

活性炭对玉米芯半纤维素稀硫酸水解液的 脱毒效果

葛菁萍 刘国明 孙红兵 凌宏志 杨晓峰 房保柱 平文祥*

(黑龙江省普通高等学校微生物重点实验室 黑龙江大学生命科学学院 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 用稀硫酸对玉米芯半纤维素进行水解是一种常用的方法,但是玉米芯半纤维素在水解成木糖等还原糖的同时还产生了糠醛、乙酸和酚类等抑制水解液发酵的毒物。以混合脱毒法为基础,研究活性炭在脱毒过程中的作用。结果表明,有脱毒效果的活性炭种类是 GH-13 和 GH-15,随着活性炭添加量的增大,脱毒效果增强,但木糖损失也随之增多。其中采用 5% GH-15 时的脱毒效果最佳,该条件下乙酸去除率为 24.60%,糠醛去除率达 100%,酚类化合物去除效率 R_{280} 值 0.009,而木糖的损失率为 23.70%。

关键词: 木糖, 半纤维素水解液, 活性炭, 脱毒, 稀硫酸

Effect of the activated charcoal on corncob hemicellulose hydrolysate detoxification

GE Jing-Ping LIU Guo-Ming SUN Hong-Bing LING Hong-Zhi
YANG Xiao-Feng FANG Bao-Zhu PING Wen-Xiang*

(Key Laboratory of Microbiology, College of Life Science, Heilongjiang University, Harbin, Heilongjiang 150080, China)

Abstract: It is a common method that hemicellulose of corncob was hydrolyzed by dilute sulfuric acid to obtain hemicellulose hydrolysates. However, the hydrolysates of hemicelluloses contain not only xylose but also some inhibitors such as furfural, acetic acid and various phenol compounds. Based on the combination of multiple detoxification methods, the effect of activated charcoal in detoxification procedure was studied. The results showed that the activated charcoal GH-13 and GH-15 were effective for detoxification of the hydrolysate. The more the activated charcoal charge, the less the content of inhibitors in the hydrolysate, but the more xylose loss. GH-15 of 5% (W/V) was best for detoxification of the hydrolysate and acetic acid of 24.60% and furfural of 100% were removed in the condition, the R_{280}

基金项目: 国家 863 计划项目(No. 2007AA100702-6); 国家自然科学基金项目(No. 31070446); 黑龙江省教育厅重点项目(No. 11551z011); 黑龙江省科技攻关重大项目(No. GA07B401-6); 科技创新人才研究专项资金项目优秀学科带头人项目(No. RC2010XK002028); 黑龙江大学高层次人才(创新团队)支持计划项目(No. Hdd2010-17)

* 通讯作者: Tel: 86-451-86609016; ✉ wshw512@gmail.com
收稿日期: 2010-08-03; 接受日期: 2011-01-05

© 中国科学院微生物研究所期刊联合编辑部 <http://journals.im.ac.cn>

was 0.009, which stands for removal of phenolic compounds in hydrolysates, but xylose of 23.70% was lost in the process.

Keywords: Xylose, Hemicellulose hydrolysate, Activated charcoal, Detoxification, Dilute sulphuric acid

木质纤维素原料是地球上最丰富、最廉价的可再生资源,木质纤维素中半纤维素约占 30%。半纤维素经稀硫酸水解可得含有木糖、阿拉伯糖等单糖的半纤维素水解液,可用于微生物发酵获得木糖醇、乙醇和其它有用产物。但在水解过程中也产生了一定量的糠醛、乙酸、酚类等抑制水解液发酵的毒性物质^[1]。如何在发酵前对水解液预处理脱毒,对改善水解液发酵性能、提高产品得率非常重要。目前常用的脱毒方法主要有汽提法^[2]、碱调节法^[3]、负压蒸发法^[4]、溶剂萃取法^[5]、吸附法^[6]等。此外,将上述几种脱毒方法混合使用(混合脱毒法)可以产生更好的脱毒效果^[2]。对于吸附法脱毒,采用活性炭吸附^[6]是较常用且非常有效的脱毒方法。本文以半纤维素含量高、来源广泛的玉米芯为原料,利用稀酸水解法对玉米芯半纤维素进行水解获得半纤维素水解液。采用混合脱毒方法对半纤维素水解液进行脱毒,研究了活性炭在脱毒过程中起到的重要作用。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 菌种: 休哈塔假丝酵母 *Candida shehatae* HDYXHT-01, 黑龙江大学微生物重点实验室提供。

