

热碱预处理对菊芋茎秆组成和酶水解影响

王卿, 邱婧雯, 李阳, 沈飞

四川农业大学生态环境研究所, 四川 成都 611130

王卿, 邱婧雯, 李阳, 等. 热碱预处理对菊芋茎秆组成和酶水解影响. 生物工程学报, 2015, 31(10): 1459–1467.

Wang Q, Qiu JW, Li Y, et al. Effects of hot-NaOH pretreatment on Jerusalem artichoke stalk composition and subsequent enzymatic hydrolysis. Chin J Biotech, 2015, 31(10): 1459–1467.

摘要: 为了深入了解菊芋茎秆用于生物能源转化的潜力, 在对菊芋茎秆的全秆、韧皮以及髓芯的组成分析基础上, 采用不同浓度的 NaOH 在 121 °C 对菊芋茎秆进行预处理, 并对预处理后的茎秆进行酶水解。结果表明: 菊芋茎秆具有较高木质素含量 (32.0%), 且韧皮中木质素含量最高; 茎秆中碳水化合物总含量与传统农作物秸秆相当, 但纤维素含量相对较高 (40.5%), 半纤维含量相对较低 (19.6%)。经不同浓度 NaOH 预处理后, 相对于未处理茎秆, 全秆、韧皮以及髓芯中木质素含量分别降低 13.1%–13.4%、8.3%–13.5% 和 19.9%–27.2%, 半纤维素含量分别降低了 87.8%–96.9%、87.6%–95.0% 和 74.0%–90.2%。纤维素含量在全秆、韧皮和髓芯中相应增加了 56.5%–60.2%、52.2%–55.4% 和 62.7%–73.2%。酶水解的结果显示, 增加预处理过程中 NaOH 的浓度, 全秆和韧皮的水解率可被提高 2.3–2.6 倍和 10.3–18.5 倍。虽然热 NaOH 预处理可以有效地改善髓芯水解性能, 但经过高浓度的 NaOH (2.0 mol/L) 预处理, 髓芯的水解性能下降明显。由此可见, 菊芋用于生物能源转化技术中, 热碱法可较好地适用于菊芋秸秆预处理。提高碱浓度, 有利于半纤维素和木质素的去除, 并实现酶水解糖化产率的提高。但鉴于碱浓度过高会造成髓芯糖产率降低, 热碱预处理菊芋秸秆工艺条件需进一步优化。

关键词: 菊芋茎秆, 组分分析, 热碱预处理, 酶水解

Received: January 29, 2015; **Accepted:** April 10, 2015

Supported by: National Natural Science Foundation of China (No. 21306120), Chunhui Program of China (No. Z2011102).

Corresponding author: Fei Shen. Tel/Fax: +86-28-86291390; E-mail: fishen@sicau.edu.cn

国家自然科学基金 (No. 21306120), 春晖计划 (No. Z2011102) 资助。

Effects of hot-NaOH pretreatment on Jerusalem artichoke stalk composition and subsequent enzymatic hydrolysis

Qing Wang, Jingwen Qiu, Yang Li, and Fei Shen

Institute of Ecological and Environmental Sciences, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, Sichuan, China

Abstract: In order to explore the possibility of Jerusalem artichoke stalk for bioenergy conversion, we analyzed the main composition of whole stalk, pitch, and core of the stalk. Meanwhile, these parts were pretreated with different NaOH concentrations at 121 °C. Afterwards, enzymatic hydrolysis was performed to evaluate the pretreatment efficiency. Jerusalem artichoke stalk was characterized by relatively high lignin content (32.0%) compared with traditional crop stalks. The total carbohydrate content was close to that of crop stalks, but with higher cellulose content (40.5%) and lower hemicellulose (19.6%) than those of traditional crop stalks. After pretreatment, the lignin content in the whole stalk, pitch, and core decreased by 13.1%–13.4%, 8.3%–13.5%, and 19.9%–27.2%, respectively, compared with the untreated substrates. The hemicellulose content in the whole stalk, pitch, and core decreased 87.8%–96.9%, 87.6%–95.0%, and 74.0%–90.2%, respectively. Correspondingly, the cellulose content in the pretreated whole stalk, pitch, and core increased by 56.5%–60.2%, 52.2%–55.4%, and 62.7%–73.2%, respectively. Moreover, increase of NaOH concentration for pretreatment could improve the enzymatic hydrolysis of the whole stalk and pitch by 2.3–2.6 folds and 10.3–18.5 folds, respectively. The hydrolysis of pretreated stalk core decreased significantly as 2.0 mol/L NaOH was employed, although the increased NaOH concentration can also improve its hydrolysis performance. Based on these results, hot-NaOH can be regarded as an option for Jerusalem artichoke stalk pretreatment. Increasing NaOH concentration was beneficial to hemicellulose and lignin removal, and consequently improved sugar conversion. However, the potential decrease of sugar conversion of the pretreated core by higher NaOH concentration suggested further optimization on the pretreatment conditions should be performed.

