

猪粪中温半干法连续厌氧发酵产气性能

王 明¹, 赵胜雪², 李旭荣¹, 晏水平¹, 袁巧霞¹, 张衍林¹

(1. 华中农业大学工学院, 农业部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430000; 2. 八一农垦大学工程学院, 大庆 163000)

摘 要: 为改善猪粪在连续型沼气工程中的容积产气效率和降低其进出料过程的热损失, 该研究拟采用高浓度和小体积喂料方式进行, 将新鲜猪粪分别稀释成总固体质量分数 (total solid, TS) 为 10%、12% 和 14% 3 个水平, 通过逐级缩短水力停留时间 (hydraulic retention time, HRT) (HRT: 25 d 20 d 18.5 d) 的方式来改变各组反应器的负荷。试验结果表明, 当 HRT: 25 d 时, 各组平均日产气量均表现最高, 约为 460 mL/g, 此阶段可获得 85% 以上的沼气转化效率; 当 HRT: 20 d 时, 各组均获得最大容积产气率, 最高达到 2.29 L/(L·d) (TS: 14%); 当 HRT 下降至 18.5 d 时, 各组产气量均呈下降趋势, 表明有机负荷已超出反应器的最大转化能力。通过综合原料产气转化效率和容积产气效率 2 个指标, 发现进料 TS 为 14% 和 HRT 为 25 d 为较优组合条件。该研究可为在实际沼气工程中如何协调进料浓度和 HRT 的关系提供参考。

关键词: 粪; 发酵; 甲烷; 农业废弃物; 沼气

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.01.028

中图分类号: S216.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2018)-01-0204-06

王 明, 赵胜雪, 李旭荣, 晏水平, 袁巧霞, 张衍林. 猪粪中温半干法连续厌氧发酵产气性能[J]. 农业工程学报, 2018, 34(1): 204 - 209. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.01.028 http://www.tcsae.org

Wang Ming, Zhao Shengxue, Li Xurong, Yan Shuiping, Yuan Qiaoxia, Zhang Yanlin. Biogas production performance of swine manure by mesophilic semi-dry continuous anaerobic digestion[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(1): 204 - 209. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.01.028 http://www.tcsae.org

0 引 言

随着畜禽养殖规模化、产业化, 其快速带动农业经济发展的同时, 也带来污染问题。据 2010 年 2 月发布的《第一次污染源普查公报》显示, 中国畜禽养殖业的化学需氧量和氨氮排放量占农业源化学需氧量和氨氮的 95.8% 和 78.1%, 而农业源污染物排放量又占全国总排放的 1/2 左右^[1-2]。目前, 养殖行业已经成为中国污染防治的重点目标之一。

目前国家已经出台多项相关政策, 要求在运行养殖场需逐渐升级为干清粪工艺, 而新建养殖场必须按照干清粪工艺设计^[3-4]。与水冲粪和水泡粪工艺不同, 干清粪工艺从源头即把粪污隔离, 产出的粪污总固体质量分数 (total solid, TS) 较高, 一般可达 20% 以上^[5]。利用高固粪污作为沼气发酵原料, 在沼气发酵工艺上就会有更多的选择空间, 如可采用湿法 (TS < 10%), 半干法 (10% < TS < 20%) 或干法 (TS > 20%) 工艺方式进行^[6-7]。

虽然湿法工艺更利于厌氧反应器内的传质、传热及搅拌等, 但有研究表明, 采用半干法或干法工艺可以较湿法工艺获得更高的产气效率和有机物去除效率。Jha 等^[8]对比了湿法和干法牛粪厌氧发酵分别在中温和高温条件

下的产气效率和挥发性固体 (volatile solid, VS) 去除率, 其结果表明, 干法发酵过程 (TS: 15.18%) 获得的产气效率和 VS 去除率均要优于湿法发酵 (TS: 7.68%)。之前的一项研究也表明^[9], 餐厨垃圾以 TS 为 19.0% 进料的产气效率要明显优于 TS 为 9.5% 的进料组, 这是由于在同等有机负荷下, 湿法工艺低固进料的体积会更大, 对反应器内发酵环境冲击也就越大, 且不利于维持反应器内的较高污泥浓度。Ahn 等^[10]研究了植物茎秆与动物粪便的混合干式厌氧发酵过程, 在高温条件下发酵 62 d 后, 与猪粪混合获得的 VS 去除率和甲烷产率分别为 52.9% 和 337.02 mL/g; 该研究同时还指出 TS > 15% 干式厌氧发酵与 TS < 10% 湿式厌氧发酵相比, 可以减少稀释原料用水量和缩小反应器的体积, 而且产生的沼肥也更便于运输。此外, 湿法工艺中较大的进出料体积, 并不利于反应器的保温和维持反应器内的生态环境; 而 TS > 20% 的干法工艺, 其流动性较差, 泵输送困难, 一般多用于批式发酵当中^[11]。因此, 针对干清粪工艺获得的“干粪污”, 研究其半干法厌氧发酵过程更具有应用价值。

