

反复冻融对淡水鲢鱼鳔理化特性及品质的影响

黄达荣 冯 瑞 钟碧銮 田柬昕 梁结桦 张 宇

(广东官栈营养健康科技有限公司, 广东 广州 510277)

摘要: [目的] 研究冻融次数对鲢鱼鳔理化特性及品质的影响。[方法] 以新鲜鲢鱼鳔为研究对象, 分析不同冻融次数下鲢鱼鳔的保水性、色差、质构特性、基本营养成分含量及微观结构的变化趋势。[结果] 随着冻融次数的增加, 鲢鱼鳔的蒸煮涨发率、亮度值、黄度值、硬度、凝聚性、胶黏性、胶原蛋白及总蛋白含量均显著下降 ($P < 0.05$), 下降幅度分别为 45.52%, 10.90%, 48.99%, 47.45%, 13.56%, 58.04%, 10.54%, 4.57%, 而水分、脂肪与灰分含量下降幅度较低, 解冻损失率和颜色红度值均显著上升 ($P < 0.05$), 上升幅度分别为 4.80%, 140.72%, 鲢鱼鳔的微观结构在反复冻融过程中逐渐解构、恶化。[结论] 综合冻融过程中的品质恶化程度, ≤ 5 次冻融循环可较好地保持鲢鱼鳔的特性及品质价值。

关键词: 鲢鱼鳔; 冻融; 胶原蛋白; 微观结构; 质构

Effects of repeated freezing-thawing on physicochemical properties and quality of freshwater silver carp bladder

HUANG Darong FENG Rui ZHONG Biluan TIAN Jianxin LIANG Jiehua ZHANG Yu

(Guangdong Guanzhan Nutrition and Health Technology Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510277, China)

Abstract: [Objective] To investigate the effects of different freezing and thawing cycles on the physicochemical properties and quality of silver carp fish bladder. [Methods] Fresh silver carp fish bladder was used as the research material. The trends of water retention, color difference, textural properties, basic nutrient content, and microstructure of the fish bladder were analyzed under different freezing-thawing cycles. [Results] As the number of freeze-thaw cycles increased, the cooking swelling rate, brightness value, yellowness value, hardness, cohesion, adhesiveness, collagen content, and total protein content of the silver carp fish bladder all decreased significantly ($P < 0.05$), with reductions of 45.52%, 10.90%, 48.99%, 47.45%, 13.56%, 58.04%, 10.54%, and 4.57%, respectively. The decreases in moisture, fat, and ash content were relatively low. The thawing loss rate and color redness value both increased significantly ($P < 0.05$), by 4.80% and 140.72%, respectively. The microstructure of the silver carp fish bladder gradually deteriorated and broke down during the repeated freezing-thawing process. [Conclusion] Based on the quality deterioration during the comprehensive freezing-thawing process, limiting the freezing-thawing cycles to no more than five can effectively preserve the characteristics and quality of the silver carp fish bladder.

Keywords: silver carp bladder; freezing-thawing; collagen; microstructure; texture

鱼鳔是鱼的囊状器官, 干制后即成鱼肚, 又名鱼胶、花胶等, 是一种传统中药材。鱼胶性平味甘, 归肾、肝经, 具有补肝肾、养血止血、散瘀消肿等功能^[1]。此外, 鱼鳔中含有丰富的氨基酸与微量元素^[2], 是一种优质食材。现代研究表明, 鱼鳔具有抗氧化^[3]、抗疲劳^[4]、抗癌^[5]、促进伤口修复^[6]等作用。随着药食同源观念的普及, 鱼胶逐渐被内陆居民所接受, 其需求量逐年攀升, 预计 2025 年中国

鱼胶市场规模将达到 54.32 亿元^[7]。

根据鱼种可将鱼胶分为石首鱼胶和非石首鱼胶两类; 白花胶、赤嘴鲮鱼胶、北海胶、大口胶等传统鱼胶均为石首鱼胶, 黄花胶、鳕鱼胶、鲢鱼胶等鱼胶则归类为非石首鱼胶^[8]。此外, 还可根据鱼种生活环境进行区分: 鳕鱼 (*Gadus morhua*) 等生活在海域甚至深海的鱼胶为海鱼胶; 鲈鱼 (*Lates niloticus*)、查鱼 (*Pangasianodon hypophthalmus*)、

通信作者: 张宇 (1981—), 男。E-mail: zhangy@gnlifetech.cn

收稿日期: 2024-10-15 改回日期: 2025-02-12

引用格式: 黄达荣, 冯瑞, 钟碧銮, 等. 反复冻融对淡水鲢鱼鳔理化特性及品质的影响[J]. 食品与机械, 2025, 41(5): 114-120.

Citation: HUANG Darong, FENG Rui, ZHONG Biluan, et al. Effects of repeated freezing-thawing on physicochemical properties and quality of freshwater silver carp bladder[J]. Food & Machinery, 2025, 41(5): 114-120.

