

# 双条杉天牛幼虫人工饲料的筛选

耿涌鑫<sup>1,2</sup>, 杨锦<sup>1</sup>, 朱知睿<sup>1</sup>, 魏丹峰<sup>1</sup>, 陈敏<sup>1\*</sup>

(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. 中国农业科学院植物保护研究所, 植物病虫害生物学国家重点实验室, 北京 100193)

**摘要** 双条杉天牛 *Semanotus bifasciatus* (Motschulsky) 是柏科树木最严重的钻蛀性害虫之一。开发双条杉天牛的人工饲料是开展该害虫防治技术研究及生物学相关基础研究的重要条件。本研究在参考了其他天牛人工饲料配方的基础上, 采用正交试验设计方法设计饲料配方, 通过对不同配方饲料对双条杉天牛幼虫的饲养效果进行比较和极差分析, 最终筛选出双条杉天牛幼虫的人工饲料最优组合为: 琼脂 4.7%、蔗糖 3.5%、对-羟基苯甲酸甲酯 0.5%、酵母粉 3.1%、柏树木粉 30%、抗坏血酸 0.5% 以及水。使用该人工饲料可将双条杉天牛幼虫成功饲养至羽化, 并且蛹羽化率高达 81.25%, 总成活率为 54.16%。本研究的结果可为天牛科其他天牛人工饲料的开发提供借鉴。

**关键词** 双条杉天牛; 人工饲料; 正交试验; 极差分析

**中图分类号:** S 433.5 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16688/j.zwbh.2017095

## Screening for artificial diets for *Semanotus bifasciatus*

GENG Yongxin<sup>1,2</sup>, YANG Jin<sup>1</sup>, ZHU Zhirui<sup>1</sup>, WEI Danfeng<sup>1</sup>, CHEN Min<sup>1</sup>

(1. Beijing Key Laboratory for Forest Pest Control, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

**Abstract** *Semanotus bifasciatus* (Coleoptera: Cerambycidae) is one of the most serious stem borers in Cupressaceae trees. Development of artificial diets for *S. bifasciatus* is important for further studies on its control strategies and biology. The orthogonal design was used in this research to develop the feed formula based on several feed recipes for long-horned beetles. According to the results of the screening tests, we improved the diet formula and finally obtained an optimal diet formula for *S. bifasciatus* larvae. The optimal formula was followed: agar 4.7%, sucrose 3.5%, methyl *p*-hydroxybenzoate 0.5%, yeast powder 3.1%, *Platycladus orientalis* wood sawdust 30%, ascorbic acid 0.5% and distilled water 57.7%. This diet could feed the larvae from the initial incubation to pupae successfully, and the pupal emergence rate was as high as 81.25%, with a final survival rate up to 54.16%. The results provide a reference for the development of artificial diets for other long-horned beetles.

**Key words** *Semanotus bifasciatus*; artificial diet; orthogonal analysis; range analysis

双条杉天牛 *Semanotus bifasciatus* (Motschulsky) 属鞘翅目 Coleoptera 天牛科 Cerambycidae, 是我国林业上一种重要的毁灭性钻蛀害虫, 1996 年被确定为我国林业有害生物检疫对象。2013 年国家林业局在对林业有害生物进行全面的风险分析的基础上, 又将双条杉天牛列入全国林业危险性有害生物名单<sup>[1-4]</sup>。双条杉天牛在我国主要寄主为侧柏

*Platycladus orientalis* (Linn.) Franco、圆柏 *Sabina chinensis* (Linn.) Antoine、龙柏 *S. chinensis* (Linn.) Ant. cv. Kaizuca Hort. 等柏类和杉木 *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook. 类树种<sup>[1, 5-6]</sup>。双条杉天牛主要以幼虫在枝、干的皮层和边材部位蛀食为害, 破坏树木的输导功能, 导致受害木长势衰退, 易造成雪折、风折, 甚至呈现整株树木或整片

林子死亡<sup>[6-7]</sup>,严重影响树木的正常生长以及景观效果,尤其危及柏类和杉木古树名木的存活<sup>[8-10]</sup>。同时,由于蛀干害虫的发育周期较长,采集困难等原因,给野外的防治研究造成很大困难。因此,研制优良的双条杉天牛人工饲料,探索双条杉天牛的人工饲养方法,成为双条杉天牛防治技术研究的基础。

