不同质量分数NaCl和$CaCl_2$盐溶液解冻对金枪鱼品质的影响

余文晖[1,2]，王金锋[1,2,3]，谢 晶[1,2,3,4,*]
（1.上海海洋大学食品学院，上海 201306；2.上海冷链装备性能与节能评价专业技术服务平台，上海 201306；
3.上海水产品加工及贮藏工程技术研究中心，上海 201306；
4.食品科学与工程国家级实验教学示范中心（上海海洋大学），上海 201306）

摘 要：采用不同质量分数NaCl和$CaCl_2$溶液对金枪鱼鱼块进行解冻，测定并分析解冻时间、a^*值、盐溶性蛋白含量、质构等指标，并对解冻后金枪鱼鱼肉的微观组织结构进行观察比较，研究不同质量分数盐溶液解冻对金枪鱼品质的影响。结果表明：对于同类盐溶液，随着盐溶液质量分数增加，金枪鱼鱼块的解冻速率和渗盐量增加。经质量分数3% $CaCl_2$解冻后的金枪鱼鱼肉保水性、盐溶性蛋白含量较高，质构最理想，微观组织结构最完整。综上，采用质量分数3% $CaCl_2$解冻，能够减轻解冻过程对金枪鱼鱼肉的影响，维持金枪鱼的新鲜度。

关键词：金枪鱼；盐溶液解冻；盐溶性蛋白；渗盐量；微观组织结构

Effects of Thawing in NaCl and $CaCl_2$ Solutions at Different Concentrations on the Quality of Frozen Tuna

YU Wenhui[1,2], WANG Jinfeng[1,2,3], XIE Jing[1,2,3,4,*]
(1. College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Shanghai Professional Technology Service Platform on Cold Chain Equipment Performance and Energy Saving Evaluation, Shanghai 201306, China; 3. Shanghai Engineering Research Center of Aquatic Product Processing & Preservation, Shanghai 201306, China; 4. National Experimental Teaching Demonstration Center for Food Science and Engineering (Shanghai Ocean University), Shanghai 201306, China)

Abstract: NaCl and $CaCl_2$ solutions at different concentrations were used to thaw frozen tuna pieces. In order to explore the effects of the thawing methods on tuna quality, the thawing time, color difference, salt soluble protein content and texture were analyzed, and the microstructure of tuna meat after thawing was observed. The results showed that with the increase of salt concentration, the thawing rate and salt infiltration rate increased gradually for each salt. Tuna thawed in 3% $CaCl_2$ had good water retention, desired salt-soluble protein content and texture, and its microstructure was best maintained. To sum up, thawing in 3% $CaCl_2$ had a reduced effect on the quality and could maintain better freshness of tuna.

Keywords: tuna; thawing in salt solutions; salt soluble protein; salt infiltration; microstructure
DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190303-026
中图分类号：TS254.4 文献标志码：A 文章编号：1002-6630（2019）17-0240-07
引文格式：
余文晖, 王金锋, 谢晶. 不同质量分数NaCl和$CaCl_2$盐溶液解冻对金枪鱼品质的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(17): 240-246. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190303-026. http://www.spkx.net.cn
YU Wenhui, WANG Jinfeng, XIE Jing. Effects of thawing in NaCl and $CaCl_2$ solutions at different concentrations on the quality of frozen tuna[J]. Food Science, 2019, 40(17): 240-246. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190303-026. http://www.spkx.net.cn

收稿日期：2019-03-03
基金项目：“十三五”国家重点研发计划项目（2018YFD0400605）；现代农业产业技术体系建设专项（CARS-47）；上海市科委公共服务平台建设项目（17DZ2293400）
第一作者简介：余文晖（1994—）（ORCID: 0000-0003-1144-2237），女，硕士研究生，研究方向为动力工程。E-mail: strfor@163.com
*通信作者简介：谢晶（1968—）（ORCID: 0000-0002-0507-4136），女，教授，博士，研究方向为食品冷冻冷藏。E-mail: jxie@shou.edu.cn

金枪鱼味道鲜美营养丰富，具有高蛋白、低脂肪的特点，经济和食用价值很高。为了保持金枪鱼的新鲜度，金枪鱼在捕获之后一般在－55 ℃下低温贮藏[1-2]。金枪鱼冻藏期间处于完全冻结状态，细胞内生物化学反应基本停滞，对其新鲜度影响较小。金枪鱼在加工或食用之前，必须进行解冻，解冻过程对其色泽、质地和营养价值等影响巨大，因此寻找合适的解冻方式对保持金枪鱼的品质十分重要。

目前，对金枪鱼解冻方式研究集中在空气解冻、低频解冻、微波解冻等常用的解冻方式[3-4]，但空气解冻时间长、效果差；低频解冻对鱼块平整性要求较高，微波解冻存在局部过热的问题[5-7]。刘燕[8]比较了空气解冻、冷藏库解冻、温盐水-冷藏库组合解冻等解冻方式对金枪鱼解冻后品质的影响，发现温盐水-冷藏库解冻能更好地保持金枪鱼的口感和色泽，但存在解冻时间较长的缺陷。包海蓉等[9]对比研究了冰盐水组合冷藏室解冻和传统冷藏室解冻方式对金枪鱼品质的影响，通过测定解冻速率、质构、*K*值等指标，发现采用冰盐水组合冷藏室解冻比传统冷藏室解冻能够缩短近一半时间，解冻后的各项品质指标都优于冷藏室解冻。王锡昌等[10]对温盐水-冷藏库组合解冻工艺进行了优化，通过对红度和咀嚼性的比较，确定盐水质量分数和盐水温度是影响金枪鱼解冻的主要因素，并通过正交试验最终得出40 ℃、质量分数3%盐水条件下解冻效果最好。与其他解冻方式相比，经盐溶液解冻后的金枪鱼色泽鲜亮，富有弹性，具有一定的抑菌作用，但若解冻的盐溶液质量分数过低，会存在解冻时间过长、可溶性物质流失等问题[11]。因此选用合适的盐溶液质量分数和种类对解冻后的金枪鱼品质有着直接的影响。

