

接种量对餐厨垃圾高温厌氧消化的影响

马磊¹, 王德汉^{1*}, 谢锡龙¹, 李亮¹, 王梦男², 文伟发³, 曾彩明¹

(1. 华南农业大学资源环境学院环境科学与工程系, 广州 510642; 2. 华南农业大学资源环境学院, 广州 510642; 3. 广东农业科学院 土壤肥料研究所, 广州 510640)

摘要: 研究不同接种量对餐厨垃圾高温厌氧消化的影响, 探求餐厨垃圾高温厌氧消化的最佳接种量。在 55℃ 条件下, 比较 6 种不同接种量对餐厨垃圾高温厌氧消化过程中 pH、总磷浓度、VFA 浓度、产气量及餐厨垃圾 TS、VS 去除效果和消化液 COD_{Cr} 去除效果的影响, 结果表明: 添加接种物不仅可以提高消化系统的缓冲能力, 而且缩短系统产甲烷细菌的积累周期, 有利于产气高峰提前, 同时对餐厨垃圾的降解有一定的促进作用。其中, 在消化物总量 600 g 条件下, 480 g 餐厨垃圾接种 120 g 接种物 (TS 比为 9.47) 产气效果最佳, 整个过程累积产气量为 9359 mL, 显著高于其它处理, 此外, 餐厨垃圾 TS、VS 去除率和消化液 COD_{Cr} 去除率也达到最佳效果, 去除率依次为 60%、70% 和 39.67%, 但是 COD_{Cr} 去除率与 CK 差异不显著。

关键词: 餐厨垃圾, 厌氧消化, 高温, 接种物

中图分类号: S216, X71

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2008)-12-0178-05

马磊, 王德汉, 谢锡龙, 等. 接种量对餐厨垃圾高温厌氧消化的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 178-182.

Ma Lei, Wang Dehan, Xie Xilong, et al. Influence of inoculum on thermophilic anaerobic digestion of food waste[J].

Transactions of the CSAE, 2008, 24(12): 178-182. (in Chinese with English abstract)

0 引言

接种物的数量和质量对于厌氧消化中产甲烷阶段的运行效果和稳定性非常重要^[1]。如果接种量偏少, 微生物数量不够 (尤其是甲烷菌数量), 容易使发酵起始时间延长, 产甲烷的速度降低, 造成酸积累从而使沼气发酵失败^[2]。如果接种量偏多, 则在保证高处理效率的条件下, 消化器的容积必然增大。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^[3-12], 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^[13]。在接种量的研究上, 张爱军等人认为在沼气固态厌氧发酵时, 接种物比例为料重的 20% 左右, 甚至 30% 以上, 这样可以提高产气速率和甲烷的产量, 并且随着固体含量的增大, 接种量也相应增大, 有时固体废物的量与接种物的量之比达到 60:40 以上^[14]。Nallathambi 在研究不同接种量对一种草料降解的影响时也发现气体产量随接种量的增加而增加^[15]。潘云霞等研究了接种物浓度对厌氧发酵产气特性的影响, 发现适宜的接种物浓度有利于细菌和微生物的生长, 使产气加快, 并且接种物的浓度与物料浓度相互制约^[6]。在餐厨垃圾厌氧消化的

厌氧消化处理研究中, 王星等先后采用了驯化后的厌氧污泥和运行中的厌氧消化器中消化物进行接种^[16,17], 然而对接种量还未作研究。本文在驯化研究的基础上对接种物的数量进一步深入研究, 在 55℃ 条件下, 采用驯化后的厌氧污泥作为接种物, 在消化底物总量一定的前提下研究了 6 种不同接种量对餐厨垃圾高温厌氧消化过程的影响, 以期对餐厨垃圾的厌氧消化工艺的完善提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

1) 餐厨垃圾

试验所用餐厨垃圾取自校内某一学生食堂, 主要是餐后垃圾, 成分包括米饭、蔬菜、肉、骨头、菜汤等。新取来的餐厨垃圾经过机械打浆, 保存于 -4℃ 冰箱待用。餐厨垃圾的主要性质见表 1, 同时测定餐厨垃圾离心液 (3500 r/min, 10 min) 中 Ca²⁺ 浓度为 1452.28 mg/L, Mg²⁺ 浓度为 95.05 mg/L, pH 值为 4.22。

