

菠萝蜜多糖流变学特性研究

马之原, 朱科学, 吴桂萍, 张彦军, 谭乐和, 吴 刚, 徐 飞

Rheological Properties of Polysaccharide from *Artocarpus heterophyllus* Lam. Pulp

MA Zhiyuan, ZHU Kexue, WU Guiping, ZHANG Yanjun, TAN Lehe, WU Gang, and XU Fei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021030007>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

苦丁茶冬青多糖流变学特性研究

Rheological properties of polysaccharide isolated from *Ilex kudingcha* C.J.Tseng

食品工业科技. 2017(22): 61-65

西藏灵菇中两株产胞外多糖单胞酿酒酵母菌发酵性能及其发酵乳的流变学特性研究

Comparative analysis of fermentability and rheological properties of two strains of exopolysaccharide-producing *Kazachstania unispora* from Tibetan kefir

食品工业科技. 2018, 39(1): 87-91

西藏灵菇中产胞外多糖假肠膜明串珠菌发酵性能及流变学特性研究

Fermentability and rheologic properties of three strains of exopolysaccharide-producing *Leuconostoc pseudomesenteroides* from Tibetan kefir

食品工业科技. 2017(04): 106-110

河套面粉流变学特性与馒头品质的相关性研究

Correlative Study between Rheological Properties of Hetao Flour and Quality of Steamed Bread

食品工业科技. 2021, 42(3): 31-35

壳聚糖对小麦面团流变学特性的影响

Effect of Chitosan on the Rheological Properties of Wheat Flour Dough

食品工业科技. 2018, 39(20): 30-34,40

玉米-小麦混合粉面团流变学特性、面条品质及两者相关性

The Rheological Properties of Dough, the Quality of Noodles of Corn-wheat Blended Flour and Their Correlation

食品工业科技. 2019, 40(22): 73-76,81



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

马之原, 朱科学, 吴桂萍, 等. 菠萝蜜多糖流变学特性研究 [J]. 食品工业科技, 2021, 42(23): 81–86. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021030007

MA Zhiyuan, ZHU Kexue, WU Guiping, et al. Rheological Properties of Polysaccharide from *Artocarpus heterophyllus* Lam. Pulp[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(23): 81–86. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021030007

菠萝蜜多糖流变学特性研究

马之原^{1,2,3}, 朱科学^{2,3}, 吴桂萍^{2,3}, 张彦军^{2,3}, 谭乐和^{2,3,*}, 吴 刚^{2,3}, 徐 飞^{2,3}

(1. 华中农业大学食品科技学院, 湖北武汉 430070;

2. 中国热带农业科学院香料饮料研究所, 海南万宁 571533;

3. 海南省特色热带作物适宜性加工与品质控制重点实验室, 海南万宁 571533)

摘要: 本文研究了菠萝蜜多糖 (*Artocarpus heterophyllus* Lam. Pulp Polysaccharide, JFP-Ps) 的流变学特性, 分析浓度、剪切速率、温度、加热时间、pH、冻融变化和盐离子等因素对 JFP-Ps 溶液的表现粘度和粘弹性的影响。结果表明, JFP-Ps 溶液的表现粘度与浓度呈正相关; JFP-Ps 溶液的表现粘度与剪切速率呈负相关, 出现剪切稀释的现象, 为“非牛顿流体”, 呈现假塑性行为; JFP-Ps 溶液表现粘度与温度呈负相关; 随加热时间的延长, JFP-Ps 的表现粘度先上升后下降; JFP-Ps 溶液在 pH4~10 范围内表现粘度值变化不大; 冻融变化可使 JFP-Ps 溶液表现粘度增大; 5%NaCl 溶液使 JFP-Ps 溶液的表现粘度减小, 5% KCl 溶液使 JFP-Ps 溶液的表现粘度增大; 在粘弹性测试中, JFP-Ps 的储能 G' 和损耗 G'' 随着频率的增大而增大, 且 G' 始终高于 G'' , 另外, JFP-Ps 溶液的储能模量 G' 和损耗模量 G'' 随着溶液浓度的增大而上升, 呈现凝胶性质。研究结果可为菠萝蜜果肉多糖在食品工业中的应用提供一定的理论借鉴。

关键词: 菠萝蜜多糖, 表现粘度, 剪切速率, 粘弹性, 流变学特性

中图分类号: TS272

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2021)23-0081-06

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021030007



本文网刊:

Rheological Properties of Polysaccharide from *Artocarpus heterophyllus* Lam. Pulp

MA Zhiyuan^{1,2,3}, ZHU Kexue^{2,3}, WU Guiping^{2,3}, ZHANG Yanjun^{2,3}, TAN Lehe^{2,3,*}, WU Gang^{2,3}, XU Fei^{2,3}

(1. College of Food Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2. Spice and Beverage Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Wanning 571533, China;

3. Key Laboratory of Processing Suitability and Quality Control of the Special Tropical Crops of Hainan Province, Wanning 571533, China)