盐溶液解冻能够提高解冻速率，但盐溶液质量分数和盐溶液种类会对金枪鱼的品质和口感具有一定影响。因此，本实验通过测定金枪鱼经不同种类和质量分数盐溶液解冻后，其保水性、盐溶性蛋白含量、色差等指标，并对微观组织结构进行观察，深入研究盐溶液质量分数和盐溶液种类对金枪鱼品质的影响，获得最佳质量分数盐溶液解冻工艺。本研究为金枪鱼盐溶液解冻的实际应用提供理论参考，也为进一步的研究提供新的思路。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

实验金枪鱼购自浙江丰汇远洋渔业有限公司，其捕捞后经超低温速冻、真空包装后贮藏于－50 ℃条件。

氯化钠、无水氯化钙、二甲苯、无水乙醇、体积分数10%的福尔马林、切片石蜡，苏木精染色液、伊红染色液、改良型Bradford法蛋白浓度测定试剂盒、10×磷酸盐缓冲液　生工生物工程（上海）股份有限公司。

1.2 仪器与设备

DC系列低温恒温槽　上海方瑞仪器有限公司；H-2050R型台式高速冷冻离心机　湖南湘仪实验室仪器开发有限公司；F2640A型多路采集热电偶　上海弗鲁克流体机械制造有限公司；UV-2100型紫外-可见分光光度计　尤尼柯（上海）仪器有限公司；CM1100冷冻切片机　德国徕卡测量系统有限公司；Eclipse E200生物显微镜　日本尼康仪器有限公司；PQ001台式脉冲核磁共振（nuclear magnetic resonance，NMR）分析仪　上海纽迈公司。

1.3 方法

1.3.1 原料解冻处理

本实验分为7 组，将每块质量约400 g的金枪鱼鱼块完全浸没于去离子水（对照）和质量分数分别为2%、3%、6%的NaCl和$CaCl_2$溶液中，每组体积约500 mL，烧杯放置于低温恒温槽内，温度保持在20 ℃，采用F2640A型多路采集热电偶对鱼块中心温度进行检测，每秒记录一次数据，当金枪鱼鱼块中心温度到达5 ℃时即为解冻结束，记录从－50 ℃升温至5 ℃所需要的时间，即为解冻时间。

1.3.2 指标测定

1.3.2.1 渗盐量测定

渗盐量表示单位质量鱼块渗入盐分的质量，参考徐慧文等[12]的方法测定渗盐量。

1.3.2.2 解冻损失率测定

参考Bedane等[13]的方法测定金枪鱼鱼块的解冻损失率。

1.3.2.3 持水力测定

参照Saito等[14]的方法并稍作修改。称取2 g左右解冻后的金枪鱼鱼肉，质量记为m_1/g，用滤纸包裹后4 ℃、5 000 r/min冷冻离心，去掉滤纸，称量滤纸质量，记为m_2/g，持水力按下式计算。实验重复3 次取平均值。

$$持水力/\%=\frac{m_2}{m_1}\times 100$$

1.3.2.4 蒸煮损失率测定

参考Li Dapeng等[15]的方法测定蒸煮损失率。

1.3.2.5 质构测定

参考李念文等[16]的方法并稍作修改。将解冻后的鱼块切成1 cm×1 cm×2 cm的方块，每组实验各取6 份样品，测定后取平均值，对样品进行2 次压缩测试，取弹性、硬度、咀嚼性3 个指标。

1.3.2.6 LF-NMR测定

参考Wang Shuo等[17]的方法对金枪鱼进行低场核磁共振（low field-NMR，LF-NMR）分析，将金枪鱼鱼肉切成规格为2 cm×1 cm×2 cm大小的方块，放入磁场中心位置的射频线圈中心，使用CPMG序列，设置参数为：

采样宽带SW＝100 kHz、重复采样时间为4 000 ms、回波时间TE＝0.500、回波个数NECH＝8 000、重复采样次数2 次，采用分析软件进行迭代反演。

1.3.2.7 色泽测定

将解冻后的金枪鱼鱼肉切块（1 cm×1 cm×2 cm）采用色差仪测定正反两面的红度（*a**值），每面测定2 次，重复实验3 次取平均值。

1.3.2.8 盐溶性蛋白含量测定

参考Niu Lihong等[18]的肌原纤维蛋白提取方法并稍作修改。称取2 g的金枪鱼肉，加入18 mL蒸馏水，均质（14 000 r/min、1 min）后将溶液冷冻离心10 min（10 000 r/min、4 ℃），过滤获得沉淀，再次加入18 mL质量分数为3%的NaCl溶液，均质（14 000 r/min、1 min），冷冻离心10 min（10 000 r/min、4 ℃），取上清液。蛋白质含量测定均采用Bradford法蛋白浓度测定试剂盒，每组实验均重复3 次。

