

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2012.00167

## 反复冷冻-解冻对鲢品质的影响

史策<sup>1</sup>, 崔建云<sup>1</sup>, 王航<sup>1</sup>, 沈慧星<sup>2</sup>, 罗永康<sup>1</sup>

1. 中国农业大学 食品科学与营养工程学院, 北京 100083;

2. 中国农业大学 理学院, 北京 100083

**摘要:** 研究鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)在冷冻-解冻过程中的品质变化规律。鲢于-18℃条件下冻藏 10 d, 流水解冻后再贮藏于-18℃条件下, 5 d 后解冻, 共反复冷冻-解冻 5 次。在解冻 1、3、5 次后随机取 3 条鲢测定其解冻损失、蒸煮损失、硬度、咀嚼性、恢复性、硫代巴比妥酸(TBA)值、L\*值、b\*值、盐溶性蛋白(SSP)含量、Ca<sup>2+</sup>-ATP 酶活性、总巯基含量、表面疏水性和感官值等指标, 评价反复冷冻-解冻对鲢品质的影响。结果表明, 在第 1 次冷冻-解冻时, 硬度、咀嚼性、恢复性、盐溶性蛋白(SSP)含量和 Ca<sup>2+</sup>-ATP 酶活性与鲢初始值相比显著降低( $P<0.05$ ), b\*值和表面疏水性显著升高( $P<0.05$ ); 解冻损失、L\*值和 TBA 值在第 3 次冷冻-解冻时显著上升( $P<0.05$ ); 总巯基含量在第 5 次冷冻-解冻时显著下降( $P<0.05$ ); 而蒸煮损失在冷冻-解冻过程中没有显著变化( $P>0.05$ ); 感官值在第 5 次冷冻-解冻时为 47, 感官品质已不可接受。各指标变化表明, 鲢品质会随着反复冷冻-解冻次数增加而下降, 在运输、贮藏和销售过程中要防止温度波动, 避免反复冻融对鲢品质造成不利影响。

**关键词:** 鲢; 冷冻-解冻; 质构特性; 理化性质; 感官评价

中图分类号: S984

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2012)01-0167-07

白鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)属于鲤形目, 鲤科, 是中国四大家鱼之一, 生长快、疾病少、产量高, 其肉质鲜嫩, 营养丰富, 已经成为中国淡水鱼产品的重要原料之一。鲢起捕集中, 批量较大, 如不及时加工处理, 容易发生腐败变质<sup>[1]</sup>。冷冻贮藏是水产品广泛采用的保藏方法, 通过使肉中的水分冻结, 来抑制微生物的生长繁殖和酶的活性, 从而延长食品的货架期, 但冻藏速率、贮藏温度、贮藏、运输和销售过程中温度波动及解冻方法等因素都会影响鱼肉品质。

在实际生产过程中, 由于冷链技术在运输、贮藏、零售、消费过程中不完善, 温度波动较大, 使食品经历多次冷冻-解冻。反复冻融使样品中冰晶重结晶以及在肌原纤维中重新分布, 导致细胞结构被破坏, 脂肪氧化, 色泽劣变, 质构变化, 盐溶性蛋白(SSP)含量、Ca<sup>2+</sup>-ATP 酶活性以及总巯

基含量下降<sup>[2-5]</sup>, 从而降低了动物产品的食用价值。因此, 从蛋白功能性质、脂肪氧化、色泽、质构、肌原纤维蛋白结构等方面了解反复冷冻-解冻对动物产品品质的影响具有重要意义。

目前国内外对海产品、畜禽肉冷冻-解冻的研究较多。Xia 等<sup>[6]</sup>研究反复冻融后猪肉的理化性质变化和蛋白质氧化时发现, 脂肪氧化值增大, 色泽劣变, 剪切力减小, 并引起肌原纤维蛋白交联。Sriket 等<sup>[7]</sup>研究黑老虎虾(*Penaeus monodon*)和白老虎虾(*Penaeus vannamei*)理化性质及微观结构发现, 随着冷冻-解冻次数的增加,  $\alpha$ -糖苷酶和  $\beta$ -乙酰基-氨基葡萄糖苷酶增加, Ca<sup>2+</sup>-ATP 酶活性、总巯基含量下降, 导致蛋白质变性, 细胞破裂, 肌肉结构损坏。李金平等<sup>[8]</sup>研究表明, 反复冻融造成牛外脊肉的解冻损失和硫代巴比妥酸值增大, 蛋白质降解。但系统针对淡水鱼反复冻融的研究

收稿日期: 2011-07-17; 修订日期: 2011-09-19.

