



沈礼晨, 叶小梅, 孔祥平, 王聪, 王莉, 奚永兰, 韩挺, 张应鹏, 李福鹏, 朱飞, 杜静. 不同投料方式对黑水虻幼虫生长性能的影响[J]. 环境昆虫学报, 2022, 44 (5): 1271–1277.

不同投料方式对黑水虻幼虫生长性能的影响

沈礼晨^{1,2}, 叶小梅^{1,2}, 孔祥平², 王 聪², 王 莉², 奚永兰^{1,2},
韩 挺², 张应鹏², 李福鹏², 朱 飞², 杜 静^{1,2*}

(1. 江苏大学农业工程学院, 江苏镇江 212013; 2. 江苏省农业科学院畜牧研究所, 农业农村部种养结合重点实验室, 农业农村部农村可再生能源开发利用华东科学观测实验站, 江苏省有机固体废弃物资源化协同创新中心, 南京 210014)

摘要: 以获得黑水虻 *Hermetia illucens* 转化有机废弃物的养殖投喂工艺参数为目标, 采用实验室小试模拟试验, 以餐厨垃圾为试验原料, 研究不同投料方式 (1 次、2 次、3 次和 4 次投料) 对黑水虻转化餐厨垃圾过程中幼虫生长性能的影响。结果表明, 采用多次投料方式, 随着投料次数增加, 对转化物料温度波动影响较大, 不利于幼虫快速生长; 在投虫量和投料量相同条件下, 养殖周期为 10 d, 其中以 1 次投料处理组的收虫体重、体长、单位面积虫产量为最高, 料虫比为最低, 与 2 次投料差异不显著 ($P > 0.05$), 但与 3 次、4 次投料处理组差异显著 ($P < 0.05$); 黑水虻转化废弃物前期较低的物料含水率更加有利于虫体生长, 而后期物料含水率较高则更为有利。通过生产性能分析发现, 从投料回报效果角度考虑生产性能以 1 次投料为最佳, 而从高效率处理餐厨垃圾和投料回报效果两者角度综合分析, 生产性能以 2 次投料为最佳。该结果可为构建黑水虻转化餐厨垃圾标准化生产工艺参数技术体系奠定基础。

关键词: 黑水虻; 投料方式; 多次投料; 幼虫; 生长性能

中图分类号: Q968.1; S89

文献标识码: A

文章编号: 1674-0858 (2022) 05-1271-07

Effect of different feeding methods on the growth performance of black soldier fly, *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae)

SHEN Li-Chen^{1,2}, YE Xiao-Mei^{1,2}, KONG Xiang-Ping², WANG Cong², WANG Li², XI Yong-Lan^{1,2}, HAN Ting², ZHANG Ying-Peng², LI Fu-Peng², ZHU Fei², DU Jing^{1,2*} (1. Institute of Agricultural Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu Province, China; 2. Institute of Livestock Research, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences; Key Laboratory of Crop and Livestock Integration, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; East China Scientific Observing and Experimental Station of Development and Utilization of Rural Renewable Energy, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; Jiangsu Collaborative Innovation Center for Solid Organic Waste Resource Utilization, Nanjing 210014, China)

Abstract: The effect of various feeding methods (1, 2, 3 and 4 times) on the larvae growth performance during the transformation of black soldier fly was evaluated using laboratory simulation tests and kitchen waste as the raw material to determine the breeding process optimization parameters for black soldier fly

基金项目: 江苏省农业科技自主创新资金 [CX (21) 1008]

作者简介: 沈礼晨, 男, 硕士研究生, 主要研究方向为黑水虻转化有机废弃物智能化装备及匹配养殖工艺技术, E-mail: 94099725@qq.com

* 通讯作者 Author for correspondence: 杜静, 男, 工程博士, 副研究员, 主要研究方向为有机废弃物昆虫转化及循环利用模式, E-mail: dj1982111@126.com

收稿日期 Received: 2021-06-08; 接受日期 Accepted: 2021-12-31

into organic waste. The results revealed that as the feeding times increased, the temperature variation of the changed material was considerably affected, which was detrimental for larval growth. The breeding period was 10 days, during which the yield per unit area was maximum and the feed ratio was lowest ($P > 0.05$), although the difference was significant ($P < 0.05$) under the same feeding quantity of larvae and kitchen garbage. The earlier stage of the low material's moisture content was more advantageous to the formation of the insect body, but the later stage of the high material's moisture content was more favorable. From the perspective of material feeding return benefits, the production performance was best with one feeding time, whereas the best production performance was two feeding times taking into account the large amount of kitchen waste treatment and good feeding return effect comprehensive analysis. The result could be used to build a standardized production technical parameter system for the transformation of kitchen trash by black soldier fly.

