

# 水热法主要提取因素对光皮木瓜多糖结构的影响

葛含静<sup>1,2\*</sup>

- (1. 农业农村部富硒产品开发与质量控制重点实验室, 安康 725000;
2. 陕西学前师范学院生命科学与食品工程学院, 西安 710100)

**摘要:** **目的** 优化水热法提取光皮木瓜(*Chaenomeles sinensis*)多糖的提取工艺条件, 分析光皮木瓜不溶性多糖的组成和结构。**方法** 光皮木瓜样品经水热法提取、抽滤、冲洗、浓缩等操作, 分别得到不溶性多糖、醇沉多糖和醇溶多糖, 通过傅里叶变换红外光谱、扫描电子显微镜及X射线衍射分析不溶性多糖的组成和结构。**结果** 多糖的最佳提取条件为150 °C/45 min, 料液比1:10 (g/mL); 温度对水热法提取效果影响较大, 适当升高温度、延长提取时间和减少料液比有利于多糖提取; 高温虽能促进半纤维素溶解, 但无法使木质素和木聚糖降解; 不同温度提取的光皮木瓜不溶性多糖的结构相似; 水热法提取光皮木瓜多糖不会导致多糖的功能性基团变化, 只改变多糖的化学组成。**结论** 该研究可为光皮木瓜多糖的结构与功能研究提供实验依据。

**关键词:** 水热法; 光皮木瓜; 多糖; 傅里叶变换红外光谱; X射线衍射

## Influence of main hydrothermal extraction factors on structure of polysaccharides from *Chaenomeles sinensis*

GE Han-Jing<sup>1,2\*</sup>

- (1. Key Laboratory of Se-enriched Products Development and Quality Control, Ministry of Agriculture, Ankang 725000, China;
2. College of Life Sciences and Food Engineering, Shaanxi Xueqian Normal University, Xi'an 710100, China)

**ABSTRACT: Objective** To optimize the hydrothermal extraction conditions of *Chaenomeles sinensis* polysaccharides, analyze the composition and structure of insoluble polysaccharides. **Methods** The polysaccharides in *Chaenomeles sinensis* were extracted from the samples by hydrothermal, then filtered, rinsed and concentrated to obtain the insoluble polysaccharides, the alcohol-precipitated polysaccharides and the alcohol-soluble polysaccharides, respectively. The composition and the structure of the insoluble polysaccharides were analyzed by Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR), scanning electron microscopy (SEM), and X-ray diffraction (XRD). **Results** The optimum conditions for polysaccharides extracting were 150 °C/45 min and the ratio of material to liquid was 1:10 (g/mL). Temperature had a great influence on the extraction effect of hydrothermal method. Properly increasing the temperature, extending the extraction time and reducing the material-to-liquid ratio are beneficial to the extraction of polysaccharides. Furthermore, high temperature could promote the dissolution of hemicellulose, but could not degrade lignin and xylan, and the insoluble polysaccharides extracted at different temperatures had the similar structures. The hydrothermal extraction of papaya polysaccharide did not change the functional groups of the

基金项目: 陕西学前师范学院扶贫科研项目(2018F12)、农业农村部富硒产品开发与质量控制重点实验室开放课题项目(Se-2018B04)

Fund: Supported by Poverty Alleviation Research Project of Shaanxi Preschool Normal University (2018F12) and Key Laboratory Open Project Fund of Se-enriched Products Development and Quality Control, Ministry of Agriculture and Rural Affairs (Se-2018B04)

\*通信作者: 葛含静, 副教授, 主要研究方向为粮食工程与发酵技术创新。E-mail: gehanjing1981@163.com

\*Corresponding author: Ge Han-Jing, Associate Professor, Shaanxi Xueqian Normal University, No.2, Shenhe Road, Chang'an District, Xi'an, 710100, China. E-mail: gehanjin1981@163.com

polysaccharide, but only changed the chemical composition of the polysaccharide. **Conclusion** This study can provide experimental basis for the study of structure and function of *Chaenomeles sinensis* polysaccharide

**KEY WORDS:** hydrothermal; *Chaenomeles sinensis*; polysaccharide; fourier transform infrared spectroscopy; X-ray diffraction

