

张斌成, 陆佳伟, 李燕苹, 等. 糖基化蛋白质的功能特性及应用研究进展 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(17): 480–489. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024110102

ZHANG Bincheng, LU Jiawei, LI Yanping, et al. Research Progress on the Function Properties and Application of Glycosylated Proteins[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(17): 480–489. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024110102

· 专题综述 ·

糖基化蛋白质的功能特性及应用研究进展

张斌成¹, 陆佳伟¹, 李燕苹¹, 赵彦钦¹, 张 瑶¹, 田元勇^{1,2}, 卢 航^{1,2}, 赵 慧^{1,2,*}

(1. 大连海洋大学食品科学与工程学院, 辽宁省水产品加工及综合利用重点实验室, 辽宁省水产品分析
检验及加工科技服务技术中心, 辽宁大连 116023;

2. 大连工业大学, 海洋食品精深加工关键技术省部共建协同创新中心, 辽宁大连 116034)

摘要: 蛋白质因其独特的结构及功能特性在食品行业发挥着重要的作用。但在应用过程中蛋白质会受环境条件的影响, 导致结构和功能特性的改变, 进而应用受到限制。糖基化改性是一种自发的蛋白质修饰反应, 因其反应条件温和、修饰产物稳定、无有毒有害物质添加等优点, 被广泛应用于食品领域。蛋白质的糖基化反应集合了蛋白质和糖的功能特性, 在有效控制糖基化反应进程的前提下, 改性后的蛋白质功能特性明显改善, 从而拓宽了蛋白质在食品领域的应用。因此, 本文在总结糖基化反应方法的基础上, 对糖基化改性后蛋白质的溶解性、乳化性、凝胶性、起泡性和热稳定性等性质的变化进行分析, 并对其在食品领域的应用进行展望, 以期对蛋白质改性尤其是糖基化改性的研究提供参考。

关键词: 蛋白质, 糖基化, 结构, 功能特性, 应用

中图分类号: TS201.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)17-0480-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024110102



本文网刊:

Research Progress on the Function Properties and Application of Glycosylated Proteins

ZHANG Bincheng¹, LU Jiawei¹, LI Yanping¹, ZHAO Yanqin¹, ZHANG Yao¹, TIAN Yuanyong^{1,2},
LU Hang^{1,2}, ZHAO Hui^{1,2,*}

(1. Liaoning Provincial Key Laboratory of Aquatic Product Processing and Comprehensive Utilization, Liaoning Provincial Aquatic Product Analysis, Inspection and Processing Technology Service Technology Center, School of Food Science and Engineering, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China;

2. Collaborative Innovation Center of Seafood Deep Processing, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China)

Abstract: Proteins play a critical role in the food industry due to their unique structural and functional properties. However, these properties can be altered by environmental factors during processing, leading to changes in their structure and function that limit their applications. Glycosylation modification is a spontaneous protein modification reaction widely used in the food industry. It offers advantages such as mild reaction conditions, stable modification products, and the absence of toxic or harmful byproducts. The glycosylation reaction combines the functional properties of proteins and sugars, significantly enhancing the functional attributes of proteins when the reaction is effectively controlled. This enhancement expands the potential applications of proteins in the food industry. Therefore, building upon a summary of the methods of the glycosylation reaction, this paper examines the changes in protein properties—specifically solubility, emulsification, gelation, foaming, and thermal stability—following glycosylation modification. Furthermore, it explores the potential applications of this modification in the food industry, aiming to provide valuable references for research on protein modification, particularly glycosylation, to enhance functionality and broaden usage.

收稿日期: 2024-11-11

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2024YFD2401904); 辽宁省教育厅面上项目 (JYTMS20230467)。

作者简介: 张斌成 (1997-) 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品科学, E-mail: 824338393@qq.com。

* 通信作者: 赵慧 (1978-) 女, 博士, 副教授, 研究方向: 食品科学, E-mail: zhaohui@dlou.edu.cn。

Key words: protein; glycosylation; structure; functional properties; application

蛋白质是维持生命活动的物质基础,其营养价值和功能特性,使蛋白质在食品行业的应用越来越广泛。蛋白质的乳化性、凝胶性、发泡性等特性,在食品的风味、颜色、质地等方面发挥重要的作用^[1],这些特性与其结构密切相关。蛋白质由自由氨基酸脱水缩合组成多肽链,多肽链通过氢键作用弯曲折叠形成局部空间构象,再通过疏水作用、范德华力、氢键和静电作用进一步弯曲折叠形成球状和纤维状等三维空间结构^[2],多个三级结构通过次级键相连形成具有复杂空间构象的结构^[3]。在实际应用中,环境条件的改变,如 pH 变化、高温高压环境和外力作用的敏感性,会使蛋白质各水平的结构发生不同的变化,从而导致功能特性的改变^[4]。因此,工业上常通过人为地对蛋白质进行改性,实现扩大其适用性的目的。

蛋白质的改性是在不改变主要功能前提下,通过适当的方法(如改变蛋白质的氨基酸组成、分子大小、空间结构等)改变蛋白质的化学基团或分子结构,加强或改善蛋白质的功能特性。蛋白质的改性方法有物理法、化学法、酶法等。物理改性主要是利用加热、机械作用、声波以及电磁场等方式定向改变蛋白质的高级结构和蛋白质分子间聚集方式,一般不改变蛋白质的一级结构^[5]。化学改性是指通过化学试剂引入新的功能基团,以改善蛋白质的功能特性^[6]。酶法改性主要对蛋白质进行水解、交联或共价接枝^[7]。化学改性中的糖基化改性因不需要添加任何化学试剂,经加热即可使反应自发进行,所以蛋白质的糖基化反应成为蛋白质改性领域的研究热点之一。进一步研究发现,复合改性能够提高糖基化改性效率,显著改善蛋白质的功能特性(表 1)。

蛋白质糖基化主要是由糖的末端羰基和蛋白质

上的氨基在简单加热条件下形成蛋白质-糖共价复合物的过程。糖基化改性过程温和,修饰产物稳定,无有毒有害试剂添加。研究表明,通过糖基化反应在蛋白中引入糖链后,蛋白质的稳定性、溶解性及乳化性等均得到了改善^[8],同时还会出现蛋白质本身不具有的性质,如抗氧化性和抗菌性等^[9]。因此,本文在总结蛋白质糖基化改性方法的基础上,探讨糖基化改性后蛋白质的功能特性及应用范围,以期对蛋白质产品的深度开发提供参考。

1 蛋白质糖基化方法

蛋白质糖基化通过将蛋白质和糖“连接”在一起,改善蛋白质的理化性质,扩大蛋白质应用范围。非酶法、酶法和复合法制备糖基化蛋白是食品工业中常用的三种方法。

1.1 非酶法

非酶糖基化反应,即美拉德反应(Maillard Reaction, MR),是蛋白质的氨基和糖的羰基之间发生的复杂化学反应,是食品加工过程中常见的非酶褐变反应^[26]。MR 一般分为 3 个阶段^[27]:初始阶段、中间阶段和末期阶段(图 1)。蛋白质非酶糖基化初始和中间反应阶段会产生醛、酮等风味化合物,蛋白质特性也主要集中在两个阶段发生改变,因此,将非酶糖基化反应控制在初始和中间阶段会更有利于其在食品工业中的应用。

