

李子妍, 陈泽凡, 汤佳佳, 等. 热压鲟鱼软骨明胶对冻藏虾糜品质的改善及肌原纤维蛋白的影响 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(19): 336–346. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024090243

LI Ziyen, CHEN Zefan, TANG Jiajia, et al. Improvement of Frozen Shrimp Surimi Quality by Gelatin Prepared through Hot-pressing of Sturgeon Cartilage and Its Effects on the Myofibrillar Protein[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(19): 336–346. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024090243

· 贮运保鲜 ·

热压鲟鱼软骨明胶对冻藏虾糜品质的改善 及肌原纤维蛋白的影响

李子妍^{1,2,*}, 陈泽凡^{1,2,+}, 汤佳佳^{3,4}, 徐永钦^{3,4}, 赵元晖^{1,2,*}

(1. 中国海洋大学食品科学与工程学院 海洋食品加工与安全控制国家重点实验室, 山东青岛 266404;

2. 中国海洋大学三亚海洋研究院, 海南三亚 572024;

3. 荣成市日鑫水产有限公司, 山东威海 264309;

4. 荣成市日晟水产有限公司, 山东威海 264306)

摘要: 为探究热压鲟鱼软骨明胶 (gelatin prepared through hot-pressing of sturgeon cartilage, SCG) 对虾糜肌原纤维蛋白 (myofibrillar protein, MP) 的冷冻保护作用, 以期提高冻藏虾糜的品质稳定性。本研究将不同浓度的 SCG (0%、0.5% 和 1.0%, w/w) 添加到虾糜中, 并与传统商业抗冻剂 (4% 蔗糖+4% 山梨糖醇) 进行对比。在虾糜冻藏 0、15、30、45 和 60 d 时, 通过感官评价、质构、色差、持水性、pH、TVB-N、TBARs 和蛋白含量系统地分析了虾糜及其凝胶的品质变化, 并通过测定总巯基含量、活性巯基含量、羧基含量、二巯键含量、圆二色谱和内源荧光光谱, 分析了虾糜 MP 在结构和功能完整性上的差异。结果显示, SCG 的添加增强了虾糜的弹性和凝胶强度, 优化了感官属性, 并提高了持水性。同时, SCG 能够减缓冻藏过程中 MP 的氧化, 不仅减少了氧化标记物羧基的含量, 还增加了抗氧化相关的总巯基和活性巯基含量。在 0.5% 的添加量下, SCG 对虾糜凝胶特性的改善及 MP 氧化抑制效果最佳, 且优于传统商业抗冻剂。经 60 d 冻藏后, 添加 0.5% SCG 的虾糜凝胶相比添加商业抗冻剂在弹性和凝胶强度上分别提升了 43.30% 和 14.36%, 持水性增加了 12.73%, MP 总巯基和活性巯基含量分别增加了 12.90% 和 34.39%, 羧基含量降低了 27.08%, Ca^{2+} -ATPase 活性增加了 21.21% ($P<0.05$)。综上所述, 添加 0.5% SCG 具有与商业抗冻剂相当的抗冻效果, 能有效减缓虾糜在冷冻过程中的蛋白变性, 并维持其良好品质。

关键词: 虾糜, 冻藏, 热压鲟鱼软骨明胶, 肌原纤维蛋白, 抗冻效果, 品质改善

中图分类号: TS254.9

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)19-0336-11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024090243

本文网刊:



Improvement of Frozen Shrimp Surimi Quality by Gelatin Prepared through Hot-pressing of Sturgeon Cartilage and Its Effects on the Myofibrillar Protein

LI Ziyen¹, CHEN Zefan^{1,2,+}, TANG Jiajia^{3,4}, XU Yongqin^{3,4}, ZHAO Yuanhui^{1,2,*}

(1. State Key Laboratory of Marine Food Processing and Safety Control, College of Food Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266404, China;

2. Sanya Oceanographic Institution of Ocean University of China, Sanya 572024, China;

3. Rongcheng Rixin Aquatic Product Co., Ltd., Weihai 264309, China;

4. Rongcheng Risheng Aquatic Products Co., Ltd., Weihai 264306, China)

收稿日期: 2024-09-20 +并列第一作者

基金项目: 山东省重点研发计划 (2021SFGC0701); 海南省重点研发计划 (ZDYF2022XDNY191); 海南省科技计划 (2021CXJH0006)。

作者简介: 李子妍 (2000-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 水产品高值化利用, E-mail: LI19839527710@163.com。

陈泽凡 (1997-), 男, 博士研究生, 研究方向: 水产品高值化利用, E-mail: chefaanchen@126.com。

* 通信作者: 赵元晖 (1979-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 水产品高值化利用, E-mail: zhaoyuanhui@ouc.edu.cn。

Abstract: This study aimed to investigate the cryoprotective effect of gelatin prepared by hot-pressing sturgeon cartilage (SCG) on myofibrillar protein (MP) in shrimp surimi, with the aim of improving the quality stability of frozen shrimp surimi. In this study, different concentrations of SCG (0%, 0.5%, and 1.0% w/w) were added to shrimp surimi and compared with traditional commercial antifreeze (4% sucrose+4% sorbitol). Changes in minced shrimp quality and gel characteristics during a 60-day freezing period were systematically evaluated using sensory analysis, texture profile, colorimetry, water holding capacity, pH, TVB-N, TBARs, and protein content. Concurrently, MP structure and functionality, relating to shrimp integrity differences, were analyzed by determining total sulfhydryl, active sulfhydryl, carbonyl, and disulfide bond content, alongside circular dichroism and endogenous fluorescence spectroscopy. The results showed that the addition of SCG improved the elasticity and gel strength of minced shrimp, optimized sensory attributes, and enhanced the water holding capacity. Meanwhile, SCG slowed down the oxidation of MP during freezing and storage, reducing the carbonyl content of the oxidation marker and increasing the content of antioxidant-related total and active sulfhydryl groups. At the 0.5% addition level, SCG showed the best effect on the improvement of gel properties and MP oxidation inhibition of minced shrimp, even better than traditional commercial antifreeze. After 60 d of freezing, the gel of minced shrimp with 0.5% SCG increased 43.30% and 14.36% in elasticity and gel strength, increased by 12.73% in water-holding capacity, 12.90% and 34.39% in total MP sulfhydryl group and active sulfhydryl group content, respectively, decreased 27.08% in the carbonyl group content, and increased by 21.21% ($P<0.05$) in Ca^{2+} -ATPase activity. In conclusion, the addition of 0.5% SCG had an antifreezing effect comparable to that of commercial antifreeze and was able to effectively slow down the protein denaturation of minced shrimp during the freezing process and maintain its good quality.

Key words: shrimp surimi; frozen storage; gelatin prepared through hot-pressing of sturgeon cartilage; myofibrillar protein; cryoprotective effect; quality improvement

随着现代饮食文化的多元化与人们健康意识的提升, 虾糜制品正逐渐成为消费者餐桌上的新宠。这类制品不仅保留了虾类低脂高蛋白、营养丰富的特性, 还凭借其风味独特及口感丰富受到了消费者的青睐^[1]。冷冻作为延长虾糜制品货架期的常用手段, 虽然可以有效抑制微生物的繁殖, 但也会促使冰晶形成与生长。冰晶的力学效应会破坏虾糜的组织细胞, 进而导致蛋白质聚集、降解和脂肪氧化等问题^[2], 这些问题是虾糜凝胶结构劣化的主要原因, 对虾糜制品的感官品质和经济价值具有不利影响。肌原纤维蛋白(myofibrillar protein, MP)作为虾糜凝胶网络结构的核心组成部分, 其稳定性直接关系到产品的最终品质。由于冷冻储藏过程中冰晶生长和氧化反应加剧, MP 变性尤为常见, 具体表现在巯基含量减少、羰基含量增加、表面疏水性提升及蛋白质异常聚集, 这也导致了虾糜制品的凝胶性能与整体品质劣变^[3-4]。

添加抗冻剂是一种可以减缓虾糜冷冻变性并改善虾糜凝胶功能性质的有效方式。传统商业抗冻剂如海藻糖、蔗糖与山梨糖醇的组合^[5], 虽在一定程度上延缓了冷冻对虾糜品质的损害, 但由于其具有高糖和高热量的特性, 存在加剧肥胖和龋齿等问题的风险。因此, 探寻健康高效的新型抗冻剂是当下的热点之一。抗冻蛋白与抗冻多肽因其独特的热滞活性和重结晶抑制活性, 在降低冰晶对蛋白结构损伤方面展现出显著优势^[6]。这为虾糜制品的冷冻保护及新型抗冻剂的挖掘提供了新的思路。

近年来, 明胶及其水解物在改善食品质构特性与抗冻性能方面的研究日益增多^[7]。某些特定来源的明胶及其衍生物具有显著提升冷冻储藏过程中产品感官品质的效果, 并可以有效延缓蛋白质与脂肪的

氧化进程^[8]。基于前期研究, 采用热压制备的鲟鱼软骨明胶(gelatin prepared through hot-pressing of sturgeon cartilage, SCG)表现出了良好的抗冻活性。鉴于当前对虾糜冷冻保护的研究尚少, 本研究旨在探究 SCG 对虾糜冻藏过程中凝胶特性、品质变化及蛋白氧化与结构的影响, 以期为明胶在水产品抗冻剂领域的创新应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

