

# 乳清蛋白- $\beta$ -葡聚糖美拉德产物热凝胶流变性的研究

许晶<sup>1</sup>, 齐宝坤<sup>2</sup>, 赵青山<sup>1</sup>, 金花<sup>1</sup>, 张晓松<sup>1</sup>, 江连洲<sup>2</sup>

(1. 东北农业大学理学院, 黑龙江哈尔滨 150030) (2. 东北农业大学食品学院, 黑龙江哈尔滨 150030)

**摘要:** 蛋白质与多糖通过美拉德反应形成的复合物具有很好的乳化性, 然而关于蛋白质/多糖美拉德产物在凝胶体系中应用的研究很少。本研究采用干热法将乳清分离蛋白(WPI)与不同分子量(20~210 ku)的大麦 $\beta$ -葡聚糖(BGL)制备成WPI-BGL美拉德产物, 通过分光光度计测定褐变强度, 利用荧光光谱分析结构, 并探讨美拉德反应对WPI-BGL热凝胶流变性的影响。结果表明: WPI-BGL20的褐变强度最大, WPI-BGL的荧光强度都低于WPI, WPI与BGL发生美拉德反应使体系的结构发生很大改变。离子强度对WPI-BGL凝胶流变性有一定影响, WPI与BGL发生美拉德反应会降低WPI的凝胶 $G'$ , 原因可能是在WPI-BGL体系中蛋白质分子间二硫键的形成和疏水相互作用受到了抑制, 导致WPI-BGL凝胶的弱化。随着BGL分子量的减小, WPI-BGL的凝胶 $G'$ 逐渐降低, 这表明美拉德反应进程越大, 形成的凝胶越弱。

**关键词:** 乳清蛋白;  $\beta$ -葡聚糖; 美拉德产物; 热凝胶; 流变性

文章编号: 1673-9078(2016)1-111-115

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2016.1.018

## Rheological Properties of Thermal Gels Prepared from Whey Protein- $\beta$ -glucan Maillard Products

XU Jing<sup>1</sup>, QI Bao-kun<sup>2</sup>, ZHAO Qing-shan<sup>1</sup>, JIN Hua<sup>1</sup>, ZHANG Xiao-song<sup>1</sup>, JIANG Lian-zhou<sup>2</sup>

(1.College of Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

(2.College of Food Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

**Abstract:** Protein/polysaccharide conjugates obtained by Maillard reaction (MR) have good emulsifying properties. However, only few reports are available on the use of MR protein/polysaccharide gel systems. Whey protein isolate (WPI) and barley  $\beta$ -glucan (BGL) with different molecular weights (20~210 ku) were used to prepare WPI-BGL Maillard products by dry heat processing in this study. Browning intensity was measured by spectrophotometry, the structure was analyzed by fluorescence spectra, and the effect of MR on the rheological properties of WPI-BGL thermal gel was explored. The results showed that the browning intensity was highest for WPI-BGL20, the ionic strength affected the rheological properties of WPI-BGL gel, the fluorescence intensity of WPI-BGL samples was lower than that of WPI, and the MR between WPI and BGL resulted in a significant change in structure and a decrease in gel storage modulus ( $G'$ ). This was possibly due to the suppression of disulfide bond formation between protein molecules and hydrophobic interactions in WPI-BGL systems, leading to weakening of the WPI-BGL gel.  $G'$  of the WPI-BGL gel reduced gradually with a decrease in BGL molecular weight, indicating that a greater extent of MR results in a weaker conjugate gel.

**Key words:** whey protein;  $\beta$ -glucans; Maillard products; thermal gels; rheological property

蛋白质由于具有乳化性、发泡性、凝胶性和溶解性等特性被广泛应用于食品工业中。乳清分离蛋

收稿日期: 2015-03-30

基金项目: 黑龙江省博士后基金(LBH-Z11237); 哈尔滨市应用技术研究与开发项目(2014RFQXJ123)

作者简介: 许晶(1979-), 女, 副教授, 博士研究生, 研究方向为植物蛋白工程

通讯作者: 江连洲(1960-), 男, 博士, 教授, 研究方向为粮食、油脂及植物蛋白工程

白是奶酪制作工业的副产品, 主要由球蛋白组成, 包括 $\beta$ -乳球蛋白、 $\alpha$ -乳白蛋白、牛血清白蛋白和免疫球蛋白<sup>[1]</sup>。近年来, 乳清蛋白的生物学活性和功能特性成为研究热点, 为了扩大其在食品及其他领域的应用, 很多改善乳清蛋白功能特性的研究受到广泛关注<sup>[2]</sup>。糖化是改善蛋白质功能性的一种有效途径, 是将蛋白质和糖通过美拉德反应制备成共价复合物的方法。由于美拉德反应对食品质量和感官具有重要影响, 国内外许多学者对蛋白质与糖共价复合物进行研究。与单

