

低温高湿解冻降低鲳鱼理化品质的劣变

崔燕, 林旭东, 康孟利, 宣晓婷, 尚海涛, 俞静芬, 朱麟, 凌建刚

(宁波市农业科学研究院农产品加工研究所, 宁波市农产品保鲜工程重点实验室, 浙江宁波 315040)

摘要: 本文以传统 4 °C 空气解冻(RH83±2%)为对照, 研究低温高湿解冻(-1~1 °C、2~4 °C、5~7 °C和 8~10 °C, RH≥95%)对鲳鱼解冻效果(解冻时间、解冻损失率)、肌肉品质(蒸煮损失率、持水性、pH、质构及脂质氧化)及其蛋白生化特性(表面疏水性、总巯基、蛋白、羰基含量及 Ca²⁺-ATPase 活性)的影响。结果表明, 高湿有利于鲳鱼解冻, 5~7 °C 时解冻效率较对照组提高 42.47%。低温高湿(-1~7 °C)条件下解冻、蒸煮和离心汁液流失均显著下降, 肉质更新鲜; 硬度、咀嚼性、胶黏性等均显著高于对照组, 质构保持良好。肌原纤维蛋白生化指标结果显示, 解冻会导致蛋白变性, 但低温高湿解冻(-1~7 °C)后蛋白变性程度显著降低, 总巯基、蛋白含量、Ca²⁺-ATPase 活性均显著高于对照组, 而羰基含量则明显下降。与传统 4 °C 空气解冻相比, 低温高湿解冻能显著提高解冻效率, 降低汁液流失, 延缓鲳鱼在解冻过程中的品质劣变, 提高解冻鲳鱼品质。

关键词: 低温高湿解冻; 鲳鱼; 理化品质; 肌原纤维蛋白; 生化特性

文章编号: 1673-9078(2018)08-81-89

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2018.8.013

Low Temperature Combined with High-humidity Thawing Reduced the Physicochemical Quality Deterioration of *Pampus argenteus*

CUI Yan, LIN Xu-dong, KANG Meng-li, XUAN Xiao-ting, SHANG Hai-tao, YU Jing-fen, ZHU Lin, LING Jian-gang

(Institute of Agricultural Products Processing, Key Laboratory of Preservation engineering of Agricultural Products, Ningbo Academy of Agricultural Sciences, Ningbo 315040, China)

Abstract: In order to determine the effect of low temperature combined with high-humidity thawing (LT) on the quality and biochemical properties of myofibrillar protein of *Pampus argenteus*, the fresh fishes were frozen and treated with LT (-1~1 °C, 2~4 °C, 5~7 °C and 8~10 °C, RH≥95%) and refrigerator thawing (RT, 4 °C, RH 83±2%). The effect of LT on the thawing of *Pampus argenteus* was determined by investigating thawing time, and thawing loss. The changes in cooking loss, water binding capacity (WBC), pH, texture, lipid oxidation of fish muscle, as well as surface hydrophobicity, total sulfhydryl content, protein content, carbonyl content and Ca²⁺-ATPase activity of myofibrillar protein were also investigated. Results showed that high humidity was beneficial to the thawing of *Pampus argenteus*. Under the treatment of LT at 5~7 °C, the thawing efficiency increased by 42.47% as compared with that of RT. LT treatment (-1~7 °C) observably reduced the thawing loss and cooking loss, and remarkably increased the WBC. Compared to RT, the hardness, chewiness and gumminess levels of LT treatment (-1~7 °C) were enhanced obviously, and were closer to fresh samples. With the treatment of LT (-1~7 °C), the total sulfhydryl content, myofibrillar protein content, and Ca²⁺-ATPase activity were significantly increased, while the carbonyl content was remarkably reduced when compared to RT samples. It is demonstrated that LT can improve thawing efficiency and product yield, and reduce the physicochemical quality deterioration of *Pampus argenteus* during thawing process, suggesting a bright application potential of LT on thawing of frozen aquatic products.

Key words: low temperature combined with high-humidity thawing; *Pampus argenteus*; physicochemical quality; myofibrillar protein; biochemical properties

鲳鱼 (*Pampus argenteus*) 又名镜鱼, 为我国东南

收稿日期: 2018-04-10

基金项目: 宁波市农业重大项目 (2016C11016、2015C110002); “十三五”

国家重点研发计划项目 (2016YFD0400304)

作者简介: 崔燕 (1987-), 女, 博士, 助理研究员, 研究方向: 农产品保鲜与非热加工

通讯作者: 凌建刚 (1973-), 男, 研究员, 研究方向: 农产品保鲜与加工

沿海重要经济鱼类, 营养丰富、肉质鲜美, 深受消费者青睐^[1,2]。但鲳鱼捕捞后即死, 且肉质细嫩, 富含蛋白质、不饱和脂肪酸等营养成分, 在贮运销期间极易腐败变质, 因此除少量鲜销外, 冷冻是其储存、加工和流通主要形态。然而, 冷冻、冻藏和解冻过程均会引起汁液流失及品质劣变, 解冻作为冷冻鲳鱼加工及消费前的必须环节, 很大程度上影响着其最终食

用品质及价值。

空气解冻、水解冻是鲳鱼等冷冻水产品的常规解冻方法^[3]。空气解冻成本低、操作简便,但耗时长,存在微生物增速快、氧化劣变严重等问题;水解冻速率较快,但易造成营养物质流失、微生物交叉污染及水资源浪费。此外,鲳鱼还常用碎冰解冻,解冻缓慢,品质难以保证,解冻后商品价值急剧下降,售价仅为冰鲜鲳鱼的三分之一甚至更低,鲳鱼的高效、高品质解冻技术亟待突破。然而,目前鲳鱼相关研究仍集中在冷藏保鲜、速冻领域,解冻相关研究匮乏,新型解冻技术严重空缺。近年来,低温高湿^[4]、欧姆加热^[5]、高压电场^[6,7]和超高压^[8,9]等新型解冻技术涌现,其中低温高湿解冻技术在保持冻品解冻品质的同时兼备经济实用、水资源浪费少等优势,在高附加值、供鲜销冻品解冻领域备受关注。Li 等^[4]发现低温高湿有助于牛肉解冻,与 4℃空气解冻相比,可显著降低牛肉理化品质劣变,解冻汁液流失率、汁液蛋白含量、蒸煮损失率、剪切力和羰基含量均显著降低,且肌肉微观结构遭破坏程度较轻。钟莉等^[10]发现,鸡胸肉、猪里脊在低温高湿解冻后,其汁液、营养流失较静水、超声波、超高压及微波解冻降低,肉质保持良好。Zhang 等^[11]的研究发现,与静水解冻相比,低温高湿可显著降低鸡胸肉解冻汁液流失,减缓劣变并保持肌肉色泽稳定。张春晖等^[12]则在羊肉解冻研究中发现,低温高湿解冻可显著降低羊肉解冻过程中的品质劣变,解冻、蒸煮汁液流失率及蛋白表面疏水性均显著低于 4℃空气解冻,肉色更新鲜,硬度及咀嚼性也高于对照组。目前,低温高湿解冻技术的研究主要集中在肉品领域,并已在猪肉、牛肉等解冻工序中实现了产业化应用,虽有专利、报道提及其可应用于水产品中,但相关研究却鲜有报道。

