

# 酸奶对玉米淀粉流变特性的影响

付雪侠, 戴丽媛, 曾 承, 季香青, 杨定宽, 李晓磊\*, 李 丹\*

(长春大学农产品加工技术吉林省普通高等学校重点实验室, 长春 130022)

**摘 要: 目的** 考察含有活性乳酸菌的酸奶对淀粉黏弹特性的影响。**方法** 以玉米淀粉为原料, 分别加入 1%(V/V)的酸奶, 并在 37 °C 保温 1 h; 用流变仪研究发酵后玉米淀粉的流变学性质。**结果** 剪切流变曲线服从 Herschel-Bulkley 模型( $R^2>0.90$ )。屈服应力  $\tau_0$ 、粘度系数  $k$  增加, 流动指数  $n$  减小( $n<1$ ), 显示发酵后的玉米淀粉仍然是非牛顿、屈服假塑性流体。震荡流变曲线显示添加酸奶的样品组的贮能模量  $G'$  与损耗模量  $G''$  均大于空白组、且均随着剪切频率的增大而增大。**结论** 经乳酸菌发酵的玉米淀粉, 具有更高的黏弹特性。

**关键词:** 玉米淀粉; 酸奶; 流变特性; 贮能模量; 损耗模量

## Effects of yogurt on the rheological properties of corn starch

FU Xue-Xia, DAI Li-Yuan, ZENG Cheng, JI Xiang-Qing, YANG Ding-Kuan, LI Xiao-Lei\*, LI Dan\*

(Key Laboratory of Agroproducts Processing Technology at Jilin Provincial University, Changchun 130022, China)

**ABSTRACT: Objective** To investigate the effect of yogurt containing active lactic acid bacteria on the viscosity characteristics of starch. **Methods** Corn starch was used as the raw material, 1% (V/V) yogurt was added respectively and keeping them at 37°C for 1 h. The rheological properties of corn starch after fermentation were studied by rheometer. **Results** The shear rheological curve obeyed the Herschel-Bulkley model ( $R^2>0.90$ ). The yield stress  $\tau_0$  and the viscosity coefficient  $k$  were increased, while the flow index  $n$  was decreased ( $n<1$ ). It was shown that the fermented corn starch was still a non-Newtonian, yielding pseudo plastic fluid. The oscillating rheological curve showed that the storage modulus  $G'$  and loss modulus  $G''$  of the sample group with yogurt added were higher than those of the blank group, and both increased with the increase of the shear frequency. **Conclusion** Corn starch fermented by lactic acid bacteria has higher viscoelastic properties.

**KEY WORDS:** corn starch; yogurt; rheological properties; storage modulus; loss modulus

## 1 引 言

淀粉是由玉米、小麦、马铃薯等植物在生长过程中产

生的一种由大量  $\alpha$ -D-葡萄糖单元通过糖苷键连接而成的大分子碳水化合物, 属于一种多糖。由于淀粉分子中包含大量氢键, 致使其不溶于冷水或酒精, 导致淀粉具有较弱

基金项目: 吉林省科技厅国际交流项目(20190701075GH)、吉林省发改委计划项目(2020LY700L01)、吉林省教育厅科研项目(JJKH20200578KJ)、长春大学人才支持计划项目(2019JBC00L45)

**Fund:** Supported by International Exchange Project of Jilin Provincial Science and Technology Department(20190701075GH), Plan Project of Jilin Provincial National Development and Reform Commission(2020LY700L01), Scientific Research Project of Jilin Provincial Science and Technology Department (JJKH20200578K), and Talent Support Project of Changchun University (2019JBC00L45)

\*通讯作者: 李晓磊, 教授, 博士, 主要研究方向为功能性食品。E-mail: xiaolei97@163.com

李丹, 教授, 博士, 主要研究方向为食品生物技术。E-mail: drlidan@sina.com

\*Corresponding author: LI Xiao-Lei, Professor, Ph.D, Key Laboratory of Agroproducts Processing Technology at Jilin Provincial University, Changchun 130022, China. E-mail: xiaolei97@163.com

