

低温冻藏过程中鲈鱼肌肉蛋白质氧化特性研究

陈晓楠¹, 赵金丽¹, 张宾¹, 苏来金², 水珊珊¹

(1.浙江海洋大学 食品与医药学院, 浙江 舟山 316022; 2.温州市农业科学研究院温州市特色食品资源工程技术研究中心, 浙江 温州 325006)

摘要: **目的** 探讨低温冻藏过程中鲈鱼肌肉蛋白质的氧化规律。**方法** 以鲈鱼为研究对象, 在-18℃条件下分别贮藏10, 20, 40, 60, 80, 100 d, 测定鲈鱼的pH值、色泽、肌肉质构特性, 提取肌原纤维蛋白, 测定羰基含量、巯基含量、表面疏水性。**结果** 随着冻藏时间的增加, 鲈鱼的pH值呈现先下降后上升的趋势; 在色差测定中, 鲈鱼的 L^* 值不断降低, a^* 值也呈下降趋势; 鲈鱼的硬度、弹性、胶粘性 and 咀嚼性均呈下降趋势, 且贮藏时间越长, 下降程度越明显; 鲈鱼的蛋白表面疏水性随着贮藏时间的延长, 呈上升趋势; 肌原纤维蛋白羰基含量随着贮藏时间的增加而增多, 巯基含量却出现相反现象, 随着贮藏时间的增加而减少。**结论** 鲈鱼在低温冷冻贮存前期, 肌肉蛋白质小幅度降解, 品质逐渐发生劣变, 随着冻藏时间的增加, 在贮存后期其蛋白质品质会出现大幅度下降。

关键词: 鲈鱼; 低温冻藏; 肌原纤维蛋白; 氧化规律

中图分类号: TS254.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2020)17-0038-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.17.006

Oxidation of Muscle Protein in Mackerel during Cryopreservation

CHEN Xiao-nan¹, ZHAO Jin-li¹, ZHANG Bin¹, SU Lai-jin², SHUI Shan-shan¹

(1.College of Food and Pharmacy, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China;
2.Wenzhou Research Center of Characteristic Food Resources Engineering and Technology, Wenzhou Academy of Agricultural Science, Wenzhou 325006, China)

ABSTRACT: The paper aims to investigate the oxidation rule of muscle protein in mackerel during the frozen storage. Mackerel was stored at -18℃ for 10, 20, 40, 60, 80 and 100 d, respectively. The pH value, color, muscle texture properties of mackerel were determined. Myofibrillar protein was extracted to measure the content of hydroxyl, sulfhydryl and surface hydrophobicity. With the increase of frozen time, the pH value of mackerel decreased first and then increased. In the determination of color difference, L^* and a^* value of mackerel decreased continuously. The hardness, elasticity, adhesiveness and mastication of the samples also decreased. The longer the storage time was, the more obvious the decrease was. The content of carbonyl and hydrophobicity of protein surface in mackerel increased with the increase of storage time, while the content of sulfhydryl decreased with the increase of storage days. The protein quality of mackerel decreased slightly in the early stage of low temperature frozen storage, but decreased greatly with the increase of time.

KEY WORDS: mackerel; low temperature frozen storage; myofibrillar protein; oxidation rule

收稿日期: 2020-06-17

基金项目: 国家自然科学基金(31871871); 浙江省自然科学基金(LY18C200008); 温州市重大科技创新攻关项目(ZS2019001, ZD202003)

作者简介: 陈晓楠(1996—), 女, 浙江海洋大学硕士生, 主攻水产品加工及贮藏。

通信作者: 水珊珊(1989—), 女, 博士, 浙江海洋大学讲师, 主要研究方向为食品分子营养。

鲈鱼 (*Pneumatophorus japonicus*) 属于鲈形目, 鲈科, 鲈属, 又名青占鱼、鲈鲛鱼, 属于青皮红肉多脂鱼类^[1]。鲈鱼在全国各地分布广泛, 因其生长速度较快, 周期短, 产量较其他鱼类高, 所以是近几年我国重要的中上层经济鱼类之一^[2]。鲈鱼属于远洋暖水中性鱼类, 因其内部含水率高, 营养丰富, 但其极易腐坏变质, 因此捕捞后应立刻用冰块进行冻藏^[3]。

低温冻藏可使食物内部的水分变成冰晶, 从而改变食物的内部环境, 不利于微生物的生长和繁殖, 所以低温冻藏在鱼类贮藏中被广泛使用^[4]。郑平安、孙静等^[5]研究了不同贮藏温度对鲈鱼品质的影响, 结果证明低温冻藏对鲈鱼鲜度的降低速率有明显减缓作用。另外, 许多学者对鱼类蛋白质在贮藏过程中的氧化规律进行了研究。随着冻藏时间的延长, 鱼类体内蛋白质会发生不同程度的变化。鱼肉新鲜度等品质变化也与其蛋白质的变化有着不可分割的关系。刘小莉等^[6]研究发现在不同冻藏温度条件下, 鲈鱼的 pH 值、 Ca^{2+} -ATPase 活性、肌原纤维蛋白、活性巯基、表面疏水性等指标均发生明显变化, 变化表明鲈鱼在冻藏时质构等品质特性发生劣变。马文慧等^[7]在研究冻藏乌鳢鱼片时发现, 虽然冻藏可以延缓样品体内蛋白和脂肪的变性, 延长鱼体的保鲜期限, 但贮藏时间过长, 鱼肉体内的冰晶增长会破坏细胞的结构, 导致其营养价值和风味品质等下降。李姣^[8]研究发现中国对虾在低温贮藏过程中随着时间的延长, 鱼体肌肉蛋白质发生了一定程度的变性, 并且冷藏温度越低其蛋白质的生化特性越稳定。目前, 在低温冻藏或蛋白质氧化等方面均有很多研究结果, 但低温冻藏过程中对于鲈鱼肌肉蛋白质氧化特性的研究报道不多。

