

# 右旋糖酐/蚕豆蛋白复合凝胶的流变特性

汤回花, 陈骏飞, 刘毕琴, 王馨蕊, 史巧\*, 李宏

(云南省农业科学院农产品加工研究所, 云南昆明 650223)

**摘要:** 为研究乳酸菌右旋糖酐对蚕豆蛋白食品相关性质的影响, 采用哈克流变仪和质构仪等测定了添加不同浓度右旋糖酐时 GDL 诱导的酸致蚕豆蛋白复合凝胶质构和流变特性等指标。结果表明: 添加右旋糖酐能显著增加蚕豆蛋白凝胶保水性, 空白组蚕豆蛋白凝胶保水性为 60.38%, 1%右旋糖酐与蚕豆蛋白形成的复合凝胶保水性为 70.08% ( $p<0.05$ ); 右旋糖酐浓度在 0.25%~1%之间, 对复合蛋白凝胶色泽有一定影响; 0.5%右旋糖酐与蚕豆蛋白形成的复合凝胶强度为 0.27 N, 与空白组蚕豆蛋白凝胶 (0.37 N) 差异显著, 可软化含高蚕豆蛋白食品质构特性; 右旋糖酐/蚕豆蛋白复合凝胶流动曲线符合 Carreau 模型 ( $R^2>0.99$ ), 具有假塑性流体的特性; 应变扫描的弹性模量  $G'$  均高于黏性模量  $G''$ , 说明右旋糖酐/蚕豆蛋白复合凝胶的弹性占主导; 频率扫描结果显示添加右旋糖酐可软化蚕豆蛋白凝胶, 使凝胶  $G'$ 、 $G''$  降低, 更易于加工。在蚕豆食品中添加右旋糖酐可改善蚕豆蛋白的质构和流变特性, 为拓展其应用范围提供参考。

**关键词:** 右旋糖酐; 蚕豆蛋白; 复合凝胶; 流变特性

文章编号: 1673-9078(2022)04-69-75

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.4.0797

## Rheological Properties of Dextran/Faba Bean Protein Composite Gel

TANG Huihua, CHEN Junfei, LIU Biqin, WANG Xinrui, SHI Qiao\*, LI Hong

(Agro-Products Processing Research Institute, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650223, China)

**Abstract:** In order to study the effect of lactic acid bacteria dextran on the properties of faba bean protein food, the textural and rheological properties etc. of the faba bean protein composite gels induced by GDL with different concentrations of dextran were determined by using Haake rheometer and texture analyzer. The results showed that dextran significantly increased the water holding of faba bean protein gel. The water holding index of faba bean protein gel was 60.38%, and the index of the composite gel with 1% dextran was 70.08% ( $p<0.05$ ). The concentration of dextran between 0.25% and 1% had a certain effect on the color of composite gel, the color of faba protein gel could be adjusted. The strength of the composite gel with 0.5% dextran was 0.27 N, which was significantly different from that of faba bean protein gel (0.37 N). The texture properties of foods containing high faba protein were softened by the addition of dextran. The flow curve of the dextran/faba bean protein composite gel conformed to the Carreau model ( $R^2>0.99$ ), showing the properties of pseudoplastic fluid. The elastic modulus  $G'$  of strain scanning was higher than the viscous modulus  $G''$ , indicating that the elasticity of the dextran/faba bean protein composite gel was dominant. The results of frequency scanning showed that dextran could soften the gel and significantly reduced the elastic modulus and viscous modulus of faba protein gels, thereby being more suitable for processing. The texture and rheological properties of faba protein were improved by adding dextran to faba food, which provided reference for expanding its application range.

**Key words:** dextran; faba bean protein; composite gel; rheological properties

引文格式:

汤回花,陈骏飞,刘毕琴,等.右旋糖酐/蚕豆蛋白复合凝胶的流变特性[J].现代食品科技,2022,38(4):69-75,+207

TANG Huihua, CHEN Junfei, LIU Biqin, et al. Rheological properties of dextran/faba bean protein composite gel [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(4): 69-75, +207

蚕豆是一种广泛种植的粮食作物, 可用作食物和

收稿日期: 2021-07-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31960468)

作者简介: 汤回花 (1994-), 女, 硕士研究生, 研究实习员, 研究方向: 食品生物技术, E-mail: thh@yaas.org.cn

通讯作者: 史巧 (1983-), 女, 博士研究生, 助理研究员, 研究方向: 食品生物技术, E-mail: sq@yaas.org.cn

肥料, 其种子主要由蛋白质 (约占 29%) 和淀粉 (约占 39%) 组成, 其余为维生素、矿物质和膳食纤维<sup>[1]</sup>。蚕豆蛋白因具有良好的溶解性、乳化性、起泡性和凝胶性, 成为多种食品工业的重要原料。胞外多糖是微生物利用各种糖作为底物产生的长链多糖, 根据其化学组成为杂多糖和同多糖。从近些年来对乳酸菌胞外多糖生理活性功能的研究可知, 其有抗肿瘤、抗氧

