李佳丽，张悦，吴芳花，等. 球磨处理酵母蛋白对生鲜面条品质特性的影响 [J]. 食品工业科技，2026, 47(14)：64−71. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070023

LI Jiali, ZHANG Yue, WU Fanghua, et al. Effects of Ball-milled Yeast Protein on the Quality Properties of Fresh Noodle[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(14): 64−71. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070023

·研究与探讨·

球磨处理酵母蛋白对生鲜面条品质特性的影响

李佳丽[1]，张　悦[1]，吴芳花[1]，孙莎莎[1]，朱培蕾[2,*]，汪名春[1,*]

（1.安徽农业大学食品与营养学院，农业农村部江淮农产品精深加工与资源利用重点实验室，安徽省特色农产品高值化利用工程研究中心，安徽合肥 230036；
2.安徽省农业科学院蔬菜研究所，安徽合肥 230031）

摘　要：为了探究球磨处理酵母蛋白（Yeast protein，YP）对生鲜面条品质特性的影响，使用行星球磨仪在不同处理条件（100 r/min 处理 10 和 40 min，以及 500 r/min 处理 10 和 40 min）下对 YP 粉末样品进行处理，并对球磨处理 YP 样品的形貌、色泽和粒径进行了表征。在此基础上，将球磨处理 YP 添加到小麦粉中制作成生鲜面条，系统表征了 YP 面条的表观、微观、蒸煮、质构、感官以及消化等品质特性。结果表明，YP 原样呈不规则球状大颗粒，$D_{[4,3]}$ 为 42.26 μm，与之相比，500 r/min 球磨处理 40 min 的 YP 样品则呈不规则形状的细小颗粒且 $D_{[4,3]}$ 显著降低至 5.04 μm（P<0.05）。与空白组相比，直接添加 YP 原样的面条各项品质下降，而随着球磨处理能量的增加，YP 面条品质逐渐提高。其中，与添加 YP 原样的面条相比，添加 500 r/min 40 min 球磨处理 YP 的面条色泽从暗黄逐渐变为淡黄，面筋网络呈连续且致密的微观结构，吸水率和蒸煮损失率分别从 64.91% 和 3.30% 降低至 61.19% 和 3.05%，坚实度和咀嚼度分别从 2.656 N 和 2.923 J 提升至 2.967 N 和 3.600 J，淀粉消化率从 67.3% 降低至 63.1%。与 YP 原样面条相比，添加 500 r/min 40 min 球磨处理 YP 的面条感官评分高、口感筋道、表面光滑且颜色的感官接受度更高。综上所述，球磨处理能够改善 YP 在面条中的应用效果，提升面条的整体品质。研究结果为 YP 在食品工业中的应用提供了理论依据，也为开发功能性面条产品提供了新的思路和方法。

关键词：球磨，酵母蛋白，生鲜面条，蒸煮，质构

中图分类号：TS219　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1002−0306(2026)14−0064−08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070023

本文网刊：

Effects of Ball-milled Yeast Protein on the Quality Properties of Fresh Noodle

LI Jiali[1], ZHANG Yue[1], WU Fanghua[1], SUN Shasha[1], ZHU Peilei[2,*], WANG Mingchun[1,*]

（1.Anhui Engineering Research Center for High Value Utilization of Characteristic Agricultural Products, Key Laboratory of Jianghuai Agricultural Product Fine Processing and Resource Utilization of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, School of Food and Nutrition, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China；
2.Institute of Vegetables, Anhui Academy of Agricultural Science, Hefei 230031, China）

Abstract: To investigate the effects of ball milling (BM) treated of yeast protein (YP) on the quality properties of fresh noodles, YP powder samples were processed using a planetary ball mill under different conditions (100 r/min for 10 and 40 min, and 500 r/min for 10 and 40 min). The resulting BM-treated YP samples were characterized for their morphology, color, and particle size. These treated YP were then incorporated into wheat flour to prepare fresh noodles, and the appearance, microstructure, cooking properties, texture, sensory attributes, and digestibility of the YP noodles were systematically char-

收稿日期：2025−07−04

基金项目：安徽省自然科学基金（2308085MC106）。

作者简介：李佳丽（2003−），女，硕士研究生，研究方向：食品生物大分子结构与功能，E-mail: 2869282021@qq.com。

*** 通信作者：**朱培蕾（1981−），女，博士，副研究员，研究方向：农产品贮藏与加工，E-mail: zpl@qq.com。

汪名春（1982−），男，博士，教授，研究方向：食品生物大分子结构与功能，农产品精深加工与副产物综合利用，E-mail: wmc@ahau.edu.cn。

acterized. The results showed that untreated YP consisted of large, irregular spherical particles with a $D_{[4,3]}$ of 42.26 μm. In contrast, the YP sample treated at 500 r/min for 40 min exhibited finer, irregular particles, with a significant reduction in $D_{[4,3]}$ to 5.04 μm (P<0.05). Compared to the control group, the direct addition of untreated YP led to a decline in all noodle quality parameters. However, as the BM energy input increased, the quality of YP noodles gradually improved. Specifically, compared to noodles with untreated YP, noodles containing YP ball-milled at 500 r/min for 40 min demonstrated a color shift from dark yellow to light yellow, a continuous and dense gluten network microstructure, reduced water absorption (from 64.91% to 61.19%) and cooking loss (from 3.30% to 3.05%), increased firmness (from 2.656 N to 2.967 N) and chewiness (from 2.923 J to 3.600 J), and a decreased starch digestibility (from 67.3% to 63.1%). Moreover, these noodles achieved higher sensory scores, characterized by a more elastic texture, smoother surface, and better color acceptance. In conclusion, BM treatment enhanced the applicability of YP in noodles and improved their overall quality. This study provides a theoretical basis for the application of YP in the food industry and offers new insights for developing functional noodle products.

