



陈耀, 陈冬梅, 邱枢林, 周材权. 黄粉虫对不同比例聚苯乙烯的取食效率研究 [J]. 环境昆虫学报, 2021, 43 (3): 690–698.

## 黄粉虫对不同比例聚苯乙烯的取食效率研究

陈耀, 陈冬梅, 邱枢林, 周材权\*

(西华师范大学生态研究院, 西南野生动植物资源保护教育部重点实验室, 四川南充 637002)

**摘要:** 为探索黄粉虫 *Tenebrio molitor* 在降解聚苯乙烯过程中聚苯乙烯与麸皮的最佳配比, 本研究将聚苯乙烯与麸皮按不同比例 PS1 (1:9), PS2 (2:8), PS3 (3:7), PS4 (4:6), PS5 (5:5), PS6 (6:4), PS7 (7:3), PS8 (8:2), PS9 (9:1), PS10 (10:0), CK (0:10) 共设置 11 组饲养黄粉虫, 研究不同比例聚苯乙烯对黄粉虫的增重、死亡率、取食量、取食聚苯乙烯量、消化率、利用率、虫粪量、化蛹率、羽化率、产卵量等指标的影响。结果表明: 黄粉虫生长性能随着饲料中聚苯乙烯含量的升高而降低。至黄粉虫大量化蛹时, CK、PS1、PS2、PS3、PS4 组黄粉虫的生长性能相接近, PS3 和 PS4 组进入大量化蛹期的时间要晚 7 d 左右, 有助于降解更多的聚苯乙烯。虽然 PS4 组黄粉虫取食聚苯乙烯的量略高于 PS3 组, 且两组的消化率、利用率、死亡率、产卵量差异不显著, 但 PS3 组在化蛹率、羽化率、干物质等方面优于 PS4 组。综上所述, PS3 (3:7) 组的配比较优, 既能保证黄粉虫的正常生长发育确保其经济价值, 又能降解较多的聚苯乙烯, 可为规模化养殖黄粉虫降解聚苯乙烯提供实验依据。

**关键词:** 黄粉虫; 聚苯乙烯; 生长发育

中图分类号: Q968.1; S89

文献标识码: A

文章编号: 1674-0858 (2021) 03-0690-09

### Study of the ingestion efficiency of *Tenebrio molitor* on different proportion of polystyrene

CHEN Yao, CHEN Dong-Mei, QIU Shu-Lin, ZHOU Cai-Quan\* (Key Laboratory of Southwest China Wildlife Resources Conservation (Ministry of Education), Institute of Ecology, China West Normal University, Nanchong 637002, Sichuan Province, China)

**Abstract:** In order to explore the best ratio between polystyrene and wheat bran in the degradation of polystyrene of the *Tenebrio molitor*, 11 groups of feed (polystyrene: wheat bran) PS1 (1:9), PS2 (2:8), PS3 (3:7), PS4 (4:6), PS5 (5:5), PS6 (6:4), PS7 (7:3), PS8 (8:2), PS9 (9:1), PS10 (10:0) and CK (0:10) were used to evaluate the weight gain, mortality, feed intake, polystyrene intake, feed digestibility, feed utilization rate, faecal output, pupation rate, emergence rate and oviposition number of the *T. molitor*. The results showed that the growth performance of the *T. molitor* decreased with the ratio of polystyrene in the feed. However, the weight gain in the groups of CK, PS1, PS2, PS3 and PS4 were similar, when a majority of the larvae pupated. The pupation age of PS3 and PS4 group were about 7 days later than that in the groups of CK, PS1 and PS2, which was helpful for the larvae to degrade more polystyrene. The amount of polystyrene intake of PS4 group was slightly higher than that in the PS3 group, while there was no significant difference in feed digestibility, feed utilization, mortality and

基金项目: 西华师范大学英才科研基金 (17YC367)

作者简介: 陈耀, 女, 四川达州人, 兽医硕士, 高级畜牧师, 主要从事动物饲养管理、动物生态学研究, E-mail: 1912983340@qq.com

\* 通讯作者 Author for correspondence: 周材权, 男, 博士, 教授, 主要从事动物生态学和保护生物学研究, E-mail: drcqzhou1@163.com

收稿日期 Received: 2020-04-14; 接受日期 Accepted: 2020-08-12

oviposition number between the PS3 and PS4 group. However, the pupation rate, emergence rate and dry matter in the PS3 group were better than those in the PS4 group. In these regards, the ratio of 3 : 7 ( polystyrene: wheat bran) was optimal, which could not only ensure the normal growth and development of the *T. molitor* to keep the economic value, but could also degrade more polystyrene. The results of this study provided fundamental information for large-scale cultivation of the *T. molitor* in polystyrene degradation.