Key words: Black soldier fly; feeding methods; multiple feeding; larvae; growth performance

随着我国人口、经济的快速增长,餐厨垃圾产生量急剧增长。2014 年以来我国厨余垃圾的年产量超过 6 000 万吨,并以每年 10% 的比例增长,2019 年我国餐厨垃圾产生量已突破 1.2 亿吨(安新城等, 2010; 安新城, 2016; 常燕青等, 2021)。餐厨垃圾的高含水率、高油脂、高有机质等特点,使得它具有“危害性”和“资源性”的双重属性。面临环境与资源的双重压力,餐厨垃圾的资源化利用是我国当前面临的迫切问题,也是社会广泛关注的问题(Bondari and Canale, 1981; Beneli *et al.*, 2014; Beskin *et al.*, 2018)。餐厨垃圾主要资源化利用途径有能源化(厌氧消化)、肥料化(好氧堆肥)与饲料化(昆虫蛋白)(柴志强和朱彦光, 2016; 龙云等, 2016; 陈美珠, 2017; Cai *et al.*, 2018)。厌氧消化与好氧堆肥均存在技术运营成本高、产出附加值低,主要依靠政府补贴来维持运行。因此,研究开发经济效益高,兼顾处理效率、环境友好和生物安全的餐厨垃圾资源化处理技术成为亟待解决的产业问题。

餐厨垃圾昆虫转化技术一种以资源化为导向的生物转化方法,通过食物链方法,将餐厨垃圾转化为其他生物种类的营养物质,不仅成本经济,而且有效杜绝了同源性污染的问题。目前行业内已陆续将蚯蚓、蝇类、黑水虻 *Hermetion illucens*、黄粉虫 *Tenebrio molitor* 等作为餐厨垃圾处理的媒介昆虫,其中黑水虻的生物学特性表现得尤其突出,具有食谱宽、取食量大、发育周期较短、环境安全性高以及可耐受餐厨垃圾高盐、高含水率和高油脂处理弊端等优势,同时经转化后产品可作为高价值的饲料蛋白,经济效益高,已成为餐厨垃

圾处理的新兴产业(Erickson *et al.*, 2004; Diener *et al.*, 2011; Choi and Zhang, 2014; Cutrignelli *et al.*, 2018)。

目前我国利用黑水虻生物转化餐厨垃圾主要以粗放的地养模式和层叠式盒养模式为主,但这两种方式人工成本较高,不利于经济效益的提升和养殖过程的精准控制。国内已有设备企业开发出了黑水虻自动化养殖成套设备,以期实现黑水虻的全自动养殖,降低人工成本,提高转化效率。然而,目前与之匹配的标准化生产技术参数缺失,智能管控数据不精准,严重限制了产业化的开发与应用(刘宏宇等, 2015)。因此,本研究以获得黑水虻转化餐厨垃圾养殖投喂工艺参数为目标,采用实验室小试模拟试验,研究不同投料方式下黑水虻转化餐厨垃圾对幼虫生长特性和生产性能的影响,以期构建标准化生产工艺参数技术体系奠定基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试餐厨垃圾取自南京某环保科技有限公司,经粉碎、匀浆且去除粗渣后的浆料,含水率为 $82.58\% \pm 1.26\%$ 。黑水虻幼虫转化试验在江苏省农业科学院内有机废弃物昆虫转化试验基地进行,养殖环境温度 $26 \pm 1^\circ\text{C}$,相对湿度 $70\% \pm 2\%$ 。供试黑水虻虫卵来自自建黑水虻成虫房中自产虫卵。幼虫转化试验采用盒养方式,养殖盒规格为: $37\text{ cm} \times 26.5\text{ cm} \times 14\text{ cm}$,底面积约 0.1 m^2 。

