

油料蛋白

蛋白质转谷氨酰胺酶途径糖基化研究进展

宋莲军^{1,2}, 余留印^{1,2}, 黄现青^{1,2}, 乔明武^{1,2}, 赵秋艳^{1,2}, 张平安^{1,2}, 李 宁^{1,2}

(1. 河南农业大学 食品科学技术学院, 郑州 450002; 2. 郑州市大豆深加工重点实验室, 郑州 450002)

摘要:蛋白质的糖基化修饰可提高其功能性质, 介绍了蛋白质通过转谷氨酰胺酶途径糖基化修饰的优点, 综述了其反应机制、糖基化蛋白主要功能性质变化及结构变化, 并讨论了转谷氨酰胺酶途径糖基化的发展前景。

关键词:蛋白质; 糖基化; 转谷氨酰胺酶

中图分类号:TS201.2; TQ932 **文献标识码:**A **文章编号:**1003-7969(2018)11-0034-05

Review on glycosylation of protein catalyzed by transglutaminase

SONG Lianjun^{1,2}, YU Liuyin^{1,2}, HUANG Xianqing^{1,2}, QIAO Mingwu^{1,2}, ZHAO Qiuyan^{1,2}, ZHANG Ping'an^{1,2}, LI Ning^{1,2}

(1. College of Food Science and Technology, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China;

2. Zhengzhou City Key Laboratory for Soybean Refined Processing, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: The glycosylation can improve the functional properties of protein. The advantages of glycosylated protein catalyzed by transglutaminase were reviewed, and the glycosylation mechanisms as well as the structure and main functional properties of glycosylated protein were described, also the future development potential of glycosylation of protein catalyzed by transglutaminase was discussed.

Key words: protein; glycosylation; transglutaminase

蛋白质是人体所需的营养素之一, 蛋白质所具有的溶解性、乳化性、起泡性及胶凝性等功能特性使其在食品工业中得到广泛应用。但单一来源的天然蛋白如大豆蛋白、酪蛋白、面筋蛋白等由于其结构和功能性质的局限性, 并不能满足食品生产过程中的所有要求, 因而蛋白质改性技术成为赋予食品蛋白质优良特性的必要手段。

食品蛋白质的糖基化修饰, 是将亲水性的糖类物质以共价键连接的方式导入蛋白质分子中, 使糖基化蛋白既具有蛋白质的功能特性, 又具有糖类物质的亲水特性, 使其表现出良好的乳化能力, 并且溶解性、胶凝性、流变学特性、热稳定性、抗氧化性、抗菌性等功能特性也有不同程度的改善^[1]。

美拉德反应和转谷氨酰胺酶(TGase)途径是蛋白质糖基化的两种主要途径^[1]。虽然美拉德反应

途径糖基化修饰能够有效改善蛋白质的功能特性, 但美拉德反应途径糖基化的反应时间较长, 降低了蛋白质的营养价值^[2], 同时存在食品安全问题^[3]。研究证实, 美拉德反应终产物可以引起氧化应激和毒害神经元^[4-5]、引发炎症^[6]、促进结缔组织老化^[7]。与美拉德反应途径糖基化相比, 转谷氨酰胺酶途径糖基化具有反应条件温和且专一、无副产物等优点, 并赋予蛋白质良好的功能特性, 具有良好的应用前景^[8]。本文综述了转谷氨酰胺酶途径的蛋白质糖基化, 并对其反应机制、功能性质及产物结构变化等进行系统的介绍和讨论。

1 转谷氨酰胺酶途径糖基化的反应机制

转谷氨酰胺酶能催化蛋白质分子中的谷氨酰胺残基与赖氨酸残基中的 ϵ -氨基发生反应, 在分子内或分子间形成赖氨酸异肽键, 导致蛋白质分子发生交联^[1], 如图1所示的反应A, 其中, 赖氨酸残基可以被伯胺类物质取代, 即转谷氨酰胺酶能够催化蛋白质分子中谷氨酰胺残基与伯胺类物质发生反应, 如图1所示的反应B。在转谷氨酰胺酶的作用

收稿日期: 2018-02-02

基金项目: 河南省产学研合作计划项目(172107000024)

