

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.039

两步预处理对厌氧消化产酸纤维酶解和沼气发酵的影响

王殿龙^{1,2} 吴波³ 艾平⁴ 辛娅^{1,2} 何明雄³ 张衍林⁴

(1. 淮阴工学院生命科学与食品工程学院, 淮安 223003; 2. 江苏省生物质转化与过程集成重点实验室, 淮安 223003;
3. 农业部沼气科学研究所生物质能技术研究中心, 成都 610041; 4. 华中农业大学工学院, 武汉 430070)

摘要: 对厌氧消化产酸纤维(挥发性脂肪酸生产废渣)进行了酶解糖化和沼气发酵实验研究,探索了乙酸氨水两步预处理对木质纤维素降解、葡萄糖浓度、木糖浓度和沼气产率的影响。结果表明:乙酸氨水两步预处理进一步降解了厌氧消化产酸中的半纤维素和木质素,而且纤维素回收率较高,为77.47%~81.44%,其中4%乙酸处理和10%氨水处理实验组的纤维素质量分数达到56.82%,半纤维素质量分数仅为7.94%;在上述预处理条件下,酶解糖化效率最高,葡萄糖质量浓度达到47.46 g/L,葡萄糖得率为67.73%;同时在此乙酸氨水两步预处理条件下的沼气产率明显优于单独乙酸和单独氨水预处理,获得的最高沼气产率为414 mL/g,有效提高了厌氧消化产酸纤维的产气效率。

关键词: 厌氧消化产酸纤维; 酶解; 沼气发酵; 两步预处理

中图分类号: X705; S216.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2018)03-0322-06

Effect of Two-step Pretreatment on Enzymatic Hydrolysis and Biogas Fermentation of Anaerobically Digested Fiber from VFAs Production

WANG Dianlong^{1,2} WU Bo³ AI Ping⁴ XIN Ya^{1,2} HE Mingxiong³ ZHANG Yanlin⁴

(1. School of Life Science and Food Engineering, Huaiyin Institute of Technology, Huaian 223003, China

2. Jiangsu Provincial Engineering Laboratory for Biomass Conversion and Process Integration, Huaian 223003, China

3. Biomass Energy Technology Research Center, Biogas Institute of Ministry of Agriculture, Chengdu 610041, China

4. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: The enzymatic hydrolysis and biogas fermentation of anaerobically digested fiber from volatile fatty acids (VFAs) production with rice straw were studied. The effects of two-step pretreatment of acetic acid and aqueous ammonia on the degradation of lignocellulose, glucose concentration, xylose concentration and biogas production were explored. The results showed that two-step pretreatment of acetic acid and aqueous ammonia can further degrade the hemicellulose and lignin in anaerobically digested fiber from VFAs production, and the recovery rate of cellulose was higher, which was 77.47%~81.44%. Among them, the mass fraction of cellulose was 56.82% and the mass fraction of hemicellulose was only 7.94% for pretreatment of 4% acetic acid and 10% aqueous ammonia at 121°C. Under the above pretreatment conditions, the enzymatic saccharification efficiency was the highest, the mass concentration of glucose was 47.46 g/L, and the glucose yield was 67.73%. Furthermore, the biogas production rate of anaerobically digested fiber from volatile fatty acids production pretreated by two-step pretreatment was better than those of acetic acid pretreatment alone and aqueous ammonia pretreatment alone. The highest biogas yield (414 mL/g) was obtained. Two-step pretreatment effectively improved the biogas yield of anaerobically digested fiber from VFAs production. Therefore, the research proved a new biorefinery way of anaerobically digested fiber.

Key words: anaerobically digested fiber from VFAs production; enzymatic hydrolysis; biogas fermentation; two-step pretreatment

收稿日期: 2017-08-08 修回日期: 2017-08-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(51406064)、中国农业科学院基本科研业务费前沿探索项目(Y2017JC39)、四川省科技支撑计划项目(17ZDYF1305)和农业部沼气科学研究所基本科研业务费项目(1610012016020)

作者简介: 王殿龙(1988—),男,讲师,主要从事生物质转化与利用技术研究,E-mail: wangdianlong@caas.cn

通信作者: 艾平(1976—),女,副教授,主要从事农业生物环境能源与农业系统工程研究,E-mail: aiping@mail.hzau.edu.cn

0 引言

随着化石能源的消耗和能源需求的不断增加,生物质能源已经受到世界各国的重视^[1],其研究广泛,工艺技术日趋成熟^[2]。生物质能源主要以农作物秸秆和畜禽粪便为原料,在解决环境问题的基础上,生产沼气和纤维乙醇等^[3-4]。为了提高能源品质,目前已有研究利用厌氧发酵手段生产挥发性脂肪酸^[5],以挥发性脂肪酸为中介制取高值化烃类能源。挥发性脂肪酸生产周期短,产量高^[6],但存在木质纤维素利用率低的特点,其主要降解了半纤维素,导致大量富含纤维素的沼渣产生,此类沼渣称为厌氧消化产酸纤维。