本研究以东海银鲳为对象,在评价解冻效果基础上,系统分析比较新型解冻技术-低温高湿解冻与传统低温空气解冻(4℃)对冷冻鲳鱼解冻后肌肉品质及其蛋白生化特性的影响,以期为低温高湿解冻技术的应用推广提供理论依据,也为鲳鱼解冻品质控制提供指导。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

实验用新鲜东海银鲳(*Pampus argenteus*)购自宁波路林水产交易市场,挑选个体新鲜,体长、重量均匀个体(100±10 g),冰藏条件下于 20 min 内送至实验室。Ca²⁺-ATP 酶试剂盒南京建成生物工程研究所;

其他试剂均为分析纯。

1.2 仪器与设备

温湿度记录仪,杭州美控自动化技术有限公司; ZLE-B300 型均质机,上海众时机械公司; PB-10 型 pH 计,德国 Sartorius 公司; TA.XT Plus 质构仪,英国 Stable Micro Systems 公司; H1850R 型台式高速冷冻离心机,湖南湘仪离心机仪器有限公司; MS105DU 电子分析天平, Mettler Toledo 仪器有限公司; ST-756P 型紫外/可见分光光度计,上海光谱仪器有限公司; TSE240V 超低温冰箱,美国赛默飞世尔科技公司。

低温高湿解冻设备,由天津大远东制冷设备有限公司承建,主要包括蒸汽加热加湿、变频制冷、布风及 PLC 智能控制系统,利用均匀的低湿高湿循环空气通过冻品表面实现解冻,解冻加热方式为蒸汽加热。

1.3 样品处理

将购买的新鲜银鲳用冰水洗净,一部分作为新鲜对照组(新鲜组)直接进行指标测定,其余部分真空包装后置于-80℃超低温冰箱速冻,24 h 后转移至-20℃冷柜冻藏备用。将冷冻鲳鱼随机分成 5 组,用于解冻试验。试验设置-1~1℃(LT-1-1 组)、2~4℃(LT2-4 组)、5~7℃(LT5-7 组)和 8~10℃(LT8-10 组)共 4 个温度梯度的低温高湿解冻组(相对湿度 RH≥95%),并以传统低温空气解冻(4℃冰箱进行,RT 组, RH 83±2%)作为对照。

1.4 解冻效果评价

通过测定各解冻条件下鲳鱼的解冻时间及解冻损失率评价解冻效果。

解冻时间:将温度传感器探针插入样品中心位置,实时监控样品中心温度随解冻时间的变化情况,以样品中心温度达到 0~2℃为解冻终点^[13],通过软件读取数据,绘制温度变化曲线,记录解冻时间。

解冻损失率:依据 Xia 等^[14]的方法,精确称量解冻前后鱼的质量(称取前用滤纸吸干鱼体表面的水分),解冻损失率计算公式如下:

$$\text{解冻损失率} / \% = \frac{M_0 - M_1}{M_0} \times 100$$

式中: M_0 , M_1 分别为解冻前后鱼的质量(g)。

1.5 蒸煮损失率的测定

参考张春晖等^[12]方法。解冻完成后,精确称重的鱼体脊背部肌肉样品置于塑料袋中,放入 80℃水浴蒸煮 30 min 后取出,冷却后用滤纸吸干表面水分,

称重。鲳鱼的蒸煮损失率计算公式见下式。

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

式中: W_1 为蒸煮前样品质量 (g), W_2 为蒸煮后质量 (g)。

1.6 持水性的测定

持水性用离心后的失水多少来衡量。在洁净干燥的离心管底部填入棉花, 再将解冻后的鲳鱼脊背部肌肉 10 g 放入离心管, 在 4500 r/min 下离心 5 min 后取出称重, 持水性以离心失水率 W_{WH} 表示, 计算公式如下。

$$W_{WH}/\% = \frac{M_M - M_N}{M_M} \times 100$$

式中, M_M 和 M_N 分别为离心前、后的鲳鱼肌肉质量 (g)。

1.7 pH 值的测定

pH 值的测定方法参照《食品安全国家标准食品 pH 值的测定》(GB/T 5009.237-2016)。称取鲳鱼脊背部肌肉 5 g, 加蒸馏水至 50 mL, 充分均质后静置 30 min, 取滤液后用 pH 计测定。

1.8 质构参数的测定

采用 TPA 模式, 测定鲳鱼脊背部肌肉的硬度、弹性、咀嚼度、胶黏性和回复性。测试参数: P5 探头, 探头下行速度 2 mm/s、下压速度 1.0 mm/s、回升速度 1.0 mm/s, 下压深度 5 mm, 触发力 5 g, 停留间隔时间 5 s, 每组设置 10 个平行。

1.9 硫代巴比妥酸 (thiobarbituric acid reactive substances, TBARS) 值的测定

称取 10.0 g 研磨后的鲳鱼脊背部肌肉样品, 加入 50 mL 7.5% 的三氯乙酸 (含 0.1% 乙二胺四乙酸), 震荡提取 30 min, 离心得上清。取 5 mL 上清液, 加入 5 mL 0.02 mol/L 硫代巴比妥酸溶液, 沸水浴中反应 40 min, 冷却后, 离心取上清, 加入 5 mL 氯仿摇匀, 静置分层, 取上层清液分别测定 532 和 600 nm 处吸光度值。TBARS 值以每 1 kg 鱼肉样品中丙二醛 (malondialdehyde, MDA) 的毫克数表示 (mgMDA/Kg), 其中 MDA 摩尔消光系数为 155000/(mol·cm), 摩尔质量 72.06 g/mol, 光径 1 cm。

