

# 苹果果胶改善马铃薯淀粉的糊化和流变特性

曾琼<sup>1</sup>, 成健<sup>1</sup>, 李丛冠<sup>1</sup>, 张智怡<sup>1</sup>, 刘云飞<sup>2\*</sup>

(1. 江西省检验检测认证总院, 江西南昌 330052) (2. 江西省科学院应用化学研究所, 江西南昌 330096)

**摘要:** 马铃薯淀粉黏度高、热稳定性差和抗剪切性能低的特点使其在食品加工中的应用受到限制。该研究将马铃薯淀粉与苹果果胶复配, 制备不同果胶质量分数的淀粉-果胶体系, 考察苹果果胶对马铃薯淀粉的糊化和流变特性的改善作用。结果表明添加苹果果胶显著降低了马铃薯淀粉的峰值黏度(4 400 cP至849 cP)、谷值黏度(1 210 cP至141 cP)、终值黏度(1 639 cP至941 cP)和崩解值(3 157 cP至208 cP), 增加了峰值时间(4.93 min至9.71 min)和糊化温度(65.15℃至68.87℃)。同时, 苹果果胶降低了马铃薯淀粉糊的稠度系数K(41.18 Pa·s<sup>n</sup>至15.23 Pa·s<sup>n</sup>), 增加了流体指数(0.41至0.52)和抗剪切能力。总之, 相比于纯马铃薯淀粉, 马铃薯淀粉-苹果果胶体系具有更低的黏度, 更好的热稳定性、抗老化特性和抗剪切能力, 因此苹果果胶有效改善了马铃薯淀粉的糊化和流变特性。

**关键词:** 苹果果胶; 马铃薯淀粉; 糊化特性; 流变特性; 黏弹性

文章编号: 1673-9078(2023)07-75-81

DOI: DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.7.1486

## Improving the Pasting and Rheological Properties of Potato Starch Using Apple Pectin

ZENG Qiong<sup>1</sup>, CHENG Jian<sup>1</sup>, LI Congguan<sup>1</sup>, ZHANG Zhiyi<sup>1</sup>, LIU Yunfei<sup>2\*</sup>

(1. Jiangxi General Institute of Testing and Certification, Nanchang 330052, China)

(2. Institute of Applied Chemistry, Jiangxi Academy of Sciences, Nanchang 330096, China)

**Abstract:** It is challenging to use potato starch in food processing due to its high viscosity, poor stability, and low shear resistance. In this study, potato starch was mixed with apple pectin to prepare starch-pectin mixtures with varying pectin mass fractions to investigate the effects of apple pectin on the pasting and rheological properties of potato flour. Addition of apple pectin significantly decreased the peak (from 4 400 to 849 cP), minimum (from 1 210 to 141 cP), final (from 1 639 to 941 cP), and breakdown (from 3 157 to 208 cP) viscosities of potato starch and increased its time of peak viscosity (from 4.93 to 9.71 min) and pasting temperature (from 65.15 °C to 68.87 °C). In addition, apple pectin decreased the consistency coefficient K of potato starch (from 41.18 to 15.23 Pa·s<sup>n</sup>) and increased its flow behavior index (from 0.41 to 0.52) and shear resistance. In summary, potato starch-apple pectin mixtures have lower viscosity, higher thermal stability, better aging resistance, and greater shear resistance than pure potato starch. Therefore, apple pectin effectively improves the pasting and rheological properties of potato starch.

**Key words:** apple pectin; potato flour; pasting properties; rheological properties; viscoelasticity

引文格式:

曾琼,成健,李丛冠,等.苹果果胶改善马铃薯淀粉的糊化和流变特性[J].现代食品科技,2023,39(7):75-81.

ZENG Qiong, CHENG Jian, LI Congguan, et al. Improving the pasting and rheological properties of potato starch using apple pectin [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(7): 75-81.

马铃薯是世界第四大主食, 其淀粉常用作食品配料, 起到增稠、稳定、胶凝、填充和保水等作用<sup>[1]</sup>。

收稿日期: 2022-11-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(32260606); 江西省重点研发计划项目(20202BBFL63033)

作者简介: 曾琼(1973-), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 食品生物大分子改性, E-mail: 410854569@qq.com

通讯作者: 刘云飞(1989-), 男, 博士, 助理研究员, 研究方向: 淀粉结构和功能性质, E-mail: liuyunfei@jxas.ac.cn

天然马铃薯淀粉颗粒尺寸较大, 受热糊化吸水后的膨胀能力较强, 导致其糊化后黏度较高<sup>[2]</sup>。此外, 膨胀后的马铃薯淀粉颗粒脆性较高, 使其受到水热作用和剪切作用时更容易出现剪切变稀(黏度降低)的现象<sup>[3]</sup>。马铃薯淀粉的以上性质属于其糊化和流变特性, 淀粉的糊化特性是其加工特性的基础, 而流变特性是淀粉及淀粉基产品作为涂抹食品的一个重要性质。然而, 在食品加工中, 黏度高、热稳定性差和抗剪切性能低的马铃薯淀粉的利用受到限制<sup>[4]</sup>。因此, 改善马

