

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2025.80324

塔格糖糖基化对蛋清蛋白粉功能特性的影响

窦小雪^{1,2} 陈会民³ 李倩文² 陈卓^{1,2} 陈树兴^{1,2} 刘丽莉¹

(1. 河南科技大学食品与生物工程学院, 河南 洛阳 471023; 2. 中原食品实验室, 河南 漯河 462333;
3. 洛阳市农产品安全认证中心, 河南 洛阳 471000)

摘要: [目的] 利用塔格糖糖基化改善蛋清蛋白(EWP)的功能特性。[方法] 对比糖基化蛋清蛋白(G-EWP)、热处理蛋清蛋白(H-EWP)和蛋清蛋白的抗氧化性、乳化及其稳定性、起泡及其稳定性的差异, 并采用十二烷基硫酸钠-聚丙烯酰胺凝胶电泳、傅里叶变换红外光谱、圆二色谱、扫描电子显微镜、粒径分析等探究糖基化蛋清蛋白的结构变化机理。[结果] 相较于EWP和H-EWP, G-EWP的抗氧化性、乳化性、乳化稳定性、起泡性和泡沫稳定性均显著提高($P < 0.05$); 糖基化后相对分子质量增大, 塔格糖与蛋清蛋白发生共价接枝, α -螺旋、 β -折叠、 β -转角含量发生变化, 形态由球状变为大块状复合物, 平均粒径由153.53 nm降至129.33 nm ($P < 0.05$), Zeta电位值由-22.68 mV下降至-31.83 mV ($P < 0.05$)。[结论] 塔格糖糖基化能明显改善EWP的功能特性。

关键词: 塔格糖; 糖基化; 蛋清蛋白; 功能特性

Effect of tagatose glycosylation on functional characteristics of egg white protein powder

DOU Xiaoxue^{1,2} CHEN Huimin³ LI Qianwen² CHEN Zhuo^{1,2} CHEN Shuxing^{1,2} LIU Lili¹

(1. College of Food & Bioengineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471023, China;
2. Food Laboratory of Zhongyuan, Luohe, Henan 462333, China;
3. Luoyang Agricultural Product Safety Certification Center, Luoyang, Henan 471000, China)

Abstract: [Objective] To improve the functional characteristics of egg white protein (EWP) by tagatose glycosylation. [Methods] Firstly, the differences in antioxidant activity, emulsifying property, emulsion stability, foaming ability, and foaming stability are compared among glycosylated EWP (G-EWP), heat-treated EWP (H-EWP), and EWP. Then, the mechanism underlying the structural changes of G-EWP is investigated by sodium dodecyl sulfate-polyacrylamide gel electrophoresis, Fourier transform infrared spectroscopy, circular dichroism, scanning electron microscopy, and particle size analysis. [Results] Compared with EWP and H-EWP, G-EWP exhibits significantly improved antioxidant activity, emulsifying property, emulsion stability, foaming ability, and foaming stability ($P < 0.05$). After glycosylation, the molecular weight increases. Tagatose is covalently grafted to egg white protein, with the content of α -helix, β -sheet, and β -turn changing and the morphology changing from spherical to large block-like complexes. The average particle size decreases from 153.53 nm to 129.33 nm ($P < 0.05$), and the zeta potential value decreases from -22.68 mV to -31.83 mV ($P < 0.05$). [Conclusion] Tagatose glycosylation can significantly improve the functional characteristics of EWP.

Keywords: tagatose; glycosylation; egg white protein; functional characteristics

蛋清蛋白(egg white protein, EWP)作为一种优质动物蛋白来源,因其高营养价值,良好的乳化性、起泡性及凝胶性而被广泛应用于食品工业中^[1]。相对于新鲜蛋,粉末状蛋制品更容易处理、易于运输、成本低且货架期更

基金项目:国家重点研发计划项目(编号:2023YFF1104505-5)

通信作者:陈树兴(1965—),男,河南科技大学教授,博士。E-mail:chenshuxing1@163.com

收稿日期:2025-04-09 改回日期:2025-09-07

引用格式:窦小雪,陈会民,李倩文,等. 塔格糖糖基化对蛋清蛋白粉功能特性的影响[J]. 食品与机械, 2025, 41(9): 8-14.

Citation: DOU Xiaoxue, CHEN Huimin, LI Qianwen, et al. Effect of tagatose glycosylation on functional characteristics of egg white protein powder[J]. Food & Machinery, 2025, 41(9): 8-14.