糖和二糖相比较,多糖与蛋白质反应形成复合物能够明显改善蛋白质的理化性质<sup>[3]</sup>。

$\beta$ -葡聚糖是一种活性多糖,具有较高的溶解性和较强的吸水溶胀能力,在水溶液中能够发挥多种生理功能,如调节免疫、降血糖、降血脂、降胆固醇等<sup>[4]</sup>,这些生理功能与其溶液流变性有密切关系。 $\beta$ -葡聚糖可以与蛋白质通过美拉德反应进行共价复合,不同分子量的多糖可以改变蛋白质原有的空间结构,进而改善美拉德产物的功能性质<sup>[5]</sup>。

乳清蛋白- $\beta$ -葡聚糖美拉德产物可以应用于酸奶、豆乳等乳制品加工中,产品具有乳清蛋白和 $\beta$ -葡聚糖双重营养特性的同时,还具备美拉德反应的色泽、香味及感官特性。近年来,有许多关于蛋白质与多糖发生美拉德反应改善蛋白质功能性质的研究,如:卵清蛋白、大豆蛋白和乳清蛋白与葡聚糖、壳聚糖及半乳甘露聚糖等多糖共价复合<sup>[6]</sup>。然而,这些研究大多数集中在蛋白质热性质和乳化性的研究,很少有关于美拉德反应对蛋白质凝胶性质影响的研究,而目前还未见有关乳清蛋白- $\beta$ -葡聚糖美拉德产物凝胶性的相关研究。本试验采用干热法制备乳清蛋白- $\beta$ -葡聚糖美拉德产物,旨在美拉德反应和多糖分子量对乳清蛋白热凝胶流变性的影响,为进一步了解蛋白质和多糖美拉德产物的凝胶机制提供一定理论依据。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 材料、试剂与amp;仪器

大麦:市售;乳清分离蛋白:郑州天顺食品添加剂有限公司。

耐热 $\alpha$ -淀粉酶:天津市光复精细化工研究所;Sepharaose CL-4B柱子:美国GE公司;Dextran系列标准样品:美国Sigma公司;无水乙醇、磷酸、盐酸均为分析纯。

F2102型植物试样粉碎机:天津泰斯特仪器有限公司;GalanzWD900G型微波炉:中国顺德格兰仕微波炉电器有限公司;旋转蒸发仪:梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;LGJ-1冷冻干燥机:上海医用离心机厂;722型分光光度计:杭州汇尔仪器设备有限公司;日立F2000荧光光谱谱仪:天美(中国)科学仪器有限公司;RHS600哈克流变仪:德国HAKKE公司。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 大麦 $\beta$ -葡聚糖(BGL)的制备

大麦麸粉筛过筛后加入4倍质量的无水乙醇,在80℃下进行回流脱脂2 h。烘干后加水混合,料液比为

1:12,调节混合液温度为95℃,pH为10,在微波功率为720 W下进行微波辅助提取12 min。然后调节pH为6.5,加入耐热 $\alpha$ -淀粉酶除淀粉,搅拌酶解至碘液不变蓝。调节pH为4.5,静置2 h,然后离心分离去沉淀除蛋白。将上清液调节pH至中性,进行真空浓缩,向浓缩液中缓慢搅拌加入无水乙醇使最终浓度达到60%,4℃静置过夜,离心分离收集沉淀。无水乙醇洗涤沉淀,沉淀加水复溶,然后冷冻干燥,得BGL提取物。将BGL配成3% (m/V)的溶液,用2 mol/L磷酸调pH为2.5,85℃下分别水解60、100、150、210 min,冷却至室温,调pH为7,冷冻干燥,得到不同分子量BGL。BGL的分子量采用凝胶过滤色谱法测定<sup>[7]</sup>,分别为210、140、80和20 ku,分别用BGL210、BGL140、BGL80和BGL20来表示。

