

植物半纤维素结构研究进展

余紫苹, 彭 红, 林 娟, 阮榕生*, 王 娜, 胡铮璐, 刘玉环, 张锦胜
(南昌大学生物质转化教育部工程技术研究中心, 南昌 330047)

摘要:综述了目前国内外研究半纤维素结构的主要方法以及研究成果, 比较了各种方法的优缺点, 重点介绍了甲基化法、高碘酸氧化、傅里叶红外技术(FIR)、核磁共振分析(NMR)和原子力显微镜分析(AFM)在植物半纤维素结构研究中的应用情况, 本文从初级结构和高级结构两个方面对半纤维素结构的研究进行了概述。本文还介绍了几种重要的半纤维素改性产物及其应用。

关键词: 半纤维素; 初级结构; 高级结构; 改性

半纤维素是植物纤维原料中含量较多的一类碳水化合物, 它在针叶木中的含量为 25%~35%, 在阔叶木中的含量为 18%~22%, 而在禾本科植物中的含量为 16%~25%。近年来, 随着能源问题的日益突出, 半纤维素逐渐被认为是地球上最丰富、最廉价的可再生资源之一。半纤维素有巨大的利用潜力和市场价值, 它可以直接或者通过结构改性后间接应用于食品、材料、医药、化工产品等各个领域。比如半纤维素大量应用于造纸工业, 其含量影响纸张性能。水解木聚糖可生产低聚木糖, 低聚木糖具有很好的保健功能, 可应用于食品工业。半纤维素水解后用于发酵生产生物乙醇, 成本低又环保。利用半乳糖甘露聚糖制作包装材料可以降低材料的透湿性及防止紫外光透过, 从而延长食品的货架期^[1]。甘露聚糖可以作为饮料中的乳化剂, 研究显示低聚合度和高取代度的半乳糖甘露聚糖可以减少乳化剂的浑浊程度^[2]。国内外对于半纤维素的提取工艺选择和结构测定的研究较早, 但是由于半纤维素结构的复杂性限制了其应用, 为了克服这一缺陷, 近十几年来, 各种半纤维素改性产物的研究一定程度上扩大了半纤维素的应用领域。但是到目前为止对植物半纤维素结构的研究还不够深入, 特别是高级结构的确定以及改性条件的优化等使我们还不能很好地利用这一资源。本文主要是对近年来半纤维素的结构研究进展进行了阐述。

1 半纤维素的结构特点

半纤维素是构成植物细胞壁结构的第二大碳水化合物高聚物, 含量仅次于纤维素, 但它不同于均多糖纤维素, 是一种由不同类型单糖组成的杂多糖。这些单糖主要有五碳糖如木糖、阿拉伯糖、鼠李糖、岩藻糖等和六碳糖如半乳糖、甘露糖和葡萄糖等, 有的还含有酸性多糖如半乳糖醛酸和葡萄糖醛酸等。在构成半纤维素时, 不是以一种单糖以一种连接方式构成均一的单糖, 而是由两种以上单糖以多种连接方式构成带支链的杂多糖。除了构成半纤维素的单糖多样外, 在不同的植物中甚至同一植物的不同生长期半纤维素结构也有所不同, 有的半纤维素一级结构相同, 但二级结构就相差很大。

1.1 半纤维素与木素、纤维素的连接方式

半纤维素在植物细胞壁中通过酚酸如阿魏酸和对香豆酸等与木素共价连接, 形成碳水化合物-木素复合体(LCC)。草本中阿魏酸多糖酯类通过醚键与木素连接, 阿魏酸的 C-8 位与羟基肉桂醇的 β 位连接即 8- β 键^[3]; 半纤维素中糖醛酸的自由羧基通过酯键与木素的苯甲基相连^[4]。目前还没有关于半纤维素和纤维素间存在共价键的报道, 通常认为半纤维素主要通过氢键、范德华力等非共价键与纤维素作用形成植物细胞壁的网络结构。

基金项目: 国家自然科学基金项目(30960304)资助;

作者简介: 余紫苹(1987-), 女, 硕士研究生, 研究方向为生物质能源;

* **通讯联系人:** 阮榕生(1963-), 男, 教授, E-mail: penghong@ncu.edu.cn.

