

# 反复冻融对草鱼和鲤鱼冷冻鱼糜品质变化的影响

吴 晓<sup>1</sup>, 孙卫青<sup>2</sup>, 杨 华<sup>1</sup>, 马丽珍<sup>3,\*</sup>

(1.山西农业大学食品科学与工程学院, 山西 太谷 030801;

2.长江大学生命科学学院, 湖北 荆州 434023; 3.天津农学院食品科学系, 天津 300384)

**摘 要:** 为了解反复冻融对淡水冷冻鱼糜品质变化的影响, 本实验以草鱼和鲤鱼冷冻鱼糜为研究对象, 通过测定二者在反复冷冻-解冻后的色泽、蒸煮损失、持水性、剪切力和硫代巴比妥酸值等指标, 分析冷冻鱼糜冷冻贮存4个月过程中, 期间反复冻融4次后其品质的变化。结果表明: 随着冻融次数的增加, 两种鱼糜的蒸煮损失均显著增加( $P<0.05$ ), 持水性显著降低( $P<0.05$ ), 而两种鱼之间差异不显著。草鱼冷冻鱼糜的剪切力随着冻融次数的增加直线式下降; 第1次冻融, 鲤鱼鱼糜蛋白变性收缩, 剪切力提高, 之后随着冻融次数的增加剪切力下降。反复冻融促进了两种冷冻鱼糜的脂肪氧化, TBARS值显著增加( $P<0.05$ ), 且组间差异也显著( $P<0.05$ )。两种冷冻鱼糜反复冻融4次后失去了新鲜鱼糜的表现色泽。

**关键词:** 反复冻融; 鱼糜; 草鱼; 鲤鱼; 品质

## Effect of Repeated Freeze-Thaw Cycles on Quality Properties of Frozen Surimis of Grass Carp and Common Carp

WU Xiao<sup>1</sup>, SUN Wei-qing<sup>2</sup>, YANG Hua<sup>1</sup>, MA Li-zhen<sup>3,\*</sup>

(1.College of Food Science and Engineering, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China;

2. College of Life Science, Yangtze University, Jingzhou 434023, China;

3. Department of Food Science, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384, China)

**Abstract:** In order to explore the effect of repeated freeze-thaw cycles on their quality, color parameters, cooking loss, water-holding capacity, shearing force and TBARS of frozen surimis of grass carp and common carp were determined during 4 repeated freeze-thaw cycles. More freeze-thaw cycles could result in a significant increase ( $P<0.05$ ) in cooking loss of grass carp and common carp surimi and a significant reduction ( $P<0.05$ ) in water-holding capacity but no significant difference between both fish species was observed. The shearing force of grass carp surimi was inversely proportional to the number of freeze-thaw cycles. The first freeze-thaw cycle caused denaturation and contraction of protein in common carp surimi and resulted in an increase in its shearing force, whereas the parameter declined with increasing number of freeze-thaw cycles. Repeated freeze-thaw cycles aggravated lipid oxidation in surimi from both fish species. As a result, significantly increased TBARS ( $P<0.05$ ) was observed and a significant difference ( $P<0.05$ ) was also between both fish species. After the fourth freeze-thaw cycle, surimi from both carp species lost their original color.

**Key words:** freeze-thaw cycle; surimi; grass carp; common fish; properties

中图分类号: S984

文献标识码: A

文章编号: 1002-6630(2012)20-0323-05

冷冻鱼糜是将鱼体经过机械去骨、漂洗后进行冷冻贮藏的肌原纤维蛋白浓缩物<sup>[1]</sup>, 是生产鱼糜制品, 如鱼丸、鱼糕、仿真蟹肉、虾仁、扇贝、仿鱼翅等的主要原料, 国内市场需求量很大。但是实际生产中, 由于鱼糜的储藏、运输、加工和销售等环节的温度波动较大, 使得冷冻鱼糜在加工消费之前容易处于冷冻-解冻的循环之

