

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2019.07.034

# D-氨基半乳糖改性对玉米谷蛋白结构性质及抗氧化活性的影响

Effects of modification by *D*-galactosamine on structural properties and antioxidant activities of corn glutelin

王晓杰<sup>1,2</sup> 曲悦<sup>1,2</sup> 刘晓兰<sup>1,2</sup> 丛万锁<sup>1,2</sup>

WANG Xiao-jie<sup>1,2</sup> QU Yue<sup>1,2</sup> LIU Xiao-lan<sup>1,2</sup> CONG Wan-Suo<sup>1,2</sup>

(1. 齐齐哈尔大学食品与生物工程学院, 黑龙江 齐齐哈尔 161006; 2. 黑龙江省玉米深加工理论

与技术重点实验室, 黑龙江 齐齐哈尔 161006)

(1. College of Food and Biological Engineering, Qiqihar University, Qiqihar, Heilongjiang 161006, China;

2. Key Laboratory of Corn Deep Processing Theory and Technology, Qiqihar, Heilongjiang 161006, China)

**摘要:**为了提高玉米谷蛋白的水溶性,采用谷氨酰胺转氨酶(TGase)和 *D*-氨基半乳糖对玉米谷蛋白进行糖基化改性,研究了糖基化改性对原玉米谷蛋白结构性质及抗氧化活性的影响。红外光谱的测定结果表明,在 TGase 的催化下,玉米谷蛋白与 *D*-氨基半乳糖发生了共价结合。与玉米谷蛋白相比,*D*-氨基半乳糖的共价结合使玉米谷蛋白的游离氨基含量增加 158 mmol/kg·蛋白,热变性温度和变性焓分别降低 9.03 °C 和 68.74 J/g,即糖基化改性使玉米谷蛋白的结构变得无序而松散,热稳定降低;同时,糖基化改性使玉米谷蛋白对 3 种自由基(包括 DPPH、羟基和超氧阴离子)的清除活性、对 Fe<sup>2+</sup> 的螯合能力以及还原力等显著提高,尤其是 Fe<sup>2+</sup> 螯合活性,其 EC<sub>50</sub> 值减少了 1.27 mg/mL。试验结果表明酶法糖基化是一种适合于对玉米谷蛋白进行改性的有效方法。

**关键词:**玉米谷蛋白; *D*-氨基半乳糖;糖基化;热稳定性;抗氧化活性

**Abstract:** The transglutaminase (TGase) and *D*-galactosamine were modified improve the solubility in water of corn glutelin. The effect of the glycosylation modification on structural properties and antioxidant activities of original corn glutelin were evaluated. The result of Fourier transform infrared spectroscopy indicated that *D*-galactosamine was covalently conjugated to corn

**基金项目:**黑龙江省省属高等学校基本科研业务费科研项目(粮头食尾)(编号:LTWSW201739,LTWSW201719);齐齐哈尔市科学技术计划项目(编号:GYTG-201701);黑龙江省省属高等学校基本科研业务费青年创新人才科研项目(编号:135309345)

**作者简介:**王晓杰(1980—),女,齐齐哈尔大学副教授,硕士。

E-mail: wangxiaojie80@163.com

**收稿日期:**2019-02-24

glutelin under the catalysis of transglutaminase. The free amino groups and the denaturation temperature, as well as the enthalpy of thermal denaturation of the glycosylated corn glutelin, decreased by 158 mmol/kg protein and 9.03 °C and 68.74 J/g compared with the original corn glutelin, respectively. These indicated that the structure of corn glutelin became disordered and loose, and the thermal stability of corn glutelin was significantly decreased by glycosylation modification. Meanwhile, three radical scavenging activities (including DPPH, superoxide, hydroxyl), Fe<sup>2+</sup>-chelating capacity, and the reducing power of the glycosylated corn glutelin were increased, and its EC<sub>50</sub> value for Fe<sup>2+</sup>-chelating capacity was decreased by 1.27 mg/mL. The results suggested that enzymatic glycosylation would be an effective method for the modification of corn gluten.

