美国白蛾幼虫人工饲料的筛选研究*

杨丽元[1**] 刘兆丰[1] 丛昕尧[2] 孙守慧[1***]

（1. 沈阳农业大学林学院，沈阳 110866；2. 四川农业大学农学院，成都 611130）

摘 要 **【目的】** 筛选出适合美国白蛾 *Hyphantria cunea* 大量饲养的人工饲料，提高饲养效果，为美国白蛾的人工繁育及实验种群建立奠定基础。**【方法】** 通过组建特定年龄生命表的方法，以复叶槭为对照，研究 3 种人工饲料对美国白蛾生长发育和种群增长趋势的影响。**【结果】** 3 种人工饲料对美国白蛾的饲养效果具有明显差异。其中，以改良配制的饲料Ⅲ饲养效果最好，总发育历期[（45.91±0.41）d]、幼虫存活率(95.6%±0.6%)、老熟幼虫体长[（3.67±0.13）cm]及体重[（0.175 1±0.015 4）g]、新鲜蛹重[（0.151 1±0.012 4）g]、成虫体长[♂（1.61±0.06）cm，♀（1.85±0.06）cm]和翅展[（♂（2.95±0.16）cm，♀（3.60± 0.19）cm）]、单雌平均产卵量[（265±46）粒]、种群发展趋势等生物学指标均优于另外两组。**【结论】** 综合相关生物学指标，饲料Ⅲ是饲养美国白蛾的适宜人工饲料。

关键词 美国白蛾；人工饲料；生长发育；繁殖力；种群生命表

Screening of artificial diets for *Hyphantria cunea* larvae

YANG Li-Yuan[1**] LIU Zhao-Feng[1] CONG Xin-Yao[2] SUN Shou-Hui[1***]

(1. College of Forestry, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China;
2. College of Agronomy, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

Abstract **[Aim]** This study aims to identify the optimal artificial diet for *Hyphantria cunea* mass rearing, providing a basis for artificial breeding and experimental population establishment for pest control research. **[Methods]** An age-specific life table was used to test the effects of three candidate artificial diets on *H. cunea* development, fecundity, and population growth potential. The control group was reared on maple leaves. **[Results]** There was a significant difference between the three artificial diets in the rearing effect of *H. cunea*. Of these, AD-Ⅲ was the most effective diet, with developmental duration (45.91±0.41) d, immature survival rate 95.6%±0.6%, body length (3.67±0.13) cm and body weight (0.175 1±0.015 4) g of older larvae, fresh pupa weight (0.151 1±0.012 4) g, body length [♂ (1.61±0.06) cm; ♀ (1.85±0.06) cm] and wingspan [♂ (2.95±0.16) cm; ♀ (3.60±0.19) cm] of adults, fecundity [265±46)/♀], and population development significantly higher than in the AD-I and AD-Ⅱ groups. **[Conclusion]** AD-Ⅲ is the optimal artificial diet for mass-rearing of *H. cunea*.

Key words *Hyphantria cunea*; artificial diets; insect development; reproduction; life table of population

美国白蛾 *Hyphantria cunea* 属于鳞翅目 Lepidoptera 目夜蛾科 Erebidae，又名秋幕毛虫、秋幕蛾、网幕毛虫，是世界性检疫害虫，也是我国重大外来林业有害生物，被国家林业和草原局列为重点防控对象。在过去的几十年中，借助人为活动已从北美传播到亚洲 7 个国家、欧洲 23 个国家和美洲 3 个国家（罗立平等, 2018; 孙守慧等, 2021）。1979 年在我国辽宁丹东首次发现，现已入侵北京、天津、河北、内蒙古、辽宁、吉林、上海、江苏、浙江、安徽、山东、河南、湖北等 13 个省（直辖市、自治区）（国家林业和草原局 2025 年公告）。美国白蛾在我国可危害数百种作物，对环境具有极强的适应性，幼虫取食量大，成虫繁殖力强，可通过多种途径传播，给国

