



刘俊兰,徐愉聪,王雯瑄,等.物理场辅助解冻对蓝鳍金枪鱼肌肉品质及肌红蛋白特性的影响[J].轻工学报,2026,41(4):29-43.
LIU J L,XU Y C,WANG W X,et al. Effects of physical field-assisted thawing on muscle quality and myoglobin characteristic of *Thunnus maccoyii*[J]. Journal of Light Industry,2026,41(4):29-43.
DOI:10.12187/2026.04.003

物理场辅助解冻对蓝鳍金枪鱼肌肉品质及肌红蛋白特性的影响

刘俊兰,徐愉聪,王雯瑄,栾宏伟,步营,朱文慧,李学鹏

渤海大学 食品科学与工程学院/生鲜农产品贮藏加工及安全控制技术
国家地方联合工程研究中心,辽宁 锦州 121013

摘要:【目的】提高冷冻金枪鱼类产品的解冻品质。【方法】以冷冻蓝鳍金枪鱼为研究对象,采用冷藏解冻(CST)、微波解冻(MT)、磁场解冻(MFT)和低压静电场解冻(LEFT)这4种方式对其进行解冻,考查其持水能力、水分分布、色泽、肌红蛋白氧化还原物质、质构特性、新鲜度、挥发性风味化合物等的变化。【结果】CST处理组的品质劣变最为严重,蒸煮损失率、离心损失率和解冻损失率均显著高于其他处理组,高铁肌红蛋白占比高达31.93%,硫代巴比妥酸(TBA)值和TVB-N含量分别为0.19 mg MDA/kg和0.185 9 mg/g,2-戊酮相对浓度较高,同时肌红蛋白氧化程度最高, α -螺旋含量(19.83%)较低,不利于肌红蛋白二级结构的稳定性。MT处理组可以更好地维持金枪鱼的色泽,其 a^*/b^* (2.97)显著高于其他处理组,但因其具有加热不均匀的特点,导致其水分分布不均匀且肌肉组织的持水能力较差,肌红蛋白的氧化变性程度较为严重。MFT能抑制大冰晶的形成,可以显著维持金枪鱼的持水能力和质构特性,其硬度(566.73 g)和咀嚼性(228.98 mJ)均显著高于其他处理组,且总巯基含量最高(277.05 nmol/mg),在一定程度上可抑制肌红蛋白的氧化变性。LEFT处理组的综合品质保持最佳,持水能力较好,不易流动水占比高达97.33%,TVB-N含量(0.157 2 mg/g)最低,粒径(199.95 nm)最小,溶解度(84.37%)最高,能有效降低肌红蛋白氧化变性程度;紫外吸收光谱和内源荧光光谱均具有最高的吸收峰,能更好地维持肌红蛋白三级结构的稳定性,且肌肉组织完整性良好。此外,4个处理组中共鉴定出70种挥发性风味化合物,主要是醛类、酯类、醇类、酮类等化合物。【结论】LEFT在抑制肌红蛋白氧化变性、维持新鲜度和肌肉组织完整性等方面具有明显优势,可作为提高蓝鳍金枪鱼解冻品质的有效手段。

关键词:蓝鳍金枪鱼;物理场辅助解冻;肌肉品质;肌红蛋白特性

中图分类号:TS254.4 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-1553(2026)04-0029-15

收稿日期:2025-06-26;修回日期:2025-09-12;出版日期:2026-08-15

基金项目:辽宁省自然科学基金面上项目(2023-MS-297);辽宁省教育厅基本科研项目面上项目(LJKMZ20221486)

作者简介:刘俊兰(2001—),女,辽宁省辽阳市人,渤海大学硕士研究生,主要研究方向为水产品加工与贮藏。E-mail:liujl6924@163.com

通信作者:步营(1981—),男,山东省曲阜市人,渤海大学副教授,博士,主要研究方向为水产品加工与贮藏。E-mail:buying130@126.com

0 引言

蓝鳍金枪鱼 (*Thunnus maccoyii*) 是金枪鱼属中的重要经济物种,属于红肉鱼类,富含肌红蛋白、肌原纤维蛋白等优质蛋白质、多不饱和脂肪酸及必需矿物质,深受广大消费者喜爱。但蓝鳍金枪鱼在加工、贮藏过程中易发生蛋白质和脂质的氧化与变性,这会降低最终产品的品质^[1]。解冻是冷冻金枪鱼类加工前的一个关键环节,传统的空气解冻、静水解冻、冷藏解冻 (Cold Storage Thawing, CST) 等解冻方式往往会导致肌肉组织结构被破坏、色泽劣变、风味改变等问题,严重制约了金枪鱼类产品的商业化发展^[2]。

微波、磁场、电场等物理场辅助解冻技术具有解冻速度快、质量损失小、能源消耗低等优势,已逐渐应用于冷冻水产品的解冻^[3]。其中,微波解冻 (Microwave Thawing, MT) 利用电磁波中微波辐射与食品中偶极分子的相互作用实现能量转化,从而提高食品的温度,不仅可缩短解冻时间,还能快速通过微生物易繁殖的危险温度区,进而抑制氧化反应,保障食品安全^[2]。万海伦等^[4]以虹鳟鱼为研究对象,发现 1300 W、2450 MHz 的 MT 处理能有效抑制微生物生长、减缓色泽劣变,并降低氨、胺类等碱性物质含量。磁场解冻 (Magnetic Field Thawing, MFT) 利用磁场破坏水分子之间氢键的稳定性,促使大分子团簇分裂为多个小团簇,进而抑制大冰晶的形成,有利于维持水产品解冻后的品质^[5]。M. Mohsenpour^[6]等研究发现,MFT 具有更短解冻时间,在 40 Hz 和 80 Hz 条件下均可使肌原纤维蛋白结构展开并聚集,表明 MFT 在加速解冻过程方面具有潜力。R. Shi 等^[7]的研究进一步证实,MFT 在抑制脂质氧化和保持肌肉组织结构方面均存在显著优势。低压静电场解冻 (Low-voltage Electrostatic Field Thawing, LEFT) 则依靠电极板产生的电场力加速自由电子运动形成电晕风,其与中性粒子碰撞产生湍流和涡流,从而增加传热系数,加速解冻速率^[8]。此外,LEFT 处理还能减小冷冻水产品的冰晶尺寸,抑制冰晶形成并保护巯基,有效维持蛋白质的天然构象^[9]。S. Y. Qian 等^[10]研究发现,与

CST 处理组相比,LEFT 处理组的解冻时间明显缩短,且能通过保护肌肉的微观结构而显著降低水分损失和剪切力,有利于保持新鲜肉质,在肉类解冻中展现出良好的应用潜力。

目前,关于冷冻金枪鱼类的研究主要集中在解冻方式对其色泽、持水能力、质构等品质特性及肌原纤维蛋白的影响。例如,全潇洋等^[11]通过比较盐水解冻、CST 和 LEFT 对金枪鱼品质特性的影响,发现 LEFT 处理组可以更好地保持金枪鱼肉的色泽、质构、新鲜度及持水能力。X. X. Li 等^[12]研究发现,超声解冻可显著提升金枪鱼的持水能力,在 160 W 和 280 W 功率下肌原纤维蛋白的表面疏水性均降低,能更好地维持肌原纤维蛋白二级结构。Y. Y. Ma 等^[13]研究发现,280 W 超声解冻 12 min,可维持金枪鱼蛋白质结构稳定性,并提升肌原纤维蛋白的凝胶品质。然而,有关物理场辅助解冻对金枪鱼类肌肉品质及肌红蛋白特性的影响研究仍较少。

鉴于此,本研究拟以冷冻蓝鳍金枪鱼为研究对象,以 CST 为对照,研究 MT、MFT 和 LEFT 这 3 种物理场辅助解冻方式对其理化特性、风味特征及肌红蛋白氧化变性、构象等的影响,以期获得一种高效的冷冻金枪鱼类解冻方式,为提升金枪鱼类贮藏品质及维持其产品新鲜度提供参考。

1 材料与方法

1.1 主要材料与试剂

冷冻蓝鳍金枪鱼,购自山东蓝润水产有限公司,于 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保存;硼酸、 MgO 、硫代巴比妥酸 (TBA)、盐酸胍、尿素和戊二醛,上海麦克林生化科技股份有限公司;2-硝基苯甲酸 (DTNB)、酒石酸钾钠和 NaCl ,北京伊诺凯科技有限公司;苏木素-伊红染色试剂盒、三(羟甲基)氨基甲烷 (Tris) 和甘氨酸,北京索莱宝科技有限公司;2,4-二硝基苯肼 (DNPH)、乙二胺四乙酸 (EDTA) 和三氯乙酸,上海阿拉丁生化科技股份有限公司; NaH_2PO_3 、 Na_2HPO_3 和 HCl ,国药集团化学试剂有限公司; NaOH ,福晨 (天津) 化学试剂有限公司; $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 和乙醇,天津市风船化学试剂科技。上述试剂均为分析纯。

1.2 主要仪器与设备

NN-DF392B 型微波设备,松下电器(中国)有限公司;MFI-F1 型磁场冷冻冷藏箱,英都斯特(无锡)感应科技有限公司;CBJ-150-PM 型静电场设备,昆山广腾制冷设备有限公司;NM2012 型低场核磁共振(LF-NMR)仪,苏州纽迈分析仪器股份有限公司;CR-400 型色彩色差计,日本 Konica Minolta 控股公司;UV-2550 型紫外-可见分光光度计,岛津仪器(苏州)有限公司;TA-XT Plus 型质构仪,英国 SMS 公司;K9840 型自动凯氏定氮仪,山东海能生物工程有限公司;LE438 型 pH 计,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;G. A. S. 型气相色谱-离子迁移谱(GC-IMS)仪,海能未来技术集团股份有限公司;NanoBrook 90Plus 型 Zeta-粒径电位分析仪,美国布鲁克海文仪器公司;F-7000 型荧光分光光度计,S-4800 型扫描电子显微镜(SEM),日本 Hitachi 公司;LabRAM HR Evolution 型显微激光共聚焦拉曼光谱仪,法国 HORIBA France SAS 公司;Nikon Eclipse 80i 型光学显微镜,日本尼康株式会社;CM-1850 型冷冻切片机,德国徕卡公司。

