

离子强度对南极磷虾肉保水性及其肌原纤维蛋白特性的影响

刘晓芳, 姜鹏飞, 杜晓平, 傅宝尚, 尚珊, 祁立波

Effects of Ionic Strength on Water-holding Capacity and Properties of Myofibrillar Protein of Antarctic Krill Meat

LIU Xiaofang, JIANG Pengfei, DU Xiaoping, FU Baoshang, SHANG Shan, and QI Libo

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024030388>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

煮制压力和保压时间对鸡肉肌原纤维蛋白结构的影响

Effect of Cooking Pressure and Holding Time on the Structure of Chicken Myofibrillar Protein

食品工业科技. 2024, 45(10): 25-31 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023050136>

氧化及不同离子强度下猪肉肌原纤维蛋白结合风味物质的研究

Effects of Oxidation and Different Ionic Environment on the Binding of Pork Myofibrillar Protein to Flavor Substances

食品工业科技. 2022, 43(23): 35-41 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022010139>

不同蛋白粉对南极磷虾混合虾糜凝胶特性的影响

Effects of Different Protein Powders on Gelation Properties of Mixed Shrimp Mince of Antarctic Krill

食品工业科技. 2023, 44(1): 87-95 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022030258>

不同浓度丁香酚对肌原纤维蛋白结构和乳液凝胶特性的影响

Effects of Different Concentrations of Eugenol on the Structure and Emulsion Gel Properties of Myofibrillar Protein

食品工业科技. 2025, 46(1): 144-151 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024010299>

冻融对冷藏藏羊肉保水性及蛋白氧化和溶解特性的影响

Effects of Repeated Freezing-thawing on Water Holding Capacity, Protein Oxidation and Dissolution Characteristics of Tibetan Mutton during Chilled Storage

食品工业科技. 2021, 42(19): 21-28 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020120148>

超声处理对鲈鱼肌原纤维蛋白结构和功能特性的影响

Effect of Ultrasonic Treatment on the Structure and Functional Properties of Myofibrillar Protein in Sea Bass

食品工业科技. 2022, 43(17): 95-103 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021120027>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

刘晓芳, 姜鹏飞, 杜晓平, 等. 离子强度对南极磷虾肉保水性及其肌原纤维蛋白特性的影响 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(6): 64–74.
doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024030388

LIU Xiaofang, JIANG Pengfei, DU Xiaoping, et al. Effects of Ionic Strength on Water-holding Capacity and Properties of Myofibrillar Protein of Antarctic Krill Meat[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(6): 64–74. (in Chinese with English abstract).
doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024030388

· 研究与探讨 ·

离子强度对南极磷虾肉保水性及其肌原纤维蛋白特性的影响

刘晓芳¹, 姜鹏飞¹, 杜晓平², 傅宝尚¹, 尚 珊¹, 祁立波^{1,*}

(1.大连工业大学食品学院, 海洋食品加工与安全控制全国重点实验室, 国家海洋食品工程技术研究中心, 辽宁大连 116034;

2.辽渔集团有限责任公司, 辽宁大连 116000)

摘要:为改善南极磷虾肉水分易损失, 质地较硬等问题, 通过测定离心损失、水分分布、质构特性、肌原纤维断裂指数 (Myofibril Fragmentation Index, MFI)、蛋白质表面疏水性、蛋白质组成和蛋白质二级结构等指标, 研究不同离子强度的浸泡液 (0.8、0.9、1.0、1.1 mol/L) 和浸泡时间 (1、2、4、6 h) 对南极磷虾保水性和肌原纤维蛋白特性的影响。结果表明, 随离子强度的增加, 虾肉的蒸煮损失、离心损失和硬度先下降后升高, 不易流动水增加, 均显著优于对照组 ($P<0.05$); 在同一离子强度下, 虾肉的保水效果在 2 h 达到最佳, 相比对照组, 1.0 mol/L 浸泡液处理组的虾肉其弹性从 0.76 增加到 0.98, 硬度从 241.99 g 下降到 102.66 g; 且虾肉的肌原纤维断裂指数达到最大, 为 11.43; 蛋白质表面疏水性从 9.85 μg 下降到 1.83 μg 。在 2 h 浸泡时间下, 肌动蛋白含量和 β -折叠相对含量随着离子强度的增加呈先升高后降低的趋势; 过高的离子强度 (1.1 mol/L) 会使蛋白质出现不同程度的聚集, 肌纤维组织破坏较为严重, 不利于形成良好的保水效果。结合感官评定, 离子强度 1.0 mol/L、浸泡时间为 2 h 时能够改善南极磷虾的保水特性, 可为南极磷虾虾肉的加工提供理论依据。

关键词:南极磷虾, 离子强度, 肌原纤维蛋白, 蛋白质二级结构, 保水性

中图分类号: S985.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)06-0064-11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024030388



本文网刊:

Effects of Ionic Strength on Water-holding Capacity and Properties of Myofibrillar Protein of Antarctic Krill Meat

LIU Xiaofang¹, JIANG Pengfei¹, DU Xiaoping², FU Baoshang¹, SHANG Shan¹, QI Libo^{1,*}

(1.School of Food Science and Technology, Dalian Polytechnic University, SKL of Marine Food Processing & Safety Control, National Engineering Research Center of Seafood, Dalian 116034, China;

2.Liao Yu Group Co., Ltd., Dalian 116000, China)

Abstract: To address the issues of fluid loss and tough texture in Antarctic krill meat, the impact of soaking times and solutions of varying ionic strengths (0.8, 0.9, 1.0, and 1.1 mol/L) on the properties of myofibrillar proteins (MPs) and water-holding capacity of Antarctic krill myofibrillar protein (1, 2, 4, and 6 h) was investigated in aspects of centrifugal loss, water distribution, hardness, myofibril fragmentation index (MFI), protein surface hydrophobicity, protein composition and protein secondary structure. Results demonstrated that with an increase in ionic strength, there was an initial decrease followed by an increase in cooking loss, centrifugal loss, and hardness, along with an increase in immobilized water content, superior to the control group ($P<0.05$). Under the same ionic strength conditions, the water-holding capacity of krill

收稿日期: 2024-03-26

基金项目: 国家自然科学基金 (32022067)。

作者简介: 刘晓芳 (2000–), 女, 硕士研究生, 研究方向: 水产品加工, E-mail: 2517462574@qq.com。

* 通信作者: 祁立波 (1974–), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 农 (水) 产品精深加工, E-mail: 905390442@qq.com。

meat was demonstrated to be optimal after 2 h soaking. When the krill meat was immersed in a soaking solution with a concentration of 1.0 mol/L for 2 h, the springiness increased from 0.76 to 0.98, and the hardness reduced from 241.99 g to 102.66 g. The myofibril fragmentation index of krill meat was the highest, measuring 11.43. The protein surface hydrophobicity dropped from 9.85 μg to 1.83 μg . The protein content in β -sheet structures exhibited an initial increase followed by a subsequent drop as the ionic strength increased after a 2 h immersion period. High ionic strength of 1.1 mol/L leads to excessive protein aggregation, resulting in severe damage to the muscle fiber tissue and negatively impacting its water-holding ability. Combined with sensory evaluation, the immersion solutions with ionic strength of 1.0 mol/L and soaking duration of 2 h improved the water-retentive capacity of Antarctic krill meat, establishing a theoretical guideline for Antarctic krill meat processing.

Key words: Antarctic krill; ionic strength; myofibrillar protein; protein secondary structure; water-holding capacity

南极磷虾(Antarctic Krill)是南极海域重要的物种之一,不仅有助于维持南极的生态系统,而且还是一个巨大的动物蛋白库^[1]。南极磷虾肉形体小,热处理会使南极磷虾肉失水严重和硬度增加,造成品质劣化,感官接受度差^[2]。肌原纤维蛋白是肌肉中的主要蛋白质,与其保水特性密切相关,因此有必要研究保水剂对肌原纤维蛋白的影响^[3]。无磷盐类保水剂主要有 Na_2CO_3 、 NaHCO_3 、柠檬酸钠、乳酸钠和 NaCl 等,这类保水剂可增加肌肉的 pH 和离子强度,使其偏离蛋白质的等电点来提高肌肉的保水能力。其中柠檬酸钠能螯合金属离子,使其肌肉蛋白结构发生松弛来提高其持水能力^[4-5]。王荣等^[6]使用 0.8% 柠檬酸钠、0.4% NaHCO_3 和 0.4% Na_2CO_3 复合处理冷冻鲷鱼鱼排,能够显著降低鱼肉的解冻和蒸煮损失率。目前关于南极磷虾的研究主要在南极磷虾油和肽等方面,而对于南极磷虾肉保水特性和物化品质研究较少。

