

网络出版时间:2012-04-16 15:42

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20120416.1542.032.html>

不同预处理方法对麦秆厌氧消化产气特性的影响

季艳敏^{1a,2}, 杨改河^{1b,2}, 尹冬雪^{1a,2}, 刘娟娟^{1b,2}

(1 西北农林科技大学 a 林学院, b 农学院, 陕西 杨凌 712100; 2 陕西省循环农业工程技术研究中心, 陕西 杨凌 712100)

[摘 要] **【目的】**探索不同的生物和化学预处理方法对麦秆厌氧发酵产气的影响, 为提高麦秆能源转化率提供依据。**【方法】**采用自行设计的可控恒温发酵装置, 以经生物(复合菌剂、糖醇酶、沼液)和化学(NaOH(添加量为 60 g/kg)和氨水(20 mL/L))方法预处理过的麦秆和未处理麦秆(CK)为发酵原料, 以常温厌氧发酵池的底物为接种物, 在总固体(TS)质量分数为 8% 的条件下进行批次厌氧发酵(35 °C), 分析复合菌剂、糖醇酶、沼液、NaOH 和氨水对麦秆厌氧发酵产气量、甲烷含量和 pH 值变化的影响, 并对其产气指标(干物质产气率、挥发性干物质(VS)产气率和甲烷平均含量)进行比较。**【结果】**各预处理方法均可明显提高麦秆的日产气量峰值, 并可提早产气高峰的出现时间。各处理总产气量的高低顺序为: NaOH > 复合菌剂 > 糖醇酶 > 沼液 > 氨水 > CK; 与 CK 相比, 不同生物和化学预处理方法可提高麦秆产气量 5.85%~48.16%, 提高甲烷平均含量 15.06%~39.47%。经 NaOH 预处理的麦秆发酵后总产气量为 12 620 mL, 比 CK 提高了 48.16%; 甲烷平均含量为 46.8%, 比 CK 高出 39.47%。随着发酵时间的延长, 所有处理 pH 均呈先下降后升高直至趋于稳定的变化趋势。经 NaOH 处理的麦秆发酵后 TS、VS 产气率显著高于其他处理($P < 0.05$)。**【结论】**用 NaOH(添加量为 60 g/kg)对麦秆进行预处理后在 35 °C 下厌氧发酵, 可以有效提高麦秆的产气量。

[关键词] 预处理; 麦秆; 厌氧消化; 甲烷

[中图分类号] X712.05

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2012)05-0149-08

Effect of different pretreatments on biogas production characteristics of anaerobic fermentation of wheat straw

Ji Yan-min^{1a,2}, Yang Gai-he^{1b,2}, Yin Dong-xue^{1a,2}, Liu Juan-juan^{1b,2}

(1 a College of Forestry, b College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 Research Center of Agricultural Engineering and Technology of Shaanxi Province, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: **【Objective】**The study was to explore the effect of different biological and chemical pretreatments on biogas production of wheat straw by anaerobic fermentation to find a more effective pretreatment to improve energy conversion of straw. **【Method】**A batch of experiments under the condition of 8% mass fraction of total solid were conducted in a self-manufactured anaerobic fermentation reactor, with wheat straw pretreated by biological methods (complex microbial agent, sugar fermentation enzyme and biogas slurry), and chemical methods (NaOH (amount: 60 g/kg), and $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (20 mL/L)) as fermentation materials, and the untreated as control (CK), and the substrate of constant temperature fermentation pool as inoculation substance. The biogas production rate, biogas yield, and the change of methane content and pH value were determined at 35 °C and compared the biogas production index at different pretreatments,

* **[收稿日期]** 2011-11-03

[基金项目] 陕西省“13115”重大专项(2010ZDKG-06); 农业部农村能源综合建设项目(2011-65); “十二五”国家科技支撑计划项目“混合原料高产生物燃气技术集成示范”(2011BAD15B03)

[作者简介] 季艳敏(1987—), 女, 山东菏泽人, 在读硕士, 主要从事生物质能和循环农业技术研究。

E-mail: jym1987@nwsuaf.edu.cn

[通信作者] 杨改河(1957—), 男, 陕西耀县人, 教授, 博士生导师, 主要从事生态农业与循环农业技术研究。

E-mail: ygh@nwsuaf.edu.cn

which included total solid (TS) gas yield, volatile solid (VS) gas yield and average methane content. 【Result】 Every pretreatment could increase the gas production peak obviously, and shorten the time of peak appearance. The results showed that the biogas yield after different biological and chemical pretreatments was raised by 5.85%—48.16%, NaOH > complex microbial agent > sugar fermentation enzyme > biogas slurry > ammonia > CK, the average content of methane improved by 15.06%—39.47% after different pretreatments. The total biogas production of wheat straw under NaOH pretreatment was 12 620 mL, which was 48.16%, 39.47% higher than CK. In addition, the average methane content was 46.8% higher than CK. The pH value of all pretreatment decreased in initial stage, and increased in the next stage, then stabilized with anaerobic digestion carried on. The TS and VS gas yield of NaOH pretreatment were significantly higher than other pretreatments ($P < 0.05$). 【Conclusion】 The method of wheat straw pretreated by NaOH (amount: 60 g/kg) can improve biogas production effectively at 35 °C.

