斑翅果蝇和黑腹果蝇成虫飞行能力的研究*

刘 莎[1, 2**] 高欢欢[3] 翟一凡[1] 陈 浩[1] 郑 礼[1]
党海燕[4] 李 强[2] 于 毅[1***]

（1. 山东省农业科学院植物保护研究所，济南 250100；2. 云南农业大学植物保护学院，昆明 650201；
3. 山东省葡萄研究院，济南 250100；4. 太原海关，太原 030024）

摘 要 **【目的】** 为明确斑翅果蝇 *Drosophila suzukii* Matsumura 和黑腹果蝇 *Drosophila melanogaster* 飞行能力的差异。**【方法】** 利用昆虫飞行磨系统对斑翅果蝇和黑腹果蝇雌、雄虫各 7 个日龄分别进行 22-24 h 连续吊飞试验，并对相关飞行参数进行显著性检验。**【结果】** 两种果蝇在 1 日龄时的飞行时间、飞行速度和飞行距离均最小，随着日龄的增加，飞行能力出现两个高峰。斑翅果蝇的第一个高峰出现在 2 日龄，黑腹果蝇的第一个高峰出现在 3 日龄；两种果蝇飞行能力的第二个高峰均出现在 15 日龄，此时雌、雄虫的累计飞行距离均最大。斑翅果蝇雌、雄虫 15 日龄的总飞行距离最远，而黑腹果蝇雌虫 15 日龄、雄虫 3 日龄飞行距离最远、飞行时间最长。**【结论】** 斑翅果蝇和黑腹果蝇的飞行能力与日龄和性别均有关系，且两种果蝇雌虫的飞行能力均强于雄虫。

关键词 果蝇；日龄；飞行距离；总飞行时间；平均飞行速度

The flight ability of adult *Drosophila suzukii* and *Drosophila melanogaster* (Diptera: Drosophilidae)

LIU Sha[1, 2**] GAO Huan-Huan[3] ZHAI Yi-Fan[1] CHEN Hao[1]
ZHENG Li[1] DANG Hai-Yan[4] LI Qiang[2] YU Yi[1***]

(1. Institute of Plant Protection, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100, China;
2. College of Plant Protection, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China;
3. Shandong Academy of Grape, Jinan 250100, China; 4. Taiyuan Customs, Taiyuan 030024, China)

Abstract **[Objectives]** To compare the flight ability of *Drosophila suzukii* and *D. melanogaster*. **【Methods】** A flight mill system was used to measure the flight ability of 1-7 day-old male and female *D. suzukii* and *D. melanogaster* for 22-24h, after which differences in relevant flight parameters were tested for significance. **【Results】** One day-old adults had the shortest flight duration, velocity and distance. There were subsequently two peaks in flight capacity; the first at 2 days of age in *D. suzukii* and at 3 day of age in *D. melanogaster*, and the second at 15 days of age when the longest total flight distance was recorded for females of both species. Fifteen day old female and male *D. suzukii*, and female *D. melanogaster*, had the longest total flight distance, whereas the longest flight distance, and flight time, recorded for male of *D. melanogaster* was achieved by 3 day old individuals. **【Conclusion】** The flight ability of *D. suzukii* and *D. melanogaster* are related to age and sex and females of both species have stronger flight capacity than males.

Key words *Drosophila*; age; flight distance; flight duration; average flight velocity

*资助项目 Supported projects：国家自然科学基金（31972273）；山东省自然科学基金（ZR2019MC034）；国家重点研发计划（2017YFGH000664）；泰山产业领军人才工程（LJNY201821）

**第一作者 First author，E-mail：liusha668@126.com

***通讯作者 Corresponding author，E-mail：robertyuyi@163.com

收稿日期 Received：2018-12-18；接受日期 Accepted：2019-03-19

斑翅果蝇 *Drosophila suzukii* Matsumura 和黑腹果蝇 *Drosophila melanogaster* 隶属双翅目（Diptera）果蝇科（Drosophilidae），寄主种类繁多，可危害樱桃、葡萄、杨梅等 60 多种水果（孙鹏等，2011；黄贞光等，2014；Stewart *et al.*，2014）。斑翅果蝇雌虫具有发达的锯齿状产卵器可刺破寄主水果表皮，将卵产于刚刚成熟的果实中，幼虫蛀食果肉，导致细菌和真菌的进一步侵染，给水果产业带来巨大的经济损失。黑腹果蝇则主要取食成熟腐烂的水果，以危害中晚熟果树品种为主（郭建明，2007；张治军等，2013）。因此，两种果蝇的取食习性具有明显的差异。

