

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.05.012

燕麦 β -葡聚糖的理化特性及其 对肌原纤维蛋白乳化性质的影响

王启龙^{1,2}, 王军辉^{1,2}, 左淑荣¹, 刘咏¹

(1. 合肥工业大学 食品与生物工程学院, 安徽 合肥 230601; 2. 合肥工业大学 农产品生物化工教育部工程研究中心, 安徽 合肥 230601)

摘要:文章以不同产地的燕麦为原料,采用热水提取法提取燕麦 β -葡聚糖,并用傅里叶变换红外光谱(Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)、气相色谱(gas chromatography, GC)、高效凝胶渗透色谱(high performance gel permeation chromatography, HPGPC)和 X 射线衍射(X-ray diffraction, XRD)等方法对其进行表征;同时制备肌原纤维蛋白(myofibrillar protein, MP)和燕麦 β -葡聚糖复合乳液,探究其乳化活性、乳化稳定性及乳液液滴尺寸。结果表明,所提取的燕麦 β -葡聚糖均由葡萄糖组成,3 种燕麦 β -葡聚糖之间没有明显的理化或结构差异;复合乳液的乳化活性和乳化稳定性均明显高于纯 MP 乳液,且 3 种燕麦 β -葡聚糖均能显著减小 MP 乳液液滴的尺寸,提高乳液质量。研究结果为 MP 和燕麦 β -葡聚糖食品乳液体系的构建提供了参考。

关键词:燕麦 β -葡聚糖;肌原纤维蛋白(MP);乳液;乳化性

中图分类号:TS201.2

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2025)05-0659-06

Physicochemical characterization of oat β -glucan and its effect on emulsifying properties of myofibrillar protein

WANG Qilong^{1,2}, WANG Junhui^{1,2}, ZUO Shurong¹, LIU Yong¹

(1. School of Food and Biological Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China; 2. Engineering Research Center of Bio-process of Ministry of Education, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China)

Abstract: In this paper, oat β -glucans were extracted from oats of different origins by hot water and characterized by Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), gas chromatography (GC), high performance gel permeation chromatography (HPGPC), and X-ray diffraction (XRD). A composite emulsion of myofibrillar protein (MP) and oat β -glucan was prepared to investigate its emulsification activity, emulsification stability, and emulsion droplet size. The results showed that all the oat β -glucans consisted of glucose, and there were no significant physicochemical or structural differences among the three oat β -glucans. The emulsification activity and emulsification stability of the composite emulsion were significantly higher than those of pure MP emulsion. All three oat β -glucans could significantly reduce the droplet size of MP emulsion and improve the emulsion quality. The results may provide a reference for constructing MP and oat β -glucan based food emulsion systems.

Key words: oat β -glucan; myofibrillar protein (MP); emulsion; emulsifying properties

燕麦 β -葡聚糖是以 70% β -(1 \rightarrow 4)糖苷键和 30% β -(1 \rightarrow 3)糖苷键所连而形成的一类高分子

聚合物^[1],具有优越的乳化、胶凝特性,在食品、药品、乳制品等领域应用广泛^[2-3]。蛋白质与碳水化

收稿日期:2023-03-07;修回日期:2023-04-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(31771974);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(JZ2020YYPY0246)

作者简介:王启龙(1999—),男,安徽六安人,合肥工业大学硕士生;

王军辉(1976—),男,广西陆川人,博士,合肥工业大学教授,硕士生导师,通信作者, E-mail: junhuiwang@hfut.edu.cn;

刘咏(1968—),女,安徽凤阳人,合肥工业大学教授,硕士生导师。

合物之间的潜在作用会导致蛋白质的一些功能特性发生改变,因此很多学者对燕麦 β 葡聚糖与肌原纤维蛋白(myofibrillar protein, MP)之间的相互作用进行了深入研究。文献[4]通过研究燕麦纤维的理化性质发现,燕麦纤维具有优良的持水力 and 持油力;文献[5]研究发现在燕麦麸皮中添加肉丸可以显著增加肉丸的营养和健康价值;文献[6]研究了不同干燥处理方式的燕麦蛋白添加后肉类食品性质的变化情况,结果表明,不同处理的燕麦蛋白加入到肉类食品后会造成其蛋白质组成发生变化,从而对其部分功能效应产生影响。

