北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

长林小蠹林间种群扬飞日节律观察及飞行能力测定

顾颖 任利利 骆有庆 刘董浩

Flight daily rhythm observation and flight ability assessment of *Hylurgus ligniperda* populations in forests

Gu Ying, Ren Lili, Luo Youqing, Liu Donghao

引用本文:
顾颖, 任利利, 骆有庆, 刘董浩. 长林小蠹林间种群扬飞日节律观察及飞行能力测定[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(4):1–9. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240236
Gu Ying, Ren Lili, Luo Youqing, Liu Donghao. Flight daily rhythm observation and flight ability assessment of *Hylurgus ligniperda* populations in forests[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(4):1–9. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240236

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240236

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

大兴安岭南段马鹿日活动节律的季节变化研究
Variations in seasonal activity pattern of red deer in southern part of Daxing'an Ling Mountains, northeastern China
北京林业大学学报, 2017, 39(4): 55–62. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20160390

文冠果不同交配组合种实性状变异及综合评价
Variation and comprehensive evaluation of fruit and seed phenotypic traits of different mating combinations in *Xanthoceras sorbifolium*
北京林业大学学报, 2019, 41(1): 42–56. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180105

长白山木本植物性别系统及其生态关联性
Sexual system and ecological links of woody plants in Changbai Mountains, northeastern China
北京林业大学学报, 2017, 39(5): 58–64. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20160404

青黑杨全同胞杂种功能叶片及气孔性状变异的倍性、基因型和性别效应解析
Ploidy, genotype and gender effects of functional leaf and stomatal traits on short branches in full–sib hybrids between section Tacamahaca and sect. Aigeiros of *Populus*
北京林业大学学报, 2020, 42(9): 11–18. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200095

毛果杨丝氨酸蛋白酶抑制子PtrSPI的抗虫能力分析
Analysis of insect resistance ability of the serine protease inhibitor PtrSPI from *Populus tomentosa*
北京林业大学学报, 2021, 43(9): 51–58. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210163

土壤紧实度和凋落物覆盖对城市森林土壤持水、渗水能力的影响
Effects of soil compactness and litter covering on soil water holding capacity and water infiltration ability in urban forest
北京林业大学学报, 2020, 42(8): 102–111. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190476

DOI:10.12171/j.1000−1522.20240236

长林小蠹林间种群扬飞日节律观察及飞行能力测定

顾 颖[1] 任利利[1] 骆有庆[1] 刘董浩[1,2]
（1. 北京林业大学林木有害生物防治北京市重点实验室，北京 100083；2. 西藏自治区林芝市波密县八盖乡人民政府，西藏 林芝 860000）

摘要:【目的】明确长林小蠹扬飞的日节律，探讨饥饿和交配对其飞行能力的影响，以预测其扩散模式和种群空间动态，为精准防控提供科学依据。**【方法】**利用植物源引诱剂连续监测各时段长林小蠹的诱捕数量，以反映其野外的日飞行活动规律。利用飞行磨系统室内吊飞试验，测定长林小蠹的飞行能力及影响因素。**【结果】**(1)5 月长林小蠹的日飞行节律呈两个高峰，分别出现在 05:00—08:00 和 18:00—19:30。(2)24 h 吊飞结果显示：长林小蠹累计飞行距离最长可达 6.994 km，平均为(0.784 ± 0.010)km；累计飞行时间最长为 20.36 h，平均为(2.77 ± 0.31)h；飞行速度最快为 0.848 km/h，平均为(0.231 ± 0.007)km/h。(3)未交配雄虫的累计飞行距离和累计飞行时间均高于未交配雌虫，交配后性别差异达到显著水平($P < 0.01$)。24 h 饥饿处理后，雌雄成虫的飞行能力增强，且对雄虫的起飞次数、累计飞行距离、累计飞行速度和最大飞行速度的影响达到显著水平($P < 0.05$)。交配后，雄虫的起飞次数、累计飞行距离、累计飞行时间、最大飞行速度显著增加($P < 0.05$)，雌虫的累计飞行距离和平均飞行速度小幅增加，而累计飞行时间和最大飞行速度小幅降低。**【结论】**本研究揭示了长林小蠹的日飞行节律主要集中在晨昏时段，其强大的飞行能力及以短距离迁飞为主的行为，可能对种群的空间动态和扩散模式产生重要影响。交配和饥饿显著增强雄虫的飞行能力，表明雄虫的飞行能力在种群扩散中可能发挥重要作用。研究结果为预测长林小蠹的扩散模式提供了理论依据，并为精准防控措施的制定提供了数据支持，尤其在考虑饥饿和交配等因素对其迁飞能力的影响时，具有重要的实践意义。

关键词：长林小蠹；性别；饥饿；交配；飞行能力；飞行日节律
中图分类号：S763.38　**文献标志码：**A　**文章编号：**1000−1522(2025)04−0001−09
引文格式：顾颖，任利利，骆有庆，等. 长林小蠹林间种群扬飞日节律观察及飞行能力测定［J］. 北京林业大学学报，2025，47(4)：1−9. Gu Ying, Ren Lili, Luo Youqing, et al. Flight daily rhythm observation and flight ability assessment of *Hylurgus ligniperda* populations in forests［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(4): 1−9.

Flight daily rhythm observation and flight ability assessment of *Hylurgus ligniperda* populations in forests

Gu Ying[1] Ren Lili[1] Luo Youqing[1] Liu Donghao[1,2]
(1. Beijing Key Laboratory for Forest Pest Control, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. The People's Government of Bagai Township, Bomê County of Nyingchi City, Nyingchi 860000, Xizang, China)

Abstract:［**Objective**］This paper aims to clarify the flight daily rhythm of *Hylurgus ligniperda* in forests, explore the impacts of starvation and mating on flight ability of males and females, so as to predict the dispersal patterns and population space dynamics of this pest in forests, and provide scientific basis for precise prevention and control.［**Method**］Plant-derived attractants were used to continuously monitor the number of *H. ligniperda* during different time periods to reflect its daily flight activity in the wild. Flight mills were employed to suspend and assess the flight capacity of *H. ligniperda* and its influencing factors.

