

doi:10.3969/j.issn.1673-5854.2020.01.001

研究报告——生物质能源

水稻秸秆渗滤床半固态厌氧发酵性能研究

刘科^{1,3}, 贺静^{2*}, 韦秀丽¹, 蒋滔^{1,3}, 唐宁¹, 张德勇⁴

(1.重庆市农业科学院, 重庆 401329; 2.农业部农村可再生能源开发利用重点实验室, 四川 成都 610041;
3.农业部农村可再生能源开发利用南方科学观测实验站, 重庆 401329; 4.农业废弃物资源化
利用技术与设备研发重庆市重点实验室, 重庆 401329)

摘要:以水稻秸秆为原料,利用自行设计的渗滤床反应器,对比研究了不同温度(20、25、30 和 35 °C)及不同预处理方式(NaOH、生物试剂和沼液)对秸秆厌氧发酵产气性能、物能转化率、发酵后沼液性能和产气成本等方面的影响。实验结果表明:发酵后总固体(TS)质量分数稳定在 13%~15%之间,属于半固态厌氧发酵,同时累积产气量与温度、发酵后 COD 及 NH₃-N 的变化量均呈极显著正相关。相同温度(20~30 °C)条件下,经预处理后的水稻秸秆 TS 产气率较空白均有所提高;其中沼液预处理效果最为明显,35 °C 条件下,TS 产气率及挥发性固体(VS)产甲烷率分别为 154.0 和 55.2 mL/g,较空白样品分别提高 25.1% 和 52.5%。同时,沼液预处理可显著提升厌氧发酵产气中的甲烷体积分数。各预处理样品 TS 产甲烷率及 VS 产甲烷率呈随温度(20~30 °C)上升而增加的趋势,但产甲烷提升率随温度的上升而逐渐下降,将系统温度从 20 °C 提升至 25 °C,各处理产甲烷率可提高 90% 以上。考虑到沼气工程罐体升温及产能收支平衡等因素,温度控制在 25 °C 是经济性最好的策略模式。从产气成本上分析,自产沼液具有较佳的处理效果和较低的生产成本,每生产 1 m³ 沼气的可变成本 1.62 元。

关键词:水稻秸秆;半固态发酵;渗滤床反应器;预处理;沼液

中图分类号:TQ35

文献标识码:A

文章编号:1673-5854(2020)01-0001-08

引文格式:刘科,贺静,韦秀丽,等. 水稻秸秆渗滤床半固态厌氧发酵性能研究[J]. 生物质化学工程,2020,54(1):1-8.

Research on Capability of Semi-solid Anaerobic Digestion of Rice Straw Using Percolation Bed Reactor

LIU Ke^{1,3}, HE Jing², WEI Xiuli¹, JIANG Tao^{1,3}, TANG Ning¹, ZHANG Deyong⁴

(1.Chongqing Academy of Agricultural Sciences, Chongqing 401329, China; 2.Key Laboratory of Development and Application of Rural Renewable Energy, Ministry of Agriculture, Chengdu 610041, China; 3.Southern Scientific Observing and Experimental Station for Development and Utilization of Rural Renewable Energy, Ministry of Agriculture, Chongqing 401329, China; 4.Key Laboratory of Agricultural Waste Recycling Technology and Equipment R&D, Chongqing 401329, China)

Abstract:The effects on the gas production and the energy conversion rate of straw anaerobic fermentation, the performance of biogas slurry and the gas production cost after fermentation were comparative researched under four different temperatures(20, 25, 30 and 35 °C) and three different pretreatment methods(NaOH, biological reagents and biogas slurry) by self-designed leach bed reactors using rice straw as raw material. The results showed that the total solid(TS) mass fraction of substrate after fermentation reached a stable level at 13% to 15%—semi-solid anaerobic fermentation; also the cumulative gas production and temperature, the changes of COD and NH₃-N after fermentation were significantly correlated. It also showed that the TS biogas yield of rice straw after pre-treatment was higher than that of the untreated under the same temperature(20–30 °C). The TS biogas production was 154.0 mL/g and volatile solids(VS) methane yield was 55.2 mL/g under 35 °C, which increased 25.1%

收稿日期:2019-01-14

基金项目:重庆市社会民生重点项目(cstc2017shms-zdyfX0052);农业部可再生能源开发利用重点实验室开放课题(2015005,2013005)

作者简介:刘科(1982—),男,重庆人,工程师,硕士,主要从事农业生物环境与能源工程研究;E-mail:273021978@qq.com

*通讯作者:贺静,副研究员,研究领域为生物质能源工程;E-mail:hejing@caas.cn。

and 52.5% respectively comparing with those of the untreated sample. At the same time, the methane volume fraction in anaerobic fermentation gas production could be significantly improved by biogas slurry pretreatment. The methane yield of TS and VS increased, while the elevation rate of methane production gradually decreased with the increase of temperature (20–30 °C). The methane production of all treatments could be increased by 90% when the fermentation temperature rose from 20 to 25 °C. According to the analysis of gas production cost, the self-produced biogas slurry had better treatment effect and lower production cost. The variable cost for each 1 m³ of biogas produced was 1.62 yuan. Considering the warming of biogas fermentation tank and energy input-output balance, temperature control at 25 °C might be the optimal economic strategy mode.