Key words: pretreatment; wheat straw; anaerobic fermentation; methane

小麦是我国北方主要的粮食作物,我国每年产生的小麦秸秆超过 1 亿 t^[1]。除部分秸秆用于造纸和还田外,另有大量秸秆遭到田间焚烧,对环境造成污染。而将麦秆用于厌氧发酵产沼气,可以有效提高麦秆的利用率,减少生物资源浪费。但是,麦秆中的木质纤维素含量较高,厌氧消化产气率低、经济性差。通过预处理破坏麦秆的物理化学结构,将其降解成简单化合物,是提高厌氧消化效率和产气量的简单而有效的手段。常见的预处理方法有粉碎、汽爆、真菌处理、氨化处理、尿素处理和酸碱处理^[2-5]等。目前, Yang 等^[3]分别用 NaOH 和氨水对玉米秸秆进行预处理,发现用 NaOH 预处理的玉米秸秆产气效果较好。康佳丽等^[1]研究发现,经 NaOH (添加量为 60 g/kg) 处理后的麦秆在 65 g/L 负荷率下的单位干物质产气量最高,比对照提高了 49.9%,厌氧消化时间缩短了 19 d。邵艳秋等^[6]用 NaOH (添加量为 40 g/kg) 预处理花生壳进行厌氧发酵制取沼气,结果显示,不仅启动速度快,而且产气潜力也大,比未处理的试验组高出 48.91%。这些研究均表明, NaOH、氨水预处理对提高秸秆厌氧消化产气率具有明显的效果。万楚筠等^[7]采用混合菌剂对油菜秸秆进行预处理,发现累积产气量比未处理组提高了 17.8%。楚莉莉等^[8]研究发现,用沼液预处理可以提早小麦秸秆厌氧消化产气高峰出现的时间。但以上研究仅讨论 1 种预处理方式,而对多种预处理方式厌氧发酵产沼气效果进行比较的研究较为少见。

本试验在前人研究的基础上,比较生物预处理(复合菌剂、糖醇酶、沼液)方法以及化学预处理(NaOH、氨水)方法对麦秆厌氧发酵特性的影响,以期选择高效的环境友好型麦秆预处理方法提供理

论支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

风干的麦秆取自陕西省循环农业工程技术研究中心试验田,粉碎至长度为 2~3 cm 备用。沼液取自陕西杨凌示范区崔西沟农户家正常厌氧发酵的沼气池。处理采用的菌剂为由陕西省循环农业工程技术研究中心研制的复合菌剂,酶制剂为陕西省酶工程中心研制的糖醇酶, NaOH 和氨水为分析纯试剂。

1.2 试验设计

1.2.1 生物预处理试验 分别称取 4 g (秸秆质量的 0.8%) 复合菌剂和糖醇酶于烧杯内,加入 1 500 mL 蒸馏水,放入恒温培养箱内于 37 °C 活化 24 h。24 h 后将活化好的复合菌剂和糖醇酶分别倒进已加入 500 g 麦秆的塑料桶中;称取 200 g 沼液倒进已加入 500 g 麦秆的塑料桶中,然后加入 1 500 mL 蒸馏水,充分搅拌均匀后密封,7 d 后用于配制发酵原料。

1.2.2 化学预处理试验 称取一定量的固体 NaOH 均匀撒进已加入麦秆的塑料桶中,其中 NaOH 添加量为 60 g/kg,加入 1 500 mL 水;配制 20 mL/L 氨水 1 500 mL,倒进已加有 500 g 麦秆的塑料桶中,搅拌均匀后密封,7 d 后用于配制发酵原料。

按照总固体(TS)质量分数 8% 的标准,将经预处理的麦秆发酵液配制成发酵料液,在 1 000 mL 三角瓶中分别装入均匀的发料液 500 g 和沼液 200 g,以未处理的粉碎后的麦秆为对照(CK),发酵温度设为 35 °C,每处理重复 3 次。发酵周期 45 d,每 6 d 取样 1 次,并人工搅拌料液。产气量从气体可以点

燃(蓝色火焰)时开始统计。试验采用批式发酵进行,采用 1 000 mL 具塞三角瓶为发酵瓶和集气瓶,放于可控温的水槽内。采用地热丝进行加热,智能温度控制仪(PC-1000)控制发酵温度(图 1)。

1.3 测定项目及方法

秸秆的 TS 含量测定在(105±5)℃的烘箱中烘至质量恒定后进行,挥发性干物质(VS)含量测定在

(560±2)℃马弗炉中烘 2 h 后进行^[9]。发酵开始后,用排水集气法测定气体产量,每天定时测量。计算 TS 和 VS 的产气率,公式^[10]为:

TS 产气率=产气量/TS,

VS 产气率=产气量/VS。

每 6 d 用 Gasboard23200P 沼气分析仪测定气体中的甲烷含量和发酵料液的 pH 值。

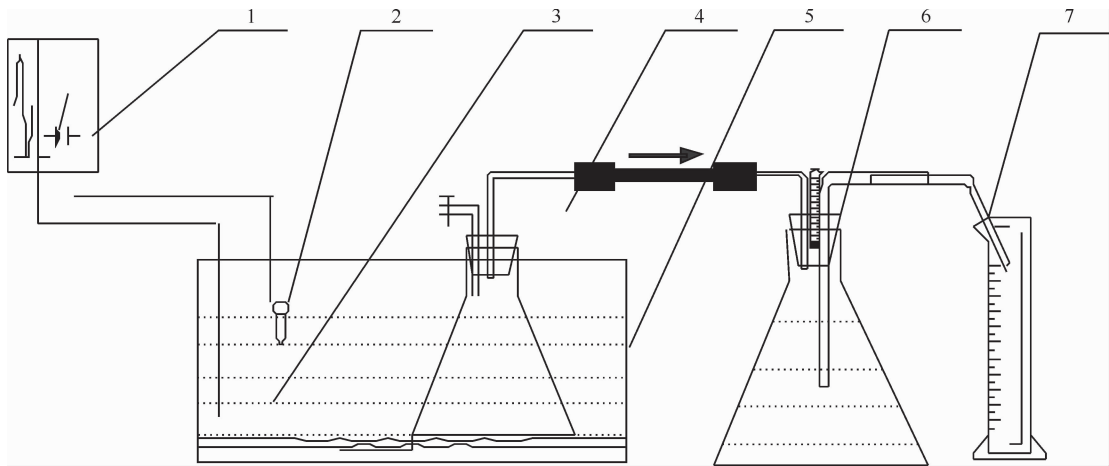


图 1 可控恒温厌氧发酵装置示意图

1. 温控箱;2. 温度传感器;3. 加热丝;4. 发酵罐;5. 恒温水槽;6. 集气瓶;7. 量筒

Fig.1 Controllable and constant temperature anaerobic fermentation device

1. Temperature controlling box;2. Temperature sensor;3. Heating wire;4. Fermentor;

5. Water thermostat system;6. Biogas-collecting bottle;7. Graduated flask

2 结果与分析

2.1 不同预处理方法对麦秆厌氧发酵产气效果的影响

图 2 表明,不同预处理方法对麦秆厌氧消化产气效果的影响明显不同。由图 2A 可知,在整个厌氧发酵过程中,所有处理的日产气量均有 1 个明显的峰值,而且经过预处理的麦秆峰值明显高于 CK。经复合菌剂、糖醇酶、沼液、NaOH 和氨水预处理后,麦秆日产气量峰值分别出现于第 7,9,10,8,10 天;分别为 610,725,520,690,560 mL/d;CK 日产气量峰值出现在第 13 天,为 390 mL/d。经过化学和生物方法预处理后,麦秆日产气量峰值比 CK 提前 3~6 d,日产气量峰值提高了 33.3%~85.9%。由图 2B 可见,所有处理的累积产气量变化趋势基本一致,均表现为快速增加后逐渐趋于稳定。但是复合菌剂、糖醇酶和 NaOH 处理的累积产气量明显高于其他 3 种处理,其中在发酵前期(0~14 d)糖醇酶处理的累积产气量明显高于复合菌剂和 NaOH 处理;发酵进行至 14 d 时,NaOH 处理的累积产气量与糖醇酶处理持平,20 d 后逐渐超过糖醇酶处理。所有

处理的产气期集中出现在 6~28 d,28 d 后产气速率明显下降,前 29 d 的累积产气量占总产气量的 75.4%~88.5%。可见,预处理可以明显提高麦秆的日产气量峰值,并使产气高峰提前出现。

45 d 后,统计不同处理的总产气量,结果见图 3。由图 3 可以看出,经复合菌剂、糖醇酶、沼液、NaOH 和氨水预处理后,麦秆的总产气量均明显提高,其总产气量分别为 12 288,12 057,11 056,12 620 和 9 016 mL,分别比 CK 提高了 44.25%,41.55%,29.79%,48.16% 和 5.85%,其中以 NaOH 的处理效果最好。采用 SAS^[11] 软件中的 DUNCAN 方差分析法,对不同方法预处理后的麦秆总产气量进行分析,结果表明,5 种预处理方法与 CK 之间的差异均达到极显著水平($P \leq 0.001$),除复合菌剂与糖醇酶处理之间差异不显著($P > 0.05$)外,其余预处理之间差异显著($P < 0.05$)。这说明用化学和生物方法预处理可以明显提高麦秆的总产气量;在生物预处理方法中,复合菌剂的处理效果优于其他 2 种,在化学预处理方法中,NaOH 的处理效果优于氨水,而在所有处理中,以 NaOH 处理提高总产气量的效果最为显著。