肌原纤维蛋白(Myofibrillar Protein, MP)是肉类加工的主要功能性蛋白^[7]。介质中的离子种类和强度、pH 和热加工条件等因素都能影响其功能,离子强度(Ionic Strength, IS)是一个主要因素,与保水特性和凝胶的变化密切相关^[8]。然而 pH 也会影响肌肉蛋白质净电荷产生变化,随之其保水性发生改变^[9]。Zhang 等^[10]提出, Cl^- 能选择性地结合到肌球蛋白细丝的疏水区域,会导致其持水性的变化。在肉类体系中添加相对较高的离子强度(含 1.0~1.5 mol 的 NaCl),可增加其肌肉组织的保水能力^[11]。而目前离子强度对南极磷虾保水特性的影响鲜有研究。

因此,本研究探讨不同离子强度(0.8、0.9、1.0、1.1 mol/L)浸泡(1、2、4、6 h)对南极磷虾的 pH、持水力、蒸煮损失、水分分布和微观组织结构的影响来

探究南极磷虾肉保水特性的变化;通过测定肌原纤维断裂指数和表面疏水性、蛋白质组成和蛋白质二级结构的变化来进一步探究离子强度对南极磷虾肌原纤维蛋白特性的变化,为改善南极磷虾肉的加工特性提供其理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

碳酸钠(食品级) 河南圣斯德实业有限公司; 碳酸氢钠(食品级) 浙江一诺生物科技有限公司; 柠檬酸钠(食品级) 河南万邦化工科技有限公司; 氯化钠 中盐国本盐业有限公司; 南极磷虾肉 大连辽渔远洋食品有限公司; 戊二醛固定液(2.5%)、无水乙醇、磷酸二氢钠、酒石酸钾钠、磷酸氢二钠、氯化钠、溴酚蓝 均为分析纯,购于国药化学试剂有限公司。

TA.XT.plus 质构仪 英国 SMS 公司; Frontier 傅里叶变换红外光谱仪 日本铂金埃尔默仪器有限公司; LC-1.0 冷冻干燥机 沈阳航空信阳速冻厂; CP100NX 高速冷冻离心机 株式会社日立制作所; M1N1 MR 核磁共振分析仪 上海纽迈电子科技有限公司; JSM-7800F 热场发射扫描电镜 日本电子株式会社。

1.2 实验方法

1.2.1 样品制备 冻藏南极磷虾肉冰箱 4 $^{\circ}\text{C}$ 过夜解冻,如表 1 所示,根据离子强度计算公式
$$\text{IS} = \frac{1}{2} \left[C_{(\text{阴离子})} \cdot Z^2 + C_{(\text{阳离子})} \cdot Z^2 \right]$$
 计算出不同组别的离子强度(IS),C 为浸泡液中离子的质量摩尔浓度(mol/L),Z 为浸泡液中离子所带的电荷数。按照料液比=1:2.5(g/g)的比例用去离子水分别制备浸泡液,称取一定质量的南极磷虾肉置于浸泡液中浸泡,4 $^{\circ}\text{C}$ 环境下浸泡时间分别为 1、2、4 和 6 h,以未浸泡为对照

表 1 不同组别中南极磷虾浸泡液的离子强度(IS)

Table 1 Ionic strength of Antarctic krill immersion solution in different groups

组别	浸泡液组成	离子强度(IS)(mol/L)
C	—	0
ST1	0.6% Na_2CO_3 、0.6% NaHCO_3 、0.8%柠檬酸钠	0.8
ST2	0.6% Na_2CO_3 、0.6% NaHCO_3 、0.8%柠檬酸钠、0.5% NaCl	0.9
ST3	0.6% Na_2CO_3 、0.6% NaHCO_3 、0.8%柠檬酸钠、1.0% NaCl	1.0
ST4	0.6% Na_2CO_3 、0.6% NaHCO_3 、0.8%柠檬酸钠、1.5% NaCl	1.1

组别。浸泡完成后将南极磷虾肉水分沥干,置于沸水中漂烫 15 s,放凉至室温后备用。

1.2.2 pH 测定 将哈斯等^[12]的方法进行适当修改。称 10 g 处理好的样品,加入 100 mL 的蒸馏水混匀后 6000 r/min 匀浆 1 min,4 ℃ 条件下静置时间为 1 h,用 pH 计测定其值。

1.2.3 离心损失率测定 根据张杰等^[13]的方法进行适当的修改,准确称取 5.00 g 的南极磷虾样品用不同离子强度的浸泡液在 4 ℃ 环境下进行浸泡,料液比均为 1:2.5,浸泡时间分别为 1、2、4 和 6 h,未浸泡的为对照组,浸泡结束后,进行冲洗后再放入沸水中漂烫 15 s,待恢复到室温时,用滤纸仔细包好放入 10 mL 离心管,4 ℃ 条件下 5000 r/min 离心 15 min,南极磷虾肉离心损失率按以下公式进行计算。

$$\text{离心损失率}(\%) = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \quad \text{式 (1)}$$

式中: m_1 , 初始南极磷虾肉的质量, g; m_2 , 离心后的质量, g。

1.2.4 蒸煮损失率测定 根据吴亮亮等^[14]的方法进行适当的修改,称取 10 g 的南极磷虾肉在 4 ℃ 环境下不同离子强度的浸泡液中浸泡,浸泡后的南极磷虾装于蒸煮袋中,置于 90 ℃ 恒温水浴锅,加热 30 min 后取出待恢复室温后,用滤纸吸去南极磷虾肉表面的水分称重。计算公式如下。

$$\text{蒸煮损失率}(\%) = \frac{\text{加热前的质量(g)} - \text{加热后的质量(g)}}{\text{加热前的质量(g)}} \times 100 \quad \text{式 (2)}$$

1.2.5 水分分布测定 根据 Shao 等^[15]的方法进行适当的修改。用不同离子强度浸泡不同时间的南极磷虾肉放入沸水中漂烫 15 s,放凉至室温后,再放入低场核磁成像分析仪中,再用 CP-MG 序列采集样品横向弛豫信号。信号采集参数: 90°和 180°脉冲时间分别为 10 μs 和 50 μs,重复采样等待时间 3000 ms, RG1 为 10, DRG1 为 1, PRG 为 2, NECH 为 3500, NS 为 8。测定后每个样品进行反演,进而得到样品

的弛豫时间与相关的峰面积比例,即弛豫时间可分为 T_{2b} 、 T_{21} 和 T_{22} , 与之相关的峰面积比例为 P_{2b} 、 P_{21} 和 P_{22} 。

1.2.6 全质构分析测定 依据 Lobo 等^[16]的方法做了适当修改。称取浸泡完质量一致的南极磷虾肉,将虾肉装入盒中,保持虾肉高度一致,采用 TA.XT.plus 物性分析仪,利用平底柱头 P/0.5(直径为 5 mm),对南极磷虾肉进行 2 次 TPA 模式压缩测试,测试条件为:测试前速度为 2 mm/s,测试速度为 2 mm/s,测试后速度 5 mm/s,压缩程度是 50%,连续两次下压,平行测定六次。

1.2.7 感官评价 将 Chen 等^[17]的方法稍作修改,选择 10 名经验较为丰富的感官人员进行对色泽、口感、组织弹性和形态以及整体接受度进行感官评价,具体评分标准见表 2,其中 0 表示未感受到该属性,数值越大代表感受该属性越强烈。

1.2.8 苏木精-伊红染色 根据陈礼福等^[18]的方法进行修改。在 4 ℃ 条件下,将处理好的磷虾肉置于 4% 的戊二醛溶液中固定 24 h。取出已固定好的虾肉组织进行包埋切片。其切片进行苏木精-伊红染色处理,用显微镜观察虾肉组织结构变化。

1.2.9 微观结构 根据 Hu 等^[19]的方法稍作修改。选择样品规则一致的虾肉,置于 2.5% 戊二醛(pH7.4)固定 2 d,用浓度为 0.1 mol/L 的磷酸盐缓冲溶液清洗 3 次,分别使用浓度为 40%、50%、70%、80%、90%、100% 的乙醇溶液进行依次梯度洗脱 15 min,洗脱完的南极磷虾肉进行冷冻干燥,喷金镀膜,在扫描电子显微镜进行微观结构扫描。

1.2.10 肌原纤维蛋白提取 参照 Sun 等^[20]的方法进行适当修改。将大约 5 g 南极磷虾肌肉样品放入 40 mL 的 0.1 mol/L 磷酸缓冲溶液(pH7.0,含有 0.1 mol/L 的 NaCl、2 mmol/L 的 $MgCl_2$ 和 1 mmol/L 的 EGTA)中,将样品放在冰浴中 10000 r/min 均质 1 min。4 ℃ 条件下 8500 r/min 离心 10 min,以上重复两次,去除上清液,然后将 8 倍体积(含 0.6 mol/L NaCl) pH 为 7.0 的磷酸缓冲液加入到沉淀中,

表 2 不同离子强度浸泡南极磷虾肉感官评价

Table 2 Sensory evaluation of Antarctic krill meat soaked with different ionic strength

