

## 分子链修饰改善玉米谷蛋白的功能性质

闫爽<sup>1,2,3</sup>, 宋春丽<sup>1,2,3</sup>, 任健<sup>1,2,3</sup>, 刘晓兰<sup>1,2,3</sup>, 陈佳鹏<sup>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. 黑龙江省玉米主食工业化工程技术研究中心, 黑龙江齐齐哈尔 161006; 3. 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)

**摘要:**为了改善玉米谷蛋白的功能性质,研究了碱性蛋白酶酶解及转谷氨酰胺酶(TGase)催化交联协同作用对玉米谷蛋白功能性质的影响。首先利用碱性蛋白酶酶解玉米谷蛋白制备水解度为5%的酶解产物,随后控制TGase催化交联反应程度(反应时间分别为1、2、3 h)得到3种交联产物(GAT1, GAT2, GAT3),测定了酶解产物和交联产物的结构、功能性质和苦味值,并与玉米谷蛋白进行了对比。结果表明:相对于玉米谷蛋白,其酶解产物(GA)及交联产物具有更加疏松的结构;酶解产物及交联产物溶解性显著增强,起泡能力、持水性显著增加,而泡沫稳定性没有显著变化,GA和GAT1的持油性没有显著变化,而GAT2和GAT3的持油性显著增加;玉米谷蛋白本身没有苦味,酶解后苦味值显著增加,但随着蛋白交联程度的加深,苦味值显著降低。研究表明结合碱性蛋白酶酶解和TGase催化交联两种修饰反应能够改善玉米谷蛋白的功能性质,同时一定程度上克服酶解带来的苦味。

**关键词:**玉米谷蛋白;酶解;交联;功能性质;苦味

中图分类号:TS251.6;TS210.1 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2021)10-0024-06

## Effects of molecular chain modification on the functional properties of maize glutelin

YAN Shuang<sup>1,2,3</sup>, SONG Chunli<sup>1,2,3</sup>, REN Jian<sup>1,2,3</sup>,  
LIU Xiaolan<sup>1,2,3</sup>, CHEN Jiapeng<sup>2</sup>

(1. College of Food and Bioengineering, Qiqihar University, Qiqihar 161006, Heilongjiang, China;  
2. Heilongjiang Engineering Research Center of Corn Staple Food Industrialization, Qiqihar 161006, Heilongjiang, China; 3. Heilongjiang Key Laboratory of Corn Deep Processing Theory and Technology, Qiqihar 161006, Heilongjiang, China)

**Abstract:** In order to improve the functional properties of maize glutelin, the synergistic effects of hydrolysis with alkaline protease and cross-linking catalyzed by transglutaminase (TGase) on the functional properties of maize glutelin were investigated. The maize glutelin was firstly hydrolyzed by alkaline protease to obtain the hydrolysates with degree of hydrolysis of 5%, followed by controlled TGase catalytic reaction (reaction for 1, 2, 3 h) to obtain three cross-linked products (GAT1, GAT2 and GAT3). The structure, functional properties and bitterness value of the hydrolysates and cross-linked products were determined and compared with that of maize glutelin. The results showed that compared

with the maize glutelin, the enzymatic hydrolysate (GA) and cross-linked products had a looser structure. The solubility, foaming ability and water-holding capacity of GA and cross-linked products increased significantly, while there was no significant change in foam stability. The oil-holding capacity of GA and GAT1 did not change significantly, while that of GAT2 and GAT3

收稿日期:2020-10-21;修回日期:2021-07-09

基金项目:黑龙江省教育厅基本业务专项“粮头食尾”(LTSW 201741);黑龙江省教育厅科研业务专项(135309370);齐齐哈尔大学研究生创新科研项目(YJSCX2019068)

作者简介:闫爽(1996),女,在读硕士,研究方向为粮食、油脂及植物蛋白工程(E-mail)1027609222@qq.com。

通信作者:宋春丽,教授,博士(E-mail)songchunli@qghu.edu.cn。

increased significantly. The maize glutelin was not inherently bitter, and the bitter value increased significantly after enzymatic hydrolysis, but decreased significantly as the degree of cross-linking increased. The study showed that combining the two modification reactions of hydrolysis with alkaline protease and cross-linking catalyzed by TGase could improve the functional properties of maize glutelin, and at the same time overcome the bitterness caused by enzymatic hydrolysis to a certain extent.

