

甘蓝夜蛾 *Mamestra brassicae* Linnaeus 飞行能力研究*

吴 晓^{1, 2**} 付晓伟² 赵新成¹ 吴孔明^{2***}

(1. 河南农业大学植物保护学院, 郑州 450002;

2. 中国农业科学院植物保护研究所, 植物病虫害生物学国家重点实验室, 北京 100193)

摘 要 【目的】测定日龄、性别、交配等因素对农业迁飞性害虫甘蓝夜蛾 *Mamestra brassicae* Linnaeus 飞行能力的影响, 为其迁飞行为研究和异地测报提供理论依据。【方法】在气温为 (24±1) °C、相对湿度为 75%±5% 的实验室环境下, 利用飞行磨系统对甘蓝夜蛾实验室种群 1~5 日龄未交配个体、已交配的 3 日龄个体以及野外迁飞种群分别进行连续 24 h 吊飞测试, 记录其累计飞行时间、累计飞行距离、平均飞行速率等参数。【结果】甘蓝夜蛾实验室种群的飞行能力随日龄增长而变化, 初羽化时即具有较强的飞行能力, 2~3 日龄达到峰值, 4~5 日龄的飞行能力显著下降; 雌性甘蓝夜蛾的飞行能力强于雄性甘蓝夜蛾; 交配的甘蓝夜蛾平均飞行速率显著小于处女甘蓝夜蛾, 但二者的平均飞行时间和飞行距离均无显著差异。此外, 渤海湾迁飞种群中晚季节南迁种群的飞行能力显著强于早季节北迁种群和过渡种群。【结论】日龄和交配状态是影响甘蓝夜蛾飞行能力的关键因素。

关键词 甘蓝夜蛾, 飞行能力, 飞行磨, 羽化, 交配状态

Preliminary study of the flight capacity of the cabbage moth, *Mamestra brassicae* Linnaeus

WU Xiao^{1, 2**} FU Xiao-Wei² ZHAO Xin-Cheng¹ WU Kong-Ming^{2***}

(1. College of Plant Protection, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China;

2. State Key Laboratory of Insect Pests and Plant Diseases, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

Abstract [Objectives] To test the effects of age, sex and mating etc. on the flight capacity of the cabbage moth, *Mamestra brassicae* Linnaeus (Lepidoptera: Noctuidae), an important migratory insect pest of vegetable crops throughout the world. [Methods] The flight performances of mated and virgin male and female *M. brassicae* were examined by tethering individuals to computerized flight mills for 24 h to measure the parameters of total flight distance, flight time, and flight velocity, under a laboratory conditions at a temperature of (24±1)°C and relative humidity of 75%±5%. [Results] Mean flight velocity, duration, and distance, varied with age. The flight capacity of *M. brassicae* was strong after emergence, peaked at 2- to 3-days of age, and then underwent a significant decrease in 4- to 5-day old moths. The flight capacity of the females was greater than that of males. The mean flight velocity of mated moths was significantly less than that of virgin moths, but there were no significant difference in mean flight duration and flight distance between mated and virgin moths. The flight capacity of the southward migratory population was significantly higher than that of the northward migratory population and that of the transitional population collected in the Bohai Gulf. [Conclusion] Age and mating status are the key factors affecting the flight capacity of *M. brassicae*.

Key words *Mamestra brassicae*, flight capacity, flight mill, emergence, mating status

*资助项目 Supported projects: 中国农业科学院植物保护研究所基本科研业务费专项资金(1610142014010)

**第一作者 First author, E-mail: wuxiao9088@163.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: kmwu@ippcaas.cn

收稿日期 Received: 2016-02-24, 接受日期 Accepted: 2016-05-12

甘蓝夜蛾 *Mamestra brassicae* Linnaeus 隶属鳞翅目 (Lepidoptera) 夜蛾科 (Noctuidae), 是一种世界性农业害虫, 广泛分布于 30°~70°N 欧洲和亚洲的大部分地区 (Øgaard, 1983 ; Finch and Thompson, 1992 ; Turnock and Carl, 1995 ; 石宝才等, 2005)。该虫在我国广泛分布, 东北、华北和西北地区发生为害较为严重 (吴孔清等, 2013 ; 张秀梅, 2015), 且具有间歇性和暴发为害的特点 (甘国福等, 1997 ; Geffen *et al.*, 2014)。甘蓝夜蛾幼虫食性广, 寄主植物多达 100 科 300 余种, 嗜食寄主主要为十字花科、葫芦科和茄果类蔬菜 (石宝才等, 2005 ; 张筱秀等, 2007), 一般年份可造成蔬菜田 20%~25% 的产量损失, 大发生年份产量损失高达 40%, 同时对蔬菜品质造成严重影响 (于学池和吴柏明, 1996 ; 张筱秀等, 2008 ; 于洪春等, 2013)。

迁飞是昆虫长期进化过程中应对复杂多变的生境所产生的一种从“空间”上保证其种群繁衍的行为对策 (Rankin and Burchsted, 1992 ; Roff, 1994 ; Dingle and Drake, 2007)。远距离迁飞是害虫异地突发致灾和造成农牧业产量严重损失的重要原因 (程遐年, 1992 ; 安丽芬和战继春, 2005 ; 罗礼智和屈西锋, 2005 ; 江幸福和罗礼智, 2008), 昆虫迁飞行为的发生与调控机制一直是国内外相关研究领域的热点问题 (罗礼智和屈西锋, 2005 ; 周世文等, 2007 ; 张云慧, 2008 ; 张云慧等, 2012), 对揭示害虫的异地灾变规律、提高预测预报水平、制定相应的综合防治策略等具有重要的理论和实践意义 (Dent, 2000 ; 张云慧, 2008)。

