

# 废弃烟头饲喂黄粉虫的生物降解研究

邢露芸<sup>1</sup>, 徐 轲<sup>1</sup>, 饶桂维<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>浙江树人大学生物与环境工程学院, 浙江 杭州

<sup>2</sup>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: 以黄粉虫为研究对象, 根据其杂食性的特点, 研究其降解废弃烟头的可行性并得出最优饲喂条件, 利用黄粉虫强大的消化吸收能力, 进行废弃烟头的降解, 为环境的可持续发展做出贡献。方法: 采用单因素实验法, 改变饲喂条件(废弃烟头与麦麸的比例和饲养密度), 通过测定黄粉虫幼虫的死亡率、增重率、水溶性蛋白含量、重金属含量, 研究不同饲喂条件对其生长发育的影响, 得出废弃烟头作为饲料是否具有可行性, 以及最适合的饲喂条件。结果: 黄粉虫生物降解最适配方为75%废弃烟头 + 25%麦麸, 其增长率、增重率最大。在最佳配比和最优条件下饲喂黄粉虫幼虫, 不同虫龄蛋白质含量与100%麦麸饲养没有明显差异。在虫体长2.5 cm时, 测定黄粉虫幼虫中的重金属含量并未超标。在密度为0.4头/cm<sup>3</sup>时, 黄粉虫幼虫取食量最大, 最大可达2.0256 mg/d。结论: 本研究表明利用废弃烟头饲喂黄粉虫幼虫的方法具有可行性并且不会对黄粉虫生长发育造成影响。

## 关键词

废弃烟头, 生物降解, 黄粉虫幼虫, 饲喂条件

# Study on Biodegradation of Waste Cigarette Butts Fed on *Tenebrio molitor*

Luyun Xing<sup>1</sup>, Ke Xu<sup>1</sup>, Guiwei Rao<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>School of Biotechnology and Environmental Engineering, Zhejiang Shuren University, Hangzhou Zhejiang

<sup>2</sup>Interdisciplinary Research Academy, Zhejiang Shuren University, Hangzhou Zhejiang

Received: Jan. 3<sup>rd</sup>, 2022; accepted: Feb. 2<sup>nd</sup>, 2022; published: Feb. 9<sup>th</sup>, 2022

\*通讯作者。

文章引用: 邢露芸, 徐轲, 饶桂维. 废弃烟头饲喂黄粉虫的生物降解研究[J]. 环境保护前沿, 2022, 12(1): 71-80.  
DOI: 10.12677/aep.2022.121010

## Abstract

**Objective:** Taking *Tenebrio molitor* as the research object, according to its omnivorous characteristics, to study the feasibility of degrading waste cigarette butts, and obtain the optimal feeding conditions, and make use of its strong digestion and absorption capacity to degrade waste cigarette butts, so as to contribute to the sustainable development of the environment. **Methods:** Single factor experiment was used to change the feeding conditions (the ratio of waste cigarette butts to wheat bran and feeding density). By measuring the mortality, weight gain rate, water-soluble protein content and heavy metal content of *Tenebrio molitor* larvae, the effects of different feeding conditions on their growth and development were studied, and the feasibility of waste cigarette butts as feed and the most suitable feeding conditions were obtained. **Results:** The optimum formula of *Tenebrio molitor* biodegradation was 75% waste cigarette butts + 25% wheat bran, and its growth rate and weight gain rate were the highest. *Tenebrio molitor* was fed under optimal feeding ratios and feeding conditions showed no significant difference in protein content between different stages and 100% wheat bran feeding. When the length of the insect was 2.5 cm, the content of heavy metals in *Tenebrio molitor* larvae did not exceed the standard. When the density was 0.4 head/cm<sup>3</sup>, the feeding amount of *Tenebrio molitor* larvae was the largest, up to 2.0256 mg/d. **Conclusion:** This study shows that the method of feeding *Tenebrio molitor* larvae with waste cigarette butts is feasible and will not affect the growth and development of *Tenebrio molitor*.

## Keywords

Waste Cigarette Butts, Biodegradation, *Tenebrio molitor* Larvae, Feeding Conditions