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项资金项目(CARS-46).

作者简介: 史策(1989-), 女, 硕士研究生, 研究方向为农产品加工及贮藏. E-mail: shice001@163.com

通信作者: 罗永康, 教授, 博士, 主要从事水产品贮藏与加工研究. Tel: 010-62737385; E-mail: luoyongkang@263.net

鲜有报道。本研究以白鲢为研究对象,主要探讨反复冷冻-解冻过程对鲢品质的影响,为实际生产中鱼类运输、贮藏和消费过程提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料及预处理

鲜活白鲢购于农贸市场,体质量(715.7±63.4)g。白鲢击毙后,立即去鳞、去内脏、去鳃,用水冲洗干净,沥干后装入聚乙烯保鲜袋并密封,置于-18℃冰箱中贮藏。10 d后将鲢从-18℃冰箱中取出,用聚乙烯保鲜袋密封,流水解冻,水温保持在 20~22℃,使用数字温度计测定鱼体中心温度,解冻终点温度为 0~2℃,完成第 1 次冷冻-解冻过程。解冻后的白鲢一部分立即进行各指标的测定;另一部分放入-18℃冰箱中继续冷冻,5 d 后取出再解冻(流水解冻),为第 2 次冷冻-解冻。依次循环完成 3、4、5 次冷冻-解冻。其中测定 0、1、3、5 次冷冻-解冻各指标。

### 1.2 实验方法

**1.2.1 质构特性(TPA)的测定** 参照李汴生等<sup>[9]</sup>关于质构特性的测定方法,并做部分修改。主要测定参数有硬度、咀嚼性和恢复性,样品使用质构仪(TA-XT2i 型,英国 SMS 公司)进行质构分析(TPA)。测试时取鲢背部肌肉,切成 2.0 cm×2.0 cm×1.5 cm 小块。探头为 P35 圆柱型,探头测试速度始终保持 1 mm/s,测试间隔时间为 5 s,压缩比为 30%;每组样品重复测定 6 次。

**1.2.2 色泽的测定** 鱼肉的 颜色采用色差仪(ADCI,北京辰泰克仪器技术有限公司)测定,用白板对设备进行校准后测定解冻后鱼肉的 L\*值和 b\*值。

### 1.2.3 理化指标的测定

(1)解冻损失 鲢解冻前和解冻后的样品质量分别为  $W_1$ 、 $W_2$ ,采用 AOAC<sup>[10]</sup>方法测解冻损失。

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

(2)蒸煮损失 将解冻后的样品(2.0 cm×2.0 cm×1.5 cm)称重( $W_1$ ),放入保鲜袋中密封,在 85℃水浴锅中加热 15 min,然后在室温下冷却

3 min,用吸水纸擦干后再次称重( $W_2$ )。

$$\text{蒸煮损失(\%)} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100\%$$

(3)硫代巴比妥酸(TBA)值 参照 Song 等<sup>[11]</sup>关于 TBA 值的测定方法。

(4)盐溶性蛋白含量、 $\text{Ca}^{2+}$ -ATPase 活性及总巯基(SH)含量的测定 参照潘锦锋<sup>[12]</sup>关于盐溶性蛋白、 $\text{Ca}^{2+}$ -ATPase 活性、总巯基含量的测定方法。

(5)表面疏水性的测定 参照 Sriket 等<sup>[7]</sup>关于表面疏水性的测定方法,并做部分修改。使用 8-苯胺基-1-萘磺酸镁(ANS)做为荧光探针。将肌原纤维蛋白溶解于含有 0.6 mol/L NaCl 的 10 mmol/L 磷酸缓冲液中(pH 6.3),蛋白浓度分别稀释到 0.125、0.25、0.5 和 1 mg/mL。2 mL 蛋白溶液加入 10 μL 含有 8 mmol/L ANS 的 0.1 mol/L 磷酸缓冲液(pH 7.0)。蛋白-ANS 复合物的荧光强度使用荧光分光光度计(970CRT,上海精科仪器有限公司)测定,激发波长 390 nm,发射波长 468 nm。以荧光强度与蛋白浓度做图,曲线斜率表示为蛋白表面疏水性 SoANS。