Key word: rice straw; hemi-solid anaerobic digestion; percolation bed reactors; pre-treatment; biogas slurry

据调查统计,2017年中国农作物秸秆可收集量约7亿吨^[1],其中水稻秸秆占总量的近1/3。农作物秸秆作为物质、能量和养分的载体,是一种宝贵的自然资源^[2],若不妥善处理会导致严重的空气污染和资源浪费。随着能源消耗和环境污染问题日益突出,秸秆沼气因既能提供清洁能源又能减少秸秆焚烧造成的污染^[3],成为秸秆综合利用的重要措施和研究热点。

秸秆沼气按发酵原料总固体(TS)质量分数可分成液态发酵(TS < 10%),半固态发酵(TS = 10% ~ 15%)和固态发酵(TS > 15%)3种类型^[4-5]。相比液态发酵,半固态及固态发酵具有容积产甲烷率高、系统保温加热的能量需求低、沼液产量少、沼渣水分低且易处理等优点^[6-7],是目前国内外厌氧发酵技术的研究热点。据报道,欧洲近年新建的沼气工程超过60%采用半固态或固态发酵工艺^[8]。然而秸秆原料中外层木质素的屏蔽效应阻碍了纤维素酶对内层纤维素的分解^[9-10],严重制约了秸秆的厌氧发酵效率,因此预处理工艺显得尤为重要。目前水稻秸秆预处理方式包括稀酸^[11]、稀碱^[12]、蒸汽爆破^[13]、水热^[14]、湿式氧化^[15]和生物试剂^[16-17]等,其中以稀碱和生物试剂应用最为普遍。研究发现稀碱预处理后的水稻秸秆的挥发性固体(VS)产甲烷率可以达到341~520 mL/g,相比未处理时提高30%~100%^[8]。Zheng等^[18]通过查阅大量文献总结出NaOH对秸秆甲烷产气率的促进作用在3.2%~230%之间,采用生物预处理秸秆甲烷产气率可提升至15%~500%,然而以上结论都是以液态发酵为参照的,预处理方式对固态发酵及半固态发酵产气提升率还有待进一步研究^[7]。另一方面,渗滤床发酵系统作为近年来新兴的一种厌氧发酵技术,被广泛用于畜禽粪便、秸秆、有机生活垃圾等废物的固态发酵处理中^[19]。Degueurce等^[20]采用渗滤床工艺对牛粪的固态发酵产气率进行了研究,并取得了较好的产气效果,但目前采用渗滤床厌氧发酵工艺对不同温度下、经不同预处理后水稻秸秆产气效率的影响研究尚未见报道。因此,本研究以水稻秸秆为原料,利用自行设计的渗滤床发酵系统,对比分析了稀碱水解、生物酶解及沼液预处理3种方式对秸秆厌氧物能转化率、发酵后沼液成分变化等方面的影响,以期对秸秆半固态发酵提供基础实验数据,从而为渗滤床发酵工艺实际运行提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

水稻秸秆取自重庆市白市驿镇皇田,收集后用清水洗净,自然风干后,剪短至5~10 cm,置干燥箱中55 °C烘6 h,并测定其理化指标。通过分析,水稻秸秆含水率为6.5%,总固体(TS)93.5%,挥发性固体(VS)86.5%,C 42.12%,N 0.87%,H 5.73%,O 40.30%。NaOH,市售分析纯;秸秆沼液,实验室自制^[21];绿秸灵,中科院成都生物研究所。

1.2 水稻秸秆的预处理

参考文献[21]方法,采用稀碱、沼液以及生物试剂3种方式进行预处理,每种方式称取水稻秸秆160.43 g,分别放置于8 L的自制渗滤床反应器中,每种预处理方式做2次重复。其中,稀碱样品用900 mL质量分数为1.5%的NaOH溶液预处理7 d;沼液样品用900 mL的秸秆沼液预处理7 d;生物试剂样品用绿秸灵预处理7 d;并以用900 mL清水浸渍处理7 d的样品为空白对照。以上所有处理在25 °C恒温条件下进行。

