

不同温度吊飞对草地螟飞行能力、 能源物质含量及生殖能力的影响*

唐继洪^{1,2**} 罗礼智^{1***} 江幸福^{1***} 程云霞¹ 张 蕾¹

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

2. 中国热带农业科学院环境与植物保护研究所, 海口 571101)

摘 要 【目的】为研究不同温度条件下草地螟 *Loxostege sticticalis* L. 成虫飞行能力的差异, 飞行后能源物质含量以及生殖能力的变化。【方法】本实验通过飞行磨系统测试 3 日龄草地螟成虫在不同温度下 10 h 内的飞行能力, 飞行后通过甘油三酯试剂盒、糖元试剂盒以及蛋白质试剂盒来分别测试其体内甘油三酯、糖元及蛋白的含量, 再将飞行后成虫配对测试其生殖能力的变化。【结果】18–22 °C 条件下草地螟成虫的飞行能力最强, 各个温度条件下飞行后甘油三酯及糖元的含量都较对照降低, 18 和 22 °C 下降幅度最大, 然而能源物质的利用效率较高, 是其最适宜飞行的温度。各个温度条件下飞行后可溶性蛋白质的含量没有显著差异 ($P > 0.05$); 不同温度吊飞后生殖能力没有显著差异 ($P > 0.05$)。【结论】18 °C 和 22 °C 是草地螟较适宜的飞行温度。甘油三酯及糖元是草地螟飞行的能源物质。草地螟 10 h 内的飞行不需要付出生殖的代价。

关键词 草地螟; 甘油三酯; 飞行磨系统; 糖元; 利用效率

Effect of flight temperature on flight capacity, energy substances and fecundity of the beet webworm (*Loxostege sticticalis* L.)

TANG Ji-Hong^{1,2**} LUO Li-Zhi^{1***} JIANG Xing-Fu^{1***} CHENG Yun-Xia¹ ZHANG Lei¹

(1. State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Institute of Plant Protection, Chinese Academy

of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China; 2. Environment and Plant Protection Institute,

Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou 571101, China)

Abstract 【Objectives】To study the flight capacity, energy content and fecundity of the beet webworm (*Loxostege sticticalis* L.), at different temperatures. 【Methods】Three-day-old adults were tethered for 10h in a flight mill to test their flight capacity at different temperatures, after which their triglyceride, glycogen and protein content were measured using the corresponding assay kit, and their fecundity assessed. 【Results】18–22 °C was the optimal flight temperature. Triglyceride and glycogen content were significantly lower in flight-tested moths than in the control group and those flight-tested at 18–22 °C had the lowest triglyceride and glycogen content. There was no significant difference in protein content and fecundity between flight-tested moths and the control group. 【Conclusion】18 °C to 22 °C was the optimal flight temperature range for the beet webworm, and triglyceride and glycogen are the main energy source for flight. 10h of tethered flight did not affect the fecundity of 3-day-old moths.

Key words *Loxostege sticticalis*; Triglyceride; flight mill system; glycogen; utilization efficiency

*资助项目 Supported projects: 国家重点研发计划项目 (2022YFD1400600); 国家绿肥产业技术体系 (CARS-22); 农业农村部政府购买服务项目 (15226006); 中国农业科学院植物保护研究所基本科研业务费 (S2022XM05)

**第一作者 First author, E-mail: jihong_23@163.com

***共同通讯作者 Co-corresponding authors, E-mail: lzl原因@ippcaas.cn; xfjiang@ippcaas.cn

收稿日期 Received: 2022-09-14; 接受日期 Accepted: 2023-08-23

草地螟 (*Loxostege sticticalis* L.) 是我国北方地区的一种重要农牧业害虫 (罗礼智, 2004; 罗礼智等, 2009), 因其具有远距离迁飞的习性, 从而使得难以对其发生进行预测, 而其低龄幼虫又较为隐蔽, 往往发现其危害时为时已晚, 曾多次给我国北方地区的农牧业造成较大的经济损失 (顾成玉等, 1987; 崔万里, 1992)。草地螟的迁飞是其在漫长的进化史中形成的逃离不良环境条件的一种生活史对策。而其迁飞过程中已有研究表明其在离地面 400 m 左右的高度聚集成层飞行 (陈瑞鹿等, 1992; 孙雅杰和高月波, 2004; 张丽等, 2012)。草地螟迁飞高度的选择与环境条件有何关系, 特别是温度条件对其迁飞高度选择有何影响还未见报道。迁飞是一种持续的高能耗的飞行活动, 很多鳞翅目昆虫的飞行主要以糖类和脂类为能源物质, 而持续的远距离的飞行则主要以脂类为能源物质 (黄冠辉和马世骏, 1964; 张孝羲等, 1983; Gunn and Gatehouse, 1988; 曹雅忠等, 1995; 吴孔明和郭予元, 1998)。草地螟迁飞的能源物质是什么也还没有相关报道。不同温度条件下飞行草地螟能源物质的消耗情况如何, 以及飞行后生殖能力有何变化? 为明确这些问题, 作者在室内对 3 日龄草地螟雌、雄蛾在不同温度条件下进行了 10 h 的吊飞, 测试了其飞行能力, 飞后糖类、甘油三酯和蛋白等物质的含量以及生殖能力的变化。

1 材料与方法

1.1 供试虫源

本实验草地螟虫源采自河北省康保县 (114.63° E, 41.87° N), 经实验室内饲养繁殖数代后作为供试虫源。取适量虫卵置于塑料纸罩 (直径 9 cm 高 21 cm) 中, 两端罩以细的尼龙纱布, 并将罩子置于养虫室内待其孵化。孵化出的幼虫以新鲜的灰菜叶 *Chenopodium album* L. 饲喂在 750 mL 罐头瓶中, 每瓶放入 20 头健壮、活跃、龄期一致的草地螟幼虫, 瓶底放入滤纸片, 瓶口罩以细尼龙纱布防止幼虫逃脱。饲养过程中及时清理排泄物并更换新鲜的灰菜叶。待幼虫老熟后将其转入装有含水量约为 15% 的 5 cm 高的