斑翅果蝇最初于 1916 年发现于日本，20 世纪 80 年代在美国夏威夷首次被发现，2008 年传入美国加州开始危害水果，随后又在欧洲意大利和法国被发现（Calabria *et al.*，2012），近年来又对中国的浆果类水果造成巨大的危害（林清彩等，2013）。2013 年，斑翅果蝇已经被列为入侵害虫，其迁飞行为和飞行能力的研究可为探索斑翅果蝇的入侵生物学研究提供重要的指导作用。飞行能力的测定是研究昆虫迁飞规律的基础（Campos *et al.*，2004），有利于探究迁飞路径，找到适合的预测预报及防治方法。而斑翅果蝇和黑腹果蝇在飞行能力是否存在差异也是研究其取食习性差异的重要依据之一。关于昆虫飞行能力的测定方法，室外多用雷达模拟昆虫的飞行轨迹监测迁飞昆虫的种群密度和飞行行为（高月波等，2008）；室内则主要采用飞行磨系统测试昆虫的飞行能力，该系统由电脑控制，适用于中小型昆虫的吊飞试验（崔建新等，2016）。

对于不同日龄和不同性别的昆虫，其飞行速度和飞行距离差异均较为明显。前人已对很多迁飞性昆虫进行飞行能力的研究，如魏书军等（2013）研究表明，不同日龄小菜蛾 *Plutella xylostella* 雌成虫的飞行能力具有明显差异。草地螟 *Loxostege stieticatis* 成虫 1 日龄飞行能力弱，2 日龄至 5 日龄飞行能力较强（程云霞，2012）。东亚飞蝗 *Locusta migratoria* 在 10 日龄时飞行能力最强，单头最远飞行距离达 65 km（刘辉，2007）。桔小实蝇 *Bactrocera dorsalis* 雌、雄成虫的飞行能力随日龄的增加显著增强，雌虫 16 日龄的累计飞行距离最远，达到 8 116.6 m（崔建新等，2016）。然而，斑翅果蝇和黑腹果蝇的飞行能力尚未有相关的报道。

本研究通过室内飞行磨系统，分别测定不同日龄及不同性别的 2 种果蝇的飞行速度和飞行时间，旨在明确两种果蝇的飞行能力与日龄、性别之间的关系，为掌握其扩散习性及综合防治提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试虫来源

斑翅果蝇和黑腹果蝇均来自山东省农业科学院植物保护研究所实验室种群（养虫室饲养条件：温度（25±1）℃，湿度 70%±5%，光周期 16L：8D）。以同一时期羽化的斑翅果蝇和黑腹果蝇成虫为研究材料。由于大多数昆虫在低日龄时飞行能力较强，因此本实验选取 1、2、3、4、5、10、15 日龄的黑腹果蝇和斑翅果蝇的雌、雄成虫进行飞行能力的测定。

1.2 飞行能力的测定

飞行能力的测试采用河南科技学院开发的 26 路飞行磨系统，分别将不同日龄的雌、雄成虫，冰上冷冻 2 min，待试虫不动后，吊臂端粘取少量市售 502 胶，小心地粘于成虫的前胸背板处，确认头、胸、腹部和翅未受到影响，待试虫稳定飞行后放到飞行磨上吊飞，每个日龄雌、雄虫各取不少于 20 头果蝇进行吊飞。吊飞期间保持全光照条件，整个飞行过程不补充水分和营养，温度 24-25 ℃，相对湿度 50%-60%，光照强度 450-550 lx。每天吊飞试验从 10: 00 开始，飞行 24 h（次日 10：00）后人工干预停止（崔建新等，2016）。

1.3 数据处理

利用 Matlab 软件计算试虫在测试时间内的累计飞行距离（m）、最大飞行距离（m）、累计飞行时间（s）、平均飞行速度（m/s）等参数。对累计飞行距离在 10 m 以下视为不飞行个体，

飞行数据予以排除。采用 SPSS 19.0 软件分别分析不同日龄斑翅果蝇和黑腹果蝇雌、雄虫飞行能力的差异，通过 S-N-K 法进行差异显著性检验，对同一日龄雌、雄虫的累计飞行距离、最大飞行距离、总飞行时间、平均飞行速度分别进行独立样本 *t*-检验，显著水平为 0.05。