中, 出现多次冻融现象。反复冷冻-解冻对鱼糜品质的影响已受到国外学者的关注。反复冷冻-解冻循环波动越剧烈, 鱼糜中重结晶现象越严重, 产品组织形态和新鲜度的劣变越剧烈<sup>[2]</sup>。这样严重影响其品质, 造成风味的下降、脂肪氧化、冰晶升华或重结晶、嫩度下降、可溶性蛋白减少和蛋白质形成凝胶能力下降等。Soottawat等<sup>[3]</sup>

收稿日期: 2011-09-19

基金项目: 湖北省教育厅重点项目(D20111303); 天津市农委项目(0705302)

作者简介: 吴晓(1985—), 女, 硕士研究生, 研究方向为畜禽和水产品加工与质量控制。E-mail: wuxiao1891@163.com

\*通信作者: 马丽珍(1963—), 女, 教授, 博士, 研究方向为畜禽和水产品加工与质量控制。E-mail: malizhen-6329@163.com

报道, 鳕鱼冷冻-解冻循环会导致蛋白质的严重变性, 随着循环次数的增加, 鳕鱼肉蛋白的盐溶性蛋白含量显著下降, 当循环次数达到5次时, 盐溶性蛋白含量下降了约60%。Boonsumrej等<sup>[4]</sup>报道随着冷冻-解冻次数的增加, 虾肉的TBARS和剪切力增加、肌肉蛋白盐溶性减小、肌纤维弯曲甚至断裂。Sriket等<sup>[5]</sup>报道反复冷冻-解冻黑老虎虾和白老虎虾虾肉蛋白变性,  $\text{Ca}^{2+}$ -ATPase酶活性降低, 肌纤维断裂及肌肉结构混乱。Thanonkaew等<sup>[6]</sup>还报道了反复冷冻-解冻过程中加速了乌贼肌肉的脂肪氧化。原因可能是由于反复冷冻-解冻使肌细胞发生破裂并将酶释放到肌浆中, 加速了脂肪的氧化, 对肌肉品质造成了严重影响。本实验研究反复冷冻-解冻对淡水鱼糜品质的影响为此, 本研究以我国养殖广泛的淡水鱼品种草鱼和鲤鱼为原料, 研究不同冻融次数下其品质的变化, 研究结果对实际生产具有重要实践指导意义。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料与试剂

体质量为1200~1500g的新鲜草鱼和鲤鱼, 由天津市德仁水产养殖中心提供。

TG酶 天津市诺奥科技发展有限公司; 结冷胶 浙江中肯生物科技有限公司; 高倍丁香汁、大料汁、小茴香汁 天津市顶兴食品有限公司; 大豆分离蛋白、葡萄糖、复合磷酸盐、D-异抗坏血酸钠、米淀粉、白胡椒粉、葱姜蒜粉、白砂糖、味精等均为食品纯。

### 1.2 仪器与设备

YC 200鱼类采肉机 潍坊格瑞食品机械有限公司; DK20型消化炉、UDK142型自动凯氏定氮仪 北京盈盛恒泰科技有限责任公司; GZX-9076 MBE数显鼓风干燥箱 上海博迅实业有限公司医疗设备厂; DC-B5/11马弗炉 北京独创科技有限公司; LD4-40低速大容量离心机 北京医用明星机厂; 2018A尊贵型电饼铛 北京利仁科技有限责任公司; JM222便携式数字温度计 天津今明仪器有限公司; TCP2全自动测色色差计 北京鑫奥依克广电技术有限公司; Biofuge D-37520 Osterode离心机 德国Kendro Laboratory Products公司; TA-TX plus Texture Analyser质构仪 英国Stable Micro System公司。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 冷冻鱼糜加工工艺

工艺流程: 原料鱼前处理→采肉→漂洗→脱水→干腌→真空包装→冷冻贮藏(-18℃)。

干腌: 将食盐1.5%, 复合磷酸盐0.4%, 亚硝酸钠0.014%, 抗坏血酸钠0.12%, 白糖0.8%, 葡萄糖0.4%, 小苏打0.6%溶于10%的冷却水中, 同鱼糜搅拌均匀, 冷藏条件下腌制15h。

