

解冻方式对金线鱼肌原纤维蛋白热稳定性 和组织结构的影响

刘宏影¹ 马莹莹¹ 李秀霞¹ 励建荣¹ 郭晓华² 于建洋³

1.渤海大学食品科学与工程学院,锦州 121013; 2.山东美佳集团有限公司,日照 276800;

3.山东荣城泰祥食品股份有限公司,威海 264309

摘要 为研究不同解冻方式对金线鱼品质的影响,分别采用0℃冰水混合解冻、4℃冰箱解冻、20℃静水解冻、0℃超声波解冻(160、280、400 W)这4种解冻方式对-20℃贮藏的金线鱼进行解冻,测定金线鱼的解冻损失率、蒸煮损失率和质构特性,并应用差示扫描量热仪(DSC)研究蛋白质热稳定性,拉曼光谱分析蛋白质二级结构,光学显微镜观察其组织微观结构。结果显示:4℃冰箱解冻后金线鱼的解冻损失率最低,其次是0℃超声波(280 W)解冻处理组。金线鱼经过0℃超声波(280 W)解冻处理后肌束排列紧密,蛋白质表现出良好的热稳定性,肌原纤维蛋白的二级结构变化较小。金线鱼经过0℃超声波(400 W)解冻后,具有较好的热稳定性和质构特性,但是过高功率的超声波会使肌原纤维严重断裂并增大间隙。综合对比4种解冻方式,0℃超声波(280 W)解冻对金线鱼品质的破坏性最小,是值得推荐的快速解冻方式。

关键词 金线鱼;解冻方式;肌原纤维蛋白;热稳定性;组织结构;质构特性;解冻损失

中图分类号 TS 254.1 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2019)06-0025-08

金线鱼属(*Nemipterus*)隶属于硬骨鱼纲(Osteichthyes)、鲈形目(Perciformes)、金线鱼科(Nemipteridae),其中红衫鱼(*Nemipterus virgatus*)一直是最主要的经济捕捞种类,2018年其总产量达33.43万t^[1-2]。金线鱼肉质鲜美、营养丰富,占有重要的渔业生态地位,并有巨大的资源开发潜力^[2-3]。因其肉质细嫩、营养价值高,富含ω-3系多烯不饱和脂肪酸^[4],其中的DHA和EPA更是对人体有维系骨骼健康、预防心血管疾病、减少血小板聚集、抗癌等作用^[5-7],深受消费者喜爱,一般在海捕后作为冷冻海鲜或加工制成鱼丸、鱼肠等鱼糜制品。目前多采用冷冻保藏来延长其货架期,虽然低温条件能够有效抑制微生物的繁殖、保持酶的活性,但鱼肉品质仍会发生劣变,如保水性、色泽及质构特性等变化^[8]。

解冻是冷冻的逆过程,冷冻食品原料在加工之前都需要进行解冻处理,解冻后的食品由于汁液流失、蛋白质变性等问题会使其营养成分减少、口感变差,所以解冻方式及相关技术是影响冷冻食品品质

的一个重要因素。传统的解冻方法包括空气解冻、液体解冻和蒸汽解冻,但都存在解冻时间过长、汁液流失、细菌繁殖等问题。近几年,微波解冻、真空解冻、高压解冻、超声波解冻、电解冻等新兴解冻技术出现,为冷冻食品的品质保证提供了更多选择。超声波解冻技术是借助超声波热效应产生的能量在已冻结区组织中的衰减程度远远高于未冻结区组织,来加速食品解冻^[9]。但是超声波解冻由于渗透性差、局部温度高和功率高等缺点,对其发展有一定抑制,需要选择适宜的频率和功率,因此,优化超声波解冻工艺在食品工业中的应用变得非常必要^[10]。张绍志等^[11]对冷冻食品进行超声波解冻实验,研究发现超声波解冻后食品局部高温与超声波强度、频率及加载方向有关。Cai等^[12]通过不同解冻方式对红鲷鱼片进行解冻研究,认为超声波真空解冻和微波真空解冻这2种解冻方式可在解冻期间改善鱼片蛋白质的理化性质。因此,可尝试将超声波与其他解冻方式结合,探究解冻新方式。

本试验分别采用0℃冰水混合解冻、4℃冰箱

收稿日期:2019-07-16

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFD0901106);“十二五”国家科技支撑计划项目(2015BAD17B03)

刘宏影,硕士研究生。研究方向:食品加工与安全。E-mail: 284134253@qq.com

通信作者:励建荣,博士,教授。研究方向:水产品贮藏加工与质量安全控制。E-mail: lijr6491@163.com

解冻、20 °C 静水解冻、0 °C 超声波解冻 (160、280、400 W) 的方法对金线鱼进行解冻处理, 旨在探索有效保持金线鱼品质的解冻方式。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

新鲜金线鱼, 平均体长 (20 ± 5) cm, 体质量 95~115 g, 购自锦州市林西街水产市场; 高温蒸煮袋、苏木素-伊红 (HE) 试剂盒、其他试剂 (均为分析纯), 锦州药业 (集团) 器化玻有限公司。

