

秸秆批式和半连续式发酵物料浓度对沼气产率的影响

杜 静, 陈广银, 黄红英, 靳红梅, 奚永兰, 钱玉婷, 徐跃定, 常志州*

(江苏省农业科学院农业资源与环境研究所; 农业部农村可再生能源开发利用华东科学观测实验站, 南京 210014)

摘 要: 为比较秸秆批式发酵和半连续发酵工艺的产沼气效果, 以水稻秸秆为单一发酵底物, 开展了室内中温批式发酵和半连续发酵对比试验, 以容积产气率和原料产气率为特征指标, 研究不同料液浓度对秸秆批式和半连续发酵产沼气的影响, 以期获得秸秆沼气工程适宜的运行参数。结果表明, 批式发酵容积产气率随着 TS 浓度的增加而增加, 但增幅逐渐减少; 与静态批式发酵相比, 间歇搅拌有助于提高批式发酵容积产气率, 特别对高 TS 浓度处理容积产气率的提升效果更加明显; 而半连续进料条件下更有利于高 TS 浓度处理容积产气率的提高, 但各处理原料产气率均随着固物滞留时间(solid retention time, SRT) 缩短而逐渐降低。综合考虑产气情况及工程应用实际, 建议秸秆批式发酵底物质量分数不超过 8%, 而半连续发酵 TS 质量分数 8% 时 SRT 设计为 20 d (容积产气率 $1.00 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$), 若发酵 TS 质量分数 6% 时, SRT 设计为 15 d, 容积产气率 $0.75 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$, 该运行参数为秸秆沼气工程发展提供了理论依据。

关键词: 秸秆; 沼气; 发酵; 发酵物料浓度; 批式; 半连续

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.15.028

中图分类号: X705

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-15-0201-07

杜 静, 陈广银, 黄红英, 靳红梅, 奚永兰, 钱玉婷, 徐跃定, 常志州. 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. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.15.028 <http://www.tcsae.org>
Du Jing, Chen Guangyin, Huang Hongying, Jin Hongmei, Xi Yonglan, Qian Yuting, Xu Yueding, Chang Zhizhou. 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) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.15.028 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

随着中国农村经济的快速发展和农民收入的提高, 秸秆传统利用方式正在发生转变, 呈现多元化趋势^[1-4]。现阶段秸秆处理利用方法中, 采用厌氧发酵产沼气是一条清洁高效的秸秆利用途径, 其反应过程最为平和稳定、能耗最低、无污染、生态和经济效益最佳^[5]。研究表明, 秸秆沼气发酵能量利用效率是直接燃烧的 1.2~1.9 倍, 同时产生的副产物沼渣沼液, 因其富含氮、磷等营养元素, 可以有效地应用于农业生产, 提高农作物产量^[6]。近年来, 随着秸秆厌氧发酵技术的逐渐成熟, 秸秆沼气工程越来越受到人们的关注。从进料方式角度, 一般将厌氧消化工艺分为批式和连续式。在批式发酵过程中, 水解、酸化、产乙酸和产甲烷过程相继进行, 与外界没有物料交换, 发酵过程为非稳态过程。然而实际运行良好的沼气工程中, 多采用半连续式进料或连续式进料, 厌氧过程处于稳定状态, 水解产酸与产甲烷过程同时进行,

有效避免过程中的产物抑制, 提高了基质转化率^[7]。

2012 年 3 月国家颁布了编号为 NY/T2142-2012 的《秸秆沼气工程工艺设计规范》, 对涵盖秸秆沼气工程工艺设计的一般规定、设计内容、主要技术参数和工程设计参数等进行规范^[8], 此规范的出台为秸秆沼气工程快速发展奠定了基础。据报道, 截至 2012 年, 经农业部批复并建成秸秆沼气工程有 47 余处, 分布于 20 多个省。据调查, 中国的秸秆沼气工艺类型多样, 根据反应器的类型以及进出料方式, 主要可分为完全混合式、竖向推流式、覆膜槽式、自载体生物膜式、一体化两相、红泥塑料式发酵工艺^[9], 其中完全混合式厌氧反应器(CSTR)也被农业部、国家能源局、财政部下发的《绿色能源示范县建设技术治理暂行办法》列入秸秆沼气工程推荐工艺之一^[10-11]。可见, 从政府层面来看, CSTR 发酵工艺将在较长时期内成为秸秆沼气工程主推工艺技术之一。

国外秸秆沼气工艺也在快速的发展当中, 德国秸秆原料以青贮为主, 连续湿式消化工艺占主导地位, 干消化仅仅在进行小规模试验示范^[12]; 大约 90% 沼气工程采用立式消化罐(完全混合式), 装置容积 $800 \sim 1\,500 \text{ m}^3$, 而在奥地利, 采用完全混合式工艺的立式消化罐沼气工程占 84% 左右, 标准容积 $500 \sim 2\,000 \text{ m}^3$ ^[13]。可见, 连续进料全混式发酵工艺已成为国际公认并得到广泛应用的技术。

众所周知, 全混式发酵工艺由于其搅拌作用增强了物料传质, 加速物料能源转化, 有助于提高容积产气率。然而, 发酵物料含固率的高低一定程度上制约着搅拌作用的效果, 同时也是影响厌氧消化性能的重要因素之一^[14]。

