

超声辅助浸渍冷冻对鲢鱼肉品质的影响

叶 剑¹, 林胜利¹, 戴璐怡¹, 周 环¹, 苏来金^{2*}

(1. 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, 温州 325006;
2. 温州大学生命与环境科学学院, 温州 325035)

摘 要: **目的** 探究低频超声波用于浸渍冷冻技术的可行性, 比较不同冷冻方式对鲢鱼肉品质的影响。**方法** 采用超声辅助浸渍冷冻(ultrasound-assisted immersion freezing, UIF)、浸渍冷冻(immersion freezing, IF)和空气冷冻(air freezing, AF)处理新鲜鲢鱼肉, 通过温度曲线比较不同冷冻方式处理样品的冷冻速率大小, 并在冷冻贮藏期间定期检测样品的持水力、白度及肌原纤维蛋白质变化。**结果** 在频率为 25 kHz、功率为 180 W 的超声波处理下, UIF 方法可以使鱼肉的冷冻速率远高于 IF 方法, 较 AF 方法提高了 10 倍以上。与 AF 和 IF 组样品相比, UIF 样品在 12 周的-26℃冷冻贮藏期间持水力维持较好, 且肌原纤维蛋白质表现出相对更高的Ca²⁺-ATPase 活性和巯基含量。**结论** 一定功率的超声波是浸渍冷冻技术的有益补充, 可以更有效地抑制鱼肉在冻藏期间的品质降低。

关键词: 超声辅助浸渍冷冻; 鲢鱼; 冷冻速率; 品质; 肌原纤维蛋白质

Effects of ultrasound-assisted immersion freezing on the muscle quality in *Miichthys miiuy*

YE Jian¹, LIN Sheng-Li¹, DAI Lu-Yi¹, ZHOU Huan¹, SU Lai-Jin^{2*}

(1. Wenzhou Characteristic Food Resources Engineering and Technology Research Center, Wenzhou Academy of Agricultural Science, Wenzhou 325006, China; 2. College of Life and Environmental Science, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China)

ABSTRACT: Objective To explore the feasibility of the application of low-frequency ultrasonic waves in immersion freezing technology, and compare the effects of different freezing methods on the muscle quality of *Miichthys miiuy*. **Methods** Ultrasound-assisted immersion freezing (UIF), immersion freezing (IF) and air freezing (AF) were used to treat fresh *Miichthys miiuy* muscle, and the freezing rates of samples treated with different freezing methods were compared through temperature curves. The water-holding capacity, whiteness, and myofibrillar protein changes of the samples were periodically tested during frozen storage. **Results** Under the ultrasonic treatment with a frequency of 25 kHz and a power of 180 W, the UIF method could make the freezing rate of fish muscle much higher than that of the IF method, which was more than 10 times higher than that of the AF method. Compared with AF and IF group samples, UIF samples maintained better water holding capacity during 12-week' -26℃ frozen

基金项目: 温州市基础性农业科技项目(N20180017)、温州市重大科技创新攻关项目(ZS2019001)、温州市重点实验室(工程中心)建设项目(ZD202003)

Fund: Supported by the Basic Agricultural Science and Technology Project of Wenzhou Technical (N20180017), the Major Scientific and Technological Innovation Projects of Wenzhou (ZS2019001), and the Construction Project of Wenzhou Key Laboratory (Engineering Center) (ZD202003)

*通信作者: 苏来金, 博士, 副教授, 主要研究方向为海洋生物资源开发及利用。E-mail: sulaijin@163.com

*Corresponding author: SU Lai-Jin, Ph.D, Associate Professor, College of Life and Environmental Science, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China. E-mail: sulaijin@163.com

storage, and myofibrillar proteins showed relatively higher Ca^{2+} -ATPase activity and sulfhydryl content. **Conclusion** A suitable power of ultrasound is a beneficial supplement to the immersion freezing technology, which can more effectively inhibit the quality reduction of fish during frozen storage.

KEY WORDS: ultrasound-assisted immersion freezing; *Miichthys miiuy*; freezing rate; quality; myofibrillar protein

0 引言

鳊鱼(*Miichthys miiuy*)俗称米鱼,是分布于我国沿海各省的重要经济鱼类之一^[1],近年来凭借其鲜美的口感和鱼鳔等高值副产物广受人们青睐。然而,鳊鱼鱼肉水分含量近 80%^[2],若捕获后未进行合适的贮藏与及时的加工处理,则极易腐败变质。因此优质的鳊鱼保鲜技术对新鲜鳊鱼的大量供应尤为重要,特别是在每年的禁渔期。

