

不同暂养方式对淡水产品生理特征和肌肉品质影响的研究进展

孙依珍^{1,2}, 李梦姣^{1,2}, 汪兰², 石柳², 郭晓嘉², 陈朗², 吴文锦², 熊光权², 陈胜^{2*}, 孙卫青^{1*}

(1. 长江大学生命科学学院, 湖北荆州 434025)

(2. 湖北省农科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)

摘要: 因水产品运输过程易受到各种应激源如温度、低氧、拥挤、振动、和氨氮等环境因素的影响而产生应激反应, 目前采用添加盐及抗氧化剂、冷驯诱导休眠等暂养方法成为缓解鱼类运输应激有效方式。通过比较采用净水、低温和添加剂等暂养方式对不同品种淡水鱼、虾、蟹产品的健康程度的实验结果影响, 分析不同条件下产品生理特征和品质指标的变化。本文综述了近年来不同暂养方式在淡水产品的研究应用, 对其生理特征和肌肉品质方面的影响, 为优化暂养条件, 提高其存活率和品质提供参考方案。

关键词: 暂养方式; 淡水产品; 生理特征; 肌肉品质

文章编号: 1673-9078(2026)1-349-360

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.1.1865

Research Progress on the Effects of Different Temporary Cultivation Methods on the Physiological Characteristics and Muscle Quality of Freshwater Products

SUN Yizhen^{1,2}, LI Mengjiao^{1,2}, WANG Lan², SHI Liu², GUO Xiaojia², CHEN Lang², WU Wenjin²,

XIONG Guangquan², CHEN Sheng^{2*}, SUN Weiqing^{1*}

(1.College of Life Science, Yangtze University, Jinzhou 434025, China)(2.Institute of Agro-product Processing and Nuclear Agricultural Technology, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Cold Chain Logistics Technology for Agro-product, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430064, China)

Abstract: Aquatic products are susceptible to stress reactions during transportation due to various stressors such as temperature, hypoxia, crowding, vibration, and ammonia nitrogen. At present, the use of temporary culture methods such as adding salt and antioxidants, and inducing dormancy through cold acclimation has become an effective way to alleviate fish transportation stress. By comparing the experimental results on the health status of different species of freshwater fish, shrimp and crab products under temporary culture methods such as the uses of clean water, low temperature, and additives, the changes of physiological

引文格式:

孙依珍,李梦姣,汪兰,等.不同暂养方式对淡水产品生理特征和肌肉品质影响的研究进展[J].现代食品科技,2026,42(1): 349-360.

SUN Yizhen, LI Mengjiao, WANG Lan, et al. Research progress on the effects of different temporary cultivation methods on the physiological characteristics and muscle quality of freshwater products [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(1): 349-360.

收稿日期: 2024-12-16; 修回日期: 2025-05-19; 接受日期: 2025-05-29

基金项目: 中央引导地方科技发展专项 (2023EGA025); 国家现代农业 (特色淡水鱼) 产业技术体系建设专项 (CARS-46); 湖北省重点研发计划项目 (2023BBB103); 湖北省自然科学基金青年项目 (2024AFB330); 湖北省农业科学院青年科学基金项目 (2024NKYJJ27)

作者简介: 孙依珍 (2002-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 水产品养殖与加工, E-mail: 2464926530@qq.com

通讯作者: 孙卫青 (1971-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 畜禽水产加工与质量控制, E-mail: sunweiqing@yangtze.edu.cn; 共同通讯作者:

陈胜 (1992-), 男, 博士, 助理研究员, 研究方向: 水产品活运和保鲜, E-mail: cs55490964@163.com

characteristics and quality indexes of products under different conditions were analyzed. This paper reviews the research and application of different temporary culture methods for freshwater products in recent years, and their effects on the physiological characteristics and muscle quality of freshwater products, to provide reference strategies for optimizing temporary culture conditions and improving the survival rate and quality of freshwater products.

Key words: temporary cultivation method; freshwater products; physiological characteristics; muscle quality

淡水产品中富含优质动物蛋白质, 在中国居民膳食结构中占有重要的位置。淡水产品的市场需求的日益提高有效推动了淡水养殖业发展。我国的水产养殖量在过去几年中不断增加, 2023 年的中国水产养殖总产量为 5 809.61 万 t, 其中淡水养殖产量达到 3 530.85 万 t, 约占总产量的 60.78%, 较 2022 年增长了 3.65%^[1]。大部分淡水产品主要以鲜活状态销售, 经济效益较高, 但在其流通过程中涉及的捕捞、运输和卸载等操作, 这些操作单元伴随着温度波动、低氧、密度高、振动、和氨氮积累等应激源, 这些应激源会导致鱼类氧化应激水平提高^[2], 其体内 ROS 自由基不断增加, 打破鱼类的生理生化平衡, 具体表现在破坏机体抗氧化系统, 降低非特异性免疫性能, 减弱抗病能力, 降低存活率, 并进一步影响其营养成分、色泽、质构、风味等肌肉品质^[3]。此外, 应激反应会加速鱼体氨氮物质的排放, 氨氮类毒性化合物在水中发生富集破坏水质, 恶劣的养殖环境使得鱼类存活率进一步降低, 最终造成巨大的经济损失^[4]。因此, 寻求快速有效的缓解应激、提升肌肉品质方法是亟待解决的科学问题。

目前缓解淡水产品运输应激普遍有效的方法是暂养, 将养殖或捕获的鲜活水产品转入人工控制条件下的小面积场地进行短暂养殖的一种方法, 是水产品上市前的一个过渡阶段^[5]。适当的暂养可以减少氨氮胁迫对于鱼体的损害, 有助于调节能量代谢, 防止运输应激损伤, 减少氧化应激, 增强水产品的品质^[6,7]。由于淡水产品的种类、运输方式、运输时长各方面的差异, 暂养方式也不同, 根据暂养水体环境的差异, 初步将其划分为净水暂养、低温暂养和添加剂暂养。其中净水暂养主要包括微流水暂养和循环水暂养; 添加剂暂养主要有微咸水暂养、微生物制剂暂养和天然抗氧化剂暂养。