## 0 引言

光皮木瓜, 蔷薇科木瓜属, 又名榭楂、木李<sup>[1]</sup>, 有机酸、矿物质、维生素含量丰富, 还富含多糖、齐墩果酸、膳食纤维等功能性成分, 可药食两用<sup>[2-3]</sup>; 其果实对急性过敏、咳嗽、病毒性感冒等多种疾病的治疗有效, 其提取物具有抗溃疡、抗肿瘤、保肝、抗氧化功效<sup>[4-6]</sup>。但由于光皮木瓜糖酸比低, 纤维素和单宁物质相对较高, 不能鲜食, 故其加工产品仅限于果脯、酒等极少数产品, 因此开发新的光皮木瓜产品及提取其功能成分对光皮木瓜资源的利用极具意义。

水热法是通过加热高压釜里的水溶液, 以形成高温高压环境, 使常态下难溶或不溶物质溶解并重结晶, 是一种非常环保的活性成分提取方法<sup>[7]</sup>。在高压釜内, 水达到超临界状态, 虽仍为液态, 但极性、表面张力、溶解度、密度和扩散性等理化性质都有异于液态水<sup>[8-9]</sup>。相比有机溶剂萃取法, 高压水热法不使用有机溶剂, 故不污染环境<sup>[8]</sup>; 相比热水浸提法, 水热法可使目标产物溶解度和溶剂扩散率显著增加, 使溶剂粘度和表面张力大大下降, 从而使溶剂更好地渗透到物料中, 提高产物的提取率, 且能使蛋白、淀粉发生变性, 便于后续的分离纯化<sup>[7-9]</sup>。

陕西白河素有“木瓜之乡”的称号, 其光皮木瓜个大肉厚, 色泽亮黄, 香气宜人, 以“花果兼美, 色香俱佳”而备受人们喜爱<sup>[10]</sup>, 然而加工产品极少, 资源利用不充分; 对其多糖的研究也仅限于含量测定。鉴于此本研究以高压水热法提取陕西白河光皮木瓜多糖, 优化提取工艺, 探究影响提取率的主要因素及其对提取物的组成和结构的影响, 为光皮木瓜多糖的结构与功能研究提供实验依据, 也为陕西白河光皮木瓜资源的综合利用提供研究参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

原材料: 从陕西安康白河县采摘成熟的光皮木瓜果实。

试剂: 乙醇、盐酸、硫酸、氢氧化钠、甲苯等均为分析纯, 购自国药集团有限公司。

### 1.2 主要仪器设备

HH-SJ2CD 恒温磁力搅拌油浴锅(常州市金坛友联仪器研究所); RE5200 旋转蒸发器(上海亚荣生化仪器厂);

FTIR-1500 傅立叶变换红外光谱仪(中世沃克科技发展股份有限公司); BTX III X 射线衍射分析仪(日本奥林巴斯株式会社); STA-449C 同步热分析仪(德国耐驰仪器制造有限公司); JSM-6700F 扫描电子显微镜(日本电子株式会社); ICS-3000 高效离子气相色谱仪(美国戴安公司)。

## 1.3 方法

### 1.3.1 原材料预处理

原材料清洗去核、切片、冻干, 粉碎后过 40 目筛后, 用甲苯和乙醇的混合溶液(甲苯:乙醇=2:1, V/V)于(60±2)°C 经索氏抽提直至无色, 然后放在通风厨中风干。

### 1.3.2 多糖提取

取 10 g 预处理的样品于 350 mL 耐压瓶中, 加入蒸馏水, 放入油浴锅中, 待反应完毕静置 20 min, 抽滤, 以分开溶液和固体残渣(solid residue, SR, 主要是不溶性多糖)。用 200 mL 蒸馏水冲洗 SR 3~5 次, 然后合并滤液, 再于 52 °C 减压浓缩, 加入约 3~5 倍体积的乙醇, 冰箱 4 °C 静置 12 h。将上一步操作得到的醇沉物(precipitation A, PA, 主要是醇沉多糖)用 75% 的乙醇冲洗 3 次, 而醇溶物(precipitation B, PB, 主要是醇溶多糖)直接于 45 °C 减压浓缩。将最终所得的 SR、PA、PB 于(105±2)°C 烘至恒重<sup>[11]</sup>。产物得率计算公式如下:

$$Y_p = \frac{W_p}{W_d(1 - Y_w)} \times 100\%$$

式中:  $Y_p$  为产物得率, wt%;  $W_p$  为产物质量, g;  $W_d$  为原料质量, g;  $Y_w$  为原料含水量, wt%。

### 1.4 多糖结构表征

高效阴离子交换色谱检测。取 4~6 mg 样品, 加 72% 硫酸 0.125 mL、超纯水 1.35 mL, 105 °C 水解反应 2.5 h, 期间每 0.5 h 取出, 充分振荡 1 次<sup>[11]</sup>。反应结束后, 反应液冷却、过滤, 将滤液稀释 30 倍, 进离子色谱柱检测。

红外光谱检测。参数为: 分辨率 4  $\text{cm}^{-1}$ , 扫描次数 16, 扫描范围 4000~4500  $\text{cm}^{-1}$ 。

扫描电镜观察。将木瓜冻干粉或 SR 样品平铺、固定, 真空镀一层金膜, 在 30 kV 的加速电位下放大 1000 倍观察。

X 射线衍射分析。参数为: Cu-K $\alpha$  辐射源, 管流 40 mA, 管压 40 kV, 扫描速度 12 °/min, 扫描范围 5°~38°, 步长 0.013°, 室温。SR 的结晶度公式如下:

$$CrI = \frac{I_{002} - I_{Amr}}{I_{002}}$$

式中:  $I_{002}$  为 002 晶型在 21.5° 扫描时的最大衍射强度,  $I_{Amr}$  为在 16.8° 附近扫描的非结晶峰。

## 1.5 残渣中木质素含量的测定

取 5 g SR 粉, 加 100 mL 洗涤剂(20 g 溴化十六烷基三甲铵溶于 1 L 的 1 mol/L  $H_2SO_4$ ), 10 min 内加热至沸腾后回流 1 h, 冷却后抽滤, 将 SR 移至烧杯, 加 72%  $H_2SO_4$  至浸没固体, 15 °C 消化 3 h, 抽干滤液, 蒸馏水冲洗至中性后 100 °C 烘干, 冷却, 称重。最后, 用马弗炉于 550 °C 灰化, 冷却, 称重, 计算木质素含量。

## 2 结果与分析

### 2.1 提取条件参数对产物得率的影响

#### 2.1.1 提取温度

反应料液比为 1:10(g/mL), 反应时间为 45 min, 反应温度分别设置为 105、120、135、150、165 °C 时测定 3 种产物得率, 探究反应温度的影响, 结果见图 1。SR 得率随温度升高而下降, 当温度达到 150 °C 时, SR 得率降到最低值 61.08%; PA 和 PB 得率随温度升高而增加, 当温度为 150 °C 时, 两者得率均达到最大值, 分别为 14.8% 和 23.1%。可见, 光皮木瓜中的纤维素、半纤维素等在高温下能发生降解, 使水溶性多糖得率升高, 这与 SAMAVATI 等<sup>[12]</sup>的研究结果一致; 当温度大于 150 °C 时, 木质素降解形成的水溶性物质可能因为再凝结作用而附着在不溶性残渣表面, 从而使 SR 得率有所上升<sup>[13]</sup>, PA 由于脱水分解, 得率下降, PB 得率稍稍下降。据此可知, 高温可使多糖的溶解度和扩散性大大提高, 但却会一定程度地破坏醇溶多糖的结构。

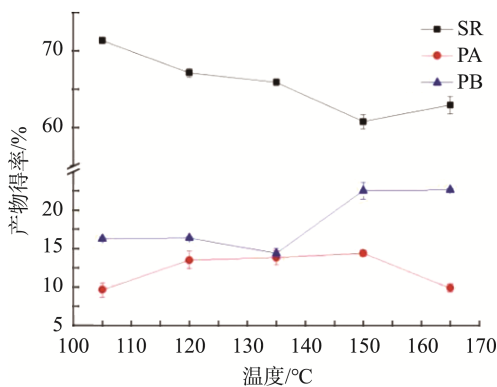


图 1 提取温度对提取产物各部分得率的影响( $n=3$ )