当前海产品中最常用的冷冻保鲜技术能使海产品在贮藏、流通和销售环节中长期处于 -18°C 以下,以此抑制微生物和酶的影响,一定程度上保障了鳊鱼的供应^[3]。但冷冻保鲜的质量通常取决于对产品中冰晶大小、形态及分布的控制^[4-5]。由于食品的导热性能较低 $[0.5\sim 1.5\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})]$ ^[6],传统的食品空气冷冻(air freezing, AF)速率较慢,会导致冷冻的食品在局部生成较大冰晶,进而导致产品蛋白质变性、质构劣化、持水能力下降等现象。为改善相关问题,采用食品级冷冻介质提升冷冻速率的浸渍冷冻(immersion freezing, IF)技术逐渐得到推广。由于液体介质 $[100\sim 140\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})]$ 相对空气 $[15\sim 17\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})]$ 具有更高的传热系数^[7],IF技术具有更高的冷冻速率,以延缓食品冻藏过程中较大冰晶的形成和对食品的损伤^[8-9]。

超声辅助浸渍冷冻(ultrasound-assisted immersion freezing, UIF)是近年来新开发的食品冷冻技术。在IF过程中加入低频超声波(20~100 kHz)^[10-11],一方面能够在冷冻介质中产生微流,加快传热作用;另一方面产生的空化气泡能够诱导冰晶核形成,促进水分相变过程。同时空化气泡的破裂能够将原始冰晶破碎成更小的碎片,而这些碎片也会成为新的晶核,从而促进二次冰核形成。最终能够在组织中形成细小且均匀的冰晶,减小对食品结构的破坏^[12-13]。UIF技术往年在冷冻果蔬类产品中的应用较多^[14-16],近年来开始应用于动物性食品原料如对虾^[11]、海鲈鱼^[13]、猪肉^[17]、鲤鱼^[18-19]和石首鱼^[20]等,分别从冷冻速率、持水力、微观结构等角度分析 UIF 技术的冷冻质量。但是目前关于鳊鱼的冷冻方法及冻藏过程中肉质变化的研究报道甚少。

本研究首先在鳊鱼肉的 IF 过程中分别施加 3 种功率的超声波,并以 IF 和 AF 方法作为对照,探讨超声强度对冷冻速率的影响,然后比较 3 种冷冻方法对鳊鱼肉冻藏期间的持水力、色泽、肌原纤维蛋白质的影响,旨在了解 UIF 技术在鳊鱼及相关产品冷冻加工中的研究及应用潜力,为鳊鱼冷链储运过程中的品质提升提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

新鲜鳊鱼购于温州金虹农贸市场,选取个体重约(200±20) g,体表无损伤的鳊鱼,装于泡沫箱内,层冰层鱼覆盖,包装后 30 min 内运回实验室。

水产品冷冻液(温州吴昊农业生物科技有限公司);总蛋白定量测定试剂盒、总巯基(-SH)测试盒、超微量 Ca^{2+} -ATP 酶试剂盒(南京建成生物工程研究所有限公司);其他试剂均为分析纯(国药集团化学试剂有限公司)。

1.2 仪器与设备

AL204 电子天平(精度 0.1 mg)、FE20K pH 计(瑞士梅特勒仪器有限公司);S10 高速匀浆机、DCSD-40 双频超声辅助速冻机(宁波新芝生物科技股份有限公司);HH-2 恒温水浴锅(杭州力辰科技有限公司);TGL-18 台式高速冷冻离心机(四川蜀科仪器有限公司);RC-4HA/C 迷你型温湿度记录仪(江苏精创电气股份有限公司);NR20XE 手持式色差仪(深圳三恩驰科技有限公司);ReadMax 1500 全波长酶标仪(上海闪谱生物科技有限公司);BD715 冰柜(青岛澳柯玛股份有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 原料预处理

样品处理全程在低温下进行。鳊鱼去除鳞片、鱼头、鱼尾、鱼鳍和内脏,清洗表面的血液等杂质后,垂直于鱼身,将鱼背部肌肉切成近似 $5\text{ cm}\times 4\text{ cm}\times 4\text{ cm}$ 的鱼块,每条鱼获得 2 块鱼肉。用滤纸吸去表面水分并真空包装后,置于 4°C 冰箱预冷 2~4 h。

1.3.2 冷冻方法选择

将真空包装的鱼肉样品分成 5 组,采用不同冷冻工艺处理样品。实验分组情况如下:

① UIF: 将样品完全浸没于预冷至 -40°C 的冷冻液中快速冻结,冷冻过程中开启频率 25 kHz,功率分别为 120、180 和 240 W 的超声波。通过冷冻曲线比较不同超声功率下样品的冷冻速率。

