

DOI: 10.12161/j.issn.1005-6521.2024.10.005

基于脂肪替代品的柠檬果胶凝胶特性

何雨婕^{1,2}, 张巧^{1,3,4}, 李巧巧⁵, 雷激^{1,3,4*}, 李贤^{1,3,4}, 魏春菊^{1,3,4}, 卢钊燊^{1,3,4}, 周静^{1,3,4}

(1. 西华大学 食品与生物工程学院, 四川 成都 610039; 2. 广汉市迈德乐食品有限公司 四川省牛油加工工程技术研究中心, 四川 广汉 618305; 3. 川渝共建特色食品重庆市重点实验室, 四川 成都 610039; 4. 食品微生物四川省重点实验室, 四川 成都 610039; 5. 成都纺织高等专科学校 轻工与材料学院, 四川 成都 611731)

摘要: 为提高柠檬皮渣的经济效益, 拓宽柠檬高酯果胶在脂肪替代品中的应用, 该文针对果胶凝胶作为固态脂肪替代品的相关要求, 探讨柠檬高酯果胶的凝胶特性。以柠檬皮渣为原料采用超声辅助柠檬酸法提取果胶, 考察柠檬果胶凝胶质构的影响因素, 并在质构结果基础上进一步分析果胶质量分数对凝胶流变学特性及持水性能的影响。结果表明, 所制备的柠檬果胶为高酯果胶, 影响其凝胶质构特性的主要因素有果胶质量分数、蔗糖质量分数和 pH 值。当果胶质量分数为 1.8%、蔗糖质量分数为 68%、pH 值为 2.7 时果胶凝胶具有最好的质构特性、流变性及持水性, 此时果胶凝胶结构最为稳定, 综合性能最优。

关键词: 柠檬果胶; 果胶凝胶; 质构特性; 流变特性; 持水性

The Properties of Lemon Pectin Gel Based on Fat Substitutes

HE Yujie^{1,2}, ZHANG Qiao^{1,3,4}, LI Qiaoqiao⁵, LEI Ji^{1,3,4*}, LI Xian^{1,3,4}, WEI Chunju^{1,3,4}, LU Chuanyi^{1,3,4}, ZHOU Jing^{1,3,4}

(1. College of Food Science and Biological Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, Sichuan, China; 2. Sichuan Beef Tallow Processing Engineering Technology Research Center, Guanghan Medele Food Co., Ltd., Guanghan 618305, Sichuan, China; 3. Chongqing Key Laboratory of Specialty Food Co-Built by Sichuan and Chongqing, Chengdu 610039, Sichuan, China; 4. Food Microbiology Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610039, Sichuan, China; 5. School of Light Industry and Materials, Chengdu Textile College, Chengdu 611731, Sichuan, China)

Abstract: In order to improve the economic benefits of lemon peel residue and broaden the application of lemon high-ester pectin in fat substitutes, this study explored the gel characteristics of lemon high-ester pectin for the requirements of pectin gel as a solid fat substitute. Firstly, pectin was extracted from lemon peel residue by ultrasound-assisted citric acid method, and the influencing factors of lemon pectin gel texture were investigated. The influence of pectin mass fraction on the rheological properties and water-holding properties of the gel was further analyzed on the basis of the textural results. The results showed that the prepared lemon pectin was a high-ester pectin, and the main factors affecting its gel texture characteristics were pectin mass fraction, sucrose mass fraction and pH value. When the pectin mass fraction was 1.8%, sucrose mass fraction was 68% and pH value was 2.7, the pectin gel had the best textural characteristics, rheological properties and water holding capacity, and the pectin gel had the most stable structure and the optimal overall performance.

Key words: lemon pectin; pectin gel; texture characteristics; rheological properties; water holding capacity

引文格式:

何雨婕, 张巧, 李巧巧, 等. 基于脂肪替代品的柠檬果胶凝胶特性[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(10): 29-35.

HE Yujie, ZHANG Qiao, LI Qiaoqiao, et al. The Properties of Lemon Pectin Gel Based on Fat Substitutes[J]. Food Research and Development, 2024, 45(10): 29-35.

基金项目: 四川省科技计划项目(2020YFN0149)

作者简介: 何雨婕(1997—), 女(汉), 硕士研究生, 研究方向: 食品科学。

*通信作者: 雷激(1966—), 女(汉), 教授, 博士, 研究方向: 食品营养学。

柠檬(*Citrus limon*)属芸香科柑橘属常绿小乔木,是第三大柑橘品种^[1]。目前,人们的需求越来越多元化,对柠檬的消费不仅仅局限于鲜果需求,还有各类柠檬加工产品包括柠檬油、柠檬(浓缩)汁及其饮料、柠檬蜜饯等。大量的加工副产物会随着柠檬加工过程产生,其皮渣废弃物比例可达30%~50%^[2]。柠檬皮渣中含有大量的活性成分,包括果胶、黄酮类物质、苦味素等,其中果胶的含量高达30%^[3],如果直接丢弃柠檬皮渣会造成严重的资源浪费及环境污染^[4]。柠檬皮渣是优质的果胶原料,相较于其他类果胶,柠檬果胶具有酯化度高、色泽好、胶凝性强的优点^[5]。