收稿日期: 2015-05-14 修订日期: 2015-07-14

基金项目: 国家科技支撑计划(2014BAL02B04); 农业部公益性行业专项(201403019, 201503135-17); 江苏省科技支撑计划资助项目(BE2012775)

作者简介: 杜 静, 男(汉族), 四川眉山人, 助理研究员, 主要从事农业固体废弃物资源化研究。南京 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 210014。Email: dj1982111@126.com

*通信作者: 常志州, 男, 研究员, 主要从事农业固体废弃物资源化研究。南京 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 210014。

Email: czhizhou@hotmail.com

增加发酵 TS 浓度可提高反应器有效容积的利用率和容积产气率,但 TS 浓度过高反而会造成氨氮或挥发酸等中间产物的累积,从而导致厌氧消化工程产气不稳定,甚至失败^[15]。可见,研究 TS 浓度对发酵物料厌氧消化性能的影响具有重要意义。目前,关于 TS 浓度对畜禽粪便或混合厌氧消化影响的研究已较多^[16-20],但针对纯秸秆半连续发酵工艺参数的研究相对较少,段娜等以粉碎干秸秆和青贮秸秆为发酵原料,考察了中温立式 CSTR 发酵工艺和半连续投料方式下的厌氧消化特性和产气性能,分别获得了 2 种类型发酵原料的最大池容产气率^[21],但其仅通过增加进料秸秆量而提高发酵物料浓度,并未获得有益的工程运行参数。因此,开展秸秆批式发酵和半连续发酵工艺的产沼气效果对比研究,以期获得固物滞留时间与反应器产气特征之间对应关系,对秸秆沼气工程或以秸秆为主要原料的沼气工程运行具有很好的指导意义。

本文采用水稻秸秆为单一唯一发酵原料,开展了室内中温批式发酵和半连续发酵对比研究,并采用缩短固物滞留时间方式提高发酵系统有机负荷,以平均容积产气率和原料产气率为特征指标,研究不同发酵浓度对批式和半连续 2 种发酵工艺产气特性的影响,以期获得秸秆沼气工程适宜的运行参数。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试秸秆取自江苏省农业科学院试验田自然条件下风干后的水稻秸秆,经破碎处理成 5 mm 左右的颗粒粉末,备用。风干后水稻秸秆的总固体(total solid, TS)为 87.62%±0.07%,TS 的挥发性固体质量分数(volatile solid, VS)为 87.99%±0.13%,碳氮比(C/N)为 73.20。接种物为本试验室污泥驯化罐排液(发酵底物为新鲜猪粪),经纱布过滤后于 35℃ 下保存待用。接种物的 TS 为 4.88%±0.01%,VS 为 65.06%±0.09%,pH 值为(7.62±0.07)。

1.2 试验设计

试验包括 2 个部分,即批式发酵试验和半连续发酵试验。

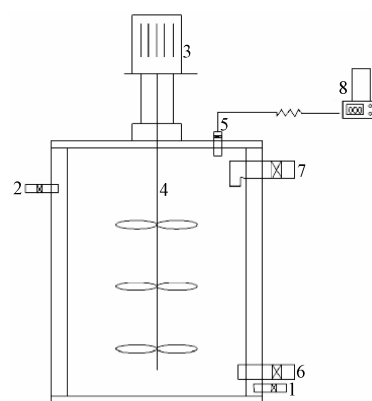
1.2.1 秸秆批式发酵试验

试验设置 4 个处理,TS 质量分数分别为 4%、6%、8%,另设置对照组 CK。各处理设置 3 个平行,取平均值用于分析。发酵瓶采用塑料大口型乐扣杯,总容积 760 mL,瓶盖上采用电钻开具 1 个 8 mm 的小孔,然后将 5 mL 的塑料移液枪头的大口端融化后插入空中,连接并密封;集气瓶和集水瓶均采用 1 000 mL 广口玻璃瓶。试验发酵物料总质量设置为 500 g,根据不同 TS 浓度称取对应发酵秸秆干质量的风干秸秆样品,装入乐扣杯中,加入等比例的接种物(接种量以接种污泥 TS 为秸秆 TS 的 35%计),然后用尿素调节 C/N 为 30,用自来水补足至物料总质量。

1.2.2 秸秆半连续发酵试验

试验装置采用自行设计的 CSTR 反应器(图 1),材质为有机玻璃,总容积为 12.5 L(内径 20 cm,高 40 cm),有效容积为 10.0 L。双层夹套,用恒温水浴锅(37±2℃)

为反应器保温。反应器内设有垂直搅拌器,机械密封,搅拌轴连接高频电机与定时开关。反应器顶部设有进料口,底部为出料口,采用阀门控制。搅拌轴上固定 3 层叶片,采用间歇搅拌方式,6 h 搅拌 1 次,每次搅拌 2 min,转速 20 r/min。



1.水浴进口 2.水浴出口 3.搅拌电机 4.搅拌轴 5.沼气出口 6.进料口
7.出料口 8.气体计量仪

1. Water bath inlet 2. Water bath outlet 3. Stirring motor 4. Stirring shaft
5. Biogas outlet 6. Feed inlet 7. Feed outlet 8. Gas meter