② IF: 将样品完全浸没于预冷至 -40°C 的冷冻液中快速冻结。

③ AF: 将样品直接置于 -40°C 冰箱中冷冻。

将 RC-4 温湿度记录仪的温度探头插入部分样品的背部肌肉中,记录冷冻过程中鱼体温度随时间的变化趋势。

其中 UIF 和 IF 样品每隔 10 s 检测 1 次, AF 样品每隔 1 min 检测 1 次。

当鱼体温度降至 -20°C 以下, 取出样品, 立即放入 -26°C 冰箱保存。在贮藏的第 2、4、6、8、10、12 周分别取出部分样品, 在 4°C 冰箱中解冻后测定 UIF (180 W)、IF 和 AF 样品的各项指标。

1.3.3 持水力的测定

解冻损失的检测在 XIA 等^[21]的方法上略作修改: 在解冻前立即称量样品和其包装袋的总重(W_0), 待样品解冻, 打开包装后用滤纸擦去样品表面和袋内水分, 称量样品和包装袋的总重(W_1)和包装袋重量(W_2)。解冻损失按公式(1)计算。

$$\text{解冻损失}/\% = \frac{W_0 - W_1}{W_0 - W_2} \times 100\% \quad (1)$$

蒸煮损失的检测在 FARIDNIA 等^[22]的方法上略作修改: 将解冻的样品称重(W_3), 然后放入蒸煮袋中真空包装, 85°C 水浴 20 min 后取出冷却。打开包装后用滤纸擦去样品表面水分, 将煮过的鱼肉称重(W_4)。蒸煮损失计算如式(2)。

$$\text{蒸煮损失}/\% = \frac{W_3 - W_4}{W_3} \times 100\% \quad (2)$$

1.3.4 色泽的测定

使用白板校正后的手持式色差仪对鱼肉进行色差测试, 得到亮度值(L^*)、红度值(a^*)值和黄度值(b^*)后, 计算鱼肉白度。白度的计算公式如式(3)^[23]。

$$\text{白度} = 100 - [(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}]^{0.5} \quad (3)$$

1.3.5 肌原纤维蛋白的提取

参考胡馨月等^[24]的方法并略做修改: 称取 3.0 g 绞碎的鱼肉, 加入 10 倍体积预冷的 Tris-HCl 缓冲液(20 mmol/L, pH 7.0, 含 50 mmol/L KCl), 低温均质 1 min 后, 在 4°C 条件下以 8000 r/min 离心 15 min。弃去上清液, 重复 2 次。然后在沉淀中加入 10 倍体积的 Tris-HCl 缓冲液(20 mmol/L, pH 7.0, 含 0.6 mol/L KCl), 均质后 4°C 提取 1 h, 再次离心, 上清液即肌原纤维蛋白液。当天检测其他所有相关指标。

1.3.6 肌原纤维蛋白质相关指标检测

采用南京建成生物工程研究所提供的测试盒, 通过二喹啉甲酸(bicinchoninic acid, BCA)比色法测定肌原纤维蛋白质浓度, Ca^{2+} -ATPase 活性及总巯基含量通过微板法检测。

1.3.7 数据处理

所有检测指标做 3 次平行实验。实验结果表示为平均值 \pm 标准偏差。采用 Origin 9.0 对数据进行制图分析。

2 结果与分析

2.1 鲢鱼肉的冷冻时间

图 1 展示了使用不同冷冻方法的鲢鱼肉温度($4\sim-20^{\circ}\text{C}$)随时间变化的曲线。由图 1 可知, 不同处理组的冻结曲线均呈现出初始快速下降的趋势, 然后是一段稳定期后继续

快速下降。而冷冻速率则是 $\text{UIF} > \text{IF} > \text{AF}$, 这与前人报道的结果^[17-20]相似。

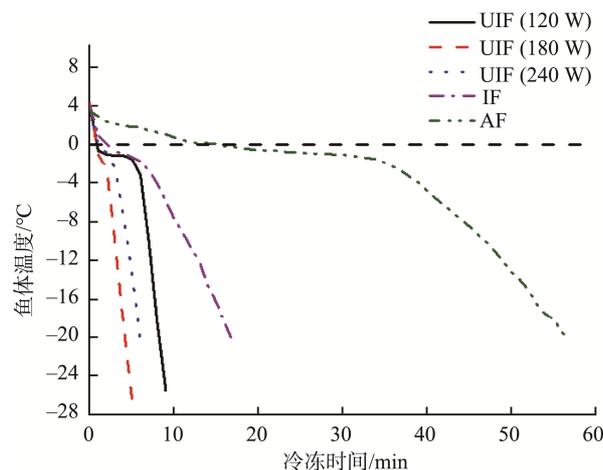


图 1 不同冷冻方式处理的鲢鱼肉温度曲线对比

Fig.1 Comparison of temperature curves of *Miuy croaker* meat processed by different freezing methods

