

大豆蛋白-大豆膳食纤维凝胶的流变特性

王 研, 杜先锋*

(安徽农业大学茶与食品科技学院, 合肥 230036)

摘 要: 为研究恒定的蛋白纤维质量比及不同蛋白浓度对大豆蛋白复合大豆膳食纤维 (SPI-SF) 凝胶的影响, 选用小形变振荡流变仪进行粘弹性测定, 并以幂律模型分析流变数据。实验结果表明: SPI-SF 的储能模量 (G') 和损耗模量 (G'') 随蛋白浓度的增加大幅增加, 且随时间的延长而逐渐增加; 蛋白浓度 3% 的 SPI-SF 的 $G' < G''$, 而蛋白浓度 4% ~ 8% 的 SPI-SF 的 $G' > G''$, 表明除蛋白 3% 的 SPI-SF 外其他 SPI-SF 均形成了凝胶。由幂律模型拟合得到相关系数 n' 和 n'' , 及参数 A 和 z , 由 n' 、 n'' 的变化趋势可知, 蛋白浓度 4% ~ 8% SPI-SF 形成的凝胶为弱凝胶, 且通过其参数 A 的增大、 $1/z$ 的减小可知: 随蛋白浓度的增加, SPI-SF 凝胶的粘性减弱而弹性增强。

关键词: 大豆蛋白; 大豆膳食纤维; 流变特性; 幂律模型

中图分类号: TS201.7

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2016)01-0011-06

Rheological properties of the soybean protein-soybean dietary fiber gel

WANG Yan, DU Xianfeng

(School of Tea and Food Science & Technology, Anhui Agricultural University, Hefei 230036)

Abstract: The rheological properties of soybean protein-soybean dietary fiber gel (SPI-SF) were determined using a small deformation oscillation. The rheological data were analyzed with the power law models to study the effect of protein concentration on the gel with a constant mass ratio of protein and fiber. Results showed as follow. The storage modulus (G') and Loss modulus (G'') of all SPI-SF samples increased substantially as a gradual increase of the protein concentration; $G' < G''$ of the SPI-SF with 3% protein and $G' > G''$ of the SPI-SF with 4%-8% protein indicated that all SPI-SF formed gels except the SPI-SF with 3% protein. The correlation coefficients of n' and n'' , and the power law parameters of A and z were fitted by the power law model, and the trends of n' and n'' indicated that SPI-SF gels of 4%-8% protein were weak. With an increase of parameter A and a decrease of parameter $1/z$ decreased, the viscosity became weaker and the elasticity became stronger in the SPI-SF gel along with an increase of the protein concentrations.

Key words: soybean protein; soybean dietary fiber; rheological properties; power law models

大豆膳食纤维 (soybean dietary fiber, SF) 指大豆中那些不被人体所消化吸收的高分子糖类的总称, 其中主要包括纤维素、果胶、甘露醇和木聚糖等, 它虽不为人体提供任何营养成分、不产生能量, 却具有重要的生理作用, 被医学界和营养学界公认为“第七大营养素”, 是预防高血压、心脏病、冠心病、肥胖症、糖尿病等富贵病的重要食物成分^[1-4], 可显著降低血液中胆固醇、促进胃肠蠕动、预防便

秘与肠癌、排毒养颜及减肥瘦身^[5]等。

传统豆制品生产过程产生大量副产物豆渣, 豆渣中富含的大豆膳食纤维会随豆渣排放而流失^[6], 而将大豆膳食纤维在蛋白凝胶中加以利用, 不但能增加食品中的膳食纤维含量、增加食品的保健功能、提高原料利用率, 更可为豆制品企业解决大量副产物所带来的烦恼。目前, 国内外对大豆蛋白与大豆膳食纤维复合凝胶的形成研究中, 较多集中在添加

收稿日期: 2015-05-12

作者简介: 王 研, 硕士。

* 通信作者: 杜先锋, 博士, 教授, 博士生导师。E-mail: dxp@ahau.edu.cn

豆渣的豆腐及全豆腐的制作方面,且都注重工艺的改进及产品的品质评价上,而对于大豆蛋白与豆渣中主要成分-大豆膳食纤维所形成复合凝胶的理化特性的深度分析研究较少^[6-12]。

