应用昆虫学报 *Chinese Journal of Applied Entomology* 2014, 51(5): 1376−1386. DOI: 10.7679/j.issn.2095−1353.2014.165

其他技术与方法

适合三种鳞翅目昆虫的一种人工饲料配方*

曹利军 杨 帆 唐思莹 陈 敏**

（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）

摘 要 **【目的】** 昆虫的人工饲养是昆虫学研究和害虫防治技术研究的重要基础，开发一种适用于多种昆虫的人工饲料将大大减少昆虫饲养的成本，提高工作效率。**【方法】** 本研究以美国白蛾 *Hyphantria cunea*（Drury）为初试昆虫，通过两次正交试验开发出一种适合饲养美国白蛾、斜纹夜蛾 *Prodenia litura*（Fabricius）和舞毒蛾 *Lymantria dispar*（L.）3 种多食性昆虫的人工饲料配方。**【结果】** 该配方的成分和比例为：麦胚（12%）、蔗糖（2%）、酪蛋白（4.5%）、琼脂（1.5%）、氯化胆碱（0.05%）、韦氏盐（1.0%）、山梨酸（0.4%）、对羟基苯甲酸（0.25%）、抗坏血酸（0.5%）、范氏维生素 B（0.003%）、胆固醇（0.1%）和肌醇（0.035%）。**【结论】** 该配方饲养 3 种昆虫在幼虫历期、蛹重、成蛹率和羽化率等各项指标均表现优良。本研究的试验方法和配方将会为其他多食性昆虫人工饲料的开发提供借鉴。

关键词 昆虫人工饲料，正交试验，美国白蛾，斜纹夜蛾，舞毒蛾

Development of an artificial diet for three lepidopteran insects

CAO Li-Jun YANG Fan TANG Si-Ying CHEN Min**

(Beijing Key Laboratory for Forest Pest Control, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract **[Objectives]** The establishment of insect colonies under artificial conditions is important for research and the development of a set of artificial diets suitable for a variety of insect species can greatly decrease costs and improve the efficiency of maintaining such colonies. **[Methods]** A diet was developed using two rounds of orthogonal design methods and employed successfully in rearing three Noctuoidea species: *Hyphantria cunea* (Drury), *Prodenia litura* (Fabricius) and *Lymantria dispar* (L.). **[Results]** The diet contained wheat germ (12%), sugar (2%), casein (4.5%), agar (1.5%), choline chloride (0.05%), Wesson's salt (1.0%), sorbic acid (0.4%), methyl p-hydroxybenzoate (0.25%), ascorbic acid (0.5%), Vanderzant's vitamin mix (0.003%), cholesterol (0.1%) and inositol (0.035%). **[Conclusion]** The three insect species reared on this diet displayed normal larval development, pupal weight, pupation and eclosion rates. This research will provide a basis for the development of artificial diets for other polyphagous insects.

Key words artificial diet, orthogonal design, *Hyphantria cunea*, *Prodenia litura*, *Lymantria dispar*

昆虫人工饲料不仅可解决天然食料的季节性短缺，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（忻介六和苏德明，1979；Singh and Moore，1985）。研究表明，昆虫发育所需要的营养成分大致相同，只是不同昆虫需要的量有较大差异（王延年，1984；方杰等，2003）。多食性昆虫由于自然食料范围广，对饲料的要求比

* 资助项目：中央高校基本科研业务费专项资金（YX2013-11）；“十二五”农村领域国家科技计划“杨树分子育种与品种创制（2011AA100201）”；国家自然科学基金项目（30970462）

**通讯作者，E-mail: minch@bjfu.edu.cn

收稿日期：2013-12-23，接受日期：2014-01-09

寡食性昆虫更为宽松。有些多食性昆虫有多种饲料配方，并且这些饲料配方大多可以摆脱寄主植物或其提取物（王延年，1984；陈其津等，2000；蒋素蓉和付凤玲，2004；毛建萍等，2008）。鉴于多食性昆虫人工饲料的以上特点，使得为多种昆虫设计一种通用的人工饲料成为可能，这对于需要同时大量饲养多种昆虫的研究室和研发单位，将大大减少饲料配制的工作量和昆虫饲养的成本。

本研究以我国重要的农林害虫美国白蛾 *Hyphantria cunea*（Drury）、斜纹夜蛾 *Prodenia litura*（Fabricius）和舞毒蛾 *Lymantria dispar*（L.）为目标昆虫，综合参考了鳞翅目昆虫如美国白蛾、盐泽灯蛾 *Estigmene acrea*（Drury）、家蚕 *Bombyx mori*（L.）、甘蓝夜蛾 *Mamestra brassicae*（L.）、小菜蛾 *Plutella xylostella*（L.）、三化螟 *Tryporyza incertulas*（Walker）、粘虫 *Mythimna separate*（Walker）等鳞翅目昆虫已有的人工饲料配方（王延年，1984；张永安等，2007），设计出一种适合该 3 种多食性昆虫的人工饲料配方。试验中首先以生活史较短的美国白蛾为初试昆虫，采用正交试验对多因素多个水平进行考察以寻找各因素的最佳搭配，再用夜蛾总科的舞毒蛾和斜纹夜蛾对设计出的饲料配方进行检验，从而对该饲料配方的饲养效果进行综合评价。