化、免疫调节和益生功能等多种作用<sup>[2]</sup>。右旋糖酐是由乳酸菌分泌的右旋糖酐蔗糖酶催化蔗糖水解产生的同多糖，在食品工业中通常用作增稠、稳定、膨化和胶凝剂<sup>[3]</sup>，研究表明右旋糖酐可用于改善酸奶的流变学，质地和感官特性<sup>[4]</sup>。

食品大分子物质（蛋白、多糖等）普遍存在于食品体系中，是构建各种食品体系的最主要基材。蛋白多糖的相互作用形式和程度决定了多数食品材料最终体系结构，进而主导各种食品质地的体现<sup>[5]</sup>。国内外对大豆蛋白、豌豆蛋白与多糖复合凝胶相关研究表明，这两种聚合物之间通过美拉德反应形成的共价键改变了蛋白-多糖混合物的流变特性<sup>[6-8]</sup>，当多糖浓度超过特定水平，蛋白和多糖两种生物聚合物会发生相分离，不能形成凝胶从而影响所得产品质量<sup>[9,10]</sup>。然而关于蚕豆蛋白与多糖复合凝胶研究较少，主要集中在热诱导蚕豆蛋白凝胶流变学特性和微观结构的影响<sup>[11]</sup>，关于右旋糖酐对蚕豆蛋白酸致复合凝胶流变性影响的研究却鲜有报道。本试验以不同浓度右旋糖酐与一定浓度蚕豆蛋白形成的复合凝胶为研究对象，研究凝胶体系的流变和质构特性以期为后续调控蚕豆蛋白凝胶的形成过程、拓宽蚕豆蛋白在新型食品产品开发提供一定的理论指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 原料

蚕豆原料：云豆 1183，购于云南省农业科学院粮食作物研究所；柠檬明串珠菌 *LC19* 保藏于本课题组，分离来源黑麦；氢氧化钠、磷酸氢二钠、磷酸二氢钠、葡萄糖酸内酯（GDL）、盐酸、蔗糖、无水乙醇，均为国产分析纯试剂。培养基为 MRS 培养基。

### 1.2 主要仪器设备

Five Easy Plus pH 计，梅特勒-托利多仪器（上海）有限公司；YXQ-LS-75SII 高压灭菌锅，上海博迅仪器有限公司；MARS40 哈克流变仪，Thermo Fisher Scientific；TMS-Touch 食品质构测定仪，美国 FTC；LGJ-25C 冷冻干燥机，北京四环；CM-5 台式色差仪，日本美能达。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 蚕豆蛋白的提取

蚕豆去皮，通过研磨机粉碎，过 80 目筛，得蚕豆粉。经杜马斯定氮法测定蛋白质含量为 32.80%（N\*6.25）。

称取蚕豆粉 40 g，按照 1:10 加入 400 mL 蒸馏水，通过 1 mol/L NaOH 将 pH 调整至 9.5，室温下搅拌 40 min。以 3000 r/min 离心 10 min，分别收集上清液和沉淀。沉淀按 1:5 加入蒸馏水重复提取一次，合并上清液，将 pH 调节至 4.5。以 3000 r/min 离心 10 min 回收沉淀的蛋白质，复溶于蒸馏水中，将 pH 调节至 7.0，经冷冻干燥得蚕豆蛋白<sup>[11]</sup>。杜马斯定氮法测定蚕豆蛋白纯度为 83.75%（N\*6.25）。

#### 1.3.2 右旋糖酐的提取

取 -80 °C 保藏的柠檬明串珠菌 *LC19*，按 1%（V/V）接种于 MRS 液体培养基，37 °C 培养 24 h，活化 2 代后作为种子液备用。取 1% 种子液接种到 MRS 液体培养基（含 10% 蔗糖），培养条件为 30 °C，80 r/min 培养 48 h，所得发酵液 1000 r/min 离心 10 min 去除菌体，上清用 80% 三氯乙酸调至终浓度 5%，磁力搅拌 2 h，1000 r/min 离心 10 min 去除蛋白，所得上清用 3 倍乙醇沉淀 12 h，1000 r/min 离心 10 min 收集沉淀，沉淀透析 72 h，每 12 h 换一次蒸馏水，透析液经冷冻干燥得右旋糖酐。经 APC 联用多角度激光散射仪测定右旋糖酐重均分子量为  $4.50 \times 10^7$  Da；经 <sup>1</sup>H-NMR 分析，右旋糖酐由主链  $\alpha$ -(1,6) 和侧链  $\alpha$ -(1,3) 糖苷键连接，通过 <sup>1</sup>H-NMR 谱的积分计算得其主链  $\alpha$ -(1,6) 和侧链  $\alpha$ -(1,3) 的百分率分别为 76.80% 和 23.20%。

#### 1.3.3 凝胶制备

称取一定量蚕豆蛋白及不同质量的右旋糖酐，加入不同质量的蒸馏水，使得蚕豆蛋白浓度为 8%（m/m）、右旋糖酐浓度分别为 0%、0.25%、0.5%、1%、2%（m/m）。将混合体系磁力搅拌 1 h 后在 80 °C 水浴条件下磁力搅拌 30 min，使蚕豆蛋白充分变性。立即加入 1%（m/m）葡萄糖酸内酯，磁力搅拌 1 min，使凝固剂在溶液中充分溶解分散均匀，然后立即将该混合体系分装至小烧杯中，待右旋糖酐/蚕豆蛋白复合凝胶冷却至室温后，放入 4 °C 冰箱中过夜。

