

马贤武, 王 凯, 刘 轩, 等. 揉搓与稀碱联合预处理对水稻秸秆酶解产糖率及结构的影响[J]. 江苏农业学报, 2018, 34(6): 1294-1299.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2018.06.013

揉搓与稀碱联合预处理对水稻秸秆酶解产糖率及结构的影响

马贤武, 王 凯, 刘 轩, 荣昭强, 李晓林, 刘玉涛

(南京农业大学工学院/江苏省智能化农业装备重点实验室, 江苏 南京 210031)

摘要: 为了提高水稻秸秆中木质纤维素的利用率, 尽可能减少预处理过程中化学物质的使用量, 开展了揉搓与稀碱联合预处理对水稻秸秆酶解产糖率及结构影响的研究, 并通过正交试验获得最佳预处理效果的条件。研究采用 3,5-二硝基水杨酸法测定不同预处理酶解还原糖的含量, 并通过硅含量测定, 傅立叶变换红外光谱(FTIR), X 射线衍射(XRD)和秸秆成分测定对预处理后的水稻秸秆进行成分和结构分析。结果表明, 揉搓预处理不能明显提升水稻秸秆的酶解产糖率, 但能够加强稀碱的作用效果, 揉搓与稀碱联合预处理后的秸秆酶解产糖率达 33.63%, 明显高于原始秸秆和单独稀碱预处理秸秆; 揉搓预处理能够去除秸秆表面 33.40% 的硅, 与原始秸秆及单独稀碱预处理秸秆之间差异显著, 但与揉搓和稀碱联合预处理之间差异不明显; FTIR、XRD 和成分测定结果显示, 揉搓和稀碱联合预处理能够有效去除秸秆中的木质素, 使纤维素的结晶度提升; 正交试验发现氢氧化钙质量浓度 6%、反应温度 40℃, 反应时间 6 d 时, 联合预处理酶解产糖率最佳。研究结果将为秸秆高效资源化利用提供理论依据和指导。

关键词: 水稻秸秆; 联合预处理; 硅质; 产糖率; 结构

中图分类号: S38 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2018)06-1294-06

Study on the effects of rubbing-alkali pretreatment on enzymatic hydrolysis reducing sugar yield and structure of rice straw

MA Xian-wu, WANG Kai, LIU Xuan, RONG Zhao-qiang, LI Xiao-lin, LIU Yu-tao

(College of Engineering/Jiangsu Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

Abstract: In order to increase the utilization ratio of lignocellulose in rice straw and reduce the amount of chemicals used in pretreatment process, the effects of combined pretreatment with rubbing and dilute alkali on the sugar yield and structure of rice straw were studied, and the optimum pretreatment conditions were obtained through orthogonal experiment. 3,5- two nitro salicylic acid method was used to determine the content of enzymatic hydrolysis reducing sugar in different pretreatments, and the composition and structure of the pretreated rice straw were analyzed by silica content determination, Fourier transformation infrared spectroscopy (FTIR), X ray diffraction (XRD) and composition determination. The results showed that the rubbing pretreatment did not significantly increase the rate of enzymatic hydrolysis sugar of rice straw, but

it could enhance the effect of dilute alkali. The enzymatic hydrolysis sugar rate of straw pretreated with rubbing-alkali was 33.63%, which was significantly higher than that of the original straw and straw pretreated with dilute alkaline alone. Rubbing pretreatment could remove 33.40% of the surface silicon of straw, which was significantly higher than that of the original straw and the straw pretreated with

收稿日期: 2018-04-05

基金项目: 南京市科技发展项目(201608039); 江苏省苏北科技专项(SZ-YC2017002); 国家自然科学基金项目(41301261); 南京农业大学大学生科研训练计划项目(1730A37)

作者简介: 马贤武(1998-), 男, 安徽宣城人, 本科, 研究方向为生物能源。(Email) 1720272922@qq.com

通讯作者: 刘玉涛, (E-mail) ytliao@njau.edu.cn

dilute alkali alone, but there was no obvious difference between straw pretreated with rubbing and rubbing-alkali. The results of FTIR, XRD and composition determination showed that the combined pretreatment could dissolve lignin efficiently, and increase the crystallinity of cellulose. The orthogonal experiment results showed that the yield of reducing sugar was highest when the concentration of calcium hydroxide was 6%, the reaction temperature was 40 °C and the reaction time was six days. The results would provide a theoretical basis and guidance for efficient utilization of straw.