为了实现生物质有机碳的全效利用,以厌氧消化产酸纤维为原料生产其他生物基产品显得尤为重要。目前,已有研究开展了对厌氧消化纤维生产乙醇的探索^[7],MACLELLAN等^[8]利用玉米芯和猪粪混合发酵后得到的沼渣进行糖化制取乙醇,实现了甲烷和乙醇的联产,增加了纤维利用率和能源产量。针对厌氧消化纤维,本课题组前期的研究中对对比了酸碱预处理,结果表明碱预处理厌氧消化纤维的乙醇产量较高,研究也证明厌氧消化纤维可进一步糖化生产生物基产品^[9]。将厌氧消化产酸纤维用于糖化生产乙醇和进一步生产沼气,不但提供了挥发性脂肪酸生产中大量沼渣利用的新途径,而且也实现了生物质资源的全效利用,拓展了秸秆能源转化产业链,可构建“挥发酸-乙醇”或“挥发酸-沼气”联产的农作物秸秆能源转化模式。

对于木质素纤维原料的预处理措施中,酸、碱等化学方法具有处理效率高的优点,有效提高纤维素酶解糖化效率^[10-12]。针对不同的原料,预处理方法的选取对纤维转化效率具有重要影响。与强酸相比,有机酸预处理具有较优的木质素溶解性能、高的半纤维素降解率和易于回收等特点;氨水预处理可选择性地与木质素中的酯键和醚键反应^[13],导致木质素降解,同样氨水处理成本低,易回收。

基于此,本文首先在实验条件下制取厌氧消化产酸纤维,分析厌氧消化产酸纤维组分特性,采用乙酸氨水两步预处理手段,考察预处理过程中的木质纤维素降解特性,研究预处理对厌氧消化产酸纤维酶解糖化效率的影响,同时也探究预处理对厌氧消化产酸纤维产沼气潜力的影响,分析沼气产率和总固体去除率,并利用模型分析产气特性,最后进行质量平衡分析,为厌氧消化产酸纤维的糖化和产沼气利用提供参考。

1 材料和方法

1.1 厌氧消化产酸纤维制备

稻秸取自华中农业大学水稻田,自然风干后粉碎备用;接种污泥取自华中农业大学正常运行的以猪粪为发酵原料的户用沼气池,调节接种污泥的pH值为5.5,分别按照3%和1%的比例加入猪粪和葡萄糖驯化14 d。

根据前期产酸实验结果,厌氧消化产挥发性脂肪酸过程中采用1%质量分数的氢氧化钙预处理稻秸,按照10 mL/g的液固比于121℃下预处理1 h,预处理完成后,将预处理的稻秸在35℃条件下发酵10 d,接种率为10%,发酵质量分数为10%。经测定,挥发性脂肪酸质量浓度为14 g/L,挥发性脂肪酸转化率达到0.25 g/g。发酵结束后收集厌氧消化产酸纤维,在50℃下干燥备用。稻秸、接种污泥和厌氧消化产酸纤维的总固体、挥发性固体和木质纤维素特性见表1。

表1 实验原料的特性

Tab.1 Characteristics of experimental materials %

| 参数 | 数值 | | |
|-----------|-------|----------|--------------|
| | 稻秸 | 驯化 污泥 | 厌氧消化 产酸纤维 |
| 总固体质量分数 | 86.89 | 10.79 | - |
| 挥发性固体质量分数 | 74.43 | 3.50 | 78.65 |
| 纤维素质量分数 | 34.99 | 18.16 | 44.19 |
| 半纤维素质量分数 | 26.02 | 9.40 | 13.54 |
| 木质素质量分数 | 3.56 | 6.37 | 9.72 |
| 灰分质量分数 | 3.25 | 3.31 | 5.41 |

1.2 厌氧消化产酸纤维的两步预处理

厌氧消化产酸纤维先采用4%质量分数的乙酸在121℃下预处理2 h,液固比为10 mL/g;乙酸预处理完成后分别采用5%、10%和15%质量分数的氨水在121℃下预处理1 h,预处理完成后,固体样品经洗涤干燥后进行组分测定、酶解和沼气发酵。预处理设置两组对照,分别为单独乙酸预处理和单独氨水预处理。