LI Dan, Professor, Ph.D, Key Laboratory of Agroproducts Processing Technology at Jilin Provincial University, Changchun 130022, China. E-mail: drlidan@sina.com

的黏弹特性<sup>[1]</sup>,使其不能完全满足工业需求,仍需经过加工改性来满足不同工业领域的应用要求<sup>[2]</sup>。玉米是广泛种植的淀粉质作物,其籽粒中淀粉含量为 64%~78%。大量研究表明,玉米淀粉资源丰富、价格较低、且具有稳定性较好、不易老化以及抗剪切力强等优点<sup>[3]</sup>;但是,玉米淀粉也具有一定的缺点,例如有较弱的假塑性、不容易成形、较差的耐水性和冻融稳定性<sup>[2,3]</sup>,限制了其在一些食品中的应用。

酸奶以其独特的营养价值和风味受到越来越多的消费者的青睐,在乳制品市场中占据重要的位置<sup>[4]</sup>。传统的酸奶是以牛奶为原料,经过巴氏杀菌后、向牛奶中添加活性乳酸菌,如保加利亚乳杆菌和乳双歧杆菌,再经乳酸发酵冷却灌装的一种牛奶制品<sup>[5,6]</sup>。吴飞<sup>[7]</sup>研究了大麦粉对酸奶的增稠作用及其作用机制,但是把酸奶添加到淀粉中作为发酵剂的研究还未见报道。本研究以玉米淀粉为主要原料,添加不同品牌的酸奶,探究发酵后玉米淀粉的流变特性,旨在为酸奶在改变淀粉性能方面提供理论依据。

## 2 材料与方法

### 2.1 材料、试剂与仪器

玉米淀粉(美国 Sigma 公司);蒙牛酸奶(含有乳双歧杆菌、保加利亚乳杆菌、嗜热链球菌、乳酸乳球菌乳脂亚种、乳酸乳球菌乳酸亚种、嗜酸乳杆菌,蒙牛乳业有限公司);完达山酸奶(含有乳双歧杆菌、保加利亚乳杆菌、嗜热链球菌、植物乳杆菌,黑龙江省完达山乳业有限公司);伊利酸奶(含有乳双歧杆菌、保加利亚乳杆菌、嗜热链球菌、嗜酸乳杆菌,伊利酸奶公司)。

HX-201 型恒温循环水槽(北京长流科学仪器公司);Discovery HR3 型旋转流变仪(美国 TA 公司);AUW120D 型天平(日本岛津公司);C-MAG HS7 型磁力搅拌器(德国 IKA 公司)。

### 2.2 实验方法

#### 2.2.1 样品的制备

准确称取一定量玉米淀粉加入适量蒸馏水制成 5% (mg/mL) 的淀粉溶液,用磁力搅拌器一边搅拌(600 r/min),一边沸水浴糊化 20 min 后冷却至室温。加入 1% (V/V) 不同品牌的酸奶,放在磁力搅拌器上 37 °C 发酵 1 h,之后沸水浴 10 min。

#### 2.2.2 流变特性的测定

将所需样品均按照 2.2.1 方法制备。采用平板-平板测量系统,平板直径 40 mm,放入样品,平板间距为 1 mm,用纸轻轻擦去平板外多出的样品,盖上盖板。每组样品平行测定 3 次,每次测试均需更换不同样品。

剪切流变性的测定:在 25 °C,测定体系剪切应力

随剪切速率( $\dot{\gamma}$ )从 0~300 s<sup>-1</sup> 递增,再从 300~0 s<sup>-1</sup> 递减的变化。采用 Herschel-Bulkley 模型对数据点进行回归拟合<sup>[7]</sup>,方程拟和精度用决定系数  $R^2$  表示,模型可由公式  $\tau = \tau_0 + k\dot{\gamma}^n$  表示,其中  $\tau$  表示剪切应力,Pa;  $\tau_0$  表示屈服应力,Pa;  $k$  表示稠度系数,Pa·s<sup>n</sup>;  $\dot{\gamma}$  表示剪切速率, s<sup>-1</sup>;  $n$  表示流动行为指数。

