

沼液预处理玉米秸秆与牛粪混合厌氧消化产气性能的研究

魏域芳, 李秀金, 袁海荣

(北京化工大学 资源与环境研究中心, 北京 100029)

摘要: 文章用沼液预处理玉米秸秆后与牛粪按 3:1 混合, 进行中温 ($35^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$) 批式厌氧消化实验, 考察沼液预处理玉米秸秆对混合厌氧消化产气性能的影响。通过全因素实验设计, 对不同沼液浓度 (过 5 目, 10 目, 20 目, 40 目滤网的沼液) 和不同沼液固体含量 (10%, 15%, 20%, 25%) 条件下预处理的玉米秸秆与牛粪混合厌氧消化的产甲烷性能进行分析。结果表明: 不同浓度的沼液在不同的固体浓度下预处理玉米秸秆后与牛粪混合厌氧消化的负荷产甲烷量较未预处理组显著提高, 消化时间明显缩短。当沼液过 5 M 筛网, 预处理固体浓度为 15% 时可获最大负荷产甲烷量 $238.35 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}\text{VS}$, 相比未预处理组 $173.43 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}\text{VS}$ 提高 37.43%, 而厌氧消化周期 T_{90} (26 天) 相对未预处理组 (39 天) 缩短 33.33%。

关键词: 沼液; 厌氧消化; 甲烷; 玉米秸秆; 牛粪

中图分类号: S216.4; X712 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1166(2018)01-0039-08

Anaerobic Co-digestion of Cattle Manure and Corn Stalk Pretreated by Digestate Slurry / WEI Yu-fang, LI Xiu-jin, YUAN Hai-rong / (Center for Resources and Environmental Research, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: Corn stalk was pretreated by different mesh filtered biogas slurry (filtered by 5, 10, 20 and 40 mesh sieve, respectively) with different solid concentration (10%, 15%, 20%, 25%), and then mixed with cattle manure in dry matter ratio of 3:1. The mixture was anaerobically digested under $35^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$. The results showed that all pretreated corn stalk mixed with cattle manure significantly improved the biogas yield comparing with un-pretreated corn stalk mixture, and the digestion time was significantly shorter. The group mixed with corn stalk pretreated with 5 mesh filtered slurry and with solid concentration of 15% obtained the best methane yield of $238.35 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}\text{VS}$, which was 37.43% higher than the un-pretreated group ($173.43 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}\text{VS}$), and the digestion time T_{90} was 26 days comparing with 39 days for the un-pretreated group, which was 33.33% shortened.

Key words: biogas slurry; anaerobic digestion; methane; corn stalk; cattle manure

我国作为农业大国, 秸秆产量逐年增长, 2015 年全国秸秆总产量已超过 8 亿吨^[1]。而如此庞大秸秆的利用率仅有 50%, 其余大部分都被直接露天焚烧, 不仅增加了空气污染, 而且失去了热能利用^[2]。近年来, 将其与粪便混合进行联合厌氧消化, 不仅可以提高利用率, 而且能产生清洁能源, 减少温室气体的排放, 因此成为研究热点。

然而, 秸秆的主要成分纤维素、半纤维素、木质素相互缠绕结合形成“木质素-碳水化合物”联合体 (LCC)^[3]。纤维素和半纤维素被木质素包裹, 使二者与酶和微生物充分接触受到阻碍。因此, 需对秸

秆进行预处理破坏木质纤维素的结构来提高它的生物降解性。常用的预处理方法主要有蒸汽爆破法、酸法 (硫酸、磷酸和硝酸等)、碱法 (NaOH , $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和氨水)、氧化法和离子液体法等^[4-6]。但是, 这些预处理方法中的大多数都因为成本高昂或废弃酸、碱液的产生而未得到大量的工业应用。

而生物预处理相对条件温和, 预处理效果好, 且能耗低, 无污染, 成为研究热点^[7-8]。但菌种 (白腐真菌、复合菌系) 的培养复杂, 预处理时间长, 很难用于工程生产。而厌氧消化产物沼液中含有大量的木质纤维素降解微生物菌种和氮、磷、钾及有机物