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

**第一作者 First author，E-mail：yangliyuan87@syau.edu.cn

***通讯作者 Corresponding author，E-mail：shh1@syau.edu.cn

收稿日期 Received：2024-02-08；接受日期 Accepted：2024-05-21

内经济发展和生态环境安全造成了严重威胁（Ning *et al.*, 2021），如何有效地防控美国白蛾是目前生产实践中亟待解决的问题。

美国白蛾室内规模繁育体系的建立，是开展美国白蛾生物学生态学特性、迁飞扩散规律、高效杀虫剂研制、抗性监测与治理、优势天敌控害效能评价等研究的基础。以往的昆虫饲养以天然饲料为主，不但消耗大量的劳动力，而且天然饲料易腐烂变质，使昆虫饲养难以持续和规模化生产。人工饲料能克服天然饲料的缺陷（Jha *et al.*, 2012），不仅可以打破寄主、季节限制、减少或避免微生物感染及农药等因子的干扰，还可以降低昆虫饲养成本，且易于管理，能得到发育整齐、生理标准一致的大量虫源，是昆虫学研究和害虫防治技术研究的重要基础（曹利军等, 2014; 曾凡荣, 2018）。美国白蛾人工饲料和饲养技术相关的研究将为美国白蛾的天敌开发利用和分子生物学研究奠定坚实的基础。

本研究通过组建特定年龄生命表（Age specific life table）的方法，比较 3 种人工饲料对美国白蛾生长发育与繁殖力的影响，同时筛选出适合美国白蛾大量饲养的人工饲料。选择依据三点：（1）选择市场上采购的美国白蛾幼虫通用人工饲料；（2）选择对美国白蛾幼虫人工饲料适度改良的配方；（3）选择对 3 种鳞翅目昆虫人工饲料适度改良的配方。

1　材料与方法

1.1　供试虫源

2023 年 6 月 15 日在沈阳市浑南区东陵南街复叶槭行道树（41° 49' 35" N，123° 34' 28" E）上采获美国白蛾卵块，带回室内作为供试虫源。人工气候箱（RXZ-260A，宁波江南仪器厂）参数设置温度（27±1）℃，相对湿度 60%-70%，光周期 14L∶10D。

1.2　供试人工饲料

选定 3 种人工饲料配方（表 1）用于美国白蛾的饲养，其中饲料Ⅰ为科云生物线上平台采购的美国白蛾幼虫通用人工饲料；饲料Ⅱ是在美国白蛾幼虫人工饲料专利（张永安等, 2009）基础上，适度改良的配方；饲料Ⅲ是在饲养美国白蛾、斜纹夜蛾 *Prodenia litura* 和舞毒蛾 *Lymantria dispar* 3 种鳞翅目昆虫的人工饲料配方（曹利军等, 2014）基础上，适度改良的配方；选取沈阳市浑南区危害相对严重的树种复叶槭，摘取未被为害的新鲜叶片为对照。

配制饲料Ⅰ时先称取琼脂 7.5 g，放入 380 mL 蒸馏水中煮沸；加入 120 g 通用人工饲料后再次煮沸；充分搅拌后冷却至 70 ℃左右时倒入饲养容器（果冻杯改装），冷凝后放入 3-5 ℃冰箱保存备用。配制饲料Ⅱ和饲料Ⅲ时先将各组分分成 A、B 两组；称取琼脂放入蒸馏水中煮沸后加入 A 组，充分搅拌再次煮沸；冷至 70 ℃左右时加入 B 组，搅拌均匀后倒入饲养容器，待冷却至室温后放入 4-5 ℃冰箱保存，保质期 25 d 左右。

1.3　试验方案

采用特定年龄生命表的方法，评价 3 种人工饲料对美国白蛾生长发育与繁殖的影响，筛选出合适配方。饲养方案如下：

卵的消毒：野外采集的新鲜卵块用 5%的甲醛溶液消毒 15 min，用无菌水冲洗 3 次，将卵块冲洗干净，晾干（陈其津等, 2000），置于人工气候箱中孵化。

幼虫饲养：饲养密度及容器参考赵正萍等（2020）。预先准备圆形塑料养虫盒（图 1：A），容量 370 mL，盒盖扎小孔以增加透气性，使用前经过高压灭菌锅灭菌处理。幼虫孵化后用软毛笔接入，每盒 30 头，饲喂不同人工饲料，并以复叶槭叶片为对照，每个处理重复 3 次。整个饲喂过程要根据幼虫龄期及取食情况调整用量，同时根据水分丧失速度调整更换频率（12-24 h），确保食源充足、新鲜。此外，注意定期清理食物残渣和虫粪，保证养虫盒清洁。