1.3 酶解

取预处理后样品3 g,加入47 mL乙酸-乙酸钠缓冲溶液(50 mmol/L, pH值4.8)使固体质量分数为6%。纤维素复合酶(β -葡聚糖酶活力大于等于 6×10^4 U,纤维素酶活力大于等于600 U,木聚糖酶活力大于等于 1×10^5 U)来自宁夏和氏壁生物技术有限公司,在150 r/min和50℃下酶解48 h,每隔24 h取液样分析糖浓度。

1.4 沼气发酵

沼气潜力测试采用150 mL发酵瓶,加入3 g预

处理后的厌氧消化产酸纤维和 60 g 新鲜未驯化的接种污泥,通过添加蒸馏水调节总发酵质量分数为 8%,初始 pH 值为 7.0,厌氧发酵温度为 35℃。实验设置污泥对照和未预处理厌氧消化产酸纤维对照,发酵过程中监测日产气量和气体成分。

1.5 检测方法

总固体质量分数采用 105℃ 干燥 24 h,挥发性固体质量分数采用 550℃ 灰化 4 h,差重法测定;木质纤维素成分采用 ANKOM A2000i 型全自动纤维分析仪(美国),根据范氏洗涤法测定;葡萄糖和木糖浓度采用安捷伦 1220 型液相色谱仪测定,Zorbax 碳水化合物分析柱,示差折光检测器,柱温和检测器温度为 35℃,流动相为 75% 乙腈,流速为 0.8 mL/min;沼气气体成分采用 GC9790II 型气相色谱仪(中国浙江)测量,检测器为 TCD,分析柱为 5A 分子筛不锈钢填充柱和 Hayesep Q 填充柱,柱箱温度 50℃,进样口温度为 100℃,检测器温度为 55℃,载气为氦气。

2 结果与讨论

2.1 厌氧消化产酸纤维的预处理特性

稻秸经过厌氧消化产挥发酸后,半纤维素含量降低,纤维素和木质素含量增加,表明厌氧发酵产挥发酸主要利用半纤维素,而且由于挥发酸对半纤维素的进一步降解作用,使得厌氧消化产酸纤维素具有较低的半纤维素质量分数,为 13.54%。厌氧消化纤维中纤维素含量较高,有利于酶解产糖和生产沼气。针对厌氧产酸纤维中较高的木质素含量,分别考察了乙酸预处理、氨水预处理和乙酸氨水联合预处理对木质纤维素的降解效果。

从图 1 中可以看出,乙酸预处理进一步去除了厌氧产酸纤维中的半纤维素,但去除效果不显著,半纤维素质量分数降低至 11.94%;由于乙酸对木质素降解作用较小,因此乙酸预处理后纤维素含量明显增加。与单独乙酸预处理不同的是,氨水

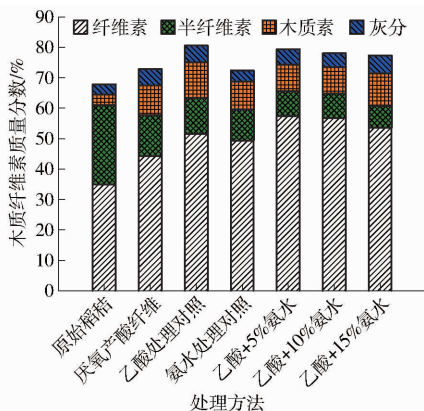


图 1 预处理对厌氧消化产酸纤维木质纤维素含量的影响
Fig. 1 Effect of pretreatment on lignocellulose content of anaerobically digested fiber from VFAs production

预处理对半纤维素的降解略强,而且对木质素的去除有一定作用。但单独氨水预处理对厌氧消化产酸纤维的木质素脱出效果不显著,这主要是因为厌氧消化后,纤维变得更难降解,针对这种难降解厌氧消化纤维,提出了乙酸氨水两步预处理,在结构上破坏木质素,增加纤维素酶和厌氧发酵菌群对纤维素的接触面积,促进木质纤维素的利用^[14]。两步预处理进一步加强了半纤维素的降解,使得纤维素含量增加,其中 10% 氨水处理组,纤维素质量分数达到 56.82%,半纤维质量分数仅为 7.94%。随着氨浓度的增加,纤维素和半纤维素含量降低,木质素含量升高。

