

林云琴,王德汉,王钜汀,等. 2010. 造纸污泥与味精废液联合厌氧消化产甲烷性能研究[J]. 环境科学学报,30(8):1627-1633
Lin Y Q, Wang D H, Wang T T, et al. 2010. Methane production through anaerobic co-digestion of paper mill sludge and monosodium glutamate waste liquor[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,30(8):1627-1633

造纸污泥与味精废液联合厌氧消化产甲烷性能研究

林云琴,王德汉*,王钜汀,吴少全,林钊洪

华南农业大学资源环境学院环境科学与工程系,广州 510642

收稿日期:2009-11-26 修回日期:2010-03-05 录用日期:2010-04-26

摘要:采用造纸污泥与味精废液间歇式联合厌氧消化产沼气,通过设计总固体(TS)含量、碳氮比(C/N)和接种量等不同的工艺参数,研究了不同工艺条件下各反应器的产甲烷性能.试验结果表明:在中温(37±2)℃条件下,TS含量对系统累积产气量的影响较大,各反应器的累积产气量随TS含量的增加而增加;各反应器的单位质量挥发性固体(VS)累积产气率和TS、VS的去除率随TS含量增加而降低;在TS含量为10%的3组反应器中,造纸污泥:味精废液(w/w)=10:1的反应器产气效果优于造纸污泥:味精废液(w/w)=25:1和70:1两组处理,这与前者在消化过程中pH值下降最多、酸化能力最强有关;联合厌氧消化累积甲烷产量最大值为5482mL(TS含量为10%,造纸污泥:味精废液(w/w)=10:1),单位质量VS甲烷产率最大值为362 mL·g⁻¹(TS含量为3%,造纸污泥:味精废液(w/w)=11:1),可见这两种工业废物联合厌氧消化具有巨大的产甲烷潜力.

关键词:造纸污泥;味精废液;联合厌氧消化;产甲烷性能

文章编号:0253-2468(2010)08-1627-07 中图分类号:X793 文献标识码:A

Methane production through anaerobic co-digestion of paper mill sludge and monosodium glutamate waste liquor

LIN Yunqin, WANG Dehan*, WANG Tuting, WU Shaoquan, LIN Zhaohong

Department of Environmental Science and Engineering, College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642

Received 26 November 2009; received in revised form 5 March 2010; accepted 26 April 2010

Abstract: Methane production was investigated during anaerobic co-digestion of paper mill sludge (PS) and monosodium waste liquor (MWL). TS (total solid) content, C/N (the ratio of organic carbon to total nitrogen) and inoculum concentration were varied in batch reactors. The results showed that in methophilic (37±2)℃ anaerobic digestion, the CH₄ yield increased as the TS content increased. In each reactor, the accumulative methane production per gram of VS (volatile solid) content and the removal efficiency of TS and VS content decreased as TS increased. For the reactors with 10% TS, the CH₄ yield in the reactor with a PS:MWL ratio of 10:1 was higher than those with ratios of 25:1 and 70:1, which was expected due to the change of pH. The maximum CH₄ yield (5482 mL) was attained in the reactor loaded with PS and MWL at a ratio of 10:1 by weight (TS = 10%) and the maximum CH₄ production efficiency (362 mL·g⁻¹) was attained with a PS:MWL ratio of 11:1 by weight and TS = 3%. The results indicate that anaerobic co-digestion of two industrial wastes has great potential for methane production.

Keywords: paper mill sludge; monosodium glutamate waste liquor; anaerobic co-digestion; methane production

1 引言 (Introduction)

造纸工业是关系国民经济的重要产业,目前我国的纸生产量正以每年超过10%的速度递增(杜伟等,2008).同时,造纸工业又是一个污染比较严重的行业,且其污染程度随着行业的发展日趋严重.

一般造纸废水产生的污泥量是同等规模市政污水处理厂的5~10倍,在二次沉淀池中,生产1t纸约产生65kg干污泥,按照脱水污泥含水量为80%估算,2007年我国大约产生2389×10⁴t脱水污泥、478×10⁴t干污泥,预计到2020年,我国大约将产生30889×10⁴t脱水污泥、6189×10⁴t干污泥(中国造

基金项目:广东省自然科学基金(No. 06025856);广东省科技攻关项目(No. 2008B030302044)

Supported by the Natural Science Foundation of Guangdong Province (No. 06025856) and the Science and Technology Key Project of Guangdong Province (No. 2008B030302044)

作者简介:林云琴(1977—),女,E-mail: yqin@scau.edu.cn; *通讯作者(责任作者),E-mail: dehanwang@scau.edu.cn

Biography: LIN Yunqin (1977—), female, E-mail: yqin@scau.edu.cn; * Corresponding author, E-mail: dehanwang@scau.edu.cn

纸学会,2008). 因此,实现这些污泥的无害化、减量化和资源化处理迫在眉睫.