收稿日期: 2017-11-23

项目来源: 十二五支撑计划 (2015BAD21B03)

作者简介: 魏域芳 (1991 -) 女, 博士生, 研究方向为生物质能和固体废弃物资源化利用, E-mail: weiyufg@163.com

通信作者: 袁海荣, E-mail: yuanhairong75@163.com

等^[9-10],用作生物预处理菌剂,即可减少环境污染,节省预处理成本,又可提高消化系统缓冲能力,提高厌氧消化效率。Hu^[11]用沼液预处理玉米秸秆,发现沼气产量可提高 57.3%~70.4%,消化时间(T_{80})可缩短 33.3%~41.7%。可见,沼液用于农作物秸秆的预处理时,既能达到生物化学预处理的目的,又能将部分沼液回收利用,避免污染的同时增加了经济效益,对实际工程具有重要的意义。

实验用沼液预处理玉米秸秆后与牛粪混合进行厌氧消化,分析比较甲烷产量和厌氧消化性能,探究沼液生化预处理玉米秸秆的可行性,以期经济高效的环境友好型预处理方法提供理论依据,为厌氧

发酵工程应用提供支撑。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验所用玉米秸秆取自北京延庆区农田,先风干后切成 3~4 cm 的小段,再用带 20 目筛网的粉碎机粉碎干燥保存备用。牛粪取自北京顺义区农户,置于 -20℃ 冰箱保存待用。沼液来自实验室的 CSTR 厌氧消化反应器。接种物为厌氧消化污泥,取自北京小红门污水处理厂,实验原料和接种物基本性质见表 1。

表 1 实验原料和接种物的基本性质

基本参数	玉米秸秆	牛粪	沼液				接种物
			5 目	10 目	20 目	40 目	
TS/%	93.25 ± 0.04	29.14 ± 2.22	3.51 ± 0.11	3.36 ± 0.14	2.63 ± 0.16	2.32 ± 0.12	10.54 ± 0.08
VS/%	87.59 ± 0.13	18.04 ± 0.23	2.41 ± 0.02	2.07 ± 0.05	1.57 ± 0.04	1.34 ± 0.02	5.69 ± 0.07
TC/%	42.00 ± 0.23	30.26 ± 2.67	28.42 ± 0.12	28.08 ± 0.43	28.39 ± 0.56	27.43 ± 0.40	40.38 ± 0.50
TN/%	1.02 ± 0.05	1.96 ± 0.12	2.81 ± 0.03	2.50 ± 0.02	2.74 ± 0.08	2.72 ± 0.04	2.23 ± 0.05
C/N	41.31	15.44	10.11	11.23	10.36	10.08	18.11
纤维素/%	35.04 ± 0.08	15.15 ± 0.78	—	—	—	—	—
半纤维素/%	31.41 ± 0.03	20.14 ± 1.40	—	—	—	—	—
木质素/%	14.49 ± 1.47	6.49 ± 0.15	—	—	—	—	—

1.2 实验装置

实验采用厌氧消化批式实验装置,主要由 3 部分组成:1 L 蓝盖瓶,1 L 广口瓶和 1 L 烧杯。它们之间由玻璃管、乳胶管连接。蓝盖瓶作为厌氧消化反应器,工作体积为 0.8 L,广口瓶上标有刻度,通过排水法记录日产气量。用 35℃ ± 1℃ 的水浴箱给蓝盖瓶加热保证实验为中温厌氧消化。

1.3 实验方法

实验以沼液浓度和预处理过程中秸秆和沼液混合后的固体浓度为实验因子,设定沼液分别为过 5 目、10 目、20 目和 40 目滤网的出料,固体浓度分别为 10%、15%、20% 和 25%。上料负荷为 65 gTS · L⁻¹,原料混合比为(秸秆:牛粪)3:1,预处理时间 3 天,污泥接种量为 15 gTS · L⁻¹。同时设置未预处理玉米秸秆和牛粪混合组,只添加接种物和只添加沼液的空白组。每组实验设 3 个平行,设计如表 2 所示。全因子实验设计及数据分析通过 Minitab[®] 16.2.3 软件进行处理,采用 OriginPro 8.0 软件进行图像绘制。