1.3.2.9 微观结构观察

参考汤元睿等[19]的方法并稍作修改。将解冻后的金枪鱼切成4 mm×4 mm×4 mm大小鱼块，置于体积分数5%福尔马林固定液中静置24 h，采用不同体积分数乙醇进行梯度脱水（70%→85%→90%→95%→100%）；对脱水后的鱼块进行二甲苯透明处理，之后浸蜡包埋，制成切片（厚度4 μm）；切片经苏木精-伊红（hematoxylin and eosin，HE）法染色后，采用Nikon-E200光学显微镜进行观察（10×10 倍），并拍摄典型组织图像。

1.4 数据处理与分析

数据均采用SPSS Statistic 20.0软件进行统计分析，结果采用Tukey法检验显著差异性，差异显著水平P＜0.05。使用Origin 8.5软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同解冻方式对金枪鱼解冻时间的影响

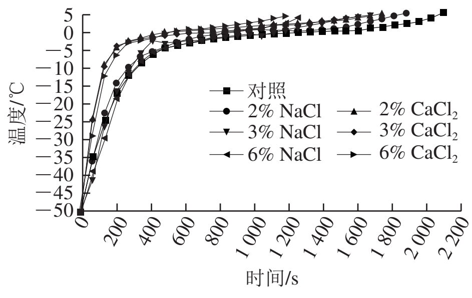
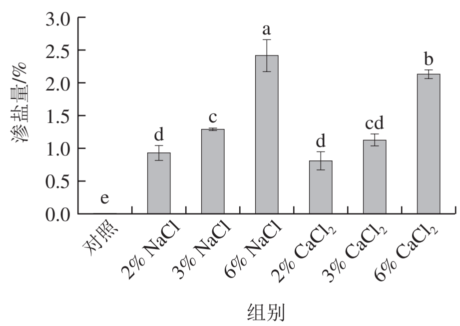


图 1 不同质量分数盐溶液解冻金枪鱼的温度曲线

Fig. 1 Temperature curves of tuna thawing in salt solutions at different concentrations

图1所示是金枪鱼鱼块在20 ℃的低温恒温槽中解冻时鱼肉中心温度的变化情况。在－50～－10 ℃这一阶段，金枪鱼鱼块的解冻速率较快，肌肉中的水分主要以冰晶的形式存在，冰晶热导率较高，属于显热升温阶段，鱼块中心温度上升迅速[20]。在－10～5 ℃这一阶段，冰晶开始逐渐融化。当温度接近0 ℃时，会发生物理相变，在物理相变的过程中，吸收大量热量，解冻速率变缓，耗时较长[21]，温度上升变慢，冰晶大量融化，相变完成后，冰晶全部融化，冷冻速率再次上升[22]。解冻过程中，冰晶的融化会对细胞的完整性造成一定破坏，缩短冰晶融化时间对于维持解冻后金枪鱼的品质十分重要[23]。与对照去离子水相比，盐溶液解冻能够明显缩短解冻时间，盐溶液质量分数越高，解冻速率越快，同种质量分数下的$CaCl_2$盐溶液导热系数更高，解冻速率更快，可以有效减少解冻过程中冰晶融化对金枪鱼品质的影响。

2.2 不同解冻方式对金枪鱼渗盐量的影响



小写字母不同表示差异显著（P＜0.05）。下同。

图 2 不同质量分数盐溶液解冻对金枪鱼渗盐量的影响

Fig. 2 Effect of thawing in salt solutions at different concentrations on salt infiltration in tuna

金枪鱼在盐溶液中解冻会增加鱼肉中盐分的含量，渗盐量过高会对解冻后金枪鱼鱼肉的口感和风味造成一定的影响[19,24]。由图2可以看出，随着盐分质量分数的增加，金枪鱼鱼肉的渗盐量逐渐增加，说明盐溶液质量分数对金枪鱼鱼肉的渗盐量影响较大。质量分数为2%、3%的NaCl溶液组渗盐量分别为0.9%、1.2%，当盐溶液质量分数增加到6%时，渗盐量增加至2.4%，说明渗盐量与盐溶液质量分数呈正相关。相同质量分数下，经$CaCl_2$溶液解冻后的金枪鱼鱼块，渗盐量始终低于经NaCl溶液解冻后的金枪鱼鱼块。因此，采用$CaCl_2$解冻能够减少盐分的渗入，这与徐慧文等[12]的研究结果一致。

2.3 不同解冻方式对金枪鱼保水性的影响

2.3.1 不同解冻方式对金枪鱼蒸煮损失率、解冻损失率和持水力的影响

金枪鱼鱼肉中含有的大量水分是金枪鱼鱼肉的重要组成部分，其含量和分布状态与蛋白质、色泽、质构等方面紧密相关[25]。蒸煮损失率、解冻损失率和持水力是衡量金枪鱼蛋白质变性程度的重要指标[26]。表1所示为不

同质量分数盐溶液解冻对金枪鱼保水性的影响。7 种解冻方式中，对照组保水性较差，解冻损失率和蒸煮损失率较高，这是因为解冻损失率和蒸煮损失率与鱼肉的完整性相关，可能去离子水解冻后的金枪鱼鱼肉所受损伤较大，汁液流失严重[27]。

表 1　不同质量分数盐溶液解冻对金枪鱼保水性的影响

Table 1　Effect of thawing in salt solutions at different concentrations on water-holding capacity of tuna