Abstract: The present study was designed to investigate the rheological properties of polysaccharide from *Artocarpus heterophyllus* Lam. pulp. The effects of concentration, shear rate, temperature, heating time, pH, freeze-thaw change and salt ions on the apparent viscosity and viscoelasticity of JFP-Ps solution were studied. The results indicated that JFP-Ps as a "non-Newtonian fluid" exhibited pseudoplastic behavior, the apparent viscosity of JFP-Ps solution was positively correlated with the concentration, there existed a negative correlation between the apparent viscosity of JFP-Ps solution and the shear rate, with an emergence of dilution at the sharing mouth. The apparent viscosity of JFP-Ps solution was negatively correlated with temperature; with the extension of heating time, the apparent viscosity of JFP-Ps increased first and then declined; the apparent viscosity of JFP-Ps solution changed a little in the range of pH4~10; freeze thawing changed may cause an increase in the apparent viscosity of JFP-Ps solution; 5% NaCl solution reduced the apparent viscosity of the JFP-Ps solution, while 5% KCl solution increased the apparent viscosity of the JFP-Ps solution; in the viscoelasticity test, the storage energy G' and loss energy G'' of JFP-Ps enlarged with increase of frequency, and G' was always larger than G'' . Moreover, the storage modulus G' and loss modulus G'' of JFP-Ps solution enhanced with the increase of the concentration

收稿日期: 2021-03-02

基金项目: 国家自然科学基金 (31901649); 中国热带农业科学院基本科研业务费专项资金 (1630142020007)。

作者简介: 马之原 (1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与功能评价, E-mail: mzy_123@webmail.hzau.edu。

* 通信作者: 谭乐和 (1969-), 男, 本科, 研究员, 研究方向: 热带作物的科研与工程化开发, E-mail: tlh3687@163.com。

of the solution, showing the properties of gel. The research results can provide certain theoretical reference for the application of jackfruit pulp polysaccharides in food industry.

Key words: JFP-Ps; apparent viscosity; shear rate; viscoelasticity; rheological properties

多糖是一类来源广泛的天然高分子聚合物,由单糖通过糖苷键相互结合而成^[1],具有抗氧化、抗病毒、抗疲劳、抑制肿瘤、降血脂、降血糖、保肝、免疫调节等生理活性^[2-7]。多糖溶液本身具有一定的粘弹性,此外,多糖的凝胶化对于食品质构和感官特性至关重要,因此可用作食品中的增稠剂、稳定剂、胶凝剂和粘合剂^[8]等。

多糖流变学特性对于多糖类的提取工艺、食品设计、感官评价、产品研发、货架期评估等都具有重要意义^[9]。在食品加工过程中,浓度、剪切速率、温度、pH、金属离子等因素都影响着多糖的流体特性。IAGHER 等^[10]发现芒果果肉中多糖溶液浓度为 3 g/L 时具有假塑性行为并且表现为粘弹性液体;MA 等^[9]报道了薯蓣粗多糖溶液和浓度为 40%、60% 的薯蓣多糖溶液的流变性都表现为假塑性和“凝胶状”行为。

菠萝蜜(*Artocarpus heterophyllus* Lam.)是一种木本粮食作物,分布于我国华南地区,种植历史悠久^[11],虽易于种植、产量较大但商品化程度不高,经济效益低;大多以鲜果或粗加工产品形式销售,缺乏精深加工限制了菠萝蜜产业价值的提升^[12-13]。菠萝蜜多糖(JFP-Ps)具有较强的体外抗氧化活性及免疫调节等活性^[2-3];对于人体肠道微生物菌群调节有明显益处^[14],是一种具有开发潜力的生物活性物质。目前,对菠萝蜜多糖的流变性仍有待深入研究。本文通过分析浓度、剪切速率、温度、pH、冻融和盐浓度等因素对 JFP-Ps 表观粘度和粘弹性的影响,考察 JFP-Ps 溶液的流变学特性,为 JFP-Ps 在食品工业的研发和生产提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

JFP-Ps(总糖含量为 79.12%,主要由鼠李糖、阿拉伯糖、半乳糖、葡萄糖、木糖和半乳糖醛酸组成,平均分子量为 1668 kDa^[2])由中国热带农业科学院香料饮料研究所提取纯化制得;HCl、NaOH 分析纯,国药集团化学试剂有限公司;NaCl、KCl 分析纯,西陇化工股份有限公司。

DV2T 粘度计 美国博勒飞公司;MCR302 流变仪 奥地利安东帕公司;FE20pH 计、AL104 型电子天平 上海梅特勒-托利多仪器有限公司;K-98-IIA 电热恒温水浴锅 天津市泰斯特仪器有限公司;Master-s-plus UVF 全自动超纯水设备 上海和泰公司。

1.2 实验方法

1.2.1 浓度和剪切速率对 JFP-Ps 溶液表观粘度的影

响 分别称取一定质量的 JFP-Ps 样品,蒸馏水配制 0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5%、0.6%、0.7%、0.8%、0.9%、1.0%(w/v,下同)的 JFP-Ps 溶液,室温(25℃)下测定 60 r/min 下的表观粘度。室温(25℃)条件下分别测定 0.2%、0.4%、0.6%、0.8% 和 1.0% 的 JFP-Ps 溶液在 5、15、30 和 60 r/min 剪切速率条件下的表观粘度。

