

# 餐厨垃圾高温厌氧消化接种物的驯化研究

马 磊, 王德汉\*, 杨文杰, 曾彩明, 王梦男

(华南农业大学资源环境学院, 广州 510642)

**摘 要:** 研究不同投料方式对餐厨垃圾高温厌氧消化接种物产气活性的影响, 探求餐厨垃圾高温厌氧消化接种物的最佳驯化方法。在 55℃ 条件下, 采用不同方式对厌氧污泥进行驯化作为餐厨垃圾高温厌氧消化的接种物, 观察了驯化前后污泥中微生物菌群的形态结构, 考察了驯化过程中污泥 pH 值和 VFA(挥发性脂肪酸)浓度的变化, 并且比较了驯化后污泥的产气活性, 结果表明: 污泥经过添加一定量的餐厨垃圾驯化培养后, 其微生物菌群形态由球形演变为单一的杆状菌体, 且分布较分散, 产气活性也有所提高, 其中每日投加餐厨垃圾 2.5 g(污泥质量的 0.5%), 驯化 20 d 后的污泥产气活性最高, 达 135.65 mL/(g·d), 显著高于其它处理。驯化污泥可以改善污泥的微生物菌群, 采用最佳的驯化方式可以使污泥具有高的产气活性, 提高餐厨垃圾的产气量。

**关键词:** 餐厨垃圾; 厌氧消化; 接种物

中图分类号: X705

文献标识码: B

文章编号: 1002-6819(2007)6-0203-05

马 磊, 王德汉, 杨文杰, 等. 餐厨垃圾高温厌氧消化接种物的驯化研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(6): 203-207.

Ma Lei, Wang Dehan, Yang Wenjie, et al. Domestication of inoculums in treating food waste by thermophilic anaerobic digestion[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(6): 203-207. (in Chinese with English abstract)

## 0 引 言

餐厨垃圾厌氧消化处理的优点在于利用微生物降解有机成分, 不仅具有较高的废物处理效率, 而且可以得到有机肥料和生物气能源。在此过程中, 接种物的数量和质量对于厌氧消化中的产甲烷阶段的运行效果和稳定性非常重要<sup>[1]</sup>。目前, 在研究固体废弃物厌氧消化时, 国内外研究者大多采用经过驯化的厌氧污泥作为接种物, 污泥主要取自污水处理厂厌氧消化池的活性污泥、化粪池的厌氧污泥和池塘污泥等, 也有研究者采用牛粪等材料作接种物<sup>[2-11]</sup>, 此外, Lopes 等研究了反刍动物的瘤胃液接种对有机固体废弃物厌氧消化的影响<sup>[12]</sup>。本文作者在研究餐厨垃圾厌氧消化过程中也曾采用运行中的厌氧消化器中消化物作为接种物<sup>[13]</sup>。研究者大多选择中温进行驯化<sup>[15,14]</sup>。在驯化方法方面, 有的研究者用底物的浸泡液与污泥混合在 35℃ 下恒温培养 20 d<sup>[15]</sup>。也有的采用前次厌氧发酵的不同阶段的发酵液与污泥混合密闭, 在 35℃ 恒温培养至产气为止<sup>[16]</sup>。

然而, 资料表明驯化良好的高温厌氧细菌的代谢速率可比 35℃ 中温厌氧细菌提高 50%~100%<sup>[17]</sup>。本文在以前研究的基础上, 以 55℃ 作为驯化温度, 在投加底物餐厨垃圾总量一定的情况下, 研究不同投料方式对厌氧污泥驯化的影响, 并在驯化完成后对其产气活性进行了测定比较。研究高温条件下不同驯化方式对污泥活性的影响, 为餐厨垃圾的高温厌氧消化工艺的应用提供依据。

收稿日期: 2006-08-30 修订日期: 2007-01-08

作者简介: 马 磊(1983-), 男, 湖北当阳人。广州 华南农业大学资源环境学院, 510642。Email: malei1006@tom.com

\*通讯作者: 王德汉, 教授, 研究方向为固体废弃物的生物处理及资源化。广州 华南农业大学资源环境学院, 510642。

Email: dehanwang@scau.edu.cn

## 1 材料与方 法

### 1.1 材 料

#### 1) 餐厨垃圾

餐厨垃圾取自华南农业大学校内某一学生食堂, 主要是餐后垃圾, 成分包括米饭、蔬菜、肉类、骨头、菜汤等。餐厨垃圾的容重为 1.0 kg/L。新取来的餐厨垃圾经过机械打浆, 保存于 -4℃ 冰箱内待用。餐厨垃圾的主要性质见表 1, 挥发性固体(VS)占总固体(TS)的百分比表明餐厨垃圾中有机组分占 90.71%。

