



黄兰英, 胡红元, 池骋, 宋儒胜, 陈霞, 张昌容, 尚小丽, 吴建伟. 家蝇幼虫对两种秸秆的消化及利用研究 [J]. 环境昆虫学报, 2021, 43 (2): 436–444.

家蝇幼虫对两种秸秆的消化及利用研究

黄兰英^{1 2*}, 胡红元^{3*}, 池骋^{1 2}, 宋儒胜^{1 2}, 陈霞^{1 2},
张昌容⁴, 尚小丽^{1 2**}, 吴建伟^{2**}

(1. 贵州医科大学生物与工程学院贵州省免疫细胞与抗体工程研究中心, 贵阳 550025;

2. 贵州医科大学基础医学院现代病原生物学特色重点实验室, 贵阳 550025; 3. 三峡旅游职业技术学院, 湖北宜昌 443000;

4. 贵州省农业科学院植物保护研究所, 贵阳 550006)

摘要: 本文旨在探明家蝇 *Musca domestica* 幼虫对高粱秸秆和小麦秸秆营养成分利用和木质纤维素的降解情况, 以及不同配比秸秆饲料对家蝇生物学指标的影响, 为今后产业化利用家蝇来生物降解秸秆类有机废弃物奠定理论基础。本研究采用 70% 高粱秸秆粉、70% 麦秸秆粉和纯麦麸作为饲料, 每种饲料各设置对照组、发酵组和家蝇幼虫取食组 3 种处理, 检测并分析 3 种饲料各处理组中一般营养成分和木质纤维素的含量及变化; 同时采用 7 种配比饲料喂养家蝇, 观察各组家蝇不同发育阶段的体长、体重、存活率和发育历期等。结果表明: (1) 3 种饲料的各处理组中, 一般营养成分和木质纤维素的含量均呈现: 对照组 > 发酵组 > 家蝇取食组的趋势, 此外除高粱秸秆组粗蛋白外, 其余各组成份均差异显著 ($P < 0.05$); (2) 小麦秸秆的木质纤维素含量 > 高粱秸秆 > 麦麸, 且各组间均差异显著 ($P < 0.05$); (3) 在相同秸秆配比条件下, 高粱秸秆饲喂的家蝇其各虫态体长、体重、总存活率和发育历期均要优于麦秸秆喂养, 且总存活率和发育历期与麦麸喂养相比差异不显著 ($P > 0.05$); (4) 纯高粱秸秆喂养下家蝇仍能保持正常的生长发育, 而在 90% 小麦秸秆喂养下, 家蝇则无法存活。综上所述, 家蝇适合作为生物转化器用于秸秆、尤其是高粱秸秆的降解, 且降解效果优于单纯的微生物发酵降解, 研究结果为今后规模化利用家蝇降解秸秆类有机废弃物提供了理论依据和科学基础。

关键词: 家蝇; 秸秆; 生物降解; 木质纤维素; 生长发育

中图分类号: Q968.1; S489

文献标识码: A

文章编号: 1674-0858 (2021) 02-0436-09

Studies on digestion and utilization of two straws by feeding *Musca domestica* larva

HUANG Lan-Ying^{1 2*}, HU Hong-Yuan^{3*}, CHI Cheng^{1 2}, SONG Ru-Sheng^{1 2}, CHEN Xia^{1 2}, ZHANG Chang-Rong⁴, SHANG Xiao-Li^{1 2**}, WU Jian-Wei^{2**} (1. Immune Cells and Antibody Engineering Research Center of Guizhou Province, College of Biology and Engineering, Guizhou Medical University, Guiyang 550025, China; 2. The Key and Characteristic Laboratory of Modern Pathogen Biology, Basic Medical College, Guizhou Medical University, Guiyang 550025, China; 3. Three Gorges Tourism

基金项目: 贵州省科技合作计划 (黔科合 LH 字 [2015] 7328); 大学生创新创业训练计划 (201610660012); 贵阳医学院博士启动基金 (合同字第 009 号); 贵州省教育厅创新群体重大研究项目 (黔教合 KY 字 [2016] 031); 贵州省免疫细胞与抗体工程研究中心 (黔教合 KY 字 [2017] 017)

* 共同第一作者简介: 黄兰英, 女, 硕士研究生, 研究方向为昆虫免疫与资源利用, E-mail: ml7311983586@163.com; 胡红元, 女, 讲师, 研究方向为昆虫免疫与资源利用, E-mail: 416780592@qq.com

** 共同通讯作者 Author for correspondence: 尚小丽, 女, 博士, 副教授, 主要研究方向昆虫免疫与昆虫资源利用, E-mail: shangxl2013@163.com; 吴建伟, 博士, 教授, 主要研究方向为医学昆虫免疫, E-mail: wjw@gmc.edu.cn

收稿日期 Received: 2020-03-09; 接受日期 Accepted: 2020-06-18

College, Yichang 443000, Hubei Province, China; 4. Institute of Plant Protection, Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang 550006, China)

Abstract: To lay a theoretical foundation for the future industrial utilization of *Musca domestica*, to biodegrade straw organic wastes, we measured the relative indicators, which include the utilization of nutritional components, the lignocellulose degradation of sorghum straw and wheat straw, as well as the influence of different proportions of straw feed on the biological traits of *M. domestica*. In this study, 70% sorghum straw powder, 70% wheat straw powder and pure wheat bran were used as feeds. Each feed was treated with three ways: control group, fermentation group, and larva feeding group. The contents and changes in general nutrition and lignocellulose in each treatment group of the three feeds were detected and analyzed. Moreover, the body length, weight, survival rate and developmental duration of *M. domestica* in different development stages were observed. The results showed that: (1) The contents of general nutrition and lignocellulose in each treatment group of the three feeds displayed the trend of the control group > the fermentation group > the feeding larva group, and the differences between each two groups were significant except the contents of crude protein in sorghum straw ($P < 0.05$); (2) The lignocellulose contents of straw in wheat straw was higher than that in sorghum straw, and in sorghum straw was higher than that in wheat bran, and the differences between each two groups were significant ($P < 0.05$); (3) Under the same condition with a fixed ratio of straw, *M. domestica* fed with sorghum straw performed better than those fed with wheat straw in the body length, weight, overall survival rate, and shorter developmental duration, the differences in overall survival rate and developmental duration were not significant between sorghum straw group and wheat bran group ($P > 0.05$); (4) *M. domestica* could maintain normal growth and development when fed with pure sorghum straw, while they could not survive when fed with 90% wheat straw. In conclusion, *M. domestica* was a great candidate as a bioconverter for straw degradation, especially for sorghum straw, and the degradation was better than the simple microbial fermentation. This study provided the theoretical evidence and scientific basis for the large scale use of *M. domestica* to degrade straw organic waste in the future.

