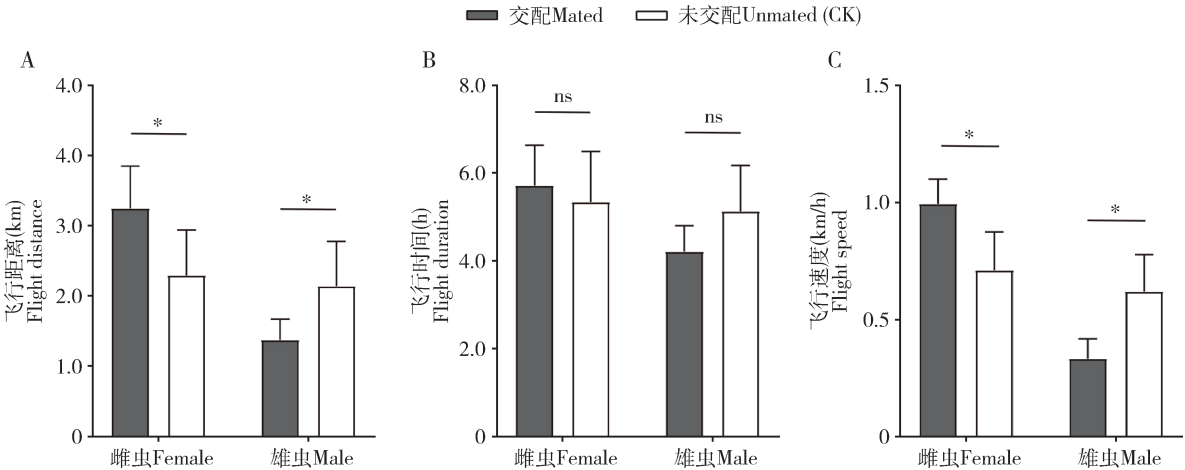


图2 不同交配状态金纹细蛾5日龄雌雄成虫间飞行能力的比较

Fig. 2 Comparison of flight capacity between the 5-d-old female and male adults of *Lithocolletis ringoniella* under different mating states

A: 飞行距离 Flight distance; B: 飞行时间 Flight duration; C: 飞行速度 Flight speed.

3 讨论

本研究通过对金纹细蛾不同日龄成虫飞行能力的测定表明(表1):金纹细蛾成虫的飞行能力与日龄之间关系紧密,随着日龄增长表现为由弱到强,再由强到弱的变化趋势。羽化初期,飞行能力随日龄的增加逐渐增强,5日龄达到峰值,之后随日龄的增加逐渐下降,10日龄飞行能力最弱。这种飞行能力变化的规律与苹果蠹蛾 *Cydia pomonella*、草地螟 *Loxostege sticticatis*、草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda*、甘蓝夜蛾 *Mamestra brassicae*、二点委夜蛾 *Athetis lepigone* 和伞裙追寄蝇 *Exorista civilis* 等(罗礼智和李光博, 1992; Schumacher *et al.*, 1997; 郑作涛等, 2014; 吴晓等, 2016; 岳方正等, 2016; 葛世帅等, 2019)相似。羽化初期飞行能力相对较弱,可能是由于营养的供应和吸收不够完全,其飞行肌的发育尚未完成,飞行能源物质和有关酶活性较低,各项飞行参数比较低。随着飞行肌等发育成熟,飞行能源物质的积累和酶活性的增强,飞行能力逐渐提高,当达到一定的发育阶段,昆虫的重心转向生殖,卵巢开始逐渐发育并且导致飞行肌的降解,从而飞行能力下降(Johnson, 1969; Sun *et al.*, 2013)。本试验测定结果表明金纹细蛾最佳日龄成虫可连续飞行5 h左右,最长飞行距离4 km以上(表2),虽不及已报道的甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua*、草地贪夜蛾和二点委夜蛾等(郑作涛等, 2014; 邹金城等, 2017; 葛世帅, 2019),但仍具有迁飞扩散的潜力,这可能是导