#### 1.3.2 冻融试验设计

对照组: 真空包装好的鱼糜, 不做冷冻处理, 直接进行试验。

反复冻融组: 将真空包装好的两种鱼糜于-18℃的冰箱中冷冻, 冷冻1个月(28d)后, 全部取出于0~4℃冷库中解冻24h, 草鱼和鲤鱼鱼糜各取一袋进行试验, 反复冻融次数为1次, 其余样品均继续放于-18℃的冰箱中冷冻; 冷冻至第2个月时, 重复之前操作, 反复冻融次数为2次; 依次重复为第3、4次反复冻融。

鱼肉饼制作方法: 每次指标测定时, 将解冻的鱼糜再添加辅料做成鱼肉饼, 辅料的添加比例为, 大豆蛋白粉5%, 谷氨酰胺转氨酶0.8%, 结冷胶0.05%, 玉米淀粉7%, 味精0.5%, 白胡椒粉0.3%, 高倍大料汁、高倍桂皮汁、高倍丁香汁、高倍草果汁、高倍花椒汁适量溶于20%冰水中, 同解冻好的鱼糜搅拌均匀, 在冷藏条件下腌制2h。然后每105g鱼肉糜手工成型成圆饼状, 用电饼铛烤熟, 冷却后测定各项指标。

#### 1.3.3 营养成分的测定

蛋白质含量参照GB/T 5009.5—2003《食品中蛋白质的测定》; 粗脂肪含量参照GB/T 14772—2008《食品中粗脂肪的测定》; 水分含量参照GB/T 5009.3—2003《食品中水分的测定》; 灰分测定参照GB/T 5009.4—2003《食品中灰分的测定》。

#### 1.3.4 蒸煮损失的测定

将精确称质量的生鱼糜饼于175℃的电饼铛中加热, 用数字温度计测量肉样中心温度, 待中心温度达70℃, 将饼取出冷却后精确称质量, 蒸煮损失用加热前后样品的质量变化计算:

$$\text{蒸煮损失率}/\% = \frac{\text{生样品质量} - \text{熟样品质量}}{\text{生样品质量}} \times 100$$

#### 1.3.5 色差的测定

将熟肉饼切去表层, 在室温下平衡一段时间, 用取样器取样, 用白板对色差仪器进行校准后测定样品的L\*值、a\*值和b\*值; L\*值为亮度, a\*值为红度, b\*值为黄度。

#### 1.3.6 持水性的测定

$$\text{持水性}/\% = \frac{\text{样品的水分含量} - \text{失水率}}{\text{样品的水分含量}} \times 100$$

##### 1.3.6.1 失水率测定

取3g熟样品, 精确称质量, 用滤纸包好, 2000×g离心15min后, 取出样品精确称质量, 离心损失的水分为离心前与离心后的样品质量之差。

$$\text{失水率}/\% = \frac{\text{离心损失的水分}}{\text{离心前样品质量}} \times 100$$

##### 1.3.6.2 水分含量测定

将称量皿于105℃烘箱中烘4~6h, 烘至质量恒定后

在干燥器中冷却0.5h, 精确称量, 准确称取切碎、混匀的熟样品2.00g于称量皿中, 连同皿盖放入烘箱中, 105℃烘4~6h, 烘至质量恒定后在干燥其中冷却0.5h, 精确称质量, 水分含量计算公式如下:

$$\text{水分含量}/\% = \frac{\text{烘前样品质量} - \text{烘后样品质量}}{\text{烘前样品质量}} \times 100$$

### 1.3.7 剪切力测定

用圆形取样器钻取肉样, 将样品统一为直径1cm、高2cm的圆柱体, 用 TA-XTPlus 质构仪HDP-BSW探头测定剪切力, 测定参数是: 剪切速度1.00mm/s; 剪切后速度10.00mm/s; 剪切距离20.00mm; 负载类型auto-5g; 数据收集率200点/s; 测定时环境温度20~25℃(室温)。

