

文章编号: 1674-5566(2024)05-1283-09

DOI: 10.12024/jsou.20231104344

不同解冻方式对金枪鱼品质特性的影响

全潇洋^{1,2}, 张怡², 刘宝林¹, 逢金鑫², 寇兴然³, 邬松恒², 邢岐杰⁴, 乔勇进²

(1. 上海理工大学 健康科学与工程学院, 上海 200093; 2. 上海市农业科学院 作物育种栽培研究所, 上海 201403; 3. 上海应用技术大学 香料香精技术与工程学院, 上海 201418; 4. 上海曼透鲑业国际贸易有限公司, 上海 200433)

摘要: 金枪鱼富含蛋白质和多不饱和脂肪酸, 是主要的深海商品食用鱼。为减少其营养流失和品质下降, 捕捞后需立即进行冷冻保存。因此, 为了提高金枪鱼的食用品质, 冷冻金枪鱼的解冻工艺成为影响金枪鱼产业发展的关键技术。为探究不同解冻方式对金枪鱼品质的影响, 从持水性、色泽、质地、抗氧化性、新鲜度和微观结构等方面对3种解冻方式(盐水解冻, ST; 冷藏解冻, RT; 低压静电场解冻, LV)进行了比较研究。结果表明, 解冻方式对金枪鱼品质有显著影响。ST组可更好地保持金枪鱼肉的持水性(79.878%±3.913%)和新鲜度[(8.750±0.495) mg/100 g]。但ST组具有较高的氧化水平和微观结构损伤。RT组在色泽、质地和氧化抑制作用方面显著优于ST组; 但RT组解冻损失率高、新鲜度差。相比于其他两种解冻方式, LV组能够更好地保持金枪鱼肉的色泽、质地、新鲜度[(8.367±0.404) mg/100 g]和持水性(77.827%±0.215%), 并可有效抑制金枪鱼解冻过程中的脂质和蛋白质氧化水平, 微观结构损伤最小。综上所述, 低压静电场解冻可较好的保持金枪鱼肉品质。本文为提升冷冻鱼类产品的解冻品质提供了理论依据和实践探索。

关键词: 金枪鱼; 品质特性; 解冻; 低压静电场

中图分类号: TS 254.4 **文献标志码:** A

金枪鱼(*Thunnus thynnus*), 隶属鲈形目(Perciformes)鲭科(Scombrida), 是一种深海商品食用鱼, 其富含蛋白质和多不饱和脂肪酸, 具有极高的经济价值和营养价值^[1]。在远洋捕捞过程中, 由于捕鱼船的捕捞周期较长, 因此被捕捞的金枪鱼需要进行快速冷冻处理, 以此延长金枪鱼的货架期^[2]。这也使得解冻成为金枪鱼加工前的必要工序, 并显著影响金枪鱼肉的品质^[3]。

目前常用的解冻方式有流水解冻、空气解冻和盐水解冻(Salt water thawing, ST)等。但上述解冻技术存在着解冻后产品品质劣变程度大^[4-5]、耗能高^[6]或解冻速度慢^[7]等缺点。其中, 流水解冻不利于肌原纤维蛋白凝胶的形成, 未能有效改善解冻后肉品的品质^[8]。也有研究指出, 高于4%质量分数的氯化钠溶液会导致肌原纤维蛋白快

速失水以及鱼肉咀嚼性下降^[9]。因此, 亟待探寻一种可改善金枪鱼肉解冻品质, 降低蛋白质和脂质氧化程度的解冻技术, 以期提高金枪鱼产业的经济效益。低压静电场(Low-voltage electrostatic field, LVEF)作为一种新型解冻技术, 具有改善肉类解冻品质的效果。在辅助肉及肉制品解冻领域具有较高的研究热度^[10]。在解冻鸡胸肉的过程中, LVEF表现出了抑制冰晶损伤, 维持肌纤维完整性的效果^[11]。然而, 目前关于低压静电场辅助解冻金枪鱼的应用及其对解冻过程中金枪鱼品质和理化指标的影响鲜有报道。因此本研究将对盐水解冻、冷藏解冻以及低压静电场辅助解冻技术对金枪鱼品质劣变的抑制效果, 以此寻找最佳解冻工艺, 提高其食用品质。

收稿日期: 2023-11-14 修回日期: 2024-01-22

基金项目: 上海农产品保鲜加工工程技术研究中心项目(19DZ2251600); 上海市农产品保鲜加工专业技术服务平台项目(21DZ2292200); 上海市科委“创新行动计划”国际合作计划项目(073907003)

作者简介: 全潇洋(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为肉及肉制品保鲜及加工技术。E-mail: qq3323702770@163.com

通信作者: 乔勇进, E-mail: qiaoyongjin@hotmail.com

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)

Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0)

<http://www.shhydx.com>

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

冷冻金枪鱼由上海鲐业有限公司提供,鱼体质量为28 kg。金枪鱼在 $(-70\pm 1)^{\circ}\text{C}$ 下经过5 d运输至 $(-28\pm 1)^{\circ}\text{C}$ 冷库冻藏,实验前金枪鱼已在冷库中存放12 h。

磷酸二氢钠、磷酸氢二钠、25%戊二醛水溶液、无水乙醇、碳酸钾、硼酸、盐酸、甘油、阿拉伯胶(分析纯),购买于国药集团化学试剂有限公司;总巯基含量检测试剂盒、蛋白质羰基含量检测试剂盒,购买于北京索莱宝科技有限公司;丙二醛(Malondialdehyde, MDA)测试盒,购买于南京建成生物工程研究所。