1.2 试验虫卵孵化及育雏

将黑水虻虫卵置于温湿度培养箱(型号 LRH-

250-SE, 广东泰宏君) 内孵化, 箱内设定温度 30℃, 相对湿度 80%。孵化后使用纯麦麸作为黑水虻初孵幼虫饲料 (调节含水率 60% ~ 65%), 将育雏饲养盒置于人工气候箱 (型号 RXZ, 宁波江南, 温度 28℃, 相对湿度 65%) 连续饲喂 4 d 得到 4 日龄幼虫, 备用于后续餐厨垃圾转化试验。

1.3 试验设计

试验设置 4 个处理组, 分别为 1 次投料、2 次投料、3 次投料和 4 次投料。每个处理设置 3 个重复, 初始投放幼虫体重为 4.44 ± 0.12 mg/头, 单个养殖盒投虫量为 6 000 头, 整个试验周期餐厨浆

料投放量为 6 kg。各处理组分批次投料情况见表 1, 其中第 1 次投放餐厨浆料量与 690 g 稻壳粉混合均匀, 作为初始养殖饲料, 即调节 1 次投料处理组的初始物料含水率为 75%, 其余处理组为 65%。

采用温度记录仪 (型号 I100-E2T, 玉环智拓) 实时记录料温及环境温度, 试验第 96、144、192 和 240 h 随机采集幼虫样品测定平均体长 (30 头/盒, 3 次) 和平均体重 (10 头/盒, 3 次), 试验第 48、96、144、192、216 和 240 h 测定各养殖盒中物料减重情况。

表 1 不同投料方式下分批次投料表
Table 1 Table of batch feeding quantity for different feeding modes

投料方式 Feeding modes of processing group	餐厨浆料投放总量 (g) Total amount of kitchen slurry	分批次投料量构成 (g) Composition of batch feeding quantity			
		第 1 次 First	第 2 次 Second	第 3 次 Third	第 4 次 Fourth
1 次投料 One-time feeding	6 000	6 000			
2 次投料 Feed in twice	6 000	2 500	3 500		
3 次投料 Feed in 3 times	6 000	2 500	2 000	1 500	
4 次投料 Feed in 4 times	6 000	2 500	2 000	1 200	300

1.4 测试指标及方法

平均体重采用随机称取 30 头不同生长期黑水虻幼虫体重, 并折算单头幼虫重量, 以 mg/头为单位; 平均体长采用随机测量 10 头不同生长期黑水虻幼虫的体长, 并折算平均值, 以 mm/头为单位; 单位面积幼虫产量 = 收虫分离新鲜幼虫体重/收虫面积; 料虫比 = 餐厨垃圾浆料量/收虫幼虫重量 (代发文等, 2019)。

2 结果与分析

2.1 料温变化规律

料温变化是黑水虻转化有机废弃物过程中重要的性能指标。研究表明, 黑水虻幼虫适宜的温度范围为 30 ~ 38℃, 正常生长的温度上限为 43℃ (姬越等, 2017; 张铭杰, 2019)。料温过低, 容易导致幼虫不工作或活力降低, 而料温过高则容易导致幼虫灼伤甚至死亡。因此, 料温变化规律监测有助于反映有机废弃物转化过程中黑水虻幼虫活力状况和物料转化效率。

在不同投料方式下黑水虻转化餐厨垃圾试验

周期内, 环境温度处于 22 ~ 28℃, 在此工况下, 不同投料方式间料温变化规律差异明显, 1 次投料料温变幅较小, 由初始 19℃ 缓慢升高至 30℃, 随后处于 30℃ 处小幅波动, 可能因为 1 次投料处理组物料含水率较高导致料温变化不大; 而 2 次、3 次、4 次投料处理组料温迅速升高, 至试验第 57 h 时料温均达到最高值 48℃, 随后逐渐降低, 且 3 个处理组料温变化无差异, 可能由于 3 个处理组初始物料含水率均调节为 65%, 且加入物料配比完全一致, 可见此参数条件下黑水虻幼虫转化餐厨垃圾重复性效果很好, 试验第 72 h 对 3 个处理组进行第 2 次餐厨浆料, 由于投料量存在差异, 导致料温差异明显, 但总体上都呈现投料后料温先迅速升高然后缓慢降低趋势, 试验第 140 h 对 3 次、4 次投料处理组进行投料作业也表现出类似趋势, 但 4 次投料处理组在第 192 h 最后 1 次投料后料温一直维持于 30℃ 左右, 可能由于临近黑水虻幼虫生长发育后期, 因虫体活力减弱所致 (图 1)。