果胶是高分子多糖聚合物,是自然界最复杂的高分子化合物之一^[6]。果胶广泛应用于食品、医药、化妆品领域^[7],其中应用最广泛的是食品行业,经常作为胶凝剂、增稠剂、乳化剂、稳定剂等添加到食品中^[8]。凝胶性和流变性是果胶的两个重要特性。其中果胶凝胶的特性对其在食品工业中的应用十分重要,其在脂肪替代品中的应用为近年来一个较新的领域,现已有将果胶凝胶作为脂肪替代品的相关报道。Liu等^[9]将低甲氧基果胶用于制备脂肪替代品后添加至固体奶酪中,结果表明果胶凝胶添加对低脂奶酪类似物的质地特征显示出积极影响,添加果胶凝胶的低脂奶酪类似物通过感官评估获得了更好的质地和更高的口感得分。赵锦妆^[10]将橘皮果胶用以制备脂肪替代品并将其添加至人造奶油中,替代比例为10%时口感与未添加的口感无异。

研究表明适宜的果胶凝胶的制备是其作为脂肪替代品的前提^[11],而目前以柠檬果胶为原料模拟固态脂肪特征制备凝胶的研究鲜见。因此本研究以超声辅助柠檬酸提取的柠檬皮渣果胶为原料,探究影响果胶凝胶质构的因素及果胶质量分数对果胶凝胶流变性及持水性的影响,综合果胶的凝胶性、流变性和持水性优化出最佳的果胶凝胶,为柠檬皮渣果胶在脂肪替代品中的应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

柠檬、蔗糖:市售;愈创木酚(分析纯):国药集团化学试剂有限公司;过氧化氢(分析纯):河南慧泽生物工程有限公司;无水柠檬酸:潍坊英轩实业有限公司;无水乙醇、盐酸、95%乙醇(均为分析纯):成都市科隆化学有限公司;咪唑(分析纯):上海易恩化学技术有限公司;D-(+)-半乳糖醛酸分析标品:上海源叶生物科技有限公司;二甲基硅油:天津市恒兴化学试剂制造有限公司;NaOH标准溶液(0.100 0、0.500 0 mol/L):广检(广州)检测科技有限公司;HCl标准溶液(0.500 0 mol/L):广州凯尔化工科技有限公司。

1.2 仪器与设备

水浴锅(HH-4):常州普天仪器制造有限公司;显数式pH计(PHS-430):成都世纪方舟科技有限公司;恒温鼓风干燥箱(DHG-9030A):上海一恒科技有限公司;百万分之一天平(FA2104S):上海舜宇恒平科学仪器有限公司;多功能粉碎机(RRH-A750):永康市红太阳机电有限公司;球磨机(Retsch MM400):沈阳沐伦科技有限公司;旋转蒸发器(IKA HB 10 digital):艾卡(广州)仪器设备有限公司;超声清洗机(SB-5200DTN):宁波新芝生物科技股份有限公司;双光束紫外可见分光光度计(UV-1900i):日本岛津公司;涡旋混合器(XW-80A):其林贝尔仪器制造有限公司;磁力搅拌器(SN-MS-H280D):上海尚普仪器设备有限公司;质构仪(TA-XT Plus):英国 Stable Micro Styste 公司;流变仪(MCR302):奥地利安东帕有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 柠檬皮渣的制备

参考刘江等^[12]的方法制备柠檬干渣,将新鲜柠檬去油胞、去籽及柠檬汁液后剩余的残渣置于100℃水浴中漂烫5 min灭酶,然后将灭酶后的柠檬皮渣进行梯度式热风干燥,干燥粉碎后过40目筛得到柠檬皮渣干渣。

1.3.2 柠檬皮渣果胶提取

采用超声辅助柠檬酸提取法提取果胶,称取一定质量的柠檬皮渣,按照料液比1:25(g/mL)加入pH值为2.0的柠檬酸溶液,在70℃水浴中超声提取20 min,并不断搅拌,使果胶充分析出,后续步骤参考辛明等^[13]的试验方法采用乙醇沉淀果胶,将沉淀的滤渣在50℃恒温鼓风干燥箱中干燥至恒重,粉碎后即成果胶成品。

1.3.3 柠檬皮渣果胶理化指标的测定

1.3.3.1 果胶得率

果胶得率(D ,%)的计算公式如下。

$$D = \frac{M_1}{M_2} \times 100$$

式中: M_1 为提取的柠檬皮渣果胶质量,g; M_2 为柠檬皮渣粉质量,g。

1.3.3.2 半乳糖醛酸值

参照耿敬章等^[14]的方法即硫酸咪唑比色法进行测定。

1.3.3.3 酯化度

参考李加兴等^[15]的方法即滴定法进行测定。

1.3.4 果胶凝胶制备方法

将凝胶体系的总质量控制在100 g,改变相应的果胶、蔗糖及去离子水的质量分数制备不同浓度的果胶凝胶。

将用去离子水溶解的果胶在80℃水浴保温30 min

后用 12.5% 柠檬酸调节果胶溶液 pH 值,并加入蔗糖,80 °C 隔水融化,待其冷却胶凝,用于质构测定。

1.3.4.1 果胶质量分数单因素试验

果胶凝胶制备方法参考 1.3.4,其中考察的果胶质量分数分别为 1.0%、1.2%、1.4%、1.6%、1.8%,固定 pH 值为 2.7,蔗糖质量分数为 68%。