**Key words:** maize glutelin; enzymatic hydrolysis; cross-linking; functional property; bitterness

玉米谷蛋白具有维持小肠屏障等良好的生理功能<sup>[1]</sup>,但其中性及弱碱性环境中溶解性差,限制了玉米谷蛋白在食品加工体系中的应用。而蛋白质改性技术能够改变蛋白质的分子结构,从而有望获得具有特定功能性质和营养特性的新型食品配料。通常,蛋白质限制性酶解可以将蛋白质主肽链断裂,从而有效地提高蛋白质的溶解性、乳化性、起泡性以及其他功能性质<sup>[2-3]</sup>。蛋白质的交联对蛋白质功能性质的改善也有一定的贡献<sup>[4]</sup>,如转谷氨酰胺酶(TGase)催化的蛋白质侧链的赖氨酸及谷氨酰胺残基发生分子内及分子间交联,引起蛋白质结构发生改变,从而影响蛋白质的凝胶性、乳化性、起泡性、黏度和持水能力等<sup>[5]</sup>。在实际应用中,由于蛋白质酶解过程中疏水性氨基酸的暴露,常常会引发苦味<sup>[6-7]</sup>。理论上,TGase催化的交联反应有利于包埋疏水性氨基酸,从而有利于改善酶解产物的苦味<sup>[8]</sup>。

针对玉米谷蛋白溶解性等功能性质差而应用受限的问题,本研究采用碱性蛋白酶酶解和TGase催化交联对蛋白质主侧链进行修饰,改变其结构,从而赋予其新的功能特性,以期在改善玉米谷蛋白功能性质的同时克服酶解产生的苦味,为其开发利用提供一定的理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

玉米蛋白粉,中粮生化能源(龙江县)有限公司;转谷氨酰胺酶(TGase),江苏一鸣精细化工有限公司;碱性蛋白酶,泰兴市一鸣生物制品有限公司;亮氨酸标准品,天津市光复精细化工研究所;邻苯二甲醛(OPA),上海麦克林生化科技有限公司;苦丁茶,杭州艺福堂茶叶有限公司;其他试剂均为分析纯。

XW-80A型涡旋混合器,上海青浦沪西仪器厂;T25型均质机,德国IKA公司;RF-5301PC型荧光分光光度计,日本岛津公司;UV5100型紫外可见分光光度计,上海元析仪器有限公司;CF15RX型高

速离心机,Hitachi公司。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 玉米谷蛋白及其分子链修饰产物的制备

采用Zheng等<sup>[9]</sup>的方法,从玉米蛋白粉中提取玉米谷蛋白。玉米蛋白粉依次经过去除淀粉、色素、醇溶蛋白后,用0.1 mol/L NaOH溶液在料液比1:10、60℃、水浴振荡2 h条件下提取玉米谷蛋白,然后于4 000 r/min离心10 min,收集上清液调节pH至4.8(玉米谷蛋白的等电点),于4 000 r/min离心10 min,收集沉淀并用70%乙醇洗涤两次,再水洗两次后冷冻干燥,即得玉米谷蛋白(G)。

配制质量浓度为6 g/100 mL的玉米谷蛋白溶液,调节pH至8.5,并升温至60℃(反应过程维持恒温),加入0.1%碱性蛋白酶,反应过程中用0.05 mol/L NaOH溶液维持体系pH 8.5恒定,根据pH-Stat法<sup>[10]</sup>测定反应过程中的水解度,当水解度达到5%时,于85℃灭酶5 min终止反应,冷却至室温,冻干,获得酶解产物(GA)。

将酶解产物(GA)配制成蛋白质含量为4 g/100 mL、pH 8.0的溶液,升温至37℃时添加20 U/g(以蛋白质质量为基准)TGase,恒温振荡不同时间(1、2、3 h),反应结束后于85℃灭酶5 min,冷冻干燥,获得交联产物GAT1(反应1 h)、GAT2(反应2 h)和GAT3(反应3 h)。

#### 1.2.2 游离氨基含量的测定

OPA溶液的配制:用0.4 mol/L硼酸缓冲溶液(pH 9.5)溶解2.00 g十二烷基磺酸钠(SDS),加入1 mL 80 g/L的OPA-乙醇溶液和200 μL β-巯基乙醇,用0.4 mol/L硼酸缓冲溶液(pH 9.5)定容于100 mL棕色容量瓶中(现配现用)。