2　结果与分析

2.1　日龄及性别对斑翅果蝇飞行能力的影响

2.1.1　不同日龄斑翅果蝇的飞行距离　斑翅果蝇不同日龄雌、雄虫的飞行距离差异显著(表 1)。雌虫和雄虫的总飞行距离及单次最远飞行距离在 15 日龄前均出现 3 个高峰值，分别为 2 日龄、4 日龄和 15 日龄。其中，雌、雄虫 15 日龄的累计飞行距离及雄虫单次最远飞行距离显著高于其它日龄，而 1 日龄雌、雄虫的累计飞行距离及雄虫最远飞行距离则最小，其他日龄之间并没有显著差异（雌虫累计飞行距离 F=5.97，P<0.01；雄虫累计飞行距离 F=3.793，P<0.01；雄虫单次最远飞行距离 F = 3.586，P<0.01)。斑翅果蝇雌虫 2 日龄、4 日龄和 15 日龄的单次最远飞行距离虽然显著高于其他日龄（F=4.659，P<0.01)，但三者之间并无显著差异。由此可见，斑翅果蝇的雌虫和雄虫均在 2 日龄、4 日龄和 15 日龄时飞行距离较远。

表 1　不同日龄斑翅果蝇雌、雄成虫的飞行距离

Table 1　Flight distance of females and males of *Drosophila suzukii* at different day-ages

性别 Sex	日龄 Day-age	累计飞行距离（m） Total flight distance	单次最远飞行距离（m） Longest single flight distance
雌虫 Female	1	79.45±19.41 c	38.94±18.32 b*
	2	360.93±56.76 a	143.93±50.47 ab
	3	170.36±48.87 bc	47.19±16.27 b
	4	281.38±59.95 ab	143.43±42.37 ab*
	5	185.83±40.69 bc*	99.90±39.33 b*
	10	166.14±32.52 bc*	64.71±21.77 b*
	15	406.00±57.80 a	248.96±22.13 a
雄虫 Male	1	63.65±13.87 c	17.14±7.23 c
	2	210.43±55.31 ab	143.93±50.47 ab
	3	148.29±31.51 abc	95.61±27.10 abc
	4	205.70±45.18 ab	101.26±28.49 abc
	5	110.80±20.15 abc	58.83±16.51 abc
	10	83.30±23.12 bc	33.79±10.49 bc
	15	243.26±30.69 a	160.20±21.94 a

同列数据（平均值±标准误）后标有不同字母代表不同日龄斑翅果蝇雌（雄）虫飞行距离间差异显著（S-N-K 检验，P=0.05)，*表示同一日龄雌、雄虫的累计飞行距离和单次最远飞行距离经 *t*-检验在 0.05 水平上差异显著。下表同。

Different letters following the data (mean±SE) in a column indicate significant difference among day-ages at 0.05 level by S-N-K test. * indicates that total flight distance and longest single flight distance of female and male at the same day-age are significant difference at the 0.05 level by the *t*-test. The same below.

通过对各个日龄雌、雄虫的累计飞行距离及最远飞行距离进行独立样本 *t*-检验，5 日龄和 10 日龄雌、雄虫的累计飞行距离存在显著差异，10 日龄雌虫的累计飞行距离约为雄虫的 2 倍（5 日龄：t=1.652，P=0.042；10 日龄：t=2.076，P=0.032)，而 1、4、5、10 日龄雌虫的单次最远飞行距离显著大于雄虫（1 日龄：t=1.107，P=0.041；4 日龄：t=2.714，P<0.01；5 日龄：

t=2.892，P=0.010；10 日龄：t=3.873，P<0.01）。

2.1.2 不同日龄斑翅果蝇的总飞行时间 斑翅果蝇不同日龄雌、雄虫的总飞行时间如图 1 所示。不同日龄雌成虫的总飞行时间无显著差异（F=1.412，P=0.125）。10 日龄雄虫的总飞行时间最短，仅为(831.47±199.82)s，明显低于其他日龄的雄虫（F=2.493，P=0.026）；2 日龄雄虫的飞行时间最长，达(2 546.27±541.08) s。对各日龄雌、雄虫的总飞行时间进行独立样本 t-检验发现，仅 3 日龄、5 日龄雌虫的总飞行时间显著大于雄虫（3 日龄：t=1.322，P=0.012；5 日龄：t=2.243，P=0.010）。

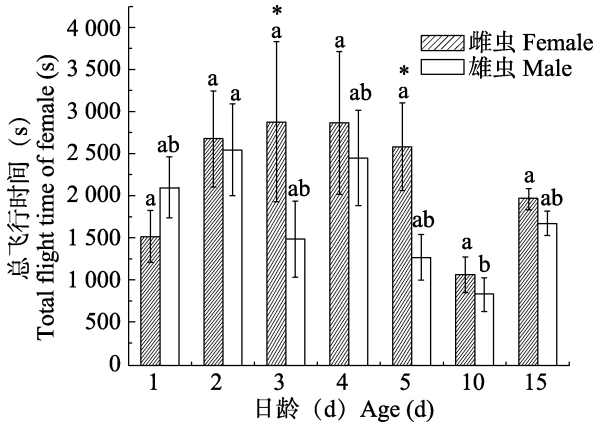

图 **1** 不同日龄斑翅果蝇雌、雄成虫的总飞行时间

Fig. 1 Flight duration of females and males of *Drosophila suzukii* on different day-ages