#### 1.3.4 保水性

参考 Lan 等<sup>[12]</sup>研究方法对经过不同处理的样品进行保水性测量，并稍加改动。将右旋糖酐/蚕豆蛋白复合凝胶样品（每管 3 g）放入 5 mL 离心管中，以 8000 r/min 离心 10 min。离心后，将试管倒置以沥干水分并用干燥滤纸除去内壁残留的水珠。准确称重离心前后带有凝胶样品试管重量，并根据以下公式计算保水性（waterholding capacity, WHC）：

$$WHC = \frac{W_1}{W_2} \times 100\%$$

式中：

$W_1$ ——离心前凝胶的总重量；

$W_r$ —离心后凝胶的重量。

### 1.3.5 颜色分析

采用台式色差仪 (CM-5, 日本美能达) 测定右旋糖酐/蚕豆蛋白复合凝胶的颜色。通过内置的标准白板进行仪器校准。测量值记录为亮度 (L), 红色/绿色 (a) 和黄色/蓝色 (b) 色标。

色差测定参考孟岳成<sup>[13]</sup>方法, 公式如下:

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2}$$

式中:

$\Delta E$ —总色彩的大小;

$\Delta L = L_{\text{样品}} - L_{\text{空白}}$ ;

$\Delta a = a_{\text{样品}} - a_{\text{空白}}$ ;

$\Delta b = b_{\text{样品}} - b_{\text{空白}}$ ;

$\Delta L(+)$ —偏白;

$\Delta L(-)$ —偏黑;

$\Delta a(+)$ —偏红;

$\Delta a(-)$ —偏绿;

$\Delta b(+)$ —偏黄;

$\Delta b(-)$ —偏蓝。

### 1.3.6 凝胶强度分析

采用 GMIA (2013) Standard<sup>[14]</sup>测定右旋糖酐/蚕豆蛋白复合凝胶的凝胶强度。根据 1.3.3 节所述方法, 在烧杯 (直径 40 mm, 高度 35 mm; 每个容器 10 g 凝胶) 中形成右旋糖酐/蚕豆蛋白复合凝胶样品。采用美国 FTC 食品质构测定仪 P/0.5 探针测量凝胶强度至目标距离 (4 mm)。测试前速度, 测试速度和测试后速度为 1 mm/s。凝胶强度定义为第一次挤压变形时, 物体所产生应力的最大值。每个样品进行 3 次重复测量, 并将这些读数的平均值记录为凝胶强度的最终值。

### 1.3.7 流变性测定

#### 1.3.7.1 静态扫描

采用平板 pp50 系统, 板间距 1 mm, 剪切速率范围 0.1~100 s, 测量温度 25 °C, 观察右旋糖酐浓度对蚕豆蛋白凝胶体系的黏度 ( $\eta$ ) 随剪切速率 ( $r$ ) 变化趋势。通过 carreau 模型拟合黏度随剪切速率变化趋势。

$$\eta = \frac{\eta_0 - \eta_\infty}{\left[1 + (\lambda r)^2\right]^{\frac{1-n}{2}}} + \eta_\infty$$

式中:

$\eta_0$ —零剪切率黏度;

$\eta_\infty$ —无限剪切时黏度;

$\lambda$ —破坏流体结构的时间常数;

$n$ —流动特性指数。

#### 1.3.7.2 应变扫描

采用平板 pp50 系统, 板间距 1 mm, 频率 1 Hz, 测量温度 25 °C, 在 1%~100% 范围内进行应变扫描, 观察右旋糖酐浓度对蚕豆蛋白凝胶体系弹性模量 ( $G'$ )、黏性模量 ( $G''$ ) 之间的变化趋势。

#### 1.3.7.3 频率扫描

采用平板 pp50 系统, 板间距 1 mm, 剪切速率范围 0.1~100 s, 测量温度 25 °C, 采用振荡模式进行参数设定, 角频率变化范围 1~100 rad/s, 应变 1% (保证在线性黏弹性范围), 观察在不同频率范围内右旋糖酐浓度对蚕豆蛋白凝胶体系弹性模量 ( $G'$ )、黏性模量 ( $G''$ ) 之间的变化趋势。通过幂律模型拟合  $G'$ 、 $G''$  随剪切频率 ( $f$ ) 的变化趋势。

$$G' = K' f^{n'}$$

$$G'' = K'' f^{n''}$$

式中:

$K'$ 、 $K''$ —黏度常数;

$n'$ 、 $n''$ —频率模量指数。

### 1.3.8 统计分析

每个试验重复 3 次, 实验数据采用 SPSS 17.0 和 Origin 8.5 软件进行统计分析, 每组数据均进行单因素方差分析 (ANOVA), 平均值差异的统计学显著性 ( $p < 0.05$ ) 通过 LSD 测试进行评估, 所有结果均以  $\bar{x} \pm s$  表示。

## 2 结果与讨论

### 2.1 凝胶保水性分析

表 1 右旋糖酐浓度对蚕豆蛋白凝胶保水性的影响

Table 1 Effect of dextran concentration on Water holding capacity of dextran/faba bean protein composite gel