**Key words:** *Tenebrio molitor*; polystyrene; growth and development

塑料废物处理是环保界的一个世界难题。目前绝大多数塑料废物采用填埋、焚烧及化学处理, 这几种处理方式存在着污染土壤和水、产生有毒气体、成本高并产生二次污染等问题, 导致新的污染生成 (夏炎等, 2018; 周晶和周谦, 2019)。为了更好地处理废旧塑料, 学者们纷纷转向使用生物处理来消除塑料白色污染。目前关于塑料的生物处理主要集中在 3 个方面。分别是分离特殊菌降解 (Gilan *et al.*, 2004; Yang *et al.*, 2015a; 孔芳等, 2018)、采取相关酶处理 (Yoshida *et al.*, 2016) 以及使用昆虫取食进行降解 (沈叶红, 2011; Yang *et al.*, 2014; Yang *et al.*, 2015b)。

黄粉虫 *Tenebrio molitor* 是一种具有降解塑料能力的昆虫, 在过程中其更偏向于取食聚苯乙烯塑料 (周尔康和单玉昕, 2019)。目前, 学者们通过黄粉虫的生长发育、肠道微生物及细菌的分离培养等方面的研究, 鉴定出了能降解聚苯乙烯的肠道微生物群落和菌株。黄粉虫能将聚苯乙烯转化为自身的生物量, 且虫体没有生理毒性 (沈叶红, 2011; Yang *et al.*, 2015a; Yang *et al.*, 2015b; 陈冠舟等, 2017; 孔芳等, 2018)。结合黄粉虫规模化饲养技术成熟, 耐粗饲, 蛋白含量高, 具有极高的饲用、食用、医用价值等特点 (余有成等, 1997; 刘怀如等, 1999; 杜开书, 2003; 刘怀如等, 2003; 叶榕村, 2008; 李宁等, 2017)。因此利用黄粉虫处理白色污染具有天然优势性, 既能发挥黄粉虫自身价值又能降解白色垃圾。但是, 仅食用聚苯乙烯不利于黄粉虫的生长发育, 不能达到双赢目的。为此, 可将聚苯乙烯和常规饲料按一定比例混合来饲喂黄粉虫。当前研究主要集中在使用聚苯乙烯和发酵牛粪、玉米秸秆、红薯秸秆等混合饲喂黄粉虫 (吉志新等, 2011; 曾祥伟, 2012; 吕树臣等, 2013; 徐世才等, 2013a; 王春清等, 2013; 李小龙等, 2018), 对麸皮和聚苯乙烯泡沫塑料配比研究的文献较少, 仅有徐世才等 (2013b) 对黄粉虫在不同麸皮比例下的泡沫降解率进行了初步探索。为进一步研究黄粉虫饲

料中麸皮和聚苯乙烯的最适配比, 为规模化养殖黄粉虫降解塑料提供更多的数据支撑, 使其既能保证黄粉虫的生长发育, 又尽可能降解更多的聚苯乙烯。本试验设置 11 个聚苯乙烯与麸皮比例梯度, 通过综合测定黄粉虫的增重、取食量、饲料的消化率、利用率、死亡率、干物质等指标, 综合分析一定比例聚苯乙烯和麸皮对黄粉虫生长发育的影响, 筛选出聚苯乙烯与麸皮的最优配比, 以期达到黄粉虫生产、塑料降解双赢目的。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

黄粉虫幼虫购买自南充市黄粉虫养殖场; 麸皮购买自南充市粮油市场; 聚苯乙烯塑料 (Polystyrene plastic) 粉购买自东莞市樟木头思科塑胶原料经营部公司; 电子天平 (万分之一)、温度计、湿度计、烘箱、筛子 (45 目)。

### 1.2 试验分组及饲料配比

试验共分 11 个组, 分别为聚苯乙烯组 (PS) 和对照组 (CK) 每个组 3 个重复, 每个重复 100 头黄粉虫。聚苯乙烯与麸皮具体比例分组分别为 PS1 (1:9), PS2 (2:8), PS3 (3:7), PS4 (4:6), PS5 (5:5), PS6 (6:4), PS7 (7:3), PS8 (8:2), PS9 (9:1), PS10 (10:0), CK (0:10)。

### 1.3 试验方法

本试验在温度  $25 \pm 4^\circ\text{C}$ , 相对湿度 65% ~ 75%, 虫龄相近、大小一致的虫子进行分组试验。黄粉虫 100 头初始重的范围为 4.2573 ~ 4.5291 g, 经方差分析差异不显著 ( $P > 0.05$ ); 饲喂初始料重为黄粉虫初始重的 1.2 倍左右, 后根据黄粉虫的食用情况适当调整, 保证足够采食。

试验期间每 7 d 测量黄粉虫重、余料、粪重并做好记录, 每次称重后添加少量等量青菜补充水分。饲养过程中, 每 2 ~ 3 d 检出死亡的虫子并计数, 然后用与处理相同饲料喂养的生长状态一致的虫体补齐。进入蛹 (成虫) 期, 每 1 ~ 3 d 检测

化蛹(成虫)数并记录,并将蛹放入铺有常规饲料的盒中。由于化蛹时间不一致,每7 d收集的蛹放一起用常规饲料饲养,蛹羽化后将成虫检出计数单独饲养。在幼虫生长、化蛹、羽化高峰期选择样本进行干物质测定。

#### 1.4 测定指标

消化率 = (取食量 - 虫粪量) / 取食量; 利用率 = (末重 - 初始重) / 取食量; 日平均死亡率 = 该时期死亡虫数 / (300 头 × 7 d); 死亡率 = 已死亡总数 / (300 + 补充虫体数); 化蛹率 = 已化蛹总数 / (300 + 补充虫体数); 羽化率 = 已羽化总数 / (300 + 补充虫体数)。

#### 1.5 统计分析

使用 Excel 进行数据处理分析及作图,图表中数据为各处理的平均数;采用 SPSS 中的 LSD、SNK 检验进行显著性 ( $P < 0.05$ ) 及极显著性 ( $P < 0.01$ ) 分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同饲料配比下黄粉虫幼虫的体重变化