铃薯淀粉的糊化和流变特性, 以确保其更好满足工业的各种需求是目前的研究热点。

淀粉中复配亲水胶体是改变天然淀粉的糊化和流变特性的有效方法<sup>[5]</sup>。众多研究表明, 添加各种亲水胶体可以改善天然淀粉的理化性质<sup>[6,7]</sup>。刺槐豆胶的添加可抑制淀粉颗粒的糊化, 但增加淀粉糊的黏度<sup>[8]</sup>。添加阿拉伯胶对小麦或马铃薯淀粉的黏度和糊化特性没有显著影响<sup>[9]</sup>。果胶是亲水胶体中的一种阴离子多糖, 广泛分布于大多数植物的细胞壁和中间薄片<sup>[10]</sup>。果胶在改善淀粉性能方面有少量研究。Sasaki 等<sup>[11]</sup>研究发现添加柑橘果胶对高直链淀粉的表观黏度影响小, 但会增加马铃薯淀粉的黏度<sup>[12]</sup>。Ma 等<sup>[13]</sup>报道高浓度的果胶(来源不明)增加了玉米淀粉的峰值黏度, 但低浓度的果胶表现出相反的趋势。同时, 本课题组前期还报道了不同结构的柑橘果胶对大米淀粉的糊化性有显著影响<sup>[14]</sup>。苹果果胶和柑橘果胶是目前商业市场上用量较大的果胶, 但是苹果果胶和淀粉相互作用的相关研究较少, 苹果果胶能否与柑橘果胶一样具有改善淀粉的加工特性的功能, 以及如何改善马铃薯淀粉的糊化和流变特性尚不明确。

因此, 本研究的目的是(1)通过快速黏度分析仪评估苹果果胶对马铃薯淀粉的糊化特性的影响,(2)通过流变仪分析苹果果胶对马铃薯淀粉的流体性质和黏弹性特性的影响。本研究的结果将为苹果果胶和马铃薯淀粉之间的相互作用的研究提供新的思路, 并有助于马铃薯淀粉基食品的开发。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

#### 1.1.1 材料与试剂

马铃薯淀粉(S4251)购自 Sigma 公司(中国上海), 其水分、脂质、蛋白质、灰分和直链淀粉的质量分数分别为 12.45%、0.01%、0.52%、0.33%和 26.88%。苹果果胶(76282)购自 Sigma 公司(中国上海), 其甲酯化程度为 72.58%。马铃薯淀粉和苹果果胶放置于干燥器内保存待用。试验所用水均为去离子水。

#### 1.1.2 主要仪器设备

EL104 电子天平, 上海梅特勒-托利多仪器有限公司; RVA-TEC 快速黏度分析仪, 瑞典 Perten 公司; MCR302 流变仪, 奥地利 Anton Paar 公司。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 样品制备

制备五种不同果胶质量分数(占淀粉干基质量的

0%、0.5%、1%、5%和 10%)的淀粉-果胶复配体系悬浮液, 即其淀粉和果胶质量比例(干基)为: 100:0、99.5:0.5、99:1、95:5 和 90:10。详细地, 分别称取 0.00、0.08、0.16、0.80 和 1.60 g 苹果果胶完全溶解在 250 mL 去离子水中。然后, 分别称取 16.00、15.92、15.84、15.20 和 14.40 g 马铃薯淀粉分散在上述果胶水溶液中, 得到淀粉-果胶复配体系悬浮液, 备用。

#### 1.2.2 糊化特性测定

使用快速黏度分析仪分析淀粉-果胶复配体系糊化过程的特征黏度和黏度曲线。采用仪器自带的“标准 2”温度程序用于控制淀粉-果胶复配体系糊化。具体程序如下: 选取 1.2.1 中制备的悬浮液 25 mL 置于铝筒中并用塑料浆搅拌均匀, 在 50 °C 下保持 60 s, 然后在 450 s 内升至 95 °C 并保持 300 s。最后, 以相同的速率冷却至 50 °C 并保持 120 s, 得到最终的淀粉糊。塑料浆叶的转速在前 10 s 内为 960 r/min, 然后保持在 160 r/min。记录糊化过程的糊化特性参数, 包括峰值黏度、谷值黏度、崩解值、回生值、峰值时间和糊化温度。

#### 1.2.3 流变特性测定

##### 1.2.3.1 温度时间扫描

温度时间扫描是根据 Kaur 等<sup>[15]</sup>描述的程序修改的。吸取适量淀粉-果胶复配体系悬浮液到流变仪的平台, 降低转子, 并用硅油覆盖样品的边缘(减少水分蒸发损失)。选择平板转子(PP50,  $d=25$  mm), 测量间隙 1 mm。在测试温度时间扫描之前, 实验样品需要先在 1 Hz 的频率下进行应变扫描(0.01%~10%)实验, 确定浆料的线性黏弹性区域(结果未显示)。温度时间扫描的应变和频率分别设置为 1%和 1 Hz。将淀粉-果胶复配体系悬浮液从 25 °C 加热至 50 °C 并保持 1 min, 然后加热至 95 °C 并保持 5 min。随后, 冷却至 50 °C 并保持 2 min, 继续冷却至 4 °C 并保持 60 min, 加热和冷却速率均为 5 °C/min。

