



赵莹,卢晨曦,林颖,等.不同冻结方式对鲍鱼肌肉品质的影响[J].轻工学报,2025,40(6):31-42,53.
ZHAO Y, LU C X, LIN Y, et al. Effects of different freezing methods on the qualities of abalone muscle [J]. Journal of Light Industry, 2025, 40(6): 31-42, 53. DOI: 10.12187/2025.06.004

不同冻结方式对鲍鱼肌肉品质的影响

赵莹,卢晨曦,林颖,刘玉欣

大连工业大学 食品学院/海洋食品加工与安全控制全国重点实验室/国家海洋食品工程技术研究中心/辽宁海洋食品精深加工关键技术省部共建协同创新中心,辽宁 大连 116034

摘要:【目的】探究不同冻结方式对冷冻鲍鱼肌肉品质的影响。【方法】采用空气冷冻(Air Freezing, AF)、煮冻(Cooked Freezing, CF)、急速低温冷冻(Rapid Cryogenic Freezing, RCF)及液氮冷冻(Liquid Nitrogen Freezing, LNF)这4种冻结方式对新鲜鲍鱼进行处理,研究不同冻结方式对鲍鱼肌肉冰晶形成、组织结构、水分变化与分布、蛋白质特性及质构特性的影响。【结果】经AF处理的鲍鱼肌纤维基本保持完整,解冻损失率和蒸煮损失率均较高,蛋白质构象和质地特性发生轻微改变。经CF处理的鲍鱼肌肉中出现大而不均匀的冰晶,肌纤维断裂程度增大,与水结合能力下降,解冻损失率和蒸煮损失率均最高,蛋白质氧化变性程度加剧,表面疏水性和总巯基含量均最低,分别为 $(6.39 \pm 0.96) \mu\text{g}/\text{mg}$ 和 $(1.49 \pm 0.04) \mu\text{mol}/\text{g}$,质构特性劣变最严重。经RCF处理后,鲍鱼肌肉中形成细小、均匀的冰晶,肌纤维结构致密且均匀,解冻损失率较低,持水力较强,为 $(40.49 \pm 2.89)\%$,蛋白质结构稳定,能够有效保持鲍鱼肌肉的质构特性。经LNF处理的鲍鱼肌肉形成的冰晶更小,分布更均匀,肌纤维结构排列更加紧密,解冻损失率和持水力与经RCF处理的鲍鱼肌肉无显著性差异,蛋白质结构更稳定,能够更好地保持鲍鱼肌肉的质构特性。【结论】LNF能通过形成细小、均匀的冰晶及有效维持蛋白质结构的稳定,更好地保持鲍鱼肌肉的品质。

关键词:鲍鱼;冻结方式;肌肉品质;冰晶形成;蛋白质特性;质构特性

中图分类号:TS254.4 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-1553(2025)06-0031-12

0 引言

鲍鱼是一种名贵的单壳贝类,营养价值高,味道鲜美,2023年全球鲍鱼产量已达到244 991 t^[1]。然而,鲍鱼在捕捞后的运输与储藏过程中,易受内源酶、微生物、温度等多种因素的影响而出现蛋白质降解、肌肉组织软化等变质现象,严重影响鲍鱼

的质构特性、食用安全性、经济价值等。

低温保藏是通过控制温度以抑制微生物生长、延缓酶活性和生化反应的食品保鲜技术,包括冷却保藏和冻结保藏两大类,其中冻结保藏技术可进一步分为慢速冻结、快速冻结、超低温冻结等,均能有效延长水产品的货架期,已广泛应用于水产品保鲜领域^[2]。传统的水产品冻结保藏主要采用空气冷

收稿日期:2025-04-09; **修回日期:**2025-05-16; **出版日期:**2025-12-15

基金项目:辽宁省教育厅高校基本科研项目(JYTMS20230428)

作者简介:赵莹(1999—),女,辽宁省锦州市人,大连工业大学硕士研究生,主要研究方向为水产品加工、贮藏过程中品质变化。E-mail:1361853287@qq.com

通信作者:刘玉欣(1988—),女,辽宁省沈阳市人,大连工业大学副教授,博士,主要研究方向为水产品加工、贮藏过程中品质变化与调控机制及新产品开发。E-mail:303999266@qq.com

冻(Air Freezing, AF)、平板接触冷冻等慢速冻结技术^[3];煮冻(Cooked Freezing, CF)作为一种与热处理相结合的创新方法,以“热定构、冻锁鲜”的技术逻辑,在预制菜领域实现了品质、效率与成本的三维优化,为高价值水产预制品的工业化升级提供了关键技术路径^[4];急速低温冷冻(Rapid Cryogenic Freezing, RCF)则是一种利用低温制冷设备,在短时间内使物体温度迅速降低到极低水平的快速冻结保藏技术^[5];此外,液氮冷冻(Liquid Nitrogen Freezing, LNF)是一种具有独特热力学特性的超低温快速冻结方式,在形成纳米级均匀冰晶、维持蛋白质构象稳定性及细胞完整性方面展现出显著的优势^[6-8]。研究^[9-11]表明,冻结速率作为冻结保藏技术的关键参数之一,是影响产品品质的重要因素,其主要影响冰晶的生长过程,进而调控冰晶的大小、形态及空间分布。在慢速冻结条件下,细胞内水分不断向外迁移,导致细胞外冰晶持续增长且体积逐渐增大,显著损伤肌肉组织^[12];而快速冻结则能形成致密均匀的细小冰晶,有利于保持肌肉组织的完整性^[8]。因此,不同冻结保藏技术因冻结速率的差异,会对食品组织结构产生不同程度的影响,并最终决定食品的品质。现有研究多集中于探究不同冻结方式对虾类、鱼类等常规水产品品质的影响。例如,向迎春等^[13]研究了LNF、平板接触冷冻和冰柜冻结对凡纳滨对虾在-20℃贮藏过程中组织结构与品质变化的影响,发现LNF处理效果显著优于平板速冻和冰柜冻结,其冻结温度更低,形成冰晶更小,对虾体组织的损伤面积相应更小,进而有效减缓了脂肪氧化及蛋白质变性,更好地维持了凡纳滨对虾的品质。还有学者^[14-15]研究了冰箱冷冻、螺旋隧道冷冻、平板接触冷冻、LNF等冻结方式对鲭鱼和金鲳鱼品质的影响,发现经螺旋隧道冷冻后,鲭鱼保水性更好,硬度和弹性下降更慢,蛋白质二级结构更稳定,有效保持了自身水分和新鲜度;而经LNF处理后,金鲳鱼的总冷冻时间显著缩短,蒸煮损失显著降低,肌肉水分流失被抑制,持水性和硬度保持较好,肌肉微结构也相对完整。然而,针对鲍鱼这类高附加值海产品的冻结保藏技术研究相对较少。

鲍鱼的肌肉组织结构独特,其富含胶原蛋白的

致密肌层与鱼虾类呈束状排列的横纹肌存在显著差异。这种特殊的纤维构造导致鲍鱼的冰晶形成机制可能异于其他常规水产品,因而冻结过程中更易因冰晶刺伤发生质地劣变^[16]。现有冷冻鲍鱼产品主要分为生冻和煮冻两大类。生冻通常采用AF、RCF、LNF等方式,其中AF操作简便、成本低廉,但冻结速率较慢;RCF能够形成细小冰晶,更好地保持鲍鱼品质,但能耗较高;LNF可最大程度减少冰晶对肌肉组织结构的机械损伤,但成本较高。煮冻则通过预煮使蛋白质变性,进而形成独特质地,能为鲍鱼预制菜产品提供加工基础。因此,系统研究不同冻结方式对鲍鱼肌肉品质的影响并探究其中的调控机制具有重要意义。

鉴于此,本研究拟基于生产实际和鲍鱼自身组织结构特点,采用AF、CF、RCF及LNF这4种冻结方式对新鲜鲍鱼进行处理,通过测定水分变化(解冻损失率、持水力、蒸煮损失率、水分含量)及分布、蛋白质特性(表面疏水性、蛋白质聚集性、总巯基含量、内源荧光强度)和质构特性,并结合冰晶形成和肌肉结构分析,从宏观和微观层面探究不同冻结方式对鲍鱼肌肉品质的影响,以期填补高水分贝类冷冻损伤理论体系的空白,推动水产品冻结保藏技术从“单一控温”向“多维度品质调控”转型,为其他高价值海产品的冻结保鲜研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 主要材料与试剂