一般来说, 水产品的冷冻可分为 3 个阶段。首先是从起始温度降至冰点, 此时食品释放的是显热。此阶段的超声波在冷冻液介质中移动并产生强烈的微流, 可以增加传热效率, 以实现更快速的降温。第二阶段是相变阶段, 即最大冰晶形成阶段, 此时食品释放潜热, 温度下降速度较慢。而此阶段用时越短, 形成的冰晶就越小, 对细胞损伤较小^[25]。通过图 1 的温度曲线可知, 鱼体温度降至 0°C 时, 降温速率已经大幅下降。而当温度降至 -4°C 以下, 速率又开始提高, 因此将相变阶段定为 0°C 至 -4°C 。此时超声波能够通过空化作用产生气泡, 使之作为晶核, 能够在鱼肉中快速产生细小且均匀的冰晶。第二阶段结束后, 残余的水分继续结冰, 而已结冰的水分释放热量, 此时超声波继续发挥作用, 在加快传热效率的同时破碎较大冰晶, 避免对细胞的损伤。

比较 3 种超声功率处理的 UIF 冷冻时间(图 1、表 1)可以发现, 当超声功率为 180 W 时, 样品通过相变阶段的用时和冷冻总用时都最短, 冷冻总用时为(5.25 ± 0.42) min。当超声功率在 120 W, 主要影响样品的相变阶段, 可能是较低的超声强度难以在食品中产生空化气泡, 延缓了成核过程。而当功率高达 240 W, 偏高的超声强度可能会增加反应体系中的热量, 导致第一和第三阶段的降温缓慢^[26]。

与 AF 相比, IF 和 UIF 方法能明显提高鱼的冷冻速度, 冷冻时间大幅缩短, 这主要是由于液体的传热系数高于空气。特别是 UIF (180 W) 样品处理鱼肉所需时间最短, 仅用时 5.25 min 就使鱼体温度降至 -20°C 以下, 相较 AF 样品的 57.30 min 缩短了 90.8%, 且明显快于 IF 的 16.57 min, 说明超声作用的确有提高冷冻效率的作用。但另一方面, 本研究的样品是切成小块的鲢鱼背部肌肉, 不同组间明显的结

果差异和较大的标准偏差值(表 1)也可能与样品体积偏小有关。鉴于本研究结果,之后选用 UIF (180 W)样品进行理化性质的研究。

表 1 不同冷冻条件下鲢鱼肉通过各冷冻阶段所用的时间(min)
Table 1 Time taken for *Miuy croaker* to pass through each freezing stage under different freezing conditions (min)

处理方式	4°C至 0°C	0°C至 -4°C	-4°C至 -20°C	总用时
UIF (120 W)	1.17±0.18	6.08±0.72	2.00±0.35	9.25±0.68
UIF (180 W)	1.25±0.27	2.08±0.40	1.92±0.45	5.25±0.42
UIF (240 W)	2.05±0.25	2.33±0.28	2.42±0.30	6.82±0.55
IF	2.17±0.32	5.92±0.52	8.50±0.58	16.57±0.48
AF	16.50±0.90	23.50±2.20	18.00±2.10	57.30±3.50

注:当样品温度通过某个温度临界值的用时介于2个时间点之间,取2个时间点的平均值。

2.2 冷冻方式对鱼肉贮藏期间持水力的影响

冻藏鱼肉的持水力通常与冷冻及解冻方式、冰晶的分布及大小等因素相关^[27],且持水力大小会影响其重量、外观及其他理化性质。持水力大小可以通过检测样品解冻及蒸煮过程中的汁液损失率来判定。本研究检测了不同冷冻方式处理的样品在贮藏期间的解冻损失和蒸煮损失,结果如图 2 所示。随着冻藏时间的延长,鲢鱼的总体汁液损失逐渐升高,且2种指标呈现出一致性。在冻藏前6周,UIF样品的汁液损失明显低于同期的AF和IF样品,说明UIF能使鱼肉冷冻过程中形成细小且均匀的冰晶,有利于降低肌肉细胞的损伤和蛋白质变性,所以能更好地保持肌肉持水性。冻藏后6周,AF和IF样品的汁液损失率相对稳定,这可能是两者的汁液损失已经接近临界值。而UIF样品汁液损失还在缓慢提高,可能与冻藏过程中的冰晶生长和蛋白质变性有关。

2.3 冷冻方式对色度的影响

鲢鱼肉经不同冷冻方式处理后,会发生一系列的生物化学反应如脂肪氧化和色素降解,从而使肌肉的颜色发生变化。因此冻藏后的肉色一方面能反映出样品的生理变化,另一方面也会影响消费者选择。从图 3 可知,新鲜样品的白度值较低。而在冻藏期间,不同冷冻方法处理的鱼肉白度均有提高,其中AF样品白度最高。这可能是由于冷冻过程形成的冰晶破坏了肌肉持水性,导致解冻后样品游离水含量增加,从而提高了样品对光的反射效果,令亮度值(L^*)升高^[18,28]。而UIF组白度升高最小,这表明样品的肌肉组织结构得以保持,失水得到有效抑制。

