

红树榄李害虫——木麻黄胸枯叶蛾 *Streblote castanea* 的形态学特征及 幼虫龄期快速鉴定*

王和旺^{1,2**} 王伟¹ 郭福莹¹ 李诗缘¹ 朱慧婷¹
周璇¹ 王星^{1***} 黄国华²

(1. 琼台师范学院, 热带生物多样性与资源利用实验室, 海口 571127;

2. 湖南农业大学植物保护学院, 植物病虫害生物学与防控湖南省重点实验室, 长沙 410128)

摘要 【目的】本研究旨在建立红树植物榄李的重要害虫——木麻黄胸枯叶蛾 *Streblote castanea* 各虫态外部形态精准、高效的鉴定方法, 并构建基于头壳宽度的幼虫龄期判别体系, 以为该害虫的快速识别、发生动态与危害程度监测、发生规律探究、预测预报及防治策略制定提供科学依据。【方法】采用肉眼观察与高清数码摄影相结合的方法, 系统观察并记录木麻黄胸枯叶蛾各虫态(卵、幼虫、蛹、成虫)的外部形态特征; 使用游标卡尺测量各龄期幼虫的头壳宽度, 并运用频次分布分析、Dyar 法则、Brooks 指数和 Crosby 指数及回归分析等多种统计方法, 对幼虫头壳宽度数据进行分析。【结果】木麻黄胸枯叶蛾卵呈宽椭圆形, 表面光滑且具深褐色斑纹。1 龄幼虫头壳深黑色且具光泽, 中、后胸背部橙黄色; 2 龄幼虫与 3 龄幼虫形态相似, 头壳被有灰色绒毛; 4 龄幼虫体呈白色、灰色和红褐色等颜色分化; 5 龄幼虫形态与 4 龄幼虫相似; 6 龄幼虫腹部背板具“V”形深色斑纹。蛹外被黑褐色刺毛茧。雌性成虫体型大于雄性。尽管 5 龄幼虫头壳宽度变化不符合 Crosby 生长法则, 但其相邻龄期之间的头壳宽度差异均达到显著水平 ($P < 0.05$), 且头壳宽度与龄期之间具有较高的相关性 ($R^2 = 0.9582$), 综合头壳宽度骨化程度高、变幅分界明显、变异系数小等特征, 表明头壳宽度可作为木麻黄胸枯叶蛾幼虫龄期快速判别的可靠指标(1 龄约为 0.97 mm, 2 龄约为 1.55 mm, 3 龄约为 2.32 mm, 4 龄约为 3.39 mm, 5 龄约为 4.35 mm, 6 龄约为 5.39 mm)。【结论】基于上述各虫态外部形态学特征, 可在野外实现对木麻黄胸枯叶蛾的快速准确鉴定; 结合幼虫头壳宽度测量数据, 可高效、精准判别幼虫龄期。本研究为木麻黄胸枯叶蛾的实时监测、发生期预测及针对性防治措施的制定提供了重要的基础数据与技术支持。

关键词 木麻黄胸枯叶蛾; 外部形态; Dyar 法则; Crosby 生长法则; 快速鉴定

Morphological characteristics of *Streblote castanea*, a pest of mangrove *Lumnitzera littorea*, and rapid identification of its larval instars

WANG He-Wang^{1,2**} WANG Wei¹ GUO Fu-Ying¹ LI Shi-Yuan¹ ZHU Hui-Ting¹
ZHOU Xuan¹ WANG Xing^{1***} HUANG Guo-Hua²

(1. Tropical Biodiversity and Bioresource Utilization Laboratory, Qiongtai Normal University, Haikou 571127, China;

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Biology and Control of Plant Diseases and Insect Pests, College of Plant Protection, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

*资助项目 Supported projects: 国家自然科学基金(32360134); 琼台师范学院校级重点课题(qtky202402); 琼台师范学院校级名师工作室项目(qtjg2024-15); 琼台师范学院热带生物多样性与资源利用实验室项目(QTP21-5)