1 净水暂养对淡水产品肌肉品质的影响

净水暂养是长期健康管理工具(数天至数周), 其核心在于水质调控和营养优化。通过水质调控(如溶氧、pH、氨氮控制)和营养优化(如饵料补充、抗应激剂)维持生物活性, 提升水产品存活率、健康状态和肌肉品质。适用于水产养殖场内分拣、病害隔离、

高附加值产品(如龙虾、观赏鱼)的长期暂养, 以及生态修复前的适应性训练。

1.1 微流水暂养

微流水暂养是指将人工养殖的鱼类转移至清洁且具流动性的水体中以低密度状态暂养, 以减少鱼类的宰前应激反应。微流水处理主要对水产品肌肉品质方面有显著提升作用, 可减少不良风味物质的累积, 提升风味、提高鱼肉的质构特性、提升营养品质。

在提升风味方面, 阮秋凤等^[8]证明短期微流水暂养(4~7 d)会改变草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)的代谢通路, 使肌肉中的多不饱和脂肪酸含量、谷氨酸和谷氨酰胺含量显著上升, 降低了引起鱼腥味、青草味的短链醛类含量、(E)-2-辛烯醛含量(油脂味)和 1-庚醇含量(发酵味); 同时鲜味氨基酸、甜味氨基酸和风味核苷酸含量增加, 苦味氨基酸含量降低, 有效提高了草鱼鱼肉的风味品质。陈周等^[9]表明微流水暂养 4 d, 鱼肉中 IMP、鲜味氨基酸(天冬氨酸和谷氨酸)、甜味氨基酸(丝氨酸和丙氨酸)、苦味氨基酸(亮氨酸和异亮氨酸)含量显著增加, 鱼肉气味、滋味评分显著提高。Lv 等^[10]发现微流水暂养 20 d 后, 草鱼肌肉中呈味氨基酸和核苷酸等鲜味物质含量增加, 异味挥发性化合物如壬醛和己醛减少, 有效改善了鱼的风味。高琴等^[11]探究微流水暂养对鳙(*Aristichthys nobilis*)的影响, 发现 6 d 时肌肉中总游离氨基酸含量、甜味氨基酸含量、腺苷酸(AMP)含量和甜菜碱含量提高, 鲜味氨基酸含量也显著增加; 而苦味氨基酸含量、酸味氨基酸含量、次黄嘌呤核苷和次黄嘌呤含量则逐渐降低。总之, 微流水处理显著提高了鳙鱼肌肉鲜味和甜味, 降低了其咸味、苦味和腥味。蔡礼彬等^[13]发现在微流水暂养鲫鱼(*Carassius auratus*) 10 d 过程中, 肌肉的气味特征发生显著改变, 异味挥发物含量明显减少、风味物质含量明显增加。Zhou 等^[14]证明黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco*)禁食暂养 20 d 后, 肌肉中 ADP、AMP、IMP、谷氨酸和牛磺酸含量显著升高, 肉的嫩度和品质显著提高, 而与异味相关的醛、酮类化合物以及与苦味相关的皮质酮均减少, 有效提高了鱼肉的风味。

表 1 净水暂养对不同淡水产品的影响

Table 1 Effect of temporary culturing in clean water on different freshwater products

暂养方式	物种	流速	时间/d	作用	参考文献
微流水暂养	草鱼 (<i>Ctenopharyngodon idella</i>)	置换量 400% d ⁻¹	4~7	多不饱和脂肪酸、谷氨酸、谷氨酰胺含量升高，短链醛类（鱼腥味、青草味）、（E）-2-辛烯醛含量（油脂味）、1-庚醇含量（发酵味）降低；鲜味氨基酸、甜味氨基酸、风味核苷酸含量升高，苦味氨基酸含量降低。	[8]
		置换量 400% d ⁻¹	4	IMP、鲜味氨基酸、甜味氨基酸，鱼肉气味、滋味评分均升高。	[9]
		\	20	呈味氨基酸、核苷酸含量升高，异味挥发性化合物含量降低。硬度、弹性、粘性等质构参数提升，持水能力增强。	[10]
	鳙 (<i>Aristichthys nobilis</i>)	置换量 400% d ⁻¹	6	总游离氨基酸、甜味氨基酸、腺苷酸含量升高。AMP、甜菜碱、鲜味氨基酸含量也升高；苦味氨基酸、酸味氨基酸、次黄嘌呤核苷、次黄嘌呤含量均下降。	[11]
		0.3 m ³ s ⁻¹	50	肌肉硬度升高，黏着性和咀嚼性优于净化初期。	[12]
	鲫鱼 (<i>Carassius auratus</i>)	置换量 400% d ⁻¹	10	异味挥发物降低、风味物质含量增加。肌糖原和总糖降低。	[13]
	黄颡鱼 (<i>Pelteobagrus fulvidraco</i>)	0.8 L·s ⁻¹	20	肌肉中 ADP、AMP、IMP、谷氨酸和牛磺酸含量升高，肉的嫩度和品质提升，而异味化合物（醛、酮类）以及与苦味（皮质酮）降低。肌纤维密度、肌肉硬度、咀嚼性和弹性升高。	[14]
	杂交鮠 (<i>Erythroculter ilishaeformis</i> (♀) × <i>Ancherythroculter nigrocauda</i> (♂) Hybrid F1)	1.2 体长 s ⁻¹	8	α-亚麻酸、花生三烯酸、花生四烯酸、顺-15-二十四碳一烯酸和 n-6 多不饱和脂肪酸含量均上升。	[15]
		\	30	肌肉中氨基酸含量、EPA、DHA 含量增加，挥发性风味物质也增加。	[16]
	大口黑鲈 (<i>Micropterus salmoides</i>)	45 t·h ⁻¹	20	相较于暂养前，暂养 15 d 后鱼肉中粗蛋白、灰分、呈味氨基酸、必需氨基酸、单不饱和脂肪酸含量、EPA + DHA 总量和 ω-3 脂肪酸含量均升高；且土腥味物质在净养 15 d 时已低于感官阈值。且暂养 20 d 鱼肉质构特提升↑。	[17]
循环水暂养	草鱼 (<i>Ctenopharyngodon idella</i>)	2 t·h ⁻¹	28	粗蛋白质含量增加，脂肪含量降低。肌纤维横截面积减少，肌纤维间结缔组织增多，肌肉硬度提升；而肌纤维内和肌纤维间脂滴减少，使得肌肉更加紧实。	[18]
	斑点叉尾鮰 (<i>Ictalurus punctatus</i>)	2 t·h ⁻¹	21	脂肪含量降低；肌纤维横截面积减少，肌纤维间结缔组织增多，肌肉硬度提升。而肌纤维内和肌纤维间脂滴减少，肌肉更加紧实。	[18]