鲈鱼的色泽、组织结构、水分含量等在冻藏过程中因其内部蛋白质的氧化, 出现腐败现象, 从而发生性质改变^[1]。文中以鲈鱼为研究对象, 在低温冻藏期间分别对其 pH 值、色泽、质构、羰基含量、活性巯基含量、表面疏水性等指标进行分析, 综合评价鲈鱼在低温冻藏过程中肌肉蛋白质的氧化特性, 旨在为鲈鱼低温冻藏过程中肌肉蛋白质氧化特性规律提供科学理论依据。

1 实验

1.1 材料与试剂

原料: 冷冻鲈鱼, 长为 (20 ± 2) cm, 质量为 (250 ± 10) g, 采购于舟山定海区丰茂菜场, 将鲈鱼保持原样冰鲜储存运回实验室, 在样品较新鲜时进行相应处理。

试剂: Tris-顺丁烯二酸缓冲液、2,4-二硝基苯胍 (DN-PH)、二硝基苯甲酸钠、三氯乙酸、乙酸乙酯、乙醇、盐酸胍、尿素、2-硝基苯甲酸 (DNTB)、乙二

胺四乙酸 (EDTA)、氯化钠、溴酚蓝、磷酸缓冲液, 购自国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

主要的仪器与设备: MDF-U53V 型超低温冰箱, 日本 SANYO 公司; CM-5 型美能达台式分光测色仪, 天友利标准光源宁波有限公司; PHS-3C 酸度计, 浙江纳德科学仪器有限公司; TMS-Pro 物性测试仪, 美国 FTC 公司; CF-16RN 型高速冷冻多用途离心机, 日本日立公司; Direct-Q3U 型超纯水制备机, 法国 Millipore 公司。

1.3 材料预处理

将新鲜的鲈鱼样品去掉鱼头、鱼骨及鱼尾, 用蒸馏水充分清洗, 洗净后切分成大小相对一致的鱼块, 用纱布轻轻将鱼块表面水分擦干, 用封口袋把鲈鱼块全部分装, 并标号, 先将其放到 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 超低温冰箱中冻藏 3 h, 然后取出另放到 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冰箱中贮存, 用于后续取样处理。

将样品低温冻藏 100 d, 期间多次从 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱中取出所需的鲈鱼样品, 前 2 次间隔 10 d, 之后每次间隔 20 d, 流水解冻后进行相应指标的测定 (文中冻藏前的测定值均指新鲜样品的测定值)。

1.4 肌肉 pH 值测定

取鲈鱼鳃下 4 cm 处肌肉约 5.0 g, 装进小烧杯中, 用剪刀处理成小块状适合均质, 加入适量的蒸馏水, 利用均质机以 15 000 r/min 的转速进行均质匀浆, 匀浆处理后继续静置浸泡, 待 20 min 后进行过滤, 测定滤液的 pH 值。测定 2 次 pH 值, 并取其平均值。

1.5 肌肉色泽测定

选用鲈鱼鳃下 4 cm 处约 10 mm^3 的肌肉进行色差分析。在使用色差计时应提前将仪器预热, 校正后开始测定。 L^* 代表亮度, a^* 代表红度值, b^* 代表黄度值。为减小误差每组样品均测量 3 次, 取其平均值为最终结果。

1.6 肌肉质构特性测定

此次试验选用质构仪测定肌肉质构特性, 选取鲈鱼鳃下 4 cm 处的肌肉, 切取适宜大小样品。测定前选取合适的探头 (平底柱形探头); 起始力为 0.6 N; 设定感应量程为 60; 测试速度为 60 mm/min, 压缩形变比为 30%。

1.7 肌原纤维蛋白提取

实验开始前, 提前预冷 Tris-顺丁烯二酸缓冲液 (200 mL), 其浓度为 20 mmol/L。离心机在实验前提前预冷至 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。剪碎 10 g 鲈鱼肉, 在 15 000 r/min 条件下均质匀浆 2 min, 向其中加入 100 mL 的缓冲

液,在一定离心条件下离心 10 min,保留其沉淀,将上清液去除。将 50 mL 上述缓冲液滴入沉淀中,进行 2 次均质,然后置于 4 °C 冰箱中存放 1 h 后取出,在 8000 r/min 条件下离心 10 min,取上清液,在 4 °C 条件下进行保存,用于后续测定。