右旋糖酐浓度/%	保水性/%
0	60.38±0.71 <sup>d</sup>
0.25	63.34±1.00 <sup>c</sup>
0.5	66.09±0.48 <sup>bc</sup>
1	70.08±2.02 <sup>b</sup>
2	78.32±1.87 <sup>a</sup>

注: 表中数据均为均值±标准差, 同行不同小写字母表示差异显著 ( $p < 0.05$ ), 下同。

保水性是凝胶的一个重要特性, 反映了凝胶通过毛细作用力将水固定在基质中的能力, 与凝胶强度和结构有关<sup>[15,16]</sup>。如表 1 所示, 随着右旋糖酐浓度的增加, 右旋糖酐/蚕豆蛋白复合凝胶的保水性逐渐增加。空白组蚕豆蛋白凝胶和添加 1% 右旋糖酐/蚕豆蛋白复合凝胶差异明显 ( $p < 0.05$ )。空白组蚕豆蛋白凝胶的保

水性为 60.38%，在右旋糖酐浓度 2% 时，达到 78.32%。本文实验结果与 Wang 等<sup>[6]</sup>研究结果一致，其发现凉粉草多糖可以提高 GDL 诱导大豆分离蛋白凝胶的保水性，凉粉草多糖浓度为 0.5% 时，大豆分离蛋白凝胶保水性为 52.10%，当浓度 1% 时，大豆分离蛋白凝胶保水性为 86.43%。关于加入右旋糖酐提高保水性的原因可能是多糖分子的强亲水性可以吸附水分子，这使得在离心过程中很难去除<sup>[16]</sup>。

## 2.2 颜色分析

通过美拉德反应与多糖进行糖基化是改善蛋白质功能特性的一种有效途径。蛋白质与多糖通过糖基化作用形成的复合物具有良好的理化性质和功能特性<sup>[17,18]</sup>。通过颜色变化可以评估美拉德反应程度，多糖和蛋白质可以在美拉德反应的晚期阶段形成有色化合物<sup>[19,20]</sup>。右旋糖酐浓度对蚕豆蛋白凝胶颜色的影响如表 2 所示。在实验研究浓度范围内 (0%~0.5%, m/m)，右旋糖酐/蚕豆蛋白复合凝胶色差从肉眼观察没有显著差别，并且右旋糖酐/蚕豆蛋白复合凝胶的  $\Delta a$  值呈负值，颜色偏向绿色。当右旋糖酐浓度由 0.5% 增加到 1% 时，右旋糖酐/蚕豆蛋白复合凝胶的色差能被人眼有效识别判断，表明其颜色过深，在一定程度上会影响食品的外观，同时该反应最后阶段还可能产生一些羟甲基咪喃、咪喃等对人体健康不利的物质<sup>[21]</sup>。根据赵秀萍等<sup>[22]</sup>对色差系统分析的定义，当色差值大于 3 小于 6 时，可以被肉眼视觉分辨；当色差值大于 6.0 时，颜色差别可以人眼有效识别判断。实验实际观察现象与色差系统分析一致，在食品中添加浓度为 0.25%~0.5% 的右旋糖酐可与蚕豆蛋白发生适当程度美拉德反应，赋予食品特定的色泽和风味。

表 2 右旋糖酐浓度对蚕豆蛋白凝胶颜色的影响

Table 2 Effect of dextran concentration on the color of

dextran/faba bean protein composite gel

右旋糖酐浓度/%	$\Delta E$	L	a	b
0	/	66.47±0.46 <sup>a</sup>	-0.69±0.05 <sup>a</sup>	10.83±0.64 <sup>a</sup>
0.25	3.75	62.75±0.31 <sup>b</sup>	-0.76±0.09 <sup>a</sup>	10.45±0.21 <sup>a</sup>
0.5	3.22	63.42±0.18 <sup>b</sup>	-0.99±0.12 <sup>b</sup>	9.38±0.05 <sup>b</sup>
1	6.50	59.38±0.44 <sup>c</sup>	-1.17±0.02 <sup>c</sup>	8.32±0.38 <sup>c</sup>
2	11.21	55.37±0.20 <sup>d</sup>	-1.14±0.02 <sup>c</sup>	9.30±0.72 <sup>bd</sup>

## 2.3 强度分析

测量不同浓度右旋糖酐对蚕豆蛋白凝胶强度的影响，如表 3 所示。随着右旋糖酐浓度增加，右旋糖酐/蚕豆蛋白复合凝胶强度呈逐渐下降趋势。空白组蚕豆蛋白凝胶和 0.25% 右旋糖酐/蚕豆蛋白复合凝胶之间没

有观察到明显差异，添加 0.25% 和 0.5% 右旋糖酐/蚕豆蛋白复合凝胶差异显著 ( $p < 0.05$ )，表明一定浓度的右旋糖酐可以降低右旋糖酐/蚕豆蛋白复合凝胶的强度，可能是右旋糖酐/蚕豆蛋白复合凝胶水分含量的增加使蛋白胶束变弱从而削弱凝胶强度。赵城彬等<sup>[23]</sup>研究发现  $\beta$ -葡聚糖混入大豆分离蛋白后会产生排斥絮凝作用，并且吸附大豆蛋白微粒，使蛋白网络结构的连续性被打破，凝胶强度减小，0.4~1.6 mg/100 mL 葡聚糖会使大豆分离蛋白酸致凝胶的凝胶强度从 300 Pa 降低到 50 Pa。此外，美拉德反应也可能造成凝胶强度降低，Spotti 等<sup>[24]</sup>研究发现美拉德反应会影响游离巯基的含量进而影响到二硫键的形成从而抑制凝胶的形成，凝胶强度会随着美拉德反应程度的增加而减小。

