

# 两步法高效水解水稻秸秆制取木糖和葡萄糖

闫碌碌<sup>1</sup>, 申 锋<sup>1</sup>, 王 岩<sup>2</sup>, 漆新华<sup>1\*</sup>

(1.农业部环境保护科研监测所, 天津 300191; 2.天津市建筑材料产品质量监督检测中心, 天津 300381)

**摘 要:** 在序批式高压反应釜反应器中, 采用两步法研究了水稻秸秆在稀硫酸水溶液中水解为木糖和葡萄糖, 系统考察了反应温度、反应时间、水稻秸秆用量和稀酸浓度对水稻秸秆水解反应的影响。实验结果表明: 与传统一步法酸水解相比, 采用两步法酸水解水稻秸秆, 既可以得到很高的木糖产率, 又可以得到较高的葡萄糖产率; 反应温度、反应时间和酸浓度对水稻秸秆酸水解产物的分布和产率有着重要影响。第一步水解反应中, 当底物用量为 1.5 g, 酸浓度为 0.5% wt 时, 140 °C 反应 120 min, 木糖产率高达 162.6 g·kg<sup>-1</sup>; 第二步水解反应中, 当底物用量为 0.5 g, 酸浓度为 1.0% wt 时, 180 °C 反应 120 min, 葡萄糖产率高达 216.5 g·kg<sup>-1</sup>。本研究为农业废弃物水稻秸秆的高效和高值资源化利用提供了新的策略。

**关键词:** 水稻秸秆; 葡萄糖; 木糖; 两步法; 水解

中图分类号: X71 文献标志码: A 文章编号: 2095-6819(2016)04-0355-06 doi: 10.13254/j.jare.2016.0054

引用格式:

闫碌碌, 申 锋, 王 岩, 等. 两步法高效水解水稻秸秆制取木糖和葡萄糖[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(4): 355-360.

YAN Lu-lu, SHEN Feng, WANG Yan, et al. Efficient Hydrolysis of Rice Straw into Xylose and Glucose by a Two-step Process[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2016, 33(4): 355-360.

## Efficient Hydrolysis of Rice Straw into Xylose and Glucose by a Two-step Process

YAN Lu-lu<sup>1</sup>, SHEN Feng<sup>1</sup>, WANG Yan<sup>2</sup>, QI Xin-hua<sup>1\*</sup>

(1. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China; 2. Tianjin Building Materials and Product Quality Control Center, Tianjin 300381, China)

**Abstract:** The hydrolysis of rice straw into xylose and glucose in dilute sulfuric acid aqueous solution was studied with a two-step process in batch autoclave reactor. The results showed that compared with the traditional one-step acid hydrolysis, both xylose and glucose could be produced in high yields from rice straw by using the two-step acid hydrolysis process. The effects of reaction temperature, reaction time, the amount of rice straw and acid concentration on the hydrolysis of rice straw were systematically studied, and showed that except initial rice straw loading amount, the other parameters had remarkable influence on the products distribution and yields. In the first-step of the hydrolysis process, a high xylose yield of 162.6 g·kg<sup>-1</sup> was obtained at 140 °C after 120 min reaction time. When the solid residues from the first step were subjected to a second-step hydrolysis, a glucose yield as high as 216.5 g·kg<sup>-1</sup> could be achieved at 180 °C after 120 min. This work provides a promising strategy for the efficient and value-added utilization of agricultural wastes such as rice straw.

**Keywords:** rice straw; glucose; xylose; two-step process; hydrolysis

化石能源的日渐耗竭及其引发的严重环境问题, 迫使人们寻找新的可再生和清洁能源<sup>[1-2]</sup>。生物质作为一种可再生能源, 其分布广泛, 储量丰富, 引起越来越

多的关注<sup>[3]</sup>。以自然界广泛存在的木质纤维素为原料, 经过一系列的物理和化学过程可生产制备多种高附加值的化学品, 它们在医药、化工等领域有着非常广泛的应用<sup>[4-7]</sup>。