震荡流变性的测定:在 25 °C,设置应变为 1.0%,震荡频率的范围是 0.1~10 Hz,测定储能模量  $G'$ 、损耗模量  $G''$ 、损失正切  $\tan\delta = G''/G'$  随角频率( $\omega$ )变化的情况。

### 2.3 数据统计分析

每个样品均需 3 组平行。使用软件 SPSS 20.0 进行数据统计和分析,使用方差分析法对数据的显著性差异进行分析( $P < 0.05$ ),结果表示为:平均值±标准偏差;同一列显著性差异用 a、b、c 表示。

## 3 结果与分析

### 3.1 发酵后玉米淀粉剪切流变特性

由图 1 可以看出,随着剪切速率的增大,剪切应力也随之增大,降低剪切速率时,剪切应力随之减小。外部剪切力作用在淀粉上,表观黏度因淀粉内部结构破坏而表现出不同程度回升,因而呈现出具有不同大小的滞后回路,即滞后环。用滞后环面积的大小可以表示打破淀粉结构所需要能量<sup>[8,9]</sup>。从表 1 可以看出,伊利和蒙牛酸奶的触变环面积较空白组有显著性差异,说明这 2 组发酵后的玉米淀粉结构被打破所需要的能量较大。所有样品的拟合决定系数  $R^2$  均大于 0.9,表明该模型可以很好地拟合体系的流动曲线。屈服应力  $\tau_0$  大于 0,流体指数  $n$  小于 1,说明体系是典型的屈服假塑性流体。流体指数  $n$  相较于对照组都有所降低,说明发酵后玉米淀粉更易剪切稀化。

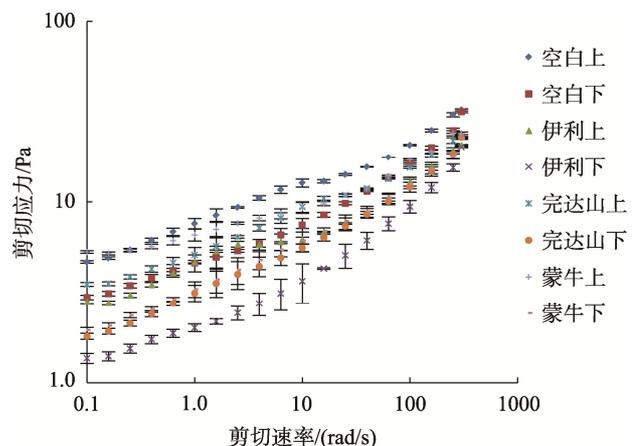


图 1 发酵后玉米淀粉剪切流变曲线( $n=3$ )

Fig.1 Shear rheological curve of corn starch after fermentation ( $n=3$ )

表 1 发酵后玉米淀粉 Herschel-Bulkley 方程拟合参数  
Table 1 Fitting parameters of Herschel-Bulkley equation of corn starch after fermentation