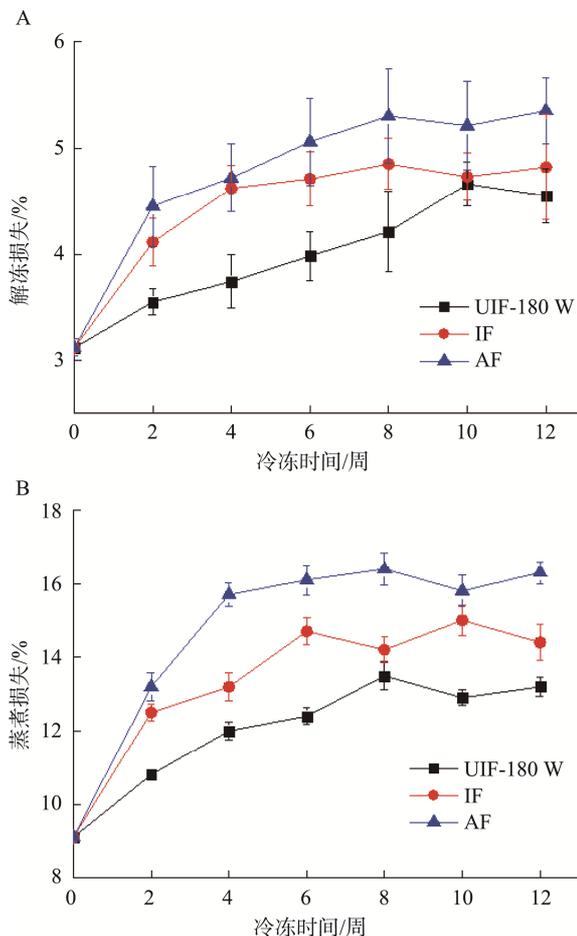


图 2 不同冷冻方式对鲢鱼贮藏期间解冻损失(A)和蒸煮损失(B)的影响($n=3$)

Fig.2 Effects of different freezing methods on thawing loss (A) and cooking loss (B) during storage of *Miuy croaker* ($n=3$)

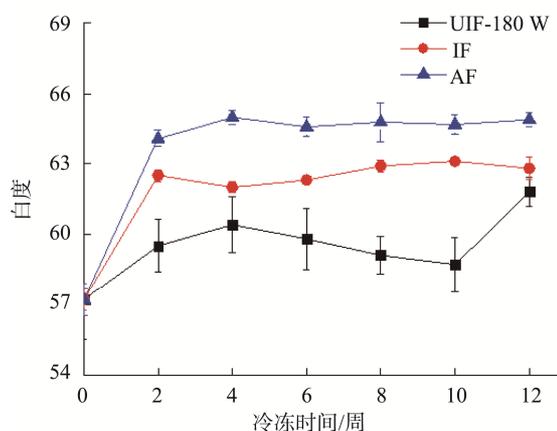


图 3 不同冷冻方式对鲢鱼贮藏期间白度的影响($n=3$)

Fig.3 Effects of different freezing methods on whiteness of *Miuy croaker* during storage ($n=3$)

2.4 冷冻方式对总巯基活性的影响

鲢鱼肉中除了近80%的水分,其余大部分为蛋白质,

而盐溶性的肌原纤维蛋白占了绝大多数。肌原纤维蛋白质的氧化会导致蛋白质交联、降解, 对肌纤维造成破坏, 进而影响其嫩度、持水性及风味等指标, 因此评估肌原纤维蛋白的质量变化对冷冻方法的研究具有重要价值。在冷冻储存过程中, 肌原纤维蛋白空间结构的改变会导致分子内部的巯基暴露出来, 使其极易被氧化成二硫键, 进一步导致蛋白质分子的交联^[20,29]。故本研究通过检测总巯基含量的变化来了解该蛋白在冻藏过程中的变性程度。

图 4 展示了鲢鱼肉的总巯基含量在不同冷冻条件下随冻藏时间的变化。3 种冷冻方式获得的鱼肉总巯基含量均随时间延长而逐渐下降, 且在冻藏的开始 2 周内下降速率较快, 后期逐步放缓。冷冻至第 12 周时, UIF 样品的总巯基含量从最初的 $(5.61 \pm 0.12) \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{g}^{-1} \text{ pro}$ 下降至 $(3.37 \pm 0.16) \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{g}^{-1} \text{ pro}$, 下降幅度达 40.0%, 略低于 IF 样品的 44.9%, 但明显低于 AF 样品的 56.7%。可能是速冻技术使样品得到了较小的冰晶, 令其对肌肉损伤较小, 抑制了蛋白质巯基的氧化变性。