指标	对照	2% NaCl	3% NaCl	6% NaCl	2% $CaCl_2$	3% $CaCl_2$	6% $CaCl_2$
蒸煮损失率/%	22.36 ± 1.30^{bc}	33.49 ± 0.45^{a}	15.11 ± 5.12^{c}	18.18 ± 1.84^{bc}	24.41 ± 4.05^{b}	14.39 ± 2.04^{c}	19.99 ± 1.32^{bc}
解冻损失率/%	7.96 ± 0.24^{a}	6.15 ± 0.33^{b}	3.34 ± 1.20^{d}	5.28 ± 0.76^{bc}	4.31 ± 0.21^{c}	2.44 ± 0.55^{d}	3.09 ± 0.29^{d}
持水力/%	72.81 ± 2.92^{ab}	80.63 ± 6.96^{a}	76.14 ± 7.37^{ab}	74.22 ± 2.32^{ab}	81.92 ± 1.34^{a}	78.33 ± 2.49^{ab}	67.17 ± 3.42^{c}

注：同行肩标小写字母不同表示差异显著（P<0.05）。

相同质量分数下，使用$CaCl_2$溶液解冻的金枪鱼鱼肉解冻损失率更低，持水力更高，这是因为$CaCl_2$溶液的熔点更低，解冻速率更高。余小领等[28]对冻结猪肉进行不同速率解冻研究后也发现，解冻速率越大，汁液损失率越小。在所有解冻方式中，盐溶液质量分数为3%时，解冻后的金枪鱼解冻损失率和蒸煮损失率最小。盐溶液质量分数过高会造成细胞失水，过低会造成金枪鱼鱼肉细胞内外的压差不均衡，使得细胞膜破裂或失水，溶质外流，造成持水力下降、解冻损失率和蒸煮损失率增加。因此，选用3% $CaCl_2$盐溶液解冻金枪鱼能够有效降低金枪鱼解冻损失率，减少解冻过程中的营养损失。

2.3.2　不同解冻方式对金枪鱼含水量的影响

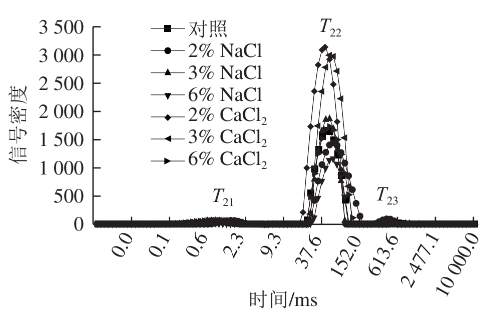


图 3　不同质量分数盐溶液解冻后的金枪鱼横向弛豫时间T_2的分布

Fig. 3　Distribution of transverse relaxation time (T_2) of tuna after thawing in salt solutions at different concentrations

LF-NMR技术利用固定磁距的原子核（^{1}H）在磁场的作用下发生能量交换的原理，对样品组分进行分析，通过测量^{1}H质子的横向弛豫时间（T_2）在肉制品中的衰减规律来测定样品中不同状态水分的含量，水分含量以曲线所对应的峰面积来表示[29-30]。金枪鱼鱼肉中的水分种类根据活动状态可以分为结合水、不易流动水和自由水3 种形式，其中弛豫时间在0～10 ms的峰（T_{21}）代表结合水，10～150 ms的峰（T_{22}）代表不易流动水，150～1 245 ms的峰（T_{23}）表示自由水[31]。如图3所示，盐溶液经3% $CaCl_2$盐溶液解冻后的金枪鱼总峰面积最大，含水量最高；NaCl溶液解冻后的金枪鱼含水量随着质量分数的增加逐渐降低，溶液质量分数增大会大幅降低金枪鱼鱼肉中的含水量。

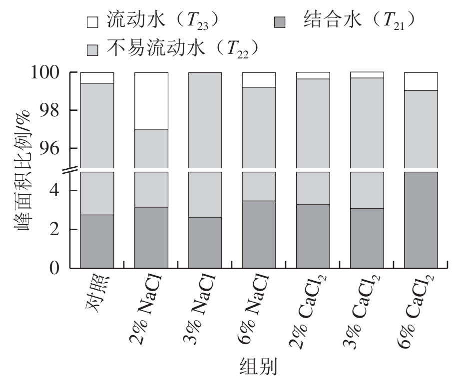
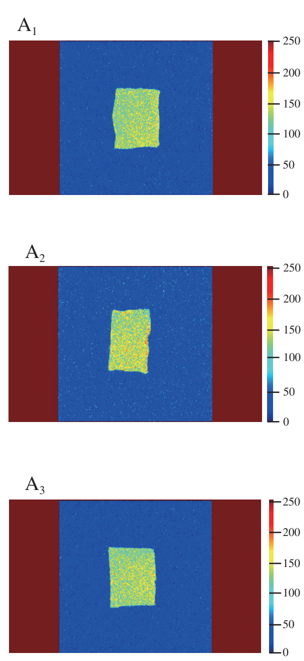
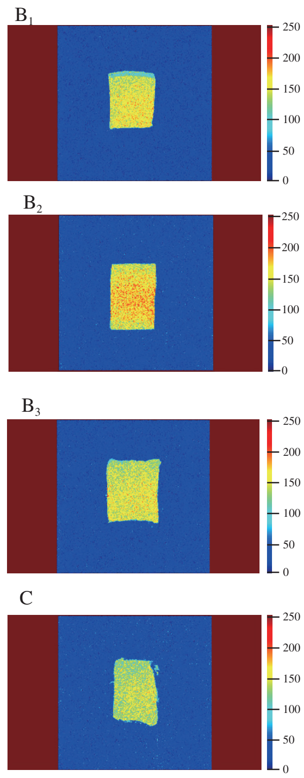


