

蝇蛆生物转化餐厨垃圾的效能评估*

江承亮¹ 滕昌运^{1,2} 李敬¹ 朱军⁴ 封代华¹ 楼莉萍¹ 张志剑^{1,3**}

¹浙江大学环境与资源学院 杭州 310058

²杭州吾美环保科技有限公司 杭州 311113

³杭州谷胜农业科技有限公司 杭州 311108

⁴阿肯色大学生物与农业工程学系 美国费耶特维尔 72704

摘要 餐厨垃圾具有资源性和危害性。利用家蝇幼虫(蝇蛆)的食腐性以及生命周期短特性研究餐厨垃圾处理,探究最佳蝇蛆接种量,而后分析此接种量下处理前后堆体的理化指标,并对蝇蛆进行营养评价。结果表明,蝇蛆处理餐厨垃圾的最佳接种量约为13 300只/kg,此接种量下餐厨垃圾的减量可达55%,减量指标为13.8;处理后堆体的含水量、有机质、全氮、全磷、全钾总量分别下降71.1%、63.9%、75.4%、8.13%、5.3%,碳氮比和pH分别为31.2、8.43,均满足好氧堆肥所需的初始条件;蝇蛆生物转化餐厨垃圾的平均产率为26.4%,转化效率达79.7%;所得干蛆的蛋白质含量接近50%,综合营养价值高于国产鱼粉及豆饼;多烯脂肪酸含量(亚油酸、亚麻酸等)超过智利鱼粉,深加工潜力大。上述结果表明蝇蛆生物转化餐厨垃圾效能显著,具有较好发展前景。(图5 表4 参41)

关键词 蝇蛆;餐厨垃圾;接种量;减量化;资源化
CLC X799.3

The effectiveness of bioconversion of food waste by housefly larvae*

JIANG Chengliang¹, TENG Changyun^{1,2}, LI Jin¹, ZHU Jun⁴, FEN Daihua¹, LOU Liping¹ & ZHANG Zhijian^{1,3**}

¹ College of Environment and Source Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

² Hangzhou Wufumei Environmental Protection Co., Ltd, Hangzhou 311113, China

³ Hangzhou Gusheng Biotech Co., Ltd, Hangzhou 311108, China

⁴ Department of Biological and Agricultural Engineering, University of Arkansas, Fayetteville 72704, USA

Abstract According to the scavenging and short life cycle, housefly larvae were used to test the efficacy of food waste bioconversion. First, we explored the best inoculation quantity, then we tested the physical and chemical parameters of pile biomass before and after bioconversion at the best inoculation quantity, and finally evaluated the nutrition of larvae for commercial use. The results showed that the best inoculation quantity for larvae-driven bioconversion was 13 300 heads per kilogram. With this inoculation quantity, the processing technology achieved a 55% reduction, and the waste reduction index (WRI) was found to be 13.8. After processing, in the pile biomass, the moisture content, organic matter, total nitrogen, total phosphorus, and total potassium decreased by 71.1%, 63.9%, 75.4%, 8.13%, and 75.4%, respectively. Meanwhile, the carbon-to-nitrogen ratio and pH were found to be 31.2 and 8.43, respectively, in pile biomass, and could meet the initial conditions required for aerobic compost. In addition, the yield of larvae-driven biotransformation was 26.4%, and the efficacy of conversion of digested feed (ECD) reached 73.4%. The protein content of dried larvae was close to 50%, and the comprehensive nutritional value was higher than that of domestic fish meal and bean cake, while polyene fatty acids (linoleic acid, linolenic acid, etc.) were more abundant than those in Chile fish meal. Thus, the food waste-bioconverting larvae showed an enormous potential for deep bioprocessing for downstream uses. In conclusion, larvae can bioconvert food waste effectively and have promising development prospects.

Keywords larvae; food waste; inoculation quantity; reduction; resource utilization

餐厨垃圾是我国城乡居民生活中最为常见的一种有机废弃物,其来源为各类餐饮店、居民家庭及单位食堂等。随

着社会经济的不断发展,国民生活方式的改变,2014年来我国餐厨垃圾的年产量超过6 000万t,并以每年10%的速度递增^[1]。餐厨垃圾的化学组分复杂,地域不同其成分也不相同^[2],但都具有水份高、油脂含量大、有机质含量高等特点^[3-4],这些属性使其成为资源性与危害性并存的污染物。厌氧消化、好氧堆肥及饲料化是我国餐厨垃圾无害化、资源化、减量化的代表性技术,但在工程应用方面都尚存一定的弊端。厌氧消化耗时长、成本高,且对预处理技术和调试要求较高^[5];而好氧堆肥周期长、占地大、成本高,且存在无害

收稿日期 Received: 2017-03-09 接受日期 Accepted: 2017-04-19

*浙江省重点研发计划项目(2015C03009)、国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07101)和浙江省重点研发计划(2015C03SA420001)资助 Supported by the Primary Research & Development Plan of Jiangsu Province, China (2015C03009, 2015C03SA420001) and the National Water Pollution Control and Treatment Science and Technology Major Project of China (2012ZX07101)

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: zhangzhijian@zju.edu.cn)

化不彻底,易造成二次污染的风险;饲料化则存在潜在的食物链、同源性污染及疾病传染率高等安全问题^[1]。因此,目前急需开发更高效、对环境更友好且高值化潜力更大的资源化新技术。