表 1 餐厨垃圾的主要性质

Table 1 Basic characteristics of food waste

项目	TS /%	VS /%TS	有机质 /%	N /%	C/N	P ₂ O ₅ /%	K ₂ O /%	Na ⁺ /mg·kg ⁻¹
餐厨垃圾	20.60	93.06	83.90	2.93	16.58	1.96	0.33	7.17

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、P₂O₅、K₂O、Na⁺ 含量均以干基计。

2) 接种物

厌氧消化所用接种物为驯化 20 d 的化粪池厌氧污泥, 每天添加餐厨垃圾的量为污泥质量的 0.5%^[18], 餐厨垃圾的理化性质与本试验的相同。其色为黑色, 均匀疏松, 主要性质见表 2。

收稿日期: 2007-10-09 修订日期: 2008-10-16

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金

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

表 2 接种物的主要性质

Table 2 Basic characteristics of inoculums

项目	TS /%	VS /%	DVFA /mg·L ⁻¹	TVFA /mg·L ⁻¹	COD _{Cr} /mg·L ⁻¹	总磷 /mg·L ⁻¹	pH 值
接种物	8.70	4.23	535.83	5947.72	1019.54	13.01	7.43

注：DVFA 为游离态 VFA，TVFA 为总 VFA。

1.2 试验装置

试验装置(图 1)主要由 1000 mL 的广口消化瓶, 1000 mL 集气瓶和 100 mL 量筒三部分组成。消化瓶处在 (55±1)°C 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 溶液在压力作用下置换溢流至量筒, 量筒中液体的体积读数即为所产甲烷气体的体积。在试验材料入瓶前和每次取样前, 先关闭阀门 3, 然后在材料入瓶后和取样完成后打开阀门 2, 从阀门 1 向消化瓶通入 N₂ 2 min, 以保持消化瓶内的厌氧环境。

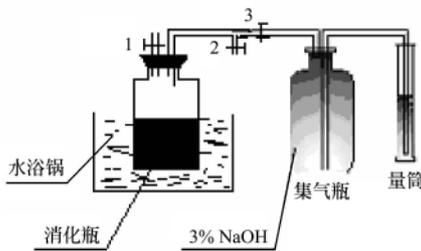


图 1 餐厨垃圾高温厌氧消化装置

Fig.1 Experimental configuration of thermophilic anaerobic digestion of food waste

1.3 试验方法

试验设 6 处理(表 3), 每处理 3 个重复。在相同试验条件下分别取与 T1、T2、T3、T4 和 T5 质量相等的接种物做产气试验, 在计算各处理累计产气量时扣除其产气量。试验于 2007 年 4 月 26 日 14:00 开始, 混合完成后取样测定各处理各项指标作为反应起始值, 第 2 天(4 月 28 日) 14:00 开始取样测定各指标, 并记录产气量(量筒中 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。餐厨垃圾酸化水解迅速, pH 大幅度下降, 对甲烷菌有一定的抑制作用, 因此, 试验过程中对各处理进行了 pH 的调节, 试验开始第 4 天, 各处理加入 20%KHCO₃ 溶液 5 mL 来增强系统的缓冲能力, 减缓 pH 的下降。第 8 天, 各处理加入 20%KOH 溶液 15 mL。第 10~12 天, 继续使用 20%KOH 溶液来调节系统的 pH 值, 使 pH 值维持在 6.5 左右, 然后不再进行调节。该试

表 3 试验处理设计

Table 3 Design of experimental treatments

序号	处 理	餐厨垃圾与接种物 TS 比
CK	600g 餐厨垃圾	123.6 : 0
T1	540 g 餐厨垃圾 + 60 g 接种物	21.31 : 1
T2	480 g 餐厨垃圾 + 120 g 接种物	9.47 : 1
T3	420 g 餐厨垃圾 + 180 g 接种物	5.52 : 1
T4	360 g 餐厨垃圾 + 240 g 接种物	3.55 : 1
T5	300 g 餐厨垃圾 + 300 g 接种物	2.37 : 1

验不使用石灰水来调节系统 pH, 因为要考察过程中消化液总磷浓度的变化, 同时本试验不考虑 K⁺对试验过程的影响, 试验结束时, 对各处理消化液中 K⁺浓度进行测试, 结果均小于厌氧消化抑制浓度^[1]。

