美国白蛾幼虫头壳发育规律及其影响因素*

龙 丹[1, 2**] 刘 乐[1**] 魏一彤[1] 党英侨[1] 宋学雨[1, 3] 王小艺[1***]

（1. 中国林业科学研究院森林生态环境与自然保护研究所，北京 100091；
2. 中国林业科学研究院，北京 100091；3. 安徽省林业科学研究院，合肥 230031）

摘 要 **【目的】** 本研究通过测定美国白蛾 *Hyphantria cunea* 幼虫头壳宽度增长规律，并探究其在不同环境条件下的发育差异，旨在明确头壳宽度作为美国白蛾幼虫龄期划分指标的适用性和稳定性。**【方法】** 室内条件下，观测美国白蛾幼虫头壳宽度随发育时间和龄期的变化规律，同时记录在不同食料、取食量、温度以及光周期条件下，幼虫头壳发育差异情况。**【结果】** 随着日龄的增加，美国白蛾幼虫头壳宽度呈现出典型的指数函数增长趋势（R^2 = 0.961 2）。不同龄期幼虫的头壳宽度差异显著（P < 0.001），回归分析表明，幼虫龄数与头壳宽度之间呈指数相关关系（R^2 = 0.995 3），说明头壳宽度可作为美国白蛾幼虫分龄的可靠指标。取食不同食料对美国白蛾 3-6 龄幼虫头壳宽度有显著影响（P < 0.05）。取食量总体上对幼虫头壳宽度发育影响不显著（P > 0.05）。温度对 2 龄及以上幼虫的头壳宽度影响较大，20 ℃条件下，幼虫的头壳宽度显著小于其他高温条件（P < 0.05）。除 4 龄和 6 龄幼虫外，在长日照条件下发育的幼虫头壳宽度均显著大于短日照条件（P < 0.05）。**【结论】** 美国白蛾幼虫头壳宽度适于作为分龄指标，但食料、温度和光周期等因子在一定程度上影响幼虫的头壳发育，在野外应用 Dyar 氏定律进行幼虫分龄时，应采集相同生长环境下的美国白蛾幼虫，以保证害虫种群头壳发育情况一致。

关键词 Dyar 氏定律；头壳宽度；温度；光周期；饥饿胁迫；寄主植物

Development of the head capsule of *Hyphantria cunea* larvae

LONG Dan[1, 2**] LIU Le[1**] WEI Yi-Tong[1] DANG Ying-Qiao[1]
SONG Xue-Yu[1, 3] WANG Xiao-Yi[1***]

(1. Ecology and Nature Conservation Institute, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 3. Anhui Academy of Forestry, Hefei 230031, China)

Abstract **[Aim]** To clarify the applicability and stability of head capsule width (HCW) as a parameter for instar identification in *Hyphantria cunea*. **[Methods]** Growth patterns of larval HCW were measured and the effects of various environmental conditions on HCW development were investigated. Temporal and instar-specific changes in HCW were observed under controlled laboratory conditions. In addition, differences for head capsule development under various diet type, food consumption, temperature, and photoperiod were also recorded. **[Results]** With increasing age in days, the HCW of *H. cunea* larvae had a typical exponential growth trend (R^2 = 0.961 2). Validation using Crosby's growth rule and linear regression analysis confirmed significant differences in HCW between successive instars (P < 0.001). An exponential relationship was observed between instar number and HCW (R^2 = 0.995 3), confirming its validity as a parameter for instar determination. Diet type significantly affected the HCW of 3rd to 6th instar larvae (P < 0.05), whereas food consumption had no significant effect. Temperature significantly influenced HCW from the 2nd instar onward; notably, HCW at 20 ℃ was significantly narrower than at higher temperatures (P < 0.05). With the exception of the 4th and 6th instars, larvae reared under long-day conditions possessed significantly wider HCW than those reared under short-day conditions (P < 0.05). **[Conclusion]** HCW is a suitable

*资助项目 Supported project：国家重点研发计划项目（2021YFD1400300）

**共同第一作者 Co-first authors，E-mail：373578116@qq.com；15240808864@163.com

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

收稿日期 Received：2025-11-28；接受日期 Accepted：2026-04-12

parameter for instar identification in *H. cunea*. However, environmental factors such as diet, temperature, and photoperiod influence head capsule development to varying degrees. Therefore, when applying Dyar's Law for instar determination in the field, larvae should be sampled from the same environmental conditions to ensure accurate instar identification.

Key words Dyar's law; head capsule width; temperature; photoperiod; starvation stress; host plant

美国白蛾 *Hyphantria cunea* 属鳞翅目 Lepidoptera 目夜蛾科 Erebidae（韩辉林，2019），是一种世界性的检疫害虫。该虫寄主植物多达 600 多种，包括森林、果树、灌木、草本植物及多种农作物（Edosa *et al.*，2019），对我国农林业生态系统构成了严重威胁（刘枫和李群，2022）。美国白蛾原产于北美，后经朝鲜传入我国辽宁省丹东市，并迅速扩散蔓延（张生芳，1980），截至 2025 年已经扩散到我国 13 个省（直辖市、自治区）596 个县（区）（国家林业和草原局，2025）。据统计，2024 年我国美国白蛾疫情的发生面积达到 57.18 万 hm^2，约占全国全年虫害发生面积的 8.95%（闫佳钰等，2025）。美国白蛾以幼虫取食危害，低龄幼虫具有群集性，往往吐丝结网隐藏在网幕中取食，4 龄后破网分散，食量剧增，不仅对寄主造成严重危害，其抗药性亦显著增强（Schowalter and Ring，2017；罗立平等，2018）。该虫在我国自北向南一年至少发生 2-3 代，自第 2 代起出现世代重叠现象（卢修亮等，2023）。前期研究曾记录美国白蛾幼虫通常发育至 7 龄（Szalay-Marzso，1971），后续研究发现，第 1 代和第 2 代幼虫中常出现仅发育至 6 龄的个体（闫家河等，2011；黄广育，2022；卢修亮等，2026）。此外，饶宫羽等（2025）进一步发现，寄主转换可导致幼虫龄期发生变化，取食桑叶 *Morus alba* 和落羽杉 *Taxodium distichum* 时仅发育至 6 龄，而由桑叶转至水杉 *Metasequoia glyptostroboides* 后可发育至 8 龄。