Fig.1 Effects of extraction temperature on the yield of each part of the extracted products( $n=3$ )

#### 2.1.2 提取时间

反应料液比为 1:10(g/mL), 反应温度为 135 °C, 反应时间分别设置为 10、25、45、65、85 min 时测定 3 种产物得率, 探究反应时间的影响, 结果见图 2。SR 得率随时间延长而下降; 而 PA 得率相反, 在 45 min 时达到最大, 之后缓慢下降; PB 得率缓慢下降, 但在 45 min 后略有增加, 可能是由于 PA 降解导致。据此可知, 提取时间较短可使多糖溶解不

够充分, 但时间过长则加速 PA 降解, 使其转化为 PB, 这与 LIU 等<sup>[14]</sup>的研究结果一致, 长时间静态提取或可使物质质量传递驱动力降低甚至消失, 导致水溶性产物的溶解度由于降解而下降<sup>[15]</sup>。

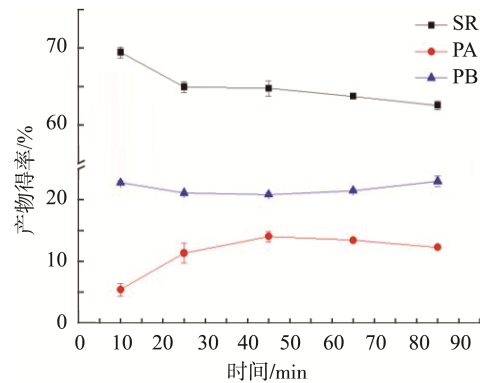


图 2 提取时间对提取产物各部分得率的影响( $n=3$ )

Fig.2 Effects of extraction time on the yield of each part of the extracted products ( $n=3$ )

#### 2.1.3 提取料液比

反应温度为 135 °C, 反应时间为 45 min, 反应料液比分别设置为 1:5、1:10、1:15、1:20、1:30(g/mL) 时测定 3 种产物得率, 探究料液比的影响, 结果见图 3。料液比从 1:5 降至 1:15 时, SR 得率显著降低, PA 得率先提高后降低。大量的水可加速溶液向物料细胞内扩散, 使多糖溶解得更多<sup>[16-17]</sup>, 但过量的水反而吸收了反应体系的空化能量<sup>[12]</sup>。反应体系的料液比小于 1:15(g/mL) 时, 若再增加反应溶剂, 多糖得率均变化不大, 并未有明显提高。

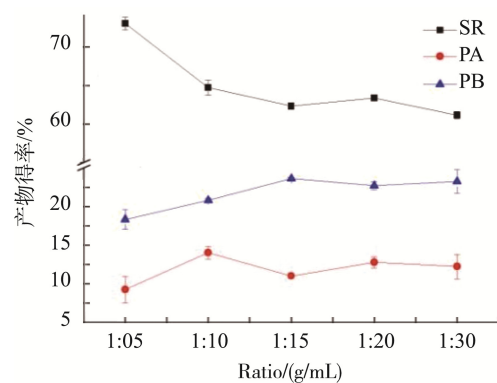


图 3 提取料液比对提取产物各部分得率的影响( $n=3$ )

Fig.3 Effects of the ratio of material to liquid on the yield of each part of the extracted products( $n=3$ )

综上所述, 根据水热法提取光皮木瓜多糖的总得率, 多糖提取较优条件为 150 °C/45 min, 料液比 1:10(g/mL)。水热法提取多糖时, 料液比是影响产物得率的重要因素, 液相较多时能促进纤维素脱水和半纤维素溶解<sup>[14]</sup>, 而温度是影响提取效率和选择性的主要因素, 可能因为蒸汽压的增加导致化合

