



王瑞,周磊,张万刚. 菠萝蜜果皮多糖对低盐猪肌原纤维蛋白凝胶特性的影响[J]. 南京农业大学学报,2026,49(4):902-909.

Wang R,Zhou L,Zhang W G. Effect of jackfruit peel polysaccharide on gel properties of low-salt pork myofibrillar protein[J]. Journal of Nanjing Agricultural University,2026,49(4):902-909.

菠萝蜜果皮多糖对低盐猪肌原纤维蛋白凝胶特性的影响

王瑞¹,周磊²,张万刚^{2*}

(1.南京农业大学密西根学院,江苏 南京 211800;2.南京农业大学食品科学技术学院,江苏 南京 211800)

摘要:[目的]本文旨在应用菠萝蜜果皮多糖(JPP)来增强低盐环境($0.2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NaCl}$)下肌原纤维蛋白(MP)的凝胶特性。[方法]以不同盐离子强度(0.6 、 0.4 和 $0.2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NaCl}$)MP作为对照,研究JPP添加量(0.05% 、 0.10% 、 0.15% 、 0.20% 、 0.25% 、 0.30%)对低盐肌原纤维蛋白($0.2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ MP}$)凝胶特性的影响,测定指标包括凝胶强度、水分分布、保水能力、流变特性、微观结构和二级结构。[结果]在 $0.2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NaCl}$ 条件下,降低盐离子强度会明显降低MP凝胶的保水能力和凝胶强度,而添加JPP可以提高MP凝胶的保水能力和凝胶强度。添加 0.25% JPP后,低盐凝胶强度从 28.54 g 增加到 65.59 g ,保水能力从 31.75% 增加到 45.12% ,与 $0.4\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ MP}$ 凝胶相比无显著差异。微观结果显示,JPP能填充凝胶中的空隙,使低盐凝胶孔径变得均匀致密。与未添加JPP的对照组($0.2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NaCl}$)相比,添加 0.25% JPP组的凝胶显著促进了 α -螺旋向 β -折叠结构的转变。[结论]添加JPP可以改善低盐MP的凝胶特性,且添加量为 0.25% 的JPP提升效果最好。

关键词:菠萝蜜果皮多糖;低盐;肌原纤维蛋白;凝胶特性;食品副产品

中图分类号:TS251.1

文献标志码:A

文章编号:1000-2030(2026)04-0902-08

Effect of jackfruit peel polysaccharide on gel properties of low-salt pork myofibrillar protein

WANG Rui¹,ZHOU Lei²,ZHANG Wangang^{2*}

(1.College of Michigan,Nanjing Agricultural University,Nanjing 211800,China;2.College of Food Science and Technology,Nanjing Agricultural University,Nanjing 211800,China)

Abstract:[Objectives] This paper was designed to apply jackfruit peel polysaccharides (JPP) to enhance the gel properties of myofibrillar proteins (MP) under a low-salt environment ($0.2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NaCl}$). [Methods] The changes in gel strength, water holding capacity, water distribution, rheological properties, microstructure and secondary structure of low-salt MP gel under different JPP additions (0.05% , 0.10% , 0.15% , 0.20% , 0.25% , 0.30%) were compared with MP gel under 0.6 , 0.4 and $0.2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NaCl}$. [Results] The reducing salt ionic strength significantly decreased the water holding capacity (WHC) and strength of MP gel, while the JPP addition could improve the water holding capacity and gel strength of MP gel under $0.2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NaCl}$. The 0.25% JPP addition increased the low-salt gel strength from 28.54 g to 65.59 g , water holding capacity from 31.75% to 45.12% , and showed no significant difference compared with $0.4\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ MP}$ gel. Microscopic results indicated that JPP could fill the gaps in the gel, making the pore size of the low-salt gel uniform and dense. Compared with the control group without JPP ($0.2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NaCl}$), the addition of 0.25% JPP significantly promoted the transformation of α -helix to β -sheet structure. [Conclusions] The addition of JPP could improve the gel properties of low-salt MP, with the optimal effect achieved at an addition level of 0.25% JPP.

Keywords: jackfruit peel polysaccharide; low-salt; myofibrillar protein; gel properties; food by-products

随着消费群体健康和营养意识的增强,低盐肉制品受到消费者的青睐,因为它们可以降低慢性疾病的风险。然而,低盐条件下肉类凝胶性质的恶化限制了低盐肉类产品的开发。为改善低盐肉制品的品质特性,目前普遍采用物理^[1]、化学和添加剂^[2]等多种处理方式。添加膳食纤维多糖被认为是一种有前景的提高低盐肉类产品品质的方法。例如,加入天然多糖(如柑橘纤维)和大豆蛋白可以通过与肌原纤维蛋白(myofibrillar protein,MP)的相互作用来增强凝胶化性质^[3];加入燕麦 β -葡聚糖能稳定低盐肉糜凝胶的结构^[4]。卡拉胶和大豆蛋白分离物可以增强肉类蛋白的凝胶强度^[5]。此外,将罗勒籽胶加入肉类凝胶中可

收稿日期:2025-03-18

基金项目:江苏省农业科技自主创新资金[CX(23)3141]

作者简介:王瑞,硕士研究生。*通信作者:张万刚,教授,研究方向为蛋白质翻译后修饰与肉品质,E-mail:wangang.zhang@njau.edu.cn。

以改善其微观结构^[6]。

菠萝蜜皮是菠萝蜜的副产品,含有丰富的功能成分(包括酚类化合物、维生素、矿物质等)及生物活性多糖。研究表明,菠萝蜜皮具有抗氧化和抗炎作用^[7]。此外,菠萝蜜果皮多糖(jackfruit peel polysaccharide, JPP)可以通过促进短链脂肪酸的产生来改善肠道环境,增强肠道健康^[7]。在食品工业中,JPP 通常作为增稠剂和乳化剂,能够增强食品的质地和口感。例如,在饼干中添加 JPP 后,水分含量和质地得到显著提升^[8]。同时,从菠萝蜜中提取的果胶具有很强的黏性,可用于增强食品的凝胶化。