昆虫基础研究和害虫防控技术研究,需要大量的生理指标统一的试虫。人工饲料不仅可以饲养发育整齐的昆虫,还不受季节性饲料短缺的限制,实现昆虫的连续饲养,可满足相关科学研究的持续开展<sup>[11-13]</sup>。鳞翅目以及膜翅目等农林业害虫以及一些天敌昆虫的人工饲养已经趋于成熟与完善,进入规模化生产研究阶段<sup>[14-16]</sup>,但是鞘翅目天牛科昆虫,尤其蛀干害虫由于取食环境特殊,以及幼虫隐蔽的生活习性,使用人工饲料饲养相对困难<sup>[17-18]</sup>。目前,已经成功开发了几种天牛,如黄斑星天牛 *Anoplophora nobilis* Ganglbauer、槐绿虎天牛 *Chlorophorus diadema* Motsch.、光肩星天牛 *Anoplophora glabripennis* (Motschulsky)等的人工饲料<sup>[19-29]</sup>。本研究在综合参考以上几种天牛的人工饲料配方和幼虫饲养方法的基础上,初步设计了双条杉天牛幼虫的人工饲料配方。采用正交试验对多因素多个水平进行综合评价,以寻找各因素的最佳组合和水平,在试验的过程中不断地进行改进,通过对饲料配方中的元素和配比进行优化,进而应用生物统计学方法<sup>[30]</sup>对优化后的饲料配方的饲养效果进行综合评价,最终获得双条杉天牛完成幼虫发育至羽化的最佳人工饲料配方。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试昆虫

2016年3月—4月从颐和园和天坛公园的侧柏诱饵木上收集双条杉天牛成虫,将1雌1雄两两配对分别放入布丁杯中(杯底直径3 cm,杯口直径5 cm,高4 cm),用10%的蜂蜜水饲喂,待其交尾产卵后收集卵粒至新的布丁杯中。布丁杯中放入吸水脱脂棉以保持足够的湿度,于人工气候箱中,25℃湿度75%,黑暗饲养。待卵孵化后,挑选同一时期孵化的幼虫进行人工饲料筛选试验。

## 1.2 人工饲料配方和饲养方法

### 1.2.1 试验材料预处理

将柏木段树皮和木质部分离后,将木质部放入烘箱,60℃处理24 h,磨碎过80目筛,将木粉放入1 L三角瓶中,120℃下灭菌20 min。

### 1.2.2 饲料配方设计

利用正交试验方法对多因素多水平进行考察以期找出适合饲养双条杉天牛幼虫的最优配方搭配。本次试验依据王延年的昆虫人工饲料手册<sup>[11]</sup>,以及参考了星天牛、光肩星天牛、槐绿虎天牛等天牛的人工饲料配方的成分和配比<sup>[19-29]</sup>,设定的饲料配方中主要成分为:琼脂、蔗糖、对羟基苯甲酸甲酯、酵母粉、柏树木质部、抗坏血酸、黄豆粉以及水。按照曹利军等<sup>[24]</sup>的正交试验设计方法,将第1次试验设为7因子3水平正交试验(表1),选择正交表L18(3<sup>7</sup>),共18个处理(表2)。根据确定的正交试验方案,对双条杉天牛初孵幼虫进行室内的人工饲养试验。根据试验统计结果确定进一步优化的因素和水平(优化结果见表3),其中根据第一次的正交试验结果将营养元素A琼脂、D抗坏血酸和E酵母粉选取最佳水平进行固定。将剩余的4个营养因素设计根据正交表L9(3<sup>4</sup>)设计第2次正交试验,如表4所示。按照第2次正交试验方案,从野外获取双条杉天牛幼虫,选取和第1次正交试验结束时幼虫头壳宽一致(1.1~1.4 mm)的试虫进行饲养试验。每天观察幼虫的存活和化蛹情况,并记录每头幼虫的存活时间,定期统计记录每组试虫的存活率、体重和化蛹率等指标,以便于对试验进行评估。本研究试验过程中若出现有超过半数(及9组以上)的幼虫平均成活率小于50%,则视为本次试验的饲料配方需要改进,则试验结束,继续改进饲料配方进行试验。然后计算各水平在本试验阶段的平均值。通过比较各水平和各因素的平均值,确定每一营养因素的最优水平,各营养因素的最优水平组合成该人工饲料配方的最佳搭配。计算并比较分析各水平平均值间的极差,得出影响试验结果最关键的因子。本试验将平均体重增加最多、平均存活时间最长、成活率(每个试验阶段历期的总成活率)最高作为各因素最佳水平的标准。

表 1 第 1 次正交试验的因素和水平设置<sup>1)</sup>

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

水平 Level	因素及百分含量/% Factor and percentage						
	A	B	C	D	E	F	G
1	1.6	0.1	4.8	0.15	1.6	17	2.5
2	3.1	0.15	6.3	0.30	3.1	22	3.1
3	4.7	0.3	9.3	0.50	3.6	27	3.7

1) A:琼脂; B: 对羟基苯甲酸甲酯; C: 黄豆粉; D: 抗坏血酸; E: 酵母粉; F: 柏木粉; G: 蔗糖。下同。  
A: Agar; B: Methyl 4-hydroxybenzoate; C: Soybean powder; D: Ascorbic; E: Yeast powder; F: Platycladus sawdust; G: Sugar. The same below.