Key words: *Musca domestica*; straw; biodegradation; lignocellulose; growth and development

秸秆是地球上最丰富的可再生资源,其主要成分为木质纤维素,包含纤维素、半纤维素、木质素 (Sarkar *et al.*, 2012)。据报道,全球植物利用光合作用合成的木质纤维素每年能够达到 2×10^{11} 吨/年,可固定极为丰富的太阳能 (4×10^{21} J/yr) (黄鑫, 2015),这使得秸秆成为了世界上储量最大的可再生资源 (Wilson, 2011)。

目前我国秸秆资源一直存在污染重、消耗大、利用率低等问题,现有的秸秆处理方法有化学法、物理法、物理化学法和生物法 (杨玉楠等, 2007; Kumar *et al.*, 2009; Zheng *et al.*, 2018)。前3种处理方法大多都需要昂贵的机器设备,以及消耗大量的能量来创造高温高压或适应强酸强碱的极端环境 (Liu *et al.*, 2017; Vanneste *et al.*, 2017; Veluchamy *et al.*, 2018),因而应用方面受到限制。生物法方面利用微生物工程等生产复合纤维素酶用以降解纤维素现应用较广 (Wong *et al.*, 2014),

但由于该项生物技术设备成本高 (Daas *et al.*, 2018)、微生物酶工程预处理周期过长等问题,在工业界仍然无法被大规模应用 (Kumar *et al.*, 2008; Fischer *et al.*, 2013; Garvey *et al.*, 2013),这也是利用微生物降解木质纤维素的瓶颈 (Russell *et al.*, 2009)。生物法另一方面在利用反刍动物消化研究中,也存在木质纤维素利用率不佳,降解时间较长等不足 (Watanabe and Tokuda, 2010; 谢蓉蓉等, 2015)。因此,寻求高效降解木质纤维素的方法,成为了当前秸秆类生物质能开发利用的关键。

昆虫的消化系统异于反刍动物,目前已有大量研究表明,很多昆虫的消化系统可作为一种高效的生物反应器在降解木质纤维素消化中发挥着重要作用。现已报道的具有较好木质纤维素降解潜力的昆虫有:白蚁 Termitidae (Peterson *et al.*, 2016; Li *et al.*, 2017; Geng *et al.*, 2018)、黄粉虫

Tenebrio molitor (阮传清等, 2018)、黑水虻 *Hermetia illucens* L. (Bava et al., 2019)、竹鼻甲虫 *Cyrtotrachelus buqueti* (Luo et al., 2018; Luo et al., 2019) 等。

贵州为我国产酒大省, 高粱秸秆和酒糟资源丰富。本课题组前期在与贵州茅台集团合作进行酒糟资源化处理中发现, 利用家蝇 *Musca domestica* 可对酒糟进行有效降解 (吴建伟等, 2014 a; 2014 b), 并初步证实家蝇体内含有可对酒糟和秸秆进行降解的内源木质纤维素酶类 (张姝等, 2013; 胡蓉等, 2013), 但目前关于家蝇对高粱秸秆类的具体消化降解情况和高粱秸秆对家蝇生长发育的影响等尚缺乏详细研究, 且未见报道。此外, 刘颖等 (2017) 虽已报道了小麦秸秆对家蝇的饲养效果, 但其实验设计的角度与本研究存在差异。因此, 为探明家蝇对高粱秸秆和小麦秸秆的木质纤维素利用情况, 以及高含量秸秆对家蝇生长发育的影响, 本文开展了相关研究, 以期今后规模化利用家蝇作为资源昆虫, 生物降解秸秆类有机废弃物提供理论依据和科学基础。

1 材料与方法

1.1 供试昆虫

以贵州医科大学基础医学院现代病原生物学特色重点实验室饲养繁育的家蝇为试验昆虫。

1.2 供试饲料

幼虫饲料: (1) 高粱秸秆和小麦秸秆饲料: 将秸秆晒干后, 用粉碎机粉碎, 并通过孔径 2 mm 网筛筛选, 40℃ 干燥机烘干后, 装袋密封, 4℃ 保存备用; (2) 麦麸饲料: 用干燥机 40℃ 烘干, 装袋密封, 4℃ 保存备用。

成虫饲料: (1) 成虫批量保种时, 使用 1:1 的白糖和奶粉固体混合后放于培养皿饲养, 饮用水为置于培养皿内 (放有海绵) 的无菌蒸馏水。 (2) 成虫实验单头饲养时, 饲料为 10% 奶粉水 (溶质为白糖和奶粉 1:1 的混合物, 溶剂为无菌蒸馏水), 用棉球蘸取适量奶粉水放于养虫瓶内 (190 mL 一次性塑料杯, 纱布封口, 下文中养虫瓶均此类型), 并注意每日更新。