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

1.2 不同原料来源中半纤维素的 structural 特点

不同种类植物中半纤维素含量、结构都各有不同,阔叶林的边材中半纤维素含最高约含 31%,而木本的树叶和树皮以及中草药的根部含量最少约 10%~15%;阔叶林、草本和中草药中半纤维素单糖主要以木糖为主,而针叶林中则以阿拉伯糖、半乳糖和甘露糖为主^[5]。

从禾本科如谷物和草本的细胞壁中提取的半纤维素主链由(1→4)- β -D-吡喃木糖组成,在主链的 C-2 或 C-3 位被 α -L-阿拉伯糖基、 α -D-葡萄糖醛酸基或短链的糖残基取代,这些糖残基包括阿拉伯糖、木糖和半乳糖^[6,7]。阿拉伯木聚糖的化学结构式如图 1 所示。

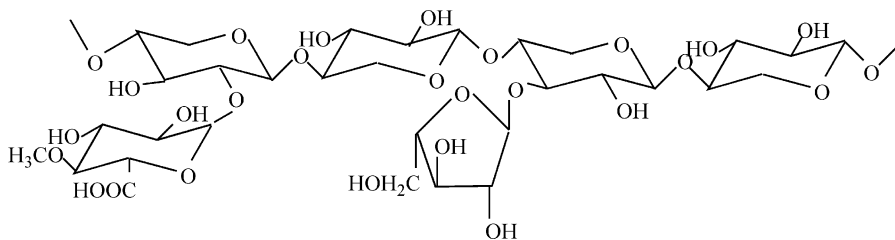


图 1 4-*O*-甲基葡萄糖醛酸阿拉伯木聚糖

Figure 1 The structure of 4-*O*-methyl glucuronic acid arabinoxylan

裸子植物中的半纤维素主要是葡萄糖甘露聚糖,还有少量的阿拉伯葡萄糖醛酸木聚糖,从南洋杉中取得到的半乳甘露聚糖与阿拉伯糖木聚糖的比例为 2.3:1^[8]。半乳甘露聚糖由葡甘露聚糖构成主链,其中约 65%甘露糖的 C-2 或 C-3 位被乙酰基取代,吡喃半乳糖主要连在甘露糖的 C-6 位^[9]。半乳糖葡萄糖甘露聚糖的化学结构式如图 2 所示。

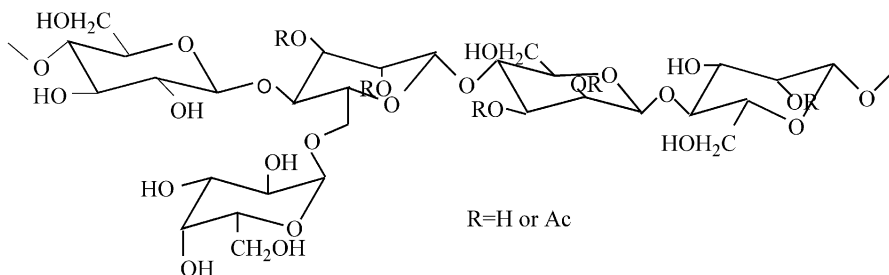


图 2 半乳糖葡萄糖甘露聚糖

Figure 2 The structure of galactose glucomannan

阔叶林的半纤维素中没有阿拉伯糖,其半纤维素为 4-*O*-甲基葡萄糖醛酸木聚糖,由(1→4)- β -D-木糖构成主链,主链的 C-2 位被 4-*O*-甲基- α -D-葡萄糖醛酸取代,C-2 或 C-3 位发生乙酰基取代^[10-12]。葡萄糖醛酸木聚糖的化学结构式如图 3 所示。

