

# 低聚糖改性对蛋清蛋白凝胶性影响研究进展

## Progress in the effect of oligosaccharide modification on gelability of egg white protein

张根生<sup>1</sup> 苏文文<sup>1</sup> 徐桂杨<sup>1</sup> 孙立瑞<sup>1</sup> 费英敏<sup>2</sup>

ZHANG Gensheng<sup>1</sup> SU Wenwen<sup>1</sup> XU Guiyang<sup>1</sup> SU Lirui<sup>1</sup> FEI Yingmin<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨商业大学食品工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150028; 2. 黑龙江民族职业学院, 黑龙江 哈尔滨 150066)

(1. College of Food Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin, Heilongjiang 150028, China;

2. Heilongjiang Vocational College for Nationalities, Harbin, Heilongjiang 150066, China)

**摘要:** 蛋清蛋白是一种营养价值丰富, 具有多种功能特性的优质蛋白。低聚糖可通过糖基化反应与蛋清蛋白共价结合, 其偶联物的功能特性较天然蛋清蛋白有所改善。文章综述了低聚糖—蛋清蛋白偶联物的凝胶机理, 探讨了低聚糖改性蛋清蛋白凝胶的影响因素, 梳理了低聚糖对蛋清蛋白功能特性产生的影响, 并对低聚糖改性蛋清蛋白的加工应用进行了展望。

**关键词:** 蛋清蛋白; 低聚糖; 糖基化; 凝胶特性

**Abstract:** Egg white protein is a high-quality protein with high nutritional value and a variety of functional properties. The oligosaccharides can be covalently bound to the egg white protein through the glycosylation reaction, and the functional properties of the conjugates were improved compared with the natural egg white protein. In this review, the gel mechanism of oligosaccharide-egg white protein conjugates was reviewed, and the influencing factors of oligosaccharide-modified egg albumin gels were discussed. Moreover, effects of oligosaccharides on the functional properties of egg albumins were summarized, and the processing and application of oligosaccharide-modified egg albumin were prospected.

**Keywords:** egg white protein; oligosaccharides; glycosylation; gel properties

蛋清蛋白(egg white protein, EWP)是位于蛋黄与蛋壳之间, 由蛋白质组成的透明胶质物, 具有凝胶特性、乳化特性和起泡特性等多种功能特性。蛋清蛋白凝胶常被

用于改善食品硬度、弹性和持水力等, 然而, 蛋清蛋白凝胶化过程容易受到环境或添加物的影响, 导致蛋清蛋白凝胶弹性、硬度和持水力等性能下降<sup>[1]</sup>。因此, 在食品加工中常常采用物理、化学、酶解法对蛋清蛋白进行改性以提高蛋清蛋白凝胶性能, 化学改性相较于物理和酶法改性速度快, 效果显著。其中, 糖基化反应已被证实是一种绿色安全、简单有效改善蛋白凝胶功能特性的方法, 与酰化、磷酸化、烷基化等化学方法不同, 经糖基化改性后的蛋清蛋白凝胶特性显著提高<sup>[2]</sup>。

低聚糖是一种糖类聚合物, 通常由2~10个单糖通过糖苷键连接在一起, 存在于天然植物中, 具有温和的甜味和良好的稳定性<sup>[3]</sup>。功能性低聚糖不被人体消化酶水解, 具有改善肠道菌群、抗龋齿和保护肝脏等功效<sup>[4]</sup>。蛋清蛋白通过添加低聚糖进行糖基化反应, 可增强蛋清蛋白凝胶特性, 提高其在食品加工中的应用效果。

文章通过对近年来国内外相关研究文献的梳理, 综述了低聚糖改性蛋清蛋白的凝胶机理, 探讨了低聚糖改性蛋清蛋白凝胶性质的影响因素, 以及低聚糖对蛋清蛋白凝胶功能特性产生的影响, 旨在为进一步开展低聚糖改性蛋清蛋白凝胶研究提供理论参考, 拓展低聚糖改性蛋清蛋白的加工应用途径。

### 1 低聚糖改性蛋清蛋白凝胶机理

糖基化是美拉德反应的初始阶段, 还原糖的羰基与蛋白质游离的 $\alpha$ -或 $\epsilon$ -氨基通过共价键连接生成糖—蛋白质偶联物, 相比于天然蛋白质其功能特性得到提升, 如高持水性和硬度等<sup>[5]</sup>。不同分子量的还原糖对蛋清蛋白凝胶特性的影响不同, 此外, 糖基化反应速率与还原糖链长短有关, 还原糖链短(空间位阻小)可表现出较快的反应速率, 易发生褐变, 不易被消费者接受<sup>[6]</sup>。Huang等<sup>[7]</sup>将葡萄糖、乳糖和可溶性淀粉分别与卵清蛋白进行糖基化