1　材料与方法

1.1　试验材料

采集美国白蛾老熟幼虫和舞毒蛾卵块，在室内分别用桑【*Morus alba*（L.）】叶和栎树【*Quercus mongolica*（Fischer ex Ledebour）】叶饲养至成虫，收集卵块作为虫源；斜纹夜蛾卵购自河南省济源白云实业有限公司。

饲料配方中的一些成分需要预先处理或配制，方法如下。

市售麦胚经 120℃高压灭菌，后置于 60℃烘箱中干燥，备用。

韦氏盐：称取 KCl 120 g，$CuSO_4$ 0.39 g，KI 0.05 g，$MnSO_4$ 0.2 g，NaCl 105 g，$MgSO_4$ 90 g，NaF 0.57 g，$K_2Al(SO4)_2 \cdot H_2O$ 0.09 g，KH_2PO_4 31 g 溶于 2 L 水中，记为成分 1。$CaCO_3$ 10.5 g，$FePO_4 \cdot 4H_2O$ 1.044 g，$Ca_3(PO_4)_2$ 7.45 g 研成粉末，装入广口瓶中，记为成分 2。1 g 韦氏盐需加 2 mL 成分 1 和 0.38 g 成分 2。

范氏维生素 B 称取核黄素 0.5 g，叶酸 0.25 g，放入小烧杯中，加 50 mL 蒸馏水用玻璃棒搅拌，然后加数滴 1 mol/L 的 KOH 溶液并搅拌至溶液透明，再加入烟酰胺 1 g，泛酸钙 1 g，盐酸硫胺素 0.25 g，盐酸吡哆醇 0.25 g，生物素 0.02 g，维生素 B_{12} 0.002 g，用蒸馏水定容至 100 mL。即 0.003 g 范氏维生素 B 需 100 μL 此溶液。

1.2　饲料配方的正交试验设计及实施

参考美国白蛾、盐泽灯蛾、家蚕、甘蓝夜蛾、小菜蛾、三化螟、粘虫等鳞翅目昆虫的饲料配方的成分和比例（王延年，1984；张永安等，2007），初步拟定饲料的成分与水平（表 1）。第 1 次正交试验为 11 因子 3 水平正交试验，选择正交表 $L_{27}(3^{13})$，共 27 个处理。按照确定的正交试验方案，用美国白蛾进行各处理的饲养试验。根据实验统计结果确定需进一步优化的因素和水平，设计第 2 次正交试验的正交表 $L_{18}(3^7)$，如表 2 所示。按照第 2 次正交试验方案，进行美国白蛾的饲养试验。

观察美国白蛾发育情况，记录各虫龄历期、存活时间和化蛹率等指标，将结果填在正交表右边栏，然后计算各水平的平均值。通过各水平平均值的比较，找出每一营养因素的最佳水平，从而发现各营养因素的最佳搭配。计算各水平平均值间的极差，分析影响试验结果的主导因素。本试验将平均历期最短、平均存活时间最长、平均化蛹率最高作为各因素最佳水平的标准。

1.3　饲料配制

称取麦胚、酪蛋白、蔗糖、胆固醇，放入容器中混合均匀，记为 a 组。称（或量）取韦氏盐、山梨酸、抗坏血酸、范氏维生素 B、对羟基苯甲酸甲酯、氯化胆碱、肌醇混均记为 b 组。根据上述成分的比例计算出水的量，称取琼脂放入蒸馏水中煮沸加入 a 组，充分搅拌再次煮沸。冷至 70℃左右加入 b 组搅拌均匀，倒入饲养容器（果

冻杯改装），冷凝后放入 4℃冰箱保存。

表 1 第 1 次正交试验的营养因素与水平

Table 1 Nutrition factors and their levels for the 1st orthogonal design

水平 Level	A (%)	B (%)	C (%)	D (%)	E (%)	F (%)	G (%)	H (%)	I (%)	J (%)	K (%)	L (%)
1	5	2.0	3.5	0.50	0.3	0.1	0.06	0.003	1	0.05	0.05	0.020
2	9	3.5	4.5	0.75	0.7	0.2	0.15	0.004	2	0.10	0.10	0.035
3	12	5.0	5.5	1.00	1.0	0.3	0.30	0.005	3	0.30	0.20	0.050

A: 胚芽；B：蔗糖；C：酪蛋白；D：韦氏盐；E：山梨酸；F：对羟基苯甲酸甲酯；G：抗坏血酸；H：范氏维生素 B；I：琼脂；J：胆固醇；K：氯化胆碱；L：肌醇。下表同。

A. Wheat germ; B. Sugar; C. Casein; D. Wesson's salt; E. Sorbic acid; F. Methyl p-hydroxybenzoate; G. Ascorbic acid; H. Vanderzant's vitamin mix; I. Agar; J. Cholesterol; K. Choline chloride; L. Inositol. The same below.

