

固含率对酒糟与餐厨垃圾混合厌氧发酵产沼气的影 响

张 笑¹, 蔡玮玮¹, 王利红¹, 孙晓红², 汪群慧^{1*}

(1.北京科技大学环境工程系, 北京 100083; 2.北京市农林科学院, 北京 100097)

摘 要:采用酒糟与餐厨垃圾作为发酵底物,并接种消化污泥进行厌氧干式发酵试验,比较固含率为15%、20%、25%、30%条件下甲烷产率、有机物去除率,并结合各项参数综合分析干式厌氧发酵过程。结果表明,由于营养物质较多,在一定范围内提高固含率有助于提高总甲烷产率,但较高的固含率会影响微生物代谢活性,降低反应速率,延长发酵周期,发酵50 d后,各试验组中,固含率为25%时产气效果最佳,其总产气率达238.48 mL·g⁻¹ TS,且TS、VS减量化程度达到最大,分别为55.65%、72.15%,继续增大固含率甲烷产率反而降低。干式厌氧发酵过程主要问题是由于发酵初期快速水解酸化引起的酸抑制作用,且固含率越高,抑制现象越明显。试验中累计甲烷产率基本符合一级反应动力学模型,其R²值均高于0.94,但随着固含率增加,体系产甲烷潜能逐步提升,反应速率逐步减慢,试验数据对模型的符合程度逐步降低。

关键词:固含率;酒糟;餐厨垃圾;甲烷;厌氧混合干式发酵

中图分类号:S216.4 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2013)05-1078-07 doi:10.11654/jaes.2013.05.028

Influence of Total Solid Contents on Anaerobic Co-digestion from Distiller's Grains and Food Waste for Methane Production

ZHANG Xiao¹, CAI Wei-wei¹, WANG Li-hong¹, SUN Xiao-hong², WANG Qun-hui^{1*}

(1.Department of Environmental Engineering, Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083, China; 2.Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China)

Abstract: The method of anaerobic solid-state digestion was used to examine the effects of different total solid contents on methane yield and organic removal rate from distiller's grains and food waste at total solid content of 15%, 20%, 25% and 30% with activated sludge as inocula. Combined with various procedure parameters such as VFA, alkalinity and pH value, solid-state fermentation process was also analysed. The results showed that due to the high nutrient content, increasing total solid content within a certain extent could boost the production of methane, but decrease reaction speed and prolong fermentation period because of low metabolites from microbiology. After 50-days of fermentation, the highest accumulated methane yield of all the groups was 238.48 mL·g⁻¹ TS at total solid content of 25% with optimal TS removal of 55.65% and VS removal of 72.15%. Keeping increasing total solid content lead to less methane yield. The irreversible acidification of the digestion resulting from the rapid hydrolysis and acidogenesis was the major challenge in solid-state anaerobic digestion considering that it could inhibit methanogenesis or dictate the failure of the digestion. And the higher total solid content could cause more obvious inhibition. In addition, the cumulative methane production rate basically fitted the first order kinetic model, and R² of all the groups were higher than 0.94. As the total solid contents increased, methane producing potential enhanced, the kinetic constants slowed down and the degree of compliance with the model lowered gradually.

Keywords: total solid content; distiller's grains; food waste; methane; anaerobic solid-state co-digestion

近年来,由于农村地区粮食产量逐年增高,以及地方政府对农村经济发展的支持,大量农村小酒厂一

哄而起,而在农民脱贫致富的同时,酿酒副产物酒糟的处理逐渐成为人们关注的焦点。酒糟中含有丰富的蛋白质、氨基酸、维生素以及磷、钾等无机元素成分,且酒糟中粗纤维含量较高,是纤维素类废物的典型代表^[1]。目前我国农村地区大多采用鲜酒糟直接作为饲料,喂养牲畜。此种方法操作简单,但酒糟易腐败变质携带致病菌,严重威胁牲畜健康,特别是白酒酒糟的

收稿日期:2012-11-06

基金项目:国家自然科学基金(51278050);环保公益型行业科研专项(201109024)

作者简介:张 笑(1990—),女,在读硕士,主要从事固体废物资源化研究。E-mail:bjkjdxzx@126.com

* 通信作者:汪群慧 E-mail:wangqh59@sina.com

可消化吸收性差,销售困难,只能大量堆积,危害环境。与此同时,农村小饭店的餐厨垃圾产生量也逐渐增多,其主要成分为淀粉、纤维素、蛋白质、脂类等,同时含有少量氮、磷、钾、钙、镁、铁等无机元素^[2],如处置不当不仅污染环境、损害人体健康且会造成巨大的资源浪费。干式厌氧消化处理技术则为上述两类废物处理提供了良好的资源化途径。

