

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250418001

引用格式: 封铧, 管家宁, 刘智禹, 等. 冷链流通过程中温度波动对预制烤鱼品质劣变的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(16): 221-229.

FENG H, GUAN JN, LIU ZY, *et al.* Effects of temperature fluctuations in cold chain circulation on quality degradation of pre-prepared grilled fish [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(16): 221-229. (in Chinese with English abstract).

冷链流通过程中温度波动对预制烤鱼品质劣变的影响

封铧¹, 管家宁¹, 刘智禹², 许心语¹, 牟伟丽³, 林洪¹, 王皓¹, 栾福磊⁴, 李振兴^{1*}

(1. 中国海洋大学食品科学与工程学院, 青岛 266003; 2. 福建省水产研究所, 福建省海洋生物增殖与高值化利用重点实验室, 厦门 361013; 3. 荣成银海水产有限公司, 威海 264300; 4. 海信冰箱有限公司, 青岛 266104)

摘要: **目的** 探究预制烤鱼在冷链流通过程中因温度波动引发的反复冻融现象对其品质劣变的影响。**方法** 采用极端化处理构建品质加速劣变模型, 研究冻融次数(8次)对预制烤鱼微观组织结构、质构特性、pH、色差及脂肪氧化等指标的影响规律, 并结合相关性分析明确主导品质劣变的关键因素。**结果** 随冻融次数增加, 肌肉组织受损加剧, 肌纤维断裂明显, 硬度、弹性、咀嚼性与剪切力下降, 胶黏性上升; pH呈先降后升趋势; 总体上, 亮度值(L^*)逐渐下降, 红度值(a^*)与黄度值(b^*)持续升高; 硫代巴比妥酸反应物(thiobarbituric acid reactive substances, TBARS)含量由0.28 mg/kg显著升高至2.00 mg/kg ($P<0.05$); 6次冻融后产品挥发性盐基氮(total volatile basic nitrogen, TVB-N)含量超出食用安全限值(27.43 mg/100 g, 国家标准 ≤ 25 mg/100 g)。**结论** 预制烤鱼在流通过程中品质显著下降, 且随着冻融次数的增加, 预制烤鱼品质破坏更为严重, 经超过5次冻融后已不宜食用, 这为其在冷链流通中的品质调控提供理论依据。

关键词: 预制烤鱼; 冷链流通; 温度波动; 品质劣变

Effects of temperature fluctuations in cold chain circulation on quality degradation of pre-prepared grilled fish

FENG Hua¹, GUAN Jia-Ning¹, LIU Zhi-Yu², XU Xin-Yu¹, MU Wei-Li³, LIN Hong¹,
WANG Hao¹, LUAN Fu-Lei⁴, LI Zhen-Xing^{1*}

(1. College of Food Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266003, China; 2. Key Laboratory of Cultivation and High-value Utilization of Marine Organisms in Fujian Province, Fisheries Research Institute of Fujian, Xiamen 361013, China; 3. Rongcheng Yinhai Aquatic Product Co., Ltd., Weihai 264300, China; 4. Hisense Refrigerator Co., Ltd., Qingdao 266104, China)

ABSTRACT: Objective To investigate the effects of repeated freeze-thaw cycles, induced by temperature

收稿日期: 2025-04-18

基金项目: 山东省科技型中小企业创新能力提升工程项目(2023TSGC0639); 国家海水鱼产业技术体系项目(CARS-47)

第一作者: 封铧(1995—), 男, 博士后, 主要研究方向为食品安全与质量控制。E-mail: fenghua@ouc.edu.cn

*通信作者: 李振兴(1978—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为食品安全与质量控制。E-mail: lizhenxing@ouc.edu.cn

fluctuations during cold chain circulation, on the quality deterioration of pre-prepared grilled fish. **Methods** An accelerated deterioration model was established through extreme treatment to examine the effects of up to 8 freeze-thaw cycles on microstructure, texture properties, pH, color parameters and lipid oxidation. Correlation analysis was conducted to identify the primary factors contributing to quality degradation. **Results** As the number of freeze-thaw cycles increased, muscle tissue damage intensified, myofibril structures fractured, and hardness, elasticity, chewiness and shear force declined, while adhesiveness increased. The pH value showed a decreasing-then-increasing trend. Overall, the lightness value (L^*) progressively decreased, while the redness (a^*) and yellowness (b^*) values continuously increased. The thiobarbituric acid reactive substances (TBARS) value significantly increased from 0.28 mg/kg to 2.00 mg/kg ($P<0.05$). After 6 cycles, the total volatile basic nitrogen (TVB-N) content exceeded the national safety limit for consumption (27.43 mg/100 g, national standard limit ≤ 25 mg/100 g). **Conclusion** The quality of pre-cooked grilled fish significantly deteriorates during distribution, and the damage becomes more severe with increasing freeze-thaw cycles. After more than 5 cycles, the product is no longer suitable for consumption. These findings provide a scientific basis for quality control strategies in the cold chain logistics of pre-prepared aquatic products.

KEY WORDS: pre-prepared grilled fish; cold chain circulation; temperature fluctuation; quality deterioration

0 引言

随着现代生活节奏的加快与居民消费水平的不断提升,营养美味、便捷高效的水产预制菜市场呈现快速增长的趋势。烤鱼凭借独特的风味及丰富的营养价值,逐渐成为消费者青睐的热门餐饮选择^[1]。据《2024年中国烤鱼行业研究发展报告》数据显示,2018年至2023年中国烤鱼市场规模总体保持上升趋势,2023年达到1396.6亿元人民币,同比增长12.6%,预计至2029年将突破2431.3亿元人民币^[2]。近年来,随着国内预制菜产业链的不断完善,在消费需求增长与产业供给提质的双驱动下,预制烤鱼作为兼具风味特色与便捷属性的调理型水产品,其市场潜力逐渐显现,满足了快节奏生活背景下消费者对“即热即食”产品的需求。