图中数据为平均数±标准误，同色柱子上的不同字母表示差异显著（One-way ANOVA, S-N-K 法，P<0.05）。下图同。

Data are mean±SE. Histograms with different letters indicate significant difference by using the S-N-K test (P<0.05). The same below.

2.1.3 不同日龄斑翅果蝇的平均飞行速度 斑翅果蝇不同日龄雌、雄虫的平均飞行速度差异显著（图 2）。雌虫在 15 日龄前出现两个高峰值，分别为 2 日龄和 10 日龄，其中 10 日龄的平均飞行速度最大，为（0.32±0.04）m/s，与 2 日龄和 15 日龄雌虫的平均飞行速度无显著差异，但明显高于 1 日龄、3 日龄和 5 日龄雌虫，其中，1 日龄雌虫的平均飞行速度最小，为（0.15±0.03）m/s（F=4.770，P<0.01）。1 日龄雄虫的飞行速度也最小，其它各日龄雄虫的平均飞行速度无显著差异（F=5.839，P<0.01）。利用独立样本 t-检验对各个日龄雌、雄虫的平均飞行速度进行分析，只有 10 日龄雌、雄虫的平均飞行速度存在显著差异（t=1.377，P<0.01）。

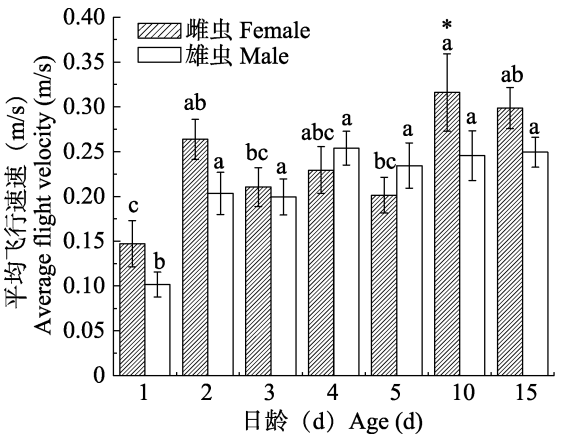

图 **2** 不同日龄斑翅果蝇雌、雄成虫的平均飞行速度

Fig. 2 Average flight velocity of females and males of *Drosophila suzukii* on different day-ages

2.2 日龄及性别对黑腹果蝇飞行能力的影响

2.2.1 不同日龄黑腹果蝇的飞行距离 不同日龄黑腹果蝇雌、雄虫的累计飞行距离及单次最远飞行距离如表 2 所示。1 日龄雌虫和雄虫的累计飞行距离和单次最远飞行距离均低于其他日龄。雌虫和雄虫的累计飞行距离在 15 日龄前均出现两个高峰，分别为 3 日龄和 15 日龄。15 日龄雌虫的累计飞行距离高于其它 1、2、4 日龄（F=4.437，P<0.01），其次为 10 日龄和 3 日龄；3 日龄和 4 日龄雄虫的累计飞行距离最远，明显大于 1 日龄、2 日龄，其次为 15 日龄（F=3.344，P<0.01）。对于单次最远飞行距离而言，10 日龄雌虫显著高于其他日龄（F=2.336，P=0.021），雄虫 15 日龄的单次最远飞行距离最大，其次为 3 日龄和 15 日龄（F=3.596，P<0.01）。由此可见，黑腹果蝇的雌虫在 3 日龄、10 日龄和 15 日龄时飞行距离较远，而雄虫在 3 日龄、4 日龄和 15 日龄时的飞行距离较远。

通过对各日龄雌、雄虫的累计飞行距离及单次最远飞行距离进行独立样本 t-检验发现，各日龄雌、雄虫的累计飞行距离及单次最远飞行距离均无显著差异。

表 2　不同日龄黑腹果蝇雌、雄成虫的飞行距离

Table 2　Flight distance of females and males of *Drosophila melanogaster* at different day-ages