干式厌氧消化通常指发酵液固体浓度(即 TS 浓度)大于 20%的沼气发酵方式,现阶段是一种新型沼气发酵技术,目前在国内外应用还不够广泛。与湿式发酵技术相比,干式厌氧消化技术可提高单位容积产气率,减少发酵需水量(或不需水),消化后产品不需脱水即可作为肥料或土壤调节剂等,降低处理成本^[3-4],近年来逐渐成为研究该领域的热点。例如采用干式厌氧消化处理餐厨垃圾无需在调质时加入大量新鲜水来稀释餐厨垃圾,减少了后期沼液的处理投入,还可获得更高的有机负荷率和产气效率^[5]。Parawira W 等^[6]采用马铃薯为原料,研究其厌氧干发酵特性,结果表明当 TS 含量为 40%,CH₄ 产率为 0.32 L·g⁻¹ VS,所产沼气中甲烷的体积分数高达 84%。Forster-Carneiro 等^[7]探索餐厨垃圾的厌氧干发酵过程,发现当 TS 含量为 20%、污泥接种量为 30%时,餐厨垃圾 CH₄ 产率高达 0.49 L·g⁻¹VS。Chae 等^[8]研究发现当 TS 含量为 23.9%时,鲜猪粪批处理厌氧发酵的 CH₄ 产率可达 0.39~0.40 L·g⁻¹ VS。

本研究采用白酒酒糟与餐厨垃圾两种原料进行混合干式厌氧发酵试验,可同时实现两类废物的减量化、资源化要求;与此同时,将两类废物进行混合同时具有显著的协同效应:由于酒糟 C/N 比值较高,餐厨垃圾 C/N 比值较低,可利用两者互补特性保证发酵底物适宜的营养成分;此外,据资料显示,食物类废物的产甲烷能力远高于纤维类废物,而其较高的水解速率也可保证短期内甲烷能量的有效回收,因此食物类废物比纤维类废物更适于厌氧发酵工艺处理。但是,以较高食物类废物含量的垃圾作为厌氧发酵的原料时,初期固相快速水解酸化产生的高浓度 VFA 会对产甲烷化甚至水解酸化过程造成抑制,从而影响厌氧发酵工艺的效率和稳定性^[9]。而纤维类废物所含木质纤维素含量高,可生化降解性差,降解速度慢,产甲烷能力弱,以其作为厌氧发酵的原料,初期的缓慢水解使其液相产物的有机物浓度较低,也影响厌氧发酵工艺的产气效率^[10]。因此,将纤维类废物(餐厨垃圾)和食物类废物(酒糟)按一定比例混合后进行厌氧发酵处理,

可在一定程度上减弱餐厨垃圾单一发酵引起的 VFA 抑制问题,还可以加速纤维类废物的水解,避免纤维类废物厌氧发酵停留时间过长,从而在一定程度上缩短了单一餐厨垃圾发酵抑制期并解决了酒糟发酵水解困难的问题,实现了较好的发酵效果。目前关于这两类废物混合发酵工艺尚未有相关报道。本文在前期研究^[11-12]的基础上,进一步探索固含率对酒糟与餐厨垃圾产气特性的影响,以期为该工艺条件的调控和优化提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

厌氧发酵底物酒糟取自北京某白酒厂,研磨后放入冰箱储存备用;餐厨垃圾取自北京科技大学学生食堂,经简单分拣、绞碎后 4℃冷藏备用;接种污泥取自北京农林科学院厌氧消化池。试验材料主要成分指标见表 1。由表 1 可知,酒糟和餐厨垃圾中有机固体含量较高,占总固体含量的 91%以上,可成为良好的发酵底物。

表 1 厌氧发酵底物主要成分

Table 1 Composition of anaerobic digestion substrates

测定参数	餐厨垃圾	酒糟	接种污泥
TS/%	28.36	35.93	23.89
VS/%	27.14	32.73	18.68
VS/TS	95.70	91.10	78.18
蛋白质/%	14.82	9.83	14.50
碳水化合物/%	40.59	55.11	25.36
脂肪/%	32.10	6.50	—
C/N	18.23	27.35	11.47
半纤维素/%	12.32	22.86	47.17
纤维素/%	4.43	19.92	18.47
木质素/%	2.83	13.82	14.50
灰分/%	1.22	3.20	5.21

