

干湿耦合厌氧发酵工艺设计与发酵特性试验*

李文哲¹ 罗立娜¹ 窦钰程² 徐名汉¹ 王小伟¹ 袁虎¹

(1. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 黑龙江省农业机械工程科学研究院, 哈尔滨 150040)

摘要: 针对目前大中型沼气工程存在原料单一及沼液沼渣处理难的问题, 提出了干法发酵与湿法发酵相结合的干湿耦合厌氧发酵工艺, 即畜禽粪便采用湿发酵, 将湿法发酵产生的沼液沼渣与秸秆混合进行干法发酵。并研究了干湿耦合比例——沼液沼渣与秸秆比例(BRSR)及干法发酵渗滤液回流对发酵特性的影响, 结果表明, 随着湿干比例的增加启动时间缩短、产气量增加; 干法发酵的渗滤液总固体质量分数为1%以下, 达到了固液分离的效果, 有利于循环利用和喷淋, 解决了湿法厌氧发酵沼液沼渣处理难的问题, 实现了沼液的循环利用。

关键词: 厌氧发酵 干湿耦合发酵 沼液沼渣与秸秆比例 发酵特性

中图分类号: S216.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)05-0148-06

Wet and Dry Coupling Anaerobic Fermentation Process and Fermentation Characteristic Test

Li Wenzhe¹ Luo Li'na¹ Dou Yucheng² Xu Minghan¹ Wang Xiaowei¹ Yuan Hu¹

(1. College of Engineering College, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. Heilongjian Institute of Agricultural Mechanical Engineering Science, Harbin 150040, China)

Abstract: According to the current problem of materials' singleness and biogas slurry and residue handling difficultly in large and medium-sized biogas engineering, wet and dry coupling anaerobic fermentation combined with dry and wet fermentation was put forward, namely wet fermentation used livestock and poultry manure as raw materials, and dry fermentation used mixture of straw and biogas slurry and residue from wet fermentation as fermentation substrate. The effect of wet and dry coupling ratio-biogas residue straw ratio and leachate recirculation on fermentation properties were studied, and the results show that with the increase of BRSR, start time is shorten and the biogas production increases. TS of leachate from dry fermentation is below 1%, achieves the effect of the solid-liquid separation, is conducive to leachate recycling and spraying, solves the difficult problem of biogas slurry and residue treatment from wet anaerobic fermentation, and realizes the cyclic utilization of biogas slurry.

Key words: Anaerobic fermentation Wet and dry coupling fermentation Biogas residue-straw ratio Fermentation characteristics

引言

目前湿法发酵的大型沼气工程存在两个问题: 一是原料单一, 发酵工艺不适应原料的多样性和季节性, 特别是高寒地区冬季原料收集困难, 影响沼气生产; 二是沼液沼渣粘性大, 固液分离困难, 分离不

彻底, 固液分离后沼液中的干物质含量高, 给后续处理或利用带来困难, 甚至造成二次污染。这两个问题已经成为制约大型沼气工程普及和推广的技术瓶颈。干湿耦合发酵就是针对此问题提出来的^[1]。

干湿耦合发酵就是湿法厌氧发酵与干法厌氧发酵相结合, 畜禽粪便采用湿发酵, 将湿发酵产生的沼

收稿日期: 2012-12-12 修回日期: 2013-01-02

* “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD15B04)和国际科技合作项目(2010DFB606801)

作者简介: 李文哲, 教授, 博士生导师, 主要从事农畜废弃物资源化利用研究, E-mail: liwenzhe9@163.com

液沼渣与秸秆混合进行干发酵,沼液沼渣对干发酵进行补水、补氮和接种。干发酵过程中液体缓慢渗滤,保证干发酵顺利进行。徐霄等^[2]对秸秆干式厌氧发酵渗滤液回流技术进行了研究,结果表明,当底物浓度提高到 20% 以上时,渗滤液回流可明显地提高秸秆厌氧发酵的产气率,提高纤维素和半纤维素的降解率。Li 等^[3]的研究结果也表明稻秆发酵过程中渗滤液的循环喷淋能有效抑制酸中毒。秸秆发酵生产沼气的同时还对沼液沼渣进行了固液分离,分离后沼液中的干物质降低,有利于沼液循环利用^[2]。同时扩大了沼气生产原料范围,从而解决大型沼气工程发展面临的瓶颈问题。

