吴艺文, 王琛鑫, 夏雨婷, 等. 短期没食子酸暂养对大口黑鲈氧化应激、肌肉品质以及鱼片贮藏品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(4): 369−380. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024120124

WU Yiwen, WANG Chenxin, XIA Yuting, et al. Effects of the Short-term Temporary Rearing of *Micropterus salmoides* on Gallic Acid on Its Oxidative Stress Level, Muscle Quality, and Storage Quality[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(4): 369−380. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024120124

· 贮运保鲜 ·

短期没食子酸暂养对大口黑鲈氧化应激、肌肉品质以及鱼片贮藏品质的影响

吴艺文[1,2,3], 王琛鑫[1,4], 夏雨婷[1,5], 胡　澳[1,5], 陈　朗[1,2], 郭晓嘉[1,2], 吴文锦[1,2], 石　柳[1,2], 尹　涛[1,3], 熊光权[1,2], 汪　兰[1,2,*], 陈　胜[1,2,*]

（1.湖北省农业科学院农产品加工与核农技术研究所, 农业农村部农产品冷链物流技术重点实验室, 湖北武汉 430064;
2.湖北省农业科技创新中心农产品加工研究分中心, 湖北武汉 430064;
3.华中农业大学食品科学技术学院, 湖北武汉 430070;
4.湖北民族大学生物与食品工程学院, 湖北恩施 445000;
5.湖北工业大学生物工程与食品学院, 湖北武汉 430068）

摘　要: 为探索一种高效、低成本的暂养方式，从原料品质保障角度探讨了一种改善大口黑鲈氧化应激、肌肉品质及提升鱼片贮藏品质的方法。本文筛选出了天然抗氧化剂没食子酸，确定了其最佳添加量为 5 mg/L 并进一步探讨了 5 mg/L 没食子酸短期暂养 7 d 对大口黑鲈氧化应激、肌肉品质以及在 4 ℃ 贮藏的肌肉品质变化。结果表明：5 mg/L 没食子酸能够降低血清和肌肉中的氧化应激，如血清超氧化物歧化酶（Superoxide dismutase，SOD）、肌肉 SOD 和过氧化氢酶（Catalase，CAT）酶活降低，5 mg/L 没食子酸 7 d 暂养能够改善大口黑鲈肌肉品质，蛋白质含量增加，色泽、硬度、持水性提高；在 4 ℃ 贮藏期间 5 mg/L 没食子酸延缓了大口黑鲈鱼片质地下降，持水性增强、pH 和白度降低，抑制了组织蛋白酶 B+L 活性、降低 MDA 含量。5 mg/L 没食子酸短期暂养 7 d 能够降低大口黑鲈氧化应激，并通过抑制蛋白质降解和脂质氧化延长 4 ℃ 冷藏的大口黑鲈鱼片的保鲜时间。

关键词: 没食子酸, 暂养, 大口黑鲈, 氧化应激, 贮藏品质
中图分类号: TS254.4　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)04−0369−12
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024120124　　本文网刊:

Effects of the Short-term Temporary Rearing of *Micropterus salmoides* on Gallic Acid on Its Oxidative Stress Level, Muscle Quality, and Storage Quality

WU Yiwen[1,2,3], WANG Chenxin[1,4], XIA Yuting[1,5], HU Ao[1,5], CHEN Lang[1,2], GUO Xiaojia[1,2], WU Wenjin[1,2], SHI Liu[1,2], YIN Tao[1,3], XIONG Guangquan[1,2], WANG Lan[1,2,*], CHEN Sheng[1,2,*]

（1.Institute of Agro-Products Processing and Nuclear Agricultural Technology, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Agricultural Products Cold Chain Logistics, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430064, China;
2.Agricultural Product Processing Research Branch, Hubei Agricultural Science and Technology Innovation Center,

收稿日期: 2024−12−12
基金项目: 湖北省自然科学基金（2024AFB330）; 武汉市知识创新专项（2023020201020430）; 湖北省农业科学院青年科学基金（2024NKYJJ27）; 现代农业产业技术体系建设专项（CARS-46）。
作者简介: 吴艺文（1998−）, 女, 博士研究生, 研究方向: 水产品活运与保鲜, E-mail: Wuyiwen9809@163.com。
*** 通信作者:** 汪兰（1981−）, 女, 博士, 研究员, 研究方向: 农产品加工和保鲜, E-mail: lilywang_2016@163.com。
陈胜（1992−）, 男, 博士, 助理研究员, 研究方向: 水产品活运与保鲜, E-mail: cs55490964@163.com。

Wuhan 430064, China;
3.College of Food Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;
4.College of Biology and Food Engineering, Hubei Minzu University, Enshi 445000, China;
5.College of Bioengineering and Food Science, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: To explore an efficient and low-cost temporary rearing method from the perspective of the quality assurance of raw materials, we investigated the effects of the temporary rearing of *Micropterus salmoides* on gallic acid on its oxidative stress level, muscle quality, and storage quality at 4 ℃. The results showed that after the temporary rearing of this fish species with 5 mg/L gallic acid for 7 days, the serum superoxide dismutase (SOD), muscle SOD, and catalase activities were reduced and the protein content of the muscle was increased along with its color, hardness, and water-holding capacity. When stored at 4 ℃, deterioration of the muscle texture slowed down. The water-holding capacity increased. The pH, whiteness, and malondialdehyde content decreased, and the activity of cathepsin B+L was inhibited. Therefore, short-term temporary rearing on 5 mg/L gallic acid for 7 days reduced oxidative stress in *Micropterus salmoides* and prolonged its freshness at 4 ℃ by inhibiting protein degradation and lipid oxidation.

Key words: gallic acid; temporary rearing; *Largemouth Sea bass*; oxidative stress; storage quality

在我国大口黑鲈(*Micropterus salmoides*)是重要的淡水经济型养殖鱼类之一, 2023 年淡水鲈鱼养殖产量为 888030 t[1], 是养殖产量最高的特色淡水鱼, 因其肉质细腻鲜嫩且营养丰富广受消费者喜爱。目前大口黑鲈以鲜活状态销售为主, 但由于高密度、高脂饲料的养殖现状导致其在捕捞或运输过程中易产生更为强烈的应激反应, 鱼体表面损伤、生理响应、代谢紊乱, 导致肌肉品质劣变。随着消费者对食品原料品质要求的升级, 急需一种高效、低成本的方法提升大口黑鲈肌肉品质。

暂养是鲜活鱼出售前的商品储备, 同时具有改善鱼类肌肉品质的效果, 使鲜活鱼类品质提升且又耐运输[2]。恰当的暂养方式和暂养时间能够缓解鱼类的氧化应激, 达到改善鱼类肌肉品质的目的; 此外, 暂养过程中在暂养水中添加适当的外源添加剂, 如益生菌、天然抗氧化剂等, 能够进一步提升肌肉品质。清水暂养 6 d, 鲫鱼的持水率和熟肉率保持相对稳定, 但暂养时间至第 7 d, 鲫鱼持水率显著下降[3]; 在暂养水中添加 20 mg/mL 牛磺酸和 30 mg/mL 谷氨酰胺混合物, 珍珠龙胆石斑鱼肝脏中过氧化氢酶(Catalase, CAT)、超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)、总抗氧化能力(Total antioxidant capacity, T-AOC)、谷胱甘肽过氧化物酶(Glutathione peroxidase, GPX)降低, 可有效减缓无水保活所导致的鱼体内氧化应激损伤[4]; 随着暂养时间的延长, 鳙鱼肌肉中的游离氨基酸总量和呈味核苷酸含量提高[5]。

没食子酸是一种天然多酚化合物, 是植物中被发现最广泛的酚酸之一, 具有强大的抗氧化活性, 能够激活 Keap 1/Nrf 2/ARE 通路调节抗氧化酶表达, 迅速清除活性氧, 提高鱼体抗氧化能力[6]。研究表明, 在胶原蛋白/玉米醇溶蛋白组装的复合静电纺丝膜中添加 8% 没食子酸, 能够延缓罗非鱼肌肉品质劣化, 延长货架期至少 2 d, 且没食子酸会影响纤维直径、蛋白疏水性和抗氧化性能[7], 这表明没食子酸的添加会影响鱼肉品质。随着预制菜的快速发展, 大口黑鲈加工产品迅速增加, 鱼片是重要的加工方式之一, 但鲈鱼片面临货架期短、品质劣变速度快等问题。目前解决方法大多是利用保鲜剂[8]、低温等离子体[9] 等保鲜技术对死后宰杀的鱼或鱼片进行保鲜, 目前从原料品质保障方面改善鲈鱼片贮藏品质的相关研究较少。

本文通过抗氧化活性筛选, 选择没食子酸作为大口黑鲈暂养的外源添加剂, 将大口黑鲈暂养 7 d 后, 通过测定血清和肌肉中的抗氧化能力、肌肉品质评价相关指标, 筛选出暂养 7 d 后, 对大口黑鲈缓解氧化应激及改善肌肉品质的有效没食子酸添加量。将在有效没食子酸添加量下暂养后的大口黑鲈鱼片进行 4 ℃ 贮藏, 通过检测肌肉品质指标、安全指标、脂肪氧化和蛋白降解指标, 探究短期没食子酸暂养对大口黑鲈鱼片贮藏品质的影响。以期探索一种高效、低成本的暂养方式, 从原料品质保障角度为鲜活大口黑鲈的高品质商品储备、品质改善及货架期延长提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

大口黑鲈(*Micropterus salmoides*) 质量 394.45±47.32 g, 长度 30.44±2.69 cm, 2023 年 10 月份购于湖北省武汉市华中农业大学水产养殖基地; 没食子酸 河南中辰生物科技有限公司; 儿茶素、表儿茶素、原花青素 上海源叶生物科技有限公司; 3-氨基苯甲酸乙酯甲基磺酸盐(Tricaine methane-sulfonate, MS-222) 上海麦克林生化科技有限公司; SOD、CAT、GSH、MDA 试剂盒 南京建成生物工程研究所; 甲基红、溴甲酚绿 德国 Sigma 公司; 维生素 C、平板计数琼脂 国药集团化学试剂有限公司; 其余试剂均为分析纯。

T18 高速分散均质机 德国 IKA 集团; Spark 酶标仪 瑞士 Tecan 仪器公司; 3K15 高速离心机 德国 Sigma 公司; K9860 自动凯氏定氮仪 山东海能仪器有限公司; G2-B 便携式 pH 计 梅特勒-托利