准确的龄期判定不仅是研究害虫生物学特性和发生规律的基础，更是实施精准防治的关键（魏书军等，2006）。目前，美国白蛾幼虫龄期的识别已有较多研究报道。例如，美国白蛾幼虫体表的刚毛数量随着龄期增长呈递增趋势，可作为区分龄期的辅助特征（崔新仪等，2015）；体长也是分龄的常用指标，通常在幼虫处于龄末期至蜕皮前进行测量，但该指标易受寄主植物营养状况影响，不同龄期间的体长范围常存在重叠，限制了其在实际应用中的可靠性（闫家河等，2011；杨庆兰等，2023）。依据经典 Dyar 氏定律，鳞翅目相邻龄期的幼虫其骨化部位以几何级数方式增长（Dyar，1890；Chapman，1998；彩万志等，2001），头壳作为昆虫幼虫骨化程度最高的部位，其宽度常被用作为幼虫分龄的可靠指标（陈永年和潘桐，1988）。前期研究初步表明，相同龄期的美国白蛾幼虫头壳宽度变异较小，且龄期间未出现重叠的情况（闫家河等，2011；杨庆兰等，2023），但取食不同寄主植物的个体间头壳发育仍表现出一定的差异（韩鸣花等，2014；张书曼等，2023）。

为明确头壳宽度作为美国白蛾幼虫分龄指标在不同条件下的适用性与稳定性，本研究系统观测了该虫的头壳宽度发育规律，并进一步探究了食料、取食量、温度及光周期等对其头壳发育的影响，以期为该入侵害虫的林间种群监测及精准预测预报提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试虫源

2017 年 8 月 24 日在山东省滨州市山东航空学院（37°23′15″N，117°59′07″E）白蜡树上采集第 3 代美国白蛾卵块，将其带回实验室装入带有湿纱布的培养皿内，于（25±1）℃、光周期 16 L∶8 D、相对湿度 50%±5% 的智能人工气候箱（PRX-1000B，宁波赛福实验仪器有限公司，下同）中饲养至孵化后，每日提供鲜嫩的杨树 *Populus canadensis* 叶片供幼虫取食。美国白蛾 1-3 龄幼虫在塑料器皿（直径 8.8 cm、高 17 cm）中饲养，饲养密度为 50-60 头/盒；4 龄后置于大塑料器皿（直径 11.8 cm、高 33 cm）中，饲养密

度为 25-30 头/盒。

1.2　头壳宽度测量方法

用佳能相机（IXUS 1000 HS）拍下幼虫头壳，并放置刻度尺作为参照标准线，通过图像软件（Adobe Photoshop Lightroom 5.7）对图片进行分析处理，测算出头壳（头壳最宽处）宽值。每次测量时间固定为蜕皮后头壳完全骨化变褐。

1.3　幼虫头壳宽度增长规律

供试幼虫自孵化之日起，饲喂足量的新鲜杨树叶片，饲养条件同 1.1 节。每天随机选取 15 头幼虫，测量并记录不同日龄下的头壳（头壳最宽处）宽度。同时观察记录幼虫蜕皮情况，每次蜕皮 24 h 后选取 15 头幼虫测量头壳宽度，记录不同龄期的头壳宽度，直到化蛹。

1.4　不同食料饲喂幼虫的头壳宽度

挑选健康程度一致的初孵幼虫 525 头，随机均分为 5 组，分别饲喂以下 5 种食料：杨树、核桃 *Juglans regia*、柳树 *Salix babylonica*、桑树 *Morus alba* 以及人工饲料。实验期间，每日提供足量食料供幼虫取食，每天定时更换。自孵化日开始，幼虫每蜕皮一次，随机选取 15 头记录头壳宽度，直到化蛹。寄主叶片均采自中国林业科学研究院内，水肥条件和管理措施一致。人工饲料为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原微生物实验室提供，经高温消毒后使用。其余饲养条件同 1.1 节。

1.5　不同取食量下的幼虫头壳宽度

挑选健康程度一致的初孵幼虫 210 头，随机均分为 2 组，分别进行饱食处理和饥饿处理。所有幼虫均饲喂新鲜杨树叶片。本研究通过严格控制每日的供叶量来模拟不同的取食状态，基于前期预实验获得各龄期幼虫在 1.1 节饲养密度下单盒虫数的日取食量，制定了不同发育阶段饥饿与饱食处理的具体定量供叶标准（表 1）。实验期间每天定时更换新鲜叶片，饲养条件同 1.1 节。自孵化之日起，每组在每次蜕皮后随机选取 15 头幼虫，测量其头壳宽度，直至化蛹。

表 1　不同龄期美国白蛾幼虫在两种饲喂条件下取食的杨树叶面积

Table 1　Poplar leaf provided to *Hyphantria cunea* larvae at different instars under two feeding regimes

龄期 Instar	饥饿处理叶面积（cm^2） Leaf size under starvation (cm^2)	饱食处理叶面积（cm^2） Leaf size under satiation (cm^2)
1-2	20	50
3	50	100
4	100	225
5	169	324
6	225	400
7	400	625

1.6　不同温度下的幼虫头壳宽度

挑选健康程度一致的初孵幼虫 420 头，随机均分为 4 组，实验期间均提供足量的新鲜杨树叶片饲养。本实验设置恒温与变温两种环境处理：其中 3 个恒温处理组置于智能人工气候箱中，温度分别设定为 20、25 和 30 ℃；第 4 组变温处理置于室内自然条件下。室内温度利用自动温度记录仪进行 24 h 连续监测（记录频率为 1 次/h），通过计算实验期间每日相同时刻的温度均值来呈现室温的日变化趋势，实验期间日均温度的变幅为 23.91-24.64 ℃（图 1）。所有处理的光周期（16 L∶8 D）与相对湿度（50%±5%）均保持一致。在幼虫每蜕皮一次后，随机选取 15 头测量头壳宽度，直至化蛹。

1.7　不同光周期下的幼虫头壳宽度

挑选健康程度一致的初孵幼虫 315 头，随机均分为 3 组，统一饲喂新鲜杨树叶片。将各组分别置于光周期设定为 8 L∶16 D、12 L∶12 D、16 L∶8 D 的智能人工气候箱中，温度为（25±1）℃，相对湿度为 50%±5%。自孵化之日起，在幼虫每次蜕皮进入下一龄期后，每组随机选取 15 头测量头壳宽度，直至化蛹。