本文主要分析干湿耦合发酵工艺过程,研究湿发酵沼液沼渣与秸秆混合比例,以及渗滤液回流喷淋对发酵特性的影响,确定干湿耦合发酵负荷匹配,为干湿耦合发酵应用于大中型沼气工程提供参数。

1 沼气干湿耦合厌氧发酵工艺

1.1 工艺的提出

长期以来,畜禽粪便因其含水量大一般采用湿法厌氧发酵,发酵料液总固体(TS)一般为 6%~8% (质量分数),而粪便的 TS 为 16%~20%,为了获得合适的发酵浓度要求,需要加水稀释。湿法厌氧发酵的优点是料液流动性好,便于输送和搅拌,传热传质效果好,产生的沼气释放快,有利于厌氧生物过程的快速进行。缺点是耗水量大,并且使净水变成脏水,产生的沼液沼渣如果利用不好,容易造成二次污染^[4-5]。干法厌氧发酵的 TS 一般为 20%~30%,如果将单纯的粪便进行干法发酵,由于其透气性以及传热传质性较差,厌氧发酵几乎难以进行,效率低下。而按照一定的颗粒要求粉碎的秸秆堆垛,其透气性好,具有一定的传热传质性能,而且可以通过液体、气体与固体间的相对运动提高传质效果,自然风干秸秆的 TS 为 70%~80%,碳氮比都在 50~80^[6],并且秸秆几乎不携带厌氧微生物,所以,以其为原料进行干发酵存在补水、补氮和接种的问题。为此,提出了如图 1 所示的沼气干湿耦合厌氧发酵工艺。

干湿耦合厌氧发酵工艺包括湿法两相厌氧发酵工艺和干法厌氧发酵工艺。湿法两相厌氧发酵工艺原料采用畜禽粪便,以牛粪为原料与水按一定比例进行混合,配好的料液在预处理罐内先进行预加热,然后进入酸化罐内酸化。当挥发酸的含量达到最大值时,将其送入产甲烷罐进行产气,产气罐出来的沼液沼渣经输送装置输送到干法发酵混料装置,使沼液沼渣与秸秆均匀混合。秸秆主要采用稻秸和玉米秸秆,秸秆经过粉碎处理后与沼液沼渣混合并送入

干法发酵装置。干法发酵秸秆起到了渗滤床的作用,液体自然渗滤到发酵装置下部具有一定增温作用的储液槽。干法发酵装置上部安装有渗滤液和原始沼液沼渣喷淋装置,储液槽中的渗滤液通过泵循环喷淋,不断地为干发酵秸秆补水、补氮,促进干发酵物料的传热传质,加速秸秆的降解。喷淋液循环周期根据秸秆降解程度、渗滤液氮含量以及活性等参数通过试验确定^[7],按照确定的循环周期定期将渗滤液送回湿法发酵配料池,用以调节湿发酵原料浓度。干发酵装置出料后的沼渣进行堆肥处理。

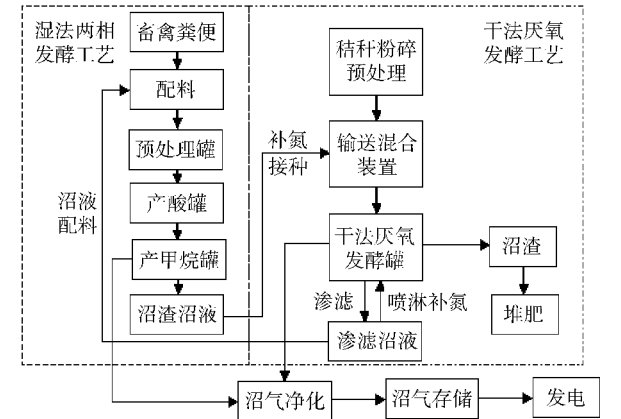


图 1 沼气干湿耦合厌氧发酵生产工艺框图
Fig. 1 Biogas dry and wet coupling anaerobic fermentation production process