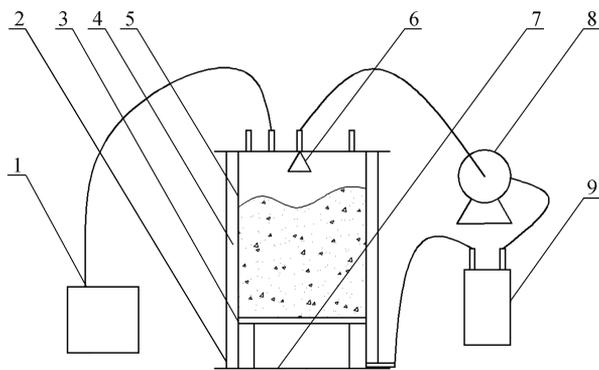
1.3 渗滤床发酵试验

前期研究表明^[21],预处理过程结束后,可加入沼液接种物直接发酵,无需其他处理。利用反应器外层

恒温水循环系统分别在 20、25、30 及 35 °C 下恒温发酵。发酵接种物为 2 L 不产气沼液,反应器底部为多孔滤板,秸秆在滤板上,当沼液喷淋在秸秆原料上方后,多余的沼液会顺多孔板流入沼液存储罐内,存储罐内的沼液又可通过回流泵加压喷入发酵罐内,完成循环喷淋。通过此工艺反应器中的发酵原料 TS 质量分数约为 15%。发酵过程中产生的沼气用 3 L 铝箔集气袋收集。渗滤床厌氧发酵装置如图 1 所示。

1.4 分析方法

参考文献 [21], pH 值利用便携式 pH 计 (IQ150) 测定,每次测量前用 7.00 和 10.00 的 pH 标准液校准。沼气中 CH_4 及 CO_2 浓度采用 GEM 2000 plus 便携式沼气分析仪测定;TS 采用烘干法测定;VS 采用灼烧称重法测定;COD 采用重铬酸钾比色法测定; $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度采用纳氏试剂光度法测定;产气量采用 100 mL 的针筒抽取测定。



1. 集气袋 biogas storage bag; 2. 发酵罐外壁 fermenter external;
3. 过滤板 filter plates; 4. 恒温水腔 thermostatic water chamber;
5. 发酵罐内腔 fermenter chamber; 6. 喷头 nozzle;
7. 沼液腔 leachate chamber; 8. 回流泵 reflux pump;
9. 沼液存储罐 leachate storage tank

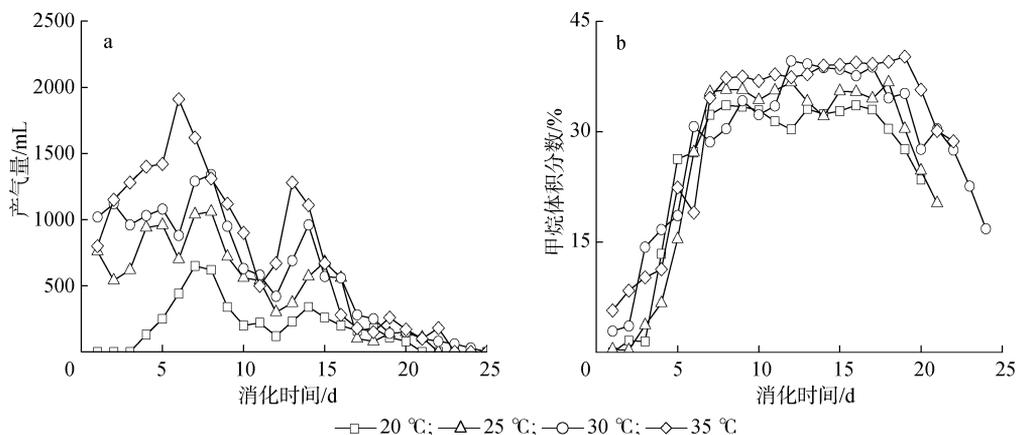
图 1 渗滤床厌氧发酵装置结构图

Fig. 1 Schematic diagram of anaerobic leach bed reactors

2 结果与讨论

2.1 预处理对稻秆发酵产气的影响

2.1.1 空白处理 图 2(a) 为空白处理水稻稻秆的日产气过程。总体上各温度下的日产气量呈现“两峰”趋势。第一峰值出现时间在发酵第 6~8 d, 第二峰值在随后的 6~7 d 出现。温度越高产气峰值越大, 35 °C 发酵时的第一峰值为 1 910 mL, 而 20 °C 仅 650 mL; 同时, 35 °C 样本的峰值出现时间较 20 °C 提前约 1 d。在 25 d 的发酵周期内, 20、25、30 和 35 °C 条件下总产气量分别为 4 530、11 500、15 170 和 18 460 mL。由图 2(b) 可知, 发酵前 5 d 产气中甲烷含量迅速上升, 至发酵第 7 d 后, 各样品系统基本进入稳定产甲烷期, 且随温度上升甲烷体积分数有增加的趋势, 35 °C 时产气高峰期的甲烷体积分数在 36%~39% 之间, 较 20 °C 的 30%~33% 提高近 6 个百分点。



a. 日产气量 daily gas production; b. 甲烷体积分数 volume fraction of methane

图 2 空白预处理稻秆日产气量及甲烷体积分数

Fig. 2 Daily gas production and volume fraction of methane of rice straw after water pretreatment

2.1.2 碱预处理 碱预处理作为秸秆预处理最为高效的方式之一, 是实现秸秆资源高值转化利用的重要途径^[9,22]。微生物的酶反应、膜平衡的维持以及渗透压的调节都需要无机盐, 研究表明发酵液中

