

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2024.81014

3 种抗冻剂对虾滑冻融品质的影响

陈江平^{1,2,3,4} 黄建联^{1,2,3,4} 钟倩^{1,2,3,4} 陈慧^{1,2,3,4}

(1. 安井食品集团股份有限公司, 福建 厦门 361022; 2. 农业农村部冷冻调理水产品加工重点实验室, 福建 厦门 361022; 3. 福建省冷冻调理水产品加工重点实验室, 福建 厦门 361022; 4. 厦门市速冻调制食品重点实验室, 福建 厦门 361022)

摘要: [目的] 对比 3 种抗冻剂对虾滑抗冻性的提升效果。[方法] 制备虾滑样品, 测定反复冻融 3 次后虾滑的凝胶强度、储能模量、盐溶性蛋白含量、巯基含量、黏度、微观结构等指标, 对比添加不同含量的海藻糖、山梨糖醇、鳕鱼鳞胶原蛋白肽后经反复冻融的虾滑品质的变化。[结果] 鳕鱼鳞胶原蛋白肽添加组虾滑的凝胶强度、巯基含量均高于海藻糖添加组和山梨糖醇添加组, 其结构更致密、孔径大小更规则有序, 且其黏度显著高于海藻糖添加组和山梨糖醇添加组。[结论] 添加鳕鱼鳞胶原蛋白肽可显著抑制虾滑冻融过程中蛋白变性程度, 提高虾滑的抗冻性。

关键词: 虾滑; 抗冻剂; 胶原蛋白肽; 蛋白变性; 冻融

Effects of three cryoprotectants on freeze-thaw qualities of shrimp paste

CHEN Jiangping^{1,2,3,4} HUANG Jianlian^{1,2,3,4} ZHONG Qian^{1,2,3,4} CHEN Hui^{1,2,3,4}

(1. Anjoy Foods Group Co., Ltd., Xiamen, Fujian 361022, China; 2. Key Laboratory of Refrigeration and Conditioning Aquatic Products Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Xiamen, Fujian 361022, China; 3. Fujian Provincial Key Laboratory of Refrigeration and Conditioning Aquatic Products Processing, Xiamen, Fujian 361022, China; 4. Xiamen Key Laboratory of Quick-frozen Prepared Food, Xiamen, Fujian 361022, China)

Abstract: [Objective] To compare the effects of three cryoprotectants on the freezing resistance improvement of shrimp paste. [Methods] Shrimp paste samples are prepared. After three consecutive freeze-thaw cycles, the following indicators are determined in the samples: gel strength, energy storage modulus, salt-soluble protein content, sulfhydryl group content, viscosity, and microstructure, to compare the quality change of shrimp paste added with trehalose, sorbitol, and cod scale collagen peptide after repeated frozen-thaw. [Results] The gel strength and sulfhydryl group content in the cod scale collagen peptide group are higher than those in the trehalose and sorbitol group, with smoother structures and more uniform pore sizes. Besides, the viscosity of the cod scale collagen peptide group is significantly higher than that of the trehalose and sorbitol groups. [Conclusion] The addition of cod scale collagen peptide can significantly inhibit the protein denaturation during freeze-thaw of shrimp paste, improving freezing resistance.

Keywords: shrimp paste; cryoprotectant; collagen peptide; protein degeneration; freeze-thaw

虾滑作为一种高档鱼糜制品, 是火锅、餐饮行业比较受欢迎的产品之一。目前市面上流通的虾滑主要是以南美白对虾和白鲢鱼糜为原料制作而成。向虾滑中添加少量白鲢鱼糜可增加浆料黏性, 赋予产品一定的口感强度并降低成本。但因其是生浆制品, 在冷冻贮藏、运输或售卖过程中温度波动时容易导致冰晶的形成与重结晶造成

肌原纤维蛋白结构的变化, 使蛋白质发生变性, 降低感官品质^[1]。一方面, 冷冻过程会影响蛋白质与水的结合状态, 化学键发生改变, 导致蛋白质空间构象发生变化^[2]。另一方面, 冷冻过程中肽链极易发生拉伸和折叠, 疏水区域和非极性基团暴露形成共价键, 使蛋白质分子发生聚集^[3]。食品工业中常使用磷酸盐、蔗糖、山梨糖醇等抗冻

通信作者: 黄建联(1971—), 男, 安井食品集团股份有限公司正高级工程师。E-mail: 416688254@qq.com

收稿日期: 2024-10-08 改回日期: 2025-04-16

引用格式: 陈江平, 黄建联, 钟倩, 等. 3 种抗冻剂对虾滑冻融品质的影响[J]. 食品与机械, 2025, 41(7): 113-119.

Citation: CHEN Jiangping, HUANG Jianlian, ZHONG Qian, et al. Effects of three cryoprotectants on freeze-thaw qualities of shrimp paste [J]. Food & Machinery, 2025, 41(7): 113-119.