1.2 干湿负荷匹配

在高寒地区,冬季畜禽养殖量减少,畜禽粪便快速冻结难以收集,导致冬季沼气工程原料供应困难。干湿耦合发酵沼气生产工艺可以根据季节和原料的变化,调整干湿耦合的负荷匹配,如冬季粪便少秸秆多,夏季粪便多秸秆少,通过在一定范围内调整干、湿耦合比例来适应这样的变化,使沼气工程适应原料的多样性和季节性。原料配比计算式为

$$R_{\text{BRSR}} = \frac{X_1}{X_2} = \frac{T_2 - T_3}{T_3 - T_1} \tag{1}$$

- 式中 R_{BRSR} ——沼液沼渣与秸秆比例
 X_1 ——湿法出料沼液沼渣的质量,数值可根据沼气工程的规模进行设定,kg/d
 X_2 ——干法秸秆的质量,未知量可以通过计算得出,kg/d
 T_1 ——湿法出料沼液沼渣的总固体质量分数,可通过试验测得,%
 T_2 ——秸秆的总固体质量分数,可通过试验测得,%
 T_3 ——干湿耦合发酵物料总固体质量分数,根据试验要求自行设定,%
混合物料的总碳氮比计算公式为^[8]

$$K = \frac{C_Z}{N_Z} = \frac{C_b X_b + C_1 X_1 + C_2 X_2 + C_3 X_3 + \cdots}{N_b X_b + N_1 X_1 + N_2 X_2 + N_3 X_3 + \cdots} = \frac{C_b X_b + \sum C_i X_i}{N_b X_b + \sum N_i X_i} \quad (2)$$

式中 C_Z ——混合物料的总碳质量,kg
 N_Z ——混合物料的总氮质量,kg
 C_b ——沼液沼渣中碳素质量分数,%
 X_b ——沼液沼渣的质量,kg
 N_b ——沼液沼渣中氮素质量分数,%
 C_i ——秸秆 i 的碳素质量分数,%
 N_i ——秸秆 i 的氮素质量分数,%
 X_i ——秸秆原料 i 的质量,kg
 K ——混合原料的碳氮比

厌氧发酵适宜的碳氮比为 20 ~ 30, 可以根据式(2)将总碳氮比限定在此范围内。

2 干湿耦合厌氧发酵特性试验设计

2.1 BRSR 对发酵特性影响

根据厌氧发酵原理, 沼液沼渣与秸秆比例

(Biogas residue-straw ratio, BRSR) 必将影响秸秆干发酵系统启动时间和秸秆产甲烷的潜力, 科学地确定 BRSR 对整个发酵过程高效运行是非常重要的^[9~11]。本试验研究不同 BRSR 对发酵产气量及气体成分的影响, 为干湿耦合发酵确定适宜的工艺参数。

采用批式发酵方式, 反应器的有效容积为 1 L, 发酵温度(35 ± 1)℃, 用气袋收集产生的气体, 每组设 3 个平行, 稻秸取自哈尔滨市周边农田, 将稻秸剪成 3 ~ 5 cm 的小段, 取样测定各项指标。稻秸的 TS 和 VS 分别为 89. 83% 和 75. 32%。接种物为实验室沼气中试系统的沼液, 沼液的 TS 和 VS 分别为 7. 33% 和 5. 20%。固定稻秸的质量为 40 g, 改变沼液的量调节碳氮比在厌氧发酵最佳碳氮比的范围内, 配比如表 1 所示。