**Keywords:** corn protein; *D*-galactosamine; glycosylation; thermal stability; antioxidant activities

玉米中含有 64%~78% 的淀粉,通常作为生产淀粉的原料。在湿磨法玉米淀粉生产过程中,产生了玉米加工量 6.12% 的玉米蛋白粉。玉米蛋白粉中含有 4 种溶解性不同的蛋白质,分别为醇溶蛋白、谷蛋白、清蛋白和球蛋白<sup>[1]</sup>。其中,玉米谷蛋白是由 20 多种分子量在 11~127 kDa 的蛋白质亚基通过二硫键等紧密结合而形成的巨大、复杂的大分子蛋白质,其不溶于中性水溶液和乙醇溶液,仅溶于稀酸或稀碱溶液<sup>[2]</sup>。玉米谷蛋白水溶性差的特性限制了这一量大、廉价、有优良功能潜力的植物蛋白在食品工业的应用。

目前,为了提高玉米蛋白的水溶性,主要采用化学法对其进行改性处理,包括磷酸化<sup>[3]</sup>、琥珀酰化<sup>[4]</sup>与糖基

化<sup>[5-6]</sup>等。其中,糖基化改性是利用糖类物质的多羟基特性改善食物蛋白质的亲水-亲油平衡,进而改善蛋白质在水相中的溶解性等特性,采用的方法包括美拉德反应和酶法糖基化。其中,酶法糖基化改性具有反应特异性强、反应条件温和、产物食用安全等优点,已成功应用于大豆蛋白<sup>[7]</sup>、酪蛋白<sup>[8]</sup>、乳清蛋白<sup>[9]</sup>、豌豆蛋白<sup>[10]</sup>、燕麦麸皮球蛋白<sup>[11]</sup>等食物蛋白质的改性中,显示出良好的应用优势与前景。

酶法糖基化改性是以转谷氨酰胺酶(TGase)为催化剂,利用其酰基转移能力催化氨基糖与蛋白质中谷氨酰胺残基之间异肽键的形成。玉米谷蛋白中谷氨酰胺残基含量高达34%<sup>[12]</sup>,是酶法糖基化改性的良好底物。但到目前为止,仅见用壳寡糖对玉米谷蛋白进行糖基化改性的报道<sup>[13]</sup>。未见对改性产物的结构和功能性质进行的研究,也未见用其他氨基糖对玉米谷蛋白进行改性的报道。在前期研究工作中,本课题组已经建立了TGase和D-氨基半乳糖改性玉米谷蛋白的反应体系。在此基础上,本试验拟以D-氨基半乳糖糖基化改性玉米谷蛋白为原料,研究糖基化改性对玉米谷蛋白结构性质及抗氧化活性的影响,为糖基化改性玉米谷蛋白在功能性食品领域的应用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

#### 1.1.1 材料与试剂

D-氨基半乳糖:分析纯,上海御略化工有限公司;

TGase:食品级,酶活力1 000 U/g,泰兴市一鸣生物制品有限公司;

邻苯二甲醛、菲洛嗪、硫代巴比妥酸:分析纯,上海生工生物有限公司;

DPPH、2-脱氧-D-核糖:分析纯,美国Sigma公司。

#### 1.1.2 主要仪器设备

差示扫描量热仪:Q-20型,美国TA仪器有限公司;

傅里叶变换红外光谱仪:Spectrum One型,美国Perkin Elmer公司;

双光束紫外可见分光光度计:TU1901型,北京普析通用仪器有限责任公司。

### 1.2 方法

1.2.1 玉米谷蛋白的提取 参照文献<sup>[13]</sup>。玉米蛋白粉经挤压膨化、去淀粉和脱色处理后,用70%乙醇萃取两次。将两次萃取后的沉淀按1:10(g/mL)加入0.1 mol/L NaOH溶液,50~60℃条件下水浴振荡2 h。水浴结束后,4 500 r/min离心10 min,沉淀再用相同条件萃取1次,将两次上清液合并。调节上清液pH至4.5~4.8,4 500 r/min离心10 min,沉淀用70%乙醇静置洗涤两次,水洗两次,取沉淀烘干,获得玉米谷蛋白。

1.2.2 糖基化玉米谷蛋白的制备 向底物浓度为

3 g/100 mL的玉米谷蛋白悬浮液中添加D-氨基半乳糖(酰基供体与酰基受体的物质的量比为1:3),按35 U/g·蛋白的加酶量加入TGase,在pH 7.7、44℃条件下反应4 h。反应结束后,85℃热处理5 min,钝化反应体系中的TGase。冷却至室温,用截断分子量1 000 Da的透析袋除去反应体系中未反应的氨基糖。透析后的样品经冷冻干燥后获得糖基化玉米谷蛋白,贮存在干燥器中备用。