表 2 七因素三水平的正交试验设计表

Table 2 Table of orthogonal design for the 1st test (7 factors and 3 levels)

编号 No.	因素及水平 Factor and level						
	A	B	C	D	E	F	G
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2	2	2
3	1	3	3	3	3	3	3
4	2	3	1	2	2	3	1
5	2	1	2	3	3	1	2
6	2	2	3	1	1	2	3
7	3	3	2	1	3	2	1
8	3	1	3	2	1	3	2
9	3	2	1	3	2	1	3
10	1	1	3	3	2	2	1
11	1	2	1	1	3	3	2
12	1	3	2	2	1	1	3
13	2	2	2	3	1	3	1
14	2	3	3	1	2	1	2
15	2	1	1	2	3	2	3
16	3	2	3	2	3	1	1
17	3	3	1	3	1	2	2
18	3	1	2	1	2	3	3

表 3 第 2 次正交试验的营养因素与水平

Table 3 Nutritional factors and their levels for the 2nd orthogonal design

水平 Level	因素及百分含量/% Factor and percentage						
	A	B	C	D	E	F	G
1	4.7	0.3	0	0.5	3.1	27	1.0
2	4.7	0.5	2.0	0.5	3.1	30	2.5
3	4.7	0.8	4.8	0.5	3.1	34	3.5

表 4 四因素三水平正交试验设计表<sup>1)</sup>

Table 4 Table of orthogonal design for the 2nd test (4 factors and 3 levels)

编号 No.	因素及水平 Factor and level			
	B	C	F	G
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

1) B: 对羟基苯甲酸甲酯; C: 黄豆粉; F: 柏木粉; G: 蔗糖。  
B: Methyl 4-hydroxybenzoate; C: Soybean powder; F: Platycladus sawdust; G: Sugar.

### 1.2.3 饲料的配制

按照表 2 的设计依次配制 18 组饲料。首先称取黄豆粉、酵母粉、蔗糖,放入容器中混合均匀,记为 M 组。称取抗坏血酸、对羟基苯甲酸甲酯混均记为 N 组,并先将 N 组元素溶于 70% 的乙醇中。根据表中每组饲料所对应的水量准确称取琼脂和柏木粉,将琼脂放入盛有蒸馏水烧杯中,用微波炉加热煮沸,再加入 M 组组分,充分搅拌再次煮沸。冷至 55℃ 左右加入 N 组搅拌均匀,最后加入柏木粉充分搅拌,倒入储藏饲料的容器(布丁杯),待冷却至室温时,盖上杯盖,放入 4℃ 冰箱保存,以备换饲料的时候随用随取。为保证饲料的新鲜,饲料的保存时间应不超过 1 个月。为避免饲料污染,饲料的配制应在无菌环境下进行。

### 1.2.4 试虫饲养方法

参照尹新明等<sup>[27]</sup>管式饲养天牛的方法,将双条杉天牛幼虫饲养在 1.5 mL 的离心管中。首先在离心管底部剪一透气孔,塞上一小团脱脂棉以防止饲料漏出或幼虫逃逸,再将制作好的 18 种饲料分别装入 1.5 mL 的离心管,将饲料压实,以模拟幼虫在自然界的取食环境,同时在饲料上挖一小槽便于幼虫的取食和钻入。选取初孵天牛幼虫接入离心管内,每管一头,每组 18 头,于人工气候箱中(25℃, 75% 湿度)黑暗饲养。

饲养过程中,每天观察饲料的状况和幼虫的取食情况,如遇到饲料发霉、失水和幼虫死亡情况应及时做好记录,并更换饲料。每天观察幼虫的存活和蜕皮情况并做记录。每 5 d 测量每头试虫的体重。

### 1.2.5 饲料配方的优化和检验

根据第 2 次正交试验的分析结果对饲料配方进行优化。从侧柏诱木上解剖获取双条杉天牛幼虫,选取和第 2 次正交试验结束时幼虫头壳宽大小一致(2.5~2.6 mm)的幼虫作为试虫,用该饲料对幼虫进行饲养(一组 16 头,设 3 组),记录双条杉天牛幼虫的成活数、成蛹数和羽化数等生长发育的指标数据。对数据进行分析并检验该饲料饲养双条杉天牛的总成活率,以对本次配方进行综合评价。

