

谷氨酰胺转氨酶催化蛋白质糖基化的研究进展

李洪波, 李春爽, 张天琪, 李红娟, 于景华

(天津科技大学 食品工程与生物技术学院, 天津 300457)

摘要:谷氨酰胺转氨酶(TGase)作为生物催化剂,催化蛋白质中 γ -谷氨酰胺残基与带有伯氨的糖共价结合,从而改善蛋白的功能特性,减少美拉德反应中副产物的形成。综述了谷氨酰胺转氨酶酶促糖基化的反应机理、作用形式及其产物在食品中的应用,并对谷氨酰胺转氨酶催化蛋白质糖基化的发展前景进行了展望。

关键词:谷氨酰胺转氨酶;酶促糖基化;蛋白质改性;美拉德反应

中图分类号:TS201.1;O652.6 **文献标识码:**A **文章编号:**1003-7969(2020)04-0018-06

Advance in protein glycosylation catalyzed by transglutaminase

LI Hongbo, LI Chunshuang, ZHANG Tianqi, LI Hongjuan, YU Jinghua

(College of Food Engineering and Biotechnology, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: As a biocatalyst, transglutaminase (TGase) can catalyze the covalent binding of γ -carboxamide of glutaminy residues in proteins with sugar containing primary ammonia to improve the functional properties of proteins and reduce the formation of by-products in Maillard reaction. The reaction mechanism, action form and application in food of enzymatic glycosylation of transglutaminase were reviewed, and the prospects of transglutaminase-catalyzed protein glycosylation were also discussed.

Key words: transglutaminase; enzymatic glycosylation; protein modification; Maillard reaction

蛋白质为生命活动提供必需氨基酸,但天然蛋白质在某些功能性质上具有局限性,不能满足加工过程中的需求,可通过物理、化学、酶法、基因工程或化学-酶法结合等技术修饰^[1],从而改变蛋白质的某个理化性质,达到改善蛋白质功能特性的目的。

蛋白质糖基化是化学改性方法中的一种,广泛存在于酒液酿造、香精生产、烟草制造等过程中。该过程是将亲水性的糖与蛋白质分子共价交联,使产物兼具蛋白质大分子的功能特性和糖的亲水性,从而提高蛋白质的溶解性和乳化性,并改善蛋白质的其他功能特性^[2]。美拉德反应是蛋白质糖基化修饰的途径之一,在食品的色、香、味等风味特征中起

重要作用,但经较长时间加热处理或在长期保存的氧化过程中会产生晚期糖基化终末产物(AGEs),该物质可能与一些潜在的慢性病形成有关^[3]。与美拉德反应相比,谷氨酰胺转氨酶(TGase)催化糖基化反应的条件温和,同时利用了酶的专一性,能有效减少AGEs的产生。有研究表明,酶促糖基化产物对AGEs的主要成分 N^{ϵ} -(1-羧甲基)-L-赖氨酸(CML)的抑制率是普通抗氧化剂氨基胍的两倍^[4]。TGase作为生物催化剂,催化蛋白质糖基化从而改善蛋白质的功能特性,使其在食品加工过程中具有良好的发展前景。本文综述了谷氨酰胺转氨酶催化蛋白质糖基化途径,并对反应机理、作用形式及其产物在食品中的应用进行了阐述。

1 谷氨酰胺转氨酶的反应机理

谷氨酰胺转氨酶是一种催化酰基转移反应的蛋白酶,其中酰基供体为蛋白质多肽链中谷氨酰胺残基的 γ -羧酰胺基。当多肽链中赖氨酸残基的 ϵ -氨基为氨基受体时,TGase催化形成 ϵ -(γ -谷氨酰基)赖氨酸异肽键,从而导致蛋白质分子间或分

收稿日期:2019-06-19;修回日期:2019-09-20

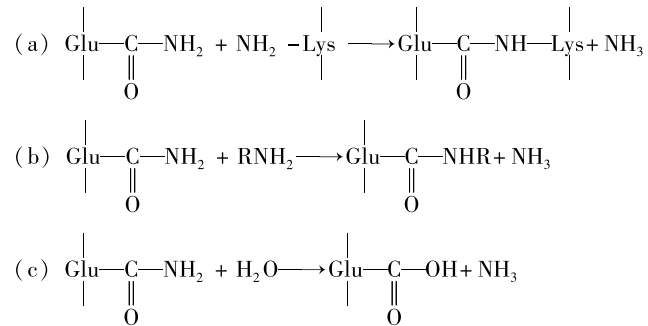
基金项目:天津市教委科研计划项目(2018KJ092)