1.3 实验方法

1.3.1 冷冻蓝鳍金枪鱼解冻处理 本实验共分 4 个处理组,解冻过程中实时监测冷冻蓝鳍金枪鱼块的中心温度,当中心温度达到 0 ℃ 时,视为解冻结束。

CST 处理:将冷冻蓝鳍金枪鱼块放在烧杯中,再于 4 ℃ 冰箱中解冻^[14]。

MT 处理:将冷冻蓝鳍金枪鱼块放在烧杯中,在 300 W、2450 MHz 的微波条件下解冻^[14]。

MFT 处理:将冷冻蓝鳍金枪鱼块放在烧杯中,在 10 mT、4 ℃ 的磁场条件下解冻^[15]。

LEFT 处理:将冷冻蓝鳍金枪鱼块放在烧杯中,在电流为 0.23 A、电极尺寸为 260 nm×300 nm×150 nm、输出电压为 2.5 kV、温度为 4 ℃ 的静电场条件下解冻^[16]。

1.3.2 蒸煮损失率、离心损失率和解冻损失率测定 参考步营等^[17]的方法测定蒸煮损失率和离心损失率,参考 J. Q. Zhou 等^[18]的方法测定解冻损失率,并稍作修改。取 5 g(记为 m_1 ,下同)解冻后的蓝鳍

金枪鱼样品放入蒸煮袋中封口,在 85 ℃ 条件下水浴加热 20 min,待样品冷却至室温后,称重,记为 m_2 ,计算蒸煮损失率;取 5 g 解冻后的蓝鳍金枪鱼样品,用滤纸包裹后放入 50 mL 离心管中,于 4000 r/min、4 ℃ 条件下离心 10 min,取出后用滤纸擦干附着在样品上的水分,称重,记为 m_3 ,计算离心损失率;取 5 g 冷冻蓝鳍金枪鱼样品,将其解冻后,用滤纸擦干附着在样品表面的水分,称重,记为 m_4 ,计算解冻损失率。蒸煮损失率、离心损失率和解冻损失率的计算公式如下:

$$\text{蒸煮损失率} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\%$$

$$\text{离心损失率} = \frac{m_1 - m_3}{m_1} \times 100\%$$

$$\text{解冻损失率} = \frac{m_1 - m_4}{m_1} \times 100\%$$

1.3.3 水分分布测定 采用步营等^[19]的方法,将不同解冻处理的蓝鳍金枪鱼块(2 cm×2 cm×2 cm)置于直径为 60 mm 的核磁共振管中,使用 LF-NMR 仪中的 Carr-Purcell-Meiboom-Gill 脉冲序列测定弛豫时间(T_2),具体参数为:前方挡位为 3,射频时间为 0.02 μs,等待时间为 2500 ms,回波时间为 0.2 ms,回拨个数为 5000 个,点击“累加采样”后得到 1 条回波曲线,再将其反演处理,类型选择 SIRT,迭代次数设置为 1 000 000 次,最后得到 T_2 谱图、峰对应的面积及比例,峰对应的横坐标为 T_2 。

利用多自旋回波成像序列对蓝鳍金枪鱼块进行核磁共振成像分析。首先使用水膜自检,随后放入蓝鳍金枪鱼样品,预扫描,选择成像的面,单一平面成像范围(FOV)为 100,重复时间(TR)为 2620 ms,命名后点击扫描,保存图片,最后在成像处理软件中选择颜色,得到磁共振成像(MRI)图像。

1.3.4 色差参数测定 在室温下,使用色彩色差计进行黑白校正后,测定蓝鳍金枪鱼的红绿色度值(a^*)、黄蓝色度值(b^*)、明度值(L^*)及红绿色度值与黄蓝色度值的比值(a^*/b^*)。

1.3.5 氧合肌红蛋白、脱氧肌红蛋白和高铁肌红蛋白占比测定 参考刘梦等^[12]的方法,并稍作修改。取 2 g 绞碎的蓝鳍金枪鱼样品,加入 20 mL 磷酸钠缓冲液(0.04 mol/L,pH 值为 6.8),以 10 000 r/min

的转速均质后,在 4 ℃、10 000 r/min 条件下离心 15 min,取上清液,使用双层滤纸过滤,将滤液分别在 525 nm、545 nm、565 nm 和 572 nm 波长处测定吸光度。氧合肌红蛋白、脱氧肌红蛋白和高铁肌红蛋白占比计算公式如下:

$$\text{氧合肌红蛋白占比} = (0.882R_1 - 1.267R_2 + 0.809R_3 - 0.361) \times 100\%$$

$$\text{脱氧肌红蛋白占比} = (0.369R_1 + 1.140R_2 - 0.941R_3 + 0.015) \times 100\%$$

$$\text{高铁肌红蛋白占比} = (-2.514R_1 + 0.778R_2 + 0.800R_3 + 1.098) \times 100\%$$

式中, R_1 为 A_{572}/A_{525} , R_2 为 A_{565}/A_{525} , R_3 为 A_{545}/A_{525} 。

1.3.6 质构特性测定 参考步营等^[17]的方法,并稍作修改。将蓝鳍金枪鱼块(2 cm×2 cm×2 cm)置于质构仪载物台上,使用 P50 探头进行测定,每个样品进行 2 次轴向压缩,压缩比例为 30%,测试速度均为 1 m/s,感应力为 5.0 g。

1.3.7 总挥发性盐基氮(Total Volatile Base Nitrogen, TVB-N)含量测定 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)^[20]中的自动凯氏定氮法测定蓝鳍金枪鱼中的 TVB-N 含量。

1.3.8 pH 值测定 将 5 g 绞碎的蓝鳍金枪鱼肉与 50 mL 去离子水混合,以 10 000 r/min 的转速均质 30 s,随后在 4 ℃、2991 r/min 条件下离心 10 min,取上清液,使用 pH 计测定 pH 值。

1.3.9 GC-IMS 测定 取 2 g 绞碎的蓝鳍金枪鱼肉于顶空瓶中,选择自动顶空进样,在 60 ℃、500 r/min 条件下孵育 15 min,进样体积为 0.5 mL,进样针温度为 65 ℃,载气为 N_2 ,IMS 温度为 45 ℃,气体流速为:0~2 min 为 2 mL/min;2~10 min,从 2 mL/min 升到 15 mL/min;10~20 min,从 15 mL/min 升到 100 mL/min;20~25 min,从 100 mL/min 升到 150 mL/min,总分析时间为 25 min。

1.3.10 肌红蛋白提取 参考 Y. Thiansilakul 等^[21]的方法,将 50 g 绞碎的蓝鳍金枪鱼肉与 150 mL Tris-HCl 缓冲液(10 mmol/L, pH 值为 8.0,含 1 mmol/L EDTA)混合,于 8000 r/min 条件下均质 1 min 后,在 4 ℃冰箱中静置 1.5 h,再将样品在 4 ℃、10 000 r/min

条件下离心 15 min,上清液即为肌红蛋白溶液。取 1 mL 肌红蛋白溶液与 4 mL 双缩脲溶液混合,静置 30 min 后,测定 540 nm 波长处的吸光度,采用双缩脲方法计算肌红蛋白溶液的浓度。

1.3.11 粒径和溶解度测定 使用 Tris-HCl 缓冲液(10 mmol/L, pH 值为 8.0,含 1 mmol/L EDTA)将提取的肌红蛋白溶液稀释至 1.0 mg/mL,室温下,使用 Zeta-粒径电位分析仪测定其粒径。溶解度的测定参考王艺月^[22]的方法,并稍作修改。将肌红蛋白溶液稀释至 5 mg/mL,取 5 mL 于离心管中,在 4 ℃、10 000 r/min 条件下离心 10 min,分别取上清液和未离心的肌红蛋白溶液各 1 mL,加入 4 mL 双缩脲溶液,室温下避光放置 30 min,再于 540 nm 波长处测定吸光度。按下式计算溶解度。

$$\text{溶解度} = \frac{\text{离心后蛋白质质量浓度}}{\text{离心前蛋白质质量浓度}} \times 100\%$$

1.3.12 总巯基、羰基和二聚酪氨酸含量及 TBA 值测定 1) 总巯基含量。参考 W. H. Zhu 等^[14]的方法,使用 DTNB 法测定肌红蛋白总巯基含量,并稍作修改。使用 Tris-HCl 缓冲液(10 mmol/L, pH 值为 8.0,含 1 mmol/L EDTA)将提取的肌红蛋白溶液稀释至 1.0 mg/mL,取 0.5 mL 稀释后的肌红蛋白溶液,加入 4.5 mL Tris-甘氨酸缓冲液(pH 值为 8.0,含有质量分数 1% 的 Tris、92 mmol/L 甘氨酸、4 mmol/L EDTA 和 8 mol/L 尿素),以 10 000 r/min 的转速均质后,加入 0.5 mL Ellman 试剂(10 mmol/L DTNB),于 25 ℃条件下反应 30 min,在 412 nm 波长处测定吸光度。巯基摩尔消光系数为 13 600 L/(mol·cm)。

2) 羰基含量。根据徐愉聪等^[23]的方法,使用 DNPH 法测定肌红蛋白羰基含量,并稍作修改。使用 Tris-HCl 缓冲液(10 mmol/L, pH 值为 8.0,含 1 mmol/L EDTA)将提取的肌红蛋白溶液稀释至 1.0 mg/mL,取 1 mL 稀释后的肌红蛋白溶液于 50 mL 离心管中,加入 1 mL 10 mmol/L 的 DNPH 溶液,于暗处反应 1 h,随后加入 4 mL 质量分数为 20% 的三氯乙酸溶液,在 4 ℃、10 000 r/min 条件下离心 15 min,弃上清液;沉淀用 1 mL 乙酸乙酯与无水乙醇的混合溶液(体积比为 1:1)洗涤 3 次,以除

