梅爽, 庞子皓, 郭梦迪, 等. 魔芋葡甘聚糖对花生蛋白结构及凝胶特性的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(1): 16−23. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030313

MEI Shuang, PANG Zihao, GUO Mengdi, et al. Effects of Konjac Glucomannan on the Structure and Gel Properties of Peanut Protein[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(1): 16−23. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030313

·特邀主编专栏—植物基食品原料基础研究、前沿技术创新及其健康绿色产品开发（客座主编：于寒松、张健、李健）·

魔芋葡甘聚糖对花生蛋白结构及凝胶特性的影响

梅　爽[1,2], 庞子皓[1], 郭梦迪[1], 周羽洁[1], 王宁伟[1], 汪　琴[1], 汪　超[1,2], 李　玮[1,*]

（1.湖北工业大学国家“111”细胞调控与分子药物研究中心, 工业发酵教育部与湖北省协同创新中心, 湖北武汉 430070;
2.武汉一元堂生物科技股份有限公司, 湖北武汉 430070）

摘　要: 探究魔芋葡甘聚糖（Konjac Glucomannan，KGM）添加量（0.5%~5.0%）对花生蛋白结构及其凝胶特性的影响规律与作用机制。通过质构分析、显微结构分析、表面疏水性分析以及巯基含量测定等手段发现，随着KGM添加量增加，花生蛋白凝胶硬度显著提升（P<0.05）（5%添加量时较对照组增强237.58%），其微观结构由粗糙多孔转变为细腻致密；同时，蛋白表面疏水性急剧升高（5%添加量时提升194.01%），巯基含量下降，且在4%添加量时荧光最大发射波长显著红移，表明蛋白链更易延展。这些变化共同揭示了KGM通过促进花生蛋白官能团聚集和亚基结构改变，从而优化凝胶性能的分子机制，为开发低脂功能食品提供了理论基础。

关键词: 魔芋葡甘聚糖, 花生蛋白, 分子结构, 分子间作用力, 凝胶特性

中图分类号: TS201.7　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)01−0016−08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030313　　本文网刊:

Effects of Konjac Glucomannan on the Structure and Gel Properties of Peanut Protein

MEI Shuang[1,2], PANG Zihao[1], GUO Mengdi[1], ZHOU Yujie[1], WANG Ningwei[1], WANG Qin[1], WANG Chao[1,2], LI Wei[1,*]

（1.National "111" Center for Cellular Regulation and Molecular Pharmaceutics, Cooperative Innovation Center of Industrial Fermentation (Ministry of Education & Hubei Province), Hubei University of Technology, Wuhan 430070, China;
2.Wuhan Yiyuantang Biotechnology Co., Ltd., Wuhan 430070, China）

Abstract: This work investigated how the content of konjac glucomannan (KGM) (0.5%~5.0%) affected the structure and gel properties of peanut protein, with the aim of elucidating the underlying mechanisms. Results from texture analysis, microscopic analysis, surface hydrophobicity analysis, and thiol content measurement showed that as KGM content increased, peanut protein gel hardness increased significantly (P<0.05) (by 237.58% at 5% KGM content compared to the control group), and the microstructure became finer and denser. Furthermore, protein surface hydrophobicity increased sharply (by 194.01% at 5% KGM content), and thiol content decreased. At 4% KGM content, the maximum fluorescence emission wavelength showed a significant red shift, suggesting that protein chains were more likely to extend. These changes revealed the molecular mechanism by which KGM promoting functional group aggregation and subunit structural

收稿日期: 2025−03−25

基金项目: 湖北省自然科学基金项目（2022CFB452）; 湖北省科技人员服务企业项目（2024DJC019）; 湖北省科技创新计划项目（2024BBB034）。

作者简介: 梅爽（1997−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品工程, E-mail: 1306820304@qq.com。

*** 通信作者:** 李玮（1985−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 生物技术在植物蛋白构效关系中的研究与应用, E-mail: wesley@hbut.edu.cn。

changed of peanut protein to optimize gel properties. This provides a theoretical basis for developing low-fat functional foods.

Key words: konjac glucomannan; peanut protein; molecular structure; intermolecular forces; gel properties

近年来，超重与肥胖成为引发高血压、糖尿病、心脑血管疾病及癌症等许多慢性病的重要危险因素，受到全人类社会的广泛关注。随着人们对健康诉求增加，低脂、低糖、高蛋白的营养代餐代替节食减肥成为新时代健康减肥的首选。花生蛋白含有多种人体必需氨基酸，是一种优质代餐用蛋白质补充剂[1−4]，花生蛋白作为优质植物蛋白源，其凝胶性能不足严重制约了在代餐食品中的应用[5−9]。大量研究表明，多糖与蛋白复合可有效提升蛋白凝胶的稳定性，且可以通过调控复合体系中的各种因素来形成多种凝胶网络结构，从而影响复合凝胶的品质特性[10−12]。Molina 等[13] 研究发现在低离子浓度条件下，κ-卡拉胶与大豆分离蛋白形成了新型的凝胶网络结构，提高了凝胶强度。杨琴[14] 的研究表明在低离子强度下蛋白分子更倾向于形成细链的网络结构，而在高离子强度下则会形成颗粒网络。

目前市场上大部分代餐食品是通过提高配料中的多糖和膳食纤维含量来达到增强饱腹感作用，但大量单一食用代餐产品存在能量不足和机体活力下降的风险[15−17]。魔芋葡甘聚糖是一种非离子型水溶性多糖，与植物蛋白通过非共价的形式结合，包括疏水相互作用和氢键结合，影响植物蛋白凝胶性质[18−20]。龚加顺等[21] 提出，在魔芋胶与大豆蛋白质混合形成的共混凝胶中，特别是当魔芋胶的添加量达到一定阈值时，所形成的凝胶转变为一种不可逆的三维网络结构。根据 Guo 等[22] 的成果，适宜浓度的魔芋胶能够提升小麦面筋中的麦醇溶蛋白和麦谷蛋白的 β-折叠结构的比例，同时降低蛋白质的变性温度，并增强凝胶的黏弹性特性。本研究拟通过 KGM 与花生蛋白的复合作用，突破传统蛋白凝胶性能局限，为开发高品质植物基代餐产品提供新思路。