1.1.2 玉米芯及活性炭: 玉米芯,收购自黑龙江省望奎县,自然晾干,粉碎至 1 cm 左右粒径。用于制备玉米芯半纤维素水解液。活性炭 XB,购自天津鑫铂特公司(生产原料为煤,是不定型颗粒活性炭,粒度范围: 0.55 mm–0.70 mm); 活性炭 GH-13 和 GH-15: 购自北京光华晶科活性炭有限公司(生产原料均为椰果壳,均是不定型颗粒活性炭, GH-13 粒度范围: 0.35 mm–0.45 mm, GH-15 粒度范围: 0.55 mm–0.65 mm)。

1.1.3 培养基: YPX (Yeast extract peptone xylose)培养基(g/L): 木糖 20, 蛋白胨 20, 酵母粉 10, pH 自然(固体 YPX 加 2%琼脂), 0.9×10⁵ Pa 灭菌 20 min; 发酵培养基(g/L): 经脱毒处理的玉米芯水解液(含还

原糖约 30 g/L, 各成分含量见表 1, 包括葡萄糖、木糖和阿拉伯糖), KH₂PO₄ 2.5, MgSO₄·7H₂O 0.25, CaCl₂ 0.25, 酵母粉 5, pH 5.0, 0.9×10⁵ Pa 灭菌 20 min。

1.2 方法

1.2.1 玉米芯半纤维素水解液的制备: 将粉碎后的玉米芯粉碎至 1 cm 左右粒径,按 1:10 固液比(W/V)^[7-9]加入 1.0% (V/V)的稀硫酸,在自动灭菌锅中 120 °C 下水解 1.5 h。抽滤除去玉米芯残渣后,得玉米芯半纤维素水解液。

1.2.2 玉米芯半纤维素水解液脱毒: 将玉米芯半纤维素水解液煮沸 15 min, 去除部分挥发性组分,然后按 1 g/L 的添加量加入无水 Na₂SO₃,再用 CaO 调 pH 至 7.0^[10-12]进行过中和处理,抽滤去沉淀;滤液用浓 H₂SO₄回调 pH 至 5.0,再次抽滤去沉淀,之后分别添加不同种类和浓度(W/V)的活性炭,在 40 °C、200 r/min 条件下振荡 1 h,抽滤得混合脱毒水解液。

1.2.3 菌种发酵: (1) 种子液培养,挑取斜面菌种一环,接入种子培养基,装液量为 30 mL/50 mL 三角瓶,于 30 °C、140 r/min 条件下培养 24 h; (2) 发酵培养,以 5% (W/V)接种量接种到装液量为 100 mL/250 mL 的脱毒水解液发酵培养基中,于 30 °C、140 r/min 条件下培养 48 h。

1.3 分析方法

1.3.1 还原糖、乙酸及糠醛的测定: 高效液相色谱法(HPLC)测定, HPLC 系统为 SCL-10A, 包括 LC-10ATvp 泵, RID-10A 示差检测器, HPX-87H (300 mm×7.8 mm, Aminex HPX-87H Ion Exclusion column)色谱柱。分析条件: 示差检测器温度 40 °C, 色谱柱温度 65 °C, 流动相为 0.005 mol/L H₂SO₄, 流速 0.8 mL/min, 上样量 20 μL/针, 水解液分析时间 32 min, 发酵液分析时间 17 min。发酵(水解)液处理方法: 取 1 mL 发酵(水解)液于 1.5 mL 离心管中, 13 000 r/min 离心 10 min, 保留上清液用于 HPLC 分析。各还原糖、乙酸及糠醛的浓度通过各自的标准曲线直接换算出来。