无菌沙土的罐头瓶中做茧和化蛹。从卵孵化到成虫羽化的过程中, 养虫室温度控制在 (22±1) °C, 相对湿度控制在 75%±5%, 光周期为 L16:D8。

1.2 草地螟成虫的饲养

草地螟成虫羽化当日选取健壮活跃大小适中的个体逐只编号并称量和记录初羽化蛾重量后放入 40 mL 带盖医用塑料尿杯中, 并放入小块用 10% (w/v) 葡萄糖水浸透的脱脂棉为其提供食物, 杯盖用打孔器打数个直径 3 mm 的孔洞。饲养一日后选取部分草地螟成虫用乙醚将其麻醉后在其胸腹连接处背面粘以直径 1 mm×长 4 mm 的塑料管后再放回尿杯中饲养至 3 日龄后进行飞行能力测试。另一部分草地螟成虫不做任何处理作为对照。成虫饲养的环境条件与 1.1 所述幼虫饲养环境一致。

1.3 不同温度吊飞处理对草地螟能源物质含量的影响

吊飞实验使用昆虫飞行磨 (佳多科工贸公司) 进行。本实验共设置 14、18、22、26 和 30 °C (温度的误差范围为±0.5 °C) 5 个吊飞温度 (吊飞实验时吊飞室内的环境温度), 每个温度测试雌、雄草地螟成虫各 60 头。所需温度条件在吊飞室内通过空调控制能够到达±1 °C 的精度。吊飞室内湿度都控制在 70%±10%, 这个湿度范围为草地螟飞行的最适宜湿度 (罗礼智和李光博, 1992)。吊飞测试时间为从成虫进入暗期后开始共 10 h。吊飞过程中飞行磨能自动记录草地螟成虫的飞行时间, 距离和速度等指标。吊飞前后均对每只成虫 (包括对照) 进行称重并记录, 吊飞结束并称重完成后将虫体装入 1.5 mL 离心管中并标记上相应编号, 立即用液氮将其冻死后于 -80 °C 保存, 用于测试能源物质含量。

1.3.1 甘油三酯含量测定 每个吊飞温度及对照随机选取雌、雄草地螟成虫各 20 头, 去掉头、足和翅后将虫体分为胸和腹两部分, 并分别称重和记录, 然后用甘油三酯测定试剂盒 Tissue triglyceride assay kit E1003-2 (普利莱基因技术有限公司) 分别测定胸、腹部甘油三酯含量。

1.3.2 糖元含量测定 每个吊飞温度及对照随机选取雌、雄草地螟成虫各 20 头, 去掉头、足和翅后将虫体分为胸和腹两部分, 并分别称重和记录, 然后用肝/肌糖元测定试剂盒 A043 (南京建成生物工程研究所) 分别测定胸、腹部糖元含量。

1.3.3 可溶性蛋白含量测定 每个吊飞温度及对照随机选取雌、雄草地螟成虫各 20 头, 去掉头、足和翅后将虫体分为胸和腹两部分, 并分别称重和记录, 然后用 Bradford 蛋白浓度测定试剂盒 PC0010 (北京索莱宝科技有限公司) 分别测定胸、腹部蛋白含量。

1.4 不同温度吊飞对草地螟生殖能力的影响

如 1.3 所述, 取每个温度吊飞后及未吊飞对照雌、雄成虫各 20 头按照 1♀: 1♂ 配对后放入草地螟成虫饲养装置 (程云霞和罗礼智, 2014) 中并标记后进行饲养, 用脱脂棉浸润 10% (w/v) 的葡萄糖水作为成虫食物, 放入硫酸纸供成虫产卵。每天及时检查硫酸纸, 若发现卵粒便记录产卵量并更换新的硫酸纸, 直至成虫全部死亡, 记录雌、雄成虫的死亡时间, 并对雌成虫进行解剖, 检查并记录其腹部精珠数量作为交配次数的指标。待实验全部结束后统计每对成虫的寿命, 产卵前期, 产卵历期, 产卵量和交配次数等指标。

1.5 数据处理

文中数据都表示为均值±标准误 (Mean ± SE), 所有方差分析前均对数据进行正态性和方差齐次性检验, 并对不满足这个条件的数据进行对数转换 $\ln(x+1)$ 。通过检验后, 再进行单因素方差分析, 对于存在显著差异的指标, 再应用 Tukey's HSD 法进行多重比较。雌雄蛾之间同一指标的对比采样 *T* 检验的方法进行。所有试验数据分析在 SAS 9.1 中进行。

2 结果与分析

2.1 不同温度吊飞草地螟飞行能力变化

如图 1 所示, 不同温度条件下吊飞 10 h 草地螟雌性成虫的飞行能力随吊飞温度的上升先

升高而后降低。不同温度条件下吊飞 10 h 雌成虫的总飞行时间存在显著差异 ($F_{(4,295)}=17.71$, $P<0.0001$), 22 °C 条件下最长, 并显著长于 26 和 30 °C。不同温度条件下吊飞 10 h 雄成虫的总飞行时间存在显著差异 ($F_{(4,295)}=21.66$, $P<0.0001$), 18 °C 条件下最长, 并显著长于 14、26 和 30 °C, 30 °C 条件下的总飞行时间最短, 显著短于其他温度条件下的总飞行时间; 18 °C 及 22 °C 是雌成虫飞行的最佳温度, 30 °C 的高温最不宜其飞行 (图 1: A)。

不同温度条件下吊飞 10 h 草地螟雌成虫的飞行距离存在显著差异 ($F_{(4,295)}=15.23$, $P<0.0001$), 22 °C 条件下飞行距离最大, 且显著大于 14、26 和 30 °C。14 °C 下的飞行距离显著高于 30 °C 下的。雌成虫的最佳飞行温度也是 18 和 22 °C, 高温下飞行距离要小于低温, 故而高温对其飞行能力有抑制的作用。不同温度条件下吊飞 10 h 草地螟雄成虫的飞行距离存在显著差异 ($F_{(4,295)}=15.10$, $P<0.0001$), 18 °C 条件下飞行距离最大, 且显著大于 26 和 30 °C; 14 和 22 °C 条件下的飞行距离还显著大于 26 及 30 °C 的; 同一吊飞温度条件下雌、雄成虫的飞行距离不存在显著差异 ($P>0.05$, 图 1: B)。