作者简介:李洪波(1986),女,讲师,博士,研究方向为乳与乳制品(E-mail)hljbobo@tust.edu.cn。

通信作者:于景华,教授,博士(E-mail)yujinghua@tust.edu.cn。

子内的交联。当伯胺类物质为氨基受体时, TGase 催化谷氨酰胺残基与伯胺类物质发生酰基转移反应^[5]。如果小分子伯胺物质为氨基糖时, 即发生蛋白质糖基化反应。但是, 在 TGase 催化蛋白质糖基

化反应时, 蛋白质分子间的交联反应也在进行, 这两个反应存在竞争关系^[6]。若底物中不存在氨基, 水作为酰基受体, 谷氨酰胺残基脱酰胺形成谷氨酸和氨^[7], 反应机理如图 1 所示。



注: (a) 谷氨酰胺残基和赖氨酸残基交联反应; (b) 酰基转移反应; (c) 脱酰胺反应。

图 1 TGase 反应机理

2 TGase 酶促糖基化的作用形式

与谷氨酰胺转氨酶催化蛋白质交联的研究相比, 酶促糖基化反应的研究较少。1984 年, Yan 等^[8]利用动物来源 TGase 催化 β -酪蛋白与胺化麦

芽三糖的连接, 首次证实了 TGase 催化蛋白质糖基化的可行性, 随后开始了酶促糖基化的研究。表 1 列举了 TGase 酶促糖基化的研究进展。

表 1 TGase 酶促糖基化反应研究进展

| 酰基供体 | 酰基受体 | 供受体质量比 | 反应温度/ $^{\circ}\text{C}$ | 反应时间/h | 反应 pH | 改善性能 | 文献 |
|---------------|----------------------------|--------|--------------------------|--------|-----------|--|------|
| 豌豆球蛋白和小麦醇溶蛋白 | 6-氨基-1-硫代- β -D-半乳糖苷 | - | 37 | 过夜 | 8.1 | 等电点处溶解度增加。 | [9] |
| 胰蛋白酶 | β -糊精衍生物 | 1:3 | 35 | 1 | 7.5 | 胰蛋白酶酯化活性最适温度升高 5 ~ 10 $^{\circ}\text{C}$, 热稳定性增加, 减少在碱性 pH 下自溶现象。 | [10] |
| 过氧化氢酶 | 葡聚糖衍生物 | 1:25 | 37 | 2 | 7.0 | 过氧化氢酶活性增加, 热稳定性提高, 抗胰蛋白酶降解能力提高, 也改善了药动力学, 增加半衰期。 | [11] |
| 明胶 | 壳聚糖 | 1:1 | 50 | 0.67 | 6.0 | 10 g/kg 壳聚糖-明胶共聚物溶液对金黄色葡萄球菌的抑菌作用是壳聚糖的 70%。 | [12] |
| 肌动球蛋白 | 氨基葡萄糖 | 1:1 | 37 | 6 | 7.5 | 等电点处溶解度、乳化活性和乳化稳定性提高, 封闭的高密度的凝胶网络结构。 | [13] |
| 乳酸链球菌肽 | 壳聚糖 | 1:200 | 30 | 1.5 | 4.0 | 有效抑制革兰氏阳性菌(枯草芽孢杆菌和金黄色葡萄球菌)和革兰氏阴性菌(大肠杆菌), 与其他交联产物相比在 0.005 ~ 0.01 mg/mL 更安全, 微毒性。 | [14] |
| 胰蛋白酶水解的小麦醇溶蛋白 | 壳聚糖 | 40:1 | 50 | 0.83 | 6.0 ~ 6.5 | 有效抑制革兰氏阳性菌(枯草芽孢杆菌和金黄色葡萄球菌)和革兰氏阴性菌(大肠杆菌和肠炎沙门氏菌)。 | [15] |