作者简介: 宋莲军(1969), 女, 教授, 硕士生导师, 研究方向为大豆精深加工与安全控制(E-mail) slj69@126.com。

下,两种反应竞争发生,即伯胺类糖类对蛋白质进行糖基化修饰的同时,蛋白质分子间的交联反应也在进行^[9]。Yan等^[10]利用动物来源的转谷氨酰胺酶

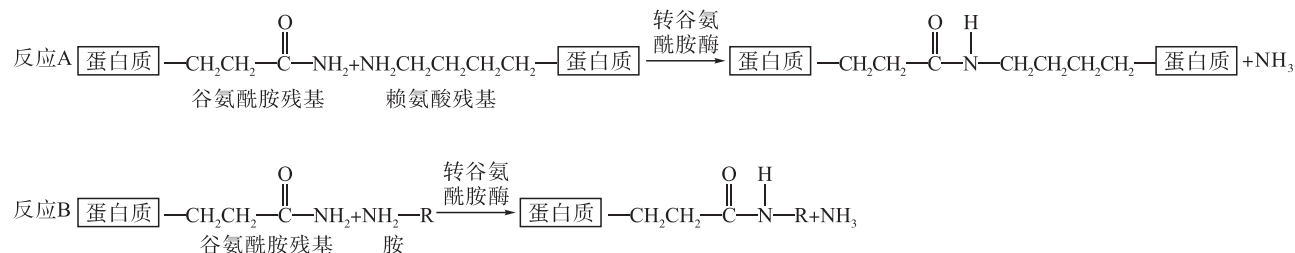


图1 转谷氨酰胺酶催化作用反应机制

2 糖基化蛋白的功能性质变化

2.1 溶解性质

溶解性是蛋白质重要指标,蛋白质的大多数功能性质与其溶解性密切相关,溶解性的高低直接影响蛋白质的乳化性、凝胶性、起泡性及流变学等特性^[11]。研究表明,通过转谷氨酰胺酶途径将糖基导入蛋白质中,其羟基的亲水特性能够有效地提高蛋白质的溶解性。在37℃、pH 7.5、酶添加量10 U/g的条件下,进行酪蛋白的氨基葡萄糖糖基化修饰,糖基化酪蛋白在所有pH条件的溶解性均高于酪蛋白,在碱性pH范围内其溶解性提高更显著^[12]。Colas等^[13]利用转谷氨酰胺酶将半乳糖胺导入豌豆蛋白和醇溶蛋白,每摩尔豌豆蛋白及醇溶蛋白分别导入18个和57个糖基,糖基化蛋白在等电点处的溶解度增加了20%。刘金玲等^[14]通过酶促作用将壳寡糖(相对分子质量1 000 Da)共价交联到玉米谷蛋白分子中,玉米谷蛋白糖基化修饰产物的溶解性在pH 2~10范围内显著高于玉米谷蛋白。

通过转谷氨酰胺酶途径对蛋白质进行糖基化修饰时,糖的种类对其溶解性的影响很大。将氨基葡萄糖与壳寡糖分别共价连接到酪蛋白中,酪蛋白-氨基葡萄糖糖基化产物的溶解度明显高于酪蛋白,而酪蛋白-壳寡糖的糖基化产物的溶解度在总体上低于未修饰的酪蛋白,这是因为两种糖的糖基化修饰对酪蛋白表面疏水性的影响不同,酪蛋白经氨基葡萄糖糖基化修饰后表面疏水性显著降低,而经壳寡糖修饰后表面疏水性却升高^[15-16]。

2.2 乳化性质

乳化性是蛋白质的界面性质,蛋白质能够吸附在油-水界面上,降低界面张力。研究表明,糖基化修饰过程中导入的糖基可在膜的周围形成立体网络结构,增加膜的厚度和机械强度,促进蛋白质在两相界面的吸附,从而提高其乳化性。通过转谷氨酰胺

将胺化的麦芽三糖导入β-酪蛋白,1 mol琥珀酰化β-酪蛋白可结合8 mol胺化的麦芽三糖,首先证实了转谷氨酰胺酶途径实现蛋白质糖基化的可行性。

酶途径将氨基葡萄糖分别共价连接到酪蛋白与大豆分离蛋白分子上,糖基化产物的乳化性均有显著改善^[17-18],其中大豆分离蛋白-氨基葡萄糖产物与未改性大豆分离蛋白相比,乳化性提高了19%,乳化稳定性提高了35%。

一般研究认为,蛋白质进行糖基化修饰时大分子糖基能更有效地改善其乳化性,即增加糖链的长度能够改善糖基化产物的乳化能力^[19-20]。但研究表明通过酶促作用将大分子糖基导入蛋白质分子中,可能导致蛋白质乳化性降低,Fu等^[21-22]将相对分子质量5 kDa壳寡糖通过酶促作用分别共价交联到酪蛋白与大豆分离蛋白分子上,产物的乳化性均有不同程度的降低。造成这种现象的原因一方面可能是由于蛋白质经长链壳寡糖的糖基化修饰后表面疏水性降低,表面吸附能力下降,不能阻止油滴的聚结^[23];另一方面蛋白质分子间的交联修饰也降低了其乳化性^[24]。