1.4 测定项目及方法

总固体(TS)和挥发性固体物(VS): 烘干法; 挥发性有机酸(VFA): 3500 r/min 离心 10 min, 取上清液, 蒸馏滴定法, 结果以乙酸计。具体操作参照厌氧实验室研究和分析方法^[19]。

总磷(TP): 过硫酸钾消解钼蓝比色法。

化学需氧量(COD_{Cr}): 催化消解密封法。

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 厌氧消化过程中 pH 值的变化

厌氧消化过程中, 各处理 pH 值变化的趋势基本一致, 均在试验开始的第 4 天下降到整个过程的最低值, 然后逐渐上升(图 2)。其中, T4 和 T5 从第 4 天开始迅速上升, 在第 10 天达到最大值, 随后一直维持在 7.0 左右。CK、T2 和 T3 在第 12 天达到最大 pH 值, 而 T1 在第 14 天达到最大 pH 值, 随后 T2 和 T3 也维持 pH 值于 7.0 左右, 然而 CK 和 T1 处理 pH 开始下降, 最终 CK 维持 pH 值在 5.0 左右, T1 维持 pH 值在 6.8 左右。加入的 KHCO₃ 溶液增强系统的缓冲能力, 减缓了 pH 下降的趋势。从第 10 天开始, 20%KOH 溶液的加入使各处理的 pH 值逐渐上升, 除 CK 外, 其他各处理 pH 从第 16 天开始均维持在 6.5~7.5, 说明 CK 较其他处理酸碱缓冲能力较差, 添加接种物可以有效地改善系统的酸碱缓冲能力, 为产酸和产甲烷过程提供适宜的 pH 环境。

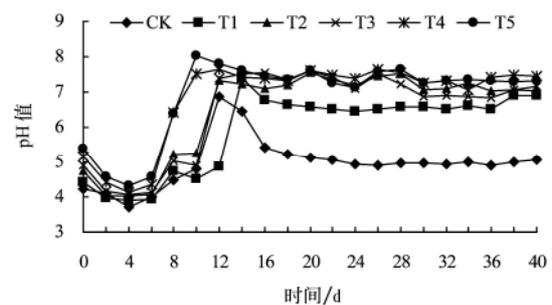


图 2 厌氧消化过程中 pH 的变化曲线

Fig.2 Variation curves of pH during anaerobic digestion

2.2 厌氧消化过程中消化液总磷浓度的变化

图 3 描述了厌氧消化过程中消化液中总磷浓度的变化。各处理均在初期总磷浓度上升, 然后下降, 最后达到平衡。初期总磷浓度的升高主要是因为聚磷菌在厌氧的不利状态下, 将体内积聚的聚磷分解产生能量, 分解形成的无机磷释放到消化液环境中。随着系统 pH 的升高, 餐厨垃圾中大量的 Ca²⁺与系统中的磷酸盐形成最稳固的固态磷酸盐——羟基磷酸钙沉淀^[20], 同时, 大量的 Mg²⁺与磷酸盐合成磷酸铵镁沉淀^[21]。比较最终消化液中

总磷的浓度, CK 最高, 达 499.77 mg/L, T1 次之, 其余处理除 T3 外, 均低于 50 mg/L, T5 最低, 说明增加接种量不仅可以缩短系统厌氧放磷的时间, 而且可以降低消化液最终的总磷浓度。

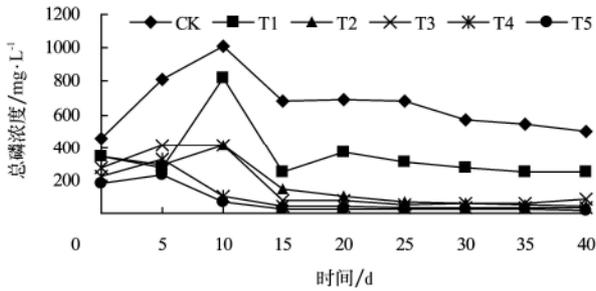


图 3 厌氧消化过程中消化液总磷浓度变化曲线

Fig.3 Variation curves of total phosphorus concentration during anaerobic digestion