不同温度条件下吊飞 10 h 草地螟雌成虫的平均飞行速度存在显著差异 ($F_{(4,295)}=6.79$, $P<0.0001$), 18 °C 条件下平均飞行速度最大, 且显著大于 14、26 和 30 °C; 不同温度条件下吊飞 10 h 草地螟雄成虫的平均飞行速度存在显著差异 ($F_{(4,295)}=5.12$, $P=0.0005$), 18 °C 条件下平均飞行速度最大, 且显著大于 14、26 和 30 °C; 30 °C 条件下雄成虫的平均飞行速度显著高于雌成虫 ($df=118$, $t=-2.17$, $P=0.0324$), 其他温度条件下, 两者平均飞行速度不存在显著差异 (图 1: C)。不同温度下吊飞 10 h 草地螟雌成虫的体重损失量存在显著差异 ($F_{(4,295)}=14.36$, $P<0.0001$), 22 °C 条件下最少且显著少于 14、26 和 30 °C, 30 °C 下吊飞后体重损失最多, 显著多于其他温度。14 °C 下 ($df=118$, $t=2.4$, $P=0.0177$) 及 26 °C 下 ($df=118$, $t=2.26$, $P=0.0259$) 草地螟雌成虫的体重损失量显著高于雄成虫的, 其他温度下吊飞草地螟雌、雄成虫的体重

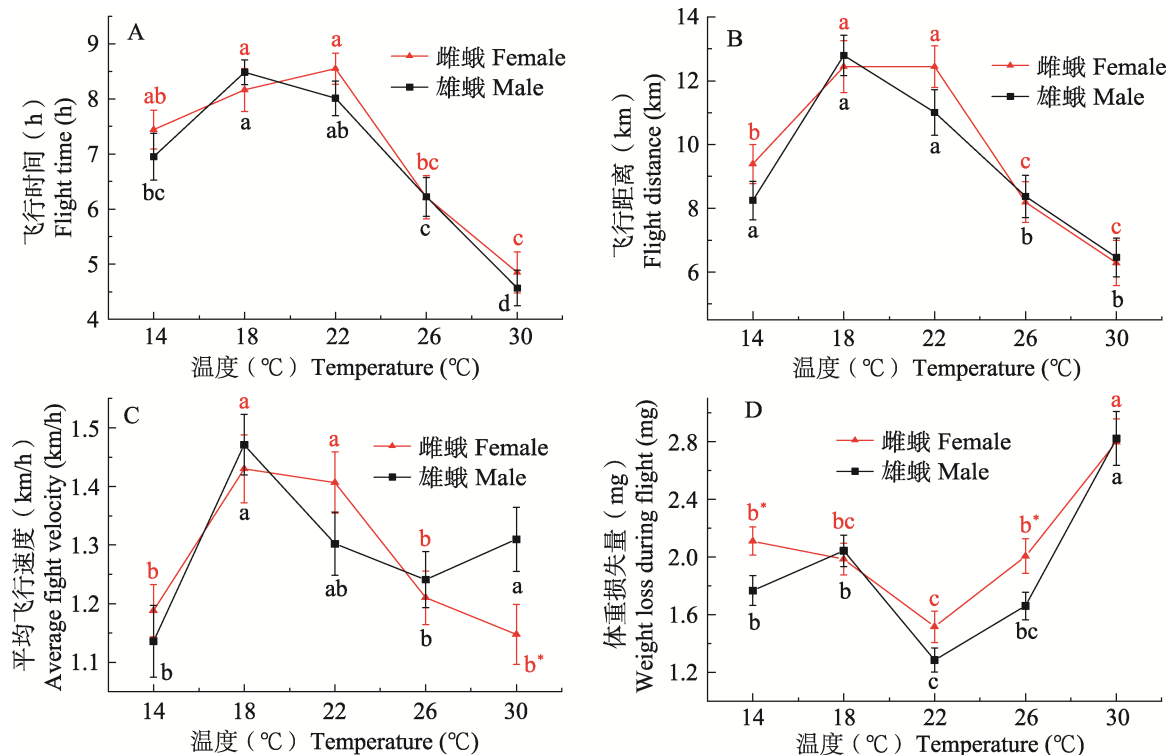


图 1 不同温度条件吊飞 10 h 草地螟成虫飞行能力变化情况

Fig. 1 Flight capacity variation of adults of *Loxostege sticticalis* during 10 h tethered flight under different room temperatures

图中折线上标有相同小写字母的代表雌成虫或者雄成虫在不同吊飞温度条件下的各种指标经 Tukey's HSD 多重比较在 $\alpha=0.05$ 水平差异不显著, *代表在同一温度条件下雌、雄成虫的相应指标经 T 检验在 $\alpha=0.05$ 水平差异显著。

The same letters above broken line represent no significant difference tested by Tukey's HSD test at $\alpha=0.05$ level.

* represents significant differences between female and male adults under the same condition tested by T -test at $\alpha=0.05$ level.

