

DOI: 10.12161/j.issn.1005-6521.2024.07.006

右旋糖酐/蚕豆蛋白复合体系的流变及功能特性

陈玉春^{1,2}, 汤回花², 李欣忆², 陈骏飞², 刘毕琴², 阚欢^{1*}, 史巧^{2*}

(1. 西南林业大学 生命科学学院, 云南昆明 650224; 2. 云南省农业科学院农产品加工研究所, 云南昆明 650223)

摘要: 该文以右旋糖酐(dextran, L12)和蚕豆蛋白(faba bean protein isolate, FPI)为原料, 探究 L12 浓度(1%、4%)对 FPI-L12 复合体系流变及功能特性的影响。与纯蛋白对照组相比, 流变学性质结果表明, 随着 L12 浓度增加, FPI-L12 复合体系的表观黏度、黏弹性模量和滞后面积逐渐增大; 功能特性结果表明, 当 L12 的浓度为 4% 时, FPI-L12 复合体系的乳化活性(emulsifying activity index, EAI)、乳化稳定性(emulsion stability index, ESI)、泡沫稳定性(foam stability, FS)分别增加至(47.47±1.77) m²/g、(92.64±4.62)%和(92.82±1.98)%, 而起泡性(foamability, FA)在添加 1% 的 L12 时最高, 为(92.00±2.16)%, 且添加 4% L12 时 FA 低于对照组。此外, 添加 1% L12 使 FPI-L12 复合体系的胶凝温度从 86.43 °C 显著降低至 56.20 °C, 而添加 4% L12 复合体系的弹性模量(G')与黏性模量(G'')无交点并且随着 L12 浓度的升高, FPI-L12 复合凝胶的黏弹性模量逐渐增大。该研究为拓展 FPI-L12 复合体系在食品中的应用提供理论依据。

关键词: 右旋糖酐; 蚕豆蛋白; 流变学性质; 功能特性; 胶凝性

Rheological and Functional Properties of Dextran/Faba Bean Protein Isolate Composite System

CHEN Yuchun^{1,2}, TANG Huihua², LI Xinyi², CHEN Junfei², LIU Biqin², KAN Huan^{1*}, SHI Qiao^{2*}

(1. College of Life Sciences, Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China;

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

Abstract: In this paper, dextran (L12) and faba bean protein isolate (FPI) were used to explore the effects of L12 concentration (1% and 4%) on the rheological and functional properties of the FPI-L12 composite system. Compared with the conditions in control group (pure protein), the apparent viscosity, viscoelastic moduli and hysteresis area of the FPI-L12 composite system gradually increased as the L12 concentration increased. When the L12 concentration was 4%, the emulsifying activity index (EAI), emulsion stability index (ESI), and foam stability (FS) of the FPI-L12 composite system rose to (47.47±1.77) m²/g, (92.64±4.62)%, and (92.82±1.98)%, respectively. When supplemented with 1% L12, the foamability (FA) of the system reached the highest, which was (92.00±2.16)% and when added with 4% L12, the FA was lower than that of the control group. In addition, 1% L12 significantly reduced the gelling temperature of the FPI-L12 composite system from 86.43 °C to 56.20 °C, while the storage modulus(G') and loss modulus(G'') of the system with 4% L12 did not have an intersection. The G' and G'' of the FPI-L12 composite system gradually increased with the increase of the L12 concentration. This paper provided a theoretical basis for expanding the application of FPI-L12 composite system in food.

Key words: dextran; faba bean protein isolate; rheological property; functional property; gelling property

引文格式:

陈玉春, 汤回花, 李欣忆, 等. 右旋糖酐/蚕豆蛋白复合体系的流变及功能特性[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(7): 41-48.

CHEN Yuchun, TANG Huihua, LI Xinyi, et al. Rheological and Functional Properties of Dextran/Faba Bean Protein Isolate Composite System[J]. Food Research and Development, 2024, 45(7): 41-48.

基金项目: 国家自然科学基金项目(31960468)

作者简介: 陈玉春(1997—), 女(汉), 硕士, 研究方向: 食品加工与安全。

*通信作者: 阚欢(1965—), 女, 教授, 研究方向: 农林食品研究与开发; 史巧(1983—), 女, 副研究员, 研究方向: 食品生物技术。

蛋白质具有良好的增稠、胶凝、乳化、发泡、持水和持油等功能特性,为人类提供多种氨基酸,可以作为营养补充剂和功能性食品的成分^[1]。近年来,由于植物基食品的兴起,植物蛋白已成为国内外的研究热点。蚕豆具有蛋白质含量高(29%),营养丰富等特点被视为一种有价值的蛋白质来源,可作为功能性食品配料或营养补充剂^[2]。蚕豆蛋白(faba bean protein isolate, FPI)主要由球蛋白组成,其氨基酸均衡,含有生物活性物质^[3]。球蛋白含量过高会导致蛋白质的溶解性差^[4],而蚕豆蛋白由于球蛋白含量高,溶解性低,导致其功能特性差,因而在食品中的应用受到限制^[5]。

多糖可以改善蛋白质的性质,是由于多糖加入蛋白体系中可以增加其黏度,阻止或延迟蛋白质颗粒沉淀^[6]。Razi等^[7]研究发现罗勒籽胶能显著改善蛋清蛋白的流变学性质和功能特性。右旋糖酐(dextran, L12),是乳酸菌以蔗糖为底物产生的同型胞外多糖,由主链 α -(1 \rightarrow 6)、支链 α -(1 \rightarrow 3)、 α -(1 \rightarrow 2)或 α -(1 \rightarrow 4)连接而成,具有良好的生物相容性,作为增稠剂、稳定剂和胶凝剂等广泛应用于医药、食品、化工等领域^[8]。据报道,20 g/100 mL右旋糖酐能改善蚕豆蛋白的流变学性质^[9],而较低浓度右旋糖酐对蚕豆蛋白流变学性质及功能特性的影响未见报道。

