

秸秆床厌氧发酵产沼气系统优化试验

陈广银,毕金华,杜 静,常志州*,叶小梅

(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:针对前期研究中发现秸秆床反应器内秸秆在发酵后期上浮、进水短流等问题,采取在秸秆床反应器内增加导气管、在秸秆床底部预留缓冲空间以及 2 种方式组合的方式,研究改进措施对秸秆床反应器及整个发酵系统产气、化学需氧量(chemical oxygen demand, COD)去除等的效果。结果表明:直接以打捆秸秆为固定相,以猪粪废水为流动相的处理在猪粪废水有机负荷为 $2.13 \text{ kg}/(\text{m}^3/\text{d})$ 条件下出现轻度酸化,产气受到明显抑制,日产气量明显低于其它处理,继续提高猪粪废水有机负荷后各处理间无明显差别;采用增加导气管、增加缓冲空间以及导气管+缓冲空间的方式改善了秸秆床反应器内发酵环境,未出现酸化现象,日产气量稳定性明显提高。试验结束时,各处理秸秆床反应器累积产气量较对照分别提高了 18.90%、9.05%和 22.48%,累积产甲烷量较对照分别提高了 23.02%、9.34%和 25.21%;采用该研究提出的改进措施对二级反应器产气组成无明显影响,各处理平均甲烷含量均在 68%左右,对整个秸秆床发酵系统累积产气量、平均甲烷体积分数以及 COD 去除率无明显影响。以上结果表明,在秸秆床反应器内增加导气管对提高反应器产气量、甲烷含量及产气稳定性有较好的效果,在条件允许的情况下可以考虑在反应器底部增加缓冲空间。

关键词:秸秆;沼气;优化;秸秆床反应器;导气;缓冲空间;猪粪废水;厌氧发酵

doi:10.11975/j.issn.1002-6819.2016.01.035

中图分类号:X705

文献标志码:A

文章编号:1002-6819(2016)-01-0250-08

陈广银,毕金华,杜 静,常志州,叶小梅. 秸秆床厌氧发酵产沼气系统优化试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(01): 250-257. doi:10.11975/j.issn.1002-6819.2016.01.035 http://www.tcsae.org

Chen Guangyin, Bi Jinhua, Du Jing, Chang Zhizhou, Ye Xiaomei. Optimization experiment of straw-bed anaerobic fermentation system for biogas production[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(01): 250-257. (in Chinese with English abstract) doi:10.11975/j.issn.1002-6819.2016.01.035 http://www.tcsae.org

0 引 言

渗滤床发酵系统是近年来新兴的一种厌氧发酵技术,被广泛用于畜禽粪便、蔬菜废物、有机生活垃圾等废物处理中。Demirer 等^[1]将渗滤床厌氧反应器用于奶牛粪便厌氧发酵产沼气,取得了较好的效果,沼气产量较传统的浆料发酵提高了 25%以上。Browne 等^[2]采用渗滤床反应器研究了食品废物水解特性并对相关参数进行了优化。Shewani 等^[3]用数学模型研究了牛粪固态渗滤床反应器厌氧发酵过程中渗滤液的下渗特征。Koppar 和 Pullammanappallil^[4]采用渗滤床发酵系统处理废弃甜菜浆,取得了较好的产气效果,但发酵液在循环使用 3 次后,第 4 次试验对产气产生明显抑制,主要是由于氨的累积造成的抑制。此外,一些学者还将该发酵系统用于处理互花米草^[5]、餐厨垃圾^[6]、有机生活垃圾^[7]等。然而,单纯以渗滤床

反应器处理有机废物,存在对废弃物处理时间长、出水化学需氧量(chemical oxygen demand, COD)浓度偏高等问题。Jagadabhi 等^[8]采用渗滤床+上流式厌氧污泥床反应器(up-flow anaerobic sludge bed/blanket, UASB)反应器组成两相厌氧发酵系统处理番茄、黄瓜、芦苇和青贮草产沼气,取得了较好的产气效果。Linke 等^[9]采用渗滤床+厌氧滤器(anaerobic filter, AF)反应器组成两相厌氧发酵系统处理青贮玉米。可以看出,渗滤床反应器已被广泛用于固体物料厌氧处理中,作为两相厌氧发酵的水解相也逐步得到应用,且表现出较好的效果。

然而,渗滤床反应器的提出和应用仅仅满足于处理固体废弃物,对废水无能为力。在广大农村地区,不仅有农业秸秆等固体废弃物,还有数量更为庞大且更难处理的畜禽养殖污水。秸秆能源化是秸秆综合利用的重要方向之一,国内外学者在这方面进行了大量研究^[10-11],但将农业秸秆与畜禽养殖污水联合处理的研究还不多^[12-13]。曹杰等^[14]以打捆麦秸为固定相,以猪粪废水为流动相组成秸秆床反应器作为两相厌氧发酵系统的水解产酸相,并试图通过逐渐提高猪粪废水有机负荷的方式促进水解产酸相酸化,达到“相分离”的目的,结果显示,较高的猪粪废水有机负荷对反应器产气有一定抑制,但 25 d 后日产气量和容积产气量迅速增加,且明显高于低猪粪废水有机负荷的处理;对发酵后麦秸水浸提液的变性梯度凝胶电泳(denatured gradient gel electrophoresis, DGGE)检测表明,猪

收稿日期:2015-08-01 修订日期:2015-11-30

基金项目:国家水体污染控制与治理重大专项(2012ZX07101-004);国家科技支撑计划(2014BAL02B04);农业部公益性行业专项(201403019)

作者简介:陈广银,男,江苏大丰人,博士,主要从事生物质能的研究。南京 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所,210014。

Email: xzcf2004@163.com

*通信作者:常志州,男,江苏句容人,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

中国农业工程学会会员:陈广银(E041100020M)