本试验对恒定的蛋白与纤维素质量比及不同蛋白浓度的蛋白-纤维复合凝胶体系的流变特性进行了研究,探讨了在TG酶催化下该复合体系的粘弹特性的变化,以期在一定程度上为研究富含大豆膳食纤维的大豆蛋白凝胶制品的凝胶机理研究提供参考和理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料

大豆分离蛋白(SPI)购自河南省昆华生物技术有限公司,蛋白含量93%(N×5.71)^[13];豆渣自制。谷氨酰胺转氨酶(TGase):广西庞博生物提供;CBZ-GLN-GLY和L-glutamic acid- γ -monohydroxamate(标准品):Sigma提供;其他试剂均为分析纯。

GYB40-10S型高压均质机,上海华东均质机厂;FJ200-SH型高速分散均质机,上海标本模型厂;DHR-3型动态流变仪,美国TA公司。

1.2 方法

1.2.1 TG酶活性测定 TG酶活性参照的Fork和Cole的分光Hydroxamate^[14]分析法进行测定(96.7 U·g⁻¹)。

1.2.2 大豆膳食纤维(SF)的高压均质 豆渣用水反复清洗至用清水多次洗涤直至洗涤水澄清透明为止脱除蛋白,将水洗后的豆渣于60℃烘箱烘干,用普通粉碎机将豆渣粉碎,再用无水乙醚将豆渣脱脂,再于60℃烘干^[15]。用酸碱消煮法^[16]测定其纤维素含量。

配制3%(w/v)SF悬浮液,经胶体磨初步研磨后,以100MPa的均质压力对SF悬浮液进行高压均质2次。得到的超细SF悬浮液4℃冷藏备用。

1.2.3 TG酶促大豆蛋白-大豆膳食纤维(SPI-SF)凝胶的制备 配制一定蛋白浓度(% w/v)、SF添加量(% v/v)的SPI-SF混合物150 mL,用2 mol L⁻¹ NaOH溶液和1 mol L⁻¹ HCl溶液调至pH 7.5。搅拌均匀,在水浴锅中逐渐升温至100℃保持5 min后取出,放在冰水中迅速冷却至45℃,添加20 U·g⁻¹(蛋白质)的TGase并边加边搅拌,杯口封好保鲜膜,于45℃水浴中保温2 h。

其中,SF添加量由前期实验结果选定,大豆蛋白质与大豆膳食纤维质量比例为3:1。

1.2.4 动态流变特性测定 参照1.2.3中蛋白和SF比例制备SPI-SF混合液。制得蛋白浓度3%、4%、5%、6%、7%和8%(w/v)的SPI-SF混合液各100 mL,经混匀、加热、冷却后加入TG酶。

加酶后的SPI-SF混合物经低速离心(1500 r min⁻¹, 15 min)^[17]除去气泡,取适量样品加到动态流变仪的底板上,采用平行板式探头(半径40 mm, 0°, 间距1 mm)。将平板充满样品,擦除多余液体后在表面涂上薄薄一层硅油以防止水分蒸发。

时间扫描条件如下:保持恒定温度(45℃)、恒定应变(0.7%)以及恒定频率(1 Hz),记录0~100 min内动态模量(G', G'')和其他参数的变化情况。

频率扫描条件如下:时间扫描结束后,保持温度、应变不变,测定频率从0.1~10 Hz过程中G'和G''及其他参数的变化^[18-19]。

1.3 振荡流变数据的分析

频率扫描首先用一个对数函数模型来描述G'和G''对频率(f)的依赖性,用方程(1)和(2):

$$\log G' = A' \log f + B' \quad (1)$$

$$\log G'' = A'' \log f + B'' \quad (2)$$

其中G'和G''是频率范围0~10 Hz下的储能模量和损耗模量,A'和A''分别是两直线的斜率。

参照Alvarez和Canet^[20]的方法进行振荡流变数据的分析。用如下方程(3)和(4)来表征G'和G''对角频率(ω)依赖性的函数模型:

$$G' = G'_0 \omega^{n'} \quad (3)$$

$$G'' = G''_0 \omega^{n''} \quad (4)$$

其中,G'_0(Pa)和G''_0(Pa)分别为1 rad/s下的储能模量和损耗模量;参数n'和n''(均无量纲)表征 ω 对于两模量的影响程度。G'_0表示每个正弦剪切形变周期储存和恢复的能量,它的增加表明样品的硬度与弹性凝胶结构的形成有关;G''_0表示每个正弦应变周期的释放能量,表示样品中粘性单元的扩展和延伸。