表 2 第 2 次正交试验的营养因素与水平

Table 2 Nutrition factors and their levels for the 2nd orthogonal design

水平 Level	D (%)	E (%)	F (%)	G (%)	H (%)	J (%)	L (%)
1	0.50	0.3	0.20	0.3	0.003	0.05	0.020
2	0.75	0.4	0.25	0.4	0.004	0.10	0.035
3	1.00	0.5	0.30	0.5	0.005	0.15	0.050

1.4 饲养方法

用果冻杯作为饲养容器（底部直径 3 cm，顶部直径 5 cm，高 4 cm），杯盖用 80 目防虫网制作一个边长 1 cm 的方形通气窗。美国白蛾和斜纹夜蛾的卵块变色后用 10%甲醛溶液浸泡 1 h，冲洗晾干后置于饲料表面待其孵化。舞毒蛾卵块放入 4℃冰箱处理 4 个月左右，破除滞育。因舞毒蛾卵块有毛状覆盖物，且幼虫无取食卵壳的习性，不对其进行消毒。将饲养容器放入人工气候箱中，日照长度 16 h，温度 25℃，湿度 70%~80%。

饲养过程中，视饲料状况和幼虫取食情况及时更换饲料。为避免粪便对饲料的污染，美国白蛾和舞毒蛾幼虫 2 龄后将容器倒置饲养。美国白蛾一般 3 龄之前可不更换饲料。在更换饲料时，可以利用美国白蛾低龄幼虫聚集在网幕内取食的习性，将幼虫与网幕一起转移。舞毒蛾和斜纹夜蛾的低龄幼虫用软毛刷小心转移。

在容积约为 3 L 的保鲜盒四周用 80 目防虫网各做一个边长 3 cm 的方形通气窗，并在内侧围有白纸，放置浸有 10%蜂蜜水的脱脂棉，作为昆虫的产卵室。

1.5 优化配方的检验与评价

根据第 2 次正交试验的统计结果，设计出优化的饲料配方。用美国白蛾（灯蛾科 Hypercompe）、舞毒蛾（毒蛾科：Lymantridae）和斜纹夜蛾（夜蛾科：Noctuidae）对优化的配方进行检验，记录 3 种昆虫的幼虫历期、化蛹率、蛹重、羽化率等，并与其他人工饲料的研究结果相比较，以对新开发的饲料配方进行综合评价。

2 结果与分析

2.1 第 1 次正交试验结果与分析

用第 1 次正交试验设计的饲料配方饲养美国白蛾幼虫，结果见表 3。为便于统计，各处理中幼虫全部死亡之后的各龄生长历期都记为 20 d，但幼虫存活时间仍按实际情况来计算。27 个

处理均不能将美国白蛾幼虫饲养至化蛹，存活最长仅至 4 龄。表 3 中平均龄期历期最短、平均存

表 3　第 1 次饲料筛选正交设计 $L_{27}(3^{13})$及极差分析

Table 3　The 1st orthogonal design and range analysis

处理 Treatment	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L		a1	a2	a3	b
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	7	9	20	20
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	7	20	20	16
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	7	9	20	16
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3	7	10	20	20
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1	7	10	20	20
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2	7	9	20	20
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2	8	20	20	11
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3	6	20	20	8
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1	20	20	20	7
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	5	8	7	27
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1	5	20	20	10
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2	20	20	20	2
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2	7	20	20	10
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3	5	10	20	21
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1	20	20	20	7
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1	7	6	5	27
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2	20	20	20	7
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	20	20	20	7
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2	3	7	7	28
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3	3	6	20	26
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1	4	8	20	27
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1	20	11	20	19
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	4	20	20	9
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3	20	20	20	3

应用昆虫学报 *Chinese Journal of Applied Entomology* 2014, 51(5): 1376–1386. DOI: 10.7679/j.issn.2095–1353.2014.165

