

张敏, 王振旗, 沈根祥, 等. 基于连续运行条件下的稻秸干法厌氧发酵中试研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(12): 2852–2859.

ZHANG Min, WANG Zhen-qi, SHEN Gen-xiang, et al. Effect of operating conditions on the dry anaerobic fermentation of rice straw[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(12): 2852–2859.

## 基于连续运行条件下的稻秸干法厌氧发酵中试研究

张敏<sup>1</sup>, 王振旗<sup>1</sup>, 沈根祥<sup>1</sup>, 钱晓雍<sup>1</sup>, 张心良<sup>1\*</sup>, 陈静<sup>2</sup>

(1.上海市环境科学研究院, 上海 200233; 2.上海环境保护有限公司, 上海 200233)

**摘要:**为了探索连续进料运行下稻秸干法厌氧发酵的产气情况,设计了一种适用于稻秸干法厌氧发酵中试系统,研究了牛粪单发酵启动试验、不同进料方式和氮源添加下的产气特征并且进行了技术经济性分析评估。结果表明:中试装置可实现含固率为20%的秸秆物料均匀混合,提高进料效率和实现连续发酵均衡产气。发酵启动试验阶段,牛粪单发酵29 d后具备处理稻秸所需的最佳厌氧微生物体系、适宜的发酵温度等,从而使连续进料阶段快速启动。在连续进料稳定运行阶段,秸秆进料量 $80\text{ kg}\cdot\text{d}^{-1}$ 并添加猪粪(干质量) $4.54\text{ kg}\cdot\text{d}^{-1}$ 为补充氮源,单日 $\text{CH}_4$ 产气量从 $137.28\text{ L}\cdot\text{kg}^{-1}\text{VS}$ 达到 $227.8\text{ L}\cdot\text{kg}^{-1}\text{VS}$ ,并能连续维持 $20\sim 22\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 。对于缺乏猪粪等氮源的地区可采用一次性投加的方式,单次补充 $68.1\text{ kg}$ 猪粪(干质量)且定期补充时间为20 d。研究表明,该适用于稻秸干法厌氧发酵中试系统技术可行且可实现连续进出料和稳定运行产气,并产生可观的经济效益。

**关键词:**水稻秸秆;干法厌氧发酵;中试研究;连续进料

中图分类号:X712 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2019)12-2852-08 doi:10.11654/jaes.2019-1059

### Effect of operating conditions on the dry anaerobic fermentation of rice straw

ZHANG Min<sup>1</sup>, WANG Zhen-qi<sup>1</sup>, SHEN Gen-xiang<sup>1</sup>, QIAN Xiao-yong<sup>1</sup>, ZHANG Xin-lang<sup>1\*</sup>, CHEN Jing<sup>2</sup>

(1. Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China; 2. Shanghai Environmental Protection (Group) Co. Ltd, Shanghai 200233, China)

**Abstract:** To investigate biogas production during continuous-feed dry anaerobic rice straw fermentation, the aims of the present study are to investigate the effects of single fermentation of cow manure, feeding method and nitrogen source on biogas production and on technical economic analysis and evaluation. The pilot system could reach uniform mixing of straw materials at a solid content of 20%, thereby achieving continuous fermentation and balanced biogas production. At the beginning of the experiment, the optimal anaerobic microbial system and suitable fermentation temperature for rice straw treatment were available after 29 d of the single fermentation of cow manure. Thus, the continuous feeding phase test could be started quickly. At the continuous-feeding and stable-operation stage, during which  $80\text{ kg}\cdot\text{d}^{-1}$  feeding quantity and  $4.54\text{ kg}\cdot\text{d}^{-1}$  (TS) pig manure were used as supplementary nitrogen sources, the daily biogas  $\text{CH}_4$  production increased significantly from  $137.28\text{ L}\cdot\text{kg}^{-1}\text{VS}$  to  $227.8\text{ L}\cdot\text{kg}^{-1}\text{VS}$ , and total production could be maintained at  $20\sim 22\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ . For area where pig manure source is scarce, the one-time addition of  $68.1\text{ kg}$  (TS) pig manure could be adopted. The regular replenishment period was every 20 d. These results indicate that dry anaerobic rice straw fermentation is feasible and can facilitate continuous-feed and stable-operation biogas production, which will have great application prospects and economic benefits.

**Keywords:** rice straw; dry anaerobic fermentation; pilot study; continuous feeding

收稿日期:2019-09-25 录用日期:2019-10-22

作者简介:张敏(1994—),女,山东德州人,硕士,研究方向为农业废弃物资源化利用。E-mail:s843817407@163.com

\*通信作者:张心良 E-mail:zhangxl@saes.sh.cn

基金项目:上海市重大环保科研项目(沪环科[2015]第8号);上海市科委“科技创新行动计划”项目(19DZ1204801)

Project supported: The Major Environmental Protection Research Program of Shanghai, China (Huhuanke[2015] No.8); The Shanghai Committee of Scientific and Technical Innovation Action Project, China (19DZ1204801)