本文以 3 种不同产地(云南、山东、内蒙古)的燕麦中提取的燕麦 β 葡聚糖为研究对象,探究其物理特性和化学结构。同时,主要从复合乳液的乳化活性和乳化稳定性来考察不同乳液间性质的区别,研究 3 种燕麦 β 葡聚糖与肌原纤维蛋白之间的相互作用。研究结果对利用肌原纤维蛋白和燕麦 β 葡聚糖构建食品乳液体系具有参考价值。

1 材料与方法

1.1 实验材料

云南、山东和内蒙古燕麦分别购于云南彩霞农业发展有限公司、山东河谷食品有限公司、呼和浩特淮拓食品有限公司;猪里脊肉、大豆调和油购于当地超市(合肥);单糖(货号 1048288)、 β 葡聚糖标准品(货号 47267)购于 Sigma-Aldrich 公司;牛血清白蛋白(货号 B2064-50G)购于国药集团化学试剂有限公司。

1.2 燕麦 β 葡聚糖的提取及分析

1.2.1 原料预处理

参考文献[7]处理内源性 β 葡聚糖酶的方法并稍加修改。先将燕麦麸皮粉碎化处理,倒入 80%乙醇浸泡、烘干,在 80 $^{\circ}$ C 热水中搅拌一段时间,回流 2 h 灭酶。

1.2.2 燕麦 β 葡聚糖的提取

在 pH 值为 10 的碱液(料液体积比 1:20~1:30)中加入已灭酶的 3 种不同产地的燕麦麸皮 100 g,热水提取 2 次,每次 1.5 h,保留水溶液;过滤操作,滤液添加 α -淀粉酶,经过离心去除其上清液杂质后,浓缩、脱蛋白,在 4 $^{\circ}$ C 冰箱静置(约 12 h),7 000 r/min 离心 15 min,去除底部沉淀后得到上清液,减压浓缩,并进行 3 d 的去离子水透析(去离子水在此期间需要更换);放入冷冻干燥机,完全烘干后取出,即得到 3 种 β 葡聚糖样品,分别命名为 YN、SD、N。

1.2.3 紫外光谱分析

在 5 mL 蒸馏水中加入 10 mg 燕麦 β 葡聚糖样品,混合均匀,适量放入石英比色皿中,在紫外光谱仪上扫描,波长范围^[8]为 180~400 nm。

1.2.4 红外光谱分析

多糖样品红外光谱分析参考溴化钾(KBr)压片法^[9]。使用真空干燥法完全干燥多糖,并与 KBr 粉末混合均匀、研磨,压片法压制成透明状薄片,采用傅里叶变换红外光谱仪(Fourier transform infrared spectrometer, FTIR)在波数为 4 000~400 cm^{-1} 范围内扫描。

1.2.5 燕麦 β 葡聚糖单糖组成测定

取 7 mg β 葡聚糖样品于 10 mL 安培管溶解在 2 mol/L 的三氟乙酸(TFA)中,摇匀 2 min,酒精喷灯密封管,在 120 $^{\circ}$ C 条件下反应 4 h,以除去 TFA。将所得溶液溶于 3 mL 蒸馏水,加入硼氢化钠 30 mg,常温条件还原 3 h。过多的硼氢化钠采用 25%的乙酸中和,再加 1~2 滴乙酸,此时溶液中不再有气泡生成(pH 值为 5~7),添加甲醇,将多余的硼酸及水分去除。分别加入 3 mL 乙酸酐和 3 mL 吡啶于上述所得溶液中,密封置于 120 $^{\circ}$ C 烘箱中,干燥 15 min 取出。所得样品于 100 $^{\circ}$ C 条件下反应 1 h,并使用甲苯减压蒸干。加入同体积的氯仿和蒸馏水后使用无水硫酸钠以除去多余的水分,溶液分层后取适量上清液于进样瓶中备用,石英微管 HP-5 分离。以不同单糖作为参考,比较出峰时间以确定单糖种类^[10]。