1.3 昆虫保种饲养条件

保种和实验用家蝇均饲养于养虫室中, 养虫室温度 27℃, 相对湿度 (RH) 60% ~ 70%, 光照周期 12 N:12 D。保种用家蝇幼虫按饲料种类不同

分为纯麦麸保种饲养、70% 高粱秸秆粉 (30% 为麦麸) 保种饲养和 70% 小麦秸秆粉保种 (30% 为麦麸) 饲养。各饲养种类幼虫分别饲养于养虫盒 (体积为 1 000 mL 的一次性塑料碗, 下文中养虫盒均此类型) 中, 盒口有纱布封口, 并将养虫盒放于对应的养虫笼中 (55 cm × 55 cm), 每日对幼虫生长情况和化蛹情况进行观察, 对饲料湿润情况适时调整; 待有成虫羽化后将养虫盒纱布打开让成虫飞出, 成虫仍保种饲养于的该养虫笼内, 待成虫羽化 3 d 后即可根据保种和实验需要开始接卵。保种用卵随需随接, 实验用卵于每天早上 9:00 开始, 接卵盒 (盒内含已提前一天发酵的饲料) 敞口放入蝇笼进行接卵, 当天中午 12:00 结束, 接卵后将卵块用毛笔挑出放入少量含无菌水的培养皿内, 利用无菌水快速将卵分离并计数放入已盛有发酵饲料的养虫盒中, 并将此批卵孵化的幼虫视为同龄幼虫开展后续试验。

1.4 3 种饲料的制备和不同的处理方法

先配置 3 种饲料: (1) 在 100 g 高粱秸秆粉中加入 50 g 的麦麸设为 70% 高粱秸秆组; (2) 在 100 g 麦秸秆粉中加入 50 g 麦麸设为 70% 小麦秸秆组; (3) 将含 150 g 纯麦麸设为麦麸组。而后每种饲料均做 3 种处理方式: (1) 对照组: 不做任何处理, 干燥饲料 150 g 于室温条件下放置 6 d 后待测; (2) 发酵组: 取 150 g 干燥饲料, 向内加入 150 mL 无菌水, 室温发酵 6 d 后待测; (3) 家蝇幼虫取食组: 取 150 g 干燥饲料, 向内加入 150 mL 无菌水, 室温发酵 1 d 后的向其中接入 300 头卵喂养至家蝇幼虫第 5 天, 后分离去除家蝇待测。

1.5 化学成分测定

将上述 3 种饲料分别经对照、发酵和幼虫取食处理后, 收集样品并对其粗蛋白、粗脂肪、总糖、纤维素、木质素和半纤维素的含量进行测定, 以观察发酵和幼虫取食对不同秸秆饲料的降解情况。测定方法或依据标准分别如下, 粗蛋白 (GB/T 6432-1994)、粗脂肪 (GB/T 5512-2008)、总糖 (DNS 法) (Miller, 1959)、纤维素、木质素和半纤维素 (Van Soest 法) (刘文静等, 2013)。每组处理设置 3 个重复。

1.6 不同配比饲料对家蝇生长发育影响的观察

设置纯麦麸为对照组, 实验组则将纯麦麸、高粱秸秆粉、麦秸秆粉和菜籽饼按不同比例进行配置, 并饲养家蝇幼虫, 详细配比如下 (表 1)。

表 1 不同配比饲料处理
Table 1 Treatment of feed with different proportion

组数 Groups	饲料处理 Feed processing	组数 Groups	饲料处理 Feed processing
1	纯麦麸 WB	5	小麦秸秆: 麦麸: 菜籽饼 = 7:2:1 WS: WB: RSC = 7:2:1
2	高粱秸秆: 麦麸: 菜籽饼 = 7:2:1 SS: WB: RSC = 7:2:1	6	小麦秸秆: 麦麸 = 7:3 WS: WB = 7:3
3	高粱秸秆: 麦麸 = 7:3 SS: WB = 7:3	7	小麦秸秆: 麦麸 = 9:1 WS: WB = 9:1
4	纯高粱秸秆 SS		

注: WB, 麦麸; SS, 高粱秸秆; WS, 小麦秸秆; RS, 菜籽饼。Note: WB, Wheat bran; SS, Sorghum straw; WS, Wheat straw; RSC, Rape seed cake.

每实验组称取已配比好的饲料 40 g 放入养虫盒中, 并向每个养虫盒中加入等量的无菌蒸馏水, 均匀搅拌, 待室温发酵 1 d 后, 每盒接入 30 头卵, 养虫盒用纱布封口并单独放于养虫笼中开始实验, 每实验组重复 3 次。在卵接种后第 3 天 (3 龄幼虫) 随机挑选养虫盒内 8 头幼虫, 测量每头幼虫的体长、体重并放回养虫盒; 当幼虫进入预蛹后 (一般为接卵后第 5 天), 从养虫盒内挑取预蛹 12 头分别放入养虫瓶中单头单瓶饲养并编号, 期间养虫瓶内家蝇发育至成虫后需于瓶内放入沾有 10% 奶粉水的棉球作为成虫营养供给, 并根据单头单瓶饲养的家蝇发育情况统计家蝇发育历期。

另待养虫盒内饲养的家蝇幼虫化蛹后, 随机挑取 8 头蛹, 测量记录每头蛹的体长、体重并放回; 待养虫盒内有家蝇羽化后, 将盒口纱布打开将家蝇释放入养虫笼, 并随机挑取 8 头成虫放入 -20℃ 冰柜 10 min 进行处死, 测量每头成虫的体长、体重, 剩余成虫依旧在笼内饲养至自然死亡。并根据养虫盒和养虫瓶内所有家蝇的整体化蛹和羽化情况, 统计化蛹率、羽化率和性比。

此外, 本实验中由于家蝇初孵幼虫过小且有钻入潮湿饲料内的习性, 难以对家蝇卵孵化率进行观察, 故本研究视各组饲料喂养下家蝇的卵孵化率均为 1, 则家蝇总存活率 = 1 × 化蛹率 × 羽化率。

1.7 数据统计

利用 Excel 2016 对实验中所得到的数据进行数据整理及绘图, 各处理相关指标数据均以平均数 ± 标准差表示。利用 SPSS Statistics 18.0 对数据