1.8　数据分析

利用图像处理软件 Adobe Photoshop Lightroom 5.7 对拍摄的幼虫头壳图片进行校准与测量。原

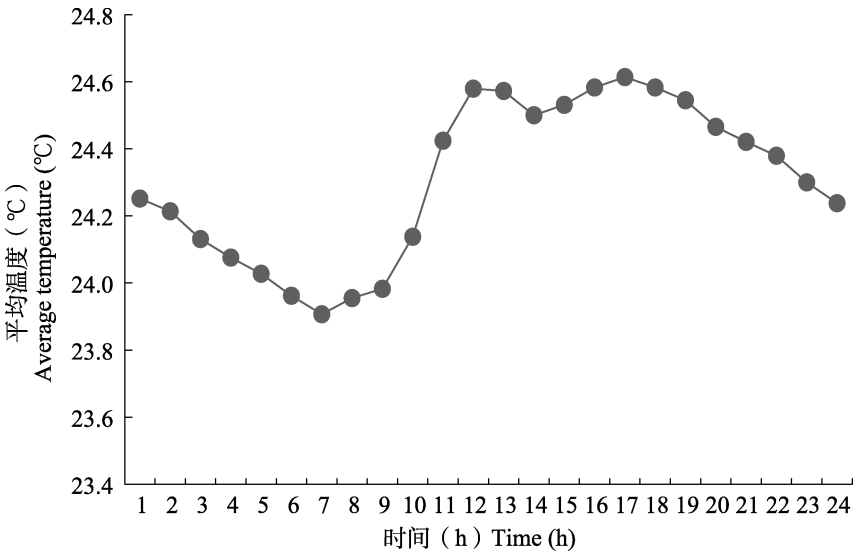


图 1　室内温度日变化情况

Fig. 1　Daily fluctuations of indoor temperature

始数据采用 Microsoft Excel 2007 录入整理，并计算各处理的平均值与标准差。利用 SPSS 27 软件对数据进行统计分析，同一龄期幼虫在不同食料、温度及光周期条件下的头壳宽度差异采用单因素方差分析（One-way ANOVA）进行分析，组间差异显著时利用 LSD 法进行事后多重比较；饥饿和饱食处理下的头壳宽度差异，采用独立样本 *t* 检验（*t*-test）。利用 Origin 2021 软件进行非线性曲线拟合及绘图，经比较多种模型后，选择拟合优度最佳且符合生物学规律的方程作为拟合方程。此外，引入 Brooks 指数（生长比）与 Crosby 指数（变异率）验证幼虫分龄的合理性：Brooks 指数= X_n/X_{n-1}（X_n 和 X_{n-1} 分别表示 n 龄和 $n-1$ 龄幼虫各个测量指标的平均值）；Crosby 指数= $(b_n - b_{n-1})/b_{n-1}$（b_n 和 b_{n-1} 分别表示第 n 和 $n-1$ 个 Brooks 指数），若 Crosby 指数若大于 10%，则提示分龄可能存在偏差（Loerch and Cameron，1983）。

2　结果与分析

2.1　美国白蛾幼虫头壳宽度的日龄变化

室内条件下使用杨树叶片饲养美国白蛾幼虫时，其头壳宽度与日龄呈指数函数增长关系[$y = 0.128\ 7\exp^{(x-75.728\ 4)/20.089\ 5} - 1.548\ 2$]，决定系数 $R^2 = 0.961\ 2$，拟合程度较高（$F = 12\ 345.98$，$P < 0.001$）（图 2）。

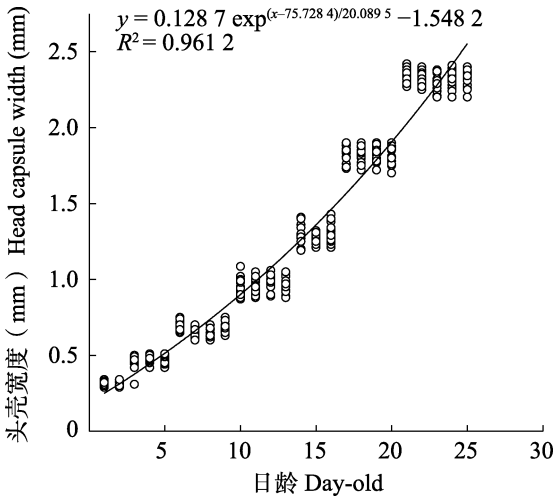


图 2　美国白蛾幼虫头壳宽随日龄的变化

Fig. 2　The daily changes in head capsule width of *Hyphantria cunea* larvae

2.2　美国白蛾各龄幼虫头壳宽度统计参数分析

将头壳宽度进行统计分析可知（表 2），美国白蛾不同龄期的平均头壳宽度存在极显著差异（$df = 6, 98$，$F = 3\ 908.339$，$P < 0.001$），且各龄期内的变异系数均小于 7%，表明头壳发育整齐度高。各龄期间头壳宽度 Brooks 指数稳定在 1.305-1.463 之间，且 Crosby 指数的绝对值均小于 10%，符合统计要求。

表 2　美国白蛾各龄幼虫头壳宽度及其统计参数

Table 2　Head capsule width and its statistical parameters of *Hyphantria cunea* larvae

龄数 Instar	平均头壳宽度（mm） Average width of head capsule (mm)	变异系数（%） Coefficient of variation (%)	Brooks 指数 Brooks index	Crosby 指数 Crosby's index
1	0.318±0.017 g	5.21	—	—
2	0.465±0.026 f	5.51	1.461	—
3	0.680±0.044 e	6.51	1.463	0.002
4	0.949±0.047 d	4.93	1.396	- 0.046
5	1.318±0.061 c	4.65	1.388	- 0.006
6	1.783±0.057 b	3.20	1.353	- 0.025
7	2.328±0.049 a	2.10	1.305	- 0.035

表中数值为平均值±标准差，同列数据后不同小写字母表示差异显著（$P < 0.05$, one-way ANOVA）。

Values in the table are mean±SD, and followed by the different lowercase letters within a column indicate significant difference ($P < 0.05$, one-way ANOVA).

