

不漂洗鲢鱼鱼糜浸渍冻藏及其品质变化

Quality changes in the unwashed silver carp surimi during the immersion frozen storage

何羽茜^{1,2} 柏妮^{1,2} 王余德³

HE Yu-xi^{1,2} BO Ni^{1,2} WANG Yu-de³

俞健^{1,2} 刘永乐^{1,2} 王发祥^{1,2}

YU Jian^{1,2} LIU Yong-le^{1,2} WANG Fa-xiang^{1,2}

(1. 长沙理工大学食品与生物工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 湖南省水生资源食品加工工程技术研究中心, 湖南 长沙 410114; 3. 湖南师范大学生命科学学院, 湖南 长沙 410081)

(1. College of Food Science and Bioengineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha, Hunan 410114, China; 2. Human Provincial Engineering Research Center for Food Processing of Aquatic Biotic Resources, Changsha, Hunan 410114, China; 3. College of Life Science, Hunan Normal University, Changsha, Hunan 410081, China)

摘要:目的:研究浸渍冻藏(IFS)对不漂洗鲢鱼鱼糜品质变化的影响。方法:将鱼糜样品非接触浸入过冷液(-20 ± 2)℃冻藏 60 d,以传统空气冻藏(TFS)为对照,分析不漂洗鲢鱼鱼糜 Ca^{2+} -ATP 酶活性、羧基含量、硫代巴比妥酸值(TBA)以及凝胶强度、持水力和凝胶结构在冻藏过程中的变化规律。结果:IFS 组鱼糜冻结过程中通过最大冰晶生成带时间仅为 10 min,冻藏过程中温度波动幅度为 0.72℃,显著低于 TFS 组(分别为 78 min 和 1.43℃);冻藏过程中,鱼糜 Ca^{2+} -ATPase 活性、凝胶强度和持水力逐渐下降,蛋白质羧基含量、TBA 值逐渐上升,凝胶网络结构逐渐被破坏;但与 TFS 组相比,IFS 能明显减小这些指标的变化幅度。结论:浸渍冻藏能有效延缓鱼糜冻藏过程中的品质劣变,是一种有潜力的食品冷链技术。

关键词:鱼糜;过冷液;浸渍冻藏;温度波动;品质

Abstract: Objective: To evaluate the effect of immersion frozen storage (IFS) on quality of the unwashed silver carp surimi.

Methods: The surimi samples were immersed into liquid coolant non-contacted and stored at (-20 ± 2)℃ for 60 days, and changes in the Ca^{2+} -ATPase activity, carbonyl content,

thiobarbituric acid value (TBA), as well as the strength, water holding capacity and structure of surimi gel during frozen storage were analyzed, using the traditional frozen storage (TFS) as a control. **Results:** The results were showed that surimi in IFS group passed through the maximum ice crystal formation zone in 10 min, which was much faster than that of surimi with TFS group (78 min). The temperature fluctuation range during the whole storage period in IFS and TFS group was 0.72℃ and 1.43℃, respectively. With prolongation of frozen storage time, the Ca^{2+} -ATPase activity, gel strength and water holding capacity of all samples gradually decreased, while protein carbonyl content and TBA value of all samples gradually increased, and the surimi gel network structure was gradually destroyed. However, changes of all the above indicators for IFS group were distinctly smaller than those for TFS group. **Conclusion:** IFS could effectively alleviate the deterioration of surimi quality during storage, and was a potential low-temperature cold chain technique for food processing and preservation.

Keywords: surimi; supercooled liquid; immersion frozen storage; temperature fluctuation; quality

基金项目:国家重点研发计划项目(编号:2020YFD0900104);湖南省重点研发计划项目(编号:2022NK2038)

作者简介:何羽茜,女,长沙理工大学在读硕士研究生。

通信作者:王发祥(1978—),男,长沙理工大学副教授,博士。

E-mail: wfx@csust.edu.cn

收稿日期:2022-09-02 **改回日期:**2022-12-10

鱼糜是鱼肉经过一定工序制得的鱼肉制品^[1]。传统鱼糜加工需要通过漂洗工序浓缩鱼肌纤维蛋白,除去鱼肉中的脂肪、血液和色素等,增强鱼糜的凝胶强度和感官质量。但漂洗过程会产生水的消耗和废物处理等问题,还会降低鱼糜营养和风味物质^[2]。因此,研究开发不漂洗鱼糜近年来逐渐成为热点,但目前其加工技术在基础