损失量不存在显著差异。18 和 22 °C 条件下吊飞草地螟成虫的飞行时间较长[(8.37±0.28) h 和 (8.28±0.32) h], 飞行距离较大[(29.09±1.48) km 和 (26.84±1.62) km], 平均飞行速度较快[(3.35±0.12) m/s 和 (3.07±0.12) m/s], 而体重损失量较小[(1.99±0.11) mg 和 (1.52±0.11) mg], 故应为草地螟飞行较为适宜的温度(图 1: D)。

2.2 不同温度吊飞对草地螟甘油三酯含量的影响

如表 1 所示, 不同温度条件下吊飞 10 h 后草地螟雌、雄成虫腹部甘油三酯含量有显著差异($F_{(5, 114)}=7.12, P\leq 0.000 1$; $F_{(5, 114)}=11.98, P\leq 0.000 1$), 随着吊飞温度的升高, 腹部甘油三酯含量上升(14 °C 除外), 18 °C 下吊飞 10 h 后腹部甘油三酯含量最低, 其中雌成虫在此温度下吊飞 10 h 后显著低于 14 °C, 而雄成虫在此温度

下吊飞 10 h 后腹部甘油三酯的含量显著小于 14 °C 和 30 °C 条件下的。未吊飞的对照雌、雄草地螟成虫腹部甘油三酯含量最高, 对于雌性成虫, 其含量显著高于 18、22、26 和 30 °C 下的, 而对于雄性成虫其含量也显著高于 18、22 和 26 °C 条件下的。在 26 °C ($df=38, t=-2.22, P=0.032 3$)、30 °C ($df=38, t=-4.1, P=0.000 2$) 下吊飞 10 h 后及对照 ($df=38, t=-2.38, P=0.022 5$), 雌、雄成虫的腹部甘油三酯含量存在显著差异且都是雄成虫高于雌成虫。雌、雄成虫的胸部甘油三酯含量在不同温度条件下吊飞 10 h 后变化较小, 只有雌成虫在 22 °C 下吊飞后的与 26 °C 下吊飞后的含量存在显著差异($F_{(5, 114)}=3.41, P=0.0065$; $F_{(5, 114)}=1.63, P=0.156 4$)。对照雄成虫的胸部甘油三酯含量显著高于雌成虫的($df=38, t=-2.59, P=0.013 6$), 而各温度

表 1 不同温度吊飞 10 h 后草地螟甘油三酯含量变化情况
Table 1 Triglyceride content variation of adults of *Loxostege sticticalis* during 10 h tethered flight under different room temperatures

温度 (°C) Temperature (°C)	N	腹部甘油三酯含量 (μg/mg) Triglyceride content in abdomen (μg/mg)		胸部甘油三酯含量 (μg/mg) Triglyceride content in thorax (μg/mg)		总甘油三酯含量 (μg/mg) Total triglyceride content (μg/mg)		甘油三酯利用效率 (km·mg·μg ⁻¹) Utilization efficiency (km·mg·μg ⁻¹)	
		雌 Female	雄 Male	雌 Female	雄 Male	雌 Female	雄 Male	雌 Female	雄 Male
14	20	51.84±3.39	66.88±7.62	0.72±0.02	0.85±0.06	30.94±2.24	38.64±4.36	0.33±0.04	0.43±0.04
		ab	ab	ab	a	ab	ab	b	a
18	20	31.84±3.81	35.07±3.90	0.68±0.07	0.76±0.07	20.25±2.35	21.73±2.29	0.49±0.04	0.42±0.02
		c	c	ab	a	c	c	a	ab
22	20	35.53±4.33	35.30±3.90	0.54±0.04	0.65±0.07	21.56±2.53	20.92±2.44	0.41±0.04	0.34±0.02
		bc	c	b	a	bc	c	ab	ab
26	20	41.90±4.50	55.46±4.12	0.79±0.05	0.70±0.06	25.74±2.64	31.55±2.26	0.35±0.03	0.31±0.03
		bc*	bc	a	a	bc	bc	ab	b
30	20	42.24±2.93	64.37±4.54	0.75±0.07	0.86±0.07	26.96±1.64	40.06±2.66	0.30±0.04	0.32±0.03
		bc*	ab	ab	a	abc*	ab	b	b
ck	20	61.73±5.29	83.17±7.30	0.58±0.05	0.76±0.05	37.30±3.50	47.36±3.82	-	-
		a*	a	ab*	a	a	a		

表中的数据表示为均值±标准误, 同一列数据后具有相同小写字母的项表示经 Tukey's HSD 多重比较在 $\alpha=0.05$ 水平差异不显著, *代表在同一温度条件下雌、雄成虫的相应指标经 T 检验在 $\alpha=0.05$ 水平差异显著。- 代表无相关数据。表 3、5 和 7 同。
Data are presented as mean±SE, and followed by the same letters in the same column represent no significant difference at 0.05 level tested by Tukey's HSD test. While followed by * represents significant differences between female and male adults under the same condition tested by T -test at 0.05 level. “-” represents none data. The same for table 3, table. 5 and table 7.

下吊飞 10 h 后雌、雄成虫的胸部甘油三酯含量不存在显著差异。不同温度下吊飞 10 h 后雌、雄成虫的总甘油三酯含量存在显著差异 ($F_{(5, 114)}=6.12, P<0.000 1$; $F_{(5, 114)}=11.84, P<0.000 1$), 总甘油三酯含量随着吊飞温度的上升而升高 (14 °C 除外), 18 和 22 °C 下吊飞 10 h 后的总甘油三酯的含量较低, 都显著低于对照的含量。在 30 °C 下吊飞 10 h 后雄成虫的总甘油三酯含量显著高于雌成虫的 ($df=31.6, t=-4.19, P=0.000 2$), 其他温度下二者不存在显著差异。18 和 22 °C 温度下吊飞 10 h 后雌、雄成虫的甘油三酯含量都较低, 可能是该温度条件下飞行能力强, 高强度的飞行消耗了大量的甘油三酯而造成的; 不同温度下吊飞 10 h 后胸部甘油三酯的含量较对照

变化较小可能是腹部甘油三酯运输到了胸部及时进行了补充, 从而维持较高的能耗。雌性草地螟成虫甘油三酯的利用率在 18- 26 °C 范围较高 ($F_{(4, 95)}=3.96, P=0.005 2$), 显著高于 14 和 30 °C。而雄性草地螟成虫甘油三酯利用率在 14-22 °C 都较高 ($F_{(4, 95)}=3.96, P=0.005 2$)。在同一温度条件下雌、雄成虫甘油三酯的利用效率相当, 没有显著差异。随温度的升高, 草地螟甘油三酯利用效率有所下降。
如表 2 所示, 草地螟成虫实际的飞行距离, 飞行时间及平均飞行速度都与其飞行后的甘油三酯含量呈显著的负相关关系, 也即是飞行距离越大, 飞行时间越长, 平均飞行速度越快则剩余的甘油三酯含量就越少。

