

南瓜籽蛋白-卡拉胶乳液脂肪替代物对肌原纤维蛋白凝胶特性的影响

郑爽, 李艳青, 李博, 周天硕, 韩齐

Effect of Fat Substitution in Pumpkin Seed Protein-Carrageenan Emulsion on Myofibrillar Protein Gel Properties

ZHENG Shuang, LI Yanqing, LI Bo, ZHOU Tianshuo, and HAN Qi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024010266>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

薯类淀粉与卡拉胶共混体系特性及其对肌原纤维蛋白凝胶特性的影响

Characteristics of the Mixed Systems of Tuber Starch and Carrageenan and Its Effect on the Gel Properties of Myofibrillar Protein

食品工业科技. 2020, 41(2): 1-8,15 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.02.001>

多糖添加对兔肌原纤维蛋白Pickering乳液稳定性及凝胶特性的影响

Effect of Polysaccharide Addition on the Stability and Gel Properties of Rabbit Myofibrillar Pickering Emulsion

食品工业科技. 2023, 44(13): 21-29 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022110340>

不同浓度卡拉胶对汉麻分离蛋白凝胶性质及结构的影响

Effects of Different Concentrations of Carrageenan on the Gel Properties and Structure of Hemp Protein Isolate

食品工业科技. 2024, 45(12): 28-37 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023050357>

大豆分离蛋白-卡拉胶-黄原胶三元复合Pickering乳液的制备与特性分析

Preparation and Characterization of Pickering Emulsion of Soybean Protein Isolate-Carrageenan-Xanthan Terpolymer

食品工业科技. 2023, 44(15): 16-24 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023010181>

金鲷鱼肌原纤维蛋白乳液凝胶的制备及表征

Preparation and Characterization of *Trachinotus ovatus* Myofibrillar Protein Emulsion Gel

食品工业科技. 2023, 44(6): 201-208 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022050308>

基于多糖调节肌原纤维蛋白凝胶特性的研究进展

Research Progress in Regulation of the Gel Properties of Myofibrillar Protein Based on Polysaccharides

食品工业科技. 2022, 43(19): 446-452 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021100012>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

郑爽, 李艳青, 李博, 等. 南瓜籽蛋白-卡拉胶乳液脂肪替代物对肌原纤维蛋白凝胶特性的影响 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(16): 138-145. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024010266

ZHENG Shuang, LI Yanqing, LI Bo, et al. Effect of Fat Substitution in Pumpkin Seed Protein-Carrageenan Emulsion on Myofibrillar Protein Gel Properties[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(16): 138-145. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024010266

· 研究与探讨 ·

南瓜籽蛋白-卡拉胶乳液脂肪替代物对肌原纤维蛋白凝胶特性的影响

郑爽, 李艳青*, 李博, 周天硕, 韩齐
(黑龙江八一农垦大学食品学院, 黑龙江大庆 163319)

摘要:为进一步开发蛋白-多糖复合脂肪替代物在低脂肉制品中的应用, 本研究以南瓜籽蛋白 (Pumpkin Seed Protein, PSP) 和卡拉胶为原料制备复合乳液脂肪替代物, 并将其加入到肌原纤维蛋白 (Myofibrillar Protein, MP) 中形成热诱导凝胶, 通过对凝胶水分分布、质构特性、微观结构、流变学特性等指标的测定, 研究不同添加量下 PSP-卡拉胶形成的复合乳液对 MP 凝胶特性的影响。结果表明, PSP-卡拉胶复合乳液添加量为 50% 显著提高了凝胶持水性和凝胶强度 ($P<0.05$), MP 凝胶的质构特性得到了改善, 凝胶蒸煮损失和冻融稳定性显著降低 ($P<0.05$)。流变学特性表明, 凝胶的 G' 始终高于 G'' , 能够形成具有弹性的凝胶结构, 并且表现出较为致密均一的微观结构。因此, PSP-卡拉胶复合乳液添加量为 50% 对肌原纤维蛋白的凝胶性能有较好的改善。

关键词: 南瓜籽蛋白, 卡拉胶, 脂肪替代物, 肌原纤维蛋白, 凝胶性

中图分类号: TS225.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)16-0138-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024010266



本文网刊:

Effect of Fat Substitution in Pumpkin Seed Protein-Carrageenan Emulsion on Myofibrillar Protein Gel Properties

ZHENG Shuang, LI Yanqing*, LI Bo, ZHOU Tianshuo, HAN Qi

(College of Food Science, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China)

Abstract: To further develop a protein-polysaccharide composite fat replacer in low-fat meat products, this used pumpkin seed protein (PSP) and carrageenan to prepare a composite emulsion fat replacer, and added it to myofibrillar protein (MP) to form heat induced gel. The effects of the composite emulsion formed by PSP and carrageenan at various additive amounts on the properties of MP gels were investigated through the determination of gel moisture distribution, textural properties, microstructure, rheological properties, and other indexes. The results showed that when PSP and carrageenan composite emulsion was added at 50%, the water-holding properties and strength of the gel significantly improved ($P<0.05$), textural properties improved, and cooking loss and freeze-thaw stability significantly reduced ($P<0.05$). The rheological properties showed that the G' of the gel was always higher than the G'' . Therefore, a gel structure with elasticity and a denser and homogeneous microstructure was formed. Collectively, the gel properties of MP improved with the addition of 50% PSP and carrageenan composite emulsion.

Key words: pumpkin seed protein; carrageenan; fat replacement; myofibrillar protein; gel properties

肌原纤维蛋白 (Myofibrillar Protein, MP) 是组成肌肉肌原纤维的一种重要蛋白质, 约占肌肉中总蛋白

质的 50%~55%, 在影响加工肉制品质量方面起着关键作用^[1]。肌原纤维蛋白的凝胶特性是决定肉糜类

收稿日期: 2024-01-24

基金项目: 黑龙江八一农垦大学三横三纵支持计划 (TDJH202003); 黑龙江省杂粮生产与加工优势特色学科项目 (2022-78)。

作者简介: 郑爽 (1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品科学与工程, E-mail: 1947369601@qq.com。

* 通信作者: 李艳青 (1978-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 肉制品加工, E-mail: liyanqing2003@163.com。