因此,本研究以右旋糖酐与蚕豆蛋白复合体系为研究对象,探究右旋糖酐浓度(1%、4%)对蚕豆蛋白体系流变学性质(流动曲线、频率扫描、触变性)及功能特性(乳化性能、泡沫性能、胶凝特性)的影响,以期蚕豆蛋白的性质改善及开发应用提供理论参考。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

蚕豆蛋白:宝鸡森瑞生物化工有限公司;柠檬明串珠菌 L12:保藏于云南省农业科学院发酵食品微生物菌种库;磷酸氢二钠、磷酸二氢钠(均为分析纯):天津市风船化学试剂科技有限公司;蔗糖(分析纯):西陇科学股份有限公司;无水乙醇(分析纯):天津市永大化学试剂有限公司;MRS培养基:青岛高科技工业园海博生物技术有限公司;玉米油:中粮福临门食品营销有限公司;十二烷基硫酸钠(分析纯):北京索莱宝科技有限公司;透析袋(截留分子量 14 kDa):生工生物工程(上海)股份有限公司。

1.2 仪器与设备

YXQ-LS-75SII 高压灭菌锅:上海博迅仪器有限公司;MARS40 哈克流变仪、Multiskan Go 酶标仪:美国 Thermo 公司;LGJ-25C 冷冻干燥机:北京四环科学仪器厂有限公司;FJ200-SH 数显高速分散均质机:上海沪析实业有限公司;S210 pH 计:梅特勒托利多科技(中国)有限公司;DAWN HELEOS 8 激光光散射仪:美国

Wyatt 公司。

1.3 试验方法

1.3.1 右旋糖酐 L12 的提取

参照汤回花等^[10]的研究方法并稍作修改,取保藏于 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的柠檬明串珠菌 L12,按 1%(体积分数)接种于 MRS 液体培养基中, $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ 培养 24 h,活化 2 代后作种子液备用。然后取 1% 的种子液接种到 MRS 液体培养基,培养基中蔗糖含量为 10 g/100 mL;培养条件为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、80 r/min、48 h。将发酵液于 8 000 r/min 离心 10 min 去除菌体,上清液用 80% 的三氯乙酸调至终浓度 5%,磁力搅拌 2 h,8 000 r/min 离心 10 min 去除蛋白,所得上清液用 3 倍无水乙醇沉淀 12 h,8 000 r/min 离心 10 min 收集沉淀,每 12 h 换一次蒸馏水,透析液经冷冻干燥得右旋糖酐(L12)。

1.3.2 L12 的性质测定

参照汤回花等^[10]的研究方法,用多角度激光散射仪分析 L12 的重均分子量,采用核磁共振氢谱(^1H nuclear magnetic resonance, ^1H -NMR)分析 L12 的结构组成,并参照 Monteiro 等^[11]的研究方法,选择毛细管内径为 0.3~0.4 mm 的乌氏黏度计, $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下测定 L12 的特性黏度。使用 Huggins 公式和 Kraemer 公式来计算特性黏度 $[\eta]$ 。

$$\frac{\eta_{sp}}{C} = [\eta] + K'[\eta]^2 C \quad (1)$$

$$\frac{\ln \eta_r}{C} = [\eta] - K''[\eta]^2 C \quad (2)$$

式中: K' 为 Huggins 常数; K'' 为 Kraemer 常数; η_{sp} 为增比黏度,值为 $\eta_r - 1$,dL/g; C 为样品质量浓度,mg/mL; η_r 为相对黏度,dL/g;特性黏度 $[\eta]$ 为在无限稀释时的外推,dL/g。

1.3.3 FPI-L12 复合体系的制备

称取一定量的 FPI 及不同质量分数的 L12,加入 pH7.0、0.1 mol/L 的磷酸盐缓冲溶液,使得 FPI 的浓度为 15%,L12 浓度为 1%、4%,以不添加 L12 的为对照,取用前将各体系用磁力搅拌均匀。

1.3.4 FPI-L12 复合体系的流变学性质测定

1.3.4.1 流动曲线测定

参照汤回花等^[10]的研究方法并稍作修改,采用流变仪平板 pp50 系统,板间距 1 mm,应变 1%,剪切速率的范围为 0.01~1 000 s^{-1} ,测量温度 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$,系统平衡 3 min 后测定复合体系的表观黏度,通过 Carreau 模型拟合复合体系的表观黏度(η)随剪切速率(r)的变化趋势。

$$\eta = \frac{\eta_0 - \eta_{\infty}}{[1 + (\lambda r)^2]^{\frac{1-n}{2}}} + \eta_{\infty} \quad (3)$$

式中: η_0 为零剪切速率表观黏度,mPa·s; η_{∞} 为无限剪切时表观黏度,mPa·s; λ 为破坏流体结构的时间常数,s; n 为流动特性指数。

1.3.4.2 频率扫描

参照汤回花等^[10]的研究方法进行适当修改,采用振荡模式进行参数设定,应变 1%(处于线性黏弹区范围),测量温度 25 °C,剪切速率范围为 0.1~100 s⁻¹,测定在不同角速度范围内复合体系的弹性模量(G')与黏性模量(G'')。通过幂律模型拟合 G' 和 G'' 随剪切频率(f)的变化趋势。

$$G' = K' f^{n'} \quad (4)$$

$$G'' = K'' f^{n''} \quad (5)$$

式中: K' 、 K'' 为黏度常数; n' 、 n'' 为频率模量常数。

1.3.4.3 触变性测定

参照胡方洋等^[12]的研究方法进行适当修改,采用平板 pp50 系统,板间距 1 mm,测定温度为 25 °C,剪切速率从 0.01 s⁻¹ 增加到 100 s⁻¹,随后从 100 s⁻¹ 下降到 0.01 s⁻¹,通过 RheoWin Date Manager 软件计算滞后面积。

