

秸秆水解液还原糖组分特征及产甲烷特性*

艾平¹ 王殿龙¹ 谭中欣² 晏水平¹ 张衍林¹ 袁巧霞¹

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070)

摘要: 为认识预处理方式对秸秆水解液中还原糖组分特征和产甲烷特性的影响,对稻秸分别进行酸、碱预处理:在HCl质量分数较高(9%和7%)时,所得还原糖中木糖所占比例大;在Ca(OH)₂质量浓度(2 g/L和4 g/L)较低时,前48 h葡萄糖比例较高。以配水实验研究不同比例的葡萄糖和木糖混合液的产甲烷特性,混合物中葡萄糖摩尔分数对产气特性影响显著,随葡萄糖摩尔分数的增加,产气速率增加,葡萄糖摩尔分数100%时对应最低的产气率191.75 mL/g,25%实验组获得最高产气率633.14 mL/g和最高能量转换效率26.40%,纯木糖发酵存在一定的初期产气迟滞。

关键词: 秸秆 水解液 还原糖 厌氧 甲烷

中图分类号: S216.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)10-0177-06

Reducing Sugar Component Characteristics and Methanogenic Features of Straw Hydrolysate

Ai Ping¹ Wang Dianlong¹ Tan Zhongxin² Yan Shuiping¹ Zhang Yanlin¹ Yuan Qiaoxia¹

(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

2. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: The acid and alkali pretreatment method was employed to explore the different effect of straw pretreatment on reducing sugar component and methanogenic features of straw hydrolysate. The results indicated that xylose was the major component in the mixed reducing sugar solution in the tests with higher HCl concentration(9% and 7%), however that of glucose was slightly higher than xylose in the tests with lower Ca(OH)₂ concentration(2 g/L and 4 g/L) in the early 48 h. Methanogenic features with different ratio of glucose and xylose was studied and indicated it was significantly affected by the mole fraction of glucose in mixture. The biogas yield increased with the xylose increasing, and the lowest biogas 191.75 mL/g was in the test of 100% glucose, while the highest biogas yield 633.14 mL/g and energy conversion efficiency 26.40% were both in the test of 25% glucose. There was certain biogas production delay for pure xylose test.

Key words: Straw Hydrolysate Reducing sugar Anaerobic Methane

引言

秸秆厌氧转化技术是秸秆能源化利用的一种有效途径^[1~2]。一般认为秸秆厌氧转化实质上是秸秆水解后的水解液参与产酸、产甲烷的过程,因此,认

识不同预处理方式下的秸秆水解液产物构成特征,及其对产甲烷影响,可为优化预处理工艺提供一定理论依据。

纤维素水解主要产物为葡萄糖,半纤维素水解主要产物为木糖、阿拉伯糖、甘露糖等^[3]。不同预

收稿日期: 2012-11-08 修回日期: 2012-12-06

* 公益性行业(农业)科研专项经费资助项目(201303091)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2013PY056)

作者简介: 艾平,副教授,博士,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

通讯作者: 晏水平,副教授,博士,主要从事沼气高值化利用和CO₂捕集技术研究,E-mail: yanshp@mail.hzau.edu.cn

处理方式对纤维素、半纤维素、木质素水解有不同的作用效果,如稀酸作用下半纤维素 80% ~ 100% 水溶,木质素基本不溶;氢氧化钙作用下半纤维素明显水溶,木质素部分水解^[4-5]。因而预处理方式对秸秆中纤维素、半纤维的水解率,以及水解液中葡萄糖、木糖等还原糖的生成速率和组分比例有直接影响。

秸秆水解的混合还原糖液中主要成分葡萄糖和木糖有不同的代谢途径和特性^[6-7],因而葡萄糖、木糖混合物反应速率不同于单一碳源的反应速率,木糖的代谢速率受到葡萄糖影响,进而影响最优产甲烷条件。

当前有关葡萄糖和木糖混合发酵的研究开始增多^[8-9],但主要集中在产乙醇和产氢方向^[10-12]。本文分析酸、碱预处理后秸秆水解液中葡萄糖、木糖等组分,并以配水实验研究不同比例的葡萄糖和木糖混合液的产甲烷特性。