##### 1.2.3.2 频率扫描

将 1.2.2 节所述制备淀粉-果胶凝胶立即转移至流变测量平台, 选择平板转子(PP50,  $d=25$  mm), 测量间隙 1 mm。并在 25 °C 下平衡 5 min 后测定。频率扫描测量(0.062 8~62.8 rad/s)在线性黏弹性区域中以 1%的恒定应变进行。将流变学参数(储能模量( $G'$ )和损耗模量( $G''$ ))确定为频率的函数。

##### 1.2.3.3 静态剪切扫描

将 1.2.2 节所述制备淀粉-果胶凝胶立即转移至流变测量平台, 选择平板转子(PP50,  $d=25$  mm), 测量间隙 1 mm。并在 25 °C 下平衡 5 min 后测定。根据 Sikora<sup>[16]</sup>的方法进行静态剪切扫描测量。试验条件如下: 剪切速率从 0.1 s<sup>-1</sup> 线性增加至 300 s<sup>-1</sup>, 并且所得



到的曲线用幂定律 (Power law) 模型进行拟合<sup>[17]</sup>, 模型公式为:

$$\tau = K \times \gamma^n \quad (1)$$

式中:

$\tau$ ——剪切应力, Pa;

$K$ ——稠度系数, Pa s<sup>n</sup>;

$\gamma$ ——剪切速率, s<sup>-1</sup>;

$n$ ——流体指数, 无量纲。

#### 1.2.3.4 剪切结构恢复扫描

将 1.2.2 节所述制备淀粉-果胶凝胶立即转移至流变测量平台, 选择平板转子 (PP50,  $d=25$  mm), 测量间隙 1 mm。并在 25 °C 下平衡 5 min 后测定。通过修改 Wang 等<sup>[18]</sup>的程序进行剪切结构恢复测量。试验条件如下: (1) 施加 1 s<sup>-1</sup> 的恒定剪切速率 120 s, (2) 施加 300 s<sup>-1</sup> 的恒定剪切速率 60 s, (3) 施加 1 s<sup>-1</sup> 的恒定剪切速率 180 s。结构恢复率的值为第三个和第一个测量步骤中的平均表观黏度的百分比。

### 1.3 数据分析

所有试验至少重复三次, 结果以均值±标准差表示。使用 SPSS 26.0 统计软件 (美国 IBM) 进行统计分析。使用邓肯的事后检验的单因素方差分析 (ANOVA) 来比较用含有不同果胶质量分数的马铃薯淀粉之间的差异, 置信度为 0.05。

## 2 结果与分析

### 2.1 糊化特性

不同果胶质量分数的马铃薯淀粉-苹果果胶复配体系的糊化特性曲线如图 1 所示, 糊化特性参数如表 1 所示。相较于纯马铃薯淀粉, 添加质量分数低于 10% 的苹果果胶后, 马铃薯淀粉的峰值黏度 (从 4 400 cP 降低至 849 cP)、谷值黏度 (从 1 210 cP 降低至 141 cP)、终值黏度 (从 1 639 cP 降低至 941 cP) 和崩解值 (从 3 157 cP 降低至 208 cP) 显著降低 ( $P<0.05$ ), 且该影响随着果胶质量分数的增加而增加, 表明苹果果胶显著降低马铃薯淀粉体系糊化后的黏度, 并且提高体系的热稳定性。马铃薯淀粉的黏度降低可能是由于带负电的苹果果胶和同样带负电的马铃薯淀粉之间的静电排斥作用, 负离子之间的离子排斥削弱了带电聚合物分子之间的联系<sup>[19]</sup>。其他研究也证明带负电的亲水胶体 (卡拉胶、海藻酸盐、蒺藜籽多糖和黄原胶等) 大幅度降低了马铃薯淀粉的峰值黏度<sup>[20,21]</sup>。此外, 添加质量分数 5% 和 10% 的苹果果胶的马铃薯淀粉之间的黏度无显著差异 ( $P>0.05$ ), 两者的糊化特性曲线

几乎重合。类似的, Cai 等<sup>[19]</sup>发现质量分数低于 1.25% 的黄原胶显著降低了马铃薯淀粉的峰值黏度, 从 4 500 cP 左右降低至 1 300 cP 左右, 而质量分数在 1.25% 到 10% 之间的黄原胶对马铃薯淀粉的峰值黏度 (保持在 1 300 cP 左右) 没有显著影响。降低马铃薯淀粉糊化后的峰值黏度可以节省糊化过程的能耗, 在软糖等食品中起到凝胶、增稠等作用。