基于生物转化与再利用原理,众多学者将蚯蚓^[6-7]、黑水虻^[8-11]、蝇蛆^[12]等蠕虫用于餐厨垃圾的处理和资源化再利用。其中,蝇蛆因具有食腐性、繁殖能力强且周期短等特点,在20世纪70年代Boushy设计了蝇蛆反应器,在5-7 d的周期内快速转化鸡粪,获得腐熟度高、稳定性好且养分充足的有机肥同时还收获数量可观的蝇蛆蛋白^[13]。张志剑等发现,在6 d周期内猪粪减量55%-65%,蝇蛆产量95-120 kg/t^[14],且堆体的有机质降解和恶臭控制效能显著^[8, 15-16],剩余堆体稳定性好,有利于后续利用。深入研究发现,蝇蛆能削减猪粪中残留的大部分抗生素^[17]及抗性基因^[18]。

餐厨垃圾与畜禽粪便同属有机固体废物,其生物转化和资源化再利用潜力明显,但鲜有研究者对蝇蛆转化餐厨垃圾的资源化与减量化潜力进行深入研究。因此,我们基于粪便蝇蛆生物转化技术^[13, 15-16, 19],设计餐厨垃圾蝇蛆生物反应器,考查不同接种量水平对蝇蛆转化效果的影响,研究最佳接种量下蝇蛆的处理效能及营养价值,旨在为解决日益严重的餐厨垃圾污染提供更高效率的处理方式。

1 材料与方法

1.1 实验材料

供试餐厨垃圾取自浙江大学紫金港校区学生食堂;辅料(苕糠)购于杭州市余杭区,其粒径小于1 mm;虫卵孵化后18 h的1日龄幼虫接种物由德清国胜科技有限公司提供,1 g接种物中1日龄幼虫数经统计调查值为1 000只。

1.2 实验装置

实验装置采用智能光照培养箱(型号:赛福PAX-4508)[0.6 m(长)×0.6 m(宽)×1.6 m(高)],共4层。参数设定:环境温度恒定为25℃;光周期L:D=12:12 h。培养容器为白色塑料方盒[20 cm(长)×15 cm(宽)×15 cm(高)]。

1.3 实验条件和步骤

1.3.1 接种量实验 (1)收集的餐厨垃圾经人工分拣后,利用电动分离式绞肉机破碎至粒径小于4 mm,为调理原料利于蝇蛆生长,将破碎后的餐厨垃圾与辅料按质量比(4:1)进行混合,得餐厨垃圾混合料。

(2)按每公斤餐厨垃圾接种1日龄幼虫接种物的量设计8种接种量处理组,每组3次重复,6.67 g/kg接种组、10.0 g/kg接种组、13.3 g/kg接种组、16.7 g/kg接种组、20 g/kg接种组、23.3 g/kg接种组、26.7 g/kg接种组、30 g/kg接种组。

(3)称取步骤(1)制备的1.5 kg混合料,平铺于标记好的培养器,厚度约为6 cm,接种相应数量的接种物,经36 h后每日翻垛一次。

(4)待虫体由白转黄,并出现部分化蛹现象时,将蝇蛆与堆体分离称重。

1.3.2 效能动态评估实验 (1)设置6个实验组,每组3次重复,分别标记为1日处理组、2日处理组、3日处理组、4日处理组、5日处理组、6日处理组。

(2)取1.5 kg混合料铺设于白色塑料方盒中,按最佳接种量将相应数量的接种物均匀撒入。

(3)在周期内,每天测量堆体温度后,将堆体与虫体分离称重,取200 g堆体及全部虫体,将样品置于-20℃保存备用。

1.4 测定项目和方法

样品送至农业部农产品质量监督检验测试中心(杭州)测定,其中全氮(以N计)、有机质、全磷(以P₂O₅计)、全钾、总汞、总砷、总铅、总镉、总铬依据中华人民共和国标准化管理办法NY525-2012测定,铵态氮按GB/T3600-2000测定,氯离子按GB/T24890-2010测定,氨基酸(天门冬氨酸、丝氨酸、谷氨酸、脯氨酸、甘氨酸、丙氨酸、蛋氨酸、酪氨酸、精氨酸、赖氨酸、苯丙氨酸、异亮氨酸、色氨酸、缬氨酸、亮氨酸、苏氨酸)和脂肪酸[月桂酸(C14:0)、棕榈酸(C16:0)、棕榈烯酸(C16:1)、硬脂酸(C18:0)、油酸(C18:1)、亚油酸(C18:2)、亚麻酸(C18:3)]按GB/T18246-2000和GB/T17377-2008测定;温度:煤油温度计;pH:玻璃电极法;含水率:105℃烘干法;堆体重量:电子台秤;数据分析:Excel及SPSS 18.0。

1.5 数学模型

$$R = \frac{A_t}{\sum_{i=1}^t A_i} \times 100\%$$

$$A_t = B_{t+1} - B_t$$

式中, R 为每日堆体减率(或每日虫体增率), t 为转化天数, A_t 为转化天数为 t 时堆体减少(或虫体增加)的重量[kg(mg)], B_t 为转化天数为 t 时堆体(或虫体)的重量[kg(mg)]。

2 结果与讨论

2.1 不同接种量水平对餐厨垃圾减量及蝇蛆产率的影响

由表1可知,当接种水平处于6.70-13.3 g/kg时,增加接种量可显著提高蝇蛆产量及堆体减量($P < 0.05$),且对单只蝇蛆重量影响不大。接种水平为13.3 g/kg时,蝇蛆产率、餐厨垃圾减量及单只虫重都处于较高水平,分别为28.8%、55.4%和22.9 mg。此后提高接种量对蝇蛆产率和餐厨垃圾减量水平没有显著影响($P < 0.05$),但单只蝇蛆重量不断下降,至接种量30 g/kg时减至10.6 mg,这可能会影响虫体的营养价值。由此可知,13.3 g/kg为本研究的最佳接种量,过高或过低水平的接种量均无助于提高蝇蛆生物量及堆体的减量效果。

