

鹰嘴豆蛋白粉的添加对面团及馒头品质的影响

郑雁, 林江涛*, 岳清华*, 李淑月, 李心灵, 曾佳
(河南工业大学粮油食品学院, 河南郑州 450001)

摘要: 该文考察不同质量分数的0%、2%、4%、6%、8%、10%的鹰嘴豆蛋白粉制作馒头, 研究其对面团粉质特性、水分分布、流变学特性、二级结构含量和馒头品质的影响规律。结果表明, 鹰嘴豆蛋白粉添加量小于4%时, 面团吸水率增加、形成时间、稳定时间和粉质指数上升, 弱化度下降; 面团中弱结合水向结合水和自由水转移。流变学结果显示, 鹰嘴豆蛋白粉添加量小于6%时, 面团的弹性和黏性模量得到提高, 大于6%时会削弱面团结构强度。二级结构测试中表明, 鹰嘴豆蛋白粉添加量为2%时, β -折叠结构含量最高为37.76%, 能够有效促进面筋蛋白形成更加稳定的体系, 提高面团的品质。随着鹰嘴豆蛋白粉添加量的上升, 馒头的颜色变深, 比容和宽高比减小, 硬度、胶着性和咀嚼性增大, 弹性、内聚性和回复性减小; 当添加量为2%时, 馒头比容最大为2.52 mL/g, 质构特性最好(硬度3 182.46 g, 咀嚼性2 493.15 g, 回复性0.46 mm), 面团持气性增强, 感官评分最高为83.71。综上所述, 在馒头制作时加入一定量的鹰嘴豆蛋白粉制成的面团品质较好, 为鹰嘴豆蛋白粉在面食及焙烤食品中的应用提供了参考依据。

关键词: 鹰嘴豆蛋白粉; 加工特性; 流变学特性; 馒头品质

文章编号: 1673-9078(2025)01-173-181

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.1.1559

Effects of Chickpea Protein Powder on Dough and Steamed Bread Quality

ZHENG Yan, LIN Jiangtao*, YUE Qinghua*, LI Shuyue, LI Xinling, ZENG Jia

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

Abstract: The effects of chickpea protein powder incorporation in mass fractions of 0, 2, 4, 6, 8, and 10% on steamed bread quality were examined. In particular, its effects on the farinograph index, water distribution, rheological properties, and secondary structure content of the dough, and the steamed bread's quality were investigated. When less than 4% chickpea protein powder is added, the dough's water absorption rate, formation time, stability time, and farinograph index increase, while the degree of weakening decreases. Weakly bound water in the dough gradually separates into bound and free water pools. Rheological results reveal that addition of <6% chickpea protein powder improves the elasticity and viscosity moduli of the dough, but the dough's structural strength is reduced when added powder exceeds 6%. Secondary structure analysis shows that, with 2% chickpea protein powder, the β -sheet content peaks at 37.76%, effectively enabling formation of a more stable gluten network, thereby enhancing dough quality. As the chickpea protein powder content gradually increases, the steamed bread becomes darker, and its specific volume and width-to-height ratio decrease. Notably, the hardness,

引文格式:

郑雁,林江涛,岳清华,等.鹰嘴豆蛋白粉的添加对面团及馒头品质的影响[J].现代食品科技,2025,41(1):173-181.

ZHENG Yan, LIN Jiangtao, YUE Qinghua, et al. Effects of chickpea protein powder on dough and steamed bread quality [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(1): 173-181.

收稿日期: 2023-12-27

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(32101985); 河南省重大科技专项项目(221100110700); 河南省重大科技专项(231100110300); 河南工业大学博士基金项目(2023BS107)

作者简介: 郑雁(1999-), 女, 硕士, 研究方向: 谷物加工技术与品质, E-mail: 1732618454@qq.com

通讯作者: 林江涛(1973-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 谷物加工技术与品质, E-mail: hautlin@126.com; 共同通讯作者: 通讯作者: 岳清华(1988-), 女, 博士, 讲师, 研究方向: 谷物科学与加工技术, E-mail: yqhlst1208@126.com

adhesiveness, and chewiness increase, while elasticity, cohesiveness, and resilience decline. At a chickpea protein powder mass fraction of 2%, the steamed bread achieves its highest specific volume (2.52 mL/g) and optimal textural properties (hardness: 3 182.46 g, chewiness: 2 493.15 g, and resilience: 0.46 mm). Gas retention in the dough increased, and the highest sensory score (83.71) was achieved. In short, adding appropriate amounts of chickpea protein powder to steamed bread dough can improve the bread quality. These findings provide references for the application of chickpea protein powder in pasta and bakery products.

Key words: chickpea protein powder; processing characteristics; rheological properties; steamed bread quality

鹰嘴豆 (*Cicer arietinum* L.) 属于豆科鹰嘴豆属, 又称鸡豆、桃尔豆, 因其豆子外形类似于鹰嘴而名为鹰嘴豆。鹰嘴豆中营养成分丰富, 蛋白质含量尤其突出占鹰嘴豆的 15%~30%, 蛋白体外模拟消化率为 97.9%^[1], 鹰嘴豆具有较高的蛋白质生物利用率和生物价值^[2]。鹰嘴豆蛋白质中氨基酸种类齐全且均衡, 谷氨酸含量最高为 10.17, 蛋氨酸含量最低为 0.55, 被视为优质的植物蛋白来源, 可替代动物蛋白^[3]。鹰嘴豆蛋白质主要由谷蛋白、球蛋白、清蛋白和醇溶蛋白组成, 其中谷蛋白占总蛋白的 15%~25%, 含量较高^[4], 球蛋白主要包含豆球蛋白 (11 S) 和豌豆球蛋白 (7 S)^[5], 清蛋白主要由许多酶和代谢蛋白组成^[6], 醇溶蛋白占总蛋白的 3%~7%^[7]。另外, 鹰嘴豆蛋白质还具有多种功能性质, 如溶解性^[8]、吸水/吸油性^[9]、乳化性^[10]、发泡性和凝胶性^[11]。将鹰嘴豆蛋白应用于食品中, 会对食品的品质、感官和营养带来不同程度的改变, 但目前对于鹰嘴豆蛋白质的研究较少, 大部分集中在鹰嘴豆粉的研究上。