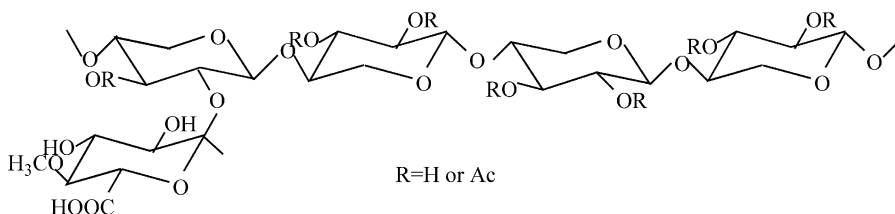


图 3 葡萄糖醛酸木聚糖

Figure 3 The structure of glucuronic acid arabinoxylan

同一作物的不同生长时期其半纤维素结构会发生改变。Cheng 等^[13]研究了香蕉果实成熟过程的半纤维素多糖结构的改变情况,发现在成熟过程中半纤维素分子质量明显降低,(1→4)-吡喃葡萄糖基含量也发生了改变。Yashoda 等^[14]发现芒果中半纤维素由 1,4-半乳糖或聚半乳糖醛酸构成主链,但是在

未成熟芒果中半纤维素主要为木糖葡聚糖。

2 半纤维素初级结构

2.1 半纤维素化学组成分析

半纤维素的单糖组成测定一般是酸水解后直接用液相色谱分析,或经过还原、衍生化成易挥发产物后用气相色谱分析。水解时要尽量用温和的条件,防止结构遭到破坏。近年来普遍采用三氟乙酸催化水解半纤维素,可更适用于各种原料,且水解后三氟乙酸易于除去,更利于分析,也可以采用酶法水解半纤维素,可以更专一地水解所需要的单糖,而不影响其它结构。Sun 等^[15]从麦草秸秆中提取的半纤维素经三氟乙酸水解后的中性糖衍生成糖醇衍生物后用气相色谱技术分析测得中性糖组成及含量。高效阴离子交换色谱-脉冲安培检测技术(HPAEC-PAD)也可以测定半纤维素水解产物中糖组分的成分和含量^[16]。HPAEC-PAD 技术灵敏度高,分离效果更好,且这一方法不需要衍生就能分析几乎所有的单糖和大部分低聚糖。Mittal 等^[17]利用高场¹H-NMR 定量测定了阔叶林水解液的各单糖及低聚糖含量,该法与其它方法相比有较好的重现性。彭云云等^[18]则利用离子色谱法测定了蔗渣半纤维素中单糖和糖醛酸含量,蔗渣半纤维素经水解、稀释过滤后直接进样上机分析,并且采用梯度洗脱使各种单糖及糖醛酸得到了较好的分离,从而快速、准确地测定糖醛酸含量。

半纤维素中的乙酰基测定首先可以用酸水解或用热碱溶液把乙酰基转变成乙酸后测定。其原理如图 4 所示。

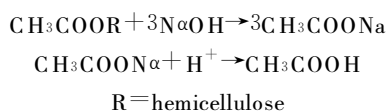


图 4 半纤维素皂化反应式

Figure 4 The formula of hemicellulosic saponification

Teleman 等^[11]利用酶/光度法测定乙酸含量来测定桦树和山毛榉中 *O*-乙酰基-(4-*O*-甲基葡萄糖醛酸)木聚糖的乙酰基含量。Hara 等^[19]利用气相和¹H-NMR 光谱测定了(1→4)- α -D-甘露聚糖中乙酰基的含量和取代位置,如果在¹H-NMR 图谱中在 2.17ppm 和 2.18ppm 有两个强信号说明有乙酰基的存在。仪器分析法不仅可以测定乙酰基含量还可以确定乙酰基的连接位置。