1 材料与方法

1.1 材料及装置

秸秆选用风干稻秸,取自华中农业大学实验田,铡切至 20 mm 长度,稻秸总固体(TS)质量分数 92.37%,挥发性固体(VS)质量分数 87.68%。

配水实验以葡萄糖、木糖为碳源加适量蒸馏水稀释配制,投加 NH_4Cl 作为氮源, NaHCO_3 用于调节碱度,试剂均采用分析纯。

启动接种污泥取自华中农业大学农业生物环境与能源实验基地正常运行的以猪粪为原料户用沼气池,污泥 TS 质量分数 11.91%,VS 质量分数 11.22%。

厌氧反应装置为 1 L 血清瓶,工作容积 800 mL,采用排水法集气^[13]。

1.2 分析方法

TS、VS 测定采用灼烧法;pH 值测定采用酸度计(pHS-25 型);沼气成分用 GC-900C 型气相色谱仪测量,采用 TCD 检测器;沼气总产量采用排水法测定;葡萄糖浓度测定采用生物传感分析仪(SBA-40E 型,山东省科学院生物研究所),木糖测定采用间苯三酚法显色法^[14];VFA 和乙醇的浓度测量采用气相色谱仪,采用 FID 检测器。

1.3 实验设计

(1)酸、碱预处理稻秸实验。分别采用 HCl、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液对稻秸进行浸泡,设定 HCl 质量分数为 1%、3%、5%、7% 和 9% 5 组,以及 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 质量浓度为 2、4、6、8 和 10 g/L 5 组,每组加入稻秸 30 g,按实验设计加入不同质量分数的 HCl 和不同

质量浓度的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液定容至 1 L。在室温下对稻秸进行浸泡。

(2)葡萄糖、木糖混合溶液产甲烷实验。在葡萄糖和木糖混合物中,分别采用葡萄糖摩尔分数 100%、75%、50%、25%、0% 5 个不同混合梯度,各处理的 COD 负荷均为 8 000 mg/L,补充 NH_4Cl 调节 C/N 为 60, NaHCO_3 添加量为 3 000 mg/L,污泥的总挥发性固体接种质量浓度为 10 g/L,污泥接种后添加蒸馏水定容至 800 mL。

2 结果与分析

2.1 酸、碱预处理对应的秸秆水解液中还原糖组分特征

分别采取 HCl、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液浸泡稻秸,稻秸水解液中葡萄糖和木糖质量浓度的变化特征如图 1 所示。

在不同 HCl 质量分数下,稻秸水解液中葡萄糖和木糖质量浓度呈现相反的变化规律:总体上葡萄糖质量浓度随着 HCl 质量分数的增加而减少,葡萄糖质量浓度从高至低按 HCl 质量分数依次为 1%、7%、3%、5%、9% 实验组,即 HCl 质量分数为 1% 时葡萄糖质量浓度最高,HCl 质量分数为 9% 时葡萄糖质量浓度处于最低;木糖质量浓度随着 HCl 质量分数的增加而增高,木糖质量浓度从高至低按 HCl 质量分数依次为 9%、7%、5%、3%、1% 实验组,相较而言,在不同的 HCl 质量分数下,木糖质量浓度差别较葡萄糖大,即木糖质量浓度变化范围较大。

在不同 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液质量浓度下,稻秸水解液中葡萄糖和木糖质量浓度变化规律不同,总体上,葡萄糖产率变化与 HCl 类似,即较低 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 质量浓度(2、4 g/L)对应着较高的葡萄糖产率,而较高 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 质量浓度(8、10 g/L)对应着较低的葡萄糖产率,葡萄糖质量浓度从高至低按 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 浓度依次为 2、4、6、10、8 g/L 实验组;不同 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 质量浓度对应的木糖质量浓度均较为接近,木糖质量浓度范围差别较葡萄糖小,说明在 2 ~ 10 g/L 范围内, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 质量浓度对木糖质量浓度影响较小,但木糖质量浓度在整个反应周期内随反应时间有较大波动。

HCl 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 预处理所得稻秸水解液中葡萄糖、木糖等主要还原糖组分质量浓度具有较大差异:在 HCl 较高质量分数(9%、7%)时,所得还原糖中木糖所占比例较大; $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 处理的组间差异相对较小,总体上在 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 较低质量浓度(2、4 g/L)时,48 h 前葡萄糖所占比例较高,且低质量浓度组的葡萄糖摩尔分数略高于高质量浓度组。酸碱浓度、

