

白星花金龟卵孵化及初孵幼虫开口料优化*

毕勇利^{1**} 黎春慧¹ 张广杰^{2,3} 李明¹ 马德英^{1***}

(1. 新疆农业大学农学院, 农林有害生物监测与安防重点实验室, 乌鲁木齐 830052;

2. 吉林农业大学食用菌教育部工程研究中心, 长春 130118; 3. 玛纳斯县金昆虫生物科技有限公司, 昌吉 832205)

摘要 【目的】探究平菇菌糠、牛粪与棉花秸秆的配合物料对白星花金龟 *Protaetia brevitarsis* 卵孵化及初孵幼虫生长发育的影响, 明确适宜白星花金龟 1 龄幼虫生长发育的农业废弃物及复合饲料配比, 为其规模化高效养殖和农业固体废弃物的资源化利用提供依据。【方法】以平菇菌糠、牛粪与棉花秸秆混合饲料为研究对象, 设置 4 个不同配比处理组 (M1-M4), 并以传统牛粪-棉秆组合 (CK1) 和纯平菇菌糠 (CK2) 为对照。系统测定并分析各饲料配方对虫卵孵化、幼虫体长、体重、存活率、生长速率、饲料利用率、料重比及体内保幼激素含量的影响。【结果】在虫卵孵化方面对照组 (CK1、CK2) 与处理组 (M1-M4) 之间无显著差异 ($P>0.05$)。其余方面, 处理组 M1 (32%牛粪、20%平菇菌糠、48%棉花秸秆) 综合表现最优, 其幼虫体重、获得生物量、生长速率及饲料利用率分别较 CK1 显著提高了 131%、152%、152% 和 67% ($P<0.05$), 较 CK2 分别显著提高了 427%、508%、507% 和 623% ($P<0.05$); 处理组 M4 (80%平菇菌糠、8%牛粪、12%棉花秸秆) 促进幼虫体长增长的效果最佳, 其体长较 CK1 提高了 22.86%, 较 CK2 提高了 85.01% ($P<0.05$)。此外, 处理组 M2 (24%牛粪、40%平菇菌糠、36%棉花秸秆) 可显著提升幼虫体内保幼激素含量, 较 CK1、CK2 分别提高了 108.94% 和 70.76% ($P<0.05$), 该效果有助于维持幼虫虫态稳定性, 延长其对农业废弃物的转化处理周期。【结论】综合评价, 使用 32%牛粪、20%平菇菌糠、48%棉花秸秆作为饲料可促进白星花金龟幼虫生长发育, 更好地转化利用牛粪、棉秆废弃物。

关键词 白星花金龟; 平菇菌糠; 复合饲料; 幼虫生长发育

Optimization the hatching and feeding of *Protaetia brevitarsis* larvae

BI Yong-Li^{1**} LI Chun-Hui¹ ZHANG Guang-Jie^{2,3} LI Ming¹ MA De-Ying^{1***}

(1. Key Laboratory of the Pest Monitoring and Safety Control of Crops and Forests of the Xinjiang Uygur Autonomous Region, College of Agronomy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Engineering Research Center of Edible and Medicinal Fungi, Ministry of Education, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China;

3. Manas County Golden Insect Biotechnology Co., Ltd., Changji 832205, China)

Abstract [Aim] To investigate the effects of mixed materials; *Pleurotus ostreatus* spent mushroom substrate, cow dung, and cotton straw, on the hatching, growth and development of *Protaetia brevitarsis* larvae, and also to determine the appropriate agricultural wastes and compound feed ratios for the optimal growth and development of 1st-instar larvae, thereby providing a basis for both the efficient, large-scale breeding of this species, and the efficient utilization of solid agricultural waste. [Methods] Treatments (M1-M4) were four different combinations of mushroom substrate, cow dung, and cotton straw, with the traditional cow dung-cotton straw combination (CK1) and pure *Pleurotus ostreatus* spent mushroom substrate (CK2) serving as the controls. The hatching rate, larval body length, body weight, survival rate, growth rate, feed utilization rate, feed conversion ratio, and internal juvenile hormone content of larvae in each treatment group were systematically measured and analyzed. [Results] Although there was no significant difference in hatching rate between the control and

*资助项目 Supported project: 新疆维吾尔自治区重点研发专项 “基于昆虫生物转化的农田残膜回收混合物分离技术研究 (2022B02046)”

**第一作者 First author, E-mail: 1982611003@qq.com

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

收稿日期 Received: 2026-01-12; 接受日期 Accepted: 2026-03-22

treatment groups, the M1 treatment (32% cow dung, 20% *Pleurotus ostreatus* spent mushroom substrate, 48% cotton straw) was superior to the other treatments in all other parameters measured. The larval body weight, obtained biomass, growth rate, and feed utilization rate of M1 (131%, 152%, 152%, and 67%, respectively) was significantly higher than that of both CK1 and CK2 (427%, 508%, 507%, and 623%, respectively) ($P < 0.05$). Treatment M4 (80% *Pleurotus ostreatus* spent mushroom substrate, 8% cow dung, 12% cotton straw) was the best in terms of promoting larval body length. Body length was 22.86% greater in this treatment group than in CK1, and 85.01% greater than in CK2 ($P < 0.05$). In addition, the juvenile hormone content of the M2 treatment group (24% cow dung, 40% *Pleurotus ostreatus* spent mushroom substrate, 36% cotton straw) was significantly higher (108.94% and 70.76%, respectively) than that of the CK1 and CK2 groups ($P < 0.05$). This was helpful for maintaining the stability of larval instars and also prolonged the transformation and treatment cycle of agricultural waste.