目前,市面上大多数预制烤鱼产品以冷冻形式进行流通储运。冷链在保障产品品质方面发挥着关键作用,然而在实际运输及存储过程中,因温控管理不当或外界环境变化等原因,易出现温度波动现象,进而引发产品多次冻融循环^[3-4]。反复冻融不仅导致肌肉组织的机械性破坏,细胞膜结构受损,还会促进脂类成分的氧化反应加剧,从而影响产品质构、风味及色泽等关键品质指标,降低消费者的接受度^[5-6]。已有研究表明,多次冻融对水产品的品质具有不利影响。ZHANG等^[7]发现南美白对虾(*Litopenaeus vannamei*)在冷冻温度反复波动条件下,其肌纤维结构遭受破坏,肌原纤维蛋白发生变性,导致持水性和质构性能显著下降。LI等^[8]研究指出,5次冻融循环对大黄鱼(*Pseudosciaena crocea*)品质造成不可逆的损伤,其组织结构完整性降低,保水能力和口感指标均显著下降。尽管冻融循环对传统冷冻水产品品质变化已有较系统的研究,但针对预制烤鱼等新兴水产调理制品在冷链流通中温度波动

对品质变化的影响研究较少。

本研究通过模拟流通过程中的温度波动现象,采用反复冻融处理构建品质加速劣变模型,对预制烤鱼进行不同次数的冻融循环实验,系统研究冻融循环次数对其微观组织结构、质构特性、pH、色差、脂肪氧化水平以及新鲜度等关键品质指标的影响。旨在揭示反复冻融条件下预制烤鱼理化性质的变化规律,明确其品质在可接受范围内的最大冻融次数上限,并通过主成分分析法进一步明确影响产品品质劣变的主要因素,为冷链流通中预制烤鱼的品质控制提供理论依据与实践指导。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

海鲈鱼(*Lateolabrax japonicus*),购自青岛市武夷山农贸市场。

磷酸二氢钾、磷酸氢二钾、无水乙醇、三氯乙酸、乙二胺四乙酸(ethylene diamine tetraacetic acid, EDTA)、硼酸、甲基红、溴甲酚绿、碳酸钾、阿拉伯树胶粉、甘油、碳酸钾(分析纯,国药集团化学试剂有限公司);戊二醛固定液、2-巯代巴比妥酸、1,1,3,3-四乙氧基丙烷(分析纯,北京索莱宝科技有限公司);乙酸异戊酯(分析纯,上海麦克林生化科技股份有限公司)。

1.2 仪器与设备

ANO-28L电烤箱、BCD-215KS低温冰箱(青岛海尔集团);DZ600/2S真空包装机(青岛诺邦自动化设备有限公司);BS-224-S电子分析天平(精度0.0001 g,德国赛多利斯有限公司);ALPHA 1-2LD plus冷冻干燥机(德国Christ公司);EM ACE200喷金仪(德国徕卡公司);Sigma 500扫描电镜

(德国卡尔·蔡司公司); TMS-Touch 质构仪(美国 FTC 公司); CR-400 便携式色差仪(日本柯尼卡美能达公司); MS-PA 数显磁力搅拌器、MX-S 涡旋振荡器(大龙兴创实验仪器股份有限公司); FA25 均质机(上海弗鲁克科技发展有限公司); TGL-16 台式高速冷冻离心机(湖南湘仪实验室仪器开发有限公司); HH-1 数显恒温水浴锅(国华电器有限公司); Powerwave XS 酶标仪(美国 Biotek 公司); PHS-3C pH 计(上海伟业仪器厂)。

1.3 实验方法

1.3.1 样品制备

从市场购买新鲜的海鲈鱼, 将其加冰并迅速运输到实验室。对海鲈鱼进行去皮、去鱼骨、去内脏等前处理, 保留背部肌肉并用蒸馏水进行流水清洗。沥干表面水分后, 放入 250 °C 的电烤箱中烤制 10 min, 冷却至室温后进行真空包装。

冻融处理: 采用反复冻融处理构建品质加速劣变模型, 模拟产品流通过程中温度波动现象。取处理后的预制烤鱼样品放入 -18 °C 冰箱中冷冻贮藏 24 h, 取出后置于 4 °C 冰箱中解冻 12 h, 作为 1 次冻融处理。再放回 -18 °C 下进行冷冻贮藏, 重复上述步骤, 共进行 8 次冻融处理。未经过冷冻的产品为对照组。

1.3.2 肌肉微观结构观察

参考 WANG 等^[9]的方法并略作修改。将样品切成 2.0 cm×1.0 cm×0.5 cm 的块状, 放在体积分数为 2.5% 的戊二醛溶液中, 溶液与样品的体积比为 10:1。将其置于 4 °C 下固定 24 h 后, 用 0.1 mol/L 的磷酸盐缓冲液(pH 7.4)漂洗 3 次, 每次 15 min。再依次用浓度为 30%、50%、70%、80%、90% 和 100% 的乙醇溶液对样品进行梯度脱水处理, 然后用乙酸异戊酯重复洗脱 2 次, 每次 15 min。将样品冷冻干燥 24 h 并喷金后, 置于扫描电子显微镜下观察、拍照。

1.3.3 质构特性分析

参考李锐等^[10]的方法并略作修改。将样品切成 2.0 cm×2.0 cm×1.5 cm 的块状, 选用 P/50 平底柱形探头, 采用质地多面剖析(texture profile analysis, TPA)模式测定。测试在室温下进行, 测试速度设置为 120 mm/min, 形变量 50%, 触发力为 0.15 N, 测定样品硬度、弹性、咀嚼性、胶黏性 4 个指标。每组实验重复 6 次, 去除最大值和最小值后取平均值。

1.3.4 剪切力的测定

参考陈佳奇等^[11]的方法并略作修改。将样品切成 2.0 cm×2.0 cm×0.5 cm 的块状, 使用单刀剪切探头测量样品的剪切力。设置测试前速度设置 60 mm/min, 测试后速度 60 mm/min, 回程距离为 40 mm, 触发力 0.1 N。每组实验重复 6 次, 去除最大值和最小值后取平均值。

1.3.5 色差的测定

使用白板校准后的便携式色差仪直接测定鱼肉表面

的亮度值 L^* 、红度值 a^* 、黄度值 b^* , 对每个样品进行 3 次重复测定。

1.3.6 pH 的测定

参照 GB 5009.237—2016《食品安全国家标准 食品 pH 值的测定》的方法测定。

1.3.7 硫代巴比妥酸反应物值的测定

参考 LI 等^[12]的方法并略作修改。称取 3 g 左右鱼肉样品, 加入 30 mL 7.5% 的三氯乙酸溶液(含 0.1% EDTA), 混合均质 60 s 后, 4 °C 下 8000 r/min 离心 15 min 后保留上清液。取 5 mL 上清液加入 5 mL 0.02 mol/L 的 2-硫代巴比妥酸溶液, 混匀, 置于 90 °C 下水浴反应 30 min, 冷却至室温后, 在 532 nm 处测定样品的吸光值。以 1,1,3,3-四乙氧基丙烷制备标准曲线并测定硫代巴比妥酸反应物(thiobarbituric acid reactive substances, TBARS)。TBARS 按公式(1)计算。

$$\text{TBARS}/(\text{mg}/\text{kg}) = \frac{c \times V \times 1000}{m \times 1000} \quad (1)$$

