

# 不同明胶添加量馒头的质构、营养价值及微观结构差异

丁长河<sup>1,2\*</sup>, 苏玉宵<sup>1</sup>, 姜艳敏<sup>1</sup>, 庸菁喆<sup>3</sup>

(1. 河南工业大学粮油食品学院, 河南郑州 450001)(2. 中原食品实验室, 河南漯河 462300)

(3. 河南雅奇明胶有限公司, 河南郑州 450006)

**摘要:** 该研究分析了不同明胶添加量引起的馒头的质构、营养价值及微观结构变化。通过 TPA 质构分析、感官评定、比容及氨基酸组分测定分析馒头的质构、营养及微观结构等。研究表明, 明胶添加量增大, 馒头硬度、胶着度及咀嚼性先减小后增大, 黏聚性和回复性先升高后降低。明胶添加量为 3% 时, 其硬度、胶着性及咀嚼性最小, 弹性、黏聚性及回复性最大, 此时馒头比容 (1.96) 和感官评分 (81.72) 显著提高, 各指标均为最优。添加明胶馒头蛋白质含量比普通白馒头高 17.62%, 必需氨基酸含量高 46.06%, 赖氨酸评分高 52.12%, 总必需氨基酸评分高 22.00%。GC-MS 检测添加明胶的馒头酯类含量升高 40.61%, 烷烃类提高 48.60%, 芳香杂环胺类提高 34.03%。 $\alpha$ -螺旋含量在面团中有所变化; $\beta$ -折叠含量在蒸制后馒头中显著增大; $\beta$ -转角含量均有不同程度的下降 ( $P<0.05$ ), 说明添加明胶使蛋白质二级结构中无序的 $\beta$ -转角向有序的 $\beta$ -折叠或 $\alpha$ -螺旋结构转换, 蛋白质结构更趋于稳定。添加明胶能显著改善馒头的质构特性、感官品质及营养价值。

**关键词:** 明胶; 馒头; 质构; 感官评定; 营养学评价; 微观结构

文章编号: 1673-9078(2024)08-274-282

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.8.0800

## Differences in Texture, Nutritional value and Microstructure of Steamed Buns with Different Amounts of Gelatin

DING Changhe<sup>1,2\*</sup>, SU Yuxiao<sup>1</sup>, JIANG Yanmin<sup>1</sup>, YONG Jingzhe<sup>3</sup>

(1.College of Grain, Oil and Food, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

(2.Zhongyuan Food Laboratory, Luohe 462300, China)(3.Henan Yaqi Gelatin Co. Ltd., Zhengzhou 450006, China)

**Abstract:** The changes in the texture, nutritional value, and microstructure of the steamed buns caused by the addition of different amounts of gelatin were studied. The texture, nutrition value and microstructure of the steamed buns were analyzed by TPA, sensory evaluation, specific volume measurement and amino acid composition analysis. The results showed that with the increase of gelatin content, the hardness, adhesiveness and chewiness of the steamed bun decreased firstly then increased, and the cohesiveness and resilience decreased firstly then increased. When the content of gelatin was 3%, the hardness, adhesiveness and chewiness of the finished steamed bun were the lowest, while the elasticity, cohesiveness and resilience were the greatest, with the specific volume (1.96) and sensory score (81.72) Therefore, the indexes of the finished

引文格式:

丁长河, 苏玉宵, 姜艳敏, 等. 不同明胶添加量馒头的质构、营养价值及微观结构差异 [J]. 现代食品科技, 2024, 40(8):274-282.

DING Changhe, SU Yuxiao, JIANG Yanmin, et al. Differences in texture, nutritional value and microstructure of steamed buns with different amounts of gelatin [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(8): 274-282.

收稿日期: 2023-07-03

作者简介: 丁长河 (1968-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 功能低聚糖; 发酵食品, E-mail: dch@haut.edu.cn

steamed bread all reach the optimal value. Compared with the ordinary white steamed bun, the gelatin-fortified steamed bread had higher protein content (increased by 17.62%), essential amino acid content (increased by 46.06%), lysine score (increased by 52.12%), and overall essential amino acid score (increased by 22.00%). The results of GC-MS analysis showed that the gelatin-fortified steamed bun had increased contents of esters, alkanes and aromatic heterocyclic amines (by 40.61%, 48.60% and 34.03%, respectively). The addition of gelatin led to a change in the content of  $\alpha$ -helix, a significant increase in the content of  $\beta$ -sheet after steaming, and different degrees of decrease in the content of  $\beta$ -turns ( $P < 0.05$ ). These results indicated that the addition of gelatin made the disordered  $\beta$ -turns of the protein secondary structure convert to the ordered  $\beta$ -sheets or  $\alpha$ -helical structure, and the protein structure became more stable. Thus, the addition of gelatin can significantly improve the textural characteristics, sensory quality and nutritional value of steamed bun.

**Key words:** gelatin; steamed bread; texture; sensory evaluation; nutritional evaluation; microstructure

小麦是中国播种范围最广、产量最高的重要谷类作物之一，其产量占粮食总产量 20% 以上<sup>[1]</sup>。小麦可加工成小麦粉，是我国北方居民的主食之一。而我国约 70% 的小麦粉都用于制作馒头<sup>[2]</sup>。馒头是由发酵面团蒸制而成，距今已有 1 700 多年历史<sup>[3]</sup>。是我国及许多亚洲国家餐桌上较受欢迎的一种食品<sup>[4]</sup>。但由于小麦粉馒头自身的膳食结构差异，其赖氨酸及维生素和矿物质含量偏低，其营养成分不全面、不均衡。因此很多学者开始研究往小麦面粉中添加亚麻籽粉<sup>[5]</sup>、鹰嘴豆粉<sup>[6]</sup>、藜麦粉<sup>[7]</sup>等以改善馒头的营养价值和功能品质。