1.10 肌原纤维蛋白溶液的制备

参考林娴萍等^[15]方法。称取一定量的鲳鱼脊背部肌肉, 加入 10 倍体积预冷的 Tris-maleate 缓冲溶液 (50

mmol/L KCl-20 mmol/L Tris-maleate, pH 7), 匀浆后 10000 r/min 离心 10 min, 沉淀加入 4 倍体积的 Tris-maleate 缓冲液 (0.6 mol/L KCl-20 mmol/L Tris-maleate, pH 7), 匀浆后提取 1 h, 10000 r/min 离心 10 min, 上清液即为肌原纤维蛋白溶液。上述过程均在 4 °C 下进行, 双缩脲法测定蛋白含量。

1.11 肌原纤维蛋白表面疏水性的测定

表面疏水性测定参照文献^[16,17]方法进行, 以每毫克蛋白所结合的溴酚蓝量表示 ($\mu\text{g}/\text{mg prot}$)。

1.12 肌原纤维蛋白总巯基 (total sulfhydryl, T-SH) 含量的测定

按文献^[18,19]使用 Ellman 试剂法进行测定。吸取肌原纤维蛋白提取液 0.25 mL 于试管中, 加入 2.5 mL 磷酸盐缓冲液 (0.1 mol/L 磷酸-8 mol/L 尿素, pH 8.0) 混合均匀后, 分别加入 50 mL 0.01 mol/L 的 5,5'-二硫代双 (2-硝基苯甲酸) 溶液, 40 °C 反应 15 min, 然后测定其在 412 nm 处吸光度值。使用摩尔消光系数为 13600/(mol·cm) 计算 T-SH 含量, 结果表示为 $\mu\text{mol}/\text{mg prot}$ 。

1.13 肌原纤维蛋白 Ca^{2+} -ATPase 活性的测定

按试剂盒操作说明进行。

1.14 羰基含量的测定

羰基含量参照文献^[20,21]采用 2,4-二硝基苯肼比色法进行测定。羰基含量计算使用摩尔消光系数 22000/(mol·cm), 用 nmol/mg prot 表示。蛋白质含量采用双缩脲法进行测定。

1.15 数据分析

各组数据以平均值 \pm 标准差表示, 应用 SPSS 18.0 软件(美国 SPSS 公司)以 one-way ANOVA 法及 Duncan 检验对实验数据进行组间比较和差异显著性分析。以 $p < 0.05$ 为存在显著性差异。

2 结果与讨论

2.1 低温高湿解冻对鲳鱼解冻时间和解冻损失率的影响

不同解冻方法所用的解冻时间如表 1 所示。由表 1 可以看出, 不同解冻条件下解冻时间依次为:

LT8-10<LT5-7<LT2-4<LT-1-1<RT, 低温高湿解冻组的解冻时间均显著少于对照组 ($p<0.05$), 并随着温度的升高解冻速率明显上升, 相同温度梯度下 LT2-4 解冻时间缩短为 280.17 min, 仅为 RT 组 (411.93 min) 的 68.01%。这是因为在低温高湿条件下水蒸气发生冷凝释放大量潜热 (2500 KJ/kg, 约为冰转化为水所需潜热 (335 KJ/kg) 的 7 倍), 并在鱼体表面不断形成水膜, 而水的比热远大于空气比热, 能大大提高热的传导速率, 从而缩短解冻时间。邸静等^[22]在牛肉解冻中也发现高湿度有利于解冻, 相同温度下 (4 °C), 高湿条件下解冻时间较较低湿度明显下降, 结果与本实验相同。

不合适的解冻方法将导致严重的汁液流失, 进而导致营养流失, 从而影响产品的重量、品质及感官特性^[14]。从表 1 可以看出, 低温高湿有助于降低鲳鱼在解冻过程中的汁液流失, 各低温高湿解冻条件下解冻损失率均显著低于对照组 ($p<0.05$), 其中-1~1、5~7 °C 条件下效果最为显著, 但-1~1 °C 解冻时间较长, 影响效率。研究报道, 低温高湿在畜禽解冻中亦表现出相似效果, Li 等^[4]对牛肉进行低温高湿解冻时, 发现低温高湿解冻后牛肉的汁液流失仅为 4 °C 低温空气解冻的 52.73%; 于冰等^[23]在进行鸡肉解冻中也发现低温高湿解冻后鸡肉的解冻损失率显著降低。低温高湿降低鲳鱼解冻损失率可能是由于鱼体表面形成的水膜能够阻止水分的散失, 同时有效加速冰晶的融化和细胞的复水, 保护肌细胞完整性和保水性, 从而减少解冻过程中的汁液流失及营养流失, 改善解冻鲳鱼的品质。

表 1 不同解冻方法对鲳鱼解冻时间和解冻损失率的影响

Table 1 Effects of different thawing methods on the thawing time and thawing loss of *Pampus argenteus*

解冻方式	解冻温度	解冻时间/min	解冻损失率/%
LT-1-1	-1~1 °C	343.08±0.95 ^d	-0.09±0.16 ^a
LT2-4	2~4 °C	280.17±1.76 ^c	0.21±0.08 ^b
LT5-7	5~7 °C	237.00±4.58 ^b	-0.25±0.09 ^a
LT8-10	8~10 °C	206.33±3.06 ^a	0.43±0.12 ^c
RT	4 °C	411.93±0.81 ^e	1.13±0.28 ^d

注: 同一列不同字母表示差异显著 ($p<0.05$)。下表同。

2.2 低温高湿解冻对鲳鱼蒸煮损失率和持水性的影响

蒸煮损失率和离心失水率是衡量肌肉保水性的主要指标, 不同解冻方式对保水性的影响如表 2 所示。由表可知, 与新鲜鲳鱼 (27.43) 相比, -1~7 °C 范围内低温高湿解冻的蒸煮损失率均无明显变化, LT-1-1、