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

每年全世界因吸烟而产生的烟蒂数以万亿计, 而现如今的中国在卷烟的产量、消费量和烟草的产量方面均达到了世界总量的三分之一[1]。烟头中最主要部分的滤棒是由醋酸纤维素和木头的塑性材料构成, 烟头中附着尼古丁[2]等化学物质, 具有巨大的毒性, 同时烟中含有大量的重金属, 如镉和铅[3] [4], 一般通过焚烧填埋等方法处理, 处理成本约 300 元每吨, 这不但是对资源的极大浪费, 还会对环境造成严重的二次污染, 特别是水质污染。目前, 较有价值的研究有利用烟蒂进行 DNA 分型[5] [6], 在法医实践中有较高的应用价值, 使烟蒂也成为一种常见的生物检验材料, 有利于刑事案件现场分析; 澳大利 RMIT 大学经过多年的研究, 希望将废弃烟头与沥青混合用于城市道路建设, 可降低城市热岛效应, 缓解全球变暖现象, 但其安全性还有待考究; 用氯代 1-烯丙基-3-甲基咪唑([AMIM] Cl)离子液体进行了溶解和回收烟蒂中的醋酸纤维[7] [8], 但大量实验中, 所用化学试剂并没有得到很好的利用, 化学药剂的加热挥发, 污水排放依然会对环境造成二次污染; 采用静电纺丝法制备二醋酸纤维素膜, 对纤维素膜的过滤性能及吸附性能进行了表征, 可无机械损伤地回收二醋酸纤维, 但醋酸纤维的回收处理成本较高, 花费人力较大, 并且没有对废弃烟草中的有害类的化学类物质进行系统性的去除。对于烟草大国来说, 废弃烟头进行减量化、无害化、资源化处理的问题迫在眉睫。

黄粉虫又叫面包虫, 属鞘翅目拟步甲科昆虫, 以植物性食物为主, 易于人工养殖, 是一种资源型昆

虫。黄粉虫的蛋白质含量很高,幼虫中蛋白质占干重的 54.25%左右,虫体内还含有多种常量及微量元素,被誉为“蛋白质饲料宝库”[9]。根据调查,黄粉虫幼虫生性食杂,除麦麸外,还可食用畜禽粪便[10]甚至塑料薄膜[11][12][13][14]和聚苯乙烯泡沫[15][16],在重金属环境下也有顽强的适应能力[17][18][19],这些现象为黄粉虫幼虫的生物降解研究提供了思路。

本课题组自 2018 年起就关注到黄粉虫的多种特性,并对其展开了研究,课题组华姝雯对孕宝口服液生产过程中产生的中药渣进行了黄粉虫饲喂中药渣与麦麸比例及其生长影响的研究[20]。在此研究中,课题组积累了丰富的黄粉虫的饲养经验,这为本实验的开展提供了坚实的基础。本实验主要研究黄粉虫饲喂废弃烟头对其生物体征的影响,研究将处理后的烟头作为饲料,改变废弃烟头占总饲料比[21],对比黄粉虫幼虫增重,增长,死亡率等生长发育指标,蛋白质含量,重金属含量等生理发育指标[22],探求它对有毒物质即醋酸纤维的吸收转化,以期为实现黄粉虫规模化降解废弃烟头提供理论依据。

## 2. 实验材料与方法

### 2.1. 试验材料和仪器

材料: 试验所用的黄粉虫幼虫购买于浙江绍兴黄粉虫专业养殖厂,烟草天下秀(四川中烟工业有限责任公司)购自市区烟草专卖店。

试剂: 五水硫酸铜,硫酸钾,氢氧化钠,对硝基苯酚,水为 GB/T 6682 规定的三级水。

仪器: 6 cm × 6 cm × 6 cm 的塑料盒、BJ-8001 不锈钢粉碎机拜杰有限公司、M1-L213B 微波炉、FA2004 电子天平上海恒平、HH-1 型电热恒温水浴锅常州国华电器、L65 紫外可见分光光度计上海精科、JK-100 型超声波清洗器合肥金尼机械制造有限公司、生化培养箱波莱福科技有限公司、电感耦合等离子体体质谱仪(ICP-MS) Elan DRC-e 美国铂金埃尔默。

### 2.2. 试验前期处理

对同一品牌,同一包装的香烟采用人工方法吸烟,当吸至烟头为总烟长的 1/3 时(不包括滤嘴长度)熄灭,并将烟头放入粉碎机中进行粉碎处理;将麦麸放入微波炉中,高温加热 3 min,以消灭市购麦麸中可能存在的微生物,减少对试验的影响。

人工挑选个体发育健康、活力强和直径和长度相近的个体供试。试验开始前,先将供试虫体置于人工气候培养箱中饥饿处理,方式为:黄粉虫置于人工气候培养箱中,24 h 不予喂食。饥饿处理后使用筛网分离虫粪[23]根据废弃烟头在麦麸中的比重,设置废弃烟头含量分别为 100%、95%、90%、85%、80%、75%、70%、65%、60%、55%、50%、45%、40%,13 个处理以及麦麸 100%的对照处理[24],每组实验设计两个平行组,由于黄粉虫为群体性昆虫,单头饲养所得数据可能与实际群体饲养中有所差异,所以本试验研究群体饲养下废弃烟头占饲料比对虫体各指标的影响[24]。

### 2.3. 试验方法设计

据前期单因素实验法得麦麸饲喂黄粉虫幼虫得出最佳饲养条件:密度为 0.4 头/cm<sup>3</sup>;光暗比为 0:24;饲料含水量为 20%;室温为 30℃ [20]。本试验均在培养箱中进行。