肌原纤维蛋白(MP)占肌肉蛋白的50%,在肉类质地和凝胶化中起着关键作用,这对于生产乳化肉类制品(如香肠和肉丸)至关重要。在低盐环境中,肌球蛋白的盐溶性显著影响其溶解性和凝胶化性质。肌球蛋白单体的棒状尾部在静电作用下卷曲,形成不溶解的自组装结构,导致凝胶特性降低^[9]。因此,人们采用许多方法来增强 MP 在低盐条件下的凝胶特性,以改善其对低盐肉制品的增强效果。例如,调整蛋白质的化学环境、采用物理处理方法、添加添加剂等都能有效改善 MP 的凝胶特性。其中,果皮多糖的添加因其绿色环保的优点而备受关注。

本研究选取 0.6、0.4 和 0.2 mol·L⁻¹ 这 3 种盐离子强度,代表肉制品中添加食盐量分别为 1.5%、1.0%、0.5%,探讨不同盐离子强度对 MP 凝胶特性的影响,并进一步研究从菠萝蜜皮中提取多糖对低盐条件下 MP 凝胶特性的改善效果,同时还研究不同 JPP 添加量下低盐凝胶特性的变化,旨在为低盐肉制品的开发及品质改善提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

猪背最长肌购于南京雨润食品集团有限公司;越南菠萝蜜购于南京百果园水果超市;牛血清蛋白购自上海麦克林生化科技股份有限公司;无水乙醇购自南京迈博昊成生物科技有限公司;氯化钠(NaCl)、盐酸(HCl)、氢氧化钠(NaOH)、六水氯化镁(MgCl₂·6H₂O)、五水硫酸铜(CuSO₄·5H₂O)、四水酒石酸钾钠(KNaC₄H₄O₆·4H₂O)、二水磷酸二氢钠(NaH₂PO₄·2H₂O)和十二水磷酸氢二钠(Na₂HPO₄·12H₂O)均购自南京晶格化学科技有限公司。试验中使用的所有化学试剂均为分析纯。

1.2 仪器与设备

Grindomix GM 200 绞肉机购自德国 Retsch 公司;500-TP 高速匀浆机购自英国 Prima 公司;TW20 水浴锅购自德国 JULABO 公司;TA-XT plus 质构仪购自英国 Stab Micro System 公司;Physica MCR 302 流变仪购自奥地利 Anton Paar 公司;M2e 多功能酶标仪购自德国 MD 公司;Niumag PQ001 核磁共振成像分析仪购自上海纽迈电子科技有限公司;Avanti J-E 高速冷冻离心机购自美国 Beckman Coulter 公司;Allegra 64R 离心机购自美国 Beckman 公司。

1.3 试验方法

1.3.1 JPP 提取 参考 Wang 等^[10]的方法,采用改进的热水提取法提取果皮多糖。将菠萝蜜果皮剪碎,烘干(65 ℃、24 h),粉碎过筛后获得粉末,加入无水乙醇除去粉末中的色素,在烘箱中烘干。将 1 g 粉末与 40 mL 纯水混合,90 ℃水浴 2.5 h。滤布粗过滤后的滤液进一步通过真空抽滤去除残余固体杂质,再将滤液通过旋转蒸发浓缩至原体积的 1/3,随后用 Sevage 法(氯仿、正丁醇、滤液体积比为 4:1:5)除去蛋白,重复 3 次。向脱蛋白后的溶液中加入 4 倍体积的无水乙醇,4 ℃静置过夜,经双层滤布过滤后收集析出的沉淀样品,经冻干 48 h 后得到干燥的 JPP。

1.3.2 单糖成分的测定 采用柱前衍生高效液相色谱法(HPLC)分析 JPP 中的单糖成分。将精确称量为 5 mg 的多糖样品加入 1 mL 2 mol·L⁻¹ 三氟乙酸(TFA)溶液中,在 121 ℃下加热 2 h。通过甲醇清洗和超纯水溶解,将样品转移到待测的色谱瓶中。对于 1-苯基-3-甲基-5-吡唑啉酮(PMP)衍生化,首先将 0.2 mL 单糖标准品溶液或多糖水解液与氢氧化钠溶液和 PMP 甲醇溶液在 70 ℃水浴中反应 1 h,然后进行盐酸中和、氯仿萃取,最后加水定容至 1 mL。使用 Thermo U 3000 液相色谱系统和 ZORBAX EclipseXDB-C18 色谱柱,在乙腈和磷酸盐缓冲液的流动相(体积比为 82:18)下进行色谱分离,流速为 0.8 mL·min⁻¹,柱温为 30 ℃,检测波长为 250 nm,进样量为 10 μL。

1.3.3 肌原纤维蛋白提取 蛋白提取参考高廷轩等^[11]的方法,并适当修改。取 50 g 猪背最长肌,用绞肉机搅碎后加入 4 倍体积缓冲液 1(含 0.1 mol·L⁻¹ NaCl、2 mmol·L⁻¹ MgCl₂·6H₂O、1 mmol·L⁻¹ EGTA、20 mmol·L⁻¹

$\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 $2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$, pH7) $10\,000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 匀浆 10 s。将混合物在 $2\,000 \text{ g}$ 下离心 20 min, 获取沉淀。重复上述步骤 3 次后取沉淀加 4 倍体积缓冲液 2 ($0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NaCl}$, pH6) $10\,000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 冰浴匀浆 10 s。将经过 1 层纱布过滤后得到的滤液在 $2\,000 \text{ g}$ 下离心 20 min, 获取沉淀。重复上述步骤 3 次, 所得沉淀即为 MP。MP 的蛋白质浓度使用双缩脲法以牛血清白蛋白为标准蛋白进行计算。