2.3 厌氧消化过程中 VFA (挥发性脂肪酸) 浓度的变化

厌氧消化过程中各处理 VFA 浓度的变化如图 4 所示。初期 (1~8 d) 各处理 VFA 浓度变化不大, 接种量大的处理 VFA 浓度较高。从第 8 天开始, 各处理 VFA 的浓度均显著上升, 并进入平衡期 (16~32 d), 与 pH 的变化趋势基本一致。第 32 天开始, 除 CK 外, 各处理 VFA 浓度开始下降。在整个厌氧消化过程中, T2、T3、T4 和 T5 处理 VFA 浓度变化基本一致, 并且高于 CK 和 T1 处理。说明添加接种物可以促进餐厨垃圾的酸化, 在达到甲烷菌适宜 pH 时, 系统 VFA 并没有因为被消耗而减少, 其浓度反而增加, 最终达到动态平衡, 同时 pH 的升高也有利于餐厨垃圾的酸化^[22]。

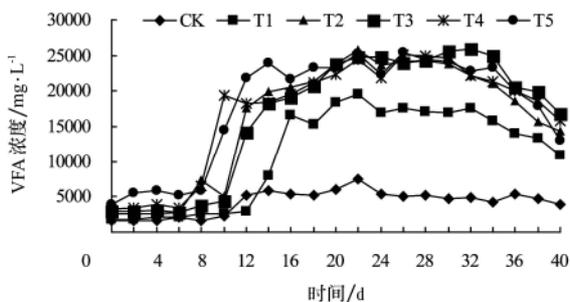


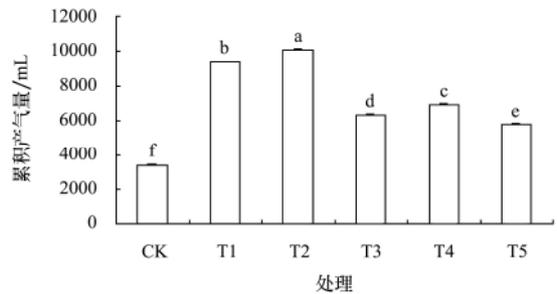
图 4 厌氧消化过程中消化液总 VFA 浓度变化曲线

Fig.4 Variation curves of total VFA concentration during anaerobic digestion

2.4 接种量对产气总量和日产气量的影响

各处理总气体产量和日产气量如图 5 和图 6 所示。添加接种物处理的气体产量显著高于 CK (不接种) ($p < 0.05$)。T1、T2、T3、T4 和 T5 处理分别达到了 CK 产气量的 2.72 倍、2.93 倍、1.83 倍、2.00 倍和 1.69 倍。而且添加接种物的处理 (T1、T2、T3、T4 和 T5) 之间产气量也差异显著, 其中 T2 显著高于其它处理 (9359 mL)。这主要是因为添加接种物的处理 (T1、T2、T3、T4 和 T5) 具有较高的 VFA 浓度, 为产甲烷准备了充足的原料。由图 6 可以看出, T2、T4 和 T5 处理产气峰值较早, T3

和 T1 次之, CK 最晚。因为接种可以增加系统甲烷菌的数量, 所以先达到产气峰值。试验初 8 d, 各处理日产气量较稳定, 然后开始大幅度上升, 最后在试验后期下降, 各处理产气大部分集中在第 8~19 天。



注: 不同字母表示各处理之间存在显著差异, $p < 0.05$

图 5 各处理的气体总产量

Fig.5 Biogas production of each treatment

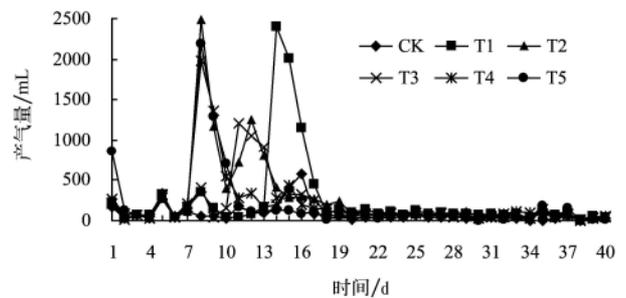


图 6 各处理日产气量的变化曲线

Fig.6 Variation curves of daily biogas production of each treatment

2.5 接种量对厌氧消化过程中餐厨垃圾 TS 和 VS 去除效果的影响

图 7 和图 8 分别描述了餐厨垃圾高温厌氧消化过程中 TS 和 VS 的去除效果。增加接种量可以降低餐厨垃圾的固含率, 从而克服消化底物固含率过高引起的消化底物流动性和混合性差的缺点, 减少搅拌能耗。在整个试验过程中, 添加接种物的处理 (T1、T2、T3、T4 和 T5) 餐厨垃圾 TS 和 VS 的去除效果明显高于 CK ($p < 0.05$)。与 CK (不接种) 相比, T1、T2、T3、T4 和 T5 处理的 TS 去除率分别提高了 17.96%、74.86%、40.81%、52.98% 和 36.07%, VS 去除率分别提高了 30.27%、61.68%、48.37%、38.30% 和 39.82%, 表明增加接种量可以促进 TS 和 VS 的降解, 其中以 T2 效果最佳。