NaCl 质量分数为 3% 时,适于厌氧微生物生长,而当 NaCl 质量分数继续增高反而会产生抑制作用,呈现“低促高抑”的结果^[23]。本研究稀碱预处理后发酵液中 Na 质量分数不足 1%,不足以产生盐抑制影响。研究发现经 NaOH 稀碱预处理后的水稻秸秆日产气量与空白样品相似,亦呈“双峰”趋势(见图 3(a)),且峰值时间随温度升高逐渐提前,35 °C 较 20 °C 提前约 2 d,峰值提高 2 倍多。25 d 的发酵过程中,经 NaOH 稀碱预处理的样品在 20、25、30 和 35 °C 条件下累积产气量分别为 5 360、12 060、17 470 和 16 210 mL。由图 3(b)可知,发酵过程中甲烷体积分数也呈现随温度升高而上升的趋势。35 和 30 °C 样品产气稳定期的甲烷体积分数约 35%,而 20 和 25 °C 稳定期的甲烷体积分数约 31%。

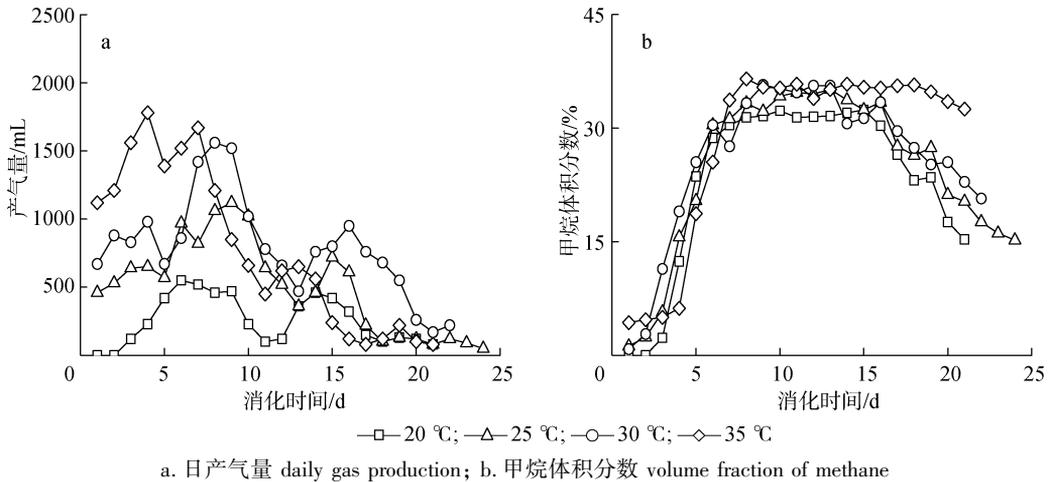


图 3 NaOH 预处理稻秆日产气量及甲烷体积分数

Fig. 3 Daily gas production and volume fraction of methane of rice straw after NaOH pretreatment

2.1.3 生物试剂预处理 生物试剂预处理主要是利用真菌或混合菌体对秸秆中木质素、纤维素等的降解能力达到破坏秸秆纤维结构的目的^[24-25]。由图 4 可知,经生物试剂预处理后的水稻秸秆在 35 °C 发酵温度下,产气峰值明显上升,达到 2 390 mL,较空白样本(1 910 mL)提高 25.1%。峰值出现时间与空白、稀碱预处理样品相差不大,约为发酵后的 5~7 d。发酵结束后,20、25、30 和 35 °C 条件下总产气量分别为 6 320、17 040、20 200 和 21 540 mL。可见 30 °C 以后,产气总量提高并不明显。甲烷体积分数变化趋势与 2.1.1 和 2.1.2 节相似,即 35 和 30 °C 处理样品在产气稳定期的甲烷体积分数较 20 和 25 °C 样品平均高约 5~6 个百分点。