LT2-4 和 LT5-7 组分别较对照组 (32.90) 下降了 13.31%、9.57%和 13.65% ($p<0.05$)。Li 等^[4]在低温高湿解冻牛肉中的发现与本实验研究结果相似, 可能与高湿条件下鱼体表面水膜隔氧而抑制微生物生长相关。然而, LT8-10 组 (37.92) 蒸煮损失率显著高于对照组 ($p<0.05$), 这是由于该解冻条件环境温度相对较高, 解冻过程中蛋白酶活性较强, 从而影响肌肉蛋白结构, 造成保水性的下降。

离心失水率的变化规律与蒸煮损失率有所不同, 与新鲜鲳鱼相比, 冷冻、解冻处理造成了失水率的显著增加 ($p<0.05$), 传统低温空气解冻后鲳鱼的离心失水率由 10.31%上升至 23.15% ($p<0.05$), 持水性严重下降。然而, 低温高湿解冻组 (-1~7 °C 范围内) 失水率明显低于对照组 ($p<0.05$), 其中 LT5-7 的持水性保持最好, 离心失水率下降至对照组的 72.01%。

综合分析, 7 °C 以下低温高湿解冻鲳鱼的保水性较高, 蒸煮、离心汁液流失较少, 而 8 °C 以上高湿解冻和空气解冻对鲳鱼的保水性影响较大。

表 2 不同解冻方法对鲳鱼蒸煮损失率和持水性的影响

Table 2 Effects of different thawing methods on the cooking loss and water binding capacity of *Pampus argenteus*

解冻方式	蒸煮损失率/%	离心失水率/%
新鲜组	27.43±1.09 ^a	10.31±1.55 ^a
LT-1-1	28.52±3.33 ^a	17.90±0.61 ^b
LT2-4	29.75±1.8 ^a	18.84±1.67 ^{bc}
LT5-7	28.41±1.97 ^a	16.67±2.86 ^b
LT8-10	37.92±0.60 ^c	22.72±2.69 ^{cd}
RT	32.90±0.95 ^b	23.15±2.94 ^d

2.3 低温高湿解冻对鲳鱼 pH 的影响

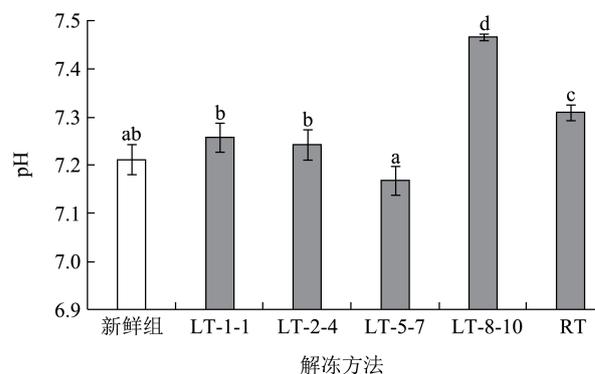


图 1 不同解冻方法对鲳鱼 pH 的影响

Fig.1 Effects of different thawing methods on the pH of *Pampus argenteus*

注: 不同字母表示差异显著 ($p<0.05$), 下图同。

不同解冻方式对鲳鱼 pH 的影响如图 1 所示, 新鲜鲳鱼 pH 值为 7.21, RT 解冻后 pH 上升至 7.31, 显

著高于新鲜值水平 ($p<0.05$); $-1\sim 7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内低温高湿解冻处理后 pH 值变化不显著, 与新鲜值接近并显著低于对照组 ($p<0.05$)。而 $8\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温高湿解冻后鲳鱼的 pH 明显升高, 解冻后 pH 上升至 7.47, 这是因为在较高温度下, 蛋白酶活性较高且微生物繁殖加快, 蛋白质被逐渐分解成氨基酸、氨及胺类等碱性物质, 从而导致肌肉 pH 值上升。研究结果表明, 与传统低温空气解冻方法相比, $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下低温高湿解冻更有助于保持冷冻鲳鱼的新鲜程度, 新鲜度接近新鲜鲳鱼。

2.4 低温高湿解冻对鲳鱼质构的影响

鲳鱼质构特性在不同解冻条件下的变化情况见表 3。结果显示, 解冻后鲳鱼的硬度、弹性、咀嚼性、胶黏性和回复性均发生了不同程度的变化, 其中传统低温空气解冻后鲳鱼质构下降最为明显, 硬度、咀嚼性和胶黏性较新鲜值分别下降了 20.56%、23.80% 和 15.35% ($p<0.05$), 这与该解冻条件较高的解冻汁液流

失密切相关, 肌细胞破坏严重。低温高湿解冻后鱼体的各项质构指标接近新鲜鱼值, 解冻后鲳鱼硬度由对照组的 1038.02 g 显著上升至 1477.40 g (LT-1-1)、1393.42 g (LT2-4)、1254.96 g (LT5-7) 和 1291.92 g (LT8-10) ($p<0.05$), 并与新鲜鲳鱼硬度无显著差异; LT-1-1、LT2-4 组的弹性、咀嚼性、回复性变化不明显, 但在 LT5-7、LT8-10 条件下其值显著高于对照组 ($p<0.05$), 甚至显著高于新鲜值 ($p<0.05$); 胶黏性则除 LT8-10 组外, 均显著高于对照组和新鲜组 ($p<0.05$), 其中 LT5-7、LT8-10 解冻条件下, 鲳鱼质构保持最好, 但 LT8-10 解冻后鲳鱼鲜度下降较为严重, 影响最终品质。本实验研究结果表明, 低温高湿解冻较传统低温空气解冻能更好地保持鱼体的质构特性, 能在一定程度上延缓鱼体硬度、弹性、咀嚼性等质构参数的下降, 延缓鱼体质构品质劣变, 这与高湿环境下鱼体表面水膜形成密切相关, 其在有效维持鱼体保水性的同时, 通过隔氧抑制微生物生长从而延缓鱼体的品质的下降。

表 3 不同解冻方法对鲳鱼质构的影响

Table 3 Effects of different thawing methods on the texture of *Pampus argenteus*