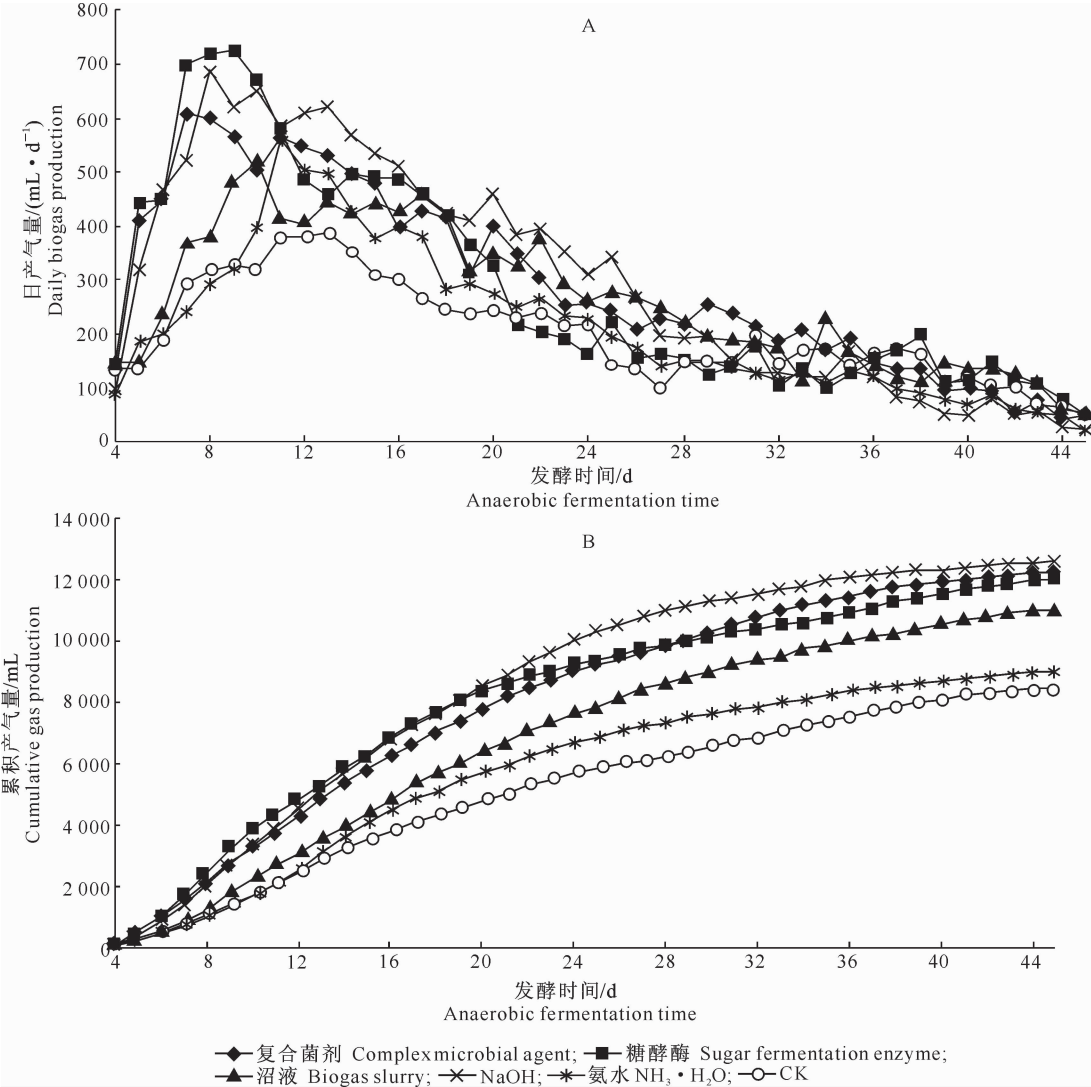


图 2 不同预处理方法对麦秆厌氧发酵日产气量(A)和累积产气量(B)的影响

Fig. 2 Effect of different pretreatments on daily gas production (A) and cumulative gas production(B) of wheat straw

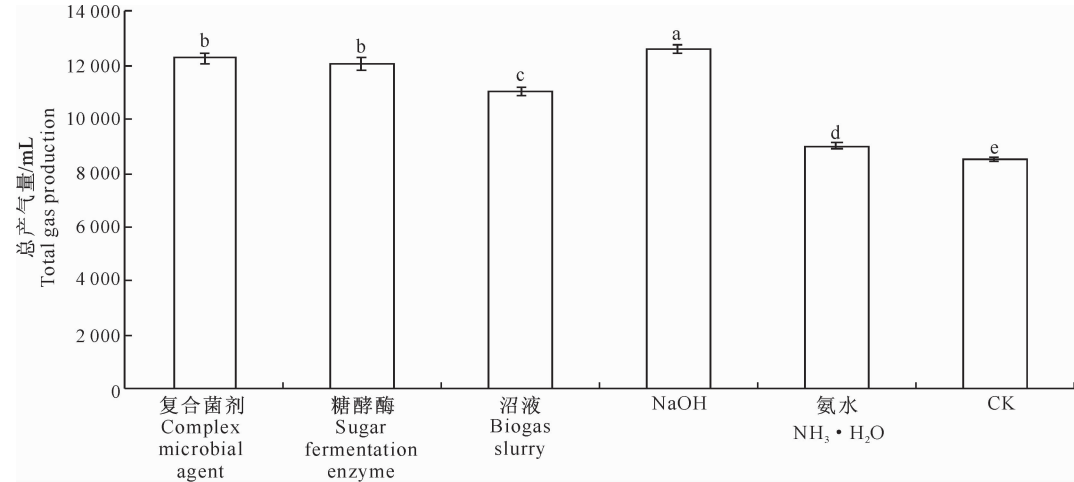


图 3 不同预处理方法对麦秆厌氧发酵总产气量的影响

不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)

Fig. 3 Effect of different pretreatments on total gas production of wheat straw

Different lowercase letters indicate significant difference ($P<0.05$)