1.2.2 温度对 JFP-Ps 溶液表观粘度的影响 蒸馏水配制 0.8% JFP-Ps 溶液在 30、40、50、60、70、80 和 90℃ 下恒温保持 10 min,分别于 60 r/min 下测定其表观粘度。

1.2.3 冻融变化对 JFP-Ps 溶液表观粘度的影响 蒸馏水配制 0.8% JFP-Ps 溶液,4℃ 和 -20℃ 下保持 24 h,解冻至室温(25℃),分别于 60 r/min 下测定其表观粘度,与未处理溶液的表观粘度值进行比较。

1.2.4 加热时间对 JFP-Ps 溶液表观粘度的影响 蒸馏水配制 0.8% JFP-Ps 溶液,60℃ 下分别加热 0.5、1、1.5、2、2.5、5 h,冷却至室温(25℃)后,分别于 60 r/min 下测定其表观粘度。

1.2.5 pH 对 JFP-Ps 溶液表观粘度的影响 蒸馏水配制 0.8% JFP-Ps 溶液,用 1 mol/L HCl 溶液和 1 mol/L NaOH 溶液调节 JFP-Ps 溶液 pH 至 2、3、4、5、6、7、8、9、10,分别于 60 r/min 下测定其表观粘度^[15]。

1.2.6 JFP-Ps 溶液耐盐性研究 蒸馏水配制 0.8% JFP-Ps 溶液,室温(25℃)下加入 NaCl、KCl 使溶液中 NaCl、KCl 的终浓度均为 5%,搅拌均匀,加入无机盐后,胶溶液体系不稳定,静置 1 d 后测量在 60 r/min 下的表观粘度,连续测定 5 d,研究 JFP-Ps 溶液的耐盐性^[16-17]。

1.2.7 JFP-Ps 粘弹性的测定 采用 MCR302 流变仪对样品的流变特性进行研究。采用动态应变扫描法测定应变范围为 0.01%~100% 的线性粘弹性体系。在控制应变模式下,用振荡法对储能模量 G' 和损耗模量 G'' 进行动态频率扫描测量。将试样加载到流变仪上,使其平衡至测量温度((25±1)℃,0.5 min)。频率扫描条件:频率 0.1~10 Hz(应变 0.01%),记录 G 随频率变化的曲线图。

1.2.8 抗降解性能 蒸馏水配制 0.8% JFP-Ps 溶液,室温(25℃)下放置 3、6、12、24、48、72、96 h,测定 JFP-Ps 溶液表观粘度。

1.3 数据处理

所有实验重复三次,使用 Excel 2020、SPSS 24.0 软件处理数据,实验结果均用平均值±标准差表示,用 Origin 2020 软件作图。

2 结果与分析

2.1 浓度和剪切速率对 JFP-Ps 溶液表观粘度的影响

浓度对 JFP-Ps 溶液表观粘度的影响如图 1 所示, JFP-Ps 溶液的表观粘度与浓度呈正相关, 该变化可能是随着溶液浓度的增加, 溶液中单位体积内分子数增加, 链内、链间相互无顺序的缠绕和链间的相互作用增强, 使溶液的流动阻力进一步增加^[17-18], 多糖浓度为 1.0% 时, 表观粘度基本上达到最大值 3.79 mPa·s。ANVARI^[19]、WU^[20]、CHEN^[21] 分别研究了 *Alyssum homolocarpum* 种子果胶、船果仁酸性多糖和秋葵多糖的表观粘度, 溶液的表观粘度随着浓度的增加而增加, 与本结果一致。

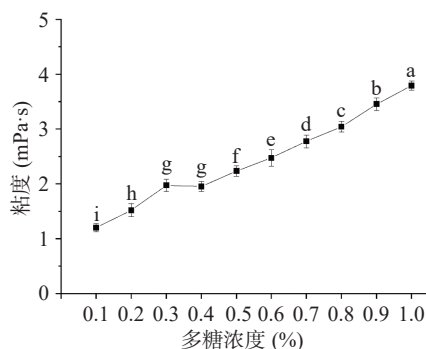


图 1 浓度对 JFP-Ps 表观粘度的影响

Fig.1 Effect of concentration on viscosity of JFP-Ps

注: 不同小写字母表示差异显著, $P < 0.05$; 图 2~图 6、图 9 同。

浓度和剪切速率对 JFP-Ps 表观粘度的影响如图 2 所示。JFP-Ps 溶液浓度在 0.2%~1.0% 时, JFP-Ps 溶液的表观粘度随剪切速率的增加而降低, 呈现剪切稀释现象, 说明 JFP-Ps 为“非牛顿流体”, 呈现假塑性行为。在相同浓度下, 剪切速率越高, JFP-Ps 溶液表观粘度越低, 即 JFP-Ps 溶液表观粘度随剪切速率的增大而减小。相同剪切速率下, 浓度越高, JFP-Ps 溶液表观粘度越大。当剪切速率增大时, 高浓度 JFP-Ps 溶液 (0.6%~1.0%) 的表观粘度降低的速率逐渐减慢。可能是由于低剪切速率时, 单糖分子链通过静电阻力、氢键等作用形成无规则体系, 其分子链相互缠绕, 产生很大的粘性阻力。在高剪切速率下, 布朗运动随机取向被破坏, 倾向于使颗粒沿定向流动^[22]。