明胶是一种通过胶原蛋白部分水解获得的可溶性蛋白质<sup>[8]</sup>，是一种特殊的亲水性胶体，通常来源于猪、牛的皮、骨骼、肌腱和软骨及各种鱼类产品，如鱼鳞、鱼皮、鱼骨等<sup>[3]</sup>。明胶中含有丰富的蛋白质和多种氨基酸，其中包括除色氨酸外所有的必需氨基酸，其易被人体吸收，且不含脂肪和胆固醇，在多个领域应用广泛。其特有的三股螺旋结构赋予了它独特的功能特性，易形成较好的空间网络结构，使其具有良好的增稠性、乳化性以及凝胶性，可作为一种多用途的食品添加剂。曾有研究表明，明胶/阿拉伯胶和明胶/ $\kappa$ -角叉菜胶的包封能够掩盖肉桂提取物的风味和涩味<sup>[9]</sup>。另外明胶可以用作肉制品、水果等食品的可食用包装<sup>[10]</sup>，还可作为抗氧化剂、抗菌剂应用于食品中，以延长食品的货架期<sup>[11]</sup>。目前关于明胶在食品行业中应用的相关研究较多，但其在馒头中的应用较少，因此，本研究将明胶加入小麦面粉中做成馒头，分析不同明胶添加量对馒头的质构、营养价值及微观结构变化和成品品质的影响，为明胶在面制品中的应用奠定理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

鱼皮明胶：冻力 250 Bloom，粘度 3.7 mPa·s，河南雅奇明胶有限公司；金龙鱼多用途麦芯小麦粉：蛋白质含量 12.30 g/100 g，湿面筋含量 28.10% (wt.)，灰分含量 0.46 g/100 g，水分含量 13.31 g/100 g，益海嘉里粮油工业有限公司；高活性干酵母，安琪酵母股份有限公司。

### 1.2 馒头的制备

将明胶以 0、1%、2%、3%、4% (wt.%) 的比例分别加入 20 mL 水后置于烧杯中，放入电热恒温水浴锅 (DK-98-II，天津市泰斯特仪器有限公司) 在 37 °C 充分溶解 30 min；再取酵母 0.8 g 加入 10 mL 水中于 37 °C 温水浴活化；将其加入 100 g 小麦面粉中，再加入 20 mL 水在搅拌机 (HM790，海氏电器有限公司) 中 40 r/min 搅拌 2~3 min，80 r/min 搅拌 3 min 至面团表面光滑不粘手。取出面团转移至 35 °C，湿度 75% 的醒发箱中 (DNP-905a，上海精宏实验设备有限公司) 醒发 45 min。面团用压面机 (DMT-10A，龙口市复兴机械有限公司) 压片 6~8 次后，将面团搓揉成大小均匀、形状相同的面团，再次放入醒发箱中，相同条件下醒发 30 min，结束后将成型的面团放置在蒸锅屉上蒸 20 min (冒气起计时) 得到馒头。关火 2~3 min 后取出馒头，冷却至室温待测。所有试验重复 3 次，并做空白对照。

### 1.3 馒头的质构分析

馒头的质构分析参照 Raheem 等<sup>[12]</sup>并稍作修改。采用 TA.XTplus 质构仪 (Stable Micro System 公司) 进行馒头质构测定：用切片器将馒头切成 25 mm

的薄片,平放在测试探头正下方进行测试。选用 P/36R 柱形探头;测试前、中、后速率分别为:2.0、1.0、1.0 mm/s;压缩率:50%;两次压缩的时间间隔:5.0 s;触发类型为:Auto;点感应力:5 g;数据采集速率:200 pps。从 TPA 实验曲线上可得到 6 个参数值:硬度、弹性、黏聚性、胶着性、咀嚼性、回复性。重复测定三次。

#### 1.4 馒头比容的测定

比容测定参照 GB/T 21118-2007《小麦粉馒头》,采用小米置换法测定比容。比容为其体积(mL)与质量(g)间的比率。

#### 1.5 馒头的感官评定

馒头的感官评价参照 GB/T 35991-2018《小麦粉馒头加工品质评价》,由 10 位经过培训的人员进行感官评分。

表 1 馒头标准和评分细则

项目	分值/分	馒头标准和评分细则
比容/(mL/g)	20	电子天平称重(g);小米置换法测体积(mL),计算比容。 ≥2.8得满分20分;≤1.8得最低分5分;在2.8~1.8之间,每下降0.1扣1.5分。
表面色泽	10	光泽性好8~10分;稍暗6~7分;灰暗4~5分。
表面结构	10	表面光滑8~10分;皱缩、塌陷、有气泡或烫斑4~7分。
弹性	10	手指按压回弹性好8~10分;手指按压回弹弱6~7分;手指按压不回弹或按压困难4~5分。
韧性	10	咬劲强8~10分;咬劲一般6~7分;咬劲差、切时掉渣或咀嚼干硬4~5分。
粘性	10	爽口不粘牙8~10分;稍黏6~7分;拒绝不爽口、很黏4~5分。
内部结构	20	气孔细腻均匀18~20分;气孔细腻基本均匀、有个别气泡13~17分;边缘与表皮有分离现象扣1分;气孔基本均匀,但有下情况之一的10~12分:过于细密、稍多气泡、气孔均匀但结构稍显粗糙、气孔不均匀或结构很粗糙5~9分。
风味	5	接近正常小麦固有的味道5分;滋味平淡4分;有异味2~3分。