标准曲线绘制:配制0.6 g/L亮氨酸标准储备溶液,稀释制得系列质量浓度的亮氨酸标准工作溶液(0、0.012、0.018、0.024、0.030、0.036 g/L)。分别取系列亮氨酸标准工作溶液3 mL,与同体积的OPA溶液混合均匀后计时5 min,在340 nm处测定吸光度,以亮氨酸的质量浓度为横坐标,吸光度为纵坐标,绘制标准曲线。

样品测定:取 3 mL 待测样品稀释液(代替亮氨酸标准工作溶液),按照标准曲线绘制方法,测定吸光度,再通过标准曲线计算样品中游离氨基的含量,结果以 mol/kg(以蛋白质质量为基准)表示。

### 1.2.3 内源荧光发射光谱分析

用 0.01 mol/L 磷酸盐缓冲液(pH 7.0)配制质量浓度为 0.5 mg/mL 的蛋白质分散液,于 10 000 r/min 离心 15 min,取上清液。在激发波长 390 nm、发射波长 470 nm 以及狭缝宽度 5 nm 条件下,用荧光分光光度计扫描 300~400 nm 的发射光谱。

### 1.2.4 溶解性的测定

用 0.05 mol/L pH 2.0~10.0 的缓冲溶液(pH 2.0~3.0,柠檬酸盐缓冲溶液;pH 4.0~5.0,乙酸盐缓冲溶液;pH 6.0~8.0,磷酸盐缓冲溶液;pH 9.0~10.0,碳酸盐缓冲溶液)分别配制质量浓度为 2 g/L 的蛋白溶液,充分溶解后,于 8 000 g 离心 10 min,取上清液稀释适当倍数后,采用福林酚法分析其蛋白质含量,以待测样品中可溶性蛋白质含量的占比表示其溶解性<sup>[11]</sup>。

### 1.2.5 起泡能力和泡沫稳定性的测定

参照 Hammershøj 等<sup>[12]</sup>的方法,采用搅打法测定样品的起泡性和泡沫稳定性。用 0.05 mol/L 磷酸盐缓冲液(pH 7.0)配制质量浓度为 1 g/L 的蛋白溶液。取 100 mL 蛋白溶液于 250 mL 烧杯中,测量样品体积( $V_L$ ),用均质机以 12 000 r/min 的转速均质 1 min,记录搅打刚停止时的泡沫体积( $V_0$ )以及静置 30 min 时的泡沫体积( $V_{30}$ ),重复测定 3 次。待测样品的起泡能力( $F_c$ )和泡沫稳定性( $F_s$ )分别按式(1)、式(2)计算。

$$F_c = V_0/V_L \times 100\% \quad (1)$$

$$F_s = V_{30}/V_0 \times 100\% \quad (2)$$

### 1.2.6 持水性和持油性的测定

参照 Zhao 等<sup>[13]</sup>的方法测定样品的持水性和持油性。

向干燥的离心管(质量为  $m_0$ )中加入 0.400 0 g 样品(样品质量记为  $m_1$ ),再加入 4.0 mL 蒸馏水,室温下溶胀 30 min,使蛋白质充分水合,随后于 5 000 g 离心 30 min,倒出上清液,称量离心管总质量( $m_2$ ),按式(3)计算样品的持水性( $H_w$ )。

$$H_w = (m_2 - m_0)/m_1 \quad (3)$$

向离心管中加入 0.200 0 g 样品(样品质量记为  $m_3$ ),随后加入 3.0 mL 大豆油(体积记为  $V_1$ ),室温放置 30 min 后,于 5 000 g 离心 30 min,缓慢将上清液倒入 10 mL 量筒中,读取上清液体积( $V_2$ ),按式(4)计算样品持油性( $H_o$ )。

$$H_o = (V_1 - V_2)/m_3 \quad (4)$$

### 1.2.7 苦味值的测定

参照罗鹏等<sup>[14]</sup>的方法,以苦丁茶为基准物质,室温(22℃)条件下由感官评价人员评定样品的苦味值。将含量为 25、50、75、100、150 mg/kg 的苦丁茶标准溶液分别定义苦味值为 2.0、4.0、6.0、8.0、10.0。检验前感官评价人员不得吸烟或吃刺激性较强的食物,以免降低感觉器官灵敏度,检验时取待测液 2.0 mL 放入口中,细心品尝,然后吐出,用温水漱口,再取苦丁茶标准溶液进行品尝,若两者苦味相近,即将该待测液定义为该标准溶液的苦味值(每品尝一种样品后都要用温水漱口)。平行测定 3 次。