1.4 分析方法

总固体含量(TS)、挥发性固体含量(VS)、COD 的测量采用国标法。气体成分通过配有热导检测器(TCD)的气相色谱仪检测。用岛津 GC-2014 气相色谱仪检测挥发性脂肪酸(VFA)含量。纤维素、半纤维素、木质素的含量通过纤维素仪测定。总碱度采用溴甲酚绿—甲基红指示剂滴定。

2 结果与讨论

2.1 日产甲烷量

经各浓度沼液(5 M、10 M、20 M、40 M)按不同固体浓度(10%、15%、20%、25%)预处理及未预处理的玉米秸秆与牛粪混合厌氧消化的日产甲烷量变化如图 1~图 4 所示。4 种固体浓度下各浓度沼液预处理组均呈现相似的变化规律,预处理组经过 2~3 个产气高峰,且主要产气都集中在前 20 天,而未预处理组先后经过 3 个明显的产气高峰,主要产气在后 35 天。各预处理组均在 1~5 天达到第 1 个

表2 Minitab 生成的沼液浓度和总固体浓度的全因子实验设计表

标准序	运行序	点类型	区组	固体浓度	过筛网目数	负荷产甲烷率 ($\text{mL} \cdot \text{g}^{-1} \text{VS}$)
10	1	1	1	0.20	10	209.23
16	2	1	1	0.25	40	199.51
40	3	1	1	0.15	40	216.85
37	4	1	1	0.15	5	248.27
5	5	1	1	0.15	5	229.84
12	6	1	1	0.20	40	190.73
33	7	1	1	0.10	5	220.32
7	8	1	1	0.15	20	218.42
39	9	1	1	0.15	20	221.64
45	10	1	1	0.25	5	199.13
15	11	1	1	0.25	20	217.22
36	12	1	1	0.10	40	231.33
48	13	1	1	0.25	40	196.90
35	14	1	1	0.10	20	216.16
19	15	1	1	0.10	20	217.91
2	16	1	1	0.10	10	207.84
4	17	1	1	0.10	40	214.46
8	18	1	1	0.15	40	207.36
24	19	1	1	0.15	40	191.76
32	20	1	1	0.25	40	195.95
20	21	1	1	0.10	40	196.68
44	22	1	1	0.20	40	216.09
22	23	1	1	0.15	10	232.24
30	24	1	1	0.25	10	213.15
43	25	1	1	0.20	20	219.81
1	26	1	1	0.10	5	228.44
11	27	1	1	0.20	20	228.01
46	28	1	1	0.25	10	213.25
27	29	1	1	0.20	20	222.53
42	30	1	1	0.20	10	216.78
6	31	1	1	0.15	10	222.12
29	32	1	1	0.25	5	216.27
28	33	1	1	0.20	40	212.51
23	34	1	1	0.15	20	192.26
18	35	1	1	0.10	10	214.84
14	36	1	1	0.25	10	211.86
31	37	1	1	0.25	20	193.95
3	38	1	1	0.10	20	218.10
41	39	1	1	0.20	5	151.60
25	40	1	1	0.20	5	198.99
26	41	1	1	0.20	10	213.61
47	42	1	1	0.25	20	202.52
9	43	1	1	0.20	5	209.51
34	44	1	1	0.10	10	210.24
38	45	1	1	0.15	10	234.28
21	46	1	1	0.15	5	241.03
13	47	1	1	0.25	5	215.54
17	48	1	1	0.10	5	211.41

产气高峰,随后甲烷产量下降后又迅速升高,在6~12天内达到第2、3个产气高峰。而未预处理组在第1天就达到第1个产甲烷高峰,143.48 mL,随后又迅速下降至甲烷产量几乎为0,表明进入了酸化阶段,甲烷菌的活性受到了抑制。通过添加适

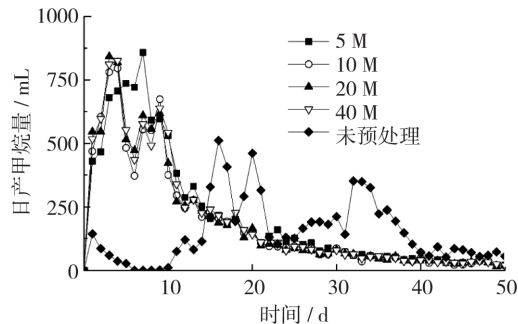


图1 日产甲烷量(10%固体浓度)