按照上述饲料比例将饲料放置于塑料盒中,使用电子天平每隔 3 天称重 1 次,取其平均值;按上述条件饲养,统计死亡幼虫的个体数,计算死亡率。得出最适黄粉虫饲料废弃烟头饲养比例,定时对黄粉虫的生长发育情况进行观察,根据取食情况及时更换食物,清理蜕皮及虫粪[25][26]。

用最佳比例饲料饲喂黄粉虫幼虫,测定不同虫龄段的生理指标和生长指标变化:设置 3 个不同虫龄段: I 龄(1.5 cm) II 龄(2.0 cm) III 龄(2.5 cm),以 100%麦麸条件为对照,测定黄粉虫幼虫的生理指标和生

长指标(虫体平均体长)。

最佳饲料比饲养黄粉虫幼虫,至 III 虫龄(2.5 cm),设置 3 组平行实验,以 100%麦麸饲养为对照组,运用电感耦合等离子体质谱法的方法,测定最终虫体内重金属的含量。

由于黄粉虫幼虫为群体性昆虫,故探究密度对其取食废弃烟头量的影响。用最佳比例饲料饲喂黄粉虫,设定密度(0.1 头/cm<sup>3</sup>、0.2 头/cm<sup>3</sup>、0.4 头/cm<sup>3</sup>、0.6 头/cm<sup>3</sup>、0.8 头/cm<sup>3</sup>),每组实验设计两个平行组,每隔一周,测定黄粉虫幼虫取食废弃烟头的质量和化蛹率,根据取食情况,及时增添食物,保证最佳饲养比例。

## 2.4. 指标测定方法

生长指标:黄粉虫幼虫的平均单体重(M) (g)、死亡率(D) (%)虫体平均体长(L) (cm)和化蛹率(Y) (%),分别按照(1)~(4)计算。

$$M = \frac{M_{\text{总}}}{X_1} \quad (1)$$

$$D = \frac{X_2}{X_1 + X_2} \times 100\% \quad (2)$$

$$L = \frac{L_{\text{总}}}{X_1} \quad (3)$$

$$Y = \frac{X_3}{\Delta X} \quad (4)$$

式中  $\Delta X$ : 试验总虫数(个);  $M_{\text{总}}$ : 饲喂后虫体总重(g);  $X_1$ : 存活幼虫总数(个);  $X_2$ : 死亡幼虫总数(个);  $L_{\text{总}}$ : 试验组虫体总长;  $X_3$ : 化蛹虫数(个)。

生理指标: 主要测量黄粉虫幼虫的水溶性蛋白含量(P) (g/100 g)按照公式(5)计算、测定重金属含量。

$$P = \frac{(C - C_0) \times V_1 \times V_3}{m \times V_2 \times V_4 \times 1000 \times 1000} \times 100 \times F \quad (5)$$

式中  $C$ : 试样测定液中氮的含量( $\mu\text{g}$ );  $C_0$ : 试剂空白测定液中氮的含量( $\mu\text{g}$ );  $V_1$ : 试样消化液定容体积(mL);  $V_3$ : 试样溶液总体积(mL);  $m$ : 试样质量(g);  $V_2$ : 制备试样溶液的消化液体积(mL);  $V_4$ : 测定用试样溶液体积(mL);  $F$ : 氮换算为蛋白质的系数。