#### 2) 污 泥

污泥取自生活污水化粪池的厌氧污泥, 为黑色絮凝状物质。污泥取回后于塑料瓶内密封, 置于 4℃ 冰箱中保存。污泥的主要性质见表 1。

表 1 餐厨垃圾和污泥的主要性质

Table 1 Basic characteristics of food waste and sludge

项目	TS /%	VS/TS /%	有机质 /%	N /%	C/N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /%	K <sub>2</sub> O /%	pH 值
餐厨垃圾	20.19	90.71	83.90	2.93	16.58	1.96	0.33	4.23
污泥	8.93	45.29	45.11	1.99	13.13	2.86	0.22	7.71

注: TS 为总固体, VS 为挥发性固体; 表中 TS 及 VS/TS 的含量以湿基计, 有机质、N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 含量均以干基计。

### 1.2 试验装置

#### 1) 污泥驯化试验装置

污泥驯化试验装置(图 1)主要由 1000 mL 的驯化瓶和(55±1)℃ 水浴锅组成。驯化瓶塞带有导气管, 以排出驯化过程中产生的少量气体。装瓶和每次投料取样后, 打开阀门 2, 从阀门 1 通入 N<sub>2</sub> 2 min, 然后关闭阀门 1 和阀门 2, 以保持驯化过程中瓶内厌氧环境。

#### 2) 驯化完成后污泥产气活性测定装置

装置(图 2)主要由 250 mL 的广口消化瓶, 500 mL 集气瓶和 100 mL 量筒三部分组成。消化瓶处在(55±1)℃ 的水浴中, 消化

过程产生的气体经聚乙烯管进入集气瓶,同时等体积的 3% NaOH 溶液被压入到量筒,量筒的读数为所产甲烷气体的体积。试验材料入瓶后和每次取样完,关闭阀门 3,打开阀门 2,从阀门 1 向消化瓶通入  $N_2$  2 min,以保持消化瓶内的厌氧环境。

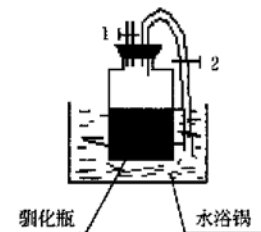


图 1 污泥驯化试验装置

Fig. 1 Experiment configuration of sludge domestication

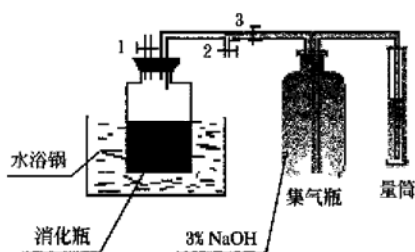


图 2 驯化后污泥产气活性测定装置

Fig. 2 Experimental configuration of aerogenic activity measurement of domesticated sludge

### 1.3 试验方法

#### 1) 污泥驯化试验方法

试验前先将保存的污泥放入  $(55 \pm 1)^\circ\text{C}$  水浴中预热 30 min, 然后按 4 种方式投加餐厨垃圾(表 2), 在  $(55 \pm 1)^\circ\text{C}$  水浴中驯化 20 d, 过程中不定时地摇动驯化瓶, 起到搅拌作用。每个处理中加入 1 g 活性炭, 以增加其比表面积, 有利于有机物的吸附及微生物生长<sup>[5]</sup>。每天 8:30 加入餐厨垃圾浆, 并取样测定 VFA(挥发性脂肪酸)浓度和 pH 值。

表 2 污泥驯化过程中餐厨垃圾的投料方式

Table 2 Adding quomodo of food waste during domestication of sludge

处理号	投料方式
S1	污泥 500 g, 不投加餐厨垃圾
S2	污泥 500 g, 试验开始时一次性加入餐厨垃圾 50g
S3	污泥 500 g, 从试验开始每天定时加入餐厨垃圾 5 g, 历时 10 d
S4	污泥 500 g, 从试验开始每天定时加入餐厨垃圾 2.5 g, 历时 20 d