微流水暂养也可以改善肌肉质构。喻亚丽等^[15]发现微流水暂养杂交鮠（*Erythroculter ilishaeformis* (♀) × *Ancherythroculter nigrocauda* (♂) Hybrid F1) 8 d 后，其肌纤维密度、肌肉硬度、咀嚼性和弹性显著提升。胡伟华^[12]表明微流水净化可以改善鳙鱼肌肉口感，具体表现为肌肉硬度显著上升，黏着性和咀嚼性优于净化初期。微流水暂养草鱼 20 d，其硬度、弹性、粘性等质构参数显著提升，肌肉的持水能力也显著提高^[9]。

同样微流水暂养在提升肌肉营养方面也具有显著效果。例如在微流水暂养鲫鱼 10 d 过程中，对肌肉中

水分、粗蛋白质、粗脂肪含量的影响不大，而肌肉中总糖和肌糖原含量均在处理 7 d 后显著下降，灰分增加，说明短时间微流水处理期间鲫主要将肌肉中糖类物质作为能量来源，而对蛋白质和脂肪的分解代谢作用不强，保证了禁食暂养期间的营养保留^[13]。喻亚丽等^[15]发现微流水暂养杂交鮠 8 d 后，肌肉营养品质得到改善，其中 α-亚麻酸、花生三烯酸、花生四烯酸、顺-15-二十四碳一烯酸、n-6 多不饱和脂肪酸含量显著提高，体色和肌肉颜色也得到有效改善。

目前微流水暂养主要在草鱼、鳙鱼、鲫鱼、黄颡鱼等多种淡水经济鱼种，研究发现不同鱼种对微流水

刺激的敏感度存在差异,需要根据鱼体生物学特性调整暂养时长,以达提升鱼类的风味、质构与营养指标的目的。暂养时长与鱼体生物学特性的适配度是品质调控的关键,所以针对目标鱼种的生态习性制定差异化的暂养策略,实现风味-质构-营养三维品质的协同提升是趋势所向。

1.2 循环水暂养

循环水养殖系统通过一系列水处理单元将养殖池中产生的废水处理后再次循环回用,相比于蓄水暂养,循环水可以减少暂养水中的有害物质,减少鱼类体内污染物,延长水产动物存活时间,并提高鱼肉品质。孙丽慧等^[16]证明循环水暂养可提高大口黑鲈肌肉营养品质及风味。循环水暂养大口黑鲈 30 d,可显著提升肌肉中氨基酸含量、以及多不饱和脂肪酸 EPA、DHA 含量,并且肌肉中挥发性风味物质含量暂养时间的延长而增加。周秀珍^[17]探究了循环水净化暂养对大口黑鲈质构特性、营养成分及风味的影响。相较于暂养前,净养 20 d 后内鱼肉质构特性得到提高;15 d 内鱼肉中粗蛋白、灰分、呈味氨基酸、必需氨基酸、单不饱和脂肪酸含量均提高、EPA 和 DHA 总量、 ω -3 脂肪酸含量均显著升高;土腥味物质在暂养 15 d 时已低于感官阈值。杜瑞雪等^[18]在循环水系统中令草鱼禁食 28 d、斑点叉尾鮰 (*Ictalurus punctatus*) 禁食 21 d 的肌肉营养组成和质构特性最佳。暂养后草鱼粗蛋白质含量增加,草鱼和斑点叉尾鮰脂肪含量均降低;肌纤维横截面积减小,肌纤维间结缔组织增多,肌肉硬度增大。而肌纤维内和肌纤维间脂滴减少,肌肉更加紧实。

循环水养殖系统通过动态水质调控与生物净化机制,能够有效优化水产品的营养品质与食用特性。研究表明,合理的暂养周期可显著提升鱼类肌肉的氨基酸组成、多不饱和脂肪酸含量及质构特性,同时降低土腥味物质和脂质沉积。这种品质提升源于水体污染物的减少,鱼体代谢模式发生改变,其营养物质发生再分配与沉积;肌肉组织结构被重塑,肌纤维更加致密。

2 低温暂养对淡水产品生理特征和肌肉品质的影响

温度对水产动物的代谢速率有很大的影响,环境温度直接影响机体新陈代谢的水平。大多数水产动物是冷血动物,都存在临界休眠温度和临界死亡温度,从临界休眠温度到临界死亡温度的这段温度称作生态冰温区。当环境温度降低到生态冰温区,使其处于半

休眠或者完全休眠状态时,能够降低运输过程中的代谢强度,从而达到延长保活时间、提高存活率的目的。低温暂养是短时(数小时至数天)、应急导向的运输适应性手段,其核心在于抑制机体代谢和微生物活动来降低机应激和能量消耗。通常适用于活体运输、市场临时存放等需快速周转的场景,故具有短时、高效、低成本的特点。但长期使用易导致代谢紊乱或免疫力下降,无法改善生物健康状态,把控温度和时间可以更好地平衡存活率与经济效益。