随着一次性能源的日趋减少,能源紧缺问题越发严重. 目前,世界各国都在积极探索可再生能源的开发与利用,而厌氧消化技术因具有优良的产能特性而备受关注 (Mata-Alvarez *et al.*, 2000; Hartmann *et al.*, 2005; Edelmann *et al.*, 1999). 全球每年有机废物的处理量高达 10^6 t (以湿重计) 左右,这些废物最终均转变为有用的生物气体(甲烷)和稳定残渣体(堆肥) (Montgomery, 2004). 研究发现,造纸污泥中富含细小纤维、木质素及其衍生物、糖类和盐,并含有一定量的蛋白质(沈清江等, 2006),因此,生物处理成为造纸污泥资源化利用的一个重要途径. 研究表明,利用造纸污泥进行厌氧消化产沼气是可行的,但由于其含碳量高、含氮量低的特点,通常需要寻找含氮量高的物质进行联合厌氧消化 (Ratnieks *et al.*, 1997; Poggi *et al.*, 1997).

我国是味精生产大国,每年约产生 10009×10^4 t 左右的味精废液(龚盛昭等,2000;金新梅,1997). 味精废液中含有丰富的蛋白质、氨基酸、菌体和其它营养物质,而目前的味精废液处理处置工艺中存在 NH_4^+ -N 中毒、操作困难、设备复杂等问题 (Sabine *et al.*, 2001; Jia *et al.*, 2007; 李红光, 2007). 如果利用其富氮特点,将其添加到造纸污泥中进行联合发酵,将有可能提高系统产气量.

联合厌氧消化是通过对发酵基质的调理,在消化物料间建立起一种良性互补关系,并通过对发酵物料的 C/N/P、水分以及其他厌氧微生物的必需生长因子进行调整,创造良好的发酵条件,从而提高有机废物厌氧消化的沼气产量和有机物转化率. 目前,研究最多的是城市有机废物和污水污泥的混合厌氧消化 (Callaghan *et al.*, 1999; Chan, 1999),有关造纸污泥与城市污泥联合消化的研究也有报道 (Poggi *et al.*, 1997),而关于造纸污泥与味精废液的联合厌氧消化的研究却还未见报道. 因此,本研究通过中温、间歇式厌氧消化试验,探讨总固体 (TS) 含量、碳氮比 (C/N) 和接种量等工艺参数对造纸污泥与味精废液联合厌氧消化系统甲烷产率的影响,以期为造纸污泥与味精废液资源化利用提供基础数据.

2 材料与方法 (Materials and methods)

2.1 试验材料

造纸污泥取自广州造纸厂,是造纸废水处理过程中得到的生化污泥,新鲜污泥用尼龙袋取回后置于 4°C 冰箱保存备用. 味精废液取自广州奥桑味精厂,新鲜味精废液用塑料桶取回后密封置于 4°C 冰箱保存备用. 采用驯化方式培养种泥,选取经过 2 个月厌氧发酵驯化后的造纸污泥作为接种污泥,现取现用. 物料的基本理化性质如表 1 所示.

表 1 物料的基本理化性质

Table 1 Main characteristics of the materials

物料	TS	VS	OC(有机碳)	TN(总氮)	C/N	pH
造纸污泥	29.32%	52.18%	32.75%	1.09%	30.05	7.82
味精废液	43.00%	68.51%	29.5%	11.83%	2.49	5.36
接种污泥	10.76%	45.35%	-	-	37.61	7.85

注:有机碳和总氮含量均以干重计;“-”表示未测定.