**第一作者 First author, E-mail: 2787998634@qq.com

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

收稿日期 Received: 2025-02-08; 接受日期 Accepted: 2025-08-31

Abstract [Aim] This study aims to establish accurate and efficient methods for identifying the external morphologic characteristics of all life stages of *Streblote castanea*, a pest of the mangrove plant *Lumnitzera littorea*, and to develop a larval instar determination system based on head capsule width. The findings are expected to provide a scientific basis for rapid pest identification, monitoring of infestation dynamics and damage severity, investigation of occurrence patterns prediction of occurrence trends, and development of control strategies. [Methods] The external morphological features of each life stage (egg, larva, pupa, and adult) of *S. castanea* were systematically observed and recorded using visual inspection combined with high-definition digital photography. The head capsule width of larvae at each instar was measured with a vernier caliper. Multiple statistical methods, including frequency distribution analysis, Dyar's rule, Brooks' index, Crosby's index, and regression analysis, were applied to analyze the larval head capsule width data. [Results] The eggs are broadly oval with a smooth surface and dark brown patches. 1st-instar larvae possess a deep black, glossy head capsule and an orange-yellow dorsum on the mesothorax and metathorax. 2nd- and 3rd-instar larvae are morphologically similar, with head capsules covered by gray pubescence. 4th-instar larvae exhibit color differentiation, appearing in white, gray, and reddish-brown. 5th-instar larvae are generally similar in shape to fourth-instar larvae. 6th-instar larvae are distinguished by a dark "V"-shaped marking on the abdominal tergites. The pupae are encased in a cocoon covered with dark brown setae. Female adults are larger than males. Despite not conforming to Crosby's growth rule, the head capsule width of 5th-instar larvae exhibited significant differences between adjacent instars ($P < 0.05$) and a high coefficient of determination ($R^2 = 0.958\ 2$). Combined with its strong sclerotization, distinct size variation boundaries, and low coefficient of variation, head capsule width serves as a reliable indicator for rapid larval instar discrimination. (1st instar: approximately 0.97 mm; 2nd instar: approximately 1.55 mm; 3rd instar: approximately 2.32 mm; 4th instar: approximately 3.39 mm; 5th instar: approximately 4.35 mm; 6th instar: approximately 5.39 mm). [Conclusion] The external morphological characteristics described herein allow for rapid and accurate field identification of *S. castanea* at different life stages. Moreover, larval head capsule width measurements enable efficient and precise instar determination. This study provides essential baseline data and technical support for real-time monitoring, prediction of occurrence periods, and the development of targeted control measures against this pest.

Key words *Streblote castanea*; external morphology; Dyar's rule; Crosby's growth law; rapid identification

红树林是具有重要生态与经济价值的海岸植被,作为热带和亚热带潮间带特有的蓝碳生态系统,其单位面积固碳能力约为同面积热带雨林的 50 倍 (Sandilyan and Kathiresan, 2012),因而在碳源汇研究中备受关注 (Qin *et al.*, 2021)。同时,其对周边生态系统的稳定与功能起关键作用。从生态角度看,红树林的破坏会显著增加碳排放,加剧全球变暖,导致海啸威胁增加。在经济方面,红树林不仅提供木材等资源,还是众多生物的栖息地 (Friess, 2016),全球年生态价值估计达 1 800 亿美元 (Costanza *et al.*, 1998)。然而,自 20 世纪 50 年代以来,我国红树林面积经历了先减少后缓慢恢复的过程 (林天维等, 2020)。榄李 *Lumnitzera racemosa* 作为红树林主要造林树种之一,天然更新能力弱、恢复难度大 (Rangkuti *et al.*, 2024),其可持续保育面临严峻挑战。

木麻黄胸枯叶蛾 *Streblote castanea* 是危害榄

李的一种重要害虫。其幼虫食叶量大,具暴食性;体色与榄李枝干相近、隐蔽性高,具有较强的迁移和活动能力。老熟幼虫在树干等处结茧,蛹期较短。成虫繁殖力强、产卵量高。国外分布于印度、斯里兰卡和菲律宾等地,国内主要发生在海南 (刘友樵和武春生, 2006; Prozorov *et al.*, 2022)。其发生常导致榄李大面积受害,破坏红树林生态结构与功能。目前,针对该虫的研究较为有限,尤其是缺乏适用于现场实践的害虫速诊断与龄期鉴定技术。

本研究以木麻黄胸枯叶蛾为研究对象,通过人工饲养观察构建全虫态形态鉴定方法;运用 Dyar 法则、频次分布、Brooks 指数、Crosby 指数以及回归分析等多种统计分析方法,对幼虫头壳宽度等形态指标进行系统处理,确定最佳分龄指标及龄数,建立一套科学、准确且便于实操的幼虫龄期快速鉴定技术。研究成果将助力该害虫的种群监测、预测预报及红树林保护修复,对维

护红树林生态系统稳定性具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 供试虫源与寄主植物

1.1.1 供试虫源 木麻黄胸枯叶蛾采自海南省三亚市铁炉港红树林自然保护区(18°15'-18°17'N, 109°42'-109°44'E), 室内饲养繁殖。

1.1.2 寄主 榄李树苗购自海南考斯特红树林研究有限公司, 种植于琼台师范学院野生动植物资源保护与利用中心试验田。

1.2 实验方法

1.2.1 试虫饲养 将野外采集的木麻黄胸枯叶蛾蚬置于规格为 80 目, 尺寸为 45 cm×45 cm×45 cm 的养虫笼中, 于 28 °C 环境条件下等待成虫羽化。于羽化后 24 h 内, 随机选取个体配对。自然交配产卵, 及时收集所产卵块。

卵、幼虫、蛹和成虫各阶段的饲养方法如下: 将卵置于迅能 AS-R600L2 人工气候培养箱(迅能仪器(北京)有限公司)中, 设定温度为 28 °C, 相对湿度 65%, 光周期为 12 L : 12 D。待卵孵化后, 一部分幼虫继续饲养于上述条件一致的人工气候箱中; 另一部分幼虫则转移至室外自然环境下的榄李植株上进行饲养。所有幼虫均以新鲜的榄李叶片持续饲喂, 直至化蛹。蛹及成虫的饲养条件与幼虫饲养条件保持一致。