1.3.4.2 蔗糖质量分数单因素试验

果胶凝胶制备方法参考 1.3.4,其中考察的蔗糖质量分数分别为 60%、62%、64%、66%、68%,固定 pH 值为 2.7,果胶质量分数为 1.8%。

1.3.4.3 pH 值单因素试验

果胶凝胶制备方法参考 1.3.4,其中考察的 pH 值分别为 2.7、2.8、2.9、3.0、3.1,固定果胶质量分数为 1.8%,蔗糖质量分数为 68%。

1.3.5 正交试验

在单因素试验基础上,选取 $L_9(3^4)$ 正交表进行正交试验,因素水平设定详见表 1。以质构特性作为应变量,通过变异系数权重法计算出质构的综合评分。

表 1 果胶凝胶正交试验因素水平

Table 1 Factors and levels of pectin gel orthogonal test

水平	因素			
	A pH 值	B 果胶质量分数/%	C 蔗糖质量分数/%	D 空列
1	2.7	1.4	64	1
2	2.8	1.6	66	2
3	2.9	1.8	68	3

1.3.6 果胶凝胶质构的测定

采用质构仪对果胶凝胶进行全质构扫描,测试条件设置为探头 P0.5,测前速度 1.0 mm/s,测中速度 0.5 mm/s,测后速度 10 mm/s,压缩程度 50%,触发力 5 g。每组样品平行测量 6 次,得到果胶凝胶的硬度、弹性、胶黏性、咀嚼性,取均值作为测定结果,其中弹性为反向力,故取其绝对值作为最终结果。

1.3.7 综合评分

对质构测定正交试验结果进行综合评分,综合评分参考文献[5]进行。将正交试验中的各指标采用变异系数法得到相应权重系数,利用加权平均的方法得到质构指标的综合评分。各指标的变异系数计算公式如下。

$$V_i = \frac{\sigma_i}{X_i}$$

式中: V_i 为第 i 项指标的变异系数; σ_i 为第 i 项指标的标准差; X_i 为第 i 项指标的算术平均值。

各指标的权重的计算公式如下。

$$W_i = \frac{V_i}{\sum_{i=1}^n V_i}$$

式中: W_i 为第 i 项因素的权重; V_i 为第 i 项指标的变异系数。

1.3.8 果胶凝胶流变性测定

果胶凝胶制备方法同 1.3.4,以果胶质量分数作为自变量,探究果胶质量分数对果胶凝胶流变特性的影响,其中果胶凝胶制备的 pH 值、蔗糖质量分数参考质构正交试验优化出的数据。

测试时采用平板-平板测量系统,平板直径为 25 mm,设置测试间距为 1 mm,将样品置于流变仪平板中心位置,并用刮板刮去平板外多余样品,并用硅油涂抹于试样周围,防止水分挥发。

参考赵锦妆等^[16]的方法进行动态剪切流变性测定,温度设置为 5 °C,应变设置为 0.5%,测定果胶凝胶在振荡频率 0.1~100 Hz 下储能模量 G' 及损耗模量 G'' 的变化情况。

动态温度扫描测定:应变设置为 0.5%,频率设置为 1 Hz,分别测定果胶凝胶在 5~80 °C、升温速率 5 °C/min 下储能模量 G' 及损耗模量 G'' 的变化情况。

1.3.9 果胶凝胶持水性的测定

参考刘贺^[17]的方法进行测定计算,果胶凝胶制备方法参考 1.3.4,果胶凝胶体系 pH 值及蔗糖质量分数参考质构正交试验优化出的结果,进一步探究果胶质量分数对果胶凝胶持水性的影响。

1.4 数据分析

利用 SPSS 25.0 进行数据的单因素方差分析及多重比较($P < 0.05$ 为差异有统计学意义),试验数据用平均值±标准差表示,利用 Origin 2018 绘制图形。

2 结果与分析

2.1 柠檬皮渣果胶基本理化指标

柠檬皮渣果胶的部分理化指标见表 2。

表 2 柠檬皮渣果胶理化指标($n=3$)

Table 2 Physical and chemical indicators of lemon peel pectin($n=3$)

半乳糖醛酸/%	酯化度/%	果胶得率/%
83.32±0.25	68.11±0.39	26.64±0.51

由表 2 可知,柠檬皮渣果胶的酯化度大于 50%,故本试验提取的果胶为高酯果胶,所提取的果胶半乳糖醛酸含量远高于国标 65% 的要求,达到 GB 25533—2010《食品安全国家标准 食品添加剂 果胶》的要求,果胶得率高于刘江^[5]、刘义武等^[18]关于柠檬皮渣提取果胶的得率(24.04%、23.8%),说明本提取方法在满足果胶国标的基础上可以更好提高柠檬皮渣果胶得率。

2.2 柠檬皮渣果胶凝胶质构的影响因素

2.2.1 果胶质量分数对果胶凝胶质构体系的影响

由于固体脂肪具有良好的强度和弹性以及良好的几何形状稳定性,因此制备一款脂肪替代品,果胶凝胶

质构特性是重要的衡量指标^[19-20], 固态脂肪一般硬度较大, 所以需要制备的果胶凝胶强度大、结构紧密。果胶质量分数对果胶凝胶特性的影响如表 3 所示。

表 3 果胶质量分数对果胶凝胶特性的影响 ($n=6$)Table 3 Effect of pectin mass fraction on pectin gel properties ($n=6$)