理论研究和实际应用中仍存在诸多问题,如凝胶形成能力较差、贮藏过程中易品质劣变等^[3]。

冷冻保藏是目前最常用的食品贮藏方法之一,被广泛应用于肉、禽、水产等易腐食品的生产、运输和贮藏。鱼糜加工成型后一般需要迅速冻结,然后在冷冻条件下贮藏一段时间,在冻结和长期冻藏过程中,冰晶的形成和冷冻浓缩效应导致肌原纤维蛋白变性和组织损伤,鱼糜的凝胶特性和质量逐渐下降^[4-5]。为最大程度保持鱼糜产品的质量,延长保质期,除添加高效抗冻剂外,各类速冻技术也应运而生^[6]。浸渍式冷冻是指冷冻物料与液体载冷剂接触,换热后物料迅速降温及冻结,是一种新型高效的冷冻技术,相对于传统的板式冷冻和空气冷冻,具有冷冻速率快、能耗低、冻品品质高等优点^[7]。Qian等^[8]利用浸渍冷冻处理鲮鱼样品,发现其组织纤维的结构完整性比空气冷冻处理组更好;Yang等^[9]研究发现河豚鱼片浸渍冷冻的冻结速度是空气冷冻的4.17倍,且形成的冰晶更小更均匀。尽管研究表明冻结过程对食品质量的损害更大^[10],但冻藏过程中环境温度的波动也会使蛋白质发生变性、聚集与功能特性丧失^[3,11],严重影响鱼糜的质地和凝胶性能,因为温度波动会导致冰晶重结晶^[12-13],对组织会造成更大的机械损伤^[14],同时加速鱼糜中蛋白质变性、氧化和脂肪氧化等不良生化反应^[15]。因此,除了提高冻结速率,减少冻藏过程中的温度波动也是改善鱼糜贮藏过程中品质劣变的关键。

浸渍冷冻以液体为载冷介质,传热效率是传统空气冻结的20倍以上,能够快速吸收食品内部的热量,到达速冻的效果^[6]。然而,目前对浸渍冷冻技术的研究和应用基本集中在冻结环节,而对于浸渍冻藏过程则很少涉及。相对于传统鱼糜,不漂洗鲢鱼鱼糜中含有较多的水溶性蛋白质(酶)、不饱和脂肪酸及金属离子等,在冻藏过程中更容易发生氧化、降解等生化变化,但目前关于浸渍冻藏对不漂洗鱼糜品质变化影响的研究还十分匮乏。研究拟通过比较分析浸渍冻藏和空气冻藏60 d期间不漂洗鲢鱼鱼糜凝胶特性、蛋白质和脂肪氧化等品质指标的变化规律,揭示浸渍冻藏技术对提升鱼糜冻藏稳定性的作用,为开发新型水产品冷链物流技术提供理论依据和技术参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

新鲜鲢鱼:每尾重 (2.0 ± 0.2) kg,市售;

氯化钠、三氯乙酸(TCA)、没食子酸丙酯(PG)、乙二胺四乙酸二钠(EDTA-2Na)、2,4-二硝基苯肼(DNPH)、2-硫代巴比妥酸(TBA)及其他试剂:国产分析纯。

1.1.2 主要仪器设备

斩拌机:ZB-20型,山东省诸城市华钢机械有限公司;
电热偶测温记录仪:YET-620L型,兴华市苏玛电器

仪表有限公司;

热电偶:KPS-T-1000-SMPW-G开普森T型,泰州众投贸易有限公司;

扫描电镜:JEOL JSM 5900LV型,日本日立公司;

质构仪:TA·XTplus型,英国Stable Micro System公司;

台式低速离心机:LD5-10型,北京京立离心机有限公司;

恒温摇床:HZQ-X100型,常州诺基仪器有限公司;

紫外分光光度计:TU-1901型,北京普析通用仪器有限公司。

1.2 方法

1.2.1 不漂洗鲢鱼鱼糜及鱼糜凝胶的制备 参考李婷等^[17]的方法,将新鲜鲢鱼宰杀后采背部肌肉,放入斩拌机中于 $0 \sim 4$ °C下预斩1 min,按每100 g鱼肉加入2.5 g食盐继续斩拌5 min,即为生鱼糜样品。将生鱼糜分装于若干带盖塑料盒中(每盒23 g)并用包装袋密封(以确保过冷液不与鱼糜直接接触),然后等分成两部分,第一部分直接置于 (-20 ± 2) °C冰箱冻藏,另一部分先浸入过冷液[280 g/L的CaCl₂溶液,提前24 h置于 (-20 ± 2) °C的冰箱中预冻备用]中,再置于和第一部分相同的冰箱冻藏(冻藏期间样品一直浸入过冷液中),分别在冻藏第0,1,7,15,30和60天取出,于4 °C解冻12 h进行后续试验。

称取上述冻藏不同时间的生鱼糜样品约10 g置于15 mL塑料离心管(Φ 17 mm $\times$ 120 mm)中,于4 °C、6 000 r/min离心10 min后,40 °C预加热30 min,再90 °C加热30 min制得鱼糜凝胶,于冰水中冷却20 min后保存于4 °C冰箱待测。

1.2.2 鱼糜样品中心温度监控 鱼糜样品冻结和冻藏期间的温度变化监测参考Diao等^[7]的方法稍作修改。将外径尺寸为2 mm $\times$ 0.5 mm的热电偶插入鱼糜样品中心并连接测温记录仪,实时监测鱼糜样品中心温度。鱼糜样品冻结曲线的采样率为10 s/个,测量至两组鱼糜样品中心温度均达到 -20 °C并平衡1 h左右后停止;鱼糜样品冻藏期间温度波动的采样率为60 s/个,测量24 h后停止。

1.2.3 凝胶强度的测定 鱼糜凝胶从冰箱取出,室温下平衡30 min后切成高2.5 cm的圆柱体。参考王崑等^[18]的方法使用配置球形探头P/5S的质构仪测定其破断力(N)和破断距离(cm),两者之积即为凝胶强度(N $\cdot$ cm)。质构仪设定为压缩距离测定模式,参数设置:测前、测中、测后速度分别为1.00,1.10,10.00 mm/s,压缩距离为15.000 mm,触发力为0.1 N。