1.2 试验装置

本试验采用 500 mL 广口瓶作为反应容器,置于恒温水浴中(37±1)℃。发酵过程产生的气体通过导气管进入装有 3%NaOH 溶液的集气装置中,以排水法收集(图 1)。

1.3 试验方法

试验采用间歇发酵方式,选择 4 组固含率分别为 15%、20%、25%、30%。并设置对照组,以消除接种污泥本身对总产气量的影响。各组接种比例均为 1:1(接种污泥 TS:混合发酵原料 TS),且酒糟与餐厨垃圾 TS

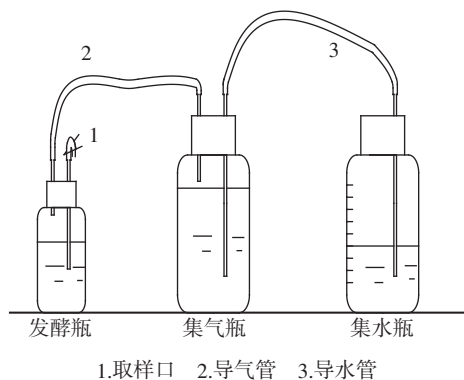


图 1 厌氧发酵试验组成装置示意图

Figure 1 Sketch map of anaerobic digestion test device

混合比例为 8:1,具体试验方案见表 2。试验开始前,根据前期参数优化结论,最佳碱度配比为 3.75%,按照总物料核算,向各试验组分别加入 NaHCO_3 固体 7.5 g 以提高体系缓冲能力,并向反应器内通入氮气 (2 min)以排出残留空气,发酵温度保持 $(37\pm 1)^\circ\text{C}$ 。发酵进行期间,每日搅拌物料两次(手动摇晃 5 min),使其保持在最佳产气状态。记录每 24 h 净产气量,产气结束后,进行各项参数测定。

1.4 分析指标与方法

①甲烷体积测定:排水集气法——试验组量筒中体积减去对照组气体体积,再换算为标准温度与压力

(STP)下体积。

②挥发性脂肪酸(VFA)浓度测定:高效液相色谱法——色谱条件:色谱柱 Shimadzu LC-20A;进样量 20 μL ;流速 $0.5\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$;检测波长 210 nm。

③TS、VS 含量测定:减量法^[13]——分别于 105、600 $^\circ\text{C}$ 恒温 12、2 h 至恒重,计算质量减少百分比。

④纤维素测定:洗涤法(SLQ-6 型纤维素测定仪)。

⑤脂肪含量测定:酸水解法(GB/T 5009.6—2003 食品中脂肪的测定)。

⑥TC 测定:TOC 分析仪测定 (Primacs SLC TOC Analyzer Model CS22)。

⑦TN 测定:凯氏定氮法^[13](KDN-2C 型凯氏定氮仪)。

⑧气体成分:气相色谱法测定(瓦里安 Cp-3800 气相色谱分析仪)。

2 结果与讨论

2.1 固含率对甲烷产率的影响

不同固含率条件下酒糟与餐厨垃圾厌氧发酵日产气率变化如图 2 所示。厌氧发酵 50 d 后,各试验组基本结束产气。

产气过程主要集中在试验前期,发酵过程启动较快,这主要是由于试验前菌种经长时间驯化,对底物

表 2 试验方案
Table 2 Experiment scheme

试验序号	酒糟		餐厨垃圾		总发酵底物		接种污泥		总 TS 质量/g	物料总质量/g	固含率/%
	质量/g	TS/g	质量/g	TS/g	质量/g	TS/g	质量/g	TS/g			
1	37.11	13.33	5.88	1.67	42.99	15.00	62.79	15.00	30.00	200.00	15.00
2	49.48	17.78	7.84	2.22	57.32	20.00	83.72	20.00	40.00	200.00	20.00
3	61.85	22.22	9.80	2.78	71.65	25.00	104.65	25.00	50.00	200.00	25.00
4	74.22	26.67	11.75	3.33	85.98	30.00	125.58	30.00	60.00	200.00	30.00
对照	0	0	0	0	0	0	200.00	47.78	47.78	200.00	23.89