幼虫生长至 4 龄时移入长方形塑料养虫盒（图 1：B），每盒 10 头。养虫盒容量 1 000 mL，盒盖制作尼龙纱密封的方形窗口，以保证透气

表 1 供试美国白蛾人工饲料配方

Table 1 Formula of artificial diets used for rearing *Hyphantria cunea*

组别 Group	组分 Ingredients	组分用量 Ingredient amount	
		饲料Ⅱ Artificial diet Ⅱ	饲料Ⅲ Artificial diet Ⅲ
A 组 Group A	小麦胚芽① Wheat germ	60 g	60 g
	蔗糖② Sucrose	25 g	10 g
	黄豆粉③ Bean powder	25 g	20 g
	胆固醇④ Cholesterol	0.5 g	0.5 g
B 组 Group B	韦氏盐⑤ Webster’s salt	5 g	5 g
	山梨酸⑥ Sorbic acid	2 g	4 g
	对羟基苯甲酸甲酯⑥ Methyl-phydroxy benzoate	0.5 g	1.0 g
	抗坏血酸⑦ Ascorbic acid	0.5 g	2.5 g
	维生素 B⑧ Vitamin B	0.5 g	0.5 g
	氯化胆碱⑨ Choline chloride	0 g	0.5 g
	肌醇④ Inositol	0.5 g	0.5 g
	琼脂② Agar	7.5 g	5.0 g
	蒸馏水 Distilled water	380 mL	380 mL

表中上标序号为生产厂家：①徐州伊尔健食品有限公司；②上海阿拉丁生化科技股份有限公司；③山东燕鑫园电子商务有限公司；④天津希恩思生化科技有限公司；⑤北京邦德瑞生物技术有限公司；⑥西陇化工股份有限公司；⑦天津市瑞金特化学品有限公司；⑧山西省临汾健民制药厂；⑨上海罗恩化学试剂。

The superscript numbers in the table represent the manufacturers: ① Xuzhou Yierjian Food Co., Ltd.; ② Shanghai Aladdin Biochemical Technology Co., Ltd.; ③ Shandong Yanxinyuan E-commerce Co., Ltd.; ④ Tianjin Xiensi Biochemical Technology Co., Ltd.; ⑤ Beijing Bondray Biological Co., Ltd.; ⑥ Xilong Chemical Co., Ltd.; ⑦ Tianjin Ruijinte Chemical Co., Ltd.; ⑧ Linfen Jianmin Pharmaceutical Factory, Shanxi Province; ⑨ Shanghai Ron Chemical Reagent.

性，使用前灭菌处理。饲养过程中持续观察并记录幼虫死亡情况，使用游标卡尺（精度 0.02 mm）和天平（PTX-FA210, d=0.1 mg）测量美国白蛾老熟幼虫的体长和体重，每个处理测量 15 头，并观察记录幼虫发育历期和存活率等。

蛹的管理：幼虫化蛹后放入养殖笼待其羽化，养殖笼高 94 cm，开口内径为 57 cm（图 1：C）。持续观察并记录化蛹、成虫羽化等情况，测量蛹重、成虫的体长和翅展，并统计化蛹率、羽化率和性比。

成虫饲养：成虫按雌雄 1∶1 的比例放入养殖笼，每笼 5 对。笼内每天更换浓度为 10%-15% 的新鲜蜂蜜水，并悬挂 2 cm 宽的硫酸纸条供其产卵，待交配产卵后收集卵块，统计产卵量和子代孵化率。

1.4 数据处理

人工饲料饲喂效果的评价一方面依据种群的生物学指标如发育历期、幼虫的体长和体重、蛹重、成虫的体长和翅展、性比、产卵量等，另一方面依据种群遗传的影响如活动能力、飞翔能力、其他活力等。本试验主要依据种群生物学指标进行饲喂效果评价。

使用 Excel 2023 对各项生物学指标进行记录和初步处理，选用 SPSS 26 软件进行统计分析。采用 Duncan’s 新复极差法对上述相关指标进行多重比较。

生命表参数存活率（S_x）为 x 期间的存活率；种群标准产卵量（F）为实际观测的单头雌虫最大产卵量；P_F 为实际产卵量/标准产卵量；雌性

图 1　美国白蛾饲养装置

Fig. 1　Feeding devices of *Hyphantria cunea*

A. 1-3 龄幼虫圆形养虫盒；B. 4-6 龄幼虫方形养虫盒；C. 成虫养殖笼。

A. 1st-3rd instars' round rearing box; B. 4th-6th instars' oblong rearing box; C. Adult rearing cage.

比率（$P_{♀}$）为雌性个体数量/个体总数；种群趋势指数（I）为 $S_1S_2...S_nFP_FP_{♀}$。

2　结果与分析

2.1　人工饲料对美国白蛾存活率的影响

观察并记录各组美国白蛾幼虫存活、老熟幼虫化蛹和成虫羽化情况，计算存活率、化蛹率和羽化率（图 2）。幼虫存活率分别为：饲料Ⅰ组 90.6%±0.6%，饲料Ⅱ组 88.9%±1.5%，饲料Ⅲ组 95.6%±0.6%，天然食料组 90.0%±0.6%。化蛹率分别为：饲料Ⅰ组 90.4%±1.3%，饲料Ⅱ组 90.0%±2.5%，饲料Ⅲ组 91.4%±0.2%，天然食料组 85.1%±0.3%。羽化率分别为：饲料Ⅰ组 85.2%±0.8%，饲料Ⅱ组 78.9%±0.3%，饲料Ⅲ组 87.5%±0.4%，天然食料组 81.8%±0.3%。综上可