[Conclusion] A combination of 32% cow dung, 20% *Pleurotus ostreatus* spent mushroom substrate, and 48% cotton straw can both promote the growth and development of *P. brevitarsis* larvae, and the transformation and utilization of cow dung and cotton straw waste.

Key words *Protaetia brevitarsis*; oyster mushroom spent substrate; compound feed; larval growth and development

随着农业生产规模的持续扩大, 农作物秸秆、畜禽粪便及食用菌栽培废料等农业有机废弃物的产量日益增加(崔霞, 2025; 胡毅航和张俊飏, 2025; 李蓉蓉等, 2025; 伍祎翌等, 2025; 赵晏等, 2025)。这些废弃物若处置不当, 不仅造成资源浪费, 还可能引发环境污染和生态问题等(侯丽鹏等, 2025)。因此, 寻求高效、环保的农业废弃物资源化利用途径, 已成为当前农业可持续发展的重要课题之一(雷禄旺, 2025; 刘玉升, 2025; 姚媛妹和曹延涵, 2026)。昆虫转化技术因其高效、低成本和环境友好等优势, 被视为处理有机废弃物的潜在有效方法(雷佳琦等, 2025; 赵子榆等, 2025)。其中, 白星花金龟 *Protaetia brevitarsis* 幼虫作为一种腐食性昆虫, 能够取食并转化牛粪、秸秆等有机废弃物, 在减少污染的同时生成高价值虫体蛋白与虫砂有机肥, 兼具环境效益与潜在的经济价值(王晓娜, 2022; 赵正萍等, 2024; 周诗玉, 2024)。目前, 利用牛粪与棉花秸秆混合物料饲养白星花金龟已具有一定的应用基础, 但其饲料转化效率、幼虫生长发育性能仍有待进一步提升(张广杰等, 2019; 李潘潘, 2021)。平菇菌糠是食用菌生产后的残余培养基质, 富含粗蛋白、粗纤维、多糖及多种微量元素, 理论上可作为昆虫饲料的优质营养补充来源(楚晓真等, 2024; 范宁宁等, 2025)。然而, 将平菇菌糠与牛粪、棉花秸秆进行复配, 并系统评估其对白星花金龟幼虫生长发

育、饲料利用效率及体内生理指标影响的研究尚显不足。鉴于此, 本研究以白星花金龟虫卵及 1 龄幼虫为研究对象, 通过将平菇菌糠、牛粪与棉花秸秆按不同比例复配, 设计系列饲料配方, 以传统牛粪-棉花秸秆组合及单一平菇菌糠为对照, 探究不同饲料配方对幼虫孵化动态、存活率、体长体重增长、饲料利用率、料重比以及体内保幼激素含量的影响。旨在筛选出可显著促进白星花金龟虫卵孵化、幼虫生长、提高饲料转化效率或调控发育周期的优化饲料配比, 为白星花金龟规模化养殖及其在农业废弃物高效转化中的应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料及仪器

白星花金龟虫卵由新疆农业大学玛纳斯科研基地提供; 平菇菌糠购买于包家店镇; 牛粪来自塔西河村堆粪场; VT-1000 菌剂(北京恒盛鑫科生物科技有限公司); 甲酸(国药集团化学试剂有限公司); 甲醇(默克)、乙腈(默克); 保幼激素(Cayman)。电子天平(上海舜宇恒平科学仪器有限公司); 离心机(湘仪); 液相色谱仪质谱仪(Agilent)。

1.2 试验方法

1.2.1 基质处理 将平菇菌糠、牛粪、棉花秸秆

按表 1 进行配比,所有材料均为干重配比。以 40%牛粪 60%棉花秸秆组合和 100%平菇菌糠组合为对照。各物料混合后,将含水量调节至 60%±5%,与 VT-1000 菌剂拌匀发酵 25 d,每 5 d 进行一次翻堆,确保发酵充分。发酵完成后,放置于太阳下晒干,使用时用粉碎机粉碎。

1.2.2 饲养方法 取白星花金龟同一天所产虫卵 20 粒,放置于圆形养虫盒(面直径 15 cm×底直径 10 cm×高 8.5 cm)中饲养,饲料盒中放入 200 g 饲料,含水量调节至 50%±5%,每个处理重复 3 次。试验时,每天测定含水量并适当补水,试验在温室大棚中进行,50%幼虫变为 2 龄幼虫时结束。

表 1 白星花金龟 1 龄幼虫饲料配比
Table 1 Feed ratio for 1st instar larvae of *Protaetia brevitarsis*

处理 Treatment	牛粪 (%) Cow dung (%)	平菇菌糠 (%) <i>Pleurotus ostreatus</i> spent mushroom substrate (%)	棉花秸秆 (%) Cotton straw (%)
CK1	40.0	0.0	60.0
CK2	0.0	100.0	0.0
M1	32.0	20.0	48.0
M2	24.0	40.0	36.0
M3	14.0	60.0	24.0
M4	8.0	80.0	12.0

CK1 为牛粪-棉花秸秆 (4 : 6); CK2 为纯平菇菌糠 (100%); M1 为 32%牛粪+20%平菇菌糠+48%棉花秸秆; M2 为 24%牛粪+40%平菇菌糠+36%棉花秸秆; M3 为 14%牛粪+60%平菇菌糠+24%棉花秸秆; M4 为 8%牛粪+80%平菇菌糠+12%棉花秸秆。下图和下表同。

CK1 represents cow manure-cotton straw (4 : 6); CK2 represents pure *P. ostreatus* spent substrate(100%); M1 represents 32% cow manure+20% *P. ostreatus* spent substrate+48% cotton straw; M2 represents 24% cow manure+40% *P. ostreatus* spent substrate+36% cotton straw; M3 represents 14% cow manure+60% *P. ostreatus* spent substrate+24% cotton straw; M4 represents 8% cow manure+80% *P. ostreatus* spent substrate+12% cotton straw. The same below.