Key words: ball milling; yeast protein; fresh noodle; steaming; texture

近年来，随着生活水平提高，人们对高质量和低成本蛋白质的需求增加，而传统动植物蛋白质供应不足，促使研究者们致力于开发新型蛋白质替代品[1]。酵母蛋白（Yeast protein, YP）是一种微生物蛋白，在 2023 年 12 月被国家卫生健康委员会批准作为新食品原料[2]。YP 包含 8 种人体必需氨基酸，其中异亮氨酸、亮氨酸和缬氨酸是其特征性氨基酸，且赖氨酸含量高达 7.73%。这些必需氨基酸占总氨基酸的比例超过 40%，完全符合 FAO/WHO 制定的优质蛋白质标准，有利于维持人体健康和生长发育[3−4]。

面条是我国的传统面食，因其制作简单、食用方便和易于储存等优点，深受消费者喜爱[5]。小麦粉是面条生产的主要原料[6]，其蛋白质形成的面筋网络结构决定了面条的口感和蒸煮特性[7]。然而，小麦粉蛋白质中必需氨基酸组成比例不平衡，赖氨酸含量仅为蛋白质的 2.88% 左右[8]，因此，将 YP 添加到小麦制品中有利于弥补赖氨酸的不足，提升产品的营养价值。但受限于提取和加工技术，现有 YP 产品的溶解性较差，导致其营养和加工功能特性尚未得到充分发挥[9]。胡新平等[10] 发现添加 10% 和 20% YP 可以使面包的咀嚼性提高，但是会使面包比容降低、质地粗糙以及硬度增加。因此，有必要对 YP 进行适当的改性处理，以改善其功能特性，进而拓宽其在面制品中的应用范围。

球磨处理（Ball milling, BM）技术凭借其安全高效和工艺简便的特点[11]，在改善大豆分离蛋白、蛋清蛋白等功能特性方面展现出巨大潜力[12−13]。目前，有关 YP 的 BM 改性研究鲜有报道。前期预实验发现添加 YP 原样会劣化面条品质，因此本研究提出先对 YP 进行 BM 处理，在此基础上进一步系统探究 BM 改性 YP 对面条表观、微观、色泽、蒸煮、质构、感官及消化等品质特性的影响。本研究旨在为 YP 在面制品中的应用提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

酵母蛋白　湖北安琪酵母股份有限公司（型号 F80：蛋白质含量 79.3%（w/w），脂肪 9.0%（w/w），灰分 3.1%（w/w），水分 2.0%（w/w），总碳水化合物 6.6%（w/w）；小麦粉　安徽金沙河面业有限责任公司；胃蛋白酶（3000 U/mg）、胰酶（P7545，猪胰腺来源，8×USP）　美国 Sigma-Aldrich 化学公司；其他试剂均为分析纯。

YD-YXQM 冷冻行星球磨机　长沙米淇仪器设备有限公司；KitchenAid 和面机　美国 Whirlpool Corporation 公司；FKM-180 压面机　浙江俊媳妇厨具有限公司；CR-400 色彩色差计　日本 Konica Minolta 公司；TA.XT PLUS 物性分析仪　英国 Stable Micro System 公司；MIXOLAB1 混合仪　法国肖邦公司；Hitachi S-4800 扫描电子显微镜、Hitachi Flex1000 Ⅱ 钨灯丝扫描电子显微镜、Hitachi E-1045 离子溅射仪　日本日立公司；Lambda 35 紫外分光光度计　美国铂金埃尔默股份有限公司；Bettersize 2600 激光粒度分析仪　丹东百特仪器有限公司；SHY-2A 数显水浴恒温振荡器　常州普天仪器制造有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　酵母蛋白的球磨处理　BM 处理过程参考朱培蕾[14] 的方法稍作修改。取 5 g YP 样品置于 125 mL 氧化锆材质的球磨罐中，同时在罐中加入总重 130 g 的直径为 10、8 和 5 mm 氧化锆研磨球 8、25 和 130 颗。将球磨罐固定于球磨仪中，启动仪器使其在固定的转速（100 和 500 r/min）下持续研磨一定时间（10 和 40 min）即可获得 BM 处理的 YP 样品。球磨仪在运转过程中通过液氮将箱体温度维持在−10 ℃ 左右。球磨 100 r/min 处理 10 和 40 min 的酵母蛋白分别命名为 BM100-T10 和 BM100-T40，500 r/min 处理 10 和 40 min 的酵母蛋白分别命名为 BM500-T10 和 BM500-T40.

1.2.2　酵母蛋白粒径测定　使用激光粒度分析仪测定 YP 样品的体积平均粒径（$D_{[4,3]}$）和表面积平均粒径（$D_{[3,2]}$），测定方法为干法标准型，仪器设置参数如下：物质折射率 1.52，遮光率上限 5.65%，折光率下

限 4.38%。

1.2.3 酵母蛋白表观和微观结构观察 采用数码相机拍摄 YP 的表观形貌。采用 Hitachi S-4800 扫描电子显微镜(SEM)观察样品微观结构。将样品均匀地粘附在导电胶上,在真空环境下经离子溅射仪喷金处理后,观察样品在 500 倍放大下的形貌图片。

1.2.4 酵母蛋白色差测定 使用 CR-400 色彩色差计对 YP 样品的色差进行测定,获得色差参数 L^*、a^*和 b^*值。

1.2.5 生鲜面条制备 参照王丹等[15] 的方法进行制备并略作修改。将 5 g YP 样品与 95 g 小麦粉混合均匀制得混合粉,随后加入含有 1 g 食盐的蒸馏水(加水量根据 MIXOLAB1 混合仪测定结果确定),使用和面机搅拌 5 min 形成均匀面团碎。手工将面团碎揉搓成团后用保鲜膜密封,室温下醒发 30 min。随后采用压面机反复压延 15~20 次至 2.0 mm 厚的面片。最后,将面片切成 5 mm 宽、15 mm 长的面条,置于密封袋中保存备用。其中,没有添加 YP 的小麦粉记为空白组。小麦粉和各组混合粉的吸水率和加水量如表 1 所示,其中加水质量采用公式(1)进行计算。

$$Q = m \times q \times 0.6 \quad \text{式(1)}$$

式中:Q 为加水量,g;m 为面粉质量,g;q 为混合实验仪测得的吸水率,%。

表 1 小麦粉和混合粉的吸水率和加水量

Table 1 Water absorption and addition of wheat flour and flour blends

样品	吸水率(%)	加水量(g)
空白组	56.3±0.08^a	28.21
YP原样	59.0±0.00^f	29.21
BM100-T10	57.9±0.05^c	29.05
BM100-T40	57.7±0.00^b	29.04
BM500-T10	58.4±0.05^e	29.09
BM500-T40	58.2±0.05^d	29.09

注:同列不同小写字母表示差异显著(P<0.05),表3~表6同。

1.2.6 面条表观和微观结构观察 采用数码相机拍摄面条的表观形貌。采用 Hitachi Flex1000Ⅱ钨灯丝 SEM 观察其微观结构。首先将生鲜面条和煮熟后的面条分别进行冷冻干燥,随后按 1.2.3 的方法观察冻干样品的横截面,放大倍率为 200 倍和 500 倍。