#### 2) 驯化后污泥产气活性测定方法

试验在污泥驯化试验完成后进行, 水浴  $(55 \pm 1)^\circ\text{C}$ , 设 5 处理(表 3), 每处理 3 重复, 其中, 50 g 餐厨垃圾作为底物一次性加入与接种物混合均匀。试验于第 1 天 9:00 开始, 每隔 24 h 记录其产气量, 即为装置中量筒里 3% NaOH 溶液的体积。过程中不

定时地摇动消化瓶, 起到搅拌作用。

表 3 驯化后污泥产气活性测定试验处理设计

Table 3 Treatment of aerogenic activity measurement of domesticated sludge

处理号	处 理
CK	未驯化污泥 100 g+ 50 g 餐厨垃圾
T1	100 g S1 驯化污泥+ 50 g 餐厨垃圾
T2	100 g S2 驯化污泥+ 50 g 餐厨垃圾
T3	100 g S3 驯化污泥+ 50 g 餐厨垃圾
T4	100 g S4 驯化污泥+ 50 g 餐厨垃圾

### 1.4 测定项目及方法

污泥驯化前后微生物菌群的观察: 将观察对象各 10 g 放入 20 mL 试管中, 分别加入 10 mL 蒸馏水, 振荡混匀, 然后浓缩<sup>[15]</sup>, 进行革兰氏染色, 最后在 XS- 18(双目)生物显微镜(目镜 16 $\times$ , 物镜 100 $\times$ )下观察, 用数码相机拍照。

总固体(TS)和挥发性固体物(VS)采用烘干法测定, 挥发性脂肪酸(VFA)采用蒸馏滴定法测定, 结果以乙酸计。具体操作参照厌氧实验室研究和分析方法<sup>[18]</sup>。

金属离子: 取消液液经 15 min, 4000 r/min 高速离心后用原子吸收法测定。

### 1.5 数据分析方法

数据分析采用 SAS8.0 软件分析, 统计方法采用 DUNCAN 多重比较及 ANOVA 方差分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 驯化前后污泥中微生物菌群的形态变化

驯化前污泥板结, 黑色絮状, 细菌形态以球形为主(图 3a)。经 S1 驯化处理后, 细菌的形态没有发生变化, 但是污泥蓬松, 而且可以观察到明显的球形(图 3b)。添加餐厨垃圾驯化培养后, 污泥中细菌的形状较为均一, 以杆状细菌居多, 此外有少量的球形细菌, 细菌分布也多为分散(图 3c、图 3d、图 3e)。经比较表明, 用餐厨垃圾驯化后的污泥菌体形状比较单一, 表明其习性与餐厨垃圾的性质相匹配, 是驯化后的优势菌。

### 2.2 污泥驯化过程中 pH 值的变化

图 4 显示了驯化培养过程中各处理 pH 值的变化。S1 处理驯化过程中 pH 值略有上升, 维持在 7.5~ 8.5 之间, 经测定发现 S1 驯化完成后, 污泥中  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度由初始的 5.05 mg/L 增加到 8.74 mg/L, 这可能是造成 pH 值上升的原因。S2 处理驯化因为餐厨垃圾一次性加入, 迅速酸化水解, 导致 pH 值较低, 一直到第 14 d 均在 6.5 之下。S3 处理中, 随着餐厨垃圾的累积, 一直到第 10 天, pH 值下降到最低(5.56), 然后开始升高, 从第 16 d 开始维持在 7.6 左右。S4 处理下, 污泥的 pH 值变化不如 S2、S3 明显, 说明在此负荷之下, 污泥驯化过程中没有出现酸积累的现象。这是因为厌氧消化过程可以分为产酸阶段和产甲烷阶段, 并且同时进行, 在 S4 处理的负荷下, 餐厨垃圾酸化产生的有机酸大部分被产甲烷作用消耗掉了。