鲢鱼(*Hypophthalmichthys molitrix*)等分布在淡水域的鱼胶称为淡水鱼胶。鱼胶中胶原蛋白干重占比高,为鱼胶营养的关键成分,但胶原蛋白在反复冻融过程中会发生变性降解^[9-11],严重影响鱼胶的营养价值与加工品质如持水性、质构特性等。目前,有关反复冻融的研究大多集中在水产品如罗非鱼肉^[12]、乌鱼肉^[13]、磷虾肉^[14]等,也有陆生动物如牦牛肉^[11],但反复冻融对鳔鱼鳔胶原蛋白特性及品质的影响规律尚不清楚。

由于鱼胶产地与加工厂的时空距离限制,冷冻保鲜是除干制外鲜鱼鳔最常见的处理方法,其能较好地提高鱼胶原料的稳定性和货架期。但运输条件或冷链技术的缺陷使得冷冻鲜品鳔鱼鳔在运输、贮藏、交付过程中易产生冻融循环。因此,结冻阶段形成的冰晶在解冻升温阶段会不可逆地损害鱼胶品质,直接表征为营养成分流失及微观结构失稳^[10]。但国内外未有针对鲜鱼鳔的冻融稳定性研究,普通冻融研究的测量指标不完全适用于鳔鱼鳔,因此对于鲜鱼鳔冻融的研究方法需要在其他冻融稳定性研究^[9-10,15-17]的基础上进行改进,如测定鳔鱼鳔保水性时,添加鳔鱼鳔实际应用过程中的蒸煮涨发率作为量化指标等,以适应鳔鱼鳔样品的测试。

研究拟以鲜品鳔鱼鳔为试验对象,考察反复冻融处理对鳔鱼鳔保水性、色差、质构、营养成分和微观结构的影响,旨在为鳔鱼鳔的加工、保藏与品控夯实基础数据,为鳔鱼鳔的扩大化、高值化应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

鳔鱼鳔鲜品:市售;

蒸煮袋:广东顺德一览包装有限公司;

无水硅胶、圆筒过滤纸、脱脂棉球:广州市左克生物科技有限公司;

乙酸镁、氯胺T三水合物、柠檬酸一水合物、氢氧化钠、异丙醇、对二甲氨基苯甲醛:分析纯,上海易恩化学技术有限公司;

羟脯氨酸标准品:色谱纯,上海源叶生物科技有限公司;

石油醚、浓盐酸、浓硫酸等:分析纯,广州化学试剂厂。

1.1.2 主要仪器设备

干燥器:LA13553型,广州市左克生物科技有限公司;

索氏抽提器:B-032201型,广州市左克生物科技有限公司;

万分位电子天平:FA214型,梅特勒—托利多(上海)仪器有限公司;

紫外分光光度计:UV-1100型,上海美谱达仪器有限公司;

恒温水浴锅:HH-8型,上海析达仪器有限公司;

pH计:PHS-3E型,上海仪电科学仪器有限公司;

电蒸锅:DZG-P20Q5型,广东小熊电器有限公司;

台式干燥箱:202-0型,北京永光明医疗仪器有限公司;

分光测色仪:DS-620型,杭州彩谱科技有限公司;

冰箱:KT7520型,长虹菱菱股份有限公司;

质构仪:EZ-SX型,苏州岛津仪器有限公司;

扫描式电子显微镜:EVO-MA-15型,卡尔蔡司光学(中国)有限公司;

真空镀膜仪:EM-ACE600型,徕卡测量仪器(中国)有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 样品采集和制备 参考曹银娟等^[10]的方法并修改。新鲜鳔鱼宰杀后,摘取新鲜的鳔鱼鱼鳔,冲洗去除表面的血液、油脂等杂质,将鳔鱼鳔平均装入10个聚乙烯食品保鲜袋中,每袋约500g,即为10组;使用小样品袋进一步将每组样品分装成50g左右一袋,即每组10袋。置于4℃保温箱中保藏,2h内送至实验室。鳔鱼鱼鳔于-18℃冷冻12h后室温解冻12h为1次冻融循环,全部鳔鱼鳔同时进行冻融循环,分别于冻融0,1,2,3,4,5,6,7,8,9次后取出,测定相关指标。

1.2.2 鳔鱼鳔保水性测定

(1) 解冻损失率:参考赵立柱等^[11]的方法并修改。取50g冷冻鳔鱼鳔样品,称重,常温解冻后沥干,称重,按式(1)计算解冻损失率。

$$R_1 = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

R_1 ——解冻损失率,%;

W_1 ——解冻前的鳔鱼鳔质量,g;

W_2 ——解冻后沥干的鳔鱼鳔质量,g。

(2) 蒸煮涨发率:参考袁毅^[15]的方法,按式(2)计算蒸煮涨发率。

$$R_2 = \frac{W_4 - W_3}{W_3} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

R_2 ——蒸煮涨发率,%;

W_3 ——蒸煮前的鳔鱼鳔质量,g;

W_4 ——蒸煮后的鳔鱼鳔质量,g。

1.2.3 鳔鱼鳔色差测定 参考袁毅等^[16]的方法并修改。取50g解冻完成的鳔鱼鳔样品,沥干,利用色差仪进行测定。

1.2.4 鲢鱼鳔质构测定 参考赵立柱等^[11]的方法并修改。取 50 g 解冻完成的鲢鱼鳔样品,沥干,用刀切割成 50 mm×50 mm×2 mm 的长方体,并堆叠 4 层“长方体”以供检测。探头型号为 TA/50,目标值为 6 mm,测试速度为 0.50 mm/s,测试目标为距离。每组样品平行测定 3 次取平均值。