半纤维素中连接的木素可以通过硝基苯氧化成芳香醛和酸类物质后通过高效液相色谱测定^[20]。

2.2 半纤维素化学键连接情况分析

甲基化法是一种测定半纤维素中各单糖连接键类型及位置的重要方法,首先将半纤维素聚糖全部甲基化,然后进行甲醇解或酸水解,得到的中性糖和糖醛酸经还原、乙酰化后用气相色谱分析,若发现糖基哪个位置上没有甲基,则该位置上原来与其它糖基或糖醛酸基连接。Chaikumpollert 等^[7]利用甲基化法测定出岩石草中半纤维素木糖间以(1→4)糖苷键构成木聚糖,且取代发生在主链 2-位和 3-位。Komiyama 等^[21]利用甲基化法和部分酸水解法测定洋麻中的半纤维素结构,发现甲基化产物中存在四种乙酰基糖醇衍生物,即 1,5-二-*O*-乙酰基-2,3,4-*O*-甲基木糖醇、1,4,5-三-*O*-乙酰基-2,3-二-*O*-甲基木糖醇、1,5,6-三-*O*-乙酰基-(6,6-二氘代)-2,3,4-三-*O*-甲基葡萄糖醇和 1,2,4,5-四-*O*-乙酰基-3-*O*-甲基木糖醇,这说明木聚糖主链是(1→4)- β -木聚糖,有些木糖基的 2-位被吡喃葡萄糖醛酸基取代。

还可以利用高碘酸盐的氧化作用,氧化聚糖生成相应的多糖醛、甲醛或甲酸,每断开一个 C—C 键消耗一分子高碘酸盐,因此根据高碘酸的消耗量和甲酸的生产量就可以判断糖苷键的位置、聚合度、支链取代度等,从而确定半纤维素的一级结构。Rao 和 Muralikrishna^[22]利用高碘酸氧化稻草和啤酒稗中提取的水溶性阿拉伯木聚糖时没有检测到甲酸,说明在糖基中没有三个相邻的羟基,这说明有较高含量的糖醛酸以 4-*O*-甲基的形式存在;在随后的 Smith 降解产物中存在少量 2,3,6-三甲基-半乳糖/葡萄糖说明有半乳糖和葡萄糖以短链的形式存在。

2.3 半纤维素中官能基团分析

傅里叶红外光谱(FT-IR)技术可以确定半纤维素中官能团类型、糖苷键连接类型和支链分布情况。在红外光谱中, $1125 \sim 1000 \text{ cm}^{-1}$ 范围内的峰是木聚糖的典型标志, 另一个半纤维素的标志峰是 1370 cm^{-1} , 1168 cm^{-1} 是阿拉伯侧链的特征峰^[23], $1200 \sim 1000 \text{ cm}^{-1}$ 区间是 C—OH 和糖苷键(C—O—C)伸缩振动, 糖单元上的羟基和醚键分别在 3397 cm^{-1} 和 1046 cm^{-1} 处有很强吸收峰, 在 2924 cm^{-1} 和 2848 cm^{-1} 处是 C—H 的伸缩振动, 羰基震动区域 $1628 \sim 1623 \text{ cm}^{-1}$ 有峰说明有结合水, 1736 cm^{-1} 的肩峰来源于半纤维素的乙酰基、糖醛酸和酯键, 1512 cm^{-1} 是半纤维素上残留木质素的特征峰^[24]。

2.4 半纤维素元素分析

元素含量、种类和价态的分析对半纤维的结构确定起到一定的辅助作用。可以采用元素分析仪对半纤维中碳、氢、氧等元素含量和种类进行分析。元素价态分析主要采用的是 X 射线光电子能谱手段, 可以分析出所分离得到的半纤维素中碳、氧等元素的分布情况、元素价态分布情况等, 包括 C—O、C—O—C、O—H、C—C、C=O、C≡C、C—H 等。