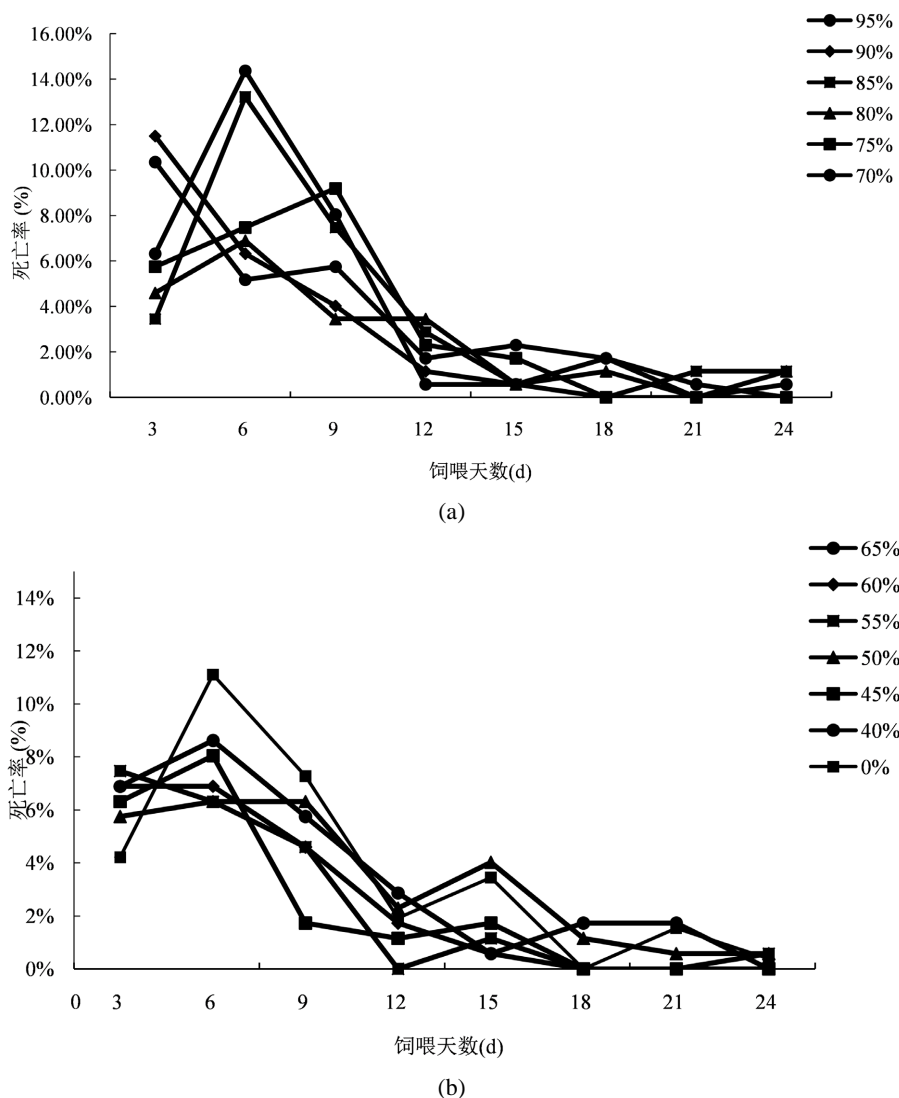
样品前处理: 称取黄粉虫幼虫准确至 0.0001 g, 在电热鼓风干燥箱中于(100  $\pm$  5)°C干燥 60 min 后,取出放入干燥器中冷却 30 min, 用研钵碾碎。

采用国家标准 GB/T 5009.5-2016 食品中蛋白质的测定紫外光分光光度法测定黄粉虫的水溶性蛋白质含量。用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)进行黄粉虫重金属含量测定。

## 3. 实验结果和分析

### 3.1. 废弃烟头含量对黄粉虫生长指标的影响

由图 1 得知,从第 9 天开始,幼虫死亡率都开始大幅度下降,到 12 天,基本下降到 5%以下,由此可见 12 天以后,黄粉虫幼虫基本适应转变的生长环境。95%和 90%烟头含量比死亡率在前期超过 10%,而 85%及以下烟头含量的组保持着较高的存活率,由此可得适当添加麦麸,幼虫存活率可以维持在正常水平。80%和 75%死亡率一直都低于对照组。



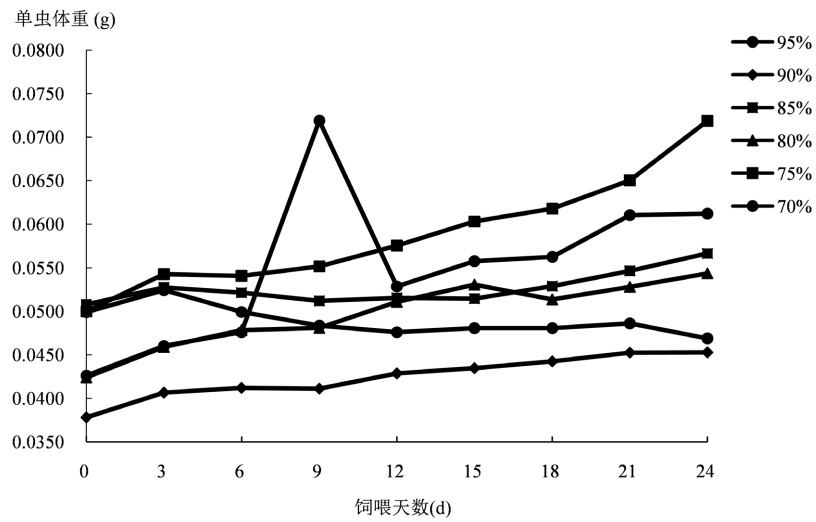
**Figure 1.** Effects of different proportions of waste cigarette butts on the mortality of *Tenebrio molitor* larvae