1.2.4 持水力的测定 参考胡曼子等^[19]的方法并稍作修改。将鱼糜凝胶切成5 mm厚的薄片,准确称重,用两层滤纸包裹样品于50 mL离心管中,4 °C、3 000 r/min离心

20 min, 根据离心前后样品质量计算鱼糜凝胶的持水力。

1.2.5 鱼糜 Ca^{2+} -ATPase 活性和羰基含量测定

(1) 鱼糜蛋白样品制备: 参考 Li 等^[20]的方法, 称取 2 g 解冻后生鱼糜样品, 加入 40 mL 磷酸缓冲液 (pH 为 7.0, 含 0.5 mol/L NaCl 和 15.6 mmol/L NaH_2PO_4), 充分匀浆后于 4 °C 静置提取 1 h, 4 °C、6 000 r/min 离心 10 min, 上清液即为鱼糜蛋白质提取液, 以福林酚试剂法测定其蛋白含量, 将其质量浓度调整为 1.0 g/L 进行 Ca^{2+} -ATPase 活性和羰基含量测定。

(2) Ca^{2+} -ATPase 活性测定: 参考 Benjakul 等^[21]和 Li 等^[20]的方法, 取 2 mL 的鱼糜蛋白样品与 0.5 mL Tris-HCl 缓冲液 (0.5 mol/L, pH 7.0), 8 mL CaCl_2 溶液 (10 mmol/L) 和 0.5 mL ATP (20 mmol/L, pH 7.0) 反应 8 min; 立即加入 5 mL 15 g/100 mL 三氯乙酸 (TCA, 4 °C) 终止反应, 混合物以 6 000 r/min 离心 5 min, 通过钼酸铵比色法测量上清液中的无机磷含量, Ca^{2+} -ATPase 活性以每毫克蛋白每分钟释放的无机磷 (Pi) 微克数表示。

(3) 羰基含量测定: 参考 Li 等^[20]的方法稍作修改。取 1.8 mL 鱼糜蛋白样品于离心管中, 加入 1.8 mL 10 mmol/L DNPH 溶液, 在室温下暗处反应 1 h 后加入 20% TCA, 于 4 °C 下 6 000 r/min 离心 15 min, 弃上清液, 用 3 mL 乙酸乙酯—乙醇溶液 ($V_{\text{乙酸乙酯}}:V_{\text{乙醇溶液}}=1:1$) 清洗沉淀 3 次, 加 3 mL 6 mol/L 盐酸胍后, 置于 37 °C、150 r/min 的摇床中振荡 1 h 后, 在 370 nm 处测定其吸光值, 计算羰基含量。

1.2.6 硫代巴比妥酸 (TBA 值) 的测定 参考米红波等^[22]的方法并稍作修改, 准确称取 1.00 g 生鱼糜样品加入 10 mL 7.5% TCA 混合液 (含有 0.1% 没食子酸丙酯、0.1% EDTA-2Na), 均质 30 s, 用双层滤纸过滤后取 5 mL 上清液, 再加入 5 mL 0.02 mol/L 的 TBA, 置于 90 °C 水浴锅中加热 30 min, 冷却后在 532 nm 处测吸光值。同时做空白和标曲。TBA 值以每克鱼糜样品中丙二醛 (MDA) 的毫克数表示。

1.2.7 鱼糜凝胶微观形貌 参考 Li 等^[20]的方法。鱼糜凝胶从冰箱取出, 室温下平衡 30 min 后切成厚度为 1 mm

的薄片, 用液氮冷冻 3 min 后置于预冷的真空冷冻干燥机中冻干 14 h。样品喷金 1 min 后, 使用 SEM 在 20.0 kV 的加速电压下观察。

1.2.8 数据处理 每组试验至少重复 3 次, 结果以平均值±标准差表示; 试验数据采用 Excel 软件处理, 以 Origin 9 软件作图; 使用 SPSS 23 软件进行方差分析 (ANOVA), 采用多重比较分析法对各组进行显著性检验 ($P<0.05$)。

2 结果与讨论

2.1 不同冻藏方式下鱼糜样品的中心温度变化

如图 1(a) 所示, 在冻结阶段, 浸渍冻藏组温度下降较快, 鱼糜中心温度从 10 °C 降至 0 °C 仅需 5 min, 从 0 °C 降至 -20 °C 约需要 94 min, 而空气冻藏组鱼糜降到相同的温度分别耗时 19, 198 min。此外, 浸渍冻藏组鱼糜冻结时通过最大冰晶生成带 (-1~-5 °C)^[23] 的时间约为 10 min, 为空气冻藏组 (78 min) 1/8 左右。一般来说, 样品在最大冰晶生成带停留时间越短, 形成的冰晶颗粒越小越均匀, 对样品品质影响越小。因此, 浸渍冻藏因为液体媒介导热快而具有速冻效果, 可减少冻结对鱼糜质量的损伤。

除了冷冻速率, 冻藏或转运过程中的温度波动也对冻品质量具有很大影响^[24]。由图 1(b) 可见, 在鱼糜中心温度达到 -20 °C 后, 两组样品在冻藏过程中均存在明显的温度波动, 其中浸渍冻藏组的波动幅度为 0.72 °C (-20.79~-20.07 °C), 明显小于空气冻藏组 (1.43 °C), 空气冻藏组的温度波动约为浸渍组的 2 倍。这可能与液体媒介的比热容较大, 温度变化受环境影响较小有关。因此, 浸渍冻藏过程中样品的温度波动相对较小, 有利于抑制冰的重结晶, 阻止冰晶尺寸和形状变化, 从而稳定冻品的质量。