新鲜鲍鱼,产自大连渤海海域,(70±10)g/只。5,5'-二硫代双(2-硝基苯甲酸)(DTNB)、溴酚蓝,上海生工生物工程有限公司;尼罗红、石蜡,上海麦克林生化科技股份有限公司;苏木精染色液、伊红染色液,珠海贝索生物技术有限公司;4%多聚甲醛固定液,北京雷根生物技术有限公司;乙醇,天津市富宇精细化工有限公司。以上试剂均为分析纯。

1.2 主要仪器与设备

354A0100型急速冷冻柜,意大利TECHFROST公司;i500-ULT型超低温温度记录仪,杭州德鲁克公司;Pannoramic MIDI型扫片机,匈牙利3D HISTECH公司;SU8010型冷场发射扫描电子显微镜(C-FESEM)、

CF16RN 型高速冷冻离心机、F-2700 型荧光分光光度计,日本 HITACHI 公司;MesoQMR23-060H 型核磁共振成像分析仪,上海纽迈科技有限公司;M200 型多功能酶标仪,瑞士 TECAN 公司;TA-XT Plus 型物性分析仪,英国 Stable Micro System 公司。

1.3 实验方法

1.3.1 不同冻结方式鲍鱼样品制备 取 36 只新鲜鲍鱼,随机分为 4 组,每组 9 只。去除外壳和内脏后,清洗干净,置于冰上放血 1 h,分别进行如下冻结处理:

- 1) AF: 直接置于 -18 ℃ 冷库冷冻 24 h。
- 2) CF: 70 ℃ 水浴 (m (鲍鱼/g)) : V (水/mL) = 1 : 3) 10 min 后,立即放入冰中冷却,随后置于 -18 ℃ 冷库冷冻 24 h。
- 3) RCF: -40 ℃ 急速冷冻柜冷冻 1 h,随后置于 -18 ℃ 冷库冷冻 24 h。
- 4) LNF: 液氮 (m (鲍鱼/g)) : V (液氮/mL) = 1 : 5) 浸泡 40 s,随后置于 -18 ℃ 冷库冷冻 24 h。

冻结处理结束后,将以上 4 组样品置于 4 ℃ 条件下解冻 6 h。部分鲍鱼肌肉直接用于实验,余下鲍鱼肌肉经冷冻干燥后于 -80 ℃ 冰箱保存,备用。

1.3.2 冻结曲线绘制 将超低温温度记录仪的传感器探头插入鲍鱼肌肉中心位置,以放入 -18 ℃ 冷库中为冻结起始时间,每 30 s 记录温度,当样品中心温度降至 -18 ℃ 时停止数据采集。以温度为纵坐标、冻结时间为横坐标绘制冻结曲线^[17]。

1.3.3 组织结构观察 参考 X. Du 等^[18] 的方法,并稍作修改。将鲍鱼肌肉在 4% 多聚甲醛固定液中固定 24 h,经梯度乙醇脱水、石蜡包埋后,切成厚度 4 μm 的薄片,再经苏木精-伊红染色 (Hematoxylin-eosin Staining, H&E) 后,通过扫片机分别在放大 20 倍和 80 倍条件下采集图像。

1.3.4 微观结构观察 参考 Z. Q. Liu 等^[19] 的方法,并稍作修改。将鲍鱼肌肉置于 SEM 的冷冻隧道真空室内,于 -80 ℃ 条件下升华 30 min。SEM 冷阱、SEM 冷台、制备室冷阱和制备室冷台的温度分别设置为 -175 ℃、-140 ℃、-175 ℃ 和 -140 ℃。将样品在氩气环境中喷金 60 s 后放入 SEM 冷台,在 10 kV 加速电压下观察冰晶升华后遗留孔隙的微观结构,

并在放大 1000 倍和 5000 倍条件下采集图像。利用 Image J 图像分析软件对图像进行二值化处理,分析孔隙特征^[20]。

1.3.5 解冻损失率测定 参考 X. Y. Teng 等^[8] 的方法。分别称量鲍鱼肌肉解冻前、后的质量,按下式计算解冻损失率。

$$\text{解冻损失率} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\%$$

式中, m_1 是鲍鱼肌肉解冻前质量/g, m_2 是鲍鱼肌肉解冻后质量/g。

1.3.6 水分含量测定 采用直接干燥法^[21] 测定鲍鱼肌肉的水分含量,具体计算公式如下:

$$\text{水分含量} = \frac{m_3 - m_4}{m_3 - m_5} \times 100\%$$

式中, m_3 是称量瓶和鲍鱼肌肉干燥前质量/g, m_4 是称量瓶和鲍鱼肌肉干燥后质量/g, m_5 是称量瓶质量/g。

1.3.7 持水力测定 参考 M. M. Yu 等^[22] 的方法。取 4 g 鲍鱼肌肉,用 3 层滤纸包裹后放入 50 mL 离心管中,在 4 ℃、11 700 r/min 条件下离心 20 min。按下式计算持水力。

$$\text{持水力} = \frac{M_1 \times W - (M_1 - M_2)}{M_1 \times W} \times 100\%$$

式中, W 是鲍鱼肌肉水分含量/%, M_1 是鲍鱼肌肉初始质量/g, M_2 是离心后鲍鱼肌肉质量/g。

1.3.8 蒸煮损失率测定 参考 M. M. Yu 等^[23] 的方法。将鲍鱼肌肉切成 1 cm³ 小块,并准确称重 (M_3),沸水蒸煮 3 min,冷却后擦干表面水分再次称重 (M_4),并按下式计算蒸煮损失率。

$$\text{蒸煮损失率} = \frac{M_3 - M_4}{M_3} \times 100\%$$

1.3.9 水分分布测定 参考 Q. Deng 等^[24] 的方法,并稍作修改。使用核磁共振成像分析仪对整个鲍鱼肌肉组织进行 T_2 横向弛豫测量。参数设置如下:磁场强度为 0.5 T,磁体温度为 32 ℃,射频线圈直径为 60 mm,Carr-Purcell-Meiboom-Gill(CPMG)序列的 90° 和 180° 脉冲分别为 32.0 μs 和 58.0 μs,重复采样间隔时间 (T_w) 为 3000 ms,弛豫数据收集累积次数 (NS) 为 8 次,回波次数 (NECH) 为 2000 次。通过 Mini MR-Rat 核磁共振成像系统,使用多层自旋回波

(SE)序列对鲍鱼肌肉样品进行 T_2 加权成像。参数设置如下: T_2 加权成像重复时间(TR)为1600 ms,回波时间(TE)为50 ms,视野为100 mm×100 mm,层厚为3 mm,层间隙为2 mm,扫描次数为2次,读取大小为256,相位大小为192。

1.3.10 肌原纤维蛋白提取 参考 Y. Zheng 等^[25]的方法,并稍作修改。取1 g 鲍鱼肌肉冻干粉与20倍体积20 mmol/L Tris-HCl 缓冲液(pH值为7.5,含0.1 mol/L NaCl)于冰浴条件下匀浆90 s(10 000 r/min,30 s/次,共3次,下同),磁力搅拌30 min,在4 °C、11 000 r/min 条件下离心10 min,去除上清液,此步骤重复2次。在沉淀中加入6倍体积20 mmol/L Tris-HCl 缓冲液(pH值为7.5,含0.6 mol/L NaCl)匀浆90 s,在4 °C、11 000 r/min 条件下离心10 min,保留上清液,此步骤重复3次。合并上清液,即得到肌原纤维蛋白,4 °C保存,48 h内使用。采用双缩脲法测定肌原纤维蛋白浓度。