小麦粉在加工过程中会使矿物质、膳食纤维和维生素等大量流失, 而且小麦蛋白中缺乏赖氨酸, 长期食用会使体内营养失衡^[12]。将小麦粉与高蛋白原料搭配食用是很好的营养互补方法^[13]。Mohammed 等^[14]研究了将鹰嘴豆粉加入小麦粉中对面团糊化和面包品质的影响, 表明添加鹰嘴豆粉能改善面团的流变学和糊化性能, 提升面包品质。Man 等^[15]也得出相似的结论, 添加 10% 的鹰嘴豆粉使面包具有良好的感官属性。Ghribi 等^[16]指出添加鹰嘴豆浓缩蛋白能改善香肠的感官特性, 降低脂质氧化水平, 提高肉制品的色泽。Sofi 等^[17]将发芽和不发芽两种鹰嘴豆蛋白粉加入米粉中, 米粉蛋白质含量整体增加, 对米粉色泽和蒸煮品质均有明显的改善作用。但目前将鹰嘴豆蛋白粉添加到馒头制品和其它面制品中的研究鲜有报道, 尤其是对面团流变学特性、成品品质的影响方面缺少系统研究。

本文旨在研究不同添加量鹰嘴豆蛋白粉对面团及馒头品质特性的影响, 从粉质特性、水分分布、流变学特性、二级结构和馒头品质等方面探讨鹰嘴豆蛋白粉与小麦粉相互作用的影响, 对高蛋白面制品的改良、专用蛋白粉的开发以及豆类蛋白在食品加工中的应用和工业化生产奠定基础。

1 材料与方法

1.1 原料

鹰嘴豆蛋白粉 [Chickpea Protein, CPI, 蛋白质含量 81.46% (鲜重)], 实验室自制; 小麦粉, 金苑特一粉; 高效活性干酵母, 安琪酵母股份有限公司。

1.2 仪器与设备

Foss Kjeltec 8400 全自动凯氏定氮仪, 福斯分析仪器公司; SDmatic 破损淀粉测定仪, 法国 CHOPIN 公司; FN-II 型降落数值测定仪, 杭州麦哲仪器有限公司; LXJ-IIB 离心机, 上海安亭科学仪器有限公司; FD-1A-50 冷冻干燥机, 北京博医康实验仪器有限公司; Brabender 粉质仪, 德国布拉班德仪器公司; MicroMR-CL-I 核磁共振成像分析仪, 苏州 (上海) 纽迈电子科技有限公司; MARS60 哈克流变仪, 美国 Thermo Fisher Scientific 公司; Nicolet iS20 型傅里叶红外光谱仪, 美国 Thermo Fisher 公司; CR-410 型色彩色差仪, 日本柯尼卡美能达公司; TA-XTPlus 质构仪, 德国 Stable Micro Systems 公司。

1.3 实验方法

1.3.1 CPI-小麦粉混合粉的制备

以小麦粉鲜重质量 100% 为基准, CPI 的添加比例为小麦粉总质量的 0%、2%、4%、6%、8%、10% (m/m) 混合制成 CPI-小麦粉混合粉, 混合均匀后备用。

1.3.2 混合粉基本理化指标的测定

水分含量测定：GB 5009.3-2016 方法；蛋白质含量测定：GB 5009.5-2016 方法；灰分含量测定：GB 5009.4-2016 方法；总淀粉测定，采用 AACC 76-13.01 测定；破损淀粉含量测定：使用 SDmatic 破损淀粉测定仪；直链淀粉含量的测定：使用 GB/T 15683-2008 测定；降落数值：使用 GB/T 10361-2008 测定。

1.3.3 混合粉粉质特性的测定

按照国标 GB/T 14614-2019 测定混合粉粉质特性。称取不同比例混合粉 50 g 加入粉质仪揉面钵中，混合搅拌 1 min 后加入适量的水，使面团的最大稠度控制在 (500±20) FU，对混合粉粉质参数进行测定。

1.3.4 混合粉面团的制备

称取适量 1.3.1 中制备的混合粉放入和面机中，根据称取混合粉质量加入吸水率 75% (V/m) 的蒸馏水，和面 3 min 后取出备用。

1.3.5 面团水分分布的测定

将 1.3.4 制备好的面团取 1.00 g 用聚四氟乙烯膜包裹成细条状放入核磁共振专用试管中，放入核磁共振成像仪中进行测定。参数设置为：采样点数 TD=70 000，采样频率 SW=200.00 kHz，采样间隔时间 TW=1 500 ms，NS=32，TE=0.1 ms，采样结束后利用 T_2 反演程序进行反演，可得到 T_2 弛豫时间反演图。

1.3.6 面团动态流变学特性的测定

将 1.3.4 制备好的面团取适量置于测试探头上，选择直径为 35 mm 探头，平行板间隙为 2 mm，在 25 °C 下进行测试，频率设置为 10 rad/s，应变扫描范围 0.01%~100%，得到最佳线性粘弹性区域，确定应变为 0.5%，使用频率扫描测定，频率范围为 0.1~10 Hz，温度 25 °C。测定面团的弹性模量 (G')、黏性模量 (G'')，通过公式 $\tan\delta=G''/G'$ 计算得出损耗角正切值 ($\tan\delta$)。

1.3.7 面团二级结构的测定

参照 Warren 等^[18]的方法，将 1.3.4 制备好的面团进行冷冻干燥，过筛，于 -4 °C 保存。将制备好的面团冻干粉与干燥完全的溴化钾按照 1:100 的比例称样在玛瑙研钵中充分研磨。取适量样品进行压片，利用傅里叶红外光谱仪对压制好的薄片进行测定，分析

蛋白质的二级结构。扫描范围 4 000~400 cm^{-1} ，分辨率 4 cm^{-1} ，扫描次数 32。采用 PeakFit v4.12 对 1 700~1 600 cm^{-1} 处吸收峰图谱依次进行基线校正、高斯去卷积和二阶导数拟合，分析面筋蛋白的二级结构。

1.3.8 混合粉馒头制作

参照 GB/T 35991-2018 进行馒头的制作，并进行一定的修改。称取 1.3.1 中所制混合粉 200 g 放入和面机中，将 0.8% 的酵母加入的蒸馏水中溶解，蒸馏水依次为：93.08、94.05、95.25、96.45、98.1 和 100.73 g；之后加入和面机中，和面 3 min 后取出面团，用压片机压制 10 次，分成三个 80 g 面团，手搓成型后放入发酵箱中，设置温度与湿度分别为 35 °C 与 85%，发酵 30 min 后，将馒头放入锅中蒸制 25 min，焖 1 min 后取出。冷却 60 min 后开始测试各项指标。