剂来减缓蛋白结构的变化,其中 4%蔗糖+4%山梨糖醇是常用的商业抗冻剂^[4]。但磷酸盐摄入过多会影响人体对钙质的吸收,使体内钙磷比例失衡,导致骨质疏松症,加重心血管和肾脏疾病^[5-6]。然而,糖类抗冻剂由于高糖、高热量对产品口感及受众人群造成影响,限制了其应用范围^[7-8]。

海藻糖是一种非还原性二糖,甜度仅为蔗糖的 45%,可有效防止冷冻后的蛋白变性。胶原蛋白肽属于无磷蛋白类抗冻剂,可有效调控冰晶生长,并通过降低蛋白质的修饰或抑制蛋白质变性产物的形成来达到提高贮藏品质的目的,同时兼具抗氧化活性,可抑制蛋白和脂质氧化^[9]。Jenkelunas 等^[10]发现鳕鱼片蛋白水解物可延缓鳕鱼片冻融过程中的盐溶性蛋白变性。Yasemi 等^[11]研究表明,鲟鱼皮明胶水解物中含有小肽和游离氨基酸,具有自由基清除活性,可减缓冻融后小龙虾的脂质氧化程度、提高 Ca²⁺-ATP 酶活性和巯基含量。梁嘉健等^[12]研究表明,鳕鱼皮胶原蛋白肽可用于鱼糜的抗蛋白冷冻变性。但关于鳕鱼鳞胶原蛋白肽在水产品中的抗冻效果研究较少,且主要集中于熟制品,对生浆制品冻藏期间蛋白变性与氧化情况的研究尚未见报道。

试验拟以虾滑为研究对象,探究海藻糖、山梨糖醇和鳕鱼鳞胶原蛋白肽添加量对虾滑反复冻融 3 次后凝胶强度的影响,并结合盐溶性蛋白含量、巯基含量、黏度、微观结构等指标,分析 3 种抗冻剂对虾滑反复冻融后蛋白变性情况的改善效果,以期对虾滑的生产与贮藏提供依据。

1 材料与方 法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料

南美白对虾:3~4 g/只,福建海菜食品有限公司;
冷冻白鲢鱼糜:AAA 级,湖北安润食品有限公司;
硅油:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;
巯基检测试剂盒:索莱宝生物科技有限公司;
海藻糖:食品级,通辽梅花生物科技有限公司;
山梨糖醇:食品级,罗盖特(中国)营养食品有限公司;

鳕鱼鳞胶原蛋白肽(蛋白三肽):食品级,西安贝吉诺生物科技有限公司。

1.1.2 主要仪器设备

电子天平:LCD-AS00 型,华志(福建)电子科技有限公司;

数显恒温水浴锅:HH.S21-4 型,上海博迅实业有限公司医疗设备厂;

Texture Analyser:TA.new plus 型,美国 iSENSO 公司;

高速冷冻离心机:3-18KS 型,德国 Sigma 公司;

数显黏度计:DV-C 型,美国博勒飞公司;

流变仪:DHR-1 型,无锡市赛维商贸有限公司;

紫外分光光度计:TU-1810 型,北京普析通用仪器有限公司;

扫描电镜:FEI Quanta 450 型,美国 FEI 公司;

低温冷冻制备传输系统:PP3000T 型,英国 Quorum 公司。

1.2 方 法

1.2.1 虾滑样品的制备 将冷冻白鲢鱼糜取出后解冻至中心温度约-6℃,切成约 5 cm 厚的片状,用 4 mm 孔板绞制,放入预冷的斩拌机中低速斩拌 8 min,加入 3%食盐高速斩拌 6 min,取出备用。

冷冻的虾仁冰水完全解冻沥干后,与斩拌后的鱼糜按质量比 8:2 于已预冷的斩拌机中低速斩拌 2 min,添加 3%食盐,高速斩拌 5 min,分别加入 0%,2%,4%,6%,8%的海藻糖、山梨糖醇和胶原蛋白肽,斩拌 2 min,取出浆料装入样品袋,-60℃冻藏 3 h 至中心温度达到-18℃后取出,-18℃冻藏备用。

1.2.2 反复冻融试验 将样品于 4℃解冻 12 h 后,继续于-18℃冻藏过夜,反复解冻 3 次。

1.2.3 凝胶强度测定 参考 Zhong 等^[13]的方法并修改。将虾滑样品用 48 mm 塑料肠衣灌肠,采用一段式加热,90℃水浴 30 min 后冰水冷却 30 min,平衡至室温后剥去肠衣切成 2 cm 高的圆柱体。使用质构仪 P5S 探头,测前、中、后速度分别为 5.0,1.0,5.0 mm/s,形变 15 mm,感应力 0.049 N。

1.2.4 流变学特性测定 参考 Zhong 等^[13]的方法。振动频率 1 Hz,应变 1%,以 2℃/min 的速度从 20℃升温至 90℃,记录升温过程中储能模量 G' 。