Keywords: Jerusalem artichoke stalk, composition analysis, hot-NaOH pretreatment, enzymatic hydrolysis

能源是社会发展的物质保障，目前所使用的化石燃料日益枯竭，寻找可替代能源已成为当今社会发展的重中之重。生物质由于其资源丰富、来源广泛、可再生、低污染等特点，具有较大的能源开发价值与应用前景。现已成为能源发展与开发的重要组成部分，在各国的能源结构中占有重要地位^[1]。目前，在生物能源开发过程中，为了避免“与人争粮，与粮争地”，利用能源植物以及木质纤维素原料进行生物燃料转化已成为当前研究的重点与热点^[2]。

菊芋 *Helianthus tuberosus* L. 生长适应性强，适合在沙漠、滩涂、盐碱荒地等非宜农土

地上生长，具有耐寒、耐旱以及耐盐碱的特点。其生物学产量较高，一般块茎产量可达 50–77 t/hm²，茎秆产量可达 20–28 t/hm²^[3-4]。菊芋块茎中菊粉含量丰富，占其干基质量的 70%–90%^[5]。而菊芋茎秆以木质纤维素为主，其中碳水化合物占其干基质量的 60%–65%^[6]。因此，菊芋已经被视为一种有发展前途的能源作物。

以菊芋的块茎为原料进行生物燃料开发，尤其是生物乙醇很早就受到人们的关注^[7-8]。近年来，由于生物能源开发引起的土地资源紧张问题，使得菊芋作为能源植物的开发与利用重

获重视。目前以菊芋块茎为原料通过化学或生物的方式进行生物燃料转化, 其主要包括通过生物酶解(菊粉酶)或者酸解, 将菊粉转化成单糖。然后再通过微生物将其转化成生物乙醇、生物柴油等生物燃料^[9-10]。然而, 对菊芋茎秆进行生物能源转化的研究目前较少, 且现有的研究均集中在茎秆与块茎联合转化工艺方面。然而, 这些联合工艺中所涉及的菊芋茎秆, 均需经独立的预处理后, 再与块茎进行联合水解发酵^[6,11-12]。因此, 为了有效地利用菊芋茎秆进行生物能源转化, 本文对菊芋茎秆的不同部位的组分进行了分析。并采用热 NaOH 预处理法对其不同部位进行预处理, 明确预处理对菊芋茎秆不同部位的响应以及对酶水解的影响。为进一步选择优化预处理工艺提供必要的参考。

1 材料与方 法

1.1 菊芋茎秆

菊芋(南芋一号)种植于四川农业大学成都校区附近苗圃空地, 茎秆采收于 2012 年 11 月。茎秆采收后经自然风干, 手工分离髓芯和韧皮。将各部分及全秆粉碎至 40 目用于组分测定, 粉碎过 10 目用于预处理。酶水解使用的纤维素酶和纤维二糖酶(Sigma 公司, 美国), 分别产自里氏木霉 *Trichoderma reesei* ATCC26924 和黑曲霉 *Aspergillus niger*。

1.2 热 NaOH 预处理

配制浓度分别为 0.5、1.0、2.0 mol/L 的 NaOH 溶液, 用于浸渍菊芋茎秆韧皮、髓芯以及全秆 30 min(固液比 1:20)。密封后置于 121 °C 预处理 30 min。冷却后采用真空抽滤方式对预处理后的滤渣进行冲洗至滤液的 pH 值为 7.0-7.5, 收集清洗后的滤渣用于酶水解。