根据制备方式的不同,非酶糖基化法分为干热法和湿热法。干热法是将蛋白质与糖按一定溶液比例混合,冻干后置于密闭容器中,在特定温度和湿度条件下反应数小时乃至数周即得美拉德反应产物(MRPs)^[28]。干热法常用于蛋白质和多糖的接枝反应,产物具有优良的功能特性,但反应时间长,即使是

表 1 蛋白质改性方法对其结构和功能特性的影响

Table 1 Effects of protein modification methods on its structural and functional properties

改性方法		对结构和功能特性的影响
物理改性	加热	二级结构发生变化,乳化性、发泡性和消化性提高 ^[10]
	超声	粒径减小,凝胶强度和乳化性提高 ^[11]
	超高压	α -螺旋和 β -折叠转变为无规则卷曲和 β -转角,溶解度和凝胶性提高 ^[12]
	微波	α -螺旋、结晶度增加,力学性能、热稳定性和吸湿性提高 ^[13]
	磷酸化	α -螺旋、 β -折叠减少,溶解度提高 ^[14]
化学改性	酰化	无规则卷曲减少,乳化性、凝胶性、持水性和持油性提高 ^[15]
	羟基改性	溶解度降低,乳化性和界面稳定性提高 ^[16]
	多酚改性	α -螺旋减少,无规则卷曲增加,溶解性和热稳定性提高 ^[17]
	糖基化	α -螺旋减少, β -折叠增加,溶解性和乳化性提高 ^[18]
酶法改性	酶水解	氨基酸组成和二级结构发生显著变化,持水性、持油性和溶解度提高 ^[19]
	酶交联	聚合形成聚集体,粒径增大,二级和三级结构显著变化,乳化性、凝胶性和持水性提高 ^[20]
复合改性	超声+糖基化	粒径减小,疏水性和乳化性增加 ^[21]
	微波+糖基化	二、三级结构变化,溶解度增加 ^[22]
	脉冲电场+糖基化	表面疏水性、乳化性和发泡性提高 ^[23]
	羟基+糖基化	二、三级结构变化,溶解性和乳化性提高 ^[24]
	酶水解+糖基化	溶解性、持油性和乳化性提高 ^[25]

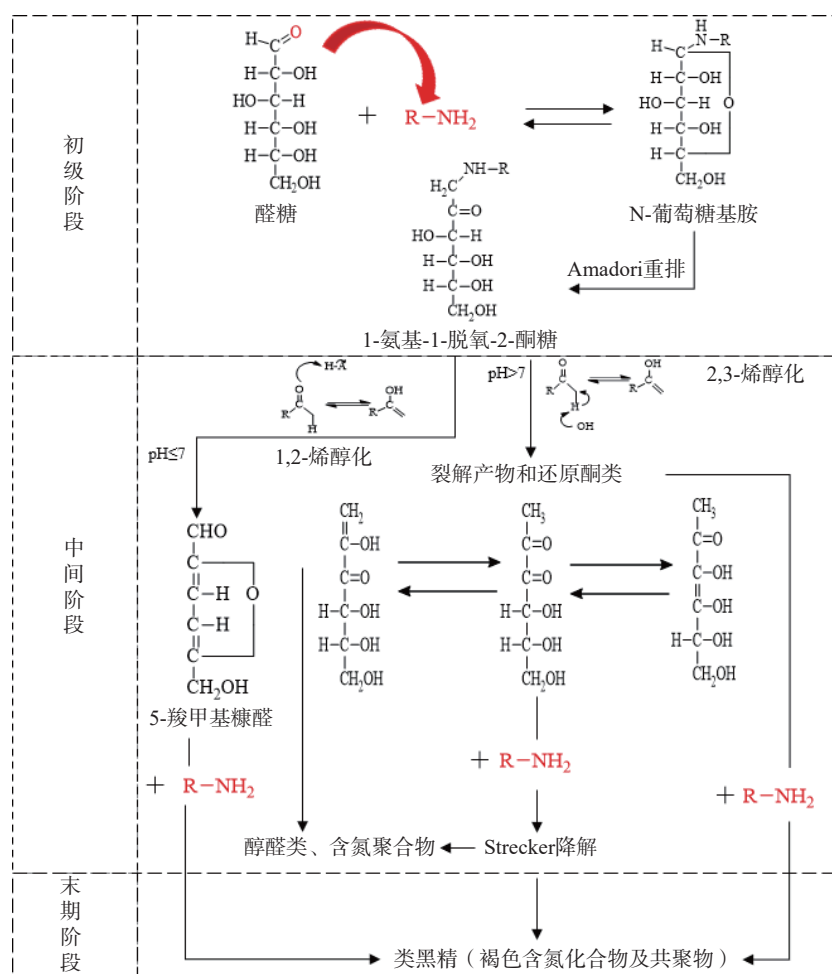


图1 非酶糖基化反应机理图(以葡萄糖为例)

Fig.1 Mechanism diagram of non-enzymatic glycosylation reaction (taking glucose as an example)

反应最快的酪蛋白,达到适宜的接枝度也需要约24 h,同时还要严格控制反应条件,反应进程难控制^[29]。湿热法工艺相对简单,将蛋白质与还原糖按一定溶液比例混合,调整 pH,转入密闭容器,在特定温度下反应,反应结束后冷却,终止反应^[30]。湿热法在温度低于 90 ℃ 时反应缓慢,超过 100 ℃ 后反应速度加快,需几个到十几个小时不等,湿热法主要用于蛋白质与还原糖的反应,在反应过程中,蛋白质易于在高温溶液中变性并发生聚合现象。

1.2 酶法

酶在蛋白质的分解及代谢过程中发挥着重要作用,酶与蛋白质相互作用,促使蛋白质发生交联或水解,引起蛋白质结构和性质上的变化。谷氨酰胺转移酶(Transglutaminase, TGase)是一种催化酰基反应的酶,它能够催化蛋白质的谷氨酰胺残基的 γ -甲酰胺基团与伯氨基化合物之间的酰基发生转移反应,使蛋白质糖基化^[31]。TGase 可通过胺的导入、分子内和分子间的交联、脱胺基作用三种途径改变蛋白质的结构,使蛋白质形成高分子的聚合物或者改变其疏水性,进而蛋白质的凝胶性、乳化性和起泡性等发生改变^[32]。TGase 催化蛋白质糖基化反应主要有 3 种形式(图 2): a: TGase 催化蛋白质分子内或分子间交联

后形成高聚物,再与糖分子发生非酶糖基化反应; b: 蛋白质和糖首先参与非酶糖基化反应,再经 TGase 酶法脱酰胺改性增加亲水侧链羧基含量; c: TGase 直接催化糖基化反应,改善蛋白质性质^[33]。TGase 的催化反应受反应时间、TGase 添加量、酰基供体和受体比例等因素影响,进而影响蛋白质和糖类的接枝程度。