1.3.4 凝胶的制作 凝胶的制作参考 Zhao 等^[12]的方法。用不同盐离子强度 (0.2 、 0.4 、 $0.6 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NaCl}$) 的缓冲液将提取的肌原纤维蛋白稀释到 $40 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$, 然后在 $0.2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NaCl}$ 的蛋白溶液中分别加入 0.05% 、 0.10% 、 0.15% 、 0.20% 、 0.25% 和 0.30% JPP (JPP 添加量按 MP 的质量计算)。JPP 先用缓冲液溶解, 然后与 MP 混合。将混合均匀的蛋白溶液从 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 加热到 $65\text{ }^\circ\text{C}$, 并在 $65\text{ }^\circ\text{C}$ 保持 20 min, 在 $4\text{ }^\circ\text{C}$ 冷库中过夜获得 MP 凝胶。

1.3.5 凝胶强度测定 猪肉 MP 凝胶强度在室温下用质构仪进行测定。测试前, 凝胶样品被切成直径和高度均为 1.5 cm 的圆柱体。凝胶强度测试选用探头型号为 P/0.5 s, 测试模式为压缩模式。压缩距离 4.0 mm , 触发力为 5 g , 测试前速度为 $2.0 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 测试速度为 $1.0 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 测试后速度为 $2.0 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

1.3.6 保水能力测定 参考 Han 等^[13]的方法, 将凝胶样品放在离心管中, $4\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $10\,000 \text{ g}$ 离心 10 min, 用吸水纸除去上清液, 记录并计算离心前后的离心损失, 即为保水能力。

1.3.7 水分分布测定 凝胶低场核磁的水分分布测定参考 Shao 等^[14]的方法, 并适当修改。将凝胶 (直径 1.5 cm , 高 1.5 cm) 样品用单层保鲜膜包裹, 测定样品的自旋-自旋弛豫时间 (T_2)。参数设置: $P_1 = 23 \text{ }\mu\text{s}$, $P_2 = 44 \text{ }\mu\text{s}$, $SW = 100 \text{ kHz}$, $T_w = 3\,000$, $NECH = 10\,000$ 。采用反演拟合软件拟合核磁共振弛豫时间, 生成 T_2 成像图谱。

1.3.8 动态流变测定 流变测定参考张承宗等^[15]的方法, 使用安东帕 MCR 302 流变仪对凝胶进行测定。将样品加到样品台上, 下压 PP 50 转子到 1 mm 的间隙, 使用刮板清除多余样品并使用硅油液封, 防止水分挥发。凝胶测定条件: 在 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下让 MP 样品平衡 5 min, 然后逐步将其加热到 $85\text{ }^\circ\text{C}$ 。在加热的过程中, 对 1 Hz 的固定频率和 1% 的应变进行动态温度的扫描检测。随着温度的上升, 可以测定样本的储存模量 (G') 以及损耗模量 (G'') 的变动情况。

1.3.9 微观结构测定 参考 Guo 等^[16]的方法, 将制得的凝胶经过液氮冷冻干燥和喷金后, 在电压 $0.5 \sim 30 \text{ kV}$ 下放大 $2\,000$ 倍观察样品微观结构。

1.3.10 蛋白质二级结构测定 参考 Zhang 等^[17]的方法, 使用拉曼光谱测定凝胶的二级结构。将凝胶样品抹平, 置于带有 50 倍物镜的显微镜下的石英载玻片上, 以收集样品的拉曼散射。以发射波长为 532 nm 的氩离子激光器作为激发源。设置参数为光谱范围 $400 \sim 2\,000 \text{ cm}^{-1}$, 自动曝光强度 $50\,000 \text{ cnts}$, 采集时间 5 s 。每个样品重复 3 次。每组样品取平均值用于数据分析。信号处理采用 Labspec 5.0 软件。使用 PeakFit 4.12 软件中的二阶导数计算二级结构 (α -螺旋、无规卷曲、 β -折叠、 β -转角) 的相对含量。

1.4 数据统计与分析

试验重复 3 次, 数据以 $\bar{x} \pm SE$ 表示。使用 SPSS 24.0 软件中的单因素方差分析来确定组间的差异显著性, 使用 Origin 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 菠萝蜜果皮多糖 (JPP) 的单糖组成成分

水提菠萝蜜果皮多糖的试验中, 多糖的提取率为 $5.2\% \sim 5.8\%$ 。菠萝蜜果皮多糖的单糖组成测定结果表明, 葡萄糖占比最高, 为 39.104% , 表明葡萄糖是组成菠萝蜜果皮多糖的主要单糖; 其次是半乳糖醛酸, 占比为 26.605% , 这一比例表明菠萝蜜果皮多糖中半乳糖醛酸的丰富程度较高, 这可能与显著的抗氧化、抗炎生物活性密切相关。此外, 半乳糖、阿拉伯糖、甘露糖的占比也相对较高, 分别为 19.535% 、 7.172% 和 4.648% 。而在所有检测出的单糖中, 鼠李糖和葡萄糖醛酸的含量较低, 分别为 0.896% 和 2.041% 。

2.2 JPP 对凝胶保水能力 (WHC) 和凝胶强度的影响

由图 1 可见, 盐离子强度的降低会显著降低 MP 凝胶的保水性和凝胶强度, 而 JPP 的添加能够在一定程度上提升 $0.2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NaCl}$ 浓度下 MP 凝胶的保水性和凝胶强度。低盐条件 MP 凝胶特性的降低可能是由于 MP 凝胶在此浓度条件下难以形成良好的凝胶网络结构, 从而降低凝胶强度。与此同时, 较差的凝胶结构会使得水分子难以被束缚在蛋白质分子中, 从而导致其保水性下降。