本研究选取花生分离蛋白与魔芋葡甘聚糖为原料制备复合凝胶，运用质构仪、傅里叶红外光谱仪、荧光分光光谱仪、扫描电镜等先进技术手段，研究魔芋葡甘聚糖添加量对花生蛋白凝胶质构特性和微观结构的影响，有效拓宽花生蛋白及魔芋葡甘聚糖在食品工业中的应用领域，推动植物基辅料在食品工业中的创新应用与发展。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

花生蛋白粉　上海源叶生物科技有限公司；魔芋葡甘聚糖　湖北一致魔芋科技有限公司；1-苯胺基-8-萘磺酸、氯化钠、β-巯基乙醇　国药集团化学试剂有限公司；所用试剂均为分析纯。

Vortex-Genie2 涡旋振荡器　美国 Scientific Industroes 公司；UV-4800 型紫外可见分光光度计　尤尼科科学仪器有限公司；ZLGJ-12 真空冷冻干燥机　郑州科旺达生物仪器有限公司；Vertex 70 傅里叶变换红外光谱仪　德国 Bruker 公司；F-7000 荧光分光光谱仪　日本日立公司；TA-XTplus 质构分析仪　英国 StableMicro Systems 公司。

1.2　实验方法

1.2.1　魔芋葡甘聚糖(KGM)纯化　参考马建龙等[23] 的方法，采用乙醇沉淀法对魔芋葡甘聚糖进行纯化。具体步骤如下：称取魔芋粉样品 50 g，在 5~10 ℃ 下研磨 60 min，研磨过程中，持续清除液面上浮的杂质，直至无新的漂浮物出现为止，然后进行过滤。过滤后，沉淀用 200 mL 95% 乙醇溶液室温洗涤 2 次，每次搅拌 30 min。洗涤液经离心(8000×g, 15 min)，检测无杂质残留后，进行冷冻干燥(−50 ℃, 0.01 mbar, 48 h)，获得纯净的白色固体，即 KGM。

1.2.2　魔芋葡甘聚糖-花生蛋白复合凝胶制备　量取 20 mL 含质量分数 20% 的花生分离蛋白悬浊液，加入 100 mL 超纯水，300 r/min 恒速搅拌 30 min，依设缓慢添加悬浊液质量分数为 0.5%、1%、2%、3%、4%、5% 的 KGM，持续搅拌 15 min，滴加 1 mol/L NaOH 溶液调 pH 至 10.0，转移至 90 ℃ 水浴锅溶胀 60 min，迅速冰水浴冷却 15 min，4 ℃ 冷藏 24 h 构建热不可逆凝胶，以未添加 KGM 的花生蛋白作为空白对照。

1.2.3　凝胶游离巯基含量测定　参照 Beveridge 等[24] 的方法略作修改进行测定。称取 60.00 mg 样品，溶于 10.00 mL Tris-Gly 标准缓冲液(pH8.0)，涡旋混匀后 25 ℃ 水浴振荡(100 r/min)反应 60 min，高速冷冻离心(8000×g, 4 ℃, 20 min)，取 2 mL 上清液至具塞比色管，加入 50 μL Ellman 试剂，涡旋 30 s，室温避光静置 5 min，用紫外分光光度计于 412 nm 测定吸光度，用试剂缓冲液作空白对照，计算游离巯基含量。

$$\text{游离巯基含量}(\mu\text{mol/g}) = \frac{73.53 \times A_{412}}{C \times L}$$

式中：A_{412} 为 412 nm 处的吸光值；C 为样品质量浓度，mg/mL；L 为石英皿的直径，cm。

1.2.4　凝胶傅里叶变换红外光谱(FT-IR)扫描　将复合凝胶于−80 ℃ 预冷冻 12 h，转至真空冷冻干燥机−60 ℃ 干燥 48 h，取 1.00 mg 干燥样品与 100.00 mg 干燥 KBr 于玛瑙研钵研磨 30 min，压片(压力 10 MPa，保压 5 min)，用傅里叶红外光谱仪(分辨率 4 cm^{-1}，扫描次数 64 次)在 4000~500 cm^{-1} 波数范围扫描测定[25]。经基线校正和去噪处理后，采用二阶导数处理增强谱峰分辨率，通过分峰拟合确定

官能团特征峰，结合标准谱图完成峰位归属，并分析特征峰位移以揭示复合凝胶的分子相互作用变化。

1.2.5 凝胶表面疏水性测定 根据贾润红[26]的方法并稍作修改，用磷酸盐缓冲液（0.01 mol/L，pH7.0）配制 0.05、0.1、0.2、0.5、1 mg/mL 花生蛋白复合凝胶溶液各 4 mL，分别加入 20 μL 1-苯胺基-8-萘磺酸（ANS）溶液（8 mmol/L，pH7.4），涡旋 10 s 后立即用荧光分光光度计（激发波长 390 nm，发射波长 450~650 nm，狭缝宽 5 nm，光电倍增管电压 600 V）测定荧光强度，以蛋白浓度为横坐标、荧光强度为纵坐标绘制标准曲线，线性回归方程斜率即为蛋白质表面疏水性（H_0）。

1.2.6 凝胶蛋白质内源荧光光谱分析 参考 Wang 等[27]的方法稍作修改，取适量魔芋葡甘聚糖-花生蛋白混合溶液，用 0.01 mol/L 磷酸缓冲液（pH7.0，经超滤脱气处理）稀释至蛋白浓度 0.2 mg/mL，转移至荧光比色皿，置于荧光分光光度计，设定激发波长 280 nm，扫描发射波长 290~450 nm 区间内的最大吸收波长及荧光强度进行测定，扫描速率 1200 nm/min。

1.2.7 凝胶分子间作用力的测定 参考冯倩[28]的方法，化学作用力通过以下四个步骤测定：

离子键：准确称取 1.0 g 胶体样品，加入 20 mL 0.6 mol/L NaCl 溶液，4 ℃ 静置 60 min，8000 r/min 离心 10 min，取上清液用考马斯亮蓝法测定蛋白浓度，以未添加 KGM 样品为对照，收集上清液测蛋白浓度，计算离子键作用强度变化。

氢键：在离子键测定所得沉淀中加入 20 mL 含 0.6 mol/L NaCl 与 1.5 mol/L 尿素混合溶液，4 ℃ 静置 60 min，8000×g 离心 10 min，收集上清液测蛋白浓度，分析氢键对蛋白溶出影响。