综上所述, 本研究以干清粪工艺获得的干粪污为研究对象, 采用半干法工艺对其进行连续厌氧发酵试验, 主要考察进料浓度和水力停留时间对产气量、容积产气率以及发酵液缓冲能力等的影响。为在开展半干法连续厌氧发酵的沼气工程中, 如何协调进料 TS 和 HRT 的关系提供参考方法和理论支撑。

1 材料与方法

1.1 材料

猪粪取自华中农业大学试验基地养猪场, 该养殖场

收稿日期: 2017-09-24 修订日期: 2017-12-08

基金项目: 中央高校基本科研业务专项资金资助 (2662015QD034); 公益性行业 (农业) 科研专项 (201303099)

作者简介: 王 明, 讲师, 主要从事农业废弃物处理及沼气工程技术方面的研究。Email: mawang211@163.com

通信作者: 张衍林, 教授, 博士生导师, 主要从事柑橘生产机械化与生物资源开发利用研究。Email: zhangyl@mail.hzau.edu.cn

采用人工干清粪工艺，因此，产出的猪粪其含固率一般可保持在 25%以上。为保证试验过程与实际一致，模拟半干法连续厌氧发酵的进料浓度，将取回后的猪粪用自来水将其调配成 TS 为 10%、12%和 14%的 3 种浓度料液，并置于 4 冰箱储存备用。反应器内接种物取自华中农业大学农业废弃物处理试验室厌氧发酵中式装置（总体积/有效容积：500 L/400 L；运行温度（35±1）；pH 值 7.58±0.15；悬浮物固体浓度（suspend solids, SS）47.5±1.71 g/L。底物及接种物的理化性质见表 1。

表 1 底物及接种物的性质
Table 1 Characteristics of substrates and inoculums

参数 Param- eters	*挥发性固体		pH 值 pH value	*总碳质量 分数 *Total carbon mass fraction/%	*总氮质 量分数 *Total nitro- gen mass fraction/%	碳氮比 Carbon/ Nitrogen
	总固体 质量分数 Total solid mass frac- tion/%	质量分数 *Volatiles solid mass fraction/%				
猪粪 Swine manure	27.50±0.14	82.45±1.03	6.98±0.05	38.26±0.56	2.75±0.14	13.91
接种物 Inocula	4.65±0.13	85.23±0.82	7.63±0.04	35.80±0.38	1.85±0.09	19.35

注：*表示以干物质计。

Note: * means based on dry matter.

1.2 原料沼化潜力测试

评估某种原料的产气潜力，一般有以下几种方式：1) 可通过 Buswell 经验方程按照原料中元素组成比例计算理论产气值^[12]；2) 根据碳水化合物、蛋白质和脂肪各自的理论甲烷产量，按照原料中各有机物质量分数进行测算^[13]；3) 通过一定时间的批式厌氧发酵试验，获取某种原料的实际产气潜力，又被称为沼化或甲烷化潜力测试^[14]。由于某些难被降解有机物质的存在，通过沼化潜力测试获得的产气量一般要小于由经验公式计算的理论值，但却更能反映某种原料的实际产气潜力。因此，为保证试验过程与实际一致，本研究采用沼化潜力测试来获取猪粪的最大产气量。

沼化潜力测试采用瑞典 AMPTS-II 全自动沼化/甲烷测试系统，其每个反应器容积为 500 mL。为了获取原料的最大沼化潜力，需要足够的发酵周期，一般在 15~30 d。首先将原猪粪稀释至 TS 为 6%，然后与接种物按照体积比 1:2 进行混配。每个反应器中装入 400 mL 混配好的料液，发酵温度设定为（35±1）。

研究表明，采用修正的 Gompertz 模型对实际试验获得的产气数据进行拟合修正，可以获得更加接近于真实的物料产气潜力数据^[15-16]。因此，本研究在评估猪粪的产气潜力上，以修正的 Gompertz 模型拟合数值为参考依据。修正的 Gompertz 公式如公式（1）所示。

$$y = A \exp \left\{ - \exp \left(\frac{\mu_m e}{A} (\lambda - t) + 1 \right) \right\} \quad (1)$$

式中 y 为第 t 天的累计产沼气量，mL/g（以 VS 计，下同）； t 为发酵时间，d； A 为物料最大产气潜力，mL/g； μ_m 为最大产气速率，mL/(g·d)； λ 为产气延迟时间，d； e 为自然常数，2.718 282。