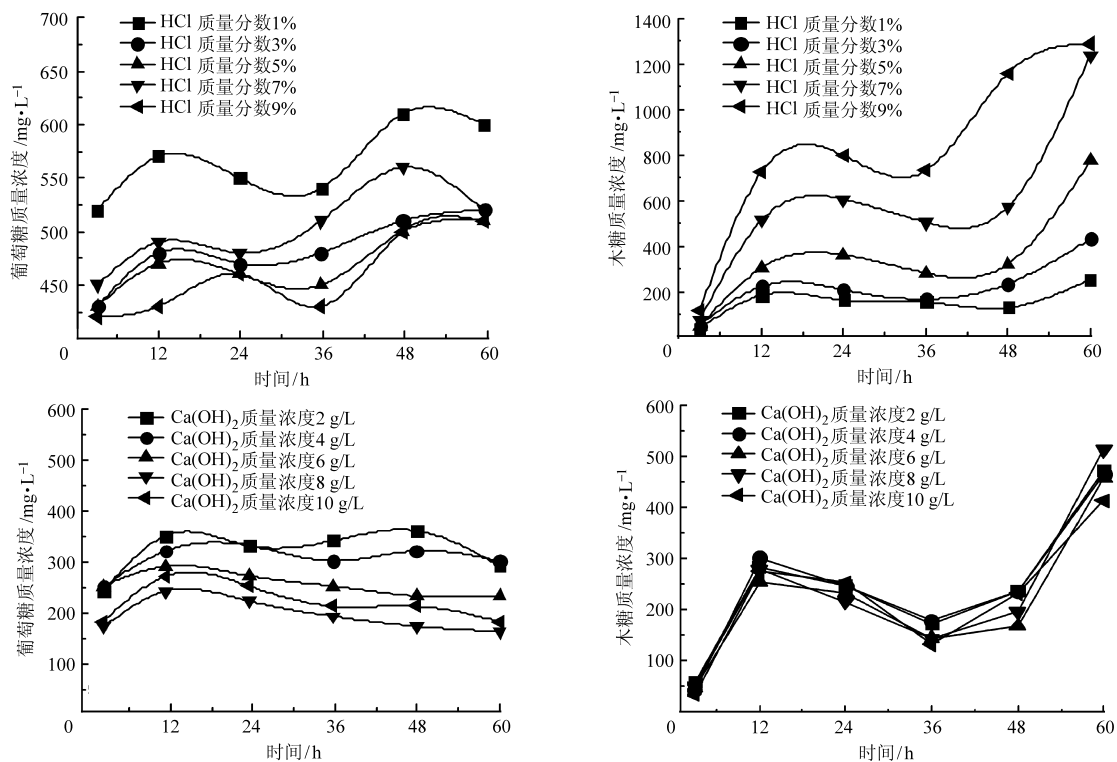


图 1 稻秸 HCl、Ca(OH)₂处理后水解液中的葡萄糖、木糖质量浓度

Fig. 1 Concentration of glucose and xylose in hydrolysate of rice straw pretreated by acid or alkali

水解时间对稻秸水解液中的葡萄糖、木糖质量浓度都有影响。HCl 预处理 60 h 时,随 HCl 质量分数增加,葡萄糖占葡萄糖与木糖混合量的质量分数从 70. 24% 降至 28. 33% ; Ca(OH)₂ 预处理 60 h 时,葡萄糖质量分数变化范围为 23. 78% 至 39. 19% , Ca(OH)₂ 预处理 36 h 时其变化范围为 57. 21% 至 66. 39% 。

以上结果说明利用预处理条件可得到具有不同还原糖组分特征的水解液,进一步从获得最佳甲烷转化效率出发,探寻葡萄糖、木糖的组分比例对甲烷转化过程的影响,以葡萄糖、木糖的模拟配水实验对此进行研究。

2. 2 不同葡萄糖摩尔分数的混合还原糖液产甲烷特性

2. 2. 1 不同葡萄糖摩尔分数下的产气特征

不同葡萄糖摩尔分数的混合还原糖液在产气量上有较大差别。从图 2 可见,随着葡萄糖摩尔分数的减少,产气速率增加,其中葡萄糖摩尔分数为 100% 时,产气量最低,第 48 小时的沼气产气速率为 1 337 mL/d, 仅为同期 0% 处理组 2 457 mL 的 54. 4% 。

以厌氧产甲烷为目的,总体可见,以葡萄糖摩尔分数为 100% 和 75% 处理组未能获得高甲烷含量的气体。50% 和 25% 处理组产气量最高,累计产气量分别为 4 666 mL 和 5 065 mL,50%、25% 和 0% 处理

组中均在产甲烷阶段获得了高甲烷含量的沼气产量,特别是以木糖为主的 25% 和 0% 处理组中,甲烷含量上升快,72 h 以后进入产甲烷期,最终甲烷体积分数达到 63. 0% 和 50. 6% ,表现了较好的持续产气性。

值得注意的是,纯木糖发酵,即 0% 处理组表现出了明显的初期停滞,其产气高峰来临晚于其他各组(约 24 h),但是一旦菌种适应后,且此时氢气浓度保持在较低水平,木糖开始被迅速降解,由于初期迟滞影响,尽管后期产气表现较好,但总产气量仅为最高处理组,即葡萄糖摩尔分数为 25% 时的 76. 36% 。