性别 Sex	日龄 Day-age	累计飞行距离（m） Total flight distance	单次最远飞行距离（m） Longest single flight distance
雌虫 Female	1	529.43±95.83 b	181.30±45.07 b
	2	902.10±97.36 a	363.28±41.63 ab
	3	1 074.41±113.00 a	489.82±85.34 ab
	4	881.17±80.26 a	421.50±71.34 ab
	5	965.29±121.48 a	427.15±99.98 ab
	10	1 085.47±99.89 a	690.41±108.24 a
	15	1 142.51±128.58 a	423.09±60.56 ab
雄虫 Male	1	368.38±64.63 b	155.83±39.71 b
	2	727.38±122.06 ab	234.18±73.81 b
	3	830.92±83.21 a	408.23±53.26 ab
	4	821.67±122.96 a	372.32±59.07 ab
	5	530.91±132.15 ab	258.50±87.93 b
	10	551.81±91.79 ab	374.48±92.23 ab
	15	787.26±87.11 a	561.95±106.35 a

2.2.2　不同日龄黑腹果蝇的总飞行时间　图 3 为不同日龄黑腹果蝇雌、雄虫的总飞行时间。所有供试雄虫的总飞行时间受日龄影响差异不显著（F=1.818，P=0.102）。雌虫 15 日龄的总飞行时间为（20 656.63±5 764.24）s，显著长于其他日龄的雌虫（F=3.550，P<0.01）；1 日龄黑腹果蝇雌虫的总飞行时间最短，仅（3 172.76±668.20）s。

对各日龄雌、雄虫的总飞行时间进行独立样本 t-检验表明，15 日龄雌虫的总飞行时间显著高于雄虫（t=2.572，P<0.01）。

2.2.3　不同日龄黑腹果蝇的平均飞行速度　黑腹果蝇雌虫的平均飞行速度在不同日龄间差异显著（图 4）。雌虫 15 日龄的平均飞行速度为（0.30±0.04）m/s，显著低于 4 日龄（F=2.714，P=0.016），其他各日龄雌虫的平均飞行速度并无显

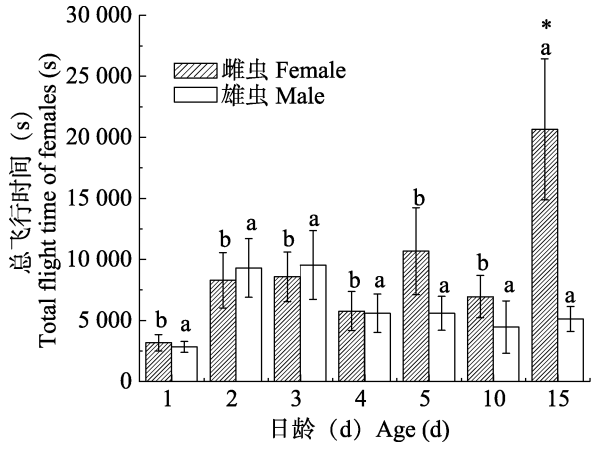

图 3　不同日龄黑腹果蝇雌、雄虫的总飞行时间

Fig. 3　Flight duration of females and males of *Drosophila melanogaster* on different day-ages

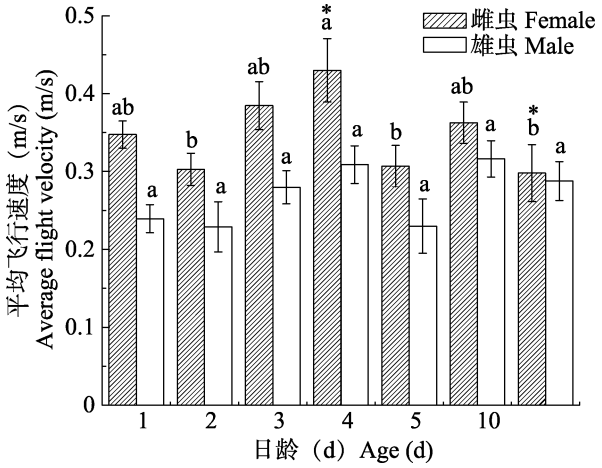

图 4　不同日龄黑腹果蝇雌、雄虫的平均飞行速度

Fig. 4　Average flight velocity of females and males of *Drosophila melanogaster* on different day-ages

著差异；雄虫各日龄的平均飞行速度差异不明显（F=2.165，P=0.052）。对各日龄雌、雄虫的平均飞行速度进行独立样本 t-检验，仅 4 日龄、15 日龄雌虫的平均飞行速度显著大于雄虫，其他日龄雌、雄虫的平均飞行速度无显著差异（4 日龄：t=2.635，P=0.028；15 日龄：t=0.226，P=0.023）。