1.8 肌原纤维蛋白羰基含量测定

参照 Bahar 等^[9]的方法,并进一步完善。在 5 mL 离心管内加入 1 mL DN-PH (10 mmol/L 2,4-二硝基苯肼),室温下反应 1 h,再滴入 1 mL 质量分数为 20 % 的三氯乙酸溶液,漩涡混匀后在 12 000 r/min 条件下离心 10 min (4 °C),去除上清液,用 1 mL 无水乙醇乙酸乙酯混合应用液清洗沉淀,再次重复漩涡离心操作 4 次,至沉淀无颜色,捣碎沉淀,静置 10 min。将沉淀物溶于 3 mL 6 mol/L 盐酸胍溶液中,在 37 °C 下准确水浴 15 min,在 12 000 r/min 条件下离心 15 min,取上清液,在 370 nm 处测其吸光值后进行羰基含量的计算。

1.9 肌原纤维蛋白活性巯基含量测定

提取 1 mL 上述操作保留的上清液,将其缓慢加入 4 mL 8.0 mol/L 的尿素溶液中,混匀。从中取出 2 mL 混合液,并滴加 0.01 mL DNTB 溶液,充分混合均匀,静置 10 min。此次测得吸光值的波长为 412 nm,空白对照组中不添加 DNTB。活性巯基含量用式(1)求得:

$$C_0 = \frac{A \times D}{\varepsilon \times C} \quad (1)$$

式中: C_0 为活性巯基含量 (mol/g); A 为 412 nm 处的吸光度值; ε 为摩尔吸光系数,数值为 13.6 mol·cm/mL; D 为稀释倍数; C 为蛋白质的质量浓度 (mg/mL)。

1.10 肌原纤维蛋白表面疏水性测定

实验参照周景丽等^[10]方法,并适当修改,采用 20 mmol/L 磷酸盐缓冲液把 1.7 节操作保留的提取液浓度稀释至 2 mg/mL。把 2 mL 肌原纤维蛋白提取液加入 40 μ L 1 mg/mL 溴酚蓝溶液中,对照组则将缓冲液加入同等质量的溴酚蓝溶液中。静置融合 8~10 min 后,离心条件为 4000 r/min,时间设为 15 min。在 595 nm 下测量吸光值 A 。由于溴酚蓝具有结合疏水性基团的能力,因此溴酚蓝和蛋白质内部暴露出的氨基酸残基的结合量可以用来表示表面疏水性。蛋白质内部疏水基团暴露程度越大,与溴酚蓝的结合量越多,即表面疏水性越高。肌原纤维蛋白表面疏水性可用式(2)求得:

$$B = \frac{40 \times (A_{\text{对照}} - A_{\text{样品}})}{A_{\text{对照}}} \quad (2)$$

式中: B 为溴酚蓝结合量 (μ g)。

1.11 数据分析

数据处理采用 SPSS 19.0 进行,结果表示为平均值 $\pm$ 标准差。采用 Origin 8.5 对结果数据进行制图分析。

2 结果与分析

2.1 冻藏过程中鲈鱼肌肉 pH 值的变化

将 pH 值作为评价鱼类品质的指标之一,是因为其能够将肌肉内游离的 H^+ 和 OH^- 的浓度通过一定形式反映出来,且 pH 值越大越能体现样品的腐败程度。从图 1 中可知,在冻藏 0~20 d 内 pH 值出现显著下降 ($P < 0.05$),在冻藏 20 d 时, pH 值最低,其值为 5.8。其原因可能是鲈鱼经打捞离水后出现了僵硬期,随着冻藏时间的增加,乳酸因无氧酵解逐渐在肌肉中生成^[11]。在贮藏中期, pH 值在 6.0~6.2 左右波动,样品一直处于低温环境当中,温度不利于体内微生物的繁殖,这可能是 pH 值在一定幅度内变化不大的原因^[1]。在冻藏 80 d 时, pH 值又出现一次下降,二次下降原因可能是鲈鱼表面吸附了大量二氧化碳,二氧化碳与水反应生成了碳酸,导致肌肉酸化,所以 pH 值出现再次下降的趋势^[12]。范文教等^[13]研究茶多酚对鲢鱼微冻冷藏保鲜的影响也得出了同样的结果。从整体来看,鲈鱼在冻藏期间的 pH 值呈现先下降后上升的趋势。在冻藏 20 d 后, pH 值整体呈现上升趋势,可能是样品自身的内源酶和细菌数量的不断增加,使得含氮的化合物分解生成碱类物质,从而提高了 pH 值^[14]。