KQ-400KDE 超声波仪, 昆山市超声仪器有限公司; LabRAM HR Evolution 高分辨拉曼光谱仪,

法国 HORIBA Jobin Yvon 公司; Nikon80-i 正置显微镜, 日本尼康公司; TA-XT Plus 质构仪, 英国 SMS 公司; Q2000 差示扫描量热仪, 美国 TA 公司; CM-1850 冰冻切片机, 德国莱卡公司; Model 11036 高精度探针式食品中心温度计, 美国 Delta TRAK 公司。

1.2 样品处理

将新鲜的金线鱼用高温蒸煮袋密封, 置于 -20 °C 下冷冻。在冷冻 72 h 后分别用 6 种不同解冻方式进行解冻 (解冻过程中不破坏鱼体完整性), 如表 1 所示。直至金线鱼的中心温度达到 0 °C 视为解冻完成, 并记录解冻时间, 然后进行各项理化指标

表 1 冻结金线鱼的解冻方式

Table 1 Thawing methods of frozen *Nemipterus virgatus*

| 样品 Samples | 解冻方式 Thawing method | 操作步骤 Steps | 解冻时间/min Thawing time |
|---------------|---|---|--------------------------|
| 1 | 4 °C 冰箱解冻 4 °C refrigerator defrosting | 将冻结的金线鱼放入 4 °C 的冰箱中解冻, 直至中心温度达 0 °C The frozen <i>Nemipterus virgatus</i> was thawed in a refrigerator at 4 °C until the center temperature reached 0 °C | 750 |
| 2 | 20 °C 静水解冻 20 °C water soaking thawing | 将冻结的金线鱼放入 20 °C 的恒温水浴中解冻, 直至中心温度达 0 °C The frozen <i>Nemipterus virgatus</i> was thawed by water soaking thawing at 20 °C until the center temperature reached 0 °C | 43 |
| 3 | 0 °C 冰水混合水浴解冻 0 °C water bath | 将冻结的金线鱼放入 0 °C 的恒温水浴中解冻, 直至中心温度达 0 °C The frozen <i>Nemipterus virgatus</i> was thawed in still water at 0 °C until the center temperature reached 0 °C | 510 |
| 4 | 0 °C 160 W 超声波解冻 0 °C ultrasonic thawing (160 W) | 将冻结的金线鱼放入 0 °C 160 W 超声波环境中解冻, 直至中心温度达 0 °C The frozen <i>Nemipterus virgatus</i> was thawed by ultrasonic of 160 W at 0 °C until the center temperature reached 0 °C | 41 |
| 5 | 0 °C 280 W 超声波解冻 0 °C ultrasonic thawing (280 W) | 将冻结的金线鱼放入 0 °C 280 W 超声波环境中解冻, 直至中心温度达 0 °C The frozen <i>Nemipterus virgatus</i> was thawed by ultrasonic of 280 W at 0 °C until the center temperature reached 0 °C | 27 |
| 6 | 0 °C 400 W 超声波解冻 0 °C ultrasonic thawing (400 W) | 将冻结的金线鱼放入 0 °C 400 W 超声波环境中解冻, 直至中心温度达 0 °C The frozen <i>Nemipterus virgatus</i> was thawed by ultrasonic of 400 W at 0 °C until the center temperature reached 0 °C | 19 |

和性质的测定。

1.3 解冻损失率和蒸煮损失率的测定

参考刘欢等^[13]的方法, 先称取冻结的金线鱼质量, 记为 m_1 , 然后将其放入高温蒸煮袋中, 解冻完成后将袋中的汁液倒掉, 用滤纸吸干鱼体表面水分, 再次称取其质量, 记为 m_2 。每组样品平行测定 3 次。解冻损失率按式(1)进行计算:

$$\text{解冻损失率} = (m_1 - m_2)/m_1 \times 100\% \quad (1)$$

参考程天赋等^[14]的方法, 从各鱼肉样品中称取 (40 ± 5) g 肉样, 记为 m_3 , 放入高温蒸煮袋中并标记组号, 采用 75 °C 水浴 30 min, 之后取出置于室温下

自然冷却, 用滤纸将鱼肉样表面水分吸干, 称其质量, 记为 m_4 。每组样品平行测定 3 次。蒸煮损失率按式(2)进行计算:

$$\text{蒸煮损失率} = (m_3 - m_4)/m_3 \times 100\% \quad (2)$$

1.4 质构特性的测定

参考姜晴晴等^[15]的方法并稍作修改, 将解冻后的金线鱼切成 2 cm × 2 cm × 1 cm 的鱼片, 使用 TA-XT Plus 质构仪对金线鱼肉的质构特性进行测定分析。参数设定如下: 探头型号为 P50, 压缩形变为 50%, 测前速率 1.00 mm/s, 测试速率 1.00 mm/s, 测定距离为鱼片形变量的 50%, 间隔时间