分析发现, 在投虫量相同条件下, 料温的变化受到物料含水率影响很大, 特别是初始物料含水率偏低, 利于黑水虻初孵幼虫活力启动, 一旦

启动成功有利于物料升温,随着水分蒸发又会加剧料温升高进程,而一旦料温出现高峰并开始回落,可能预示着存在饲料短缺或物料环境不佳等原因导致幼虫活力不佳,这一现象可作为后续自动化投料设备确定最佳投料节点参数的依据。

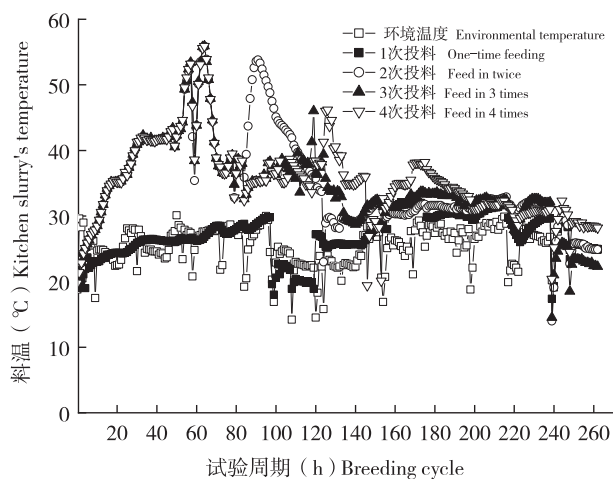


图1 不同投料方式下料温变化规律

Fig. 1 Variation of material temperature under different feeding methods

2.2 黑水虻幼虫生长性能

黑水虻幼虫体长和体重变化是反映黑水虻幼虫生长性能的重要指标。试验结果表明,不同投料方式下幼虫生长的平均体长差异较明显,在试验第96 h时表现为4次投料 $\approx$ 3次投料 $>$ 2次投料 $>$ 1次投料,之后各处理组均表现出线性增长趋势(相关系数 R^2 为0.975~0.994),且斜率 k 值差异明显,表现为1次投料(2.53) $>$ 2次投料(2.22) $>$ 3次投料(1.70) $>$ 4次投料(1.62),至试验结束收虫时,平均体长以1次投料为最大,达20.56 mm,依次高于2次投料(20.27 mm)、3次投料(19.67 mm)和4次投料(19.46 mm)(图2)。结合料温变化规律分析发现,可能由于初始物料含水率较低条件下,初孵幼虫活力更加旺盛,更加有利于幼虫生长,但后续随着不断追加投料,使得物料料温时高时低,且波动较大,对虫体影响较大,而2次投料处理组,可能由于仅补料1次,料温难以形成大幅度波动,使得幼虫体长变化一直以较高速率升高。可见,采用多次投料方式,随着投料次数增加,对料温波动影响较大,从而不利于幼虫生长,因此,建议选用1次或2次投料方式。

不同投料方式下幼虫生长的平均体重差异明显,在试验第96 h时平均体重表现为4次投料 $\approx$ 3次投料 $\approx$ 2次投料 $>$ 1次投料,随后1次投料处理组逐渐与其他处理组缩小差距,并于试验第192 h跃升为最高并直至试验结束;从收虫体重来看,表现为单头幼虫体重以1次投料(234.37 mg) $>$ 2次投料(226.00 mg) $>$ 4次投料(209.04 mg) $>$ 3次投料(203.78 mg)(图3)。值得注意的是,3次和4次投料的幼虫体重峰值为试验第192 h,至收虫时体重有所降低,而1次和2次投料处理组体重峰值位于收虫节点,可能2个处理组因物料含水率偏高,营养摄取吸收效率高,导致后期转化阶段幼虫体重变化较快,而本试验设置48 h的体重监测间隔可能会掩盖掉实际的体重峰值临界点出现时间,因此后续试验中有待改进。结合料温变化规律的分析发现,1次投料处理组因前期料温偏低导致初孵幼虫活力偏弱,从而幼虫体重增幅较小,但进入快速增长期,因料温变幅小且浆料易于吸收,从而幼虫体重增长速率较快,促使幼虫转化后期的体重反而超过其他处理组,其次为2次投料处理组,从另一个侧面也反映出后期养殖饲料呈浆料状态更加有利于黑水虻幼虫转化吸收。