1.2.7 面条色差测定 将自然晾干的生鲜面条研磨成粉末,其它步骤同 1.2.4。

1.2.8 面条蒸煮特性测定 参照张健[16] 的方法并略作修改。取 20 根长 15 cm 的生鲜面条,置于盛有 500 mL 沸水的锅中开始计时。每隔 20 s 取出一根,观察面条内部白芯状态,白芯消失时,停止计时,该时间即为面条的最佳蒸煮时间。

取 20 根长 15 cm 的面条称重,记 M_1,在 500 mL 沸水中煮至最佳蒸煮时间,记录断条数(N),捞出晾干 15 min 后再次称重,记 M_2。称量直径15 cm 的培养皿记 M_3,剩余面汤冷却至室温后转移至培养皿上,放入 105 ℃ 烘箱内烘至恒重,称量培养皿和剩余物质总质量记 M_4。面条吸水率、干物质损失率和断条率分别根据公式(2)、公式(3)和公式(4)进行计算:

$$\text{面条吸水率}(\%) = (M_2 - M_1) \times 100 / M_1 \quad \text{式(2)}$$

$$\text{干物质损失率}(\%) = (M_4 - M_3) \times 100 / [M_1 \times (1 - W)] \quad \text{式(3)}$$

$$\text{断条率}(\%) = N \times 100 / 20 \quad \text{式(4)}$$

式中:M_1 是面条煮之前质量,g;M_2 是面条煮之后质量,g;W 是面条煮之前的水分含量,%;M_4 是培养皿和干物质总质量,g;M_3 是培养皿质量,g。

1.2.9 面条质构特性测定 参照蔡攀福等[17] 的方法并稍作修改。选取 20 根长度为 15 cm 的生鲜面条,放入 500 mL 沸水中,煮至最佳蒸煮时间,捞出晾干 20 min 后去除表面多余水分,随即进行面条质构特性的测定。采用 A/LKD 型号探头,实验参数设置如下:测试前和测试中速率均为 10.2 mm/min,测试后速率为 600.0 mm/min,剪切距离 4.5 mm,每组样品重复 6 次。

1.2.10 面条感官评定 根据 GB/T 35875-2018《粮油检验 小麦粉面条加工品质评价》标准,将生鲜面条煮熟后,由 10 位食品专业的学生组成感官评定小组(年龄在 21~30 岁),分别对面条坚实度、弹性、光滑性、食味、表面状态和色泽打分。面条感官评分标准见表 2。

1.2.11 面条体外模拟消化实验 采用 Brodkorb 等[18] 的 INFOGEST 体外模拟消化模型并参照 Fan

表 2 面条样品的感官评分标准

Table 2 Sensory evaluation criteria of noodle samples

项目	满分(分)	评分
坚实度	10	软硬合适(8分~10分);稍软或稍硬(7分);很软或很硬(4分~6分)
弹性	25	弹性好(21分~25分);弹性一般(16分~20分);弹性差(10分~15分)
光滑性	20	光滑爽口(17分~20分);较光滑(13分~16分);不爽口(9分~12分)
食味	5	具有麦香味(5分);基本无异味(4分);有异味(2分~3分)
表面状态	10	表面光滑、有明显透明质感(8分~10分);表面较光滑、透明质感不明显(7分);表面粗糙、明显膨胀(4分~6分)
色泽	30	亮白或亮黄(26分~30分);亮度一般或稍暗(20分~25分);灰暗(14分~19分)
综合评分	100	

等[19]方法进行模拟消化实验。该方案模拟了在特定条件下（如 pH、温度、电解质、酶等）的整个消化过程，包括口腔、胃和肠道消化三个阶段。每个阶段的实验方法如下：

口腔阶段：将生鲜面条煮熟后冷冻干燥，研磨成粉末并过 60 目筛，称取 500 mg 过筛后的粉末至 50 mL 的离心管里，加入 2 mL 水混匀。与模拟唾液（1.60 mL）混合，然后加入 10.0 μL 0.3 mol/L $CaCl_2$ 和 390 μL 水。在恒温水浴振荡器内，37 ℃ 连续搅拌（200 r/min）2 min。

胃相阶段：在 4 mL 口腔消化液里加入 2.4 mL 模拟胃液、2.0 μL $CaCl_2$ 和适量 1 mol/L HCl，使 pH 降至 3.0，然后加入 800 μL 胃蛋白酶溶液（8 mg/mL）和适量水，使模拟胃液的体积达到 20 mL，20 mL 溶液中胃蛋白酶的活性为 2000 U/mL。37 ℃ 连续搅拌（200 r/min）2 h。

肠相阶段：在 8 mL 胃相消化液里加入 16 μL $CaCl_2$、4.8 mL 模拟肠液和适量 1 mol/L NaOH，使 pH 调至 7.0，然后加入 1.6 mL 胰酶溶液（5 mg/mL）和适量水，使模拟肠相最终体积为 16 mL，确保 37 ℃ 下混合肠液中 α-淀粉酶的活性为 200 U/mL。在恒温水浴振荡器内，37 ℃ 连续旋转（200 r/min）3 h。

1.2.12　面条中淀粉消化率测定　在上述肠相消化阶段，分别于 0、10、20、30、60、90、120、150 和 180 min 时取消化液 500 μL 置于 10 mL 离心管中，加入 2 mL 无水乙醇灭酶后 4000 r/min 离心 20 min，取上清液并采用 DNS 法测定其中的葡萄糖含量。淀粉消化率参照秦永萍等[20]的方法根据公式（5）进行计算。

$$\text{淀粉消化率}(\%) = \frac{100\times\text{葡萄糖质量浓度}(\text{g/mL})\times\text{反应体系总体积}(\text{mL})\times 0.9}{\text{淀粉总质量}(\text{g})} \quad \text{式（5）}$$

1.3　数据处理

每个实验重复三次，结果以平均值±标准差表示。分别采用 Excel 和 Origin 2021 进行数据统计分析和绘图，采用 SPSS 软件进行单因素方差分析，事后比较采用 Duncan 多重检验，显著性水平设为 $P<0.05$。