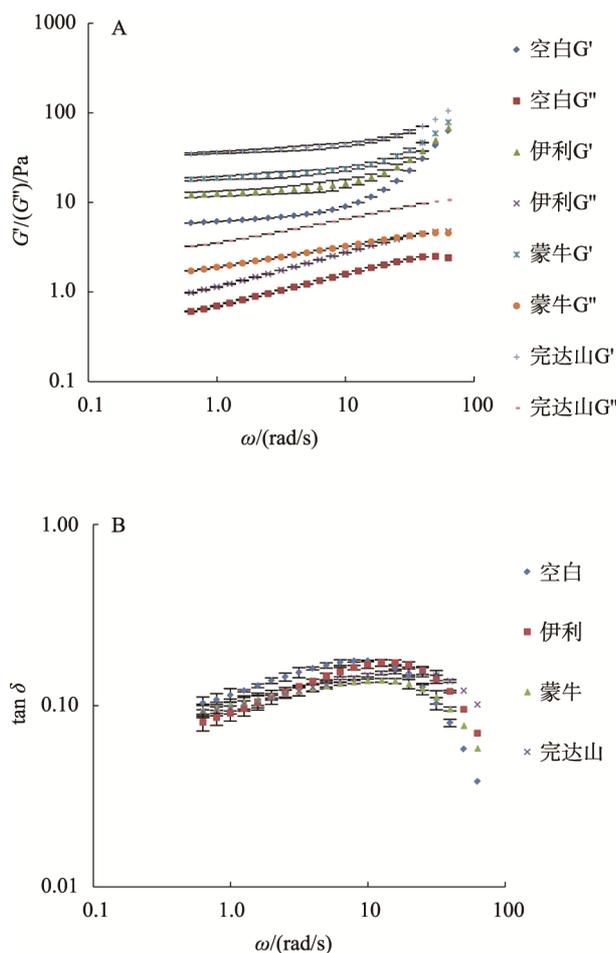
样品	触变环面积/ (Pa/s)	上行线				下行线			
		流体指数 $n$	屈服应力 $\tau_0/\text{Pa}$	稠度系数 $k/(\text{Pa/s})$	决定系数 $R^2$	流体指数 $n$	屈服应力 $\tau_0/\text{Pa}$	稠度系数 $k/(\text{Pa/s})$	决定系数 $R^2$
空白	16.25±1.49 <sup>b</sup>	0.40±0.02 <sup>a</sup>	1.53±0.02 <sup>c</sup>	1.74±0.01 <sup>b</sup>	0.984	0.53±0.01 <sup>a</sup>	1.14±0.02 <sup>c</sup>	1.39±0.06 <sup>b</sup>	0.998
伊利	22.34±1.31 <sup>a</sup>	0.33±0.03 <sup>a</sup>	4.74±0.02 <sup>a</sup>	1.86±0.03 <sup>b</sup>	0.982	0.50±0.02 <sup>a</sup>	3.77±0.01 <sup>a</sup>	2.35±0.01 <sup>a</sup>	0.997
完达山	16.30±1.34 <sup>b</sup>	0.35±0.02 <sup>a</sup>	2.40±0.01 <sup>b</sup>	2.75±0.01 <sup>a</sup>	0.994	0.48±0.03 <sup>a</sup>	1.82±0.01 <sup>b</sup>	1.41±0.04 <sup>a</sup>	0.996
蒙牛	21.73±1.15 <sup>a</sup>	0.28±0.01 <sup>b</sup>	5.08±0.01 <sup>a</sup>	2.30±0.01 <sup>a</sup>	0.993	0.44±0.03 <sup>b</sup>	1.70±0.02 <sup>b</sup>	1.69±0.02 <sup>b</sup>	0.997

注: 数据均采用 3 次平行测定, 结果表示为平均值±标准差, 同一列中不同字母 a, b, c 表示在  $P < 0.05$  的差异显著性。

剪切稀化是淀粉分子在剪切力的作用下既旋转又形变的状态。在保温处理发酵过程中, 酸奶中的乳酸菌可能产生特殊酶系, 例如胞外淀粉酶, 把淀粉分解成小分子葡萄糖, 致使流体指数  $n$  降低<sup>[10,11]</sup>。相较于玉米淀粉, 添加 3 种不同品牌的酸奶均提高了玉米淀粉的稠度系数  $k$ , 其中完达山和蒙牛酸奶较为显著; 张喻等<sup>[12]</sup>研究表明酸奶是典型的酸促凝胶, 酪蛋白、乳清蛋白、脂肪和乳酸菌形成了三维网络结构。一方面在加热的过程中, 酸奶中的三维网络结构可能镶嵌在逐步融出的直连淀粉分子之间, 使最终形成的凝胶网络结构致密均匀, 使体系表现出更高的增稠性。另一方面, 在发酵过程中, 酸奶中的乳酸菌产生胞外多糖, 易于与淀粉分子间相互作用形成氢键, 使得分子链段间的缠结点增加, 对流动产生的黏性阻力增强, 使剪切稀化程度增加。同时, 分子缠结使得其体系黏度增加, 稠度系数变大<sup>[13,14]</sup>。