多仪器(上海)有限公司；TAXT plus 质构仪　英国 Stable Micro System 公司；CR-400 色差仪　日本 Konica Milotia 公司。

1.2　实验方法

1.2.1　实验设计方案　测定 2,4-二硝基苯肼(2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl, DPPH)清除能力、2,2'-联氮-双(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)(2,2'-Azinobis-(3-ethylbenzthiazoline-6-sulphonate), $ABTS^+$)清除能力、铁离子还原抗氧化能力测定(Ferric reducing antioxidant power, FRAP)、总抗氧化能力(Total Antioxidant Capacity, T-AOC)四个抗氧化能力指标评判五种天然抗氧化物质(没食子酸、儿茶素、表儿茶素、原花青素、维生素 C)，筛选出了具有最强抗氧化能力的物质——没食子酸。随后将不同添加量(0、5、20 mg/mL)没食子酸加入暂养水箱(暂养水箱规格：2.0 m×0.8 m×1.8 m，加入水量：已曝气水 200 L)中。从基地养殖中捕捞同一批次、鲜活的大口黑鲈 60 尾，随水箱运输至养殖室(运输时间：5 min，运输距离：500 m)，暂养 7 d，分为 4 组：未暂养组(T0-0)、0 mg/mL 没食子酸添加暂养 7 d 组(T7-0)、5 mg/mL 没食子酸添加暂养 7 d 组(T7-5)、20 mg/mL 没食子酸添加暂养 7 d 组(T7-20)。暂养条件：氧气泵维持溶解氧，溶解氧为 7.85±0.15 mg/L，pH 为 7.63±0.06，温度为 19.39±0.45 ℃，氨氮值为 1.34±0.12 mg/L，每缸定期更换 1/2 的水，并在水中重新注入相同浓度的没食子酸(假设第 2 d 没食子酸完全消化)。

取样流程为：利用 200 mg/L MS-222 致使大口黑鲈处于麻醉状态，将鱼置于碎冰上后进行尾部静脉取血、静置 1 h 后，4676×g 离心 10 min 取血清，经液氮速冻后于−80 ℃ 冰箱保存待测血清抗氧化酶活；取背部最长肌，部分用于测定基本肌肉品质指标、部分经液氮速冻后于−80 ℃ 冰箱保存待测抗氧化酶活。经筛选，确定 5 mg/mL 没食子酸添加暂养 7 d 组最佳。

将 5 mg/L 没食子酸添加进水中，暂养大口黑鲈 7 d，取背部肉并切成厚约 2 cm、重约 20 g 的鱼片，真空处理于 4 ℃ 贮藏，分别于第 0、1、3、5、7、9、11 d 取样测定肌肉品质指标，探究短期没食子酸添加对大口黑鲈鱼片贮藏品质的影响。本实验中所用肉样均为鲜样。

1.2.2　天然抗氧化剂筛选

1.2.2.1　DPPH 自由基清除能力测定　根据 Zhang 等[10] 的方法并稍作修改，将天然抗氧化剂浓度配制为 7.5、10、15、20、30、40、60 μg/mL 的混合物，测定 DPPH 自由基清除能力。

1.2.2.2　$ABTS^+$自由基清除能力测定　根据 Kut 等[11] 的方法并加以修改，将天然抗氧化剂浓度配制为 20、30、40、60、80 μg/mL 的混合物，测定 $ABTS^+$自由基清除能力。

1.2.2.3　FRAP 铁离子还原能力测定　根据 Sarabandi 等[12] 的方法并进行一些调整，将天然抗氧化剂浓度配制为 50、100、200、400、600、800 μg/mL 的混合物，测定 FRAP 铁离子还原能力。

1.2.2.4　T-AOC 测定　将天然抗氧化剂浓度配制为 20、50、100、200、500 μg/mL 的混合物，采用试剂盒测定样品的总抗氧化能力。

通过预实验确定天然抗氧化剂的浓度-效应关系，选择抗氧化能力达到平台期(即指标数值不再随浓度增加而显著变化)时的最低浓度，作为浓度区间的最高浓度。

1.2.3　血清及肌肉氧化应激能力评估　SOD、CAT、GSH、MDA 均采用相应试剂盒方法进行测定。

1.2.4　肌肉基本成分组成　肌肉基本成分(水分、粗脂肪、粗蛋白、灰分)分别用 GB 5009.3-2016《食品安全国家标准食品中水分的测定》[13]、GB 5009.6-2016《食品安全国家标准食品中脂肪的测定》[14]、GB 5009.5-2016《食品安全国家标准食品中蛋白质的测定》[15]、GB 5009.4-2016《食品安全国家标准食品中灰分的测定》[16] 测定，粗脂肪、粗蛋白、灰分含量以干重百分比表示。

1.2.5　肌肉品质的测定

1.2.5.1　pH 的测定　校正便携式 pH 计，清洗并擦拭探头，将探头直接插入样品内不同三个地方进行 pH 的测定。

1.2.5.2　白度的测定　色度计经校准后测定样品，白度按下式计算：

$$白度 = 100 - \sqrt{(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}}$$

1.2.5.3　剪切力的测定　将背部肌肉分切为形状、规格类似的长条状，测定前将 C-LM3 数显式肌肉嫩度仪清零，每个样品重复 3 次。

1.2.5.4　加压失水率　参考周俊鹏等[17] 的方法并稍作修改。首先剪取 4 cm×4 cm 的纱布并称重 M_0，称取 2±0.02 g 肉样品并用纱布包裹称重 M_1，在样品的顶部和底部分别放置 8 张大小规格相同的滤纸，将包裹鱼肉的样品放置在 YYW-2 型压力板中间位置，并调整压力仪器为 145 Pa 在样品上保持 5 min。测试结束后，将加压后的纱布与样品称重并记录为 M_2。鱼片的加压失水率用以下公式计算：

$$X(\%) = \frac{M_2 - M_1}{M_1 - M_0} \times 100$$

1.2.5.5　组织结构的测定　参考 Wu 等[18] 方式进行制片处理，并在 Nikon EclipseTi-SR 倒置荧光显微镜(日本尼康株式会社)下观察组织结构。

1.2.5.6　离心失水率　根据 Li 等[19] 描述的方法，测定鱼肉样品的离心失水率。准确称取 2 g、形状规整的鱼肉，记为 M1；称取 4 cm×4 cm 的纱布的重量为 M2；用纱布包裹住鱼肉，再取 4 层滤纸包裹住，放入

50 mL 离心管中，4 ℃ 下 4000 r/min 离心 10 min，取出称重，记为 M_3。离心失水率以样品初始重量的百分比表示，用以下公式计算：

$$X(\%) = \frac{M1 + M2 - M3}{M1} \times 100$$

1.2.5.7 水分分布 根据 Xia 等[20] 描述的方法稍加修改测定鱼肉的水分分布。将样品鱼肉放入核磁管内，待其温度与环境温度达到平衡，将其放入核磁共振分析仪中，进行 T2 信号采集及 MRI 成像测定。其中，T2 信号采集采用 CPMG 序列，相关参数为：PRG=1，NS=4，TW=3000 ms，TE=0.5 ms，NECH=7000。成像测定采用 MSE 序列，相关参数为：Slice Width=4.5 mm，Slice Gap= 0.5 mm，TE=20 ms，TR=1000 ms，Averages=4。

1.2.5.8 质构特性 根据 Wang 等[21] 描述的方法并加以修改，采用 TA-XT Plus 质构仪测定鱼肉的质构特性。将 2.0 cm×3.0 cm×3.0 cm 的鱼肉放在 P/36R 探头下，测前速率=2 mm/s、测中速率=0.5 mm/s、测后速率=2 mm/s、测试深度=5 mm。

1.2.5.9 组织蛋白酶 B+L 活力的测定 组织蛋白酶 B+L 粗酶液的制备：根据 Wang 等[22] 的方法进行并加以修改，将每个样品(5 g)鱼肉，加入 20 mL 预冷缓冲液 [100 mmol/L NaCl，50 mmol/L NaAc，1 mmol/L EDTA，0.2%(V/V)聚乙二醇辛基苯基醚(TritonX-100)，pH5.0]，以 8017×g 匀浆 2 min，随后将提取物在 4 ℃ 下以 13361×g 离心 20 min，用纱布过滤除去上浮脂肪，所得上清液即为组织蛋白酶 B+L 粗酶液；组织蛋白酶 B+L 的活力测定：取粗酶液 0.5 mL，加入 0.25 mL 反应缓冲液(4 mmol/L Na_2EDTA，60 mmol/L HAc，340 mmol/L NaAc，pH 5.5，使用前配制成含 8 mmol/L DTT 的新鲜溶液)，需在 40 ℃ 的水浴中预热 5 min，预热完成后加入预热 5 min 的 20 μmol/L 荧光合成肽底物(Z-Phe-Arg-AMC)0.5 mL，混合均匀后于 40 ℃ 孵化 30 min，加入 2 mL 终止试剂(100 mmol/L $ClCH_2COONa$，30 mmol/L NaAc，70 mmol/L HAc，pH4.3)终止反应，离心(13361×g，10 min)，取上清液于激发波长340 nm，发射波长 440 nm 下测定荧光值，对照组为先加入终止试剂再加入反应缓冲液和底物。

1.2.5.10 TVB-N 值的测定 根据 Sun 等[23] 描述的方法并进行了一些修改。采用自动凯氏定氮仪测定鱼肉样品的挥发性盐基氮值。准确称取 5 g 碎鱼肉与 75 mL 蒸馏水充分混合后在 4 ℃ 下浸渍 30 min。过滤后取 5 mL 滤液与 5 mL 10 g/L 的 MgO 溶液混合，凯氏定氮蒸馏 6 min。接收液为 30 mL 硼酸溶液(20 g/L)，指示剂为甲基红-乙醇溶液(1 g/L)和溴甲酚绿-乙醇溶液(1 g/L)的混合物(1.7∶8.3，v/v)。接收液用 0.01 mol/L 盐酸标准滴定液滴定，滴定终点为蓝紫色。TVB-N 值以 mg/100 g 表示，计算公式如下：

$$\text{TVB-N(mg/100 g)} = \frac{(V1 - V2) \times C \times 14}{m} \times 100$$

其中：V1 为样品消耗盐酸标准滴定溶液的体积，mL；V2 为 CK 消耗盐酸标准滴定溶液的体积，mL；C 为盐酸标准滴定溶液浓度，mol/L；m 为样品质量，g。