续表 3（Table 3 continued）

处理 Treatment	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L		a1	a2	a3	b
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3	5	6	8	20
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1	5	20	20	16
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2	5	20	20	11
a1 $\overline{x1}$	8.4	6.8*	12.4	7.6*	7.7	10.4	9.0	10.3	8.9*	7.2*	7.2*	12.1					
a1 $\overline{x2}$	12.1	10.8	7.3*	8.7	6.9*	7.6*	12.0	10.4	10.2	10.4	9.1	9.0					
a1 $\overline{x3}$	7.7*	10.7	10.3	12.0	13.7	10.2	7.2*	7.4*	9.1	10.6	10.7	7.1*					
a2 $\overline{x1}$	14.1	*11.9	15.0	14.9	10.8*	16.1	15.2	15.7	12.3*	14.7*	13.8*	13.8*					
a2 $\overline{x2}$	16.0	14.4	13.7*	10.7*	16.2	14.7	14.9	16.3	14.7	14.8	14.1	14.0					
a2 $\overline{x3}$	7.7*	16.9	14.6	17.7	16.2	12.4*	13.1*	12.1*	16.2	13.8	15.3	14.7					
a3 $\overline{x1}$	20.0	17.1	18.3	18.7	14.1*	20.0	20.0	17.1	18.3	18.7	17.1	18.7					
a3 $\overline{x2}$	16.9*	20.0	17.2*	16.9*	20.0	16.9*	17.2	20.0	17.2*	17.7*	17.0*	18.6					
a3 $\overline{x3}$	17.2	17.0*	18.6	18.6	20.0	17.2	16.9*	17.0*	18.6	18.6	20.0	16.9*					
b $\overline{x1}$	15.3	19.1*	13.8	15.2	20.2*	13.1	14.4	15.1	17.1*	14.6	16.7*	16.7					
b $\overline{x2}$	13.1	14.3	16.2*	20.2*	14.8	16.6*	14.1	14.0	15.6	15.6	15.6	18.2*					
b $\overline{x3}$	17.7*	12.7	16.1	10.7	11.1	16.4	17.6*	17.0*	13.4	16.0*	13.9	15.1					
a1’	4.4	4.0	5.1	4.4	6.8*	2.9	4.8	3.0	1.3	3.3	3.4	5.0					
a2’	8.3*	5.0	1.3	7.0	5.4	3.7	2.1	4.2	3.9	1.0	1.6	0.9					
a3’	3.1	3.0	1.3	1.8	5.9*	3.1	3.1	4.9	1.3	1.0	3.0	1.8					
b’	4.6	6.4	2.3	9.6*	9.1	3.4	3.4	3.0	3.7	1.4	2.8	3.1					

A. 胚芽；B. 蔗糖；C. 酪蛋白；D. 韦氏盐；E. 山梨酸；F. 对羟基苯甲酸甲酯；G. 抗坏血酸；H. 范氏维生素 B；I. 琼脂；J. 胆固醇；K. 氯化胆碱。a1. 1 龄历期（d）；a2. 2 龄历期（d）；a3. 3 龄历期（d）；b. 存活时间（d）；a1’. 1 龄历期极差；a2’. 2 龄历期极差；a3’. 3 龄历期极差；b’. 存活时间极差。表中*号表示平均龄期历期最短、平均存活时间最长或极差最大的因素。

A. Wheat germ; B. Sugar; C. Casein; D. Wesson’s salt; E. Sorbic acid; F. Methyl p-hydroxybenzoate; G. Ascorbic acid; H. Vanderzant’s vitamin mix; I. Agar; J. Cholesterol; K. Choline chloride; a1. 1st instar (d); a2. 2nd instar (d); a3. 3rd instar (d); b. Lifespan (d). a1’. Range analysis of 1st instar; a2’. Range analysis of 2nd instar; a3’. Range analysis of 3rd instar; b’. Range analysis of lifespan. The shortest developmental duration of each instar, the longest lifespan of larvae and the biggest range are marked by asterisk.

活时间最长或极差最大的因素用*标记。将各因素不同水平下*号出现的频次进行统计，列入表4。通过极差分析，得出影响幼虫前 3 个龄期发育和存活时间的关键因子是麦胚、山梨酸和韦氏盐。其中山梨酸是 4 个指标（幼虫 1 到 3 龄历期和存活时间）中 2 个指标的关键因子。

根据表 4 的频次分布，将频次出现高的因素水平作为最佳水平确定下来，进而对其他营养因素进一步优化。本试验先将大量组分胚芽、蔗糖、酪蛋白、琼脂和微量组分中的氯化胆碱选取最佳水平确定下来，再对韦氏盐、山梨酸、对羟基苯甲酸、抗坏血酸、维生素 B、胆固醇、肌醇等营养因素继续优化，具体见表 5。

2.2　第 2 次正交试验结果与分析

第 2 次正交试验的结果见表 6。18 个处理中仅有 3 个处理能够饲养幼虫至化蛹，但化蛹率很低。这 3 个处理的幼虫存活时间记为 50 d，其他均按实际情况记录。对应处理饲养的幼虫全部死亡之后的每个生长历期都记为 20 d。表 6 中平均龄期历期最短、平均存活时间最长或极差最大的因素用*标记。统计各因素最佳水平频次记入表7，从而得到配方的最优组合（表 8）。极差分析可以看出影响幼虫发育和存活时间的关键因子是韦氏盐、对羟基苯甲酸、抗坏血酸和范氏维生素 B，其中对羟基苯甲酸是 7 个指标（幼虫 6 个龄期的历期和存活时间）中 4 个指标的关键因子。

2.3　优化配方的评价

用筛选获得的饲料配方（表 8）同时对 3 种鳞翅目昆虫的饲养结果表明，3 种昆虫在该人工饲料饲养下均能顺利完成整个生活史发育，并且在幼虫发育历期、蛹重、成蛹率和羽化率等各方面都表现优良，除了斜纹夜蛾幼虫历期稍长于其他配方外，3 种昆虫其余各项指标均达到甚至优于同种昆虫的现有人工饲料配方（表 9）。