1.3.11 表面疏水性测定 参考 I. Chelh 等^[26]的方法,并稍作修改。将1 mL 5 mg/mL 的肌原纤维蛋白溶液和200 μL 1 mg/mL 的溴酚蓝溶液混合均匀,于20 °C条件下静置10 min,在4 °C、6360 r/min 条件下离心15 min,将上清液稀释50倍后,在595 nm 波长处测定吸光度。空白组取1 mL 20 mmol/L 磷酸盐缓冲液(pH值为6.0,含0.6 mol/L NaCl)代替上述肌原纤维蛋白溶液,其余步骤相同。以溴酚蓝结合量(μg/mg)表征表面疏水性,并按下式计算。

$$\text{溴酚蓝结合量} = \frac{A_1 - A_2}{A_1} \times 200$$

式中, A_1 是空白组上清液吸光度, A_2 是样品组上清液吸光度。

1.3.12 蛋白质聚集性测定 参考 M. M. Yu 等^[27]的方法。将1 mL 5 mg/mL 的肌原纤维蛋白溶液与10 μL 0.32 mg/mL 尼罗红溶液混合均匀,采用荧光分光光度计进行测量。参数设置如下:激发波长为560 nm,发射波长为620 nm,激发和发射狭缝宽度为10 nm。以尼罗红荧光强度表征蛋白质聚集性。

1.3.13 总巯基含量测定 参考 K. X. Zhang 等^[28]的方法。取1.5 mL 5 mg/mL 的肌原纤维蛋白溶液与10 mL Tris-Glycine 缓冲液(含8 mmol/L 尿素、

86 mmol/L Tris、4 mmol/L EDTA、90 mmol/L 甘氨酸及0.5 mL 10 mmol/L DTNB, pH值为8.0)混合,20 °C条件下孵育1 h。在4 °C、11 000 r/min 条件下离心10 min,上清液于412 nm 波长处测定吸光度(A)。按下式计算总巯基含量(μmol/g)。

$$\text{总巯基含量} = A \times 14.706$$

1.3.14 内源荧光强度测定 参考 Y. Y. Liu 等^[29]的方法。将肌原纤维蛋白用50 mmol/L 磷酸盐缓冲液(pH值为7.0,含0.6 mol/L NaCl)稀释至0.1 mg/mL,采用荧光分光光度计测定其内源荧光强度。参数设置如下:激发波长为280 nm,发射波长为300~400 nm,扫描速度为3000 nm/min,光径为5 nm,电压为400 V。

1.3.15 质构特性测定 参考 X. P. Dong 等^[30]的方法。将鲍鱼内收肌修剪为(1.50±0.10) cm³ 小块,置于物性分析仪载物台上,采用HDP/BS探头测定剪切力,测前、测中和测后速率均为1 mm/s;采用P50探头测定硬度和弹性,测前、测中和测后速率均为1 mm/s,压缩程度为75%。

1.4 数据统计与分析

除剪切力、硬度和弹性采用八平行实验之外,其余实验操作均采取三平行实验,实验数据以(平均值±标准差)表示;采用Origin 2021 软件进行绘图,采用SPSS 26.0 软件中的单因素方差(Student-Newman-Keuls 模式)进行显著性分析, $P<0.05$ 时认为具有统计学显著性差异。

2 结果与分析

2.1 不同冻结方式下鲍鱼肌肉冻结曲线分析

冻结曲线是描述食品在冻结过程中温度随时间变化的曲线,反映了食品从初始温度逐渐冷却至冰点以下,最终达到完全冻结状态的全过程^[31]。食品的冻结曲线通常可分为3个阶段:第一阶段是初始降温期,食品温度缓慢下降至冻结温度;第二阶段是冰晶形成期,约80%的水分会被冻结成冰晶,冻结曲线趋于平缓,此阶段所需时间较长;第三阶段是深冻期,食品温度从初始冻结点继续降至冷藏标准温度^[8]。不同冻结方式下鲍鱼肌肉的冻结曲线如图1所示。由图1可知,AF组、CF组和RCF组

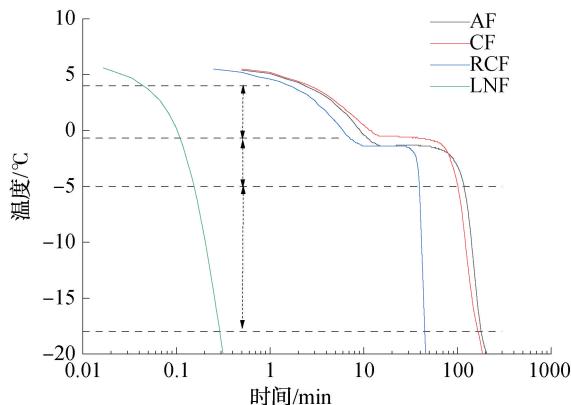


图 1 不同冻结方式下鲍鱼肌肉的冻结曲线

Fig. 1 Freezing curves of abalone muscle under different freezing methods

的冻结曲线均呈先缓慢下降后趋于平缓再迅速下降的趋势,其中 AF 组和 CF 组通过最大冰晶生成带的时间较长,RCF 组次之,而 LNF 组的冻结曲线呈快速下降的趋势,冻结时间明显短于其他组,冻结速率最快。最大冰晶生成带作为冻结过程中的关键阶段,样品通过该区域所需时间越短,形成的冰晶尺寸越小、分布越均匀。由于 RCF 组能够较快通过最大冰晶生成带,而 LNF 组几乎没有最大冰晶生成带,因而均在肌肉组织中形成了细小、均匀的冰晶,从而减小了冰晶对肌肉组织的机械损伤。因此,快速冻结能够通过缩短冰晶生成时间有效抑制大冰晶的形成,进而最大限度地维持鲍鱼肌肉细胞结构的完整性^[32]。

2.2 不同冻结方式下鲍鱼肌肉结构分析

2.2.1 组织结构 不同冻结方式会影响鲍鱼肌肉组织中冰晶的形成,进而改变其组织结构。H&E 染色可直观反映鲍鱼肌肉组织结构的变化情况,其中肌纤维组织被染成红色,冰晶析出所形成的空隙呈白色^[33]。不同冻结方式下鲍鱼肌肉的纵切和横切组织结构如图 2 所示。由图 2 可知,AF 组、RCF 组和 LNF 组的肌纤维均呈规则的条状,排列整齐并具有一定的方向性,肌纤维之间存在一定量的冰晶。AF 组肌纤维排列有序、基本完整,冻结后产生的冰晶较多;RCF 组和 LNF 组肌纤维结构完整、排列更加紧密,冻结后产生的冰晶较少,其中 RCF 组肌纤维结构致密且均匀,无大量聚集的冰晶,LNF 组肌纤维排列更为紧密,但肌纤维之间偶有较大缝隙。

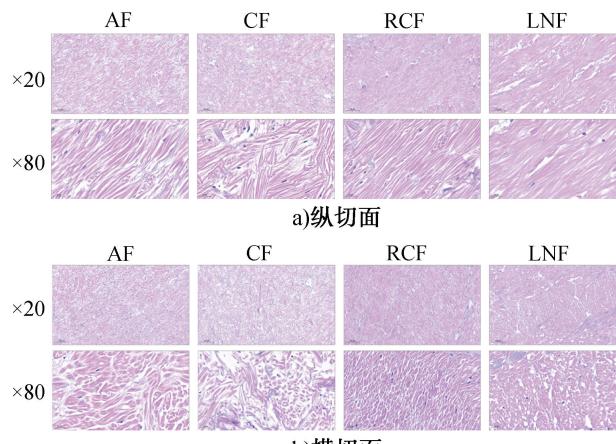


图 2 不同冻结方式下鲍鱼肌肉的纵切和横切组织结构

Fig. 2 Tissue structure (longitudinal and transverse sections) of abalone muscle under different freezing methods

这可能是由于 AF 组冻结速率较慢,形成冰晶较大,导致肌纤维之间形成较大缝隙; RCF 组和 LNF 组冻结快速,细胞内产生的冰晶细小、均匀,对肌纤维的损伤较小,呈现完整且致密的肌纤维网络^[34],其中 LNF 组超低温快速冻结形成的冰晶更小,但冷冻过程中温度的剧烈变化会引起个别肌纤维断裂,进而产生裂纹和破损。CF 组肌纤维的方向性较差,排列混乱,部分发生断裂、卷曲,肌纤维之间存在大量大而不规则的冰晶。这可能是由于 CF 组经预煮后,肌肉中的胶原组织发生变性降解,使得肌纤维暴露并破损,导致冻结时形成大而不规则的冰晶。L. L. Luan 等^[35]研究发现,与 -20 °C AF 相比,经 -80 °C 低温冷冻和 -196 °C LNF 处理的带鱼肌肉中形成了更小、更规则的冰晶。本研究结果与其较一致。