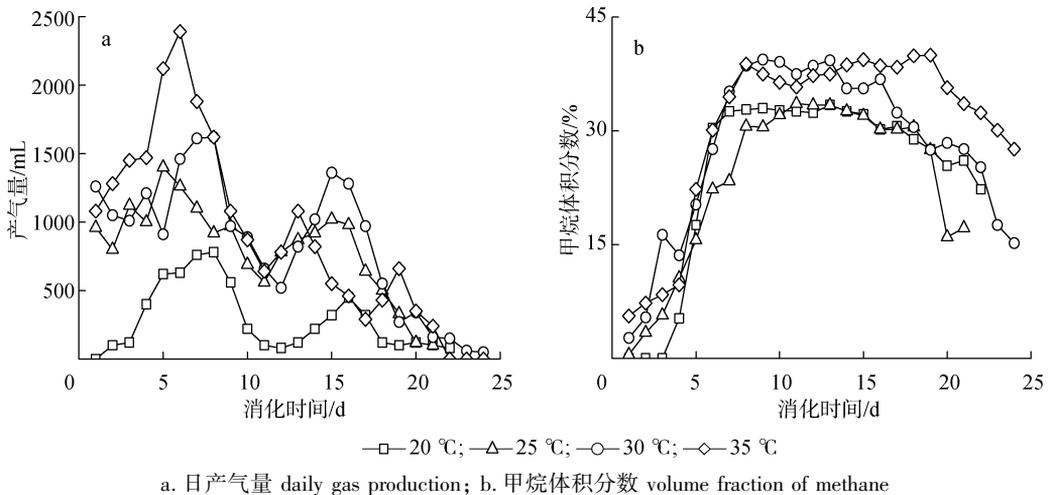
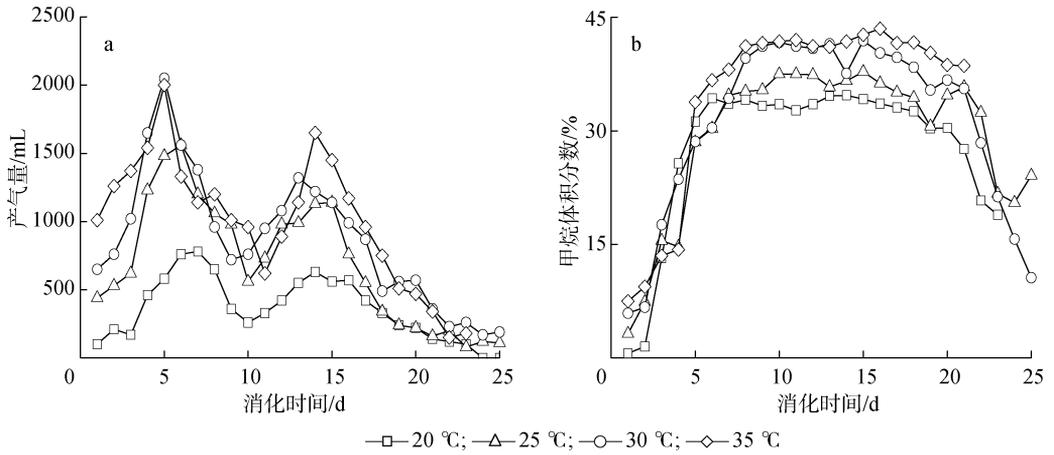


图 4 生物试剂预处理稻秆日产气量及甲烷体积分数

Fig. 4 Daily gas production and volume fraction of methane of rice straw after biological pretreatment

2.1.4 沼液预处理 沼液作为来自厌氧发酵体系中的物质,本身含有大量可降解木质纤维原料的微生物

物,张瑞^[26]从沼液中分离出可降解木质纤维原料的米根霉、白腐菌、黄曲霉和螺孢菌。此外沼液中还含有大量的 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$, 可以作为氮源来调整 C/N 比值, 优化产气条件^[27]。由图 5 可知, 在 35 和 30 °C 发酵条件下, 经沼液预处理后的样品产气出峰时间较空白处理提前 1 ~ 2 d, 这与李伟^[28]的研究结果基本一致。在 25 d 的发酵周期内, 20、25、30 和 35 °C 条件下总产气量分别为 8 960、17 410、21 910 和 23 100 mL。经沼液预处理后的样品, 甲烷体积分数提高较为明显。尤其对于 30 及 35 °C 2 个样品, 在产气稳定期甲烷体积分数达到 41% ~ 43%, 较 20 °C 提高近 10 个百分点, 也较空白、稀碱预处理和生物试剂预处理时 35 °C 处理样品提高近 5 个百分点。由此可见, 沼液预处理可显著提升厌氧发酵产气中的甲烷体积分数。



a. 日产气量 daily gas production; b. 甲烷体积分数 volume fraction of methane

图 5 沼液预处理稻秆日产气量及甲烷体积分数

Fig. 5 Daily gas production and volume fraction of methane of rice straw after biogas slurry pretreatment

2.2 发酵前后指标对比分析

水稻秸秆发酵前后 TS 质量分数、pH 值、COD 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度随预处理方式和发酵温度的变化数据见表 1。

表 1 发酵前后各指标变化

Table 1 The initial and final indexes of rice straw anaerobic fermentation

预处理 pretreatments	发酵温度/°C fermentation temperature	发酵前 initial				发酵后 final			
		TS/%	pH 值 pH value	COD/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$\text{NH}_3\text{-N}/$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	TS/%	pH 值 pH value	COD/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$\text{NH}_3\text{-N}/$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
空白 blank sample	20	14.0	7.15	5680	34.4	13.2	6.62	7870	67.0
	25	15.0	7.26	9630	43.0	13.4	6.57	12450	69.7
	30	14.9	7.56	8450	30.6	14.2	6.84	14100	67.0
	35	14.3	7.43	9480	20.3	13.9	6.74	15720	80.2
NaOH	20	14.1	7.56	5550	37.1	14.2	7.23	7630	53.6
	25	14.8	8.72	6680	48.1	14.7	7.67	10100	80.4
	30	14.6	8.88	8860	44.3	14.1	7.36	13680	95.8
	35	14.4	8.92	9740	37.5	14.0	7.21	14520	110.4
生物试剂 bio-pretreatment	20	15.2	7.23	5640	38.9	14.9	6.77	8360	61.1
	25	14.5	7.43	6790	47.1	14.1	6.98	9230	91.0
	30	14.2	7.51	8670	43.0	13.3	6.77	12430	125.3
	35	13.8	7.46	9520	34.7	13.9	7.01	14310	130.3
沼液 biogas slurry	20	15.2	7.07	6370	46.4	15.0	6.54	9860	76.6
	25	14.7	7.19	7860	42.3	13.7	6.75	10260	111.9
	30	14.2	7.37	9620	38.3	13.6	6.42	16540	135.9
	35	14.0	7.28	10100	50.1	14.0	6.83	17640	178.5