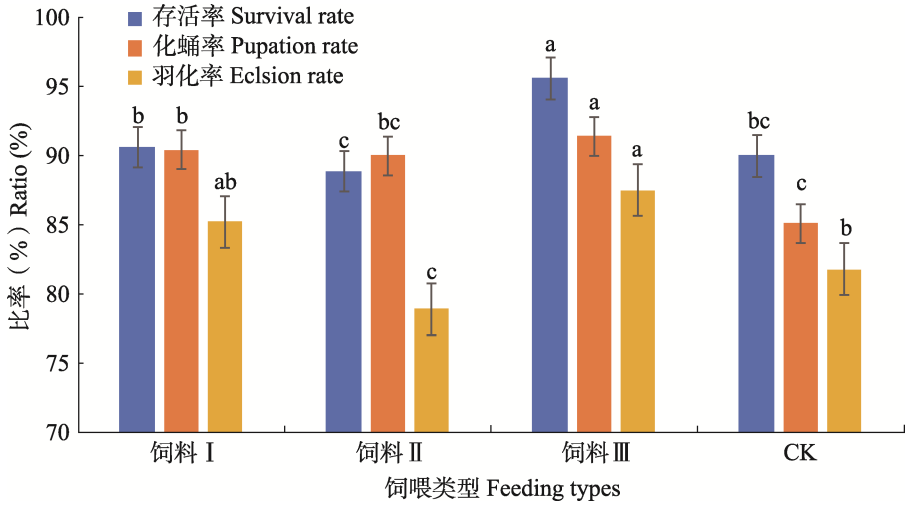

图 2　美国白蛾存活率、化蛹率及羽化率

Fig. 2　Survival rate, pupation rate and eclosion rate of *Hyphantria cunea*

CK 为新鲜复叶槭叶片。柱上不同小写字母表示差异显著（P<0.05，Duncan 氏新复极差法检验）。下图同。

CK represents fresh leaves of *Acer negundo*. Different lowercase letters above bars indicate significant difference at the 0.05 level by Duncan's multiple range test. The same below.

得饲料Ⅲ饲喂组的幼虫存活率、化蛹率和羽化率均明显高于其他组（P<0.05）；饲料Ⅰ组次之；天然食料组的化蛹率较低，饲料Ⅱ组的羽化率较低。

2.2 人工饲料对美国白蛾发育历期的影响

观察并记录室内饲养的美国白蛾发育进程，获得 3 种人工饲料饲养的美国白蛾发育历期（表 2）。饲料Ⅰ饲喂组总发育历期（46.92±0.59）d，其中幼虫期（25.96±0.30）d，蛹期（8.00±0.15）d，成虫期（6.00±0.21）d，卵期（6.97±0.28）d；饲料Ⅱ饲喂组总发育历期（46.99±0.68）d，其中幼虫期（25.97±0.18）d，蛹期（8.01±0.18）d，成虫期（6.03±0.32）d，卵期（6.98±0.30）d；饲料Ⅲ饲喂组总发育历期（45.91±0.41）d，其中幼虫期（25.02±0.15）d，蛹期（7.96±0.21）d，成虫期（5.96±0.21）d，卵期（6.98±0.21）d；天然食料饲喂组总发育历期（46.54±1.37）d，其中幼虫期（26.47±0.82）d，蛹期（7.29±0.72）d，成虫期（5.93±0.42）d，卵期（6.86±0.55）d。综合上述分析，饲料Ⅲ饲喂的美国白蛾发育历期明显短于其他组（P<0.05），天然食料组次之，饲料Ⅰ和饲料Ⅱ组发育历期稍长；饲料Ⅰ和饲料Ⅱ组的发育历期基本无差异；人工饲料组较天然食料组个体发育更加整齐。