采用修正 Gompertz 模型描述累积产甲烷过程^[15],即

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

式中 H —— t 时刻的累积甲烷产量, mL
 P ——最终甲烷产量, mL
 R_m ——最大产甲烷速率, mL/h
 λ ——延迟时间, h

P 、 R_m 和 λ 是通过累积产甲烷曲线拟合得到的,其中 λ 可作为评价启动快慢的重要指标。

参数值及拟合结果见表 1,其中 t_{80} 为甲烷累积产量达最终产量的 80% 所需的时间, P_{60} 为 60 h 的累积产甲烷量,括号中为占最终甲烷产量的比例。

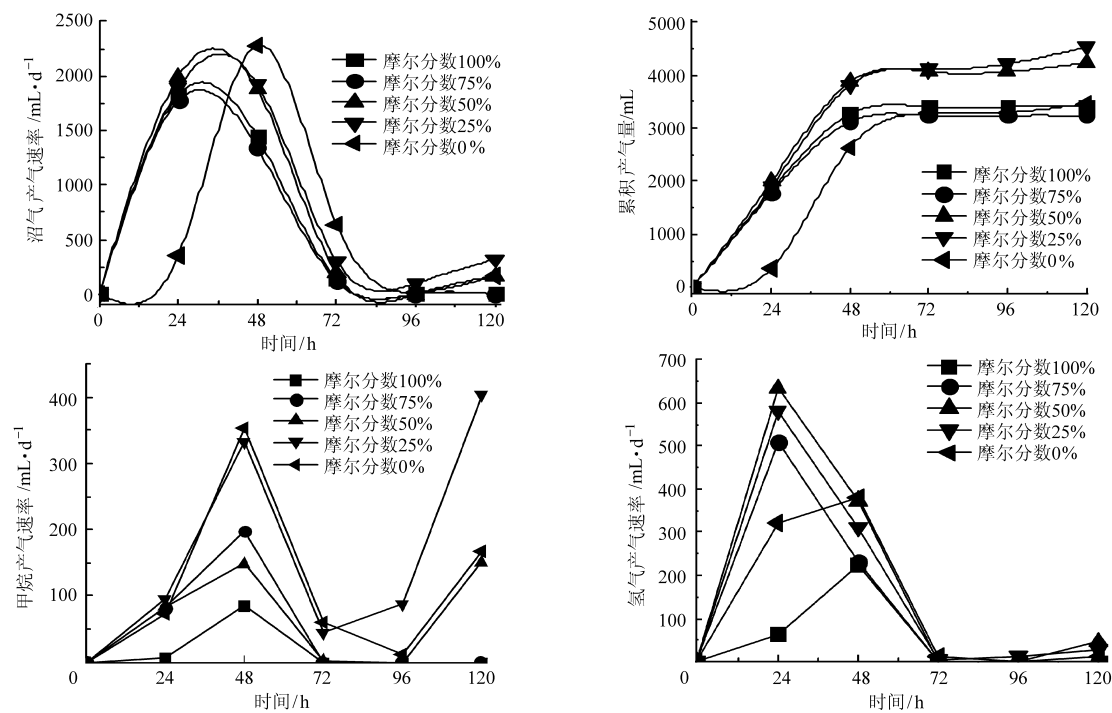


图 2 不同葡萄糖摩尔分数的产气速率
Fig. 2 Biogas yield with various glucose mole fractions

表 1 修正 Gompertz 的模型参数						
Tab. 1 Model parameters of modified Gompertz						
葡萄糖 摩尔分 数/%	P / mL	R_m / mL·h ⁻¹	λ /h	R^2	t_{80} /h	P_{60} /mL
100	93.47	25.39	23.87	1	27.18	93.47 (100%)
75	280.72	54.00	22.48	1	27.23	280.72 (100%)
50	386.43	3.54	1.89	0.88	97.90	215.98 (55.89%)
25	963.18	8.96	12.08	0.90	110.68	429.01 (44.54%)
0	665.58	9.06	10.55	0.94	77.87	430.41 (64.67%)

最大产甲烷速率 R_m 在 75%、100% 处理组获得,但其产甲烷延迟时间 λ 较大,产甲烷期启动慢,而对于木糖比例高的 25% 和 0% 处理组,其最大产甲烷速率 R_m 低于葡萄糖比例高的处理组,但其产甲烷启动快,且从 t_{80} 和 P_{60} 参数可见其产甲烷持续时间长。

计算能量转化效率^[16]和综合产气率(表 2)分析,最佳处理组为葡萄糖摩尔分数 25%,其最高甲烷产率为 120.38 mL/g,产气率为 633.14 mL/g,能量转化效率为 26.40%,为各组中最高。其次为纯木糖处理组,即葡萄糖摩尔分数 0% 时的甲烷产率为 83.25 mL/g,产气率为 524.76 mL/g,低于 50% 处理组 583.26 mL/g,但因甲烷产率高出 50% 处理组 72.54%,因此能源转化效率为 18.64%,高于 50%