疏水相互作用：于氢键测定后沉淀加入 20 mL 含 0.6 mol/L NaCl 及 8 mol/L 尿素混合溶液，4 ℃ 静置 60 min，8000×g 离心 10 min，取上清液测蛋白浓度，研究疏水作用变化规律。

二硫键：在前述沉淀中加入 20 mL 含 0.6 mol/L NaCl、1.5 mol/L 尿素及 0.5 mol/L β-巯基乙醇混合液，4 ℃ 静置 60 min，8000×g 离心 10 min，取上清液测定蛋白浓度。

1.2.8 复合凝胶的 SEM 观察 将复合凝胶样品经 24 h 冷藏预处理后，采用真空冷冻干燥机进行 48 h 脱水处理，所得样品密封保存于干燥器中备用。扫描电镜测试前，将样品经导电胶固定于铜质载物台，在 10^{-2} 至 10^{-3} Pa 的真空环境下，溅射电压 1.1~1.2 kV，时间 2~3 min，进行离子溅射镀金处理。镀金后样品经室温静置 10 min 平衡，随后使用扫描电子显微镜进行微观形貌观察，放大倍数为 200 倍，选取典型区域采集图像数据[29]。

1.2.9 凝胶质构特性测定 采用 TA-XTplus 质构分析仪对凝胶的质构特性进行测定[30]，选择 TPA 模式，使用 P/0.5 探头。测试触发力 0.05 N，测试前速率 1 mm/s，测试速率 2 mm/s，测试后速率 1 mm/s，形变量 50%，压缩距离 25 mm，对魔芋葡甘聚糖-花生蛋白复合凝胶 3 个不同部位重复测试，测定硬度、胶粘性、弹性、内聚性和咀嚼性指标，仪器使用前经标准块校准，测试环境温度 25 ℃，湿度 50%±5%，确保测试条件标准化。

测定凝胶强度：操作条件：以 P/0.5 探头，力量感应量程 50 N，起始力 0.100 N，测试前速度 1 mm/s，测中速度 1 mm/s，测后速度 1 mm/s，形变量 25%，返回距离 20 mm 条件测定凝胶强度，魔芋葡甘聚糖-花生蛋白复合凝胶重复 3 次取平均值。

1.3 数据处理

实验均独立重复三次（n=3）。实验数据以均值±标准差表示，并使用 Origin 2024 进行图表绘制与初步分析，Excel 2019 进行数据整理。采用 SPSS 27.0 进行单因素方差分析（ANOVA），多组间比较采用 Tukey 事后检验，显著性水平设为 $P<0.05$。

2 结果与分析

2.1 凝胶游离巯基含量

KGM 的添加对凝胶游离巯基含量的影响见图 1。常温和 90 ℃ 加热条件下，添加 KGM 后，花生分离蛋白游离巯基含量均有所下降，随着 KGM 添加量的增加，游离巯基含量先增加后减少，其中 KGM 添加量为 1% 时，巯基含量最多，分别为 15.54±0.58 μmol/g 和 11.70±0.09 μmol/g。常温下，因环境中的氧气、氧化剂等氧化因素作用，及蛋白质结构变化、化学反应、酶催化、微生物影响等，会使巯基被氧化或参与其他反应，致其浓度降低。相对于常温情况下，90 ℃ 加热后游离巯基含量减少。巯基浓度的减少或许源于加热处理期间，它们转变为了硫含量较高的氨基酸，并经过氧化作用生成了二硫键；这种致密的构造使得巯基被封闭在蛋白质分子的内层。由二硫键构成的高分子聚合物通过动态氧化交联，在加热条件下促进蛋白质分子展开并加速巯基向二硫键的转化，从而构建更紧密的三维网络结构，显著增强凝胶特性。尽管 KGM 的空间位阻可能干扰蛋白直

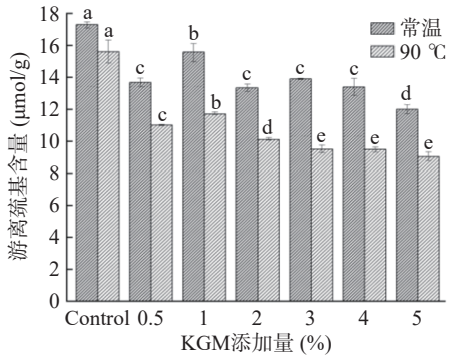


图 1 复合凝胶的游离巯基含量

Fig.1 Free sulfhydryl content of the composite gel

注：不同的字母表示不同的 KGM 的添加量之间的差异性，$P<0.05$，图 3、图 4、图 6、图 8 同。

接交联，但其可能通过与蛋白分子链的相互作用形成补充性网络，最终协同强化凝胶结构[31−32]。

2.2　凝胶傅立叶变换红外光谱（FT-IR）扫描

KGM 的高吸水性使其红外光谱中羟基的伸缩振动峰从 3272 cm^{-1} 移至 3303 cm^{-1}（图 2），表明氢键网络发生重排。这一变化是 KGM 吸水后，水分子与 KGM 羟基形成氢键以及分子链扩张和溶剂化作用产生新分子间相互作用的共同结果。同时，酰胺 Ⅰ 带峰位从 1646 cm^{-1} 移至 1654 cm^{-1}，源于羰基伸缩振动受体系静电环境变化的影响。KGM 吸水后可能改变离子强度或 pH，进而影响蛋白质表面电荷分布，导致蛋白质二级结构变化，如 α-螺旋向 β-折叠的转变，最终使羰基振动频率改变，峰位向高波数移动。