1.2.2 外部形态观察及幼虫龄期划分 于卵孵化当日选取 25 头 1 日龄幼虫, 以其头壳宽度作为初始参照指标。将初孵幼虫单头饲养于规格为 15 cm×15 cm×15 cm 的养虫笼中。每日从饲养群体中随机抽取 10-15 头幼虫, 进行详细的形态学观察; 并使用 SK-94150 电子游标卡尺(精度约为±0.02)精准测量新蜕皮幼虫的头壳宽度; 依据 Dyar 法则(Chapman, 1998; 彩万志等, 2011)鉴定虫龄。详实记录数据至幼虫化蛹。化蛹后, 每日观察蛹体颜色变化, 并跟踪至成虫羽化及产卵完毕, 完整记录其生活史关键特征。为系统记录各龄期幼虫外部形态, 采用 Canon EOS 5D Mark IV 相机搭配 Canon RF100 mm F2.8 L MACRO IS USM 微距镜头, 对不同龄期的幼虫

进行多角度高清拍摄, 确保形态特征完整、清晰存档。

为进一步验证龄期划分标准的可靠性与准确性, 另设验证实验: 选取 24 h 内同期孵化的幼虫 60 头, 单头按上述条件饲养。每日早、中、晚 3 个固定时间点(9:00、12:00 和 21:00)观察幼虫的蜕皮情况, 以此交叉验证虫龄划分的科学性与准确性。

1.2.3 外生殖器解剖 取木麻黄胸枯叶蛾成虫腹部, 置于 10%浓度的 NaOH 溶液中沸水浴 5 min, 取出用 70%乙醇冲洗数次, 清理干净后, 置于载玻片上, 滴入丙三醇, 制作雌雄外生殖器的临时玻片, 使用徕卡 S8 APO 体视显微镜(德国徕卡显微系统公司生产)进行观察并拍照。

1.3 数据分析

采用 Excel 2021 软件和 WPS Office 2024 进行数据处理与分析。为准确判定幼虫龄期, 依据 Dyar 法则、Brooks 指数(1)和 Crosby 指数(2), 对头壳宽度数据进行系统评估, 并建立头壳宽度与幼虫龄数之间的回归模型。

基于头壳宽度的频次分布初步划分幼虫龄期。采用单因素方差分析(One-way ANOVA)检验各龄期头壳宽度均值的差异性。若 ANOVA 检验结果显著($P < 0.05$), 则进一步使用 Duncan 氏多重比较检验进行龄间差异分析, 以验证龄期划分的有效性。通过上述分析, 最终确立基于头壳宽度的木麻黄胸枯叶蛾幼虫龄期划分标准。

$$(1) \text{ Brooks 指数 } G_n = \frac{x_n}{X_{n-1}};$$

$$(2) \text{ Crosby 指数公式 } C_n = \frac{G_n - G_{n-1}}{G_{n-1}}。$$

式中 G_n 为生长率(Growth rate), 即 Brooks 指数。 x_n 和 X_{n-1} 为相邻两个龄期幼虫分龄指标的平均值。 C_n 为 Crosby 指数, G_n 和 G_{n-1} 为相邻两个龄期幼虫的生长率。

2 结果与分析

2.1 木麻黄胸枯叶蛾形态学特征

成虫: 雌雄二型。雄性体型小于雌性, 翅展

为 (34.39 ± 2.97) mm, 体长为 (22.58 ± 1.69) mm。体色红褐色, 触角双栉齿形, 后缘栉齿明显长于前缘, 末端纤细。胸部背板中部有一大椭圆状褐色斑, 周边饰有白色纹路。前、后翅均为红褐色, 基部色深, 外缘区半透明; 后翅外缘内凹。腹部较瘦小, 被白色绒毛, 末端具黑色毛丛 (图 1: A)。雌性翅展为 (67.51 ± 6.49) mm, 体长为 (28.3 ± 3.3) mm。整体体色呈现乳白色, 触角羽状。头、胸部均呈白色, 胸部背板两侧具有独特的盾形斑块。前翅浅褐色, 肩角处有一点状白斑, 外缘约 1/3 处有一条与翅外缘平行的白线; 后翅白色, 基部颜色较深 (图 1: B)。静止时, 两翅合拢成屋脊状 (图 1: C)。

本研究发现一例雌雄嵌合体, 成虫体型介于

雌雄之间, 腹部同雌虫相似, 较为肥大。身体左侧呈典型雄性特征, 触角双栉齿形, 前后翅翅形窄小, 红褐色; 右侧则呈雌性特征, 触角羽状, 前后翅比较宽大, 前翅呈褐色, 后翅白色 (图 1: D)。