处理组的能源转化效率 15.71%。可见,葡萄糖和木糖混合液中,木糖摩尔分数提高有助于甲烷产率增加,但纯木糖发酵较之混合糖(25% 处理组)气体产率下降 17.11%,同时甲烷产量占总产气量比例降低,因此采取以木糖为主的混合糖共发酵有利于营造产氢、产甲烷良好的协同代谢环境,从而获得较高的氢气和甲烷产量。

表 2 能量转化效率及气体产率					
Tab. 2 Energy conversion efficiency and biogas production rate					
参数	葡萄糖摩尔分数/%				
	100	75	50	25	0
累积产气量/mL	1 534	3 451	4 666	5 065	4 198
氢气总产量/mL	287	738	1 051	936	731
甲烷总产量/mL	93	281	386	963	666
能量转化效率/%	4.14	11.36	15.71	26.40	18.64
气体产率/mL·g ⁻¹	191.75	431.39	583.26	633.14	524.76
甲烷产率/mL·g ⁻¹	11.63	35.13	48.25	120.38	83.25

反之,在 100%、75%、50% 等葡萄糖摩尔分数较高的处理组中,随着葡萄糖比例增加,产气率、甲烷产率和能量转化效率均随之下降,特别是纯葡萄糖(100%)发酵,其产气率、甲烷产率和能量转化效率仅为 75% 处理组的 44.45%、33.11% 和 36.44%,可见纯葡萄糖较之混合糖,产气特性显著下降。同时,100%、75%、50% 处理组中,氢气占氢气与甲烷总产量比例较为接近,分别为 75.53%、72.42%、73.14%,而 25% 和 0% 处理组中为 49.29%、

52.33%，即葡萄糖摩尔分数对氢气与甲烷的产量比例有显著影响。

2.2.2 产酸动力学及发酵途径分析

水解液中还原糖分解的第一步是降解为挥发性脂肪酸,对产酸过程进行分析,引入酸化度 (Degree of acidification)、VFA 产率、污泥比产酸率 3 指标^[17]。

$$D_A = \frac{T_e - T_i}{S_i} \times 100\%$$
 (2)

$$Y_{VFA} = \frac{T_e - T_i}{(S_i - T_i) - (S_e - T_e)}$$
 (3)

$$q_{VFA} = \frac{T_e - T_i}{R_{VSS}}$$
 (4)

式中 D_A ——酸化度,表示有机物在某一时刻的酸化程度,%
 T_e ——出水中挥发性脂肪酸质量浓度,mg/L
 T_i ——进水中挥发性脂肪酸质量浓度,即发酵液中挥发性脂肪酸的初始质量浓度,mg/L
 S_i ——发酵底物的初始质量浓度,mg/L

S_e ——出水中发酵底物质量浓度,mg/L
 Y_{VFA} ——底物产酸率,即消耗单位发酵底物生成的 VFA 量,mg/mg
 q_{VFA} ——污泥比产酸率,即单位污泥的挥发性脂肪酸的产率,mg/mg
 R_{VSS} ——污泥中可挥发性固体质量浓度,mg/L

选取各组中 VFA 浓度最大时刻数据代入公式,即达到最大酸化度对应的临界酸化时间,计算得到产酸动力学参数(表 3)。产气量较低的 100% 和 75% 处理组具有相对较高的酸化度,挥发酸在可溶性 COD 中占有很高比例(0.83 和 0.97),特别是葡萄糖摩尔分数 75% 处理组的 COD 产酸率和污泥比产酸率较葡萄糖摩尔分数 100% 处理组都有明显提高,从酸化产物看来,葡萄糖摩尔分数 100% 处理组的丙酸比例高达 30%,也即该处理组的 COD 产酸率、污泥比产酸率和产气率都较低的原因,一方面是因为葡萄糖选择通过丙酮酸降解为丙酸的途径时,没有氢气产生,另一方面,丙酸对产甲烷菌有较强的抑制作用。

表 3 葡萄糖和木糖比例对产酸动力学参数及发酵产物组分的影响

Tab.3 Effect of ratio of glucose and xylose on acidification kinetics parameters and fermentation productions

葡萄糖 摩尔分数/%	ΔT_{VFA} /mg·L ⁻¹	D_A /%	T_{VFA}/S_{COD}	Y_{VFA} /mg·mg ⁻¹	q_{VFA} /mg·mg ⁻¹	各 VFA 组分所占质量分数/%			
						H_{Et}	H_{Ac}	H_{Pr}	H_{Bu}
100	4 239	53.66	0.83	0.60	52.37	10	13	30	46
75	6 847	85.58	0.97	0.88	83.52	1	27	10	62
50	4 264	53.30	0.68	0.71	52.01	3	21	8	68
25	2 378	29.73	0.35	0.68	29.01	7	17	7	69
0	4 385	54.81	0.59	0.89	53.49	0	15	8	77