2.2 不同预处理方法对麦秆厌氧发酵过程中甲烷含量的影响

甲烷含量是反映发酵工艺参数的重要因素。图 4 表明,经不同生物和化学方法预处理后,麦秆厌氧发酵过程中的甲烷含量明显不同。在整个厌氧发酵过程中,所有处理的甲烷含量均呈现出先升高后降低的动态变化趋势,而这种变化趋势与厌氧发酵过程中的微生物活动密切相关。在发酵初期,因产甲烷菌含量较少,故甲烷含量较低;随着发酵时间的延长,发酵料液中的产甲烷菌活性增强,甲烷含量升高;之后产甲烷菌活性又逐渐降低,因此甲烷含量也

随之降低。经复合菌剂、糖酵酶、沼液、NaOH 和氨水处理后,沼气中的甲烷含量在 12~30 d 达到 43.8%~60.5%,CK 的甲烷含量为 36.9%~48.3%,与 CK 相比,经过预处理的麦秆所产沼气的甲烷含量提高了 18.7%~25.3%。其中经 NaOH 处理后,沼气中的甲烷含量最高可达 60.5%,明显高于其他处理;且 NaOH 处理的甲烷含量一直较高,并持续稳定。而糖酵酶、复合菌剂和沼液处理的甲烷含量持续波动,氨水处理的甲烷含量在迅速上升后一直下降。由此可知,在所有的预处理方法中,以 NaOH 预处理提高沼气中甲烷含量的效果最好。

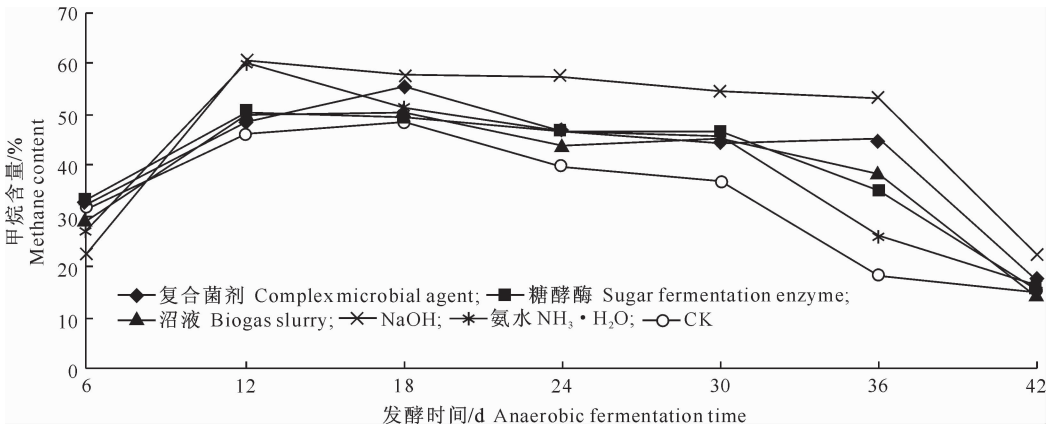


图 4 不同预处理方法对麦秆厌氧发酵过程中甲烷含量的影响

Fig. 4 Effects of different pretreatments on methane content during anaerobic fermentation of wheat straw

2.3 不同预处理方法对麦秆厌氧发酵过程中 pH 值的影响

适宜的 pH 值是沼气微生物生长的必要条件。李杰等^[12]研究表明,产甲烷菌适宜的 pH 值为 6.80~7.80,厌氧发酵可正常进行,甲烷菌可正常代谢产生甲烷;当 pH 值低于 6.70 时,甲烷菌活性受到抑制。图 5 表明,不同预处理方法对秸秆厌氧发酵过程中 pH 值变化的影响明显不同。在整个厌氧

发酵过程中,所有处理的 pH 值为 6.50~7.60,且均处于动态变化之中。在厌氧发酵初期(0~6 d),所有处理的 pH 值均下降至 7.0 以下;随着发酵的进行,所有处理的 pH 值逐渐升高直至趋于稳定;其中,NaOH 和氨水处理的 pH 值在 6.80~7.20 波动,复合菌剂、糖酵酶和沼液处理的 pH 值在 6.70~7.10 波动,CK 的 pH 值在 6.55~6.90 波动,所有处理 pH 值的上下波动幅度为 0.35~0.40。

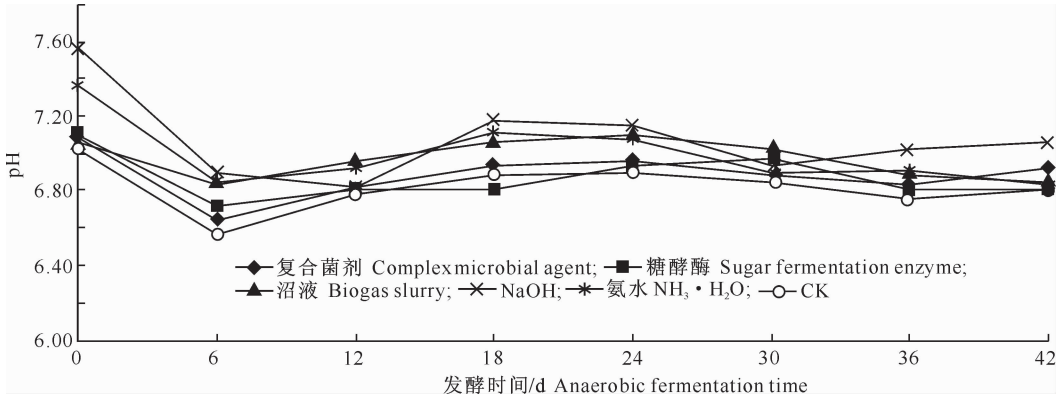


图 5 不同预处理方法对麦秆厌氧发酵过程中 pH 值的影响

Fig. 5 Effect of different pretreatment on pH value during anaerobic fermentation of wheat straw