2.2 浸渍冻藏过程中鱼糜 Ca^{2+} -ATPase 活性和羰基含量变化

Ca^{2+} -ATPase 活性能反映肌球蛋白的完整性和变性程度。其活性下降可视为是肌球蛋白头部巯基氧化和蛋

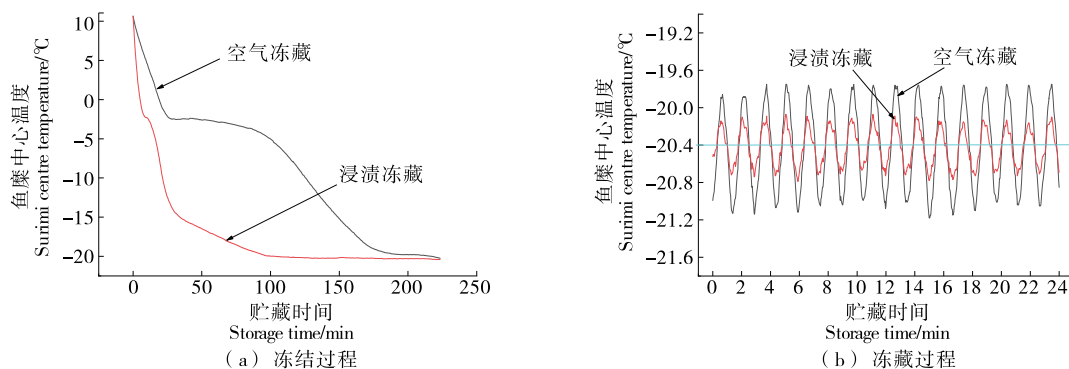
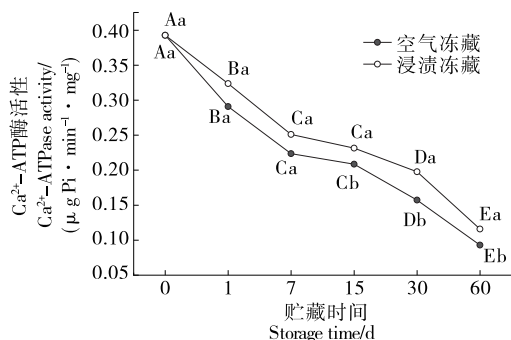


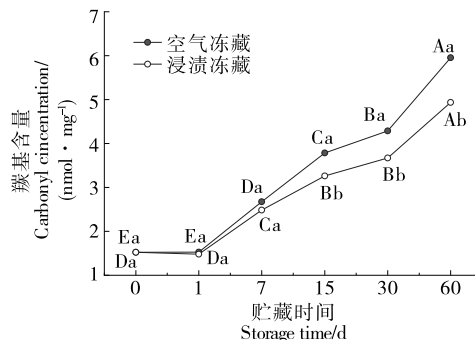
Figure 1 Freezing curve and a 24-hours temperature monitoring during frozen storage for surimi samples

白交联引起的蛋白质变性^[25]。由图 2(a)可见,两种冻藏方式下鱼糜蛋白质 Ca^{2+} -ATPase 活性均随冻藏时间的延长显著下降($P<0.05$),表明冻藏过程中蛋白质变性程度不断增加;可能是因为冰晶的生长导致蛋白质三级结构破坏、体系浓度增加以及蛋白质重排交联,使肌球蛋白头部发生变化而变性^[26]。冻藏 15 d,浸渍冻藏组 Ca^{2+} -ATPase 活性由 $0.39 \mu\text{g Pi}/(\text{mg} \cdot \text{min})$ 剧烈下降至 $0.23 \mu\text{g Pi}/(\text{mg} \cdot \text{min})$,降幅为 41%,而相同空气冻藏组

样品的降幅为 47%,降幅明显低于空气冻藏组;冻藏 60 d,浸渍冻藏组 Ca^{2+} -ATPase 活性为 $0.12 \mu\text{g Pi}/(\text{mg} \cdot \text{min})$,显著高于空气冻藏组的($P<0.05$)。这可能与图 1 中浸渍冻藏的速冻效果及温度波动较小有关,速冻使鱼糜内部形成的冰晶体积较小且均匀,从而减轻了肌原纤维蛋白变性;此外,肌球蛋白头部巯基氧化也是 Ca^{2+} -ATPase 活性降低的部分原因^[25],而控制样品温度波动可有效减轻氧化反应的发生^[27]。



(a) Ca^{2+} -ATPase 活性



(b) 羰基含量

大写字母不同表示同一冻藏方式不同贮藏时间之间差异显著($P<0.05$);小写字母不同表示同一贮藏时间不同冻藏方式之间差异显著($P<0.05$)

图 2 鱼糜冻藏过程中蛋白质 Ca^{2+} -ATPase 活性和羰基含量的变化

Figure 2 Changes in the protein Ca^{2+} -ATPase activity and carbonyl compounds of surimi during frozen storage