从比容、色泽、结构、粘弹性、韧性和风味等对馒头进行综合评价。

#### 1.6 馒头的营养学评价

##### 1.6.1 基本营养成分的测定

将馒头冷冻干燥后研磨成馒头粉,进行营养

学评价。

水分、蛋白质、灰分、脂肪含量的测定分别参照 GB/T 5009.3-2016《食品中水分的测定》、GB 5009.5-2016《食品中蛋白质的测定》、GB 5009.4-2016《食品中蛋白质的测定》、GB 5009.6-2016《食品中脂肪的测定》,还原糖和总糖含量的测定采用 DNS 法<sup>[13]</sup>。

##### 1.6.2 氨基酸评价

参照 GB/T 5009.124-2016 测定馒头中的氨基酸含量,参照 Mahmud 等<sup>[14]</sup>的方法进行氨基酸评价。

##### 1.6.3 风味分析

将蒸制好的馒头在室温下放置 1 h 后进行风味物质测定。馒头风味测定参考 Yang 等<sup>[15]</sup>并稍作修改。

固相微萃取:称取馒头样品 2 g 左右置于萃取瓶中,加盖封口。恒温水浴锅设置温度 60 °C,把萃取瓶置于水浴锅内固定好,将提前老化好的萃取头穿过瓶子的硅胶瓶垫,伸出纤维头进行固相微萃取 1 h,待萃取结束后,拔出纤维头,置于 GC-MS 进样口中解析 2~3 min。

GC-MS 仪器分析条件:

气相条件:色谱柱为 DB-5MS,载气为高纯氮气;载气流速为 1.0 mL/min;进样口温度 250 °C;程序升温为在 40 °C 保持 1 min,以 60 °C/min 升到 160 °C,再以 10 °C/min 升至 250 °C,保持 10 min,采用手动进样,不分流模式。

质谱条件:离子源温度 230 °C,MS 四级杆 150 °C,传输线温度 280 °C,离子化模式为 EI;电子能为 70 eV,扫描范围 43~500 nm,数据采集为全扫描。

#### 1.7 面团及馒头微观结构的测定

按照 1.2 的方法制备好中筋粉面团和馒头,速冻后进行冷冻干燥处理。称取干燥样品 1 mg 与 100 mg 提前烘干的溴化钾混合均匀,充分研磨后压片,将压好的透明薄片置于分析仪上进行红外光谱扫描。波数扫描范围 400~4 000 cm<sup>-1</sup>,分辨率 4 cm<sup>-1</sup>,扫描次数 32 次。重复测定三次取平均值进行计算。

#### 1.8 统计学分析

使用 SPSS 20 软件分析数据,Origin 2021 进行图表绘制,实验结果采用平均值 ± 标准偏差的形式,样本间的显著性差异采用单因素方差分析, $P < 0.05$  说明差异具有统计学意义。