2.3 人工饲料对美国白蛾生物学参数的影响

为衡量不同饲料在美国白蛾幼虫期的饲喂效果，对美国白蛾老熟幼虫的体长和体重，以及新鲜蛹重进行统计（表 2）。饲料Ⅰ饲喂组老熟幼虫体长（3.40±0.17）cm，饲料Ⅱ组（3.24±0.14）cm，饲料Ⅲ组（3.67±0.13）cm，天然食料组（3.51±0.09）cm。饲料Ⅰ饲喂组老熟幼虫体重（0.151 8±0.023 3）g，饲料Ⅱ组（0.131 6±0.018 1）g，饲料Ⅲ组（0.175 1±0.015 4）g，天然食料组（0.158 1±0.020 1）g。饲料Ⅰ饲喂组新鲜蛹重（0.146 0±0.014 0）g，饲料Ⅱ组（0.143 4±0.012 2）g，饲料Ⅲ组（0.151 1±0.012 4）g，天然食料组（0.145 7±0.016 1）g。由美国白蛾老熟幼虫的体长和体重，以及新鲜蛹重分析，饲料Ⅲ饲喂组在体长上呈现明显优势（P<0.05），优于天然食料和饲料Ⅰ组，饲料Ⅱ组体长最短；幼虫体重及蛹重结果与之相近，饲料Ⅲ组最重，天然食料和饲料Ⅰ组居中，且均重于饲料Ⅱ组。

每个处理随机选取 50 头成虫，统计性比（图 3：A），同时记录成虫产卵情况（图 3：B）。饲料Ⅰ饲喂的美国白蛾性比为 1.63∶1（31 雌 19 雄），单雌平均产卵（251±42）粒；饲料Ⅱ饲喂的美国白蛾性比为 1.27∶1（28 雌 22 雄），单雌平均产卵（248±41）粒；饲料Ⅲ饲喂的美国白蛾性比为 1.50∶1（30 雌 20 雄），单雌平均产卵（265±46）粒；天然食料饲喂的美国白蛾性比为 1.50∶1（30 雌 20 雄），单雌平均产卵（239±21）粒。饲料Ⅲ组产卵量显著高于其余组（P<0.05）；饲料Ⅰ和饲料Ⅱ组产卵量接近，居中；天然食料组产卵量最小。

产卵后死亡的成虫统一做成干制标本，测量其体长与翅展（表 2）。饲料Ⅰ、饲料Ⅱ、饲料Ⅲ和天然食料组雄性成虫的体长依次是（1.41±0.05）、（1.41±0.02）、（1.61±0.06）和（1.41±0.05）cm，翅展分别为（2.61±0.13）、（2.68±0.17）、（2.95±0.16）和（2.59±0.09）cm；雌性成虫的体长依次是（1.67±0.10）、（1.67±0.06）、（1.85±0.06）和（1.74±0.06）cm，翅展分别为（3.11±0.20 cm）、（3.16±0.15 cm）、（3.60±0.19 cm）和（3.31±0.21）cm。由成虫体长和翅展分析，饲料Ⅲ饲喂组美国白蛾的体长和翅展明显优于其余组（P<0.05），且成虫在养殖笼内相对活跃；饲料Ⅰ和饲料Ⅱ组基本无差异（P>0.05）；天然食料组雌虫较饲料Ⅰ和饲料Ⅱ组的雌虫稍优，雄虫差异不明显（P>0.05）。

2.4 人工饲料饲养的美国白蛾实验种群生命表参数

在饲养过程中发现，美国白蛾幼虫期主要致死因子是微生物感染，且以饲料Ⅱ组的死亡率最高，天然食料组次之。预蛹期主要致死因子之一是幼虫取食，个体之间化蛹进程的不同步导致先化蛹者被幼虫啃食，该现象在不同处理组均存在且差异不明显（P>0.05）；预蛹期主要致死因子之二是化蛹失败，天然食料组化蛹失败率明显高于人工饲料组（P<0.05）。停留在蛹期不羽化的

表 2　3 种人工饲料饲养的美国白蛾发育历期及生物学参数

Table 2　Developmental duration and biology parameter of *Hyphantria cunea* reared on 3 artificial diets