图 4　不同质量分数盐溶液解冻对金枪鱼横向弛豫时间T_2峰分布的影响

Fig. 4　Effect of thawing in salt solutions at different concentrations on T_2 peak distribution in tuna

图4显示了金枪鱼鱼肉中不同状态的水分所占比例。不易流动水主要存在于肌原纤维蛋及膜之间，占金枪鱼鱼肉中总水分含量的80%以上；结合水主要以结合蛋白的形式存在，含量较少，不到总水分含量的5%；自由水存在于细胞间隙，受到外力影响后易于流失，这与夏天兰等[32]的分析结果一致。不易流动水的含量与保水性呈正相关[33]，其中经3% NaCl盐溶液和3% $CaCl_2$盐溶液解冻后的金枪鱼鱼肉中，不易流动水所占比例较高，肌肉的保水性最好。因此，采用质量分数3%的盐溶液解冻可以减轻对金枪鱼鱼肉的纤维结构破坏，最大限度地避免肌纤维组织中的不易流动水向自由水转化，减少金枪鱼鱼肉的水分流失。





A. NaCl；B. $CaCl_2$；C.对照；下标1～3.分别表示质量分数2%、3%、6%。图9同。

图 5 不同质量分数盐溶液解冻后金枪鱼鱼肉的NMR图像

Fig. 5 Nuclear magnetic resonance images of tuna thawed in salt solutions at different concentrations

LF-NMR技术还可以通过样品所反射出的信号强度来观测水分的分布情况，鱼肉中含水量越高，颜色越亮，反之，则颜色越暗[34]。由图5可知，经NaCl溶液解冻后的金枪鱼鱼肉呈现绿色，水分含量整体较低，说明采用NaCl溶液解冻对金枪鱼鱼肉的含水量影响较大；而经$CaCl_2$溶液解冻后的金枪鱼鱼肉颜色呈现黄红色，分布均匀，说明$CaCl_2$溶液解冻可以有效减少金枪鱼鱼肉中的水分流失，提高保水性，其中质量分数为3%的$CaCl_2$溶液具有最好的保水效果。

2.4 不同解冻方式对金枪鱼色泽的影响

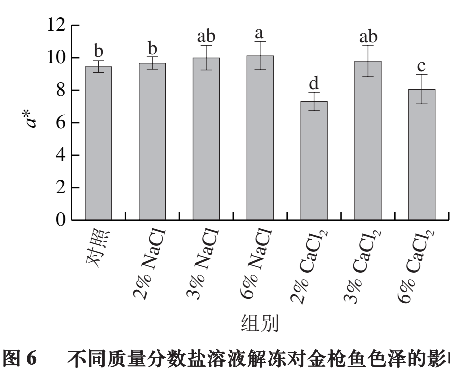


图 6 不同质量分数盐溶液解冻对金枪鱼色泽的影响

Fig. 6 Effect of thawing in salt solutions at different concentrations on color difference of tuna

新鲜的金枪鱼鱼肉呈鲜红色，在解冻过程中，金枪鱼鱼肉会发生一定程度的褐变，对金枪鱼鱼肉的外观造成一定的影响，从而降低金枪鱼鱼肉的商品价值[35]。金枪鱼鱼肉肉色的变化与高铁肌红蛋白的变化密切相关，高铁肌红蛋白的氧化导致金枪鱼鱼肉色泽暗淡，而高铁肌红蛋白的含量又受到肌肉部位、脂肪氧化等多种因素的影响[36-37]。图6所示为不同质量分数的盐溶液解冻金枪鱼后其红度的变化情况。随着NaCl盐溶液质量分数的增加，解冻时间缩短，a^*值逐渐增加。与NaCl盐溶液相比，$CaCl_2$盐溶液解冻后的金枪鱼色泽较差，实际解冻实验中，$CaCl_2$溶液解冻后的金枪鱼的表面出现了轻微泛白的现象。2% $CaCl_2$盐溶液解冻时间较长，高铁肌红蛋白氧化程度较高，红度较低。3% $CaCl_2$盐溶液解冻时间缩短，解冻后金枪鱼肉的a^*值接近10。6% $CaCl_2$盐溶液解冻时间最短，高铁肌红蛋白氧化程度最低，但随着$CaCl_2$溶液质量分数的增加，鱼肉表面泛白现象也较为严重，影响了金枪鱼的色泽，造成红度降低。对比所有的实验组发现，采用NaCl溶液解冻后的金枪鱼红度较高，其中6% NaCl溶液效果最好。采用3% $CaCl_2$盐溶液解冻后的金枪鱼与3%、6% NaCl溶液解冻后的金枪鱼相比，a^*值差异不显著（$P>0.05$）。