1.3 连续厌氧发酵试验

连续厌氧反应器由实验室自制，其总容积为 2 L，有效容积为 1.5 L；反应器主体采用耐高温耐腐蚀 PP 材质，瓶子正顶端设有出气口，出气口外连接铝箔集气袋（容积 1 L），瓶子侧面设有进出料口（位于瓶内页面下方，软管连接，保证密封性）。反应器进料浓度设 3 个梯度，即 TS 分别为 10%、12%和 14%。每个进料 TS 对应 1 个试验组且组内做 3 个平行试验，即共需 9 组反应器。将所有反应器置于同一恒温水浴中（35±1），每天进出料各 1 次，进出料体积按公式（2）计算。

$$V_{\text{进出料}} = \frac{V_{\text{有效容积}}}{\text{HRT}} \quad (2)$$

式中 $V_{\text{进出料}}$ 为反应器连续运行过程中的每日进出料体积，mL； $V_{\text{有效容积}}$ 为反应器内的发酵料液体积，mL，本研究所有反应器的有效容积均为 1 500 mL；HRT (hydraulic retention time) 为反应器运行过程中的水力停留时间，d。

各反应器初始均以较低负荷启动（HRT:40.0 d），目的是活化接种物中的厌氧菌群，待产气平稳后，逐级降低 HRT（25.0 d 20.0 d 18.5 d），使反应器的有机负荷逐级升高（在进料 TS 一定时，降低 HRT 相当于升高反应器负荷）。由于设定的 HRT 变化间隔较小，由进出料过程对反应器内厌氧菌群引起的冲击作用较弱，而主要表现在有机负荷的增大对反应器产气效率的影响上。因此，对每个 HRT 下的厌氧过程至少观察 30 d，如日产气量和出料 pH 未表现持续下降，则表明反应器可承受该负荷，则继续降低 HRT；反之，则表明反应器正进入不稳定状态，需继续观察或停止实验。

1.4 连续厌氧发酵沼化转化效率

在采用连续厌氧发酵方式的沼气工程中，为了获取更大的容积产气率来降低沼气的生产成本，一部分降解缓慢的成分可能会被提前排出反应器。因此，在连续式厌氧发酵中，获得的底物沼化产量一般均要低于其在批式试验中的最大沼化产量。鉴于此，本研究以沼化转化效率（biogas conversion rate, BCR）来评估连续厌氧发酵过程的产气能力，其由公式（3）计算得出

$$\text{BCR} = \frac{y_{\text{Continuous}}}{y_{\text{Batch}}} \times 100\% \quad (3)$$

式中 $y_{\text{Continuous}}$ 为在连续厌氧发酵过程中获得的底物沼化产率，mL/g； y_{Batch} 为猪粪实际最大产沼化潜力值，mL/g，在本研究中 y_{Batch} 使用修正的 Gompertz 模型对猪粪沼化潜力测试值的拟合值（ A ，公式（1））。

1.5 分析方法

样品中 TS、VS 根据标准方法测定^[17]；pH 值采用实验室用数显酸度计 PHS-3C 测定；采用 1 L 铝箔集气袋收集气体，排水法测定体积；气体组成成分及质量分数分析采用 GC9707II（福立，浙江）气相色谱测定，装载 TDX-01 型填充柱和热导检测器。色谱条件如下：氦气载气，流量设置 40 mL/min；进样口温度 150，柱箱温度 120，检测器温度 220；挥发性脂肪酸测定采用另一台同型号气相色谱仪，装备有火花离子检测器，KB-WAX 毛细管柱 30 m×0.32 mm×0.25 μm，载气为氮气，进样口

温度 250 , 柱箱温度 80 , 检测器温度 250 。总碱度分析按 Callaghan 等^[18]的方法, 即 0.05 mol/L H₂SO₄ 作为滴定剂, 滴定至 pH 值 4.5 时的碱度值。

2 结果与分析

2.1 猪粪产气潜力测试

本研究中, 猪粪产气潜力测试试验共进行了 26 d (图 1)。实测最大累积产气量为 508 mL/g (以 VS 计, 下同), 发酵第 14 d 时, 累积产气量已达 465.97 mL/g, 此时已完成总产气量的 91.72%。采用修正的 Gompertz 模型 (公式 (1)) 对试验获得数据进行拟合, 获得的预测最大产气量 A 为 528.6 mL/g, 发酵过程最大产气速率为 43.89 mL/(g·d), 产气延迟时间为 2.66 d; 模型拟合决定系数 $R^2=0.9924$, 与文献报道的 R^2 值在 0.983 ~ 0.999 8 的范围内波动相一致^[19-21], 表明模型拟合良好。