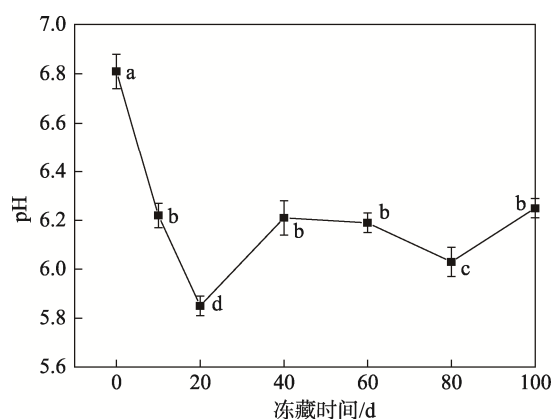


图 1 冻藏时间对鲈鱼肌肉 pH 值的影响

Fig.1 Effect of frozen storage time on pH of mackerel

2.2 冻藏过程中鲈鱼肌肉色泽的变化

鲈鱼在冻藏过程中,由于贮藏时间的增加,其肌肉颜色会发生一定的变化,且鱼肉中含有肌红蛋白、血红蛋白等,在冻藏过程中易发生氧化反应^[15]。消费者可以通过观察鱼肉表面的色泽、光亮程度等来直观地评判鱼肉的新鲜程度和价值^[1]。

通过表 1 可知,从鲈鱼 3 个不同部位选取的肌肉(记为 A 组、B 组、C 组)比较其冻藏前和冻藏 100 d 可知 L^* 值均显著减小 ($P<0.05$),可能是样品经过长时间的低温贮藏,其内部蛋白质结构发生了严重氧化变性。从表 2 中可看出,从新鲜样品到冻藏 100 d 期间, a^* 值也发生了明显下降 ($P<0.05$),这可能是由于二价铁离子被氧化成了三价铁离子,内部肌红蛋白经氧化转变成高铁肌红蛋白,导致鲈鱼的颜色变深^[16]。不同部位间无显著性差异 ($P>0.05$)。Chen 等^[17]在研究冷藏对鲢鱼和马鲛鱼肌红蛋白稳定性的影响时也得出这一结论。

2.3 冻藏过程中鲈鱼肌肉质构特性变化情况

抵抗破坏内部结合力的大小,即肌肉在受力时对变形的抵抗力能力的大小可由硬度来表示^[18]。由图 2a 可以看出,鲈鱼在整个冻藏过程中硬度不断下降。在 0~10 d,硬度下降程度明显 ($P<0.05$),下降速率较快。在 40~80 d,硬度值差距不太明显。在 80~100 d 时,硬度再次出现大幅度下降,这可能是肌肉中蛋

白质随着冻藏时间的增加被微生物分解得越来越严重所致^[19]。

样品恢复到受压力之前状态的能力可用弹性来表示^[20]。从图 2b 中可知,新鲜鲈鱼的弹性最佳值为 0.38,低温冷冻贮藏时间越长,鲈鱼肌肉弹性则越低 ($P<0.05$),在冻藏 100 d 时,弹性下降到 0.24。这可能是由于冻藏的鱼肉组织内部水分形成冰晶,再经解冻后组织内部水分随之流失,导致肌肉弹性降低^[4]。

除此之外,在同等条件下鲈鱼肌肉间结合力的大小也可由胶粘性和咀嚼性来体现。由图 3a 可知,随着冻藏时间的延长,鲈鱼的胶黏性逐渐下降。从图 3b 可知,咀嚼性值在 0.45~0.15 间波动,相较于冻藏前和冻藏 100 d 的值差异显著 ($P<0.05$)。随着冻藏时间的延长,咀嚼性不断下降,其整体变化趋势与弹性、硬度、胶黏性变化一致。这可能是由于肌肉中蛋白质冷冻变性作用,鱼肉会发生变质,风味和口感等均受到影响,导致肌肉质构特性快速降低。

表 1 不同冻藏时间对鲈鱼 L^* 值的影响
Tab.1 Effect of frozen storage time on L^* of macherel

冻藏时间/d	L^*		
	A 组	B 组	C 组
冻藏前	47.71±1.58 ^{aA}	47.64±2.04 ^{aA}	46.65±0.56 ^{abcA}
10	46.51±1.28 ^{abB}	47.17±0.42 ^{abAB}	48.56±0.26 ^{aA}
20	45.25±1.36 ^{bcA}	47.25±0.76 ^{abA}	48.34±1.27 ^{abA}
40	43.92±1.15 ^{cdB}	43.35±0.62 ^{cB}	44.73±0.73 ^{cA}
60	43.49±1.20 ^{cdA}	44.36±0.76 ^{cA}	47.10±1.06 ^{abA}
80	45.78±1.11 ^{abcA}	45.28±1.08 ^{bcA}	46.24±1.56 ^{bcA}
100	42.74±0.35 ^{dA}	43.54±0.68 ^{cA}	42.07±1.52 ^{dA}

注：同列中不同小写字母上标表示差异显著($P<0.05$)；同行不同大写字母上标表示差异显著($P<0.05$)