1.3 复合法

近年来,研究人员进行了协同糖基化对蛋白质改性的研究。蛋白质的物理法改性(如超声、微波、高压、静电纺丝技术等)因操作简便、过程易控制、时间短、效率高,可辅助糖基化反应,使糖基化进程更快速,蛋白质的功能特性改善效果更明显^[34]。利用静电纺丝技术协同鱼明胶与不同糖(蔗糖、葡萄糖、果糖)进行糖基化反应,复合改性显著增强了明胶纳米纤维抗水解降解的稳定性、力学性能与吸湿性能,并表现出显著的抗氧化能力^[35]。同样,蛋白质的化学法及酶法改性对糖基化反应也具有相似的效果。蛋清蛋白磷酸化产物和磷酸化后再糖基化的产物均显著提高蛋清蛋白的热稳定性、对磷酸钙的增溶能力,降低抗卵清蛋白抗体反应,其中磷酸化+糖基化反应产物较单纯磷酸化产物效果更显著^[36]。在探讨高压酶解+糖基化复合反应对蓝蛤风味影响的研究中,发

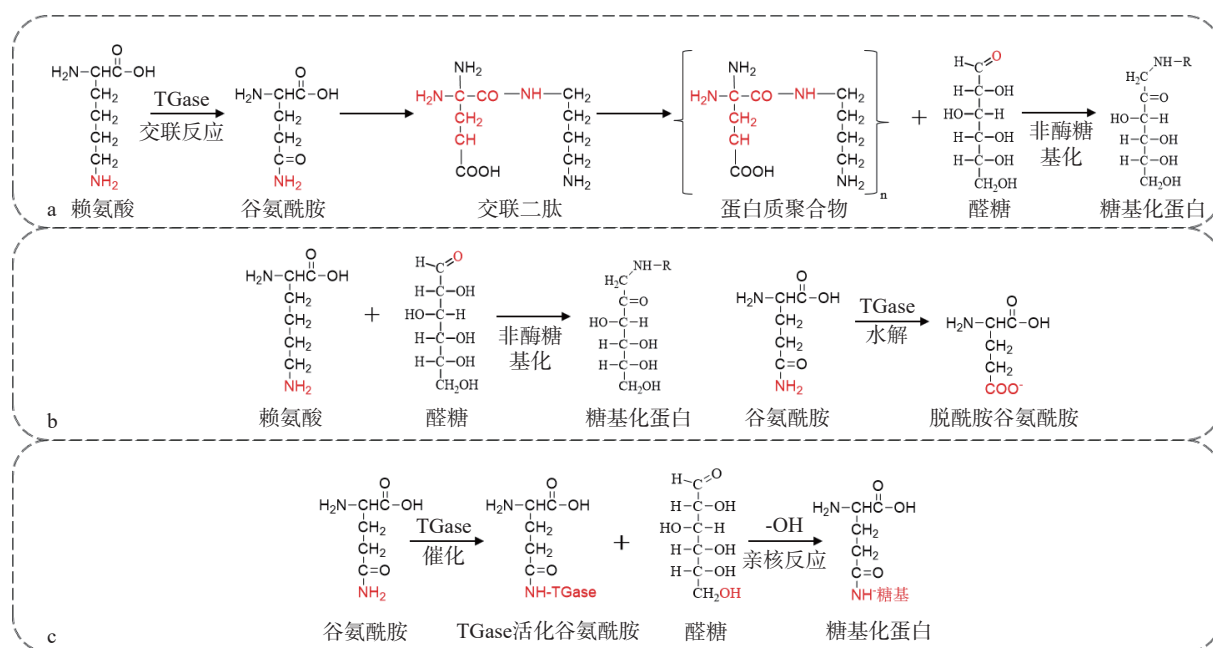


图 2 TGase 催化酶法糖基化机理图

Fig.2 Mechanism map of enzymatic glycosylation catalyzed by TGase

注: a-交联反应; b-酰基转移反应; c-脱酰基反应。

现高压酶解能提高蓝蛤酶解产物的有机酸、5'-核苷酸和游离氨基酸含量,之后再行糖基化处理,5'-核苷酸和游离氨基酸含量降低,有机酸含量增加,经电子鼻和气相-质谱分析表明,糖基化后酶解产物的风味发生了变化,具有鱼腥味特征的醛明显减少,具有肉腥味的呋喃和含硫化合物增加。因此,高压酶解+糖基化复合反应可以显著改善风味^[37]。

非酶法、酶法和复合法均可制备糖基化蛋白,其中非酶糖基化应用更为广泛,但也存在一定的缺陷,如无法有效控制反应进行,造成营养物质流失或产生有害物质。TGase 诱导的糖基化反应条件温和、效率更高且不会产生有害物质。为了满足食品加工的需求,复合法糖基化反应具有更好的加工适用性。复合法改性的研究将促进蛋白质在食品领域得到更深入的应用。

2 糖基化蛋白的功能特性

蛋白质在糖基化过程中分子结构发生变化,主要包括氨基酸组成的变化; α -螺旋、 β -折叠、 β -转角、无规则卷曲的改变;静电作用、氢键、疏水作用、二硫键的变化^[38]。糖基化蛋白的功能特性(溶解性、乳化性、凝胶性、起泡性和起泡稳定性、热稳定性等)也会随之发生改变^[39]。

2.1 溶解性

蛋白质的溶解性与蛋白质氨基酸残基上的亲水和疏水基团有密切关系。一般蛋白质分子表面疏水基团越少,溶解性越大。溶解性的改变直接影响其乳化性、凝胶性和起泡性等其他特性^[40]。蛋白质糖基化改性被广泛应用于改善蛋白质的溶解度,主要是因为糖的引入改变了蛋白质的结构,使蛋白质分子之间的相互作用减弱,抑制蛋白质聚集,从而提高其溶解

度^[41]。另一方面,糖的加入引入了-OH 等亲水性基团,吸附在蛋白质表面,增强蛋白质与水分子之间的相互作用,降低蛋白质的表面疏水性,溶解度提高^[42]。Cheng 等^[40]在大分子拥挤条件下利用大米蛋白(Rice Protein, RP)与葡聚糖糖基化反应,葡聚糖作为一种聚集剂吸附或包裹在 RP 表面,增强了 RP 与水分子的相互作用,同时增加了蛋白质之间的位阻,抑制蛋白质聚集,提高了 RP 的溶解度。Xu 等^[43]利用微生物转谷氨酰胺酶使鸡胸肉中的肌原纤维蛋白(Myofibrillar Protein, MP)和葡萄糖胺(Glucosamine, GlcN)发生糖基化反应,以提高 MP 的溶解度。最佳反应条件为温度 37 °C, pH7.5, MP/GlcN 质量比为 1:3,反应时间 6 h。糖基化后的 MP 显示出明显不同的二级和三级结构,MP 的构象变化可能导致其溶解度增加。然而,糖基化反应条件的改变也可能导致蛋白溶解性下降。Cheng 等^[44]发现大米蛋白与右旋糖酐进行糖基化反应。当温度在 95 °C 时,蛋白质的溶解度增加,而温度升到 100 °C 时,由于蛋白质分子间的相互作用,尤其是疏水蛋白重新折叠、凝聚,导致糖基化程度下降,进而使大米蛋白的溶解度下降。综上,糖基化改性是改善蛋白质溶解性的有效途径,根据不同需求改变反应条件,使溶解度增加或下降,可以在饮品开发方面得到更好的应用。