2.2.2 微观结构 不同冻结方式下鲍鱼肌肉的微观结构如图 3 所示,图 3c)—f) 中不同小写字母表示组间差异显著($P < 0.05$),下同。由图 3a) 和 b) 可知,AF 组、RCF 组和 LNF 组的肌纤维排列较完整、有序,呈多孔蜂窝状结构,其中 AF 组的蜂窝状孔洞大小不一,RCF 组和 LNF 组的蜂窝状孔洞更细致均匀,肌纤维排列更加致密;而 CF 组的肌纤维出现明显破损,蜂窝孔径较大。由图 3c)—f) 可知,CF 组的平均孔面积、当量直径、高度和宽度均显著大于其他组,分别为 $(583.44 \pm 49.51) \mu\text{m}^2$ 、 $(37.58 \pm 1.36) \mu\text{m}$ 、 $(29.12 \pm 1.56) \mu\text{m}$ 、 $(31.20 \pm 1.10) \mu\text{m}$,

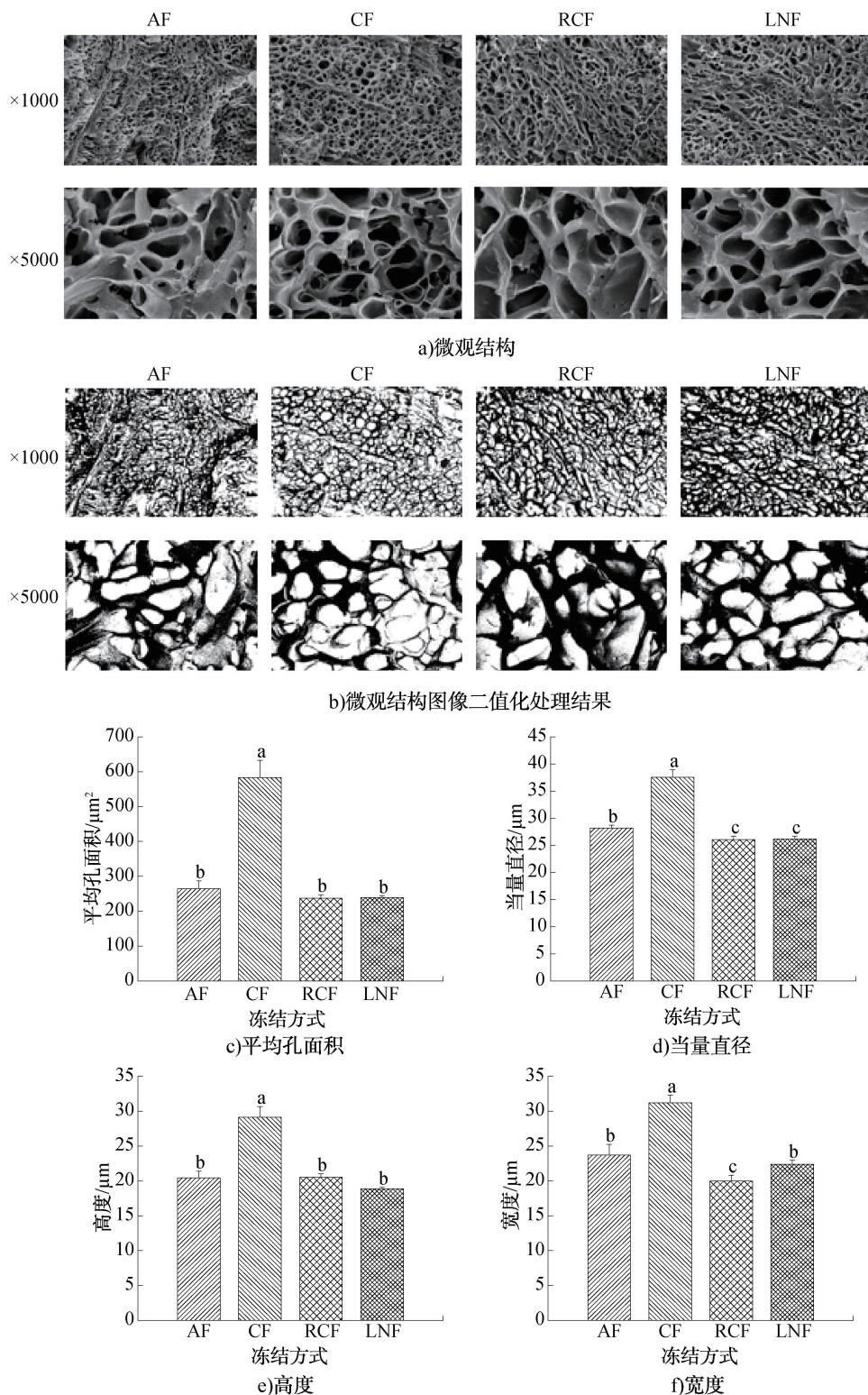


图3 不同冻结方式下鲍鱼肌肉的微观结构

Fig. 3 Microstructure of abalone muscle under different freezing methods

而AF组、RCF组和LNF组差异不大。这可能是由于AF组冻结时通过最大冰晶生成带的时间较长，生成的冰晶偏大且不均匀；RCF组和LNF组在快速冻结过程中维持了细胞内外冰晶结构，形成的冰晶

更小，组织结构更完整，其中LNF组形成的冰晶更小、分布更均匀；CF组在预煮时，一部分包围肌纤维的胶原组织发生变性降解，导致部分肌纤维暴露，发生断裂破损，冻结后形成的冰晶数量较多且尺寸

较大。唐佳楣等^[36]研究发现,LNF 对大黄鱼肌纤维的损伤最小,肌纤维排列整齐、条理清晰,肌节结构完整,更好地保持了鱼肉组织的完整性。本研究结果与其较一致。

2.3 不同冻结方式下鲍鱼肌肉水分变化及分布分析

2.3.1 水分变化 不同冻结方式能够影响鲍鱼肌肉的组织结构,进而影响其水分变化,而这一变化直接关联解冻损失率、持水力、蒸煮损失率、水分含量等关键品质指标^[37]。不同冻结方式下鲍鱼肌肉的水分变化如图 4 所示。由图 4a) 可知,CF 组的解冻损失率最大,为 $(7.79 \pm 1.18)\%$,其次是 AF 组、RCF 组和 LNF 组。由图 4b) 可知,CF 组的持水力最小,为 $(36.74 \pm 0.25)\%$,其余 3 组的持水力差异不显著($P > 0.05$),其中 AF 组略低于 RCF 组和 LNF 组。由图 4c) 可知,CF 组的蒸煮损失率最高,为 $(11.17 \pm 0.85)\%$,其次是 AF 组、LNF 组和 RCF 组。由图 4d) 可知,LNF 组的水分含量最大,为 $(74.56 \pm 0.95)\%$,其次是 RCF 组、CF 组和 AF 组,但 4 组水分含量差异不显著($P > 0.05$)。CF 组经预煮处理后,肌纤维发生轻微收缩,蛋白质发生部分变性,导

致其与水分子的结合能力降低,因而表现出较高的解冻损失率和蒸煮损失率,以及较低的持水力。相比之下,AF 组、RCF 组和 LNF 组冻结后肌纤维结构基本保持完整,各项水分相关指标变化均较小。其中,RCF 组和 LNF 组快速冻结形成的较小冰晶对肌肉组织结构损伤较小,能够更好地维持肌肉组织对水分的束缚能力,因而解冻损失率和蒸煮损失率均较低,持水力较高。但 LNF 组的超快速降温过程导致个别肌纤维之间出现裂缝,致使蒸煮损失率略高于 RCF 组。Y. Lyu 等^[38]研究发现,LNF 处理的墨鱼的解冻损失率和蒸煮损失率均较低,可能是由于冻结速率较快,形成的冰晶较细小,对肌肉组织产生的机械破坏作用较小,能维持肌肉组织对水分的束缚能力。本研究结果与其较一致。