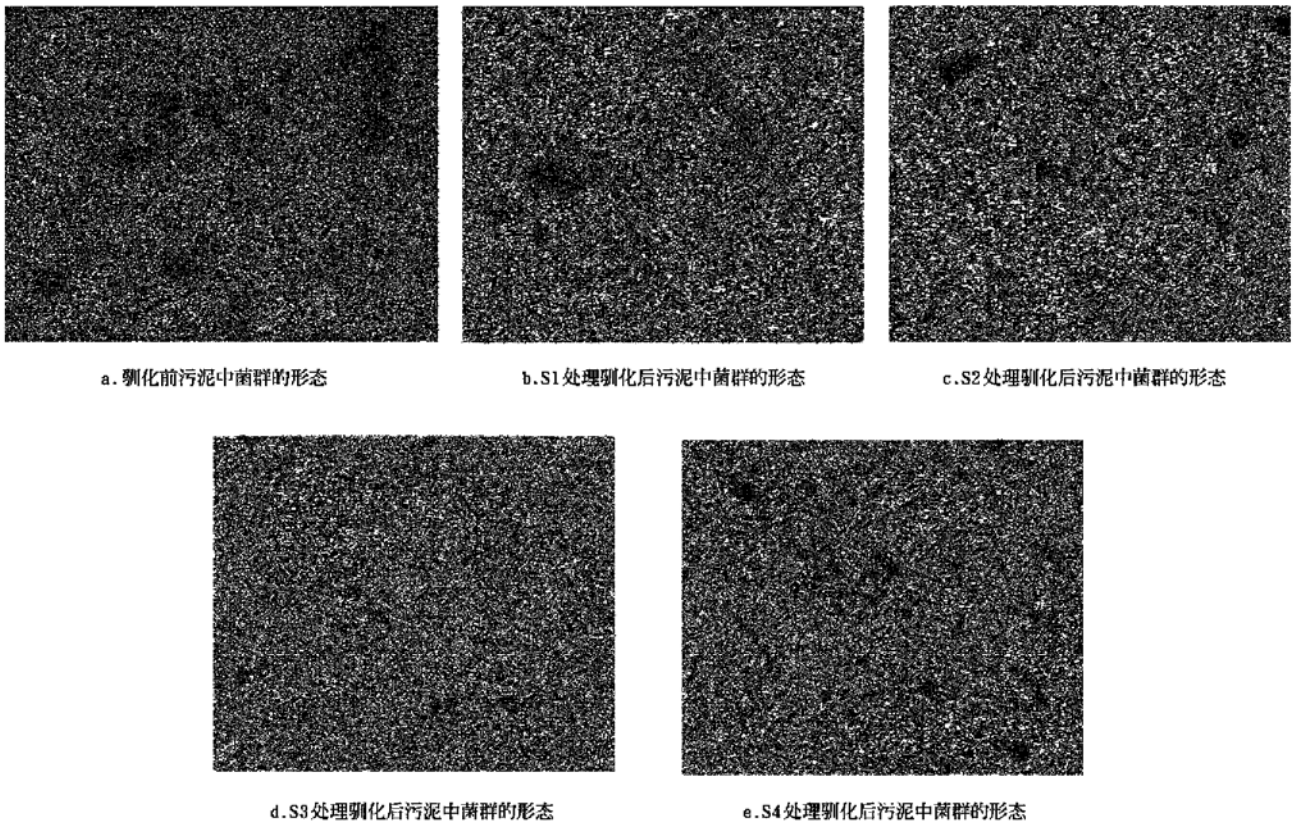


图 3 驯化前后污泥中微生物菌群的形态

Fig. 3 Microorganism form of original and domesticated sludge

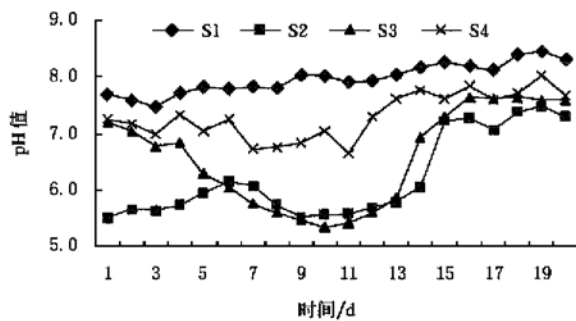


图 4 污泥驯化过程中 pH 值的变化

Fig. 4 Variation of pH value during domestication of sludge

### 2.3 污泥驯化过程中 VFA(挥发性脂肪酸)的变化

污泥驯化过程中 VFA 的变化如图 5、图 6 所示。在整个驯化过程中 S1 处理中的 VFA 均为离子态的。S2 处理在加入餐厨垃圾后,污泥中游离态 VFA 浓度第 3 d 就由初始的 444.08 mg/L 增加到 2640.28 mg/L,这主要是由于餐厨垃圾的迅速酸化水解造成的,并在第 9 d 达到最大值 3982.30 mg/L,然后开始下降,而且其总 VFA 浓度也在第 9 d 达到最大值 4970.39 mg/L。S3 在前 9 d 里,游离态 VFA 和总 VFA 浓度均迅速上升,然后在停止加入餐厨垃圾之后,从第 11 d 开始下降。S4 处理中游离态和总 VFA 浓度的最大值也均出现在第 9 d,然后开始下降,驯化结束时游离态 VFA 浓度为 0。乙酸等挥发性脂肪酸在游离状态下是