表 2 不同温度吊飞 10 h 后甘油三酯含量与实际飞行能力的简单相关关系
Table 2 Correlation between triglyceride content of adults of *Loxostege sticticalis* during 10 h tethered flight and flight capacity

	总甘油三酯含量 Total triglyceride content	腹部甘油三酯含量 Triglyceride content in abdomen	胸部甘油三酯含量 Triglyceride content in thorax
飞行距离 Total flight distance	- 0.85***	- 0.82***	- 0.28***
飞行时间 Total flight Time	- 0.73***	- 0.68***	- 0.28***
平均飞行速度 Average flight velocity	- 0.73***	- 0.73***	- 0.18***

***代表 Pearson 简单相关系数达到极显著, **代表 Pearson 简单相关系数达到显著; 表 4 同。
*** represents Pearson's correlation coefficient be highly significant at 0.01 level, ** represents Pearson's correlation coefficient be significant at 0.05 level. The same for table 4.

2.3 不同温度吊飞对草地螟糖元含量的影响

如表 3 所示不同温度条件下吊飞 10 h 后草地螟雌、雄成虫腹部糖元含量有显著差异 ($F_{(5, 114)} = 11.94, P < 0.0001$; $F_{(5, 114)} = 10, P < 0.0001$), 随温度的升高腹部糖元含量逐渐上升 (14 °C 除外), 18 °C 条件下含量最低, 26 °C 条件下雌成虫腹部糖元含量显著高于雄成虫 ($df=38, t=2.34, P=0.0246$), 其他温度下二者不存在显著差异。不同温度条件下吊飞 10 h 后草地螟雌、雄成虫胸部糖元含量不存在显著差异而与对照相比存在显著差异 ($F_{(5, 114)} = 3.22, P=0.0093$; $F_{(5, 114)} = 2.92, P=0.0161$), 对于雌成虫 18、22 和 26 °C 下吊飞 10 h 后的胸部糖元含量显著低于对照的, 而对于雄成虫 22 °C 下吊飞 10 h 后的胸部糖元含量显著低于对照的。不同温度条件下吊飞 10 h 后草地螟雌成虫总糖元含量不存在显著差异而

与对照相比存在显著差异 ($F_{(5, 114)} = 13.18, P < 0.0001$), 对照的总糖元含量显著高于其他各个温度下吊飞 10 h 后的含量。不同温度条件下吊飞 10 h 后草地螟雄成虫总糖元含量存在显著差异存在显著差异 ($F_{(5, 114)} = 11.32, P < 0.0001$), 对照的总糖元含量显著高于其他各个温度下吊飞 10 h 后的含量 (14 °C 除外)。雌、雄成虫糖元的利用效率在 18 和 22 °C 最高, 高于或者低于此温度范围利用效率下降 ($F_{(4, 95)} = 5.04, P=0.001$; $F_{(4, 95)} = 3.49, P=0.0106$)。雌、雄成虫在同一温度下利用效率基本相似, 只有在 14 °C 条件下雌性高于雄性 ($df=38, t=2.42, P=0.0206$)。在温度较低时雌性利用效率高, 而温度较高时雄性高于雌性。

如表 4 所示总糖元含量及腹部糖元含量与飞行距离及飞行时间存在显著的负相关关系, 与

表 3 不同温度吊飞 10 h 后糖元含量变化情况
Table 3 Glycogen content variation of adults of *Loxostege sticticalis* during 10 h tethered flight under different room temperatures

温度 (°C) Temperature (°C)	N	腹部糖元含量 (μg/mg) Glycogen content in abdomen (μg/mg)		胸部糖元含量 (μg/mg) Glycogen content in thorax (μg/mg)		总糖元含量 (μg/mg) Total glycogen content (μg/mg)		糖元利用效率 (km·mg·μg ⁻¹) Utilization efficiency (km·mg·μg ⁻¹)	
		雌 Female	雄 Male	雌 Female	雄 Male	雌 Female	雄 Male	雌 Female	雄 Male
14	20	1.62±0.13 b	1.83±0.23 ab	0.97±0.23 ab	1.16±0.22 ab	1.34±0.13 b	1.51±0.16 ab	4.40±0.52 abc	2.79±0.41 b
18	20	1.01±0.10 b	0.83±0.10 c	0.77±0.05 b	1.01±0.15 ab	0.92±0.06 b	0.92±0.09 c	5.01±0.39 ab	4.72±0.30 a
22	20	1.29±0.14 b	1.07±0.16 bc	0.75±0.12 b	0.63±0.13 b	1.07±0.08 b	0.84±0.10 c	5.57±0.38 a	4.67±0.54 a
26	20	1.84±0.19 b*	1.13±0.24 bc	0.81±0.15 b	0.74±0.17 ab	1.38±0.14 b	0.94±0.16 c	3.52±0.54 bc	4.23±0.43 ab
30	20	1.69±0.16 b	1.54±0.23 bc	0.97±0.19 ab	0.79±0.18 ab	1.40±0.11 b	1.18±0.13 bc	2.85±0.59 c	3.28±0.58 ab
ck	20	3.47±0.52 a	2.53±0.19 a	1.62±0.27 a	1.43±0.18 a	2.47±0.27 a	1.99±0.12 a	-	-

表 4 不同温度吊飞 10 h 后糖元含量与实际飞行能力的简单相关关系
Table 4 Correlation between glycogen content of adults of *Loxostege sticticalis* during 10 h tethered flight and flight capacity

	总糖元含量 Total glycogen content	腹部糖元含量 Glycogen content in abdomen	胸部糖元含量 Glycogen content in thorax
飞行距离 Total flight distance	- 0.16**	- 0.15**	- 0.068
飞行时间 Total flight Time	- 0.20**	- 0.18***	- 0.083
平均飞行速度 Average flight velocity	- 0.093	- 0.11	- 0.007 7