制品品质最重要的因素,良好的凝胶特性可以分散并稳定油滴,提高产品的持水性,使肉糜类制品具有良好的质地与口感。由于肌原纤维蛋白能够通过热诱导过程形成三维凝胶网络结构,因此在肉制品的功能特性中发挥着至关重要的作用^[2]。肉制品中的动物脂肪含有高比例的饱和脂肪酸,大量摄入会导致高血压、肥胖、冠心病和心血管等疾病,因此,如何降低肉制品中的脂肪含量,使肉制品更健康已成为肉制品研究的一大重点^[3]。Rezaee 等^[4]发现将油菜籽蛋白-黄原胶乳液作为脂肪替代物加入到肉制品中,能够降低饱和脂肪酸含量和蒸煮损失,增强产品的乳化稳定性和氧化稳定性,改善产品的营养价值;唐月利等^[5]制备亚麻籽胶-亚麻籽油乳液以替代猪背膘,结果发现当替代水平为 75% 时,乳化肠的蒸煮损失降低,保水性增加,乳化稳定性最好,且感官品质无显著变化。

南瓜籽蛋白(Pumpkin Seed Protein, PSP)氨基酸种类丰富、含量较高,是一种极具发展前景的优质植物蛋白,南瓜籽蛋白还具有良好的功能性质,如溶解性、持水性、吸油性、起泡性及泡沫稳定性等^[6]。卡拉胶(Carrageenan, CAR),又称角叉菜胶,是一种硫酸酯线性多糖,通常从海藻类植物中提取^[7],根据硫酸酯结合状态的不同,卡拉胶分为 κ 型、I 型、 λ 型等多种类型。肉蛋白凝胶形成过程中, κ -卡拉胶对肌原纤维蛋白凝胶的保水性和凝胶强度起到增强作用,作为一种高效的增稠和胶凝剂,已广泛应用于肉类行业,以提高乳化肉制品的水/脂肪结合能力、凝胶特性和质构特性^[8]。

目前,关于 PSP 和多糖复合对 MP 凝胶特性的研究较少,郭芳等^[9]以南瓜籽蛋白为主要原料制作了素食香肠,陈雅琪^[10]通过碱法制备了南瓜籽蛋白-迷迭香酸复合物,并利用该复合物来稳定南瓜籽油 Pickering 乳液,探究了 Pickering 乳液体系对南瓜籽油储藏稳定性的影响,但未见 PSP-卡拉胶-MP 复合凝胶体系的凝胶性能探究。

本研究选取 PSP 和卡拉胶制备复合乳液来代替动物脂肪,将其加入到肌原纤维蛋白溶液中,形成复合凝胶,通过测定肌原纤维蛋白复合凝胶持水性、凝胶强度、流变特性、质构特性及微观结构等指标的变化,探究 PSP-卡拉胶复合乳液对 MP 凝胶性能的影响,为下一步 PSP 和卡拉胶制备的乳液凝胶作为脂肪替代物在肉制品中的应用提供一定理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

猪背最长肌 当地北京华联超市;南瓜籽蛋白(蛋白含量大于 90%) 陕西萤草生物科技有限公司;大豆色拉油 九三食品股份有限公司;卡拉胶 食品级,纯度 98%,绿新(福建)食品有限公司;十二烷基硫酸钠(SDS) 化学纯,广州赛国生物科技有限公司;磷酸二氢钠、磷酸氢二钠 均为分析纯,辽宁泉瑞试剂有限公司;溴酚蓝 分析纯,天津市科密

欧化学试剂有限公司;戊二醛 分析纯,北京雷根生物技术有限公司;哌嗪-1,4-二乙磺酸、叔丁醇 均为分析纯,上海麦克林生化科技有限公司。

FA-1004 型精密电子天平 上海舜宇恒平科学仪器有限公司;DHR-2 型混合流变仪 美国 TA 仪器公司;TA-XT PLUS 质构仪 英国 Stable Micro Systems 公司;UV-1100 型紫外分光光度计 上海美谱达仪器;CM-5 型色差仪 日本 Konica Minolta 公司;DK-S24 型电热恒温水浴锅 上海森信实验仪器有限公司;BR4I 型冷冻离心机 美国 Thermo 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 肌原纤维蛋白的提取 以猪背最长肌肉为原材料,参照 Cao 等^[11]的方法略作调整,具体操作如下:整个提取过程在 4 ℃ 的条件下进行。将肉取出解冻后切成小块并称重放入烧杯,加入 4 倍体积的肌原纤维蛋白提取液,其中包含 0.1 mol/L NaCl、2 mmol/L MgCl₂、1 mmol/L EGTA 和 10 mmol/L 磷酸盐缓冲液,然后置于绞肉机中,将匀浆的肌肉提取液放入离心管中离心(4500×g 15 min, 4 ℃),弃去上清液,所得沉淀再加入 4 倍体积肌原纤维蛋白提取液,重复操作 3 次,上述操作结束后将离心后得到的沉淀加入 4 倍体积的 0.1 mol/L NaCl 溶液,充分搅拌均匀后过滤(3 层纱布),调 pH 至 6.25 后在相同的条件下再次离心,得到的肌原纤维蛋白保存在碎冰中,在 48 h 内使用。以 BSA 作为标准蛋白,采用双缩脲法测定肌原纤维蛋白的蛋白含量。

1.2.2 PSP-卡拉胶复合乳液的制备 根据前期预实验结果,将 PSP(最终浓度为 3%, w/v)均匀地分散在蒸馏水中,使用磁力搅拌器搅拌 5 min 后加入大豆油(最终浓度为 10%, v/v),并在 6000 r/min 条件下均质 3 min,然后在磁力搅拌器的搅拌下加入卡拉胶(最终浓度为 1.5%, w/v),搅拌均匀后得到 PSP-卡拉胶复合乳液。

1.2.3 肌原纤维蛋白复合凝胶体系制备 将肌原纤维蛋白配制成 40 mg/mL 的蛋白溶液,置于烧杯中并搅拌均匀,然后将制备好的 PSP-卡拉胶复合乳液在搅拌条件下缓慢加入到烧杯中,并在前期预实验的基础上设置添加量分别为 0%、10%、30%、50%、70%,再放入 70 ℃ 的水浴锅中加热 30 min,制成肌原纤维蛋白热诱导复合凝胶。加热结束后,取出凝胶,冰浴冷却 1 h,之后将凝胶样品贮存在 4 ℃ 冰箱中备用。