Key words: rice straw; rubbing-alkali pretreatment; silicon layer; sugar yield; structure

秸秆的资源化利用是解决中国秸秆过剩问题的根本途径^[1]。目前中国主要农作物秸秆理论资源量为 1.04×10^9 t, 其中水稻秸秆为 2.99×10^8 t; 但由于农村能源结构的改变和各类替代燃料的应用, 加上秸秆资源分布零散、体积大、收集运输成本高, 以及综合利用经济效益差, 产业化程度低等原因, 导致秸秆出现了地区性、季节性、结构性过剩, 对生态环境造成极大的威胁, 因而寻求秸秆的合理利用方式已迫在眉睫。

水稻秸秆主要成分为纤维素、半纤维素和木质素, 其表面覆盖有蜡质层和硅质层, 使得纤维素难以被降解利用。通过预处理打破秸秆的复杂结构是提高其利用有效性的重要手段。预处理方法主要有物理预处理、化学预处理、生物预处理以及联合预处理等。物理预处理能够减少秸秆的尺寸、增大与反应物的接触面积^[2]且不会产生后续反应的抑制物^[3], 有利于乙醇和甲烷产量的提升, 但其能耗较高导致经济上不可行^[4]; 化学预处理的效率较高, 但容易导致半纤维素的损失, 抑制物产生和二次污染^[3]。因而, 能否针对水稻秸秆的特点, 部分破坏其表面结构, 从而减少预处理的能源消耗和降低后续化学预处理碱的用量, 值得研究。

前期研究发现单独揉搓预处理后水稻秸秆的硅质层遭到破坏, 为后续厌氧发酵产气提供了良好的条件, 但其酶解还原糖产量却没有得到明显提升。因而, 本试验将利用揉搓后联合稀 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液对水稻秸秆进行预处理, 研究其对酶解还原糖产生率及硅质去除率、结晶度和化学成分的影响, 旨在为水稻秸秆高效资源化利用提供一种环境友好且可大规模应用的方法。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验选用江苏省南京市六合区收获的水稻秸秆为材料, 测得其总固体质量浓度 (TS) 为 90.02%, 挥

发性固体质量浓度 (VS) 为 76.84%, 灰分含量为 14.08%。对照秸秆自然风干后剪成 2~3 cm 小段备用, 揉搓处理秸秆通过机器处理后获得。

化学试剂: 试验中的化学试剂均购自上海晶纯生化科技股份有限公司, 均为分析纯。

1.2 试验仪器

紫外分光光度计 (UV-2008) 由尤尼柯上海仪器有限公司生产, X 射线衍射仪 (X'Pert PRO) 由荷兰帕纳科公司生产, 傅立叶变换红外光谱仪 (Nicolet iS10 型) 由赛默飞世尔科技 (中国) 有限公司生产。

1.3 水稻秸秆的预处理方法

1.3.1 揉搓预处理 揉搓预处理机的工作原理如图 1 所示。水稻秸秆进入喂入口后, 受到喂入口处锤片的打击, 被打断、打折的秸秆受到锤片的抓取和气流的抽吸双重作用, 被带入揉碎室, 进入揉碎室内的物料受到锤片和齿条的冲击、揉搓以及揉碎室内的流场作用, 被逐渐加工成丝段状, 最后推送至抛送口处, 被抛出揉搓机。

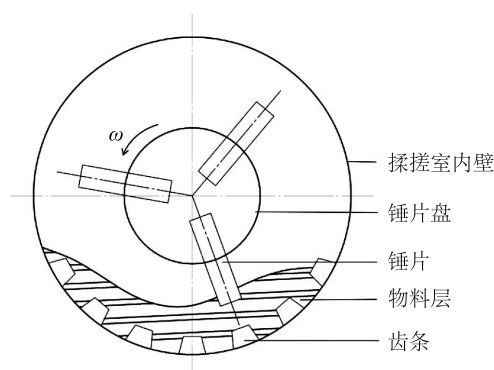


图1 揉搓预处理机示意图

Fig.1 Working principle diagram of the rubbing pretreatment

1.3.2 揉搓与稀碱联合预处理 将揉搓过的水稻秸秆采用稀 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液处理, 设置 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 质量浓度、处理时间和处理温度 3 个试验因素, 分别取 2%、4%、6%、6 d、7 d、8 d 和 20 °C、40 °C、60 °C 3 个