根据不同处理阶段黄粉虫体重的测量情况,得出黄粉虫取食不同配比饲料后体重情况折线图(图1)。结果表明,黄粉虫幼虫初始体重差异不显著 ( $P > 0.05$ ),在不同配比饲料处理下,在前42 d 都有不同程度的增重。处理第7天,CK 组的增重速度在各个阶段明显高于其它组,PS1、PS2、PS3 组紧随其后。从第14天起,以PS5 处理组为

分界线,PS1 ~ PS4 组和 CK 组增重明显高于其它几组。处理第42天各组重量差异明显(表1),PS10 组每100头黄粉虫的平均体重(7.2245 g)仅为CK 组(15.1734 g)的1/2,PS2、PS3、PS4 组之间差异不显著。此后黄粉虫开始进入大量化蛹期,导致第49天和第56天时各组平均重量出现波动。但第56天时,CK、PS1、PS2、PS3、PS4、PS5 组重量仍然比PS6、PS7、PS8、PS9、PS10 组高。这表明聚苯乙烯与麸皮的比例各占50%时是影响黄粉虫生长的一个分界点。

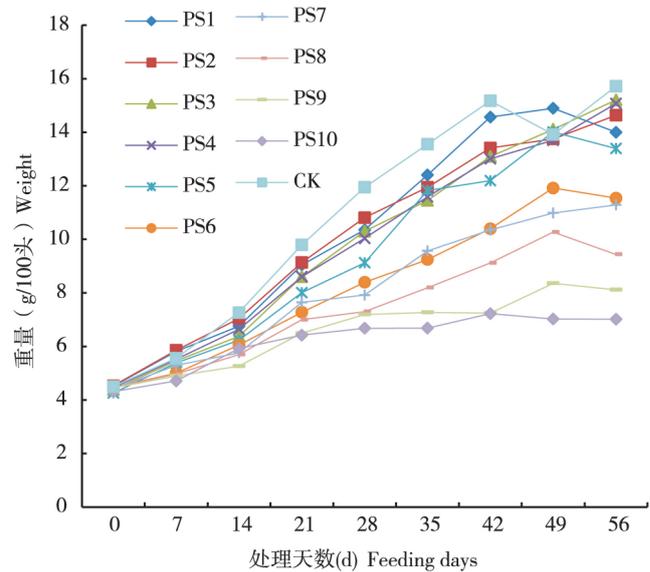


图1 不同比例聚苯乙烯饲喂下黄粉虫(100头)初始重至56 d 的重量变化

Fig. 1 Weight of *Tenebrio molitor* (100 larvae) feed with different ratio of polystyrene from the initial to 56 days

表1 各处理组第42天、49天、56天黄粉虫的平均重量(100头)比较

Table 1 Comparison of the weight of *Tenebrio molitor* (100 larvae) from different group at 42, 49 and 56 days

组别 Group	42 d (g/100 头)	49 d (g/100 头)	56 d (g/100 头)
PS1	14.5652 ± 0.5138 a	14.8937 ± 1.0112 a	13.9973 ± 3.9111 ab
PS2	13.4121 ± 0.2770 b	13.7476 ± 0.4745 b	14.6336 ± 3.2887 ab
PS3	13.0911 ± 0.3696 bc	14.1079 ± 0.2292 b	15.2070 ± 0.4037 a
PS4	13.0076 ± 0.8906 bc	13.6986 ± 0.4680 b	15.0721 ± 0.3231 a
PS5	12.1912 ± 0.8572 c	14.0103 ± 0.2551 b	13.3913 ± 1.4921 ab
PS6	10.3940 ± 0.4563 d	11.9164 ± 0.2079 c	11.5380 ± 0.8826 bc
PS7	10.3489 ± 0.4004 d	10.9842 ± 0.1517 d	11.2840 ± 0.3977 bc
PS8	9.1150 ± 0.6484 e	10.2692 ± 0.2686 e	9.4357 ± 0.9888 cd
PS9	7.2432 ± 0.4004 f	8.3543 ± 0.3611 f	8.1114 ± 0.3007 d
PS10	7.2245 ± 0.3997 f	7.0791 ± 0.0791 g	7.0144 ± 0.3645 d
CK	15.1734 ± 0.9804 a	13.9145 ± 0.8558 b	15.7176 ± 2.7994 a

注: 同列同一因素后不同字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ ), 下同。Note: Different small letters about the same factor in one column meant significant difference ( $P < 0.05$ ), the same below.

2.2 不同饲料配比对黄粉虫取食量、取食聚苯乙烯量、消化率、利用率以及虫粪量的影响

以 7 d 为一阶段, 前 56 d 各处理组的平均取食量如图 2 所示。各个处理组在不同处理期基本呈层次梯度。在大部分组中, 第 7 天至 14 天的取食量有极少量下降, 这可能与黄粉虫的适应有关。除 PS10 组外, 第 14 天至 21 天的取食量快速上升, 第 21 天后趋于平稳。第 35 天后 PS8、PS9 组取食

量急剧下降, 然后在处理第 42 天后趋于平稳, PS10 组的取食量一直处于较低水平。饲喂 42 d 后, 各处理组黄粉虫的取食总量、取食聚苯乙烯总量、消化率、消化利用率以及虫粪量如表 2 所示。显著性分析表明, 饲喂 42 d 时, 黄粉虫 (100 头) 的总取食量除 PS7、PS8 组外, 其它各组间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 麸皮含量越高, 取食量越多, CK 组最多, 达到 35.3325 g, PS10 最低,

