

废弃塑料快递包装袋饲喂黄粉虫的生物降解研究

徐 轲¹, 刘姝含¹, 饶桂维^{2*}

¹浙江树人大学生物与环境工程学院, 浙江 杭州

²浙江树人大学交叉科学研究院, 浙江 杭州

收稿日期: 2022年1月3日; 录用日期: 2022年2月2日; 发布日期: 2022年2月9日

摘 要

目的: 以生物降解的方式降解废弃塑料。废弃塑料的处理是目前环境问题的难点, 焚烧或填埋, 对环境污染影响更大。其中塑料包装多由不可降解的高分子化合物组成, 具有难降解, 污染大的危害。黄粉虫生性食杂, 能将废弃物(塑料、泡沫等有毒害物质)很好的吸收转化。方法: 采用单因素实验法, 通过改变废弃塑料包装袋与麦麸的比例作为饲料、光照周期、饲养密度和温度, 来测定黄粉虫的死亡率、增重率、增长率、化蛹率、可溶性蛋白含量、多糖含量和油脂含量。结果: 实验得到最佳饲喂条件为: 饲料塑麦比为8:2, 其增长率、增重率最好, 为最佳配比; 其他最佳饲养条件为密度2.5头/cm²; 光暗比0:24; 饲料含水量16.7%; 温度26℃。分别对全麦麸饲喂与最佳塑料饲喂条件的黄粉虫测定得到其可溶性蛋白含量(7.09 mg/g、7.05 mg/g), 多糖含量(0.24 mg/g、0.21 mg/g)和油脂(20.83%、20.04%)含量, 且无明显差异。结论: 本研究表明黄粉虫可以生物降解废弃塑料快递包装袋, 若大批量饲养黄粉虫用来降解废弃塑料对废弃塑料造成的环境污染可以起到缓解作用。

关键词

环境污染, 废弃塑料, 生物降解, 黄粉虫

Study on Biodegradation of *Tenebrio molitor* Fed with Waste Plastic Express Bags

Ke Xu¹, Shuhan Liu¹, Guiwei Rao^{2*}

¹School of Biotechnology and Environmental Engineering, Zhejiang Shuren University, Hangzhou Zhejiang

²Interdisciplinary Research Academy, Zhejiang Shuren University, Hangzhou Zhejiang

*通讯作者。

Abstract

Objective: To biodegrade waste plastics. The disposal of waste plastics is the difficulty of current environmental problems. Incineration or landfill has a greater impact on environmental pollution. Among them, plastic packaging is composed of non-degradable polymer compounds, which is difficult to degrade and has great harm of pollution. Mealworms have a nature of miscellaneous food, can waste (plastic, foam and other toxic substances) very good absorption transformation. **Method:** The mortality rate, weight gain rate, growth rate, pupation rate, soluble protein content, polysaccharide content and oil content of yellow mealworm were determined by single factor experiment by changing the ratio of discarded plastic bags to wheat bran as feed, light cycle, stocking density and temperature. **Results:** The optimal feeding conditions were as follows: the ratio of plastic to wheat was 8:2, with the best growth rate and weight gain rate. Other optimal feeding conditions were density of 2.5 head/cm²; light to darkness ratio 0:24; feed water content 16.7%; 26°C temperature. The soluble protein content (7.09 mg/g, 7.05 mg/g), polysaccharide content (0.24 mg/g, 0.21 mg/g) and oil content (20.83%, 20.04%) of mealworms fed with whole wheat bran and the optimal plastic feeding condition were determined, respectively, and no significant difference was found. **Conclusion:** This study showed that *Tenebrio molitor* could biodegrade waste plastic express packaging bags, and the environmental pollution caused by waste plastic could be alleviated if *Tenebrio molitor* was raised in large quantities to degrade waste plastic.

Keywords

Environmental Pollution, Waste Plastics, Biodegradation, Yellow Powder Insect

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

目前,我国城市生活垃圾年产量已达1.2亿吨以上,其中废塑料占比2%~4%,即每年产生废弃塑料总量约240万~480万吨。污染大、难降解的塑料废弃物的日益增多,严重污染了生态环境,甚至存在危及人类生存的可能[1]。现阶段在我国许多大中城市中尚缺少现代化的垃圾填埋或焚烧设施,大中城市对塑料制品的用量更大,所以大部分的废弃塑料只能采取露天堆放的办法。而大多数人们并没有认识到问题的严重性,2019年我国塑料废弃量约为 6.3×10^7 t,其中,一次性塑料产品如塑料袋、农膜、饮料瓶,年废弃量超过 2×10^7 t,这使得“白色污染”成为城市的难题[2]。