木质纤维素含量体现了预处理后厌氧消化纤维的组分特性,为了更深入地阐明两步预处理对纤维素和半纤维素的降解效果和后续纤维的利用,考察了木质纤维素的回收率,如图 2 所示。可以看出,单独乙酸预处理和氨水预处理的纤维素回收率较高,分别为 92.56% 和 87.96%,经过乙酸和氨水两步预处理后,纤维素回收率仍较高,为 77.47% ~ 81.44%,这有利于纤维素的利用。对于半纤维素,单独氨水预处理比单独乙酸预处理的半纤维素回收率低,即氨水预处理的半纤维素降解更强,这主要是由厌氧产酸纤维的特性引起的,一方面厌氧产酸纤维已经经过有机酸的处理,另一方面大量半纤维素已经在厌氧产酸阶段降解^[15],氨水处理的脱木质素能力可进一步导致半纤维素降解。重要的是,乙酸氨水两步预处理后的半纤维素回收率为 33.29% ~ 37.78%,均明显低于乙酸处理对照和氨水处理对照,而且随氨浓度的增加,半纤维素回收率逐渐降低,这表明两步预处理对难降解的厌氧产酸纤维有着较好的降解作用。从木质素回收率上看,乙酸单独预处理对木质素脱出作用较弱,木质素回收率达 95.39%,单独氨预处理表现出了一定的木质素去除能力,

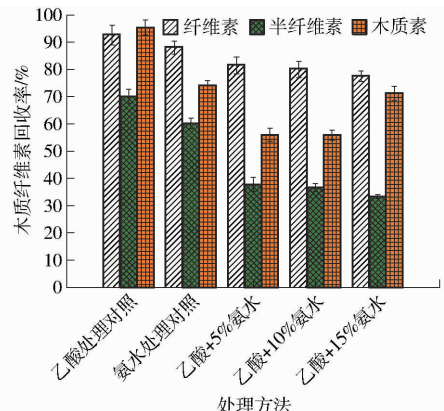


图 2 预处理对厌氧产酸纤维木质纤维素回收率的影响
Fig. 2 Effect of pretreatment on lignocellulose recovery rate of anaerobically digested fiber from VFAs production

木质素回收率为 74.18%, 而两步预处理在木质素的脱出效果上更为显著, 其中乙酸联合 10% 氨水预处理组的木质素回收率仅为 55.85%, 去除了较多的木质素, 有利于纤维素的酶解和发酵。当氨水质量分数为 15% 时, 木质素回收率反而增高, 这可能是由降解过程中产生有机抑制物导致的^[16]。综上, 两步预处理对半纤维素和木质素的降解作用得到强化, 对纤维素的回收效果显著。

2.2 两步预处理对厌氧消化产酸纤维酶解特性的影响

为了考察两步预处理对厌氧消化产酸纤维的处理效果, 分析了不同处理下的厌氧消化产酸纤维酶解后的葡萄糖和木糖质量浓度, 见表 2。未经过处理原始稻秸酶解 48 h 的葡萄糖质量浓度为 23.31 g/L, 木糖质量浓度仅为 2.49 g/L, 这是由于未处理的稻秸结构致密, 受到木质素的包裹使得酶解效率较低。厌氧产酸后的稻秸葡萄糖质量浓度明显提高, 可见厌氧产酸过程不仅可以生产挥发酸, 而且可以作为一种厌氧处理手段; 而木糖含量仍较低, 这也体现出厌氧消化产酸阶段主要降解的是半纤维素。

表 2 酶解过程中葡萄糖和木糖质量浓度变化

Tab.2 Changes in glucose and xylose concentrations during enzymatic hydrolysis g/L

| 组别 | 葡萄糖 | | 木糖 | |
|----------|-------|-------|------|------|
| | 24h | 48h | 24h | 48h |
| 稻秸 | 20.38 | 23.31 | 2.17 | 2.49 |
| 厌氧消化产酸纤维 | 32.90 | 36.49 | 2.25 | 2.99 |
| 乙酸处理对照 | 36.28 | 39.44 | 2.82 | 3.20 |
| 氨水处理对照 | 29.46 | 36.50 | 5.27 | 5.87 |
| 乙酸+5%氨水 | 37.22 | 44.15 | 4.90 | 5.54 |
| 乙酸+10%氨水 | 38.62 | 47.46 | 4.48 | 5.93 |
| 乙酸+15%氨水 | 38.92 | 43.25 | 4.61 | 5.66 |