2.3 胶凝性质

研究表明,酶促糖基化修饰可以增加蛋白质的胶凝性质,转谷氨酰胺酶催化蛋白质自身交联致使凝胶结构致密,同时糖基导入对凝胶性质的提高具有协同效应。宋春丽^[25]、Song^[26]等将壳聚糖酶促交联到酪蛋白分子上,修饰产物的凝胶形成时间明显缩短(约50%),凝胶的持水能力显著提高,且随着反应时间(1、2、4 h)的延长,修饰产物凝胶的空间网络结构更加规则。Yuliya等^[27]研究发现,氨基葡萄糖的酶促交联对肌球蛋白的热致凝胶起到显著的促进作用,电镜扫描结果表明糖基化对凝胶的微观结构产生明显的影响,形成了致密的网络结构。Chen等^[28]利用转谷氨酰胺酶诱导明胶与壳聚糖形成凝胶,结果表明凝胶形成时间明显缩短,且凝胶强度明显升高。

2.4 流变学特性

流变学特性是蛋白质重要的功能特性之一。在

酶促糖基化修饰过程中,蛋白质的交联会使蛋白质的相对分子质量增加和体积增加,进而蛋白质的表观黏度增加,同时糖基的水合作用也会增加蛋白质的表观黏度。姜淑娟等^[18]通过酶促作用将氨基葡萄糖共价交联到大豆分离蛋白上,大豆分离蛋白-氨基葡萄糖共聚物的表观黏度显著提高。相比于小分子糖,大分子长链糖基的导入能更有效地改善蛋白质的流变学特性。宋春丽^[29]、Song^[30]等通过酶促作用制备了酪蛋白-壳聚糖产物,并对其乳液的流变性质及稳定性进行研究,结果表明糖基化修饰酪蛋白的表观黏度明显高于未改性的酪蛋白,且在放置3 d后依然保持较高的表观黏度。

2.5 热稳定性

糖基与蛋白质的共价结合,抑制了蛋白质之间的相互作用,从而可提高蛋白质的热稳定性。Villalonga等^[31]利用转谷氨酰胺酶的催化作用将 β -环糊精的衍生物(单-[6-(乙二胺)-6-脱氧]- β -环糊精)与胰蛋白酶交联,发现胰蛋白酶-环糊精共聚物的热稳定性大大增强。Ramezani等^[15]将氨基葡萄糖酶促交联到酪蛋白分子上,糖基化修饰酪蛋白在pH 3、60℃热处理6 h后仍具有良好的乳化和能力。乳清蛋白经壳寡糖酶促糖基化修饰后,糖基化产物的热稳定性有一定程度的提高^[32]。

2.6 其他性质

除了上述功能性质的改变,蛋白质及其水解物的糖基化反应还可以提高蛋白质及水解物的抗氧化能力和抗菌能力。Davide等^[33]通过酶促作用将氨基葡萄糖交联到面筋蛋白水解物中,提高了面筋蛋白水解物清除DPPH自由基的能力,并提高其抗菌能力(埃希氏杆菌属)。Pui等^[34]利用转谷氨酰胺酶将氨基葡萄糖酶促交联到胶原多肽上,其清除自由基的能力显著提高。Fan等^[35]利用转谷氨酰胺酶催化羧甲基壳聚糖共价交联到胶原蛋白肽中,研究结果显示,糖基化产物胶原蛋白肽-羧甲基壳聚糖具有显著的清除过氧化氢自由基的能力,还发现其能够有效促进小鼠纤维细胞的生长。糖基化反应还能降低蛋白质的致敏作用,肌球蛋白通过酶促糖基化修饰,改变了其原有的蛋白质结构,从而降低了致敏作用^[36]。

3 糖基化蛋白质的结构变化

蛋白质的糖基化修饰是在蛋白质分子的侧链引入糖基,所以势必对蛋白质的结构产生影响。对糖基化蛋白结构的研究,有利于了解其功能性质变化的因果关系。相对于美拉德反应途径糖基化蛋白结构的研究,对酶促途径糖基化蛋白结构的研究较少。