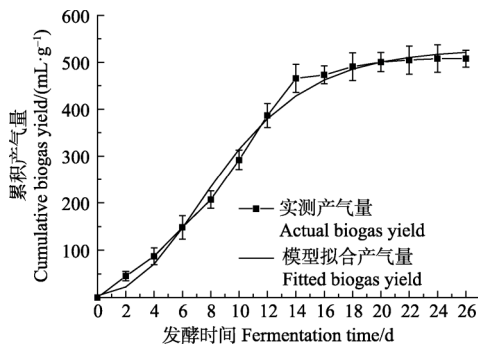


图 1 批次试验中实测与模型拟合的猪粪累积产气量
Fig.1 Measured and fitted biogas yield in batch test

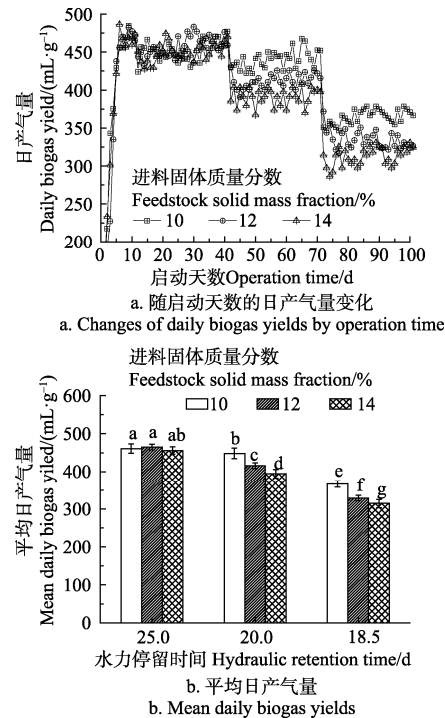
2.2 连续厌氧发酵试验

2.2.1 沼气产率与沼气转化效率

发酵到第 7 d 时, 猪粪产气效率就已达到正常水平值, 这得益于接种物直接取自以猪粪为唯一底物的厌氧系统且储存时间较短, 活性损失率较小。

如图 2a 所示, 随着 HRT 的逐级下降, 各反应器中猪粪日产气量也逐渐降低。这可能是因为, HRT 的降低除了会直接增加反应器的有机负荷外, 对反应器内部厌氧菌群的冲击作用也会加强, 其主要表现在进出料体积的加大对反应器内部厌氧微生物的洗出作用加强。在第 1 阶段 (图 2a, 11 ~ 40 d, HRT:25 d), 各反应器中猪粪平均日产气量之间无显著性差异 (图 2b, $P>0.05$), 约为 460 mL/g, 表明此阶段各反应器负荷较低, 均可有效转化猪粪中的易降解成分; 当进入第 2 阶段时 (图 2a, 41 ~ 70 d, HRT:20 d), 各反应器的日产气量均表现为显著降低, 进料 TS:10%、TS:12%和 TS:14%对应的平均日产气量分别为 448.22 mL/g、415.44 mL/g 和 394.37 mL/g, 并呈现显著性差异 (图 2b, $P<0.05$), 且负荷越高, 日产气量下降幅度越大。这表明随着反应器有机负荷升高, 底物中一部分降解缓慢的物质已不能被有效降解转化, 此时各反应器已接近自身的最大消化能力; 当进入第 3 阶段时 (图 2a, 71 ~ 100 d, HRT:18.5 d), 各组反应器的平均日产气量进一步显著降低 (图 2b, $P<0.05$), 且 pH 值

均已低于 7.0 (表 3), 表明各组反应器已接近各自的最大消化能力, 此时容易形成挥发酸的积累。



注: 柱形图上不同字母表示差异显著 ($P<0.05$), 下同。
Note: The different letters above the columns indicate significant differences ($P<0.05$), the same below.

图 2 连续厌氧发酵过程的产气量变化
Fig.2 Changes of biogas yield in continuous anaerobic test

将各阶段的平均日产气量 (图 2b) 分别带入公式 (3) 计算反应器在不同 HRT 下的 BCR, 发现随着 HRT 的缩短和有机负荷的增加, BCR 呈下降趋势。当 HRT 为 25 d 时, 此时由于各反应器的有机负荷相对较低, 3 个试验组的 BCR 均达 85% 以上; 当 HRT 降为 20 d 时, 除 TS:10% 组的 BCR 仍能维持在 80% 以上, 而另外 2 组均在 80% 以下, 分别为 78.59% 和 74.60%; 当 HRT 进一步缩短至 18.5 d 时, 所有反应器的 BCR 均降至 70% 以下。郭艳锋等^[22]的研究也指出, 随着有机负荷的不断增加, 猪粪沼气产量呈逐渐下降趋势, 当有机负荷增加到一定程度时, 沼气产量显著下降甚至由于挥发酸的积累而停止。

2.2.2 容积产气率

以连续厌氧发酵方式运行的沼气工程中, 容积产气率 (volumetric biogas production rate, VBPR) 是影响沼气和生产成本的关键指标之一^[23]。