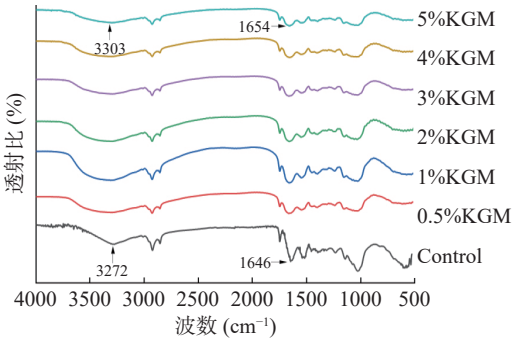


图 2　不同 KGM 含量复合凝胶的红外光谱

Fig.2　FT-IR spectra of composite gel with different KGM content

复合凝胶二级结构中，随着 KGM 添加量的增加，α-螺旋占比先减后增，β-折叠比例呈类似变化，反映蛋白从无序卷曲向有序构象转变（图 3）。在 0.5% KGM 添加量时，β-折叠降至 27.77%±0.54%，α-螺旋维持 14.76%±0.10%，无序卷曲升至 21.85%±0.45%，结构转变与凝胶性能提升紧密相关。从分子振动光谱学视角解析，特征峰位移本质是 KGM 多糖与花生蛋白通过分子间氢键网络重构及静电屏蔽效应，打破了蛋白分子内 α-螺旋/β-折叠的固有氢键体系，同时改变分子间疏水相互作用与二硫键的动态平衡。这种多尺度作用力调控触发蛋白三级结构的域间解旋，

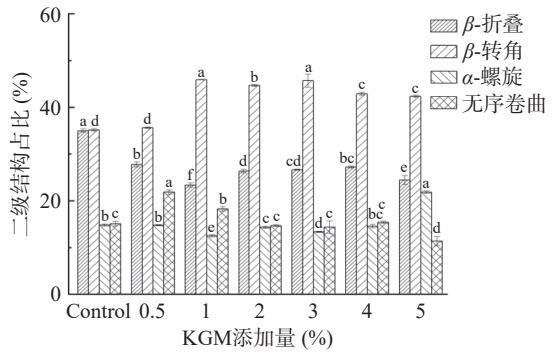


图 3　复合凝胶的二级结构

Fig.3　Secondary structure of composite gel

导致肽链柔顺性增强。当 KGM 分子链通过立体阻碍效应限制蛋白分子运动自由度时，凝胶网络形成机制发生转变，氢键和静电作用的改变，使 α-螺旋、β-折叠等结构的稳定性变化，进而改变分子间相互作用模式，影响凝胶形成中分子堆积和网络稳定性[33]。

2.3　凝胶表面疏水性

由图 4 可知，随着 KGM 添加量增加，花生蛋白表面疏水性也有所提升。常温下，当 KGM 添加量增至 5% 时，与空白组相比，表面疏水性增加 194.01%。90 ℃ 加热条件下，KGM 添加量为 3% 时，表面疏水性达到峰值，增幅为 77.12%。花生蛋白的疏水性变化是由于蛋白质高级结构的展开，使得原本隐藏在内部的疏水性氨基酸侧链基团被暴露出来，这表明蛋白质分子链的扩展以及疏水基团的持续外露。在凝胶的形成过程中，蛋白质表面疏水性的变化对三维网络结构的构建和稳定性起着重要作用，因此疏水相互作用是维持凝胶网络稳定性的关键指标[34−35]。Li 等[36]探究表明，在 6% 的氯化钠环境下，蛋白的表面疏水性质呈现缓慢上升的趋势。然而，在 80~90 ℃ 的加热条件下，这种疏水性质保持不变或明显减少。本实验中，随着 KGM 添加量的增加，蛋白质表面疏水性逐渐增强与蛋白质分子链的扩展以及疏水基团的外露程度密切相关[37]。

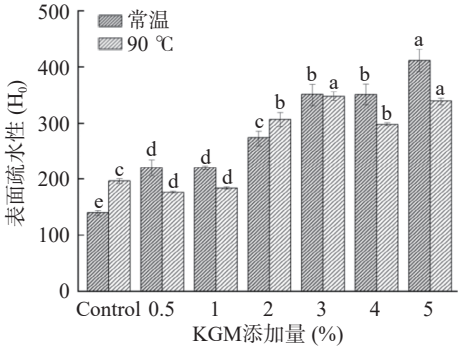


图 4　复合凝胶的表面疏水性

Fig.4　Surface hydrophobicity of composite gel

2.4　凝胶荧光光谱

花生蛋白的荧光强度随 KGM 浓度的增大而呈现先降低后增加的趋势，混合体系中生物大分子的相互作用是导致荧光强度降低的主要因素，这与蛋白质分子内色氨酸所受的猝灭作用密切相关[38]。这一现象表明 KGM 对蛋白质的高级结构产生了显著影响，导致蛋白质中的色氨酸残基向更高极性的区域迁移。进一步观察发现，未经处理的花生蛋白在 329 nm 处展现出最强的发射波长，而加入 4% 的 KGM 后，这一波长位移至 331.2 nm（图 5）。这一波长的变化揭示了 KGM 与花生蛋白之间的相互作用，导致原本隐藏于蛋白质核心的色氨酸残基逐渐向外部极性环境转移，从而改变了花生蛋白的表面疏水性质，这与对疏水性的研究结果是相吻合的。

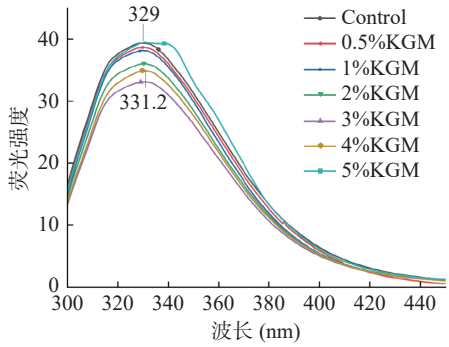


图 5 花生分离蛋白与不同含量 KGM 荧光光谱图

Fig.5 Fluorescence spectra of peanut isolate proteins with different contents of KGMs

2.5 凝胶分子间作用力的测定

由图 6 可知，在花生蛋白质形成的凝胶里，疏水力和二硫键起着关键作用。花生蛋白的碱性部分内富含众多疏水性基团，加热时其分子结构伸展，使得这些疏水基团得以暴露出来。KGM 亲水性极强，易与蛋白质间形成氢键。添加 KGM 后，二硫键含量增大，可能促进了游离巯基与二硫键间的转换。