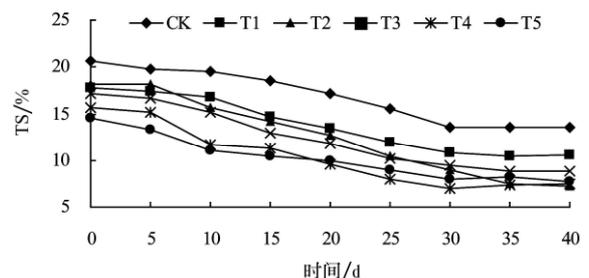


图 7 餐厨垃圾 TS 的去除效果

Fig.7 Total solid reduction effect of food waste

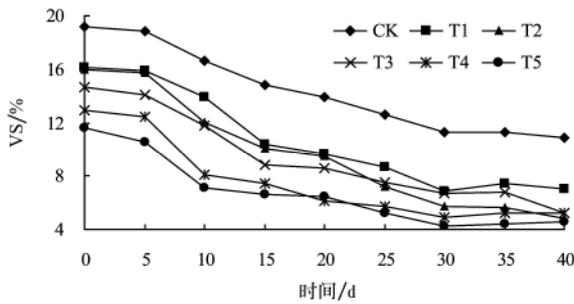
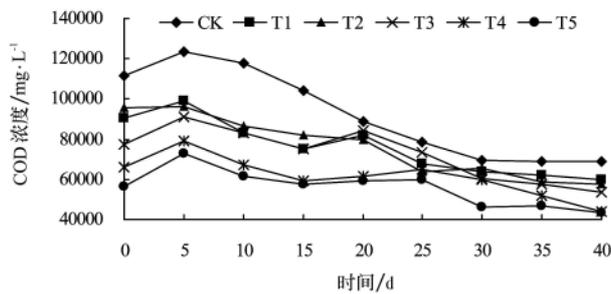


图 8 餐厨垃圾 VS 的去除效果

Fig.8 Volatile solid reduction effect of food waste

2.6 接种量对厌氧消化过程中消化液 COD_{Cr} 去除效果的影响

整个试验过程中, 消化液中 COD_{Cr} 浓度先上升然后下降, CK 处理 COD_{Cr} 浓度始终高于其它处理 (图 9), 表明添加接种物可以降低消化底物的 COD_{Cr} 浓度, 从而减轻消化完成后沼液的处理负荷。试验初期, 餐厨垃圾的酸化水解使系统 COD_{Cr} 浓度升高, 然后随着各种微生物活性的增加, 一些有机物质被利用, 从而导致 COD_{Cr} 的下降。CK、T1、T2、T3、T4 和 T5 处理 COD_{Cr} 的去除率分别为 38.24%、33.68%、39.67%、30.71%、33.86 和 22.64%, 其中以 T2 去除效果最佳。

图 9 厌氧消化过程中消化液 COD_{Cr} 的变化曲线Fig.9 Variation curves of COD_{Cr} during anaerobic digestion

3 结论与讨论

在消化物总量 600g 一定的条件下, 480g 餐厨垃圾接种 120g 接种物 (TS 比为 9.47) 产气效果最佳, 整个过程累积产气量为 9359 mL, 显著高于其它处理, 此外, 餐厨垃圾 TS、VS 去除率和消化液 COD_{Cr} 去除率也达到最佳效果, 去除率依次为 60%、70% 和 39.67%, 但是 COD_{Cr} 去除率与 CK 差异不显著。这主要是因为接种物含有丰富的微生物 (尤其是产甲烷菌), 从而缩短产甲烷细菌的积累周期, 提高对底物的利用效率。然而, 一味地提高接种量, 并不能实现产气量和降解的相应提高, 因为一定的营养条件下, 微生物达到一定数量时, 营养的相对缺乏导致生存竞争, 从而降低了微生物的活性。