如图 3 所示, 在同一 HRT 下, 随着进料 TS 的升高, VBPR 也会随之升高; 在不同 HRT 阶段, 3 组反应器的 VBPR 均表现为先升高后降低的趋势, 即均在 HRT 为 20 d 的阶段获得各自的最大值。这与杨红男等^[24]的研究结果类似, 随着与有机负荷的增加, 反应器的容积负荷率呈上升趋势, 然而在本研究中, 在 HRT:18.5 d 时, 各组反应器的 VBPR 并没有随着当有机负荷率的升高而继续升高, 反而呈下降趋势, 表明此时反应器已达到所能承受负荷的上限, 甲烷菌群的活性已经受到了一定抑制, 致

使反应器的 BCR 也大幅下降。

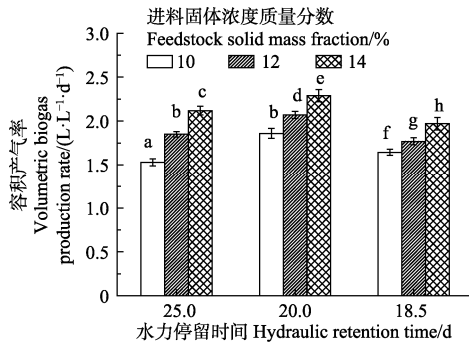


图 3 不同水力停留时间下的容积产气率
Fig.3 Volumetric biogas production rate under different hydraulic detention time

将 3 个试验组在 3 个不同 HRT 下运行所获得的 VBPR 由高到低排列, 可获得如表 2 所示的 9 个不同组合排列。

表 2 不同进料固体浓度和水力停留时间的容积产气率
Table 2 Volumetric biogas production rate of different feedstock total solid content with different hydraulic detention time

序号 No.	进料固体质量分数 Feedstock solid mass fraction/%	水力停留时间 Hydraulic retention time/d	有机负荷率 Organic loading rate/(g·L ⁻¹ ·d ⁻¹)	容积产气率 Volumetric biogas production rate/(L·L ⁻¹ ·d ⁻¹)
1	14	20	5.78	2.29 ^c
2	14	25	4.62	2.12 ^c
3	12	20	4.95	2.07 ^d
4	14	18.5	6.24	1.97 ^h
5	10	20	4.13	1.86 ^b
6	12	25	3.96	1.85 ^b
7	12	18.5	5.35	1.77 ^e
8	10	18.5	4.46	1.64 ^f
9	10	25	3.30	1.53 ^a

注：数据后不同字母代表存在显著性差异 ($P < 0.05$)
Note: Different letters behind the data indicate significant differences ($P < 0.05$)

如表 2 所示, VBPR 超过 1.9 的组合一共有 4 个。其中, 最高为 2.29 L/(L·d), 对应的进料 TS 为 14%、HRT 为 20 d, 然而由表 3 可知, 此组合的挥发性脂肪酸与总碱度比值已接近 0.4, 缓冲能力较弱; 而排在 2、3 和 4 位的组合中, 排在第 2 位的组合 (TS:14%、HRT:25 d), 不仅 VBPR 最高且 OLR 最低, 表明其有更好的沼气转化效率, 因此, 该组合的 BCR 要优于另外 2 组。此外, 通过对比表 2 中第 5 和第 6 组合, 二者的 VBPR 没有显著性差异, 后者 OLR 却低于前者, 这也表明较高的进料浓度和较长的水力停留时间, 可获得较高的沼气转化效率。

2.2.3 pH、VFA 及总碱度

对于长期运行的连续厌氧反应器, pH 值、挥发性脂肪酸 (volatile fatty acids, VFA) 及总碱 (total alkalinity, TA) 度等是判断其运行稳定性的重要指标。研究表明, 产甲烷菌的适宜 pH 值在 6.5~8.2 之间, 当 pH 值低于 6.5 和高于 8.2 时产甲烷菌代谢将会受到严重抑制^[25]。而 VFA/TA 能够较好地反应系统的缓冲能力^[26-28], 研究表明, 当 VFA/TA 介于 0.3~0.4 时, 系统具有一定缓冲能力, 能够适应有机负荷一定程度的波动; 在 0.4~0.8 之

间时, 表明系统缺乏缓冲能力, 此时应考虑降低系统负荷, 以减少发生酸败的风险; 当大于 0.8 时, 表明反应器已接近酸化状态, 此时应停止向反应器进料^[29-30]。从表 3 可以看出, 在 HRT:25 d 时, 各组反应器的 pH 值均在 7.0 以上, 此时挥发酸质量分数较低, VFA/TA<0.3, 表明此阶段各反应器运行平稳, 抗缓冲能力较强, 可以继续增大有机负荷; 在 HRT 为 20 d 时, 随着有机负荷的增加, 各组反应器 pH 值有所降低且 VFA 质量分数逐渐升高, 除了 TS:10%组的 VFA/TA 仍小于 0.3 之外, 其余两组反应器的已趋近于 0.4, 表明此时各反应器更具有有一定缓冲能力; 当 HRT 为 18.5 d 时, TS:12%和 TS:14%两组反应器的 VFA/TA 已高于 0.4 且 pH 值已接近于 6.5, 表明该 2 组反应器在此负荷下运行已十分危险, 此时应考虑降低负荷。郭建斌等^[31]人的研究也表明, 在 28℃ 下进行猪粪产沼气发酵, 当有机负荷率大于 3.3 g/(L·d) 时, 反应器内 VFA/TA 已大于 0.3, 当有机负荷率大于 4.3 g/(L·d) 时, VFA/TA 已接近 0.6, 表明, 随着有机负荷的增加, 会导致 VFA/TA 的升高。