1.3.5 FPI-L12 复合体系的功能特性测定

1.3.5.1 乳化性能测定

乳化性能包括乳化活性(emulsifying activity index, EAI)和乳化稳定性(emulsion stability index, ESI),复合体系的乳化性能参照 Baskinci 等^[13]的研究方法进行适当修改,取 8 mL 复合体系与 2 mL 玉米油混合,用数显高速分散均质机在 20 000 r/min 下均质 2 min,立即取 50 μ L 乳液加入 5 mL 0.1% 的十二烷基硫酸钠(sodium dodecyl sulfate, SDS)溶液,涡旋振荡均匀,以 0.1% 的 SDS 溶液为空白,在波长 500 nm 处测定吸光度;静置 10 min 后用同样方法测定乳液的吸光度。EAI 和 ESI 的计算公式如下。

$$E = \frac{4.606 \times A_0 \times N}{C \times (1 - \varphi) \times 10\,000} \quad (6)$$

$$S = \frac{A_{10}}{A_0} \times 100 \quad (7)$$

式中: E 为乳化活性, m²/g; N 为稀释倍数, 100; C 为蛋白质量浓度, g/mL; φ 为乳液中油相的体积分数; S 为乳化稳定性, %; A_0 和 A_{10} 分别为乳液静置 0、10 min 时的吸光度。

1.3.5.2 泡沫性能测定

泡沫性能指标包括起泡性(foamability, FA)和泡沫稳定性(foam stability, FS),复合体系的泡沫性能参照 Baskinci 等^[13]的研究方法进行适当修改,取 10 mL 复合体系,用数显高速分散均质机在 20 000 r/min 下均质 2 min 后立刻转移到刻度管中,记录均质后 0 min 和 30 min 的泡沫体积。起泡性和泡沫稳定性的计算公式如下。

$$A = \frac{V_1}{V_0} \times 100 \quad (8)$$

$$F = \frac{V_{30}}{V_1} \times 100 \quad (9)$$

式中: A 为起泡性, %; F 为泡沫稳定性, %; V_0 为初始体积, mL; V_1 和 V_{30} 分别为均质后 0 min 和 30 min 的泡沫体积, mL。

1.3.5.3 胶凝特性测定

复合体系的胶凝特性参照李倩文等^[14]的研究方法进行适当修改,对不同浓度的 FPI-L12 复合体系进行温度和频率扫描。温度扫描测试条件:样板间隙 1 mm,上样 1 mL,在样品暴露的边缘涂一圈硅油以防止水分蒸发,由 20 °C 升温至 90 °C,90 °C 下保温 30 min 后再由 90 °C 降至 20 °C,升降温速率均为 5 °C/min,频率 1 Hz,应变 1%。温度扫描结束后,立即对样品进行频率扫描,频率扫描的测试条件为样板间隙 1 mm、角速度 1~100 rad/s、应变 1%、测试温度 25 °C。

1.4 数据处理与分析

每个试验做 3 次重复,采用 SPSS 26.0 和 Origin 2021 软件进行统计分析与作图,用单因素方差分析法检验结果统计学意义;所有结果以平均值 \pm 标准差表示。

2 结果与分析

2.1 L12 的理化性质分析

L12 理化性质分析见表 1。

表 1 L12 理化性质分析

Table 1 Physicochemical properties of dextran (L12)

右旋糖酐	重均分子量/Da	表观黏度/(mPa·s)	特性黏度/(dL/g)	糖苷键类型	糖苷键含量/%
L12	3.86 \times 10 ⁶	408.7	6.14	\rightarrow 6)- α -D-Glep-(1 \rightarrow 6)	87.79
				\rightarrow 3,6)- α -D-Glep-(1 \rightarrow 6)	12.21

由表 1 可知,L12 的重均分子量为 3.86 \times 10⁶ Da,在 0.01 s⁻¹ 下的表观黏度为 408.7 mPa·s。经过核磁分析后,L12 由 α -(1 \rightarrow 6) 主链和 α -(1 \rightarrow 3) 支链组成,其占比分别为 87.79% 和 12.21%;此外,特性黏度一般用来衡量溶剂中多糖链所占据的流体体积,主要与多糖的分子结构和溶剂性质相关^[15]。L12 在蒸馏水中的特性黏度为 6.14 dL/g。在前期研究中,比较右旋糖酐浓度对蚕豆蛋白溶液流变学性质的影响,发现在 15% 蚕豆蛋白溶液中添加 L12 的浓度低于 1% 时,FPI-L12-1% 复合体系的流变学性质与空白对照组相比无差异,而 L12 的浓度为 4% 时,接近实际添加浓度。故 L12 的浓度选择为 1%、4%,研究不同浓度下复合体系的流变学性质及功能特性。

2.2 FPI-L12 复合体系的流变学性质分析

2.2.1 流动曲线分析

L12 浓度对 FPI-L12 复合体系表观黏度的影响见图 1。

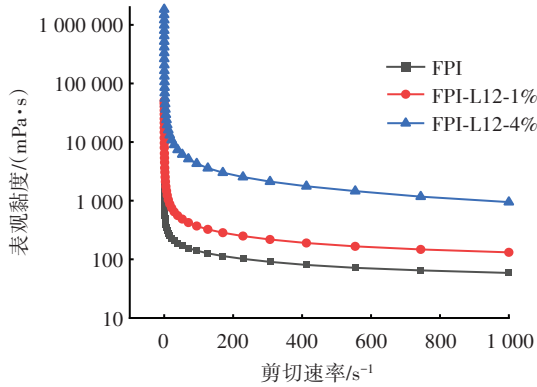


图1 L12浓度对FPI-L12复合体系表观黏度的影响

Fig.1 Effect of dextran (L12) concentration on apparent viscosity of faba bean protein isolate (FPI)-L12 composite system