表 2 不同冻藏时间对鲈鱼 a^* 值的影响
Tab.2 Effect of frozen storage time on a^* of macherel

冻藏时间/d	a^*		
	A 组	B 组	C 组
冻藏前	0.26±0.20 ^{aA}	-0.14±0.12 ^{aA}	-0.25±0.46 ^{aA}
10	-0.59±0.45 ^{bA}	-0.17±0.22 ^{aA}	-0.31±0.24 ^{aA}
20	-0.71±0.24 ^{bA}	-0.26±0.12 ^{aA}	-0.30±0.32 ^{aA}
40	-0.42±0.41 ^{abA}	-0.17±0.14 ^{aA}	-0.46±0.28 ^{aA}
60	-0.92±0.52 ^{bA}	-0.69±0.24 ^{bA}	-0.71±0.38 ^{abA}
80	-1.00±0.21 ^{bA}	-0.89±0.26 ^{bA}	-0.88±0.52 ^{abA}
100	-1.12±0.33 ^{bA}	-1.09±0.30 ^{bA}	-1.34±0.20 ^{bA}

注：同列中不同小写字母上标表示差异显著($P<0.05$)；同行不同大写字母上标表示差异显著($P<0.05$)

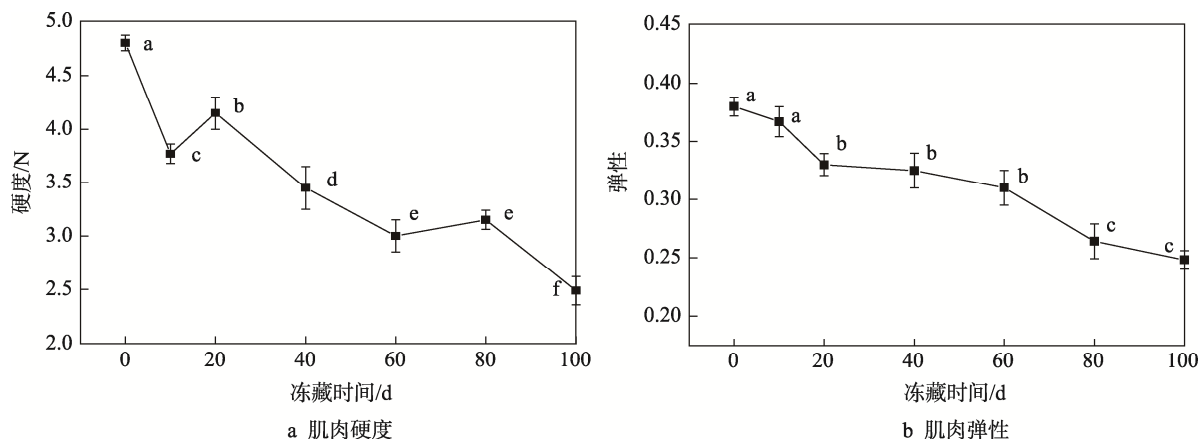


图2 冻藏时间对肌肉硬度和弹性的影响

Fig.2 Effects of frozen storage time on muscle hardness and elasticity

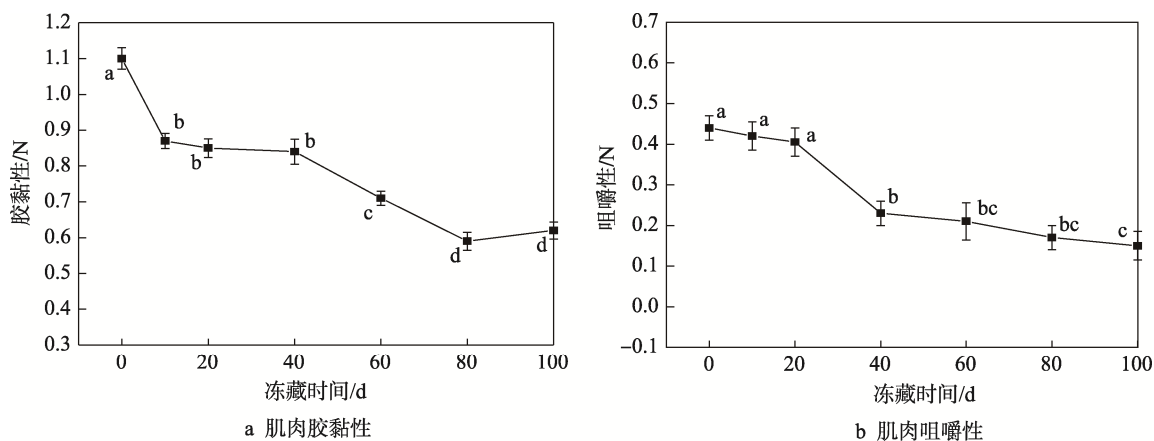


图3 冻藏时间对肌肉胶黏性和咀嚼性的影响

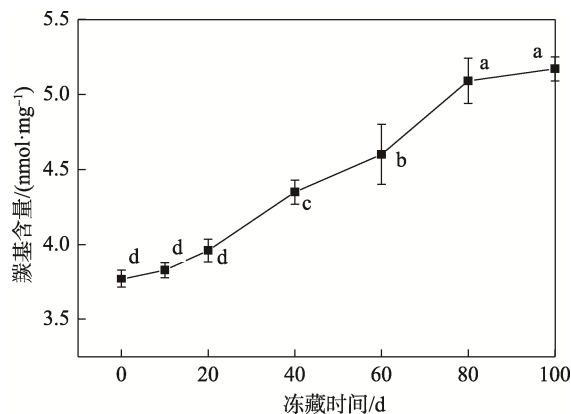
Fig.3 Effects of frozen storage time on muscle glue viscosity and mastication