新鲜南美白对虾 青岛商城农贸市场; 鲟鱼软骨 衢州鲟龙水产食品科技开发有限公司; BCA 蛋白浓度试剂盒、蛋白质总巯基含量检测试剂盒、蛋白质羰基含量检测试剂盒 北京索莱宝科技有限公司; 超微量 Ca^{2+} -ATPase 活性试剂盒 南京建成科技有限公司; 使用的其他化学药品和试剂均为国产分析级或以上。

PF3010 食品多功能斩拌机 山东博朗厨房电器有限公司; TMS-TOUCH 质构仪 美国 FTC 公司; H5-21KR 落地式高速冷冻离心机 湖南可成仪器设备有限公司; NR60CP 立式色差仪 深圳三恩时科技有限公司; UV-2550 紫外可见分光光度计 日本岛津公司; F-4600 内源荧光分光光度计 日立分析仪器(上海)有限公司; J-1500 圆二色谱仪 日本 JASCO 公司; DR-5000 酶标仪 上海启前电子科技有限公司; 高压蒸汽灭菌锅 青岛精诚仪器仪表有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 SCG 的提取 参考 Hou 等^[9]的方法, 将鲟鱼软骨粉碎成 $0.5\text{ cm}\times 0.5\text{ cm}\times 0.5\text{ cm}$ 的小块状, 清洗干净后用 0.1 mol/L 的碳酸氢钠溶液以 $1:6(\text{g/mL})$

的料液比浸泡并搅拌 30 min, 用蒸馏水洗至中性, 除去非胶原蛋白成分。然后于室温下用 0.1 mol/L 的柠檬酸溶液以 1:6(g/mL) 的料液比浸泡并搅拌 30 min, 用蒸馏水洗至中性。将软骨与蒸馏水以 1:4 的料液比混合, 放至蒸汽灭菌锅中于 115 ℃ 热压 30 min, 经 8000 r/min 离心 20 min 后得到上清液, 通过冷冻干燥制得 SCG(蛋白质含量为 88.18%±1.88%)。

1.2.2 各实验组样品的制备 将南美白对虾取肉后, 清洗干净并分为 4 组。向 1 组虾肉中加入 1% 食盐(w/w)并于冰水浴下斩拌约 5 min 至虾糜细腻有弹性, 作为空白组。重复上述操作分别向另 3 组添加 1% 食盐(w/w)的虾肉中加入商业抗冻剂组(4% 蔗糖+4% 山梨糖醇, w/w)、0.5% SCG 组(0.5% SCG, w/w)、1.0% SCG 组(1.0% SCG, w/w)在冰浴下斩拌 5 min。将制备好的虾糜放入-20 ℃ 中进行冻藏实验, 分别在 0、15、30、45 和 60 d 取出对应样品。

1.2.3 虾糜凝胶制备 分别将各组虾糜样品放入半径为 1 cm 的圆柱形模具中, 于 40 ℃ 水浴中加热 30 min 后再于 90 ℃ 水浴中加热 20 min, 放入冰水中冷却至室温。

1.2.4 冻藏虾糜凝胶的感官评价 随机抽取 20 名男女各半的研究生组成感官评定小组, 参考乔敏等^[1]方法并稍作修改。根据表 1 从口感、滋味和色泽三方面对不同组别的虾糜凝胶进行感官评分。

表 1 虾糜凝胶的感官评分
Table 1 Sensory rating for shrimp paste

指标	评分标准	分值(分)
口感	爽滑Q弹, 紧实不松散	7~10
	弹性一般, 略有松散	4~6
	毫无弹性, 松散严重	0~3
滋味	虾的特征味道浓郁, 无异味	7~10
	具有虾的特征味道, 略有异味	4~6
	虾的特征味道较淡或没有, 具有浓重异味	0~3
色泽	呈现自然的虾红色, 柔和且分布均匀	7~10
	呈现较浅的虾红色, 轻微偏白, 分布较均匀	4~6
	几乎没有虾红色, 颜色暗淡, 分布不均匀	0~3

1.2.5 SCG 对冻藏虾糜凝胶物理特性指标的影响

1.2.5.1 质构测定 参考 Zhang 等^[10]的方法并作适当修改, 将样品切成高 2.5 cm、直径 2 cm 的圆柱体, 采用质构仪的 TPA 和凝胶强度程序进行测定, 获取硬度、弹性、胶粘性、咀嚼性和凝胶强度五组数据。TPA 参数如下: 探头类型 P1, 检测速度 60 mm/min, 起始力 0.2 N, 形变量 60%; 凝胶强度具体参数如下: 探头类型 R0.5, 检测速度 60 mm/min, 起始力 0.2 N, 形变量 60%。

1.2.5.2 色差测定 将样品切成约 2 cm 厚的薄片, 通过色差仪测定其 L^* (亮度)、 a^* (红度)和 b^* (黄度)值。

1.2.6 SCG 对冻藏虾糜品质稳定性的影响

1.2.6.1 盐溶性蛋白含量测定 称取 3 g 虾糜加入

30 mL 缓冲液 I(20 mmol/L Tris-HCl, 0.05 mol/L 氯化钾, pH7.0), 以 10000 r/min 均质 60 s, 于 4 ℃ 静置 1 h 后以 6000 r/min 离心 15 min, 弃去上清液, 得到沉淀, 重复以上操作 3 次。得到的沉淀加入 30 mL 缓冲液 II(20 mmol/L Tris-HCl, 0.6 mol/L 氯化钾, pH7.0), 以 10000 r/min 均质 60 s, 于 4 ℃ 静置 1 h 后以 6000 r/min 离心 15 min, 得到的上清液即为 MP 溶液。采用 BCA 试剂盒测定 MP 浓度。

1.2.6.2 pH 测定 参照 GB 5009.237-2016《食品安全国家标准 食品 pH 值的测定》测定样品的 pH。

1.2.6.3 TVB-N 值测定 参照 GB/T 5009.228-2016《食品安全国家标准 食品中挥发性盐基氮的测定》中的微量扩散法测定 TVB-N 值。

1.2.6.4 TBARs 测定 参考 Fiego 等^[11]的方法对虾糜样品进行 TBARs 的测定。称取 5 g 样品于 50 mL 离心管中, 加入 12.5 mL 20% 三氯乙酸和 10 mL 蒸馏水, 10000 r/min 均质 60 s, 再于 4 ℃ 下以 5500 r/min 离心 15 min, 吸取 2 mL 上清液加入 2 mL 0.02 mol/L TBA 溶液, 于沸水浴中加热 20 min, 冷却至室温后, 以 2 mL TCA/H₂O(1:1)+2 mL TBA 溶液作为空白对照组, 测定溶液在 532 nm(A_{532})和 600 nm(A_{600})处的吸光值。计算公式如下:

$$\text{TBARs值(mg/100 g)} = \frac{(A_{532} - A_{600}) \times 72.06 \times 10}{155}$$

1.2.6.5 持水性的测定 将虾糜凝胶切成约 5 mm 厚的薄片, 称量并记录质量 m_1 , 用两层滤纸包裹住样品后放入 50 mL 离心管中, 于 4 ℃ 下以 5000 r/min 离心 10 min, 称量并记录质量 m_2 , 持水性计算公式如下:

$$\text{持水性(\%)} = \frac{m_2}{m_1} \times 100$$

1.2.7 SCG 对冻藏虾糜 MP 结构与功能完整性的影响

1.2.7.1 总巯基和活性巯基含量的测定 总巯基含量采用蛋白质总巯基含量检测试剂盒测定。活性巯基含量的测定参考刁玉段^[12]的方法, 将提取的 MP 溶液用缓冲液 A(20 mmol/L Tris-HCl, 0.6 mol/L 氯化钾, pH7.0)稀释至 1 mg/mL。取 1 mL MP 溶液加入 9 mL 缓冲液 B(0.09 mol/L Tris-甘氨酸, 4 mmol/L EDTA 溶液, pH8.0)混合均匀。取 4 mL 混合后溶液加入 0.4 mL 的 0.1% (w/v) 的 DTNB 溶液于 30 ℃ 条件下振荡 25 min, 之后在 412 nm 处测定其吸光值。以缓冲液 B 为空白对照, 计算公式如下:

$$\text{活性巯基含量(nmol/mg prot)} = \frac{(A \times D) \times 10^6}{C \times B}$$

式中: A 为吸光值; B 为摩尔吸光系数, 13600 (L/(mol·cm)); C 为蛋白浓度, 1 mg/mL; D 为稀释倍数, 1。

1.2.7.2 二硫键测定 参照 1.2.7.1 中活性巯基含量

的测定方法,将缓冲液 B 替换成缓冲液 C(0.09 mol/L Tris-甘氨酸, 8 mol/L 尿素, 4 mmol/L EDTA, 2% SDS, pH8.0),并以缓冲液 C 为空白对照,计算公式如下:

$$\text{二硫键含量}(\mu\text{mol/g prot}) = \frac{(A \times D) \times 10^6}{C \times B}$$