1.2.5 盐溶性蛋白含量测定 参考 Chen 等^[14]的方法并修改。取 10 g 虾滑样品,加入 100 mL 蒸馏水,均质,4℃搅拌提取 1 h,4℃、12 000 r/min 离心 20 min,取沉淀重复加蒸馏水、均质、搅拌提取、离心,按 $m_{\text{沉淀}}:V_{\text{溶液}}$ 为 1:10 (g/mL) 加入 1 mol/L 的 NaCl 溶液,均质,4℃提取 1 h,4℃、12 000 r/min 离心 20 min,沉淀重复提取一次,合并上清液,即为盐溶性蛋白。按 GB 5009.5—2016 测定上清液中蛋白质含量。

1.2.6 巯基含量测定 按照巯基试剂盒说明书进行测定。

1.2.7 黏度测定 称取 40 g 虾滑浆料,加入 80 g 蒸馏水,高速均质 1 min 使其形成糊状匀浆,用数显黏度计 06 转子于 20 r/min 下进行测定,记录转子伸入匀浆 1 min 时的数据。

1.2.8 扫描电镜 参考肖媛等^[15]的方法并修改。在样品台上涂抹导电炭胶,用镊子夹起样品粘在导电炭胶上。将粘有样品的样品台投入液氮雪泥中速冻 30 s,使用低温冷冻制备传输系统在真空状态下将其转移至样品制备腔

室,进行断裂、升华、镀金处理。样品于 -90°C 升华10 min后以10 mA的电流溅射镀金60 s,送入扫描电镜样品室观察,冷台温度 -140°C ,加速电压10 kV,放大倍数4 000。

1.2.9 数据分析 采用Excel、SPSS 26软件进行统计学分析,结果表示为平均值 \pm 标准差,采用Origin 2018软件绘制图表, $P<0.05$ 代表差异显著。

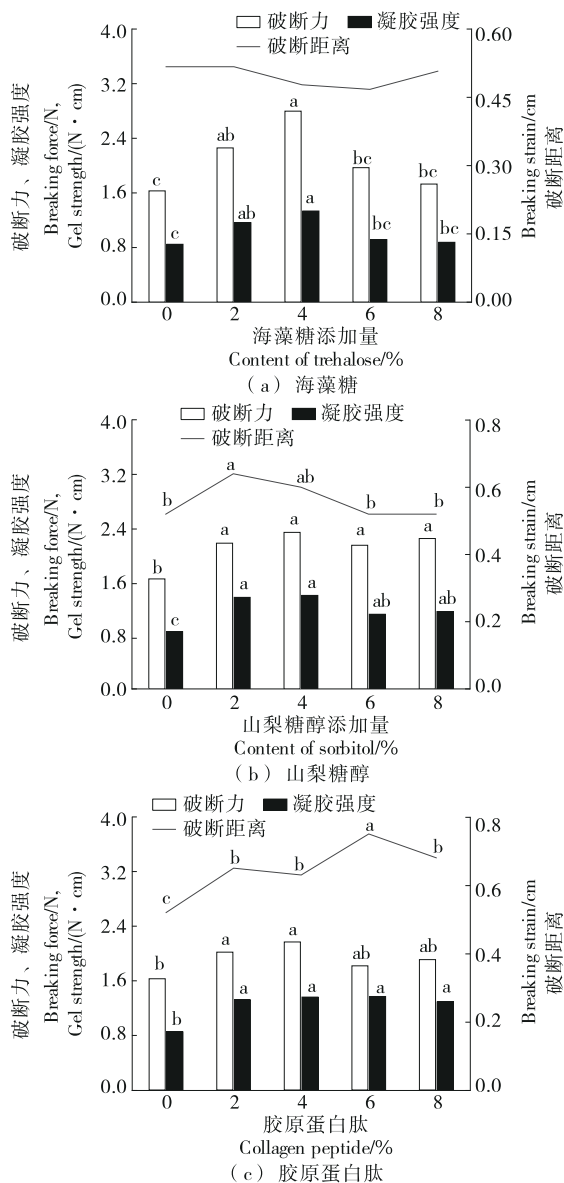
2 结果与分析

2.1 凝胶强度

由图1可知,3种抗冻剂均能减缓蛋白变性,使其具有高于空白组的凝胶强度。添加海藻糖可显著提高虾滑的破断力和凝胶强度($P<0.05$),添加量为4%时的凝胶强度最大,比空白组提高了58.21%。随着山梨糖醇添加量的增加,虾滑的破断力先显著增加后趋于平缓,凝胶强度先增大后减小,添加2%~4%的山梨糖醇能使反复冻融后的虾滑保持较高的凝胶强度。这可能是由于海藻糖和山梨糖醇属于糖类物质,其含有的游离羟基可与水分子结合形成氢键,减少冰晶的生成,同时可与蛋白质分子中的某些基团作用,限制蛋白质分子间的聚集,减少蛋白变性^[16]。但添加量过高则可能会使离子强度处于较高水平,降低 Ca^{2+} -ATP酶活性,不利于肌球蛋白的交联^[17]。当胶原蛋白肽的添加量为2%时,虾滑的破断力、破断距离和凝胶强度显著增加($P<0.05$),且具有比同等添加量下海藻糖和山梨糖醇更高的凝胶强度。随着胶原蛋白肽添加量的增加,虾滑的凝胶强度差异不显著但保持在较高水平,凝胶强度提高了52.8%~60.9%,表明添加2%的胶原蛋白肽即可较好地抑制冻融过程中的蛋白变性。研究^[8,18]表明,蛋白肽具有热滞后活性,可降低冰晶的冰点,但不影响融化温度,造成冰点和熔点之间的温差,从而抑制冰晶生长和减少由冻融引起的再结晶。蛋白肽与肌球蛋白、带电氨基酸残基以及暴露在表面的疏水残基之间形成的氢键、离子键、疏水相互作用也可改善产品的质构特性^[19]。此外,胶原蛋白肽属于蛋白三肽,具有Gly-X-Y结构,其游离氨基酸可通过与水形成氢键和冰晶平面结合,阻止水分子再进入形成巨大冰晶体,从而提高凝胶强度^[20]。