## 2 结果与分析

### 2.1 第一次正交试验结果分析

18 种配方的人工饲料分别饲养双条杉天牛幼

虫 45 d 后,计算 45 d 时的幼虫存活率、幼虫平均存活时间和平均体重增加量各项生长发育指标(表 5)。统计数据显示,1 号、5 号、10 号、12 号和 18 号 5 种饲料饲养 6 日后幼虫全部死亡,其余 13 个配方的人工饲料饲养的幼虫平均存活时间为 7.2~22.2 d,平均体重均有增长,增长率为 0.18%~0.56%。将各因素在不同水平下出现最佳的次数进行了统计,结果见表 7。同时通过极差分析,得出本次试验中影响幼虫生长发育最主要的因素为对羟基苯甲酸甲酯(表 6)。

根据表 7 的频次分布,将出现频次高的因素作为最优水平固定下来,进而对该饲料配方各因素水平进行进一步的优化。本研究中先将影响试验结果较小的非关键营养元素琼脂、抗坏血酸、酵母粉选取最佳水平进行固定,接下来还需对对羟基苯甲酸甲酯、黄豆粉、柏木粉和蔗糖进行进一步优化。

表 5 18 种饲料饲养双条杉天牛幼虫的各项生长发育指标<sup>1)</sup>  
Table 5 Developmental characteristics of *Semanotus bifasciatus* larvae feeding on 18 formulated diets

处理 Treatment	成活率/% Survival rate	平均存活时间/d Survival time	平均体重增加量/mg Increase in weight
1	0.0	6.0	0
2	22.2	8.4	1.8
3	33.3	9.7	2.9
4	73.3	16.5	5.6
5	0.0	6.0	0
6	11.1	7.2	2.2
7	44.4	10.9	3.6
8	22.2	8.4	2.3
9	61.1	12.7	4.3
10	0.0	6.0	0
11	44.4	10.9	3.4
12	0.0	6.0	0
13	50.0	11.5	4.1
14	50.0	11.5	4.5
15	16.7	7.8	2.4
16	22.2	8.4	3.2
17	77.0*	22.2*	4.2
18	0	6.0	0

1) \* 代表各因素的最优指标。下同。

\* : Optimal index. The same below.

表 6 饲料筛选结果的极差分析<sup>1)</sup>

Table 6 Range analysis of feed screening results

处理 Treatment	A	B	C	D	E	F	G
a1	16.65	6.48	45.42*	24.98	26.72	22.22	31.65
a2	33.52	35.17	19.43	26.10	34.43*	28.57	35.97*
a3	37.82*	46.33*	23.13	36.90*	26.83	37.20*	20.37
R	21.17	39.85*	22.28	11.92	7.72	14.98	15.60
b1	7.83	6.71	12.69*	8.75	10.23*	8.44	11.25*
b2	10.09	9.87	8.14	9.28	10.19	10.44	9.89
b3	11.45*	12.80*	8.55	11.35*	8.95	10.50*	8.24
R	3.62	6.08*	4.56	2.60	1.28	2.06	3.01
c1	1.4	0.8	3.3*	2.3	2.1	2.0	2.8*
c2	3.1*	3.2	1.6	2.6*	2.7*	2.4	2.7
c3	2.9	3.5*	2.5	2.6*	2.6	3.1*	2.0
R	1.8	2.7*	1.7	0.3	0.6	1.1	0.8

1) A: 琼脂; B: 对羟基苯甲酸甲酯; C: 黄豆粉; D: 抗坏血酸; E: 酵母粉; F: 柏木粉; G: 蔗糖。

a: 成活率; b: 存活时间; c: 体重增加量; R: 极差值; \* 最优指标。

A: Agar; B: Methyl 4-hydroxybenzoate; C: Soybean powder; D: Ascorbic; E: Yeast powder; F: Platycladus sawdust; G: Sugar.

a: Survival rate; b: Survival time; c: Increase in weight; R: Maximum difference; \* : Optimal index.