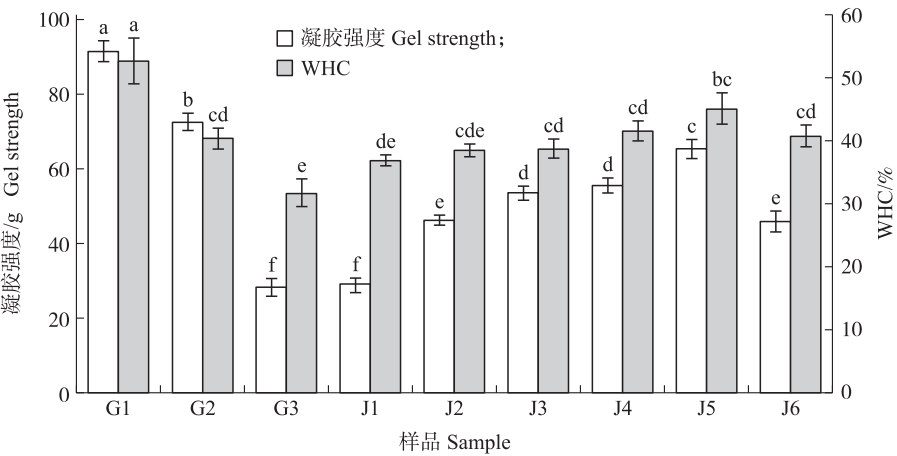


图 1 菠萝蜜果皮多糖(JPP)对低盐凝胶强度和保水能力(WHC)的影响

Fig. 1 Effect of jackfruit peel polysaccharide(JPP) on the strength and water holding capacity(WHC) of low-salt gels

G1—G3 分别为 0.6、0.4、0.2 mol·L⁻¹ NaCl 制作的凝胶;J1—J6 分别为 0.2 mol·L⁻¹ NaCl 制作的凝胶中添加 0.05%、0.10%、0.15%、0.20%、0.25%、0.30%的 JPP。下同。G1—G3 are gels made of 0.6, 0.4, 0.2 mol·L⁻¹ NaCl, respectively; J1—J6 are gels made of 0.2 mol·L⁻¹ NaCl with 0.05%, 0.10%, 0.15%, 0.20%, 0.25%, 0.30% JPP, respectively. The same as follows.

不同小写字母表示各组间差异显著($P<0.05$)。下同。Different lowercase letters indicate significant differences among groups($P<0.05$). The same as follows.

2.3 JPP 对凝胶水分分布的影响

由图 2 可见,识别的 3 个峰分别对应于凝胶中不同状态的水:0~10 ms (T_{2b}) 的结合水、10~1 000 ms (T_{21}) 的不可移动水以及 1 000~10 000 ms (T_{22}) 的游离水。由表 1 可见,随着盐离子强度的降低,低盐凝胶中水的分布出现显著差异,尤其是在不可移动水和游离水方面。与 0.6 mol·L⁻¹ NaCl (G1) 组相比,0.2 mol·L⁻¹ NaCl (G3) 组不可移动水显著减少,游离水显著增加($P<0.05$)。这是因为盐减少水的流动性,显著增加不可移动水的峰值区域,从而增强了水分保持。与 0.4 mol·L⁻¹ NaCl (G2) 组相比,含有 0.25% JPP 的凝胶显著增加了结合水。与 G1 组相比,含有 0.30% JPP 的凝胶显著增加了游离水。值得注意的是,当 JPP 浓度为 0.25% 时,与 G3 组相比,结合水显著增加,游离水显著减少。适度添加 JPP 使游离水转化为结合水和不可移动水,这说明 JPP 具有保水性。

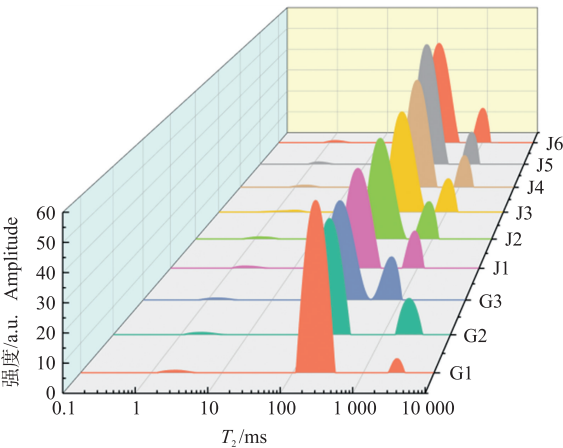


图 2 添加 JPP 后肌原纤维蛋白(MP)凝胶的 T_2 弛豫时间分布

Fig. 2 T_2 relaxation time distribution of myofibrillar protein(MP) gels after addition of JPP

表 1 低盐凝胶的 LF-核磁共振峰面积比例

Table 1 Proportion of LF-NMR peak areas of low-salt gels

样品 Sample	P_{2b}	P_{21}	P_{22}	样品 Sample	P_{2b}	P_{21}	P_{22}
G1	1.36±0.07 ^{bc}	90.66±1.68 ^a	7.97±1.68 ^c	J3	1.51±0.06 ^{ab}	84.02±0.72 ^{abc}	14.46±0.68 ^{abc}
G2	1.43±0.07 ^{bc}	86.75±3.16 ^{ab}	11.81±3.10 ^{bc}	J4	1.57±0.06 ^{ab}	85.12±0.73 ^{abc}	13.31±0.70 ^{abc}
G3	1.34±0.07 ^{bc}	78.36±2.41 ^c	20.29±2.46 ^a	J5	1.69±0.01 ^a	85.26±1.90 ^{abc}	13.05±1.90 ^{bc}
J1	1.27±0.02 ^c	82.67±1.68 ^{bc}	16.06±1.68 ^{ab}	J6	1.41±0.05 ^{bc}	82.95±0.91 ^{bc}	15.64±0.94 ^{ab}
J2	1.24±0.05 ^c	83.55±0.99 ^{bc}	15.21±0.98 ^{ab}				

注: P_{2b} :结合水的峰面积比例 Peak area proportion of bound water; P_{21} :不可移动水的峰面积比例 Peak area proportion of immobile water;
 P_{22} :游离水的峰面积比例 Peak area proportion of free water.