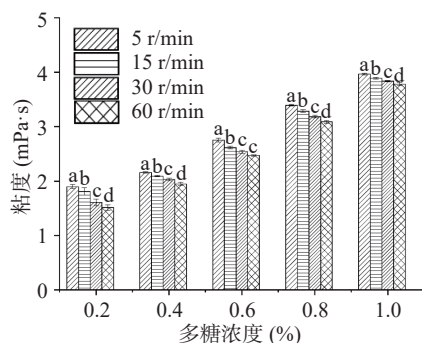


图 2 剪切速率和浓度对 JFP-Ps 表观粘度的影响

Fig.2 Effects of shear rate and concentration on viscosity of JFP-Ps

剪切速率增大时, 分子间作用力被破坏, 分子链的运动阻力降低, 由该取向阻力产生的表观粘度随着剪切速率的增加而降低。当剪切速率超出一定范围后, 体系的分子链形成比较稳定有序的结构, 剪切速率的变化对表观粘度造成的影响不明显^[23]。本实验结果与朱会霞^[24]、郭守军^[18]、XU^[25]、STOKES^[26]、GALLÃO^[27] 等研究的樟芝多糖、龙须菜多糖、花菇多糖和铁架木种子多糖等报道结果一致。

2.2 温度对 JFP-Ps 溶液表观粘度的影响

如图 3 所示, 随着温度的上升, JFP-Ps 溶液的表观粘度由 2.97 mPa·s 逐渐下降至 1.66 mPa·s。当体系温度升高时, 分子热运动加剧, 导致分子链间和链内氢键的断裂^[19, 27], 削弱了多糖大分子间的缠结^[28], 使溶液出现了热胀现象, 即 JFP-Ps 溶液产生了“稀释效应”, 此效应降低了 JFP-Ps 溶液的表观粘度。研究结果与菅红磊^[29]、蒋建新^[28]、郭守军^[30] 等研究的皂荚多糖、塔拉多糖胶、带形蜈蚣藻多糖结果一致。

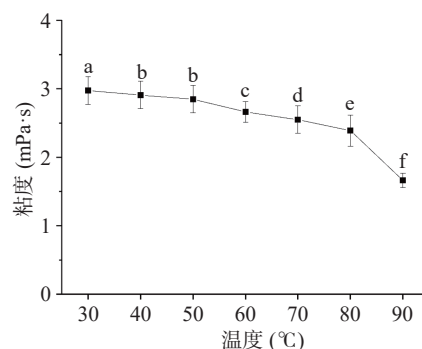


图 3 温度对 JFP-Ps 表观粘度的影响

Fig.3 Effect of temperature on viscosity of JFP-Ps

2.3 冻融变化对 JFP-Ps 溶液表观粘度的影响

冻融变化对 JFP-Ps 溶液表观粘度的影响如图 4 所示, 与空白组相比, -20°C 冷冻处理后的 JFP-Ps 溶液表观粘度升高了 0.78 mPa·s, 4°C 冷藏处理后的 JFP-Ps 溶液表观粘度升高了 0.23 mPa·s, 这表明冷冻和冷藏的处理过程中多糖溶液中分子的物理性交联增加, 从而升高了 JFP-Ps 溶液的表观粘度。此外, 冷冻处理使多糖分子间交联程度增加的幅度较大^[17, 28], 因而溶液表观粘度有较大幅度的增加。但总体来看, 冻融变化对 JFP-Ps 溶液的表观粘度影响较

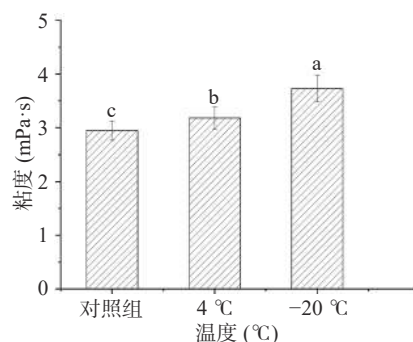


图 4 冻融变化对 JFP-Ps 表观粘度的影响

Fig.4 Effect of freezing/thawing on viscosity of JFP-Ps

小。研究结果与郭守军^[17, 28]研究的龙须菜多糖和带形蜈蚣藻多糖结果一致。

2.4 加热时间对 JFP-Ps 溶液表观粘度的影响

加热时间对 JFP-Ps 溶液表观粘度有一定的影响, 当加热时间在 1.5 h 内, JFP-Ps 溶液的表观粘度随着时间的延长而增加, 当加热至 1.5 h 时, JFP-Ps 溶液的表观粘度增至最大达到 2.98 mPa·s, 当加热时间超过 1.5 h, JFP-Ps 溶液的表观粘度逐渐减小(图 5)。加热增加了 JFP-Ps 的溶解性和分散性, 即相应的增加溶液的表观粘度, 但是随着时间的延长, 分子热运动加剧, 分子间相互作用力减弱, 因此溶液的流动阻力下降^[18]; 此外, 溶液中的多糖分子可能发生降解, 多糖分子链变短, 经过长时间的高温加热, 溶液出现了热胀现象^[29], 导致 JFP-Ps 溶液的表观粘度降低。