1.3.8.1 馒头比容和宽高比测定

用游标卡尺分别量取馒头中心位置的高度及底部宽度，直径与高度之比为宽高比。使用小米置换法测定馒头体积^[19]，使用天平测定馒头质量，用体积质量之比计算比容。

1.3.8.2 馒头芯色泽测定

采用色差仪测定馒头的 L^* 、 a^* 、 b^* 值。白度值 (WI) 按公式 (1) 计算：

$$WI=100-\sqrt{(100-L^*)^2+(a^*)^2+(b^*)^2} \quad (1)$$

式中：

L^* ——馒头亮度值；

a^* ——馒头红绿色偏差值；

b^* ——馒头黄蓝色偏差值。

1.3.8.3 馒头质构特性测定

冷却后的馒头使用切片机切成 15 mm 厚的馒头片，使用质构仪 P/36R 探头进行测定。测试参数：测前、测试和测后速度分别为：1、1 和 1 mm/s，压缩比 50%，触发力 5 g，间隔时间 5 s，测试 4 次求平均值。

1.3.8.4 馒头感官评定

馒头的感官评价标准参考 GB/T 35991-2018，并进行一定的修改。优选 10 位感官评价人员组成小组，按照表 1 对产品进行感官评价，感官评价总分为 100 分。

表 1 馒头感官评级标准

Table 1 Sensory rating standard for steamed bread

项目	满分	得分标准
比容	20	比容 ≥ 2.8 得20分, 2.8>比容>1.8时比容每降低0.1扣1.5分, 比容 ≤ 1.8 时得最低分5分
宽高比	5	宽高比 ≤ 1.4 时得最高分5分, 1.6>宽高比>1.4时每增加0.5扣1分, 宽高比 ≥ 1.6 得最低分0分
弹性	10	弹性较好得8~10分, 弹性较弱得6~7分, 按压困难、较硬得4~5分
表面色泽	10	表面光泽好得8~10分, 表面光泽稍暗得6~7分, 表面光泽灰暗得4~5分
表面结构	10	表面光滑得8~10分, 有气泡、皱缩、塌陷和烫斑得4~7分
内部结构	20	内部气孔均匀得18~20分, 气孔较均匀、存在个别气泡得13~17分, 气孔过于细密、气泡过多得10~12分, 气孔不均匀、结构粗糙得5~9分, 表皮分离时在以上基础上扣1分
韧性	10	有较强咬劲得8~10分, 咬劲一般得6~7分, 咬劲较差4~5分
黏性	10	爽口不黏牙得8~10分, 较黏牙得6~7分, 黏牙不爽口得4~5分
食味	5	正常小麦风味得5分, 滋味平淡3~4分, 有异味1~2分

表 2 混合粉中基本成分含量

Table 2 Content of basic ingredients in powder mixes

CPI 质量 分数/%	水分/%	蛋白质/%	灰分/%	总淀粉/%	破损淀粉/ UCD _c	直链淀粉/%	降落数值/S
0	12.81 ± 0.01 ^a	9.83 ± 0.13 ^a	0.37 ± 0.01 ^d	68.38 ± 2.17 ^a	23.80 ± 0.00 ^d	26.93 ± 1.10 ^b	527 ± 25.46 ^{ab}
2	12.40 ± 0.10 ^b	11.33 ± 0.11 ^b	0.53 ± 0.01 ^c	65.49 ± 1.95 ^{ab}	24.10 ± 0.00 ^c	28.70 ± 0.28 ^a	545.50 ± 26.11 ^a
4	11.91 ± 0.04 ^c	12.46 ± 0.10 ^c	0.60 ± 0.12 ^{bc}	67.74 ± 0.56 ^{ab}	24.25 ± 0.07 ^c	20.28 ± 0.39 ^c	524 ± 11.31 ^{abc}
6	11.73 ± 0.17 ^{cd}	13.76 ± 0.16 ^d	0.71 ± 0.06 ^{ab}	64.68 ± 0.86 ^{ab}	24.60 ± 0.00 ^b	18.37 ± 0.58 ^d	486.50 ± 12.02 ^{bcd}
8	11.58 ± 0.08 ^{de}	15.04 ± 0.06 ^e	0.79 ± 0.04 ^a	63.71 ± 2.10 ^b	24.80 ± 0.14 ^b	16.67 ± 0.68 ^e	481 ± 16.97 ^{cd}
10	11.50 ± 0.04 ^e	16.32 ± 0.12 ^f	0.83 ± 0.08 ^a	63.65 ± 1.71 ^b	25.25 ± 0.21 ^a	15.89 ± 0.00 ^e	451 ± 2.83 ^d

注: 表中上标小写字母表示相同字母表示无显著差异 ($P > 0.05$); 不同字母表示具有显著性差异 ($P < 0.05$)。

1.4 数据处理

使用 Excel 进行数据统计, 采用 SPSS 25.0 对数据进行显著性分析, 不同的小写字母表示样品间存在显著性差异 ($P < 0.05$), 结果用“平均值 ± 标准偏差”表示, 再使用 Origin 2018 作图软件进行绘图。

2 结果与讨论

2.1 混合粉基本理化指标

混合粉的基本成分分析如表 2 所示, 随着 CPI 添加量的增加, 混合粉中蛋白质、灰分和破损淀粉含量增加; 水分、总淀粉、直链淀粉和降落数值含量降低。从表 3 中可以看出, CPI 的蛋白质含量显著高于小麦粉, 添加 CPI 后显著提高了混合粉的蛋白含量; 还因其本身淀粉含量较少, 在提取过程中经历破碎等过程, 机械损伤大, 使总淀粉含量减少, 破损淀粉含量增加。有研究表明, 降落数值和破损淀粉含量呈现负相关^[20], 随着 CPI 的增加降落数值由 527 S 下降至 481 S, 下降趋势显著, 表明混合粉

中 α -淀粉酶活性增强, 其原因可能是 CPI 的添加使破损淀粉含量升高, 而破损淀粉与完整淀粉相比更容易水解产生更多的糖类物质, 使 α -淀粉酶活性增强, 导致降落数值显著下降。