式中: c 为从标准系列曲线中得到的样品溶液中丙二醛的浓度, $\mu\text{g}/\text{mL}$; V 为样品溶液总体积, mL ; m 为样品质量, g 。

1.3.8 挥发性盐基氮的测定

参考 GB 5009.228—2016《食品安全国家标准 食品中挥发性盐基氮的测定》中微量扩散法进行测定。

1.4 数据处理

实验数据采用平均值±标准偏差的形式表示。采用 Microsoft Excel 2021 软件对实验数据进行初步统计, 并通过 SPSS 26.0 统计软件进行单因素方差分析处理, 差异显著性水平设置为 $P < 0.05$ 。利用 Origin 2022 软件作图。

2 结果与分析

2.1 反复冻融对肌肉微观结构的影响

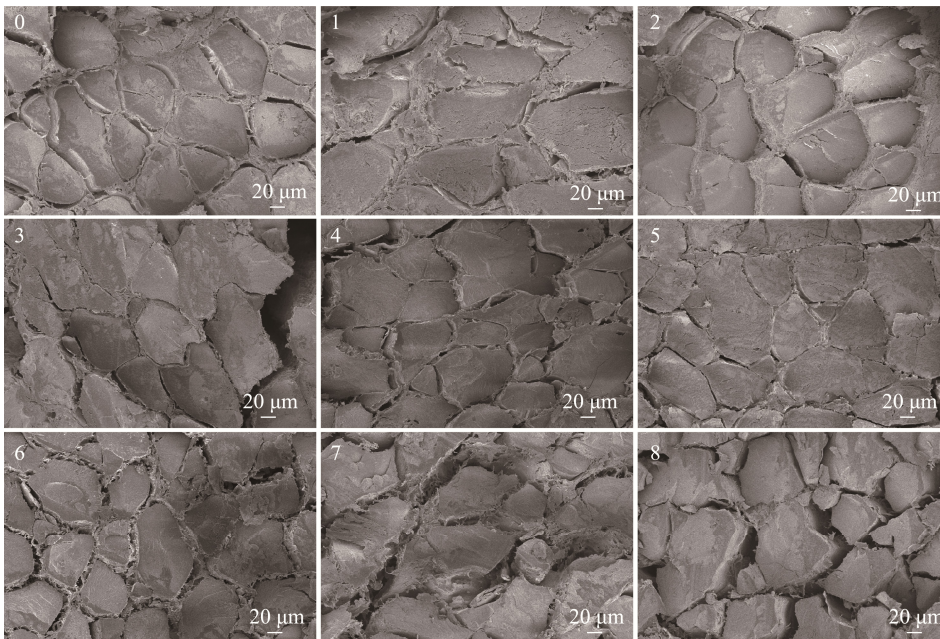
肌肉微观结构的变化可直观反映肌纤维的损伤程度, 是评估鱼肉质量劣变的重要指标之一^[13]。图 1 展示了样品在经历 1~8 次冻融循环后的组织微观结构变化。结果表明, 新鲜样品肌纤维排列紧密、方向一致, 组织结构完整。而随着冻融次数的增加, 肌纤维逐渐出现排列紊乱、结构松散的现象。尤其在经历第 6 次冻融处理后, 肌束间开始形成明显空隙, 肌纤维结构疏松, 至第 7 至第 8 次冻融时, 更可见肌纤维断裂, 组织结构呈现高度无序状态。ZHANG 等^[14]在研究多次冻融处理对乌鳢鱼肌肉结构的影响时亦观察到类似结果, 证实冻融处理显著加剧肌肉组织孔隙化现象。

肌肉组织结构的破坏主要归因于冻融过程中冰晶的反复生成和融化, 使得细胞内外发生机械挤压和破裂^[15]。冰晶的累积损伤不仅破坏肌细胞膜及肌内膜的完整性, 还诱发蛋白质变性^[16], 导致肌肉组织孔洞增加、结构疏松。冻融循环引起的组织结构松弛最终会反映于产品质构性能的劣变, 严重影响鱼肉的食用品质。

2.2 反复冻融对预制烤鱼质构特性的影响

质构特性是衡量水产品品质的关键指标之一,直接影响消费者的口感体验^[17]。图2展示了不同冻融次数对预

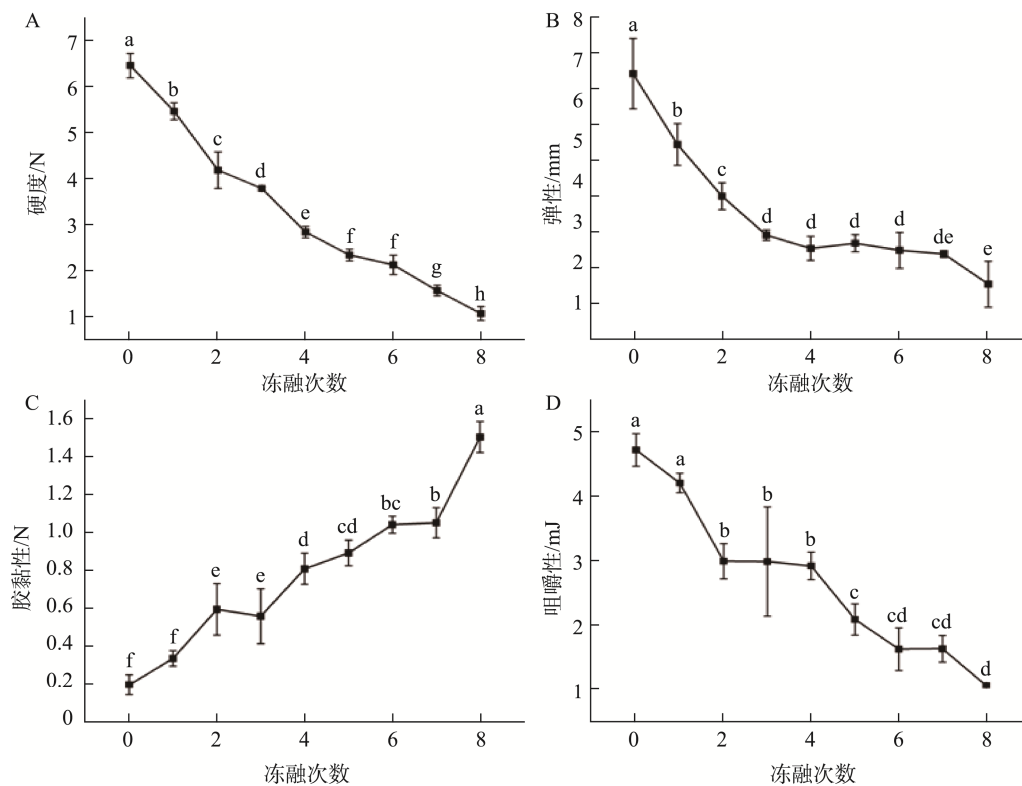
制烤鱼硬度、弹性、胶黏性与咀嚼性等质构参数的影响趋势。随着冻融次数的增加,样品硬度下降,由初始的(6.58±0.27) N降至(1.17±0.15) N,降幅达82%(图2A),说