**基金项目:** 黑龙江省“百千万”工程科技重大专项(编号: 2019ZX07B03-3)

**作者简介:** 张根生, 男, 哈尔滨商业大学教授, 硕士。

**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:** 2023-06-17 **改回日期:** 2023-09-18

反应,发现葡萄糖-卵清蛋白复合凝胶的褐变强度高于其他混合体系,葡萄糖和乳糖均体现了较高的反应速率和抗氧化性。低聚糖具有良好的水溶性和低黏度,低聚糖-蛋清蛋白偶联物结构和性能稳定,相比于单糖-蛋清蛋白偶联物褐变程度低,多糖不易溶于蛋清蛋白,二者之间的电负性差异导致蛋白质相分离,多糖的低反应性和空间位阻限制了糖基化的程度<sup>[8-9]</sup>。综上,低聚糖是糖基化改性蛋清蛋白的理想还原糖。

糖基化改性分为干法糖基化改性和湿法糖基化改性,两种改性方法机理相同<sup>[10]</sup>。图1为低聚糖改性蛋清蛋白机理图。热诱导前天然的蛋清蛋白呈球状,大多数疏水残基埋藏在分子结构中,只有小部分暴露在表面<sup>[11]</sup>。在热诱导过程中低聚糖和蛋清蛋白结构展开,蛋白质分子内部的氨基酸残基暴露在表面,进一步与低聚糖的羰基共价结合,形成较小的聚集体,阻碍了蛋白质分子之间的聚集交联,凝胶形成初期的低聚集率有利于最终形成更稳定的凝胶网络<sup>[12]</sup>。表面疏水性( $H_0$ )与游离巯基可以反映蛋白质的展开程度,有助于偶联物形成网状结构,从而增强偶联物的功能特性,且二者有显著相关性<sup>[13]</sup>。Wang等<sup>[14]</sup>发现异麦芽低聚糖(IMO)通过糖基化改性蛋清蛋白可以推动蛋白质的 $\alpha$ -螺旋向 $\beta$ -折叠转化,蛋白质结构展开导致内部疏水基团暴露在分子表面,其 $H_0$ 增加,促进蛋白质和蛋白分子间的疏水相互作用,进而使额外的蛋白质排列或聚集。Ma等<sup>[15]</sup>通过研究糖基化对蛋清蛋白的影响证实,在糖基化过程中,蛋白质结构展开,一些嵌入的-SH基团暴露出来,表面-SH基团的含量显著增加,而总-SH基团含量下降,巯基键和二硫键相互转化加强网络结构形成一定强度的凝胶。

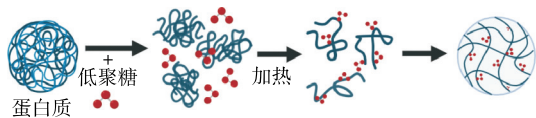


图1 低聚糖改性蛋清蛋白机理图

Figure 1 Mechanism of oligosaccharide-modified egg albumin

## 2 影响低聚糖改性蛋清蛋白凝胶特性的主要因素

低聚糖-蛋清蛋白偶联物的凝胶特性主要受低聚糖性质、添加量、加热温度、时间、pH值和离子浓度等多种因素的影响(表1)。低聚糖由酮糖和醛糖构成,醛糖多的低聚糖羰基数量多,由于活性氨基酸残基的反应位点有限,天然蛋清蛋白一般只能与1或2个低聚糖分子进行糖基化,在热诱导下天然蛋白质变性,更多的低聚糖分子可以与暴露的氨基酸残基共价连接<sup>[16-17]</sup>。根据反应部位的不同,蛋白质与低聚糖的质量比应为氨基与羰基的