2.3.2 水分分布 低场核磁共振成像是一种基于核磁共振原理的非侵入式检测技术,能够通过捕获食品中的水分子信号,无损地反映鲍鱼肌肉内部水分的状态、分布及迁移规律^[39]。不同冻结方式下鲍鱼肌肉的水分分布如图 5 所示,其中 P_{21} 、 P_{22} 、 P_{23} 分别代表结合水、不易流动水、自由水弛豫峰面积占比。

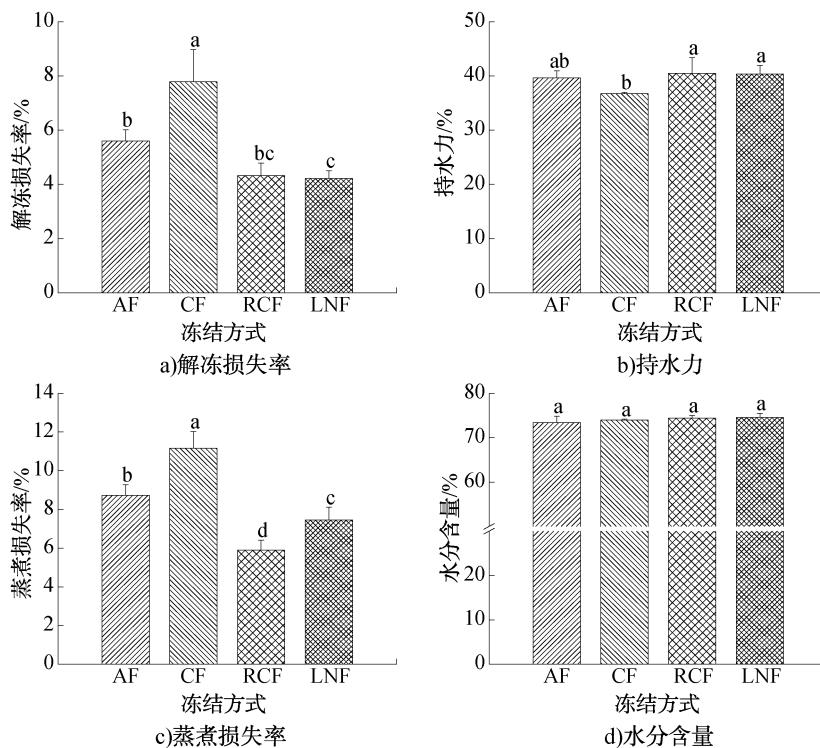


图 4 不同冻结方式下鲍鱼肌肉的水分变化

Fig. 4 Moisture changes in abalone muscle under different freezing methods

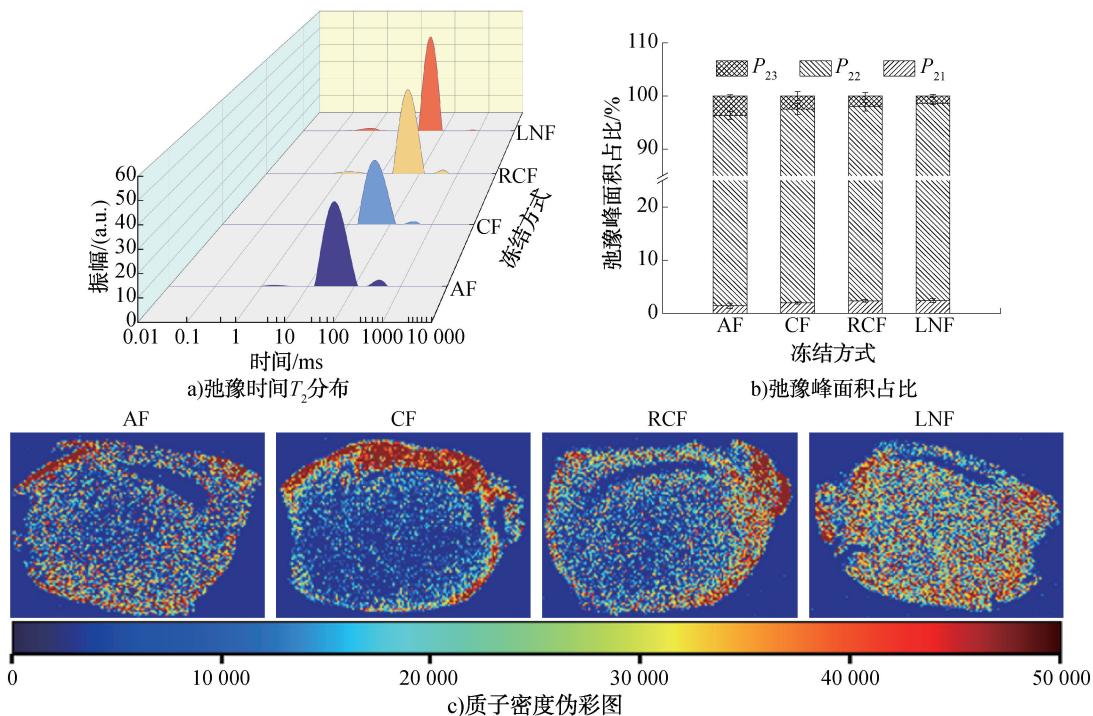


图 5 不同冻结方式下鲍鱼肌肉的水分分布

Fig. 5 Water distribution in abalone muscle under different freezing methods

由图 5a) 可知, 不同冻结方式下鲍鱼肌肉的横向弛豫时间(T_2) 均呈现 3 个明显的峰, 分别对应 3 种水分状态, 依次为结合水(T_{21} , 1~10 ms)、不易流动水(T_{22} , 10~100 ms) 和自由水(T_{23} , 100~1000 ms)。由图 5b) 可知, RCF 组和 LNF 组的结合水含量显著高于 AF 组和 CF 组($P<0.05$)。质子密度伪彩图中红色信号的强度反映了样品中质子密度的大小, 可直观表示水分的空间分布情况。由图 5c) 可知, LNF 组整体信号强度高且分布均匀, 表明其含水量较高、水分分布更均一; 而 CF 组不同部位之间差异明显, 裙边区域信号较强、内收肌区域信号较弱, 表明其水分分布不均一。这可能是由于 LNF 组快速冻结形成的较小冰晶对肌纤维结构的机械损伤较小, 肌肉组织表现出良好的均一性; CF 组经预煮处理后, 裙边部位的胶原蛋白发生变性, 增强了其与水的结合能力, 而内收肌中肌原纤维蛋白发生聚集和交联, 形成更紧密的结构, 使其与水的结合能力下降^[23]。W. D. Yan 等^[6]研究发现, 与鼓风冷冻相比, LNF 处理的虾在质子密度伪彩图中呈现出更明显的红色信号, 这可能是由于 LNF 形成的冰晶较小, 对肌肉组织的损伤较小, 从而有

效抑制了水分流失。本研究结果与其较一致。

2.4 不同冻结方式下鲍鱼肌肉蛋白质特性分析

冻结过程中, 冻结速率的差异会影响冰晶的大小及分布, 进而导致蛋白质构象发生不同程度的改变, 这可通过蛋白质的表面疏水性、蛋白质聚集性、总巯基含量、内源荧光强度等指标进行表征^[40]。不同冻结方式下鲍鱼肌肉的蛋白质特性如图 6 所示。由图 6a) 可知, CF 组的表面疏水性最低, 为(6.39±0.96) μg/mg, 其次是 AF 组和 RCF 组, 分别为(18.70±0.99) μg/mg 和(25.66±1.30) μg/mg, 而 LNF 组最高, 为(29.98±0.91) μg/mg。由图 6b) 可知, CF 组的蛋白质聚集性最高, 其次是 RCF 组、AF 组和 LNF 组。由图 6c) 可知, CF 组的总巯基含量最低, 为(1.49±0.04) μmol/g, 其次是 LNF 组和 AF 组, 分别为(2.27±0.08) μmol/g 和(2.44±0.05) μmol/g, 而 RCF 组最高, 为(3.42±0.11) μmol/g。由图 6d) 可知, CF 组的内源荧光强度最低, RCF 组的内源荧光强度最高, AF 组和 LNF 组的内源荧光强度介于二者之间。在慢速冻结过程中, AF 组冰晶持续生长并挤压周围蛋白质分子, 破坏蛋白质结构, 导致疏