长。根据全球市场的最新研究报告,2020年蛋清蛋白粉市场估计为74亿美元,预计2027年将达到约108.50亿美元。但是蛋清蛋白粉的抗氧化性和乳化等特性相对有限,这限制了粉末状蛋制品在食品中的应用。近年来,蛋白质改性技术逐渐成为提升其功能特性的重要手段。目前常用的蛋白质改性有物理、化学和生物改性。物理改性的效果不够持久;化学改性可能生成有害物质;生物改性成本较高,反应速率受底物特异性限制等。

糖基化反应可通过将还原糖的羰基与蛋白质的氨基共价结合,形成糖基化产物^[2]。郭浩彬等^[3]利用核糖、果糖、木糖和葡萄糖与藜麦多肽进行糖基化,得到的糖基化产物抗氧化活性均显著提升。Fu等^[4]研究发现,糖基化可以显著提高酵母蛋白的乳化特性。Chen等^[5]研究发现,糖基化是一种可以有效改善蛋白特性的方法。糖基化处理不仅能够使蛋白质的一些物理或化学性质得到改善,还能通过共价键引入糖链,协同提升其功能特性^[6]。糖基化反应因为环保高效和能显著改善蛋白质理化性质的特点备受关注,被认为是扩大蛋白在食品加工中应用的一种有前景的策略^[7]。

塔格糖作为一种低热量、高甜度的稀有单糖^[8],其分子中的多羟基结构可能通过糖基化反应赋予蛋白质更优的亲水性和空间位阻效应,进一步改善功能特性。将塔格糖作为糖基,有利于提高复合物的功能特性。试验拟对比糖基化蛋清蛋白(G-EWP)、热处理蛋清蛋白(H-EWP)和蛋清蛋白的抗氧化、乳化及起泡特性,并结合十二烷基硫酸钠-聚丙烯酰胺凝胶电泳、傅里叶变换红外光谱、圆二色谱、扫描电子显微镜等多尺度结构表征手段,阐明塔格糖糖基化对蛋清蛋白分子构象、聚集状态及表面电荷的作用机制,旨在为稀有糖糖基化改性蛋白的功能性开发提供依据,并拓展蛋清蛋白在功能性食品中的应用潜力。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

蛋清蛋白粉:蛋白质含量 $\geq 78\%$,安徽省亳州市众意蛋业有限责任公司;

塔格糖:食品级,益恒源生物科技有限公司;

邻苯二甲醛(OPA)、十二烷基硫酸钠(SDS)、四硼酸钠、甲醇、 β -羟基乙醇、溴化钾(KBr):分析纯,上海麦克林生化科技股份有限公司。

1.2 仪器与设备

紫外可见分光光度计:UV-2800A型,尤尼柯(上海)仪器有限公司;

傅里叶变换红外光谱仪:INVENIO型,上海爱仪通科技有限公司;

扫描电子显微镜:蔡司Sigma500型,上海翔研仪器有

限公司;

圆二色谱:jasco J-1500型,上海翔研仪器有限公司;

Malvern纳米粒度仪:Zetasizer Ultra型,英国马尔文仪器有限公司;

数显恒温水浴锅:HH-6型,常州普天仪器制造有限公司;

真空冷冻干燥机:SCIENTZ-12N/D型,宁波新芝生物科技股份有限公司。

1.3 方法

1.3.1 H-EWP、G-EWP的制备 称取EWP粉溶解于蒸馏水中配成5%的乳浊液,60℃水浴60 min,8 000 r/min离心10 min,取上清液冷冻干燥,得到H-EWP。配制质量分数为5%的EWP乳浊液,按质量比1:1加入塔格糖,充分搅拌溶解,60℃水浴60 min,8 000 r/min离心10 min,取上清液冷冻干燥,得到G-EWP^[9],接枝度为20.49%。

1.3.2 DPPH自由基清除能力测定 参照Li等^[10]的方法并稍作修改。取冻干样品,配制成10 mg/mL样品溶液(2 mL),加入8 mL 0.1 mmol/L DPPH-甲醇溶液,暗处反应30 min后,用酶标仪测定517 nm处吸光度。按式(1)计算DPPH自由基清除率。

$$R = \frac{A_0 - A}{A} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

R——DPPH自由基清除率,%;

A_0 ——样品组吸光度值;

A——对照组吸光度值。

1.3.3 乳化性和乳化稳定性测定 参照文献[11]。分别按式(2)、式(3)计算乳化性(EAI)和乳化稳定性(ESI)。

$$E = \frac{2 \times 2.303 \times A_0 \times D_F}{C \times \varphi \times \theta \times 10^4}, \quad (2)$$

$$S = \frac{A_0}{A_0 - A_{30}} \times \Delta t, \quad (3)$$

式中:

E——乳化性,m²/g;

S——乳化稳定性,min;