2.2 渗滤液喷淋对秸秆厌氧发酵特性影响

试验装置如图 2 所示, 装置设有夹套, 通过热水循环对其进行加热保温, 由控制柜实现温度的自动控制。发酵过程中渗滤液通过渗滤板经底部锥形斗

表 1 沼液与秸秆不同的比例
Tab. 1 Different biogas slurry and straw ratios

沼液质量/g	沼液组分质量			秸秆质量/g	秸秆组分质量			混合原料	
	总固体质量/g	碳质量/g	氮质量/g		总固体质量/g	碳质量/g	氮质量/g	BRSR	碳氮比
679. 66	49. 82	21. 41	1. 43	40	35. 93	17. 41	0. 37	1. 4	22
479. 88	35. 18	15. 12	1. 01	40	35. 93	17. 41	0. 37	1. 0	24
349. 54	25. 62	11. 01	0. 73	40	35. 93	17. 41	0. 37	0. 7	26
278. 20	20. 39	8. 76	0. 58	40	35. 93	17. 41	0. 37	0. 6	27
227. 85	16. 70	7. 18	0. 48	40	35. 93	17. 41	0. 37	0. 5	29

收集, 根据设定时间回流到顶部渗滤液喷淋装置, 通过均匀喷淋促进传热传质, 保证微生物与底物充分接触, 使养分在秸秆干发酵装置中均匀分布, 从而促进底物的降解^[12~13]。试验温度为中温(35 ± 1)℃, 试验采用批式发酵方式, 每组设 3 个平行, 稻秆质量为 0. 5 kg, BRSR 分别为 1. 4、1. 0 和 0. 7, 考察渗滤液循环对厌氧发酵产气特性的影响和发酵过程中渗滤液的变化规律。

2.3 指标及测定方法

TS 测定: 采用(105 ± 5)℃干燥法; VS 测定: 采用 550 ~ 600℃灼烧法^[14]; pH 值采用杭州奥利龙公司 PHS-3C 型便携式 pH 计进行测定。总氮测定: Kjelttec 2300 自动定氮系统。

气体成分(H₂ + N₂ + CH₄ + CO₂) 的测定: 气相色谱仪为安捷伦 6890N 型, 柱型号 TDX-01, 柱温 170℃, 运行 2. 5 min, 总流量 30. 8 mL/min, 进样口温度为室温, TCD 检测器, 检测器温度 220℃, 载气为

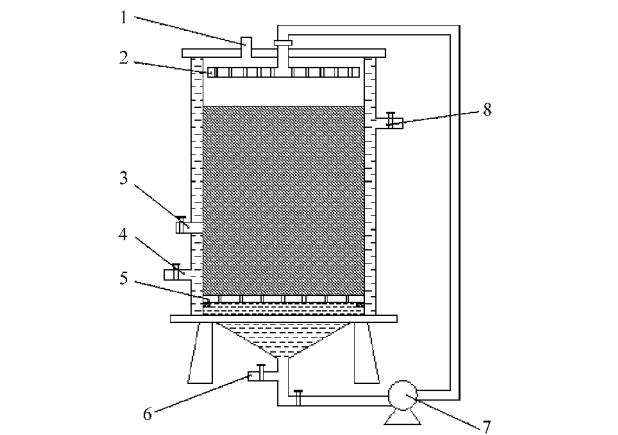


图 2 试验装置示意图
Fig. 2 Test device schemes

1. 出气口 2. 渗滤液喷淋管 3. 取样口 4. 夹套循环进水口
5. 渗滤板 6. 渗滤液取样口 7. 渗滤液循环泵 8. 夹套循环水出口

氩气, 尾气为氮气, 标准样为 5 个不同浓度, 甲烷体积分数变化范围为 9. 8% ~ 80. 3%, 采用外标法

测定气体的成分及含量。

挥发性脂肪酸用同一台气相色谱仪测定,样品先以 12 000 r/min 的转速离心 10 min,取上清液与质量分数为 25% 的偏磷酸溶液按照 10:1 的比例混合,然后再以 12 000 r/min 的转速离心 10 min,取上清液过 0.45 μm 滤膜后,取 1 mL 滤液进行测定。色谱条件如下:载气和尾吹气均为氮气,载气采用恒压模式,压强保持在 187 kPa,尾吹气流量为 30 mL/min;进样口温度为 220℃,初始柱温为 60℃,然后以 15℃/min 的速度升至 140℃并维持 1.2 min,检测器温度为 250℃。整个测定时间为 6.53 min。