由表1可知,发酵后物料TS质量分数略有下降,但基本保持在13%~15%之间,说明系统属于半固态发酵。发酵后沼液pH值较发酵前有所降低,并稳定在6.40~7.70之间,可见渗滤床反应器运行良好,没有出现酸化现象。各预处理样品发酵产气结束后沼液中COD及NH₃-N质量浓度上升,且随发酵温度升高其变化率有增大的趋势。空白样品20℃时沼液中COD、NH₃-N质量浓度较发酵前分别提高38.6%和94.8%,而在35℃发酵条件下,这一数值提升至65.8%和295.1%。进一步分析表明,累积产气量与温度、发酵后COD及NH₃-N的变化量均呈极显著正相关(Pearson相关系数, $n = 16$),相关系数分别为0.856、0.721和0.871;而与发酵后pH值、TS质量分数无关。在一定范围内发酵温度升高,微生物及酶活性增强,对原料的降解会更彻底,因此沼液中残留COD及NH₃-N质量浓度更大。

2.3 物能转化率的对比分析

2.3.1 预处理方式 预处理不同程度地破坏了秸秆纤维结构,有助于微生物对可发酵物质的利用和酶解的进行,提高秸秆的物能转化速率^[8,29]。由表2可知,同一温度(20~30℃)条件下,经预处理后的水稻秸秆样品的TS产气率均有所提高,20℃恒温发酵条件下,NaOH、生物试剂及沼液预处理样品的TS产气率分别为35.7、42.1、59.7 mL/g,分别较空白样品提高18.2%、39.4%及97.6%。35℃恒温条件下,3种预处理样品的TS产气率分别为108.1、143.6及154.0 mL/g,分别较空白样品提高-12.2%、16.6%、25.1%。从甲烷产量来看,由于整个发酵过程中甲烷体积分数不高,各预处理下产气稳定期保持在31%~42%的水平,因此TS产甲烷率略低,最佳处理样品累积产甲烷量仅7 658 mL,占总产气量的33.2%,VS产甲烷率为55.2 mL/g,较相同温度下的空白处理提高52.5%。对于半固态水稻秸秆发酵系统,沼液为最佳预处理方式,优于生物试剂及NaOH。沼液预处理作为秸秆生物处理的一种方式,不仅有效破坏了秸秆纤维结构,提高了产气率,而且改善了发酵液的C/N比,提升了发酵产气速率^[21,28]。而NaOH预处理后的稻秆,在35℃条件下的VS产甲烷率较空白样品降低28.2%,这与陈广银等^[30]关于NaOH处理对互花米草高温干式厌氧发酵所得结果相似。

表2 不同条件下水稻秸秆产气数据

Table 2 Biogas production of rice straw relative under different conditions

预处理 pretreatments	发酵温度/℃ fermentation temperature	累积产气量/mL cumulative gas production	TS产气率/ (mL·g ⁻¹) biogas yield of TS	累积产甲烷量/mL cumulative methane production	TS产甲烷率/ (mL·g ⁻¹) methane yield of TS	VS产甲烷率/ (mL·g ⁻¹) methane yield of VS
空白 blank sample	20	4530	30.2	1401	9.3	10.1
	25	11500	76.7	2841	18.9	20.5
	30	15170	101.1	3944	26.3	28.4
	35	18460	123.1	5019	33.5	36.2
NaOH	20	5360	35.7	1504	10.0	10.8
	25	12060	80.4	3213	21.4	23.2
	30	17470	116.5	4730	31.5	34.1
	35	16210	108.1	3614	24.1	26.0
生物试剂 bio-pretreatment	20	6320	42.1	1726	11.5	12.4
	25	17040	113.6	3892	25.9	28.0
	30	20200	134.7	5772	38.5	41.6
	35	21540	143.6	5998	40.0	43.2
沼液 biogas slurry	20	8960	59.7	2786	18.6	20.1
	25	17410	116.1	5337	35.6	38.5
	30	21910	146.1	7139	47.6	51.5
	35	23100	154.0	7658	51.1	55.2

2.3.2 温度 半固态发酵温度主要是通过影响厌氧微生物体内酶活性,进而影响其生长速率及对底物的代谢速率。因此,在适当的温度范围内,原料产气率随温度上升而提高。由表2可知,各样品TS产气率及VS产甲烷率基本呈随温度上升而增加的趋势。空白、NaOH、生物试剂及沼液预处理在