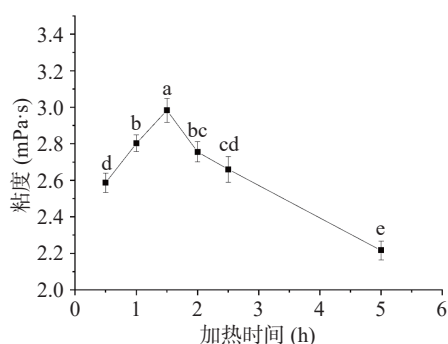


图 5 加热时间对 JFP-Ps 表观粘度的影响

Fig.5 Effect of heating time on viscosity of JFP-Ps

2.5 pH 对 JFP-Ps 溶液表观粘度的影响

pH 对 JFP-Ps 溶液表观粘度的影响如图 6 所示, JFP-Ps 溶液在 pH4~10 区间内表观粘度值为 3.05~3.07 mPa·s, 未产生较大变化。当溶液 pH 小于 4 时, 溶液表观粘度随酸性增强而下降, 由 3.07 mPa·s 降至 2.92 mPa·s, 可能是由于 JFP-Ps 溶液中, 大分子糖呈无规则线团状, 彼此交叠, 相互缠结, 过量的酸根离子起到了静电屏蔽作用而使单个高分子无规线团紧缩^[29], 从而减弱了缠结程度, 导致 JFP-Ps 表观粘度降低。但总体结果表明 JFP-Ps 溶液具有良好的耐酸碱稳定性, 故 JFP-Ps 可用于酸性和碱性食品中。

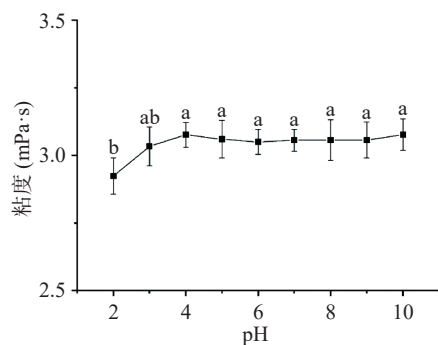


图 6 pH 对 JFP-Ps 表观粘度的影响

Fig.6 Effect of pH on viscosity of JFP-Ps

2.6 JFP-Ps 溶液耐盐性研究

JFP-Ps 溶液的耐盐性如图 7 所示, 5% NaCl 溶

液和 5% KCl 溶液对 JFP-Ps 溶液表观粘度的影响存在差异。Na⁺ 的加入使 JFP-Ps 溶液的表观粘度随着时间的延长而减小, 放置 3 d 后的表观粘度变化量 (0.23 mPa·s) 大于放置 1~2 d 的表观粘度变化量 (0.09 mPa·s), 原因可能是 Na⁺ 与 JFP-Ps 分子上的羟基反应生成钠盐^[28], 阻碍了分子间缔合氢键的形成, 造成表观粘度的下降。K⁺ 的加入使 JFP-Ps 溶液的表观粘度随着时间的延长而增大, 加入 KCl 的 JFP-Ps 溶液放置 4 d 时, JFP-Ps 溶液表观粘度升高了 0.22 mPa·s, 说明 K⁺ 与 JFP-Ps 分子间可能发生了交联反应^[31], 可能是 K⁺ 减少了 JFP-Ps 分子的电荷, 促使可溶性分子配合物的产生^[32], 掩盖了半乳糖醛酸残基之间的静电作用, 溶液的聚合更加灵活^[33], 从而使表观粘度增大。溶液在放置 4 d 后表观粘度变化不大, 说明 JFP-Ps 有良好的耐盐特性, 可应用于高盐食品中。

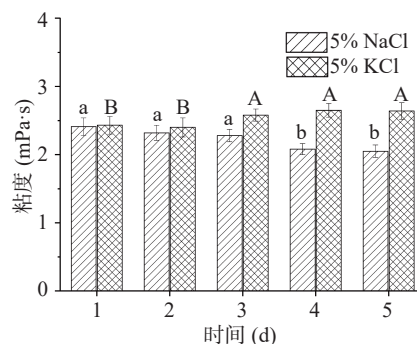


图 7 JFP-Ps 溶液耐盐性研究

Fig.7 Study on salt tolerance of JFP-Ps

注: 不同小写字母表示 NaCl 随时间变化差异显著, $P < 0.05$; 不同大写字母表示 KCl 随时间变化差异显著, $P < 0.05$ 。

2.7 JFP-Ps 粘弹性测量分析

储能模量 G' 指粘弹性材料在交变应力作用下一个周期内储存能量的能力, 通常指弹性; 耗能模量 G'' 指在一个变化周期内所消耗能量的能力, 通常指粘性。本实验用频率振荡测试 JFP-Ps 溶液的粘弹性, 不同浓度 JFP-Ps 振荡测试结果如图 8 所示。JFP-Ps 溶液的储能模量 G' 和损耗模量 G'' 随着溶液