1.2.5.11 菌落总数(Total Viable Count，TVC)的测定 根据 Zhang 等[24] 描述的平板计数法，测定菌落总数。将连续稀释(1∶9)的匀浆样品(1 mL)与平板计数琼脂(PCA，15~20 mL)混合。琼脂凝固后，在 30 ℃ 下倒置培养 72 h。菌落总数以 lg CFU/g 表示。

1.3 数据处理

所有实验均独立重复 3 次，实验结果用平均值±标准偏差表示；用 Excel、SPSS 20.0、GraphPad Prism 5.01 对实验数据进行处理、单因素方差分析(ANOVA)来评估统计差异、绘图，显著性水平设定为 $P<0.05$。

2 结果与分析

2.1 天然抗氧化剂筛选

由表 1 可知，浓度在 7.5~15 μg/mL 范围内，没食子酸 DPPH 自由基清除能力显著性高于儿茶素、原花青素、表儿茶素、维生素 C($P<0.05$)；浓度在 20~60 μg/mL 范围内，没食子酸 DPPH 自由基清除能力仅次于维生素 C。由表 2 可知，没食子酸 $ABTS^+$自由基清除率在 20 μg/mL 时达到 86.49%，儿茶素、表儿茶素的 $ABTS^+$自由基清除率分别在浓度为 30 μg/mL、40 μg/mL 与对应浓度的没食子酸 $ABTS^+$自由基清除率无显著性差异($P>0.05$)，原花青素、维生素 C 的 $ABTS^+$自由基清除率在最高浓度

表 1 天然抗氧化剂的 DPPH 自由基清除率

Table 1 Free radical scavenging rate of DPPH in natural antioxidants

指标	天然抗氧化剂	浓度(μg/mL)						
		7.5	10	15	20	30	40	60
DPPH自由基清除率(%)	没食子酸	93.57 ± 0.02^{Eab}	93.45 ± 0.00^{Ea}	93.57 ± 0.00^{Eab}	93.52 ± 0.00^{Dab}	93.90 ± 0.00^{Cbc}	93.84 ± 0.00^{Cabc}	94.24 ± 0.00^{Dc}
	儿茶素	88.86 ± 0.00^{Ca}	92.04 ± 0.00^{De}	92.01 ± 0.00^{Ce}	91.75 ± 0.00^{Cde}	90.95 ± 0.00^{Bb}	91.15 ± 0.00^{Bbc}	91.52 ± 0.00^{Ccd}
	原花青素	35.64 ± 0.00^{Aa}	54.94 ± 0.00^{Ab}	62.41 ± 0.00^{Ac}	87.64 ± 0.00^{Ad}	89.10 ± 0.00^{Ae}	89.53 ± 0.00^{Aef}	90.08 ± 0.00^{Bf}
	表儿茶素	89.86 ± 0.00^{Dc}	90.11 ± 0.00^{Cc}	90.15 ± 0.00^{Bc}	90.02 ± 0.00^{Bb}	89.29 ± 0.00^{Ab}	89.13 ± 0.00^{Ab}	88.47 ± 0.00^{Aa}
	维生素C	74.46 ± 0.04^{Ba}	89.35 ± 0.01^{Bb}	92.86 ± 0.00^{Dc}	96.30 ± 0.00^{Ed}	94.00 ± 0.00^{Dcd}	96.17 ± 0.00^{Dd}	96.06 ± 0.00^{Ed}

注：不同大写字母表示同一浓度下不同抗氧化剂具有显著性差异($P<0.05$)，不同小写字母表示不同浓度下同一抗氧化具有显著性差异($P<0.05$)。

表 2　天然抗氧化剂的 $ABTS^+$自由基清除率

Table 2　$ABTS^+$ free radical scavenging rate of natural antioxidants

指标	天然抗氧化剂	浓度(μg/mL)				
		20	30	40	60	80
$ABTS^+$自由基清除率(%)	没食子酸	86.49 ± 0.00^{Ed}	86.26 ± 0.00^{Dbc}	85.92 ± 0.02^{Cab}	85.42 ± 0.03^{Ca}	86.39 ± 0.03^{Ccd}
	儿茶素	73.61 ± 0.01^{Da}	85.52 ± 0.02^{Dbc}	85.96 ± 0.03^{Cd}	85.86 ± 0.03^{Ccd}	85.32 ± 0.04^{Cb}
	原花青素	27.19 ± 0.02^{Ba}	32.01 ± 0.02^{Ab}	43.42 ± 0.04^{Ac}	65.02 ± 0.10^{Ad}	72.54 ± 0.04^{Ae}
	表儿茶素	48.19 ± 0.00^{Ca}	70.95 ± 0.01^{Cb}	84.29 ± 0.02^{Cc}	84.99 ± 0.03^{Cd}	85.25 ± 0.03^{Cd}
	维生素C	15.38 ± 0.03^{Aa}	38.89 ± 0.03^{Bb}	52.69 ± 0.04^{Bc}	78.36 ± 0.03^{Bd}	78.51 ± 0.03^{Bd}

注: 不同大写字母表示同一浓度下不同抗氧化剂具有显著性差异(P<0.05), 不同小写字母表示不同浓度下同一抗氧化具有显著性差异(P<0.05)。

表 3　天然抗氧化剂的 FRAP 铁离子还原能力

Table 3　Iron ion reduction capacity FRAP of natural antioxidants

指标	天然抗氧化剂	浓度(μg/mL)					
		50	100	200	400	600	800
FRAP铁离子还原能力(Abs)	没食子酸	0.47 ± 0.01^{Ea}	0.92 ± 0.01^{Eb}	1.58 ± 0.01^{Dc}	1.62 ± 0.01^{Cc}	1.62 ± 0.01^{Bc}	1.62 ± 0.00^{Bc}
	儿茶素	0.36 ± 0.01^{Ca}	0.63 ± 0.00^{Cb}	1.32 ± 0.00^{Cc}	1.63 ± 0.01^{Cd}	1.62 ± 0.01^{Bd}	1.61 ± 0.00^{Bd}
	原花青素	0.12 ± 0.01^{Aa}	0.23 ± 0.01^{Ab}	0.42 ± 0.01^{Ac}	0.72 ± 0.00^{Ad}	1.14 ± 0.00^{Ae}	1.57 ± 0.00^{Af}
	表儿茶素	0.24 ± 0.00^{Ba}	0.43 ± 0.02^{Bb}	0.81 ± 0.02^{Bc}	1.57 ± 0.00^{Bd}	1.60 ± 0.00^{Bd}	1.59 ± 0.00^{Ad}
	维生素C	0.41 ± 0.00^{Da}	0.76 ± 0.00^{Db}	1.62 ± 0.00^{Ec}	1.69 ± 0.00^{Cc}	1.70 ± 0.01^{Cc}	1.70 ± 0.00^{Cc}

注: 不同大写字母表示同一浓度下不同抗氧化剂具有显著性差异(P<0.05), 不同小写字母表示不同浓度下同一抗氧化具有显著性差异(P<0.05)。

表 4　天然抗氧化剂的 T-AOC 能力

Table 4　T-AOC capacity of natural antioxidants

指标	天然抗氧化剂	浓度(μg/mL)				
		20	50	100	200	500
T-AOC(U/mg)	没食子酸	11.10 ± 4.27^{Ba}	44.15 ± 2.74^{Db}	76.22 ± 1.54^{Cc}	161.32 ± 4.00^{Cd}	247.16 ± 4.41^{Ee}
	儿茶素	12.09 ± 0.89^{Bb}	6.17 ± 0.24^{Aa}	4.95 ± 1.50^{Aa}	21.95 ± 7.35^{Ac}	52.29 ± 3.85^{Bd}
	原花青素	4.93 ± 0.14^{Aa}	6.41 ± 0.51^{Ab}	6.17 ± 1.24^{Aab}	18.25 ± 0.86^{Ac}	45.38 ± 0.49^{Ad}
	表儿茶素	19.98 ± 0.31^{Ca}	27.62 ± 0.30^{Bb}	93.22 ± 0.37^{Dd}	68.57 ± 0.80^{Bc}	123.05 ± 1.14^{Ce}
	维生素C	54.76 ± 0.55^{Dc}	37.99 ± 0.51^{Ca}	47.36 ± 0.25^{Bb}	70.05 ± 12.60^{Bd}	141.09 ± 1.55^{De}

注: 不同大写字母表示同一浓度下不同抗氧化剂具有显著性差异(P<0.05), 不同小写字母表示不同浓度下同一抗氧化具有显著性差异(P<0.05)。

60 μg/mL 时显著低于没食子酸 $ABTS^+$自由基清除率(P<0.05)。由表 3 可知, 没食子酸和维生素 C 的 FRAP 铁离子还原能力在 200 μg/mL 时达到顶点, 儿茶素、表儿茶素达到 FRAP 铁离子还原能力峰值的最小浓度为 400 μg/mL, 随后浓度增加但没食子酸、维生素 C、儿茶素和表儿茶素 FRAP 铁离子还原能力无显著性增长(P>0.05), 原花青素 FRAP 铁离子还原能力在 800 μg/mL 达到最大值 1.57 且低于其他 4 种抗氧化剂的最大值(P>0.05)。由表 4 可知, 当抗氧化剂浓度处于 200~500 μg/mL 时, 没食子酸的总抗氧化能力最强。综上, 没食子酸为这五种天然抗氧化剂中抗氧化能力最强, 作为暂养外源添加剂加入水中。