注:0~8 分别代表冻融次数,0代表新鲜的鱼肉样品。

图1 反复冻融对预制烤鱼微观结构的影响

Fig.1 Effects of repeated freeze-thaw cycles on the microstructure of pre-prepared grilled fish



注:不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$),图3、5~6同。

图2 反复冻融对预制烤鱼质构特性的影响($n=3$)

Fig.2 Effects of repeated freeze-thaw cycles on texture characteristics of pre-prepared grilled fish ($n=3$)

明肌肉组织结构稳定性降低, 水分保持能力减弱。弹性方面, 冻融前 3 次导致其显著下降($P<0.05$), 至第 4 次后下降趋势趋于缓和, 表明此时肌纤维的弹性结构已发生不可逆破坏(图 2B)。相较之下, 胶黏性则呈现持续上升趋势, 由(0.21±0.05) N 升至(1.46±0.08) N(图 2C), 可能与肌细胞破裂释放的亲水性组分在表面迁移与重组过程中形成新的界面黏附层有关。咀嚼性作为综合反映样品硬度、弹性和胶黏性的复合指标, 其下降趋势呈现非线性特征, 第 2 和第 5 次冻融处理后下降幅度增大(图 2D), 证实了各质构参数之间的协同作用机制。

总之, 随着冻融循环次数增加, 预制烤鱼的硬度、弹性和咀嚼性总体上显著下降($P<0.05$), 胶黏性则逐步上升。这一趋势与史策等^[18]的研究结果一致。冻融过程中冰晶的生成与重结晶对肌纤维产生持续性破坏, 导致其断裂、排列紊乱、组织松散, 进而增加汁液流失, 显著削弱鱼肉质地^[19]。结合微观结构的变化可推断, 肌纤维完整性的逐步丧失是质构参数劣变的核心驱动机制, 反映了微观损伤对宏观质感的直接影响, 最终降低产品的感官接受度。

2.3 反复冻融对预制烤鱼剪切力的影响

嫩度是鱼肉品质的重要感官属性之一, 通常通过剪切力的大小进行量化评价, 其数值越小, 代表鱼肉越柔嫩^[20]。图 3 展示了冻融次数对预制烤鱼剪切力的影响趋势。结果发现未冻融样品的剪切力为(29.35±0.36) N, 经历 1 次冻融后即显著下降($P<0.05$), 随后至第 4 次冻融时降幅逐步减缓。至第 8 次处理后, 剪切力降至(5.30±0.63) N, 较初值下降幅度达 82%。剪切力的下降反映出肌纤维间黏连性和组织完整性的持续削弱^[21], 其变化机制一方面是冰晶的形成与重结晶过程中肌纤维的机械损伤, 导致肌间隙扩大、结构断裂, 降低其抵抗剪切力的能力^[22], 另一方面是冰晶对细胞溶酶体结构的破坏促使胞内酶释放, 加速肌原纤维蛋白的降解^[23], 从而进一步削弱肌肉组织的机械强度。综合来看, 冻融循环显著降低了预制烤鱼的剪切力, 削弱其嫩度, 与微观结构和质构特性分析结果高度一致。冻融过程对蛋白质结构的破坏及其对肌肉组织完整性的持续削弱是影响剪切性能的主要原因。

2.4 反复冻融对预制烤鱼色泽的影响

色泽是衡量预制烤鱼感官品质的重要指标之一, 消费者通常通过视觉判断产品的新鲜度与整体质量。冻融循环过程中肉制品的理化性质会发生显著改变, 其中色泽变化明显^[24]。表 1 数据显示, 随着冻融次数的增加, 样品表面亮度值(L^*)由 75.48±0.72 降低至 63.49±3.07, 部分处理组与对照组间差异显著($P<0.05$), 说明反复冻融可能导致样品表面逐渐变暗。JIANG 等^[25]在对金枪鱼冻融变化的研究中也发现, 其肉色光泽随冻融次数增加而减弱,

颜色暗淡, 这主要归因于脂肪氧化与肌红蛋白降解共同作用所致。

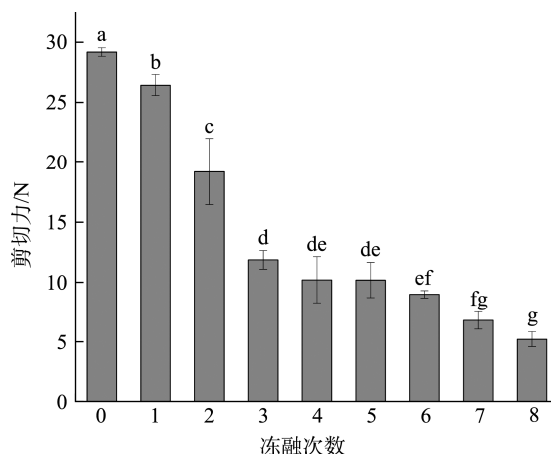


图 3 反复冻融对预制烤鱼剪切力的影响($n=3$)

Fig.3 Effects of repeated freeze-thaw cycles on the shear force of pre-prepared grilled fish ($n=3$)