2.2 乳化性和乳化稳定性

蛋白质的糖基化已被证明是提高乳化性的重要手段,乳化能力的提高是由于蛋白质与亲水性糖类的结合提高了蛋白质在水溶液中的有效浓度和迁移率,蛋白质的亲水基团和疏水基团均暴露在分子表面,引起蛋白质空间构象的改变,使结构变得更加灵活,能够更快地迁移和吸附到油水界面,形成稳定的界面

层^[45]。接枝在蛋白质上的糖类可以在油滴之间产生一定的位阻斥力,促进蛋白质吸附在油滴表面形成致密的多层结构,抑制乳滴之间的聚集絮凝,从而提高乳液的稳定性^[8]。乳化活性指数(Emulsion Activity Index, EAI)和乳化稳定性(Emulsion Stability, ES)是表征蛋白质乳化性能的两个重要指标。EAI 揭示了蛋白质在油水界面上快速吸附的能力,反映蛋白质构象的松弛。ES 反映蛋白质在油水界面的吸附能力和稳定能力,以及乳状液滴聚集的能力^[46]。在乳铁蛋白和低聚壳聚糖糖基化反应中发现,糖基化产物的 EAI 和 ES 显著升高,随着反应时间的延长, EAI 和 ES 先上升后下降,说明糖基化程度对乳铁蛋白的乳化性能具有显著影响^[47]。Chen 等^[48]利用超声辅助豌豆分离蛋白和阿拉伯糖糖基化,结果表明随着蛋白质结构的展开,暴露出更多的疏水性基团,改善了糖基化产物的乳化性, EAI 和 ES 都有所提高,对乳液稳定性有积极影响。在蛋清蛋白和葡聚糖的反应中,随着葡聚糖添加量的提高,其稳定的乳液有更小的粒径,对于环境条件的变化如 pH、离子强度和温度表现出强耐受性,蛋清蛋白的乳化稳定性得以提高^[49]。综上,糖基化反应促进蛋白质乳化性能的提高,并且糖类的比例越高,糖基化产物的乳化性能越好。

2.3 凝胶性

蛋白质糖基化通过改变蛋白质的结构,疏水基团的暴露导致分子之间的疏水相互作用提高,增强了蛋白质在成胶过程中的聚集和交联行为,调节形成凝胶的网状结构,从而对凝胶强度产生影响^[50]。超声辅助卵白蛋白糖基化对其凝胶性能影响的研究结果表明,超声促进了糖基化反应,使更多的疏水基团暴露,糖基化卵白蛋白通过分子间相互作用形成更均匀、致密的凝胶,凝胶性显著增强^[51]。利用 TGase 催化天然肌球蛋白的糖基化反应,冷冻扫描电镜下观察肌球蛋白凝胶强度的变化,糖基化水平越高,凝胶结构越弱。可能是蛋白糖基化通过阻止肌凝蛋白球状头的展开,延缓了蛋白质的变性,进而影响了凝胶化的进程^[52]。对乳清分离蛋白与右旋糖酐糖基化反应研究发现,参与反应糖的分子量不同,凝胶强度呈现出不同的状态,糖基化产物也可能会抑制凝胶的形成,降低凝胶强度,主要是因为凝胶表面疏水性的降低,这是构建凝胶网络的主要相互作用之一^[53]。糖基化蛋白质凝胶性与所选蛋白和糖的种类差异有关,选择合适的蛋白质和糖类进行糖基化,可以满足新型凝胶食品的不同需求。

2.4 起泡性和起泡稳定性

蛋白质的起泡性在食品体系中有重要的作用,泡沫的形成和稳定性影响食品的品质。糖基化修饰可以提高蛋白质的起泡性和起泡稳定性。Sheng 等^[54]通过对天然卵清蛋白(Native Ovalbumin, N-OVA)和糖基化 OVA(Glycosylated Ovalbumin, G-OVA)对比后发现, G-OVA 起泡稳定性为 50.5%,

是 N-OVA 起泡稳定性(7.1%)的 7.1 倍。G-OVA 泡沫的气泡尺寸比 N-OVA 更小、更均匀。经过糖基化反应后起泡性显著增强。He 等^[55]通过 TGase 辅助玉米醇溶蛋白水解物与乳酸低聚壳聚糖进行糖基化反应,产物具有快速形成具有凝聚力的界面膜的能力,该界面膜能够捕获空气并提供保持稳定泡沫的强度,进而提高了发泡性能。Jian 等^[56]用葡萄糖和甘露糖分别对牛血清白蛋白进行糖基化反应,经葡萄糖糖基化后,其产物发泡能力大幅增加,发泡稳定性下降;经甘露糖糖基化后产物发泡能力略有变化,发泡稳定性下降。葡萄糖糖基化后发泡能力的大幅增加是由于形成了更灵活、更松散的结构。起泡稳定性的下降主要是由于糖基化后表面疏水性下降,此外,蛋白质的溶解度和界面性质也会对起泡稳定性造成影响。通过糖基化对蛋白质发泡性能的改善,能克服蛋白质在食品加工中应用的局限性。

2.5 热稳定性

蛋白质在高温条件下会因结构变化导致变性,出现沉淀,同时营养价值下降。糖基化改性可以改善蛋白的热稳定性。Liu 等^[57]对不同脱乙酰度的魔芋低聚葡甘聚糖对肌球蛋白的糖基化改性作用进行探讨发现,改性后蛋白质热稳定性从 58.60 ± 1.23 °C 提高到 92.30 ± 2.66 °C,可能是亲水性羟基的引入使蛋白质中的净负电荷数量增加,同时蛋白质的空间位阻和静电斥力也随之增加,阻止了肌凝蛋白分子的聚集,使糖基化产物的热稳定性提高。牛血清白蛋白(Bovine Serum Albumin, BSA)和岩藻聚糖反应生成的糖基化 BSA 具有高熔融温度 97.09 ± 1.45 °C,岩藻聚糖的附着增强了 BSA 的负电荷分布和空间稳定性,使热稳定性得到提高^[58]。大豆分离蛋白和葡聚糖进行糖基化反应,最佳糖基化条件为 pH8.5、反应温度 60 °C、相对湿度 79%、反应时间 8 d,在此条件下,糖基化后大豆球蛋白和 β -伴大豆球蛋白组分的变性温度分别为 97.1 ± 0.22 °C 和 80.5 ± 0.11 °C,显著高于未糖基化前的 88.9 ± 1.15 °C 和 73.8 ± 0.17 °C,糖基化显著提高了产物的热稳定性^[59]。综上,糖基化蛋白在高温处理时能更好地保持功能特性,使其更适应产品加工过程。

3 糖基化蛋白的应用

3.1 食品风味的改善

糖基化反应广泛存在于食品工业中,对食品的风味、气味和颜色有重要贡献。研究表明,美拉德反应可以产生超过 2500 种不同的风味化合物,其中吡嗪和呋喃被认为是具有烘焙、咖啡、坚果、焦糖和巧克力气味描述的理想风味物质^[60]。Chen 等^[61]对鳕鱼胶原蛋白肽和木糖反应的研究结果表明,糖基化反应后吡嗪和呋喃的含量显著增加,其中 2,5-二甲基吡嗪具有烤花生香味和巧克力、奶油香味,而 2-乙基-3,5-二甲基吡嗪具有油炸可可和杏仁的香味,它们被认为是糖基化反应重要的风味前体。而呋喃是糖的