1.2 仪器与设备

TA.XT plus 质构仪,加拿大PIERCE公司;F6/

10 Tissuelyser 匀浆机,上海净信实业发展有限公司;CM-5 色差仪,柯盛行(杭州)仪器有限公司;MQX200 酶标仪,美国百特仪器有限公司;DENBA-08R 低压静电场, DENBA JAPAN 株式会社;CR21N 高速冷冻离心机,日本HITACHI公司;MA100 快速水分分析仪,德国SARTORIUS公司。

1.3 原料处理

从冷冻金枪鱼背部切分15块厚度为 $(3.5\pm 0.5)\text{cm}$ 的长方体鱼块,每块质量为 $(250\pm 30)\text{g}$,随机分为3组。按表1中列举的不同解冻方式对冷冻金枪鱼肉进行分类解冻,每个解冻方式设3组平行,解冻示意图见图1。采用曹珠等^[4]的方法并进行了微小的修改,采用温湿度记录仪(RC-4HC,江苏精创电器股份有限公司)测定金枪鱼块的中心温度,将 1°C 设置为金枪鱼块的解冻完成温度,解冻完成后金枪鱼肉外观图见图2。

表1 金枪鱼的解冻方法
Tab. 1 Thawing methods for tuna

解冻方式 Thawing method	简称 Abbreviation	操作方法 Operation method
盐水解冻 Salt water thawing	ST	样品置于40 g/L氯化钠溶液中进行解冻,水温 $(20\pm 1)^{\circ}\text{C}$
冷藏解冻 Refrigeration thawing	RT	样品置于保鲜盒中,放在 $(4\pm 1)^{\circ}\text{C}$ 下进行解冻
低压静电场辅助解冻 Low-voltage electrostatic field assisted thawing	LV	样品置于1 000 mV/m 低压静电场中解冻,环境温度 $(4\pm 1)^{\circ}\text{C}$

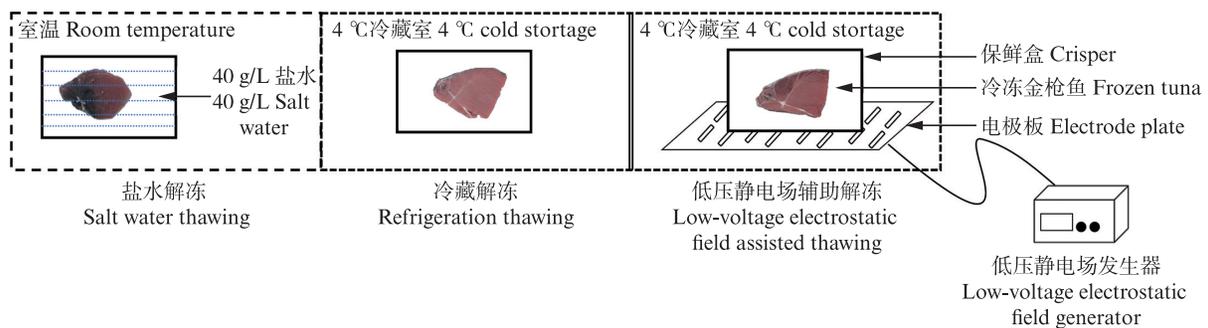


图1 金枪鱼解冻示意图
Fig. 1 Schematic diagram of tuna thawing

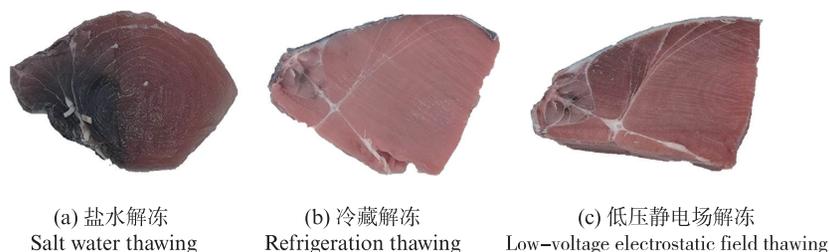


图2 不同解冻方式解冻后金枪鱼外观
Fig. 2 Appearance of tuna after thawing by different thawing methods

1.4 指标测定

1.4.1 解冻损失率

参考ZHANG等^[12]的方法,并进行轻微改动。金枪鱼解冻前后的质量分别记为 m_0 和 m_1 。金枪鱼的解冻损失计算公式:

$$X_T = (m_0 - m_1) / m_0 \times 100\% \quad (1)$$

式中: X_T 为金枪鱼的解冻损失率,%; m_0 为金枪鱼解冻前的质量,g; m_1 为金枪鱼解冻后的质量,g。

1.4.2 离心损失率

称取1 g金枪鱼肉(不含有结缔组织)于10 mL离心管中(m_2)。在4 °C,10 000×g条件下离心10 min。用滤纸拭干离心出的水分后称取质量(m_3)。离心损失率计算公式:

$$X_C = (m_2 - m_3) / m_2 \times 100\% \quad (2)$$

式中: X_C 为金枪鱼的离心损失率,%; m_2 为金枪鱼离心前的质量,g; m_3 为金枪鱼离心后的质量,g。

1.4.3 持水性

参考JIANG等^[13]的方法。测定离心前后的含水量,评估离心前每100 g金枪鱼肉中水分保留的百分比。 ω_0 和 ω_1 分别为离心前和离心后的含水量,CL为离心损失率。水分含量的测定:称取0.5 g金枪鱼肉(精确至0.000 1 g)并尽可能切碎,厚度不超过5 mm,使用MA100快速水分分析仪测定。持水性计算公式:

$$X_{WHC} = \omega_1 \times (100\% - X_C) / \omega_0 \quad (3)$$

式中: X_{WHC} 为金枪鱼持水性,%; ω_0 为离心前金枪鱼的含水量; ω_1 为离心后金枪鱼的含水量, X_C 为离心损失率。

1.4.4 色泽

参考CHANG等^[14]的方法并稍有改动。用CM-5比色仪测量金枪鱼肉表面的色泽。测量参数:8 mm测量孔径,SCE,光源D65,标准观察者10°,黑板归零,白板校正($L^*=96.45$, $a^*=-0.14$, $b^*=-0.28$)。