2.2 CPI 添加量对面团粉质特性的影响

粉质特性是面团流变学特性的重要指标, 主要反映面粉的筋度强弱、吸水量以及面团在揉混过程中内在品质发生的变化^[21]。如表 4 所示, 随着 CPI 的添加, 吸水率由 62.05% 增加到 67.15%, 这是因为 CPI 的吸水能力比小麦粉强^[8], 且混合粉的破损淀粉含量较高, 使混合粉的吸水率显著增加; 面团的吸水率越高, 食品的出品率越高, 但吸水率过高将导致产品不易成型。与未添加 CPI 相比, 当 CPI 添加量小于 4% 时, 形成时间和稳定时间延长, 弱化度减小, 粉质指数增加, 主要是因为 CPI 吸水性较强, 使面筋蛋白充分吸水的时间延长, 还可能是 CPI 与面筋蛋白发生作用, 形成了更加稳定的面筋网络结构。CPI 添加量大于 4% 时, 其形成时间和稳

定时间缩短，弱化度增加，粉质指数减小，这是由于CPI竞争水分导致面筋不完全水合，削弱了面筋网络结构，使面团的耐搅拌能力下降，从而导致形成时间、稳定时间和粉质指数降低^[22]。

2.3 CPI添加量对面团水分分布的影响

低场核磁共振技术反映面团内部水分含量以及水分结合状态。 t_{21} 、 t_{22} 、 t_{23} 分别代表深层结合水、弱结合水和自由水的流动性^[23]。相对应的峰面积 A_{21} 、 A_{22} 、 A_{23} 分别是深层结合水、弱结合水以及自由水的含量，峰面积越大对应的水分相对含量越大^[24]。深层结合水是与蛋白质或淀粉紧密结合的水；弱结合水是流动性介于深层结合水和自由水之间的水^[25]。

如图1所示，面团中水分存在形式主要是弱结合水。从表5可知，与未添加CPI相比，CPI添加量小于6%时， A_{21} 显著增加， A_{22} 显著降低，添加量为6%时， A_{21} 达到最大值， A_{22} 达到最小值， A_{23} 显著增加，表明CPI使部分弱结合水向自由水和紧

密结合水迁移，促进了水与面筋蛋白、淀粉的结合，限制了水的流动性。一方面可能是CPI具有良好的亲水性^[9]和较强的持水性，改变了面团中水的分布，使体系中的水分与淀粉和面筋蛋白结合的更加紧密；另一方面可能是CPI和面筋蛋白产生新的交联结构，促进面筋网络结构加强，使蛋白质-淀粉结构更加连续紧密，使面团的持水能力上升，保留更多的水分。

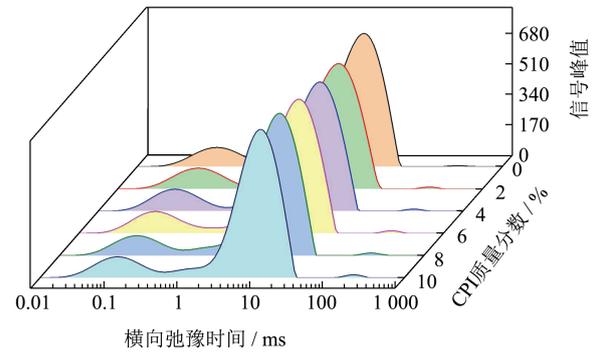


图1 CPI对面团水分横向弛豫时间(T_2)反演图

Fig.1 Inverse plot of CPI on dough moisture transverse relaxation time (T_2)

表3 原料的基本理化指标

Table 3 Basic physical and chemical indicators of raw materials

CPI添加量/%	水分/%	蛋白质/%	灰分/%	总淀粉/%	脂肪/%
小麦粉	12.98 ± 0.13	9.83 ± 0.13	0.37 ± 0.01	68.38 ± 2.17	0.72 ± 0.09
CPI	5.08 ± 1.66	81.46 ± 0.12	3.23 ± 0.01	0.16 ± 0.01	2.54 ± 0.01

表4 CPI对混合粉粉质特性的影响

Table 4 Effect of CPI on the powder properties of blended powders

CPI质量分数/%	吸水率/%	形成时间/min	稳定时间/min	弱化度/FE	粉质指数/mm
0	62.05 ± 0.21 ^a	5.12 ± 0.08 ^a	7.29 ± 0.09 ^b	90.50 ± 3.54 ^a	91 ± 2.83 ^c
2	62.70 ± 0.14 ^b	5.18 ± 0.11 ^a	8.25 ± 0.01 ^a	68.50 ± 3.54 ^{bc}	106.50 ± 4.95 ^{ab}
4	63.50 ± 0.14 ^c	5.33 ± 0.23 ^a	8.93 ± 0.60 ^a	59 ± 7.07 ^d	116.50 ± 6.36 ^a
6	64.30 ± 0.00 ^d	4.96 ± 0.62 ^{ab}	8.41 ± 0.05 ^a	62.50 ± 0.71 ^{cd}	109 ± 4.24 ^{ab}
8	65.40 ± 0.14 ^c	4.75 ± 0.57 ^{ab}	7.38 ± 0.11 ^b	61.50 ± 0.71 ^{cd}	103 ± 4.24 ^b
10	67.15 ± 0.07 ^f	4.12 ± 0.03 ^b	5.94 ± 0.54 ^c	72.50 ± 0.71 ^b	91.50 ± 0.71 ^c