## 2 结果与讨论

### 2.1 游离氨基含量

玉米谷蛋白及其修饰产物的游离氨基含量变化见表 1。

表 1 玉米谷蛋白及其修饰产物的游离氨基含量变化

mol/kg

G	GA	GAT1	GAT2	GAT3
0.207 ± 0.006 <sup>a</sup>	0.402 ± 0.002 <sup>c</sup>	0.381 ± 0.008 <sup>d</sup>	0.364 ± 0.003 <sup>c</sup>	0.355 ± 0.004 <sup>b</sup>

注:不同字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。下同

由表 1 可知:玉米谷蛋白经碱性蛋白酶酶解后,游离氨基含量显著提高,由 0.207 mol/kg 提高至 0.402 mol/kg,随后经 TGase 催化交联游离氨基含量又显著降低;TGase 不同催化交联反应时间得到的修饰产物游离氨基含量也存在显著差异,随着反应时间的延长,游离氨基含量显著降低。这是因为碱性蛋白酶是一种内肽酶,可以随机断裂蛋白质的肽键,从而暴露出部分游离氨基,导致游离氨基含量增加,而 TGase 引起的蛋白质中赖氨酸的  $\epsilon$ -氨基

和谷氨酰胺的  $\gamma$ -氨基自交联,会导致游离氨基含量减少<sup>[4,15]</sup>,且随着交联反应时间的延长,交联程度加深,游离氨基含量减少得更多。研究结果说明,通过碱性蛋白酶酶解协同 TGase 催化交联获得了具有不同肽链组成的玉米谷蛋白修饰产物。

### 2.2 蛋白质构象

蛋白质内部色氨酸残基在微环境中的最大吸收波长( $\lambda_{max}$ )变化可反映蛋白质结构的变化<sup>[16]</sup>,故检测了玉米谷蛋白及其修饰产物的内源荧光发射光

谱,结果如图1所示。

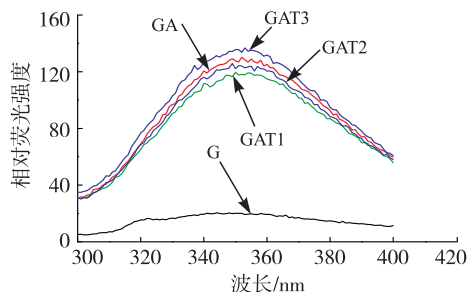


图1 玉米谷蛋白及其修饰产物的内源荧光发射光谱

由图1可知,玉米谷蛋白对应的 $\lambda_{\max}$ 为344 nm,是典型的色氨酸荧光光谱<sup>[17]</sup>,其酶解产物的 $\lambda_{\max}$ 增加至352 nm,即荧光峰发生了不同程度的红移。相对于玉米谷蛋白,交联产物仍表现为红移, $\lambda_{\max}$ 在349~352 nm之间。一般来说, $\lambda_{\max}$ 红移与蛋白质分子荧光发射基团暴露密切相关<sup>[18-19]</sup>。研究结果说明,玉米谷蛋白经碱性蛋白酶酶解及TGase催化交联协同处理后表现为更加松散的结构特征。

### 2.3 溶解性

玉米谷蛋白及其修饰产物的溶解性如图2所示。

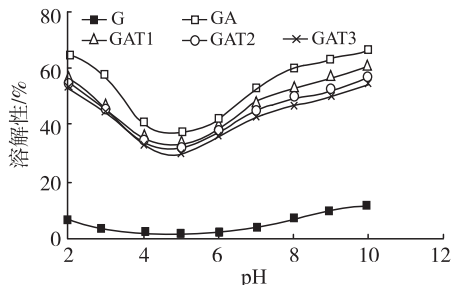


图2 不同pH条件下玉米谷蛋白及其修饰产物的溶解性

由图2可知,玉米谷蛋白在pH 4.8附近溶解性最低,pH偏离4.8时,其溶解性有所提高。蛋白质的溶解性与该蛋白质分子的解离及氨基酸所带电荷密切相关,当pH为4.8时,体系中无正负电荷迁移,净电荷值为0,此时的蛋白质溶解性最差(等电点);当体系pH发生变化,蛋白质分子出现不同程度的解离,甚至改变其自身的带电性,因此蛋白质的溶解性随pH变化而发生改变。在测定的pH范围内,玉米谷蛋白表现为低的溶解性,碱性蛋白酶酶解处理后,其溶解性显著提高。这是因为酶解使蛋白质的肽键断裂,产生了相对分子质量较低的肽段,从而显著提高了该蛋白的溶解性<sup>[9]</sup>。随后的TGase催化交联处理,修饰产物仍表现为较高的溶解性。结果表明,所制备的玉米谷蛋白修饰产物的溶解性显著提高。

