

碱性过氧化氢处理对藕渣可溶性膳食纤维结构及流变学特性的影响

徐磊, 张倩, 王佩瑶, 王子成, 黄琳茜, 何玲

(淮阴工学院 生命科学与食品工程学院 江苏淮安 223003)

摘要 以藕渣作为主要原料,采用碱性过氧化氢(AHP)处理后提取可溶性膳食纤维(SDF),比较处理前、后所得藕渣 SDF 结构和流变学特性的变化。结果表明:经 AHP 处理后,藕渣 SDF 提取率提高了 7.21 倍($P<0.05$),单糖组成分析表明其 L-鼠李糖和 D-半乳糖含量分别增加了 51.85%和 39.27%($P<0.05$)。与未处理藕渣的 SDF 相比,AHP 处理后藕渣 SDF 的分子质量减小,Zeta-电位从-24.80 mV 降至-26.95 mV ($P<0.05$)。扫描电子显微镜、傅里叶变化光谱分析表明:AHP 处理藕渣的 SDF 结构变得蓬松,表面变得粗糙,部分特征官能团发生变化。X-射线衍射、热重分析表明:经 AHP 处理的藕渣 SDF 结晶度降低,而其高温热稳定性提高。稳态、动态流变学分析表明:在 Ca^{2+} 存在下 AHP 处理藕渣的 SDF 表现出更高的剪切黏度和更强的凝胶化能力。结论:AHP 处理藕渣能改善所得 SDF 的结构及流变学特性,可为藕渣的开发利用提供一定的参考。

关键词 碱性过氧化氢; 藕渣; 可溶性膳食纤维; 结构; 流变学特性

文章编号 1009-7848(2024)05-0245-09 DOI: 10.16429/j.1009-7848.2024.05.020

莲藕(*Nelumbo nucifera* Gaertn.),又名藕、藕节、白茎等,多年来作为一种食药同源植物在我国被广泛种植和食用。莲藕富含多种天然化合物,如多糖、蛋白质、矿物质、生物碱和多酚等^[1],已被证实具有抗氧化、抗炎和免疫刺激活性等^[2]。目前,莲藕被用于加工藕粉、藕饮料等多种产品,具有较好的市场前景。然而,在莲藕生产过程中会产生大量的副产物藕渣,除了少部分被用作动物饲料外,大部分残渣被丢弃,在一定程度上造成资源浪费并增加了环境负担^[3]。研究表明,藕渣中含有丰富的膳食纤维(Dietary fiber, DF),对其开发利用可有效提高莲藕加工的经济效益^[4]。

欧洲食品安全局将 DF 定义为不可消化的碳水化合物、木质素类物质^[5]。近年来,DF 因突出的功能特性而备受关注,长期摄食可降低冠心病、中风、高血压、糖尿病、肥胖症和某些胃肠道疾病的发病风险^[6-7]。根据 DF 在水中的溶解性可分为不溶性膳食纤维(Insoluble dietary fiber, IDF)和可溶性膳食纤维(Soluble dietary fiber, SDF)。与 IDF 相比,SDF 可表现出更好的生理和生物活性,如更强的抗氧化活性、更高的凝胶形成能力、更大的发酵能力和黏度等^[8]。SDF 可以作为增稠剂、乳

化剂、稳定剂和脂肪替代品应用于食品加工中^[9]。然而,大多数 DF 来源中 IDF 含量远高于 SDF,因此,有必要对其进行一定的加工处理,以提高其功能特性^[10]。目前,酶法、超声波法和微波法等多种手段被开发出来处理 DF,以提高其 SDF 含量^[11]。

研究表明,碱性过氧化氢(Alkaline hydrogen peroxide, AHP)处理可提高 SDF 的提取率并改善其理化性质^[12-13]。此外,AHP 处理条件温和,其处理过程中仅产生氧气和水,具有较高的安全性和良好的适用性,可应用于食品工业中^[14]。然而,关于 AHP 处理藕渣对 DF 的影响鲜有报道。本试验利用 AHP 法处理藕渣,提取其中的 SDF。通过单糖组成、分子质量、Zeta-电位、扫描电子显微镜(Scanning electron microscope, SEM)、傅里叶红外光谱(Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)、X-射线衍射和热重对其结构进行表征,测定其稳态和动态流变学性质,为更好地利用藕渣提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

新鲜莲藕购自当地农贸市场;碱性蛋白酶(200 000 U/g)、 α -淀粉酶(10 000 U/g),北京索莱宝科技有限公司;淀粉葡萄糖苷酶(260 U/mL),上海阿拉丁生化科技股份有限公司;30% H_2O_2 、浓盐酸、NaOH、 $CaCl_2$ 、95%乙醇等,国药集团化学试剂

收稿日期: 2023-05-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(31801581)

第一作者: 徐磊,男,博士,副教授

E-mail: dapangxulei@163.com

有限公司。

1.2 仪器

Waters 1525 型高效液相色谱仪,美国 Waters 公司;SU8010 型场发射扫描电镜,日本日立高新技术公司;Scientific Nicolet iS5 型红外光谱仪,美国 Thermo 公司;DHR-1 流变仪,美国 TA 仪器公司;Smartlab 9KW 型 X-射线衍射,日本理学株式会社;Zetasizer Nano ZS90 纳米粒度、Zeta 电位分析仪,英国马尔文仪器有限公司;STA449F3 同步热分析仪,德国耐驰仪器制造有限公司。