1.2.4 肌原纤维蛋白复合凝胶持水性的测定 参考戴慧敏等^[12]的实验方法并稍作修改。将复合凝胶用刀切成立方体小块,准确称取质量(约 2 g)凝胶至 50 mL 离心管中,用滤纸包裹后置于离心管中离心(8000 r/min, 10 min, 4 ℃)。离心完成后从离心管中取出滤纸,将滤纸上的凝胶小心刮下,称取离心后凝胶质量。凝胶持水性按如下公式计算:

$$\text{持水性}(\%) = \frac{\text{离心后凝胶净重}}{\text{离心前凝胶净重}} \times 100$$

1.2.5 肌原纤维蛋白复合凝胶强度的测定 参考贾娜等^[13]的方法略作改动。肌原纤维蛋白凝胶质构特性的测定采用 TA-XT plus 型质构分析仪。质构分析仪采用的参数如下:测定模式选择下压距离,测试前速率为 1 mm/s,测试中速率为 2 mm/s,测试后速率为 1 mm/s,下压距离为凝胶高度的 5 mm,引发力为 5 g,探头型号选择 P/0.5。将待测样品置于测定平台上固定好,在室温下进行测定,每组样品进行 3 次平行实验,取平均值。

1.2.6 肌原纤维蛋白复合凝胶低场核磁水分分布的测定 参考费立天^[14]的方法略作改动。将复合凝胶(10 g)在室温(25 ℃)下平衡 30 min 后转移至核磁管(20 mm×300 mm,内径×高度)中,放入分析仪中。室温(25 ℃)下,进行低场核磁共振弛豫时间测试,主要参数如下:测试序列为 Carr-Purcell-Meiboom-Gill(CPMG)序列,工作频率为 18.18 MHz,分子 90°脉冲和 180°脉冲之间间隔 20 μs,扫描范围为 0~10000 ms,18000 次回波,至少重复 3 次。采用 MultiExp Inv Analysis 程序对所得曲线进行多指数曲线反衍,即得弛豫时间(T₂)。

1.2.7 肌原纤维蛋白复合凝胶质构特性的测定 参考汪佳佳^[15]的方法,并略作改动。将复合凝胶在室温下平衡 30 min 后,使用 TA-XT plus 物性测试仪,配备 P/50 探头进行测定。设置测定参数为:测前速度 5.0 mm/s;测后速度为 5.0 mm/s;测试中速度 1.0 mm/s。测定距离为复合凝胶高度的 1/2。质构测定指标为:硬度、弹性、内聚性、黏性、咀嚼性。

1.2.8 肌原纤维蛋白复合凝胶蒸煮损失的测定 根据 Li 等^[16]的测定方法并稍作修改:取制备好的过夜凝胶样品 5 g,测量离心管和样品的重量,用小勺将凝胶与离心管壁分开,在滤纸上倒置 30 min,待蒸煮汁液全部排出后,再称量凝胶及离心管的质量。蒸煮损失按以下公式计算:

$$\text{蒸煮损失}(\%) = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \times 100$$

式中: m₁: 离心管质量(g); m₂: 样品和离心管质量(g); m₃: 去除水后样品和离心管质量(g)。

1.2.9 肌原纤维蛋白复合凝胶冻融稳定性的测定 冻融稳定性参考 Cui 等^[17]的方法略作修改。将 5 g 湿凝胶在 -20 ℃ 低温冷冻 22 h,在 30 ℃ 水浴中解冻 2 h。冻融循环重复 5 次。析水率(%)反映了冻融循环处理后凝胶的失水程度,并使用以下公式计算:

$$\text{析水率}(\%) = \frac{A - B}{A} \times 100$$

式中: A 为冻融处理前凝胶的重量(g); B 为冻融处理后从其表面水分除去的凝胶的重量(g)。

1.2.10 肌原纤维蛋白复合凝胶色差的测定 将复合

凝胶样品置于同样环境下,用色差仪对其进行色差测量,将色差仪垂直于断面上,镜口紧扣切面。通过测量每组置于室温环境的复合凝胶样品,校正,记录 L*、a*、b*值。

1.2.11 肌原纤维蛋白复合凝胶微观结构 根据 Jia 等^[18]的实验方法并做修改,将样品大小修整为 1 mm×1 mm×1 mm,用 2.5% 的戊二醛(pH6.8)浸泡 24 h 固定;倒掉戊二醛,用 0.1 mol/L, pH 为 6.8 的磷酸缓冲液冲洗 10 min,重复 3 次;依次增大乙醇溶液的浓度(50%、70%、80%、90%)进行脱水,每次重复 3 遍;接着用无水乙醇脱水 3 次,每次 10 min;再用无水乙醇:叔丁醇(1:1, V:V)以及叔丁醇,各进行一次置换,每次 15 min;样品冷冻干燥后,用离子溅射仪在样品表面镀一层厚度为 10 nm 的金膜后观察样品微观结构(电压 15.0 kV,放大倍数 2000 倍)。

1.2.12 肌原纤维蛋白复合凝胶流变特性的测定 参考黄滢莹^[19]的方法测定动态流变特性。取适量 1.2.2 制备的待测样品,转移至流变仪测样台上,在测量过程中,样品的边缘覆盖一层薄薄的硅油,以 2 ℃/min 的加热速率由 20 ℃ 升温到 80 ℃,设定应变为 0.5%,频率为 1 Hz,观察凝胶的储能模量(G')和损耗模量(G'')的变化。

1.3 数据处理

实验结果均为重复三次测定计算的平均值,使用 SPSS 24 软件进行数据统计分析,并使用 ANOVA 程序进行显著性分析(P<0.05),使用 Origin 2022、SigmaPlot 14.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 PSP-卡拉胶复合乳液不同添加量对肌原纤维蛋白凝胶持水性和凝胶强度的影响

图 1 反映了 PSP-卡拉胶复合乳液不同添加量下肌原纤维蛋白复合凝胶的持水性和凝胶强度变化情况。随着 PSP-卡拉胶乳液添加量的增加,处理组的持水性和凝胶强度均优于对照组,即复合乳液的添加