处理 Treatment	幼虫期（d） Larval stage (d)	蛹期（d） Pupal stage (d)	成虫期（d） Adult stage (d)	卵期（d） Egg stage (d)	发育历期（d） Developmental duration (d)	老熟幼虫体长（cm） Mature larval length (cm)	老熟幼虫体重（g） Mature larval weight (g)	蛹重（g） Pupal weight (g)	成虫体长（cm） Body length (cm)		成虫翅展（cm） Wing spread (cm)	
									雄性 Male	雌性 Female	雄性 Male	雌性 Female
饲料Ⅰ Artificial diet Ⅰ	25.96±0.30 bc	8.00±0.15 a	6.00±0.21 a	6.97±0.28 a	46.92±0.59 a	3.40±0.17 c	0.151 8±0.023 3 bc	0.146 0±0.014 0 b	1.41±0.05 b	1.67±0.10 c	2.61±0.13 bc	3.11±0.20 c
饲料Ⅱ Artificial diet Ⅱ	25.97±0.18 b	8.01±0.18 a	6.03±0.32 a	6.98±0.30 a	46.99±0.68 a	3.24±0.14 d	0.131 6±0.018 1 c	0.143 4±0.012 2 c	1.41±0.02 b	1.67±0.06 c	2.68±0.17 b	3.16±0.15 bc
饲料Ⅲ Artificial diet Ⅲ	25.02±0.15 c	7.96±0.21 ab	5.96±0.21 ab	6.98±0.21 a	45.91±0.41 b	3.67±0.13 a	0.175 1±0.015 4 a	0.151 1±0.012 4 a	1.61±0.06 a	1.85±0.06 a	2.95±0.16 a	3.60±0.19 a
复叶槭叶片（对照） *Acer negundo* leave (CK)	26.47±0.82 a	7.29±0.72 b	5.93±0.42 b	6.86±0.55 b	46.54±1.37 ab	3.51±0.09 b	0.158 1±0.020 1 b	0.145 7±0.016 1 bc	1.41±0.05 b	1.74±0.06 b	2.59±0.09 c	3.31±0.21 b
N	360	360	360	360	360	60	60	60	60	60	60	60
df	359	359	359	359	359	59	59	59	59	59	59	59
T	710.325	298.551	375.043	364.587	1 038.206	130.736	48.659	83.297	118.639	129.991	104.463	94.813
SD	0.691	0.497	0.303	0.361	0.884	0.205	0.025	0.014	0.095 41	0.103 28	0.200 84	0.269 08
SE	0.036	0.026	0.160	0.019	0.047	0.026	0.003	0.002	0.012 32	0.013 33	0.025 93	0.034 74

表中数据为平均值±标准误，同列不同小写字母表示差异显著（$P<0.05$，Duncan 氏新复极差法检验）；*N* 表示样本数量；*df* 表示自由度；*T* 值为 *t* 检验时计算出的值，用于比较一个或两个样本的均值是否存在显著性差异；SD 表示标准差；SE 表示标准误。

The data in the table are mean±SE. Different letters in each column indicate significant difference ($P<0.05$, Duncan's multiple range test); *N* indicates number of samples; *df* indicates degree of freedom; *T*-value is calculated during the *t*-test to compare the means of one or two samples for significant difference; SD indicates standard deviation; SE indicates standard error.

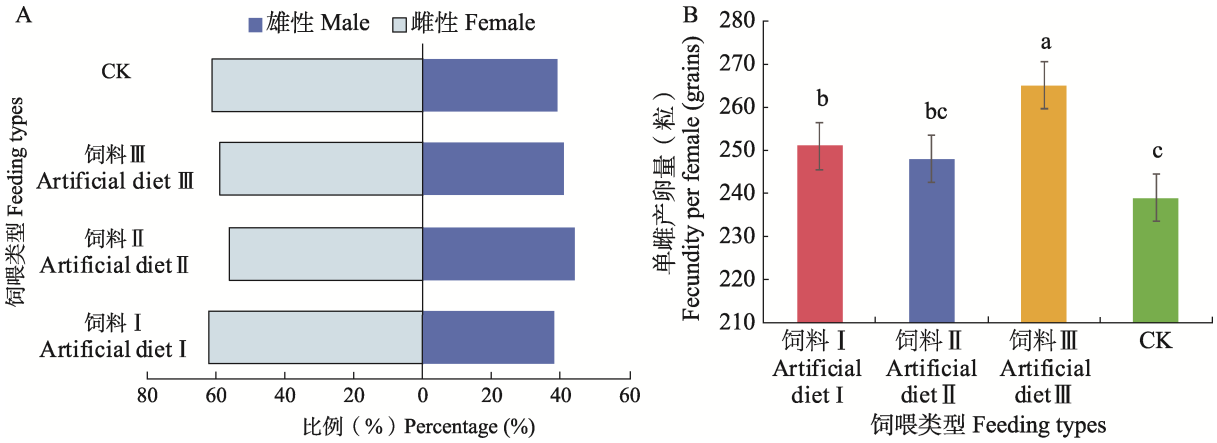

图 3　供试美国白蛾性比（A）和产卵量（B）

Fig. 3　Sex ratio (A) and fecundity (B) of the experimental *Hyphantria cunea*

表 3　3 种人工饲料饲养的美国白蛾种群生命表

Table 3　Laboratory population life table of *Hyphantria cunea* reared on 3 artificial diets