1.3 方法

1.3.1 藕渣的制备 新鲜莲藕洗净去杂后切成 5 mm 的立方体,加入适量去离子水后用高速组织捣碎机打成浆,接着用双层滤布过滤除去淀粉,再用去离子水清洗残渣 3 次,然后收集残渣于 45 °C 烘箱内干燥 24 h,粉碎过 100 目筛后备用。

1.3.2 藕渣的 AHP 处理 称取适量藕渣,按料液比 1:15 加入 1% H₂O₂ 溶液,调节 pH 值至 11.0,然后将混合物在 60 °C 水浴中以恒定速率搅拌 2 h。待反应结束后,调节 pH 值到 7.0,加入反应液 3 倍体积的 95%乙醇,沉淀 12 h 后离心收集沉淀,然后将沉淀转移到 45 °C 烘箱中干燥至恒重,充分研磨粉碎,过筛备用。

1.3.3 藕渣 SDF 的制备 分别称取未处理和 AHP 处理的藕渣各 100 g,加入 1.5 L 去离子水,调节 pH 值至 8.2,磁力搅拌混匀 1 h。向混合液中添加 0.5 g α -淀粉酶,在 95 °C 水浴下水解 30 min,待混合液降温至 60 °C 后添加 0.5 g 碱性蛋白酶,水解 30 min,接着调节 pH 值至 4.5,然后添加 0.1 mL 淀粉葡萄糖苷酶,水解 30 min。反应结束后立即用沸水浴灭酶 15 min,待混合液冷却至室温,过滤水解产物,将滤液用 3 倍体积的 95%乙醇沉淀,收集沉淀用烘箱干燥至恒重并粉碎过筛,得未处理 SDF(Original soluble dietary fiber, O-SDF)和 AHP 处理 SDF(AHP modified soluble dietary fiber, A-SDF),并计算提取率。

1.3.4 单糖组成测定 参照鲁振杰等^[15]的方法进行藕渣 SDF 单糖组成的测定,取适量样品酸水解后上样分析,高效液相系统配备示差折光检测器,选用 Hi-Plex H(7.7 mm × 300 mm)色谱柱,柱温为 30 °C,流动相为超纯水,流速为 0.25 mL/min。

1.3.5 Zeta-电位测定 Zeta-电位的测定参照 Feng 等^[12]的方法,藕渣 SDF 水溶液的质量浓度为 2 mg/mL,测试温度为 25 °C。

1.3.6 分子质量分布测定 参照王海燕等^[16]的方法进行藕渣 SDF 分子质量分布的测定,称取适量样品用流动相溶解制成质量浓度为 1 mg/mL 的溶液,10 000×g 离心 10 min 后取 200 μ L 上清液进行分析。高效液相色谱系统将尺寸排阻色谱和多角度光散射仪联用,采用等度洗脱,流动相为含有 0.2 mol/L NaCl 溶液,流速为 0.5 mL/min,色谱柱包括 Shodex OHPak SB-805HQ 和 Shodex OHPak SB-804HQ,柱温控制为 25 °C。

1.3.7 SEM 分析 取适量藕渣 SDF,将其固定于双面胶带上,采用离子溅射的方法镀金,然后置于 SEM 载物台上,在适当的放大倍数下进行观察并拍摄,设置加速电压为 5 kV。

1.3.8 FTIR 光谱分析 准确称取 2 mg 藕渣 SDF 于玛瑙研钵中,加入 200 mg KBr,充分研磨后压成薄片。随后,将样品装载于样品架上,置于 FTIR 光谱仪中进行扫描,采用 KBr 作为空白对照,扫描范围为 400~4 000 cm⁻¹,分辨率为 4 cm⁻¹。

1.3.9 X-射线衍射分析 取适量藕渣 SDF,将其平铺于玻片圆槽中并压平,然后从 5°扫描到 60°,扫描速率为 5°/min。测试时采用 Cu-K α 靶(波长为 0.154 nm),极板电压和电流分别设置为 40 kV 和 40 mA。

1.3.10 热重分析 取适量藕渣 SDF 放入坩埚,在氮气环境下将样品从 30 °C 加热至 600 °C,升温速率为 10 °C/min,记录样品的热重(Thermogravimetry, TG)和微商热重(Differential thermogravimetry analysis, DTG)曲线。

1.3.11 流变学性质分析 配置质量浓度为 60 mg/mL 的藕渣 SDF 溶液,选用流变仪模具为直径 40 mm 的平板,测定间隙为 1 000 μ m,平衡时间为 2 min。

1.3.11.1 稳态流变学性质分析 向藕渣 SDF 溶液中加入 CaCl₂,分别调整 Ca²⁺浓度至 0, 2.5, 5, 10 mmol/L,在剪切速率范围为 0.1~100 s⁻¹ 内进行剪切黏度的测定,测定时控制温度为 25 °C。

1.3.11.2 动态流变学性质分析 调整藕渣 SDF 溶液中 Ca²⁺浓度至 10 mmol/L 以形成凝胶,凝胶样

品以 1 rad/s 的恒定频率进行应变扫描试验, 应变范围为 0.1% 至 100%, 然后在 25 °C 下以 1% 的恒定应变进行频率扫描试验, 角频率范围为 0.1 rad/s 至 100 rad/s, 接着将凝胶样品在 25~80 °C 的受控加热下进行研究, 角频率为 1 rad/s, 最后在 1 rad/s、25 °C 下进行 2 000 s 的凝胶固化试验。

