

高起泡性玉米谷蛋白水解物对戚风蛋糕品质的影响

Effect of high foam ability corn glutelin hydrolysate on quality of chiffon cake

范广琦¹ 刘晓兰² 郑喜群^{1,3} 王俊彤^{1,4} 赵婉宏¹

FAN Guangqi¹ LIU Xiaolan² ZHENG Xiqun^{1,3} WANG Juntong^{1,4} ZHAO Wanhong¹

(1. 黑龙江八一农垦大学食品学院, 黑龙江 大庆 163319; 2. 齐齐哈尔大学食品与生物工程学院, 黑龙江 齐齐哈尔 161006; 3. 黑龙江八一农垦大学国家杂粮工程技术研究中心, 黑龙江 大庆 163319; 4. 粮食副产物加工与利用教育部工程研究中心, 黑龙江 大庆 163319)

(1. Food College, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing, Heilongjiang 163319, China; 2. College of Food and Bioengineering, Qiqihar University, Qiqihar, Heilongjiang 161006, China; 3. Heilongjiang Bayi Agricultural University Coarse Cereal Engineering Technology Research Center, Daqing, Heilongjiang 163319, China; 4. Engineering Research Center of the Ministry of Education for Processing and Utilization of Food By-products, Daqing, Heilongjiang 163319, China)

摘要:目的:为蛋白酶限制性修饰技术在玉米谷蛋白上的应用提供新方向。方法:以玉米蛋白粉为原料,提取玉米谷蛋白,利用响应面法优化碱性蛋白酶及复合蛋白酶水解玉米谷蛋白的酶解条件,探究不同水解物对玉米谷蛋白泡沫性质及其添加量对戚风蛋糕品质的影响。结果:经优化碱性蛋白酶及复合蛋白酶最佳水解条件分别为:pH 8.0、温度 60 ℃、加酶量 3% 和 pH 7.0、温度 50 ℃、加酶量 0.81%。水解物的起泡性及泡沫稳定性均升高。当碱性蛋白酶水解物添加量为 10%,复合蛋白酶水解物添加量为 30% 时,戚风蛋糕的质构特性均为最佳,其膨胀度均达最高,硬度及咀嚼性达最低,弹性及回复性达最大。此外,此添加量下其色度与零添加组最为接近。结论:碱性蛋白酶及复合蛋白酶水解可有效提高玉米谷蛋白的泡沫性质,拓宽其在食品行业中的应用。

关键词:玉米谷蛋白;起泡性;戚风蛋糕;质构

Abstract: Objective: This study aimed to provide a new direction

for the application of protease restriction modification technique in corn protein. **Methods:** Corn glutelin was extracted from corn gluten meal. The response surface method was used to optimize the hydrolysis conditions of corn glutelin hydrolyzed by alcalase and protamex. The effects of different hydrolysates on the foam properties of corn glutelin and the additional amount on the quality of chiffon cake were investigated. **Results:** The optimal hydrolysis conditions for the protease alcalase and protamex on corn gluten were: pH 8, temperature 60 ℃, enzyme dosage 3%, pH 7, temperature 50 ℃, and enzyme dosage 0.81%, respectively. The foaming property and foam stability of hydrolysates were increased. When the amount of alcalase hydrolysate and protamex hydrolysate were 10% and 30%, respectively. The texture characteristics of chiffon cake were the best. At this time, the expansion degree of chiffon cake reached the highest, the hardness and chewability reached the lowest, and the elasticity and recovery reached the maximum. In addition, in this addition amount, its chroma was the closest to that of the 0-addition group. **Conclusion:** Corn glutelin can be effectively hydrolyzed by alcalase and protamex to obtain glutelin hydrolysates with good foaming properties, which will be beneficial to expand its application in the food industry.

Keywords: corn glutelin; foam ability; chiffon cake; texture

基金项目:黑龙江省自然科学基金资助项目(编号:YQ2020C036);黑龙江八一农垦大学学成、引进人才科研启动计划项目(编号:XYB201916);大庆市指导性科技计划项目(编号:zd-2021-76)

作者简介:范广琦,女,黑龙江八一农垦大学在读硕士研究生。

通信作者:郑喜群(1963—),男,黑龙江八一农垦大学教授,博士。

E-mail: zhengxiqun@126.com

王俊彤(1987—),女,黑龙江八一农垦大学讲师,博士。

E-mail: wangjuntong1248@163.com

收稿日期:2023-02-24 **改回日期:**2023-06-30

玉米蛋白粉(corn gluten meal, CGM)为湿磨法生产淀粉时的主要副产物,在中国年产量可达 7 000 万 t,其蛋

白质含量约 60%~70%，其中谷蛋白约占 22%，可作为蛋白质的良好来源^[1-2]。目前主要用于饲料行业或直接废弃，造成了一定的资源浪费以及环境污染。但玉米谷蛋白中含有较高比例的酰胺基氨基酸如谷氨酰胺(33.3%)等^[3]，具有提高机体免疫力^[4]、改善胃肠道功能^[5]及抗氧化等功能性质^[6]，也是天然表面活性剂的良好来源，有利于泡沫在界面上的形成及稳定，因此有着较大的高值化利用空间。

戚风蛋糕主要依靠蛋白质在搅打过程中不断充入空气形成泡沫气腔来维持蛋糕体积^[7-9]。因此所添加蛋白质的起泡性以及泡沫稳定性会直接影响产品的最终品质，将玉米谷蛋白适当处理后搭配蛋清蛋白添加到戚风蛋糕中，改善产品品质的同时，还将实现“双蛋白”均衡饮食理念。蛋清蛋白质起泡能力已经得到充分认可^[10-12]，而关于玉米谷蛋白的起泡性研究较少，由于其氨基酸组成复杂，是一种多以聚合体形式存在的大分子蛋白，不易溶于水，导致其功能特性不能充分发挥^[13-14]，限制了其在食品行业的应用。

研究以起泡性和泡沫稳定性为响应值，采用响应面法优化碱性蛋白酶和复合蛋白酶水解玉米谷蛋白工艺，通过酶解修饰玉米谷蛋白结构，并探讨玉米谷蛋白水解物(corn glutelin hydrolysates, CGH)添加量对戚风蛋糕质构特性、色度等指标的影响，以期在蛋白酶限制性修饰技术在玉米蛋白质上的应用提供新方向，从而促进玉米蛋白质的高值化应用。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