2.2 试验装置

本试验装置如图 1 所示,其主要组成为:1000 mL 的三颈发酵瓶(有效容积 900 mL)、酸性气体吸收瓶(内部填充 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、工业硅胶)、1000 mL 集气瓶、100 mL 量筒. 发酵瓶经聚乙烯管与酸性气体吸收瓶相连,发酵过程产生的生物气经过吸收瓶后进入集气瓶,同时,等体积的水被压入到量筒,量筒的读数为产生物质气体的体积. 由于生物气经过了 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 NaOH 的吸收和工业硅胶的吸附,其中, CO_2 、 H_2S 等酸性气体、 NH_3 和水蒸气均被吸收. 因

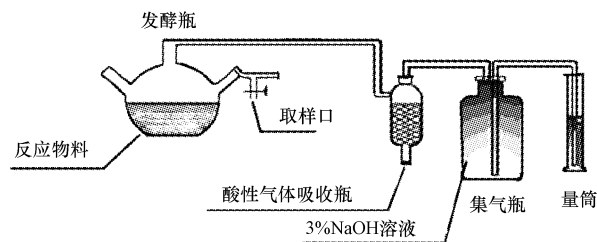


图 1 造纸污泥与味精废液联合厌氧消化试验装置

Fig. 1 Reactor set-up for co-digestion

此,气体经过酸性气体吸收瓶和集气瓶之后,排入量筒的液体体积可以视为纯甲烷体积(幽景元等,2003)。

2.3 试验方法

根据前期探索性试验的结果(吴少全,2009),并结合张碧波等(2006)的研究成果,选定对造纸污泥与味精废液联合厌氧消化产气效果影响较大的 TS 含量、C/N、接种量作为间歇式厌氧消化试验因素,各因素设计的水平分别为:TS 含量为 3%、6%、10% (以湿基计),C/N = 13、20、25,接种量为 5%、10%、20% (以干基计)。试验共设 9 组反应器,编号分别为 T1、T2、T3、T4、T5、T6、T7、T8、T9,S 是空白对照,其反应瓶内只添加接种污泥,不添加其他任何物料。按照试验设计各组反应器的要求(表 2),精确称取不同质量的造纸污泥、味精废液和接种污泥,分别装入各个反应瓶,然后再加入蒸馏水,使得各反应瓶物料总质量均为 700g,集气瓶中装满 3% NaOH 溶液,待物料全部装瓶后,按照图 1 所示连接好装置,用胶塞塞住反应瓶口,将反应瓶置于(37 ± 2)℃ 的水浴锅中,石蜡封口,并向反应瓶中通氮 2min,以保证系统处于厌氧状态。试验过程中,每次

表 2 造纸污泥与味精废液联合厌氧消化试验设计及物料用量

Table 2 The experimental design and the dosage of test materials for anaerobic co-digestion of paper mill sludge and monosodium glutamate waste liquor

反应器	C/N	TS	接种量
T1	13	3%	10%
T2	13	6%	20%
T3	13	10%	5%
T4	20	3%	5%
T5	20	6%	10%
T6	20	10%	20%
T7	25	3%	20%
T8	25	6%	5%
T9	25	10%	10%
S	38	11%	0

反应器	接种污泥 /g	造纸污泥 /g	味精废液 /g	造纸污泥/味精废液(w/w)
T1	20	55	5	11:1
T2	78	96	11	8:1
T3	33	196	18	10:1
T4	10	64	2	31:1
T5	39	122	4	30:1
T6	130	179	7	25:1
T7	39	56	1	56:1
T8	20	133	2	66:1
T9	65	209	3	70:1
S	50	0	0	0

取样结束,均要重复上述通氮步骤。整个试验过程持续 55d,直至系统停止产气。各组反应器做 3 个平行,重复两次。

2.4 测定方法

总固体(TS)含量和挥发性固体物(VS)采用烘干法测定;挥发性有机酸(VFA)采用蒸馏滴定法测定,结果以乙酸计;可溶性 COD 采用重铬酸钾滴定法测定,具体操作参考贺延龄(1998)的厌氧实验研究和分析方法;OC 测定采用重铬酸钾-浓硫酸消煮法测定,TN 测定采用凯氏定氮法测定,具体操作参考 NY525-2002。

3 结果(Results)