2.2 流变学特性

储能模量(G')受蛋白质分子间相互作用的影响,可反映蛋白质凝胶网络的储能能力,即反应物质的弹性特征,其值越大,表明凝胶网络的弹性越好^[21]。由图2可知,在20~90 $^{\circ}\text{C}$ 升温过程中, G' 出现2次上升,第1次升高是由于肌球蛋白去折叠后头部聚集,并通过疏水相互作用初步形成弹性蛋白网络结构;第2次增加可能是由于蛋白质侧链的交联聚合形成大分子,进一步形成蛋白凝胶并改善网络结构^[22]。



小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)

图1 抗冻剂对虾滑反复冻融后凝胶强度的影响

Figure 1 Effects of different cryoprotectants on shrimp paste gel strength after repeated freeze-thaw

由图2可知,当海藻糖添加量为4%时,虾滑的储能模量最大。4%山梨糖醇添加组也可获得远大于空白组的储能模量,可能是由于糖类可以诱导蛋白质之间的交联,使凝胶网络结构更加紧密稳定^[23],也可能是海藻糖对冷冻贮藏后鱼糜的冷冻保护效果优于山梨糖醇和蔗糖^[24]。当胶原蛋白肽添加量为2%时,虾滑的储能模量最大,添加量过高则会使 G' 减小,这归因于胶原蛋白肽可以在冷冻贮藏过程中抑制肌原纤维蛋白变性,减缓凝胶形成能力的下降并增加加热过程中蛋白质去折叠的程度,从而获得更好的凝胶结构^[22]。然而,高浓度的添加会导致游

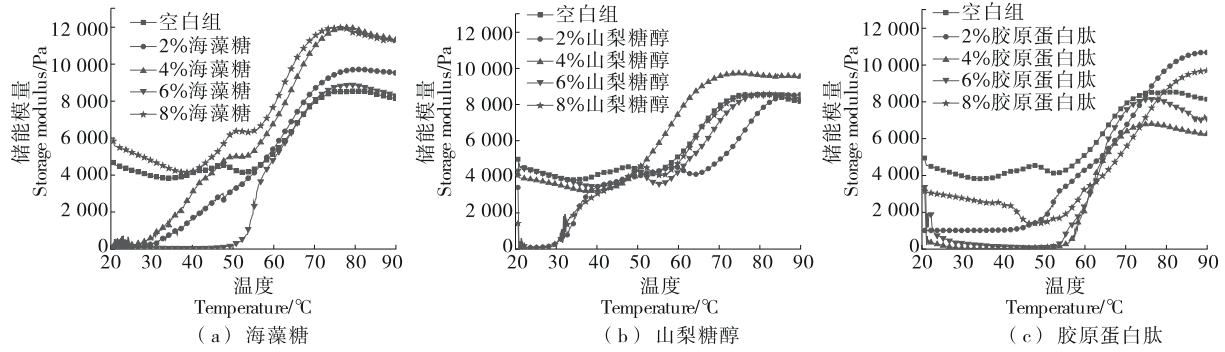


图 2 抗冻剂对虾滑反复冻融后流变学特性的影响

Figure 2 Effects of different cryoprotectants on shrimp paste storage modulus after repeated freeze-thaw

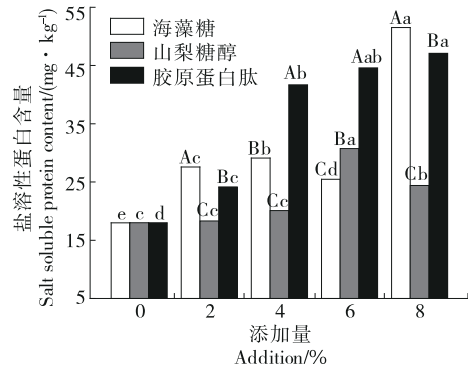
离氨基酸含量过高,抑制凝胶网络结构的形成,从而使弹性下降^[25]。添加胶原蛋白肽后的储能模量小于海藻糖添加组,可能与胶原蛋白肽主要作用于抑制蛋白结构的氧化与变性有关。综上,添加 4% 海藻糖、4% 山梨糖醇、2% 胶原蛋白肽可减少冻融过程中冰晶对蛋白造成的损伤,使凝胶后的虾滑具有更好的弹性网络结构,与凝胶强度结果一致。