外生殖器: 雄性外生殖器背兜狭长, 爪形突三角形, 具一对纽状鞘; 抱器端延长呈指状, “C”形, 顶部稍弯曲; 抱器腹短小, 瘤状, 先端尖 (图 2: A); 阳具短剑状, 末端锐利 (图 2: C)。雌性外生殖器肛瓣延长, 密被乳状突; 后表皮突略短于前表皮突; 阴道前瓣为硬化盾状结构, 外侧具立方臂状沟槽, 内侧于瓣基顶端处有一凹陷; 囊导管短, 有皱褶; 交配囊球形, 中等大小, 背面着生微小囊突 (图 2: B)。

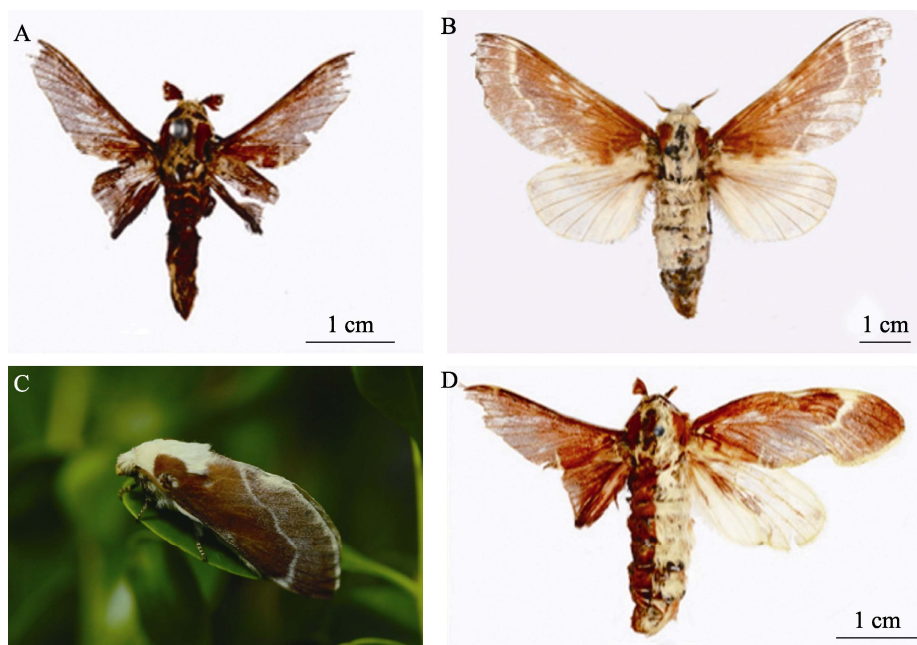


图 1 木麻黄胸枯叶蛾成虫

Fig. 1 Adult of *Streblote castanea*

A. 雄性; B. 雌性; C. 生态照; D. 雌雄嵌合体。

A. Male; B. Female; C. Ecological photo; D. Hermaphrodite.

卵: 单粒卵长约 2.32 mm, 宽约 1.88 mm。宽椭圆形, 白色, 表面分布有不规则的深褐色斑块。表面附着有透明黏液, 黏液凝固后, 可使卵粒与其他卵粒或固体表面相互粘连, 有时会形成大小各异的卵块 (图 3: A)。

1 龄幼虫: 初孵的 1 龄幼虫, 头壳呈深黑色

且具明显光泽; 前胸黑色, 中后胸背部为橙黄色。腹部各节背部的橙黄色区域面积较为狭小, 仅集中于上方毛簇基部周围 (图 3: B)。各龄幼虫趾钩为单序, 呈中带式排列, 趾钩近乎等长, 于腹足腹面末端紧密排列成一个连续且无中断的弧形带 (图 4: A, B)。