指标	感官方式	评分标准	分值
色泽 (20%)	观察虾肉外观	色泽均匀一致,颜色呈粉色 色泽较均匀,颜色呈淡粉色 色泽不均匀,颜色呈白色	15~20 7~14 0~6
组织弹性 (20%)	用手轻轻按压,感受虾肉的回弹性	紧实富有弹性 较有弹性 无弹性	15~20 7~14 0~6
组织形态 (20%)	观察虾肉截面组织外观	肌肉组织紧密 肌肉组织较紧密,但不松散 肌肉组织不紧密,松散	15~20 7~14 0~6
口感 (20%)	通过咀嚼 10 s 左右感受熟虾肉适口、粘聚性	弹性好,咀嚼性好,多汁性好 弹性一般,咀嚼性一般,多汁性一般 没有弹性,发柴,多汁性差	15~20 7~14 0~6
整体接受度 (20%)	综合评价	可接受度高 可接受度一般 不接受	15~20 7~14 0~6

10000 r/min 均质 1 min 后,放入 4 ℃ 冰箱静置 1 h, 8500 r/min 离心 20 min。其上清液为南极磷虾肌原纤维蛋白溶液,将牛血清白蛋白(Bovine Serum Albumin, BSA)作为标准蛋白浓度,采用双缩脲法测定上清液浓度。

1.2.11 肌原纤维断裂指数 实验参照 Cheng 等^[21]的方法并根据实验需要做了适当修改。将所提取肌原纤维蛋白浓度稀释至 0.5 mg/mL,吸取 200 μ L 稀释液用酶标仪测定其在 540 nm 下的吸光值(A₅₄₀)。

$$\text{MFI} = A_{540} \times 200 \quad \text{式 (3)}$$

式中: MFI 表示肌原纤维断裂指数; A₅₄₀ 表示 540 nm 下的吸光值; 200=100/C(蛋白质浓度, mg/mL)。

1.2.12 蛋白质表面疏水性 参照唐欣颖等^[22]方法做了适当修改。在室温下,将 0.2 mL 的 1 mg/mL 溴酚蓝(Bromophenol Blue, BPB)溶液加入到 1 mL 肌原纤维蛋白溶液(1 mg/mL)中充分混合。混合溶液在 4 ℃ 6500 r/min 离心 10 min。取上清液 200 μ L 稀释 10 倍,595 nm 波长下测定吸光度值,用 pH7.0 的磷酸缓冲液(10 mmol/L)代替蛋白溶液的吸光度值为空白对照吸光度。肌原纤维蛋白表面疏水性可用溴酚蓝结合量(μ g)来表示,使用以下公式计算。

$$\text{溴酚蓝结合量}(\mu\text{g}) = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 200 \quad \text{式 (4)}$$

式中: A₀, 空白对照吸光度; A₁, 样品吸光度。

1.2.13 十二烷基硫酸钠-聚丙烯酰胺凝胶电泳 参照邓少颖等^[23]的方法做了适当修改,称取冻干后的 5 mg 虾肉,加入 1 mL 5% 十二烷基硫酸钠(Sodium Dodecyl sulfate, SDS)溶液和 0.01 mL β -巯基乙醇混合振荡过夜,85 ℃ 水浴 60 min,上样前离心 15 min,采用 10% 丙烯酰胺的分离胶和 5% 的浓缩胶。上样量为 15 μ L。浓缩胶中采用恒压 80 V,进入分离胶后恒压 120 V,直至电泳结束。用考马斯亮蓝过夜染色,进行脱色和拍照。

1.2.14 蛋白质二级结构 根据 Yang 等^[24]的方法做了适当修改,将制备好的南极磷虾肉进行冷冻干燥,冻干后的样品称取 1 mg,加入 100 mg 无水溴化钾进行充分混合,加压后形成溴化钾压片。利用傅里叶变换红外光谱仪在波数 4000~400 cm^{-1} 内扫描,得到红外光谱。其蛋白质二级结构相对含量的变化使用 OMNIC 软件分析。

1.3 数据处理

实验平行测定 3 次,测定结果表示为平均值 \pm 标准差。采用 IBM SPSS 统计软件进行显著性分析($P < 0.05$, 差异显著),并采用 Origin 2021 软件进行绘制分析图表。

2 结果与分析

2.1 离子强度对南极磷虾肉 pH 的影响

南极磷虾蛋白质的等电点为 pH4.6,此时蛋白质

分子因没有相同电荷的排斥而凝聚沉降^[25]。不同离子强度和浸泡时间对南极磷虾 pH 的影响如图 1 所示,由图 1 可知,不同离子强度处理的南极磷虾肉 pH 与 C 组具有显著差异($P < 0.05$),pH 随浸泡时间的增加呈先上升后趋于平缓的趋势,且在 2~4 h 无显著性差异($P > 0.05$)。在浸泡 2 h 时,ST1 处理组、ST2 处理组、ST3 处理组和 ST4 处理组 pH 均显著提高,分别可达到 9.84、9.87、9.89 和 9.96,较 pH 为 7.47 的对照组分别提高了 2.37、2.40、2.42 和 2.59。pH 随离子强度的增加呈上升趋势,这可能是柠檬酸钠、Na₂CO₃、NaHCO₃ 制备的浸泡液呈碱性,进而增大了虾肉的 pH。

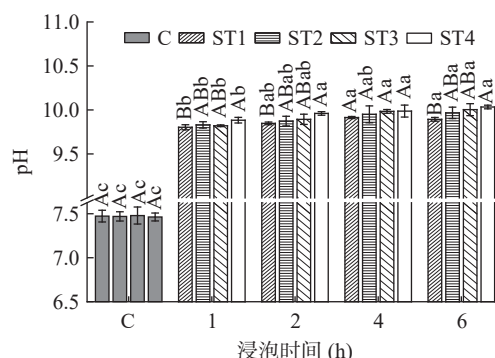


图 1 离子强度和浸泡时间对南极磷虾 pH 影响

Fig.1 Effects of ionic strength and soaking time on the pH of Antarctic krill

注:不同小写字母表示同一离子强度下不同浸泡时间差异显著($P < 0.05$);不同大写字母表示同一时间点不同离子强度差异显著($P < 0.05$),图 2~图 3、图 5、图 9~图 10 同。

2.2 离子强度对南极磷虾肉离心损失率的影响

如图 2 所示,经过处理的南极磷虾肉与 C 组相比离心损失显著减少($P < 0.05$)。ST1 处理组离心损失随浸泡时间的增加先下降($P < 0.05$)后趋于平缓,离心损失率下降的原因可能是 Na₂CO₃、NaHCO₃、柠檬酸钠可以提高浸泡液的 pH,使其呈碱性具有缓冲作用,另一方面可能是浸泡液中其离子态可以螯合金属离子,增大肌肉蛋白质之间的排斥力,使得离心损失率下降^[13]。ST2 处理组、ST3 处理组和 ST4 处理组,随浸泡时间增加,离心损失率呈现先减少后增加

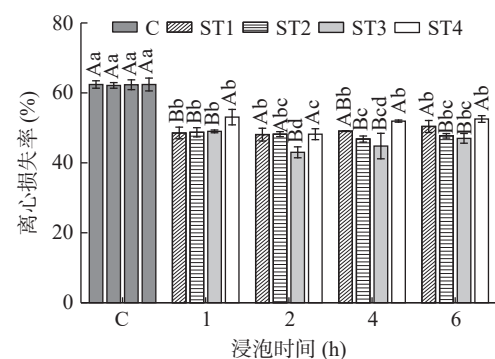


图 2 离子强度和浸泡时间对南极磷虾离心损失率影响

Fig.2 Effects of ionic strengths and soaking time on centrifugal loss rate of Antarctic krill

的趋势($P<0.05$)。ST2 处理组离心损失在 4 h 达到最低,为 46.80%。ST3 和 ST4 处理组离心损失在 2 h 达到最小,分别为 43.00% 和 48.20%。离心损失率减少可能是由于 Cl^- 与肌球蛋白丝的优先结合,因为 Cl^- 可能不仅会被吸收到肌球蛋白丝的外表面,还会被吸收到肌球蛋白丝的空隙中,使其持水能力增加^[26]。浸泡时间 2 h 后离心损失率升高,可能是蛋白质吸收自由水能力达到饱和,离心损失率升高。同一浸泡时间下,离心损失率随离子强度的增加呈先下降后上升的趋势($P<0.05$),离心损失率下降的原因可能是 Cl^- 与蛋白质上的阳离子侧基(R-NH_3^+)的强亲和力结合,降低了蛋白质之间的静电吸引力,从而避免了蛋白质聚集,使其持水性增加^[27]。

2.3 离子强度对南极磷虾肉蒸煮损失率的影响

不同离子强度和浸泡时间对南极磷虾蒸煮损失的影响如图 3,由图 3 可知,经过处理的南极磷虾肉与 C 组蒸煮损失率相比显著减少($P<0.05$),蒸煮损失下降表明了不同离子强度浸泡处理在一定程度上降低了南极磷虾肉的蒸煮损失,提高其持水能力^[27]。ST1 处理组随浸泡时间增加,蒸煮损失率呈先下降后趋于平缓($P<0.05$),ST2、ST3 和 ST4 处理组浸泡处理后蒸煮损失率呈先下降后上升($P<0.05$),各处理组浸泡 2 h 蒸煮损失率最少,分别为 37.53%、36.70%、31.60% 和 36.16%。各处理组浸泡时间延长至 4 h 和 6 h,蒸煮损失率显著增加,但均优于 C 组的蒸煮损失率($P<0.05$)。在同一浸泡时间内,不同离子强度