采用 Duncan 氏新复极差法在显著性水平 0.05 的条件下进行单因素方差分析。

2 结果与分析

2.1 3 种饲料不同处理条件下粗蛋白、粗脂肪和总糖的含量变化

根据 3 种饲料在不同处理条件下粗蛋白、粗脂肪、总糖的测定结果显示 (图 1 ~ 图 3), 跟秸秆饲料相比, 麦麸的粗蛋白、粗脂肪和总糖含量最高, 而在高粱秸秆和小麦秸秆中, 又以高粱秸秆的营养成分较高, 其粗蛋白和总糖含量都要高于小麦秸秆。而 3 种饲料在不同处理条件下, 对照组、发酵组和家蝇幼虫取食组中饲料粗蛋白、粗脂肪、总糖的含量则均呈现对照组 > 发酵组 > 家蝇取食组的趋势, 此外仅高粱秸秆饲养条件下发酵组和幼虫取食组相比粗蛋白的含量无显著差异, 余下各组均差异显著 ($P < 0.05$)。由此说明, 饲料环境中存在的微生物可使饲料当中的营养成分初步降解, 而家蝇幼虫的取食则可以使饲料中营养成分的降解加剧。

2.2 3 种饲料不同处理条件下纤维素、半纤维素和木质素含量变化

通过测定 3 种饲料在不同处理条件下纤维素、半纤维素、木质素的含量结果进行分析 (图 4 ~ 图 6), 3 种饲料未做任何处理下 (对照组) 的木质纤维素总含量呈现小麦秸秆 > 高粱秸秆 > 麦麸的趋势, 其中纤维素含量比较丰富的为麦秸秆和高

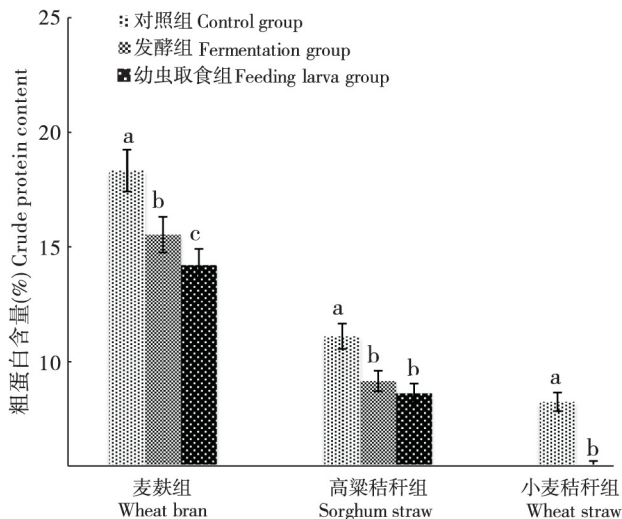


图1 3种饲料不同处理条件下粗蛋白的含量比较

Fig. 1 Comparison of crude protein content in 3 feeds under different treatments

注: 图上标有不同小写字母表示处理间有显著差异 ($P < 0.05$)。下图同。Note: Different lowercase letters indicate significant difference for date in the same column group at $P < 0.05$ level. The same below.

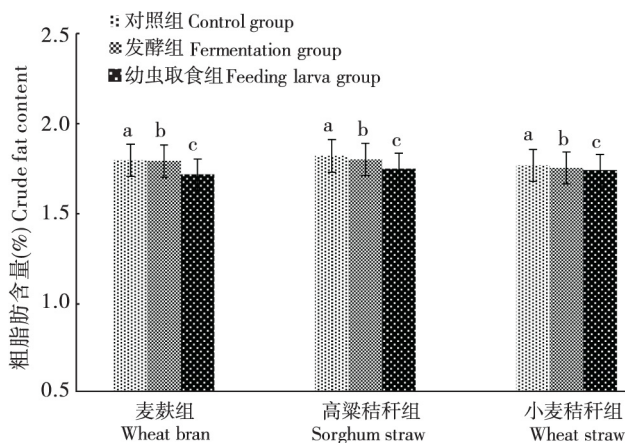


图2 3种饲料不同处理条件下粗脂肪的含量比较

Fig. 2 Comparison of crude fat content in 3 feeds under different treatments

梁秸秆, 半纤维素含量最丰富的为麦麸, 而木质素含量在3种饲料中基本相当。将3种饲料均采用未处理(空白对照)、单纯发酵和发酵后饲喂家蝇, 结果表明各种饲料经处理后其纤维素、半纤维素和木质素含量在对照组、发酵组和幼虫取食组中具有明显差异 ($P < 0.05$), 且均呈现对照组 > 发酵组 > 家蝇取食组的趋势, 由此说明, 家蝇幼虫对木质纤维素各成分的降解程度要优于单纯的微生物发酵。