35 ℃的TS产气率分别较20 ℃提升307.6%、202.8%、241.1%及157.9%;35 ℃的VS产甲烷率分别较20 ℃提升258.4%、140.7%、248.4%及174.6%。主要是因为温度升高有利于提高纤维素酶、木聚糖酶的活性^[31]。杨先荣等^[32]研究也发现,30 ℃恒温条件下水葫芦渣干发酵VS产气率为87 mL/g,是25 ℃发酵条件下产气率的1.4倍。另一方面,从温度梯度及产气提升率方面来看(见表2),将温度从20 ℃提升至25 ℃,各处理产甲烷率可提高90%以上;而将温度从25 ℃提升至30 ℃,VS产甲烷率可提高30%以上;将温度从30 ℃提升至35 ℃,经生物试剂和沼液预处理后的样品VS产甲烷率提高低于8%。考虑到沼气工程罐体增温及产能收支平衡等因素,温度控制在25 ℃是经济性最好的策略模式。

2.4 产气成本初步分析

秸秆沼气工程是一种低附加值、低收益的环保产业,如果预处理成本过高,或者预处理后产气量的提升不能支付预处理费用,那么对于企业来说将是沉重的负担,可见成本是制约秸秆沼气工程预处理方法推广应用的重要因素。因此,有必要在研究得出的最大干物质产气率和处理成本基础上对水稻秸秆产沼气的可变成本进行初步分析。本研究中化学预处理试剂主要包括生物试剂和NaOH,其市场价格分别为60 000和2 000元/吨,水稻秸秆原料的价格约为250元/吨,据此计算得到不同方法生产沼气所需的可变成本见表3。由表3可知,利用自产沼液预处理水稻秸秆的成本最低,每生产1 m³沼气的可变成本为1.62元;采用生物试剂预处理水稻秸秆,每生产1 m³沼气的可变成本为1.80元,采用1.5% NaOH溶液预处理水稻秸秆的可变成本为3.70元,可变成本最高。比较而言,自产沼液具有较佳的预处理效果和较低的生产成本,更利于工程推广应用。

表3 不同预处理方式下水稻秸秆产沼气的可变成本分析

Table 3 Analysis of variable costs in per unit biogas production of different pretreatment methods

预处理 pretreatments	最大干物质产气率/ (m ³ ·t ⁻¹) mass dry matter gas production rate	单位干物质试剂用量/ (kg·t ⁻¹) unit dry matter reagent dosage	成本 cost/(元·m ⁻³)		
			预处理试剂 pretreatment reagent	原料 raw material	可变 variable
空白 blank sample	123.1			2.03	2.03
NaOH	116.5	90.0	1.55	2.15	3.70
生物试剂 bio-pretreatment	143.6	0.1	0.05	1.75	1.80
沼液 biogas slurry	154.0			1.62	1.62

3 结论

3.1 经NaOH、生物试剂和沼液预处理后的秸秆日产气量呈现“两峰”趋势,发酵过程中产气峰值及甲烷体积分数呈现随温度升高(20~35 ℃)而上升的趋势。

3.2 相同温度(20~30 ℃)条件下,经预处理后的水稻秸秆TS产气率均有所提高,相比NaOH和生物试剂,沼液预处理效果最为明显,35 ℃条件下,TS产气率达到154.0 mL/g,较空白样品提高25.1%;VS产甲烷率达到55.2 mL/g,较空白样品提高52.5%。各预处理样品TS产气率及VS产甲烷率随温度(20~30 ℃)上升而增加,但产气提升率随温度的上升而逐渐下降,温度从20 ℃提升至25 ℃时,各处理产甲烷率可提高90%以上。考虑到沼气工程罐体增温及产能收支平衡等因素,温度控制在25 ℃是经济性最好的策略模式。

3.3 发酵结束后TS质量分数稳定在13%~15%之间,沼液pH值略有降低,但沼液COD及NH₃-N质量浓度增加,且增幅随发酵温度上升而提高。累积产气量与温度、发酵后COD及NH₃-N的变化量均呈极显著正相关。

3.4 从沼气生产可变成本看,沼液预处理秸秆的成本最低,每生产1 m³沼气的可变成本为1.62元,采用1.5% NaOH溶液预处理水稻秸秆成本最高。比较而言,自产沼液预处理水稻秸秆更利于工程推广应用。

参考文献:

[1]程曼,解文艳,杨振兴,等.基于能值理论的山西省农作物秸秆生态足迹研究[J].山西大学学报(自然科学版),2019,42(3):682-

690.