高温乙酸预处理后, 葡萄糖和木糖质量浓度略有增加, 而单独氨水处理后, 葡萄糖质量浓度无明显变化, 而木糖质量浓度较高, 这是因为氨处理过程中不仅去除了木质素, 增强了半纤维素的水解, 而且也去除了部分纤维素, 使得葡萄糖质量浓度没有增加。乙酸氨水两步预处理组的葡萄糖质量浓度显著升高, 其中 10% 氨水实验组葡萄糖质量浓度最高, 为 47.46 g/L, 这表明乙酸预处理后的纤维再经过氨水处理时, 纤维素的降解被缓解, 相比单独氨水处理提高了纤维素的酶解糖化效率, 这也验证了前面预处理过程中的木质纤维素降解机理。

2.3 两步预处理对厌氧产酸纤维沼气发酵性能和木质纤维素降解的影响

预处理对厌氧消化产酸纤维的产沼气潜力的影响如图 3 所示, 与未处理的厌氧消化产酸纤维相比

(287 mL/g), 单独乙酸和单独氨水预处理后, 沼气产率没有明显提高, 单独乙酸预处理促进半纤维素的降解, 导致沼气产率略有下降; 单独氨水预处理后的沼气产率为 304 mL/g, 表明木质素的去除有利于提高沼气产量^[17]。因此, 基于前面两步预处理对木质素的去除效果, 两步预处理后的厌氧消化产酸纤维沼气产率大幅提高, 乙酸联合 5% 氨水和 15% 氨水预处理组的沼气产率与未处理组相比分别提高了 25.09% 和 28.92%; 乙酸联合 10% 氨水预处理组的沼气产率最高, 为 414 mL/g, 相比未处理组, 沼气产率提高了 44.25%, 表明乙酸氨水两步预处理可有效提高厌氧消化产酸纤维的沼气产率, 实现了生物质木质纤维素的全效利用。

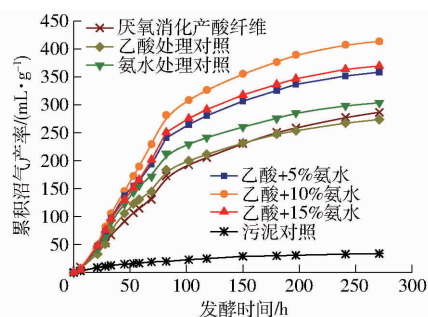


图 3 预处理对厌氧消化产酸纤维沼气发酵潜力的影响

Fig.3 Effect of pretreatment on biogas potential of anaerobically digested fiber from VFAs production

平均甲烷质量分数和总固体去除率如表 3 所示 (R_m 表示最大产沼气速率, λ 表示延迟时间, P_s 表示模拟的沼气产率, R_s 表示模拟的产沼气速率), 与原始厌氧消化产酸纤维相比, 预处理后发酵的平均甲烷产量略高, 各组间相差不大; 总固体去除率是评价厌氧发酵过程的一个重要指标^[18], 未处理组的总固体去除率为 29.40%, 与其他研究相比略高, 这是因为厌氧发酵产酸过程也具有一定的预处理效果。单独乙酸和氨水预处理组的总固体去除率较高, 分别为 40.50% 和 42.67%, 可见厌氧消化产酸纤维的预处理特性明显不同于原始稻秸; 而两步乙酸氨水预处理组的总固体去除率规律明显, 氨水浓度越高, 总固体去除率越高, 结合产气和木质纤维素含量分析可知预处理过程中木质素去除越多, 发酵后总固体去除率越高, 即: 两步预处理获得的可发酵纤维素和半纤维素含量较高。

2.4 沼气发酵过程的修正 Gompertz 模型参数

采用修正的 Gompertz 模型描述厌氧发酵过程^[19], 模型公式为

$$H = P \exp \left(- \exp \left(\frac{R_m e}{P} (\lambda - t) + 1 \right) \right)$$

式中 H —— t 时刻的累积沼气产量, mL

P ——沼气产量的潜力, mL

表3 修正 Gompertz 的模型参数

Tab.3 Model parameters of modified Gompertz equation

| 组别 | 沼气产率/ ($\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$) | P_s / ($\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$) | R_m / ($\text{mL}\cdot\text{h}^{-1}$) | R_s / ($\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) | λ / h | 平均甲烷 质量分数/% | 总固体 去除率/% | R^2 |
|----------|--|--|--|--|------------------|----------------|--------------|---------|
| 厌氧消化产酸纤维 | 287 | 279 | 6.09 | 2.03 | 2.04 | 56.70 | 29.40 | 0.992 6 |
| 乙酸预处理对照 | 274 | 262 | 7.11 | 2.37 | 4.27 | 61.61 | 40.50 | 0.988 5 |
| 氨水预处理对照 | 304 | 290 | 8.43 | 2.81 | 4.00 | 63.75 | 42.67 | 0.988 6 |
| 乙酸+5%氨水 | 359 | 344 | 9.57 | 3.19 | 5.85 | 62.49 | 25.56 | 0.991 7 |
| 乙酸+10%氨水 | 414 | 399 | 11.28 | 3.76 | 7.28 | 63.25 | 42.64 | 0.993 0 |
| 乙酸+15%氨水 | 370 | 356 | 10.02 | 3.34 | 7.43 | 64.26 | 51.28 | 0.993 5 |