5.00 s, 每组样品平行测定 6 次。

1.5 蛋白热稳定性的测定

参考李慢等^[16]的方法并稍作修改, 准确称取 5~10 mg 肉样, 记录鱼肉样品的精确质量, 放入差示扫描量热仪 (DSC) 配套的铝质样品盘中, 立即用配套铝盖压盖密封, 上机测定, 并以空铝盘作为空白对照。测定条件为: 样品于 20 °C 平衡 1 min, 升温速率 5 °C/min, 分析温度范围 25~90 °C, 记录该升温范围内的吸热变性曲线。每个样品平行测定 3 次, 结果取 3 次平均值。用 TA Universal Analysis 软件来分析不同解冻方式下金线鱼的蛋白质 DSC 图谱中各峰的变性温度以及变性焓的变化。

1.6 拉曼光谱的测定

参考 Shao 等^[17]的方法并稍作修改, 将约 1 g 处理好的样品置于载玻片上并放在拉曼显微镜下, 调节焦距进行测试并收集光谱。参数设定如下: 光谱扫描范围 400~4 000 cm⁻¹, 激光波长 532 nm, 曝光时间 30 s, 分辨率 2 cm⁻¹, 动波长扫描, 每次扫描 6 次。

1.7 组织微观结构的测定

参考李学鹏等^[18]的方法并稍作修改, 将解冻后的鱼肉切成 5 mm×5 mm×5 mm 的块状, -20 °C 冻藏 20 min, 用冷冻切片机切成 8 μm 薄片, 置于载玻片上, 采用苏木素-伊红 (HE) 染色法染色, 在光学显微镜下放大 40 倍观察。

1.8 数据处理

每个样品至少重复测定 3 次。数据绘图采用 ORIGIN9.0 软件, 显著性分析使用 SPSS 19.0 软件的 ANOVA 程序, 显著性水平设置为 $\alpha=0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 不同解冻方式对金线鱼解冻损失率和蒸煮损失率的影响

4 种解冻方式对金线鱼解冻损失和蒸煮损失的影响如表 2 所示。由表 2 可见, 经过不同解冻方式处理的金线鱼, 其解冻损失率和蒸煮损失率均有显著性的差异 ($P<0.05$)。4 °C 冰箱解冻具有较低的解冻损失率 (0.97%) 与蒸煮损失率 (13.36%), 这与 Xia 等^[19]对猪肉的解冻试验中的结果相似, 表明缓慢解冻有利于肌肉组织吸收冰晶融化的水以减少汁液流失。随着超声波功率的增加, 解冻损失率降低, 但在功率达到 400 W 时, 解冻损失率显著增大 ($P<0.05$), 这与马超锋等^[20]的研究结果相似。可

能是由于超声波的汽蚀效应产生微气核, 其可以有效地减少鱼组织遭受的机械损伤, 有助于降低解冻损失率。在一定范围内, 超声波功率越大, 汽蚀效应越显著, 产生的微气核越多^[10]。然而, 当超声功率超过一定阈值时, 机械损伤可能阻碍了微气核的产生, 因此, 解冻损失率在超声波功率达到 400 W 时反而增加。蒸煮损失率与个体差异以及冷冻速率有关, 随着超声波功率的提升, 蒸煮损失率也逐渐升高, 超声波功率达到 400 W 时, 蒸煮损失率显著高于其他样品 ($P<0.05$), 这与解冻损失率的变化结果一致。

表 2 不同解冻方式对冻结金线鱼解冻损失率和蒸煮损失率的影响

Table 2 Effect of different thawings on thawing loss rate and cooking loss rate of frozen *Nemipterus virgatus* %

| 解冻方式 Thawing method | 解冻损失 Thawing loss rate | 蒸煮损失 Cooking loss rate |
|---|------------------------------|------------------------------|
| 4 °C 冰箱解冻 4 °C refrigerator defrosting | 0.97±0.03b | 13.36±1.59b |
| 20 °C 静水解冻 20 °C water soaking thawing | 2.21±0.52a | 16.27±0.67ab |
| 0 °C 冰水混合水解冻 0 °C water bath | 2.01±0.12a | 12.97±0.49b |
| 0 °C 160 W 超声波解冻 0 °C ultrasonic thawing (160 W) | 1.94±0.21a | 15.43±0.79b |
| 0 °C 280 W 超声波解冻 0 °C ultrasonic thawing (280 W) | 1.79±0.32a | 15.65±1.46b |
| 0 °C 400 W 超声波解冻 0 °C ultrasonic thawing (400 W) | 2.23±0.08a | 19.53±0.37a |

注: 同列不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。下同。Note:

In the same column, values with different small letters mean significant difference ($P<0.05$). The same as below.