D_F ——稀释倍数;

C——初始蛋白质质量浓度,g/mL;

θ ——光路,1 cm;

φ ——乳液中油相体积分数,0.25;

A_0, A_{30} ——0,30 min时溶液的吸光度值;

Δt ——时间差,min。

1.3.4 起泡性和泡沫稳定性测定 配制1 g/mL各样品溶液,10 000 r/min均质2 min,迅速将均质后的样品转移到刻度量筒中,分别于均质后静置0,30 min时读取总体积。分别按式(4)、式(5)计算起泡性和泡沫稳定性。

$$F = \frac{V_1}{V_0} \times 100\%, \quad (4)$$

$$FS = \frac{V_2}{V_1} \times 100\%, \quad (5)$$

式中:

F ——起泡性, %;

FS ——泡沫稳定性, %;

V_0, V_1, V_2 ——各样品体积和静置 0, 30 min 时泡沫体积, mL。

1.3.5 十二烷基硫酸钠—聚丙烯酰胺凝胶电泳 根据预试验配制 4 mg/mL 的样品溶液, 使用雅酶预制胶进行垂直电泳, 80 V 运行 30 min, 120 V 运行 1 h。电泳结束后用 0.1% G250 考马斯亮蓝染色, 用含 10% 乙酸和 5% 无水乙醇的水溶液脱色, 直到背景板清晰, 用凝胶成像仪进行拍照。

1.3.6 傅里叶红外光谱测定 将 EWP、H-EWP 和 G-EWP 冻干样品分别与溴化钾按质量比 1:100 混匀研磨, 压成薄片, 以 4 cm^{-1} 的分辨率于 $4000\sim 400 \text{ cm}^{-1}$ 范围内进行扫描, 以纯溴化钾为测量背景。

1.3.7 圆二色谱分析 制备质量浓度为 1 mg/mL 的各样品溶液, 置于石英池中, 利用圆二色谱仪于 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 下进行扫描(扫描范围 $180\sim 260 \text{ nm}$), 测定 EWP、H-EWP 和 G-EWP 的二级结构, 采用 CD Pro 计算二级结构含量变化。

1.3.8 扫描电子显微镜 称取 50 mg 冻干样品均匀平铺到圆柱形铝盘的黑色双面胶带上, 喷金涂层完成后, 于 5.0 kV 加速电压下进行扫描。

1.3.9 粒径和 Zeta 电位测定 将各冻干样品配制成质量浓度为 1 mg/mL 的样品溶液, 使用马尔文激光粒度分析仪测量粒径和 Zeta 电位。

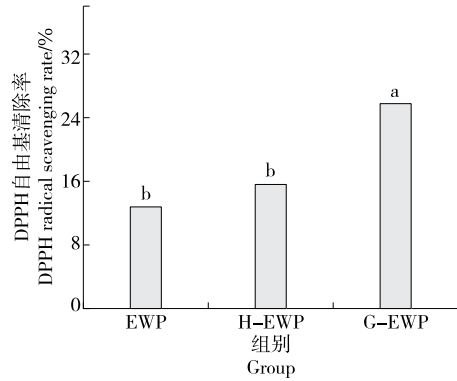
1.4 数据处理

各样品重复测定 3 次, 结果以平均值 \pm 标准差表示, 采用 Excel 和 SPSS 27.0 软件进行数据处理和显著性分析, 采用 Origin 2024b 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 DPPH 自由基清除能力

由图 1 可知, G-EWP 的 DPPH 自由基清除率显著高于 EWP 和 H-EWP 的 ($P < 0.05$)。热处理会使蛋白质特有结构打开, 暴露活性基团, 致使抗氧化性小幅度提高。塔格糖分子中含有多个羟基(—OH), 通过糖基化与蛋清蛋白的氨基共价结合, 在蛋白质表面形成了富含羟基的糖链层。复合物可以通过提供氢来清除 DPPH 自由基, 形成稳定的 DPPH—H 分子, 从而呈现较好的自由基清除能力^[12]。G-EWP 的 DPPH 自由基清除能力也超过了单独的塔格糖, 可能是糖基化反应过程中形成了类黑精, 与 Wang 等^[13]的研究结果相似。G-EWP 的 DPPH 自由基清除能力提高, 也有可能是糖基化反应在蛋白质分子上引



字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图 1 EWP, H-EWP 和 G-EWP 的自由基清除能力
Figure 1 Free radical scavenging ability of EWP, H-EWP, and G-EWP