注: T_{VFA} 为总挥发性脂肪酸质量浓度,mg/L; ΔT_{VFA} 为批次发酵中为最大 T_{VFA} 质量浓度与初始 T_{VFA} 质量浓度之差; S_{COD} 为可溶性 COD 质量浓度,mg/L, T_{VFA}/S_{COD} 为 T_{VFA} 在 S_{COD} 中所占的比例; H_{Et} 、 H_{Ac} 、 H_{Pr} 、 H_{Bu} 依次为乙醇、乙酸、丙酸、丁酸。

产气量较高的葡萄糖摩尔分数 25% 和 0% 处理组中,尽管其酸化度不高(29.73% 和 54.81%),但具有较高的底物产酸率,即基质转化为挥发酸的效率较高,消耗单位基质(以 COD 计)转化为挥发酸比率分别为 0.68、0.89,且两处理组在最大酸化度时的挥发酸占可溶性 COD 比例(T_{VFA}/S_{COD})较低,分别为 0.35 和 0.59,这说明当木糖比例较高时溶液水解产酸速率变慢,尽管最终都能转化为挥发酸并被降解,但相较于其他比例的处理组,在最大酸化度时还有较多的 COD 尚未转化为挥发酸,这也与葡萄糖摩尔分数 25% 和 0% 处理组在前期的 COD 都处于较高水平相一致。由此,较低的酸化速率使得 VFA 积累现象得到改善,同时通过相对较慢但持续的 COD 向挥发酸的转化,也更有利于调节产酸和产甲烷过程的速率匹配,从而营造良好的产甲烷环境,

通过后期产甲烷阶段使得 COD 得到充分降解。
酸化产物 VFA 的组分变化对产甲烷性能会产生影响^[18~20]。随着木糖比例的提高,丙酸所占比例逐步下降,特别是在葡萄糖摩尔分数 100% 处理组中,丙酸比例高达 30%,但在葡萄糖摩尔分数 75% 处理组中下降为 10%,其他组中丙酸比例均低于 10%,因此除葡萄糖摩尔分数 100% 处理组为丙酸和丁酸混合型发酵途径外,其余均为典型的丁酸型发酵途径。可见,葡萄糖和木糖配比对水解发酵中间产物浓度和产物分布有着较大影响。从产酸阶段末端产物看来,100% 处理组在初始阶段乙酸、丙酸、丁酸都有着较高产生速率,特别不同于其他组的是丙酸和乙醇浓度较高,丙酸在 48 h 内成为主要挥发酸成分,但 48 h 后丙酸浓度开始逐步降低,这可能与 pH 值在 48 h 后提升到 6.5 以上有关。

3 结 论

(1) HCl 处理中,随 HCl 质量分数增加,葡萄糖质量浓度总体上减少,木糖质量浓度增高。碱处理中,随 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 质量浓度增加,葡萄糖质量浓度也呈减小趋势,但不同碱液浓度对应的木糖质量浓度均较为接近。在 HCl 较高质量分数(9%、7%)时,所得还原糖中木糖所占比例较大; $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 处理的组间差异相对较小,总体上在 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 较低质量浓度(2.4 g/L)时,前 48 h 葡萄糖所占比例较高。

(2) 葡萄糖和木糖的混合比例对产气特性影响显著,具体表现为随木糖比例的增加,产气速率增加,其中葡萄糖摩尔分数为 100% 时对应最低的产气率 191.75 mL/g,葡萄糖摩尔分数为 100% 和 75%

处理组未能获得高甲烷含量的气体,在葡萄糖摩尔分数 25% 实验组获得最高 COD 产气率 633.14 mL/g 和最高能量转化效率 26.40%,而纯木糖发酵的葡萄糖摩尔分数 0% 处理组存在一定的初期产气迟滞。

(3) 选用修正 Gompertz 模型描述了累积产甲烷过程,以酸化度、底物产酸率、污泥比产酸率等产酸动力学参数描述了产酸阶段动力学特点。在高 COD 浓度的发酵基质下,采用混合糖组分时,能有效避免高浓度基质产生的底物抑制,加快酸化进程,为采用混合基质提供了理论依据。酸化产物质量分数由大到小依次为:丁酸、乙酸、丙酸、乙醇,其中丁酸在最大酸化度时刻质量分数为 46% ~ 77%,除 100% 处理组为丙酸和丁酸混合型发酵途径外,其余均为典型的丁酸型发酵。