表 3 右旋糖酐浓度对蚕豆蛋白凝胶强度的影响

Table 3 Effect of dextran concentration on the strength of

dextran/faba bean protein composite gel

右旋糖酐浓度/%	凝胶强度/N
0	0.37±0.01 <sup>a</sup>
0.25	0.34±0.00 <sup>a</sup>
0.5	0.27±0.02 <sup>b</sup>
1	0.17±0.01 <sup>c</sup>
2	0.15±0.02 <sup>c</sup>

## 2.4 流动曲线

由图 1 可知，不同浓度右旋糖酐/蚕豆蛋白复合凝胶的黏度随着剪切速率的增大而缓慢下降，表现出明显的非牛顿流体剪切稀化现象，不同浓度右旋糖酐/蚕豆蛋白复合凝胶的流动曲线都符合假塑性流体的特性。因此，采用 Carreau 模型进行分析，如表 4 所示，Carreau 模型可以在 0.1~100 s<sup>-1</sup> 的剪切速率范围内较好地拟合流动曲线 ( $R^2 > 0.99$ )。随着右旋糖酐浓度的升高， $\eta_0$  逐渐减小，表明零剪切速率下的表观黏度随浓度的增加而降低，进一步说明空白组蚕豆蛋白凝胶黏度最大。本文实验结果与 Zarour 等<sup>[25]</sup>研究结果一致，其发现右旋糖酐浓度增大，其黏度随剪切速率增加而降低，这是由于剪切过程中产生的流体动力破坏了聚合物之间的网络结构。对于很多聚合物流体，当剪切速率增大到一定程度时，大分子链容易发生断裂，因此，聚合物流动曲线的第二流动平台不会出现， $\eta_{\infty}$  取值为 0。n 值称为流动特性指数，n 值的大小代表了流体非牛顿行为的强弱。n 值越小，非牛顿特性越显著；n=1，流体呈牛顿行为。由表 2 可知，在不同浓度右旋糖酐/蚕豆蛋白复合凝胶中，n 值都不为 1，说明不同浓度右旋糖酐/蚕豆蛋白复合凝胶体系都为非牛顿流体。 $\lambda$  值是破坏流体结构的时间常数，其倒数  $\lambda^{-1}$  是

剪切变稀的临界速率,  $\lambda$  值越小, 说明破坏结构所需的剪切速率就越大。空白组蚕豆蛋白凝胶  $\lambda$  最小为 57.41 s, 2%右旋糖酐/蚕豆蛋白复合凝胶  $\lambda$  最大为 114.00 s, 表明破坏空白组蚕豆蛋白凝胶所需的剪切速率最大, 破坏 2%右旋糖酐/蚕豆蛋白复合凝胶所需的剪切速率最小, 添加右旋糖酐可以调节含高蚕豆蛋白食品的质构特性, 更易于加工。

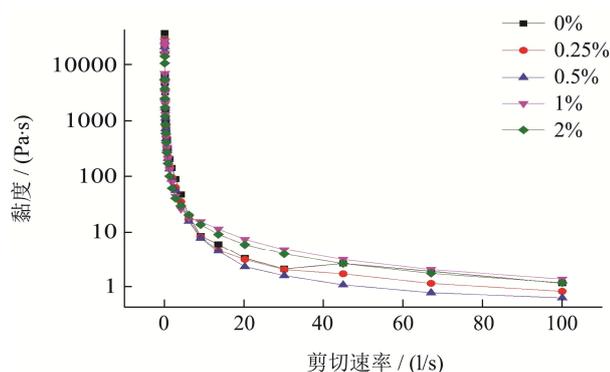


图1 不同浓度右旋糖酐/蚕豆蛋白复合凝胶流动曲线

Fig.1 Flow curves of dextran/faba bean protein composite gel with different dextran concentrations

表4 右旋糖酐浓度对 Carreau 拟合模型参数的影响

Table 4 Effects of dextran concentration on the Carreau fitting model parameters

右旋糖酐 浓度/%	模型参数				$R^2$
	$\eta_0$ (Pa.s)	$\eta_\infty$ (Pa.s)	$\lambda$ /s	n	
0	33470	0	57.41	-0.63	0.99
0.25	26050	0	73.90	-0.42	0.99
0.5	24610	0	62.64	-0.43	0.99
1	25550	0	83.47	-0.15	0.99
2	15300	0	114.00	-0.02	0.99