平均飞行速度没有相关关系。飞行时间越长, 飞行距离越长, 糖元的含量就越少。胸部糖元含量与飞行距离, 飞行时间及平均飞行速度没有相关关系。

2.4 不同温度吊飞对草地螟成虫可溶性蛋白含量的影响

如表 5 所示不同温度条件下吊飞 10 h 后草地螟雌、雄成虫腹部可溶性蛋白含量没有显著差异 ($F_{(5, 114)}=0.74, P=0.591 4; F_{(5, 114)}=2.02, P=0.080 4$), 在 18 °C 条件下雌成虫的腹部可溶性蛋白含量显著高于雄成虫的 ($df=38, t=2.07, P=0.045 2$)。不同温度条件下吊飞 10 h 后草地螟雌、雄成虫胸

部可溶性蛋白含量没有显著差异 ($F_{(5, 114)}=2, P=0.084 1; F_{(5, 114)}=1.11, P=0.361 3$)。不同温度条件下吊飞 10 h 后草地螟雌、雄成虫总可溶性蛋白含量没有显著差异 ($F_{(5, 114)}=1.17, P=0.328 8; F_{(5, 114)}=2.15 P=0.064 6$), 在 18 °C 条件下雌成虫的总可溶性蛋白含量显著高于雄成虫的 ($df=38, t=2.14, P=0.038 4$)。雌雄成虫在不同温度条件下吊飞 10 h 后可溶性蛋白含量较对照相比都没有显著差异, 故而可溶性蛋白不是草地螟成虫飞行的能源物质。

如表 6 所示, 可溶性蛋白含量与飞行时间、距离及速度都没有显著的相关关系, 进一步说明其不是飞行的能源物质。

表 5 不同温度吊飞 10 h 后可溶性蛋白含量变化情况
Table 5 Protein content variation of adults of *Loxostege sticticalis* during 10 h tethered flight under different room temperatures

温度 (°C)		腹部可溶性蛋白含量 (μg/mg)		胸部可溶性蛋白含量 (μg/mg)		总可溶性蛋白含量 (μg/mg)	
Temperature (°C)	N	Protein content in abdomen (μg/mg)		Protein content in thorax (μg/mg)		Total protein content (μg/mg)	
		雌 Female	雄 Male	雌 Female	雄 Male	雌 Female	雄 Male
14	20	126.78±10.42	125.88±0.86	87.26±2.62	85.73±3.52	108.64±6.01	107.53±2.01
18	20	137.66±9.58*	111.58±8.17	89.51±2.52	90.37±2.38	116.63±5.19*	101.67±4.66
22	20	134.05±8.65	134.16±8.06	87.16±3.20	87.43±2.63	111.68±4.88	113.38±4.72
26	20	137.01±7.35	115.46±8.04	90.42±2.07	87.36±2.63	115.26±3.89*	103.32±3.92
30	20	125.88±10.06	137.22±11.09	84.21±2.23	88.27±2.78	107.21±6.08	115.09±6.17
ck	20	118.44±5.37	116.08±4.17	81.16±1.68	81.75±2.49	102.14±3.24	100.53±2.17

表 6 不同温度吊飞 10 h 后可溶性蛋白含量与实际飞行能力的简单相关关系
Table 6 Correlation between protein content of adults of *Loxostege sticticalis* during 10 h tethered flight and flight capacity

	总可溶性蛋白含量 Total protein content	腹部可溶性蛋白含量 Protein content in abdomen	胸部可溶性蛋白含量 Protein content in thorax
飞行距离 Total flight distance	0.036	0.034	0.040
飞行时间 Total flight Time	0.071	0.066	0.067
平均飞行速度 Average flight velocity	- 0.024	- 0.017	- 0.029

2.5 不同温度吊飞后对草地螟成虫生殖力的影响

如表 7 所示不同温度条件下吊飞 10 h 后草地螟雌、雄蛾寿命没有显著差异 ($F_{(5, 114)}=2.17$, $P=0.0618$; $F_{(5, 114)}=1.02$, $P=0.4091$); 虽然在 18 和 22 °C 下雌性蛾的寿命较对照减少了几天, 但是还未到达差异显著的程度。不同温度条件下吊飞 10 h 后草地螟成虫产卵前期没有显著差异 ($F_{(5, 114)}=0.79$, $P=0.5569$)。不同温度条件下吊飞 10 h 后草地螟成虫产卵历期没有显著差异

($F_{(5, 114)}=1.33$, $P=0.2584$), 不同温度下吊飞后产卵历期有减短的趋势, 但是也未到达显著。不同温度条件下吊飞 10 h 后草地螟成虫产卵量没有显著差异 ($F_{(5, 114)}=0.42$, $P=0.8358$), 不同温度下吊飞 10 h 后的产卵量较对照有一定程度的减少, 但是没有达到差异显著。不同温度条件下吊飞 10 h 后草地螟成虫交配次数没有显著差异 ($F_{(5, 114)}=2.15$, $P=0.0649$)。不同温度吊飞 10 h 后草地螟成虫后所产卵粒的孵化率没有显著差异 ($F_{(5, 114)}=1.57$, $P=0.1733$)。

表 7 不同温度下吊飞 10 h 后生殖力变化情况

Table 7 Reproductivity variation of *Loxostege sticticalis* after 10 h tethered flight under different room temperature

温度 Temperature (°C)	N	雌蛾寿命 (d) Female longevity (d)	雄蛾寿命 (d) Male longevity (d)	产卵前期 (d) Preoviposition period (d)	产卵历期 (d) Oviposition period (d)	产卵量 (粒) Fecundity (grain)	交配次数 Mate frequency	孵化率 (%) Hatch rate (%)
14	20	19.60±1.05 a	17.55±1.84 a	7.10±0.45 a	9.40±1.12 a	175.80±15.54 a	1.40±0.17 a	75.78±6.02 a
18	20	16.95±0.97 a	16.35±1.41 a	7.50±0.33 a	8.15±0.90 a	155.40±16.21 a	1.25±0.14 a	61.46±8.88 a
22	20	17.95±1.03 a	15.05±1.66 a	7.90±0.45 a	9.20±0.96 a	175.90±17.82 a	1.55±0.15 a	82.08±6.36 a
26	20	21.10±1.86 a	18.25±2.39 a	8.45±0.94 a	10.30±1.27 a	163.85±17.56 a	1.20±0.12 a	75.97±6.10 a
30	20	20.30±1.15 a	15.95±1.96 a	7.50±0.75 a	10.35±0.92 a	181.50±23.57 a	1.15±0.13 a	81.90±5.21 a
CK	20	21.60±1.10 a	20.30±1.78 a	7.05±0.37 a	11.80±1.26 a	191.55±25.91 a	1.75±0.22 a	82.97±5.96 a