2.3　幼虫龄数和头壳宽度的回归分析

基于回归分析，对美国白蛾幼虫头壳宽度（y）与龄数（x）的关系进行拟合（图 3）。结果显示，二者之间呈指数增长关系，回归方程为 $y = 0.140\ 7e^{(x-0.80)}-0.29$，决定系数 $R^2 = 0.995\ 3$。极高的拟合度表明，幼虫头壳宽度随龄期的变化规律性强，可作为判定美国白蛾幼虫龄期的准确指标。

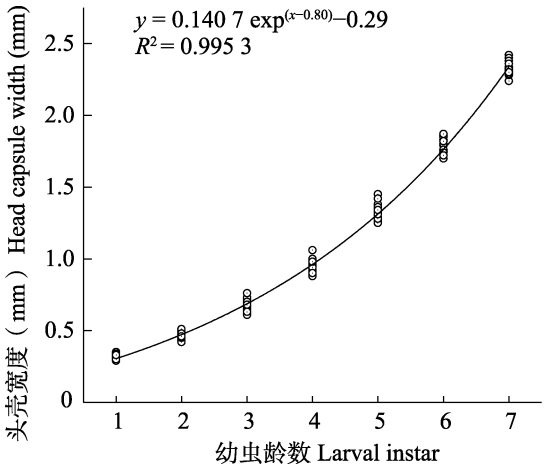


图 3　美国白蛾幼虫虫龄与头壳宽度的回归关系

Fig. 3　Regression relationship between larval instar and head capsule width in *Hyphantria cunea*

2.4　食料对美国白蛾幼虫头壳宽度的影响

食料在一定程度上会对美国白蛾幼虫头壳宽度造成影响。不同食料对美国白蛾 1 龄、2 龄和 7 龄幼虫的头壳宽度影响不显著，而对 3-6 龄幼虫头壳宽度的影响显著。其中，饲喂柳树叶片的 3 龄幼虫头壳宽度显著大于饲喂杨树叶片和人工饲料（$F = 2.75$，$df = 4, 70$，$P = 0.035$）；饲喂人工饲料的 4 龄幼虫头壳宽度显著小于其他食料的幼虫（$F = 6.69$，$df = 4, 70$，$P < 0.001$）；饲喂核桃、柳树、桑树的 5 龄幼虫头壳宽度显著大于饲喂人工饲料的幼虫（$F = 3.43$，$df = 4, 70$，$P = 0.013$）；饲喂柳树叶片的 6 龄幼虫头壳宽度显著大于饲喂其他食料的幼虫（$F = 5.53$，$df = 4, 70$，$P < 0.01$）（图 4：A）。

2.5　取食量对美国白蛾幼虫头壳宽度的影响

取食量对美国白蛾 6 龄幼虫头壳宽度影响显著，而对其他龄期幼虫的头壳宽度影响不显著（图 4：B）。6 龄幼虫头壳宽度在饥饿处理下显著小于饱食处理（$F = 13.11$，$df = 4, 70$，$P < 0.001$）。

2.6　温度对美国白蛾幼虫头壳宽度的影响

美国白蛾幼虫的头壳宽度在不同温度下差异显著。1 龄幼虫在不同温度条件下的头壳宽度差异不显著（$F = 2.287$，$df = 3, 56$，$P = 0.100$）。3 龄、5 龄、7 龄幼虫的头壳宽度在 25、30 ℃和变温环境中没有差异，但显著大于 20 ℃（3 龄：$F = 19.509$，$df = 3, 56$，$P < 0.001$；5 龄：$F = 4.690$，

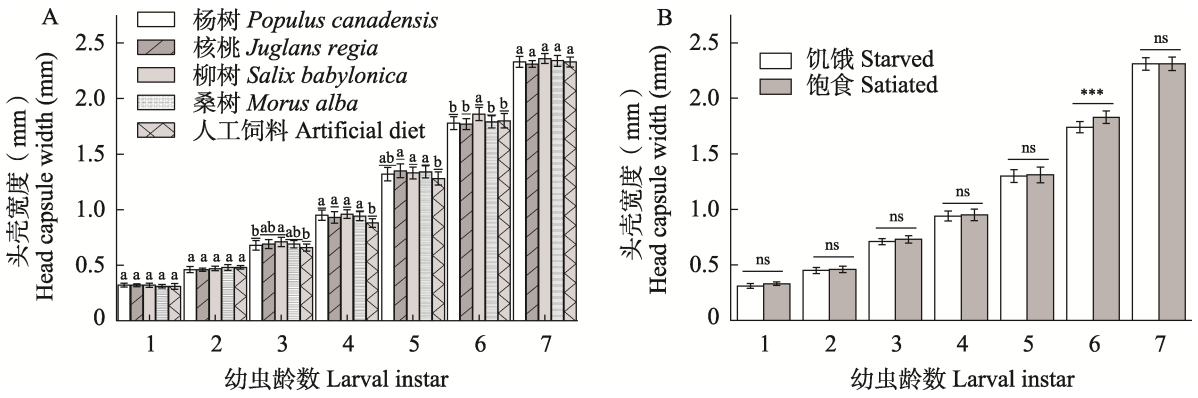


图 4　食料（A）和取食量（B）对美国白蛾幼虫头壳宽度的影响

Fig. 4　Effects of foods (A) and its consumptions (B) on the head capsule width of *Hyphantria cunea* larvae

数据均为平均值±标准差，柱上方不同小写字母表示同一龄期内不同处理间头壳宽度差异显著（$P < 0.05$，one-way ANOVA）；***表示差异极显著（$P < 0.001$，t 检验）；ns 表示差异不显著（$P > 0.05$，t 检验）。下图同。

Data in the figure are mean±SD. Different lowercase letters above the bars indicate significant difference in head capsule width among treatments within the same instar ($P < 0.05$, one-way ANOVA); *** indicates extremely significant difference ($P < 0.001$, t-test); ns indicates no significant difference ($P > 0.05$, t-test). The same below.