粪废水高有机负荷促进了厌氧微生物在麦秸表面定植,微生物种群数量和丰富度均明显提高,反应器耐高有机负荷冲击的能力得到增强。在该研究启发下,我们提出了一个新的思路,即能否以结构疏松多孔的秸秆为固定相,以养殖/生活污水为流动相,组成秸秆床反应器厌氧产甲烷。在该思路下作者设计了秸秆床厌氧发酵系统,并对其可行性进行了研究,详见文献[15]。结果表明,秸秆床厌氧发酵系统可同时处理打捆秸秆和猪粪废水,且不影响发酵物料的厌氧生物转化率,系统产气稳定性大幅提高,避免了单一原料日产气量波动较大的问题,但试验35 d后,秸秆互相粘结,导气性下降,造成秸秆上浮、进水短流,反应器出水COD浓度快速增加^[15]。通过在厌氧反应器内增加导气措施可促进物料产气已有相关研究报道^[16]。在秸秆捆与反应器底部预留一定的空间,减少进水对发酵系统的冲击,大量文献查阅还未发现这方面的研究报道。因此,研究在秸秆捆中增加导气管以及在秸秆捆底部预留缓冲空间对秸秆床发酵系统产气的影响很有必要,但还未见这方面的研究报道。

本研究以打捆麦秸为固定相,以猪粪废水为流动相,组成秸秆床反应器,并在秸秆床反应器后连接污水深度厌氧反应器,组成秸秆床厌氧发酵系统。通过在秸秆床反应器内增加导气管、在秸秆捆底部预留缓冲空间的方式,研究这些改进措施对秸秆床发酵系统产沼气的影响,为秸秆床反应器改进提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

小麦秸秆取自江苏省农业科学院小麦试验田,风干后,人工打成圆柱形捆(质量300 g,高18 cm,Φ16 cm),于干燥阴凉处备用,总固体(total solid, TS)质量分数为87.48%,挥发性固体(volatile solid, VS)质量分数为86.88%,C/N为55.32;猪粪pH值为7.20,TS为24.14%,以猪粪:水质量比1:5混合后过20目筛的液体模拟猪粪废水;接种污泥由实验室自行驯化,TS为9.46%,VS为34.63%,COD浓度为13 900 mg/L,pH值为7.65。文中物质含量均为占干物质的百分比。

1.2 试验方法

试验用秸秆床厌氧发酵系统同文献[15]。该发酵系统由2套总容积各5 L的升流式固体反应器(upflow solid reactor, USR)串联而成。首先,将干物质重300 g的打捆秸秆和3 657 g接种物装入秸秆床反应器(1#)内,将4 000 g接种物装入二级厌氧反应器(2#)内,猪粪废水从秸秆床反应器底部进水口进入,排出的发酵液用蠕动泵泵入二级厌氧反应器(2#)继续发酵产沼气。每天向一级发酵罐内加入猪粪废水,每5 d一个周期,逐步提高猪粪废水进水量,即逐步提高猪粪废水有机负荷。试验启动后第1天猪粪废水进水量为200 mL,5 d后每天进350 mL猪粪废水,10 d后为500 mL,以此类推。秸秆床厌氧发酵系统发酵温度为(37±1)℃。

试验设4个处理,其中1个对照。对照(CK):直接将打捆秸秆装入秸秆床反应器内,无其它措施;处理1(T1),

在秸秆捆体竖向方向插入6根导气管,1根导气管位于捆体中心,另5根导气管在离发酵罐壁3 cm左右呈圆形均匀分布,导气管内径8 mm,长度20 cm,其它同CK;处理2(T2),将秸秆捆固定于发酵罐内,捆体底部留出1 L的空间(距罐底约5 cm),其它同CK;处理3(T3),将秸秆捆底部留出约1 L空间,并在捆体中插入导气管,即将T1和T2的处理措施整合起来,其它同CK。各处理二级反应器分别标记为CK'、T1'、T2'、T3'。每个处理2个平行,取平均值进行分析。试验第45天时,猪粪废水日进水量达1 400 mL,之后停止进水,仅测定日产气量和甲烷含量至试验第52天。试验过程中,每日测定日产气量和甲烷体积分数,测定进出水pH值和COD浓度。

1.3 测定指标和方法

以排水集气法测定产气量;采用气相色谱仪(GC-9890A,南京仁华色谱科技应用开发中心,南京)分析产气中甲烷体积分数(TCD检测器);采用105℃烘24 h,差重法测定TS;采用550℃灼烧4 h,差重法测定VS;采用酸度计(pHS-2F型,上海精密科学仪器有限公司,上海)测定发酵液pH值;有机碳含量采用重铬酸钾氧化-外加热法^[17];采用H₂SO₄-H₂O₂消煮,凯氏定氮法测定全氮^[18];参照GB1194-89测定COD浓度。

1.4 作图及统计分析

采用Origin 8.0作图,Excel 2003软件处理试验数据,SPSS 13.0软件进行统计分析,置信水平为95%($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 第1级/1#反应器厌氧发酵特性

2.1.1 进出水pH值的变化

试验过程中,各处理进出水pH值的结果见图1。由于试验用猪粪废水为当天用猪粪现配,故试验过程中猪粪废水pH值波动较大,波动范围在6.0~6.8之间;除CK外,各处理pH值的变化趋势相似,试验过程中基本稳定在7.0~7.5之间;CK在试验启动后,pH值迅速降低,在试验第7天达到最低值6.32,之后迅速回升,并稳定在7.0~7.5之间。可以看出,无论是增加导气措施还是在发酵罐底部预留缓冲空间,对秸秆床反应器出水pH值均无明显影响。经秸秆床反应器处理后,出水pH值大幅增加,从进水的6.0~6.8之间大幅增加至7.0~7.5之间,这可能与猪粪废水经厌氧发酵处理后,有机氮大量转化为铵态氮有关^[19]。