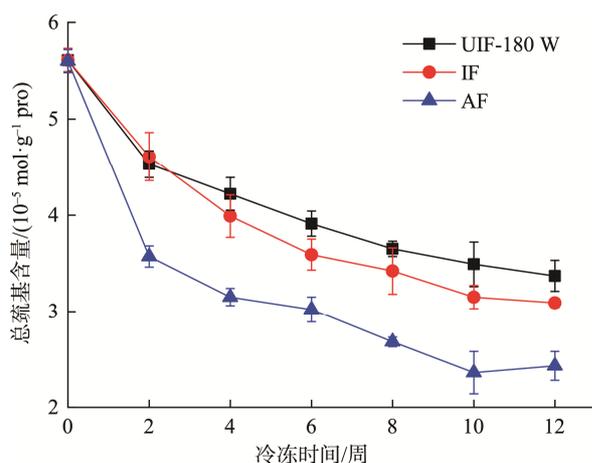


图 4 不同冷冻方式对鲢鱼贮藏期间总巯基含量的影响(n=3)

Fig.4 Effects of different freezing methods on total sulfhydryl content of *Miiuy croaker* during storage (n=3)

2.5 冷冻方式对 Ca²⁺-ATPase 活性的影响

鱼肉肌球蛋白的球状头部是 Ca²⁺-ATPase 的活性中心, 其结构在鱼肉冻藏过程中会因为冰晶的作用发生构象变化, 导致 Ca²⁺-ATPase 活性下降, 同时巯基氧化成二硫键以及蛋白质分子重排也会可能导致活性下降, 因此 Ca²⁺-ATPase 活性大小能反映蛋白质的变质情况^[30-32]。由图 5 可知, 肌原纤维蛋白中 Ca²⁺-ATPase 活性变化趋势和总巯基变化相似, 随贮藏时间延长而不断降低。且冻藏前期 Ca²⁺-ATPase 活性下降较快, 随后下降速率逐渐降低。AF 样品的下降幅度最大, 12 周后残余 Ca²⁺-ATPase 活性为

0.109 U/mg, 仅为新鲜样品的 43.95%; 采用 IF 的样品变性较为平缓, 残余酶活维持在 50%以上, 可能是由于高冻结速率延缓了较大冰晶的形成, 进而延缓了环境中离子浓度升高和肌球蛋白变性。虽然 UIF 样品中的 Ca²⁺-ATPase 活性维持情况较 IF 样品更好, 但从图 5 中可以看出, 在冻藏的前 8 周内, 其差异并不大, 直到第 10 周起 UIF 样品的 Ca²⁺-ATPase 活性才明显高于 IF 样品, 说明冷冻方式不同对样品肌原纤维蛋白质变性的影响可能要等到贮藏后期才能显现, 也可能与本研究中使用的鱼块样品体积偏小有关。

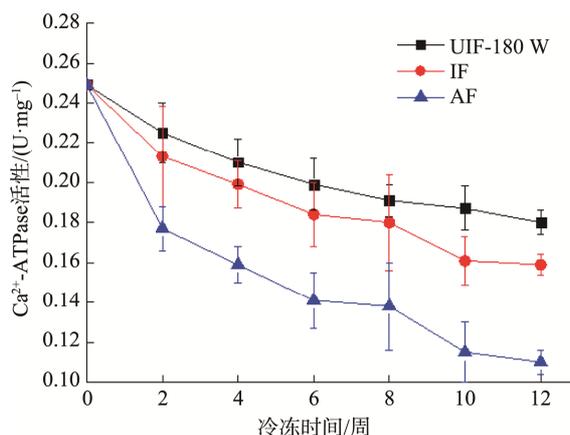


图 5 不同冷冻方式对鲢鱼贮藏期间肌原纤维蛋白 Ca²⁺-ATPase 活性的影响(n=3)

Fig.5 Effects of different freezing methods on Ca²⁺-ATPase activity in myofibrillar protein of *Miiuy croaker* during storage (n=3)

3 结论

本研究探究了 UIF、IF 和 AF 冷冻条件对鲢鱼肉在冻藏过程中肉质各项理化指标的影响。结果表明: UIF 过程中加入 25 kHz、180 W 的超声波作用, 不仅能够使鱼肉样品的冷冻速率较普通的 IF 大幅提高, 还能小幅降低鱼肉的汁液损失率, 同时蛋白质变性程度得到了较好地改善, 可见 UIF 技术在提高鱼肉冷冻加工效率、维持鱼肉品质方面具有较好的潜力。此外, 本研究检测了鱼肉在不同冷冻条件下随贮藏时间变化的白度值, 后期可以据此开发基于机器视觉或光谱技术的鱼肉新鲜度检测方法。但应该注意的是, 本研究所用样品为切成块的鲢鱼背部肌肉, 若采用整鱼冷冻或是冷冻体型更大的样品, 则 UIF 冷冻工艺和冷冻速率需要更细致的评估。后期还可以从样品的微观结构入手, 探讨 UIF 技术对样品冰晶大小及蛋白质空间结构的影响。本研究为改善冻藏鲢鱼品质的控制技术、延长鲢鱼的货架期提供了理论支持。