收稿日期: 2024−07−24　**修回日期:** 2024−09−18
基金项目: 国家重点研发计划(2021YFD1400300)。
第一作者: 顾颖。主要研究方向：小蠹伴生微生物多样性及功能。Email: gu_ying@bjfu.edu.cn　地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学林学院。
责任作者: 骆有庆，教授。主要研究方向：林木钻蛀性害虫和林业入侵生物防控。Email: yqluo@bjfu.edu.cn　地址：同上。任利利，高级实验师。主要研究方向：林木钻蛀性害虫和林业入侵生物防控。Email: lily_ren@bjfu.edu.cn　地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

［**Result**］(1) The daily flight rhythm of *H. ligniperda* showed two peaks, with peak flight periods occurring in 05:00−08:00 and 18:00−19:30. (2) The results of 24 h flight showed that the cumulative flight distance of *H. ligniperda* was up to 6.994 km, average was (0.784 ± 0.010) km. The cumulative flight time was up to 20.36 h, average was (2.77 ± 0.31) h. The maximum flight speed was 0.848 km/h, with an average of (0.231 ± 0.007) km/h. (3) Unmated males' cumulative flight distance and cumulative flight time were slightly higher than those of the unmated females. The cumulative flight time of unmated males was slightly higher than that of unmated females, with significant gender differences observed after mating ($P < 0.01$). 24 h starvation treatment increased the flight ability of both male and female adults, and the effects on the number of take-offs, cumulative flight distance, cumulative flight time, and the maximum flight speed of males reached a significant level ($P < 0.05$). The frequency of take-offs, cumulative flight distance, cumulative flight time, and the maximum flight speed of males significantly increased after mating ($P < 0.05$), while females showed slight increases in accumulated flight distance and average flight speed, and slight decreases in accumulated flight time and maximum flight speed. ［**Conclusion**］This study reveals that the daily flight peaks of *H. ligniperda* mainly occur during dawn and dusk. The beetle demonstrates strong flight ability, characterized by short-distance dispersal. This behavior may have significant implications for the spatial dynamics and dispersal patterns of populations. Mating and starvation significantly enhance the flight performance of males, suggesting that male flight ability plays a pivotal role in population dispersal. These findings provide a theoretical basis for predicting the dispersal patterns of *H. ligniperda* and offer empirical support for developing precision management strategies. In particular, integrating physiological factors (e.g., hunger and mating status) into dispersal models holds practical significance for optimizing pest control protocols.

Key words: *Hylurgus ligniperda*; gender; starvation; mating; flight ability; flight daily rhythm

长林小蠹(*Hylurgus ligniperda*)隶属于鞘翅目(Coleoptera)象虫科(Curculionidae)林小蠹属(*Hylurgus*)，是一种次期性树皮小蠹，其寄主包括绝大部分松属(*Pinus*)树种，以及部分落叶松属(*Larix*)、冷杉属(*Abies*)、云杉属(*Picea*)、黄杉属(*Pseudotsuga*)树种[1]。该虫主要侵染新伐木、衰弱木以及受伤的健康树，危害范围下至距根际 7.4 m 远的侧根，上至距干基 1.8 m 的主干[2]。据国外报道，除了钻蛀危害外，该虫还能携带和传播蓝变菌[3−8]和部分伞滑刃属(*Bursaphelenchus*)线虫[9−11]，不仅可能导致树木死亡，还会严重影响成品木材的品质[12]。长林小蠹原产于欧洲，但由于个体较小，易藏匿于木制材料中随贸易活动扩散[13]，加之其飞行能力较强，已先后传入日本、澳大利亚、乌拉圭、南非、新西兰、智利、巴西、纽约、加利福尼亚州、韩国和阿根廷[14−15]。长林小蠹被列为我国进境植物检疫性有害生物，并于 2020 年被报道在我国山东省成功定殖[2]。

翅的产生和演化是昆虫纲至今繁荣昌盛的重要原因之一，其飞行能力使昆虫能够有效地逃避天敌和不良环境，并高效地寻找寄主与配偶。在山东省，3—11 月份均可见长林小蠹在林间飞行[16]，表明其在一年中的大部分时间都能通过飞行活动进行自然传播和侵染。因此，长林小蠹的种群扩散速度和对松林的威胁程度均与其飞行能力密切相关。据国外报道，长林小蠹在澳大利亚 18 个月内扩散了 25 km[17]；在新西兰，其在寄主松林以外 25 km 远处被诱捕到，不到 3 年该虫便扩散到整个新西兰[18−19]；在智利，长林小蠹传入 5 年后就已扩散至辐射松的所有种植区域[20]。以上报道表明，长林小蠹具有较强的自然扩散能力，但其在林间扬飞的日节律尚不明确，飞行能力也有待进一步研究和量化。

本研究通过长林小蠹各时段的林间诱捕量反映其飞行行为的日节律，并利用飞行磨系统进行室内吊飞试验，探究饥饿和交配状态对不同性别长林小蠹飞行能力的影响。研究旨在为长林小蠹的精准防控提供科学依据，为揭示其扩散模式提供数据支撑，并为预测其种群空间动态提供重要参考。

1 材料与方法

1.1 林间种群扬飞日节律观察

由于长林小蠹 2021 年和 2022 年的第一个扬飞高峰期分别出现在 5 月 17 日和 5 月 20 日[16]，本试验日期定为 2023 年 05 月 15—21 日，在山东省烟台市牟平区沿海防护林内(121°43′24″E，37°27′04″N)用长林小蠹植物源引诱剂 B(质量比为 2∶1 的 α-蒎烯和乙醇)[21]诱捕并统计各时段内新诱集到的长林



a. 5 个诱捕点的分布图；b. 6 层漏斗诱捕器的野外布设；c. 黑布诱捕法的野外布设

图 1　试验地诱捕点分布图及两种诱捕方式的野外布设

Fig. 1　Distribution map of trap points in the experimental plot and field deployment of two trapping methods