1.2.5 鲢鱼鳔微观结构观察 将鲢鱼鳔切成 8 mm×5 mm×2 mm 的长方体,于 -80 ℃ 预冻 24 h,冷冻干燥 48 h,使用真空镀膜仪进行 150 s 喷金处理^[17],再使用扫描电子显微镜于 5.0 kV 加速电压下以 1 000,2 000,5 000 倍放大观察样品的微观结构。

1.2.6 鲢鱼鳔基本成分测定

(1) 水分含量:按 GB 5009.3—2016 执行。

(2) 胶原蛋白含量:采用羟脯氨酸换算法,样品中羟脯氨酸浓度标准曲线为 $y=39.012x+0.1007$, $R^2=0.9934$ 。羟脯氨酸含量乘以系数 10.0 换算为胶原蛋白含量,即鲢鱼鳔样品的干基胶原蛋白含量。

(3) 总蛋白含量:按 GB 5009.5—2016 执行。

(4) 脂肪含量:按 GB 5009.6—2016 执行。

(5) 总灰分含量:按 GB 5009.4—2016 执行。

1.3 数据处理

所有试验重复 3 次,结果以均值±标准差表示,使用 SPSS 24.0 软件对数据进行 Tukey 检验与单因素方差分析, $P<0.05$ 为具有统计学意义。采用 GraphPad Prism 8.0 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 反复冻融对鲢鱼鳔保水性的影响

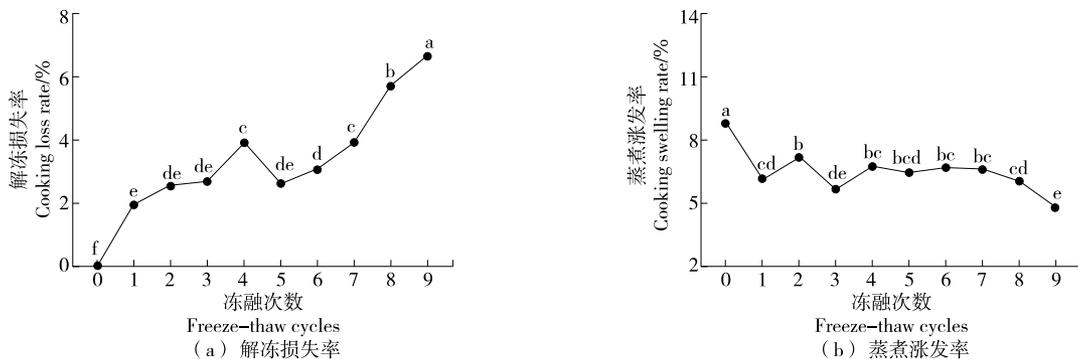
冷冻使得鱼鳔胶原蛋白结合的部分水分转化为冰晶,降低了鲢鱼鳔对水的束缚力^[18],可显著影响鱼鳔的持水能力;鱼鳔的胶原蛋白遇热后分子结构降解,生成明胶,其吸水能力大大增强,所以鱼鳔尤其是鱼鳔干品具有

蒸煮后明显涨发的特点。因此,以解冻损失率与蒸煮涨发率对鱼鳔的保水性进行评价,可直接反映鲢鱼鳔自身对于水分的保持能力,而持水力影响着食品的感官品质^[19]。由图 1 可知,随着冻融次数的增加,鲢鱼鳔的解冻损失率显著上升($P<0.05$),同时其蒸煮涨发率显著下降($P<0.05$)。解冻过程中,首次冻融使鲢鱼鳔损失约 2% 的水分,冻融 4 次后,水分损失率再次显著增加至 4% 左右,形成一个失水峰,这是因为胶原蛋白被反复冻融的冰晶损伤而变性,失去原本的持水能力;第 5 次冻融的解冻损失率反而下降,可能是因为鲢鱼鳔中的胶原蛋白降解产物交联形成新的储水网格。

首次冻融即可显著降低鲢鱼鳔的蒸煮涨发率,但涨发率并未随冻融次数增加而显著下降,这是因为胶原蛋白等主要营养成分的降解产物的持水能力弱于完整三螺旋的胶原蛋白,同时降解产物的冻融稳定性强。因此,从鲢鱼鳔的保水性角度出发,鲢鱼鳔的贮藏冻融次数应控制在 3~5 次及以下;鲢鱼鳔的蒸煮涨发率整体稍高于解冻损失率,在冻融循环 8 次后两者数值接近。这是因为鲢鱼鳔在蒸煮后其胶原蛋白发生变性,胶原蛋白结构松散出现空洞并容纳更多的水分^[20]。