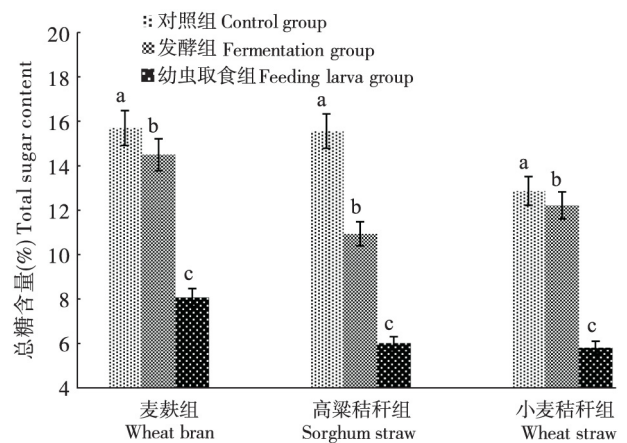


图3 3种饲料不同处理条件下总糖的含量比较

Fig. 3 Comparison of total sugar content in 3 feeds under different treatments

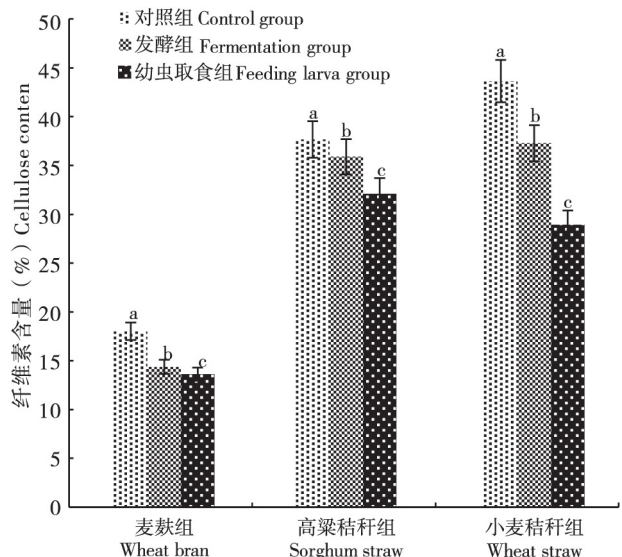


图4 3种饲料不同处理条件下纤维素的含量比较

Fig. 4 Comparison of cellulose content in 3 feeds under different treatments

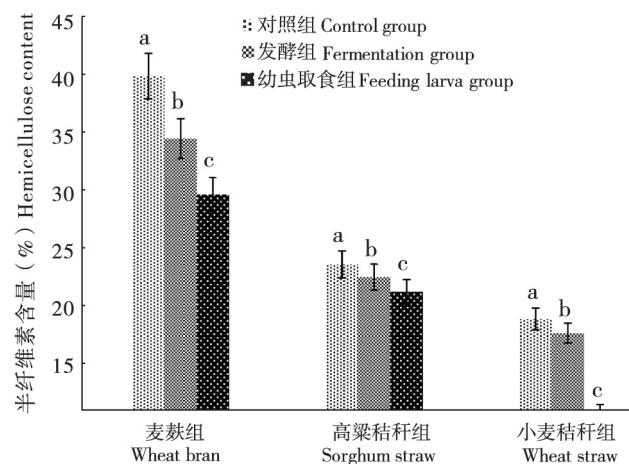


图5 3种饲料不同处理条件下半纤维素的含量比较

Fig. 5 Comparison of hemicellulose content in 3 feeds under different treatments

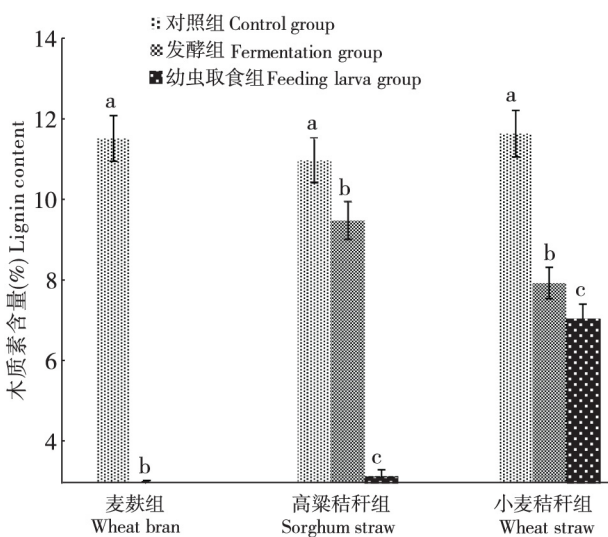


图 6 3 种饲料不同处理条件下木质素的含量比较
Fig. 6 Comparison of lignin content in 3 feeds under different treatments

2.3 不同配比饲料对家蝇生长发育的影响

使用高粱秸秆和麦秸秆按照不同配比饲养家蝇，高粱秸秆的饲养效果要优于麦秸秆的饲养效果。其中，当饲料中不添加菜籽饼时：秸秆喂养的家蝇其各虫态体长、幼虫和成虫体重都要显著 ($P < 0.05$) 低于麦麸饲养的家蝇；在相同秸秆配比条件下，高粱秸秆饲喂的家蝇其各虫态体长、体重、总存活率和发育历期均要优于麦秸秆喂养的家蝇，且在幼虫和蛹的体长、蛹重方面差异显著 ($P < 0.05$)；70% 高粱秸秆喂养时家蝇存活率和发育历期较麦麸饲养无显著差异 ($P > 0.05$)，而 70% 小麦秸秆喂养时家蝇存活率和发育历期较麦麸饲养存在显著差异 ($P < 0.05$)，当麦秸秆添加至 90% 时，家蝇则无法存活（表 2、表 3）。在秸秆含量相同的饲料中，适当添加菜籽饼，可提高家蝇各发育阶段的体长、体重、存活率，缩短其发育历期。

表 2 不同配比饲料处理对家蝇各虫态体长、体重的影响

Table 2 Effects of different feeds on body length and body weight of *Musca domestica*

不同配比饲料 Feeds of different proportion	3 龄幼虫 体长 (mm) 3 rd instar larva length	蛹体长 (mm) Pupa length	成虫体长 (mm) Adult length	3 龄体重 (mg) 3 rd instar larva weight	蛹体重 (mg) Pupa weight	成虫体重 (mg) Adult weight
纯麦麸 WB	11.44 ± 0.15 a	6.23 ± 0.012 a	8.71 ± 0.20 a	29.83 ± 0.32 a	21.53 ± 0.31 a	18.20 ± 0.27 a
高粱秸秆: 麦麸: 菜籽饼 = 7: 2: 1 SS: WB: RSC = 7: 2: 1	10.93 ± 0.18 b	6.18 ± 0.15 ab	8.52 ± 0.33 a	29.30 ± 0.46 a	20.87 ± 0.51 ab	17.90 ± 0.46 a
高粱秸秆: 麦麸 = 7: 3 SS: WB = 7: 3	10.58 ± 0.24 bc	5.93 ± 0.27 b	6.51 ± 0.13 b	28.40 ± 0.30 b	21.00 ± 0.56 ab	14.77 ± 0.50 b
纯高粱秸秆 SS	10.15 ± 0.05 c	6.14 ± 0.06 ab	6.34 ± 0.06 b	28.60 ± 0.26 b	20.47 ± 0.15 bc	14.00 ± 0.79 b
小麦秸秆: 麦麸: 菜籽饼 = 7: 2: 1 WS: WB: RSC = 7: 2: 1	10.53 ± 0.22 bc	6.16 ± 0.21 ab	6.39 ± 0.22 b	28.50 ± 0.40 b	20.73 ± 0.15 b	12.40 ± 0.35 c
小麦秸秆: 麦麸 = 7: 3 WS: WB = 7: 3	9.39 ± 0.32 d	5.59 ± 0.02 c	6.45 ± 0.05 b	28.30 ± 0.27 b	19.83 ± 0.42 c	14.60 ± 0.17 b
小麦秸秆: 麦麸 = 9: 1 WS: WB = 9: 1	—	—	—	—	—	—