2.2　没食子酸添加量筛选

2.2.1　血清中抗氧化酶活的变化　鱼类血清指标可以反映鱼体产生环境应激时, 机体内物质代谢和器官功能的变化情况[25]。鱼体在正常生理状况下, 活性氧自由基与体内氧化还原体系处于平衡状态; 但是当受到外界环境影响, 其体内产生大量活性氧自由基, 体内第一道抗氧化酶 SOD 响应, 将体内产生的活性氧自由基分解为过氧化氢, CAT 和 GPX 作为过氧化氢清除剂, 将其还原为氧分子和水, 从而维持机体的正常生理活动[26]。在本实验中, T7-0 组的 SOD 与 GSH 含量均高于未暂养组(图 1), 这可能是由于暂养缓解了由于捕捞、运输带来的应激。经过暂养处理, 黄颡鱼的血清中抗氧化酶活性(CAT、GSH、GSH-Px)均下降[27]。在暂养组中, 在水体中添加 5 mg/L 没食子酸后, 大口黑鲈血清中 SOD 活性达到最小值, GSH 活性呈现最大值(图 1); 在 20 mg/L 没食子酸添加组呈现相反现象, 这可能是由于加入 5 mg/L 没食子酸经过 7 d 暂养的大口黑鲈中抗氧化酶活能够有效清除血清中的活性氧自由基, 活性氧自由基产生能力与抗氧化酶活清除活性氧自由基能力达到相对稳定的氧化还原状态, 同时能够促进非酶促抗氧化系统的进行, 而 20 mg/L 没食子酸暂养后会产生一定程度的应激反应, 使得 SOD 酶活升高清除活性氧自由基[28]。

2.2.2　肌肉中抗氧化酶活的变化　在肌肉中, MDA 是活性氧自由基攻击脂质而产生的脂质过氧化产物,

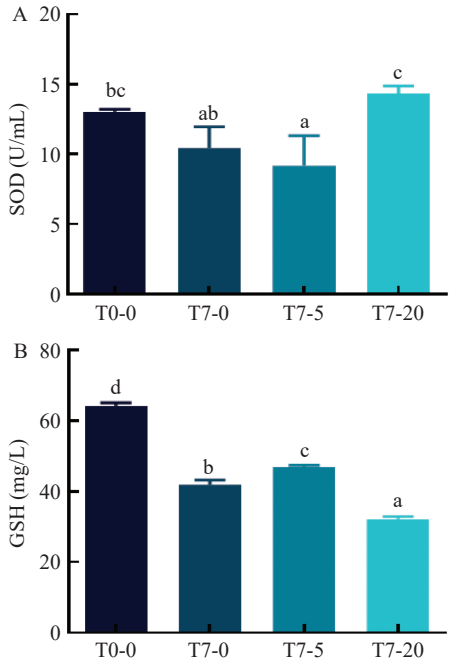


图 1 没食子酸不同添加量对暂养 7 d 大口黑鲈血清抗氧化酶活的影响

Fig.1 Effects of different levels of gallic acid on serum antioxidant enzyme activities of largemouth bass reared temporarily for 7 days

注: A: SOD; B: GSH; 不同字母表示差异显著(P<0.05), 图 2~图 3 同。

是机体氧化损伤的重要指标[29]。T7-0 组 MDA 含量低于未暂养组, 且 T7-20 的 MDA 含量显著高于 T7-5 组(图 2D), MDA 含量变化与血清中抗氧化酶变化一致, 说明暂养能缓解由捕捞、运输造成的氧化应激, 且 20 mg/L 添加量的没食子酸对于大口黑鲈是一种应激源, 在肌肉中的 SOD、CAT 酶活变化也能证实这一点(图 2A、图 2B)。在经过 7 d 暂养后, 大口黑鲈的氧化系统与抗氧化系统恢复到平衡状态, 降低鱼体能量代谢, 缓解氧化应激反应, 使机体内稳态正常。没食子酸的分子结构中含有酚羟基和芳香环等基团, 能够迅速清除或者中和机体中产生的自由基[30], 作用途径是由于其对细胞色素 P450 依赖性单加氧酶活性的作用和环氧化物水解酶活性的增强[31]。5 mg/L 没食子酸暂养可以抑制抗氧化酶底物-氧自由基的结合, 没食子酸自身与自由基反应, 能够恢复鱼体的抗氧化状态; 但 20 mg/L 没食子酸暂养由于浓度较高, 鱼体受到一定的刺激, 大量活性氧自由基产生, 没食子酸与活性氧的结合率低于活性氧自由基的产生, 导致 SOD 活性、CAT 活性、GSH 含量的升高进一步消除大量的活性氧自由基, 但仍对细胞产生影响, 使得肌肉中 MDA 含量累积(图 2A、图 2B、图 2C、图 2D)。

2.2.3 肌肉基本组成和肌肉品质的变化 如表 5 所示, 暂养后, 肌肉灰分含量无显著变化(P>0.05)。研究表明, 在传统池塘、稻田共生和帆布桶养殖模式等三种不同养殖模式下马口鱼的肌肉灰分无显著差

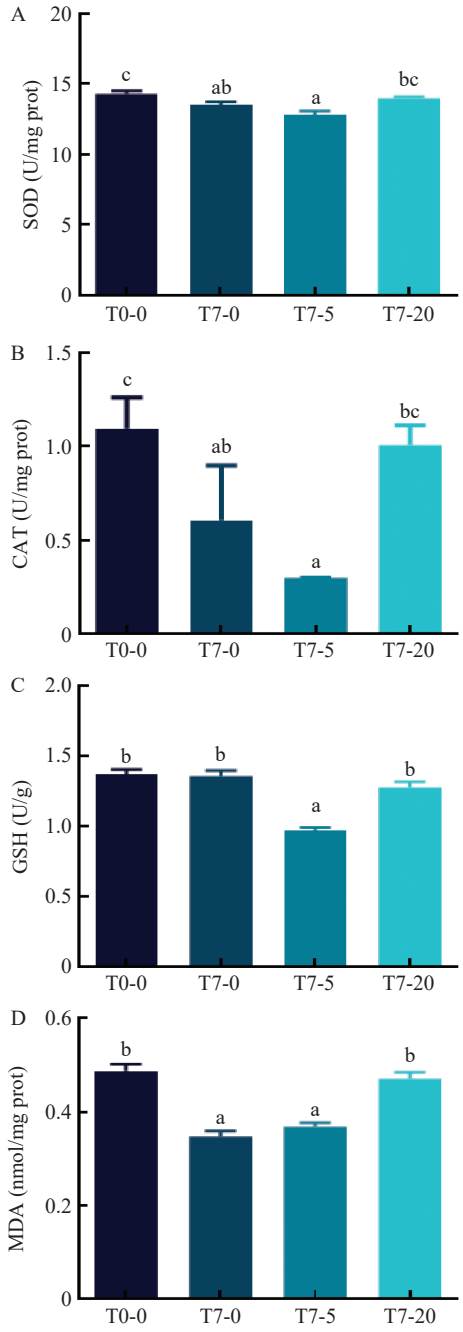


图 2 没食子酸不同添加量对暂养 7 d 大口黑鲈肌肉抗氧化酶活的影响

Fig.2 Effects of different levels of gallic acid on muscle antioxidant enzyme activities of largemouth bass reared temporarily for 7 days

注: A: SOD; B: CAT; C: GSH; D: MDA。

表 5 没食子酸不同添加量对暂养 7 d 大口黑鲈肌肉基本组成的影响

Table 5 Effects of gallic acid levels on muscle composition of largemouth bass after 7 days of temporary rearing

样品	水分 (%)	粗脂肪 (%)	粗蛋白 (%)	灰分 (%)
T0-0	73.96±0.75^{a}	7.03±0.11^{ab}	55.58±0.05^{a}	5.56±0.10^{a}
T7-0	74.89±0.35^{b}	6.77±1.45^{a}	56.03±0.69^{a}	5.42±0.08^{a}
T7-5	77.17±0.29^{d}	5.75±0.07^{a}	56.79±0.01^{b}	5.64±0.17^{a}
T7-20	76.28±0.5^{c}	8.31±0.33^{b}	58.56±0.02^{c}	5.51±0.11^{a}

注: 同一列不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

异[32]。蛋白质、脂肪和碳水化合物为鱼体内的三大主要营养物质，在暂养时可为鱼体提供代谢物质来维持其生命活动。肌肉中粗脂肪含量在 T7-5 组中呈现最低值，这可能是由于此时鱼体内氧化还原系统处于平衡状态，但鱼体需要消耗自身脂肪维持自身能量运转，从而消耗体内的脂肪以供能、加快脂肪分解降低脂质蓄积；但在 T7-20 组中呈现最高值，可能是由于此时体内氧化还原系统处于失衡状态，需要消耗大量能量，导致体内能量代谢失常，发生糖异生使得脂质、蛋白质累积。5 mg/L 没食子酸暂养可以增加鱼体的水分含量和粗蛋白质，降低脂肪含量，改善大口黑鲈的肌肉品质。

未暂养组 pH 较低（图 3A）可能是由于捕捞或运输应激后，机体产生应激消耗大量能量，导致无氧糖酵解产生，乳酸堆积[33]；暂养后大口黑鲈肌肉 pH 显著上升（$P<0.05$），暂养缓解应激、减少了乳酸堆积。暂养组肌肉白度均显著高于未暂养组（图 3B），且在 T7-5 组呈现最高值，可能是由于短期暂养能够使鱼肉肌红蛋白发生变化，改变色泽，即白度值增加，使得鱼肉色泽更加鲜亮。该结果与郭晓东[34] 在研究循环水暂养对团头鲂肌肉品质中白度值的变化一致。添加 20 mg/L 没食子酸可能导致大口黑鲈的高铁肌红蛋白迅速增长，肌肉的光泽度降低，从而色泽变暗。

未暂养肌肉的剪切力最低（图 3C），可能是由于鱼体在捕捞时会降低肌肉品质，导致肌肉中乳酸堆积，使质地柔软。在 T7-5 组中，剪切力呈最大值，可能是由于其氧化应激程度最低，肌纤维呈较为紧密的排列，与 Li 等[35] 研究有机硒对暂养大口黑鲈质构特性的研究结果一致。与肌肉的加压失水率的结果一致（图 3D），Utrera 等[36] 研究发现氧化损伤会降低牛肉的持水性。持水力的强弱与肌肉的蛋白质空间结构密切相关，研究表明，氧化诱导蛋白质交联导致肌丝间距的变化，肌肉中的水分因间距的变化而流失，导致持水能力降低[37]。在肌肉中，肌源纤维蛋白降解与持水力有关[38]。结果表明，经过适当时间的暂养，能够减少氧化损伤，增强鱼肉的持水性；5 mg/L 没食子酸暂养能够使肌肉蛋白网络结构更加稳定，对于防止肌肉中水分的流失，增强持水能力更加有益，能够进一步改善鱼肉的品质。

短期没食子酸暂养对大口黑鲈肌肉微观结构的影响的结果如图 3E 所示，未暂养组可能是由于捕捞、运输应激造成肌纤维空隙较大，经暂养后，肌纤维组织结构完整、空隙较小，但由于 20 mg/L 没食子酸添加量可能对于大口黑鲈是外源应激，因此导致其肌细胞破损、排列不规则。