果胶质量分数/%	硬度/g	弹性	胶黏性	咀嚼性
1.0	12.77±0.68 ^a	17.01±0.67 ^a	9.44±0.51 ^a	10.14±0.78 ^a
1.2	16.89±0.92 ^d	20.98±0.76 ^d	13.05±1.62 ^d	14.48±0.11 ^d
1.4	19.16±1.32 ^e	23.71±0.50 ^e	15.64±0.70 ^e	15.72±0.53 ^e
1.6	22.40±0.17 ^b	27.81±0.51 ^b	26.25±1.16 ^b	26.05±0.50 ^b
1.8	28.46±1.01 ^a	29.88±0.45 ^a	31.06±0.42 ^a	33.76±0.62 ^a

注: 同列不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

由表 3 可知, 不同质量分数果胶制备的果胶凝胶的硬度、弹性、胶黏性、咀嚼性具有显著差异 ($P<0.05$)。随着果胶质量分数的增加, 果胶凝胶的 4 个质构指标都显著增加, 果胶质量分数为 1.8% 时达到最大值, 这可能由于低质量分数时, 溶于水的果胶分子过于分散, 形成的氢键作用力弱, 因而形成的凝胶不稳定, 凝胶性能较差, 随着果胶质量分数增大, 溶液中的羧基相应增多, 从而增加三维晶型网状结点数, 氢键与疏水作用力增强, 使得凝胶组织结构越致密、截留在网络结构中水分子越多, 故凝胶强度增大^[21], 此研究结果与赵锦妆等^[16]结果一致。通过前期试验得知当果胶质量分数超过 1.8%, 由于果胶本身的黏附性, 不易溶解, 故确定果胶的最大质量分数为 1.8%。综上, 选择果胶质量分数为 1.4%、1.6%、1.8% 进行下一步正交试验。

2.2.2 蔗糖质量分数对果胶凝胶质构体系的影响

蔗糖质量分数对果胶凝胶质构体系的影响如表 4 所示。

表 4 蔗糖质量分数对果胶凝胶特性的影响 ($n=6$)Table 4 Effect of sucrose mass fraction on the gel properties of pectin ($n=6$)

蔗糖质量分数/%	硬度/g	弹性	胶黏性	咀嚼性
60	12.62±1.58 ^c	14.61±1.15 ^c	9.57±0.63 ^c	10.09±0.62 ^c
62	16.96±0.60 ^d	17.21±0.33 ^d	12.61±0.96 ^d	13.79±0.32 ^d
64	19.06±0.85 ^e	20.87±0.63 ^e	17.27±1.02 ^e	16.67±1.46 ^e
66	22.15±0.67 ^b	26.99±1.05 ^b	25.00±0.87 ^b	24.62±0.45 ^b
68	28.08±0.91 ^a	29.75±0.47 ^a	31.26±0.46 ^a	31.31±7.98 ^a

注: 同列不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

由表 4 可知, 不同质量分数蔗糖的果胶凝胶质构指标均差异显著 ($P<0.05$), 随着蔗糖质量分数的增大各指标均在整体趋势上呈现逐渐上升的趋势, 这是由于随着蔗糖质量分数增大, 大量共溶物(蔗糖)能产生稳定的疏水网状结构^[10], 蔗糖的醇羟基通过氢键和果胶分子链竞争体系里的结合水, 使果胶分子之间彼此靠近聚集成链胶束, 形成三维结合区, 故果胶的凝胶

强度增强^[21]。通过试验可知, 当蔗糖质量分数大于 68% 时, 呈现出难溶的状态, 故蔗糖的最大添加量为 68%。选择蔗糖质量分数为 64%、66%、68% 进行下一步正交试验。

2.2.3 pH 值对果胶凝胶质构体系的影响

pH 值对果胶凝胶特性的影响如表 5 所示。

表 5 pH 值对果胶凝胶特性的影响 ($n=6$)Table 5 Effect of pH value on the properties of pectin gels ($n=6$)

pH 值	硬度/g	弹性	胶黏性	咀嚼性
2.7	28.56±1.25 ^a	29.53±0.74 ^a	31.66±1.17 ^a	33.60±0.99 ^a
2.8	23.05±1.88 ^b	28.04±6.48 ^a	28.08±1.52 ^b	27.03±0.21 ^b
2.9	18.76±0.54 ^c	20.18±1.05 ^{ab}	18.40±0.32 ^c	19.81±0.62 ^c
3.0	13.93±0.67 ^d	16.22±1.06 ^b	14.54±0.32 ^d	13.70±0.91 ^d
3.1	13.05±0.32 ^d	13.06±1.09 ^b	9.94±0.60 ^c	11.63±1.22 ^c

注: 同列不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

由表 5 可知, 随着 pH 值的增加, 果胶凝胶的各个指标数据均呈现降低的趋势, 各指标均在 pH2.7 时达到最大值, 说明此时果胶凝胶的网络结构较强, 想要破坏其凝胶结构需要更多的能量^[22]。有研究表明低 pH 值会促进果胶的凝胶化^[23], 可能是由于 pH 值较低时可有效抑制体系中带电荷的半乳糖醛酸羧基的电离, 分子间静电排斥力变小, 使果胶分子相互缠绕形成一个稳定的三维晶型网络结构并截留部分水^[21]。通过预试验, 当 pH 值小于 2.7 时, 得到的果胶凝胶不成型且质地较稀, 无法进行质构测定, 故试验直接从 pH 值为 2.7 开始进行。综合来看, 选择 pH 值为 2.7、2.8、2.9 进行正交试验。