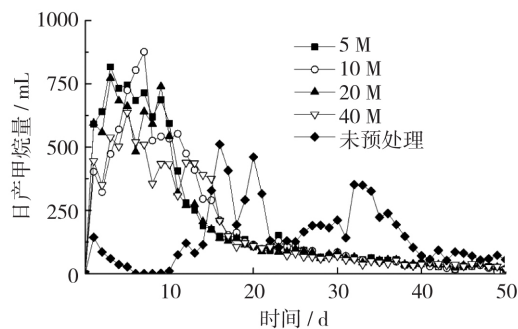


图2 日产甲烷量(15%固体浓度)

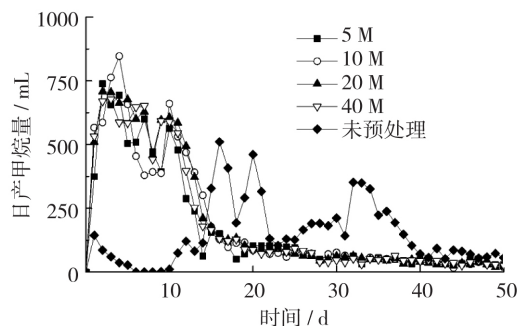


图3 日产甲烷量(20%固体浓度)

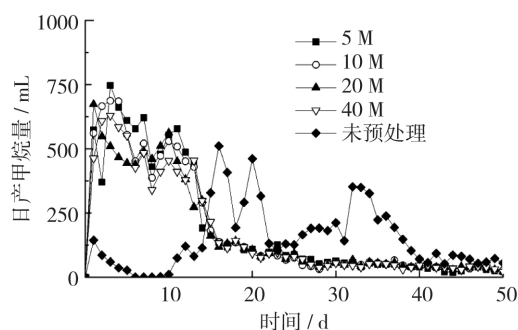


图4 日产甲烷量(25%固体浓度)

量 NaOH 溶液调节 pH 值使甲烷菌活性恢复,在第9天甲烷产量逐渐升高。可见沼液预处理能有效缓冲调节发酵前期发酵液酸度,明显缩短厌氧消化时间。

2.2 累计甲烷产量

图5~图8所示为50天厌氧消化过程中,经各浓度沼液(5 M、10 M、20 M、40 M)按不同固体浓度(10%、15%、20%、25%)预处理及未预处理玉米秸秆与牛粪混合厌氧消化的累计产甲烷量。从图5中可看出,当固体浓度为10%时,5 M、10 M、20 M、40 M沼液预处理条件下的最终甲烷累计产量分别为10251.54、9438.57、9708.70和9954.31 mL,相对未预处理组7507.81 mL分别获得的36.55%、25.72%、29.31%和32.58%的极显著提升($p < 0.01$)。可见,在固体浓度为10%时,5 M沼液预处理秸秆与牛粪混合消化产甲烷量最高。

从图6、图7、图8分别可看出每组的最大累计甲烷产量分别在5 M、20 M和5 M条件下产生,分别为10644.82、10060.54、9642.23 mL,比未预处理分别提高41.78%、34.00%、28.43%。由此得出最高累计甲烷产量为10644.82 mL,最佳沼液浓度和固体浓度组合是5 M、15% ($p < 0.05$)。

2.3 负荷产甲烷率

不同浓度的沼液与玉米秸秆在不同固体浓度预处理后与牛粪混合厌氧消化的负荷产甲烷率如表2

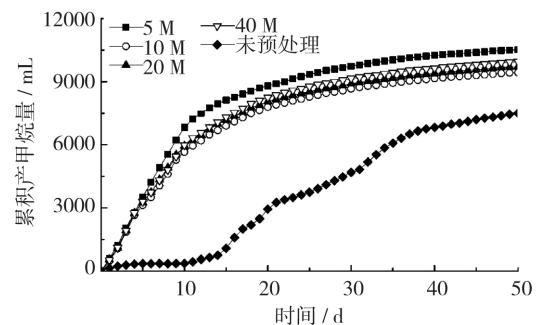


图5 累积产甲烷量(10%固体浓度)