1.4.5 肌红蛋白含量

根据HU等^[15]的方法测定肌红蛋白含量,即测定脱氧肌红蛋白(DMb)、氧肌红蛋白(OMb)和高铁肌红蛋白(MMb)的含量。样品取自金枪鱼肉表面,样品(1 g)加入5 mL磷酸盐缓冲液(0.04 mol/L,pH 6.8)在冰浴中匀浆。4 °C静置1 h后,4 °C,8 000×g离心30 min,然后过滤取上清液。随后,分别在503 nm、525 nm、557 nm和582 nm测定滤液的吸光度。肌红蛋白的相对量计算公

式:

$$X_{DMb} = (-0.543R_1 + 1.594R_2 + 0.550R_3 - 1.329) \times 100\% \quad (4)$$

$$X_{OMb} = (0.722R_1 - 1.432R_2 - 1.659R_3 + 2.599) \times 100\% \quad (5)$$

$$X_{MMb} = (-0.159R_1 - 0.085R_2 + 1.262R_3 - 0.52) \times 100\% \quad (6)$$

式中: X_{DMb} 为脱氧肌红蛋白相对含量; X_{OMb} 为氧合肌红蛋白相对含量; X_{MMb} 为高铁肌红蛋白相对含量; R_1 为 A_{582}/A_{525} ; R_2 为 A_{557}/A_{525} ; R_3 为 A_{503}/A_{525} 。

1.4.6 质构特性

将金枪鱼肉切成30 mm×30 mm×20 mm的规格,压缩力以垂直于肌纤维方向加载两次。使用TA.XT-plus质构仪测定,加装P/36R型号探头,参数设置如表2所示。

表2 TPA参数设置
Tab. 2 TPA parameter settings

项目 Item	设定值 Set value
测前速率 Pre-test speed	5.00 mm/s
测中速率 Test speed	1.00 mm/s
测后速率 Post-test speed	5.00 mm/s
压缩变形率 Compression set	50.00%
触发力 Trigger force	5.00 g
探头2次测定间隔时间 Probe 2 measurement intervals	5.00 s
触发类型 Trigger type	自动

1.4.7 MDA含量

根据王雪松等^[3]的方法提取金枪鱼肉中的MDA。取解冻后切碎的金枪鱼肉1 g,加入9 mL 0.9%的氯化钠溶液,冰浴匀浆,以5 000 r/min室温离心10 min。取上清液,采用MDA测试盒,并根据使用说明书在532 nm处测定吸光度,计算鱼肉中MDA的含量。

1.4.8 巯基含量

使用总巯基含量检测试剂盒,并根据使用说明书在412 nm处测定吸光度,计算金枪鱼肉中巯基的含量。

1.4.9 羰基含量

使用蛋白质羰基含量检测试剂盒,并根据使用说明书在370 nm处测定吸光度,计算金枪鱼肉中羰基的含量。

1.4.10 TVB-N值

根据《食品安全国家标准食品中挥发性盐基氮的测定》(GB 5009.228—2016)测定不同解冻方式对金枪鱼肉中TVB-N含量的影响。

1.4.11 微观结构

根据凌胜男等^[16]的方法测定并做出轻微改动。肌肉组织样本(0.5 cm×0.5 cm×0.25 cm)在25 mL/L戊二醛(使用0.2 mol/L pH 7.2的磷酸盐缓冲液稀释)中浸泡2 h。蒸馏水冲洗1 h后,在连续浓度为50%、70%、80%、90%和100%的乙醇中各脱水1 h。对干燥后的样品进行镀金,通过扫描电子显微镜[TM4000Plus Tabletop Microscope,日立高新技术(上海)国际贸易有限公司]观察肌肉组织纤维的纵截面。

1.5 数据处理与分析

实验设置3组平行,结果以平均值±标准差表示。采用SPSS 20软件中单因素方差分析对试验数据进行Duncan's方差分析,显著水平为0.05,采用Origin 2018软件进行绘图。

2 结果

2.1 不同解冻方式对金枪鱼解冻时间和持水性的影响

常温盐水解冻是目前常见的解冻方法之一^[4,17],以该方法作为对照组,可直接反映实验组解冻效果的优劣。由图3可知,ST组的解冻时间最短,其次是LV组,而RT组的解冻时间最长,说明相同温度下LVEF能够缩短金枪鱼的解冻时间。由表3可知,ST组和LV组的解冻损失率无显著差异($P > 0.05$),且均显著低于RT组($P < 0.05$),其中LV组的解冻损失率最低,为 $5.803\% \pm 0.339\%$ 。ST组和LV组的离心损失率显著低于RT组($P < 0.05$),其中ST组离心损失率最低,为 $19.015\% \pm 1.761\%$ 。ST组的持水性最高,为 $79.878\% \pm 3.913\%$,其次是LV组,且两组均显著高于RT组($P < 0.05$)。同时,ST组的持水性与LV组间无显著差异($P > 0.05$)。这些结果表明,ST组和LV组能够更有效地保留金枪鱼的水分,并缩短金枪鱼的解冻时间。