去未反应的试剂;之后加入 5 mL 6 mol/L 的盐酸胍溶液,在 37 ℃ 条件下溶解 25 min,再于 4 ℃、10 000 r/min 条件下离心 5 min,除去不溶物质,最终在 370 nm 波长处测定上清液吸光度。

3)二聚酪氨酸含量。参考朱文慧等^[24]的方法,并稍作修改。使用荧光分光光度计测定肌红蛋白二聚酪氨酸含量。测试条件为:激发波长为 325 nm,发射波长为 420 nm,狭缝宽度为 10 nm,采用相对荧光值表示。

4)TBA 值。参考步营等^[19]的方法,并稍作修改。取 10 g 绞碎的蓝鳍金枪鱼肉,加入 50 mL 质量分数为 5%的三氯乙酸溶液,以 10 000 r/min 的转速均质、过滤后,吸取 5 mL 上清液,加入等体积的 0.02 mol/L TBA 溶液,混合均匀,于 80 ℃ 条件下水浴加热 40 min,冷却至室温,使用紫外-可见光分光光度计在 532 nm 波长处测定吸光度。

1.3.13 蛋白质构象检测 1)二级结构。将肌红蛋白溶液冻干后,使用显微激光共聚焦拉曼光谱仪在 1800~800 cm⁻¹ 范围内对其进行扫描,设置激发波长为 532 nm,曝光时间为 120 s,再利用 PeakFit v4.04 软件分析数据。

2)三级结构。参考朱文慧等^[25]的方法,并稍作修改。使用 10 mmol/L 的 Tris-HCl 缓冲液将肌红蛋白溶液的质量浓度调为 0.1 mg/mL,在 220~360 nm 范围内测定肌红蛋白的紫外吸收光谱。参考 Y. Li 等^[26]的方法,并稍作修改。使用荧光分光光度计测定 0.1 mg/mL 肌红蛋白溶液的内源荧光光谱。测试条件为:激发波长 295 nm,扫描范围 320~460 nm,工作电压 700 V。

1.3.14 微观结构观察 参考 W. H. Zhu 等^[14]的方法,并稍作修改。使用手术刀将解冻后的蓝鳍金枪鱼切成薄片(5 mm×5 mm×3 mm),使用体积分数为 25%的戊二醛溶液固定 24 h,随后除去固定液,再用 0.2 mol/L 磷酸盐缓冲液(pH 值为 7.2)漂洗 15 min,重复此步骤 3 次;使用去离子水漂洗 1 h,依次用体积分数为 50%、70%、90%的乙醇溶液梯度脱水 15 min,再用无水乙醇脱水 10 min,重复此步骤 3 次;使用 SEM 在放大 300 倍的情况下观察蓝鳍金枪鱼的微观结构。

参考 W. X. Wang 等^[6]的方法,并稍作修改。使用冷冻切片机将蓝鳍金枪鱼切成 5~10 μm 的薄片,利用苏木素-伊红染色试剂盒进行染色,采用光学显微镜在放大 40 倍的情况下观察蓝鳍金枪鱼的微观结构。

1.4 数据处理

每组实验均重复进行 3 次,实验结果以(平均值±标准差)表示,使用 SPSS 19.0 软件进行单因素方差分析(ANOVA),利用 OriginPro 9.0 软件进行数据可视化和绘图,其中, $P<0.05$ 表示差异显著, $P<0.01$ 表示差异极显著。

2 结果与分析

2.1 蓝鳍金枪鱼持水能力分析

持水能力是评估冷冻水产品品质劣变程度的重要参数之一^[2]。解冻过程中冰晶对肌肉组织造成的机械损伤,会使一部分水不能被细胞吸收,进而导致水产品的持水能力下降^[27]。不同物理场辅助解冻对蓝鳍金枪鱼持水能力的影响如图 1 所示,其中不同小写字母表示组间差异显著性($P<0.05$),下同。由图 1 可知,CST 处理组的解冻损失率(38.43%)、离心损失率(37.57%)和蒸煮损失率(35.76%)均显著高于其他解冻方式($P<0.05$),表明其持水能力最差。这可能是因为 CST 处理组的解冻时间最长,缓慢的热量交换过程会促进冰晶重结晶,加剧肌肉组织结构的破坏,进而降低肌肉的持水能力。MT 处理组因加热不均匀,使蛋白质变

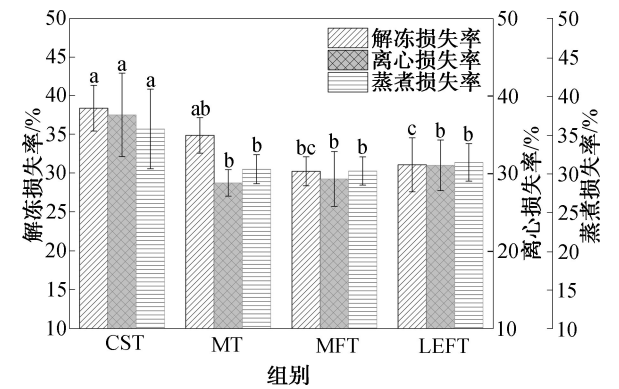


图 1 不同物理场辅助解冻对蓝鳍金枪鱼持水能力的影响
Fig. 1 Effects of different physical field-assisted thawing on water-holding capacity of *Thunnus maccoyii*

性和脂质氧化更为严重,此过程产生的次级氧化产物会干扰蛋白质与水之间的相互作用,最终导致水分和营养物质流失^[28]。相比之下,MFT 和 LEFT 处理组均表现出较好的持水能力,这可能是因为磁场和低压静电场对肌原纤维蛋白结构具有保护作用,能显著提升蓝鳍金枪鱼肌肉组织的持水能力^[29]。

2.2 蓝鳍金枪鱼水分分布分析

LF-NMR 技术可以表征水产品组织中的水分迁移特性,其中 T_2 可反映水分的存在状态,较短的 T_2 对应较低的水分流动性,即水分子的分子构型更稳定,其在组织内的移动受到限制^[1]。不同物理场辅助解冻对蓝鳍金枪鱼水分状态分布的影响如图 2 所示。由图 2a)和 b)可知,与 LEFT 处理组相比,CST、MT 和 MFT 处理组的 T_2 图谱中 3 个特征峰均出现明显的右移现象,这可能是因为解冻过程中冰晶的生长导致细胞膜结构损伤,促使结合水向自由水转化,同时,结构蛋白的降解可引发结合水释放,从而改变组织内部水分的分布状态^[31]。MFT (2.26%) 和 LEFT (2.44%) 处理组中结合水占比更高,不易流动水占比分别达 97.37% 和 97.33%,这主要是由于较短的解冻时间能有效减少冰晶对肌肉组织造成的机械损伤,更好地维持肌肉组织的持水能力。因此,MFT 和 LEFT 在保持蓝鳍金枪鱼水分分布和整体品质方面表现出明显优势。

MRI 技术能够可视化食品中氢质子的空间排列情况;在 MRI 图像中,信号强度与水分子的浓度呈正相关,图像中亮度和红色区域的信号越强,表明此处氢质子密度越高^[32]。由图 2c)可知,MFT 和 LEFT 处理组中红色区域信号强度明显,且分布均匀,表明这 2 种解冻方式均可有效维持肌肉组织的持水能力;相比之下,MT 处理组中红色区域信号强度较弱,且分布不均匀,表明其肌肉组织的持水能力较差,这可能与 MT 解冻过程中因局部过热导致的蛋白质变性 & 水分迁移有关。

2.3 蓝鳍金枪鱼色泽分析

色泽是影响消费者购买行为的关键感官指标。S. Palanisamy 等^[31]研究表明,相较于单独分析 a^* 、 b^* 和 L^* , a^*/b^* 更能准确地表征蓝鳍金枪鱼肉的色泽品质。不同物理场辅助解冻对蓝鳍金枪鱼色泽

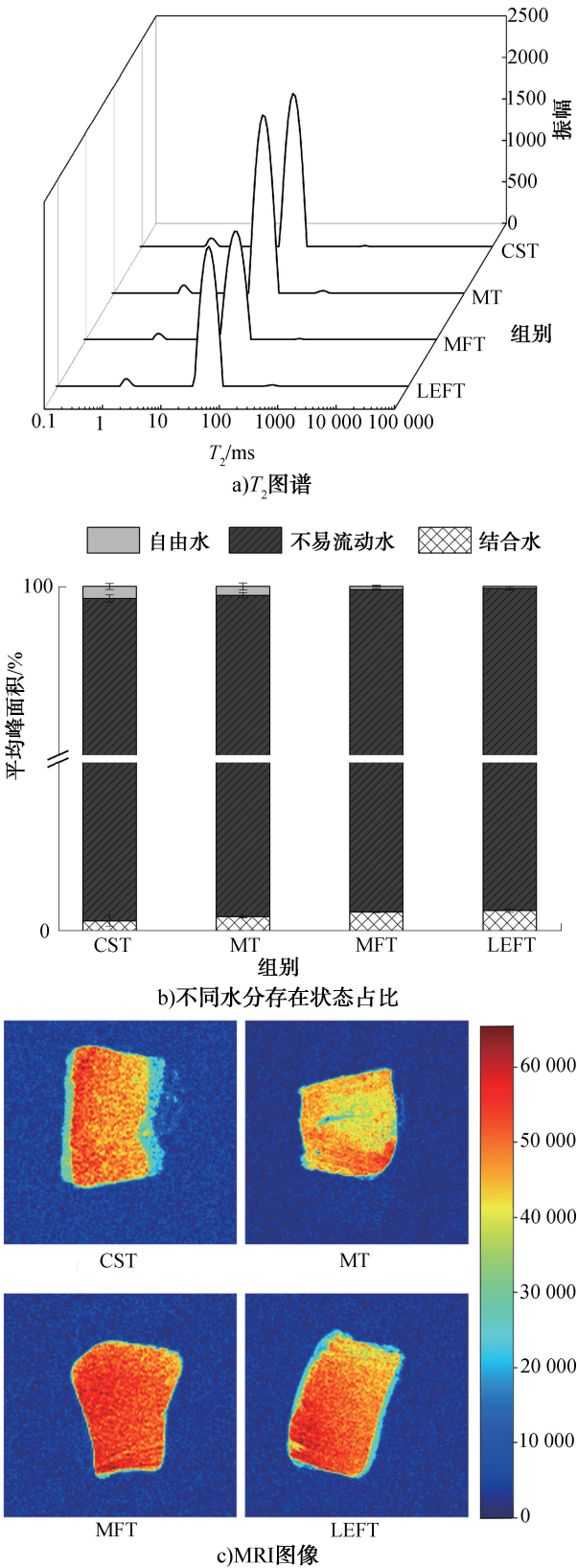


图 2 不同物理场辅助解冻对蓝鳍金枪鱼水分分布的影响
Fig. 2 Effects of different physical field-assisted thawing on water distribution of *Thunnus maccoyii*