1.2.6 燕麦 β 葡聚糖的分子量测定

参考文献[11]测定分子量的方法并稍加修改。将 1 mg/mL 多糖溶液完全溶解一段时间,以 0.22 μm 过滤,重复 3 次,然后装入样品瓶。采用 WATERS E2695 高效凝胶渗透色谱(high performance gel permeation chromatography, HPGPC)、2424 蒸发光散射检测器(evaporative light-scattering detector, ELSD)测定分子量。7.8 mm \times 300 mm 凝胶柱(UltrahydrogelTM2 000)与 7.8 mm \times 300 mm 凝胶柱(UltrahydrogelTM500)串联,流动相为现制超纯水,置于玻璃瓶中,流速设定为 0.5 mL/min,注射量为 20 μL 。参照葡萄糖标准绘制标准曲线。

1.2.7 燕麦 β 葡聚糖 XRD 测定

采用真空干燥法得到适量已干燥至恒质量的多糖样品,利用 X 射线衍射仪(X-ray diffractometer, XDR)对 3 种燕麦 β 葡聚糖进行测定。检测条件^[12]如下:CuK α 靶,电压为 40 kV、电流为 40 mA, 2θ 扫描范围为 4 $^{\circ}$ ~50 $^{\circ}$,扫描速率为 2 ($^{\circ}$)/min。

1.3 复合乳液乳化性质的测定

1.3.1 乳液的制备

取 80 g 的 20 mg/mL 肌原纤维蛋白溶液分别加入 0、0.25%、0.50%、0.75%、1.00% 的多糖,同时依次加入 20% 的植物油并搅拌均匀。以 10 000 r/min 均质速度均质 3 min,得到新鲜乳液,所得乳液应立即使用。

1.3.2 乳液乳化活性和乳化稳定性的测定

使用浊度法测定混合溶液的乳化活力和乳化稳定性。参考文献[13]的方法并稍加修改,取 40 μ L 获得的混合凝胶乳液,与 10 mL 的 0.1% SDS 溶液混和摇匀,并在 500 nm 处测定其吸光度值。乳化活性指数 E_{AI} 及乳化稳定性指数 E_{SI} 的计算公式如下:

$$E_{AI} = 2.303A_0/L,$$

$$E_{SI} = (A_{10}/A_0) \times 100\%.$$

其中: A_0 为乳液静置 0 min 在 500 nm 处测得的吸光度值; A_{10} 为乳液静置 10 min 后在 500 nm 处测得的吸光度值; L 为光路长度。

1.3.3 乳液液滴尺寸的测定

本文采用激光粒度分析仪(丹东市百特仪器

有限公司)测定乳液滴的平均粒径大小,乳液超声 2 min 后进行测定[13]。

1.4 数据分析

实验重复测试 3 次,统计数据均以(平均值 \pm 标准差)表示,使用最小显著性差异(least significant difference, LSD) 检验 ($P < 0.05$),并使用 SPSS 21.0 软件进行比较。

2 结果与讨论

2.1 燕麦 β 葡聚糖的理化性质

2.1.1 燕麦 β 葡聚糖的紫外光谱分析

3 种燕麦 β 葡聚糖的紫外光谱图如图 1 所示。

从图 1 可以看出,在 220、260 nm 波长处均没有明显的吸收峰,说明这 3 种燕麦 β 葡聚糖都含有少量的蛋白质。考马斯亮蓝法是最常用的蛋白质快速定量方法,使用上述方法测量 3 种多糖 YN、SD 和 N 的蛋白质质量分数分别为 $(2.88 \pm 0.05)\%$ 、 $(4.89 \pm 0.04)\%$ 、 $(3.74 \pm 0.02)\%$ 。而图 1 中波长 280 nm 处未发现吸收峰,表明其中并无核酸。