式中: A 为吸光值; B 为摩尔吸光系数, 13600 (L/(mol·cm)); C 为蛋白浓度, 1 mg/mL; D 为稀释倍数, 1。

1.2.7.3 Ca^{2+} -ATPase 活性测定 采用超微量 Ca^{2+} -ATPase 活性试剂盒进行测定,肌原纤维蛋白的 Ca^{2+} -ATPase 活性以单位时间内单位蛋白中 Ca^{2+} -ATPase 分解三磷酸腺苷产生无机磷的量表示,单位为 $\mu\text{mol Pi/mg prot/h}$ 。

1.2.7.4 羰基含量测定 采用蛋白质羰基含量检测试剂盒进行测定。

1.2.7.5 肌原纤维碎片化指数(myofibrillar fragmentation index, MFI)测定 参考 Lametsch 等^[13]的方法并进行修改。将 1 g 虾糜样品与 10 mL 缓冲液 III(20 mmol PBS, pH7.0)混合后均质。将匀浆液在 3000 r/min, 4 ℃ 的条件下离心 30 min, 再次加入 10 mL 上述缓冲液 III 将蛋白质含量用稀释到 0.5 mg/mL, 在 540 nm 处测定蛋白溶液的吸光值 (A_{540})。

$$\text{MFI} = A_{540} \times 200$$

1.2.8 SCG 对冻藏虾糜 MP 构象与功能状态的影响

1.2.8.1 圆二色谱分析 参考 Zou 等^[14]的方法并进行一定的修改。用缓冲液 II 将提取的 MP 稀释至 1 mg/mL, 放入 1 mm 的石英比色皿中, 以缓冲液 II 为对照。通过圆二色谱仪进行扫描, 扫描范围为 260~190 nm。用 Dichroweb 网站 ([http://dichroweb.](http://dichroweb.cryst.bbk.ac.uk/html/home.shtml)

[cryst.bbk.ac.uk/html/home.shtml](http://dichroweb.cryst.bbk.ac.uk/html/home.shtml)) 的 SELCON 3 模式计算扫描结果中蛋白质的二级结构相对含量。

1.2.8.2 内源荧光光谱 用缓冲液 II 将 MP 溶液稀释至 1 mg/mL, 采用荧光分光光度计进行扫描, 以缓冲液 II 作为空白对照^[15]。参数设定为: 激发波长 295 nm, 狭缝宽度 2.5 nm, 扫描波长范围 300~400 nm。

1.3 数据处理

每个试验重复三次, 最终结果取三次试验的平均值。采用 SPSS Statistics 27 对数据进行显著性分析, 采用 Origin 2019 制作图形。

2 结果与分析

2.1 SCG 对冻藏虾糜感官品质的影响

添加了商业抗冻剂和不同添加量 SCG 的冻藏虾糜感官评定如图 1 所示。随着冻藏时间的增加, 各组虾糜的感官评分呈现逐渐减小的趋势, 空白组、商业抗冻剂组、0.5% SCG 组和 1.0% SCG 组的感官评分分别从 23.53 ± 1.62 、 25.33 ± 1.32 、 25.10 ± 1.62 和 24.13 ± 1.75 下降至 15.29 ± 1.29 、 18.52 ± 1.18 、 19.01 ± 1.17 和 16.30 ± 1.37 , 各组在初始时出现的差异与商业抗冻剂和 SCG 中含有的亲水性基团有关, 它们能通过与水分结合, 使虾糜凝胶口感更嫩滑, 因而呈现较高的综合评分。相比 0 d 的空白组, 0.5% SCG 经过 60 d 冻藏后感官评分下降程度最小; 在口感方面, 经过 60 d 的冻藏各组虾糜凝胶逐渐由爽滑 Q 弹变得松散, 其中空白组松散程度严重, 而添加了商业抗冻剂和 0.5% SCG 的虾糜凝胶变化程度较小, 口感评分显著高于空白组 ($P < 0.05$)。在色泽方面, 空白组由于经过长时间的冻藏虾糜凝胶网络结构劣化, 致使其中的水分流失, 鱼糜凝胶表面亮度降低, 蛋白质和脂肪的氧化剧烈导致颜色偏向黄色且暗淡^[16], 添加了商业抗冻剂和 0.5% SCG 的虾糜凝胶颜色则呈现浅粉

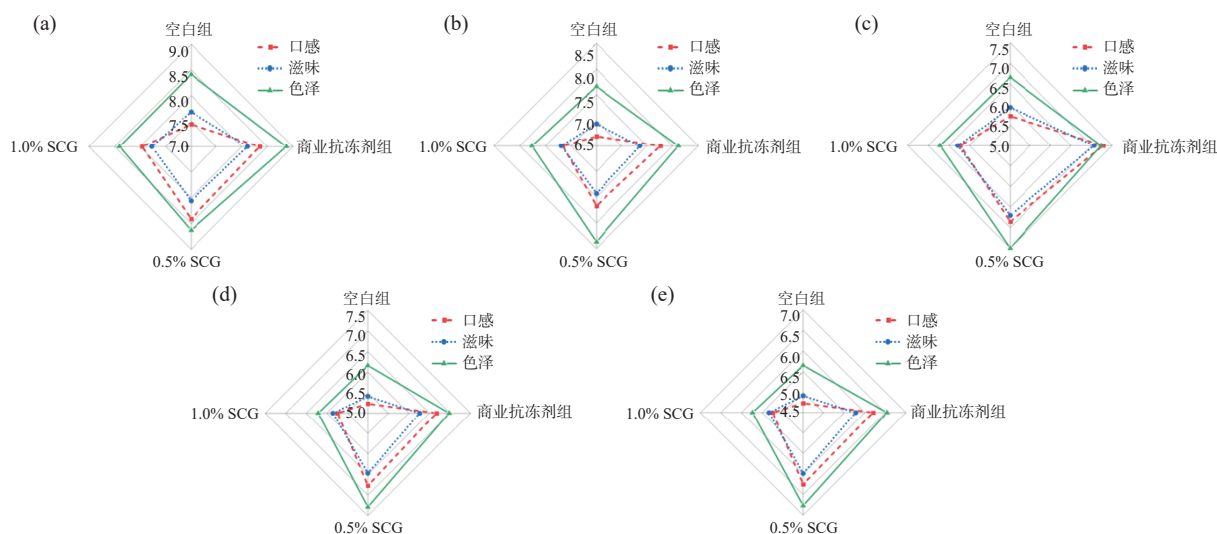


图 1 冻藏过程中虾糜的感官品质变化

Fig.1 Changes in sensory evaluation of shrimp surimi during freezing process

注: a~e 分别为 0、15、30、45、60 d 的感官评价。

红色。在冻藏过程中,各组的滋味具有显著性差异($P<0.05$)。添加了0.5% SCG的虾糜凝胶滋味较好,可能是由于SCG能够有效保护虾糜在冻藏中的凝胶网络结构,并使虾糜凝胶的风味物质被很好地保留^[17]。上述结果表明添加0.5% SCG的虾糜凝胶具有最高的可接受性得分,综合感官品质最佳。可以有效延缓冻藏虾糜的蛋白和脂质氧化,保持了其良好的感官品质。

2.2 SCG对冻藏虾糜物理特性指标的影响

2.2.1 冻藏过程中虾糜的质构变化 质构作为评价水产及其制品品质的关键指标之一,与保水能力、蛋白质结构完整性及感官体验等状态紧密相关^[18]。如图2所示,随着冻藏时间的递增,各组样品的硬度、弹性及凝胶强度均呈现出下降趋势,咀嚼性和胶粘性的变化虽亦有下滑倾向,但缺乏明确的规律性。由图2a可以看出,空白组、商业抗冻剂组、0.5% SCG组和1.0% SCG组的硬度分别由 48.39 ± 1.42 、 44.41 ± 0.86 、 32.65 ± 0.27 、 38.10 ± 0.10 N下降至 22.96 ± 0.40 、 21.37 ± 3.04 、 17.57 ± 2.91 、 19.54 ± 1.63 N。与空白组相比,商业抗冻剂组、0.5% SCG组和1.0% SCG组的硬度较小,其中添加0.5% SCG的虾糜凝胶在60 d后硬度最小。Korzeniowska等^[19]研究指出添加抗冻剂会降低鱼糜凝胶硬度并使其质地变得更柔软,这表明0.5% SCG具有与商业抗冻剂类似的效果,可以降低虾糜凝胶的硬度,使其变得更加嫩滑。

通过图2b可得,空白组的虾糜凝胶在经过60 d的冻藏后弹性急剧下降(7.65 ± 0.23 mm下降至 4.21 ± 0.05 mm),而商业抗冻剂组和0.5% SCG组的弹性下降幅度相对较小(分别从 8.22 ± 0.41 与 8.61 ± 0.39 mm下降至 5.01 ± 0.01 和 7.18 ± 0.06 mm)。

通过图2c可得,空白组的凝胶强度由 $10.32\pm$

0.62 N下降至 4.17 ± 0.14 N,商业抗冻剂和0.5% SCG组的凝胶强度则分别由 10.59 ± 0.18 和 10.01 ± 0.29 N下降至 5.14 ± 0.69 和 5.86 ± 0.31 N,具有较小的下降幅度。这进一步印证了SCG在延缓质构劣化方面的积极作用,表明0.5% SCG具有与商业抗冻剂相当的冷冻保护效果。