### 1.3.8 硫代巴比妥酸值(TBARS值)的测定

依照Lee等<sup>[7]</sup>方法适当调整。精确称取1.00g 碎鱼饼(熟), 加5mL储备液(0.375%硫代巴比妥酸和15%三氯乙酸溶于0.25mol/L盐酸, 沸水浴10min, 自来水冷却, 加2mL氯仿, 充分混匀, 高速冷冻离心机10000r/min离心10min, 取上清液, 在λ=532nm条件下测其吸光度。计算公式如下:

$$\text{TBA}/(\text{mg}/\text{kg}) = A_{532} \times (1M / 1.56 \times 10^5) \times [(1\text{mol}/\text{L}) / M] + (\text{样品质量} + 5) \times 10^{-3} (\text{L}/\text{g}) \times (72.07\text{g}/\text{mol}) \times (1000\text{mg}/\text{g}) + (1000\text{g}/\text{kg})$$

式中:  $M$ 为丙二醛分子质量。

### 1.4 数据处理

用Microsoft Excel整理试验数据, SigmaPlot 10.0绘图, Statistix 8.1分析标准偏差。

## 2 结果与分析

### 2.1 营养成分

表1 草鱼和鲤鱼的营养成分

Table 1 Nutrients of grass carp and common carp

品种	水分含量/%	蛋白含量/%	粗脂肪含量/%	灰分/%
草鱼	78.30±0.43 <sup>b</sup>	17.31±0.04 <sup>a</sup>	2.82±0.31 <sup>b</sup>	0.92±0.02 <sup>a</sup>
鲤鱼	76.53±0.18 <sup>a</sup>	19.18±0.25 <sup>b</sup>	2.51±0.14 <sup>a</sup>	1.11±0.12 <sup>b</sup>

注: 肩标小写字母不同表示差异显著, 大写字母不同表示差异极显著。下同。

表2 冻融次数对草鱼和鲤鱼鱼糜色差的影响

Table 2 Change in color parameters of grass carp and common carp surimi during freeze-thaw cycles

冻融次数	$L^*$		$a^*$		$b^*$	
	草鱼	鲤鱼	草鱼	鲤鱼	草鱼	鲤鱼
0	54.93±0.51 <sup>AcD</sup>	54.12±0.66 <sup>Ab</sup>	-0.82±0.08 <sup>Ad</sup>	-0.51±0.34 <sup>Ab</sup>	7.23±0.09 <sup>Bc</sup>	8.59±0.09 <sup>Ac</sup>
1	55.98±0.11 <sup>Ab</sup>	54.07±0.04 <sup>Bb</sup>	-0.87±0.17 <sup>Bd</sup>	-0.54±0.07 <sup>Ab</sup>	9.25±0.4 <sup>Bb</sup>	9.94±0.08 <sup>Aa</sup>
2	56.95±0.26 <sup>Aa</sup>	55.55±0.43 <sup>Ba</sup>	-0.3±0.04 <sup>Ac</sup>	-0.18±0.17 <sup>Ab</sup>	7.56±0.16 <sup>Bc</sup>	8.4±0.1 <sup>AcD</sup>
3	55.42±0.07 <sup>Abc</sup>	53.61±0.16 <sup>Bb</sup>	0.16±0.25 <sup>Ab</sup>	-0.09±0.06 <sup>Ab</sup>	7.41±0.48 <sup>Bc</sup>	8.22±0.11 <sup>Ad</sup>
4	54.21±0.34 <sup>Ad</sup>	53.45±0.1 <sup>Bb</sup>	2.69±0.09 <sup>Aa</sup>	2.92±0.26 <sup>Aa</sup>	10.11±0.22 <sup>Aa</sup>	9.35±0.12 <sup>Bb</sup>

食品的营养成分主要有水分、灰分、蛋白质和脂肪等, 蛋白质和脂肪含量是评价鱼类营养价值的重要指标。由表1看出, 草鱼和鲤鱼在肌肉化学组成上存在一定差异。草鱼肌肉中水分含量和粗脂肪含量显著高于鲤鱼, 而鲤鱼肌肉中的蛋白含量和灰分显著高于鲤鱼。