致近年来其为害范围逐年扩大的重要原因之一。金纹细蛾雌雄成虫的飞行能力几乎相同,虽然雌成虫的平均飞行距离、飞行时间和飞行速度均大于雄成虫,但雌雄个体间平均飞行距离、飞行时间和飞行速度均不存在显著差异(表1)。这一研究结果与苹果蠹蛾、黄地老虎 *Agrotis segetum*、橘小实蝇 *Bactrocera dorsalis* 和草地贪夜蛾等(Schumacher *et al.*, 1997; 崔建新等, 2016; 郭江龙等, 2016; 葛世帅等, 2019)相似,与绿盲蝽 *Lygus lucorum*、花曲柳窄吉丁 *Agrilus marcopoli* 和家蝇 *Musca domestica* 等(Lu *et al.*, 2007; 刘吉起等, 2011; 王辉等, 2015)相悖。金纹细蛾雌成虫的飞行能力基本参数均大于雄成虫,可能是由于雌虫为了寻求交配及完成交配后寻找适宜的产卵场所,对飞行的需求比雄虫更为强烈。一般而言,体型较大的昆虫飞行能力较强,雌性昆虫飞行能力强于雄性,这与雌雄生理或形态差异有关(Shirai, 1995; Lu *et al.*, 2007; 王辉等, 2015)。

成虫期取食对昆虫飞行能力具有重要影响,成虫在饥饿状态下或长期营养不足时飞行能力显著下降(张蕾等, 2006; 郭文超等, 2012)。本研究结果表明获取补充营养(5%蜂蜜水)的金纹细蛾雌雄成虫平均飞行距离均有显著提高(图1),营养物质的及时补充是金纹细蛾飞行扩散的关键。这一研究结果与黄地老虎、二点委夜蛾和草地贪夜蛾等(郑作涛, 2014; 郭江龙等, 2016; 葛世帅, 2019)一致。交配对生殖和飞行能力的影响在多种昆虫中已被证实。本研究结果表明金纹细蛾雌成虫交配后飞行能力提高,雄成虫交配后飞行能力降低(图2)。交配

对雌成虫飞行能力有较大的影响, 交配后雌成虫飞行能力更强, 有利于其寻找合适的寄主植物来产卵 (Hanski *et al.*, 2006; Hashiyama *et al.*, 2013)。暗脉菜粉蝶 *Pieris napi* 的飞行能力研究表明, 未交配雄成虫的飞行速度大于已交配, 交配后雄成虫飞行能力减弱 (Almbro and Kullberg, 2012)。这一结论在本实验中也得到印证, 交配过程中雄虫向雌虫体内转移了许多生理效应的物质, 包括肽类物质、保幼激素类似物、前列腺素等多种“交配因子”(华荣胜等, 2010), 促使雌虫将用于飞行的能源物质转移到生殖方面, 飞行能力随之下降。

本研究在室内对金纹细蛾成虫飞行能力进行了初步探索, 明确了不同日龄、性别、营养状态、交配状态对成虫飞行能力的影响。此外, 影响金纹细蛾飞行能力的因素还包括振翅频率、生殖、种群密度、温湿度和光照强度等 (程登发等, 2002; 江幸福和罗礼智, 2008), 影响金纹细蛾飞行能力的因素仍有待于进一步探索。本试验供试虫源为实验室种群, 利用飞行磨系统测定金纹细蛾飞行生物学参数, 不能完全模拟该虫在自然条件下的飞行状态, 所得结果与实际存在一定差异。因此, 采取室外室内相结合的方法, 进一步研究影响金纹细蛾飞行能力的因素十分必要。

参考文献 (References)

Almbro M, Kullberg C, 2012. Weight loading and reproductive status affect the flight performance of *Pieris napi* butterflies. *J. Insect Behav.*, 25(5): 441–452.

Campos WG, Schoereder JH, Sperber CF, 2004. Does the age of the host plant modulate migratory activity of *Plutella xylostella*? *Entomol. Sci.*, 7(4): 323–329.