2.1 低温暂养对淡水产品生理特征的影响

对于鱼类而言,低温暂养一方面通过禁食排空肠道内的食物残渣,降低营养物质的消耗,以调节能量代谢和降低氧化应激来提高机体的抗逆能力,减少新陈代谢和耗氧量,延长保活时间,提高存活率。另一方面通过梯度降温对鱼冷驯,使其适应运输环境,最终达到维持机体生理稳态的结果^[19]。因此适当降低暂养温度能够利于维持水产品的生理生化平衡,从而提高存活率。何静怡等^[20]证明在 16 °C 暂养温度下草鱼应激迟缓,水体中氨氮浓度较低,鱼存活率最高。保活 48 h 后血清中谷丙转氨酶 (ALT)、谷草转氨酶 (AST) 含量较低,有效保护了肝功能、降低了肌肉损伤;皮质醇 (COR) 含量降低,抗应激水平提升;葡萄糖 (GLU) 含量降低,能量稳态维持良好;超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (CAT)、谷胱甘肽过氧化物酶 (GSH-Px) 活力最高,MDA 含量较其他温度组显著降低,抗氧化能力显著提升。此外,还发现以 3 °C·h⁻¹ 的降温速率将暂养池温度降低至半休眠温度 16 °C,并在此条件下暂养草鱼 48 h,相比于室温组,16 °C 组水中氨氮含量降低,除 AST 水平外,血清生化指标酸性磷酸激酶 (ALT) 活力、碱性磷酸酶 (AKP) 活力、COR 浓度、GLU 浓度先增加后降低,抗氧化指标 SOD、CAT、GSH-PX 活力也呈现先增加后降低的趋势,此暂养方式利于草鱼恢复生理稳态平衡^[21]。周文等^[22]发现经过 17.2 °C 暂养 7 d 的黄颡鱼,其 COR 水平最低,温度压力小,而 GLU 水平最高,处于非应激性供能模式,故认为 17.2 °C 是暂养黄颡鱼的最佳温度。

对虾、蟹、贝等淡水产品而言,水温对这些甲壳类动物的生理生化过程具有显著性影响,温度变化可能会导致离子和水稳态失衡、神经肌肉功能丧失、细胞脱水 and 代谢途径改变^[23]。杨丰^[24]表明罗氏沼虾 (*Macrobrachium rosenbergii*) 降温至 20 °C 暂养 24 h,水体氨氮含量和总菌数含量上升,鱼肌肉中肌糖原、pH 和 ATP 下降,乳酸升高;血液 ALT 和

AST 含量显著上升; 肝脏总超氧化物歧化酶 (T-SOD) 活性先下降后升高、丙二醛 (MDA) 含量变化趋势则相反, 入水受到的氧化应激在暂养中后期逐渐得到缓解, 抗氧化能力提升。

低温暂养技术通过禁食和温度调控的协同作用, 探究提升水产品存活率、维持其生理稳态并提高水产品福利的最佳方案, 结果证明低温暂养技术的影响因素主要是物种和温度。不同水产品对降温速率、目标温度敏感性差异显著。故未来的研究应聚焦于低温胁迫下代谢机, 通过对比不同水产品的代谢机制, 总结其共通性以得出各物种最佳低温暂养方案。

2.2 低温暂养对淡水产品肌肉品质的影响

经济养殖鱼类的肌肉营养成分的丰富程度和肉质口感被视为评价水产鱼类肌肉品质的核心指标。粗蛋白和粗脂肪含量尤为重要, 其直接影响鱼肉营养价值的高低, 间接反映鱼肉品质^[25]。有研究表明低温可以减弱鱼的呼吸代谢强度, 抑制氨氮物质和乳酸的生成, 使肌肉保持良好化学组成^[26]。也有研究认为低温暂养可以改善肌肉持水性能, 质构特性等方面的品质。陈亚楠等^[27]证明 12 °C 暂养斑点叉尾鲴 7 d, 鱼肉的水分含量、持水力显著提高, pH 值维持稳定, 且肌肉弹性和咀嚼性显著高于其他温度组 (16、20、24 °C)。张瑞霞等^[28]认为低温处理对鲫鱼鱼肉的弹性和粗蛋白含量无影响, 而对鱼肉的持水力、粘聚性、回弹性有正向作用。杨晓^[29]研究了在不同季节下低温暂养 36 h 对团头鲂 (*Megalobrama amblycephala*) 肉质的影响, 发现春季低温 (5 °C) 暂养对团头鲂肌肉粗脂肪、粗蛋白含量以及持水力影响较小, 而温度越低肌肉硬度越大; 夏季低温处理 (11 °C) 对团头鲂肌肉水分、粗蛋白含量以及粘附性、弹性及回弹性影响较小, 而对肌肉中的粗脂肪、肌糖原、可溶性蛋白含量以及持水力、pH 值、硬度有显著影; 而冬季低温暂养仅对水分含量以及鱼肉 pH 值产生影响, 故冬季常温 (10 °C) 暂养即可获得最佳肌肉品质。低温暂养技术通过控温与禁食协同调控, 显著提升水产品存活率及品质。对鱼类, 适度低温可抑制代谢、降低氨氮排放, 激活抗氧化酶维持生理稳态; 甲壳类虽初期出现代谢紊乱 (乳酸积累), 但后期抗氧化能力恢复。水产品种属对降温速率、目标温度敏感性差异显著, 需建立精准暂养模型。未来应深入解析低温代谢机制, 优化暂养参数, 支撑冷链品质保鲜。

3 添加剂暂养对淡水产品生理特征和肌肉品质的影响

3.1 咸水暂养

咸水广泛分布在世界各地的海洋、泻湖、河口、池塘和海岸, 其盐度条件不稳定。根据盐度范围, 水产养殖用水可分为淡水 (盐度 < 0.1‰)、半咸水 (盐度 0.5‰~30‰) 和海水 (盐度 > 35‰)。在鱼类养殖中盐度是影响生理功能、生长性能和免疫调节的关键因素^[30]。盐度是决定不同种类淡水鱼类渗透调节应激水平的最重要特征之一^[31]。盐度的高低在不同程度上影响着水产品的新陈代谢, 鱼类的生存、生长、采食量也与盐度有较大的关联^[32]。盐度的变化对生物有不同的影响, 这取决于压力大小以及不同鱼类调整渗透平衡的能力^[33]。