参 考 文 献

- 刘荣厚,吴晋锴,武丽娟. 菌种添加量对生物预处理小麦秸秆厌氧发酵的影响[J]. 农业机械学报,2012,43(11):147 ~ 151.
Liu Ronghou, Wu Jinkai, Wu Lijuan. Effects of supplement dose of microorganism in biological pretreatment of wheat straw on its characteristics of anaerobic digestion for biogas production[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43 (11): 147 ~ 151. (in Chinese)
- 艾平,晏水平,李会,等. 秸秆规模化利用农村能源工程模式评价[J]. 农业现代化研究,2011,32(增刊):56 ~ 61.
Ai Ping, Yan Shuiping, Li Hui, et al. Evaluation on different modes of rural energy project for large-scale straw utilization [J]. Research of Agricultural Modernization, 2011, 32(Supp.): 56 ~ 61. (in Chinese)
- 何北海,林鹿,孙润仓,等. 木质纤维素化学水解产生可发酵糖研究[J]. 化工进展,2007,19(7):1 141 ~ 1 146.
He Beihai, Lin Lu, Sun Runcang, et al. Chemical hydrolysis of lignocellulosics into fermentable sugars [J]. Progress in Chemistry, 2007, 19 (7): 1 141 ~ 1 146. (in Chinese)
- Hendriks A, Zeeman G. Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass[J]. Bioresource Technology, 2009, 100(1): 10 ~ 18.
- Mosier N, Wyman C, Dale B, et al. Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass[J]. Bioresource Technology, 2005, 96(6):673 ~ 686.
- 田沈,徐鑫,孟繁燕,等. 木质纤维素乙醇发酵研究进展[J]. 农业工程学报,2006,22(增刊1):221 ~ 224.
Tian Shen, Xu Xin, Meng Fanyan, et al. Development of ethanol production from hydrolysates [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(Supp.1):221 ~ 224. (in Chinese)
- Hespeell R B. Extraction and characterization of hemicellulose from the corn fiber produced by corn wet-milling processes [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1998, 46(7): 2 615 ~ 2 619.
- Lin C Y, Cheng C H. Fermentative hydrogen production from xylose using anaerobic mixed microflora[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2006, 31(7):832 ~ 840.
- Lo Y C, Chen W M, Hung C H, et al. Dark H_2 fermentation from sucrose and xylose using H_2 producing indigenous bacteria: feasibility and kinetic studies [J]. Water Research, 2008, 42(4):827 ~ 842.
- 任云利,汪同嘉,王键吉. 葡萄糖和木糖共发酵的产氢特性[J]. 化工学报,2011,62(9):2 629 ~ 2 634.
Ren Yunli, Wang Tongjia, Wang Jianji. Characterization of biohydrogen production by co-fermentation of glucose and xylose[J]. CIESC Journal, 2011, 62(9):2 629 ~ 2 634. (in Chinese)
- Li S, Lai C F, Cai Y H, et al. High efficiency hydrogen production from glucose/xylose by the ldh-deleted thermoanaerobacterium strain [J]. Bioresource Technology, 2010, 101(22):8 718 ~ 8 724.
- 张强,庄莉,Thomsen A B. 玉米秸秆水解液脱毒处理发酵生产酒精研究 [J]. 农业机械学报,2012,43(7):108 ~ 111.
Zhang Qiang, Zhuang Li, Thomsen A B. Ethanol production from detoxified corn stover hydrolysate [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(7): 108 ~ 111. (in Chinese)
- Wang Y Y, Ai P, Hu C X, et al. Effects of various pretreatment methods of anaerobic mixed microflora on biohydrogen production and the fermentation pathway of glucose [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2011, 36(1):390 ~ 396.
- 王君福,吴丁丁,刘倩倩,等. 间苯三酚法测定玉米芯水解液中木糖含量[J]. 安徽农业科学,2011,39(22):13 542 ~ 13 544.
Wang Junfu, Wu Dingding, Liu Qianqian, et al. Determination of xylose content in corncob hydrolyzate by phloroglucinol method [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011, 39(22):13 542 ~ 13 544. (in Chinese)