红度值(a^*)总体上呈上升趋势, 由-3.21±0.41 升至-2.61±0.11 ($P<0.05$), 黄度值(b^*)则在多数处理组中表现出显著升高, 从 10.23±0.58 升至 17.44±2.23 ($P<0.05$)。相关研究指出, b^* 值的升高与脂质氧化水平呈正相关性^[26]。鱼肉中富含不饱和脂肪酸, 在氧化过程中生成的大量自由基可与蛋白质中的氨基类物质发生反应, 形成呈黄色的氧化产物, 进而导致肉色向黄色偏移。此外, 鱼肉中的铜、铁等微量金属元素在氧化反应中亦可能促进色素变化, 导致颜色发红或发黄。同时, 频繁的冻融处理破坏了肌肉纤维结构, 加剧细胞间水分渗出, 在肉品表面形成自由水积聚层, 干扰了光线在表面的反射与散射, 进一步削弱肉品的视觉亮度^[27]。因此, 冻融循环不仅加剧脂质氧化, 也显著破坏了鱼肉色泽的稳定性, 影响其市场接受度与消费意愿。

表 1 反复冻融对预制烤鱼色泽的影响($n=3$)

Table 1 Effects of repeated freeze-thaw cycles on the color of pre-prepared grilled fish ($n=3$)

冻融次数	L^*	a^*	b^*
0	75.48±0.72 ^a	-3.21±0.41 ^{bc}	10.23±0.58 ^d
1	74.03±0.44 ^{ab}	-2.64±0.08 ^a	12.24±0.97 ^{cd}
2	73.68±0.29 ^{ab}	-2.61±0.11 ^a	13.54±0.16 ^{bc}
3	72.44±1.39 ^b	-3.42±0.15 ^c	13.34±2.09 ^{bc}
4	74.65±1.49 ^{ab}	-2.67±0.52 ^a	14.23±1.30 ^{bc}
5	73.85±0.42 ^{ab}	-2.65±0.15 ^a	15.06±0.26 ^b
6	72.76±2.41 ^b	-2.99±0.34 ^{abc}	13.77±1.53 ^{bc}
7	66.94±1.50 ^c	-2.83±0.24 ^{ab}	14.57±0.56 ^b
8	63.49±3.07 ^d	-2.61±0.11 ^a	17.44±2.23 ^a

注: 同列上标字母不同表示各组之间存在显著性差异($P<0.05$)。

2.5 反复冻融对预制烤鱼 pH 的影响

pH 是衡量鱼肉新鲜度及其功能特性的重要理化参数,直接影响肉品的色泽、保水性、嫩度及风味等多个质量属性^[28]。图 4 结果显示,对照样品初始 pH 呈弱酸性,可能是与屠宰后肌糖原经糖酵解生成乳酸有关^[29]。在 1 至 4 次冻融处理后,样品 pH 下降至 6.64,可能由于肌肉细胞内糖原及 ATP 降解所产生的酸性物质积聚,以及冰晶对细胞结构的破坏导致氢离子释放,从而使 pH 降低^[30-31]。然而,当冻融次数超过 5 次后,pH 出现回升趋势,并在第 8 次处理后恢复至 6.87。这与鱼肉中蛋白质的降解作用增强有关,冻融循环造成的细胞破损加剧内源性酶释放,同时促进表面微生物生长,加速蛋白质水解,生成氨基类、胺类、吲哚等碱性代谢产物,进而使 pH 上升^[32]。李桂敏等^[33]研究也表明,在多次冻融过程中鲟鱼肉的 pH 呈现“先降后升后趋稳”的变化趋势,与本研究结果基本一致。因此,冻融循环通过破坏细胞结构并诱导生化反应过程,引起鱼肉 pH 的动态变化。这一变化趋势不仅反映了样品品质的演变过程,也为评价产品新鲜度提供了重要参考依据。

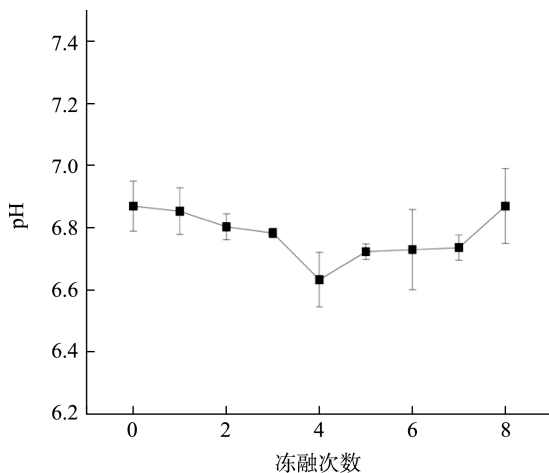


图 4 反复冻融对预制烤鱼 pH 的影响($n=3$)
Fig.4 Effects of repeated freeze-thaw cycles on pH of pre-prepared grilled fish ($n=3$)

2.6 反复冻融对预制烤鱼硫代巴比妥酸反应物值的影响

TBARS 是衡量肉制品脂质氧化程度的关键指标,可定量反映脂质过氧化过程中丙二醛等次级氧化产物的含量^[34]。鱼肉富含多不饱和脂肪酸,极易受到温度波动等外界因素的影响而发生氧化反应^[35]。图 5 结果显示,对照组样品的初始 TBARS 值为 (0.28 ± 0.03) mg/kg。在冻融初期(1~3 次),TBARS 值略有上升,且各组间差异不显著($P>0.05$),表明此阶段脂质氧化程度较轻。第 4 次冻融后,TBARS 值持续增加。尽管第 4 与第 5 次冻融处理组之间差异不显著($P>0.05$),但自第 7 次起至第 8 次,各处理组

间均表现出统计学显著差异($P<0.05$),最终在第 8 次冻融后达到峰值 (2.00 ± 0.16) mg/kg。该结果表明,随着冻融次数的增加,样品中脂质氧化程度显著增强,氧化速率呈加快趋势。推测其机制是在冻融过程中,反复生成与重结晶的冰晶破坏肌肉细胞膜结构,释放细胞内的氧化酶,加速脂质的氧化降解反应^[36]。同时,组织破损导致脂肪暴露面积增加,与氧气接触更加充分,从而促进脂质氧化的发生。JIANG 等^[25]在低盐冷冻金枪鱼研究中也发现类似趋势,TBARS 值随冻融次数增加而升高,与本研究结果相符。结合色差结果中 b^* 的升高趋势进一步证实了脂质氧化对肉色变化的影响。因此, TBARS 值的变化不仅揭示了冻融循环对脂肪氧化的推动效应,也从侧面反映出鱼肉品质劣变的化学基础。