2.2 反复冻融对鲢鱼鳔色差的影响

由图 2 可知,随着冻融循环次数的增加,亮度值 L^* 呈波动下降趋势。经 3 次冻融后,亮度值由 84.10 ± 0.99 显著下降至 80.60 ± 1.47 ,最后达到 74.93 ± 1.54 ,此时亮度值远高于未冻融的牦牛肉^[15],说明鱼鳔样品经反复冻融后其表面颜色由亮白转向暗黑,但仍呈现较高的亮白度,可能与其高含量的胶原蛋白有关;红度值 a^* 则呈上升趋势,经 6 次冻融后,红度值由 -1.67 ± 0.11 增加至 -0.76 ± 0.30 ,最后达到 0.68 ± 0.71 ,此时红度值远低于牦牛肉^[15]、文昌鸡鸡胸肉^[21]与东方鲀鱼皮的胶原蛋白肽溶液^[22],说明鱼鳔表面的颜色在反复冻融中由绿色向(负 a^*)转变为红色向(正 a^*),但数值接近于 0,对整体颜色的影响能力



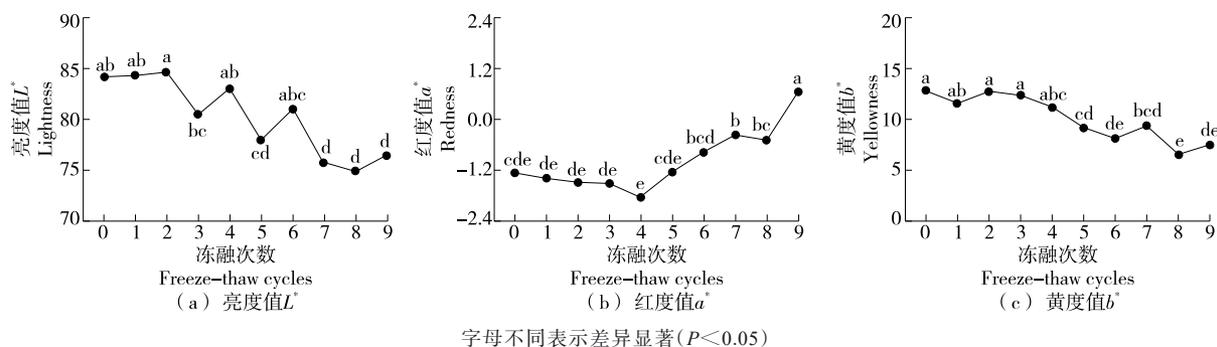
字母不同表示差异显著($P<0.05$)

图 1 冻融次数对鲢鱼鳔保水性的影响

Figure 1 Effect of freezing-thawing cycles on water retention of silver carp bladder

较弱;黄度值 b^* 缓慢下降,由首次冻融后的最高值 12.88 ± 0.91 下降至 6.57 ± 0.87 ,说明鱼鳔的黄色逐渐减弱。综合色差指标,反复冻融的鱼鳔表面从亮度较高的黄色变向

暗黄色,与鱼鳔干制品的相同,其本质为鱼鳔的老化,冻融时鱼鳔胶原蛋白与脂肪的氧化是鱼鳔变黄的主要原因。综上,鲢鱼鳔经3~5次冻融后的颜色变化可接受。



字母不同表示差异显著($P < 0.05$)

图2 冻融次数对鲢鱼鳔色差的影响

Figure 2 Effect of freezing-thawing cycles on color difference of silver carp bladder

2.3 反复冻融对鲢鱼鳔质构特性的影响

由表1可知,随着冻融次数的增加,鲢鱼鳔的质构特性在9次冻融后发生显著变化($P < 0.05$),其中硬度、凝聚性和胶黏性分别下降了47.45%,13.56%,58.04%;弹性与咀嚼性分别上升了9.73%,54.09%。鲢鱼鳔的硬度与胶黏性较高^[10-11],这与鲢鱼鳔的胶原蛋白含量较高有关;而鲢鱼鳔的弹性与凝聚性较小,是因为鲢鱼鳔的形态与其他食品有所差异,呈现一种薄片形态,下压后提供的回弹力较小;咀嚼性是硬度、弹性及内聚性的乘积,鲢鱼鳔的咀嚼性呈负值且上升,这是由于内聚性为负值且数值较小,说明鲢鱼鳔在第1次压缩形变后结构失衡,无法提供足够的回弹力来抵抗第2次压缩,与鲢鱼鳔的硬度下降及弹性较小有关。综上,反复冻融可显著改变鲢鱼鳔的质构特性,这与鲢鱼鳔的保水性变化趋势类似,说明鲢鱼鳔的食用品质严重下降,是因为冻融过程生成的冰晶会损伤鲢