### 2.2 色泽变化

由表2可以看出, 随着冻融次数的增加, 草鱼和鲤鱼的亮度呈降低趋势, 两种鱼糜的红色和黄色总体呈升高的趋势, 但整体变化差异不显著。从表2可看出, 草鱼和鲤鱼鱼糜的 $a^*$ 值偏低, 且为负数,  $b^*$ 值相对较高, 说明这两种淡水鱼糜的色泽偏黄绿, 多次冻融后红色值逐渐增加, 这可能与血红素蛋白质的存在状态以及水分含量有关。

### 2.3 蒸煮损失变化

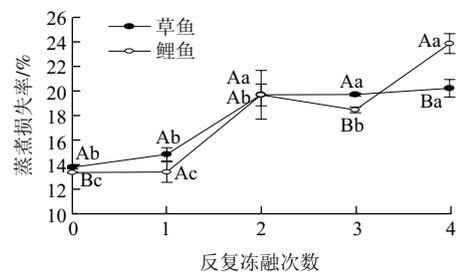


图1 冻融次数对草鱼和鲤鱼鱼糜蒸煮损失的影响

Fig.1 Change in cooking loss of grass carp and common carp surimi during freeze-thaw cycles

由图1可以看出, 草鱼和鲤鱼鱼糜的蒸煮损失随着反复冻融次数的增加而增大。在第1次冻融时两种淡水鱼糜的蒸煮损失与无冻融组的差异不显著, 第2次冻融时, 二者的蒸煮损失显著高于未冻融对照组, 第3、4次冻融, 草鱼鱼糜的蒸煮损失相对于第2次变化差异不显著, 而鲤鱼鱼糜的蒸煮损失第4次冻融时极显著提高。这可能是由于鲤鱼的蛋白质、水分和灰分显著高于草鱼的结果(表1)。多次冻融蛋白质过度变性, 使得蛋白质的空间结构发生变化, 蛋白网络中的水溶性成分大量流失。

### 2.4 持水性变化

由图2可看出, 草鱼和鲤鱼鱼糜的持水性随着冻融次数的增加而降低。前两次冻融对草鱼和鲤鱼鱼糜的持水性影

响不大,变化差异均不显著。到第3、4次冻融时,两种淡水鱼糜的持水性显著下降( $P<0.05$ ),但组间差异不显著。

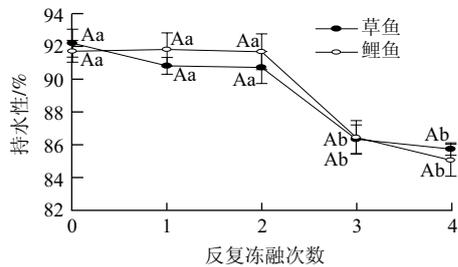


图2 冻融次数对草鱼和鲤鱼鱼糜持水性的影响

Fig.2 Change in water-holding capacity of grass carp and common carp surimi during freeze-thaw cycles

## 2.5 剪切力变化

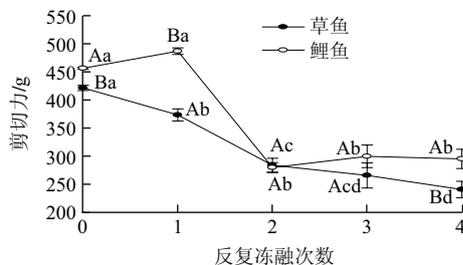


图3 冻融次数对草鱼和鲤鱼鱼糜剪切力的影响

Fig.3 Change in shearing force of grass carp and common carp surimi during freeze-thaw cycles

由图3可以看出,草鱼鱼糜随着反复冻融次数的增加,剪切力直线式下降,且变化差异显著( $P<0.05$ )。鲤鱼鱼糜经第1次冻融,剪切力有所升高,第2次冻融,剪切力极显著下降,随后又略微升高,第3次和第4次冻融变化差异不显著。事实上,第4次冻融的鲤鱼鱼糜饼表面已有点发黏,鲤鱼鱼糜第3、4次冻融剪切力回升可能与蛋白质脲化分解有关。