我国是世界上秸秆资源最丰富的国家之一<sup>[1]</sup>,每年产出超过7亿t的农作物秸秆<sup>[2]</sup>,其中稻秸年产量在1.8亿t至2.8亿t之间,但约50%以上未合理利用<sup>[3]</sup>。稻秸处置不当不仅会造成严重的环境污染,更是一种资源浪费<sup>[4]</sup>。目前稻秸的处置方式主要是露天焚烧和直接还田,这会导致不同程度的温室气体排放,造成环境污染<sup>[5-7]</sup>。厌氧消化技术被认为是有效的农田废弃物管理技术<sup>[8]</sup>,可以同时进行污染控制、能源回收和营养循环<sup>[9]</sup>。一般而言,厌氧发酵分为湿法工艺和干法工艺<sup>[10]</sup>。相关研究表明,干法厌氧发酵工艺与湿法厌氧发酵相比,具有更高的原料利用范围,发酵过程有机负荷高,工程占地少,沼液产生少可以减少二次污染,是高含固率纤维秸秆类废弃物最佳处理路径之一<sup>[11-12]</sup>,正成为国内外研究热点。但干法厌氧发酵技术在国内仍处于实验室研究阶段<sup>[13]</sup>,已得出的最佳工艺参数,如温度、营养平衡、接种率和预处理策略等<sup>[14-15]</sup>均基于小试试验,中试研究在国内研究虽有进展,但缺乏大规模产业化应用案例。而在国外沼气干发酵技术已经较为成熟,如Valorg工艺、Kompogas工艺和Dranco工艺等大型沼气干发酵系统都已经投入生产性应用并主要针对城市生活垃圾、餐厨垃圾等<sup>[16-17]</sup>,对于农业废弃物尤其单一稻秸地区的干法连续式厌氧发酵技术仍缺乏系统性研究。

稻秸作为干发酵主要的基质面临最大的挑战是其复杂的木质纤维结构使其难以分解,水解是稻草厌氧发酵过程的限速步骤<sup>[3,18]</sup>。反刍动物(牛、绵羊、山羊和骆驼)以纤维类的饲料为食,在这些动物的瘤胃中,微生物发酵将饲料转化成可以被动物消化和利用的物质<sup>[19]</sup>。该发酵过程会产生甲烷作为副产物由动物呼吸排出<sup>[20]</sup>,因此动物粪便中含有大量可以分解纤维类物质的厌氧微生物和产甲烷菌,有利于连续进料阶段秸秆的快速水解和沼气产量的增加。有机负荷率(OLR)和C/N对于水稻秸秆厌氧消化的稳定性具有重要影响,优化干法厌氧发酵过程中的有机负荷率可以为商业规模连续流的搅拌式反应器提供最佳的运行条件<sup>[4]</sup>。并且已有的研究表明厌氧消化过程中

微生物生长的最佳C/N范围是20~30<sup>[21]</sup>,水稻秸秆的C/N高达68.0,不适于单独发酵,实际沼气生产过程中需要补充氮源,以促进微生物代谢<sup>[22]</sup>。因此,基于水稻秸秆的干发酵反应器和过程控制条件等方面亟需深入的研究。

为此,本研究基于秸秆作为发酵基质传质困难和C/N较高的特点,设计了可满足稻秸干法厌氧发酵连续运行的中试装置,并用鲜牛粪作为装置运行启动反应物料,研究了在缺乏稳定氮源的情况下,稻秸连续进料过程中氮源的补充和添加方式对沼气产生情况的影响,并分析评估了稻秸干法厌氧发酵的应用前景,为单一稻秸地区干法厌氧处理工程应用及稳定运行提供技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 底物与接种物

中试试验所需水稻秸秆采自上海自在源农业发展有限公司,用破碎机将其破碎至3 cm以下,采用“黄储”方式,洒水(河水)压实后存放,进料测定含固率为53.4%~64.7%。中试设备发酵启动阶段选用牛粪作为启动物料,试验阶段选用鲜猪粪作为氮源添加物,鲜牛粪取自金山某奶牛场,鲜猪粪主要从周边养殖户收集,分批分次采集后,分装在若干塑料桶内密封备用。考虑到功能厌氧微生物种群类型及其遴选环境的营养结构,接种物为采集干法厌氧发酵池沼渣固液分离后的新鲜沼液,采自上海市某奶牛场。启动阶段,采用一次性投加方式;连续运行后以沼液回流补充为主。底物与接种物的具体理化性质见表1。

### 1.2 中试装置发酵的设计与运行

#### 1.2.1 设计方法

水稻秸秆等农业废弃物作为反应基质,其结构、组成以及颗粒大小等呈不均匀性,搅拌阻力大,并且干发酵物料比较黏稠,流动性较差,物料传质困难。本研究的中试装置基于以上特点设计了螺旋式的进料方式和水平搅拌桨式的搅拌装置,通过平推流的方式改善传统中试装置传质不均、流动性差的缺点。

表1 试验材料的理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of test materials

试验材料 Test materials	TS/%	VS/%	C/%	N/%	H/%	纤维素 Cellulose/%	半纤维素 Hemi-cellulose/%	C/N
水稻秸秆	86.8	97.3	42.12	0.62	5.92	13.37	41.53	68:1
鲜猪粪	22.7	86.6	37.10	4.15	6.46	—	—	9:1
沼液	4	—	45.32	6.23	—	—	—	7:1

由于季节性温度的变化,本装置通过在线监测的控温系统维持发酵过程中的温度保证其稳定运行。

### 1.2.2 运行方法

为培养、遴选适于纤维秸秆类农业废弃物的厌氧微生物,尤其是增加产甲烷菌的种群密度,在中试设备安装完成后,首先将约3 t鲜牛粪(含固率8.5%)装罐启动试验,无需加水调节。发酵温度设置为 $(35\pm 5)^\circ\text{C}$ ,设置为连续搅拌,转速 $1\sim 2\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ,每12 h切换一次。