**1.2.4 感官评价** 参照任亚梅等<sup>[13]</sup>的感官指标测定方法。设定 7 人评分小组,在光线好无气味环境中,对鱼眼球、肌肉色泽、肌肉弹性、气味和滋味 5 个方面分别评分,每个部分满分 20 分。以 60 分为食用标准,100 分为新鲜鱼,低于 60 分不可食用。各项感官指标评分标准如表 1 所示。

**1.2.5 统计分析** 实验数据使用 Excel 2007 进行数据处理,采用 SAS 软件进行方差分析和差异显著性分析。每个指标重复测定 3 次,质构特性指标重复测定 6 次,差异显著性水平为 0.05。

## 2 结果与分析

### 2.1 解冻次数对鲢解冻损失及蒸煮损失的影响

从表 2 可以得到,鲢体解冻损失随着解冻次数的增加呈上升趋势,第 3、5 次解冻后的解冻损失比第 1 次解冻损失分别增加了 56.39%、62.14%,差异显著( $P < 0.05$ )。在冷冻-解冻过程中,鲢肉蒸煮损失没有显著变化( $P > 0.05$ )。鲢总损失包括解冻损失和蒸煮损失,经过 5 次冷冻-解冻后的鱼肉总损失比新鲜鲢总损失增加了 34.66%,表明肌肉持

表 1 解冻后鲢感官评价标准  
Tab. 1 The criterion of sensory index for thawed silver carp

| 指标<br>item              | 感官评分 score of sensory value                                       |   |  |
|-------------------------|---|---|--|
|                         | 满分 20 分 20 points   | 10~19 分 10-19 points  | 0~9 分 0-9 points   |
| 眼球<br>eyeball           | 眼球饱满透亮<br>plump and bright  | 稍有塌陷和白色浑浊<br>a little dent and white muddiness                                    | 眼眶凹陷, 眼球出现黄浊色<br>dent and yellow muddiness                                   |
| 肌肉色泽<br>muscle<br>color | 红色与白色肌肉色泽鲜亮分明<br>all fresh colour for red muscle and white muscle | 红色肌肉呈暗红色, 白色肌开始变暗<br>showing wine-colour for red muscle and dark for white muscle | 红色肌呈现褐色, 白色肌发黄<br>showing brown for red muscle and a yellow for white muscle |
| 肌肉弹性<br>tonicity        | 解冻后, 肌肉弹性恢复良好<br>after thawed, well tonicity                      | 指捏后可以恢复原形<br>after finger press, can recover original shape                       | 无法恢复弹性<br>after finger press, to be minced                                   |
| 气味<br>smell             | 鱼块气味正常, 有鱼类特有鲜腥味<br>normal fresh fishy smell                      | 腥味变重, 不新鲜<br>heavy and off-fresh fishy smell                                      | 出现腐败气味, 冰箱中冻臭味<br>decay and stink smell                                      |
| 滋味<br>flavor            | 肉质柔嫩, 质感细腻<br>tender, fine and smooth                             | 肉质变干, 易破碎<br>drying and easy fall to pieces                                       | 肉质非常干, 纤维很短, 近乎粉状<br>very dry, short fibre, and near powder                  |

表 2 解冻次数对鲢解冻损失和蒸煮损失的影响  
Tab. 2 Influence of freeze-thawing cycles on thawing loss and cooking loss in silver carp

$n=3$ ;  $\bar{x} \pm SD$

| 指标<br>item          | 冷冻-解冻次数 freeze-thaw cycle |                         |                         |                         |
|---------------------|---------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
|                     | 0                         | 1                       | 3                       | 5                       |
| 解冻损失/% thawing loss | -                         | 3.65±0.14 <sup>b</sup>  | 8.37±0.60 <sup>a</sup>  | 9.64±1.21 <sup>a</sup>  |
| 蒸煮损失/% cooking loss | 21.36±1.19 <sup>a</sup>   | 21.72±1.14 <sup>a</sup> | 22.78±2.32 <sup>a</sup> | 23.05±2.89 <sup>a</sup> |
| 总损失/% total loss    | 21.36±1.19                | 25.37±1.24              | 31.15±2.92              | 32.69±4.10              |

注: 同一行有相同字母者表示差异不显著( $P>0.05$ ).

Note: Same letters in the same row indicate no significant differences ( $P>0.05$ ).