**图 1.** 不同比例的废弃烟头对黄粉虫幼虫死亡率的影响

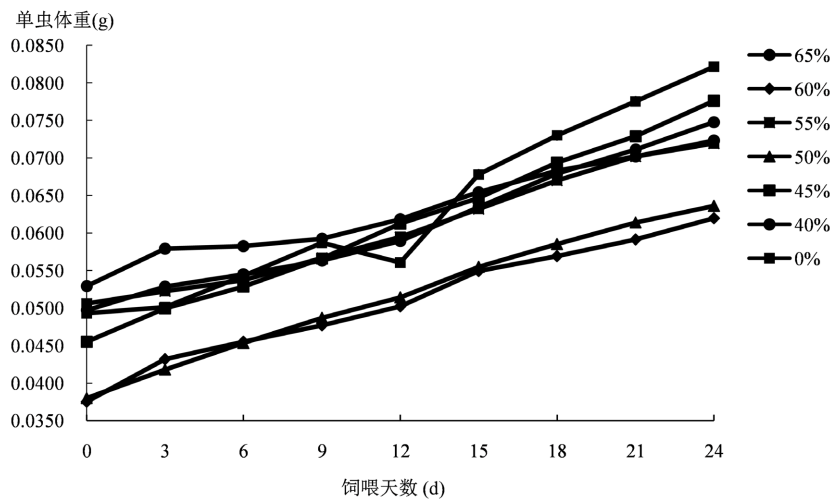
由图 2 可知饲喂不同比例烟头含量的饲料，黄粉虫幼虫的平均虫体重量呈现明显的规律性变化，图 2(b)明显比图 2(a)数值高，由此可见麦麸所占比例越高，平均虫体重量越大。75%废弃烟头饲料比在高含量饲料比中，虫体平均体重明显高于其他高含量比例。

### 3.2. 最优烟头含量比对不同虫龄蛋白质含量的影响

用 L65 紫外可见分光光度计在 400 nm 处测量吸光度值，绘制标准曲线，所求的得线性回归方程为： $y = 0.1067x - 0.0519$  ( $R^2 = 0.9889$ )，由图 3(a)可得 75%废弃烟头饲料比(实验组)含量下，水溶性蛋白含量与 100%麦麸饲养(对照组)的黄粉虫幼虫在不同虫龄无明显差异，由此可见 75%含量的废弃烟头饲料没有对黄粉虫幼虫的生理指标产生重大影响；由图 3(b)可知，黄粉虫幼虫虫体平均体长实验组与对照组无明显差异，由此可见 75%含量的废弃烟头饲料饲喂，对黄粉虫幼虫的生长指标同样无重大影响。



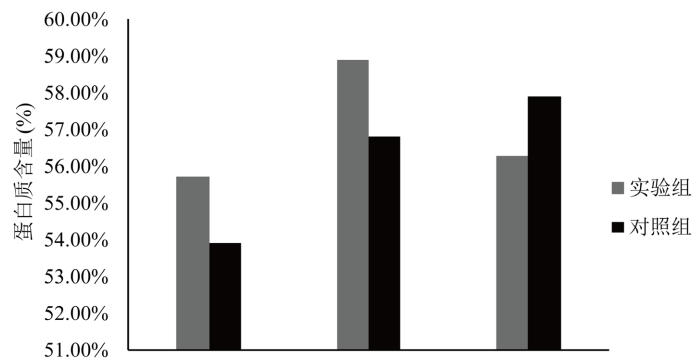
(a)



(b)

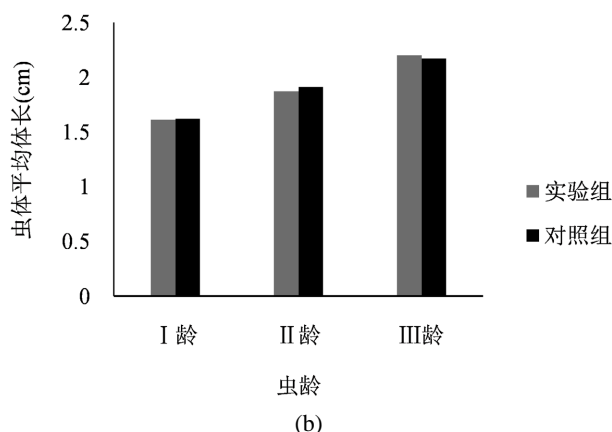
**Figure 2.** Effects of different proportions of waste cigarette butts on the average body weight of *Tenebrio molitor* larvae

**图 2.** 不同比例的废弃烟头对黄粉虫幼虫平均虫体体重的影响



(a)





**Figure 3.** Protein content (a) and average body length (b) of *Tenebrio molitor* larvae at different instars

**图 3.** 不同虫龄黄粉虫幼虫蛋白质含量(a)和虫体平均体长(b)

### 3.3. 重金属含量的测定

由表 1~3 所示, 在最优烟头饲料比(75%)饲养条件下, 与 0%烟头饲养条件对比可得, 各类重金属元素含量与纯麦麸饲养虫体内重金属元素含量无大幅上升现象, 分析结果表明, 烟头内含有的重金属, 通过黄粉虫幼虫取食, 在幼虫体内充分降解, 并未在虫体内富集。