#### 1.2.2 WPI-BGL美拉德产物的制备

采用干热法制备WPI-BGL美拉德产物。将WPI分散于蒸馏水中配成10% (m/V)的蛋白溶液,然后加入5% (m/V)不同分子量的BGL,搅拌均匀配成混合溶液,调节混合溶液pH为7后冷冻干燥。将冻干粉在相对湿度为63% (饱和KI溶液)、温度为60℃下干热处理5 d,得到WPI-BGL美拉德产物,4℃储藏。WPI与不同分子量BGL形成的美拉德产物分别用WPI-BGL20、WPI-BGL80、WPI-BGL140、WPI-BGL210来表示,对照组为不含BGL的WPI。测定WPI-BGL美拉德产物的褐变强度和荧光光谱。

#### 1.2.3 凝胶的制备

将WPI-BGL美拉德产物分散于离子强度分别为250 mM和500 mM的NaCl溶液中溶解,配成浓度为10% (m/V) WPI-5% (m/V) BGL的溶液。将配好的溶液密封,于90℃水浴中加热30 min,冷却至室温,然后4℃冷藏12 h即得凝胶,测定凝胶的流变性和持水性。

#### 1.2.4 美拉德产物褐变强度和荧光光谱的测定

将WPI-BGL美拉德产物复溶于水配成溶液,将溶液稀释至WPI浓度为1% (m/V),BGL浓度为0.5% (m/V)。褐变强度采用分光光度计进行测定,以420 nm下的吸光度 $A_{420}$ 表示。荧光光谱采用荧光光谱仪进行测定,激发波长280 nm,发射波长测定范围为300~450 nm。

#### 1.2.5 凝胶流变性的测定

采用哈克流变仪对凝胶流变性进行测定。将样品溶液置于流变仪平板间,平板间距1 mm,频率1 Hz,应变0.1%,溶液由25℃升温至90℃并在90℃保温30 min,然后冷却至25℃并保持15 min,记录此过程样品的储能模量(G')随时间的变化,初始的应变和

频率扫描试验显示流变性测定是在凝胶线性黏弹性范围内；时间扫描后再对凝胶进行频率扫描，扫描范围0.01~10 Hz，记录储能模量（G'）随频率变化趋势，探讨凝胶的稳定性。

### 1.2.6 统计分析

采用统计学软件SPSS17.0对试验数据进行统计分析，采用Origin8.5软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 美拉德产物褐变强度分析

美拉德反应晚期产物是产生褐色的主要物质，褐变强度为美拉德反应进程的一个重要指标。图1为WPI-BGL美拉德产物的褐变强度，用420 nm处的吸光度 $A_{420}$ 表示。当WPI与BGL发生美拉德反应后，棕色出现，吸光度增加。与对照组WPI相比，WPI-BGL210几乎没有改变吸光度，随着样品BGL分子量的降低（210~20 ku），体系的吸光度逐渐增加，即褐变强度增大，WPI-BGL20的褐变强度最大，这表明20 kDa的BGL与WPI美拉德反应活性最强，也就是说，低分子量的BGL利于体系美拉德反应的进行。这可能是由于多糖分子量越小，空间位阻就越小，这使得多糖分子更容易接近蛋白质的氨基，利于反应的进行，因此有更大的反应进程<sup>[8]</sup>。

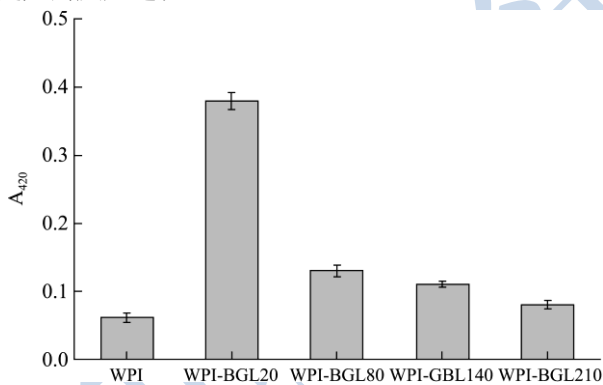


图1 WPI-BGL 美拉德产物褐变强度

Fig.1 Browning intensity of WPI-BGL Maillard products

### 2.2 美拉德产物荧光光谱分析

色氨酸的荧光发射通常用作蛋白质构象变化的指示器，由于色氨酸对局部环境的高灵敏性，因此蛋白质的荧光强度反映水相中暴露色氨酸残基的平均值。图2为WPI-BGL美拉德产物的荧光光谱，由图2可以看出，WPI-BGL美拉德产物的荧光强度均低于WPI，这表明WPI与BGL发生美拉德反应降低了WPI的荧光强度，荧光强度的降低可能是由于多糖链的屏蔽作用<sup>[9]</sup>。Hattori等<sup>[10]</sup>发现 $\beta$ -乳球蛋白/羧甲基环状糊