1.4 数据统计与分析

每组试验均重复测定 3 次, 采用 SPSS 22.0 软件对数据进行 *t* 检验分析, $P < 0.05$ 为差异显著, 利用 Origin 2022 b 软件进行数据绘图。

2 结果与分析

2.1 提取率和单糖组成分析结果

由表 1 可知, 经 AHP 处理后藕渣的 SDF 提取率显著提高 ($P < 0.05$), 从 3.20% 增加到 26.28%, 提

高了 7.21 倍。AHP 处理过程中可以产生多种自由基, 这些自由基可氧化、破坏细胞壁中多糖的交联结构, 去除木质素, 改变半纤维素的结构以增加其水溶性^[14,17]。Liu 等^[18]在采用 AHP 处理红薯渣后也发现了显著提高的 SDF 提取率。

除 *L*-阿拉伯糖外, AHP 处理前、后藕渣的 SDF 具有相同的单糖种类(表 1)。O-SDF 中主要含有 7 种单糖组分, 其中 *D*-葡萄糖、半乳糖醛酸和 *D*-半乳糖的含量较为丰富, 占总单糖的 95.40%, 这与先前藕渣 SDF 的单糖组成研究结果是一致的^[19]。经 AHP 处理后, *L*-鼠李糖和 *D*-半乳糖含量分别增加了 51.85% 和 39.27% ($P < 0.05$), *D*-甘露糖、氨基葡萄糖、葡萄糖醛酸和半乳糖醛酸含量显著降低 ($P < 0.05$), 而 *D*-葡萄糖含量未发生显著变化 ($P > 0.05$)。

表 1 AHP 处理前、后藕渣 SDF 的提取率及单糖组成

Table 1 Extraction yield and monosaccharide compositions of SDF from lotus root residue before and after AHP treatment

样品	提取率/%	质量分数/%							
		<i>D</i> -甘露糖	氨基葡萄糖	<i>L</i> -鼠李糖	葡萄糖醛酸	半乳糖醛酸	<i>D</i> -葡萄糖	<i>D</i> -半乳糖	<i>L</i> -阿拉伯糖
O-SDF	3.20 ± 0.29	2.63 ± 0.04	0.49 ± 0.03	0.27 ± 0.04	1.21 ± 0.14	8.82 ± 0.26	81.36 ± 0.51	5.22 ± 0.28	-
	26.28 ± 1.47*	1.20 ± 0.09*	0.16 ± 0.02*	0.41 ± 0.02*	0.77 ± 0.19*	8.16 ± 0.11*	81.49 ± 0.82	7.27 ± 0.41*	0.53 ± 0.02*

注:“-”表示未检测到; * 表示有显著差异 ($P < 0.05$), 下同。

2.2 分子质量和 Zeta-电位分析结果

由表 2 可知, 经 AHP 处理后藕渣 SDF 的 M_n 、 M_w 、 R_n 和 R_w 均降低, 而 M_w/M_n 升高, 这可能是由于 AHP 的氧化作用可以破坏 SDF 的结构, 且更易导致低分子质量的 SDF 发生分解, 从而使分子质量降低, 分布变宽, 分子链长短不均匀程度提高^[15]。这些发现与 Liu 等^[18]采用 AHP 处理红薯渣得到的结果一致。

通过 Zeta-电位的测定对藕渣 SDF 的表面电荷进行了表征, 结果如表 2 所示。O-SDF 和 A-SDF 的 Zeta-电位分别为 -24.80 mV 和 -26.95 mV, 经 AHP 处理后, Zeta-电位显著降低 ($P < 0.05$)。藕渣 SDF 负电荷越低说明其解离程度越大, 可与其它离子产生更强的静电引力, 同时存在 Ca^{2+} 存在下可能会形成强度更高的凝胶^[20]。与本研究结果

一致, Li 等^[13]在采用 AHP 处理番茄皮时也发现所得 SDF 具有更低的 Zeta-电位。

表 2 AHP 处理前、后藕渣 SDF 的分子质量分布及 Zeta-电位

Table 2 Molecular weight and Zeta-potential of SDF from lotus root residue before and after AHP treatment

参数	O-SDF	A-SDF
数均分子质量 (M_n)/g·mol ⁻¹	8.571×10 ⁴	1.267×10 ⁴
重均分子质量 (M_w)/g·mol ⁻¹	5.921×10 ⁵	9.131×10 ⁴
M_w/M_n	6.908	7.206
数均旋转半径 (R_n)/nm	87.2	44.8
重均旋转半径 (R_w)/nm	85.1	40.8
Zeta-电位/mV	-24.80 ± 0.19	-26.95 ± 0.23*

2.3 SEM 分析结果

SEM 是表征材料微观结构的有力工具,可以用于揭示材料加工过程中形态特征的变化。如图 1 所示,O-SDF 由大小不一、形状各异的块状颗粒组成,颗粒结构紧凑,表面较为平滑。经 AHP 处理后 SDF 的颗粒尺寸降低,颗粒结构变得蓬松,表面变得更加粗糙,呈现蜂窝状。这可能是由于 AHP 处理藕渣,一方面去除了大量的结合态蛋白或多酚,另一方面破坏了 DF 的内部和表面结构^[21]。A-SDF 的粗糙表面可提供更多的表面积与 Ca^{2+} 相互作用,意味着其可能具有更强的凝胶能力,从而表现出更好的物理化学性质^[22]。