2.5 不同解冻方式对金枪鱼盐溶性蛋白含量的影响

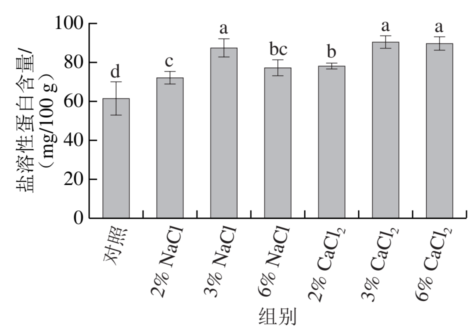


图 7 不同盐溶液解冻对金枪鱼盐溶性蛋白含量的影响

Fig. 7 Effect of thawing in salt solution at different concentrations on the content of salt-soluble protein in tuna

蛋白含量是评判肌肉品质优劣的重要指标，盐溶性蛋白是金枪鱼肌肉组织中的主要成分[38-39]。由图7可以看出，去离子水解冻后金枪鱼盐溶性蛋白含量最低，显著低于盐溶液解冻组（$P<0.05$），这是因为去离子水解冻时间最长，微生物繁殖较多导致蛋白质变性严重。使用NaCl、$CaCl_2$溶液解冻金枪鱼鱼肉，解冻时间较短，且盐对微生物具有一定的抑制作用，因此盐溶性蛋白的含量更高。使用$CaCl_2$溶液解冻的效果要整体好于NaCl，其中经3% $CaCl_2$溶液解冻的金枪鱼鱼肉具有最高的盐溶性蛋白含量，这可能是因为金枪鱼生活的海水环境中，盐分质量分数一般为3%～4%，在此质量分数下解冻金枪鱼，可以最大程度地平衡渗透压，减少蛋白质的变性，保持金枪鱼鱼肉的品质。

2.6 不同解冻方式对金枪鱼质构的影响

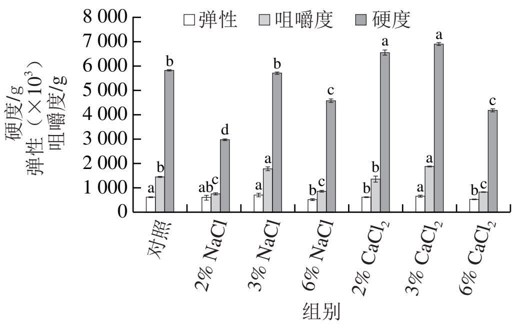


图 8 不同质量分数盐溶液解冻对金枪鱼质构的影响

Fig. 8 Effect of thawing in salt solutions at different concentrations on texture of tuna

金枪鱼鱼肉的质构特性主要与肌肉组织的纤维状态以及肌肉蛋白含量相关，金枪鱼鱼肉中的蛋白质变性和微生物的分解都会导致质构下降[40-41]。如图8所示，不同方式解冻组金枪鱼鱼肉硬度和咀嚼度差异显著，弹性差异较小，说明不同质量分数的盐溶液解冻对金枪鱼鱼肉的弹性影响较小，对硬度影响较大。对于同种盐溶液处理组，质量分数3%盐溶液解冻后的金枪鱼鱼肉弹性和咀嚼性显著高于其他解冻组（P<0.05）。两种不同类型的盐溶液比较，$CaCl_2$盐溶液解冻后的金枪鱼鱼肉质构特性要整体好于经NaCl盐溶液解冻的金枪鱼鱼肉，这是因为NaCl盐溶液解冻后的金枪鱼鱼肉蛋白质含量较低，而蛋白含量是影响质构变化的主要原因之一[42]。在不同质量分数盐溶液的解冻实验中，采用3% $CaCl_2$溶液解冻能够最大程度地保持金枪鱼鱼肉的硬度，降低解冻过程对其质构的影响。

2.7 不同解冻方式对金枪鱼组织结构的影响

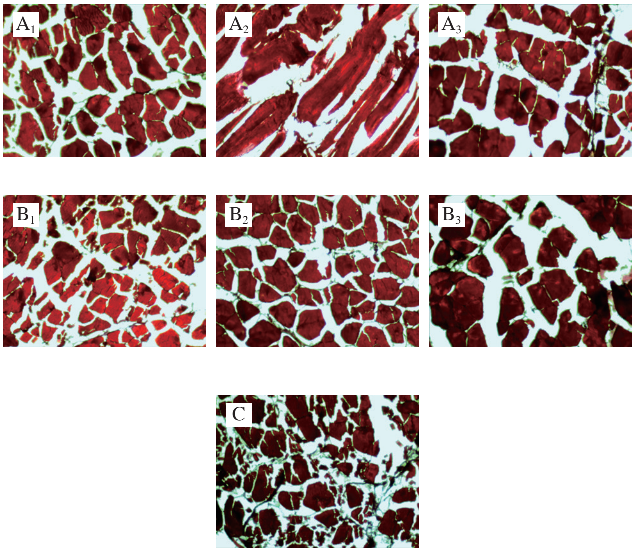


图 9 不同质量分数盐溶液对解冻后的金枪鱼微观组织结构的影响

Fig. 9 Effect of thawing in salt solutions at different concentrations on microstructure of tuna

不同解冻方式下的金枪鱼鱼肉，冰晶融化速率不同会对肌肉组织结构造成不同的影响。由图9可以看出，去离子水解冻后的金枪鱼鱼肉组织无规则、破坏严重，这是因为去离子水解冻时间较长，肌原纤维蛋白在微生物和酶的作用下降解变性[43]。NaCl和$CaCl_2$溶液解冻后的金枪鱼肌肉组织结构较为完整，质量分数3%的盐溶液相对于质量分数2%的盐溶液解冻时间更短，组织结构完整性更好。当盐溶液质量分数达到6%时，鱼肉组织间隙增大、肉质松散，这可能是因为盐溶液质量分数过高，水分流失严重所导致。郭恒等[27]通过研究解冻温度对冷冻鲐鱼的影响也得出解冻速率越快，鱼肉肌束之间的间隙越大的结论。对比所有的解冻方式可以发现，使用3% $CaCl_2$溶液解冻后的金枪鱼，肌肉组织结构间隙均匀，边缘清晰，保持了鱼肉组织原本的致密性，解冻效果最好。