物从物料中的热解吸加强<sup>[15-16]</sup>。

## 2.2 提取温度参数对产物组成及结构的影响

### 2.2.1 不同温度所得单糖的组成

不同温度所得产物及甲苯-乙醇混合溶液抽提后原料中的单糖组成见表 1。由表 1 可知, 木糖是光皮木瓜原料中含量最多的单糖, 高达 47.92%, 经水热法处理后, 主要存在于残渣中, 且随处理温度的升高而富集, 在 150 °C 下可增至 62.19%。可见, 在 120~150 °C 水热法处理下, 光皮木瓜中木聚糖几乎不与其他物质一起发生降解。此外, 光皮木瓜中约含 17.5% 的阿拉伯糖和葡萄糖, 葡萄糖最先水解, 形成 PA 中的葡萄糖寡糖; 当提取温度不断升高, 水溶性产物中葡萄糖含量均呈下降趋势; 原料中的半纤维素是残渣中阿拉伯糖的主要来源, 且随提取温度不断升高, SR 中的阿拉伯糖含量从 16.38% 快速降至 5.21%, 同时 PB 中的阿拉伯糖从 5.02% 升高到 35.45%, 纤维的紧密结构在高温条件下可吸水溶胀, 使之与半纤维素间的非离子作用力减弱, 半纤维素更易溶出。LV 等<sup>[17]</sup>在通过水热法提取果胶多糖的研究中发现, 毛发区的阿拉伯糖最先发生水解并降解成小分子。所以, PB 中阿拉伯糖来源途径可能为半纤维素的降解和 PB 的转化。

表 1 不同提取温度所得多糖产物的组成(%)  
Table 1 Composition of polysaccharide products obtained at different extraction temperatures(%)

单糖含量		提取温度/°C			
		150	135	120	原料
阿拉伯糖	SR	5.21	9.14	16.38	
	PB	35.45	18.79	5.02	17.56
	PA	39.74	40.08	33.38	
半乳糖	SR	5.80	5.04	6.56	
	PB	2.91	3.86	1.86	7.36
	PA	13.02	12.91	10.35	
葡萄糖	SR	17.95	14.58	14.25	
	PB	52.94	67.15	82.18	17.65
	PA	10.94	12.61	15.74	
鼠李糖	SR	-	-	-	
	PB	-	-	-	-
	PA	4.64	3.81	2.68	
木糖	SR	62.19	61.73	58.24	
	PB	8.29	8.28	9.98	47.92
	PA	-	-	-	
甘露糖	SR	3.32	2.71	2.67	
	PB	0.47	1.98	1.02	5.96
	PA	3.02	2.43	3.06	
半乳糖醛酸	SR	5.57	6.90	1.92	
	PB	-	-	-	3.55
	PA	28.69	27.25	34.78	

注: - 未检出。

### 2.2.2 不同温度所得残渣的木质素含量

不同温度所得残渣的木质素含量见表 2, 可知, 残渣中木质素的含量随提取温度的升高而增大, 说明在 120~150 °C 水热法处理对木质素的脱除效果不高。

表 2 不同提取温度所得残渣的木质素含量  
Table 2 Lignin content of residue obtained at different extraction temperatures