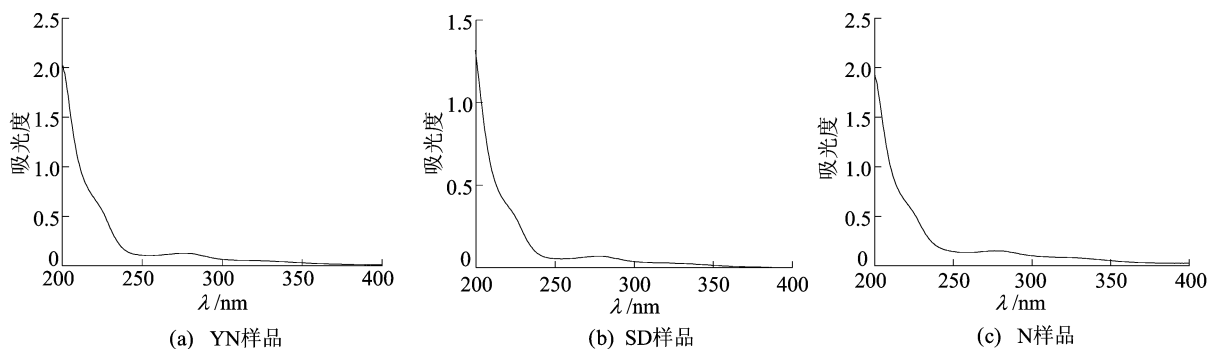


图 1 3 种燕麦 β 葡聚糖的紫外光谱图

2.1.2 红外光谱分析

燕麦 β 葡聚糖 YN、SD 和 N 的 FTIR 谱图如图 2 所示。

从图 2 可以看出:在 3368 cm^{-1} 处有一个较宽的吸收峰,表明糖环上有 O—H 的伸缩振动[14];在 2925 cm^{-1} 处由于 C—H 的伸缩振动,出现了一个较窄的吸收峰[15];多糖糖环中的 C—O—C 键表现为 1026 cm^{-1} 处出现的吸收峰[16]; 1662 、 1536 cm^{-1} 处的吸收峰是羧酸根的非对称和对称的振动引起的[17]。3 种燕麦 β 葡聚糖在 1730 cm^{-1} 处均没有吸收峰,表明其糖醛酸占比极低[9]; 920 cm^{-1} 处的吸收峰表明多糖中含有 β 构型的异头碳葡聚糖。