因此，确定 5 mg/mL 没食子酸添加暂养 7 d 组最佳，基于此条件，暂养大口黑鲈后，取背部肉并切成厚约 2 cm、重约 20 g 的鱼片，真空处理于 4 ℃ 贮藏，分别于第 0、1、3、5、7、9、11 d 取样测定肌肉品质指标，探究短期没食子酸添加对大口黑鲈鱼片贮藏品质的影响。

2.3　没食子酸暂养 7 d 对大口黑鲈鱼片贮藏品质的影响

2.3.1　pH、白度、离心失水率　pH 是肌肉新鲜度、口感和品质重要影响因素，是评价肌肉品质的重要指标之一[39]。随着贮藏时间的延长，pH 呈先下降再上升（图 4（A））。在贮藏 0~3 d 内，肌肉中糖原发生无氧酵解，生成乳酸、丙酮酸等有机酸，有机酸在肌肉中累积导致 pH 下降[32]；在贮藏 5~11 d 内，由于微生物的生长和繁殖导致蛋白质分解和脂质氧化产生胺、氨、吲哚等碱性物质，导致 pH 升高[40]。贮藏期（1~11 d）内，T7-5 肌肉的 pH 均低于 T7-0 组，这可能是由于 5 mg/mL 没食子酸的添加能够抑制内源酶活性和微生物生长[41]。Song 等[7] 研究结果发现 8% 没食子酸添加可以有效延缓尼罗罗非鱼鱼片 pH 的增加。

在贮藏过程中，T7-0 组白度值呈现上升趋势；T7-5 组中肌肉白度值在贮藏第 1 d 下降，随后上升

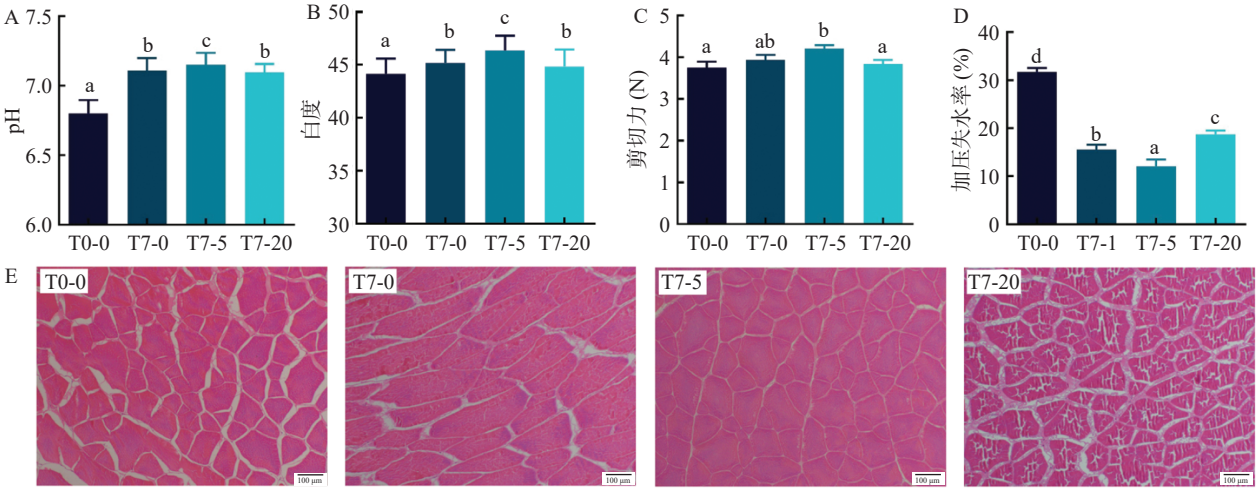


图 3　没食子酸不同添加量对暂养 7 d 大口黑鲈肌肉品质的影响（100 μm）

Fig.3　Effects of different levels of gallic acid on muscle quality of largemouth bass reared temporarily for 7 d (100 μm)

注：A：pH；B：白度；C：剪切力；D：加压失水率；E：肌肉组织切片。

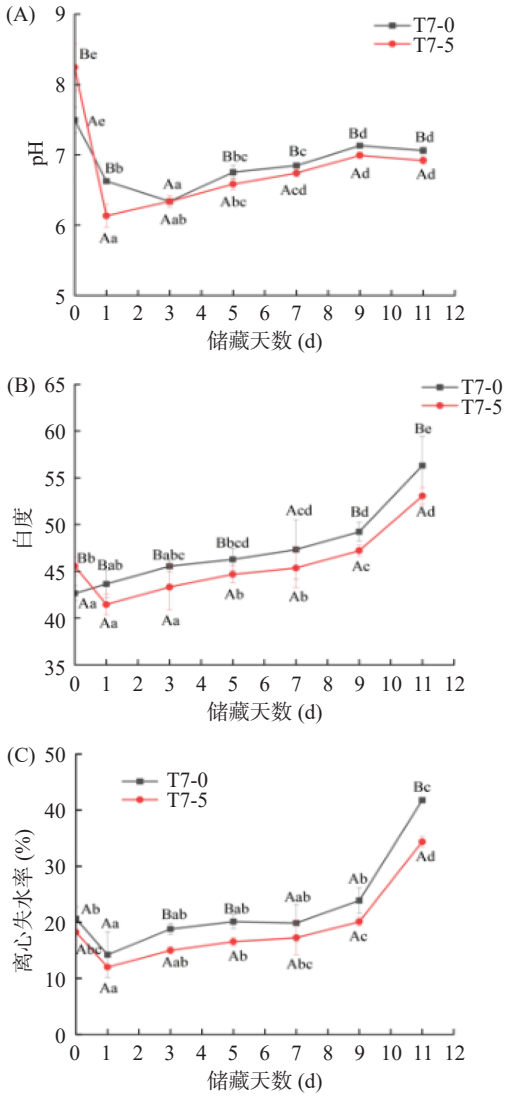


图 4 5 mg/L 没食子酸暂养 7 d 大口黑鲈鱼片贮藏品质的影响

Fig.4 Effects of 5 mg/L gallic acid supplementation on storage quality of largemouth bass fillets temporarily reared for 7 days

注: A: pH; B: 白度; C: 离心失水率; 不同字母表示差异显著(P<0.05), 大写字母表示不同处理组的差异, 小写字母表示不同储藏天数间的差异。

(图 4(B))。在贮藏第 0 d, T7-5 组的白度值高于 T7-0 组(图 4(B)), 说明 5 mg/L 没食子酸暂养后的新鲜样品肌肉中的水分含量高于未添加组, 导致白度值的增加[42]。在贮藏过程中, 鱼片白度值的变化是由于脂质氧化、蛋白质降解或微生物作用引起的水分流失, 降低了肌肉的持水性, 水分停留在肌肉表面, 导致光反射增强, 导致白度值增加[43]。贮藏期(1~11 d)内, T7-5 组的白度值小于 T7-0, 可能是由于 5 mg/L 没食子酸能够抑制微生物的繁殖, 缓解蛋白质降解速率, 从而使得白度值增加缓慢[44]。

贮藏 1 d 后, 两组的离心损失率都呈下降趋势(图 4(C)), 可能是由于暂养缓解了由捕捞、运输带来的应激, 因此鱼片肌肉组织结构均匀, 肌原纤维排列整齐紧密, 减少了水分流失。在贮藏第 3 d, 离心失水率持续上升, 可能是在贮藏过程中, 水溶性维生素、矿物质等营养物质大量损失以及蛋白质变性导致[45], 5 mg/L 没食子酸添加可以稳定鱼肉中蛋白质的网络结构, 增强蛋白质与水之间的结合能力, 使得水分更加稳定, 有效降低组织内水分的流失[46]。

2.3.2 水分分布 5 mg/L 没食子酸暂养 7 d 后, 大口黑鲈鱼片贮藏的水分分布变化如表 6 所示。在贮藏过程中, 除第 9 d 外, T7-0 组的 T21 均无显著变化(P>0.05); T7-5 组的 T21 随着贮藏时间的延长出现波动, 这可能是由于 5 mg/L 没食子酸影响肌肉水和基质中固体物质的相互作用。T7-0 组的 T22 在贮藏 0~3 d 和 7~9 d 呈现上升的趋势, 表明在贮藏过程中, 水分子越来越活跃, 水分子与组织结构之间的结合能力越来越小, 可能是由于肌肉中蛋白质被微生物或者酶等相关物质水解[47]。在贮藏 7~11 d, T7-5 组的 T22 显著低于 T7-0 组, 表明 5 mg/L 没食子酸有利于延缓冷藏过程中鱼片水分的流失。

核磁共振成像(Magnetic resonance imaging, MRI)可直观表征冷藏期间大口黑鲈鱼片内部的水分分布情况。MRI 中红色代表质子密度高的区域, 蓝

表 6 5 mg/L 没食子酸暂养 7 d 大口黑鲈鱼片贮藏期水分分布的影响

Table 6 Effects of 5 mg/L gallic acid supplementation on water distribution of 7-day largemouth bass fillets during storage