玉米蛋白粉：蛋白质含量为 65%，黑龙江龙凤玉米开发有限公司；

玉米油：黑龙江九三油脂有限责任公司；

蛋糕粉：新乡市新良粮油加工有限责任公司；

碱性蛋白酶(2.5×10⁵ U/g)、复合蛋白酶(3.3×10⁵ U/g)：丹麦诺维信公司；

α-淀粉酶：3.7×10³ U/g，北京奥博星生物技术责任有限公司；

其他试剂均为国产分析纯，另有说明的除外。

1.1.2 主要仪器设备

集热式磁力加热搅拌器：DF-101S 型，济南欧莱博技术有限公司；

酸度计：FE28 型，梅特勒—托利多(上海)有限公司；

高速分散机：T25 型，德国 IKA 公司；

便携式分光测色仪：CM-700d 型，日本柯尼卡美能达公司；

物性分析仪：7A-XTplus100 型，英国 SMS 公司。

1.2 试验方法

1.2.1 玉米谷蛋白的提取 参照许瑞雪等^[15]所述方法稍作修改，将膨化后的 CGM 配制为 pH 6.5、质量浓度 10 g/100 mL 的水溶液，于 65℃ 恒温水浴磁力搅拌器中，加入 1 g/100 g 的 α-淀粉酶反应 2 h 维持 pH 恒定(0.1 mol/L NaOH)。随后煮沸灭酶 15 min，室温下离心(4 000 r/min, 15 min)，所得沉淀用蒸馏水洗涤(3 次)，晾干、粉碎后溶于 70% 的乙醇溶液[料液比 1 : 10 (g/mL)]，60℃ 恒温抽提 2 h，4 000 r/min 离心 15 min(重复抽提 2 次)，所得沉淀晾干、粉碎后以料液比 1 : 10 (g/mL)溶于 0.1 mol/L NaOH，于 60℃ 恒温水浴磁力搅拌器中提取 2 h 后离心(4 000 r/min, 15 min)，将上清液用 HCl(4 mol/L)调节 pH 至等电点，4 000 r/min 离心 15 min，沉淀用 70% 的乙醇和蒸馏水分别洗涤 3 次，并将 pH 调回至 7.0，将所得玉米谷蛋白冻干、粉碎过 80 目筛待用。

1.2.2 起泡性及泡沫稳定性的测定 参照 Yin 等^[16]所述搅打法稍作修改，将样品分散在蒸馏水中制成质量浓度为 10 mg/mL 的蛋白溶液。取 20 mL 样品溶液置于 50 mL 的烧杯中，记录初始体积高度 H_0 ，以 13 500 r/min 高速间歇搅打 2 min，并记录此时泡沫高度 H_1 及室温下静置 30 min 后的泡沫高度 H_2 。分别按式(1)和式(2)计算起泡性(foamability, FA)和泡沫稳定性(foam stability, FS)。

$$F_A = \frac{H_1}{H_0} \times 100\%, \quad (1)$$

$$F_S = \frac{H_2}{H_0} \times 100\%, \quad (2)$$

式中：

F_A ——起泡性，%；

F_S ——泡沫稳定性，%；

H_0 ——样品溶液初始高度，cm；

H_1 ——搅打后 0 min 时的泡沫高度，cm；

H_2 ——室温放置 30 min 后的泡沫高度，cm。

1.2.3 碱性蛋白酶水解条件优化

(1) pH 值的选择：在酶添加量 3%，水解时间 60 min，水解温度 60℃ 的条件下，考察 pH 值(pH 7.0, 8.0, 9.0, 10.0, 11.0)对水解物起泡性及泡沫稳定性的影响，确定水解时的最适 pH 值。

(2) 温度的选择：在酶添加量 3%，水解时间 60 min，pH 8.0 的条件下，考察水解温度(45, 50, 55, 60, 65℃)对水解物起泡性及泡沫稳定性的影响，得到最适水解温度。

(3) 加酶量的选择：在水解时间 60 min，pH 8.0，水解温度 60℃ 的条件下，考察加酶量(1%，2%，3%，4%，5%)对水解物起泡性及泡沫稳定性的影响，以确定最适加酶量。

1.2.4 复合蛋白酶水解条件优化

(1) pH 值的选择：在酶添加量 0.81%，水解时间

120 min,水解温度 50 ℃ 的条件下,考察 pH 值(pH 6,7,8,9,10)对水解物起泡性及泡沫稳定性的影响,确定水解时的最适 pH 值。

(2) 温度的选择:在酶添加量 0.81%,水解时间 120 min,pH 7.0 的条件下,考察水解温度(40,45,50,55,60 ℃)对水解物起泡性及泡沫稳定性的影响,得到最适水解温度。

(3) 加酶量的选择:在水解时间 120 min,pH 7.0,水解温度 50 ℃ 的条件下,考察加酶量(0.61%,0.71%,0.81%,0.91%,1.01%)对水解物起泡性及泡沫稳定性的影响,以确定最适加酶量。

1.2.5 响应面试验设计 在单因素试验的基础上,基于 Box-Behnken 中心组合试验设计原理,选取 pH、温度及加酶量 3 个影响因子为自变量,以起泡性和泡沫稳定性为响应值,设计三因素三水平的响应面分析试验优化玉米谷蛋白的水解条件。

1.2.6 玉米谷蛋白水解物的制备

(1) 碱性蛋白酶水解物的制备:将 1.2.1 所得玉米谷蛋白分散于蒸馏水中,底物质量浓度 5 g/100 mL,碱性蛋白酶按底物质量的 3% 加入,在 pH 8.0、60 ℃ 条件下进行水解,以 0.1 mol/L NaOH 维持 pH 值恒定,并采用 pH-stat 法^[17]测定水解度(degree of hydrolysis, DH),以煮沸 30 min 方式灭酶,水解液于 4 500 r/min 离心 15 min,所得上清液冻干后,待测。

(2) 复合蛋白酶水解物的制备:将 1.2.1 所得玉米谷蛋白分散于蒸馏水中,底物质量浓度 5 g/100 mL,复合蛋白酶按底物质量的 0.81% 加入,在 pH 7.0、50 ℃ 条件下进行水解,期间以 0.1 mol/L NaOH 维持 pH 值恒定,并测定水解度,煮沸 30 min 灭酶,水解液于 4 500 r/min 离心 15 min,所得上清液冻干后,待测。

1.2.7 CGH 在戚风蛋糕制作中的应用 混合物 1:将牛奶、玉米油以 1:1 混合均匀,筛入蛋糕粉(低筋)充分搅拌后加入蛋黄搅拌至顺滑,备用。混合物 2:将 CGH 以添

加量 0,10%,30%,50% 部分替代蛋清制作发泡剂,利用打蛋器搅打发泡剂并分 3 次加入适量白砂糖,搅打至干性发泡,备用。将混合物 1 与混合物 2 翻拌均匀,倒入模具 150 ℃ 烤制 30 min,倒扣脱模冷却。

1.2.8 戚风蛋糕色度的测定 参照李波轮等^[18]所述方法稍作改变,将上述样品沿着横截面切开,用色度仪测定蛋糕表面及芯部的色度值 L^* 、 a^* 、 b^* ,其中 a^* 为红绿偏向, b^* 为黄蓝偏向。

1.2.9 戚风蛋糕质构的测定 参照刘浩男^[19]的方法稍作修改。将上述所得样品切成长、宽、高均为 2 cm 的正方体,采用 P/36 R 探头进行全质构分析。测定参数:测定前速度 5 mm/s,测定速度 10 mm/s,测后速度 10 mm/s,压缩比 40%,引发力 0.049 N,引发类型为自动。

