

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2025.60169

小麦胚清蛋白—低聚半乳糖共价复合物的起泡性与结构表征

张根生¹ 苏文文¹ 黄昕钰² 杜一男¹ 那治国¹ 费英敏³

(1. 哈尔滨商业大学食品工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150028; 2. 黑龙江省绿色食品科学研究院, 黑龙江 哈尔滨 150028; 3. 黑龙江民族职业学院, 黑龙江 哈尔滨 150066)

摘要: [目的] 改善小麦胚清蛋白(WGA)的起泡性。[方法] 采用低聚半乳糖(GOS)湿法糖基化对WGA进行改性, 探究小麦胚清蛋白—低聚半乳糖共价复合物的起泡性及起泡稳定性, 并对其结构进行表征。[结果] 与WGA相比, 小麦胚清蛋白—低聚半乳糖共价复合物(WGA-GOS)的起泡性及起泡稳定性分别提高了41.7%, 7.9%。通过傅里叶变换红外光谱、圆二色谱、内源荧光光谱和扫描电镜分析表明, 低聚半乳糖的引入使小麦胚清蛋白空间结构发生变化, 证明小麦胚清蛋白与低聚半乳糖发生了共价结合, 改性后的小麦胚清蛋白的 α -螺旋结构、 β -折叠结构和 β -转角结构减少, 无规卷曲增加, 蛋白质分子柔性增强, 气液界面吸附能力提升; 色氨酸荧光强度降低。[结论] 低聚半乳糖改性小麦胚清蛋白能够提高其起泡性。

关键词: 小麦胚清蛋白(WGA); 低聚半乳糖; 糖基化; 功能性质; 微观结构

Foaming properties and structural characterization of wheat germ albumin-galacto-oligosaccharide covalent complexes

ZHANG Gensheng¹ SU Wenwen¹ HUANG Xinyu² DU Yinan¹ NA Zhiguo¹ FEI Yingmin³(1. College of Food Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin, Heilongjiang 150028, China;
2. Heilongjiang Provincial Institute of Green Food Science, Harbin, Heilongjiang 150028, China;
3. Heilongjiang Vocational College for Nationalities, Harbin, Heilongjiang 150066, China)

Abstract: [Objective] To improve the foaming properties of wheat germ albumin (WGA). [Methods] WGA was modified by wet glycosylation with galacto-oligosaccharides (GOS). The foaming capacity and foam stability of the wheat germ albumin-galacto-oligosaccharide covalent complex (WGA-GOS) were investigated, and its structure was characterized. [Results] Compared with WGA, the foaming capacity and foam stability of the WGA-GOS increased by 41.7% and 7.9%, respectively. Fourier transform infrared spectroscopy, circular dichroism, intrinsic fluorescence spectroscopy, and scanning electron microscopy analyses showed that the introduction of GOS altered the spatial structure of WGA, confirming the formation of covalent bonds between WGA and GOS. After modification, the α -helix, β -sheet, and β -turn structures decreased, while the random coil content increased, indicating enhanced molecular flexibility of the protein and improved adsorption capacity at the gas-liquid interface. Meanwhile, the fluorescence intensity of tryptophan decreased. [Conclusion] Modification of WGA with GOS can improve its foaming properties.

Keywords: wheat germ albumin (WGA); galacto-oligosaccharide; glycosylation; functional properties; microstructure

基金项目: 黑龙江省自然科学基金资助项目(编号:LH2024C069)

通信作者: 费英敏(1973—), 女, 黑龙江民族职业学院副教授, 硕士。E-mail: ddhgk@126.com

收稿日期: 2025-11-22 改回日期: 2026-03-08

引用格式: 张根生, 苏文文, 黄昕钰, 等. 小麦胚清蛋白—低聚半乳糖共价复合物的起泡性与结构表征[J]. 食品与机械, 2026, 42(3): 21-26.

Citation: ZHANG Gensheng, SU Wenwen, HUANG Xinyu, et al. Foaming properties and structural characterization of wheat germ albumin-galacto-oligosaccharide covalent complexes[J]. Food & Machinery, 2026, 42(3): 21-26.