**Table 1.** Analysis and test results I (mg / kg)

**表 1.** 分析检测结果之一(mg/kg)

元素名称	Li	B	Cr	Sc	V	Mn	Fe	Co
75%烟头饲料比虫体	0.016	9.28	2013.33	11.59	119.08	1435.5	46453.40	89.25
0%烟头饲料比虫体	1435.78	20.74	1908.07	20.74	230.3	1432.37	51574.17	89.67

**Table 2.** Analysis and test results II (mg/kg)

**表 2.** 分析检测结果之二(mg/kg)

元素名称	Ni	Cu	Zn	As	Se	Sr	Zr
75%烟头饲料比虫体	746.2	8913.39	66762.83	159.07	132.29	1429.38	105.73
0%烟头饲料比虫体	913.55	12473.54	81938.72	137.17	71.80	1486.44	96.52

**Table 3.** Analysis and test results III (mg/kg)

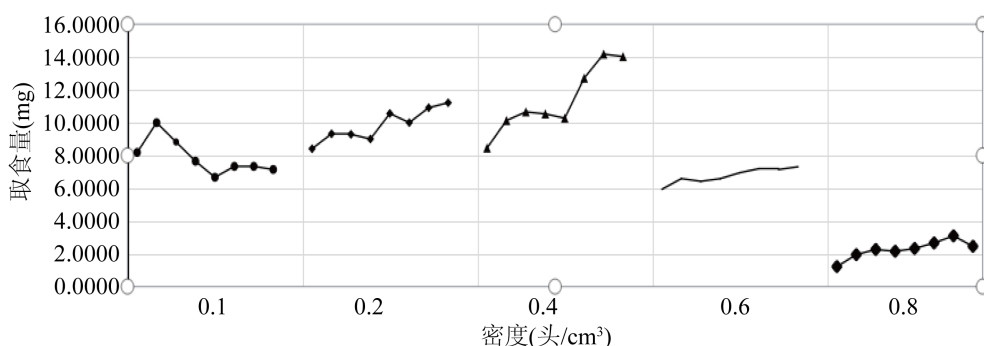
**表 3.** 分析检测结果之三(mg/kg)

元素名称	Cd	Bi	Pb	Sb	Te	Ba	Hg
75%烟头饲料比虫体	11.24	100.98	213.44	5.138	0.30	1371.03	29.94
0%烟头饲料比虫体	78.038	72.53	540.37	12.15	13.05	1549.79	582.4

### 3.4. 密度对黄粉虫幼虫取食率的影响

由图 4 可知, 0.6 头/cm<sup>3</sup>、0.8 头/cm<sup>3</sup>取食量明显低于其他实验组, 导致此种现象出现的原因除了空间不足, 生长困难等外, 其最主要的原因是黄粉虫的自相残杀现象, 由此可以推断密度过大不适合黄粉

虫幼虫生长。由黄粉虫幼虫取食量来看, 废弃烟头饲喂黄粉虫幼虫最佳密度为  $0.4 \text{ 头}/\text{cm}^3$ , 在第七周达到最大值  $14.1791 \text{ mg}/\text{周}$ , 即  $2.0256 \text{ mg}/\text{d}$ 。

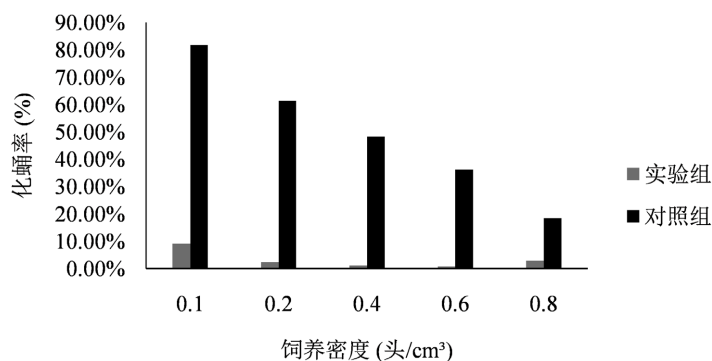


**Figure 4.** Effects of feeding density on the amount of waste cigarette butts eaten by *Tenebrio molitor* larvae

**图 4.** 饲养密度对黄粉虫幼虫取食废弃烟头量的影响

### 3.5. 粉虫幼虫化蛹率的影响

由图 5 数据可得, 饲喂麦麸的黄粉虫幼虫(对照组), 化蛹率随密度增大而下降, 其原因可能在于黄粉虫幼虫需适当隔离才能正常化蛹, 在群集环境中会有化蛹抑制的现象。饲喂废弃烟头大幅降低黄粉虫幼虫化蛹率,  $0.1 \text{ 头}/\text{cm}^3$  密度下麦麸饲养的黄粉虫幼虫除去死亡外, 在八周后全部化蛹, 而在同一时间, 最优废弃烟头含量比例下饲喂的黄粉虫幼虫实验组化蛹率较低。在较低的化蛹率下, 实验组拉长了黄粉虫幼虫取食废弃烟头的周期, 增加了废弃烟头降解量。