Wu 等 (2015) 的研究结果在国内外首次证实了甘蓝夜蛾自然种群具有远距离迁飞行为, 初步明确了该虫在中温带 (夏季繁殖区) 和暖温带 (安全越冬区) 之间的季节性迁飞规律, 并发现北迁种群性成熟个体和已交配个体的比例均比较高, 即未发生明显的“卵子发生-飞行拮抗”现象, 但目前国内外对该虫的迁飞生物学还缺乏系统的研究报道。本项研究利用飞行磨系统测定了日龄、性别、交配状态对甘蓝夜蛾飞行能力的影响, 以期深入明确甘蓝夜蛾的迁飞机理和发

展异地测报技术提供科技支撑。

1 材料与方法

1.1 供试虫源

1.1.1 实验室种群 甘蓝夜蛾野外迁飞种群的成虫采自中国农业科学院植物保护研究所长岛有害生物防治野外科学观测试验站 (简称长岛站, 山东省长岛县北隍城乡, 38°24'N, 120°55'E) 的高空测报灯下, 采集方法同 Fu 等 (2015)。采集后的成虫在温度 (24±1) °C、相对湿度 75%±5%, 光周期 8 L : 16 D 的人工气候箱内饲以 5% 蜂蜜水 (V/V), 用无菌脱脂纱布收集卵粒; 初孵幼虫在同等环境条件下的人工气候箱内连续多代饲养。人工饲料配方参照潘洪玉和张浩 (1991) 和梁梦媛等 (2006) 并有所改进, 饲养方法如下: 1~3 日龄幼虫 5~10 头/管 (玻璃管, 直径 2.5 cm, 高 12 cm), 4~6 日龄幼虫单头单管饲养, 老熟幼虫在盛有无菌土的养虫盒 (长×宽×高=20 cm×12 cm×8 cm) 内化蛹直至成虫羽化。

1.1.2 野外迁飞种群 甘蓝夜蛾野外迁飞种群成虫采自长岛站的高空测报灯下。吊飞成虫采集时间段为 2015 年的 5—10 月份, 每天早上 6:30 关闭测报灯, 6:30—7:30 采集成虫样本, 当甘蓝夜蛾诱捕总数≤8 头时, 采集所有健康完整的成虫; 当甘蓝夜蛾诱捕总数>8 头时, 随机抽取 8 头健康完整成虫, 采集样本后, 成虫不进行营养补充, 立即进行吊飞测试。按照 Wu 等 (2015) 和付晓伟 (2015) 关于北迁期和回迁期的划分标准, 将 5 月中旬至 7 月底诱捕的甘蓝夜蛾成虫定义为北迁种群, 7 月底至 8 月下旬诱捕的甘蓝夜蛾定义为北迁种群和回迁种群混合的过渡种群, 8 月下旬至 9 月底诱捕的甘蓝夜蛾成虫定义为回迁种群。

1.2 飞行能力测试

测试仪器为鹤壁佳多科工贸股份有限公司研制的 24 通道昆虫飞行信息系统 (FXMD-24 型), 飞行磨吊臂为长 30 cm、直径 0.4 cm 不锈钢丝, 采样误差≤1 圈。吊飞方法参考 Liu 等 (2011) 并做部分调整: 测试前先将试虫置于 100 mL 广

口瓶,用加 50~100 μL 乙醚的滤纸条麻醉 20~30 s,待试虫不动后立即取出,用毛笔轻轻去除成虫胸腹连接处的鳞片;将蘸取少量 502 胶的自制吊环(直径 0.5 mm 铜丝)迅速粘接于胸腹交接处,随后将吊环套接于吊臂末端,让成虫绕吊臂中轴做自由切线旋转;信息采集卡自动记录并计算出测试昆虫的累计飞行时间、累计飞行距离、平均飞行速率、最大飞行速率等参数。所有测试均在温度 $(24\pm 1)^\circ\text{C}$ 、相对湿度 $75\%\pm 5\%$ 、完全黑暗的室内进行,吊飞时间均为 24 h。

1.2.1 测定实验室种群甘蓝夜蛾成虫不同日龄和性别的飞行能力 刚羽化的雌、雄成虫分开群体饲养,选取 1、2、3、4、5 日龄的健康处女雌蛾和处女雄蛾进行吊飞测试。

1.2.2 测定交配的实验室种群甘蓝夜蛾的飞行能力 将羽化后单个雌、雄性个体进行配对,配对 3 d 后,选取未产卵的健康雌蛾以及配对的雄蛾进行吊飞,吊飞完成后,对雌蛾进行卵巢解剖,确定该对雌、雄性个体是否已交配。如未交配,则将该对雌、雄个体的数据剔除。