2.2 不同解冻方式对金线鱼质构特性的影响

通过 TA-XT Plus 质构仪测试可以得到样品的硬度、咀嚼度、弹性等质构特性, 可以直接反映出解冻后鱼肉品质变化^[21], 而不同的解冻方式对质构特性的影响差异明显。如表 3 所示, 0 °C 400 W 超声波解冻的样品硬度 (508.55 g) 和咀嚼度 (157.15 g) 显著高于其他样品 ($P<0.05$), 随着超声波功率的增加, 硬度和咀嚼度呈现逐渐增大的趋势。同样, 谭明堂等^[21]发现鱿鱼经超声波解冻后的咀嚼性、硬度是最好的。Xiong^[22]的研究表明, 在冻结和解冻过程中, 质构特性的下降与蛋白质变性有关, 超声波的解冻速率较快, 蛋白质的变质程度少, 因此也表现出

较好的质构特性。弹性是表示鱼肉撤掉外力之后, 的弹性差异性并不显著, 李天翔等^[23]也得到了类似发生形变的恢复程度。4种解冻方式处理后的样品的结论。

表3 不同解冻方式对冻结金线鱼质构特性的影响

Table 3 Effect of different thawing methods on texture characteristics of frozen *Nemipterus virgatus*

| 解冻方式 Thawing method | 硬度/g Hardness | 咀嚼度 Chewiness | 弹性 Elasticity |
|--|------------------|------------------|------------------|
| 4℃冰箱解冻 4℃ refrigerator defrosting | 265.63±20.99c | 59.19±31.55d | 0.49±0.03b |
| 20℃静水解冻 20℃ water soaking thawing | 326.29±21.07b | 106.95±41.12b | 0.66±0.05a |
| 0℃冰水混合水浴解冻 0℃ water bath | 294.96±21.62bc | 83.06±46.19c | 0.62±0.03a |
| 0℃ 160 W 超声波解冻 0℃ ultrasonic thawing (160 W) | 258.82±29.40c | 90.63±28.28bc | 0.67±0.02a |
| 0℃ 280 W 超声波解冻 0℃ ultrasonic thawing (280 W) | 323.53±29.66b | 98.65±28.85b | 0.65±0.04a |
| 0℃ 400 W 超声波解冻 0℃ ultrasonic thawing (400 W) | 508.55±17.38a | 157.15±29.81a | 0.65±0.01a |

2.3 不同解冻方式对金线鱼蛋白质热稳定性的影响

表4显示了不同解冻方式处理对鱼肉变性温度和变性焓值的影响, 有3个主要吸热区域(峰I、峰II、峰III), T_{max1} (45~50℃)为肌球蛋白头部的最大变性温度, T_{max2} (55~60℃)为肌浆蛋白和肌球蛋白尾部的最大变性温度, T_{max3} (70~75℃)为肌动蛋白的最大变性温度, ΔH 表示蛋白质中变性焓值^[24]。 T_{max} 和 ΔH 值可以反映蛋白质是否发生变性, 值越小表明加热处理使蛋白质变性越容易。如表4所示, 在 T_{max1} 中, 0℃ 400 W 超声波解冻的样品的 T_{max} 和 ΔH 值比其他组样品略高 ($P < 0.05$), 可能是由于高功率超声辅助解冻较快且稳定, 使解冻后的鱼肉蛋白热稳定性较好。而4℃冰箱处理的样品, 因为冷冻的金线鱼和冰箱气温差别较小, 这种解冻过程非常温和, 样品中几乎没有发生化学变化。 ΔH_1 值在 20℃ 静水解冻、0℃ 冰水混合水浴解冻、

0℃ 160 W 超声波解冻和 0℃ 280 W 超声波解冻样品中没有显著差异, 这表明肌球蛋白变性所需能量在各样品之间是相似的。但 0℃ 400 W 超声波解冻样品的 ΔH_1 值与之相比却显著升高, 这表明肌球蛋白中焓变所需的能量较多。

肌球蛋白尾部、肌浆蛋白和肌动蛋白的 T_{max2} 和 T_{max3} 中, 所有样品之间没有极显著差异。结果表明, 金线鱼鱼肉中的肌球蛋白尾部、肌浆蛋白和肌动蛋白比肌球蛋白头部具有更好的热稳定性, 并且在这些解冻过程中几乎没有变性。 ΔH_2 在 6 组样品中没有显著差异, 这表明肌球蛋白尾部、肌浆蛋白变性所需的能量在各样品之间大致相同。对于 ΔH_3 , 除了 0℃ 280 W 超声波解冻样品显著高于其他样品外, 其他样品之间没有显著差异, 这可能是因为聚集和降解首先发生在不稳定的蛋白质中, 其余的则更加稳定。总体来看, 0℃ 280 W 超声波解冻处理能够较好地维持蛋白质热稳定性。

表4 不同解冻方式对冻结金线鱼最大变性温度和焓值的影响

Table 4 Effect of different thawing methods on maximum transition temperatures and enthalpy of frozen *Nemipterus virgatus*