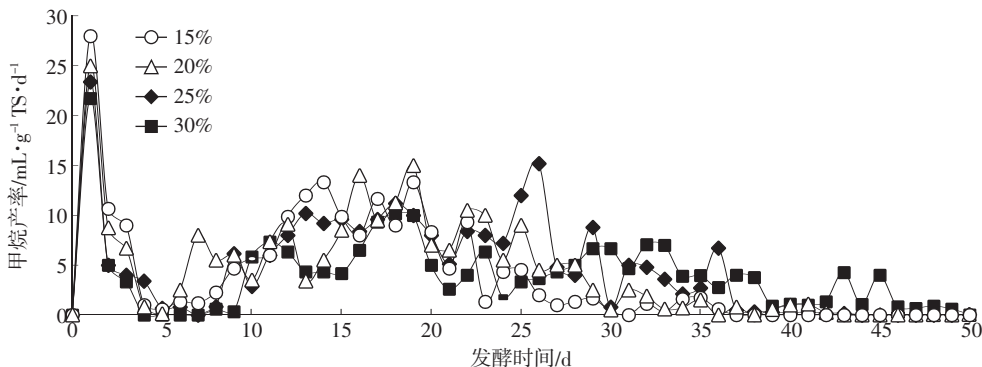


图 2 不同固含率条件下日甲烷产率

Figure 2 Effects of different total solid contents on daily methane yield

适应能力很强,且发酵条件(温度、pH、厌氧环境)较为良好,短时间内可达到较好的产气效果。各组均在发酵第1 d达到产气最高峰,固含率为15%、20%、25%、30%试验组产气峰值分别为28.0、25.0、23.4、21.7 mL·g⁻¹ TS·d⁻¹。而初始发酵20 d内,固含率为15%、20%、25%、30%试验组平均产气率分别为8.29、7.87、6.87、5.22 mL·g⁻¹ VS·d⁻¹,即当TS浓度由30%降低至15%时,初始反应速率提高了1.6倍,反应速率显著加快。纵观整个发酵周期,固含率降低则有助于缩短反应时间,15%试验组在第37 d结束产气,而20%、25%、30%试验组持续产气时间分别为43、44、50 d。由此表明,在适宜范围内,降低固含率可提高厌氧发酵反应速率,缩短反应周期。这主要由以下两个原因引起:一是TS浓度增加,反应体系水分含量降低,影响了微生物代谢活性;二是固体浓度过高易引起发酵体系酸抑制问题的出现。

厌氧发酵过程中,有机物逐步被微生物转化为挥发性脂肪酸(VFA),VFA中其他种类有机酸继续转化为乙酸,而乙酸可作为产甲烷菌的直接食源,通过自身代谢作用生成甲烷。但较高的VFA浓度会引起发酵体系酸化、pH值降低、微生物代谢过程停滞,导致发酵过程失败^[14-16]。

本试验以25%试验组为代表,同时对发酵体系的VFA浓度、碱度以及pH值进行分析(图3),以探索干式发酵的内在机理。

结合图2可知,发酵进行1 d后,由于有机物水解酸化作用速度较快,体系中VFA累积浓度显著上升,pH值、碱度随之下降,发酵过程受到抑制作用,甲烷产率迅速下降。当VFA浓度升高至12 000 mg·L⁻¹左右时,发酵体系基本停止产气,VFA浓度在发酵第8 d达到最大值15 625 mg·L⁻¹。随后由于水解酸化速

率减慢,有机酸利用速率大于生成速率,累积的有机酸不断被降解转化,pH值、碱度转而上升,最终达到平衡值。当体系VFA浓度降低至约10 000 mg·L⁻¹时,产气过程逐步恢复。

此外,当VFA浓度达到10 000 mg·L⁻¹时发酵过程仍可顺利进行,这与Siegert等^[17]研究结果不符(当体系VFA浓度超过2000 mg·L⁻¹时即对纤维素降解形成抑制,超过4000 mg·L⁻¹时会对葡萄糖的降解形成抑制),但与Dong等^[18]研究结果一致(当VFA浓度大于6800 mg·L⁻¹时仍可保证发酵正常进行;当VFA浓度达到22 400 mg·L⁻¹时甲烷产生受到抑制)。此矛盾产生原因与体系中的碱度相关。本次发酵过程中,25%试验组碱度大多维持在10 000~15 000 mg·L⁻¹之间,而初始碱度高于13 000 mg·L⁻¹,为发酵体系提供较高的缓冲能力,使干发酵体系可承受较高的VFA,防止由于酸积累而使发酵过程受到抑制甚至引起发酵过程失败。这可能是保障发酵过程顺利进行的主要原因之一。