由图1可知,随着剪切速率的增加,表观黏度先迅速下降后趋于平稳,表现出了剪切稀化行为,呈现假塑性特征。复合体系的表观黏度始终高于对照组且随着L12浓度的增加逐渐升高,这可能是由于L12具有增稠性,浓度越大使复合体系的黏度越高。吴云辉^[16]研究发现酪蛋白-魔芋葡甘聚糖体系的黏度随着魔芋葡甘聚糖浓度的增加逐渐升高。

采用Carreau模型对复合体系的流动曲线进行拟合,L12浓度对FPI-L12复合体系Carreau拟合模型参数的影响见表2。

表2 L12浓度对FPI-L12复合体系Carreau拟合模型参数的影响
Table 2 Effect of dextran (L12) concentration on the Carreau fitting model parameters of faba bean protein isolate (FPI)-L12 composite system

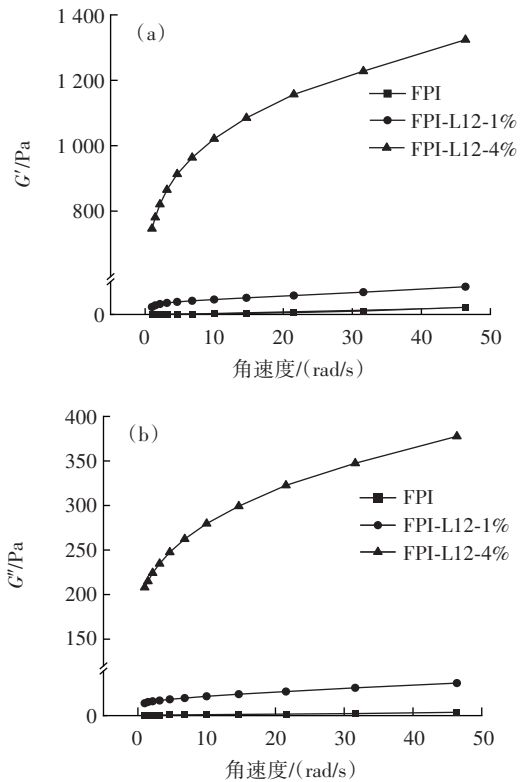
样品	模型参数				R ²
	$\eta_0/(\text{mPa}\cdot\text{s})$	$\eta_\infty/(\text{mPa}\cdot\text{s})$	λ/s	n	
FPI	6 907	0	22.97	0.31	0.99
FPI-L12-1%	57 710	0	50.57	0.38	0.99
FPI-L12-4%	5 501 000	0	246.90	0.27	0.99

如表2所示,在0.01~1 000 s⁻¹的剪切速率范围内能较好地拟合流动曲线。随着L12浓度的增加, η_0 逐渐增大,说明复合体系在零剪切速率下的表观黏度随着其浓度的增加而逐渐升高。 λ 值是破坏流体结构的时间常数, λ 值越小,表明破坏流体所需的剪切速率就越大^[10]。从Carreau拟合模型可以看出,随着L12浓度的增加,复合体系的 λ 值逐渐增大,破坏体系所需的剪切速率逐渐减小。

2.2.2 频率扫描分析

复合体系的黏弹性行为可以通过黏弹性模量变化来表示,L12浓度对FPI-L12复合体系黏弹性的变化见图2。

由图2可知,在角速度为0~50 rad/s时,复合体系



(a)为FPI-L12复合体系的弹性模量;(b)为FPI-L12复合体系的黏性模量。

图2 L12浓度对FPI-L12复合体系弹性模量(G')与黏性模量(G'')的影响

Fig.2 Effect of dextran (L12) concentration on storage modulus (G') and loss modulus (G'') of faba bean protein isolate (FPI)-L12 composite system

的弹性模量(G')与黏性模量(G'')随角速度的增加而逐渐增大,且 G' 远大于 G'' ,说明所有的样品都表现出弹性流体特征。加入L12后,复合体系的 G' 和 G'' 都高于对照组。白英等^[17]研究果胶浓度(1~5 g/L)对乳清蛋白流变学性质的影响,发现随着果胶浓度的增加,果胶-乳清蛋白混合体系的黏弹性模量逐渐增大,推测是由于果胶增加了混合体系的黏度,导致复合体系的 G' 和 G'' 逐渐增大。

G' 和 G'' 随频率的变化趋势用幂律模型拟合,L12浓度对FPI-L12复合体系幂律模型参数的影响见表3。

表3 L12浓度对FPI-L12复合体系幂律模型参数的影响
Table 3 Effect of dextran (L12) concentration on the power law model of faba bean protein isolate (FPI)-L12 composite system

样品	$G'=K'f^{n'}$			$G''=K''f^{n''}$		
	K'	n'	R ²	K''	n''	R ²
FPI	1.08	0.14	0.99	0.93	0.14	0.98
FPI-L12-1%	24.09	0.33	0.99	15.22	0.34	0.94
FPI-L12-4%	961.10	1.40	0.99	264.70	0.52	0.99

K 为黏度常数,数值越大,体系的弹性和表观黏度越高^[18]。由表 3 可知,复合体系的 K' 和 K'' 高于对照组,随着 L12 浓度的增加而逐渐增大,说明 L12 能够增加 FPI 体系的弹性和表观黏度,且浓度越高增加趋势越明显。频率模量指数 n 为黏弹性模量与频率的相关程度,数值越大影响越大^[19]。复合体系的 n' 和 n'' 值大于对照组,可能是由于 L12 增加了体系的黏弹性模量,使 FPI-L12 复合体系具有频率依赖性。