3 结 论

与去离子水解冻相比，盐溶液解冻能够明显缩短解冻时间，同种盐溶液解冻时，质量分数越高，解冻时间越长，渗盐量越高；且与相同质量分数NaCl溶液相比，$CaCl_2$溶液解冻速率更快、渗盐量更低。在所有的实验组中，质量分数3%的盐溶液解冻后的金枪鱼解冻损失和蒸煮损失最小。3% $CaCl_2$溶液解冻后的金枪鱼鱼肉其盐溶性蛋白含量最高，硬度最大，组织结构最为完整，红度较高。综合考虑，采用$CaCl_2$溶液解冻能够提升金枪鱼的解冻品质，缩短解冻时间，其中质量分数3% $CaCl_2$溶液效果最好，能够最大限度地保持金枪鱼的新鲜度。

参考文献：

[1] 苗振清, 黄锡昌. 远洋金枪鱼渔业[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 2003: 245-246.

[2] 上海市质量技术监督局. 食品冷链物流技术与规范: DB31/T 388－2007[S]. 上海: [出版者不详], 2007: 2-10.

[3] 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. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201610044.

[4] 余文晖, 王金锋, 谢晶. 不同解冻方式对金枪鱼品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(12): 189-197. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.019538.

[5] 郑大宇, 刘蕾, 毛伟杰, 等. 金枪鱼解冻技术研究[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2017, 33(1): 56-60. DOI:10.3969/j.issn.1672-0946.2017.01.014.

[6] 李念文, 谢晶, 周然. 金枪鱼解冻方法及解冻品质评价的研究进展[J]. 广东农业科学, 2012, 39(19): 108-111. DOI:10.3969/j.issn.1004-874X.2012.19.036.

[7] DINÇER T, CADUN A, ÇAKLI Ş, et al. Effects of different thawing methods on the freshness quality of fish[J]. Journal of Fisheries & Aquatic Sciences, 2009, 26(4): 253-256.

[8] 刘燕. 金枪鱼块解冻工艺优化的研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2011: 12-30. DOI:10.7666/d.y1946944.

[9] 包海蓉, 奚春蕊, 刘琴, 等. 两种解冻方法对金枪鱼品质影响的比较研究[J]. 食品工业科技, 2012, 33(17): 338-341. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2012.17.048.

[10] 王锡昌, 刘燕, 刘源. 大目金枪鱼块温盐水-冷藏库组合解冻工艺的优化[J]. 农业工程学报, 2010, 26(7): 358-363. DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2010.07.063.

[11] 林建飞. 探讨肉类解冻工艺及设备发展趋势[J]. 企业技术开发, 2018, 37(5): 88-90.

[12] 徐慧文, 谢晶, 汤元睿, 等. 金枪鱼盐水浸渍过程中渗盐量及品质变化的研究[J]. 食品工业科技, 2014, 35(12): 349-354; 364. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2014.12.068.

[13] BEDANE T F, ALTIN O, EROL B, et al. Thawing of frozen food products in a staggered through-field electrode radio frequency system: a case study for frozen chicken breast meat with effects on drip loss and texture[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2018, 50: 139-147. DOI:10.1016/j.ifset.2018.09.001.

[14] SAITO K, AHHMED A M, KAWAHARA S, et al. Effects of humidity-stabilizing sheets on the quality of bigeye tuna meat (*Thunnus obesus*) during refrigerated storage[J]. Food Science and Technology Research, 2009, 15(3): 283-292. DOI:10.3136/fstr.15.283.

[15] LI Dapeng, Jia Shiliang, ZHANG Longteng, et al. Effect of using a high voltage electrostatic field on microbial communities, degradation of adenosine triphosphate, and water loss when thawing lightly-salted, frozen common carp (*Cyprinus carpio*)[J]. Journal of Food Engineering, 2017, 212: 226-233. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2017.06.003.

[16] 李念文, 谢晶, 周然, 等. 真空解冻工艺对金枪鱼品质的影响[J]. 食品工业科技, 2013, 34(23): 84-87; 92. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2013.23.083.

[17] WANG Shuo, XIANG Wan, FAN Hanzhi, et al. Study on the mobility of water and its correlation with the spoilage process of salmon (*Salmo solar*) stored at 0 and 4 ℃ by low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR ^{1}H)[J]. Journal of Food Science & Technology, 2018, 55(1): 173-182. DOI:10.1007/s13197-017-2880-5.

[18] NIU Lihong, RASCO B A, TANG Juming, et al. Relationship of changes in quality attributes and protein solubility of ground beef under pasteurization conditions[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 61(1): 19-24. DOI:10.1016/j.lwt.2014.11.016.

[19] 汤元睿, 谢晶, 李念文, 等. 不同冷链物流过程对金枪鱼品质及组织形态的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(5): 285-292. DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2014.05.036.

[20] 李慢, 马晓彬, 王文骏, 等. 解冻方式对中国对虾品质的影响[J]. 中国食品学报, 2019, 19(5): 182-190. DOI:10.16429/j.1009-7848.2019.05.023.