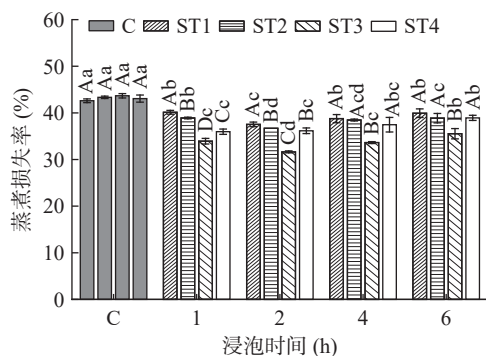
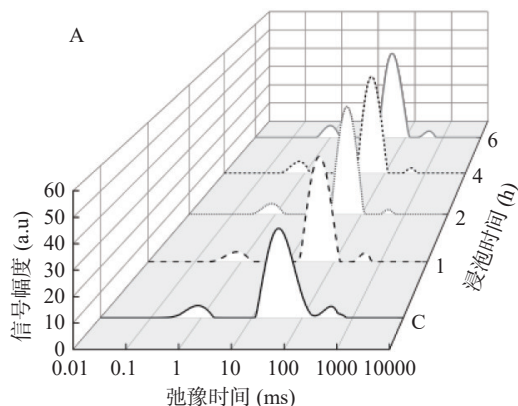


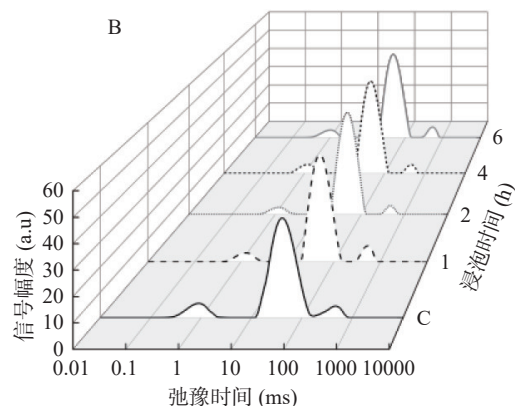
图 3 离子强度和浸泡时间对南极磷虾蒸煮损失率的影响
Fig.3 Effects of ionic strength and soaking time on cooking loss rate of Antarctic krill



浸泡的蒸煮损失率呈先下降后上升的趋势($P<0.05$), ST3 处理组浸泡 2 h 时蒸煮损失率达到最低,为 31.60%。该结果表明,适当的盐含量有利于提高肉制品的保水性,这可能是由于在 NaCl 的作用下,增大了离子强度,使得蛋白质静电排斥力增加,导致肌原纤维发生膨胀,进而增加了蛋白质的水合作用^[14]。虾肉在浸泡过程中,较高的 pH 能增加蛋白质的净负电荷,进而增强其蛋白分子间静电斥力和水合能力,最终提高其水分含量^[28-29]。

2.4 离子强度对南极磷虾肉水分分布的影响

图 4 显示了不同离子强度和浸泡时间处理下南极磷虾在 0.01~10000.00 ms 的 T_2 弛豫特征峰的 3 个主峰,这三个峰代表了南极磷虾肉中 3 种不同状态水,其中, T_{2b} (0.01~10 ms) 表示结合水, T_{21} (10~100 ms) 表示不易流动水; T_{22} (100~1000 ms) 表示自由水。在 T_2 弛豫特征图中,弛豫时间越短与水分流动性成正比,即弛豫时间越短,结合水与体系结合的更紧密,使得保水性越好^[30]。不同离子强度和浸泡时间对南极磷虾水分分布的影响如图 4 所示,从图 4 可以看出不易流动水的弛豫时间 T_{21} 显著增大,且随着浸泡时间的增大而持续向右偏移,不易流动水的峰末端逐渐向自由水的峰起点靠拢,这说明经过不同离子强度浸泡处理的南极磷虾肉中细丝间距膨胀到最大值,因此暴露出更多的大分子作为水结合的位置,这部分水的自由度和流动性显著增加^[31]。从表 3 峰面积比例上看,经过不同离子强度浸泡处理可以使南极磷虾中的自由水向不易流动水和结合水转化。ST1 处理组、ST2 处理组、ST3 处理组和 ST4 处理组与 C 组相比不易流动水显著增加,各处理组随着浸泡时间的增加,不易流动水的峰面积比例呈先增加后减小的趋势($P<0.05$)。当浸泡时间达到 2 h 时,峰面积比例最大,分别为 89.97%、90.57%、92.28% 和 92.10%。一部分可能是由于 Cl^- 可以结合肌肉蛋白质中带正电荷的基团,增强了蛋白质分子的静电排斥力,降低了肌原纤维蛋白分子间的内聚力,增加了结合不易流动水的能力,这能导致肌肉纤维的松弛,进而提高其保水性^[15]。还可能是因为较高的 pH 会增强肌肉蛋白质静电效应,促进肌肉中蛋白质与水之间更强的结合^[32]。



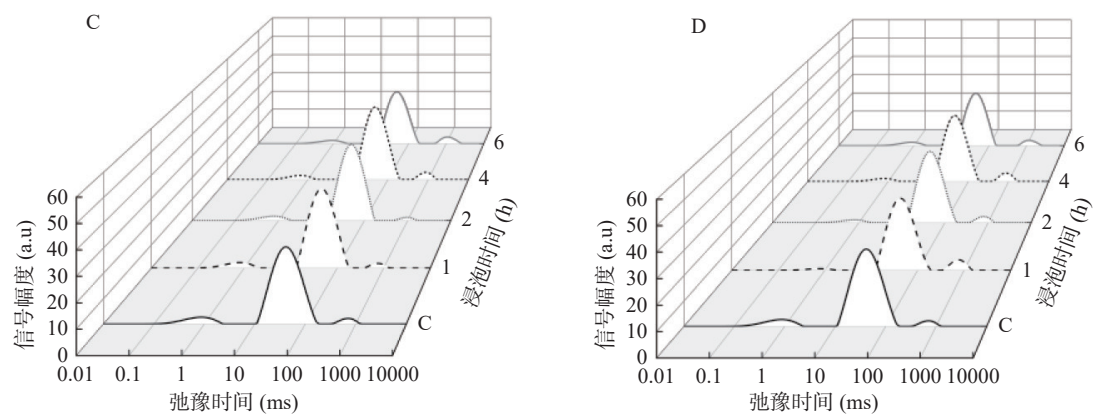


图 4 离子强度和浸泡时间对南极磷虾水分迁移的影响

Fig.4 Effects of ionic strength and soaking time on water migration of Antarctic krill

注: A~D 依次为 ST1、ST2、ST3、ST4 处理组。

表 3 离子强度和浸泡时间对南极磷虾水分含量的影响

Table 3 Effects of ionic strength and soaking time on the moisture content of Antarctic krill

水分相对百分含量	对照组(C)	处理组	浸泡时间(h)			
			1	2	4	6
P _{2b} (%)	9.15±0.91 ^{Ba}	ST1	8.33±0.48 ^{Aa}	8.30±0.26 ^{Aa}	9.37±0.24 ^{Aa}	9.41±1.08 ^{Aa}
	11.23±0.41 ^{Aa}	ST2	6.40±0.37 ^{Bbc}	5.63±0.97 ^{Bc}	7.50±0.67 ^{Bb}	7.36±0.20 ^{Bb}
	7.84±0.77 ^{Ca}	ST3	5.87±0.86 ^{Bb}	5.73±0.53 ^{Bb}	4.97±0.40 ^{Cb}	5.48±1.93 ^{Cb}
	7.14±0.74 ^{Ca}	ST4	1.98±0.59 ^{Cd}	3.52±0.12 ^{Cc}	3.84±0.35 ^{Dc}	5.83±0.25 ^{Cb}
P ₂₁ (%)	85.26±0.64 ^{Bd}	ST1	88.39±0.41 ^{Bb}	89.97±0.59 ^{Ba}	88.52±0.11 ^{Cb}	87.05±0.36 ^{Bc}
	82.59±0.84 ^{Cd}	ST2	86.75±0.31 ^{Cc}	90.57±0.57 ^{Ca}	88.41±0.21 ^{Cb}	86.91±0.17 ^{Bc}
	89.03±0.40 ^{Ac}	ST3	90.62±0.29 ^{Ab}	92.28±0.11 ^{Aa}	90.01±0.41 ^{Ab}	87.06±0.54 ^{Bd}
	89.58±0.11 ^{Ad}	ST4	90.50±0.37 ^{Ab}	92.10±0.19 ^{Aa}	89.66±0.30 ^{Bc}	88.41±0.39 ^{Ae}
P ₂₂ (%)	5.60±0.75 ^{Ba}	ST1	3.29±0.16 ^{Cbc}	1.72±0.39 ^{Cd}	2.10±0.26 ^{Dcd}	3.54±1.17 ^{Cb}
	6.18±0.82 ^{Aab}	ST2	6.85±0.30 ^{Ba}	3.80±0.53 ^{Bc}	4.10±0.49 ^{Cc}	5.74±0.34 ^{Bb}
	3.13±0.90 ^{Cc}	ST3	3.51±1.13 ^{Cbc}	1.99±0.59 ^{Cc}	5.02±0.30 ^{Bb}	7.47±1.41 ^{Aa}
	3.27±0.75 ^{Cd}	ST4	7.52±0.94 ^{Aa}	4.37±0.19 ^{Ac}	6.50±0.06 ^{Ab}	5.76±0.14 ^{Bb}