2.4 冻藏过程中鲑鱼肌原纤维蛋白羰基含量变化情况

研究发现,鲑鱼贮藏期间肌原纤维蛋白经氧化会产生羰基及其化合物^[21]。由图4可知,在贮藏初始时羰基含量为3.77 nmol/mg,在冻藏20 d后,仅上升到3.96 nmol/mg,表明在贮藏前期羰基含量上升缓慢,无显著性差异 ($P>0.05$)。到冻藏中后期,上升速率大幅度提高,在冻藏60~80 d时,最高上升了0.49 nmol/mg,差异明显 ($P<0.05$)。这与Cakatay U等^[22]的研究结果相同。在整个冻藏期间,羰基含量随着冻藏时间的增加不断升高,可能是脂肪等在冻藏后期的氧化速率低于冻藏前期的氧化速率所致^[23]。

2.5 冻藏过程中鲑鱼肌原纤维蛋白巯基含量变化情况

蛋白质氧化变性集合的程度化可由巯基含量的变化反映出来。蛋白质在氧化过程中空间结构发生变化,巯基被暴露,极易氧化生成二硫键。有研究表明,在肌原纤维中含有大量的巯基,且蛋白质氧化程度的

图4 冻藏时间对肌原纤维蛋白羰基含量的影响
Fig.4 Effect of frozen storage time on the carbonyl content of myofibrillar protein

大小与巯基含量成反比^[24]。由图5结果可知,在鲑鱼低温冻藏期间,巯基含量受贮藏时间的影响较严重。在整个冻藏期间,巯基含量逐渐下降。从图5可以看出,巯基含量在冻藏前期骤减,在冻藏0~40 d期间下降了35.4%,有显著性差异 ($P<0.05$)。在冻藏中后期巯基含量的下降速率变缓,在冻藏60~100 d期

间共下降了 12 %。有研究表明, 鲱鱼在冻藏期间巯基的含量会随着贮藏时间的增加而减少^[25], 结果与文中实验结果一致。综上所述, 在低温贮藏期间肌肉内部水分凝结成冰晶, 大量蛋白质被氧化, 其内部空间结构被破坏, 从而生成大量二硫键, 致使巯基含量下降。

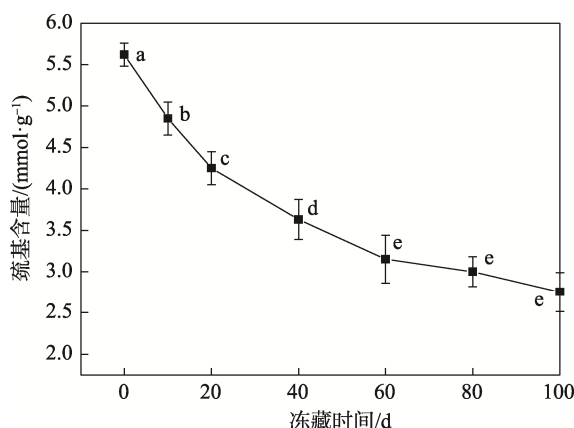


图 5 冻藏时间对肌原纤维蛋白巯基含量的影响

Fig.5 Effect of frozen storage time on the sulfhydryl content of myofibrillar protein

2.6 冻藏过程中鲈鱼肌原纤维蛋白表面疏水性变化情况

蛋白质内部基团的暴露程度可由疏水性变化反应出来^[26]。从图 6 可知, 在低温冻藏期间, 蛋白质表面疏水性随着贮藏时间的增加呈现上升趋势。冻藏前溴酚蓝的结合量为 39.7 μg , 而冻藏 100 d 时, 其数值达到 108.6 μg 。在冻藏 15 d 内, 疏水性呈小幅度上升, 而在冻藏 15~100 d 过程中, 溴酚蓝结合量显著增加, 疏水性呈现大幅度上升趋势。这可能是因为贮藏前期氧化程度不高, 随着冻藏时间逐渐增加, 蛋白质氧化程度也随之大幅度增加, 破坏了蛋白质结构, 因此暴露了表面疏水性的结构。有研究发现, 在冰温贮藏

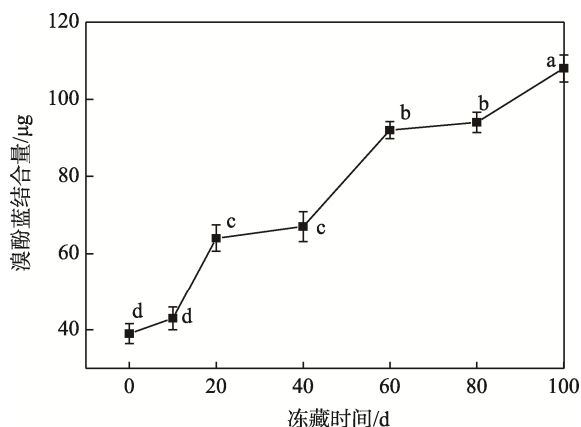


图 6 冻藏时间对肌原纤维蛋白表面疏水性的影响

Fig.6 Effect of frozen storage time on the surface hydrophobicity of myofibrillar protein