入了新的具有抗氧化活性的基团或结构导致的。

2.2 乳化特性

由表 1 可知, G-EWP 的乳化性和乳化稳定性较 EWP 分别提高了 15.08% 和 27.94% ($P < 0.05$), 较 H-EWP 分别提高了 4.88% 和 24.20% ($P < 0.05$)。热处理可以使蛋白分子的空间结构变得松散^[14], 增加蛋白质在乳化相中的分散和吸附, 引起乳化性和乳化稳定性的上升。G-EWP 的乳化特性提高, 可能是糖基化修饰改变了蛋白质的结构, 增强了其乳化特性^[15]; 还可能是塔格糖的键入使其形成了相对分子质量更大的复合物, 分散在油水界面上增加了空间位阻, 液滴无法在短时间内进行聚合, 因此油滴不易聚集和凝结^[16]。G-EWP 结合了蛋白质的大分子特性和塔格糖的亲水特性也可能是乳化特性提高的原因^[17], 与 Zheng 等^[18]的研究结果相似。

表 1 EWP, H-EWP 和 G-EWP 的乳化性和乳化稳定性[†]

Table 1 Emulsifying property and emulsion stability of EWP, H-EWP, and G-EWP

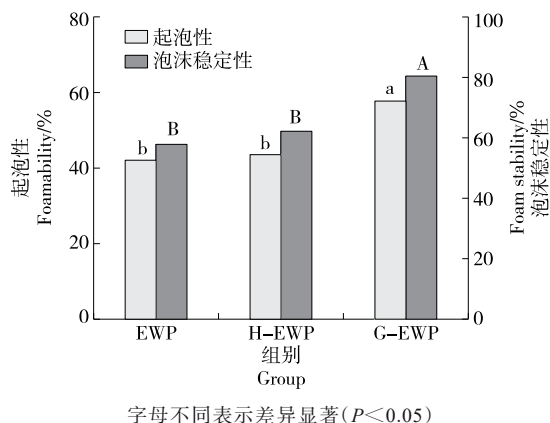
组别	乳化性/($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	乳化稳定性/min
EWP	5.04 ± 0.11^c	36.73 ± 2.58^c
H-EWP	5.53 ± 0.03^b	41.04 ± 0.44^b
G-EWP	5.80 ± 0.05^a	50.97 ± 0.19^a

[†] 同列字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)。

2.3 起泡性和泡沫稳定性

起泡性和泡沫稳定性是蛋白质在食品加工中非常重要的功能特性。由图 2 可知, G-EWP 的起泡性和泡沫稳定性显著高于 EWP 和 H-EWP ($P < 0.05$), 这是因为糖基化引入了亲水性糖基团, 改变了蛋清蛋白的表面疏水性, 使其更容易在气液界面吸附, 形成稳定的液相薄层^[19]。这与 Han 等^[20]的结论一致。同时, 糖基化降低了蛋白质

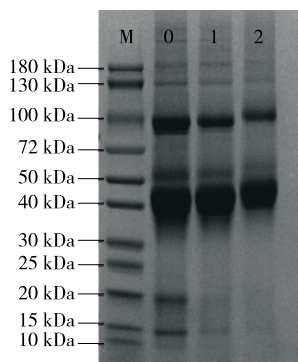
的净电荷,减少了分子间的静电排斥,促进蛋白质在界面聚集,也可增强泡沫稳定性^[21]。在一些产品中,如冰淇淋,起泡性和乳化特性的协同作用会形成更稳定的气泡网络结构,改善食品的质地和口感^[22]。



字母不同表示差异显著($P < 0.05$)
图2 EWP, H-EWP和G-EWP的起泡性和泡沫稳定性
Figure 2 Foaming ability and foaming stability of EWP, H-EWP, and G-EWP

2.4 相对分子质量

相对分子质量的增加表明蛋清蛋白和塔格糖发生了共价结合。由图3可知,EWP有多个清晰条带,G-EWP的小分子条带几乎消失,大分子条带相较于EWP和H-EWP均有明显的上移,表明塔格糖与蛋清蛋白发生了共价键合,改变了蛋白质的电荷构象,形成大分子物质,导致条带向高相对分子质量区域迁移,形成高分子聚集,影响其在凝胶中的迁移行为。H-EWP的低分子条带变得模糊,说明蛋清蛋白热处理变性展开,内部疏水基团暴露^[23],通过疏水相互作用形成大分子聚集。这些聚集因相对分子质量过大无法进入分离胶,导致小分子条带变浅。