$df = 3, 56$，$P = 0.005$；7 龄：$F = 11.247$，$df = 3, 56$，$P < 0.001$）。在 20 ℃条件下的 2 龄、4 龄、6 龄幼虫头壳宽度也显著小于其他温度，同时在 25、30 ℃和变温环境中的头壳宽度也存在一定程度的差异（2 龄：$F = 20.326$，$df = 3, 56$，$P < 0.001$，4 龄：$F = 19.373$，$df = 3, 56$，$P < 0.001$；6 龄：$F = 7.647$，$df = 3, 56$，$P < 0.001$）（图 5：A）。

2.7　光周期对美国白蛾幼虫头壳宽度的影响

光周期对美国白蛾幼虫的头壳宽度也存在一定影响。在 16 L：8 D 的光周期条件下，1 龄、2 龄幼虫的头壳宽度显著大于其他 2 个光周期（1 龄：$F = 4.628$，$df = 2, 42$，$P = 0.015$；2 龄：$F = 8.485$，$df = 2, 42$，$P < 0.001$）。3 龄和 7 龄幼虫在 16 L：8 D、12 L：12 D 的光周期条件下，头壳宽度均显著大于 8 L：16 D 的光周期条件（3 龄：$F = 11.333$，$df = 2, 42$，$P < 0.001$；7 龄：$F = 14.601$，$df = 2, 42$，$P < 0.001$）。5 龄幼虫在 16 L：8 D 的光周期条件下，头壳宽度均显著大于 8 L：16 D（$F = 3.977$，$df = 2, 42$，$P = 0.026$）。在不同光周期条件下，4 龄和 6 龄幼虫的头壳宽度均没有显著差异（4 龄：$F = 1.743$，$df = 2, 42$，$P = 0.187$；6 龄：$F = 0.502$，$df = 2, 42$，$P = 0.609$）（图 5：B）。

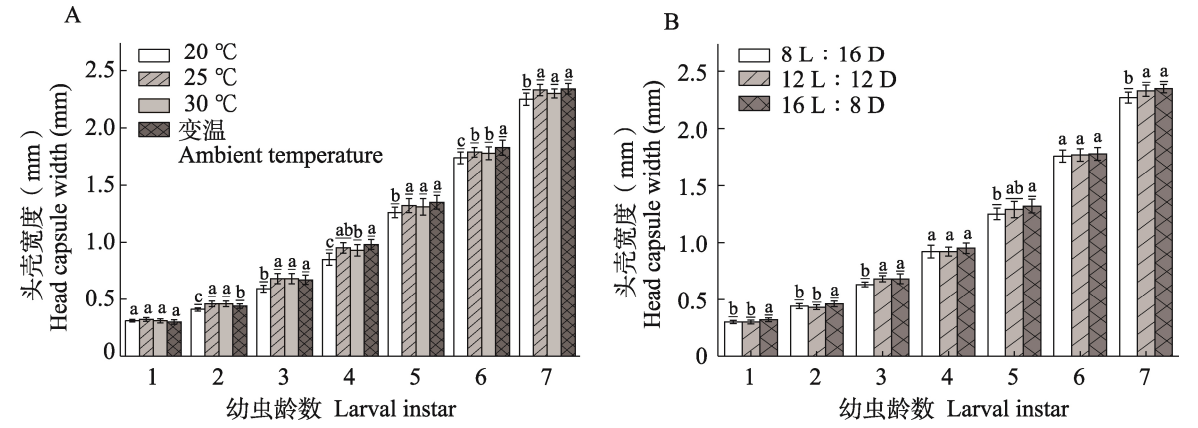


图 5　温度（A）和光周期（B）对美国白蛾幼虫头壳宽度的影响

Fig. 5　Effects of temperature (A) and photoperiod (B) on the head capsule width of *Hyphantria cunea* larvae

3　结论与讨论

鳞翅目害虫以幼虫取食为害，掌握其幼虫发育速率可以对害虫发生期进行准确测报并选择合适的防治期（陈元生等，2022）。虽然部分昆虫可通过体表特征直接区分，如棉铃虫 *Helicoverpa armigera* 依靠毛片和体色，二化螟 *Chilo suppressalis* 依据体色和体线，梨小食心虫 *Grapholita molesta* 则通过刚毛和头壳颜色判定（朱宝涛，1979；王芳等，2016）。但这类指标往往随幼虫取食状态和发育时间呈现连续性变化，易受干扰。Dyar 氏定律指出，鳞翅目幼虫相邻龄期的头壳宽度呈几何级数增长。该定律已在食叶性和钻蛀性鳞翅目害虫的龄期测定中得到大量应用（万喻等，2015；马晓凡等，2023；信晓萌等，2024），不少学者还将此定则延伸至鞘翅目蛀干害虫龄期划分中去（Loerch and Cameron，1983；王小艺等，2005；魏书军等，2006；张海滨等，2011；陆俊姣等，2020）。本研究显示，美国白蛾的幼虫头壳宽度并不随着日龄连续增长，而是在蜕皮后显著增长，并且头壳宽度与龄期呈指数增长关系，符合 Dyar 氏定律。因此认为可根据头壳宽度来划分美国白蛾幼虫的龄数。

尽管头壳宽度相对稳定，但昆虫的生长发育具有表型可塑性，极易受营养条件的调控（Naseri *et al.*，2009；Razmjou *et al.*，2014）。作为典型的多食性昆虫，美国白蛾对不同食料表现出不同的适应性（武海卫等，2012；李路莎等，2018），这主要归因于食料间营养成分和次生代谢物的差异（王沫等，2020；李欣素等，2025）。与前期研究类似，本研究发现美国白蛾幼虫取食不同食料后头壳发育存在差异，并且该效应集中表现在 3-6 龄幼虫，其中取食柳树的 6 龄幼虫头壳宽度显著大于其他寄主植物。这一结果与 Tanino-Springsteen 等（2024）关于红头型美国白蛾的研究高度吻合，他们同样证实寄主植物对头壳发育的影响从 4 龄开始显现，取食黑柳 *Salix nigra* 的幼虫头宽显著大于取食薄叶桤木 *Alnus tenuifolia* 和紫叶稠李 *Prunus virginiana* 的幼虫，且在 6 龄时差异最显著。此外，红头型美国白蛾取食大部分寄主时都仅发育至 7 龄，但取食美洲黑杨 *Populus deltoides* 后发育至 8 龄（Tanino-Springsteen *et al.*，2024）。然而，在本研究所设定的所有食料条件下，幼虫均发育至 7 龄，未出现龄数分化。除了食料种类，绝对摄入量也是影响昆虫发育的关键因子。在面临食物短缺时，昆虫可能会出现生长发育减缓及化蛹提前等情况（丛林等，2015；李文平等，2023）。例如，鞠珍等（2008）发现长时间处于饥饿状态的美国白蛾幼虫发育历期会相应增长，且老熟幼虫多会提前化蛹。然而，本研究结果表明，取食量总体上未对幼虫头壳宽度产生显著影响，仅 6 龄幼虫的头壳发育受到食物短缺的抑制。推测可能是由于本实验设置的饥饿时间相对较短。未来有必要开展更长时间梯度的饥饿实验，以进一步阐明长期营养胁迫对幼虫头壳发育的具体作用机制。