## 2.6 脂肪氧化的结果

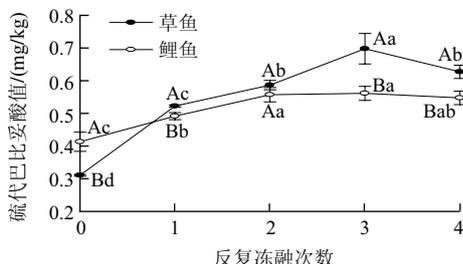


图4 冻融次数对草鱼和鲤鱼鱼糜TBARS的影响

Fig.4 Change in TBARS of grass carp and common carp surimi during freeze-thaw cycles

由图4可以看出,草鱼和鲤鱼鱼糜的TBARS值随着冻融次数的增加而显著增加。而且草鱼和鲤鱼处理组间差异显著( $P<0.05$ ),草鱼鱼糜脂肪氧化值增加幅度显著

( $P<0.05$ )高于鲤鱼。草鱼以草为食,其中含有丰富的不饱和脂肪酸,脂肪很容易被氧化,反复冻融进一步促进了脂肪的氧化反应。

## 3 讨论

肌肉的嫩度是消费者最重视的食用品质之一,它决定了消费者食用时的口感,反映了肌肉的质地。通常嫩度与持水性呈正相关。本实验草鱼的剪切力随着反复冻融次数的增加直线式下降,同时持水性也随着冻融次数的增加而降低。可能一方面多次冻融后使肌细胞膜受到机械损伤,肌肉中的结缔组织膜被破坏,同时冰结晶使肌纤维断裂,剪切力降低,另一方面,肌肉在经过多次冷冻-解冻后肌纤维发生明显收缩,肉的完整性丧失,汁液流失过多,肌纤维保水性降低。前两次冻融持水性降低不显著,说明肌纤维虽然有所断裂,剪切力下降,但蛋白的网络结构破坏不显著,只是这个网络结构很不结实,烹调很容易破坏,使得蒸煮损失显著增加。Siddaiah等<sup>[8]</sup>曾报道冻结过程中因蛋白质聚集和变性(主要是肌球蛋白变性)使肉的保水性降低,也可能是由于肌肉中蛋白质变性后形成肌原纤维蛋白网络结构的能力变弱使肉保持原有水分的能力降低。Sriket等<sup>[9]</sup>报道反复冻融使虾肌肉的剪切力降低,新鲜黑白虾肉冻融5次后,其剪切力分别由26.42N和22.26N降到20.56N和16.52N。Pornrat等<sup>[10]</sup>也报道,冻藏破坏了肌原纤维蛋白结构的完整性,使虾肉的质地变软,剪切力变小。而实验中鲤鱼的剪切力却出现了一些反复,第1次冻融后剪切力显著增加,第2次冻融后显著下降,这可能是草鱼与鲤鱼的蛋白含量及组成不同导致的结果。鲤鱼蛋白以及水分含量相对较高,第一次冻融蛋白变性,肌纤维显著收缩,细胞间汁液流失,肌肉变硬,剪切力增加。随着冻融次数的增加,肌肉细胞所受到的机械损伤也随之加大,肌细胞(肌原纤维)的完整性被破坏,肌纤维断裂,细胞间及细胞内汁液流失,以及多次冻融使得鱼糜蛋白被微生物污染发生降解,使鱼糜组织软烂,剪切力降低。反复冻融导致的鱼糜蛋白结构和状态的变化均会使肌肉的持水性降低,蒸煮损失增加。由此看来,剪切力不能完全反映肌肉的嫩度和质地,应该用持水性,蒸煮损失以及溶解性、乳化性、凝胶特性等多种有关肌肉蛋白特性的指标综合评价鱼糜肌肉的品质。

反复冷冻-解冻引起冰晶的多次重新形成,损坏了肌细胞的结构、失去肌纤维的完整性,加速了脂肪氧化。鲤鱼的在反复冻融过程中TBA不断增加,从2.2mg/kg增加到3.5mg/kg<sup>[11]</sup>。冻融过程也会使抑制脂肪氧化的抗氧化酶类发生变性,活性丧失。另外,冻藏过程中冰晶破坏了细胞膜,可能释放出脂肪氧化的前体物质,特别是自由铁离子,它参与分子氧的电子传递反应,产生过