小蠹虫量。在林内虫害高发区域选取 5 个诱捕点，相邻诱捕点之间的间距为 40 ~ 70 m（图 1a），其中 4 个点均挂设 1 个 6 节多漏斗型诱捕器，诱捕器的最下方高度距离地面 0.3 m，缓释诱芯悬挂于诱捕器第 3 个漏斗上方（图 1b），剩余 1 个点绑挂一张 4 m × 2 m 的黑布（黑布为东西朝向）。黑布下方铺设一张 4 m × 2 m 的透明塑料布以便抓捕降落到地面的长林小蠹，黑布下方距透明塑料布的高度为 0.2 m，塑料布的东面和西面各放置一个 84 mm × 84 mm × 28 mm 的聚丙烯塑料盒用于盛放引诱剂，塑料布及黑布上一旦有长林小蠹降落立即抓捕，每个整点对 5 个诱捕点均进行一次诱捕虫量的计数统计。试验连续进行 6 d 整（2023−05−15 05:00 至 2023−05−21 05:00）。由于天黑后长林小蠹飞行活动明显减少且不易观察，为避免人造灯源干扰其日飞行节律，夜间（19:00/19:30 至次日 04:00）仅使用 4 个诱捕器诱捕进行监测，日间（04:00—19:00/19:30）则采用黑布辅助人工捕捉和诱捕器诱集两种方式进行监测和统计。

1.2　室内飞行能力测定

1.2.1　室内吊飞虫源

在当年长林小蠹羽化之初（3 月），用凿子解剖 1.1 所述林地中的伐桩获得尚未黑化（初羽化，鞘翅尚未变黑）的长林小蠹，立即鉴定雌雄（可鸣叫发声者为雄虫，反之为雌虫）[22]放入不同的饲养盒内，雌虫至少重复鉴定 3 次。饲养盒中铺一层湿润的滤纸保持长林小蠹生存所需的湿度，每天以新鲜黑松韧皮饲喂。饲养条件为温度 20 ℃，相对湿度 65%，全黑暗（PRX-600C 智能人工气候箱，宁波科晟实验仪器有限公司）。

所有试验采用羽化后鞘翅完全变黑的黑化试

虫。测定饥饿对飞行能力的影响，选取未交配试虫，饥饿处理 24 h 后进行试验。测定交配状态对飞行能力的影响的试虫，单独配对饲养，每天检查是否产卵，初次产卵后的成对成虫用于试验。吊飞试验结束后所有试虫在 Stemi 508 体式显微镜（ZEISS，德国）下解剖生殖器以验证性别。室内吊飞试验共测试 180 头成虫（雌/雄对照、雌/雄饥饿、雌/雄交配组各 30 头），所有试虫均不重复使用。

1.2.2 室内吊飞试验

试验使用 32 通道佳多昆虫飞行磨系统（佳多科工贸有限责任公司，中国），飞行磨系统由飞行磨主机 FXM-Z、昆虫飞行磨 FXM-D、飞行磨传感器 FXM-S、板卡 PCI8360V 及配套飞行磨软件组成。

飞行磨吊臂采用长 5.5 cm、直径 0.2 mm 的铜丝，将吊臂中央用万能胶固定于 0 号无柄昆虫针上，确保吊臂两端均为 2.5 cm，吊臂一端用少量万能胶与长林小蠹前胸背板黏接，注意吊臂方向需与虫体方向垂直，且不能黏到鞘翅、触角和足等；吊臂另一端黏接与虫体等重的铜丝球，两臂需保持水平。确保黏好的虫能正常飞行后将吊臂与飞行磨连接，确保试虫飞行时能绕飞行磨中轴做切线旋转。打开飞行磨系统软件，登记试虫的相关信息并记录累计飞行距离、累计飞行时间、平均飞行速度、最大飞行速度、起飞次数等飞行参数。室内吊飞试验每次测试时长为 24 h，测试环境条件为温度 25 ℃，相对湿度 60%，无风，全黑暗。

1.3 数据分析

所有原始数据均用 Excel 2019 进行处理，用 GraphPad Prism 8.0.2 进行分析和作图。经正态性检验，本研究的飞行数据不符合正态分布，采用 Kruskal-Wallis 非参数检验分析同一性别的长林小蠹在正常饲养−未交配（对照组）、饥饿−未交配（饥饿组）、正常饲养−交配（交配组）3 种状态下累计飞行距离、累计飞行时间、平均飞行速度、最大飞行速度和起飞次数的差异，若差异显著则用 Dunn's 进行多重比较。用 Mann-Whitney U 检验分析不同性别的长林小蠹在同一种状态下各飞行参数的差异。

2 结果与分析

2.1 长林小蠹林间种群的扬飞日节律

长林小蠹成虫在林间的扬飞活动随天气变化而有所不同，与林间气温有相关性，且飞行高峰时段均出现在日出和日落前后，扬飞日节律呈现双峰模式，且日落前后出现的扬飞高峰明显高于日出前后（图 2）。在天气晴朗、温度相对较高（日最高温度超过 25 ℃）之时（图 2a ~ c），长林小蠹第一个飞行活动高峰时段出现在上午 05:00—07:00，第二个飞行活动高峰时段出现在 18:00—19:30，日间（08:00—17:00）很少甚至几乎不进行飞行活动。而在天气多云、温度适宜之时（日最高温度不高于 25 ℃）（图 2d ~ f），几乎全天可见长林小蠹的飞行活动，其第一个飞行活动高峰时段为 05:00—08:00，第二个飞行活动高峰时段出现在 14:00—19:30。