在中试发酵装置稳定运行后,以“黄储”预处理后的稻秸为主要发酵原料,从中试设备启动运行的第51 d开始添加稻秸,并根据液位情况变化按需排渣,为防止有机负荷过高采用 $10、20、30、50\text{ kg}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $80\text{ kg}\cdot\text{d}^{-1}$ 的递进方式进料,并根据观测到的日产气情况变化调整进料量。从第111 d开始,按照 $80\text{ kg}\cdot\text{d}^{-1}$ 连续添加稻秸,同时添加鲜猪粪(干质量) $4.54\text{ kg}\cdot\text{d}^{-1}$ ,日排渣量 $18\sim 22\text{ kg}$ ,按照C/N为50:1情况下稳定运行30 d后不再添加猪粪。发酵温度设置为 $(35\pm 5)^\circ\text{C}$ ,发酵罐搅拌器设置为连续搅拌,转速 $1\sim 2\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ,每12 h切换一次正反转,并通过油泵系统强化发酵物料内部循环,即将出料端沼液内循环输送至进料端,每间隔12 h开启12 h。通过连续进、出料,沼液100%回流,考察系统随连续出料造成的C/N逐步升高对产气效率的影响,重点关注单日产气量和沼气中甲烷含量变化情况。

## 1.3 样品分析与测定

### 1.3.1 分析方法

总固体(TS): $(105\pm 5)^\circ\text{C}$ 烘箱烘干至恒质量测定;挥发性固体(VS): $550\sim 600^\circ\text{C}$ 马弗炉灼烧至恒质量测定<sup>[23]</sup>。总碳:用重铬酸钾-稀释热法;总氮:用半微量开氏法;总氢:全元素分析仪(美国Thermo Electron SPA公司);沼气含量:通过在线气体流量表和沼气在线分析仪监测;甲烷含量:便携式甲烷测定仪(型号HND 880,深圳市万安迪科技有限公司)测定。

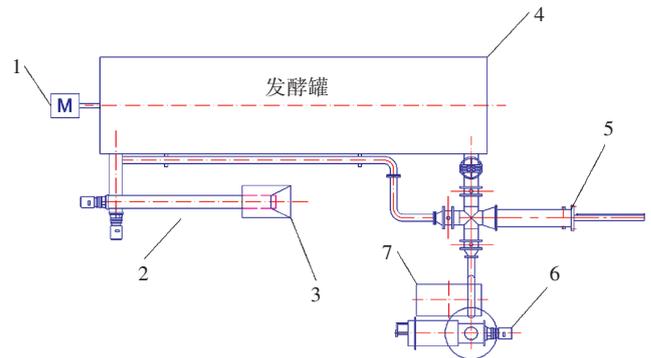
### 1.3.2 沼气产生潜力评价

理论产沼气潜力(Theoretical biogas potential, TBP)可用来评估有机物完全降解产生的最大沼气产量,通过测定和分析底物不同元素组成(C、H、O、N的含量)并结合Buswell方程<sup>[24]</sup>和相关公式计算,本研究稻秸、猪粪的理论产气参数分别按照 $523.21、805.98\text{ L}\cdot\text{kg}^{-1}\text{VS}$ 计<sup>[25]</sup>。

## 1.4 中试装置

基于中试研究项目的发酵区域占地面积大约60

$\text{m}^2$ ,本研究自主研发了1套日处理能力 $100\text{ kg}\cdot\text{d}^{-1}$ 的自动控制干法厌氧发酵罐中试装置,总功率 $10.25\text{ kW}$ ,罐体容积 $20\text{ m}^3$ ,发酵温度 $25\sim 40^\circ\text{C}$ ,停留时间 $30\sim 40\text{ d}$ 。配备接收进料系统、干法厌氧发酵系统、后处理系统(沼渣脱水机)和监测仪表,并配套上位机控制系统,结构见图1所示。



1. 监测设备 2. 螺旋进料装置 3. 进料口 4. 发酵罐  
5. 出料器 6. 脱水机 7. 沼液罐  
1. Monitor system; 2. Spiral feeding device; 3. Feed inlet;  
4. Fermentation reactor; 5. Discharge device; 6. Dehydrator;  
7. Biogas slurry tank

图1 中试装置示意图(俯视图)

Figure 1 Schematic diagram of pilot system (top view)

### 1.4.1 进出料系统

本装置的进料系统基于水稻秸秆等农业废弃物为固态非流质、物料黏性大、传质困难的特点,采用混合螺旋进料器将原料混合后输送至厌氧发酵罐内,进料器由接收上料螺旋和发酵罐进料器两部分构成。本进料系统的上料螺旋与地面成 $45^\circ$ 夹角,参照螺旋输送器的设计标准,螺旋外径 $0.2\text{ m}$ ,处理量为 $2\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ ,螺旋转速为 $4200\text{ r}\cdot\text{h}^{-1}$ ,可以将破碎机破碎后低于 $3\text{ cm}$ 、含固率为20%的秸秆物料有效混合,然后通过发酵罐进料器将原料输送至发酵罐。Dranco、Kompogas、Valorga这3种典型的连续式单相干发酵反应器的进料系统主要是采用不同类型的物料泵然后将原料泵入发酵罐内混合<sup>[26]</sup>,主要针对城市生活垃圾、餐厨垃圾等有机固体废弃物<sup>[27]</sup>,而本进料装置更适用于水稻秸秆等农业废弃物,既保证了原料的均匀混合,又实现了推动物料的目的,提高进料效率。