2.4 FTIR 光谱分析结果

如图 2 所示,AHP 处理前、后藕渣 SDF 的 FTIR 光谱相似,均表现出多个多糖的特征吸收峰,只是少部分特征谱带的强度发生变化。 $3\ 356\ \text{cm}^{-1}$ 和 $3\ 379\ \text{cm}^{-1}$ 处的较宽吸收峰主要为多糖的 O-H 伸缩振动引起^[23]; $2\ 926\ \text{cm}^{-1}$ 和 $2\ 927\ \text{cm}^{-1}$ 处的弱吸收峰主要为多糖甲基和亚甲基的 C-H 伸缩振动引起; $1\ 650\ \text{cm}^{-1}$ 和 $1\ 632\ \text{cm}^{-1}$ 处的吸收峰主要为 -COOH 的伸缩振动引起; $1\ 426\ \text{cm}^{-1}$ 和 $1\ 418\ \text{cm}^{-1}$ 处的吸收峰主要为甲基和亚甲基的 C-H 弯曲振动引起;而在 $1\ 026\ \text{cm}^{-1}$ 和 $1\ 029\ \text{cm}^{-1}$ 处的吸收峰可能与 C-O-C 的伸缩振动有关^[13]。O-SDF 在 $1\ 733\ \text{cm}^{-1}$ 处存在一弱吸收峰,这可归因于酯化的 C=O 的伸缩振动,而在 AHP 处理后此吸收峰消失,这可能是由于 AHP 的氧化效应所致。Feng 等^[12]在黑豆皮的 AHP 处理过程中也发现了类似的现象。

2.5 X-射线衍射分析结果

AHP 处理后藕渣 SDF 的晶体结构变化如图 3 所示。在 X-射线衍射图谱中,O-SDF 在 2θ 为 20° 处出现明显的结晶衍射峰,同时在 9° 处存在一个低强度衍射峰,呈现纤维素 II 型晶体结构,表明其由有序的纤维素结晶区和无序的纤维素、半纤维素非结晶区共同构成^[24]。与 O-SDF 相比,A-SDF 主要衍射峰的位置未发生变化,而衍射峰强度均略微降低,此外还在 2θ 为 14° 和 32° 处出现新的衍射峰,表明存在少量的纤维素 I 型晶体结构。这可能是由于 AHP 处理破坏了纤维素分子中的结晶区域,增加了非晶成分含量,导致非晶区域比例升高,同时也促进了部分纤维素晶体结构的溶解。AHP 处理

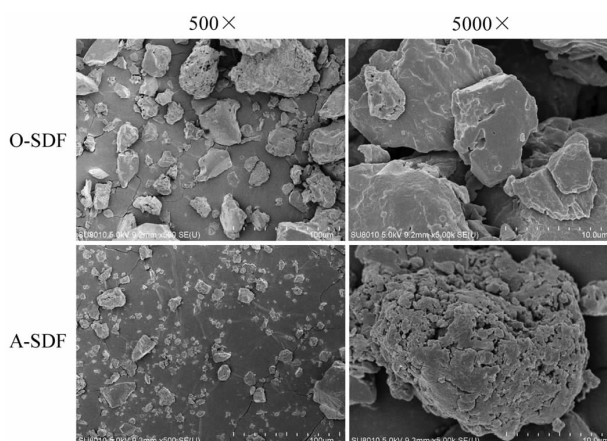


图 1 AHP 处理前、后藕渣 SDF 的 SEM 图

Fig.1 SEM images of SDF from lotus root residue before and after AHP treatment

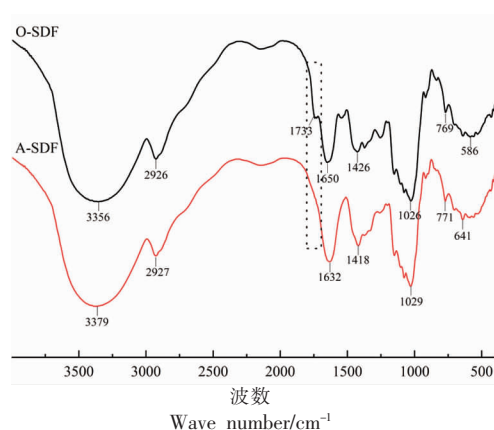


图 2 AHP 处理前、后藕渣 SDF 的 FTIR 光谱图
Fig.2 FTIR spectra of SDF from lotus root residue before and after AHP treatment

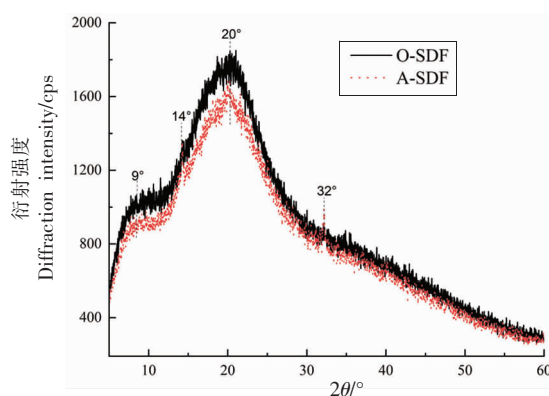


图 3 AHP 处理前、后藕渣 SDF 的 X-射线衍射图
Fig.3 X-ray diffraction diagrams of SDF from lotus root residue before and after AHP treatment

后藕渣 SDF 有序结构的降低,可使得 SDF 的结构更加松散,这将有助于增加其溶解度和改善其理化性质^[18]。山药皮在 AHP 处理后其 SDF 的结晶度也降低^[21],与本研究结果一致。

