

柚木驼蛾飞行能力测定*

刘云朋^{1**} 孔德治^{1,2} 王子轩鑫¹ 赵纪成^{1,3}
赵同海^{1,2} 朱耀军⁴ 曲良建^{1,2***}

(1. 中国林业科学研究院森林生态环境与自然保护研究所, 国家林业和草原局森林保护学重点实验室, 北京 100091;
2. 南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 南京 210037; 3. 安徽农业大学林学与园林学院, 合肥 230000;
4. 广东湛江红树林湿地生态系统国家定位观测研究站, 湛江 524448)

摘要 【目的】柚木驼蛾 *Hyblaea puera* 原产于印度及东南亚国家, 近年来在我国广西、广东等地多次暴发危害红树林中的白骨壤 *Avicennia marina*, 对我国红树林的健康发展构成严重威胁。柚木驼蛾在寄主植物柚木 *Tectona grandis* 和红树林之间可能存在迁移扩散活动。测定和明确柚木驼蛾成虫的飞行能力, 为今后深入研究其种群迁移扩散规律和科学防控提供基础。【方法】基于飞行磨吊飞试验, 测定和比较不同日龄、是否补充营养等不同处理下柚木驼蛾雌雄成虫的飞行能力。【结果】飞行磨吊飞试验结果表明, 相同日龄下柚木驼蛾雄虫飞行能力高于雌虫。雌雄成虫平均累计飞行距离均随着日龄增加呈现先增加后减少的趋势, 其中 2 日龄补充营养后的成虫飞行能力最强, 雌雄成虫 24 h 平均累计飞行距离分别为 (22.24±8.63) 和 (33.44±9.44) km, 平均累计飞行时间依次为 (8.89±2.75) 和 (11.66±2.81) h, 平均飞行速度分别为 (2.70±0.72) 和 (2.88±0.56) km/h, 不同日龄、不同性别的成虫平均飞行速度差异不显著 ($P>0.05$)。补充营养的雌雄成虫平均累计飞行距离和平均累计飞行时间显著高于同性别未补充营养的成虫 ($P<0.05$)。【结论】柚木驼蛾成虫具有较强的飞行能力, 性别、日龄以及是否补充营养均对柚木驼蛾的飞行能力有显著影响, 柚木驼蛾飞行能力的差异主要体现在累计飞行时间的长短。

关键词 柚木驼蛾; 飞行能力; 性别; 日龄; 补充营养; 红树林

Determination of the flight ability of *Hyblaea puera*

LIU Yun-Peng^{1**} KONG De-Zhi^{1,2} WANG Zi-Xuan-Xin¹ ZHAO Ji-Cheng^{1,3}
ZHAO Tong-Hai^{1,2} ZHU Yao-Jun⁴ QU Liang-Jian^{1,2***}

(1. Key Laboratory of Forest Protection of National Forestry and Grassland Administration, Ecology and Nature Conservation Institute, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 3. College of Forestry and Horticulture, Anhui Agricultural University, Hefei 230000, China; 4. Zhanjiang National Research Station for Mangrove Wetland Ecosystem, Zhanjiang 524448, China.)

Abstract 【Aim】To clarify the flight ability of adult *Hyblaea puera*, a introduced pest native to India and Southeast Asian countries that poses a risk to *Avicennia marina* in Guangxi and Guangdong, in order to better understand the potential for the spread of this pest, and develop prevention and control strategies for it. Recent repeated outbreaks of *H. puera* in China have seriously threatened the health of mangrove ecosystems. *H. puera* may migrate between its host plant, teak *Tectona grandis*, and mangroves. 【Methods】The flight ability of different ages of female and male adults of *H. puera* was measured in an insect flight mill both with, and without, food supplementation. 【Results】The flight ability of males was higher than that of females. The average cumulative flight distance of male and female adults first increased, then decreased, with age. The flight ability of 2-day-old adults with food supplementation was the highest. The average cumulative flight distance of females and males was (22.24 ± 8.63) and (33.44 ± 9.44) km, respectively, the average cumulative flight duration was (8.89±2.75) and (11.66±2.81) h, respectively, and the average cumulative flight speed was (2.70±0.72) and (2.88±0.56) km/h, respectively. The

*资助项目 Supported project: “十四五”国家重点研发计划资助 (2023YFC2604800)

**第一作者 First author, E-mail: 15993311970@163.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: qulj2001@caf.ac.cn

收稿日期 Received: 2024-12-27; 接受日期 Accepted: 2025-01-25

flight ability of female and male adults was significantly higher with, than without, supplementary food ($P < 0.05$). The average cumulative flight speed of *H. puera* did not, however, significantly differ among treatment groups ($P > 0.05$). [Conclusion] Adult *H. puera* have strong flying ability, which is significantly affected by gender, age and food availability, all of which mainly affect the cumulative flight time.