水性下降。由于多次冷冻-解冻使冰晶不断冻结破坏细胞组织, 造成氨基酸、核苷酸等风味物质损失, 导致鱼肉可接受性下降<sup>[6]</sup>。

## 2.2 解冻次数对鲢质构特性、色泽、TBA 值和感官值的影响

质构特性和色泽是影响鱼肉可接受性的重要指标。表 3 指出, 鲢硬度、咀嚼性和恢复性在第 1 次冷冻-解冻后显著减小( $P<0.05$ ), 经过 5 次冷冻-解冻后, 这些指标与新鲜鱼肉相比, 分别减少了 99.32%、99.56%和 61.70%。新鲜鲢的  $L^*$ 值和  $b^*$ 值为 47.13 和 3.20, TBA 值为(0.34±0.02) mg/kg; 经过 5 次冷冻-解冻后, 分别上升至 53.28 和 3.47, TBA 值也增大至 1.10 mg/kg, 与新鲜鱼肉相比差异显著( $P<0.05$ )。有学者认为, 冰晶的反复冻结融化使细胞膜及细胞器破裂, 使酶类物质释放, 且在冻藏过程中发生脂肪水解及氧化, 导致肉质变软, 进而破坏肌肉结构, 不利于保持鱼肉肉质鲜嫩感和质感<sup>[7, 14]</sup>。

通过鲢眼球、肌肉色泽、肌肉弹性、气味和滋味 5 个方面, 对鲢品质进行感官评定, 由表 3

可知, 随着冷冻-解冻次数的增加, 感官值显著( $P<0.05$ )下降。在第 5 次冷冻-解冻后, 鲢感官值为 47 分, 感官品质已不可接受。从表 3 可以看出, 硬度、咀嚼性、恢复性在第 1 次冷冻-解冻后显著降低( $P<0.05$ ),  $b^*$ 值在第 1 次冷冻-解冻后显著( $P<0.05$ )上升; 第 5 次冷冻-解冻后, 与新鲜鲢各指标相比, 硬度、咀嚼性和恢复性分别下降了 99.32%、99.56%和 61.70%,  $L^*$ 值和  $b^*$ 值分别上升了 11.54%和 7.78%, 与新鲜鲢差异显著( $P<0.05$ )。

## 2.3 解冻次数对鲢 SSP 含量、 $Ca^{2+}$ -ATP 酶活性、总巯基含量和表面疏水性的影响

鲢 SSP 含量、 $Ca^{2+}$ -ATP 酶活性、总巯基含量和鲢肌原纤维蛋白表面疏水性在冷冻-解冻过程中的变化如表 4 所示。新鲜鲢 SSP 含量为 82.51 mg/g, 经过 5 次冷冻-解冻后, 显著降至 53.54 mg/g ( $P<0.05$ )。  $Ca^{2+}$ -ATP 酶活性也由新鲜鲢的 0.45  $\mu\text{mol}/(\text{mg}\cdot\text{mL})$ 降至 0.15  $\mu\text{mol}/(\text{mg}\cdot\text{mL})$ , 差异显著( $P<0.05$ ), 造成这一现象的原因可能是反复冻融造成蛋白之间交联, 使  $Ca^{2+}$ -ATP 酶活性降低<sup>[15]</sup>。新鲜鲢肌原纤维蛋白总巯基含量为 6.16 mol/10<sup>5</sup>g,

表 3 解冻次数对鲢质构特性、色泽、TBA 值和感官值的影响  
Tab. 3 Influence of freeze-thawing cycles on texture, color, TBA value and sensory scores in silver carp