由上述分析可知,干式厌氧发酵试验中,由于初期有机物负荷较高,有机酸积累过多,会使反应体系出现酸抑制现象。且由图2可知,固含率越高,抑制现象越明显:当TS浓度为15%、20%时,酸化现象较弱,抑制期仅为2 d;当TS浓度达到25%、30%时,抑制期分别为4、6 d。由此可知,较低固含率体系可快速将VFA转化为目标产物甲烷,防止发酵过程中过多的酸积累,减弱体系中由较高VFA浓度引起的抑制作用,从而提高反应速率,缩短反应周期。

由图4可知,各组发酵50 d后,固含率为25%时产气效果最佳,其总产气率达238.48 mL·g⁻¹ TS。此后继续增加固含率,总产气率反而下降。其余试验组总甲烷产率分别为201.77 mL·g⁻¹ TS(15%)、227.38 mL·

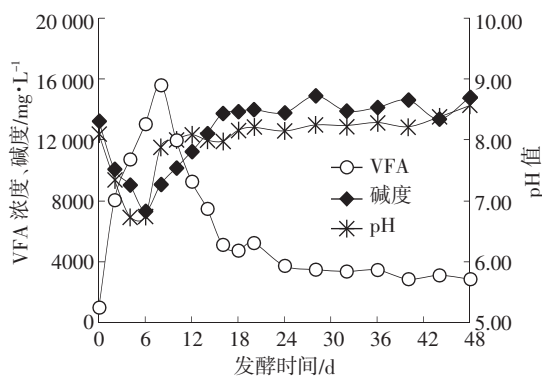


图3 发酵过程中VFA浓度、pH值、碱度变化

Figure 3 Variations of VFA concentrations, pH value, alkalinity during fermentation process

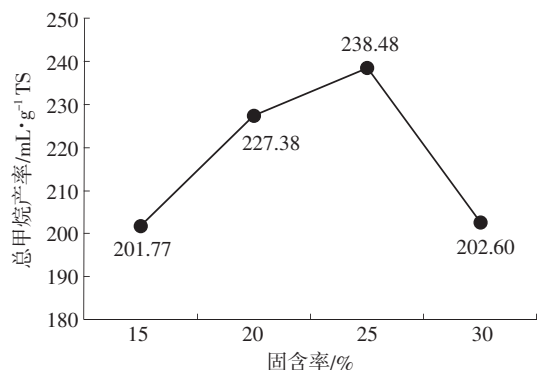


图4 不同固含率条件下累积甲烷产率

Figure 4 Effects of different total solid contents on ultimate methane yield

$\text{g}^{-1} \text{TS}(20\%)$ 、 $202.60 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1} \text{TS}(30\%)$ 。虽然较高底物浓度会提高体系 VFA 浓度,加剧酸化程度,但可为微生物生长繁殖提供充足的营养物质,减弱微生物间竞争作用,因此在一定范围内提高干物质浓度可维持较长的产气时间,增加总甲烷产率。但过高的固含率对细菌活性影响较大,易导致发酵失败,并不能达到很好的产气效果,这与国内很多学者的研究结果一致^[19-20]。

2.2 固含率对产甲烷潜能的影响

生物质产甲烷过程一般遵循一级反应动力学模型^[21-22],本研究为探索各试验组产甲烷潜能,方便对比试验结果,采用 1995 年 Borja^[23]提出的沼气发酵一级动力学方程:

$$G_t = G_m (1 - e^{-kt}) \quad (1)$$

式中: G_t 为 t 时刻累计产气率, $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1} \text{TS}$; G_m 为理论累计产气率, $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1} \text{TS}$; t 为降解时间, d ; k 为降解动力学常数, d^{-1} 。

将试验所得累计产气率 G 及时间 t 代入公式(1)中,经 Origin 软件非线性拟合得出各试验组累积产气率动力学曲线(图 5)以及反应速率参数(表 3),由分析可知,各试验组拟合模型决定系数 R^2 均大于 0.94,该模型可基本反映厌氧消化过程。但固含率越低,试验数据对模型的符合程度越好,当固含率为 15%时, R^2 可达 0.979。这主要是由于固含率较高时,发酵初期出现较长的酸抑制期所致。