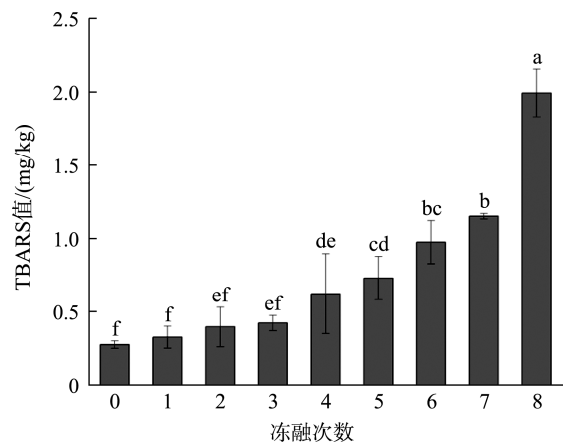


图 5 反复冻融对预制烤鱼 TBARS 值的影响($n=3$)
Fig.5 Effects of repeated freeze-thaw cycles on TBARS of pre-prepared grilled fish ($n=3$)

2.7 反复冻融对预制烤鱼挥发性盐基氮值的影响

挥发性盐基氮(total volatile basic nitrogen, TVB-N)是衡量鱼类等动物性食品新鲜度和腐败程度的重要指标,主要包括蛋白质在微生物及内源酶作用下分解产生的氨、胺类等挥发性含氮化合物。TVB-N 含量的升高通常反映蛋白质降解程度的加剧,尤其涉及蛋氨酸、酪氨酸等功能性氨基酸的破坏,进而影响鱼肉的营养价值与食用安全性^[37]。如图 6 所示,对照组样品的初始 TVB-N 值为 (6.33 ± 0.23) mg/100 g,随着冻融循环次数的增加,TVB-N 值显著上升($P<0.05$),至第 8 次冻融后升高至 (34.73 ± 0.47) mg/100 g。上述结果表明,冻融处理显著加速了预制烤鱼样品中蛋白质的降解过程。LI 等^[38]在研究冷冻鲑鱼过程中发现,冻融循环破坏了肌纤维结构的完整性,导致细胞内容物外渗,为微生物提供了良好的水分环境及营养基质,从而促进其生长繁殖并释放腐败代谢产物,造成 TVB-N 的迅速积累。此外,反复冻融也促使胞内氧化酶活性增强,氨基酸脱氨基作用加剧,加速 TVB-N 值上升^[39]。

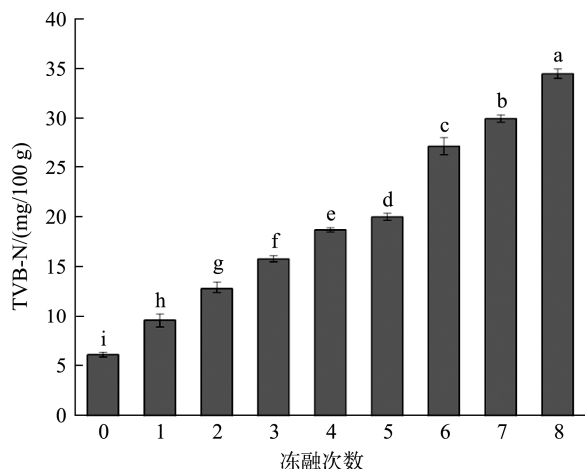


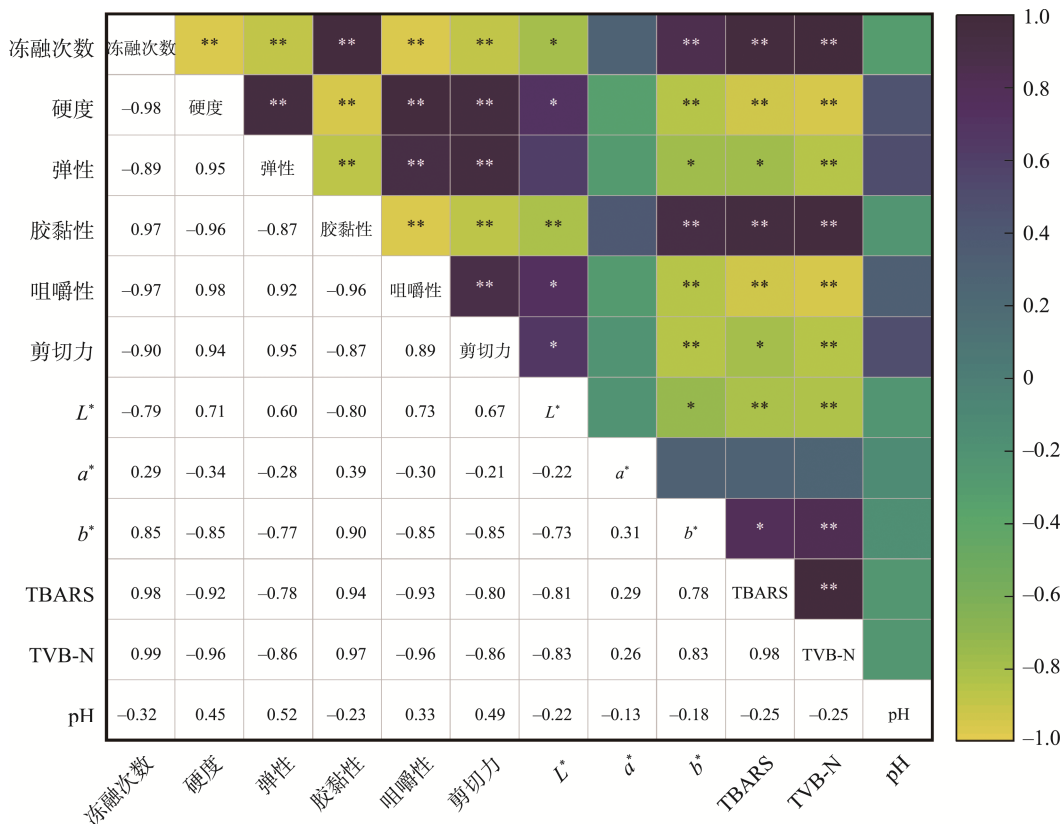
图 6 反复冻融对预制烤鱼 TVB-N 的影响(n=3)
Fig.6 Effects of repeated freeze-thaw cycles on TVB-N of pre-prepared grilled fish (n=3)

根据 GB 10136—2015《食品安全国家标准 动物性水产制品》的规定, TVB-N 含量不应超过 25 mg/100 g。研究结果显示, 样品在经历 6 次冻融循环后 TVB-N 已达 (27.43±0.86) mg/100 g, 超过了国家标准限值, 表明此时鱼肉已不再适宜食用。因此, 为确保产品品质与安全, 建