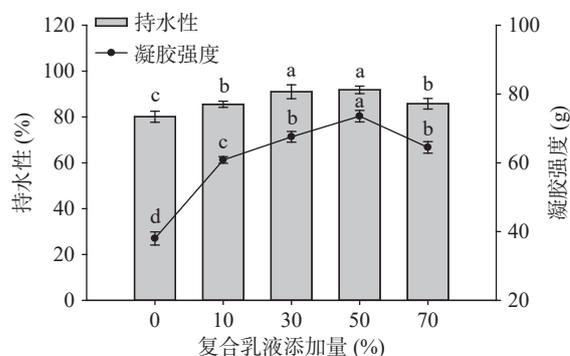


图 1 PSP-卡拉胶复合乳液不同添加量对肌原纤维蛋白凝胶持水性和凝胶强度的影响

Fig.1 Effects of different additions to pumpkin seed protein-carrageenan composite emulsion on the water-holding properties and gel strength of myofibrillar protein gels

注:不同字母表示差异显著(P<0.05);图 3 同。

可以显著增强肌原纤维蛋白凝胶的持水性和凝胶强度。还可以观察到,在复合乳液添加量为 50% 时,持水性和凝胶强度均处于较优水平。这可能是由于乳液的加入使凝胶形成过程中乳化作用增强, PSP 颗粒填充到了肌原纤维蛋白结构的空隙中,同时在加热过程中蛋白与卡拉胶产生了协同作用,进而改善了凝胶结构,形成更致密的网状结构,改善了肌原纤维蛋白凝胶的持水性和凝胶强度。卡拉胶还可以与肌原纤维蛋白之间形成氢键,从而促进凝胶网络结构更加紧密^[20]。同时,卡拉胶是一种亲水性胶体,可以在热诱导形成凝胶过程中吸收更多的水分子,促进水在凝胶网络结构中的聚集^[21],增加凝胶的持水性。此外,当复合乳液添加量为 70% 时,凝胶强度和持水性降低,推测可能是由于复合乳液添加量过高,导致其从肌原纤维蛋白凝胶体系中分离出来,阻碍了肌原纤维蛋白聚集,影响了凝胶网络结构的完整性,从而降低了凝胶强度和持水性^[22]。

2.2 PSP-卡拉胶复合乳液不同添加量对肌原纤维蛋白凝胶水分分布情况的影响

水分子在凝胶网络中的存在状态影响蛋白凝胶性质,低场核磁共振(LF-NMR)弛豫时间 T_2 的变化可直观显示水分子的存在状态^[23]。图 2A 显示了肌原纤维蛋白复合凝胶的 T_{21} 、 T_{22} 、 T_{23} 和 T_{24} 弛豫时间分布。 T_{21} (0.1~1.0 ms)代表自由度极低的强结合水; T_{22} (1~10 ms)为与蛋白基团结合相对紧密的水; T_{23} (10~100 ms)代表不易流动水; T_{24} (100~10000 ms)代表自由水^[24]。研究表明,被束缚的氢离子越多或自由度越小,弛豫时间 T_2 越短, T_2 谱上的峰值越靠左^[25],从图 2A 中可以观察到,与对照组相比,处理组的 T_2 曲线各峰发生右移,说明 PSP-卡拉胶复合乳液的添加量增加导致复合凝胶束缚水的能力下降,水分流动性增加,凝胶内部水分进行了重新分布,自由度变高。

同时,由图 2B 可以观察到 T_{23} 和 T_{24} 的峰面积占比最高,因此不易流动水和自由水是复合凝胶中的主要水分组成,随着 PSP-卡拉胶复合乳液的添加,处理组自由水相对含量与对照组相比呈下降趋势,说明凝胶中的水分在不断向外迁移。不易流动水的相对含量呈先上升再下降的趋势,这表明凝胶在 PSP-卡拉胶复合乳液的作用下,结合水开始向不易流动水方

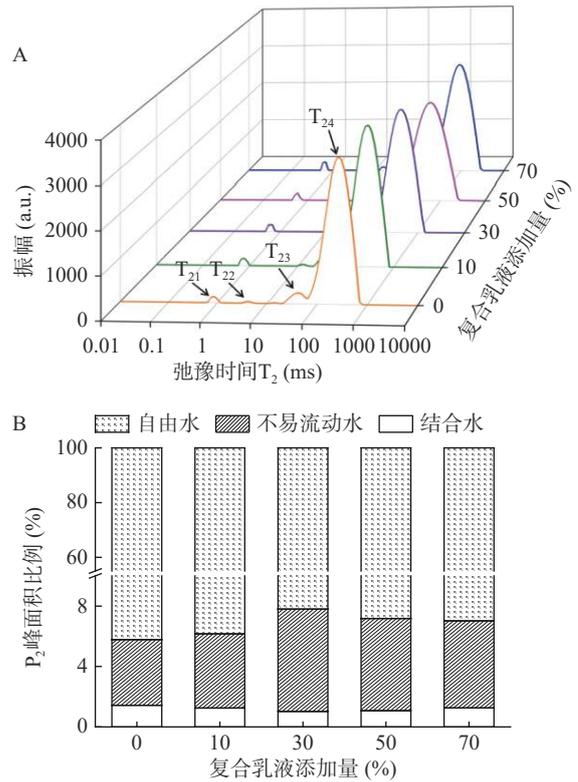


图 2 PSP-卡拉胶复合乳液不同添加量对肌原纤维蛋白凝胶弛豫时间(A)和峰面积比例(B)的影响

Fig.2 Effects of different additions of pumpkin seed protein-carrageenan composite emulsion on relaxation time (A) and peak area ratio (B) of myofibrillar protein gels

向迁移,不易流动水增加,但是随着 PSP-卡拉胶复合乳液的持续添加,凝胶内部的不易流动水开始逐渐转化为自由水。

2.3 PSP-卡拉胶复合乳液不同添加量对肌原纤维蛋白凝胶质构的影响

质构是研究肌原纤维蛋白凝固状态的重要指标,也是评价蛋白凝胶质量的重要参数^[26]。由表 1 可知,随着 PSP-卡拉胶乳液的添加,肌原纤维蛋白复合凝胶的弹性和内聚性与对照组差异不显著($P>0.05$),对照组与处理组的硬度、黏性和咀嚼性均有显著变化($P<0.05$)。当复合乳液添加量为 50% 时,肌原纤维蛋白复合凝胶的硬度、黏性和咀嚼性达到最大值。此变化趋势与前文持水性和凝胶强度一致,这表明添加的 PSP-卡拉胶乳液可以与肌原纤维蛋白很好地结合,改善凝胶网络结构,表现出较好的质构特