2.2 长林小蠹室内吊飞的飞行能力

本研究共测试了 180 头长林小蠹的 24 h 飞行能力，其中 178 头个体被检测到有飞行行为，累计飞行距离在 1 m 以下数据被视为不可靠数据，予以筛除，故最终获得 168 头成虫（雄虫 87 头；雌虫 81 头）的有效飞行数据，每个组别的有效数据≥24 头（表 1）。在 24 h 飞行能力测试中，长林小蠹起飞次数最多达到了 1 178 次，平均起飞次数为（249.7 ± 23.7）次；长林小蠹单次最长飞行距离可达 0.410 km，累计飞行距离最长达到了 6.994 km，平均累计飞行距离仅为（0.784 ± 0.010）km；单次最长飞行时间可达 1.34 h，累计飞行时间最长达到了 20.36 h，平均累计飞行时间为（2.77 ± 0.31）h；最大飞行速度为 0.848 km/h，平均飞行速度为（0.231 ± 0.007）km/h。

2.3 饥饿和交配对不同性别长林小蠹飞行能力的影响

2.3.1 不同性别长林小蠹飞行能力的差异

在未交配状态下，对照组和饥饿组不同性别成虫飞行能力的差异均是不显著的（图 3）。交配后的长林小蠹雄虫起飞次数（$P = 0.002\ 9$）、累计飞行距离（$P = 0.002\ 4$）、累计飞行时间（$P = 0.003\ 2$）、和最大飞行速度（$P = 0.048\ 6$）均显著高于雌虫，平均飞行速度也高于雌虫，但差异未达显著水平（表 2）。

2.3.2 饥饿与交配对长林小蠹飞行能力的影响

将饥饿组和交配组分别与对照组比较后发现（图 3，表 2）：对长林小蠹雄虫而言，两种处理均使其起飞次数（饥饿：$P = 0.015\ 0$；交配：$P = 0.006\ 6$）、累计飞行距离（饥饿：$P = 0.012\ 8$；交配：$P = 0.006\ 8$）、累计飞行时间（饥饿：$P = 0.013\ 2$；交配：$P = 0.013\ 7$）和最大飞行速度（饥饿：$P = 0.006\ 3$；交配：$P = 0.045\ 0$）显著增加；对雌虫而言，饥饿和交配处理对其飞行能力的影响则均未达到显著水平。饥饿处理后其起飞次数、累计飞行距离、累计飞行时间、平均飞行速度、最大飞行速度均有所增加，而交配处理后其起飞次数、累计飞行时间和最大飞行速度略有下降。

3 讨论与结论

长林小蠹传入我国的时间尚短，其生物生态学特性和行为习性还没有得到系统性的研究。明确其飞行能力有助于揭示长林小蠹种群扩散趋势，并预

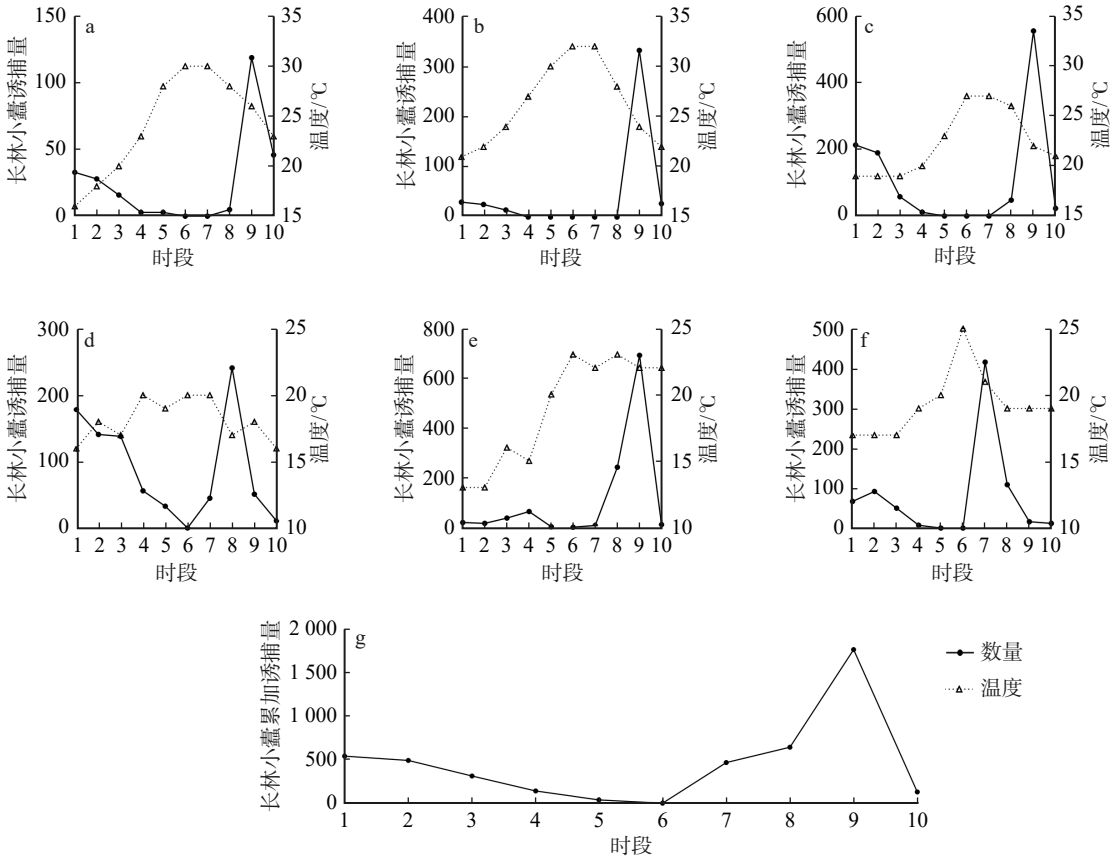


图 a～f 按顺序分别对应 2023−05−15 至 2023−05−21 各时段的诱捕量及气温。a～c 为晴天；d～f 为多云天气。图 g 为 2023−05−15 至 2023−05−21 各时段的累加诱捕量。时段 1 为 05:00—06:00，2 为 06:00—07:00，3 为 07:00—08:00，4 为 08:00—10:00，5 为 10:00—12:00，6 为 12:00—14:00，7 为 14:00—16:00，8 为 16:00—18:00，9 为 18:00—19:00(a、d、f)/19:30(b、c、e)，10 为 19:00(a、d、f)/19:30(b、c、e) 至次日 05:00。