对鲤鱼品质的影响中, 疏水性增加是由于蛋白质分子结构发生了不可逆的转变^[27]。

3 结语

随着冻藏时间的增加, 鲈鱼的 pH 值整体表现为下降趋势; 色泽出现小幅变化; 在质构分析中, 硬度、弹性、胶黏性和咀嚼性等 4 个指标均出现下降趋势。随着冻藏时间的延长, 其肌原纤维蛋白羰基含量显著上升; 肌原纤维蛋白巯基含量因氧化生成大量二硫键, 从而出现大幅度下降; 肌原纤维蛋白表面疏水性随着冻藏时间的增加明显出现倍增现象。综上所述, 低温冻藏过程中鲈鱼肌肉蛋白质逐渐氧化, 在冻藏 20 d 内其品质变化较小, 更适宜加工或食用, 随着冻藏时间的增加其品质也随之下降, 导致其营养和加工价值随之降低。文中研究揭示了鲈鱼在低温冻藏过程中肌肉蛋白质的氧化特性, 可为后续鲈鱼贮藏运输新技术的开发提供一定的科学指导, 并对进一步提高水产品质量与安全性具有重要意义。

参考文献:

- [1] 赵金丽. 冻藏鲈鱼蛋白质和脂肪氧化及其控制技术[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2019: 1—5.
ZHAO Jin-li. Study on Protein Oxidation and Fat Oxidation of Frozen Mackerel with Different Antioxidants[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2019: 1—5.
- [2] 孟璐. 鲈鱼贮藏过程中的品质变化及特定腐败菌的研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2017: 1—5.
MENG Lu. The Quality Changes during Storage of Mackerel and Specific Spoilage Bacteria[D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2017: 1—5.
- [3] 周果, 王芝妍, 陈霞霞, 等. 贮藏温度及解冻方式对鲈鱼肉蛋白生化特性的影响[J]. 中国食品学报, 2016, 16(7): 164—169.
ZHOU Guo, WANG Zhi-yan, CHEN Xia-xia, et al. Effect of Storage Temperature and Thawing Way on the Biochemical Properties of Protein from *Pneumatophorus Japonicus*[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2016, 16(7): 164—169.
- [4] 向迎春, 吴丹, 黄佳奇, 等. 冻藏过程中冰晶对水产品品质影响的研究现状[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(12): 187—193.
XIANG Ying-chun, WU Dan, HUANG Jia-qi, et al. The Current Research Progress of Ice Crystals Acting on the Quality of Seafood during Freezing Storage[J]. Food Research and Development, 2018, 39(12): 187—193.
- [5] 郑平安, 孙静, 全晶晶, 等. 贮藏温度对鲈鱼品质的影响研究[J]. 核农学报, 2013, 27(1): 75—80.