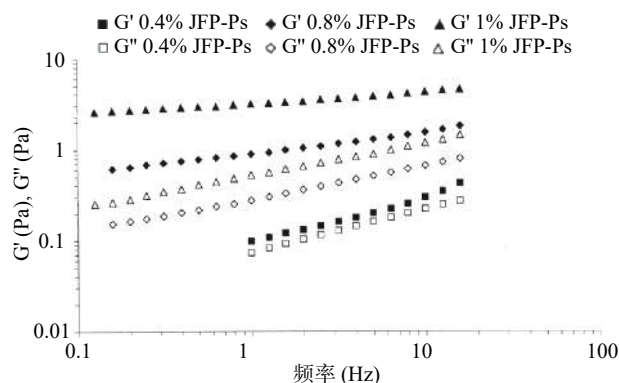


图 8 不同浓度 JFP-Ps 振荡测试结果

Fig.8 Test results of different concentrations of JFP-Ps oscillation

浓度的增大而上升,这是由于在低浓度下不能参与非共价交叉连接的分子间带,在较高的浓度下可以形成结合带^[19],使分子间网络增多。浓度为 0.4%、0.8% 和 1% 的 JFP-Ps 溶液的储能 G' 和损能 G'' 随着频率的增大而增大,且 G' 一直高于 G'' ,表明在 0.1~10 Hz 整个频率范围内, JFP-Ps 仍表现出弹性行为,呈现凝胶性质。此时高浓度下的 JFP-Ps 溶液可能会形成凝胶网络^[31],其凝胶的稳定与其浓度有一定的依赖性,呈现的凝胶性质可能与其具有的三维网状结构、官能团、交联程度及聚合度等相关^[34]。

2.8 JFP-Ps 溶液的抗降解性能

如图 9 所示, JFP-Ps 溶液在放置 0~12 h 时,多糖溶液表观粘度逐渐由 3.16 mPa·s 下降至 2.49 mPa·s,可能是多糖自身带有的 α -半乳糖苷酶和 β -甘露聚糖酶起到降解作用,以及其他微生物的侵蚀作用导致表观粘度降低^[35]。12~48 h 时,多糖溶液表观粘度下降速率变慢,变化量为 0.3 mPa·s,放置超过 48 h 后,溶液表观粘度基本不变,表明 JFP-Ps 具有良好的抗降解性能。郭守军^[30]和朱科学等^[32]研究结果表明带形蜈蚣藻多糖溶液和苦丁茶冬青多糖溶液均具有良好的抗降解性能,本实验研究结果与之相一致。

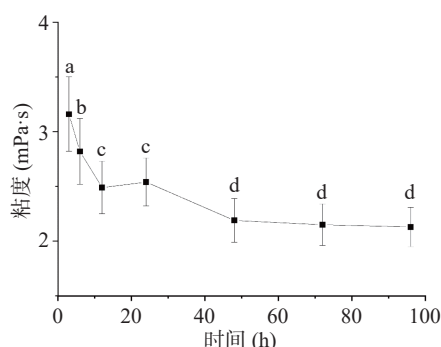


图 9 JFP-Ps 抗降解性曲线

Fig.9 JFP-Ps degradation resistance curve

3 结论

JFP-Ps 为“非牛顿流体”,呈现假塑性行为,具有良好的抗降解性能; JFP-Ps 溶液的表观粘度与浓度呈正相关,随剪切速率的增加呈现剪切稀释现象;随着温度的升高, JFP-Ps 溶液表观粘度降低;冷冻(-20 ℃)和冷藏(4 ℃)均能使 JFP-Ps 溶液表观粘度增加; JFP-Ps 溶液表观粘度随加热时间的增加而增大,当加热时间超过 1.5 h 时, JFP-Ps 溶液的表观粘度逐渐减小; JFP-Ps 溶液在 pH4~10 范围内表观粘度值变化不大; Na^+ 的加入使 JFP-Ps 溶液的表观粘度减小, K^+ 的加入使 JFP-Ps 溶液的表观粘度增大;在粘弹性测试中, JFP-Ps 的储能 G' 和损能 G'' 随着频率的增大而增大,且 G' 始终高于 G'' ,另外, JFP-Ps 溶液的储能模量 G' 和损耗模量 G'' 随着溶液浓度的增大而上升,呈现凝胶性质;研究表明, JFP-Ps 具有良好的酸碱稳定性、耐盐稳定性和良好的抗降解性能,可广泛应用于酸性或碱性食品、高盐食品、冷冻冷藏食品