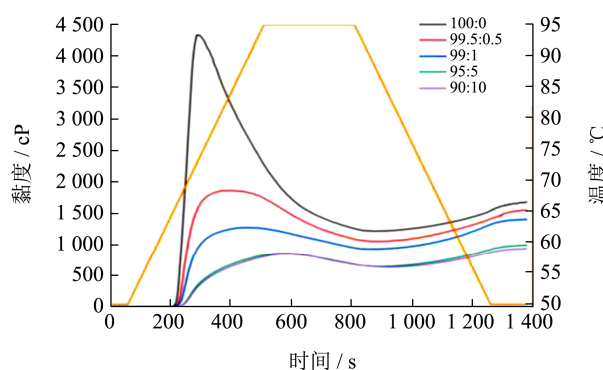


图 1 不同果胶质量分数的马铃薯淀粉-苹果果胶复配体系的糊化特性曲线

Fig.1 The viscosity profiles of potato starch and apple pectin mixed pastes with different pectin mass ratios

注: 果胶不同质量分数分别为 0.0%、0.5%、1%、5% 和 10%。下同。

同样, 马铃薯淀粉的糊化峰值时间 (从 4.93 min 增加至 9.71 min) 和糊化温度 (从 65.15 °C 增加至 68.87 °C) 随苹果果胶质量分数的增加而显著增加 ( $P<0.05$ ), 表明苹果果胶可以抑制马铃薯淀粉颗粒的膨胀。在果胶对大麦淀粉的研究中也发现了类似的变化, 果胶的存在使大麦淀粉的峰值时间从 5.79 min 增加至 6.57 min, 糊化温度从 89.60 °C 增加至 92.46 °C<sup>[22]</sup>。果胶的强结合水能力会破坏围绕淀粉颗粒的水合膜并与淀粉竞争自由水, 因此苹果果胶可能通过限制水的渗入来抑制马铃薯淀粉颗粒的膨胀。此外, 糊化过程渗出的淀粉通过分子间氢键与苹果果胶相互作用或者链缠结, 这些纠缠的分子链围绕淀粉颗粒限制其膨胀。果胶质量分数为 5% 和 10% 的淀粉-果胶复配体系的峰值时间无显著差异 ( $P>0.05$ ), 表明质量分数为 5% 的苹果果胶足以完全覆盖在马铃薯淀粉颗粒表面, 最大程度抑制马铃薯淀粉颗粒在糊化过程中的膨胀。回生值是淀粉体系短期回生的重要指标, 苹果果胶的添加显著降低纯淀粉的回生值 ( $P<0.05$ ), 从 428 cP 降低至 301 cP, 这是因为苹果果胶与淀粉竞争水分以及果胶与渗透出的直链淀粉通过氢键结合, 抑制直链淀粉重排, 从而降低回生值, 抑制短期回生<sup>[23]</sup>。以上结果表明, 添加苹果果胶改善了马铃薯淀粉的糊化特性, 降低了其黏度值, 抑制了其糊化和短期老化。

表 1 不同果胶质量分数的马铃薯淀粉-苹果果胶复配体系的糊化特性

**Table 1 Pasting properties of potato starch and apple pectin mixed pastes with different pectin mass ratios**

淀粉-果胶比例	峰值黏度 /( $\times 10^2$ cP)	谷值黏度 /( $\times 10^2$ cP)	崩解值 /( $\times 10^2$ cP)	终值黏度 /( $\times 10^2$ cP)	回生值 /( $\times 10^2$ cP)	峰值时间 /min	糊化温度 / $^{\circ}$ C
100:0	44.00 $\pm$ 0.60 <sup>a</sup>	12.10 $\pm$ 0.13 <sup>a</sup>	31.57 $\pm$ 0.62 <sup>a</sup>	16.39 $\pm$ 0.44 <sup>a</sup>	4.28 $\pm$ 0.31 <sup>c</sup>	4.93 $\pm$ 0.12 <sup>d</sup>	65.15 $\pm$ 0.00 <sup>e</sup>
99.5:0.5	18.56 $\pm$ 0.17 <sup>b</sup>	10.79 $\pm$ 0.25 <sup>b</sup>	7.78 $\pm$ 0.28 <sup>b</sup>	15.78 $\pm$ 0.41 <sup>a</sup>	5.00 $\pm$ 0.18 <sup>a</sup>	6.73 $\pm$ 0.17 <sup>c</sup>	65.90 $\pm$ 0.00 <sup>d</sup>
99:1	12.15 $\pm$ 0.58 <sup>c</sup>	9.06 $\pm$ 0.29 <sup>c</sup>	3.09 $\pm$ 0.30 <sup>c</sup>	13.73 $\pm$ 0.34 <sup>b</sup>	4.67 $\pm$ 0.06 <sup>b</sup>	7.73 $\pm$ 0.27 <sup>b</sup>	66.72 $\pm$ 0.03 <sup>c</sup>
95:5	8.58 $\pm$ 0.08 <sup>d</sup>	6.72 $\pm$ 0.29 <sup>d</sup>	1.86 $\pm$ 0.29 <sup>d</sup>	10.08 $\pm$ 0.27 <sup>c</sup>	3.36 $\pm$ 0.02 <sup>d</sup>	9.51 $\pm$ 0.03 <sup>a</sup>	68.60 $\pm$ 0.22 <sup>b</sup>
90:10	8.49 $\pm$ 0.05 <sup>d</sup>	6.41 $\pm$ 0.07 <sup>d</sup>	2.08 $\pm$ 0.04 <sup>d</sup>	9.41 $\pm$ 0.08 <sup>d</sup>	3.01 $\pm$ 0.02 <sup>e</sup>	9.71 $\pm$ 0.17 <sup>a</sup>	68.87 $\pm$ 0.20 <sup>a</sup>