3.1.1 咸水暂养对淡水产品生理特征的影响

研究发现, 在低盐条件的水域中饲养淡水产品和海水产品会直接影响其生理机能, 可能会导致应激反应增加、生长不良、死亡率增加、免疫反应低和抗病性低等后果^[34], 例如, Miglio 等^[35]发现人工海水可以影响罗氏沼虾的存活率以及对镁和钾的利用率。Okutsu 等^[36]研究表明 3.5‰ 的人工海水可替代盐度为 0.18‰~0.27‰ 的洞穴流水, 能成功培育出自由游动的喻氏沼虾 (*Macrobrachium yui*) 幼虾, 利于促进幼虾的生长发育。而高盐条件也可能对维持淡水鱼类各种组织 (鳃、肾和肠道) 的最佳生物学功能和生长易造成不良影响^[37], 例如, Raza 等^[31]研究表明将鲮鱼 (*Cirrhinus mrigala*) 暴露在 5‰ 和 7‰ 的咸水中 (90 d) 会降低鲮鱼肝脏、肾脏和鳃的不同抗氧化生物标志物, 并增加氧化应激生物标志物, 造成 DNA 损伤。同时部分淡水鱼不能很好地适应盐水养殖系统, 盐度胁迫会对其造成不良影响。例如, Hu 等^[38]证明斑点鲈鱼 (*Lateolabrax maculatus*) 在高盐度 (32‰) 和低盐度 (8‰) 暂养 72 h 的 Na/K-ATP 酶和 MDA 水平均提高, 鳃组织中与免疫应答相关的 *DEGs* 显著下调, 长期盐度胁迫抑制免疫应答。极端盐度环境均会引发水产动物应激反应、生长抑制及免疫损伤, 由于各物种耐盐阈值差异显著, 精准调控盐度利于平衡存活率与健康的关系。

3.1.2 咸水暂养对淡水产品肌肉品质的影响

加盐(常用 NaCl)是减缓应激反应的常见措施,有助于维持水产动物的渗透压平衡,进而保证水产品肌肉品质的优良,特别地表现在肌肉营养组成和风味品质提升方面。Qin 等^[39]研究发现在盐度为 7‰ 的条件下暂养中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*) 15 d,其可食部分游离氨基酸的含量增加,游离核苷酸在肌肉、肝胰腺和性腺中的含量增加,并且肌肉和性腺中的等效鲜味浓度值也显著增加。但同时肌肉和性腺中 PUFA 的比例降低,导致一定的营养流失。Zhang 等^[40]证明在 12‰ 的盐度下暂养 2~4 周,可以改善中华绒螯蟹的肌肉品质。在第 4 周鲜味 FAAs 显示出当量鲜味浓度的最大值,鲜味和咸味离子(Ca^{2+} 和 Cl^-)含量也显著增加;在食用品质方面,暂养 4 周的中华绒螯蟹口感质量最佳。Long 等^[41]发现中华绒螯蟹在不同盐度(0‰、6‰、12‰ 和 18‰)暂养 40 d,可促进肝胰腺中总脂质和中性脂质的积累并改变脂肪酸谱。其中 12‰ 组的肝胰腺中总脂质和中性脂含量最高,肌肉中总脂含量最高。王丹青等^[42]发现 8‰ 海水暂养中华绒螯蟹 2 周,可食部分和采黄率都升高。1~2 周后鲜味氨基酸比例升高,同时味精当量值也表明,海水组鲜味在暂养过程中逐步升高。并且经感官评价后认为雌蟹暂养 2 周后品质最佳。Wang 等^[43]将中华绒螯蟹于淡水(FW)、盐水(SW)和碱性水(AW)育肥 55 d,与 FW 相比,SW 和 AW 雌性甲壳的色泽得到显著改善,性腺和雄性肌肉中的粗蛋白、雌性肌肉中的水分和雄性肌肉中的粗脂质显著增加。雄性肝胰腺和肌肉中也检测到丰富的营养和风味价值,包括冻干甲壳中的类胡萝卜素的积累,雄性肝胰腺和肌肉中 DHA、EPA、总必需游离氨基酸、总游离氨基酸和总鲜味值的含量。

Cheng 等^[44]证明尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)肌肉中脂肪酸和风味氨基酸的含量受环境盐碱度的影响,其比较了在盐水(SW)、碱性水(AW)、盐碱性水(SAW)和淡水(FW)条件下暂养罗非鱼 56 d 肌肉中的脂肪酸和游离氨基酸含量,发现 AW 和 SAW 组 SFA 和 MUFA 含量显著高于 SW 组,其中 EPA 和 DHA 含量在 SAW 组中最高。SAW 和 AW 组风味氨基酸含量也显著高于 SW 组,FW 中脯氨酸含量明显低于其他组。

Weng 等^[45]表明海水驯化(54 h)罗氏沼虾能显著改善淡水虾的风味。和未驯化的淡水虾相比,在整个测试期间,海水驯化淡水虾的盐和游离氨基酸含量稳步增加。感官评定结果显示海水组食用品质较优。Qu 等^[46]以草鱼和青鱼(*Mylopharyngodon piceus*)为研究对

象,分别在 0‰、5‰ 和 7.5‰ 的盐度下暂养 48 h,与淡水组比,7.5‰ 草鱼组肌肉中总氨基酸、Lys、Arg 含量和必需氨基酸指数(EAAI)显著升高。7.5‰ 青鱼组肌肉中风味氨基酸含量和 EAAI 显著高于其他组。在草鱼中,盐水组的 SFA 含量水平显著降低,而 MUFA 和 PUFA 含量显著增加。随着盐度的增加,盐水组的草鱼和黑鱼肌肉中泥土和霉味异味的挥发性化合物的含量显著降低。7.5‰ 草鱼组和 5‰ 青鱼组的肌肉质地特性,如硬度、弹性、胶质和咀嚼性也得到改善。

综合研究表明,在适宜的盐度环境中,淡水产品可通过调节渗透压显著提升水产动物肌肉鲜味物质含量、降低异味、改善质构特性,但同时可能伴随脂质含量和脂肪酸谱的改变。不同物种对盐度响应存在差异,故需要结合暂养时长来优化盐度参数,在保障营养品质与风味提升间寻求平衡。