小麦胚清蛋白作为从小麦胚芽中提取的优质水溶性植物蛋白,不仅蛋白质含量高达 30%,还富含赖氨酸、谷氨酸等多种必需氨基酸,兼具高营养价值与低致敏性的突出特点,是一类极具开发潜力的新型植物蛋白资源^[1-2]。在食品加工领域,该蛋白已展现出良好的溶解性、乳化性及热稳定性,为其多元化应用奠定了基础,但实际应用中发现其起泡能力显著弱于乳清蛋白、蛋清蛋白等传统发泡剂,严重限制了其在烘焙食品、含气饮料等需稳定泡沫体系食品中的推广应用^[3]。

小麦胚清蛋白的起泡能力与其分子结构特性密切相关:该蛋白相对分子质量较大,且分子表面疏水基团分布较少,导致其在气液界面的吸附速率较慢,难以快速形成稳定的泡沫结构;同时,蛋白质分子间存在较强的相互作用,在搅拌等加工过程中易发生聚集,进一步降低了泡沫的延展性与持气能力^[4-5]。为改善这一关键缺陷,糖基化改性是一种高效可行的技术手段,该技术通过美拉德反应将还原糖(如葡萄糖、葡聚糖等)共价接枝至蛋白质分子表面,既能增加蛋白质的亲水性与空间位阻,有效降低分子间聚集倾向,又能借助糖分子的引入增强蛋白质的表面活性,促进其在气液界面的快速吸附与铺展^[6-7]。

小麦胚清蛋白来源于小麦加工副产品,具有来源丰富、成本相对较低的优势。试验拟选择低聚半乳糖对小麦胚清蛋白进行糖基化改性,在改善其起泡性能的同时,引入低聚半乳糖所具备的益生元功能,实现蛋白功能与营养特性的双重优化。分析低聚半乳糖对小麦胚清蛋白糖基化产物起泡性及分子结构的影响,揭示小麦胚清蛋白—低聚半乳糖共价复合物的结构与起泡性之间的构效关系,旨在为小麦胚清蛋白的深加工与高值化利用提供依据。

1 材料与方 法

1.1 材料与仪器

脱脂小麦胚芽:河南省鲲鹏华生物技术有限公司;
低聚半乳糖(GOS):天津博迪化工有限公司;
大豆油:九三粮油工业集团有限集团;
磷酸盐缓冲溶液(PBS):分析纯,北京兰杰柯科技有限公司;
无水乙醇、盐酸(HCl)、氢氧化钠(NaOH):分析纯,丹东胜利化工厂;
考马斯亮 G-250:分析纯,无锡市晶科化工有限公司;
十二烷基磺酸钠(SDS):分析纯,山东哲源化工有限责任公司;
扫描电子显微镜:SU8010 型,日本日立公司;
电子天平:FA1104B 型,上海越平科学仪器有限公司;
数显 pH 计:pHS-25 型,上海雷磁仪器公司;

台式高速离心机: TG16-WS 型,上海卢湘仪离心机器有限公司;

电热恒温水浴锅: HH 511-4 型,天津天泰仪器有限公司;

真空冷冻干燥机: YTLG-10A 型,德国 CHRIST 公司;

均质仪: FJ200-SH 型,上海光谱仪器有限公司;

紫外分光光度计: UV-5200 型,上海光谱仪器有限公司;

傅里叶红外光谱仪: IRPREST IGZ-21 型,日本岛津公司;

荧光分光光度计: RF-5301PC 型,日本岛津公司;

圆二色谱仪: MOS-450 型,法国 Bologicol 公司;

激光粒度仪: Nano-ZS90 型,珠海欧美克仪器有限公司;

凯氏定氮仪: KDY-9820 型,苏州江东精密科学仪器有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 小麦胚清蛋白的制备 参照张亚奇^[8]的方法稍作修改。将脱脂小麦胚芽粉过 120 目筛,准确称取 20 g 脱脂小麦胚芽粉与去离子水按料液比 1:11 (g/mL) 溶解,用 1 mol/L NaOH 溶液调 pH 至 7.0, 30 °C 搅拌 120 min, 10 000 r/min 离心 10 min, 取上清液。采用有机溶剂沉淀法对蛋白进行分离,将上清液与无水乙醇(-20 °C 预冷 4 h)按体积比 1:1 混匀,用 1 mol/L HCl 调 pH 至 4.2,静置 30 min, 10 000 r/min 离心 10 min, 取沉淀,水洗 2 次,调 pH 至 7.0,用 0.01 mol/L PBS 溶液(pH 7.0)于 4 °C 透析 24 h,冷冻干燥。经分离纯化后的小麦胚清蛋白(WGA)纯度可达(83.917±0.420)%。