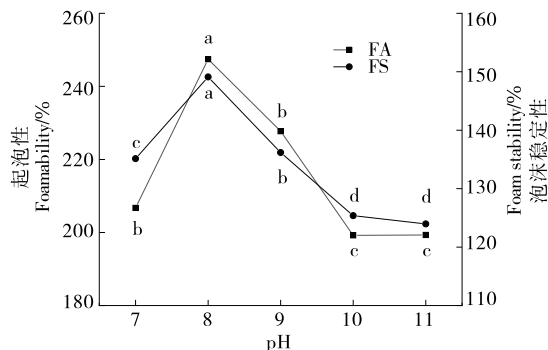
1.3 数据处理

以平均值±标准差表示所得数据,每个试验重复至少 3 次。分别运用 SPSS 17.0、Origin 8.0 及 Dx-8 软件进行 ANOVA 分析($P<0.05$)、图谱处理及响应面分析。

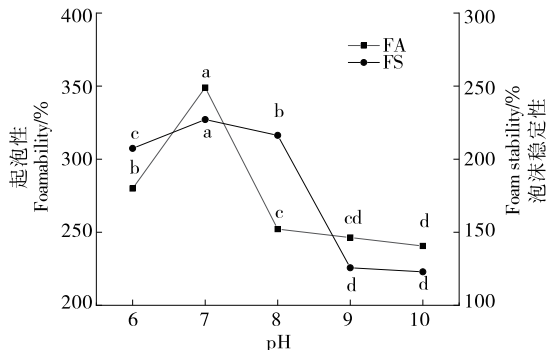
2 结果与分析

2.1 玉米谷蛋白水解条件优化

2.1.1 pH 对蛋白质起泡性及泡沫稳定性的影响 由图 1 可知,随着 pH 的升高,CGH 的 FA 及 FS 均呈先升高后下降趋势。如图 1(a) 所示,当碱性蛋白酶水解 pH 上升到 pH 8.0 时,FA 及 FS 均达最大,分别为(247.39±2.48)%,(149.11±0.96)%,随后水解物的 FA 及 FS 显著下降,在 pH 达 10.0 后逐渐平稳。而当复合蛋白酶水解物的 FA 及 FS 在 pH 上升至 pH 7.0 时达最大,分别为(348.80±1.63)%,(227.10±1.34)%,随着 pH 的继续升高,FA 及 FS 显著下降,在 pH 达 9.0 后逐渐平稳,见图 1(b)。这是由于水解时 pH 偏离了蛋白酶的最适范围,从而造成了蛋白酶自身结构的破坏减弱了蛋白酶的活力,导致其与玉米谷蛋白酶切位点结合能力减弱,未能充分水解谷蛋白分子,使其功能性质发挥不完全导致起



(a) 碱性蛋白酶水解物的起泡性及泡沫稳定性



(b) 复合蛋白酶水解物的起泡性及泡沫稳定性

字母不同表示样品在 $P<0.05$ 水平上有显著差异

图 1 pH 对 CGH 起泡性及泡沫稳定性的影响

Figure 1 Effects of pH on foamability and foam stability of CGH

泡性及泡沫稳定性降低,Liang 等^[20]和赵婉宏等^[21]也发现了相似现象。因此,选择碱性蛋白酶水解 pH 7.0~9.0 及复合蛋白酶水解 pH 6.0~8.0 作为响应面试验的因素水平。

2.1.2 温度对蛋白质起泡性及泡沫稳定性的影响 由图 2(a)可知,当碱性蛋白酶水解温度在 45~55 ℃时其水解物的 FA 和 FS 缓慢升高,当温度达 60 ℃时,其 FA 和 FS 急速升高达到峰值,分别为 $(248.28 \pm 2.49)\%$, $(146.62 \pm 1.10)\%$,温度继续升高至 65 ℃时,其 FA 和 FS 显著下降。由图 2(b)可知,当复合蛋白酶水解温度在 40~50 ℃时,水解物的 FA 和 FS 急速上升并在温度为 50 ℃时达最大值,分别为 $(353.73\% \pm 0.89)\%$, $(230.29 \pm 1.15)\%$,当温度继续升高至 55 ℃后其 FA 和 FS 缓慢降低。这是由于温度的高低直接影响酶活性的变化,蛋白酶在最适温度条件下表现出最大酶活,偏离最适温度条件酶活性受到抑制,催化效果减弱,水解效率降低,从而导致其水解物的起泡性及泡沫稳定性降低,与郑志强等^[22]水解小麦蛋白时所得结果一致。因此,选择碱性蛋白酶水解温度 55~65 ℃及复合蛋白酶水解温度 40~50 ℃作为响应面试验的因素水平。

2.1.3 加酶量对蛋白质起泡性及泡沫稳定性的影响 如图 3 所示,随着加酶量的增加,CGH 的 FA 和 FS 均呈先增大后减小的变化趋势。由图 3(a)可知,当碱性蛋白酶的 E/S 在 1%~3% 时,水解物的 FA 和 FS 随 E/S 的升高快速上升,当加酶量达 3% 时其 FA 和 FS 达最大值,分别为 $(252.29 \pm 0.66)\%$, $(152.44 \pm 1.67)\%$,随后不断下降。而当复合蛋白酶加酶量为 0.81% 时[图 3(b)],其水解物的 FA 和 FS 达最高,分别为 $(358.08 \pm 2.92)\%$, $(234.05 \pm 3.78)\%$ 。说明在上述条件下,酶与底物已基本处于饱和状态,继续增加会导致酶与底物处于过饱和状态,反而抑制了酶的催化作用,从而使得水解物的起泡性和泡沫稳定性降低,Klost 等^[23]在水解豌豆蛋白时也发现了这种现象。因此,选择碱性蛋白酶加酶量 2%~4% 及复合蛋白酶加酶量 0.71%~0.91% 作为响应面试验的因素水平。