综合黑水虻幼虫体长和体重变化规律分析,黑水虻转化废弃物前期较低的物料含水率更加有利于幼虫生长,而后期在维持料温比较稳定条件下,较高的物料含水率更加有利于黑水虻幼虫的消化吸收和增重进程。

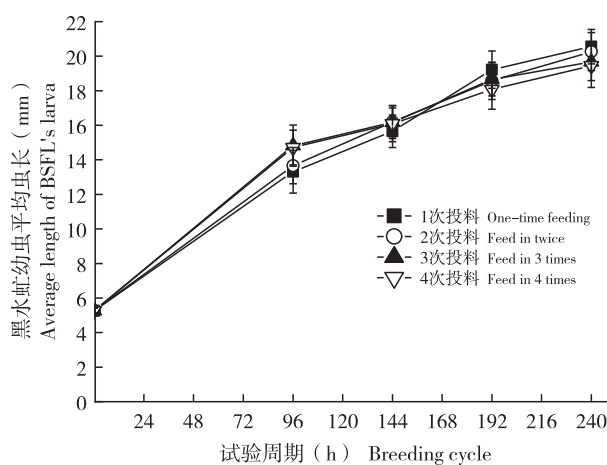


图2 不同投料方式下黑水虻幼虫平均体长变化规律

Fig. 2 Variation of the average length of BSFL under different feeding methods

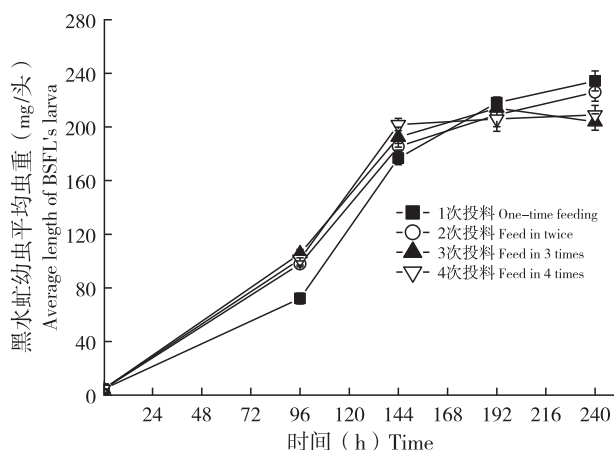


图3 不同投料方式下黑水虻幼虫平均体重变化规律

Fig. 3 Variation of the average weight of BSFL under different feeding methods

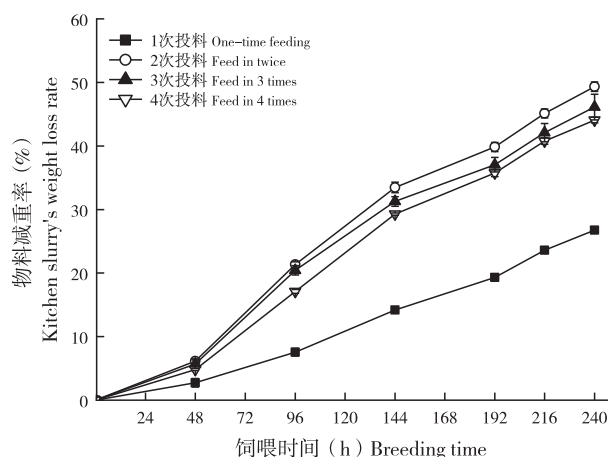


图4 不同投料方式下物料减量率变化规律

Fig. 4 Law of material reduction rate under different feeding methods

2.3 物料减量率变化

物料减量率既可反映黑水虻幼虫处理废弃物的效率, 又可以反映不同处理工艺参数下, 幼虫对废弃物的吸收转化效果。

结果表明, 各处理组物料减重率逐渐升高, 但各阶段增幅有所差异, 以试验 48 ~ 144 h 增幅为最高, 可能由于此阶段处于幼虫生长的快速增长期, 且料温偏高导致水分散失较快所致; 至试验结束时, 以 2 次投料处理组为最高, 达 49.32%, 其次为 3 次投料 (46.12%) 和 4 次投料 (44.08%), 而 1 次投料处理组物料减重率为最低, 仅 26.74% (图 4)。结合料虫比和单位面积虫产量分析, 1 次投料方式下幼虫转化餐厨垃圾的生物转化率较高, 并且 1 次投料料温较低导致水分蒸发有限, 这与收虫时 1 次物料含水率明显高于其他处理组, 且难与虫粪分离的实际工况相符。

2.4 黑水虻转化餐厨垃圾生产性能

生产性能指标通常是多项技术指标的集合, 可以综合反映出不同工艺技术参数条件下所获得的目标效果, 并估算出工厂化养殖工况下该技术的生产性能, 为优选或评估该技术的经济效益和应用可行性提供数据支撑。

根据不同投料方式下黑水虻转化餐厨垃圾的生产性能指标对比分析, 试验以经粉碎磨浆除杂预处理后的浆料饲喂黑水虻幼虫, 在投虫量和投料量相同条件下, 养殖周期为 10 d, 其中以 1 次投料处理组的收虫体重、体长、单位面积虫产量最高, 料虫比最低, 且 1 次投料与 2 次投料处理组各

项指标上差异不显著 ($P > 0.05$), 而 3 次投料和 4 次投料处理组各指标之间同样表现为差异不显著 ($P > 0.05$), 并与 1 次投料和 2 次投料处理组呈现显著差异 ($P < 0.05$) (表 2)。因此, 结合物料减量率分析看, 从投料回报效果角度考虑生产性能以 1 次投料为最佳, 即物料减量率 26.74%, 料虫比 4.28; 从高效率处理餐厨垃圾和投料回报效果两者综合分析, 生产性能以 2 次投料为最佳, 即物料减量率 49.32%, 料虫比 4.48。

3 结论与讨论

本研究通过不同投料方式对黑水虻幼虫生长性能的影响, 归纳出以下 3 个规律。