现今,快递行业竞争激烈,为了降低成本的包装材料,生产企业通常会回收含有超标重金属、细菌病原体和有毒物质的再生料去生产快递塑料包装袋,这些再生料大部分来源于医疗、生活或化工废弃物。此外,对于纸箱包装的生产,通常添加过量泥土、碳酸钙等物质填充以达到增加纸张克重的目的;并且使用劣质油漆等,使得商品上有害物质严重超标,加剧了二次污染。快递行业的快速发展符合了当代社会的需求,但也造成了这些非法生产行为的加剧[3] [4]。废弃塑料包装在自然环境中难以降解(自行降解需1000~2000年),废弃塑料包装(快餐盒、超市包装袋、一次性餐具等一次性用品)使用量大,分布散乱,很难收集。对环境造成的危害巨大,也在某种程度上影响了生态平衡。所以引起了世卫组织和各国政府

高度重视, 如何解决这一现象现已成为一大难题[5]。

废弃塑料的生物降解也是现如今的一热点问题。研究者有用不同的酶来降解不同种类的废弃塑料[6], 但由于塑料降解物的种类繁多, 单一微生物是不能做到完全分解的。采用多细胞混合培养技术, 针对性地选用功能微生物会更好降解废弃塑料。也有用昆虫降解塑料, 研究不同的昆虫体内的肠道功能菌群和微生物, 以找到最适合生物降解塑料的途径。其中不同塑料种类对应所需的降解酶和微生物也有所不同。

黄粉虫(*Tenbrio molitor* L.), 俗名为面包虫、黄粉甲, 属鞘翅目拟步行虫科粉甲虫属(拟步行虫属) [7]。是一种全变态类昆虫, 分别是卵、幼虫、蛹、成虫四种变态。黄粉虫一般长 20~25 mm。黄粉虫含有丰富的油脂、蛋白质、氨基酸、维生素和有益微量元素, 具有“动物蛋白饲料之王”的誉称[8]。其蛋白含量、脂肪含量及脂肪中不饱和脂肪酸含量都很高。黄粉虫可以直接作为动物饲料, 并且在食品制造、保健品、化妆品等领域常用黄粉虫提取物进行应用。民间规模化饲养黄粉虫目前主要以麦麸、米糠等作为饲料, 但其中付出成本较高, 收益率低下。根据调查, 黄粉虫生性食杂, 除麦麸外还可取食浮萍[9], 塑料薄膜[10], PVC 塑料[11]和聚苯乙烯塑料[12] [13] [14]。黄粉虫适应性广, 生命力强, 曾被用于处理农业废弃物如秸秆[15] [16]、厨余垃圾[17]和城市污泥, 在重金属环境下也有一定适应能力。

目前关于用废弃快递包装袋饲喂黄粉虫对其生长发育的影响研究较少, 本实验主要基于黄粉虫生性食杂的优点, 其次它生命力顽强。研究废弃塑料快递包装袋饲喂黄粉虫的条件及其对其生长发育的影响, 探索黄粉虫被饲喂废弃塑料包装袋后化蛹率、增重率、增长率、死亡率、可溶性蛋白含量、多糖含量和油脂含量的变化, 以了解以废弃塑料包装袋为饲料对黄粉虫生理变化影响, 通过分析变化影响, 得到用黄粉虫生物降解废弃塑料快递包装袋是否具有可行性的结论[18] [19] [20] [21]。

2. 材料与方法

2.1. 供试虫源和饲料

试验所用的黄粉虫购买于南通如皋市潘潘农家庄园, 采用长宽高为 5 cm × 8 cm × 6 cm 的塑料盒为饲养容器, 试虫在 26℃ 全暗环境下饲养, 密度为 2.5 头/cm², 饲料含水量为 16.7%, 饲料总量为 5 g。饲养黄粉虫用的麦麸为市购; 废弃塑料快递包装袋为学校快递站收集。

2.2. 试剂与仪器

试剂: 硫酸为优级纯, 95%乙醇, 葡萄糖, 考马斯亮蓝 G-250, 氢氧化钠, 石油醚等其他试剂均为分析纯, 牛血清蛋白为生物技术级, 水为 GB/T 6682 规定的三级水。

仪器: L65 紫外可见分光光度计上海精科仪器有限公司; JK-100 型超声波清洗器合肥金尼机械制造有限公司; C 型 30 玻璃仪器快速烘干机长城科工贸有限公司; HH-1 型电热恒温水浴锅常州国华电器有限公司; ME204E 型电子天平梅特勒-托利多仪器有限公司; KQ-300GVDV 型三晶恒温数控超声波清洗器昆山超声仪器有限公司; LG10-2.4A 高速离心机北京医用离心机厂; SXT-02 型索氏提取器上海洪纪仪器设备有限公司; L9/13/P330 型高温箱式电阻炉德国 Nabertherm GmbH 公司; DGG-9140A 型电热恒温鼓风干燥箱上海森信实验仪器有限公司。

2.3. 实验方法

2.3.1. 材料处理

为了消灭麦麸中可能存在的螨虫或其他生物, 先将麦麸放入微波炉中高温加热 2 min 以达到目的。选取筛孔尺寸为 1.40 mm 和 1.00 mm 的筛网筛选直径大约在 0.7~0.8 cm 之间的黄粉虫。实验进行前需要