3　结论与讨论

本研究在参照多种鳞翅目昆虫现有人工饲料配方的基础之上，通过两次正交试验，最终获

表 4　第 1 次正交试验各因素最佳水平出现的频次
Table 4　Frequency of optimal level of each factor in the 1st orthogonal design

水平 Level	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	0	3	0	1	3	0	0	0	3	1	3	1
2	1	0	4	3	1	3	0	0	1	1	1	1
3	3	1	0	0	0	1	4	4	0	2	0	2

表 5　第 1 次正交试验较优水平组合
Table 5　Results of the 1st orthogonal design

饲料成分 Nutrition factors	含量 (%) Percentage	饲料成分 Nutrition factors	含量 (%) Percentage	饲料成分 Nutrition factors	含量 (%) Percentage
A	12	K	0.05	G	0.3-0.5
B	2	D	0.5-1.0	H	0.003-0.005
C	4.5	E	0.3-0.5	J	0.05-0.15
I	1.5	F	0.2-0.3	L	0.02-0.05

表 6　第 2 次饲料筛选正交设计 $L_{18}(3^7)$及极差分析

Table 6　The 2nd orthogonal design and range analysis

处理 Treatment	D	E	F	G	H	J	L	a1	a2	a3	a4	a5	a6	b
1	1	1	1	1	1	1	1	5	7	7	20	20	20	20
2	1	2	2	2	2	2	2	6	4	4	5	5	5	50
3	1	3	3	3	3	3	3	6	6	5	20	20	20	19
4	2	1	1	2	2	3	3	5	4	4	8	20	20	23
5	2	2	2	3	3	1	1	6	5	5	6	20	20	23
6	2	3	3	1	1	2	2	7	7	6	20	20	20	19
7	3	1	2	1	3	2	1	6	3	4	5	7	20	20
8	3	2	3	2	1	3	2	5	5	4	20	20	20	29
9	3	3	1	3	2	1	3	5	4	4	20	20	20	18
10	1	1	3	3	2	2	1	6	5	5	20	20	20	19
11	1	2	1	1	3	3	2	6	4	6	20	20	20	24
12	1	3	2	2	1	1	3	6	6	5	20	20	20	29
13	2	1	2	3	1	3	2	4	4	4	4	7	6	50
14	2	2	3	1	2	1	3	5	5	6	20	20	20	24
15	2	3	1	2	3	2	1	5	5	4	20	20	20	21
16	3	1	3	2	3	1	2	5	5	4	6	20	20	26
17	3	2	1	3	1	2	3	4	5	4	5	6	4	50
18	3	3	2	1	2	3	1	5	5	6	6	20	20	23
a1 $\overline{x1}$	5.8	5.2*	5.0*	5.7	5.2*	5.3	5.5							
a1 $\overline{x2}$	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.7	5.5							
a1 $\overline{x3}$	5.0*	5.7	5.7	5.2*	5.7	5.2*	5.2*							
a2 $\overline{x1}$	5.3	4.7*	4.8	5.2	5.7	5.3	5.0							
a2 $\overline{x2}$	5.0	4.7*	4.5*	4.8*	4.5*	4.8	4.8*							
a2 $\overline{x3}$	4.5*	5.5	5.5	4.8*	4.7	4.7*	5.0							
a3 $\overline{x1}$	5.3	4.7*	4.8	5.8	5.0	5.2	5.2							

续表 6（Table 6 continued）

处理 Treatment	D	E	F	G	H	J	L	a1	a2	a3	a4	a5	a6	b
a3 $\overline{x2}$	4.8	4.8	4.3*	4.2*	4.8	4.5*	4.7*							
a3 $\overline{x3}$	4.3	5.0	5.0	4.5	4.7*	4.8	4.7*							
a4 $\overline{x1}$	17.5	10.5*	15.5	15.2	14.8	15.3	12.8							
a4 $\overline{x2}$	13.0	12.7	7.5*	13.2	13.2	12.5*	12.5*							
a4 $\overline{x3}$	10.3	17.7	17.7	12.5*	12.8*	13.0	15.5							
a5 $\overline{x1}$	17.5	15.7	17.7	17.8	15.5*	20.0	17.8							
a5 $\overline{x2}$	17.8	15.2*	10.8*	17.5	17.5	13.0*	15.3*							
a5 $\overline{x3}$	15.5	20.0	20.0	15.5*	17.8	17.8	17.7							
a6 $\overline{x1}$	17.5	17.7	17.3	20.0	*15.0	20.0	20.0							
a6 $\overline{x2}$	17.7	14.8*	12.5*	17.5	17.5	14.8*	15.2*							
a6 $\overline{x3}$	17.3	20.0	20.0	15.0*	20.0	17.7	17.3							
b $\overline{x1}$	26.8	26.3	26.0	21.7	32.8*	23.3	21.0							
b $\overline{x2}$	26.7	33.3*	37.0*	29.7	26.2	29.8*	33.0*							
b $\overline{x3}$	27.7	21.5	22.7	29.8*	22.2	28.0	27.2							
a1’	0.8*	0.5	0.7	0.5	0.5	0.5	0.3							
a2’	0.8	0.8	1.0	0.3	1.2*	0.7	0.2							
a3’	1.0	0.3	0.7	1.7*	0.3	0.7	0.5							
a4’	4.5	7.2	10.2*	2.7	2.0	2.8	3.0							
a5’	0.3	4.8	9.2*	2.3	2.3	7.0	2.5							
a6’	0.3	5.2	7.5*	5.0	5.0	5.2	4.8							
b’	0.8	11.8	14.3*	8.2	10.7	6.5	12.0							