注: 表中“-”为尚未明确报道。

进一步研究表明,美拉德反应与酶促糖基化反应存在竞争关系,其中酶促糖基化占主导地位,这可能是由于美拉德反应初期产物不稳定,从而更有利于稳定的酶促糖基化共轭物的形成,并相对减少美拉德副产物的产生^[16],也可能是糖在 TGase 催化作用下与肽链中谷氨酰胺残基的结合位点形成空间位阻,阻碍了谷氨酰胺残基附近的赖氨酸残基与糖的美拉德反应,从而减少 AGEs 的形成^[17]。酶促糖基化过程也会影响蛋白质分子内或分子间的交联。质谱和动态光散射分析表明,蛋白质聚合物的尺寸随着氨基糖浓度的增大逐渐减小。这表明氨基糖和多肽链中赖氨酸残基的 ϵ -氨基竞争氨基受体,从而降低了蛋白质的聚合程度^[6]。

TGase 催化蛋白质糖基化反应主要有 3 种形式:①TGase 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美拉德反应,探究美拉德反应是否可以改善 TGase 交联的蛋白性质,如经 TGase 催化交联后的米渣蛋白与不同相对分子质量的糖进行美拉德反应,与交联蛋白相比,相对分子质量较低的五碳糖-核糖糖基化产物表现出较好的乳化性,乳化活力指数(EAI)提高约 96%,乳化稳定性指数(ESI)提高近 70%^[18]。②蛋白质和糖首先参与美拉德反应,再经 TGase 酶法脱酰胺改性来增加亲水侧链胺基含量,此方法目的是通过美拉德反应掩盖蛋白质中赖氨酸侧链上 ϵ -NH₂,从而减少分子间或分子内交联,使修饰的蛋白既具有糖的亲水性,又能减少高分子聚合物,从而提高溶解度。如将谷朊分别与葡萄糖或葡聚糖进行美拉德反应,经 TGase 处理后得到的产物与非糖基化谷朊相比,溶解性小幅度提高约 4%,持水性在酶反应 1 h 内显著提高了 1 倍^[19]。③TGase 直接催化糖基化反应,以改善蛋白性质。Jiang^[20-21]、Song^[22] 等利用 TGase 催化几种蛋白与带伯胺的糖进行糖基化反应,以研究改性蛋白性质变化,结果表明,与原蛋白相比,其中大豆蛋白-氨基葡萄糖 EAI、ESI 分别增加 19% 和 35%,泡沫稳定性提高 29%,凝胶强度提高 30%,酪蛋白-氨基葡萄糖 EAI 和 ESI 分别增加 10.5% 和 13.8%,泡沫稳定性提高 6.4%,在 pH 6 和 pH 9 下溶解度分别提高 23.9% 和 10.2%,酪蛋白酸钠-壳聚糖 EAI 提高 14.5%,ESI 差别不大,凝胶时间缩短 105~125 min。王晓杰等^[23] 对酶促糖基化改善玉米蛋白性质方面的研究表明,糖基化修饰和体外消化均可以明显改善玉米谷蛋白的抗氧化活性和体外促酒精代谢活性,与原蛋白相比,在

TGase 作用下玉米谷蛋白-壳寡糖体外消化性提高 18.08%。

TGase 催化蛋白交联,形成大分子聚合物。研究表明,高相对分子质量的聚合物和扩展的蛋白质结构会改变交联蛋白的某些功能性质,如溶解性的降低,表面疏水性的增加,表观黏度的增加或凝胶特性的变化^[24]。当糖基化和蛋白交联同时发生时,改性产物的功能受到两个反应的综合影响。如 TGase 催化蛋白质低聚物的形成展开了蛋白质的结构,导致掩埋在三级结构中的疏水氨基酸残基暴露,增加了其表面疏水性^[20]。但结合了氨基糖的蛋白的亲水性却有所增加,这主要是由于氨基糖的结合类似于蛋白质多肽链的一个分支结构,干扰了蛋白质分子二级结构的有序形成,从而得到了开放的二级结构,增加了蛋白的亲水性^[21,25]。总的结果是,改性产品的表面疏水性(或亲水性)降低(或增加)。