将黄粉虫停喂一天。将收集到的废弃塑料快递包装袋剪碎，根据塑料与麦麸的不同比例，设置塑麦比例为全塑、1:9、2:8、3:7、4:6、5:5、6:4、7:3、8:2、9:1 和全麦 11 个实验组并与全麦组作对照处理，每个实验组设置两组平行，编号 1、2。

2.3.2. 实验步骤

1) 更改废弃塑料快递包装袋和麦麸比例饲喂黄粉虫的研究：设置 11 个实验组在密度为 2.5 头/cm²、光暗比为全暗、饲料含水量为 16.7%、温度为 26℃ 饲养条件下饲养黄粉虫，每隔 7 天测量虫体的体重、身长、死亡数和化蛹数，观察并计算黄粉虫的死亡率、增重率、增长率，得出最佳饲料喂养塑麦比。

2) 废弃塑料快递包装袋饲喂黄粉虫的生长条件的研究：用塑麦比为 5:5 的饲料饲喂黄粉虫，改进的生长条件：小密度组(0.25 头/cm²、1 头/cm²、1.75 头/cm²、2.5 头/cm² 等)；大密度组(2.5 头/cm²、5 头/cm²、7.5 头/cm²、10 头/cm²)光周期(0L:24D、6L:18D、12L:12D、18L:6D)；温度(26℃、35℃)，每隔 3 天或 7 天测量虫体的体重、身长、死亡数和化蛹数，观察黄粉虫的死亡、增重、增长和化蛹，记录并计算出相应的死亡率、增重率、增长率和化蛹率并实时优化饲养条件。

3) 影响实验效果的关键因素：投喂饲料的塑麦比(塑麦之比 8:2 时黄粉虫生长发育状态最佳，是由于适量比例的塑料与麦麸会促进黄粉虫取食从而更好的生长发育)；饲养环境的光照时间(黄粉虫最适应全暗环境下生长，光照会影响其发育)；饲养密度(2.5 头/cm² 适宜黄粉虫生长发育，适当的密度环境会促进其发育，密度过大或过小综合来看都不适宜)。

2.4. 生长指标

生长指标的测定(华淑雯, 2019)：生长指标包括黄粉虫的死亡率(D) (%)、身长和平均身长(L) (cm)、身长增长率(ΔX_1) (%)总体重量和平均重量(M) (g)和体重增重率(ΔX_2) (%)。D, ΔX_1 , ΔX_2 分别按式(1)~(3)计算

$$D = \frac{X_D}{X_1} \times 100\% \quad (1)$$

$$\Delta X_1 = \frac{X_3 - X_2}{X_2} \times 100\% \quad (2)$$

$$\Delta X_2 = \frac{X_5 - X_4}{X_4} \times 100\% \quad (3)$$

式中， X_D ：死虫的个数(个)； X_1 ：总数(个)； X_2 ：初始身长(cm)； X_3 ：饲喂后身长(cm)； X_4 ：初始平均重量(g)； X_5 ：饲喂后虫体平均重量(g)。

2.5. 生理指标

生理指标的测定包括黄粉虫的可溶性蛋白含量、多糖含量和油脂含量。

前处理：称取黄粉虫，在电热鼓风干燥箱中在 50℃ 条件下干燥 24 h，取出后用粉碎机粉碎得虫粉。

可溶性蛋白质含量的测定[22]：称取牛血清蛋白对照品 0.025 g，加入纯水定容至 100 mL，制成 0.25 mg/mL 的对照品溶液。准确吸取对照品溶液 0.05、0.1、0.2、0.3、0.4 mL，各定容至 1.0 mL，加入 5.0 mL 考马斯亮蓝，反应 5 min。另取蒸馏水 1.0 mL，加入 5.0 mL 考马斯亮蓝，反应 5 min，作为空白对照。设置波长为 595 nm，以牛血清蛋白浓度为横坐标，测得的吸光度为纵坐标，绘制标准曲线。标准曲线： $y = 4.2994x + 0.0923$ ， $R^2 = 0.9951$ 。表明在浓度 0.0125~0.1 mg/mL 之间线性良好。后取 1 g 虫粉，加入 PH = 10 的 NaOH 溶液 50 mL，超声提取 30 min，5000 r/min 离心 15 min，静置 10 min，取上清液(蛋白样液) 0.1