3 半纤维素高级结构

3.1 核磁共振分析在半纤维素高级结构研究中的应用

核磁共振(NMR)技术是利用不同分子中原子核的化学环境不同产生不同共振谱, 从而判断该原子在分子中所处的位置及数量。在 ^1H -NMR 光谱中, $1.8 \sim 2.1 \text{ ppm}$ 是与双键或羰基相连的甲基或亚甲基质子的化学位移, $3.2 \sim 4.4 \text{ ppm}$ 是木糖中氢原子的化学位移, 3.4 ppm 是 D-葡萄糖醛酸, 5.5 ppm 是阿拉伯糖末端基, $5.6 \sim 4.9 \text{ ppm}$ 间的峰代表 α 构型, $4.9 \sim 4.3 \text{ ppm}$ 间的峰代表 β 构型, 在 ^{13}C NMR 光谱中, 101.6 、 76.3 、 73.6 、 72.6 和 62.5 ppm 处五个峰分别对应 β -D-吡喃木糖中 C-1、C-4、C-3、C-2 和 C-5 的化学位移, 86.5 ppm 和 71.0 ppm 分别是葡萄糖醛酸 C-4 和 C-5 的化学位移, 97.6 ppm 代表 4-O-甲基- α -D-葡萄糖醛酸, 173.4 ppm 和 59.9 ppm 分别是 4-O-甲基-D-葡萄糖醛酸中 C-6 和甲氧基的化学位移, 74.6 ppm 和 68.4 ppm 两处的弱峰是半乳糖基 C-2 的化学位移^[25~27]。二维 NMR 是上世纪 80 年代发展起来的, 它使得半纤维素的 ^1H 和 ^{13}C -NMR 谱得到归属。Yuan 等^[27] 利用 ^1H -NMR、 ^{13}C -NMR 和 ^1H - ^{13}C 相关谱(HSQC)分析了白杨中半纤维素的结构, 结合糖组成分析和 FT-IR 光谱得出半纤维素结构为 β -(1 $\rightarrow$ 4)-吡喃木糖构成主链, 其中至少有一个木糖基在 C-2 位被 4-O-甲基葡萄糖醛酸基取代, 且 4-O-甲基葡萄糖醛酸与木糖含量比为 1:4。

3.2 原子力显微镜分析在半纤维素高级结构研究中的应用

原子力显微镜(AFM)是一种利用原子、分子间的相互作用力来观察物体表面微观形貌的新型实验技术。它作为一种纳米级技术是近年来发展起来的一种可以观察物质表面结构的强有力工具, 特别适用于生物大分子的可视化和功能化研究。但是利用 AFM 成像对样品的制备有很高的要求, 样品制备的好坏直接关系到样品的成像, 随着非接触 AFM 技术和样品制备技术的发展, AFM 已被广泛用于多糖的定性定量研究中。Adams 等^[28] 利用 AFM 成像分析了杂多糖阿拉伯木聚糖大小、形状以及可能的连接键和分枝情况, 测得延伸的分子长度为 128 nm , 以有序的螺旋结构形式存在, 观察到有小部分支链(约 15%), 其中有 1% 的支链取代度大于 1, 并且发现支链取代度随着分子伸长而增加, 通过木聚糖酶证实支链为 β -(1 $\rightarrow$ 4)-D-木糖基。通过 AFM 可以观察到半纤维素的三维结构, 从而更直观地观察半纤维素的分支情况, 且利用 AFM 软件可以定量测定半纤维素中的不同基团。Chen 等^[29] 观察到樱桃中半纤维素的 AFM 成像为扫帚形状, 在主链中存在很多分支, 主链的长度大约为 $2 \sim 5 \mu\text{m}$, 支链长度约 $100 \text{ nm} \sim 2 \mu\text{m}$, 但是有些分子聚集成球状体, 而在成像中不能分离这些聚集物从而不能准确测定这些分子的链长。

4 半纤维素结构改性及其应用

近十几年来, 为了满足不同的需要和提高半纤维素的利用率, 半纤维素结构改性作为结构研究的一个重要方向受到了越来越多的重视, 半纤维素通过化学改性可以改变其水溶性、热塑性、生物活性等, 从

而扩大了半纤维素的应用。

4.1 乙酰化半纤维素

半纤维素与长链酰基氯反应可以生成热塑性材料,乙酰基比羟基更疏水,半纤维素乙酰化作用是改善聚合物疏水性能应用最广泛的方法。半纤维素羟基基团的衍生化作用还可以减少半纤维素形成强氢键结合网络的倾向,从而提高半纤维素膜的柔韧性。半乳糖甘露聚糖经乙酰化作用后可以使聚糖具有一定的免疫活性,从而作为生物应答调节剂和抗氧化剂添加到食品和药品中^[30]。程合丽、林春香、朱平安等^[31]研究了以丁二酸酐为酯化剂时半纤维素在离子液体 1-丁基-3-甲基咪唑氯盐(BMIMCl)中并且不加催化剂条件下的均相酯化改性(见图 5),改性后的半纤维素对金属离子具有较好的螯合能力。Xu、Jiang 和 Sun 等^[32]研究了半纤维素与各种的酰氯(C₂-C₁₈)在均相体系 *N,N*-二甲基甲酰胺(DMF)/氯化锂中的酯化反应,实验使用 *N*-溴丁二酰亚胺(NBS)作催化剂利用微波辐射法可以使酯化反应快速进行,仅仅几分钟就可以使取代度 DS 达到 1.34。