图 2 3 种燕麦 β 葡聚糖的 FTIR 谱图

2.1.3 单糖组成分析

燕麦 β 葡聚糖的单糖组成通过气相色谱(gas

chromatography,GC)分析获得。本文将 3 种燕麦 β -葡聚糖水解还原以及衍生化处理,得到糖醇乙酸酯,并进行 GC 分析,如图 3 所示。

由图 3 可知,3 种燕麦 β -葡聚糖气相色谱图均只有 1 个主峰,参考标准品出峰时间后,发现 3 种燕麦 β -葡聚糖均由葡萄糖组成。

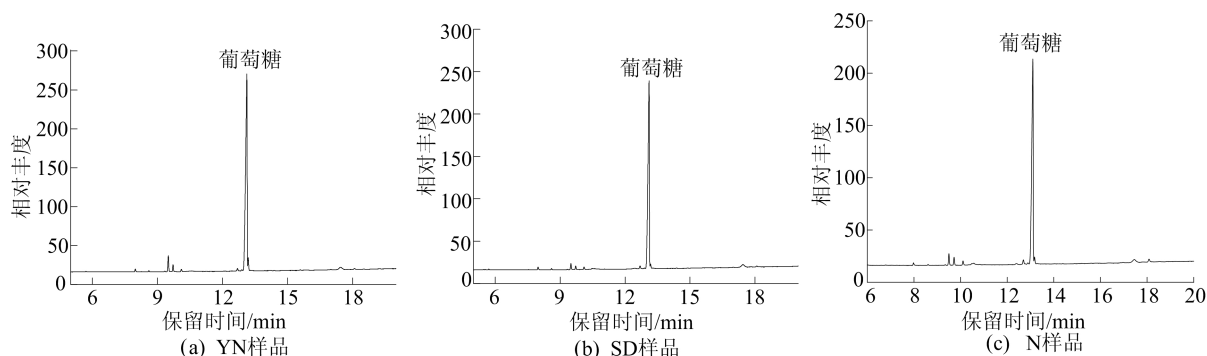


图 3 3 种燕麦 β -葡聚糖的 GC 谱图

2.1.4 分子量分析

3 种燕麦 β -葡聚糖的 HPGPC 谱图如图 4 所示。由图 4 可知:YN 和 SD 样品有 3 个峰,YN 样品出峰时间分别为 18.381、24.120、42.090 min;SD 出峰时间分别为 18.389、24.131、41.853 min,N 样品含有 4 个峰,出峰时间分别为 18.355、24.192、

41.862、49.996 min,由此可得,实验获得的多糖为杂多糖。从图 4 还可以看出,YN、SD 和 N 样品分子分布总体上差异不大,同一化合物的不同分子可能具有不同的分子量,计算出 YN、SD、N 样品的平均分子量分别为 8.42×10^2 、 6.27×10^2 、 4.7×10^2 kDa。

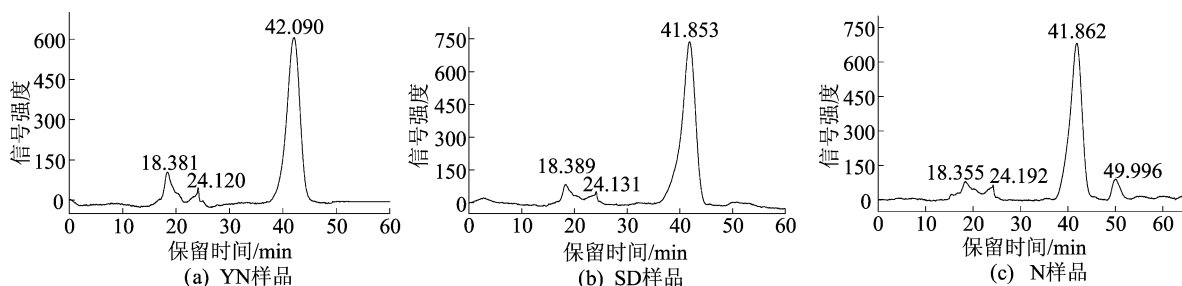


图 4 3 种燕麦 β -葡聚糖的 HPGPC 谱图

2.1.5 XRD 分析

本文使用 XRD 分析燕麦 β -葡聚糖是否含有结晶区,分析结果如图 5 所示。

从图 5 可以看出,在 2θ 为 $18^\circ \sim 22^\circ$ 之间均出现了结晶峰,表明燕麦 β -葡聚糖有一定结晶区,部

分有序的结构可能存在于这些结晶区。文献[18]发现魔芋葡甘聚糖在加入玉米黄质形成复合凝胶后,结晶度显著上升($P < 0.05$),表明其产生了一定的协同作用,有利于有序网络结构的形成,且随着多糖纯度的升高,其结晶度会更加明显。

