

pH 对醇法花生蛋白功能特性的影响 及其在馒头中的应用

赵树超¹, 张相凤², 王文昕¹, 郭兴凤², 逢 飞¹

(1. 济宁市机械设计研究院有限公司, 山东 济宁 272000; 2. 河南工业大学 粮油食品学院, 郑州 450001)

摘要:旨在为醇法花生蛋白的应用提供参考,以低温压榨花生饼经索氏抽提脱脂后的花生粕(CP)为原料,采用醇法制备花生蛋白产品(D1和D2),系统研究了pH对花生蛋白功能特性的影响。另外,将花生蛋白添加至面粉中制作馒头,分析了馒头的理化指标,以考察花生蛋白对馒头品质的影响。结果表明:与CP相比,D1和D2的溶解性下降,但持水性、持油性、乳化特性、起泡特性以及胶凝性均提高;在pH 5~9范围内,随pH增大,D1的溶解性、起泡性、乳化性和胶凝性先增后减,持水性降低,持油性增加,D2的溶解性、持油性增加,持水性、起泡性、胶凝性整体呈降低趋势,乳化性先增后减;D1和D2的添加量(1%~3%)对馒头比容、水分含量、pH、孔隙结构参数(孔隙率、孔隙密度和孔隙平均面积)基本无显著影响,对表皮色泽影响显著,D1和D2的添加促使馒头更柔软和有弹性,其中添加1%D1的馒头综合评分为91.07分,显著高于纯面粉馒头的(85.88分)。综上,醇法加工可有效提升花生蛋白除溶解性外的其他功能特性,适量添加于面粉中可提升馒头综合品质。

关键词:醇法浸提;花生蛋白;pH;功能特性;馒头;综合品质

中图分类号:TS229;TS209

文献标识码:A

文章编号:1003-7969(2025)07-0046-08

Effect of pH on the functional properties of peanut protein prepared by alcohol leaching and their application in steamed bun

ZHAO Shuchao¹, ZHANG Xiangfeng², WANG Wenxin¹,
GUO Xingfeng², PANG Fei¹

(1. Jining Machinery Design and Research Institute Co., Ltd., Jining 272000, Shandong, China;

2. College of Food Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In order to provide reference for the application of alcohol-leached peanut protein, defatted peanut meal (CP) obtained from cold-pressed peanut cake after Soxhlet extraction was taken as the raw material to prepare peanut protein products (D1 and D2) by alcohol leaching, and the effects of pH on the functional properties of the products were studied. In addition, the products were added to flour to prepare steamed bun, and the physicochemical indexes of steamed bun were analyzed to investigate the influence of peanut protein on its quality. The results showed that the solubility of D1 and D2 decreased, while their water-holding capacity, oil-holding capacity, emulsifying property, foaming property, and gelation property all improved compared with CP. Within the pH range of 5 to 9, as the pH increased, the solubility, foaming capacity, emulsifying capacity and gelation property of D1 all first increased and

then decreased, the water-holding capacity decreased, the oil-holding capacity increased. The solubility and oil-holding capacity of D2 increased, while the water-holding capacity, foaming capacity and gelation property generally showed a decreasing trend, and the emulsifying capacity first increased and then decreased. The

收稿日期:2025-03-18;修回日期:2025-04-28

基金项目:山东省重点研发计划(重大科技创新工程)项目(2021CXGC010808)

作者简介:赵树超(1979),男,高级工程师,主要从事油脂、蛋白工艺技术管理工作(E-mail)public@sdchemsta.com。

通信作者:郭兴凤,教授,硕士(E-mail)guoxingfeng@haut.edu.cn。

addition of D1 and D2 (1% – 3%) had no significant effect on the specific volume, moisture content, pH and pore structure parameters (porosity, pore density, and average pore area) of steamed bun, but significantly affected the surface color. The addition of D1 and D2 made the steamed bun softer and more elastic. Among them, the comprehensive score of steamed bun with 1% D1 added was 91.07, which was significantly higher than that of pure flour steamed bun (85.88). In conclusion, alcohol leaching process can effectively enhance the functional properties of peanut protein except for solubility, and appropriate addition to flour can improve the overall quality of steamed bun.

Key words: alcohol leaching; peanut protein; pH; functional property; steamed bun; overall quality

花生的蛋白质含量较高,其脱脂后的饼粕中含有高达 50% ~ 60% 的蛋白质^[1]。根据花生蛋白的溶解性可将其分为两类,即盐溶性蛋白(约占 90%)和水溶性蛋白(约占 10%)^[2]。花生蛋白不仅具有较高的营养价值,还表现出较好的乳化、凝胶等功能性质^[3]。目前,制备花生蛋白常用的方法有醇法、碱法、水酶法、超声辅助法等^[2]。醇法制备花生蛋白主要是利用乙醇水溶液对花生中蛋白质等组分溶解度的差异,通过浸提、沉淀、分离等步骤除去可溶性组分,从而提升花生蛋白纯度的一种方法^[4]。相比其他方法,醇法加工工艺具有成本低、操作简单等优点。

蛋白质的功能特性受诸多因素的影响,其中 pH 是影响蛋白质功能特性的一个重要因素^[5]。Li 等^[6]研究了 pH 变换处理对热诱导花生分离蛋白凝胶特性的影响,发现 pH 10→pH 7 的变换处理可提高热诱导花生分离蛋白凝胶的强度和保水能力,而经极端酸(pH 2→pH 7)或极端碱(pH 12→pH 7)变化处理的花生分离蛋白会失去凝胶形成能力。