1.2.3 不同基质对白星花金龟虫卵孵化及幼虫存活率的影响 每日目测观察虫卵孵化情况,记录以下参数:孵化起始时间(首次卵壳破裂时间);孵化高峰期(75%虫卵完成孵化的时间点);

完全孵化周期(从首次孵化至最后 1 粒虫卵孵化的持续时间);幼虫存活率计算(岳海林等, 2024):待全部虫卵完成孵化(连续 48 h 无新幼虫),采用小匙收集基质中的 1 龄幼虫。收集的幼虫置于培养皿中,使用计数器计数。

1.2.4 测定数据 将 1.2.3 节中白星花金龟虫卵孵化数量点清后放回基质中,每 3 d 随机取 5 只白星花金龟幼虫,使用电子台秤(LT3002,常熟市天量仪器有限责任公司)和数显游标卡尺测白星花金龟幼虫体重、体长,取平均值作为幼虫平均体长、体重,并计算虫卵孵化率、幼虫存活率、幼虫获得生物量、幼虫生长率、消耗饲料总量、饲料利用率、料重比、虫体转化率(张广杰等, 2019)。

幼虫增重量=幼虫最终总鲜重-初始总鲜重
(1)

幼虫生长率=幼虫增重量÷饲养时间×100%
(2)

饲料取食量=初始饲料总重-结束时剩余物质总重
(3)

饲料利用率=(总饲料量-剩余饲料量)÷总饲料量×100%
(4)

料重比=饲料取食量÷幼虫获得生物量 (5)

虫体转化率=虫体增重量÷(取食量-虫砂量)×100%
(6)

1.2.5 不同饲养基质对白星花金龟幼虫体内保幼激素的影响

测试方法

(1) 前处理方法

称取适量混匀样品(0.5 g 左右)于离心管中,加入 0.9 mL 甲醇,加入钢珠打碎,超声提取 30 min,涡旋混匀,12 000 r/min 离心 10 min,取上清液过 0.45 μm 微孔滤膜后上机测定。

(2) 仪器方法

①色谱条件:

色谱柱: Agilent C18 (2.1 mm×100 mm, 1.8 μm); 柱温: 30 ℃; 进样量: 4 μL; 质谱条件: 离子喷射电压: 正离子模式: 3 500 V; 温度: 300 ℃; 源内气体: N₂; 流动相梯度如表 2 所示。

表 2 流动相梯度
Table 2 Mobile phase gradient

时间 (min) Time (min)	流速 (mL/min) Flow rate (mL/min)	A% (0.1%甲酸 水溶液) A% (0.1% Formic acid aqueous solution)	B% (乙腈) B% (Acetonitrile)
0.00	0.2	90.0	10.0
1.00	0.2	40.0	60.0
1.50	0.2	10.0	90.0
3.00	0.2	10.0	90.0
3.50	0.2	90.0	10.0
5.00	0.2	90.0	10.0

②计算公式

含量按公式计算：
$$W = \frac{(C - C_0) \times V \times N}{m} \quad (7)$$

式中：

W —试样中目标物含量，单位 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ；

C —试样测定液中目标物的浓度，单位 $\mu\text{g}/\text{L}$ ；

C_0 —空白对照中目标物的浓度，单位 $\mu\text{g}/\text{L}$ ；

V —定容体积，单位 mL ；

N —稀释倍数；

m —试样的称样质量，单位 g 。

1.3 数据分析

试验数据采用 IBM SPSS Statistics 27 进行 One-way ANOVA 方差分析，对不同处理间的差异进行 Tukey 多重比较分析，并用 GraphPad Prism 10 进行统计并制图。数据处理结果以平均值 $\pm$ 标准误表示， $P<0.05$ 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 不同饲料配方对白星花金龟虫卵孵化率及幼虫存活率的影响

不同配方饲料条件下，白星花金龟成虫所产虫卵的孵化率及幼虫存活率如表 3 所示。在孵化率方面纯平菇菌糠对照组（CK2）、处理组 M4 表现最好，显著高于处理组 M3（ $P<0.05$ ）；对照组传统牛粪-棉秆组合（CK1）与对照组 CK2 无

显著差异（ $P>0.05$ ）；并且对照组 CK1、CK2 与处理组 M1、M2、M4 之间无显著差异（ $P>0.05$ ）。在幼虫存活率方面各对照组与处理组无显著差异（ $P>0.05$ ），但在所有实验组中处理组 M4 的幼虫存活率最高。

表 3 不同比例饲料配方对白星花金龟
虫卵孵化率及幼虫存活率的影响
Table 3 Effects of different proportion of feed
formulas on the hatching rate of eggs and survival
rate of larvae of *Protaetia brevitarsis*

处理 Treatment	孵化率（%） Hatching rate (%)	存活率（%） Survival rate (%)
CK1	81.67 $\pm$ 0.03 ab	91.30 $\pm$ 0.08 a
CK2	86.67 $\pm$ 0.03 a	90.41 $\pm$ 0.09 a
M1	80.00 $\pm$ 0.05 ab	89.21 $\pm$ 0.05 a
M2	81.67 $\pm$ 0.06 ab	89.93 $\pm$ 0.03 a
M3	75.00 $\pm$ 0.05 b	89.58 $\pm$ 0.10 a
M4	85.00 $\pm$ 0.05 a	95.93 $\pm$ 0.04 a

表中数值为平均值 $\pm$ 标准误，同列数据后不同小写字母表示显著性差异（ $P<0.05$ ，Tukey 检验）。下表同。
Data in the table are presented as mean $\pm$ SE, and followed by the different letters within the same column indicate significant difference ($P<0.05$, Tukey's test). The same below.