出料系统采用活塞式出料器和沼渣脱水机组成,由出料器厌氧发酵后的沼渣输送至沼渣脱水系统,处理量 $2\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ ,功率 $2.2\text{ kW}$ ,可将含固率10%~15%的沼渣脱水至含固率30%以上。活塞式的出料器可以有效地推动物料进入沼液分离装置,且耗能低,可降低运行成本。脱水后沼渣堆肥再利用,沼液则收集至

沼液池,通过水泵提升回流至厌氧发酵罐,而畜禽粪便或尿素等辅料可通过沼液池与沼液回流一起投加至发酵罐。

#### 1.4.2 发酵系统

本装置的发酵系统为卧式柱形的厌氧发酵罐,基于日处理水稻秸秆约  $100 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$ 、含水率约 20%、停留时间 30~40 d 的需求,设计了罐体半径 1.5 m,长 6 m,容积为  $20 \text{ m}^3$  的厌氧发酵罐。发酵装置罐体设计成卧式柱形,依次由物料进料口、沼气出口、沼渣出口、沼液回流口、搅拌器、加热管组成,发酵物料可以通过平推流方式从进料端逐步移动到出料端,解决了物料逐步推进和沼渣出料的难题,基于水解、产酸、产气的厌氧发酵三阶段理论有利于有机废弃物的连续发酵和均衡产气,同时沼气出口设在发酵罐顶,进料口和沼液回流口设在发酵罐的中上部,同一标高,位置临近,便于沼液与原料的混合、接种。与湿法厌氧发酵相比,干式厌氧发酵反应基质浓度高,流动性差,容易造成反应中间产物与能量在介质中传递、扩散困难。瑞士 Komopogas 工艺<sup>[16,26]</sup>是有机废物的典型工艺,其采用水平安装搅拌轴,通过搅拌轴完成物料的充分混合,并完成物料的推流出料,已取得良好的运行效果。因此,本装置发酵罐内设置 2 套水平搅拌桨式搅拌器,采用斜框式的搅拌桨并增加了正反转功能,不仅实现了连续搅拌,还能够满足不同试验要求,调节搅拌转速在  $1 \sim 10 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  和调节正反转时间在 1~24 h 内。与传统的锚式、螺带式搅拌桨等相比,本装置的水平搅拌桨式搅拌器更适用于流动性差、难以搅拌均匀的物料,可以将罐内的物料、辅料及回流沼液搅拌均匀,提高物料的流动性,克服了搅拌阻力大、基质搅拌混合困难的问题。

#### 1.4.3 监控系统

整套设备安装在线监控系统由沼气在线分析仪、温度表、沼气流量表和沼气压力表组成,对发酵过程中温度、气体流量、甲烷含量等参数进行在线监测及数据存储。温度对厌氧微生物的生长、反应过程动力学和稳定性、沼气的产量等都有显著的影响<sup>[6,28]</sup>。通过在线监控系统可以对反应过程中的温度进行 25~40 °C 实时调控、流量计和压力表可在  $0 \sim 4 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $0 \sim 6 \text{ kPa}$  进行实时监测,保证厌氧发酵过程稳定运行并提供产气参数,为实际工程运行提供参考。

## 2 结果与讨论

### 2.1 启动阶段产气特征

中试设备启动阶段的产气情况如图 2 所示。结果显示,  $\text{CH}_4$  含量在第 9 d 达到 50% 以上,并逐步维持在 60%~70%,并且观测到,发酵前期单日产气量递增速度较快,第 18 d 时最高达  $7.5 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ,产气的高峰集中在 16~24 d,说明富集了大量的产甲烷菌,达到了产沼气的适宜的厌氧微生物条件。在发酵时间超过 29 d 后,单日产气量逐渐走低。因此,利用牛粪进行启动试验最佳时间是 29 d 左右。已有研究表明,发酵过程产生的甲烷在气体含量  $>60\%$  (V/V) 时,认为厌氧发酵达到平衡状态<sup>[29]</sup>,本阶段通过该批次试验,可认为利用反刍动物的粪便(鲜牛粪)进行启动试验,可以有助于罐内富集处理稻秸所需的厌氧微生物体系、适宜的发 酵温度等厌氧发酵条件,使后续以稻秸为主的厌氧发酵试验可以迅速启动并提高产气效率。

### 2.2 递进式进料对产气情况的影响

递进式进料下不同的有机负荷对产气情况的影响如图 3 所示。在  $10 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$  进料的情况下,发酵前 12 d 的产气量逐日增加的趋势明显,12 d 后趋于平稳,