2.2.3 触变性分析

L12 浓度对 FPI-L12 复合体系触变性的影响见图 3。

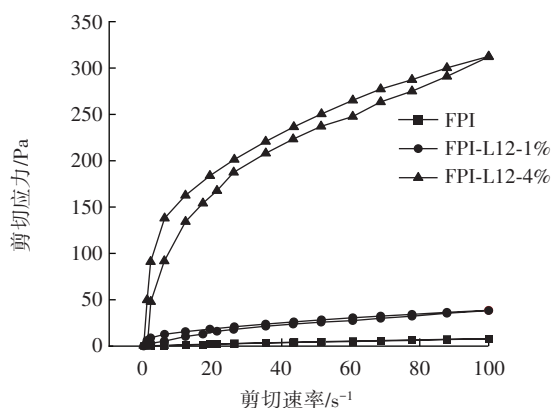


图 3 L12 浓度对 FPI-L12 复合体系触变性的影响

Fig.3 Effect of dextran (L12) concentration on thixotropy of faba bean protein isolate (FPI)-L12 composite system

滞后面积由哈克流变仪自带的软件计算得到,FPI-L12 复合体系的滞后面积见表 4。

表 4 FPI-L12 复合体系的滞后面积

Table 4 Hysteresis area of faba bean protein isolate (FPI)-dextran (L12) composite system

样品	滞后面积/(Pa/s)
FPI	557.5±51.1 ^c
FPI-L12-1%	2 622.0±45.7 ^b
FPI-L12-4%	20 992.3±191.9 ^a

注:不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

滞后环法是测定溶液触变性质的重要方法之一,滞后面积的大小与破坏触变结构所需的能量成正比^[20]。由图 3 和表 4 可知,FPI 体系和不同浓度的 FPI-L12 复合体系都有一定的触变性,相较于对照组,加入 L12 后 FPI-L12 复合体系的触变性增强,且添加 1% L12 复合体系的滞后面积低于添加 4% L12 的复合体系,可能是由于多糖添加量增大时,复合体系的黏度增大,从结构改变到恢复至初始状态所需时间较长^[21],所以添加 4% L12 复合体系的滞后面积更大。FPI 体系的滞后面积为 557.5 Pa/s,L12 浓度为 4% 时复合体系的滞后面积为 20 992.3 Pa/s,这个较高的数值可能与

4% L12 与 FPI 体系产生的更紧密的结构相对应。

2.3 FPI-L12 复合体系的功能特性分析

2.3.1 乳化性能分析

L12 浓度对 FPI-L12 复合体系乳化性能的影响见图 4。

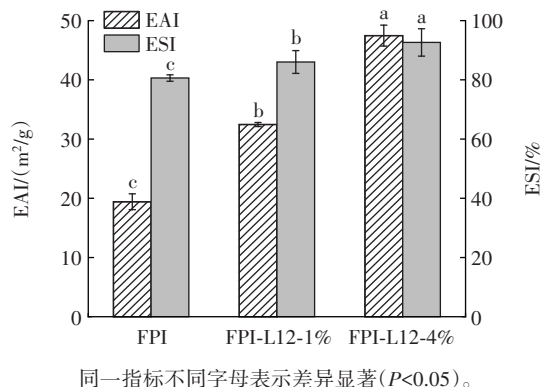


图 4 L12 浓度对 FPI-L12 复合体系乳化性能的影响

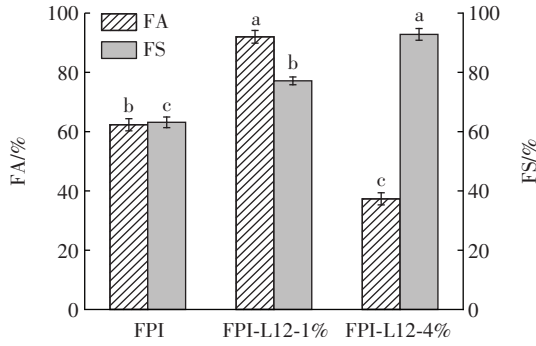
Fig.4 Effect of dextran (L12) concentration on emulsifying property of faba bean protein isolate (FPI)-dextran (L12) composite system

乳化活性与乳化稳定性可以反映出蛋白质形成及稳定乳化体系的能力,可用于衡量蛋白质的乳化性。由图 4 可知,对照组的 EAI 较低,为 $(19.42\pm 1.33)\text{m}^2/\text{g}$ 。加入 L12 后,复合体系的 EAI 显著提升($P<0.05$)。穆婉菊等^[22]研究菊粉添加量(2.5%~20%)对小麦面筋蛋白-菊粉复合物乳化特性的影响规律,发现添加菊粉后小麦面筋蛋白的 EAI 显著提高,推测是由于菊粉的吸水性强,改变了蛋白质内部水分分布,破坏了蛋白质分子间的静电斥力,促进蛋白质中疏水基团相互作用,从而增加了复合体系的 EAI。此外,对照组的 ESI 为 $(80.62\pm 1.09)\%$,随着 L12 浓度的增加,ESI 也呈现上升趋势。推测是由于 L12 浓度的增加使复合体系的黏度增加,限制油滴的聚集,从而使乳液的稳定性升高^[23]。