由于蛋白质变性程度与凝胶形成能力之间存在负相关性,即变性程度越高,凝胶强度越低^[20]。冻藏过程中形成的冰晶对MP结构的破坏,是导致虾糜凝胶弹性和强度显著下降的主要原因。SCG之所以能有效改善虾糜的质构特性,一方面得益于其类似抗冻蛋白的热滞活性,能够吸附于冰晶表面,抑制其形成、生长及聚集,从而减少冰晶对MP的破坏^[21]。另一方面,SCG富含亲水性氨基酸,不仅能与水分子结合提高蛋白质浓度,还能通过吸水溶胀在凝胶体系中产生局部压力,促进形成更为紧凑的凝胶网络结构,进而增强凝胶强度^[22]。然而,添加了1.0% SCG反而致使虾糜凝胶的弹性与强度下降。这可能是由于SCG中含有游离氨基酸,添加量增加将导致虾糜中游离氨基酸含量升高,影响虾糜MP形成致密的凝胶网络结构^[23]。疏松的凝胶网络结构容易造成水分流失,冷冻所产生的冰晶会严重损伤蛋白质并导致聚集现象的发生,进一步削弱虾糜凝胶的整体强度。综上,0.5% SCG的添加量在改善虾糜质构特性方面表现最为优异,减缓了弹性和凝胶强度下降的幅度,是优化虾糜制品品质的理想选择。

2.2.2 冻藏过程中虾糜的色差变化 色差作为衡量虾糜产品质量的关键指标,会直接影响消费者的选择。 L^* 值和 a^* 值作为CIELab色彩体系中的核心参数,它们提供了丰富的信息以揭示色差变化的内在机制。

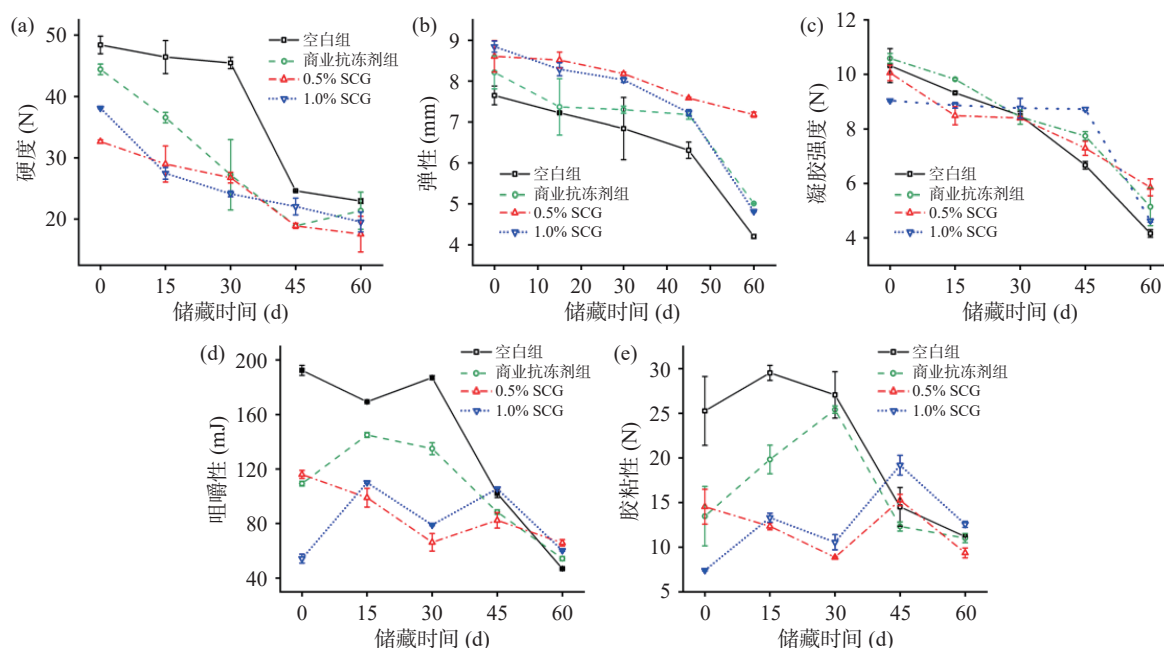


图2 冻藏过程中虾糜的质构变化

Fig.2 Changes in texture of shrimp surimi during freezing storage

如图 3a 所示,随着冻藏时间的递增,所有实验组的 L^* 值均呈现出稳步下降的趋势,0.5% SCG 组(从 69.72 ± 1.07 降低至 59.38 ± 0.60)和 1.0% SCG 组(从 66.67 ± 0.69 降低至 62.47 ± 0.07)相比空白组(从 60.18 ± 0.78 降低至 52.33 ± 0.93)和商业抗冻剂组(从 63.45 ± 0.91 降低至 54.02 ± 2.22)在各冻藏时间下均较高。冻藏过程中虾糜凝胶网络结构会逐渐瓦解,进而导致水分流失加剧并削弱光线在其表面的折射效应,使亮度降低^[24]。SCG 能与虾糜中的水分结合,有效地减缓了虾糜凝胶因水分流失而造成的色泽劣化现象。同时 SCG 存在独特的反光特性,有效提升了虾糜的亮度,因此添加 1.0% SCG 的虾糜凝胶的 L^* 值会较高。

从图 3b 中,可以发现各组虾糜的 a^* 值呈现出逐渐攀升的趋势,其中空白组(从 -0.5 ± 0.02 上升至 1.28 ± 0.02)和 1.0% SCG 组(从 -0.37 ± 0.04 上升至 1.11 ± 0.04)的增幅较大,0.5% SCG 组(从 -0.41 ± 0.06 上升至 0.64 ± 0.07)与商业抗冻剂组(从 0.43 ± 0.04 上升至 0.65 ± 0.16)则表现出相近的抑制效果。这一变化说明 0.5% SCG 或具有类似商业抗冻剂能够抑制肌肉细胞产生的美拉德反应的作用,通过抑制具有褐色色泽的产物如丙烯醛-赖氨酸与戊二醛-赖氨酸等的产生,减缓了 a^* 值的上升^[25]。

此外,如图 3c 所示,各组虾糜的 b^* 值也随冻藏时间的延长而逐渐上升,反映出色泽向黄色方向的转变,这可能是蛋白质持续氧化的结果。0.5% SCG 组对虾糜的色泽保护效果显著优于其他 3 组($P < 0.05$),这与其含有的抗氧化成分有关,它们能有效延缓虾糜中蛋白质、脂肪和虾青素的氧化进程^[26]。同时也说明 SCG 具有保持冻藏虾糜的原有色泽的卓越潜力。1.0% SCG 组的 a^* 和 b^* 相较商业抗冻剂组和 0.5% SCG 组较高,可能是由于过量的 SCG 阻碍了蛋白质间的交联,加剧水分流失、冰晶形成及蛋白质结构的破坏^[27],同时促氧剂的释放会加速蛋白质和脂肪氧化,导致虾糜色泽显著劣化。

2.3 SCG 对冻藏虾糜品质稳定性的影响

MP 的含量与虾糜的凝胶网络结构紧密相关,其变化能够有效反映虾糜在冻藏过程中的冷冻变性状况^[28]。如图 4a 所示,经 60 d 冻藏各组样品中的盐溶

蛋白含量均呈现下降趋势。在冷冻贮藏过程中,MP 中的共价键易受破坏而断裂,促使蛋白质发生聚集,导致 MP 溶解性显著下降。其中,0.5% SCG 组(43.90 ± 0.31 mg/100 g 至 31.77 ± 1.81 mg/100 g)展现出了最高的盐溶性蛋白含量保持率,其效果优于商业抗冻剂组(46.75 ± 3.06 至 23.19 ± 0.68 mg/100 g)。SCG 富含亲水性氨基酸残基,这些残基能够与蛋白质表面的亲水基团发生相互作用,进而稳定蛋白质的三维结构,限制蛋白质肽链的过度展开。同时 SCG 还能有效降低蛋白质之间因分子间疏水作用而引发的聚集现象,有效保护蛋白质的结构^[29]。1.0% SCG 组的效果接近商业抗冻剂组,但低于 0.5% SCG 组,原因可能是添加过量的 SCG,使抗冻剂和蛋白质的比例过高,导致抗冻剂的结晶和失稳,消除了其对蛋白质的保护作用^[30]。

图 4b 揭示了冻藏期间各样品 pH 的变化规律,都经历了先降后升的过程。至 60 d 冻藏期结束时,商业抗冻剂组(7.06 ± 0.03)、0.5% SCG 组(7.23 ± 0.02)和 1.0% SCG 组(7.75 ± 0.06)的 pH 均低于空白组(8.15 ± 0.03),0.5% SCG 组在延缓虾糜 pH 上升方面表现最佳。虾糜在冻藏初期因糖原酵解、脂肪分解及 ATP 降解产生的酸性物质会导致 pH 降低,而后期则因内源性酶与微生物活动生成的碱性物质使 pH 回升^[31]。添加 0.5% SCG 或能抑制微生物活性,从而减缓蛋白质的冷冻变性及 pH 上升。