### 2.5 应变扫描

图 2 显示了应变对不同浓度右旋糖酐/蚕豆蛋白复合凝胶  $G'$  和  $G''$  的影响。如图 2 所示, 当应变 $<10\%$ 时, 不同浓度右旋糖酐/蚕豆蛋白复合凝胶  $G'$  和  $G''$  随着右旋糖酐浓度的增加而下降。在线性黏弹性范围内,  $G' > G''$  且未观察到重叠, 表明右旋糖酐/蚕豆蛋白复合凝胶的弹性占主导。此外, 在图 2 中可以看出, 右旋糖酐浓度差值较小的情况下, 模量的差异较大。例如, 浓度为 0.25%右旋糖酐/蚕豆蛋白复合凝胶(应变为 1%时)的  $G'$  为 854.40 Pa, 浓度为 0.5%右旋糖酐/蚕豆蛋白复合凝胶(应变为 1%时)的  $G'$  为 550.60 Pa,  $G'$  相差为 303.80 Pa。模量越高代表样品的抗形变能力越强, 凝胶结构更强, 应变扫描结果与凝胶强度趋势保持一致。

应变扫描确定了不同浓度右旋糖酐/蚕豆蛋白复

合凝胶的线性黏弹性范围, 用哈克流变仪自身分析软件分析线性黏弹性范围, 线性黏弹性范围在 1%~10% 之间。线性黏弹性范围决定了频率扫描参数应变的最大值, 最终选择频率扫描应变值设为 1%。

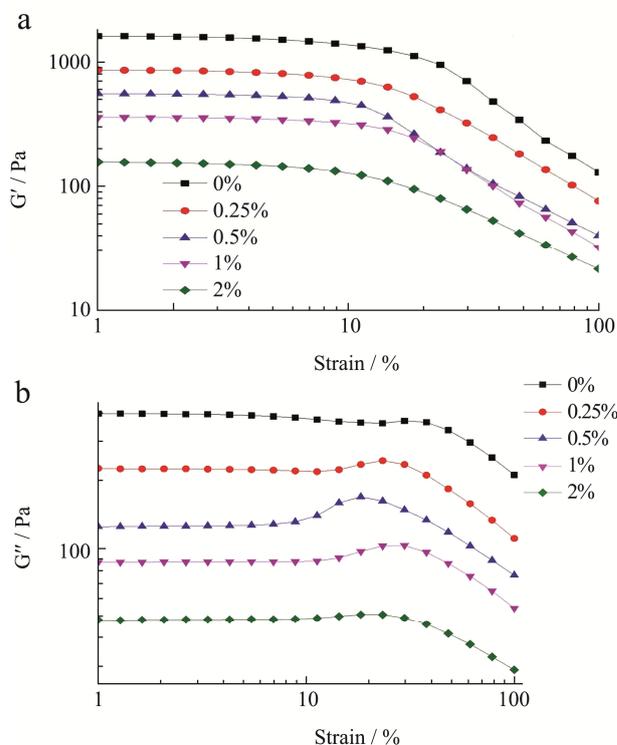
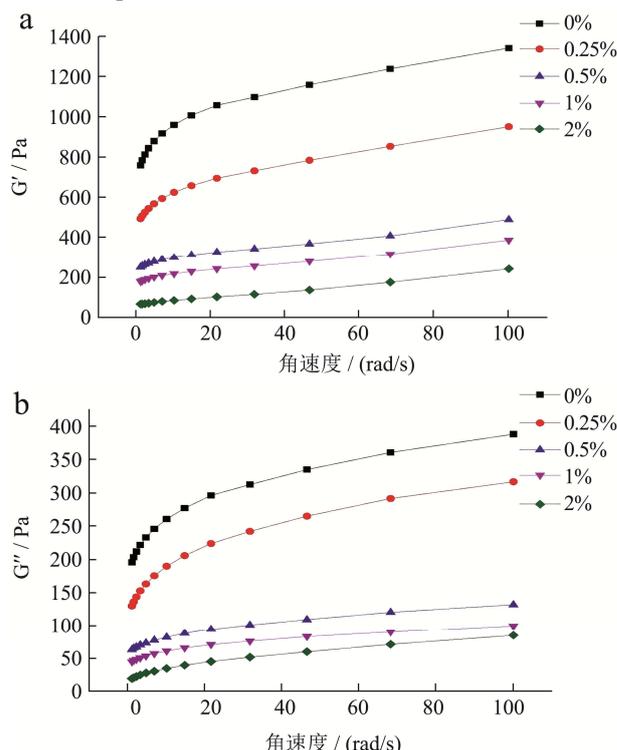


图2 应变对不同浓度右旋糖酐/蚕豆蛋白复合凝胶 (a) 弹性模量 ( $G'$ ) 和 (b) 黏性模量 ( $G''$ ) 的影响

Fig.2 Effects of strain on (a) elastic modulus ( $G'$ ) and (b) viscosity modulus ( $G''$ ) of dextran/faba bean protein composite gel with different dextran concentrations