2.3.2 泡沫性能分析

L12 浓度对 FPI-L12 复合体系泡沫性能的影响见图 5。

由图 5 可知,随着 L12 浓度的增加,FPI-L12 复合体系的 FA 呈现先增加后减小的趋势。与对照组的 FA $[(62.33\pm 2.05)\%]$ 相比,当 L12 浓度为 1% 时,复合体系的 FA 增加至 $(92.00\pm 2.16)\%$,说明一定浓度的 L12 可以增加 FPI-L12 复合体系的起泡性。当 L12 浓度为 4% 时,复合体系的 FA 降低至 $(37.33\pm 2.05)\%$ 。结合 2.2.1 流动曲线的结果可知,此时复合体系的黏度过高,影响蛋白质的发泡能力,会使起泡性变弱,这也与高黏度时气泡在蛋白质体系中的分散困难有关^[24]。此外,FPI-L12 复合体系的 FS 显著高于对照组 $[(63.15\pm 1.78)\%]$ ($P<0.05$),随着 L12 浓度的增加,复合体系的



同一指标不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。

图5 L12浓度对FPI-L12复合体系泡沫性能的影响

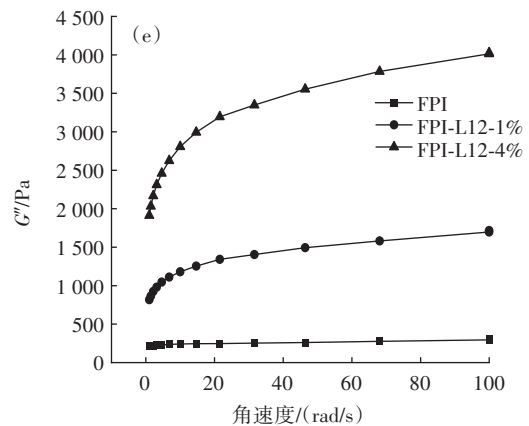
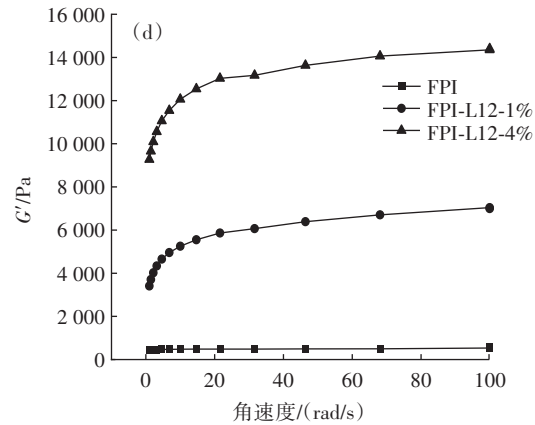
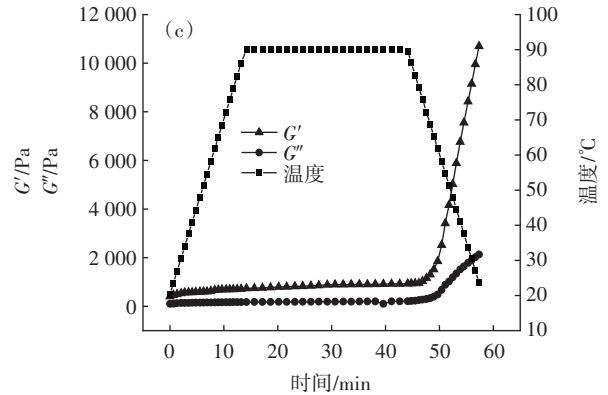
Fig.5 Effect of dextran (L12) concentration on foam property of faba bean protein isolate (FPI)-dextran (L12) composite system

FS逐渐升高,这可能是由于多糖增加了复合体系的黏弹性和界面膜面积,提升了界面稳定性,降低了界面面积损失和气泡粗化^[24]。

2.3.3 胶凝特性分析

L12浓度对FPI-L12复合体系胶凝特性的影响见图6。

在20~90℃对复合体系进行温度扫描以模拟凝胶的形成过程。由图6可知,同一温度下,FPI-L12复合体系的 G' 和 G'' 始终高于对照组,这可能是由于多糖与蛋白质形成了复杂的网络结构^[25]。在20~90℃升温阶段,对照组与添加1% L12的复合体系分别在86.43℃

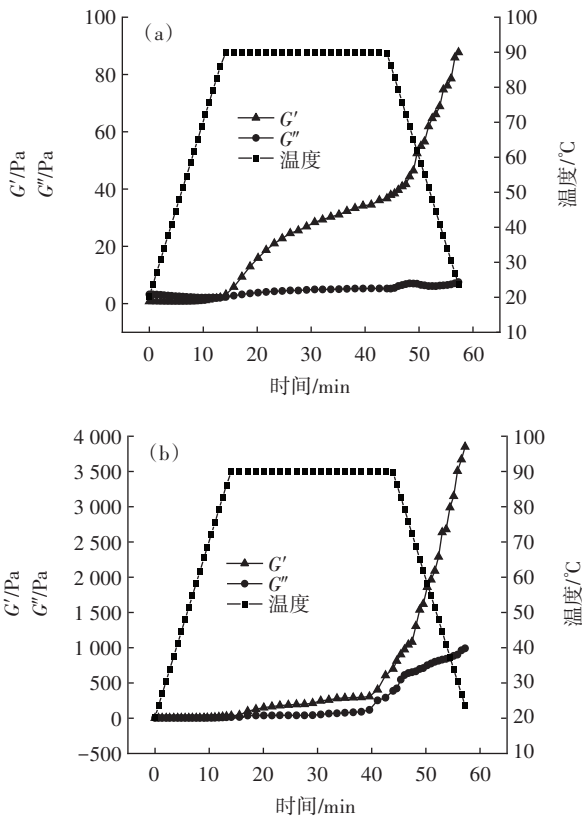


(a)FPI的胶凝特性;(b)FPI-L12-1%复合体系的胶凝特性;
(c)FPI-L12-4%复合体系的胶凝特性;(d)FPI-L12复合凝胶的弹性模量;(e)FPI-L12复合凝胶的黏性模量。