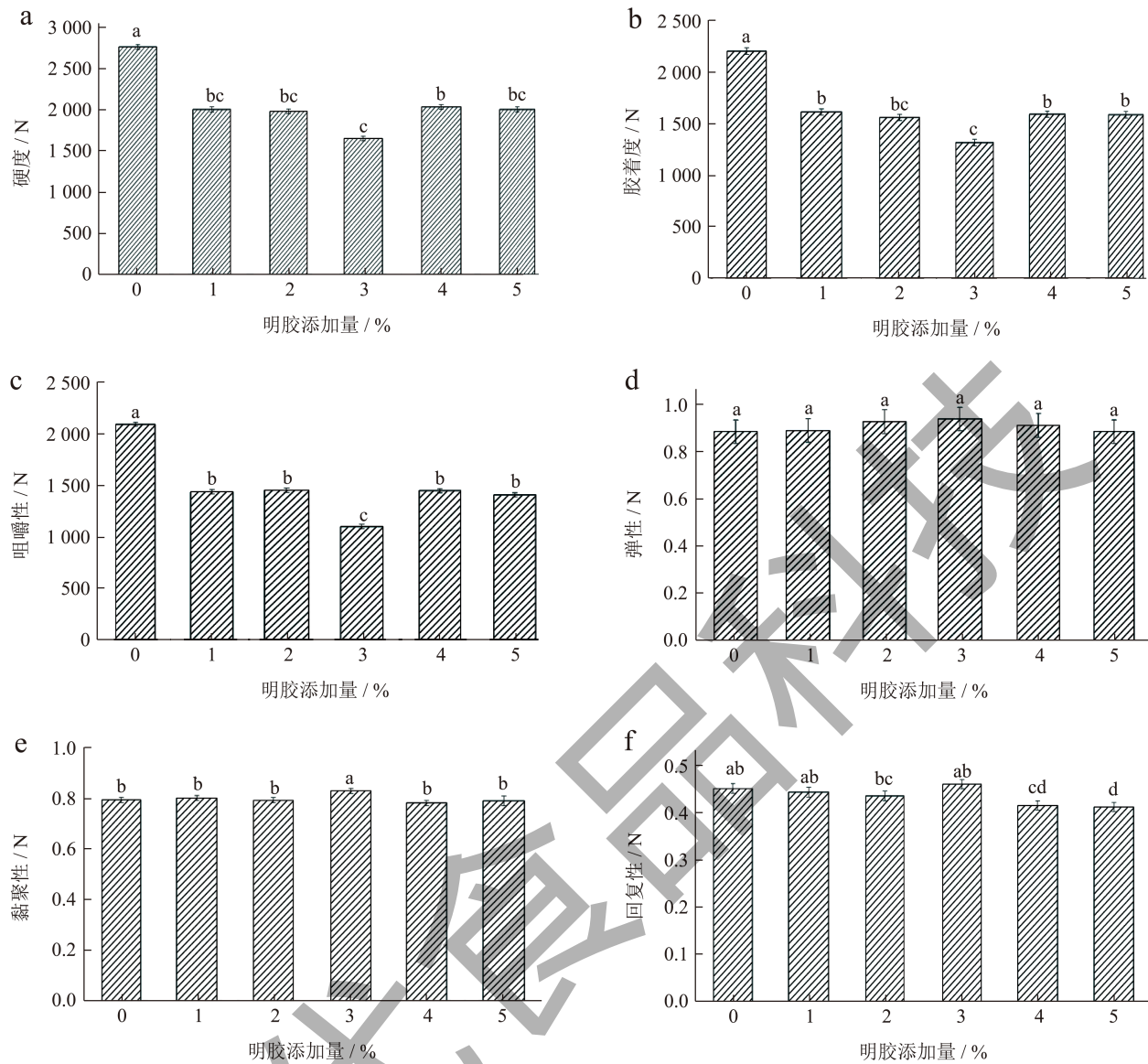


图1 明胶添加量对馒头成品质地特性的影响

Fig.1 The effect of the amount of gelatin added on the texture properties of the finished steamed bread

注: 图中的 a、b、c 表示不同明胶添加量同一指标间的显著性差异。

## 2 结果与分析

### 2.1 明胶添加量对成品馒头质构特性的影响

如图1所示, 添加明胶后, 馒头的硬度、胶着性及咀嚼性三者变化趋势一致, 与空白组相比均具有显著性差异 ( $P < 0.05$ ), 这表明明胶对馒头的质构有显著的影响。Ares 等<sup>[16]</sup>曾报道将明胶添加到酸奶中, 酸奶的粘度随着明胶添加量的增大呈现先上升后下降的趋势, 且与酸奶酪蛋白基质形成了比淀粉更强的三维网络。Yu 等<sup>[17]</sup>报道了明胶能通过提高面团的持气能力, 增大面包的孔隙率从而降低面包的硬度。添加一定量的明胶 (1%~5%) 能改善馒

头的质地和口感, 在明胶添加量 3% 时, 馒头的各项指标均达到最优值, 馒头的品质最好<sup>[18]</sup>。随着明胶添加量的增大, 馒头的硬度、胶着性及咀嚼性呈先降低后增加的趋势, 在添加量 3% 时达到最小值, 此时与空白组仍具有显著差异 ( $P < 0.05$ )。这可能是由于明胶能与蛋白质发生相互作用生成大分子的聚合物, 且还会填充在面筋网络结构以及淀粉颗粒周围, 形成复杂的明胶凝胶网络结构, 导致三维空间结构也更加紧密稳定, 凝胶性增强, 面团的硬度增大, 导致蒸制后的馒头内部坚实, 口感变差<sup>[19]</sup>。馒头的黏聚性及回复性变化整体上呈先增加后降低的趋势, 在添加量从 0% 增至 2% 时降低, 但差异不显著, 可能与指标检测时间差异及面粉质量有关;

在添加量 3% 时达到最优值, 这与硬度、胶着性、咀嚼性的变化呈相反的趋势, 表明硬度、胶着性及咀嚼性与馒头的品质可能呈负相关, 弹性、黏聚性及回复性与馒头的品质呈正相关。

## 2.2 明胶添加量对成品馒头的比容及感官评定的影响

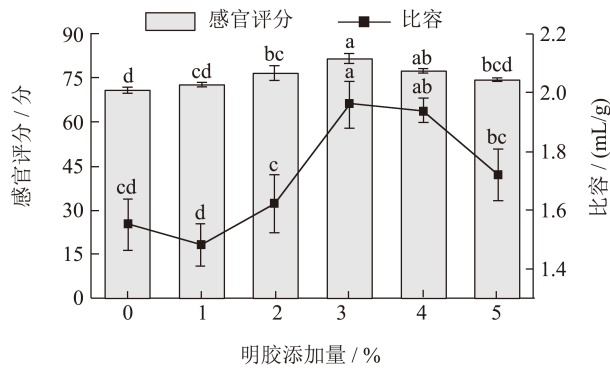


图 2 明胶添加量对中筋馒头比容及感官评价的影响

Fig.2 The effect of adding amount of gelatin on the specific volume and sensory evaluation of middle gluten steamed bread

注: 图中的 a、b、c 表示不同明胶添加量同一指标间的显著性差异。

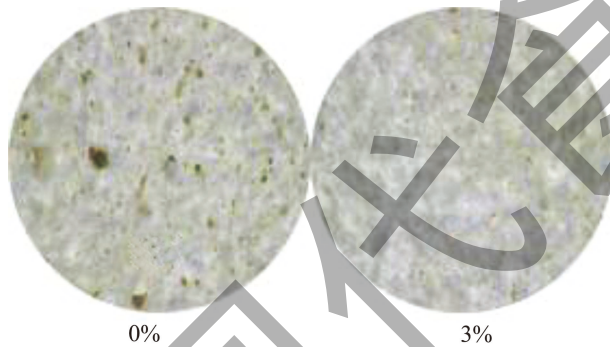


图 3 不同明胶添加量下的馒头内部纹理图

Fig.3 Internal texture map of steamed buns with different amounts of gelatin added

感官评定是通过评价食品的色、香、味以及外观等最直接接触食品口感和风味的一种方法, 从而为满足更多消费者的需求, 不断地改善产品的质量。食品的比容反应了它在发酵或蒸制过程中, 是否醒发充分或面团吸水膨胀的程度, 是一种直接反应馒头品质的一项重要指标<sup>[20]</sup>。Park 等<sup>[21]</sup>曾报道明胶是一种亲水胶体可以提高馒头的比容。如图 2 所示: 馒头的感官评定与比容表现出相似的变化, 均是随着添加量的增大呈现先上升后下降的趋势。与对照组相比, 添加明胶后比容显著增大 ( $P < 0.05$ )。当