Chen C, An KJ, Yang MX, Guo XX, 2016. Dynamics of *Lithocolletis ringoniella* adults in orchards in Shaanxi. *J. Plant Prot.*, 43(2): 351–352. [陈川, 安克江, 杨美霞, 郭小侠, 2016. 陕西地区苹果金纹细蛾成虫消长规律的观察. 植物保护学报, 43(2): 351–352]

Chen WM, Zhang L, Jing J, Wang JH, 2016. Observation on the biological characteristics of *Lithocolletis ringoniella* Matsumura in Yili, Xinjiang. *China Plant Prot.*, 36(1): 59–62, 82–83. [陈卫民, 张林, 荆珩, 王杰花, 2016. 新疆伊犁地区苹果金纹细蛾生物学特性观察. 中国植保导刊, 36(1): 59–62, 82–83]

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]

Cui JX, Dong JF, Ren XH, Wu LM, Zuo WQ, Wang Y, 2016. Effects

of gender and age (in days) on flight capacity of an experimental population of the oriental fruit fly, *Bactrocera dorsalis* (Hendel). *Acta Ecol. Sin.*, 36(5): 1292–1302. [崔建新, 董钧锋, 任向辉, 吴利民, 左文倩, 王颖, 2016. 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, 36(5): 1292–1302]

Dingle H, Drake VA, 2007. What is migration? *BioScience*, 57(2): 113–121.

Fan XJ, Mi YX, Ren H, Zhang C, Li Y, Xian XX, 2015. Cloning and functional expression of a chitinase cDNA from the apple leaf miner moth *Lithocolletis ringoniella*. *Biochemistry*, 80(2): 242–250.

Ge SS, He LM, He W, Xu RB, Sun XT, Wu KM, 2019. Determination on moth flight capacity of *Spodoptera frugiperda*. *Plant Prot.*, 45(4): 28–33. [葛世帅, 何莉梅, 和伟, 徐瑞斌, 孙晓婷, 吴孔明, 2019. 草地贪夜蛾的飞行能力测定. 植物保护, 45(4): 28–33]

Guo JL, Fu XW, Zhao XC, Wu KM, 2016. Preliminary study on the flight capacity of *Agrotis segetum* (Lepidoptera: Noctuidae). *J. Environ. Entomol.*, 38(5): 888–895. [郭江龙, 付晓伟, 赵新成, 吴孔明, 2016. 黄地老虎飞行能力研究. 环境昆虫学报, 38(5): 888–895]

Guo WC, Tuexun, Guo LN, He J, Xu JJ, 2012. Effects of different nutrients on flight capacity in Colorado potato beetles. *Xinjiang Agric. Sci.*, 49(3): 461–469. [郭文超, 吐尔逊, 郭利娜, 何江, 许建军, 2012. 营养对马铃薯甲虫迁飞能力的影响. 新疆农业科学, 49(3): 461–469]

Hanski I, Saastamoinen M, Ovaskainen O, 2006. Dispersal-related life-history trade-offs in a butterfly metapopulation. *J. Anim. Ecol.*, 75(1): 91–100.

Hashiyama A, Nomura M, Kurihara J, Toyoshima G, 2013. Laboratory evaluation of the flight ability of female *Autographa nigrisigna* (Lepidoptera: Noctuidae), measured by actograph and flight mill. *J. Econ. Entomol.*, 106(2): 690–694.