Gabirele等^[21]在2001年提出了幂律模量的概念,以确定酸奶、生面团和果酱这类弱凝胶的流变学行为。弱凝胶模型参数z(配位数)是指流动单元相互作用以应对流动的数量,流动模式用下面方程(Eq.5)表示:

$$|G^*| = \{ [G'(\omega)]^2 + [G''(\omega)]^2 \}^{1/2} + A\omega^{1/z} \quad (5)$$

其中,A为常数,可表示流动的流变单元间相互作用的强弱;这里讲的流变单元是基本的构象结构,是通过流动单元以一定程度的配合形成的小螺旋来连接的。用三级结构表征一种凝胶就是就A而言进行描述的,A与LVR区间内、角频率为1 rad/s

下样品的总硬度和抗形变性有关; 而 z 可以看作是凝胶相互作用强度的一个简便的度量^[22]。

1.4 数据分析

所有实验重复 3 次。数据和模型中参数均采用 SPSS 19.0 进行了单因素方差分析, 平均数比较采用邓肯的多范围检验 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 TG 酶酶促 SPI-SF 凝胶的流变特性

实验样品首先进行动态应变扫描以确定出线性粘弹性区域 (LVR), LVR 是在应变范围内 G' 和 G'' 随应变振幅的变化而变化的区域。

为探究恒定的蛋白与纤维素质量比、不同蛋白浓度的 TG 酶酶促 SPI-SF 凝胶流变特性的影响, 测定 G' 和 G'' 作为衡量凝胶的参数。图 1 给出了不同蛋白浓度 SPI-SF 在添加 TG 酶后, 作为时间函数的 G' 和 G'' 的典型曲线。可明显看出, 各 SPI-SF 样品的 G' 和 G'' 均随着反应时间的延长而增加, 但振荡幅度及相位角 (或称为损耗角 δ) 的正切值 $\tan \delta$ ($\tan \delta = G''/G'$) 的变化均有不同。由图 1(a), G'' 始终高于 G' , $\tan \delta$ 呈现先上升后下降趋势且始终大于 1, 这样的曲线通常说明没有形成凝胶。“凝胶时间”定义为加入凝固剂后, G' 超过 G'' 所需要的时间; 而在 1 Hz 下, G' 与 G'' 的交叉即被定义为“凝胶点”。由图 1(b), G'' 在反应初始阶段高于 G' , 随着反应时间的延长 G'' 的增幅逐渐减小而 G' 的增幅保持增大, 最终在 45.6 min 以后 G' 始终大于 G'' , 故蛋白浓度 4% 的 SPI-SF 混合体系的凝胶时间为 45.6 min, 加酶后的第 45 min 即为其凝胶点; 同样地, 蛋白浓度 5% 的 SPI-SF 混合体系 (图 1(c)) 的凝胶时间为 4.3 min, 加酶后的第 4.3 min 即为其凝胶点。而在图 1(d)~(f) 中均没有观察到凝胶点, 加酶后各样品的 G' 均远大于 G'' , 这是由于加酶后凝胶形成的太过迅速原因。由图 1(a)~(f) 可知, SPI-SF 混合体系浓度越大, G' 和 G'' 值越大、 $\tan \delta$ 越小 (G' : 6.01~1370.74 Pa; G'' : 26.52~106.29 Pa; $\tan \delta$: 5.7672~0.0749), 且除蛋白浓度 3% SPI-SF 外其他浓度相对较大的 SPI-SF 样品均形成了凝胶, 且凝胶时间随着蛋白浓度的增大而急剧缩短 (图 1(b) 和 1(f))。在复合凝胶体系中, 当蛋白浓度较低时, 体系中由于超细 SF 的存在而使蛋白浓度更低, 一方面蛋白质分子间的间距过大使分子间相互作用 (氢键、二硫键、疏水相互作用、静电引力及范德华力)^[23] 太微弱而不足以相互结合形成凝胶, 另一方面蛋白浓度低, 在 TG 酶的催化下形成蛋白质聚集体, 但由于蛋白