此外,TVB-N 值作为衡量水产品新鲜度的重要指标,其变化如图 4c 所示。各组的初始 TVB-N 值约为 4 mg/100 g,均随着冻藏时间延长而不断增加,反映了蛋白质结构的劣变与氧化分解。至 60 d 时,各组的 TVB-N 值都没有超过《GB 2733-2005 鲜、冻动物性水产品卫生标准》中对于海虾 TVB-N 的上限(30 mg/100 g),且 0.5% SCG 组(7.87 ± 0.09 mg/100 g)显著低于其他 3 组($P < 0.05$),表明添加 0.5% SCG 有助于减少蛋白质氧化分解产生的含氮碱性物质,更利于维持冷冻虾糜的品质。

图 4d 中 TBARs 值的变化则直观反映了脂肪氧化酸败的程度。经过 60 d 的冻藏,空白组脂肪氧化最为严重, TBARs 值从 0.29 ± 0.03 mg/100 g 跃升至 0.80 ± 0.07 mg/100 g,而添加了商业抗冻剂或 SCG 的

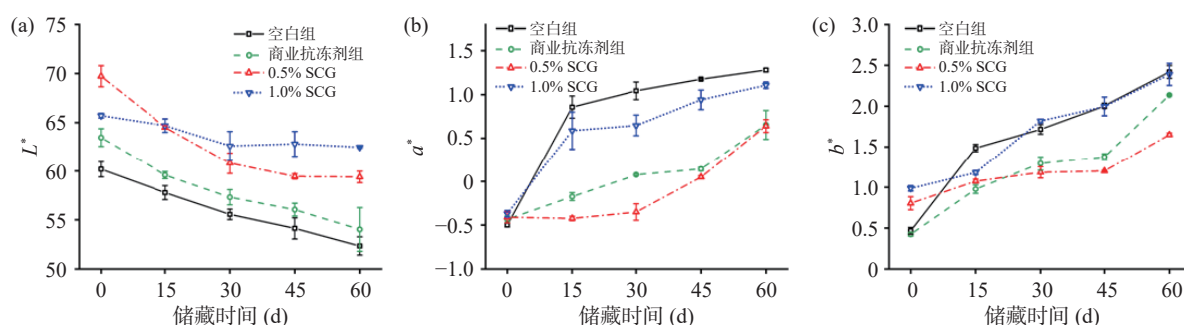


图 3 冻藏过程中虾糜的色差变化

Fig.3 Changes in color of shrimp surimi during freezing storage

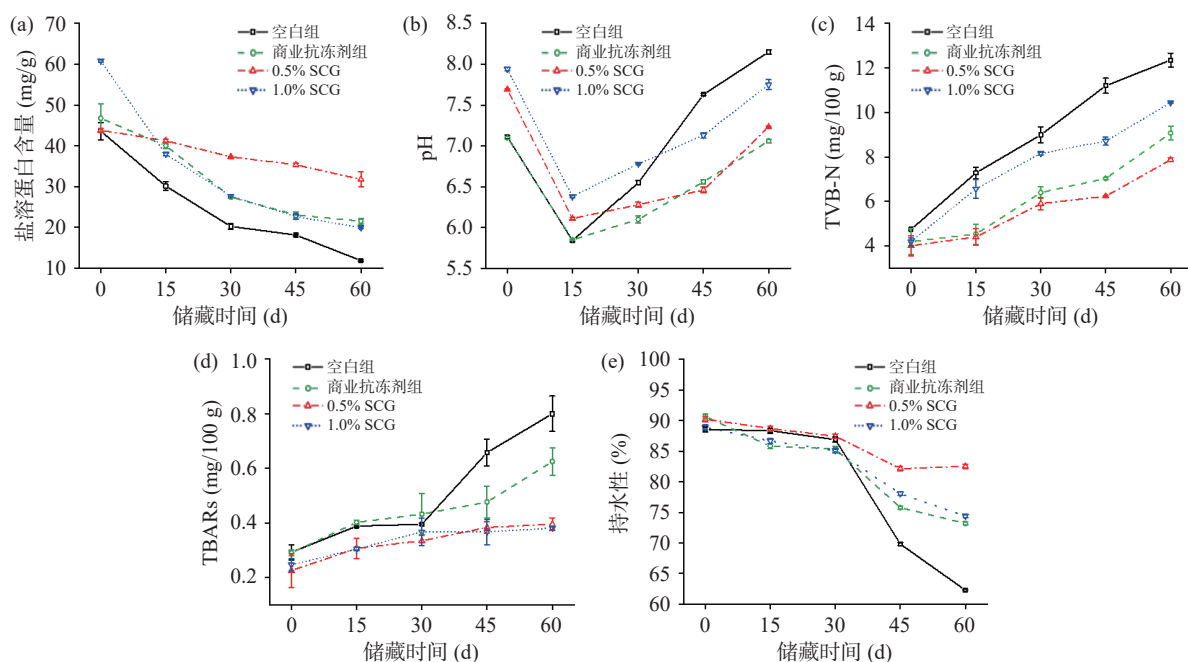


图4 冻藏过程中虾糜的品质变化

Fig.4 Quality changes of shrimp surimi during freezing storage process

组别增长相对平缓,其中 0.5% SCG 组(0.40 ± 0.02 mg/100 g)效果最佳,印证了 SCG 在抑制脂肪氧化及维持冷冻虾糜品质方面的显著作用。

最后,图 4e 揭示的持水性变化进一步证实了 SCG 的积极作用,随着冻藏时间的延长,MP 的冷冻变性会引起凝胶网络结构改变,进而导致各组虾糜凝胶的持水性均逐渐下降^[32],空白组的持水性下降最明显,这很可能由于冻藏时间的延长导致冰晶逐渐生长至一定程度,对肌肉细胞结构造成了严重的破坏,不易流动的水分子转变为自由水从细胞中流出,细胞间的结合力减弱,在离心处理等外力作用下细胞更容易失去持有的水分,从而导致持水性显著降低^[33]。在 60 d 时,0.5% SCG 组($82.53\% \pm 0.36\%$)显著高于 1.0% SCG 组($74.38\% \pm 0.27\%$)、商业抗冻剂组($73.21\% \pm 0.25\%$)和空白组($62.29\% \pm 0.14\%$)($P < 0.05$),这得益于 SCG 对 MP 结构的稳固作用及对冰晶生长的抑制,并有效减少了解冻后汁液流失,提升了虾糜的整体品质^[34]。添加 1.0% SCG 的虾糜凝胶持水性降低,可能是较高含量的 SCG 对蛋白质凝胶交联有一定的抑制作用。

2.4 SCG 对冻藏虾糜 MP 结构与功能完整性的影响

巯基是稳定蛋白质空间结构的一个重要的活性基团,总巯基和活性巯基易被氧化形成二硫键,能够用于表征蛋白质的氧化和变性情况^[35]。

如图 5a 所示,随着冻藏时间的延长,各组虾糜的总巯基含量均呈现出下降趋势,空白组的总巯基和活性巯基含量的下降程度最大,表明其被氧化的程度最大,添加了 0.5% SCG 的虾糜在 60 d 的冻藏后显示出最高的总巯基含量(62.23 ± 0.61 nmol/mg prot),显著高于商业抗冻剂组(55.12 ± 3.29 nmol/mg prot)、1.0% SCG 组(51.29 ± 4.57 nmol/mg prot)和空白组

(41.38 ± 1.03 nmol/mg prot)($P < 0.05$),MP 表现出较高的稳定性。与张晓颀^[27]的研究结果一致,SCG 所含的活性羟基与 MP 的功能基团相结合,有效减缓了 MP 中巯基的氧化速率,有效保持了 MP 的空间结构和功能活性。同时 SCG 还能与冰晶结合,通过水约束效应显著减少冰晶的形成与生长,缓解了因冰晶生长而引发的蛋白质聚集现象,进一步稳定了蛋白质结构,减缓了总巯基和活性巯基含量的下降速度。但当虾糜中添加 1.0% SCG 时,其总巯基含量显著低于 0.5% SCG 组和商业抗冻剂组。可能是过量的 SCG 会抑制蛋白质之间的交联作用,导致更多的自由水转化为冰晶,破坏了蛋白质的结构,加速了蛋白质的氧化进程,MP 的巯基被氧化成二硫键和羰基^[27]。

由图 5b 可以发现冻藏 60 d 后,所有组的活性巯基含量均急剧降低,但 0.5% SCG 组的活性巯基含量显著高于其他组($P < 0.05$),达到了 88.36 ± 1.20 nmol/mg prot。这表明 0.5% SCG 有效保护了 MP 活性巯基,也反映了其对减缓蛋白质冷冻变性的积极作用。

与总巯基和活性巯基的变化趋势相反,二硫键的含量随冻藏时间的延长而增加(图 5c),这是 MP 内部的活性巯基因暴露和氧化所致。相较于空白组和商业抗冻剂组,0.5% SCG 组的二硫键增幅显著较小,这一结果有力地证实了 SCG 在抑制巯基向二硫键氧化转化方面的积极作用。

此外, Ca^{2+} -ATPase 活性与肌球蛋白头部区域的巯基状态紧密相关,该区域活性位点上的巯基一旦发生氧化,将直接导致 Ca^{2+} -ATPase 活性的下降,进而反映出肌球蛋白结构的完整性^[35]。结果显示,各组虾糜的 Ca^{2+} -ATPase 活性均随冻藏时间的延长而下降,空白组的 Ca^{2+} -ATPase 活性相较于未冻藏时出现了