注: 不同小写字母表示同一离子强度下不同浸泡时间差异显著($P<0.05$); 不同大写字母表示同一时间点不同离子强度差异显著($P<0.05$)。

2.5 离子强度对南极磷虾肉对质构的影响

质构特性的变化可能与水分的散失密切相关, 从而影响其经济价值^[33]。不同离子强度和浸泡时间对南极磷虾肉硬度和弹性的影响见图 5, 如图 5A 所示, 与 C 组的南极磷虾肉相比, 用不同离子强度浸泡后的磷虾肉硬度显著下降($P<0.05$), 各处理组随着浸泡时间的延长, 南极磷虾肉的硬度先下降(0~2 h)后上升(2~6 h)($P<0.05$), 硬度下降可能是由于其肌纤维部分断裂或开始松弛, 导致其肉质变软, 硬度下降^[34]。同一浸泡时间下, 硬度随离子强度的增加呈先下降后上升趋势($P<0.05$)。硬度上升的原因可能是 ST4 处理组中过多的 NaCl 进入到南极磷虾肉中, 抑制了其内源抗氧化酶的活性, 使肌原纤维更容易受到自由基和其他促氧化因子, 导致其蛋白质结构发生聚集^[16]。图 5B 所示, 弹性随浸泡时间的延长呈先上升后下降的趋势($P<0.05$), 各处理组在 2 h 弹性达到最大, 分别为 0.87、0.88、0.98 和 0.86。虾肉在浸泡 0~2 h 弹性上升可能是由于蛋白质表面吸收水合离子物质能产生水合力, 在蛋白质结构表面周围的水层能产生这种水合力^[8], 也可能是由于 pH 和离子强度的

增加, 增加了其肌球蛋白溶解度, 继而提高了其保水性^[6]。同一浸泡时间下, 弹性随浸泡液离子强度的增加呈先上升后下降的趋势($P<0.05$)。ST3 处理组浸泡 2 h 弹性达到最大。可能是在 ST3 处理组浸泡 2 h 下吸收水合离子最多, 肌原纤维蛋白的负电荷增加了蛋白质之间的静电斥力, 弹性上升。虾肉在浸泡处理的过程中, 由于其电荷增多导致肌肉内部的静电斥力增大, 减小了使肌肉组织内部的结合力, 进而其质构特性发生变化^[35]。

2.6 离子强度对南极磷虾肉感官评定的影响

不同离子强度浸泡的南极磷虾肉感官评价结果如图 6 所示, 各处理组的整体接受度都高于 C 组, 其中, ST3 处理组感官评分最高, 为 17.67 分, 可能是由于盐类物质(NaCl、Na₂CO₃、NaHCO₃ 和柠檬酸钠)浸泡液能螯合金属离子, 增加了离子强度和 pH, 促进其肉类的保水能力^[6]。从而改善了南极磷虾肉的组织弹性和形态。从口感这一指标可看出, ST3 处理组浸泡的南极磷虾口感最好, 而 ST4 处理组浸泡的南极磷虾口感破坏较为严重, 说明用适当的离子强度浸泡液处理南极磷虾肉能提高其多汁性, 可能是带正电

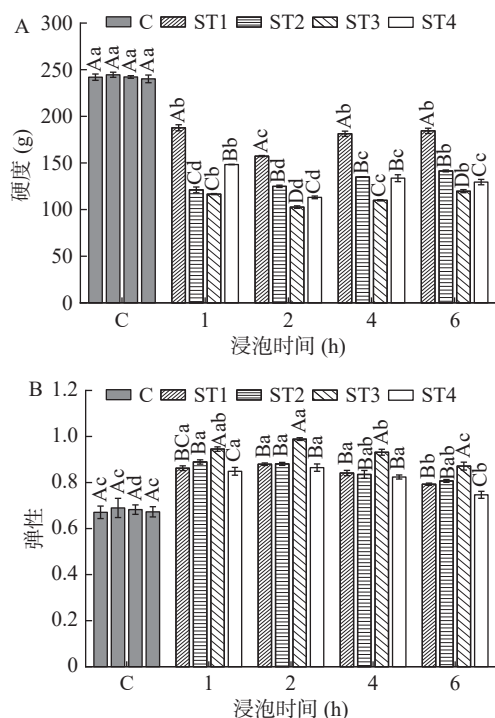


图 5 离子强度和浸泡时间对南极磷虾硬度(A)和弹性(B)影响

Fig.5 Effects of ionic strength and soaking time on the hardness (A) and springiness (B) of Antarctic krill

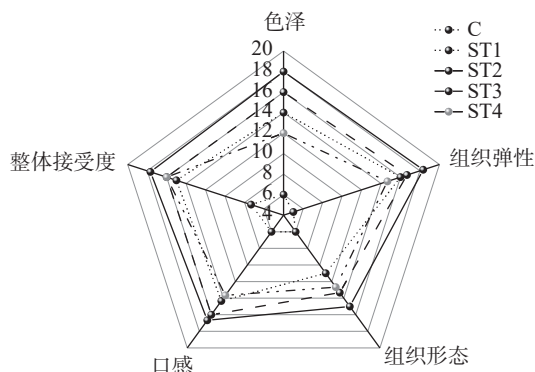


图 6 离子强度对南极磷虾感官品质影响

Fig.6 Effects of ionic strength on the sensory quality of Antarctic krill

的蛋白质与 Cl^- 结合, 从而使其等电点偏离, 蛋白质带净负电荷使得其静电排斥力的增加, 保水性增

加^[18]。结果表明用不同离子强度的浸泡液处理能改善南极磷虾肉的口感和组织结构。

2.7 离子强度对南极磷虾肌肉纤维组织的影响

图 7 为不同离子强度浸泡南极磷虾肉组织变化, 从图 A 可观察到, 南极磷虾肉未浸泡时, 其肌原纤维整齐连贯且比较紧密(红色染色), 肌原纤维之间可观察到一些小空隙(白色区域), 经过用不同离子强度的浸泡液浸泡后, 图 B 和图 C 中可以观察到间隙稍大, 图 D 可观察到南极磷虾肌肉组织间隙明显增大、肌肉纤维结构由致密趋于疏松。可能是在肌原纤维中存在大量的 Cl^- , 导致其负电荷含量增加, 产生更多的静电排斥力, 肌原纤维发生膨胀, 水分流失减少, 其保水性增加^[14]。也可能是因为柠檬酸钠与 NaHCO_3 共同添加能更好地整合其肌动球蛋白中的金属离子, 使其肌肉中蛋白质形成紧致和稳定的三维网状结构, 提高其保水能力^[36]。图 E 中观察到明显的肌纤维小片化现象, 南极磷虾肌肉结构发生破坏。组织结构劣变会降低肌肉的持水性, 弱化肌肉和水的结合能力, 使水分发生迁移, 最终导致肌肉质地过于软化进而不利于持水^[37]。

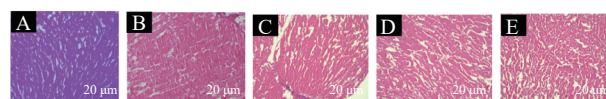


图 7 不同离子强度处理的南极磷虾肌纤维组织 HE 染色图

Fig.7 HE staining of Antarctic krill myofiber tissues with different ionic strength treatment

注: A~E 依次为 C、ST1、ST2、ST3、ST4 处理组(20×)。

2.8 离子强度对南极磷虾肉微观结构的影响

不同离子强度浸泡南极磷虾肉微观结构如图 8 所示, 同一浸泡时间内, C 组结构没有规则, ST1 处理组和 ST2 处理组孔洞较少且空隙较大, 并开始发生变化, 肌肉组织壁开始增厚且空隙变小, ST3 处理组结构致密, 孔洞较多。从 E₁ 图中可以观察到 ST4 处理组处的孔洞大小呈现无规则的状态, 其空隙间分布散乱且不均匀。从 E₂ 观察到肌肉组织壁最厚。结构孔洞多少的排序为 D 组(ST3) > E 组(ST4) > C 组(ST2) > B 组(ST1) > A 组(C)。这与南极磷虾持