图 1 CSTR 反应器结构图

Fig.1 Schematic diagram of CSTR reactor

试验设置 3 个处理,无重复,发酵 TS 质量分数分别为 4%、6%、8%,试验包括启动阶段、SRT 为 20 和 15 d 半连续发酵方式 3 个阶段。各处理装料方式、接种量(接种量以接种污泥 TS 为秸秆 TS 的 35%计)和 C/N 调节如同静态批式发酵试验。启动阶段实际上仍然为批式试验,但采用间歇搅拌方式运行。而 SRT 20 d 和 SRT 15 d 半连续发酵阶段,采用每天定时进出料方式,各阶段进出料料液体积分别为 500、667 mL,出料料液采用 100 目网筛将发酵残渣滤除,滤液用于配制进料料液并回用至发酵罐中,进料料液体积不足出料体积时采用自来水补足。

秸秆半连续发酵试验共 64 d,分为 A、B、C 3 个阶段,A 阶段为发酵启动阶段(即间歇搅拌条件下的批式发酵),共计 20 d;B 阶段为固物滞留时间(SRT)为 20 d 发酵情况,共计 20 d;C 阶段为固物滞留时间(SRT)为 15 d 发酵情况,共计 24 d。

1.3 测试指标及方法

试验过程中取样测定有关指标:1)以排水集气法收集气体,每日测定产气量;2)采用 GC-7890A 气相色谱仪分析产气中的甲烷含量(TCD 检测器),检测器类型:热导检测器 TCD;检测器温度:120℃,进样器类型:平面流通阀;分析柱:TDC-01Φ4×1 m;柱温:100℃,载气类型:H₂;载气流量:50 mL/min;定量管:1 mL;标准气体:N₂中 42.4%CH₄+28.4%CO₂;分析方法:外标法;3)干物质的测定采用 105℃烘 24 h,差重法测定;4)挥发性固体的测定采用 550℃灼烧 4 h,差重法测定^[22]。

2 结果与分析

2.1 批式发酵试验

2.1.1 容积产气率变化

容积产气率是沼气发酵重要的性能指标。在反应器

容积相同情况下, 容积产气率越高, 能生产的沼气就越多, 这意味着在工程设计及运用中, 达到沼气需求量所设计的发酵系统规模较小, 大大节省场地建设面积及工程基建投资成本^[23]。

秸秆批式厌氧发酵过程中容积产气率的变化见图 2a。可以看出, 各处理容积产气率的变化趋势相似, 均为先迅速增加, TS 质量分数 4%、6% 和 8% 处理分别在试验第 2、3 和 2 天的容积产气率达到最大, 分别为 0.71、0.90 和 1.00 L/(L·d) ($P<0.01$), 维持短暂的高容积产气率后迅速降低, 试验第 6 天后各处理又逐渐升高, 分别在试验第 7、7 和 10 天达第 2 个产气峰值, 分别为 0.54、0.68 和 0.77 L/(L·d) ($P<0.01$), 之后各处理均缓慢降低。由于前期预试验结果及本试验室长期批式发酵结果均表明, 发酵 20 d 累积 TS 产气率可达整个发酵

周期原料产气率 70% 左右, 后续产气速率明显降低, 因此考虑到提高沼气工程中发酵罐的利用效率, 此试验发酵周期设定为 20 d。从容积产气率的结果看, 发酵浓度对秸秆批式厌氧发酵容积产气率的影响较大, 表现为容积产气率随着 TS 质量分数的增加而增加, 但值得注意的是, 在第 1 个产气峰值后, TS 浓度越高, 容积产气率下降越快, 表明秸秆批式发酵启动阶段, 随着发酵 TS 质量分数越高, 系统酸化的可能性越大。发酵 20 d 各处理平均容积产气率分别为 (0.33 ± 0.02) 、 (0.51 ± 0.02) 和 (0.60 ± 0.03) L/(L·d) ($P<0.01$), 分析发现, 容积产气率的增加并非随着 TS 质量分数增加而等比例增加, 其增幅呈逐渐减少趋势, 表明以秸秆为单一发酵原料时, 追求高容积产气率时必须重视发酵 TS 质量分数参数的选择。