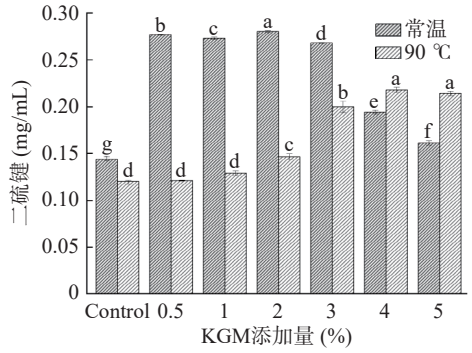


图 6 复合凝胶二硫键含量

Fig.6 Disulfide bonding content of composite gel

由表 1 可知，随着 KGM 添加量的增加，复合凝胶的分子间作用力呈现先上升后下降的趋势，表明适量 KGM 可增强部分作用力。在 KGM 添加量由 0.5% 增加至 1% 时，复合凝胶的分子间作用力显著增强（P<0.05），在 KGM 添加量 1% 时达到峰值；但添加量超过 2% 后，各作用力逐渐呈现减弱趋势，且 5% 时离子键和氢键强度低于对照组，表明 KGM 添加量在 0.5% 到 2% 时可显著增强凝胶分子间作用力，提升凝胶稳定性和力学性能，但过量添加会适得其反，这可能是由于过量的 KGM 可能在体系中形成过多的氢键和离子键，干扰了蛋白质分子间原有的疏水相互作用和二硫键的形成。此外，过多的 KGM 可能会在蛋白质分子之间产生空间位阻效应，阻碍蛋白质分子之间的紧密堆积和相互作用，从而削弱了凝胶网络的强度。同时，过多的 KGM 还可能与蛋白质分子竞争结合位点，影响蛋白质分子间的疏水相互作用和二硫键的形成，进而导致分子间作用力的下降，影响了凝胶的形成和稳定性。

表 1 复合凝胶的分子间作用力

Table 1 Intermolecular force in composite gel

KGM 添加量 (%)	离子键 (mg/mL)	氢键 (mg/mL)	疏水作用 (mg/mL)	二硫键 (mg/mL)
Control	2.39±0.06^{b}	1.10±0.06^{d}	2.55±0.06^{b}	1.44±0.23^{d}
0.5	2.44±0.03^{b}	1.60±0.21^{b}	2.62±0.15^{a}	2.77±0.06^{a}
1	2.57±0.01^{a}	1.85±0.10^{a}	2.65±0.58^{a}	2.74±0.12^{a}
2	2.30±0.02^{bc}	1.46±0.27^{b}	2.57±0.06^{b}	2.81±0.15^{a}
3	1.74±0.03^{c}	1.23±0.29^{c}	1.96±0.02^{c}	2.69±0.06^{b}
4	0.98±0.03^{d}	1.19±0.12^{d}	1.76±0.12^{d}	1.94±0.21^{c}
5	1.38±0.02^{c}	1.16±0.06^{d}	1.73±0.10^{d}	1.61±0.23^{d}

注：同列上标不同小写字母表示差异显著（P<0.05）；表2同。

2.6 复合凝胶的 SEM 观察

花生蛋白凝胶样品呈现连续疏松多孔的结构，添加 KGM 后，孔隙减小，呈现不规则，更加紧密的凝胶（图 7）。未添加 KGM 的情况下，能够观察到花生蛋白整体结构疏松，联结程度较低；而当 KGM 含量为 1% 时，花生蛋白结构致密，交联程度较高；随着 KGM 含量的不断增加，处理组花生蛋白结构慢慢地展开，当 KGM 含量为 5% 时，与空白组相比，处理组花生蛋白结构交联度仍然很大，结构也相对紧密，表明 KGM 能够影响花生蛋白结构。KGM 的加入会改变花生蛋白分子间的相互作用，进而影响巯基的氧化还原状态。低浓度的 KGM 能促进蛋白质分子有序组装，使巯基更易发生氧化反应形成二硫键，增强蛋白质间的交联程度，使凝胶结构致密。但 KGM 浓度过高时，会因空间位阻效应或与蛋白质竞争结合位点，干扰正常交联过程，还可能改变凝胶体系的物理化学环境，影响蛋白质聚集状态，使部分巯基无法充分参与二硫键形成，导致交联程度下降，凝胶结构逐渐展开。巯基含量变化与凝胶结构交联程度密切相关，是造成上述结构变化趋势的重要原因。

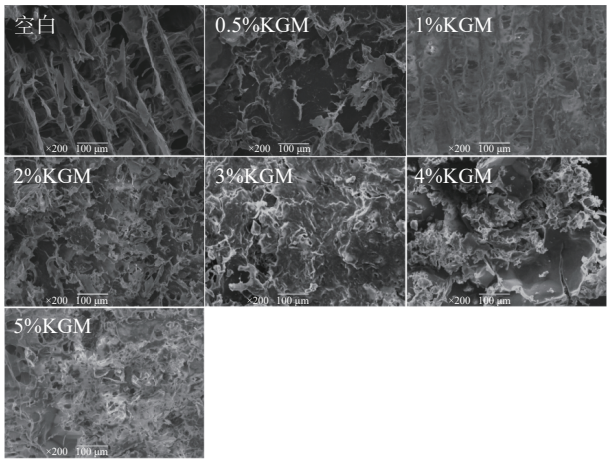


图 7 复合凝胶扫描电子显微镜图（200×）

Fig.7 Scanning electron micrograph of composite gel (200×)

2.7 凝胶强度

在添加 KGM 后，花生蛋白凝胶的稳固性得到显著提升。当 KGM 掺入比例达到 5% 时，凝胶凝结强度达到峰值，为（116.38±3.30）g×cm（图 8）。KGM 分子链与花生蛋白分子间存在相互作用，当 KGM 加入

后，其分子链会与花生蛋白分子相互交织、缠绕或吸附在一起，从而在局部区域使花生蛋白分子更加集中、聚集，增加了花生蛋白分子间的碰撞和相互作用机会，有利于形成更致密的凝胶结构。同时，KGM 分子链在花生蛋白网络中的相互交织作用，进一步加固了凝胶基质，使复合凝胶的整体强度增强。这种凝胶网络并非典型的互穿聚合物网络，因为互穿聚合物网络通常是由两种或多种不同的聚合物网络相互贯穿、交织形成的具有复杂结构的网络。而在本研究中，KGM 主要作为添加剂或辅助成分与花生蛋白相互作用，形成的凝胶网络仍以花生蛋白为主体，KGM 分子链在其中起到增强和辅助作用，使花生蛋白分子间的相互作用和网络结构更加紧密和稳固，从而提高了凝胶的强度和稳定性[14,39]。