水平,进行正交试验。将反应后的样品用盐酸中和至中性,洗净过滤,保留固体残渣,放入 105 ℃ 烘箱中烘干后粉碎,分别用 40 目、60 目、200 目标准筛筛选出所需粒度的样品,密封常温备用。

1.3.3 稀碱预处理 根据正交试验得到的最佳质量浓度、时间及温度组合条件处理原始秸秆。反应后的处理步骤与方法 1.3.2 相同。

经过以上预处理,得到了原始秸秆、揉搓秸秆、稀碱处理原始秸秆、稀碱处理揉搓秸秆 4 个不同的处理样品,分别记为原始、揉搓、原始+碱、揉搓+碱。

1.4 性能测试表征及检测方法

1.4.1 酶解还原糖的检测 精确称取不同预处理之后过 60 目筛的水稻秸秆样品 0.2 g,放入锥形瓶中,并加入 20 mg 纤维素酶,以 pH=4.8 NaAc-HAc 缓冲液定容至 50 ml,混匀后置 50 ℃ 恒温水箱中反应 48 h。本研究选用 3,5-二硝基水杨酸法检测水稻秸秆酶解后还原糖产量^[5]。酶解还原糖产生率=还原糖产量/水稻秸秆的质量×100%;酶解还原糖提高率=(处理秸秆酶解还原糖产生率-对照秸秆酶解还原糖产生率)/对照秸秆酶解还原糖产生率。

1.4.2 水稻秸秆硅去除率检测 硅含量检测方法参照文献[6]、[7]。精确称取不同预处理之后过 60 目筛的水稻秸秆样品 0.1 g,放入 50 ml 离心管中,加入 3 ml 质量比为 50% 的 NaOH 消化液,使用涡旋振荡器混合均匀,保证消化液充分浸润水稻秸秆,放入立式压力蒸汽灭菌器中 121 ℃ 消化 20 min 后,使用定性滤纸过滤并定容至 50.0 ml,在 20.0 ml 试管中依次加入 5.4 ml 去离子水、400.0 μl 样品溶液、3.0 ml 0.26 mol/L 盐酸和 400.0 μl 10% 钼酸铵,均匀混合后静置 5 min,再依次加入还原剂 20% 酒石酸溶液 400.0 μl 和 400.0 μl 2% 抗坏血酸溶液,均匀混合后静置 25 min,紫外分光光度计预热 20 min 后,在 600 nm 波长处比色皿测定。最后根据不同质量浓度硅标准液吸光度结果所拟合出来的标准曲线求出各吸光度对应的硅含量。硅去除率=(处理秸秆硅含量-对照秸秆硅含量)/对照秸秆硅含量。

1.4.3 X 射线衍射光谱分析 取不同预处理之后的过 60 目筛水稻秸秆样品,均匀放入玻片凹槽中压实,用 X 射线衍射仪进行扫描。测试条件:铜靶,λ=0.154 nm,管压 40 KV,电流 40 mA,扫描步长

0.02°,扫描范围 10~45°。纤维素的结晶度(CrI)一般参照 Segal 经验法^[8]计算: $CrI = [(I_{002} - I_{am}) / I_{002}]$ 。式中: I_{002} 表示 2θ 在 22°和 23°之间的最大衍射强度; I_{am} 表示 2θ 在 18°和 19°之间的最小衍射强度。

1.4.4 FTIR 红外光谱分析 取不同预处理之后的过 200 目筛水稻秸秆,加入约为样品质量 100 倍的 KBr(溴化钾)于研钵中,混合均匀后研磨 20 min,放入 YB-2 压片机中制备试样,再利用傅立叶红外光谱仪扫描试样。扫描次数:16 次,扫描区间:4 000~500 cm⁻¹。根据所得到的红外光谱分析不同预处理后秸秆内部官能团的变化。