对糖基化蛋白结构的相关研究,主要是对蛋白质的一级结构、二级结构以及蛋白质相关特征官能团的分析。

3.1 一级结构变化

点喷雾电离质谱(ESI-MS)和基质辅助激光解-电离飞行时间质谱(MALDI-MS)能够精确测定蛋白质与糖基的交联位点及产物交联程度^[37-39],是研究糖基化蛋白结构的有效手段。Yuliya等^[27]通过MALDI-MS测定确定了肌球蛋白与氨基葡萄糖酶促糖基化的糖基化位点,谷氨酰胺是主要的糖基化位点,同时随着反应时间的延长,所得产物的ESI-MS图谱中糖基化蛋白的信号逐渐增强,最大交联度为15%。

红外光谱在一定程度上能够反映蛋白质一级结构的变化,主要体现在C—N和N—H的变化,这些基团具有红外特征吸收峰。Fu等^[22]分析了酪蛋白与壳聚糖的酶促糖基化产物的红外特征,结果表明,与未改性的酪蛋白相比,糖基化酪蛋白在3 300~3 600 cm^{-1} 和1 050~1 150 cm^{-1} 处的吸收峰有较大的波动,—NH₂基团减少,—OH基团增加,一定程度上表明蛋白质在经过糖基化修饰后一级结构发生了改变。Jiang等^[17]对大豆分离蛋白的氨基葡萄糖糖基化修饰产物进行红外光谱分析,产物在1 070 cm^{-1} 处的吸收峰有明显的增强,意味着有羟基导入大豆分离蛋白分子中,证明了酶促反应途径糖基化反应的发生。

3.2 二级结构变化

研究表明,糖基化反应会引起蛋白质二级结构的变化,主要表现为 α 螺旋、 β 折叠、 β 转角和无规则卷曲的增减,圆二色谱分析能够对蛋白质的二级结构进行有效的分析。Yuliya等^[27]研究表明,肌球蛋白的二级结构中 α 螺旋占92.6%、 β 折叠0.3%、 β 转角8.3%、无规则卷曲2.9%,而肌球蛋白的氨基葡萄糖糖基化产物的二级结构中 α 螺旋为96.2%、 β 折叠0.3%、 β 转角6.4%、无规则卷曲1.1%,这一结果表明酶促反应途径糖基化对蛋白质二级结构的影响很大。不同糖类对蛋白质二级结构的影响具有差异性,大豆蛋白经壳聚糖酶促糖基化后 α 螺旋和 β 折叠的含量降低,二级结构变得更无序。燕麦麸皮球蛋白经氨基葡萄糖酶促糖基化后, α 螺旋和 β 折叠的含量反而上升,无规则结构则几乎无变化,整个二级结构趋向有序^[40]。

3.3 特征官能团分析

蛋白质能够吸收一定波长范围的紫外光,其色氨酸、酪氨酸及苯丙氨酸残基侧链对在紫外光下有

特定的吸收峰,通过吸收峰强度的变化也能推测蛋白质相应的结构变化。Yuliya 等^[27]对肌球蛋白氨基葡萄糖糖基化产物在 220 ~ 320 nm 范围内进行紫外光谱扫描分析,研究发现其吸收光谱发生偏移,糖基化后蛋白质暴露了更多的色氨酸、酪氨酸及苯丙氨酸。王长远等^[40]对氨基葡萄糖糖基化的燕麦麸皮球蛋白进行紫外光谱扫描分析,结果表明酪氨酸分子呈“暴露态”,推测其球状结构经糖基化后被打开,结构变得更加松散。

4 结束语

综上所述,通过转谷氨酰胺酶的催化作用进行蛋白质的糖基化,是一种具有巨大前景的蛋白质糖基化途径,反应速度快、条件温和,能够有效地改善蛋白质的功能性质,并且不存在美拉德反应途径进行蛋白质糖基化过程中发生的副反应,是未来进行蛋白质糖基化的研究方向。

目前对酶促反应途径糖基化反应条件的研究大多局限在氨基葡萄糖等少数糖类的研究,需要进一步研究不同种类的具有伯胺特性的糖类与蛋白质之间的糖基化反应,以及深入研究糖基化反应对蛋白质结构和功能性质的影响,最终完善基于转谷氨酰胺酶途径的蛋白质糖基化技术。

参考文献:

- [1] 宋春丽,赵新淮. 食品蛋白质的糖基化反应:美拉德反应或转谷氨酰胺酶途径[J]. 食品科学,2013,34(9): 369-373.
- [2] MARTINS S, JONGEN W, VAN B M. A review of Maillard reaction in food and implications to kinetic modeling[J]. Trends Food Sci Technol, 2001, 11(9): 364-373.
- [3] BRANDS C, ALINGM, VAN B M, et al. Mutagenicity of heated sugar-casein systems: effect of the Maillard reaction [J]. J Agric Food Chem, 2000, 48(6): 2271-2275.
- [4] MRUTHINTI S, SOOD A, HUMPHERY C L, et al. The induction of surface beta-amyloid binding proteins and enhanced cytotoxicity in cultured PC-12 and IMR-32 cells by advanced glycation end products[J]. Neuroscience, 2006, 142(2): 463-473.
- [5] WEI Y, CHEN L, CHEN J. Rapid glycation with D-ribose induces globular amyloid-like aggregations of BSA with high cytotoxicity to SH-SY5Y cells[J]. BMC Cell Biol, 2009, 10(1): 10.
- [6] MUNCH G, APELT J, ROSEMARIE K E, et al. Advanced glycation endproducts and pro-inflammatory cytokines in transgenic Tg2576 mice with amyloid plaque pathology[J]. Neurochemistry, 2003, 86(2): 283-289.
- [7] BAYNES J W, MONNIER V M, AMES J M, et al. The Maillard reaction: chemistry at the interface of nutrition, aging and disease[J]. Annals New York Acad Sci, 2005, 1043: 1-8.
- [8] FLANAGAN J, SINGH H. Conjugation of sodium caseinate and gum arabic catalyzed by transglutaminase[J]. J Agric Food Chem, 2006, 54(19): 7305-7310.
- [9] JONG G A H, KOPPELMAN S J. Transglutaminase catalyzed reactions: impact on food applications[J]. Concise Rev Hypotheses Food Sci, 2002, 67(8): 2798-2806.
- [10] YAN S C B, WOLD F. Neoglycoproteins: in vitro introduction of glycosyl units at glutamine in α -casein using transglutaminase [J]. Biochemistry, 1984, 23(16): 3759-3769.
- [11] 夏秀芳,洪岩,郑环宇,等. 湿法糖基化改性对大豆分离蛋白溶解性和乳化能力的影响[J]. 中国食品学报, 2016, 16(1): 167-172.
- [12] JIANG S J, ZHAO X H. Transglutaminase-induced cross-linking and glucosamine conjugation of casein and some functional properties of the modified product[J]. Int Dairy J, 2011, 21(4): 198-205.
- [13] COLAS B, CAER D, FOURNIER E. Transglutaminase-catalyzed glycosylation of vegetable proteins. Effect on solubility of pea legumin and wheat gliadins[J]. J Agric Food Chem, 1993, 41: 1811-1815.
- [14] 刘金玲,刘晓兰,徐晶,等. TGase催化玉米谷蛋白与壳寡糖糖基化修饰的研究[J]. 食品工业, 2015, 36(9): 52-56.
- [15] RAMEZANI R, ESMAILPOUR M, AMINLARI M. Effect of conjugation with glucosamine on the functional properties of lysozyme and casein[J]. J Sci Food Agric, 2008, 88(15): 2730-2737.
- [16] ZHU C Y, ZHAO X H. Property modification of caseinate responsible to transglutaminase-induced glycosylation and crosslinking in the presence of a degraded chitosan [J]. Food Sci Biotechnol, 2015, 24(3): 843-850.
- [17] JIANG S J, ZHAO X H. Transglutaminase-induced cross-linking and glucosamine conjugation in soybean protein isolates and its impacts on some functional properties of the products[J]. Eur Food Res Technol, 2010, 231(5): 679-689.
- [18] 姜淑娟,冯镇,赵新淮. 酪蛋白的转谷氨酰胺酶促糖基化交联条件及产物性质[J]. 中国乳品工业, 2011, 39(7): 25-28.
- [19] BABIKER E E. Effect of chitosan conjugation on the functional properties and bactericidal activity of gluten peptides[J]. Food Chem, 2002, 79(3): 367-372.
- [20] DIFTIS N, KIOSSEOGLU V. Physicochemical properties of dry-heated soy protein isolate-dextran mixtures [J]. Food Chem, 2006, 96(2): 228-236.