2.2.4 果胶凝胶质构正交试验结果

根据单因素试验结果, 选择 $L_9(3^4)$ 正交表进行正交试验, 试验结果如表 6 所示。

表 6 果胶凝胶质构正交试验结果

Table 6 Pectin gel texture orthogonal test results

试验号	因素				硬度/g	弹性	胶黏性	咀嚼性	综合评分
	A	B	C	D					
1	1	1	1	1	18.85	11.60	10.87	10.88	13.25
2	1	2	2	2	21.60	16.97	15.11	15.44	17.46
3	1	3	3	3	27.62	28.08	21.89	23.60	25.53
4	2	1	2	3	9.66	10.79	14.74	15.20	12.39
5	2	2	3	1	21.38	20.14	23.74	22.80	21.91
6	2	3	1	2	15.55	24.33	11.29	10.31	15.75
7	3	1	3	2	10.91	12.39	20.33	20.67	15.70
8	3	2	1	3	12.76	12.23	11.37	11.45	12.00
9	3	3	2	1	12.02	21.53	18.48	17.50	17.31
k_1					18.75	13.78	13.67	17.49	
k_2					16.68	17.12	15.72	16.30	
k_3					15.00	19.53	21.04	16.64	
极差 R					3.74	5.75	7.38	1.19	
因素主次					C>B>A				
最优方案					A ₁ B ₃ C ₃				

由表6可知,变异系数权重法计算出硬度、弹性、胶黏性、胶着性、咀嚼性的权重值分别为0.273、0.270、0.224、0.233,计算得到最终的综合评分,由综合评分结果可知,最佳的方案为A₁B₃C₃,即pH2.7、果胶质量分数1.8%、蔗糖质量分数68%,此时综合评分最高,为25.53。

将正交试验得到的结果进行验证试验,得到综合评分结果分别为25.68、25.70、25.71,均值为25.69,与预测值之间的相对误差较小,说明该方法优化出的工艺参数可靠,可用于最佳果胶凝胶质构的筛选。

2.3 柠檬皮渣果胶凝胶流变性

2.3.1 动态黏弹性测定

储能模量 G' 可以用来反映样品的弹性,损耗模量 G'' 反映样品的黏性,它是测定物体黏弹性的方法之一^[24]。与静态剪切测定不同的是动态黏弹性测定可以体现出果胶凝胶随着剪切频率变化下凝胶状态的变化,考察不同剪切频率下果胶凝胶的稳定性。果胶凝胶的动态黏弹性测定结果如图1、图2所示。

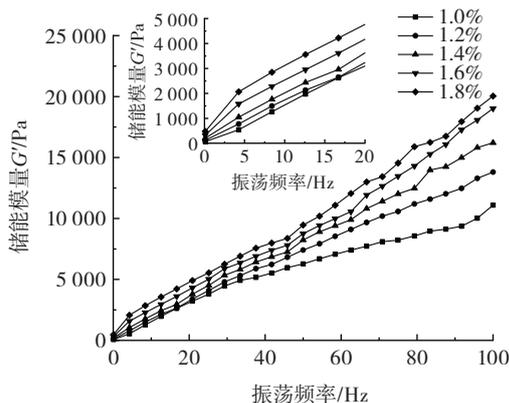


图1 振荡频率对不同质量分数果胶凝胶 G' 的影响

Fig.1 Effect of oscillation frequency on G' of pectin gel with different mass fractions

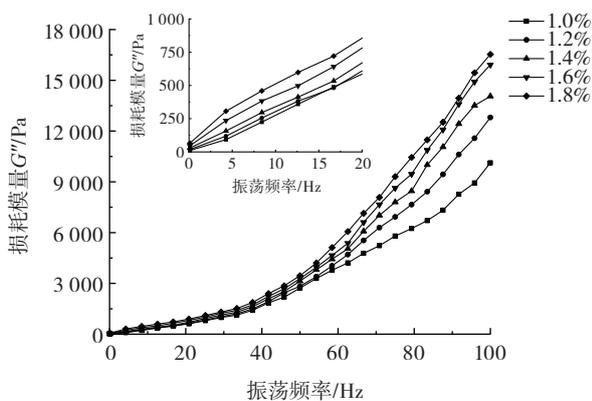


图2 振荡频率对不同质量分数果胶凝胶 G'' 的影响

Fig.2 Effect of oscillation frequency on G'' of pectin gel with different mass fractions

由图1和图2可知,随着振荡频率的增加,果胶凝胶的 G' 及 G'' 均呈现逐渐增大的趋势,体现出典型的黏

弹性体的特征,且随着果胶质量分数的增加,果胶凝胶的 G' 和 G'' 均增大。在动态黏弹性的表示中,通常将应力与应变的相位差角 δ 称为损耗角, $\tan\delta$ 为损耗正切值,又可称为衰减率,损耗正切可表示为 G'' 与 G' 的比值,即 $\tan\delta=G''/G'$,相位角的存在,表示黏弹性体同黏性液体一样,在振动中产生流动^[25]。振荡频率对果胶凝胶 $\tan\delta$ 的影响如图3所示。