摩尔比,随着羰基数量的增加,蛋清蛋白与低聚糖接枝率提高,接枝度与凝胶硬度显著相关,低聚糖的性质和添加量显著影响蛋清蛋白凝胶特性<sup>[27-28]</sup>。一般情况下,反应时间与反应温度密切相关,即反应温度越高,反应时间越短<sup>[29]</sup>。蛋清蛋白在干法糖基化过程中选择的温度为40~60℃,60℃是最常用的反应温度;蛋清蛋白在湿法糖基化过程中选择的温度为70~90℃,90℃是最常用的反应温度<sup>[30]</sup>。低聚糖改性蛋清蛋白 $\zeta$ -电位绝对值增大,净电荷升高,分子间的静电斥力增大,添加pH值和盐离子浓度能够影响蛋白质分子的净电荷值,进而改变了分子之间的吸引力和排斥力以及蛋白质分子与水分子结合的能力,从而影响低聚糖改性蛋清蛋白凝胶形成和维持的作用力<sup>[31-33]</sup>。此外,不同种类的盐离子对蛋清蛋白凝胶的影响不同,例如低浓度CaCl<sub>2</sub>可降低卵白蛋白的变性温度,Ca<sup>2+</sup>可通过桥接带负电荷的羧基削弱蛋白质与低聚糖之间的相互作用,进而导致复合凝胶强度下降;相比于MgCl<sub>2</sub>,NaCl与蛋白质的结合具有更强的静电屏蔽效应<sup>[34]</sup>。目前糖基化改性蛋清蛋白中研究较多的为NaCl。崔冰<sup>[35]</sup>研究发现在添加NaCl后,经糖基化改性后的卵清蛋白结构稳定且黏性显著增加。选择适当的pH值、盐离子浓度和类型对低聚糖改性蛋清蛋白凝胶至关重要。

## 3 低聚糖改性对蛋清蛋白凝胶功能特性的影响

### 3.1 蛋清蛋白凝胶质构特性

低聚糖改性蛋清蛋白其分子间作用力增强,导致复合凝胶硬度和弹性提升,硬度和弹性是表征凝胶质构特性的重要指标<sup>[36]</sup>。张根生等<sup>[37]</sup>添加4%低聚半乳糖对蛋清蛋白进行湿法糖基化修饰,结果发现与天然蛋清蛋白凝胶相比,改性后的蛋清蛋白凝胶硬度和弹性分别增加68.30%和15.05%,证实添加低聚半乳糖可改善蛋清蛋白凝胶的硬度和弹性。王玉玺<sup>[38]</sup>将葡萄糖、麦芽三糖分别对蛋清蛋白进行干法糖基化改性,研究复合凝胶强度变化,蛋清蛋白与还原糖的物质的量比均为20:1,结果发现在反应初期经还原糖改性的蛋清蛋白凝胶强度高于天然的蛋清蛋白,其中麦芽三糖-蛋清蛋白复合凝胶强度呈良好的上升趋势,而葡萄糖-蛋清蛋白复合凝胶则出现先升高后下降的趋势。无论是湿法还是干法糖基化,低聚糖改性蛋清蛋白凝胶都可改善其质构特性。

### 3.2 低聚糖改性对蛋清蛋白凝胶流变特性的影响

Abdulaziz等<sup>[39]</sup>在研究低聚木糖对蛋清蛋白流变特性的影响时发现,与天然蛋清蛋白相比,蛋清蛋白-低聚木糖复合凝胶的黏弹性显著提高,低聚木糖的加入导致蛋白质结构延伸,分子内和分子间的相互作用增强,空间网络结构得到促进,有助于形成更紧密的凝胶网络,从而提高偶联物凝胶黏弹性。Hu等<sup>[40]</sup>研究低聚壳聚糖对卵