2.3 盐溶性蛋白含量

冻融过程中,疏水氨基酸和巯基暴露出来,形成疏水键和二硫键,加速肌原纤维蛋白的聚集和变性,最终导致盐溶性蛋白含量降低^[14]。由图 3 可知,添加海藻糖、山梨糖醇和胶原蛋白肽后虾滑的盐溶性蛋白含量显著高于空白组($P < 0.05$)。添加抗冻剂可减少蛋白分子间氢键、疏水键、二硫键的形成,从而提高盐溶性蛋白含量^[3]。这也表明 3 种抗冻剂均能抑制蛋白在冷冻过程中的聚集变性。其中,海藻糖添加组与胶原蛋白肽添加组对盐溶性蛋白含量的提升效果优于山梨糖醇添加组。低含量的山梨糖醇(2%~4%)对盐溶性蛋白含量的影响不显著,当山梨糖醇添加量为 6% 时,盐溶性蛋白含量显著增加($P < 0.05$),继续添加山梨糖醇,盐溶性蛋白含量未增加,但仍显著高于空白组,表明添加 6%~8% 的山梨糖醇可较好地延缓虾滑冻融过程中的蛋白变性,与黄建联^[17]的研究结果一致。当海藻糖和胶原蛋白肽添加量仅为 2% 时,盐溶性蛋白含量可分别提高 53.33% 和 34.17%,继续添加至 4% 和 6%,胶原蛋白肽添加组的盐溶性蛋白含量显著高于海藻糖添加组和山梨糖醇添加组。这可能是由于胶原蛋白肽在结合游离水、减少冰晶对蛋白结构变化的同时,还具有抗氧化活性,从而减缓氧化诱导的肌原纤维蛋白结构的变化^[20]。

2.4 巯基含量

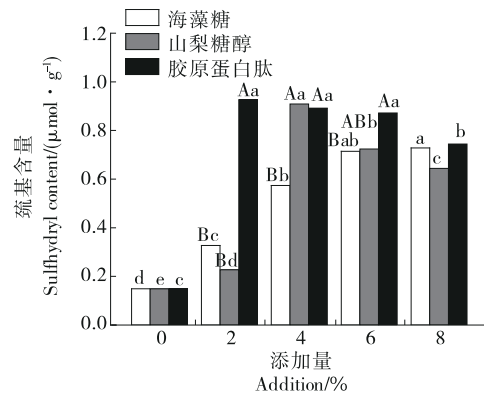
巯基大多数分布在肌球蛋白头中,在维持蛋白质的三级、四级结构中发挥重要作用^[26]。冻融过程中,半胱氨酸中的巯基易暴露氧化生成二硫键,导致巯基含量逐渐降低,二硫键含量增加,蛋白发生聚集^[27]。由图 4 可知,添



字母不同表示组间差异显著 ($P < 0.05$)

图 3 抗冻剂对虾滑反复冻融后盐溶性蛋白含量的影响
Figure 3 Effects of different cryoprotectants on salt-soluble protein content of shrimp paste after repeated freeze-thaw

加海藻糖、山梨糖醇和胶原蛋白肽均能显著提高巯基含量($P < 0.05$),表明 3 种物质均可有效延缓冻融过程中的蛋白变性。冻融后空白组的巯基含量仅为 0.15 $\mu\text{mol/g}$,



字母不同表示组间差异显著 ($P < 0.05$)

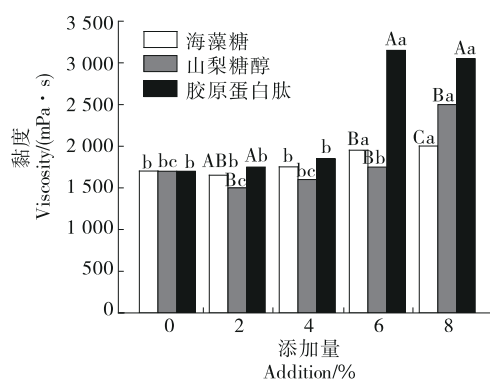
图 4 抗冻剂对虾滑反复冻融后巯基含量的影响
Figure 4 Effects of different cryoprotectants on shrimp paste sulfhydryl content after repeated freeze-thaw

添加4%海藻糖后巯基含量可达到 $0.57\ \mu\text{mol/g}$,且巯基含量随海藻糖添加量的增加继续增加,但增加趋势较为平缓。这与海藻糖能螯合促氧化剂,从而减少游离羟基的产生和巯基的暴露有关^[22]。添加4%山梨糖醇可使巯基含量提高至原来的6倍,继续增加添加量巯基含量下降,但仍明显高于空白组及2%山梨糖醇添加组。Kong等^[28]研究表明,添加山梨糖醇可作为防止氧化引发剂的屏障。然而,添加胶原蛋白肽可使巯基含量达到 $0.7\sim 0.9\ \mu\text{mol/g}$,且添加2%胶原蛋白肽可得到大于更高添加量海藻糖和山梨糖醇的巯基含量,表明胶原蛋白肽抑制蛋白氧化的效果优于海藻糖和山梨糖醇。Chen等^[29]研究发现,添加胶原蛋白可以抑制反应性巯基和疏水性芳香族氨基酸的暴露,从而阻止二硫键的形成。