P_s 和 R_s 分别通过 P 和 R_m 除以发酵原料质量得到。该模型主要用来拟合最大产沼气速率、累积沼气产量和延迟时间。通过对模型公式求导令结果为零,就可以得到最大的甲烷产率。 P 、 R_m 和 λ 是通过拟合得到的,其中 λ 可作为评价启动快慢的重要指标。模型参数结果见表3,可以看出,乙酸联合10%氨水预处理组模拟沼气产率最高,为399 mL/g,最大产沼气速率为3.76 mL/(g·h),而且延迟时间均较短,表明厌氧消化产酸纤维是一种合适的发酵原料,两步预处理有利于提高沼气产量,与单独乙酸和单独氨水预处理组相比,两步预处理效果显著,提高了纤维的转化效率。

2.5 预处理、酶解和沼气发酵过程质量平衡

基于100 g厌氧消化产酸纤维作质量平衡分析(图4),经过厌氧消化后的沼渣中含有44.19 g的纤维素,半纤维素质量仅为13.54 g。乙酸预处理后,纤维损失20.56 g,其中纤维素损失3.3 g,半纤维素损失4.05 g,木质素含量基本没有变化;乙酸处理后的纤维再经过10%氨水预处理,总质量损失21.70%,纤维素质量仍较高,为35.34 g,半纤维素质量仅为4.94 g,同时去除了较多的木质素,增加了纤维的孔隙度和接触面积,有利于与纤维素复合酶及厌氧微生物的接触。酶解糖化结果获得了33.22 g葡萄糖,基于厌氧消化产酸纤维计算,葡萄糖水解得率达到67.73%;两步预处理的纤维厌氧发酵后可获得25.8 L沼气。质量平衡分析更加清晰地阐明了两步乙酸氨水预处理厌氧消化产酸纤维过程的纤维素和半纤维素降解机理。

2.6 厌氧消化产酸纤维产糖产沼气参数对比

表4对比了稻秸、厌氧消化纤维和厌氧消化产酸纤维在不同预处理方法下的酶解葡萄糖得率和厌氧发酵的沼气产率,从沼气产率上来看,乙酸预处理比硫酸和水热处理条件下的沼气产率较高,乙酸和氨水的两步预处理能进一步提高厌氧消化产酸纤维的沼气产量,总固体产气率达到414 mL/g;对于葡萄糖得率,稀酸预处理应用较为普遍,葡萄糖得率较高,为51.60%,与原始稻秸相比,厌氧消化纤维和厌氧消化产酸纤维由于其是发酵后的沼渣,难于

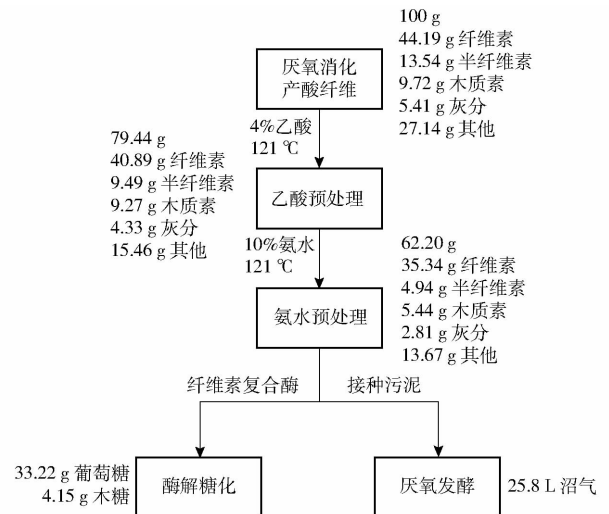


图4 两步预处理厌氧产酸纤维产糖/产沼气全过程质量平衡

Fig.4 Mass balance in two-step pretreatment for sugar or biogas production with anaerobically digested fiber from VFAs production