1.2.3 测定不同迁飞期野外迁飞种群甘蓝夜蛾的飞行能力 根据当地已划分的北迁期、过渡期和回迁期,确定认为 5 月 20 日—7 月 27 日诱捕的甘蓝夜蛾为北迁种群,7 月 31—8 月 21 日诱捕的甘蓝夜蛾为过渡种群,8 月 22 日—9 月 24 日诱捕的甘蓝夜蛾为回迁种群,每日早晨关闭高空测报灯后,随机抽取测报灯下当日所诱集的健康完整雌、雄甘蓝夜蛾立即进行吊飞测试,测试前不进行营养补充。所测试的甘蓝夜蛾的日龄及交配状态未知。

1.3 数据处理

本文所有数据均用平均值 $\pm$ 标准误表示,两组数据均值的差异分析采用 t -测验,两组以上处理间的差异分析采用单因素方差分析(ANOVA),如果差异显著则进行 Tukey's HSD 多重比较。方差分析前先对累计飞行速率、累计飞行时间、累计飞行距离的原始数据进行正态性检验,如不符合正态分布,则进行平方根转换。所有数据均利用 SPSS20.0 进行统计分析。

甘蓝夜蛾实验室种群不同日龄飞行能力的

差异分析采用单因素方差分析(ANOVA),实验室种群性别间和不同交配状态下飞行能力的差异分析采用 t -测验,甘蓝夜蛾野外跨海迁飞种群不同迁飞期飞行能力的差异分析采用单因素方差分析(ANOVA)。

2 结果与分析

2.1 不同日龄实验室种群甘蓝夜蛾的飞行能力

2.1.1 平均飞行速率 24 h 连续吊飞条件下,不同日龄甘蓝夜蛾的平均飞行速率之间存在显著差异($F_{4,299} = 5.63$, $P < 0.01$),且呈现为单峰分布,表现为羽化后即具有较快的平均飞行速率(3.45 ± 0.16) km/h,2~3 日龄达到峰值,分别为(3.65 ± 0.20) km/h 和 (3.77 ± 0.17) km/h,之后随日龄增加平均飞行速率快速下降,至 4~5 日龄降为(3.22 ± 0.15) km/h 和 (2.77 ± 0.14) km/h。在测试的 299 头成虫中,平均飞行速率最大可达 7.01 km/h、最小仅为 0.77 km/h;而瞬时极大飞行速率最大可达 10.17 km/h、最小仅为 2.71 km/h(图 1)。

2.1.2 平均飞行时间 24 h 连续吊飞条件下,甘蓝夜蛾的平均飞行时间存在显著的日龄差异($F_{4,299} = 11.29$, $P < 0.01$)且呈现为单峰分布:刚羽化后的平均飞行时间已相对较长,为(8.02 ± 0.66) h;2 日龄时达到峰值,为(8.59 ± 0.79) h;3~5 日龄则显著下降至(7.74 ± 0.69)、(5.16 ± 0.58) 和 (3.45 ± 0.40) h。在测试的 299 头成虫中,累计飞行时间最长可达 23.93 h、最短仅为 0.01 h(图 1)。

2.1.3 平均飞行距离 24 h 连续吊飞条件下,甘蓝夜蛾的平均飞行距离存在显著的日龄差异($F_{4,299} = 11.32$, $P < 0.01$)且呈现为单峰分布:初羽化成虫的平均飞行距离相对较短,为(32.17 ± 3.15) km;2~3 日龄平均飞行距离显著增加并达到峰值,分别为(38.65 ± 4.34) km 和 (32.89 ± 3.44) km;4~5 日龄则显著下降至(18.93 ± 2.42) km 和 (11.65 ± 1.75) km。在测试的 299 头成虫中,累计飞行距离最长可达 121.44 km、最短仅为 0.01 km(图 1)。

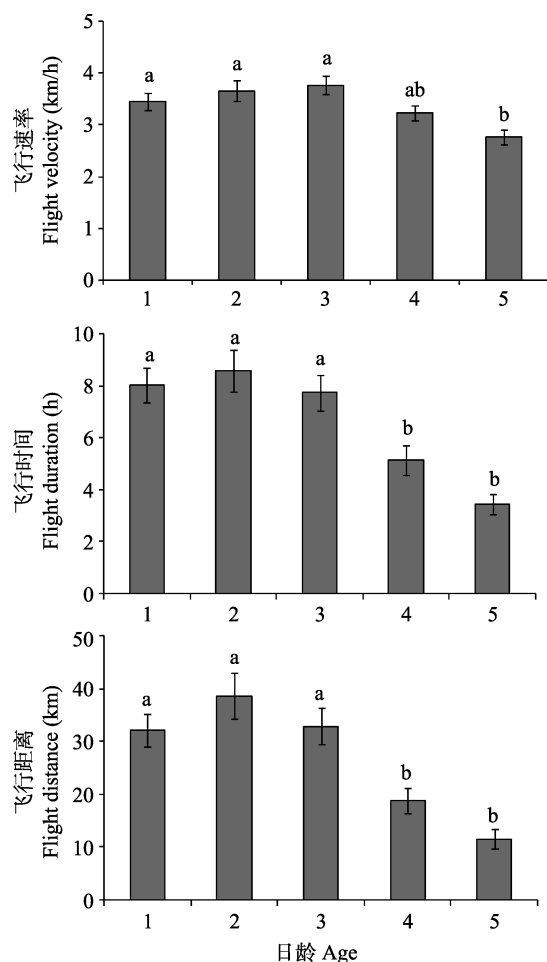


图1 不同日龄甘蓝夜蛾连续吊飞24 h的飞行能力
Fig. 1 Flight capacity of *Mamestra brassicae* during 24 hours tethered flight on different days after emergence

图中不同小写字母表示经 Tukey's HSD 多重比较差异显著 ($P < 0.05$), 相同小写字母表示差异不显著。

Histograms with the same letters indicate no significant difference during days at the 5% level by Tukey's HSD test.