2　结果与分析

2.1　球磨对酵母蛋白微观、色差和粒径的影响

采用 SEM 观察 YP 微观结构，结果如图 1 所示。YP 原样呈现为大量不规则球状颗粒，每个颗粒由更细小颗粒聚集而成，表面突起且呈致密聚集状态，这与 Wang 等[21]观察到的 YP 表面形貌一致。经 BM500 处理后，YP 形成大量不规则形状的碎小颗粒，破碎程度变得彻底，这一现象与 BM 处理牡蛎蛋白的 SEM 观察结果相一致[22]。采用激光粒度仪测定 YP 粒径尺寸，结果如表 3 所示。YP 的 $D_{[4,3]}$ 和 $D_{[3,2]}$ 分别为 42.26 μm 和 24.40 μm。值得注意的是，BM100 处理后的 YP 样品 $D_{[4,3]}$ 和 $D_{[3,2]}$ 均略微增加，仍以较大颗粒为主，这一现象与 SEM 结果观察一致。这可能是因为低能量撞击使 YP 球状颗粒出现裂痕，但未能完全破碎，导致其粒径略微增加。相比于 YP 原样，BM500 处理的 YP 粒径大幅降低，尤其是 BM500-T40 的 $D_{[4,3]}$ 和 $D_{[3,2]}$ 显著降低至 5.04 μm 和 2.90 μm（$P<0.05$）。YP 色差的测定结果如表 3 所示，色差参数中 L^* 值代表亮度，数值越高代表颜色亮度越高；a^* 值代表颜色红绿倾向，正值表示偏红，负值表现偏绿；b^* 代表颜色黄蓝倾向，正值表现偏黄，负值表现偏蓝。随着 BM 处理能量的增加，YP 的 L^* 值和 a^* 值分别从 83.01 和 3.16 显著增加至 94.45 和 6.14，b^* 值从 26.81 显著降低至 14.25（$P<0.05$），表明随 BM 处理能量的增加 YP 的亮度提高、色泽变浅。这一结果与 YP 表观呈现的色泽变化相一致，即 BM 处理使 YP 样品的颜色由黄棕色逐渐转变为浅黄色（图 1）。

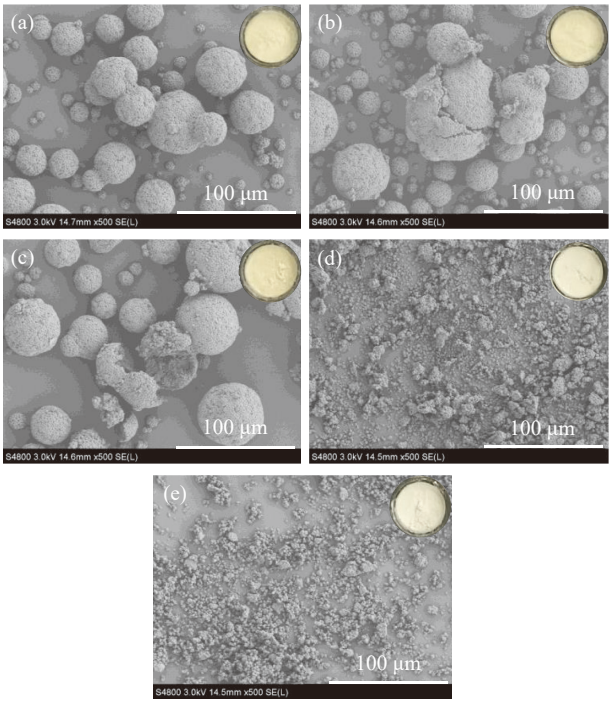


图 1　YP 样品的表观和 SEM 图（500×）

Fig.1　Appearance and SEM image of YP samples after BM treatmrnt (500×)

注：（a）~（e）分别代表 YP 原样、BM100-T10、BM100-T40、BM500-T10 和 BM500-T40。

表 3　YP 样品的粒径和色差参数

Table 3　Particle size and color difference parameters of YP samples

样品	$D_{[4,3]}$（μm）	$D_{[3,2]}$（μm）	L^* 值	a^* 值	b^* 值
YP原样	42.26±1.29^{c}	24.40±1.63^{bc}	83.01±0.12^{a}	3.16±0.02^{a}	26.81±0.12^{e}
BM100-T10	44.90±0.24^{d}	25.83±0.12^{c}	83.80±0.16^{b}	3.40±0.02^{b}	26.26±0.09^{d}
BM100-T40	42.50±1.73^{c}	23.16±1.76^{b}	87.25±0.08^{c}	4.03±0.03^{c}	25.68±0.17^{c}
BM500-T10	10.31±0.33^{b}	4.44±0.01^{a}	94.45±0.14^{d}	5.78±0.02^{d}	17.68±0.05^{b}
BM500-T40	5.04±0.03^{a}	2.90±0.03^{a}	94.45±0.14^{d}	6.14±0.01^{e}	14.25±0.12^{a}

以上结果表明，高能量的 BM 处理对 YP 产生更大的冲击力，从而改变 YP 颗粒形态和大小，使其从致密的球状结构转变为不规则细小颗粒，同时使 YP 样品色泽变浅。

2.2 球磨酵母蛋白对面条表观和色差的影响

面条颜色是消费者接受度的关键因素之一。研究表明，消费者通常偏好亮白色的面条，因为这种颜色通常与产品的新鲜度和高品质呈正相关[23]。

采用相机拍摄了生鲜面条的表观照片，结果如图 2 所示。可以观察到空白组面条呈亮白色，YP 原样制作的面条呈现出暗黄色。随着 BM 处理能量的增加，尤其是添加 BM500-T40 处理的 YP 制作的面条呈淡黄色，最接近空白对照组。