提取温度/°C	150	135	120	原料
木质素含量/%	28.74	24.62	20.42	14.58

### 2.2.3 不同温度所得残渣及醇沉多糖的 FT-IR 分析

光皮木瓜的 SR 红外光谱分析如图 4 和 5。在图 4 中, 原料随着温度升高, 1739  $\text{cm}^{-1}$  和 1022  $\text{cm}^{-1}$  处半纤维素的吸收峰强度逐渐减小<sup>[18]</sup>, 150 °C 右移至 1719  $\text{cm}^{-1}$  处, 这说明半纤维素在高温高压的条件下结构会被破坏, 且温度越高, 半纤维素水解程度越大。根据 150 °C 处理条件下 1514  $\text{cm}^{-1}$  处吸收峰的强度变化可知, 通过水热法所得的 SR 中木质素含量比原料中要高, 因为大部分半纤维素在水预热过程中可被脱除, 于是 SR 中木质素含量相对有所提高, 也说明水热预处理中木质素基本不会被降解, 这与上述研究中结果一致。在 150 °C 提取多糖之后, 由位于 1246  $\text{cm}^{-1}$  处的醚键伸缩振动吸收峰近乎消失可知, 水热法温度高时对于木质素和其他碳水化合物间的醚键脱除极为有利; 1439、1367 和 1105  $\text{cm}^{-1}$  几处的纤维素亚甲基变角振动、伸缩振动和 C-OH 骨架振动的吸收峰强度变化不太明显, 说明水预热过程主要作用是脱除半纤维素。根据 1030  $\text{cm}^{-1}$  附近强烈的特征吸收峰可知, SR 中木聚糖丰富<sup>[19]</sup>。在 135 °C 和 150 °C 残渣中, 由位于 895  $\text{cm}^{-1}$  处的特征峰略微增强可知, SR 中的单糖间主要是以  $\beta$  糖苷键相互连接<sup>[20]</sup>。777  $\text{cm}^{-1}$  吸收峰表明, 样品中有少量甘露糖存在。图 5 的 1745  $\text{cm}^{-1}$  和 1615  $\text{cm}^{-1}$  吸收峰表明三种多糖中均含有糖醛酸<sup>[21]</sup>。1097、1017 和 920  $\text{cm}^{-1}$  几处的特征吸收峰表明光皮木瓜多糖主要是  $\alpha$ -吡喃糖, 829  $\text{cm}^{-1}$  处吸收峰说明其中还含有少量的  $\beta$ -吡喃糖<sup>[22]</sup>。

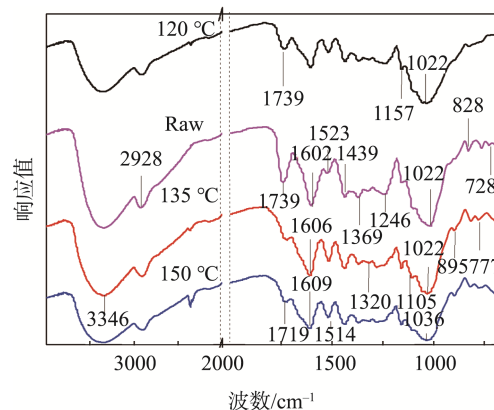


图 4 不同提取温度处理后 SR 的红外图谱  
Fig.4 FT-IR of SR treated at different extraction temperatures

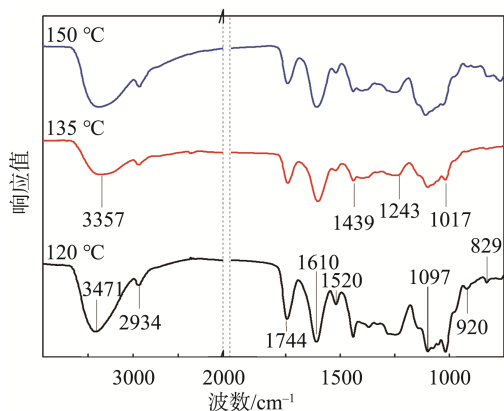


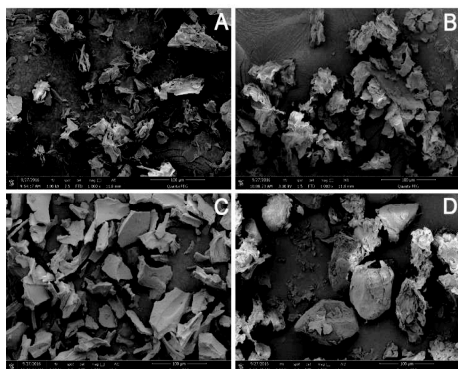
图5 不同提取温度处理后PA的红外图谱

Fig.5 FT-IR of PA treated at different extraction temperatures

综上,不同提取温度处理后SR和PA的红外吸收特征峰位置相似,强度不同,说明水热法提取光皮木瓜多糖不会导致多糖的功能性基团变化,只改变多糖的化学组成。

#### 2.2.4 不同温度所得残渣的SEM分析

对不同温度下所得SR的表观形貌进行SEM观察,可知,SR聚集程度随提取温度的升高而升高,同时残渣颗粒的尺寸增大。水热处理会造成提取原料板结,可能因此导致残渣凝集(图6)。