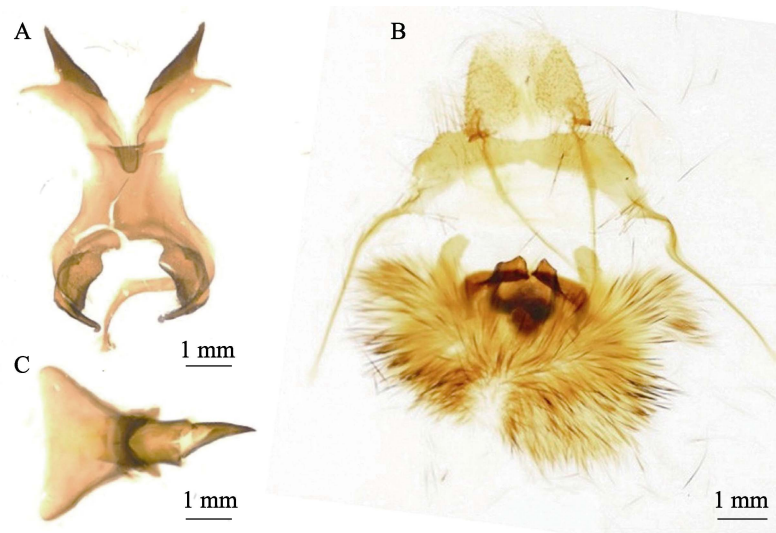


图 2 木麻黄胸枯叶蛾雌雄外生殖器

Fig. 2 The genitalia of *Streblote castanea*

A. 雄性 (不含阴茎); B. 雌性; C. 阴茎。A. Male (no aedeagus); B. Female; C. Aedeagus.

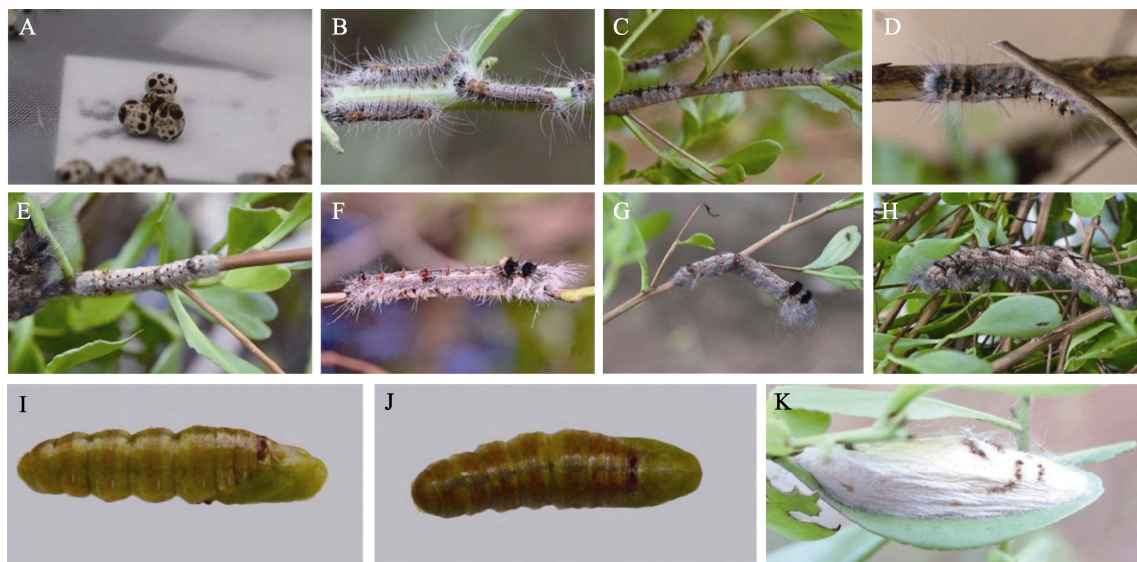


图 3 木麻黄胸枯叶蛾的卵、幼虫、蛹和茧

Fig. 3 Eggs, larva, pupa, and cocoon of *Streblote castanea*

A. 卵; B. 1 龄幼虫; C. 2 龄幼虫; D. 3 龄幼虫; E. 4 龄幼虫 (白色); F. 4 龄幼虫 (灰色);
G. 5 龄幼虫; H. 6 龄幼虫 (灰色); I. 蛹初始; J. 蛹后期; K. 茧。

A. Eggs; B. 1st instar larva; C. 2nd instar larva; D. 3rd instar larva; E. 4th instar larva (white); F. 4th instar larva (gray);
G. 5th instar larva (reddish brown); H. 6th instar larva (gray); I. Pupa beginning; J. Pupa anaphase; K. Cocoon.

2 龄幼虫: 进入 2 龄后, 幼虫头壳开始出现灰色绒毛, 这是一个明显的形态变化。中胸背板出现单个蓝色斑点, 刺毛数量相较于 1 龄幼虫显著增多。此外, 背部毛簇基部周围的颜色由橙黄色转变为红色 (图 3: C)。

3 龄幼虫: 幼虫的取食能力显著增强, 进入暴食期, 食量增大, 且主要在夜间取食。3 龄幼虫与 2 龄幼虫相比, 除体型明显增大、背板黑色刺毛明显增多外, 在整体形态上差异不显著 (图 3: D)。

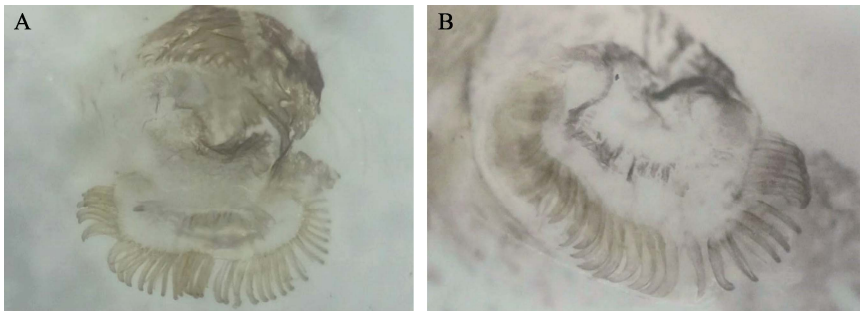


图 4 木麻黄胸枯叶蛾幼虫腹足趾钩的序及其排列
Fig. 4 Pattern and arrangement of proleg crochets in the larvae of *Streblote castanea*