在结果分析中,各参数换算关系为:各成分的损失率(去除率)(%)=(原液各成分的含量-经脱毒处理后各成分的含量)/原液各成分的含量;还原糖利用率(%)=消耗还原糖量/初始还原糖量;乙醇得率(g/g)=乙醇产量/消耗还原糖量;乙醇产率[g/(L·h)]=乙醇产量/发酵时间。

1.3.2 酚类化合物的测定:用 UV-min 1240 紫外分光光度计对水解原液和脱毒液在 280 nm 波长下进行吸光度测定,水解液和脱毒液用蒸馏水稀释 100 倍后测吸光值,蒸馏水为空白对照。根据以下公式可以粗略的估算出活性炭对酚类化合物的 R_{280} 值^[5],此比值代表了对酚类化合物的去除效果,当比值为 1 时,说明对酚类化合物没有去除效果;比值越小,去除的酚类化合物也就越多。

$$R_{280}=\text{脱毒液吸光值/水解原液吸光值}$$

2 结果与分析

2.1 活性炭种类的选择

玉米芯半纤维素水解液经 CaO 脱毒后,再分别用 2% (W/V)的活性炭 XB、GH-13 和 GH-15 对其进行脱毒,脱毒后水解液中的还原糖、乙酸和糠醛等组分的含量见表 1。

由表 1 可知,经 2% (W/V) XB 脱毒后,脱毒液中还原糖、乙酸和糠醛含量与 CaO 脱毒后无明显变化;而经 2% (W/V) GH-13 和 2% (W/V) GH-15 脱毒

后,糠醛的去除率提高,分别达到 93.27%和 96.15%,但对乙酸的去毒效果不明显。上述结果表明,活性炭 XB 对水解液中乙酸和糠醛均没有明显的去除效果,而活性炭 GH-13 和 GH-15 对影响玉米芯半纤维素水解液利用的主要抑制物糠醛具有一定脱除效果。虽然 3 种活性炭的粒度相差较小,但 XB 原料来源为煤, GH-13 和 GH-15 原料来源为椰果壳,可见不同原料来源的活性炭对糠醛的脱除效果会产生一定影响。在后续的试验中,选择采用活性炭 GH-13 和 GH-15,研究了活性炭用量(浓度)对水解液脱毒效果的影响。

2.2 活性炭浓度的选择

2.2.1 活性炭浓度对脱毒效果的影响:分别选择 1%、2%、3%、4%和 5% (W/V)的 GH-13 和 GH-15 对玉米芯稀酸水解液进行脱毒处理,脱毒后采用 HPLC 法进行检测,结果见图 1 和图 2。

由图 1 和图 2 可知, GH-13 及 GH-15 的浓度对玉米芯半纤维素水解液的脱毒均有较大的影响,并且影响趋势也很相似。随着 GH-13 及 GH-15 浓度的增大,玉米芯半纤维素水解液中糠醛和乙酸的去除率增大,呈上升趋势,同时水解液中各还原糖损失率也随之增加。当 GH-13 及 GH-15 浓度均为 5% (W/V)时,糠醛可以被完全除去,而乙酸的去除率却分别为 29.41%及 24.60%,这对今后半纤维素水解液发酵产醇将带来不利影响。

表 1 活性炭 XB、GH-13 和 GH-15 对玉米芯半纤维素水解液的脱毒效果										
Table 1 The results of hemicellulose hydrolysate detoxified by activated charcoal XB, GH-13 and GH-15										
成分 Composition	葡萄糖 Glucose (g/L)	损失率 Loss rate (%)	木糖 Xylose (g/L)	损失率 Loss rate (%)	阿拉伯糖 Arabinose (g/L)	损失率 Loss rate (%)	乙酸 Acetic acid (g/L)	去除率 Removal rate (%)	糠醛 Furfural (g/L)	去除率 Removal rate (%)
原液 Stock solution	3.93±0.01	0	28.40±0.02	0	2.81±0.01	0	4.43±0.02	0	0.312±0.007	0
CaO	3.62±0.03	7.89±0.51	26.72±0.03	5.98±0.11	2.51±0.01	10.68±0.36	3.63±0.01	18.06±0.23	0.124±0.006	50.26±1.92
A	3.61±0.04	8.14±1.02	26.44±0.02	6.87±0.07	2.50±0.02	11.03±0.71	3.59±0.02	18.96±0.46	0.119±0.001	61.86±0.32
B	2.83±0.04	27.99±1.02	22.82±0.03	19.71±0.11	2.01±0.01	28.47±0.36	3.50±0.01	20.09±0.23	0.021±0.003	93.27±0.96
C	2.76±0.03	29.77±0.51	23.61±0.03	16.82±0.11	1.96±0.03	30.25±1.07	3.50±0.02	20.09±0.23	0.012±0.002	96.15±0.64