D. 韦氏盐；E. 山梨酸；F. 对羟基苯甲酸甲酯；G. 抗坏血酸；H. 范式维生素 B；J. 胆固醇；L. 肌醇。a1. 1 龄历期（d）；a2. 2 龄历期（d）；a3. 3 龄历期（d）；a4. 4 龄历期（d）；a5. 5 龄历期（d）；a6. 6 龄历期（d）；b. 存活时间（d）；a1’. 1 龄历期极差；a2’. 2 龄历期极差；a3’. 3 龄历期极差；a4’. 4 龄历期极差；a5’. 5 龄历期极差；a6’. 6 龄历期极差；b’. 存活时间极差。表中*号表示平均龄期历期最短、平均存活时间最长或极差最大的因素。

D. Wesson’s salt; E. Sorbic acid; F. Methyl p-hydroxybenzoate; G. Ascorbic acid; H. Vanderzant’s vitamin mix; J. Cholesterol; L. Inositol; a1. 1st instar (d); a2. 2nd instar (d); a3. 3rd instar (d); a4. 4th instar (d); a5. 5th instar (d); a6. 6th instar (d); b. Lifespan (d); a1’. Range analysis of 1st instar; a2’. Range analysis of 2nd instar; a3’. Range analysis of 3rd instar; a4’. Range analysis of 4th instar; a5’. Range analysis of 5th instar; a6’. Range analysis of 6th instar; b’. Range analysis of lifespan. The shortest developmental duration of each instar, the longest lifespan of larvae and the biggest range are marked by asterisk.

表 7 第 2 次正交试验各因素最佳水平出现的频次
Table 7 Frequency of optimal level of each factor in the 2nd orthogonal design

水平 Level	D	E	F	G	H	J	L
1	0	2	1	0	4	0	0
2	0	5	6	1	1	5	6
3	7	0	0	6	2	2	1

表 8 最优配方的组分及含量
Table 8 Nutrition factors and their optimal levels

饲料成分 Nutrition factors	含量 (%) Percentage	饲料成分 Nutrition factors	含量 (%) Percentage	饲料成分 Nutrition factors	含量 (%) Percentage
A	12.0	K	0.05	G	0.500
B	2.0	D	1.00	H	0.003
C	4.5	E	0.40	J	0.100
I	1.5	F	0.25	L	0.035

得适合美国白蛾、舞毒蛾以及斜纹夜蛾的通用人工饲料配方。与张永安（2007）等的美国白蛾人工饲料专利配方相比，本饲料配方增加了氯化胆碱和肌醇两种组分，但二者对美国白蛾饲养的各项指标相当；对舞毒蛾的饲养在平均历期和雌蛹的蛹重方面都明显优于王志英（2004）的试验结果（加拿大太平洋林业研究中心的人工饲料配方）；饲养斜纹夜蛾的幼虫历期（26 d）长于现有的斜纹夜蛾人工饲料配方（14~19 d），而在蛹重、化蛹率和羽化率方面均已达到现有的人工饲料相应的指标范围值（表 9）。卢文华等（1986）研究发现，抗坏血酸过低或过高会对斜纹夜蛾的发育和存活率造成不利影响，本饲料配方的抗坏血酸含量（0.5%）高于其他斜纹夜蛾人工饲料（0.2%~0.4%）（卢文华等，1986；涂业苟和曾吉华，2010；严珍等，2013），这可能是本配方饲养斜纹夜蛾幼虫发育历期相对较长的原因，需要在以后的研究中对抗坏血酸的比例进行进一步优化。

本研究发现，营养成分比例不适对昆虫的生长有重大影响甚至导致饲养失败。第 1 次正交试验 27 个处理仅有 3 个处理能将美国白蛾幼虫养至 4 龄；当较大比例的组分固定后进行第 2 次正交试验时，所有处理都将美国白蛾饲养至 4 龄；对少量成分进一步优化之后得到的饲料配方可以饲养美国白蛾完成整个世代。因此，虽然多食性昆虫对人工饲料营养的要求相对宽松，但只有各营养组分在合适比例时才可以为昆虫的生长发育提供平衡的营养条件（王延年，1990）。另外，昆虫人工饲料通常需要添加防腐杀菌物质来防止微生物污染，但这类物质加入过多会对昆虫产生毒害作用（毕富春，1983；朱金娥和金振玉，1999），两次正交试验中，对羟基苯甲酸甲酯、山梨酸在不同指标中（幼虫发育历期和存活时间）多次成为关键因子，尤其第 2 次正交试验缩小了对羟基苯甲酸甲酯水平范围，但仍然是美国白蛾 4 龄后幼虫存活的关键因子（如表 6，第 4~6 龄幼虫发育历期和存活时间的关键因子）。应霞玲和曾玲等（1999）在筛选红纹凤蝶 *Pachliopta aristolochiae* (Fabricius) 人工饲料的研究中也发现不提供营养成分的防腐物质成为关键因子。因此，防腐杀菌剂的比例在饲料配方筛选中至关重要。