*n*=3;  $\bar{x} \pm SD$

| 指标<br>item                             | 冷冻-解冻次数 freeze-thaw cycle  |                            |                          |                         |
|--|----------------------------|----------------------------|--------------------------|-------------------------|
|  | 0                          | 1                          | 3                        | 5                       |
| 硬度/g hardness                          | 1110.43±39.49 <sup>a</sup> | 936.17±109.01 <sup>b</sup> | 122.36±4.13 <sup>c</sup> | 7.59±0.36 <sup>d</sup>  |
| 咀嚼性/g chewiness                        | 4.55±0.46 <sup>a</sup>     | 3.66±0.21 <sup>b</sup>     | 0.30±0.06 <sup>c</sup>   | 0.02±0.00 <sup>c</sup>  |
| 恢复性 resilience                         | 0.47±0.02 <sup>a</sup>     | 0.32±0.02 <sup>b</sup>     | 0.22±0.01 <sup>c</sup>   | 0.18±0.01 <sup>d</sup>  |
| L*值 L* value                           | 47.13±0.11 <sup>a</sup>    | 49.02±0.09 <sup>a</sup>    | 49.81±1.07 <sup>ab</sup> | 53.28±4.27 <sup>b</sup> |
| b* 值 b* value                          | 3.20±0.72 <sup>a</sup>     | 3.98±0.19 <sup>b</sup>     | 3.91±0.07 <sup>b</sup>   | 3.47±0.10 <sup>ab</sup> |
| TBA 值/(mg·kg <sup>-1</sup> ) TBA value | 0.34±0.02 <sup>a</sup>     | 0.39±0.01 <sup>a</sup>     | 0.87±0.12 <sup>b</sup>   | 1.10±0.10 <sup>c</sup>  |
| 感官值 sensory score                      | 100±0.00 <sup>a</sup>      | 78.67±5.86 <sup>b</sup>    | 65.00±3.46 <sup>c</sup>  | 45.67±6.66 <sup>d</sup> |

注: 同一行有相同字母者表示差异不显著( $P>0.05$ ).

Note: Same letters in the same row indicate no significant differences( $P>0.05$ ).

表 4 解冻次数对鲢 SSP 含量、Ca<sup>2+</sup>-ATP 酶活性、总巯基含量和表面疏水性的影响

Tab. 4 Influence of freeze-thawing cycles on SSP content, Ca<sup>2+</sup>-ATPase, total sulfhydryl content and surface hydrophobicity in silver carp

*n*=3;  $\bar{x} \pm SD$

| 指标 item  | 冷冻-解冻次数 freeze-thaw cycle |                           |                           |                          |
|--|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|
|  | 0                         | 1                         | 3                         | 5                        |
| SSP 含量/(mg·g <sup>-1</sup> ) SSP content   | 82.51±0.28 <sup>a</sup>   | 70.95±2.72 <sup>b</sup>   | 68.69±6.89 <sup>b</sup>   | 53.54±5.77 <sup>c</sup>  |
| Ca <sup>2+</sup> -ATP 酶活性/( $\mu\text{mol}\cdot\text{mg}^{-1}\cdot\text{mL}^{-1}$ )<br>Ca <sup>2+</sup> -ATPase activity | 0.45±0.01 <sup>a</sup>    | 0.36±0.06 <sup>b</sup>    | 0.26±0.03 <sup>c</sup>    | 0.15±0.02 <sup>d</sup>   |
| 总巯基含量/(mol·10 <sup>-5</sup> g) total SH content  | 6.16±0.38 <sup>ab</sup>   | 6.11±0.55 <sup>ab</sup>   | 6.53±0.58 <sup>a</sup>    | 5.54±0.27 <sup>b</sup>   |
| 表面疏水性 surface hydrophobicity   | 371.33±9.25 <sup>a</sup>  | 438.65±60.46 <sup>b</sup> | 443.90±15.98 <sup>b</sup> | 444.55±4.17 <sup>b</sup> |

注: 同一行有相同字母者表示差异不显著( $P>0.05$ ).

Note: Same letters in the same row indicate no significant differences ( $P>0.05$ ).

经过 5 次冷冻-解冻后减少为 5.54 mol/10<sup>5</sup>g, 由于肌球蛋白分子变性和蛋白结构改变, 使巯基暴露逐步氧化为二硫键, 导致总巯基含量下降。经过第 1 次冷冻-解冻后, 表面疏水性显著增加( $P<0.05$ ), 随着解冻次数增加至 3、5 次, 表面疏水性保持平稳。在冷冻-解冻过程中, 蛋白变性使分子内部的疏水性基团逐渐暴露, 引起蛋白二级结构肽链的卷曲或三级结构的变化, 导致表面疏水性增加<sup>[16]</sup>。

### 3 讨论

#### 3.1 解冻次数对鲢解冻损失及蒸煮损失的影响

鲢体解冻损失随着解冻次数的增加呈上升趋势, 与 Srinibasan 等<sup>[17]</sup>研究结果相似, 在反复冻融过程中, 重复解冻和冰晶重结晶使细胞膜及细胞器破坏, 对肌肉组织造成不利影响, 导致解冻损失的增加。鲢肉蒸煮损失在冷冻-解冻过程中没有显著变化, 这个结果与 Jittinandana<sup>[18]</sup>研究鱧