Key words *Hyblaea puera*; flight ability; gender; age; complementary nutrition; mangroves

柚木驼蛾 *Hyblaea puera* 隶属鳞翅目 Lepidoptera 驼蛾总科 Hyblaeoidea 驼蛾科 Hyblaeidae 驼蛾属 *Hyblaea*, 其最初被纳入夜蛾科 Noctuidae, 中文名曾为全须夜蛾、柚木肖弄蝶夜蛾和柚橙带夜蛾等, 后根据形态学将其从夜蛾科中分出来, 与螟蛾总科 Pyraloidea 合为新的驼蛾科 Hyblaeoidea, Chandrasekhar 等 (2008) 经过分子生物学手段鉴定, 反驳了曾经的形态学分类结论, 最终将其纳入单独的驼蛾总科。柚木驼蛾原产于印度、老挝、缅甸等南亚和东南亚国家, 在当地主要取食柚木 *Tectona grandis*。我国柚木驼蛾最早的发现记录于 1975 年, 其分布在国内主要的柚木种植地区 (陈芝卿和吴士雄, 1978)。2010 年柚木驼蛾首次在广西红树林发生, 危害红树植物白骨壤 *Avicennia marina*, 并在 2015 年大规模暴发, 危害面积达 300 hm²。白骨壤叶片被取食殆尽, 只剩下枝干, 造成白骨壤大量失叶死亡 (李鹏, 2015; 胡荣等, 2016; 刘文爱和李丽凤, 2017)。随后在我国广西、广东等地多次暴发, 严重威胁我国红树林的健康发展。柚木驼蛾寄主广泛, 除取食柚木、白骨壤外, 在我国还可取食马鞭草科 Verbenaceae 的多种植物 (陈芝卿和吴士雄, 1984; 常明山, 2023), 具有较强的环境适应能力、繁殖能力与飞行能力, 并且柚木驼蛾的发育历期短, 取食柚木叶片的柚木驼蛾整个生命周期为 25 d 左右, 成虫寿命约 7 d (Kabade and Patel, 1997), 在广西沿海地区取食白骨壤的柚木驼蛾一年可发生 11 代 (刘文爱和李丽凤, 2017)。目前柚木驼蛾在我国已扩散至多地, 如陕西、甘肃等北方地区也陆续出现, 呈现出南害北移的扩散趋势, 是一个亟需重视的问题 (宋玉双, 2019)。

作者多次于广东、广西等地调查柚木驼蛾发生和危害情况时发现, 在柚木驼蛾危害严重的红树林周边存在小面积种植的柚木, 在多处柚木上均能发现柚木驼蛾。柚木驼蛾在红树林中暴发具

有突发性的特点, 大面积暴发过后, 柚木驼蛾将红树林中白骨壤嫩叶取食殆尽, 但却难以在林中找到柚木驼蛾踪迹, 推测其可能存在柚木与白骨壤之间转移危害情况。Nair 等 (1985) 研究表明, 柚木驼蛾会在柚木种植地区不同斑块间迁移, 在一片柚木林的柚木叶片被取食殆尽或缺少嫩叶不适于取食的情况下, 柚木驼蛾会短距离迁飞至 10-20 km 外新的斑块取食为害。Chandrasekhar 等 (2005) 也证实了不同地区之间迁移是柚木驼蛾暴发成灾的原因之一, Tripathy 等 (2018) 认为柚木驼蛾可能会从柚木迁移至周边黄荆 *Vitex negundo*、火焰树 *Spathodia campanulata* 进行危害, 存在风辅助迁移情况, 甚至可能会迁飞至距离 200 km 外的红树林取食白骨壤。

昆虫飞行能力的研究是了解昆虫生物学特性和预测其传播扩散趋势的一种重要技术手段。目前测定昆虫飞行能力常用的研究方法是采用昆虫飞行磨系统, 通过对昆虫吊飞测试, 能够获取昆虫的飞行速度、飞行时间、飞行距离等参数 (刘莎等, 2018)。目前国内外学者已对鳞翅目的草地贪夜蛾 *Spodopetera frugiperda*、棉铃虫 *Helicoverpa armigera*、稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis*、美国白蛾 *Hyphantria cunea*、亚洲型舞毒蛾 *Lymantria dispar* 等一系列农林类重要害虫进行了飞行能力测定 (王凤英等, 2010; 杨帆等, 2012; 葛世帅等, 2019; 孙晓婷等, 2019; 李雅惠等, 2023), 飞行能力较强的害虫会对农林业造成极其严重的经济与生态损失 (刘莎等, 2018; 胡高等, 2020)。对于柚木驼蛾的飞行能力, 国外 Nair 等 (1985)、Chandrasekhar 等 (2005) 和 Tripathy 等 (2018) 虽推测柚木驼蛾具有迁飞特性, 但并未开展飞行能力研究去证实。此外, 柚木驼蛾雌雄成虫难以通过肉眼从触角、颜色、体型等常规方法进行鉴别, 目前主要通过腹部末端的细微差异进行区分 (常明山, 2023), 在实际

生产与科研工作中缺乏便捷性。本研究通过柚木驼蛾蛹的特征进行雌雄鉴别, 并采用昆虫飞行磨系统对柚木驼蛾飞行能力进行测定, 在补充完善其生物学特性的同时, 亦为柚木驼蛾的暴发机制研究和科学防控策略制定提供依据和参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 供试虫源 供试虫源柚木驼蛾由中国林业科学研究院森林生态环境与自然保护研究所昆虫病理与病原微生物研究室提供, 为室内人工饲料连续饲养 10 代以上虫源。

1.1.2 仪器设备 使用的仪器设备包括体式显微镜 (SZX7, 奥林巴斯 OLYMPUS), 佳多昆虫飞行磨系统 (河南佳多科工贸有限公司), 飞行磨的吊臂材质为不锈钢丝, 规格为 30 cm 长、直径 0.2 mm。反应式 CO₂ 发生器 (绍兴欣沂水族器材有限公司), 自制吊环 (细铜丝) 和万能胶等。

1.2 试验方法

1.2.1 柚木驼蛾雌雄蛹的鉴别 利用体式显微镜观察并记录柚木驼蛾蛹的外部特征, 按照不同特征将蛹进行区分, 每头蛹单独放置, 待羽化后使用眼科镊解剖出性腺确定性别, 以明确蛹的性别鉴定特征。按照确定的鉴别特征观察鉴定 100 头蛹, 每头蛹单独放置于透气小盒中, 待羽化后查看成虫性别, 统计蛹鉴别特征的准确率。试验环境条件为: 温度 (26±1) °C, 光周期 16L : 8D, 相对湿度 60%±5%, 光照强度 15 000 lx。