虫期 Stage *X*	致死因子 d_xF Death factors	存活率 S_x（%）Survival rate (%)			
		饲料Ⅰ Artificial diet Ⅰ	饲料Ⅱ Artificial diet Ⅱ	饲料Ⅲ Artificial diet Ⅲ	复叶槭叶片（对照）*Acer negundo* leave (CK)
卵期 Egg stage	不孵化 Nonhatch	100.0	100.0	100.0	98.0
幼虫期 Larval stage	微生物感染 Microbial infection	90.6	88.9	95.6	90.0
预蛹期 Pre-pupal stage	幼虫取食 Larval attack	93.3	93.8	93.6	94.0
	化蛹失败 Failed pupation	97.1	96.2	97.8	91.1
蛹期 Pupal stage	不羽化 Noneclosion	85.2	78.9	87.5	81.8
成虫期 Adult stage	饥饿致死（不食不动）Died of starvation (no feeding and inaction)	89.7	84.1	90.2	86.8
	生理不适致死 Died of physical discomfort	94.1	92.9	93.3	94.5
种群标准产卵量 *F* Population standard oviposition capacity		550	550	550	550
实际产卵量/标准产卵量 P_F Probability of standard eggs		45.64	45.09	48.18	43.45
雌性比率 $P_♀$ Probability of females		62	56	59	61
种群趋势指数 *I* Population trend index		91.87	68.68	100.75	73.88

个体，统计为蛹期死亡。成虫期部分成虫不食不动，最终饥饿致死，该现象在饲料Ⅱ组最为明显，在天然食料组次之；成虫期也存在翅不伸展、飞行障碍等个体，且人工饲料组更明显（P<0.05）。

综合生命表参数分析（表 3），饲料Ⅰ饲喂组种群趋势指数为 91.87，饲料Ⅱ组为 68.68，饲料Ⅲ组为 100.75，天然食料组为 73.88。饲料Ⅲ更适合作为室内饲养美国白蛾的人工饲料，比目前市售的通用饲料效果更优；饲料Ⅱ不适合用作美国白蛾人工饲料。

3　结论与讨论

本试验通过组建实验种群生命表的方法，研究了 3 种人工饲料对美国白蛾生长发育、繁殖力及种群增长潜能的影响，以复叶槭叶片饲养的美国白蛾作为对照。结果表明，改良饲料Ⅲ饲养的美国白蛾发育历期、老熟幼虫的体长和体重、新鲜蛹重、成虫的体长和翅展、幼虫存活率、老熟幼虫化蛹率以及成虫羽化率等单项指标均优于饲料Ⅰ和饲料Ⅱ，且实际产卵量和种群趋势指数

等生命表参数也高于另外两组，说明该配方是饲养美国白蛾的适宜人工饲料配方，且在一定程度上优于市售饲料。

饲料Ⅱ在原配方基础上，提高了胚芽、蔗糖和韦氏盐的比例，降低了山梨酸和对羟基苯甲酸甲酯的用量。胚芽可以为供试昆虫提供全部或大部分天然营养物质，且加工方便；蔗糖可以增强取食刺激，是兼具营养功能的取食刺激物；韦氏盐有利于缩短幼虫历期，使幼虫发育更加整齐；考虑到很多防腐剂都带有毒性，降低了山梨酸和对羟基苯甲酸甲酯的用量（吕飞等, 2007; 曾凡荣, 2018）。该组美国白蛾虽然可以完成世代发育，但其发育历期偏长，个体发育整齐度较另两组人工饲料差。此外，幼虫存活率低，微生物感染的个体相对较多，且幼虫和蛹偏轻，单雌产卵量少。推测蔗糖比例调高对美国白蛾的摄食和生长发育起到了抑制作用，引起幼虫生长缓慢，蛹变小。同时，山梨酸和对羟基苯甲酸甲酯的减少，增加了饲料被污染、变质的风险（吕飞等, 2007）。改良饲料Ⅱ总体难以满足美国白蛾室内大量饲养的要求。