表 7 正交试验各因素最佳水平出现的频次

Table 7 The frequencies of the optimal level of each factor in the orthogonal experiment

水平 Level	A	B	C	D	E	F	G
1	0	0	3	0	1	0	2
2	1	0	0	1	2	0	1
3	2	3	0	3	0	3	0

## 2.2 第 2 次正交试验结果与分析

第 2 次正交试验的 9 个处理,统计天数为 50 d,所有配方的饲料饲养的双条杉天牛幼虫成活率均高

于 60%(成活率为每个处理 50 d 的平均成活率),最高达 83.33%(见表 8)。将表 9 各因素在不同水平出现最佳的次数进行了统计,并记录在表 10 中,从中得出最优的饲料配方和配比组合(表 11)。通过极差分析得出在双条杉天牛幼虫的生长发育过程中,饲料配方的 7 个因素中影响双条杉天牛幼虫的成活率最关键的因素是对羟基苯甲酸甲酯,影响存活时间的关键因子是对羟基苯甲酸甲酯和柏木粉,影响体重增加的关键是蔗糖。

表 8 第 2 次正交试验处理各项生长发育指标

Table 8 Developmental characteristics of *Semanotus bifasciatus* larvae in the second orthogonal experiment

处理 Treatment	幼虫成活率/% Survival rate	平均存活时间/d Survival time	平均体重增加量/mg Increase of weight
1	61.1	36.1	-24.7
2	61.1	38.1	-14.9
3	61.1	38.0	-6.7
4	77.8	45.5	-9.7
5	83.3	42.8	-25.2
6	61.1	37.8	-24.6
7	72.2	42.1	-32.9
8	66.7	38.9	-15.8
9	77.8	43.3	-9.4

表 9 不同因素水平下双条杉天牛的各项指标的极差分析

Table 9 Range analysis of the indicators affecting the development of *Semanotus bifasciatus*

处理 Treatment	B	C	F	G
a1	61.10	70.37*	62.96	75.00*
a2	74.07*	70.37*	72.22*	64.81
a3	72.22	66.66	72.22*	66.66
R	12.97*	3.71	9.26	10.19
b1	37.4	42.3*	37.6	40.8
b2	42.1*	40.0	42.3*	39.3
b3	41.4	39.7	41.0	42.0*
R	4.6*	2.6	4.7*	2.7
c1	-15.43*	-22.43	-21.69	-19.75
c2	-19.83	-18.61	-11.32*	-24.15
c3	-19.38	-13.59*	-21.62	-10.73*
R	4.40	8.84	10.37	13.42*

表 10 各因素最佳水平频次统计

Table 10 Frequencies of the best level of each factor

水平 Level	B	C	F	G
1	1	2	0	1
2	2	1	3	0
3	0	1	1	2

表 11 饲料最优配方组合

Table 11 Nutritional factors and their optimal levels

成分 Nutritional factors	百分比/% Percentage	成分 Nutritional factor	百分比/% Percentage
柏木粉 Platyclusus sawdust	30	琼脂 Agar	4.7
蔗糖 Sugar	3.5	抗坏血酸 Ascorbic	0.5
对羟基苯甲酸甲酯 Methyl 4-hydroxybenzoate	0.5	酵母粉 Yeast powder	3.1
黄豆粉 Soybean powder	0		

表 12 最优配方饲养结果

Table 12 Feeding results with the optimal diet

总虫数/头 Number of insects	幼虫成活率/% Survival rate	化蛹率/% Pupation rate	羽化率/% Eclosion rate	总成活率/% Total survival rate
48	83.33	80.00	81.25	54.16

### 2.3 优化饲料配方验证

用表 11 中的饲料配方对双条杉天牛幼虫进行饲养效果检验。结果表明,该配方可以成功地将双条杉天牛幼虫饲养至成虫羽化,饲养的试虫在成活率(83.33%)、成蛹率(80%)、羽化率(81.25%)等方面均表现良好(详见表 12)。

### 3 讨论

本研究以双条杉天牛幼虫作为研究对象,通过两次正交试验,分别设计了 18 种和 9 种饲料配方,根据各饲料饲养双条杉天牛幼虫存活率、平均存活时间、平均体重增加量等指标,通过统计学分析,最终锁定影响试验结果的主要因素和获得双条杉天牛完成幼虫发育至羽化的最佳配方。

双条杉天牛的卵和幼虫在室内比较稳定的环境条件下孵化率和成活率要明显高于野外条件下的成活率。调查结果显示双条杉天牛卵的室内孵化率达 97% 以上<sup>[31-32]</sup>,而野外的平均孵化率仅为 70%<sup>[9]</sup>;由于野外自然条件不可控因素较多,双条杉天牛在野外的死亡率普遍较高,达 56%~85%<sup>[31]</sup>,梁修山等<sup>[9]</sup>在林间调查的存活率为 32.23%,在室内用木段饲养的成化率(成虫羽化孔数与幼虫蛀食道数之比)为 37.25%,从卵到羽化的总存活率仅为 13.04%<sup>[9]</sup>。本试验中得出的最优配方可以将天牛的幼虫饲养至羽化,幼虫成活率为 83.33%,且羽化率为 81.25%,总存活率为 54.16%。