M. 标准蛋白 0. EWP 1. H-EWP 2. G-EWP
图3 EWP, H-EWP和G-EWP的SDS-PAGE图谱
Figure 3 SDS-PAGE profiles of EWP, H-EWP, and G-EWP

2.5 傅里叶变换红外光谱分析

由图4可知,G-EWP在1700~1600 cm^{-1} 处峰的吸收强度增加,相较于EWP和H-EWP吸收峰发生了红移,美拉德反应过程中可能增加了氨基酸残基的消耗。3700~3000 cm^{-1} 处G-EWP的峰宽增大,峰的吸收强度增加,可能是糖分子引入的羟基或塔格糖和蛋清蛋白复合物中形成了氢键网络^[24]。这与张斌等^[25]的研究结果一致。根据两组峰的变化可以进一步确认糖基化对蛋白质结构的改变以及接枝物中糖类化合物的存在^[26],表明糖基化反应能引起C—H的变角振动及C—OH振动的增加,而单一热处理对蛋白质的结构影响较小。

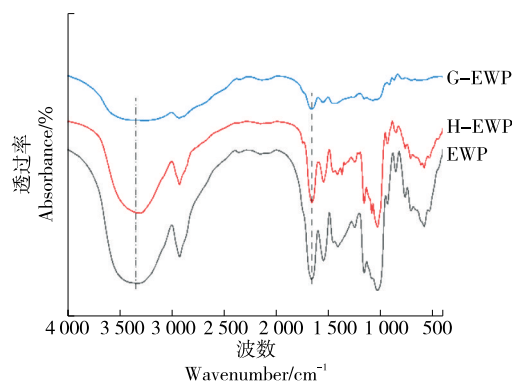


图4 EWP, H-EWP和G-EWP的傅里叶变换红外光谱分析
Figure 4 Fourier transform infrared spectroscopy analysis of EWP, H-EWP, and G-EWP

2.6 二级结构

由表2可知,相较于EWP和H-EWP,G-EWP的二级结构中 α -螺旋含量显著降低($P < 0.05$), β -折叠、 β -转角含量显著增加($P < 0.05$)。 α -螺旋含量降低说明EWP分子的去折叠结构减少, β -折叠含量增加表明蛋白质有较高的聚集倾向,有助于形成致密的微观结构。这种含量变化会影响蛋白质分子的整体柔韧性^[27],揭示了塔格糖接入蛋清蛋白后,会导致蛋清蛋白肽链结构的改变和伸展^[28],使其功能特性发生变化。李倩文等^[29]研究发现,糖基化乳清蛋白因二级结构的改变,提高了蛋白质维持水油界面的能力,进而增强了蛋白质的乳化特性。

表2 EWP, H-EWP和G-EWP的二级结构相对含量[†]
Table 2 Relative content of secondary structures in EWP, H-EWP, and G-EWP %

组别	α -螺旋	β -折叠	β -转角	无规卷曲
EWP	9.20 ± 0.12 ^a	38.90 ± 0.02 ^e	12.60 ± 0.10 ^b	39.30 ± 0.20
H-EWP	8.90 ± 0.06 ^b	39.18 ± 0.09 ^b	12.62 ± 0.08 ^b	39.30 ± 0.15
G-EWP	8.60 ± 0.23 ^c	40.00 ± 0.32 ^a	13.69 ± 0.17 ^a	39.51 ± 0.17

[†] 同列字母不同表示差异显著($P < 0.05$)。

2.7 微观结构

由图 5 可知,3 种样品的聚集状态和表观形貌有明显差异。EWP 呈现出形状大小不一的球状结构,H-EWP 呈现出破碎松散且不规则片状结构,主要是包埋在 EWP 内部的疏水基团外露,表面疏水性增加,蛋白质分子在温度的作用下发生聚集,形成热聚集体,从而导致蛋白结构呈现片状结构^[30]。G-EWP 的黏附性增强,发生了结合聚集现象,形貌呈现出更大更厚的不规则形状和致密紧凑的排列,表明分子间发生了相互作用。Song 等^[31]在干热条件下制备的面筋蛋白和麦芽糖共价复合物也形成了致密的微观结构。

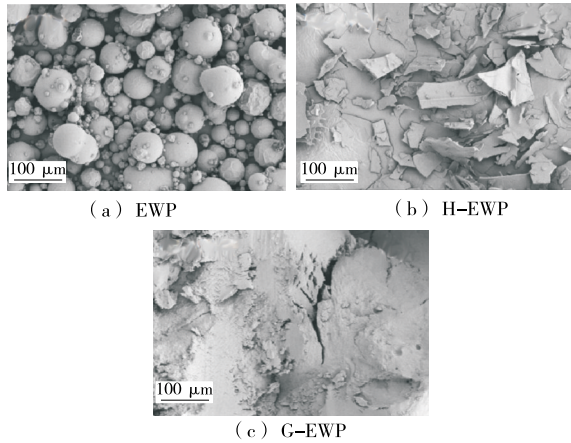
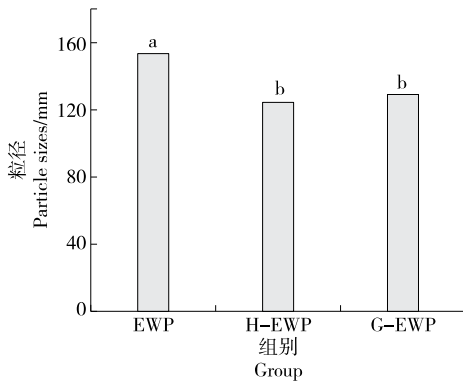