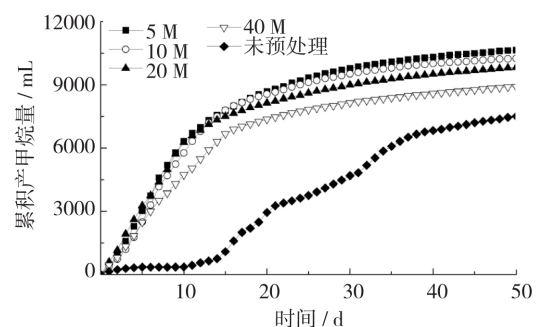


图6 累积产甲烷量(15%固体浓度)

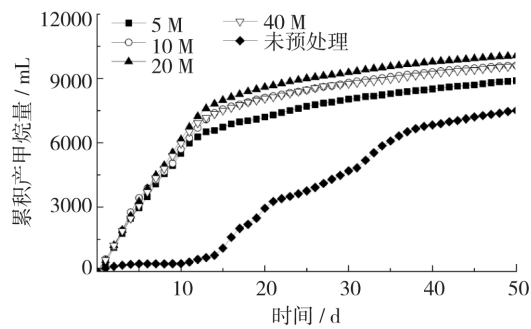


图7 累积产甲烷量(20%固体浓度)

所示。当沼液过 5 M 筛网,固体浓度为 15% 时可获得最大负荷产甲烷率 $238.35 \text{ mL} \cdot \text{gVS}^{-1}$ 。在一定程度范围内提高固体含量和沼液浓度都可相应地提高负荷产甲烷率。

由负荷产甲烷率的方差分析结果表 3 可见,

表3 负荷产甲烷率的方差分析结果

项 目	自由度	Seq. ss	Adj. SS	Adj. MS	F	p
固体含量/%	3	1812.4	1807.6	602.5	3.86	0.019 (<0.05)
过筛网目数/M	3	855.1	778.7	259.6	1.66	0.196 (>0.05)
固体含量/% *	9	4133.2	4133.2	459.2	2.94	0.013 (<0.05)
误差	30	4686.1	4686.1	156.2	—	—
合计	45	11486.9	—	—	—	—

注: * 过筛网目数(M)

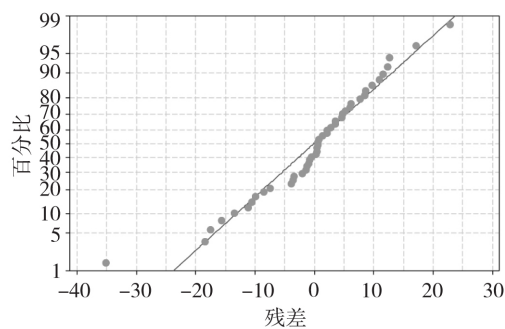


图9 负荷产甲烷率残差的正态概率图

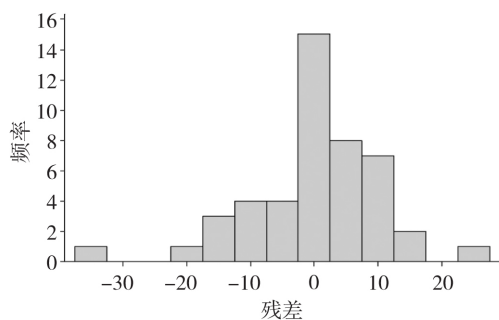


图10 负荷产甲烷率残差的直方图

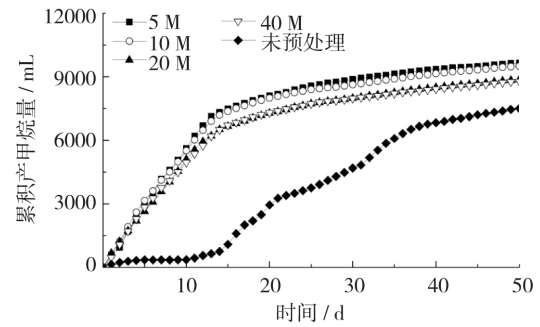


图8 累积产甲烷量(25%固体浓度)