表4 不同原料和预处理方法的酶解葡萄糖得率和沼气产率

Tab.4 Comparison of glucose conversion and biogas yield of different feedstocks and pretreatments

| 发酵原料 | 预处理方法及条件 | 酶解葡萄糖得率/% | 沼气产率/ ($\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$) |
|----------|----------------------------------|-----------------------|--|
| 稻秸 | 6%硫酸,20℃,30 d | | 150 ^[20] |
| 稻秸 | 水热处理,80℃,6 h | | 281 ^[21] |
| 稻秸 | 10%乙酸,126℃,1 h | | 314 ^[22] |
| 稻秸 | 稀酸预处理 | 51.60 ^[23] | |
| 厌氧消化纤维 | 2% NaOH,130℃,2 h | 68.20 ^[24] | |
| 厌氧消化纤维 | 3% NaOH,60℃,6 h | 58.70 ^[9] | |
| 厌氧消化产酸纤维 | 4%乙酸,2 h,121℃; 10%氨水,2 h,121℃ | 67.73 | 414 |

降解,因此其预处理和酶解特性不同于原始稻秸,NaOH预处理可有效提高厌氧消化纤维的酶解糖化效率。本研究基于厌氧消化产酸纤维的独特性质,采用了乙酸氨水两步处理方法,葡萄糖得率和沼气产率均较高,这为挥发性脂肪酸生产过程中的废渣利用提供了新的途径和参考。

3 结论

(1) 针对厌氧消化产酸纤维采用了乙酸氨水两步预处理, 纤维素回收率为 77.47% ~ 81.44%, 经过 4% 乙酸和 10% 氨水在 121℃ 的连续预处理, 纤维素质量分数达到 56.82%, 经过产酸和两步预处理后稻秸残渣中半纤维素质量分数仅为 7.94%。

(2) 酶解糖化过程中, 两步预处理具有明显优势,

在最优条件下, 葡萄糖质量浓度达到 47.46 g/L, 基于原始厌氧消化产酸纤维计算, 葡萄糖得率较高, 为 67.73%。

(3) 从厌氧发酵的沼气产率上看, 乙酸氨水两步预处理的沼气产率明显优于单独乙酸和单独氨水预处理, 其中乙酸联合 10% 氨水预处理组获得了最高的沼气产率, 为 414 mL/g, 有效提高了厌氧消化产酸纤维的产气效率。