由图 4 和图 5 可见,在发酵初期(0~6 d),发酵料液中的 pH 值逐渐降低,并于第 6 天降至 6.8,产

甲烷菌的含量低并且活性受到抑制,因此沼气中的甲烷含量低;随着发酵时间的延长(6~36 d),pH 值逐渐升高,适于产甲烷菌的生长和代谢,因此沼气中的甲烷含量迅速增高,日产气量先增高后降低;在发酵后期(36~42 d),沼液的 pH 值虽然大于 6.8,但是甲烷含量仍持续下降,这可能是由于产甲烷菌代谢周期结束所致。

2.4 不同预处理方法下麦秆厌氧发酵产气指标的比较

干物质(TS)产气率和挥发性干物质(VS)产气

表 1 不同预处理方法下麦秆厌氧发酵产气指标的比较

Table 1 Biogas production index of the raw materials anaerobic fermentation at different pretreatments

处理方法 Treatment method	TS 产气率/(mL·g ⁻¹) TS gas yield	VS 产气率/(mL·g ⁻¹) VS gas yield	甲烷平均含量/% Average methane content
复合菌剂 Complex microbial agent	298.69 b	324.17 b	41.3
糖酵酶 Sugar fermentation enzyme	293.07 b	318.18 b	39.6
沼液 Biogas slurry	268.74 c	291.82 c	38.6
NaOH	306.76 a	332.78 a	46.8
氨水 NH ₃ ·H ₂ O	219.15 d	237.90 d	39.0
CK	207.05 e	224.91 e	33.6

注:同列数据后标不同小写字母者表示在 $P=5\%$ 水平上差异显著。
Note: Values followed by different letters are significantly different at $P=5\%$ level.

3 讨 论

本研究发现,经过不同的生物和化学方法预处理后,麦秆的发酵启动迅速,日产气量峰值提前出现,且峰值增大。楚莉莉等^[8]研究发现,经过沼液处理后,小麦秸秆的产气高峰提前了 9~17 d,产气峰值提高了 49.2%~83.6%,这与本试验结果相似。本研究中,经过生物和化学方法预处理后,麦秸厌氧发酵的 TS 产气率、VS 产气率和甲烷含量均显著高于 CK,这是因为在预处理过程中,麦秆的组成结构发生了变化。麦秆的主要成分是木质纤维素,木质纤维素降解是一个有多种酶参与的复杂的反应过程,经过酶的水解作用,大分子木质纤维素可被降解为小分子化合物^[13]。在本试验所用的促发酵原料中,复合菌剂中含有可以降解纤维素大分子物质的多种微生物;糖酵酶可以加速秸秆腐熟,使大分子物质降解为可溶性糖类;沼液中富含酶和微生物,对秸秆有腐解作用,因此采用这 3 种物质对麦秆进行预处理可以起到较好的促发酵结果。研究表明,利用 NaOH 和氨水预处理作物秸秆后,可使秸秆中的纤维素和半纤维素含量降低,这主要是由于氢氧根(OH⁻¹)破坏了木质素与纤维素和半纤维素之间的联接键,从而使纤维素和半纤维素暴露出来,并使部分纤维素和半纤维素得以分离或降解,同时使细胞

率可以反映单位发酵原料的产气量,对研究厌氧发酵秸秆的利用程度有重要意义。表 1 表明,经不同的生物和化学方法预处理后,麦秆厌氧发酵的 TS 产气率和 VS 产气率均明显高于 CK,除复合菌剂与糖酵酶处理之间差异不显著($P>0.05$)外,其余处理之间差异均达显著水平($P<0.05$),且以 NaOH 处理最高;NaOH 处理的甲烷平均含量也均高于其他处理。综合厌氧发酵 3 个产气指标可知,用 NaOH 预处理麦秆是一种较好的方法。

壁膨胀、结构疏松,扩大了纤维素、半纤维素与微生物的接触面积,从而提高了作物秸秆的厌氧消化率^[14-16]。本试验结果也证明了这一点。

在沼气发酵中,甲烷含量是反映发酵工艺的重要参数。邵艳秋等^[6]和 Bruni 等^[17]研究发现,麦秆在厌氧发酵过程中,甲烷含量的变化趋势是先升高,升高到一定程度后降低,这与本试验中甲烷含量的变化趋势基本一致。而这种变化趋势与厌氧发酵过程中产甲烷菌活性的波动趋势相吻合。经生物和化学方法预处理后,麦秆中的木质纤维素大分子物质被降解为可溶性糖类,发酵启动后这些可溶性糖可以被沼气微生物直接利用,因此预处理后的麦秆所产沼气中的甲烷含量在初期可以迅速升高,而且在一段时间内维持在较高的水平。发酵启动时,由于未经处理(CK)的麦秆中的大分子物质没有降解,因此初期甲烷含量低;随着发酵进行,通过自身的降解作用,可溶性糖含量升高,沼气中的甲烷含量也逐渐增高;但由于自身降解作用有限,因此未处理秸秆所产沼气中的甲烷含量仍低于预处理后的秸秆。