固体含量的 p 值为 0.019 ,小于 0.05 ,是显著影响因子,而过筛网目数的 p 值为 0.196 ,大于 0.05 ,不是显著影响因子。固体含量与过筛网目数交互作用的 p 值为 0.013 ,小于 0.05 ,表明两因子之间存在交互作用,且对负荷产甲烷率具有显著性影响。

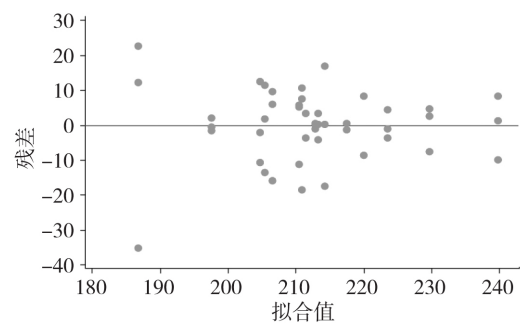


图11 负荷产甲烷率的残差与拟合值图

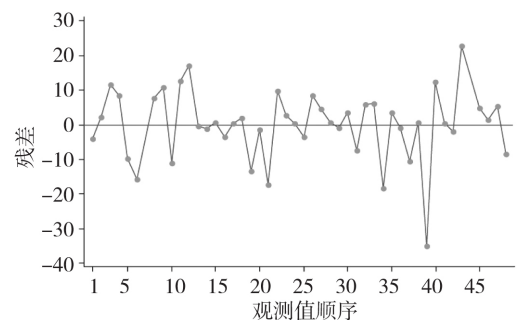


图12 负荷产甲烷率的残差与观测值顺序图

由图9 负荷产甲烷率残差的正态概率图可以看出散点呈现直线状分布,说明48个残差来自同一正态分布。负荷产甲烷率残差与频率直方图显示出两端低、中间高,左右基本对称,可以认为是正常型的稳定状态(见图10)。同样,图11 拟合值与残差关系表明,不存在异方差、缺项或异常值,所有残差随机分布在水平值0附近。从残差-观测值顺序图可看出,残差随机分布在0附近,且无证据表明误差项彼此相关(见图12)。

图13 为不同浓度的沼液与玉米秸秆在不同固体浓度预处理后与牛粪混合厌氧消化的负荷产甲烷率主效应图。由图可见,随着固体含量的增大负荷产甲烷率先上升后下降。固体含量从10%增加到15%时,负荷产甲烷率均值从215.72 mL 提高到221.34 mL,相对增加了2.61%;从15%增加到20%时,负荷产甲烷率均值却从221.34 mL 降低到了207.45 mL,降低6.28%;从20%增加到25%时,负荷产甲烷率均值从207.45 降低到了206.27,降低0.57%。负荷甲烷产率的均值在沼液所过筛网从5 M 到10 M 时呈现小幅提高,增幅为1.70%。继续减小浓度到过20 M 时,负荷甲烷产率的均值从217.20 mL 缓慢降低至214.05 mL,降低1.45%,当沼液过40 M 筛网时,负荷产甲烷率迅速降低至205.85 mL,降幅为3.83%。可见,沼液浓度和固体含量对负荷产甲烷率均有显著影响。由负荷产甲烷率交互作用图14 可以看出沼液浓度和固体含量之间存在交互作用,且交互作用在沼液过5 M ~10 M 范围内更显著。