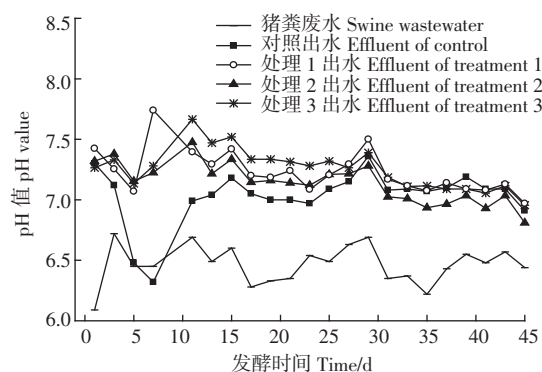


图1 各处理进出水pH值的变化

Fig.1 Changes of pH values during experiments

2.1.2 进出水 COD 浓度及有机负荷率 (organic loading rate, OLR) 的变化

试验过程中,各处理进出水 COD 浓度及反应器猪粪废水 OLR 的结果见图 2。试验用猪粪废水为当天用猪粪现配,故试验过程中猪粪废水 COD 浓度波动较大,波动范围在 10.0~16.6 g/L 之间;经秸秆床反应器处理后,出水 COD 浓度均大幅下降。除 CK 外,T1-T3 在试验前 20 d COD 去除率均在 40%以上,之后逐渐下降;CK 在试验启动后,出水 COD 浓度迅速上升,在试验第 15 天时 COD 去除率达到最低值,为-25.0%,即出水 COD 浓度高于进水,对照 pH 值的结果推测该阶段反应器出现酸积累,造成 COD 累积,之后 COD 在 8.0~12.0 g/L 之间波动,COD 去除率稳定在 20%~40%之间;T1-T3 发酵液 COD 浓度的变化趋势相似,均为缓慢增加的趋势,COD 去除率则呈缓慢降低的趋势,分别从试验起始的 73.91%、69.57%和 69.57%降低至第 45 d 时的 30.32%、16.77%和 27.74%。

试验过程中,猪粪废水 COD 浓度相对稳定,通过逐步提高猪粪废水添加量的方式提高猪粪废水 OLR,各处理秸秆床反应器 OLR 从试验第 1 天时的 0.644 kg/(m³/d)增加到试验第 45 天时的 4.34 kg/(m³/d)。试验过程中,随着猪粪废水添加量逐渐增加,猪粪废水发生短流的风险增加,表现为出水 COD 浓度快速增加,T2 在试验 27 d 后出水 COD 浓度快速增加,且明显高于 T1 和 T3,表明在发酵罐底部预留一定空间对缓冲进料的冲击有一定作用,但当进料量大于预留的空间容积时,这种缓冲作用逐渐降低;在试验前 21 d,T3 出水 COD 浓度最低,表明在发酵罐底部预留缓冲空间结合秸秆捆中增加导气管的方式对促进 COD 在秸秆床反应器内分解转化有积极作用,但随着猪粪废水添加量逐渐增加,这种促进作用逐渐降低。

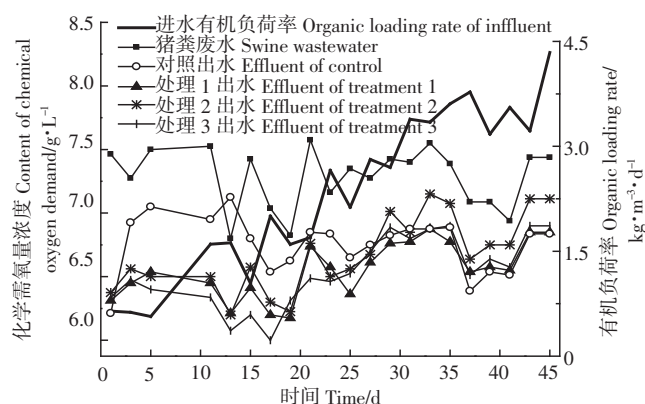


图 2 各处理进出水化学需氧量(COD)浓度及有机负荷(OLR)变化

Fig.2 Changes of chemical oxygen demand(COD) content of influent and effluent and organic loading rate(OLR) during experiments

2.1.3 产气特性

各处理试验过程中日产气量的变化见图 3a。可以看出,除 CK 外,T1-T3 日产气量的变化趋势相似,均为试验启动后迅速增加,分别在试验第 6、6 和 4 天日产气量达到第一个高峰,峰值分别为 6 863、7 044 和 6 306 mL,之后有一个短暂的稳定期。对照图 2 的结果可知,该阶段猪粪废水 OLR 较低,在 1.5 kg/d 以下,故推测该阶段的产气主要

来自秸秆。12 d 后,随着猪粪废水有机负荷逐渐增加,产气主要来自每日添加的猪粪废水,产气量快速增加,T1-T3 分别在试验第 26、26 和 25 天出现第 2 个产气高峰,峰值分别为 8 230、7 180 和 7 165 mL,之后产气逐渐下降,对应的猪粪废水 COD 去除率逐渐降低。日产量的结果表明,将增加导气管和在发酵罐底部预留缓冲空间相结合对提高日产气量有较好的效果。CK 在试验启动后,日产气量迅速增加,在试验第 4 天达到第一个产气高峰,峰值为 4 400 mL,之后产气迅速降低,并在第 6 天达到谷值,仅为 350 mL,这与 pH 值的结果一致,之后产气量迅速回升,并在第 32 天达到第 2 个产气高峰,峰值为 8 120 mL,之后产气逐渐降低,但该阶段日产气量明显高于其它处理。

试验 30 d 后,猪粪废水进水量达到 1 L 以上,对反应器的冲击作用增大,发生短流的风险进一步增大,T2 和 T3 尽管在发酵罐底部预留了 1 L 的缓冲空间,但未能发挥明显作用,各处理日产气量逐渐下降。通过在发酵罐底部预留一定缓冲空间的方式,在进水量低于预留空间时对缓冲进水对发酵系统的冲击有较好的效果,但当进水量大于预留体积时无明显影响;在反应器内增加导气管可以将发酵罐内产生的气体及时排出,促进物料产气,但在猪粪废水负荷进一步增大后,这种促进作用被逐步减弱甚至消失。日产气量的结果表明,对于秸秆床反应器,猪粪废水每次进水量不宜过高,控制在 1 L 以内为宜,进水量过大导致出水 COD 较高,COD 转化率偏低,建议工程中采取分次进水的方式。