1.2.2 不同日龄及性别柚木驼蛾的飞行能力测定 按照 1.2.1 方法, 将柚木驼蛾雌雄蛹分别单独放于透气小盒中等待羽化。记录成虫的羽化时间, 选取羽化 12 h 内未取食、未交配的健康成虫进行吊飞试验, 测定 1 日龄初羽化柚木驼蛾成虫的飞行能力。其余成虫羽化后采用 10% 蔗糖水溶液补充营养, 分别选取 2、4 和 6 日龄未交配的健康成虫进行吊飞试验。不同日龄雌雄成虫各测试 30 头, 去除吊飞过程中出现死亡、脱落等异常的飞行数据, 实际测得不同日龄雌雄成虫各 20 头飞行数据, 若少于 20 头则继续补充测试成虫。

吊飞试验参考李雅惠等 (2023) 的方法略加改进, 具体方法为: 测试前将柚木驼蛾成虫用 CO₂ 麻醉 30 s, 轻轻刮去前胸背板浮毛, 自制吊环蘸取少量万能胶粘接在前胸背板后缘处, 粘接方向与前胸背板垂直。吊环粘接好后固定在飞行磨吊臂上, 其与吊臂夹角呈 90°, 柚木驼蛾成虫呈水平状态, 飞行方向与吊臂垂直, 将吊臂安装至飞行磨上, 2-3 min 后成虫苏醒, 轻轻碰触使其开始飞行, 飞行姿态良好、振翅正常的成虫即可用作数据采集。试验环境温度为 (26±1) °C, 相对湿度 60%±5%, 全黑暗, 无风, 吊飞时间为 24 h。

1.2.3 补充营养对柚木驼蛾雌雄成虫飞行能力影响测定 将羽化后的柚木驼蛾成虫设置为饲喂 10% 蔗糖水溶液与蒸馏水两个处理, 选取 4 日龄健康的雌雄成虫进行吊飞测试。吊飞步骤同 1.2.2。不同处理雌雄成虫各测试 30 头, 吊飞结束后剔除吊飞过程中出现死亡、脱落等异常的飞行数据, 实际测得不同处理雌雄成虫各 20 头飞行数据, 少于 20 头则继续补充测试成虫。

1.2.4 数据分析 使用统计分析软件 SPSS 25.0 进行数据分析。对飞行数据进行正态检验, 若不符合正态分布, 将数据进行对数转换后再做统计分析。使用单因素方差分析法进行 Tukey HSD 多重比较, 分析不同日龄雌雄成虫飞行能力, 使用独立样本 *t* 检验分析补充营养对雌雄成虫飞行能力的影响。

2 结果与分析

2.1 柚木驼蛾蛹的雌雄鉴定结果

通过解剖柚木驼蛾成虫的性腺验证雌雄蛹的鉴定识别特征。结果表明, 100 头柚木驼蛾雌雄蛹性别鉴定识别的准确率为 100% (表 1), 其具体鉴别特征为: 雄性蛹生殖孔位于蛹的第 9 节腹面中央, 生殖孔左右两侧形成 2 个表面光滑的球状突起。上述特征肉眼可见, 可作为柚木驼蛾雌雄虫快速鉴别的主要特征 (图 1: A)。雌蛹生殖孔位于蛹的第 8 节腹面中央, 为一条深色裂缝, 裂缝从第 7 节后缘延伸至第 9 节前缘, 第 9 腹节与第 10 腹节连接处从第 9 腹节前缘中央向尾部裂开形成 “^” 形、夹角接近 90° 状构造 (图 1: B)。

表 1 柚木驼蛾雌雄蛹的鉴定
Table 1 Identification of male and female pupae of *Hyblaea puera*

性别 Gender	鉴定蛹数 The number of pupae	羽化成虫量 The number of emerged adults	鉴定成虫数 The number of adults	准确率 (%) Accuracy (%)
雌 Female	56	53	53	100
雄 Male	44	39	39	100

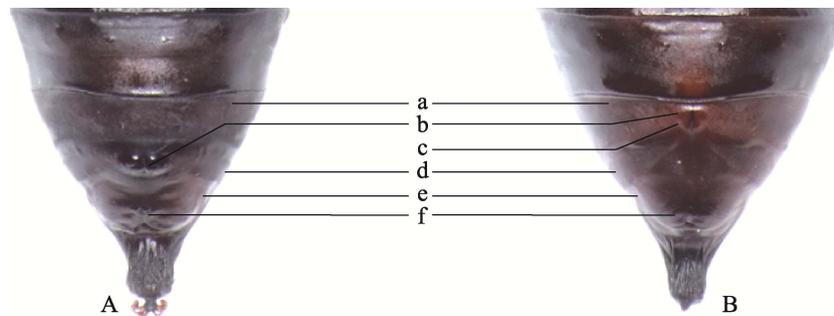


图 1 柚木驼蛾雄蛹 (A) 和雌蛹 (B) 腹部末端

Fig. 1 The abdomen end of male (A) and female (B) pupae of *Hyblaea puera*

a: 第 8 腹节; b: 生殖孔; c: 产卵孔; d: 第 9 腹节; e: 第 10 腹节; f: 肛门。
a: The 8th abdominal segment; b: Gonopore; c: Oviposition holes; d: The 9th abdominal segment; e: The 10th abdominal segment; f: Anus.