馒头是我国的传统主食,可提供碳水化合物,但其蛋白质含量偏低,且缺乏某些必需氨基酸,如赖氨酸。花生蛋白是一种优质的植物蛋白,含有人体所需的 8 种必需氨基酸,消化率大于 90%,易被人体消化吸收,是一种营养价值较高的植物蛋白^[7-8]。将花生蛋白添加到馒头中,可提升馒头中蛋白质的含量,从而提升馒头的营养价值。

本文系统探究了 pH 对醇法花生蛋白功能特性的影响规律,并在面粉中添加花生蛋白制作馒头,探讨醇法花生蛋白添加量对馒头品质的影响,以期醇法花生蛋白的应用提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

花生粕(CP,由低温压榨花生饼经索氏抽提脱脂制备),青岛长寿食品有限公司;金龙鱼一级大豆油,嘉里粮油(天津)有限公司;金苑特一粉(蛋

白质含量 11.10%)、酵母;石油醚、酒石酸钾钠、硫酸铜、尿素、磷酸氢二钠、磷酸二氢钠、氢氧化钠、盐酸等试剂,均为分析纯,天津天力化学试剂有限公司。

TGL-6C 高速离心机,上海安亭科学仪器厂;HH-6 数显恒温水浴锅,常州普天仪器制造有限公司;722s 可见分光光度计,上海精密科学仪器有限公司;TA-XT Plus 质构仪,英国 Stable Micro System 公司;FM200 高剪切分散乳化机,上海弗鲁克科技发展有限公司;AY120 分析天平,日本岛津公司;DMT-10A 电动家用面条机,山东龙口市复兴机械有限公司;CR-400 色彩色差计,日本美能达公司;SPX 型生化培养箱,北京市永光明医疗仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 醇法花生蛋白的制备

依据课题组前期分别以产品得率和产品蛋白质含量为指标优化的条件制备醇法花生蛋白^[9]。花生浓缩蛋白 1(D1)制备条件:乙醇体积分数 75.00%、浸提温度 35.00℃、浸提时间 55.45 min,产品得率为 87.82%,蛋白质含量为 58.02%。花生浓缩蛋白 2(D2)制备条件:乙醇体积分数 67.12%、浸提温度 42.02℃、浸提时间 58.28 min,产品得率为 86.08%,蛋白质含量为 61.10%。

1.2.2 不同 pH 下醇法花生蛋白功能特性分析

1.2.2.1 溶解性

取一定量花生蛋白,加入去离子水配制成蛋白质质量分数为 2% 的悬浮液,利用 1 mol/L 的 HCl 或 1 mol/L 的 NaOH 调节其 pH,于 5 000 r/min 离心 10 min,取 1 mL 上清液于试管中,加入 4 mL 双缩脲溶液混匀,静置 30 min 后在 540 nm 波长处测定吸光度^[10],根据绘制的吸光度与标准蛋白质质量浓度的标准曲线计算上清液中蛋白质含量。同时,采用凯氏定氮法测定总蛋白质质量。溶解度以上清液中蛋白质质量与总蛋白质质量的比值计算。

1.2.2.2 持水性/持油性

将花生蛋白按固液比 1:15 配制成溶液,调节其 pH,冷冻干燥后参考赵雪淞等^[11]的方法测定其持水性/持油性。称取 0.2 g 样品于 15 mL 离心管中,加入 4 mL 蒸馏水/大豆油混匀,静置 30 min 后于 5 000 r/min 离心 20 min,弃去上清液,测定样品与吸收的水/油的质量。持水性/持油性表示为每克样品吸收水/油的质量。

1.2.2.3 起泡特性

参考杨柳等^[12]的方法,取 1.2.2.2 中制备的不同 pH 的花生蛋白,配制成蛋白质质量浓度为 2 g/100 mL 的花生蛋白溶液(体积记为 V_0),于 11 000 r/min 剪切 30 s,立即记录剪切后泡沫体积(记为 V_1),室温下静置 30 min,立即记录泡沫体积(记为 V_2),分别按公式(1)、公式(2)计算花生蛋白起泡性(F)及泡沫稳定性(S)。

$$F = V_1/V_0 \times 100\% \quad (1)$$

$$S = V_2/V_1 \times 100\% \quad (2)$$

1.2.2.4 乳化特性

取 1.2.2.2 中制备的不同 pH 的花生蛋白,参考 Tigar 等^[13]的方法测定其乳化特性。称取 0.15 g 花生蛋白,加入 10 mL 0.01 mol/L 的磷酸盐缓冲溶液(pH 7.0)及 5 mL 大豆油进行高速剪切,离心 10 min,以管中乳化层高度与液体总高度的比值表征乳化性。将离心管于 80 ℃ 水浴 30 min,待冷却至室温后离心,以离心管中乳化层高度与液体总高度的比值表征乳化稳定性。

1.2.2.5 胶凝性

取 1.2.2.2 中制备的不同 pH 的花生蛋白,参考赵雪淞等^[11]的方法制备凝胶。称取 5 g 花生蛋白,制备成蛋白质质量浓度为 20 g/100 mL 的花生蛋白溶液,于 90 ℃ 水浴加热 30 min,冷却后置于 4 ℃ 冰箱冷藏 12 h,得到花生蛋白凝胶。采用 P/0.5R 探头测定凝胶的硬度,表示其胶凝性。