表 1 影响低聚糖改性蛋清蛋白凝胶特性的因素

Table 1 Influencing factors of oligosaccharide-modified egg white protein gel

影响因素	反应条件	结论	参考文献
低聚糖结构	酮糖	糖基化反应使得复合凝胶强度提升	[16]
	醛糖	相比于由酮糖构成的低聚糖,由醛糖构成的低聚糖氨基多,与蛋清蛋白接枝度高导致复合凝胶强度提升	[17]
低聚糖添加量	添加量过高	复合凝胶强度呈下降趋势,可能是因为低聚糖具有还原性,会破坏蛋白质分子的二硫键,分子过度断裂导致复合凝胶强度降低	[18]
	添加量低	破坏蛋白质的三级结构,蛋白质分子延展,复合凝胶强度增强,低聚糖添加量少与反应体系中活性位点接触的机会减少	[19]
温度	温度过高	蛋白质之间发生不同程度的聚集,反应体系中不溶性组分显著增多,不利于糖基化反应的进行,复合凝胶强度下降	[20]
	温度低	蛋白质的疏水相互作用增强影响复合凝胶强度	[21]
时间	时间长	导致暴露在表面的疏水基团重新被蛋白质嵌入体内,偶联物表面疏水性降低,复合凝胶网络结构致密性下降,硬度和持水性随之降低	[22]
	时间短	蛋白质和低聚糖结构不完全伸展,接枝度低影响复合凝胶的功能特性	[15]
pH	高于蛋白质等电点(pI)	当 pH 大于 pI 时,糖基化后的 $\zeta$ -电位绝对值增加导致异麦芽糖—蛋清蛋白分子间的静电斥力增强;随着 pH 值升高,蛋白质结构展开,碱性环境有利于偶联物的形成	[23]
	接近蛋白质等电点(pI)	当 pH 接近蛋白质的等电点时会诱导蛋白质聚集,不利于糖基化反应,蛋清蛋白的电荷降低,分子间相互作用力下降,导致凝胶强度和持水性显著降低	[24]
离子强度	高浓度	能够屏蔽蛋清蛋白分子间的电荷效应,降低肽链间的静电相互作用,阻碍肽链间氢键的形成,蛋清蛋白结构稳定性下降,不利于糖基化改性	[25]
	低浓度	能与蛋白发生非特异性的静电相互作用,使蛋白分子在凝胶化前肽链充分展开对低聚糖—蛋清蛋白交联起到促进作用,改善复合凝胶的功能性能	[26]

清蛋白流变特性的影响时发现,低聚壳聚糖—卵清蛋白复合凝胶表现出较高的黏性特性,随着剪切速率增加表观黏度先升后降;低聚壳聚糖—卵清蛋白复合凝胶的弹性模量( $G'$ )、黏性模量( $G''$ )随着时间的增加而增加,且均显著高于天然卵清蛋白,此外, $G' > G''$ ,说明低聚壳聚糖通过糖基化改性卵清蛋白的形成的是弹性凝胶。Yang 等<sup>[16]</sup>采用低聚异麦芽糖对蛋清蛋白进行改性,结果发现在冷却阶段低聚异麦芽糖—蛋清蛋白复合凝胶的弹性模量显著高于天然蛋清蛋白凝胶,表明低聚异麦芽糖—蛋清蛋白复合凝胶在形成过程中有更多的氢键参与。低聚糖改性蛋清蛋白凝胶对流变特性有显著影响,蛋白质分子间氢键作用增强进而改善复合凝胶黏弹性。

### 3.3 低聚糖改性对蛋清蛋白持水性的影响

持水性是衡量复合凝胶特性的重要指标,即凝胶网络结构锁住水分的能力,反映了蛋白质分子间相互作用以及与水作用的程度<sup>[41]</sup>。低聚糖的部分引入增加了蛋白质的静电荷,静电荷是蛋白质分子吸引水分子的强有力的中心,使其具有静电斥力,静电斥力的增加导致复合凝

胶的持水性升高<sup>[42]</sup>。张根生等<sup>[37]</sup>用低聚半乳糖对蛋清蛋白进行糖基化修饰,结果发现与天然蛋清蛋白凝胶相比,改性后的蛋清蛋白凝胶保水性增加 27.54%。此外,王晨莹<sup>[43]</sup>发现低聚异麦芽糖—蛋清蛋白偶联物的持水性与  $T_2$  弛豫时间存在显著相关性,随着糖基化程度的增加更多的水分子作为结合水被捕获在凝胶网络中,氢键和疏水相互作用在糖基化后贡献增强,可以更好地锁住水分,凝胶中的结合水与持水性呈显著相关性。经低聚糖改性蛋清蛋白后偶联物结合水的能力增强,偶联物的网络结构有助于改善其持水性。

### 3.4 低聚糖改性对蛋清蛋白凝胶热稳定性的影响

刘欣慈等<sup>[10]</sup>研究异麦芽低聚糖对蛋清蛋白的影响时发现,当加热温度高于 60 °C 时,蛋清蛋白凝胶浊度明显增加,而异麦芽低聚糖—蛋清蛋白偶联物浊度随加热温度的升高几乎没有变化,仍然保持透明,异麦芽低聚糖—蛋清蛋白偶联物疏水相互作用显著增强,加热后共轭聚集的抑制可能归因于热稳定性增强和静电斥力的增加。Abdulaziz 等<sup>[39]</sup>在研究糖基化对卵清蛋白的特性影响时,