2.2 不同日龄及性别柚木驼蛾成虫飞行能力

2.2.1 不同日龄及性别柚木驼蛾成虫累计飞行距离

统计和分析不同日龄及性别柚木驼蛾成虫吊飞 24 h 的试验数据, 结果表明, 不同日龄雄成虫平均累计飞行距离均显著高于雌成虫 ($P < 0.05$)。雌雄成虫平均累计飞行距离随着日龄增加呈现先增加后减少的趋势, 2 日龄雌雄成虫平均累计飞行距离为同性别不同日龄中最大, 分别为 (22.24 ± 8.63) 和 (33.44 ± 9.44) km。各日龄雌成虫 ($F = 23.02$, $df = 3$, $P < 0.01$) 和雄成虫 ($F = 13.78$, $df = 3$, $P < 0.01$) 的平均累计飞行距离存在显著差异 (图 2: A)。分析不同日龄柚木驼蛾雌雄成虫累计飞行距离的个体范围分布, 根据成虫累计飞行距离分别划分为 4 个等级, 弱飞行 (< 10 km)、中飞行 (10-20 km)、强飞行 (20-30 km) 与极强飞行 (> 30 km)。其中, 在 1 日龄雌成虫中, 中飞行个体数占比最高, 为 60.00%; 2 日龄雌成虫中, 强飞行个体数占比最高, 为 55.00%, 极强飞行个体占比 20.00%, 累计飞行距离最大达到 40.21 km; 4 日龄雌成虫中, 中飞行个体数占比最高, 为 70.00%; 6 日龄雌成

虫中, 弱飞行个体数占比最高, 为 85.00%; 1 日龄雄成虫中, 极强飞行个体数占比最高, 为 40.00% (图 3: A)。2 日龄雄成虫中, 极强飞行个体数占比最高, 为 60.00%, 累计飞行距离最大达到 46.73 km; 4 日龄雄成虫中, 强飞行个体数占比最高, 为 45.00%; 6 日龄雄成虫中, 中飞行个体数占比最高, 为 55.00% (图 3: B)。

2.2.2 不同日龄及性别柚木驼蛾成虫累计飞行时间

不同日龄雄成虫平均累计飞行时间显著高于雌成虫 ($P < 0.05$)。雌雄成虫平均累计飞行时间随着日龄增加呈现先增加后减少的趋势, 2 日龄雌雄成虫平均累计飞行时间为同性别不同日龄中最大, 分别为 (8.89 ± 2.75) 和 (11.66 ± 2.81) h, 雌雄成虫平均累计飞行时间随日龄增加而减少, 各日龄雌成虫 ($F = 25.60$, $df = 3$, $P < 0.01$) 和雄成虫 ($F = 13.59$, $df = 3$, $P < 0.01$) 的平均累计飞行距离存在显著差异 (图 2: B)。根据成虫累计飞行时间分别划分为 4 个等级, 弱飞行 (< 4 h)、中飞行 (4-8 h)、强飞行 (8-12 h) 与极强飞行 (> 12 h)。其中, 1 日龄雌成虫中, 中飞行个体数占比最高, 为 55%; 2 日龄雌成虫中, 强飞行个体数占比最高, 为 60.00%, 极强飞行个体占

比 10.00%，累计飞行时间最大达到 13.30 h；4 日龄雌成虫中，中飞行个体数占比最高，为 70.00%；6 日龄雌成虫中，弱飞行个体数占比最高，为 80.00%（图 4：A）。1 日龄雄成虫中，强飞行个体数占比最高，为 70%；2 日龄雄成虫中，强飞行个体数占比最高，为 55.00%，累计飞行时间最大达到 17.58 h；4 日龄雄成虫中，中飞行和强飞行个体数占比最高，均为 40.00%，6 日龄雄成虫中，中飞行个体数占比最高，为 65.00%（图 4：B）。

2.2.3 不同日龄及性别柚木驼蛾成虫平均飞行速度 不同日龄雌成虫 ($F=0.26, df=3, P=0.86$) 和雄成虫 ($F=0.16, df=3, P=0.93$) 的平均飞行速度差异不显著。相同日龄雌雄成虫间平均飞行速

度也未呈现显著差异 ($P>0.05$)。2 日龄雄成虫平均飞行速度最高，为 (2.88 ± 0.56) km/h，1 日龄雌成虫平均飞行速度最低，为 (2.52 ± 0.81) km/h（图 2：C）。

2.3 补充营养对柚木驼蛾雌雄成虫飞行能力的影响

统计和分析补充营养和未补充营养的柚木驼蛾雌雄成虫飞行能力，结果表明，补充营养的雌成虫和雄成虫平均累计飞行距离分别为 (14.82 ± 4.40) 和 (23.77 ± 9.16) km，未补充营养的雌成虫和雄成虫平均累计飞行距离分别为 (3.37 ± 2.82) 和 (4.47 ± 3.22) km（图 5：A）。补充营养的雌成虫和雄成虫平均累计飞行时间