### 3.2 发酵后玉米淀粉态黏弹性

$G'$  表示储能模量, 是物体受到剪切力后形变而储存的能量, 代表样品的弹性行为;  $G''$  表示损耗模量, 是物体受到剪切力后了抵抗形变阻力而损耗的能量, 代表样品的黏性行为; 损耗角的正切值( $\tan\delta$ )表示  $G''$  与  $G'$  的比值,  $\tan\delta$  越大表明体系的黏性比例越大, 流动性越强, 反之弹性比例大<sup>[15]</sup>。由图 2 可知, 所测样品的  $G'$  与  $G''$  随角频率的增加而上升, 且  $G'$  均大于  $G''$ , 损耗角正切值( $\tan\delta$ )均小于 1, 体系结构被高频率破坏, 表现为一种典型的弱凝胶动态流变学谱图<sup>[16]</sup>。在整个频率扫描过程中, 添加不同品牌酸奶样品的  $G'$  与  $G''$  相较于空白组  $G'$  与  $G''$  都有所增大, 这表明添加酸奶能够使玉米淀粉的凝胶强度增加, 发酵后的玉米淀粉表现出更强的粘弹性。此结果进一步说明淀粉结构内部的分子链段间的缠结点增多, 凝胶体系网络结构加强。 $\tan\delta$  越大, 表明体系的黏性比例越大, 流动性强, 反之则弹性比例较大<sup>[17,18]</sup>, 从图 2 中能明显看出  $\tan\delta$  均小于 1, 表明体系的弹性占主导地位。



注: A 动态模量; B 正切值。

图 2 发酵后玉米淀粉的动态模量及损耗角的正切值随角频率变化曲线( $n=3$ )

Fig.2 The dynamic modulus and tangent value of loss angle of corn starch after fermentation with the angular frequency ( $n=3$ )

## 4 结论与讨论

本研究对不同品牌酸奶与玉米淀粉的混合物进行黏弹特性分析, 剪切流变实验结果显示, 在外力剪切作用下,

流体指数  $n < 1$ , 屈服应力  $\tau_0 > 0$ , 发酵后的玉米淀粉是典型的屈服假塑性流体, 更易剪切稀化。与空白组相比, 具有更高的稠度系数  $K$ , 体系可通过分子间的相互作用而达到协同增效的作用。震荡流变实验结果显示, 发酵后的玉米淀粉的  $G'$  与  $G''$  均大于对照组, 整个体系具有较好的黏弹性。酸奶与玉米淀粉发酵是一种成本低、效果好、工艺简单、适合工业化生产的方法, 采用发酵的方法, 可改善玉米淀粉本身性能的不足, 从而减少或替代变性淀粉在食品中的应用。