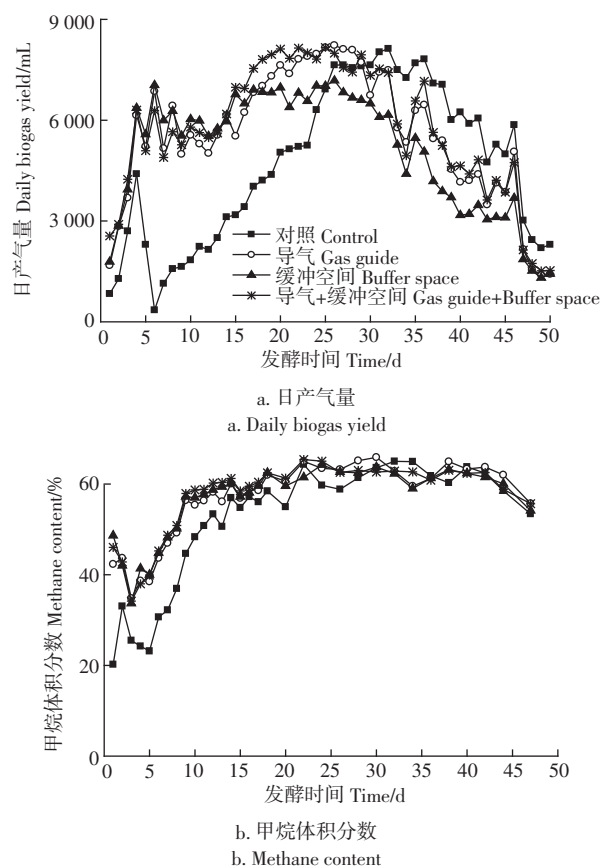


图 3 试验过程中日产气量和产气中甲烷体积分数的变化
Fig.3 Changes of daily biogas yield and methane content during experiments

各处理试验过程中产气中甲烷体积分数的变化见图3b。可以看出,与日产气量的结果相似,T1-T3产气中甲烷体积分数的变化趋势相似,CK略有不同。试验启动后,T1-T3产气中甲烷体积分数迅速降低,均在试验第3天达到最低,分别为34.78%、33.68%和34.16%,之后迅速增加,13 d后达到相对稳定,在57%~65%之间波动;CK在试验启动后产气中甲烷体积分数迅速增加,在第2天达到第一个高峰,峰值为33.05%,之后迅速降低,在第5天达到最低,仅为23.17%,这与pH值及日产气量的结果一致,之后产气中甲烷体积分数迅速回升,在第22天达到峰值,为64.28%,之后稳定在60%左右。秸秆床反应器的优化措施对产气中甲烷含量未表现出明显影响。

2.2 第2级(2#)反应器厌氧发酵特性

将第1级反应器出水作为二级厌氧反应器进水继续发酵产沼气,二级厌氧反应器即为本试验第2级。

2.2.1 试验过程中各处理进水 OLR 及出水 COD 浓度的变化

试验过程中,各处理进水 OLR 及出水 COD 浓度的变化见图4。在该阶段,反应器 OLR 受进水(即1#反应器出水)体积和 COD 浓度的双重影响,进水 COD 浓度则受1#反应器运行状况的影响。从图4a可知,试验过程中,CK'、T1'-T3'进水 OLR 呈逐渐增加趋势,各处理分别从试验初始的0.16、0.17、0.20和0.20 kg/(m³/d)增加到第45天时的3.00、3.02、3.61和3.14 kg/(m³/d)。可以看出,随着猪粪废水进水量逐渐增大,很大一部分猪粪废水的 COD 未能在1#反应器中分解,而是进入2#反应器中,这从1#反应器 COD 去除率相对较低也可得到印证,该结果与作者之前的研究结果一致^[15]。

试验过程中各处理出水 COD 浓度的变化见图4b。可以看出,CK'、T1'-T3'出水 COD 浓度的变化趋势基本相似,均为先增加,保持相对稳定后降低,在试验后期又增加的趋势。出水 COD 浓度可以反映厌氧反应器的运行状况。试验启动后,随着进水量增加,出水 COD 浓度随之增加,在11天左右达到峰值,在13~31 d达到一个相对稳定期,表明该阶段反应器进入稳定运行阶段。31 d后,由于进水 COD 浓度降低,出水 COD 浓度随之降低。但是,随着进水量逐步增加,对发酵系统的冲击增大,试验结束时,出水 COD 浓度有增加趋势。对比进水 COD 浓度(第1#反应器出水)的结果可知,进水 COD 浓度对出水 COD 浓度的影响较大。将进出水 COD 浓度折换成 COD 去除率可以看出,各处理 COD 去除率均呈先降低后增加的趋势。试验启动后,由于厌氧发酵系统尚不稳定,随着进水量增加,出水 COD 去除率有降低趋势,但随着发酵系统内厌氧微生物对发酵环境逐渐适应,对 COD 的去除率随之增加。试验结束时,CK'、T1'-T3'出水 COD 去除率分别为76.82%、72.59%、83.26%和72.14%。

试验过程中,各处理出水 pH 值相对稳定(结果未列出),基本稳定在7.50~8.00之间,且各处理间无明显差别,表明在秸秆床反应器内增加的两种改进措施对发酵系统最终出水 pH 值无明显影响。