1.2.3 醇法花生蛋白馒头的制作

按照 0%、1%、2%、3% 的比例将花生蛋白添加到面粉中,混匀,加水和成面团后,常温下发酵 1 h,揉搓成型后蒸制得馒头,冷却后备用。

1.2.4 馒头理化指标测定

1.2.4.1 基本理化指标

参照 GB/T 21118—2007 测定馒头的比容、水分含量、pH。

1.2.4.2 色泽

使用色差计评估馒头表层颜色,记录 L^* (亮

度/白度)、 a^* (红度/绿度)和 b^* (黄度/蓝度),并以未添加花生蛋白时的馒头作为对照,按照公式(3)计算添加花生蛋白前后的馒头样品的色差值(ΔE)。

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad (3)$$

式中: L^* 、 a^* 、 b^* 为添加花生蛋白馒头的色度值; L_0^* 、 a_0^* 、 b_0^* 为未添加花生蛋白馒头的色度值。

1.2.4.3 质构特性

将馒头切成 10 mm 厚的馍片后,采用质构仪,在模式 TPA、测试探头 P/35、测试速度 1.0 mm/s、压缩比例 50%、两次压缩时间间隔 5.0 s 条件下测定其质构特性。

1.2.4.4 内部结构

截取馒头剖面边长 2 cm 的区域拍摄图像,并使用 Image Meter 和 ImageJ 软件分析测定馒头的孔隙结构参数^[14]。

1.2.4.5 感官品质评价

由 8 名经过培训的食品专业人员组成评价小组,参照 GB/T 35991—2018 对馒头表面结构、内部结构、韧性等 9 个感官品质指标进行测评,每个指标评价结果取均值,绘制感官品质评价雷达图,同时以 9 个指标评分均值的总和计算综合评分。

1.2.5 数据处理

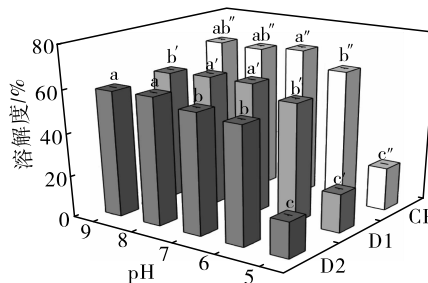
采用 Origin 9.0、Design Expert 11、SPSS 22.0、ImageJ、Image Meter 软件进行数据统计和图像处理。每组数据至少重复测定 3 次,结果表示为“平均值 $\pm$ 标准偏差”。数据之间差异显著性检验采用 Duncan 多重比较法,差异显著水平为 $p < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 pH 对醇法花生蛋白功能特性的影响

2.1.1 溶解性

pH 对花生蛋白溶解性的影响如图 1 所示。



注:不同字母表示组内具有显著差异($p < 0.05$)。下同

Note: Different letters indicate significant differences within groups ($p < 0.05$). The same below

图1 pH 对花生蛋白溶解性的影响

Fig.1 Effect of pH on the solubility of peanut protein

由图 1 可知,在 pH 5~9 范围内,CP 和 D2 的溶解度随着 pH 的增加总体呈增加的趋势,而 D1 则呈先增后减的趋势。花生蛋白等电点在 pH 4.5 左右^[15],pH 5 靠近等电点,因此 3 种蛋白在 pH 5 时的溶解度均最低。在 pH 7 时,CP 的溶解度达到最大值,为 69.32%,相比于 pH 5 时其溶解度提升了 48.94 百分点。D1 的溶解度也在 pH 7 时达到最大值,而 D2 则在 pH 8 时达到最大值。在相同 pH 条件下,D1、D2 的溶解度均低于 CP 的,与 CP 相比,D1 的溶解度降低了 2.14~8.01 百分点,D2 的溶解度降低了 3.12~13.01 百分点。醇法处理过程中,乙醇分子进入水化层竞争水分子结合位点,造成蛋白质脱水,蛋白质表面疏水性增强^[16],蛋白质溶解性降低,故 CP 的溶解度高于 D1 和 D2 的。而 D1 与 D2 之间溶解性的差异(D1 的溶解性优于 D2 的),推测与乙醇体积分数和浸提温度关系密切。研究表明,乙醇体积分数为 65% 时花生蛋白溶解性最差^[17]。此外,D2 的浸提温度高于 D1 的,蛋白质升温变性也会导致溶解性下降。

2.1.2 持水性

pH 对花生蛋白持水性的影响如图 2 所示。

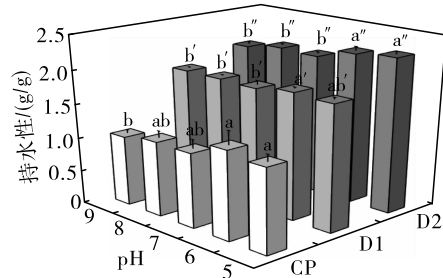


图 2 pH 对花生蛋白持水性的影响
Fig. 2 Effect of pH on the water – holding capacity of peanut protein

由图 2 可知,在 pH 5~9 范围内,随着 pH 的增大,3 种蛋白的持水性总体均呈降低的趋势。这主要是因为,在一定范围内,pH 增加,蛋白质的溶解性增强(图 1),减少了持水的蛋白质的量,造成