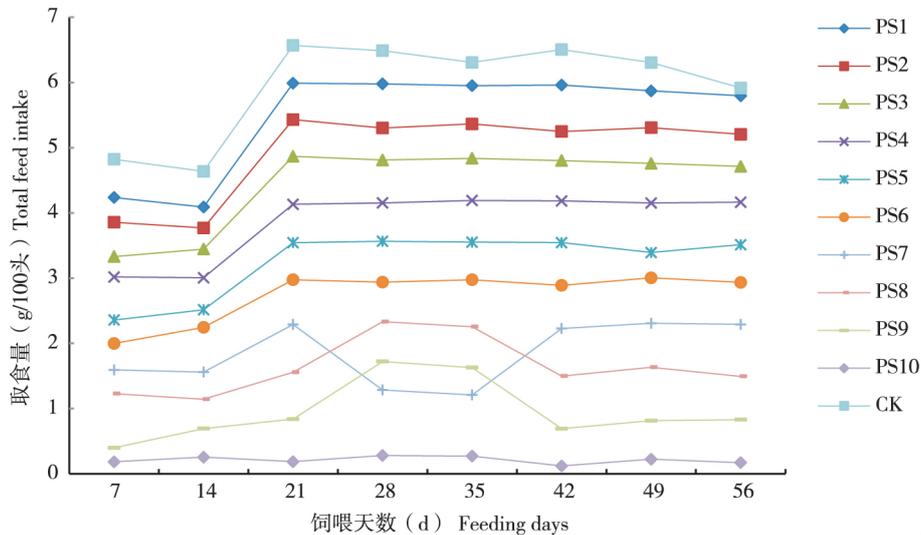


图 2 各时间段黄粉虫 (100 头) 的取食总量

Fig. 2 Total feed intake of *Tenebrio molitor* (100 larvae) during each period

表 2 各处理组黄粉虫 42 d 的取食总量、取食聚苯乙烯总量、消化率、利用率以及虫粪量  
Table 2 Total feed intake, total polystyrene intake, digestibility, utilization rate and faecal output of larvae from each group at 42 days

组别 Group	取食总量 (g/100 头) Total feed intake	取食聚苯乙烯总量 (g/100 头) Total polystyrene intake	消化率 (%) Digestibility	利用率 (%) Utilization rate	虫粪量 (g/100 头) Faecal output
PS1	32.1189 ± 0.0400 b	3.2119 ± 0.0040 g	39.2100 ± 6.4568 b	31.4560 ± 1.5692 c	19.5239 ± 2.0667 b
PS2	28.9711 ± 0.1407 c	5.7942 ± 0.0281 e	35.5680 ± 0.7501 b	30.6610 ± 1.5559 c	18.6666 ± 0.1911 c
PS3	25.9955 ± 0.2055 d	7.7987 ± 0.0617 c	36.3000 ± 0.6379 b	33.8317 ± 1.8568 c	16.5582 ± 0.0700 d
PS4	22.6836 ± 0.1680 e	9.0734 ± 0.0672 b	37.1840 ± 0.6258 b	37.6827 ± 3.8504 c	14.2482 ± 0.6485 e
PS5	19.0773 ± 0.1650 f	9.5386 ± 0.0825 a	36.7780 ± 1.3767 b	41.5924 ± 4.5753 bc	12.0613 ± 0.2852 f
PS6	16.0220 ± 0.5862 g	9.6132 ± 0.3517 a	38.6140 ± 2.7459 b	37.0193 ± 3.9071 c	9.8246 ± 0.2630 g
PS7	10.1631 ± 0.1143 h	7.1142 ± 0.0800 d	23.5540 ± 1.5064 b	58.4848 ± 4.7224 b	7.7686 ± 0.1311 h
PS8	10.0150 ± 0.1842 h	8.0120 ± 0.1474 c	47.4940 ± 3.6165 a	46.5780 ± 7.6580 bc	5.2544 ± 0.2968 i
PS9	5.9679 ± 0.2400 i	5.3711 ± 0.2160 f	40.4600 ± 1.6300 b	46.8218 ± 4.0041 bc	3.5543 ± 0.1933 j
PS10	1.2994 ± 0.1854 j	1.2994 ± 0.1854 h	9.3200 ± 7.1536 d	231.8433 ± 47.8860 a	1.2871 ± 0.1233 k
CK	35.3325 ± 0.0831 a	0	35.2275 ± 1.1395 b	30.0014 ± 3.1433 c	22.8866 ± 0.4500 a

为 1.2994 g。PS6 组消耗聚苯乙烯最多，达到 9.6132 g，而 PS10 组取食聚苯乙烯量最少。除 PS5、PS6 组以及 PS3、PS8 组外，其它组均有显著差异 ( $P < 0.05$ )。表明饲料中一定量的麸皮有助于黄粉虫取食聚苯乙烯，过高的聚苯乙烯含量反而有不利影响。PS8 组的消化率最高 (47.4940%)，PS10 组最低 (9.3200%)。除 PS7、PS8、PS10 组外，其余各组差距不明显，均在 35% 左右。与其他组相比 PS10 组的利用率出现反常现象，可能是由于 PS10 组饲喂单一的聚苯乙烯，称重后补充的青菜致其利用率高。各处理组 42 d 黄粉虫的虫粪总量层次梯度明显，经显著性分析，各组间差异显著 ( $P < 0.05$ )。结合取食总量，麸皮含量越多，取食量多，产粪量多。

### 2.3 不同饲料配比下黄粉虫的死亡率

不同饲料配比下黄粉虫的死亡率由图 3 所示，在处理前 7 d 各组日平均死亡率较高，死亡率在第 14 天后急剧下降，处理第 35 天后趋于平稳，趋近于零。表明前期由于饲料的适应性对黄粉虫的影