的影响如图 3 所示。由图 3a)可知,CST(40.06)和MT(42.06)处理组的 L^* 均显著高于其他处理组 ($P<0.05$),这可能与解冻过程中自由水迁移引起表面光反射增强有关^[32],也可能是因为金枪鱼内部的色素活性降低及蛋白质的凝固变性,导致样品表面发生改变,增加了光的反射,导致 L^* 增加^[33]。MFT 处理组的 b^* (2.68)最低,表明磁场能有效抑制脂质氧化反应^[3]。 a^*/b^* 的降低可反映氧合肌红蛋白向高铁肌红蛋白的转化过程^[18]。LEFT 处理组的 a^*/b^* (1.93)显著低于其他处理组 ($P<0.05$),可能是解冻过程中空气在电场作用下发生电离产生臭氧,对蓝鳍金枪鱼的蛋白质和脂质产生一定的氧化作用,进而降低肌红蛋白的稳定性。由图 3b)可知,经 4 种解冻方式处理后,蓝鳍金枪鱼样品在肉眼观察下未出现明显色泽差异。

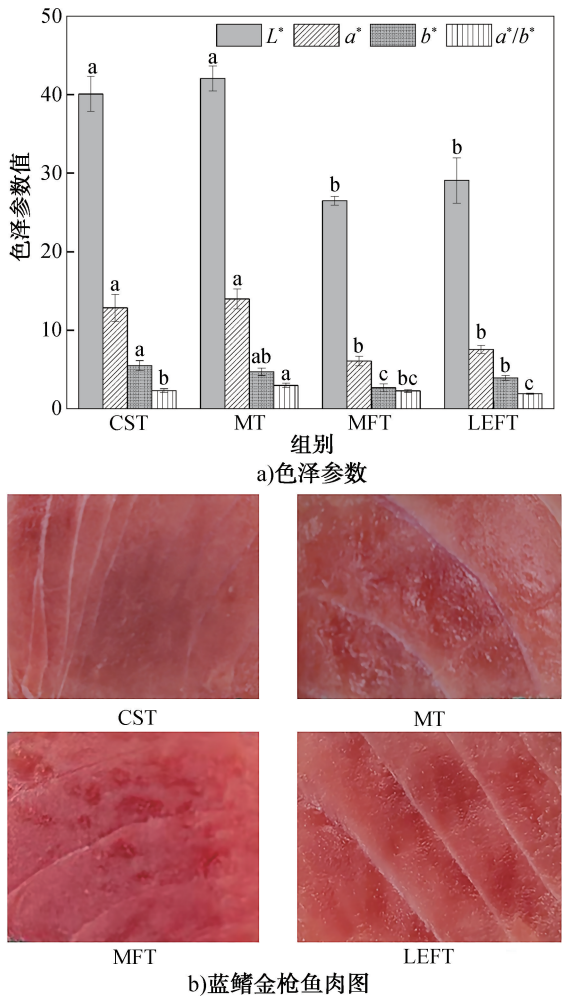


图 3 不同物理场辅助解冻对蓝鳍金枪鱼色泽的影响

Fig. 3 Effects of different physical field-assisted thawing on color of *Thunnus maccoyii*

2.4 蓝鳍金枪鱼肌红蛋白氧化还原物质分析

肌红蛋白作为决定红肉颜色的关键色素蛋白之一,主要以鲜红色的氧合肌红蛋白、紫红色的脱氧肌红蛋白和红棕色的高铁肌红蛋白这 3 种状态存在,其中脱氧肌红蛋白会与氧气发生反应形成氧合肌红蛋白,再进一步氧化生成高铁肌红蛋白^[33]。不同物理场辅助解冻对蓝鳍金枪鱼肌红蛋白氧化还原物质的影响如图 4 所示。由图 4 可知,不同解冻方式对氧合肌红蛋白占比的影响无显著性差异 ($P>0.05$)。CST 处理组具有最低的脱氧肌红蛋白占比 (59.22%) 和最高的高铁肌红蛋白占比 (31.93%),这可能与其较长的解冻时间促进了蛋白质和脂质发生氧化反应有关。相比之下,LEFT 处理组具有最低的高铁肌红蛋白占比 (19.87%) 和最高的脱氧肌红蛋白占比 (69.90%),这可能是因为较短的解冻时间会减少肌肉组织与空气的接触,进而有效抑制肌红蛋白的氧化。

2.5 蓝鳍金枪鱼质构特性分析

有研究^[35]表明,在解冻过程中,内源性蛋白酶作用及微生物代谢活动会导致蛋白质和脂质氧化,进而改变鱼肉的硬度、弹性、咀嚼性等质构特性;此外,冰晶对肌肉组织造成的机械损伤,也会降低肉制品的持水能力,进而降低产品品质。不同物理场辅助解冻对蓝鳍金枪鱼质构特性的影响见表 1。由

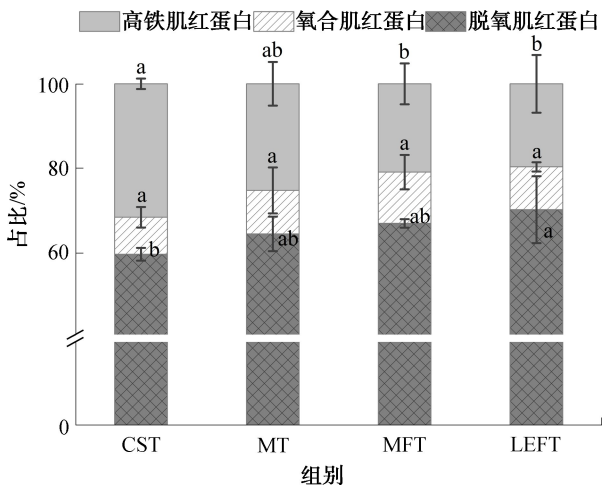


图 4 不同物理场辅助解冻对蓝鳍金枪鱼肌红蛋白氧化还原物质的影响

Fig. 4 Effects of different physical field-assisted thawing on redox substances of *Thunnus maccoyii* myoglobin

表 1 可知,各处理组之间的硬度差异显著($P<0.05$),其中 MFT 处理组具有最大的硬度(556.73 g),这可能是因为 MFT 解冻均匀,对细胞的破坏程度较小,能更好地维持肌肉的韧性;其次是 LEFT 处理组(556.73 g),这可能是因为蓝鳍金枪鱼在低压静电场作用下,内源性蛋白酶活性受到抑制,导致肌肉组织的损伤程度降低;而 MT 处理组的硬度最低(273.73 g),这可能是因为 MT 加热不均匀,促进了肌肉纤维损伤和蛋白质氧化变性,导致肌肉组织结构变得松散,因此硬度降低。MFT 处理组的咀嚼性也最高(228.98 mJ),这可能是因为磁场可以抑制肌原纤维蛋白变性,维持肌肉组织的结合力和持水能力。各处理组之间的弹性和回复性均无显著性差异($P>0.05$)。综上,MFT 和 LEFT 处理组均能保持样品更优的质地,这可能归因于其解冻过程既能有效抑制蛋白质变性,还能减轻肌肉组织结构损伤。

2.6 蓝鳍金枪鱼新鲜度分析

TVB-N 是评价水产品新鲜度的重要指标之一,能反映由微生物代谢活动和内源性蛋白酶作用所产生的氨、二甲胺等含氮化合物的累积情况^[35]。根据国家标准^[20],当海水鱼虾的 TVB-N 含量超过 0.300 0 mg/g 时,表明其新鲜度严重降低,不建议食用。不同物理场辅助解冻对蓝鳍金枪鱼 TVB-N 含量和 pH 值的影响如图 5 所示。由图 5 可知,各解冻处理组的 TVB-N 含量均在食品安全国家标准限值之内。CST 处理组的 TVB-N 含量最高(0.185 9 mg/g),这可能是因为蓝鳍金枪鱼在该解冻过程中长时间暴露于空气中,导致微生物活动加剧。相比之下,MFT 和 LEFT 处理组的 TVB-N 含量较低且相近($P>0.05$),分别为 0.157 5 mg/g 和 0.157 2 mg/g,表明较短的解冻时间能有效抑制蛋白质的脱酰胺和脱

羧反应,进而减少 TVB-N 生成^[33]。此外 MFT 和 LEFT 处理组的 pH 值相近,较 CST 处理组分别降低了 4.94%和 3.68%,这可能是因为磁场和低压静电场的作用缩短了解冻时间,抑制了内源性蛋白酶活性和微生物生长,进而减少了碱性物质累积,使 pH 值降低^[36]。相比之下,MT 处理组表现出较高的 pH 值,这可能是因为微波辐射与内源性蛋白酶的共同作用促使蛋白质构象发生改变,加速了氨基酸降解,最终导致氨类物质生成,使 pH 值升高^[37]。