Hua RS, Qi ZL, Shi LG, 2010. Advance of insect mating factor. *Bull. Sci. Technol.*, 26(4): 556–559. [华荣胜, 戚志良, 时连根, 2010. 昆虫交配因子的研究进展. 科技通报, 26(4): 556–559]

Jiang XF, Luo LZ, 2008. Regulation basis and perspectives on insect migration. *Acta Ecol. Sin.*, 28(6): 2835–2842. [江幸福, 罗礼智, 2008. 昆虫迁飞的调控基础及展望. 生态学报, 28(6): 2835–2842]

Jiang YB, Du YM, Wang WH, Xiong Y, Jia XH, Wang ZH, 2019. Investigation on storage and preservation of ‘Fuji’ apple in Aksu area of Xinjiang. *China Fruits*, (5): 102–104. [姜云斌, 杜艳民, 王文辉, 熊勇, 贾晓辉, 王志华, 2019. 新疆阿克苏地区‘富士’苹果贮藏保鲜情况调查. 中国果树, (5): 102–104]

Johnson CG, 1969. Migration and Dispersal of Insects by Flight. Methuen Press, London. 745–763.

Kees AM, Hefty AR, Venette RC, Seybold SJ, Aukema BH, 2017. Flight capacity of the walnut twig beetle (Coleoptera: Scolytidae) on a laboratory flight mill. *Environ. Entomol.*, 46(3): 633–641.

Lee SW, Kim IS, Kim JH, Lee MH, Hyun JS, 1985. Seasonal occurrence of the apple leafminer, *Phyllonorycter ringoniella*