注: 活性炭处理后体积加水补至水解原液体积进行 HPLC 检测。A: CaO+2% (W/V) XB 脱毒液; B: CaO+2% (W/V) GH-13 脱毒液; C: CaO+2% (W/V) GH-15 脱毒液。

Note: Add water to hemicellulose hydrolysate to initiate volume after detoxified with activated charcoal. A, B, C: Detoxified by CaO+2% (W/V) XB, 2% (W/V) GH-13 and 2% (W/V) GH-15, respectively after CaO treatment.

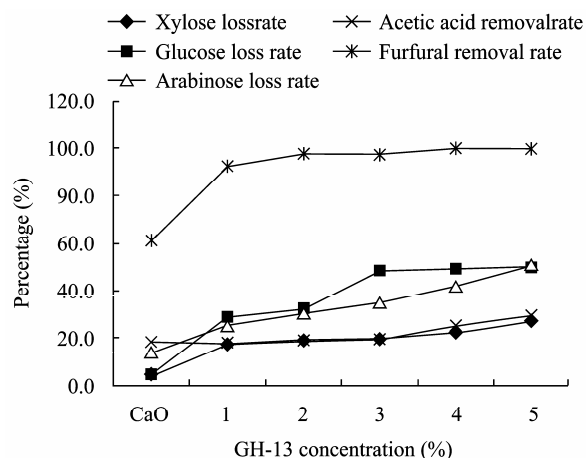


图1 不同浓度 GH-13 对半纤维素水解液成分的影响
Fig. 1 Effects of different concentrations of GH-13 on compositions of hemicellulose hydrolysate

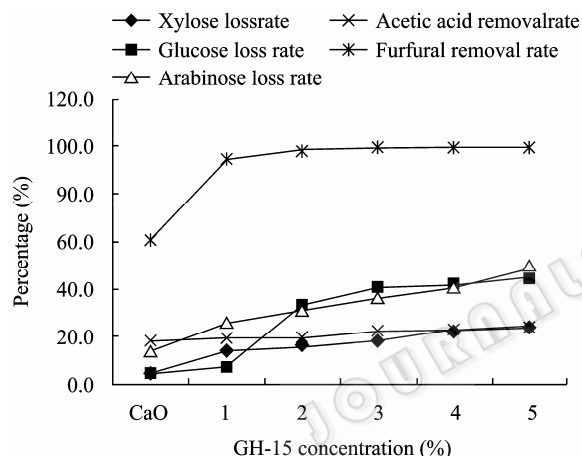


图2 不同浓度 GH-15 对半纤维素水解液成分的影响
Fig. 2 Effects of different concentrations of GH-15 on compositions of hemicellulose hydrolysate

不同浓度 GH-13 和 GH-15 对玉米芯半纤维素水解液中酚类物质去除的影响见图 3。由图 3 可看出, 玉米芯半纤维素水解液经 CaO 脱毒后, R_{280} 值为 0.833, 这说明酚类化合物去除效果不明显。当经 GH-13 和 GH-15 脱毒后, 随着 GH-13 和 GH-15 浓度的增大, R_{280} 值明显下降, 对酚类化合物的去除效果增强。当 GH-13 和 GH-15 浓度均为 5% (W/V) 时, R_{280} 值分别为 0.022 和 0.009, 说明此时酚类化合物去除比较完全。