mL, 用蒸馏水定容至 1.0 mL, 加入 5.0 mL 考马斯亮蓝, 反应 5 min, 测定吸光度。

多糖含量的测定[23]: 苯酚-硫酸法测定, 称取葡萄糖对照品 0.0929 g, 加入纯水定容至 100 mL, 制成 92.9 mg/mL 的对照品溶液。准确吸取对照品溶液 0.02、0.04、0.06、0.08、0.1 mL, 各定容至 1.0 mL, 加入 1.0 mL 5% 苯酚, 摇匀, 迅速加入浓硫酸 5.0 mL, 沸水浴 15 min。另取蒸馏水 1.0 mL, 同上操作加入 5% 苯酚和浓硫酸进行显色反应, 作为空白对照。设置波长为 490 nm, 以葡萄糖浓度为横坐标, 测得的吸光度为纵坐标, 绘制标准曲线。标准曲线: $y = 8.5205x + 0.0352$, $R^2 = 0.9951$ 。表明在葡萄糖浓度 0.0185~0.0929 mg/mL 之间线性良好。后称取虫粉 5 g 按料液比 1:8 加入 40 mL 水, 80℃ 恒温水浴四小时, 抽滤三次合并滤液, 减压浓缩之至合并滤液的 1/10, 倒入浓缩液体积四倍的 95% 乙醇溶液, 4℃ 冷藏 24 h, 将溶液倒入离心管, 8000 r/min 离心 5 min, 得多糖沉淀。配置 1 mg/mL 的多糖溶液, 按照苯酚-硫酸法测定吸光度, 后带入标准曲线, 算出多糖含量(平行测定两次)。

油脂含量的测定: 称取黄粉虫虫粉 m (2 g) 包于滤纸内, 加入 50 mL 的石油醚溶解, 后于 100 mL 圆底烧瓶内, 90℃ 加热回流 6 h, 至油脂完全提取。称重 1000 mL 29# 圆底空瓶重量记为 W1, 将提取物倒入圆底烧瓶内, 石油醚润洗三次, 用旋转蒸发仪减压浓缩蒸发至石油醚完全蒸出, 测量圆底烧瓶含浓缩液总重量记为 W2。将黄粉虫油脂重量记为 M。则 $M = W2 - W1$ 。油脂含量(%) = $M/m * 100\%$ 。

2.6. 数据处理

利用 Microsoft Excel 2019 进行数据处理和分析, 所有试验均重复二次, 取平均值。

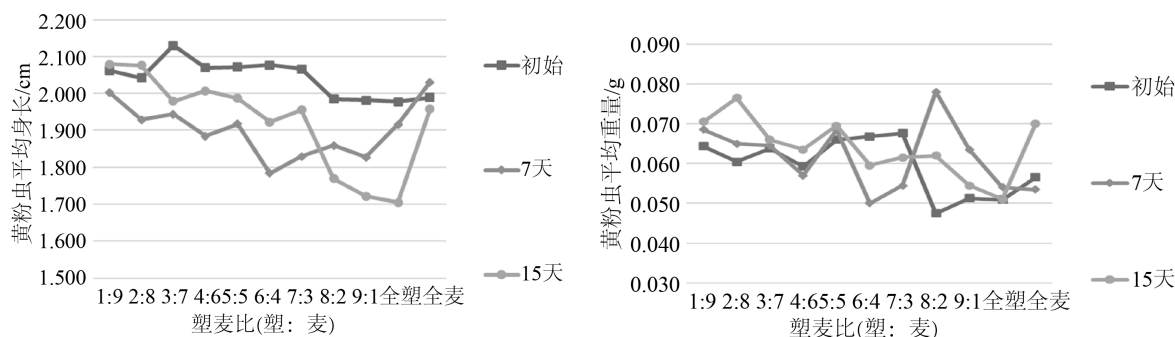
3. 结果

3.1. 塑料添加量对黄粉虫生长发育的影响

由图 1 可得, 与对照组全麦相比, 塑麦比为 8:2 时黄粉虫增重率和增长率最高, 塑麦比为 5:5 次之, 但塑料添加量越大, 对黄粉虫的生长影响越大; 塑麦比为 9:1 和全塑饲喂的黄粉虫体重和身长呈明显下降趋势。根据死亡率的图表可见, 塑料添加量越多, 死亡率越高。由此可见塑麦混合饲喂更适合黄粉虫的生长发育, 其中塑麦比为 8:2 的黄粉虫死亡率大大降低, 而全塑组的死亡率最高。所以塑麦比为 8:2 的饲料最适合黄粉虫。

3.2. 光照时间对黄粉虫生长发育的影响

根据黄粉虫体重和身长关系图 2 可得, 随着光照时间增长, 黄粉虫的体重增重率和身长增长率相较于全暗情况下增长缓慢。根据黄粉虫死亡率图表可得, 随着光照时间的增长, 黄粉虫死亡率增加。光暗比 0:24 时增重率和增长率最大, 故光暗比 0:24 是最佳光照时间; 光暗比 18:6 时黄粉虫各项生长发育结果都不理想, 可得黄粉虫喜暗。由此可得, 黄粉虫适宜在全暗环境下生长, 不适合在光照环境下饲养。



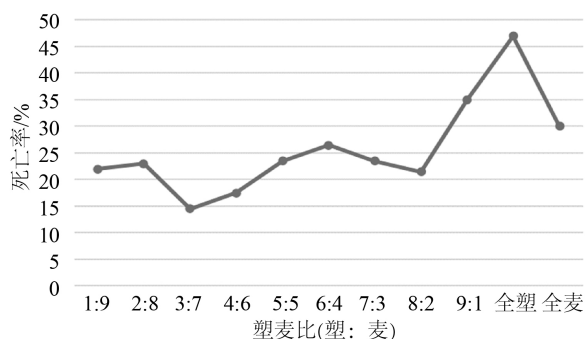


Figure 1. Effects of different proportions of plastics on the growth and development of *Tenebrio molitor*