注: A-Raw B-120 °C C-135 °C D-150 °C。

图6 不同提取温度处理后残渣的表观形貌图

Fig.6 SEM of the residue treated at different extraction temperatures

#### 2.2.5 不同温度所得残渣的XRD分析

纤维素的结晶度和晶体结构非常影响纤维素的酶解效率<sup>[23]</sup>。由不同提取温度所得残渣和原料中纤维素结晶度的变化(图7)可知,主要衍射峰均在 $2\theta=21.5^\circ$ 、 $16.8^\circ$ 和 $34.5^\circ$ 处,且 $22.5^\circ$ 处衍射峰最强,这说明纤维素I晶型没有明显改变;由Segal公式计算得,光皮木瓜原料中纤维素的结晶度为16.72%,不同温度的水热法处理后纤维素的结晶度均增加(在120、135和150 °C时结晶度分别为21.84%、26.21%和22.15%),说明水热法能有效降解无定型的半纤维素和木质素,留下完整的纤维素晶体。纤维素结晶度增加的根本原因

是由于在生物体内的物质转化中,首先参与反应的是无定形结构部分的木质纤维素和短分子链结晶区的木质纤维素,存在于植物细胞壁中的半纤维素可溶于水,但木质素却很少粘附于纤维素上<sup>[24]</sup>。

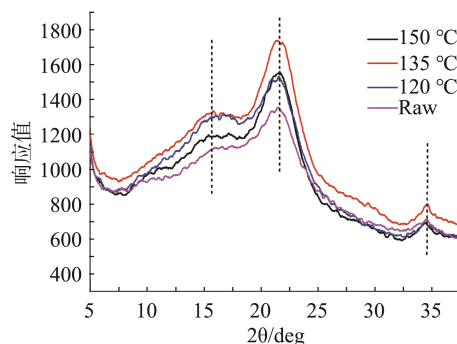


图7 不同提取温度处理后残渣的XRD分析

Fig.7 XRD analysis of residue treated with different extraction temperatures

### 3 结论

本研究利用水热法提取光皮木瓜多糖,采用醇沉法对所得多糖的水溶性组分进行纯化,研究各提取因素对产物得率的影响及不同提取温度对产物组成的影响,并对光皮木瓜中糖类的降解规律进行分析。研究发现,光皮木瓜多糖提取的较优条件为150 °C/45 min,料液比1:10(g/mL);水热法提取温度对多糖提取效果影响较大,适当升高提取温度、延长提取时间和减少提取料液比利于多糖提取;较高提取温度虽能促进半纤维素溶解,但无法使木质素和木聚糖降解;提取温度对光皮木瓜多糖结构几乎无影响。

#### 参考文献

- [1] HAMAUZY Y, TAKEDACHI N, MIYASAKA R, *et al.* Heat treatment of Chinese quince polyphenols increases rat plasma levels of protocatechuic and vanillic acids [J]. *Food Chem*, 2010, 118(3): 757–763.
- [2] JANG MS, PARK JE, PARK HY. Formulation optimization of salad dressing added with Chinese quince (*Chaenomeles sinensis*) juice by mixture design [J]. *Food Sci Biotechnol*, 2011, 20(2): 409–417.
- [3] ZHANG LH, XU HD, LI SF. Effects of micronization on properties of *Chaenomeles sinensis* (Thouin) Koehne fruit powder [J]. *Innovat Food Sci Emerg Technol*, 2009, (10): 633–637.
- [4] KIM H, LEE JS, YUN CY *et al.* Chinese quince (*Chaenomeles sinensis*) extract inhibits cell migration and cytokine release in HMC-1 cells [J]. *Food Sci Biotechnol*, 2013, 22: 501–506.
- [5] 《中华本草》编辑委员会. 中华本草(第四卷)[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2002.
- [6] 吴廷俊, 张浩. 中药木瓜的基源和性状鉴定[J]. *华西医学报*, 1996, 27(4): 190–192.
- [7] WU TJ, ZHANG H. Botanical origin and morphological identification of