2.7 蓝鳍金枪鱼挥发性风味化合物分析

挥发性风味化合物是评价食品品质和新鲜度的关键指标之一,能极大程度地影响消费者的偏好和市场接受度^[6]。挥发性风味指纹图谱中信号峰的强度可反映各挥发性风味化合物的相对浓度,颜色越深表示其相对浓度越高。不同物理场辅助解冻对蓝鳍金枪鱼挥发性风味化合物的影响如图 6 所示。由图 6 可知,共检测到 70 种挥发性风味化合物,主要包括 5 种烃类、17 种醛类、11 种酯类、13 种醇类、7 种酮类、1 种呋喃类等。其中,嗅阈值较低的醛类化合物被确认为蓝鳍金枪鱼的主要挥发性风味化合物,主要来源于脂肪氧化和蛋白质降解,包括癸醛、反-2-辛烯醛、苯甲醛甘油缩醛等,对蓝鳍金枪鱼独特的香气特征具有显著贡献。正己醛虽对蓝鳍金枪鱼整体风味有所贡献,但其在较高相对浓度下可能会产生酸败气味。酯类化合物通常呈

表 1 不同物理场辅助解冻对蓝鳍金枪鱼质构特性的影响

Table 1 Effects of different physical field-assisted thawing on textural properties of <i>Thunnus maccoyii</i>				
组别	硬度/g	弹性/mm	咀嚼性/mJ	回复性
CST	423.70±2.68 ^c	0.72±0.04 ^a	185.06±10.80 ^{ab}	0.24±0.03 ^a
MT	273.73±11.23 ^d	0.77±0.02 ^a	146.41±8.67 ^b	0.26±0.01 ^a
MFT	556.73±35.02 ^a	0.75±0.06 ^a	228.98±38.42 ^a	0.24±0.03 ^a
LEFT	504.53±36.12 ^b	0.71±0.03 ^a	202.95±56.87 ^{ab}	0.26±0.01 ^a

注:同列不同小写字母表示组间差异显著($P<0.05$)。

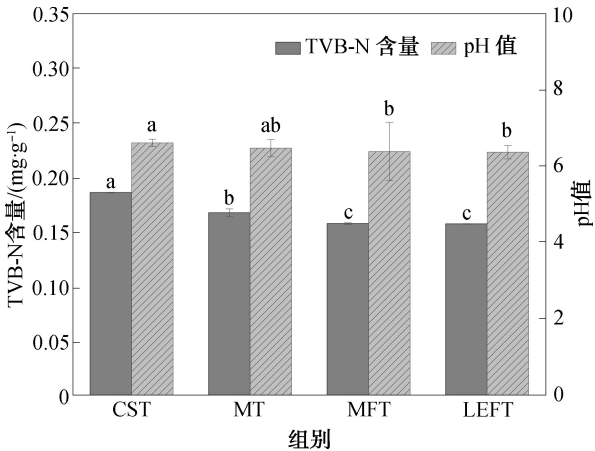


图 5 不同物理场辅助解冻对蓝鳍金枪鱼 TVB-N 含量和 pH 值的影响

Fig. 5 Effects of different physical field-assisted thawing on TVB-N content and pH value of *Thunnus maccoyii*

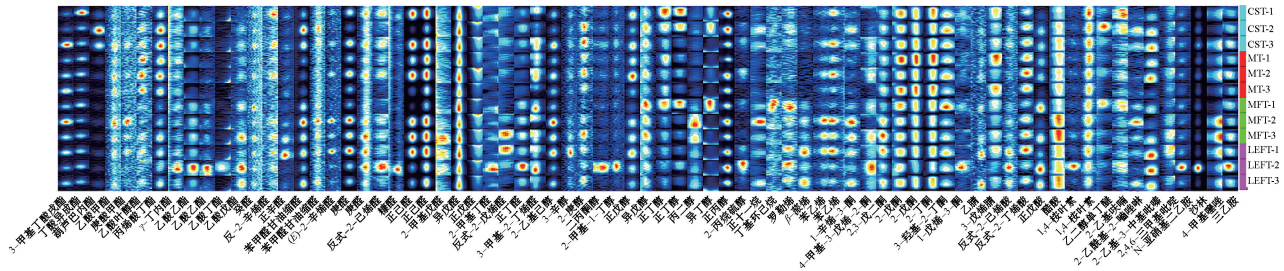


图 6 不同物理场辅助解冻对蓝鳍金枪鱼挥发性风味化合物的影响
Fig. 6 Effects of different physical field-assisted thawing on volatile flavor compounds of *Thunnus maccoyii*

现花香和果香,在 4 种处理组之间存在明显差异,其中乙酸乙酯在 MFT 处理组中含量较高,在 MT 处理组中含量较低,表明其可能作为区分不同解冻方式的标志物。醇类化合物包括 2-乙基己醇、正丁醇、正丙醇,其中正丙醇在 MFT 处理组中的相对浓度最高。这些醇类化合物可能由微生物代谢活动形成,能促进多不饱和脂肪酸的氧化和分解。CST 处理组中 2-戊酮的相对浓度较高,可能是由长时间解冻导致脂质氧化加速所致。MFT 和 LEFT 处理组均含有较高相对浓度的 1-辛烯-3-酮、 β -蒎烯、罗勒烯和丁烯环己烷。与 CST 处理组相比,MFT 和 LEFT 处理组中 2-戊酮、正丁醛、正戊醛的相对浓度均较低,表明 MFT 和 LEFT 均可有效抑制冷冻蓝鳍金枪鱼在解冻过程中产生不良气味。碳氢类化合物的气味阈值较高,其对蓝鳍金枪鱼的整体风味影响不大。因此,解冻方式会影响蓝鳍金枪鱼挥发性风味化合物的组成和相对浓度,进而影响最终产品的风味感官特性。

2.8 蓝鳍金枪鱼蛋白质氧化变性分析

2.8.1 粒径和溶解度分析 蛋白质的变性程度可通过粒径和溶解度进行表征,其中溶解度的降低通常伴随着粒径的增大^[38]。不同物理场辅助解冻对蓝鳍金枪鱼肌红蛋白粒径和溶解度的影响如图 7 所示。由图 7 可知,CST 处理组的粒径最大(380.82 nm),其次是 MFT(319.01 nm)、MT(217.66 nm)和 LEFT(199.95 nm)处理组,这可能是因为肌红蛋白在解冻过程中发生了变性和聚集,导致内部疏水基团暴露,增强了分子之间的相互作用。值得注意的是,LEFT 处理组的粒径最小,这可能是因为低压静电场产生的臭氧和负离子可有效抑制内源性蛋白酶的

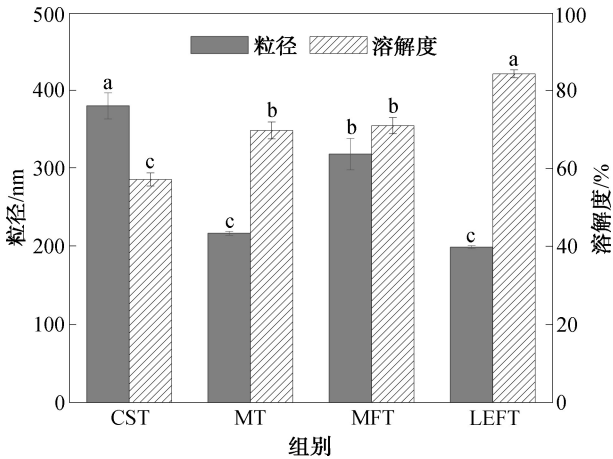


图 7 不同物理场辅助解冻对蓝鳍金枪鱼肌红蛋白粒径和溶解度的影响
Fig. 7 Effects of different physical field-assisted thawing on particle size and solubility of *Thunnus maccoyii* myoglobin

活性和微生物生长,减轻肌红蛋白的氧化损伤,进而更好地维持肌红蛋白的天然构象^[30]。

在 4 个处理组中,LEFT 处理组的溶解度最高(84.37%),这可能一方面是因为低压静电场处理对钙蛋白酶活性具有抑制作用,可通过促进蛋白质复性,有效维持肌红蛋白的溶解度^[10];另一方面,低压静电场可以降低蛋白质的粒径,进而增加蛋白质与水之间的相互作用,即 LEFT 可有效维持肌红蛋白结构的稳定性。MT 和 MFT 处理组的溶解度均显著低于 LEFT 处理组,分别为 69.87% 和 71.10%,这可能是因为 MT 的解冻过程中,电磁波和热能的转化加速了肌红蛋白的氧化变性进程,而 MFT 通过抑制大冰晶的形成,降低冰晶对肌肉组织造成的机械损伤,进而抑制促氧化剂释放。

2.8.2 总巯基、羰基和二聚酪氨酸含量分析 自由基与氨基酸侧链或肽键之间的相互作用可引发蛋

白质氧化,其特征性变化包括巯基的形成及羰基含量的减少,这些分子层面的改变会显著影响蛋白质的构象和功能特性^[39]。不同物理场辅助解冻对蓝鳍金枪鱼肌红蛋白总巯基、羰基和二聚酪氨酸含量的影响如图 8 所示。由图 8a)可知,CST 处理组的总巯基含量最低(149.04 nmol/mg),这可能是由缓慢的解冻过程导致肌红蛋白结构展开,使原本埋藏的巯基暴露于氧化环境中所致^[6];相比之下,MT(257.87 nmol/mg)、MFT(277.05 nmol/mg)和 LEFT(274.82 nmol/mg)处理组的总巯基含量更高,且三者无显著性差异($P>0.05$),表明这些解冻方式能更有效地维持肌红蛋白的氧化稳定性。CST 处理组的羰基含量最高(6.89 nmol/mg),而 MFT 处理组的羰基含量则保持了最低水平(5.35 nmol/mg),这可能