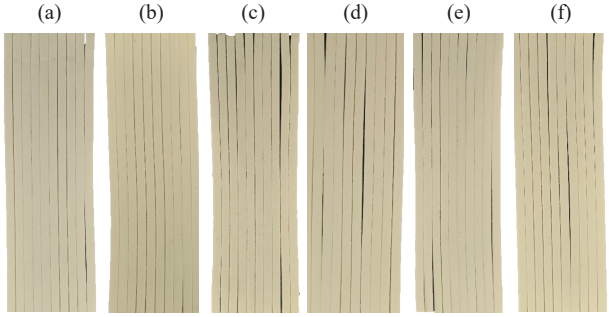


图 2 面条样品的表观图

Fig.2 Appearance of noodle samples

注：(a)~(f)分别指未添加 YP、添加 YP 原样、BM100-T10、BM100-T40、BM500-T10 和 BM500-T40 制作成的面条。

采用色差计测定了面条的色差，结果如表 4 所示。空白组面条的 L^*和 b^*值分别为 90.41 和 7.67，添加 YP 原样制作的面条其 L^*值降低至 89.03，b^*值增加至 11.25，说明 YP 的引入会导致面条表观色泽亮度变暗，颜色变黄。随着 BM 处理能量的增加，面条 L^*值从 89.03 增加至 89.89，b^*值从 11.25 降低至 9.43，这是因为 YP 原样呈黄棕色，随着 BM 处理能量的增加颜色逐渐变成淡黄色，所以面条色泽在加入酵母蛋白后先变深后变浅是受到酵母蛋白颜色本身影响，这一结果与王贝贝等[24]将亚麻籽粉添加到面条里导致面条颜色发生变化的原因一致。因此，相比于直接添加 YP 原样，经 BM 处理的 YP 能显著提升面条的色泽和亮度(P<0.05)。

表 4 面条样品的色差参数

Table 4 Color difference parameter of noodle samples

样品	L^*值	a^*值	b^*值
空白组	90.41±0.49^{c}	−0.57±0.10^{b}	7.67±0.31^{a}
YP原样	89.03±0.30^{a}	−0.62±0.09^{b}	11.25±0.16^{d}
BM100-T10	89.67±0.30^{b}	−0.70±0.12^{ab}	10.99±0.36^{d}
BM100-T40	89.69±0.56^{b}	−0.6±0.12^{b}	10.47±0.26^{c}
BM500-T10	89.78±0.52^{b}	−0.75±0.11^{a}	10.24±0.13^{c}
BM500-T40	89.89±0.38^{b}	−0.69±0.15^{ab}	9.43±0.42^{b}

2.3 球磨酵母蛋白对面条横截面形态的影响

采用扫描电镜分别在 200×和 500×放大倍数下观察生面条与熟面条的横截面形态，实验结果如图 3 所示。空白组中放大 200×和 500×的生面条内部基质形成的网络结构黏附于淀粉颗粒表面，结构紧密，没有空隙，这一结构特征与已报道的面条微观结构的 SEM 观察结果相近[25]。在添加 YP 原样的生面条中观察到淀粉颗粒与面筋网络之间空隙较多，结构松散。随着 BM 处理能量增加，YP 被破碎成不规则细小颗粒后均匀地嵌入到面筋网络中，从而提升网络的连续性与致密性[26]。尤其是添加 BM500-T40 处理的 YP 制作的面条时，面筋网络形成连续致密的结构，均匀地将淀粉颗粒包裹。

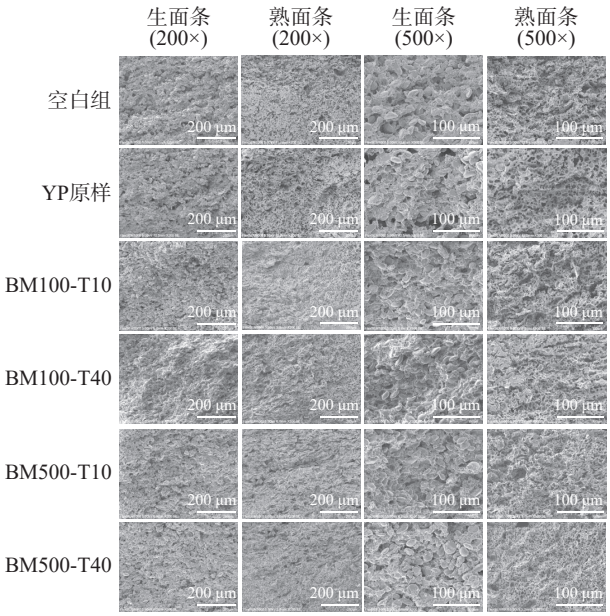


图 3 面条样品的 SEM 图(200×和 500×)

Fig.3 SEM image of noodle samples (200× and 500×)

另一方面，在蒸煮过程中，淀粉颗粒吸水膨胀并糊化，与凝固的面筋蛋白相互作用，最终形成多孔复合凝胶结构。其中放大 200×和 500×后的熟面条在添加 YP 原样后呈现出多孔疏松结构，而添加经 BM 处理后的 YP 制成面条结构更为致密光滑，孔隙变少。这是因为 BM 处理后的 YP 粒径更小，这种细小的颗粒填充到面筋网络里导致其孔隙减小，减少面条在烹饪过程中淀粉的流失，使面条质地变得坚实[27]，这与后续质构特性评估的结果一致。

2.4 球磨酵母蛋白对面条蒸煮特性的影响

在面条蒸煮过程中，随着水温升高，淀粉和蛋白质等成分的溶出会导致面汤浑浊度增加，即蒸煮损失率升高，过高的蒸煮损失率会显著劣化面条的食用品质[28]。面条吸水率主要取决于淀粉和蛋白质在蒸煮过程中的溶胀能力，这种溶胀作用受到面筋蛋白网络结构的直接影响[29]。在蒸煮过程中面条的断条率为 0%，其吸水率和干物质损失率如表 5 所示。与空白组相比，添加 YP 原样制作的面条吸水率从 68.64% 降至 64.91%，这是因为 YP 替代了 5% 的淀粉，而淀粉是亲水性大分子，YP 的亲水性较差且不如淀粉，

导致面条吸水率下降。随着 BM 处理能量的增加，吸水率进一步下降至 61.19%，这是因为 YP 表面活性增高，能在水相中形成稳定的界面膜[30]，阻碍水分与淀粉颗粒的直接接触，从而降低面条的吸水率。

由表 5 可知，与空白组相比，添加 YP 原样制作的面条干物质损失率从 2.94% 升高至 3.30%。这是因为 YP 原样的引入导致面条面筋网络孔隙变大、结构松散，从而使糊化的淀粉更易渗出，造成营养物质的流失。这一结果与添加大豆蛋白导致面条蒸煮损失增加的实验现象相似[31]。添加 BM 处理后的 YP 制成的面条，其干物质损失率逐渐减小至 3.05%，这是因为 YP 经 BM 处理后粒径变小，均匀分散在面筋网络中，与面筋蛋白共同形成连续的凝胶网络结构，将淀粉束缚在其中，防止其流出，从而降低了面条干物质损失率[32]。综上，经 BM 处理后的 YP 添加到面条里，能够提升面条在蒸煮过程中的品质稳定性。