下文均采用最佳接种量13.3 g/kg水平来研究蝇蛆生物转化堆体的理化性状等指标及蝇蛆营养价值。

2.2 蝇蛆转化前后理化性质的变化

如表2所示,在蝇蛆转化前后,有机质含量从78.9%减至67.7%,有机质总量减少63.9%;餐厨垃圾混合料含水率从66.3%降至42.3%,水分总量减少71.1%,普通堆肥、蚯蚓堆肥分别需要30-40 d^[20]、20-40 d^[21]才能达到同等效果;全氮、铵态氮以及全磷总量较原水平分别减了75.4%、96.2%、8.13%,此趋势与普通堆肥^[22]相反,这可能是由于蝇蛆将碳氮等元素同化成自身组织细胞成分。钾含量略有升高,但总量下降了5.3%,这可能是由于堆体质量减少,含水率下降,但蝇蛆对钾的需求量较低,导致其含量浓缩升高。由此可见,餐厨垃圾经

表1 不同接种量下餐厨垃圾的减量及蝇蛆生长

Table 1 The reduction of food waste and the growth of larvae under different inoculation quantity

接种比例 Inoculum ratio (w/g kg ⁻¹)	剩余堆体重量 Residual weight (m/g)	餐厨垃圾减量 Food waste reduction (P/%)	蝇蛆产量 Larvae yield (m/g)	蝇蛆产率 Larvae productivity (r/%)	单只蝇蛆重量 Larvae weight (m/mg)
6.70	1091 ± 34 ^a	27.3 ± 2.3 ^a	231 ± 24.0 ^c	15.4 ± 1.6 ^c	23.1 ± 3.6 ^a
10.0	865.5 ± 15 ^b	42.3 ± 0.98 ^b	339 ± 34.1 ^b	22.6 ± 2.2 ^b	23.4 ± 5.7 ^a
13.3	669.0 ± 11 ^c	55.4 ± 0.73 ^c	432 ± 19.7 ^a	28.8 ± 1.3 ^a	22.9 ± 3.7 ^a
16.7	658.5 ± 17 ^d	56.1 ± 1.2 ^c	438 ± 7.62 ^a	29.2 ± 0.6 ^a	18.1 ± 2.5 ^b
20.0	645 ± 3.7 ^d	57.0 ± 0.24 ^c	431 ± 16.8 ^a	28.7 ± 1.1 ^a	15.1 ± 2.2 ^c
23.3	633 ± 7.6 ^{de}	57.8 ± 0.50 ^c	428 ± 8.21 ^a	28.5 ± 0.54 ^a	13.5 ± 1.9 ^c
26.7	627 ± 9.0 ^e	58.2 ± 0.60 ^{cd}	439 ± 16.0 ^a	29.3 ± 1.1 ^a	11.7 ± 1.6 ^{cd}
30.0	612 ± 15 ^f	59.2 ± 1.0 ^d	433 ± 18.3 ^a	28.9 ± 1.2 ^a	10.6 ± 4.2 ^d

数据后不同的小写字母代表显著差异 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters following the data represent significant differences.

表2 堆体理化指标变化

Table2 The change of physical and chemical indexes of pile body

理化指数 Physical and chemical index	处理前 Before treatment		处理后 After treatment		物料减量 (以干物质计) Material reduction (dry matter) (%)
	平均 Average	N	平均 Average	N	
含水率 Moisture content (w/%)	66.3 ± 3.2	8	43.0 ± 2.3	8	71.1
pH	6.72 ± 0.26	8	8.43 ± 0.37	8	-
全氮 (以N计) Total nitrogen (w/%)	3.88 ± 0.31	8	1.26 ± 0.25	8	75.4
全磷 (以P ₂ O ₅ 计) Total phosphorus (w/%)	4.36 ± 0.54	8	13.8 ± 0.31	8	8.13
铵态氮 Ammonium nitrogen (w/%)	0.280 ± 0.12	8	0.014 ± 0.08	8	96.2
氯离子 Cl ⁻ (w/%)	1.22 ± 0.13	8	0.800 ± 0.12	8	50.4
有机质 Organic matter (w/%)	78.9 ± 10	8	67.7 ± 5.9	8	63.9
全钾 Total potassium (w/%)	0.370 ± 0.11	8	0.460 ± 0.25	8	5.30

N表示采样数量。

N represents the number of samples.

6 d蝇蛆生物转化后, 各项理化指标含量明显下降, 减量化效果显著。

根据表2数据分析可知, 蝇蛆转化后所得堆体的含水率、pH、有机质含量分别为43.0%、8.43、67.7%, 基本符合适宜好氧堆肥的初始条件范围, 即含水率40%^[23]、pH值6.0-8.5^[24]、有机质含量20%-80%^[25]; 此外, C/N比为31.2 (其中C含量由有机质转化而来), 也能满足好氧堆肥所需的最佳条件30-38^[26]。并有研究发现, 蝇蛆处理后的堆体只需2-4周即可腐熟成为优质有机肥^[21], 大幅缩短了堆肥周期。因此蝇蛆生物转化可作为餐厨垃圾好氧堆肥的预处理措施。

2.3 蝇蛆转化过程中堆体pH及温度的动态变化

如图1所示, 在本研究中, 餐厨垃圾在接种后温度迅速升高, 至第4日达到最高值45.7℃, 这可能是由于前期堆体中的蝇蛆生长代谢及微生物分解有机物的过程中产生了大量的热量。第5、6日蝇蛆老熟化蛹、活动性减弱, 加之前期有机物质大量降解, 微生物活性降低, 温度下降。