2.5 黏度

虾滑经反复冻融后,蛋白变性过程常伴随蛋白自凝胶的发生,导致虾滑的黏性急剧下降,结构松散,不易成型,从而影响消费终端的食用与感官品质^[30]。由图5可知,当添加量 $<4\%$ 时,3种抗冻剂对黏度的改善效果均不显著。当抗冻剂添加量为6%时,黏度均显著高于空白组($P<0.05$)。冻融过程中肌原纤维蛋白溶出并在内源性TG酶的作用下发生缓慢凝胶,且蛋白经冷冻变性后聚集成大分子物质,从而使黏度下降^[30]。然而,添加抗冻剂可减缓肌原纤维蛋白的变性与聚集,使虾滑保持较好的黏度。当海藻糖、山梨糖醇、胶原蛋白肽添加量为6%时,虾滑黏度比空白组分别提高了14.7%,2.9%,85.3%,表明添加胶原蛋白肽对黏度的改善效果最为明显。胶原蛋白

中含有大量的亲水性氨基酸残基,这些残基可以与水相互作用形成氢键,防止水从蛋白质上脱落并保护蛋白质之间的氢键,通过与蛋白质的官能团结合来稳定其功能和结构特性,从而避免蛋白质空间结构的剧烈变化。此外,胶原蛋白可以与冰晶结合,抑制冰晶的生长,从而维持较好的网络结构和黏性^[29]。这也说明胶原蛋白肽对减缓蛋白冷冻变性的效果更佳,与巯基含量的结论基本一致。



字母不同表示组间差异显著($P<0.05$)

图5 抗冻剂对虾滑反复冻融后黏度的影响

Figure 5 Effects of different cryoprotectants on shrimp paste viscosity after repeated freeze-thaw

2.6 扫描电镜

由图6可知,空白组虾滑中存在较多聚集体,且网络孔洞不规则、表面凌乱,这可能是虾滑经反复冻融后,蛋

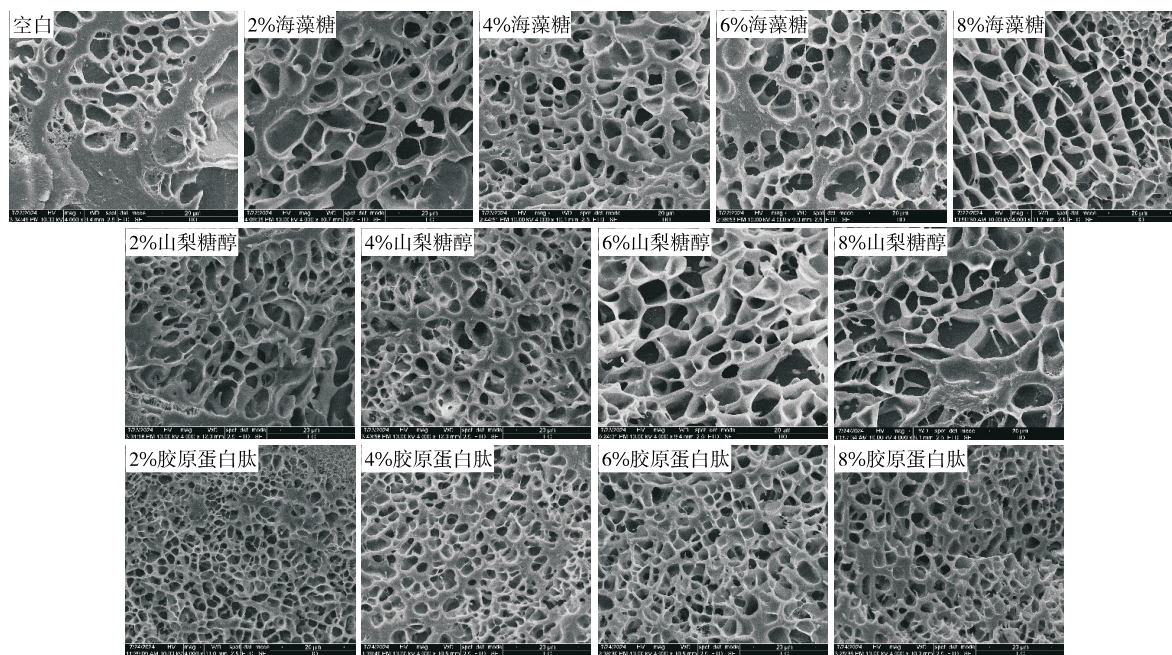


图6 抗冻剂对虾滑反复冻融后微观结构的影响

Figure 6 Effects of different cryoprotectants on shrimp paste microstructure after repeated freeze-thaw