图6 FPI-L12复合体系温度扫描及频率扫描图

Fig.6 Temperature and frequency scanning diagrams of faba bean protein isolate (FPI)-dextran (L12) composite system

和56.20℃时 G' 与 G'' 出现交点,表明此温度下该体系由溶胶转变成凝胶。Tseng等^[26]研究菊粉浓度1%~4%对大豆豆浆流变学性质的影响,发现随着菊粉浓度的增加,豆浆形成凝胶的温度逐渐降低,推测是由于菊粉的加入改善了蛋白质之间的相互作用,从而促进蛋白质-胶质分散体在更低温度下形成凝胶。Lopes-Da-Silva等^[27]探究半乳甘露聚糖对大豆蛋白水解物胶凝



特性的影响,发现半乳甘露聚糖可以降低复合体系的胶凝温度,推测是由于蛋白质与多糖之间发生相分离,导致局部蛋白质浓度增加,降低复合体系的胶凝温度。而添加4% L12复合体系的 G' 始终大于 G'' ,未出现交点,表明一定浓度的右旋糖酐可以促使蚕豆蛋白在室温下形成凝胶。Netsopa等^[28]研究魏斯氏菌生产的右旋糖酐不同浓度(2.5%、5%、10%)的流变学性质,发现右旋糖酐由液体行为转变为固体行为的临界范围浓度是2.5%~5%。在90℃恒温阶段,对照组与FPI-L12复合体系的 G' 和 G'' 继续增加。李倩文等^[14]研究低聚木糖对乳清蛋白凝胶特性的影响,发现在90℃恒温阶段,复合体系的 G' 和 G'' 继续升高,原因是此阶段二硫键的形成促进蛋白分子交联,此趋势与试验结果一致。在90~20℃降温阶段,各体系的 G' 和 G'' 继续升高。Zhao等^[29]研究魔芋胶和结冷胶对硫酸钙诱导的大豆分离蛋白凝胶流变学特性的影响,发现在冷却阶段,所有复合凝胶的 G' 与 G'' 都增加,推测是由于此阶段凝胶结构中形成了其他非共价键和共价键。

由图6(d)、图6(e)可知,FPI-L12复合凝胶的 G' 大于 G'' ,且随着角速度的升高, G' 与 G'' 逐渐增大,表明FPI-L12复合凝胶具有频率依赖性且以弹性特征为主。与对照组相比,当L12的浓度从1%增加到4%时,复合凝胶的黏弹性模量逐渐增大,Pang等^[30]也发现随着刺槐豆胶浓度增加,豆乳酸凝胶的黏弹性模量逐渐增加,推测刺槐豆胶增加了凝胶网络结构的致密性,这与本研究的结果一致。因此,蛋白质凝胶可能在高浓度的多糖体系下形成复杂的网络结构。

3 结论

本文探究L12在不同浓度(1%、4%)下对FPI-L12复合体系的流变学性质和功能特性的影响。研究发现,随着L12浓度的增加,FPI-L12复合体系的表现黏度、黏弹性模量、触变性、乳化活性、乳化稳定性和泡沫稳定性都逐渐增加,而高浓度多糖由于使复合体系的黏度过高,气泡在蛋白质溶液中分散困难,导致起泡性呈现先升高后降低趋势。此外,添加L12显著降低了FPI-L12复合体系的胶凝温度,添加4% L12的复合体系在常温下就形成了凝胶。总体而言,添加L12能够改善FPI-L12复合体系的流变学性质和功能特性。本研究为拓展FPI的开发应用提供新思路。

参考文献:

[1] CAO Y P, MEZZENGA R. Food protein amyloid fibrils: Origin, structure, formation, characterization, applications and health implications[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2019, 269: 334-356.

[2] SAMAEI S P, GHORBANI M, TAGLIAZUCCHI D, et al. Functional, nutritional, antioxidant, sensory properties and comparative

peptidomic profile of faba bean (*Vicia faba*, L.) seed protein hydrolysates and fortified apple juice[J]. *Food Chemistry*, 2020, 330: 127120.

[3] NIVALA O, NORDLUND E, KRUS K, et al. The effect of heat and transglutaminase treatment on emulsifying and gelling properties of faba bean protein isolate[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 139: 110517.

[4] ZHA F C, DONG S Y, RAO J J, et al. Pea protein isolate-gum Arabic Maillard conjugates improves physical and oxidative stability of oil-in-water emulsions[J]. *Food Chemistry*, 2019, 285: 130-138.

[5] ECKERT E, HAN J, SWALLOW K, et al. Effects of enzymatic hydrolysis and ultrafiltration on physicochemical and functional properties of faba bean protein[J]. *Cereal Chemistry*, 2019, 96(4): 725-741.

[6] AZARIKIA F, ABBASI S. Mechanism of soluble complex formation of milk proteins with native gums (tragacanth and Persian gum)[J]. *Food Hydrocolloids*, 2016, 59: 35-44.

[7] RAZI S M, MOTAMEDZADEGAN A, SHAHIDI S A, et al. Physical and rheological properties of egg albumin foams are affected by ionic strength and basil seed gum supplementation[J]. *International Journal of Chemical Engineering*, 2019, 2019: 2502908.

[8] DÍAZ-MONTES E. Dextran: Sources, structures, and properties[J]. *Polysaccharides*, 2021, 2(3): 554-565.

[9] DONG H, LI Y T, JIA C H, et al. Mechanism behind the rheological property improvement of fava bean protein by the presence of dextran[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 133: 107907.

[10] 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.