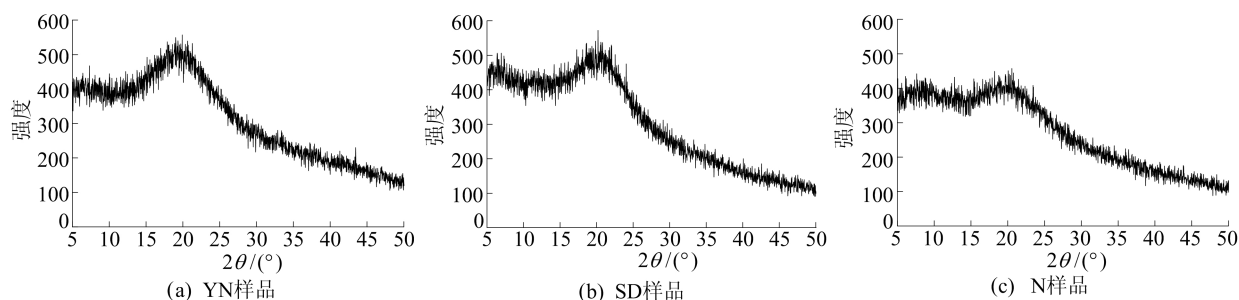
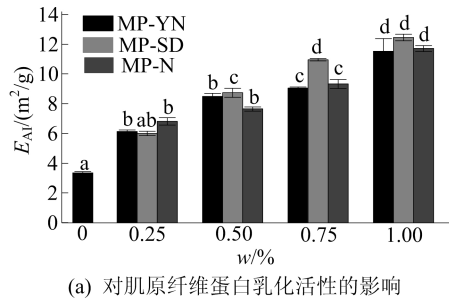


图 5 3 种燕麦 β -葡聚糖的 XRD 图

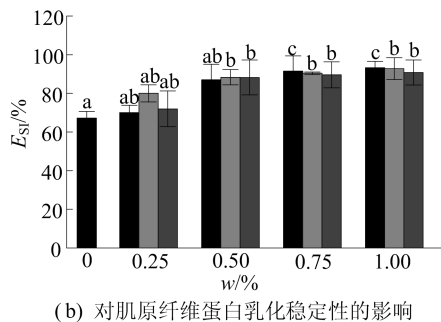
2.2 复合乳液的乳化性质分析

2.2.1 乳液的乳化活性及稳定性分析

3种燕麦 β -葡聚糖对肌原纤维蛋白乳化活性和乳化稳定性的影响如图6所示。图6中,不同小写字母表示同一多糖对肌原纤维蛋白乳化作用的显著差异($P < 0.05$)。



(a) 对肌原纤维蛋白乳化活性的影响



(b) 对肌原纤维蛋白乳化稳定性的影响

图6 3种燕麦 β -葡聚糖对乳化活性和乳化稳定性的影响

从图6a可以看出,混合凝胶的乳液随着 β -葡聚糖质量分数的升高,乳化活性也逐渐增强,最高可达 $12.45 \text{ m}^2/\text{g}$,显著高于肌原纤维蛋白凝胶的乳液乳化活性($3.34 \text{ m}^2/\text{g}$) ($P < 0.05$),表明 β -葡聚糖的添加对于乳液的乳化活性提高具有重要作用,且这种作用呈现剂量依赖性。溶液的黏度、交联度、pH值、蛋白质的表面结构、净电荷、离子强度等均对乳液的稳定性有一定影响^[13]。

由图6b可知:添加 β -葡聚糖质量分数在 $0.50\% \sim 1.00\%$ 之间的混合凝胶乳液的乳化稳定性相较于添加 $0 \sim 0.50\%$ β -葡聚糖提高显著($P < 0.05$);当质量分数处于 $0 \sim 0.25\%$ 之间,乳化稳定性增加并不显著($P > 0.05$)。乳化稳定性的提高,表明在非等电点时,乳液形成的油滴界面蛋白膜可以阻止脂肪滴的聚集,防止蛋白质在静电斥力的作用下发生沉淀,使乳液系统保持稳定。

结合以上2个因素发现, β -葡聚糖的加入可以使肌纤维蛋白乳化得到的复合乳液体系保持在一定的稳定状态。类似的研究结果在其他亲水胶体与肌原纤维蛋白混合乳液中也有报道。文献^[19]发现大豆分离蛋白添加量的增加也能够使其