### 2.4 起泡能力和泡沫稳定性

玉米谷蛋白及其修饰产物的起泡能力和泡沫稳定性如图3所示。

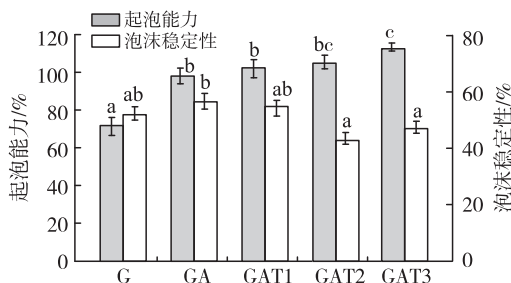


图3 玉米谷蛋白及其修饰产物的起泡能力及泡沫稳定性

由图3可知,玉米谷蛋白的起泡能力为71.64%,酶解及交联产物的起泡能力显著增加,GAT3的起泡能力达到113.4%。酶解及随后的交联显著提高了玉米谷蛋白的溶解性(图2),这有利于蛋白质界面上膜的形成和泡沫的产生,从而增加了起泡能力<sup>[9]</sup>。此外,酶解及交联产物的泡沫稳定性与玉米谷蛋白无显著差异( $P > 0.5$ )。结果表明,碱性蛋白酶酶解协同TGase催化交联有助于改善玉米谷蛋白的起泡能力,但对泡沫稳定性无显著影响。

### 2.5 持水性和持油性

玉米谷蛋白及其修饰产物的持水性及持油性如图4所示。

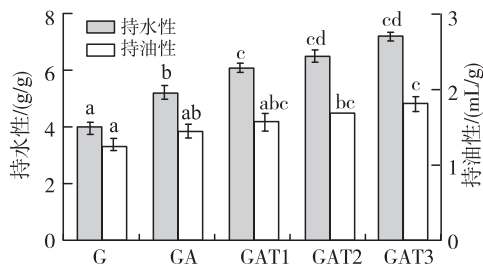


图4 玉米谷蛋白及其修饰产物的持水性及持油性

由图4可知:玉米谷蛋白修饰产物的持水性显著增加,与玉米谷蛋白(持水性3.97 g/g)相比,酶解产物的持水性增加至5.21 g/g,GAT3的持水性增加至7.20 g/g;玉米谷蛋白的持油性(1.26 mL/g)也发生了改变,酶解产物及GAT1的持油性无显著变化,而GAT2和GAT3的持油性则显著增加,GAT3的持油性增加至1.80 mL/g。这是因为酶解过程中产生的亲水性肽段,有利于束缚水分子,导致持水性增加<sup>[20]</sup>;而TGase催化交联作用赋予修饰产物一定的空间网状结构,也有利于对水<sup>[21]</sup>和油<sup>[22-23]</sup>的束缚,从而增加了持水性和持油性。结果说明,碱性蛋白酶酶解以及TGase催化交联协同作用有利于提高玉米谷蛋白的持水性及持油性。

## 2.6 苦味值

玉米谷蛋白及其修饰产物的苦味评价结果见表2。

表2 玉米谷蛋白及其修饰产物的苦味值

G	GA	GAT1	GAT2	GAT3
无	4.00 ± 0.20 <sup>d</sup>	2.00 ± 0.15 <sup>c</sup>	1.30 ± 0.22 <sup>b</sup>	0.67 ± 0.08 <sup>a</sup>

由表2可知,玉米谷蛋白酶解后出现苦味,而经TGase催化交联处理后,苦味值下降,且随着交联程度的增加,苦味值逐渐降低,GAT3的苦味值由酶解产物的4.00下降至0.67。当蛋白质酶解为低相对分子质量肽段时,隐藏在蛋白质分子结构内部的疏水性氨基酸暴露出来,肽链伸展,从而产生苦味<sup>[24]</sup>。而TGase催化交联作用使疏水性氨基酸重新被包埋在分子内部,使得苦味降低<sup>[25]</sup>。结果说明,TGase的交联可以改善玉米蛋白酶解带来的苦味。