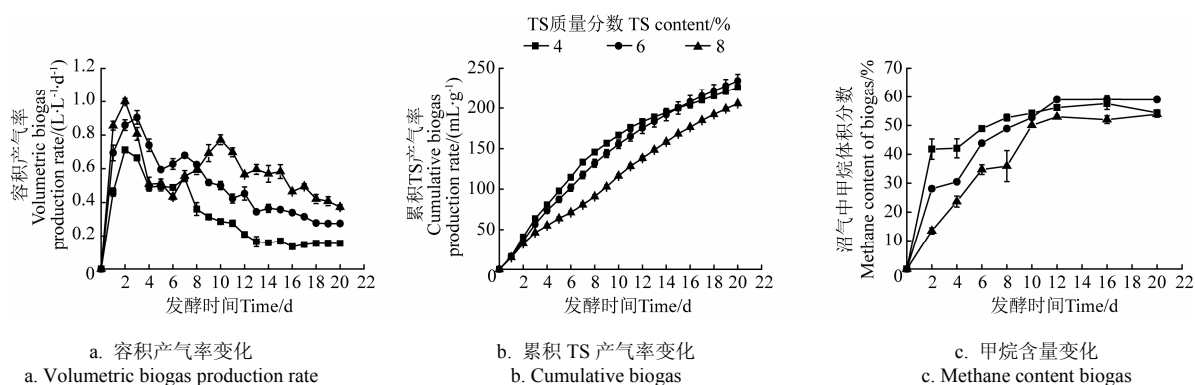


图 2 批式发酵产气特征变化

Fig.2 Changes of volume of gas production rate for batch fermentation

2.1.2 累积 TS 产气率变化

原料产气率是指发酵物料中单位总固体、挥发性固体或有机物在发酵过程中的产气量。由于采用的发酵原料、温度、滞留时间等条件不同, 其产气率也存在较大差异。发酵物料整个发酵周期内的累积 TS 产气率即为原料产气率, 研究原料产气率情况, 对于掌握发酵原料一定时期内物料的能源转化效率具有重要意义^[24]。

图 2b 是各处理试验过程中累积 TS 产气率的变化情况。可以看出, TS 4% 与 6% 处理的累积 TS 产气率变化趋势较相似, 并且在发酵第 0~14 天, 以 TS4% 处理高于 TS6% 处理, 随后, TS6% 处理的增长幅度明显高于 TS4% 处理, 至发酵第 20 天, TS 4% 和 6% 处理的累积 TS 产气率分别为 (226.22 ± 0.93) 和 (234.36 ± 8.16) mL/g; 而 TS8% 处理的累积 TS 产气率变化则不同, 表现为发酵第 0~3 天迅速增加, 随后发酵第 4~7 天, 其增幅明显放缓, 之后逐渐增加。然而, 从累积 TS 产气率的结果来看, 以秸秆为唯一厌氧发酵底物时, 并非 TS 浓度越高越有利于原料产气率提高, TS 过高反而使发酵受到一定程度的抑制, 这一结果与丁福贵等^[25]和席江等^[26]有关进料浓度对猪粪批式发酵的研究结果相一致。

2.1.3 沼气中甲烷含量变化

从图 2c 批式发酵产沼气中甲烷含量变化规律来看, 各处理变化趋势基本相同, 先迅速增加, 随后增幅减缓, 最后基本稳定于 50%~60%。但各处理在发酵第 0~10

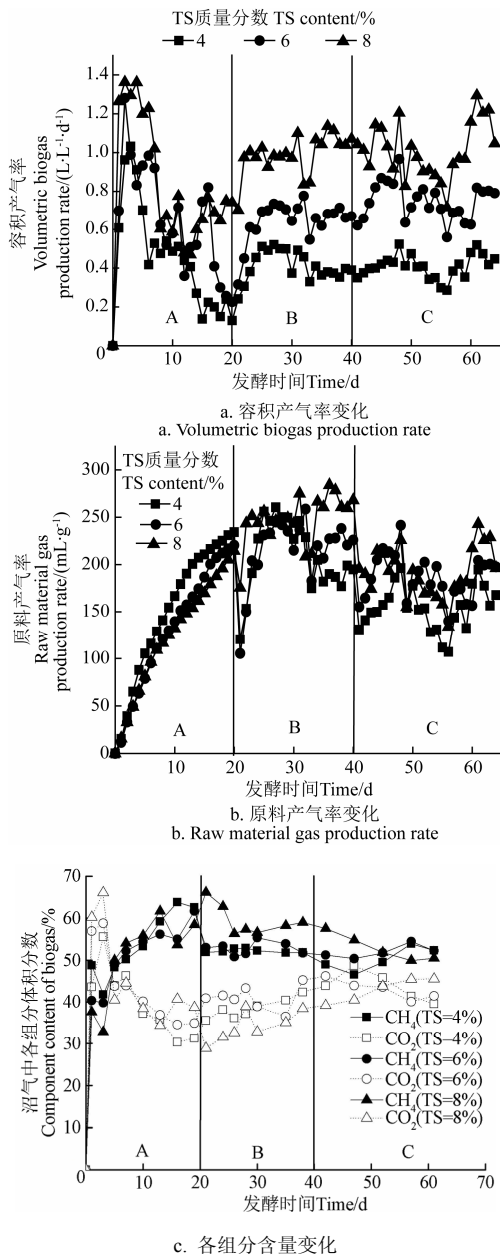
天的甲烷含量有较大差异, 并且随着 TS 浓度的增加, 甲烷含量增幅反而降低, TS4%、6% 和 8% 处理所产沼气中甲烷体积分数超过 50% 的时间分别为第 7、9 和 10 天, 结合厌氧发酵 3 阶段理论原理^[27], 可能随着 TS 浓度提高, 可利用的底物 (特别是秸秆中的可溶性有机物) 增多, 导致系统中水解产酸速率明显高于产甲烷速率。