1.3 酶水解

在 100 mL 螺口三角瓶中加入 0.4 g 滤渣(干基), 纤维素酶和纤维二糖酶的用量分别为 20 单位滤纸酶活/g 纤维素(20 FPU/g 纤维素)和 40 单位纤维二糖酶活/g 纤维素(40 CBU/g 纤维素), 并用醋酸-醋酸钠缓冲溶液(0.05 mol/L, pH 4.8)调节水解体积为 20 mL。封口后置于 50 °C、150 r/min 的恒温空气浴摇床水解 72 h。水解过程中定时取样 0.8 mL, 密封置于 100 °C 干式恒温器灭活 10 min 后, 13 000 r/min、4 °C 离心 5 min。上清液于-18 °C 保存, 用于葡萄糖浓度测定。根据测得水解液中葡萄糖的含量, 按照公式(1)计算纤维素的酶水解率。

$$\text{水解率}(\%) = \frac{\text{水解所得葡萄糖质量}}{\text{水解底物干重} \times \text{纤维素含量} \times 1.11} \times 100 \quad (1)$$

1.4 分析方法

预处理前后物料组分分析采用 National Renewable Energy Laboratory 木质纤维素原料碳水化合物及木质素含量测定方法^[13]。

采用高效液相色谱仪(Flexar, PerkinElmer, Inc., MA, 美国)分析水解液中葡萄糖浓度。在分析过程中, 为了减少误差, 采用内标法测定, 内标物为 0.5 g/L 乳糖溶液。以 0.05 mol/L 的 H₂SO₄ 为流动相(流速为 0.8 mL/min)。每次进样量控制为 0.1 mL。糖分离采用色谱柱(SH1011, Shodex, 日本), 柱温维持 60 °C。葡萄糖浓度检测采用示差折光检测器, 检测器温度为 50 °C。

经不同 NaOH 浓度预处理后菊芋茎秆的结晶度指数通过 X 射线衍射仪(D2 PHASER, Bruker, 德国)在 2θ=10-40° 范围内, 以步长为 0.02° 测定。以 2θ 在 18° 和 22° 附近的衍射强

度按公式 (2) 计算。

$$\text{相对结晶度 (\%)} = \frac{I_{002} - I_{am}}{I_{002}} \times 100 \quad (2)$$

式中, I_{002} 指 002 面的最大衍射强度; I_{am} 指 $2\theta=18^\circ$ 时衍射强度, 即无定形区的衍射强度。

2 结果与讨论

2.1 菊芋茎秆的组分分析

菊芋茎秆全秆以及其韧皮和髓心中的主要组分如表 1 所示。菊芋茎秆含有丰富的葡聚糖和木聚糖, 碳水化合物的总量约占整个茎秆干重的 60.1%, 说明它具有较好的生物能源转化的物质基础。茎秆中纤维素 (组分中的葡聚糖) 含量约为 40.5%, 半纤维素 (组分中木聚糖、甘露聚糖、半乳聚糖以及阿拉伯聚糖之和) 含量约为 19.6%, 木质素 (酸溶性木质素和酸不溶性木质素之和) 的含量约为 32.0%。茎秆中抽提物和灰分的含量分别为 6.1% 和 2.9%。与常规的农作物秸秆相比^[14-16], 其碳水化合物的总量与玉米、

表 1 菊芋茎秆基本组分含量

Table 1 Main composition of Jerusalem artichoke stalk

Main composition	Stalk pitch	Stalk core	Whole stalk
Glucan (%)	40.6±0.13	45.6±0.07	40.5±0.13
Xylan (%)	16.9±0.19	11.1±0.19	16.2±0.07
Mannan (%)	1.8±0.15	2.6±0.07	2.0±0.28
Galactan (%)	1.0±0.00	1.27±0.03	0.99±0.01
Arabinan (%)	0.51±0.01	0.42±0.00	0.42±0.00
AIL* (%)	32.7±0.40	15.9±0.14	29.7±0.19
ASL# (%)	2.2±0.01	3.2±0.01	2.3±0.03
Extractives (%)	5.0±0.15	6.7±0.10	6.1±0.15
Ash (%)	2.4±0.10	3.2±0.10	2.9±0.03

AIL* refers to acid-insoluble lignin; ASL# refers to acid-soluble lignin.