衍生物,随着反应温度从 80 ℃ 升到 140 ℃,呋喃的含量随之增加,表明剧烈的热处理是呋喃形成的原因。此外,低分子量的多肽因具有较强的氨基活性可能有助于吡嗪类化合物的生成。Liu 等^[62]发现低分子量鸡肉蛋白肽(<500 Da)与木糖发生糖基化反应,会生成更多的吡嗪类化合物,大多数吡嗪具有强烈的气味以及低的气味阈值,从而产生大量香味和风味。在芝麻分离蛋白和低聚糖糖基化反应中发现,随着反应温度和反应时间的增加,挥发性化合物的种类(特别是杂环类化合物)和浓度都显著增加。在高温下短时间反应(180 ℃, 5 min)对风味形成的影响与低温下长时间反应(160 ℃, 10 min)的效果大致相同^[63]。然而,糖基化反应形成的烷基嘧啶和吡咯等化合物会产生一些令人不悦的味道^[64],因此有效控制糖基化反应条件,可促进风味物质的形成,糖基化反应作为食品风味物质改善的重要手段,是食品工业发展的方向之一。

3.2 生物活性物质的递送

生物活性成分在食品开发中常作为功能性成分被利用,蛋白质则广泛应用于包裹并递送各种生物活性分子。在递送过程中,生物活性分子由于水溶性差和生物利用度低而易被分解,蛋白质也会因温度、pH 和离子强度的改变异常敏感,导致递送效果不理想^[65]。基于糖基化反应的蛋白糖复合物是有效的载体之一,是可应用于递送系统的理想成分^[66]。Wang 等^[67]将牛血清白蛋白与葡聚糖糖基化反应,其糖基化产物形成的乳液在 pH 和温度条件下均稳定,可有效避免姜黄素的氧化,并且乳液有效提高了姜黄素在小鼠体内的生物利用度和吸收率。Jiao 等^[68]将玉米蛋白和低聚壳聚糖糖基化,制备装载叶黄素的糖基化玉米蛋白纳米颗粒,作为叶黄素递送的新型载体。糖基玉米蛋白纳米载体显著提高了叶黄素的溶解度,包封能力和在胃肠道环境中的释放能力。对叶黄素及其纳米颗粒在饮料中的稳定性进行评价,发现 4 ℃ 条件下 25 d 贮藏后,糖基化纳米载体的叶黄素在饮料中的保留率从改性前的 22.92%±1.11% 提高到 87.96%±1.11%,说明糖基化纳米颗粒对在常规贮藏条件下的稳定性更为有效。Zhang 等^[69]以酪蛋白酸钠和低聚异麦芽糖的糖基化反应产物为壁材制备高载量亚麻籽油微胶囊。糖基化反应后酪蛋白酸钠表现出良好的乳化性,糖基化反应产物包裹亚麻油乳液可获得更小的液滴尺寸和多分散指数。当载油率为 58.43% 时,微胶囊的包封率可达 98.22%。此外,糖基化反应产物作为壁材可以在 50 ℃ 下保护亚麻籽油免受脂质氧化 4 周,具有良好的氧化稳定性,在制备高载油量微胶囊方面具有很大的应用潜力。综上,糖基化蛋白无论作为壁材或乳化剂包封生物活性物质,保护其营养价值和功能,都具有重要的实际意义。

3.3 可食膜的制备

可食膜是以天然可食性生物大分子为主要基

质,通过特定的处理工序形成具有力学性能和选择透过性的多孔网状、结构致密的薄膜。与传统塑料包装膜相比,可食膜具有无毒、无害、可生物降解性等优点^[70]。但其本身阻隔性能差,会使水分、氧气和其他气体渗透到包装里,从而影响食品的质量。此外,可食性薄膜通常具有较差的机械性能,例如低拉伸强度和较差的抗撕裂性,这可能导致运输或处理过程中的包装破损。通过糖基化改性后,能够改善可食膜的阻隔性和机械性能等特性^[71-72]。Kchaou 等^[73]通过将葡萄糖以不同摩尔比与鱼明胶的成膜液混合,在 90 ℃ 下加热 24 h 糖基化反应,改性后的薄膜玻璃化转变温度提高 46%,断裂伸长率提高 54%。通过水溶性和水接触角测定,糖基化降低了薄膜的水敏感性。Yu 等^[74]利用壳寡糖与赖氨酸糖基化反应,壳寡糖和其糖基化反应产物涂膜用于鲜切猕猴桃冷藏保鲜过程,发现糖基化产物对冷藏猕猴桃起到保护作用。此外,糖基化产物涂膜处理还降低了冷藏猕猴桃的失重率和缓解果皮颜色变深,抑制果实微生物的生长。糖基化蛋白制备的可食膜对于延长食品货架期、保护氧化敏感的食品以及提高食品产品的质量有潜在的应用价值。

3.4 食品过敏反应的改善

食物过敏是常见的免疫系统疾病,糖基化反应可以对食物中引起过敏反应的组分上的序列表位进行修饰或屏蔽,也可以引起构象表位的变化,从而改变食物的致敏性^[75]。张敏等^[76]将鳕鱼小清蛋白与核糖糖基化反应,糖基化产物经体外模拟消化后发现,胃消化 1 h 后产物的 IgE 降低速率最快,胃肠消化 2 h 最低,3 h 略有增加。这表明糖基化反应可有效降低鳕鱼小清蛋白的致敏性。Wu 等^[77]发现糖基化后 β -乳球蛋白的 IgE 结合能力的降低,主要是由于过敏原构象表位被阻断所致,通过减少 β -乳球蛋白的肠上皮转移、增加树突状细胞摄取和加速其在体内的降解来降低其在体内的致敏性。Zhang 等^[78]利用多种糖类对虾的原肌球蛋白进行糖基化反应,发现小分子量糖类修饰的对虾原肌球蛋白 IgE 结合活性均显著降低,并在肥大细胞和小鼠模型的过敏反应时表现出较低的致敏性,而麦芽糖糖基化产物其致敏性变化不显著。同样 Fu 等^[79]将虾原肌球蛋白与核糖、低聚半乳糖和低聚壳聚糖糖基化反应,发现所有产物的 IgE 结合能力降低了 60% 以上。但是,贝类原肌球蛋白与葡萄糖、核糖和麦芽糖糖基化后,改性贝类原肌球蛋白的 IgE 结合能力增加,说明糖基化反应导致贝类原肌球蛋白的致敏性增加^[80]。由此,在研究糖基化改性蛋白的致敏性时也要充分考虑蛋白的来源所带来的差异性。另外,对于参与糖基化反应的糖类,为避免新过敏原的产生,也需要结合具体蛋白质进行分析,减少致敏性带来的影响^[81]。