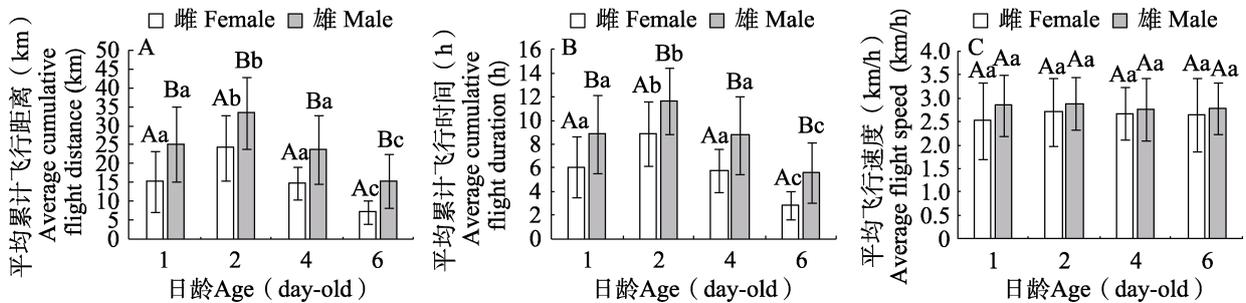


图 2 不同日龄柚木驼蛾雌雄成虫飞行能力

Fig. 2 The flight ability of female and male adults of *Hyblaea puera* at different day of ages

A. 平均累计飞行距离；B. 平均累计飞行时间；C. 平均飞行速度。柱上标有不同大写字母表示相同日龄不同性别之间差异显著 ($P<0.05$)，不同小写字母表示相同性别不同日龄之间差异显著 ($P<0.05$, Tukey HSD 多重比较)。下图同。

A. Average cumulative flight distance; B. Average cumulative flight duration; C. Average flight speed. Different uppercase letters above bars indicate significant difference between the same day-old adults and different sexes ($P<0.05$), while different lowercase letters above bars indicate significant difference between the same sex and different day-old adults ($P<0.05$, Tukey HSD test). The same below.

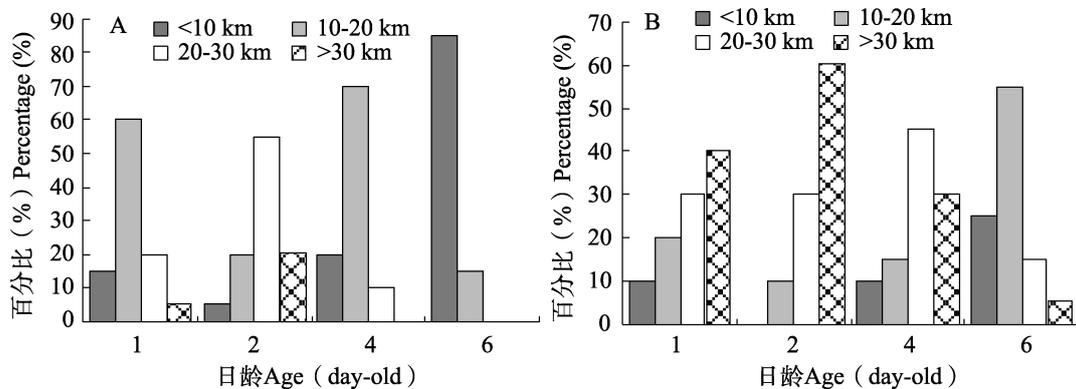


图 3 不同日龄柚木驼蛾雌 (A)、雄 (B) 成虫累计飞行距离的个体比例范围分布图

Fig. 3 Frequency distribution of flight distance of *Hyblaea puera* for female (A) and male (B) at different day of ages

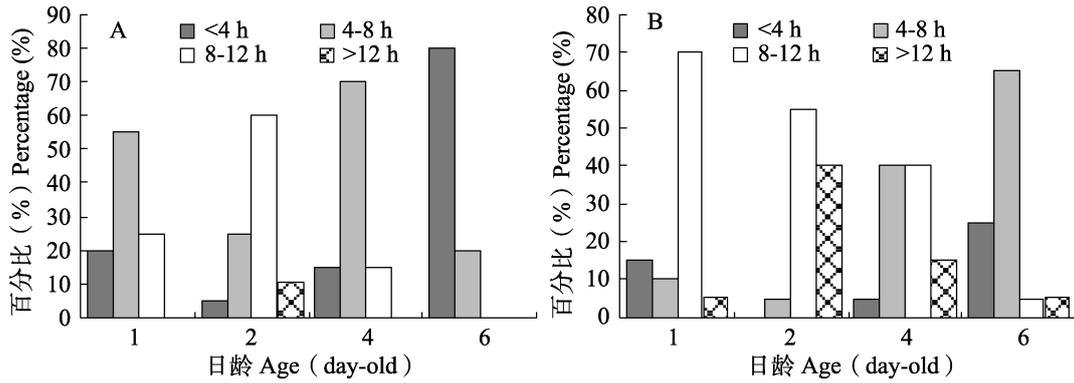


图 4 不同日龄柚木驼蛾雌 (A)、雄 (B) 成虫累计飞行时间的个体比例范围分布图
 Fig.4 Frequency distribution of flight duration of *Hyblaea puera* for female (A) and male (B) at different day of ages

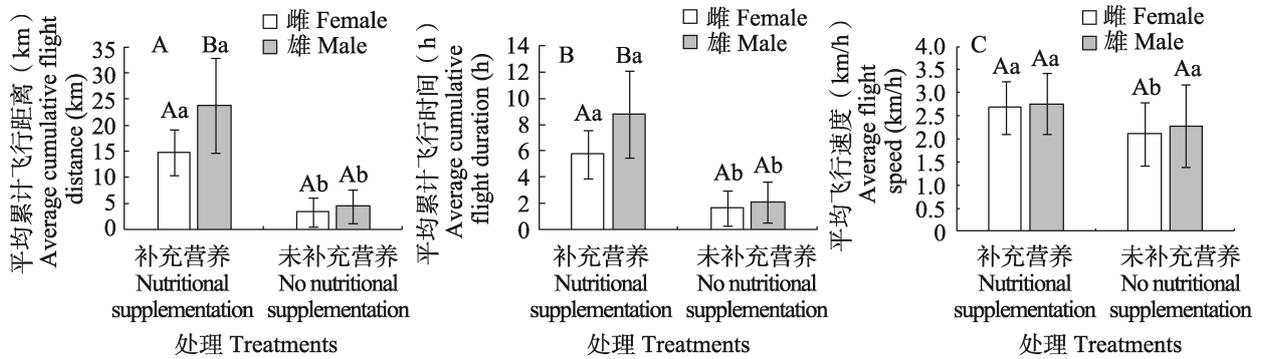


图 5 补充营养对柚木驼蛾雌雄成虫飞行能力的影响
 Fig. 5 Effect of nutritional supplementation on the flight ability of female and male adults of *Hyblaea puera*