归因于磁场在 MFT 中发挥的双重作用:一方面抑制脂质的过氧化反应,另一方面通过减轻冰晶造成的细胞损伤,有效减少了过氧化物的累积^[3]。这与前述总巯基含量的变化趋势相互印证,进一步证实了 MFT 在延缓蛋白质氧化方面具有优势。

由图 8b)可知,MFT 和 LEFT 处理组的二聚酪氨酸含量均较低,表明这 2 种解冻方式能有效抑制酪氨酸自由基之间的相互作用,从而减轻肌红蛋白的氧化损伤,这不仅有助于维持肌红蛋白结构的稳定性,还能保持其色泽品质。相比之下,CST 和 MT 处理组均表现出较高的二聚酪氨酸含量,反映了氨基酸分子之间的作用力减弱,这与前述 TVB-N 含量升高的结果相一致。

2.9 蓝鳍金枪鱼脂质氧化分析

解冻过程中不饱和脂肪酸产生的次级氧化产物,会对蓝鳍金枪鱼的品质造成不良影响。不同物理场辅助解冻对蓝鳍金枪鱼肌红蛋白 TBA 值的影响如图 8b)所示。由图 8b)可知,CST 处理组的 TBA 值(0.19 mg MDA/kg)显著高于其他处理组($P<0.05$),这可能是因为 CST 处理组中鱼肉表面与空气接触的时间较长,导致脂质氧化更加严重,在脂质稳定性保持方面存在劣势;其次是 LEFT 处理组(0.17 mg MDA/kg),这可能是因为 LEFT 产生的臭氧会加剧氧化敏感性食品的脂质氧化^[33];而 MT(0.14 mg MDA/kg)和 MFT(0.13 mg MDA/kg)处理组的 TBA 值之间无显著性差异($P>0.05$),这可能是因为 MFT 有利于蓝鳍金枪鱼均匀解冻,能有效抑制大冰晶形成,降低组织损伤和脂质氧化程度;同时,MT 能实现快速解冻,提高解冻效率,降低解冻过程中的脂肪氧化。

2.10 蓝鳍金枪鱼蛋白质构象分析

2.10.1 二级结构分析 拉曼光谱可以表征蛋白质的二级结构,通常 α -螺旋和 β -折叠含量越高,表明蛋白质的结构越稳定;而 β -转角和无规则卷曲含量越高,表明蛋白质结构越松散、无序和不稳定。解冻过程中,肌肉组织中水分的迁移、冰晶的融化及机械损伤,均会影响蛋白质中氢键的稳定性,进而促使蛋白质的二级结构发生改变;此外,蛋白质的氧化也会破坏蛋白质中氨基酸侧链和肽中的氢键,

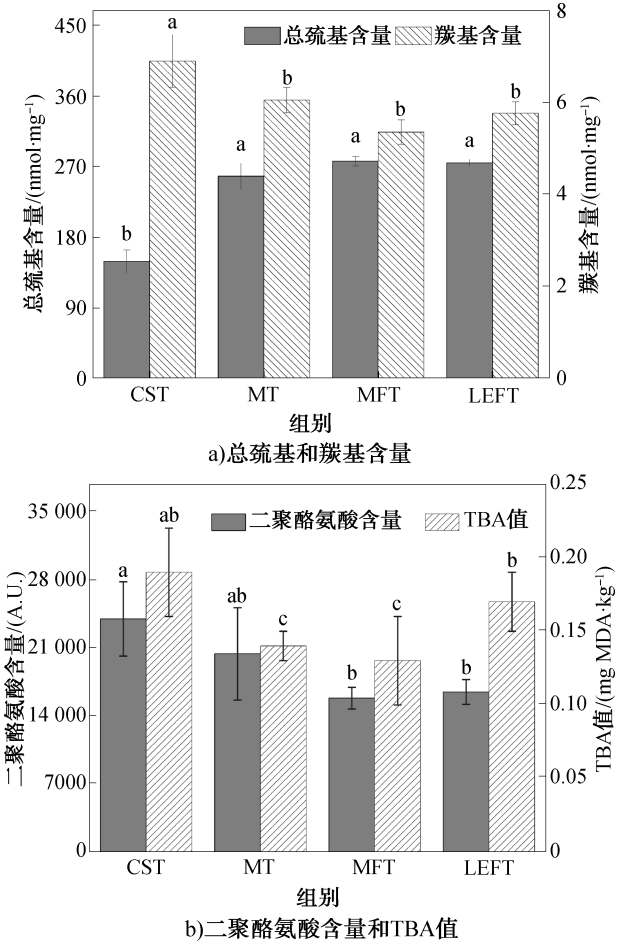


图 8 不同物理场辅助解冻对蓝鳍金枪鱼肌红蛋白总巯基、羰基和二聚酪氨酸含量及 TBA 值的影响
Fig. 8 Effects of different physical field-assisted thawing on total sulfhydryl, carbonyl group and dityrosine contents, and TBA value of *Thunnus maccoyii* myoglobin

导致蛋白质结构的变化^[16]。不同物理场辅助解冻对蓝鳍金枪鱼肌红蛋白二级结构的影响如图 9 所示。由图 9 可知,CST 处理组的 α -螺旋含量最低 (19.83%),无规则卷曲含量最高 (14.05%),表明 CST 易引起肌红蛋白二级结构发生变化,降低其结构稳定性。各处理组的 β -折叠和 β -转角含量均无显著差异($P>0.05$)。LEFT 处理组的 α -螺旋含量最高 (24.94%),无规则卷曲含量最低 (12.14%),表明 LEFT 可以维持肌红蛋白二级结构的稳定性,抑制蛋白质结构从有序向无序转变,减轻解冻对蛋白质的损伤。综上,LEFT 在维持肌红蛋白二级结构稳定性方面效果更佳。

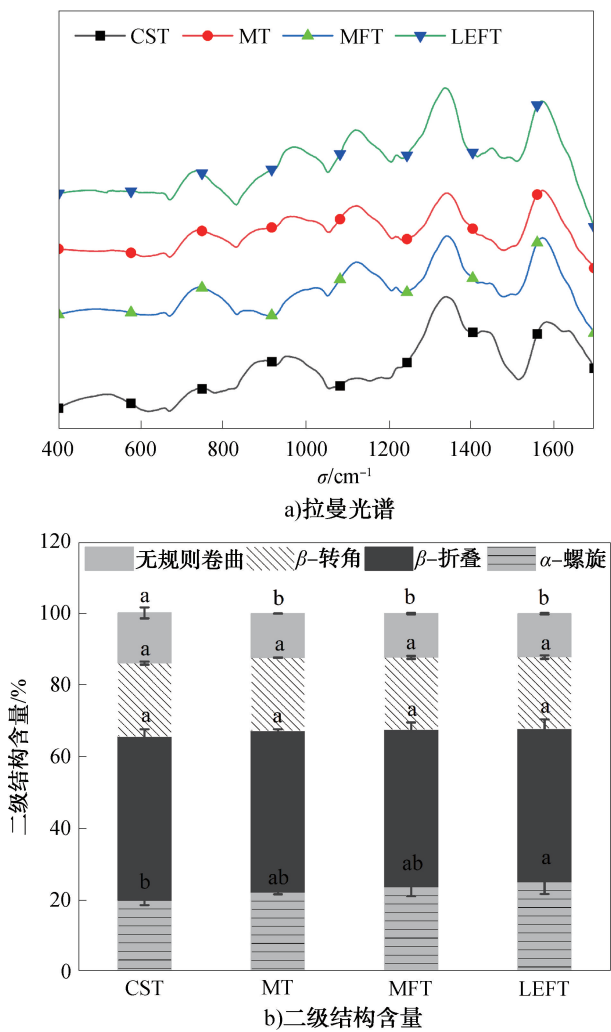


图 9 不同物理场辅助解冻对蓝鳍金枪鱼肌红蛋白二级结构的影响

Fig. 9 Effects of different physical field-assisted thawing on secondary structure of *Thunnus maccoyii* myoglobin

2.10.2 三级结构分析 蛋白质三级结构的变化可以通过紫外吸收光谱和内源荧光光谱进行表征,其中后者主要基于芳香族氨基酸,尤其是色氨酸对环境极性变化的氧化敏感性^[40],在蛋白质发生聚集和交联过程中,色氨酸残基会暴露于溶剂环境中,导致荧光猝灭现象。不同物理场辅助解冻对蓝鳍金枪鱼肌红蛋白三级结构的影响如图 10 所示。由图 10a)可知,LEFT 处理组具有最高的吸收峰,其次是 MFT 处理组,表明 LEFT 和 MFT 均对蓝鳍金枪鱼肌红蛋白的氧化损伤较小,这可能是因为这 2 种解冻方式有助于芳香族氨基酸氧化、结构展开及疏水基团暴露,降低对肌红蛋白的破坏,进而有利于维持其结构完整性,最大限度地延缓其氧化^[14]。由图 10b)可知,相较于 CST,其他 3 种解冻方式均引起最大吸收波长(λ_{max})发生红移,表明色氨酸残基微环境的极性增强,肌红蛋白三级结构发生了显著改

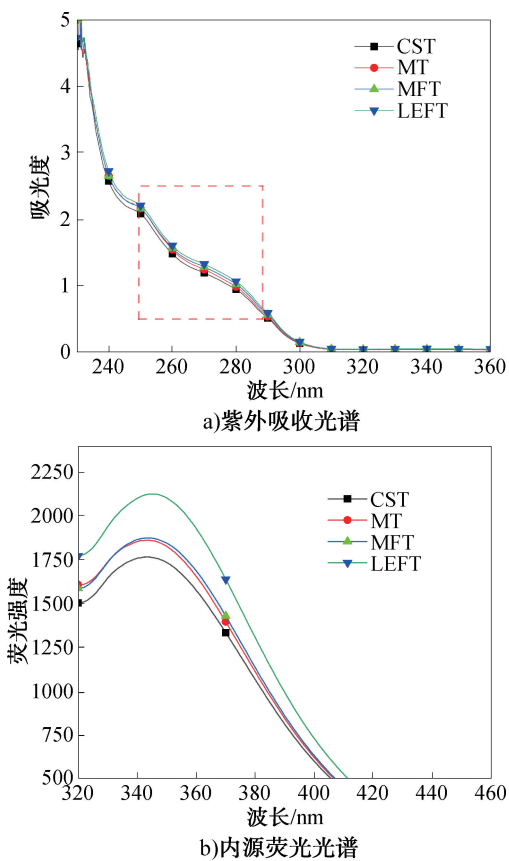


图 10 不同物理场辅助解冻对蓝鳍金枪鱼肌红蛋白三级结构的影响

Fig. 10 Effects of different physical field-assisted thawing on tertiary structure of *Thunnus maccoyii* myoglobin