2.2 响应面优化试验

在单因素试验基础上进行响应面试验分析,各因素水平见表 1。

根据 Box-Behnken 所设计的响应面试验方案进行试验,所得结果见表 2。并进行二次多元回归拟合,碱性蛋

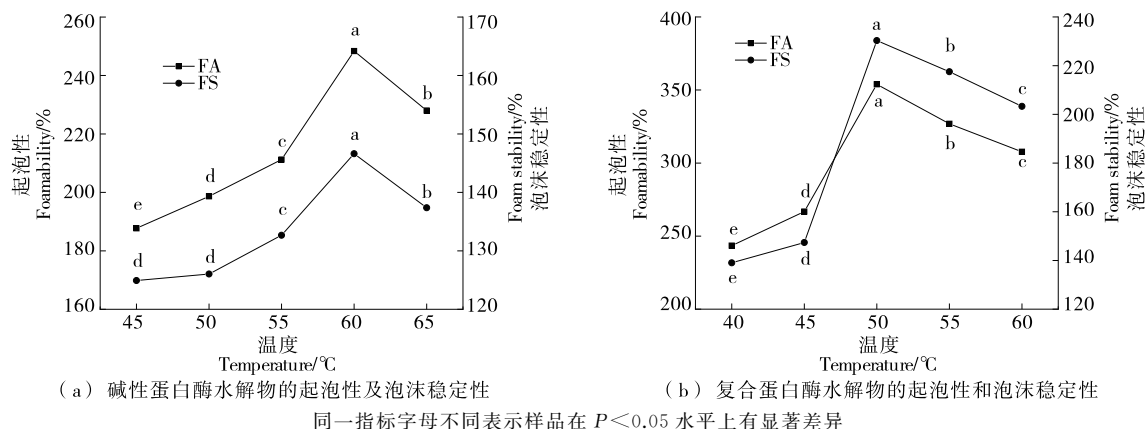


图 2 温度对 CGH 起泡性及泡沫稳定性的影响

Figure 2 Effects of temperature on foamability and foam stability of CGH

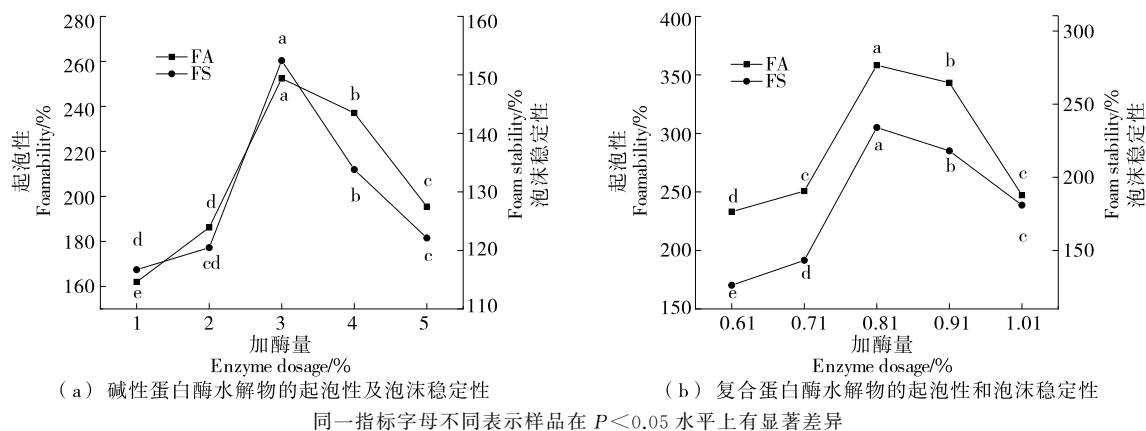


图 3 加酶量对 CGH 起泡性及泡沫稳定性的影响

Figure 3 Effects of enzyme dosage on foamability and foam stability of CGH

白酶及复合蛋白酶所得起泡性(Y_1)及泡沫稳定性(Y_2)大小的标准回归方程分别为:

(1) 碱性蛋白酶水解物所得标准回归方程:

$$Y_1 = 250.95 + 2.86A + 2.8B + 9.11C - 1.27AC - 10.25A^2 - 11.03B^2 - 13.75C^2 \quad (R^2 = 0.993\ 5, R^2_{\text{Adj}} = 0.985\ 1),$$

(2) 复合蛋白酶水解物所得标准回归方程:

$$Y_1 = 354.27 - 5.24A + 9.37B + 15.4C - 1.25AB - 28.6A^2 - 19.99B^2 - 20.15C^2 \quad (R^2 = 0.997\ 2, R^2_{\text{Adj}} = 0.993\ 5),$$

(3) 碱性蛋白酶水解物所得标准回归方程:

$$Y_2 = 235.28 - 3.18A + 6.69B + 9.26C - 7.18AB + 0.5AC + 4.93BC - 13.56A^2 - 18.99B^2 - 13.63C^2 \quad (R^2 =$$

$$0.952\ 7, R^2_{\text{Adj}} = 0.891\ 9).$$

对上述回归模型进行方差分析,结果如表 3 及表 4 所示。碱性蛋白酶及复合蛋白酶所得回归模型显著均为 $P < 0.01$,失拟项不显著分别为 0.58、0.74、0.79 及 0.06,说明方程与实际情况相符且对试验拟合良好,故可用此回归模型对试验结果进行分析。通过响应面分析得到碱性蛋白酶最佳工艺组合为:pH 8.0,酶解温度 60 ℃,加酶量 3%,在此条件下进行 3 次重复验证实验,测得碱性蛋白酶水解物的 FA 为 $(247.45 \pm 3.90)\%$,FS 为 $(149.94 \pm 3.47)\%$,与理论预测值基本相符;复合蛋白酶最佳工艺组合为:pH 7.0,酶解温度 50 ℃,加酶量 0.81%,在此条件下进行 3 次重复验证实验,测得复合蛋白酶水解物的 FA 为 $(350.57 \pm 2.83)\%$,FS 为 $(228.39 \pm 2.90)\%$,与理论预测值相近,说明响应面优化试验所得的最佳酶解工艺参数可靠。

表 1 响应面试验因素及水平表

Table 1 Response surface test factors and level table

因素	碱性蛋白酶			复合蛋白酶		
	A pH	B 温度/℃	C 加酶量/%	A pH	B 温度/℃	C 加酶量/%
—1	7.0	55	2	6.0	45	0.71
0	8.0	60	3	7.0	50	0.81
1	9.0	65	4	8.0	55	0.91

表 2 响应面试验设计及结果

Table 2 Response surface test design and results

试验号	A	B	C	碱性蛋白酶		复合蛋白酶	
				FA/%	FS/%	FA/%	FS/%
1	0	—1	1	231.85	138.53	319.53	197.52
2	0	0	0	249.32	149.39	307.29	194.83
3	0	1	1	237.44	140.10	294.74	195.62
4	0	—1	—1	214.91	131.87	339.53	220.88
5	0	0	0	253.29	151.24	353.54	230.48
6	1	0	1	237.65	138.87	308.73	197.94
7	0	1	—1	220.50	135.65	321.55	223.90
8	0	0	0	250.85	150.52	288.73	194.31
9	1	1	0	235.97	142.00	301.55	196.26
10	—1	0	1	235.75	138.53	357.16	236.37
11	1	0	—1	220.71	134.42	325.54	218.57
12	0	0	0	249.38	148.90	354.17	233.68
13	1	—1	0	230.38	140.43	350.76	238.82
14	—1	—1	0	223.38	140.08	355.73	237.03
15	—1	0	—1	213.72	134.08	285.50	196.61
16	—1	1	0	228.97	141.65	316.30	221.55
17	0	0	0	251.93	150.62	292.30	195.92