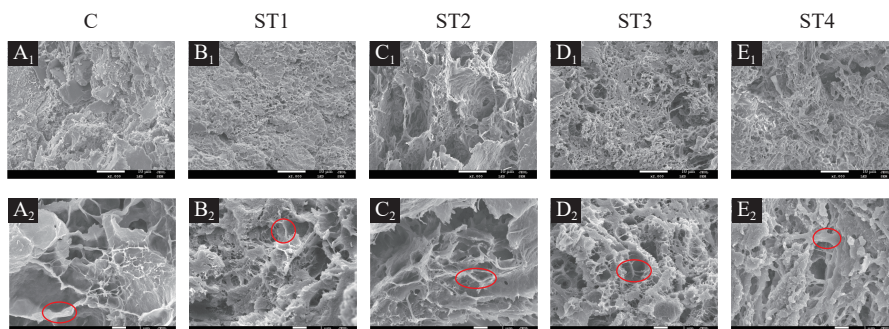


图 8 离子强度对南极磷虾微观结构影响

Fig.8 Effects of ionic strength on the microstructure of Antarctic krill

注: 1: 2000×; 2: 10000×。

水性密切相关, Na_2CO_3 、 NaHCO_3 、柠檬酸钠和 NaCl 的加入可能是通过蛋白质疏水作用进入到蛋白质中, 通过分子间交联构建紧密的网络结构, 在加热过程中形成二硫键, 导致更多的水分包裹在网络结构中, 从而提高水分含量^[19]。Zhou 等^[38] 的研究也表明, 柠檬酸盐等保水剂极大地促进蛋白质分子间的相互作用, 形成更均匀的肌肉蛋白质网络结构, 提高其持水能力。与 C 组相比, 南极磷虾肌肉组织壁随着离子强度的增加而增厚, 空隙变小。这可能是 NaCl 的添加使得肌原纤维膨胀, 大量 Cl^- 被束缚在肌原纤维中, Na^+ 则在肌丝蛋白周围形成离子云将其包裹, 当肌动蛋白膨胀时, 肌球蛋白从肌原纤维蛋白中分离出来, 在肉的表面形成一种黏性渗出物, 将自由水固定, 从而增强了肉的黏结性及持水力^[39]。也可能是添加柠檬酸钠等无磷保水剂会引起蛋白质结构发生变化, 促进肌肉细胞中离子的释放, 导致离子官能团位置的变化, 有效改变其 pH, 增加其保水性^[36]。结果表明, 四个处理组浸泡南极磷虾均能改善南极磷虾的持水能力, 但 ST3 处理组的作用效果最明显。

2.9 离子强度对南极磷虾肉肌原纤维断裂指数的影响

由图 9 可知, 随着浸泡处理的进行, 各处理组的肌原纤维断裂指数与 C 组相比明显增加 ($P < 0.05$)。随浸泡时间延长, ST1 处理组、ST2 处理组、ST3 处理组和 ST4 处理组肌原纤维断裂指数均呈先增加后减少的趋势 ($P < 0.05$), ST1、ST2 和 ST4 处理组浸泡 2 h 和 4 h 时肌原纤维断裂指数达到最大, 但没有显著性变化 ($P > 0.05$)。ST3 处理组浸泡 2 h 时肌原纤维断裂指数达到最大, 为 11.43。其肌原纤维断裂指数增加可能是因为 NaCl 促使肌动球蛋白解离为肌球蛋白和肌动蛋白, 肌原纤维蛋白断裂呈不同数目的肌节小片, 使其肌原纤维间隙变大, 增加了暴露于外界的结构接触氧的机会, 从而加剧了小片化的速率^[40]。当浸泡 2 h 时, 肌原纤维断裂指数随离子强度的增加呈先增加后减少的趋势 ($P < 0.05$), 并在 ST3 处理组达到最大, 肌原纤维断裂指数增加, 可能

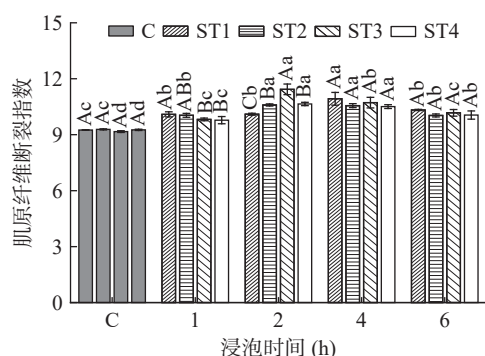


图 9 离子强度和浸泡时间对南极磷虾肌原纤维断裂指数影响

Fig.9 Effects of ionic strength and soaking time on the myofibril fragmentation index of Antarctic krill

是因为经过浸泡液处理后, 南极磷虾蛋白质结构部分展开, 使其暴露出更多的自由亲水基团, 促进肌球蛋白和肌动蛋白的溶解来增加其保水性^[21]。

2.10 离子强度对南极磷虾肉蛋白质表面疏水性的影响

蛋白质表面疏水性指数可间接地反映出蛋白质水合作用, 蛋白表面疏水性数值越低, 说明结合水的能力越强^[41]。不同离子强度和浸泡时间对南极磷虾肌原纤维蛋白表面疏水性的影响如图所示, 由图 10 可观察到经过浸泡的各处理组与 C 组表面疏水性显著下降 ($P < 0.05$), 可能是因为浸泡液呈碱性, 提高了虾肉的 pH, 使其蛋白质所带的负电荷增加, 静电斥力增加使其肌原纤维间距增大, 肌纤维结构变松弛, 其保水能力得到提高^[42]。ST1 处理组、ST2 处理组、ST3 处理组和 ST4 处理组随浸泡时间的延长呈先下降后上升的趋势, 并在 2 h 达到最小 ($P < 0.05$), 分别为 5.49、2.47、1.83 和 2.94 μg 。南极磷虾肌原纤维蛋白的表面疏水性指数下降, 这可能是因为水分子与蛋白质中的亲水基团结合, 使其暴露的疏水性残基被修饰或重新嵌入形成的蛋白质聚集体中^[43]。当浸泡时间到达 4 h 时, 南极磷虾肌原纤维蛋白的表面疏水性指数显著增加, 表明肌原纤维蛋白的构象再次发生变化, 疏水性残基进一步暴露出来。同一浸泡时间下, 表面疏水性随离子强度的增加呈先下降后上升的趋势 ($P < 0.05$), ST3 处理组在浸泡 2 h 时达到最小 ($P < 0.05$)。主要是 NaCl 使肌原纤维蛋白分子静电荷增加, 周围的亲水基团与水分子结合使其疏水基团掩埋于蛋白质内部, 进而造成蛋白质表面疏水性的降低^[44]。

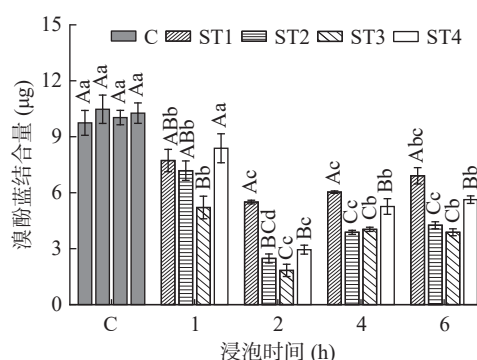


图 10 离子强度和浸泡时间对南极磷虾肌原纤维蛋白表面疏水性影响

Fig.10 Effects of ionic strength and soaking time on the surface hydrophobicity of myofibrillar protein of Antarctic krill

2.11 离子强度对南极磷虾肉 SDS-PAGE 的影响

蛋白质重要条带主要包括肌球蛋白重链(MHC, 200 kDa)、肌动蛋白(Actin, 42 kDa)、肌钙蛋白(TroponinT, 37 kDa)、原肌球蛋白(Tropomyosin, 35 kDa)以及肌球蛋白轻链(MLC, 25 kDa)。在 SDS-PAGE 凝胶电泳试验中可以常规宽分子质量

Marker 作为参比,操作相对简便,故常以肌动蛋白含量表征肌动球蛋白解离情况^[23]。肌原纤维蛋白的降解和肌动球蛋白的解离都可以改善肉的嫩度,肌动球蛋白解离为肌动蛋白和肌球蛋白,能破坏紧密的肌原纤维结构,可增强肉的嫩度^[45]。图 11 为不同离子强度浸泡南极磷虾肉 SDS-PAGE 凝胶电泳图,各处理组均无碎条带且完整清晰,说明不同离子强度的浸泡液均未破坏蛋白亚基的组成。随着离子强度的增大以及 pH 的改变,不同处理组之间的肌动球蛋白条带(Actin, 42 kDa)粗细和深浅有显著的差别,即肌动蛋白条带先变宽后变窄。在 ST3 处理组中肌动蛋白条带最粗,且与 C 组和 ST4 处理组差异显著,肌动蛋白含量最高。这可能是由于不同离子强度下的浸泡液能使肌动蛋白溶出,肌动蛋白游离出来,在电泳蛋白条带中主要表现为肌动蛋白条带增粗。