表 3 反应器各阶段稳定性参数及甲烷质量分数
Table 3 Stability parameters and methane mass fraction of reactors different stages

参数 Parameters	HRT:25			HRT:20			HRT:18.5		
	TS:10 %	TS:12 %	TS:14 %	TS:10 %	TS:12 %	TS:14 %	TS:10 %	TS:12 %	TS:14 %
pH 值 pH Value	7.45	7.48	7.36	7.25	7.18	6.98	6.95	6.68	6.58
挥发性脂肪酸 Volatile fatty acids/(mg·L ⁻¹)	851	924	953	1350	1545	1803	2075	2812	3356
挥发性脂肪酸/总碱度 Volatile fatty acids/Total alkalinity	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.4	<0.4	<0.4	>0.4	>0.4
甲烷质量分数 Methane mass fraction/%	61.45	60.03	60.38	60.35	61.22	59.27	57.09	55.47	54.45

如表 3 所示, 除 HRT:18.5 阶段的甲烷质量分数略有降低外, 各反应器甲烷质量分数均在 60%附近。这表明, 对于同一底物, 在发酵环境变化幅度较小时, 其甲烷质量分数并不会产生较大改变。这与杨红男等^[24]的研究结果类似, 当 OLR 和 HRT 变化时, 反应器的容积产气率和原料产气量均有变化, 而沼气中的甲烷质量分数变化却不明显。

3 结 论

通过对 3 组不同 TS 的猪粪进料 (10%、12%、14%) 在 HRT 逐级下降过程中 (25.0 d 20.0 d 18.5 d) 的日产气量、容积产气效率及发酵液缓冲能力等因素的考察,

得到如下结论：

1) 随着 HRT 的缩短, 猪粪日产气量呈不断下降趋势, 且进料 TS 越高, 下降速度越快; HRT 为 25 d 时, 各组日产气量均表现最高; 当 HRT 降至 20 d 时, 各组容积产气率均获得最大值。这表明虽然随着负荷增加会导致沼气转化效率的下降, 但在一定范围内会增加容积产气率。

2) 当 HRT 降至 18.5 d 时, 各组反应器负荷均已超出最大承受能力。TS 为 12% 和 14% 的试验组的 VFA/TA 已经大于 0.4, 表明此阶段各反应器缓冲能力均很弱, 正处于不稳定状态。

3) 在实际连续型沼气工程中, 应以稳定性为前提, 综合考虑沼气转化效率和容积产气效率 2 方面因素来确定反应器的运行条件。本研究中, 在进料 TS 和 HRT 分别为 14% 和 25 d 时, 反应器的综合表现最好。

[参 考 文 献]