3 试验结果与分析

3.1 BRSR 对厌氧发酵产气量的影响

图 3 和图 4 分别为不同 BRSR 对厌氧发酵日产气量和累积产气量的影响,由于试验在前 15 d 变化比较显著,15 d 后产气量基本保持不变,因此只给出前 15 d 的变化情况。由图可以看出各组的日产气量的变化趋势相同,各组均在 2~3 d 内达到产气高峰,产气高峰保持一段时间之后开始下降,只是产气高峰的数值有很大不同。BRSR 为 1.4、1.0、0.7、0.6 和 0.5 时产气高峰分别为 1 120、1 000、770、650 和 550 mL/d。随着 BRSR 的增加,累积产气量增加,BRSR 为 1.4、1.0、0.7 和 0.6 的累积产气量比 BRSR 为 0.5 分别高 66.67%、44.51%、25.32% 和 10.23%。可见增加沼液沼渣的加入量、即增大 BRSR,有助于提高沼气产量,说明沼液沼渣在秸秆发酵过程中发挥了重要作用。由表 1 可知,BRSR 在 1.4~0.5 之间变化时,碳氮比的变化为 22~29,碳氮比在这个范围内对发酵产气不应产生较大的影响^[15],因此可以肯定沼液沼渣起到了重要的接种作用,并且随接种量的增加促进了秸秆的降解。在发酵周期为 15 d 时,BRSR 为 1.4、1.0、0.7、0.6 和 0.5 的 TS 产气率分别为 91.48、94.12、95.30、91.22 和 88.48 mL/g。

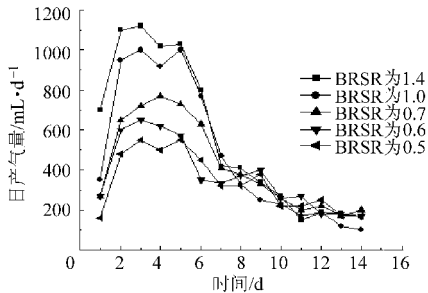


图3 不同 BRSR 对日产气量的影响曲线
Fig. 3 Daily biogas production yields of different BRSR

3.2 BRSR 对甲烷体积分数的影响

图 5 为不同 BRSR 对甲烷体积分数的影响。由

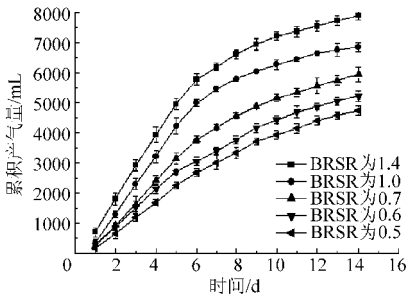


图4 不同 BRSR 对累积产气量的影响曲线
Fig. 4 Cumulative biogas production yields of different BRSR

图可以看出不同 BRSR 组的甲烷体积分数的变化趋势一致,均是在前几天升高,达到高峰后基本保持不变,只是达到峰值的时间不同。

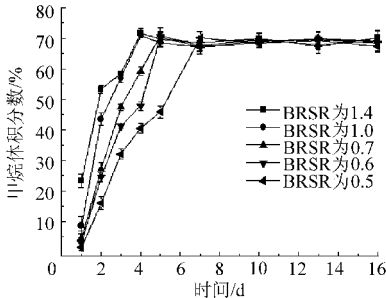


图5 不同 BRSR 对甲烷体积分数的影响曲线
Fig. 5 Methane concentrations of different BRSR

BRSR 为 1.4、1.0、0.7、0.6 和 0.5 组达到甲烷体积分数峰值的时间分别为 4 d、4 d、5 d、5 d 和 7 d,进入稳定期各组甲烷体积分数均在 70% 左右。可见 BRSR 只对启动阶段的甲烷体积分数以及达到稳定期的时间有一定影响,不影响稳定期的甲烷体积分数。说明加入多量的沼液沼渣可以促进水解酸化过程,快速进入稳定产甲烷期。而经过一定时间以后,液体下渗,各组发酵物料含水量趋于接近,BRSR 对产气的影响降低,由此怀疑渗滤液中的活性物质影响了秸秆发酵产气能力。为了验证这一疑点,进行了渗滤液喷淋试验。