由图可知, pH的动态变化与温度曲线基本类似, 与普通堆肥^[27]相反, 这可能是由于接种蝇蛆后堆体中溶解性有机物减少^[19], 从而抑制或减少堆体中有机酸的产生, 加之含氮物质被微生物分解产生氨氮, 从而导致初期pH值快速上升, 至第4天达到最大值7.6; 第5、6日由于蝇蛆出现化蛹现象, 蛋白质等含氮有机物减少, 氨氮产量降低, 加上原有氨氮的不断挥发, pH值下降。

2.4 蝇蛆转化过程中堆体重量及蝇蛆重量的动态变化

如图2所示, 接种蝇蛆后, 堆体重量呈明显下降趋势, 经6 d处理, 堆体重量减至0.67 kg, 减量率高达55%。处理的第1、2、6日减量速度较为缓慢, 第3-4日堆体减量最大, 分别可

达总减重的25.2%、31.6%; 单只蝇蛆重量由2.11 mg增至23.3 mg, 增长趋势与堆体减量相似, 在第3-4日蝇蛆增幅最大, 分别可占总增重的27.5%、34.8%; 第5、6日虫体增重及堆体减量速度明显下降。综上可知, 蝇蛆处理餐厨垃圾减量化效果显著, 且在转化的第3、4日蝇蛆生长代谢最为旺盛, 减幅最大。

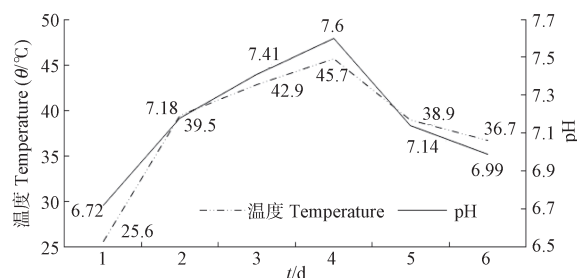


图1 温度及pH变化。

Fig. 1 The change of temperature and pH.

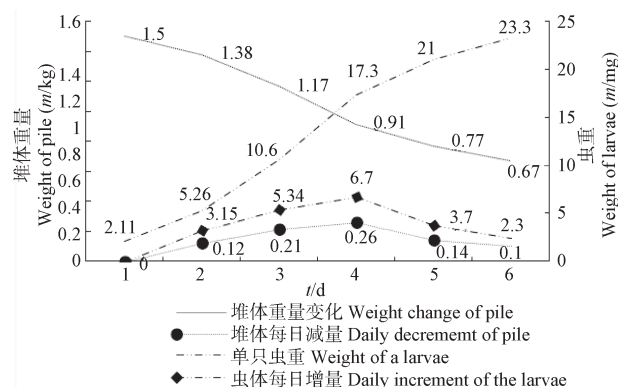


图2 蝇蛆重量及堆体重量变化。

Fig. 2 The change of maggot weight and pile weight.

通过以上数据计算蝇蛆转化餐厨垃圾的减量指标 (Waste reduction index, WRI)、蝇蛆的转化效率 (Efficiency of conversion digested-feed, ECD)^[28]及代谢效率 (Metabolic rate, MR). 计算式如下:

$$\begin{aligned} \text{WRI} &= (A - H)/t \times 100\% \\ \text{ECD} &= \frac{I - F - M}{I - F} \times 100\% \\ \text{MR} &= \frac{M}{A - H} \times 100\% \end{aligned}$$

式中, *A*为原料重量 (kg), *H*为处理后剩余堆体重量 (kg), *t*为堆肥时间 (d), *I*为处理前物料的总重 (干重) (kg), *F*为剩余物料的总重 (干重) (kg), *M*为处理过程蝇蛆和微生物的代谢量 (kg), 可以通过物料平衡计算得出, 因数100用来赋予指数实用价值.

将所得数据带入以上4个公式, 得出蝇蛆转化餐厨垃圾的减量指标 (WRI) 为13.8, 蝇蛆每日可处理总量的9.2%. 转化效率 (ECD) 高达79.7%, 代谢率为20.3%, 说明蝇蛆可将餐厨垃圾减量中3/4的干物质转化为自身生物物质, 高出Stefan Diener研究所得黑水虻38%^[28]的转化效率2倍之多, 可见其优质的资源化及减量化能力.

表3 皮尔森相关性分析
Table 3 Pearson correlation analysis

分析项目 Analysis item		pH	温度 Temperature	堆体每日减量 Daily decrement of pile	蝇蛆每日增量 Daily increment of the larvae
pH	Pearson相关性 Pearson correlation	1	0.957**	0.990**	0.993**
	显著性 (双侧) Significant (both)		0.003	0.000	0.000
	N	7	6	6	6
温度 Temperature	Pearson相关性 Pearson Correlation	0.957**	1	0.963**	0.960**
	显著性 (双侧) Significant (both)	0.002		0.000	0.002
	N	6	6	6	6
堆体每日减量 Daily decrement of pile	Pearson 相关性 Pearson Correlation	0.990**	0.963**	1	0.998**
	显著性 (双侧) Significant (both)	0.000	0.002		0.000
	N	6	6	6	6
蝇蛆每日增量 Daily increment of the larvae	Pearson相关性 Pearson Correlation	0.993**	0.960**	0.998**	1
	显著性 (双侧) Significant (both)	0.000	0.002	0.000	
	N	6	6	6	6