## 3 结论

虽然酶解一定程度上有助于改善玉米谷蛋白的功能性质,但是产品常伴有苦味。本研究将酶解及TGase交联修饰相结合,不但改善了玉米谷蛋白的一些功能性质,如提高了玉米谷蛋白的溶解性、持水性、持油性以及起泡能力,而且一定程度上克服了酶解带来的苦味。

## 参考文献:

[1] 李运罡. 玉米谷蛋白功能性质研究[D]. 郑州:河南农业大学, 2009.

[2] JUNG S, MURPHY P A, JOHNSON L A. Physicochemical and functional properties of soy protein substrates modified by low levels of protease hydrolysis[J]. *J Food Sci*, 2005, 70(2): C180 - C187.

[3] JUNG S, LAMSAL B P, STEPIEN V, et al. Functionality of soy protein produced by enzyme - assisted extraction [J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2006, 83(1): 71 - 78.

[4] MARQUEZ G R, DI PIEERO P, MARUMIELLO L, et al. Fresh - cut fruit and vegetable coatings by transglutaminase crosslinked whey protein/pectin edible films [J]. *LWT - Food Sci Technol*, 2017, 75: 124 - 130.

[5] LUISA A, GASPAR C, DE GOES - FAVONI S P. Action of microbial transglutaminase (MTGase) in the modification of food proteins: a review [J]. *Food Chem*, 2015, 171: 315 - 322.

[6] ARAI S, NOGUHI M, KUROSAWA S, et al. Applying proteolytic enzymes on soybean. 6. Deodorization effect of aspergillopeptidase A and debittering effect of *Aspergillus* acid carboxypeptidase [J]. *J Food Sci*, 1970, 35(4): 392 - 395.

[7] MAHASHI K, HUANG L. Bitter peptides and bitter taste

receptors [J]. *Cell Mol Life Sci*, 2009, 66(10): 1661 - 1671.

[8] BABIKER E L F E, FUJISAWA N, MATSUDOMI N, et al. Improvement in the functional properties of glutelin by protease digestion or acid hydrolysis followed by microbial transglutaminase treatment [J]. *J Agric Food Chem*, 1996, 44(12): 3746 - 3750.

[9] ZHENG X Q, WANG J T, LIU X L, et al. Effect of hydrolysis time on the physicochemical and functional properties of corn glutelin by Protamex hydrolysis [J]. *Food Chem*, 2015, 172(1): 407 - 415.

[10] ADLER - NISSEN J. Limited enzymic degradation of proteins: a new approach in the industrial application of hydrolases [J]. *J Chem Technol Biotechnol*, 1982, 32(1): 138 - 156.

[11] 王晓杰, 刘晓兰, 石彦国. 玉米肽的酶法糖基化修饰及产物溶解性的研究 [J]. *中国油脂*, 2019, 44(11): 70 - 74.

[12] HAMMERSHØJ M, QVIST K B. Research note: importance of hen age and egg storage time for egg albumen foaming [J]. *LWT - Food Sci Technol*, 2001, 34(2): 118 - 120.

[13] ZHAO L, ZHANG S, ULUKO H, et al. Effect of ultrasound pretreatment on rennet - induced coagulation properties of goat's milk [J]. *Food Chem*, 2014, 165: 167 - 174.

[14] 罗鹏, 王越, 李雅婷, 等. 碱性蛋白酶 - 风味蛋白酶协同对葵花籽蛋白水解度和苦味值的影响 [J]. *农业机械*, 2013, 26(9): 42 - 45.

[15] YUAN F, AHMED I, LV L, 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.

[16] 张慧莹. 碱性蛋白酶改性对葵花分离蛋白结构与功能特性的影响 [D]. 黑龙江 齐齐哈尔: 齐齐哈尔大学, 2015.

[17] SHARMA V K, KALONIA D S. Steady - state tryptophan fluorescence spectroscopy study to probe tertiary structure of proteins in solid powders [J]. *J Pharm Sci*, 2003, 92(4): 890 - 899.

[18] ZHAO G, LIU Y, ZHAO M, et al. Enzymatic hydrolysis and their effects on conformational and functional properties of peanut protein isolate [J]. *Food Chem*, 2011, 127(4): 1438 - 1443.