图 2　长林小蠹每日各时段诱捕量(连续 144 h 诱捕)

Fig. 2　Number of *Hylurgus ligniperda* trapped in each period of the day (144 h continuous trapping)

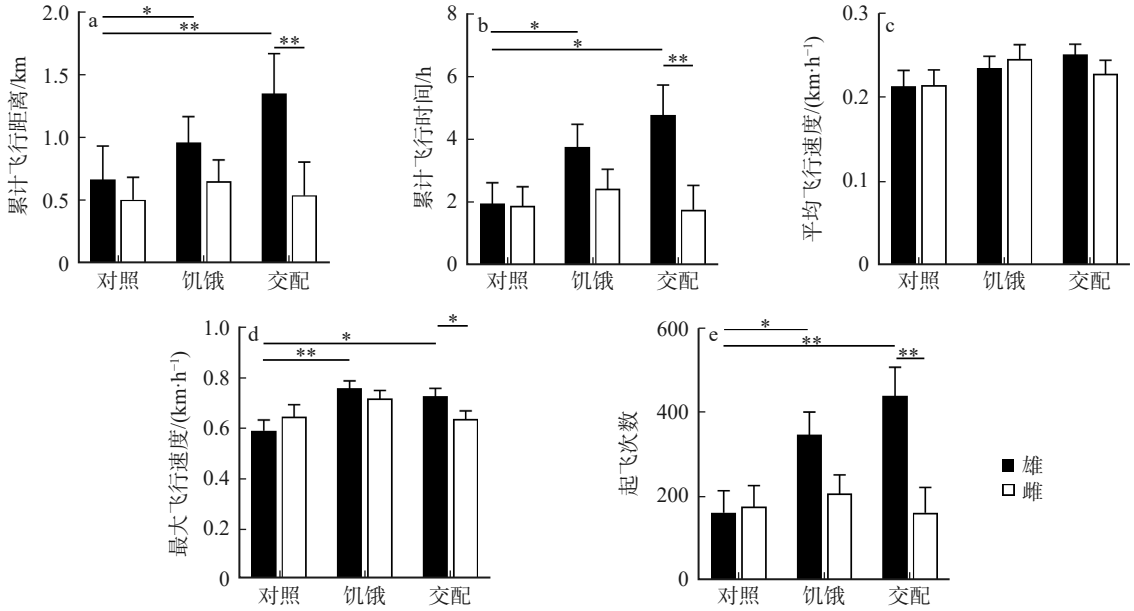
表 1　长林小蠹 24 h 飞行能力参数

Tab. 1　Parameters of 24 h flight ability of *Hylurgus ligniperda*

飞行参数	范围	中值	均值 ± 标准误
起飞次数	1～1 178	73	249.7 ± 23.7
累计飞行距离/km	0.001～6.994	0.063	0.784 ± 0.010
单次最长飞行距离/km	0.001～0.410	0.007	0.025 ± 0.004
累计飞行时间/h	0.01～20.36	0.32	2.77 ± 0.31
单次最长飞行时间/h	0.01～1.34	0.03	0.08 ± 0.01
平均飞行速度/(km·h^{-1})	0.080～0.521	0.216	0.231 ± 0.007
最大飞行速度/(km·h^{-1})	0.226～0.848	0.735	0.672 ± 0.015

测其种群数量动态及空间分布。掌握其飞行日节律可为精准防控提供重要依据，从而降低防治成本。

长林小蠹在林间扬飞的日节律呈现双峰模式，这与 Kerr 等[23]在新西兰诱捕长林小蠹得到的规律是一致的。但本研究发现的日飞行高峰时段集中在 05:00—08:00 和 18:00—19:30，而在新西兰的日飞行高峰时段则相对后移，分别是 07:30—10:30 和 19:30—22:30，这种差异可能与两地日出和日落时间不同有关。本研究执行期间，样地的日出和日落时间分别为 04:42 和 18:56（https://richurimo.bmcx.com/moupingqu__time__2023_05__richurimo/），而 Kerr 等[23]的研究中标注的日出和日落时间则分别为 06:34 和 20:37。无论在我国还是新西兰，长林小蠹都倾向于在日出后的 3～4 h 及日落前后的 1～2 h 内飞行，表现出明显的晨昏节律。除了长林小蠹，欧洲根小蠹（*Hylastes ater*）、西松大小蠹（*Dendroctonus*



*表示在 $P < 0.05$ 水平上差异显著；**表示 $P < 0.01$ 水平上差异显著。

图 3 雌雄长林小蠹不同状态下的飞行能力

Fig. 3 Flight ability of male and female *Hylurgus ligniperda* in different states

表 2 不同组别飞行参数的 *P* 值

Tab. 2 *P* values of flight parameters in different groups

组别	累计飞行距离	累计飞行时间	平均飞行速度	最大飞行速度	起飞次数
雌对照vs.雄对照	0.217 8	0.321 9	0.880 3	0.366 3	0.220 1
雌交配vs.雄交配	0.002 4	0.003 2	0.112 2	0.048 6	0.002 9
雌饥饿vs.雄饥饿	0.143 3	0.080 5	0.934 0	0.374 8	0.057 1
雌对照vs.雌交配	0.338 3	0.170 4	> 0.999 9	> 0.999 9	0.107 5
雌对照vs.雌饥饿	0.646 1	> 0.999 9	0.441 3	0.563 9	> 0.999 9
雄对照vs.雄交配	0.006 8	0.013 7	0.050 1	0.045 0	0.006 6
雄对照vs.雄饥饿	0.012 8	0.013 2	0.341 5	0.006 3	0.015 0

brevicomis）、*Hylastes nigrinus*、*Pityophthorus juglandis* 均有相似的晨昏飞行模式[24−26]。清晨和黄昏时气温和光强相对温和，可能是造成晨昏节律出现的原因之一；Pawson 等[27]构建的预测长林小蠹飞行活动的贝叶斯网络模型显示日出日落时间和最高小时温度是对长林小蠹飞行活动影响最大的两个非生物因素，他们观测到在极低和中等光子通量密度条件下，长林小蠹的飞行活动达到峰值，此时的最高小时温度在 17 ~ 18 ℃，而当最高小时温度达到 31.6 ℃ 时，便不再能观察到长林小蠹的飞行活动。在本研究中，当时温达到 30 ℃ 时便不再观察到长林小蠹的飞行活动，但当其飞行活动达到峰值时的温度并不固定，这表明其飞行活动可能受各种气象因子的综合影响，有待展开进一步的研究。