议在加工、贮藏及流通过程中严格控制温度波动, 最大限度减少冻融次数, 预制烤鱼产品应在 5 次冻融以内食用为宜。

2.8 冻融次数与鱼肉品质指标的相关性分析

为进一步揭示冻融循环对预制烤鱼品质变化的规律性, 采用皮尔森(Pearson)相关性分析对冻融次数与质构、色泽、脂质氧化及蛋白质降解指标之间的关系进行评估(图 7)。结果表明, 冻融次数与硬度、弹性、咀嚼性及剪切力呈极显著负相关($P<0.01$), 反映出反复冻融处理引起鱼肉肌原纤维结构破坏, 导致肉质逐渐软化, 质构特性劣化。在色泽方面, 冻融次数与 L^* 呈显著负相关($P<0.05$), 而与 b^* 呈极显著正相关($P<0.01$), 说明肌肉表面亮度降低, 黄度增强, 推测主要与脂肪氧化产物的积累相关。冻融次数与 TBARS 值及 TVB-N 值均呈极显著正相关($P<0.01$), 提示冻融循环显著促进脂质氧化及蛋白质降解过程。进一步分析显示, 样品质构参数(硬度、弹性、胶黏性、咀嚼性、剪切力)与 TBARS 值之间存在显著相关性($|r|=0.78\sim 0.94$), 说明脂质氧化是引起质构劣变的重要驱动因素之一。因此, 建议通过构建以抑制脂肪氧化为核心的品质控制策略, 强化对冷冻贮藏期间鱼肉品质的调控。



注: *表示差异显著($P<0.05$); **表示差异极显著($P<0.01$)。

图 7 各指标相关性分析

Fig.7 Correlation analysis of each indicator

3 结 论

本研究构建了 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}\leftrightarrow 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的极端温度波动模型,系统评估了冻融循环对预制烤鱼品质的多维影响。结果表明,反复冻融显著破坏肌纤维结构,造成肌肉完整性下降,引起鱼肉硬度、弹性、剪切力和咀嚼性呈下降趋势,硬度降幅达 82%,严重影响其口感质量与消费者接受度。同时,胶黏性表现出递增趋势,可能与肌细胞破裂及内源性物质迁移有关。冻融次数的增加显著促进脂质氧化进程, TBARS 值从初始的 $(0.28\pm 0.03)\text{ mg/kg}$ 上升至 $(2.00\pm 0.16)\text{ mg/kg}$ ($P<0.05$); TVB-N 值在第 6 次冻融后超过国家标准限值,达到 $(27.43\pm 0.86)\text{ mg/100 g}$,表明产品已不宜食用。相关性分析和主成分分析进一步证实脂质氧化是预制烤鱼品质劣变的关键驱动因素之一。因此,建议在预制烤鱼产品的加工、贮藏和运输过程中,严格控制温度变化,避免反复冻融,确保产品在冻融次数不超过 5 次的条件下销售与食用,从而最大限度地保持其营养价值与食用品质。

参考文献

- 葛智勤, 陈哲, 余达威, 等. 油炸预制鱼冷冻复热过程中的品质变化[J]. 食品工业科技, 2024, 45(4): 267–272.
GE ZQ, CHEN Z, YU DW, *et al.* Quality changes of pre-fried fish during frozen and reheating process [J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(4): 267–272.
- 艾媒咨询. 2024 年中国烤鱼行业研究发展报告[EB/OL]. (2024-02-07) [2025-03-07]. <https://www.iimedia.cn/c400/98897.html>
iiMedia Research. Research report on the development of China's grilled fish industry in 2024 [EB/OL]. (2024-02-07) [2025-03-07]. <https://www.iimedia.cn/c400/98897.html>
- 甘俊伟, 马捷, 许丽娟. 预制菜产业冷链物流支撑力影响因素分析与提升路径研究[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(6): 390–397.
GAN JW, MA J, XU LJ. Analysis of influencing factors on cold chain logistics support for prepared dishes industry and design of enhancement paths [J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(6): 390–397.
- NDRAHA N, SUNG WC, HSIAO HI. Evaluation of the cold chain management options to preserve the shelf life of frozen shrimps: A case study in the home delivery services in Taiwan [J]. Journal of Food Engineering, 2019, 242: 21–30.
- ZAHID MA, CHOI JY, SEO JK, *et al.* Effects of clove extract on oxidative stability and sensory attributes in cooked beef patties at refrigerated storage [J]. Meat Science, 2020, 161: 107972.
- HAM YK, SONG DH, HA JH, *et al.* Efficacy of ascorbic acid on processing characteristics and lipid oxidation of pre-rigor salted chicken breasts during vacuum refrigerated storage [J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 118: 108691.
- ZHANG B, CAO H, WEI W, *et al.* Influence of temperature fluctuations on growth and recrystallization of ice crystals in frozen peeled shrimp (*Litopenaeus vannamei*) pre-soaked with carrageenan oligosaccharide and xylooligosaccharide [J]. Food Chemistry, 2020, 306: 125641.
- LI H, WANG L, WANG J, *et al.* Effects of ultrasound-assisted freezing on the quality of large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea*) subjected to multiple freeze-thaw cycles [J]. Food Chemistry, 2023, 404: 134530.
- WANG Y, WANG D, LIU J, *et al.* Effects of rice bran feruloyl oligosaccharides on gel properties and microstructure of grass carp surimi [J]. Food Chemistry, 2023, 407: 135003.
- 李锐, 孙祖莉, 杨贤庆, 等. 加热方式对罗非鱼片质构特性和蛋白质理化特性的影响[J]. 大连海洋大学学报, 2020, 35(4): 577–583.
LI R, SUN ZL, YANG XQ, *et al.* Effects of heating methods on texture and protein physicochemical properties of Nile tilapia fillets [J]. Journal of Dalian Ocean University, 2020, 35(4): 577–583.
- 陈佳奇, 刘天毅, 贾逾泽, 等. 水煮鱼微波烹饪过程中鱼肉水分及组织变化对嫩度的影响[J]. 食品与机械, 2020, 36(4): 51–55.
CHEN JQ, LIU TY, JIA YZ, *et al.* Effects of moisture and tissue changes on tenderness of boiled fish during microwave cooking [J]. Food & Machinery, 2020, 36(4): 51–55.
- LI H, WANG Y, ZHANG J, *et al.* Prediction of the freshness of horse mackerel (*Trachurus japonicus*) using E-nose, E-tongue, and colorimeter based on biochemical indexes analyzed during frozen storage of whole fish [J]. Food Chemistry, 2023, 402: 134325.
- CHENG S, WANG X, LI R, *et al.* Influence of multiple freeze-thaw cycles on quality characteristics of beef semimembranous muscle: With emphasis on water status and distribution by LF-NMR and MRI [J]. Meat Science, 2019, 147: 44–52.
- ZHANG L, ZHANG N, YU X, *et al.* Cryoprotective effect of trehalose on myofibrillar protein of snakehead fish (*Channa argus*) during freeze-thaw cycles [J]. Food Chemistry, 2025, 474: 143213.
- ZHANG B, DENG SG, GAO M, *et al.* Effect of slurry ice on the functional properties of proteins related to quality loss during skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) chilled storage [J]. Journal of Food Science, 2015, 80(4): 695–702.
- WANG B, LI F, PAN N, *et al.* Effect of ice structuring protein on the quality of quick-frozen patties subjected to multiple freeze-thaw cycles [J]. Meat Science, 2021, 172: 108335.
- MONTEIRO MLG, ROSARIO DKA, NETO LT, *et al.* Exploring high hydrostatic pressure for enhancing the preservation of white and dark muscle fish fillets stored at different packaging systems under refrigeration [J]. Food Control, 2024, 155: 110038.
- 史策, 崔建云, 王航, 等. 反复冷冻-解冻对鲢品质的影响[J]. 水产科学, 2012, 19(1): 167–173.
SHI C, CUI JY, WANG H, *et al.* Effect of freeze-thaw cycles on the quality of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2012, 19(1): 167–173.
- KINGWASCHARAPONG P, BENJAKUL S. Effect of phosphate and bicarbonate replacers on quality changes of raw and cooked Pacific white shrimp as influenced by the repeated freeze-thawing [J]. International Journal of Refrigeration, 2016, 67: 345–354.
- LI R, GUO M, 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.
- 赵立柱, 魏占楠, 张燕, 等. 冻融次数对牦牛肉胶原蛋白特性及品质的