有效浓度过低不能够进一步相互结合形成凝胶; 随蛋白浓度的增加, 体系中蛋白有效浓度增大, 分子间距足够小、相互作用力足够大, 虽有超细 SF 的存在, 大豆蛋白也能够 TG 酶的催化下使其肽链谷氨酰胺残基和氨基的各种伯胺 (例如赖氨酸残基) 的 γ -羧基酰胺基团发生氨基转移反应, 形成异肽键 (ϵ - $(\gamma$ -谷氨酰基) 赖氨酸), 导致蛋白质的聚集和三维网络结构的形成, 即形成凝胶; 且蛋白浓度越大, 三维网络结构越紧密, 凝胶强度越大。

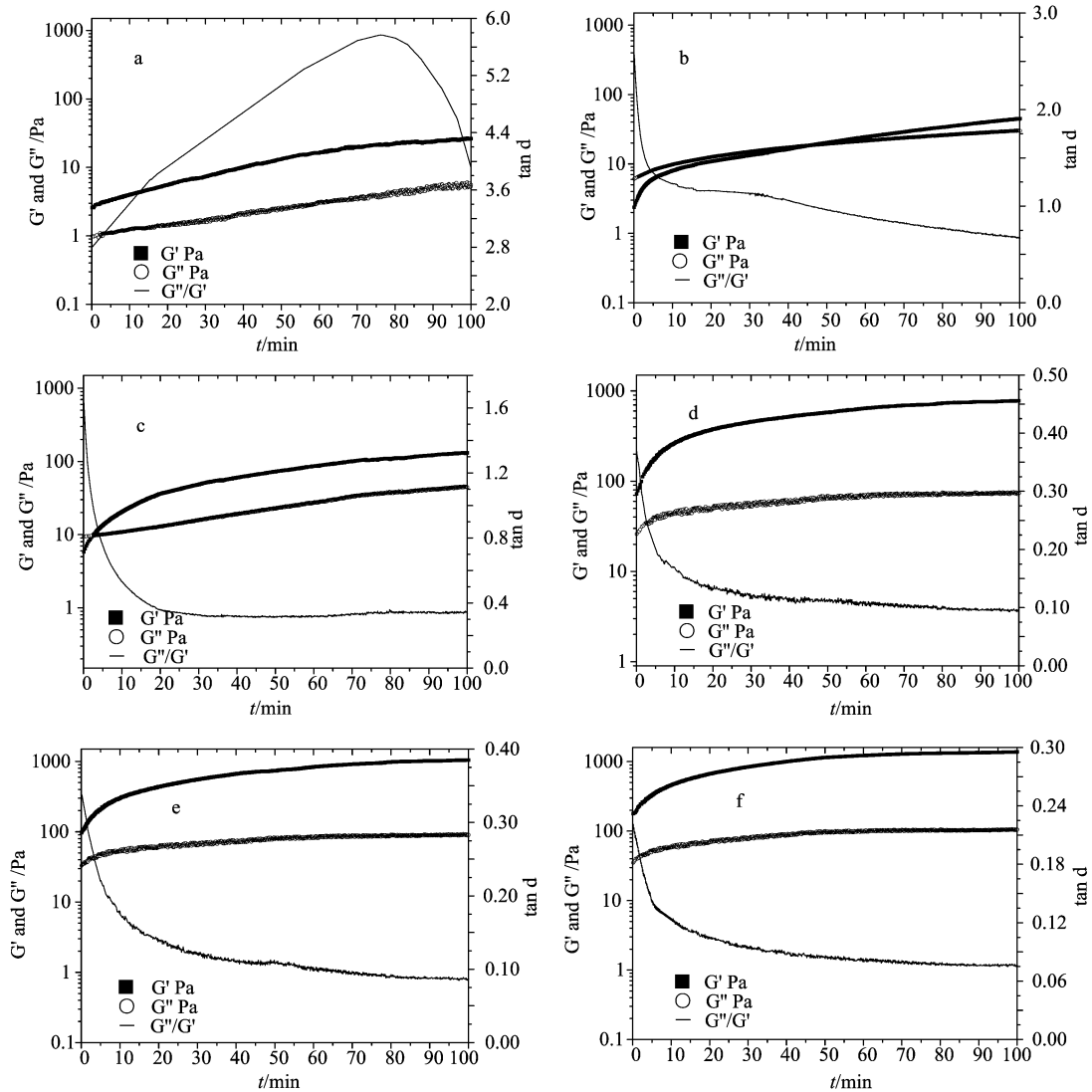
2.2 SPI-SF 凝胶体系的频率扫描分析

动态频率扫描在 LVR 内进行以探究 G' 和 G'' 对频率 (f) 依赖性。各样品的机械测定结果如图 2 所示, 且表征各样品的 G' , G'' 对频率 (f) 依赖性的幂律模型 (Eq. 3, 4) 分析结果如表 1 所示。 G' 和 G'' 分别用来表征一个凝胶体系呈现固体状的 (弹性) 和液体状的 (粘性) 的程度^[24]。 $\tan \delta$ 是循环形变中能量损失与能量储存的一个相对度量: 当 $G' > G''$ (即 $\tan \delta < 1$) 时, 体系主要表现弹性; 当 $G' < G''$ ($\tan \delta > 1$) 时, 体系主要表现粘性^[19]。故对于一种典型的凝胶来说, G' 和 G'' 的曲线会彼此平行且 $G' > G''$ 。由图 2 可知, 蛋白浓度 4~8% 的样品在频率从 0.1 变化到 10 Hz 时, G' 和 G'' 值基本不随频率变化; 而对于蛋白浓度 3% 的样品, G' 和 G'' 发生交叉, 表明该样品中分子间的交联很弱处于半流体状态, 当振荡频率低时可以相应而流动, 而振荡频率变大时, 由于体系的迟滞阻力表现出抗力, 呈现固体性质^[25]。此外, 由 $\log G'$ 和 $\log G''$ 对 $\log f$ 作曲线的斜率可知, 蛋白浓度 4%~8% 样品的斜率为 0.0256~0.0836 < 0.09 且 $G' > G''$, 表明体系的 G' 和 G'' 不依赖于频率, 这种图形常被认为是弱凝胶的典型曲线^[24]; 而蛋白浓度 3% 的样品斜率达到了 0.3375, 且 G' 和 G'' 有交叉, 表现出对于频率的依赖性, 表明没有形成凝胶, 此结果也与前面的分析相一致。