[19] FENG X L, LIU H Z, SHI A M, et al. Effects of transglutaminase catalyzed crosslinking on physicochemical characteristics of arachin and conarachin - rich peanut protein fractions [J]. *Food Res Int*, 2014, 62: 84 - 90.

(下转第36页)

- 工业, 2020, 46(1): 118 - 124.
- [8] 杨楠, 罗凡, 费学谦, 等. 干燥方式对油茶籽油中美拉德反应产物及其抗氧化性的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(23): 14 - 18.
- [9] 布冠好, 朱婷伟, 陈复生. 糖基化改性对大豆蛋白抗原性及结构特性的影响[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(1): 34 - 39.
- [10] 何晓叶, 邵克东, 高彦祥, 等. 美拉德反应制备蛋白质-多糖共价复合物的研究进展[J]. 食品工业科技, 2016, 37(6): 377 - 382.
- [11] 张洪云, 谢晶, 邵则淮, 等. 大豆分离蛋白美拉德反应研究进展[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(10): 196 - 202.
- [12] 项惠丹, 许时婴, 王璋. 蛋白质与还原糖美拉德反应产物的抗氧化活性[J]. 食品科学, 2008, 29(7): 52 - 57.
- [13] TAVARES L, SOUZA H K S, GONALVES M P, et al. Physicochemical and microstructural properties of composite edible film obtained by complex coacervation between chitosan and whey protein isolate[J/OL]. Food Hydrocolloid, 2021, 113: 106471 [2020 - 12 - 26]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106471>.
- [14] MENGIBAR M, MIRALLES B, HERAS A. Use of soluble chitosans in Maillard reaction products with  $\beta$ -lactoglobulin. Emulsifying and antioxidant properties[J]. LWT - Food Sci Technol, 2017, 75(1): 440 - 446.
- [15] 邱婷婷, 谭啸, 李若男, 等. 壳聚糖-单糖美拉德反应产物的制备及其在抗菌和抗氧化中的应用研究进展[J]. 食品科学, 2020, 41(19): 327 - 333.
- [16] 赵磊, 王旋, 宋亚旭. 大豆分离蛋白-多糖美拉德反应共聚物的制备及性能研究[J]. 食品科技, 2015, 40(8): 256 - 261.
- [17] WANG Y Y, LIU F G, LIANG C X, et al. Effect of Maillard reaction products on the physical and antimicrobial properties of edible films based on  $\epsilon$ -polylysine and chitosan[J]. Sci Food Agric, 2014, 94(14): 2986 - 2991.
- [18] 齐宝坤, 赵城彬, 杨树昌, 等. 绿豆分离蛋白-葡聚糖接枝反应及产物抗氧化性研究[J]. 中国食品学报, 2018, 18(12): 74 - 80.
- [19] 刘海梅, 陈静, 郝良文, 等. 葡萄糖-牡蛎酶解液美拉德反应体系的抗氧化活性[J]. 食品科学, 2018, 39(1): 47 - 52.
- [20] 董志俭, 李冬梅, 徐黎涵, 等. 反应条件对壳聚糖/果糖美拉德产物抗氧化性和抑菌性的影响[J]. 食品工业科技, 2014, 35(6): 212 - 215.
- [21] 林巍, 曲国强, 高健, 等. 糖对紫花芸豆肽美拉德反应产物抗氧化活性及结构的影响[J]. 食品科技, 2019, 44(11): 298 - 301.
- [22] 杨楠, 罗凡, 费学谦, 等. 油茶籽美拉德反应及其产物抗氧化性[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(2): 67 - 72.
- [23] 杨健, 李芳菲, 武淑影, 等. 大豆蛋白美拉德反应产物的抗氧化特性及其机理[J]. 中国食品学报, 2017, 17(2): 44 - 51.
- [24] SHENG W W, ZHAO X H. Functional properties of a cross-linked soy protein-gelatin composite towards limited tryptic digestion of two extents[J]. J Sci Food Agric, 2014, 93(15): 3785 - 3791.
- [25] KIM H O, EUNICE C Y, LI C. Quantitative structure-activity relationship study of bitter peptides[J]. J Agric Food Chem, 2006, 54(26): 10102 - 10111.
- [25] TANG S C H. Microfluidization as a potential technique to modify surface properties of soy protein isolate[J]. Food Res Int, 2012, 48(1): 108 - 118.

(上接第 28 页)