一般来说,与交联蛋白相比,蛋白与氨基糖的结合增强了改性产物的功能性质。据报道,蛋白质的疏水性残基可以锚定到乳液或泡沫中油/气滴的表面,同时亲水性残基定向到覆盖在油/气滴表面的水相^[26]。高相对分子质量的蛋白质聚合物及低活性的交联蛋白降低了其泡沫形成能力和乳化活性^[27-28]。但是蛋白质侧链氨基糖的结合会增加蛋白表面的亲水性,并增强蛋白分子水化或水结合能力,致使酶促糖基化的改性蛋白可以形成更加稳定的乳液或泡沫^[20]。同时,蛋白质的交联和酶促糖基化可以通过隐藏过敏表位来协同改善食物蛋白的致敏性^[25,29]。

3 TGase 酶促糖基化蛋白在食品中的应用

TGase 催化蛋白质糖基化利用酶的专一性、高效性、反应条件温和等优势,主要针对蛋白侧链基团或多肽链进行特异性修饰,改善食品蛋白的诸多性质,从而提高食品的品质和营养价值,同时经改性的蛋白质分子或多肽在开发利用加工副产物方面具有重要的经济价值。以下主要介绍了 TGase 催化蛋白质糖基化反应在不同食品中的应用。

3.1 TGase 酶促糖基化蛋白在谷类食品中的应用

面筋蛋白是小麦淀粉的加工副产物,因其含有较多的疏水性氨基酸,溶解度较低,不能满足实际生产需求,可通过酶促糖基化提高其功能特性。Gottardi 等^[30] 利用蛋白酶水解面筋蛋白得到多肽,随后与氨基葡萄糖在不同温度下分别进行美拉德反应和 TGase 催化糖基化反应。结果表明,在 37℃ 下,与美拉德反应结果相比,酶促糖基化修饰产物的抗氧

化性提高近3倍,且具有抗菌性,同时减少了美拉德反应中副产物的产生。

酶促糖基化后,蛋白质的结构也会发生相应的变化,一般表现为蛋白质二级结构更开放,三级结构中酪氨酸分子呈现暴露态,这些构象的变化改善了蛋白质的功能特性。全越^[31]利用 TGase 催化燕麦麸皮中球蛋白与氨基葡萄糖交联,相比未修饰球蛋白,交联后蛋白质的 β -折叠降低, α -螺旋增加, β -转角减少。而在 Zhang 等^[32]修饰黑豆分离蛋白方法中,比较湿热糖基化处理、TGase 催化与壳寡糖糖基化、酶催化蛋白之间交联3个反应分别对原蛋白结构性质的影响,结果表明糖基的导入使得蛋白质形成更加开放的二级结构, α -螺旋、 β -折叠和无规则卷曲减少,有序的二级结构增多。

3.2 TGase 酶促糖基化蛋白在水产品中的应用

酶促糖基化蛋白可以减少水产品的致敏性。研究表明酶促糖基化后的原肌球蛋白的致敏性降低,这是由于赖氨酸和谷氨酰胺等游离氨基酸残基的修饰会改变结合表位,从而影响了抗体的结合能力。同时,酶促产物二级结构的改变也可能导致抗原表位的隐藏或暴露,影响致敏性抗体 IgG/IgE 结合能力^[33]。

酶促糖基化产物在鱼类产品深加工、副产物的利用方面也有一定的应用潜力。Fan 等^[34]用 TGase 催化鱼鳞胶原蛋白与壳聚糖的交联,并作用于小鼠成纤维细胞 L929,结果发现,该交联产物明显促进细胞增殖,增加胶原蛋白的分泌,有助于提高细胞的吸湿性、保水性、抗氧化性。所以该交联作用具有修复皮肤细胞的潜力,可能在化妆品、医药学等领域有更多的应用价值。Hong 等^[35]将酶降解的鱼皮明胶蛋白水解物与氨基葡萄糖在 TGase 存在下糖基化,结果表明,在亚油酸氧化体系中,经碱性蛋白酶水解物在 25℃下糖基化 3.5 h 得到的交联衍生物,抗氧化活性和生物活性比原水解物有所提高,这种糖基化肽可以作为潜在的抗菌剂和抗氧化剂。利用酶促糖基化方法加工水产品副产物可以进一步提高其经济价值,减少资源浪费。