2.4 消化液性质分析

表4 所示为厌氧消化结束后 TS 和 VS 产甲烷

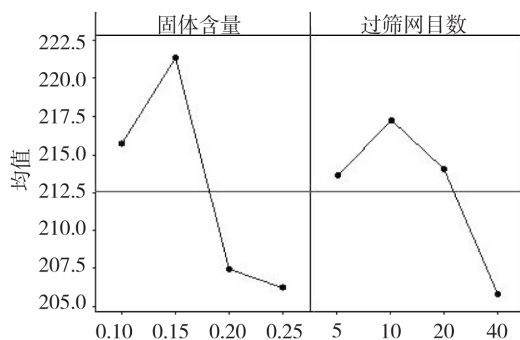


图13 负荷产甲烷率主效应图

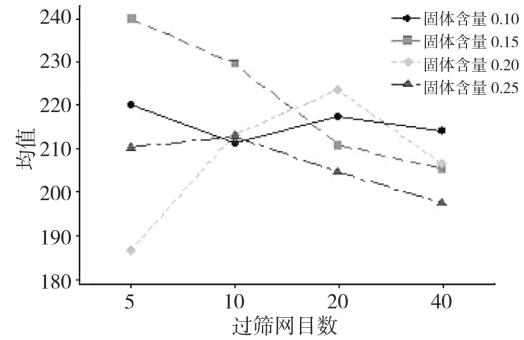


图14 负荷产甲烷率交互效应图

量, T_{90} 、pH 值、氨氮、碱度及 VFA 含量等厌氧消化性质。沼液预处理实验组 VS 产甲烷率为 196.43 ~ 238.35 mL · g⁻¹ VS, 比未预处理组 (173.43 mL · g⁻¹ VS) 提高 13.26% ~ 37.43%, T_{90} 为 26 ~ 30 时, 比未预处理组 (39) 缩短 23.08% ~ 33.33%。其中, 当预处理沼液过 5 M 筛网, 固体浓度为 15% 时, 厌氧消化 VS 产甲烷率最高 (238.35 mL · g⁻¹ VS), T_{90} 最短 (26), 且其 TS 和 VS 去除率分别为 43.80%、53.17%, 明显高于未预处理组 (42.88% 和 50.34%)。可见, 沼液预处理明显缩短了厌氧消化时间, 提高了负荷产甲烷率。作为评价批式厌氧消化性能及微生物新陈代谢状态的重要指标, 当出料液 VFA 含量高于 5600 mg · L⁻¹, pH 值 < 6.8 时, 系统的产甲烷过程将会受到抑制^[12-13]。由表4 可见, 本实验各组出料 VFA、pH 值均在甲烷菌生长的适宜范围内。同时, 各组氨氮和碱度也均在厌氧菌生长的最适范围 (氨氮 < 2000 mg · L⁻¹, 碱度 > 4000 mg · L⁻¹)^[14-15], 能有效提高消化系统的缓冲能力, 维持系统的稳定性。

3 结论

不同浓度的沼液在不同的固体浓度下预处理玉米秸秆后与牛粪联合厌氧消化负荷产甲烷量较未预处理组显著提高, 消化时间明显缩短。

(1) 沼液过 5 M 筛网, 预处理固体浓度为 15% 时可获最大负荷产甲烷量 238.35 mL · g⁻¹ VS, 相比未预处理组 173.43 mL · g⁻¹ VS 提高 37.43%。