3 结论与讨论

本研究发现，斑翅果蝇和黑腹果蝇的飞行能力与日龄和性别均有关系。综合各项飞行参数，两种果蝇在 1 日龄时飞行能力最弱；斑翅果蝇雌虫和雄虫在 2 日龄和 15 日龄时的飞行能力最强，而黑腹果蝇雌虫和雄虫在 3 日龄和 15 日龄时的飞行能力最强。两种果蝇的雌虫飞行能力均强于雄虫。

魏书军等（2013）对不同日龄小菜蛾的飞行能力进行测定，与本研究结果相同，也发现 1 日龄小菜蛾雌虫的飞行能力最弱，这是因为刚羽化的成虫各器官发育并不完善，不具备较强的飞行能力。1 日龄之后，昆虫的飞行能力迅速增强，2-4 日龄后不断下降。例如，3 日龄小菜蛾的飞行能力最强（魏书军等，2013），2 日龄脐橙螟 *Amyelois transitella* 的最大飞行距离明显高于其它日龄，而柑桔木虱 *Diaphorina citri* 的飞行能力在 4 日龄时也达到了高峰；意大利蝗 *Calliptamus italicus* (L.)雄虫 2 日龄飞行能力最强，之后逐渐降低（任金龙等，2015）。因此，日龄是影响昆虫选择配偶和交配成功率的因素之一（王香萍和张钟宁，2004；Wang *et al.*，2011）。已有研究表明，松树蜂 *Sirex noctilio* Fabricius 雌、雄成虫的飞行能力随日龄增加不断下降（刘晓博等，2017）；马尾松毛虫 *Dendrolimus punctatus* 雌虫偏爱选择 2 日龄雄虫交配（张诗语，2017），未交配的小菜蛾雌蛾比已交配的雌蛾飞行时间更长（Shirai，1995），黑尾叶蝉 *Nephotettix cincticeps*（UHLER）雌虫产卵前 1-2 d 飞行时间最长（Kakiya and Kiritani，1972）。这说明，昆虫为了成功交配和产卵，需要具有较强的飞行能力寻找配偶来满足种群繁衍的要求。与前人研究相似的是斑翅果蝇和黑腹果蝇羽化后 30 h 开始交配（吴军等，2013），导致两种果蝇在 2-3 日龄时的飞行能力急剧增强。而此后飞行能力的不断下降是因为随着日龄的增加，果蝇的线粒体受到损伤，飞行肌纤维退化，导致飞行能力严重下降（Miller *et al.*，2008；Vance *et al.*，2009；Stjernholm and Karlsson，2013），磷酸甘油脱氢酶等活性也是影响果蝇飞行能力的原因之一（Iii，1978）。但本研究中两种果蝇的飞行能力在 15 日龄时出现第二次高峰，赵远鹏等（2018）认为斑翅果蝇雌、雄虫在 15 日龄之后开始出现死亡，种群数量有下降的趋势，而斑翅果蝇成虫在 15 日龄的飞行能力达到高峰可能是为了更好地寻找配偶、繁衍后代，维持种群的数量。黑腹果蝇成虫在 18 日龄的繁殖力最强（Lin *et al.*，2014），说明黑腹果蝇可能会通过再次增强飞行能力来达到提高交配几率和繁殖力的目的。

另外，多项研究也表明，昆虫的飞行能力与性别密切相关。杨帆等（2013）研究证明，2 日龄、3 日龄稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis* 雌虫的起飞比例远高于雄虫；对梨小食心虫 *Cydia molesta* 进行飞行能力测试，雌虫的总飞行距离、单次最远飞行距离和速度均大于雄虫（Hughes and Dorn，2010），这些与本研究结果一致，即两种果蝇雌虫的飞行能力均比雄虫强。这是因为，相对于雄虫而言，雌虫为了完成交配和产卵，对飞行能力的需求则更为强烈。

由于本试验是在室内无风、无营养供给的条件下完成的，与自然界相比飞行距离、飞行速度等参数均有一定的差异，这 2 种果蝇在室外的飞行状态仍有待于进一步探索。除此之外，环境因素也是影响昆虫飞行能力的重要因素之一，温度、湿度、光照等环境因子对这 2 种果蝇飞行能力的影响需要进行深入的试验来验证。尽管如此，本研究将不同日龄和性别的两种果蝇的飞行能力进行了系统的研究，仍可丰富和完善两种果蝇的生物学特征，并为其迁飞习性的研究提供理论基础。

参考文献 (References)

Calabria G, Máca J, Bächli G, Serra L, Pascual M, 2012. First records of the potential pest species *Drosophila suzukii* (Diptera: Drosophilidae) in Europe. *Journal Applied Entomology*, 136(1/2): 139–147.