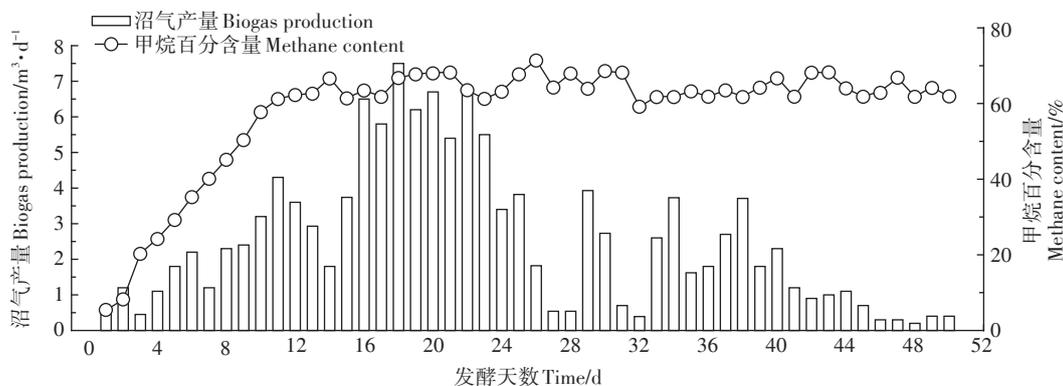


图 2 牛粪单发酵预试验的日产气量的变化

Figure 2 The change of daily biogas production of single fermentation of cow manure

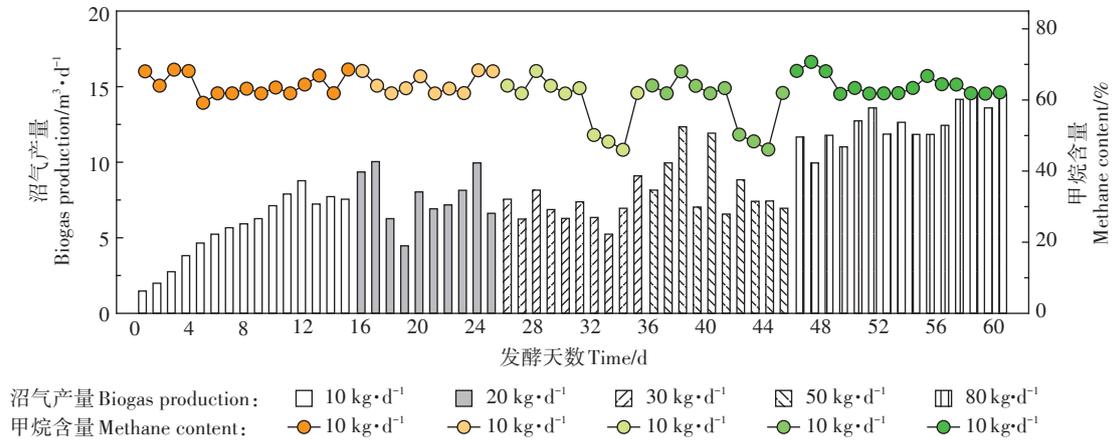


图3 递进式进料阶段日产气量和甲烷含量的变化

Figure 3 The variation of daily biogas production and methane content in progressive feeding stage

12 d时单日产气量达到 $1011.5 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1}$ 稻秸(TS),之后发酵趋于稳定。因此,在第16 d开始将进料量调至 $20 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$ ,并按照此规律在第26、36、46 d开始按照 $30$ 、 $50 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $80 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$ 的进料量进行试验观测,该期间产气情况如图3所示。总体上,随着稻秸干物质的添加,日产气量呈逐步上升趋势,出现了多个产气峰值, $10 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$ 到 $50 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$ 时,产气逐渐上升但上升并不明显,当进料量达到 $80 \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,单日产气量明显上升,最高达到了 $14.5 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ,达到 $10 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$ 的1.65倍,并且发酵一开始甲烷的百分含量达到60%左右并维持稳定,可不经脱水脱硫直接燃烧,说明启动阶段富集的微生物体系可以有效快速消化利用秸秆并产甲烷,提高秸秆的利用率。

当 $80 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$ 进料时单日的总产气量有所上升但秸秆的转化率降低,最高仅 $208.8 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1}$ 稻草(TS),低于 $10 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$ 的4.84倍。木质纤维素秸秆具有较高的C/N,高木质素和纤维素结晶度使反应器中微生物的生长环境极其恶劣<sup>[30]</sup>。随着有机负荷的不断增加,单位物质的产气量受到抑制,因此,在高的有机负荷率下,通过额外补充氮源对于秸秆干法厌氧消化稳定产气是非常重要的。

### 2.3 稳定式进料对产气情况的影响

从递进式进料阶段到稳定进料期间的产气情况与pH的变化如图4所示,猪粪(干质量)进料按照 $4.54 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$ 的连续混合进料30 d后,pH变化呈现出明显的先下降后逐步回升的趋势,因为在厌氧干发酵过程中猪粪的添加不仅平衡了C/N,还促进有机物的水解过程使pH降低,但是pH的短暂下降并未导致产气量的下降,反而单日产气量明显增加,并能维持20~

$22 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 的产气量约22 d,分别是不添加猪粪时 $80 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $10 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$ 进料量最大产气量的1.38~1.52倍和2.28~2.50倍。因此,本试验过程中猪粪的添加主要起到为厌氧干发酵过程补充氮源、调节C/N的作用,并且补充氮源对产气量提升具有重要作用。在按照 $80 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$ 连续添加秸秆的99 d内,累计产气 $1741.5 \text{ m}^3$ ,达到理论产气量的72.6%,单日最高产气量 $22.65 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ,虽然单位质量(TS)的稻草每日产量仅 $326.2 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,远远低于 $10 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$ 的进料量时,但是 $80 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$ 的进料量的单日总产气量极大提升,符合废弃物再利用的商业化需求。