2.2 不同性别实验室种群甘蓝夜蛾的飞行能力

24 h 连续吊飞条件下, 甘蓝夜蛾雌蛾的平均飞行速率 ($t = 2.02$, $df = 297.97$, $P = 0.04$) 显著大于雄蛾, 但二者的平均飞行时间 ($t = -1.04$, $df = 302$, $P = 0.30$) 和平均飞行距离 ($t = -0.08$, $df = 302$, $P = 0.94$) 均无显著的性别间差异 (表 1)。

2.3 不同交配状态实验室种群甘蓝夜蛾的飞行能力

24 h 连续吊飞条件下, 3 日龄已交配成虫的平均飞行速率 ($t = -2.78$, $df = 98.70$, $P < 0.01$) 显著小于处女成虫, 但交配与否对二者的平均飞行时间 ($t = 0.14$, $df = 118$, $P = 0.89$) 和平均飞行距离 ($t = -0.81$, $df = 101.44$, $P = 0.42$) 均无显著影响 (表 2)。

2.4 甘蓝夜蛾野外迁飞种群飞行能力

24 h 连续吊飞条件下, 野外迁飞种群不同迁飞期的平均飞行速率无显著差异 ($F_{2,89} = 2.34$, $P = 0.10$) (表 3)。野外迁飞种群不同迁飞期的平均飞行时间存在显著差异 ($F_{2,89} = 7.64$, $P = 0.001$), 其中, 北迁种群和过渡种群的平均飞行时间无显著差异 ($P > 0.05$), 而回迁种群的平均飞行时间显著高于北迁种群 ($P < 0.05$) 和过渡种群 ($P < 0.05$) (表 3)。野外迁飞种群不同迁飞期的平均飞行距离存在显著差异 ($F_{2,89} = 6.27$, $P = 0.003$), 其中, 北迁种群和过渡种群的平均飞行时间无显著差异 ($P > 0.05$), 而回迁种群的平均飞行距离显著高于北迁种群 ($P < 0.05$) 和过渡种群 ($P < 0.05$) (表 3)。

表1 不同性别甘蓝夜蛾吊飞24 h的飞行能力

Table 1 Flight capacity of *Mamestra brassicae* during 24 hours tethered flight on different sex moths after emergence

参数 Parameters	雌虫 Female			雄虫 Male			t-值 t-value	P-值 P-value
	测试头数 Number	平均值±标准误 Mean±SE	范围 Range	测试头数 Number	平均值±标准误 Mean±SE	范围 Range		
飞行速率 Flight velocity (km/h)	155	3.53±0.11	0.77-7.01	149	3.22±0.10	0.90-6.53	2.02	0.04
飞行时间 Flight duration (h)	155	6.28±0.41	0.11-20.62	149	7.00±0.46	0.01-23.93	- 1.04	0.30
飞行距离 Flight distance (km)	155	27.21±2.18	0.09-104.35	149	26.89±2.13	0.01-121.44	- 0.08	0.94

表 2 交配状态对甘蓝夜蛾飞行能力的影响
Table 2 The effect of mating status on the flight capacity of *Mamestra brassicae*

参数 Parameters	交配 Mated			未交配 Unmated			<i>t</i> -值 <i>t</i> -value	<i>P</i> -值 <i>P</i> -value
	测试头数 Number	平均值±标准误 Mean±SE	范围 Range	测试头数 Number	平均值±标准误 Mean±SE	范围 Range		
飞行速率 Flight velocity (km/h)	62	3.21±0.11	1.64-6.20	58	3.77±0.17	0.95-6.47	- 2.78	< 0.01
飞行时间 Flight duration (h)	62	7.88±0.64	0.78-24.11	58	7.74±0.69	0.01-20.31	0.14	0.89
飞行距离 Flight distance (km)	62	26.43±2.37	1.27-89.45	58	32.89±3.44	0.01-100.41	- 0.81	0.42

表 3 甘蓝夜蛾野外迁飞种群飞行能力的差异
Table 3 The differences of flight capacity of the *Mamestra brassicae* migratory populations

参数 Parameters	北迁种群 Northward population		过渡种群 Transition population		回迁种群 Backward population		<i>F</i> -值 <i>F</i> -value	<i>P</i> -值 <i>P</i> -value
	测试头数 Number	平均值±标准误 Mean±SE	测试头数 Number	平均值±标准误 Mean±SE	测试头数 Number	平均值±标准误 Mean±SE		
	测试头数 Number	平均值±标准误 Mean±SE	测试头数 Number	平均值±标准误 Mean±SE	测试头数 Number	平均值±标准误 Mean±SE		
飞行速率 Flight velocity (km/h)	60	3.09±0.16a	14	3.49±0.32a	18	3.79±0.31a	2.34	0.10
飞行时间 Flight duration (h)	60	3.38±0.291b	14	3.80±0.69b	18	6.79±1.13a	7.64	0.001
飞行距离 Flight distance (km)	60	12.59±1.48b	14	13.92±3.34b	18	28.87±6.29a	6.27	0.003

表中同列数据后标有不同小写字母表示经 Tukey’s HSD 多重比较差异显著 ($P < 0.05$)，相同小写字母表示差异不显著。
Data followed by different letters in the same column indicate significantly different at 0.05 level by Tukey’s HSD test.