参 考 文 献

- 李文哲, 丁清华, 魏东辉, 等. 稻秸好氧厌氧两相发酵工艺与产气特性研究 [J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 150 - 157. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160322&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.022.
- LI Wenzhe, DING Qinghua, WEI Donghui, et al. Aerobic and anaerobic two-phase fermentation process and biogas production characteristics of rice straw [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 150 - 157. (in Chinese)
- 吴创之, 周肇秋, 阴秀丽, 等. 我国生物质能源发展现状与思考 [J]. 农业机械学报, 2009, 40(1): 91 - 99.
- WU Chuangzhi, ZHOU Zhaoqiu, YIN Xiuli, et al. Current status of biomass energy development in China [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(1): 91 - 99. (in Chinese)
- ABDESHAHIAN P, LIM J S, HO W S, et al. Potential of biogas production from farm animal waste in Malaysia [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 60: 714 - 723.
- ARAMRUEANG N, ZICARI S M, ZHANG R. Characterization and compositional analysis of agricultural crops and residues for ethanol production in California [J]. Biomass and Bioenergy, 2017, 105: 288 - 297.
- CHEN Y, JIANG X, XIAO K, et al. Enhanced volatile fatty acids (VFAs) production in a thermophilic fermenter with stepwise pH increase-investigation on dissolved organic matter transformation and microbial community shift [J]. Water Research, 2017, 112: 261 - 268.
- KIM N J, PARK G W, KANG J, et al. Volatile fatty acid production from lignocellulosic biomass by lime pretreatment and its applications to industrial biotechnology [J]. Biotechnology and Bioprocess Engineering, 2013, 18(6): 1163 - 1168.
- WANG D, XI J, AI P, et al. Enhancing ethanol production from thermophilic and mesophilic solid digestate using ozone combined with aqueous ammonia pretreatment [J]. Bioresource Technology, 2016, 207: 52 - 58.
- MACLELLAN J, CHEN R, KRAEMER R, et al. Anaerobic treatment of lignocellulosic material to co-produce methane and digested fiber for ethanol biorefining [J]. Bioresource Technology, 2013, 130: 418 - 423.
- 王殿龙, 艾平, 鄢烈亮, 等. 稻秸厌氧消化纤维制取乙醇实验研究 [J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(5): 156 - 163. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150521&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.05.021.
- WANG Dianlong, AI Ping, YAN Lieliang, et al. Research on ethanol production of anaerobic digestion fiber from rice straw [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5): 156 - 163. (in Chinese)
- VEGI S, SHASTRI Y. Optimal control of dilute acid pretreatment and enzymatic hydrolysis for processing lignocellulosic feedstock [J]. Journal of Process Control, 2017, 56: 100 - 111.
- 王健, 赵玲, 田萌萌, 等. 组合碱预处理对玉米秸秆厌氧消化的影响 [J]. 太阳能学报, 2014, 35(12): 2577 - 2581.
- WANG Jian, ZHAO Ling, TIAN Mengmeng, et al. Influence of combined alkali pretreatment on anaerobic digestion of corn stalk [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2014, 35(12): 2577 - 2581. (in Chinese)
- 张万钦, 戚丹丹, 吴树彪, 等. 不同预处理方式对污泥厌氧发酵的影响 [J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(9): 187 - 198. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140931&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.09.031.
- ZHANG Wanqin, QI Dandan, WU Shubiao, et al. Effect of different pretreatment methods on sewage sludge anaerobic digestion [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9): 187 - 198. (in Chinese)
- GAO A H, BULE M V, LASKAR D D, et al. Structural and thermal characterization of wheat straw pretreated with aqueous ammonia soaking [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(35): 8632 - 8639.
- MATHEW A K, PARAMESHWARAN B, SUKUMARAN R K, et al. An evaluation of dilute acid and ammonia fiber explosion pretreatment for cellulosic ethanol production [J]. Bioresource Technology, 2016, 199: 13 - 20.
- CHANG H N, KIM N J, KANG J, et al. Biomass-derived volatile fatty acid platform for fuels and chemicals [J]. Biotechnology and Bioprocess Engineering, 2010, 15(1): 1 - 10.
- YU Q, ZHUANG X, WANG W, et al. Hemicellulose and lignin removal to improve the enzymatic digestibility and ethanol production [J]. Biomass and Bioenergy, 2016, 94: 105 - 109.
- HE Y, PANG Y, LIU Y, et al. Physicochemical characterization of rice straw pretreated with sodium hydroxide in the solid state for enhancing biogas production [J]. Energy & Fuels, 2008, 22(4): 2775 - 2781.
- 刘战广, 朱洪光, 王彪, 等. 粪草比对干式厌氧发酵产沼气效果的影响 [J]. 农业工程学报, 2009, 25(4): 196 - 200.
- LIU Zhanguang, ZHU Hongguang, WANG Biao, et al. Effect of ratios of manure to crop on dry anaerobic digestion for biogas production [J]. Transactions of the CASE, 2009, 25(4): 196 - 200. (in Chinese)
- WANG D, AI P, YU L, et al. Comparing the hydrolysis and biogas production performance of alkali and acid pretreatments of rice straw using two-stage anaerobic fermentation [J]. Biosystems Engineering, 2015, 132: 47 - 55.
- 覃国栋, 刘荣厚, 孙辰. 酸预处理对水稻秸秆沼气发酵的影响 [J]. 上海交通大学学报: 农业科学版, 2011, 29(1): 58 - 61.
- QIN Guodong, LIU Ronghou, SUN Chen. Effects of acid pretreatment on biogas fermentation of rice straw [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University: Agricultural Science Edition, 2011, 29(1): 58 - 61. (in Chinese)
- 钱玉婷, 杜静, 陈广银, 等. 温和水热预处理促进秸秆产沼气的条件优化研究 [J]. 中国环境科学, 2016, 36(12): 3703 - 3710.
- QIAN Yuting, DU Jing, CHEN Guangyin, et al. Optimization of conditions for promoting biogas production with hydrothermal pretreatment for straw [J]. China Environment Science, 2016, 36(12): 3703 - 3710. (in Chinese)
- AMNUAYCHEWA P, HENGARONPRASAN R, RATTANAPORN K, et al. Enhancing enzymatic hydrolysis and biogas production from rice straw by pretreatment with organic acids [J]. Industrial Crops and Products, 2016, 87: 247 - 254.
- 宋安东, 任天宝, 张百良. 玉米秸秆生产燃料乙醇的经济性分析 [J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 283 - 286.
- SONG Andong, REN Tianbao, ZHANG Bailiang. Economic analysis for production of fuel ethanol with corn straw [J]. Transactions of the CASE, 2010, 26(6): 283 - 286. (in Chinese)
- YUE Z, TEATER C, MACLELLAN J, et al. Development of a new bioethanol feedstock-anaerobically digested fiber from confined dairy operations using different digestion configurations [J]. Biomass and Bioenergy, 2011, 35(5): 1946 - 1953.