长林小蠹 24 h 累计飞行距离的均值为 0.784 km，中值仅为 0.063 km；单次最长飞行距离的均值为 0.025 km，中值仅为 0.007 km。这表明长林小蠹以短距离飞行为主。其种群扩散除依赖人为传播外，主要依靠于长时序的短距离迁飞。值得注意的是，长林小蠹 24 h 飞行距离最长可达 6.994 km，单次最长飞行距离最长可达 0.410 km，表现出较强的飞行能力。长达 9 个月的扬飞期也使该虫有了更多的机会进行迁移和扩散，从而快速入侵新的地区并建立新的种群。而寿命长和繁殖能力强的特点[28]又能极大地增加长林小蠹成功定殖的概率，使得其在新入侵地区能够快速建立庞大的种群，成为区域性的优势种[29−30]。

未交配雌雄长林小蠹飞行能力的差异并不显著，雌虫的平均飞行速度略快于雄虫，而累计飞行距离和累计飞行时间则是雄虫略大于雌虫，这可能跟雌虫是“先锋”性别有关，飞行速度而非距离的优势可能有利于其寻找寄主并抢占生态位。而在交配之后，雌雄的飞行能力出现了显著差异，雌虫的起飞次数、累计飞行距离、累计飞行时间和最大飞行速度均

显著低于雄虫，这可能是因为生殖对母体能源物质消耗过多导致的。

许多昆虫为了避开食物资源短缺的不良环境，会增加对飞行的投入。例如，沙漠飞蝗(*Schistocerca gregaria*)在食物短缺的情况下有更明显的起飞行为[31]；马铃薯甲虫(*Leptinotarsa decemlineata*)在短期饥饿处理后会促进迁飞[32]。此外，一些研究表明，饥饿胁迫会提升昆虫飞行能力，如菜粉蝶(*Pieris rapae*)[33]、丛林斜眼褐蝶(*Bicyclus anynana*)[34]和斑豹蛱蝶(*Speyeria mormonia*)[35]等在饥饿条件下飞行肌蛋白含量增加，稻纵卷叶螟(*Cnaphalocrocis medinalis*)雌蛾在饥饿胁迫下会增加飞行方面的能量分配[36]。本研究也得到类似的结果：24 h 饥饿胁迫使得雌雄虫的飞行能力均有所提升，且对雄虫的提升作用更为明显，雄虫在饥饿状态下的起飞次数、累计飞行距离、累计飞行时间和最大飞行速度均显著增加。这表明当长林小蠹面临着食物紧缺的生存压力时，体内的能量可能会更多地分配到有利于生存的飞行活动上，飞行能力的提升不仅能够使长林小蠹在资源短缺时更快地寻找到新的寄主，还使雄虫能更快速地找到配偶完成交配，对个体的生存和种族的延续都具有十分重要的意义。

交配对昆虫飞行能力的影响因物种而异。例如，金纹细蛾(*Lithocolletis ringoniella*)[37]和苹小吉丁(*Agrilus mali*)[38]雄虫在交配后飞行能力下降，而雌虫飞行能力则增强；香梨优斑螟(*Euzophera pyriella*)[39]和黄地老虎[40]的雌雄成虫在交配后飞行能力均下降；而白蜡窄吉丁(*Agrilus planipennis*)在交配后雌雄成虫的飞行能力均增强[41]。而在本研究中，交配对雌雄长林小蠹飞行能力的影响则与以上所述情况均不相符：已交配雄虫除了平均飞行速度增加得不显著外，其起飞次数、累计飞行距离、累计飞行时间和最大飞行速度均显著大于未交配雄虫，这可能和长林小蠹雄虫能与多个雌性进行多次交配[42]的特性有关，已交配雄虫飞行能力的提升将大大提高再次交配的成功率，有利于种群增长；相比之下，交配对长林小蠹雌虫飞行能力的影响就相对较小，已交配雌虫的累计飞行距离、平均飞行速度略高于未交配雌虫，而起飞次数、累计飞行时间和最大飞行速度反而有所下降，这表明已交配雌虫的飞行意愿和耐力开始下降，这可能和交配产卵后飞行肌细胞逐步裂解，能源物质向生殖活动倾斜有关[43]。

本研究调查了长林小蠹在林间的扬飞日节律。由于诱捕器和黑布的捕捉效率不同，可能影响夜间和日间诱捕结果的可比性；此外，黑布处理点未设重复，不同样点之间的捕捉效果是否一致尚待验证。该节律有可能具有季节性和区域性特征[44]，需要长时序观测有待进一步确认，影响日节律的外部环境因素和内部生物机理也有待系统性地探究。本研究在全黑暗无风的条件下用飞行磨探究了长林小蠹的飞行能力，明确了饥饿和交配对不同性别成虫飞行能力的影响，以短距离飞行为主的飞行模式表明长林小蠹的自然扩散需要长时序的累计，短时间内的远距离扩散可能主要依靠人为传播。但室内吊飞实际上忽略了其在自然条件下起飞对光强和风速的要求，而且长林小蠹在实际飞行扩散时会受到林间复杂环境的综合影响，室内吊飞的飞行参数并不能完全反映其在自然条件下的飞行能力，因此对其飞行能力的探究还有望进一步结合长林小蠹的生物生态学特性和行为习性，综合考虑光照、风速、温湿度等环境因素和日龄、体型大小等自身生理状态的影响。

参　考　文　献

[1] Hoebeke E R. *Hylurgus ligniperda*: a new exotic pine bark beetle in the United States[J]. Newsletter of the Michigan Entomological Society, 2001, 46(1−2): 1−2.