3.2 微生物制剂暂养

现代水产养殖通常采用集约化水产养殖,该模式伴随高密度化养殖,容易导致水质恶化以及细菌、病毒、寄生虫和其他病原体的扩散,进而影响水生生物的生长和健康,给行业造成重大经济损失。已知较为常见的解决方法是添加抗生素,但是由于抗生素在培养水中难以降解,会在水体、沉积物和养殖生物等环境介质中积累,一方面会破坏水质,另一方面抗生素通过食物链进入人体时会带来潜在的健康风险。并且抗生素的过度使用会使得水生生物致病菌产生细菌耐药性,耐药基因可能在不同细菌物种之间水平转移,导致交叉耐药性^[47]。研究发现,益生菌可作为抗生素的有效替代品。在水产养殖中,水生动物益生菌是由特定细菌或细菌种群混合物形成的微生物,通过调节宿主相关微生物群落或环境微生物群落,提高饲料利用率和营养价值、增强宿主的疾病反应以及改善水体质量,对宿主产生积极影响,包括维持宿主生理稳态以及提高水产品品质^[47,48]。

3.2.1 微生物制剂暂养对淡水产品生理特征的影响

用于水产养殖实践的常见益生菌包括枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)、丁酸梭菌(*Clostridium butyricum*)、多粘类芽孢杆菌(*Paenibacillus polymyxa*)乳酸片球菌(*Pediococcus acidilactici*)、嗜酸乳杆菌(*Lactobacillus acidophilus*)等,这些益生菌参与鱼类的营养、抗病和其他有益影响已被证实^[53]。在养殖水体中添加益生菌对于鱼体的益处有很多,包括(1)改善水质(2)提高饲料的利用率、增加宿主的生长速率(3)缓解氧化应激(4)增强肠道有益菌的多样性以及丰富度、调节宿主新陈代谢(5)增强

机体的免疫力，提高宿主存活率（6）抑制部分真菌感染等^[54]。微生物制剂对淡水鱼生理状态的提升具有显著意义，如表 2，Gupta 等^[49]研究发现多粘类芽孢杆菌可以提高鲤鱼（*Cyprinus carpio*）的存活率，增强了鲤鱼对嗜水曲霉感染的抵抗力。Kord 等^[50]发现商业益生菌显著降低了弧菌数量，提高了池塘水和鱼内脏中的芽孢杆菌数量，通过增强尼罗罗非鱼的肠道形态、抗氧化和免疫生物标志物，显著改善鱼类产量。Hendam 等^[51]表明乳酸片球菌作为水添加益生菌可以增强尼罗罗非鱼的免疫调节基因的表达，在黄曲霉菌（*Aspergillus flavus*）感染期间可以保持较高的存活率。Costa 等^[48]发现在养殖水中加入 0.5% 的枯草芽孢杆菌，可以提高尼罗罗非鱼生长性能、肝糖原水平和肠道细菌定植、降低肝脏 AST 活性、在维持水质以及维持血液学和血浆参数的稳态方面发挥积极作用。Gram 等^[52]用添加荧光假单胞菌（*Pseudomonas fluorescens* AH2）的水体暂养虹鳟鱼（*Oncorhynchus mykiss* Walbaum）5 d，并以安圭拉弧菌攻击，其累计死亡率显著降低，表现出优良的抗病性。Qiu 等^[47]证实嗜酸乳杆菌（*Lactobacillus acidophilus* AC）暂养有效提高了斑马鱼（*Danio rerio*）鳃的离子交换能力，增强了肝脏抗氧化和免疫酶活性。此外，嗜酸乳杆菌显著增强了肠道形态和肠道内消化酶的活性，并且增加对嗜水气单胞菌的抗性。基于水产动物种属特异性，建立益生菌制剂的科学筛选体系，是实现宿主－菌群互作机制精准调控的关键。通过系统评估益生菌株的代谢功能特征、定植能力及其与宿主免疫系统的协同效应，可针对性地构建具有种质适配性的菌群干预方

案，从而最大化益生菌的生长促进、免疫增强及抗病防御等增益效果，同时有效规避菌株功能冗余或宿主特异性排斥引发的潜在风险。

3.2.2 微生物制剂暂养对淡水产品肌肉品质的影响

益生菌可以通过调控水产动物消化酶、改变肠道形态结构以及分泌胞外酶分解食道中的大分子有机物来促进营养物质的吸收，从而影响水产动物肌肉的营养组成。而肌肉营养成分又进一步影响肌肉质构特性，例如肌肉中粗蛋白质含量升高有助于肌原纤维蛋白的生长，肌原纤维蛋白与质构弹性呈正相关，硬度与水分含量呈负相关^[54]。赵怡迪^[55]证明添加复合益生菌暂养鲤鱼 2 周可以增加肌肉中蛋白质和部分氨基酸的含量，改善了肌肉的营养价值。认为复合益生菌可以通过抑制嗜水气单胞菌引起的鲤鱼肌肉蛋白质、氨基酸和脂肪含量的下降，来改善鲤鱼的肌肉营养价值。王朝瑾等^[56]以复合益生菌暂养鲫鱼 32 d，肌肉的蛋白质、灰分含量得到显著提升，证实了复合益生菌对肌肉营养品质的优化作用。Yang 等^[57]补充 10⁹ CFU/kg 蜡样芽孢杆菌（*Bacillus cereus*）可以显著改善鲫鱼肌肉的质地，并且鱼片的硬度、胶质、咀嚼性和弹性随着剂量的增加而增加。Cao 等^[58]证明枯草芽孢杆菌可显著提高鲫鱼肌肉质地，在硬度、弹性、内聚性和咀嚼性等参数上得到改善。Wang 等^[59]添加活性凝结芽孢杆菌（*Bacillus coagulans*）培养白虾（*Litopenaeus vannamei*）50 d，发现其肌肉中粗脂肪含量以及肌苷酸含量均显著高于对照组。综合现有研究表明，复合益生菌制剂通过暂养干预可有效优化淡水产品肌肉组织的营养组成并改善其质构特性。