复合乳液的乳化活性和乳化稳定性有显著提高。文献^[20]发现低浓度的魔芋葡甘露寡糖可提高鲢鱼肌原纤维蛋白的乳化活性和乳化稳定性,且效果随浓度的增加而递减。

2.2.2 乳液液滴尺寸

各 1% YN、SD、N与肌原纤维蛋白形成的复合乳液粒径如图7所示,其中MP-YN、MP-SD、MP-N复合乳液和MP乳液的液滴平均粒径分别为 2.63 、 3.13 、 3.67 、 $5.36 \mu\text{m}$,可以看出,肌原纤维蛋白乳液粒径均呈现单峰,即乳液中主要存在1种微粒,且微粒在溶液中均匀分布。研究发现,加入 β -葡聚糖后,乳液的液滴尺寸比单一蛋白质乳液的液滴尺寸要小。这可能是燕麦 β -葡聚糖的作用减小了肌纤维蛋白乳液的液滴粒径大小,提高了乳化活性,增加了乳化稳定性。

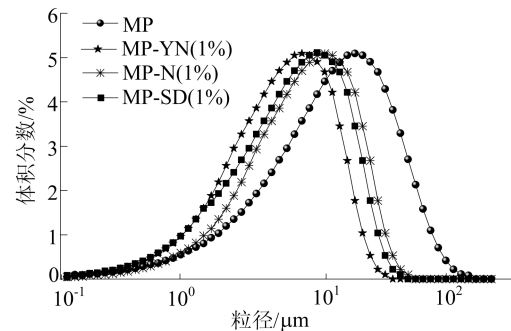


图7 3种燕麦 β -葡聚糖对肌原纤维蛋白乳液粒径的影响

3 结 论

本文对从3种地域差异较大的燕麦中提取的燕麦 β -葡聚糖进行研究,发现这3种燕麦 β -葡聚糖之间没有明显的理化或结构差异,燕麦 β -葡聚糖的添加能够显著提高肌纤维蛋白乳化体系的乳化活性和乳化稳定性,并呈现剂量依赖性。此外,燕麦 β -葡聚糖可以减小肌纤维蛋白乳液的液滴大小,降低乳液的粒径,提高乳液的乳化活性和乳化稳定性。研究结果可为燕麦的深层次加工利用、肌纤维蛋白和燕麦 β -葡聚糖食品乳液体系的构建提供理论依据。

[参 考 文 献]

- [1] 于永华,徐飞飞,林琳,等.燕麦 β -葡聚糖降血脂作用的研究进展[J].临床与病理杂志,2022,42(2):486-491.
- [2] 刘博,林亲录,罗非君.燕麦葡聚糖的生理功能研究进展[J].粮食与油脂,2016,29(2):1-5.
- [3] 孟续,李言,钱海峰,等.燕麦 β -葡聚糖的提取制备及纯化研