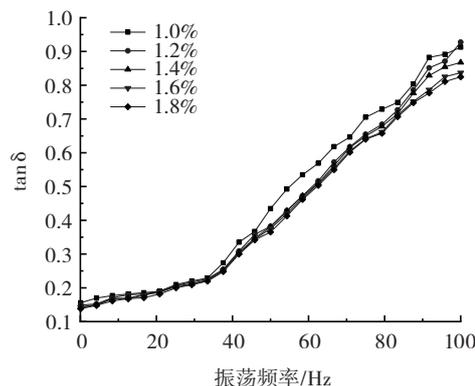


图3 振荡频率对不同质量分数果胶凝胶 $\tan\delta$ 的影响

Fig.3 Effect of oscillation frequency on $\tan\delta$ of pectin gel with different mass fractions

由图3可知,果胶质量分数越低的果胶凝胶 $\tan\delta$ 值越大,所有质量分数的果胶凝胶均随着剪切速率的增加而被破坏,但是在剪切范围内,果胶凝胶的 $\tan\delta$ 均小于1,说明仍处于凝胶状态。综合来看,当果胶质量分数为1.8%时制备的果胶凝胶流变性能较好,体系的弹性比例越大。

2.3.2 动态温度扫描测定

用果胶凝胶制备脂肪替代品,其稳定性也十分重要,故通过动态温度扫描来考察凝胶在不同温度下的凝胶状态变化以探究其稳定性,稳定性越强,越适合于制备脂肪替代品。温度扫描对果胶凝胶 G' 及 G'' 的影响如图4、图5所示。

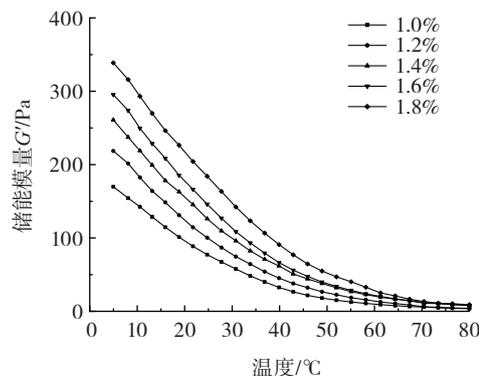
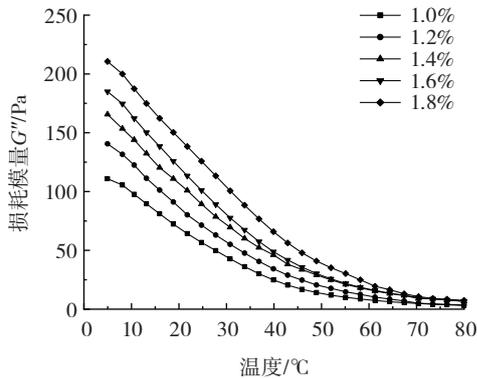


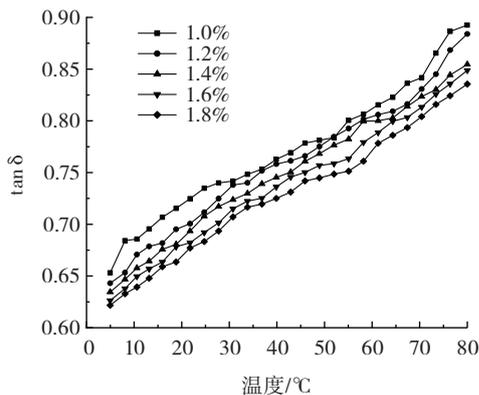
图4 温度对不同质量分数果胶凝胶 G' 的影响

Fig.4 Effect of temperature on G' of pectin gel with different mass fractions

由图4、图5可知,随着温度的升高,果胶凝胶的

图5 温度对不同质量分数果胶凝胶 G' 的影响Fig.5 Effect of temperature on G' of pectin gel with different mass fractions

G' 及 G'' 均呈现逐渐下降的趋势,这可能是由于温度的升高,体系分子运动加剧,使得体系的凝胶内部结构间的相互联结被打乱,凝胶强度遭到破坏,弹性性能及黏性性能发生改变^[26]。 G' 及 G'' 随着果胶质量分数的增加而增大,原因是高质量分数的果胶凝胶体系结构更致密,相对来说不易被温度破坏^[10]。温度对果胶凝胶 $\tan\delta$ 的影响如图6所示。

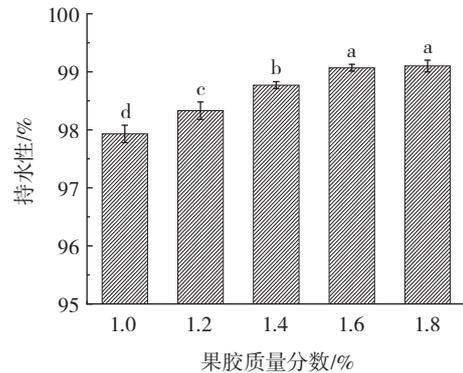
图6 温度对不同质量分数果胶凝胶 $\tan\delta$ 的影响Fig.6 Effect of temperature on $\tan\delta$ of pectin gel with different mass fractions