小麦以及水稻等相当, 但纤维素含量高于常规的农作物秸秆 (34%–36%)。半纤维素的各种聚糖组成与农作物秸秆相近, 但其含量低于常规的农作物秸秆 (24%–29%)。较高的纤维素含量, 可提高纤维素向葡萄糖转化的物质潜力, 同时较低的半纤维素含量, 可降低预处理难度, 减少后续酶水解过程中的位阻效应。而菊芋茎秆中木质素的含量明显高于传统的农作物秸秆 (12%–17%), 这可能潜在地增加预处理难度。

此外, 髓芯中纤维素含量高于韧皮约 5.0%, 而半纤维素和木质素含量明显低于韧皮约 4.8% 和 15.8%。从植物生长的角度, 菊芋属高大菊科作物, 韧皮中较高木质素含量有利固化细胞壁, 增加茎秆的抗压和抗倒伏能力。而茎秆的髓芯的质地相对疏松, 木质素含量较低, 这与髓芯主要承担水分和养分的输送功能相关, 且髓芯中较高的灰分和抽提物含量也可能与此相关。

2.2 不同浓度 NaOH 预处理对菊芋茎秆主要组分的影响

木质纤维素原料因其结构较为致密, 一般需要进行预处理后, 才可以较为容易地通过酶水解, 将纤维素转化为葡萄糖。采用不同浓度 NaOH 在 121 °C 条件下对菊芋全秆、韧皮和髓芯分别进行预处理, 预处理后物料的组分如表 2 所示。

整体上, 采用热 NaOH 预处理法对菊芋全秆、韧皮和髓芯的木质素的去除具有一定的作用。经不同浓度的 NaOH 进行预处理后, 全秆中木质素含量相对于未处理全秆含量降低 13.1%–13.4%, 韧皮中木质素含量降低 8.3%–13.5%, 而髓芯中木质素含量降低了 19.9%–27.2%。随着预处理的 NaOH 浓度的提高, 全秆、韧皮以及髓芯的木质素含量均呈下降趋势, 该趋势在全秆和韧皮中变

表 2 NaOH 预处理对菊芋茎秆主要组分的影响
Table 2 Main composition of Jerusalem artichoke stalk after hot-NaOH pretreatment

Main composition (%)		NaOH concentration (mol/L)			Unpretreated stalk
		0.5	1.0	2.0	
Stalk pitch	Lignin	32.0	30.9	30.2	34.9
	Hemicellulose	3.5	2.2	1.0	20.2
	Cellulose	61.8	62.8	63.1	40.6
Stalk core	Lignin	15.3	14.3	13.9	19.1
	Hemicellulose	4.0	3.2	1.5	15.4
	Cellulose	74.2	75.8	79.0	45.6
Whole stalk	Lignin	27.8	27.7	27.7	32.0
	Hemicellulose	2.4	1.5	0.6	19.6
	Cellulose	63.4	63.5	64.9	40.5

化较小,而在髓芯中较为明显。由此可见,菊芋茎秆的韧皮是决定 NaOH 预处理过程中木质素去除的关键。通过热 NaOH 预处理,全秆、韧皮以及髓芯中的半纤维素明显降低,且随着 NaOH 浓度的提高,半纤维素含量下降明显。相对于未处理的茎秆,全秆中半纤维素含量降低了 87.8%–96.9%,韧皮中半纤维素含量降低了 87.6%–95.0%,而髓芯中半纤维素含量降低为 74.0%–90.2%。由此可见,菊芋茎秆中的髓芯部分,虽然其质地较为疏松,然而其半纤维素去除难度相对较大。由于其在整个茎秆中占有的质量分数相对较低 (9.1%),因此,对全秆预处理的半纤维素去除产生的影响不大。在预处理过程中由于一部分木质素和半纤维素被去除,茎秆中纤维素的含量相对于未处理茎秆均有增加,且随着 NaOH 预处理浓度的增加,纤维素的含量呈较为明显的上升趋势。经预处理后,

菊芋全秆中纤维素含量相对于未处理的全秆增加了 56.5%–60.2%,韧皮中纤维素含量增加了 52.2%–55.4%,而髓芯中纤维素含量增加了 62.7%–73.2%。整体而言,菊芋茎秆的全秆、韧皮以及髓芯在不同浓度的 NaOH 预处理作用下,其三大组分表现出的变化趋势与其他生物质材料 (水稻秸秆、玉米秸秆、百慕大草等) 相似^[17-19]。预处理过程中所表现出木质素的去除作用,主要来自木质素在碱性条件下的溶解,而表现出的半纤维素的去除作用,主要是该组分在较高温度下具有不稳定的性质^[20],以及在碱作用下半纤维素的溶解去除作用^[21]。此外,通过 NaOH 预处理对茎秆中的纤维素产生溶胀效果,可潜在地增大纤维素的无定形区,有利于菊芋茎秆后续酶水解的改善^[22]。相比于目前研究较多的木质纤维素物理化学处理法 (例如:蒸汽爆破法、氨纤维爆法以及水热法^[20]),在组分去除方面,热碱预处理菊芋秸秆可以在较低温度下 (121 °C),实现蒸汽爆破法 (180–210 °C) 以及水热法 (160–240 °C) 的典型半纤维素去除功能,同时还具有一定的木质素去除能力。相比于以结构溶胀破坏为主,组分去除功能不明显的氨纤维爆法,热碱预处理法对各类木质纤维素结构影响尚不明确,需要进一步研究。