- Chinese traditional drug mugua (fruit of chaenomeles) [J]. J West China Univ Med Sci, 1996, 27(4): 190–192.
- [7] 施建畏, 夏长泰, 王步国, 等. 水热法的应用与发展[J]. 无机材料学报, 1996, 11(2): 193–206.
- SHI EW, XIA CT, WANG BG, *et al.* Development and application of hydrothermal method [J]. J Inorgan Mater, 1996, 11(2): 193–206.
- [8] ZHAO CA, YANG RFA, QIU TQB. Ultrasound-enhanced subcritical water extraction of polysaccharides from *Lycium barbarum* L [J]. Sep Purif Technol, 2013, 120: 141–147.
- [9] TEO CC, TAN SN, YONG JWH, *et al.* Pressurized hot water extraction (PHWE) [J]. J Chromatogr A, 2010, 1217(16): 2484–2494.
- [10] 张建新, 杜双奎. 白河县不同地区光皮木瓜营养成分分析[J]. 西北农业学报, 2005, 14(4): 106–109.
- ZHANG JX, DU SK. Analysis of nutritional components of *chaenomeles sinensis* (thouin) koehne from the different regions of Baihe county [J]. Acta Agric Boreali-occident Sin, 2005, 14(4): 106–109.
- [11] 吴敏. 光皮木瓜中水溶性多糖和木聚糖的分离、结构表征及应用研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2017.
- WU M. Separation, structural characterization and application of water-soluble polysaccharide and hemicellulose from *Chaenomeles sinensis* [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2017.
- [12] SAMAVATI V. Polysaccharide extraction from *Abelmoschus esculentus*: Optimization by response surface methodology [J]. Carbohydr polym, 2013, 95(1): 588–597.
- [13] ALVIRA P, TOMÁS-PEJÓ E, BALLESTEROS M, *et al.* Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: A review [J]. Bioresour Technol, 2010, 101(13): 4851–4861.
- [14] LIU HM, WANG FY, LIU YL. Hot-compressed water extraction of polysaccharides from soy hulls [J]. Food Chem, 2016, 202: 104–109.
- [15] ONG ES, LEN SM. Pressurized hot water extraction of berberine, baicalein and glycyrrhizin in medicinal plants [J]. Anal Chim Acta, 2003, 482(1): 81–89.
- [16] TEO CC, TAN SN, YONG JWH, *et al.* Pressurized hot water extraction (PHWE) [J]. J Chromatogr A, 2010, 1217(16): 2484–2494.
- [17] LV X, YAMAUCHI K, PHAIBOONSILPA N, *et al.* Two-step hydrolysis of Japanese beech as treated by semi-flow hot-compressed water [J]. J Wood Sci, 2009, 55(5): 367–375.
- [18] BIAN J, PENG F, PENG P, *et al.* Isolation and fractionation of hemicelluloses by graded ethanol precipitation from *Caragana korshinskii* [J]. Carbohydr Res, 2010, 345(6): 802–809.
- [19] SUN R, LAWTHOR JM, BANKS WB. Fractional and structural characterization of wheat straw hemicelluloses [J]. Carbohydr Polym, 1996, 29(4): 325–331.
- [20] GUPTA S, MADAN RN, BANSAL MC. Chemical composition of *Pinus caribaea* hemicellulose [J]. TAPPI J (USA), 1987, 70: 113–114.
- [21] NA YS, KIM WJ, KIM SM, *et al.* Purification, characterization and immunostimulating activity of water-soluble polysaccharide isolated from *Capsosiphon fulvescens* [J]. Int Immunopharmacol, 2010, 10(3): 364–370.
- [22] HAN Y L, GAO J, YIN YY, *et al.* Extraction optimization by response surface methodology of mucilage polysaccharide from the peel of *Opuntia dillenii* haw, fruits and their physicochemical properties [J]. Carbohydr Polym, 2016, 151: 381–391.
- [23] CETINKOL ÖP, DIBBLE DC, CHENG G, *et al.* Understanding the impact of ionic liquid pretreatment on eucalyptus [J]. Biofuels, 2010, 1(1): 33–46.
- [24] XIAO LP, SUN ZJ, SHI ZJ, *et al.* Impact of hot compressed water pretreatment on the structural changes of woody biomass for bioethanol production [J]. Bio Res, 2011, 6(2): 1576–1598.

(责任编辑: 韩晓红)

## 作者简介



葛含静, 博士, 副教授, 主要研究方向为粮食工程与发酵技术创新。

E-mail: gehanjing1981@163.com