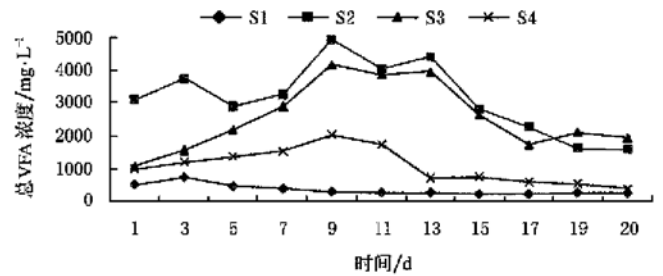


图 5 污泥驯化过程中总 VFA 浓度的变化

Fig. 5 Variation of total VFA concentration during domestication of sludge

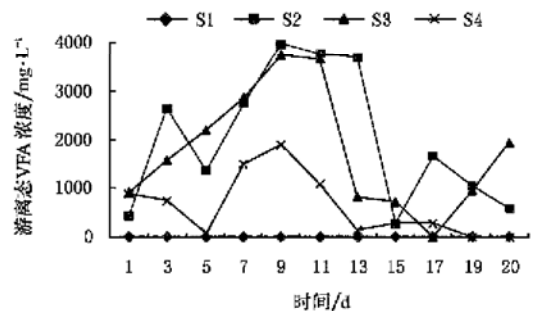


图 6 污泥驯化过程中游离态 VFA 浓度的变化

Fig. 6 Variation of dissociative VFA concentration during domestication of sludge

有毒的,在同一总VFA浓度下,游离酸所占的比例越大,毒性越强<sup>[18]</sup>。S4与其它添加餐厨垃圾的处理(S2、S3)相比,游离态VFA浓度显著较低,而S2和S3处理,由于投料方式的差异,使污泥的驯化过程中出现较高的游离态VFA浓度。这主要是因为S4处理的负荷下,餐厨垃圾酸化产生的有机酸大部分被产甲烷作用消耗掉,没有造成酸积累,从而减轻对接种植物的酸毒性,有利于餐厨垃圾高温厌氧消化的顺利进行。

#### 2.4 驯化前后污泥中部分盐基离子和重金属离子的变化

低浓度的无机盐对微生物的生长有促进,但是高浓度的有抑制。 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 的抑制浓度分别为8000、8000和3000  $\text{mg/L}^{[11]}$ 。从表4可以看出,添加餐厨垃圾驯化培养污泥(S2、S3、S4)后,因餐厨垃圾中含有大量的 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ ,因此驯化后污泥中该类离子的含量有所增加,但仍远远低于抑制浓度。同时,消化细菌对重金属等有毒有害物质很敏感,重金属离子的50% IC(使厌氧过程中污泥产甲烷活性降低50%的有毒物质浓度,即50%抑制浓度)范围在30~300  $\text{mg/L}^{[18]}$ 。检测发现污泥驯化前后各重金属离子含量都比较低(表4),对污泥中的菌群没有毒性。

表4 污泥驯化前后部分盐基离子和重金属离子浓度

Table 4 Variation of some electropositive ions and metal ions concentration for original and domesticated sludge

污泥样品	/mg · L <sup>-1</sup>						
	Cd <sup>2+</sup>	Cr <sup>3+</sup>	Cu <sup>2+</sup>	Ni <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>
未驯化的污泥	0.002	0.032	0.101	0.030	51.27	6.55	353.06
S1 驯化污泥	0.003	0.036	0.172	0.169	46.66	5.35	316.41
S2 驯化污泥	—	—	0.036	0.046	136.22	18.74	456.69
S3 驯化污泥	—	—	0.042	0.534	161.48	22.97	433.22
S4 驯化污泥	0.001	0.012	0.107	0.077	67.71	10.11	417.01