鱼鳔胶原蛋白的交联结构^[21]。因此,鲢鱼鳔经4~6次冻融后仍处于可接受状态。

2.4 反复冻融对鲢鱼鳔微观结构的影响

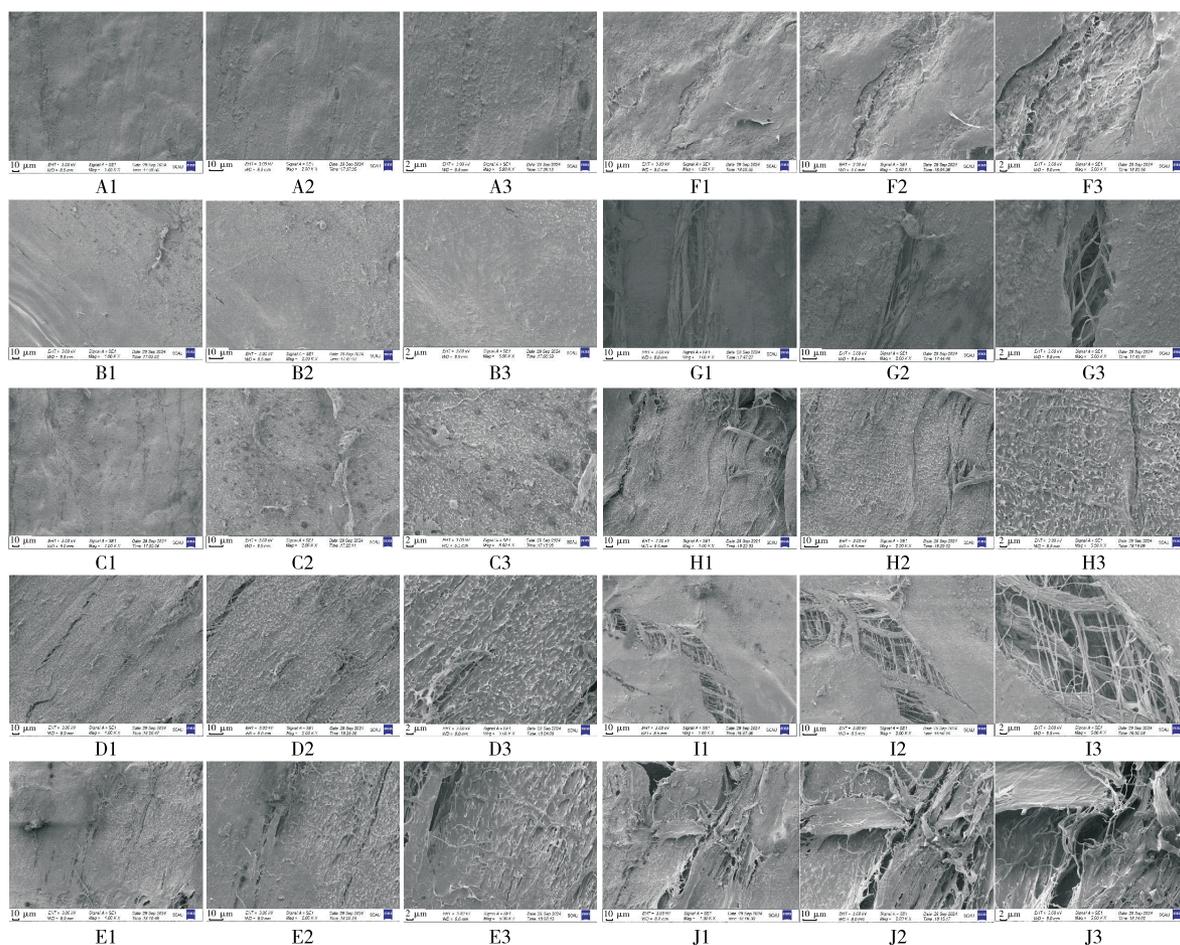
由图3可知,新鲜鲢鱼鳔的胶原蛋白纤维排列整齐致密,随着冻融次数的增加,鲢鱼鳔的微观结构逐渐劣化,在第3次冻融循环结束后,鲢鱼鳔表面开始出现明显的裂纹;在第4、5次冻融循环结束后,裂纹逐渐变大,出现间隙以及胶原蛋白纤维破损断裂的碎片,但其微观结构仍处于链接状态;经6~8次冻融循环后,鲢鱼鳔表面纤维束间变大,胶原蛋白纤维的分离及断裂更明显,同时出现排列混乱、结构松散现象,这与冰晶造成的机械性损伤有关,此时鲢鱼鳔的保水能力较弱;9次冻融循环后,鲢鱼鳔表面横向、纵向纤维均断裂,边缘模糊,纤维束间致密性大大降低,孔隙极大,结缔组织失去了原有的结构特性,此时胶原蛋白变性严重,持水性弱。

表1 鲢鱼鳔质构特性[†]