除营养因素外，温度和光周期等非生物环境因子同样会影响昆虫的形态发育。对于变温动物而言，温度直接制约其发育速率与代谢水平。Irigaray 等（2006）曾报道葡萄花翅小卷蛾 *Lobesia botrana* 幼虫头壳宽度受温度影响显著。本研究结果进一步证实，温度对美国白蛾 2 龄及以上幼虫的头壳宽度具有显著调控作用，20 ℃低温条件下的幼虫头壳宽度显著小于 25 和 30 ℃及变温处理组。推测可能是因为低温抑制了蜕皮期的代谢水平，限制了蜕皮后头壳的充分扩张。同时，美国白蛾作为典型的短日照滞育型昆虫，其临界光周期通常介于 850-885 min 之间（Masaki，1977；Gomi *et al.*，2007；王少博等，2020）。本研究发现，处于长日照（16 L：8D，非滞育诱导条件）下的幼虫头壳宽度总是显著大于短日照（8 L：16 D，滞育诱导条件）处理组。与此类似的，滞育型玉米禾螟 *Chilo partellus* 的幼虫头壳宽度显著小于非滞育个体（Dhillon and Hasan，2017）。出现这一差异的内在机制可能是光照刺激了幼虫体内保幼激素或蜕皮激素的分泌平衡。值得注意的是，有研究表明美国白蛾不同发生代数的田间种群在幼虫龄数上存在一定差异（黄广育，2022；卢修亮等，2026）。然而，在本研究设定的各温度和光周期梯度下，幼虫的龄数均保持恒

定。后续研究可进一步探索寄主植物的营养水平与美国白蛾幼虫龄数变异之间的相关性。

本研究明确了头壳宽度是判定美国白蛾幼虫龄期的理想指标，但其发育具有一定的环境依赖性。因此，在利用头壳宽度进行野外种群龄期判定时，应充分考虑环境异质性带来的误差，采样时避免将取食不同寄主植物和不同生境的幼虫混合统计，以提高分龄的准确性和普适性，从而为害虫的精细化测报提供科学参考。

参考文献 (References)

Cai WZ, 2001. General Entomology. Beijing: China Agricultural University Press. 263. [彩万志, 2001. 普通昆虫学. 北京: 中国农业大学出版社. 263.]

Chapman RF, 1998. The Insects: Structure and Function. 4th ed. Cambridge: Cambridge University Press. 376–380.

Chen YN, Pan T, 1988. Research on the relationship between larval head capsule width and food consumption in insects. *Entomological Knowledge*, 25(4): 235–240. [陈永年, 潘桐, 1988. 也谈昆虫幼虫头宽及摄食量的增长规律. 昆虫知识, 25(4): 235–240.]

Chen YS, Zhou JY, Zhang YB, Song DF, Luo ZD, 2022. Preliminary study on the larval instar determination of *Casmara patrona*. *China Plant Protection*, 42(11): 33–37, 75. [陈元生, 周嘉颖, 张杨斌, 宋墩福, 罗致迪, 2022. 油茶织蛾幼虫龄期的初步研究. 中国植保导刊, 42(11): 33–37, 75.]

Cong L, Jiang XZ, Yang WJ, Xu KK, Dou W, Ran C, Wang JJ, 2015. Identification of ecdysone synthesis pathway genes and analysis on the impact of food deprivation on larvae development of *Bactrocera dorsalis* Hendel. *Scientia Agricultura Sinica*, 48(22): 4469–4482. [丛林, 蒋玄赵, 杨文佳, 许抗抗, 豆威, 冉春, 王进军, 2015. 橘小实蝇蜕皮激素合成通路基因鉴定分析及饥饿对幼虫发育的影响. 中国农业科学, 48(22): 4469–4482.]

Cui XY, Hu Q, Luo J, Xie YS, 2015. Observation on characteristics of *Hyphantria cunea* (Drury) larvae in different instar stage. *Tianjin Agricultural Sciences*, 21(9): 167–170. [崔新仪, 胡奇, 罗洁, 谢雨杉, 2015. 美国白蛾幼虫期特性观察. 天津农业科学, 21(9): 167–170.]

Dhillon MK, Hasan F, 2017. Morphological changes in *Chilo partellus* (Swinhoe) undergoing diapause. *Journal of Entomology and Zoology Studies*, 5(3): 1658–1661.

Dyar HG, 1890. The number of molts of lepidopterous larvae. *Psyche*: *A Journal of Entomology*, 5(175/176): 420–422.

Edosa TT, Jo YH, Keshavarz M, Anh YS, Noh MY, Han YS, 2019. Current status of the management of fall webworm, *Hyphantria cunea*: Towards the integrated pest management development. *Journal of Applied Entomology*, 143(1/2): 1–10.

Gomi T, Nagasaka M, Fukuda T, Hagihara H, 2007. Shifting of the life cycle and life-history traits of the fall webworm in relation to climate change. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 125(2): 179–184.

Han HL, 2019. Progress of taxonomy of Erebidae (part), Euteliidae, Nolidae and Noctuidae (Lepidoptera) in the Northeast China. *Journal of Environmental Entomology*, 41(6): 1181–1195. [韩辉林, 2019. 中国东北目夜蛾科(部分)、尾夜蛾科、瘤蛾科和夜蛾科(鳞翅目)分类学研究进展. 环境昆虫学报, 41(6): 1181–1195.]

Han MH, Wu J, Song J, Ding YZ, Zhang JY, 2014. A comparative study on rearing the *Hyphantria cunea* on three host plants. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 42(10): 145–146. [韩鸣花, 吴晶, 宋杰, 丁运昭, 张敬友, 2014. 3 种食料植物饲养美国白蛾的比较. 江苏农业科学, 42(10): 145–146.]

Huang GY, 2022. Occurrence regularity of *Hyphantria cunea* in Jinshan District of Shanghai. *Forest Pest and Disease*, 41(2): 27–31. [黄广育, 2022. 上海金山区美国白蛾发生规律初探. 中国森林病虫, 41(2): 27–31.]

Irigaray FJS, Moreno F, Pérez-Moreno I, Marco V, 2006. Larval growth and the effect of temperature on head capsule size in *Lobesia botrana* (Lepidoptera: Tortricidae). *Environmental Entomology*, 35(2): 189–193.

Ju Z, Zhao J, Ding FB, Qu JJ, Li MG, Xu YY, 2008. Effects of starvation on the development and reproduction of *Hyphantria cunea*. *Chinese Bulletin of Entomology*, 45(3): 437–440. [鞠珍, 赵静, 丁福波, 曲建军, 李明贵, 许永玉, 2008. 饥饿程度对美国白蛾生长发育和繁殖的影响. 昆虫知识, 45(3): 437–440.]