表 1 PSP-卡拉胶复合乳液不同添加量对肌原纤维蛋白凝胶质构的影响

Table 1 Effects of different additions of pumpkin seed protein-carrageenan composite emulsion on the texture of myofibrillar protein gels

复合乳液添加量(%)	硬度(g/cm ²)	弹性(mm)	内聚性	黏性(g·s)	咀嚼性(mJ)
0	74.11±2.33 ^e	0.93±0.06 ^a	0.427±0.04 ^a	30.52±4.29 ^e	28.41±2.59 ^e
10	81.14±2.82 ^d	0.96±0.04 ^a	0.366±0.03 ^b	30.48±4.01 ^e	29.67±3.20 ^e
30	96.06±2.94 ^c	0.98±0.02 ^a	0.396±0.02 ^b	39.81±2.35 ^c	36.76±2.73 ^c
50	158.11±2.28 ^a	0.95±0.02 ^a	0.411±0.07 ^b	65.34±3.46 ^d	61.83±3.02 ^d
70	106.87±3.39 ^b	0.94±0.05 ^a	0.468±0.02 ^b	50.75±3.96 ^b	48.38±5.84 ^b

注: 同列不同字母表示差异显著($P<0.05$); 表2同。

性, 推测原因可能是在热诱导形成凝胶过程中, 复合乳液中的 PSP、卡拉胶与肌原纤维蛋白间的交联程度增加, 乳液中的油脂也能更好地填充到凝胶网状结构中, 从而增强了凝胶的质构特性^[27]。

2.4 PSP-卡拉胶复合乳液不同添加量对肌原纤维蛋白凝胶蒸煮损失的影响

图 3 反映了 PSP-卡拉胶复合乳液不同添加量对肌原纤维蛋白复合凝胶蒸煮损失的影响。随着南瓜籽蛋白-卡拉胶乳液添加量的增加, 肌原纤维蛋白复合凝胶的蒸煮损失逐渐降低, 由此可知, 复合乳液的添加可以降低肌原纤维蛋白凝胶在加热过程中水分的损失, 这表明在肌原纤维蛋白中加入卡拉胶是有益的, 卡拉胶不仅可以增强水的结合能力, 将水困在蛋白质凝胶结构中, 还具有良好的胶凝性, 使得 PSP 和卡拉胶在加热过程中与肌原纤维蛋白的结合更加紧密, 进而形成更加稳定的凝胶网络结构^[28]。乳液的加入也可以通过增强乳化作用来增加凝胶形成过程中的交联作用, 使得蛋白质与水的结合更加牢固, 从而形成致密的凝胶结构, 捕获更多的水, 降低蒸煮损失。

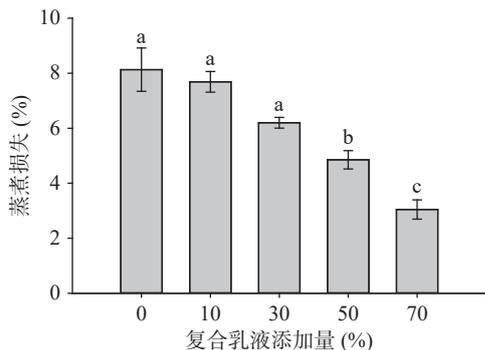


图 3 PSP-卡拉胶复合乳液不同添加量对肌原纤维蛋白凝胶蒸煮损失的影响

Fig.3 Effects of different additions to pumpkin seed protein-carrageenan composite emulsion on cooking loss of myofibrillar protein gels

2.5 PSP-卡拉胶复合乳液不同添加量对肌原纤维蛋白凝胶冻融稳定性的影响

冻融稳定性是指凝胶经反复冷冻、解冻后保持原有结构的能力。析水率反映了凝胶的失水程度, 凝胶析水率越低说明其抑制脱水收缩的能力更强, 冻融稳定性越高^[29]。由图 4 可知, 随着 PSP-卡拉胶乳液的添加, 肌原纤维蛋白复合凝胶的析水率逐渐上升, 处理组的析水率均高于对照组, 此现象可能是由于将肌原纤维蛋白复合凝胶冷冻处理一段时间之后, 再取出解冻时, 通过热诱导形成的凝胶网络结构被破坏, 内部的水分开始逐渐从网状结构中析出^[30], 添加的 PSP-卡拉胶乳液越多, 对凝胶内部的结构和分子链的排列分布影响越大, 因此冻融处理后的凝胶析水率增加, 冻融稳定性降低。

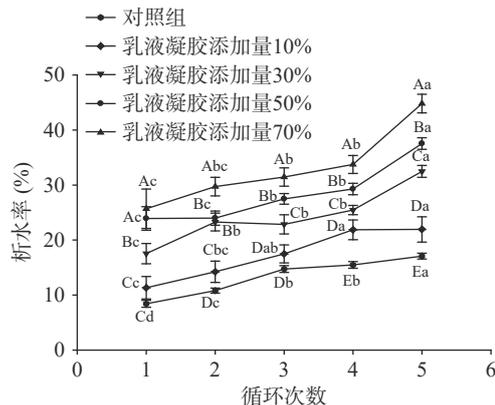


图 4 PSP-卡拉胶复合乳液不同添加量对肌原纤维蛋白凝胶冻融稳定性的影响

Fig.4 Effects of different additions of pumpkin seed protein-carrageenan composite emulsion on freeze-thaw stability of myofibrillar protein gels

注: 大写字母表示不同处理组之间差异显著 ($P < 0.05$), 小写字母表示不同循环次数之间差异显著 ($P < 0.05$)。

2.6 PSP-卡拉胶复合乳液不同添加量对肌原纤维蛋白凝胶色差的影响

由表 2 可知, 不同 PSP-卡拉胶乳液添加量的肌原纤维蛋白复合凝胶亮度值 L^* 和黄度值 b^* 表现出显著差异 ($P < 0.05$), 红度值 a^* 差异不显著 ($P > 0.05$)。处理组的亮度值均低于对照组, 这可能是由于南瓜籽蛋白本身的颜色导致的, PSP 为淡绿色粉末, 加入到凝胶体系后使其变暗, 从而降低了亮度值 L^* 。黄度值 b^* 在乳液添加量为 30% 时达到最大, 推测可能是由于 PSP-卡拉胶乳液中有一定量的大豆油, 导致黄度值增加, 但随着复合乳液添加量持续增加, 卡拉胶含量增加, 使得凝胶形成得更加均匀, 更接近肌原纤维蛋白本身的颜色, 导致 b^* 下降^[31]。