(*Sq- ualiobarbus ourriculus*)15 次反复冻融蒸煮损失的结果相似。

#### 3.2 解冻次数对鲢质构特性、色泽、TBA 值和感官值的影响

本研究发现, 鲢硬度、咀嚼性和恢复性在冷冻-解冻过程中逐渐减小。Srinibasan 等<sup>[17]</sup>研究对虾(*Machrobrachium rosenbergii*)时指出经过 5 次冻融后, 剪切力质构特性没有明显变化, 这与本实验结果不同, 造成这一现象的原因可能是由于品种及贮藏温度不同。鱼肉的 L\*值和 b\*值逐渐增大, 色泽发生劣变, 使肉的可接受程度降低, 同时鲢肉 b\*值的增加伴随着 TBA 值的增大, 这一结果与 Thanonkaew 等<sup>[2]</sup>和 Yu 等<sup>[19]</sup>的结果相似。可能由于细胞膜上高不饱和脂肪酸氧化生成的自由基与蛋白中胺类物质发生反应, 导致黄色色素产生<sup>[2]</sup>。在多次冷冻-解冻过程中, 感官值显著下降, 伴随着质构特性变化和色泽劣变。这一结果表明感官值与硬度、咀嚼性、恢复性、L\*值和 b\*值有



密切关系<sup>[20]</sup>。

### 3.3 解冻次数对鲢 SSP 含量、Ca<sup>2+</sup>-ATP 酶活性、总巯基含量和表面疏水性的影响

鱼类在冷藏运输过程中发生的变化很多, 其中鱼肉蛋白的冷冻变性对鱼肉肉质影响最大。鲢在冷冻-解冻过程中, 肌原纤维蛋白空间结构受冰晶反复冻融的影响, 发生不同程度的变化, 从而引起鲢 SSP 含量下降、Ca<sup>2+</sup>-ATP 酶活性下降、总巯基含量和表面疏水活性下降。

在冷冻-解冻过程中, 鲢 SSP 含量呈下降趋势, 表明蛋白质发生变性, 从而导致鱼肉质的劣变。Tseng 等<sup>[14]</sup>通过研究红螯螯虾(*Cherax quadricarinatus*)肌肉蛋白后指出, 肌球蛋白和肌动蛋白在反复冻融过程中不稳定, 最终导致蛋白溶解性降低、变性和凝聚。SSP 含量的变化趋势表明, 随着解冻次数的增加, 鲢肉 SSP 含量的降低伴随着鲢硬度、咀嚼性和恢复性的降低。巯基对于稳定肌原纤维蛋白的空间结构有重要意义。由于巯基氧化形成二硫键引起蛋白质分子交联、聚合, 因此总巯基含量的变化表明肌原纤维蛋白的空间变化。经过 5 次冷冻-解冻后, 鲢肌原纤维蛋白总巯基含量下降了 10.06%, Xia 等<sup>[6]</sup>研究猪肉纤维蛋白总巯基含量发现, 猪肉纤维蛋白总巯基含量经过 5 次冷冻-解冻后下降了 24.30%, 高于鲢总巯基含量在 5 次冷冻-解冻后下降的值, 可能因为研究品种及样品处理方法不同。Ca<sup>2+</sup>-ATP 酶活性是评价肌球蛋白分子完整性的良好指标。由表 4 可知, 随着冷冻-解冻次数增加, 鲢肌原纤维蛋白 Ca<sup>2+</sup>-ATP 酶活性的下降和总巯基含量的下降有一定关系, 可能由于肌球蛋白活性部位的巯基发生氧化对肌球蛋白产生影响, 从而使 Ca<sup>2+</sup>-ATP 酶活性降低<sup>[21]</sup>, 这一结果与 Soottawat 等<sup>[22]</sup>研究鳕(*Gadus morhua* L.)鱼肉蛋白的结果相似。

肌原纤维蛋白表面疏水性的变化也是鱼肉蛋白质变性的主要表现。当蛋白质空间结构发生变化时, 疏水基团和亲水基团相对位置改变, 导致表面疏水性含量的变化。结合表 4 中表面疏水性的变化与 SSP 含量的变化, 在冷冻-解冻过程中, 蛋白质变性凝聚, 从而导致 SSP 含量下降。这一