蛋白羰基含量是蛋白质氧化损伤的敏感指标。由图 2(b)可见,无论是浸渍冻藏还是空气冻藏,鱼糜蛋白羰基含量均随冻藏时间增加而显著上升($P<0.05$),表明冻藏过程中鱼糜蛋白质持续发生了不同程度的氧化。在相同的冻藏周期,浸渍冻藏组样品的羰基含量均低于空气冻藏组,尤其在冻藏 15~60 d,浸渍冻藏组样品的羰基含量增加了 2.1 倍,而空气冻藏组则增加了 2.5 倍,显著高于浸渍冻藏组($P<0.05$)。这可能是因为冻藏期间鱼糜样品内部的氧化反应依然在进行,而传统空气冻藏诱导了更多的蛋白质变性或去折叠^[26],比浸渍冻藏组更有利于形成席夫碱等反应,从而使胺与羰基之间的反应速度更快^[28],生成更多的羰基化合物,这也与 Ca^{2+} -ATPase 活性变化的结果吻合。

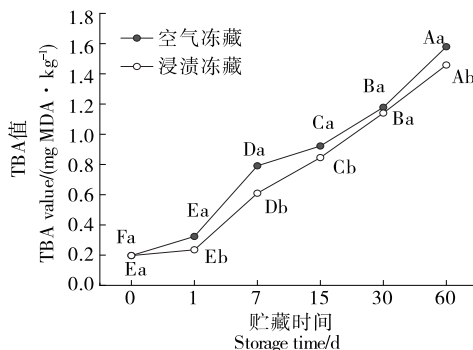
2.3 浸渍冻藏过程中鱼糜 TBA 值的变化

TBA 值反映了脂质氧化过氧化物降解产物丙二醛(MDA)的水平,是表征食品脂肪氧化程度的常用指标^[29],鱼糜样品在冻藏过程中 TBA 值的变化如图 3 所示。随着冻藏时间的延长,两种冻藏方式下鱼糜样品的 TBA 值均显著上升($P<0.05$),表明冻藏过程中发生了脂质氧化反应,可能与不漂洗鱼糜中含有较高含量的不饱和脂肪酸有关,其不断氧化导致产生了更多的氢过氧化物降解产物(如 MDA)。冻藏过程中,浸渍冻藏组的鱼糜样品 TBA 值明显低于空气冻藏组,且冻藏前 15 d 差异更显著($P<0.05$),说明浸渍冻藏一定程度上能抑制鱼糜中脂质氧化,可能是由于其形成的冰晶较小,减轻了鱼糜

组织的损伤,从而减少了血红素、金属离子等促氧化剂的释放,延缓了脂质氧化,与 Wang 等^[30]的研究结论一致。此外,与传统漂洗鱼糜相比,不漂洗鱼糜初始 TBA 值较高,贮藏过程上升也较快^[31],但其冻藏 60 d 内的蛋白质羰基含量差异不显著^[32],说明脂质氧化对不漂洗鱼糜贮藏过程中的品质变化影响更大,加工过程中可以考虑添加合适的抗氧化物质。

2.4 浸渍冻藏过程中鱼糜凝胶强度的变化

鱼糜凝胶主要是由肌原纤维蛋白分子中暴露在一定温度下的疏水基团之间的分子间相互作用形成^[33],是冷



大写字母不同表示同一冻藏方式不同贮藏时间之间差异显著($P<0.05$);小写字母不同表示同一贮藏时间不同冻藏方式之间差异显著($P<0.05$)

图 3 鱼糜冻藏过程中 TBA 值的变化

Figure 3 Changes in the TBA value of surimi during frozen storage

冻鱼糜商业价值的重要指标。由图 4 可见,随着冻藏时间增加,鱼糜凝胶的凝胶强度呈下降趋势,且冻藏前 7 d 下降尤为显著($P<0.05$),可能是因为冻结及冻藏过程中肌原纤维蛋白发生了冷冻变性,导致鱼糜凝胶强度下降,从而降低了鱼糜品质。与空气冻藏组相比,浸渍冻藏组样品的凝胶强度下降幅度较小,如冻藏第 60 天,浸渍冻藏组样品的凝胶强度下降了 39%,而空气冻藏组的降幅为 44%;但可能是因为质构仪测定结果的误差较大,两组样品凝胶强度的差异并不显著。此外,不漂洗鱼糜因未经漂洗除去影响鱼糜凝胶形成的各种成分,通常其制品的凝胶强度要低于传统漂洗鱼糜^[34],加工过程中可以通过添加某些改良剂^[35]提高凝胶强度,改善口感。

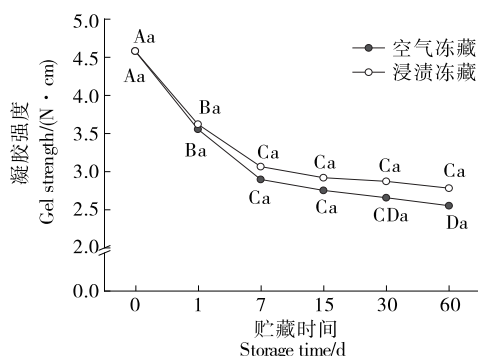
2.5 浸渍冻藏过程中鱼糜凝胶持水力的影响

持水力反映了鱼糜凝胶结合(截留)水的能力,是决定鱼糜品质和经济价值的重要指标,贮藏过程中鱼糜凝

胶持水力的降低主要与肌原纤维的损伤和变性有关^[36]。由图 5 可知,随着冻藏时间的增加,两组鱼糜的持水力均呈下降趋势,表明冻藏改变了肌原纤维蛋白性质和结构,损害了凝胶网络结构^[36]。整个冻藏期间,浸渍冻藏组的持水力显著高于空气冻藏组($P<0.05$);其中冻藏 60 d,浸渍冻藏组的持水力为 85.84%,下降了 4.1%,而空气冻藏组的持水力为 84.63%,下降了 5.4%。说明浸渍冻藏有利于抑制鱼糜凝胶持水力的下降,主要是因为浸渍冻藏能减轻肌原纤维蛋白的变性和氧化,延缓了凝胶网络结构劣化,从而使鱼糜凝胶的保水能力得到改善,这也与图 2 中的结果相符。