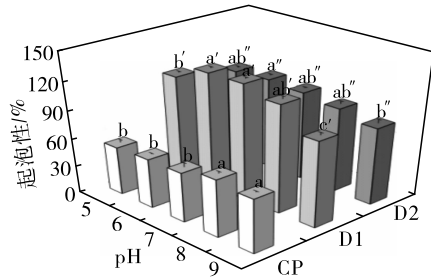


图 4 pH 对花生蛋白起泡特性的影响

Fig. 4 Effect of pH on the foaming property of peanut protein

持水性降低。3 种蛋白在 pH 6 时持水性均最高,其中 CP 的持水性为 1.30 g/g,D1 的持水性为 1.86 g/g,D2 的持水性为 2.25 g/g。在相同 pH 条件下,醇法花生蛋白的持水性均大于 CP 的。这是因为醇法处理使花生蛋白粒径减小,比表面积增大,暴露基团增多^[10],结合水的量增加。Wu 等^[18]研究也表明醇洗可以增加花生蛋白的持水性。

2.1.3 持油性

pH 对花生蛋白持油性的影响如图 3 所示。

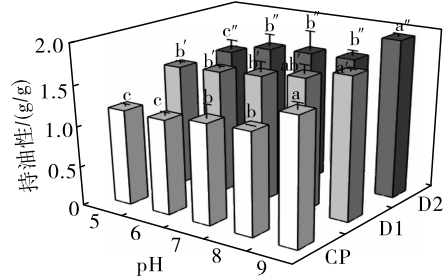
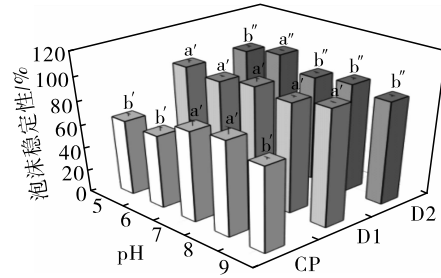


图 3 pH 对花生蛋白持油性的影响
Fig. 3 Effect of pH on the oil – holding capacity of peanut protein

由图 3 可知,在相同 pH 条件下,D1、D2 的持油性均显著高于 CP 的,且 3 种蛋白的持油性均随着 pH 的增加而增加,D1 和 D2 的持油性均在 pH 9 时最高,分别达 1.75 g/g 和 1.98 g/g。蛋白质的持油性主要源于其分子侧链的疏水基团与油脂的相互作用,因此蛋白质的持油性与蛋白质分子表面疏水性基团的数量密切相关^[19]。Ge 等^[20]研究了 pH 对蛋白质表面疏水性的影响,发现在 pH 5~9 范围内,随着 pH 增加,蛋白质分子的表面疏水性增加,持油性也呈增加的趋势,这与本研究结果一致。乙醇处理对蛋白质持油性的影响机制比较复杂,与热处理使蛋白质结构松散不同,乙醇处理能使蛋白质大分子解聚和重构,增加蛋白质分子的有序性,进而影响其持油性^[18]。

2.1.4 起泡特性

pH 对花生蛋白起泡特性的影响如图 4 所示。



由图4可知,在pH 5~9范围内,D1和D2的起泡性均大于CP的,且D1的起泡性整体上大于D2的。D1在pH 7时起泡性最高,为123.28%,而D2在pH 6时起泡性最高,为97.42%。pH对D1的泡沫稳定性影响不显著,对D2和CP的泡沫稳定性影响显著,其中D2在pH 6时泡沫稳定性最好。研究表明,蛋白质的起泡特性受其溶解性、分子柔韧性、

构象和分子质量的影响^[20]。pH增加,远离花生蛋白的等电点,蛋白质表面电荷增加,泡沫之间的静电斥力增强,泡沫颗粒的聚结速率降低,从而增加泡沫稳定性^[20]。

2.1.5 乳化特性

pH对花生蛋白乳化特性的影响如图5所示。

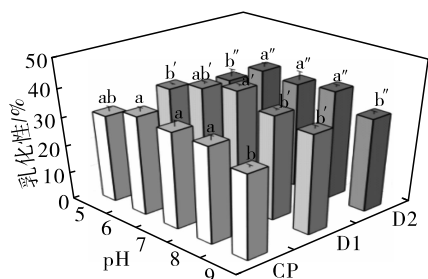


图5 pH对花生蛋白乳化特性的影响

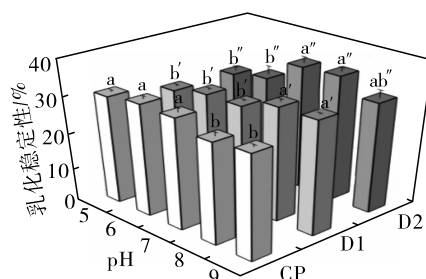
Fig. 5 Effect of pH on the emulsifying property of peanut protein