3 结论与讨论

本研究明确了 3 日龄草地螟雌、雄成虫较适宜的飞行温度为 18 和 22 °C, 温度高于或低于这个范围草地螟的飞行能力都有所下降, 特别是当温度在 30 °C 以上, 其飞行能力受到显著的抑制。孙雅杰和高月波 (2004) 通过雷达和地面观测发现, 草地螟成虫在气温低于 15 °C 时不起飞, 15-17 °C 下受惊扰能近距离飞行, 而气温高于 18 °C 便能主动飞行, 而气温升到 20 °C 以上便大量成虫主动飞行。18-22 °C 作为草地螟的适宜飞行温度和田间的实际情况是相符合的。草地螟在迁飞中选择不同的高度成层飞行, 这个高度应该是在其最适宜飞行的温度范围。封洪强 (2003) 雷达观测草地螟迁飞认为其迁飞成层高度在风速最大处而不是最高温度处, 其观测到的草地螟迁飞成层高度处的温度范围大部分在 18-22 °C 之间, 最高温度低于 30 °C。30 °C 以上的高温不适宜草地螟飞行。

不同温度条件下吊飞后草地螟成虫的甘油三酯含量及糖元含量较对照有显著的降低, 特别是甘油三酯的含量与草地螟成虫的实际飞行能力有显著的负相关关系, 这些都表明甘油三酯和糖元草地螟飞行的能源物质, 而草地螟体内甘油三酯的含量比糖元要高一个数量级, 因而草地螟飞行的主要能源物质应该是甘油三酯。这和棉铃虫 *Helicoverpa armigera*、粘虫 *Mythimna separata*、秋粘虫 *Spodoptera frugiperda* 以及稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis* 等鳞翅目害虫以及东亚飞蝗 *Locusta migratoria manilensis* 的研究结果是一致的 (黄冠辉和马世骏, 1964; 张孝羲等, 1983; Gunn and Gatehouse, 1988; 曹雅忠等, 1995; 吴孔明和郭予元, 1998)。以脂类作为飞行的能源物质优势明显, 不但所蕴含的能量高, 且其代谢能产生大量的水用于其他生命活动 (郭郭等, 1991)。18-22 °C 草地螟成虫飞行后体内甘油三酯及糖元含量最低, 而此温度范围内其飞行的时间最长, 距离最大因而消耗较多, 但此飞行温度

下甘油三酯和糖元的利用效率较高。飞行较长的时间和距离是要以体内能源物质的大量消耗为代价的。

草地螟成虫在经过 10 h 飞行后, 其生殖能力较对照虽有一定程度下降, 但没有达到差异显著的水平。草地螟此种强度的吊飞后其生殖能力基本不变, 与马利筋长蝽 *oncopeltus fasciatus*、蚜虫 *Aphis fabae* 和蚱蜢 *melanoplus sanguinipes* 等昆虫飞行后的情况类似 (Cockbain, 1961; Slansky, 1980; McAnelly and Rankin, 1986), 不同于大豆蚜 *Aphis glycines*, 非洲粘虫 *Spodoptera exempta* 及光蝉 *Prokelisia marginata* 等飞行后生殖能力下降 (Denno *et al.*, 1989; Gunn and Gatehouse, 1993; Zhang *et al.*, 2009)。18 和 22 °C 飞行能力较强, 其消耗的能源物质也较多, 但是飞后的生殖能力较其他温度却没有显著减少, 说明草地螟在飞行后能够一定程度上通过补充营养补充因飞行而带来的能量消耗。草地螟成虫飞行后能源物质的补充途径可能也像粘虫、烟芽夜蛾 *Heliothis virescens* 及乳草蝽 *Oncopeltus fasciatus* 等昆虫一样通过增加取食, 或利用飞行肌降解的物质, 或两者兼具 (Slansky, 1980; Willers *et al.*, 1987; 李克斌等, 2005)。

参考文献 (References)

Cao YZ, Luo LZ, Li GB, Hu Y, 1995. The relationship between utilization of energy materials and sustained flight in the moths of oriental armyworm, *Mythimna separata* (Walker). *Acta Entomologica Sinica*, 38(3): 290–295. [曹雅忠, 罗礼智, 李光博, 胡毅, 1995. 粘虫飞翔能源物质及其消耗. 昆虫学报, 38(3): 290–295.]

Chen RL, Bao XZ, Wang SY, Sun YJ, Li LQ, Liu JR, 1992. An observation on the migration of meadow moth by radar. *Acta Phytophylacica Sinica*, 19(2): 171–174. [陈瑞鹿, 暴祥致, 王素云, 孙雅杰, 李立群, 刘继荣, 1992. 草地螟迁飞活动的雷达观测. 植物保护学报, 19(2): 171–174.]

Cheng YX, Luo LZ, 2014. Rearing apparatus for adult beet webworm. China, ZL 201410053578.3. 2016-01-20. [程云霞, 罗礼智, 2014. 草地螟成虫饲养器具. 中国, ZL 201410053578.3, 2016-01-20.]

Cockbain AJ, 1961. Viability and fecundity of alate alienicolae of *Aphis fabae* scop. after flights to exhaustion. *Journal of*

Experimental Biology, 38(1): 181–187.

Cui WL, 1992. Observation on biological characteristics of meadow moth. *Entomological Knowledge*, 29(5): 289–292. [崔万里, 1992. 草地螟生物学特性的观察. 昆虫知识, 29(5): 289–292.]