我国是典型的农业大国, 作为生物质资源的农作物秸秆产量巨大, 据统计其产量可达 7 亿多 t·a<sup>-1</sup><sup>[8]</sup>, 其中水稻秸秆占南方农作物秸秆的绝大部分。目前, 相当一部分农作物秸秆被就地焚烧或用作生活燃料<sup>[8]</sup>, 这样不仅浪费了宝贵的资源, 而且容易引起环境

收稿日期: 2016-03-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(21577073); 中国农业科学院创新工程协同创新项目和青年英才项目; 948 项目(2016-948-朱岩)。

作者简介: 闫碌碌(1988—), 山东东营人, 助理研究员, 研究方向为生物质资源化。

\* 通信作者: 漆新华 E-mail: qixinhua@nankai.edu.cn

污染等问题,因此对农作物秸秆的有效利用成为研究的重点<sup>[9]</sup>。在农作物秸秆的资源化利用过程中,关键步骤之一是其水解产生糖。农作物秸秆的稀酸水解是较常见的水解方法<sup>[10-11]</sup>。但是由于农作物秸秆中的半纤维素与纤维素的水解条件差异较大<sup>[12-13]</sup>,传统的一步水解法很难同时得到较高的木糖和葡萄糖产率。本文将采用两步法对水稻秸秆进行酸水解,以期获得较高的木糖和葡萄糖产率,为水稻秸秆的资源化利用提供一定借鉴。

## 1 材料与方法

### 1.1 试剂与材料

葡萄糖、木糖、糠醛(天津市光复精细化工研究所);甲酸、乙酰丙酸、乙酸(天津市津科精细化工研究所);5-HMF(安耐吉化学公司);稀硫酸溶液(上海麦克林生化科技有限公司)。

水稻秸秆取自湘潭(长沙)某农田,于 80 °C 干燥 24 h,之后粉碎,过 40 目筛备用。水稻秸秆成分通过美国国家可再生能源实验室(NREL)的方法测定,其纤维素、半纤维素含量分别为 30.5%和 17.2%。

### 1.2 仪器设备

Waters 超高效液相色谱(UPLC);德国 Sartorius 公司电子天平;低、高速离心机。

### 1.3 实验方法

准确称取一定质量的水稻秸秆于聚四氟乙烯不锈钢反应釜中,加入一定体积的稀硫酸溶液,将不锈钢反应釜置于预先升温至设定温度的加热搅拌仪,开始计时。第一、二步水解反应所用反应釜体积分别为 100 mL 和 50 mL,反应过程中转速控制在 1 000 r·min<sup>-1</sup>;每组实验重复 3 次,实验数据取平均值计算。反应流程如图 1 所示。

### 1.4 测定方法

反应结束后,迅速用冷水将反应釜冷却,将水解液离心分离,过 0.2 μm 滤膜,用高效液相色谱分析,采用标准曲线法对水解产物进行定量测定。

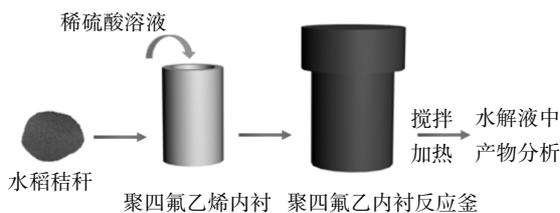


图 1 水稻秸秆稀酸水解流程图

Figure 1 Dilute acid hydrolysis process of rice straw

高效液相色谱分析测试条件:色谱柱型号为 SUGAR SH1011,流动相 0.005 mol·L<sup>-1</sup> 硫酸溶液,流速 0.5 mL·min<sup>-1</sup>,柱温 50 °C,RI 检测器温度 35 °C。