明胶添加量在 0%~3% 时, 面团具有良好的延展性, 能增强面筋网络结构, 使馒头的感官评定和比容逐渐增大。在明胶添加量为 3% 时, 馒头的感官评分最高, 此时对应的比容也达到了最优值。当继续增大明胶添加量, 馒头体积缩小, 质地硬实且没有弹性, 此时比容和感官评分也逐渐下降。结合图 3 可知, 明胶最优添加量 3% 与空白组的馒头相比, 气孔稍多, 馒头质地柔软且富有弹性, 馒头的质构各指标达到最优值。

## 2.3 馒头的营养学评价

### 2.3.1 馒头的基本营养成分分析

表 2 馒头的基本营养成分 (g/100 g 干物质)

Table 2 The basic nutrients of steamed bread

营养成分	混合粉馒头	普通白馒头
粗蛋白	15.69 ± 0.28 <sup>a</sup>	13.34 ± 0.04 <sup>b</sup>
粗脂肪	0.15 ± 0.00 <sup>a</sup>	0.10 ± 0.00 <sup>b</sup>
灰分	0.55 ± 0.00 <sup>a</sup>	0.58 ± 0.02 <sup>a</sup>
还原糖	1.24 ± 0.05 <sup>b</sup>	2.30 ± 0.03 <sup>a</sup>
总糖	47.78 ± 0.57 <sup>b</sup>	52.09 ± 0.31 <sup>a</sup>

注: 混合粉馒头指添加明胶的馒头。表格中的 a、b、c 表示同行不同列指标之间的显著性差异 ( $P < 0.05$  表示显著,  $P < 0.01$  表示极显著), 下同。

明胶是一种可溶性蛋白质, 加入馒头中可能补充蛋白质, 具有降血压, 预防肥胖等营养保健效果。如表 2 所示, 添加明胶的馒头的粗蛋白、粗脂肪含量均高于普通白馒头, 灰分、还原糖和总糖含量均显著低于普通白馒头 ( $P < 0.05$ ), 添加明胶的馒头的蛋白质含量比普通白馒头增加了 17.62 wt.%, 还原糖含量降低了 85.48 wt.%, 总糖含量降低了 9.02 wt.%。提示明胶的添加能显著增加蛋白质含量, 提高馒头营养品质, 减少还原糖及总糖含量, 降低升糖指数。这可能与明胶自身特性有关。

### 2.3.2 馒头的氨基酸评价

蛋白质是生命之源, 而氨基酸是蛋白质的基本组成单位, 蛋白质的质量由它所含的必须氨基酸的种类、数量和构成比例决定<sup>[22]</sup>。明胶富含多种非极性氨基酸, 如甘氨酸 (Gly), 丙氨酸 (Ala), 缬氨酸 (Val) 和脯氨酸 (Pro)<sup>[23]</sup>。Miao 等<sup>[24]</sup>曾报道在饲料中添加 Fe (II) 螯合带鱼蛋白水解物 (Fe (II) - HPH), 泥鳅肉中检测出 17 中氨基酸, 其中谷氨酸含量最高, 半胱氨酸最低。Mahmud 等<sup>[14]</sup>表明, 将

草鱼蛋白浓缩物(GCPC)添加到小麦粉中,小麦粉的DIAAS评分(36%)提高至72%~99%,显著改善了小麦粉的蛋白质品质。在本研究中,两种馒头中均检测出17种氨基酸,除半胱氨酸外,添加明胶的馒头检测出的所有氨基酸含量均高于普通白馒头,且添加明胶的馒头其必需氨基酸含量比普通白馒头显著提高了46.06 wt.% ( $P < 0.05$ ),总氨基酸含量比普通白馒头高了56.63 wt.%.两种馒头中均是谷氨酸含量最高,脯氨酸次之,添加明胶的馒头其谷氨酸含量比普通白馒头高了38.08%,脯氨酸含量高了66.67 wt.%.说明添加明胶会增加馒头的氨基酸含量。添加明胶的馒头其必需氨基酸评分均高于普通白馒头,总必需氨基酸评分提高了22.00 wt.%,第一限制氨基酸赖氨酸评分提高了52.12 wt.%,其余必需氨基酸的评分均高于参考值,而普通白馒头只有异亮氨酸、苯丙氨酸+酪氨酸评分略大于参考值。这表明,添加明胶的馒头必需氨基酸含量高且更接近于人体氨基酸模式,因此其营养价值较高。见表3、表4。

表3 馒头的氨基酸含量(g/100 g干物质)

Table 3 Amino acid content of steamed bread

氨基酸	混合粉馒头	普通白馒头
天冬氨酸 Asp	0.60	0.33
苏氨酸 Thr	0.33	0.22
丝氨酸 Ser	0.52	0.34
谷氨酸 Glu	4.17	3.02
甘氨酸 Gly	1.05	0.33
丙氨酸 Ala	0.65	0.26
半胱氨酸 Cys	0.07	0.09
缬氨酸 Val	0.48	0.35
蛋氨酸 Met	0.17	0.07
异亮氨酸 Ile	0.45	0.32
亮氨酸 Leu	0.83	0.59
酪氨酸 Tyr	0.31	0.25
苯丙氨酸 Phe	0.55	0.39
组氨酸 His	0.37	0.28
赖氨酸 Lys	0.34	0.19
精氨酸 Arg	0.62	0.33
脯氨酸 Pro	1.50	0.90
必需氨基酸	3.52	2.41
非必需氨基酸	9.48	5.89
总氨基酸	13.0	8.30

表4 馒头的必需氨基酸评分(WHO/FAO模式建议)