3.1 联合厌氧消化过程中各反应器的产气性能

由图 2 可见,不同反应器(T1 ~ T9)的累积产气量大小顺序为:T3 > T9 > T6 > T2 > T5 > T8 > T4 > T1 > T7,其中,T3、T6、T9 反应器的产气量远高于其他反应器,这 3 组反应器的 TS 含量均为 10%;TS 含量为 3% (T1、T4、T7)、6% (T2、T5、T8)、10% (T3、T6、T9)的 3 类反应器的平均产气量分别为 1328、2296、5360mL(以甲烷计),其中,TS 为 6% 含量组平均产气量比 3% 含量组提高了 72.89%,10% 含量组平均产气量比 3% 含量组提高了 303.61%;可见 TS 含量对系统的产气效果影响较大。

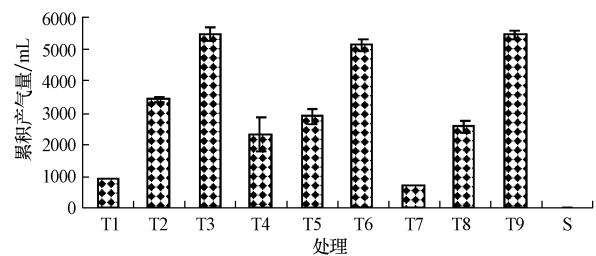


图 2 厌氧消化过程中各反应器的累积产气量

Fig. 2 The total CH₄ yield during co-digestion

由图 3 可见,不同 TS 含量的反应器中,甲烷日产量最高值大小顺序为 T3 > T6 > T9 ≈ T2 > T5 > T8 > T4 > T1 > T7,基本上遵循以下规律:TS = 3% 含量组 < TS = 6% 含量组 < TS = 10% 含量组,该结果与上述各反应器累积产气量大小顺序一致。在 TS 均为 10% 的 3 组反应器(T3、T6、T9)中,初始各反应器中 VS 含量分别为 5.4%、5.2%、5.2%,启动时的有机负荷分别为 0.98、0.94、0.94 g · L⁻¹ · d⁻¹ (以 VS 计),3 组反应器中的初始 VS 含量和有机负荷差异不大。由图 3c 可知,T3、T6、T9 反应器的日产气量高

峰期分别出现在第6、15、17d,可见T3反应器的启动时间短、速度快;在产气阶段的第2d T3反应器的产气量就达到268mL,是T6反应器同期产气量(184mL)的146%,是T9反应器同期产气量(111mL)的258%;由图4可见,在整个产气周期内,T3、T6、T9 3组反应器的平均产气率分别为170.21、163.94、185.72 mL·g⁻¹(以VS计),三者的产气率相差不大,其中,T3仅比T9低8.4%;综合上述3种因素可知,T3反应器的产气效果优于T6和T9反应器。

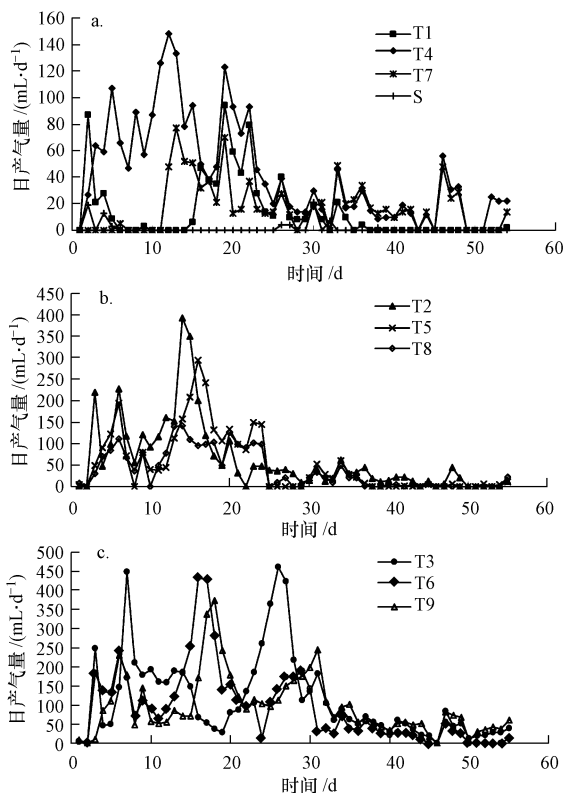


图3 厌氧消化过程中各反应器日产气量(a. TS为3%各反应器, b. TS为6%各反应器, c. TS为10%各反应器)

Fig.3 The daily yield of methane for each treatment during co-digestion (a. Reactors with 3% TS, b. Reactors with 6% TS, c. Reactors with 10% TS)