白结构裂变、蛋白发生聚集所致。添加 3 种抗冻剂后, 虾滑的孔洞变小, 网络结构更为致密、有序。冷冻保护剂可以与游离水分子形成氢键, 抑制冰晶生长, 延迟蛋白质结构变化, 防止蛋白过度聚集和凝胶孔径增加^[18]。当海藻糖、山梨糖醇和胶原蛋白肽添加量分别为 4%, 4%, 2% 时, 虾滑结构最为致密, 与凝胶强度和储能模量的结果一致。然而, 胶原蛋白肽添加组虾滑凝胶网络孔径明显小于海藻糖添加组和山梨糖醇添加组, 这可归因于蛋白肽抑制冰晶生长、阻止冰晶重结晶的能力, 减少对蛋白的机械损伤。此外, 胶原蛋白肽还可以抑制蛋白冷冻造成的氧化和变质, 使其保持更规则有序的网络结构^[31]。这表明胶原蛋白肽抑制蛋白氧化的效果优于海藻糖添加组和山梨糖醇添加组, 与黏度和巯基含量的结果一致。

3 结论

添加 3 种抗冻剂均能减缓冻融过程中的蛋白变性。当海藻糖和山梨糖醇添加量为 4%~8% 时, 虾滑具有较高的储能模量、盐溶性蛋白含量、巯基含量、黏度和凝胶强度, 微观结构较为致密。添加胶原蛋白肽可使虾滑具有更高的巯基含量、黏度和更均匀致密的凝胶网络结构, 能更好地减缓蛋白变性, 抑制虾滑冻融过程中的品质劣变, 且其最佳添加量下的效果在 3 种抗冻剂中最佳。后续可进一步探究 3 种抗冻剂对虾滑的风味影响及机制, 全面评估添加抗冻剂的虾滑经反复冻融后的品质变化。

参考文献

[1] BANERJEE R, MAHESWARAPPA N B. Superchilling of muscle foods: potential alternative for chilling and freezing[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2019, 59(8): 1 256-1 263.

[2] ZHANG M C, LI F F, DIAO X P, et al. Moisture migration, microstructure damage and protein structure changes in porcine longissimus muscle as influenced by multiple freeze-thaw cycles [J]. *Meat Science*, 2017, 133: 10-18.

[3] DU X, LI H J, DONG C H, et al. Effect of ice structuring protein on the microstructure and myofibrillar protein structure of mirror carp (*Cyprinus carpio L.*) induced by freeze-thaw processes[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 139: 110570.

[4] 李敏涵, 李洪军, 李少博, 等. 抗冻保护剂在肉品及水产品贮藏保鲜中的应用研究进展[J]. *食品科学*, 2021, 42(1): 294-301. LI M H, LI H J, LI S B, et al. Application of cryoprotectants in the frozen storage of meat and aquatic products: a review[J]. *Food Science*, 2021, 42(1): 294-301.

[5] LING M P, HUANG J D, HSIAO H A, et al. Risk assessment of the dietary phosphate exposure in Taiwan population using a total diet study[J]. *Foods*, 2020, 9(11): 1 574.

[6] 刘建华, 苏琦, 罗亚洪, 等. 蛋白质及多肽作为水产品抗冻剂的应用及其机理[J]. *食品与发酵工业*, 2017, 43(10): 283-288. LIU J H, SU Q, LUO Y H, et al. Application and mechanisms of proteins and polypeptides as cryoprotectants in aquatic products [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2017, 43(10): 283-288.

[7] NIKOO M, BENJAKUL S, RAHMANIFARAH K. Hydrolysates from marine sources as cryoprotective substances in seafoods and seafood products[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2016, 57: 40-51.

[8] LIU J H, FANG C H, LUO Y H, et al. Effects of konjac oligo-glucomannan on the physicochemical properties of frozen surimi from red gurnard (*Aspitrigla cuculus*) [J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 89: 668-673.

[9] LIU Z L, YANG W G, WEI H M, et al. The mechanisms and applications of cryoprotectants in aquatic products: an overview [J]. *Food Chemistry*, 2023, 408: 135202.

[10] JENKELUNAS P J, LI-CHAN E C Y. Production and assessment of pacific hake (*Merluccius productus*) hydrolysates as cryoprotectants for frozen fish mince[J]. *Food Chemistry*, 2018, 239: 535-543.

[11] YASEMI M. Prevention of denaturation of freshwater crayfish muscle subjected to different freeze-thaw cycles by gelatin hydrolysate[J]. *Food Chemistry*, 2017, 234: 199-204.

[12] 梁嘉健, 陈秀娟, 韩梅, 等. 鲑鱼皮胶原蛋白肽抗冻活性及其作用机制[J]. *广东海洋大学学报*, 2024, 44(5): 115-124. LING J J, CHEN X J, HAN M, et al. Anti-freeze activity of cod Skin collagen peptide and its mechanism of action[J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2024, 44(5): 115-124.

[13] ZHONG Q, WANG Y D, TIAN Y X, et al. Effects of anthocyanins and microbial transglutaminase on the physicochemical properties of silver carp surimi gel[J]. *Journal of Texture Studies*, 2023, 54(4): 541-549.