1.2.3 玉米谷蛋白及其糖基化改性产物游离氨基含量的测定 采用邻苯二甲醛(OPA)法<sup>[14]</sup>。取3 mL一定浓度的待测样品,与同体积的OPA溶液混合,反应5 min后测定340 nm处的吸光度值。利用L-亮氨酸标准曲线( $y=2.583x+0.002$ , $R^2=0.999$ )计算样品中游离氨基的含量。

#### 1.2.4 玉米谷蛋白及其糖基化改性产物的红外光谱分析

采用KBr压片法制备两种待测样品,测定波数为4 000~400 cm<sup>-1</sup>范围内的红外光谱,分辨率为4 cm<sup>-1</sup>。

#### 1.2.5 玉米谷蛋白及其糖基化改性产物热稳定性的测定

精确称取2.0 mg样品放入铝盒中,压盖密封后在升温速率10℃/min、温度范围20~190℃的条件下进行DSC扫描。通过变性峰的面积计算热焓值,并得到相关蛋白的变性温度。以密封空铝盒作为对照。

1.2.6 玉米谷蛋白及其糖基化改性产物抗氧化活性的测定 抗氧化活性的测定指标包括3种自由基清除活性(包括DPPH、羟基和超氧阴离子自由基)、Fe<sup>2+</sup>螯合能力以及还原力,测定方法参照文献<sup>[2]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 糖基化改性对玉米谷蛋白结构性质的影响

2.1.1 红外光谱分析 在酶法糖基化改性研究中,普遍采用红外光谱来鉴定氨基糖是否与底物蛋白质发生了共价结合。玉米谷蛋白及其糖基化改性产物的红外光谱图如图1所示。

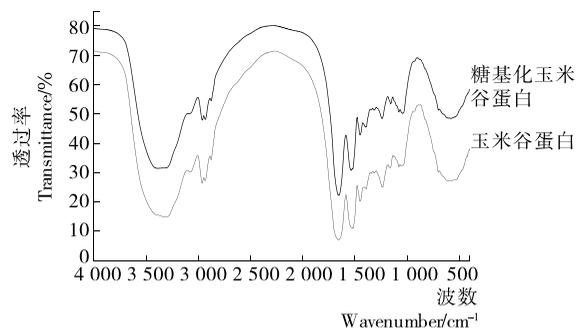


图1 玉米谷蛋白及其糖基化改性产物的傅里叶变换红外光谱图

Figure 1 Fourier transform infrared spectroscopy spectra of corn glutelin and its modified production by the glycosylation

由图 1 可以看出,玉米谷蛋白及其糖基化改性产物的红外光谱图变化趋势基本相同,仅在 1 130~1 200  $\text{cm}^{-1}$  处略有差异,而 1 200~1 000  $\text{cm}^{-1}$  间比较大的吸收峰是由两种 C—O 伸缩振动所引起的,其中一种是属于 C—O—H 的,另一种是糖环的 C—O—C 官能团的伸缩振动和糖环存在的典型特征<sup>[15]</sup>。说明在 TGase 的催化下,*D*-氨基半乳糖与玉米谷蛋白发生了共价结合,但糖基结合量相对较低。

2.1.2 DSC 分析 采用 DSC 考察糖基化改性对玉米谷蛋白热稳定性的影响,结果如图 2 和表 1 所示。

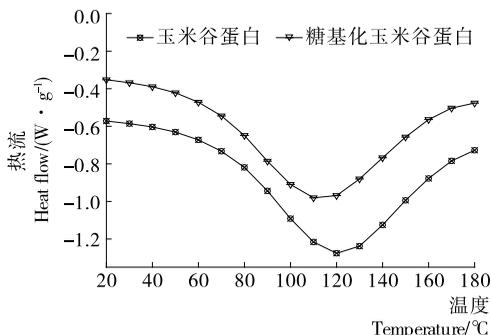


图 2 玉米谷蛋白及其糖基化改性产物的 DSC 曲线  
Figure 2 DSC profile of corn glutelin and its modified production by the glycosylation

表 1 糖基化改性对玉米谷蛋白变性温度和热变性焓的影响

Table 1 Effect of the glycosylation modification on the denaturation temperature and enthalpy of thermal denaturation of corn glutelin ( $n=3$ )