(1) 采用多次投料方式, 随着投料次数增加, 对料温波动影响较大, 不利于幼虫快速生长;

(2) 黑水虻转化废弃物前期较低的物料含水率更加有利于幼虫生长, 而后期物料含水率较高则更为有利;

(3) 通过生产性能分析发现, 从投料回报效果考虑黑水虻幼虫的生产性能以 1 次投料为最佳, 而从高效率处理餐厨垃圾和投料回报效果两者综合分析, 生产性能以 2 次投料为最佳。

黑水虻幼虫可将各种体积庞大的有机废弃物转化为高附加值产品。采食不同有机废弃物对黑水虻机体组成和转化效率都存在显著影响 (Surendra *et al.*, 2016; Yu *et al.*, 2017; Guo *et al.*, 2021), 比如刘瑜彬等人 (2017) 研究结果

表 2 黑水虻转化餐厨垃圾生产性能

Table 2 Production performance of BSFL transformed into food waste

处理组 Group	接虫规格 (mg/头) Insect specification	餐厨垃圾 浆料用量 (kg/m) Total amount of kitchen slurry	养殖周期 (d) Breeding cycle	收虫体重 (mg/头) Larvae weight	收虫体长 (mm/头) Larvae grow	单位面积 虫产量 (kg/m ²) Pest yield per unit area	料虫比 Feed-to- worm ratio
1 次投料 One-time feeding	4.44 ± 0.12	60	10	234.37 ± 7.44 a	19.22 ± 1.08 a	14.03 ± 0.23 Aa	4.28 ± 0.07 c
2 次投料 Feed in twice	4.44 ± 0.12	60	10	226.00 ± 6.74 ab	18.58 ± 1.08 ab	13.40 ± 0.18 ab	4.48 ± 0.06 bc
3 次投料 Feed in 3 times	4.44 ± 0.12	60	10	203.78 ± 6.15 c	18.66 ± 0.96 ab	12.47 ± 0.47 bc	4.82 ± 0.19 ab
4 次投料 Feed in 4 times	4.44 ± 0.12	60	10	209.04 ± 7.06 bc	18.06 ± 1.15 b	12.29 ± 0.53 c	4.90 ± 0.22 a

注：采用 Duncan 方法分析，同列标有不同大写字母表示组间差异极显著 ($P < 0.01$, $n = 3$)；标有不同小写字母表示组间差异显著 ($P < 0.05$, $n = 3$)。Note: Duncan method was used for analysis. Those with different capital letters in the same column indicated extremely significant differences between groups ($P < 0.01$, $n = 3$); those with different lowercase letters indicated significant differences between groups ($P < 0.05$, $n = 3$).