Li LS, Yuan YF, Wu L, Chen M, 2018. Effects of host plants on the feeding behavior and detoxification enzyme activities in *Hyphantria cunea* (Lepidoptera: Arctiidae) larvae. *Acta Entomologica Sinica*, 61(2): 232–239. [李路莎, 袁郁斐, 武磊, 陈敏, 2018. 不同寄主植物对美国白蛾幼虫取食行为及解毒酶活性的影响. 昆虫学报, 61(2): 232–239.]

Li WP, Zhang YL, Yang SY, Wang ZL, Jin QT, 2023. Effect of starvation stress on contents of glycogen, trehalose and ecdysone in *Mythimna separata* (Walker) larvae. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 32(7): 1138–1143. [李文平, 张亚玲, 杨顺义, 王贞霖, 金秋彤, 2023. 饥饿胁迫对粘虫幼虫糖原、海藻糖含量和蜕皮激素滴度变化的影响. 西北农业学报, 32(7): 1138–1143.]

Li XS, Zhang SM, Meng ZJ, Li YY, Zhai X, Tan MM, Yan SC, 2025. Correlation between young tree leaf compounds and growth, development, and enzyme activities in *Hyphantria cunea* larvae.

Journal of Northeast Forestry University, 53(10): 117–124. [李欣素, 张书曼, 孟昭军, 李颜颜, 翟信, 檀明明, 严善春, 2025. 幼树叶片化合物与美国白蛾幼虫生长发育及体内酶活的相关性. 东北林业大学学报, 53(10): 117–124.]

Liu F, Li Q, 2022. Occurrence, forest control status and prospect of fall-webworm (*Hyphantria cunea* Drury) in China. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 53(5): 630–640. [刘枫, 李群, 2022. 美国白蛾在中国发生情况、林间防治现状及展望. 沈阳农业大学学报, 53(5): 630–640.]

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.

Lu JJ, Ren MF, Li DQ, Gao XY, Yang J, Dong JM, 2020. Determination of larval instars of *Holotrichia oblita* (Coleoptera: Melolonthidae). *Chinese Journal of Applied Entomology*, 57(5): 1206–1212. [陆俊姣, 任美凤, 李大琪, 高晓云, 杨静, 董晋明, 2020. 华北大黑鳃金龟幼虫龄期的划分. 应用昆虫学报, 57(5): 1206–1212.]

Lu XL, Tang J, Feng FJ, Song YX, Wang QS, Hao CJ, 2026. The voltinism change of *Hyphantria cunea* in Shenyang City. *Forest Pest and Disease*, 45(2): 56–61. [卢修亮, 唐健, 冯斐靖, 宋依璇, 王巧申, 赫传杰, 2026. 沈阳市美国白蛾的世代变化. 中国森林病虫, 45(2): 56–61.]

Lu XL, Xie T, Cheng XC, Zhang RX, Wang B, Jin J, Wang M, Shi Y, 2023. Change in voltinism increases the spread of *Hyphantria cunea* in China. *Journal of Biosafety*, 32(1): 1–7. [卢修亮, 谢天, 程相称, 张睿轩, 汪波, 金娇, 王梦, 时勇, 2023. 美国白蛾在我国发生的世代变化分析. 生物安全学报, 32(1): 1–7.]

Luo LP, Wang XY, Yang ZQ, Cao LM, 2018. Research progress in the management of fall webworm, *Hyphantria cunea* (Drury) (Lepidoptera: Arctiidae). *Journal of Environmental Entomology*, 40(4): 721–735. [罗立平, 王小艺, 杨忠岐, 曹亮明, 2018. 美国白蛾防控技术研究进展. 环境昆虫学报, 40(4): 721–735.]

Ma XF, Li YF, Dou FR, Ailiukamali TMX, Shi J, 2023. Division of instar number and stage of the spongy moth *Lymantria dispar* larvae. *Journal of Plant Protection*, 50(6): 1625–1632. [马晓凡, 李亚飞, 窦烽瑞, 艾流卡玛丽·吐木逊, 石娟, 2023. 舞毒蛾幼虫龄数和龄期的划分. 植物保护学报, 50(6): 1625–1632.]

Masaki S, 1977. Past and future. // Hidaka T (ed.). Adaptation and Speciation in the Fall Webworm. Tokyo: Kodansha. 129–148.

Naseri B, Fathipour Y, Moharramipour S, Hosseininaveh V, 2009. Comparative life history and fecundity of *Helicoverpa armigera* (Hubner) (Lepidoptera: Noctuidae) on different soybean varieties. *Entomological Science*, 12(2): 147–154.

National Forestry and Grassland Administration, 2025. Announcement of the NFGA (No. 2, 2025) (Infestation areas of *Hyphantria cunea* in 2025). https://www.forestry.gov.cn/lyj/1/gsgg/20250303/612535.html. [国家林业和草原局, 2025. 国家林业和草原局公告(2025 年第 2 号) (2025 年美国白蛾疫区). https://www.forestry.gov.cn/lyj/1/gsgg/20250303/612535.html.]

Rao GY, Zhang XH, Chen Y, Zhang Y, Guo HY, Chen M, 2025. Investigation of the feeding suitability of two Taxodiaceae plants to *Hyphantria cunea* (Lepidoptera: Arctiidae) based on age-stage, two-sex life table and host-shift experiments. *Acta Entomologica Sinica*, 68(11): 1580–1589. [饶宫羽, 张新华, 陈煜, 张怡, 郭海垚, 陈敏, 2025. 基于年龄-龄期两性生命表和寄主转换试验探究两种杉科植物对美国白蛾的取食适合度. 昆虫学报, 68(11): 1580–1589.]

Razmjou J, Naseri B, Hemati SA, 2014. Comparative performance of the cotton bollworm, *Helicoverpa armigera* (Hübner) (Lepidoptera: Noctuidae) on various host plants. *Journal of Pest Science*, 87(1): 29–37.

Schowalter TD, Ring DR, 2017. Biology and management of the fall webworm, *Hyphantria cunea* (Lepidoptera: Erebidae). *Journal of Integrated Pest Management*, 8(1): 1–6.

Szalay-Marzso L, 1971. Biology and control of the fall webworm (*Hyphantria cunea* Drury) in the middle- and east European countries. *EPPO Bulletin*, 1(3): 23–31.