2.6 热重分析结果

AHP 处理对藕渣 SDF 的热稳定性的影响如图 4 所示。所有样品都表现出相似的热降解行为,热分解曲线可分为 3 个阶段:第 1 阶段发生在 50~150 °C,分别造成 O-SDF 和 A-SDF 5.75% 和 6.55% 的质量损失,这可能是由于藕渣 SDF 中存在的水分蒸发和不稳定元素降解造成的;第 2 阶段出现在 140~400 °C,热分解速率最大,分别导致 O-SDF 和 A-SDF 质量损失 56.53% 和 53.87%,主要是由于纤维素和半纤维素分解导致的;第 3 阶段出现在 400~600 °C,O-SDF 和 A-SDF 的失重率分别为 8.28% 和 7.45%,可能是纤维素和半纤维素的深度热裂解所致^[25]。O-SDF 和 A-SDF 的最大热解失重速率分别发生在 203 °C 和 193 °C,而其质量残留率分别为 29.44% 和 32.13%。与 O-SDF 相比,A-SDF 的分解温度降低,而其质量残留率反而升高,表明 AHP 处理后 SDF 的高温热稳定性提高。产生上述现象可能是由于一方面 AHP 处理破坏了藕渣 SDF 的晶体结构使得 SDF 的稳定性降低,因而最大分解温度降低,另一方面 AHP 处理降解了藕渣,可能使得藕渣中部分难热解的物质转为可溶性物质被提取出来,因而最终质量残留率升高。

2.7 稳态流变学分析结果

藕渣 SDF 在不同 Ca^{2+} 浓度下剪切黏度随剪切速率的变化如图 5 所示。在所有测试样品中,剪切黏度均随着剪切速率的提高而逐渐降低,表现出剪切稀化行为,为非牛顿流体,这是大多数多糖溶液的共同特征,主要是因为施加剪切时聚合物原本通过分子链相互缠结形成的三维网络结构沿流动方向排列,进而减少了相邻链之间的相互作用^[26]。从曲线的斜率可以看出,随着 Ca^{2+} 浓度的提高,藕渣 SDF 溶液剪切黏度更容易受到剪切速率增加的影响,表明体系的假塑性行为增强。未添加 Ca^{2+} 时,O-SDF 的剪切黏度要高于 A-SDF,这可能是由于 AHP 处理对 SDF 的降解作用所致,多糖的分子质量与其剪切黏度密切相关,通常情况下剪

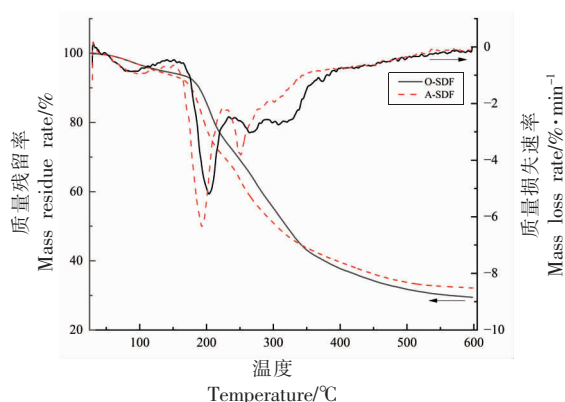


图 4 AHP 处理前、后藕渣 SDF 的热重曲线图

Fig.4 Thermogravimetric curves of SDF from lotus root residue before and after AHP treatment

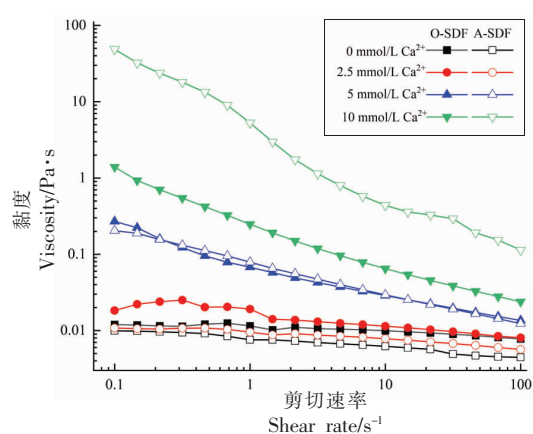


图 5 不同 Ca^{2+} 浓度下藕渣 SDF 的稳态剪切流动曲线

Fig.5 Steady shear flow curves of SDF from lotus root residue added with different concentrations of Ca^{2+}

切黏度会随着分子质量的降低而降低^[20]。此与 2.2 节中 AHP 处理前、后藕渣 SDF 的分子质量变化结果是一致的。在剪切速率为 1 s^{-1} 时,O-SDF 和 A-SDF 的剪切黏度分别为 $0.012 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 和 $0.008 \text{ Pa}\cdot\text{s}$,这些值要远远低于其它来源的 SDF^[12,18]。当添加 Ca^{2+} 后,藕渣 SDF 溶液的剪切黏度均随着 Ca^{2+} 浓度的增加而增加,其中当 Ca^{2+} 浓度低于 2.5 mmol/L 时,O-SDF 的剪切黏度要高于 A-SDF,当 Ca^{2+} 浓度达到 5 mmol/L 时,两个样品剪切黏度相差不大,而当 Ca^{2+} 浓度达到 10 mmol/L 时 A-SDF 的剪切黏度则要远高于 O-SDF。上述结果表明,经 AHP 处理后藕渣 SDF 的 Ca^{2+} 敏感性提高,将更适合于生产高黏稠的饮料和食品。