项目	分组	贮藏时间(d)						
		0	1	3	5	7	9	11
T_{21}(ms)	T7-0	1.09±0.23^{Bb}	1.18±0.07^{Bb}	1.19±0.20^{Ab}	1.24±0.16^{Ab}	1.33±0.26^{Ab}	0.81±0.15^{Aa}	1.24±0.12^{Bb}
	T7-5	0.83±0.06^{Aa}	0.89±0.09^{Aa}	0.96±0.13^{Aab}	1.08±0.09^{Abc}	1.19±0.09^{Ac}	0.94±0.09^{Aab}	0.94±0.12^{Aab}
T_{22}(ms)	T7-0	50.83±2.82^{Aa}	51.90±3.64^{Bab}	54.74±4.30^{Abc}	48.84±2.45^{Aa}	56.16±2.82^{Bc}	49.77±0.00^{Aa}	49.77±0.00^{Ba}
	T7-5	49.77±0.00^{Aab}	47.34±3.35^{Aa}	48.69±2.65^{Aab}	52.25±3.73^{Bb}	49.77±0.00^{Aab}	49.77±0.00^{Aab}	46.53±4.58^{Aa}
T_{23}(ms)	T7-0	479.15±150.89^{Aa}	406.33±48.99^{Aa}	1179.32±92.71^{Bb}	490.35±64.98^{Aa}	449.04±30.23^{Aa}	479.15±150.89^{Aa}	501.18±64.98^{Aa}
	T7-5	1052.70±164.45^{Bc}	1112.41±80.2^{Bc}	806.75±142.70^{Ab}	1112.41±80.29^{Bc}	481.54±34.76^{Aa}	451.31±61.86^{Aa}	1158.57±172.60^{Bc}
P_{21}(%)	T7-0	2.91±0.24^{Ade}	2.61±0.09^{Abc}	2.93±0.13^{Ae}	2.78±0.01^{Acde}	2.73±0.07^{Acd}	2.10±0.06^{Aa}	2.44±0.03^{Ab}
	T7-5	3.28±0.05^{Ad}	2.82±0.13^{Bbc}	3.19±0.16^{Bd}	3.13±0.04^{Bd}	2.68±0.10^{Ab}	2.37±0.02^{Ba}	2.90±0.14^{Bc}
P_{22}(%)	T7-0	96.59±0.13^{Acd}	96.26±0.19^{Abcd}	96.69±0.08^{Bd}	96.25±0.50^{Abcd}	95.92±0.64^{Abc}	95.07±0.08^{Aa}	95.77±0.01^{Ab}
	T7-5	97.25±0.03^{Be}	96.68±0.13^{Bd}	96.40±0.11^{Acd}	96.29±0.03^{Abc}	96.00±0.32^{Aab}	95.78±0.04^{Ba}	96.66±0.07^{Bd}
P_{23}(%)	T7-0	0.51±0.11^{Ba}	1.56±0.01^{Be}	0.67±0.01^{Bb}	0.96±0.02^{Bc}	1.64±0.03^{Ade}	0.58±0.02^{Aa}	1.72±0.08^{Be}
	T7-5	0.23±0.05^{Aa}	0.25±0.08^{Aa}	0.35±0.01^{Aa}	0.40±0.01^{Aa}	1.30±0.30^{Ab}	1.77±0.08^{Bc}	0.33±0.02^{Aa}

注: 不同大写字母表示不同处理组间差异显著(P<0.05), 不同小写字母表示不同储藏天数间差异显著(P<0.05)。

色代表质子密度低的区域，颜色越红，表明样品的水分含量越高[48]。如图 5 所示，两个样品组在贮藏第 0 d 的时候 MRI 呈现出较明显的黄红色，说明新鲜大口黑鲈鱼片的水分含量较高。随着贮藏时间的延长，MRI 由红色逐渐变为绿色，表明其含水量逐渐降低。但 T7-5 组的含水量始终能够维持在较高的水平，表明 5 mg/L 没食子酸处理组具有较强的维持鱼片中水分含量下降的能力，这与离心损失率的结果一致。

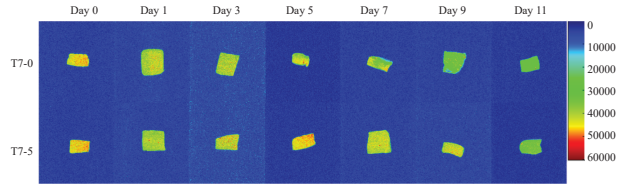


图 5　5 mg/L 没食子酸添加对暂养 7 d 大口黑鲈鱼片贮藏期 MRI 伪彩图

Fig.5　MRI pseudo-color image of 5 mg/L gallic acid supplementation for 7 d largemouth bass fillet during storage

2.3.3　质构特性　食品的质地特性是决定食品品质的最关键因素之一[49]。随着贮藏时间的延长，T7-0 组的剪切力、硬度、回复性、弹性、咀嚼性、胶黏性均呈现下降趋势；T7-5 组的硬度、回复性、弹性、咀嚼性、胶黏性均呈下降的趋势，其中回复性在贮藏 7~11 d 无显著变化（表 7）。

整体来说，在 4 ℃ 冷藏 11 d 后，鱼肉的质地变软，可能是由于微生物（细菌和酵母）的作用和贮藏过程中各种蛋白酶的水解作用促进了鱼肉蛋白的降解，破坏了肌肉纤维和结缔组织[50]。咀嚼性和弹性降低归因于内源性水解酶、特定腐败细菌和代谢副产物的共同作用，导致蛋白质降解，削弱肌肉中的细胞粘附力，最终使得肌肉中水分的流失和肌肉组织结构的损伤[51]。研究表明，没食子酸与海藻酸钠的复合涂层能有效减少冷藏鲭鱼鱼片的菌落总数[52]。抗氧化剂能够保护肌肉脂质免受氧化损伤，还可以保持肌肉纤维的膜完整性，减少水分流失，从而对鱼片的质地产生影响[53]。随着贮藏时间的延长，氧化作用的加剧会导致乳剂体系中脂肪球周围的蛋白质膜降解[54]。脂质和蛋白质氧化与肉制品中发生的变质过程密切相关[55]，蛋白质氧化会对鲜肉和肉制品在质地、嫩度和颜色方面的感官质量产生负面影响[21]。

2.3.4　组织蛋白酶 B+L、TVB-N、TVC、MDA　组织蛋白酶 B+L 活性如图 6A 所示。贮藏期（1~11 d）内，T7-5 组的组织蛋白酶酶活 B+L 均低于 T7-0 组，可能与没食子酸能够较长时间作用于活性氧物质有关，导致酶结构变化从而影响其活性；也可能与活性物质对鱼肉中的其他蛋白质、酶类、脂肪等的作用有关，间接地影响了组织蛋白酶的活性[56]。组织蛋白酶 B+L 必须从溶酶体中释放出来才能参与肉的嫩化，对肌原纤维蛋白和胶原蛋白造成损伤，引起蛋白质降解[22]，从而导致肌肉剪切力的下降。

随着贮藏时间的延长，TVB-N 值升高，在贮藏至第 9 d 时，T7-0 组 TVB-N 含量为 19.13±1.07 mg/100 g；T7-5 组 TVB-N 含量为 17.08±2.53 mg/100 g，随后在第 11 d，两组 TVB-N 值均超过生鲜淡水鱼卫生标准（图 6B）。TVB-N 值的快速增加是由肌肉组织中的微生物引起的，腐败细菌在肉中快速增长和增殖，促进了蛋白质的降解[57]。TVC 可以直接反映微生物活动对水产品的腐败程度[58]。随着贮藏时间的延长，TVC 值在贮藏前 7 d 呈现逐渐增长的趋势，随后稳定不变（图 6C），在贮藏第 5 d 时，已超过淡水鱼中微生物可接受的最上限值为 7 CFU/g。

在肉类中，脂质氧化随着自由基和氢过氧化物的积累而迅速增加，具有较强的促氧化作用，是肉类和肉制品变质的主要原因，涉及多不饱和脂肪酸（PUFA）的降解，并导致产生二次分解产物，如 MDA[59]。两组在第 1 d 的 MDA 值降低显著低于贮藏第 0 d，随后随着贮藏时间的延长，MDA 值持续升

表 7　5 mg/L 没食子酸暂养 7 d 大口黑鲈鱼片贮藏期质构特性的影响

Table 7　Effects of 5 mg/L gallic acid supplementation on texture property of 7-day largemouth bass fillets during storage

分组	贮藏时间(d)	剪切力(g)	硬度(g)	回复性	弹性	咀嚼性(g)	胶黏性(g)
T7-0	0	75.56±3.61^{Ad}	2746.04±37.30^{Ae}	27.15±2.75^{Ad}	51.35±1.89^{Ad}	611.37±10.95^{Af}	1181.52±59.76^{Ac}
	1	69.03±7.65^{Bc}	2217.24±627.52^{Ad}	20.42±4.44^{Ac}	43.42±2.41^{Ac}	494.35±44.47^{Ae}	1172.30±161.53^{Ac}
	3	50.51±6.09^{Ab}	1972.08±290.16^{Acd}	18.65±2.23^{Abc}	41.48±3.14^{Abc}	401.48±25.75^{Ad}	601.46±38.03^{Ab}
	5	46.13±4.11^{Ab}	1575.61±35.27^{Abc}	15.61±2.31^{Aab}	40.65±3.71^{Abc}	332.29±11.11^{Ac}	413.45±42.69^{Aa}
	7	40.07±1.55^{Aa}	1402.80±190.80^{Ab}	13.42±1.64^{Aa}	39.35±1.40^{Aabc}	220.71±22.78^{Ab}	397.41±51.90^{Aa}
	9	36.93±6.39^{Aa}	1329.32±161.04^{Ab}	15.75±1.27^{Aab}	38.39±1.93^{Aab}	202.32±64.34^{Ab}	345.07±28.23^{Aa}
	11	38.76±5.89^{Aa}	832.00±61.81^{Aa}	15.15±1.90^{Aa}	35.93±2.26^{Aa}	109.41±32.77^{Aa}	261.65±55.97^{Aa}
T7-5	0	90.69±6.58^{Be}	3271.83±650.14^{Ad}	39.44±1.69^{Bc}	56.71±3.01^{Bd}	901.21±74.97^{Bd}	1871.73±175.21^{Be}
	1	50.95±6.12^{Ab}	2913.88±970.75^{Acd}	29.69±2.36^{Bb}	51.32±4.02^{Bcd}	612.70±96.00^{Ac}	1322.14±22.37^{Ad}
	3	59.92±4.51^{Bd}	2221.12±162.48^{Abc}	22.80±2.73^{Aa}	47.22±5.45^{Abc}	522.23±25.11^{Bc}	773.48±38.20^{Bc}
	5	56.70±5.39^{Bcd}	2007.13±275.25^{Bab}	20.72±4.64^{Aa}	45.11±6.73^{Aabc}	369.17±46.38^{Ab}	589.55±8.18^{Bb}
	7	52.74±5.05^{Bbc}	1892.27±52.37^{Bab}	19.27±0.90^{Ba}	43.30±2.49^{Bab}	322.66±23.07^{Bab}	504.50±32.02^{Aab}
	9	49.75±5.69^{Bb}	1515.14±294.93^{Aab}	21.96±1.06^{Ba}	43.41±1.86^{Bab}	340.43±72.22^{Ab}	444.41±37.38^{Aab}
	11	44.24±4.00^{Ba}	1334.94±122.72^{Ba}	20.14±1.57^{Ba}	40.16±3.31^{Ba}	219.95±29.70^{Ba}	409.22±72.07^{Aa}