综合而言, 不同浓度下活性炭 GH-13 和 GH-15 对乙酸的去除效果不明显, 但对糠醛去除效果较为

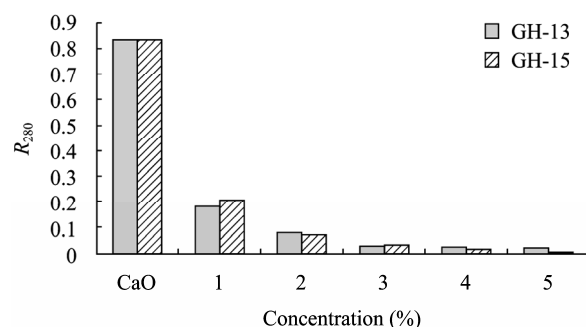


图3 GH-13 和 GH-15 浓度对酚类物质去除的影响
Fig. 3 Effects of GH-13 and GH-15 concentrations on the removal of phenolic compounds

显著, 4% (W/V) 的 GH-13 或 GH-15 即可完全去除糠醛。对于酚类化合物的去除, 3% (W/V) 的 GH-13 及 GH-15 均可达到较好的效果, R_{280} 值分别达到 0.030 及 0.034。但随着活性炭浓度的增大, 在增加抑制物去除率的同时, 还原糖的损失量也增大, 采用 5% (W/V) 的 GH-13 和 GH-15 处理, 木糖损失率分别为 27.20% 及 23.70%。

为进一步确定 GH-13 和 GH-15 的最佳脱毒浓度, 将休哈塔假丝酵母 HDYXHT-01 在不同浓度 GH-13 和 GH-15 玉米芯半纤维素脱毒水解液中进行乙醇发酵, 以选择较佳的活性炭浓度。

2.2.2 活性炭浓度对脱毒液发酵的影响: 将玉米芯半纤维素水解液采用上述方法脱毒处理后, 利用休哈塔假丝酵母 HDYXHT-01 在 30 °C、140 r/min 发酵 48 h 后, 检测玉米芯半纤维素水解液中还原糖浓度的变化及乙醇产量等指标, 计算得到还原糖的利用率、乙醇得率及乙醇产率, 结果见表 2。

从表 2 可以看出, 随着 GH-13 和 GH-15 浓度的增大, 发酵液乙醇产量增高, 还原糖利用率增大, 休哈塔假丝酵母 HDYXHT-01 对玉米芯半纤维素水解液的利用能力提高, 呈上升趋势。当 GH-13 浓度为 5% (W/V) 时, 乙醇产量达 10.86 g/L, 且还原糖利用率达 98.73%, 乙醇得率为 0.37 g/g, 乙醇产率为 0.23 g/(L·h); GH-15 浓度为 5% (W/V) 时, 乙醇产量达 11.21 g/L, 还原糖利用率达 95.84%, 乙醇得率为 0.39 g/g, 乙醇产率为 0.23 g/(L·h), 各参数均达到最大值。

表 2 活性炭脱毒半纤维素水解液发酵结果
Table 2 Fermentation results of hemicellulose hydrolysate detoxified by activated charcoal