试验所采用的 3 种昆虫都是农林重大害虫，分属灯蛾科、毒蛾科和夜蛾科。本研究只试验了这 3 种昆虫，该人工饲料配方可能还适用于其他

表 9　人工饲料饲养 3 种鳞翅目幼虫的发育特征

Table 9　Development characteristics of three lepidopteran larvae fed on artificial insect diets

昆虫种类 Species	幼虫历期（d） Developmental duration of larvae		蛹重（雌/雄，g） Pupal weight (female/male, g)		成蛹率（%） Pupation rate (%)		羽化率（%） Eclosion rate (%)	
	新配方 New diet	已有配方 Reported diets	新配方 New diet	已有配方 Reported diets	新配方 New diet	已有配方 Reported diets	新配方 New diet	已有配方 Reported diets
美国白蛾 *Hyphantria cunea*	26.24±0.12	23.10- 25.00	0.179±0.004/0.127±0.002	0.1467-0.1800	95.7	95.0-96.7	86.3	88.5
斜纹夜蛾 *Prodenia litura*	26.09±0.12	14.50-19.65	0.377±0.006/0.283±0.005	0.332-0.501	77.6	55.30-95.24	78.5	76.00-99.08
舞毒蛾 *Lymantria dispar*	40.31±0.41	57.00	1.710±0.087/0.540±0.018	1.53/0.72	96.2	—	100.0	—-

以上 3 种昆虫已有的人工饲料配方对昆虫饲养的发育指标来自以下参考文献：美国白蛾（张永安等，2007；隋贺等，2008）；斜纹夜蛾（卢文华等，1986；林佩卿和刘复生，1994；陈其津等，2000；朱丽梅等，2001；毛建萍等，2008；利广规等，2013；吕宝乾等，2013；严珍等，2013)；舞毒蛾（王志英等，2004）。

Development characteristics of three insects that fed on reported diet are based on the results of following references (Zhang *et al*., 2007; Sui *et al*., 2008; Lu *et al*., 1986; Lin and Liu, 1994; Chen *et al*., 2000; Zhu *et al*., 2001; Mao *et al*., 2008; Li *et al*., 2013; Lv *et al*., 2013; Yan *et al*., 2013; Wang *et al*., 2004).

鳞翅目多食性昆虫。目前，本人工饲料对美国白蛾已经连续饲养了 6 代, 对舞毒蛾已经连续饲养了 3 代，未发现其存在明显的种群生活力衰退现象。本研究的试验方法和配方将会为其他多食性昆虫人工饲料的开发提供参考，也将为营养生态学和昆虫食性的研究提供新的思路。

参考文献 (References)

Singh P, Moore RF, 1985. Handbook of Insect Rearing. Vol. I. Elsevier Science Publishers BV. 1–488.

毕富春, 1983. 粘虫的简易人工饲料及防腐剂对其生长发育的影响. 昆虫知识, 30(6): 260–263.

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. [Chen QJ, Li GH, Pang Y, 2000. A simple artificial diet for mass rearing of some noctuid species. *Chinese Bulletin of Entomology*, 37(6): 325-327.]

方杰, 朱麟, 杨振德, 赵博光, 2003. 昆虫人工饲料配方研究概况及问题探讨. 四川林业科技, 24(4): 18−26. [Fang j, Zhu L, Yang ZD, Zhao BG, 2003. Advances and problems in insect artificial diet studies. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 24(4): 18-26.]

蒋素蓉, 付凤玲, 2004. 几种半人工饲料饲养粘虫的效果. 四川农业大学学报, 24(2): 222−224. [Jiang SR, Fu FL, 2004. Effect of several meridic diets on armyworm Rearing. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 24(2): 222-224.]

利广规, 吕思行, 杨欣, 徐树兰, 郑常格, 陈其津, 2013. 光周期对人工半合成饲料饲养斜纹夜蛾的影响. 广东农业科学, 40(10): 89−90. [Li GG, Lv SX, Yang X, Xu SL, Zheng CG, Chen QJ, 2013. Influence of the photoperiod on the artificial rearing, Sprodoptera litura (Fabricius). *Guangdong Agricultural Sciences*, 40(10): 89-90.]