注：不同字母表示差异显著（P<0.05），大写字母表示不同处理组的差异，小写字母表示不同储藏天数间的差异。

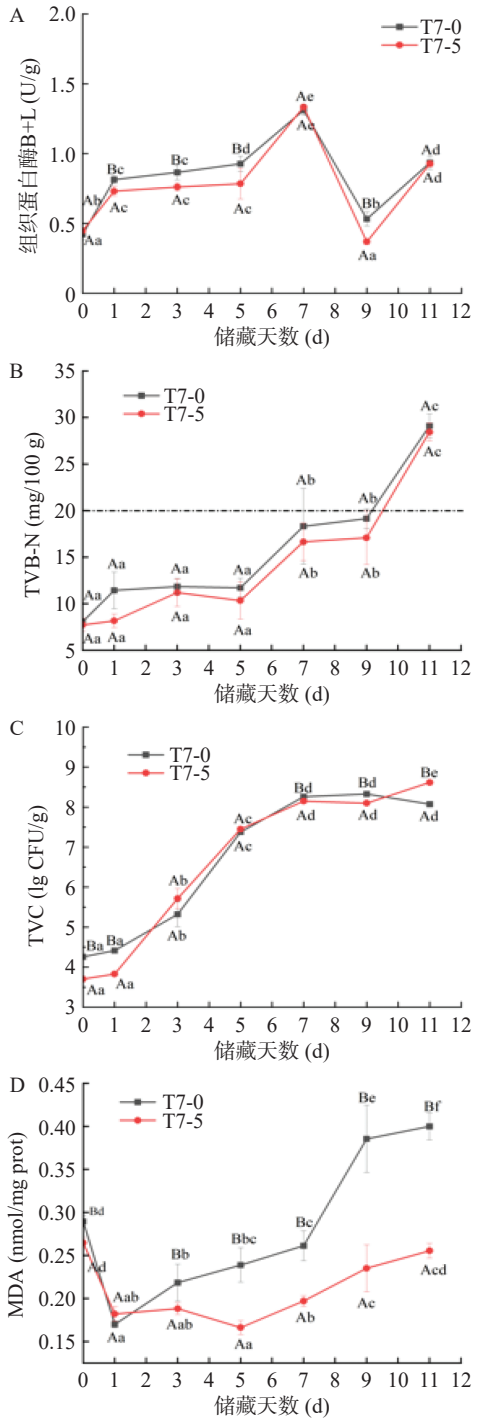


图 6　5 mg/L 没食子酸暂养 7 d 大口黑鲈鱼片贮藏期组织蛋白酶 B+L、TVB-N、TVC、MDA 的变化

Fig.6　Changes of 5 mg/L gallic acid supplementation on sum cathepsins of B+L activity, TVB-N, TVC and MDA of 7-day largemouth bass fillets during storage

注：A: 组织蛋白酶 B+L 活性；B: TVB-N 值；C: TVC 值；D: MDA 值；不同字母表示差异显著(P<0.05)，大写字母表示不同处理组的差异，小写字母表示不同储藏天数间的差异。

高(图 6D)，可能与 MDA 和蛋白质、氨基酸、糖原等相互作用，导致游离 MDA 含量降低有关[59]。随后随着贮藏期的延长，T7-0 组和 T7-5 组的 MDA 值持续升高(P<0.05)，说明随着贮藏时间的增加，脂质过氧化程度增加，但 5 mg/L 没食子酸可以有效缓解这一现象。Fan 等[60] 研究发现在贮藏期间，鱼肉会部分脱水并且导致不饱和脂肪酸的氧化增加。Fu 等[61] 发现在冷藏过程中，没食子酸能有效抑制草鱼的细菌生长，防止脂肪氧化。

3　结论

从原料品质保障角度，探寻一种高效、低成本的暂养方法提升鲜活大口黑鲈商品储备的品质，本研究探讨了短期没食子酸暂养对大口黑鲈氧化应激、肌肉品质及鱼片贮藏品质的影响。5 mg/L 没食子酸 7 d 暂养降低了血清和肌肉中的氧化应激，血清 SOD、肌肉 SOD 和 CAT 酶活降低；导致肌肉蛋白质含量增加，色泽、硬度、持水性提高，有效改善大口黑鲈肌肉品质；在 4 ℃ 贮藏期间延缓了大口黑鲈鱼片质地下降，持水性增强、pH 和白度降低，抑制组织蛋白酶 B+L 活性、降低 MDA 含量。因此，5 mg/L 没食子酸能够通过自身与自由基结合降低肌肉和血清中抗氧化酶活，并进一步地改善大口黑鲈肌肉品质，在 4 ℃ 贮藏时有效减缓大口黑鲈鱼片肌肉品质劣变。本研究为高品质鲜活大口黑鲈的商品储备、品质改善及货架期延长提供参考，可以进一步进行没食子酸暂养对大口黑鲈肌肉品质提升的机理探究。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] 王丹, 高宏泉. 2023 中国渔业统计年鉴[S]. 北京: 中国农业出版社, 2024, 25. [WANG D, GAO H Q. China fishery statistical yearbook 2023[B]. Beijing: China Agriculture Press, 2024.]

[2] 储张杰. 水生动物珍品暂养及保活运输技术[B]. 北京: 海洋出版社, 2011. [CHU Z J. Temporary maintenance and transportation technology of aquatic animal treasures[B]. Beijing: Ocean Press, 2011.]

[3] 吴朝朝, 陈丽丽, 袁美兰, 等. 短期暂养对鲫鱼肉品质影响的研究[J]. 食品工业科技, 2015, 36(15): 334−337. [WU Z Z, CHEN L L, YUAN M L, et al. Research of the effect of short term starvation to the crucian meat quality[J]. Food Industry Science and Technology, 2015, 36(15): 334−337.]

[4] 米红波, 鹿悦, 陈敬鑫, 等. 牛磺酸和谷氨酰胺暂养液对珍珠龙胆石斑鱼的应激缓解作用: 中国食品科学技术学会第二十届年会, 中国湖南长沙[C], 2023. [MI H B, LU Y, CHEN J X, et al. The stress relieving effect of taurine and glutamine temporary culture solution on Gentian Epinephelus pearl; 20th Annual Conference of Chinese Society of Food Science and Technology, Changsha, Hunan, China[C], 2023.]

[5] 凌俊, 陈小雷, 江河, 等. 湖泊深水暂养过程中鳙鱼品质变化研究[J]. 安徽农业科学, 2024, 52(3): 80−87. [LING J, CHEN X L, JIANG H, et al. Study on the quality changes of *Bighead carp* during temporary rearing in deep Lake[J]. Journal of Anhui agricultural sciences, 2024, 52(3): 80−87.]

[6] BANGAR N S, DIXIT A, APTE M M, et al. *Syzygium cumini* (L.) skeels mitigate diabetic nephropathy by regulating *Nrf2* pathway and mitocyhondrial dysfunction: *In vitro* and *in vivo* studies[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2025, 336: 118684.