同样发现乳糖和麦芽糖可以提高蛋白质的热稳定性。低聚糖通过糖基化反应可以提高蛋清蛋白的热稳定性,低聚糖与蛋白质分子共价接枝形成了一种抗热能力较强的结构,这种结构可以抑制变性过程中蛋白与蛋白之间的相互作用,由于空间位阻作用,变性的蛋白分子不易聚集在一起。

#### 4 结语

低聚糖改性后的蛋清蛋白空间结构和分子构象发生改变,共价键和非共价键贡献增强,相比于蛋清蛋白凝胶,低聚糖—蛋清蛋白复合凝胶质构特性、流变特性、持水性、热稳定性显著提升。目前,糖基化改性蛋清蛋白凝胶常用的低聚糖有低聚木糖、低聚异麦芽糖、低聚半乳糖等,低聚糖种类繁多,且个别具有独特的功能性质,有望更多的低聚糖参与到改性蛋清蛋白的试验研究中。低聚糖相对于单糖褐变程度浅,但仍然存在,在未来的研究中应考虑如何阻止褐变情况发生。pH值和盐离子对低聚糖改性蛋清蛋白影响显著,但pH值和盐离子协同作用的试验研究较为空白,还需进一步探索低聚糖改性蛋清蛋白的条件,以期得到较好的低聚糖—蛋清蛋白复合凝胶,有益于其在食品加工中的应用。

#### 参考文献

- [1] ZANG J W, ZHANG Y Y, PAN X Y, et al. Advances in the formation mechanism, influencing factors and applications of egg white gels: A review[J]. *Food Science & Technology*, 2023, 138: 417-432.
- [2] 程进霞, 李景军. 蛋清蛋白修饰改性方法研究进展[J]. *陕西理工大学学报(自然科学版)*, 2023, 39(3): 62-68.  
CHENG J X, LI J J. Research progress on modification methods of egg white protein[J]. *Journal of Shaanxi University of Technology (Natural Science Edition)*, 2023, 39(3): 62-68.
- [3] CATENZA K F, DONKOR K K. Recent approaches for the quantitative analysis of functional oligosaccharides used in the food industry: A review[J]. *Food Chemistry*, 2021, 355: 129416.
- [4] LONG J F, YANG J P, SU S N, et al. Xylooligosaccharide supplementation decreases visceral fat accumulation and modulates cecum microbiome in mice[J]. *Journal of Functional Foods*, 2019, 52: 138-146.
- [5] 冯燕英, 牟代臣, 祁文磊, 等. 蛋白质糖基化接枝改性研究进展[J]. *食品与机械*, 2019, 35(2): 190-195.  
FENG Y Y, MOU D C, QI W L, et al. Research progress on grafting modification of protein glycosylation[J]. *Food & Machinery*, 2019, 35(2): 190-195.
- [6] AN Y P, CUI B, WANG Y T, et al. Functional properties of ovalbumin glycosylated with carboxymethyl cellulose of different substitution degree[J]. *Food Hydrocolloids*, 2014, 40: 1-8.
- [7] HUANG X Q, TU Z C, XIAO H, et al. Characteristics and antioxidant activities of ovalbumin glycosylated with different saccharides under heat moisture treatment [J]. *Food Research International*, 2012, 48(2): 886-872.
- [8] MU Y Y, SUN J, OBADI M, et al. Effects of saccharides on the rheological and gelling properties and water mobility of egg white protein[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 108: 106038.
- [9] KANZLER C, SCHESTKOWA H, HAASE P T, et al. Formation of reactive intermediates, color, and antioxidant activity in the Maillard reaction of maltose in comparison to d-glucose[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2017, 65(40): 8 957-8 965.
- [10] 刘欣慈, 吕云雄, 孙维宝, 等. 热诱导鸡蛋蛋清蛋白凝胶化影响因素研究进展[J]. *食品与机械*, 2021, 37(1): 210-214.  
LIU X C, LU Y X, SUN W B, et al. Research progress on the affecting factors of heat-induced gelation of egg albumin[J]. *Food & Machinery*, 2021, 37(1): 210-214.
- [11] GU L P, PENG N, CHANG C H, et al. Fabrication of surface-active antioxidant food biopolymers: Conjugation of catechin polymers to egg white proteins[J]. *Food Biophysics*, 2017, 12: 198-210.
- [12] YANG M, LIU J B, GUO J, et al. Tailoring the physicochemical stability and delivery properties of emulsions stabilized by egg white microgel particles via glycation: Role of interfacial particle network and digestive metabolites[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 131: 107833.
- [13] 王亚婷. 不同二糖糖基化修饰在卵清蛋白改性中的应用研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2022: 1-42.  
WANG Y T. Application of glycosylation of different disaccharides in modification of ovalbumin [D]. Nanchang: Nanchang University, 2022: 1-42.
- [14] WANG C Y, REN X D, SU Y J, et al. Application of glycation in regulating the heat-induced nanoparticles of egg white protein[J]. *Nanomaterials*, 2018, 8(11): 943.
- [15] MA Y Q, ZANG J N, QING M M, et al. Glycosylation of egg white protein with maltodextrin in the dry state: Changes in structural and gel properties [J]. *Food Chemistry*, 2023, 401: 134113.
- [16] YANG Y, LIU G, WANG H. Investigation of the mechanism of conformational alteration in ovalbumin as induced by glycation with different monoses through conventional spectrometry and liquid chromatography high-resolution mass spectrometry [J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2019, 67(11): 3 096-3 105.
- [17] WANG C Y, LI J H, LI X, et al. Molecular forces and gelling properties of heat-induced gel from egg white protein glycosylated with isomalto-oligosaccharide [J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 99: 105356.
- [18] 魏晨. 木糖糖基化改性对卵白蛋白功能特性的影响[D]. 长春: 吉林大学, 2019: 1-49.  
WEI C. Effect of xylose glycosylation modification on the