图 1. 不同比例的塑料添加量对黄粉虫生长发育的影响

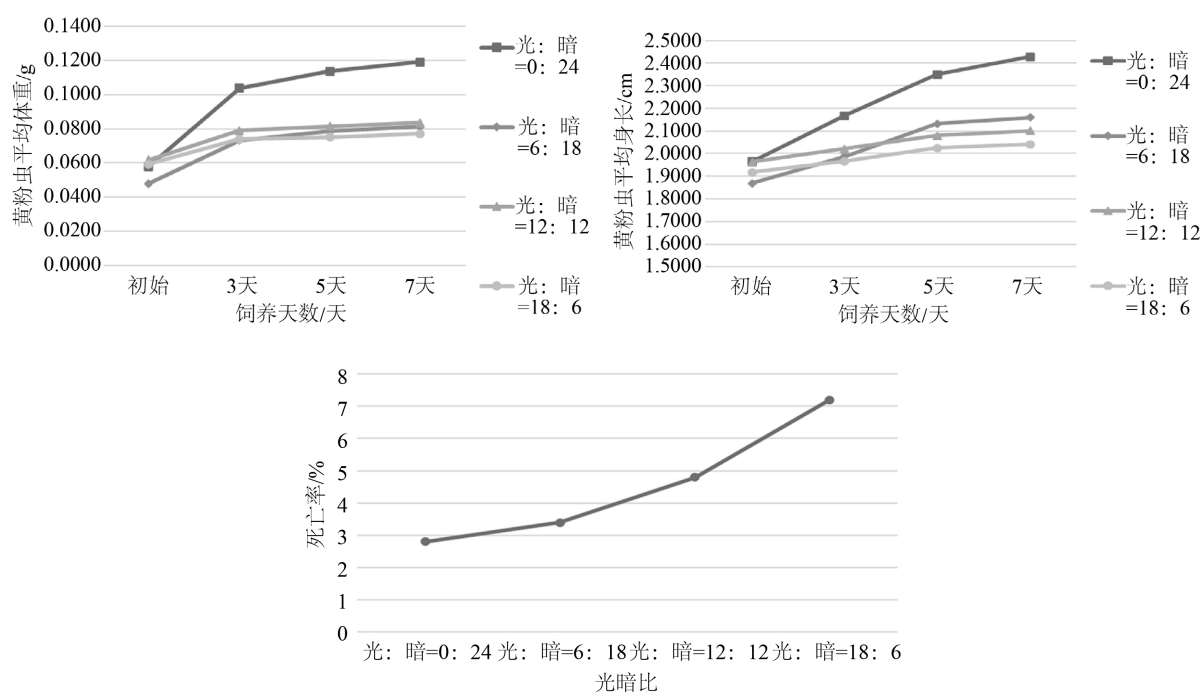


Figure 2. Effect of different illumination time on growth and development of *Tenebrio molitor*

图 2. 不同光照时间对黄粉虫生长发育的影响

3.3. 饲养密度对黄粉虫生长发育的影响

据图 3 可得, 黄粉虫在密度为 0.25 头/ cm^2 和 2.5 头/ cm^2 的体重增重率和身长增长率较高, 但由于密度为 0.25 头/ cm^2 的黄粉虫数量少, 实验具有偶然性, 会引起较大误差。且根据死亡率来看, 2.5 头/ cm^2 的黄粉虫死亡率不高, 因此 2.5 头/ cm^2 的密度较为适宜黄粉虫生长发育。

3.4. 饲养密度(大组)对黄粉虫生长发育的影响

由图 4 可知, 各组的黄粉虫身长均呈上升趋势, 且密度为 2.5 头/ cm^2 黄粉虫的体重及身长增长最为明显; 密度越大, 黄粉虫的生长越缓慢。从死亡率来看, 密度为 2.5 头/ cm^2 的黄粉虫死亡数最少, 密度越大的黄粉虫死亡率越高, 其中密度为 10 头/ cm^2 的黄粉虫死亡率为 2.5 头/ cm^2 的 2~3 倍。综合上述数据, 进一步证实了 2.5 头/ cm^2 的密度最为适宜饲养黄粉虫。