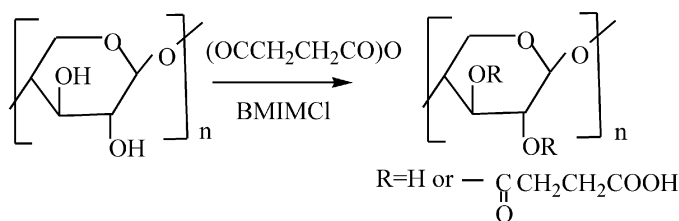


图 5 半纤维素与丁二酸酐的反应式

Figure 5 Reaction between hemicellulose and succinic anhydride

4.2 羧甲基半纤维素

半纤维素羧甲基化后可以得到羧甲基半纤维素,一直以来羧甲基半纤维素的合成都是人们热衷研究的重点。全金英、王佩卿^[33]利用麦草碱法制浆黑液中提取的变性半纤维素在 80%乙醇介质中与一氯醋酸、氢氧化钠进行羧甲基化反应(见图 6),通过一氯醋酸和氢氧化钠的用量可使产品 DS 达到 0.3~0.6,一氯醋酸的用量为 5~10 mol/mol 糖基,氢氧化钠用量为一氯醋酸的 2 倍。经多方药理验证,产品具有提高免疫功能的作用,由于在强碱、高温条件下的一系列变化,半纤维素聚合度下降,羧基含量增加,且本身还有一些酸性基团,羧甲基半纤维素的药用效果可能优于其它多糖的羧甲基衍生物。Petzold、Schwikal、Heinze^[34]研究了羧甲基木聚糖合成,实验比较了不同的反应顺序和介质对羧甲基反应的影响,结果表明当按照先将木聚糖溶解在氢氧化钠再加反应介质异丙醇的反应顺序可以得到最高的 DS 为 1.22,实验还证明了在介质异丙醇中进行反应合成效果优于乙醇和苯醇溶液。

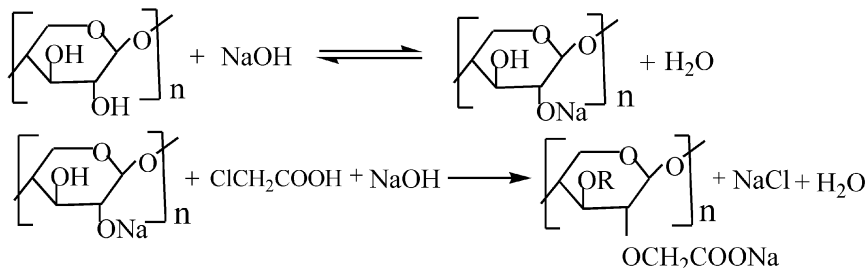


图 6 半纤维素的羧甲基化反应

Figure 6 Carboxymethylation of hemicellulose

4.3 季铵型半纤维素

季铵化后的半纤维素可增加其水溶性,它可以作为打浆助剂,不仅有助于节省打浆能耗,还能增加漂白有机溶解浆的撕裂强度,还可以作为絮凝剂、助留剂等应用于造纸中。国内张继颖、胡惠仁^[35]研究了从制浆废液中得到的半纤维素制备季铵型半纤维素(如图 7 所示),最佳制备条件为是醚化剂用量为 100%,NaOH 用量为 6%,反应时间为 4h 和温度为 65℃,可以得到取代度为 0.08 的季铵型半纤维素,此