**在0.01 水平 (双侧) 上显著相关.
** represents significant at *P* < 0.01 (double side).

表4 蝇蛆成分表
Table 4 The composition of the larvae

类别 Category	项目 Item	含量 Content	类别 Category	项目 Item	含量 Content
基本成分 Elementary composition	粗蛋白 Crude protein (w/%)	49.0	非必须氨基酸 Nonessential amino acid (w/%)	天门冬氨酸 Aspartic acid	3.98
	粗脂肪 Crude fat (w/%)	34.3		丝氨酸 Serine	1.99
	*水分 Moisture content (w/%)	74.8		谷氨酸 Glutamic acid	5.80
	灰分 Ash (w/%)	9.80		脯氨酸 Proline	1.91
	铜 Cu (w/mg kg ⁻¹)	14.4		甘氨酸 Glycine	1.93
	镉 Cd (w/mg kg ⁻¹)	0.380		丙氨酸 Alanine	2.56
	铅 Pb (w/mg kg ⁻¹)	0.480		蛋氨酸 Methionine	0.980
	铬 Cr (w/mg kg ⁻¹)	2.60		精氨酸 Arginine	1.96
	汞 Hg (w/mg kg ⁻¹)	0.00790		酪氨酸 Tyrosine	1.74
	月桂酸 (C14:0)	1.64	必须氨基酸 Essential amino acid (w/%)	赖氨酸 Lysine	3.60
脂肪酸 (以脂肪含量计) Fatty acids (as fat content meter) (w/%)	棕榈酸 (C16:0)	20.6		苯丙氨酸 Phenylalanine	0.690
	棕榈烯酸 (C16:1)	12.3		色氨酸 Tryptophan	2.56
	硬脂酸 (C18:0)	3.49		缬氨酸 Valine	2.28
	油酸 (C18:1)	30.6		异亮氨酸 Isoleucine	1.96
	亚油酸 (C18:2)	29.1		亮氨酸 Leucine	2.87
	亚麻酸 (C18:3)	2.59		苏氨酸 Threonine	1.74

*表示鲜虫含水率.
* represent the moisture content of fresh larvae.

2.5 堆体pH值、温度与减量和蝇蛆生长的相关性

由表3可知, 堆体每日减量、蝇蛆每日增量与pH的相关系数分别为0.990和0.993 (*P* < 0.01), 与温度的相关系数分别为0.963和0.960 (*P* < 0.01). 这说明pH、温度可能是影响蝇蛆转化餐厨垃圾效果的重要因素. 此外, 温度与pH的相关系数为0.957 (*P* < 0.01), 接近完全正相关系数1. 由此, 我们可以推测pH (温度) 是通过影响微生物和蝇蛆的生长来改变温度 (pH) 的变化趋势. 堆体每日减量与蝇蛆每日增量存在显著的负相关关系, 相关系数高达0.998 (*P* < 0.01), 接近完全正相关系数1, 虫体增重越大, 堆体减量越高, 这说明蝇蛆的生长代谢可能是堆体减量最主要的原因.

2.6 最佳接种量下所得蝇蛆的营养价值分析

2.6.1 综合营养价值分析 蝇蛆成分见表4.

将蝇蛆的粗蛋白、粗脂肪、灰分以及必须氨基酸含量与高克昌整理的国产鱼粉和豆饼^[29]进行比较可知, 蝇蛆在蛋白质以及粗脂肪含量方面优势明显, 蛋白质含量接近50% (干重) (图3), 高于国产鱼粉平均45%的水平^[30], 超过世界粮食与农业组织/世界卫生组织 (FAO/WHO) 提出的参考值 (40%)^[31]; 粗脂肪含量分别高出两者84.1%和81.4%. 灰分含量较低, 因此蝇蛆可能在矿物质含量方面存在缺陷. 由此可

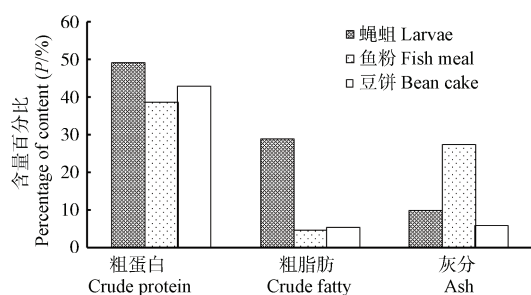


图3 综合营养价值比较。

Fig. 3 The comparison figure of comprehensive nutritional value.

知, 蝇蛆的综合营养价值高于国产鱼粉和豆饼。

2.6.2 深加工潜力分析 由图4可知, 7种人体必需氨基酸中, 蝇蛆的赖氨酸、色氨酸、缬氨酸含量显著高于鱼粉和豆饼, 其中赖氨酸及色氨酸含量分别超过国产鱼粉的38.6%、31.9%和豆饼的76.6%、76.6%; 三者的苏氨酸及亮氨酸含量基本接近, 但苯丙氨酸含量远低于国产鱼粉与豆饼, 异亮氨酸含量明显低于国产鱼粉, 因此蝇蛆可作为氨基酸的提取原料。

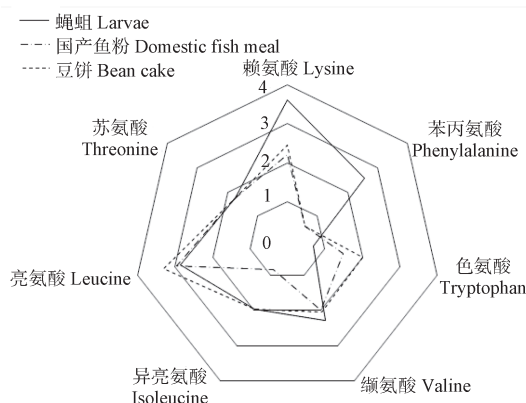


图4 必需氨基酸比较图。

Fig. 4 Comparison of essential amino acids.