3.5 3D 打印的优势

3D 打印技术简化了产品制造的过程,缩短了制

造时间,从而提高了生产效率。在食品领域,因其具有实现定制设计、个性化营养、优化供应链和拓宽食材种类等多重优势而受到广泛研究^[82]。糖基化蛋白质通常具有较好的稳定性和可打印性,在逐层制造复杂结构中更有优势,从而提高了3D打印的分辨率和保真度^[83]。Zhou等^[84]以马铃薯淀粉、豌豆蛋白和甘油为基料,添加豌豆蛋白酶解液或酶解液-木糖糖基化产物,经过糊化处理,得到3D打印基质材料,结果表明,含有糖基化产物的3D打印材料颗粒交联度最高,抗氧化活性最好,打印成型性最好,造型逼真,融合性好、层状边界不明显,适合后续加工。Kan等^[85]研究乳清分离蛋白和阿拉伯糖糖基化产物在3D打印方面的应用,发现3%的糖基化产物和80%油质量分数稳定的高内相乳剂具有更好的自支撑性能、更高的黏度和更低的频率依赖性。制备的高内相乳剂可作为食品级3D打印油墨,用于打印具有良好尺寸打印精度的模型。

4 总结与展望

蛋白质通过糖基化改变结构,改善其功能特性,是拓展其在食品和医药领域应用的有效途径之一。然而,目前针对糖基化产物的结构及其功能特性之间关联性的系统化、全面化分析方法尚未完全建立,制约了该技术的进一步优化和应用。未来的研究应更加注重以下几个方面的发展趋势和可行方向。

a.在糖基化反应条件的调控方面,如糖基化方法、蛋白和糖的比例、种类、时间、温度、pH、相对湿度等对产物分子结构和功能特性的影响需要更为深入的量化研究。通过高通量筛选结合多维度表征技术,开发标准化的方法以精确解析糖基化反应的动力学规律和分子机制。基于这些规律,设计满足特定产业化需求的定制化糖基化蛋白质,将成为未来发展的重点方向。b.为了提高糖基化改性的效率 and 安全性,研究需聚焦于反应过程中不同阶段产物的动态调控。重点关注如何通过优化反应条件,有效提升总反应前期和中期的功能性产物比例,同时抑制终末期糖基化产物(Advanced Glycation End-products, AGEs)的生成。这不仅能够增强产物的功能特性,还能够避免AGEs可能带来的健康风险,为食品安全提供新的保障。c.随着消费者对健康与营养功能食品需求的不断增长,蛋白质糖基化改性在提升产物生物活性方面的潜力逐渐受到重视。例如,在抗氧化、抗菌等功能性领域,深入研究糖基化对蛋白质关键活性基团的修饰作用及其分子机制,探索与揭示其在健康食品和药物开发中的应用价值,将成为研究热点。这类研究有望推动更高附加值的功能性食品和医药产品的开发。d.随着老龄化社会的加剧以及可持续发展理念的推广,蛋白质的综合利用研究还应关注绿色化、低能耗的糖基化技术开发。结合人工智能、大数据分析等新兴技术,构建智能化的糖基化反应预测模型,为反应条件的优化和产品设计提供理论指导。这

将推动蛋白质糖基化技术向更加精准、高效和环境友好的方向迈进。综上所述,蛋白质糖基化改性研究的未来不仅在于优化现有技术,还应关注多学科交叉融合下的新思路和新方法。通过从分子结构到功能特性的系统研究,将进一步拓展蛋白质在食品、医药及相关领域的应用范围,展现其在健康和产业价值上的巨大潜力。

© The Author(s) 2025. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] FOEGEDING E A, DAVIS J P. Food protein functionality: A comprehensive approach[J]. *Food Hydrocolloids*, 2011, 25(8): 1853–1864.
- [2] 郭蔚波, 赵燕, 徐明生, 等. 不同处理方式下蛋白质结构变化与体外消化性关系研究进展[J]. *食品科学*, 2019, 40(1): 327–333. [GUO W B, ZHAO Y, XU M S, et al. Research progress on the relationship between protein structure changes and *in vitro* digestibility under different treatment methods[J]. *Food Science*, 2019, 40(1): 327–333.]
- [3] 程凯丽, 胡志和, 赵旭飞, 等. 超高压处理对乳制品中蛋白质和酶的影响研究进展[J]. *乳业科学与技术*, 2019, 42(6): 34–40. [CHENG K L, HU Z H, ZHAO X F, et al. Research progress on the effects of ultra-high pressure treatment on proteins and enzymes in dairy products[J]. *Dairy Science and Technology*, 2019, 42(6): 34–40.]
- [4] ZHANG Q, LI L, LAN Q, 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): 2506–2533.
- [5] MIRMOGHATAIE L, SHOJAEI ALIABADI S, HOSSEINI S M. Recent approaches in physical modification of protein functionality[J]. *Food Chemistry*, 2016, 199: 619–627.
- [6] BOUTUREIRA O, BERNARDES G J L. Advances in chemical protein modification[J]. *Chemical Reviews*, 2015, 115(5): 2174–2195.
- [7] 王迪, 代蕾, 高彦祥. 蛋白质酶法改性研究进展[J]. *食品科学*, 2018, 39(15): 233–239. [WANG D, DAI L, GAO Y X. Research progress of protein enzymatic modification[J]. *Food Science*, 2018, 39(15): 233–239.]
- [8] NOOSHKAM M. Functional and biological properties of Maillard conjugates and their potential application in medical and food: A review[J]. *Food Research International*, 2020, 131: 109003.
- [9] 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 protein glycosylation modification methods and product verification methods[J]. *Food and Machinery*, 2019, 35(2): 196–201.]
- [10] LI C, TIAN Y, LIU C, et al. Effects of heat treatment on the structural and functional properties of *Phaseolus vulgaris* L. protein[J]. *Foods*, 2023, 12(15): 2869–2886.
- [11] YAO K, XIA Y, GAO H, et al. Influence of ultrasonic power and ultrasonic time on the physicochemical and functional properties of whey protein isolate[J]. *International Journal of Food Engineering*, 2019, 15(3-4): 20170370.