由于季节性和地理位置差异,本研究基于缺乏猪粪等氮源的地区考察了系统连续出料造成的C/N逐步升高对产气效率的影响,以确定其定期补充氮源的最佳时间。在连续添加猪粪30 d后停止添加,如图4所示。产气量随后呈逐步递减的趋势,从停止添加猪粪之后的第32 d,单日产气量下降至 $10.3 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ,产气量削减近50%,与氮素随排渣、氨挥发等形式的损耗有直接关系。pH值一直在6.8左右然后缓慢下降,可能是因为碳氮比不平衡而导致有机酸的累计而导致的pH下降,因此pH下降可以作为补充氮源的指导指标。不添加猪粪后的第34~36 d添加 $22.7 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$ 猪粪(干质量),通过本试验一次性添加 $68.1 \text{ kg}$ (干质量)的鲜猪粪后,单日产气量逐步回升至 $20 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 左右,并且 $20 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 左右产气量维持大约20 d左右,之后随着氮源的不断流失,产气量逐渐降低。因此,本研究说明在以纤维秸秆类为主的农业废弃物干法厌氧发酵过程中,定期补充氮源十分重要,在氮源缺乏的情况下可以通过一次性添加的方式,并定期进行氮

源补充,定期添加猪粪的时间宜设定在20 d最佳。

#### 2.4 稻秸干法厌氧发酵技术与评价

通过与其他有机物料干法厌氧发酵产气效率的比较(见表2)可知,基于稻秸干法厌氧发酵中试系统技术可行,且可实现连续运行,添加猪粪为外加氮源可实现在有机负荷达到 $4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ (进料量 $80 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$ )时,每日 $\text{CH}_4$ 产气效率从 $137.28 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1} \text{VS}$ 达到 $227.8 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1} \text{VS}$ ,为餐厨垃圾、城市固体废弃物的0.91、0.99倍,几乎达到了相同的效果。Hu等<sup>[31]</sup>利用畜禽粪便在 $55 \text{ }^\circ\text{C}$ 下进行连续运行的厌氧发酵, $\text{CH}_4$ 产气效率达到 $416 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1} \text{VS}$ ,是本研究产气效率的1.8倍,但其反应温度高,耗能几乎为本试验的2倍左右。Cui等<sup>[32]</sup>利用小麦秸秆做的小试试验的 $\text{CH}_4$ 产气效率仅 $150 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1} \text{VS}$ ,仅为本研究产气效率的66%。因此本中试装置与其他有机物料的干法厌氧发酵比较,产气潜力、能耗等指标综合评价下来,稻秸的干法厌氧发酵技术是切实可行的。

我国农作物秸秆理论资源量为8.2亿t,可收集资

源量6.87亿t,秸秆资源化利用现状如表3所示。全国仍有31.31%的农作物秸秆以废弃或燃烧的方式进行处置,2.15亿t的秸秆仍未合理利用。即使秸秆通过燃烧发电、生产柴油,厌氧发酵等能源化的方式利用,但秸秆用于产沼气等新型化能源仅640万t。通过利用干法厌氧发酵技术对秸秆进行资源化利用,可以通过产气发电约1095亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。已有研究表明,秸秆发电每吨可获得收益9.37元,将未利用的秸秆资源化利用将产生20亿元的经济效益。同时堆肥是秸秆等农业废弃物干法厌氧发酵合理的后处理技术之一,可以有效消除病原体并控制残留沼气的排放<sup>[10]</sup>。与传统的秸秆肥料化过程相比,干法厌氧发酵可以生产沼气作为燃料,提高秸秆的利用率,并且杜绝了传统堆肥过程面积大和散发气味等问题,发酵后的沼渣仅需要简单堆肥处理,就可以用作肥料或土壤改良剂。原料化和其他能源化方式不仅处置工艺复杂且成本较高,而干法厌氧发酵能够在相对较小的区域中运行且工艺简单,降低处置成本,提高经济效益<sup>[33]</sup>。因此,

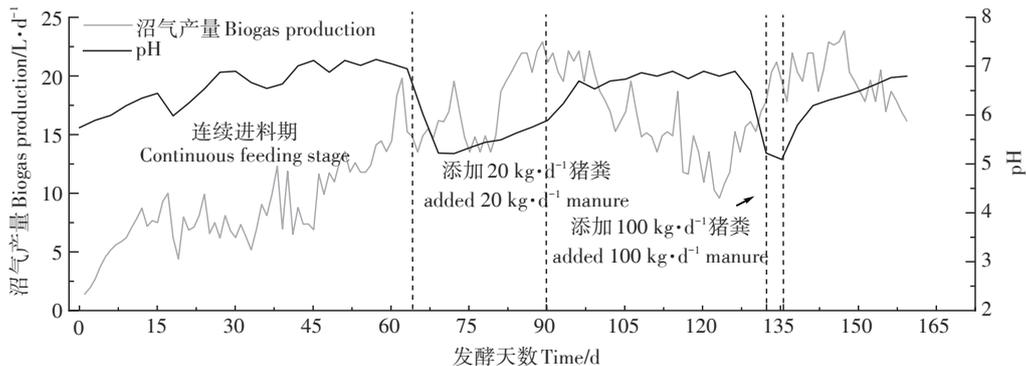


图4 稳定式进料阶段的日产气量与pH的变化

Figure 4 The change of daily biogas production and pH in stable feeding stage

表2 稻秸与其他有机物料产气效率分析比较

Table 2 Analysis and comparison of biogas production efficiency between straw and other organic materials