表 3 碱性蛋白酶回归模型方差分析
Table 3 Variance analysis of alcalase regression model

变异来源	平方和		自由度	均方		F 值		P 值	
	FA	FS		FA	FS	FA	FS	FA	FS
模型	2 749.42	633.49	9	305.49	70.39	118.34	100.44	<0.01	<0.01
A	65.49	0.24	1	65.49	0.24	25.37	0.34	<0.01	0.58
B	62.50	9.01	1	62.50	9.01	24.21	12.86	<0.01	0.01
C	663.39	50.05	1	663.39	50.05	256.98	71.42	<0.01	<0.01
AB	-4.55E-13	0.00	1	-4.55E-13	0.00	-1.76E-13	0.00	1.00	1.00
AC	6.48	0.00	1	6.48	0.00	2.51	0.00	0.16	1.00
BC	-4.55E-13	1.22	1	-4.55E-13	1.22	-1.76E-13	1.74	1.00	0.23
A ²	442.22	88.25	1	442.22	88.25	171.30	125.93	<0.01	<0.01
B ²	512.33	85.86	1	512.33	85.86	198.46	122.51	<0.01	<0.01
C ²	795.85	347.20	1	795.85	347.20	308.29	495.41	<0.01	<0.01
残差	18.07	4.91	7	2.58	0.70				
失拟项	6.50	1.22	3	2.17	0.41	0.75	0.44	0.58	0.74
纯误差	11.57	3.68	4	2.89	0.92				
总离差	2 767.49	638.40	16						

表 4 复合蛋白酶回归模型方差分析
Table 4 Variance analysis of protamex regression model

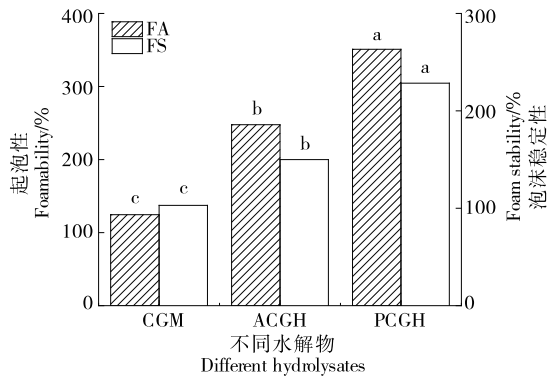
变异来源	平方和		自由度	均方		F 值		P 值	
	FA	FS		FA	FS	FA	FS	FA	FS
模型	10 434.65	4 851.22	9	1 159.41	539.02	273.75	15.67	<0.01	<0.01
A	220.40	80.90	1	220.40	80.90	52.04	2.35	<0.01	0.17
B	702.94	358.32	1	702.94	358.32	165.97	10.42	<0.01	0.01
C	1 897.28	685.24	1	1 897.28	685.24	447.97	19.92	<0.01	<0.01
AB	6.28	206.35	1	6.28	206.35	1.48	6.00	0.26	0.04
AC	0.00	0.99	1	0.00	0.99	0.00	0.03	1.00	0.87
BC	0.00	97.32	1	0.00	97.32	0.00	2.83	1.00	0.14
A ²	3 445.19	774.40	1	3 445.19	774.40	813.45	22.52	<0.01	<0.01
B ²	1 683.33	1 517.88	1	1 683.33	1 517.88	397.46	44.13	<0.01	<0.01
C ²	1 709.10	781.85	1	1 709.10	781.85	403.54	22.73	<0.01	<0.01
残差	29.65	240.76	7	4.24	34.39				
失拟项	6.30	198.38	3	2.10	66.13	0.36	6.24	0.79	0.06
纯误差	23.35	42.38	4	5.84	10.60				
总离差	10 464.30	5 091.99	16						

2.3 CGH 的起泡性与泡沫稳定性

根据响应面试验所得最佳酶解条件对玉米谷蛋白进行水解,测得碱性蛋白酶水解度为(15.75±0.68)%,复合蛋白酶水解度为(15.55±0.68)%,此时的起泡性和泡沫稳定性如图 4 所示。

泡沫的形成取决于蛋白质分子在气/水界面上的迁移、展开和重排,对食品的形态及风味有着重要作用。蛋白质的起泡性与其溶解性和分子的界面张力等性质有

关,而泡沫稳定性则由蛋白质膜的厚度与韧性等性质决定^[24-25]。由图 4 可知,CGH 的 FA 和 FS 均显著高于原玉米谷蛋白。碱性蛋白酶水解物(ACGH)的 FA 为(247.00±3.90)%,较未水解的谷蛋白提高了约 2.0 倍,FS 为(163.35±3.57)%,提高了 1.6 倍左右。复合蛋白酶水解物(PCGH)的 FA 和 FS 分别为(350.57±2.83)%,(228.39±2.90)%,分别较原谷蛋白样品提升了 2.8 倍和 2.2 倍左右。由此可见,两种蛋白酶水解都能显著提高玉



同一指标字母不同表示样品在 $P < 0.05$ 水平上有显著差异

图4 CGH的起泡性及泡沫稳定性

Figure 4 Foaming property and foam stability of CGH

米谷蛋白的起泡性和泡沫稳定性 ($P < 0.05$)。Ren 等^[26]水解向日葵蛋白分离物时得到了相似的结果,且过度水解会对泡沫性质产生不利影响。

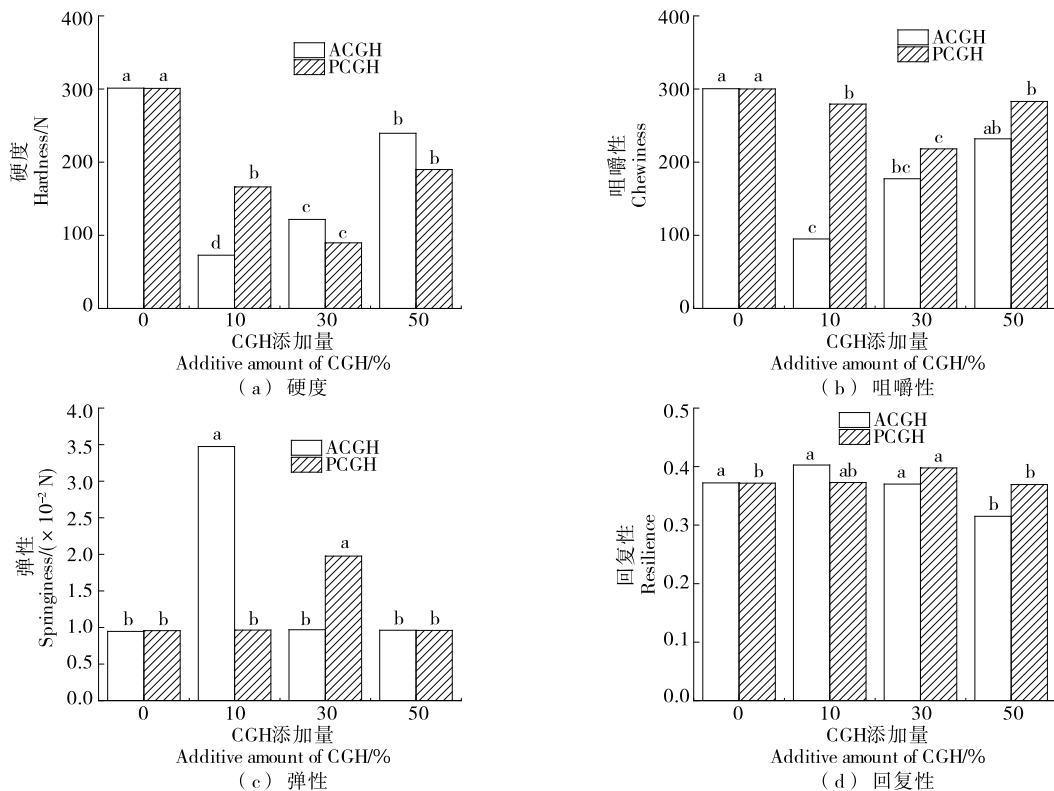
2.4 CGH添加量对戚风蛋糕品质的影响

2.4.1 对质构特性的影响 蛋糕气孔的膨胀程度主要受烘焙过程中的加热速率、 CO_2 生成量及蛋白质变性等引起的结构变化所影响^[27]。在焙烤过程中,添加了CGH后能加速蛋糕糊气泡周围的蛋白质发生变性、交联,使得制作过程中搅打充入的气体能稳定地存在于蛋糕糊体系