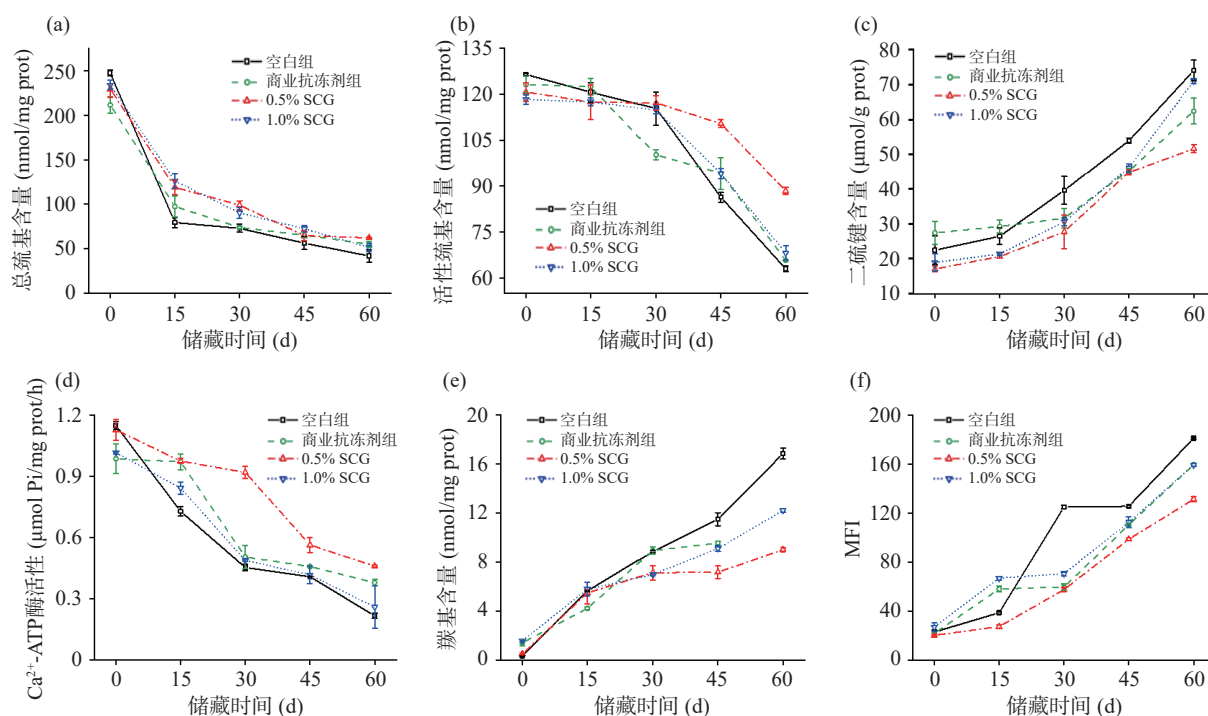


图 5 冻藏过程中虾糜的 MP 结构与功能完整性的变化

Fig.5 Changes in MP structure and functional integrity of shrimp paste during freezing storage

显著下降,表明 MP 受到严重破坏。0.5% SCG 组 Ca^{2+} -ATPase 活性的下降幅度相对较小,在 60 d 的冻藏期内,其活性仅下降了 59.2%。这一积极效应可能是由于 SCG 中丰富的亲水性氨基酸,这些氨基酸能够稳定蛋白质周围的水分子,有助于维持 MP 的完整性^[36]。此结果与之前关于 MP 总巯基和活性巯基含量变化的观察结果相一致。1.0% SCG 组在维持 Ca^{2+} -ATPase 活性方面的作用明显弱于 0.5% SCG 组。可能是由于过量 SCG 的添加阻碍了蛋白质间的正常交联,导致更多的自由水转化为冰晶,破坏了肌肉细胞结构,促使 MP 发生变性和聚集,最终导致了 Ca^{2+} -ATPase 活性的进一步降低^[27]。以上结果表明 0.5% SCG 的添加能够在一定程度上抑制蛋白质间的变性与聚集,有助于保持 MP 的结构完整性。

并且在羰基含量的测定中(图 5e),可以观察到各组虾糜的羰基含量随着冻藏时间的延长都有所增加,在冻藏过程中,细胞内外形成的冰晶会破坏细胞结构,从而加速释放促氧化剂,进一步氧化 MP。但 0.5% SCG 组的增加幅度显著小于其他组($P<0.05$),SCG 可能是通过控制冰晶的生成,抑制其对细胞结构的破坏,从而延缓促氧化剂对蛋白质的氧化,这一结果同样表明 SCG 能够有效抑制 MP 氧化降解。

最后,通过 MFI 的评估(图 5f),四组样品的 MFI 值均随着冻藏时间的延长而呈现上升趋势。这一趋势表明冰晶严重破坏了虾糜 MP,导致蛋白质降解。在冻藏期间,空白组的 MFI 值增幅最大,表明其 MP 降解程度最严重。相比之下,添加了商业抗冻剂和 0.5% SCG 的虾糜 MP 的 MFI 值在冻藏过程中相对较低。然而,1.0% SCG 组的 MFI 值高于 0.5%

SCG 组,这一现象可能是过量的 SCG 会干扰蛋白质间的正常交联作用,导致水分流失、冰晶形成、蛋白质结构被破坏,最终加速了 MP 的氧化降解及碎片化^[27]。以上结果证明 SCG 能够有效减缓冷冻虾糜 MP 的破坏与降解进程,从而保持其结构的完整性。上述结果一致表明,SCG 作为一种天然的抗冻保护剂,通过减缓巯基的氧化、抑制二硫键的生成、维持 Ca^{2+} -ATPase 的活性以及减少 MP 的碎片化等方式,有效保护 MP 的结构和功能完整性,在虾糜的冻藏过程中展现出了显著的抗氧化和抗冻的能力。

2.5 SCG 对冻藏虾糜 MP 构象与功能状态的影响

2.5.1 冻藏过程中虾糜的二级结构变化

通过圆二色谱在 190~260 nm 的范围内能够精准地揭示蛋白质分子二级结构的精细构象特征,这些特征主要包括 α -螺旋、 β -折叠、 β -转角和无规则卷曲^[37]。如图 6a、6c、6e 和 6g 所示,各组 MP 在 210 nm 与 222 nm 附近呈现出的双凹槽特征表明其存在 α -螺旋结构。由图 6b、6d、6f 和 6h 可以进一步观察得出,随着冻藏时间延长,各组 MP 中的 α -螺旋含量呈现下降趋势,与此同时, β -折叠、 β -转角和无规则卷曲的含量则不断上升。经 60 d 的冻藏处理,空白组、商业抗冻剂组、0.5% SCG 组和 1.0% SCG 组的 α -螺旋含量分别从初始的 89.30%、89.20%、86.70% 和 89.40% 显著下降至 1.3%、11.2%、21.3% 和 6.3%;无规卷曲的含量则分别从 8.10%、10.00%、10.02% 和 7.60% 大幅上升至 41.3%、80.1%、20.2% 和 42.9%。这一变化表明 MP 的二级结构在冻藏过程中遭受了一定程度的破坏。MP 的变性促使 α -螺旋结构解旋并转变为 β -折叠及无规卷曲形态,进而导致 MP 分子的紧

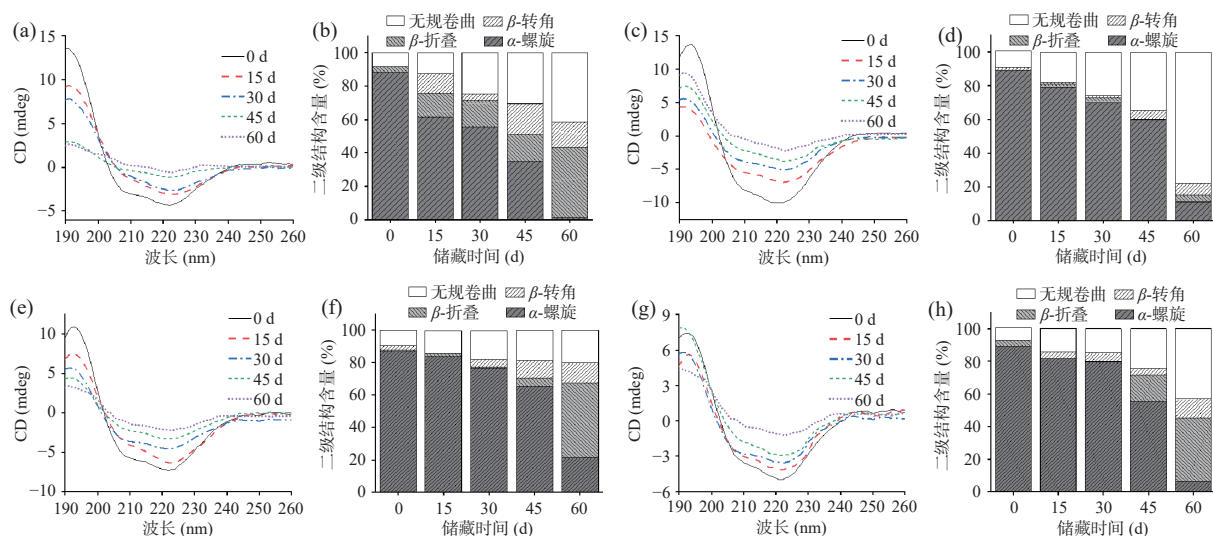


图6 冻藏过程中虾糜 MP 的二级结构变化

Fig.6 Secondary structural changes of shrimp surimi MP paste during freezing storage