Table 4 Essential amino acid scores of steamed bread

氨基酸	FAO/ WHO	混合粉馒头		普通白馒头	
		Ax	AAS	Ax	AAS
赖氨酸	55	21.67	39.40	14.24	25.90
异亮氨酸	40	28.68	71.70	23.99	59.97
亮氨酸	70	52.90	75.57	44.23	63.18
蛋氨酸+胱氨酸	35	15.30	43.70	11.99	34.27
苏氨酸	40	21.03	52.58	16.49	41.23
缬氨酸	50	30.59	61.19	26.24	52.47
苯丙氨酸+酪氨酸	60	54.81	91.35	47.98	79.96
总氨基酸	350	224.98	435.50	185.16	356.98

### 2.3.3 馒头的风味分析

烷烃类物质的风味阈值较高,对风味的贡献较小,但它可作为反应底物发生化学反应生成风味物质<sup>[25]</sup>。醛类物质可以赋予食品更加浓郁的香气,对风味的贡献较大。馒头的风味分析结果如表5、6所示:两种馒头通过GC-MS共检测出24种风味物质,共有的风味物质11种;其中六甲基环三硅氧烷、八甲基环四硅氧烷、十甲基环五硅氧烷等烷烃类物质在混合粉馒头中的含量较高。但其风味阈值较高,对风味的贡献较小<sup>[26]</sup>。苯甲醛在混合粉馒头中的相对含量较普通白馒头提高了51.34 wt.%。苯乙醛、癸醛、邻苯二甲酸二丁酯等标志性醛类和酯类只在混合粉馒头中检出。这可能是由于明胶能增加馒头中的脂质和氨基酸降解且能发生酯化反应。两种馒头的醛类、酯类以及芳香杂环胺类等风味物质差异明显,其中酯类和芳香杂环胺类在混合粉馒头中含量丰富。提示酯类和芳香杂环胺类物质可能在添加明胶的馒头中起主导作用。

### 2.4 面团及馒头的微观结构

傅里叶红外通过测定蛋白质分子内部化学键的存在状态和其所处环境的变化,决定了红外光谱图峰值的强度和出峰位置,由于它不易受外界环境以及样品存在状态的影响,因此通常被用来分析蛋白质的二级结构<sup>[27]</sup>。中筋粉面团及馒头的傅里叶红外如图4所示。谱图分析的波数范围一般在400~4 000  $\text{cm}^{-1}$ 内,其中波数3 500~3 200  $\text{cm}^{-1}$ 范围内表示蛋白质分子内-OH与氢键的振动强度;2 927  $\text{cm}^{-1}$ 表示 $\text{CH}_2$ 的不对称拉伸运动;1 653  $\text{cm}^{-1}$ 表示水在淀粉无定形区的吸收峰;1 024  $\text{cm}^{-1}$ 表示C-O拉伸运动。

表5 馒头中的风味物质 (g/100 g干物质)  
Table 5 Flavor substances in steamed buns

序号	保留时间/min	挥发性物质	相对含量 (wt.%)	
			普通白馒头	混合粉馒头
1	3.216	六甲基环三硅氧烷	10.28	11.96
2	9.474	苯甲醛	4.48	6.78
3	10.978	2-正戊基呋喃	13.08	19.61
4	11.632	八甲基环四硅氧烷	6.71	13.81
5	12.244	1,1,3,3,5,5,7,7-八甲基-7-(2-甲基丙氧基)四硅氧烷-1-醇	1.65	—
6	13.048	苯乙醛	—	2.38
7	15.326	壬醛	26.07	8.93
8	17.158	反式-2-壬烯醛	3.72	—
9	17.205	十甲基环五硅氧烷	5.06	10.65
10	17.729	甘菊蓝	0.74	—
11	18.414	2,4-二甲苯庚烷	—	2.04
12	18.616	癸醛	—	0.94
13	21.304	吡啶	1.94	0.95
14	21.791	十二甲基环六硅氧烷	6.00	3.87
15	22.056	反式-2,4-癸二烯醛	1.29	—
16	24.822	十四烷	0.54	—
17	24.827	十九烷	—	0.90
18	25.823	2,4,7,9-四甲基-5-癸炔-4,7-二醇	7.79	2.10
19	28.490	1,1,3,3,5,5,7,7,9,9,11,11-十二烷基甲基-六硅氧烷	—	1.86
20	28.749	2,6-二叔丁基对甲酚	0.31	—
21	37.612	1,1,3,3,5,5-六甲基-1,5-二苯基三硅氧烷	2.50	2.22
22	40.886	邻苯二甲酸二异丁酯	6.46	9.52
23	43.890	邻苯二甲酸丁基酯 2-乙基己基酯	1.38	—
24	43.936	邻苯二甲酸二丁酯	—	1.49

表6 不同种类馒头的风味物质统计结果 (相对含量/wt.%)  
Table 6 Statistical results of flavor substances in different kinds of steamed buns

类别	醇类	酯类	醛类	烷烃类	芳香杂环胺类
普通白馒头	9.44	7.83	35.56	31.83	15.34
混合粉馒头	2.10	11.01	19.03	47.30	20.56

图中添加 3 wt.% 明胶和未添加明胶的未发酵面团、发酵面团及馒头表现出相似的谱图形状,这可能是由于添加明胶粉的面团内部没有类似于面筋蛋白的成分出现。随着发酵过程的进行,可以看到明胶添加量 3 wt.% 的面团与纯小麦粉面团的 3 500~3 200 cm<sup>-1</sup> 吸收峰强度不断下降,这表明面筋蛋白结合的水分越来越少,网络结构中水分子中的相互作用越来越强。与纯小麦粉面团相比,添加明胶的混合粉面团的 3 500~3 200 cm<sup>-1</sup> 吸收峰位置向右偏移,这可能是由于明胶的添加导致馒头分子量增加,-OH 与氢键的振动强度增加,从而导致光谱峰位的偏移。因此推断明胶可能通过氢键作用与馒头中的蛋白质和淀粉发生相互作用。