2.2 不同比例饲料配方对白星花金龟幼虫体长的影响

不同比例饲料配方下对白星花金龟幼虫体长变化的影响如表 4 所示。分析结果显示饲养第 3 天时，处理组 M2、M3、M4 幼虫平均体长显著优于对照组 CK1、CK2（ $P<0.05$ ），但各处理组（M1-M4）间未表现出显著差异（ $P>0.05$ ）。第 6 天时，仅处理组 M1、M4 的幼虫体长显著高于对照组 CK2（ $P<0.05$ ）；对照组 CK1 与所有处理组间无显著差异（ $P>0.05$ ），且对照组 CK2 与对照组 CK1、处理组 M2、M3 的体长也无显著差异（ $P>0.05$ ）。第 9 天时，幼虫体长变化趋势与第 6 天相近，但差异显著性更为清晰：对照组 CK2 的幼虫体长显著低于对照组 CK1 及全部处理组（ $P<0.05$ ），对照组 CK1 与各处理组间仍无显著差异（ $P>0.05$ ）；此外，处理组 M4 的幼虫体长显著高于对照组 CK1、CK2（ $P<0.05$ ），

表 4 不同比例饲料配方对白星花金龟幼虫体长 (mm) 的影响

Table 4 Effects of different proportion diets on body length (mm) of *Protaetia brevitarsis* larvae

处理 Treatment	饲养天数 (d) Feeding time (d)				
	3	6	9	12	15
CK1	9.41±0.71 b	10.76±2.77 ab	11.86±1.30 ab	13.53±2.87 b	15.57±0.82 b
CK2	8.79±0.58 b	9.31±0.66 b	9.56±0.45 c	9.72±0.33 c	10.34±0.31 c
M1	9.65±0.63 ab	12.21±1.09 a	14.58±1.53 a	15.17±1.24 ab	17.59±2.08 ab
M2	10.78±0.61 a	11.89±0.49 ab	13.90±1.91 ab	15.81±0.75 ab	17.15±1.04 ab
M3	9.88±0.70 a	11.59±1.11 ab	12.68±0.52 ab	14.31±0.95 ab	15.55±1.98 b
M4	10.70±0.70 a	12.50±0.36 a	14.23±0.92 a	16.66±1.44 a	19.13±1.09 a

其余处理组间无显著差异 ($P>0.05$)。饲养至第 12 天, 组间差异进一步加剧, 处理组 M4 的幼虫体长显著高于对照组 CK1、CK2 ($P<0.05$), 且对照组 CK1 的幼虫体长显著高于对照组 CK2 ($P<0.05$), 各处理组间无显著差异 ($P>0.05$)。第 15 天时, 处理组 M4 的幼虫体长优势更为突出, 显著高于对照组 CK1、CK2 及处理组 M3 ($P<0.05$), 而处理组 M1、M2、M3 间的体长未表现出显著性差异 ($P>0.05$)。

2.3 不同比例饲料配方对白星花金龟幼虫体重、获得生物量及生长率的影响

不同比例配方饲料对白星花金龟幼虫体重的影响如表 5 所示。饲养第 3 天时, 对照组 CK1 与处理组 M1、M3 的幼虫体重均显著高于处理组 M4 及对照组 CK2 ($P<0.05$); 而对照组 CK1 与处理组 M1、M2、M3 之间的幼虫体重无显著差异 ($P>0.05$), 表明该阶段 CK1、M1、M2、M3 组饲料对幼虫体重的促进效果无明显区别,

且优于 M4 组及 CK2 组。

饲养第 6 天时, 各组幼虫体重呈现明显分化: 处理组 M4 幼虫体重显著高于对照组 CK1、CK2 及处理组 M1、M2 ($P<0.05$); 对照组 CK2 与处理组 M1、M2、M3 幼虫体重无显著差异 ($P>0.05$); 处理组 M2、M3 幼虫体重显著高于处理组 M1 ($P<0.05$); 同时, 对照组 CK2 及各处理组幼虫体重均显著高于对照组 CK1 ($P<0.05$), 说明随着饲养时间延长, M4 组饲料的增重优势开始显现, 且 CK2 组及各处理组的饲养效果均优于 CK1 组。

饲养第 9 天时, 处理组 M1 幼虫体重显著高于其他所有处理组及对照组 CK1、CK2 ($P<0.05$); 对照组 CK1 与 CK2 之间无显著差异 ($P>0.05$), 处理组 M2 与 M4 之间亦无显著差异 ($P>0.05$), 该阶段 M1 组饲料的增重效果最为突出, 而 M2 与 M4 组、CK1 与 CK2 组的饲养效果分别趋于一致。

表 5 不同比例配方饲料对白星花金龟幼虫体重 (mg) 的影响

Table 5 Effects of formulated feeds with different proportion on the body weight (mg) of *Protaetia brevitarsis* larvae

处理 Treatment	饲养天数 (d) Feeding time (d)				
	3	6	9	12	15
CK1	13.33±1.62 a	22.70±0.90 d	34.40±2.40 d	84.60±4.80 d	98.30±0.30 e
CK2	8.00±0.69 c	26.07±5.67 cb	28.60±3.80 d	38.30±1.90 e	43.20±2.40 f
M1	13.47±0.83 a	30.60±7.80 c	104.20±8.40 a	110.50±0.10 b	227.47±5.15 a
M2	9.40±0.92 ab	40.90±3.70 b	76.00±0.80 b	159.40±5.20 a	190.17±6.46 b
M3	14.73±1.22 a	30.00±4.80 ab	63.87±1.40 c	87.60±1.80 d	134.30±2.90 d
M4	10.27±0.42 b	53.20±0.40 a	76.10±0.90 b	101.90±4.10 c	149.20±9.60 c