**Figure 5.** Effects of feeding density on pupation rate of *Tenebrio molitor* larvae

**图 5.** 饲养密度对黄粉虫幼虫化蛹率的影响

## 4. 结论

实验结果表明, 在群体饲养条件下, 100% 废弃烟头饲喂黄粉虫体平均重量逐渐下降, 死亡率远高于对照组, 导致出现这种现象的原因是前期试验, 因处于暑假时期, 室温饲养, 温度过高, 废弃烟头碾碎不够到位, 黄粉虫无法获取到常规食物, 导致营养不良, 蜕皮和生长困难等, 从而造成黄粉虫个体的大量死亡。于是采用在饲料中将麦麸与烟头进行混合饲喂, 使黄粉虫种群保持较高的存活率、正常虫体体长和正常蛋白质含量, 得到一个可以最大程度降解废弃烟头, 同时又可以保证正常生长发育繁殖的饲料



比例：废弃烟头与麦麸的含量比 75% 和 25%。本实验还对烟头饲养的黄粉虫进行重金属含量测定，最终结果表明烟头中含有的重金属并未在黄粉虫体内富集。

由实验结果可看出，0.4 头/cm<sup>3</sup> 密度条件下，设定最优饲料比例：75% (废弃烟头) + 25% (麦麸)，黄粉虫幼虫的取食量达到最大，最大可达 2.0256 mg/d。废弃烟头的饲喂导致黄粉虫幼虫的化蛹率大幅下降，拉长了黄粉虫幼虫取食废弃烟头的周期，增加了废弃烟头降解量。

同时，实验过程中发现 100% 和 95% 饲料含量的黄粉虫黑化，据有关研究显示，黄粉虫的黑化程度可作为抗逆性的衡量标准，许多生物在胁迫环境(如饥饿、高温、冷冻、干燥、高渗、辐射、有毒物质等)下会表现出的抗逆耐受力。综上可得出，以黄粉虫为对象，生物降解废弃烟头具有可行性。

## 5. 前景讨论

对于实验所产生的黄粉虫粪可作为畜禽饲料[27] [28] [29]添加剂或生产有机蔬菜及花卉的基肥，同时，养殖成的黄粉虫老熟幼虫可作为资源加以利用，黄粉虫每次成长所蜕的虫皮可用于化妆品原料，由此可预测黄粉虫是继家蚕、蜜蜂后又一个极可能被产业化开发的昆虫种类[30] [31]。

研究表明，使用生物代谢的方式使废弃烟头以二氧化碳，水和生物物质等形式进入到地球化学物质循环中，相比于焚烧和掩埋处理方式，更符合可持续发展理念，生物降解的方式响应“碳达峰碳中和”战略，共享低碳发展。

## 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)。

## 参考文献

- [1] 刘世强. 2013 年全国卷烟市场综述[J]. 中国烟草, 2014(5): 39.
- [2] Novotny, T.E. and Zhao, F. (1998) Consumption and Production Waste: A Not Her Externality of Tobacco Use. *Tobacco Control*, **8**, 75-80. <https://doi.org/10.1136/tc.8.1.75>
- [3] 张领弟, 林春丽, 杨增, 张丽萍. 吸烟过程香烟中铅和镉挥发性的研究[J]. 中华卫生检验杂志, 2001, 11(5): 1004-8685.
- [4] 高红莉, 张砾, 李洪涛, 周文宗. 黄粉虫幼虫对城市污泥重金属的积累作用[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(1): 150-154.
- [5] Walsh, D.J., Corey, A.C. and Cotron, R.W. (1992) Isolation of Deoxyribonucleic Acid (DNA) from Saliva and Forensic Science Samples Containing. *Journal of Forensic Sciences*, **37**, 387-395.
- [6] 张庆霞, 刘雅诚, 唐辉, 王静, 严江伟, 高俊薇. 烟蒂 DNA 分型的研究[J]. 中国法医学, 2003, 18(1): 29-30.
- [7] 周雅文, 邓宇, 尚海萍. 烟蒂醋酸纤维在离子液体[AMIM]Cl 中的溶解与回收[J]. 烟草科技, 2010(2): 39-42+59.
- [8] Zhao, M., Xu, X.L., Jiang, Y.D., Sun, W.-Z., Wang, W.-F. and Yuan, L.-M. (2009) Enantioseparation of Trans-Stilbene Oxide Using a Cellulose Acetate Membrane. *Journal of Membrane Science*, **336**, 149-153. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2009.03.034>
- [9] Morales-Ramos, J.A., Guadalupe Rojas, M., Shelby, K.S. and Coudron, T.A. (2016) Nutritional Value of Pupae Versus Larvae of *Tenebriomolitor* (Coleoptera: Tenebrionidae) as Food for Rearing *Podisus maculiventris* (Heteroptera: Pentatomidae). *Journal of Economic Entomology*, **109**, 564-571. <https://doi.org/10.1093/jee/109.3.564>
- [10] 熊晓莉, 邵承斌, 李宁, 杨红英. 黄粉虫处理鸡粪[J]. 环境工程学报, 2013, 7(11): 4564-456.
- [11] 张可, 胡芮绮, 蔡珉敏, 郑龙玉, 喻子牛, 张吉斌. 黄粉虫取食和消化降解 PE 塑料薄膜的研究[J]. 化学与生物工