样品名称	变性温度/°C	热变性焓/(J·g <sup>-1</sup> )
玉米谷蛋白	119.90±0.92	280.27±21.14
糖基化玉米谷蛋白	110.87±3.24	211.53±26.87

由图 2 可以看出,与玉米谷蛋白相比,糖基化改性产物的 DSC 曲线变浅,且波谷向左移动。由表 1 可知,玉米谷蛋白的变性温度及变性焓值分别为 119.9 °C 和 280.27 J/g,说明玉米谷蛋白具有较高的热稳定性,与其结构紧密的特点相符。与玉米谷蛋白相比,糖基化改性玉米谷蛋白的变性温度及变性焓分别降低 9.03 °C 和 68.74 J/g,说明糖基化改性使玉米谷蛋白由有序结构转变为无序结构,此时谷蛋白的结构较为松散,热稳定性降低。这一结果与糖基化改性燕麦麸皮中的球蛋白结果<sup>[11]</sup>一致,但与玉米醇溶蛋白的糖基化改性结果<sup>[16]</sup>相矛盾,可能与底物蛋白质的本身结构有关。

2.1.3 游离氨基含量 玉米谷蛋白及其糖基化改性产物的游离氨基含量的测定结果如表 2 所示。

由表 2 可以看出,玉米谷蛋白的游离氨基含量仅为

表 2 糖基化改性对玉米谷蛋白游离氨基含量的影响

Table 2 Effect of the glycosylation modification on the free amino groups content of corn glutelin ( $n=3$ )

样品名称	游离氨基含量/(mmol·kg <sup>-1</sup> ·Prot)
玉米谷蛋白	32.23±0.51
糖基化玉米谷蛋白	190.05±0.04

32 mmol/kg·蛋白,进一步说明了玉米谷蛋白的结构紧密,将含有氨基的酰胺基氨基酸埋藏在分子内部。在糖基化改性过程中,糖基化玉米谷蛋白的游离氨基含量显著增加,达 190 mmol/kg·蛋白,与美拉德反应及大豆酶法糖基化改性的结果相矛盾<sup>[8,17]</sup>,可能是糖基化改性使玉米谷蛋白本身紧密的结构变得松散,使分子内部暴露出的游离氨基的含量远大于糖基化反应损耗的游离氨基的含量,导致虽然酶法糖基化反应发生,但游离氨基含量增加,与 2.1.1 红外光谱分析的结论一致,即 *D*-氨基半乳糖虽然与玉米谷蛋白发生了结合,但结合量较低。

2.2 糖基化改性对玉米谷蛋白抗氧化活性的影响

2.2.1 DPPH 自由基清除率 以玉米谷蛋白为对照,测定不同浓度下糖基化改性玉米谷蛋白对 DPPH 自由基的清除能力,结果如图 3 所示。

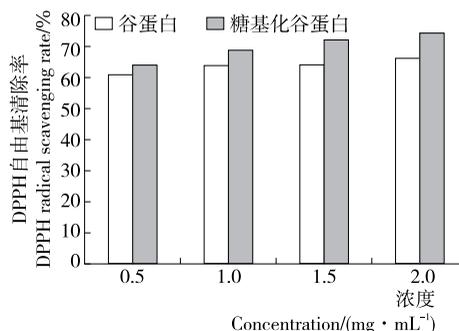


图 3 糖基化改性和蛋白浓度对玉米谷蛋白 DPPH 自由基清除率的影响

Figure 3 Effect of the modification and protein content on the DPPH radical scavenging capacity of corn glutelin

由图 3 可知,玉米谷蛋白及其糖基化改性产物的 DPPH 自由基清除率均随着样品浓度的增加而逐渐增大,且糖基化改性产物清除 DPPH 自由基的能力高于玉米谷蛋白。在浓度为 2 mg/mL 时,糖基化玉米谷蛋白的 DPPH 自由基清除率为 74.49%,比玉米谷蛋白高 8.23%。玉米谷蛋白及其糖基化产物清除 DPPH 自由基的  $EC_{50}$  值分别为 0.71, 0.68 mg/mL,说明 TGase 和 *D*-氨基半乳糖的改性改善了玉米谷蛋白清除 DPPH 自由基的能力。分析可能有两方面的原因:① 糖基化改性产物可以向 DPPH 自由基提供氢原子,使之形成稳定的非活性化合物 DPPH-H;② 糖基化改性使谷蛋白分子结构展开,暴露出