饲养第 12 天时, 各实验组间幼虫体重存在显著差异 ($P<0.05$), 具体表现为处理组 M2 幼虫体重显著高于 M1 组, M1 组显著高于 M4 组, M4 组显著高于 M3 组与对照组 CK1, 且 M3 组与对照组 CK1 幼虫体重显著高于对照组 CK2, 各组增重效果呈现明确的梯度差异。

饲养第 15 天时, 各试验组幼虫体重仍存在显著差异 ($P<0.05$), 组间体重由高至低依次为 M1 组>M2 组>M4 组>M3 组>对照组 CK1>对照组 CK2, 且相邻组别间的幼虫体重均存在显著性差异, 表明不同比例配方饲料对白星花金龟幼虫体重的影响随饲养周期推进逐渐稳定, 且组间差异持续显著。

在白星花金龟幼虫获得生物量及生长率方面如表 6 所示, 在处理第 15 天时, 对不同组别白星花金龟幼虫的生物量积累情况进行测定, 结果显示对照组 CK1、CK2 及处理组 M1、M2、M3、M4 幼虫的生物量分别为 (84.97 ± 4.93) (35.20 ± 1.83) (214.00 ± 5.01) (180.77 ± 6.77) (119.57 ± 4.11) 与 (138.93 ± 9.20) mg。其中, 处理组 M1 幼虫生物量积累量最高, 且显著高于对照组及其他各处理组 ($P<0.05$); 对照组 CK2 幼虫生物量最低, 显著低于其余所有试验组别。各试验组幼虫生物量由高至低的排序为 M1>M2>M4>M3>CK1>CK2, 进一步统计分析表明, 相邻组别间幼虫平均生物量均存在显著性差异 ($P<0.05$)。在白星花金龟幼虫生长率的测定与分析中, 幼虫个体生长率的差异显著性水平, 与

获得生物量的差异显著性水平呈现出一致性。

2.4 不同比例配方饲料对白星花金龟幼虫饲料利用率和料重比的影响

白星花金龟幼虫饲料利用率如图 1 所示。分析数据显示, 其处理组 M1 幼虫饲料利用率表现最优为 $33.96\%\pm1.02\%$, 显著高于其他处理组及对照组 CK1、CK2 ($P<0.05$), 对照组 CK2 最低仅为 $4.7\%\pm0.46\%$ 。进一步分析发现, 对照组 CK1 与处理组 M3、M4 之间无显著差异 ($P>0.05$), 但此 3 组幼虫饲料利用率都显著低于处理组 M2 ($P<0.05$)。

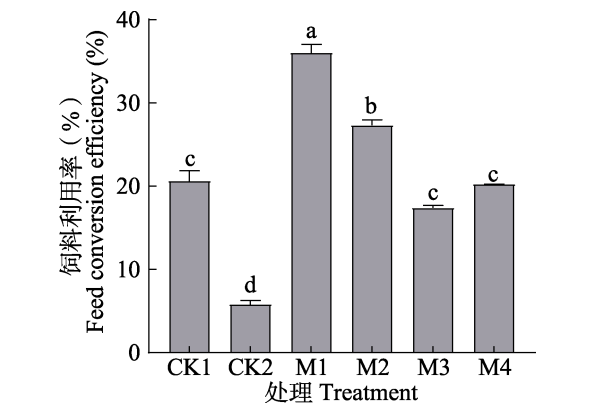


图 1 不同比例配方饲料对白星花金龟幼虫饲料利用率的影响
Fig. 1 Effects of formulated feeds with different proportion on the feed utilization rate of *Protaetia brevitarsis* larvae

图中数值为平均值±标准误, 图中不同小写字母表示显著性差异 ($P<0.05$, Tukey 检验)。下图同。
Data are shown as mean±SE. Different lowercase letters above bars indicate significant difference at $P<0.05$ level by Tukey test. The same below.

白星花金龟幼虫料重比结果如图 2 所示, 对照组 CK2 的幼虫料重比数值最高, 为 19.25 ± 1.68 , 显著高于对照组 CK1 及处理组 M1-M4 ($P<0.05$); 处理组 M1 的料重比最低, 为 1.45 ± 0.08 。差异性分析结果表明, 对照组 CK1 与处理组 M2-M4 的料重比无显著差异 ($P>0.05$); 处理组 M1 与 M2 的料重比也未表现出显著差异 ($P>0.05$), 而处理组 M1 的料重比显著低于对照组 CK1、CK2 及处理组 M3、M4 ($P<0.05$)。

表 6 不同比例配方饲料对白星花金龟幼虫获得生物量及生长速率的影响		
Table 6 The effects of dietary formulations with different proportion on the acquired biomass and growth rate of larvae of <i>Protaetia brevitarsis</i>		
处理 Treatment	获得生物量 (mg) Biomass gain (mg)	生长率 (mg/d) Growth rate (mg/d)
CK1	84.97 ± 4.93 e	5.66 ± 0.33 e
CK2	35.20 ± 1.83 f	2.35 ± 0.12 f
M1	214.00 ± 5.01 a	14.27 ± 0.33 a
M2	180.77 ± 6.77 b	12.05 ± 0.45 b
M3	119.57 ± 4.11 d	7.97 ± 0.27 d
M4	138.93 ± 9.20 c	9.26 ± 0.61 c