2.3 不同浓度 NaOH 预处理对菊芋茎秆酶水解的影响

将预处理后的菊芋茎秆的全秆、韧皮以及髓芯,以质量分数为 2.0%的基质浓度,在过量纤维素酶条件下进行水解。并以未处理的全秆、韧皮以及髓芯作为对照,以评估不同浓度 NaOH 预处理对水解的影响。酶水解过程中水解率与时间的关系如图 1-3 所示。

由图 1A 可知,随着酶水解时间的延长,不

同 NaOH 浓度预处理后的韧皮其水解率均表现出上升趋势。且随着预处理的 NaOH 浓度增加, 韧皮的水解速率和水解率均表现出明显的上升。此结果与不同浓度 NaOH 预处理后韧皮组分的变化相对应。经酶水解 72 h 后, 经 0.5 mol/L NaOH 预处理后的韧皮, 其水解率为 35.9%, 而经 1.0 mol/L 和 2.0 mol/L NaOH 预处理后韧皮水解率分别为 53.8% 和 64.8%。而未经预处理的韧皮 72 h 水解率仅为 3.5%。经不同浓度 NaOH 预处理后的韧皮相对于未处理对照, 其水解率提高了 10.3–18.5 倍。

由图 1B 可知, 经不同浓度 NaOH 预处理后的髓芯, 水解率也呈现随时间显著上升趋势, 经 24 h 水解后水解率基本保持不变, 水解可视为基本结束。由 72 h 各处理组的水解率可见, 随着预处理的 NaOH 浓度从 0.5 mol/L 增加到 1.0 mol/L, 水解率由 71.3% 增加到 91.6%, 随着 NaOH 浓度继续增加时, 水解率则明显降低 (85.2%)。此结果并没有完全对应预处理后髓芯

的木质素和半纤维素组分的变化。水解 72 h 后, 未处理的髓芯的水解也达到 39.7%。整体上, 相对于未处理髓芯, 通过 NaOH 预处理后, 其水解率可提高 1.8–2.3 倍。

如图 2 所示, 在相同的酶水解条件, 对菊芋茎秆的全秆进行不同浓度 NaOH 预处理后, 全秆的酶水解同样随时间呈现明显的上升趋势, 24 h 后各组上升趋势减缓。提高 NaOH 的预处理浓度, 可以改善全秆的酶水解效果。经 72 h 酶水解后, 随着 NaOH 浓度的增加, 水解率由 43.1% 增加到 49.2%, 且浓度由 0.5 mol/L 提高到 1.0 mol/L 对水解率改善不明显。而未经预处理的全秆其酶水解率为 18.8%。相对于未处理全秆经不同浓度的 NaOH 预处理后, 其酶水解率可提高 2.3–2.6 倍。此外, 通过热 NaOH 预处理后的菊芋全秆相比于水热预处理 (180 °C), 在相同的酶水解方式下, 水解率提高 16.8%–33.3%, 且热 NaOH 预处理能耗和设备耐高压要求较低^[23]。