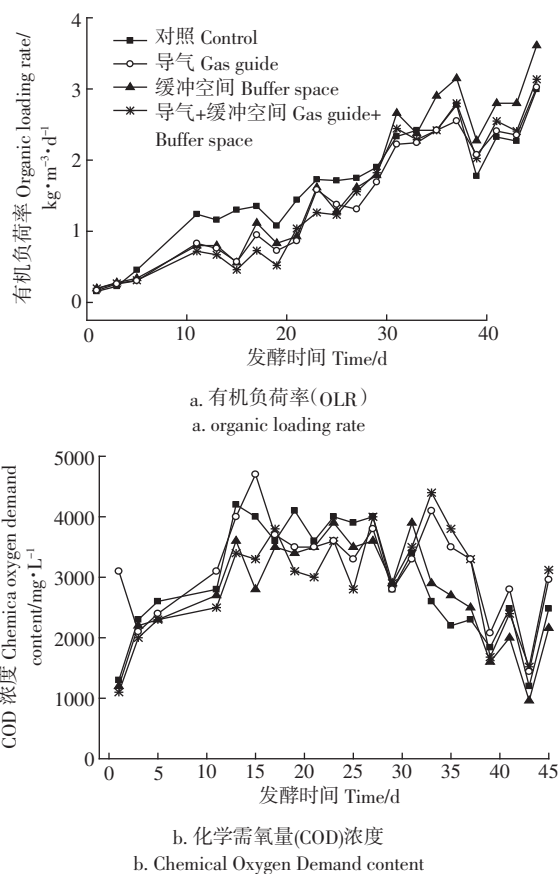


图4 试验过程中各处理出水 COD 浓度及反应器 OLR 随发酵时间的变化

Fig.4 Changes of chemical oxygen demand(COD) content of effluent and organic loading rate(OLR) of bioreactor during experiments

2.2.2 产气特性

试验过程中各处理日产气量和产气中甲烷体积分数的随实验时间变化的结果见图5。由图5a可以看出,各处理日产气量的变化趋势相似,均为试验启动后逐渐增加,分别第35、36、36和37 d达到第一个产气高峰,为6 600、4 965、6 800和5 400 mL,之后产气迅速降低,38 d后达到相对稳定,43 d后逐渐增加,第45天达到第二个产气高峰,之后迅速降低。在本试验中,产气量受进水量及进水 COD 浓度的双重影响,由于2#反应器进水来自1#反应器出水,故各处理2#反应器进水 COD 浓度是该阶段各处理日产气量存在差别的主要原因。对比图2各处理1#反应器出水 COD 浓度的结果可以看出,2#反应器日产气量与进水 COD 负荷保持较好的相关性。在试验前22 d,CK的1#反应器出水 COD 浓度明显高于其它处理,对应的2#反应器在该阶段日产气量高于其它处理;试验35~42 d,各处理1#反应器出水 COD 浓度出现较大幅度降低,导致2#反应器日产气量在该阶段大幅下降,但随着进水量进一步提高,日产气量随之增加;45 d后,1#反应器停止进水,2#随之停止进水,导致45 d后日产气量迅速降低。试验46~50 d的产气主要是残留在2#反应器内的 COD 进一步转化而来。但是,从2#反应器日产气量并不能评判本试验改进措施的效果,需结合1#反应器对整个发酵系统的产气效果进行综合评价,具体见2.3部分。

试验过程中各处理产气中甲烷体积分数的随实验时间

的变化结果见图 5b。可以看出, 各处理变化趋势极其相似, 均为试验启动后迅速增加, 10 d 后稳定在 60%~70% 之间, 各处理无明显差别。从产气中甲烷含量的结果看, 尽管各处理进水 COD 浓度不同, 日产气量不同, 但对产气中甲烷体积分数并无明显影响, 且产气中甲烷体积分数高于 1# 反应器, 这与作者之前的研究结果一致^[15]。

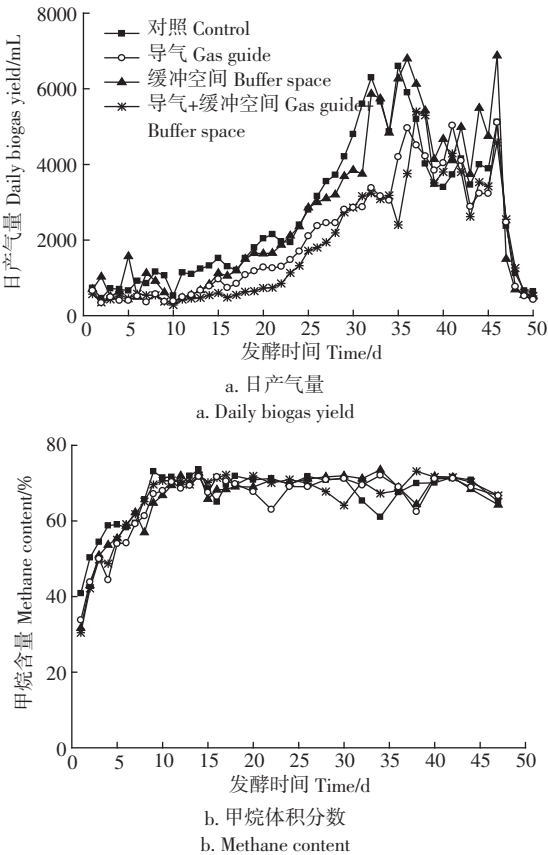


图 5 试验过程中各处理日产气量和产气中甲烷体积分数的变化
Fig.5 Changes of daily biogas yield and methane content during experiments

2.3 产气效果综合评价

第一、二级反应器日产气量仅能反映单个反应器的运行状况, 并不能直观的反映系统的运行状况, 将一、二级反应器日产气量累加为该发酵系统的日产气量并折算成容积产气量, 可以更直观的反映该系统的运行状况。试验过程中, 各处理发酵系统容积产气量的结果见图 6。可以看出, 各处理容积产气量的变化与 1# 反应器日产气量的变化趋势极相似, 均为先增加后保持相对稳定, 最后降低的趋势。试验启动后, 各处理容积产气量迅速增加, 但第 4