不同活性炭的浓度 Different activated charcoal's concentrations (W/V)	木糖 Xylose (g/L)	葡萄糖 Glucose (g/L)	阿拉伯糖 Arabinose (g/L)	还原糖利用率 Reducing sugar utilization (%)	乙醇产量 Ethanol production (g/L)	乙醇得率 Ethanol yield (g/g)	乙醇产率 Ethanol productivity [g/(L·h)]
1% GH-13	23.13±0.04	2.86±0.03	2.13±0.04	64.71±1.01	5.62±0.21	0.29±0.01	0.12±0.04
2% GH-13	22.80±0.02	2.83±0.02	2.00±0.02	89.26±1.20	8.93±0.13	0.33±0.05	0.19±0.03
3% GH-13	22.42±0.03	2.16±0.01	1.83±0.04	94.33±1.52	10.11±0.14	0.36±0.05	0.21±0.03
4% GH-13	21.63±0.04	2.07±0.04	1.64±0.04	97.72±1.43	10.62±0.21	0.36±0.07	0.22±0.04
5% GH-13	20.32±0.03	2.02±0.01	1.48±0.03	98.73±1.64	10.86±0.23	0.37±0.08	0.23±0.05
1% GH-15	23.91±0.03	3.71±0.04	2.12±0.04	63.33±1.34	6.81±0.16	0.36±0.08	0.14±0.03
2% GH-15	23.61±0.04	2.76±0.03	1.96±0.03	87.58±1.69	9.62±0.18	0.37±0.07	0.20±0.04
3% GH-15	22.78±0.02	2.45±0.04	1.85±0.01	91.07±1.28	10.42±0.11	0.38±0.04	0.22±0.02
4% GH-15	21.53±0.04	2.34±0.02	1.74±0.04	93.92±1.43	10.85±0.22	0.39±0.08	0.23±0.05
5% GH-15	21.34±0.04	2.24±0.03	1.43±0.04	95.84±1.76	11.21±0.14	0.39±0.05	0.23±0.03

综上所述, 休哈塔假丝酵母 HDYXHT-01 可以很好地利用脱毒后的玉米芯半纤维素脱毒水解液进行乙醇发酵。在研究浓度范围内, GH-13 和 GH-15 的最佳脱毒浓度均为 5% (W/V), 在该浓度下乙醇产量、还原糖利用率、乙醇得率和乙醇产率均达到最大值, 但 5% (W/V) GH-15 脱毒液发酵乙醇产量和乙醇得率高于 5% (W/V) GH-13, 并且该两种活性炭目前的市场价格均是 15 元/公斤, 因此, 在本试验条件下, 确定 5% (W/V) GH-15 为最佳选择。

3 讨论

木质纤维素原料在水解获得可发酵糖的同时, 也产生了发酵抑制物, 这些抑制物能限制菌体对糖的利用, 阻碍其生长及影响发酵过程^[8]。本文在综合使用过中和法^[3,13]、活性炭法和真空浓缩法^[4]的基础上, 重点研究了活性炭在水解液脱毒过程中的作用。这种混合脱毒法因为可以有效地去除或减少水解液中的抑制物, 是目前应用最多的脱毒方法。Alves^[14]将过中和法与活性炭吸附法组合使用, 脱毒液经 63 h 发酵后, 木糖醇得率达到了 0.79 g/g, 木糖醇产率达到了 0.47 g/(L·h), 而没经活性炭吸附脱毒发酵的木糖醇得率只有 0.58 g/g, 木糖醇产率只有 0.35 g/(L·h)。Converti 等^[15]用嗜鞣管囊酵母发酵木材脱毒水解液, 脱毒流程为用 Ca(OH)₂ 调 pH 10.0 后, 用硫酸回调 pH 5.5, 加入 1 g/L 的亚硫酸钠, 煮

沸至 100 °C, 最后采用活性炭吸附脱毒, 在起始木糖浓度为 89.0 g/L 的脱毒液中发酵 96 h, 最终获得木糖醇浓度为 39.5 g/L。在本研究中, 利用 5% (W/V) 的活性炭 GH-15 对玉米芯半纤维素水解液进行脱毒处理后, 在得到的还原糖浓度为 30 g/L 左右的水解液中, 利用休哈塔假丝酵母 HDYXHT-01 进行发酵 48 h, 乙醇产量可达 11.21 g/L, 且还原糖利用率达 95.84%, 乙醇产率为 0.23 g/(L·h), 乙醇得率为 0.39 g/g, 达到理论乙醇得率的 84.78%。

本文在试验中, 选择使用了不同原料来源和粒径的活性炭, 结果发现活性炭的脱毒效果与其原料有关, 在粒度范围相近的条件下, 果壳来源活性炭 (GH-13、GH-15) 对水解液脱毒效果优于煤来源活性炭 (XB)。但同样来源的活性炭 GH-13 和 GH-15 对水解液的脱毒效果相差不大, 说明活性炭的粒度范围对脱毒影响较小。随着活性炭浓度的增大, 还原糖损失随之增多。综合考虑还原糖利用率、损失率, 乙醇产量及活性炭的价格等因素, 在本试验条件下, 以 5% (W/V) GH-15 脱毒效果最好, 且脱毒后水解液的利用效率也较高。