由图6可知,随着温度的升高,体系的 $\tan\delta$ 不稳定且逐渐增大,但是在温度扫描范围内,所有浓度的果胶凝胶 $\tan\delta$ 均小于1,说明体系仍处于凝胶状态。综合来看,果胶质量分数为1.8%时各方面性能均较好。结合流变性测定试验结果可知,最佳的果胶质量分数为1.8%,此时果胶凝胶的流变性能均达到最佳状态。

2.4 果胶凝胶持水性测定

以果胶凝胶为基质的脂肪替代品可以改善水相的结构特征,所形成的三维网状结构的凝胶能将大量的水截留,这些被截留的水具有较好的流动性,在质感和口感上与脂肪类似^[20]。持水性是指食品在经脱水处理后保持水分或其他食品汁液的能力大小^[27]。持水性越强,表明凝胶体系截留的水越多,越利于制备脂肪替代

品。不同果胶质量分数对凝胶体系持水性的影响如图7所示。



不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图7 不同果胶质量分数下果胶凝胶的持水性

Fig.7 Water-holding capacity of pectin gel with different pectin mass fractions

由图7可知,随着果胶质量分数的增加,果胶凝胶持水性逐渐增加,凝胶离心后表面均未见明显水分析出,说明高酯果胶凝胶表现出较强的持水能力。凝胶的形成是由于凝胶网络结构内部束缚了大量的水分子,所以凝胶保持水分子的能力是其重要的一个特性^[28]。本试验制备的果胶凝胶持水性均良好,在果胶质量分数为1.8%时持水性达到最大值,形成的凝胶结构紧密,有利于果胶凝胶应用于脂肪替代品的制备。

3 结论

以柠檬皮渣为原料采用超声辅助柠檬酸法提取的果胶为高酯果胶,该果胶制备的凝胶随果胶质量分数增大,凝胶体系黏弹性越大且越稳定,持水性越强。当果胶和蔗糖质量分数分别为1.8%和68%时,控制pH2.7,制备的果胶凝胶其质构特性、流变性及时持水性最佳,此时凝胶最稳定,后期可考虑用作固态脂肪替代品。

参考文献:

- [1] CATALANO C, DI GUARDO M, DISTEFANO G, et al. Biotechnological approaches for genetic improvement of lemon (*Citrus limon* (L.) burm. f.) against *Mal secco* disease[J]. *Plants*, 2021, 10(5): 1002.
- [2] 黄莹星. 柠檬皮高酯果胶的分步提取及其性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
HUANG Yingxing. Step-by-step extraction of high-ester pectin from lemon peel and its properties[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [3] 容欧, 刘珊. 柠檬精深加工研究现状[J]. *现代食品*, 2019(4): 5-7, 11.
RONG Ou, LIU Shan. Research status of lemon deep processing[J]. *Modern Food*, 2019(4): 5-7, 11.
- [4] HSIEH C Y, CIOU J Y, SHIH M K, et al. Effect of lemon water vapor extract (LWAE) from lemon byproducts on the physiological activity and quality of lemon fermented products[J]. *International Journal of Food Properties*, 2021, 24(1): 264-276.