由图5可知, 与智利鱼粉^[32]进行脂肪酸含量比较, 蝇蛆的多烯脂肪酸(亚油酸、亚麻酸等)含量为31.7%, 显著高于智利鱼粉的1.75%; 而饱和脂肪酸(硬脂酸、棕榈酸、月桂酸)含量低于后者。有研究表明亚油酸、亚麻酸具有预防和治疗肿瘤, 降低血压、血脂, 以及抑制血小板凝聚, 减少血栓形成的功效^[33]。此外, 众多学者还从蝇蛆体内提取出抗菌肽、壳聚糖及甲壳素等特殊活性物质^[34-36]。抗菌肽不仅能替代抗生素, 缓解环境中抗性基因的污染^[37], 还能清除伤口坏死组织, 刺激纤维原细胞生长, 抑制病原体并治愈伤口^[38-39]; 壳

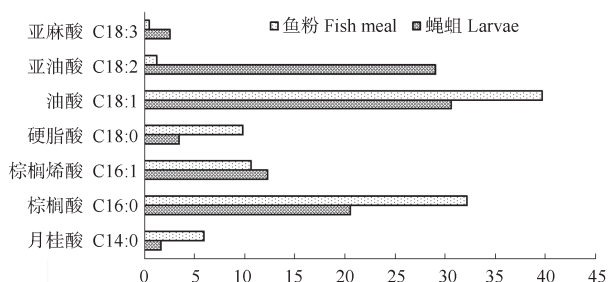


图5 脂肪酸比较图。

Fig. 5 The comparison figure of fatty acids.

聚糖和甲壳素是自然界中独有的碱性多糖, 具有多种生理功能, 被广泛应用于医药、食品、轻纺、农业^[40]及污水重金属富集分离^[41]。由此可知, 蝇蛆具有巨大的深加工潜力。

3 结论

1) 由接种量实验发现, 在13.3 g/kg接种量下, 即13 300只/kg, 堆体减量、蝇蛆产量以及单只虫重都处在较高水平, 综合转化效果最佳。

2) 最佳接种量下, 餐厨垃圾在6 d周期内减量55%, 减量指标为13.8; 有机质、全氮及铵态氮含量明显下降, 减量化效果显著; 堆体温度、pH、减量和蝇蛆生长量的最大值均出现在周期内的第3-4日, 可知此阶段蝇蛆的生长代谢最为旺盛; pH、温度与堆体和虫体的重量变化显著相关 ($P < 0.01$), 可能是影响蝇蛆生物转化效果的重要因素。此外, 蝇蛆转化后堆体的各项理化指标都符合好氧堆肥的初始条件, 因此可尝试将蝇蛆生物转化作为餐厨垃圾好氧堆肥的预处理措施。

3) 最佳接种量下, 餐厨垃圾经转化可得0.396 kg蝇蛆, 产率为26.4%, 3/4的原料干物质转化为蝇蛆生物物质, 转化效率高。蝇蛆的综合营养价值高于国产鱼粉及豆饼, 多烯脂肪酸含量高于智利鱼粉, 深加工潜力大。

参考文献 [References]

- 毕少杰, 洪秀杰, 韩晓亮, 高亚梅, 晏磊, 王伟东, 王彦杰. 餐厨垃圾处理现状及资源化利用进展[J]. 中国沼气, 2016, 34 (2): 58-61 [Bi SJ, Hong XJ, Han XL, Gao YM, Yan L, Wang WD, Wang YJ. Status and development of resource processing technologies of food waste [J]. *China Biogas*, 2016, 34 (2): 58-61]
- 王攀, 任连海, 甘筱. 城市餐厨垃圾产生现状调查及影响因素分析[J]. 环境科学与技术, 2013, 36 (3): 181-185 [Wang P, Ren LH, Gan X. Investigation and output factors analysis of restaurant garbage for cities in China [J]. *Environ Sci Technol*, 2013, 36 (3): 181-185]
- 李荣平, 葛亚军, 王奎升, 李秀金, 庞云芝. 餐厨垃圾特性及其厌氧消化性能研究[J]. 可再生能源, 2010, 28 (1): 76-80 [Li RP, Ge YJ, Wang KS, Li XJ, Pang YZ. Characteristics and anaerobic digestion performances of kitchen wastes [J]. *Renew Energy Resour*, 2010, 28 (1): 76-80]
- 杨璐, 张影, 汤岳琴, 孙照勇, 黄玉莲, 木田建次. 温度对厨余垃圾高温厌氧消化及微生物群落的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2014, 20 (4): 704-711 [Yang L, Zhang Y, Tang YQ, Sun ZY, Huang YL, KIDA Kenji. Effect of temperature on performance and microbial community of thermophilic methane fermentation of kitchen waste [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2014, 20 (4): 704-711]
- 靳秋颖, 王伯铎. 餐厨垃圾资源化技术进展及发展方向研究[J]. 环境工程, 2012, 30 (S2): 327-330, 531 [Jin QY, Wang BD. Status and development of food residue resource technology [J]. *Environ Eng*, 2012, 30 (S2): 327-330, 531]
- Normanq A, Clivea E, Andrei B, John C, Paola G, Jamesd M. Influences of vermicomposts, produced by earthworms and microorganisms from cattle manure, food waste and paper waste, on the germination, growth and flowering of petunias in the greenhouse [J]. *Appl Soil Ecol*, 2008, 39