中,增加了蛋糕糊的稳定持气能力,从而提高了戚风蛋糕的膨胀度。

由图5(a)、图5(b)可知,添加CGH后戚风蛋糕的硬度及咀嚼性明显降低,呈先降低后升高的趋势。其硬度及咀嚼性在ACGH添加量为10%时降到最低,分别为 (72.73 ± 12.32) N 和 94.95 ± 12.87 ,较零添加组降低了约4.1倍和3.2倍,当ACGH添加量继续升高至30%~50%时其硬度及咀嚼性明显升高但仍显著低于零添加组。而PCGH添加量为10%时其硬度及咀嚼性均较零添加组显著降低,当添加量为30%时均达最低 $[(89.71 \pm 4.22)$ N、 $218.20 \pm 4.52]$,分别降低了3.4倍和1.4倍左右,而当添加量升高至50%时,其硬度及咀嚼性则再一次升高但仍低于零添加组。

由图5(c)、图5(d)可知,随着CGH添加量的增多其弹性及回复性呈先增加后下降的趋势,在ACGH添加量为10%时优于零添加组达最大,为 (0.0347 ± 0.0017) N 和 0.40 ± 0.03 ,分别增长了约3.7倍和1.1倍。当添加量继续增大至30%~50%时其弹性与零添加组相比差异不显著,且在添加量为50%时其回复性显著低于零添加组。在PCGH添加量为30%时达最大,分别为 (0.0198 ± 0.0002) N 和 0.40 ± 0.05 ,增大了2.1倍与1.1倍左右。当其添加量低于或高于30%时弹性及回复性与零添加组相比差异均不显著。这是由于CGH的添加有助于维持



同一水解物不同添加量之间字母不同表示样品在 $P < 0.05$ 水平上有显著差异

图5 CGH添加量对戚风蛋糕质构特性的影响

Figure 5 Effects of different CGH addition amount on texture characteristics of chiffon cake

蛋糕糊中的凝胶网络结构,使戚风蛋糕更加柔软,有助于其弹性及回复性的提升^[28]。此外,有研究^[29]表明,蛋白质水解物中的亲水基团与直链或支链淀粉在糊化过程中竞争水分子,由于支链淀粉链的流动性有限,造成糊化不足可减少淀粉回生,并且蛋白质水解物表面所带电荷可能通过离子键和氢键形成的空间效应阻碍支链淀粉微晶的形成,抑制淀粉的长期回生,从而降低戚风蛋糕的硬度。朱琳等^[30]在制作草鱼多肽面包时也发现水解物的增加会使其弹性上升。

2.4.2 对色度的影响 由表 5 可知,戚风蛋糕的表面色度差异较为明显,在 ACGH 添加量为 10% 时其色度与零添加组差异最小。随着 ACGH 添加量的增加,戚风蛋糕表面的 L^* 、 a^* 及 b^* 值均显著降低,说明其蛋糕亮度减

小、绿调增强、黄度降低。而戚风蛋糕芯部的 L^* 和 b^* 值随 CGH 添加量的增大显著升高,但戚风蛋糕芯部的 a^* 值显著降低即蛋糕芯部亮度、黄度增强,红调减弱。当 PCGH 添加量达 30% 时,其色度与零添加组最相近,继续增加 PCGH 添加量其表面 L^* 值显著降低, a^* 、 b^* 值显著增大,表明其蛋糕亮度减弱,红调及黄度增加;芯部 L^* 、 b^* 值显著降低而 a^* 值显著增加,代表其蛋糕芯部亮度及黄度降低,红调升高。由于受蛋糕制作过程中热处理影响,美拉德反应产物对其颜色影响较大,并且氨基酸的种类等对美拉德反应的速率、途径及终产物的影响很大,从而影响蛋糕表面及内部的色度^[31],随水解物的增多美拉德反应增强,可导致其亮度降低,杨晓钊等^[32]制作扁桃仁蛋糕时也有同样发现。

表 5 CGH 添加量对戚风蛋糕色度的影响[†]

Table 5 Effects of CGH addition amount on chroma of chiffon cake

水解物	添加量/ %	表面			芯部		
		L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*
ACGH	0	75.34±1.06 ^{ab}	6.25±1.53 ^a	44.29±1.11 ^a	87.48±0.40 ^a	-4.45±0.29 ^d	31.54±0.59 ^a
	10	78.46±3.19 ^a	4.70±1.94 ^a	35.59±3.50 ^b	84.49±0.23 ^a	-2.86±0.07 ^c	-2.86±0.07 ^c
	30	81.41±1.76 ^a	-0.53±0.18 ^b	35.42±3.25 ^b	82.04±0.71 ^{ab}	-1.00±0.08 ^b	28.46±0.38 ^b
	50	69.81±5.77 ^b	-1.86±0.44 ^b	31.90±2.87 ^b	77.51±1.91 ^b	0.96±0.07 ^a	26.02±0.25 ^c
PCGH	0	75.34±1.06 ^{ab}	6.25±1.53 ^a	44.29±1.11 ^a	87.48±0.40 ^a	-4.45±0.29 ^d	31.54±0.59 ^a
	10	78.75±2.98 ^b	1.90±0.52 ^b	38.54±1.67 ^b	85.27±0.61 ^c	-2.72±1.03 ^a	27.23±0.86 ^c
	30	75.53±1.04 ^b	6.58±0.35 ^a	44.13±1.86 ^a	86.55±1.27 ^{ab}	-3.15±0.10 ^c	31.48±0.22 ^{ab}
	50	83.44±1.20 ^a	2.04±0.77 ^b	35.97±4.21 ^b	84.43±0.46 ^d	-2.37±0.42 ^{ab}	26.38±0.10 ^d

† 同一水解物不同添加量之间字母不同表示样品在 $P<0.05$ 水平上有显著差异。

3 结论

研究以限制性水解改性改善玉米谷蛋白的泡沫性质为目的,通过响应面法优化碱性蛋白酶及复合蛋白酶水解条件,研究了不同水解物及其添加量对戚风蛋糕品质的影响。结果表明:碱性蛋白酶最优水解工艺为 pH 8.0、温度 60℃、加酶量 3%;复合蛋白酶最优水解工艺为 pH 7.0、温度 50℃、加酶量 0.81%。经水解当碱性蛋白酶水解物和复合蛋白酶水解物添加量分别在 10% 和 30% 时,戚风蛋糕的膨胀度最好且表现出良好的质构特性,其中硬度及咀嚼性达最低,弹性及回复性为最高。并且在此添加量下其色度与零添加组最为接近。后续将进一步深入研究开拓玉米谷蛋白水解物作为高起泡性蛋白基料在食品行业应用的可能性。