- [1] 第一次全国污染源普查资料编纂委员会. 污染源普查技术报告[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011.
- [2] 石嫣, 程存旺, 朱芝, 等. 中国农业源污染防治的制度创新与组织创新——兼析《第一次全国污染源普查公报》[J]. 农业经济与管理, 2011, 2(06): 27 - 37.
Shi Yan, Cheng Cunwang, Zhu Yi, et al. Institutional and organizational innovation on China agricultural non-point pollution prevention: analysis on the 1st National Survey of Pollution Sources Bulletin[J]. Agricultural Economics and Management, 2011, 2(06): 27 - 37. (in Chinese with English abstract)
- [3] 畜禽规模养殖污染防治条例[Z]. 北京: 中华人民共和国国务院令 第 643 号. 2013 - 10 - 08.
- [4] 中华人民共和国环保部办公厅函[2014]335 号. 《畜禽养殖业污染物排放标准》(二次征求意见稿)意见[Z]. 2014 - 03 - 27.
- [5] 祝其丽, 李清, 胡启春, 等. 猪场清粪方式调查与沼气工程适用性分析[J]. 中国沼气, 2011, 29(1): 26 - 28.
Zhu Qili, Li Qing, Hu Qichun, et al. Investigation and analysis of animal manure collection methods on pig farms and their applicability to the anaerobic digestion[J]. China Biogas, 2011, 29(1): 26 - 28. (in Chinese with English abstract)
- [6] Abbassi-Guendouz A, Brockmann D, Trably E, et al. Total solids content drives high solid anaerobic digestion via mass transfer limitation[J]. Bioresource Technology, 2012, 111(3): 55 - 61.
- [7] Qian X, Shen G, Wang Z, et al. Performance of semi-dry anaerobic co-digestion of swine manure with rice straw under biogas slurry addition[C]//. International Conference on Machinery, Materials Engineering, Chemical Engineering and Biotechnology. 2016.
- [8] Jha A K, Li J, Zhang L, et al. Comparison between wet and dry anaerobic digestions of cow dung under mesophilic and thermophilic conditions[J]. Advances in Water Resource and Protection, 2013, 1(2): 28 - 38.
- [9] 王明, 李文哲, 殷丽丽, 等. 高固体含量进料提高餐厨废弃物连续厌氧发酵性能[J]. 农业工程学报. 2015. 31(3): 283 - 287.
Wang Ming, Li Wenzhe, Yin Lili, et al. High solid concentration feedstock improving performance of continuous anaerobic digestion of food waste[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(3): 283 - 287. (in Chinese with English abstract)
- [10] Ahn H K, Smith M C, Kondrad S L, et al. Evaluation of biogas production potential by dry anaerobic digestion of switchgrass-animal manure mixtures[J]. Applied Biochemistry & Biotechnology, 2010, 160(4): 965 - 975.
- [11] 刘战广, 朱洪光, 王彪, 等. 粪草比对干式厌氧发酵产沼气效果的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(4): 196 - 200.
Liu Zhanguang, Zhu Hongguang, Wang Biao, et al. Effect of ratios of manure to crop on dry anaerobic digestion for biogas production[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(4): 196 - 200. (in Chinese with English abstract)
- [12] Buswell A M, Mueller H F. Mechanism of Methane Fermentation[J]. Industrial and Engineering Chemistry, 1952, 44(3): 550 - 552.
- [13] Girolamo D G, Grigatti M, Barbanti L, et al. Effects of hydrothermal pre-treatments on Giant reed (Arundo donax) methane yield[J]. Bioresource Technology, 2013, 147(8): 152 - 159.
- [14] Isci A, Demirel G N. Biogas production potential from cotton wastes[J]. Renewable Energy, 2007, 32(5): 750 - 757.
- [15] Altaş L. Inhibitory effect of heavy metals on methane-producing anaerobic granular sludge[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 162(2): 1551 - 1556.
- [16] Lo H M, Kurniawan T A, Sillanpää M E T, et al. Modeling biogas production from organic fraction of MSW co-digested with MSWI ashes in anaerobic bioreactors[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(16): 6329 - 6335.
- [17] 国家环境保护总局, 水和废水监测分析方法编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002. State Environmental Protection Administration of China, Editorial Committee for Monitoring and Analysis of Water and Wastewater. Monitoring and Analysis Method of Water and Wastewater[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [18] 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, 22(1): 71 - 77.
- [19] Lo H M, Kurniawan T A, Sillanpää M E T, et al. Modeling biogas production from organic fraction of MSW co-digested with MSWI ashes in anaerobic bioreactors[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(16): 6329 - 6335.
- [20] 冯晶, 张玉华, 罗娟, 等. 批式与连续两相发酵的果蔬废弃物厌氧产气性能[J]. 农业工程学报, 2016, 32(22): 233 - 238.
Feng Jing, Zhang Yuhua, Luo Juan, et al. Biogas production of fruit and vegetable wastes two-phase fermentation by batch and continuous feeding[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(22): 233 - 238. (in Chinese with English abstract)
- [21] Donoso-Bravo A, Pérez-Elvira S I, Fdz-Polanco F. Application of simplified models for anaerobic biodegradability tests: evaluation of pre-treatment processes[J]. Chemical Engineering Journal, 2010, 160(2): 607 - 614.
- [22] 郭燕锋, 孔晓英, 刘婉玉, 等. 有机负荷对厨余垃圾常温厌氧发酵产甲烷的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(增刊 1): 96 - 100.
Guo Yanfeng, Kong Xiaoying, Liu Wanyu, et al. Effects of organic loading rate on anaerobic digestion of food waste at room temperature[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(Supp. 1): 96 - 100. (in Chinese with English abstract)
- [23] 杜静, 陈广银, 黄红英, 等. 秸秆批式和半连续式发酵物料浓度对沼气产率的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(15): 201 - 207.
Du Jing, Chen Guangyin, Huang Hongying, et al. Effect of