等食品中。本研究为 JFP-Ps 在食品工业中的功能食品、食品感官评价及天然增稠剂的选择提供了一定的理论支持。

参考文献

- [1] HU Q B, HU S Q, FLEMING E, et al. Chitosan-caseinate-dextran ternary complex nanoparticles for potential oral delivery of astaxanthin with significantly improved bioactivity[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020: 151.
- [2] ZHU K X, ZHANG Y J, NIE S P, et al. Physicochemical properties and *in vitro* antioxidant activities of polysaccharide from *Artocarpus heterophyllus* Lam. pulp[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2017, 155: 354–361.
- [3] 朱科学, 王颖倩, 张彦军, 等. 菠萝蜜多糖对脾淋巴细胞抗氧化作用及免疫功能的影响[J]. *食品科学*, 2017, 38(23): 207–212.
- [4] ZHU K X, WANG Y Q, ZHANG Y J, et al. Antioxidant and immunoenhancing activity of polysaccharide from *Artocarpus heterophyllus* Lam. on spleen lymphocytes[J]. *Food Science*, 2017, 38(23): 207–212.
- [5] 张婷. 紫芝菌丝体多糖的分离纯化、结构鉴定及生物活性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017. [ZHANG T. Extraction, purification, structure and bioactivities of the polysaccharide from *Ganoderma lucidum* Mycelium [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.]
- [6] 刘伟帆. 兜唇石斛免疫活性多糖及抗氧化肽的结构鉴定及功能表征[D]. 广州: 华南理工大学, 2018. [LIU Y F. The identification of structure and characterization of immunoregulatory polysaccharide and antioxidative peptides isolated from *Dendrobium aphyllum*[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.]
- [7] 刘瑶. 玫瑰花多糖的提取及功能性饮料的制备[D]. 天津: 天津科技大学, 2017. [LIU Y. Study on extraction of rose polysaccharide and preparation of functional beverage [D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2017.]
- [8] 吴少微. 鸡骨草多糖的生物活性、结构解析及快速制备活性多糖的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016. [WU S W. Biological activities and structural characteristics of polysaccharides from *Abrus cantoniensis* and the rapid preparation for the bioactive polysaccharide [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.]
- [9] BAO H, YOU S G, CAO L K, et al. Chemical and rheological properties of polysaccharides from fruit body of *Auricularia auricular-judae*[J]. *Food Hydrocolloids*, 2016, 57: 30–37.
- [10] MA F Y, ZHANG Y, LIU N H, et al. Rheological properties of polysaccharides from *Dioscorea opposita* Thunb[J]. 2017, 227: 64–72.
- [11] IAGHER F, REICHER F, GANTER J. Structural and rheological properties of polysaccharides from mango (*Mangifera indica* L.) pulp[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2002, 31(1-3): 9–17.
- [12] 张彦军, 王少曼, 左慧玉, 等. 菠萝蜜主要功能活性成分及其研究进展[J]. *食品科学技术学报*, 2019, 37(6): 16–22.
- [13] ZHANG Y J, WANG S M, ZUO H Y, et al. Research progress on main functional components of *Artocarpus heterophyllus* Lam.[J].