注：表中上标小写字母表示相同字母表示无显著差异 ($P > 0.05$)；不同字母表示具有显著性差异 ($P < 0.05$)，下表同。

表5 CPI对面团水分分布的影响

Table 5 Effect of CPI on the moisture distribution of doughs

CPI质量分数/%	t_{21} /ms	t_{22} /ms	t_{23} /ms	A_{21} /%	A_{22} /%	A_{23} /%
0	0.55 ± 0.09 ^a	39.75 ± 2.21 ^a	309.55 ± 93.40 ^a	12.04 ± 0.31 ^c	87.74 ± 0.31 ^a	0.22 ± 0.00 ^d
2	0.57 ± 0.05 ^a	37.18 ± 3.63 ^{ab}	196.93 ± 24.34 ^b	13.48 ± 0.03 ^b	86.14 ± 0.06 ^b	0.38 ± 0.03 ^c
4	0.59 ± 0.12 ^a	38.07 ± 0.13 ^{ab}	248.07 ± 44 ^{ab}	14.27 ± 0.46 ^{ab}	85.28 ± 0.45 ^{bc}	0.45 ± 0.02 ^c
6	0.71 ± 0.26 ^a	34.93 ± 0.28 ^{bc}	210.13 ± 9.69 ^b	15 ± 0.90 ^a	84.44 ± 0.86 ^c	0.56 ± 0.05 ^b
8	0.52 ± 0.04 ^a	33.28 ± 1.61 ^c	212.96 ± 43.99 ^b	13.15 ± 0.28 ^{bc}	86.22 ± 0.29 ^b	0.62 ± 0.06 ^{ab}
10	0.49 ± 0.06 ^a	32.38 ± 0.07 ^c	214.83 ± 1.54 ^b	13.41 ± 0.79 ^b	85.93 ± 0.80 ^b	0.66 ± 0.03 ^a

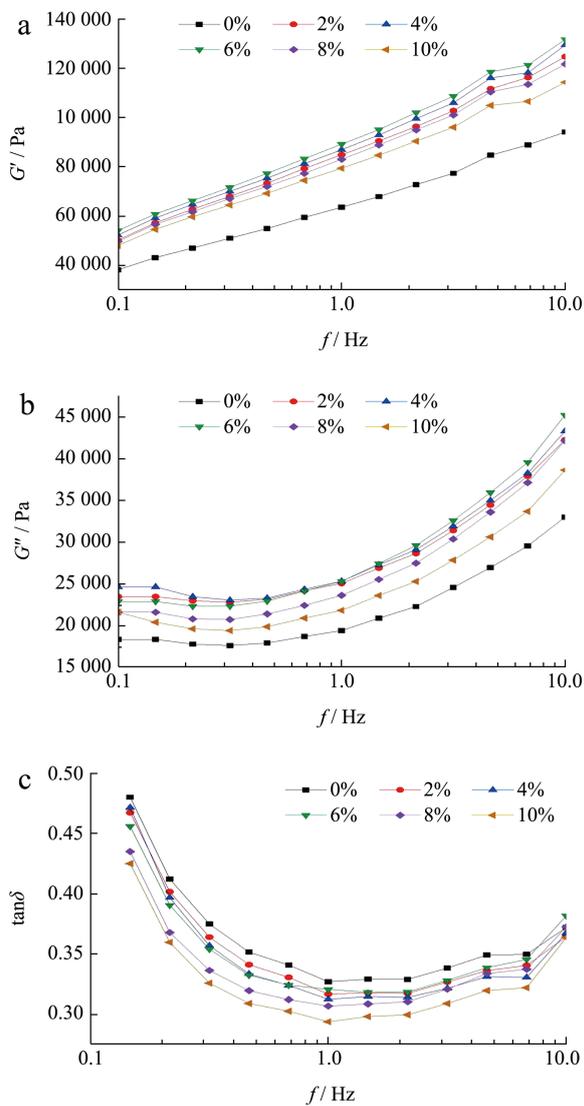


图2 CPI对面团流变性能的影响

Fig.2 Effect of CPI on the rheological properties of doughs

2.4 CPI添加量对面团动态流变学特性的影响

面团的动态流变学特性可以反映面团黏弹性的变化趋势,能够很好的预测馒头的品质。如图2所示。在0.1~10 Hz的频率范围内,所有样品的弹性模量(G')均大于黏性模量(G''),面团的损耗角正切值($\tan\delta$)始终小于1,面团表现为固体类弹性行为。添加CPI面团的 G' 和 G'' 随频率的变化趋势一致,并始终高于对照组,用CPI替代小麦粉后,面团的黏弹性得到增强,并随着CPI浓度的增加呈现先增加后减小的趋势。CPI添加量为6%时, G' 和 G'' 增加到最大,在10%时降到最低。在CPI为6%添加量时,面团以弹性为主而非黏性^[26],可能是CPI促进了面团中面筋蛋白的相互作用,产生了新的交联结构,使面团面筋蛋白的网络结构加强,面团呈现出较好的黏弹性^[27]。当CPI添加量过大时,面筋

蛋白与淀粉的结构被破坏,使面团稳定体系难以维持,导致面团的黏弹性下降。Zhao等^[28]研究发现在添加大米蛋白后提高了面团的弹性和黏性模量,过量添加会削弱面团的强度。石长硕等^[29]在研究中指出,添加大豆分离蛋白后,醇溶蛋白含量减小,麦谷蛋白大聚体含量增加,使面筋的 G' 和 G'' 都呈现增加的趋势,赋予面团较好的弹性。

2.5 CPI添加量对面团二级结构的影响

蛋白质的红外光谱图包括酰胺I区、酰胺II区和酰胺III区。酰胺I区主要为C=O的伸缩振动,在1600~1700 cm^{-1} 范围内,包含 α -螺旋、 β -折叠、 β -转角和无规则卷曲等结构信息,常用来对蛋白质的二级结构进行表征^[30]。从表6可以看出,当CPI添加量为2%时 β -折叠相对含量达到最大值为37.76%,相比对照组增加了2.56%。在CPI添加量为4%~10%时, β -折叠和无规则卷曲整体呈现先下降后增加趋势,而 α -螺旋和 β -转角则呈现先增加后下降,且均在CPI添加量为6%时,达到拐点。有研究报道称 β -折叠和 β -转角是面筋蛋白的主要结构^[31], β -折叠和 α -螺旋对应面筋蛋白的有序结构, β -折叠是一种刚性结构,稳定性较强, β -转角和无规则卷曲是蛋白质的无序二级结构^[32]。与对照组相比,CPI本身具有高含量的 α -螺旋和 β -折叠结构,分别为17.66%和40.63%,导致CPI的添加对面筋结构的破坏所造成的 α -螺旋和 β -折叠含量整体变化不明显。陈玉^[33]研究指出南瓜籽蛋白本身具有高含量的 β -折叠和 β -转角,因此对面筋蛋白的破坏所造成的 β -折叠和 β -转角含量的变化不明显。当CPI添加量为2%时,蛋白的二级结构从 α -螺旋、 β -转角和无规则卷曲向 β -折叠结构转变,以牺牲 β -转角结构形成的 β -折叠结构会使面团形成更稳定的面筋网络结构^[34],较高水平的 β -折叠可以增强分子间氢键作用,这使得CPI添加量为2%时获得更加稳定的面筋蛋白网络结构,有利于提高面制品的弹性,这与前面研究面团动态流变学特性结果一致。