1.4.5 不同处理水稻秸秆的成分分析 不同处理水稻秸秆中纤维素、半纤维素和木质素的含量测定参考美国国家可再生能源实验室的方法^[9]。

1.5 数据处理

每个处理至少重复 3 次,利用 Excel 2013 和 SPSS 17.0 对数据进行处理;正交试验根据各因素下对应的各水平的试验结果总和(K)、平均值(\bar{K})以及极差值(R)来进行分析;显著性分析采用 Duncan's 检验(α=0.05)。

2 结果与分析

2.1 揉搓与稀碱联合预处理对水稻秸秆酶解产糖率的影响

2.1.1 稀碱处理揉搓秸秆的最佳工艺条件 以酶解产糖率为指标,通过正交试验得出稀碱处理揉搓水稻秸秆的最佳工艺条件。正交试验的设计及结果分析如表 1 所示。

根据表 1 中的极差值(R)的大小分析,可知影响酶解产糖率的因素强度从大到小依次为:处理时间、稀碱质量浓度、处理温度。且根据表中 K 值可推导出最佳预处理条件:即 Ca(OH)₂ 质量浓度 6%、处理温度 60 ℃、处理天数 8 d。为了验证试验数据的可靠性,在得到的最佳预处理条件下进行 3 组平行验证试验,测得其酶解产糖率为 33.67%,均高于正交实验表中的 9 组数据。但发现正交试验表中第 4 组[处理温度 40 ℃、Ca(OH)₂ 质量浓度 6%、处理时间 6 d],其酶解产糖率为 33.62%,与最佳预处理条件酶解产糖率无显著性差异。从经济成本和能源消耗角度出发,第 4 组所消耗的成本要比最佳组合小的多,故选择第 4 组为最优预处理条件。

表 1 揉搓秸秆稀碱预处理酶解产糖率正交试验结果

Table 1 The orthogonal test results of enzymatic hydrolysis sugar yield by rubbing-alkali pretreatment

序号	处理温度 (℃)	稀碱质量浓度 (%)	处理时间 (d)	酶解产糖率 (%)
1	20	2	6	30.36
2	20	4	7	30.49
3	20	6	8	31.10
4	40	6	6	33.63
5	40	2	7	26.91
6	40	4	8	31.68
7	60	4	6	31.07
8	60	6	7	30.57
9	60	2	8	33.07
K_1	91.95	90.34	95.06	
K_2	92.22	93.24	87.97	
K_3	94.71	95.30	95.85	
\bar{K}_1	30.65	30.11	31.69	
\bar{K}_2	30.74	31.08	29.32	
\bar{K}_3	31.57	31.77	31.95	
极差(R)	0.92	1.66	2.63	

2.1.2 不同预处理对水稻秸秆酶解产糖率的影响

为了验证稀碱与揉搓联合预处理的有效性,分别测定了原始秸秆、揉搓秸秆、原始秸秆+碱[处理温度 40℃、Ca(OH)₂质量浓度 6%、处理时间 6 d]、揉搓秸秆+碱[处理温度 40℃、Ca(OH)₂质量浓度 6%、处理时间 6 d] 4 种预处理秸秆酶解还原糖产量,结果如表 2 所示。

由表 2 可以看出,经过揉搓预处理后的水稻秸秆酶解产糖率与原始秸秆间没有显著差异($P>0.05$),这与前期的试验结果一致。经过稀碱预处理后的秸秆酶解产糖率为 29.86%,较未处理的原始秸秆提升了 61.41%,说明稀碱破坏了水稻秸秆的内部结构,提高了纤维素的降解率。揉搓和稀碱联合预处理的水稻秸秆酶解产糖率得到进一步提升,达到了 33.63%,与稀碱处理秸秆及揉搓秸秆的酶解产糖率都有显著差异($P<0.05$),较原始秸秆提升了 81.76%,说明揉搓预处理能够加强稀碱预处理的作用效果。

2.2 不同预处理对水稻秸秆硅去除率的影响

分别测定了 4 种预处理情况下水稻秸秆的硅含

量,结果如表 3 所示。水稻秸秆外表面附有一层硅,不仅是疏水性的,而且坚固,能够有效保护内部的木质纤维素结构。因此打破水稻秸秆的硅保护层,使得水稻秸秆木质纤维素结构暴露出来,可以大幅提升水稻秸秆的利用率。通过对硅去除率的分析,可以初步了解揉搓与稀碱联合预处理的作用机理。