图 5 EWP, H-EWP 和 G-EWP 的微观结构分析

Figure 5 Microstructure analysis of EWP, H-EWP, and G-EWP

2.8 粒径和 Zeta 电位分析

由图 6 可知,H-EWP 和 G-EWP 的粒径均显著小于 EWP 的($P < 0.05$)。H-EWP 粒径较小可能是 EWP 在热处理过程中分解成单体或者更小的多肽链,从原来的球状



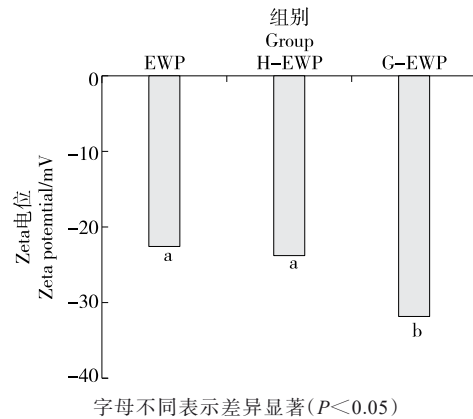
字母不同表示差异显著($P < 0.05$)

图 6 EWP, H-EWP 和 G-EWP 的粒径大小

Figure 6 Particle size analysis of EWP, H-EWP, and G-EWP

结构展开成线状或者更松散的片状,在溶液中的分布更加均匀导致粒径减小。G-EWP 粒径较小可能是糖基化引入的糖分子可能会在蛋白质表面形成一层亲水层,增加空间位阻效应,这些更强的相互作用力会促使分子链更紧密地排列、堆积在一起,减少了分子链间的自由体积。这种更紧密的堆积方式使得由大量分子链形成的整体颗粒的密度更高,在相同质量下体积可能更小,宏观上表现为粒径减小。这与 Jiang 等^[32]的研究结果类似。

当 Zeta 电位的绝对值为 30 mV 左右时,蛋白质的静电排斥力强,溶液更加稳定。由图 7 可知,G-EWP 的 Zeta 电位绝对值显著大于 EWP 和 H-EWP($P < 0.05$),说明塔格糖与 EWP 共价结合后促进了多肽链的膨胀,暴露了负电荷,增强了颗粒之间的排斥力,抑制了聚集,保持了体系的稳定性^[33]。同时也说明糖基化可以改变表面静电荷,增加静电斥力,维持蛋白稳定性,与 Yu 等^[34]的研究结果相似。



字母不同表示差异显著($P < 0.05$)

图 7 EWP, H-EWP 和 G-EWP 的 Zeta 电位

Figure 7 Zeta potential analysis of EWP, H-EWP, and G-EWP

3 结论

塔格糖糖基化蛋清蛋白可以得到具有较高抗氧化性、乳化活性、乳化稳定性、起泡性和泡沫稳定性的复合物。十二烷基硫酸钠-聚丙烯酰胺凝胶电泳结果表明,塔格糖与蛋清蛋白可以生成较大相对分子质量的复合物;傅里叶变换红外光谱结果表明部分吸收峰增强;圆二色谱结果表明复合物的二级结构发生变化,其中 α -螺旋含量下降($P < 0.05$), β -折叠和 β -转角含量上升($P < 0.05$);扫描电子显微镜结果表明塔格糖与蛋清蛋白形成了致密复合物;粒径减小至 129.33 nm,Zeta 电位稳定于 -31.83 mV。综上,塔格糖糖基化蛋清蛋白可以改善蛋白质特性,拓展蛋清蛋白粉在功能性食品中的应用。塔格糖糖基化反应可能伴随醛类、酮类等风味物质的生成,可采用顶空固相微萃取(HS-SPME)等方法检测 G-EWP