结果与 Benjakul 等<sup>[15]</sup>的研究相似, 石首鱼(*Pennahai macropthalmus*)、马鲛(*Nemipterus bleekeri*)和大眼海鲈(*Priacanthus tavenus*)肌动球蛋白表面疏水性的增加与 SSP 含量的减小也相一致。

## 4 结论

随着冷冻-解冻次数的增加, 加速了鲢肉保水性下降、脂肪氧化、蛋白变性、质构特性下降及色泽劣变和肌原纤维蛋白结构变化, 在第 5 次冷冻-解冻后, 感官评价为不可接受; 在冷冻-解冻过程中, 脂肪氧化和蛋白降解引起鲢品质的劣变。因此在运输、贮藏和销售过程中要防止温度波动, 避免反复冻融对鲢肉品质造成影响。

### 参考文献:

- [1] Yongswawatdigul J, Park J W. Biochemical and conformation changes of actomyosin from threadfin bream stored in ice[J]. *J Food Sci*, 2002, 67(3): 985-990.
- [2] Thanonkaew A, Benjakul S, Visessanguan W, et al. The effect of metal ions on lipid oxidation, colour and physicochemical properties of cuttlefish (*sepia pharaonis*) subjected to multiple freeze-thaw cycles[J]. *Food Chem*, 2006, 95(4): 591-599.
- [3] Boonsumrej S, Chaiwanichsiri S, Tantratian S, et al. Effects of freezing and thawing on the quality changes of tiger shrimp (*penaeus monodon*) frozen by air-blast and cryogenic freezing[J]. *J Food Eng*, 2007, 80(1): 292-299.
- [4] Suvanich V, Jahncke M L, Marshall D L. Changes in selected chemical quality characteristics of channel catfish frame mince during chill and frozen storage[J]. *J Food Sci*, 2000, 65(1): 24-29.
- [5] 夏秀芳, 孔保华, 郭园园, 等. 反复冷冻-解冻对猪肉品质特性和微观结构的影响[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(3): 982-988.
- [6] 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(2): 239-245.
- [7] Sriket P, Benjakul S, Visessanguan W, et al. Comparative studies on the effect of the freeze-thawing process on the physicochemical properties and microstructures of black tiger shrimp (*penaeus monodon*) and white shrimp (*penaeus*

- vannamei*) muscle[J]. Food Chem, 2007, 104(1): 113–121.
- [8] 李金平, 李春保, 徐幸莲, 等. 反复冻融对牛外脊肉品质的影响[J]. 江苏农业学报, 2010, 26(2): 406–410.
- [9] 李汴生, 俞裕明, 朱志伟, 等. QIM 和理化指标综合评价南方鲇鱼片冷藏新鲜度[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2007(12): 126–131.
- [10] AOAC. Official methods of analysis[M]. 17th ed. Washington, DC: Association of Official Analytical Chemists, 2002.
- [11] Song Y, Liu L, Shen H, et al. Effect of sodium alginate-based edible coating containing different anti-oxidants on quality and shelf life of refrigerated bream (*Megalobrama amblycephala*)[J]. Food Control, 2011, 22(3-4): 608–615.
- [12] 潘锦锋. 草鱼肌原纤维蛋白在冻藏与加热过程中理化特性的变化及蛋白变性保护剂的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2009.
- [13] 任亚梅, 董蕾, 袁春龙, 等. 鲤鱼冻藏期间品质变化的研究[J]. 西北农业学报, 2005(4): 162–165.
- [14] Tseng Y, Xiong Y L, Feng J, et al. Quality changes in australian red claw crayfish (*cherax quadricarinatus*) subjected to multiple freezing-thawing cycles[J]. J Food Quality, 2003, 26(4): 285–298.
- [15] Benjakul S, Visessanguan W, Thongkaew C, et al. Comparative study on physicochemical changes of muscle proteins from some tropical fish during frozen storage[J]. Food Res Int, 2003, 36(8): 787–795.
- [16] Riebroy S, Benjakul S, Visessanguan W, et al. Acid-induced gelation of natural actomyosin from Atlantic cod (*Gadus morhua*) and burbot (*Lota lota*)[J]. Food Hydrocolloids, 2009, 23(1): 26–39.
- [17] Srinivasan S, Xiong Y L, Blanchard S P, et al. Physicochemical changes in prawns (*Machrobrachium rosenbergii*) subjected to multiple freeze-thaw cycles[J]. J Food Sci, 1997, 62(1): 123–127.
- [18] Jittinandana S, Kenney P B, Slider S D. Cryoprotectants preserve quality of restructured trout products following freeze-thaw cycling[J]. J Muscle Foods, 2005, 16(4): 354–378.
- [19] Yu L H, Lee E S, Jeong J Y, et al. Effects of thawing temperature on the physicochemical properties of pre-rigor frozen chicken breast and leg muscles[J]. Meat Sci, 2005, 71(2): 375–382.
- [20] Pornrat S, Sumate T, Rommanee S, et al. Changes in the ultrastructure and texture of prawn muscle (*macrobrachium rosenbergii*) during cold storage[J]. LWT - Food Sci Technol, 2007, 40(10): 1747–1754.
- [21] Jiang S T, Hwang D C, Chen C S. Denaturation and change in sulfhydryl group of actomyosin from milkfish (*chanos chanos*) during storage at -20.degree.c[J]. J Agric Food Chem, 1988, 36(3): 433–437.
- [22] Soottawat B, Friedrich B. Physicochemical and enzymatic changes of cod muscle proteins subjected to different physicochemical and enzymatic changes of cod muscle proteins subjected to different freeze-thaw cycles[J]. J Sci Food Agric, 2000, 80(8): 1143–1150.