3 讨论

本项研究结果表明，甘蓝夜蛾成虫具有较强的飞行能力，在 24 h 连续吊飞条件下，甘蓝夜蛾实验室种群的飞行时间可达 23.93 h，飞行距离达 121.44 km，与粘虫 *Mythimna separata* Walker、棉铃虫 *Helicoverpa armigera* Hübner 的测试结果相近（张志涛和李光博，1985；吴孔明和郭予元，1996），显著高于稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis* Guenée 和草地螟 *Loxostege sticticalis* Linnaeus（罗礼智和李光博，1992；潘攀等，2013），粘虫、棉铃虫、稻纵卷叶螟以及草地螟都是远距离迁飞性害虫，说明甘蓝夜蛾具有较强的远距离迁能力，昆虫之间飞行能力的相似或差距，可能与其体型大小或翅膀结构等有关，已有研究表

明，不同鳞翅目昆虫的翅膀形态、微观结构、纳米力学性能均不相同，而且这些因素与昆虫的飞行效率和飞行距离密切相关（邢振龙等，2014）。本研究表明甘蓝夜蛾成虫的飞行能力受不同生物因素（日龄、性别、交配状态）的影响。其中，日龄是影响其飞行能力的关键因素。甘蓝夜蛾实验室种群成虫在初羽化时已具备一定的飞行能力，2~3 日龄时飞行能力增强且达到最强，4 日龄之后飞行能力开始下降，5 日龄时降至最低，推测其初羽化时处于幼嫩阶段初期，飞行肌等飞行系统尚未健全，飞行能源物质的含量以及与飞行相关酶系的活性较低，其飞行能力和活跃性都比较差，但是在初羽化后飞行系统迅速发育，能够在其羽化后 1 日龄晚间时达到幼嫩阶段末期，并且飞行系统开始健全；到 2~3 日龄时

其飞行系统发育完全健全,飞行能源物质的积累和酶活性的增强,使其飞行能力达到最强,同时其飞行活动导致保幼激素含量增加,加快了卵巢内卵黄蛋白的合成,从而加快卵巢发育成熟的过程,促进生殖;4日龄之后飞行能力开始下降,可能因为雌虫卵巢发育已经成熟,并进入产卵期,飞行能源物质由飞行系统转向生殖系统(Johanson, 1969),飞行肌开始退化已不适合迁飞。甘蓝夜蛾成虫在羽化后1~2 d即可交配,2~3 d后产卵(齐孟文和崔秀兰, 1986; 吴孔清等, 2013);同时,根据室内卵巢解剖发现,羽化后1日龄成虫的卵巢发育普遍处于1~2级,2日龄成虫普遍处于3级,3日龄成虫虽普遍处于3级,但有些已经达到4级。当其性未成熟(1日龄)且腹部有大量的脂肪体时,平均可飞行8.02 h和32.17 km,而当其性成熟(2~3日龄),卵巢充分发育,腹部脂肪体很少时,平均可飞行8.59 h、38.65 km和7.74 h、32.89 km,此时飞行能力达到最强,随着卵巢的发育,其飞行能力增强,甘蓝夜蛾的这种飞行机制与粘虫、原切根虫 *Euxoa auxiliaris* Grot)相似,其飞行系统与卵巢是同步发育的,可能不存在“卵子发生-飞行拮抗”(Koerwitz and Pruess, 1964; 罗礼智等, 1995)。但当甘蓝夜蛾成虫进入产卵期后飞行能力则开始下降,如粘虫的飞行能力会随着产卵天数和产卵量的增加而急剧下降(罗礼智等, 1995),甘蓝夜蛾产卵行为对飞行能力的影响则需要进一步的研究。甘蓝夜蛾雌虫的平均飞行速率显著大于雄虫,但平均飞行时间和飞行距离并没有显著的性别间差异。室外甘蓝夜蛾种群动态结果发现,在5—9月份,诱捕的野外迁飞种群中雌虫的比例均显著高于雄虫(Wu *et al.*, 2015),推测性别对甘蓝夜蛾成虫飞行能力有影响,并且雌虫的飞行能力强于雄虫,可能雌虫在迁飞过程中,卵巢的发育成熟会促进其迁飞,以便能尽快的找到合适的栖息地进行产卵繁殖。

比较3日龄交配成虫和未交配成虫的飞行能力,发现未交配成虫的飞行能力显著高于交配成虫,交配状态对甘蓝夜蛾飞行能力有显著的影响。推测交配行为不仅消耗甘蓝夜蛾的能源物质,而且改变了成虫体内的激素种类和含量,这

些因素都有可能影响甘蓝夜蛾的飞行能力。同时也有研究表明,交配会影响飞行肌的发育,对红火蚁 *Solenopsis invicta* Buren 和小地老虎 *Agrotis ypsilon* Rotttemberg 的研究发现,交配能够诱导飞行肌细胞裂解,使飞行肌发生降解,降解产物被转到生殖等方面重新利用,生命活动中心由飞行转向生殖(Hanski *et al.*, 2006; Togghara *et al.*, 2009; 王伟等, 2013)。