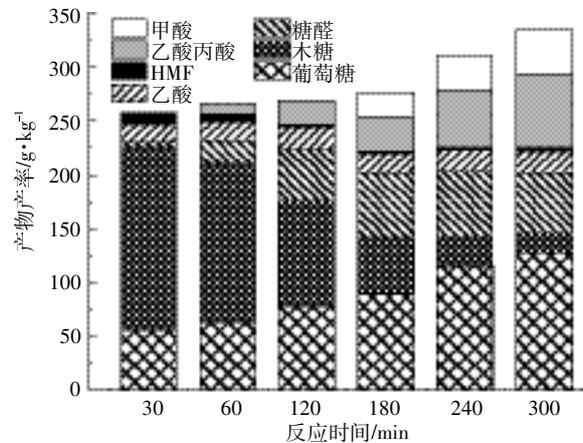
### 1.5 数据分析

利用 Microsoft Excel 2013 进行实验基础数据的处理,应用 Origin 8.5 分析数据、作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 一步法酸水解

首先采用传统的一步法对水稻秸秆进行了稀酸水解实验(图 2)。从图 2 可以看到,在 160 °C 下反应 30 min,就可以得到较高的木糖产率(169.1 g·kg<sup>-1</sup>),而此时葡萄糖产率只有 55.6 g·kg<sup>-1</sup>。为了提高葡萄糖产率,进一步延长反应时间,可以看到随着反应时间的延长,葡萄糖产率逐步增加,到 300 min 时葡萄糖产率达到 127.5 g·kg<sup>-1</sup>,但此时生成的木糖却发生了明显的分解,转化为糠醛、甲酸、乙酸等产物。在 300 min 时木糖产率下降为 19.1 g·kg<sup>-1</sup>。因此,在传统的一步水解反应中,无法同时获得高产率的葡萄糖和木糖。



Reaction conditions: rice straw 0.5 g, 160 °C, 50 mL 0.125 mol·L<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

图 2 一步法酸水解中产物产率随时间的变化

Figure 2 Variation of product yields over time in one-step hydrolysis

### 2.2 两步法酸水解

为了防止葡萄糖产率增加的同时发生已经生成木糖的进一步分解,接下来采用两步水解法来处理水稻秸秆。首先在一个较低的温度下对水稻秸秆进行水解处理,以获得高产率的木糖;然后将未反应的水稻秸秆(此时的秸秆已去除绝大部分半纤维素,而以纤维素和木质素成分为主)分离后,再在较高反应温度

下将其中的纤维素组分水解为葡萄糖,以期获得高产率的木糖和葡萄糖。

### 2.2.1 第一步酸水解

在第一步酸水解反应中,主要是通过优化反应条件,得到较高的木糖产率。第一步酸水解过程中所用稀酸水溶液体积均为 25 mL。

#### 2.2.1.1 第一步中温度对水稻秸秆稀酸水解的影响

温度对第一步水解反应的影响如图 3 所示。从图 3 可知,当反应温度为 120 °C 时,反应速率较低,反应 150 min 后,木糖产率仍然较低;随着反应温度的升高,木糖生成速率开始加快,160 °C 时,反应 60 min,木糖的产率达到最大值 169.6 g·kg<sup>-1</sup>,之后随着反应时间延长,木糖产率出现一定程度的降低。

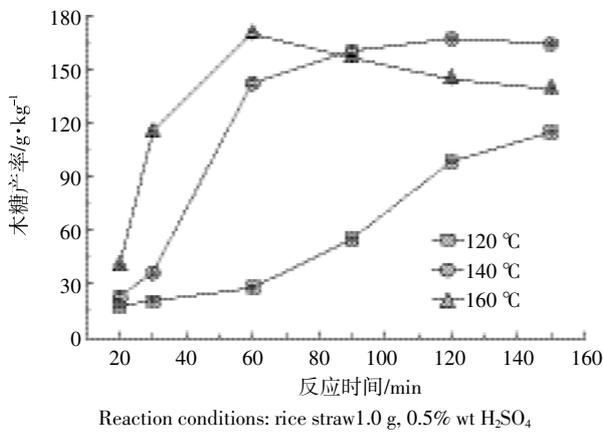


图 3 第一步中反应温度对水稻秸秆稀酸水解的影响

Figure 3 Effect of reaction temperature on rice straw hydrolysis catalyzed by dilute acid in the first-step