据表 3 可知,随着发酵体系固含率提高, 1 g TS 底物产甲烷潜能 G_m 逐渐增加,由此可知,总量不变条件下,提高固体浓度可增大理论产甲烷潜能,也从另一方面说明固含率对甲烷产率影响较大。而反应降解动力学常数 k 则随着固含率增加逐渐降低,即当固含率由 15%提高至 30%时, k 值由 0.051 减少至 0.011,降低了 78%,说明随着固含率提高,单位时间内产甲

表 3 酒糟与餐厨垃圾混合厌氧发酵反应速率参数

Table 3 Parameters of reaction rates of anaerobic digestion of distiller's grains and food waste

固含率/%	k/d^{-1}	$G_m/\text{mL} \cdot \text{g}^{-1} \text{TS}$	R^2
15	0.051 ± 0.004	235.66 ± 8.71	0.979
20	0.037 ± 0.003	295.18 ± 15.50	0.952
25	0.020 ± 0.003	418.33 ± 49.58	0.952
30	0.011 ± 0.002	507.25 ± 80.55	0.941

烷量明显下降。由此表明固体浓度对微生物活性影响较大,进而影响体系反应速率。

2.3 固含率对发酵底物减量化程度的影响

有机物经厌氧微生物代谢生成 CH_4 、 CO_2 等最终产物,挥发性固体(VS)则是厌氧消化过程的主要物质来源^[24]。本试验发酵底物(酒糟和餐厨垃圾)减量化程度拟用 TS、VS 去除率来表示。由上述分析可知,由于提高固含率可增大体系产甲烷潜能,可在一定程度上提高有机物的去除率。如图 6 所示,各组经 50 d 发酵后,固含率为 25%试验组 TS、VS 去除率最高,分别为 55.65%、72.15%,此时总甲烷产率达到最大

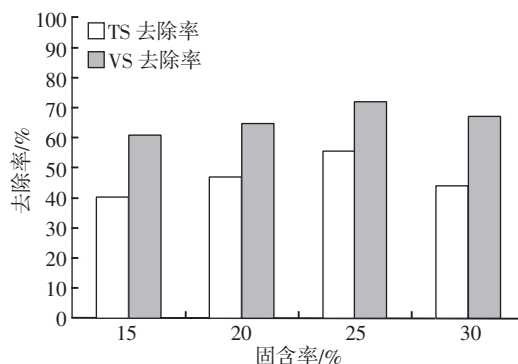


图 6 不同固含率条件下 TS、VS 去除率

Figure 6 Effects of different total solid contents on removal rate of TS and VS

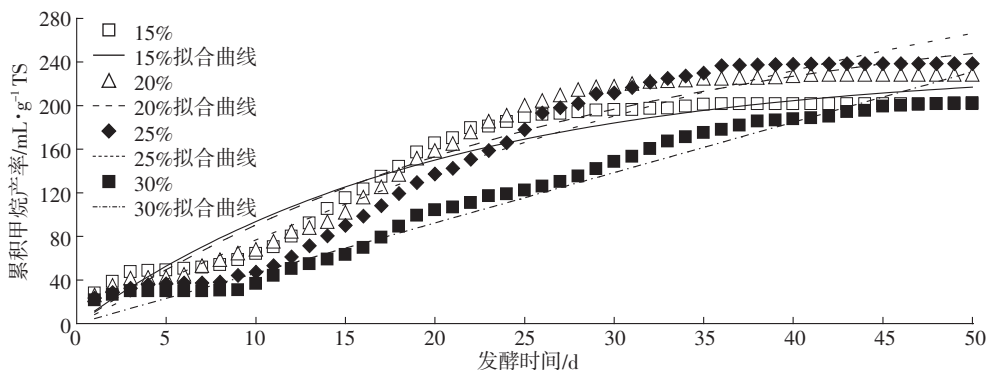


图 5 实际累计甲烷产率与理论累计甲烷产率对比

Figure 5 Comparison between experimental and theoretical methane yield

(238.48 mL·g⁻¹ TS)。当固含率为 15%时,两者去除率最低,此时对应甲烷产率的最低值。由此表明,当选择合适物料浓度时,发酵底物可实现较高的减量化程度,并可较好地转化为目标产物——甲烷。固含率为 30%时,虽然由于酸抑制现象较为严重,总产甲烷率较低,但 VS 去除率达到 67.32%,仅次于 25%试验组。利用气象色谱法对各试验组发酵第 1 d 气体成分进行检测,结果表明:4 组固含率(15%、20%、25%、30%)条件下所产出的沼气中,甲烷含量依次为:53.8%、53.7%、50.4%、47.8%。因此,固含率为 30%时,VS 去除率较高的主要原因是该浓度下有机物转化为 CH₄的同时伴随着较多其他气体产出,这些气体成分主要为 CO₂、NH₃ 等物质,提高了甲烷产率以及总固体的减量化程度,但实际甲烷所占百分比较低。