A. 个体 1; B. 个体 2。 A. Individual 1; B. Individual 2.

4 龄幼虫: 幼虫出现明显的颜色分化现象, 包含白色、灰色以及红褐色等多种色型 (图 3: E, F)。

5 龄幼虫: 相较于 4 龄幼虫, 5 龄幼虫除了体型进一步增大外, 在外部形态上未有其他显著变化 (图 3: G)。

6 龄幼虫: 幼虫腹部背板具” V “形深色斑纹 (图 3: H)。

蛹 (图 3: I, J): 为被蛹。在蛹化初始, 蛹体呈青绿色, 质地相对柔软。随时间推移, 蛹体硬度逐渐增加, 颜色由青绿色转变为棕褐色。蛹的头顶密被黄色细小绒毛。胸部中央有一条清晰

可见的蜕裂线, 该线条周围分布少量细小绒毛, 整体形状类似于盾牌。蛹体共有 7 个气门。腹部的各节都被黄色的细小绒毛环绕。蛹体外包裹一层白色的茧 (图 3: K), 茧表面布满了黑褐色的刺毛。

2.2 幼虫龄期快速鉴定

2.2.1 龄期划分 为保障数据分组的合理性和有效性, 分析以 0.30 mm 为组距, 将测量数据按照头壳宽度从小到大整理为频次分布表。各龄幼虫样本量如下: 1 龄 55 头, 2 龄 105 头, 3 龄 103 头, 4 龄 103 头, 5 龄 110 头, 6 龄 127 头 (表 1)。

表 1 木麻黄胸枯叶蛾幼虫分龄的头壳宽度指标测量值结果
Table 1 Measurement results of head capsule width index for larval instar division of *Streblote castanea*

龄期 Instar	样本数 Number of samples	头壳宽度 (均值±SE) (mm) Head capsule width (mean±SE) (mm)	变幅 Range	变异系数 Variation coefficient	Brooks 指数 Brooks index	Crosby 指数 Crosby index
1	55	0.97±0.001 a	0.83-1.09	0.06		
2	105	1.55±0.001 b	1.21-1.87	0.07	1.60	
3	103	2.32±0.002 c	2.03-2.78	0.08	1.49	- 0.07
4	103	3.39±0.002 d	3.00-3.88	0.06	1.46	- 0.02
5	110	4.35±0.002 e	4.03-4.86	0.06	1.28	- 0.12
6	127	5.39±0.002 f	5.02-5.96	0.04	1.24	- 0.03

表中数据为平均值±标准误, 同列数据后不同小写字母表示在 $P<0.05$ 水平差异显著 (Duncan 氏检验)。
Data in the table are mean±SE, and followed by the different letters within a column indicate significant difference at 0.05 level (Duncan’s test).

同时, 根据上述频次分布数据绘制了相应的直方图 (图 5)。分析结果显示, 幼虫头壳宽度呈现出 6 个高峰区 (0.75-1.05、1.35-1.65、

2.25-2.55、3.15-3.45、4.05-4.35、4.95-5.25), 分别对应 1-6 龄幼虫; 其中 1、2、4 和 5 龄幼虫的头壳宽度分布集中, 峰值显著, 区间界限清晰;

而 3 龄和 6 龄的头壳宽度频次分布较为分散, 峰值不明显。

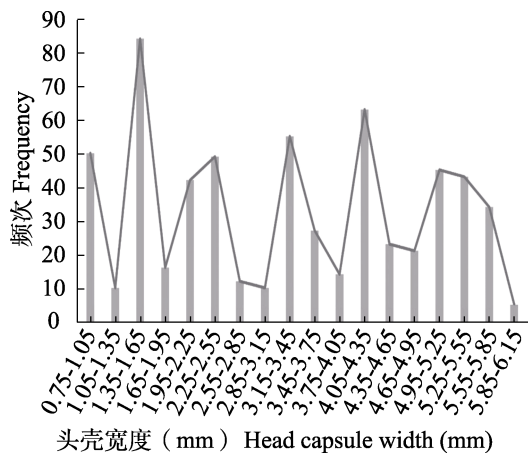


图 5 木麻黄胸枯叶蛾幼虫头壳宽度频次分布图
Fig. 5 Frequency distribution of the head capsule width of *Streblote castanea* larvae

为进一步验证龄期划分的合理性, 依据木麻黄胸枯叶蛾幼虫的头壳宽度, 分别运用 Dyar 法则、Brooks 指数和 Crosby 指数进行检验, 并将计算结果整理成表格 (表 1)。结果显示, 各龄期间头壳宽度生长比介于 1.24-1.60 之间; Crosby 指数绝对值存在大于 10% 的情况, 不符合统计要求。尽管如此, 头壳宽度因骨化程度高、变幅分界明显、变异系数较小, 且与龄数的线性拟合的决定系数最大, 仍显示出良好的分龄适用性。综合多项指标间的内在联系及昆虫生长发育基本规律, 将木麻黄胸枯叶蛾幼虫划分为 6 个龄期合理, 符合该物种生物学特性。这种划分方式不仅有助于明晰其生长发育过程, 也为后续发育进度预测与精准防治实践提供理论基础。