表 2 微生物制剂对不同淡水鱼的作用

Table 2 Effects of microbial agents on different freshwater fish				
物种	菌种	剂量 / 时间	作用	参考文献
鲤鱼 (<i>Cyprinus carpio</i>)	多粘类芽孢杆菌 (<i>Paenibacillus polymyxa</i>)	10 ³ 和 10 ⁴ CFU/mL 8 周	存活率升高，对嗜水曲霉感染的抵抗力提升。	[49]
	复合商业益生菌	8 周	弧菌数量显著降低，水体和鱼器官中的芽孢杆菌数量降低，肠道形态、抗氧化和免疫生物标志物升高，商业产量增加。	[50]
罗非鱼 (<i>Oreochromis niloticus</i>)	乳酸片球菌 (<i>Pediococcus acidilactici</i>)	0.3 g·L ⁻¹ 8 周	免疫调节基因表达提高，对黄曲霉菌的抗性增强。	[51]
	枯草芽孢杆菌 (<i>Bacillus subtilis</i>)	0.5% 45 d	提高生长性能、肝糖原水平和肠道细菌定植、肝脏 AST 活性增强，维持水质以及维持血液学和血浆参数的稳态能力提高。	[48]
虹鳟鱼(<i>Oncorhynchus mykiss</i> Walbaum)	荧光假单胞菌 (<i>Pseudomonas fluorescens</i> AH2)	10 ⁴ ~10 ⁵ CFU/mL 5 d	对安圭拉弧菌感染的抵抗力降低	[52]
斑马鱼 (<i>Danio rerio</i>)	嗜酸乳杆菌 (<i>Lactobacillus acidophilus</i> AC)	10 ⁵ 、10 ⁶ 和 10 ⁷ CFU/mL 32 d	鳃的离子交换能力提高，肝脏抗氧化和免疫酶活性增强。	[47]

3.3 天然抗氧化剂暂养

水生生物极易受到环境变化引起的应激反应,产生不同的有毒自由基,造成不利影响,包括脂肪酸氧化,产生MDA等。大量研究表明,天然抗氧化剂可以缓解鱼体所受到的氧化应激反应,可以有效改善鱼类的生长、免疫力、抗氧化性、抗逆性,并进一步改善鱼类的肌肉品质^[60]。Keap1/Nrf2/ARE信号通路被认为是在身体各个器官中发挥抗氧化作用的主要机制(图1)^[61]。核因子-E2-相关因子2(Nrf2)作为关键的抗氧化转录因子,其作用主要是调节抗氧化酶表达^[62,63]。在生理条件下,Nrf2的负调节因子Kelch样ECH关联蛋白1(Keap1)抑制了Nrf2的转录活性。机体受到氧化应激时,Nrf2易位到细胞核,在细胞核内Nrf2与抗氧化反应元件(ARE)结合,促进了酶促抗氧化系统中超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)的活性以及非酶促抗氧化系统中谷胱甘肽(GSH)谷胱甘肽过氧化物酶(GPX-SH)的活性^[64,65]。核因子- κ B(NF- κ B)对于氧化应激反应较为敏感,是关键的转录因子。机体受到氧化应激时,NF- κ B在细胞核内与特定的启动子区域结合以启动转录,促进炎症因子的产生^[66]。例如,通过抗氧化剂激活Keap1/Nrf2/ARE信号通路下调弹性蛋白酶诱导的肺气肿大鼠的NF- κ B信号传导和炎症反应^[63]。几种蛋白激酶,如磷酸肌醇-3-激酶(PI3K)/蛋白质激酶B(Akt)、丝裂原活化蛋白激酶(MAPK)和5'-腺苷单磷酸活化蛋白激酶(AMPK),促进Nrf2磷酸化,导致Nrf2从Keap1释放^[67]。抗氧化剂通过抑制MAPK/NF- κ B通路和激活脂多糖(LPS)刺激的巨噬细胞中的Akt/AMPK/Nrf2通路来增强抗氧化防御^[68]。