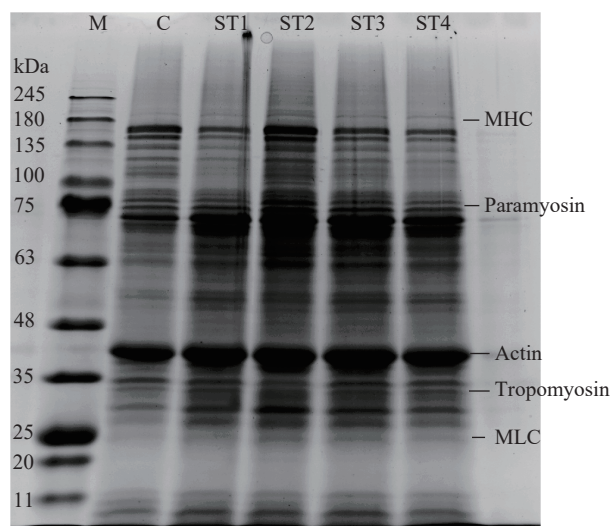


图 11 离子强度对南极磷虾 SDS-PAGE 影响

Fig.11 Effects of ionic strength on Antarctic krill SDS-PAGE

2.12 离子强度对南极磷虾肉蛋白质二级结构相对含量的影响

傅里叶变换红外光谱(Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR)特定区域在图中用阴影标记,包括水带(3500~3000 cm^{-1})和酰胺 I 带(1700~1600 cm^{-1}),通过傅里叶去卷积可定量分析蛋白质的酰胺 I 带的二级结构,包括 α -螺旋、 β -折叠、 β -转角和无规则卷曲,在特定区域中,水区大多含有水合和非水合蛋白质 N-H 基团的特征振动和 O-H 伸缩振动,被认为与肌肉蛋白的水结合能力呈正相关^[24]。从图 12A 中可观察到 ST2 处理组浸泡的南极磷虾肉吸收峰最大,说明该离子强度浸泡下的南极磷虾肌肉蛋白水结合能力最强。不同离子强度浸泡对南极磷虾的蛋白质二级结构相对百分含量的影响如图 12B 所示。由图 12B 可知,随离子强度的增加, β -折叠含量呈先增加后降低的趋势,在 ST2 处理组和 ST3 处理组达到最多,但两者没有显著性差异($P>0.05$),而 α -螺旋、无规则卷曲和 β -转角无显著性变化($P>$

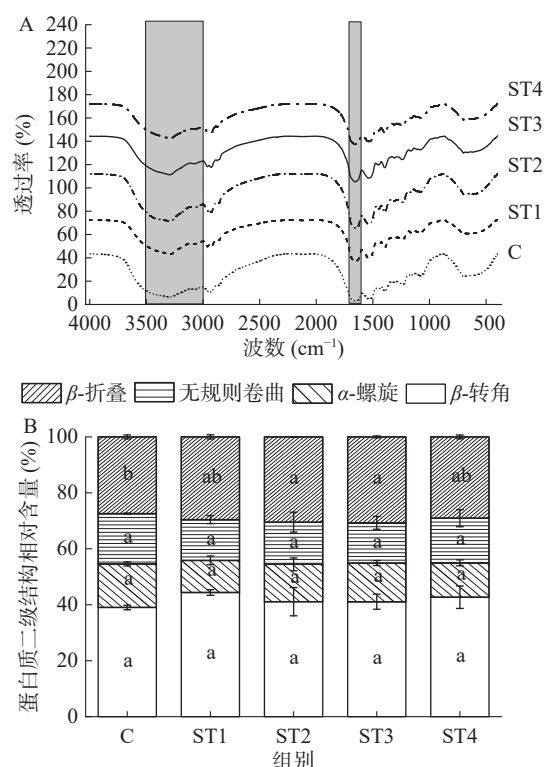


图 12 离子强度对南极磷虾 FTIR 谱图(A)和蛋白质二级结构相对含量(B)影响

Fig.12 Effects of ionic strength on the FTIR spectra (A) and relative protein secondary structure content (B) of Antarctic krill

注:不同小写字母表示不同组间差异显著($P<0.05$)。

0.05)。这可能是由于蛋白质中的正电荷与 Cl^- 结合以及加入 NaHCO_3 和柠檬酸钠使其肌肉 pH 呈碱性,增加肌原纤维蛋白质的静电斥力,蛋白质的结构展开,使得更多水进入肌原纤维中,增强其保水性^[27,46]。

3 结论

本研究探讨了不同离子强度的浸泡液和浸泡时间对南极磷虾肉保水特性的影响。结果表明,虾肉的蒸煮损失、离心损失、硬度随离子强度增加显著下降,可以改善南极磷虾肉的水分流失。但过高的离子强度(1.1 mol/L)会使肌原纤维断裂指数和蛋白质 β -折叠相对含量呈现下降的趋势,保水能力下降,导致其硬度增加。在浸泡 2 h 时,ST3 处理组中肌动球蛋白解离,肌动蛋白含量增多,改善了水分分布,显著增强了南极磷虾肉的保水能力。综合考虑,离子强度和 pH 的变化会改变南极磷虾热处理后的品质变化,南极磷虾肉加入 ST3 处理组(0.6% Na_2CO_3 、0.6% NaHCO_3 、0.8% 柠檬酸钠和 1.0% NaCl)浸泡 2 h 时可显著提高其保水能力。本研究对南极磷虾肉产品的加工及开发具有重要的参考意义。