表 2 不同预处理对水稻秸秆酶解产糖率影响

Table 2 Effect of different pretreatments on yield of enzymatic hydrolyzed reducing sugar of rice straw

处理方式	酶解产糖率 (%)	酶解还原糖提高率 (%)
原始秸秆	18.50±0.15a	0
揉搓秸秆	19.60±0.30a	5.95
原始秸秆+碱	29.86±1.95b	61.41
揉搓秸秆+碱	33.63±0.74c	81.76

同一列数据后不同字母表示在 0.05 水平上差异显著。

由表 3 可以看出,揉搓预处理可以有效去除水稻秸秆表面的硅质层,其硅去除率可达 33.40%,而稀碱对硅去除率影响不明显,该结果可以解释揉搓与稀碱联合预处理的作用机理,即揉搓预处理使水稻秸秆表面的硅质保护层被破坏,从而使稀碱更好地作用于内部的木质纤维素,提升了木质纤维素的利用率。

表 3 不同预处理对水稻秸秆硅去除率的影响

Table 3 Effect of different pretreatments on removal ratio of silicon of rice straw

处理方式	水稻秸秆硅含量 (%)	硅去除率 (%)
原始秸秆	9.96±0.08b	0
揉搓秸秆	6.63±0.13a	33.40
原始秸秆+碱	9.57±0.13b	3.92
揉搓秸秆+碱	6.17±0a	38.05

同一列数据后不同字母表示在 0.05 水平上差异显著。

2.3 不同预处理对水稻秸秆结晶度的影响

纤维素是构成水稻秸秆木质纤维素的主要成分,其具有结晶区和无定形区两相结构。而纤维素的结晶度是指结晶区占纤维素整体的百分比^[10]。因此,常用 X 射线图谱来分析研究纤维素的结晶程度。

不同预处理后的水稻秸秆 XRD 图谱和结晶度如图 2 所示。经过不同预处理之后,XRD 图谱中各衍射峰的位置基本没有改变,只是衍射峰的强度有

所差异。相比于原始秸秆和揉搓秸秆,经过稀碱处理后的水稻秸秆其衍射峰强度在 040 和 002 处都明显升高,说明稀碱预处理可以使水稻秸秆结晶区的有序性得到提升。根据结晶度计算结果可以看出,经过碱处理的原始秸秆和揉搓秸秆,其结晶度都得到了有效提升,且 4 种预处理方式中,揉搓与碱联合预处理组结晶度最高,相比于原始秸秆结晶度由 42.47% 提升至 54.31%。这是由于经过揉搓和稀碱联合预处理后,水稻秸秆中位于无定形区的木质素和半纤维素部分被溶出降解^[11],使纤维素的相对含量增加,从而提升了水稻秸秆的结晶度。

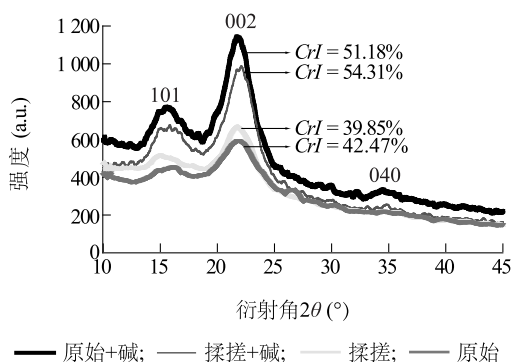


图2 不同预处理后水稻秸秆的 XRD 图

Fig.2 X-ray diffraction spectra of rice straw by different pretreatments

2.4 不同预处理后的水稻秸秆红外光谱分析及成分分析

秸秆的纤维素和木质素含量能够有效反映预处理的效果和解释酶解产糖率高低的原因,因而对不同预处理水稻秸秆的成分和 FTIR 红外光谱进行了分析,结果如表 4 和图 3 所示。

由表 4 可知,揉搓预处理使得水稻秸秆纤维素的相对含量由 29.35% 提升到 35.46%,而木质素相对含量由 23.82% 降低到 18.38%;加碱预处理能够大幅提高纤维素的相对含量和降低木质素的相对含量,分别提高或降低到 42.58%、11.88%;揉搓预处理能够加强稀碱的作用效果,水稻秸秆揉搓后联合稀碱预处理的纤维素相对含量由未揉搓原始秸秆稀碱处理的 42.58% 提高到 47.51%,木质素含量略有降低。