注: 表中数据为平均值 ± 标准差, 纵列无相同字母表示差异显著 ($P < 0.05$); WB, 麦麸; SS, 高粱秸秆; WS, 小麦秸秆; RSC, 菜籽饼。下表同。Note: Data were means ± SD, and followed by the same lowercase letters in the same column indicated no significant difference at 0.05 level; WB, Wheat bran; SS, Sorghum straw; WS, Wheat straw; RSC, Rape seed cake. The same below.

表 3 不同配比饲料处理对家蝇化蛹率、羽化率、存活率、发育历期和雌雄比的影响
Table 3 Effects of different feeds on pupation rate , eclosion rate , survival rate , developmental duration , and male-to-female ratio of *Musca domestica*

不同配比饲料 Feeds of different proportion	化蛹率 (%) Pupation rate	羽化率 (%) Eclosion rate	存活率 (%) Survival rate	发育历期 (d) Developmental duration	雌雄比 Female-male ratio
纯麦麸 WB	96. 67 ± 0. 03 a	96. 57 ± 0. 00 a	96. 67 ± 0. 03 a	33. 6 ± 2. 52 a	1 : 1
高粱秸秆: 麦麸: 菜籽饼 = 7 : 2 : 1 SS: WB: RSC = 7 : 2 : 1	97. 80 ± 0. 02 a	91. 60 ± 0. 04 a	93. 33 ± 0. 07 ab	35. 3 ± 1. 72 ab	1 : 1
高粱秸秆: 麦麸 = 7 : 3 SS: WB = 7 : 3	93. 33 ± 0. 06 a	93. 60 ± 0. 02 a	94. 77 ± 0. 05 ab	36. 1 ± 1. 37 abc	1 : 1
纯高粱秸秆 SS	93. 33 ± 0. 03 a	91. 97 ± 0. 02 a	91. 10 ± 0. 04 ab	36. 9 ± 1. 46 bc	1 : 1
小麦秸秆: 麦麸: 菜籽饼 = 7 : 2 : 1 WS: WB: RSC = 7 : 2 : 1	96. 67 ± 0. 03 a	93. 10 ± 0. 00 a	90. 00 ± 0. 03 ab	37. 4 ± 1. 70 bc	1 : 1
小麦秸秆: 麦麸 = 7 : 3 WS: WB = 7 : 3	92. 23 ± 0. 08 a	93. 03 ± 0. 03 a	85. 57 ± 0. 05 b	38. 8 ± 1. 36 c	1 : 1
小麦秸秆: 麦麸 = 9 : 1 WS: WB = 9 : 1	-	-	-	-	-

3 结论与讨论

我国是世界上秸秆产量最多的国家，秸秆作为丰富的生物质能源，一直以来都存在转化难、利用率低等问题，这也成为了限制其资源化循环利用的主要瓶颈（张晓旭等，2018）。家蝇为腐食性昆虫，生活周期短、繁殖力旺盛、易于规模化饲养。利用家蝇幼虫作为生物转化器降解秸秆，一方面可以提高秸秆降解效率，改善农业环境，另一方面还可获得更多动物蛋白，从而提高秸秆的资源化利用价值（Moon *et al.* , 2001; Zhang *et al.* , 2012）。

小麦秸秆和高粱秸秆均为我国传统农业有机废弃物，资源丰富但不易转化利用。本研究以小麦秸秆和高粱秸秆为饲料，通过分别对其进行不同处理后喂养家蝇，一方面对代谢后的营养和秸秆化学成分进行检测，另一方面探究了不同配比的秸秆饲料对家蝇生长发育的影响，旨在探明家蝇对不同秸秆的降解情况，并明确更适于利用家蝇来降解的秸秆种类和秸秆饲料最大配比浓度，从而为今后规模化利用家蝇来降解秸秆类有机废弃物提供重要的数据参考和理论支撑。

通过上述研究结果表明，一般营养成分（粗

蛋白和总糖）方面，常规家蝇饲料麦麸（对照组）的营养成分 > 高粱秸秆 > 小麦秸秆；木质纤维素总体含量方面，小麦秸秆 > 高粱秸秆 > 麦麸；另外，各饲料处理组中粗蛋白、粗脂肪、总糖、纤维素、半纤维素、木质素的含量，均呈现为未发酵组 > 发酵组 > 家蝇取食组的趋势，且除高粱秸秆组粗蛋白外其余成份各组间均差异显著。由此说明微生物发酵过程可消耗秸秆饲料的营养物质，并可促进秸秆木质纤维素的降解，而家蝇取食除可通过自身对秸秆营养物质的消耗生产附加值较高的动物蛋白产品，还可更大程度的显著降解木质纤维素。本结论与刘颖等（2017）研究结果存在差异，刘颖等研究发现，小麦秸秆粗蛋白和可溶性糖的含量发酵组 > 未发酵组，而纤维素、半纤维素、木质素的含量则家蝇取食组 > 发酵组。此外，彭宇等（1996）曾报道家蝇幼虫生长发育阶段所需的能量营养物质主要由糖类供应，由此说明从营养成分上看，本研究中高粱秸秆较小麦秸秆更适于家蝇幼虫的生长发育。

在不同配比秸秆饲料对家蝇生长发育的影响方面，本研究发现秸秆配比相同的条件下，高粱秸秆喂养的家蝇各虫态体长、体重、总存活率和发育历期均要优于麦秸秆喂养，再次说明高粱秸秆更适于家蝇的饲养；此外，在秸秆含量相同的