注: a: 空白组圆二色谱图; b: 空白组二级结构含量; c: 商业抗冻剂组圆二色谱图; d: 商业抗冻剂组二级结构含量; e: 0.5% SCG 组圆二色谱图; f: 0.5% SCG 组二级结构含量; g: 1.0% SCG 组圆二色谱图; h: 1.0% SCG 组二级结构含量。

密性与构象稳定性急剧降低,疏水基团外露且疏水性增强,蛋白质分子间发生聚集^[38]。0.5% SCG 组的 MP 在冻藏后依然保持了相对较高的 α -螺旋含量,显著高于其他三组($P<0.05$),说明适量添加 SCG 能够有效抵御蛋白质二级结构被破坏,从而在冷冻贮藏过程中为虾糜品质提供有力保障。

2.5.2 冻藏过程中虾糜的三级结构变化 芳香族氨基酸,诸如色氨酸、酪氨酸及苯丙氨酸,是蛋白质固有荧光的重要贡献者^[39],其中色氨酸尤为显著,其荧光特性对周围微环境的极性变化异常敏感。色氨酸荧光强度的波动直接映射出微环境的细微变迁,因此,通过监测色氨酸的荧光强度变化能够精准表征蛋白质疏水结构稳定性的动态,进而洞悉蛋白质三级结构的变化^[40]。如图 7 所示,随着冻藏时间的延长,各组 MP 的最大荧光强度都呈现出了不同程度的衰减

趋势,这是由于 MP 的结构改变促进了色氨酸暴露于极性环境中。内源荧光光谱分析结果显示,位于 335 nm 处的宽带对应了色氨酸的荧光特征。经过一定时间的冻藏后,商业抗冻剂组、0.5% SCG 组以及 1.0% SCG 组的内源荧光强度均高于空白组,这一差异表明空白组 MP 的变性程度更为显著。相较于空白组与 1.0% SCG 组,0.5% SCG 处理组的荧光强度下降幅度较小,其效果与商业级抗冻剂相近。之前的研究已证实,在冻藏过程中 MP 会发生变性并伸展,导致分子内部的色氨酸残基逐渐暴露至外部的疏水环境中,进而引起内源荧光强度的降低^[41]。有研究表明色氨酸暴露于疏水环境会促进 MP 间的相互作用,加速 MP 的聚集过程。这些聚集物质可能会进一步掩盖部分非极性的芳香族氨基酸,从而减少其对荧光的吸收,导致荧光强度的进一步下降^[42]。

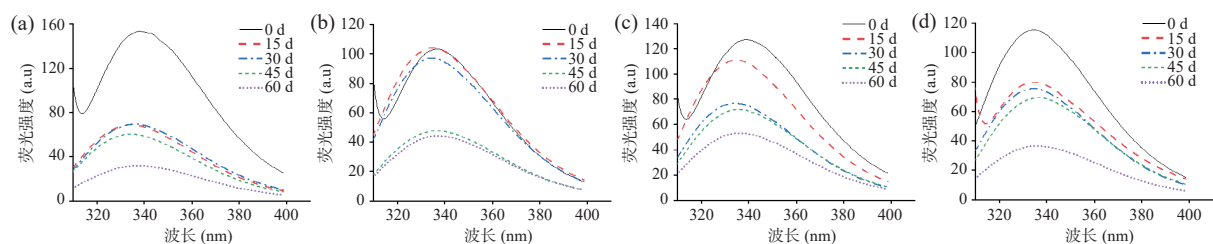


图7 冻藏过程中虾糜 MP 的荧光强度变化

Fig.7 Fluorescence intensity changes of shrimp mince MP during freezing process

注: a: 空白组; b: 商业抗冻剂组; c: 0.5% SCG 组; d: 1.0% SCG 组。

通过对巯基含量、二硫键含量以及 Ca^{2+} -ATPase 活性等关键指标的综合分析,表明 0.5% SCG 能够有效保护冷冻虾糜 MP 结构,从而维持其良好的品质。具体而言,0.5% SCG 组的冰晶含量相对较低,这得益于 SCG 所含的大量亲水性氨基酸残基,它们能够与肌原纤维蛋白(MP)中的水分子紧密结合,有效减少水分的流失并抑制冰晶的形成,从而维持了

MP 的结构稳定性。此外 SCG 通过削弱脂肪与蛋白质的氧化进程,从而有效维持虾糜的色泽和口感。综上所述,0.5% SCG 为维持虾糜品质的稳定性提供了强有力的支持,其保护效果略优于商业抗冻剂组。

3 结论

本研究聚焦于探索 SCG 作为新型抗冻剂在冻藏过程中对虾糜凝胶特性、品质变化及蛋白氧化与

结构变化的影响。相较于传统的商业抗冻剂, SCG 在延缓冰晶生长、抑制蛋白质与脂肪氧化及保持 MP 稳定性等方面具有一定的效果。添加 0.5% SCG 不仅有效提高了虾糜在冻藏过程中的持水性和弹性等物理特性, 还减缓了色泽变化, 维持了良好的感官品质。本研究不仅为虾糜制品的冷冻保护提供了新思路, 也为 SCG 在水产品抗冻剂领域的创新应用奠定了理论基础。但 SCG 对虾糜的整体冷冻保护能力仍不及商业抗冻剂组。因此, 未来的研究应聚焦于 SCG 的修饰改性以进一步提高其抗冻能力。随着研究的深入与技术的推广, SCG 有望成为一种重要的绿色抗冻剂, 在食品工业中发挥更大的作用, 进一步推动食品保鲜技术的发展。

© The Author(s) 2025. 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] 乔敏, 步营, 王金厢, 等. 响应面法优化南美白对虾即食虾滑的加工工艺[J]. 肉类研究, 2023, 37(2): 12–19. [QIAO M, BU Y, WANG J X, et al. Optimization of processing technology for instant shrimp slippery of South American white shrimp by response surface methodology[J]. Meat Research, 2023, 37(2): 12–19.]
- [2] 马德蓉, 林娜, 张俊杰, 等. 冷冻南极磷虾加工利用研究进展[J]. 海洋渔业, 2024, 46(1): 110–117. [MA D R, LIN N, ZHANG J J, et al. Research progress on processing and utilization of frozen Antarctic krill[J]. Marine Fisheries, 2024, 46(1): 110–117.]
- [3] 张诗雯, 仪淑敏, 吕柯明, 等. 水分含量对冻结金线鱼肉香肠品质的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(24): 21–26. [ZHANG S W, YI S M, LÜ K M, et al. The effect of moisture content on the quality of frozen golden thread fish sausage[J]. Food Science, 2019, 40(24): 21–26.]
- [4] LI F, WANG B, KONG B, et al. Decreased gelling properties of protein in mirror carp (*Cyprinus carpio*) are due to protein aggregation and structure deterioration when subjected to freeze-thaw cycles[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 97: 105223.
- [5] WALAYAT N, XIONG H G, XIONG Z Y, et al. Role of cryoprotectants in surimi and factors affecting surimi gel properties: A review[J]. Food Reviews International, 2020, 38(6): 1103–1122.
- [6] 陈旭, 余璐涵, 蔡茜茜, 等. 低温冷链贮藏对鱼糜凝胶化学作用力和肌原纤维蛋白结构及功能特性的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(23): 194–201. [CHEN X, YU L H, CAI Q Q, et al. Effects of low temperature cold chain storage on chemical force of surimi gel and structure and functional properties of myofibrillar protein[J]. Food Science, 2022, 43(23): 194–201.]
- [7] 刘含, 曹慧, 徐斐, 等. 不同分子质量胶原抗冻肽的抗冻性能及机理研究[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(11): 104–110. [LIU H, CAO H, XU F, et al. Study on the antifreeze properties and mechanisms of collagen antifreeze peptides with different molecular weights[J]. Food and Fermentation Industry, 2021, 47(11): 104–110.]
- [8] 谭杨, 陈晓宇, 郭文, 等. 牦牛骨胶原蛋白肽的制备及其抗冻性能研究[J]. 上海理工大学学报, 2020, 42(6): 550–557. [TAN Y, CHEN X Y, GUO W, et al. Preparation and antifreeze properties of yak bone collagen peptide[J]. Journal of Shanghai University of Technology, 2020, 42(6): 550–557.]
- [9] HOU H, LI B F, ZHAO X, et al. The effect of pacific cod (*Gadus macrocephalus*) skin gelatin polypeptides on UV radiation-induced skin photoaging in ICR mice[J]. Food Chemistry, 2009, 115(3): 945–950.
- [10] ZHANG L, LI Q, SHI J, et al. Changes in chemical interactions and gel properties of heat-induced surimi gels from silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) fillets during setting and heating: Effects of different washing solutions[J]. Food Hydrocolloid, 2018, 75: 116–124.
- [11] FIEGO D P L, SANTORO P, MACCHIONI P, et al. The effect of dietary supplementation of vitamins C and E on the α -tocopherol content of muscles, liver and kidney, on the stability of lipids, and on certain meat quality parameters of the longissimus dorsi of rabbits[J]. Meat Science, 2004, 67(2): 319–327.
- [12] 刁玉段. 直接浸渍冻结对冻藏草鱼保鲜效果的影响和机制研究[D]. 无锡: 江南大学, 2023. [DIAO Y D. Study on the effect and mechanism of direct immersion freezing on the preservation of frozen grass carp[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2023.]
- [13] LAMETSCH R, KNUDSEN J C, ERTBJERG P, et al. Novel method for determination of myofibril fragmentation post-mortem[J]. Meat Science, 2007, 75(4): 719–724.
- [14] ZOU Y, XU P, WU H, et al. Effects of different ultrasound power on physicochemical property and functional performance of chicken actomyosin[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 113: 640–647.
- [15] 汪少芸, 李晓贞, 陈旭, 等. 鱼源抗冻多肽对鱼糜肌原纤维蛋白的冻融保护作用[J]. 广东海洋大学学报, 2023, 43(1): 78–86. [WANG S Y, LI X Z, CHEN X, et al. The freeze-thaw protective effect of fish derived antifreeze peptides on fish mince myofibrillar protein[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2023, 43(1): 78–86.]
- [16] 谢晶, 程浩. 冻藏水产品蛋白质变化与控制措施研究进展[J]. 上海海洋大学学报, 2021, 30(5): 905–912. [XIE J, CHENG H. Research progress on protein changes and control measures in frozen aquatic products[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2021, 30(5): 905–912.]
- [17] LUO X, XIAO S, RUAN Q, et al. Differences in flavor characteristics of frozen surimi products reheated by microwave, water boiling, steaming, and frying[J]. Food Chemistry, 2022, 372: 131260.
- [18] LIU L, JIAO W J, XU H, et al. Effect of rapid freezing technology on quality changes of freshwater fish during frozen storage[J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 189: 115520.
- [19] KORZENIOWSKA M, CHEUNG I W Y, LI CHAN E C Y. Effects of fish protein hydrolysate and freeze-thaw treatment on physicochemical and gel properties of natural actomyosin from pacific cod[J]. Food Chemistry, 2013, 138(2): 1967–1975.
- [20] ZHU S, YU J, CHEN X, et al. Dual cryoprotective strategies for ice-binding and stabilizing of frozen seafood: A review[J]. Trends in Food Science and Technology, 2021, 111: 223–232.
- [21] ZHANG H, XIONG Y, BAKRY A M, et al. Effect of yeast β -glucan on gel properties, spatial structure and sensory characteristics of silver carp surimi[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 88: 256–264.
- [22] 袁承志. 抗冻肽调控冷冻鱼糜品质变化的作用模式及其构效关系[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2022. [YUAN C Z. The mode of action and structure activity relationship of antifreeze peptides in regulating the quality changes of frozen fish mince[D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2022.]