2.2 不同解冻方式对金枪鱼色泽和肌红蛋白含量的影响

由表3可以发现,RT组的 L^* 值显著高于ST

组和LV组($P < 0.05$),且ST组与LV组间的 L^* 值无显著差异($P > 0.05$)。有研究指出,解冻样品表面形成的水膜能提高样品的 L^* 值,这解释了RT组中解冻损失率与 L^* 值的变化关系^[15]。金枪鱼肉红度值较高,表明其氧化程度越低。从表3可知,LV组的 a^* 值显著高于ST组和RT组($P < 0.05$),且ST的 a^* 值最低(0.301 ± 0.014)与RT组存在显著差异($P < 0.05$)。 b^* 值的增加与脂质的氧化程度呈正相关^[18],RT组的 b^* 值最高,其次是LV组,而ST组的 b^* 值最小,且3组间存在显著差异($P < 0.05$)。氧合肌红蛋白比例的下降会导致 a^* 值的下降^[19]。图4显示了不同解冻方式对金枪鱼中肌红蛋白比例的影响。结果显示,ST组的氧合肌红蛋白比例显著低于其他解冻组,且ST组的高铁肌红蛋白比例显著高于其他解冻组($P < 0.05$)。同时发现,RT组和LV组之间的氧合肌红蛋白比例以及高铁肌红蛋白比例无显著差异($P > 0.05$)。因此,LV组能够有效地保护金枪鱼的色泽。

2.3 不同解冻方式对金枪鱼质构的影响

从表3可以发现,LV组、RT组和ST组间的硬度和咀嚼性存在显著差异($P < 0.05$)。其中LV组的硬度和咀嚼性最高,ST组的硬度和咀嚼性最低。这表明硬度的变化与咀嚼性密切相关^[20]。在弹性和凝聚性方面,ST组的弹性显著低于其他处理组($P < 0.05$),且LV组与RT组间并无显著性差异($P > 0.05$)。因此,LV组有利于维持解冻金枪鱼的质地品质。

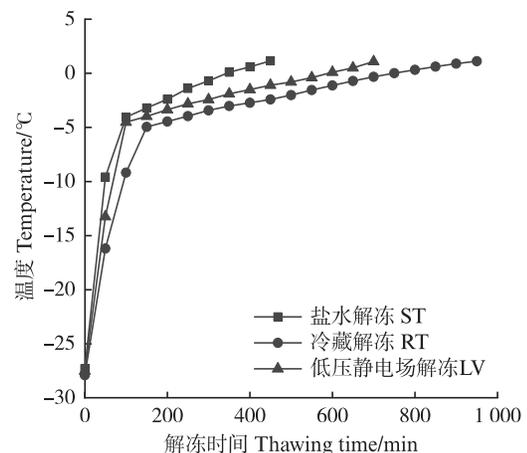
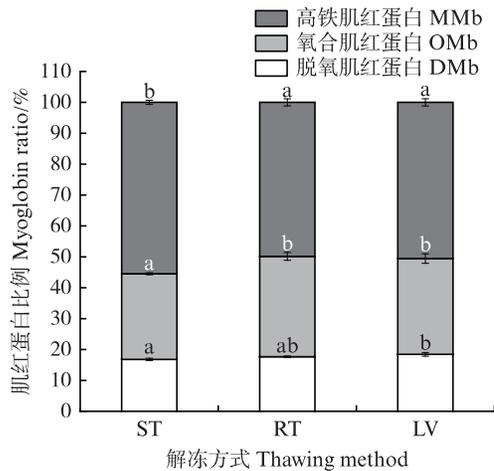


图3 不同解冻方式解冻金枪鱼的解冻曲线
Fig. 3 Thawing curves of tuna thawed by different thawing methods



不同小写字母表示显著性差异($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant differences ($P < 0.05$).

图4 不同解冻方式对金枪鱼肉中肌红蛋白形态比例的影响

Fig. 4 Effect of different thawing methods on the proportion of myoglobin morphology of tuna

2.4 不同解冻方式对脂质氧化的影响

MDA 是脂质氧化的最终产物,同时也是分析鱼肉脂质氧化的关键指标。图5结果显示了不同解冻方式对金枪鱼肉中 MDA 含量的影响。ST 组的 MDA 含量 $[(34.546 \pm 4.904) \text{ nmol/g}]$ 显著高于其他解冻组 ($P < 0.05$),表明 ST 组具有最高的脂氧化程度。其次是 RT 组 $[(21.567 \pm 1.271) \text{ nmol/g}]$ 和 LV 组 $[(13.442 \pm 0.392) \text{ nmol/g}]$,且两组间存在显著性差异 ($P < 0.05$)。因