Table 1 Texture characteristics of silver carp bladder

冻融次数	硬度/N	弹性	凝聚性	胶黏性/N	咀嚼性/N
0	305.40 ± 3.64 ^a	0.81 ± 0.02 ^a	0.45 ± 0.07 ^{ab}	137.21 ± 9.98 ^{ab}	-110.68 ± 16.11 ^a
1	281.81 ± 1.75 ^{ab}	0.83 ± 0.01 ^{ab}	0.48 ± 0.02 ^{ab}	135.32 ± 2.03 ^{ab}	-111.41 ± 1.67 ^a
2	276.77 ± 2.34 ^{ab}	0.83 ± 0.03 ^{ab}	0.51 ± 0.07 ^a	142.14 ± 19.45 ^a	-117.04 ± 16.01 ^a
3	275.15 ± 12.60 ^{ab}	0.83 ± 0.01 ^{ab}	0.50 ± 0.02 ^{ab}	136.27 ± 2.61 ^{ab}	-112.30 ± 2.20 ^a
4	255.86 ± 8.22 ^{bc}	0.84 ± 0.02 ^{bc}	0.51 ± 0.01 ^a	130.68 ± 6.67 ^{ab}	-109.06 ± 5.05 ^a
5	256.08 ± 13.11 ^{bc}	0.84 ± 0.01 ^{bc}	0.51 ± 0.01 ^a	131.01 ± 9.51 ^{ab}	-109.34 ± 6.93 ^a
6	243.58 ± 12.50 ^{cd}	0.85 ± 0.01 ^{bc}	0.50 ± 0.01 ^a	122.35 ± 8.24 ^{ab}	-103.13 ± 5.81 ^a
7	216.55 ± 11.47 ^{de}	0.86 ± 0.03 ^c	0.49 ± 0.04 ^{ab}	106.47 ± 10.70 ^{bc}	-91.08 ± 9.28 ^{ab}
8	190.96 ± 13.78 ^e	0.86 ± 0.01 ^{cd}	0.43 ± 0.04 ^{ab}	82.36 ± 20.83 ^{cd}	-70.90 ± 17.23 ^{bc}
9	160.48 ± 16.02 ^e	0.89 ± 0.01 ^d	0.39 ± 0.01 ^b	57.58 ± 9.65 ^d	-50.81 ± 7.60 ^c

[†] 同列字母不同表示差异显著($P < 0.05$)。



A1. 冻融0次1 000倍放大 A2. 冻融0次2 000倍放大 A3. 冻融0次5 000倍放大 B1. 冻融1次1 000倍放大 B2. 冻融1次2 000倍放大 B3. 冻融1次5 000倍放大 C1. 冻融2次1 000倍放大 C2. 冻融2次2 000倍放大 C3. 冻融2次5 000倍放大 D1. 冻融3次1 000倍放大 D2. 冻融3次2 000倍放大 D3. 冻融3次5 000倍放大 E1. 冻融4次1 000倍放大 E2. 冻融4次2 000倍放大 E3. 冻融4次5 000倍放大 F1. 冻融5次1 000倍放大 F2. 冻融5次2 000倍放大 F3. 冻融5次5 000倍放大 G1. 冻融6次1 000倍放大 G2. 冻融6次2 000倍放大 G3. 冻融6次5 000倍放大 H1. 冻融7次1 000倍放大 H2. 冻融7次2 000倍放大 H3. 冻融7次5 000倍放大 I1. 冻融8次1 000倍放大 I2. 冻融8次2 000倍放大 I3. 冻融8次5 000倍放大 J1. 冻融9次1 000倍放大 J2. 冻融9次2 000倍放大 J3. 冻融9次5 000倍放大

图3 不同冻融次数下鲢鱼鳔的微观结构观察

Figure 3 Microstructure of silver carp bladder with different freezing-thawing cycles

综上,多次冻融循环会引起鲢鱼鳔胶原蛋白纤维的降解、损失、聚集以及冰晶体的机械破坏作用,多方面导致鲢鱼鳔保水性、色差、质构特性等品质的恶化,与曹银娟等^[10]、赵立柱等^[11]的研究结果相似。