[2] 任利利, 陶静, 武海卫, 等. 重大害虫长林小蠹入侵我国的首次发现与侵染特征 [J]. 林业科学, 2021, 57(5): 140−150.
Ren L L, Tao J, Wu H W, et al. The first discovery and infective characteristics of a major invasive pest *Hylurgus ligniperda* (Coleoptera: Scolytidae) in China[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2021, 57(5): 140−150.

[3] Davydenko K, Vasaitis R, Meshkova V, et al. Fungi associated with the red-haired bark beetle, *Hylurgus ligniperda* (Coleoptera: Curculionidae) in the forest-steppe zone in eastern Ukraine[J]. European Journal of Entomology, 2014, 111(4): 561−565.

[4] Jankowiak R, Bilański P. Ophiostomatoid fungi associated with root-feeding bark beetles on Scots pine in Poland[J]. Forest Pathology, 2013, 43(5): 422−428.

[5] Reay S D, Thwaites J M, Farrell R L. Survey of Ophiostomataceae associated with *Hylurgus ligniperda* (Curculionidae: Scolytinae) in New Zealand[J]. New Zealand Entomologist, 2006, 29(1): 21−26.

[6] Kim S, Harrington T C, Li J C, et al. *Leptographium tereforme* sp. nov. and other Ophiostomatales isolated from the root-feeding bark beetle *Hylurgus ligniperda* in California[J]. Mycologia, 2011, 103(1): 152−163.

[7] Zhou X D, Beer Z D, Ahumada R, et al. *Ophiostoma* and *Ceratocystiopsis* spp. associated with two pine-infesting bark beetles in Chile[J]. Fungal Diversity, 2004, 15: 261−274.

[8] Zhou X D, Beer Z, Wingfield B D, et al. Ophiostomatoid fungi associated with three pine-infesting bark beetles in South Africa[J]. Sydowia, 2001, 53(2): 290−300.

[9] Mejri M, Fonseca L, Cardoso J M S, et al. *Bursaphelenchus tusciae* in Tunisia associated with *Hylurgus ligniperda*[J]. Forest

Pathology, 2016, 46(6): 663−665.

[10] Penas A C, Bravo M A, Naves P, et al. Species of *Bursaphelenchus* Fuchs, 1937 (Nematoda: Parasitaphelenchidae) and other nematode genera associated with insects from *Pinus pinaster* in Portugal[J]. Annals of Applied Biology, 2006, 148(2): 121−131.

[11] Torrini G, Paoli F, Mazza G, et al. First detection of *Bursaphelenchus abietinus* and *B. andrassyi* in Italy[J]. Forest Pathology, 2020, 50(5): e12627.

[12] 滕凯, 张卫东, 杜希豪, 等. 高度警惕长林小蠹随新西兰针叶原木入侵 [J]. 植物检疫, 2012, 26(1): 90.
Teng K, Zhang W D, Du X H, et al. High alert for *Hylurgus ligniperda* invasion with coniferous logs in New Zealand[J]. Plant Quarantine, 2012, 26(1): 90.

[13] Haack R A. Exotic bark- and wood-boring Coleoptera in the United States: recent establishments and interceptions[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2006, 36(2): 269−288.

[14] Lantschner V, Gomez D F, Vilardo G, et al. Distribution, invasion history, and ecology of non-native pine bark beetles (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) in southern South America[J]. Neotropical Entomology, 2024, 53(2): 351−363.

[15] Petrice T R, Haack R A, Poland T M. Evaluation of three trap types and five lures for monitoring *Hylurgus ligniperda* (Coleoptera: Scolytidae) and other local scolytids in New York[J]. The Great Lakes Entomologist, 2004, 37(1&2): 1.

[16] 李莎琳. 入侵种长林小蠹的寄主选择与信息素监测技术研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2023.
Li S L. Study on host selection and pheromone monitoring technology of invasive species *Hylurgus ligniperda* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2023.

[17] 杨晓军, 安榆林. 进口辐射松原木截获长林小蠹的检疫鉴定 [J]. 植物检疫, 2002(5): 288−289.
Yang X J, An Y L. Quarantine identification of *Hylurgus ligniperda* intercepted in imported radiata pine logs[J]. Plant Quarantine, 2002(5): 288−289.

[18] Bain J. *Hylurgus ligniperda* (Fabricius) (Coleoptera: Scolytidae); *Pachycotes peregrinus* (Chapuis) (Coleoptera: Scolytidae)[J]. Forest and Timber Insects in New Zealand, 1977(18): 7.

[19] Chase K D, Kelly D, Liebhold A M, et al. Long-distance dispersal of non-native pine bark beetles from host resources[J]. Ecological Entomology, 2017, 42(2): 173−183.

[20] Mausel D L, Gara R I, Lanfranco D, et al. The introduced bark beetles *Hylurgus ligniperda* and *Hylastes ater* (Coleoptera: Scolytidae) in Chile: seasonal flight and effect of *Pinus radiata* log placement on colonization[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2007, 37(1): 156−169.

[21] 任利利, 骆有庆, 武海卫, 等. 一种长林小蠹成虫植物源引诱剂及其应用: CN202110839177.0[P]. 2023−03−31.
Ren L L, Luo Y Q, Wu H W, et al. A plant-derived attractant for adult *Hylurgus ligniperda* and its application: CN202110839177.0[P]. 2023−03−31.

[22] Bedoya C L, Brockerhoff E G, Hayes M, et al. Acoustic communication of the red-haired bark beetle *Hylurgus ligniperda*[J]. Physiological Entomology, 2019, 44(3−4): 252−265.