| 解冻方式 Thawing method | 峰I Peak I | | 峰II Peak II | | 峰III Peak III | |
|---|----------------------------------|--------------------|----------------------------------|--------------------|----------------------------------|--------------------|
| | $T_{\text{max1}}/^\circ\text{C}$ | $\Delta H_1/(J/g)$ | $T_{\text{max2}}/^\circ\text{C}$ | $\Delta H_2/(J/g)$ | $T_{\text{max3}}/^\circ\text{C}$ | $\Delta H_3/(J/g)$ |
| 4℃冰箱解冻 4℃ refrigerator defrosting | 49.53±1.07b | 1.39±0.05b | 63.83±0.18a | 0.05±0.01b | 70.83±0.18b | 0.25±0.02c |
| 20℃静水解冻 20℃ water soaking thawing | 47.56±0.09bc | 0.99±0.04c | 64.55±0.52a | 0.05±0.01b | 70.89±0.05b | 0.25±0.02bc |
| 0℃冰水混合水浴解冻 0℃ water bath | 47.59±0.29bc | 0.71±0.09d | 65.08±0.85a | 0.06±0.00ab | 70.63±0.17b | 0.30±0.04ab |
| 0℃ 160 W 超声波解冻 0℃ ultrasonic thawing (160 W) | 48.57±1.99bc | 0.64±0.08d | 59.93±0.36b | 0.04±0.00b | 71.12±0.16b | 0.28±0.02bc |
| 0℃ 280 W 超声波解冻 0℃ ultrasonic thawing (280 W) | 47.03±0.34c | 0.87±0.10c | 61.08±0.89b | 0.07±0.01ab | 72.64±0.42a | 0.34±0.02a |
| 0℃ 400 W 超声波解冻 0℃ ultrasonic thawing (400 W) | 52.82±0.52a | 1.57±0.04a | 65.58±1.76a | 0.08±0.00a | 70.95±0.47b | 0.24±0.01c |

2.4 不同解冻方式对金线鱼蛋白质二级结构的影响

拉曼光谱在 $1600\text{--}1700\text{ cm}^{-1}$ 处的条带来源于 C—N 和 C=O 键的酰胺 I 带伸缩振动, 与蛋白质骨架构象有关^[12]。光谱包括 4 种二级结构, α -螺旋 ($1665\text{--}1680\text{ cm}^{-1}$)、 β -折叠 ($1665\text{--}1680\text{ cm}^{-1}$)、酰胺 III ($1600\text{--}1620\text{ cm}^{-1}$) 和无规则卷曲 ($1660\text{--}1665\text{ cm}^{-1}$)。利用二阶求导和去卷积对酰胺 I 带的谱图进行分峰处理, 并通过曲线拟合的方法, 对不同解冻方式处理的金线鱼的蛋白质二级结构进行定量分析。500~2 000 cm^{-1} 的拉曼光谱如图 1 所示。表 5 为肌原纤维蛋白 4 种二级结构的相对含量计算

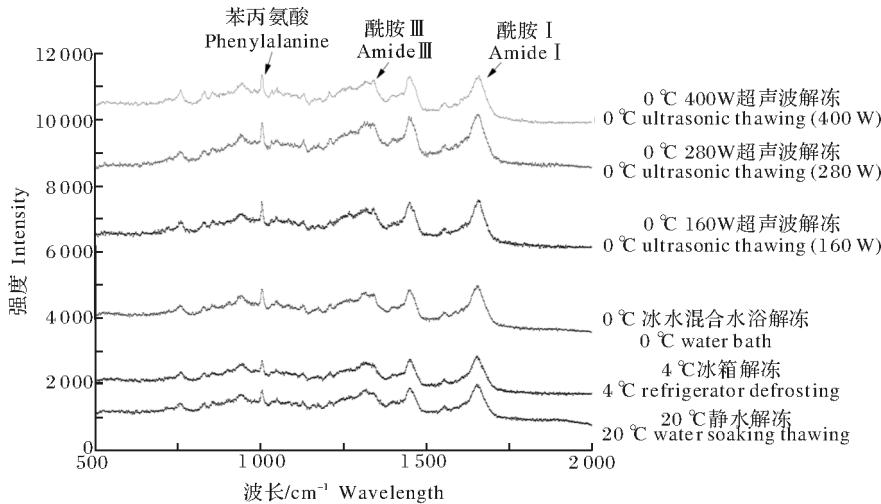


图 1 不同解冻方式下冻结金线鱼肌原纤维的拉曼光谱图

Fig.1 Raman spectroscopy of frozen *Nemipterus virgatus* myofibrillar protein by different thawing methods

结果。

在蛋白质变性过程中, α -螺旋转变为 β -折叠和 β -转角, 然后 β -折叠转变为无规则卷曲, 这主要因为氢键的破坏和疏水性的增加。 α -螺旋是一种规则结构, 其含量越多, 二级结构就越稳定^[25]。如表 5 所示, 0 °C 280 W 超声波解冻的样品中的 α -螺旋的含量高于其他样品, 二级结构较稳定; 20 °C 静水解冻样品低于其他样品, 二级结构较不稳定。蛋白中更多的无规则卷曲和 β -转角通常反映出更松散的结构。 0 °C 280 W 超声波解冻和 0 °C 400 W 超声波解冻样品中无规则卷曲和 β -转角含量低于其他组样品。 0 °C 160 W 超声波解冻和 20 °C 静水解冻的这 2 种二级结构含量较高。这表明 0 °C 280 W 超声波解冻和 0 °C 400 W 超声波解冻处理可以更好地维持金线鱼蛋白的结构, 而 0 °C 160 W 超声波解冻和 20 °C 静水解冻的蛋白结构更为松散, 这与组织微观结构的结果一致(图 2)。随着超声波功率提高, 无规则卷曲含量有下降的趋势。冰晶被超声波融化主要是由于热、机械和空化效应。超声波通过振动能量被冰晶吸收并加热样品, 从而加速解冻, 除局部加

cm^{-1})、 β -转角 (1680 cm^{-1}) 和无规则卷曲 ($1660\text{--}1665\text{ cm}^{-1}$)。利用二阶求导和去卷积对酰胺 I 带的谱图进行分峰处理, 并通过曲线拟合的方法, 对不同解冻方式处理的金线鱼的蛋白质二级结构进行定量分析。500~2 000 cm^{-1} 的拉曼光谱如图 1 所示。表 5 为肌原纤维蛋白 4 种二级结构的相对含量计算