2.6 浸渍冻藏过程中鱼糜凝胶结构变化

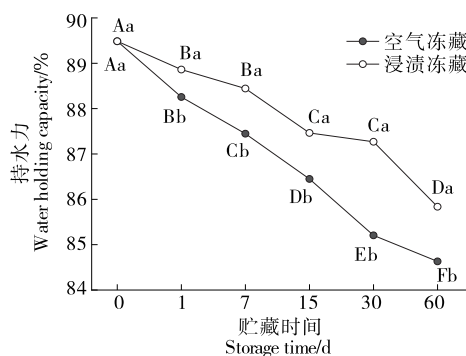
鱼糜凝胶结构主要取决于肌肉蛋白质分子间的相互作用和肌原纤维蛋白的有序聚集^[37],与鱼糜凝胶特性密切相关。由图 6 可见,未冷冻鱼糜凝胶结构致密,孔洞较



大写字母不同表示同一冻藏方式不同贮藏时间之间差异显著($P<0.05$);小写字母不同表示同一贮藏时间不同冻藏方式之间差异显著($P<0.05$)

图 4 鱼糜冻藏过程中凝胶强度的变化

Figure 4 Changes in the gel strength of surimi during frozen storage



大写字母不同表示同一冻藏方式不同贮藏时间之间差异显著($P<0.05$);小写字母不同表示同一贮藏时间不同冻藏方式之间差异显著($P<0.05$)

图 5 鱼糜冻藏过程中鱼糜凝胶持水力的变化

Figure 5 Changes in the water holding capacity of surimi during frozen storage

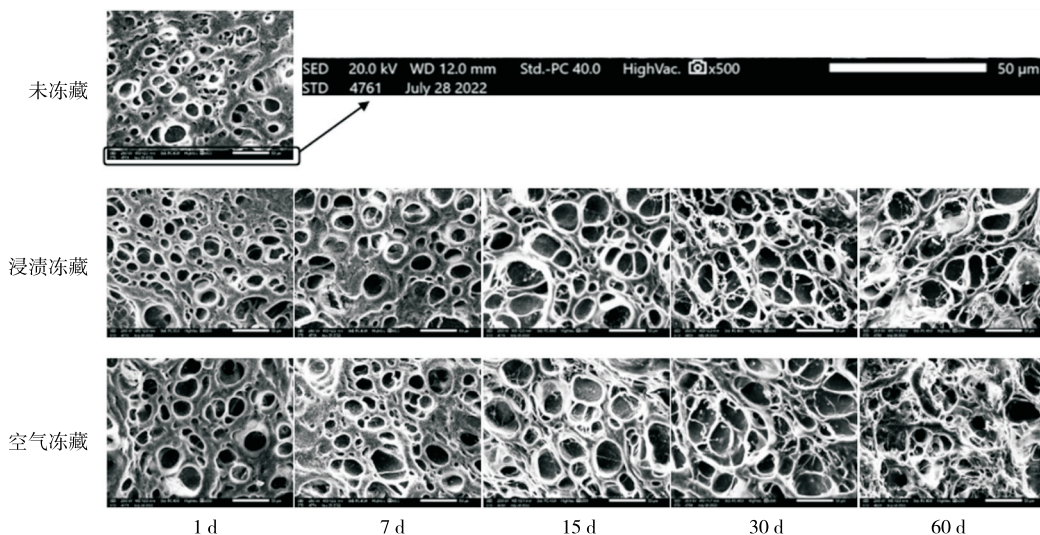


图 6 鱼糜冻藏过程中凝胶结构的变化

Figure 6 Changes in the structure of surimi gels during frozen storage ($\times 500$)

小且均匀,具有良好的网状结构;随着冻藏时间增加,两组鱼糜凝胶均有孔洞变大趋势,网络结构逐渐变得无序并坍塌,表明冻藏损害了鱼糜凝胶结构,这与其凝胶强度和持水力逐渐下降的结果(图4、图5)一致,可能与鱼糜蛋白质冷冻变性及冰晶形成和重结晶导致的鱼糜结构损伤有关^[38]。与空气冻藏组相比,浸渍冻藏组样品凝胶结构在冻藏过程中的变化相对较小,如冻藏第1天其凝胶网络的孔洞明显较空气冻藏组小且均匀;冻藏第15天,空气冻藏组凝胶网络中可观察到明显的碎片,而浸渍冻藏组则相对完整;冻藏第60天,空气冻藏组凝胶网络变得杂乱无章,观察到明显结构坍塌,而浸渍冻藏组虽然也严重碎片化,但仍具有完整的网状结构。因此,浸渍冻藏因具有速冻和减小温度波动的效果,在一定程度上能够减轻鱼糜凝胶结构的冷冻损伤,但仍难以有效抑制鱼糜凝胶结构和品质劣化,添加抗冻保护剂仍然非常必要。