2.2 半连续发酵试验

2.2.1 容积产气率变化

秸秆半连续式厌氧发酵过程中容积产气率的变化见图 3a。可以看出, 各处理在 A、B、C 3 个阶段的容积产气率变化趋势基本相似, 但处理间差异比较明显。发酵 A 阶段中, 各处理均为先迅速增加, TS 质量分数 4%、6% 和 8% 处理分别在试验第 3、2 和 2 天的容积产气率达到最大, 分别为 1.03、1.28、1.36 L/(L·d), 维持短暂的高容积产气率后迅速降低, 至发酵第 12 天, 除 TS4% 处理外, 其余处理均逐渐升高, 并于发酵第 16 天达到次高峰, 峰值分别为 0.22、0.82、0.76 L/(L·d), 之后 TS6% 处理迅速降低, 而 TS8% 处理容积产气率趋于稳定。发酵第 21 天, 开始每天进出料 (SRT 20 d), 各处理容积产气率均迅速升高, 随后经过一段时间波动调整期后, 最终分别稳定于 0.4、0.7、1.0 L/(L·d) 左右, 值得一提的是发酵第 33 天各处理容积产气率均明显下降, 这是由于试验当天停电所致。发酵第 41 天, 将 SRT 缩短为 15 d, 各处理差异明显, 总体表现为随着 TS 浓度增加, 容积产气率变化幅度

明显增大, 各处理变化幅度分别为 0.29~0.52、0.56~0.96、0.72~1.29 L/(L·d), 至发酵结束时, 各处理分别稳定于 0.4、0.8、1.0 L/(L·d) 左右。



注: A、B、C 为 3 个发酵阶段, A 阶段为发酵启动阶段 (即间歇搅拌条件下的批次发酵), B 阶段为固体滞留时间 (SRT) 为 20 d 发酵阶段, C 阶段为固体滞留时间 (SRT) 为 15 d 发酵阶段。

Note: A, B, C were three fermented stage, A was the start stage of fermentation (batch fermentation with interval stirring), B and C were the fermentation stages with SRT of 20, 30 d respectively.

图 3 半连续发酵产气特征变化

Fig.3 Changes of volume biogas production rate for semi-continuous fermentation

从发酵各阶段容积产气率变化来看, 与批次发酵阶段 A 相比, 采用半连续进出料有利于发酵系统稳定产气, 但提高发酵系统有机负荷, 容积产气率增加幅度不大, 反而使得发酵系统不稳定。

2.2.2 原料产气率变化

秸秆半连续式厌氧发酵过程中原料产气率的变化见

图 3b。可以看出, 各处理在发酵 A 阶段的容积产气率变化趋势基本相似, 发酵 20 d 期间原料产气率随着 TS 浓度的提高而降低, TS4%、6%和 8%处理分别达 234.38、220.35、214.48 mL/g; 进入 B 阶段后, 各处理原料产气率均迅速下降, 随后逐渐升高并都稳定于 240 mL/g 左右, 至发酵第 33 天后, 除 TS8%处理有所升高外, TS6%处理基本不变, 而 TS4%处理逐渐下降并基本稳定于 190 mL/g; 进入 C 阶段后, 各处理原料产气率均呈现大幅波动变化趋势, 从图 3b 中明显可以看出, C 阶段各处理原料产气率明显低于 B 阶段。

从发酵各阶段原料产气率变来看, 与批次发酵阶段 A 相比, 采用半连续进出料发酵方式, 除 TS8%处理原料产气率在 SRT 20 d 条件下有所增加外, 其余处理在 B 和 C 阶段均明显降低, 表明在间隙搅拌作用下, 较高的发酵 TS 浓度可获得更高的原料产气率, 但提高发酵系统有机负荷对累积 TS 产气率影响较大, 各处理均明显降低并很不稳定。

2.2.3 沼气中各组分含量变化

秸秆半连续式厌氧发酵过程所产沼气组分变化见图 3c。可以看出, 各处理在 A、B 和 C 3 个阶段的沼气组分变化趋势基本相似, 并且沼气中 CH₄ 和 CO₂ 体积分数变化趋势正好相反。发酵 A 阶段中, 各处理 CH₄ 体积分数均为逐渐增加至峰值, 随后略为降低并趋于稳定, TS 4%、6%和 8%处理均于发酵第 7 天沼气中 CH₄ 体积分数超过 50%, 并且产气峰值分别为 63.81%、61.71%、61.64%, 但总体上看, 随着 TS 浓度提高, 沼气中甲烷百分比例有所降低, 即不利于沼气品质的提高; 发酵 B 阶段中, 各处理均先降低后趋于稳定, 但总体较发酵 A 阶段峰值低, 并且 TS 8%处理明显高于其余 2 个处理; 进入发酵 C 阶段后, 各处理甲烷体积分数变化趋势与发酵 B 阶段类似, 均进一步下降并趋于稳定, 并且至发酵结束时, TS8%处理明显低于其余 2 个处理 ($P < 0.05$)。

从发酵各阶段沼气组分变化来看, 与批次发酵阶段 A 相比, 采用半连续进出料发酵方式, 有利于发酵系统所产沼气中 CH₄ 百分比例的稳定, 但提高发酵系统有机负荷, 沼气中 CH₄ 百分比例随之降低, 表明缩短 SRT 不利于发酵系统所产沼气品质的提高。另外, 通过缩短 SRT 后 CH₄ 百分比例逐渐降低这一现象, 从另一角度也可能由于随着有机负荷的提高, 发酵系统存在逐渐酸化趋势, 导致沼气中 CO₂ 逐渐增加。