## Effect of freeze-thaw cycles on the quality of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*)

SHI Ce<sup>1</sup>, CUI Jianyun<sup>1</sup>, WANG Hang<sup>1</sup>, SHEN Huixing<sup>2</sup>, LUO Yongkang<sup>1</sup>

1. College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. College of Science, China Agricultural University, Beijing 100083, China

**Abstract:** We evaluated the changes in silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) tissue quality during freezing and thawing processes. Silver carp is one of the primary freshwater fish species in China. With high nutritional values, fast growth rate, and high yield, this species forms the basis of an important industry. Because of the negative effects associated with microbiological growth and biochemical processes, frozen storage is widely used to preserve fish and fish products. However, the melting and reformation of ice crystals causes osmotic removal of water, mechanical damage, and denaturation of proteins. The extent of the loss in tissue quality is dependant on the rate of freezing, thawing methods, storage temperature and temperature fluctuations during storage, transportation, retail display, and consumption. Repeated freezing and thawing processes are common in storage and at retail outlets, in homes, and restaurants. Despite this, the effects of freezing/thawing on changes of color, muscle texture and protein physicochemistry have not been fully investigated. We stored fresh silver carp at  $-18^{\circ}\text{C}$  for 10 days. After being thawed by flowing water, the thawed carp were refrozen at the same temperature for another 5 days. This freeze-thaw cycle was repeated five times. After the first, third, and fifth cycles, we randomly selected three silver carp and measured changes in thawing loss, cooking loss, hardness, chewiness, resilience, thiobarbituric acid (TBA),  $L^*$  value,  $b^*$  value, salt soluble protein (SSP) content,  $\text{Ca}^{2+}$ -ATPase activity, total sulfhydryl groups (SH) content, surface hydrophobicity, and sensory scores. During the first freeze-thaw cycle, hardness, chewiness, resilience, salt soluble protein (SSP) content, and  $\text{Ca}^{2+}$ -ATPase activity decreased significantly ( $P<0.05$ ) whereas  $b^*$  and surface hydrophobicity increased significantly ( $P<0.05$ ). After the third freeze-thaw cycle, thawing loss,  $L^*$ , and TBA levels significantly increased ( $P<0.05$ ). Total SH content decreased significantly ( $P<0.05$ ) after the fifth freeze-thaw cycle. In contrast, there was no significant change ( $P>0.05$ ) in cooking loss following five freeze-thaw cycles. After the fifth freeze-thaw cycle, the sensory scores were 47, which were unacceptable. Our results confirm that the freeze-thaw process causes thawing loss, discoloration, softening of muscle tissue, lipid oxidation, decrease in SSP content, and protein conformational changes. These changes have a detrimental effect on the quality of silver carp tissue. So it is important to prevent fluctuation of temperature during storage, transportation, and retail to avoid the negative effects of freeze-thaw cycles on silver carp tissue quality.

**Key words:** *Hypophthalmichthys molitrix*; freeze-thaw cycles; texture; physicochemical property; sensory evaluation

**Corresponding author:** LUO Yongkang. E-mail: luoyongkang@263.net