3.3 TGase 酶促糖基化蛋白在乳制品中的应用

酶促糖基化反应可以改善乳蛋白的功能性质。一般情况下,酶促糖基化反应会提高蛋白的乳化性,而 Chen 等^[6]研究酶促糖基化乳清蛋白的乳化性质分别在高盐浓度体系和低盐浓度体系下的变化,结果表明,在两种体系下最理想的结合方式是酶促分子间或分子内交联,即在此反应条件下的乳化活性

和乳化稳定性最高,因形成的大分子有更厚、更强的屏障,能够降低油水乳化体系中的聚结和絮凝。而 TGase 催化糖基化反应会抑制分子间或分子内交联,形成的相对分子质量较小,吸附在油水界面上的蛋白层较薄,因此乳化活性和乳化稳定性较低。

酶促糖基化反应也可以降低牛乳中 β -乳球蛋白的致敏性。Yuan 等^[16]探究 β -乳球蛋白与氨基葡萄糖酶促糖基化对致敏性影响,结果表明,在 37℃下,相比原 β -乳球蛋白,经修饰后的蛋白与致敏性抗体 IgG 和 IgE 结合能力降低,因结构变化使抗原表位隐藏或暴露,从而降低了与致敏性抗体结合能力。

3.4 TGase 酶促糖基化蛋白的其他应用

(1)作为微胶囊壁材。由于海藻油中含有对人体有益的多不饱和脂肪酸,但加入食品中极易氧化,Yuan 等^[36]用大豆蛋白和壳聚糖复合凝聚作为制备海藻油微胶囊壁材,加入 TGase 使壁材的机械强度进一步坚固,提高了微胶囊的氧化稳定性。

(2)制备可食性膜。Di Pierro 等^[37]在 TGase 催化作用下制备壳聚糖-乳清蛋白可食性膜,制成的交联膜在较宽泛的酸碱度范围内都具有较低的溶解性、溶胀度和良好的生物降解性。TGase 的存在也增强膜机械阻力,降低变形能力,对氧和二氧化碳的阻隔效率明显提高,减少了水蒸气的渗透性。在使用 TGase 催化制备壳聚糖-卵清蛋白膜中也得到同样效果,并且经胰蛋白酶水解,表现出优良的酶水解性^[38]。研究发现酶促糖基化反应中加入果胶,会促使化学键交联形成三维网状结构,从而使可食性膜更坚固^[39-40]。总之,TGase 酶促糖基化方式能明显提高膜强度,在可食性膜的制备中具有广阔的发展前景。

(3)作为调味剂的配方成分。在 Hong 等^[41]的实验中,将鸡肉蛋白分别用碱性蛋白酶和风味蛋白酶水解,并对水解产物肽进行改性,即在 TGase 催化下与氨基葡萄糖作用,制备液体调味品成分,进行感官评价。发现 TGase 存在与否对于增强盐味并没有显著性作用,但是酶促糖基化限制了氨基葡萄糖对水解肽的潜在修饰作用,显著抑制 AGEs 的合成,从而减少有毒物质积累。

4 展望

综观谷氨酰胺转氨酶催化蛋白质糖基化反应的应用研究历程,充分利用食品加工副产物是酶促糖基化蛋白质的研究热点,以减少浪费、提高经济价值为出发点,对食品加工副产物进行预处理,通过酶促

糖基化反应改善蛋白功能和结构性质,完善糖基化反应条件,将在食品领域中有更广泛的发展前景。谷氨酰胺转氨酶作为生物催化剂,如何更具安全性地添加到食品中也是今后研究的重点。

参考文献:

- [1] 李维平. 蛋白质工程[M]. 北京:科学出版社,2013:47-58.
- [2] 宋莲军,余留印,黄现青,等. 蛋白质转谷氨酰胺酶途径糖基化研究进展[J]. 中国油脂,2018,43(11):34-38.
- [3] MÉNDEZ J D, XIE J L, AGUILAR - HERNÁNDEZ M, et al. Trends in advanced glycation end products research in diabetes mellitus and its complications[J]. Mol Cell Biochem, 2010, 341(1/2):33-41.
- [4] WANG J, ZOU L, YUAN F Z, et al. Inhibition of advanced glycation endproducts during fish sausage preparation by transglutaminase and chitosan oligosaccharides induced enzymatic glycosylation[J]. Food Funct, 2018, 9(1):253-262.
- [5] GASPAR C, LUSIA A, DE GÓES - FAVONI S P. Action of microbial transglutaminase (MTGase) in the modification of food proteins: a review[J]. Food Chem, 2015, 171:315-322.
- [6] CHEN L, ULLAH N, LI C Y, et al. Incorporated glucosamine adversely affects the emulsifying properties of whey protein isolate polymerized by transglutaminase[J]. J Dairy Sci, 2017, 100(5):3413-3423.
- [7] YOKOYAMA K, NIO N, KIKUCHI Y. Properties and applications of microbial transglutaminase[J]. Appl Microbiol Biot, 2004, 64(4):447-454.
- [8] YAN S B, WOLD F. Neoglycoproteins: in vitro introduction of glycosyl units at glutamines in *beta* - casein using transglutaminase [J]. Biochemistry, 1984, 23(16):3759-3765.
- [9] 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(11):1811-1815.
- [10] VILLALONGA R, MICHAEL F, FRAGOSO A, et al. Thermal stabilization of trypsin by enzymic modification with β - cyclodextrin derivatives [J]. Biotechnol Appl Biochem, 2003, 38(1):53-59.
- [11] VALDIVIA A, VILLALONGA R, DI PIEERO P, et al. Transglutaminase - catalyzed site - specific glycosidation of catalase with aminated dextran [J]. J Biotechnol, 2006, 122(3):326-333.
- [12] SANG L Y, ZHOU X H, YUN F, et al. Enzymatic synthesis of chitosan - gelatin antimicrobial copolymer and its characterisation[J]. J Sci Food Agric, 2010, 90(1):58-64.
- [13] HRYNETS Y, NDAGIJIMANA M, BETTI M. Transglutaminase - catalyzed glycosylation of natural actomyosin (NAM) using glucosamine as amine donor: functionality and gel microstructure [J]. Food Hydrocolloid, 2014, 36:26-36.
- [14] ZHU X M, WU H, YANG J, et al. Antibacterial activity of chitosan graftingnisin: preparation and characterization [J]. React Funct Polym, 2015, 91/92:71-76.
- [15] JIANG W, ZHOU Z M, WANG D, et al. Transglutaminase catalyzed hydrolyzed wheat gliadin grafted with chitosan oligosaccharide and its characterization[J]. Carbohydr Polym, 2016, 153:105-114.
- [16] YUAN F Z, AHMED I, LÜ L T, et al. Impacts of glycation and transglutaminase - catalyzed glycosylation with glucosamine on the conformational structure and allergenicity of bovine *beta* - lactoglobulin [J]. Food Funct, 2018,9(7):3944-3955.
- [17] LIU W X, MA H, FROST L, et al. Pomegranate phenolics inhibit formation of advanced glycation endproducts by scavenging reactive carbonyl species [J]. Food Funct, 2014,5(11):2996-3004.
- [18] 黄正花,朱小燕,李亮,等. 不同分子量的糖对 TG 酶交联米渣蛋白 MRP 结构与功能的影响研究[J]. 食品科学,2017,38(17):53-59.
- [19] 章旭,王淼. 谷朊的糖基化及其谷氨酰胺转氨酶脱酰胺改性研究[J]. 食品与发酵工业,2010,36(11):6-9.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] SONG C L, ZHAO X H. Rheological, gelling and emulsifying properties of a glycosylated and cross - linked caseinate generated by transglutaminase[J]. Int J Food Sci Technol, 2013, 48(12):2595-2602.
- [23] 王晓杰,刘晓兰,林巍,等. 体外消化对壳寡糖糖基化修饰玉米谷蛋白生物活性的影响[J]. 食品工业,2018,39(8):133-137.
- [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] ZHANG Y H, LIU J Q, XU D, et al. Impacts of glu-