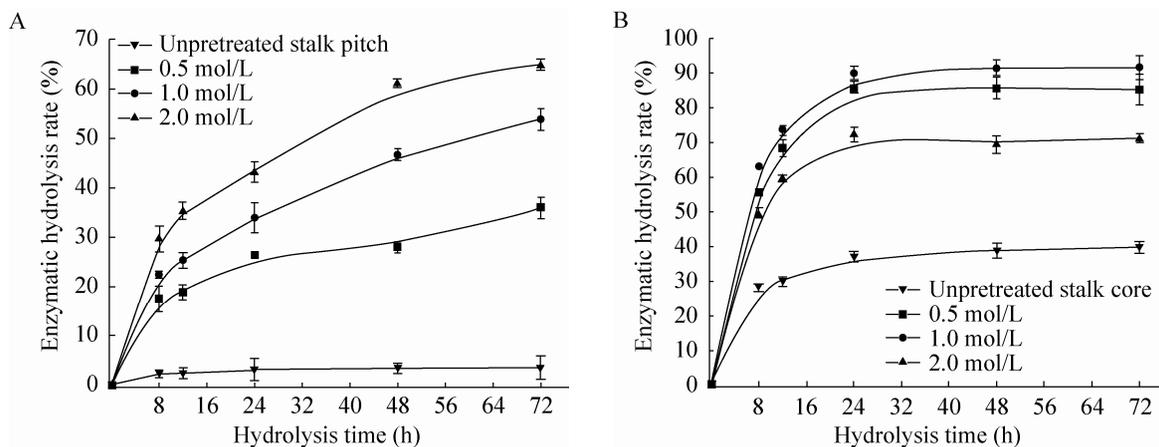


图 1 不同浓度 NaOH 预处理的髓芯酶水解

Fig. 1 The enzymatic hydrolysis of pretreated stalk pitch (A) and pretreated stalk core (B) at different NaOH concentrations.

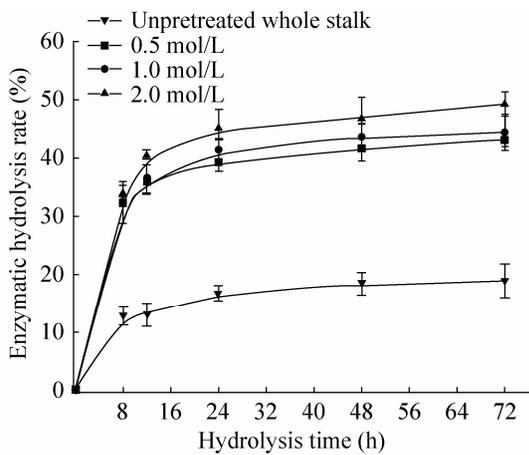


图2 不同浓度 NaOH 预处理的全秆酶水解

Fig. 2 The enzymatic hydrolysis of pretreated whole stalk at different NaOH concentrations.

通过上面的分析可以看出, 具有高木质素含量特征的菊芋全秆和韧皮, 其酶水解性能较好地响应了预处理后木质素和半纤维素的组分变化。这主要是因为通过热碱处理可以在一定程度上去除原料中的木质素、半纤维素, 降低木质素和半纤维素对纤维素酶水解作用的阻碍。同时, 热碱处理还可以使纤维素结晶结构中的氢键部分断裂, 产生较多的无定形区暴露给纤维素酶, 改善了酶水解性能^[20,22]。而对木质素含量较低的髓芯, 在较高浓度 NaOH 预处理后, 虽然其木质素和半纤维素可被较好地去除, 然而其水解率却显著下降。这可能的原因在于, 髓芯木质素和半纤维素含量较低 (表 1), 木质素和半纤维素的去除所消耗 NaOH 量相对较少。因此, 过量的 NaOH 在预处理过程中与无定形纤维素上的自由羟基发生碱化反应形成碱纤维素^[24-25]。因此, 可以推测虽然连接碱纤维素每个单元的 β -1,4 糖苷键仍可以被纤维素酶专性水解, 但葡萄糖 C₂ 位羟基上的 H 被 Na 替代, 从而导致酶水解的葡萄糖产量降低和水解

率偏低。此外, 经对不同浓度 NaOH 预处理后的菊芋秸秆各部分的相对结晶度测定发现 (表 3), 全秆和韧皮的结晶度随处理浓度增加呈下降趋势。而髓芯的结晶度有先下降后升高的趋势, 这可能是造成高浓度 NaOH 预处理后的髓芯, 其水解率下降的原因之一。对预处理后髓芯 X 光衍射图谱分析 (图 3) 发现, 在高浓度 NaOH 预处理后的菊芋髓芯, 在 $2\theta=28^\circ$ 和 34° 附近出现 2 个明显的晶峰, 增加了纤维素体系的结晶区域, 可能是造成高浓度 NaOH 预处理后髓芯酶水解率降低的另外一个原因。

表 3 NaOH 预处理后菊芋茎秆的结晶度

Table 3 Crystallinity of the pretreated Jerusalem artichoke stalk

NaOH concentration (mol/L)	Crystallinity (%)		
	Stalk core	Stalk pitch	Whole stalk
0.5	25.8	45.0	26.8
1.0	30.7	43.9	21.1
2.0	29.2	33.8	12.0
Unpretreated stalk	35.9	37.1	35.7