- [12] ZHANG Z, YANG Y, ZHOU P, et al. Effects of high pressure modification on conformation and gelation properties of myofibrillar protein[J]. *Food Chemistry*, 2017, 217: 678–686.
- [13] LIU C, MA X. Study on the mechanism of microwave modified wheat protein fiber to improve its mechanical properties[J]. *Journal of Cereal Science*, 2016, 70: 99–107.
- [14] YAN C, ZHOU Z. Solubility and emulsifying properties of phosphorylated walnut protein isolate extracted by sodium trimetaphosphate[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 143: 111117.
- [15] SHEN Y, LI Y. Acylation modification and/or guar gum conjugation enhanced functional properties of pea protein isolate[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 117: 106686.
- [16] PENG L P, XU Y T, LI X T, et al. Improving the emulsification of soy β -conglycinin by alcohol-induced aggregation[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 98: 105307.
- [17] XU Y, WEI Z, XUE C, et al. Covalent modification of zein with polyphenols: A feasible strategy to improve antioxidant activity and solubility[J]. *Journal of Food Science*, 2022, 87(7): 2965–2979.
- [18] 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.
- [19] ALAHMAD K, NOMAN A, XIA W, et al. Influence of the enzymatic hydrolysis using flavourzyme enzyme on functional, secondary structure, and antioxidant characteristics of protein hydrolysates produced from bighead carp (*Hypophthalmichthys nobilis*) [J]. *Molecules*, 2023, 28(2): 519–539.
- [20] YI J, CHEN X, WEN Z, et al. Improving the functionality of pea protein with laccase-catalyzed crosslinking mediated by chlorogenic acid[J]. *Food Chemistry*, 2024, 433: 137344.
- [21] CHEN L, CHEN J, WU K, et al. Improved low pH emulsification properties of glycosylated peanut protein isolate by ultrasound Maillard reaction[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2016, 64(27): 5531–5538.
- [22] CHENG Y H, MU D C, JIAO Y, et al. Microwave-assisted maillard reaction between rice protein and dextran induces structural changes and functional improvements[J]. *Journal of Cereal Science*, 2021, 97: 103134.
- [23] JIAN W, WANG L, WU L, et al. Physicochemical properties of bovine serum albumin-glucose and bovine serum albumin-mannose conjugates prepared by pulsed electric fields treatment[J]. *Molecules*, 2018, 23(3): 570–581.
- [24] DAI Q, HONG Q, ZHU X, et al. Formation of whey protein isolate-dextran conjugates by Maillard reaction with ethanol-water pretreatment[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2023, 185: 115142.
- [25] JIANG W, LIU Y, YANG X, et al. Recovery of proteins from squid by-products with enzymatic hydrolysis and increasing the hydrolysate's bioactivity by Maillard reaction[J]. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 2018, 27(8): 900–911.
- [26] LIU J, RU Q, DING Y. Glycation a promising method for food protein modification: Physicochemical properties and structure, a review[J]. *Food Research International*, 2012, 49(1): 170–183.
- [27] 张强, 刘昊, 马玉涵, 等. 美拉德反应改性蛋白质/肽的研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(18): 306–313. [ZHANG Q, LIU H, MA Y H, et al. Research progress of Maillard reaction modified protein/peptide[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2022, 48(18): 306–313.]
- [28] KUTZLI I, WEISS J, GIBIS M. Glycation of plant proteins via Maillard reaction: Reaction chemistry, technofunctional properties, and potential food application[J]. *Foods*, 2021, 10(2): 376–415.
- [29] 高威. 干法美拉德反应修饰酪蛋白凝胶性质的研究[D]. 大连: 大连工业大学, 2016. [GAO W. The research on gel properties of casein modified by Maillard reaction[D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2016.]
- [30] SPOTTI M J, PERDUCA M J, 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.
- [31] DUARTE L, MATTE C R, BIZARRO C V, et al. Transglutaminases: Part I—origins, sources, and biotechnological characteristics[J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2020, 36(1): 15–32.
- [32] GASPAR A L C, DE GÓES-FAVONI S P. Action of microbial transglutaminase (MTGase) in the modification of food proteins: A review[J]. *Food Chemistry*, 2015, 171: 315–322.
- [33] 李洪波, 李春爽, 张天琪, 等. 谷氨酰胺转氨酶催化蛋白质糖基化的研究进展[J]. *中国油脂*, 2020, 45(4): 18–23. [LI H B, LI C S, ZHANG T Q, et al. Research progress on protein glycosylation catalyzed by transglutaminase[J]. *China Oil*, 2020, 45(4): 18–23.]
- [34] 郑乾坤, 陈复生, 张朵朵, 等. 美拉德反应改性植物蛋白研究进展[J]. *食品研究与开发*, 2022, 43(15): 218–224. [ZHENG Q K, CHEN F S, ZHANG D D, et al. Research progress of Maillard reaction modified plant protein[J]. *Food Research and Development*, 2022, 43(15): 218–224.]
- [35] KWAK H W, PARK J, YUN H, et al. Effect of crosslinkable sugar molecules on the physico-chemical and antioxidant properties of fish gelatin nanofibers[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 111: 106259.
- [36] ENOMOTO H, NAGAE S, HAYASHI Y, et al. Improvement of functional properties of egg white protein through glycation and phosphorylation by dry-heating[J]. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 2009, 22(4): 591–597.
- [37] BU Y, ZHU L, XU W, et al. Physicochemical and flavour characteristics of Maillard reaction products derived from *Aloidiidae aloidi* muscle enzymatic hydrolysates coupled with high-pressure processing[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2021, 56(4): 1766–1776.
- [38] WANG Q, HE L, LABUZA T P, et al. Structural characterisation of partially glycosylated whey protein as influenced by pH and heat using surface-enhanced Raman spectroscopy[J]. *Food Chemistry*, 2013, 139(1-4): 313–319.
- [39] LIU G, ZHONG Q. Glycation of whey protein to provide steric hindrance against thermal aggregation[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2012, 60(38): 9754–9762.
- [40] CHENG Y H, MU D C, FENG Y Y, et al. Glycosylation of rice protein with dextran via the Maillard reaction in a macromolecular crowding condition to improve solubility[J]. *Journal of Cereal Science*, 2022, 103: 103374.
- [41] TANG C H. Emulsifying properties of soy proteins: A critical review with emphasis on the role of conformational flexibility[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2017, 57(12): 2636–2679.
- [42] KE C, LI L. Influence mechanism of polysaccharides induced Maillard reaction on plant proteins structure and functional