本试验结果显示,厌氧发酵过程中所有处理的 pH 值均呈动态变化。在厌氧发酵初期,由于微生物降解麦秆产生大量有机酸,因此使发酵料液 pH 值明显下降;之后随着氨化细菌增多,产生的氨中和部分酸,更主要的是甲烷菌将有机酸转化,因此 pH

值上升。本试验中,在发酵前期,CK 的 pH 值一直最低,5 种处理 pH 值虽然有所下降,但均高于 6.60,说明预处理可以减轻秸秆在发酵初期的酸化现象,更利于发酵产气的快速启动。在发酵进行过程中,所有处理的 pH 值变化幅度较小,这主要是由于发酵体系自身有缓冲能力,可以调节发酵料液的 pH 值。

4 结 论

(1)经不同的生物和化学方法预处理后,麦秆产气不仅启动快,而且产气速率高,总产气量的高低顺序为:NaOH>复合菌剂>糖醇酶>沼液>氨水。其中经 NaOH 预处理的总产气量为 12 620 mL,比 CK 提高了 48.16%。

(2)在麦秆发酵过程中,甲烷含量随发酵时间的延长增加到一定程度后逐渐下降,预处理后的麦秆厌氧发酵平均甲烷含量比 CK 提高了 15.06%~39.47%。其中经 NaOH 预处理的麦秆发酵后甲烷含量最高可达 60.5%;厌氧发酵开始后,所有处理的 pH 值均呈先下降后升高直至趋于稳定的变化趋势。

(3)经 NaOH 预处理的麦秆发酵后 TS、VS 产气率显著高于其他处理($P<0.05$),平均甲烷含量也最高,比 CK 提高了 39.47%,是较好的麦秆预处理方法。

[参考文献]

- [1] 康佳丽,李秀金,朱保宁,等. NaOH 固态化学预处理对麦秸沼气的发酵效率的影响研究 [J]. 农业环境科学学报,2007,26(5):1973-1976.
- Kang J L, Li X J, Zhu B N, et al. Effect of solid state pretreatment with sodium hydroxide on biogasification efficiency of wheat straw [J]. Journal of Agro-environment Science, 2007, 26(5):1973-1976. (in Chinese)
- [2] 张书荣,岳建枝,刘圣勇,等. 不同处理麦秸厌氧发酵产沼气的实验 [J]. 中国沼气,2010,28(4):21-25.
- Zhang S R, Yue J Z, Liu S Y, et al. Test on anaerobic fermentation with differently treated wheat straw [J]. China Biogas, 2010, 28(4):21-25. (in Chinese)
- [3] Yang D Y, Li X J, Gao Z J, et al. Improving biogas production of corn stalk through chemical and biological pretreatment: A preliminary comparison study [J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(5):209-213.
- [4] 杨玉楠,陈亚松,杨敏. 利用白腐菌生物预处理强化秸秆产甲烷研究 [J]. 农业环境科学学报,2007,26(5):1968-1972.
- Yang Y N, Chen Y S, Yang M. Methane production from anaerobic fermentation of straw enhanced by biological pretreatment with white-rot fungi [J]. Journal of Agro-environment Science, 2007, 26(5):1968-1972. (in Chinese)
- [5] 李敏,李铁冰,杨改河,等. 尿素和纤维素酶对厌氧发酵的影响 [J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2010,38(2):165-170.
- Li M, Li Y B, Yang G H, et al. Effect of urea and cellulose on anaerobic fermentation [J]. Journal of Northwest A&F University: Nat Sci Ed, 2010, 38(2):165-170. (in Chinese)
- [6] 邵艳秋,邱凌,石勇,等. NaOH 预处理花生壳厌氧发酵制取沼气的试验研究 [J]. 农业环境科学学报,2011,30(3):573-578.
- Shao Y Q, Qiu L, Shi Y, et al. Experiments on anaerobic digestion of peanut shell for biogas production under NaOH pretreatment [J]. Journal of Agro-environment Science, 2011, 30(3):573-578. (in Chinese)
- [7] 万楚筠,黄凤洪,刘睿,等. 微生物预处理油菜秸秆对提高沼气的产气量的影响 [J]. 农业工程学报,2010,26(6):267-271.
- Wan C Y, Huang F H, Liu R, et al. Effect on increasing biogas production using rape straw by microbiological pretreatment [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(6):267-271. (in Chinese)
- [8] 楚莉莉,李铁冰,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.
- Chu L L, Li Y B, Feng Y Z, et al. Effect of biogas slurry pretreatment on biogas production characteristics of anaerobic fermentation of wheat straw [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2011, 29(1):247-251. (in Chinese)
- [9] 中国科学院成都生物研究所. 沼气发酵常规分析 [M]. 北京:北京科学技术出版社,1984.
- Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences. Basic analysis of anaerobic fermentation [M]. Beijing: Beijing Science and Technology Press, 1984. (in Chinese)
- [10] 朱洪光,陈小华,唐集兴. 以互花米草为原料生产沼气的初步研究 [J]. 农业工程学报,2007,23(5):201-204.
- Zhu H G, Chen X H, Tang J X. Pilot study on employing *Spartina alterniflora* as material for producing biogas by biogasification [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(5):201-204. (in Chinese)
- [11] 胡小平,王长发. SAS 基础及统计实例教程 [M]. 西安:西安地图出版社,2001.
- Hu X P, Wang C F. SAS foundation and statistical examples tutorial [M]. Xi'an: Xi'an Map Press, 2001. (in Chinese)
- [12] 李杰,李文哲,许洪伟,等. 牛粪湿发厌氧消化规律及载体影响的研究 [J]. 农业工程学报,2007,23(3):186-191.
- Li J, Li W Z, Xu H W, et al. Rules of anaerobic digestion of cow manure by wet method and the effect of carriers [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(3):186-191. (in Chinese)
- [13] 文少白,李勤奋,侯先文,等. 微生物降解纤维素的研究状况 [J]. 中国农学通报,2010,26(1):231-236.
- Wen S B, Li Q F, Hou X W, et al. Recent advances in microbial degradation of cellulose [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(1):231-236. (in Chinese)