2.3 不同发酵方式下产沼气特征分析

不同发酵方式下 TS 浓度对产沼气特征的影响见表 1。可以看出, 秸秆采用批次发酵与半连续发酵方式的产沼气特征存在明显差异。与批次发酵相比, 半连续启动阶段各发酵 TS 浓度间容积产气率均明显增加, 并且随着 TS 浓度增加, 其增幅越大, 而原料产气率除 TS6%处理有所降低外, 其余处理均有所增加, 但增幅不大; 开始半连续进料后 (SRT 20 d), 仅 TS 8%处理容积产气率明显增加, TS 6%处理持平, 而 TS 4%处理有所降低, 其趋势同样表现在原料产气率; 当缩短 SRT 至 15 d 后, 除

TS6%处理容积产气率略为增加外，其余处理基本不变，但各处理的原料产气率均大大降低，与 SRT 20 d 相比，TS4%、6%和 8%处理分别降低 27.18%、13.95%和 24.19%。

总体上讲，与静态批式发酵相比，采用 CSTR 发酵工艺可以在原料产气率基本不变情况下大幅度提高容积产气率，TS4%、6%和 8%处理分别提高 42.42%、29.41%和 43.33% ($P<0.01$)，表明在间隙搅拌工况下，加快发酵系统物料传质，对高 TS 浓度发酵容积产气率的提升效果更加明显，并且产气更加稳定，可明显避免静态批式

发酵中高 TS 浓度处理酸化问题的发生；开始半连续进料后 (SRT=20 d)，TS4%和 TS6%处理容积产气率无太大变化，表明在较低 TS 浓度下，发酵系统中易降解有机物可以在发酵周期内转化并产生沼气，而 TS8%处理容积产气率有所提高，表明随着 TS 浓度提高，系统中易降解有机物偏多，在发酵周期内尚不能完全转化并产生沼气，仅将易降解有机物中更加易降解部分快速转化，而此部分易降解有机物的沼气得率较高所致。缩短 SRT 后的效果及可能原因与上述类似，在此不作赘述。

表 1 不同发酵方式下 TS 浓度对产沼气特征影响

Table 1 Effect of substrate concentration on biogas production characteristics under different fermentation mode

发酵方式 Fermentation mode		平均容积产气率			原料产气率		
		Average volume biogas production rate/(L·L ⁻¹ ·d ⁻¹)			Raw material biogas production rate/(mL·g ⁻¹)		
		TS=4%	TS=6%	TS=8%	TS=4%	TS=6%	TS=8%
批式发酵 Batch fermentation		0.33±0.02	0.51±0.02	0.60±0.03	226.22±0.93	234.36±8.16	205.68±1.52
半连续式发酵 Semi-continuous fermentation	启动阶段 Starting phase	0.47	0.66	0.86	234	220	214
	SRT 20 d	0.41	0.64	0.99	206	215	248
	SRT 15 d	0.40	0.75	1.01	150	185	188

3 结 论

1) 批式发酵条件下，发酵浓度对单一秸秆原料厌氧发酵容积产气率的影响较大，随着总固体 TS 质量分数的增加，容积产气率随之增加，但随着 TS 质量分数增加其增幅呈逐渐减少趋势。综合考虑产气情况及工程应用实际，建议秸秆批式发酵 TS 质量分数不超过 8%；

2) 与静态批式发酵相比，间歇搅拌有助于提高批式发酵容积产气率，TS 质量分数 4%、6%和 8%处理分别提高 42.42%、29.41%和 43.33% ($P<0.01$)，通过加快发酵系统物料传质，对高 TS 浓度处理容积产气率的提升效果更加明显；

3) 与启动阶段批式发酵相比，半连续进料有利于高 TS 浓度处理容积产气率的提高，但各处理原料产气率均随着 SRT 缩短而逐渐降低。综合考虑产气情况及工程应用实际，建议秸秆半连续发酵工况参数：发酵 TS 质量分数 8%时水力停留时间 SRT 设计为 20 d 和发酵 TS 质量分数 6%时 SRT 设计为 15 d。

[参 考 文 献]

[1] Wang Yajing, Bi Yuyun, Gao Chunyu. The assessment an utilization of straw in China[J]. Agricultural Sciences in China, 2010, 9(12): 1807—1815.

[2] 吴楠, 孔垂雪, 刘景涛, 等. 农作物秸秆产沼气技术研究进展[J]. 中国沼气, 2012, 30(4): 14—20.

Wu Nan, Kong Chuixue, Liu Jingtao, et al. Research progress on crop straw biogas technology[J]. China Biogas, 2012, 30(4): 14—20. (in Chinese with English abstract)

[3] 艾平, 张衍林, 盛凯, 等. 稻秸厌氧发酵产沼气预处理[J]. 农业工程学报, 2010, 26(7): 266—271.

Ai Ping, Zhang Yanlin, Sheng Kai, et al. Pretreatment for biogas production by anaerobic fermentation of rice straw[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2010, 26(7): 266—271. (in Chinese with English abstract)

[4] 万楚筠, 黄凤洪, 刘睿, 等. 微生物预处理秸秆对提高沼气产量的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 267—271.

Wan Chuyun, Huang Fenghong, Liu Rui, et al. Effect on increasing biogas production using rape straw by microbiological pretreatment[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(6): 267—271. (in Chinese with English abstract)

[5] 韩鲁佳, 闫巧娟, 刘向阳, 等. 中国农作物秸秆资源及其利用现状[J]. 农业工程学报, 2002, 18(3): 87—91.