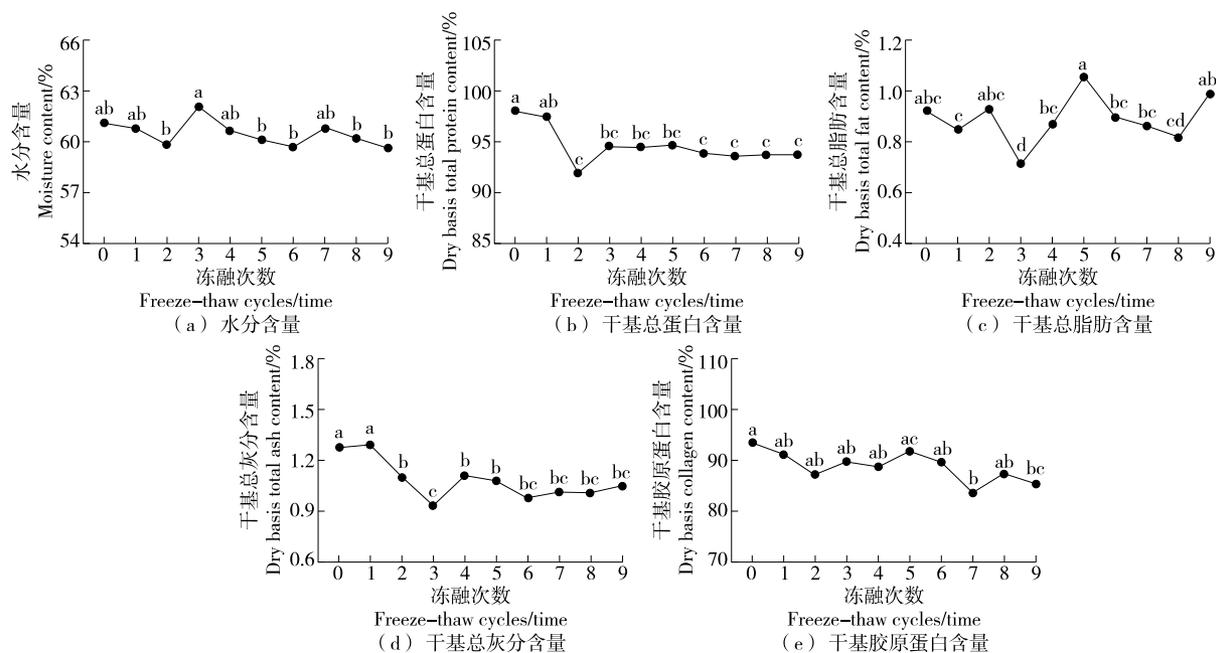
2.5 反复冻融对鲢鱼鳔基本成分的影响

由图4可知,冻融次数对鲢鱼鳔的基本营养成分含量影响显著($P < 0.05$),随着冻融次数的增加,水分、总蛋白、灰分和胶原蛋白含量呈下降趋势($P < 0.05$),与冻融罗非鱼、冻融磷虾肉、冻融鸭肉等的结果相似^[10-14,17];脂肪含量呈波动变化,可能是因为脂肪含量占比低,检测误差易造成较大数据波动。目前,胶原蛋白含量的检测方法为

羟脯氨酸换算法,羟脯氨酸在冻融时具有较好的稳定性,因此胶原蛋白含量下降幅度较小。胶原蛋白是结缔组织的主要成分,其交联结构的机械损伤会削弱鲢鱼鳔的持水能力,但鲢鱼鳔的水分含量变化幅度较小,是因为鲢鱼鳔的高胶原蛋白含量,即使胶原蛋白发生部分降解,鲢鱼鳔仍能保持较高的水分含量。此外,总蛋白含量的下降幅度小于胶原蛋白的,可能是微生物对于黏蛋白等其他蛋白的降解作用小于胶原蛋白^[23],这也与鲢鱼鳔的高胶原蛋白含量有关。综上,鲢鱼鳔经6次内的冻融仍可被接受。

3 结论

试验表明,随着冻融次数的增加,鲢鱼鳔的食用价值



字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图4 鲢鱼鳔基本成分含量的变化

Figure 4 Changes of basic components in silver carp bladder

与应用价值显著下降。因高胶原蛋白含量与片状式外观,鲢鱼鳔的保水性检测方法、色差、质构数据及微观结构均与其他冻融样品具有明显差异,需要根据鱼鳔的实际应用进行适应修改与分析。综合理化与感官品质的劣化程度和鲢鱼鳔的商业价值,将冻融次数控制在5次以内较佳。但基于羟脯氨酸含量,冻融对鲢鱼鳔酶解等高值化利用的影响较小。后续可将冻融鱼鳔进行泡发、炖煮等进一步探究冻融对工业生产的影响,并指导运输时冷冻保鲜条件的改进。

参考文献

- [1] 张金聚, 卢一泓, 何倾, 等. 市售鱼鳔氨基酸及蛋白质成分分析[J]. 中成药, 2024, 46(2): 499-506.
ZHANG J J, LU Y H, HE Q, et al. Analysis of amino acid and protein components of commercial swim-bladders[J]. Chinese Traditional Patent Medicine, 2024, 46(2): 499-506.
- [2] 霍玫希, 黄伟乾, 邓思怡, 等. 花胶中17种氨基酸及蛋白质系数的测定[J]. 食品工业, 2024, 45(7): 287-291.
HUO W X, HUANG W Q, DENG S Y, et al. Determination of 17 amino acids and protein coefficients in fish maw[J]. The Food Industry, 2024, 45(7): 287-291.
- [3] 冯瑞, 黄达荣, 钟碧鑫, 等. 白玉花胶消化液理化性质及抗氧化活性研究[J]. 食品与机械, 2024, 40(12): 137-145.
FENG R, HUANG D R, ZHONG B L, et al. Study on the physicochemical properties and antioxidant capacity of fish maw digestive juices from *Pangasianodon hypophthalmus*[J].

Food & Machinery, 2024, 40(12): 137-145.

- [4] ZHAO Y Q, ZENG L, YANG Z S, et al. Anti-fatigue effect by peptide fraction from protein hydrolysate of croceine croaker (*Pseudosciaena crocea*) swim bladder through inhibiting the oxidative reactions including DNA damage[J]. Marine Drugs, 2016, 14(12): 221.
- [5] 彭东, 赖玉健, 田东昕, 等. 黄鱼鱼鳔肽分离及其诱导前列腺癌 DU-145 细胞凋亡的机制[J]. 中国食品学报, 2023, 23(2): 72-82.
PENG D, LAI Y J, TIAN J X, et al. Isolation of peptide from yellow croaker swim bladder and its mechanism of inducing apoptosis of prostate cancer DU-145 cells[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(2): 72-82.
- [6] CHEN Y Y, JIN H X, YANG F, et al. Physicochemical, antioxidant properties of giant croaker (*Nibea japonica*) swim bladders collagen and wound healing evaluation[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 138: 483-491.
- [7] 朱凯悦, 孙娜, 董秀萍, 等. 鱼胶的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(3): 284-290.
ZHU K Y, SUN N, DONG X P, et al. Research progress of isinglass[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(3): 284-290.
- [8] 唐艺玲, 陈舒忆, 李雪芹, 等. 鱼胶的种类、成分及功效研究进展[J]. 中国食品学报, 2024, 24(3): 458-470.
TANG Y L, CHEN S Y, LI X Q, et al. The types, components and functions of isinglass: a review[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(3): 458-470.