表 2 PSP-卡拉胶复合乳液不同添加量对肌原纤维蛋白凝胶色差的影响

Table 2 Effects of different additions to pumpkin seed protein-carrageenan composite emulsion on the colour difference of myofibrillar protein gels

复合乳液添加量 (%)	L^*	a^*	b^*
0	84.7±1.58 ^a	-2.1±0.33 ^a	3.42±0.32 ^b
10	81.18±1.32 ^b	-2.12±0.35 ^a	3.05±0.40 ^b
30	78.72±1.52 ^b	-1.74±0.09 ^a	4.14±0.28 ^a
50	65.16±1.56 ^d	-1.53±0.14 ^a	2.55±0.11 ^c
70	69.47±1.25 ^c	-1.91±0.45 ^a	1.31±0.08 ^d

2.7 PSP-卡拉胶复合乳液不同添加量对肌原纤维蛋白凝胶微观结构的影响

图 5 反映了 PSP-卡拉胶复合乳液不同添加量对肌原纤维蛋白凝胶的微观结构的影响。可以看出对照组的凝胶结构呈现出较疏松的结构, 形成的三维网络结构中存在很多空洞。随着 PSP-卡拉胶复合乳液的添加, 肌原纤维蛋白复合凝胶的网络结构逐渐变得更加致密。当复合乳液添加量为 50% 时, 凝胶结构

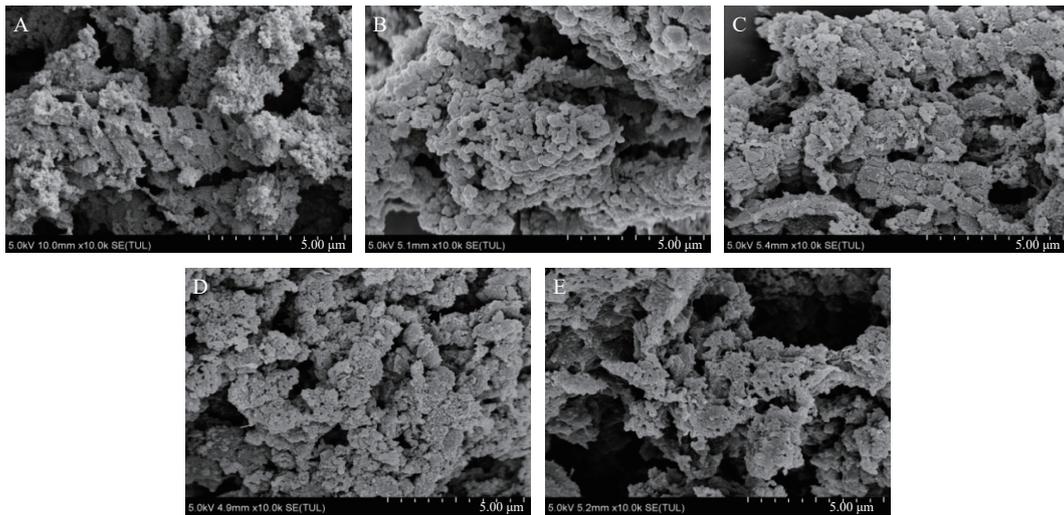


图 5 PSP-卡拉胶复合乳液不同添加量对肌原纤维蛋白凝胶微观结构的影响(5 μm)

Fig.5 Effects of different additions of pumpkin seed protein-carrageenan composite emulsion on the microstructure of myofibrillar protein gels (5 μm)

注: A 为未添加 PSP-卡拉胶乳液的 MP 凝胶样品; B 为添加 10% PSP-卡拉胶复合乳液的复合凝胶样品; C 为添加 30% PSP-卡拉胶复合乳液的复合凝胶样品; D 为添加 50% PSP-卡拉胶复合乳液的复合凝胶样品; E 为添加 70% PSP-卡拉胶复合乳液的复合凝胶样品。

致密, 空洞较少, 说明蛋白质交联程度较高, 可能是因为在热诱导凝胶形成过程中, 卡拉胶与蛋白质的协同作用促进了凝胶网络结构的形成, 使凝胶体系中的空洞面积减小, 形成了致密均一、更加稳定、连续的凝胶结构, 这与凝胶强度和持水性的结果一致。随着复合乳液的持续添加, 肌原纤维蛋白凝胶微观结构变得松散, 这说明适量 PSP-卡拉胶乳液的添加可以促进肌原纤维蛋白凝胶网络结构的形成, 过量添加则会对凝胶造成负面影响, 降低凝胶品质^[32]。

2.8 PSP-卡拉胶复合乳液不同添加量对肌原纤维蛋白凝胶流变特性的影响

图 6 反映了肌原纤维蛋白复合凝胶样品的动态流变学特性。由图可知, 在加热温度为 20~45 $^{\circ}\text{C}$, PSP-卡拉胶复合乳液添加量为 70% 时, G' 显著高于对照组, 这表明复合乳液的加入可以使凝胶体系弹性增强, 在 45 $^{\circ}\text{C}$ 之后可以观察到, 与对照组相比, 所有处理组的 G' 值均低于对照组, 推测可能是由于蛋白质的聚集和沉淀阻止了肌球蛋白作用, 导致肌球蛋白头部交联较少, 从而导致 G' 值下降^[33]。当温度升高至 50~60 $^{\circ}\text{C}$ 时, PSP-卡拉胶复合乳液不同添加量下的肌原纤维蛋白凝胶的 G' 值均呈上升趋势, 这可能是因为肌球蛋白开始变性并展开, 肌球蛋白头部通过二聚作用开始聚集, 在二硫键和非共价键的作用下形成具有弹性的蛋白凝胶网络结构, 随后随着温度的升高, 凝胶 G' 值呈持续增加趋势, 表明蛋白质因热变形而展开、折叠、交联, 开始形成不可逆的凝胶网络结构, 促进了弹性凝胶网络结构的形成^[34], 凝胶网络结构的交联程度得到增强, 从而使肌原纤维蛋白复合凝胶具有较好的凝胶性能, 这与质构特性得到的试验结果一致。