2.2.2 木麻黄胸枯叶蛾幼虫头壳宽度与龄数的关系拟合 对不同龄期幼虫的头壳宽度与龄数进行回归分析 (图 6)。拟合得到指数回归方程为 $y = 0.8025e^{0.3322x}$, 决定系数 $R^2 = 0.9582$ 。统计学上, R^2 值接近 1, 表明幼虫头壳宽度与龄期之间存在显著的指数正相关关系, 即随幼虫龄期增加, 头壳宽度呈明显的指数增长趋势, 且模型拟合优度较高。上述分析结果支持头壳宽度作为该幼虫龄期划分指标, 该指标为准确判定木麻黄胸枯叶蛾幼虫龄期、解析生长发育规律提供了可靠的量化依据。

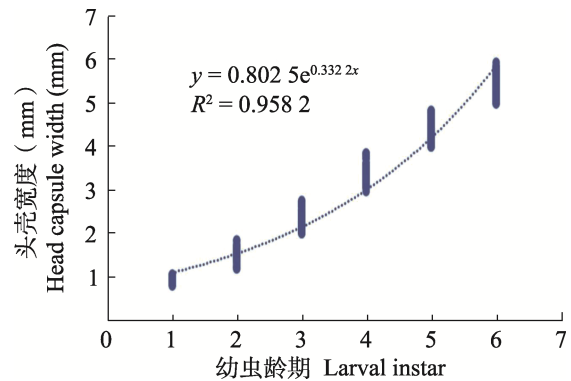


图 6 木麻黄胸枯叶蛾幼虫头壳宽度与龄期的回归关系
Fig. 6 Regressive relationship between the head capsule width and the larval of *Streblote castanea*

3 讨论

在红树林生态保护中, 木麻黄胸枯叶蛾因传播快、成灾风险高, 严重威胁生态系统稳定。目前针对该害虫的研究资料稀缺且滞后, 鉴定技术不足, 制约了有效防控。

在昆虫分类与植物保护学科领域, 形态特征鉴定是物种辨识的基础方法。本研究系统描述了木麻黄胸枯叶蛾各虫态的形态特征。其卵呈宽椭圆形, 白色卵壳具深褐色斑块, 卵块结构显示出对环境的适应策略, 有助于抵御外界干扰, 保障种群繁衍起始阶段的稳定性。幼虫期形态条纹变化多样, 这些特征很可能是其对复杂生态环境的适应性表现, 受遗传、环境及营养等多元因素协同调控, 在躲避天敌、资源利用等方面发挥作用 (Tong *et al.*, 2021)。蛹茧具刺毛与绒毛等结构, 可能兼具防御与调节功能; 成虫雌雄二型现象显著, 形态特征与生殖、求偶与栖息行为密切相关。

本研究记录到一例雌雄嵌合体成虫, 虽发生频率极低, 属偶发性事件, 但其为该物种发育稳定性与遗传调控机制的研究提供了特殊案例。该现象可能源于胚胎发育过程中的遗传或环境扰动, 是发育可塑性的一种极端表现。深入分析此类现象有助于揭示其种群遗传结构与变异机制, 对评估适应性进化趋势和种群暴发风险具有参考价值, 也可作为防控策略的制定提供依据。

尽管凭借卵、茧与成虫的显著形态特征可初步识别木麻黄胸枯叶蛾, 但幼虫因形态相似性与表型可塑性较强, 龄期鉴定仍存在困难。在昆虫

学研究中,上颚长度、体色、体长等指标常被用作龄期划分的辅助依据(王芳等,2016;张桂芬等,2023;信晓萌等,2024),但头壳宽度仍被认为是鳞翅目幼虫分龄最可靠的特征(Loerch and Cameron, 1983)。张祖兵等(2020)综合头壳宽度、体长和体宽,成功将赤斑白条天牛幼虫 *Batocera rufomaculata* 划分为 6 龄。杨眉等(2022)也证实头壳宽度是二化螟幼虫 *Chilo suppressalis* 分龄的最佳指标。本研究基于头壳宽度频次分布和 Dyar 法则,将木麻黄胸枯叶蛾幼虫划分为 6 龄。头壳宽度随龄期增加呈指数增长,拟合优度高($R^2 = 0.9582$),各龄期之间宽度无重叠,表明显著的间断性生长模式,为该虫幼虫龄期的田间快速鉴定提供了理论依据。

本研究在特定环境下建立,尚未涉特殊温湿度与营养条件对幼虫头壳发育的影响。鉴于自然环境复杂多变,后续需进一步验证该指标在不同环境下的稳定性,从而更全面掌握该害虫的生物学特性,支持防治实践中的精准龄期判别。综上所述,本研究系统完善了木麻黄胸枯叶蛾形态特征以及头壳宽度判定龄期体系。在理论上深化昆虫-红树林生态互作理解,在实践中提供实用鉴定方法,为后续该害虫种群动态监测、生态适应性研究及防治技术优化提供了基础支撑。

参考文献 (References)