响比较大，第 14 天后黄粉虫对含聚苯乙烯的饲料表现出了较好的适应性。处理 42 d 时，各组死亡率在 20% 左右，且各组间均无显著性差异 (表 3)，表明聚苯乙烯的含量对黄粉虫的死亡率不具有显著性影响。

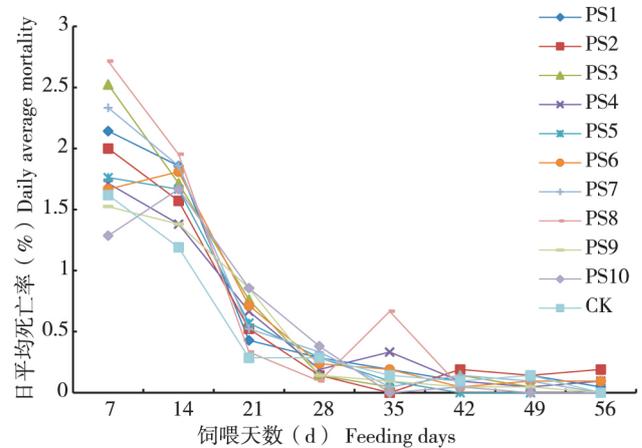


图 3 不同比例聚苯乙烯饲喂下黄粉虫日平均死亡率  
Fig. 3 Average daily mortality of *Tenebrio molitor* feed with different ratio of polystyrene

表 3 处理 42 d 黄粉虫的总死亡率

Table 3 Total mortality of *Tenebrio molitor* during the 42 days

组别 Group	PS1	PS2	PS3	PS4	PS5	PS6	PS7	PS8	PS9	PS10
死亡率 (%) Mortality	25.3372	23.4502	26.8308	22.9965	23.2971	24.1864	26.5577	27.5500	21.8546	22.8851

### 2.4 不同饲料对比对黄粉虫的化蛹率、羽化率和产卵量的影响

不同饲料配比下各处理组黄粉虫日平均化蛹率如图 4 所示，麸皮含量高的组化蛹情况较好。CK 组和 PS1、PS2、PS3、PS4 组在处理第 42 天快速化蛹，在处理第 49 天达到高峰后，此后缓慢下降。在整个时间段中，PS9、PS10 组的化蛹率一直都很低。不同饲料配比下各处理组黄粉虫 49 d 和 56 d 化蛹率如表 4 所示，49 d 时，CK 组与 PS1 组无显著性差异 ( $P > 0.05$ )，PS2、PS3、PS4 组无显著性差异 ( $P > 0.05$ )，PS9、PS10 组的化蛹率低于 1%。56 d 时，CK 与 PS1 无显著差异 ( $P > 0.05$ )，PS1 与 PS2 组无显著差异 ( $P > 0.05$ )，PS3、PS4 组无显著差异 ( $P > 0.05$ )，PS5、PS6、PS7 组无显著差异 ( $P > 0.05$ )，PS8、PS9、PS10 组无显著差异 ( $P > 0.05$ )。但 PS9、PS10 组的化蛹率仍然很低，不到 1%。

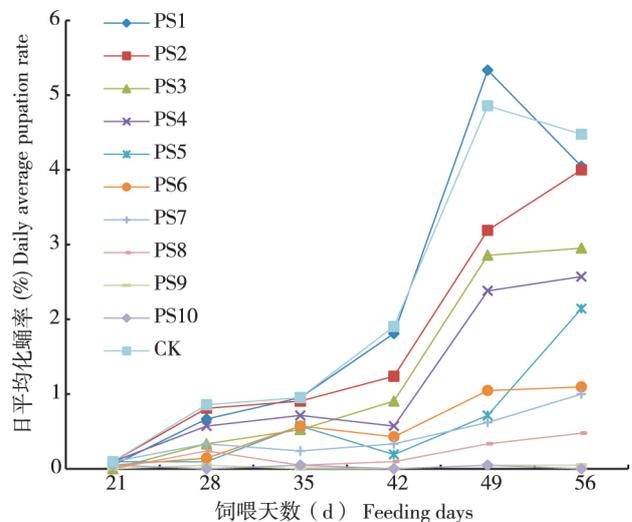


图 4 黄粉虫日平均化蛹率  
Fig. 4 Daily average pupation rate of *Tenebrio molitor*

CK 组在处理约 100 d 后化蛹结束, PS1、PS2、PS3、PS4、PS5 约在 115 ~ 130 d 左右结束化蛹。各处理组黄粉虫 180 d 化蛹率及羽化率如表 5 所示, 除 PS10 组外, 总化蛹率在 45% ~ 75% 之间。总的来说, CK、PS1、PS2、PS3、PS4 组的羽化率差异不大, 在 60% 左右, 而 PS9 组和 PS10 组的羽化率极低。PS1 组的化蛹率及羽化率略低于 PS2

组, 分析原因是部分弱小的虫子没能正常化蛹或虽化蛹但蛹比较弱, 从而导致羽化率也随之变低。CK 与 PS1、PS2、PS3、PS4 各个组间的产卵量无明显差异 (表 5), PS5、PS6、PS7、PS8、PS9 组的产卵量较低, PS10 组几乎不产卵。总的来看, 黄粉虫的化蛹率、羽化率以及产卵量随着聚苯乙烯含量增高而降低。

表 4 各处理组黄粉虫 49 d 和 56 d 化蛹率  
Table 4 Pupation rate of *Tenebrio molitor* of each group at 49 and 56 days