由图5可知,在相同pH下,D1和D2的乳化性均大于CP的。D1在pH 7时乳化性达到最大值(41.00%),D2在pH 6时达到最大值(38.39%),随着pH的继续增大,二者的乳化性均下降。3种蛋白的乳化稳定性与乳化性有不同的变化趋势。随pH的增大,CP的乳化稳定性总体呈降低的趋势,D1和D2总体呈增加的趋势,且D1和D2的乳化稳定性与CP的差别较乳化性的小。乳液体系中,蛋白质作为两亲分子吸附在油水界面保持体系的稳定,蛋白质分子的大小、荷电性质及数量、变性程度都会影响蛋白质的乳化特性。pH对花生蛋白溶解性有显著影响,而溶解性的大小与乳化性密切相关。研究表明,在蛋白质溶解度较低时,油水界面处的蛋白质吸附主要受扩散控制,乳化性较差,随着蛋白质溶解度的增加,活化能垒使得蛋白质迁移不再依赖于扩散过程,蛋白质溶解度的初始提高可增强油相与水相之间的相互作用,乳化性增大;但当蛋白质溶解度进一步增加达到某一临界点后,蛋白质浓度的继续增加导致蛋白质在水相中积累,乳化性下降^[18]。另一方面,pH影响了蛋白质的表面疏水性^[20],进而影响蛋白质与油脂的结合,对乳化特性也有影响。

2.1.6 胶凝性

pH对花生蛋白胶凝性的影响如图6所示。

由图6可知,在pH 5~9范围内,D1和D2凝胶的硬度显著高于CP的。这是因为与CP相比,醇法处理后,花生蛋白表面电荷与基团受到影响而发生重排,蛋白质分子间的作用力强弱发生改变,疏水作



用提升,二硫键含量增多^[10],而疏水相互作用以及二硫键是形成蛋白凝胶的主要作用力^[21-22]。D1凝胶的硬度在pH 7时达到峰值(76.64 g),较相同pH下CP提高48.49 g;D2凝胶的硬度在pH 5时最高,为75.00 g,较相同pH下CP提高45.00 g。CP凝胶的硬度在pH 8时最大,但pH 9时显著下降。

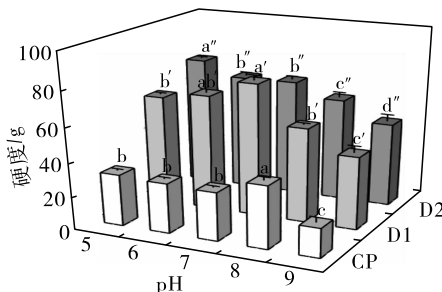


图6 pH对花生蛋白胶凝性的影响

Fig. 6 Effect of pH on the gelation property of peanut protein

2.2 醇法花生蛋白对馒头品质的影响

2.2.1 对基本理化指标的影响

测定不同花生蛋白添加量下制作的馒头的基本理化指标,结果见图7。

由图7可知,CP的添加量大于1%、D1的添加量大于2%时,馒头的比容开始显著下降,而D2在3个添加水平下,馒头的比容均与未添加花生蛋白馒头的无显著差异。CP添加量大于1%时,馒头的水分含量开始下降,而添加D1和D2的各组馒头的水分含量与未添加蛋白的馒头的均无显著差异。CP、D1和D2在3个添加水平下,馒头的pH无显著差异。

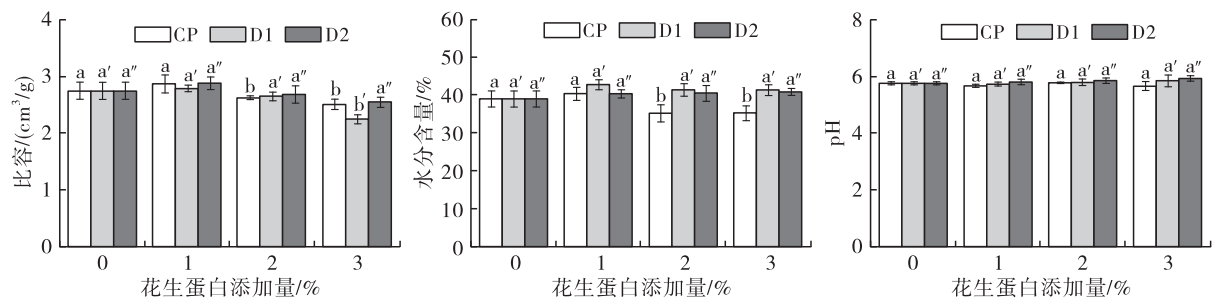


图 7 馒头的基本理化指标

Fig. 7 Basic physicochemical indicators of steamed bun

2.2.2 对色泽的影响

不同花生蛋白添加量下馒头表皮色泽测定结果见表 1。

实验发现,在 CP 添加量为 1% 时,肉眼可见其所制作馒头与对照馒头的色差,而在 D1 和 D2 添加

量为 1% 时则观察不到色差。由表 1 可知,随着花生蛋白添加量的增加,3 种馒头的亮度 (L^*) 均下降, ΔE 值总体呈增加趋势。与 D1 和 D2 相比,CP 对馒头色泽的影响更显著。