- [21] FU M, ZHAO X H. Structure and property changes of transglutaminase - induced modification of sodium caseinate in the presence of oligochitosan of 5 kDa[J]. *Int J Food Propert*, 2015,19: 2596 - 2607.
- [22] FU M, ZHAO X H. Modified properties of a glycated and cross - linked soy protein isolate by transglutaminase and an oligochitosan of 5 kDa[J]. *J Sci Food Agric*, 2017, 97:58 - 64.
- [23] YAO X T, ZHAO X H. Effects of caseinate deamidation on transglutaminase - induced glucosamine conjugation and crosslinking as well as properties of the treated caseinates [J]. *CyTA J Food*,2015,13(3) :400 - 407.
- [24] TANG C H, SUN X, YIN S W, et al. Transglutaminase - induced cross - linking of vicilin - rich kidney protein isolate; influence on the functional properties and in vitro digestibility[J]. *Food Res Int*, 2008, 41(10) : 941 - 947.
- [25] 宋春丽,陈佳鹏,任健. 糖基化交联反应对酪蛋白胶凝和乳化性质的影响[J]. *中国油脂*, 2017, 42 (2) : 98 - 101.
- [26] SONG C L, ZHAO X H. The preparation of an oligochitosan - glycosylated and cross - linked caseinate obtained by a microbial transglutaminase and its functional properties[J]. *J Dairy Technol*,2014,67(1) :110 - 116.
- [27] YULIYA H, MAURICE N, MIRKO B. Transglutaminase - catalyzed glycosylation of natural actomyosin (NMA) using glucosamine as amine donor; functionality and gel microstructure[J]. *Food Hydrocoll*,2014,36:26 - 36.
- [28] CHEN T H, HEATHER D E, ELEANOR M B, et al. Enzyme - catalyzed gel formation of gelation and chitosan; potential for in situ applications [J]. *Biomaterial*, 2003, 24: 2831 - 2841.
- [29] 宋春丽,陈佳鹏,任健. 糖基化酪蛋白乳液的流变性质及稳定性研究[J]. *中国油脂*,2016,41(9) :28 - 30.
- [30] SONG C L, ZHAO X H. Rheological, gelling and emulsifying properties of a glycosylated and cross - linking caseinate generated by transglutaminase [J]. *Int J Food Sci Technol*,2013,48 :2595 - 2602.
- [31] VILLALONGA R, FERNANDEZ M, FRAGOSO A, et al. Thermal stabilization of trypsin by enzymatic modification with β - cyclodextrin derivatives [J]. *Biotechnol Appl Biochem*, 2003, 38(1) : 53 - 59.
- [32] 马莹. 转谷氨酰胺酶协同壳寡糖修饰乳清蛋白性质研究[D]. 辽宁 大连:大连工业大学,2016
- [33] DAVIDE G, PUI K H, MAURICE N, et al. Conjugation of gluten hydrolysates with glucosamine at mild temperatures enhances antioxidant and antimicrobial properties [J]. *LWT - Food Sci Technol*,2014,57:181 - 187.
- [34] PUI K H, DAVIDE G, MAURICE N, et al. Glycation and transglutaminase mediated glycosylation of fish gelation peptides with glucosamine enhance bioactivity [J]. *Food Chem*,2014,142:285 - 293.
- [35] FAN L, WU H, CAO M, et al. Enzymatic synthesis of collagen peptide - carboxymethylated chitosan copolymer and its characterization [J]. *React Funct Polym*,2014, 76:26 - 31.
- [36] YUAN F, LÜ L T, LI Z X, et al. Effect of transglutaminase - catalyzed glycosylation on the allergenicity and conformational structure of shrimp tropomyosin [J]. *Food Chem*,2017,219:215 - 222.
- [37] OLIVER C M. Insight into the glycation of milk proteins. An ESI - and MALDI - MS perspective (review) [J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*,2011,51(5) :410 - 431.
- [38] FENAILLE F, MORGANS F, PARISOD V, et al. Solid - state glycation of β - lactoglobulin by lactose and galactose; localization of the modified amino acids using mass spectrometric techniques [J]. *J Mass Spectr*, 2004, 39 (1) : 16 - 28.
- [39] SANZ M L, CORZO - MARTINEZ M, RASTALL R A, et al. Characterization and in vitro digestibility of bovine β - lactoglobulin glycated with galactooligosaccharides [J]. *J Agric Food Chem*, 2007, 55(19) : 7916 - 7925.
- [40] 王长远,全越,李玉琼,等. 燕麦麸皮球蛋白的糖基化结构修饰及功能性变化[J]. *食品科学*,2017,38(9) : 143 - 148.

《中国油脂》微博已开通,欢迎广大油友互动交流!

新浪官方微博:中国油脂 <http://e.weibo.com/2841983372/profile>