热外, 超声波需要高功耗, 当超声波穿透冷冻食品时, 大部分能量会消失^[13]。通过低温与超声波结合, 可以在较短的时间内保持较低温度, 从而降低功率需求并维持更稳定的蛋白质二级结构。

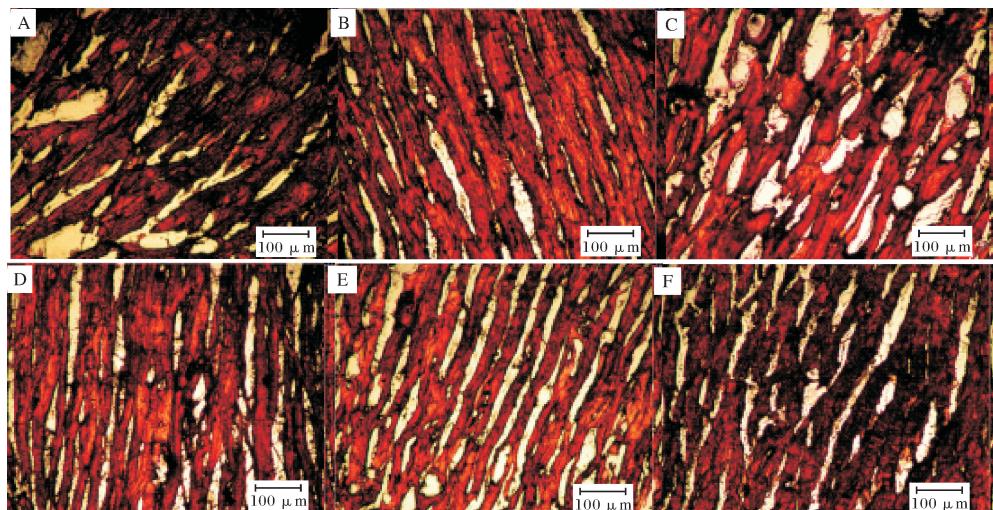
2.5 不同解冻方式对金线鱼组织微观结构的影响

图 2 是利用光学显微镜观察到的不同解冻方式处理后金线鱼的肌肉组织微观结构图。可以看出, 不同解冻方式处理的金线鱼肌原纤维都会出现弯折和断裂现象, 肌束间的空隙也会有不同程度的增大。经过 0 °C 280 W 超声波解冻和 0 °C 冰水混合水浴解冻后的样品, 肌束排列紧密, 肌原纤维较为完整、极少断裂, 可能是低温对蛋白酶活性有抑制作用, 较快的解冻速率降低了对肌原纤维的破坏。金线鱼经过 4 °C 冰箱解冻后肌束之间的间隙变大, 20 °C 静水解冻的肌原纤维大量断裂, 可能是由于冰箱解冻时间过长、静水温度较高所致, 而且金线鱼长时间暴露在空气和静水中, 结构受到一定破坏, 蛋白质出现一定程度变性。 0 °C 160 W 超声波解冻和 0 °C 400 W 超声波解冻样品中肌原纤维排列紊乱并出现大量断裂和间隙, 这与 Li 等^[26] 试验结果相似, 前者

表5 不同解冻方式对金线鱼肌原纤维蛋白二级结构含量的影响

Table 5 Effect of different thawings on secondary structure content of frozen *Nemipterus virgatus*

| 解冻方式 Thawing method | α -螺旋 α -Helix | β -折叠 β -Sheet | β -转角 β -Turn | 无规则卷曲 Random coil |
|---|---------------------------------|-------------------------------|------------------------------|----------------------|
| 4 °C 冰箱解冻 4 °C refrigerator defrosting | 35.39±2.28bc | 22.73±1.67a | 12.54±0.71ab | 29.34±2.36b |
| 20 °C 静水解冻 20 °C water soaking thawing | 31.78±1.19c | 23.13±1.56a | 15.50±2.05a | 29.60±1.51b |
| 0 °C 冰水混合水浴解冻 0 °C water bath | 34.53±1.95bc | 23.19±1.07a | 10.65±1.90b | 30.62±1.80ab |
| 0 °C 160 W 超声波解冻 0 °C ultrasonic thawing (160 W) | 33.62±1.87bc | 21.88±2.48a | 9.97±1.46b | 34.53±1.91a |
| 0 °C 280 W 超声波解冻 0 °C ultrasonic thawing (280 W) | 39.17±2.02a | 24.22±1.44a | 8.81±1.64b | 27.80±2.35b |
| 0 °C 400 W 超声波解冻 0 °C ultrasonic thawing (400 W) | 38.52±2.90ab | 22.88±1.30a | 11.53±1.34b | 27.07±2.37b |



A: 0 °C 160 W 超声波解冻; B: 0 °C 280 W 超声波解冻; C: 0 °C 400 W 超声波解冻; D: 0 °C 冰水混合水浴解冻; E: 4 °C 冰箱解冻; F: 20 °C 静水解冻。A: 0 °C 160 W ultrasonic thawing; B: 0 °C 280 W ultrasonic thawing; C: 0 °C 400 W ultrasonic thawing; D: 0 °C water bath; E: 4 °C refrigerator defrosting; F: 20 °C water soaking thawing.