同时,由图4还可知,各反应器的单位质量VS的累积产气率随TS含量不同而差异显著,总体符合“TS含量越高,单位质量VS累积产气率越低”的规律,其原因主要是TS含量高的反应器内累积产气量高,VS含量也相应较高,但累积产气量的增加幅度低于VS的增加幅度,因此,造成单位质量VS的产气量反而降低。综合图2和图4可知,TS含量越高,系统总产气量越高,单位质量VS产气量越低。因此,在实际应用中,为了达到最大产气量和消化底物充分降解的目的,可以采取低浓度、分批次

进料的方法代替高浓度一次性进料的做法。

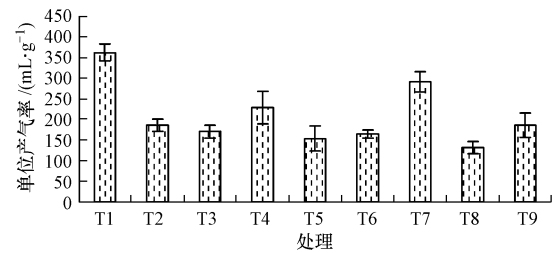


图4 厌氧消化过程中各反应器的单位质量VS产气率

Fig.4 The production efficiency of CH₄ during co-digestion

本试验中,TS为10%的各反应器单位质量VS累积产气率最低,以T3为例,其累积产气率为170.21 mL·g⁻¹(以VS计)。相对于王星(2006)在餐厨垃圾(米饭、生菜、肥肉、瘦肉、鱼骨等有机成分为主)的一段法和两段法中研究得出的沼气产气率(135.66和134.56 mL·g⁻¹,以VS计)而言,分别高25.47%、26.49%;比幽景元等(2003)利用生活垃圾(菜叶、梗、茎等蔬菜的剔除物和少量的鱼、鸡、鸭等动物的内脏)厌氧发酵实验得出的结果(107 mL·g⁻¹,以VS计)高58.14%。餐厨垃圾和生活垃圾总体来说都属有机易腐性固体废物,而造纸污泥中有机碳含量为32.75%(表1),主要以纤维素、半纤维素、木质素形式存在,但造纸污泥在与味精废液联合厌氧消化后,单位质量VS产气率超过了餐厨垃圾和生活垃圾单独厌氧消化的单位产气率,可能原因是味精废液的添加提高了造纸污泥的生化可降解性,从而提高了两种工业废物联合厌氧消化的甲烷产率。

S组为单一接种污泥的累积产气量,由图2、图3可知,添加的接种污泥产气量几乎为0,说明各反应器的产气来源于造纸污泥与味精废液的发酵分解,因此,S反应器未参与后续各指标的分析。

3.2 联合厌氧消化过程中各反应器有机物含量的变化

TS反映厌氧消化系统中总固体含量(即底物浓度),VS反映厌氧消化系统中挥发性固体含量,可用于表征体系中可供微生物利用的有机物的量。由图5可知,在整个厌氧消化过程中,TS、VS含量均呈降低趋势,其中,TS降低幅度为14.36%~38.24%,平均降幅为24.25%,VS降低幅度为21.05%~46.17%,平均降幅为32.03%,VS降低幅度大于TS,主要是由于TS当中包含的灰分在厌氧发酵时不发生变化所致。比较各反应器中TS、VS的去除率

发现(表 3),TS 含量为 3% 反应器(T1、T4 和 T7)中二者的去除率最高,这与这些反应器中单位质量 VS 的累积产气率最高相一致(图 4),主要是由于其底物浓度低(初始各系统中 VS 含量分别为 1.6%、1.6%、1.5%),便于有机固体物质液化水解,从而被甲烷菌利用。