精美拉德产物比单一蛋白质的荧光强度低，这与本研究的结果相似。WPI-BGL美拉德产物体系中，蛋白质的荧光强度随着多糖分子量的减小而降低，而WPI-BGL20的荧光强度降低的最显著。20 ku的BGL为低分子量多糖，与WPI发生美拉德反应的活性最强（图1），因此，与其他WPI-BGL体系相比，WPI-BGL20的结构会发生更显著的变化。WPI-BGL20的最大荧光峰波长（ $\lambda_{max}$ ）由352 nm（对照组WPI）变化到361 nm，其他的WPI-BGL体系显示出与WPI相似的 $\lambda_{max}$ ，这表明WPI-BGL20的 $\lambda_{max}$ 发生了红移。Jiménez-Castaño等<sup>[11]</sup>对 $\beta$ -乳球蛋白进行荧光光谱分析，发现 $\lambda_{max}$ 受色氨酸残基周围环境极性的影响，而WPI-BGL20的 $\lambda_{max}$ 变化是由于蛋白质色氨酸残基周围的构象变化导致的。

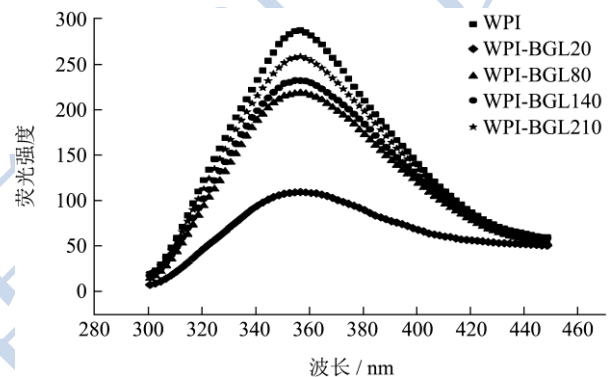


图2 WPI-BGL 美拉德产物荧光光谱

Fig.2 Fluorescence spectra of WPI-BGL Maillard products

### 2.3 凝胶流变性分析

球蛋白的热凝胶是由于聚集形成的，热处理会导致蛋白质分子结构发生改变，同时引起包埋在分子内部的疏水性氨基酸残基暴露出来。共价键、二硫键和非共价键分子间作用以及氢键、静电作用和疏水作用影响着蛋白质最终的凝胶性质<sup>[12]</sup>。

图3为WPI-BGL美拉德产物在250 mM (a)和500 mM (b) NaCl溶液中热凝胶储能模量G'的变化。对于WPI凝胶来说，在加热过程中，随着球蛋白凝胶的形成，G'不断增加。当G'达到10 Pa以上表示形成了凝胶网络，凝胶时间为12~16 min，凝胶温度为68~76℃。由图3可以看出，WPI-BGL美拉德产物凝胶G'的变化趋势与WPI凝胶相似，在加热和保温阶段，凝胶G'持续增加，这可能是由于凝胶网络中分子数量的增加或网络结构的改变而使凝胶结构逐步强化<sup>[13]</sup>。在随后的降温阶段，温度的降低使熵值减小，引起凝胶结构中蛋白粒子间的引力加强，同时促进变性蛋白间的非共价作用，导致凝胶G'进一步增加<sup>[14]</sup>。最终在25℃冷却阶段，凝胶G'保持恒定几乎不发生改

变。

在 500 mM NaCl 溶液 (图 3b) 条件下凝胶 G' 的变化趋势与 250 mM NaCl 溶液 (图 3a) 相似, 然而离子强度由 250 mM NaCl 增加到 500 mM NaCl, 相同分子量的 BGL 凝胶 G' 都相应的降低了。Zhao Cheng-Bin 等<sup>[15]</sup> 对大豆分离蛋白 (SPI) / $\beta$ -葡聚糖热致混合凝胶性质进行研究, 研究表明 500 mM NaCl 溶液中 SPI 的变性温度比 100 mM NaCl 中 SPI 的变性温度高, 不利于凝胶结构的形成, 导致凝胶 G' 的降低。这也解释了本研究中离子强度由 250 mM NaCl 增加到 500 mM NaCl, 凝胶 G' 降低的原因。