表 1 馒头表皮色泽

Table 1 color of steamed bun

蛋白种类	花生蛋白添加量/%	L^*	a^*	b^*	ΔE
CP	0	75.52 ± 0.45 ^a	0.11 ± 0.07 ^b	2.78 ± 0.30 ^a	
	1	74.37 ± 0.78 ^a	0.32 ± 0.03 ^a	2.97 ± 0.73 ^a	1.18 ± 0.24 ^b
	2	73.89 ± 0.49 ^{ab}	0.46 ± 0.12 ^a	3.18 ± 0.66 ^a	1.71 ± 0.11 ^a
	3	73.90 ± 0.23 ^b	0.38 ± 0.13 ^a	3.12 ± 0.18 ^a	1.68 ± 0.07 ^a
D1	0	75.52 ± 0.45 ^a	0.11 ± 0.07 ^b	2.78 ± 0.30 ^a	
	1	75.11 ± 0.17 ^a	0.29 ± 0.11 ^a	3.30 ± 0.17 ^a	0.69 ± 0.30 ^c
	2	74.50 ± 0.31 ^b	0.31 ± 0.12 ^a	3.48 ± 0.48 ^a	1.25 ± 0.19 ^b
	3	74.18 ± 0.28 ^b	0.38 ± 0.10 ^a	3.52 ± 0.39 ^a	1.55 ± 0.19 ^a
D2	0	75.52 ± 0.45 ^a	0.11 ± 0.07 ^c	2.78 ± 0.30 ^a	
	1	75.02 ± 0.17 ^a	0.18 ± 0.03 ^c	2.97 ± 0.39 ^a	0.54 ± 0.02 ^c
	2	74.68 ± 0.71 ^a	0.23 ± 0.05 ^b	3.01 ± 0.31 ^a	0.88 ± 0.07 ^b
	3	74.33 ± 0.23 ^a	0.33 ± 0.03 ^a	3.42 ± 0.19 ^a	1.37 ± 0.20 ^a

注:同列不同字母表示组内具有显著差异($p < 0.05$)。下同
Note: Different letters in the same column indicate significant differences within groups ($p < 0.05$). The same below

2.2.3 对质构特性的影响

不同花生蛋白添加量下馒头质构特性的测定结果见表 2。

由表 2 可知,随着花生蛋白添加量的增加,3 种馒头的硬度均呈增加趋势,弹性先增强后减小,咀嚼性先降低后升高,而内聚性和回复性则呈波动变化。

与 CP 相比,相同花生蛋白添加量下添加 D1、D2 馒头的硬度和咀嚼性更低,弹性和回复性更好。这是因为相比 CP, D1 和 D2 具有良好的胶凝性(图 6),与面粉混合可能会促进面团特性的提升,从而使馒头更加柔软和有弹性。

表 2 馒头的质构特性

Table 2 Texture characteristics of steamed bun

蛋白种类	花生蛋白添加量/%	硬度/g	弹性	内聚性	咀嚼性/g	回复性
CP	0	5 024.00 ± 285.67 ^c	0.74 ± 0.01 ^c	0.61 ± 0.01 ^a	4 374.44 ± 250.00 ^b	0.25 ± 0.01 ^a
	1	5 241.00 ± 421.44 ^c	0.85 ± 0.01 ^a	0.51 ± 0.01 ^c	2 296.43 ± 301.36 ^d	0.19 ± 0.01 ^b
	2	6 464.50 ± 98.29 ^b	0.79 ± 0.02 ^b	0.54 ± 0.01 ^b	2 882.00 ± 148.49 ^c	0.25 ± 0.01 ^a
	3	7 350.00 ± 353.55 ^a	0.80 ± 0.03 ^b	0.56 ± 0.02 ^b	5 938.86 ± 190.93 ^a	0.22 ± 0.02 ^a
D1	0	5 024.00 ± 285.67 ^c	0.74 ± 0.01 ^c	0.61 ± 0.01 ^a	4 374.44 ± 250.00 ^a	0.25 ± 0.01 ^b
	1	4 897.00 ± 130.11 ^c	0.88 ± 0.02 ^a	0.55 ± 0.03 ^b	2 288.56 ± 142.06 ^c	0.25 ± 0.03 ^b
	2	5 386.00 ± 142.25 ^b	0.88 ± 0.01 ^a	0.62 ± 0.01 ^a	2 441.57 ± 37.47 ^c	0.31 ± 0.01 ^a
	3	6 473.00 ± 56.57 ^a	0.85 ± 0.01 ^b	0.55 ± 0.02 ^b	3 045.54 ± 135.26 ^b	0.23 ± 0.02 ^b

续表 2

蛋白种类	花生蛋白添加量/%	硬度/g	弹性	内聚性	咀嚼性/g	回复性
D2	0	5 024.00 ± 285.67 ^c	0.74 ± 0.01 ^c	0.61 ± 0.01 ^a	4 374.44 ± 250.00 ^a	0.25 ± 0.01 ^b
	1	5 107.00 ± 110.11 ^c	0.98 ± 0.02 ^a	0.61 ± 0.01 ^a	2 045.06 ± 172.06 ^c	0.29 ± 0.03 ^a
	2	5 723.00 ± 167.15 ^b	0.89 ± 0.02 ^b	0.62 ± 0.01 ^a	2 214.57 ± 150.47 ^c	0.29 ± 0.06 ^a
	3	6 973.00 ± 132.77 ^a	0.85 ± 0.05 ^b	0.58 ± 0.02 ^b	3 105.54 ± 105.38 ^b	0.24 ± 0.02 ^b