本研究发现,饲料中营养成分的对比对昆虫的生长发育有重大影响。第 1 次正交试验 18 个处理仅有 3 个处理的幼虫饲养成活率高于 50%;当较大比例的组分固定后进行第 2 次正交试验时,所有处理均能将双条杉幼虫的成活率提高至 60% 以上;对少量成分进一步优化之后得到的饲料配方可以将双条杉天牛饲养至完成羽化。因此,只有提供给昆虫合适的营养组分比例才能保证昆虫正常的生长发育对均衡营养的需求,达到昆虫所需的营养水平<sup>[33]</sup>。

饲料的配方在满足昆虫的营养需求的同时,还应有良好的防腐效果<sup>[33-34]</sup>。饲料中适当的防腐剂的

添加可延长饲料的保质期和饲料更换周期,一定程度上降低人工饲养的成本<sup>[35]</sup>。有报道指出造成双条杉天牛幼虫和蛹死亡的最主要原因是真菌<sup>[36]</sup>。本研究也发现,防腐物质对羟基苯甲酸甲酯是试验中的关键因子。第 1 次正交试验中,18 种饲料中有 5 种饲料饲养的幼虫在接虫第 6 天统计死亡率为 100%,主要原因是对羟基苯甲酸甲酯的添加量过少,饲料被真菌污染、腐败变质的速度非常快,2~3 d 后出现霉变,需要经常更换饲料,严重影响幼虫的正常生长发育,甚至导致双条杉天牛幼虫死亡。第 2 次正交试验提高了饲料配方中对羟基苯甲酸甲酯的百分比,幼虫的成活率有所提高,但是体重呈现了负增长。可见防腐剂添加量可对昆虫的生长发育产生影响。

目前报道的人工饲料专利配方大多用于科研,很少应用于规模化生产,主要原因是饲料配方的制作成本较高(人工和原料)、市场需求小<sup>[37]</sup>。因此饲料成分越简单,成本越低廉,越便于大规模的生产。与现有的天牛科其他幼虫人工饲料的专利配方相比,本试验的配方相对来说成分组成相对更简单,与槐绿虎天牛和光肩星天牛的成分相近<sup>[23, 38]</sup>。其中光肩星天牛饲料配方中防腐剂用的是对羟基苯甲酸甲酯和山梨酸,其余成分和本研究中的饲料成分相同。试虫寄主因子占比较重,同时饲料成分的减少降低了饲料制作的成本。用此饲料配方饲养幼虫要比之前利用天然木段饲养双条杉天牛的幼虫更利于试验的观察,且饲养方法操作比较简便,为今后大规模的生产奠定基础。目前,该人工饲料已用于 Bt 毒蛋白对双条杉天牛初孵幼虫的室内生物活性测定试验,对照试验组的试虫死亡率小于 20%,达到了室内生测对对照组的要求(待发表试验数据),该结果结合对饲料配方的饲养检验结果,表明该饲料配方可以成功完成双条杉天牛幼虫期的饲养。本研究的试验设计方法和营养元素配比方案将会为今后研制其他天牛或昆虫人工饲料提供参考,也将为害虫的生物防治等基础提供新的思路。

## 参考文献

[1] 中国林业科学研究院. 中国森林昆虫[M]. 北京:中国林业出版社,1983.  
 [2] 王淑英. 中国森林植物检疫对象[M]. 北京:中国林业出版社,1996.  
 [3] 李娟,崔永三,宋玉双,等. 我国林业检疫性和危险性有害生物