此外, 试验结果显示活性炭对乙酸的去除效果较差, 但由于乙酸易于挥发, 因此经活性炭脱毒后, 一般可采用真空浓缩法, 以较好地去除乙酸。但尽管如此, 水解液中抑制物脱除还不够彻底, 混合脱毒方法还有待于进一步优化, 以期获得更好的脱毒

效果和更少的还原糖损失。

参 考 文 献

- [1] Mussatto SI, Roberto IC. Alternatives for detoxification of diluted-acid lignocellulosic hydrolyzates for use in fermentative processes: a review[J]. *Bioresource Technology*, 2004, 93(1): 1–10.
- [2] Yu ZS, Zhang HX. Pretreatments of cellulose pyrolysate for ethanol production by *Saccharomyces cerevisiae*, *Pichia* sp. YZ-1 and *Zymomonas mobilis*[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2003, 24(3): 257–262.
- [3] Purwadi R, Niklasson C, Taherzadeh MJ. Kinetic study of detoxification of dilute-acid hydrolyzates by $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [J]. *Journal of Biotechnology*, 2004, 114(1/2): 187–198.
- [4] Cantarella M, Cantarella L, Gallifuoco A, et al. Comparison of different detoxification methods for steam-exploded poplar wood as a substrate for the bio-production of ethanol in SHF and SSF[J]. *Process Biochemistry*, 2004, 39(11): 1533–1542.
- [5] Miyafuji H, Danner H, Neureiter M, et al. Detoxification of wood hydrolysates with wood charcoal for increasing the fermentability of hydrolysates[J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2003, 32(3/4): 396–400.
- [6] Canilha L, de Almeida e Silva JB, Solenzal AIN, et al. Eucalyptus hydrolysate detoxification with activated charcoal adsorption or ion-exchange resins for xylitol production[J]. *Process Biochemistry*, 2004, 39(12): 1909–1912.
- [7] 方祥年, 黄炜, 夏黎明. 半纤维素水解液中抑制物对发酵生产木糖醇的影响[J]. *浙江大学学报: 工学版*, 2005, 39(4): 547–551.
- [8] 张扬, 王运红, 邓立红, 等. 稻秸半纤维素水解条件和水解液脱毒的研究[J]. *纤维素科学与技术*, 2005, 13(2): 38–44.
- [9] 方祥年, 黄炜, 夏黎明. 假丝酵母发酵玉米芯半纤维素水解液生产木糖醇[J]. *生物工程学报*, 2004, 20(2): 295–298.
- [10] Millati R, Niklasson C, Taherzadeh MJ. Effect of pH, time and temperature of overliming on detoxification of dilute-acid hydrolyzates for fermentation by *Saccharomyces cerevisiae*[J]. *Process Biochemistry*, 2002, 38(4): 515–522.
- [11] Saha BC, Iten LB, Cotta MA. Dilute acid pretreatment, enzymatic saccharification and fermentation of wheat straw to ethanol[J]. *Process Biochemistry*, 2005, 40(12): 3693–3700.
- [12] Parajó JC, Domínguez H, Domínguez JM. Xylitol production from *eucalyptus* wood hydrolysates extracted with organic solvents[J]. *Process Biochemistry*, 1997, 32(7): 599–604.
- [13] 钱名宇, 杨秀山. 燃料酒精生产中对木质纤维素稀酸水解液的脱毒处理[J]. *太阳能*, 2005, 2: 49.
- [14] Alves LA, Felipe MGA, Silva JBAE. Pretreatment of sugarcane bagasse hemicellulose hydrolyzate for xylitol production by *Candida guilliermondii*[J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 1998, 70–72(1): 89–98.
- [15] Converti A, Domínguez JM, Perego P, et al. Wood hydrolysis and hydrolyzate detoxification for subsequent xylitol production[J]. *Chemical Engineering and Technology*, 2000, 23(11): 1013–1020.