试验过程中观察渗滤液情况,发现 BRSR 为 1.4、1.0 时反应器底部渗滤液较多,故采用 BRSR 为 1.4、1.0 进行渗滤液回流喷淋试验。而 BRSR 为 0.7 以下时渗滤液很少或几乎没有,故没有对其进行喷淋试验。

3.3 渗滤液喷淋对 TS 产气量的影响

BRSR 分别取 1.4 和 1.0 进行秸秆厌氧发酵渗滤液喷淋试验,每次喷淋时间间隔为 24 h,喷淋与不喷淋情况下 TS 产气量对比如图 6 所示。处理组 1: BRSR 为 1.4,不喷淋;处理组 2: BRSR 为 1.4,喷淋;处理组 3: BRSR 为 1.0,不喷淋;处理组 4: BRSR 为 1.0,喷淋。由图可知,喷淋后的 TS 产气量略高于不喷淋,BRSR 为 1.4 和 1.0 时渗滤液喷淋的 TS 产气

量分别比不喷淋高 3.40% 和 4.05%。渗滤液喷淋的效果不显著,这与傅国志的研究结果相似^[16]。这一结果说明有 2 个可能,第 1 个可能是上述的怀疑不成立,渗滤液中促进秸秆降解的营养成分含量不高,对秸秆发酵补氮和接种的作用不大;第 2 个可能是经过一定时间后,秸秆之间粘连,在不搅拌的情况下,喷淋的渗滤液流经的路径与原来渗滤时流经的路径几乎相同,上下短路,渗滤液没有深入秸秆内部,没有充分发挥其补氮和接种的作用。这 2 个可能有待进一步探讨。

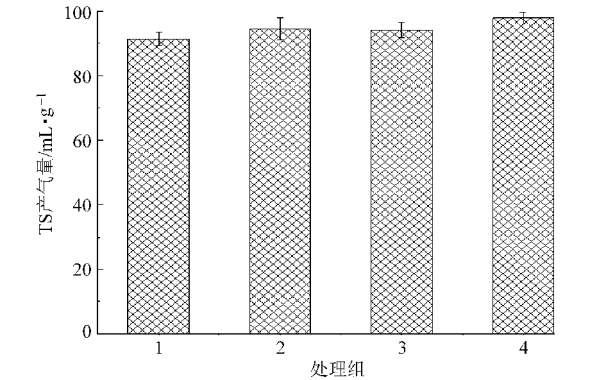


图 6 渗滤液喷淋对 TS 产气量的影响
Fig. 6 Influence of leachate spraying on biogas production yields of TS

3.4 喷淋过程中渗滤液参数的变化

图 7 为渗滤液回流过程中乙酸质量浓度和 pH 值的变化规律。由图可以看出,不同 BRSR 组回流过程中 pH 值的变化规律相同,pH 值前 8 d 总体略有下降,后有小幅波动,最后基本保持稳定。整个发酵过程中的 pH 值都在 7.0 以上。从乙酸质量浓度变化也可以看出,虽然两组前 4 d 的变化趋势不同,但 4 d 后乙酸质量浓度均呈现快速下降的趋势,最高乙酸质量浓度接近 800 mg/L,质量浓度较低说明渗滤液带走的产甲烷发酵底物较少,特别是当 BRSR 为 1.4 时,液体渗滤快,水解酸化之前即有较多液体渗出,致使初期的乙酸质量浓度远远低于 BRSR 为 1.0 时的乙酸质量浓度,伴随喷淋乙酸质量浓度增加。4 d 后 BRSR 为 1.4 和 1.0 的变化趋势一致,都呈下降趋势,直至可以忽略不计。由此可以判断,渗滤液喷淋使产气增加的部分,可能是渗滤液带走的乙酸参与发酵的结果。

图 8 为回流过程中渗滤液 TS 的变化情况,沼液初始的 TS 为 7.33%,由图可以看出在喷淋第 1 天

TS 迅速降低,两组的 TS 均在 1% 以内,之后喷淋过程中 TS 基本保持不变,BRSR 为 1.4 和 1.0 时 TS 平均去除率均在 91% 左右,两组没有明显差异。