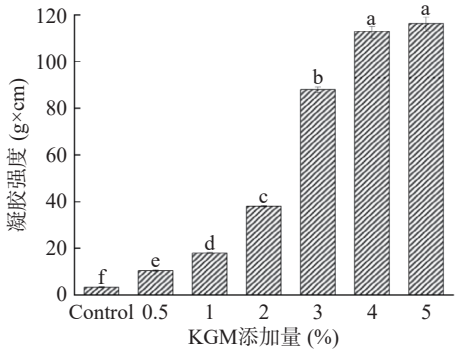


图 8　花生蛋白及其复合凝胶的凝胶强度

Fig.8　Gel strength of peanut protein and its composite gel

2.8　凝胶质构

随着 KGM 含量的增加，复合凝胶的硬度显著增大(表 2)。当 KGM 含量为 4% 时，硬度达到最大值 366.62±30.15 g。这可能是由于 KGM 促进了花生蛋白的结构网络扩张，增强了聚合物网络的致密性和均匀性，从而提高了硬度。与此同时，凝胶的咀嚼性也随着 KGM 的增加而显著提高(P<0.05)，意味着凝胶的口感变得更加坚硬。而当 KGM 添加量增至 5% 时，过量的 KGM 可能会干扰花生蛋白分子间相互作用，破坏凝胶网络结构的稳定性与均匀性，导致网络对力的承受能力减弱，进而硬度、咀嚼性出现下降[40−44]。

表 2　花生蛋白及其复合凝胶的质构特性

Table 2　Textural properties of peanut proteins and their composite gels

KGM添加量(%)	硬度(g)	咀嚼性	胶粘性(g×s)	弹性	内聚性
Control	113.81±10.08^{e}	22.22±0.02^{c}	−14.5±0.69^{a}	0.96±0.00^{a}	0.61±0.01^{ab}
0.5	130.78±22.83^{e}	26.57±0.06^{c}	−46.35±3.67^{b}	0.95±0.00^{a}	0.65±0.02^{a}
1	165.00±15.46^{d}	26.52±6.21^{c}	−99.74±3.99^{c}	0.82±0.01^{b}	0.58±0.06^{b}
2	206.48±23.69^{c}	44.28±34.15^{b}	−111.10±20.43^{cd}	0.59±0.13^{c}	0.42±0.02^{c}
3	259.68±14.12^{b}	47.26±3.04^{b}	−129.95±3.67^{de}	0.48±0.03^{c}	0.38±0.02^{c}
4	366.62±30.15^{a}	77.30±12.94^{a}	−121.69±16.28^{d}	0.51±0.05^{c}	0.42±0.05^{c}
5	270.39±12.41^{b}	56.91±3.52^{ab}	−141.7±11.66^{e}	0.49±0.01^{c}	0.43±0.02^{c}

然而，复合凝胶的内聚性和弹性则呈现出先上升后下降的趋势。当未添加 KGM(Control)或 KGM 添加量较低时(<1%)，此时凝胶具有较大的内聚性，当进一步添加 KGM(2%~4%)时，内聚性降低。当 KGM 含量为 5% 时，凝胶的咀嚼性、硬度出现降低。这可能是由于过量 KGM 干扰花生蛋白分子间相互作用，破坏凝胶网络结构稳定性与均匀性，网络对力的承受能力减弱，硬度、咀嚼性下降。内聚性是反映凝胶内部凝聚力的重要指标，其降低意味着凝胶在咀嚼过程中更易破裂，且可能出现粘牙现象，表明凝胶结构的完整性受损[45]。而弹性则随着 KGM 添加量的增加而持续下降，表明 KGM 的添加改变了凝胶网络的结构，使得凝胶在受力变形后难以恢复至初始状态。

此外，复合凝胶的胶粘性绝对值随着 KGM 含量的增加而总体增大，但并非线性关系。在花生蛋白复合凝胶中，胶粘性负值表明其具有粘附性。当 KGM 添加量在 1%~5% 时，胶粘性绝对值较高且相近，4% 时略有下降但仍较大。这可能是因为 KGM 与花生蛋白形成的氢键网络增强了粘附性，而 4% 时凝胶网络致密性增加导致粘附性略降，但 KGM 的亲水性在凝胶表面形成的水合作用层维持了较强粘附性[46−48]。

综合来看，KGM 的添加对花生蛋白凝胶的质构特性具有显著影响。虽然硬度和咀嚼性有所提高，但内聚性、弹性的降低，胶粘性绝对值的增大，表明凝胶与接触表面之间粘附作用的增强，而非粘附性本身的减弱。这些变化可能对凝胶在食品加工和应用中的适用性产生影响，因此在实际应用中需综合考虑 KGM 的添加量与所需凝胶品质之间的平衡。

3　结论

本研究发现，添加 KGM 可改变花生蛋白官能团聚集状态，使游离巯基含量减少，荧光最大波长红移，尤其 4% KGM 时花生分离蛋白链更易延展，在蛋白改性修饰上具潜力。实验结果表明，引入 KGM 能显著增强花生蛋白凝胶的塑形能力和稳定性，加热时促进蛋白分子结构重组，改变分子形态。电荷作用、排斥作用、氢键连接和二硫键形成对凝胶稳定至关重要，且随 KGM 含量增加而增强。扫描电镜图像显示 KGM 含量升高使复合凝胶微观构造更紧密。这些结果表明，KGM 对花生蛋白分子改造有积极作用，推动了花生蛋白凝胶的改良。

当前成果揭示 KGM 能显著增强花生蛋白凝胶的硬度、咀嚼性，同时影响其内聚性、弹性和胶粘性，且花生蛋白分子结构经 KGM 作用发生改变，荧光特性及游离巯基含量发生变化，表明蛋白链更易延展。然而，KGM 诱导的蛋白结构变化与功能提升的内在联系尚未完全明确。未来研究方向包括深入探究分

子机制、优化 KGM 添加比例和改性条件，以及结合其他改性方法拓展花生蛋白的应用范围，进一步挖掘其在食品工业及生物医药领域的潜在价值。

© 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] WANG Li, ZHANG Yishu, XING Qinhui, et al. Quality and microbial diversity of homemade bread packaged in cinnamaldehyde loaded poly(lactic acid)/konjac glucomannan/wheat gluten bilayer film during storage[J]. Food Chemistry, 2023, 402: 134259.

[2] YAO Yueying, HE Wenmeng, XU Baojun. Physiochemical characteristics and sensory properties of plant protein isolates-konjac glucomannan compound gels[J]. Food Science & Nutrition, 2023, 11(9): 5063−5077.