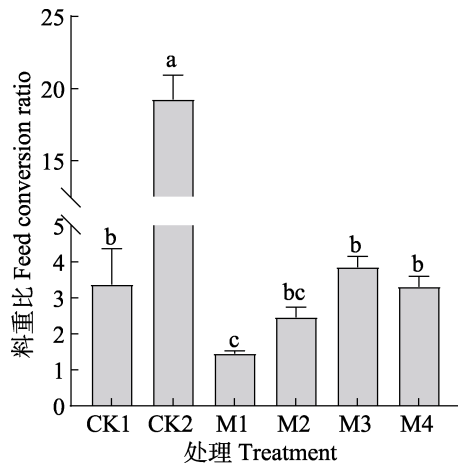


图2 不同比例配方饲料对白星花金龟幼虫料重比的影响

Fig. 2 Effects of formulated feeds with different ratio on the feed-to-gain ratio of *Protactia brevitaris* larvae

2.5 不同比例配方饲料对白星花金龟幼虫体内保幼激素的影响

在不同比例配方饲喂下白星花金龟幼虫体内保幼激素含量明显不同。由图3可得白星花金龟幼虫体内保幼激素含量呈现出显著的组间差异。各实验组的具体含量如下：对照组 CK1 为 $(2.46 \pm 0.11) \mu\text{g/kg}$ ，处理组 M1 为 $(2.86 \pm 0.09) \mu\text{g/kg}$ ，处理组 M2 为 $(5.14 \pm 0.08) \mu\text{g/kg}$ ，处理组 M3 为 $(2.36 \pm 0.17) \mu\text{g/kg}$ ，处理组 M4 为

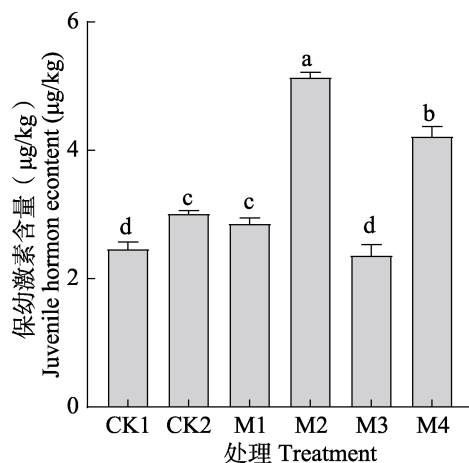


图3 不同比例配方饲料对白星花金龟幼虫体内保幼激素的影响

Fig. 3 Effects of formulated feeds with different ratio on the juvenile hormone content in larvae of *Protactia brevitaris*

$(4.22 \pm 0.15) \mu\text{g/kg}$ ，对照组 CK2 为 $(3.01 \pm 0.05) \mu\text{g/kg}$ 。比较结果表明，处理组 M2 的保幼激素含量显著高于其余各组 ($P < 0.05$)，该组含量是对照组 CK1 的 2.1 倍，较对照组 CK2 提升 70.76%；对照组 CK1 与处理组 M3 的保幼激素含量无显著差异 ($P > 0.05$)，处理组 M1 与对照组 CK2 的含量也无显著差异 ($P > 0.05$)；此外，处理组 M4 的保幼激素含量显著高于对照组 CK1、CK2 及处理组 M1、M3 ($P < 0.05$)。

3 结论与讨论

本研究表明，在牛粪-棉花秸秆基质中添加平菇菌糠后，白星花金龟 1 龄幼虫的孵化、存活、生长及饲料利用表现均发生了明显变化，但不同指标的最优处理并不一致。其中，M1 处理在体重、获得生物量、生长率、饲料利用率和料重比等指标上表现最佳；M4 处理在孵化率、存活率和体长方面更具优势；M2 处理的保幼激素含量最高。说明平菇菌糠对白星花金龟幼虫的作用具有明显的比例效应，且不同配方主要作用于不同生长发育环节。

已有研究表明，白星花金龟幼虫能够取食并转化秸秆、畜禽粪便等多种农业有机废弃物，不同基质类型会显著影响其取食量、转化效率和生物学表现(杨诚等, 2015; 杨柳等, 2019, 2020)。本研究在牛粪-棉花秸秆体系中引入平菇菌糠并设置梯度配比，结果进一步说明，平菇菌糠并非简单的营养补充物，而是能够通过与牛粪、棉花秸秆协同作用改善幼虫生长环境和营养利用效率。与之前主要围绕常规有机废弃物资源化利用展开的研究相比，本研究将食用菌菌糠纳入白星花金龟复配基质体系，并同时考察孵化、生长、料效及内源激素响应，拓展了白星花金龟饲料优化研究的内容。

从早期发育表现看，M4 处理的孵化率和存活率较高，说明较高比例平菇菌糠有利于虫卵孵化及初孵幼虫存活。该结果提示，平菇菌糠在本研究中的作用不仅体现在营养供给方面，还可能与基质微环境改善有关。平菇菌糠具有一定的蛋

白质、纤维和矿质元素含量,具备较好的再利用价值(王艳荣等,2008;楚晓真等,2024)。对白星花金龟而言,基质既是食物来源,也是栖息和取食环境,因此其透气性、保水性和疏松度等物理性状同样重要。牛粪有利于保水,棉花秸秆能够提供纤维骨架和通气空间,平菇菌糠质地较细、均匀性较好,三者复配后可能共同改善了卵和初龄幼虫周围的水气条件,从而提高了孵化率和存活率。