表明，饲喂猪饲料的黑水虻幼虫体重可达 180 mg/头，养殖周期 14 d，而饲喂中药渣的黑水虻幼虫体重仅 130 mg/头，养殖周期长达 28 d，而本试验饲喂餐厨垃圾浆料的黑水虻幼虫收虫体重高达 234.37 mg/头，养殖周期仅 10 d，表明饲喂营养丰富的餐厨浆料更利于黑水虻幼虫吸收转化，缩短养殖周期，其生产性能明显优于猪饲料和中药渣。以 1 次投料为例，处理 1 吨餐厨垃圾浆料（含水率 82.61%），可获得 234 kg 含水率 65% 左右的新鲜幼虫，按照幼虫市场价（约 4 000 元/吨）估算处理 1 吨餐厨浆料可获得约 936 元收益。此外，黑水虻处理餐厨垃圾浆料后的虫砂还可用于开发高品质有机肥或土壤改良剂。因此，应用黑水虻处理餐厨垃圾浆料具有较高的经济价值和推广潜力。

从投料回报效果角度考虑生产性能以 1 次投料为最佳，而从高效率处理餐厨垃圾和投料回报效果两者综合分析，以 2 次投料处理组的生产性能为最佳。与其他废弃物相比，饲喂营养丰富的餐厨浆料更利于黑水虻幼虫吸收转化，缩短养殖周期。为了获得更好的工厂化运行工艺参数，有必要分别针对 1 次投料和 2 次投料方式，以料温及稳定性、物料减量率、料虫比等为考查指标，通过优化投虫量、初始物料含水率、均匀布料方式、

添加辅料或填充物等措施，获得更高的幼虫增重速度以缩短养殖周期，并提高单位面积的幼虫收获产量，从而降低土地面积投入，提高虫体转化经济效益。

参考文献 (Reference)

- An XC. Technical feasibility analysis of biological disposal of food waste by black soldier fly [J]. *Environment and Sustainable Development*, 2016, 41 (3): 92–94. [安新城. 黑水虻生物处置餐厨废弃物的技术可行性分析 [J]. 环境与可持续发展, 2016, 41 (3): 92–94]
- An XC, Li J, Lv X. Research status of black soldier fly in the treatment of aquaculture waste [J]. *Environmental Science and Technology*, 2010, 33 (3): 113–116. [安新城, 李军, 吕欣. 黑水虻处理养殖废物的研究现状 [J]. 环境科学与技术, 2010, 33 (3): 113–116]
- Benelli G, Canale A, Raspi A, et al. The death scenario of an Italian Renaissance princess can shed light on a zoological dilemma: Did the black soldier fly reach Europe with Columbus [J]. *Journal of Archaeological Science*, 2014, 49 (49): 203–205.
- Beskin KV, Holcomb CD, Cammack JA, et al. Larval digestion of different manure types by the black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) impacts associated volatile emissions [J]. *Waste Management*, 2018, 74: 213–220.
- Bondari K, Sheppard DC. Soldier fly larvae as feed in commercial fish production [J]. *Aquaculture*, 1981, 24 (1/2): 103–109.
- Cai MM, Hu RQ, Zhang K, et al. Resistance of black soldier fly