1.2.2 小麦胚清蛋白—低聚半乳糖共价复合物的制备

通过前期试验,确定低聚半乳糖改性小麦胚清蛋白反应温度 50 °C,反应时间 40 min, pH 7.0, 此时共价复合物糖基化程度最好,褐变程度较低。将 WGA、GOS 分别溶于 0.1 mol/L PBS(pH 7.0)和蒸馏水,配制成 5% 溶液,搅拌至完全溶解。将 WGA 和 GOS 溶液按体积比 1:2 混匀, 50 °C 反应 40 min, 4 °C 透析 48 h, 冷冻干燥。

1.2.3 起泡性及起泡稳定性测定 取样品溶液 10 mL, 10 000 r/min 搅打 3 min, 测量 0、20 min 时的泡沫高度, 分别按式(1)、式(2)计算起泡性和泡沫稳定性^[9]。

$$F_c = \frac{H_0}{10} \times 100\%, \quad (1)$$

$$F_s = \frac{H_{20}}{H_0} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

F_c ——起泡性,%;

F_s ——起泡稳定性,%;

H_0 ——0 min 时的泡沫高度,cm;

H_{20} ——静置 20 min 后的泡沫高度, cm。

1.2.4 Zeta-电位和粒径测定 用 0.01 mol/L、pH 7.0 的磷酸盐缓冲液将样品溶液稀释至 3 mg/mL, 利用激光粒度仪测定 Zeta-电位和粒径^[10]。

1.2.5 傅里叶红外光谱测定 将冻干样品与溴化钾按质量比 1:100 充分混匀, 研磨压制成片, 利用傅里叶红外光谱仪于 4 000~400 cm^{-1} 范围内扫描样品 FT-IR 光谱^[11]。

1.2.6 圆二色谱测定 用 0.01 mol/L PBS 溶液将样品分散液稀释至 0.2 mg/mL。在氮气流保护下, 扫描速率为 100 nm/min, 响应时间为 0.15 s, 带宽为 1 nm, 190~260 nm 下测定圆二色谱信号。

1.2.7 内源荧光光谱测定 将样品与 0.01 mol/L PBS 溶液混匀, 配制成 1 mg/mL 的蛋白样品溶液, 在荧光光谱激发波长 280 nm, 扫描发射光谱范围 300~400 nm、激发和发射狭缝均为 5 nm 下测定样品荧光光谱。

1.2.8 微观结构分析 在样品台上粘少量导电胶, 用棉签取微量干燥小麦胚清蛋白粉涂于导电胶上, 将样品台置于真空镀膜机中, 调整适当的电流与真空度对样品进行喷金处理, 通过扫描电镜观察。

1.2.9 十二烷基硫酸钠聚丙烯酰胺凝胶电泳 (SDS-PAGE) 测定 用考马斯亮 G-250 进行染色、去离子水脱色。分离胶及浓缩胶质量浓度分别为 120, 40 g/L; 上样质量浓度 5 $\mu\text{g/mL}$, 上样量 10 μL , 电泳电压 80 V, 30 min 后调电压为 120 V, 当指示剂前沿距电泳槽胶底 0.5 cm 时, 停止电泳, 经胶条染色、脱色后成像分析。

1.3 数据处理

各试验至少重复测定 3 次, 结果以均数±标准差表示。采用 SPSS 26.0 软件进行单因素方差分析和 Duncan's 检验, $P < 0.05$ 表示差异显著。采用 Origin 2017 软件进行数据处理和绘图。