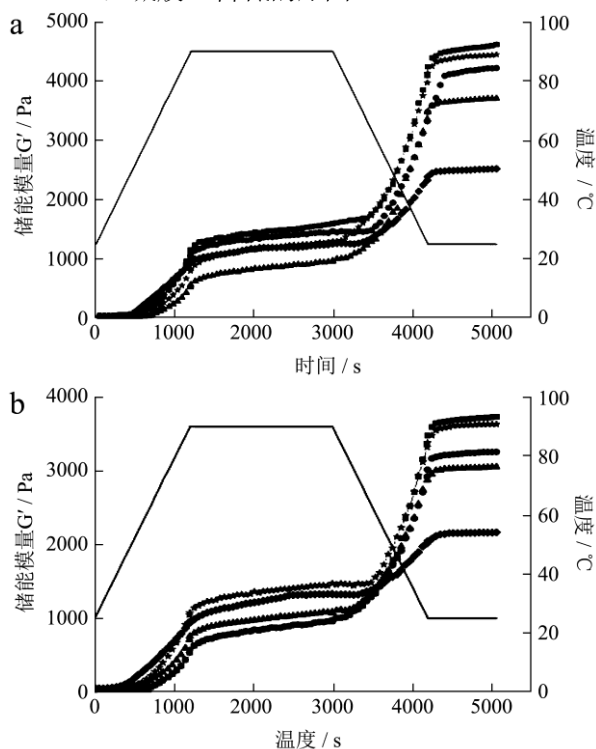


图 3 WPI-BGL 美拉德产物在 250 mM (a) 和 500 mM (b) NaCl 溶液中热凝胶储能模量 G' 的变化

Fig.3 Changes in the storage modulus G' of thermal gel of WPI-BGL Maillard products in 250 mM (a) and 500 mM (b) NaCl solution

注: ■代表WPI; ◆代表WPI-BGL20; ▲代表WPI-BGL80; ●代表WPI-BGL140; ★代表WPI-BGL210; 直线代表温度。

图 4 为 WPI-BGL 美拉德产物热凝胶 25 °C 下的储能模量 G'。由图 4 可以看出, 不论离子强度为 250 mM NaCl 还是 500 mM NaCl, WPI-BGL 的凝胶 G' 低于 WPI, 这表明 WPI-BGL 美拉德产物具有弱凝胶性, 这可能与凝胶网络中不易形成二硫键有关。此外, 美拉德产物中 BGL 的空间位阻也能够抑制水溶液中相邻蛋白质间的分子结合, 尤其是疏水相互作用<sup>[16]</sup>。疏水相互作用在球蛋白的热聚集和热凝胶中起到重要作用, 而糖化会影响疏水相互作用。这与 Sun 等<sup>[17]</sup>

研究的 WPI 与葡聚糖 DX (150 ku) 美拉德产物的流变性相似。

对于 WPI-BGL 美拉德产物凝胶来说, 随着 BGL 分子量的减小, WPI-BGL 的凝胶 G' 逐渐降低, WPI-BGL20 的凝胶 G' 最小。这可能是由于 20 ku 的 BGL 与 WPI 美拉德反应活性最强 (图 1), 即美拉德反应进程最大, 使 WPI-BGL20 的结构发生更显著的变化 (图 2), 导致凝胶网络弱化, 这与 Mar á 等<sup>[18]</sup> 研究的结果一致, 即美拉德反应活性最高的多糖与蛋白质形成的复合凝胶最弱。

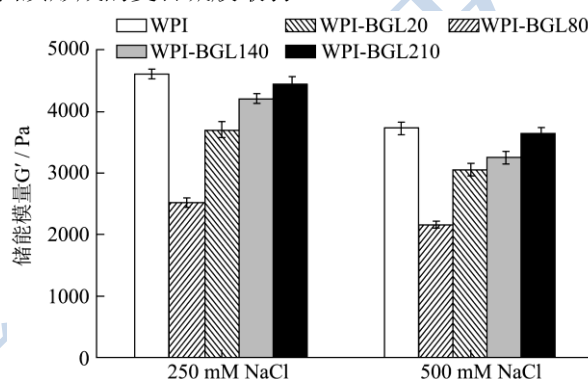


图 4 WPI-BGL 美拉德产物热凝胶 25 °C 下的储能模量 G'  
Fig.4 Storage modulus G' of the thermal gel of WPI-BGL Maillard products at 25 °C