2.4 JPP 对凝胶流变特性的影响

如图 3-A 所示,随着温度的升高,不同 JPP 浓度的 MP 凝胶的储存模量(G')呈现出特定的趋势。通过热诱导使肌原纤维蛋白形成凝胶的过程通常用动态流变学来分析,突出了各种分子间的相互作用。对于 G1 和 G2 组,随着温度从 25 ℃ 升至 52 ℃, G' 逐渐升高,在 52 ℃ 左右达到峰值。这个峰值很可能是由

于肌球蛋白头部的变性和展开,然后在凝胶的初期形成阶段通过交联形成寡聚体^[18]。相反,在低盐条件下($0.2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl 和加入 JPP 组), G' 最初下降,在 $47\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时达到最低,这表明在低盐中肌球蛋白分子聚集。从 $47\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升至 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, G' 逐渐升高,在 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 达到峰值。此后,随着肌球蛋白尾部的变性, G' 下降,在 $60\sim 65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时达到最低点,这标志着初始网络结构的破坏。随着温度升高至 $85\text{ }^{\circ}\text{C}$,所有组的 G' 急剧增加,表明 MP 完全变性并聚集成一个有弹性的凝胶网络。与 G3 组相比,JPP 的添加显著增强了低盐 MP 凝胶的 G' 。当 JPP 添加量为 0.15% 时, G' 显著超过了 G3 组的最终水平,但没有达到 G2 组的水平,表明 0.15% 的 JPP 显著提高了 MP 的弹性。

如图 3-B 所示,从 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 到 $85\text{ }^{\circ}\text{C}$,每个样本的损失模量(G'')的趋势与 G' 的趋势相反。在加热的最后阶段, 0.15% JPP 添加量的 G'' 大幅超过了 G3 组,表明肌原纤维蛋白凝胶的黏性增加。与 G3 组相比, 0.15% JPP 添加量的 G' 和 G'' 的显著增加表明 JPP 可以在低盐系统中提升 2 种模量。

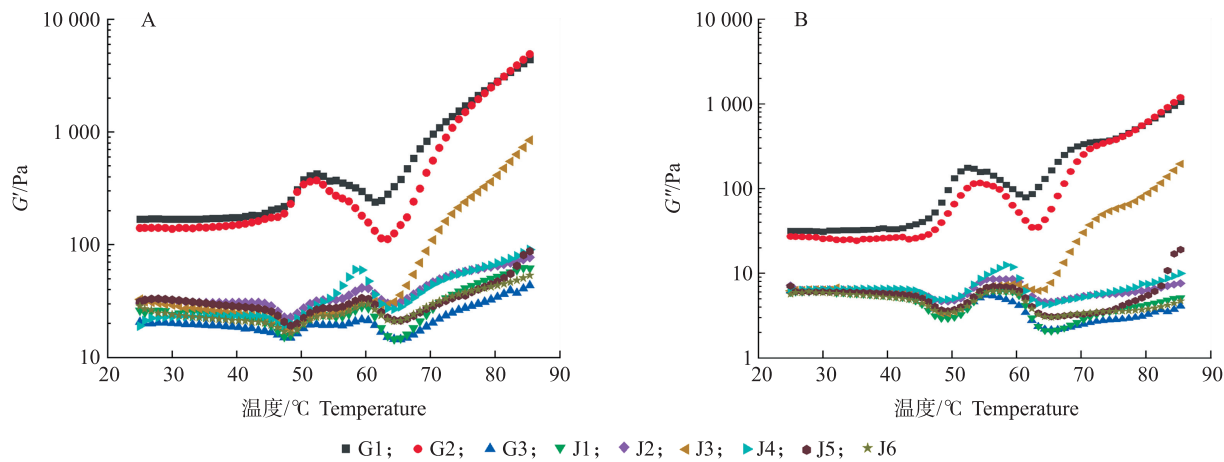


图 3 JPP 对 MP 凝胶储存模量 G' (A) 和损耗模量 G'' (B) 的影响

Fig. 3 Effect of JPP on the storage modulus G' (A) and loss modulus G'' (B) of MP gel

2.5 JPP 对凝胶微观结构的影响

从图 4 可以看出,热诱导肌原纤维蛋白凝胶的微观结构呈现出不规则的多孔三维网络凝胶结构。随着盐离子强度的降低($0.6\sim 0.2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$),结构逐渐变得无序,低盐凝胶结构疏松,孔径分布不均。多糖填充了空隙,凝胶结构随着 JPP 的增加($0.05\%\sim 0.25\%$)而变得致密。JPP 添加量为 0.25% 时凝胶结构最为致密,此时的结构也更加有序。然而,添加 0.3% 的 JPP 会破坏原有的凝胶结构。

2.6 JPP 对凝胶二级结构的影响

由表 2 可见,添加菠萝蜜果皮多糖(JPP)对低盐凝胶的二级结构有显著影响。随着盐离子强度的降低($0.6\sim 0.2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$), α -螺旋结构显著性增加, β -折叠和无规卷曲显著性减小。这可能是因为盐离子的降低,减少了溶液的离子强度,改变了蛋白质表面的电荷分布,从而影响了蛋白质分子间的相互作用力。添加 JPP 的低盐凝胶, α -螺旋结构的比例经历了显著的变化,从未添加 JPP 的 46.91% 降低至添加 0.25% JPP 后的 23.48% ,而当 JPP 的添加量进一步增至 0.30% 时, α -螺旋含量又上升至 30.95% 。此外, β -折叠和无规卷曲的含量则呈现出相反的趋势。

表 2 JPP 对低盐凝胶二级结构的影响

Table 2 Effect of JPP on the secondary structure of low-salt gels

样品 Sample	α -螺旋 α -helix	β -折叠 β -sheet	β -转角 β -turn	无规卷曲 Random coil
G1	21.33 ± 0.93^g	34.37 ± 1.38^a	11.43 ± 1.27^d	32.86 ± 2.16^a
G2	35.63 ± 1.04^d	20.74 ± 3.37^{cd}	18.22 ± 0.78^c	25.40 ± 2.71^b
G3	46.91 ± 0.22^a	11.54 ± 0.43^f	21.98 ± 0.62^a	19.57 ± 0.31^c
J1	44.46 ± 0.72^b	15.33 ± 0.07^{ef}	20.49 ± 0.17^{abc}	19.73 ± 0.53^c
J2	39.29 ± 0.85^c	18.01 ± 0.31^{de}	19.88 ± 0.62^{abc}	22.82 ± 0.40^{bc}
J3	32.83 ± 0.87^e	22.55 ± 0.38^{bc}	20.83 ± 0.58^{ab}	23.79 ± 0.20^{bc}
J4	28.01 ± 0.61^f	26.54 ± 0.98^b	20.81 ± 0.61^{ab}	24.64 ± 0.19^b
J5	23.48 ± 0.55^g	31.22 ± 0.57^a	19.31 ± 0.33^{bc}	25.99 ± 0.27^b
J6	30.95 ± 0.68^e	24.60 ± 1.48^{bc}	19.49 ± 0.92^{bc}	24.95 ± 1.87^b