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

Cheng YX, 2012. The regulation and interaction of migration and reproduction in the beet webworm, *Loxostege sticticalis* (Lepidoptera: Pyralidae). Master dissertation. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences. [程云霞, 2012. 草地螟迁飞与生殖行为的调控及互作关系. 硕士学位论文. 北京: 中国农业科学院.]

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 Ecologica Sinica*, 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.]

Gao YB, Chen X, Chen ZR, Bao YX, Yang RM, Liu TL, Zhai BP, 2008. Dynamic analysis on the migration of the rice leaf roller *Cnaphalocrocis medinalis* (Lepidoptera: Pyralidae) by Doppler insect monitoring radar and numerical simulation. *Acta Ecologica Sinica*, 28(11): 5239–5246. [高月波, 陈晓, 陈钟荣, 包云轩, 杨荣明, 刘天龙, 翟保平, 2008. 稻纵卷叶螟迁飞的多普勒昆虫雷达观察及动态. 生态学报, 28(11): 5239–5246.]

Guo JM, 2007. Bionomics of *Drosophila melanogaster*. *Chinese Bulletin of Entomology*, 44(5): 743–745. [郭建明, 2007. 樱桃新害虫黑腹果蝇的生物学特性. 昆虫知识, 44(5): 743–745.]

Huang ZG, Liu CL, Li M, Zhao GR, Li YH, 2014. The development situation of sweet cherry industry in China and abroad during recent two decades and prognostication for the future. *Journal of Fruit Science*, 31(S1): 1–6. [黄贞光, 刘聪利, 李明, 赵改荣, 李玉红, 2014. 近 20 年国内外甜樱桃产业发展动态及对未来的预测. 果树学报, 31(S1): 1–6.]

Hughes J, Dorn S, 2010. Sexual differences in the flight performance of the oriental fruit moth, *Cydia molesta*. *Entomologia Experimentalia et Appl*icata, 103(2): 171–182.

Iii G, 1978. Age-dependent α-glycerophosphate dehydrogenase activity changes in mutant and wild type *Drosophila melanogaster*. *Mechanisms of ageing*And *Development*, 7(5): 367–373.

Kakiya N, Kiritani K, 1972. The influence of maternal age, and rearing density upon flight activity of the green rice leaf hopper, *Nephotettix cincticeps* UHLER (Hemiptera: Deltocephalidae). *Japanise Journal of Applied Entomol*ogy *Zoology*, 16(2): 79–86.

Lin QC, Wang SY, Zhou CG, Yu Y, 2013. Research progress in *Drosophila suzukii*. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 25(10): 79–82. [林清彩, 王圣印, 周成刚, 于毅, 2013. 铃木氏果蝇研究进展. 江西农业学报, 25(10): 79–82.]

Lin QC, Zhai YF, Zhang AS, Men XY, Zhang XY, Zalom FG, Zhou CG, Yu Y, 2014. Comparative developmental times and laboratory life tables for *Drosophlia suzukii* and *Drosophila melanogaster* (Diptera: Drosophilidae). *Florida Entomologist*, 97(4): 1434–1442.

Liu H, 2007. Flight ability and some related physiological mechanism in social type and scattered type *Locusta migratoria manilensis* (Meyen). Master dissertation. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences. [刘辉, 2007. 两型东亚飞蝗飞行能力及其相关生理机制研究. 北京: 中国农业科学院.]

Liu XB, Zheng ZJ, Zhou F, Ren LL, Luo YQ, 2017. Effects of age (in days), gender and nematode infection on the flight capacity of *Sirex noctilio*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 54(6): 933–939. [刘晓博, 郑子金, 周丰, 任利利, 骆有, 2017. 日龄、性别及线虫侵染对松树蜂飞行能力的影响. 应用昆虫学报, 54(6): 933–939.]

Miller MS, Lekkas P, Braddock JM, Farman GP, Ballif BA, Irving TC, Maughan DW, Vigoreaux JO, 2008. Aging enhances indirect flight muscle fiber performance yet decreases flight ability in *Drosophila*. *Biophysical Journal*, 95(5): 2391–2401.

Ren JL, Zhao L, Zhao XF, Zhao Y, 2015. Study of the flight ability of *Calliptamus italicus* (L.). *Chinese Journal of Applied Entomology*, 52(5): 1272–1276. [任金龙, 赵莉, 赵雄飞, 赵炎, 2015. 意大利蝗 *Calliptamus italicus* (L.)飞行能力的研究. 应用昆虫学报, 52(5): 1272–1276.]

Shirai Y, 1995. Longevity, flight ability and reproductive performance of the diamondback moth, *Plutella xylostella* (L.) (Lepidoptera: Yponomeutidae), related to adult body size. *Researches on Popululation Ecology*, 37(2): 269–277.