新名单的特点[J]. 中国森林病虫,2013,32(5):42-47.  
 [4] 国家林业局. 国家林业局 2013 年第 4 号公告[EB/OL]. [2013-01-11]. [http://www.forestry.gov.cn/portal/main/govfile/13/govfile\\_1983.htm](http://www.forestry.gov.cn/portal/main/govfile/13/govfile_1983.htm).  
 [5] KIM K C, PARK J D. Studies on ecology and injury characteristics of Japanese Juniperus bark borer, *Semanotus bifasciatus* Motschulsky [J]. Korean Journal of Plant Protection, 1984, 23(2): 109-115.  
 [6] 王凤英,于秀杰,苏建明. 辽宁地区林业有害生物双条杉天牛风险分析[J]. 安徽农业科学,2016,44(6):134-136.  
 [7] 高苏岚,许志春,弓献词,等. 双条杉天牛的生物学特性[J]. 昆虫知识,2008,45(1):74-77.  
 [8] 刘育俭. 北京园林双条杉天牛综合防治技术的研究[D]. 北京:中国农业大学,2005.  
 [9] 梁修山,张梅,徐光余,等. 双条杉天牛生物学特性研究[J]. 安徽农业大学学报,2002,29(1):20-24.  
 [10] 孟庆兰,王晓翠,刘阳,等. 双条杉天牛发生规律调查及防治药剂筛选试验[J]. 现代农业科技,2016(22):104-106.  
 [11] 王延年. 昆虫人工饲料手册[M]. 上海:上海科学技术出版社,1984.  
 [12] 忻介六. 昆虫的人工饲料[J]. 昆虫知识,1976,13(2):41-42.  
 [13] 忻介六,苏德明. 昆虫、螨类、蜘蛛的人工饲料[M]. 北京:科学出版社,1979.  
 [14] SINGH P, MOORE R F. Handbook of insect rearing [M]. Elsevier, 1985.  
 [15] 戴长庚,欧阳芳,陈湘燕,等. 鳞翅目昆虫人工饲养技术研究进展[J]. 南方农业学报,2016,47(5):672-676.  
 [16] 张帆,李姝,肖达,等. 中国设施蔬菜害虫天敌昆虫应用研究进展[J]. 中国农业科学,2015,48(17):3463-3476.  
 [17] HANKS L M, MCELFFRESH J S, MILLAR J G, et al. *Phoracantha semipunctata* (Coleoptera: Cerambycidae), a serious pest of *Eucalyptus* in California; biology and laboratory-rearing procedures [J]. Annals of the Entomological Society of America, 1993, 86(1): 96-102.  
 [18] KEENA M A. Pourable artificial diet for rearing *Anoplophora glabripennis* (Coleoptera: Cerambycidae) and methods to optimize larval survival and synchronize development[J]. Annals of the Entomological Society of America, 2005, 98(4): 536-547.  
 [19] 贺萍. 实验室饲养四点象天牛[J]. 北京林业大学学报,1990,12(1): 104-106.  
 [20] 贺萍,黄竞芳. 光肩星天牛的人工饲养[J]. 北京林业大学学报,1992,14(2): 61-67.  
 [21] ALOO I, KATAGIRI K. Assessment of artificial rearing method for the pine sawyer beetle, *Monochamus alternatus* (Coleoptera: Cerambycidae)[M]. The Tokyo University Forests, Laboratory of Forest Zoology, Faculty of Agriculture the University of Tokyo, 1994.  
 [22] 黄华. 眉斑楔天牛的生物学特性及人工饲料研究[D]. 南宁:广西大学,2007.