种阳离子半纤维素对纸浆的物理性能具有显著的增强作用,达到“变废为宝”的目的。

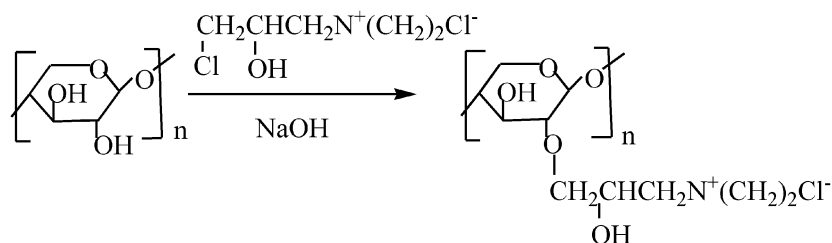


图7 半纤维素的醚化反应

Figure 7 Etherification of hemicellulose

4.4 氧化型半纤维素

半纤维素氧化后可以提高其疏水性,它可以使食品营养因子和药物等缓效释放,有利于药品胶囊化。Lucyszyn 等^[36]研究了从李叶籽中提取的木糖葡聚糖的氧化改性,实验利用 2,2,6,6-四甲基吡啶-1-氧基氧化木糖葡聚糖 6-位的半乳糖和葡萄糖形成糖醛酸,实验条件为氧化剂用量 0.008g,溴化钠 0.04g,15% 次氯酸钠 2.4mL,3℃ 氮气环境下进行,可以得到氧化度为 0.10,0.23 和 0.34 的改性产物。

5 问题与展望

植物半纤维素种类虽然很多,但分子结构一般都呈现有规律的变化,因此要分析一个复杂半纤维素多糖,首先要了解其单元结构以此推测出整个大分子的结构。但是要精确地描述一种物质的半纤维素结构尚存在一些困难,特别是半纤维素高级结构的建立,有些分枝较少的半纤维素利用化学方法就很难测得分支点,NMR 和 AFM 等这些先进的分析技术也存在信号干扰,对样品要求高的问题。半纤维素结构的复杂性也使其改性反应变得复杂,改性产物的合成机理,反应条件优化等还需要进一步探讨研究,近年来我国也逐步增加了这一领域的开发研究,这将为工业化利用农林废弃物等植物资源开创一条新路子。

参考文献:

- [1] Mikkonen K S, Heikkilä M I, Helén H, Hyvönen L, Tenkanen M. Carbohydr Polym, 2010, 79(4):1107~1112.
- [2] Mikkonen K S, Tenkanen M, Cooke P, Xu C, Rita H, Willför S, Holmbom B, Hicks K B, Yadav M P. LWT Food Sci Technol, 2009, 42(4):849~855.
- [3] Ralph J, Grabber J H, Hatfield R D. Carbohydr Res, 1995, 275(1):167~178.
- [4] Jeffries T W. Biodegradation, 1990:163~176.
- [5] Schödel C, Blöchl A, Richter A, Hoch G. Plant Physiol Biochem, 2010, 48(1):1~8.
- [6] Sun R C, Lawther J M, Banks W B. Carbohydr Polym, 1996, 88(2):134~139.
- [7] Chaikumpollert O, Methacanon P, Suchiva K. Carbohydr Polym, 2004, 57(2):191~196.
- [8] Bochicchio R, Reicher F. Carbohydr Polym, 2003, 53(2):127~136.
- [9] Willför S, Sjöholm R, Laine C, Roslund M, Hemming J, Holmbom B. Carbohydr Polym, 2003, 52(2):175~187.
- [10] Naran R, Black S, Decker S R, Azadi P. Cellulose, 2009, 16(4):661~675.
- [11] Teleman A, Tenkanen M, Jacobs A, Dahlman O. Carbohydr Res, 2002, 337(4):373~377.
- [12] Gabriellì I, Gatenholm P, Glasser W G, Jain R K, Kenne L. Carbohydr Polym, 2000, 43(4):367~374.
- [13] Cheng G P, Duan X W, Jiang Y M, Sun J, Yang S Y, Yang B, He S G, Liang H, Luo Y B. Food Chem, 2009, 115(1):43~47.
- [14] Yashoda H M, Prabha T N, Tharanathan R N. Carbohydr Res, 2005, 340(7):1335~1342.
- [15] Sun X F, Xu F, Zhao H, Sun R C, Fowler P, Baird M S. Bioresource Technol, 2005, 96(12):1342~1349.
- [16] Krawczyk H, Persson T, Andersson A, Jönsson A S. Food Bioprod Process, 2008, 86(C1):31~36.
- [17] Mittal A, Scott G M, Amidon T E, Kiemle D J, Stipanovic A J. Bioresource Technol, 2009, 64(13):3031~3041.
- [18] 彭云云, 武书彬, 程江娜, 谭细生, 欧阳春. 造纸科学与技术, 2009, 28(05):10~12.
- [19] Hara C, Kiho T, Ukai S. Carbohydr Res, 1993:317~319.
- [20] Jin A X, Ren J L, Peng F, Xu F, Zhou G Y, Sun R C, Kennedy J F. Carbohydr Polym, 2009, 78(3):609~619.
- [21] Komiyama H, Kato A, Aimi H, Ogihara J, Shimizu K. Carbohydr Polym, 2008, 72(4):638~645.