参考文献

- [1] CAVAN E L, BELCHER A, ATKINSON A, et al. The importance of Antarctic krill in biogeochemical cycles[J]. *Nature communications*, 2019, 10(1): 4742–4754.
- [2] LIN J X, SUN P Z, ZHAO Y F, et al. Effect of L-Lysine on heat-induced aggregation behavior of Antarctic krill (*Euphausia superba*) myofibrillar protein[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2023: 1–14.
- [3] 杨芳. 阿根廷鱿鱼肌原纤维蛋白特性及其加工的研究[D]. 厦门: 集美大学, 2009. [YANG F. Study on the myofibrillar character and processing of *Illex argentinus* Castellanos[D]. Xiamen: Jimei University, 2009.]
- [4] LU F, KANG Z L, WEI L P, et al. Effect of sodium bicarbonate on gel properties and protein conformation of phosphorus-free chicken meat batters[J]. *Arabian Journal of Chemistry*, 2021, 14(2): 102969.
- [5] 李莎莎, 安玥琦, 丁玉琴, 等. 碱性盐对冷冻鱼糜保水性的影响[J]. *食品科学*, 2012, 33(21): 68–72. [LI S S, AN Y Q, DING Y Q, et al. Effects of alkaline salts on water-holding capacity of frozen surimi[J]. *Food Science*, 2012, 33(21): 68–72.]
- [6] 王荣, 姜启兴, 刘秋宇, 等. 冷冻鲑鱼鱼排无磷保水剂配方的开发与优化[J]. *食品科技*, 2020, 45(6): 322–327. [WANG R, JIANG Q X, LIU Q Y, et al. Development and optimization of phosphate-free water retaining agent formula for frozen channel catfish fillet[J]. *Food Technology*, 2020, 45(6): 322–327.]
- [7] LI K, FU L, ZHAO Y Y, et al. Use of high-intensity ultrasound to improve emulsifying properties of chicken myofibrillar protein and enhance the rheological properties and stability of the emulsion[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 98: 105275.
- [8] WU L, WU T, WU J, et al. Effects of cations on the “salt in” of myofibrillar proteins[J]. *Food Hydrocolloids*, 2016, 58: 179–183.
- [9] 李银. 蛋白氧化对肌肉保水性的影响机制研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014. [LI Y. Effect-mechanism of protein oxidation on water-holding capacity of muscle[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences Dissertation, 2014.]
- [10] ZHANG Y, PUOLANNE E, ERTBJERG P. Mimicking myofibrillar protein denaturation in frozen-thawed meat: Effect of pH at high ionic strength[J]. *Food Chemistry*, 2021, 338: 128017.
- [11] HAMM R. Functional properties of the myofibrillar system and their measurements[J]. *Muscle as Food*, 1986.
- [12] 哈斯, 韩玲钰, 许皓, 等. 碱性 pH 对马鲛鱼肌球蛋白热聚集行为的影响[J]. *现代食品科技*, 2022, 38(4): 114–120, 61. [HA S, HAN L Y, XU J, et al. Effect of alkaline pH on the thermal aggregation behavior of mackerel Myosin[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2022, 38(4): 114–120, 61.]
- [13] 张杰, 唐善虎, 李思宁, 等. 添加含磷与非磷保水剂对牦牛肉肉糜保水性的影响[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(8): 306–310. [ZHANG J, TANG S H, LI S N, et al. Effect of phosphorus or phosphorus-free agents on water-holding capacity of yak meat batters[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2017, 38(8): 306–310.]
- [14] 吴亮亮, 罗瑞明, 孔丰, 等. 食盐添加量对滩羊肉蒸煮损失、嫩度及水分分布的影响[J]. *食品工业科技*, 2016, 37(2): 322–325, 366. [WU L L, LUO R M, KONG F, et al. Effect of cooking loss, tenderness and water distribution of Tan sheep at different salt addition treatment[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2016, 37(2): 322–325, 366.]
- [15] SHAO J H, DENG Y M, JIA N, et al. Low-field NMR determination of water distribution in meat batters with NaCl and polyphosphate addition[J]. *Food Chemistry*, 2016, 200: 308–314.
- [16] LOBO F, VENTANAS S, MORCUENED D, et al. Underlying chemical mechanisms of the contradictory effects of NaCl reduction on the redox-state of meat proteins in fermented sausages[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2016, 69: 110–116.
- [17] CHEN Y C, JIA X W, SUN F D, et al. Using a stable pre-emulsified canola oil system that includes porcine plasma protein hydrolysates and oxidized tannic acid to partially replace pork fat in frankfurters[J]. *Meat Science*, 2020, 160: 107968.
- [18] 陈礼福, 陈胜姝, 沈晖. 食盐添加量对猪肝片的制嫩及保水作用研究[J]. *食品科技*, 2020, 45(12): 104–108. [CHEN L F, CHEN S S, SHEN H. Effect of salt content on the tenderness and water retention of pig liver slices[J]. *Food Technology*, 2020, 45(12): 104–108.]
- [19] HU Y Q, LIU W J, YUAN C H, et al. Enhancement of the gelation properties of hairtail (*Trichiurus haumela*) muscle protein with curdlan and transglutaminase[J]. *Food Chemistry*, 2015, 176: 115–122.
- [20] SUN Y, LUO W W, HE M X, et al. Effects of different thawing methods on the physicochemical properties and myofibrillar protein characteristics of *Litopenaeus vannamei*[J]. *LWT*, 2024, 192: 115668.
- [21] CHENG C P, HE Z F, SU C, et al. Changes of pattern of myofibrils and collagen of smooth muscle from large intestine of porcine using alkali tenderisation process combined with enzymes[J]. *International Journal Food Science & Technology*, 2022, 57(11): 7116–7124.
- [22] 唐欣颖, 吉宏武, 张迪, 等. 高压静电场解冻对凡纳滨对虾肌球蛋白结构特征的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2024, 50(11): 17–184. [TANG X Y, JI H W, ZHANG D, et al. Effect of high voltage electrostatic field thawing on the structural characteristics of myosin in shrimp (*Litopenaeus vannamei*)[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2024, 50(11): 17–184.]
- [23] 邓少颖, 王道营, 张牧烺, 等. 鸭胸肌肉加热过程中肌球蛋白解离研究[J]. *食品科学*, 2015, 36(1): 1–5. [DENG S Y, WANG D Y, ZHANG M H, et al. Heat-induced dissociation of actomyosin in duck breast muscle[J]. *Food Science*, 2015, 36(1): 1–5.]
- [24] YANG H H, ZHONG C, SUN L C, et al. Effects of partial substitution of NaCl on myofibrillar protein properties from pearl mussel *Hyriopsis cumingii* muscle: Structural characteristics and aggregation behaviors[J]. *Food Chemistry*, 2021, 356: 129734.
- [25] 刘柯欣, 林松毅, 胡胜杰, 等. 南极磷虾蛋白营养与功能特性及食用安全性研究进展[J]. *食品科学*, 2022, 43(7): 263–272. [LIU K X, LIN S Y, HU S J, et al. Advances in our knowledge of the nutritional and functional properties and safety of antarctic krill proteins[J]. *Food Chemistry*, 2022, 43(7): 263–272.]
- [26] BAO Y L, ERTBJERG P. Effects of protein oxidation on the texture and water-holding of meat: A review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2019, 59(22): 3564–3578.
- [27] 张敏. 食盐对猪肉肌原纤维蛋白氧化及功能特性的影响研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022. [ZHANG M. Effects of salt on oxidation and functional properties of pork myofibrillar protein[D]. Hubei: Huazhong Agricultural University, 2022.]
- [28] GAO R C, SHI T, SUN Q C, et al. Effects of L-arginine and L-histidine on heat-induced aggregation of fish myosin: Bighead carp (*Aristichthys nobilis*) [J]. *Food Chemistry*, 2019, 295: 320–326.
- [29] SUN P Z, LIN J X, REN X, et al. Effect of heating on pro-

- tein denaturation, water state, microstructure, and textural properties of Antarctic krill (*Euphausia superba*) meat[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2022, 15(10): 2313–2326.
- [30] 程天赋, 俞龙浩, 蒋奕, 等. 基于低场核磁共振探究解冻过程中肌原纤维水对鸡肉食用品质的影响[J]. *食品科学*, 2019, 40(9): 16–22. [CHENG T F, YU L H, JIANG Y, et al. Effect of myofibrillar water on chicken quality during thawing as studied by Low-Field nuclear magnetic resonance[J]. *Food Chemistry*, 2019, 40(9): 16–22.]
- [31] BERTRAM H C, MEYER R L, WU Z, et al. Water distribution and microstructure in enhanced pork[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2008, 56(16): 7201–7207.
- [32] LEI Z, FU Y, XU P, et al. Effects of L-arginine on the physicochemical and gel properties of chicken actomyosin[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2016, 92: 1258–1265.
- [33] 胡越, 刘昊天, 夏秀芳, 等. 直接减盐法对哈尔滨红肠贮藏期间品质的影响[J]. *食品科学*, 2023, 44(7): 184–191. [HU Y, LIU H T, XIA X F, et al. Effect of direct salt reduction on the quality characteristics of harbin red sausages during storage[J]. *Food Chemistry*, 2023, 44(7): 184–191.]
- [34] 周亚军, 杨永华, 李圣桡, 等. 定量卤制牛肉干的品质特性[J]. *食品科学*, 2020, 41(21): 7–14. [ZHOU Y J, YANG Y H, LI S R, et al. Quality characteristics of beef jerky produced by quantitative marination[J]. *Food Chemistry*, 2020, 41(21): 7–14.]
- [35] 胡欣颖. 调理猪肉制品的研制及贮藏期品质变化研究[D]. 重庆: 西南大学, 2020. [HU X Y. Study on the development and quality change of marinated pork products during storage[D]. Chongqing: Southwest University, 2020.]
- [36] 赵宏蕾, 辛莹, 刘美月, 等. 柠檬酸钠协同碳酸氢钠替代磷酸盐对法兰克福香肠品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(10): 94–103. [ZHAO H L, XIN Y, LIU M Y, et al. Effect of sodium citrate combined with sodium hydrogen carbonate on the quality of phosphate-free frankfurters[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(10): 94–103.]
- [37] RHEE M S, WHEELER T L, SHACKELFORD S D, et al. Variation in palatability and biochemical traits within and among eleven beef muscles[J]. *Journal of Animal Science*, 2004, 82(2): 534–550.
- [38] ZHOU Y, WATKINS P, OISETH S, et al. High pressure processing improves the sensory quality of sodium-reduced chicken sausage formulated with three anion types of potassium salt[J]. *Food Control*, 2021, 126: 108008.
- [39] RUUSUNEN M, PUOLANNE E. Reducing sodium intake from meat products[J]. *Meat Science*, 2005, 70(3): 531–541.
- [40] 秦军委, 王汉玲, 于雪慧, 等. 蛋白质氧化对乌鳢在冻藏过程中保水性的影响[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(23): 29–34, 39. [QIN J W, WANG H L, YU X H, et al. Effects of water holding capacity of snakehead induced by protein oxidation during frozen storage[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2017, 38(23): 29–34, 39.]
- [41] WANG L, ZHANG M, FANG Z X, et al. Gelation properties of myofibrillar protein under malondialdehyde-induced oxidative stress[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2017, 97(1): 50–57.
- [42] ZHU D Y, KANG Z L, MA H J, et al. Effect of sodium chloride or sodium bicarbonate in the chicken batters: A physico-chemical and Raman spectroscopy study[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 83: 222–228.
- [43] 王栩杉. 纳米纤维膜表面接枝制备混合模式层析介质[D]. 天津: 天津工业大学, 2018. [WANG X S. Mixed-mode chromatography media prepared by surface grafting of nanofiber membranes[D]. Tianjin: Tiangong University, 2018.]
- [44] 齐宏超. NaCl对脱水过程中猪肉特性变化的影响研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017. [QI H C. Effects of sodium chloride on changes in properties of pork during dehydration[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.]
- [45] ZHANG Y Y, ZHANG D J, HUANG Y J, et al. L-arginine and L-lysine degrade troponin-T, and L-arginine dissociates actomyosin: Their roles in improving the tenderness of chicken breast[J]. *Food Chemistry*, 2020, 318: 126516.
- [46] 李桂敏, 赵春青, 窦容容, 等. 复合无磷保水剂对反复冻融鲟鱼片理化特性及微观结构的影响[J]. *食品科学*, 2022, 43(12): 87–93. [LI G M, ZHAO C Q, DOU R R, et al. Effects of non-phosphate water-retaining agents on the physicochemical and microstructure properties of sturgeon fillets subjected to repeated freeze-thaw cycles[J]. *Food Chemistry*, 2022, 43(12): 87–93.]