- functional properties of ovalbumin [D]. Changchun: Jilin University, 2019: 1-49.
- [19] 涂勇刚, 赵燕, 王丹, 等. 糖类对蛋清蛋白凝胶强度的影响[J]. 食品工业科技, 2013, 34(4): 72-75.  
TU Y G, ZHAO Y, WANG D, et al. Effect of carbohydrate on the hardness of egg white protein gel[J]. Science & Technology of Food Industry, 2013, 34(4): 72-75.
- [20] LU F, MA Y Q, ZANG J N, et al. High-temperature glycosylation modifies the molecular structure of ovalbumin to improve the freeze-thaw stability of its high internal phase emulsion [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 233: 123560.
- [21] GOMES M, PELEGRINE D. Solubility of egg white proteins: Effect of pH and temperature[J]. International Journal of Food Engineering, 2012, 8(3): 35.
- [22] DONG W Y, ZHANG X Y, DING L X, et al. Enhancement of emulsification properties by modulation of egg white protein fibril structure with different heating times[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 135: 108203.
- [23] XI C Y, KANG N X, ZHAO C H, et al. Effects of pH and different sugars on the structures and emulsification properties of whey protein isolate-sugar conjugates [J]. Food Bioscience, 2022, 33: 100507.
- [24] ZHANG Q, LI L, LAN Q Y, et al. Protein glycosylation: A promising way to modify the functional properties and extend the application in food system[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2019, 59(15): 2 506-2 533.
- [25] 唐聪敏. 三聚磷酸钠对蛋清蛋白-多糖复合体系凝胶特性影响研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022: 1-43.  
TANG C M. Study on the effect of sodium tripolyphosphate on the gel properties of egg white protein-polysaccharide complex system [D]. Changchun: Jilin University, 2022: 1-43.
- [26] 叶阳, 王洋. 金属离子对鸡蛋清凝胶特性的影响[J]. 食品科技, 2013, 38(2): 242-244, 248.  
YE Y, WANG Y. Influence of metal ions on gel properties of egg white[J]. Food Science and Technology, 2013, 38(2): 242-244, 248.
- [26] 兰秋雨, 张清, 刘琳, 等. 蛋白质糖基化改性方法和产物验证方法研究进展[J]. 食品与机械, 2019, 35(2): 196-201.  
LAN Q Y, ZHANG Q, LIU L, et al. Research progress on the preparation and identification methods of proteins glycosylation[J]. Food & Machinery, 2019, 35(2): 196-201.
- [27] 张根生, 李琪, 黄昕钰, 等. 蛋清蛋白凝胶改性及其在肉制品加工中的应用[J]. 食品与机械, 2023, 39(4): 198-204.  
ZHANG G S, LI Q, HUANG X Y, et al. Egg white protein gel modification and its application in meat processing [J]. Food & Machinery, 2023, 39(4): 198-204.
- [28] 胥伟, 王海滨, 黄迪, 等. 糖基化反应过程中卵白蛋白分子特性变化研究[J]. 东北农业大学学报, 2015, 46(12): 33-38.  
XU W, WANG H B, HUANG D, et al. Study on ovalbumin molecular properties changes in the process of glycation reaction [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2015, 46(12): 33-38.
- [30] LIU J J, ZHU K K, YE T, et al. Influence of konjac glucomannan on gelling properties and water state in egg white protein gel[J]. Food Research International, 2013, 51(2): 437-443.
- [31] LI J H, ZHANG M Q, CHANG C H, et al. Molecular forces and gelling properties of heat-set whole chicken egg protein gel as affected by NaCl or pH[J]. Food Chemistry, 2018, 261: 36-41.
- [32] 吴胤霆, 王洋, 郑贵中, 等. NaCl、糖类和木瓜蛋白酶对碱诱导蛋清凝胶性的影响[J]. 现代食品科技, 2022, 38(1): 256-263, 323.  
WU Y T, WANG Y, ZHENG G Z, et al. The effects of NaCl, sugars and papaya proteases on alkali-induced egg white gels[J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(1): 256-263, 323.
- [33] 杜文琪, 蒋盼盼, 胥伟, 等. 糖基化反应改善蛋清凝胶性的影响因素研究[J]. 食品工业, 2019, 40(2): 185-189.  
DU W Q, JIANG P P, XU W, et al. Improving gel properties of egg white powder by glycosylation[J]. Food Industry, 2019, 40(2): 185-189.
- [34] 张敏. 盐离子和糖类对蛋清蛋白起泡性能及其在蛋糕中应用的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2023: 1-40.  
ZHANG M. Investigation of ions and sugars on the foaming properties of egg white proteins and their application in cakes[D]. Changchun: Jilin University, 2023: 1-40.
- [35] 崔冰. 卵白蛋白-CMC 复合体系相行为及糖基化改性研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2013: 1-46.  
CUI B. Phase behavior and glycosylation of ovalbumin-CMC mixtures [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2013: 1-46.
- [36] HANDA A, HAYASHI K, SHIDARA H, et al. Correlation of the protein structure and gelling properties in dried egg white products [J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2001, 49(8): 3 957-3 964.
- [37] 张根生, 徐旖梦, 刘欣慈, 等. 湿法糖基化改性对蛋清蛋白凝胶特性及微观结构的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(6): 105-112.  
ZHANG G S, XU Y M, LIU X C, et al. Effects of protein alycosylation by hydrothermal processing on the gelling properties and gel microstructures of egg white proteins [J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(6): 105-112.
- [38] 王玉玺. 干热过程中美拉德反应对蛋清粉凝胶性的改性研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2011: 1-35.  
WANG Y K. Study of Maillard reaction during dry heating process for gel properties of hen ovalbumin[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2011: 1-35.
- [39] ABDULAZIZ A, ABDO A, ZHANG C, et al. Nutritive sweetener of short-chain xylooligosaccharides improved the foam properties of hen egg white protein via glycosylation [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2020, 15: 1 341-1 348.