更多的疏水基团,这些疏水性基团更易与脂溶性的 DPPH 自由基反应,从而提升了对 DPPH 自由基的清除能力。

2.2.2 羟基自由基清除率 分别测定玉米谷蛋白及其糖基化改性产物的羟基自由基清除率,结果如图 4 所示。

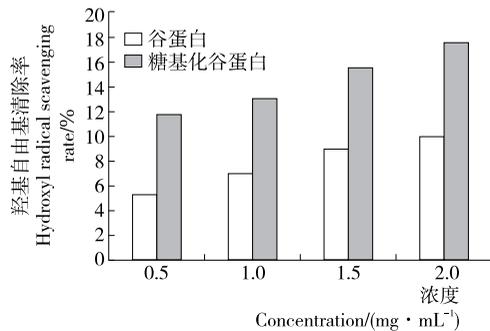


图 4 糖基化改性和蛋白浓度对玉米谷蛋白羟基自由基清除率的影响

Figure 4 Effect of the modification and protein content on the hydroxyl radical scavenging capacity of corn glutelin

由图 4 可知,糖基化改性前后玉米谷蛋白均具有清除羟基自由基的能力,且同一浓度下,糖基化玉米谷蛋白的羟基自由基清除率均高于玉米谷蛋白,可能是糖基化玉米谷蛋白既是良好的供氢体,也是亚铁离子螯合剂,能通过抑制 Fenton 反应而减少羟基和超氧阴离子自由基的生成,提高自由基的清除能力<sup>[18]</sup>。

2.2.3 超氧阴离子自由基清除活性 不同浓度下两种待测样本的超氧阴离子自由基清除率如图 5 所示。

由图 5 可知,与玉米谷蛋白相比,*D*-氨基半乳糖的糖基化改性使玉米谷蛋白清除超氧阴离子自由基的能力增强。在浓度为 2 mg/mL 时,糖基化产物的清除率为 13.26%,比玉米谷蛋白高 6.10%。这可能是因为糖基化改性产物分子中抗氧化活性的氨基酸与 *D*-氨基半乳糖的伯、仲-OH 的协同作用使邻苯三酚在自氧化初期产

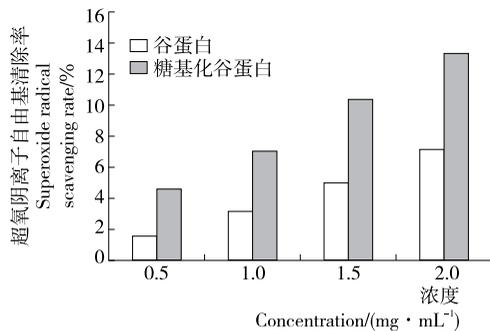


图 5 糖基化改性和蛋白浓度对玉米谷蛋白超氧阴离子自由基清除率的影响

Figure 5 Effect of the modification and protein content on the superoxide radical scavenging capacity of corn glutelin

生的超氧阴离子自由基形成稳定的分子,或者与一些过氧化物的前体物反应阻止过氧化物的生成,从而有效地阻断了自由基的反应链。

2.2.4 还原力 分别测定玉米谷蛋白及其糖基化改性产物在 700 nm 处的吸光度值,以表征两种待测样品的还原能力,结果如图 6 所示。

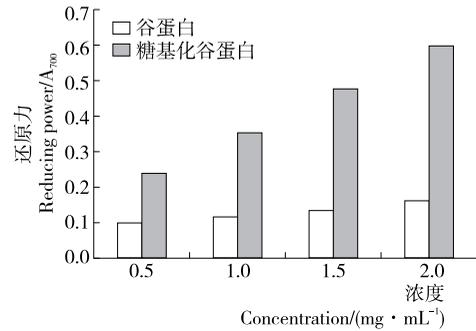


图 6 糖基化改性和蛋白浓度对玉米谷蛋白还原力的影响

Figure 6 Effect of the modification and protein content on the reducing power of corn glutelin