BRSR 为 1.4 和 1.0 时沼液回流 TS 产气量分别比不回流高 3.40% 和 4.05%, BRSR 为 1.4 和 1.0 回流后沼液的 TS 去除率无差异,均在 91% 左右。

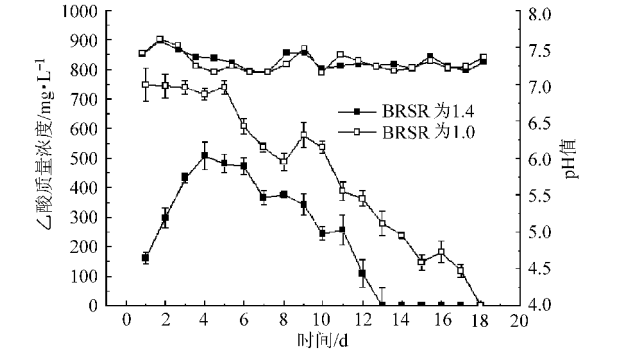


图 7 渗滤液回流过程乙酸质量浓度和 pH 值的变化曲线
Fig. 7 Acetic acid and pH value changes of leachate

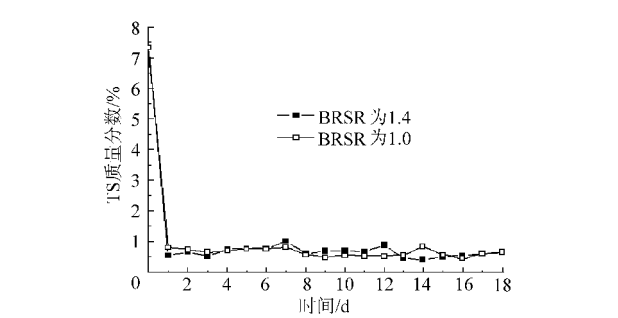


图 8 渗滤液回流过程 TS 质量分数变化曲线
Fig. 8 TS changes of leachate

4 结论

(1)研究沼液与稻秆的比例对干湿耦合厌氧发酵特性的影响,结果表明 BRSR 的提高有利于提高产气量,缩短甲烷相的启动时间,使发酵更快速的进入到产气稳定的阶段,确定 BRSR 为 1.4、1.0 为下一步进行渗滤液喷淋的参数。

(2)根据试验确定的 BRSR 进行渗滤液喷淋试验,结果表明,BRSR 为 1.4 和 1.0 时回流后的 TS 产气量比回流前的 TS 产气量分别高 3.40% 和 4.05%,其原因有 2 个可能性有待于进一步探讨,渗滤液的 TS 去除率高达 91%,达到了固液分离的效果,可以给湿法发酵的原料配料,解决了湿法两相厌氧发酵沼液无法处理的难题,可以实现沼液的循环利用。

参 考 文 献

1 李文哲. 干湿耦合厌氧发酵工艺方法: 中国, 201010515939[P]. 2011-02-16.
Li Wenzhe. Dry and wet coupling anaerobic fermentation process methods; China, 201010515939[P]. 2011-02-16. (in Chinese)
2 徐霄,叶小梅,常志州,等. 秸秆干式厌氧发酵渗滤液回流技术研究[J]. 农业环境科学学报,2009,28(6):1 273~1 278.

Xu Xiao, Ye Xiaomei, Chang Zhizhou, et al. Technique on recycle of leachate in biogas production from rice straw with dry anaerobic digestion [J]. Journal of Agro-environment Science, 2009, 28(6): 1 273 ~ 1 278. (in Chinese)

3 Li L H, Li D, Sun Y M, et al. Effect of temperature and solid concentration on anaerobic digestion of rice straw in south China [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(13): 7 261 ~ 7 266.