水基团暴露,进而引发蛋白质聚集和氧化^[41]; RCF 组和 LNF 组均能通过快速冻结抑制蛋白质构象变化及二硫键形成,从而有效减缓巯基氧化进程,维持肌纤维组织蛋白质的稳定性^[42],其中 LNF 组冻结速率极快,未冻结的液态区域溶质浓度急剧升高,形成的局部高浓度环境会破坏蛋白质水化层,使得疏水基团暴露增多^[6];而 CF 组由于预煮处理破坏了肌纤维组织结构的完整性,形成的较大冰晶会诱导蛋白质展开,促进内部疏水基团暴露,使得蛋白质发生变性和聚集^[43],进而加剧其氧化。X. Zhao 等^[44]研究发现,经 LNF 处理的红石首鱼肌肉

中形成了更细小、分布更均匀的冰晶,减少了水分迁移,并能有效抑制蛋白质变性,减少蛋白质氧化,维持蛋白质结构的稳定性。本研究结果与其较一致。

2.5 不同冻结方式下鲍鱼肌肉质构特性分析

剪切力、硬度、弹性等质构特性是影响食品品质的重要指标,也是影响水产品可接受度和机械加工特性的重要参数^[45]。不同冻结方式下鲍鱼肌肉的质构特性如图 7 所示。由图 7a)可知,CF 组的剪切力最低,为(2184±383) g,其次是 RCF 组和 LNF 组,分别为(4841±111) g 和(5149±217) g,AF 组

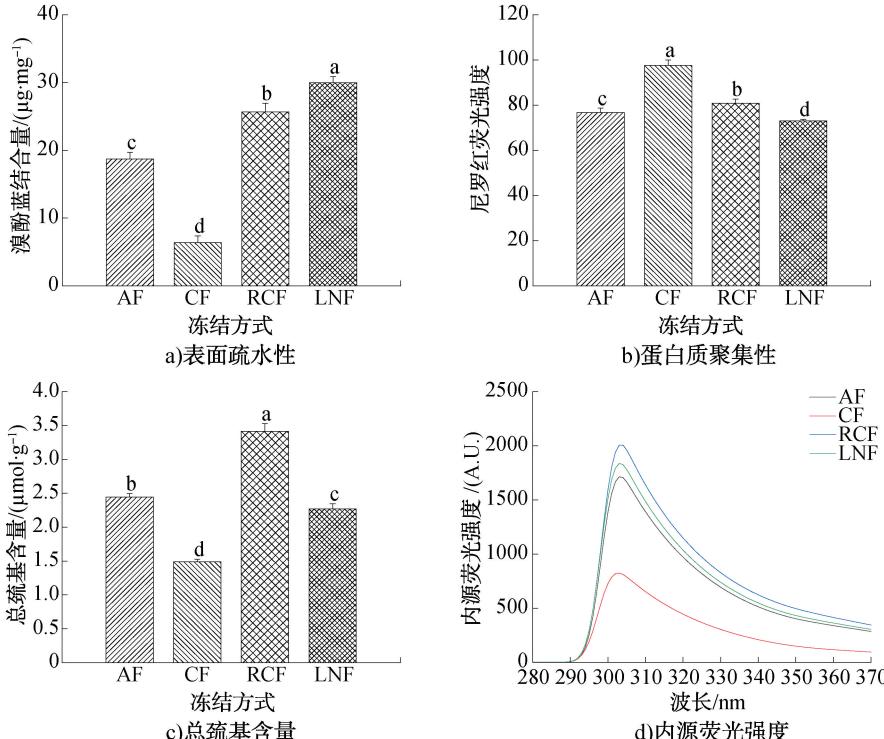


图 6 不同冻结方式下鲍鱼肌肉的蛋白质特性

Fig. 6 Protein properties of abalone muscle under different freezing methods

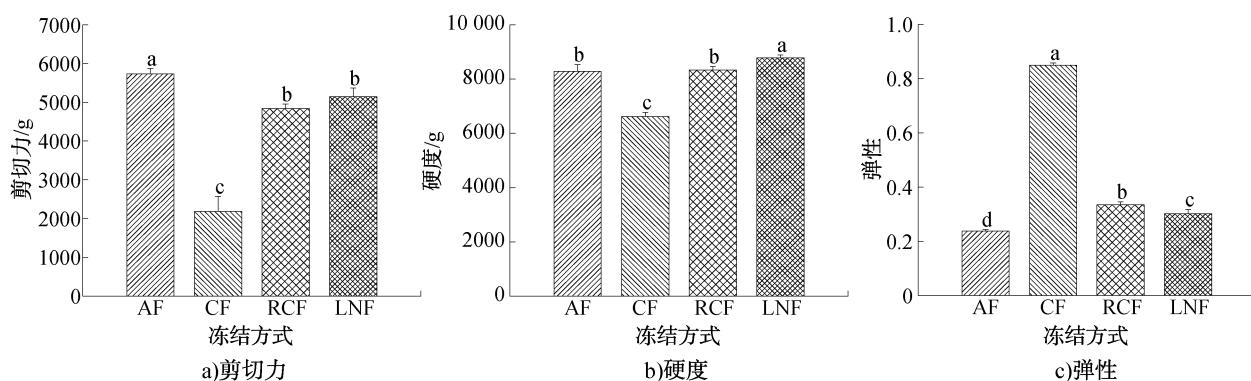


图 7 不同冻结方式下鲍鱼肌肉的质构特性

Fig. 7 Textural properties of abalone muscle under different freezing methods

最高,为(5732±138) g;由图7b)可知,CF组的硬度最低,为(6616±160) g,其次是AF组和RCF组,分别为(8292±243) g和(8332±136) g,LNF组最高,为(8782±105) g;由图7c)可知,弹性由大到小依次为CF组>RCF组>LNF组>AF组。RCF组和LNF组通过快速冻结控制冰晶尺寸和稳定蛋白质结构,有效维持了肌肉组织结构的完整性,减少了水分迁移,维持了鲍鱼肌肉的质构特性^[46]。CF组由于预煮处理诱导肌肉组织中的胶原蛋白和肌球蛋白发生变性,促使肌纤维纵向收缩,协同冻结过程中大冰晶的机械损伤,导致鲍鱼肌肉质地劣化^[23]。

3 结论

本研究以新鲜鲍鱼为对象,研究了AF、CF、RCF及LNF这4种冻结方式对鲍鱼肌肉的冰晶形成、组织结构、水分变化与分布、蛋白质特性及质构特性的影响,得到如下结论:经RCF和LNF处理的鲍鱼肌肉中形成了细小、均匀的冰晶,肌纤维结构保持较完整,解冻损失率较小,持水力较强,蛋白质构象变化被抑制,质构特性保持较好。其中经LNF处理的鲍鱼肌肉形成了更细小、分布更均匀的冰晶,水分分布更均一。与RCF和LNF相比,经AF处理的鲍鱼肌纤维排列有序、基本完整,解冻损失率和蒸煮损失率较高,蛋白质构象与质构特性发生轻微劣变;而经CF处理的鲍鱼肌纤维部分发生断裂,肌纤维之间存在大而不规则的冰晶,解冻损失率和蒸煮损失率最高,持水力最低,蛋白质氧化变性程度加剧,质地劣化最严重。综上,LNF冻结方式能够更好地保持鲍鱼肌肉品质。未来可进一步探索鲍鱼冻结保藏过程中冰晶重结晶机制、预处理与速冻工艺协同效应及基于分子模拟的微观作用机制,为冻结水产品品质调控提供参考。

参考文献:

[1] 农业农村部渔业渔政管理局,全国水产技术推广总站,中国水产学会编制.2024中国渔业统计年鉴[M].北京:中国农业出版社,2024.

Compiled by the Bureau of Fisheries and Fishery Administration, the Ministry of Agriculture, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of

Fisheries. 2024 China fishery statistical yearbook [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2024.