2 结果与分析

2.1 起泡性和起泡稳定性

蛋白质的起泡性源于搅打过程中蛋白质迅速吸附在气-水界面上, 导致其构象发生变化, 分子间的相互作用形成了具备黏弹性的网络结构, 使气-水界面的表面张力降低, 产生丰富的泡沫^[12]。由图 1 可知, WGA-GOS 的起泡性较 WGA 的显著提高了 41.7%, 起泡稳定性显著提高了 7.9%, 与 pH 7.0~7.5 时蛋液的起泡性和起泡稳定性相近^[13]。这可能是 WGA 经糖基化改性后引入大量羟基, 同时蛋白质的空间结构改变, 分子内部疏水基团暴露, WGA-GOS 表面亲水基团和疏水基团与水分子之间相互作用, 降低了气-水界面的表面张力, 界面黏弹性显著提升, 起泡性和起泡稳定性增强^[14]。

2.2 粒径和电位

粒径大小可以表征蛋白质分子的分散以及聚集情

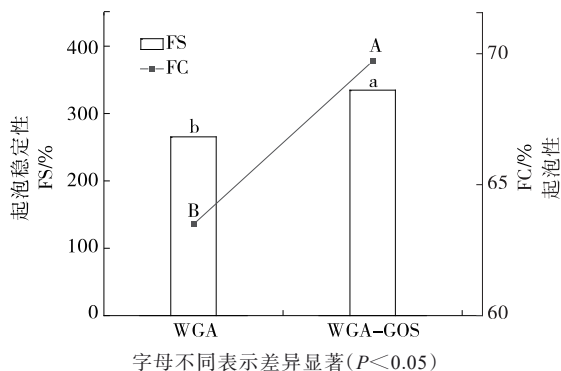


图 1 WGA 及其糖基化产物的起泡性及起泡稳定性

Figure 1 Foaming property and foaming stability of WGA and its glycosylated products

况, 反映蛋白质空间构象的变化。Zeta-电位的绝对值越大, 粒子间静电斥力越强, 其聚集的阻力越大^[15]。由表 1 可知, 与 WGA 相比, WGA-GOS 的 Zeta-电位绝对值显著提升至 9.43 mV, 粒径从 639.82 nm 增至 1 198.23 nm, 结合 WGA-GOS 微观结构的“紧密聚集”可推测粒径变化并非单纯分子膨胀, 可能是糖基化的空间位阻效应或者湿法反应过程中蛋白质非共价热聚集的结果, 是否仅由糖分子共价结合导致还需进一步证实。WGA 在中性条件下带有负电荷, 高度水合的糖分子会影响复合物的电迁移率, 且 GOS 的加入使 WGA 表面静电荷数量提升, 因此在 WGA-GOS 中观察到更多的负电位^[14]。同时, 电荷的改变也会影响蛋白质在油水界面和气-水界面的吸附和排列^[16]。

表 1 WGA 和 WGA-GOS 的 Zeta-电位和粒径[†]

Table 1 Zeta potential and particle size of WGA and WGA-GOS

组别	粒径/nm	Zeta-电位/mV
WGA	639.82±41.36 ^b	-7.46±0.15 ^a
WGA-GOS	1 198.23±91.86 ^a	-8.66±0.19 ^b

† 小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)。

2.3 傅里叶红外光谱

傅里叶红外光谱 (FTIR) 常用于分析物质的化学组成及蛋白质的二级结构等。糖基化使蛋白质的某些功能性基团消失或者出现新的基团, 红外光谱图上可清晰地观察到特定基团光谱强度及位置的变化^[17]。

由图 2 可知, 3 200~3 500 cm^{-1} 为 O—H 的伸缩振动峰, 经糖基化改性后, WGA 在 3 275 cm^{-1} 处吸收峰迁移至 3 280 cm^{-1} , 可能是 GOS 分子中的 O—H 和 WGA 分子中的 N—H 伸缩振动形成氢键缔合体所致^[18]。WGA 的酰胺 I 带 (1 700~1 600 cm^{-1}) 出现在 1 638 cm^{-1} 处, 较 WGA-