解冻方式	硬度/g	弹性	咀嚼性/g	胶黏性	回复性/%
新鲜组	1306.69±284.78 ^b	0.73±0.08 ^a	633.33±99.41 ^b	783.09±93.98 ^b	0.39±0.03 ^a
LT-1-1	1477.40±434.69 ^b	0.74±0.07 ^a	674.03±89.86 ^{bc}	892.49±88.94 ^c	0.38±0.04 ^a
LT2-4	1393.42±280.96 ^b	0.76±0.05 ^a	664.09±99.34 ^{bc}	874.85±111.76 ^c	0.38±0.03 ^a
LT5-7	1254.96±175.73 ^b	0.82±0.04 ^b	737.63±85.85 ^{cd}	888.97±89.22 ^c	0.43±0.02 ^b
LT8-10	1291.92±182.07 ^b	0.85±0.03 ^b	772.49±67.04 ^d	846.37±87.47 ^{bc}	0.42±0.03 ^b
RT	1038.02±178.16 ^a	0.73±0.06 ^a	482.59±57.06 ^a	662.85±73.97 ^a	0.37±0.02 ^a

2.5 低温高湿解冻对鲳鱼肌肉脂质氧化的影响

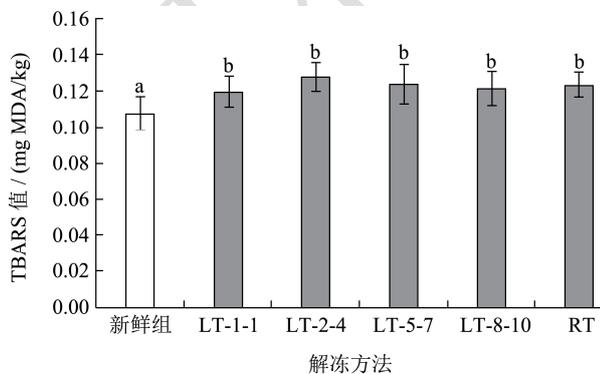


图 2 不同解冻方法对鲳鱼脂质氧化的影响

Fig.2 Effects of different thawing methods on the lipid oxidation of *Pampus argenteus*

TBARS 值反映多不饱和脂肪酸的氧化酸败程度, 与腐臭味及异味密切相关, 常以 MDA 作为指示物

[23,24]。如图 2 所示, 与鸡肉解冻之后的研究结果相似 [1], 经过解冻, 各组鲳鱼出现了不同程度的脂质氧化劣变, TBARS 值由新鲜组的 0.11 mg MDA/kg 上升至 0.12 mg MDA/kg (RT、LT-1-1、LT5-7 和 LT8-10) 和 0.13 mg MDA/kg (LT2-4) ($p<0.05$), 脂质氧化程度均明显提高, 其中 LT2-4 组脂质氧化最为明显, TBARS 值较新鲜鲳鱼升高了 18.17%, 但各解冻处理组间差异不显著, 这主要是由于冰晶对细胞膜的破坏导致氧化酶泄露所造成的。

2.6 低温高湿解冻对肌原纤维蛋白表面疏水性的影响

表面疏水性反映蛋白质分子表面疏水性氨基酸的含量, 是衡量蛋白质变性程度的重要指标 [16,25]。由图 3 可知, 新鲜鲳鱼肌原纤维蛋白表面疏水性值为 2.92 $\mu\text{g}/\text{mg prot}$, 解冻后各处理组肌原纤维蛋白表面疏水性呈现出不同程度的升高, LT2-4 和 LT5-7 组蛋白表面

疏水性上升程度相对较低,较新鲜值分别提高了20.09%和23.51%,但与新鲜值不存在显著差异,这与其相对较低的解冻温度及较短的解冻时间相关;LT-1-1、LT8-10和RT组蛋白表面疏水性显著高于新鲜组($p < 0.05$),其中LT8-10蛋白表面疏水性较新鲜值上升35.16%,这是由于LT-1-1和RT解冻传热较慢,解冻时间较长,而LT8-10则因解冻温度相对较高,酶活性较强,从而引起解冻过程中蛋白质变性,分子解折叠,使肽链断裂或结构伸展,分子内部的疏水性氨基酸残基暴露,从而使得疏水性上升^[26]。

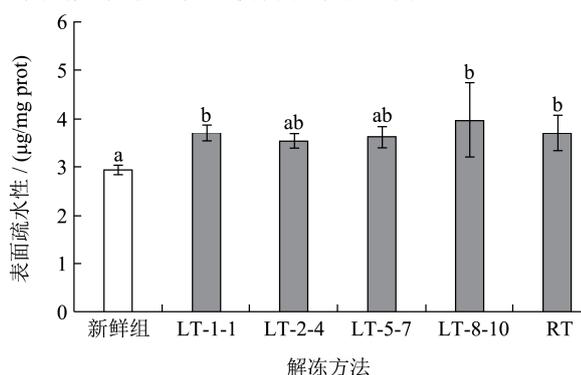


图3 不同解冻方法对鲳鱼肌原纤维蛋白表面疏水性的影响

Fig.3 Effects of different thawing methods on the surface hydrophobicity of myofibrillar protein in *Pampus argenteus*

2.7 低温高湿解冻对肌原纤维蛋白总巯基含量的影响

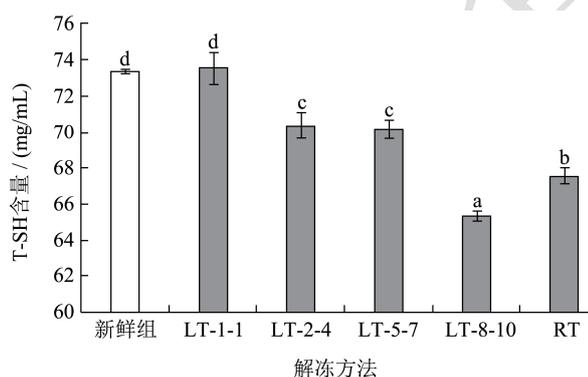


图4 不同解冻方法对鲳鱼肌原纤维蛋白总巯基含量的影响

Fig.4 Effects of different thawing methods on the total sulfhydryl content of myofibrillar protein in *Pampus argenteus*