饲料中,适当添加菜籽饼,可提高家蝇各发育阶段的体长、体重、存活率,延长其发育历期,说明菜籽饼能够给家蝇提供更多营养物质需求,对其生长发育有着显著影响;而当饲料中小麦秸秆添加至90%时,家蝇幼虫无法进行正常的生长发育繁殖,这可能与麦秸秆粗蛋白、总糖等营养成分的含量不高有关,从而影响了家蝇幼虫正常生长繁殖;总体来说,秸秆营养条件虽较麦麸匮乏,导致幼虫期、蛹期延长,成虫期缩短,羽化率及体重下降,但高粱秸秆饲养条件下家蝇生长均要优于麦秸秆,甚至在纯高粱秸秆喂养条件下,其化蛹率、羽化率和存活率等重要指标均与麦麸饲养无显著差异,说明纯高粱秸秆喂养下家蝇仍能保持正常的生长发育,故适于将家蝇作为生物转化器用于秸秆尤其是高粱秸秆的产业化降解。

综上所述,本文研究结果表明,一方面家蝇不仅可以通过对秸秆营养物质的取食生产附加值更高的动物蛋白,还可以显著降解秸秆中的木质纤维素,明确了家蝇对秸秆的降解效果;另一方面较麦秸秆,家蝇在纯高粱秸秆饲养下能保持更好的生长发育,更适用于高粱秸秆的规模化生物降解,以上结论为今后规模化利用家蝇来降解秸秆类有机废弃物提供了重要的数据参考和理论支撑。目前,关于家蝇幼虫降解秸秆的分子机制尚不清楚,如何更好的提高家蝇对秸秆木质纤维素的降解率也有待研究,解决这些问题是日后规模化利用家蝇高效生物降解秸秆类生物质能源的关键,也是我国进行农业可持续发展的趋势。

参考文献 (References)

- Bava L, Jucker C, Gision G, et al. Rearing of *Hermetia illucens* on different organic by-products: Influence on growth, waste reduction, and environmental impact [J/OL]. *Animals*, 1-16 [2019-5-29]. <https://doi.org/10.3390/ani9060289>.
- Fischer R, Ostafe R, Twyman RM. Cellulases from insects [J]. *Yellow Biotechnology II*, 2013, 136: 51-64.
- Garvey M, Klose H, Fischer R, et al. Cellulases for biomass degradation: Comparing recombinant cellulase expression platforms [J]. *Trends in Biotechnology*, 2013, 31 (10): 581-593.
- Geng A, Cheng YB, Wang YL, et al. Transcriptome analysis of the digestive system of a wood-feeding termite (*Coptotermes formosanus*) revealed a unique mechanism for effective biomass degradation [J/OL]. *Biotechnology for Biofuels*, 1-14 [2018-2-3]. <https://doi.org/10.1186/s13068-018-1015-1>.
- He ZB, Qian J, Wang ZY, et al. Effects of ultrasound pretreatment on eucalyptus thermal decomposition characteristics as determined by thermogravimetric, differential scanning calorimetry, and fourier transform infrared analysis [J]. *ACS Omega*, 2018, 3 (6): 6611-6616.
- Huang X. Experimental Study on Degrading Lignocellulosic Materials Contained in Excess Sludge by White-rot Fungi [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2015. [黄鑫. 白腐真菌降解剩余污泥木质纤维素实验研究 [D]. 北京: 北京建筑大学硕士论文, 2015]
- Hu R, Zhang S, Wu JW, et al. Tissue localization and expression difference of endogenous β -glucosidase in digestive system of *Musca domestica* third instar larvae [J]. *Chinese Journal of Parasitology and Parasitic Diseases*, 2013, 31 (4): 256-261. [胡蓉, 张姝, 吴建伟, 等. 家蝇 III 龄幼虫消化系统内源性 β -葡萄糖苷酶的组织定位和表达差异研究 [J]. 中国寄生虫学与寄生虫病杂志, 2013, 31 (4): 256-261]
- Kumar R, Mago G, Balan V, et al. Physical and chemical characterizations of corn stover and poplar solids resulting from leading pretreatment technologies [J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100 (17): 3948-3962.
- Kumar R, Singh S, Singh OV. Bioconversion of lignocellulosic biomass: Biochemical and molecular perspectives [J]. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 2008, 35 (5): 377-391.
- Li HJ. The Mechanism of Lignocellulose Degradation in the Mutualism System of *Odontotermes formosanus* and Associated Microorganism [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017. [李鸿杰. 黑翅土白蚁及其微生物协同降解木质纤维素机制研究 [D]. 杭州: 浙江大学博士论文, 2017]
- Liu WJ, Pan W, Ren LH. Study the determination of cellulose, hemicellulose and lignin in feed by FIBERTEC 2010 semi-automatic fiber analyzer [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2013, 28 (7): 722-726. [刘文静, 潘葳, 任丽花. FIBERTEC 2010 半自动纤维分析仪测定饲料中纤维素、半纤维素、木质素的方法研究 [J]. 福建农业学报, 2013, 28 (7): 722-726]
- Liu Y, Qi XW, Li ZH, et al. Effects of three fermented crop straws on mass rearing of *Musca domestica* (Diptera: Muscidae) [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2017, 36 (1): 55-60. [刘颖, 漆学伟, 李志豪, 等. 3 种作物秸秆发酵后对家蝇的饲养效果 [J]. 华中农业大学学报, 2017, 36 (1): 55-60]
- Liu Y, Guo LJ, Wang LY, et al. Irradiation pretreatment facilitates the achievement of high total sugars concentration from lignocellulose biomass [J]. *Bioresource Technology*, 2017, 232: 270-277.
- Luo CB, Li YQ, Chen Y, et al. Degradation of bamboo lignocellulose by bamboo snout beetle *Cyrtotrachelus buqueti* in vivo and vitro: Efficiency and mechanism [J/OL]. *Biotechnology for Biofuels*, 1-14 [2019-4-1]. <https://doi.org/10.1186/s13068-019-1406-y>.
- Luo CB, Li YQ, Liao H, et al. De novo transcriptome assembly of the bamboo snout beetle *Cyrtotrachelus buqueti* reveals ability to degrade lignocellulose of bamboo feedstock [J/OL]. *Biotechnology for Biofuels*, 2-20 [2018-10-27]. <https://doi.org/10.1186/>