- properties: A review[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2023, 302: 120430.
- [43] XU Y, ZHAO X, BIAN G, et al. Structural and solubility properties of pale, soft and exudative (PSE)-like chicken breast myofibrillar protein: Effect of glycosylation[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2018, 95: 209–215.
- [44] CHENG Y H, TANG W J, XU Z, et al. Structure and functional properties of rice protein-dextran conjugates prepared by the Maillard reaction[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2017, 52(2): 372–380.
- [45] KAN X, CHEN G, ZHOU W, et al. Application of protein-polysaccharide Maillard conjugates as emulsifiers: Source, preparation and functional properties[J]. *Food Research International*, 2021, 150: 110740.
- [46] QU W, ZHANG X, HAN X, et al. Structure and functional characteristics of rapeseed protein isolate-dextran conjugates[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 82: 329–337.
- [47] 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: 93–106.
- [48] CHEN X, DAI Y, HUANG Z, et al. Effect of ultrasound on the glycosylation reaction of pea protein isolate-arabinose: Structure and emulsifying properties[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2022, 89: 106157.
- [49] YAO X, MCCLEMENTS D J, SU Y, et al. Fabrication, structural and emulsifying properties of egg white protein-dextran conjugates through Maillard reaction[J]. *Food Biophysics*, 2022, 17(4): 650–661.
- [50] VANDENBERG L, VANVLIET T, VANDERLINDEN E, et al. Breakdown properties and sensory perception of whey proteins/polysaccharide mixed gels as a function of microstructure[J]. *Food Hydrocolloids*, 2007, 21(5-6): 961–976.
- [51] SHENG L, LIU Q, DONG W, 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.
- [52] HRYNETS Y, NDAGIJIMANA M, BETTI M. Transglutaminase-catalyzed glycosylation of natural actomyosin (NAM) using glucosamine as amine donor: Functionality and gel microstructure[J]. *Food Hydrocolloids*, 2014, 36: 26–36.
- [53] SPOTTI M J, LOYEAU P A, MARANGÓN A, et al. Influence of Maillard reaction extent on acid induced gels of whey proteins and dextrans[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 91: 224–231.
- [54] SHENG L, TANG G, WANG Q, et al. Molecular characteristics and foaming properties of ovalbumin-pullulan conjugates through the Maillard reaction[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 100: 105384.
- [55] HE W, TIAN L, FANG F, et al. Limited hydrolysis and conjugation of zein with chitosan oligosaccharide by enzymatic reaction to improve functional properties[J]. *Food Chemistry*, 2021, 348: 129035.
- [56] JIAN W, HE J, SUN Y, et al. Comparative studies on physicochemical properties of bovine serum albumin-glucose and bovine serum albumin-mannose conjugates formed via Maillard reaction[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2016, 69: 358–364.
- [57] LIU J, FANG C, XU X, et al. Physico-chemical and functional properties of silver carp myosin glycated with konjac oligo-glucosaccharide: Effects of deacetylation[J]. *Food Chemistry*, 2019, 291: 223–230.
- [58] KIM D Y, SHIN W S. Functional improvements in bovine serum albumin-fucoidan conjugate through the Maillard reaction[J]. *Food Chemistry*, 2016, 190: 974–981.
- [59] BOOSTANI S, AMINLARI M, MOOSAVI-NASAB M, et al. Fabrication and characterisation of soy protein isolate-grafted dextran biopolymer: A novel ingredient in spray-dried soy beverage formulation[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2017, 102: 297–307.
- [60] SCALONE G L L, IOANNIDIS A G, LAMICHHANE P, et al. Impact of whey protein hydrolysates on the formation of 2,5-dimethylpyrazine in baked food products[J]. *Food Research International*, 2020, 132: 109089.
- [61] CHEN K, YANG Q, HONG H, et al. Physicochemical and functional properties of Maillard reaction products derived from cod (*Gadus morhua* L.) skin collagen peptides and xylose[J]. *Food Chemistry*, 2020, 333: 127489.
- [62] LIU J, LIU M, HE C, et al. Effect of thermal treatment on the flavor generation from Maillard reaction of xylose and chicken peptide[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2015, 64(1): 316–325.
- [63] GUO Q, XU S, LIU H M, et al. Effects of roasting temperature and duration on color and flavor of a sesame oligosaccharide-protein complex in a Maillard reaction model[J]. *Food Chemistry*, 2022, 16: 100483.
- [64] SHANG Y, CAO H, WEI C, et al. Effect of sugar types on structural and flavor properties of peony seed derived Maillard reaction products[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2020, 44(3): e14341.
- [65] LI Z, GU L. Fabrication of self-assembled (–)-epigallocatechin gallate (EGCG) ovalbumin-dextran conjugate nanoparticles and their transport across monolayers of human intestinal epithelial Caco-2 cells[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2014, 62(6): 1301–1309.
- [66] 王植, 刘昊天, 刘骞, 等. 美拉德反应及其产物在递送生物活性物质方面的应用研究进展[J]. *食品科学*, 2021, 42(11): 324–331. [WANG Z, LIU H T, LIU Q, et al. Research progress on the application of Maillard reaction and its products in the delivery of bioactive substances[J]. *Food Science*, 2021, 42(11): 324–331.]
- [67] WANG C, LIU Z, XU G, et al. BSA-dextran emulsion for protection and oral delivery of curcumin[J]. *Food Hydrocolloids*, 2016, 61: 11–19.
- [68] JIAO Y, SHI L, LI D, et al. Lutein-loaded glycosylated zein nanoparticles-preparation, characterization, and stability in functional drink[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2023, 187: 115308.
- [69] ZHANG W, CHEN Z, YANG R, et al. Application of caseinate modified with Maillard reaction for improving physicochemical properties of high load flaxseed oil microcapsules[J]. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2021, 123(5): 2000172.
- [70] ZHU F. Polysaccharide based films and coatings for food packaging: Effect of added polyphenols[J]. *Food Chemistry*, 2021, 359: 129871.
- [71] ZHANG W, AZIZI-LALABADI M, ROY S, et al. Maillard-reaction (glycation) of biopolymeric packaging films; principles, mechanisms, food applications[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2023, 138: 523–538.
- [72] AZMAN N H, KHAIRUL W M, SARBON N M. A comprehensive review on biocompatible film sensor containing natural extract: Active/intelligent food packaging[J]. *Food Control*, 2022, 141: 109189.
- [73] KCHAOU H, BENBETTAÏEB N, JRIDI M, et al. Enhance-

ment of structural, functional and antioxidant properties of fish gelatin films using Maillard reactions[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 83: 326–339.

[74] YU X, JING Y, YAN F. Chitooligosaccharide-lysine Maillard reaction products: Preparation and potential application on fresh-cut kiwifruit[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2019, 12(7): 1133–1143.

[75] TEODOROWICZ M, VAN NEERVEN J, SAVELKOUL H. Food processing: The influence of the Maillard reaction on immunogenicity and allergenicity of food proteins[J]. *Nutrients*, 2017, 9(8): 835–852.

[76] 张敏,涂宗财,王辉,等.糖基化鳕鱼小清蛋白消化过程中的致敏性[J].*食品与机械*, 2020, 30(6): 16–22. [ZHANG M, TU Z C, WANG H, et al. Sensitization during digestion of glycosylated cod small serum proteins[J]. *Food & Machinery*, 2020, 30(6): 16–22.]

[77] WU X, LIU M, XIA L, et al. Conjugation of functional oligosaccharides reduced *in vitro* allergenicity of β -lactoglobulin[J]. *Food and Agricultural Immunology*, 2013, 24(4): 379–391.

[78] ZHANG Z, LI Z, LIN H. Reducing the allergenicity of shrimp tropomyosin and allergy desensitization based on glycation modification[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2021, 69(49): 14742–14750.

[79] FU L, WANG C, WANG J, et al. Maillard reaction with ribose, galacto-oligosaccharide or chitosan-oligosaccharide reduced

the allergenicity of shrimp tropomyosin by inducing conformational changes[J]. *Food Chemistry*, 2019, 274: 789–795.

[80] NAKAMURA A, WATANABE K, OJIMA T, et al. Effect of Maillard reaction on allergenicity of scallop tropomyosin[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2005, 53(19): 7559–7564.

[81] ZHANG Z, LI X M, XIAO H, et al. Insight into the allergenicity of shrimp tropomyosin glycosylated by functional oligosaccharides containing advanced glycation end products[J]. *Food Chemistry*, 2020, 302: 125348.

[82] GODOI F C. 3d printing technologies applied for food design: Status and prospects[J]. *Journal of Food Engineering*, 2016, 179: 44–54.

[83] KAN X, HU Y, HUANG Y, et al. Characterization of whey protein isolate-gum arabic Maillard conjugate and evaluation of the effects of conjugate-stabilized emulsion on microbiota of human fecal cultures[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 134: 108060.

[84] ZHOU Q, WANG M, LI H, et al. Application of Maillard reaction product of xylose-pea protein enzymatic hydrolysate in 3D printing[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2020, 100(7): 2982–2990.

[85] KAN X, DAI Z, CHEN D, et al. High internal phase emulsion stabilized by whey protein isolate-gum arabic Maillard conjugate: Characterization and application in 3D printing[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 145: 109137.