从体重增长、生物量积累和饲料利用结果看,M1 处理综合表现最优,而单一平菇菌糠处理 CK2 最差。这说明平菇菌糠更适合作为牛粪-棉花秸秆基质中的复配组分,而不宜单独作为白星花金龟 1 龄幼虫饲养基质。研究指出,白星花金龟幼虫在不同农业有机废弃物上的生长发育和转化效果存在明显差异,适宜的复配基质往往优于单一原料(杨柳等,2019,2020)。本研究结果与此一致,并进一步表明,M1 处理可能在营养组成与基质结构之间达到了更优平衡:牛粪提供较稳定的有机养分和保水环境,棉花秸秆维持基质孔隙结构,平菇菌糠则补充可利用养分并改善基质均一性与适口性,因此更有利于幼虫体重积累和饲料高效转化。

本研究中不同指标的最优处理并不重合:M4 更有利于孵化和体长增长,M1 更有利于虫体生物量积累和饲料转化,M2 则表现出最高的保幼激素含量。说明不同复配基质对白星花金龟幼虫的作用并不相同。未来应进一步结合蜕皮激素、消化酶活性及肠道微生物等指标开展联合分析,明确其具体调控机制。

综上,平菇菌糠在白星花金龟 1 龄幼虫饲养基质中具有较好的应用潜力,但其作用并非单纯来源于营养补充,而很可能与基质透气性、保水性、硬度及适口性等物理特性共同相关。在本试验条件下,M1(32%牛粪、20%平菇菌糠、48%棉花秸秆)可作为更适宜的优选配方。后续研究应进一步测定不同配方的营养组成和理化特性,并结合激素变化、消化代谢及肠道微生物群落分析,深入阐明平菇菌糠复配基质促进白星花金龟生长发育的作用机制。

参考文献 (References)

- Chu XZ, Liu X, Gong P, Liu G, Wang BR, Gao X, 2024. Effects of different matrix on growth, development, nutrient and mineral element content of *Pleurotus ostreatus*. *China Cucurbits and Vegetables*, 37(9): 90–95. [楚晓真, 刘璇, 龚攀, 刘格, 王保瑞, 高翔, 2024. 不同基质对平菇生长发育、营养成分及矿物元素含量的影响. *中国瓜菜*, 37(9): 90–95.]
- Cui X, 2025. Resource utilization of livestock and poultry manure and prevention measures of farming pollution. *China Poultry Science*, 47(12): 141–144. [崔霞, 2025. 畜禽粪污资源化利用及养殖污染防治措施. *家禽科学*, 47(12): 141–144.]
- Fan NN, Tan HX, Hao YF, Luan TQ, Ma JH, Xiang CH, Jiang M, 2025. Research progress on the feed utilization of edible fungi spent residue. *Edible Fungi of China*, 44(2): 6–12. [范宁宁, 谭汇轩, 郝宇凡, 栾天琪, 马嘉辉, 向昌华, 姜明, 2025. 食用菌菌糠饲料化利用研究进展. *中国食用菌*, 44(2): 6–12.]
- Hou LP, Du YR, Wu YR, Yin N, 2025. Harmless treatment and resource utilization of manure in large-scale dairy farms. *China Animal Health*, 27(9): 101–103. [侯丽鹏, 杜艳茹, 吴永儒, 殷宁, 2025. 规模化奶牛场粪污无害化处理和资源化利用. *中国动物保健*, 27(9): 101–103.]
- Hu YH, Zhang JB, 2025. Synergistic enhancement of agricultural pollution reduction and carbon emission reduction from a spatial perspective: Connotations, characteristics, practical constraints, and path selection. *Journal of Nanjing Tech University (Social Science Edition)*, 24(5): 65–78, 190. [胡毅航, 张俊飏, 2025. 空间视角下农业减污降碳协同增效: 发展特征、现实问题与路径选择. *南京工业大学学报(社会科学版)*, 24(5): 65–78, 190.]
- Lei JQ, Sun YL, Quan YD, Chen YX, Zhang L, Zhang XL, Qu YH, 2025. Research progress on biotransformation of livestock manure resources by black soldier fly. *Feed Industry*, 46(22): 155–159. [雷佳琦, 孙玉丽, 全玉东, 陈怡馨, 仇磊, 张晓琳, 曲扬华, 2025. 黑水虻幼虫对畜禽粪污资源生物转化研究进展. *饲料工业*, 46(22): 155–159.]
- Lei LW, 2025. Present situation and countermeasures of resource utilization of livestock manure in Hainan Province. *Rural Scientific Experiment*, 2025(24): 169–171. [雷禄旺, 2025. 海南省畜禽粪便资源化利用现状及对策. *农村科学实验*, 2025(24): 169–171.]
- Li PP, 2021. Study on the conversion ability of livestock and poultry manure using *Potosa brevitaris*. Master dissertation. Tai'an: Shandong Agricultural University. [李潘潘, 2021. 白星花金龟对畜禽粪污转化能力的研究. 硕士学位论文. 泰安: 山东农业大学.]
- Li RR, Wang C, Li HW, He J, Lu CY, Su XT, Hu P, 2025. Research