- (1): 91-99
- 7 Huang K, Xia H, Li F, Wei Y, Cui G, Fu X, Chen X. Optimal growth condition of earthworms and their vermicompost features during recycling of five different fresh fruit and vegetable wastes [J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2016, **23** (13): 1-7
 - 8 Paz ASP, Carrejo NS, Rodr Guez CHG. Effects of larval density and feeding rates on the bioconversion of vegetable waste using black soldier fly larvae *Hermetia illucens* (L.) (Diptera: Stratiomyidae) [J]. *Waste Biomass Valor*, 2015, **6** (6): 1059-1065
 - 9 Nguyen TT, Tomberlin JK, Vanlaerhoven S. Ability of black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) larvae to recycle food waste [J]. *Environ Entomol*, 2015, **44** (2): 406-410
 - 10 Salomone R, Saija G, Mondello G, Giannetto A, Fasulo S, Savastano D. Environmental impact of food waste bioconversion by insects: Application of life cycle assessment to process using *Hermetia illucens* [J]. *J Cleaner Prod*, 2017, **140**: 890-905
 - 11 李峰, 张可, 金鑫, 喻子牛, 张吉斌, 李明顺, 郑龙玉. 武汉亮斑水虻对猪粪的除臭功能研究[J]. 化学与生物工程, 2016, **33** (7): 28-33 [LI F, Zhang K, Jin X, Yu ZN, Zhang JB, Li MS, Zheng LY. Research on swine manure deodorization by larvae of black soldier fly Wuhan strain [J]. *Chem Bioeng*, 2016, **33** (7): 28-33]
 - 12 Zanten HHEV, Mollenhorst H, Oonincx DGAB, Bikker P, Meerburg BG, Boer IJMD. From environmental nuisance to environmental opportunity: housefly larvae convert waste to livestock feed [J]. *J Clean Prod*, 2015, **102** (2015): 362-369
 - 13 Boushy ARE. House-fly pupae as poultry manure converters for animal feed: a review [J]. *Bioresour Technol*, 1991, **38** (1): 45-9.
 - 14 Wang H, Zhang Z, Czapar GF, Winkler MK, Zheng J. A full-scale house fly (Diptera: Muscidae) larvae bioconversion system for value-added swine manure reduction [J]. *Waste Manage Res J Int Solid Wastes Publ Clean Assoc ISWA*, 2013, **31**: 223-231
 - 15 Zhang Z, Wang H, Zhu J, Suneethi S, Zheng J. Swine manure vermicomposting via housefly larvae (*Musca domestica*): the dynamics of biochemical and microbial features [J]. *Bioresour Technol*, 2012, **118** (8): 563-571
 - 16 薛纯良, 吴健桦, 徐大钢, 杨鹤萍. 猪粪经蝇蛆生态处理后粪臭素和排污量的变化[J]. 环境污染与防治, 2004, **26** (3): 218-219, 245 [Xue CL, Wu JH, Xu DG, Yang HP. Quantitative change of 3-MI, COD and BOD in the pig manures after ecological treatment with housefly larvae [J]. *Environ Pollut Control*, 2004, **26** (3): 218-219, 245]
 - 17 Wang H, Li HY, Gilbert JA, Li H, Wu LB, Liu M, Wang LL, Zhou Q, Yuan JX, Zhang ZJ. Housefly larva vermicomposting efficiently attenuates antibiotic resistance genes in swine manure, with concomitant bacterial population changes [J]. *Appl Environ Microbiol*, 2015, **81** (22): 7668-7679
 - 18 Wang H, Sangwan N, Li HY, Su JQ, Oyang WY, Zhang ZJ, Gilbert JA, Zhu YG, Ping F, Zhang HL. The antibiotic resistome of swine manure is significantly altered by association with the *Musca domestica* larvae gut microbiome [J]. *ISME J*, 2016, **11** (1): 100-111
 - 19 Wang H, Wang S, Li H, Wang B, Zhou Q, Zhang X, Li J, Zhang ZJ. Decomposition and humification of dissolved organic matter in swine manure during housefly larvae composting [J]. *Waste Manage Res*, 2016, **34** (5): 465-473
 - 20 张婷婷. 餐厨垃圾不同模式堆肥化处理效果及产品应用研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2016 [Zhang TT. The effect and application of different composting treatment of kitchen waste [D]. Tai'an: Shandong Agriculture University, 2016]
 - 21 张志剑, 刘萌, 朱军. 蚯蚓堆肥及蝇蛆生物转化技术在有机废弃物处理应用中的研究进展[J]. 环境科学, 2013, **34** (5): 1679-86 [Zhang ZJ, Liu M, Zhu J. Organic waste treatment by earthworm vermicomposting and larvae bioconversion: review and perspective [J]. *Environ Sci*, 2013, **34** (5): 1679-1686]
 - 22 杨延梅, 席北斗, 刘鸿亮, 魏自民, 杨志峰, 张相锋. 餐厨垃圾堆肥理化特性变化规律研究[J]. 环境科学研究, 2007, **20** (2): 72-7 [Yang YM, Xi BD, Liu HL, Wei ZM, Yang ZF, Zhang XF. Study on the change of physicochemical characteristics of food wastes during aerobic composting [J]. *Res Environ Sci*, 2007, **20** (2): 72-77]
 - 23 蓝俞静, 刘玉德, 张媛, 绳以健, 石文天, 刘洋. 餐厨垃圾生物好氧堆肥的影响因素研究[J]. 环境科学与技术, 2013, **36** (6L): 30-33 [Lan YJ, Liu YD, Zhang Y, Sheng YJ, Shi WT, Liu Y. Study on influencing factors of food waste biological aerobic composting [J]. *Environ Sci Technol*, 2013, **36** (6L): 30-33]
 - 24 郭倩倩, 吴拥军, 韩丽珍, 王婧, 薛伟, 卢彪. 餐厨垃圾自然升温堆肥工艺研究[J]. 环境工程学报, 2013, **7** (7): 2705-2710 [Guo QQ, Wu YJ, Han LZ, Wang Q, Xue W, Lu B. Study on natural composting process of kitchen waste [J]. *Chin J Environ Eng*, 2013, **7** (7): 2705-2710]
 - 25 李艳霞, 王敏健, 王菊思, 陈同斌. 城市固体废弃物堆肥化处理的影响因素[J]. 生态环境学报, 1999, **8** (1): 62-65 [Li YX, Wang MJ, Wang JS, Chen TB. The affecting parameters of the municipal solid wastes composting [J]. *Soil Environ Sci*, 1999, **8** (1): 62-65]
 - 26 Ekinci K, Keener HM, Elwell L. Composting short paper fiber with broiler litter and additives: Part I: effects of initial pH and carbon/nitrogen ratio on ammonia emission [J]. *Compost Sci Util*, 2002, **10** (1): 16-28
 - 27 任连海, 钱枫, 曹栩然, 孟潇. 餐厨垃圾好氧堆肥过程参数的变化规律分析[J]. 北京工商大学学报(自然科学版), 2007, **25** (2): 1-4 [Ren LH, Qian F, Cao XR, Meng X. Variation of process parameters of restaurant garbage aerobic composting [J]. *J Beijing Technol Business Univ (Nat Sci Ed)*, 2007, **25** (2): 1-4]
 - 28 Diener S, Zurbr GG C, Tockner K. Conversion of organic material by black soldier fly larvae: establishing optimal feeding rates [J]. *Waste Manage Res* 2009, **27** (6): 603-610
 - 29 高克昌. 无菌蝇蛆小型示范工厂生产及经济效益[J]. 山西农业科学, 1989, **12**: 14-16 [Gao KC. Sterile maggots small demonstration plant production and economic benefit [J]. *J Shanxi Agric Sci*, 1989, **12**: 14-16]
 - 30 尹玲, 张新明. 蝇蛆的营养价值及在畜禽生产中的应用[J]. 养殖与饲料, 2010 (2): 51-52 [Ying L, Zhang XZ. Larvae nutritional value and the application in livestock and poultry production [J]. *Anim Breed Feed*, 2010 (2): 51-52]
 - 31 Pellett PL, Yong VR. Nutritional Evaluation of Protein Foods [M]. Tokyo: United National University Publishing Company, 1980: 26-29