A. 平均累计飞行距离; B. 平均累计飞行时间; C. 平均飞行速度。

A. Average cumulative flight distance; B. Average cumulative flight duration; C. Average flight speed.

分别为 (5.75±1.84) 和 (8.77±3.30) h, 未补充营养的雌成虫和雄成虫平均累计飞行时间分别为 (1.64±1.34) 和 (2.09±1.53) h (图 5: B)。补充营养的雌成虫和雄成虫平均飞行速度分别为 (2.68±0.56) 和 (2.76±0.67) km/h, 未补充营养的雌成虫和雄成虫平均飞行速度分别为 (2.10±0.69) 和 (2.28±0.89) km/h (图 5: C)。补充营养的柚木驼蛾雌成虫平均累计飞行距离 ($t=9.80, df=38, P<0.01$)、平均累计飞行时间 ($t=8.08, df=38, P<0.01$) 与平均飞行速度 ($t=2.87, df=38, P=0.01$) 均显著高于未补充营养的雌成虫。补充营养的雄成虫平均累计飞行距离 ($t=8.89, df=38, P<0.01$) 与平均累计飞行时间 ($t=8.20, df=38, P<0.01$) 均显著高于未补充营养的雄成虫, 补充营养的雄成虫和未补充营养

的雄成虫平均飞行速度未达到显著差异水平 ($t=1.93, df=38, P=0.06$)。补充营养的雄成虫平均累计飞行距离 ($t=3.94, df=38, P<0.01$) 与平均累计飞行时间 ($t=3.57, df=38, P=0.01$) 均显著高于补充营养的雌成虫, 补充营养的雄成虫和补充营养的雌成虫平均飞行速度未达到显著差异水平 ($t=0.45, df=38, P=0.66$)。未补充营养的雌雄成虫平均累计飞行距离 ($t=1.15, df=38, P=0.26$)、平均累计飞行时间 ($t=0.99, df=38, P=0.33$) 和平均飞行速度 ($t=0.71, df=38, P=0.48$) 均未达到显著差异水平。

3 讨论

柚木驼蛾雌雄蛹的鉴别特征可用于柚木驼蛾性别的便捷、快速、准确区分, 对生物学特性

研究、种群动态的预测预报等具有重要意义。柚木驼蛾飞行能力测定的结果表明,雄成虫飞行能力高于雌成虫,与美国白蛾、二点委夜蛾 *Athetis lepigone* 等相似,均为雄虫飞行能力高于雌虫(郑作涛等, 2014; 李雅惠等, 2023), 而亚洲型舞毒蛾, 金纹细蛾蛾 *Lithocolletis ringoniella* 雌雄虫飞行能力则无明显差异(杨帆等, 2012; 侯国辉等, 2022), 红铃虫 *Pectinophora gossypiella* 雌虫飞行能力高于雄虫(武怀恒, 2006), 昆虫性别和飞行能力关系的复杂性和多样性可能与昆虫的生理和形态等因素相关(侯国辉等, 2022)。柚木驼蛾雄成虫飞行能力更强, 推测可能原因是柚木驼蛾自然状态下为散居型, 并且作者前期调查发现野外柚木驼蛾具有明显的世代重叠现象, 雄虫为寻求雌虫完成交配可能需要更远的飞行距离, 即对飞行的需求更强烈。Southwood 和 Johnson (1971) 认为大部分迁飞昆虫雌虫体内卵巢与飞行器官发育存在拮抗关系, 柚木驼蛾雌虫繁殖能力强, 单头产卵最高可达到 834 粒(刘文爱和李丽凤, 2017), 推测其在寄主植物充足时, 雌成虫容易寻找到适宜的产卵场所, 故而体内能源物质更多用作生殖系统的发育。若在幼虫期缺乏食物, 柚木驼蛾提前化蛹, 其是否会将体内能源物质更多供于飞行肌肉的发育, 高强度飞行找寻一定距离以外的合适寄主进行繁殖, 尚有待于下一步的研究, 以解释其在食物匮乏、环境条件不利时的种群迁移现象。羽化后补充营养的 2 日龄柚木驼蛾雌雄成虫飞行能力相较初羽化未补充营养的雌雄成虫明显提高, 与大部分鳞翅目昆虫相同, 可能的原因是其羽化后需要补充营养以及需要一定时间去完成飞行肌肉的发育。2 日龄补充营养后的成虫雌雄为各日龄中飞行能力最高, 2 日龄后雌雄成虫随着日龄的增加飞行能力逐渐减弱。4 日龄补充营养的雌雄成虫飞行距离与飞行速度显著高于未补充营养的雌雄成虫。不同性别、不同日龄成虫的飞行速度均未体现出显著性差异 ($P>0.05$), 不同性别、日龄与是否补充营养处理的柚木驼蛾飞行能力的差异主要取决于其累计飞行时间的长短。推测这一结果可能与柚木驼蛾在自然界中的生存对策有关, 柚木驼蛾的