[23] Kerr J L, Kelly D, Bader M K F, et al. Olfactory cues, visual cues, and semiochemical diversity interact during host location by invasive forest beetles[J]. Journal of Chemical Ecology, 2017, 43: 17−25.

[24] Daterman G E, Rudinsky J A, Nagel W P. Flight patterns of bark and timber beetles associated with coniferous forests of western Oregon[R]. Corvallis: Oregon State University, 1965.

[25] Fettig C J, Shea P J, Borys R R. Diurnal flight pattern of *Dendroctonus brevicomis* LeConte (Coleoptera: Scolytidae) in northern California[J]. Journal of Entomological Science, 2004, 39(3): 453−456.

[26] Yigen C, Seybold S J, Dickens J C. Crepuscular flight activity of an invasive insect governed by interacting abiotic factors[J]. PLoS One, 2014, 9(8): e105945.

[27] Pawson S M, Marcot B G, Woodberry O G. Predicting forest insect flight activity: a Bayesian network approach[J]. PLoS One, 2017, 12(9): e183464.

[28] Clare G K, George E M. Life cycle and mass-rearing of *Hylurgus ligniperda* using a novel egg-collection method[J]. New Zealand Plant Protection, 2016, 69: 143−152.

[29] Faccoli M, Gallego D, Branco M, et al. A first worldwide multispecies survey of invasive Mediterranean pine bark beetles (Coleoptera: Curculionidae, Scolytinae)[J]. Biological Invasions, 2020, 22: 1785−1799.

[30] Reay S D, Walsh P J. Observations of the flight activity of *Hylastes ater* and *Hylurgus ligniperda* (Curculionidae: Scolytinae) in *Pinus radiata* forests in the central North Island, New Zealand[J]. New Zealand Entomologist, 2001, 24(1): 79−85.

[31] Lambert M R K. Observations on the laboratory take-off behaviour of the desert locust, *Schistocerca gregaria* (Orthoptera: Acrididae)[J]. Bulletin of Entomological Research, 1981, 71(3): 481−482.

[32] 郭文超, 吐尔逊, 郭利娜, 等. 营养对马铃薯甲虫迁飞能力的影响 [J]. 新疆农业科学, 2012, 49(3): 461−469.
Guo W C, Tu E X, Guo L N, et al. Effects of different nutrients on flight capacity in Colorado potato beetles[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2012, 49(3): 461−469.

[33] Jaumann S, Snell-Rood E C. Adult nutritional stress decreases oviposition choosiness and fecundity in female butterflies[J]. Behavioral Ecology, 2019, 30(3): 852−863.

[34] Saastamoinen M, Dominique V D S, Vastenhout N, et al. Predictive adaptive responses: condition-dependent impact of adult nutrition and flight in the tropical butterfly *Bicyclus anynana*[J]. American Naturalist, 2010, 176(6): 686−698.

[35] Boggs C L, Niitepõld K. Effects of larval dietary restriction on adult morphology, with implications for flight and life history[J]. Entomologia Experimentalis et Applicata, 2016, 159(2): 189−196.

[36] Guo J W, Cui Y, Lin P J, et al. Male nutritional status does not impact the reproductive potential of female *Cnaphalocrocis*

medinalis moths under conditions of nutrient shortage[J]. Insect Science, 2022, 29(2): 467−477.

[37] 侯国辉, 崔笑雄, 朱悦, 等. 金纹细蛾飞行能力测定 [J]. 昆虫学报, 2022, 65(5): 612−620.
Hou G H, Cui X X, Zhu Y, et al. Determination of the flight capacity of *Lithocolletis ringoniella* (Lepidoptera: Gracillaridae)[J]. Acta Entomologica Sinica, 2022, 65(5): 612−620.

[38] 马志龙, 彭彬, 卡德艳·卡德尔, 等. 取食和交配对苹小吉丁飞行能力的影响 [J]. 昆虫学报, 2020, 63(8): 992−998.
Ma Z L, Peng B, Caddey K, et al. Effects of feeding and mating on the flight capacity of *Agrilus mali* (Coleoptera: Buprestidae)[J]. Acta Entomologica Sinica, 2020, 63(8): 992−998.

[39] 崔笑雄, 麻正辉, 熊仁次, 等. 香梨优斑螟飞行能力的研究 [J]. 环境昆虫学报, 2020, 42(5): 1223−1229.
Cui X X, Ma Z H, Xiong R C, et al. A study on the flight ability of *Euzophera pyriella* Yang[J]. Journal of Environmental Entomology, 2020, 42(5): 1223−1229.

[40] 郭江龙, 付晓伟, 赵新成, 等. 黄地老虎飞行能力研究 [J]. 环境昆虫学报, 2016, 38(5): 888−895.
Guo J L, Fu X W, Zhao X C, et al. Preliminary study on the flight capacity of *Agrotis segetum* (Lepidoptera: Noctuidae)[J]. Journal of Environmental Entomology, 2016, 38(5): 888−895.

[41] 王辉, 许志春, Wang Baode, 等. 花曲柳窄吉丁潜在飞行能力初步研究 [J]. 北京林业大学学报, 2015, 37(1): 92−97.
Wang H, Xu Z C, Wang B D, et al. Potential flight capability of the emerald ash borer, *Agrilus planipennis* Fairmaire (Coleoptera: Buprestidae)[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2015, 37(1): 92−97.

[42] Sapkota S. Acoustic communication and behaviour of the golden haired pine bark beetle, *Hylurgus ligniperda* (Coleoptera: Curculionidae) [D]. Palmerston North: Massey University, 2017.

[43] Hanski I, Saastamoinen M, Ovaskainen O. Dispersal-related life-history trade-offs in a butterfly metapopulation[J]. Journal of Animal Ecology, 2006, 75(1): 91−100.

[44] Mendel Z, Boneh O, Shenhar Y, et al. Diurnal flight patterns of *Orthotomicus erosus* and *Pityogenes calcaratus* in Israel[J]. Phytoparasitica, 1991, 19: 23−31.

（责任编辑　范　娟
责任编委　宗世祥）