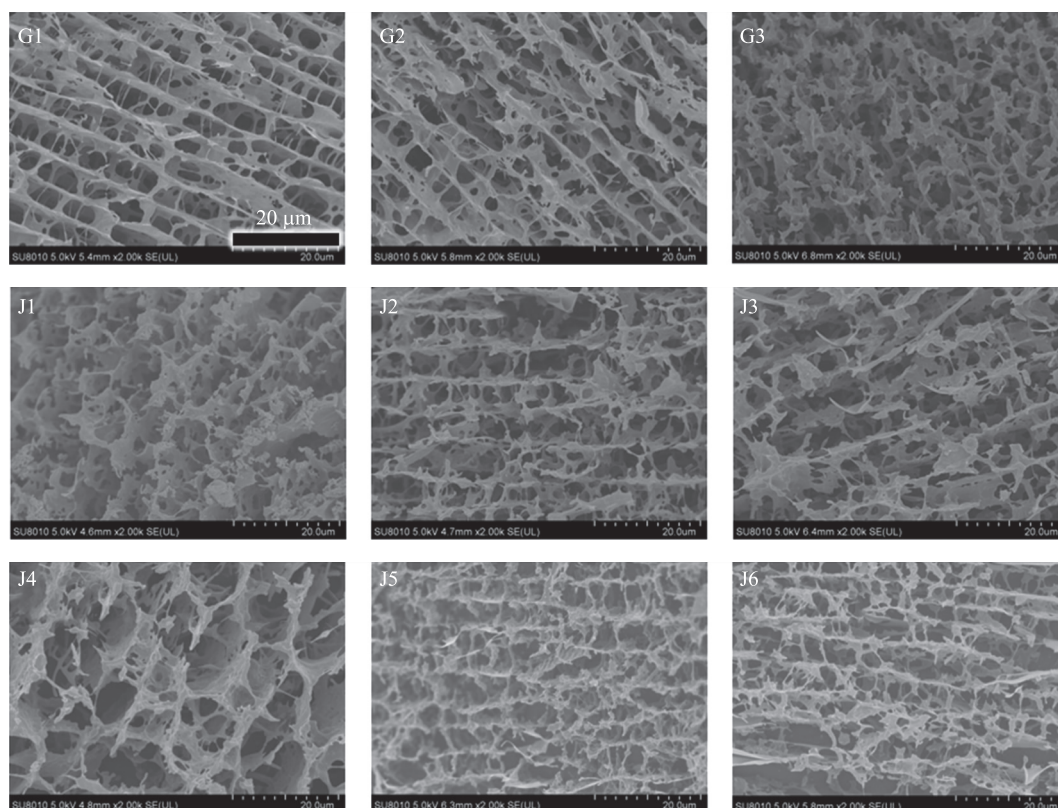


图4 添加 JPP 对 MP 凝胶微观结构的影响

Fig. 4 Effect of JPP addition on MP gel scanning electron microscopy

3 讨论与结论

本研究表明,高盐($0.6 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaCl}$)条件下盐离子通过静电屏蔽作用中和蛋白质表面的电荷,降低分子间的静电斥力,使蛋白质分子更倾向于展开或形成有序的凝胶网络;而在低盐环境中($0.2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaCl}$),电荷屏蔽效应减弱,蛋白质分子表面的净电荷增加,导致静电斥力增强。这种斥力可能使蛋白质分子过度舒展,破坏原有的 α -螺旋结构,导致构象稳定性下降。部分原本被埋藏的疏水基团暴露在外,反而增加了分子间的疏水相互作用,促进蛋白质聚集,从而降低溶解性。JPP带负电可与带正电的蛋白质区域结合,调控聚集行为,形成更均匀的凝胶结构。同时多糖可通过增加体系黏度或形成物理屏障,减少蛋白质分子的无序聚集,从而改善凝胶的强度和持水性。

菠萝蜜果皮多糖中单糖组分以鼠李糖与葡萄糖醛酸占比较低,二者虽含量不高,但对维持多糖结构及抗氧化、降脂等功能特性具有重要作用^[19]。本试验测得的JPP单糖组成与Zhu等^[20]的研究略有差异,主要归因于原料产地与生长环境的不同。JPP为水溶性多糖,可通过结合水分子提升肌原纤维蛋白凝胶持水性,并优化凝胶微观网络结构,提高凝胶强度,该结果与米糠纤维、结冷胶等多糖改善蛋白凝胶持水特性的结论一致^[21-22]。低盐条件会降低体系静电屏蔽效应,破坏蛋白与水分子的结合平衡,导致MP凝胶结合水减少、游离水增多,凝胶稳定性下降^[9]。添加JPP可有效改善低盐凝胶的水分分布状态,其中0.25% JPP处理组结合水与不可移动水含量显著升高,游离水含量显著降低,凝胶持水性能最优。JPP可通过构建多糖-蛋白复合网络束缚水分,改善凝胶保水稳定性,与Bi等^[23]和Cao等^[24]关于多糖改善肉蛋白凝胶质构的机制相符。同时,JPP与MP之间的氢键与疏水作用可进一步提升低盐凝胶的结构稳定性,表明JPP有可能成为肉类产品中一种有益的添加剂,用于改善质地和水分。JPP对MP凝胶结构的改善存在明显浓度效应。JPP添加量达到0.25%时,凝胶结构最致密,这可能是由于JPP在0.25%浓度下能够充当填充剂,减少蛋白质网络中的空隙,从而增加水分的束缚。但过高的JPP浓度(0.30%)可能会破坏肌原纤维蛋白网络,造成凝胶内部不易流动水转化为结合水,可能是由于多糖的过量添加改变了蛋白质间的最佳相互作用平衡,该规律与羧甲基纤维素纳米纤维调控MP凝胶性能的研究结论一致^[17]。流变学结果表明,JPP可显著提升低盐MP凝胶的 G' 与 G'' ,增强凝胶的弹性与黏性。JPP可通过提供额外交联位点,促进低