天后, CK 的容积产气量迅速降低, 并在第 6 天达到最低, 为 0.13 m³/(m³·d), 之后迅速增加, 并在第 32 天达到最大, 为 1.44 m³/(m³·d); 试验 4 d 后, T1-T3 容积产气量在 0.54~0.75 之间波动, 9 d 后 T1-T3 容积产气量逐渐增加, 并分别在第 36、32 和 37 天达到最大, 分别为 1.14、1.20 和 1.10 m³/(m³·d)。45 d 后, 由于停止进猪粪废水, 故各处理容积产气量均迅速降低。从各处理容积产气量的结果看, 试验前 25 d, T1-T3 容积产气量明显高于 CK, 表明在猪粪废水有机负荷相对较低的前提下, 通过在秸秆捆内增加导气管或者在秸秆床反应器底部预留缓冲空间的方式, 对物料产沼气均有促进作用, 但 25 d 后, CK 的容积产气量高于其它处理。在本试验用发酵系统中, 沼气来自秸秆床反应器内的打捆秸秆和猪粪废水, 猪粪废水每天添加, 秸秆是一次性添加, 猪粪废水中有机物的转化速度较快, 秸秆有机物水解产酸速度较慢, 是影响产气的主要因素。试验启动后, CK 的 1# 反应器发生了酸化, 影响了秸秆有机物水解溶出, 造成 25 d 前 CK 容积产气量低于其它处理, 但不影响秸秆最终的生物转化率, 在系统恢复后, 秸秆中有机物被厌氧微生物分解转化为沼气, 结果出现 25 d 后 CK 的日产气量高于其它处理的结果。

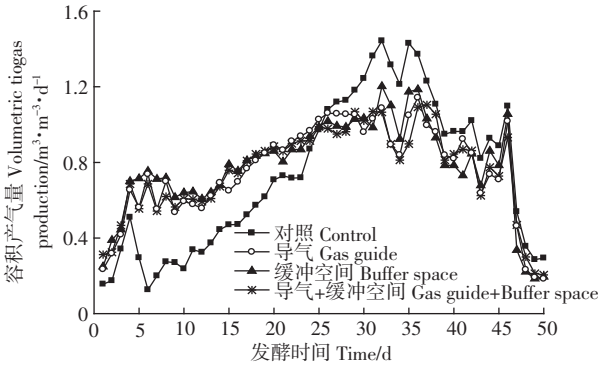


图 6 试验过程中秸秆床发酵系统容积产气量的变化
Fig.6 Changes of volumetric biogas yield of fermentation system during experiments

经 50 d 厌氧发酵处理后, 各处理产气结果汇总见表 1。可以看出, 采用增加导气管和发酵罐底部增加缓冲空间的方式均显著提高了 1# 反应器和发酵系统的累积产气量, T1-T3 较 CK 分别提高了 18.90%、9.05%、22.48% 和 3.12%、5.88% 和 3.11%。从产气中甲烷含量的结果来看, 采用增加导气管和发酵罐底部增加缓冲空间的方式均提高了 1# 反应器和发酵系统产气中平均甲烷含量, 但提高幅度均不大, 系统平均甲烷含量较 CK 提高 1 个百分点以

表 1 各处理产气结果汇总

处理编号 Treatments No.	累积产气量 Cumulative biogas yield/mL			平均甲烷体积分数 Average methane content/%			容积产气率 Volumetric biogas production rate/(m ³ /(m ³ ·d))		
	1#	2#	合计 Summary	1#	2#	合计 Summary	1#	2#	合计 Summary
CK	234 908±9 356a	132830±4 708a	367 738±3 324a	57.91±0.58a	68.06±4.96a	60.38±0.15a	0.94±0.04a	0.53±0.02a	0.74±0.01a
T1	279 298±11 751b	99 900±4 793b	379 198±3 041b	59.92±0.78c	68.19±0.18a	61.86±0.11c	1.12±0.05b	0.40±0.02b	0.76±0.01b
T2	256 173±8 902b	133 198±3 277a	389 370±5 624b	58.06±0.68ab	67.79±1.35a	61.45±0.10b	1.02±0.04b	0.53±0.01a	0.78±0.01b
T3	287 709±7 731b	91 473±3 895b	379 182±3 322b	59.20±0.01bc	68.78±0.56a	61.54±0.12b	1.15±0.03b	0.37±0.02b	0.76±0.01b

注: 同列同字母表示无显著差异 ($P>0.05$), 否则有差异显著 ($P<0.05$)。
Note: The same column data marked same letters within same factors, indicate no significant difference ($P>0.05$), or have significant difference ($P<0.05$).

上。容积产气率是根据各处理累积产气量除以发酵天数及发酵罐体积后获得,故其结果与累积产气量的结果一致。从各处理容积产气率的结果可以看出,采用本试验改进措施后,1#反应器容积产气率达到 $1\text{ m}^3/(\text{m}^3/\text{d})$,整个发酵系统容积产气率达到 $0.75\text{ m}^3/(\text{m}^3/\text{d})$,表明采用该秸秆床发酵系统具有较好的产气效果。

3 讨 论

本研究针对前期研究中发现秸秆导气性下降、秸秆上浮、进水短流等问题,设置了在秸秆床反应器内增加导气管、在秸秆捆与反应器底部预留缓冲空间以及二者联合的方式,并对秸秆加以固定,研究该改进措施对秸秆床发酵系统的影响。从试验产气的结果看,增加导气管和增加缓冲空间均改善了秸秆床反应器内厌氧发酵环境,有利于有机物快速分解转化为沼气,反应器日产气量、甲烷含量均明显高于对照,出水COD浓度远低于对照,但25 d后各处理间无明显差别,即无论采用增加导气管还是增加缓冲空间的方式,均仅对发酵初期(猪粪废水有机负荷较低)起作用,在猪粪废水有机负荷达到 $2.13\text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 后,各处理间未表现出明显差别。需要说明的是,对照在试验前25 d日产气量低于增加改进措施的处理,但25 d后高于增加改进措施的处理,由于各处理进水负荷相同,出现这样结果的可能原因是,试验前25 d对照秸秆床反应器内秸秆厌氧生物转化受到一定程度的抑制,25 d后由于pH值恢复到7以上,微生物活性逐步恢复,该阶段CK秸秆床反应器内秸秆中残留的可被厌氧微生物利用的有机物的量多于其它处理,故出现产气量高于其它处理的结果(见图3a和图6)。何晶晶等^[20]、张波等^[21]研究均认为,发酵液pH=7时最有利于微生物的合成代谢,间接印证了本推理。