表 5　面条样品的吸水率和干物质损失率

Table 5　Water absorption rate and dry matter rate loss of noodle samples

样品	吸水率(%)	干物质损失率(%)
空白组	68.64±1.34^{c}	2.94±0.13^{a}
YP原样	64.91±0.85^{b}	3.30±0.05^{d}
BM100-T10	63.69±1.17^{ab}	3.25±0.09^{cd}
BM100-T40	63.07±1.53^{ab}	3.18±0.04^{bcd}
BM500-T10	62.68±1.04^{ab}	3.13±0.05^{bc}
BM500-T40	61.19±0.63^{a}	3.05±0.03^{ab}

2.5　球磨酵母蛋白对面条质构特性的影响

面条的坚实度和咀嚼度是评价面条质地的重要指标。坚实度是指面条在受到外力作用时的抵抗能力，反映面条在特定条件下被压缩或切割时所需的最大力值；咀嚼度是指面条在标准测试条件下经历两次压缩过程所消耗的机械能，反映面条在口腔咀嚼过程中所需的能量消耗[33]。面条的坚实度和咀嚼性越高，说明其品质越好[33]。采用质构仪测定了面条的质构特性，结果如表 6 所示。与空白组相比，添加 YP 原样制作的面条其坚实度和咀嚼度从 3.019 N 和 3.939 J 降低至 2.656 N 和 2.923 J，这可能是因为 YP 的刚性结构物理阻隔了面筋蛋白分子间的接触，不利于面筋网络结构的形成，从而降低面条坚实度和咀嚼度[34]。随着 BM 处理能量的增加，面条的坚实度和咀嚼度逐渐回升，其中 BM500-T40 组的坚实度和咀嚼度分别为 2.967 N 和 3.600 J，与空白组最接近。这可能是由于 BM 处理后的 YP 粒径显著减小，更易均匀分散在面团体系中，减少局部聚集，避免形成结构缺陷。同时 YP 与面筋蛋白结合，形成复合结构并填充面筋网络孔隙，增强面筋网络结构致密性，进而提高面条的坚实度和咀嚼度[35]。以上结果说明，相较于 YP 原样，添加 BM 处理的 YP 能够改善面条的质构特性，且随着 BM 处理能量的增加，效果越明显。虽然 YP 颗粒未能完全被低能量的 BM 处理破碎，但仍能有效改善面条的品质特性。

表 6　面条样品的质构特性

Table 6　Textural property of noodle samples

样品	坚实度(N)	咀嚼度(J)
空白组	3.019±0.03^{d}	3.939±0.05^{c}
YP原样	2.656±0.04^{a}	2.923±0.03^{a}
BM100-T10	2.723±0.02^{ab}	3.299±0.06^{b}
BM100-T40	2.832±0.07^{bc}	3.401±0.13^{b}
BM500-T10	2.877±0.06^{bcd}	3.473±0.09^{b}
BM500-T40	2.967±0.01^{cd}	3.600±0.18^{bc}

2.6　球磨酵母蛋白对面条感官评分的影响

感官评价以坚实度、弹性、光滑性、食味、表面

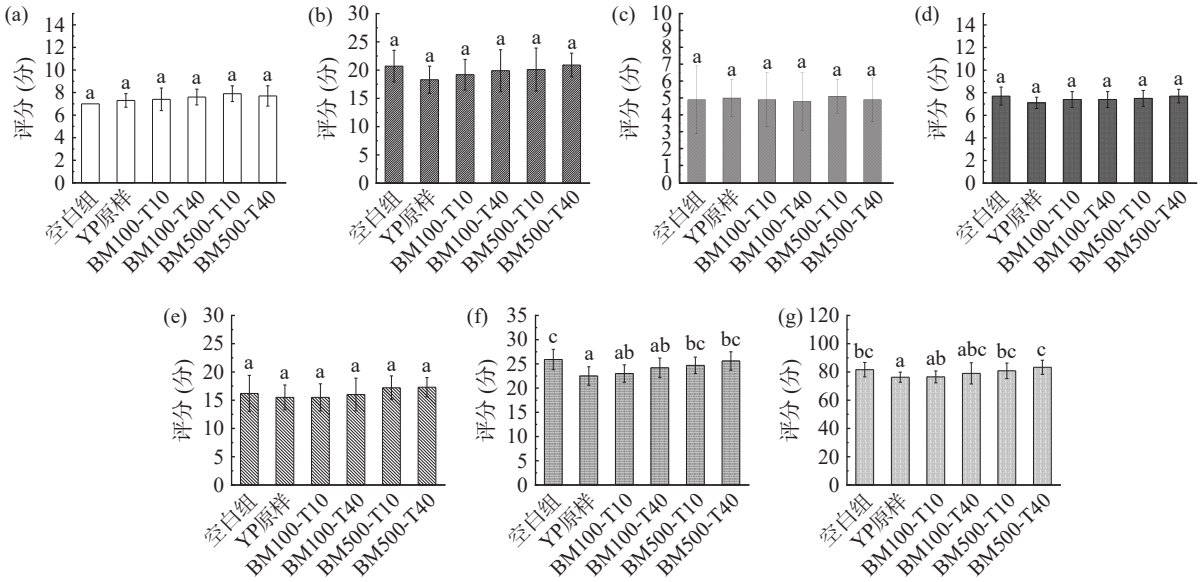


图 4　面条样品的感官评分

Fig.4　Sensory evaluation score of noodle samples

注：(a)~(g)分别代表坚实度、弹性、食味、表面状态、光滑性、色泽和综合评分。

状态和色泽等指标为基础，能够综合体现面条的感官属性，是面条整体品质评定的重要依据。通过对添加不同 BM 处理的 YP 制成的面条进行感官评价，获得了面条的感官指标，结果如图 4 所示。与空白组相比，YP 原样面条的色泽评分显著降低（P<0.05）；而 BM 处理的 YP 面条色泽评分相比于 YP 原样面条则显著提高。整体上来看，相较于添加 YP 原样，BM500-T40 处理的 YP 面条在弹性和光滑性方面表现更优，综合评分最高。这是因为 BM 处理后的 YP 颗粒细小，其在面条中分布更加均匀，从而使面条口感更加细腻和柔韧[36]。综上，相较于添加 YP 原样的面条，BM 处理的 YP 面条感官品质明显改善，并随 BM 处理能量的增加其整体品质逐渐接近白面条。