- fermenting material concentration on biogas yield in batch and continuous biogas fermentation with straws[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(15): 201 - 207. (in Chinese with English abstract)
- [24] 杨红男, 邓良伟. 不同温度和有机负荷下猪场粪污沼气发酵产气性能[J]. 中国沼气, 2016, 34(3): 36 - 43.
Yang Hongnan, Deng Liangwei. The biogas production performance of anaerobic digestion of swine wastewater under different organic loading rate and temperatures[J]. China Biogas, 2016, 34(3): 36 - 43. (in Chinese with English abstract)
- [25] Murphy J D, Thamsiriroj T. The Biogas Handbook: Science, Production and Applications[M]. Woodhead Publishing Limited, 2013.
- [26] 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 & Bioenergy, 2002, 22(1): 71 - 77.
- [27] Sánchez E, Borja R, Travieso L, et al. Effect of organic loading rate on the stability, operational parameters and performance of a secondary upflow anaerobic sludge bed reactor treating piggery waste[J]. Bioresource Technology, 2005, 96(3): 335 - 344.
- [28] Zhao H W, Viraraghavan T. Analysis of the performance of an anaerobic digestion system at the Regina Wastewater Treatment Plant[J]. Bioresource Technology, 2004, 95(3): 301 - 307.
- [29] Somasiri W, Ruan W Q, Li X F, et al. Decolourization of textile wastewater containing acid dyes in UASB reactor system under mixed anaerobic granular sludge[J]. Electronic Journal of Environmental, Agricultural and Food Chemistry, 2006, 5(1): 1224 - 1234.
- [30] 龙腾锐, 方芳, 郭劲松. 变速生物滤池处理城市污水的效能研究[J]. 中国给水排水, 2002, 18(1): 13 - 18.
Long Tengrui, Fang Fang, Guo Jinsong. Study on the performance of variable rate biofilter for treatment of municipal wastewater[J]. China Water and Wastewater, 2002, 18(1): 13 - 18. (in Chinese with English abstract)
- [31] 郭建斌, 董仁杰, 程辉彩, 等. 温度与有机负荷对猪粪厌氧发酵过程的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(12): 217 - 222.
Guo Jianbin, Dong Renjie, Cheng Huicai, et al. Effect of temperature and organic loading rates on anaerobic digestion of pig manure[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(12): 217 - 222. (in Chinese with English abstract)

Biogas production performance of swine manure by mesophilic semi-dry continuous anaerobic digestion

Wang Ming¹, Zhao Shengxue², Li Xurong¹, Yan Shuiping¹, Yuan Qiaoxia¹, Zhang Yanlin¹

(1. Key Laboratory of Agriculture Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture, College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 43000, China;

2. College of Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163000, China)

Abstract: In order to improve the volumetric gas production efficiency of pig manure in continuous biogas project and reduce the heat loss during its feeding and unloading process, the high concentration and small volume feeding method is adopted in this study. The total solid content (TS) of swine manure collected from dry cleaning mode is usually greater than 20%, and thus the manure can be used in not only wet but also the semi-dry or dry anaerobic digestion (AD). Previous reports showed that the dry AD mode can obtain better biogas production than wet AD process with a TS lower than 10%, and can also reduce the volume of dilution water and biogas slurry. Recently, Chinese government is pushing ahead the dry cleaning mode in the livestock and poultry farms, and thus there will be more and more “dry manure” with TS of above 20% produced from these farms. Therefore, it will be more necessary to study the semi-dry or dry AD process of swine manure. In present assay, a semi-continuous AD experiment up to 100 days was carried out to investigate the interaction between feedstock TS and the hydraulic retention time (HRT). There are 3 sets of reactors, and the feedstock TS is set as 10%, 12% and 14%, respectively. All the reactors start up from HRT of 25 d, and then the HRT is decreased to 20 and 18.5 d in step by step. The descent process of HRT will cause an increase of organic loading rate (OLR), and thus the reactor state and the biogas production will be influenced. The real-time biogas yield, volumetric biogas production rate (VBPR) and the buffer capacity of each reactor were investigated. The experimental results showed that all the 3 sets of reactors obtained a maximum biogas yield in the continuous AD test when they operated in the stage of HRT of 25 d, and there was no significant difference on the biogas yields among the 3 sets of reactors, around 460 mL/g which reached 86% of the maximum biogas yield of swine manure obtained from the batch AD process also carried out in present assay. The VBPR of each reactor reached the maximum value at the HRT of 20 d, and the highest VBPR of 2.29 L/(L·d) was observed at the TS of 14% and the HRT of 20 d. When the HRT decreased to 18.5 d, the biogas yield and the VBPR showed a larger reduction, mainly due to that the higher OLR had exceeded the bear capacity of these reactors. Moreover, the VFA/TA values were close to or exceeded 0.4 at HRT of 18.5 d, which suggested these reactors had a weaker buffer capacity at this time and might be running to the acidification. The optimum operating combination of feedstock TS and HRT could be selected by synthesizing the 3 factors of biogas yield, VBPR and the buffer capacity, and the feedstock TS of 14% and HRT of 25 d were recommended according to the present experimental results. The present study can provide a help to the practical biogas engineering for the matching of feedstock TS and HRT.

Keywords: manures; fermentation; methane; agricultural wastes; biogas