3 结论

浸渍冻藏处理不仅冻结速度快,而且贮藏过程中的温度波动较小,有利于提高不漂洗鲢鱼鱼糜的冻藏稳定性。与空气冻藏相比,浸渍冻藏可显著减轻鱼糜蛋白质变性(Ca^{2+} -ATPase活性下降)和氧化(羰基含量上升),抑制鱼糜脂质氧化(TBA值上升),同时也能减缓鱼糜凝胶强度和持水力的下降,一定程度上延缓了凝胶网络结构劣化,从而减少鱼糜产品冻藏过程中的品质变化。因此,浸渍冻藏是一种有效的稳定鱼糜产品质量方案,同时节能、安全,在食品冷链物流技术领域具有巨大的应用潜力。

参考文献

- [1] 熊泽语, 谢晨, 陈百科, 等. 海藻糖复配蔗糖和山梨醇对未漂洗大黄鱼鱼糜的抗冻效果研究[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(4): 109-115.
- [2] 宁云霞, 杨淇越, 鲍佳彤, 等. 抗氧化剂对未漂洗革胡子鲶鱼鱼糜品质的影响[J]. 肉类研究, 2020, 34(7): 84-90.
- [3] 余璐涵, 陈旭, 蔡茜茜, 等. 鱼糜蛋白冷冻变性规律及调控方法研究进展[J]. 食品与机械, 2020, 36(8): 1-8.
- [4] LI D, ZHU Z, SUN D. Effects of freezing on cell structure of fresh cellular food materials: A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 75: 46-55.
- [5] MAHATO S, ZHU Z, SUN D. Glass transitions as affected by food compositions and by conventional and novel freezing technologies: A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2019, 94: 1-11.
- [6] 贾世亮, 丁娇娇, 杨月, 等. 水产品速冻保鲜技术研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(11): 324-331.
- [7] JIA S L, DING J J, YANG Y, et al. Research advances in quick-freezing preservation technologies of aquatic products[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(11): 324-331.
- [8] DIAO Y, CHENG X, WANG L, et al. Effects of immersion freezing methods on water holding capacity, ice crystals and water migration in grass carp during frozen storage [J]. International Journal of Refrigeration, 2021, 131: 581-591.
- [9] QIAN P, ZHANG Y, SHEN Q, et al. Effect of cryogenic immersion freezing on quality changes of vacuum-packed bighead carp (*Aristichthys nobilis*) during frozen storage[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2018, 42(6): e13640.
- [10] YANG F, JING D, DIAO Y, et al. Effect of immersion freezing with edible solution on freezing efficiency and physical properties of obscure pufferfish (*Takifugu obscurus*) fillets [J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 118: 108762.
- [11] CHU Y M, CHENG H, YU H J, et al. Quality enhancement of large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea*) during frozen (-18°C) storage by spiral freezing[J]. CyTA-Journal of Food, 2021, 19(1): 710-720.
- [12] BUENO M, RESCONI V C, MAR CAMPO M, et al. Effect of freezing method and frozen storage duration on odor-active compounds and sensory perception of lamb [J]. Food Research International, 2013, 54(1): 772-780.
- [13] WALAYAT N, XIONG Z, XIONG H, et al. Cryoprotective effect of egg white proteins and xylooligosaccharides mixture on oxidative and structural changes in myofibrillar proteins of *Culter alburnus* during frozen storage [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 158: 865-874.
- [14] 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.
- [15] KONG C H Z, HAMID N, LIU T, et al. Effect of antifreeze peptide pretreatment on ice crystal size, drip loss, texture, and volatile compounds of frozen carrots[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2016, 64(21): 4327-4335.
- [16] ZHANG Y, KIM Y H B, PUOLANNE E, et al. Role of freezing-induced myofibrillar protein denaturation in the generation of thaw loss: A review[J]. Meat Science, 2022, 190: 108841.
- [17] 董佳, 胡嘉杰, 王庆, 等. 液体浸渍冷冻对鲟鱼贮藏过程中品质的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(5): 281-287.
- [18] DONG J, HU J J, WANG Q, et al. Effect of immersion chilling and freezing technique on sturgeon quality during frozen storage[J]. Food Science, 2017, 38(5): 281-287.
- [19] 李婷, 廖梓康, 李珍, 等. 冻融及加热过程鲢鱼鱼糜制品中晚期糖化终末产物的形成机制[J]. 食品科学, 2023, 44(2): 45-53.
- [20] LI T, LIAO Z K, LI Z, et al. Mechanism governing the formation