比较甘蓝夜蛾野外迁飞种群不同迁飞期的飞行能力,结果发现回迁种群的飞行能力显著高于北迁种群与混合种群,其中不同迁飞期的平均飞行速率并没有显著差异,但是回迁种群的平均飞行时间和平均飞行距离显著高于北迁种群和混合种群。同时,室外甘蓝夜蛾种群动态研究结果表明,甘蓝夜蛾迁出时处于幼嫩阶段,性发育不成熟,远距离迁飞后卵巢发育级别较高,虽然北迁种群雌蛾和回迁种群雌蛾的生殖系统都有一定程度的发育,但已有数据显示,5—7月份诱捕的野外迁飞种群雌蛾中性成熟和已交配个体的比例均高于50%,而8、9月份雌蛾中性成熟和已交配个体的比例均不足50%,可知北迁种群雌蛾的生殖系统发育程度明显高于回迁种群雌蛾,认为北迁种群到达长岛观测站之前已进行了长期迁飞,而回迁种群则刚刚起飞或进行了短期迁飞(Wu *et al.*, 2015),北迁种群较回迁种群进行了更长时间的迁飞,其能量消耗大,并且在迁飞过程中随着保幼激素滴度的逐渐增加,卵巢也在不断的发育成熟,导致其飞行能力降低。因此推测甘蓝夜蛾成虫的飞行与生殖存在拮抗作用,可能符合“卵子发生-飞行拮抗综合症候”现象。此外也可能由于回迁期天气变冷,温度下降对其发育造成一定的影响(江幸福等, 2002),因此,需要进一步研究影响自然种群飞行生物学的相关因素。

许多野外迁飞的鳞翅目昆虫第一次起飞时都发生在其性成熟前,如粘虫、小地老虎、稻纵卷叶螟、棉铃虫等(黄学飞等, 2010)到达迁入区前会进行多次再迁飞,甜菜夜蛾和稻纵卷叶螟等在再迁飞过程中卵巢能够逐渐发育并进行交配,不存在“卵子发生-飞行拮抗”现象(张孝羲,

1981; 韩兰芝, 2004), 推测甘蓝夜蛾也具有再迁飞习性, 需要在过境区降落栖息、补充营养, 然后继续进行迁飞行为。本实验初步研究了日龄、性别和交配等因素对实验室种群飞行能力的影响以及野外迁飞种群的飞行能力, 结果表明甘蓝夜蛾具有较强的远距离迁飞潜能, 但还需要进一步研究甘蓝夜蛾在自然条件下卵巢的发育、交配行为与其再迁飞的关系, 以及对飞行能力的影响, 有助于推测迁入区甘蓝夜蛾的危害时间、危害程度以及提高其预测水平。

参考文献 (References)

- An LF, Zhan JC, 2005. The first time of outbreak of clover cutworm *Scotogramma trifolii* R. in Baicheng city for damage. *China Plant Protection*, 25(8): 38. [安丽芬, 战继春, 2005. 旋幽夜蛾在白城市首次大面积暴发为害. 中国植保导刊, 25(8): 38.]
- Cheng XN, 1992. Recent advances in research on the migrating insects in china. *Chinese Bulletin of Entomology*, 29(3): 146–149. [程遐年, 1992. 中国迁飞昆虫的研究进展. 昆虫知识, 29(3): 146–149.]
- Dent D, 2000. *Insect Pest Management*. London: CAB International. 1–432.
- Dingle H, Drake VA, 2007. What is migration? *BioScience*, 57(2): 113–121.
- Finch S, Thompson AR, 1992. Pests of cruciferous crops// McKinlay RG (ed.). *Vegetable Crop Pests*. New York: McMillan Press. 87–138.
- Fu XW, 2005. Study on the community structure and population dynamics of migratory insects across the Bohai Strait. Doctoral dissertation. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences. [付晓伟, 2015. “渤海湾通道”迁飞性昆虫群落结构及种群动态研究. 博士学位论文. 北京: 中国农业科学院.]
- Fu XW, Zhao XY, Xie BT, Ali A, Wu KM, 2015. Seasonal pattern of *Spodoptera litura* (Lepidoptera: Noctuidae) migration across the bohai strait in northern China. *Journal of Economic Entomology*, 108(2): 525–538.
- Gan GF, Wang YL, Lei XG, Gan GJ, 1997. The spatial distribution type and sampling technique of the cabbage moth *Mamestra brassicae* (L.) larva in beet field. *Sugar Crops of China*, (1): 20–22. [甘国福, 王英兰, 雷兴国, 甘国君, 1997. 甘蓝夜蛾幼虫在甜菜田的空间分布型及抽样技术. 中国糖料, (1): 20–22.]
- Geffen KG, Grunsven RHA, Ruijven J, Berendes F, Veenendaal EM, 2014. Artificial light at night causes diapause inhibition and sex-specific life history changes in a moth. *Ecology and Evolution*, 4(11): 2082–2089.
- Han LZ, 2004. The ecological mechanisms of beet armyworm *Spodoptera exigua* Hübner migration. Doctoral dissertation. Nanjing: Nanjing Agricultural University. [韩兰芝, 2004. 甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua* Hübner 迁飞的生态机制研究. 博士学位论文. 南京: 南京农业大学.]
- Hanski I, Saastamoinen M, Ovaskainen O, 2006. Dispersal-related life-history trade-offs in a butterfly metapopulation. *Journal of Animal Ecology*, 75(1): 91–100.
- Huang XF, Zhang XX, Zhai BP, 2010. Effect of copulation on flight capacity and remigration capacity of *Cnaphalocrocis medinalis* (Guenée). *Journal of Nanjing Agricultural University*, 33(5): 23–28. [黄学飞, 张孝羲, 翟保平, 2010. 交配对稻纵卷叶螟飞行能力及再迁飞能力的影响. 南京农业大学学报, 33(5): 23–28.]
- Jiang XF, Luo LZ, 2008. Regulation basis and perspectives on insect migration. *Acta Ecologica Sinica*, 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 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 Entomologica Sinica*, 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.]
- Johnson CG, 1969. *Migration and Dispersal of Insects by Flight*. London: Methuen. 1–763.
- Koerwitz FL, Pruess KP, 1964. Migratory potential of the army cutworm. *Journal of Kansas Entomology Society*, 37(3): 234–239.
- Liang MY, Yu HC, Liu J, Huang SS, 2006. Research of cabbage moth *Mamestra brassicae* (L.) artificial feed. *Journal of Northeast Agricultural University*, 37(6): 771–774. [梁梦媛, 于洪春, 刘杰, 黄珊珊, 2006. 甘蓝夜蛾人工饲料的研究. 东北农业大学学报, 37(6): 771–774.]
- Liu ZF, Mcneil JN, Wu KM, 2011. Flight mill performance of the lacewing *Chrysoperla sinica* (Neuroptera: Chrysopidae) as a function of age, temperature, and relative humidity. *Journal of Economic Entomology*, 104(1): 94–100.
- Luo LZ, Li GB, 1992. The flight ability and behavior research of meadow moth on different days. *Youth Ecological Sciences*(two). Beijing: 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. 青年生态学论丛(二). 北京: 303–308.]
- Luo LZ, Li GB, Hu Y, 1995. Relationship between flight capacity and oviposition of oriental armyworm moths, *Mythimna separata* (Walker). *Acta Entomologica Sinica*, 38(3): 284–289. [罗礼智, 李光博, 胡毅, 1995. 粘虫飞行与产卵的关系. 昆虫学报, 38(3):