(下转第 240 页)

- naturaltirosinase inhibitors and their inhibitory effects on tyrosinase[J]. *Journal of Jilin University (Medicine Edition)*, 2014, 40(2): 454-459.
- [54] 陈静, 魏鉴腾, 裴栋, 等. 橄榄苦苷对酪氨酸酶抑制作用的研究[J]. *天然产物研究与开发*, 2021, 33(12): 1 998-2 003.  
CHEN J, WEI J T, PEI D, et al. Study on the inhibitory effect of oleuropein on tyrosinase [J]. *Natural Product Research and Development*, 2021, 33(12): 1 998-2 003.
- [55] 向玥, 陈粼波, 姚辉, 等. 人参皂苷 Rg1 对 D-半乳糖所致衰老小鼠海马的保护机制[J]. *中草药*, 2017, 48(18): 3 789-3 795.  
XIANG Y, CHEN L B, YAO H, et al. Protective mechanism of ginsenoside Rg1 on hippocampus of aging mice induced by D-galactose[J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2017, 48(18): 3 789-3 795.
- [56] 孙红艳, 刘洪臣. 晚期糖基化终末产物 (AGEs) 与衰老[J]. *中华老年口腔医学杂志*, 2010, 8(5): 314-317.  
SUN H Y, LIU H C. Advanced glycation end products (AGEs) and aging [J]. *Chinese Journal of Geriatric Dentistry*, 2010, 8(5): 314-317.
- [57] 折丽婷, 赵彩红, 陈春红, 等. 橄榄苦苷对 D-半乳糖诱导衰老小鼠的抗衰老作用研究[J]. *中国中医药科技*, 2020, 27(1): 37-40.  
SHE L T, ZHAO C H, CHEN C H, et al. Anti-aging effect of oleuropein on aging mice induced by D-galactose [J]. *Chinese Journal of Traditional Medical Science and Technology*, 2020, 27(1): 37-40.
- [58] ŞENGÜN I Y, ÖZTÜRK B. Some natural antimicrobials of plant origin[J]. *Anadolu University Journal of Science and Technology C-Life Sciences and Biotechnology*, 2018, 7(2): 256-276.
- [59] OMAR S H. Oleuropein in olive and its pharmacological effects[J]. *Scientia Pharmaceutica*, 2010, 78(2): 133-154.
- [60] CASAS-SANCHEZ J, ALSINA M A, HERRLEIN M K, et al. Interaction between the antibacterial compound, oleuropein, and model membranes[J]. *Colloid and Polymer Science*, 2007, 285(12): 1 351-1 360.
- [61] RAI M, PARALIKAR P, JOGEE P, et al. Synergistic antimicrobial potential of essential oils in combination with nanoparticles: Emerging trends and future perspectives[J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 2017, 519(1): 67-78.
- [62] LEE-HUANG S, ZHANG L, HUANG P L, et al. Anti-HIV activity of olive leaf extract (OLE) and modulation of host cell gene expression by HIV-1 infection and OLE treatment[J]. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 2003, 307(4): 1 029-1 037.
- [63] MICOL V, CATURLA N, PÉREZ-FONS L, et al. The olive leaf extract exhibits antiviral activity against viral haemorrhagic septicaemia rhabdovirus (VHSV)[J]. *Antiviral Research*, 2005, 66(2): 129-136.