GOS的(1 646 cm^{-1})向低波数方向位移了约 8 cm^{-1} ,表明蛋白质分子内氢键作用减弱,二级结构向更加无序的状态转变^[19]。WGA 经糖基化改性后,在酰胺 II 带(1 580~1 500 cm^{-1})1 522 cm^{-1} 处的吸收峰迁移至 1 535 cm^{-1} ,说明在糖基化反应过程中消耗了 WGA 的氨基酸残基^[20]。1 150~1 050 cm^{-1} 附近的吸收峰与 C—O 拉伸有关,与 WGA 相比,WGA-GOS 在 1 060 cm^{-1} 处的吸收峰强度增加,说明 WGA 与 GOS 产生了共价结合^[21]。在 1 638, 1 522, 1 240 cm^{-1} 处,吸收峰表现出了不同程度的变化,这 3 个波数分别在酰胺 I 带、酰胺 II 带和酰胺 III 带的波数范围内,表明 GOS 改变了 WGA 的二级结构。

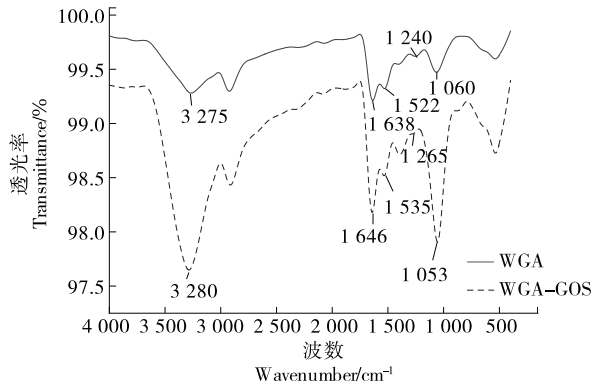


图 2 WGA 及其糖基化产物的红外光谱图
Figure 2 Infrared spectra of WGA and its glycosylated products

2.4 圆二色谱

在 190~260 nm 波段,圆二色谱可以反映蛋白质的 α -螺旋、 β -折叠、 β -转角和无规卷曲等二级结构构象信息^[22]。 α -螺旋结构的特征峰为 216 nm 处的负带, β -折叠结构在 190~200 nm 范围内具有一个特征正带。

由图 3 可知,WGA 与 WGA-GOS 的圆二色谱在 192 nm 附近均出现正带,在 208~222 nm 范围均出现负带^[23]。由表 2 可知,WGA 经糖基化改性后, α -螺旋、 β -折叠和 β -转角含量降低,无规卷曲含量从 13.61% 增至 23.65%,蛋白质分子柔性增强,更易在气液界面铺展形成连续吸附膜,分子内柔性及分子间聚集为共存关系,搅打剪切作用可推动微米级聚集体快速迁移至气液界面,实现高效吸附,从而提升起泡能力。

2.5 内源荧光光谱

内源荧光光谱可以反映蛋白质的三级结构变化,色氨酸、酪氨酸及苯丙氨酸是蛋白质内源荧光的主要来源,可以通过观察荧光强度的变化和峰位移分析复合物系统中蛋白质的三级结构^[24]。由图 4 可知,WGA 和 WGA-GOS 的色氨酸荧光发射光谱的最大波长为 344 nm,随着 GOS 的加入,WGA-GOS 复合物的荧光发射峰的峰形保

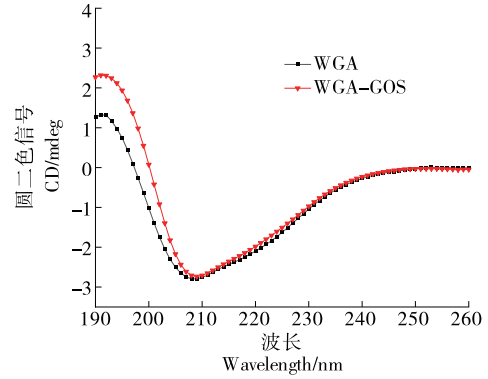


图 3 WGA 及其糖基化产物的圆二色谱图
Figure 3 Circular dichrograms of WGA and its glycosylated products

表 2 WGA 及其糖基化产物的二级结构含量[†]