Denno RF, Olmstead KL, McCloud ES, 1989. Reproductive cost of flight capability: A comparison of life history traits in wing dimorphic planthoppers. *Ecological Entomology*, 14(1): 31–44.

Feng HQ, 2003. Community aloft and radar observations of seasonal migration of insects in northern China. Doctor dissertation. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences. [封洪强, 2003. 华北地区空中昆虫群落及昆虫季节性迁移的雷达观测. 博士学位论文. 北京: 中国农业科学院.]

Guo F, Chen YL, Lu BL, 1991. The Biology of the Migratory Locusts in China. Jinan, Shandong Science & Technology Press, 582. [郭鄂, 陈永林, 卢宝廉, 1991. 中国飞蝗生物学. 济南: 山东科学技术出版社. 582.]

Gu CY, Liang YC, Zhang GZ, 1987. Occurrence and damage characteristics of meadow moth and its control strategy. *Plant Pest Forecast*, 7(S1): 32–34. [顾成玉, 梁艳春, 张广芝, 1987. 草地螟发生为害特点与防治策略的探讨. 病虫测报, 7(S1): 32–34.]

Gunn A, Gatehouse AG, 1988. The development of enzymes involved in flight muscle metabolism in *Spodoptera exempta* and *Mythimna separata*. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Comparative Biochemistry*, 91(2): 315–324.

Gunn A, Gatehouse AG, 1993. The migration syndrome in the African armyworm moth, *Spodoptera exempta*: Allocation of resources to flight and reproduction. *Physiological Entomology*, 18(2): 149–159.

Huang GH, Ma SJ, 1964. Fat consumption and water loss of the oriental migratory locust (*Locusta migratoria manilensis* Meyen) during flight, and their relation to temperature and humidity. *Acta Zoological Sinica*, 10 (3): 372–380. [黄冠辉, 马世骏, 1964. 东亚飞蝗飞翔过程中脂肪和水分的消耗及温湿度所起的影响. 动物学报, 10(3): 372–380.]

Li KB, Gao XW, Luo LZ, Yin J, Cao YZ, 2005. Changes in activities of four energy metabolism related enzymes during flight of *Mythimna separata*. *Acta Entomologica Sinica*, 48(4): 643–647. [李克斌, 高希武, 罗礼智, 尹姣, 曹雅忠, 2005. 粘虫飞行过程中四种相关酶的活性变化. 昆虫学报, 48(4): 643–647.]

Luo LZ, Li GB, 1992. Flight ability and behavior studying of beet webworm at different moth ages. National Conference on Insect Ecology. Changsha. 6. [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. 全国昆虫生态学学术研讨

- 会. 长沙. 6.]
- Luo LZ, 2004. The first generation of meadow moth will break out in China in 2004. *Plant Protection*, 30(3): 86–88. [罗礼智, 2004. 我国 2004 年一代草地螟将暴发成灾. 植物保护, 30(3): 86–88.]
- Luo LZ, Huang SZ, Jiang XF, Zhang L, 2009. Characteristics and causes for the outbreaks of beet webworm, *Loxostege sticticalis* in Northern China during 2008. *Plant Protection*, 35(1): 27–33. [罗礼智, 黄绍哲, 江幸福, 张蕾, 2009. 我国 2008 年草地螟大发生特征及成因分析. 植物保护, 35(1): 27–33.]
- McAnelly ML, Rankin MA, 1986. Migration in the grasshopper *melanoplus sanguinipes*(fab.). ii. interactions between flight and reproduction. *Biological Bulletin*, 170(3): 378–392.
- Slansky F Jr, 1980. Food consumption and reproduction as affected by tethered flight in female milkweed bugs (*Oncopeltus fasciatus*). *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 28(3): 277–286.
- Sun YJ, Gao YB, 2004. Discussion on beet webworm sources of migration and spring occurrence//60th Anniversary and Symposium of Entomological Society of China. Chongqing: Oct. 2004 [孙雅杰, 高月波, 2004. 草地螟的迁飞与春季发生种群虫源的探讨//当代昆虫学研究——中国昆虫学会成立 60 周年纪念大会暨学术讨论会论文集. 重庆: 2004 年 10 月]
- Willers JL, Schneider JC, Ramaswamy SB, 1987. Fecundity, longevity and caloric patterns in female *Heliothis virescens*: Changes with age due to flight and supplemental carbohydrate. *Journal of Insect Physiology*, 33(11): 803–808.
- Wu KM, Guo YY, 1998. The relationship between utilization of energy substances and sustained flight in cotton bollworm, *Helicoverpa armigera*. *Acta Entomologica Sinica*, 41(1): 15–20. [吴孔明, 郭予元, 1998. 棉铃虫飞翔的能量物质及消耗. 昆虫学报, 41(1): 15–20.]
- Zhang L, Zhang YH, Zeng J, Jiang YY, Cheng DF, 2012. Analysis of the sources of second generation meadow moth populations that immigrated into Chinese pastoral areas in 2010. *Acta Ecologica Sinica*, 32(8): 2371–2380. [张丽, 张云慧, 曾娟, 姜玉英, 程登发, 2012. 2010 年牧区 2 代草地螟成虫迁飞的虫源分析. 生态学报, 32(8): 2371–2380.]
- Zhang XY, Zhou WJ, Geng JG, Su QL, Zhu YC, Tang JY, 1983. Studies on the energy source of flight and migration of the rice leaf roller (*Cnaphalocrocis medialis* Guenee). *Acta Phytophylacica Sinica*, 10(3): 153–159. [张孝羲, 周威君, 耿济国, 苏庆玲, 朱玉成, 汤金仪, 1983. 稻纵卷叶螟成虫迁飞与能源物质的研究. 植物保护学报, 10(3): 153–159.]
- Zhang Y, Wu K, Wyckhuys KA, Heimpel GE, 2009. Trade-offs between flight and fecundity in the soybean aphid (Hemiptera: Aphididae). *Journal of Economic Entomology*, 102(1): 133–138.