此, LV 组能够有效抑制解冻过程中金枪鱼肉脂质的氧化。

2.5 不同解冻方式对蛋白质氧化的影响

图6显示了金枪鱼解冻过程中巯基和硫基的含量变化。ST 组的蛋白质巯基含量 $[(0.025 \pm 0.001) \mu\text{mol/g}]$ 显著高于其他解冻组 ($P < 0.05$),表明 ST 组具有更高的蛋白氧化程度^[21]。这与 ST 组中高铁肌红蛋白比例的变化相吻合。RT 组 $[(0.021 \pm 0.001) \mu\text{mol/g}]$ 显著低于 LV 组 $[(0.016 \pm 0.001) \mu\text{mol/g}]$ 的巯基含量 ($P < 0.05$),这与低压静电场抑制蛋白质的氧化速率有关。巯基生成二硫键促使蛋白质交联^[22],图6结果显示, LV 组 $[(6.170 \pm 0.531) \mu\text{mol/g}]$ 的总巯基含量显著高于其他解冻组 ($P < 0.05$),表明其具有更低的蛋白质氧化程度。其次是 RT 组 $[(5.355 \pm 0.057) \mu\text{mol/g}]$ 和 ST 组 $[(4.283 \pm 0.242) \mu\text{mol/g}]$,且组间表现出显著性差异 ($P < 0.05$)。因此,低压静电场辅助解冻能够有效抑制金枪鱼肉中蛋白质的氧化。

2.6 不同解冻方式对金枪鱼 TVB-N 的影响

TVB-N 值是反映水产品新鲜度的重要指标之一,与含氮化合物的降解程度密切相关^[23]。从图7可知, ST 组和 LV 组的 TVB-N 值并无显著性差异 ($P > 0.05$),且显著低于 RT 组 $[(11.900 \pm 0.700) \text{ mg}/100 \text{ g}]$ ($P < 0.05$),其中 LV 组的 TVB-N 值最低 $[(8.367 \pm 0.404) \text{ mg}/100 \text{ g}]$ 。这表明 LV 组能够抑制含氮化合物的降解。

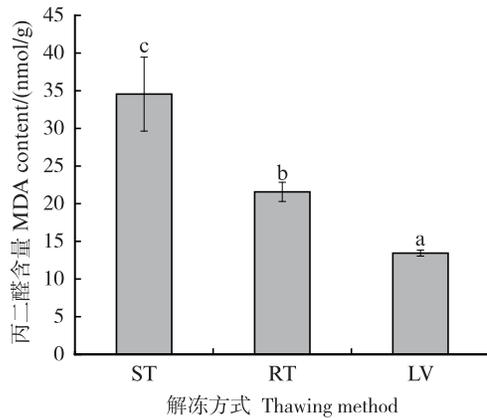
表3 解冻方式对金枪鱼持水性、色泽和质地的影响

Tab. 3 Effect of thawing method on water-holding capacity, color and texture of tuna

指标 Item	ST	RT	LV
解冻损失率 Thawing loss/%	6.038±0.152 ^a	7.446±0.628 ^b	5.803±0.339 ^a
离心损失率 Centrifugal loss/%	19.015±1.761 ^a	24.935±1.209 ^b	20.311±0.778 ^a
持水性 Water-holding capacity/%	79.878±3.913 ^a	70.981±0.410 ^b	77.827±0.215 ^a
亮度值 L*	29.945±1.775 ^a	34.177±1.229 ^b	30.463±1.360 ^a
红度值 a*	0.301±0.014 ^a	7.835±0.007 ^b	9.335±0.375 ^c
黄度值 b*	0.810±0.113 ^a	9.573±0.368 ^c	6.850±0.354 ^b
硬度 Hardness/g	2 408.728±181.163 ^a	3 417.926±1425.782 ^b	6 031.194±940.023 ^c
弹性 Springiness	0.426±0.012 ^a	0.751±0.082 ^b	0.696±0.015 ^b
凝聚性 Cohesiveness	0.175±0.003 ^a	0.372±0.089 ^b	0.440±0.061 ^b
咀嚼性 Chewiness/mJ	176.692±11.554 ^a	1 024.49±113.291 ^b	1 494.199±94.687 ^c

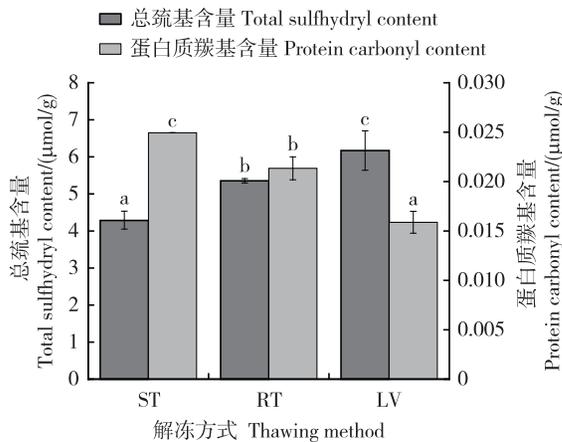
注:同行不同小写字母表示显著性差异($P < 0.05$)。

Notes: Different lowercase letters indicate significant differences ($P < 0.05$).



不同小写字母表示显著性差异 ($P < 0.05$)。
Different lowercase letters indicate significant differences ($P < 0.05$).

图5 不同解冻方式对金枪鱼肉中MDA的影响
Fig. 5 Effect of different thawing methods on the MDA of tuna



不同小写字母表示显著性差异 ($P < 0.05$)。
Different lowercase letters indicate significant differences ($P < 0.05$).