林佩卿, 刘复生, 1994. 斜纹夜蛾人工与天然饲料主要质量指标的比较研究. 中山大学学报: 自然科学版, 33(1): 119−122. [Lin PQ, Liu FS, 1994. Comparision of mian quality indexes of *Prodenia litura* Fabr. Reared by both artificial and natural diets. Joural of Zhongshan University: Natural Science Edition, 33(1): 119–122]

卢文华, 汤忠琦, 张维球, 1986. 斜纹夜蛾半合成人工饲料的研究. 华南农业大学学报, 7(2): 33–42. [Lu WH, Tang ZQ, Zhang WQ, 1986. The research of semi-artificial diets of *Prodenia litura* Fabr. Huanan Agricultural University , 7(2): 33–42]

吕宝乾, 朱文静, 严珍, 彭正强, 金启安, 温海波, 2013. 一种斜纹夜蛾的人工饲料及其制备方法、以及饲养斜纹夜蛾的方法. 中国, CN 103070309 A, 201310007612.9. 2013-05-01. [Lv BQ, Zhu WJ, Yan Z, Peng ZQ, Jin QA, Wen HB, 2013. An artificial diet of *Prodenia litura* Fabr., production method, and rearing method. China, CN 103070309 A, 201310007612.9. 2013-05-01]

毛建萍, 顾伟伟, 浦冠勤, 2008. 不同饲料对斜纹夜蛾饲育成绩的影响. 中国蚕业, 29(4): 27−29. [Mao JP, Gu WW, Pu GQ, 2008. The effects of different artificial diets on development of *Prodenia litura* Fabr. China Sericulture, 29(4): 27–29]

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. [Sui H, Li CY, Jiao SB, Zheng GL, 2008. The comparation of 4 artificial diets for rearing fall webworm. Shandong Forest Technology, 38(6): 47–48.]

涂业苟, 曾吉华, 2010. 斜纹夜蛾的人工饲养技术. 江西农业学报 , 22(1): 87 − 88. [Tu YG, Zeng JH, 2010. A method for artificial rearing of common cutworm, spodoptera l itura. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 22(1): 87-88.]

王延年, 1984. 昆虫人工饲料手册. 上海: 上海科学技术出版社. 1–297. [Wang YN, 1984. Insect artificial diet book. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press. 1-297]

王志英, 王秀国, 王丽君, 2004. 人工饲料饲养舞毒蛾的试验. 东北林业大学学报, 32(6): 69−71. [Wang ZY, Wang XG, Wang LJ, 2004. Experiment on the feeding of lymantria dispar L.by artificial diet. *Journal of Northeast Forestry University*, 32(6): 69-71.]

忻介六, 苏德明, 1979. 昆虫、螨类、蜘蛛的人工饲料. 北京: 科学出版社. 1−211. [Qi JL, Su MD. 1979. The artifial diet of insect, spider, and mite. Beijing: Science Press. 1-211]

严珍, 吕宝乾, 彭正强, 章程辉, 金启安, 温海波, 2013. 取食番茄, 辣椒和人工饲料对斜纹夜蛾生长发育和繁殖力的影响. 热带作物学报, 34(7): 1335−1339. [Yan Z, Lv BQ, Peng ZQ, Zhang CH, Jin QA, Wen HB, 2013. Effect of tomato, pepper and artificial diet on the growth, development and fecundity of spodo ptera litura fabricius. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 34(7): 1335-1339.]

应霞玲, 曾玲, 1999. 红纹凤蝶半合成人工饲料研究. 华南农业大学学报, 20(4): 24–27. [Ying XL, Zeng L, 1999. The research of semi-artificial diet of *Pachliopta aristolochiae* Fabricius.

* 资助项目：中央高校基本科研业务费专项资金（YX2013-11）；“十二五”农村领域国家科技计划“杨树分子育种与品种创制（2011AA100201）”；国家自然科学基金项目（30970462）

**通讯作者，E-mail: minch@bjfu.edu.cn

收稿日期：2013-12-23，接受日期：2014-01-09

Journal of Huanan Agricultural University, 20(4): 24–27]

张永安, 王玉殊, 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. 中国, CN100563599C, ZL 200510127628.9. 2009-12-02. [Zhang YA, Wang YZ, Xu BM, Qu JL, 2009. The artificial rearing and *Hyphantria cunea* (Drury) and artificial diet for larve. China, CN100563599C, ZL 200510127628.9. 2009-12-02]

朱金娥, 金振玉, 1999. 家蚕人工饲料防腐剂的研究. 粮食与饲料工业, 1(19): 7−199. [Zhu JE, Jin ZY, 1999. On the antiseptics used to artifical feed for silkworm. *Cereal & Feed Industry*, 1(19): 7-199.]

朱丽梅, 倪钰萍, 曹晓宇, 黄春霞, 崔勤, 2001. 斜纹夜蛾的人工饲养技术. 昆虫知识, 38(3): 227–228. [Zhu LM, Ni JP, Cao XY, Huang CX, Cui Q, 2001. A method for artificially rearing to the cotton leafworm Prodenia litura Fabricius. *Chinese Bulletin of Entomology*, 38(3): 227-228.]