变^[41]。其中,MFT 和 LEFT 均表现出优异的蛋白质天然构象保持能力,且 LEFT 优于 MFT。而 CST 的长时间解冻过程及 MT 的非均匀加热特性均促进了色氨酸的氧化变性,使荧光强度明显降低。这与紫外吸收光谱结果一致。

2.11 蓝鳍金枪鱼微观结构分析

不同物理场辅助解冻对蓝鳍金枪鱼微观结构的影响如图 11 所示。由图 11a)可知,MFT 和 LEFT 处理组的肌肉纤维网络排列紧密、结构完整,肌间空隙明显减少,这可能是因为较短的解冻时间有效抑制了冰晶重结晶,有利于保持肌肉纤维网络的完整性^[2]。相比之下,CST 和 MT 处理组的肌肉纤维断裂及肌间空隙扩大明显,这可能是因为冰晶重结晶造成的机械损伤及内源性蛋白酶活性增强引起蛋白质降解,进而导致持水能力下降。该结果与前

述持水能力结果高度吻合,也为不同解冻方式之间的水分保留差异提供了结构支持。由图 11b)可知,CST 处理组的肌肉纤维弯曲、多孔且不规则,这可能是由冰晶生长、内源性蛋白酶作用和微生物代谢活动共同作用引起的。相较于 CST,其他 3 种解冻方式均能较好地维持肌肉纤维的完整性和有序排列,其中 LEFT 的保护效果更为明显,而 MT 虽能较好地维持肌肉纤维结构稳定性,但其肌间空隙相对较大,可能会影响产品的最终持水能力。该结果与 Y. M. Zhang 等^[40]的研究结果较一致。

3 结论

本文以蓝鳍金枪鱼为研究对象,通过考查 CST、MT、MFT 和 LEFT 这 4 种解冻方式下其持水能力、水分分布、色泽、肌红蛋白氧化还原物质、质构特性、新鲜度、挥发性风味化合物等的变化,研究了不同物理场辅助解冻方式对蓝鳍金枪鱼肌肉品质及肌红蛋白特性的影响,得到如下结论:CST 会导致蓝鳍金枪鱼严重的品质劣变,表现为持水能力最差,解冻损失率高达 38.43%,肌红蛋白氧化变性程度高,高铁肌红蛋白占比为 31.93%,粒径较大且溶解度较低,不利于维持肌红蛋白的二级和三级结构;MT 在保持色泽方面效果最佳,其 a^*/b^* 最高(2.97),但因其加热不均匀,导致蛋白质变性和脂质氧化更为严重;MFT 因其可以减小冰晶对肌肉组织的机械损伤,既能显著提升蓝鳍金枪鱼的质构特性,还能抑制脂质氧化,有效维持挥发性风味化合物稳定性,其中乙酸乙酯和正丙醇的相对浓度较高;LEFT 不仅可以有效保持蓝鳍金枪鱼的新鲜度(TVB-N 值为 0.157 2 mg/g),抑制蛋白质的氧化变性(总巯基含量为 274.82 nmol/mg),还能维持肌红蛋白二级和三级结构的稳定性,有效维持肌肉结构完整性。4 个处理组中共检测出 70 种挥发性风味化合物,其中 CST 处理组中 2-戊酮相对浓度较高,劣变严重。本研究为物理场辅助解冻技术在高端水产品加工中的应用提供了参考。未来可进一步探究 LEFT 的参数优化及其影响蛋白质氧化变性的分子机制,以拓展该技术在冷链物流领域的应用范围。

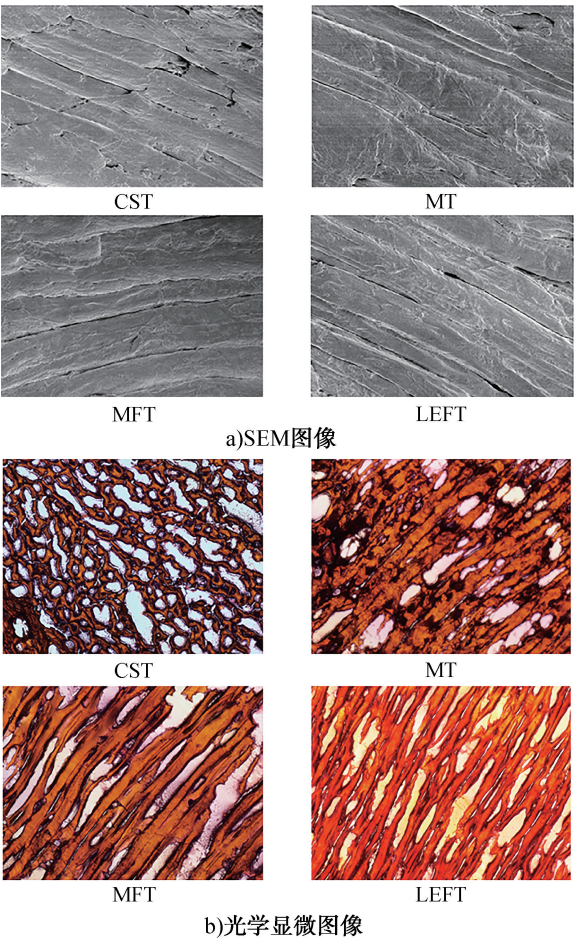


图 11 不同物理场辅助解冻对蓝鳍金枪鱼微观结构的影响
Fig. 11 Effects of different physical field-assisted thawing on microstructure of *Thunnus maccoyii*

参考文献:

- [1] WANG X Y, XIE J, CHEN X J. Differences in lipid composition of Bigeye tuna (*Thunnus obesus*) during storage at 0 °C and 4 °C [J]. Food Research International, 2021, 143: 110233.
- [2] SUN Y, LUO W W, HE M X, et al. Effects of different thawing methods on the physicochemical properties and myofibrillar protein characteristics of *Litopenaeus vannamei* [J]. LWT-Food Science and Technology, 2024, 192: 115668.
- [3] JIANG J B, ZHANG L Y, YAO J B, et al. Effect of static magnetic field assisted thawing on physicochemical quality and microstructure of frozen beef tenderloin [J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 914373.
- [4] 万海伦, 应晓国, 赵波, 等. 不同解冻方式对生食鱼片解冻品质的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(15): 227-235.
- WAN H L, YING X G, ZHAO B, et al. Effects of different thawing methods on the quality of sashimi [J]. Food Science, 2022, 43(15): 227-235.
- [5] 吴小桥, 毛爽, 阴鑫烨, 等. 物理解冻技术在肉类及其制品中的应用研究进展[J]. 粮食与油脂, 2025, 38(1): 6-11, 16.
- WU X Q, MAO S, YIN X Y, et al. Research progress on the application of physical thawing technology in meat and its products [J]. Cereals & Oils, 2025, 38(1): 6-11, 16.
- [6] MOHSENPOUR M, NOURANI M, ENTESHARY R. Effect of thawing under an alternating magnetic field on rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fillet characteristics [J]. Food Chemistry, 2023, 402: 134255.
- [7] SHI R, SUN Z Q, YU X M, et al. Effect of magnetic field-assisted thawing on the quality and microstructure of *Portunus trituberculatus* meat [J]. Food Research International, 2025, 202: 115722.
- [8] ZHANG Y L, LIU G S, XIE Q W, et al. A comprehensive review of the principles, key factors, application, and assessment of thawing technologies for muscle foods [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2023, 22(1): 107-134.
- [9] FEI L F, MA Z, YUE A D, et al. Effect of low-voltage electrostatic field-assisted partial freezing on large yellow croaker protein properties and metabolomic analysis during storage [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2024, 104(4): 2359-2371.
- [10] 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.
- [11] 全潇洋, 张怡, 刘宝林, 等. 不同解冻方式对金枪鱼品质特性的影响[J]. 上海海洋大学学报, 2024, 33(5): 1283-1291.
- TONG X Y, ZHANG Y, LIU B L, et al. Effect of different thawing methods on the quality characteristics of tuna [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2024, 33(5): 1283-1291.
- [12] 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: 5081-5093.
- [13] MA Y Y, LI X X, SUN P, et al. Effect of ultrasonic thawing on gel properties of tuna myofibrillar proteins [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46: e16268.
- [14] ZHU W H, GUO H F, HAN M L, et al. Evaluating the effects of nanoparticles combined ultrasonic-microwave thawing on water holding capacity, oxidation, and protein conformation in jumbo squid (*Dosidicus gigas*) mantles [J]. Food Chemistry, 2023, 402: 134250.
- [15] NIAN R, WANG Y, XIONG X F, et al. Effects of magnetic field-assisted thawing on the physicochemical properties of blueberries [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2025, 105(11): 6106-6114.
- [16] LI W Z, XU Y C, LIU J L, et al. Effect of plasma-activated water combined with low-voltage electric field-assisted thawing on the quality and protein structure of spotted sea bass [J]. Food Chemistry, 2025, 29: 102776.
- [17] 步营, 何圣琪, 王飞, 等. 珍珠龙胆石斑鱼无水保活过程中肌肉品质变化及近红外光谱模型的构建[J]. 中国食品学报, 2023, 23(7): 392-402.
- BU Y, HE S Q, WANG F, et al. Quality changes and near-infrared model construction of pearl gentian grouper during waterless preservation [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(7): 392-402.
- [18] ZHOU J Q, SUN Q X, WEI S, et al. Changes in microstructure, quality and water distribution of golden pompano (*Trachinotus ovatus*) muscles subjected to magnetic field-assisted immersion freezing during long-term frozen storage [J]. Journal of Food Engineering, 2023, 354: 111566.
- [19] 步营, 周洋, 韩梦琳, 等. 没食子酸对蓝鳍金枪鱼肌肉品质及肌红蛋白构象的影响[J]. 食品科学技术学报, 2024, 42(6): 79-90.
- BU Y, ZHOU Y, HAN M L, et al. Effect of gallic acid on muscle quality and myoglobin conformation in bluefin tuna [J]. Journal of Food Science and Technology, 2024, 42(6): 79-90.
- [20] GB 5009.228—2016 食品安全国家标准 食品中挥发性盐基氮的测定[S].