2.8 动态流变学分析结果

从稳态流变学研究结果可以看出,藕渣 SDF 随着 Ca^{2+} 浓度的提高其形成高黏度凝胶的能力逐渐增强,因此在以下试验中选择了 10 mmol/L Ca^{2+} 浓度来研究储能模量 G' 和损耗模量 G'' 与应变、频率、温度和时间扫描的关系。

通过应变扫描确定了藕渣 SDF 凝胶的线性黏弹区域(图 6a)。经 AHP 处理后,藕渣 SDF 的线性黏弹区域变窄,O-SDF 的 G' 直到应变达到 14% 仍保持稳定,而 A-SDF 的 G' 仅增加到 2% 时就开始显著下降。 G' 急剧下降时的应变被定义为临界应变,可反映凝胶的变形能力,高于临界应变时,凝胶的结构开始坍塌^[27]。因此,在整个振荡动态试验中选择 1% 的应变可确保藕渣 SDF 凝胶网络在测量期间不会被施加的应变损坏。

对藕渣 SDF 凝胶进行了动态频率扫描,结果

如图 6b 所示,通过对流体频率依赖性的分析,可以判断其是以黏性为主还是弹性为主^[28]。在整个频率扫描过程中,A-SDF 凝胶的 G' 始终大于 G'' ,这表明凝胶偏向弹性流体的性质。O-SDF 凝胶虽然也观察到类似的行为,但模量降低了 2 个数量级,而且在高频率区存在向黏性流体行为转变的趋势。

藕渣 SDF 凝胶 G' 和 G'' 随温度的变化如图 6c 所示。从 25 °C 上升至 85 °C 的过程中,藕渣 SDF 凝胶的 G' 均高于 G'' ,表明凝胶体系在整个温度范围内呈现典型的强凝胶性质。在升温过程中,藕渣 SDF 凝胶的 G' 和 G'' 都随着温度的升高而略微增加,且 O-SDF 受温度的影响更为显著。上述现象可归因于 A-SDF 形成的凝胶内部网络结构较 O-SDF 凝胶更强,因而不受温度影响。

藕渣 SDF 凝胶 G' 和 G'' 随时间的变化如图 6d

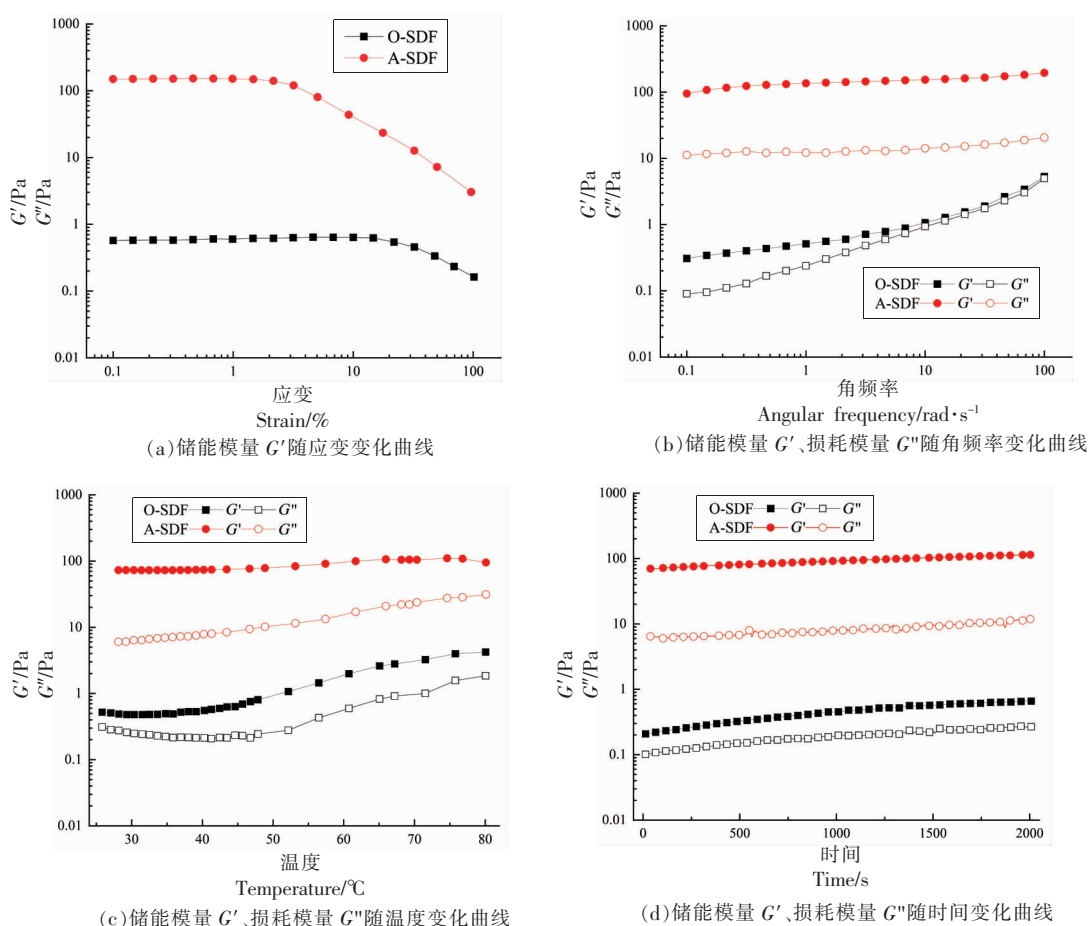


图 6 AHP 处理前、后藕渣 SDF 的动态流变学特性

Fig.6 Dynamic rheological properties of SDF from lotus root residue before and after AHP treatment