[11] MONTEIRO S R, REBELO S, DA CRUZ E SILVA O A B, et al. The influence of galactomannans with different amount of galactose side chains on the gelation of soy proteins at neutral pH[J]. *Food Hydrocolloids*, 2013, 33(2): 349-360.

[12] 胡方洋, 陈金玉, 张坤生, 等. 薯类淀粉与卡拉胶共混体系特性及其对肌原纤维蛋白凝胶特性的影响[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(2): 1-8, 15.

HU Fangyang, CHEN Jinyu, ZHANG Kunsheng, et al. Characteristics of the mixed systems of tuber starch and carrageenan and its effect on the gel properties of myofibrillar protein[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(2): 1-8, 15.

[13] BASKINCI T, GUL O. Modifications to structural, techno-functional and rheological properties of sesame protein isolate by high pressure homogenization[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 250: 126005.

[14] 李倩文, 张莉杰, 张川, 等. 低聚木糖对糖基化乳清蛋白凝胶特性的影响[J]. *中国乳品工业*, 2023, 51(9): 15-20, 26.

LI Qianwen, ZHANG Lijie, ZHANG Chuan, et al. Effects of xylooligosaccharide on the properties of glycosylated whey protein gels[J]. *China Dairy Industry*, 2023, 51(9): 15-20, 26.

[15] TANG H H, LI X Y, CHEN J F, et al. Effects of dextran on the gel properties of faba bean protein isolates prepared using different processes[J]. *Gels*, 2023, 9(12): 972.

[16] 吴云辉. 酪蛋白-魔芋葡甘聚糖混合体系相互作用研究[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2018, 40(12): 51-58.

WU Yunhui. Study on the interaction in the casein-konjac glucomannan mixed system[J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2018, 40(12): 51-58.

[17] 白英, 杨月娇, 谢瑞鹏. 果胶-乳清蛋白混合比例和pH值对体系

- 流变学特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(18): 61-66.
- BAI Ying, YANG Yuejiao, XIE Ruipeng. Effects of mixture ratio and pH on the rheological properties of mixed pectin-whey protein system[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(18): 61-66.
- [18] MIERCZYŃSKA J, CYBULSKA J, ZDUNEK A. Rheological and chemical properties of pectin enriched fractions from different sources extracted with citric acid[J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 156: 443-451.
- [19] 王研, 杜先锋. 大豆蛋白-大豆膳食纤维凝胶的流变特性[J]. 安徽农业大学学报, 2016, 43(1): 11-16.
- WANG Yan, DU Xianfeng. Rheological properties of the soybean protein-soybean dietary fiber gel[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2016, 43(1): 11-16.
- [20] 庄晓丽. 胶原蛋白分散体系流变性质研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2017.
- ZHUANG Xiaoli. Rheological properties of collagen dispersion[D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2017.
- [21] 刘少英, 孟祥瑞, 赵文刚, 等. 普鲁兰多糖对牙膏流变学性质的影响[J]. 食品与药品, 2016, 18(6): 407-410.
- LIU Shaoying, MENG Xiangjing, ZHAO Wengang, et al. Effects of pullulan on rheological properties of toothpaste[J]. Food and Drug, 2016, 18(6): 407-410.
- [22] 穆婉菊, 冯佳, 李秀秀, 等. 菊粉对小麦面筋蛋白理化性质的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(16): 64-68.
- MU Wanju, FENG Jia, LI Xiuxiu, et al. Effect of inulin on physico-chemical properties of wheat gluten[J]. Food Science, 2019, 40(16): 64-68.
- [23] DICKINSON E. Hydrocolloids at interfaces and the influence on the properties of dispersed systems[J]. Food Hydrocolloids, 2003, 17(1): 25-39.
- [24] 蒋珊珊, 吴斌, 赵志峰, 等. 全蛋液-魔芋葡甘聚糖复合体系功能特性的研究[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(20): 21-25.
- JIANG Shanshan, WU Bin, ZHAO Zhifeng, et al. Research on the functional properties of liquid whole egg-konjac glucomannan complex system[J]. Food Research and Development, 2017, 38(20): 21-25.
- [25] 谢仁香, 覃小丽, 谢勇, 等. 氧化魔芋葡甘聚糖的添加量对乳清分离蛋白凝胶性能的影响[J/OL]. 食品与发酵工业(2023-08-14)[2023-10-10].<https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.035923>.
- XIE Renxiang, QIN Xiaoli, XIE Yong, et al. Effect of the concentration of oxidized konjac glucomannan on gel properties of whey protein isolate gel[J/OL]. Food and Fermentation Industries(2023-08-14)[2023-10-10].<https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.035923>.
- [26] TSENG Y C, XIONG Y L. Effect of inulin on the rheological properties of silken tofu coagulated with glucono- δ -lactone[J]. Journal of Food Engineering, 2009, 90(4): 511-516.
- [27] LOPES-DA-SILVA J A, MONTEIRO S R. Gelling and emulsifying properties of soy protein hydrolysates in the presence of a neutral polysaccharide[J]. Food Chemistry, 2019, 294: 216-223.
- [28] NETSOPA S, NIAMSANIT S, SAKLOETSAKUN D, et al. Characterization and rheological behavior of dextran from *Weissella confusa* R003[J]. International Journal of Polymer Science, 2018, 2018: 5790526.
- [29] ZHAO H B, CHEN J, HEMAR Y, et al. Improvement of the rheological and textural properties of calcium sulfate-induced soy protein isolate gels by the incorporation of different polysaccharides[J]. Food Chemistry, 2020, 310: 125983.
- [30] PANG Z H, LUO Y W, LI B R, et al. Effect of different hydrocolloids on tribological and rheological behaviors of soymilk gels[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 101: 105558.

加工编辑:王雪
收稿日期:2023-12-09