#### 2.2.1.2 第一步中酸浓度对水稻秸秆稀酸水解的影响

图 4 显示了不同酸浓度对木糖产率的影响。从图 4 可知,较低酸浓度下,木糖的生成速率较慢;随着酸

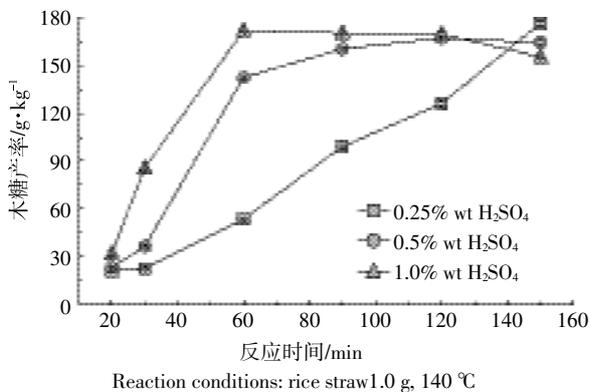


图 4 第一步中酸浓度对水稻秸秆稀酸水解的影响

Figure 4 Effect of acid concentration on rice straw hydrolysis catalyzed by dilute acid in the first-step

浓度的增加,木糖生成速率逐渐加快。与温度对反应的影响类似,在较高酸浓度下,随着反应时间的延长,木糖产率同样出现不同程度的降低。

#### 2.2.1.3 第一步中水稻秸秆用量对稀酸水解的影响

从现实意义考虑,底物浓度越高,对实际生产应用越有利。实验选取不同水稻秸秆用量进行了研究,结果如图 5 所示。当水稻秸秆用量为 0.5、1.0 g 和 1.5 g 时,木糖最大产率分别为 171.5、167.1、162.6 g·kg<sup>-1</sup>。当水稻秸秆用量从 0.5 g 增加到 1.5 g,木糖的最大产率变化不大,可见稀酸水解体系在较高底物浓度时仍具有良好的催化效果。

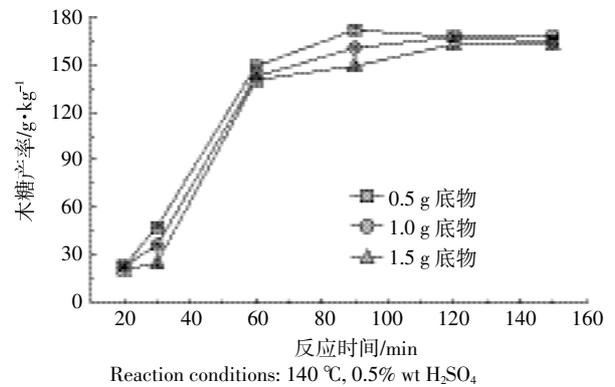


图 5 第一步中底物用量对水稻秸秆稀酸水解的影响

Figure 5 Effect of substrate concentration on rice straw hydrolysis catalyzed by dilute acid in the first-step

#### 2.2.1.4 第一步水稻秸秆酸水解液中组分分析

对水稻秸秆第一步水解液成分进行分析,结果如图 6 所示。从图 6 可知,水解液中主要组分有木糖(162.6 g·kg<sup>-1</sup>)、糠醛(5.3 g·kg<sup>-1</sup>)、乙酸(18.2 g·kg<sup>-1</sup>)、葡萄糖(30.5 g·kg<sup>-1</sup>)、HMF(4.9 g·kg<sup>-1</sup>),乙酰丙酸和甲酸未检出。由结果可知,在选定的实验条件下,水解液