图 3 为不同预处理后水稻秸秆的红外光谱图,可以看出,不同预处理的图谱形状大致相似,但部分

特征峰的吸收强度发生了变化,这表明,经过不同预处理后,水稻秸秆化学组分相对含量发生了变化。在波数 $3\ 420\text{ cm}^{-1}$ 处为羟基 ($-\text{OH}$) 基团伸展振动吸收峰,各处理在此波数下吸收峰强度较原始秸秆明显减弱,其中揉搓和稀碱联合预处理之后吸收峰强度最弱,这说明经过揉搓和稀碱联合预处理后,水稻秸秆中氢键断裂,纤维素、半纤维素和木质素之间的连接被破坏。在 $1\ 595\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\ 510\text{ cm}^{-1}$ 处为木质素收缩振动吸收峰^[12],可见揉搓和稀碱联合预处理之后该特征峰相对吸收强度与其他 3 组相比明显减弱,说明木质素得到了有效去除,这与表 4 所得到的结果相符合。

通过不同预处理水稻秸秆的光谱和成分分析,可知揉搓和稀碱联合预处理有利于木质素相对含量的降低和纤维素相对含量的提升,从而有利于酶解还原糖含量的提高。

表 4 不同预处理对水稻秸秆成分的影响

Table 4 Effect of different pretreatments on composition of rice straw

处理方式	纤维素含量 (%)	半纤维素含量 (%)	木质素含量 (%)
原始秸秆	29.35	20.74	23.82
揉搓秸秆	35.46	23.20	18.38
原始秸秆+碱	42.58	22.11	11.88
揉搓秸秆+碱	47.51	23.64	11.30

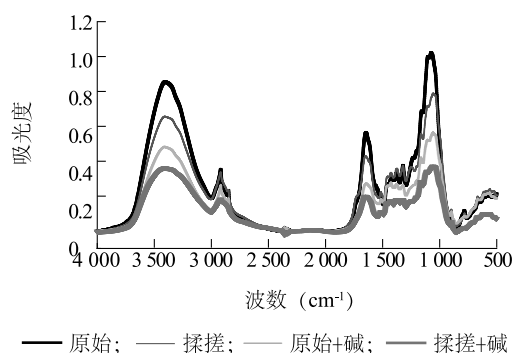


图3 不同预处理后水稻秸秆的红外光谱图

Fig.3 Fourier transformation infrared spectroscopy spectra of rice straw by different pretreatments

3 讨论

揉搓和稀碱预处理具有良好的协同作用。揉搓

和稀碱联合预处理后秸秆酶解产糖率为 33.63%, 硅去除率达 38.05%, 可以明显提高秸秆的结晶度, 有效破坏木质素的束缚作用, 是一种适于大规模应用的高效的秸秆预处理方式。

结合酶解产糖率和经济成本等因素考虑, 获得秸秆揉搓后 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 处理的最佳工艺参数为: $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 质量浓度 6%, 处理温度 40 °C, 处理天数 6 d。

水稻秸秆经过揉搓预处理之后, 其表面硅去除率可达到 30% 以上。而稀碱预处理可以使秸秆中木质素和半纤维素分子间酯键发生皂化反应, 使得纤维素、半纤维素和木质素间的交叉连接作用减弱, 从而使木质纤维原料的孔隙度增加^[13]。结合酶解产糖率结果来看, 只经过揉搓预处理对水稻秸秆酶解产糖率作用效果不明显, 但可以增强后续稀碱处理的作用效果, 在相同的稀碱处理条件下, 经过揉搓处理的秸秆相比于原始秸秆, 其酶解产糖率得到了有效的提升。从 X 射线衍射光谱、FTIR 光谱和秸秆成分测定结果来看, 水稻秸秆经过揉搓和稀碱预处理后木质素得到明显去除, 纤维素的相对含量得到了进一步提升, 前人研究发现, 纤维原料中的木质素对纤维素酶与底物的接触形成立体阻碍, 同时还能够非特异性吸附纤维素酶^[14-15], 而揉搓与稀碱联合预处理, 能有效去除秸秆表面硅质和内部的木质素, 使纤维素酶更好地作用于纤维素, 从而提高了水稻秸秆木质纤维素的利用率。揉搓与稀碱联合处理的协同作用效果, 与唐洪涛等^[16]发现的较低剂量 γ 射线辐照 (0~200 kGy) 可以大幅降低后续碱浸泡处理所需的用量和时间有一定的相似性, 但相比于 γ 射线辐照和稀碱结合处理以及张婷^[17]所采用的超声波和稀碱联合预处理手段, 揉搓与稀碱联合预处理的处理条件比较温和, 所需的经济成本也更少, 可以作为水稻秸秆大规模高效资源化利用的方式。