图6 不同解冻方式对金枪鱼中蛋白质氧化的影响
Fig. 6 Effect of different thawing methods on the protein oxidation of tuna

2.7 不同解冻方式对金枪鱼肉微观结构的影响

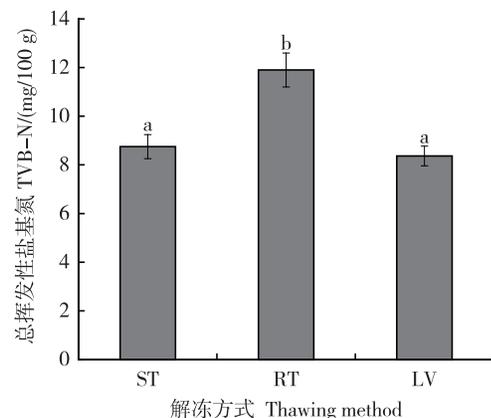
图8结果显示,ST组肌肉微观结构中存在大量孔洞,肌肉损伤较大。RT组肌肉微观结构完整,但纤维束间存在大量孔隙,纤维束上存在损伤。然而,LV组的肌肉微观结构最佳,纤维束损伤较小,纤维束间孔隙少。

3 讨论

金枪鱼具有极高的营养价值和经济价值,因此,前人对比分析了诸多能够维持金枪鱼品质的解冻技术。例如,曹珠等^[4]报道超声解冻有利于

减少冷冻金枪鱼的解冻时间,但其产生的空化效应和微射流可加剧蛋白质的氧化,影响色泽和质地^[4]。微波解冻虽然缩短了金枪鱼的解冻时间,但鱼肉出现了受热不均匀的情况^[24]。低压静电场作为新型物理场辅助解冻技术而备受关注,在解冻牛肉、羊肉、猪肉等肉类中表现出缩短解冻时间、抑制蛋白氧化和提高肉质弹性等的效果^[25-27]。因此,低压静电场可能改善金枪鱼的解冻品质。

低压静电场能够增加肉中离子键和氢键的数目,这加强了冰晶融化后蛋白质与水分子间的相互作用^[28]。同时,低压静电场可能改变生物大分子的表面电荷,抑制生化反应速率^[29]。这些使得LV组具有更高的持水性和更低的脂质与蛋白质氧化程度。此外,HU等^[15]提出静电场可以促进因冰晶而变性的肌原纤维蛋白复性。这保持了LV组中较高的硬度、弹性和咀嚼性以及良好的肌肉微观结构。此外,与去离子水相比,盐溶液具有更高的导热系数,能够明显缩短解冻时间,减小冰晶损伤^[30]。余文晖等^[31]分析了盐溶液对金枪鱼解冻品质的影响,表明3%的NaCl能有效提高金枪鱼的持水性 ($76.14\% \pm 7.37\%$),与本研究4% (40g/L)的NaCl溶液的持水性 ($79.878\% \pm 3.913\%$)类似。然而,本研究发现,ST组在质地、脂质和蛋白质的氧化程度以及微观结构均劣于RT组和LV组,可能是盐溶液的质量分数和解冻温度较高的原因。



不同小写字母表示显著性差异 ($P < 0.05$)。
Different lowercase letters indicate significant differences ($P < 0.05$).

图7 不同解冻方式对金枪鱼TVB-N值的影响
Fig. 7 Effect of different thawing methods on the TVB-N values of tuna

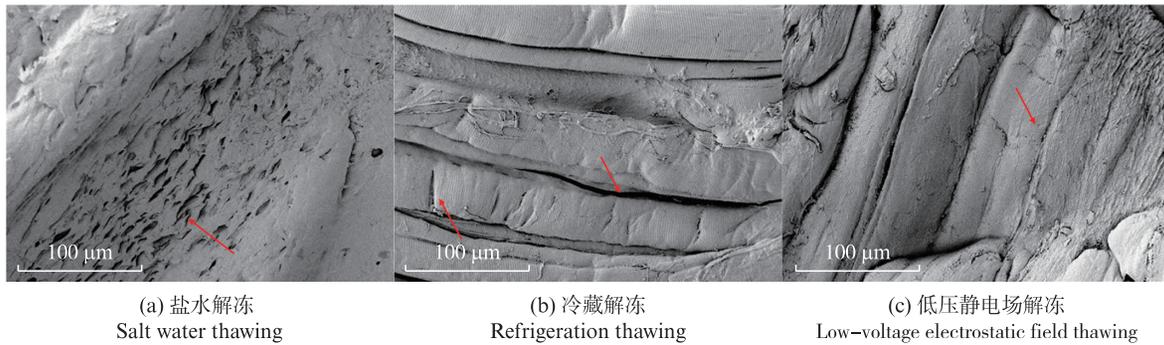


图8 不同解冻方式对金枪鱼肌肉组织微观结构(纵切面)的影响(400×)

Fig. 8 Effect of different thawing methods on the microstructure (longitudinal section) of tuna muscle tissue (400×)

研究^[9]证实,冷藏环境能够降低肉中蛋白质与脂质的氧化速率,保持了鸭腿肉的解冻品质。本研究在冷藏的基础上施加低压静电场,使氧化酶出现诱导偶极矩,改变了酶的构象,进一步降低了蛋白质和脂质的氧化程度,提高了金枪鱼的解冻品质^[29]。

与超声解冻和微波解冻类似,低压静电场辅助解冻技术也存在弊端。首先,当肉类处于较高的静电场环境时,正负离子的动能增加,可能成为部分生化反应的“催化剂”,降低产品品质。其次,静电场强度的提高可能更彻底地改变酶类的构象,使酶或蛋白质出现不可逆变性,进而影响产品的色泽和持水性。因此,未来需要进一步明确静电场强度的“催化”阈值,或探寻与其他解冻技术相联合,以期能更好的保持肉类的解冻品质。