Tanino-Springsteen MM, Vyas DK, Mitchell A, Durso C, Murphy SM, 2024. Investigating the effect of host plant identity on instar number in fall webworm, a common generalist herbivore. *Environmental Entomology*, 53(1): 188–194.

Wan Y, Liu TH, Wang JJ, He YZ, 2015. Identification of the larval instars of the *Depressaria falkovitshi* Lvovsky (Lepidoptera: Elachistidae: Depressariinae). *Chinese Journal of Applied Entomology*, 52(6): 1491–1495. [万喻, 刘廷辉, 王静静, 何运转, 2015. 法氏柴胡宽蛾幼虫龄期的划分. 应用昆虫学报, 52(6): 1491–1495.]

Wang F, Yu Q, Guo GM, Hao C, Fan RJ, 2016. Determination of larval instar number and duration of the *Grapholitha molesta* (Lepidoptera: Tortricidae). *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.]

Wang M, Jiang D, Meng ZJ, Yan SC, 2020. Adaptability of larval growth and development in *Hyphantria cunea* to different host plant secondary metabolites. *Journal of Northeast Forestry University*, 48(3): 100–104. [王沫, 姜礅, 孟昭军, 严善春, 2020. 美国白蛾生长发育对寄主植物不同次生代谢物质的适应性. 东北林业大学学报, 48(3): 100–104.]

Wang SB, Zhou Z, Chen YM, Wang YZ, Zhang YA, Qu LJ, 2020. Diapause of *Hyphantria cunea* (Lepidoptera: Arctiidae) induction by photoperiod and temperature. *Scientia Silvae Sinicae*, 56(4): 121–127. [王少博, 周洲, 陈怡萌, 王玉珠, 张永安, 曲良建, 2020. 光周期和温度诱导美国白蛾滞育. 林业科学, 56(4): 121–127.]

Wang XY, Yang ZQ, Liu GJ, Liu ES, 2005. Larval instars and stadia of *Agrilus planipennis* (Coleoptera: Buprestidae). *Scientia Silvae Sinicae*, 41(3): 97–102. [王小艺, 杨忠岐, 刘桂军, 刘恩山, 2005. 白蜡窄吉丁幼虫的龄数和龄期测定. 林业科学, 41(3): 97–102.]

Wei SJ, Zheng HH, Huangfu WG, Shi ZH, Chen XX, 2006. Division of larval instars of the citrus borer, *Agrilus auriventris* Saunders (Coleoptera: Buprestidae). *Acta Entomologica Sinica*, 49(2): 302–309. [魏书军, 郑宏海, 皇甫伟国, 施祖华, 陈学新, 2006. 柑桔爆皮虫幼虫龄期的划分. 昆虫学报, 49(2): 302–309.]

Wu HW, Kang Z, Xin SL, Qin XB, Zhang QM, Liu HX, 2012. Effects of different food plants on the growth, development and reproduction of fall webworm, *Hyphantria cunea*, larvae. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 49(4): 963–968. [武海卫, 康智, 信善林, 秦绪兵, 张秋梅, 刘焕秀, 2012. 不同食料植物对美国白蛾生长发育和繁殖的影响. 应用昆虫学报, 49(4): 963–968.]

Xin XM, Han SD, Wang Y, Zhang DF, Ma YL, Liu YX, 2024. Division of larval instars of *Streltzoviella insularis*. *Forest Pest and Disease*, 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.]

Yan JH, Wang WL, Liu Q, Sun ZG, Kang Z, Zhang QM, Xia MH, Bian XY, Wang J, Gao J, 2011. Observational study on the main occurrence dynamics of *Hyphantria cunea* in northwestern Shandong province. *Journal of Shandong Forestry Science and Technology*, 41(2): 1–8. [闫家河, 王文亮, 刘芹, 孙振国, 康智, 张秋梅, 夏明辉, 卞晓阳, 王晶, 高洁, 2011. 鲁西北地区美国白蛾主要发生规律的观察研究. 山东林业科技, 41(2): 1–8.]

Yan JY, Sun H, Wang Y, Chen YF, Ma HT, Yu ZJ, 2025. Status of major nationwide forest pest occurrence in 2024 and trend prediction for 2025. *Forest Pest and Disease*, 44(2): 52–56. [闫佳钰, 孙红, 王越, 陈怡帆, 马和婷, 于治军, 2025. 2024 年全国主要林业有害生物发生情况及 2025 年趋势预测. 中国森林病虫, 44(2): 52–56.]

Yang QL, Peng WD, Chao LD, Li T, Zhang D, Lin X, Wen XY, 2023. Observation on development progress of natural population of *Hyphantria cunea* in Shandong Province. *Biological Disaster Science*, 46(1): 43–47. [杨庆兰, 彭文迪, 晁鲁迪, 李涛, 张丹, 林晓, 温玄烨, 2023. 山东省美国白蛾自然种群发育进度观察. 生物灾害科学, 46(1): 43–47.]

Zhang HB, Wang JW, Zhu XF, Chen XX, 2011. Determination of larval instars of citrus long-horned beetle *Anoplophora chinensis* (Coleoptera: Cerambycidae). *Chinese Journal of Applied Entomology*, 48(3): 688–694. [张海滨, 王建伟, 朱小峰, 陈学新, 2011. 星天牛幼虫龄期的划分. 应用昆虫学报, 48(3): 688–694.]

Zhang SF, 1980. Control of *Hyphantria cunea* (Drury). *Plant Quarantine*, 2(1): 52–54. [张生芳, 1980. 美国白蛾的防治. 植物检疫参考资料, 2(1): 52–54.]

Zhang SM, Fang J, Zhao JQ, Wang K, Ren YJ, Meng ZJ, Yan SC, 2023. Effects of 8 host young trees on growth, development and nutritional efficiency of *Hyphantria cunea* larvae. *Forest Research*, 36(1): 124–131. [张书曼, 方静, 赵佳齐, 王楷, 任英杰, 孟昭军, 严善春, 2023. 8 种寄主幼树对美国白蛾幼虫生长发育及营养效应的影响. 林业科学研究, 36(1): 124–131.]

Zhu BT, 1979. Identification of larval instars in *Helicoverpa armigera*. *Entomological Knowledge*, 16(6): 268–269. [朱宝涛, 1979. 棉铃虫幼虫的龄期识别. 昆虫知识, 16(6): 268–269.]