中的挥发性风味物质种类及含量,明确糖基化反应产生的特征风味物质。

参考文献

- [1] 张川,李倩文,王晓楠,等. 蛋清蛋白/黄油复合凝胶的特性研究[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(7): 151-156.
ZHANG C, LI Q W, WANG X N, et al. Study on the properties of egg white protein-butter compound gel[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(7): 151-156.
- [2] MENG Y, ZHAO X, JIANG Y Q, et al. Effect of Maillard reaction conditions on the gelation and thermal stability of whey protein isolate/d-tagatose conjugates[J]. Food Chemistry, 2023, 405: 134928.
- [3] 郭浩彬,李敏杰,张陆燕,等. 美拉德反应优化藜麦多肽抗氧化活性的研究[J]. 中国调味品, 2023, 48(12): 59-68.
GUO H B, LI M J, ZHANG L Y, et al. Optimization of antioxidant activity of quinoa polypeptides by Maillard reaction [J]. China Condiment, 2023, 48(12): 59-68.
- [4] FU D W, FU J J, XU H, et al. Glycation-induced enhancement of yeast cell protein for improved stability and curcumin delivery in Pickering high internal phase emulsions[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 257: 128652.
- [5] CHEN J J, ZHANG W T, FU C R, et al. Effects of different saccharides glycosylation modified soy protein isolate on its structure and film-forming characteristics[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 304: 140834.
- [6] YANG X, LI A Q, LI D, et al. Applications of mixed polysaccharide-protein systems in fabricating multi-structures of binary food gels: a review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 109: 197-210.
- [7] LI Y H, LI N Q, SONG Q Q, et al. Effects of glycation modifications of different glycosylating agents on the molecular structure and gel properties of sheep's hoof gelatin[J]. Food Hydrocolloids, 2025, 159: 110598.
- [8] 李子杰,沈立群,费康清,等. D-塔格糖的生理活性及生物合成研究进展[J]. 食品科学技术学报, 2023, 41(6): 20-28.
LI Z J, SHEN L Q, FEI K Q, et al. Research progress on physiological activity and biosynthesis of D-tagatose[J]. Journal of Food Science and Technology, 2023, 41(6): 20-28.
- [9] 牛秋云. 小麦胚芽蛋白糖基化产物抗氧化特性研究[J]. 食品与机械, 2023, 39(5): 32-37.
NIU Q Y. Study on antioxidant properties of glycosylated products of wheat germ protein[J]. Food & Machinery, 2023, 39(5): 32-37.
- [10] LI Y C, ZHOU L, ZHANG H Z, et al. Preparation, characterization and antioxidant activity of glycosylated whey protein isolate/proanthocyanidin compounds[J]. Foods, 2023, 12(11): 2153.
- [11] 马开元,孙晓洋,陈复生,等. 超声对豌豆蛋白-高酯果胶复合颗粒理化和结构特性的影响[J]. 中国食品学报, 2024, 24(2): 130-139.
MAK Y, SUN X Y, CHEN F S, et al. Effects of ultrasound on the physicochemical and structural properties of pea protein-high methoxyl pectin composite particles[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(2): 130-139.
- [12] 卢玉婷,刘丽莉,于影,等. 酶解-糖基化对猪皮胶原蛋白特性的影响[J]. 食品与机械, 2024, 40(7): 24-29.
LU Y T, LIU L L, YU Y, et al. Effects of enzymolysis and glycosylation on the characteristics of porcine skin collagen[J]. Food & Machinery, 2024, 40(7): 24-29.
- [13] WANG Q Y, LI J Y, TU Y Q, et al. Characteristics and antioxidant activity of Maillard reaction products from β -lactoglobulin and isomaltooligosaccharide[J]. Frontiers in Nutrition, 2023, 10: 1282485.
- [14] LI T H, BU G H, XI G P. Effects of heat treatment on the antigenicity, antigen epitopes, and structural properties of β -conglycinin[J]. Food Chemistry, 2021, 346: 128962.
- [15] 万俊,张孝芹,邓博文,等. 糖基化结合单宁酸改性对溶球态蛋清蛋白乳化特性的影响[J]. 食品与机械, 2024, 40(11): 12-18.
WAN J, ZHANG X Q, DENG B W, et al. Effects of glycosylation combined with tannic acid modification on the emulsification properties of molten globule egg white protein [J]. Food & Machinery, 2024, 40(11): 12-18.
- [16] ZHANG S S, LIU Y B, WU W H. Effects of Maillard reaction durations on the physicochemical and emulsifying properties of chickpea protein isolate[J]. Foods, 2025, 14(1): 117.
- [17] 王美月,布冠好,常永锋,等. 蛋白多肽美拉德反应物稳定乳液的研究进展[J]. 食品科学, 2024, 45(3): 227-234.
WANG M Y, BU G H, CHANG Y F, et al. Research progress on emulsions stabilized by Maillard reaction products from protein-derived peptides[J]. Food Science, 2024, 45(3): 227-234.
- [18] ZHENG Y M, CHANG Y, LUO B Y, et al. Molecular structure modification of ovalbumin through controlled glycosylation with dextran for its emulsibility improvement[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 194: 1-8.
- [19] LIU X T, YANG Q, YANG M, et al. Ultrasound-assisted Maillard reaction of ovalbumin/Xylose: the enhancement of functional properties and its mechanism[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 73: 105477.
- [20] HAN X X, ZHAO Y L, MAO S N, et al. Effects of different amounts of corn silk polysaccharide on the structure and function of peanut protein isolate glycosylation products[J]. Foods, 2022, 11(15): 2214.
- [21] OTHMENI I, KAROUÏ R, BLECKER C. Impact of pH on the structure, interfacial and foaming properties of pea protein