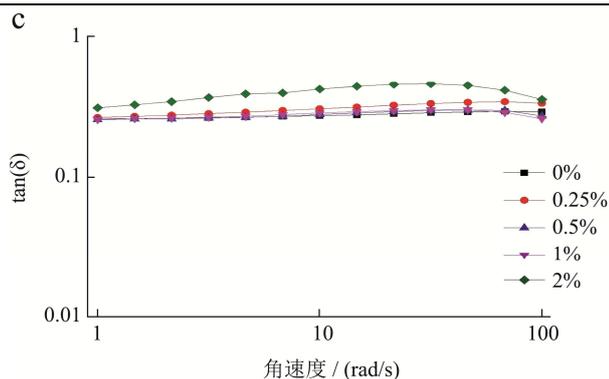


图3 不同浓度右旋糖酐/蚕豆蛋白复合凝胶动态流变学特性随频率变化的影响

Fig.3 Effect of frequency on the dynamic rheological properties of dextran/faba bean protein with different dextran concentrations

表5 右旋糖酐浓度对幂律拟合模型参数的影响

Table 5 Influence of dextran concentration on parameters of power law fitting model

右旋糖酐浓度/%	G'=K'f <sup>n'</sup>			G''=K''f <sup>n''</sup>		
	K'	n'	R <sup>2</sup>	K''	n''	R <sup>2</sup>
0	917.30	0.12	0.99	247.20	0.16	0.99
0.25	598.40	0.13	0.97	176.60	0.19	0.99
0.5	325.40	0.14	0.99	87.92	0.17	0.99
1	204.70	0.18	0.95	55.16	0.15	0.91
2	67.70	0.47	0.91	31.13	0.32	0.98

### 2.6 频率扫描

右旋糖酐/蚕豆蛋白复合凝胶的频率扫描如图3所示。在整个频率范围内，G'和G''随着频率的增加而增加；当频率恒定时，G'和G''随右旋糖酐浓度增加而降低。Sun等<sup>[26]</sup>对热诱导乳清分离蛋白-葡聚糖共轭凝胶的流变特性进行研究，频率扫描结果显示，乳清分离蛋白-葡聚糖共轭凝胶较乳清分离蛋白凝胶模量值（应变为1%时）大大降低，乳清分离蛋白凝胶模量值G'为12000 Pa、G''为7000 Pa；乳清分离蛋白-葡聚糖复合凝胶模量值G'为3000 Pa、G''为900 Pa。Goncalves等<sup>[27]</sup>研究发现将半乳甘露聚糖添加到乳清分离蛋白溶液中可以改善蛋白质凝胶的流变特性，当半乳甘露聚糖浓度提高到0.68%以上时，乳清分离蛋白-半乳甘露聚糖混合凝胶的模量值较低；可通过改变乳清分离蛋白/半乳甘露聚糖比率获得不同的流变性能用于新产品研发。在所有频率下，G'均超过G''，且未观察到重叠；损耗角正切tan(δ)的所有值在0.1至1.0之间，表明所有样品均具有显著的弹性特征和稳定的凝胶结构<sup>[28-30]</sup>。G'和G''随频率变化趋势采用幂律模型拟合，如表5所示，黏度常数K与样品的黏度有关。

较高的K值表示较高的黏度<sup>[31]</sup>。随着右旋糖酐浓度的增加，K值逐渐减小，与流动曲线趋势一致；频率模量指数n表明黏弹模量与频率的相关程度，数值越大影响越大，两模量与频率的相关程度，可以为食品原料的黏弹特性变化提供依据<sup>[32]</sup>。随着右旋糖酐浓度的增加，n'和n''值逐渐增大，表明与频率的相关性越大。

### 3 结论

本试验研究右旋糖酐浓度对GDL酸致蚕豆蛋白凝胶结构的影响。保水性测定结果表明，通过改变右旋糖酐浓度可以增加蚕豆蛋白凝胶保水性，右旋糖酐浓度在0.25%~1%之间，其与蚕豆蛋白发生美拉德反应，复合凝胶颜色较适宜；右旋糖酐/蚕豆蛋白复合凝胶流动曲线符合Carreau模型(R<sup>2</sup>>0.99)，具有假塑性流体的特性；应变扫描和频率扫描结果与凝胶强度趋势保持一致，添加右旋糖酐可软化蚕豆蛋白凝胶，使复合凝胶G'、G''降低，凝胶抗形变能力减弱。通过改变右旋糖酐添加量，控制右旋糖酐/蚕豆蛋白复合凝胶的流变特性，从而改善高蚕豆蛋白食品品质构特性和加工特性，为蚕豆蛋白在食品中的应用提供理论基础。本课题组下一步将继续深入研究右旋糖酐/蚕豆蛋白复合凝胶对不同食品产品感官等品质影响，以便为右旋糖酐/蚕豆蛋白复合凝胶在食品中的应用提供系统的理论支持。

### 参考文献

- [1] L' Hocine L, Martineau C D, Achouri A, et al. Broad Bean (Faba Bean) [M]. Pulses, 2020: 27-54
- [2] 杜瑞平,郭帅,潘娜,等.乳酸菌胞外多糖益生功能研究进展[J].动物营养学报,2018,30(7):2439-2444  
DU Ruiping, GUO Shuai, PAN Na et al. Research progress on probiotic function of lactic acid bacteria exopolysaccharides [J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2018, 30(7): 2439-2444
- [3] Coda R, Varis J, Verni M, et al. Improvement of the protein quality of wheat bread through faba bean sourdough addition [J]. LWT - Food Science and Technology, 2017, 82: 296-302
- [4] Zannini E, Jeske S, Lynch K, et al. Development of novel quinoa-based yoghurt fermented with dextran producer *Weissella cibaria* MG1 [J]. International Journal of Food Microbiology, 2018, 268: 19-26
- [5] 朱建华,杨晓泉.葡聚糖-大豆分离蛋白共混凝胶流变性质及微结构研究[J].中国食品学报,2012,12(11):42-50  
ZHU Jianhua, YANG Xiaquan. Research on the rheological properties and microstructure of dextran-soybean protein