盐体系形成更为稳定有序的蛋白凝胶网络。热处理诱导蛋白变性聚集是凝胶形成的基础^[25],而JPP可抑制肌动蛋白降解,有效提升凝胶流变特性^[26]。蛋白质二级结构分析显示,与常规盐浓度组相比,0.25% JPP可显著降低MP的 α -螺旋含量,提高 β -折叠与无规卷曲含量。 α -螺旋结构的稳定性,主要受其内部氢键的支配,这些氢键是由羰基(C=O)和氨基(—NH₂)间的相互作用形成的^[27]。 α -螺旋含量的减少意味着蛋白质结构的展开,而 β -折叠结构的增加则意味着蛋白质间分子间相互作用的增强^[28]。由此说明,JPP可通过破坏蛋白原有氢键平衡,诱导MP发生 α -螺旋向 β -折叠的构象转变,该构象变化规律与可得然胶调控肌球蛋白结构的机制一致^[29]。Li等^[30]的研究发现0.3%竹笋膳食纤维对盐溶蛋白二级结构调控效果与之相近,且可改善体系相分离,印证多糖对蛋白构象及功能的调控潜力。这些发现进一步证实了多糖在调控蛋白质构象及其功能方面的潜力。虽然JPP对低盐凝胶的凝胶特性具有改善效果,但其效果尚无法完全替代食盐,因此在具体应用中需酌情减少食盐用量。

不同类型的多糖对低盐乳化肉制品凝胶特性的影响存在显著差异,这些差异主要体现在凝胶的保水性、黏弹性、持水能力以及凝胶强度等方面。线性多糖如魔芋胶通常能增强凝胶的硬度和保水性^[31],而非线性多糖如壳聚糖则在提高凝胶硬度和保水性方面表现出不同的效果^[32]。此外,多糖的添加量、分子质量以及环境条件等因素也会影响凝胶特性。不同类型的多糖对肌原纤维蛋白凝胶特性的影响机制也不同,例如改性淀粉通过物理膨胀效果改善凝胶性质,不溶性膳食纤维通过增强水分稳定性和促进疏水基团相互作用来提高凝胶化,而魔芋葡甘露聚糖则通过干扰肌原纤维蛋白网络的聚集来降低凝胶性能^[33]。因此,在选择多糖改善肌原纤维蛋白凝胶特性时,应该根据实际条件进行选择。

综上所述,降低盐离子强度影响了MP凝胶的保水能力和硬度,而添加JPP能显著提高凝胶的结合水含量和整体保水能力,尤其是在0.25%的添加量时效果最显著。JPP的添加也影响了凝胶的微观结构,使其更致密和有序。流变学特性和二级结构分析也表明,JPP的添加有助于改善低盐MP凝胶的质构和结构。

参考文献 References:

- [1] 李可,张怡雪,王艳秋,等. 超声波处理对低盐条件下鸡肉肌原纤维蛋白结构和氧化性质的影响[J]. 食品科学,2024,45(16):177-187.
Li K,Zhang Y X,Wang Y Q,et al.Effect of ultrasonic treatment on the structural and oxidation properties of chicken myofibrillar protein under low-salt conditions[J]. Food Science,2024,45(16):177-187(in Chinese with English abstract).
- [2] 任晶晶,王茜茜,潘琼,等. 植物多糖在低盐低脂肉制品中的应用[J]. 肉类研究,2020,34(9):74-80.
Ren J J,Wang X X,Pan Q,et al. Application of plant polysaccharides in low-salt and low-fat meat products[J]. Meat Research,2020,34(9):74-80(in Chinese with English abstract).
- [3] Shi Y X,Zang M W,Wang S W,et al. Effects of *Citrus* fibre and soybean protein isolate on heat-induced pork myofibrillar protein gel properties under low-sodium salt conditions[J]. International Journal of Food Science & Technology,2022,57(12):7701-7711.
- [4] 赵谋,杨欢欢,杨莉,等. 燕麦 β -葡聚糖对低盐羊肉肉糜凝胶特性的影响[J]. 食品科学,2023,44(16):159-168.
Zhao M,Yang H H,Yang L,et al. Effect of oat β -glucan on gel properties of low-salt mutton mince[J]. Food Science,2023,44(16):159-168(in Chinese with English abstract).
- [5] Gao X Q,Hao X Z,Xiong G Y,et al. Interaction between carrageenan/soy protein isolates and salt-soluble meat protein[J]. Food and Bioproducts Processing,2016,100:47-53.
- [6] Lee C H,Chin K B. Physical properties and structural changes of myofibrillar protein gels prepared with basil seed gum at different salt levels and application to sausages[J]. Foods,2020,9(6):702.
- [7] Yu Y Y,Zhu Z S,Xu Y J,et al. Effects of *Lactobacillus plantarum* FM 17 fermentation on jackfruit polysaccharides:physicochemical,structural, and bioactive properties[J]. International Journal of Biological Macromolecules,2024,258:128988.
- [8] Goh S X,Mamat H,Abdul Aziz A H. Valorization of agriculture by-product:development of gluten-free biscuit made from blends of okara and jackfruit seed flour[J]. Waste Management Bulletin,2024,2(2):59-65.
- [9] Nakasawa T,Takahashi M,Matsuzawa F,et al. Critical regions for assembly of vertebrate nonmuscle myosin II[J]. Biochemistry,2005,44(1):174-183.
- [10] Wang C,Li J,Cao Y,et al. Extraction and characterization of pectic polysaccharides from *Choerospondias axillaris* peels:comparison of hot water and ultrasound-assisted extraction methods[J]. Food Chemistry,2023,401:134156.
- [11] 高廷轩,邓绍林,赵雪,等. 多糖协同超声波处理(PS-UT)对低盐鸡肉糜凝胶特性的影响[J]. 食品科学,2021,42(19):148-156.
Gao T X,Deng S L,Zhao X,et al. Synergistic effects of polysaccharide and ultrasonic treatment on gel properties of low-salt minced chicken meat[J]. Food Science,2021,42(19):148-156(in Chinese with English abstract).
- [12] Zhao Y Y,Wang P,Zou Y F,et al. Effect of pre-emulsification of plant lipid treated by pulsed ultrasound on the functional properties of chicken breast myofibrillar protein composite gel[J]. Food Research International,2014,58:98-104.