Han Lujia, Yan Qiaojuan, Liu Xiangyang, et al. Straw resources and their utilization in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2002, 18(3): 87—91. (in Chinese with English abstract)

[6] 庞凤梅, 李玉浸, 杨殿林, 等. 农作物秸秆沼气发酵与直接利用效益比较[J]. 中国沼气, 2008, 26(2): 34—37.

Pang Fengmei, Li Yujin, Yang Dianlin, et al. Benefit comparison of biogas fermentation and using direct with crop straw[J]. China Biogas, 2008, 26(2): 34—37. (in Chinese with English abstract)

[7] 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)

[8] 国家发展改革委, 农业部, 财政部. "十二五"农作物秸秆综合利用实施方案[Z]. 发改环资[2011]2615 号.

The National Development and Reform Commission, Ministry of Agriculture, Ministry of Finance. The 12th Implementation Plan on Comprehensive Utilization of Crop Straw[Z]. Ring Division of Development and Reform Commission No. [2011]2615. (in Chinese with English abstract)

[9] 崔文文, 梁军锋, 杜连柱, 等. 中国规模化秸秆沼气工程现状存在问题[J]. 中国农学通报, 2013, 29(11): 121—125.

- Cui Wenwen, Liang Junfeng, Du Lianzhu, et al. The current situation and problems of the large-scale biogas plants for straw in china[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(11): 121—125. (in Chinese with English abstract)
- [10] 绿色能源示范县建设技术管理暂行办法下发[EB/OL]. 上海证券报, [Http://www.asiafinance.cn/news/2011-11-23/asia0000092200.shtml](http://www.asiafinance.cn/news/2011-11-23/asia0000092200.shtml), 2011-11-23.
- [11] 吴振兴, 陈晓哗, 杨占春, 等. 秸秆两相厌氧消化产酸相发酵工艺[C]// 第三届全国化学工程与生物化工年会论文摘要集(下), 北京: 化学工业出版社, 2006.
- Wu Zhenxing, Chen Xiaohua, Yang Zhanchun, et al. Study on the process of two-phase anaerobic fermentation for crop straws[C]// 3th Chinese National Chemical and Biochemical Engineering Annual Meeting (the Second Volume), Beijing: Chemical Industry Press, 2006. (in Chinese with English abstract)
- [12] 李子富, 余敏娜, 范晓琳. 德国沼气工程现状分析[J]. 可再生能源, 2010, 28(4): 141—144.
- Li Zifu, Yu Minna, Fan Xiaolin. Current status of biogas projects in Germany[J]. Renewable Energy Resources, 2010, 28(4): 141—144. (in Chinese with English abstract)
- [13] 邓良伟, 陈子爱. 欧洲沼气工程发展现状[J]. 中国沼气, 2007, 25(5): 23—31.
- Deng Liangwei, Chen Ziai. The current state of biogas engineering in Europe[J]. China Biogas, 2007, 25(5): 23—31. (in Chinese with English abstract)
- [14] 杜连柱, 梁军锋, 杨鹏, 等. 猪粪固体含量对厌氧消化产气性能影响及动力学分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(24): 246—251.
- Du Lianzhu, Liang Junfeng, Yang Peng, et al. Influence of total solid content on anaerobic digestion of swine manure and kinetic analysis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(24): 246—251. (in Chinese with English abstract)
- [15] Qigui Niu, Wei Qiao, Hong Qiang, et al. Mesophilic methane fermentation of chicken manure at a wide range of ammonia concentration: Stability, inhibition and recovery[J]. Bioresour Technology, 2013, 137(6): 358—367.
- [16] 陈闯, 邓良伟, 信欣, 等. 上推流厌氧反应器连续干发酵猪粪产沼气试验研究[J]. 环境科学, 2012, 33(3): 1033—1040.
- Chen Chuang, Deng Liangwei, Xin Xin, et al. Continuous dry fermentation of pig manure using up plug-flow type anaerobic reactor[J]. Environmental Science, 2012, 33(3): 1033—1040. (in Chinese with English abstract)
- [17] 韩芳, 林聪. 畜禽养殖场沼气工程厌氧消化技术优化分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(13): 41—47.
- Han Fang, Lin Cong. Optimization analysis of anaerobic digestion technologies of biogas engineering in livestock and poultry farms[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(13): 41—47. (in Chinese with English abstract)
- [18] 陈广银, 郑正, 邹星星, 等. 稻草与猪粪混合厌氧消化特性研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(1): 185—188.
- Chen Guangyin, Zheng Zheng, Zou Xingxing, et al. Anaerobic co-digestion of rice straw and swine feces[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(1): 185—188. (in Chinese with English abstract)
- [19] 邓媛方. 蘑菇废弃菌棒和猪粪混合厌氧发酵特性研究[D]. 西安: 西北农林科技大学, 2012.
- Deng Yuanfang. Research on Anaerobic Co-digestion of Mushroom Cultivation Wastes and Pig Manure[D]. Xi'an: Northwest A&F University, 2012. (in Chinese with English abstract)
- [20] 王晓娇, 杨改河, 冯永忠, 等. 鸡粪、猪粪与秸秆混合厌氧发酵配比参数优化[J]. 农业机械学报, 2013, 44(11): 133—138.
- Wang Xiaojiao, Yang Gaihe, Feng Yongzhong, et al. Optimization of ration of feeding substrates in anaerobic co-digestion of chicken manure, swine manure and straw[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machine, 2013, 44(11): 133—138. (in Chinese with English abstract)
- [21] 段娜, 林聪, 王骥, 等. 不同处理秸秆半连续式中温厌氧消化产气研究[C]// 2012 年中国沼气学会学术年会论文集. Duan Na, Lin Cong, Wang Ji, et al. The gas production of different treated straw under mesophilic semi-continuous anaerobic digestion process[C]// China Biogas Society of Annual Conference in 2012 (in Chinese with English abstract)
- [22] 中科院成都微生物研究所. 沼气常规分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 1979: 17—21.
- [23] 韩捷, 向欣, 程红胜, 等. 好氧预处理对干法沼气发酵产气量的影响及能量损失[J]. 农业工程学报, 2011, 27(12): 246—249.
- Han Jie, Xiang Xin, Cheng Hongsheng, et al. Effects of aerobic fermentation pre-treatment on dry anaerobic fermentation gas production and its energy loss[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(12): 246—249. (in Chinese with English abstract)
- [24] 冯晓伟. 高浓度有机质厌氧发酵降解研究[D]. 成都: 西华大学, 2008.
- Feng Xiaowei. Research of the Organic Matter of High Concentration in Anaerobic Decomposition[D]. Chengdu: Xihua University, 2008. (in Chinese with English abstract)
- [25] 丁福贵, 李欣, 张炳宏, 等. 进料浓度对猪粪批式和连续厌氧发酵产沼气的的影响[J]. 中国沼气, 2014, 32(5): 36—39.
- Ding Fugui, Li Xin, Zhang Binghong, et al. Effect of feed input concentration on batch and continuous biogas fermentation of pig manure[J]. China Biogas, 2014, 32(5): 36—39. (in Chinese with English abstract)
- [26] 席江, 王超, 冉毅, 等. 发酵温度、进料浓度和水力停留时间对连续式厌氧发酵效果的影响[J]. 中国沼气, 2014, 32(4): 43—47.
- Xi Jiang, Wang Chao, Ran Yi, et al. Effects of temperature, feeding concentration and hydraulic retention time on continuously anaerobic digestion[J]. China Biogas, 2014, 32(4): 43—47. (in Chinese with English abstract)
- [27] McNerney M J, Bryant M P, Pfennig N. Anaerobic bacterium that degrades fatty acids in syntrophic association with methanogens[J]. Arch Microbiol, 1979, 122(2): 129—135.