图2 不同解冻方式对冻结金线鱼组织微观结构的影响(40×)

Fig.2 Effect of different thawing methods on muscular tissue of frozen *Nemipterus virgatus* (40×)

可能是过长的解冻时间伴随着超声波的空化效应对样品产生了较大的破坏,后者可能是过高的超声波功率,超出了肌原纤维可容纳范围,导致其断裂并产生间隙^[27]。因此,可以解释拉曼光谱的结果(图1),减少了纤维束网络的约束以及通过降低氢键的作用力而导致二级结构的转化。

3 讨 论

不同解冻方法会对金线鱼的解冻损失率、蒸煮损失率、质构特性、蛋白质热稳定性、蛋白质二级结

构以及组织微观结构产生不同程度的影响,本文结果表明,4 °C 冰箱解冻的金线鱼具有较小的解冻损失率与蒸煮损失率以及较好的热稳定性,但是鱼体长时间暴露在空气中,表现出在微观结构等其他指标上并不理想;0 °C 400 W 超声波解冻的金线鱼硬度和咀嚼度最高,热稳定性好,但是过高的超声波功率,超出了肌原纤维可容纳范围,导致其严重断裂并产生间隙,同时解冻损失率和蒸煮损失率最大;0 °C 160 W 超声波解冻和 20 °C 静水解冻的金线鱼蛋白质二级结构松散,肌原纤维破坏程度高,这 2 种解冻

方式在品质保持上并不理想;0℃冰水混合解冻后样品肌原纤维较为完整,其他测定结果与另5组相比并不突出;0℃280W超声波解冻后的金线鱼肌束排列紧密,肌原纤维蛋白的二级结构变化较小,蛋白质热稳定性良好,肌肉组织结构保持最好。

综上所述,选用合适的解冻方式对鱼体品质的保持具有重要作用,通过低温与超声波结合,可以短时间内保持较低的温度,以降低功率需求,所以0℃超声波解冻(280W)是一种较为理想的金线鱼解冻方式。