- ZHENG Ping-an, SUN Jing, QUAN Jing-jing, et al. Effect of Temperature on Fresh Quality of Mackerel[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2013, 27(1): 75—80.
- [6] 刘小莉, 彭欢欢, 李莹, 等. 冻藏温度对斑点叉尾鲷鱼片蛋白质特性和感官品质的影响[J]. 中国食品学报, 2019, 19(1): 141—147.
- LIU Xiao-li, PENG Huan-huan, LI Ying, et al. Effect of Storage Temperature on Protein Characteristics and Sensory Quality of Frozen Catfish Fillets[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2019, 19(1): 141—147.
- [7] 马文慧, 周宣宣, 彭祺菲, 等. 乌鳢鱼片冷冻贮藏过程中品质变化规律研究[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(7): 204—210.
- MA Wen-hui, ZHOU Xuan-xuan, PENG Zhen-fei, et al. Quality Changes of Channa Argus Fillets during Freezing Storage[J]. Food Research and Development, 2018, 39(7): 204—210.
- [8] 李姣. 中国对虾贮藏过程中肌肉蛋白质生化特性变化规律研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2011: 33—37.
- LI Jiao. Postmortem Changes in Muscle Proteins of Chinese Shrimp (*Fenneropenaeus Chinensis*) during Storage[D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2011: 33—37.
- [9] BAHAR T, KORAY K. The Effects of an Iron-catalyzed Oxidation System on Lipids and Proteins of Dark Muscle Fish[J]. Food Chemistry, 2007, 104(2): 754—760.
- [10] 周景丽, 张坤生, 任云霞. 羟自由基氧化系统对虾蛄盐溶蛋白结构和功能性的影响[J]. 食品工业科技, 2016, 37(2): 330—334.
- ZHOU Jing-li, ZHANG Kun-sheng, REN Yun-xia. Protein Oxidation-induced Structure and Function Changes of the Oratosquilla Oratoria Salt-soluble Protein[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(2): 330—334.
- [11] 董洋, 王虎虎, 徐幸莲. 真空包装盐水鹅在不同温度条件下的贮藏特性及其货架期预测[J]. 食品科学, 2012, 33(2): 280—285.
- DONG Yang, WANG Hu-hu, XU Xing-lian. Storage Characteristics and Shelf Life Prediction of Vacuum-packed Salted Goose under Different Storage Temperatures[J]. Food Science, 2012, 33(2): 280—285.
- [12] 郭珊珊. 臭氧处理对冰温保鲜脆肉鲩鱼片品质的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2010: 27—32.
- GUO Shan-shan. Effect of Ozone Treatment on Quality of Crisped Grass Carp Fillets during Controlled Freezing-point Storage[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2010: 27—32.
- [13] 范文教, 孙俊秀, 陈云川, 等. 茶多酚对鲢鱼微冻冷藏保鲜的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 25(2): 294—297.
- FAN Wen-jiao, SUN Jun-xiu, CHEN Yun-chuan, et al. Effects of Tea Polyphenols on Freshness-keeping of Partial-frozen Silver Carp in Cold Storage[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 25(2): 294—297.
- [14] 刘大松. 草鱼肉在微冻和冰藏保鲜中的品质变化及其机理[D]. 无锡: 江南大学, 2012: 7—22.
- LIU Da-song. Quality Changes of Grass Carp Muscle during Partial-frozen and Iced Storage[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2012: 7—22.
- [15] 董庆利, 郭黎洋, 龚海斌, 等. 亚硝酸盐对猪肉过程腌制过程中颜色的影响[J]. 食品与发酵工业, 2006, 32(7): 37—41.
- DONG Qing-li, GUO Li-yang, GONG Hai-bin, et al. Effect of Nitrite on the Color of Pork during Curing[J]. Food and Fermentation Industries, 2006, 32(7): 37—41.
- [16] 黄卉, 郑陆红, 李来好, 等. 不同预冷温度对鲈鱼冰藏期间质构和色差的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(24): 302—308.
- HUANG Hui, ZHENG Lu-hong, LI Lai-hao, et al. Effects of Different Precooling Temperature on Texture and Color of Micropterus Salmoides during Ice Storage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(24): 302—308.
- [17] CHEN H H. Effect of Cold Storage on the Stability of Chub and Horse Mackerel Myoglobins[J]. Journal of Food Science, 2003, 68(4): 1416—1419.
- [18] 陈涛, 陆云飞, 叶晓峰, 等. 不同贮藏条件下东海马鲛鱼肉质构变化研究[J]. 食品科技, 2012, 37(9): 129—132.
- CHEN Tao, LU Yun-fei, YE Xiao-feng, et al. Changes of Textural Properties of Scomberomorus Nipponius Muscle from East China Sea under Different Frozen Storage Conditions[J]. Food Science and Technology, 2012, 37(9): 129—132.
- [19] 孙天利, 张秀梅, 张平, 等. 冰晶结合真空包装处理对牛肉组织结构变化的影响[J]. 食品科学, 2013, 34(22): 327—331.
- SUN Tian-li, ZHANG Xiu-mei, ZHANG Ping, et al. Effect of Controlled Freezing Point Storage Combined with Vacuum Packaging on Texture and Histological Structure of Beef[J]. Food Science, 2013, 34(22): 327—331.
- [20] 徐丹亚. 基于质地及动力学特性的牛肉新鲜度检测[D]. 杭州: 浙江大学, 2006: 31—42.
- XU Dan-ya. Detection of Beef Freshness Based on Texture and Dynamic Characteristics[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006: 31—42.

- [21] SUH J H, HO C T, WANG Y. Evaluation of Carbonyl Species in Fish Oil: An Improved LC-MS/MS Method[J]. Food Control, 2017, 78: 463—468.
- [22] CAKATAY U, TELCI A, SALMAN S, et al. Oxidative Protein Damage in Type I Diabetic Patients with and without Complications[J]. Endocrine Research, 2000, 26(1): 365—379.
- [23] 石径. 中华管鞭虾冻藏过程中品质变化规律及机理研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018: 36—43.
SHI Jing. Studies on Quality Changes and Mechanism of Mud Shrimp (*Solenocera Melantho*) during Frozen Storage[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018: 36—43.
- [24] XIONG Y L, PARK D, OOIZUMI T. Variation in the Cross-linking Pattern of Porcine Myofibrillar Protein Exposed to Three Oxidative Environments[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 57(1): 153—159.
- [25] HAMRE K, LIE Y, SANDNES K. Development of Lipid Oxidation and Flesh Colour in Frozen Stored Fillets of Norwegian Spring-spawning Herring (*Clupea Harengus L*) Effects of Treatment with Ascorbic Acid[J]. Food Chemistry, 2003, 82(3): 447—453.
- [26] 李新, 汪兰, 石柳, 等. 冷熏对高白鲑理化性质及肌球蛋白构象的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(8): 254—259.
LI Xin, WANG Lan, SHI Liu, et al. Effects of Cold Smoking on Physicochemical Properties and Myosin Conformations of Coregonus Peled[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(8): 254—259.
- [27] 何雪莹. 冰温保鲜对鲤鱼鱼肉品质特性及其理化特性影响的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2012: 21—44.
HE Xue-ying. Influence of Regulating Superchilling on the Quality and Physicochemical Properties of Common Carp Muscle during Storage[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2012: 21—44.