- [23] 周文娟. 鲢鱼酶解产物在冷冻鱼糜中的抗冻机理及其应用[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2019. [ZHOU W J. Antifreeze mechanism of hydrolyzed products of silver carp in frozen surimi and its application[D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2019.]
- [24] 张洁玲. 冻藏周期和温度波动对南美白对虾品质影响研究[D]. 天津: 天津商业大学, 2023. [ZHANG J L. Study on the effects of freezing period and temperature fluctuations on the quality of South American white shrimp[D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2023.]
- [25] KITTIPHATTANABAWON P, SRIKET C, NALINANON S, et al. Gelatin hydrolyzed by papaya latex enzymes as an alternative cryoprotectant for frozen raw Pacific white shrimp (*Penaeus vannamei*) [J]. *Food Bioscience*, 2024, 60: 104199.
- [26] 应宇斌. 鲤鱼鳞水解物对罗氏沼虾抗冻保护作用及其活性成分分析研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022. [YING Y B. Study on the antifreeze protection effect and active ingredient analysis of hydrolyzed carp scales on *Macrobrachium rosenbergii*[D]. Hangzhou, Zhejiang University, 2022.]
- [27] 张晓顿. 鱼糜加工副产物水解物改善鱼糜品质及机制研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2022. [ZHANG X D. Study on the improvement of fish mince quality and mechanism by hydrolysis products of fish mince processing by-products[D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2022.]
- [28] SHI L, XIONG G, YIN T, et al. Effects of ultra-high pressure treatment on the protein denaturation and water properties of red swamp crayfish (*Procambarus clarkia*) [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 133(1): 110124.
- [29] 仪淑敏, 叶贝贝, 张诗雯, 等. 菊粉对冻藏鲢鱼鱼糜肌原纤维蛋白抗冻性的影响[J]. *食品科学*, 2019, 40(12): 16–21. [YI S M, YE B B, ZHANG S W, et al. The effect of inulin on the frost resistance of myofibrillar protein in frozen silver carp mince[J]. *Food Science*, 2019, 40(12): 16–21.]
- [30] 欧帅, 赵峰, 邹朝阳, 等. 不同冻结方式对大菱鲆鱼片冻藏过程中品质变化的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(24): 188–195. [OU S, ZHAO F, ZOU C Y, et al. The effect of different freezing methods on the quality changes of turbot fillet during freezing storage[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2019, 45(24): 188–195.]
- [31] 张海燕, 吴燕燕, 李来好, 等. 鲈鱼保鲜加工技术研究现状[J]. *广东海洋大学学报*, 2019, 39(4): 115–122. [ZHANG H Y, WU Y Y, LI L H, et al. Current status of research on preservation and processing technology of sea bass[J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2019, 39(4): 115–122.]
- [32] 陈诺. 冷冻南美白对虾虾糜加工关键技术及凝胶强化研究[D]. 无锡: 江南大学, 2023. [CHEN N. Study on the key technology of frozen shrimp surimi processing and gel strengthening[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2023.]
- [33] 李桢桢. 冷链流通中温度波动对南美白对虾色泽和质构的影响及其品质调控[D]. 上海: 上海海洋大学, 2023. [LI Z Z. The effect of temperature fluctuations in cold chain circulation on the color and texture of South American white shrimp and its quality control [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2023.]
- [34] 罗翌元, 陈梁, 齐贺, 等. 不同添加物结合真空渗透处理对冻藏虾仁肌原纤维蛋白稳定性的影响[J]. *食品科学*, 2024, 45(4): 35–41. [LUO Y Y, CHEN L, QI H, et al. The effect of different additives combined with vacuum infiltration treatment on the stability of frozen shrimp myofibrillar protein[J]. *Food Science*, 2024, 45(4): 35–41.]
- [35] CHEN X, WU J, CAI X, et al. Production, structure-function relationships, mechanisms, and applications of antifreeze peptides[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2021, 20(1): 542–562.
- [36] 朱士臣, 俞杰航, 金燕, 等. 鱼鳞明胶对鱼糜肌原纤维蛋白的冷冻保护作用及其机制[J]. *食品科学*, 2022, 43(24): 16–24. [ZHU S C, YU J H, JIN Y, et al. Cryoprotective effect and mechanism of fish scale gelatin on myofibrillar protein in fish mince[J]. *Food Science*, 2022, 43(24): 16–24.]
- [37] 罗辉, 杨波, 李亚蕾, 等. 宰后成熟期间能量物质、pH值和肌原纤维小片化指数对秦川牛肉嫩度的影响及其机理[J]. *食品科学*, 2022, 43(11): 171–179. [LUO H, LI B, LI Y L, et al. Effect and mechanism of energy substances, pH and myofibril fragmentation index on beef tenderness of Qinchuan cattle during postmortem ageing[J]. *Food Science*, 2022, 43(11): 171–179.]
- [38] 宦海珍. 秘鲁鲑鱼解冻过程中蛋白质氧化介导的保水性机制研究[D]. 锦州: 渤海大学, 2019. [HUAN H Z. Study on the water retention mechanism mediated by protein oxidation during the thawing process of Peruvian squid[D]. Jinzhou: Bohai University, 2019.]
- [39] AN W, DU J, LIU L, et al. SA-SI treatment: A potential method to maintain the quality and protein properties on mackerel (*Pneumatophorus japonicus*) during chilling storage[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2022, 15(7): 1603–1614.
- [40] 谢晨, 熊泽语, 李慧, 等. 金针菇多糖对三文鱼片冻藏期间品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(22): 178–183. [XIE C, XIONG Z Y, LI H, et al. The effect of FVP on the quality of salmon slices during freezing storage[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2021, 47(22): 178–183.]
- [41] 侯利杰, 张泽, 申炳俊, 等. 分子对接和荧光光谱法研究保泰松与人血清白蛋白的相互作用及机制[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2021, 44(6): 131–137. [HOU L J, ZHANG Z, SHEN B J, et al. Molecular docking and fluorescence spectroscopy study on the interaction and mechanism between prednisone and human serum albumin[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2021, 44(6): 131–137.]
- [42] WANG K Q, LUO S Z, ZHONG X Y, et al. Changes in chemical interactions and protein conformation during heat-induced wheat gluten gel formation[J]. *Food Chemistry*, 2017, 214: 393–399.