所示。所有藕渣 SDF 凝胶体系在 2 000 s 内均呈现稳定的 G' 和 G'' , 并表现出典型的强凝胶性质。A-SDF 凝胶 G' 达到近 100 Pa, 比 O-SDF 凝胶高出近 200 倍。

上述动态流变学分析结果表明,经 AHP 处理后藕渣的 SDF 在 Ca^{2+} 存在下表现出更强的弹性流体行为。与 O-SDF 相比,A-SDF 更易于 Ca^{2+} 之间形成离子桥,构建出更牢固的内部网络结构,因而可表现出更高的凝胶性能。本文的结果与先前研究中获得 AHP 处理对 SDF 流变特性影响的结论是高度一致的^[12,18,22]。

3 结论

经 AHP 处理后藕渣的 SDF 提取率增加,分子质量和 Zeta-电位降低,单糖组成发生变化,出现微量的 L-阿拉伯糖。AHP 处理导致藕渣 SDF 的部分特征性官能团发生降解,结晶度降低,结构变得蓬松和粗糙。然而,AHP 处理后藕渣 SDF 在 Ca^{2+} 存在下表现出更高的剪切黏度和更大的凝胶化能力,且高温稳定性提高。本研究结果为藕渣 SDF 的性质改善及其在食品工业中的应用提供了参考,将有助于藕渣资源的开发利用。

参 考 文 献

- [1] 韩丽娟, 黄楚雄, 李洁, 等. 不同品种莲藕水煮风味物质比较[J]. 食品科学, 2020, 41(22): 245-251. HAN L J, HUANG C X, LI J, et al. Comparison of flavor substances of water-boiled lotus roots from different varieties[J]. Food Science, 2020, 41(22): 245-251.
- [2] SONG Y R, HAN A R, LIM T G, et al. Isolation, purification, and characterization of novel polysaccharides from lotus (*Nelumbo nucifera*) leaves and their immunostimulatory effects[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 128: 546-555.
- [3] HU W C, JIANG Y Y, XUE Q, et al. Structural characterisation and immunomodulatory activity of a polysaccharide isolated from lotus (*Nelumbo nucifera* Gaertn.) root residues[J]. Journal of Functional Foods, 2019, 60: 103457.
- [4] 吴强, 陈韬, 朱姗, 等. 藕渣不溶性膳食纤维提取工艺及其理化性质分析[J]. 食品工业科技, 2018, 39(20): 158-164.
- [5] WU Q, CHEN T, ZHU S, et al. Extraction process of insoluble dietary fiber from lotus root residue and its physicochemical properties analysis [J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(20): 158-164.
- [5] EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition, and Allergies (NDA). Scientific opinion on dietary reference values for carbohydrates and dietary fibre [J]. EFSA Journal, 2010, 8(3): 1462.
- [6] PRAKASH N M, SURYA S M, GAURI P M, et al. Hypertension and the role of dietary fiber [J]. Current Problems in Cardiology, 2022, 47(7): 101203.
- [7] HE Y, WANG B X, WEN L K, et al. Effects of dietary fiber on human health [J]. Food Science and Human Wellness, 2022, 11(1): 1-10.
- [8] KANG J, YIN S J, LIU J, et al. Fermentation models of dietary fibre *in vitro* and *in vivo* - A review [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 131: 107685.
- [9] MOHAMED E, DOROTHEA B, OLIVIER R, et al. Dietary fibre and fibre-rich by-products of food processing: Characterisation, technological functionality and commercial applications: A review [J]. Food Chemistry, 2011, 124(2): 411-421.
- [10] XU T, WU X Y, LIU J, et al. The regulatory roles of dietary fibers on host health via gut microbiota-derived short chain fatty acids [J]. Current Opinion in Pharmacology, 2022, 62: 36-42.
- [11] YVONNE M, VICTORIA A J. Dietary fiber extraction for human nutrition - A review [J]. Food Reviews International, 2016, 32(1): 98-115.
- [12] FENG Z Q, DOU W, ALAXI S, et al. Modified soluble dietary fiber from black bean coats with its rheological and bile acid binding properties [J]. Food Hydrocolloids, 2017, 62: 94-101.
- [13] LI N, FENG Z Q, NIU Y G, et al. Structural, rheological and functional properties of modified soluble dietary fiber from tomato peels [J]. Food Hydrocolloids, 2018, 77: 557-565.
- [14] HUANG C, ZHAN Y N, CHENG J Y, et al. The bamboo delignification saturation point in alkaline hydrogen peroxide pretreatment and its association with enzymatic hydrolysis [J]. Bioresource Technology, 2022, 359: 127462.