对所有 SPI-SF 样品的动态粘弹性通过幂律模型进行进一步分析。 G' 和 G'' 对 ω 的依赖性能够用来估计凝胶结构的有效数据^[20]。对数坐标中几乎所有样品都呈线性关系 (结果未给出), 故可以建立一个以 ω 为储能模量和释能模量自变量的幂函数模型。表 2 给出了 G' 和 G'' 作为 ω 的函数的幂函数参数, 其中 G'_0 表示每个正弦剪切形变周期储存和恢复的能量, G''_0 表示每个正弦应变周期的释放能量; G'_0 和 G''_0 的相关系数 n' 和 n'' 表示 ω 对于两模量的影响程度, 数值越大影响越大, 也表明模量对 ω 依赖性也更大一些的。由表 2 可知, SPI-SF 体系的浓度越大每个正弦周期的储能和释能都增大, 这通常与

能够导致凝胶结构具有更高硬度的更致密网络结构有关。表2中整体上各样品的 n'' 值比 n' 值要高,表明各样品的 G'' 的线性行为要比 G' 的弱一些。进一步, n' 和 n'' 值的横纵变化变化趋势不同,纵向比较:蛋白浓度3%的SPI-SF的 n' 和 n'' 明显高于其他样品的,而蛋白浓度4%~8%的SPI-SF的 n' 和 n'' 都呈现先下降而后(8%)有所上升的趋势;横向比较:除

蛋白3%的SPI-SF的 $n' > n''$ 外,其他SPI-SF的 $n' < n''$ 且 n'' 值与 n' 值稍有不同,表明该SPI-SF的 G'' 对频率的依赖性要比 G' 的稍大一些。而一个具有良好特性的凝胶,在一定范围内其 G' 和 G'' 会以相同的比例变化,即 n' 和 n'' 近似相等^[26]。因此,蛋白浓度4~8%的SPI-SF混合体系的流变行为通常被认为与弱凝胶的形成有关^[27]。



1(a) ~1(f): 蛋白浓度3%~8%; TG酶: 20 U/g; (■) G' , (○) G'' , (—) $\tan \delta$

1(a) - 1(f): protein concentration of 3%-8%; TGase: 20 U/g; (■) G' , (○) G'' and (—) $\tan \delta$