(2) 沼液预处理各组 T_{90} 为 26 ~ 30 时, 比未预处理组 (39) 缩短 23.08% ~ 33.33%。

表4 消化液性质

指 标	TS 产甲烷量 ($\text{mL} \cdot \text{g}^{-1} \text{TS}$)	VS 产甲烷量 ($\text{mL} \cdot \text{g}^{-1} \text{VS}$)	T_{90}	TS 去除率 %	VS 去除率 %	pH 值	氨氮 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	碱度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	VFA ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
10% 5 M	202.20	235.44	28 ± 2	39.98	50.02	7.29	617.40	6162.50	26.81
10% 10 M	181.51	211.34	29 ± 1	42.00	51.64	7.38	630.00	5430.00	17.74
10% 20 M	186.71	217.39	28 ± 1	41.36	51.53	7.38	527.80	6133.33	15.73
10% 40 M	191.43	222.89	28 ± 1	39.14	49.28	7.38	623.00	6175.00	11.95
15% 5 M	204.71	238.35	26 ± 1	43.80	53.17	7.28	512.40	4747.50	16.13
15% 10 M	197.14	229.55	26 ± 1	45.99	54.57	7.30	550.67	5068.33	16.53
15% 20 M	188.97	220.03	26 ± 1	40.80	51.73	7.25	576.80	4750.00	10.21
15% 40 M	171.39	199.56	28 ± 1	42.36	52.02	7.31	487.20	4500.00	11.69
20% 5 M	170.90	198.99	29 ± 1	42.62	52.44	7.21	448.00	4125.00	13.81
20% 10 M	184.82	215.19	27 ± 2	43.77	54.02	7.21	478.80	4140.00	14.55
20% 20 M	193.47	225.27	26 ± 2	44.79	54.46	7.28	484.40	4210.00	14.72
20% 40 M	184.05	214.30	28 ± 2	41.90	51.48	7.24	501.20	4257.50	11.70
25% 5 M	185.43	215.90	27 ± 1	43.28	53.20	7.23	476.00	3970.00	13.85
25% 10 M	182.72	212.75	28 ± 1	42.93	53.86	7.22	437.27	3976.67	12.64
25% 20 M	170.25	198.23	30 ± 1	44.50	53.69	7.16	411.60	3727.50	11.73
25% 40 M	168.70	196.43	29 ± 1	40.08	51.20	7.24	511.00	4162.50	13.49
未预处理	144.38	173.43	39 ± 1	42.88	50.34	7.34	477.40	3900.00	46.19

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 2015 中国统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2016.
- [2] Hu Y, Shen F, Yuan H R, et al. Influence of recirculation of liquid fraction of the digestate (LFD) on maize stover anaerobic digestion [J]. Biosystems Engineering, 2014, 127, 189 – 196.
- [3] 赵 兰, 冷云伟, 任恒星, 等. 纤维素原料厌氧产甲烷气的研究进展 [J]. 安徽农学通报, 2010, 16(17): 56 – 58.
- [4] 席国赟, 张璐鑫, 王晓昌. 木质纤维素厌氧消化产甲烷的化学预处理方法研究进展 [J]. 纤维素科学与技术, 2017, 25(2): 77 – 84.
- [5] Meena K, Virendra K, Virendra K V, et al. Analysis of different techniques used for improvement of biomethanation process: A review [J]. Fuel, 2013, 106: 1 – 9.
- [6] Monlau F, Kaparaju P, Trably E, et al. Alkaline pre-treatment to enhance one-stage CH_4 and two-stage H_2 / CH_4 Production from sunflower stalks: Mass, energy and economical balances [J]. Chemical Engineering Journal, 2015, 260: 377 – 385.
- [7] Yuan X F, Cao Y Z, Li J J, et al. Effect of pretreatment by a microbial consortium on methane production of waste paper and cardboard [J]. Bioresource Technology, 2012, 118: 218 – 288.
- [8] Zhong W Z, Zhang Z Z, Luo Y J, et al. Effect of biological pretreatment in enhancing corn straw biogas production [J]. Bioresource Technology, 2011, 102: 11177 – 11182.
- [9] Rico C, Rico J L, Tejero I, et al. Anaerobic digestion of the liquid fraction of dairy manure in pilot plant for biogas production: residual methane yield of digestate. Waste Management, 2011, 31(9 – 10), 2167 – 2173.

- [10] 楚莉莉,李轶冰,冯永忠,等. 沼液预处理对小麦秸秆厌氧发酵产气特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(1): 247–251.
- [11] Hu Y, Pang Y Z, Yuan H R, et al. Promoting anaerobic biogasification of corn stover through biological pretreatment by liquid fraction of digestate[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 175: 167–173.
- [12] Izumi K, Okishio Y, Nagao N, et al. Effects of particle size on anaerobic digestion of food waste[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2010, 64(7): 601–608.
- [13] Ye J Q, Li D, Sun Y M, et al. Improved biogas production from rice straw by co-digestion with kitchen waste and pig manure [J]. *Waste Management*, 2013, 33, 2653–2658.
- [14] 蒋建国,吴时要,隋继超,等. 易腐有机垃圾单级高固体厌氧消化实验研究[J]. 环境科学, 2008, 4(29): 1104–1106.
- [15] Zhai N N, Zhang T, Yin D X, et al. Effect of initial pH on anaerobic co-digestion of kitchen waste and cow manure. *Waste Management*, 2015, 38, 126–131.