注: 同列不同字母表示具有显著差异 ( $P < 0.05$ )。

表 2 不同果胶质量分数的马铃薯淀粉-苹果果胶复配体系储能模量随温度和时间变化曲线的糊化特性

**Table 2 Pasting properties of storage modulus against temperature and time of potato starch and apple pectin mixed pastes with different pectin mass ratios**

淀粉-果胶比例	峰值 G'/Pa	谷值 G'/Pa	崩解值/Pa	终值 G'/Pa	回生值/Pa	峰值时间/( $\times 10^2$ s)	糊化温度/ $^{\circ}$ C
100:0	291.09	75.01	216.09	80.05	5.09	6.75	65.05
99.5:0.5	123.06	42.79	80.32	45.85	3.15	6.90	65.89
99:1	106.09	38.77	67.38	41.72	3.06	7.05	66.78
95:5	69.21	22.34	46.90	24.29	1.96	7.20	68.36
90:10	62.20	21.65	40.61	23.00	1.51	7.35	68.87

## 2.2 流变特性

### 2.2.1 温度时间扫描

淀粉回生在流变学特性中表现为储能模量 ( $G'$ ) 升高。在回生的初始阶段 (糊化后的几小时内), 主要为渗出的直链淀粉分子间进行定向迁移, 淀粉分子间和淀粉分子-水之间通过氢键结合, 形成三维凝胶网状结构, 导致  $G'$  快速升高<sup>[24]</sup>。图 2 表示不同质量分数果胶的淀粉-果胶复配体系悬浮液通过模拟糊化过程后, 降温至  $4^{\circ}\text{C}$  并保持 3 600 s, 体系的  $G'$  与时间的关系变化。如图 2 所示, 在  $4^{\circ}\text{C}$  时, 复配体系及纯淀粉的  $G'$  随着时间逐渐增加, 复配体系的  $G'$  曲线远低于纯淀粉的曲线, 且  $G'$  随着果胶质量分数的增加而下降, 原因可能是果胶覆盖在淀粉颗粒表面, 阻止了直链淀粉的渗出, 降低了直链淀粉分子间定向迁移概率, 从而抑制了淀粉糊化后凝胶三维网络状结构的形成, 显著降低  $G'$ 。此外, 2 400 s 后复配体系  $G'$  的增加速度 (直线斜率) 也小于纯淀粉体系  $G'$  的增加速度, 这都表明果胶的添加可以抑制淀粉的短期回生, 这对解决食品市场上一些淀粉制品短期内回生问题有一定参考意义。如表 2 所示, 从模拟糊化过程的  $G'$  变化中可知, 苹果果胶的添加使马铃薯淀粉糊化过程储能模量的峰值、谷值、崩解值、终值和回生值降低, 其中峰值  $G'$  从 291.09 Pa 降低至 62.20 Pa、谷值  $G'$  从 75.01 Pa 降低至 21.65 Pa、崩解值从 216.09 Pa 降低至 40.61 Pa、终值  $G'$  从 80.05 Pa 降低至 23 Pa、回生值从 5.09 Pa 降低至

1.51 Pa, 而使峰值时间 (从 675 s 增加至 735 s) 和糊化温度 (从  $65.05^{\circ}\text{C}$  增加至  $68.87^{\circ}\text{C}$ ) 增加, 这与第 2.1 节糊化特性结果的变化趋势一致。综上所述, 苹果果胶的添加有利于降低马铃薯淀粉短时间内的回生值, 有利于保障马铃薯淀粉制品在短期内的品质。

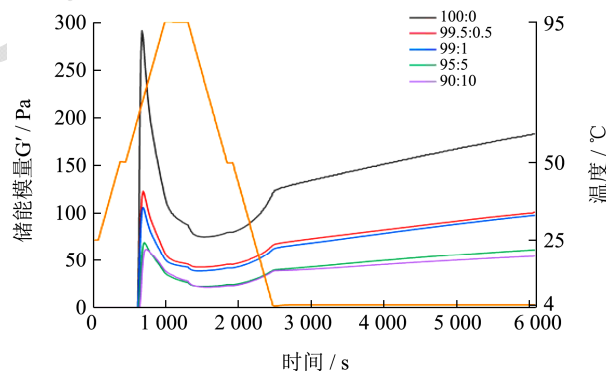


图 2 不同果胶质量分数的马铃薯淀粉-苹果果胶复配体系储能模量随温度和时间变化曲线

**Fig.2 The curves of storage modulus against temperature and time of potato starch and apple pectin mixed pastes with different pectin mass ratios**