- [5] 刘江. 柠檬果胶工艺制备及其在调配型酸性乳饮料中的应用研究[D]. 成都: 西华大学, 2020.
LIU Jiang. Study on preparation of lemon pectin and its application in blended acidic milk beverage[D]. Chengdu: Xihua University, 2020.
- [6] YOO S H, FISHMAN M L, HOTCHKISS A T, et al. Viscometric behavior of high-methoxy and low-methoxy pectin solutions[J]. Food Hydrocolloids, 2006, 20(1): 62-67.
- [7] FIDALGO A, CIRIMINNA R, CARNAROGLIO D, et al. Eco-friendly extraction of pectin and essential oils from orange and lemon peels[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2016, 4(4): 2243-2251.
- [8] MASMOUDI M, BESBES S, CHAABOUNI M, et al. Optimization of pectin extraction from lemon by-product with acidified date juice using response surface methodology[J]. Carbohydrate Polymers, 2008, 74(2): 185-192.
- [9] LIU H, XU X M, GUO S D. Comparison of full-fat and low-fat cheese analogues with or without pectin gel through microstructure, texture, rheology, thermal and sensory analysis[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2008, 43(9): 1581-1592.
- [10] 赵锦妆. 高酯橘皮果胶脂肪替代物的研究及应用[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2019.
ZHAO Jinzhuang. Research and application on fat substitute from high ester citrus pectin[D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2019.
- [11] ISHWARYA S P, SANDHYA R, NISHA P. Advances and prospects in the food applications of pectin hydrogels[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 62(16): 4393-4417.
- [12] 刘江, 张诗琪, 雷激, 等. 柠檬皮渣干燥工艺探讨[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(7): 242-249.
LIU Jiang, ZHANG Shiqi, LEI Ji, et al. Research on drying processes of lemon pomace[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(7): 242-249.
- [13] 辛明, 李昌宝, 李杰民, 等. 超声辅助柠檬酸提取百香果果皮高酯果胶及其理化性质分析[J]. 食品工业科技, 2021, 42(4): 115-120.
XIN Ming, LI Changbao, LI Jiemin, et al. Optimization of extraction technology of high methoxyl pectin from passion fruit peel by ultrasound assisted with citric acid extraction and its physicochemical properties[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(4): 115-120.
- [14] 耿敬章, 陈志远. 橘皮果胶的提取工艺及性质研究[J]. 食品工业, 2013, 34(5): 82-85.
GENG Jingzhang, CHEN Zhiyuan. Study on extraction and property of pectin from orange peel[J]. The Food Industry, 2013, 34(5): 82-85.
- [15] 李加兴, 吴萍, 吴越, 等. 八月瓜果皮果胶提取工艺优化及其理化特性研究[J]. 食品工业科技, 2016, 37(1): 275-277, 283.
LI Jiaying, WU Ping, WU Yue, et al. Optimization of extraction conditions and analysis of physicochemical property of pectin from *Akebia trifoliata* peel[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(1): 275-277, 283.
- [16] 赵锦妆, 周梦舟, 王展, 等. 高酯橘皮果胶的凝胶特性[J]. 食品工业, 2019, 40(11): 162-166.
ZHAO Jinzhuang, ZHOU Mengzhou, WANG Zhan, et al. Gel properties of high ester *Citrus* pectin[J]. The Food Industry, 2019, 40(11): 162-166.
- [17] 刘贺. 以桔皮果胶为基质的脂肪替代物的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2007.
LIU He. Study on fat substitute based on orange peel pectin[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2007.
- [18] 刘义武, 孔昭华, 王碧. 乳酸提取柠檬果皮果胶的工艺[J]. 食品研究与开发, 2012, 33(9): 76-79.
LIU Yiwu, KONG Zhaohua, WANG Bi. Technology of pectin extraction from lemon peel using lactic acid[J]. Food Research and Development, 2012, 33(9): 76-79.
- [19] 高毅, 邓力, 金征宇. 对魔芋葡甘聚糖凝胶——一种新型食品模拟的研究[J]. 食品工业科技, 2007, 28(5): 107-109, 112.
GAO Yi, DENG Li, JIN Zhengyu. Study on a new food model system - konjac glucomannan gel[J]. Science and Technology of Food Industry, 2007, 28(5): 107-109, 112.
- [20] 文仁贵, 扶雄, 杨连生, 等. 脂肪替代品模拟脂肪的机理[J]. 中国油脂, 2006, 31(5): 28-31.
WEN Rengui, FU Xiong, YANG Liansheng, et al. Fat mimic mechanism of fat replacers[J]. China Oils and Fats, 2006, 31(5): 28-31.
- [21] 黎英, 周荣池, 刘夏蕾, 等. 百香果果皮果胶的理化及凝胶特性[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(12): 140-146.
LI Ying, ZHOU Rongchi, LIU Xialei, et al. Physicochemical and gel properties of pectin from passion fruit peel[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(12): 140-146.
- [22] 王梦楠. pH值对鱼明胶-果胶体系凝胶特性的影响[D]. 南昌: 南昌大学, 2020.
WANG Mengnan. Effect of pH value on gel properties of fish gelatin-pectin system[D]. Nanchang: Nanchang University, 2020.
- [23] YULIARTI O, HOON A L S, CHONG S Y. Influence of pH, pectin and Ca concentration on gelation properties of low-methoxyl pectin extracted from *Cyclea barbata* Miers[J]. Food Structure, 2017, 11: 16-23.
- [24] 胡娟, 金征宇. 菊糖作为脂肪替代品在植脂搅奶油中的应用[J]. 食品工业科技, 2007(9): 60-63.
HU Juan, JIN Zhengyu. Inulin as a fat substitute in whipped cream [J]. Science and Technology of Food Industry, 2007(9): 60-63.
- [25] 曾瑞琪, 张明政, 张甫生, 等. 高酯果胶对酸化大豆蛋白凝胶流变及质构特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(1): 113-120.
ZENG Ruiqi, ZHANG Mingzheng, ZHANG Fusheng, et al. Effects of high-ester pectin on rheological and texture properties of acidified soybean protein gel[J]. Food and Fermentation Industries, 2018, 44(1): 113-120.
- [26] 曾瑞琪, 苗钟化, 李苇舟, 等. 羧甲基纤维素钠对低酯果胶凝胶流变特性及凝胶形成的影响[J]. 食品与发酵工业, 2017, 43(8): 108-114.
ZENG Ruiqi, MIAO Zhonghua, LI Weizhou, et al. Effect of sodium-carboxy methyl cellulose on rheological properties and gel formation of low-methoxyl pectin[J]. Food and Fermentation Industries, 2017, 43(8): 108-114.
- [27] SALARBASHI D, TAJIK S, SHOJAEI-ALIABADI S, et al. Development of new active packaging film made from a soluble soybean polysaccharide incorporated *Zataria multiflora* Boiss and *Mentha pulegium* essential oils[J]. Food Chemistry, 2014, 146: 614-622.
- [28] 刘贺, 刘昊东, 郭晓飞, 等. 大豆皮低酯-高酯复合果胶凝胶的持水能力及力学、光学特性[J]. 食品科学, 2010, 31(19): 111-114.
LIU He, LIU Haodong, GUO Xiaofei, et al. Water-holding capacity and mechanical and optical characteristics of soy hull low and high methoxyl pectin complex gel[J]. Food Science, 2010, 31(19): 111-114.