- 影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(7): 107–114.
- ZHAO LZ, WEI ZN, ZHANG Y, *et al.* Effect of freezing-thawing times on collagen properties and quality of yak meat [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(7): 107–114.
- [22] KING DA, SHACKELFORD SD, KUEHN LA, *et al.* Contribution of genetic influences to animal-to-animal variation in myoglobin content and beef lean color stability [J]. *Journal of Animal Science*, 2010, 88(3): 1160–1167.
- [23] CHENG H, SONG S, KIM GD. Frozen/thawed meat quality associated with muscle fiber characteristics of porcine longissimus thoracis et lumborum, psoas major, semimembranosus, and semitendinosus muscles [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 13354.
- [24] ZHOU K, ZHANG J, XIE Y, *et al.* Hemin from porcine blood effectively stabilized color appearance and odor of prepared pork chops upon repeated freeze-thaw cycles [J]. *Meat Science*, 2021, 175: 108432.
- [25] JIANG Q, NAKAZAWA N, HU Y, *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.
- [26] 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.
- [27] WANG Y, LIANG H, XU R, *et al.* Effects of temperature fluctuations on the meat quality and muscle microstructure of frozen beef [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2020, 116: 1–8.
- [28] SUN Q, KONG B, LIU S, *et al.* Ultrasound-assisted thawing accelerates the thawing of common carp (*Cyprinus carpio*) and improves its muscle quality [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 141: 111080.
- [29] CHI S, LIU X, WU J, *et al.* Preparation of polyvinyl alcohol/sodium alginate/*Artemisia sphaerocephala* Krasch gum hydrogels with excellent water absorption and its application in the preservation of *Lateolabrax japonicus* fillets [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2025, 308: 141824.
- [30] EKRAMI M, ROSHANI-DEHLAGHI N, EKRAMI A, *et al.* pH-responsive color indicator of saffron (*Crocus sativus* L.) anthocyanin-activated salep mucilage edible film for real-time monitoring of fish fillet freshness [J]. *Chemistry*, 2022, 4(4): 1360–1381.
- [31] LEYGONIE C, BRITZ TJ, HOFFMAN LC. Impact of freezing and thawing on the quality of meat [J]. *Meat Science*, 2012, 91(2): 93–98.
- [32] JIANG ST, LEE TC. Changes in free amino acids and protein denaturation of fish muscle during frozen storage [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1985, 33(5): 839–844.
- [33] 李桂敏, 赵春青, 窦容容, 等. 复合无磷保水剂对反复冻融鲟鱼片理化特性及微观结构的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(12): 87–93.
- LI GM, ZHAO CQ, DOU RR, *et al.* Effects of non-phosphate water-retaining agents on the physicochemical and microstructure properties of sturgeon fillets subjected to repeated freeze-thaw cycles [J]. *Food Science*, 2022, 43(12): 87–93.
- [34] ZHOU Y, XU Y, XIA W, *et al.* Insight into the role of lipids in odor changes of frozen grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) based on lipidomics and GC-MS analysis: Impact of freeze-thaw cycles and heat treatment [J]. *Food Chemistry*, 2024, 459: 140436.
- [35] 谷贵章, 徐大伦, 曾坤, 等. 滑苔多酚在鲟鱼肉冻融过程中的抗脂质氧化活性研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(2): 208–216.
- GU GZ, XU DL, ZENG K, *et al.* Study on anti-lipid oxidation activity of *Enteromorpha prolifera* polyphenols in bonito fish during freeze-thaw cycles [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2023, 14(2): 208–216.
- [36] ZHANG Y, HOLMAN BWB, PONNAMPALAM EN, *et al.* Understanding beef flavour and overall liking traits using two different methods for determination of thiobarbituric acid reactive substance (TBARS) [J]. *Meat Science*, 2019, 149: 114–119.
- [37] ZHANG Y, XUE H, MA Q, *et al.* Potential of two-dimensional correlation-based dual-band visible/near infrared spectroscopy to predict total volatile basic nitrogen content in meat [J]. *Journal of Food Composition and Analysis* 2024, 133: 106451.
- [38] LI J, SHI J, HUANG X, *et al.* Effects of pulsed electric field on freeze-thaw quality of *Atlantic salmon* [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2020, 65: 102454.
- [39] SHAO Y, WANG L, CHEN C, *et al.* Antioxidant capacity of fermented soybeans and their protective effect on protein oxidation in largemouth bass (*Micropterus salmoides*) during repeated freezing-thawing (FT) treatments [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2018, 91: 213–221.

(责任编辑: 安香玉 于梦娇)