2.6 CPI添加量对馒头品质的影响

2.6.1 CPI添加量对馒头比容、宽高比的影响

由图3可知,随着CPI添加量的增加,馒头的比容呈现先增大后减小的趋势。CPI的添加量为2%时,馒头的比容最大为2.52 mL/g,添加量小于6%时,馒头比容均大于2.3 mL/g,在馒头最佳品质范围之内,添加CPI过多,使馒头硬度增大,比

容减小。主要是过多添加 CPI 会阻止面团发酵过程中产生的二氧化碳气体释放^[35]，导致馒头内部的气孔紧密，使比容减小。Eduarda 等^[35]也得出类似的结论，添加大豆蛋白过多时，不利于发酵产生的气体释放，导致馒头的比容减小。馒头宽高比随 CPI 添加量的增加呈现减小趋势，可能是因为面团在醒发过程中持气能力受阻，无法充分保持气体而导致体积膨胀受限^[36]，使面团的横向或者竖向扩张受到影响。

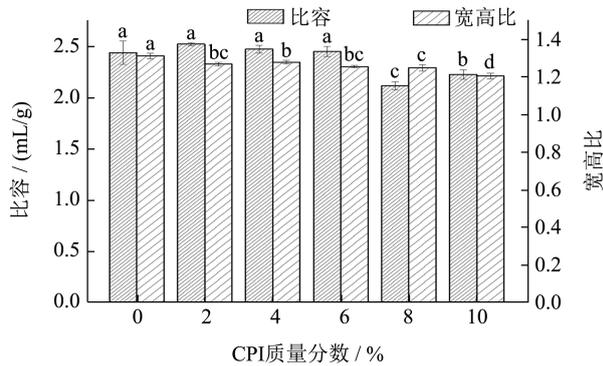


图 3 CPI 对馒头比容和宽高比的影响

Fig.3 Effect of CPI on specific volume and aspect ratio of steamed bread

2.6.2 CPI添加量对馒头芯色泽和感官品质的影响

由表 7 和图 4 可知，随着 CPI 添加量的增加，

馒头 L^* 值和白度值 (WI) 降低， a^* 值和 b^* 值上升。主要是因为 CPI 本身颜色呈现淡黄色，其颜色对馒头色泽产生了影响。随着 CPI 添加量的增加，馒头颜色变黄，馒头孔洞变大，气孔分布不均匀且馒头表皮与内部边缘开始分离，馒头弹性变差，发黏，豆味变浓，影响人们的食欲，总体食用品质降低，导致馒头的感官评分下降。当添加 2% CPI 时，馒头色泽最优，馒头感官评分最高为 83.71。

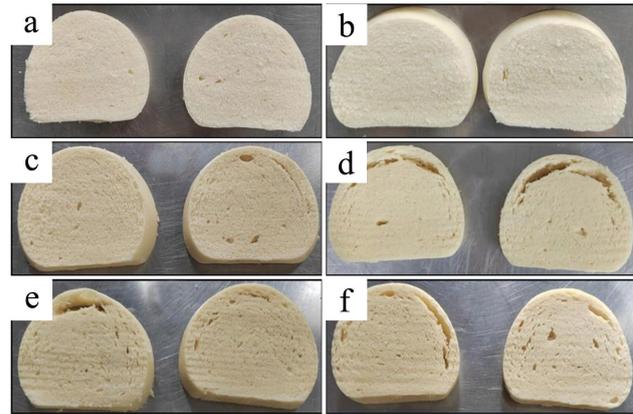


图 4 不同 CPI 添加量的馒头内部结构

Fig.4 Internal structure of steamed bread with different CPI additions

注：图 a~f 分别为 CPI 添加量 0%、2%、4%、6%、8%、10% 馒头内部结构截面图。

表 6 CPI对面团二级结构的影响

Table 6 Effect of CPI on dough secondary structure

CPI 质量分数 / %	β - 折叠 / %	无规则卷曲 / %	α - 螺旋 / %	β - 转角 / %
	1 600~1 640 cm^{-1}	1 640~1 650 cm^{-1}	1 650~1 660 cm^{-1}	1 660~1 700 cm^{-1}
CPI	40.63 ± 0.01 ^a	18.76 ± 0.14 ^d	17.66 ± 0.34 ^a	22.95 ± 0.49 ^e
0	35.20 ± 0.05 ^e	21.49 ± 0.17 ^{ab}	14.57 ± 0.14 ^{bc}	28.74 ± 0.08 ^{abc}
2	37.76 ± 0.26 ^b	21.11 ± 0.09 ^b	12.87 ± 0.12 ^d	28.26 ± 0.24 ^{bc}
4	35.29 ± 0.00 ^e	21.34 ± 0.41 ^b	13.98 ± 1.15 ^{cd}	29.39 ± 0.75 ^{ab}
6	34.27 ± 0.05 ^f	20.18 ± 0.05 ^c	15.67 ± 0.32 ^b	29.88 ± 0.22 ^a
8	35.76 ± 0.18 ^d	20.38 ± 0.23 ^c	15.10 ± 0.09 ^{bc}	28.01 ± 0.73 ^c
10	36.70 ± 0.17 ^c	21.87 ± 0.12 ^a	14.84 ± 0.12 ^{bc}	26.58 ± 0.18 ^d

表 7 CPI对馒头色泽和感官品质的影响

Table 7 Effect of CPI on the color and sensory quality of steamed bread

CPI 质量分数 / %	L^*	a^*	b^*	WI	感官评分
0	86.41 ± 0.31 ^a	0.01 ± 0.00 ^f	19.16 ± 0.22 ^f	76.51 ± 0.08 ^a	81.57 ± 1.27 ^a
2	85.33 ± 0.19 ^b	0.43 ± 0.02 ^e	19.87 ± 0.03 ^e	75.30 ± 0.11 ^b	83.71 ± 3.59 ^a
4	84.08 ± 0.48 ^c	0.85 ± 0.04 ^d	20.81 ± 0.12 ^d	73.79 ± 0.33 ^c	81.14 ± 4.53 ^a
6	82.48 ± 0.54 ^d	1.34 ± 0.03 ^c	22.47 ± 0.08 ^c	71.48 ± 0.30 ^d	75.86 ± 4.18 ^b
8	80.08 ± 0.11 ^e	1.76 ± 0.03 ^b	22.86 ± 0.15 ^b	69.63 ± 0.10 ^e	66 ± 5.54 ^c
10	79.08 ± 0.25 ^f	2.21 ± 0.02 ^a	23.66 ± 0.06 ^a	68.34 ± 0.19 ^f	63.71 ± 3.95 ^c