参考文献

[1] 高婷婷, 谭雪, 史海慧, 等. 试论玉米蛋白粉应用现状及质量控制[J]. 粮食问题研究, 2018(6): 29-33.
GAO T T, TAN X, SHI H H, et al. Discussion on application status and quality control of corn protein powder [J]. Grain Issues

Research, 2018(6): 29-33.
[2] 陈静, 陈志宏, 张余, 等. 响应面法优化玉米蛋白粉酶解工艺及其动力学研究[J]. 武汉轻工大学学报, 2020, 39(5): 9-16.
CHEN J, CHEN Z H, ZHANG C, et al. Study on enzymolysis process optimization of corn gluten meal by response surface methodology and its enzymatic hydrolysis kinetic [J]. Journal of Wuhan Polytechnic University, 2020, 39(5): 9-16.
[3] 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(9): 7-11, 16.
LIU J L, LIU X L, ZHENG X Q. TGase-catalyzed glycosylation of corn glutelin with chitosan oligochitosan [J]. Food Science and Technology, 2015(9): 7-11, 16.
[4] 韩永霞. 食物蛋白质与人体免疫力[J]. 食品安全导刊, 2020(36): 45, 47.
HAN Y X. Food protein and human immunity[J]. China Food Safety Magazine, 2020(36): 45, 47.
[5] 何娇娇, 王萍, 冯建, 等. 玉米蛋白粉对大黄鱼生长、肠道组织结构及肠道菌群的影响 [J]. 中国水产科学, 2018, 25(2): 361-372.
HE J J, WANG P, FENG J, et al. Effects of replacing fish meal with corn gluten meal on growth, intestinal histology, and intestina

- microbiota of large yellow croaker, *Larimichthys crocea*[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2018, 25(2): 361-372.
- [6] 景言, 刘晓兰, 王今雨, 等. 玉米蛋白水解物的酶法制备及其对结肠炎的缓解作用[J]. 食品工业科技, 2023, 44(8): 270-278.
JING Y, LIU X L, WANG J Y, et al. Enzymatic preparation of corn protein hydrolysate and its alleviating effect on colitis[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(8): 270-278.
- [7] 王欢, 迟玉杰, 王晓莹, 等. 蛋清粉起泡性对戚风蛋糕品质的影响[J]. 中国家禽, 2014, 36(20): 34-38.
WANG H, CHI Y J, WANG X Y, et al. Effect of foaming properties of egg white powder on the quality of chiffon cake [J]. China Poultry, 2014, 36(20): 34-38.
- [8] 张敏华, 郑宗平, 陈洪彬, 等. 淮山粉对木糖醇戚风蛋糕品质的影响[J]. 食品与机械, 2022, 38(8): 182-187.
ZHANG M H, ZHENG Z P, CHEN H B, et al. Effects of yam powder on the quality of xylitol chiffon cake[J]. Food & Machinery, 2022, 38(8): 182-187.
- [9] TINCHAN P, SIRIJSRIYSWAT A, PROMMAKOOL A, et al. *Antidesma thwaitesianum* Müll. Arg. fruit juice, its phytochemical contents, antimicrobial activity, and application in chiffon cake[J]. International Journal of Food Science, 2022, 85(3): 5183562.
- [10] 任传顺, 郑洋洋, 崔玲玲, 等. 鸡蛋的储存条件对大米戚风蛋糕品质特性的影响[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2021, 42(2): 43-49.
REN C S, ZHENG Y Y, CUI L L, et al. Effects of egg storage conditions on the qualities of rice chiffon cake [J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2021, 42(2): 43-49.
- [11] 李鑫. 基于界面特性解析蛋清蛋白体系泡沫性质及其调控机理研究[D]. 无锡: 江南大学, 2020: 1-11.
LI X. Engineered interface for explaining foaming characteristics of egg white protein systems and regulation mechanisms[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2020: 1-11.
- [12] WANG Y, ZHANG Z, HE R H, et al. Proteolysis efficiency and structural traits of corn gluten meal: Impact of different frequency modes of a low-power density ultrasound [J]. Food Chemistry, 2021, 344: 128609.
- [13] WANG Y H, LIN Y, YANG X Q. Foaming properties and air-water interfacial behavior of corn protein hydrolysate-tannic acid complexes[J]. Journal of Food Science and Technology, 2019, 56(2): 905-913.
- [14] ZHAO M, XIONG W, CHEN B, et al. Enhancing the solubility and foam ability of rice glutelin by heat treatment at pH 12: Insight into protein structure[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 103: 105626.
- [15] 许瑞雪, 刘晓兰, 王俊彤, 等. 体外消化对玉米谷蛋白酶解物抗氧化活性的影响[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(16): 1-5.
XU R X, LIU X L, WANG J T, et al. Effect of in vitro digestion on the antioxidant activities of hydrolysate from corn glutelin[J]. Food Research and Development, 2016, 37(16): 1-5.
- [16] YIN S W, TANG C H. Effects of limited enzymatic hydrolysis with trypsin on the functional properties of hemp (*Cannabis sativa* L.) protein isolate[J]. Food Chemistry, 2008, 106(3): 1 004-1 013.
- [17] 李天娇, 徐响, 孙丽萍, 等. 油菜蜂花粉蛋白水解度测定方法比较[J]. 食品科学, 2010, 31(16): 184-187.
LI T J, XU X, SUN L P, et al. Comparison of methods for determining the hydrolysis degree of rape bee pollen protein[J]. Food Science, 2010, 31(16): 184-187.
- [18] 李波轮, 全召莉, 王新宇, 等. 糊粉层添加量对土司面包品质特性的影响[J]. 粮食加工, 2022, 47(4): 12-17.
LI B L, TONG Z L, WANG X Y, et al. Effects of addition of aleurone layer on the quality characteristics of toast bread[J]. Grain Processing, 2022, 47(4): 12-17.
- [19] 刘浩男. 高功率脉冲微波对大豆分离蛋白和蓝莓花色苷互作机理及其复合物特性的影响研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2022: 43.
LIU H N. Effects of high power pulsed microwave on the interaction mechanism between soy protein isolate and biuberry anthocyanin and properties of complex [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2022: 43.
- [20] LIANG Q F, REN X F, CHALAMAIAH M, et al. Simulated gastrointestinal digests of corn protein hydrolysate alleviate inflammation in caco-2 cells and a mouse model of colitis[J]. Journal of Food Science and Technology, 2020, 57(6): 2 079-2 088.
- [21] 赵婉宏, 郑喜群, 刘晓兰, 等. 双酶复合两步水解法制备玉米降血糖活性肽及其生物活性[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(10): 221-229.
ZHAO W H, ZHENG X Q, LIU X L, et al. Preparation of corn hypoglycemic active peptide by double enzyme compound two-step hydrolysis and its biological activity[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022, 37(10): 221-229.
- [22] 郑志强, 郝利民, 刘晋, 等. 小麦蛋白双酶酶解制备高抗氧化性小麦肽研究[J]. 中国食品学报, 2019, 19(8): 78-88.
ZHENG Z Q, HAO L M, LIU J, et al. Preparation of wheat peptide with high antioxidant activity by double enzymes hydrolysis of wheat gluten[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2019, 19(8): 78-88.
- [23] KLOST M, DRUSCH S. Functionalisation of pea protein by tryptic hydrolysis-characterisation of interfacial and functional properties [J]. Food Hydrocolloids, 2018, 86: 134-140.
- [24] WOUTERS A G B, ROMBOUTS I, FIERENS E, et al. Foaming and air-water interfacial characteristics of solutions containing both gluten hydrolysate and egg white protein [J]. Food Hydrocolloids, 2018, 77: 176-186.
- [25] JUAN M, RODRIGUEZ P, JOSÉ M C, et al. Interfacial and foaming properties of enzyme-induced hydrolysis of sunflower protein isolate[J]. Food Hydrocolloids, 2006, 21(5/6): 782-793.