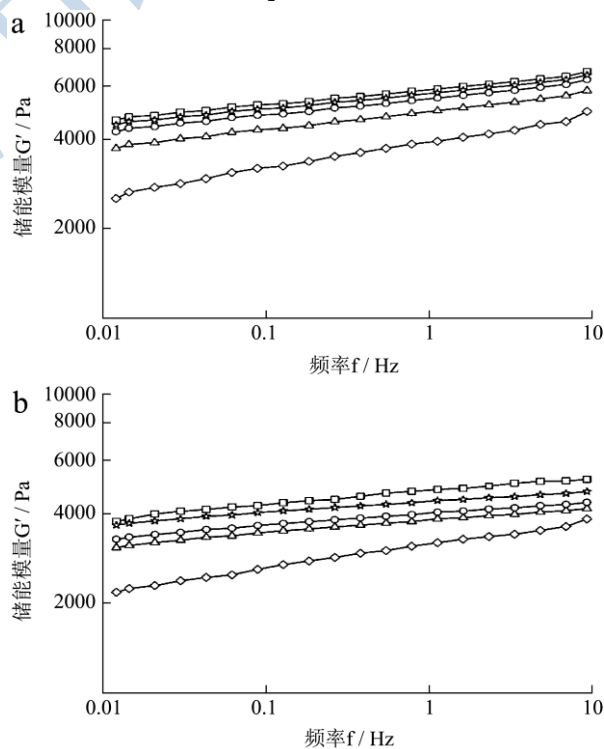


图 5 WPI-BGL 美拉德产物在 250 mM (a) 和 500 mM (b) NaCl 溶液中热凝胶的频率扫描

Fig.5 Frequency scanning of the thermal gel of WPI-BGL Maillard products in 250 mM (a) and 500 mM (b) NaCl solution

注: □代表WPI; ◇代表WPI-BGL20; △代表WPI-BGL80;  
○代表WPI-BGL140; ☆代表WPI-BGL210。

储能模量  $G'$  与频率的依赖性反应凝胶结构强度的信息, 凝胶的频率扫描用来判断样品凝胶与一个标准凝胶的相似性<sup>[19]</sup>。图 5 为 WPI-BGL 美拉德产物在 250 mM (a) 和 500 mM (b) NaCl 溶液中热凝胶的频率扫描。由图 5 可知, 不论离子强度为 250 mM NaCl 还是 500 mM NaCl, 整个扫描过程所有体系的  $G'$  均随频率的升高呈微弱升高的趋势, 即  $G'$  对频率显示出低的依赖性, 这说明所有体系形成的凝胶较稳定。此外, 凝胶  $G'$  的变化趋势与图 4 相似, 即  $G'_{\text{WPI}} > G'_{\text{WPI-BGL210}} > G'_{\text{WPI-BGL140}} > G'_{\text{WPI-BGL80}} > G'_{\text{WPI-BGL20}}$ , 表明 WPI-BGL20 美拉德产物形成一个弱的凝胶结构, 原因可能是蛋白与多糖发生美拉德反应使凝胶结构中产生某种类型的聚合物, 导致其表现出较弱的凝胶网络<sup>[20]</sup>。

### 3 结论

乳清分离蛋白(WPI)与不同分子量(20-210 kDa)的大麦β-葡聚糖(BGL)通过干热法制备成WPI-BGL美拉德产物, 并对WPI-BGL美拉德产物热凝胶流变性进行分析。分光光度计测定显示WPI-BGL20的褐变强度最大, 表明BGL20的美拉德反应活性最强。荧光光谱分析结果表明, WPI与BGL发生美拉德反应使体系的结构发生很大改变, WPI-BGL的荧光强度都低于WPI, 且荧光强度随着BGL分子量的降低而减小。凝胶流变性结果表明, 离子强度对WPI-BGL凝胶流变性有一定影响, WPI与BGL发生美拉德反应会降低WPI的凝胶 $G'$ , 原因可能是在WPI-BGL体系中蛋白质分子间二硫键的形成和疏水相互作用受到了抑制, 导致WPI-BGL凝胶的弱化。随着BGL分子量的减小, WPI-BGL的凝胶 $G'$ 逐渐降低, 这表明美拉德反应进程越大, 形成的凝胶越弱。