试验结束时,采用增加导气管与增加缓冲区组合的方式,秸秆床反应器(1#)获得最大的累积产气量,较对照提高了22.48%,但二级反应器累积产气量远低于对照,仅为对照的68.86%,二者综合后,改进后的秸秆床发酵系统累积产气量较对照提高了3.11%。分析可能的原因,由于秸秆床发酵系统由秸秆床反应器+二级反应器组成,秸秆床反应器出水经二级反应器处理后排放,二级反应器对污水有很好的处理效果,从2#反应器进出水COD浓度的变化也可看出(见图5b),即秸秆床反应器的运行状况对整个系统产气并无明显影响,但对系统产气稳定性影响较大。由于本试验采取逐步提高猪粪废水有机负荷(逐步提高猪粪废水进水量)的方式,即试验过程中秸秆有机物分解、结构破坏与逐步增加猪粪废水进水量同步。在猪粪废水有机负荷较低(猪粪废水进水量较小,低于800 mL)时,无论是在秸秆捆中增加导气管,在

发酵罐底部预留缓冲空间还是二者联合,对改善秸秆床反应器内发酵环境,提高产气量均有较好的效果,但当猪粪废水进水量大于800 mL后,增加缓冲空间的方式已经起不到缓冲作用;增加导气管的方式也因导气管堵塞、胞外多聚物大量分泌使其未能起到应有的作用。此外,本试验用秸秆床反应器高径比偏低,仅为1,能否通过提高厌氧反应器高径比的方式降低进水对发酵系统的冲击,需要作进一步研究。

4 结 论

1)以打捆秸秆为固定相,以猪粪废水为流动相的秸秆床厌氧发酵系统是可行的,系统平均容积产气率为 $0.74\text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{d})$,平均甲烷含量为60.38%。

2)在秸秆床反应器内设置导气管、在秸秆捆与反应器底部预留缓冲空间以及二者联合的方式,在猪粪废水有机负荷低于 $2.13\text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 条件下明显提高了秸秆床反应器容积产气量,继续提高猪粪废水有机负荷后各处理容积产气量间无明显差别,发酵床反应器累积产气量较对照分别提高了18.90%、9.05%和22.48%,对整个发酵系统产气影响不显著。

3)采用秸秆床反应器+二级反应器组成的秸秆床发酵系统具有较高的稳定性,采用本试验设计的改进措施仅仅影响秸秆床反应器产气量、甲烷含量及产气稳定性,对整个发酵系统产气无明显影响。

[参 考 文 献]

- [1] Demirel G N, Chen S. Anaerobic biogasification of undiluted dairy manure in leaching bed reactors[J]. Waste management, 2008, 28(1): 112-119.
- [2] Browne J D, Allen E, Murphy J D. Improving hydrolysis of food waste in a leach bed reactor[J]. Waste Management, 2013, 33 (11): 2470-2477.
- [3] Shewani A, Horgue P, Pommier S, et al. Assessment of percolation through a solid leach bed in dry batch anaerobic digestion processes[J]. Bioresource technology, 2015, 178: 209-216.
- [4] Koppa A, Pullammanappallil P. Single-stage, batch, leach-bed, thermophilic anaerobic digestion of spent sugar beet pulp [J]. Bioresource Technology, 2008, 99: 2831-2839.
- [5] 梁越敢,郑正,罗兴章,等. 高温干发酵对互花米草产气和结构的影响[J]. 环境工程学报, 2011, 5(2): 462-466.
Liang Yuegan, Zheng Zheng, Luo Xingzhang, et al. Effect of thermophilic dry digestion on biogas production and structure of smooth cordgrass[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2011, 5(2): 462-466. (in Chinese with English abstract)