### 2.2.2 频率扫描

动态流变特性是指在交变的应力 (或应变) 作用下, 物料所表现出的力学响应规律, 对食品加工特性和质量控制具有很大应用价值, 频率扫描可以在不破坏凝胶结构的前提下测定样品的储能模量 ( $G'$ ) 和损耗模量 ( $G''$ )。  $G'$  为物料在形变过程中由于弹性形变而储存的能量, 值越大表明样品受到外力形变程度越小;

$G'$ 为具有黏弹性的物料在发生形变时,由于不可逆的黏性形变而损耗的能量大小,反映物质黏性大小,值越大越易流动<sup>[25]</sup>。从图3可以得知,随着频率增加,淀粉体系的 $G'$ 和 $G''$ 逐渐增加,而且在同一频率下, $G'$ 明显大于 $G''$ ,且二者不相交,因此纯淀粉和淀粉-果胶复配体系凝胶都以弹性性质为主,这是聚合物典型的凝胶网络动态黏弹性流变图谱<sup>[26]</sup>。在极低角速度下(小于1 rad/s),复配体系的 $G'$ 和 $G''$ 随着果胶质量分数的增加的变化趋势均为先增加后降低(最大为质量分数1%果胶含量体系),且质量分数为10%的果胶使复配体系的 $G'$ 和 $G''$ 低于纯淀粉。然而,在高角速度下(大于10 rad/s),复配体系的 $G'$ 和 $G''$ 均大于纯淀粉,且质量分数为1%果胶的复配体系仍为最高,这可能是由于复配体系凝胶形成后,过量的果胶对体系的润滑作用,会降低体系的弹性。以上结果表明,与纯马铃薯淀粉相比,苹果果胶改善了马铃薯淀粉的黏弹性。

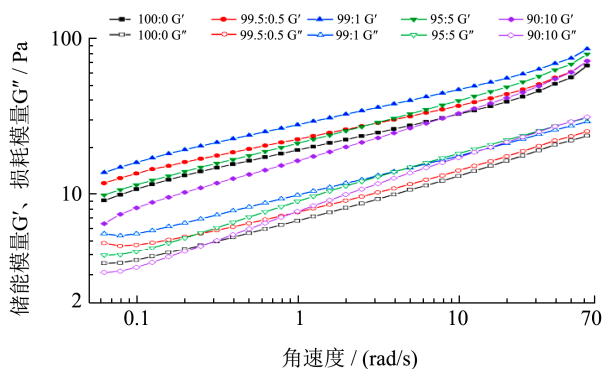


图3 不同果胶质量分数的马铃薯淀粉-苹果果胶复配体系的频率扫描曲线

Fig.3 The frequency sweep curves of potato starch and apple pectin mixed pastes with different pectin mass ratios

### 2.2.3 静态剪切扫描

静态流变学是反映样品结构随剪切速率改变的变化规律。如图4可知,随着剪切速率的增加,所有淀粉凝胶在不同剪切速率状态下,剪切应力随着剪切速率的增大而不断增加。同时,随着果胶质量分数的增

加,剪切应力逐渐增加,且质量分数到达5%以后,下降不再显著,与糊化特性曲线变化趋势一致,表明果胶的添加可以使马铃薯淀粉糊形成的三维网络结构更加刚硬,抗剪切能力更强,提高了淀粉凝胶体系的抗剪切能力。由表2可知,静态剪切扫描曲线的拟合相关系数 $R^2$ 均大于0.99,这说明了纯马铃薯淀粉及其与苹果果胶复配凝胶体系的剪切结果与幂定律(Power law)模型有着较高的拟合度,具有一定的指导意义。 $K$ 值与增稠能力有关, $K$ 值越大,增稠效果越好<sup>[27]</sup>。添加果胶后,马铃薯混合体系的稠度系数 $K$ 不断降低(从41.18 Pa·s<sup>n</sup>降低至15.23 Pa·s<sup>n</sup>),且随着果胶质量分数的增加而不断降低,表明复配苹果果胶的马铃薯淀粉的增稠作用降低。同时,添加苹果果胶后,所有凝胶的流体指数 $n$ (0.41~0.52)均小于1,这表明纯淀粉和混合体系都为假塑性流体<sup>[28]</sup>,表现为剪切稀化行为。凝胶体系的 $n$ 值随着果胶质量分数的增加而增加,表明果胶降低了淀粉凝胶的假塑性。综上所述,与纯马铃薯淀粉相比,添加苹果果胶可以降低马铃薯淀粉的黏稠度。