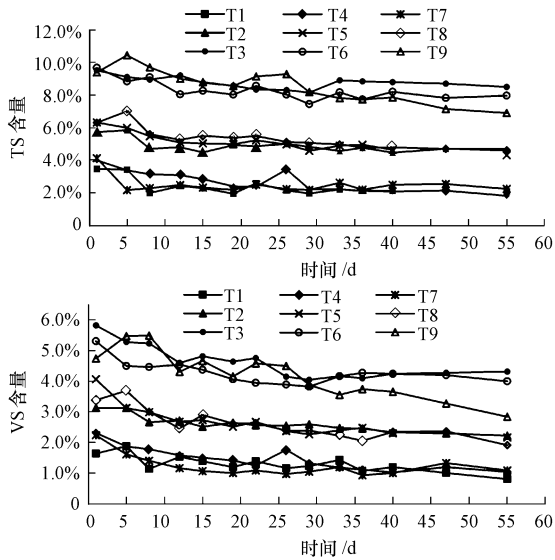


图 5 厌氧消化过程中各反应器中 TS(a) 和 VS(b) 的变化
Fig. 5 The change of TS(a) and VS(b) during co-digestion

由表 3 可见,底物浓度相同的反应器(即试验开始时 TS 含量相同的反应器)中,它们的 TS、VS 去除率基本相同(即 $T1 \approx T4 \approx T7$, $T2 \approx T5 \approx T8$, $T3 \approx T6 \approx T9$),可见底物浓度对系统有机物的去除率起重要影响;对于底物浓度相同的 T3、T6 和 T9 反应器,T3 的 VS 去除率高于 T6 和 T9,可见 T3 系统更有利于有机物的降解。

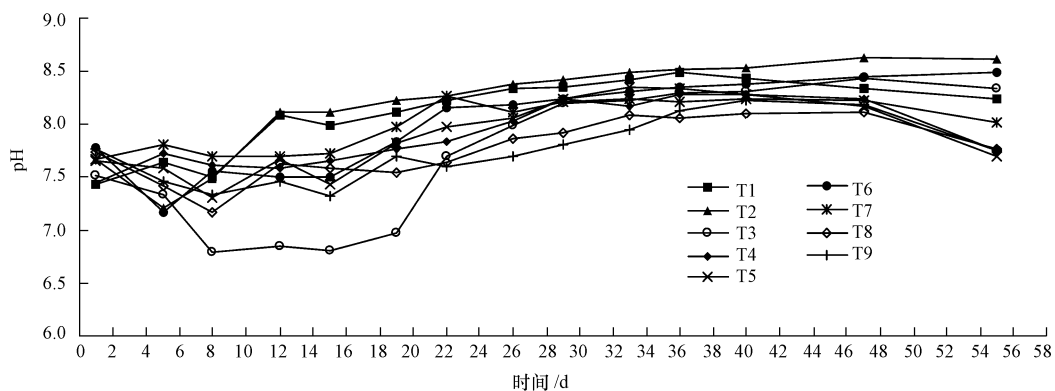


图 6 厌氧消化过程中系统 pH 值的变化
Fig. 6 Variation of pH during co-digestion

表 3 日产气高峰结束时各反应器 TS、VS 的变化率

Table 3 The decreased efficiency of TS and VS after the peak of methane production

反应器	TS 去除率	VS 去除率
T1	38.24%	34.39%
T2	18.06%	25.61%
T3	15.49%	28.52%
T4	40.50%	46.17%
T5	17.28%	34.45%
T6	14.36%	27.99%
T7	38.22%	40.72%
T8	18.51%	29.36%
T9	17.62%	21.05%

注:去除率 = $(C_0 - C_1/C_0) \times 100\%$; C_0 为起始含量, C_1 为结束含量。

3.3 联合厌氧消化过程中各反应器 pH 值的变化

环境 pH 值的变化可以引起细胞膜电荷的改变,从而影响微生物对营养物质的吸收,进而影响代谢过程中酶的活性,改变营养物质的可给性和有害物质的毒性.介质的 pH 值不仅影响微生物的生长,甚至影响微生物的形态. pH 值是氢离子活度的负对数,厌氧消化中产生的氢离子,主要来自其中间产物有机酸、 H_2CO_3 和 H_2S 等(Ren *et al.*, 2004; 徐葳等,2008)。

由图 6 可知,各反应器的初始 pH 值均在 7.5 ~ 7.8 之间,处于较佳的 pH 值范围,有利于甲烷菌的生长繁殖(张记市等,2005).系统启动后,各反应器的 pH 值都经历了一个先下降后上升的过程,主要是由于前期挥发性脂肪酸(VFA)的积累引起 pH 值降低,而后期 VFA 被消耗,同时,消化系统中的含氮有机物分解产生氨,导致系统 pH 值升高(吴少全,2009)。

比较各反应器系统的 pH 值发现, T3 反应器的 pH 值下降最多, 并在第 8d 下降到 6.79, 然后一直维持在这个水平直到第 19d, 而其它反应器的 pH 值都在 7.0 以上. 这说明 T3 反应器的水解酸化能力很强, 这与 T3 反应器在这个时段产生大量 VFA 的结果相吻合(VFA 数据详见文献(吴少全, 2009)), 同时也说明了 T3 反应器较其它反应器具有更好的产气潜能, 这与 T3 反应器累积产气量最高(图 2)的结果相一致.