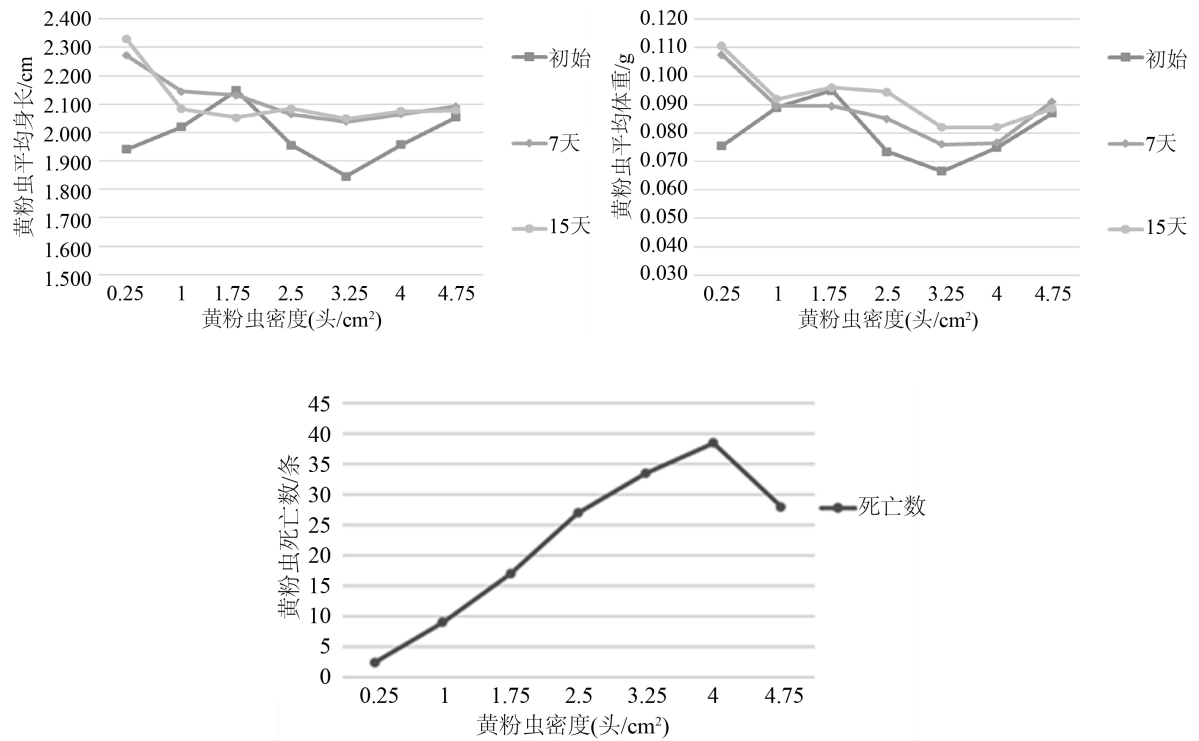


Figure 3. Effects of different feeding densities on the growth and development of *Tenebrio molitor*
图 3. 不同饲养密度对黄粉虫生长发育的影响