由图 6 可知,玉米谷蛋白具有还原力,但能力较弱,可能与玉米谷蛋白的结构紧密、抗氧化氨基酸埋藏在分子内有关。经 *D*-氨基半乳糖改性后,玉米谷蛋白的还原力显著增加,在浓度为 2 mg/mL 时,糖基化改性产物的还原力为 0.60,比同浓度玉米谷蛋白提高 0.44。这可能是糖基化改性产物可以提供电子将  $\text{Fe}^{3+}$  还原成  $\text{Fe}^{2+}$ ,使  $\text{Fe}^{2+}$  发生 Perl's Prussian 蓝反应,使普鲁士蓝的生成量增加,700 nm 处吸光值升高,糖基化样品的还原力增强<sup>[17]</sup>。

2.2.5  $\text{Fe}^{2+}$  螯合能力 分别测定玉米谷蛋白及 *D*-氨基半乳糖糖基化改性产物的  $\text{Fe}^{2+}$  螯合能力,结果如图 7 所示。

由图 7 可以看出,玉米谷蛋白具有较强的  $\text{Fe}^{2+}$  螯合能力,在浓度为 2 mg/mL 时,其螯合率达 31.23%,可能与玉米谷蛋白的长链结构有关。与玉米谷蛋白相比,糖

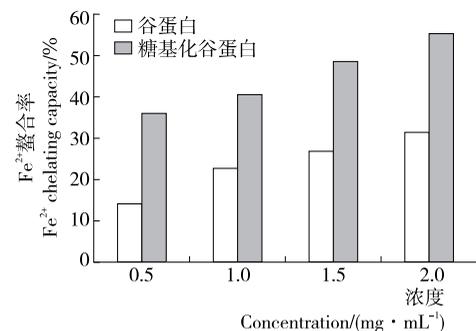


图 7 糖基化改性和蛋白浓度对玉米谷蛋白  $\text{Fe}^{2+}$ -螯合能力的影响

Figure 7 Effect of the modification and protein content on the  $\text{Fe}^{2+}$ -chelating capacity of corn glutelin

基化改性使玉米谷蛋白  $\text{Fe}^{2+}$  螯合能力进一步增加, 两者螯合  $\text{Fe}^{2+}$  的  $EC_{50}$  值分别为 2.94, 1.67 mg/mL。分析可能的原因是糖基化改性使玉米谷蛋白的结构发生改变, 谷氨酰胺残基上的一些配位能力较强的基团例如羰基 ( $-\text{C}=\text{O}$ ) 裸露出来, 更易于与  $\text{Fe}^{2+}$  发生络合反应, 因此糖基化改性玉米谷蛋白可以通过螯合  $\text{Fe}^{2+}$  来阻止  $\text{Fe}^{2+}$  与  $\text{H}_2\text{O}_2$  反应产生羟基自由基, 从而消除自由基对机体造成的氧化性损伤, 与 2.2.2 的结果相一致。

### 3 结论

玉米谷蛋白是结构紧密、分子量巨大而复杂的大分子蛋白质, 其溶于稀酸碱性溶液的特性限制了其在食品工业中的应用。本试验利用 TGase 和 *D*-氨基半乳糖对玉米谷蛋白进行糖基化改性, 研究了糖基化改性对玉米谷蛋白结构性质和抗氧化活性的影响。红外光谱的测定结果表明, 在 TGase 的催化下, 玉米谷蛋白与 *D*-氨基半乳糖发生了共价结合, 但结合量较低。与玉米谷蛋白相比, *D*-氨基半乳糖的共价结合使玉米谷蛋白的结构变得无序而松散, 热稳定性降低; 同时, 糖基化改性使玉米谷蛋白的抗氧化活性显著提高, 说明酶法糖基化是一种适合于对玉米谷蛋白进行改性的有效方法。在此基础上, 可以采用细胞试验和动物试验进一步研究糖基化玉米谷蛋白的毒性及生理功能特性, 这对糖基化玉米谷蛋白能否成功应用于食品工业具有重要意义。

#### 参考文献

[1] GIOIA L D, CUQ B, GUILBERT S. Effect of hydrophilic plasticizers on thermomechanical properties of corn gluten meal[J]. *Cereal Chemistry*, 1998, 75: 514-519.

[2] WANG Xiao-jie, ZHENG Xi-qun, KOPPARAPU N K, et al. Purification and evaluation of a novel antioxidant peptide from corn protein hydrolysate[J]. *Process Biochemistry*, 2014, 49(9): 1 562-1 569.