### 参考文献

- [1] Zhu D, Damodaran S, Lucey J A. Formation of whey protein isolate (WPI) - dextran conjugates in aqueous solutions [J]. Journal Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56: 7113-7118
- [2] 刘春波, 刘志东, 王荫榆. 糖基化反应对乳清蛋白-乳糖复合物乳化性的影响[J]. 中国乳品工业, 2010, 38(7): 25-28  
LIU Chun-bo, LIU Zhi-dong, WANG Yin-yu. Effect of glycosylation reaction on emulsification of whey protein-lactose compound [J]. China Dairy Industry, 2010, 38(7): 25-28
- [3] Akhtar M, Dickinson E. Whey protein-maltodextrin conjugates as emulsifying agents, an alternative to gum Arabic [J]. Food Hydrocolloids, 2007, 21(4): 607-616
- [4] Lawlor Susan. Beta-glucans: Discovering one of nature's healthiest assets [J]. Food Science and Technology, 2006, 20(3): 40-42
- [5] Tolstoguzov V B. Phase behaviour in mixed polysaccharide systems [J]. Food Polysaccharides, 2006, 17: 587-625
- [6] Kato A. Industrial applications of Maillard-type protein-polysaccharide conjugates [J]. Food Science and Technology Research, 2002, 8: 193-199
- [7] Lazaridou A, Biliaderis C G, Izydorczyk M S. Molecular size effects on rheological properties of oat  $\beta$ -glucans in solutions and gels [J]. Food Hydrocolloids, 2003, 17: 693-712
- [8] Miralles B, Martínez-Rodríguez A, Santiago A, et al. The occurrence of a Maillard-type protein-polysaccharide reaction between  $\beta$ -lactoglobulin and chitosan [J]. Food Chemistry, 2007, 100: 1071-1075
- [9] Hattori M, Ogino A, Nakai H, et al. Functional improvement of  $\beta$ -lactoglobulin by conjugating with alginate lyase-lysate [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1997, 45: 703-708
- [10] Hattori M, Okada Y, Takahashi K. Functional changes in  $\beta$ -lactoglobulin upon conjugation with carboxymethyl cyclodextrin [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2000, 48: 3789-3794
- [11] Jiménez-Castaño L, López-Fandiño R, Olano A, et al. Study on  $\beta$ -lactoglobulin glycosylation with dextran: effect on solubility and heat stability [J]. Food Chemistry, 2005, 93: 689-695
- [12] Baier S K, Mc Clements D J. Influence of cosolvent systems on the gelation mechanism of globular protein: thermodynamic, kinetic, and structural aspects of globular protein gelation [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2006, 4: 43-54
- [13] Verheul M, Roefs S P F M. Structure of whey protein gels, studied by permeability, scanning electron microscopy and rheology [J]. Food Hydrocolloids, 1998, 12(1): 17-24
- [14] Martínez M J, Farías M E, Pilosof A M R. The dynamics of heat gelation of casein glycomacropeptide- $\beta$ -lactoglobulin mixtures as affected by interactions in the aqueous phase [J]. International Dairy Journal, 2010, 20: 580-588
- [15] Zhao Cheng-Bin, Wu Fei, Li Yong-Ping, et al. Effects of  $\beta$ -glucans on properties of soya bean protein isolate thermal gels [J]. International Journal of Food Science and

- Technology, 2015, 50(2): 347-355
- [16] Spotti M J, Perduca M, Piagentini A, et al. Gel mechanical properties of milk whey protein-dextran conjugates obtained by Maillard reaction [J]. Food Hydrocolloids, 2013, 31(1): 26-32
- [17] Sun W, Yu S, Yang X, et al. Study on the rheological properties of heat-induced whey protein isolate-dextran conjugate gel [J]. Food Research International, 2011, 44: 3259-3263
- [18] Marín J S, Marín J M, Ana M R P, et al. Influence of Maillard conjugation on structural characteristics and rheological properties of whey protein/dextran systems [J]. Food Hydrocolloids, 2014, 39: 223-230
- [19] Spotti M J, Perduca M, Piagentini A, et al. Does dextran molecular weight affect the mechanical properties of whey protein/dextran conjugate gels [J]. Food Hydrocolloids, 2013, 32(1): 204-210
- [20] Stading M, Hermansson A M. Viscoelastic behaviour of  $\beta$ -lactoglobulin structures [J]. Food Hydrocolloids, 1990, 4(2): 121-135