- Cai WZ, Pang XF, Hua BZ, Liang GW, Song DL, 2011. General Entomology (2nd ed.). Beijing: China Agricultural University Press. 254–255. [彩万志, 庞雄飞, 花保祯, 梁广文, 宋敦伦, 2011. 普通昆虫学 (第 2 版). 北京: 中国农业大学出版社. 254–255.]
- Chapman RF, 1998. The Insects: Structure and Function. Cambridge: Cambridge University Press. 403–410.
- Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill RV, Paruelo J, Raskin RG, Sutton P, van den Belt M, 1998. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 25(1): 253–260.
- Friess DA, 2016. Mangrove forests. *Current Biology*, 26(16): R746–R748.
- Lin TW, Chai QZ, Sun ZJ, Yan ZY, Sun B, 2020. Changes in the area of mangrove forests in China and their management. *Ocean Development and Management*, 37(2): 48–52. [林天维, 柴清志, 孙子钧, 严志宇, 孙冰, 2020. 我国红树林的面积变化及其治理. 海洋开发与管理, 37(2): 48–52.]
- Liu YQ, Wu CS, 2006. Zoology of China, Insects, Volume 47, Lepidoptera, Lasiocampidae. Beijing: Science Publishing House. 385. [刘友樵, 武春生. 2006. 中国动物志, 昆虫纲, 第四十七卷, 鳞翅目, 枯叶蛾科. 北京: 科学出版社. 385.]
- Loerch CR, Cameron EA, 1983. Determination of larval instars of the bronze birch borer, *Agrilus anxius* (Coleoptera: Buprestidae). *Annals of the Entomological Society of America*, 76(6): 948–952.
- Prozorov AM, Prozorova TA, Spitsyn VM, Spitsyna EA, Volkova JS, Yakovlev RV, Meier J, Saldaitis A, Revay EE, Müller GC, 2022. Notes on *Streblote* (Lepidoptera, Lasiocampidae, Lasiocampinae) from the Malay Archipelago with two new species description. *Ecologica Montenegrina*, 58: 14–28.
- Qin ZC, Deng X, Griscom B, Huang Y, Li TT, Smith P, Yuan WP, Zhang W, 2021. Natural climate solutions for China: The last mile to carbon neutrality. *Advances in Atmospheric Sciences*, 38(6): 889–895.
- Rangkuti AB, Basyuni M, Elfiati D, Susetya IE, Hutagaol F, Rangkuti RR, 2024. Analysis of mangrove vegetation on Mursala Island. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1352(1): 012080.
- Sandilyan S, Kathiresan K, 2012. Mangrove conservation: A global perspective. *Biodiversity and Conservation*, 21(14): 3523–3542.
- Tong XL, Qiao L, Luo JW, Ding Xin, Wu SY, 2021. The evolution and genetics of lepidopteran egg and caterpillar coloration. *Current Opinion in Genetics & Development*, 69: 140–146.
- Wang F, Yu Q, Guo GM, Hao C, Fan RJ, 2016. Delineation of larval age number and age stage of the *Grapholita molesta*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 53(2): 390–395. [王芳, 庾琴, 郭贵明, 郝赤, 范仁俊, 2016. 梨小食心虫幼虫龄数和龄期的划分. 应用昆虫学报, 53(2): 390–395.]
- Xin XM, Han SD, Wang Y, Zhang DF, Ma YL, Liu YX, 2024. Delineation of larval age classes in *Streltzoviella insularis*. *Chinese Forest Pests and Diseases*, 43(1): 1–8. [信晓萌, 韩世德, 王勇, 张殿福, 马玉龙, 刘玉喜, 2024. 小线角木蠹蛾幼虫龄数的划分. 中国森林病虫, 43(1): 1–8.]
- Yang M, Tian CH, Sun FY, Liu XY, Yu FQ, 2022. Study on the use of different morphological indicators to classify the age of *Chilo suppressalis*. *Jiangsu Agricultural Science*, 50(22): 114–118. [杨眉, 田春晖, 孙富余, 刘欣宇, 于凤泉, 2022. 不同形态指标用于二化螟幼虫龄期划分的研究. 江苏农业科学, 50(22): 114–118.]
- Zhang GF, Yin HJ, Wang YS, Li ZJ, Bi SY, Wang R, Liu WX, Wan FH, 2023. Determination of the number and age of *Tuta absoluta* larvae. *Chinese Journal of Biological Control*, 39(2): 340–345. [张桂芬, 殷惠军, 王玉生, 李振江, 毕思言, 王瑞, 刘万学, 万方浩, 2023. 番茄潜叶蛾幼虫的龄数和龄期测定. 中国生物防治学报, 39(2): 340–345.]
- Zhang ZB, Long JM, Zhang YK, Zhao CP, Zhu GY, Chen S, Duan B, 2020. Screening of larval age-classification indexes for the *Batocera rufomaculata*. *China Plant Protection Guide*, 40(6): 32–38. [张祖兵, 龙继明, 张永科, 赵春攀, 朱国渊, 陈石, 段波, 2020. 赤斑白条天牛幼虫龄期划分指标的筛选. 中国植保导刊, 40(6): 32–38.]