Table 2 Secondary structure content of WGA and its glycosylated products

组别	α -螺旋	β -折叠	β -转角	无规卷曲
WGA	15.74±0.53 ^a	37.50±0.97 ^a	33.15±0.68 ^a	13.61±0.35 ^b
WGA-GOS	9.84±0.31 ^b	33.75±0.71 ^b	32.76±0.84 ^b	23.65±0.61 ^a

† 小写字母不同表示差异显著($P < 0.05$)。

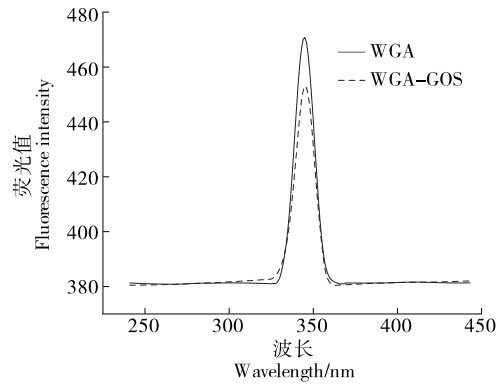


图 4 WGA 及其糖基化产物的荧光光谱图
Figure 4 Fluorescence spectra of WGA and its glycosylated products

持不变,但荧光发射强度降低。这可能是由于 WGA-GOS 复合物的形成,使得蛋白质分子重排,GOS 的加入对蛋白造成屏蔽效果,导致其荧光强度淬灭^[25]。

2.6 微观结构

由图 5 可知,未经修饰的 WGA 表面结构疏松,有空隙且大小不均匀,可能是在未经过修饰的自然状态下,温度升高,蛋白质分子的热运动加剧,一些较弱的相互作用力被破坏,原本紧密的结构变得疏松。经 GOS 修饰后的 WGA 结构紧密,且表面附着粒状 GOS,可在气泡表面形成厚度约 0.5~1.0 μm 的复合膜,减少了气泡融合,显著提

高了起泡稳定性。GOS通过共价键与WGA连接,使得蛋白质分子的局部结构发生改变,原本松散的结构区域可能会因为糖分子的加入而被“填充”,从而使整体结构变得更加紧密,其结构变化有助于蛋白质乳化性、水合能力的提升,与粒径结果一致。张玥等^[26]研究发现,改性后的共价复合物大部分以片层或块状结构存在,体积较大。

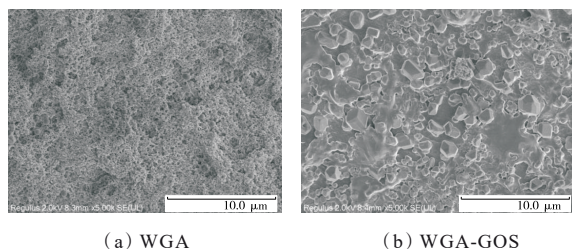


图5 WGA及其糖基化产物的微观结构图

Figure 5 Microstructures of WGA and its glycosylated products

2.7 SDS-PAGE 分析

由图6可知,WGA-GOS在上方出现轻微的条带,说明经糖基化反应后产生了大相对分子质量的物质。在SDS和 β -巯基乙醇彻底破坏非共价作用力的条件下,WGA-GOS相较于WGA条带出现明显上移且变宽,确证相对分子质量增加源于糖基的共价接入,排除非共价结合干扰。

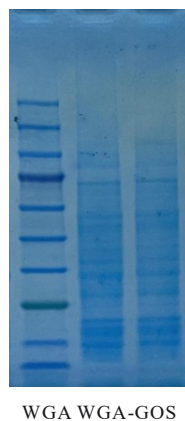


图6 WGA及其糖基化产物的SDS-PAGE图像

Figure 6 SDS-PAGE image of WGA and its glycosylated products

3 结论

选用低聚半乳糖对小麦胚清蛋白进行了糖基化改性,并分析了其乳化起泡性及结构特性。结果表明,小麦胚清蛋白经低聚半乳糖糖基化改性后,其电位绝对值和粒径显著增加,低聚半乳糖的引入致使小麦胚清蛋白空