- [64] FREDRICKSON W R. Method and composition for antiviral therapy: US 6117844[P]. 2000-09-12.
- [65] YELLON D M, HAUSENLOY D J. Myocardial reperfusion injury [J]. *New England Journal of Medicine*, 2007, 357(11): 1 121-1 135.
- [66] HEUSCH G. Critical issues for the translation of cardioprotection [J]. *Circulation Research*, 2017, 120(9): 1 477-1 486.
- [67] TURER A T, HILL J A. Pathogenesis of myocardial ischemia-reperfusion injury and rationale for therapy [J]. *The American Journal of Cardiology*, 2010, 106(3): 360-368.
- [68] TSOUMANI M, GEORGIOULIS A, NIKOLAOU P E, et al. Acute administration of the olive constituent, oleuropein, combined with ischemic postconditioning increases myocardial protection by modulating oxidative defense [J]. *Free Radical Biology and Medicine*, 2021, 166: 18-32.
- [69] HE X, ZHU Y, WANG M, et al. Antidepressant effects of curcumin and HU-211 coencapsulated solid lipid nanoparticles against corticosterone-induced cellular and animal models of major depression[J]. *International Journal of Nanomedicine*, 2016, 11: 4 975.
- [70] MARIA MICHEL T, PULSCHEN D, THOME J. The role of oxidative stress in depressive disorders[J]. *Current Pharmaceutical Design*, 2012, 18(36): 5 890-5 899.
- [71] BADR A M, ATTIA H A, AL-RASHEED N. Oleuropein reverses repeated corticosterone-induced depressive-like behavior in mice: Evidence of modulating effect on biogenic amines[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 1-10.
- (上接第 232 页)
- [40] HU X, HU W X, LU H Y, et al. Glycosylated cross-linked ovalbumin by transglutaminase in the presence of oligochitosan: Effect of enzyme action time and enhanced functional properties [J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 138: 108462.
- [41] 谭芦兰, 唐宏刚, 杨慧娟, 等. 魔芋胶对咸蛋清蛋白热诱导凝胶特性的影响[J]. *中国食品学报*, 2019, 19(8): 70-77.  
TAN L L, TANG H G, YANG H J, et al. Effect of kgm on the characteristics of heat-induced gelation of white protein from salted duck egg[J]. *Chinese Journal of Food Science*, 2019, 19(8): 70-77.
- [42] HAN T F, XUE H, HU X B, et al. Combined effects of NaOH, NaCl, and heat on the gel characteristics of duck egg white[J]. *Food Science and Technology*, 2022, 159: 113178.
- [43] 王晨莹. 糖基化蛋清蛋白的制备、性质及其在纳米颗粒中的应用[D]. 无锡: 江南大学, 2019: 1-50.  
WANG C Y. The preparation, properties of glycosylated egg white protein and its application in nanoparticles[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2019: 1-50.