除预处理后的髓芯获得了较高的水解率以外, 菊芋的全秆和韧皮的水解率相对未处理的原料有较大提高, 但整体较低。从预处理后原料组分不难看出, 虽然预处理后半纤维素含量降低较为明显, 然而木质素的去除水平也低, 这是导致整体水解率水平较低的直接原因。由此可见, 若较好地改善菊芋茎秆的水解效果, 需进一步提高碱处理的强度 (延长处理时间、提高处理浓度或提高处理温度等)。然而, 提高碱处理强度, 又必然导致髓芯的糖损失。因此, 采用热 NaOH 预处理菊芋茎秆的工艺仍需进一步兼顾性的优化。

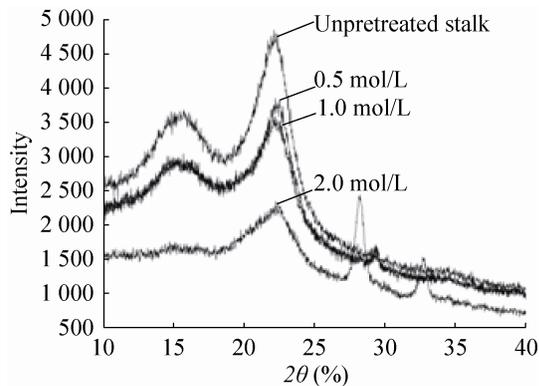


图3 不同浓度NaOH预处理的髓芯的X光衍射图
Fig. 3 The X-ray diffraction of pretreated stalk core at different NaOH concentrations.

3 结论

相比于传统农作物秸秆, 菊芋茎秆具有较高木质素含量的特征 (32.0%), 且韧皮木质素含量最高。碳水化合物含量与传统农作物秸秆相当, 但其中纤维素含量相对较高 (40.5%), 半纤维素含量相对较低 (19.6%)。热碱预处理对菊芋茎秆中半纤维素的去除能力优于木质素, 且随着碱浓度的提高, 去除效果改善明显。此外, 提高热碱处理浓度对木质素含量较高的全秆和韧皮部分酶水解糖产率的改善较为明显。而对于木质素含量较低的髓芯, 热碱处理强度增大会导致糖产率和产量的降低。为了兼顾热碱处理菊芋秸秆糖产率与处理效果, 需要进一步对生产工艺进行优化。

REFERENCES

[1] Lamers P, Carlo H, Martin J, et al. International bioenergy trade-A review of past developments in the liquid biofuel market. *Renew Sust Energy Rev*, 2011, 15(6): 2655–2676.
[2] Shen F, Saddler JN, Liu RH, et al. Evaluation of

steam pretreatment on sweet sorghum bagasse for enzymatic hydrolysis and bioethanol production. *Carbohydr Polym*, 2011, 86(4): 1542–1548.

- [3] Matías J, González J, Royano L, et al. Analysis of sugars by liquid chromatography-mass spectrometry in Jerusalem artichoke tubers for bioethanol production optimization. *Biomass Bioenerg*, 2011, 35(5): 2006–2012.
[4] Li SY, Jin XJ, Xi XD, et al. Screening suitable variety of *Helianthus tuberosus* for secondary salinization soil of inland arid irrigated area. *Chin Agr Sci Bull*, 2010, 26(15): 198–202 (in Chinese). 李世煜, 晋小军, 席旭东, 等. 内陆干旱灌区次生盐渍化土壤适宜种植菊芋品种筛选. *中国农学通报*, 2010, 26(15): 198–202.
[5] Wang LJ, Dong Y. Production of ethanol by simultaneous saccharification and fermentation from Jerusalem artichoke flour. *Trans CSAE*, 2009, 25(11): 263–268 (in Chinese). 汪伦记, 董英. 以菊芋粉为原料同步糖化发酵生产燃料乙醇. *农业工程学报*, 2009, 25(11): 263–268.
[6] Kim S, Park JM, Kim CH. Ethanol production using whole plant biomass of Jerusalem artichoke by *Kluyveromyces marxianus* CBS1555. *Appl Biochem Biotechnol*, 2013, 169(5): 1531–1545.
[7] Favela-Torres E, Allais JJ, Baratti J. Kinetics of batch fermentations for ethanol production with *Zymomonas mobilis* growing on Jerusalem artichoke juice. *Biotechnol Bioeng*, 1986, 28(6): 850–856.
[8] Kim K, Hamdy MK. Acid hydrolysis of Jerusalem artichoke for ethanol fermentation. *Biotechnol Bioeng*, 1986, 28(1): 138–141.
[9] Cheng Y, Zhou WG, Gao CF, et al. Biodiesel production from Jerusalem artichoke (*Helianthus Tuberosus* L.) tuber by heterotrophic microalgae *Chlorella protothecoides*. *J Chem Technol Biotechnol*, 2009, 84(5): 777–781.
[10] Lim SH, Ryu JM, Lee H, et al. Ethanol fermentation from Jerusalem artichoke powder using *Saccharomyces cerevisiae* KCCM50549