[14] CHEN X, LI X Z, YANG F J, et al. Effects and mechanism of antifreeze peptides from silver carp scales on the freeze-thaw stability of frozen surimi[J]. *Food Chemistry*, 2022, 396: 133717.

[15] 肖媛, 邢振飞, 李婷婷, 等. 雨生红球藻的冷冻扫描电镜制样条件初探[J]. *电子显微学报*, 2016, 35(4): 361-364. XIAO Y, XING Z F, LI T T, et al. Preliminary study on the sample preparation conditions of cryo-scanning electron microscopy for *Haematococcus pluvialis*[J]. *Journal of Chinese Electron Microscopy Society*, 2016, 35(4): 361-364.

[16] PARVATHY U, GEORGE S. Influence of cryoprotectant levels on storage stability of surimi from *Nemipterus japonicus* and quality of surimi-based products[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2014, 51(5): 982-987.

[17] 黄建联. 不同抗冻剂对冻藏鲢鱼滑品质特性的影响[J]. *中国食品学报*, 2019, 19(12): 204-212. HUANG J L. Effect of different cryoprotectants on quality properties of frozen silver carp slide[J]. *Journal of Chinese*

- Institute of Food Science and Technology, 2019, 19(12): 204-212.
- [18] NIAN L Y, CAO A L, CAI L Y. Investigation of the antifreeze mechanism and effect on quality characteristics of largemouth bass (*Micropterus salmoides*) during F-T cycles by hAFP[J]. Food Chemistry, 2020, 325: 126918.
- [19] ZHANG X D, ZHANG Y Q, LIU J K, et al. Effects of surimi by-product hydrolysates on processing quality and difference analysis of volatile compounds of silver carp surimi gel[J]. LWT- Food Science and Technology, 2024, 211: 116906.
- [20] LIN J, HONG H, ZHANG L T, et al. Antioxidant and cryoprotective effects of hydrolysate from gill protein of bighead carp (*Hypophthalmichthys nobilis*) in preventing denaturation of frozen surimi[J]. Food Chemistry, 2019, 298: 124868.
- [21] 陈婷婷, 郭全友, 包海蓉. 外源添加物和辅助加工技术对鱼糜凝胶动态流变中温度扫描的影响[J]. 食品与机械, 2023, 39(2): 214-220.
- CHEN T T, GUO G Y, BAO H R. Effects of exogenous additives and auxiliary processing techniques on temperature scanning in dynamic rheology of surimi gel[J]. Food & Machinery, 2023, 39(2): 214-220.
- [22] WU D, CAO Y, YIN T, et al. Inhibitive effect of trehalose and sodium pyrophosphate on oxidation and structural changes of myofibrillar proteins in silver carp surimi during frozen storage [J]. Food Research International, 2024, 187: 114361.
- [23] XIE F, ZHENG W Q, FU T T, et al. Cryoprotective effect of tamarind seed polysaccharide on grass carp surimi: characteristics, interactions, and mechanisms[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 153: 110022.
- [24] CAMPO-DEAÑO L, TOVAR C A, BORDERÍAS J. Effect of several cryoprotectants on the physicochemical and rheological properties of suwari gels from frozen squid surimi made by two methods[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 97(4): 457-464.
- [25] XU S J, LI P, HAN F, et al. Myofibrillar protein interacting with trehalose elevated the quality of frozen meat[J]. Foods, 2022, 11(7): 1 041.
- [26] ZHANG Y M, DONG M, ZHANG X Y, et al. Effects of inulin on the gel properties and molecular structure of porcine myosin: a underlying mechanisms study[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 108: 105974.
- [27] SOYER A, BERNA Ö, DALMIŞ Ü, et al. Effects of freezing temperature and duration of frozen storage on lipid and protein oxidation in chicken meat[J]. Food Chemistry, 2010, 120(4): 1 025-1 030.
- [28] KONG B H, GUO Y Y, XIA X F, et al. Cryoprotectants reduce protein oxidation and structure deterioration induced by freeze-thaw cycles in common carp (*Cyprinus carpio*) surimi[J]. Food Biophysics, 2013, 8(2): 104-111.
- [29] CHEN X, WU J H, LI X Z, et al. Investigation of the cryoprotective mechanism and effect on quality characteristics of surimi during freezing storage by antifreeze peptides[J]. Food Chemistry, 2022, 371: 131054.
- [30] 于希良, 蒯小雨, 谢伊莎, 等. 鱼肉颗粒及壳寡糖对中餐鱼滑品质的影响[J]. 中国食品学报, 2023, 23(10): 136-145.
- YU X L, LIN X Y, XIE Y S, et al. Effects of fish particles and chitosan oligosaccharides on the quality of Chinese fish slippery[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(10): 136-145.
- [31] YANG F J, JIANG W T, CHEN X, et al. Investigation on the quality regulating mechanism of antifreeze peptides on frozen surimi: from macro to micro[J]. Food Research International, 2023, 163: 112299.