发酵底物 Fermentation substrate	反应类型 Reaction type	TS/%	温度 Temperature/ $^\circ\text{C}$	CH <sub>4</sub> 产气效率		能耗 Energy consumption	参考文献 References
				Biogas CH <sub>4</sub> production efficiency/ $\text{L} \cdot \text{kg}^{-1} \text{VS}$	CH <sub>4</sub> /%		
稻秸+猪粪	连续进料	20	35	227	60~68	小	本研究
畜禽粪便	连续 CSTR	15	55	416	60	大	[31]
餐厨垃圾	连续实验	20	37	251	66	小	[34]
餐厨垃圾+废纸	连续实验	30	35	250	/	小	[35]
城市固体废弃物	小试实验	16	30	273	64.6	小	[36]
小麦秸秆类	小试实验	22	37	150	55~60	小	[32]
稻秸和猪粪废水	小试实验	20	35	231	49	小	[37]
城市固体废弃物	连续 CSTR	20	55	230	68.7	大	[38]

表3 秸秆资源化利用现状

Table 3 Current situation of straw resource utilization

资源化类型 Resource recovery type	技术方式 Technical way	利用量 Utilization quantity/ $10^8$ t	利用率 Utilization rate/%
肥料化	直接还田、间接还田、堆肥还田	1.33	14.78
饲料化	氨化饲料、青贮饲料等	2.11	30.69
原料化	工业原料、基质材料等	3100	18.72
能源化	秸秆气化、生产生物柴油、厌氧发酵	1.29	4.51
废弃及焚烧	—	2.15	31.31

进一步研究利用秸秆干法厌氧发酵技术对秸秆进行资源化处理不仅可以提高资源化利用率,还可以进行产气和发电,带来巨大的经济效益,未来的研究仍然需要进一步研究和优化工艺以降低成本,并多关注和优化其后处理技术。

### 3 结论

(1)设计改用混合螺旋进料器和平推流式的搅拌机,是一种适用于稻秸干法厌氧发酵中试系统,可实现含固率为20%的秸秆物料的有效混合和平推流方式实现有机废弃物的连续发酵和均衡产气。

(2)利用反刍动物粪便鲜牛粪进行发酵启动试验,可以有效富集具备处理稻秸所需的厌氧微生物体系。

(3)在秸秆缺乏氮源的情况下,通过连续进料的方式和猪粪为补充氮源来提高秸秆的产气率和利用率,连续稳定运行条件下,猪粪(干质量)按照 $4.54 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$ 进料,可使单日产气量明显增加,并能连续保持在 $20 \sim 22 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 的产气量约22 d。

(4)由于地理位置和季节性限制而猪粪缺乏的地区,提出可以采用一次性投加的方式,并以pH作为指导指标,投加量为 $68.1 \text{ kg}$ (干质量),定期补充,时间为20 d。

#### 参考文献:

- [1] Yin H J, Zhao W Q, Li T, et al. Balancing straw returning and chemical fertilizers in China: Role of straw nutrient resources[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2018, 81: 2695–2702.
- [2] Wang Q L, Li W, Gao X, et al. Life cycle assessment on biogas production from straw and its sensitivity analysis[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 201: 208–214.
- [3] Zhou J, Yan B H, Wang Y, et al. Effect of steam explosion pretreatment on the anaerobic digestion of rice straw[J]. *Rsc Advances*, 2016, 6(91): 88417–88425.
- [4] Zhou J, Yang J, Yu Q, et al. Different organic loading rates on the biogas production during the anaerobic digestion of rice straw: A pilot study[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 244: 865–871.
- [5] Yang S J, He H P, Lu S L, et al. Quantification of crop residue burning in the field and its influence on ambient air quality in Suqian, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(9): 1961–1969.
- [6] Yan Z Y, Song Z L, Li D, et al. The effects of initial substrate concentration, C/N ratio, and temperature on solid-state anaerobic digestion from composting rice straw[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 177: 266–273.
- [7] Shen Z, Cao J, Arimoto R, et al. Ionic composition of TSP and PM<sub>2.5</sub> during dust storms and air pollution episodes at Xi'an, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(18): 2911–2918.
- [8] Surendra K C, Takara D, Hashimoto A G, et al. Biogas as a sustainable energy source for developing countries: Opportunities and challenges [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2014, 31: 846–859.
- [9] Hagos K, Zong J P, Li D X, et al. Anaerobic co-digestion process for biogas production: Progress, challenges and perspectives[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2017, 76: 1485–1496.
- [10] Ge X M, Xu F Q, Li Y B. Solid-state anaerobic digestion of lignocellulosic biomass: Recent progress and perspectives[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 205: 239–249.
- [11] Riya S, Suzuki K, Meng L Y, et al. The influence of the total solid content on the stability of dry-thermophilic anaerobic digestion of rice straw and pig manure[J]. *Waste Management*, 2018, 76: 350–356.
- [12] Chiumenti A, Da Borso F, Limina S. Dry anaerobic digestion of cow manure and agricultural products in a full-scale plant: Efficiency and comparison with wet fermentation[J]. *Waste Management*, 2018, 71: 704–710.
- [13] Xie S H, Lawlor P G, Frost P, et al. A pilot scale study on synergistic effects of co-digestion of pig manure and grass silage[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2017, 123: 244–250.
- [14] Yang L C, Xu F Q, Ge X M, et al. Challenges and strategies for solid-state anaerobic digestion of lignocellulosic biomass[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2015, 44: 824–834.
- [15] Karthikeyan O P, Visvanathan C. Bio-energy recovery from high-solid organic substrates by dry anaerobic bio-conversion processes: A review[J]. *Reviews in Environmental Science and Bio-Technology*, 2013, 12(3): 257–284.
- [16] Li Y B, Park S Y, Zhu J Y. Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(1): 821–826.