2.2.4 对内部结构的影响

不同花生蛋白添加量下馒头的孔隙结构参数如表 3 所示。

表 3 馒头的孔隙结构参数

Table 3 Pore structure parameters of steamed bun

蛋白种类	花生蛋白添加量/%	孔隙率/%	孔隙密度/(个/cm ³)	孔隙平均面积/mm ²
CP	0	54.35 ± 2.50 ^a	42.78 ± 3.16 ^a	1.23 ± 0.02 ^a
	1	55.60 ± 2.01 ^a	43.89 ± 2.51 ^a	1.14 ± 0.06 ^b
	2	54.88 ± 0.80 ^a	43.54 ± 3.70 ^a	1.17 ± 0.12 ^a
	3	54.49 ± 0.09 ^a	44.19 ± 2.89 ^a	1.31 ± 0.12 ^a
D1	0	54.35 ± 2.50 ^a	42.78 ± 3.16 ^a	1.23 ± 0.02 ^a
	1	57.86 ± 2.41 ^a	43.88 ± 2.34 ^a	0.80 ± 0.16 ^a
	2	56.96 ± 0.41 ^a	43.66 ± 2.30 ^a	0.99 ± 0.11 ^a
	3	56.86 ± 2.03 ^a	43.68 ± 2.15 ^a	1.11 ± 0.15 ^a
D2	0	53.12 ± 1.34 ^a	46.78 ± 2.14 ^a	1.33 ± 0.02 ^a
	1	55.68 ± 2.41 ^a	45.88 ± 1.67 ^a	0.88 ± 0.16 ^a
	2	54.96 ± 1.39 ^a	44.66 ± 2.03 ^a	0.94 ± 0.11 ^a
	3	54.68 ± 1.13 ^a	44.18 ± 1.15 ^a	1.23 ± 0.05 ^a

由表 3 可知,3 种蛋白对馒头孔隙结构参数总体上没有显著影响。但实验发现,添加 1% 花生蛋白时馒头的体积与不添加花生蛋白馒头的体积最为相似,而花生蛋白添加量超过 2% 时,馒头表皮出现鼓泡、褶皱现象,体积显著减小。

2.2.5 对感官品质的影响

不同花生蛋白添加量下馒头的感官品质评价雷达图见图 8,综合评分见表 4。

由图 8 可知,当花生蛋白添加量超过 1% 时,3 种馒头表面结构、内部结构、表面色泽、韧性、弹性、黏性、比容评分均下降。由表 4 可知,添加 1% D1 和 D2 的馒头综合评分均高于未添加花生蛋白馒头的,添加 1% D1 的馒头综合评分最高,为 91.07 分。研究表明,蛋白质含量过多,酵母发酵过度,面筋网络承载气体过多,会导致馒头表皮塌陷^[23],影响馒头品质。

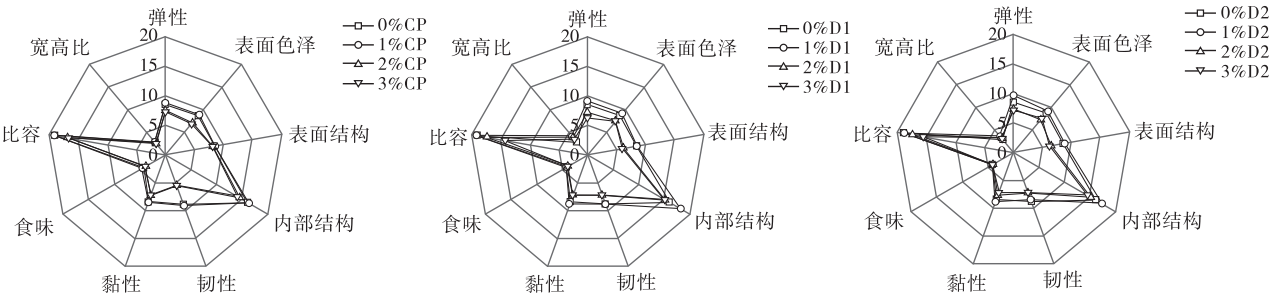


图 8 馒头感官品质评价雷达图

Fig. 8 Radar chart for sensory quality evaluation of steamed bun

表 4 馒头品质综合评分

Table 4 Comprehensive quality evaluation scores of steamed bun

花生蛋白添加量/%	评分(分)		
	CP	D1	D2
0	85.88 ± 0.58 ^{hA}	85.88 ± 0.58 ^{hA}	85.88 ± 0.58 ^{hA}
1	87.43 ± 0.58 ^{aA}	91.07 ± 0.43 ^{aA}	89.77 ± 0.13 ^{aA}
2	74.37 ± 0.26 ^{cB}	76.97 ± 0.55 ^{cA}	76.73 ± 0.25 ^{cA}
3	73.30 ± 0.47 ^{cA}	72.14 ± 0.58 ^{dA}	73.35 ± 0.42 ^{dA}

注:不同小写字母表示同列具有显著差异,不同大写字母表示同行具有显著差异($p < 0.05$)

Note: Different lowercase letters within a column indicate significant differences, while different uppercase letters within a row indicate significant differences ($p < 0.05$)

3 结论

与脱脂花生粕相比,醇法制备的花生蛋白溶解性降低,但持水性、持油性、起泡特性、乳化特性以及胶凝性均提高。D1 的溶解性、起泡性高于 D2,持水性、持油性则低于 D2,二者的胶凝性无显著差异。pH 对花生蛋白产品的功能特性有显著影响。花生蛋白在馒头中的应用表明,添加 1% D1 的馒头在所有样品中具有最高的综合评分(91.07 分),且馒头的形状、体积保持最好。综上,醇法加工可提高花生蛋白除溶解性外的其他功能特性,且在馒头制作中适量添加可提升馒头的品质。