[7] SONG Z L, LIU H M, HUANG A L, et al. Collagen/zein elec-

trospun films incorporated with gallic acid for tilapia (*Oreochromis niloticus*) muscle preservation[J]. Journal of Food Engineering, 2022, 317: 110860.
[8] DAI W L, LIU S L, WANG Y B, et al. Improving flavor quality in bighead carp (*Aristichthys nobilis*) fillets during chilled storage with chitosan-EGCG coating: Insights into its underlying regulatory mechanisms[J]. Food Chemistry, 2025, 478: 143536.
[9] CAI Z C, WANG Y Y, LIAO G H, et al. Effects of cold plasma-activated solution on microbial amounts and diversity of Tilapia fillets at refrigerator storage[J]. LWT- Food Science and Technology, 2024, 213: 117047.
[10] ZHANG Y Q, DONG Y, DAI Z Y. Antioxidant and cryoprotective effects of bone hydrolysates from bighead carp (*Aristichthys nobilis*) in Freeze-Thawed Fish Fillets[J]. Foods, 2021, 10(6): 1409.
[11] KUT K, BARTOSZ G, SOSZYŃSKI M, et al. Antioxidant properties of hispidulin[J]. Natural Product Research, 2022, 36(24): 6401−6404.
[12] SARABANDI K, SADEGHI M A, HAMISHEKAR H, et al. Microencapsulation of casein hydrolysates: Physicochemical, antioxidant and microstructure properties[J]. Journal of Food Engineering, 2018, 237: 86−95.
[13] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.3-2016, 食品安全国家标准 食品中水分的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commission, People's Republic of China. GB 5009.3-2016, Determination of moisture in food of national standard for food safety[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.]
[14] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.5-2016 食品中脂肪的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commission, People's Republic of China. GB 5009.5-2016 Determination of fat in food under National Standards for Food Safety[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.]
[15] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.5-2016 食品中蛋白质的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commission, People's Republic of China. GB 5009.5-2016 Determination of protein in foods[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.]
[16] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.4-2016, 食品安全国家标准 食品中灰分的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commission, People's Republic of China. GB 5009.4-2016, Determination of ash in food of National Standard of food safety[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.]
[17] 周俊鹏, 石钢鹏, 章蔚, 等. 两种解冻方式对淡水鱼品质影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(20): 1−6. [ZHOU J P, SHI G P, ZHANG W, et al. Effects of two kinds of thawing methods on the quality of freshwater fish[J]. Food Industry Science and Technology, 2019, 40(20): 1−6.]
[18] WU Y W, XIA Y T, HU A, et al. Difference in muscle metabolism caused by metabolism disorder of rainbow trout liver exposed to ammonia stress[J]. Science of The Total Environment, 2024: 924.
[19] LI F F, WANG B, LIU Q, et al. Changes in myofibrillar protein gel quality of porcine longissimus muscle induced by its stuctural modification under different thawing methods[J]. Meat Science, 2019, 147: 108−115.
[20] XIA W, CHEN J, HE D N, et al. Changes in physicochemical and structural properties of tapioca starch after high speed jet degradation[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 95: 98−104.
[21] WANG H R, SUO R, WANG Y Y, et al. Effects of electron beam irradiation on protein oxidation and textural properties of shrimp (*Litopenaeus vannamei*) during refrigerated storage[J]. Food Chemistry: X, 2023, 20: 101009.
[22] WANG L, LI J J, TENG S, et al. Changes in collagen properties and cathepsin activity of beef M. semitendinosus by the application of ultrasound during post-mortem aging[J]. Meat Science, 2022, 185: 108718.
[23] SUN Q X, CHEN Q, LI F F, et al. Biogenic amine inhibition and quality protection of Harbin dry sausages by inoculation with *Staphylococcus xylosus* and *Lactobacillus plantarum*[J]. Food Control, 2016, 68: 358−366.
[24] ZHANG J B, LI Y, LIU X C, et al. Characterization of the microbial composition and quality of lightly salted grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) fillets with vacuum or modified atmosphere packaging[J]. International Journal of Food Microbiology, 2019, 293: 87−93.
[25] SHAHJAHAN M, ISLAM M J, HOSSAIN M T, et al. Blood biomarkers as diagnostic tools: An overview of climate-driven stress responses in fish[J]. Science of the Total Environment, 2022, 843: 156910.
[26] WU Y W, ZHAO M M, XIA Y T, et al. Deterioration of muscle quality caused by ammonia exposure in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)[J]. Food Bioscience, 2023, 102609.
[27] 汪兰, 夏雨婷, 胡澳, 等. 维生素 C 对禁食黄颡鱼抗氧化能力和肌肉品质的影响[J]. 广东海洋大学学报, 2024, 44(1): 28−34. [WANG L, XIA Y T, HU A, et al. Effects of vitamin C supplementation on antioxidant capacity and muscle quality of Yellow Catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*) after yasting[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2024, 44(1): 28−34.]
[28] AGOSTINI J F, SANTO G D, BALDIN S L, et al. Gallic acid reverses neurochemical changes induced by prolonged ethanol Exposure in the Zebrafish Brain[J]. Neuroscience, 2021, 455: 251−262.
[29] MA X N, WU L C, BAO X L, et al. Ameliorative effects of pyrroloquinoline quinone on oxidized fish oil-induced growth retardation, immune suppression, and oxidative stress in yellow catfish *Tachysurus fulvidraco*[J]. Aquaculture Reports, 2024, 39: 102469.
[30] FLORA S J. Structural, chemical and biological aspects of antioxidants for strategies against metal and metalloid exposure[J]. Oxidative Medicine and Cellular Longevity, 2009, 2(4): 191−206.
[31] RASOOL M, SABINA E P, RAMYA S R, et al. Hepatoprotective and antioxidant effects of gallic acid in paracetamol - induced liver damage in mice[J]. Journal of Pharmacy and Pharmacology, 2010, 62.
[32] 王扬, 周秀珍, 陈小明, 等. 传统池塘、稻田共生和帆布桶养殖模式下马口鱼生长和肉品质的比较[J]. 水产科技情报, 2025, 52(5): 308-316. [WANG Y, ZHOU X Z, CHEN X M, et al. Comparison of growth and meat quality of *Opsariichthys bidens* under traditional pond, rice-fish symbiosis, and canvas bucket culture models[J]. Fisheries Science & Technology Information, 2025, 52(5): 308-316.]
[33] 彭玲, 尤娟, 汪兰, 等. 保活运输过程中武昌鱼肌肉品质的变化[J]. 肉类研究, 2022, 36(6): 42−47. [PENG L, YOU J, WANG L, et al. Changes in muscle quality of Wuchang Bream during live transportation[J]. Meat Science, 2022, 36(6): 42−47.]
[34] 郭晓东. 循环水暂养处理对团头鲂肌肉品质的提升作用[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019. [GUO X D. Effect of circulating water treatment on muscle quality improvement of *Megalobrama megalobrama*[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019.]
[35] LI H L, CHEN Y N, LI M J, et al. Effects of temporary rearing with organic selenium on the muscle flavor and texture proper-

ties of largemouth bass (*Micropterus salmonides*)[J]. Food Chemistry, 2022, 397: 133747.
[36] UTRERA M, PARRA V, ESTÉVEZ M. Protein oxidation during frozen storage and subsequent processing of different beef muscles [J]. Meat Science, 2014, 96(2, Part A): 812−820.
[37] PAN J J, LI C L, LIU X J, et al. A multivariate insight into the organoleptic properties of porcine muscle by ultrasound-assisted brining: Protein oxidation, water state and microstructure[J]. LWT - Food Science and Technology, 2022, 159: 113136.
[38] ZHAO G M, BAI X Y, TIAN W, et al. The effect of shower time, electrolyte treatment, and electrical stimulation on meat quality of cattle longissimus thoracis muscle in cold weather[J]. Meat Science, 2022, 184: 108664.
[39] 袁可怡, 赵甜甜, 焦文娟, 等. 不同烹饪方式对金鲳鱼片品质的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(12): 81−90. [YUAN K Y, ZHAO T T, JIAO W J, et al. Impact of different cooking methods on the quality of Golden Pomfret fillets[J]. Food Industry Science and Technology, 2025, 46(12): 81−90.]
[40] ZHANG L N, LI X, LU W, et al. Quality predictive models of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) at different temperatures during storage[J]. Food Control, 2011, 22: 1197−1202.
[41] 刘欣宁, 卢云浩, 何强. 没食子酸对植物乳杆菌 *Lactobacillus plantarum* 的抑制和促进生长[J]. 现代食品科技, 2024, 40(1): 61−66. [LIU X N, LU Y H, HE Q. Gallic acid both inhibits and promotes the growth of *Lactobacillus plantarum*[J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(1): 61−66.]
[42] AN Y Q, LIU N, XIONG J, et al. Quality changes and shelf-life prediction of pre-processed snakehead fish fillet seasoned by yeast extract: Affected by packaging method and storage temperature[J]. Food Chemistry Advances, 2023, 3: 100418.
[43] COLSON V, FERREIRA V H B, LUCHIARI A C, et al. Loss of light colour preference after chronic embryonic stress in rainbow trout fry: A novel and potential indicator of fish welfare? [J]. Applied Animal Behaviour Science, 2021, 239: 105335.
[44] HUANG B Q, ZHANG Z G, DING N S, et al. Investigation of the pectin grafting with gallic acid and propyl gallate and their antioxidant activities, antibacterial activities and fresh keeping performance[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 190: 343−350.
[45] CHAN S S, ROTH B, JESSEN F, et al. Water holding properties of Atlantic salmon[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2022, 21(1): 477−498.
[46] LI Q Y, ZHANG J Y, ZHU J S, et al. Effects of gallic acid combined with epsilon-polylysine hydrochloride incorporated in a pullulan–CMC edible coating on the storage quality of sea bass[J]. RSC Advances, 2021, 11(47): 29675−29683.
[47] WANG X Y, GENG L J, XIE J, et al. Relationship between water migration and quality changes of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) during storage at 0 ℃ and 4 ℃ by LF-NMR [J]. Journal of Aquatic Food Product Technology, 2018: 35-47.
[48] ZHAO X Y, LAN W Q, ZHAI Y, T et al. Multi-frequency ultrasound: A potential method to improve the effects of surface decontamination and structural characteristics on large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea*) during refrigerated storage[J]. Ultrason Sonochem, 2021, 79: 105787.
[49] BENJAKUL S, VISESSANGUAN W, THONGKAEW C, et al. Effect of frozen storage on chemical and gel-forming properties of fish commonly used for surimi production in Thailand[J]. Food Hydrocolloids, 2005, 19(2): 197−207.
[50] LIU C, PAN Y Y, LI Y Y, et al. The effect of electron beam irradiation combined with slurry ice on physicochemical parameters and bacterial communities of shrimp (*Litopenaeus vannamei*) during refrigerated storage[J]. Food Control, 2024, 158: 110264.
[51] KHODANAZARY A, MOHAMMADZADEH B. Effect of alginate-gallic acid coating on freshness and flavor properties of Mackerel (*Scomberomorus commerson*) fillets under refrigerated storage[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 249: 125999.
[52] ANVAR N, NATEGHI L, SHARIATIFAR N, et al. The effect of essential oil of *Anethum graveolens* L. seed and gallic acid (free and nano forms) on microbial, chemical and sensory characteristics in minced meat during storage at 4 ℃[J]. Food Chemistry: X, 2023, 19: 100842.
[53] CHAIYASIT W, MCCLEMENTS D J, DECKER E A. The relationship between the physicochemical properties of antioxidants and their ability to inhibit lipid oxidation in Bulk Oil and Oil-in-Water Emulsions[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2005, 53(12): 4982−4988.
[54] MERCIER Y, GATELLIER P, RENERRE M. Lipid and protein oxidation *in vitro*, and antioxidant potential in meat from Charolais cows finished on pasture or mixed diet[J]. Meat Science, 2004, 66(2): 467−473.
[55] 孙协军, 陈笑俏, 李秀霞, 等. 低温等离子体杀菌对虹鳟肌球蛋白降解及相关组织蛋白酶活性的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(12): 50−59. [SUN X J, CHEN X Q, LI X X, et al. Effect of low temperature plasma sterilization on myosin degradation and related cathepsin activity of *Oncorhynchus mykiss*[J]. Food Industry Science and Technology, 2025, 46(12): 50−59.]
[56] YU S, DUAN M X, SUN J S, et al. Immobilization of phlorotannins on nanochitin: A novel biopreservative for refrigerated sea bass (*Lateolabrax japonicus*) fillets[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 200: 626−634.
[57] LI T T, WANG D F, REN L K, et al. Involvement of exogenous N-Acyl-Homoserine lactones in spoilage potential of *Pseudomonas fluorescens* isolated from refrigerated turbot[J]. Frontiers in Microbiology, 2019, 10.
[58] AVILA R F, PRO M A, SOSA M E, et al. Dietary supplemented and meat-added antioxidants effect on the lipid oxidative stability of refrigerated and frozen cooked chicken meat[J]. Poult Sci Poultry Science, 2013, 92(1): 243−249.
[59] BABIC M J, MILIJASEVIC M, LILIC S, et al. Effect of vacuum and modified atmosphere packaging on the shelf life and quality of gutted rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) during refrigerated storage[J]. Foods, 2023, 12(16): 31−41.
[60] FAN W J, CHI Y L, ZHANG S. The use of a tea polyphenol dip to extend the shelf life of silver carp (*Hypophthalmicthys molitrix*) during storage in ice[J]. Food Chemistry, 2008, 108(1): 148−153.
[61] FU L L, XIAO Q, RU Y, et al. Bio-based active packaging: Gallic acid modified agarose coatings in grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) preservation[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 255: 128196.