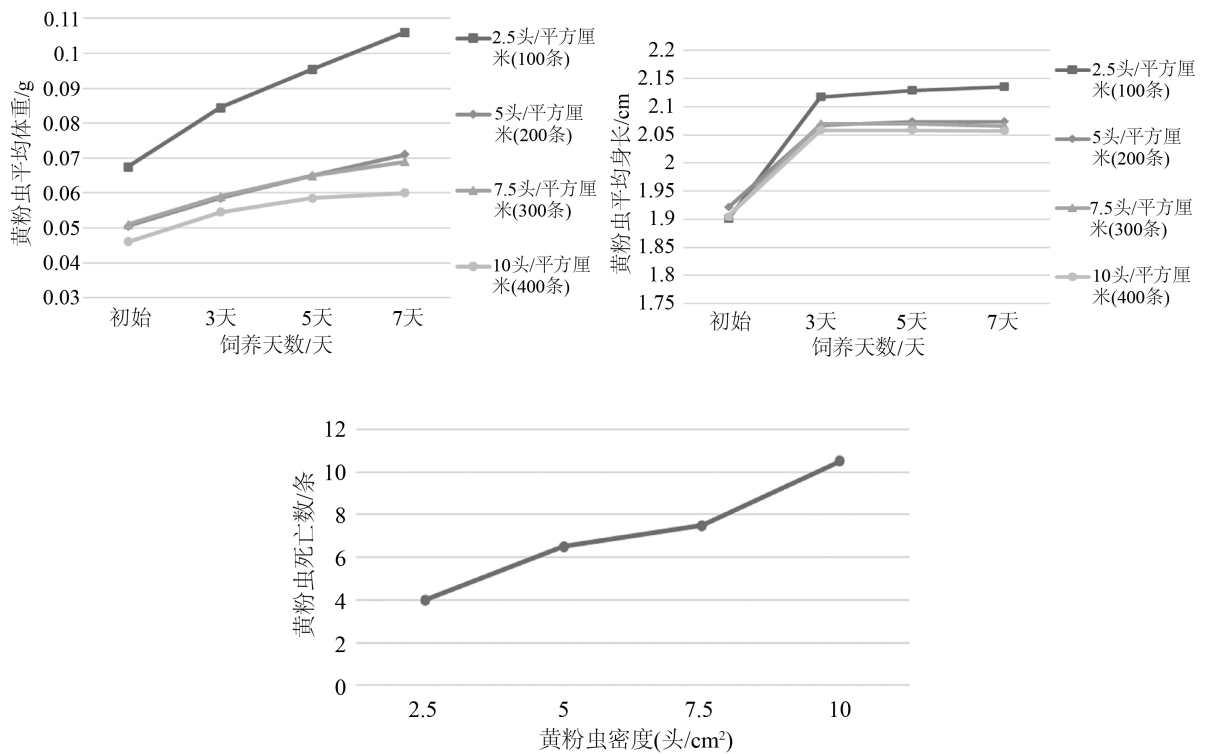


Figure 4. Effects of different feeding density (large group) on the growth and development of *Tenebrio molitor*
图 4. 不同饲养密度(大组)对黄粉虫生长发育的影响

3.5. 最佳塑麦比饲喂黄粉虫取食塑料的情况

从表 1 得到, 以最佳塑麦比饲喂黄粉虫十五天, 通过称量投食塑料的剩余量, 可见黄粉虫会食用塑料。推断大批量使用, 消耗废弃塑料快递包装袋效果显著, 将其投入使用具有可行性。

Table 1. The best ratio of plastic to wheat was feeding *Tenebrio molitor* (2.5 heads/cm²) for 15 days

表 1. 最佳塑麦比饲喂(15 d)黄粉虫(2.5 头/cm²)取食塑料量

| | 1 组 | 2 组 | 3 组 | 4 组 | 5 组 | 6 组 |
|---------|------|------|------|------|------|------|
| 平均取食塑料量 | 0.18 | 0.20 | 0.17 | 0.21 | 0.16 | 0.20 |

3.6. 不同饲料饲喂黄粉虫对生理指标的影响

由表 2 可得, 正常饲养(100% 麦麸)的黄粉虫与以最佳塑麦比饲养的黄粉虫各项生理指标基本无差别, 由此可得, 用塑料为饲料饲喂黄粉虫具有可行性, 不会对黄粉虫的正常生长发育产生负影响, 若将黄粉虫投入使用去消耗废弃塑料快递包装袋具有可行性。

Table 2. Contents of various physiological indexes

表 2. 各项生理指标含量

| | 可溶性蛋白质含量 | 多糖含量 | 油脂含量 |
|---------------|-----------|-----------|--------|
| 100% 麦麸饲喂的黄粉虫 | 7.09 mg/g | 0.24 mg/g | 20.83% |
| 最佳塑麦比饲喂的黄粉虫 | 7.05 mg/g | 0.21 mg/g | 20.04% |

4. 结论

当废弃塑料快递包装袋与麦麸比为 8:2 时最适合黄粉虫生长, 其饲养条件为密度 2.5 头/cm²; 光暗比 0L:24D; 饲料含水量 16.7%; 温度 26℃。与麦麸饲养的相比, 死亡率降低, 增长率、增重率提高。以最佳塑麦比饲喂的黄粉虫与正常饲喂的黄粉虫身长增长率、增重率、死亡率、可溶性蛋白质、油脂含量和多糖含量基本无差别, 得出取食塑料的黄粉虫仍可以正常生长发育。侧面论证了黄粉虫的杂食性, 可以生物降解塑料。这是降解废弃塑料快递包装袋的新办法, 且具有可行性。

大量研究表明黄粉虫幼虫生性食杂, 适应性广, 对污染物的抵抗力强, 可进行生物降解研究对象。而就现阶段对塑料制品需求如此之大, 塑料对整个世界的污染都是不容忽视的。环境问题刻不容缓意味着对塑料制品的治理也是箭在弦上。黄粉虫对塑料制品的生物降解为何如此吸引学者研究, 就是因为其对污染的治理有巨大的潜力。此次实验通过生物降解来降解塑料, 现阶段生物降解塑料的研究开发最为活跃。如果可行, 那我们的塑料白色污染可以很大程度上得到缓解, 这不仅是对中国而言, 甚至于世界都有着现实意义。

综上所述可得, 黄粉虫降解废弃塑料具有可行性。这保护了环境, 还可以极大地降低饲料成本、提高经济效益, 更重要的是这是可以投入现实性操作的事情, 各大快递站点可以考虑将黄粉虫投入使用。

5. 结语

本研究仅观察了黄粉虫幼虫物理变化和水溶性蛋白、多糖和油脂含量。塑料快递包装袋作为饲料对实验中极大部分黄粉虫的正常发育没有影响。黄粉虫消耗降解废弃塑料快递包装袋具有可行性, 可以推广使用。

致 谢

十分感谢老师对我的悉心指导和教育, 课题的研究成果也为论文的完成提供了主要素材, 同时也十分感谢新苗人才计划提供的资金资助, 在此表示最诚挚的谢意。

基金项目

2021 年浙江省大学生科技创新活动计划暨新苗人才计划(2021R421007); 浙江树人大学 2021 年教学研究与改革(实验室开放项目专题) (2021JS1008)。