4 朱德文, 曹成茂, 陈永生, 等. 秸秆厌氧干发酵产沼气关键技术及问题探讨[J]. 中国农机化, 2011(4): 56 ~ 59.
Zhu Dewen, Cao Chengmao, Chen Yongsheng, et al. Key technologies and discussion of the straw dry-anaerobic fermentation [J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2011(4): 56 ~ 59. (in Chinese)

5 朱圣权, 张衍林, 张文倩, 等. 厌氧干发酵技术研究进展[J]. 可再生能源, 2009, 27(2): 46 ~ 50.
Zhu Shengquan, Zhang Yanlin, Zhang Wenqian, et al. The progress of dry anaerobic fermentation technology [J]. Renewable Energy Resources, 2009, 27(2): 46 ~ 50. (in Chinese)

6 边炳鑫, 赵由才, 康文泽. 农业固体废弃物的处理与综合利用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.

7 夏吉庆, 马添翼, 毕经毅, 等. 牛粪厌氧发酵污泥回流试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(4): 105 ~ 109.
Xia Jiqing, Ma Tianyi, Bi Jingyi, et al. Sludge recycle trial of cattle manure anaerobic fermentation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(4): 105 ~ 109. (in Chinese)

8 张全国. 沼气技术及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.

9 Sun J X, Yuan X Z, Shi X S, et al. Fermentation of *Chlorella* sp. for anaerobic bio-hydrogen production: influences of inoculum-substrate ratio, volatile fatty acids and NADH [J]. Bioresource Technology, 2011, 102(22): 10 480 ~ 10 485.

10 赵洪, 邓功成, 高礼安, 等. 接种物数量对沼气产气量的影响[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(13): 6 278 ~ 6 280.
Zhao Hong, Deng Gongcheng, Gao Li'an, et al. Research on the effect of inoculated amount for biogas producing volume [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, 37(13): 6 278 ~ 6 280. (in Chinese)

11 马磊, 王德汉, 谢锡龙, 等. 接种量对餐厨垃圾高温厌氧消化的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 178 ~ 182.
Ma Lei, Wang Dehan, Xie Xilong, et al. Influence of inoculum on thermophilic anaerobic digestion of food waste [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(12): 178 ~ 182. (in Chinese)

12 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): 9 432 ~ 9 437.

13 Kusch S, Oechsner H, Jungbluth T. Biogas production with horse dung in solid-phase digestion systems [J]. Bioresource Technology, 2008, 99(5): 1 280 ~ 1 292.

14 国家环保局《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: 环境科学出版社, 1989.

15 周孟津, 张榕林, 蔺金印. 沼气实用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.

16 傅国志. 搅拌和沼液回流对麦秸序批式厌氧消化性能影响的试验研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2010.
Fu Guozhi. Investigation on effect of mixing and biogas slurry reflux on sequencing batch anaerobic digestion performance of wheat [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2010. (in Chinese)

(上接第 147 页)

11 刘爽. 中低温秸秆降解菌的筛选及其秸秆降解效果研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2011.
Liu Shuang. Screening of straw degradation strains under medium-low temperature and their degradation effects on crop straw [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2011. (in Chinese)

12 Rieger C, Weiland P. Prozessstörungen frühzeitig erkennen [J]. Biogas Journal, 2006(4): 18 ~ 20.

13 习彦花, 程辉彩, 张丽萍, 等. 产氢产乙酸菌 ZR-1 的分离鉴定及产酸特性[J]. 微生物学通报, 2011, 38(2): 181 ~ 186.
Xi Yanhua, Cheng Huicai, Zhang Liping, et al. Separation and identification of a hydrogen-producing acetogens strain ZR-1 and its acetic production characters [J]. Microbiology, 2011, 38(2): 181 ~ 186. (in Chinese)

14 文娅, 赵国柱, 周传斌, 等. 生态工程领域微生物菌剂研究进展[J]. 生态学报, 2011, 31(20): 6 287 ~ 6 294.
Wen Ya, Zhao Guozhu, Zhou Chuanbin, et al. Research progress of microbial agents in ecological engineering [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(20): 6 287 ~ 6 294. (in Chinese)

15 郭静波. 生物菌剂的构建及其在污水处理中的生物强化效能[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
Guo Jingbo. Construction of bacterial agent and its bioaugmentation efficiency in the wastewater treatment [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese)

16 朱葛夫. 厌氧折流板反应器应用技术及微生物群落生态学研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
Zhi Gefu. Practical technology and microbial community ecology of anaerobic baffled reactor [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007. (in Chinese)