- 284–289.]
- Luo LZ, Qu XF, 2005. The damage characteristics of meadow moth (*Loxostege sticticalis* L.) in 2004 and the damage trend analysis of one-generation in 2005 in our country. *Plant Protection*, 31(3): 6–71. [罗礼智, 屈西锋, 2005. 我国草地螟 2004 年危害特点及 2005 年一代危害趋势分析. 植物保护, 31(3): 6–71.]
- Pan HY, Zhang H, 1991. The development of the cabbage moth artificial feed. *Journal of Jilin Agricultural University*, (2): 17–19. [潘洪玉, 张浩, 1991. 甘蓝夜蛾人工饲料的研制. 吉林农业大学学报, (2): 17–19.]
- Pan P, Luo LZ, Jiang XF, Zhang L, 2013. The characteristics of light in the rice leaf roller, *Cnaphalocrocis medinalis*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 50(3): 583–591. [潘攀, 罗礼智, 江幸福, 张蕾, 2013. 稻纵卷叶螟飞行行为特征. 应用昆虫学报, 50(3): 583–591.]
- Øgaard L, 1983. The cabbage moth, (*Mamestra brassicae* (L.)), Lepidoptera, Noctuidae. development in Denmark illustrated by simple simulation. *Entomologiske Meddelelser*, 50: 36–46.
- Qi MW, Cui XL, 1986. The research of biological characteristics in cabbage moth adult stage. *Journal of Shandong Agricultural University*, 17(3): 67–73. [齐孟文, 崔秀兰, 1986. 甘蓝夜蛾成虫期生物学特性的研究. 山东农业大学, 17(3): 67–73.]
- Rankin MA, Burchsted JCA, 1992. The cost of migration in insects. *Annual Review of Entomology*, 37: 533–559.
- Roff DA, 1994. Habitat persistence and the evolution of wing dimorphism in insects. *American Naturalist*, 144(5): 1009–1020.
- Shi BC, Gong YJ, Lu H, 2005. The identification and control of *Mamestra brassicae* (L.) (Lepidoptera: Noctuidae). *Chinese Vegetables*, (9): 56. [石宝才, 宫亚军, 路虹, 2005. 甘蓝夜蛾的识别与防治. 中国蔬菜, (9): 56.]
- Toghara A, Johoston JS, Bradleigh VS, 2009. Initiation of flight muscle apoptosis and wing casting in the red imported fire ant *Solenopsis invicta*. *Physiological Entomology*, 34(1): 79–85.
- Turnock WJ, Carl KP, 1995. Evaluation of the palearctic *Eurithia consobrina* (Diptera: Tachinidae) as a potential biocontrol agent for *Mamestra configurata* (Lepidoptera: Noctuidae) in Canada. *Biocontrol Science and Technology*, 5(1): 55–68.
- Wang W, Yin J, Cao YZ, Li KB, 2013. The effect of feeding and mating on the development of flight muscle in *Agrotis ypsilon*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 50(6): 1573–1585. [王伟, 尹娇, 曹雅忠, 李克斌, 2013. 饥饿和交配对小地老虎飞行肌发育的影响. 应用昆虫学报, 50(6): 1573–1585.]
- Wu KM, Guo YY, 1996. The flight activity of cotton bollworm. *Acta Ecologica Sinica*, 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.]
- Wu KQ, Zhao X, Yang J, Cai QN, 2013. Advance on the occurrence regulation and control measures of *Mamestra brassicae* (L.) (Lepidoptera: Noctuidae) in sugar beet. *Journal of Agriculture*, 3(8): 25–28. [吴孔清, 赵兴, 杨军, 蔡青年, 2013. 甜菜甘蓝夜蛾的发生规律及控制措施. 农学学报, 3(8): 25–28.]
- Wu X, Fu XW, Guo JL, Zhao XC, Wu KM, 2015. Annual migration of cabbage moth, *Mamestra brassicae* L. (Lepidoptera: Noctuidae), over the sea in northern China. *PLoS ONE*, 10(7): e0132904. doi:10.1371/journal.pone.0132904.
- Xing ZL, Fu XW, Liu YQ, Wu KM, 2014. The nano-indentation method for analyzing the mechanical properties of Lepidopteran insects' wings. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 51(6): 1604–1611. [邢振龙, 付晓伟, 刘永强, 吴孔明, 2014. 鳞翅目昆虫翅膀纳米力学性能的测定方法. 应用昆虫学报, 51(6): 1604–1611.]
- Yu HC, Deng JJ, Wang YW, Zhang XL, Song LT, 2013. Effect of temperature and photoperiod on diapause induction in Harbin population of *Mamestra brassicae*. *Journal of Northeast Agricultural University*, 44(1): 133–136. [于洪春, 邓佳佳, 王雨薇, 张鑫琳, 宋龙腾, 2013. 温度与光周期对甘蓝夜蛾哈尔滨种群滞育诱导的影响. 东北农业大学学报, 44(1): 133–136.]
- Yu XC, Wu BM, 1996. The research of the harm of cabbage moth for sugar beet and the control index of that moth. *China Beet & Sugar*, (1): 39–41. [于学池, 吴柏明, 1996. 甘蓝夜蛾对甜菜的危害及其防治指标的研究. 中国甜菜糖业, (1): 39–41.]
- Zhang XM, 2015. The occurrence regularity and control measures of cabbage moth in Pingan county Qinghai Province. *Shaanxi Journal of Agricultural Science*, 61(1): 35–38. [张秀梅, 2015. 甘蓝夜蛾在青海省平安县的发生规律与防治措施. 陕西农业科学, 61(1): 35–38.]
- Zhang XX, Geng JG, Zhou WJ, 1981. Studies on the migration of rice roller *Cnaphalocrocis medinalis* Guenée. *Journal of Nanjing Agronomy Courtyard*, (3): 43–54. [张孝義, 耿济国, 周威君, 1981. 我国稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis* Guenée 迁飞规律的研究. 南京农学院学报, (3): 43–54.]
- Zhang XX, Lian ML, Li T, Zhou YN, 2007. Observation on biological characteristic of *Mamestra brassicae* L. *Journal of Shanxi Agricultural Science*, 35(6): 96–97. [张筱秀, 连梅力, 李唐, 周运宁, 2007. 甘蓝夜蛾生物学特性观察. 山西农业科学, 35(6): 96–97.]
- Zhang XX, Lian ML, Li T, Zhou YN, 2008. Investigation on occurrence regulations and damage characteristics of *Mamestra brassicae* (L.) (Lepidoptera: Noctuidae) in the center area of Shanxi. *Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science)*, 28(4): 442–443. [张筱秀, 连梅力, 李唐, 周运宁, 2008. 山西中部地区甘蓝夜蛾发生规律及为害特点调查研究. 山西农业大学学报(自然科学版), 28(4): 442–443.]