2.7 球磨酵母蛋白对面条中淀粉消化特性的影响

添加不同 BM 处理 YP 的面条中淀粉消化率如图 5 所示。其中，空白组消化率最终为 59.1%，添加 YP 原样、BM100-T40 和 BM400-T40 制作的面条淀粉消化率分别为 67.3%、65.3% 和 63.1%。与空白组相比，添加 YP 原样制作的面条淀粉消化率最高，这是由于 YP 的加入改变了面条的微观结构特性，其形成的多孔结构增加了淀粉酶与底物的接触面积，从而提高了淀粉的酶解效率。随着 BM 处理能量的增加，添加 BM 处理的 YP 制作的面条消化率逐渐降低，此时面条坚实度逐渐增加，内部形成更致密的微孔结构，这种结构限制了淀粉酶的渗透，从而延缓了淀粉的消化过程[37]。

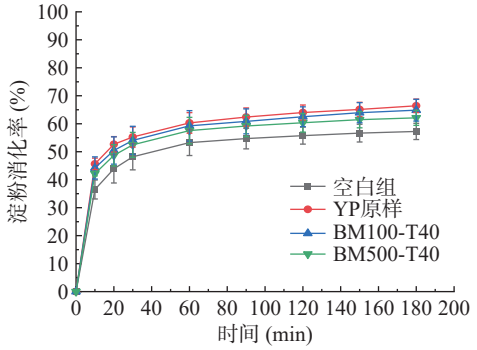


图 5 面条样品的淀粉消化率曲线图

Fig.5 Starch digestion curves of noodle samples

3 结论

本文在表征 BM 处理 YP 的形貌、色泽和粒径的基础上，研究了 YP 原样和 BM 处理 YP 对生鲜面条表观、微观、蒸煮、质构、感官和淀粉消化等方面的影响，同时分析了面条品质变化的原因。结果表明，BM 处理的 YP 能够改善面条的各项品质，使其特性更接近白面条。尤其是经高能量 BM 处理后的 YP 呈不规则细小颗粒，更易与面筋网络结合并增强其结构稳定性，从而使面条品质方面表现优异。值得注意的是，虽然低能量 BM 处理未明显改变 YP 形貌，但仍然造成了其颗粒损伤，从而促进其与面筋网络及水分相互作用，最终在一定程度上使面条品质提升。已有研究表明，在面条中添加外源蛋白质虽然能改善其氨基酸平衡，但由此引起的色泽和蒸煮品质的劣变仍是限制蛋白质强化面条产业化的技术瓶颈。本研究提出的蛋白质 BM 改性策略有效解决了 YP 面条相关品质劣变的问题。该技术方法不但为面条中 YP 的强化提供了新路径，而且也为面制品中其他种类蛋白质的强化提供了技术参考。

综上所述，添加 BM 处理后的 YP 使面条的整体品质得到提升。然而，论文的研究工作仍存在一定局限性，有关 BM 处理 YP 影响面条品质特性的机理尚不明晰。因此，未来有必要对 YP 与面筋蛋白以及淀粉分子的相互作用进行深入探究，并通过实际生产验证应用效果，以期推动 YP 在面制品中的应用。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] SHARIF M, ZAFAR M H, AQIB A I, et al. Single cell protein: Sources, mechanism of production, nutritional value and its uses in aquaculture nutrition[J]. Aquaculture, 2021, 531: 735885.

[2] TIMIRA V, CHEN X, ZHOU P, et al. Potential use of yeast protein in terms of biorefinery, functionality, and sustainability in food industry[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2024, 23(3): e13326.

[3] WANG Songyu, HUANG Fang, ZHAO Yuping, et al. Slow-digestive yeast protein concentrate: An investigation of its *in vitro* digestibility and digestion behavior[J]. Food Research International, 2023, 174: 113572.

[4] MA Junrui, SUN Yifei, MENG Demei, et al. Yeast proteins: The novel and sustainable alternative protein in food applications [J]. Trends in Food Science & Technology, 2023, 135: 190−201.

[5] 尹婷婷, 何荣, 陆雪敏, 等. 魔芋粉对面团特性及面条品质的影响[J]. 食品科技, 2023, 48(3): 201−207. [YIN Tingting, HE Rong, LU Xuemin, et al. Effects of konjac flour on wheat dough properties and noodle quality[J]. Food Science and Technology, 2023, 48(3): 201−207.]

[6] MEENU M, KAUR S, YADAV M, et al. Impact of inherent chemical composition of wheat and various processing technologies on whole wheat flour and its final products[J]. Cereal Research Communications, 2025, 53(1): 409−424.

[7] ZANG Peng, GAO Yang, CHEN Pu, et al. Recent advances in the study of wheat protein and other food components affecting the gluten network and the properties of noodles[J]. Foods, 2022, 11(23): 3824.

[8] SHEWRY P R, HEY S J. The contribution of wheat to human diet and health[J]. Food and Energy Security, 2015, 4(3): 178−202.

[9] JACH M E, SEREFKO A, ZIAJA M, et al. Yeast protein as an easily accessible food source[J]. Metabolites, 2022, 12(1): 63.

[10] 胡新平, 唐培鑫, 位凤鲁, 等. 酵母蛋白对小麦粉和高蛋白面包的品质影响[J]. 粮食与食品工业, 2024, 31(6): 1−6. [HU Xinping, TANG Peixin, WEI Fenglu, et al. Research on the effect of yeast protein on wheat flour properties and high protein bread quality[J]. Cereal & Food Industry, 2024, 31(6): 1−6.]