[3] HAN Qian, WANG Huili, ZHOU Tongxin, et al. Ultrastable emulsion stabilized by the konjac glucomannan-xanthan gum complex[J]. ACS Omega, 2023, 8(34): 31344−31352.

[4] ZHENG Mingjing, WEI Yiman, JIAO Xiaojia, et al. Effects of konjac glucomannan with different molecular weights on functional and structural properties of κ-carrageenan composite gel[J]. Food Biophysics, 2024, 19(3): 553−566.

[5] 蒋雨珊, 章绍兵. 花生蛋白凝胶特性的研究进展[J]. 中国油脂, 2020, 45(3): 98−102. [JIANG Yushan, ZHANG Shaobing. Progress in gelling property of peanut protein[J]. China Oils and Fats, 2020, 45(3): 98−102.]

[6] SPOTTI M J, LOYEAU P A, MARANGÓN A, et al. Influence of Maillard reaction extent on acid induced gels of whey proteins and dextrans[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 91: 224−231.

[7] 邓云, 薛雯晶, 唐青云, 等. 魔芋葡甘聚糖的食品加工性能研究进展[J]. 热带农业科学, 2024, 44(1): 127−134. [DENG Yun, XUE Wenjing, TANG Qingyun, et al. Research progress on food processing properties of konjac glucomannan[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2024, 44(1): 127−134.]

[8] 石义, 马小茹, 崔佳佳, 等. 魔芋葡甘聚糖及其衍生物的研究进展[J]. 食品安全导刊, 2024(18): 176−179. [SHI Yi, MA Xiaoru, CUI Jiajia, et al. Research progress of konjac glucomannan and its derivatives[J]. China Food Safety Magazine, 2024(18): 176−179.]

[9] 崔颢凡, 郭芹, 李振源, 等. 花生蛋白组成与结构对其功能特性的影响[J]. 中国食品学报, 2024, 24(10): 449−459. [CUI Haofan, GUO Qin, LI Zhenyuan, et al. Effects of peanut protein composition and structure on its functional properties[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(10): 449−459.]

[10] RUZENGWE F M, AMONSOU E O, KUDANGA T. Transglutaminase-mediated crosslinking of Bambara groundnut protein hydrogels: Implications on rheological, textural and microstructural properties[J]. Food Research International, 2020, 137: 109734.

[11] JIAO Bo, SHI Aimin, WANG Qiang, et al. High-internal-phase Pickering emulsions stabilized solely by peanut-protein-isolate microgel particles with multiple potential applications[J]. Angewandte Chemie (International Ed. in English), 2018, 57(30): 9274−9278.

[12] 孙晓洋, 耿军凤, 潘春梅, 等. 高酯果胶添加量对花生蛋白凝胶特性的影响[J]. 中国油脂, 2023, 48(11): 38−44. [SUN Xiaoyang, GENG Junfeng, PAN Chunmei, et al. Effect of high methoxyl pectin addition on gel properties of peanut protein[J]. China Oils and Fats, 2023, 48(11): 38−44.]

[13] MOLINA ORTIZ S E, PUPPO M C, WAGNER J R. Relationship between structural changes and functional properties of soy protein isolates-carrageenan systems[J]. Food Hydrocolloids, 2004, 18(6): 1045−1053.

[14] 杨琴. 花生球蛋白-罗勒籽胶复合凝胶的形成机理、结构性质及应用研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021. [YANG Qin. Formation mechanism, structure, properties and application of arachin-basil seed gum composite gels[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2021.]

[15] QIAO Dongling, LI Hao, JIANG Fatang, et al. Incorporation of κ-carrageenan improves the practical features of agar/konjac glucomannan/κ-carrageenan ternary system[J]. Food Science and Human Wellness, 2023, 12(2): 512−519.

[16] YANG J, CHOI Y J, HAHN J. Development of flaxseed gum/konjac glucomannan with agar as gelling agents with enhanced elastic properties[J]. Food Science and Biotechnology, 2023, 32(2): 181−192.

[17] SHAO Jiasheng, PU Jian, CHEN Fangfei, et al. Konjac glucomannan-based hydrogels with tunable mechanical strength and frictional resistance for biomedical applications[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 295: 139612.

[18] 邱诗波, 邓鹏鹏, 钱虹, 等. 魔芋葡甘聚糖凝胶的研究进展[J]. 武汉工程大学学报, 2022, 44(4): 355−362. [QIU Shibo, DENG Pengpeng, QIAN Hong, et al. Research progress in konjac glucomannan gel[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2022, 44(4): 355−362.]

[19] RUZENGWE F M, AMONSOU E O, KUDANGA T. Rheological and microstructural properties of Bambara groundnut protein gels[J]. LWT, 2020, 123: 109070.

[20] LI Jinxin, YADAV M P, LI Jinlong. Effect of different hydrocolloids on gluten proteins, starch and dough microstructure[J]. Journal of Cereal Science, 2019, 87: 85−90.

[21] 龚加顺, 幸治梅, 彭春秀, 等. 大豆分离蛋白及其与魔芋葡苷聚糖凝胶化作用的动态粘弹性研究[J]. 食品科学, 2005, 26(10): 25−29. [GONG Jiashun, XING Zhimei, PENG Chunxiu, et al. Dynamic viscoelastic studies on gelation of soybean protein isolate and its mixtures with konjac glucomannan[J]. Food Science, 2005, 26(10): 25−29.]

[22] GUO Jinying, HE Yijie, LIU Jiaojiao, et al. Influence of konjac glucomannan on thermal and microscopic properties of frozen wheat gluten, glutenin and gliadin[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2021, 74: 102866.

[23] 马建龙, 戴荣继, 潘琳, 等. 制备方法对魔芋葡甘聚糖溶解速率的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2010, 26(11): 52−55. [MA Jianlong, DAI Rongji, PAN Lin, et al. Effect of preparation on the dissolution rate of konjac glucomannan[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2010, 26(11): 52−55.]

[24] BEVERIDGE T, TOMA S J, NAKAI S. Determination of sh- and ss-groups in some food proteins using ellman's reagent[J]. Journal of Food Science, 1974, 39(1): 49−51.

[25] GOOGOL F, RAHMATI A. Synthesis of dicholesteryl organogelator as a green sorbent nanomaterial for oil spill remediation[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 21111.