不同解冻方式对鲳鱼肌原纤维蛋白总巯基含量的影响如图4所示。与新鲜鲳鱼相比,解冻后鲳鱼的总巯基含量均有一定程度的变化,其中LT-1-1组的巯基含量最高,与新鲜鲳鱼无显著差异;而LT2-4、LT5-7、LT8-10、RT解冻组总巯基含量显著低于新鲜组($p < 0.05$),分别下降了4.13%、4.30%、10.91%、7.96%,蛋白变性程度较大,但LT2-4、LT5-7组总巯基含量较

RT组显著提高($p < 0.05$)。Li等^[4]在研究低温高湿解冻处理对牛肉肌原纤维蛋白总巯基含量的影响时也发现相似的结果,在2~6℃低温高湿条件下总巯基含量在整个解冻过程中甚至解冻完成放置12h后均显著高于传统4℃低温空气解冻。解冻后鱼肉中肌原纤维蛋白总巯基含量的下降可能是在冰晶融化重新被吸收的过程中肌原纤维蛋白的构象发生了变化,导致巯基暴露,进而被氧化成二硫键,从而引起总巯基含量的下降^[28]。在低温高湿条件下,巯基含量的下降随温度升高呈现上升趋势,表明低温可在一定程度上降低巯基氧化速度,这可能与环境温度相对较低条件下蛋白酶活性较弱密切相关。2~4、5~7℃高湿解冻对应的总巯基含量相对传统低温空气解冻(RT组,4℃)较高,这可能与这两种解冻方式较短的解冻时间、氧气被水膜隔绝等因素相关,从而阻碍了巯基的氧化和巯基含量的减少。

2.8 低温高湿解冻对肌原纤维蛋白含量的影响

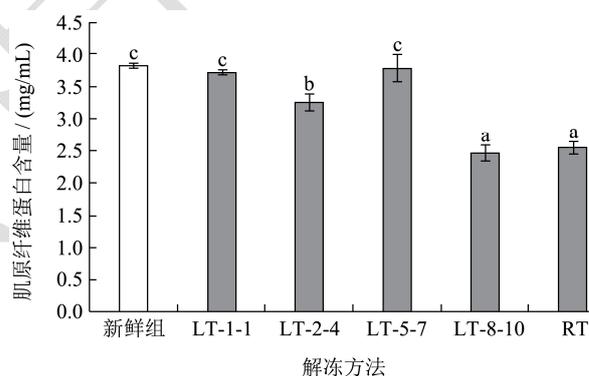


图5 不同解冻方法对鲳鱼肌原纤维蛋白含量的影响

Fig.5 Effects of different thawing methods on the myofibrillar protein content of *Pampus argenteus*

肌原纤维蛋白是水产肌肉组织重要的结构与功能蛋白,其含量一定程度上反应了冷冻水产品肌肉蛋白的变性程度^[29,30]。不同解冻方法对鲳鱼肌原纤维蛋白含量的影响如图5所示,LT-1-1、LT2-4、LT5-7、LT8-10和RT解冻后,肌原纤维蛋白含量分别降低了3.00%、15.50%、1.00%、35.50%和33.50%,其中LT8-10和RT解冻后肌原纤维蛋白含量下降最多,这可能是由于温度较高或直接与空气接触促进了蛋白质变性。结合表面疏水性变化和总巯基下降趋势来看,肌原纤维蛋白含量的降低可能是表面疏水性的上升和巯基氧化导致蛋白交联和聚集而共同引起的。

2.9 低温高湿解冻对肌原纤维蛋白羧基含量

的影响

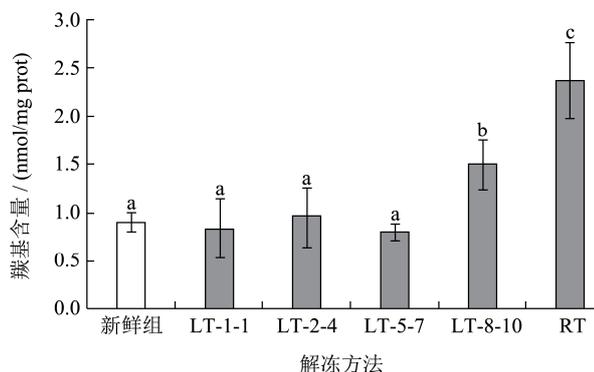


图6 不同解冻方法对鲳鱼肌原纤维蛋白羰基含量的影响

Fig.6 Effects of different thawing methods on the Carbonyl content of myofibrillar protein in *Pampus argenteus*

蛋白羰基含量是衡量肌肉中蛋白氧化程度的敏感指标^[31]。如图6所示,新鲜鲳鱼肌原纤维蛋白羰基含量为0.91 nmol/mgprot,经速冻、解冻后,LT-1-1、LT2-4和LT5-7处理组的羰基含量与新鲜鲳鱼无明显变化,而LT8-10和RT处理组的羰基含量显著上升($p<0.05$)。LT8-10组样品的羰基含量较高,这是由于较高的解冻温度有利于酶促反应的进行,进而有更多的羰基累积;而RT组的羰基含量最高,这可能是解冻过程中鱼体直接与氧气接触,进而加速了蛋白质氧化速率,导致羰基含量明显上升。以上结果表明,与传统低温空气解冻相比,低温高湿解冻(-1~7℃)可有效降低解冻过程中鲳鱼肌肉蛋白的氧化。有研究表明蛋白氧化通常与肌肉蛋白功能如保水性的下降密切相关^[32,33],因此传统低温空气解冻鲳鱼肌肉中较高的羰基含量及较低水平的巯基含量可能是导致RT组解冻(表1)、蒸煮和离心汁液流失率(表2)较高的原因之一。

2.10 低温高湿解冻对 Ca^{2+} -ATPase 活性的影响

Ca^{2+} -ATPase 活性是肌球蛋白分子结构完整性的重要指标,其活性的变化可以反映肌原纤维蛋白变性的程度,从而反映鱼肉的新鲜度^[34]。由图7可知,5种解冻方式对应的 Ca^{2+} -ATPase 活性为 LT2-4 (2.33)>LT-1-1 (2.31)> LT5-7 (2.00)>RT (1.77)>LT 8-10(1.73),其中LT8-10和RT组的 Ca^{2+} -ATPase 活性下降最多,较新鲜组显著降低了19.74%和18.24% ($p<0.05$),蛋白变性严重;而LT-1-1、LT2-4和LT5-7组 Ca^{2+} -ATPase 活性变化不大,与新鲜组之间无显著差异。因此,与传统低温空气解冻相比,低温高湿(-1~7℃)能有效延缓解冻过程中蛋白变性,从而相