- [9] 刘泓, 郭玉杰, 许雄, 等. 羧甲基壳聚糖对牛骨胶原蛋白微观结构、热稳定性及自组装性质的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(14): 1-13.
LIU H, GUO Y J, XU X, et al. Impact of carboxymethyl chitosan on the microstructure, thermal stability and self-assembly behavior of bovine bone collagen[J]. Food Science, 2024, 45(14): 1-13.
- [10] 曹银娟, 韩玲, 余群力, 等. 冻融对牛瘤胃平滑肌胶原蛋白降解、交联及品质的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(3): 221-226.
CAO Y J, HAN L, YU Q L, et al. Effect of freeze-thaw cycles on the degradation, cross-linking and quality of bovine rumen smooth muscle collagen[J]. Food Science, 2022, 43(3): 221-226.
- [11] 赵立柱, 魏占楠, 张燕, 等. 冻融次数对牦牛肉胶原蛋白特性及品质的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(7): 107-114.
ZHAO L Z, WEI Z N, ZHANG Y, et al. Effect of freezing-thawing times on collagen properties and quality of yak meat [J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(7): 107-114.
- [12] LUO K X, FENG A G, LIN X D, et al. Analysis of the water state and microfractal dimension of tilapia fillets during freezing and thawing[J]. Journal of Food Science, 2023, 88(3): 1 089-1 100.
- [13] HUANG Y Z, LIU Y, ZHANG N N, et al. The effects of trehalose synergy with NaCl on the textural, water distribution, and microstructure of snakehead fish filets induced by freeze - thaw cycles[J]. Journal of Texture Studies, 2023, 54(2): 276-287.
- [14] 刁华玉, 林松毅, 梁瑞, 等. 南极磷虾肉冻融循环过程水分的迁移及微观结构变化[J]. 中国食品学报, 2022, 22(6): 242-250.
DIAO H Y, LIN S Y, LIANG R, et al. Moisture migration and microstructure changes of Antarctic krill meat during multiple freeze-thaw cycles[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(6): 242-250.
- [15] 袁毅. 即食鱼胶品质稳定性研究[D]. 无锡: 江南大学, 2023: 13-14.
YUAN Y. Study on the quality stability of ready-to-eat isinglass[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2023: 13-14.
- [16] 袁毅, 姜启兴, 高沛, 等. 即食鱼胶产品的杀菌工艺[J]. 水产学报, 2024, 48(2): 180-188.
YUAN Y, JIANG Q X, GAO P, et al. Sterilization technology of ready-to-eat isinglass[J]. Journal of Fisheries of China, 2024, 48(2): 180-188.
- [17] 李孟孟, 何蜀峰, 孙杨赢. *L*-精氨酸或 *L*-赖氨酸对反复冻融鸭肉饼品质的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(4): 78-86.
LI M M, HE S F, SUN Y Y. Effect of *L*-arginine or *L*-lysine on the quality of duck meat patties during freeze-thaw cycles[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(4): 78-86.
- [18] PAN N, WAN W, DU X, et al. Mechanisms of change in emulsifying capacity induced by protein denaturation and aggregation in quick-frozen pork patties with different fat levels and freeze-thaw cycles[J]. Foods, 2021, 11(1): 44.
- [19] FAN L X, RUAN D N, SHEN J D, et al. The role of water and oil migration in juiciness loss of stuffed fish ball with the fillings of pig fat/meat as affected by freeze-thaw cycles and cooking process[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 159: 113244.
- [20] 赵鸾. 毛肚碱发过程中理化性质的研究[D]. 重庆: 西南大学, 2021: 20-21.
ZHAO L. Study on the physicochemical properties during the lye macerating of tripe[D]. Chongqing: Southwest University, 2021: 20-21.
- [21] 张诚. 冻藏及反复冻融对文昌鸡肉品质的影响[D]. 海南: 海南大学, 2014: 26-29.
ZHANG C. Influence of frozen storage and freeze-thawing cycles on the quality of Wenchang chicken[D]. Hainan: Hainan University, 2014: 26-29.
- [22] 乐彩虹. 暗纹东方鲀鱼皮胶原蛋白肽的制备及其消化特性[D]. 上海: 上海海洋大学, 2021: 40-41.
LE C H. Preparation and digestibility of collagen peptides from *Takifugu obscurus* skin[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2021: 40-41.
- [23] 李娜. 鳕鱼鳔胶原蛋白和胶原肽特性及对细胞衰老进程干预作用与机制[D]. 上海: 上海海洋大学, 2019: 37-39.
LI N. Study on characteristics of collagen and collagen peptides in cod swim bladder and its effect and mechanism of intervention on cellular aging process[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2019: 37-39.