- isolated mixed gels [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2012, 12(11): 42-50
- [6] Wang W, Shen M, Jiang L, et al. Influence of *Mesona blumes* polysaccharide on the gel properties and microstructure of acid-induced soy protein isolate gels [J]. Food Chemistry, 2020, 313: 126125
- [7] Xu Q, Qi B, Han L, et al. Study on the gel properties, interactions, and pH stability of pea protein isolate emulsion gels as influenced by inulin [J]. LWT - Food Science and Technology, 2020, 137: 110421
- [8] 夏晓凤.大豆可溶性多糖对大豆蛋白凝胶的影响及机理初探[D].无锡:江南大学,2015  
XIA Xiaofeng. Effect of soy soluble polysaccharide on the properties of soy protein gels and a brief study on its mechanism [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2015
- [9] Hickisch A, Beer R, Vogel R F, et al. Influence of lupin-based milk alternative heat treatment and exopolysaccharide-producing lactic acid bacteria on the physical characteristics of lupin-based yogurt alternatives [J]. Food Research International, 2016, 84: 180-188
- [10] Galante M, Boeris V, Risso P. Microstructural and textural properties of rennet-induced milk protein gel: effect of guar gum [J]. International Journal of Food Properties, 2017, 20(3): S2569-S2578
- [11] Langton M, Ehsanzamir S, Karkehabadi S, et al. Gelation of faba bean proteins-Effect of extraction method, pH and NaCl [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 103: 105622
- [12] Lan Q, Li L, Dong H, et al. Effect of soybean soluble polysaccharide on the formation of glucono- $\delta$ -lactone-induced soybean protein isolate gel [J]. Polymers, 2019, 11(12): 1997
- [13] 孟岳成,何珊珊,李延华,等.不同加热条件下牛乳美拉德反应程度的研究[J].现代食品科技,2015,31(1):158-165  
MENG Yuecheng, HE Shanshan, LI Yanhua, et al. Study on the Maillard reaction in milk under different heating conditions [J]. Modern Food Science and Technology, 2015, 31(1): 158-165
- [14] Gelatin Manufacturers Institute of America. Standard Testing Method for Edible Gelatin [S]. GMIA: New York, NY, USA, 2013
- [15] Wu M, Xiong Y L, Chen J, et al. Rheological and microstructural properties of porcine myofibrillar protein-lipid emulsion composite gels [J]. Journal of Food Science, 2009, 74(4): 77-87
- [16] Mende S, Jaros D, Rohm. Dextran modulates physical properties of rennet-induced milk gels [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2020, 55(4): 1407-1415
- [17] Liu J H, Luo Y H, Gu S Q, et al. Physicochemical, conformational and functional properties of silver carp myosin glycated with konjac oligo-glucomannan: implications for structure-function relationships [J]. Food Hydrocolloids, 2017, 72: 136-144
- [18] Ines K, Monika G, BaierS K, et al. Formation of whey protein isolate (WPI)-maltodextrin conjugates in fibers produced by needleless electrospinning [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66: 10283-10291
- [19] Li C, Wang J, Shi J, et al. Encapsulation of tomato oleoresin using soy protein isolate-gum aracia conjugates as emulsifier and coating materials [J]. Food Hydrocolloids, 2015, 45: 301-308
- [20] Murata M. Browning and pigmentation in food through the Maillard reaction [J]. Glycoconjugate Journal, 2021, 38: 283-292
- [21] 赵树静,刘宗尚,李红娟.乳制品中美拉德反应机制及控制方法研究进展[J].中国乳品工业,2021,49(3):37-41  
ZHAO Shujing, LIU Zongshang, LI Hongjuan. Research progress of Maillard reaction mechanism and control methods in dairy products [J]. China Dairy Industry, 2021, 49(3): 37-41
- [22] 赵秀萍.CIELAB 色空间及应用[J].印刷质量与标准化,2003, 5:11-13  
ZHAO Xiuping. CIELAB color space and its application [J]. Printing Quality and Standardization, 2003, 5: 11-13
- [23] 赵城彬,刘畅,张瑶,等. $\beta$ -葡聚糖对大豆分离蛋白酸致混合凝胶流变性的影响[J].中国粮油学报,2016,31(12):45-50  
ZHAO Chengbin, LIU Chang, ZHANG Yao, et al. Effect of  $\beta$ -glucans on rheology of soybean protein isolate acid-set mixed gels [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2016, 31(12): 45-50
- [24] Spotti M J, Loyeau P A, Marangon A, et al. Influence of Maillard reaction extent on acid induced gels of whey proteins and dextrans [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 91(7): 224-231
- [25] Zarour K, Llamas M G, Prieto A, et al. Rheology and bioactivity of high molecular weight dextrans synthesised by lactic acid bacteria [J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 174(15): 646-657