- Journal of Food Science and Technology*, 2019, 37(6): 16–22.]
- [12] 梁裕威. 菠萝蜜果酒酵母的选育及发酵工艺的研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2019. [LIANG Y W. Study on the yeast breeding and fermentation technology of jackfruit fruit wine[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2019.]
- [13] 刘学敏, 李宗锴, 高梅, 等. 菠萝蜜良种“马来西亚一号”在滇东南热区的引种推广与发展对策[J]. 热带农业科技, 2018, 41(2): 18–23. [LIU X M, LI Z K, GAO M, et al. The status of Malaysian Latex-free Jackfruit No. 1 in Yunnan southeast tropical zone[J]. Tropical Agricultural Science & Technology, 2018, 41(2): 18–23.]
- [14] 姚思雯, 何佳丽, 朱科学, 等. 菠萝蜜多糖体外酶解特征研究[J]. 现代食品科技, 2019, 35(3): 87–94. [YAO S W, HE J L, ZHU K X, et al. *In vitro* fermentation characteristics of polysaccharides from *Artocarpus heterophyllus* Lam. pulp[J]. Modern Food Science and Technology, 2019, 35(3): 87–94.]
- [15] CALVO C, FERRER M R, MARTINEZ-CHECA F, et al. Some rheological properties of the extracellular polysaccharide produced by *volcaniella eurihalina* F2-7[J]. Applied Biochemistry & Biotechnology, 1995, 55(1): 45–54.
- [16] B Q G A, B S W C, B Q W, et al. Microstructure and rheological properties of psyllium polysaccharide gel[J]. Food Hydrocolloids, 2009, 23(6): 1542–1547.
- [17] 杨永利, 郭守军, 何都能, 等. 鹿角海萝多糖的流变性研究[J]. 食品工业科技, 2007(7): 103–106. [YANG Y L, GUO S J, HE D N, et al. Rheological study of polysaccharides from *Gloiopeltis tenax*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2007(7): 103–106.]
- [18] 郭守军, 杨永利, 林杜鑫. 龙须菜多糖的流变性研究[J]. 食品与机械, 2009, 25(4): 23–27. [GUO S J, YANG Y L, LIN D X. Study on rheological properties of *Gracilaria lamaneiformis* polysaccharide[J]. Food & Machinery, 2009, 25(4): 23–27.]
- [19] ANVARI M, TABARSA M, CAO R A, et al. Compositional characterization and rheological properties of an anionic gum from *Alyssum homolocarpum* seeds[J]. Food Hydrocolloids, 2016, 52: 766–773.
- [20] WU Y, CUI S W, WU J H, et al. Structure characteristics and rheological properties of acidic polysaccharide from boat-fruited *sterculia* seeds[J]. Carbohydrate Polymers, 2012, 88(3): 926–930.
- [21] CHEN Y, ZHANG J G, SUN H J, et al. Pectin from *Abelmoschus esculentus*: Optimization of extraction and rheological properties[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2014, 70: 498–505.
- [22] ZISENIS M. Correlation of molecular orientation and shear viscosity of high molar mass polymers in dilute solution[J]. European Polymer Journal, 1997, 33(5): 773–780.
- [23] 刘楠华. 怀山药多糖铁补血活性及怀山药多糖乳化和流变性研究[D]. 开封: 河南大学, 2016. [LIU N H. Antanemic activities of Huaishanyao(*Dioscorea opposita* Thunb.) polysaccharide iron complex and the emulsification & rheology study on polysaccharide [D]. Kaifeng: Henan University, 2016.]
- [24] 朱会霞, 孙金旭, 王灿. 樟芝多糖流变特性研究[J]. 食品研究与开发, 2011, 32(1): 10–13. [ZHU H X, SUN J X, WANG C. The rheology study for antrodia camphorate[J]. Food Research and Development, 2011, 32(1): 10–13.]
- [25] XU J L, ZHANG J C, LIU Y, et al. Rheological properties of a polysaccharide from floral mushrooms cultivated in Huangshan Mountain[J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 139: 43–49.
- [26] STOKES J R, MACAKOVA L, CHOJNICKA-PASZUN A, et al. Lubrication, adsorption, and rheology of aqueous polysaccharide solutions[J]. Langmuir, 2011, 27(7): 3474–3484.
- [27] GALLAO M I, NORMANDO L D O, VIEIRA I G P, et al. Morphological, chemical and rheological properties of the main seed polysaccharide from *Caesalpinia ferrea* Mart[J]. Industrial Crops and Products, 2013, 47: 58–62.
- [28] 蒋建新, 朱莉伟, 张卫明, 等. 塔拉多糖胶的研究[J]. 西南林学院学报, 2003(4): 12–16. [JIANG J X, ZHU L W, ZHANG W M, et al. Study on properties of *Caesalpinia spinosa* polysaccharide gum[J]. Journal of Southwest Forestry College, 2003(4): 12–16.]
- [29] 管红磊, 朱莉伟, 张卫明, 等. 两种皂荚多糖胶流变性质的表征[J]. 食品科学, 2010, 31(17): 68–72. [JIAN H L, ZHU L W, ZHANG W M, et al. Rheological characteristics of gums from *Gleditsia sinensis* Lam. seeds with different Shapes[J]. Food Science, 2010, 31(17): 68–72.]
- [30] 郭守军, 杨永利, 谢泳娴, 等. 带形蜈蚣藻多糖的流变性研究[J]. 广东农业科学, 2014, 41(16): 112–115. [GUO S J, YANG Y L, XIE Y X, et al. Study on the rheological properties of polysaccharides from *Centipede algae*[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2014, 41(16): 112–115.]
- [31] 查春节. 龙眼多糖的流变性、结构鉴定及其清除自由基活性研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2013. [CHA C J. Rheological properties, Structure identification and the activity of scavenging radicals of polysaccharide extracted from longan (*Dimocarpus longan* Lour.)[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2013.]
- [32] 朱科学, 赵书凡, 朱红英, 等. 苦丁茶冬青多糖流变学特性研究[J]. 食品工业科技, 2017, 38(22): 61–65, 70. [ZHU K X, ZHAO S F, ZHU H Y, et al. Rheological properties of polysaccharide isolated from *Ilex Kudingcha* C. J. Tseng[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(22): 61–65, 70.]
- [33] KONTOGIORGOS V, MARGELOU I, GEORGIADIS N, et al. Rheological characterization of okra pectins[J]. Food Hydrocolloids, 2012, 29(2): 356–362.
- [34] 林丽华. 凉粉草多糖提取优化、理化性质及流变胶凝特性研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2017. [LIN L H. Polysaccharide from *Mesona chinensis*: Extraction optimization, physicochemical characterizations, rheological and gelling properties[D]. Nanchang: Nanchang University, 2017.]
- [35] 蒋建新, 朱莉伟, 安鑫南. 植物多糖胶流变性质的研究[J]. 中国野生植物资源, 2003, 22(5): 29–32. [JIANG J X, ZHU L W, AN X N. Studies on rheologies of plant polysaccharide gum[J]. Chinese Wild Plant Resources, 2003, 22(5): 29–32.]