生命周期和成虫寿命较短, 其羽化后经过短暂补充营养使体内飞行能源有关物质含量提高, 快速完成飞行肌肉的发育, 从而达到飞行能力顶峰, 随后进行一系列的飞行活动。柚木驼蛾的平均飞行速度和连续 24 h 累计飞行距离与强飞行能力的草地贪夜蛾接近, 但与草地贪夜蛾等长距离迁飞的昆虫相比, 其飞行时间较为有限, 但仍存在较强的飞行潜力。

昆虫的飞行能力受温度、湿度、营养条件、光照、性别、日龄、交尾产卵与种群密度等多种因素的影响(江幸福等, 1999; 武怀恒, 2006; 刘莎等, 2018), 自然环境中还会受到气流和磁场等因素影响, 如稻纵卷叶螟的迁飞会受到台风、副热带高压和江淮气旋的影响(高月波等, 2008; 胡高等, 2020; 闫蒙蒙, 2020; Hu *et al.*, 2025)。柚木驼蛾广泛分布的印度部分地区与我国广东、广西等地季风和台风活动频繁, 存在风辅助迁飞的可能性。本研究测试柚木驼蛾的飞行能力, 仅于室内固定温度与湿度的条件进行测试, 柚木驼蛾在其他条件下的飞行生物学还有待进一步研究。

昆虫迁飞是其在长期进化过程中形成的一种生存对策(Chapman *et al.*, 2015)。柚木驼蛾近年来在我国危害红树林, 其暴发具有突发性并且种群数量具有季节性突增和突减现象, 与印度柚木种植园中柚木驼蛾种群变化情况类似。我国广东、广西等地柚木驼蛾严重危害白骨壤主要集中在 4-5 月与 8-10 月, 其余时间经多次在红树林进行调查, 均难以发现柚木驼蛾活体, 尤其是大暴发过后, 柚木驼蛾短时间内在红树林中“消失不见”。基于柚木驼蛾的飞行能力, 推测柚木驼蛾种群突然消失的原因可能是成虫飞行转移到其他寄主上, 待白骨壤萌发嫩叶后再返回危害。针对此假设, 后续还需要进行实际自然取样来探索其飞行行为和自然条件下的飞行能力, 并且结合灯光诱集、雷达监测、遗传分子标记和卵巢解剖等一系列方法加以证实。

参考文献 (References)

- Chandrasekhar N, Neetha NV, Linda KV, Moinak B, 2008. Deciphering the molecular phylogenetics of family Hyblaeidae and inferring the phylogeographical relationships using DNA

- barcoding. *Journal of Genetics and Molecular Biology*, 19(3): 158–167.
- Chandrasekhar N, Sajeev TV, Sudheendrakumar VV, Banerjee M, 2005. Population dynamics of the teak defoliator (*Hyblaea puera* Cramer) in Nilambur teak plantations using randomly amplified gene encoding primers (RAGEP). *BMC Ecology*, 5(1): 1–11.
- Chang MS, 2023. Identification of morphological characters and antennal sensilla of the moth *Hyblaea puera* Cramer. *Biological Disaster Science*, 46(3): 342–347. [常明山, 2023. 柚木驼蛾雌雄成虫形态及其触角感器识别. *生物灾害科学*, 46(3): 342–347.]
- Chapman JW, Reynolds DR, Wilson K, 2015. Long-range seasonal migration in insects: Mechanisms, evolutionary drivers and ecological consequences. *Ecology Letters*, 18(3): 287–302.
- Chen ZQ, Wu SX, 1978. Preliminary observation of the *Hyblaea puera* (Cramer). *Tropical Forestry*, 6(2): 19–22. [陈芝卿, 吴士雄, 1978. 柚木弄蛾的初步观察. *热带林业*, 6(2): 19–22.]
- Chen ZQ, Wu SX, 1984. Preliminary observation of the *Hyblaea puera* (Cramer). *Entomological Knowledge*, 21(4): 161–163. [陈芝卿, 吴士雄, 1984. 柚木弄蛾的初步观察. *昆虫知识*, 21(4): 161–163.]
- 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): 5238–5247. [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 (*Cnaphalocrocis medinalis*) 迁飞的多普勒昆虫雷达观测及动态. *生态学报*, 28(11): 5238–5247.]
- Ge SS, He LM, He W, Xu RB, Sun XT, Wu KM, 2019. Determination on moth flight capacity of *Spodoptera frugiperda*. *Plant Protection*, 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.]
- Hou GH, Cui XX, Zhu Y, Xiong RC, Yao YS, 2022. Determination of the flight capacity of *Lithocolletis ringoniella* (Lepidoptera: Gracillariidae). *Acta Entomologica Sinica*, 65(5): 612–620. [侯国辉, 崔笑雄, 朱悦, 熊仁次, 姚永生, 2022. 金纹细蛾飞行能力测定. *昆虫学报*, 65(5): 612–620.]
- Hu G, Feng H, Otuka A, Reynolds DR, Drake VA, Chapman JW, 2025. The east Asian insect flyway: Geographical and climatic factors driving migration among diverse crop pests. *Annual Review of Entomology*, 70: 1–22.
- Hu G, Gao BY, Feng HQ, Jiang XF, Zhai BP, Wu KM, 2020. Insect migration: Individual behaviour, population dynamics and ecological consequences. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 34(4): 456–463. [胡高, 高博雅, 封洪强, 江幸福, 翟保平, 吴孔明, 2020. 迁飞昆虫的个体行为、种群动态及生态效应. *中国科学基金*, 34(4): 456–463.]
- Hu R, Chen H, Yang KX, Cai B, Li JH, 2016. Review of a new pest, *Hyblaea puera* (Cramer), in mangrove forest in China. *Forest Pest and Disease*, 35(5): 34–37, 20. [胡荣, 陈河, 杨克学, 蔡波, 李加慧, 2016. 中国红树林新害虫柚木驼蛾的研究进展. *中国森林病虫*, 35(5): 34–37, 20.]
- Jiang XF, Luo LZ, Hu Y, 1999. Influence of larval diets on development fecundity and flight capacity of the beet armyworm, *Spodoptera exigua*. *Acta Entomologica Sinica*, 42(3): 270–276. [江幸福, 罗礼智, 胡毅, 1999. 幼虫食物对甜菜夜蛾生长发育、繁殖及飞行的影响. *昆虫学报*, 42(3): 270–276.]
- Kabade KH, Patel Z, 1997. Biology of teak defoliator (*Hyblaea puera* Cramer, Hyblaedae: Lepidoptera). *Bioinfolet*, 12: 343–346.
- Li P, 2015. The war on moth control in mangroves. *China Ocean News*, 2015–10–9(3). [李鹏, 2015. 红树林里的灭蛾大战. *中国海洋报*, 2015–10–9(3).]
- Li YH, Li Q, Cao LJ, Song F, Pan ZY, Chen M, 2023. Determination of the flight ability of *Hyphantria cunea* (Drury). *Chinese Journal of Applied Entomology*, 60(1): 33–39. [李雅惠, 李强, 曹利军, 宋放, 潘忠玉, 陈敏, 2023. 美国白蛾飞行能力的测定. *应用昆虫学报*, 60(1): 33–39.]
- Liu S, Lü ZY, Gao HH, Zhai YF, Liu Q, Yang PY, Li P, Zheng L, Li Q, Yu Y, 2018. Research advances on flight capacity of insect. *Journal of Environmental Entomology*, 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 WA, Li LF, 2017. Characteristics and control of a new pest of *Avicennia marina*: *Hyblaea puera* Cramer. *Guangxi Sciences*, 24(5): 523–528. [刘文爱, 李丽凤, 2017. 白骨壤新害虫柚木肖弄蝶夜蛾的生物特性及防治. *广西科学*, 24(5): 523–528.]
- Nair KSS, Sudheendrakumar VV, Varma RV, Chacko KC, 1985. Studies on the seasonal incidence of defoliators and the effect of defoliation on volume increment of teak. *Research Report of Kerala Forest Research Institute*, 30(7): 69–74.
- Song YS, 2019. National Forest Pest Survey Results of China: 2014–2017, Volume 1. Beijing: China Forestry Publishing House. 817. [宋玉双, 2019. 中国林业有害生物 2014–2017 年全国林业有害生物普查成果, 上册. 北京: 中国林业出版社. 817.]
- Southwood TRE, Johnson CG, 1971. Migration and dispersal of