- [2] YANG F, JIA S N, LIU J X, et al. The relationship between degradation of myofibrillar structural proteins and texture of superchilled grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) fillet [J]. Food Chemistry, 2019, 301:125278.
- [3] CHEN X Q, LIU H Y, LI X X, et al. Effect of ultrasonic-assisted immersion freezing and quick-freezing on quality of sea bass during frozen storage [J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 154:112737.
- [4] ABDELNABY T, LI Z J, XUE C H. The influence of γ -PGA on the quality of cooked frozen crayfish during temperature fluctuations [J]. Food Chemistry, 2024, 441:138258.
- [5] JHA P K, CHAPLEAU N, MEYERS P E, et al. Cryogenic vs. Mechanical freezing impact on the quality of the sea bass (*Dicentrarchus labrax*) during long-term storage [J]. International Journal of Refrigeration, 2024, 160:411–422.
- [6] YAN W D, SUN Q X, ZHENG D Y, et al. Effect of liquid nitrogen freezing temperature on the muscle quality of *Litopenaeus vannamei* [J]. Foods, 2023, 12(24):4459.
- [7] REN Y M, LIANG R X, MAO X Z. Effect of liquid nitrogen freezing pretreatment on the meat quality of gazami crab (*Portunus trituberculatus*) during frozen storage [J]. Food Chemistry, 2025, 468:142367.
- [8] TENG X Y, LIU Y, CHEN L P, et al. Effects of liquid nitrogen freezing at different temperatures on the quality and flavor of Pacific oyster (*Crassostrea gigas*) [J]. Food Chemistry, 2023, 422:136162.
- [9] XIE Y, ZHOU K, TAN L J, et al. Coexisting with ice crystals: Cryogenic preservation of muscle food-mechanisms, challenges, and cutting-edge strategies [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2023, 71(49):19221–19239.
- [10] SHI J, ZHANG L T, LEI Y T, et al. Differential proteomic analysis to identify proteins associated with quality traits of frozen mud shrimp (*Solenocera melantha*) using an iTRAQ-based strategy [J]. Food Chemistry, 2018, 251:25–32.
- [11] NAKAZAWA N, OKAZAKI E. Recent research on factors influencing the quality of frozen seafood [J]. Fisheries Science, 2020, 86(2):231–244.
- [12] TAN M T, MEI J, XIE J. The formation and control of ice crystal and its impact on the quality of frozen aquatic products: A review [J]. Crystals, 2021, 11(1):68.
- [13] 向迎春,黄佳奇,杨志坚,等.冻结方式对凡纳滨对虾贮藏中组织冰晶及品质的影响[J].食品工业科技,2018,39(5):280–287.
- XIANG Y C, HUANG J Q, YANG Z J, et al. Effect of different freezing methods on the ice crystals and quality of white shrimp (*Penaeus vannamei*) in the storage [J].

- Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(5): 280–287.
- [14] ZHOU P C, CHU Y M, LV Y, et al. Quality of frozen mackerel during storage as processed by different freezing methods [J]. International Journal of Food Properties, 2022, 25(1): 593–607.
- [15] YANG Z M, LIU S C, SUN Q X, et al. Insight into muscle quality of golden pompano (*Trachinotus ovatus*) frozen with liquid nitrogen at different temperatures [J]. Food Chemistry, 2022, 374: 131737.
- [16] 尹蕾丽,周纷,郑尧,等.速冻皱纹盘鲍的肌肉营养、蛋白组成及显微结构分析[J].大连海洋大学学报,2020,35(5):741–747.
- YIN L L, ZHOU F, ZHENG Y, et al. Analysis of muscle nutrient, protein composition and microstructure of quick-frozen disk abalone *Haliotis discus* Hannai [J]. Journal of Dalian Ocean University, 2020, 35(5): 741–747.
- [17] 李秀霞,刘孝芳,刘宏影,等.超声波辅助冷冻与低温速冻对海鲈鱼冰晶形态及冻藏期间鱼肉肌原纤维蛋白结构的影响[J].中国食品学报,2021,21(10):169–176.
- LI X X, LIU X F, LIU H Y, et al. Effects of ultrasound-assisted freezing and cryogenic quick freezing on ice crystal morphology and myofibril structure of sea bass (*Lateolabrax japonicus*) during frozen storage [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(10): 169–176.
- [18] DU X, LI H J, DONG C H, et al. Effect of ice structuring protein on the microstructure and myofibrillar protein structure of mirror carp (*Cyprinus carpio* L.) induced by freeze-thaw processes [J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 139: 110570.
- [19] LIU Z Q, LI D Y, SONG L, et al. Effects of proteolysis and oxidation on mechanical properties of sea cucumber (*Stichopus japonicus*) during thermal processing and storage and their control [J]. Food Chemistry, 2020, 330: 127248.
- [20] SUN K T, PAN C, CHEN S J, et al. Effect of water change on quality deterioration of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) during partial freezing storage [J]. Food Chemistry, 2023, 416: 135836.
- [21] 范映辰,于曼曼,倪众,等.鲍鱼冷藏期间内源酶对质构特性的影响[J].大连工业大学学报,2023,42(6):391–396.
- FAN Y C, YU M M, NI Z, et al. Effect of endogenous enzymes on the texture characteristics of abalone during cold storage [J]. Journal of Dalian Polytechnic University, 2023, 42(6): 391–396.
- [22] YU M M, FAN Y C, XU S J, et al. Effects of antioxidants on the texture and protein quality of ready-to-eat abalone muscles during storage [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2022, 108: 104456.
- [23] YU M M, LI D Y, LIU Z Q, et al. Effects of heat treatments on texture of abalone muscles and its mechanism [J]. Food Bioscience, 2021, 44: 101402.
- [24] DENG Q, WANG Y L, SUN L J, et al. Migration of water in *Litopenaeus vannamei* muscle following freezing and thawing [J]. Journal of Food Science, 2018, 83(7): 1810–1815.
- [25] ZHENG Y, ZHOU F, ZHANG L, et al. Effect of different extent of protein oxidation on the frozen storage stability of muscle protein in obscure pufferfish (*Takifugu obscurus*) [J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 137: 110416.
- [26] CHELH I, GATELLIER P, SANTÉ-LHOUTELLIER V. Technical note: A simplified procedure for myofibril hydrophobicity determination [J]. Meat Science, 2006, 74(4): 681–683.
- [27] YU M M, FAN Y C, LIU Y X, et al. Effects of antioxidants of bamboo leaves on protein digestion and transport of cooked abalone muscles [J]. Food & Function, 2022, 13(4): 1785–1796.
- [28] ZHANG K X, LI N, LI J Z, et al. Improving the gelation and digestive properties of myofibrillar protein in *Litopenaeus vannamei* by ultra-high pressure [J]. Food Bioscience, 2023, 56: 103402.
- [29] LIU Y Y, ZHANG L T, GAO S, et al. Proteomic analysis of exudates in thawed fillets of bighead carp (*Hypophthalmichthys nobilis*) to understand their role in oxidation of myofibrillar proteins [J]. Food Research International, 2022, 151: 110869.
- [30] DONG X P, HOU Y W, WANG Y, et al. Effect of temperature-time pretreatments on the texture and microstructure of abalone (*Haliotis discus* Hannai) [J]. Journal of Texture Studies, 2018, 49(5): 503–511.
- [31] 刘会省,迟海,杨宪时,等.冻结方式对南极磷虾品质的影响[J].现代食品科技,2013,29(7):1601–1605.
- LIU H X, CHI H, YANG X S, et al. Effects of freezing methods on the quality of antarctic krill (*Euphausia superba*) [J]. Modern Food Science and Technology, 2013, 29(7): 1601–1605.
- [32] 巩涛硕,蓝蔚青,王蒙,等.不同冻结方式对金鲳鱼水分、组织结构与品质变化的影响[J].食品科学,2019,40(23):213–219.
- GONG T S, LAN W Q, WANG M, et al. Effects of different freezing methods on water state, tissue structure and quality changes of *Trachinotus ovatus* [J]. Food Science, 2019, 40(23): 213–219.
- [33] YIN M Y, DAI K, QIU Z H, et al. Effect of temperature fluctuations during frozen storage on ice crystal distribution and quality of tilapia (*Oreochromis mossambicus*) [J]. Food Chemistry, 2025, 463: 141104.
- [34] MAO Y X, HU L H, KUANG S Y, et al. Effect of liquid nitrogen spray freezing on the ice crystal size and quality