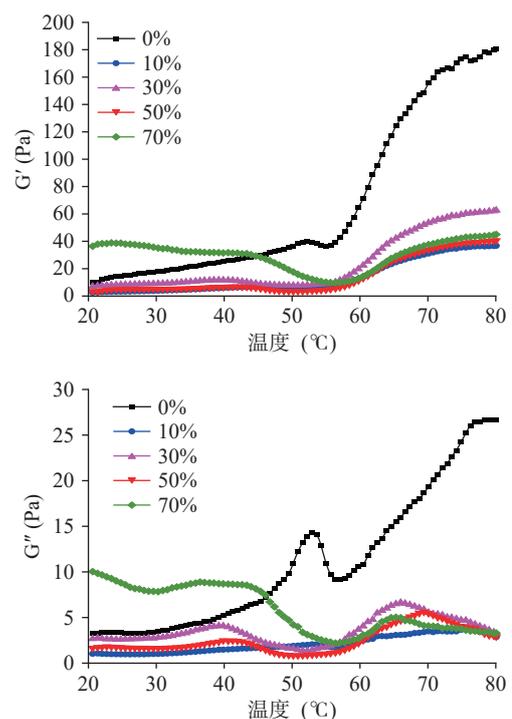


图 6 PSP-卡拉胶复合乳液不同添加量对肌原纤维蛋白凝胶流变特性的影响

Fig.6 Effects of different additions to pumpkin seed protein-carrageenan composite emulsion on rheological properties of myofibrillar protein gels

当 PSP-卡拉胶复合乳液添加量为 10% 时, G' 值和 G'' 值均处于最低水平, 这可能是由于少量的 PSP-卡拉胶复合乳液加入到肌原纤维蛋白凝胶中, 形成的凝胶体系并不稳定, 反而阻碍了凝胶网络结构的形成^[35]。随着添加量的进一步增加, G' 和 G'' 得到提高, 并在添加量为 30% 时高于其他处理组, 这表明适量 PSP-卡拉胶复合乳液的添加可以影响凝胶网络结构

的形成。不同处理下的肌原纤维蛋白凝胶 G'的变化趋势与 G''相似,并且在整个热诱导加热过程中, G'始终高于 G'',说明蛋白热诱导形成的凝胶是一个具有较好弹性的凝胶^[26]。

3 结论

本实验研究了 PSP-卡拉胶复合乳液不同添加量对肌原纤维蛋白凝胶性能的影响。研究结果显示,当 PSP-卡拉胶复合乳液添加量为 50% 时,显著提高了肌原纤维蛋白复合凝胶持水性和凝胶强度($P < 0.05$)。同时,肌原纤维蛋白复合凝胶硬度、黏性、咀嚼性也随着复合乳液添加量的增加而上升,表现出良好的质构特性,肌原纤维蛋白复合凝胶的蒸煮损失降低,并在乳液添加量为 50% 时,表现出较为致密均一的微观结构和较好的流变学特性。综合以上结果得出, PSP-卡拉胶复合乳液可作为脂肪替代物应用于肉制品加工,帮助肉制品产业满足消费者对低脂肉制品的追求,后续研究可将其应用于不同肉制品加工,探讨其对肉制品食用品质、感官品质等方面的影响,为实际生产低脂肉制品提供理论基础。

© The Author(s) 2024. 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] AMIRI A, SHARIFIAN P, SOLTANIZADEH N. Application of ultrasound treatment for improving the physicochemical, functional and rheological properties of myofibrillar proteins[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 111: 139-147.
- [2] SUN J, LI X, XU X L, et al. Influence of various levels of flaxseed gum addition on the water-holding capacities of heat-induced porcine myofibrillar protein[J]. *Journal of Food Science*, 2011, 76: C472-C478.
- [3] 吴忆惠, 黄桂颖, 陈海光. 乳液凝胶作为动物脂肪替代物的应用研究进展[J]. *食品科技*, 2023, 48(12): 236-243. [WU Yihui, HUANG Guiying, CHEN Haiguang. Research progress on application of emulsion gel as animal fat substitute[J]. *Food Science and Technology*, 2023, 48(12): 236-243.]
- [4] REZAEI M, AIDER M. Study of the effect of canola proteins-xanthan based Pickering emulsion as animal fat replacer in a food matrix produced from mechanically separated meat[J]. *Meat Science*, 2023, 204: 109283.
- [5] 唐月利, 贾娜, 杨松涛, 等. 亚麻籽胶-亚麻籽油乳液替代脂肪对乳化肠品质特性的影响[J]. *食品科学*, 2023, 44(10): 64-72. [TANG Yueli, JIA Na, YANG Songtao, et al. Effect of flaxseed gum-flaxseed oil emulsion substitution of fat on quality characteristics of emulsified sausage[J]. *Food Science*, 2023, 44(10): 64-72.]
- [6] 张芬. 南瓜籽粕蛋白的提取及性质研究[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2014. [ZHANG Fen. Extraction and properties of pumpkin seed meal protein[D]. Harbin: Heilongjiang University, 2014.]
- [7] WIJESEKARA I, KARUNARATHNA W. Usage of seaweed polysaccharides as nutraceuticals[M]. *Seaweed Polysaccharides: Elsevier*, 2017: 341-348.
- [8] 刘骞, 商旭, 姜帅, 等. 可得然胶与卡拉胶和黄原胶复配对抗

原纤维蛋白功能特性的影响[J]. *食品研究与开发*, 2019, 40(3): 45-51. [LIU Qian, SHANG Xu, JIANG Shuai, et al. Effect of compound pairing of myofibrillar protein with carrageenan gum and xanthan gum[J]. *Food Research and Development*, 2019, 40(3): 45-51.]

[9] 郭芳, 冯彩平, 邹佳. 南瓜籽蛋白素食香肠加工工艺研究[J]. *粮食与油脂*, 2023, 36(1): 78-81. [GUO Fang, FENG Caiping, ZOU Jia. Research on processing technology of pumpkin seed protein vegetarian sausage[J]. *Grains and Oils*, 2023, 36(1): 78-81.]

[10] 陈慧琪. 南瓜籽油 Pickering 乳液的制备及其稳定性与消化特性的研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2023. [CHEN Yaqi. Preparation of pumpkin seed oil Pickering emulsion and its stability and digestion characteristics[D]. Wuhan: Wuhan University of Light Industry, 2022.]

[11] CAO Y G, MA W H, HUANG J R, et al. Effects of sodium pyrophosphate coupled with catechin on the oxidative stability and gelling properties of myofibrillar protein[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 104: 105722.