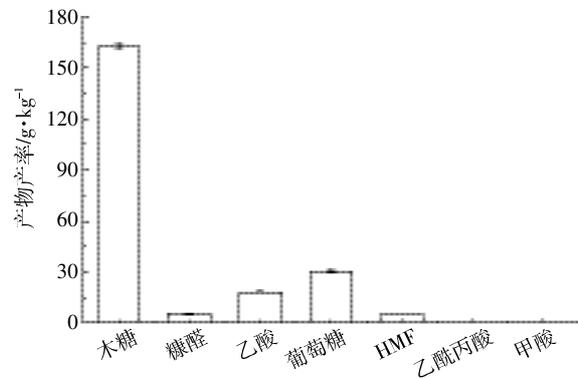


图 6 水稻秸秆稀酸水解液中产物

Figure 6 Products in the acid hydrolyzate of rice straw

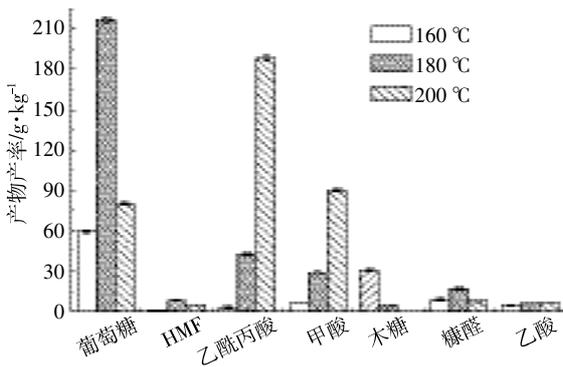
中最主要的成分是木糖，其他成分含量相对较少，因此非常有利于木糖的下一步利用。

### 2.2.2 第二步酸水解

基于第一步水稻秸秆稀酸水解的实验结果，选取 140 °C，120 min，0.5% wt H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>，1.5 g 底物反应条件下剩余的固体物质离心分离，用去离子水清洗，于 80 °C 干燥 24 h 后，进行第二步水解反应。对其成分测定可知，其纤维素为 47.0%。第二步酸水解过程中所用稀酸水溶液体积均为 10 mL。

图 7 显示了第二步中温度对水稻秸秆酸水解的影响。从图 7 可知，当反应温度为 160 °C 时，反应速率较低，葡萄糖和其他产物的产率都较低；当温度为 180 °C 时，葡萄糖的产率明显增加，达到 216.5 g·kg<sup>-1</sup>，其他产物仍维持在相对较低水平；当温度为 200 °C，葡萄糖的产率迅速减低，而乙酰丙酸和甲酸的产率有明显增加，其产率分别达到了 187.9 g·kg<sup>-1</sup> 和 90.0 g·kg<sup>-1</sup>。

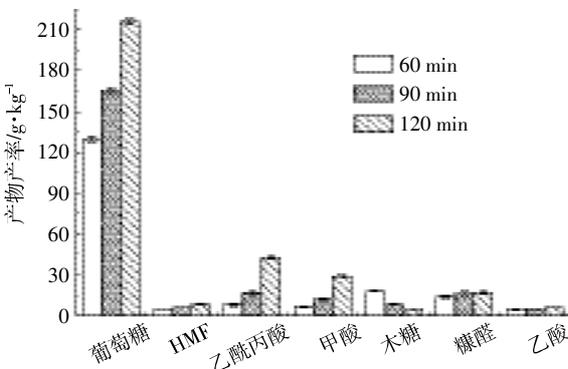
图 8 显示了 180 °C 时，第二步水解液中产物产率



Reaction conditions: 1.0% wt H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 0.5 g rice straw, 120 min

图 7 第二步中反应温度对水稻秸秆稀酸水解的影响

Figure 7 Effect of reaction temperature on rice straw hydrolysis catalyzed by dilute acid in the second-step



Reaction conditions: 180 °C, 1.0% wt H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 0.5 g rice straw

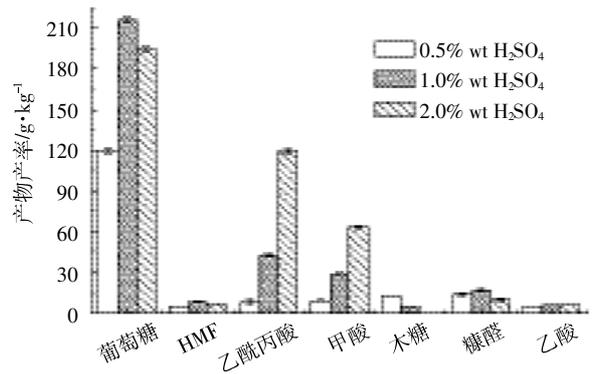
图 8 第二步中反应时间对水稻秸秆稀酸水解的影响

Figure 8 Effect of reaction time on rice straw hydrolysis catalyzed by dilute acid in the second-step