- [15] 鲁振杰, 李娟, 陈正行, 等. 碱提条件对麸皮阿拉伯木聚糖组成、理化性质、流变学特性的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(12): 22-27.
- LU Z J, LI J, CHEN Z X, et al. Effects of alkali extraction conditions on monosaccharide composition, physicochemical properties and rheological properties of arabinoxylan from wheat bran[J]. Food Science, 2020, 41(12): 22-27.
- [16] 王海燕, 戴军, 陈尚卫. 灵芝菌丝体多糖的分离纯化及其单糖组成分析与分子量测定[J]. 食品与机械, 2015, 31(5): 201-205.
- WANG H Y, DAI J, CHEN S W. Separation, monosaccharide composition and molecular weight analysis of polysaccharide from *G. lucidum* mycelium [J]. Food & Machinery, 2015, 31(5): 201-205.
- [17] SANGNARK A, NOOMHORM A. Chemical, physical and baking properties of dietary fiber prepared from rice straw [J]. Food Research International, 2004, 37(1): 66-74.
- [18] LIU M, ZHOU S H, LI Y X, et al. Structure, physicochemical properties and effects on nutrients digestion of modified soluble dietary fiber extracted from sweet potato residue[J]. Food Research International, 2021, 150: 110761.
- [19] 刘蒙瑜. 发酵法制取藕渣膳食纤维技术研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2009.
- LIU M Y. Research on fermentation preparation technology of dietary fiber from lotous root pomace [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2009.
- [20] LIU J, WANG Z W, WANG Z Y, et al. Physicochemical and functional properties of soluble dietary fiber from different colored quinoa varieties (*Chenopodium quinoa* Willd) [J]. Journal of Cereal Science, 2020, 95: 103045.
- [21] WANG H O, LIU S H, ZHOU X J, et al. Treatment with hydrogen peroxide improves the physicochemical properties of dietary fibres from Chinese yam peel[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2020, 55(3): 1289-1297.
- [22] NIU Y G, LI N, XIA Q, et al. Comparisons of three modifications on structural, rheological and functional properties of soluble dietary fibers from tomato peels[J]. LWT, 2018, 88: 56-63.
- [23] CUI S W, PHILLIPS G O, BLACKWELL B, et al. Characterisation and properties of *Acacia senegal* (L.) Willd. var. *senegal* with enhanced properties (*Acacia* (*sen*) SUPERGUM™): Part 4. Spectroscopic characterisation of *Acacia senegal* var. *senegal* and *Acacia* (*sen*) SUPERGUM™ arabic[J]. Food Hydrocolloids, 2007, 21(3): 347-352.
- [24] 王红, 刘婷婷, 樊红秀, 等. 挤压改性对金针菇膳食纤维理化性质及微观结构的影响[J]. 中国食品学报, 2021, 21(8): 166-174.
- WANG H, LIU T T, FAN H X, et al. Effects of extrusion modification on physicochemical properties and microstructure of *Flammulina velutipes* dietary fiber[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(8): 166-174.
- [25] 彭俏, 赵四九, 范国枝, 等. 玉米芯半纤维素提取、乙酰化改性及结构表征[J]. 食品工业科技, 2022, 43(11): 45-51.
- PENG Q, ZHAO S J, FAN G Z, et al. Extraction, acetylation modification and structure characterization of hemicelluloses from corncob[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(11): 45-51.
- [26] ABBOUD K Y, LACOMINI M, SIMAS F F, et al. High methoxyl pectin from the soluble dietary fiber of passion fruit peel forms weak gel without the requirement of sugar addition[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 246: 116616.
- [27] GUO Q, CUI S W, WANG Q, et al. Microstructure and rheological properties of psyllium polysaccharide gel[J]. Food Hydrocolloids, 2009, 23(6): 1542-1547.
- [28] 李妍, 崔维建, 赵城彬, 等. 玉米淀粉-玉木耳多糖复配体系理化及结构性质[J]. 食品科学, 2021, 42(4): 58-64.
- LI Y, CUI W J, ZHAO C B, et al. Physicochemical and structural properties of corn starch-*Auricularia cornea* Ehrenb. polysaccharide blends[J]. Food Science, 2021, 42(4): 58-64.

Effect of Alkaline Hydrogen Peroxide Treatment on the Structure and Rheological Properties of Soluble Dietary Fiber from Lotus Root Residue

Xu Lei, Zhang Qian, Wang Peiyao, Wang Zicheng, Huang Linxi, He Ling

(School of Life Science and Food Engineering, Huaiyin Institute of Technology, Huaian 223003, Jiangsu)

Abstract The soluble dietary fiber (SDF) was extracted from lotus root residue after treatment with alkaline hydrogen peroxide (AHP), and the structure and rheological properties of SDF were compared before and after treatment. Results showed that after AHP treatment, the extraction rate of lotus root residue SDF was increased by 7.21 times ($P < 0.05$), and the contents of *L*-rhamnose and *D*-galactose were significantly increased by 51.85% and 39.27%, respectively ($P < 0.05$). Compared with untreated lotus root residue SDF, AHP treatment reduced the molecular weight of lotus root residue SDF, and the Zeta-potential was decreased from -24.80 mV to -26.95 mV ($P < 0.05$). Scanning electron microscope and Fourier transform infrared spectroscopy analysis showed that the structure of lotus root residue SDF became loose, the surface became rough, and some characteristic functional groups changed after AHP treatment. X-ray diffraction and thermogravimetric analysis showed that the crystallinity of lotus root residue SDF after AHP treatment was decreased, but its thermal stability in high temperatures were improved. Furthermore, the steady-state and dynamic rheological analysis showed that in the presence of Ca^{2+} , the SDF treated with AHP showed higher shear viscosity and stronger gelation ability. In conclusion, AHP treatment could effectively improve the structure and rheological properties of lotus root residue SDF, which could provide a reference for the development and utilization of lotus root residue.

Keywords alkaline hydrogen peroxide; lotus root residue; soluble dietary fiber; structure; rheological properties