间结构发生了膨胀或者聚集,表面积和体积增加,水合作用增强,使蛋白质呈现出更为复杂的形态,且与微观结构观察结果一致。结合傅里叶变换红外光谱、圆二色谱及内源荧光光谱谱图分析,小麦胚清蛋白-低聚半乳糖复合物的 α -螺旋、 β -折叠和 β -转角减少,无规卷曲增加,色氨酸荧光强度降低,说明糖基化导致蛋白质二级结构和三级结构被破坏,从有序状态转变为无序状态,无序结构的增加使得蛋白质分子表面的亲水基团和疏水基团更容易暴露,为与水分子相互作用和与低聚半乳糖结合提供了更多的机会,从而增强了小麦胚清蛋白的起泡性。

经低聚半乳糖改性后,小麦胚清蛋白结构发生了改变,起泡性及起泡稳定性分别提高了41.7%,7.9%,增强了其起泡特性。后续还需对两者之间糖基化反应的热力学、动力学和反应过程进行分析,以期更科学、清晰地分析和讨论利用糖基化反应改变蛋白质性质的机制。

参考文献

- [1] 王成忠,高超,赵乃峰.复合酶结合碱法制备麦胚多肽的研究[J].食品工业科技,2012,33(14):210-213.
WANG C Z, GAO C, ZHAO N F. Study on preparation of wheat germ peptides with multiplex enzymes and Alkali[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(14): 210-213.
- [2] 刘凤茹.麦胚蛋白聚集行为及其钙离子螯合肽的制备与评价[D].无锡:江南大学,2014:11.
LIU F R. The aggregation behavior of wheat germ protein and the preparation and evaluation of calcium chelating peptides[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2014: 11.
- [3] 刘月,丑建栋,陈玥璋,等.小麦胚芽的营养功能成分及综合利用研究进展[J].食品工业科技,2022,43(12):457-467.
LIU Y, CHOU J D, CHEN Y Z, et al. Advances on nutritional functional components and comprehensive utilization of wheat germ[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(12): 457-467.
- [4] 李天文.麦胚蛋白的分级提取及其理化和功能特性研究[D].大庆:黑龙江八一农垦大学,2009:3.
LI T W. Study on fractionation of wheat germ protein and their physico-chemical and functional property[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2009: 3.
- [5] 范广琦,刘晓兰,郑喜群,等.高起泡性玉米谷蛋白水解物对戚风蛋糕品质的影响[J].食品与机械,2023,39(10):197-205,216.
FAN G Q, LIU X L, ZHENG X Q, et al. Effect of high foam ability corn glutelin hydrolysate on quality of chiffon cake[J]. Food & Machinery, 2023, 39(10): 197-205, 216.
- [6] LUO Q, CUI Y, GAO W F, et al. Preparation and functional characterization of buckwheat protein glycosylation products[J]. Food Chemistry, 2025, 30: 102879.
- [7] HUANG X Q, TU Z C, XIAO H, et al. Characteristics and