对改善了解冻鱼肉品质。目前,据文献报道, Ca^{2+} -ATPase 活性下降的可能原因有巯基氧化导致的分子聚合作用、肌原纤维蛋白水解、冰晶的机械作用等^[35-37]。对照图5和图7发现, Ca^{2+} -ATPase 活性降低趋势与巯基含量的变化趋势相类似,因此 Ca^{2+} -ATPase 活性的降低可能是由于巯基氧化引起的。

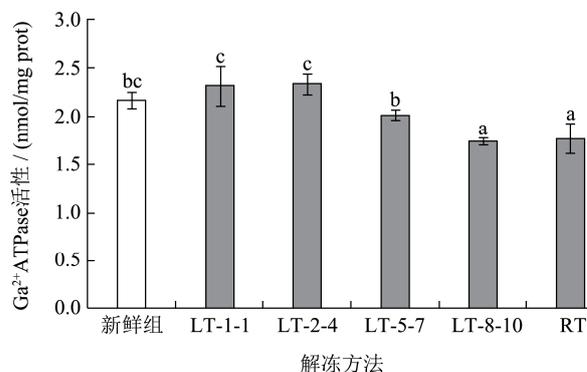


图7 不同解冻方法对鲳鱼 Ca^{2+} -ATPase 活性的影响

Fig.7 Effects of different thawing methods on the Ca^{2+} -ATPase activity of *Pampus argenteus*

3 结论

速冻、解冻会造成鲳鱼品质劣变,解冻方式显著影响鲳鱼解冻后的品质。与传统低温空气解冻相比,低温高湿解冻能有效缩短解冻时间,5~7℃条件下解冻效率提高42.47%,解冻损失率显著降低。-1~7℃高湿解冻后鲳鱼的保水性较好,蒸煮损失率和离心失水率均显著低于低温空气解冻,新鲜度保持良好;鱼体的质构特性保持良好,各项指标接近新鲜鱼值;肌原纤维蛋白变性程度显著低于低温空气解冻,总-SH、蛋白含量、 Ca^{2+} -ATPase 活性均显著高于对照组,而羰基含量则明显下降。综上,低温高湿解冻可在显著提高解冻效率的基础上,减缓冷冻鲳鱼解冻过程中的品质劣变,改善解冻鲳鱼的品质,是一种实现高效、高品质解冻的理想手段,值得更深入的研究。

参考文献

- [1] 蓝蔚青,谢晶,周会,等.不同时期鲳鱼冷藏期间优势腐败菌的多样性变化[J].食品科学,2015,36(2):226-231
LAN Wei-qing, XIE Jing, ZHOU Hui, et al. Diversity of dominant spoilage bacteria in pomfret (*Pampus argenteus*) from different growing seasons during chilled storage [J]. Food Science, 2015, 36(2): 226-231
- [2] 吴春华.壳聚糖衍生物分子修饰机理及其在银鲳鱼保鲜中的应用研究[D].杭州:浙江大学,2017
WU Chun-hua. Studies on the molecular modification mechanism of chitosan derivatives and its application in the

- preserving of silver pomfret [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017
- [3] Eastridge J S, Bowker B C. Effect of rapid thawing on the meat quality attributes of USDA select beef strip loin steaks [J]. *Journal of Food Science*, 2011, 76(2): S156-162
- [4] Li Y, Jia W, Zhang C H, et al. Fluctuated low temperature combined with high-humidity thawing to reduce physicochemical quality deterioration of beef [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2014, 7(12): 3370-3380
- [5] Richa R, Shahi N, Singh A, et al. Ohmic heating technology and its application in meaty food: a review [J]. *Advances in Research*, 2017, 10(4): 1-10
- [6] Mousakhani-Ganjeh A, Hamdami N, Soltanizadeh N. Impact of high voltage electric field thawing on the quality of frozen tuna fish (*Thunnus albacares*) [J]. *Journal of Food Engineering*, 2015, 156: 39-44
- [7] Mousakhani-Ganjeh A, Hamdami N, Soltanizadeh N. Thawing of frozen tuna fish (*Thunnus albacares*) using still air method combined with a high voltage electrostatic field [J]. *Journal of Food Engineering*, 2016, 169: 149-154
- [8] Zhu S, Ramaswamy H S, Simpson B K. Effect of high-pressure versus conventional thawing on color, drip loss and texture of Atlantic salmon frozen by different methods[J]. *Lebensmittel-Wissenschaft Und-Technologie-Food Science and Technology*, 2004, 37(3): 291-299
- [9] Zhu S M, Su G M, He J S, et al. Water phase transition under pressure and its application in high pressure thawing of agar gel and fish [J]. *Journal of Food Engineering*, 2014, 125: 1-6
- [10] 钟莉,杨庆峰,陈文,等.不同解冻方法对畜禽肉品质的影响[J].*食品工业*,2016,37(12):42-46
ZHONG Li, YANG Qing-feng, CHEN Wen, et al. Effects of different thawing methods on animal meat quality [J]. *Food Industry*, 2016, 37(12): 42-46
- [11] Zhang X, Gao T, Song L, et al. Effects of different thawing methods on the quality of chicken breast [J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2017, 52(9): 2097-2105
- [12] 张春晖,李侠,李银,等.低温高湿变温解冻提高羊肉的品质[J].*农业工程学报*,2013,29(6):267-273
ZHANG Chun-hui, LI Xia, LI Yin, et al. Low-variable temperature and high humidity thawing improves lamb quality [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2013, 29(6): 267-273
- [13] 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 Chemistry*, 2006, 95(4): 591-599
- [14] Xia X F, Kong B H, Liu J, et al. Influence of different thawing methods on physicochemical changes and protein oxidation of porcine longissimus muscle [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2012, 46(1): 280-286
- [15] 林娴萍,揭珍,束玉珍,等.鲑鱼肉酶解物添加量对带鱼鱼糜蛋白抗冻效果的影响[J].*核农学报*,2015,29(5):940-945
LIN Xian-ping, JIE Zhen, SHU Yu-zhen, et al. Cryoprotective effects of mackerel hydrolysate addition on the hairtail surimi during frozen storage [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2015, 29(5): 940-945
- [16] Chelh I, Gatellier P, Sante-Lhoutellier V. Technical note: A simplified procedure for myofibril hydrophobicity determination [J]. *Meat Science*, 2006, 74(4): 681-683
- [17] 王芝妍,杨文鸽,周果,等.超高压辅助中华管鞭虾脱壳及其肌肉品质的影响[J].*食品科学*,2017,38(7):43-48
WANG Zhi-yan, YANG Wen-ge, ZHOU Guo, et al. Shelling of *Solenocera melanthero* using ultra high pressure and its effect on the quality of muscle [J]. *Food Science*, 2017, 38(7): 43-48
- [18] Choi Y J, Park J W. Acid-aided protein recovery from enzyme-rich Pacific whiting [J]. *Journal of Food Science*, 2002, 67(8): 2962-2967
- [19] 程珍珠.超高压和膳食纤维对复合鱼糜凝胶品质的影响[D].无锡:江南大学,2012
CHENG Zhen-zhu. Effect of high pressure and dietary fiber on gel qualities of blend surimi gels [D]. Wuxi: Jiannan University, 2012
- [20] 李艳青.蛋白质氧化对鲤鱼蛋白结构和功能性的影响及其控制技术[D].哈尔滨:东北农业大学,2013
LI Ye-qing. Protein oxidation-induced structure and function changes of common Carp (*Cyprinus Carpio*) protein and its control technology [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2013
- [21] Oliver C N, Ahn B W, Moerman E J, et al. Age-related changes in oxidized proteins [J]. *Journal of Biological Chemistry*, 1987, 262(12): 5488
- [22] 邸静,靳焯.不同解冻方法对牛肉品质的影响[J].*食品工业*, 2015,1:174-177
DI Jing, JIN Ye. Effect of different thawing methods on the quality of beef [J]. *Food Industry*, 2015, 1: 174-177
- [23] 于冰,孙京新,于林宏,等.不同的冷冻和解冻方式对鸡肉品