- 究进展[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(21): 268-274.
- [4] 任国宝, 任晨刚, 郁美丽, 等. 膳食纤维对小麦粉品质的影响[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(2): 6-11, 55.
- [5] YILMAZ I, DAGLIOGLU O. The effect of replacing fat with oat bran on fatty acid composition and physicochemical properties of meatballs[J]. Meat Science, 2003, 65: 819-823.
- [6] 卢亚东, 张成楠, 李秀婷, 等. 不同干燥方式燕麦蛋白的性质及对肌原纤维蛋白凝胶特性的影响[J]. 食品科学技术学报, 2021, 39(6): 53-63.
- [7] BEER M U, ARRIGONI E, AMADO R. Extraction of oat gum from oat bran; effects of process on yield, molecular weight distribution, viscosity and (1→3)(1→4)- β -D-glucan content of the gum[J]. Cereal Chemistry, 1996, 73(1): 59-62.
- [8] 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): 207-217.
- [9] DU Y Q, LIU Y, WANG J H. Polysaccharides from *Umbilicaria esculenta* cultivated in Huangshan Mountain and immunomodulatory activity[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2015, 72: 1272-1276.
- [10] WANG J H, LUO J P, YANG X F, et al. Structural analysis of a rhamnoarabinogalactan from the stems of *Dendrobium nobile* Lindl[J]. Food Chemistry, 2010, 122(3): 572-576.
- [11] LIU Z P, PI F, GUO X B, et al. Characterization of the structural and emulsifying properties of sugar beet pectins obtained by sequential extraction[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 88: 31-42.
- [12] ZHOU F F, ZHANG Y D, ZHANG Q, et al. Structure characterization and immunological activity of a β -glucan from White *H. marmoreus* and its silver nanoparticle derivatives[J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 210: 1-8.
- [13] 张诗思, 金永国, 马美湖. 黄原胶-氯化钠提高蛋黄液乳化性的研究[J]. 中国家禽, 2018, 40(4): 42-48.
- [14] WANG J H, XU J L, ZHANG J C, et al. Physicochemical properties and antioxidant activities of polysaccharide from floral mushroom cultivated in Huangshan Mountain[J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 131: 240-247.
- [15] LIU Y, QIANG M, SUN Z, et al. Optimization of ultrasonic extraction of polysaccharides from *Hovenia dulcis* peduncles and their antioxidant potential[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2015, 80: 350-357.
- [16] KE C, QIAO D, LUO J, et al. Immunostimulatory activity and structure of polysaccharide from *Streptococcus equi* subsp. *zoepidemicus*[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2013, 57: 218-225.
- [17] WANG M C, ZHU P L, JIANG C X, et al. Preliminary characterization, antioxidant activity *in vitro* and hepatoprotective effect on acute alcohol-induced liver injury in mice of polysaccharides from the peduncles of *Hovenia dulcis* [J]. Food & Chemical Toxicology, 2012, 50: 2964-2970.
- [18] 邱诗波, 邓鹏鹏, 钱虹, 等. 魔芋葡甘聚糖凝胶的研究进展[J]. 武汉工程大学学报(自然科学版), 2022, 44(4): 355-362.
- [19] 王团结, 冯志彪, 岳莹, 等. 茶多酚与大豆分离蛋白对复合乳化体系性质的影响[J]. 中国调味品, 2017, 42(4): 26-31.
- [20] LIU S L, ZHAO P C, ZHANG J J, et al. Physicochemical and functional properties of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) myofibrillar protein glycosylated with konjac oligo-glucomanan [J]. Food Hydrocolloids, 2017, 67: 216-223.

(责任编辑 闫杏丽)

(上接第 658 页)

- [9] KANG L J, ZHU X N. Strategic timetable scheduling for last trains in urban railway transit networks[J]. Applied Mathematical Modelling, 2017, 45: 209-225.
- [10] KANG L, WU J, SUN H, et al. A case study on the coordination of last trains for the Beijing subway network[J]. Transportation Research Part B, 2015, 72(2): 112-127.
- [11] NIE W, LI H, XIAO N, et al. Modeling and solving the last-shift period train scheduling problem in subway networks[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2021, 569: 216-233.
- [12] ZHOU Y, WANG Y, YANG H, et al. Last train scheduling for maximizing passenger destination reachability in urban rail transit networks[J]. Transportation Research, 2019, 129: 79-95.
- [13] CHEN Y, MAO B, BAI Y, et al. Timetable synchronization of last trains for urban rail networks with maximum accessibility[J]. Transportation Research, 2019, 99: 110-129.
- [14] KANG L, ZHU X, SUN H, et al. Last train timetabling optimization and bus bridging service management in urban railway transit networks[J]. Omega, 2019, 84: 31-44.
- [15] IBARRA-ROJAS O J, RIOS-SOLIS Y A. Synchronization of bus timetabling [J]. Transportation Research, 2012, 46(5): 599-614.
- [16] 程涛, 周峰. 西安地铁 2 号线客流分析[J]. 城市轨道交通研究, 2015, 18(7): 5.
- [17] 陈春安, 荣建, 周晨静. 综合客运枢纽内部换乘设施通行能力研究[J]. 交通工程, 2017, 17(4): 7-12.

(责任编辑 吴亮)