- antioxidant activities of ovalbumin glycated with different saccharides under heat moisture treatment[J]. *Food Research International*, 2012, 48(2): 866-872.
- [8] 张亚奇. 麦胚清蛋白的表征及中试设计[D]. 郑州: 河南工业大学, 2018: 10.
ZHANG Y Q. Characterization and pilot-plant design of wheat germ albumin[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2018: 10.
- [9] 郭思倩, 杨肇兴, 姚洋, 等. 萌发对藜麦蛋白质结构与功能特性的影响[J]. *中国粮油学报*, 2023, 38(8): 156-162.
GUO S Q, YANG Z X, YAO Y, et al. Influence of germination on qualitative properties of quinoa (*Chenopodium quinoa willd*) protein[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2023, 38(8): 156-162.
- [10] 陈思如. 低聚木糖糖基化改性酪蛋白的功能特性及应用[D]. 长春: 吉林大学, 2022: 17.
CHEN S R. Functional properties and application of xylo-oligosaccharide modified casein[D]. Changchun: Jilin University, 2022: 17.
- [11] 康志敏, 耿宁宁, 何梦影, 等. 砂仁多糖对小麦淀粉理化性质及消化特性的影响[J]. *食品与机械*, 2024, 40(6): 19-24, 110.
KANG Z M, GENG N N, HE M Y, et al. Effects of *Amomum villosum* polysaccharide on physicochemical and *in vitro* digestibility properties of wheat starch[J]. *Food & Machinery*, 2024, 40(6): 19-24, 110.
- [12] 张迪, 付美玲, 费丛璇, 等. 多糖—植物蛋白复合物的制备及特性研究进展[J]. *食品与机械*, 2024, 40(4): 227-232.
ZHANG D, FU M L, FEI C X, et al. Research progress on preparation and characteristics of polysaccharide plant protein complex[J]. *Food & Machinery*, 2024, 40(4): 227-232.
- [13] 张桢玉. 大麦 β -葡聚糖复合小麦蛋白脂肪替代物的制备及应用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021: 25.
ZHANG Z Y. Preparation and application of a fat replacer compounding barley β -glucan with wheat protein[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021: 25.
- [14] 苏宇杰, 徐珍珍, 乔立文, 等. 全蛋液 pH 值对其功能性质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2012, 38(11): 63-67.
SU Y J, XU Z Z, QIAO L W, et al. Effect of pH values on the functional properties of liquid whole egg[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2012, 38(11): 63-67.
- [15] QUAN T H, BENJAKUL S. Impacts of desugarization and drying methods on physicochemical and functional properties of duck albumen powder[J]. *Drying Technology*, 2019, 37(7): 864-875.
- [16] 朱玉. 高溶解性菠萝蜜种子糖基化改性蛋白的制备及其性能研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2022: 31.
ZHU Y. The preparation and property study of highly soluble jackfruit seed protein modified by glycation reaction[D]. Nanchang: Nanchang University, 2022: 31.
- [17] YANG Z H, ZHOU H M, BAI Y P. Effects of vacuum ultrasonic treatment on the texture of vegetarian meatloaves made from textured wheat protein[J]. *Food Chemistry*, 2021, 361: 130058.
- [18] WANG W D, LI C, CHEN C, et al. Effect of chitosan oligosaccharide glycosylation on the emulsifying property of lactoferrin[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 209(Pt A): 93-106.
- [19] 孙金晶. 基于界面特征解析糖对蛋清蛋白泡沫性能的影响规律和作用机制[D]. 无锡: 江南大学, 2022: 41.
SUN J J. Mechanism clarification of the foam performance of egg white proteins influenced by sugars based on interface characteristics[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022: 41.
- [20] KOSARAJU S L, WEERAKKODY R, AUGUSTIN M A. Chitosan-glucose conjugates: influence of extent of Maillard reaction on antioxidant properties[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, 58(23): 12 449-12 455.
- [21] LEI D, MA X J. Effect of enzymatic glycosylation on the structure and properties of wheat gluten protein fibers[J]. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 2021, 16: 15589250211000337.
- [22] 臧艳妮, 赵妍嫣, 罗水忠, 等. 超声波和糖基化复合改性对小麦面筋蛋白性质和结构的影响[J]. *食品科学*, 2017, 38(5): 122-128.
ZANG Y N, ZHAO Y Y, LUO S Z, et al. Effect of ultrasonic treatment and glycosylation modification on characteristics and structure of wheat gluten[J]. *Food Science*, 2017, 38(5): 122-128.
- [23] WANG W D, LI C, BIN Z, et al. Physicochemical properties and bioactivity of whey protein isolate-inulin conjugates obtained by Maillard reaction[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 150: 326-335.
- [24] 张园园, 王聪, 马琴, 等. 糖基化对分离乳清蛋白结构和功能特性的影响[J]. *中国食品学报*, 2023, 23(1): 54-65.
ZHANG Y Y, WANG C, MA Q, et al. Effects of glycosylation on the structural and functional properties of whey protein isolate[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2023, 23(1): 54-65.
- [25] O'SULLIVAN J, MURRAY B, FLYNN C, et al. The effect of ultrasound treatment on the structural, physical and emulsifying properties of animal and vegetable proteins[J]. *Food Hydrocolloids*, 2016, 53: 141-154.
- [26] 张玥, 薛雨菲, 李芳, 等. 糖基化修饰对核桃谷蛋白结构和功能特性的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(17): 60-66.
ZHANG Y, XUE Y F, LI F, et al. Effects of glycosylation on structural and functional properties of walnut gluten[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(17): 60-66.