组别 Group	49 d 化蛹率 (%) Pupation rate at 42 days	56 d 化蛹率 (%) Pupation rate at 56 days
PS1	38.7322 ± 4.6458 a	45.5864 ± 2.9701 ab
PS2	28.3896 ± 6.5440 b	40.4250 ± 7.3474 b
PS3	21.3447 ± 3.8389 b	30.9928 ± 2.5670 c
PS4	21.0409 ± 3.1244 b	29.9720 ± 4.2716 c
PS5	8.4745 ± 4.4453 cd	18.7298 ± 0.7604 d
PS6	11.0284 ± 3.9521 c	15.5654 ± 5.0044 d
PS7	7.9379 ± 2.8052 cd	12.3554 ± 2.6866 d
PS8	3.4669 ± 0.4170 cd	5.6770 ± 0.5527 e
PS9	0.5089 ± 0.4408 d	0.7595 ± 0.76338 e
PS10	0.7673 ± 0.0090 d	0.7653 ± 0.0067 e
CK	40.1001 ± 6.0274 a	49.1605 ± 4.6372 a

表 5 各处理组 180 d 化蛹率、羽化率和产卵量  
Table 5 Pupation rate, emergence rate and oviposition number of each group at 180 days

组别 Group	180 d 化蛹率 (%) Pupation rate at 180 days	180 d 羽化率 (%) Emergence rate at 180 days	产卵量 (粒) Oviposition number
PS1	70.4393	57.8415	75
PS2	71.0941	62.0493	87
PS3	69.0766	59.6078	64
PS4	65.2773	51.8595	68
PS5	58.4129	33.0211	36
PS6	54.2867	29.7539	20
PS7	53.2900	23.0942	33
PS8	50.7812	12.1005	39
PS9	47.9838	3.6082	35
PS10	6.7753	1.7857	2
CK	76.0600	61.1408	72

## 2.5 不同饲料配比对黄粉虫幼虫、蛹以及成虫干物质含量的影响

为测定不同比例聚苯乙烯对黄粉虫幼虫、蛹以及成虫干物质的含量的影响,分别选择了在幼虫生长高峰期(35 d、56 d),化蛹高峰期(63 d、70 d)以及羽化高峰期(63 d、70 d)的样本进行了干物质含量测定。由于添加聚苯乙烯超过 50%

的组生长不理想,部分组无法取得足够数量样本,故蛹及成虫干物质含量测定仅选择了生长较好的几组。经显著性分析表明(表 6),幼虫干物质含量随着饲料中聚苯乙烯含量的增加而减少,但测定各组蛹和成虫干物质含量均无显著性差异( $P > 0.05$ )。

表 6 各处理组黄粉虫幼虫、蛹和成虫的干物质含量 (%)

Table 6 Dry matter content of larvae, pupae and mature worms of different group

组别 Group	幼虫 Larvae	蛹 Pupae	成虫 Mature worm
PS1	41.3404 ± 3.1806 ab	37.8313 ± 2.3033 a	40.7112 ± 2.2410 a
PS2	41.5042 ± 2.0861 ab	37.4300 ± 1.1948 a	40.0903 ± 1.8184 a
PS3	40.1374 ± 1.6116 abc	36.1745 ± 1.7794 a	39.8862 ± 1.6412 a
PS4	39.6956 ± 2.2790 abc	35.7024 ± 1.5742 a	38.1926 ± 1.7112 a
PS5	37.0322 ± 0.3068 abc	—	—
PS6	37.1581 ± 1.9716 bcd	—	—
PS7	32.6580 ± 1.3103 bcd	—	—
PS8	31.8923 ± 1.5915 cd	—	—
PS9	30.1840 ± 3.7352 d	—	—
PS10	21.9164 ± 0.9460 e	—	—
CK	43.4830 ± 3.2617 a	36.1194 ± 0.3019 a	39.7372 ± 2.025 a

## 3 结论与讨论

本试验通过研究不同配比聚苯乙烯与麸皮对黄粉虫虫重增长量、取食量、虫粪量、化蛹率、羽化率、消化率、转化率、干物质(幼虫、蛹、成虫)等指标的影响。结果表明:黄粉虫生长性能随着饲料中聚苯乙烯含量的升高而降低。黄粉虫大量化蛹时,PS3 组黄粉虫的生长量与 CK、PS1、PS2、PS4 组相接近,但高于 PS4; PS3 组进入大量化蛹期比 CK、PS1、PS2 组化蛹时间要晚 7 d 左右,有利于幼虫吃更多的聚苯乙烯。在处理 42 d 时,黄粉虫取食聚苯乙烯的量 PS6 组最多,PS5 次之,但这两组生长量不太理想,PS4 组比 PS3 组高 16.35%,比 PS2 组高 56.59%,PS3 组比 PS2 组高 34.59%,比 PS1 组高 142.81%; PS3 组与 PS4 组的消化率、利用率、死亡率、产卵量差异不显著,PS3 组在化蛹率、羽化率、干物质等方面优于 PS4。综上所述,PS3(3:7)组的配比最佳,既能保证黄粉虫的正常生长发育确保其经济

价值,又能降解较多的聚苯乙烯,可为规模化养殖黄粉虫来降解聚苯乙烯提供实验依据。

本研究的最适饲料配比聚苯乙烯含量为 30%,在不影响黄粉虫生长发育的情况下,降解的聚苯乙烯优于文献报道(徐世才等,2013b)。本研究与文献报道研究一致结论:适量添加聚苯乙烯泡沫塑料喂黄粉虫,既能保证黄粉虫的生长发育又能降解聚苯乙烯解决污染问题是具有可行性的,可为规模化饲养黄粉虫降解聚苯乙烯提供实验依据。