## 参考文献

- [1] 聂亚楠, 田孝才, 吴凯, 等. 玉米淀粉胶粘剂的增强及耐水改性研究[J]. 中国胶粘剂, 2012, 21(11): 15-18.  
Nie YN, Tian XC, Wu K, *et al.* Study on modified corn starch adhesive in reinforcing and water-resistance [J]. China Adhes, 2012, 21(11): 15-18.
- [2] 余世锋, 郑喜群. 玉米淀粉凝胶冻融特性影响因素及其变化机制研究进展[J]. 食品科技, 2013, 38(10): 184-189.  
Yu SF, Zheng XQ. Research progress on factors and mechanisms affecting freeze-thaw characteristics of corn starch granules [J]. Food Sci Technol, 2013, 38(10): 184-189.
- [3] 余世锋, 郑喜群. 玉米淀粉颗粒冻融特性影响因素及机制研究进展[J]. 食品科技, 2012, 37(2): 179-183.  
Yu SF, Zheng XQ. Research progress on factors and mechanisms affecting freeze-thaw characteristics of corn starch granules [J]. Food Sci Technol, 2012, 37(2): 179-183.
- [4] 张伏, 付三玲, 佟金, 等. 玉米淀粉糊的流变学特性分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(9): 294-297.  
Zhang F, Fu SL, Tong J, *et al.* Rheological properties of maize starch pastes [J]. Nucl Sci Tech Agric Eng, 2008, 24(9): 294-297.
- [5] 宗宪峰. 酸奶的营养价值与保健功能[J]. 中国食物与营养, 2008, (9): 60-61.  
Zong XF. The nutritional value and health function of yogurt [J]. China Food Nutr, 2008, (9): 60-61.
- [6] 孔保华. 乳品科学与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2004.  
Kong BH. Dairy science and technology [M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [7] 吴飞. 大麦粉对酸奶的增稠作用及其机制研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2017.  
Wu F. Study on the thickening effect of barley flour on yogurt and its mechanism [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017.
- [8] Tamsiripong T, Pongsawatmanit R, Ikeda S, *et al.* Influence of xyloglucan on gelatinization and retrogradation of tapioca starch [J]. Food Hydrocolloid, 2005, 19(6): 1054-1063.
- [9] 谭洪卓, 谷文英, 刘敦华, 等. 甘薯淀粉糊与绿豆淀粉糊的流变行为共性与区别[J]. 农业工程学报, 2006, 22(7): 32-37.  
Tan HZ, Gu WY, Liu DH, *et al.* Similarities and differences in rheological behavior between sweet potato starch paste and mung bean starch paste [J]. Nucl Sci Tech Agric Eng, 2006, 22(7): 32-37.
- [10] 邹海魁, 陈建峰, 王国全, 等. 纳米  $\text{CaCO}_3$  用 VC 增塑糊体系触变性性能研究[J]. 高校化学工程学报, 2003, 17(2): 207-211.  
Zou HK, Chen JF, Wang GQ, *et al.* Research on thixotropic properties of VC plastisol system for nano- $\text{CaCO}_3$  [J]. J Chem Eng Chin Univ, 2003, 17(2): 207-211.
- [11] Wang Y, Wang L, Li D, *et al.* Effect of flaxseed gum addition on rheological properties of native maize starch [J]. J Food Eng, 2008, 89(1): 87-92.
- [12] 张喻, 谭兴和, 熊兴耀, 等.  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  射线辐照处理后马铃薯淀粉糊的流变特性[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 379-383.  
Zhang Y, Tan XH, Xiong XY, *et al.* Rheological properties of potato starch paste after  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ -ray irradiation [J]. Nucl Sci Tech Agric Eng, 2010, 26(11): 379-383.
- [13] Wang B, Wang LJ, Li D, *et al.* Rheological properties of waxy maize starch and xanthan gum mixtures in the presence of sucrose [J]. Carbohydr Polym, 2009, 77: 472-481.
- [14] 李荣华. 乳蛋白对凝固型酸奶流变学特性及微观结构的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2007.  
Li RH. The effect of milk protein on the rheological properties and microstructure of coagulated yogurt [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2007.
- [15] 李智, 艾连, 丁文宇, 等. 可溶性膳食纤维对玉米淀粉体外消化的抑制作用[J]. 食品工业科技, 2019, 19: 1-6.  
Li Z, Ai L, Ding WY, *et al.* Inhibitory effects of soluble dietary fibers on the in vitro digestion of corn starch [J]. Sci Technol Food Ind, 2019, 19: 1-6.
- [16] Yuvaret V, Piyada A, Manop S, *et al.* Gelatinization and rheological properties of rice/xanthan mixtures [J]. Food Chem, 2008, 111(1): 106-114.
- [17] 顾娟, 洪雁, 顾正彪. 荞麦淀粉理化性质的研究[J]. 食品与发酵工业, 2008, 34(4): 36-39.  
Gu J, Hong Y, Gu ZB. Research on the physicochemical properties of buckwheat starch [J]. Food Ferment Ind, 2008, 34(4): 36-39.
- [18] Dirk E, Werner M, Kulicke, H, *et al.* Formation of maize starch gels selectively regulated by the addition of hydrocolloids [J]. Starch-Stärke, 1995, 47(10): 378-384.

(责任编辑: 王 欣)

## 作者简介



付雪侠, 硕士, 主要研究方向为食品生物技术。  
E-mail: 1849874625@qq.com

李晓磊, 教授, 博士, 主要研究方向为功能性食品。  
E-mail: xiaolei97@163.com

李 丹, 教授, 博士, 主要研究方向为食品生物技术。  
E-mail: drlidan@sina.com