4 结论

本研究比较了3种不同解冻方式(ST、RT、LV)对冷冻金枪鱼的解冻效果,结果表明,解冻方式对金枪鱼品质有显著影响。盐水解冻能够改善金枪鱼的持水性和新鲜度,并有效缩短了解冻时间。较低的解冻温度有利于保持金枪鱼肉的色泽、质地、微观结构。低压静电场辅助解冻金枪鱼能够更有效地缩短解冻时间并维持鱼肉品质,降低解冻过程中的氧化作用,使得解冻后金枪鱼具有最低的脂质和蛋白质氧化程度,其中MDA和羰基浓度分别为 (13.442 ± 0.392) nmol/g肉和 (0.016 ± 0.001) μ mol/g肉,TVB-N值最低,为 (8.367 ± 0.404) mg/100 g肉,肌纤维微观损伤轻微,保持了良好的质地品质和持水性(77.827%±0.215%)。

参考文献:

- [1] 高飞,徐剑宏,王晋,等. 金枪鱼营养价值及加工现状研究进展[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(15): 212-218.
GAO F, XU J H, WANG J, et al. Research progress on the nutritional value and processing status of tuna[J] Food Research and Development, 2023, 44(15): 212-218.
- [2] 张成林,刘晃,徐皓,等. 日本金枪鱼养殖产业现状及对中国的启示[J]. 渔业现代化, 2021, 48(5): 10-17.
ZHANG C L, LIU H, XU H, et al. Status quo of industrialized aquaculture of tuna in Japan and the enlightenment to China [J] Fishery Modernization, 2021, 48(5): 10-17.
- [3] 王雪松 谢晶. 不同解冻方式对冷冻竹筴鱼品质的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(23): 137-143.
WANG X S, XIE J. Effects of different thawing methods on the quality of frozen horse mackerel [J] Food Science, 2020, 41(23): 137-143.
- [4] 曹珠,沈鑫杰,施文正. 不同解冻方式对金枪鱼肉品质的影响[J]. 包装工程, 2023, 44(21): 169-175.
CAO Z, SHEN X J, SHI W Z. Effects of different thawing methods on quality of tuna meat [J]. Packaging Engineering, 2023, 44(21): 169-175.
- [5] 梁雪,刘九阳,孔保华,等. 新型物理场辅助解冻技术提升原料肉品质的研究进展[J]. 肉类研究, 2023, 37(2): 54-61.
LIANG X, LIU J Y, KONG B H, et al. Recent advances in new physical field-assisted thawing technologies to applied improve the quality of raw meat [J]. Meat Research, 2023, 37(2): 54-61.
- [6] 胡斐斐,钱书意,黄峰,等. 低压静电场辅助短期冻藏对猪肉品质的影响[J]. 中国农业科学, 2021, 54(9): 1993-2005.
HU F F, QIAN S Y, HUANG F, et al. Effect of low voltage electrostatic field-assisted short-term frozen storage on quality of pork [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(9): 1993-2005.
- [7] 程天赋. 解冻及酱卤过程中肌原纤维水对鸡胸肉品质的影响[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2019.

- CHENG T F. Effect of myofibrillar water on the quality of chicken breast during thawing and sauce [D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2019.
- [8] LI F F, WANG B, LIU Q, et al. Changes in myofibrillar protein gel quality of porcine *longissimus* muscle induced by its structural modification under different thawing methods[J]. *Meat Science*, 2019, 147: 108-115.
- [9] 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.
- WANG X C, LIU Y, LIU Y. Optimization of salt water-cold storage combined thawing technology of big-eye tuna chunk [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(7): 358-363.
- [10] 崔帅, 段玉权, 侯华铭, 等. 低压静电场辅助低温对葡萄和无花果保鲜效果的影响[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(13): 294-302.
- CUI S, DUAN Y Q, HOU H M, et al. Effects of low voltage electrostatic field assisted low temperature on preservation of *Vitis vinifera* Linn. and *Ficus carica* Linn [J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2023, 14(13): 294-302.
- [11] ZHANG M C, JIN Z C, GUO R, et al. The two-stage air thawing based on low voltage electric field (LVEF) can make the quality of thawed chicken breast close to that before freezing[J]. *LWT*, 2023, 173: 114344.
- [12] ZHANG Z L, SHI W B, WANG Y, et al. Mono-frequency ultrasonic-assisted thawing of frozen goose meat: influence on thawing efficiency, product quality and microstructure [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2023, 98: 106489.
- [13] JIANG Q Q, NAKAZAWA N, HU Y Q, et al. Changes in quality properties and tissue histology of lightly salted tuna meat subjected to multiple freeze-thaw cycles [J]. *Food Chemistry*, 2019, 293: 178-186.
- [14] CHANG H J, XU X L, ZHOU G H, et al. Effects of characteristics changes of collagen on meat physicochemical properties of beef semitendinosus muscle during ultrasonic processing [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2012, 5(1): 285-297.
- [15] HU F F, QIAN S Y, HUANG F, et al. Combined impacts of low voltage electrostatic field and high humidity assisted-thawing on quality of pork steaks [J]. *LWT*, 2021, 150: 111987.
- [16] 凌胜男, 陈雪叶, 王红丽, 等. 解冻方式对鲢鱼理化特性及微观结构的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(8): 48-54.
- LING S N, CHEN X Y, WANG H L, et al. Effect of thawing methods on the physicochemical properties and microstructure of anchovy (*Stolephorus heterolobus*) [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2022, 48(8): 48-54.
- [17] LYU Y, XIE J. Quality of cuttlefish as affected by different thawing methods [J]. *International Journal of Food Properties*, 2022, 25(1): 33-52.
- [18] PAN N, DONG C H, DU X, et al. Effect of freeze-thaw cycles on the quality of quick-frozen pork patty with different fat content by consumer assessment and instrument-based detection[J]. *Meat Science*, 2021, 172: 108313.
- [19] 余文晖, 王金锋, 谢晶. 响应面法优化金枪鱼复合冰衣液配比[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(3): 174-179.
- YU W H, WANG J F, XIE J. Response surface methodology for optimizing the proportion of tuna compound ice coating solution [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(3): 174-179.
- [20] 吕军仓, 席小艳. 质构分析仪在面粉品质评价中的应用[J]. *粮油加工*, 2006(3): 73-74, 77.
- LYU J C, XI X Y. Application of texture analyzer on quality evaluation of wheat flour products [J]. *Cereals and Oils Processing*, 2006(3): 73-74, 77.
- [21] NYAISABA B M, LIU X X, ZHU S C, et al. Effect of hydroxyl-radical on the biochemical properties and structure of myofibrillar protein from Alaska pollock (*Theragra chalcogramma*) [J]. *LWT*, 2019, 106: 15-21.
- [22] FENG Y M, HULTIN H O. Effect of pH on the rheological and structural properties of gels of water-washed chicken-breast muscle at physiological Ionic strength [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2001, 49(8): 3927-3935.
- [23] WANG J F, YU W H, XIE J. Effect of glazing with different materials on the quality of Tuna during frozen storage [J]. *Foods*, 2020, 9(2): 231.
- [24] 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.
- YU W H, WANG J F, XIE J. Effects of different thawing methods on tuna quality [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2019, 45(12): 189-197.
- [25] 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 K, YANG F W, LI X, 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.
- [26] 杨川, 武广玉, 李应彪, 等. 低压静电场结合高湿解冻对羊肉保水性的影响[J]. *食品科学*, 2023, 44(11): 86-94.
- YANG C, WU G Y, LI Y B, et al. Effect of low voltage electrostatic field combined with high humidity thawing on water holding capacity of frozen lamb meat [J]. *Food Science*, 2023, 44(11): 86-94.
- [27] 胡斐斐. 低压静电场辅助冻藏及解冻对猪肉品质的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2021.