饲料Ⅲ是基于美国白蛾、斜纹夜蛾及舞毒蛾 3 种鳞翅目昆虫的人工饲料适度改良的配方。在原配方基础上提高了山梨酸、尼泊金、氯化胆碱和维生素 B 的用量，降低了黄豆粉的比例。氯化胆碱对卵的形成和正常发育起着重要作用；维生素 B 需要从食物中摄取，是幼虫发育必需的营养物质；考虑蛋白质浓度过高会导致昆虫的生长、发育或繁殖受到抑制，稍微降低了黄豆粉的比例（曾凡荣, 2018）。该配方较曹利军等（2014）3 种鳞翅目昆虫的人工饲料配方，幼虫历期、蛹重和羽化率均有改善。较隋贺等（2008）发现的家蚕 *Bombyx mori* 人工饲料配方，蛹重和产卵量有改善，幼虫历期、羽化率和化蛹率等指标差异不显著。改良饲料Ⅲ适用于美国白蛾的饲养，可以用作美国白蛾的人工饲料。

参考文献 (References)

Cao LJ, Yang F, Tang SY, Chen M, 2014. Development of an artificial diet for three lepidopteran insects. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 51(5): 1376–1386. [曹利军, 杨帆, 唐思莹, 陈敏, 2014. 适合三种鳞翅目昆虫的一种人工饲料配方. 应用昆虫学报, 51(5): 1376–1386.]

Chen QJ, Li GH, Pang Y, 2000. A simple artificial diet for mass rearing of some noctuid species. *Entomological Knowledge*, 37(6): 325–327. [陈其津, 李广宏, 庞义, 2000. 饲养五种夜蛾科昆虫的一种简易人工饲料. 昆虫知识, 37(6): 325–327.]

Jha RK, Chi H, Tang LC, 2012. A comparison of artificial diet and hybrid sweet corn for the rearing of *Helicoverpa armigera* (Hübner) (Lepidoptera: Noctuidae) based on life table characteristics. *Environmental Entomology*, 41(1): 30–39.

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.]

Lü F, Liu YS, Zhang XB, Zhu YH, 2007. Present research condition of artificial feed to Lepidoptera. *Entomological Journal of East China*, 16(2): 149–155. [吕飞, 刘玉升, 张秀波, 朱永红, 2007. 鳞翅目昆虫人工饲料的研究现状. 华东昆虫学报, 16(2): 149–155.]

National Forestry and Grassland Administration, 2025. Epidemic Area of *Hyphantria cunea* (Drury) [EB/OL]. [2025-2-25]. URL: https://www.forestry.gov.cn/lyj/1/gsgg/20250303/612535.html. [国家林业和草原局, 2025. 美国白蛾疫区[EB/OL]. [2025-2-25]. 网址: https://www.forestry.gov.cn/lyj/1/gsgg/20250303/612535.html]

Ning J, Lu PF, Fan JT, Ren LL, Zhao LL, 2022. American fall webworm in China: A new case of global biological invasions. *The Innovation*, 3(1): 100–201.

Sui H, Li CY, Jiao SB, Zheng GL, 2008. Effect comparison of four kinds of artificial diet feed on *Hyphantria cunea* (Drury). *Shandong Forestry Science and Technology*, 38(6): 47–48. [隋贺, 李长友, 矫省本, 郑桂玲, 2008. 四种人工饲料饲养美国白蛾的效果比较. 山东林业科技, 38(6): 47–48.]

Sun SH, Nan JK, Yang LY, Song LW, Zuo TT, Wang Y, Li S, 2021. Research progress on natural enemies of the *Hyphantria cunea* (Drury). *Journal of Environmental Entomology*, 43(6): 1331–1347. [孙守慧, 南俊科, 杨丽元, 宋丽文, 左彤彤, 王悦, 李硕, 2021. 美国白蛾天敌研究进展. 环境昆虫学报, 43(6): 1331–1347.]

Zeng FR, 2018. Research of insect artificial diet. *Chinese Journal of Biological Control*, 34(2): 184–197. [曾凡荣, 2018. 昆虫人工饲料研究. 中国生物防治学报, 34(2): 184–197.]

Zhang YA, Wang YZ, Xu BM, Qu LJ, 2009. The artificial feeding and passage methods of *Hyphantria cunea* and artificial feed for its larvae. CN200510127628.9. 2009-12-02. [张永安, 王玉珠, 徐保泯, 曲良建, 2009. 美国白蛾的人工饲养和传代方法及其幼虫人工饲料. CN200510127628.9. 2009-12-02.]

Zhao ZP, Yan XW, Wang X, Guo TB, Zhou XY, Yuan DJ, 2020. Research on the influencing factors of rearing *Hyphantria cunea* (Drury). *Hunan Forestry Science & Technology*, 47(3): 65–68, 74. [赵正萍, 颜学武, 王新, 郭同斌, 周晓宇, 袁冬菊, 2020. 人工饲养美国白蛾影响因素研究. 湖南林业科技, 47(3): 65–68, 74.]