- of advanced glycation end-products in silver carp surimi products as affected by freeze-thaw and heating treatments[J]. Food Science, 2023, 44(2): 45-53.
- [18] 王嵬, 马兴胜, 仪淑敏, 等. 面筋蛋白和大米蛋白对鲢鱼鱼糜凝胶特性的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(11): 46-51.
WANG W, MA X S, YI S M, et al. Effects of gluten and rice protein on gel properties of silver carp surimi[J]. Food Science, 2017, 38(11): 46-51.
- [19] 胡曼子, 周雨琪, 罗忆芝, 等. 巴河莲藕粉对白鲢鱼糜制品品质的影响[J]. 食品科技, 2021, 46(11): 136-141.
HU M Z, ZHOU Y Q, LUO Y Z, et al. Effect of bahe lotus root powder on quality of surimi products [J]. Food Science and Technology, 2021, 46(11): 136-141.
- [20] LI J, NIU L, YU J, et al. Effects of frozen temperature and multiple freeze-thaw cycles on gel structure, protein and lipid oxidation and formation of advanced glycation end-products in unwashed silver carp surimi [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2022, 57(9): 6 191-6 200.
- [21] BENJAKUL S, BAUER F. Biochemical and physicochemical changes in catfish (*Silurus glanis* Linne) muscle as influenced by different freeze-thaw cycles [J]. Food Chemistry, 2001, 72(2): 207-217.
- [22] 米红波, 王聪, 赵博, 等. 6-姜酚对草鱼鱼糜凝胶特性及贮藏稳定性的影响[J]. 食品科学技术学报, 2017, 35(1): 21-27.
MI H B, WANG C, ZHAO B, et al. Effects of 6-gingerol on gel properties and storage stability of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) surimi gels[J]. Journal of Food Science and Technology, 2017, 35(1): 21-27.
- [23] MOUSAKHANI-GANJEH A, HAMDAMI N, SOLTANIZADEH N. Thawing of frozen tuna fish (*Thunnus albacares*) using still air method combined with a high voltage electrostatic field[J]. Journal of Food Engineering, 2016, 169: 149-154.
- [25] XIA X, KONG B, LIU Q, et al. Physicochemical change and protein oxidation in porcine longissimus dorsi as influenced by different freeze-thaw cycles [J]. Meat Science, 2009, 83(2): 239-245.
- [26] QIU S, CUI F, WANG J, et al. Effects of ultrasound-assisted immersion freezing on the muscle quality and myofibrillar protein oxidation and denaturation in *Sciaenops ocellatus* [J]. Food Chemistry, 2022, 377: 131949.
- [27] LEYGONIE C, BRITZ T J, HOFFMAN L C. Impact of freezing and thawing on the quality of meat: Review[J]. Meat Science, 2012, 91(2): 93-98.
- [28] 励建荣, 王忠强, 仪淑敏, 等. 天然抗氧化剂对鱼糜及鱼糜制品抗氧化能力及品质影响的研究进展[J]. 食品科学, 2021, 42(21): 1-7.
LI J R, WANG Z Q, YI S M, et al. Progress in research on the effect of natural antioxidants on the antioxidant capacity and quality of surimi and surimi products[J]. Food Science, 2021, 42(21): 1-7.
- [29] 王钰, 倪继龙, 李敏杰, 等. 鲈鱼低温冻藏过程中脂肪氧化特性[J]. 肉类研究, 2021, 35(6): 63-68.
- WANG Y, NI J L, LI M J, et al. Oxidation characteristics of lipids in mackerel during cryopreservation[J]. Meat Research, 2021, 35(6): 63-68.
- [30] WANG B, LI F F, PAN N, et al. Effect of ice structuring protein on the quality of quick-frozen patties subjected to multiple freeze-thaw cycles[J]. Meat Science, 2021, 172: 108335.
- [31] 牛宇光, 杨宏, 王玉栋, 等. 紫苏提取物对白鲢鱼糜挥发性成分及贮藏品质的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(4): 124-134.
NIU Y G, YANG H, WANG Y D, et al. Effects of perilla extract on volatile components and storage quality of silver carp surimi[J]. Journal of Northwest A & F University (Nat Sci Ed), 2022, 50(4): 124-134.
- [32] 李艳青, 孔保华, 夏秀芳, 等. 漂洗和冻藏对鲤鱼肌原纤维蛋白理化特性的影响[J]. 中国食品学报, 2016, 16(6): 161-166.
LI Y Q, KONG B H, XIA X F, et al. Effect of rinsing and frozen storage on physicochemical properties of common carp's myofibrillar proteins [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2016, 16(6): 161-166.
- [33] BAINY E M, CORAZZA M L, LENZI M K. Measurement of freezing point of tilapia fish burger using differential scanning calorimetry (DSC) and cooling curve method[J]. Journal of Food Engineering, 2015, 161: 82-86.
- [34] 吴润锋, 赵利, 袁美兰, 等. 漂洗前后四大家鱼鱼糜品质的变化[J]. 食品科学, 2014, 35(9): 132-136.
WU R F, ZHAO L, YUAN M L, et al. Quality change of surimi of four Major Chinese carps before and after rinsin[J]. Food Science, 2014, 35(9): 132-136.
- [35] ZHANG L, LI Q, HONG H, et al. Prevention of protein oxidation and enhancement of gel properties of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) surimi by addition of protein hydrolysates derived from surimi processing by-products[J]. Food Chemistry, 2020, 316: 126343.
- [36] WANG Y, ZHANG T, CHEN Q, et al. Effects of immersion freezing with coolant on the quality of grouper (female *Epinephelus fuscoguttatus* × male *Epinephelus lanceolatus*) during frozen storage[J]. CyTA-Journal of Food, 2021, 19(1): 634-644.
- [37] 朱士臣, 冯媛, 刘书来, 等. 鱼糜凝胶热稳定性的增强技术研究进展[J]. 中国食品学报, 2022, 22(7): 384-396.
ZHU S C, FENG Y, LIU S L, et al. Recent advances of technologies to enhance thermal stability of surimi gel products[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(7): 384-396.
- [38] MEHTA N K, ELAVARASAN K, REDDY A M, et al. Effect of ice storage on the functional properties of proteins from a few species of fresh water fish (Indian major carps) with special emphasis on gel forming ability[J]. Journal of Food Science and Technology-mysore, 2014, 51(4): 655-663.