本试验采用 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 作为代表性碱, 缺乏揉搓与其他碱协同作用效果的比较研究, 另外如何有效地将试验废液中的 Ca^{2+} 回收利用, 有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] 常志州, 靳红梅, 黄红英, 等. “十三五”江苏省秸秆综合利用策略与秸秆产业发展的思考[J]. 江苏农业学报, 2016, 32(3): 534-541.
- [2] PALMOWSKI L M, MÜLLER J A. Influence of the size reduction of organic waste on their anaerobic digestion[J]. Water Science & Technology, 2000, 41(3): 155-162.
- [3] HENDRIKS A T, ZEEMAN G. Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass[J]. Bioresource Technology, 2009, 100(1): 10-18.
- [4] ARIUNBAATAR J, PANICO A, ESPOSITO G, et al. Pretreatment methods to enhance anaerobic digestion of organic solid waste[J]. Applied Energy, 2014, 123(3): 143-156.
- [5] 粟学刚, 贺飞. 纤维素酶水解纤维素还原糖的测定[J]. 化学与生物工程, 1999, 16(1): 43-44.
- [6] 戴伟民, 张克勤, 段彬伍, 等. 测定水稻硅含量的一种简易方法[J]. 中国水稻科学, 2005, 19(5): 460-462.
- [7] 贾雨薇, 杨瑞林, 张洋, 等. 一种优化的测定水稻硅含量的方法[J]. 植物学报, 2016, 51(5): 679-683.
- [8] SEGAL L, CREELY J J, JR A E MARTIN, et al. An empirical method for estimating the degree of crystallinity of native cellulose using the X-Ray diffractometer[J]. Textile Research Journal, 2016, 29(10): 786-794.
- [9] SLUITER A, HAMES B, RUIZ R, et al. Laboratory analytical procedure ‘determination of structural carbohydrates and lignin in biomass’[M]. Colorado, USA: National Laboratory of the U S Department of Energy, 2012.
- [10] 赵晶, 张福蓉, 陈明, 等. NaOH 预处理对玉米秸秆纤维结构特性和酶解效率的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(7): 1407-1412.
- [11] 陈晓浪, 胡书春, 周祚万. 改性处理对水稻秸秆纤维结构和性能的影响[J]. 功能材料, 2010, 41(S2): 275-277.
- [12] LEE J M, JAMEEL H, VENDITTI R A. A comparison of the autohydrolysis and ammonia fiber explosion (AFEX) pretreatments on the subsequent enzymatic hydrolysis of coastal Bermuda grass[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(14): 5449-5458.
- [13] 张超. 氨水循环爆破法对玉米秸秆预处理效果的研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [14] ZHU L, ODWYER J P, CHANG V S, et al. Structural features affecting biomass enzymatic digestibility[J]. Bioresource Technology, 2008, 99(9): 3817-3828.
- [15] HEISS-BLANQUET S, ZHENG D, LOPES F N, et al. Effect of pretreatment and enzymatic hydrolysis of wheat straw on cell wall composition, hydrophobicity and cellulase adsorption[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(10): 5938-5946.
- [16] 唐洪涛, 王锋, 李伟明, 等. γ 射线辐照与 NaOH 溶液协同预处理对玉米秸秆酶解产糖率及微观结构的影响[J]. 核农学报, 2012, 26(3): 535-542.
- [17] 张婷. 超声波与稀碱法联合预处理对秸秆厌氧发酵产沼气的影 响[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2009.

(责任编辑: 陈海霞)