氧化阴离子<sup>[12]</sup>。Subramanian等<sup>[13]</sup>报道-41℃贮存的蟹肉, 120d后游离脂肪酸的含量和脂肪氧化值均显著提高。Thanonkaew等<sup>[6]</sup>报道反复冻融使得乌贼肉糜脂肪氧化值从5.30mg MDA/kg增加到10.4mg MDA/kg。实验中多次冻融使得草鱼和鲤鱼的TBARS值都显著提高, 只是多次冻融后草鱼的脂肪氧化程度显著高于鲤鱼, 主要是由于草鱼和鲤鱼的脂肪含量和组成存在显著差异的结果。

#### 4 结论

草鱼和鲤鱼鱼糜随着冷冻解冻次数的增加, 蒸煮损失增加, 持水性降低。剪切力下降, 组织塌陷软烂。鱼糜肌肉脂肪氧化加速, 失去了新鲜鱼糜的色泽。两种淡水鱼糜之间, 剪切力变化和脂肪氧化程度差异显著。反复冻融降低了草鱼和鲤鱼鱼糜的食用品质(嫩度、持水性、脂肪氧化)和商品品质(色泽、质构), 在加工和销售过程中应严格控制温度, 防止波动。

#### 参考文献:

- [1] TYRE C L, CHONG M L. Surimi Technology[M]. New York: Marcel Dekker Inc, 1992.
- [2] SIGURGISLADOTTIR S, INGVARSDOTTIR H, TORRISSEN O J, et al. Effects of freezing/thawing on the microstructure and the texture of smoked Atlantic salmon (*Salmo salar*)[J]. Food Research International, 2000, 33(10): 857-865.
- [3] SOOTTAWAT B, WONNOP V. Comparative study on physicochemical changes of muscle proteins from some tropical fish during frozen storage[J]. Food Research International, 2003, 36(8): 787-795.
- [4] BOONSUMREJ S, CHAIWANICHIRI 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]. Journal of Food Engineering, 2007, 80(1): 292-299.
- [5] 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 Chemistry, 2007, 104(1): 113-121.
- [6] THANONKAEW A, BENJAKUL S, VISESSANGUAN W, et al. The effect of metal ions on lipid oxidation, color and physicochemical properties of cuttlefish (*Sepia pharaonis*) subjected to multiple freeze-thaw cycles[J]. Food Chemistry, 2006, 95(4): 591-599.
- [7] LEE B, HENDRICKS D G, CORNFORTH D P. A comparison of carnosine and ascorbic acid on color and lipid stability in a ground beef pattie model system[J]. Meat Science, 1999, 51(3): 245-253.
- [8] SIDDAIAH D, SAGARREDDY G V, RAJU C V, et al. Changes in lipids, proteins and kamaboko forming ability of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) mince during frozen storage[J]. Food Research International, 2001, 34(1): 47-53.
- [9] 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 Chemistry, 2007, 104(1): 113-121.
- [10] PORNRAT S, SUMATE T, ROMMANEE S, et al. Changes in the ultrastructure and texture of prawn muscle (*Macrobrachium rosenbergii*) during cold storage[J]. Journal of Food Science and Technology, 2007, 40(10): 1747-1754.
- [11] BENJAKUL S, VISESSANGUAN W, ISHIZAKI S, et al. Differences in gelation characteristics of natural actomyosin from two species of bigeye snapper, *Priacanthus tayenus* and *Priacanthus macracanthus*[J]. Journal of Food Science, 2001, 66(9): 1311-1318.
- [12] SARMA J, REDDY G V S, SRIKAR L N. Effect of frozen storage on lipids and functional properties of proteins of dressed Indian oil sardine (*Sardinella longiceps*)[J]. Food Research International, 2000, 33(10): 815-820.
- [13] SUBRAMANIAN T A. Effect of processing on bacterial population of cuttle fish and crab and determination of bacterial spoilage and rancidity development on frozen storage[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2007, 31(1): 13-31.