[3] 罗晶, 涂瑾, 黄婷玉, 等. 玉米醇溶蛋白的磷酸化修饰及结构研究[J]. *现代食品科技*, 2015, 31(8): 88-94.

[4] 吴景, 杨光, 杨鹏飞. 琥珀酰化对玉米醇溶蛋白消化率的影响[J]. *食品工业科技*, 2007, 28(1): 57-59.

[5] 康伟. 糖基化玉米醇溶蛋白对脂肪氧化的抑制作用[J]. *粮食与油脂*, 2018, 31(10): 52-55.

[6] 徐晶, 刘晓兰, 郑喜群. 玉米谷蛋白的美拉德糖基化改性[J]. *食品科技*, 2016, 41(7): 244-250.

[7] FU Miao, ZHAO Xin-huai. Modified properties of a glycosylated and cross-linked soy protein isolate by transglutaminase and an oligochitosan of 5 kDa[J]. *Journal of the Science of Food & Agriculture*, 2016, 97(1): 58-64.

[8] ZHU Chang-yue, WANG Xiao-peng, ZHAO Xin-huai. Property modification of caseinate responsible to transglutaminase-induced glycosylation and crosslinking in the pres-

ence of a degraded chitosan[J]. *Food Science & Biotechnology*, 2015, 24 (3): 843-850.

- [9] CHEN Lin, ULLAH N, LI Chen-yi, et al. Incorporated glucosamine adversely affects the emulsifying properties of whey protein isolate polymerized by transglutaminase[J]. *Journal of Dairy Science*, 2017, 100(5): 3 413-3 423.
- [10] COLAS B, CAER D, FOURNIER E. Transglutaminase-catalyzed glycosylation of vegetable proteins: Effect on solubility of pea legumin and wheat gliadins[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1993, 41(11): 1 811-1 815.
- [11] 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.
- [12] 李丽, 崔波. 玉米蛋白粉的综合利用及研究进展[J]. *粮食科技与经济*, 2010, 35(3): 45-50.
- [13] 刘金玲, 刘晓兰, 郑喜群. 转谷氨酰胺酶催化壳寡糖糖基化修饰玉米谷蛋白[J]. *食品科技*, 2015, 40(9): 9-11.
- [14] 姚欣彤. 酪蛋白和大豆蛋白的脱酰胺和酶法糖基化交联修饰及产物性质[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2014: 46.
- [15] 苏钰琦. 苹果多糖的分离纯化与抗氧化活性深入研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2008: 60-62.
- [16] 曲悦, 王晓杰, 刘晓兰, 等. 酶法糖基化修饰对玉米醇溶蛋白部分结构及流变学性质的影响[J]. *食品与机械*, 2018, 34(9): 11-14, 29.
- [17] 夏秀芳, 王博, 郑幸子, 等. 大豆糖蛋白的抗氧化特性[J]. *食品科学*, 2018, 39(7): 91-97.
- [18] 王晓杰, 刘晓兰, 丛万锁, 等. 壳寡糖酶法糖基化修饰对玉米醇溶蛋白功能性质的影响[J]. *食品科学*, 2018, 39(8): 13-20.

(上接第 66 页)

- [21] YANG Xiao-yin, ZHANG Yi-min, ZHU Li-xian, et al. Effect of packaging atmosphere on storage quality characteristics of heavily marbled beef longissimus steaks[J]. *Meat Science*, 2016, 117: 50-56.
- [22] BAO Yu-long, PER E. Relationship between oxygen concentration, shear force and protein oxidation in modified atmosphere packaged pork[J]. *Meat Science*, 2015, 110(7): 174-179.
- [23] HYLDIG G, NIELSEN D. A review of sensory and instrumental methods used to evaluate the texture of fish muscle[J]. *Journal of Texture Studies*, 2001, 329(3): 219-242.
- [24] DE-HUIDOBRO F R, MIGUEL E, BLAZQUEZ B, et al. A comparison between two methods (Warner-Bratzler and texture profile analysis) for testing either raw meat or cooked meat[J]. *Meat Science*, 2005, 69(3): 527-536.
- [25] GUDMUNDSSON M, HAFSTEINSSON H. Gelatin from cod skins as affected by chemical treatments[J]. *Journal of Food Science*, 1997, 62(1): 37-39.