- progress on technology and equipment for returning straw to fields. *Journal of China Agricultural University*, 30(10): 103–120. [李蓉蓉, 王超, 李洪文, 何进, 卢彩云, 苏欣彤, 胡鹏, 2025. 秸秆还田技术与装备研究进展. 中国农业大学学报, 30(10): 103–120.]
- Liu YS, 2025. The development of insect agriculture. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 62(5): 1384–1395. [刘玉升, 2025. 从资源昆虫研究到昆虫农业模式. 应用昆虫学报, 62(5): 1384–1395.]
- Wang XN, 2022. Studies on the conversion of *Agaricus bisporus* substrate by *Protaetia brevitarsis*. Master dissertation. Tai'an: Shandong Agricultural University. [王晓娜, 2022. 白星花金龟转化处理双孢菇菌糠的研究. 硕士学位论文. 泰安: 山东农业大学.]
- Wang YR, Wang HS, Zhang HT, Zheng HY, 2008. Analysis on nutrient value of medium residues from culturing edible fungus. *Guizhou Agricultural Sciences*, 36(4): 158–159. [王艳荣, 王鸿升, 张海棠, 郑贺阳, 2008. 平菇菌糠营养价值分析. 贵州农业科学, 36(4): 158–159.]
- Wu YY, Fu MJ, Zhang T, Sui XY, Wang W, Sun XY, 2025. Exploration of vegetable waste resource utilization and sustainable development paths. *China Vegetables*, 2025(10): 59–67. [伍埏翌, 符明金, 章涛, 隋秀玉, 王伟, 孙小艳, 2025. 尾菜资源化利用与可持续发展路径探索. 中国蔬菜, 2025(10): 59–67.]
- Yang C, Liu YS, Xu XY, Zhao L, 2015. Feeding effects of fermented corn straw on larvae of *Protaetia brevitarsis*. *Journal of Environmental Entomology*, 37(1): 122–127. [杨诚, 刘玉升, 徐晓燕, 赵莉, 2015. 白星花金龟幼虫对醇化玉米秸秆取食效果的研究. 环境昆虫学报, 37(1): 122–127.]
- Yang L, Zhang GJ, Xu T, Zhang LJ, Qiang S, Ma DY, Liu YS, 2019. Study on the conversion ability of larvae of *Protaetia brevitarsis* fed with different agricultural organic wastes. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 42(3): 189–193. [杨柳, 张广杰, 徐韬, 张连俊, 羌松, 马德英, 刘玉升, 2019. 白星花金龟幼虫对不同农业有机废弃物的转化力研究. 新疆农业大学学报, 42(3): 189–193.]
- Yang L, Zhang GJ, Xu T, Zhang LJ, Li JL, Zhang S, Qiang S, Ma DY, Liu YS, 2020. Effects of different agricultural organic wastes on biological characteristics of *Protaetia brevitarsis* Lewis. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 57(4): 946–954. [杨柳, 张广杰, 徐韬, 张连俊, 李金兰, 张帅, 羌松, 马德英, 刘玉升, 2020. 不同农业有机废弃物对白星花金龟生物学特性影响研究. 应用昆虫学报, 57(4): 946–954.]
- Yao YM, Cao YX, 2026. Analysis on the path of high-quality development of agriculture empowered by new quality productivity. *Business & Economy*, 2026(2): 5–7, 39. [姚媛妹, 曹延涵, 2026. 新质生产力赋能农业高质量发展路径探析. 商业经济, 2026(2): 5–7, 39.]
- Yue HL, Guan WF, Chen HC, Li ZY, Xie YL, Xie XF, Chen LF, Huang M, Ye MQ, 2024. Effects of different formulas of sugarcane bagasse and bean dregs feed on growth performance of black soldier fly larvae. *Guangdong Feed*, 33(11): 28–32. [岳海林, 管文菲, 陈慧婵, 李志阳, 谢月亮, 谢秀凤, 陈礼芬, 黄敏, 叶明强, 2024. 甘蔗渣和豆腐渣不同配方饲料对黑水虻幼虫生长性能的影响. 广东饲料, 33(11): 28–32.]
- Zhao Y, Pang JL, Wang ZY, 2025. Study on resource utilization of cow dung and development of circular agriculture under ecological planting and breeding mode. *Oasis Agriculture Science and Engineering*, 10(4): 141–146. [赵晏, 庞嘉龙, 王振宇, 2025. 生态种植养殖模式下牛粪资源化利用与循环农业发展研究. 绿洲农业科学与工程, 10(4): 141–146.]
- Zhao ZY, Wei HJ, Zhang L, Liu XF, 2025. Study on treatment and resource utilization technology of livestock and poultry breeding waste. *Animal Industry and Environment*, 2025(17): 57–58. [赵子榆, 韦红婕, 张廉, 刘雪飞, 2025. 畜禽养殖废弃物处理与资源化利用技术研究. 畜牧业环境, 2025(17): 57–58.]
- Zhao ZP, Yan XW, Yu T, Xia YG, Zhang M, Yang M, 2024. Study on conversion capability of bamboo shoot processing residues by *Protaetia brevitarsis*. *Hunan Forestry Science & Technology*, 51(1): 97–101, 110. [赵正萍, 颜学武, 于婷, 夏永刚, 张敏, 杨明, 2024. 白星花金龟对竹笋加工剩余物的转化能力研究. 湖南林业科技, 51(1): 97–101, 110.]
- Zhang GJ, Wang Q, Liu YS, Li ZA, 2019. Study on the transformation capability of four materials in different fermentation cycles fed by *Potosia brevitarsis* (Coleoptera: Cetoniidae) larvae. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 50(5): 764–767, 804. [张广杰, 王倩, 刘玉升, 李增安, 2019. 白星花金龟幼虫对不同醇化周期四种物料的转化力研究. 山东农业大学学报(自然科学版), 50(5): 764–767, 804.]
- Zhou SY, 2024. Effects of *Protaetia brevitarsis* Lewis manure on growth, quality of *Scutellaria baicalensis* Georgi and soil quality. Master dissertation. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University. [周诗玉, 2024. 白星花金龟粪砂对黄芩生长、品质和土壤性状的影响. 硕士学位论文. 呼和浩特: 内蒙古农业大学.]