- [6] 张庆芳, 杨林海, 邵田羽, 等. 有机固体废弃物渗滤床高温干式厌氧发酵的中试研究[J]. 中国沼气, 2012, 30(4): 11–13, 20.
Zhang Qingfang, Yang Linhai, Shao Tianyu, et al. Pilot study on anaerobic dry fermentation of organic solid waste with filtration bed process at thermophilic temperature[J]. China Biogas, 2012, 30(4): 11–13, 20. (in Chinese with English abstract)
- [7] 杨林海. 有机垃圾干式厌氧发酵处理试验研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2013.
Yang Linhai. The Test of Dry Anaerobic Treatment of Organic Waste Fermentation Processing[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2013.
- [8] Jagadabhi P S, Kaparaju P, Rintala J. Two-stage anaerobic digestion of tomato, cucumber, common reed and grass silage in leach-bed reactors and upflow anaerobic sludge blanket reactors [J]. Bioresource Technology, 2011, 102: 4726–4733.
- [9] Linke B, Rodríguez-Abalde Á, Jost C, et al. Performance of a novel two-phase continuously fed leach bed reactor for demand-based biogas production from maize silage[J]. Bioresource Technology, 2015, 177: 34–40.
- [10] 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)
- [11] 罗娟, 张玉华, 陈玲, 等. CaO 预处理提高玉米秸秆厌氧消化产沼气性能[J]. 农业工程学报, 2013, 29(15): 192–199.
Luo Juan, Zhang Yuhua, Chen Ling, et al. CaO pretreatment improve biogas production performance of corn straw [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(15): 192–199. (in Chinese with English abstract)
- [12] 鲍习峰, 叶小梅, 陈广银, 等. 麦秸与奶牛场废水高固体混合厌氧发酵产甲烷研究[J]. 环境化学, 2012, 31(9): 1387–1392.
Bao Xifeng, Ye Xiaomei, Chen Guangyin, et al. Study on methane production of high-solid anaerobic co-digestion of wheat straw and cattle wastewater[J]. Environmental Chemistry, 2012, 31(9): 1387–1392. (in Chinese with English abstract)
- [13] 陈广银, 鲍习峰, 叶小梅, 等. 堆肥预处理对麦秸与奶牛废水混合物厌氧产沼气的影响 [J]. 中国环境科学, 2013, 33(1): 111–117.
Chen Guangyin, Bao Xifeng, Ye Xiaomei, et al. Effect of composting pretreatment on biogas production of the mixture of wheat straw and cattle wastewater[J]. China Environmental Science, 2013, 33(1): 111–117. (in Chinese with English abstract)
- [14] 曹杰, 陈广银, 常志州, 等. 有机负荷对秸秆床反应器厌氧生物产沼气的的影响[J]. 中国环境科学, 2014, 34(5): 1200–1206.
Cao Jie, Chen Guangyin, Chang Zhizhou, et al. Effect of organic loading rate of piggery wastewater on biogas production of straw-bed bioreactor[J]. China Environmental Science, 2014, 34(5): 1200–1206. (in Chinese with English abstract)
- [15] 陈广银, 杜静, 常志州, 等. 基于改进秸秆床发酵系统的厌氧发酵产沼气特性[J]. 农业工程学报, 2014, 30(20): 244–251.
Chen Guangyin, Du Jing, Chang Zhizhou, et al. Study on anaerobic co-digestion of agricultural straw and swine wastewater based on straw-bed bioreactor[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(20): 244–251. (in Chinese with English abstract)
- [16] 杜静, 朱德文, 钱玉婷, 等. 导气措施与渗滤液回流方式对干发酵产沼气影响中试[J]. 农业机械学报, 2013, 44(增 2): 143–148.
Du Jing, Zhu Dewen, Qian Yuting, et al. Effect of gas guide measurement and leachate-recirculation on gas production from dry fermentation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44 (S2): 143–148. (in Chinese with English abstract)
- [17] NY525–2002 《中华人民共和国农业行业标准: 有机肥料标准》[S], 2002.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 39–69.
- [19] 任南琪, 王爱杰, 马放, 著. 产酸发酵微生物生理生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 25.
- [20] 何晶晶, 潘修疆, 吕凡, 等. pH 值对有机垃圾厌氧水解和酸化速率的影响[J]. 中国环境科学. 2006, 26(1): 57–61.
He Pinjing, Pan Xiujiang, Lv Fan, et al. The influence of pH value on anaerobic hydrolysis and acidogenesis rates of biodegradable organic waste [J]. China Environmental Science, 2006, 26(1): 57–61. (in Chinese with English abstract)
- [21] 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.
Zhang Bo, Shi Hongzuan, Zhang Lili, et al. The influence of pH on hydrolysis and acidogenesis of kitchen wastes in two-phase anaerobic digestion [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, 25 (5): 665–669. (in Chinese with English abstract)

Optimization experiment of straw-bed anaerobic fermentation system for biogas production

Chen Guangyin, Bi Jinhua, Du Jing, Chang Zhizhou*, Ye Xiaomei

(East China Scientific Observing and Experimental Station of Development and Utilization of Rural Renewable Energy, Ministry of Agriculture, Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: Livestock wastewater and agricultural straw are the two main sources of agricultural nonpoint source pollution, then how to deal with these wastes is becoming more and more important. Anaerobic digestion is an attractive technique for bio-wastes treatment, which can convert bio-wastes into bio-fuel and bio-fertilizer. Straw-bed anaerobic fermentation system is a new anaerobic bioreactor for biogas production, which digests livestock wastewater and agricultural straw in one bioreactor at the same time. The straw-bed anaerobic fermentation system is composed of straw-bed bioreactor and wastewater advanced anaerobic bioreactor (USR), and effluent of straw-bed bioreactor is added as inlet into wastewater advanced anaerobic bioreactor. In straw-bed bioreactor, baling straw is used as stationary phase, and livestock wastewater is used as mobile phase. Our previous study indicated that co-digested baling straw and swine wastewater in straw-bed anaerobic digestion system was feasible and beneficial for biogas production. However, in straw-bed bioreactor, baling straw floated upward and inlet short flow appeared in the late stage. In order to solve these problems, gas guide tube was added in baling straw and reserve buffer space at the bottom of straw-bed bioreactor and the combination of the two methods were set up. There were four treatments in the study, i.e. CK (No improvement measures), adding guide tube (GT), buffer space (BS) and guide tube + buffer space (GT+BS). Meanwhile, effect of improvement measures on biogas production, and COD (Chemical Oxygen Demand) removal rate of straw-bed fermentation system were conducted. The results showed that daily biogas yield of CK was significantly inhibited during the first 25 days (organic loading rate of swine wastewater was less than 2.13 kg/(m³/d)) which was much lower than that of the other treatments. However, after 25 days' reaction, there was no significant difference of daily biogas yield between control and other treatments. By adding improvement measures, fermentation environment was ameliorated and the stability of daily biogas yield was enhanced obviously. After 50 days' reaction, cumulative biogas yield and cumulative methane yield of GT, BS and GT+BS were 18.90%, 9.05%, 22.48%, 23.02%, 9.34% and 25.21% higher than that of CK, respectively. Wastewater advanced anaerobic bioreactor (WAAB) is an important part of straw-bed fermentation system. The gas production results showed that, there was no significant difference for that of CK and the other treatments with the gas composition of WAAB. All treatments had the average methane content of 68%. Meanwhile, there was almost no significant influence on cumulative biogas yield, average methane content and COD removal rate of the straw-bed anaerobic fermentation system by adding improvement measures. The above results indicated that adding gas guide tube to straw-bed bioreactor was beneficial to improve biogas production, methane content and gas stability, adding buffer space can also be considered as conditions permit.

Keywords: straw; biogas; optimization; straw-bed bioreactor; gas guide; buffer space; swine wastewater; anaerobic fermentation