表 8 CPI对馒头质构的影响

Table 8 Effect of CPI on the texture of steamed bread

CPI 质量分数/%	硬度/g	弹性	内聚性	胶着性	咀嚼性/g	回复性/mm
0	3 557.12 ± 94.58 ^d	0.94 ± 0.01 ^a	0.81 ± 0.00 ^b	2 869.13 ± 71.79 ^c	2 695.20 ± 65.39 ^{bc}	0.44 ± 0.00 ^b
2	3 182.46 ± 155.53 ^c	0.95 ± 0.02 ^a	0.82 ± 0.00 ^a	2 617.42 ± 125.59 ^d	2 493.15 ± 109.75 ^c	0.46 ± 0.00 ^a
4	4 013.57 ± 53.66 ^c	0.95 ± 0.00 ^a	0.80 ± 0.00 ^b	3 220.71 ± 38.02 ^b	3 056.03 ± 36.88 ^{abc}	0.43 ± 0.00 ^{bc}
6	4 361.60 ± 157.03 ^{ab}	0.94 ± 0.02 ^a	0.80 ± 0.00 ^b	3 494.62 ± 109.03 ^a	3 302.17 ± 159.06 ^{abc}	0.43 ± 0.00 ^c
8	4 460.49 ± 117.41 ^a	0.93 ± 0.01 ^a	0.81 ± 0.01 ^b	3 599.02 ± 65.73 ^a	3 343.22 ± 37.47 ^{ab}	0.43 ± 0.01 ^{bc}
10	4 149.48 ± 227.78 ^{bc}	1.08 ± 0.30 ^a	0.83 ± 0.01 ^a	3 450.52 ± 145.44 ^a	3 748.85 ± 1 164.79 ^a	0.45 ± 0.01 ^a

2.6.3 CPI添加量对馒头质构的影响

馒头的弹性、内聚性和回复性与其品质呈正相关，而硬度、胶着性和咀嚼性则呈负相关^[37]。由表 8 可知，添加 CPI 馒头的硬度、胶着性和咀嚼性呈现相同的变化，随着 CPI 添加量的增加呈现先减小后增加的趋势。添加 2% CPI 馒头与对照组相比，硬度、胶着性和咀嚼性降低，表现出较好的弹性、内聚性和回复性。这可能是 CPI 的加入，与面筋蛋白发生了相互作用，形成了更加稳定的面筋蛋白网络结构，这与面团流变学特性和二级结构测定结果相一致。当 CPI 添加量大于 2% 时，表现出较高的硬度和较难的咀嚼性。这可能是 CPI 添加量在 2% 以上时，稀释了面团中的面筋蛋白，阻碍面筋网络的形成，使面团不能很好的保持发酵过程中产生的二氧化碳气体^[38]，导致形成的气室减小，降低了面团的膨松度^[39]，致使馒头变硬咀嚼性增加，受压回复能力变差，韧性降低，食用品质下降。

3 结论

CPI 的添加对面团及馒头品质影响显著。粉质结果显示，CPI 添加量小于 4% 时，形成时间和稳定时间延长，弱化度减小，即面团的内在品质较好。动态流变学表明，CPI 添加量为 6% 时 G' 和 G'' 达到最大值，说明面团具有较好的黏弹性。CPI 添加量为 2% 时，面筋蛋白二级结构中以牺牲 β -转角结构来形成 β -折叠结构，使面团形成更稳定体系。因此，CPI 添加量小于 4% 时，赋予面团较好的黏弹性，使面团体系更加稳定，添加量大于 4% 时，削弱了面筋蛋白网络结构，降低了面团的强度。

与对照组相比，添加 2% 的 CPI 馒头其比容最大为 2.52 mL/g，硬度最低为 3 182.46 g，回复性最高为 0.46 mm，面团持气性较好，内部气孔均匀，表现出较好的口感、风味和色泽，感官评分最高为

83.71，易于消费者接受。随着 CPI 添加量增多，馒头比容降低，硬度增大，弹性降低，馒头芯色泽变深，内部结构粗糙，发黏，感官评分下降。综合考虑馒头的品质，添加 2% CPI 最为适宜，此时馒头的品质达到最佳。

参考文献

- [1] 惠君玉,熊江红,杨安树,等.不同豆类蛋白组成、结构和功能特性[J].南昌大学学报(理科版),2020,44(6):562-569.
- [2] BOUKID F. Chickpea (*Cicer arietinum* L.) protein as a prospective plant-based ingredient: a review [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2021, 56(11): 5435-5444.
- [3] ONDER S, CAN KARACA A, OZCELIK B, et al. Exploring the amino-acid composition, secondary structure, and physicochemical and functional properties of chickpea protein isolates [J]. ACS Omega, 2023, 8(1): 1486-1495.
- [4] GRASSO N, LYNCH N L, ARENDT E K, et al. Chickpea protein ingredients: A review of composition, functionality, and applications [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2022, 21(1): 435-452.
- [5] DAY L. Proteins from land plants-potential resources for human nutrition and food security [J]. Trends in Food Science & Technology, 2013, 32(1): 25-42.
- [6] BESSADA S M F, BARREIRA J C M, OLIVEIRA M B P P. Pulses and food security: Dietary protein, digestibility, bioactive and functional properties [J]. Trends in Food Science & Technology, 2019, 93: 53-68.
- [7] RACHWA-ROSIK D, NEBESNY E, BUDRYN G. Chickpeas-composition, nutritional value, health benefits, application to bread and snacks: a review [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2015, 55(8): 1137-1145.
- [8] WITHANA-GAMAGE T S, WANASUNDARA J P, PIETRASIK Z, et al. Physicochemical, thermal and functional characterisation of protein isolates from Kabuli and Desi chickpea (*Cicer arietinum* L.): a comparative study with soy (*Glycine max*) and pea (*Pisum sativum* L.) [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2011, 91(6): 1022-1031.
- [9] TOEWS R, WANG N. Physicochemical and functional properties of protein concentrates from pulses [J]. Food