- insects by flight. *Journal of Animal Ecology*, 40(1): 256–257.
- Sun XT, Xu RB, Ge SS, Fu XW, Zhao XC, Wu KM, 2019. Effects of photoperiod on the eclosion, reproduction and flight performance of *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae). *Journal of Environmental Entomology*, 41(5): 1045–1056. [孙晓婷, 徐瑞斌, 葛世帅, 付晓伟, 赵新成, 吴孔明, 2019. 光周期对棉铃虫羽化、生殖和飞行的影响. *环境昆虫学报*, 41(5): 1045–1056.]
- Tripathy MK, Rout M, Tripathy A, 2018. Population dynamics of teak defoliator, *Hyblaea puera* Cramer at coastal Odisha, India. *Journal of Entomology and Zoology Studies*, 6(5): 2378–2387.
- Wang FY, Zhang XX, Zhai BP, 2010. Flight and re-migration capacity of the rice leaf folder moth, *Cnaphalocrocis medinalis* (Guenée) (Lepidoptera: Crambidae). *Acta Entomologica Sinica*, 53(11): 1265–1272. [王凤英, 张孝羲, 翟保平, 2010. 稻纵卷叶螟的飞行和再迁飞能力. *昆虫学报*, 53(11): 1265–1272.]
- Wu HH, 2006. Studies on flight potential and its relationship with reproduction in pink bollworm, *Pectinophora gossypiella* Saunders (Lepidoptera: Gelechiidae). Master dissertation. Urumqi: Xinjiang Agricultural University. [武怀恒, 2006. 红铃虫的飞翔能力测定及其与生殖能力的关系研究. 硕士学位论文. 乌鲁木齐: 新疆农业大学.]
- Yan MM, 2020. Effects of near-zero magnetic field on development, reproduction and flight behavior in *Mythimna Separata* (Walker). Master dissertation. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences. [闫蒙蒙, 2020. 近零磁场对粘虫生长发育、繁殖及飞行能力的影响. 硕士学位论文. 北京: 中国农业科学院.]
- Yang F, Luo YQ, Huang DH, Cui XP, Yang HW, Liu XX, Shi J, 2012. A preliminary study on flight ability among Chinese population of Asian gypsy moth, *Lymantria dispar*. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 28(28): 53–57. [杨帆, 骆有庆, 黄东辉, 崔晓芑, 杨华巍, 刘信旭, 石娟, 2012. 亚洲型舞毒蛾中国地理种群飞行能力初探. *中国农学通报*, 28(28): 53–57.]
- Zheng ZT, Jiang XF, Zhang L, Cheng YX, Luo LZ, 2014. Flight ability of *Athetis lepigone*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 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.]