注:“—”表示未检出。

#### 2.5 驯化后污泥产气活性的比较

污泥经过不同方式驯化后其累积产气量如图7所示,在试验开始10 d内,各处理的产气量均高于CK,产气结束后,除T1外,T2、T3和T4的累积产气量均高于CK,且差异显著( $p < 0.05$ )。在消化时间上,T2、T3和T4也较CK短,其中T3的消化时间最短(7 d)。这主要是因为T1的污泥仅仅只是作高温(55℃)驯化处理,刚开始的时候产气量略高于CK,当CK污泥适应高温环境之后,其活性与T1差异不显著。而T2、T3和T4的污泥经过餐厨垃圾驯化培养,对底物有一定的适应性,因此在消化速率和产气量方面均优于CK和T1,同时,驯化完成后T2、T3和T4处理中含有一定量的VFA,从而累积产气量也高。各处理(CK, T1, T2, T3, T4)日平均产气量依次为:43.69, 39.07, 115.22, 119.43, 118.75  $\text{mL/d}$ , T3和T4处理高于CK、T1和T2,且差异显著,但是T3和T4的日平均产气量差异不显著( $p < 0.05$ )。根据图7的曲线可以计算出各处理(CK, T1, T2, T3, T4)的平均产气活性<sup>[10]</sup>,依次为:24.25、22.77、73.61、76.31、135.65  $\text{mL}/(\text{g} \cdot \text{d})$ , T4即S4驯化污泥的在整个消化过程中产气活性最强,与其它处理差异显著( $p < 0.05$ ) (图8)。

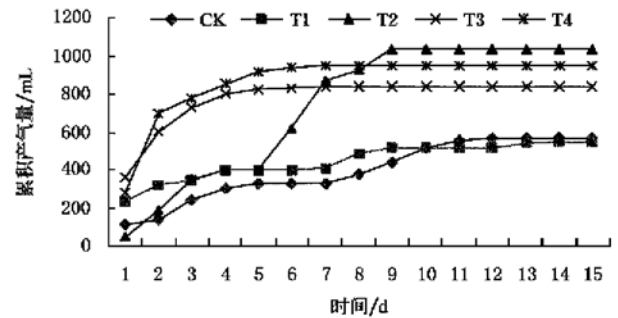
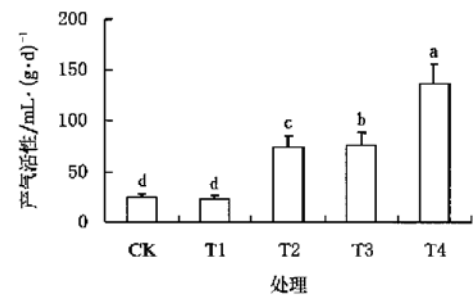


图7 驯化后污泥的累积产气量变化

Fig. 7 Variation of the cumulative biogas production of sludge domesticated by different means



注:不含相同字母表示各处理之间存在显著差异,  $p < 0.05$

图8 驯化后污泥的产气活性

Fig. 8 Aerogenic activity of sludge domesticated by different adding quomodods (Different letters indicate a significant difference at 5% level DUNCAN test)

### 3 结论与讨论

经过驯化培养厌氧污泥中菌群多为分布分散的杆状菌群,是与底物性质相匹配的优势菌。并且,试验表明,驯化培养对污泥的产气活性也有一定的促进作用,其中以每天添加餐厨垃圾2.5 g(污泥质量的0.5%),驯化20 d的污泥产气活性最强,明显高于其他处理。这是因为产气活性受到很多因素的影响,例如温度、底物浓度与组成等的影响。驯化过程中,pH值和VFA浓度的变化不仅可以反映系统的稳定性,而且影响接种污泥的性质,关系到消化系统启动和顺利运行。厌氧污泥驯化完成后,各处理污泥均呈碱性,说明在较低负荷下驯化污泥,即使VFA浓度和pH变化较大,但是驯化完成后仍能满足厌氧消化系统启动时较高pH值和较低VFA浓度的要求,同时在驯化过程中保持一个相对稳定的pH值对驯化后污泥的产气活性具有促进作用。

驯化产生具有高产气活性的接种物有利于提高餐厨垃圾的产气性能,促进餐厨垃圾的降解。然而,接种数量不仅影响消化器的废物处理能力,而且也关系到废物的资源化效率(气化潜能),在今后值得进一步研究。

#### [参考文献]

- [1] 徐文龙,卢英方, Rudolf Walder. 城市生活垃圾管理与处理技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2006:113-133.