- without pretreatment for inulin hydrolysis. *Bioresour Technol*, 2011, 102(2): 2109–2111.
- [11] Kim S, Kim CH. Evaluation of whole Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) for consolidated bioprocessing ethanol production. *Renew Energ*, 2014, 65: 83–91.
- [12] Li D, Dai JY, Xiu ZL. A novel strategy for integrated utilization of Jerusalem artichoke stalk and tuber for production of 2,3-butanediol by *Klebsiella pneumoniae*. *Bioresour Technol*, 2010, 101(21): 8342–8347.
- [13] Determination of structural carbohydrates and lignin in biomass. NREL/TP-510-42618 NREL laboratory analytical procedure [EB/OL]. [2008]. <http://www.nrel.gov/biomass/pdfs/42618.pdf>.
- [14] Talebnia F, Karakashev D, Angelidaki I. Production of bioethanol from wheat straw: an overview on pretreatment, hydrolysis and fermentation. *Bioresour Technol*, 2010, 101(13): 4744–4753.
- [15] Wyman CE. *Aqueous pretreatment of plant biomass for biological and chemical conversion to fuels and chemicals*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2013: 239–259.
- [16] Binod P, SindhuR, Singhania RR, et al. Bioethanol production from rice straw: an overview. *Bioresour Technol*, 2010, 101(13): 4767–4774.
- [17] Wang ZY, Keshwani DR, Redding AP, et al. Sodium hydroxide pretreatment and enzymatic hydrolysis of coastal Bermuda grass. *Bioresour Technol*, 2010, 101(10): 3583–3585.
- [18] Zhang QZ, Cai WM. Enzymatic hydrolysis of alkali-pretreated rice straw by *Trichoderma reesei* ZM4-F3. *Biomass Bioenerg*, 2008, 32(12): 1130–1135.
- [19] Kumar P, Barrett DM, Delwiche MJ, et al. Methods for pretreatment of lignocellulosic biomass for efficient hydrolysis and biofuel production. *Ind Eng Chem Res*, 2009, 48(8): 3713–3729.
- [20] Alvira P, Tomás-Pejó E, Ballesteros M, et al. Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: a review. *Bioresour Technol*, 2010, 101(13): 4851–4861.
- [21] Zheng MX, Li XJ, Li LQ, et al. Enhancing anaerobic biogasification of corn stover through wet state NaOH pretreatment. *Bioresour Technol*, 2009, 100(21): 5140–5145.
- [22] Mosier N, Wyman C, Dale B, et al. Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. *Bioresour Technol*, 2005, 96(6): 673–686.
- [23] Shen F, Wang Q, Li Y, et al. Relatively high-substrate consistency hydrolysis of hydrothermal pretreated Jerusalem artichoke stalk with H₂SO₃ catalysis. *Trans CSAM*, 2014, 45(3): 168–173 (in Chinese).
沈飞, 王卿, 李阳, 等. 水热亚硫酸预处理菊芋秸秆的高浓底物酶水解试验. *农业机械学报*, 2014, 45(3): 168–173.
- [24] Nie GC. Study on the synthesis and properties of ethylenediamine chelating cotton cellulose. *J South Yangtze Univ: Natl Sci Ed*, 2003, 2(6): 631–635 (in Chinese).
聂国朝. 乙二胺螯合棉纤维的制备及吸附性能研究. *江南大学学报: 自然科学版*, 2003, 2(6): 631–635.
- [25] Li S. Synthesis and characterization of CMHPC [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002 (in Chinese).
李胜. CMHPC 的合成与表征[D]. 杭州: 浙江大学, 2002.

(本文责编 郝丽芳)