- [13] Han M Y, Zhang Y J, Fei Y, et al. Effect of microbial transglutaminase on NMR relaxometry and microstructure of pork myofibrillar protein gel[J]. European Food Research and Technology, 2009, 228(4): 665–670.
- [14] Shao J J, Zou Y F, Xu X L, et al. Effects of NaCl on water characteristics of heat-induced gels made from chicken breast proteins treated by isoelectric solubilization/precipitation[J]. CyTA—Journal of Food, 2016, 14(1): 145–153.
- [15] 张承宗, 汤国泯, 黄慧琳, 等. 蔗糖对浒苔多糖凝胶流变特性及结构的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(21): 97–103.
Zhang C Z, Tang G M, Huang H L, et al. Effect of sucrose on rheological properties and structure of *Enteromorpha prolifera* polysaccharide gel[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(21): 97–103 (in Chinese with English abstract).
- [16] Guo Q, Cui S W, Wang Q, et al. Microstructure and rheological properties of *Psyllium polysaccharide* gel[J]. Food Hydrocolloids, 2009, 23(6): 1542–1547.
- [17] Zhang R Y, Xing L J, Kang D C, et al. Effects of ultrasound-assisted vacuum tumbling on the oxidation and physicochemical properties of pork myofibrillar proteins[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 74: 105582.
- [18] He Z D, Ma T Y, Zhang W W, et al. Heat-induced gel formation by whey protein isolate-*Lycium barbarum* polysaccharides at varying pHs[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 115: 106607.
- [19] Cai L L, Chen B H, Yi F L, et al. Optimization of extraction of polysaccharide from dandelion root by response surface methodology: structural characterization and antioxidant activity[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 140: 907–919.
- [20] Zhu K X, Zhang Y J, Nie S P, et al. Physicochemical properties and *in vitro* antioxidant activities of polysaccharide from *Artocarpus heterophyllus* Lam. pulp[J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 155: 354–361.
- [21] Choi Y S, Choi J H, Han D J, et al. Effects of rice bran fiber on heat-induced gel prepared with pork salt-soluble meat proteins in model system[J]. Meat Science, 2011, 88(1): 59–66.
- [22] Li Y L, Qi X, Rong L Y, et al. Effect of gellan gum on the rheology, gelling, and structural properties of thermally induced pea protein isolate gel[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 147: 109379.
- [23] Bi J J, Sun Y Y, Pan D D, et al. Effect of ultrasound combined with *Psyllium husk* powder on the structure and gel properties of goose myofibrillar protein[J]. Process Biochemistry, 2024, 136: 202–211.
- [24] Cao C N, Liang X, Xu Y N, et al. Effects and mechanisms of different κ -carrageenan incorporation forms and ionic strength on the physicochemical and gelling properties of myofibrillar protein[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 257: 128659.
- [25] Zhao N, Zou H N, Sun S, et al. The interaction between sodium alginate and myofibrillar proteins: the rheological and emulsifying properties of their mixture[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 161: 1545–1551.
- [26] Zhang T, Chen S J, Xu X Q, et al. Effects of konjac glucomannan on physical properties and microstructure of fish myofibrillar protein gel: phase behaviours involved[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 134: 108034.
- [27] Ma J B, Wang X Y, Li Q, et al. Oxidation of myofibrillar protein and crosslinking behavior during processing of traditional air-dried yak (*Bos grunniens*) meat in relation to digestibility[J]. LWT: Food Science and Technology, 2021, 142: 110984.
- [28] 王昱, 袁晶晶, 赵电波, 等. 膳食纤维对低盐鸡胸肉糜凝胶特性的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(8): 16–22.
Wang Y, Yuan J J, Zhao D B, et al. Effects of dietary fibers on gelation properties of low-salt chicken breast surimi[J]. Food Science, 2023, 44(8): 16–22 (in Chinese with English abstract).
- [29] Xu Y N, Liang X, Kong B H, et al. Evaluating the effect of thermo-reversible and thermo-irreversible curdled gels on the gelling properties and *in vitro* digestibility of myofibrillar protein gels under low-salt condition[J]. Food Research International, 2024, 181: 114115.
- [30] Li K, Liu J Y, Fu L, et al. Effect of bamboo shoot dietary fiber on gel properties, microstructure and water distribution of pork meat batters[J]. Asian-Australasian Journal of Animal Sciences, 2020, 33(7): 1180–1190.
- [31] Lin Y C, Zhang L, Li X X, et al. Effect and characterization of konjac glucomannan on xanthan gum/ κ -carrageenan/agar system[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 257: 128639.
- [32] Huang M Y, Xu Y J, Xu L N, et al. Interactions of water-soluble myofibrillar protein with chitosan: phase behavior, microstructure and rheological properties[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2022, 78: 103013.
- [33] Zhuang X B, Wang L J, Jiang X P, et al. Insight into the mechanism of myofibrillar protein gel influenced by konjac glucomannan: moisture stability and phase separation behavior[J]. Food Chemistry, 2021, 339: 127941.

责任编辑: 范雪梅