添加接种物可以增强系统的酸碱缓冲能力, 使系统可以维持在酸化水解和产甲烷均较适宜的 pH 值范围内。外界调节可以使系统提前进入稳定阶段, 达到产酸和产甲烷的平衡。同时接种可以提高系统微生物数量, 有助

于产气高峰期的提前到来。pH 值是影响餐厨垃圾产酸和产甲烷的主要因素之一, 因此在厌氧消化过程中对系统 pH 进行调节是必要的, 这样做不仅可以促进餐厨垃圾的酸化, 而且可以使产气高峰期尽快到来, 从而缩短处理时间。

[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] 徐龙君, 吴江. 预处理对城市固体有机垃圾厌氧发酵的影响[J]. 环境污染与防治, 2006, 28(1): 62-64.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Craveiro A M. Influence of waste and sewer sludge proportion on their anaerobic digestion process[J]. Sao Paulo/SP/Brazil. MS Dissertation. Polytechnic School of Universidade de Sao Paulo, 1982: 185.
- [8] Leite V D. Anaerobic treatment process of municipal solid waste with industrial sewer sludge[J]. Sao Carlos/SP/Brazil. Ph.D. Thesis. Engineering School of Sao Carlos of Universidade de Sao Paulo, 1997: 251.
- [9] Lopes W S. Anaerobic biodigestion of urban solid waste inoculated with bovine rumen[J]. Joao Pessoa/PB/Brazil. M.S.Dissertation.PRODEMA-UFPB/UEPB, 2000: 72.
- [10] Callaghan F J, Wase D A J, Thayanythy 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.
- [11] 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.
- [12] Sosnowski P, Wiczorek A, Ledakowicz S. Anaerobic co-digestion of sewage sludge and organic fraction of municipal solid wastes[J]. Advances in Environmental Research, 2003, 7, 609-616.
- [13] 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.
- [14] 张爱军, 陈洪章, 李佐虎. 有机固体废物固态厌氧消化处理的研究现状与进展[J]. 环境科学研究, 2002, 15(5): 52-54.
- [15] Nallathambi G. Effect of inoculum/substrate ration and pretreatments on methane yield from parthenium[J]. Biomass and Bioenergy, 1995, 8(1): 39-44.
- [16] 王 星, 王德汉, 徐 菲. 矿物材料对餐厨垃圾厌氧消化的影响研究[J]. 环境科学学报, 2006, 26(2): 256-261.
- [17] 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.

- [18] 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.
- [19] 贺延龄. 废水的厌氧生物处理[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1998: 88—101.
- [20] 熊鸿斌, 刘文清, 李鸿敬. 钙法处理高浓度含磷废水[J]. 中国给水排水, 2003, 19(5): 91—92.
- [21] 席北斗. 有机固体废弃物管理与词源华技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 273—281.
- [22] 张波, 史红钻, 张丽丽, 等. pH对厨余废物两相厌氧消化中水解和酸化过程的影响[J]. 环境科学学报, 2005, 25(5): 665—669.

Influence of inoculum on thermophilic anaerobic digestion of food waste

Ma Lei¹, Wang Dehan^{1*}, Xie Xilong¹, Li Liang¹, Wang Mengnan², Wen Weifa³, Zeng Caiming¹

(1. Department of Environmental Science and Engineering, College of Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. College of Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 3. Institute of Soil and Fertilizer, Guangdong Academe of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The effects of different inoculum proportion on the thermophilic anaerobic digestion of food waste were studied. The best inoculum proportion was investigated. The effects of six different inoculum proportions on pH, TP concentration, VFA concentration, biogas production and the reduction effects of TS, VS and COD_{Cr} were explored at 55°C. The results showed that the buffer capacity of digestion system was enhanced by adding inoculums. The accumulation cycle of methanogenic bacteria was shortened and the aerogenous fastigium came earlier than before. Moreover, the reduction effect of food waste was promoted. Under the condition of the same materials of 600 grams, the biogas production of the treatment with 480 grams food waste inoculated with 120 grams inoculums (TS ratio 9.47 of food waste and inoculum) was 9359 mL which was larger than that of any other treatment significantly. The reduction effects of TS, VS and COD_{Cr} were also the best, and the reduction rate was 60%, 70% and 39.67%, respectively. However, there was no significant difference in COD_{Cr} reduction compared with CK which was not inoculated.

Key words: food wastes, anaerobic digestion, thermophilic, inoculum