- (Diptera: Stratiomyidae) larvae to combined heavy metals and potential application in municipal sewage sludge treatment [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25 (2): 1559–1567.
- Chai ZQ, Zhu YG. Application of black soldier fly in food waste disposal [J]. *Environmental Science and Technology*, 2016, 26 (22): 321. [柴志强, 朱彦光. 黑水虻在餐厨垃圾处理中的应用 [J]. 环境科学与技术, 2016, 26 (22): 321]
- Chang YQ, Huang HM, Zhao ZZ, et al. Development prospect of resource treatment and high value utilization technology of food waste [J]. *Environmental Health Engineering*, 2021, 29 (1): 44–51. [常燕青, 黄慧敏, 赵振振, 等. 餐厨垃圾资源化处理与高值化利用技术发展展望 [J]. 环境卫生工程, 2021, 29 (1): 44–51]
- Chen MZ. Technical analysis and application of black soldier fly in treating food and beverage garbage [J]. *Guangdong Science and Technology*, 2017, 26 (11): 59–61. [陈美珠. 黑水虻处理餐饮垃圾的技术分析与应用探讨 [J]. 广东科技, 2017, 26 (11): 59–61]
- Choi WH, Jiang M. Evaluation of antibacterial activity of hexanedioic acid isolated from *Hermetia illucens* larvae [J]. *Journal of Applied Biomedicine*, 2014, 12 (3): 179–189.
- Cuttrignelli MI, Messina M, Tulli F, et al. Evaluation of an insect meal of the black soldier fly (*Hermetia illucens*) as soybean substitute: Intestinal morphometry, enzymatic and microbial activity in laying hens [J]. *Research in Veterinary Science*, 2018, 117: 209–215.
- Dai FW, Ge YK, Liang WC, et al. Study on the production performance of food garbage treated by black soldier fly and the growth and development of larvae [J]. *Pig Industry Watch*, 2019, 2: 81–84. [代发文, 葛远凯, 梁伟才, 等. 黑水虻处理餐厨垃圾生产性能及其幼虫生长发育规律研究 [J]. 猪业观察, 2019, 2: 81–84]
- Diener S, Solano NMS, Gutierrez FR, et al. Biological treatment of municipal organic waste using black soldier fly larvae [J]. *Waste and Biomass Valorization*, 2011, 2 (4): 357–363.
- Erickson MC, Islam M, Sheppard C, et al. Reduction of *Escherichia coli* O157: H7 and *Salmonella enterica* serovar enteritidis in chicken manure by larvae of the black soldier fly [J]. *Journal of Food Protection*, 2004, 67 (4): 685–690.
- Guo HW, Jiang CL, Zhang ZJ, et al. Material flow analysis and life cycle assessment of food waste bioconversion by black soldier fly larvae (*Hermetia illucens* L.) [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 750: 1–10.
- Ji Y, Ren DZ, Ye MQ, et al. Study on suitable temperature under artificial feeding condition of bright spot and flat angle soldier fly [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2017, 39 (2): 390–395. [姬越, 任德珠, 叶明强, 等. 亮斑扁角水虻人工饲养条件下适宜温度的研究 [J]. 环境昆虫学报, 2017, 39 (2): 390–395]
- Liu HY, Yu GH, Xia Q. Research progress of black soldier fly [J]. *Breeding and Feed*, 2015, 12: 4–7. [刘宏宇, 喻国辉, 夏婧. 黑水虻研究进展 [J]. 养殖与饲料, 2015, 12: 4–7]
- Liu YB, Jin X, Ge YZ, et al. Breeding of feeding insect black soldier fly using traditional Chinese medicine residue [J]. *China Feed*, 2017, 5: 38–40, 45. [刘瑜彬, 金鑫, 葛亚中, 等. 利用中药渣养殖饲用昆虫黑水虻 [J]. 中国饲料, 2017, 5: 38–40, 45]
- Long Y, Zhang JW, Zheng YX. Ecological circular agriculture model based on black soldier fly [J]. *Agriculture and Technology*, 2016, 36 (16): 34. [龙云, 张建文, 郑远晓. 基于黑水虻的生态循环农业模式 [J]. 农业与技术, 2016, 36 (16): 34]
- Surendra KC, Robert O, Jeffery T, et al. Bioconversion of organic wastes into biodiesel and animal feed via insect farming [J]. *Renewable Energy*, 2016, 98: 197–202.
- Yu SW, Matan Sheomi. Review of black soldier fly (*Hermetia illucens*) as animal food and human food [J]. *Foods*, 2017, 6: 91.
- Zhang MJ. Study on the Treatment of Rural Perishable Waste with Black Soldier Fly [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019. [张铭杰. 利用黑水虻处理农村易腐垃圾技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2019]