本试验采用的发酵底物中白酒酒糟所占比重较大,因白酒酒糟中粗纤维含量较高^[10],所以粗纤维去除率也是评估废物减量化程度的重要指标。粗纤维主要包括半纤维素、纤维素以及木质素等成分,其中木质素包裹在半纤维素、纤维素表面,构成了木质素-碳水化合物联合体。

由图 7 可知,不同固含率条件下发酵 50 d,其半纤维素去除率均最高(30%~50%),纤维素次之(20%~40%),木质素最低(2%~5%)。这主要是由于半纤维素分子的无晶体结构容易被水解酸化,纤维素中不定性区的存在也使其容易被降解,而木质素是苯基丙烷结构单元,通过醚键、以及 C-C 键联结而成的高分子化合物,难以被生物降解。与上述 TS、VS 去除率结果相似,TS 浓度为 25%时半纤维素、纤维素、木质素去除率最高,分别为 48.24%、40.01%、4.02%,而其他试验组去除效果较差。

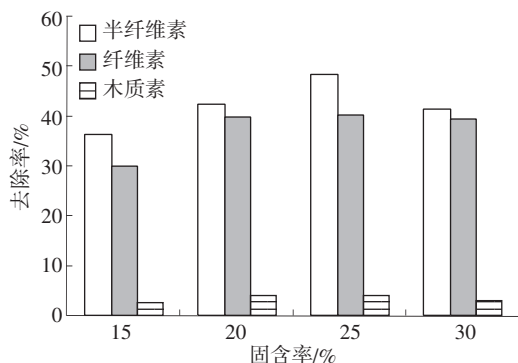


图 7 不同固含率条件下半纤维素、纤维素、木质素去除率

Figure 7 Effects of different total solid contents on removal rate of hemicelluloses, cellulose and lignose

3 结论

(1)在适宜范围内提高固含率可提高总甲烷产率,但会降低反应速率,延长发酵周期。发酵进行 50 d 后,固含率为 25%试验组产气效果最佳,其总产气率达 238.48 mL·g⁻¹ TS。此后继续增加 TS 浓度,总产气率反而下降。

(2)一级动力学模型可较好反应厌氧消化过程。固含率越高,试验数据对模型的符合程度越差,反应速率越慢,产甲烷潜能越高。

(3)当固含率为 25%时,TS、VS 分别可达 55.65%、72.15%,其半纤维素、纤维素、木质素去除率均达到最高。

参考文献:

- [1] 庞钦,章克昌.以酒糟为基质的乳酸生产菌的选育及发酵的研究[J].酿酒,2001(6):62-64.
PANG Qin, ZHANG Ke-chang. Study on the breeding of lactic acid-producing strain and its fermentation on the base of the distiller's grains[J]. *Liquor-making*, 2001(6):62-64.
- [2] 王丹阳,弓爱君,张振星,等.北京市餐厨垃圾的处理现状及发展趋势[J].环境卫生工程,2010(1):24-26.
WANG Dan-yang, GONG Ai-jun, ZHANG Zhen-xing, et al. Treatment status and developmental trend of food residue in Beijing[J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2010(1):24-26.
- [3] Zhu J Y, Wan C X, Li Y B. Enhanced solid-state anaerobic digestion of corn stover by alkaline pretreatment[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(19):7523-7528.
- [4] Liew L N, Shi J, Li Y B. Enhancing the solid-state anaerobic digestion of fallen leaves through simultaneous alkaline treatment[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(19):8828-8834.
- [5] 汪春霞.有机固体废弃物厌氧消化与综合利用[J].中国资源综合利用,2006,124(7):25-28.
WANG Chun-xia. Organic waste anaerobic digestion and its technology of comprehensive utilization[J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2006, 124(7):25-28.
- [6] Parawira W, Murto M, Zvaunya R, et al. Anaerobic batch digestion of solid potato waste alone and in combination with sugar beet leaves[J]. *Renewable Energy*, 2004, 29(11):1811-1823.
- [7] Forster-Carneiro T, Pérez M, Romero L I. Influence of total solid and inoculum contents on performance of anaerobic reactors treating food waste[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(15):6994-7002.
- [8] Chae K J, Jang A M, Yim S K, et al. The effects of digestion temperature and temperature shock on the biogas yields from the mesophilic anaerobic digestion of swine manure[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(1):1-6.
- [9] Siegert I, Banks C. The effect of volatile fatty acid additions on the anaerobic digestion of cellulose and glucose in batch reactors[J]. *Process*