- Research International, 2013, 52(2): 445-451.
- [10] KARACA A C, LOW N, NICKERSON M. Emulsifying properties of chickpea, faba bean, lentil and pea proteins produced by isoelectric precipitation and salt extraction [J]. Food Research International, 2011, 44(9): 2742-2750.
- [11] PAPALAMPROU E M, DOXASTAKIS G I, BILIADERIS C G, et al. Influence of preparation methods on physicochemical and gelation properties of chickpea protein isolates [J]. Food Hydrocolloids, 2009, 23(2): 337-343.
- [12] SHUAIBO S, XUEER Y, CHENG L. Main factors affecting the starch digestibility in Chinese steamed bread [J]. Food Chemistry, 2022, 393: 133448.
- [13] SIM S Y, AZIAH A A N, CHENG L H. Quality and functionality of Chinese steamed bread and dough added with selected non-starch polysaccharides [J]. Journal of Food Science and Technology-mysore, 2015, 52(1): 303-310.
- [14] MOHAMMED I, AHMED A R, SENGE B. Effects of chickpea flour on wheat pasting properties and bread making quality [J]. Journal of Food Science and Technology, 2014, 51(9): 1902-1910.
- [15] MAN S, PĂUCEAN A, MUSTE S, et al. Effect of the chickpea (*Cicer arietinum* L.) flour addition on physicochemical properties of wheat bread [J]. Bulletin of University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine Cluj-Napoca. Food Science and Technology, 2015, 72(1): 41-49.
- [16] MOKNI G A, BEN A A, MAKLOUF G I, et al. Toward the enhancement of sensory profile of sausage “Merguez” with chickpea protein concentrate [J]. Meat Science, 2018, 143: 74-80.
- [17] SOFI S A, SINGH J, CHHIKARA N, et al. Quality characterization of gluten free noodles enriched with chickpea protein isolate [J]. Food Bioscience, 2020, 36: 100626.
- [18] WARREN F J, GIDLEY M J, FLANAGAN B M. Infrared spectroscopy as a tool to characterise starch ordered structure a joint FTIR-ATR, NMR, XRD and DSC study [J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 139: 35-42.
- [19] 韩畅. 苦荞麸皮粉对面团特性的影响及其馒头品质改良研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2022.
- [20] LIU CHONG, LI LIMIN, HONG JING, et al. Effect of mechanically damaged starch on wheat flour, noodle and steamed bread making quality [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2014, 49(1): 253-260.
- [21] CHEN JIANSHEG, DENG ZHIYING, WU PENG, et al. Effect of gluten on pasting properties of wheat starch [J]. Agricultural Sciences in China, 2010, 9(12): 1836-1844.
- [22] ZHANG YINGYING, GUO XINGFENG, SHI CHANGSHUO, et al. Effect of soy proteins on characteristics of dough and gluten [J]. Food Chemistry, 2020, 318: 126494.
- [23] AHMED J, THOMAS L, AL-HAZZA A. Effects of frozen storage on texture, microstructure, water mobility and baking quality of brown wheat flour/ β -glucan concentrate Arabic bread dough [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2021, 15(2): 1258-1269.
- [24] 林向阳, 陈卫江, 何承云, 等. 核磁共振及其成像技术在面团形成过程中的研究[J]. 中国粮油学报, 2006, 6: 163-167.
- [25] 刘锐, 武亮, 张影全, 等. 基于低场核磁和差示量热扫描的面条面团水分状态研究[J]. 农业工程学报, 2015, 31(9): 288-294.
- [26] GUO LEI, WANG QINGRU, CHEN HENG, et al. Moderate addition of B-type starch granules improves the rheological properties of wheat dough [J]. Food Research International, 2022, 160: 111748.
- [27] DAN LI, YAKUN ZHAO, TENG FEI, et al. Effects of *Streptococcus thermophilus* GtfB enzyme on dough rheology, bread quality and starch digestibility [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 96: 134-139.
- [28] ZHAO FANGFANG, LI YANG, LI CAIMING, et al. Insight into the regulations of rice protein on the gluten-free bread matrix properties [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 131: 107796.
- [29] 石长硕, 张明, 赵方圆, 等. 大豆蛋白对小麦面筋蛋白特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(19): 174-179.
- [30] 陈珂, 刘丽莉, 郝威铭, 等. 喷雾干燥入口温度对蛋清蛋白流变和结构特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(2): 15-21.
- [31] 汪磊. 燕麦 β -葡聚糖对面粉、面团特性及馒头品质的影响和机制[D]. 重庆: 西南大学, 2018.
- [32] FERRER E G, BOSCH A, YANTORNO O, et al. A spectroscopy approach for the study of the interactions of bioactive vanadium species with bovine serum albumin [J]. Bioorganic and Medicinal Chemistry, 2008, 16(7): 3878-3886.
- [33] 陈玉. 四种外源植物蛋白对面筋结构及其制品特性的影响研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2022.
- [34] LIU JUAN, LUO DENGLIN, LI XUAN, et al. Effects of inulin on the structure and emulsifying properties of protein components in dough [J]. Food Chemistry, 2016, 210: 235-241.
- [35] EDUARDA M B, MILENA C, VAINO P, et al. Assessment of the effects of soy protein isolates with different protein compositions on gluten thermosetting gelation [J]. Food Research International, 2010, 43(6): 1684-1691.
- [36] MONTHE O C, GROSMARE L, NGUIMBOU R M, et al. Rheological and textural properties of gluten-free doughs and breads based on fermented cassava, sweet potato and sorghum mixed flours [J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 101: 575-582.
- [37] 张国权, 叶楠, 张桂英, 等. 馒头品质评价体系构建[J]. 中国粮油学报, 2011, 26(7): 10-16.
- [38] WANG XIANGYU, GUO XIAONA, ZHU KEXUE. Polymerization of wheat gluten and the changes of glutenin macropolymer (GMP) during the production of Chinese steamed bread [J]. Food Chemistry, 2016, 201: 275-283.
- [39] 黎芳, 滕文韶, 刘野, 等. 3种功能性蛋白对淀粉-面筋重组面团流变学特性及馒头品质的影响[J]. 中国食品学报, 2020, 20(3): 103-111.