- s13068-018-1291-9.
- Martinus JAD, Bart N, Antonius HPW, *et al.* Engineering geobacillus thermodenitrificans to introduce cellulolytic activity; expression of native and heterologous cellulase genes [J/OL]. *BMC Biotechnology*, 1-13 [2018-6-27]. <https://doi.org/10.1186/s12896-018-0453-y>.
- Miller GL. Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar [J]. *Analytical Chemistry*, 1959, 31 (3): 426-428.
- Moon RD, Hinton JL, Rourke SD, *et al.* Nutritional value of fresh and composted poultry manure for house fly (Diptera: Muscidae) larvae [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2001, 94 (5): 1308-1317.
- Peng Y, Zhong CZ, Lei CL. Study on rearing housefly larvae in the diets treated with different ways [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 1996, 15 (5): 431-436. [彭宇, 钟昌珍, 雷朝亮. 不同处理的饲料饲养家蝇幼虫的研究 [J]. 华中农业大学学报, 1996, 15 (5): 431-436]
- Peterson BF, Scharf ME. Metatranscriptome analysis reveals bacterial symbiont contributions to lower termite physiology and potential immune functions [J/OL]. *BMC Genomics*, 1-12 [2016-10-1]. <https://doi.org/10.1186/s12864-016-3126-z>.
- Ruan CQ, Li T, Liu B, *et al.* Isolation and identification of bacteria harbored inside *Tenebrio molitor* L. and determination of their activity of decomposing starch, cellulose and lignin [J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2018, 9 (21): 5688-5693. [阮传清, 李涛, 刘波, 等. 黄粉虫内生菌的分离鉴定及其对淀粉、纤维素和木质素的降解活性的测定 [J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9 (21): 5688-5693]
- Russell JB, Muck RE, Weimer PJ. Quantitative analysis of cellulose degradation and growth of cellulolytic bacteria in the rumen [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2009, 67 (2): 183-197.
- Sarkar N, Ghosh SK, Bannerjee S, *et al.* Bioethanol production from agricultural wastes: An overview [J]. *Renewable Energy*, 2012, 37 (1): 19-27.
- Vanneste J, Ennaert T, Vanhulsel A, *et al.* Unconventional pretreatment of lignocellulose with low-temperature plasma [J]. *Chemosphere*, 2017, 10 (1): 14-31.
- Veluchamy C, Raju VW, Kalamdhad AS. Electrohydrolysis pretreatment for enhanced methane production from lignocellulose waste pulp and paper mill sludge and its kinetics [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 252: 52-58.
- Watanabe H, Tokuda G. Cellulolytic systems in insects [J]. *Annual Review of Entomology*, 2010, 55 (1): 609-632.
- Wilson DB. Microbial diversity of cellulose hydrolysis [J]. *Current Opinion in Microbiology*, 2011, 14 (3): 259-263.
- Wu JW, Guo G, Xu N. Methods of treating distillers' grains of Luzhou-flavor liquor by using maggots as resources [P]. China: ZL 201 210 252 105.7. 2014-01-29. [吴建伟, 国果, 徐楠. 蝇蛆资源化处理浓香型白酒丢糟的方法 [P]. 中国: ZL 201 210 252 105.7. 2014-01-29]
- Wu JW, Guo G, Xu N. Methods of treating distillers' grains of Maotai-flavour liquor by using *Musca domestica* [P]. China: ZL 201 210 260 936.9. 2014-04-16. [吴建伟, 国果, 徐楠. 家蝇繁殖生态转化处理酱香型白酒丢糟的方法 [P]. 中国: ZL 201 210 260 936.9. 2014-04-16]
- Wong LJ, Hng PS, Wong SY, *et al.* Termites igestomes as a potential source of symbiotic microbiota for lignocelluloses degradation: A review [J]. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 2014, 17 (8): 965-963.
- Xie RR, Sun JZ, Geng AL, *et al.* Natural biological systems in the efficient conversion of biomass utilization of scientific value and application prospect [J]. *Biotechnology & Business*, 2015, 2: 32-40. [谢蓉蓉, 孙建中, 耿阿蕾, 等. 自然生物系统在生物质高效转化利用中的科学价值与应用前景 [J]. 生物产业技术, 2015, 2: 32-40]
- Yang YN, Chen YS, Yang M. Methane production from anaerobic fermentation of straw enhanced by biological pretreatment with white-rot fungi [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26 (5): 1968-1972. [杨玉楠, 陈亚松, 杨敏. 利用白腐菌生物预处理强化秸秆发酵产甲烷研究 [J]. 农业环境科学学报, 2007, 26 (5): 1968-1972]
- Zhang S, Hu R, Wu JW, *et al.* Analysis on the components and enzymatic activity of cellulase in digestive organs from *Musca domestica* larvae [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2013, 35 (1): 55-60. [张姝, 胡蓉, 吴建伟, 等. 家蝇幼虫消化器官中纤维素酶的组成及酶活性分析 [J]. 环境昆虫学报, 2013, 35 (1): 55-60]
- Zhang XX, Chen FS, Xin Y, *et al.* Research progress of cellulose pretreatment technology [J]. *Cereals and Oils*, 2018, 31 (6): 7-10. [张晓旭, 陈复生, 辛颖, 等. 纤维素预处理技术的研究进展 [J]. 粮食与油脂, 2018, 31 (6): 7-10]
- Zhang ZJ, Wang H, Zhu J, *et al.* Swine manure vermicomposting via housefly larvae (*Musca domestica*): The dynamics of biochemical and microbial features [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 118: 563-571.