- GB 5009.228—2016 National food safety standard—Determination of volatile basic nitrogen in food[S].
- [21] THIANSILAKUL Y, BENJAKUL S, RICHARDS M P. Isolation, characterisation and stability of myoglobin from Eastern little tuna (*Euthynnus affinis*) dark muscle[J]. Food Chemistry, 2011, 124(1): 254–261.
- [22] 王艺月. 低温等离子体对生鲜草鱼肉冷杀菌保鲜效能和肌原纤维蛋白理化特性的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2021.
- WANG Y Y. Effect of cold plasma sterilization and preservation efficiency of fresh fish and physicochemical properties of myofibrillary protein [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2021.
- [23] 徐愉聪, 何圣琪, 栾宏伟, 等. 硒代蛋氨酸对珍珠龙胆石斑鱼肌原纤维蛋白体外消化特性的影响[J]. 轻工学报, 2025, 40(4): 20–29.
- XU Y C, HE S Q, LUAN H W, et al. Effects of selenomethionine on the *in vitro* digestibility of myofibrillar proteins in pearl gentian grouper [J]. Journal of Light Industry, 2025, 40(4): 20–29.
- [24] 朱文慧, 郭慧芳, 单春雨, 等. 微波纳米解冻对秘鲁鲑鱼保水性和蛋白结构的影响[J]. 中国食品学报, 2022, 22(8): 145–152.
- ZHU W H, GUO H F, SHAN C Y, et al. Effects of microwave nanoparticles thawing on water holding capacity and protein structure of jumbo squid (*Dosidicus gigas*) [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(8): 145–152.
- [25] 朱文慧, 郭慧芳, 王雯瑄, 等. 解冻介质对秘鲁鲑鱼持水性、蛋白氧化和结构的影响[J]. 中国食品学报, 2024, 24(3): 130–138.
- ZHU W H, GUO H F, WANG W X, et al. Effects of thawing media on the water holding capacity, protein oxidation and structure of jumbo squid (*Dosidicus gigas*) [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(3): 130–138.
- [26] LI Y, BU Y, GUO H F, et al. The drip loss inhibitory mechanism of nanowarming in jumbo squid (*Dosidicus gigas*) mantles: protein structure and molecular dynamics simulation [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2022, 102(10): 4313–4321.
- [27] WANG W X, BU Y, LI W Z, et al. Effects of nano freezing-thawing on myofibrillar protein of Atlantic salmon fillets: protein structure and label-free proteomics [J]. Food Chemistry, 2024, 442: 138369.
- [28] XU Z L, ZHAO X, YANG W H, et al. Effect of magnetic nano-particles combined with multi-frequency ultrasound-assisted thawing on the quality and myofibrillar protein-related properties of salmon (*Salmo salar*) [J]. Food Chemistry, 2024, 445: 138701.
- [29] ZHAO X, WU J E, CHEN L, et al. Effect of vacuum impregnated fish gelatin and grape seed extract on metabolite profiles of tilapia (*Oreochromis niloticus*) fillets during storage [J]. Food Chemistry, 2019, 293: 418–428.
- [30] AMIRI A, MOUSAKHANI-GANJEH A, SHAFIEKHANI S, et al. Effect of high voltage electrostatic field thawing on the functional and physicochemical properties of myofibrillar proteins [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2019, 56: 102191.
- [31] PALANISAMY S, SINGH A, ZHANG B, et al. Effects of polyphenols in combination with L-cysteine/L-ascorbic acid: myoglobin redox state, color and quality of refrigerated longtail tuna (*Thunnus tonggol*) slices [J]. Food Chemistry, 2025, 465(Pt 1): 141983.
- [32] WANG W X, LI W Z, BU Y, et al. Nano freezing-thawing of Atlantic salmon fillets: impact on thermodynamic and quality characteristics [J]. Foods, 2023, 12(15): 2887.
- [33] BU Y, HAN M L, TAN G Z, et al. Changes in quality characteristics of southern bluefin tuna (*Thunnus maccoyii*) during refrigerated storage and their correlation with color stability [J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 154: 112715.
- [34] ZAREIAN M, TYBUSSEK T, SILCOCK P, et al. Interrelationship among myoglobin forms, lipid oxidation and protein carbonyls in minced pork packaged under modified atmosphere [J]. Food Packaging and Shelf Life, 2019, 20: 100311.
- [35] ZHU W H, TAN G Z, HAN M L, et al. Evaluating the effects of plasma activated slightly acidic electrolyzed water on bacterial inactivation and quality attributes of Atlantic salmon fillets [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2023, 84: 103286.
- [36] SHEN X J, GU J H, JIANG X, et al. Effect of different thawing methods on the quality of yellowtail (*Seriola quinqueradiata*) fillets [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2024, 59(8): 5389–5397.
- [37] PARK M H, KIM M. Effects of thawing conditions on the physicochemical and microbiological quality of thawed beef [J]. Preventive Nutrition and Food Science, 2024, 29(1): 80–86.
- [38] AMIRI A, SHARIFIAN P, MORAKABATI N, et al. Modification of functional, rheological and structural characteristics of myofibrillar proteins by high-intensity ultrasonic and papain treatment [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2021, 72: 102748.
- [39] TAN G Z, NING Y, SUN C N, et al. Effects of plasma-activated slightly acidic electrolyzed water on salmon myofibrillar protein: insights from structure and molecular docking [J]. Food Chemistry, 2024, 22: 101389.

[40] ZHANG Y M,ERTBJERG P. On the origin of thaw loss: relationship between freezing rate and protein denaturation [J]. Food Chemistry,2019,299;125104.

ultrasound and adenosine 5'-monophosphate marination on tenderness and structures of myofibrillar proteins of beef[J]. Asian-Australasian Journal of Animal Sciences, 2019,32(10):1611-1620.

[41] ZOU Y,YANG H,ZHANG M H,et al. The influence of

Effects of physical field-assisted thawing on muscle quality and myoglobin characteristic of *Thunnus maccoyii*

LIU Junlan,XU Yucong,WANG Wenxuan,LUAN Hongwei,BU Ying,ZHU Wenhui,LI Xuepeng
College of Food Science and Engineering/National & Local Joint Engineering Research Center of Storage,Processing and
Safety Control Technology for Fresh Agricultural and Aquatic Products,Bohai University,Jinzhou 121013,China

Abstract: [Objective] To improve the thawing quality of frozen bluefin tuna products. **[Methods]** Frozen *Thunnus maccoyii* was used as the research material and thawed by four methods: cold storage thawing (CST), microwave thawing (MT), magnetic field thawing (MFT) and low-voltage electrostatic field thawing (LEFT). The changes in water-holding capacity, water distribution, color, myoglobin redox substances, textural properties, freshness and volatile flavor compounds were systematically investigated. **[Results]** The CST group exhibited the most serious quality deterioration, and its cooking loss rate, centrifugal loss rate and thawing loss rate were significantly higher than those of other groups ($P<0.05$). The proportion of methemoglobin reached up to 31.93%, the thiobarbituric acid (TBA) value and total volatile basic nitrogen (TVB-N) content were 0.19 mg MDA/kg and 0.185 9 mg/g, respectively, with a relatively high relative concentration of 2-pentanone. Meanwhile, the CST group showed the highest myoglobin oxidation degree and a low α -helix content (19.83%), which was unfavorable to the stability of myoglobin secondary structure. The MT group better maintained the color of *Thunnus maccoyii*, and its a^*/b^* value (2.97) was significantly higher than that of other groups. However, the uneven heating of MT treatment led to inhomogeneous water distribution and poor water-holding capacity of muscle tissue, accompanied by severe oxidative denaturation of myoglobin. MFT could inhibit the formation of large ice crystals and significantly maintain the water-holding capacity and textural properties of *Thunnus maccoyii*. The hardness (566.73 g) and chewiness (228.98 mJ) of the MFT group were significantly higher than those of other groups, and its total sulfhydryl content was the highest (277.05 nmol/mg), which could inhibit the oxidative denaturation of myoglobin to a certain extent. The LEFT group showed the optimal overall quality maintenance with favorable water-holding capacity, and the proportion of immobilized water reached up to 97.33%. It had the lowest TVB-N content (0.157 2 mg/g), the smallest particle size (199.95 nm) and the highest solubility (84.37%), which effectively reduced the oxidative denaturation degree of myoglobin. Moreover, both the ultraviolet absorption spectrum and intrinsic fluorescence spectrum of myoglobin in the LEFT group presented the highest absorption peaks, contributing to better stability of myoglobin tertiary structure and intact muscle tissue. In addition, 70 volatile flavor compounds were identified in the four treatment groups, mainly including aldehydes, esters, alcohols and ketones. **[Conclusion]** LEFT has obvious advantages in inhibiting myoglobin oxidative denaturation, maintaining freshness and muscle tissue integrity, and can be used as an effective strategy to improve the thawing quality of *Thunnus maccoyii*.

Key words: *Thunnus maccoyii*; physical field-assisted thawing; muscle quality; myoglobin characteristic

[责任编辑:杨晓娟 申慧珊]