据报道,温度、湿度、光照养殖密度、环境等对黄粉虫的生长发育有影响(刘光华等,2001;肖银波,2003;高莉红等,2006;吴书侠等,2009;杜高忠,2010)。本研究优势较明显,分析其主要原因可能与地域和用的材料有一些关系。本研究所用聚苯乙烯为分析纯,地域为南方,而徐世才等人的研究中所用材料为泡沫、地域为北方。因此同一地域在黄粉虫饲料中分别添加不同比例比例聚苯乙烯泡沫塑料与分析纯聚苯乙烯试验对比研究;不同地域黄粉虫饲料中分别添加不

同比比例聚苯乙烯泡沫塑料与分析纯聚苯乙烯试验对比研究,有待更进一步探讨解决。另外,由于黄粉虫在饲喂的前 14 d 死亡率比较高,在投喂新配方料的时候应逐步加料,减少适应期的死亡率。

### 参考文献 (References)

- Chen GZ, Zhang BL, Ji MM, *et al.* Gut microbiota of polystyrene - eating mealworms analyzed by high - throughput sequencing [J]. *Microbiology China*, 2017, 44 (9): 2011 - 2018. [陈冠舟, 张白鹭, 纪梦梦, 等. 高通量测序探究嗜食聚苯乙烯泡沫塑料黄粉虫的肠道菌群结构 [J]. 微生物学通报, 2017, 44 (9): 2011 - 2018]
- Du GZ. Study on the effect of light on *Tenebrio molitor* pupation [J]. *China Science & Technology Panorama Magazine*, 2010, 17: 251. [杜高忠. 光对黄粉虫化蛹影响的研究 [J]. 中国科技纵横, 2010, 17: 251]
- Du KS. Study on the Extraction and Application of Chitosan from *Tenebrio molitor* Linanus [D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University Master Thesis, 2003. [杜开书. 黄粉虫壳聚糖的提取及应用研究 [D]. 成都: 四川农业大学硕士论文, 2003]
- Gao HL, Zhou WZ, Zhang L, *et al.* Effect of different fodders and breeding densities on the larva growth and development of *Tenebrio molitor* [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26 (10): 3258 - 3264. [高红莉, 周文宗, 张璐, 等. 饲料种类和饲养密度对黄粉虫幼虫生长发育的影响 [J]. 生态学报, 2006, 26 (10): 3258 - 3264]
- Gilan I, Hadar Y, Sivan A. Colonization, biofilm formation and biodegradation of polyethylene by a strain of *Rhodococcus ruber* [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2004, 65 (1): 97 - 104.
- Ji ZX, Wen XL, Yu JY, *et al.* Effects of feeding corn stalks on economic indicators of *Tenebrio molitor* [J]. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2011, 39 (33): 20520 - 20522. [吉志新, 温晓蕾, 余金咏, 等. 喂食玉米秸秆对黄粉虫经济指标的影响 [J]. 安徽农业科学, 2011, 39 (33): 20520 - 20522]
- Kong F, Hong KJ, Xu H, *et al.* Evidence of polystyrene biodegradation by gut microbiota of Styrofoam feeding yellow mealworms (larvae of *Tenebrio molitor* Linnaeus) [J]. *Microbiology China*, 2018, 45 (7): 1438 - 1449. [孔芳, 洪康进, 徐航, 等. 基于嗜食泡沫塑料黄粉虫肠道菌群中聚苯乙烯生物降解的探究 [J]. 微生物学通报, 2018, 45 (7): 1438 - 1449]
- Li N, Xing HW, Xiong XL. Exploitation and Utilization of *Tenebrio molitor* Resources [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2017. [李宁, 幸宏伟, 熊晓莉. 黄粉虫资源化开发与利用 [M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2017]
- Li XL, Xiong XL, Li N. Formulation optimization of crop straw feed of *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae) based on extreme vertex mixing design method [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2018, 61 (5): 596 - 603. [李小龙, 熊晓莉, 李宁. 基于极端顶点混料设计优化黄粉虫秸秆饲料配方 [J]. 昆虫学报, 2018, 61 (5): 596 - 603]
- Liu GH, Zeng L, Gan YH. Observation of instar and life character of the *Tenebrio molitor* [J]. *Journal of Zhongkai Agroteehneial College*, 2001, 15 (3): 18 - 21. [刘光华, 曾玲, 甘咏红. 黄粉虫龄期及生活习性的观察 [J]. 仲恺农业技术学院学报, 2001, 15 (3): 18 - 21]
- Liu HR, Yang ZF, Tan DF, *et al.* The comprehensive extraction of useful substances from *Tenebrio molitor* and comparison of extraction methods [J]. *Entomological Knowledge*, 1999, 36 (2): 94 - 96. [刘怀如, 杨兆芬, 谭东飞, 等. 黄粉虫有效物质的综合提取及提取方法的比较 [J]. 昆虫知识, 1999, 36 (2): 94 - 96]
- Liu HR, Yang ZF, Tan DF, *et al.* Study on the fertilizer efficiency of the frass of *Tenebrio Molitor* L. [J]. *Journal of Quanzhou Normal University*, 2003, 21 (4): 68 - 71. [刘怀如, 杨兆芬, 檀东飞, 等. 黄粉虫虫粪的肥效研究 [J]. 泉州师范学院学报, 2003, 21 (4): 68 - 71]
- Lv SC, Wang CQ, Ma ML, *et al.* Effect of fermented corn stalks on the performance of *Tenebrio molitor* larvae [J]. *Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2013, 45 (5): 42 - 44. [吕树臣, 王春清, 马铭龙, 等. 发酵玉米秸秆对黄粉虫幼虫生产性能的影响 [J]. 畜牧与兽医, 2013, 45 (5): 42 - 44]
- Shen YH. Isolation of Intestinal Bacteria from *Tenebrio Molitor* and Study on the Phenomenon of Plastic Degradation [D]. Shanghai: East China Normal University Master Thesis, 2011. [沈叶红. 黄粉虫肠道菌的分离和取食塑料现象的研究 [D]. 上海: 华东师范大学硕士论文, 2011]
- Wang CQ, Ma ML, Ding XW, *et al.* Effect of different proportion of wheat bran and corn straw on the growth performance in yellow powder larva [J]. *China Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2013, 40 (1): 210 - 212. [王春清, 马铭龙, 丁秀文, 等. 不同比例麦麸和玉米秸秆对黄粉虫幼虫生长性能的影响 [J]. 中国畜牧兽医, 2013, 40 (1): 210 - 212]
- Wu SX, Lin HF, Li MY, *et al.* Determination of some important technique parameters in the course of breeding *Tenebrio molitor* [J]. *Journal of Economic Animal*, 2009, 13 (1): 28 - 31. [吴书侠, 林华峰, 李茂业, 等. 黄粉虫饲养中几个重要技术参数的测定 [J]. 经济动物学报, 2009, 13 (1): 28 - 31]
- Xia Y, Wang YS, Jiang WH. Study on treatment technology and pollution control of waste plastics [J]. *Regional Governance*, 2018, 28: 38 - 39. [夏炎, 王一舒, 姜文华. 废塑料的处理技术及污染防治研究 [J]. 区域治理, 2018, 28: 38 - 39]
- Xiao YB. The Effects of different ecological factors on rearing efficiency of *Tenebrio molitor* L. [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 4 (23): 675 - 680. [肖银波. 饲养条件对黄粉虫幼虫生长及存活的影响 [J]. 生态学报, 2003, 4 (23): 673 - 680]
- Xu SC, Liu XW, Wang Q, *et al.* *Tenebrio molitor* L. feed production from fermentation of corn stalks [J]. *Acta Agriculturae Boreali - occidentalis Sinica*, 2013a, 22 (1): 194 - 199. [徐世才, 刘小伟, 王强, 等. 玉米秸秆发酵制取黄粉虫饲料的研究 [J]. 西北农业学报, 2013a, 22 (1): 194 - 199]
- Xu SC, Tang T, Yan H, *et al.* The study on the *Tenebrio molitor* in the