[21] 朱明明, 彭泽宇, 赵贺开, 等. 低变温高湿解冻对猪肉理化特性、蛋白热变性及流变特性的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(11): 131-138. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180606-056.

[22] 郭洁玉, 赵建伟, 徐学明, 等. 冻肉射频解冻过程中温度变化的模拟与测定[J]. 食品与生物技术学报, 2016, 35(1): 66-71.

[23] 唐梦. 高压静电场解冻对罗非鱼片品质影响及其机理的研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2017: 24-30.

[24] 徐慧文, 谢晶, 汤元睿, 等. 金枪鱼在不同浓度$CaCl_2$载冷剂冻结下的渗盐量及品质变化研究[J]. 食品工业科技, 2015, 36(9): 315-319; 326. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2015.09.060.

[25] HUGHES J M, OISETH S K, PURSLOW P P, et al. A structural approach to understanding the interactions between colour, water-holding capacity and tenderness[J]. Meat Science, 2014, 98(3): 520-532. DOI:10.1016/j.meatsci.2014.05.022.

[26] 朱文慧, 宦海珍, 步营, 等. 不同解冻方式对秘鲁鱿鱼肌肉保水性和蛋白质氧化程度的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(11): 6-11. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201711002.

[27] 郭恒, 钱怡, 李颖杰, 等. 解冻温度对冷冻鲐鱼品质、质构及超微结构的影响[J]. 中国食品学报, 2014, 14(12): 49-56. DOI:10.16429/j.1009-7848.2014.12.019.

[28] 余小领, 李学斌, 闫利萍, 等. 不同冻结和解冻速率对猪肉保水性和超微结构的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(8): 261-265. DOI:10.3321/j.issn:1002-6819.2007.08.049.

[29] PEARCE K L, ROSENVOLD K, ANDERSEN H J, et al. Water distribution and mobility in meat during the conversion of muscle to meat and ageing and the impacts on fresh meat quality attributes: a review[J]. Meat Science, 2011, 89(2): 111-124. DOI:10.1016/j.meatsci.2011.04.007.

[30] 程天赋, 蒋奕, 张翼飞, 等. 基于低场核磁共振研究不同解冻方式对冻猪肉食用品质的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(7): 20-26. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20171127-333.

[31] BROWN R J, CAPOZZI F, CAVANI C, et al. Relationships between ^{1}H NMR relaxation data and some technological parameters of meat: a chemometric approach[J]. Journal of Magnetic Resonance, 2000, 147(1): 89-94. DOI:10.1006/jmre.2000.2163.

[32] 夏天兰, 刘登勇, 徐幸莲, 等. 低场核磁共振技术在肉与肉制品水分测定及其相关品质特性中的应用[J]. 食品科学, 2011, 32(21): 253-256.

[33] STRAADT I K, RASMUSSEN M, ANDERSEN H J, et al. Aging-induced changes in microstructure and water distribution in fresh and cooked pork in relation to water-holding capacity and cooking loss: a combined confocal laser scanning microscopy (CLSM) and low-field nuclear magnetic resonance relaxation study[J]. Meat Science, 2007, 75(4): 687-695. DOI:10.1016/j.meatsci.2006.09.019.

[34] MIKLOS R, MORA-GALLEGO H, LARSEN F H, et al. Influence of lipid type on water and fat mobility in fermented sausages studied by low-field NMR[J]. Meat Science, 2014, 96(1): 617-622. DOI:10.1016/j.meatsci.2013.08.025.

[35] 李念文, 汤元睿, 谢晶, 等. 物流过程中大眼金枪鱼(*Thunnus obesus*)的品质变化[J]. 食品科学, 2013, 34(14): 319-323. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201314067.

[36] HIRAOKA Y, OHSAKA E, NARITA K, et al. Preventive method of color deterioration of yellowtail dark muscle during frozen storage and post thawing[J]. Fisheries Science, 2004, 70(6): 1130-1136. DOI:10.1111/j.1444-2906.2004.00914.x.

[37] 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. DOI:10.1016/j.foodchem.2005.01.040.

[38] 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. DOI:10.16429/j.1009-7848.2016.11.003.

[39] CHAN J T Y, OMANA D A, BETTI M. Effect of ultimate pH and freezing on the biochemical properties of proteins in turkey breast meat[J]. Food Chemistry, 2011, 127(1): 109-117. DOI:10.1016/j.foodchem.2010.12.095.

[40] OCAÑOHIGUERA V M, MARQUEZ-RÍOS E, CANIZALES-DÁVILA F J, et al. Postmortem changes in cazon fish muscle stored on ice[J]. Food Chemistry, 2009, 116(4): 933-938. DOI:10.1016/j.foodchem.2009.03.049.

[41] HERNÁNDEZ M D, LÓPEZ M B, ÁLVAREZ A, et al. Sensory, physical, chemical and microbiological changes in aquacultured meagre (*Argyrosomus regius*) fillets during ice storage[J]. Food Chemistry, 2009, 114(1): 237-245. DOI:10.1016/j.foodchem.2008.09.045.

[42] 周然, 刘源, 谢晶, 等. 电解水对冷藏河豚鱼肉质构及品质变化的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(10): 365-369. DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2011.10.064.

[43] 胡玥, 杨水兵, 余海霞, 等. 微冻保鲜方法对带鱼品质及组织结构的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(18): 290-297. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201618046.