图1 TG酶酶促的不同蛋白浓度SPI-SF混合凝胶体系的储能模量(G')和损耗模量(G'')与时间的变化曲线

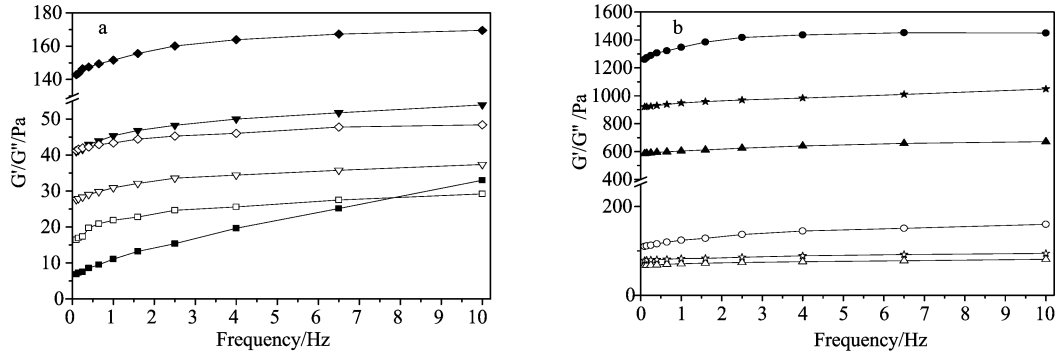
Figure 1 Curves of storage modulus (G') and loss modulus (G'') versus time of the whole soybean system at different protein concentrations with TGase

表3给出了方程(5)中两个参数A和z的计算值,而这两个参数能够描述在LVR中食品体系的物料性能^[22]。正如预想的那样,随着蛋白浓度的增加,A值也随之增加,浓度最大的样品的A值也达到最大值1283.78 Pa。参数A用来评价凝胶在面对一个相当快的变形时所表现出的凝胶硬度,幂律

函数指数 $1/z$ 可作为评价凝胶相对粘弹性的一个简单的度量,故它接近0时凝胶表现出理想的弹性特性(不依赖于频率)并随着粘弹性的增加而增加,即z随着粘弹性增加而降低^[22]。实验结果表明,随蛋白浓度的增加参数z也呈增加趋势,即 $1/z$ 逐渐减小,表明随蛋白浓度增加体系的粘弹性增加,逐

渐偏离粘性而偏向弹性, 这与模量对频率 f 依赖性

的结论相一致。



(■) G' - 3%, (□) G'' - 3%; (▼) G' - 4%, (▽) G'' - 4%; (◆) G' - 5%, (◇) G'' - 5%; (▲) G' - 6%, (△) G'' - 6%; (★) G' - 7%, (☆) G'' - 7%; (●) G' - 8%, (○) G'' - 8%

图 2 不同蛋白浓度的 SPI-SF 凝胶体系的频率扫描曲线

Figure 2 Frequency sweep measurements of the gel formation from different protein concentrations of SPI-SF

表 1 表征模量 (G' , G'') 对频率 (f) 依赖性的幂律模型分析

Table 1 Power law to characterize the frequency (f) dependence of modulus (G' , G'')

斜率 Slope	蛋白质浓度 Protein concentration					
	3%	4%	5%	6%	7%	8%
S'	$0.3375^a \pm 0.0001$	$0.0614^b \pm 0.0023$	$0.0394^{cd} \pm 0.0019$	$0.0294^{cd} \pm 0.0021$	$0.0256^d \pm 0.0008$	$0.0345^{bc} \pm 0.0001$
S''	$0.1280^a \pm 0.0011$	$0.0680^e \pm 0.0009$	$0.0352^e \pm 0.0002$	$0.0381^d \pm 0.0027$	$0.0392^d \pm 0.0014$	$0.0836^b \pm 0.0007$

注: 相同列的平均数上的不同小写字母表示差异显著性 ($P < 0.05$)。下同。

Note: The average values in the same column followed by different small letters mean significant difference at the 0.05 level. The same below.