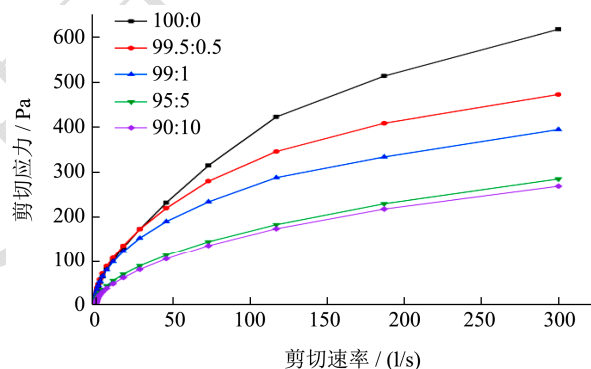


图4 不同果胶质量分数的马铃薯淀粉-苹果果胶复配体系的静态剪切性质

Fig.4 The steady shear test: flow behavior curves of potato starch and apple pectin mixed pastes with different pectin mass ratios

表3 不同果胶质量分数的马铃薯淀粉-苹果果胶复配体系的静态剪切性质拟合参数和剪切结构恢复率

Table 3 Steady shear test: flow behavior curve and in-shear structure recovery parameters of potato starch and apple pectin mixed pastes with different pectin mass ratios

淀粉-果胶比例	稠度系数 $K$ /(Pa·s <sup>n</sup> )	流体指数 $n$	相关性系数 $R^2$	结构恢复率/%
100:0	41.18	0.41	0.99	91.91
99.5:0.5	38.38	0.43	0.99	88.73
99:1	32.32	0.49	0.99	87.57
95:5	17.82	0.51	0.99	84.57
90:10	15.23	0.52	0.99	84.82



### 2.2.4 剪切结构恢复扫描

糊化后淀粉凝胶的结构在高速剪切作用下有一定的破坏,当剪切速率逐渐降低时,结构会逐渐恢复至初始状态<sup>[29]</sup>。如图5所示,在初始的低速剪切开始时,纯马铃薯淀粉及其与苹果果胶复配体系糊化后凝胶的黏度均先急速下降再趋于平稳。在经历高速剪切和低速剪切后,体系的黏度先急剧下降至2 Pa·s左右再恢复至初始黏度,表明淀粉凝胶结构被破坏后回到有一定程度的恢复。结构恢复率表明了淀粉糊结构被破坏后的恢复情况。从表3可知,相比于纯淀粉的结构恢复率(91.91%),添加果胶使淀粉糊结构恢复降低,果胶质量分数最高时(10%)的结构恢复率为84.82%,这可能是果胶的存在抑制了淀粉凝胶网络结构的恢复。Liu等<sup>[20]</sup>同样发现柑橘果胶对马铃薯淀粉糊的结构恢复率存在类似的现象,随着柑橘果胶质量分数的增加(0%~1.5%),马铃薯淀粉糊的结构恢复率从84.45%降低至78.01%。以上结果表明,与纯马铃薯淀粉相比,添加苹果果胶会抑制马铃薯淀粉的凝胶网络结构的恢复,且随着苹果果胶质量分数的增加而增加。

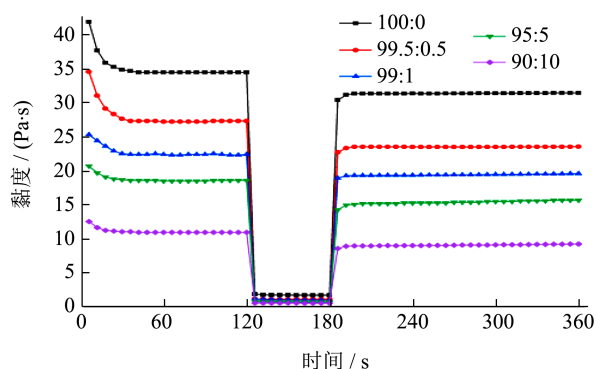


图5 不同果胶质量分数的马铃薯淀粉-苹果果胶复配体系的剪切结构恢复曲线

Fig.5 The in-shear structure recovery curves of potato starch and apple pectin mixed pastes with different AP ratios

## 3 结论

本研究的目的是探究苹果果胶对马铃薯淀粉的糊化和流变特性的影响,结果表明带负电荷和具有较强结合水能力的苹果果胶显著影响了马铃薯淀粉的糊化性能和糊化后凝胶的流变性能。由于两种带负电的聚合物之间的静电排斥,苹果果胶使马铃薯淀粉糊的黏度降低。随着果胶含量的增加,淀粉-果胶复配体系糊化后的黏度也随之降低。通过降低在热处理过程中马铃薯淀粉的黏度和改善在室温下凝胶的黏弹性,将降低马铃薯淀粉在糊化加工过程中的能耗。同时,苹果果胶较强的结合水能力及其与马铃薯直链淀粉之间的相互作用降低了马铃薯淀粉短期回生的程度,延缓了