- 社,1996.
- [8] ISKANDAROV U S, GUZALOVA A G, DAVRANOV K D. Effects of nutrient medium composition and temperature on the germination of conidia and the entomopathogenic activity of the fungi [J]. Prikladnaia Biokhimiia Mikrobiologii, 2006, 42(1): 81 - 85.
- [9] 林华峰, 樊美珍, 李增智. 不同温湿度下白僵菌对松毛虫的侵染致病效应[J]. 应用生态学报, 1998, 9(2): 195 - 200.
- [10] 原贵生, 谢映平, 牛宇, 等. 白僵菌对山西林区油松毛虫的致病效果[J]. 中国生物防治, 2006, 22(2): 118 - 122.
- [11] 武颀文. 微生物杀虫剂的应用[M]//陈昌洁. 松毛虫综合管理. 北京: 中国林业出版社, 1990: 256 - 273.
- [12] 邝灼彬, 吕利华, 冯夏, 等. 温度及常见农药对球孢白僵菌生物学特性的影响[J]. 华南农业大学学报, 2005, 26(3): 26 - 29.
- [13] 孙鲁娟, 吴孔明, 郭予元. 不同温、湿度下白僵菌对棉铃虫幼虫的致病力[J]. 昆虫学报, 2001, 44(4): 501 - 506.
- [14] 何余容, 吕利华, 邝灼彬, 等. 不同温湿度下球孢白僵菌对小猿叶甲的致病力[J]. 昆虫学报, 2005, 48(5): 679 - 686.
- [15] DAL BELLO G, PADIN S, JUAREZ P, et al. Biocontrol of *Acanthoscelides obtectus* and *Sitophilus oryzae* with diatomaceous earth and *Beauveria bassiana* on stored grains[J]. Biocontrol Science and Technology, 2006, 16(1/2): 215 - 220.
- [16] VASSILAKOS T N, ATHANASSIOU C G, KAVALLIERA-TOS N G, et al. Influence of temperature on the insecticidal effect of *Beauveria bassiana* in combination with diatomaceous earth against *Rhizopertha dominica* and *Sitophilus oryzae* on stored wheat [J]. Biological Control, 2006, 38(2): 270 - 281.
- [17] 周仙红, 张思聪, 庄乾营, 等. 非蛆人工饲料配方筛选及饲养效果比较[J]. 昆虫学报, 2015, 58(11): 1245 - 1252.
- [18] 曹卫平, 冯书亮, 王金耀, 等. 白僵菌防治刺吸式口器害虫研究与应用进展[J]. 中国生物防治, 2006, 22(2): 129 - 134.
- [19] 李荣森, 罗绍彬. 微生物防治害虫[M]. 北京: 科学出版社, 1983: 27 - 45.
- [20] 李春香, 张淑红. 白僵菌对害虫致病性的研究进展[J]. 唐山师范学院学报, 2005, 27(5): 40 - 43.
- [21] 陈浩, 王玉涛, 高欢欢, 等. 韭菜迟眼蕈蚊生物防治研究现状与展望[J]. 山东农业科学, 2016, 48(3): 158 - 161.
- [22] 周仙红, 翟一凡, 沈一凡, 等. 不同栽培模式韭菜田韭菜迟眼蕈蚊和葱黄寡毛跳甲的种群动态[J]. 植物保护, 2016, 42(3): 215 - 221.
- [23] 林华峰, 李增智, 胡萃. 不同环境中松毛虫感染白僵菌过程的组织病理变化[J]. 安徽农业大学学报, 1998, 25(4): 330 - 335.
- [24] QUESADA M E, YOUSEF M, ESTEVEZ A, et al. *Beauveria bassiana* (Ascomycota: Hypocreales) wound dressing for the control of *Euzophera pinguis* (Lepidoptera: Pyralidae)[J]. Journal of Economic Entomology, 2013, 106: 1602 - 1607.
- (责任编辑: 杨明丽)
- 
- (上接 139 页)
- [23] 寻锋, 刘强. 槐绿虎天牛人工饲养的研究[J]. 天津师范大学学报(自然科学版), 2012, 32(4): 78 - 80.
- [24] 曹利军, 杨帆, 唐思莹, 等. 适合三种鳞翅目昆虫的一种人工饲料配方[J]. 应用昆虫学报, 2014, 51(5): 1376 - 1386.
- [25] 张克斌, 胡木林. 黄斑星天牛人工饲料研究[J]. 林业科学, 1993, 29(3): 227 - 233.
- [26] 张永安, 王玉珠, 曲良建. 松褐天牛人工饲养和传代方法及其幼虫人工饲料: 101228853[P]. 2008 - 07 - 30.
- [27] 尹新明, 温发园, 江志伟, 等. 管式天牛昆虫幼虫人工饲料及其饲养方法: 100508778 C[P]. 2009.
- [28] 蔡守平, 何学友, GURR G M, 等. 星天牛幼虫人工饲料的饲养效果及温度对其生长的影响(英文)[J]. 林业科学, 2016, 52(12): 141 - 149.
- [29] 张霖. 褐梗天牛生物学特性和引诱剂的初步研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
- [30] 唐启义. DPS 数据处理系统: 实验设计统计分析及数据挖掘[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [31] 严文斌. 双条杉天牛研究初报[J]. 安徽农业大学学报, 2003, 30(1): 57 - 60.
- [32] 王宏琦. 双条杉天牛无公害防治技术研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2008.
- [33] 王延年. 昆虫人工饲料的发展应用和前途[J]. 昆虫知识, 1990, 27(5): 310 - 312.
- [34] 崔为正, 王伟东. 家蚕人工饲料防腐剂 and 抗菌素的筛选研究[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 1999(3): 219 - 225.
- [35] 张树坤, 王业成, 苏建亚, 等. 稻纵卷叶螟人工饲料中防腐剂对曲霉的抑制效果[J]. 南京农业大学学报, 2014, 37(2): 59 - 66.
- [36] 高苏岚, 许志春, 弓献词. 双条杉天牛研究进展[J]. 中国森林病虫害, 2007, 26(3): 19 - 22.
- [37] ELVIRA S, GORRÍA N, MUÑOZ, D, et al. A simplified low-cost diet for rearing *Spodoptera exigua* (Lepidoptera: Noctuidae) and its effect on *S. exigua* nucleopolyhedrovirus production [J]. Journal of Economic Entomology, 2010, 103(1): 17 - 24.
- [38] DUBOIS T, HAJEK A E, SMITH S. Methods for rearing the Asian longhorned beetle (Coleoptera: Cerambycidae) on artificial diet [J]. Annals of the Entomological Society of America, 2002, 95(2): 223 - 230.
- (责任编辑: 田 喆)