- Biochemistry*, 2005, 40(11):3412-3418.
- [10] 王肇颖, 肖敏. 白酒酒糟的综合利用及其发展前景[J]. 酿酒科技, 2004(1):64-67.
- WANG Zhao-ying, XIAO Min. Comprehensive utilization of distiller's grains and its development foreground[J]. *Liquor-making Science and Technology*, 2004(1):64-67.
- [11] Wang L H, Wang Q H, Cai W W, et al. Influence of mixing proportion on the solid-state anaerobic co-digestion of distiller's grains and food waste[J]. *Biosystems Engineering*, 2012, 112(2):130-137.
- [12] Wang L H, Wang Q H, Cai W W. Study on solid-state anaerobic co-digestion with distiller's grains and food waste for methane production[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 485:306-309.
- [13] 国家环境保护总局. 《水和废水监测分析方法》[M]. 第四版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- State Environmental Protection Administration of China. Water and wastewater test and analysis methods[M]. Fourth edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [14] Wong B T, Show K Y, Ay Su, et al. Effect of volatile fatty acid composition on upflow anaerobic sludge blanket(UASB) performance[J]. *Energy and Fuels*, 2008, 22(1):108-112.
- [15] Wang Y Y, Zhang Y L, Wang J B, et al. Effects of volatile fatty acid concentrations on methane yield and methanogenic bacteria[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2009, 33(5):848-853.
- [16] Wang Q H, Kuninobu M, Ogawa H, et al. Degradation of volatile fatty acids in highly efficient anaerobic digestion[J]. *Biomass and Bioenergy*, 1999, 16(6):407-416.
- [17] Siegert I, Banks C. The effect of volatile fatty acid additions on the anaerobic digestion of cellulose and glucose in batch reactors[J]. *Process Biochemistry*, 2005, 40(11):3412-3418.
- [18] Dong L, Zhenhong Y, Yongming S. Semi-dry mesophilic anaerobic digestion of water sorted organic fraction of municipal solid waste (WS-OFMSW)[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(8):2722-2728.
- [19] 邓恰国, 王金丽, 孙伟生, 等. 干物质浓度对菠萝叶渣干式厌氧发酵产沼气的的影响[J]. 安徽农业科学, 2010, 32:18607-18610.
- DENG Yi-guo, WANG Jin-li, SUN Wei-sheng, et al. Effect of dry matter concentration on dry anaerobic fermentation for biogas production in pineapple leaf residues[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 32:18607-18610.
- [20] 宋籽霖, 李铁冰, 杨改河, 等. 温度及总固体浓度对粪秆混合发酵产气特性的影响[J]. 农业工程学报, 2010(7):260-265.
- SONG Zi-lin, LI Yi-bing, YANG Gai-he, et al. Effect of total solid concentration and temperature on biogas yields of mixture of chicken manure and corn straw[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010(7):260-265.
- [21] Eskicioglu C, Ghorbani M. Effect of inoculum/substrate ratio on mesophilic anaerobic digestion of bioethanol plant whole stillage in batch mode[J]. *Process Biochemistry*, 2011, 46:1682-1687.
- [22] Chynoweth D P, Turick C E, Owens J M, et al. Biochemical methane potential of biomass and waste feedstocks[J]. *Biomass and Bioenergy*, 1993, 5:95-111.
- [23] Borja R, Martín A, Alonso V, et al. Influence of different aerobic pretreatments on the kinetics of anaerobic digestion of olive mill wastewater[J]. *Water Research*, 1995, 29:489-495.
- [24] 王寿权, 严群, 缪恒锋, 等. 接种比例对猪粪与蓝藻混合发酵产甲烷的影响[J]. 农业工程学报, 2009(5):172-176.
- WANG Shou-quan, YAN Qun, MIAO Heng-feng, et al. Effect of inoculum to substrate ratios on methane production in mixed anaerobic digestion of pig manure and blue-green algae[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009(5):172-176.