4 结论 (Conclusions)

1) 造纸污泥与味精废液联合厌氧消化各反应器的累积产气量随着 TS 含量的增加而明显增加, 可见 TS 对系统产气效果的影响较大, 且各反应器的单位质量 VS 产气率的变化规律基本遵循: TS 越高, 单位质量 VS 产气率累积越低的规律.

2) 各反应器中 TS、VS 的去除率基本遵循: TS 含量越高, 有机物去除率越低的规律, 这与单位质量 VS 累积产气率的规律一致, 主要是由于底物浓度低, 有利于有机固体物质的液化水解所致.

3) 厌氧消化过程中各反应器的 pH 值均位于 6.5~8.5, 其中, T3 反应器在消化过程中 pH 值下降最多、酸化能力最强, 这是导致在 TS 含量(10%)相同的反应器中, T3 反应器的产气效果优于 T6 和 T9 反应器的原因之一.

4) 造纸污泥与味精废液联合厌氧消化累积产气量最大值为 5482mL (T3 反应器), 单位质量 VS 产气率最大值为 362 mL·g⁻¹ (T1 反应器), 可见这两种工业废物联合厌氧消化有效提高系统甲烷产量的合适配比为造纸污泥: 味精废液 (w/w) = (10~11):1.

责任作者简介: 王德汉(1965—), 教授, 博士生导师, 主要从事固体废物资源化利用研究.

参考文献 (References):

Callaghan F J, Wase D A J, Thayanyithy K, *et al.* 1999. Co-digestion of waste organic solids-batch studies [J]. *Bioresource Technol*, 67 (2): 117—122

Chan Y S G. 1999. Codisposal refuse, sewage sludge and marine dredgings for methane production [J]. *Environmental Pollution*, 106: 123—132

杜伟, 郑国砥, 陈同斌, 等. 2008. 造纸污泥土地利用的资源价值与潜在风险[J]. *生态学报*, 28 (10): 5095—5103

Du W, Zheng G D, Chen T B, *et al.* 2008. Value and potential

contamination risk of paper mill sludge land application: a review [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 28 (10): 5095—5103 (in Chinese)

Edelmann W, Joss A, Engeli H. 1999. Two step anaerobic digestion of organic solid wastes [A]//Mata-Alvarez J, Tilche A, Cecchi F (Eds.). *Proceedings of the Second International Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Wastes* [C]. Barcelona: Spanish Environmental Science Press. 50—153

龚盛昭, 黄小文. 2000. 味精废母液的综合利用[J]. *中国资源综合利用*, 7: 10—13

Gong S Z, Huang X W. 2000. The utilization of monosodium glutamate waste liquor [J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 7: 10—13 (in Chinese)

Hartmann H, Birgitte K. 2005. Anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste: Influence of co-digestion with manure [J]. *Water Research*, 39: 1543—1552

贺延龄. 1998. 废水的厌氧生物处理[M]. 北京: 中国轻工业出版社. 88—101

He Y L. 1998. The Technology of Anaerobic Bio-treatment for Waste Water [M]. Beijing: China Light Industry Press. 88—101 (in Chinese)

Jia C Y, Kang R J, Zhang Y H, *et al.* 2007. Synergic treatment for monosodium glutamate wastewater by *saccharomyces cerevisiae* and *coriolus versicolor* [J]. *Bioresource Technology*, 98: 967 - 970

金新梅. 1997. 味精废水的微生物转化和效益[J]. *环境污染与防治*, 19 (2): 13—16

Jin X M. 1997. Microorganism decomposition of pollution in monosodium glutamate waste liquid and its benefits [J]. *Environmental Pollution & Control*, 19 (2): 13—16 (in Chinese)