参考文献

- [1] 郭昶畅. 中国沿海石首鱼科鱼类的鉴定、分类和分子系统发育研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2017.
GUO CC. Identification, classification and molecular phylogeny of *Sciaenidae* species from Chinese waters [D]. Xiamen: Xiamen University, 2017.
- [2] 孙素玲, 李雪, 顾小红, 等. 鲢鱼肌肉和副产物营养成分分析及评价[J]. 食品与机械, 2020, 36(7): 45–49.
SUN SL, LI X, GU XH, *et al.* Analysis and evaluation of nutrient compositions of *Miichthys miiuy* muscle and by-products [J]. Food Mach, 2020, 36(7): 45–49.
- [3] 沈月新, 章超桦, 薛长湖, 等. 水产食品学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001.
SHEN YX, ZHANG CH, XUE CH, *et al.* Aquatic food science [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2001.
- [4] HONG GP, CHOI MJ. Comparison of the quality characteristics of abalone processed by high-pressure sub-zero temperature and pressure-shift freezing [J]. Innov Food Sci Emerg, 2016, (33): 19–25.
- [5] KAALE LD, EIKEVIK TM. The influence of superchilling storage methods on the location/distribution of ice crystals during storage of Atlantic salmon (*Salmo salar*) [J]. Food Control, 2015, (52): 19–26.
- [6] SUN DW, LI B. Microstructural change of potato tissues frozen by ultrasound-assisted immersion freezing [J]. J Food Eng, 2003, 57(4): 337–345.
- [7] RODEZNO LAE, SUNDARARAJAN S, SOLVAL KM, *et al.* Cryogenic and air blast freezing techniques and their effect on the quality of catfish fillets [J]. LWT-Food Sci Technol, 2013, 54(2): 377–382.
- [8] PAN Q, ZHANG YQ, QING S, *et al.* Effect of cryogenic immersion freezing on quality changes of vacuum-packed bighead carp (*Aristichthys nobilis*) during frozen storage [J]. J Food Process Pres, 2018, 28(3): 111–117.
- [9] YANG F, JING DT, DIAO YD, *et al.* Effect of immersion freezing with edible solution on freezing efficiency and physical properties of obscure pufferfish (*Takifugu obscurus*) fillets [J]. LWT-Food Sci Technol, 2020, 118: 108762.
- [10] CHENG X, ZHANG M, XU B, *et al.* The principles of ultrasound and its application in freezing related processes of food materials: A review [J]. Ultrason Sonochem, 2015, 27: 576–585.
- [11] 向迎春. 超声辅助冻结中国对虾的组织冰晶状态及其品质变化的影响研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
XIANG YC. Studies on the effect of ultrasonic assisted freezing on the ice crystals and the quality changes in *Fenneropenaeus chinensis* [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [12] ZHANG P, ZHU Z, SUN DW. Using power ultrasound to accelerate food freezing processes: Effects on freezing efficiency and food microstructure [J]. Crit Rev Food Sci, 2018, 58(16): 2842–2853.
- [13] 刘宏影. 超声波辅助冷冻与低温速冻对海鲈鱼冰晶形成及品质特性的影响[D]. 锦州: 渤海大学, 2020.
LIU HY. Effects of ultrasound-assisted freezing and quick-freezing on ice crystal formation and quality characteristics of sea bass (*Lateolabrax japonicus*) [D]. Jinzhou: Bohai University, 2020.
- [14] ISLAM MN, MIN Z, FANG Z, *et al.* Direct contact ultrasound assisted freezing of mushroom (*Agaricus bisporus*): Growth and size distribution of ice crystals [J]. Int J Refrig, 2015, (5): 46–53.
- [15] VALLESPIR F, CÁRCEL JA, MARRA F, *et al.* Improvement of mass transfer by freezing pre-treatment and ultrasound application on the convective drying of beetroot (*Beta vulgaris* L.) [J]. Food Bioprocess Technol, 2018, 11(1): 72–83.
- [16] CHENG XF, ZHANG M, ADHIKARI B, *et al.* Effect of ultrasound irradiation on some freezing parameters of ultrasound-assisted immersion freezing of strawberries [J]. Int J Refrig, 2014, 44: 49–55.
- [17] ZHANG M, NIU H, CHEN Q, *et al.* Influence of ultrasound-assisted immersion freezing on the freezing rate and quality of porcine longissimus muscles [J]. Meat Sci, 2017, 136: 1–8.
- [18] SUN QX, ZHAO XX, ZHANG C, *et al.* Ultrasound-assisted immersion freezing accelerates the freezing process and improves the quality of common carp (*Cyprinus carpio*) at different power levels [J]. LWT-Food Sci Technol, 2019, 108: 106–112.
- [19] SUN QX, SUN FD, XIA XF, *et al.* The comparison of ultrasound-assisted immersion freezing, air freezing and immersion freezing on the muscle quality and physicochemical properties of common carp (*Cyprinus carpio*) during freezing storage [J]. Ultrason Sonochem, 2019, 51: 281–291.
- [20] QIU S, CUI FC, WANG JX, *et al.* Effects of ultrasound-assisted immersion freezing on the muscle quality and myofibrillar protein oxidation and denaturation in *Sciaenops ocellatus* [J]. Food Chem, 2022, 377: 131949.
- [21] 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 Sci, 2009, 83: 239–245.
- [22] FARIDNIA F, MA QL, BREMER PJ, *et al.* Effect of freezing as pre-treatment prior to pulsed electric field processing on quality traits of beef muscles [J]. Innov Food Sci Emerg Technol, 2015, 29: 31–40.
- [23] LIU Q, KONG B, HAN J, *et al.* Effects of superchilling and cryoprotectants on the quality of common carp (*Cyprinus carpio*) surimi: Microbial growth, oxidation, and physicochemical properties [J]. LWT-Food Sci Technol, 2014, 57(1): 165–171.
- [24] 胡馨月, 张维, 赵行, 等. 不同冻结方式对沙光鱼品质的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(9): 313–319.
HU XY, ZHANG W, ZHAO H, *et al.* Effects of different freezing methods on the quality of *Synechogobius hasta* [J]. Sci Technol Food Ind, 2021, 42(9): 313–319.
- [25] 巩涛硕, 蓝蔚青, 王蒙, 等. 不同冻结方式对金鲳鱼水分、组织结构与品质变化的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(23): 213–219.
GONG TS, LAN WQ, WANG M, *et al.* Effects of different freezing methods on water state, tissue structure and quality changes of *Trachinotus ovatus* [J]. Food Sci, 2019, 40(23): 213–219.
- [26] 吴宇桐, 张潮, 孔保华. 超声辅助浸渍冷冻对猪肉水饺肉馅品质的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(23): 107–113.