- [17] De Baere L. The dranco technology: A unique digestion technology for solid organic waste[M]. Brussels: Organic Waste Systems Pub, 2010.
- [18] Singh J, Suhag M, Dhaka A. Augmented digestion of lignocellulose by steam explosion, acid and alkaline pretreatment methods: A review[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2015, 117: 624–631.
- [19] Tauseef S M, Premalatha M, Abbasi T, et al. Methane capture from livestock manure[J]. *Journal of Environmental Management*, 2013, 117: 187–207.
- [20] Chhabra A, Manjunath K R, Panigrahy S, et al. Spatial pattern of methane emissions from Indian livestock[J]. *Current Science*, 2009, 96 (5): 683–689.
- [21] Estevez M M, Linjordet R, Morken J J B T. Effects of steam explosion and co-digestion in the methane production from *Salix* by mesophilic batch assays[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 104: 749–756.
- [22] Li D, Liu S C, Mi L, et al. Effects of feedstock ratio and organic loading rate on the anaerobic mesophilic co-digestion of rice straw and pig manure[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 187: 120–127.
- [23] 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. Methods for monitoring and analysis of water and wastewater[M]. 4th Edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [24] Buswell A, Mueller H J I, Chemistry E. Mechanism of methane fermentation[J]. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1952, 44(3): 550–552.
- [25] Li D, Liu S, Mi L, et al. Effects of feedstock ratio and organic loading rate on the anaerobic mesophilic co-digestion of rice straw and pig manure[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 187: 120–127.
- [26] 胡 鑫, 冯 晶, 赵立欣, 等. 干法厌氧发酵反应器及过程控制技术的研究进展[J]. 中国沼气, 2018, 36(2): 68–75.  
HU Xin, FENG Jing, ZHAO Li-xin, et al. Dry anaerobic fermentation reactor and process control technology research progress[J]. *China Biogas*, 2018, 36(2): 68–75.
- [27] 冯 晶, 胡 鑫, 赵立欣, 等. 横推流式连续干法厌氧发酵设备设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(7): 319–325.  
FENG Jing, HU Xin, ZHAO Li-xin, et al. Design and start-up test of horizontal plug-flow dry anaerobic fermentation equipment[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49 (7): 319–325.
- [28] 邱荣娥. 干法厌氧发酵反应器设计与启动实验研究[D]. 长沙: 华中科技大学, 2012.  
QIU Rong-e. Dry anaerobic fermentation reactor design and starting experimental study[D]. Changsha: Huazhong University of Science and Technology, 2012.
- [29] Zhang S T, Guo H G, Du L Z, et al. Influence of NaOH and thermal pretreatment on dewatered activated sludge solubilisation and subsequent anaerobic digestion: Focused on high-solid state[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 185: 171–177.
- [30] Mustafa A M, Poulsen T G, Xia Y H, et al. Combinations of fungal and milling pretreatments for enhancing rice straw biogas production during solid-state anaerobic digestion[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 224: 174–182.
- [31] Hu Y Y, Wu J, Li H Z, et al. Study of an enhanced dry anaerobic digestion of swine manure: Performance and microbial community property[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 282: 353–360.
- [32] Cui Z F, Shi J, Li Y B. Solid-state anaerobic digestion of spent wheat straw from horse stall[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102 (20): 9432–9437.
- [33] Lin L, Yang L, Xu F, et al. Comparison of solid-state anaerobic digestion and composting of yard trimmings with effluent from liquid anaerobic digestion[J]. *Bioresource Technology*, 2014, 169: 439–446.
- [34] Cho S-K, Im W-T, Kim D-H, et al. Dry anaerobic digestion of food waste under mesophilic conditions: Performance and methanogenic community analysis[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 131: 210–217.
- [35] Kim D-H, Oh S-E J W M. Continuous high-solids anaerobic co-digestion of organic solid wastes under mesophilic conditions[J], 2011, 31(9/10): 1943–1948.
- [36] Dong L, Zhenhong Y, Yongming S J B T. Semi-dry mesophilic anaerobic digestion of water sorted organic fraction of municipal solid waste (WS-OFMSW)[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(8): 2722–2728.
- [37] Mussoline W, Esposito G, Lens P, et al. Design considerations for a farm-scale biogas plant based on pilot-scale anaerobic digesters loaded with rice straw and piggery wastewater[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2012, 46: 469–478.
- [38] Bolzonella D, Battistoni P, Mata-Alvarez J, et al. Anaerobic digestion of organic solid wastes: Process behaviour in transient conditions[J]. *Water Science & Technology*, 2003, 48(4): 1–8.