- [22] Rao R S P, Muralikrishna G. Food Chem, 2007, 104(3); 1160~1170.
- [23] Chaa L, Joly N, Lequart V, Faugeron C, Mollet J C, Martin P, Morvan H. Carbohydr Polym, 2008, 74(3); 597~602.
- [24] Peng F, Ren J L, Xu F, Bian J, Peng P, Sun R C. Food Rec Int, 2010, 43(3); 683~693.
- [25] Bian J, Peng F, Xu F, Sun R C, Kennedy J F. Carbohydr Polym, 2010, 80(3); 753~760.
- [26] Peng Y Y, Wu S. J Anal Appl Pyrol, 2010, 88(2); 134~139.
- [27] Yuan T Q, Xu Fe, He J, Sun R C. Biotechnol Adv, 2010, 44(1); 29~39.
- [28] Adams E L, Kroon P A, Williamson G, Morris V J. Carbohydr Res, 2003, 338(8); 771~780.
- [29] Chen F S, Zhang L F, An H J, Yang H S, Sun X Y, Liu H, Yao Y Z, Li L T. LWT-Food Sci Technol, 2009, 42(1); 125~130.
- [30] Xu C, Leppönen A S, Eklund P, Holmlund P, Sjöholm, Sundberg K, Willför S. Carbohydr Res, 2010, 345(6); 810~816.
- [31] 程合丽, 林春香, 朱平安, 詹怀宇, 付时雨. 中国造纸学报, 2010(1); 44~46.
- [32] Xu F, Jiang J X, Sun R C, et al. Carbohydr Polym, 2008, 73(4); 612~620.
- [33] 全金英, 王佩卿. 林产化学与工业, 1997(4).
- [34] Petzold K, Schwikal K, Heinze T. Carbohydr Polym, 2006, 64(2); 292~298.
- [35] 张继颖, 胡惠仁. 中国造纸学报. 2010(1); 33~38.
- [36] Lucyszyn N, Lubambo A F, Matos K F, Marvilla I, Souza C F, Sierakowski M R. Mat Sci Eng C, 2008, 552~558.

The Structure Characteristic of Hemicellulose : A Review

YU Zi-ping, PENG Hong, LIN Da, RUAN Rong-sheng, HU Zheng-rong,
WANG Na, LIU Yu-huan, ZHANG Jin-sheng

(The Engineering Research Center for Biomass Conversion, MOE, Nanchang 330047, China)

Abstract: In the paper, the main methods and results of the hemicellulose structure study are viewed. The advantages and disadvantages of each method are compared. The application of the methylation method, periodate oxidation, fourier transform infrared technique (FTIR), nuclear magnetic resonance (NMR) and atomic force microscopy (AFM) in structure analysis are presented. The studies of hemicellulose structure are summarized, including summary structure and advanced structure. Several important hemicellulose modified products and their applications are also introduced.

Key words: Hemicellulose; Primary structure; Advanced structure; Modification