- 8 Wright J, Yang A, Ganesh A, et al. Robust face recognition via sparse representation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2009, 31(2): 210 ~ 227.
 - 9 石娜. 基于 snake 和水平集的图像分割方法的研究及应用[D]. 长春: 吉林大学, 2011.
 - 10 Li Chunming, Xu Chenyang, Gui Changfeng, et al. Level set evolution without reinitialization: a new variational formulation[J]. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2005, 1: 430 ~ 436.
 - 11 田有文. 基于纹理特征和支持向量机的葡萄病害的识别[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(8): 1 486 ~ 1 488.
Tian Youwen. A method of recognizing grape disease based on texture feature and support vector machine[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005, 26(8): 1 486 ~ 1 488. (in Chinese)
 - 12 王惠明, 史萍. 图像纹理特征的提取方法[J]. 中国传媒大学学报, 2006, 13(1): 49 ~ 52.
Wang Huiming, Shi Ping. Methods to extract images texture features[J]. Journal of Communication University of China Science and Technology, 2006, 13(1): 49 ~ 52. (in Chinese)
 - 13 Rauhut H, Schnass K, Vandergheynst P. Compressed sensing and redundant dictionaries[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2008, 54(5): 2 210 ~ 2 219.
 - 14 Candes E, Romberg J, Tao T. Robust uncertainty principles: exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(4): 489 ~ 509.
 - 15 Bruckstein A, Donoho D, Elad M. From sparse solutions of systems of equations to sparse modeling of signals and images[J]. SIAM Review, 2009, 51(1): 34 ~ 81.
 - 16 Donoho D. For most large underdetermined systems of linear equations the minimal l_1 -norm solution is also the sparsest solution [J]. Communications on Pure and Applied Mathematics, 2006, 59(6): 797 ~ 829.
-

(上接第 97 页)

- 7 姚立健, 丁为民, 赵三琴, 等. 基于 SOFM 神经网络的茄子图像分割方法[J]. 南京农业大学学报, 2008, 31(3): 140 ~ 144.
Yao Lijian, Ding Weimin, Zhao Sanqin, et al. Method of image segmentation for eggplant based on SOFM neural network[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2008, 31(3): 140 ~ 144. (in Chinese)
 - 8 乔曦, 黄亦其. Matlab 在精密排种机监测装置中的应用研究[J]. 中国农机化, 2011(2): 108 ~ 110.
Qiao Xi, Huang Yiqi. The research of precise seed metering device based on Matlab [J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2011(2): 108 ~ 110. (in Chinese)
 - 9 陆尚平, 文友先, 葛维, 等. 基于机器视觉的甘蔗茎节特征提取与识别[J]. 农业机械学报, 2010, 41(10): 190 ~ 194.
Lu Shangping, Wen Youxian, Ge Wei, et al. Recognition and features extraction of sugarcane nodes based on machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(10): 190 ~ 194. (in Chinese)
 - 10 Moshashai K, Almasi M, Minaei S, et al. Identification of sugarcane nodes using image processing and machine vision technology [J]. International Journal of Agricultural Research, 2008, 3(5): 357 ~ 364.
 - 11 Sanet H. Connected component labeling using quadrees[J]. Journal of the ACM, 1981, 28(3): 487 ~ 501.
 - 12 朱景福. 图像处理中小边缘消除方法研究[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2006, 18(3): 79 ~ 82.
Zhu Jingfu. Research on method of eliminating small edge in image processing[J]. Journal of Heilongjiang August First Land Reclamation University, 2006, 18(3): 79 ~ 82. (in Chinese)
 - 13 Galigekere R R, Holdsworth D W. Moment patterns 3n the radon space[J]. Optical Engineering, 2000, 39(4): 1 088 ~ 1 097.
-

(上接第 182 页)

- 15 Gurung A, van Ginkel S W, Kang W C, et al. Evaluation of marine biomass as a source of methane in batch tests: a lab-scale study [J]. Energy, 2012, 43(1): 396 ~ 401.
- 16 李秋敏, 杨斌, 张无敌, 等. 蔗糖发酵产氢与产甲烷能源转换效率的研究[J]. 云南师范大学学报, 2011, 31(增刊): 97 ~ 104.
Li Qiumin, Yang Bin, Zhang Wudi, et al. Study on the energy conversion efficiency of hydrogen and methane fermentation of saccharose [J]. Journal of Yunnan Normal University, 2011, 31(Supp.): 97 ~ 104. (in Chinese)
- 17 Guerrero L, Omil F, Mendez R, et al. Anaerobic hydrolysis and acidogenesis of wastewaters from food industries with high content of organic solids and protein [J]. Water Research, 1999, 33(15): 3 281 ~ 3 289.
- 18 Lier J B V, Grolle K C, Frijters C T, et al. Effects of acetate, propionate, and butyrate on the thermophilic anaerobic degradation of propionate by methanogenic sludge and defined cultures[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1993, 59(4): 1 003 ~ 1 011.
- 19 Demirel B, Yenigün O. Two-phase anaerobic digestion processes: a review [J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2002, 77(7): 743 ~ 755.
- 20 Wang Q, Kuninobub M, Ogawa H I, et al. Degradation of volatile fatty acids in highly efficient anaerobic digestion [J]. Biomass and Bioenergy, 1999, 16(6): 407 ~ 416.