(下转第 216 页)

- components, microbiota and their correlations in different sufu, a Chinese fermented soybean food [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2018, 125(6): 1 761-1 773.
- [20] 张志伟. 玉米粉的营养复配及其加工品质改良研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2020: 23.
- ZHANG Z W. Study on nutrition compound and improvement of processing quality of corn flour[D]. Xianyang: Northwest A & F University, 2020: 23.
- [21] 蒋华彬, 张小飞, 覃先武, 等. 酵母抽提物的不同添加方式对藜麦膨化粉感官品质、味觉特性和挥发性风味物质的影响[J]. *食品科技*, 2022, 47(1): 277-285.
- JIANG H B, ZHANG X F, QIN X W, et al. Effect of different addition methods of yeast extract on sensory quality, taste characteristics and volatile flavor compounds of quinoa puffed powder[J]. *Food Science and Technology*, 2022, 47(1): 277-285.
- [22] 沙见宇, 张锦丽. 不同小麦粉对馒头品质及风味的影响[J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2021, 52(5): 753-758.
- SHA J Y, ZHANG J L. Effects of different wheat flours on the quality and flavor of steamed bread [J]. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2021, 52(5): 753-758.
- [23] 林俊帆. 适度碾磨黑米的营养、食味品质、挥发性风味物质及其储藏特性的研究[D]. 成都: 西华大学, 2020: 32.
- LIN J F. Study on the nutrition, taste quality, volatile flavor substance and storage characteristics of the moderate milled black rice[D]. Chengdu: Xihua University, 2020: 32.
- [24] HE Z G, ZHANG Y, YANG M D, et al. Effect of different sweeteners on the quality, fatty acid and volatile flavor compounds of braised pork[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 9: 961998.
- [25] 康志敏, 郭东, 何梦影, 等. 不同干燥工艺对鲜玉米粉品质及风味的影响[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(18): 58-63, 69.
- KANG Z M, GUO D, HE M Y, et al. Effect of different drying methods on the quality and flavor profiles of fresh corn flour[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(18): 58-63, 69.
- [26] 冯飞. 复合杂粮冲调粉的制备工艺及风味品质评价[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2020: 49.
- FENG F. Preparation technology and flavor quality evaluation of composite mixed grain powder[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2020: 49.
- [27] 贾梦, 刘金光, 康学栋, 等. 海南特色米中营养成分及挥发性风味物质的分布特征[J]. *中国粮油学报*, 2022, 37(7): 31-38.
- JIA M, LIU J G, KANG X D, et al. Distribution characteristics of the nutritional composition and volatile compounds for the typical rice in Hainan [J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2022, 37(7): 31-38.
- [28] 范海默特. 化合物香味阈值汇编[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2015: 41-332.
- VAN GEMERT L J. Compilations of flavour threshold values in water and other media[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2015: 41-332.
- [29] WANG A X, XIAO T Z, XI H H, et al. Edible qualities, microbial compositions and volatile compounds in fresh fermented rice noodles fermented with different starter cultures[J]. *Food Research International*, 2022, 156: 111184.
- [30] YUAN H, XU L J, CHANG M C, et al. Effects of different cooking methods on volatile flavor compounds, nutritional constituents, and antioxidant activities of *Clitocybe squamulosa*[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 9: 1017014.
- (上接第 205 页)
- [26] REN J, SONG C L, ZHANG H Y, et al. Effect of hydrolysis degree on structural and interfacial properties of sunflower protein isolates[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2016, 41(1): e13092.
- [27] 罗其琪, 顾丰颖, 曹晶晶, 等. 鼠李糖乳杆菌发酵对玉米粉、玉米面团理化特性及发糕品质的影响[J]. *食品科学*, 2018, 39(18): 1-7.
- LUO Q Q, GU F Y, CAO J J, et al. Effects of lactobacillus rhamnosus fermentation on the physicochemical properties of corn flour and corn dough and the quality of steamed sponge cake[J]. *Food Science*, 2018, 39(18): 1-7.
- [28] 张佳佳, 王昱丹, 罗慧, 等. 蒲公英威风蛋糕的烘焙品质及其酚类物质抗氧化活性[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(4): 142-146.
- ZHANG J J, WANG Y D, LUO H, et al. Effect of dandelion flour on baking qualities and polyphenols antioxidant activities of chiffon cake [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2019, 45(4): 142-146.
- [29] NING J, HOU G G, SUN J, et al. Effect of green tea powder on the quality attributes and antioxidant activity of whole-wheat flour pan bread[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2017, 79: 342-348.
- [30] 朱琳, 陈丽丽, 袁美兰, 等. 草鱼多肽的营养价值及添加鱼蛋白面包的研制[J]. *食品工业*, 2017, 38(8): 125-129.
- ZHU L, CHEN L L, YUAN M L, et al. Nutritional value estimate of grass carp peptides and process of added fish protein into bread [J]. *The Food Industry*, 2017, 38(8): 125-129.
- [31] 李雪颖, 周鸿燕, 武媛媛. 大豆蛋白水解物对面包体外抗氧化及品质特性的影响[J]. *粮食与油脂*, 2021, 34(8): 21-23, 33.
- LI X Y, ZHOU H Y, WU Y Y. Effect of soybean protein hydrolysate on antioxidant in vitro and quality characteristics of bread[J]. *Cereals & Oils*, 2021, 34(8): 21-23, 33.
- [32] 杨晓钊, 王炜清, 李秀婷, 等. 酶解处理对扁桃仁蛋白质起泡特性影响及其应用研究[J]. *食品科学技术学报*, 2021, 39(5): 82-92.
- YANG X F, WANG W Q, LI X T, et al. Study on effect of enzymatic hydrolysis on foaming properties of almond protein isolate and its application [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2021, 39(5): 82-92.