- WU YT, ZHANG C, KONG BH. Effect of ultrasonic-assisted immersion freezing on the quality of pork dumpling filling [J]. *Food Sci*, 2020, 41(23): 107–113.
- [27] ZHANG M, XIA X, LIU Q, *et al.* Changes in microstructure, quality and water distribution of porcine longissimus muscles subjected to ultrasound-assisted immersion freezing during frozen storage [J]. *Meat Sci*, 2019, 151: 24–32.
- [28] 武天听, 邓晓影, 水珊珊, 等. 冷冻南美白对虾新型镀冰衣工艺优化研究[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(4): 1216–1223.
- WU TX, DENG XY, SHUI SS, *et al.* Optimization of new ice-coating technology for frozen *Penaeus vannamei* [J]. *J Food Saf Qual*, 2022, 13(4): 1216–1223.
- [29] 陈晓楠, 赵金丽, 张宾, 等. 低温冻藏过程中鲢鱼肌肉蛋白质氧化特性研究[J]. *包装工程*, 2020, 41(17): 38–45.
- CHEN XN, ZHAO JL, ZHANG B, *et al.* Oxidation of muscle protein in mackerel during cryopreservation [J]. *Packag Eng*, 2020, 41(17): 38–45.
- [30] XIONG G, CHENG W, YE L, *et al.* Effects of konjac glucomannan on physicochemical properties of myofibrillar protein and surimi gels from grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) [J]. *Food Chem*, 2009, 116(2): 413–418.
- [31] ZHANG B, HAO G, CAO H, *et al.* The cryoprotectant effect of xylooligosaccharides on denaturation of peeled shrimp (*Litopenaeus vannamei*) protein during frozen storage [J]. *Food Hydrocolloid*, 2018, 77: 228–237.
- [32] JIANG LF, WU SJ. Pullulan suppresses the denaturation of myofibrillar protein of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) during frozen storage [J]. *Int J Biol Macromol*, 2018, 112: 1171–1174.

(责任编辑: 于梦娇 郑 丽)

作者简介



叶 剑, 硕士, 讲师, 主要研究方向为水产品加工及贮藏工程。

E-mail: jianye1127@163.com



苏来金, 博士, 副教授, 主要研究方向为海洋生物资源开发及利用。

E-mail: sulaijin@163.com