对二级结构进行量化处理可得各二级结构的含量如图 4 所示。

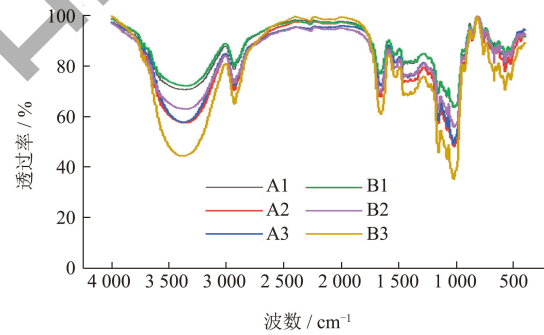


图4 面团及馒头的傅里叶红外光谱图

Fig.4 Fourier infrared spectra of dough and steamed bread

注:图中 A1、A2、A3 依次表示空白组 0% 的未发酵、发酵面团、馒头组; B1、B2、B3 依次表示明胶添加量 3% 的未发酵、发酵面团、馒头组。

表7 蛋白质各二级结构含量分布图

Table 7 Content distribution of each secondary structure of protein

样品	$\beta$ -折叠	无规则卷曲	$\alpha$ -螺旋	$\beta$ -转角
空白组 0%-未发酵面团	42.31 ± 0.32 <sup>bc</sup>	14.20 ± 0.17 <sup>ac</sup>	15.35 ± 0.04 <sup>ab</sup>	28.14 ± 0.53 <sup>aA</sup>
空白组 0%-发酵面团	42.17 ± 0.00 <sup>bc</sup>	14.17 ± 0.00 <sup>ac</sup>	15.28 ± 0.00 <sup>ab</sup>	28.38 ± 0.00 <sup>aA</sup>
空白组 0%-馒头	44.17 ± 0.45 <sup>ab</sup>	14.46 ± 0.21 <sup>abc</sup>	14.82 ± 0.22 <sup>bc</sup>	26.55 ± 0.02 <sup>bc</sup>
对照组 3%-未发酵面团	42.60 ± 0.30 <sup>bc</sup>	14.80 ± 0.07 <sup>aA</sup>	15.54 ± 0.21 <sup>aAB</sup>	27.07 ± 0.02 <sup>abc</sup>
对照组 3%-发酵面团	42.18 ± 0.45 <sup>bc</sup>	14.68 ± 0.00 <sup>aAB</sup>	15.79 ± 0.07 <sup>aA</sup>	27.35 ± 0.38 <sup>ab</sup>
对照组 3%-馒头	45.05 ± 0.02 <sup>aA</sup>	14.61 ± 0.16 <sup>aAB</sup>	14.83 ± 0.15 <sup>bc</sup>	25.51 ± 0.29 <sup>bd</sup>

注:小写字母表示 0% 或 3% 的组内差异;大写字母表示 0% 和 3% 组间差异。

Seabourn 等<sup>[28]</sup>的研究曾表明,在混合过程中, $\beta$ -折叠或 $\alpha$ -螺旋这些二级结构含量的增加,使得面筋网络结构可能向更加稳定或者有序的状态进行。在本研究中(表7),面团及馒头样品中二级结构含量主要以 $\beta$ -折叠(42%~45%)为主,其次为 $\beta$ -转角(25%~28%)、 $\alpha$ -螺旋(14%~15%)以及无规则卷曲(14%)。随着发酵过程的进行,空白组及对照组的未发酵面团、发酵面团和馒头样品的二级结构含量均无明显差异。与空白组未发酵面团相比,对照组未发酵面团的 $\beta$ -折叠含量无明显差异, $\beta$ -转角含量显著下降3.95 wt.%, $\alpha$ -螺旋含量显著上升1.24 wt.%;对照组发酵面团中各二级结构含量变化趋势与未发酵面团一致。与空白组馒头相比,对照组馒头中 $\alpha$ -螺旋含量与无规则卷曲含量无明显差异,其中 $\beta$ -折叠含量增加了1.99 wt.%, $\beta$ -转角含量显著下降3.92 wt.%.以上结果表明在发酵过程中,明胶可能与面筋蛋白发生相互作用,添加明胶对蒸制后馒头二级结构中 $\beta$ -折叠含量的影响较大,对面团中 $\alpha$ -螺旋含量也有所影响。此外,添加明胶后,面团和馒头的 $\beta$ -转角含量均呈现显著下降的趋势,这说明添加明胶使蛋白质二级结构中的 $\beta$ -转角向 $\beta$ -折叠或 $\alpha$ -螺旋转换,使蛋白质结构由无序变有序,结构更趋于稳定状态。

### 3 结论

本研究通过TPA质构分析了添加明胶后面头的质构特性,结果表明:适宜的明胶添加量可以有效降低馒头的硬度、胶着性,改善馒头咀嚼性,弹性、黏聚性和回复性等。添加明胶显著提高了馒头的蛋白质含量、氨基酸含量以及氨基酸评分。GC-MS结果表明两种馒头的醛类、酯类以及芳香杂环胺类等风味物质差异明显,酯类、芳香杂环胺类和烷烃类物质在添加明胶的馒头中含量较高。傅里叶红外光谱结果表明,明胶能与蛋白质发生相互作用,使蛋白质二级结构中无序的 $\beta$ -转角向有序 $\beta$ -折叠或 $\alpha$ -螺旋结构转换,蛋白质中的有序结构增多,内部体系变得更加稳定。总之,面团中添加适量的明胶,能改变面筋蛋白结构,从而改善馒头的质构特性、感官品质以及营养价值,为明胶在馒头中的应用提供参考;但具体影响机理尚不明确,还需要进一步的探究。

### 参考文献

[1] 丁卫新.关于GB/T 1355-2021《小麦粉》的解析[J].现代

面粉工业,2022,36(4):18-20.