[14]

Clarkson W W,Xiao W. Bench-scale anaerobic bioconversion of newsprint and office paper [J]. Water Science and Technology,2000,41(3):93-100.

[15]

李 湘,魏秀英,董仁杰. 秸秆微生物降解过程中不同预处理方法的比较研究 [J]. 农业工程学报,2006,22(1):110-116.
Li X,Wei X Y,Dong R J. A study of degradation efficiency of corn straw pretreated with different methods [J]. Transactions of the CASE,2006,22(1):110-116. (in Chinese)

[16]

何艳峰,李秀金,方文杰,等. 氢氧化钠固态预处理对稻草中木素结构特性的影响 [J]. 环境科学学报,2008,28(3):534-539.
He Y F,Li X J,Fang W J,et al. Effect of solid state pretreatment with sodium hydroxide on the lignin structure of rice straw [J]. Acta Scientie Circumstantice,2008,28(3):534-539. (in Chinese)

[17]

Bruni E,Jensen A P,Angelidaki I. Comparative study of mechanical,hydrothermal,chemical and enzymatic treatments of digested biofibers to improve biogas production [J]. Biore-source Technology,2010,101:8713-8717.

(上接第 148 页)

[15]

任 军,边秀芝,刘慧涛,等. 吉林省不同生态区玉米高产田适宜施肥量初探 [J]. 玉米科学,2004,12(3):103-105.
Ren J,Bian X Z, Liu H T,et al. Primary discusstion on rea-sonable fertilization amounts in high yield maize field in differ-ent biological areas of Jilin province [J]. Journal of Maize Sci-ence,2004,12(3):103-105. (in Chinese)

[16]

鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社,2000.
Bao S D. Analysis of soil and agro-chemistry [M]. 3rd ed. Bei-jing:China Agricultural Press,2000. (in Chinese)

[17]

朱兆良. 关于土壤氮素研究的几个问题 [J]. 土壤学进展,1989,17(2):1-9.
Zhu Z L. Several question about soil nitrogen [J]. Progress in Soil Science,1989,17(2):1-9. (in Chinese)

[18]

石岳峰,张 民,张志华,等. 不同类型氮肥对夏玉米产量、氮肥利用率及土壤氮素表观盈亏的影响 [J]. 水土保持学报,2009,23(6):95-98.
Shi Y F,Zhang M,Zhang Z H,et al. Effects of different types of nitrogen fertilization on yield,N use efficiency and apparent budget of soil nitrogen in summer maize [J]. Journal of Soil and Water Conservation,2009,23(6):95-98. (in Chinese)

[19]

蔡红光,米国华,张秀芝,等. 不同施肥方式对东北黑土春玉米连作体系土壤氮素平衡的影响 [J]. 植物营养与肥料学报,2012,18(1):85-93.
Cai H G,Mi G H,Zhang X Z,et al. Effect of different fertili-zing methods on nitrogen balance in the black soil for continu-ous maize production in Northeast China [J]. Plant Nutrion and Fertilizer Science,2012,18(1):85-93. (in Chinese)

[20]

周顺利,张福锁,王兴仁. 土壤硝态氮时空变异与土壤氮素表观盈亏: II. 夏玉米 [J]. 生态学报,2002,22(1):48-53.
Zhou S L,Zhang F S,Wang X R. The spatio-temporal varia-tions of soil NO₃⁻-N and apparent budget of soil nitrogen: II. Summer mazie [J]. Acta Ecologica Sinica,2002,22(1):48-53. (in Chinese)

[21]

Lory J A,Randall G W,Russelle M P. Crop sequence effects on response of corn and soil inorganic nitrogen to fertilizer and manure nitrogen [J]. Journal of Environmental Quality,1991,20(1):123-128.

[22]

Karlen D L,Kramer L A,Logsdon S D. Field-scale nitrogen balances associated with long-term continuous corn production [J]. Agronomy Journal,1998,9(5):644-650.