[12] 戴慧敏, 邓伟, 陈曼华, 等. 谷朊粉对低钠盐白鲢鱼糜制品凝胶特性的改良[J]. *肉类工业*, 2018(4): 30-39. [DAI Huimin, DENG Wei, CHEN Manhua, et al. Improvement of gel properties of gluten on silver carp surimi products with low sodium salt[J]. *Meat Industry*, 2018(4): 30-39.]

[13] 贾娜, 张风雪, 孙嘉, 等. 亚麻籽胶对儿茶素-肌原纤维蛋白热诱导凝胶特性的影响[J]. *食品科学*, 2019, 40(20): 1-7. [JIA Na, ZHANG Fengxue, SUN Jia, et al. Effect of flaxseed gum on heat-induced gel properties of catechin-myofibrillar protein[J]. *Food Science*, 2019, 40(20): 1-7.]

[14] 费立天. 瓜尔胶、黄原胶乳化液性质研究及对肌原纤维蛋白乳化性和凝胶性的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2018. [FEI Litian. Study on properties of guar gum and xanthan gum emulsion and its effect on myofibrillar protein emulsification and gelatinity[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2018.]

[15] 汪佳佳. 蛋白基乳液凝胶的制备及其在乳化香肠中的应用[D]. 南京: 南京财经大学, 2022. [WANG Jiajia. Preparation of protein-based emulsion gel and its application in emulsified sausage[D]. Nanjing: Nanjing University of Finance and Economics, 2022.]

[16] LI X Q, XIONG Y L L, CHEN J. Protein oxidation at different salt concentrations affects the cross-linking and gelation of pork myofibrillar protein catalyzed by microbial transglutaminase[J]. *Journal of Food Science*, 2013, 78(6): 823-831.

[17] CUI B, MAO Y Y, LIANG H S, et al. Properties of soybean protein isolate/curdian based emulsion gel for fat analogue: Comparison with pork backfat[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 206: 481-488.

[18] JIA N, WANG L T, SHAO J H, et al. Changes in the structural and gel properties of pork myofibrillar protein induced by catechin modification[J]. *Meat Science*, 2017, 127: 45-50.

[19] 黄滢莹. 基于大豆蛋白-壳聚糖-膳食纤维构建复合凝胶型凝胶体系的研究[D]. 广州: 广州大学, 2023. [HUANG Weiying. Study on the construction of composite coagulation gel system based on soybean protein-chitosan-dietary fiber[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2023.]

[20] ZHENG H, BEAMER S K, MATAK K E, et al. Effect of κ -carrageenan on gelation and gel characteristics of Antarctic krill (*Euphausia superba*) protein isolated with isoelectric solubilization/precipitation[J]. *Food Chemistry*, 2019, 278: 644-652.

[21] PETCHARAT T, BENJAKUL S. Property of fish gelatin gel

- as affected by the incorporation of gellan and calcium chloride[J]. *Food Biophysics*, 2017, 1: 1-9.
- [22] HUANG C, BLECKER C, WEI X, et al. Effects of different plant polysaccharides as fat substitutes on the gel properties, microstructure and digestion characteristics of myofibrillar protein[J]. *Food Hydrocolloids*, 2024, 150: 109717.
- [23] KANG Z L, BAI R, LU F, et al. Effects of high pressure homogenization on the solubility, foaming, and gel properties of soy 11S globulin[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 124: 107261.
- [24] XIA S G, XUE Y, XUE C H, et al. Structural and rheological properties of meat analogues from *Haematococcus pluvialis* residue-pea protein by high moisture extrusion[J]. *LWT-Food Science Technology*, 2022, 154: 112756.
- [25] LUO H B, GUO C, LIN L, et al. Combined use of rheology, LF-NMR, and MRI for characterizing the gel properties of hairtail surimi with potato starch[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2020, 13(4): 637-647.
- [26] DU J J, ZHOU C Y, XIA Q, et al. The effect of fibrin on rheological behavior, gelling properties and microstructure of myofibrillar proteins[J]. *LWT*, 2022, 153: 112457.
- [27] 韩柯颖. 添加山茶油与物理处理方式对肌原纤维蛋白凝胶与乳化特性的影响[D]. 南京: 南京财经大学, 2022. [HAN Keying. Effect of camellia oil addition and physical treatment on myofibrillar protein gel and emulsifying properties[D]. Nanjing: Nanjing University of Finance and Economics, 2022.]
- [28] 孟子晴, 赵改名, 祝超智, 等. κ -卡拉胶对西门塔尔杂交牛肉糜品质影响评价模型的建立[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(1): 136-142. [MENG Ziqing, ZHAO Gaiming, ZHU Chaozhi, et al. Establishment of an evaluation model of the effect of κ -carrageenan on the quality of Simmental hybrid beef minced beef[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2020, 46(1): 136-142.]
- [29] 蒋杰. 魔芋凝胶基块状脂肪模拟物制备及加工特性研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022. [JIANG Jie. Study on preparation and processing characteristics of konjac gel-based bulk fat simulant[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022.]
- [30] TAN M T, DING Z Y, MEI J, et al. Effect of cellobiose on the myofibrillar protein denaturation induced by pH changes during freeze-thaw cycles[J]. *Food Chemistry*, 2022, 373: 131511.
- [31] 周士琪. 海带多糖复乳凝胶脂肪替代物的制备及其在低脂鸡肉肠中的应用[D]. 上海: 华东理工大学, 2020. [ZHOU Shiqi. Preparation of kelp polysaccharide compound milk gel fat substitute and its application in low-fat chicken sausage[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2020.]
- [32] JIANG S S, MA Y Y, WANG Y H, et al. Effect of κ -carrageenan on the gelation properties of oyster protein[J]. *Food Chemistry*, 2022, 382: 132329.
- [33] XIONG Y L, BLANCHARD S P. Myofibrillar protein gelation: Viscoelastic changes related to heating procedures[J]. *Journal of Food Science*, 1994, 59(4): 734-738.
- [34] DOU Z M, CHEN C, FU X. The effect of ultrasound irradiation on the physicochemical properties and α -glucosidase inhibitory effect of blackberry fruit polysaccharide[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 96: 568-576.
- [35] 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 gum on myofibrillar protein gel properties of *Penaeus vannamei* shrimp[J]. *Food Science*, 2022, 43(12): 42-50.]