表 2 基于频率扫描实验的方程 (3) 和 (4) 的幂律参数

Table 2 Power law parameters of Eq. (3) and (4) based on frequency sweep tests

浓度/% Concentration	G'			G''		
	$(G'_0 \pm SD) (Pa s^{n'})$	n'	R^2	$(G''_0 \pm SD) (Pa s^{n''})$	n''	R^2
3	$7.28^f \pm 1.01$	$0.2136^{bA} \pm 0.0918$	0.9211	$16.91^f \pm 0.78$	$0.1232^{aB} \pm 0.0376$	0.9255
4	$41.29^e \pm 0.95$	$0.0426^{bB} \pm 0.0173$	0.9415	$27.88^e \pm 0.70$	$0.0487^{bA} \pm 0.0162$	0.9514
5	$143.57^d \pm 0.88$	$0.0288^{bB} \pm 0.0095$	0.9337	$41.59^d \pm 0.63$	$0.0341^{cA} \pm 0.0075$	0.9786
6	$588.04^c \pm 0.09$	$0.0184^{bB} \pm 0.0090$	0.9795	$67.99^c \pm 0.38$	$0.0208^{cA} \pm 0.0122$	0.9466
7	$922.11^b \pm 0.45$	$0.0157^{bB} \pm 0.0085$	0.9585	$78.98^b \pm 0.25$	$0.0230^{cA} \pm 0.0115$	0.9401
8	$1272.71^a \pm 0.61$	$0.0318^{aB} \pm 0.0054$	0.8938	$110.87^a \pm 0.91$	$0.0552^{bA} \pm 0.0232$	0.9067

注: 相同列的平均数上的不同小写字母表示差异显著性 ($P < 0.05$); 相同行的平均数上的不同大写字母表示差异显著性 ($P < 0.01$)。

Note: The average values in the same column followed with different small letters mean significant difference at the 0.05 level. And those with different capital letters mean significant difference at the 0.01 level.

表 3 基于频率扫描实验的方程 (5) 的幂律参数

Table 3 Power law parameters of Eq. (5) from frequency sweep tests

样品浓度 Sample concentration	G^*		
	$(A \pm SD) (Pa s^{1/2})$	Z	R^2
3%	$17.13^f \pm 0.41$	$4.8657^b \pm 0.3010$	0.9333
4%	$43.70^e \pm 0.67$	$8.5885^b \pm 0.1448$	0.9343
5%	$146.93^d \pm 0.29$	$12.2446^b \pm 0.2109$	0.9524
6%	$592.60^c \pm 0.11$	$13.1867^{ab} \pm 0.3238$	0.9716
7%	$928.69^b \pm 0.85$	$19.9891^a \pm 0.1448$	0.9405
8%	$1283.78^a \pm 0.80$	$19.7558^a \pm 0.0387$	0.8743

3 结论

在恒定的蛋白纤维质量比、不同蛋白浓度 TG 酶酶促 SPI-SF 复合体系的流变测定中, 时间扫描时发现所有的 SPI-SF 样品的储能模量 (G') 和损耗模量 (G'') 均随时间的延长而增大, 体系的结构随之逐渐建立; 频率扫描结果表明, 蛋白 3% 的 SPI-SF 的 G' 和 G'' 发生相交, 且 $\log G'$ 和 $\log G''$ 对 $\log F$ 作曲线的斜率分别为 0.3375 和 0.1280, 均大于 0.1, 表明对频率有依赖性, 未形成凝胶; 而蛋白浓度 4%~8% 的 SPI-SF 混合体系的 G' 和 G'' 的曲线相互平行、 G' 的值始终大于 G'' 的值, 斜率为 $0.0256 \sim 0.0836 < 0.01$, 表明其对频率无依赖性, 形成了真正的凝胶。对所有 SPI-SF 样品的动态粘弹性通过幂律模型进行了进一步分析, 由方程(3)~(4)拟合出的 n' 和 n'' , 以及及方程(5)拟合出的 A 和 z 的变化趋势分析可知, 蛋白浓度 4~8% 的 SPI-SF 所形成的凝胶为弱凝胶, 且由参数 A 的增大、 $1/z$ 的减小表明: 随蛋白浓度的增加, SPI-SF 凝胶体系的粘性减弱而弹性增强。

参考文献:

- [1] LO G, EVANS R, PHILLIPS K, et al. Effect of soy fiber and soy protein on cholesterol metabolism and atherosclerosis in rabbits [J]. *Atherosclerosis*, 1987, 64(1): 47-54.
- [2] GREENWALD P, LANZA E, EDDY G A. Dietary fiber in the reduction of colon cancer risk[J]. *Journal of the American Dietetic Association*, 1987, 87(9): 1178- 1188.
- [3] 赵萍. 粮油食品工艺[M].兰州: 甘肃科学技术出版社, 2004: 214-215.
- [4] MONTONEN J, KNEKT P J, RVINEN R, et al. Whole-grain and fiber intake and the incidence of type 2 diabetes[J]. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 2003, 77(3): 622- 629.
- [5] 姚茂昌. 实用大豆制品加工技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009: 202-206.
- [6] 怀丽华, 闫喜霜, 石彦国. 加工条件对无渣豆腐品质的影响[J]. *食品科学*, 2003, 24(11): 73-75.
- [7] 王长存, 董明盛, 聂影, 等. 全子叶生物活性豆腐凝胶特性的研究[J]. *江西农业学报*, 2007, 19(6): 92-96.
- [8] 王维坚, 田海娟. 无渣豆腐加工中凝胶工艺的研究[J]. *食品与机械*, 2010, 26(3): 51-53.
- [9] 刘成梅, 蓝海军, 刘伟, 等. 用动态超高压微射流制备全豆营养型无渣豆腐的方法[P]. CN 101181036A, 2008-5-21.
- [10] 松本亮介, 中井良雄. 全豆豆浆及豆腐的制造方法[P]. 日本专利, 1986192256, 1986-8-26.
- [11] MINE Y, YOSHIHARA S, AZUMA K, et al. Preparations of Tofu from soymilk containing Okara hydrolysates treated with immobilized transglutaminase [J]. *Journal-Japanese Society of Food Science and Technology*, 2006, 53(1): 39-47.
- [12] JOO S I, KIM J E, LEE S P. Physicochemical properties of whole soybean curd prepared by microbial transglutaminase [J]. *Food Science and Biotechnology*, 2011, 20(2): 437-444.
- [13] AOAC. Official methods of analysis[R]. 4th ed. Arlington, V A: Association of Official Analytical Chemists, 1980.
- [14] FOLK J E, COLE P W. Structural requirements of specific substrates for guinea pig liver transglutaminase [J]. *The Journal of Biological Chemistry*, 1965, 240(7): 2951-2960.
- [15] 刘玲玲, 田云波, 刘雄. 纳米豆渣纤维素的理化性质和表征特性[J]. *食品科学*, 2012, 33(9): 41-46.
- [16] 中华人民共和国卫生部.GB/T 5009.10 植物类食品中粗纤维的测定[S]. 北京: 标准出版社, 2003.
- [17] 华欲飞, STEVE W C, WANG Q. 大豆蛋白-亲水胶体混合凝胶的强度和相形为[J]. *无锡轻工业大学学报*, 2004, 23(2): 21-26.
- [18] CHEE Y G, AISHAH A, LATIFF L H, et al. Gelling of microbial transglutaminase cross-linked soy protein in the presence of ribose and sucrose [J]. *Food Research International*, 2009, 42(10): 1373- 1380.
- [19] NICOLE M, HUA Y F, MOSS V M C, et al. Gelation behavior and rheological properties of salt- or acid- induced soy proteins soft tofu- type gels [J]. *Journal of Texture Studies*, 2014, 45(1): 62-73.
- [20] ALVAREZ M D, CANET W. Dynamic viscoelastic behavior of vegetable-based infant purees [J]. *Journal of Texture Studies*, 2013, 44(3): 205-224.
- [21] GABRIELE D, DE CINDIO B, D'ANTONA P. A weak gel model for foods [J]. *Rheologica Acta*, 2001, 40(2): 120-127.
- [22] CAMPO-DEANO L, TOVAR C A. The effect of egg albumen on the viscoelasticity of crab sticks made from Alaska Pollock and Pacific Whiting surimi [J]. *Food Hydrocolloids*, 2009, 23(7): 1641-1646.
- [23] 杨芳. 豆腐凝胶形成机理及水分状态与品质关系研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2009: 40-44.
- [24] KRISTO E, BILIADERIS C G, TZANETAKIS N. Modeling of rheological, microbiological and acidification properties of a fermented milk product containing a probiotic strain of *Lactobacillus paracasei* [J]. *International Dairy Journal*, 2003, 13(7): 517- 528.
- [25] 李向红, 华欲飞, 刘展, 等. 大豆蛋白/葡聚糖混合体系相行为及流变性质的研究[J]. *中国粮油学报*, 2010, 25(2): 40-49.
- [26] CLARK A H, ROSS-MURPHY S B. Structural and mechanical properties of biopolymer gels [J]. *Advances in Polymer Science*, 1987: 83; 57-192.
- [27] AHMED J, RAMASWAMY H S. Dynamic rheology and thermal transitions in meat-based strained baby foods [J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 78(4): 1274-1284.