回生速率,有助于抑制马铃薯淀粉食品的脱水收缩变硬,延长货架期。苹果果胶可以有效改善马铃薯淀粉在食品应用中的加工特性。

## 参考文献

- [1] Bertoft E, Blennow A. Structure of Potato Starch, *Advances in Potato Chemistry and Technology* [M]. Academic Press, 2016: 57-73.
- [2] Hermansson A M, Svegmarm K. Developments in the understanding of starch functionality [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 1996, 7(11): 345-353.
- [3] Kaur L, Singh J, Singh N. Effect of cross-linking on some properties of potato (*Solanum tuberosum* L.) starches [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2006, 86(12): 1945-1954.
- [4] Choi H S, Kim H S, Park C S, et al. Ultra high pressure (UHP)-assisted acetylation of corn starch [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2009, 78(4): 862-868.
- [5] 郭晓娟,刘成梅,吴建永,等.亲水胶体对淀粉理化性质影响的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2016, 37(6): 367-376.
- [6] Bemiller J N. Pasting, paste, and gel properties of starch-hydrocolloid combinations [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2011, 86(2): 386-423.
- [7] Mahmood K, Kamilah H, Shang P L, et al. A review: Interaction of starch/non-starch hydrocolloid blending and the recent food applications [J]. *Food Bioscience*, 2017, 19: 110-120.
- [8] Sikora M, Dobosz A, Krystyan M, et al. Thixotropic properties of the normal potato starch-Locust bean gum blends [J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2017, 75: 590-598.
- [9] Varela M S, Navarro A S, Yamul D K. Effect of hydrocolloids on the properties of wheat/potato starch mixtures [J]. *Starch-Stärke*, 2016, 68(7-8): 753-761.
- [10] Chen J, Liu W, Liu C M, et al. Pectin modifications: a review [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2015, 55(12): 1684-1698.
- [11] Sasaki T, Kohyama K. Influence of non-starch polysaccharides on the in vitro digestibility and viscosity of starch suspensions [J]. *Food Chemistry*, 2012, 133(4): 1420-1426.
- [12] Sasaki T, Sotome I, Okadome H. *In vitro* starch digestibility and *in vivo* glucose response of gelatinized potato starch in the presence of non-starch polysaccharides [J]. *Starch-Stärke*, 2015, 67(5-6): 415-423.

- [13] Ma Y S, Pan Y, Xie Q T, et al. Evaluation studies on effects of pectin with different concentrations on the pasting, rheological and digestibility properties of corn starch [J]. Food Chemistry, 2019, 274: 319-323.
- [14] Luo S J, Chen R Y, Huang L, et al. Investigation on the influence of pectin structures on the pasting properties of rice starch by multiple regression [J]. Food Hydrocolloids, 2017, 63: 580-584.
- [15] Kaur L, Singh J, Singh H, et al. Starch-cassia gum interactions: A microstructure-Rheology study [J]. Food Chemistry, 2008, 111(1): 1-10.
- [16] Sikora M, Adamczyk G, Krystyjan M, et al. Thixotropic properties of normal potato starch depending on the degree of the granules pasting [J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 121: 254-264.
- [17] Steffe J F. Rheological Methods in Food Process Engineering [M]. Freeman Press, 1996: 72-73.
- [18] Wang B, Li D, Wang L J, et al. Anti-thixotropic properties of waxy maize starch dispersions with different pasting conditions [J]. Carbohydrate Polymers, 2010, 79(4): 1130-1139.
- [19] Cai X R, Hong Y, Gu Z B, et al. The effect of electrostatic interactions on pasting properties of potato starch/xanthan gum combinations [J]. Food Research International, 2011, 44(9): 3079-3086.
- [20] Bemiller J N, Shi X H. Effects of food gums on viscosities of starch suspensions during pasting [J]. Carbohydrate Polymers, 2002, 50(1): 7-18.
- [21] Liu C M, Zhang H B, Chen R Y, et al. Effects of creeping fig seed polysaccharide on pasting, rheological, textural properties and in vitro digestibility of potato starch [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 118: 106810.
- [22] Dangi N, Yadav B S, Yadav R B. Pectin and its acid hydrolysate for the modification of hydration, pasting, thermal and rheological properties of barley starch [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 152(1): 969-980.
- [23] 刘敏,赵欣,阚建全,等.黄原胶对莲藕淀粉糊化性质及流变与质构特性的影响[J].食品科学,2018,39(6):45-50.
- [24] Nagano T, Tamaki E, Funami T. Influence of guar gum on granule morphologies and rheological properties of maize starch [J]. Carbohydrate Polymers, 2008, 72(1): 95-101.
- [25] Witczak T, Witczak M, Ziobro R. Effect of inulin and pectin on rheological and thermal properties of potato starch paste and gel [J]. Journal of Food Engineering, 2014, 124: 72-79.
- [26] Zhou DN, Zhang B, Chen B, et al. Effects of oligosaccharides on pasting, thermal and rheological properties of sweet potato starch [J]. Food Chemistry, 2017, 230: 516-523.
- [27] 尚琪,赵保堂,杨富民,等.黄原胶与瓜尔豆胶复配对藜麦汁流变学特性的影响[J].食品与发酵科技,2022,58(3):64-73.
- [28] 陈丽叶,许仁杰,林艳秋,等.海藻酸钠与  $\kappa$ -卡拉胶复配胶体的流变特性研究[J].现代食品,2022,28(10):191-196.
- [29] 林东. 槟榔芋淀粉与卡拉胶复配体系的研究与应用[D].福州:福建农林大学,2018.