随时间的变化。目标产物葡萄糖的产率随着反应时间的延长，迅速增加，由 60 min 的 129.5 g·kg<sup>-1</sup> 到 120 min 的 216.5 g·kg<sup>-1</sup>。除木糖外，其他各产物产率总体随时间呈上升趋势。

从图 9 可知，较低酸浓度下，葡萄糖和其他产物产率均较低；一定浓度范围内，随着酸浓度的提高，产物产率出现明显的增加；但酸浓度为 2.0% wt 时，葡萄糖产率出现小幅度下降，而乙酰丙酸和甲酸出现了明显程度的增加，其产率分别达到了 119.6 g·kg<sup>-1</sup> 和 63.1 g·kg<sup>-1</sup>，说明酸浓度的提高不仅能保持较高的葡萄糖产率，而且有助于乙酰丙酸和甲酸的生成。

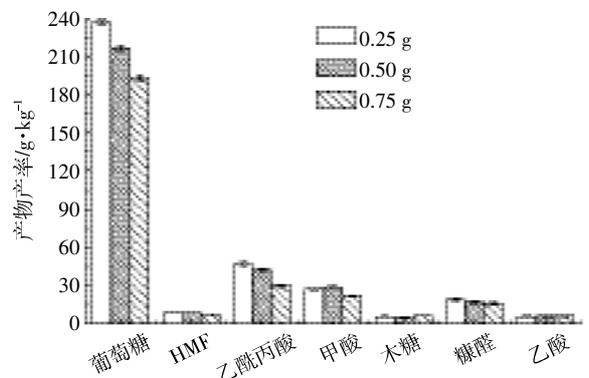
图 10 显示了第二步水解反应中不同水稻秸秆用量时，水解液中各产物产率的变化。从实验结果可知，水稻秸秆用量为 0.25、0.5 g 和 0.75 g 时，对应的葡萄糖产率分别是 237.1、216.5 g·kg<sup>-1</sup> 和 193.1 g·kg<sup>-1</sup>，随着水稻秸秆用量的增加呈现出较为明显的下降趋势。



Reaction conditions: 180 °C, 0.5 g rice straw, 120 min

图 9 第二步中酸浓度对水稻秸秆稀酸水解的影响

Figure 9 Effect of acid concentration on rice straw hydrolysis catalyzed by dilute acid in the second-step



Reaction conditions: 180 °C, 1.0% wt H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 120 min

图 10 第二步中底物用量对水稻秸秆稀酸水解的影响

Figure 10 Effect of substrate concentration on rice straw hydrolysis catalyzed by dilute acid in the second-step

### 3 讨论

水稻秸秆在酸水解过程中,乙酸主要产生于半纤维中乙酰基的裂解<sup>[14]</sup>,除此外还存在以下主要反应<sup>[15-17]</sup>:

半纤维素 $\xrightarrow{H^+}$ 木糖

木糖 $\xrightarrow{H^+}$ 糠醛

纤维素 $\xrightarrow{H^+}$ 葡萄糖

葡萄糖 $\xrightarrow{H^+}$ HMF

HMF $\xrightarrow{H^+}$ 乙酰丙酸+甲酸

因为半纤维素的酸水解比纤维素更容易实现,所以在水稻秸秆的一步法酸水解过程中,选定实验条件下,葡萄糖和木糖产率随时间呈现不同的变化趋势(图2)。也正因为这样,在水稻秸秆的一步法酸水解中很难同时得到高的木糖和葡萄糖产率。

由于半纤维素的水解较为容易<sup>[12]</sup>,因此在第一步水稻秸秆的酸水解反应中,在较低的温度、酸浓度和较高的底物浓度下(图3~图5),就可以实现水稻秸秆中半纤维素向木糖的高效转化。从图6的结果可知,第一步酸水解中,其主要产物是木糖,葡萄糖和其他糖类衍生物含量较少,说明在选定的反应条件下,可实现半纤维素的高效水解,同时减小了其他反应的发生。