- HU F F. Effect of Low Voltage electrostatic field-assisted frozen storage/thawing on quality of pork [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021.
- [28] QIAN S Y, LI X, WANG H, et al. Effects of low voltage electrostatic field thawing on the changes in physicochemical properties of myofibrillar proteins of bovine *Longissimus dorsi* muscle [J]. *Journal of Food Engineering*, 2019, 261: 140-149.
- [29] GILADI M, PORAT Y, BLATT A, et al. Microbial growth inhibition by alternating electric fields [J]. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, 2008, 52(10): 3517-3522.
- [30] 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.
- LIU Y. Study on optimization of thawing methods for tuna chunk[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2011.
- [31] 余文晖, 王金锋, 谢晶. 不同质量分数 NaCl 和 CaCl₂ 盐溶液解冻对金枪鱼品质的影响[J]. *食品科学*, 2019, 40(17): 240-246.
- YU W H, WANG J F, XIE J. Effects of thawing in NaCl and CaCl₂ solutions at different concentrations on the quality of frozen tuna[J]. *Food Science*, 2019, 40(17): 240-246.

Effect of different thawing methods on the quality characteristics of tuna

TONG Xiaoyang^{1,2}, ZHANG Yi², LIU Baolin¹, PANG Jinxin², KOU Xingran³, WU Songheng², BING Qijie⁴, QIAO Yongjin²

(1. School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Crop Breeding & Cultivation Research Institute, Shanghai Academy of Agriculture Sciences, Shanghai 201403, China; 3. School of perfume and aroma technology, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China; 4. Shanghai Mantou tuna International Trade Co., Ltd., Shanghai 200433, China)

Abstract: Tuna is rich in protein and polyunsaturated fatty acids and is a major deep-sea commercial food fish. It is frozen and preserved immediately after catching to reduce its nutrient loss and quality degradation. Therefore, to improve the edible quality of tuna, the thawing process of frozen tuna has become a key technology affecting the development of the tuna industry. To investigate the effects of different thawing methods on the quality of tuna, a comparative study of three thawing methods (salt-water thawing, ST; refrigerated thawing, RT; and low-voltage electrostatic field thawing, LV) in terms of water-holding, color, texture, antioxidant properties, freshness, and microstructure was carried out in this paper. The results showed that the thawing method significantly affected the quality of tuna. The ST group could better maintain the water holding capacity (79.878%±3.913%) and freshness [(8.750±0.495) mg/100 g] of tuna meat and effectively reduce the thawing time. However, the ST group had higher levels of oxidation and microstructural damage. The RT group was significantly better than the ST group regarding color, texture, and oxidation inhibition; however, the RT group had a high thawing loss rate and poor freshness. Compared with the other two thawing methods, the LV group can better maintain the color, texture, freshness [(8.367±0.404) mg/100 g], and water-holding capacity (77.827%±0.215%) of the tuna meat, and it can effectively inhibit the oxidation of lipids and proteins during the thawing process of tuna. At the same time, the LV group showed the smallest damage to the microstructure. In conclusion, low-voltage electrostatic field thawing can maintain tuna meat quality better. This paper provides the theoretical basis and practical exploration for improving the thawing quality of frozen fish products.

Key words: tuna; quality characteristics; thawing; low-voltage electrostatic field