- 程, 2017, 34(4): 47-49.
- [12] Yang, Y., Yang, J., Wu, W.-M., Zhao, J., Song, Y., Gao, L., *et al.* (2015) Biodegradation and Mineralization of Polystyrene by Plastic-Eating Mealworms. Part 1. Chemical and Physical Characterization and Isotopic Tests. *Environmental Science & Technology*, **49**, 12080-12086. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b02661>
- [13] Van Ooik, T., Rantala, M.J. and Saloniemi, I. (2007) Diet-Mediated Effects of Heavy Metal Pollution on Growth and Immune Response in the Geometrid Moth *Epirrita autumnata*. *Environmental Pollution*, **145**, 348-354. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.03.008>
- [14] Yang, S.S., Wu, W.M., Brandon, A.M., *et al.* (2018) Ubiquity of Polystyrene Digestion and Biodegradation within Yellow Mealworms, Larvae of *Tenebrio molitor* Linnaeus (Coleoptera: Tenebrionidae). *Chemosphere*, **212**, 262-271. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.08.078>
- [15] 刘玉升, 王付彬, 崔俊霞, 张丽. 黄粉虫资源研究利用现状与进展[J]. 环境昆虫学报, 2010, 32(1): 106-114.
- [16] 杨宇, 杨军, 吴唯民, 江雷. 黄粉虫降解聚苯乙烯的证据及其肠道微生物的作用[C]//中国化学会环境化学专业委员会, 中国仪器仪表学会原子光谱专业委员会. 全国环境纳米技术及生物效应学术研讨会摘要集. 2016: 175.
- [17] 高红莉, 张砾, 李洪涛, 周文宗. 黄粉虫幼虫对城市污泥重金属的积累作用[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(1): 150-154.
- [18] 李双喜, 周文宗, 吕卫光. 黄粉虫幼虫降解城市污泥环境影响因子研究[J]. 生态环境学报, 2017, 26(10): 1761-1767.
- [19] 肖银波. 周祖基. 杨伟, 杜开书. 饲养条件对黄粉虫幼虫生长及存活的影响[J]. 生态学报, 2003, 23(4): 673-680.
- [20] 华姝雯, 杨晨璐, 饶桂维, 许林. 保灵孕宝口服液中药渣饲喂黄粉虫幼虫条件及其生长发育的影响[J]. 农业科学, 2020, 10(4): 201-211. <https://doi.org/10.12677/HJAS.2020.104031>
- [21] Ciriminna, R. and Pagliaro, M. (2020) Biodegradable and Compostable Plastics: A Critical Perspective on the Dawn of Their Global Adoption. *Chemistry Open*, **9**, 8-13. <https://doi.org/10.1002/open.201900272>
- [22] 张铁涛, 张海华, 孙皓然, 刘志, 杨福合, 李光玉. 饲料添加黄粉虫对育成期水貂生长性能、营养物质消化率和血清生化指标的影响[J]. 动物营养学报, 2015, 27(12): 3782-3788.
- [23] 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(自然科学版), 2018, 46(7): 102-108.
- [24] 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.
- [25] 陈光道, 王鹤, 王栾雪, 刘奇琪, 付钧钧, 罗志文. 不同饲养条件对黄粉虫幼虫生长发育的影响[J]. 中国林副特产, 2017, 146(1): 22-23.
- [26] 徐世才, 刘小伟, 王强, 沈雪健. 玉米秸秆发酵制取黄粉虫饲料的研究[J]. 西北农业学报, 2013, 22(1): 194-199.
- [27] 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.
- [28] 朱琳, 王向誉, 聂磊, 王安皆, 张凤林, 施新琴, 等. 黄粉虫的主要功能成分及其应用研究进展[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(3): 10-12+14.
- [29] 申红, 潘晓亮. 高蛋白黄粉虫的饲养及其利用[J]. 草食家畜, 2004, 6(2): 48-50.
- [30] 齐爱, 彭伟录, 李小玺, 任顺祥, 邱宝利. 经济昆虫黄粉虫与大麦虫研究进展[J]. 安徽农学通报, 2004, 14(21): 158-160.
- [31] 艳芳, 伍爱萍, 徐匆, 罗华建. 黄粉虫的应用现状及展望[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(36): 99-101.