- [2] 刘存芳,袁兴中,曾光明,等.城市有机垃圾间歇厌氧消化 pH 控制动力学研究[J].环境科学,2006,27(8):1687-1691.
- [3] 吴江,徐龙君,谢金连.碱浸泡预处理对固体有机物厌氧消化的影响研究[J].环境科学学报,2006,26(2):252-255.
- [4] 吴满昌,孙可伟.温度波动对城市有机生活垃圾高温厌氧消化工艺影响[J].环境科学,2006,27(4):805-809.
- [5] 潘云霞,李文哲.接种物浓度对厌氧发酵产气特性影响的研究[J].农机化研究,2004,(1):187-188,192.
- [6] Craveiro A M. Influence of waste and sewer sludge proportion on their anaerobic digestion process[D]. Sao Paulo/SP/Brazil. MS Dissertation. Polytechnic School of Universidade de Sao Paulo, 1982:185(in Portuguese).
- [7] Leite V D. Anaerobic treatment process of municipal solid waste with industrial sewer sludge[D]. Sao Carlos/SP/Brazil. Engineering School of Sao Carlos of Universidade de Sao Paulo, 1997:251(in Portuguese).
- [8] Lopes W S. Anaerobic biodigestion of urban solid waste inoculated with bovine rumen[D]. Joao Pessoa/PB/Brazil. M. S. Dissertation. PRODEMA-UFPA/UEPB, 2000(in Portuguese).
- [9] Callaghan F J, Wase D A J, Thayanithy K, et al. Continuous co-digestion of cattle slurry with fruit and vegetable wastes and chicken manure[J]. Biomass and Bioenergy, 2002,27:71-77.
- [10] Lopes W S, Leite V D, Prasad S. Performance of anaerobic reactors in the biostabilization of organic solid wastes[J]. Journal of Solid Waste Technology and Management, 2003,29(2):108-117.
- [11] Sosnowski P, Wieczorek A, Ledakowicz S. Anaerobic co-digestion of sewage sludge and organic fraction of municipal solid wastes[J]. Advances in Environmental Research, 2003,7(3):609-616.
- [12] Lopes W S, Leite V D, Prasad S. Influence of inoculum on performance of anaerobic reactors for treating municipal solid waste[J]. Bioresource Technology, 2004,94:261-266.
- [13] 王星,王德汉,张玉帅,等.消化液回流比与有机负荷率对餐厨垃圾厌氧消化的影响[J].环境污染与防治,2006,28(10):748-752.
- [14] 幽景元,肖波,杨家宽,等.生活垃圾厌氧发酵条件的正交试验[J].能源工程,2003,(2):28-30.
- [15] 周岭.有机废弃物厌氧发酵特性的研究[D].李文哲:东北农业大学,2003.
- [16] 潘云霞,潘云锋,李文哲.不同阶段沼液作发酵接种物对牛粪产气的影响[J].农机化研究,2005,(1):202-204.
- [17] 吴满昌,孙可伟,李如燕.有机生活垃圾高温干式厌氧处理技术探讨[J].能源研究与信息,2005,21(4):187-191.
- [18] 贺延龄.废水的厌氧生物处理[M].北京:中国轻工业出版社,1998.

## Domestication of inoculums in treating food waste by thermophilic anaerobic digestion

Ma Lei, Wang Dehan<sup>\*</sup>, Yang Wenjie, Zeng Caiming, Wang Mengnan

(College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

**Abstract:** The effects of different adding quomodods of food waste during domestication on the aerogenical activities of inoculum were studied. The best domesticating means was investigated. The sludge was domesticated by different means at themophilic temperature (55°C) to be the inoculums of thermophilic anaerobic digestion for food waste. The microorganism forms of sludge were observed. The variation of pH value and VFA concentration during domestication were considered. The aerogenical activities of sludge domesticated by different means were compared. The results showed that the microorganism form of sludge treated by adding food waste was changed from sphericity to bacillus and distributed dispersedly. Moreover, the aerogenical activity was enhanced. There into, the aerogenical activity of sludge domesticated with the food waste addition of 2.5 g (0.5percent of sludge's mass) per day and the duration of 20 d was the largest. It was 135.65 mL/(g·d) and significantly larger than any other adding quomodods of food waste during domestication. The microorganism community of sludge was improved by domesticated. The largest aerogenical activities of sludge can be obtained by using the best domesticating means and the gas production can also be enhanced.

**Key words:** food waste; anaerobic digestion; inoculums