[26] 贾润红. pH 对糖基化花生蛋白乳化特性的影响[J]. 粮食与油脂, 2021, 34(3): 107−110. [JIA Runhong. Effect of pH on emulsi-

fication of glycosylated peanut protein[J]. Cereals & Oils, 2021, 34(3): 107−110.]
[27] WANG Yaru, YANG Qin, FAN Jinlei, et al. The effects of phosphorylation modification on the structure, interactions and rheological properties of rice glutelin during heat treatment[J]. Food Chemistry, 2019, 297: 124978.
[28] 冯倩. 转谷氨酰胺酶改性对白鲢鱼肌原纤维蛋白凝胶特性及体外消化特性的影响[D]. 上海: 上海海洋大学, 2022. [FENG Qian. Effects of transglutaminase modification on gel properties and in vitro digestibility of myofibrillar protein of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*)[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2022.]
[29] GONG Jiayan, SUN Fuchang, PAN Yuchen, et al. Stretchable and tough PAANa/PEDOT: PSS/PVA conductive hydrogels for flexible strain sensors[J]. Materials Today Communications, 2022, 33: 104324.
[30] 龚静妮, 杨金初, 袁毅, 等. 魔芋葡甘聚糖/黄蓍胶复合水凝胶的流变特性及质构性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2017, 33(12): 78−84. [GONG Jingni, YANG Jinchu, YUAN Yi, et al. Rheology and texture properties of konjac glucomannan-gum tragacanth hydrogel[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2017, 33(12): 78−84.]
[31] ECHALIER C, VALOT L, MARTINEZ J, et al. Chemical cross-linking methods for cell encapsulation in hydrogels[J]. Materials Today Communications, 2019, 20: 100536.
[32] 何洋, 黄雨洋, 朱秀清. 魔芋葡甘露聚糖基物理共混改性复合膜研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(11): 379−389. [HE Yang, HUANG Yuyang, ZHU Xiuqing. Research progress on konjac glucomannan-based physically modified composite films[J]. Food Science, 2023, 44(11): 379−389.]
[33] 牛付阁, 廖华斌, 顾斐娜, 等. 基于光谱技术的多糖与蛋白质相互作用研究[J]. 核农学报, 2024, 38(11): 2174−2182. [NIU Fuge, LIAO Huabin, GU Feina, et al. Study on the interaction of polysaccharide and protein by spectroscopic techniques[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2024, 38(11): 2174−2182.]
[34] SANTE-LHOUTELLIER V, AUBRY L, GATELLIER P. Effect of oxidation on *in vitro* digestibility of skeletal muscle myofibrillar proteins[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2007, 55(13): 5343−5348.
[35] MOHAN M, RAMACHANDRAN D, SANKAR T V. Functional properties of Rohu (*Labeo rohita*) proteins during iced storage[J]. Food Research International, 2006, 39(8): 847−854.
[36] LI Junhua, ZHANG Yufan, FAN Qiao, et al. Combination effects of NaOH and NaCl on the rheology and gel characteristics of hen egg white proteins[J]. Food Chemistry, 2018, 250: 1−6.
[37] 段汝清, 苏宇杰, 王俊伟, 等. 瓜尔豆胶酶解液改性蛋清蛋白凝胶性质的研究[J]. 食品与生物技术学报, 2018, 37(7): 714−721. [DUAN Ruqing, SU Yujie, WANG Junwei, et al. Effect of guar gum hydrolysate on gel properties of egg white protein[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2018, 37(7): 714−721.]
[38] 孙乐常, 周典颖, 杜瀚, 等. 魔芋胶对南美白对虾肌原纤维蛋白凝胶特性的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(12): 42−50. [SUN Lechang, ZHOU Dianying, DU Han, et al. Effect of konjac glucomannan on gelling properties of myofibrillar protein from the Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei*[J]. Food Science, 2022, 43(12): 42−50.]
[39] 张敏, 李碧婵, 陈良壁. 互穿网络聚合物水凝胶的制备及其吸附研究进展[J]. 化工进展, 2015, 34(4): 1043−1049,1087. [ZHANG Min, LI Bichan, CHEN Liangbi. Progress in preparation of interpenetrating polymer network hydrogels and their application in adsorption[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2015, 34(4): 1043−1049,1087.]
[40] LUO Denglin, LIANG Xuping, XU Baocheng, et al. Effect of inulin with different degree of polymerization on plain wheat dough rheology and the quality of steamed bread[J]. Journal of Cereal Science, 2017, 75: 205−212.
[41] SIM S Y, NOOR AZIAH A A, CHENG L H. Characteristics of wheat dough and Chinese steamed bread added with sodium alginates or konjac glucomannan[J]. Food Hydrocolloids, 2011, 25(5): 951−957.
[42] WANG Peng, ZHANG Xu, LE Xi, et al. Influence of pH on the formation of benzyl ester bonds between dehydrogenation polymers and konjac glucomannan[J]. Molecules, 2024, 29(21): 5166.
[43] ZHANG Tao, CHEN Shengjun, XU Xiaoqi, 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.
[44] 贺亿杰. 魔芋葡甘聚糖对冷冻面筋蛋白特性及冷冻馒头品质的影响[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2019. [HE Yijie. Effects of konjac glucomannan on the characteristics of frozen gluten protein and the quality of frozen steamed bread[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2019.]
[45] ZHANG Xiaofan, NING Yuli, CHAI Liwen, et al. Physicochemical properties and *in vitro* digestive behavior of astaxanthin loaded Pickering emulsion gel regulated by konjac glucomannan and *κ*-carrageenan[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 278: 134710.
[46] TU Wenyao, LIU Xizhong, LI Kexin, et al. Highly ordered aggregation of soy protein isolate particles for enhanced gel-related properties through konjac glucomannan addition[J]. Food Chemistry, 2025, 462: 141004.
[47] LI Mengying, HOU Xinran, LI Yishen, et al. Konjac glucomannan and xanthan synergistic interaction gel: Underlying mechanism for improvement of gel mechanical properties induced by freeze-thaw treatment[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 146: 109276.
[48] LI Yishen, LI Kexin, GUO Yu, et al. Mechanism for the synergistic gelation of konjac glucomannan and *κ*-carrageenan[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 277(Pt 3): 134423.