- (Matsumura) and its parasites and damaging leaf position. *Korean J. Appl. Entomol.*, 24(3): 151–156.
- Li J, 2012. Preliminary Study of Occurrence Regularity and Forecasting of Main Apple Pests in Baoding Area. MSc Thesis, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei. [李进, 2012. 保定地区苹果主要害虫发生规律及预测预报初步研究. 河北保定: 河北农业大学硕士学位论文]
- Liu JQ, Cui JX, Zhang YQ, Deng TF, Zhao XD, 2011. Comparison of sex-specific tethered flight of *Musca domestica*. *Chin. J. Vector Biol. Control.*, 22(3): 212–214, 222. [刘吉起, 崔建新, 张玉勤, 邓天福, 赵旭东, 2011. 不同性别家蝇吊飞行为研究. 中国媒介生物学及控制杂志, 22(3): 212–214, 222]
- Liu S, Lv ZY, Gao HH, Zhai YF, Liu Q, Yang PY, Li P, Zheng L, Li Q, Yu Y, 2018. Research advances of flight capacity of insect. *J. Environ. Entomol.*, 40(5): 995–1002. [刘莎, 吕召云, 高欢欢, 翟一凡, 刘倩, 杨普云, 李萍, 郑礼, 李强, 于毅, 2018. 昆虫飞行能力研究进展. 环境昆虫学报, 40(5): 995–1002]
- Liu XY, Wang X, Gao QQ, Wu JB, Hou W, Zhang BH, Zou PH, Hou M, Yuan T, Li YP, 2021. Occurrence dynamics and biogenic pesticide control technology of two pests in apple orchards. *Acta Agric. Bor.-occid. Sin.*, 30(6): 929–938. [刘雪莹, 王欣, 高其琴, 吴江波, 侯伟, 张伯虎, 邹佩华, 侯猛, 袁涛, 李怡萍, 2021. 两种果树害虫发生动态与生物源农药防治技术研究. 西北农业学报, 30(6): 929–938]
- Lu YH, Wu KM, Guo YY, 2007. Flight potential of *Lygus lucorum* (Meyer-Dür) (Heteroptera: Miridae). *Environ. Entomol.*, 36(5): 1007–1013.
- Luo LZ, Jiang XF, Li KB, Hu Y, 1999. Influences of flight on reproduction and longevity of the oriental armyworm, *Mythimna separata* (Walker). *Acta Entomol. Sin.*, 42(2): 150–158. [罗礼智, 江幸福, 李克斌, 胡毅, 1999. 粘虫飞行对生殖及寿命的影响. 昆虫学报, 42(2): 150–158]
- Luo LZ, Li GB, 1992. Variation of the flight ability and behavior of *Loxostege sticticatis* adults at different ages. In: Transactions of the Ecological Society of Chinese Youths, Vol. 2. Special Issues on Insect Ecology. 303–308. [罗礼智, 李光博, 1992. 草地螟不同蛾龄成虫飞行能力和行为的研究. 见: 中国植物保护学会生物入侵分会, 青年生态学者论丛(二). 昆虫生态学研究. 303–308]
- Qin YC, Yang SL, 2002. The outbreak of golden yellow graciariid in recent years. *Entomol. Knowl.*, 39(1): 44–47. [秦玉川, 杨书林, 2002. 金纹细蛾近年暴发原因的初步研究. 昆虫知识, 39(1): 44–47]
- Riley JR, Reynolds DR, Mukhopadhyay S, Ghosh MR, Sarkar TK, 1995. Long distance migration of aphids and other small insects in northeast India. *Eur. J. Entomol.*, 92(4): 639–653.
- Schumacher P, Weyeneth A, Weber DC, Dorn S, 1997. Long flights in *Cydia pomonella* L. (Lepidoptera: Tortricidae) measured by a flight mill: Influence of sex, mated status and age. *Physiol. Entomol.*, 22(2): 149–160.
- Shi YQ, Chen C, Hui W, Tang ZH, Guo XX, Shi XH, 2003. The general research of occurrence regularity and control of golden yellow graciariid. *J. Shaanxi Norm. Univ. (Nat. Sci. Ed.)*, 31(S2): 109–113. [石勇强, 陈川, 惠伟, 唐周怀, 郭小侠, 石晓红, 2003. 金纹细蛾发生规律与防治研究进展. 陕西师范大学学报(自然科学版), 31(S2): 109–113]
- Shirai Y, 1995. Longevity, flight ability and reproductive performance of the diamondback moth, *Plutella xylostella* (L.) (Lepidoptera: Yponomeutidae), related to adult body size. *Res. Popul. Ecol.*, 37(2): 269–277.
- Statistics Bureau of Xinjiang Production and Construction Corps, 2013. Statistical Yearbook of Xinjiang Production and Construction Corps. China Statistics Press, Beijing. [新疆生产建设兵团统计局, 2013. 新疆生产建设兵团统计年鉴. 北京: 中国统计出版社]
- Sun BB, Jiang XF, Zhang L, Stanley DW, Luo LZ, Long W, 2013. Methoprene influences reproduction and flight capacity in adults of the rice leaf roller, *Cnaphalocrocis medinalis* (Guenée) (Lepidoptera: Pyralidae). *Arch. Insect Biochem. Physiol.*, 82(1): 1–13.
- Wang CL, 2016. Research progress of *Lithocolletis ringoniella* Matsumura. *Agric. Dev. Equip.*, (5): 45. [王春蕾, 2016. 金纹细蛾研究进展. 农业开发与装备, (5): 45]
- Wang H, Xu ZC, Wang BD, Luo YQ, 2015. 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, Wang BD, 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]
- Wu X, Fu XW, Zhao XC, Wu KM, 2016. Preliminary study of the flight capacity of the cabbage moth, *Mamestra brassicae* Linnaeus. *Chin. J. Appl. Entomol.*, 53(3): 595–603. [吴晓, 付晓伟, 赵新成, 吴孔明, 2016. 甘蓝夜蛾 *Mamestra brassicae* Linnaeus 飞行能力研究. 应用昆虫学报, 53(3): 595–603]
- Yamada M, Sekita N, Oyama N, 1971. Studies on the population of apple leaf miner, *Lithocolletis ringoniella* Matsumura (Lepidoptera: Graciariidae). *Jpn. J. Appl. Entomol. Zool.*, 15(4): 248–258.
- Yu GY, Zhang JM, Wang H, 2014. Identification and control of three common Lyonetiidae in apple orchard. *Plant Prot.*, 40(1): 200–201. [虞国跃, 张君明, 王合, 2014. 苹果 3 种常见潜叶蛾的识别与防治. 植物保护, 40(1): 200–201]
- Yu JN, 2010. Atlas of Agricultural Insects in Xinjiang. Xinjiang Science and Technology Press, Urumqi. [于江南, 2010. 新疆农业昆虫图志. 乌鲁木齐: 新疆科学技术出版社]
- Yuan RL, Yang S, Feng D, Wang YX, Wang XW, Chen P, 2016. Effect of temperature, humidity and light on the flight ability of *Bactrocera dorsalis* (Hendel). *J. Environ. Entomol.*, 38(5): 903–911. [袁瑞玲, 杨珊, 冯丹, 王艺璇, 王晓渭, 陈鹏, 2016. 温度、湿度、光照对桔小实蝇飞行能力的影响. 环境昆虫学报, 38(5): 903–911]
- Yue FZ, Liu AP, Gao SJ, Wang JM, Wang MY, De WQ, Fan GM, 2016. The flight ability of *Exorista civilis* adults (Diptera: Tachinidae). *Chin. J. Biol. Control*, 32(1): 40–45. [岳方正, 刘爱萍, 高书晶, 王建梅, 王梦圆, 德文庆, 范光明, 2016. 伞裙追寄蝇成虫飞行能力测定. 中国生物防治学报, 32(1): 40–45]