- 32 宋永康, 林虬, 陈人弼. 鱼粉脂肪酸组成的分析研究[J]. 台湾海峡, 2004 (1): 88-93 [Song YK, Lin Q, Chen RB. Study on fatty acid composition in fishmeals by gas-chromatography [J]. *J Oceanogr In TaiWan Strait*, 2004 (1): 88-93]
- 33 刘艳辉, 祖岫杰, 刘铁钢, 柳鹏, 李改娟, 李秀颖. 野生及养殖拉氏鱼龄营养成分比较分析[J]. 吉林农业大学学报, 2017 (1): 1-7 [Liu YH, Zu XJ, Liu TG, Liu P, Li GJ, Li XY. The comparison analysis of the nutrient composition in the muscle of *Phoxinus lagowskii* Dybowskii with the wild and artificial breeding [J]. *J Jilin Agric Univ*, 2017 (1): 1-7]
- 34 王志涛, 王旭东, 刘玉, 王俊刚, 申红. 蝇蛆抗菌肽粗提的优化及其抑菌活性研究[J]. 畜牧与兽医, 2016, **48** (5): 86-9 [Wang ZT, Wang XD, Liu Y, Wang JG, Shen H. Extraction of antimicrobial peptide from maggot and detection of its activity [J]. *Anim Husb Vet Med*, 2016, **48** (5): 86-89]
- 35 王芳, 朱芬, 雷朝亮. 中国家蝇资源化利用研究进展[J]. 应用昆虫学报, 2013, **50** (4): 1149-1156 [Wang F, Zhu F, Lei CL. Recent advances in the utilization of the housefly as a food resource in China [J]. *Chin J Appl Entomol*, 2013, **50** (4): 1149-1156]
- 36 柏鸣, 周立. 家蝇抗菌蛋白的分离纯化及部分性质[J]. 应用与环境生物学报, 2001, **7** (6): 568-571 [Bai M, Zhou L. Purification of a kind antibacterial protein from *Musca domestica* (housefly) larvae [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2001, **7** (6): 568-571]
- 37 李冠楠, 夏雪娟, 隆耀航, 李姣蓉, 武婧洁, 朱勇. 抗菌肽的研究进展及其应用[J]. 动物营养学报, 2014, **26** (1): 17-25 [Li GN, Xia XJ, Long YH, Li JR, Wu QJ, Zhu Y. Research progresses and applications of antimicrobial peptides [J]. *Chin J Anim Nutr*, 2014, **26** (1): 17-25]
- 38 刘世财, 范琳琳, 郑珩, 张秋怡. 抗菌肽作用机制及应用研究进展[J]. 中国生化药物杂志, 2016, **36** (4): 20-23 [Liu SC, Fan LL, Zheng H, Zhang QY. Advance in mechanism and application of antibacterial peptide [J]. *Chin J Biochem Pharm*, 2016, **36** (4): 20-23]
- 39 Elhag OAO, 宋旗, 郑龙玉, 喻子牛, 张吉斌. 昆虫抗菌肽的作用机制与应用研究进展[J]. 化学与生物工程, 2014, **31** (3): 1-4 [Osma A O Elhag, Song Q, Zheng LY, Yu ZN, Zhang JB. Research advance on action mode and application of antimicrobial peptides from insects [J]. *Chem bioeng*, 2014, **31** (3): 1-4]
- 40 秦秋香, 郭祀远. 壳聚糖的成膜性及其工业应用进展[J]. 现代食品科技, 2007 (4): 93-96 [Qin QX, Guo SY. Filming of chitosan and its applications [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2007 (4): 93-96]
- 41 Gyliene O, Rekertas R, Salkauskas M. Removal of free and complexed heavy-metal ions by sorbents produced from fly (*Musca domestica*) larva shells [J]. *Water Res*, 2002, **36** (16): 4128-4136]