Stewart TJ, Wang XG, Molinar A, Daane KM, 2014. Factors limiting peach as a potential host for *Drosophila suzukii* (Diptera: Drosophilidae). *Journal of Economic Entomology*, 107(5): 1771–1779.

Stjernholm F, Karlsson B, 2008. Flight muscle breakdown in the green-veined white butterfly, *Pieris napi* (Lepidoptera: Pieridae). *European Journal of Entomology*, 105(1): 87–91.

Sun P, Liao TL, Yuan K, Shi ZH, Ji R, Chen JH, Wu J, 2011. Fruit fly-*Drosophila suzukii* Matsumura. *Plant Quarantine*, 25(6): 45–47. [孙鹏, 廖太林, 袁克, 师振华, 纪睿, 陈集翰, 吴军, 2011. 水果害虫——斑翅果蝇. 植物检疫, 25(6): 45–47.]

Vance JT, Williams JB, Elekonich MM, Roberts SP, 2009. The effects of age and behavioral development on honey bee (*Apis mellifera*) flight performance. *Journal of Experimental Biology*, 212(16): 2604–2611.

Wang XP, Fang YL, Zhang ZN, 2011. Effects of delayed mating on the fecundity, fertility and longevity of females of diamondback moth, *Plutella xylostella*. *Insect Science*, 18(3): 305–310.

Wang XP, Zhang ZN, 2004. Effect of delayed mating on the insect procreation behavior and its relationship with the pheromone control method. *Chinese Bulletin of Entomology*, 41(4): 295–298. [王香萍, 张钟宁, 2004. 延迟交配对昆虫生殖行为的影响以及与性信息素防治害虫的关系. 昆虫知识, 41(4): 295–298.]

Wei SJ, Fan X, Gu Y, Wang ZH, Gong YJ, Jin GH, Shi BC, 2013. Preliminary study of the effect of age and mating on the flight ability of the diamondback moth *Plutella xylostella*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 50(2): 474–482. [魏书军, 范潇, 顾耘, 王泽华, 宫亚军, 金桂华 石宝才, 2013. 不同日龄及交配前后小菜蛾飞行能力. 应用昆虫学报, 50(2): 474–482.]

Wu J, Liao TL, Sun P, Shi ZH, Chen JH, 2013. Bionomics of *Drosophila suzukii* Matsumura. *Plant Quarantine*, 27(5): 36–41. [吴军, 廖太林, 孙鹏, 师振华, 陈集翰, 2013. 斑翅果蝇生物学特性研究. 植物检疫, 27(5): 36–41.]

Yang F, Zheng DB, Shi JJ, Hu G, Zhang XX, Zhai BP, 2013. Observations on migratory behavior of *Cnaphalocrocis medinalis*: When will they take-off？*Chinese Journal of Applied Entomology*, 50(3): 592–600. [杨帆, 郑大兵, 史金剑, 胡高, 张孝羲, 翟保平, 2013. 稻纵卷叶螟的起飞日龄观测. 应用昆虫学报, 50(3): 592–600.]

Zhang SY, 2017. Mate preference and reproductive fitness in pine caterpilar, *Dendrolimus punctatus* Walker (Lepidoptera ： Lasiocampidae): Effect of adult age, mating history and body size. Master dissertation. Nanchang: Jiangxi Agricultural University. [张诗语, 2017. 马尾松毛虫配偶选择和生殖适度的研究-成虫日龄、交配经历和大小的影响. 硕士学位论文. 南昌: 江西农业大学.]

Zhang ZJ, Li WD, Bei YW, Zhang JM, Qi XJ, LU YB, 2013. Effects of temperature on development, reproduction and population growth of *Drosophila melanogaster*. *Acta Agriculture Zhejiangensis*, 25(3): 520–525. [张治军, 郦卫弟, 贝亚维, 章金明, 戚行江, 吕要斌, 2013. 温度对黑腹果蝇生长发育、繁殖和种群增长的影响. 浙江农业学报, 25(3): 520–525.]

Zhao YP, Chen X, Chen TT, Wu DH, Xiao C, Zhang S, Zhang LM, 2018. Age-stage two-sex life table of *Drosophila suzukii* (Diptera ： Drosophilidae) at fluctuating temperatures. *Plant Protection*, 44(3): 86–91. [赵远鹏, 陈晓, 陈婷婷, 吴道慧, 肖春, 张帅, 张立敏, 2018. 变温下铃木氏果蝇年龄-阶段两性生命表研究. 植物保护, 44(3): 86–91.]