- [2] 李新华, 郭洪海, 朱振林, 等. 不同秸秆还田模式对土壤有机碳及其活性组分的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(9): 130-135.
- [3] 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.
- [4] LI Y Q, ZHANG R H, CHEN C, et al. Biogas production from co-digestion of corn stover and chicken manure under anaerobic wet, semi-solid, and solid state conditions[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 149: 406-412.
- [5] BROWN D, SHI J, LI Y B. Comparison of solid-state to liquid anaerobic digestion of lignocellulosic feedstocks for biogas production[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 124: 379-386.
- [6] 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.
- [7] ZHU J Y, YANG L C, LI Y B. Comparison of premixing methods for solid-state anaerobic digestion of corn stover[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 175: 430-435.
- [8] YANG L, XU F, GE X, et al. Challenges and strategies for solid-state anaerobic digestion of lignocellulosic biomass[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 44: 824-834.
- [9] 刘凯旋, 张傑, 李宏强, 等. 碱浓度和温度对玉米秸秆木聚糖提取率和品质的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(11): 302-308.
- [10] POHL M, HEEG K, MUMME J. Anaerobic digestion of wheat straw-performance of continuous solid-state digestion[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 146: 408-415.
- [11] MONLAU F, ARAKAT A, STEYER J P, et al. Comparison of seven types of thermo-chemical pretreatments on the structural features and anaerobic digestion of sunflower stalks[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 120: 241-247.
- [12] ZHU J Y, WAN C X, LI Y B. Enhanced solid-state anaerobic digestion of corn stover by alkaline pretreatment[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(19): 7523-7528.
- [13] VIVEKANAND V, RYDEN P, HORN S J, et al. Impact of steam explosion on biogas production from rape straw in relation to changes in chemical composition[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 123: 608-615.
- [14] CHANDRA R, TAKEUCHI H, HASEGAWA T, et al. Improving biodegradability and biogas production of wheat straw substrates using sodium hydroxide and hydrothermal pretreatments[J]. *Energy*, 2012, 43(1): 273-282.
- [15] UELLENDAL H, WANG G, MØLLER H B, et al. Energy balance and cost-benefit analysis of biogas production from perennial energy crops pretreated by wet oxidation[J]. *Water Science & Technology*, 2008, 58(9): 1841-1847.
- [16] ZHAO J, ZHENG Y, LI Y B. Fungal pretreatment of yard trimmings for enhancement of methane yield from solid-state anaerobic digestion[J]. *Bioresource Technology*, 2014, 156: 176-181.
- [17] ZHAO J, GE X M, VASCO-CORREA J, et al. Fungal pretreatment of unsterilized yard trimmings for enhanced methane production by solid-state anaerobic digestion[J]. *Bioresource Technology*, 2014, 158: 248-252.
- [18] ZHENG Y, ZHAO J, XU F Q, et al. Pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biogas production[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2014, 42(1): 35-53.
- [19] 陈广银, 毕金华, 杜静, 等. 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(1): 250-257.
- [20] DEGUEURCE A, TOMAS N, LE R S, et al. Biotic and abiotic roles of leachate recirculation in batch mode solid-state anaerobic digestion of cattle manure[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 200: 388-395.
- [21] 李平, 龙翰威, 高立洪, 等. 不同预处理方式下水稻秸秆厌氧消化性能比较[J]. 农业工程学报, 2015, 31(12): 200-205.
- [22] LI C X, ZHANG G Y, ZHANG Z K, et al. Alkaline thermal pretreatment at mild temperatures for biogas production from anaerobic digestion of antibiotic mycelial residue[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 208: 49-57.
- [23] 王攀. 含盐量对餐厨垃圾干式厌氧发酵的影响[J]. 环境污染与防治, 2015, 37(5): 27-31.
- [24] 郭建斌, 郭亚琳, 赵倩, 等. 真菌固态载体预处理对不灭菌玉米秸秆降解的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(5): 197-202.
- [25] 李建, 刘庆玉, 郎咸明, 等. 响应面法优化沼液预处理玉米秸秆条件的研究[J]. 可再生能源, 2016, 34(2): 292-297.
- [26] 张瑞. 秸秆沼气发酵预处理微生物菌剂的制备与应用研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2014.
- [27] 王英琪, 杨宏志, 孟海波, 等. 沼液预处理玉米秸秆产沼气工艺参数优化[J]. 农业工程学报, 2018, 34(23): 247-253.
- [28] 李伟. 堆沤玉米秸秆厌氧干发酵试验与机理研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2012.
- [29] KAUR K, PHUTELA U G. Enhancement of paddy straw digestibility and biogas production by sodium hydroxide-microwave pretreatment[J]. *Renewable Energy*, 2016, 92: 178-184.
- [30] 陈广银, 郑正, 常志州, 等. NaOH 处理对互花米草高温干式厌氧发酵的影响[J]. 环境科学, 2011, 32(7): 2158-2163.
- [31] 牛俊玲, 梁丽珍, 刘蕾, 等. 温度对麦秸混合物料厌氧干发酵中糖类水解酶活性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(10): 1271-1276.
- [32] 杨先荣, 张传, 张亚松, 等. 不同温度对水葫芦渣干发酵产气潜力的影响[J]. 云南师范大学学报(自然科学版), 2015, 35(3): 5-9.