Zhai H, Li XJ, Zhang Y, Qi B, Wang T, 2013. Research on prediction model for occurrence period and quantity of *Lithocolletis ringoniella* adults in Tai'an region. *Shandong Agric. Sci.*, 45(10): 103–107. [翟浩, 李晓军, 张勇, 亓彬, 王涛, 2013. 泰安地区金纹细蛾成虫发生期及发生量预测模型研究. *山东农业科学*, 45(10): 103–107]

Zhang L, Luo LZ, Jiang XF, Hu Y, 2006. Influences of starvation on the first day after emergence on ovarian development and flight potential in adults of the oriental armyworm, *Mythimna separata* (Walker) (Lepidoptera: Noctuidae). *Acta Entomol. Sin.*, 49(6): 895–902. [张蕾, 罗礼智, 江幸福, 胡毅, 2006. 一日龄饥饿对粘虫成虫卵巢发育和飞行能力的影响. *昆虫学报*, 49(6): 895–902]

Zhang YQ, 2013. Investigation on the occurrence regularity and the reason on the rise in advantageous population of *Lithocolletis ringoniella* Matsumura in Longdong apple orchard of Gansu province. *China Fruits*, (5): 69–72. [张玉琴, 2013. 甘肃陇东苹果园金纹细蛾发生规律及上升成优势种群的原因调查. *中国果树*, (5): 69–72]

Zheng ZT, Jiang XF, Zhang L, Cheng YX, Luo LZ, 2014. Flight ability of *Athetis lepigone*. *Chin. J. Appl. Entomol.*, 51(3): 643–653. [郑作涛, 江幸福, 张蕾, 程云霞, 罗礼智, 2014. 二点委夜蛾飞行行为特征. *应用昆虫学报*, 51(3): 643–653]

Zhou GL, Cao Y, Wang QQ, Li N, Liu L, Bai CQ, Zhang T, 2018. Effect of temperature on flight behavior of the adult lesser grain borer, *Rhyzopertha dominica* (Fabricius) adults. *J. Henan Univ. Technol. (Nat. Sci. Ed.)*, 39(6): 105–110. [周国磊, 曹阳, 王欠欠, 李娜, 刘璐, 白春启, 张涛, 2018. 温度对谷蠹成虫飞行行为的影响. *河南工业大学学报(自然科学版)*, 39(6): 105–110]

Zou JC, Sun Y, Yang Y, Yang YZ, Zhang ZX, Wang SY, Su HH, 2019. Cadmium stress significantly affects the flight performance of *Spodoptera exigua* (Lepidoptera: Noctuidae) adults. *Acta Entomol. Sin.*, 60(9): 1021–1030. [邹金城, 孙宇, 杨勇, 杨益众, 张子昕, 王思雨, 苏宏华, 2018. 镉胁迫显著影响甜菜夜蛾成虫的飞行能力. *昆虫学报*, 60(9): 1021–1030]

(责任编辑: 赵利辉)