- [2] 王鑫宇,韩艳芳,李沿,等.小麦粉中的主要成分对馒头品质影响的研究进展[J].粮油食品科技,2021,29(2):152-157.
- [3] MIKHAILOV O V. Gelatin as it is: history and modernity [J]. Int J Mol Sci, 2023, 24(4): 1-31.
- [4] GAO Y, LIU T T, SU C H, et al. Fortification of Chinese steamed bread with flaxseed flour and evaluation of its physicochemical and sensory properties [J]. Food Chem X, 2022, 13(1): 1-8.
- [5] 李佳婷,王敏.鹰嘴豆与豌豆复合粉对面团特性及馒头品质的影响[J].食品研究与开发,2020,41(5):68-72.
- [6] 魏雪,韩文燕.藜麦全粉对馒头品质的影响[J].现代食品,2021,1(16):121-124.
- [7] 李良,吴瑀婕,杨静,等.多功能型明胶黏合剂的制备及应用研究进展[J].肉类研究,2022,36(4):57-64.
- [8] HUANG Y C, MENSE A L, DENG L Z, et al. The characteristics of steamed bread from reconstituted whole wheat flour (WWF) of different hard wheat classes with different bran particle size distributions [J]. Foods, 2021, 10(10): 1-22.
- [9] SOUZA V, THOMAZINI M, CHAVES I E, et al. Microencapsulation by complex coacervation as a tool to protect bioactive compounds and to reduce astringency and strong flavor of vegetable extracts [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 98(1): 1-9.
- [10] CHANNA I A, ASHFAQ J, SIDDOQUI M A, et al. Multi-shaded edible films based on gelatin and starch for the packaging applications [J]. Polymers (Basel), 2022, 14(22): 1-16.
- [11] ELGADIR M A, MARIOD A A. Gelatin and chitosan as meat by-products and their recent applications [J]. Foods, 2022, 12(1): 1-16.
- [12] RAHEEM D, LIU A P, LI C. Textural and sensory characteristics of oven baked and steamed bread [J]. Food and Agriculture, 2019, 31(8): 580-586.
- [13] HU R F, LIN L, LIU T J, et al. Reducing sugar content in hemicellulose hydrolysate by DNS method: a revisit [J]. Journal of Biobased Materials and Bioenergy, 2008, 2(2): 156-161.
- [14] MAHMUD A, GIRMATSION M, ABRAHA B, et al. Fatty acid and amino acid profiles and digestible indispensable amino acid score of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) protein concentrate supplemented noodles [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2020, 14(1): 2370-2379.
- [15] YANG P, LIU C, SONG H L, et al. Sensory-directed flavor analysis of off-flavor compounds in infant formula with deeply hydrolyzed milk protein and their possible sources [J]. LWT, 2020, 119(1): 1-9.



- [16] ARES G, GONALVEZ D, PREZ C, et al. Influence of gelatin and starch on the instrumental and sensory texture of stirred yogurt [J]. *International Journal of Dairy Technology*, 2010, 60(4): 263-269.
- [17] YU W J, XU D, LI D D, et al. Effect of pigskin-originated gelatin on properties of wheat flour dough and bread [J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 94(1): 183-190.
- [18] 邹雨君.明胶对小麦粉面团及馒头制品理化性质的影响研究[D].武汉:武汉轻工大学,2017.
- [19] GAO Z, FANG Y, CAO Y, et al. Hydrocolloid food component interactions [J]. *Food Hydrocolloids*, 2016, 68(JUL.):149-156.
- [20] 武建锋,吴瑞阁,刘洋,等.馒头和面包的比容测定方法探讨[J].*粮食科技与经济*, 2019, 44(2):46-48.
- [21] PARK J, YOO B S. Particle agglomeration of gum mixture thickeners used for dysphagia diets [J]. *Journal of Food Engineering*, 2020, 279(1): 1-8.
- [22] 陈志婧,廖成松.7个不同品种藜麦营养成分比较分析[J].*食品工业科技*,2020,41(23):266-271
- [23] KIM S K, MENDIS E. Bioactive compounds from marine processing byproducts-A review [J]. *Food Research International*, 2006, 39(4): 383-393.
- [24] MIAO J Y, LIN H M, ZHANG S, et al. Effect on amino acid and mineral content of the loach (*Misgurnus anguillicaudatus*) by adding Fe (II) chelating hairtail protein hydrolysates (Fe (II)-HPH) to the feed [J]. *Food Sci Nutr*, 2020, 8(3): 1575-1582.
- [25] ZHANG Z Q, ZANG M W, ZHANG K H, et al. GC-MS combined with electronic nose to analyze the effect of reheating on flavor compounds of linoleic acid-xylose-cysteine system [J]. *Food Science*, 2020, 41 (12): 166-172.
- [26] 张哲奇,臧明伍,张凯华,等.GC-MS结合电子鼻分析复热对亚油酸-木糖-半胱氨酸体系挥发性风味物质的影响[J].*食品科学*,2020,41(12):166-172.
- [27] NAWROCKA A, KREKORA M, NIEWIADOMSKI Z, et al. Characteristics of the chemical processes induced by celluloses in the model and gluten dough studied with application of FT-IR spectroscopy [J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 85(DEC.): 176-184.
- [28] SEABOURN B W, CHUNG O K, SEIB P A, et al. Determination of secondary structural changes in gluten proteins during mixing using Fourier transform horizontal attenuated total reflectance spectroscopy [J]. *J Agric Food Chem*, 2008, 56(11): 4236-4243.