李红光, 吕录宣. 1998. 味精生产中谷氨酸等电母液综合利用治理方法 [P]. 中国, 发明专利, 96119095, 4, 1998-01-07

Li H G, Lü L X. 1998. The treatment technologies of glutamic acid in the solution during monosodium glutamate production [P]. China, Invention partent, 96119095, 4, 1998-01-07 (in Chinese)

Mata-Alvarez S, Mace P, Llabres J. 2000. Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives [J]. *Bioresource Technology*, 74: 3—16

Montgomery R. 2004. Review paper - Development of biobased products [J]. *Bioresource Technology*, 91: 1—29

Poggi Valardo H M, Valdes L, Esparza Garcia F. 1997. Solid substrate anaerobic co-digestion of paper-mill sludge, biosolids, and municipal solid waste [J]. *Water Sci Technol*, 35 (2/3): 197—204

Ratnieks C, Gaylarde C. 1997. Anaerobic degradation of paper mill sludge [J]. *International Biodeterioration*, 39 (4): 287—293

任南琪, 王爱杰. 2004. 厌氧生物技术原理与应用[M]. 北京: 化学工业出版社. 30—31

Ren N Q, Wang A J. 2004. The method and technology of anaerobic digestion [J]. Beijing: Chemical Industry Press. 30—31 (in Chinese)

Sabine K, Sanjeev K D, Siemen V, *et al.* 2001. The effect of pH variation at the ammonium/ammonia equilibrium in wastewater and its toxicity to *Lemma gibba* [J]. *Aquat Bot*, 71: 71—78

沈清江, 秦梦华, 徐清华, 等. 2006. 造纸污泥的回收利用[J]. 造纸

- 科学与技术, 25(2): 54—58
- Shen Q J, Qin M H, Xu Q H, *et al.*, 2006. The reuse of paper mill sludge [J]. *Paper Science & Technology*, 25(2): 54—58 (in Chinese)
- 王星. 2006. 矿物材料对餐厨垃圾厌氧消化的影响的研究[D]. 广州:华南农业大学. 53—68
- Wang X. 2006. The study on the anaerobic digestion of kitchen waste with mineral admixtures [D]. *Guangzhou: South China Agricultural University*. 53—68 (in Chinese)
- 吴少全. 2009. 造纸污泥与味精废液联合厌氧消化试验——厌氧消化过程中 SCOD、VFA、pH 变化分析[D]. 广州:华南农业大学. 35—41
- Wu S Q. 2009. SCOD, VFA, pH change in anaerobic co-digestion of paper mill sludge and monosodium glutamate waste liquor [D]. *Guangzhou: South China Agricultural University*. 35—41 (in Chinese)
- 徐葳, 冯磊, Raninger B, 等. 2008. 厨余垃圾厌氧消化制取甲烷的影响因素研究[J]. *可再生能源*, 26(6): 66—71
- Xu W, Fen L, Raninger B, *et al.* 2008. Study on the influential factors for CH₄ production from kitchen residue anaerobic digestion [J]. *Renewable Energy Resources*, 26(6): 66—71 (in Chinese)
- 幽景元, 肖波, 杨家宽, 等. 2003. 生活垃圾厌氧发酵条件的正交试验[J]. *能源工程*, 2: 28—30
- You J Y, Xiao B, Yang J K, *et al.* 2003. The orthogonal experiment of anaerobic digestion of municipal solid waste [J]. *Energy Engineering*, 2: 28—30 (in Chinese)
- 张碧波, 曾光明, 张盼月, 等. 2006. 高温厌氧消化处理城市有机垃圾的正交试验研究[J]. *环境污染与防治*, 28(2): 87—91
- Zhang B B, Zeng G M, Zhang P Y, *et al.* 2006. A study of thermophilic digestion of municipal solid waste [J]. *Environmental Pollution and Protection*, 28(2): 87—91 (in Chinese)
- 张记市, 张雷, 王华. 2005. 城市有机生活垃圾厌氧发酵处理研究[J]. *生态环境*, 14(3): 321—324
- Zhang J S, Zhang L, Wang H. 2005. Study on anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste [J]. *Ecology and Environment*, 14(3): 321—324 (in Chinese)
- 中国造纸学会. 2008. 中国造纸年鉴[M]. 北京:中国轻工业出版社. 159—161
- China Technical Association of Paper Industry. 2008. *Almanac of China Paper Industry*[M]. Beijing: China Light Industry Press. 159—161 (in Chinese)