参考文献:

- [1] BOUKID F. Peanut protein: An underutilised by-product with great potential: A review[J]. *Int J Food Sci Technol*, 2022, 57(9): 5585–5591.
- [2] CUI S, MCCLEMENTS D J, XU X, et al. Peanut proteins: Extraction, modifications, and applications: A comprehensive review[J]. *Grain Oil Sci Technol*, 2023, 6(3): 135–147.
- [3] PHONGTHAI S, SINGSAENG N, NHOO-IED R, et al. Properties of peanut (KAC431) protein hydrolysates and their impact on the quality of gluten-free rice bread[J/OL]. *Foods*, 2020, 9(7): E942 [2025-03-18]. <https://doi.org/10.3390/foods9070942>.
- [4] 华欲飞, 黄友如, 顾玉兴. 醇变性大豆蛋白在物理改性条件下的溶出行为和机理[J]. *食品与发酵工业*, 2004, 30(8): 125–129.
- [5] TANG Z, YING R, SHI L. Physicochemical and functional characteristics of proteins treated by a pH-shift process: A review[J]. *Int J Food Sci Technol*, 2021, 56(2): 515–529.
- [6] LI J, WU M, WANG Y, et al. Effect of pH-shifting treatment on structural and heat induced gel properties of peanut protein isolate[J/OL]. *Food Chem*, 2020, 325: 126921 [2025-03-18]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126921>.
- [7] TORCELLO-GÓMEZ A, DUPONT D, JARDIN J, et al. Human gastrointestinal conditions affect *in vitro* digestibility of peanut and bread proteins[J]. *Food Funct*, 2020, 11(8): 6921–6932.
- [8] HARIHARAN S, PATTI A, ARORA A. Functional proteins from biovalorization of peanut meal: Advances in process technology and applications[J]. *Plant Foods Hum Nutr*, 2023, 78(1): 13–24.
- [9] 张相凤, 郭兴凤, 张倩, 等. 醇法加工花生蛋白功能特性及组成研究[J]. *粮油食品科技*, 2025, 33(1): 113–120.
- [10] 赵方园, 郭兴凤, 赵树超, 等. 加工条件对醇法大豆浓缩蛋白溶解性及结构的影响[J]. *中国油脂*, 2023, 48(10): 57–63.
- [11] 赵雪淞, 蔺雅菲, 刘民. 花生浓缩蛋白超声改性的工艺条件[J]. *食品与发酵工业*, 2014, 40(3): 147–152.
- [12] 杨柳, 江连洲, 李杨, 等. 水酶法提取的大豆蛋白功能特性研究[J]. *大豆科技*, 2019(S1): 174–178.
- [13] TIRGAR M, SILCOCK P, CARNE A, et al. Effect of extraction method on functional properties of flaxseed protein concentrates[J]. *Food Chem*, 2017, 215: 417–424.
- [14] CORRADO M, KOEV T T, SAVVA G M, et al. Starch characteristics and baking quality of chilled ready-to-eat sandwich bread made with starch branching enzyme II mutant wheat flour[J/OL]. *Food Hydrocolloid*, 2024, 147: 109390 [2025-03-18]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109390>.
- [15] LI J, SHI A, LIU H, et al. Effect of hydrothermal cooking combined with high-pressure homogenization and enzymatic hydrolysis on the solubility and stability of peanut protein at low pH[J/OL]. *Foods*, 2022, 11(9): 1289 [2025-03-18]. <https://doi.org/10.3390/foods11091289>.
- [16] BUCCIARELLI S, SAYEDI E S, OSELLA S, et al. Disentangling the role of solvent polarity and protein solvation in folding and self-assembly of α -lactalbumin[J]. *J Colloid Interface Sci*, 2020, 561: 749–761.
- [17] LU M Z, LOH T P. Development and applications of water-compatible reactions: A journey to be continued[J]. *Acc Chem Res*, 2024, 57(1): 70–92.
- [18] WU H, WANG Q, MA T, et al. Comparative studies on the functional properties of various protein concentrate preparations of peanut protein[J]. *Food Res Int*, 2009, 42(3): 343–348.
- [19] TANG Q, ROOS Y H, MIAO S. Plant protein versus dairy proteins: A pH-dependency investigation on their structure and functional properties[J/OL]. *Foods*, 2023, 12(2): 368 [2025-03-18]. <https://doi.org/10.3390/foods12020368>.
- [20] GE J, SUN C X, MATA A, et al. Physicochemical and pH-dependent functional properties of proteins isolated from eight traditional Chinese beans[J/OL]. *Food Hydrocolloid*, 2021, 112: 106288 [2025-03-18]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106288>.
- [21] ZHANG D, CHEN D, PATEL B, et al. Pectin as a natural agent for reinforcement of pea protein gel[J/OL]. *Carbohydr Polym*, 2022, 298: 120038 [2025-03-18]. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.120038>.
- [22] NGUYEN N H A, WONG M, GUYOMARC H F, et al. Effects of non-covalent interactions between the milk proteins on the rheological properties of acid gels[J]. *Int Dairy J*, 2014, 37(2): 57–63.
- [23] YANG B, ZHANG Y, YUAN J, et al. Impact of different frozen dough technology on the quality and gluten structure of steamed buns[J/OL]. *Foods*, 2022, 11(23): 3833 [2025-03-18]. <https://doi.org/10.3390/foods11233833>.