- 质的影响[J].肉类研究,2015,1:6-9
- YU Bing, SUN Jing-xin, YU Lin-hong, et al. Effects of different freezing and thawing processes on chicken quality [J]. Meat Research, 2015, 1: 6-9
- [24] Crowe K M, Skonberg D, Bushway A, et al. Application of ozone sprays as a strategy to improve the microbial safety and quality of salmon fillets [J]. Food Control, 2012, 25(2): 464-468
- [25] Zhang B, Ma L K, Deng S G, et al. Shelf-life of pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) as affected by weakly acidic electrolyzed water ice-glazing and modified atmosphere packaging [J]. Food Control, 2015, 51: 114-121
- [26] 郭园园,孔保华.冷冻贮藏引起的鱼肉蛋白质变性及其物理化学特性的变化[J].食品科学,2011,32(7):335-340
- GUO Yuan-yuan, KONG Bao-hua. Advances in the research of denaturation and change in physico-chemical properties of fish proteins during frozen storage [J]. Food Science, 2011, 32(7): 335-340
- [27] 尚柯,杨方威,李侠,等.静电场辅助冻结-解冻对肌肉保水性及蛋白理化特性的影响[J].食品科学,2018,39(3):157-162
- SHANG Ke, YANG Fang-wei, LI Xia, et al. Effect of electrostatic field-assisted freezing-thawing on water-holding capacity and physicochemical characteristics of beef muscle proteins [J]. Food Science, 2018, 39(3): 157-162
- [28] Sun W Z, Zhou F B, Sun D W, et al. Effect of oxidation on the emulsifying properties of myofibrillar proteins [J]. Food and Bioprocess Technology, 2013, 6(7): 1703-1712
- [29] Badii F, Howell N K. Changes in the texture and structure of cod and haddock fillets during frozen storage [J]. Food Hydrocolloids, 2002, 16(4): 313-319
- [30] 曹荣,卞瑞姣,赵玲,等.解冻方式对三疣梭子蟹感官特征和理化指标的影响[J].食品安全质量检测学报,2017,8(5): 1704-1708
- CAO Rong, BIAN Rui-jiao, ZHAO Ling, et al. Effects of thawing method on the sensory, physical and chemical characteristics of *Portunus trituberculatus* [J]. Journal of Food Safety and Quality, 2017, 8(5): 1704-1708
- [31] 姜晴晴,邵世奇,陈士国,等.冻融循环对带鱼蛋白质性质及肌肉品质的影响[J].中国食品学报,2016,16(4):122-129
- JIANG Qing-qing, SHAO Shi-qi, CHEN Shi-guo, et al. Effect of freeze-thaw cycles on the characteristics of protein and the quality of muscle in hairtail (*Trichiurus haumela*) [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2016, 16(4): 122-129
- [32] 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 Science, 2009, 83(2): 239-245
- [33] Eastridge J S, Bowker B C. Effect of rapid thawing on the meat quality attributes of USDA select beef strip loin steaks [J]. Journal of Food Science, 2015, 76(2): S156-S162
- [34] 李天翔,包海蓉,王锡昌,等.不同解冻方式对鲢鱼鱼肉蛋白及组胺变化的影响[J].食品与发酵工业,2017,43(3):180-185
- LI Tian-xiang, BAO Hai-rong, WANG Xi-chang, et al. Effect of different thawing methods on muscle proteins and histamine variation of skipjack tuna [J]. Food and Fermentation Industries, 2017, 43(3): 180-185
- [35] 李学鹏.中国对虾冷藏过程中品质评价及新鲜度指示蛋白研究[D].杭州:浙江工商大学,2012
- LI Xue-peng. Studies on quality assessment and protein indicators of freshness in chinese shrimp (*Fenneropenaeus Chinensis*) during refrigerated storage [D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2012
- [36] Benjakul S, Bauer F. Physicochemical and enzymatic changes of cod muscle proteins subjected to different freeze-thaw cycles [J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 2000, 80(8): 1143-1150
- [37] Jiang S T, Hwang D C, Chen C S. Effect of storage temperatures on the formation of disulfides and denaturation of milkfish myosin (*Chanos chanos*) [J]. Journal of Food Science, 1988, 53(5): 1333-1335