- cosamine/oligochitosan glycation and cross-linking by transglutaminase on the structure and in vitro antigenicity of whey proteins[J]. *Int J Dairy Technol*, 2016, 69(2): 169-176.
- [26] HASSAN A B, OSMAN G A, BABIKER E E. Effect of chymotrypsin digestion followed by polysaccharide conjugation or transglutaminase treatment on functional properties of millet proteins[J]. *Food Chem*, 2007, 102(1): 257-262.
- [27] TANG C H, YANG X Q, CHEN Z, et al. Physicochemical and structural characteristics of sodium caseinate biopolymers induced by microbial transglutaminase [J]. *J Food Biochem*, 2005, 29(4):402-421.
- [28] FLANAGAN J, FITZGERALD R J. Functional properties of *Bacillus* proteinase hydrolysates of sodium caseinate incubated with transglutaminase pre- and post-hydrolysis [J]. *Int Dairy J*, 2003, 13(2/3):135-143.
- [29] VILLAS-BOAS M B, FERNANDES M A, ZOLLNER R D, et al. Effect of polymerization with transglutaminase on in vitro digestion and antigenicity of *beta*-lactoglobulin[J]. *Int Dairy J*, 2012, 25(2):123-131.
- [30] GOTTARDI D, HONG P K, NDAGIJIMANA M, et al. Conjugation of gluten hydrolysates with glucosamine at mild temperatures enhances antioxidant and antimicrobial properties [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2014, 57(1):181-187.
- [31] 全越. 转谷氨酰胺酶对燕麦麸皮中球蛋白的结构修饰及其功能特性研究[D]. 黑龙江 大庆:黑龙江八一农垦大学, 2016.
- [32] ZHANG Y L, YIN Y Y, LU S W, et al. Effects of modified processing methods on structural changes of black soybean protein isolate[J]. *Molecules*, 2018, 23(9): 2127[2019-06-18]. <https://doi.org/10.3390/molecules23092127>.
- [33] YUAN F Z, LÜ L T, LI Z X, et al. Effect of transglutaminase-catalyzed glycosylation on the allergenicity and conformational structure of shrimp (*Metapenaeus ensis*) tropomyosin[J]. *Food Chem*, 2017, 219:215-222.
- [34] FAN L H, WU H, ZHOU X Y, et al. Transglutaminase-catalyzed grafting collagen on chitosan and its characterization[J]. *Carbohydr Polym*, 2014, 105:253-259.
- [35] HONG P K, GOTTARDI D, NDAGIJIMANA M, et al. Glycation and transglutaminase mediated glycosylation of fish gelatin peptides with glucosamine enhance bioactivity [J]. *Food Chem*, 2014, 142:285-293.
- [36] YUAN Y, KONG Z Y, SUN Y E, et al. Complex coacervation of soy protein with chitosan: constructing antioxidant microcapsule for algal oil delivery [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2017, 75:171-179.
- [37] DI PIERRO P, CHICO B, VILLALONGA R, et al. Chitosan-whey protein edible films produced in the absence or presence of transglutaminase: analysis of their mechanical and barrier properties [J]. *Biomacromolecules*, 2006, 7(3):744-749.
- [38] DI PIERRO P, CHICO B, VILLALONGA R, et al. Transglutaminase-catalyzed preparation of chitosan-ovalbumin films [J]. *Enzyme Microb Tech*, 2007, 40(3):437-441.
- [39] GIANCONE T, TORRIERI E, PIERRO P D, et al. Role of constituents on the network formation of hydrocolloid edible films[J]. *J Food Eng*, 2008, 89(2):195-203.
- [40] PORTA R, MARINIELLO L, DI PIERRO P, et al. Transglutaminase crosslinked pectin- and chitosan-based edible films: a review[J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2011, 51(3):223-238.
- [41] HONG P K, NDAGIJIMANA M, BETTI M. Glucosamine-induced glycation of hydrolysed meat proteins in the presence or absence of transglutaminase: chemical modifications and taste-enhancing activity [J]. *Food Chem*, 2016, 197:1143-1152.

欢迎订阅2020年度《中国油脂》
欢迎关注中国油脂微信公众号