- Zhang YH, 2008. The vertical radar monitoring and insect source analysis of migratory insect in northeast and north China. Doctoral dissertation. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences. [张云慧, 2008. 东北与华北地区迁飞昆虫的垂直雷达监测与虫源分析. 博士学位论文. 北京: 中国农业科学院.]
- Zhang YH, Zhang Z, Jiang YY, Zeng J, Gao YB, Cheng DF, 2012. Preliminary analysis of the outbreak of the third-generation armyworm *Mythimna separata* in China in 2012. *Plant Protection*, 28(5): 1–8. [张云慧, 张智, 姜玉英, 曾娟, 高月波, 程登发, 2012. 2012 年三代黏虫大发生原因初步分析. 植物保护, 28(5): 1–8.]
- Zhang ZT, Li GB, 1985. The preliminary research on the flight biological characteristics of armyworm. *Acta Phytophylacica Sinica*, 12(2): 93–100. [张志涛, 李光博, 1985. 粘虫飞翔生物学特性的初步研究. 植物保护学报, 12(2): 93–100.]
- Zhou SW, Mao HP, Guo YJ, Ji XX, Li FP, Li BG, 2007. Analyses on the reason and characteristics of the rice fulgorid emerging. *Hubei Agricultural Science*, 46(3): 403–404. [周世文, 毛海平, 郭勇军, 季兴祥, 李丰平, 李宝国, 2007. 稻飞虱发生特点及特大发生原因分析. 湖北农业科学, 46(3): 403–404.]