[11] 寇福兵. 超微粉碎板栗粉理化性质及其对面条加工特性的

影响[D]. 重庆：西南大学, 2022. [KOU Fubing. Physicochemical properties of superfine grinding chestnut powder and its effect on noodle processing characteristics[D]. Chongqing: Southwest University, 2022.]
[12] 刘鹏, 李明, 邵信儒. 球磨处理对大豆分离蛋白结构和起泡特性的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(14): 171−177. [LIU Peng, LI Ming, SHAO Xinru. Effects of ball milling on the structure and foaming properties of soy protein isolate[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(14): 171−177.]
[13] 谭文, 张钦俊, 万鹏宇, 等. 球磨处理对鸡蛋清蛋白结构、性质及起泡性的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(11): 124−129. [TAN Wen, ZHANG Qinjun, WAN Pengyu, et al. Effect of ball-milling treatment on protein structure and physicochemical and foaming properties of egg white[J]. Food Science, 2021, 42(11): 124−129.]
[14] 朱培蕾. 乳清分离蛋白复合大米淀粉的干热改性及其稳定 *β*-胡萝卜素乳液凝胶的研究[D]. 合肥：安徽农业大学, 2021. [ZHU Peilei. Study on the dry heating modification and *β*-carotene emulsion gel of whey protein isolate complex rice starch[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2021.]
[15] 王丹, 郑惠华, 纪阳, 等. 木耳粉对面团流变学特性及面条品质的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(21): 43−50. [WANG Dan, ZHENG Huihua, JI Yang, et al. Effects of *Auricularia powder* on dough rheological properties and noodle quality characteristics[J]. Food Science, 2019, 40(21): 43−50.]
[16] 张健. 荞麦挂面的制作及其品质的研究[D]. 合肥：安徽农业大学, 2012. [ZHANG Jian. Study on preparation and quality of its buckwheat noodle[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2012.]
[17] 蔡攀福, 李冰, 梁毅, 等. 魔芋葡甘聚糖对面条品质及其淀粉体外消化的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(5): 8−13. [CAI Panfu, LI Bing, LIANG Yi, et al. Effect of konjac glucomannan on quality and *in vitro* starch digestibility of noodles[J]. Food Science, 2018, 39(5): 8−13.]
[18] BRODKORB A, EGGER L, ALMINGER M, et al. INFOGEST static *in vitro* simulation of gastrointestinal food digestion[J]. Nature Protocols, 2019, 14(4): 991−1014.
[19] FAN Jiaxuan, GUO Xiaona, ZHU Kexue. Impact of laccase-induced protein cross-linking on the *in vitro* starch digestion of black highland barley noodles[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 124: 107298.
[20] 秦永萍, 曾鹏, 房丹丹, 等. 沙棘果渣添加量对面条品质及消化特性的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(10): 112−121. [QIN Yongping, ZENG Peng, FANG Dandan, et al. Effect of sea buckthorn pomace addition on the quality and digestive attributes of noodles[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(10): 112−121.]
[21] WANG Zihuan, XU Xiuli, LIU Zhaoli, et al. High-pressure homogenization treatment on yeast protein: Effect on structure and emulsifying properties[J]. Food Research International, 2025, 213: 116550.
[22] WANG Zhenyu, CHANG Sijia, LI Yajing, et al. Effects of ball milling treatment on physicochemical properties and digestibility of Pacific oyster (*Crassostrea gigas*) protein powder[J]. Food Science & Nutrition, 2018, 6(6): 1582−1590.
[23] MORRIS C F. Determinants of wheat noodle color[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2018, 98(14): 5171−5180.
[24] 王贝贝, 张永顺, 郭洪涛, 等. 亚麻籽粉对面条品质和消化特性的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(18): 72−79. [WANG Beibei, ZHANG Yongshun, GUO Hongtao, et al. Effects of flaxseed powder on the quality and digestive characteristics of noodles[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(18): 72−79.]
[25] ZHANG Mengli, MA Meng, YANG Tianbao, et al. Dynamic distribution and transition of gluten proteins during noodle processing[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 123: 107114.
[26] 孙晓晓. 球磨处理技术对小米粉及其面条品质特性的影响研究[D]. 邯郸：河北工程大学, 2023. [SUN Xiaoxiao. Effect of ball milling technology on the quality of foxtail millet flour and noodles[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2023.]
[27] ZHANG Jincheng, WANG Lijuan, TONG Litao, et al. Delayed effect of superfine particle size of oat bran on starch retrogradation and hydrolysis of gluten-free rice bread during short-term storage[J]. Journal of Cereal Science, 2025, 124: 104216.
[28] 马梦月, 徐紫薇, 于博, 等. 藜麦粉添加量对碱面条品质和体外消化特性的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(7): 42−48. [MA Mengyue, XU Ziwei, YU Bo, et al. Effects of quinoa powder addition on the quality and *in vitro* digestive characteristics of alkaline noodles[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(7): 42−48.]
[29] 寇锟, 陈复生, 杜艳, 等. 莱茵衣藻蛋白对小麦粉面条品质的影响[J]. 粮食与油脂, 2025, 38(1): 38−42,66. [KOU Kun, CHEN Fusheng, DU Yan, et al. Effects of *Chlamydomonas reinhardtii* protein on the quality of wheat flour noodles[J]. Cereals & Oils, 2025, 38(1): 38−42,66.]
[30] MOSIBO O K, FERRENTINO G, UDENIGWE C C. Microalgae proteins as sustainable ingredients in novel foods: Recent developments and challenges[J]. Foods, 2024, 13(5): 733.
[31] 任国谱, 曾宇. 大豆蛋白在面条中的应用研究[J]. 食品工业科技, 2003, 24(10): 82−83. [REN Guopu, ZENG Yu. The application of soy protein in noodle proceasing[J]. Science and Technology of Food Industry, 2003, 24(10): 82−83.]
[32] SHEN Huishan, YAN Mengting, LIU Xinyue, et al. Wheat starch particle size distribution regulates the dynamic transition behavior of gluten at different stages of dough mixing[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 244: 125371.
[33] 况玉玉, 杨莎, 张念念, 等. 紫菜粉对面条品质特性及微观结构的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(22): 111−121. [KUANG Yuyu, YANG Sha, ZHANG Niannian, et al. Effect of *Porphyra powder* on the quality and microstructure of noodles[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(22): 111−121.]
[34] 张莹莹, 阎欣, 魏倩, 等. 凝胶化大豆蛋白对面条品质的影响[J]. 粮食加工, 2018, 43(4): 34−38. [ZHANG Yingying, YAN Xin, WEI Qian, et al. Effect of gelatinized soybean protein on the quality of noodles[J]. Grain Processing, 2018, 43(4): 34−38.]
[35] ZHANG Lili, GUAN Erqi, YANG Yuling, et al. Impact of wheat globulin addition on dough rheological properties and quality of cooked noodles[J]. Food Chemistry, 2021, 362: 130170.
[36] RAO Zhenan, KOU Fubing, WANG Qiming, et al. Effect of superfine grinding chestnut powder on the structural and physicochemical properties of wheat dough[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 259: 129257.
[37] YAO M D, LI M, DHITAL S, et al. Texture and digestion of noodles with varied gluten contents and cooking time: The view from protein matrix and inner structure[J]. Food Chemistry, 2020, 315: 126230.