第一步酸水解,可以看作是水稻秸秆的前处理。在这一过程中,大部分半纤维素被水解转化为木糖,使水稻秸秆中的纤维素暴露,增加了第二步酸水解过程中 $H^+$ 对纤维素的可及度,可以大大增加纤维素的水解程度<sup>[18-19]</sup>。

图7~图10显示了不同因素对第二步水解反应的影响。结合前面所列举的主要反应和图7的结果可知,与低温相比,在反应温度200℃时,生成的葡萄糖在高温下可能发生进一步的分解,经由5-羟甲基糠醛(HMF)最终生成乙酰丙酸和甲酸等<sup>[20]</sup>。图8的结果显示,在一定反应时间段内葡萄糖的产率呈现上升趋势,说明在这个时间段内,葡萄糖的生成速率大于其的分解速率,葡萄糖得到不断地积累。图9则说明,酸浓度的提高有利于葡萄糖产率的增加,但是超过一定范围,葡萄糖的分解速率开始大于其生成速率,葡萄糖产率降低。但是考虑到乙酰丙酸和甲酸的大幅度增加,说明酸浓度的提高一定程度上增加了纤维素的转化率。图10说明提高底物浓度对葡萄糖的产率起到了一定抑制作用,一方面可能是高底物浓度加剧了副反应的发生;另一方面可能是高底物浓度致使 $H^+$ 浓

度不足。

### 4 结论

本研究中,通过两步法对水稻秸秆进行酸催化水解,克服了一步法水稻秸秆水解过程中无法同时获得高的木糖和葡萄糖产率的问题,既可以得到很高的木糖产率,又可以得到较高的葡萄糖产率。第一步酸水解中,木糖产率可达到 $162.6\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (140℃,0.5% wt  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,1.5 g 底物,120 min);第二步酸水解中,葡萄糖产率可达到 $216.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (180℃,1.0% wt  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,0.5 g 底物,120 min)。

反应温度、反应时间和酸浓度对水稻秸秆两步酸水解过程的产物分布和产率都有着重要影响。

#### 参考文献:

- [1] 赵 律,李辉勇,李志光,等.稀硫酸催化水解稻草秸秆半纤维素的研究[J].化学与生物工程,2007,24(12):35-38.  
ZHAO Lv, LI Hui-yong, LI Zhi-guang, et al. Study on the hydrolysis of hemicellulose in rice straw catalyzed by dilute sulfuric acid[J]. *Chemistry & Bioengineering*, 2007, 24(12): 35-38. (in Chinese)
- [2] Gurgel LVA, Marabezi K, Zambom M D, et al. Dilute acid hydrolysis of sugar cane bagasse at high temperatures: kinetic study of cellulose saccharification and glucose decomposition. Part I: sulfuric acid as the catalyst [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2012, 51:1173-1185.
- [3] Lin R, Cheng J, Ding L, et al. Subcritical water hydrolysis of rice straw for reducing sugar production with focus on degradation by-products and kinetic analysis[J]. *Bioresource Technology*, 2015,186:8-14.
- [4] Zhou C H, Xia X, Lin C X, et al. Catalytic conversion of lignocellulosic biomass to fine chemicals and fuels[J]. *Chemical Society Reviews*, 2011, 40: 5588-5617.
- [5] 李慧玲,任俊莉,王帅阳,等.农业废弃物转化成能源及高附加值化学品的研究进展[J].生物质化学工程,2012,46(6):55-60.  
LI Hui-ling, REN Jun-li, WANG Shuai-yang, et al. Research progress of the conversion of agricultural residue into energy and high-value chemicals[J]. *Biomass Chemical Engineering*, 2012, 46(6): 55-60. (in Chinese)
- [6] Roberto I C, Mussatto S I, Rodrigues R C L B. Dilute-acid hydrolysis for optimization of xylose recovery from rice straw in a semi-pilot reactor[J]. *Industrial Crops and Products*, 2003,17:171-176.
- [7] Tong X, Ma Y, Li Y. Biomass into chemicals: Conversion of sugars to furan derivatives by catalytic processes[J]. *Applied Catalysis A: General*, 2010, 385: 1-13.
- [8] 刘龙飞,邱 竹,石建东,等.稀酸催化小麦秸秆分步水解研究[J].化工技术与开发,2012,41(11):14-17.  
LIU Long-fei, QIU Zhu, SHI Jian-dong, et al. Study on dilute sulfuric acid hydrolysis of wheat straw[J]. *Technology & Development of Chemical Industry*, 2012, 41(11):14-17. (in Chinese)