参考文献

- [1] Plastics Europe (2014) Plastics-Thefacts 2014/2015—An Analysis of European Lates Plastics Production, Demand and Waste Data. Plastics Europe, Brussels.
- [2] Barnes, D.K., Galgani, F., Thompson, R.C. and Barlaz, M. (2009) Accumulation and fragmentation of Plastic Debris in Global Environments. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, **364**, 1985-1998. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0205>
- [3] Simonutti, R. and Colombo, A. (2014) Nanoparticles Confer Tailored Optical Properties on Plastics. International Society for Optics and Photonics, Bellingham. <https://doi.org/10.1117/2.1201408.005561>
- [4] Horton, A.A., Walton, A., Spurgeon, D.J., Lahive, E. and Svendsen, C. (2017) Microplastics in Freshwater and Terrestrial Environments: Evaluating the Current Understanding to Identify the Knowledge Gaps and Future Research Priorities. *Science of the Total Environment*, **586**, 127-141. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.190>
- [5] Narayan, R. (2012) Degradable Polymers and Materials: Principles and Practice. In: Khemani, K. and Scholz, C., Eds., *Degradable Polymers and Materials: Principles and Practice*, American Chemical Society, Washington DC, 13-31. <https://doi.org/10.1021/bk-2012-1114.ch002>
- [6] 钱秀娟, 刘嘉唯, 薛瑞, 刘豪杰, 闻小红, 杨璐, 等. 合成生物学助力废弃塑料资源生物解聚与升级再造[J]. 合成生物学, 2021, 2(2), 161-180.
- [7] Yi, L.Y., van Boekel, M.A.J.S., Boeren, S. and Lakemond, C.M.M. (2016) Protein Identification and *in Vitro* Digestion of Fractions from *Tenebrio molitor*. *European Food Research and Technology*, **242**, 1285-1297. <https://doi.org/10.1007/s00217-015-2632-6>
- [8] 崔蕊静, 郑立红, 周丽艳. 黄粉虫在面包生产中的应用[J]. 食品工业, 1998(6): 26-27.
- [9] 王清春, 刘玉升, 方加兴. 饲喂浮萍对黄粉虫生长发育及繁殖的影响[J]. 环境昆虫学报, 2017, 39(3): 667-672.
- [10] 许诗杰, 张雅林. 取食塑料的黄粉虫生命特征研究[J]. 西北农林科技大学学报, 2018, 46(7): 102-108.
- [11] 曹沁, 林毅博, 陈军, 肖明. 黄粉虫及其肠道微生物对聚氯乙烯的生物降解作用[J]. 微生物学通报, 2020, 47(2): 390-400.
- [12] 郭存雨. 黄粉虫取食聚苯乙烯塑料对其繁殖能力的影响[J]. 科学技术创新, 2019(12): 129-130.
- [13] 郭存雨, 黄世臣, 张诗焱. 黄粉虫幼虫降解不同塑料的研究进展[J]. 科学技术创新, 2019(13): 149-150.
- [14] 徐富凯, 孙忠芳. 黄粉虫取食和消化降解塑料的研究[J]. 中国资源综合利用, 2019, 37(1): 26-28.
- [15] 王圣印, 骆伦伦, 丁筠, 张大羽. 不同秸秆对黄粉虫生长及海藻糖含量变化的研究[J]. 环境昆虫学报, 2018, 40(1): 52-57.
- [16] 杨珊珊, 陈以頔, 张叶, 周慧敏, 计昕瑀, 何蕾, 等. 利用农作物废弃物作为饲料生产黄粉虫和其虫粪制备生物炭去除重金属[J]. 环境卫生工程, 2020, 28(6): 95.
- [17] 陈美玲, 凌源智, 黄儒强, 曾健辉, 马广智. 响应面法优化黄粉虫幼虫处理餐厨垃圾饲养条件的研究[J]. 环境工程学报, 2015, 9(5): 2455-2461.
- [18] 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):185-186+188.
- [19] 沈叶红. 黄粉虫肠道菌的分离和取食塑料现象的研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 华东师范学院, 2011.
- [20] Kim, S.Y., Park, J.B., Lee, Y.B., Yoon, H.J., Lee, K.Y. and Kim, N.J. (2015) Growth Characteristics of Mealworm *Tenebrio molitor*. *Journal of Sericultural and Entomological Science*, **53**, 1-5. <https://doi.org/10.7852/jses.2015.53.1.1>
- [21] 王宏民, 李亚芳, 杨萌萌, 张仙红. 温度对黄粉虫体重增加、食物转化率及消化酶活性的影响[J]. 应用昆虫学报,

2017, 54(3): 434-439.

- [22] 石晏丞, 任艳, 刘海波, 顾健 曹成全. 爬沙虫主要营养成分分析及其抗利尿作用[J]. 食品工业科技, 2019, 40(5): 87-92.
- [23] 何钊, 孙龙, 冯颖, 陈晓鸣. 白蜡虫多糖的提取及单糖组分分析[J]. 林业科学研究, 2008, 21(6): 792-796.