参 考 文 献

- [1] 宁平,吴仁协,刘静.中国金线鱼属鱼类分类研究进展[J].广东海洋大学学报,2011,31(3):99-102.
- [2] 农业农村部渔业渔政管理局.中国渔业统计年鉴[M].北京:中国农业出版社,2019.
- [3] HAO Q, SUN Y X, XU X R, et al. Geographical distribution and risk assessment of persistent organic pollutants in golden threads (*Nemipterus virgatus*) from the northern South China Sea[J]. Ecotoxicology, 2015, 24(7/8): 1593-1600.
- [4] MOHANTY B P, GANGULY S, MAHANTY A, et al. DHA and EPA content and fatty acid profile of 39 food fishes from India[J/OL]. BioMed research international, 2016, 2016: 1-14 [2019-07-16]. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/4027437>.
- [5] ALABDULKARIM B, BAKEET Z A N, ARZOO S. Role of some functional lipids in preventing diseases and promoting health[J]. Journal of King Saud University-Science, 2012, 24 (4): 319-329.
- [6] HARRIS W S, MILLER M, TIGHE A P, et al. Omega-3 fatty acids and coronary heart disease risk: clinical and mechanistic perspectives[J]. Atherosclerosis, 2008, 197(1): 12-24.
- [7] MURRAY M, HRAIKI A, BEBAWY M, et al. Anti-tumor activities of lipids and lipid analogues and their development as potential anticancer drugs[J]. Pharmacology & therapeutics, 2015, 150(74): 109-128.
- [8] 姜晴晴.冻融过程中带鱼脂肪和蛋白氧化及其对肌肉品质影响的研究[D].杭州:浙江大学,2015.
- [9] LI X X, SUN P, JIA J Z, et al. Effect of low frequency ultrasound thawing method on the quality characteristics of Peru squid (*Dosidicus gigas*) [J]. Food science and technology international, 2019, 25(2): 171-181.
- [10] 谷小慧.超声波对冷冻肉品质影响的研究[D].大连:大连工业大学,2013.
- [11] 张绍志,陈光明,尤鹏青.基于超声波的食品解冻技术研究[J].农业机械学报,2003,34(5): 99-101.
- [12] CAI L, CAO M, CAO A, et al. Ultrasound or microwave vacuum thawing of red seabream (*Pagrus major*) fillets[J/OL]. Ultrasonics sonochemistry, 2018, 47: 122-132 [2019-07-16]. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.05.001>.
- [13] 刘欢,陈雪,宋立玲,等.不同解冻方式对鲐鱼鲜度及品质的影响[J].食品科学,2016,37(10): 259-265.
- [14] 程天赋,俞龙浩,蒋奕,等.基于低场核磁共振探究解冻过程中肌原纤维水对鸡肉食用品质的影响[J].食品科学,2019,40(9): 16-22.
- [15] 姜晴晴,吴春华,董开成,等.解冻方式对带鱼蛋白性质及肌肉品质的影响[J].中国食品学报,2016,16(11): 17-27.
- [16] 李慢,吕瑞玲,王丹丽,等.中国对虾超声辅助解冻的数值模拟及对蛋白变性的影响[J].食品科学,2018,39(21): 94-101.
- [17] SHAO J H, ZOU Y F, XU X L, et al. Evaluation of structural changes in raw and heated meat batters prepared with different lipids using Raman spectroscopy[J]. Food research international, 2011, 44(9): 2955-2961.
- [18] 李学鹏,王祺,周凯,等.丙烯醛氧化对大黄鱼肌肉组织和肌原纤维蛋白结构性质的影响[J].现代食品科技,2014,30(10): 1-7.
- [19] XIA X, KONG B, 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.
- [20] 马超峰,关志强,李敏,等.超声波解冻对壳聚糖涂膜罗非鱼片的水分分布及品质相关性研究[J].食品工业科技,2017,38(2): 332-336,369.
- [21] 谭明堂,谢晶,王金锋.解冻方式对鱿鱼品质的影响[J].食品科学,2019,40(13): 94-101.
- [22] XIONG Y L. Antioxidations in muscle foods[M]. New York: John Wiley and Sons, Inc, 2000: 85-111.
- [23] 李天翔,包海蓉,王锡昌,等.不同解冻方式对鲤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.
- [24] CAO M J, CAO A L, WANG J, et al. Effect of magnetic nanoparticles plus microwave or far-infrared thawing on protein conformation changes and moisture migration of red seabream (*Pagrus major*) fillets[J/OL]. Food chemistry, 2018, 266: 498-507 [2019-07-16]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.06.057>.
- [25] CAI L Y, ZHANG W D, CAO A L, et al. Effects of ultrasonics combined with far infrared or microwave thawing on protein denaturation and moisture migration of *Sciaenops ocellatus* (red drum) [J/OL]. Ultrasonics sonochemistry, 2019, 55: 96-104 [2019-07-16]. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.03.017>.
- [26] LI X X, SUN P, MA Y Y, et al. Effect of ultrasonic thawing on the water holding capacity, physico-chemical properties, and structure of frozen tuna fish (*Thunnus tonggol*) myofibrillar proteins[J]. Journal of the science of food and agriculture,

2019,99(11): 5083-5091.

[27] BERTRAM H C, WHITTAKER A K, ANDERSON H J, et al.

Visualization of drip channels in meat using NMR microimaging[J]. Meat science, 2004, 68(4): 667-670.

Effect of different thawing methods on thermal stability and tissue structure of myofibrin of *Nemipterus virgatus*

LIU Hongying¹ MA Yingying¹ LI Xiuxia¹ LI Jianrong¹ GUO Xiaohua² YU Jianyang³

1. College of Food Science and Technology, Bohai University, Jinzhou 121013, China;

2. Shandong Meijia Group Co. Ltd., Rizhao 276800, China;

3. Rongcheng Taixiang Food Co. Ltd., Weihai 264309, China

Abstract In order to study the effects of different thawing methods on the quality of *Nemipterus virgatus*, 0 °C water bath, 4 °C refrigerator defrosting, 20 °C water soaking thawing and 0 °C ultrasonic thawing (160 W, 280 W, 400 W) were individually used to thaw *Nemipterus virgatus* that was stored at -20 °C. Thawing loss rate, cooking loss rate and textural properties were determined. Meanwhile, differential scanning calorimetry (DSC) was used to study protein thermal stability. Raman spectra was used to analyse to protein secondary structure. Microstructure of muscle tissue was observed by optical microscope. The results indicated that the thawing loss rate of *Nemipterus virgatus* thawed in 4 °C refrigerator was the lowest, followed by 0 °C ultrasonic (280 W) thawing. After thawing in 0 °C ultrasonic (280 W), the microstructure of *Nemipterus virgatus* was greatly maintained, the protein showed good thermal stability, and the secondary structure of myofibrillar protein changed little. Although protein thermal stability and textured property of *Nemipterus virgatus* after the 0 °C ultrasonic (400 W) thawing were the best, myofibrils were severely broken and the gap of the muscle fiber bundle in microstructure became bigger due to excessively high power ultrasonic waves. Among 4 kinds of thawing methods comprehensively, 0 °C ultrasonic (280 W) thawing could maintain the quality of *Nemipterus virgatus* and exert the least damage to *Nemipterus virgatus* muscle. It is a recommended method for rapid thawing *Nemipterus virgatus*.

Keywords *Nemipterus virgatus*; thawing methods; myofibrillar protein; thermal stability; histological structure; texture characteristics; thawing loss

(责任编辑:赵琳琳)