Effect of fermenting material concentration on biogas yield in batch and continuous biogas fermentation with straws

Du Jing, Chen Guangyin, Huang Hongying, Jin Hongmei, Xi Yonglan, Qian Yuting,
Xu Yueding, Chang Zhizhou^{*}

(Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences; Department of Agriculture Rural Renewable Energy Development and Utilization of Scientific Observation and Experiment Station in East China, Nanjing 210014, China)

Abstract: At present, large quantities of straws are burned in field in China, which not only wastes a renewable resource, but also causes serious air pollution. Anaerobic digestion of straws is an alternative method that may produce a clean fuel for energy generation. Currently, more research on impact of digestion for quality content of total solid of manure or mixed materials for the fermentation substrate has been studied, but research is limited in continuous stirred tank reactor for a single type of feedstock. Although the characteristics of anaerobic digestion and properties of gas production at the process of continuous stirred tank reactor and semi-continuous feeding mode has been examined for crushed straw and silage straw as the fermentation substrate, but the operation parameters of such system has not been determined. Thus, in order to obtain the corresponding relationship between solid matter retention time for substrate and the characteristics of gas production, a comparative study to determine biogas production in batch fermentation and semi-continuous fermentation process was carried out under medium temperature conditions with rice straw as feedstock. The effect of quality content of total solid in the batch and continuous biogas fermentation of straws was studied. The volume of gas production rate and the rate of raw material gas production were used as characteristic indicators in order to obtain parameter on optimum quality content of total solid and solid matter retention time for biogas plant with straws. The results showed that fermentation concentration of single straw type used for anaerobic fermentation raw material influenced the gas volume rate under the condition of batch fermentation. With the increase of total solid concentration, the volume of gas production rate was increased in batch fermentation process, but the trend of the increase was gradually decreasing. The volume of gas production rate was improved under condition of intermittent stirred compared with static batch fermentation. Especially, the improving effect was more obvious for the group of high-concentration of TS. However, the volume of gas production rate was more improved for the group of high-concentration of TS under semi-continuous feed conditions, but with the solid matter retention time (SRT) shortened, the rate of raw material gas production with every treatment was gradually decreased. Considering the characteristics of gas production and engineering applications, it was recommended that the concentration of batch fermentation should not exceed 8% for pure straw. For semi-continuous fermentation, if the straw composition in total solids content was 8%, SRT was designed as 20 days (the volume of gas production rate of $1.00 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$). If the total solids content was 6%, SRT was designed as 15 days (the volume of gas production rate of $0.75 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$). The operating parameters provided an operational reference for biogas plant only with straw.

Key words: straw; biogas; fermentation; fermenting substrate concentration; batch fermentation; semi-continuous fermentation