- different feed proportions of bubble degradation rate [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2013b, 35 (1): 90–94. [徐世才, 唐婷, 闫宏, 等. 黄粉虫在不同饲料比例下的泡沫降解率研究 [J]. 环境昆虫学报, 2013b, 35 (1): 90–94]
- Yang J, Yang Y, Wu WM, *et al.* Evidence of polyethylene biodegradation by bacterial strains from the guts of plastic-eating wax worms [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48 (23): 13776–13784.
- Yang Y, Yang J, Wu WM, *et al.* Biodegradation and mineralization of polystyrene by plastic-eating mealworms: Part 2. role of gut microorganisms [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015a, 49 (20): 12087–12093.
- Yang Y, Yang J, Wu WM, *et al.* Biodegradation and mineralization of Ppolystyrene by plastic-eating mealworms: Part 1. chemical and physical characterization and isotopic tests [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015b, 49 (20): 12080–12086.
- Ye RC. Mushroom cultivation experiment by substitute wheat bran with yellow mealworms feces [J]. *Zhejiang Edible Fungus*, 2008, 16 (4): 34–35. [叶榕村. 黄粉虫粪代替麦麸栽培香菇试验 [J]. 浙江食用菌, 2008, 16 (4): 34–35]
- Yoshida S, Hiraga K, Takehana T, *et al.* A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate) [J]. *Science*, 2016, 351 (6278): 1196–1199.
- Yu YC. Effects of different diets on the growth rate of *Tenebrio molitor* [J]. *Chinese Feed*, 1997, 17: 12–13. [余有成. 不同饲料对黄粉虫生长速度影响的研究 [J]. 中国饲料, 1997, 17: 12–13]
- Zeng XW. Effect of Eermented Cattle Dung Combining with Normal Feeds in Different Proportion on the Growth and Development of *Tenebrio molitor* and the Intestinal Canal Bacterium Community [D]. Taian: Shandong University Master Thesis, 2012. [曾祥伟. 不同配比发酵牛粪对黄粉虫生长发育及肠道细菌的影响 [D]. 泰安: 山东大学硕士论文, 2012]
- Zhou EK, Dan YX. Study on the plastics-eating characteristics of mealworms [J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2019, 10: 185–188. [周尔康, 单玉昕. 黄粉虫取食塑料的特征研究 [J]. 绿色科技, 2019, 10: 185–188]
- Zhou J, Zhou Q. Current situation and prospect of chemical recovery technology of waste plastics—evaluation of comprehensive utilization of waste plastics resources [J]. *China Plastics Industry*, 2019, 47 (1): 163. [周晶, 周谦. 废旧塑料化学回收技术的现状和展望—评《废旧塑料资源综合利用》[J]. 塑料工业, 2019, 47 (1): 163]