- isolate: investigation of the structure-function relationship[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 278: 134818.
- [22] 张慧, 蒋艳, 吴少福, 等. 蛋清基脂肪替代品对冰淇淋的理化性质及微观结构的影响[J]. *食品科学*, 2019, 40(20): 74-80.
ZHANG H, JIANG Y, WU S F, et al. Effects of egg white-based fat substitute on properties and microstructure of ice cream[J]. *Food Science*, 2019, 40(20): 74-80.
- [23] LU F, CHI Y J, CHI Y. High-temperature glycosylation of saccharides to modify molecular conformation of egg white protein and its effect on the stability of high internal phase emulsions[J]. *Food Research International*, 2024, 176: 113825.
- [24] AZIZNIA S, ASKARI G, EMAMDJOMEH Z, et al. Effect of ultrasonic assisted grafting on the structural and functional properties of mung bean protein isolate conjugated with maltodextrin through maillard reaction[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 254: 127616.
- [25] 张斌, 李聪方, 杨莉, 等. 亚麻籽胶糖基化改性核桃蛋白及性质分析[J]. *中国粮油学报*, 2024, 39(12): 88-96.
ZHANG B, LI C F, YANG L, et al. Modification of walnut protein by glycosylation of linseed gum and analysis of its properties[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2024, 39(12): 88-96.
- [26] SHENG L, LIU Q, DONG W Y, et al. Effect of high intensity ultrasound assisted glycosylation on the gel properties of ovalbumin: texture, rheology, water state and microstructure [J]. *Food Chemistry*, 2022, 372: 131215.
- [27] RUAN Y Y, FAN S S, JING K N, et al. Structural and functional modifications of quinoa protein *via* hyaluronic acid-induced Maillard reaction[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2025, 298: 139940.
- [28] TAN J E, LIU T T, YAO Y, et al. Changes in physicochemical and antioxidant properties of egg white during the Maillard reaction induced by alkali[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 143: 111151.
- [29] 李倩文, 梁影, 王晓楠, 等. 乳清蛋白-低聚木糖复合脂肪替代品的制备及其于再制干酪中的应用[J]. *食品科学*, 2023, 44(20): 53-61.
LI Q W, LIANG Y, WANG X N, et al. Preparation of whey protein-oligosaccharide complex and its application as fat substitute in processed cheese[J]. *Food Science*, 2023, 44(20): 53-61.
- [30] WEN C T, ZHANG J X, QIN W, et al. Structure and functional properties of soy protein isolate-lentinan conjugates obtained in Maillard reaction by slit divergent ultrasonic assisted wet heating and the stability of oil-in-water emulsions[J]. *Food Chemistry*, 2020, 331: 127374.
- [31] SONG Y L, YANG S M, LI J H. Effect of Maillard reaction conditions on the solubility and molecular properties of wheat gluten-maltose conjugates[J]. *Food Science & Nutrition*, 2020, 8(11): 5 898-5 906.
- [32] JIANG W, WANG Y Y, MA C C, et al. Pea protein isolate-inulin conjugates prepared by pH-shift treatment and ultrasonic-enhanced glycosylation: structural and functional properties[J]. *Food Chemistry*, 2022, 384: 132511.
- [33] 李琳, 孙一熙, 秦文, 等. 限制性酶解结合糖基化改性对大豆分离蛋白乳化性质的影响[J]. *食品与机械*, 2024, 40(3): 1-11.
LI L, SUN Y X, QIN W, et al. Effects of limited enzymolysis and glycosylation on emulsifying properties of soybean protein isolates[J]. *Food & Machinery*, 2024, 40(3): 1-11.
- [34] YU Y L, GUAN Y, WEN H D, et al. Mild heating assisted alkaline pH shifting modify the egg white protein: the mechanism and the enhancement of emulsifying properties[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 151: 112094.