- [9] 刘海燕, 刘 鹏, 王秀飞, 等. 利用农作物秸秆生产原料糖的研究进展[J]. 材料导报 A: 综述篇, 2015, 29(5): 97-108.  
LIU Hai-yan, LIU Peng, WANG Xiu-fei, et al. A review for producing raw sugar from crop straw[J]. *Materials Review A: Review Article*, 2015, 29(5): 97-108. (in Chinese)
- [10] 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]. 化学进展, 2007, 19(7-8): 1141-1146.  
HE Bei-hai, LIN Lu, SUN Run-cang, et al. Chemical hydrolysis of lignocellulosics into fermentable sugars[J]. *Progress in Chemistry*, 2007, 19(7-8): 1141-1146. (in Chinese)
- [11] 李星伟, 巩桂芬, 李晓东. 超临界下有机酸对稻秆水解糖化的影响[J]. 生物加工过程, 2012, 10(2): 11-14.  
LI Xing-wei, GONG Gui-fen, LI Xiao-dong. Effects of organic acids on rice straw on supercritical hydrolysis[J]. *Chinese Journal of Bioprocess Engineering*, 2012, 10(2): 11-14. (in Chinese)
- [12] 刘慧屏, 徐 刚, 罗 鹏, 等. 超/亚临界水两步法水解稻秆制备还原糖[J]. 生物质化学工程, 2011, 45(4): 17-22.  
LIU Hui-ping, XU Gang, LUO Peng, et al. Reducing sugars production from rice straw by a two-step hydrolysis with supercritical /subcritical water[J]. *Biomass Chemical Engineering*, 2011, 45(4): 17-22. (in Chinese)
- [13] Lenihan P, Orozco A, O'Neill E, et al. Dilute acid hydrolysis of lignocellulosic biomass[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2010, 156:395-403.
- [14] Gómez Bernal H, Bernazzani L, Raspolli Galletti A M. Furfural from corn stover hemicelluloses: A mineral acid-free approach[J]. *Green Chemistry*, 2014, 16:3734-3740.
- [15] Climent M J, Corma A, Iborra S. Conversion of biomass platform molecules into fuel additives and liquid hydrocarbon fuels[J]. *Green Chemistry*, 2014, 16:516-547.
- [16] Wu Q Q, Ma Y L, Chang X, et al. Optimization and kinetic analysis on the sulfuric acid - catalyzed depolymerization of wheat straw [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2015, 129:79-86.
- [17] 余晓红, 邵 荣, 董 锐, 等. 芦苇秸秆稀硫酸水解工艺研究 [J]. 安徽农业科学, 2010, 38(6): 2774-2776, 2789.  
YU Xiao-hong, SHAO Rong, DONG Rui, et al. Study on hydrolysis process of reed straw with dilute sulphuric acid[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(6): 2774-2776, 2789. (in Chinese)
- [18] Kshirsagar S D, Waghmare P R, Loni P C, et al. Dilute acid pretreatment of rice straw, structural characterization and optimization of enzymatic hydrolysis conditions by response surface methodology[J]. *RSC Advances*, 2015(5): 46525-46533.
- [19] Hsu T C, Guo G L, Chen W H, et al. Effect of dilute acid pretreatment of rice straw on structural properties and enzymatic hydrolysis [J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101:4907-4913.
- [20] Guo H, Lian Y, Yan L, et al. Cellulose-derived superparamagnetic carbonaceous solid acid catalyst for cellulose hydrolysis in an ionic liquid or aqueous reaction system[J]. *Green Chemistry*, 2013, 15:2167-2174.