- of large yellow croaker [J]. Journal of Food Engineering, 2024, 369: 111937.
- [35] LUAN L L, WANG L P, WU T T, et al. A study of ice crystal development in hairtail samples during different freezing processes by cryosectioning versus cryosubstitution method [J]. International Journal of Refrigeration, 2018, 87: 39–46.
- [36] 唐佳楣, 廖媛媛, 汤海青, 等. 不同冻结方法对大黄鱼冻藏期间品质的影响 [J]. 宁波大学学报(理工版), 2019, 32(6): 35–42.
- TANG J M, LIAO Y Y, TANG H Q, et al. Effect of different freezing rates on the quality of *Pseudosciaena crocea* during frozen storage [J]. Journal of Ningbo University (Natural Science & Engineering Edition), 2019, 32(6): 35–42.
- [37] TENG Z N, HE X Y, WANG L Q, et al. Effect of liquid nitrogen freezing on maintaining the quality of crayfish during freeze-thaw cycles: Muscle structure and myofibrillar proteins properties [J]. Foods, 2025, 14(2): 279.
- [38] LYU Y, CHU Y M, ZHOU P C, et al. Effects of different freezing methods on water distribution, microstructure and protein properties of cuttlefish during the frozen storage [J]. Applied Sciences, 2021, 11(15): 6866.
- [39] LUO J, LI M, ZHANG Y, et al. The low-field NMR studies the change in cellular water in tilapia fillet tissue during different drying conditions [J]. Food Science & Nutrition, 2021, 9(5): 2644–2657.
- [40] 郑尧. 冻藏过程中养殖暗纹东方鲀蛋白氧化与肌肉稳定性研究 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2021.
- ZHENG Y. Research on protein oxidation and muscle stability of farmed obscure pufferfish (*Takifugu obscurus*) during frozen storage [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2021.
- [41] LI R, GUO M Y, LIAO E, et al. Effects of repeated freezing and thawing on myofibrillar protein and quality characteristics of marinated Enshi black pork [J]. Food Chemistry, 2022, 378: 131994.
- [42] 卢曜昆, 李强, 朱雅情, 等. 冷冻方式对小龙虾蛋白性质和结构的影响 [J]. 肉类研究, 2024, 38(3): 49–55.
- LU Y K, LI Q, ZHU Y Q, et al. Effects of freezing methods on the properties and structure of myofibrillar proteins from crayfish (*Procambarus clarkii*) [J]. Meat Research, 2024, 38(3): 49–55.
- [43] 尹蕾丽, 周纷, 唐佳乐, 等. 冻融循环处理对皱纹盘鲍质地的影响 [J]. 上海海洋大学学报, 2021, 30(2): 359–369.
- YIN L L, ZHOU F, TANG J L, et al. Effect of freeze-thaw cycles on texture of *Haliotis discus* Hannai muscle [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2021, 30(2): 359–369.
- [44] ZHAO X, WANG L, WANG J X, et al. Effects of different freezing methods on muscle qualities and myofibrillar protein properties of red drum (*Sciaenops ocellatus*) during storage [J]. International Journal of Refrigeration, 2024, 165: 199–208.
- [45] 成谦益, 包建强, 李雪艳, 等. 微冻与冷却贮藏及在断链后 (10 °C) 对乌鳢品质的影响 [J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(18): 243–252.
- CHENG Q Y, BAO J Q, LI X Y, et al. Effect of superchilling, chilling storage, and cold-chain breakage (10 °C) on the quality of *Channa argus* [J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(18): 243–252.
- [46] 林国荣, 曾令桢. 冷冻方式对鲍鱼品质与理化性质的影响 [J]. 食品工业, 2023, 44(1): 182–186.
- LIN G R, ZENG L Z. Effects of freezing methods on quality and physicochemical properties of abalone [J]. The Food Industry, 2023, 44(1): 182–186.

Effects of different freezing methods on the qualities of abalone muscle

ZHAO Ying, LU Chenxi, LIN Ying, LIU Yuxin

School of Food Science and Technology/State Key Laboratory of Marine Food Processing and Safety Control/
National Engineering Research Center of Seafood/Liaoning Collaborative Innovation Center of Seafood
Deep Processing, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China

Abstract: **[Objective]** To investigate the effects of different freezing methods on the qualities of frozen abalone muscles. **[Methods]** Fresh abalones were treated with four freezing methods: Air Freezing (AF), Cooked Freezing (CF), Rapid Cryogenic Freezing (RCF), and Liquid Nitrogen Freezing (LNF). The effects on ice crystal formation, tissue structure, moisture distribution and changes, protein properties, and textural properties were analyzed. **[Results]** AF-treated muscles remained largely intact in fiber structure with higher thawing/ cooking losses and slight changes in protein conformation and textural properties. CF treatment induced large, irregular ice crystals, increased fiber breakage, reduced water-holding capacity, the highest thawing/ cooking

(下转第 53 页)

Comparative study on antioxidant activity of EGCG and theaflavin based on density functional theory

XU Yucong¹, LI Wenzheng¹, FAN Maomei¹, BU Ying^{1,3}, ZHU Wenhui¹, LI Jianrong^{1,2}, LI Xuepeng¹

1. College of Food Science and Technology/National & Local Joint Engineering Research Center of Storage, Processing and Safety Control Technology for Fresh Agricultural and Aquatic Products, Bohai University, Jinzhou 121013, China;

2. Liaoning Collaborative Innovation Center of Seafood Deep Processing, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China;

3. Institute of Ocean Research, Bohai University, Jinzhou 121013, China

Abstract: [Objective] To investigate the structure-activity relationship between the antioxidant activities of EGCG/theaflavin and their molecular structures. [Methods] The molecular structures and corresponding free radicals of the main functional components—epigallocatechin gallate (EGCG) and theaflavin—in green/black tea were theoretically calculated using the density functional theory (DFT) method. The differences in antioxidant activity and solvation effects between EGCG and theaflavin were analyzed based on multiple antioxidant indices.

[Results] Theaflavin exhibited higher antioxidant activity than EGCG, with a frontier molecular orbital energy gap $\Delta E_{(\text{LUMO-HOMO})}$ of 5.67 eV, a bond dissociation energy (BDE) of the C₇—OH phenolic hydroxyl of 321.9 kJ/mol, an ionization potential (IP) of 461.4 kJ/mol, and a spin population of the C_b—OH oxygen atom of 0.218. In non-polar solvents, sequential proton-loss electron transfer (SPLET) is preferred as the dominant reaction mechanism, while in polar solvents, single electron transfer followed by proton transfer (SET-PT) is preferred. The C₅—OH of the B ring may be the active site of EGCG, while the C₇—OH of the A' ring may be that of theaflavin.

[Conclusion] Theaflavin exhibits stronger antioxidant activity than EGCG, with the position of phenolic hydroxyl groups significantly influencing its activity. The DFT method offers a novel perspective for investigating the antioxidant activity of functional components in tea.

Key words: epigallocatechin gallate; theaflavin; density functional theory; antioxidant activity; free radical

[责任编辑:杨晓娟 申慧珊]

(上接第 42 页)

losses, severe protein oxidation (lowest surface hydrophobicity: (6.39±0.96) μg/mg; total sulfhydryl: (1.49±0.04) μmol/g), and most severe textural deterioration. RCF treatment formed fine, uniform ice crystals with dense, homogeneous fibers, resulting in lower thawing loss and enhanced water-holding capacity ((40.49±2.89)%), stable protein structure, and preserved textural properties. LNF treatment formed finer, more uniform ice crystals with tighter fiber packing, showed no significant difference in thawing loss and water-holding capacity compared to RCF, and demonstrated enhanced protein stability for better textural preservation. [Conclusion] LNF treatment better preserves abalone muscle quality by promoting fine, uniform ice crystal formation and maintaining protein stability.

Key words: abalone; freezing method; ice crystal; protein property; textural property

[责任编辑:杨晓娟 申慧珊]