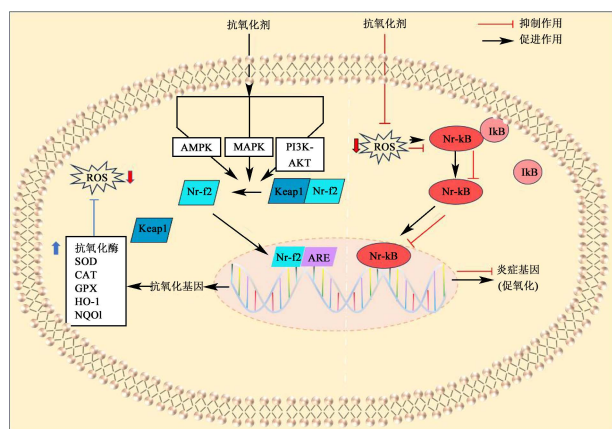


图1 天然抗氧化剂的作用机制

Fig.1 Mechanism of action of natural antioxidants

3.3.1 维生素C暂养

3.3.1.1 维生素C暂养对淡水产品生理特征的影响

Vc又称为抗坏血酸,它参与体内多种羟化反应、氧化还原反应,对促进水产动物生长,对提高免疫力和抗应激能力具有重要作用^[69]。水产动物受外界环境刺激而产生应激反应会使机体分泌大量皮质醇,而Vc对皮质醇具有很好的调节作用,能有效缓解机体的应激反应^[70]。抗氧化剂暂养可作用于应激发生前,也可作用于应激发生后。在应激发生前加入抗氧化剂暂养,能够提高机体本身的抗应激能力,当应激发生时则能够更好维持生理稳态,从而维持鱼的健康状态、提高存活率。Peng等^[71]以Vc暂养银鲳鱼(*Pampus argenteus*)9周后接受应激,发现其血清皮质醇、葡萄糖水平和血清乳酸水平相对稳定;而未添加Vc暂养的CK组血清皮质醇浓度和葡萄糖浓度显著升高。证明给予高剂量的维生素C暂养可以缓解银鲳鱼的应激,并提高鱼类在应激条件下的存活率。Daniel Okamura等^[72]在模拟运输前添加不同剂量的Vc(16、500和1 000 mg·kg⁻¹)暂养尼罗罗非鱼14 d,发现1 000 mg·kg⁻¹组模拟12 h后血糖显著低于其他组,证明添加1 000 mg·kg⁻¹的Vc暂养后有效提高了尼罗罗非鱼调控血糖的能力。Ming等^[73]添加Vc暂养团头鲂(*Megalobrama amblycephala*)60 d,与对照相比,Vc组的增重和比生长率、血清总蛋白、溶菌酶、AKP水平、肝脏SOD活性和HSP70 mRNA表达水平显著升高,COR、甘油三酯(TG)和MDA含量下降。证明Vc暂养可促进团头鲂的生长,提高鱼类非特异性免疫力、抗氧化能力和抗应激水平。水产品接受应激后,机体通过启动相应的应激应答系统来缓解损伤。水产品经转运后生理稳态被破坏,此时添加抗氧化剂暂养,可加速机体回到生理稳态以缓解应激损伤。汪兰等^[74]证明添加10 mg·L⁻¹的Vc暂养黄颡鱼5 d,血清中SOD、CAT、GSH、GSH-PX活性显著提高,MDA含量降低;肌肉中SOD、GSH活性与血清中结果变化相同,其抗氧化能力显著提高。Yang等^[75]证明在运输水体中或者暂养水体中加入Vc均能在不同程度上提高斑节对虾(*Penaeus monodon*)的存活率,抗氧化能力升高,鳃组织血细胞疾病减轻,膈肌逐渐变窄,角状皮层逐渐恢复,肿胀减轻,当Vc添加量达到333 mg·L⁻¹时,血细胞排列规则,肿胀程度减小并趋向正常水平。Vc添加暂养对水产动物的生理特征有显著性改善,但其代谢机制和潜在影响尚未明确,后续需系统性研究其残

留效应, 确保可持续应用。

3.3.1.2 维生素 C 暂养对淡水产品肌肉品质的影响

维生素 C 作为脯氨酸羟化酶和赖氨酸羟化酶的辅酶参与胶原蛋白形成, 而胶原蛋白是结缔组织、上皮组织的重要成分, 其含量与鱼肉结构、柔韧性、强度和肌肉质地密切相关。吴金平等^[76]添加适量的 Vc 长期暂养 (84 d) 杂交鲟, 能显著改善杂交鲟幼鱼的硬度、咀嚼性、回复性、黏附性。徐慧君^[77]证明适宜水平的维生素 C 能提高草鱼肌肉的鲜味和营养价值, 肌肉中必需氨基酸和鲜味氨基酸含量增加。汪兰等^[74]证明 Vc 暂养黄颡鱼 5 d 后, 其持水力增强, 剪切力、硬度、弹性、咀嚼性、黏性均提高。吴凡等^[78]添加 Vc 长期养殖 (56 d) 吉富罗非鱼, 能显著改善其肌肉品质。其中 300 mg·kg⁻¹ 组肌肉的弹性和咀嚼性显著提升, Vc 添加量为 1 500 mg·kg⁻¹ 时, 肌肉硬度、凝聚性、弹性、黏性、咀嚼性均显著高于未添加组。尽管 Vc 通过促进胶原蛋白合成有效提升了鱼类肌肉质构特性, 但其剂量效应机制与种属差异仍需深入解析。未来需结合多组学技术揭示 Vc 调控胶原代谢的关键通路, 优化与其它营养素的协同配方, 并开发基于生长阶段和环境因子的智能投喂系统, 推动技术规模化应用。

3.3.2 维生素 E 暂养

3.3.2.1 维生素 E 暂养对淡水产品生理特征的影响

VE 又称生育酚, 是一种天然的抗氧化剂, 能够清除体内多余的氧自由基, 减缓脂类氧化, 在水产养殖中起到良好的抗氧化、抗应激作用。同时也是一种维生素类免疫增强剂, 对提高水产动物的免疫同样具有重要作用^[79]。Dandapat 等^[80]证明 VE 可以提高淡水虾 (*Microtrichium rosenberger*) 的抗氧化防御系统, 膳食添加 VE 后, 鳃中 SOD 活性、CAT 活性显著降低、谷胱甘肽还原酶活性降低、GSH 含量显著升高。肝胰腺中 GSH-PX、GSH 活性显著升高、SOD 活性降低。D. Montero^[81]等证明喂食 VE 的鱼在在极性应激下血浆皮质醇水平升高更缓慢, 存活率提高, 血液中性粒细胞产生的氧自由基增多, 具有较高的抗逆性。Huang 等^[82]以不同添加量 (0~300 IU·kg⁻¹) 的 α -生育酚乙酸酯饮食持续饲养罗非鱼 14 周, 发现 CK 组 (0 IU·kg⁻¹) 鱼肌肉和肝脏组织的硫代巴比妥酸 (TBARS) 含量显著高于实验组 (40~300 IU·kg⁻¹), 表明 VE 补充剂增加了罗非鱼肌肉和组织中脂质的抗氧化能力。VE 通过其抗氧化-免疫调控协同效应, 不仅能显著提升水产动物抗氧化性能, 还可通过调节应激激素水平增强机体抗逆能力, 为水产养殖健康调控体系的构建提供初步的理论依据。

3.3.2.2 维生素 E 暂养对淡水产品肌肉品质的影响

VE 作为一种脂溶性断链抗氧化剂, 能够维持生物膜中磷脂层结构中多不饱和脂肪酸稳定性, 维持细胞膜的完整和稳定, 进而改善肌肉品质^[83]。VE 暂养对鱼类肌肉品质影响的研究较少, 唐家铭等^[84,85]认为添加 VE 暂养鲫鱼能够增强鱼体对外界刺激的适应能力, 缓解冷应激导致的肌纤维结构松散。并且在不同的温度下, VE 处理组的硬度、弹性、咀嚼性均显著低于对照组, 表明经 VE 暂养的鲫鱼在接受环境应激后肌肉品质能得到保障。Wu 等^[86]表明添加 40 mg·kg⁻¹ VE 长期暂养 (8 周) 的罗非鱼, 肌肉中的蛋白质占比显著提高, 肌肉质地特征也得到改善, 肌肉的内聚力、弹性和咀嚼性显著提高。VE 通过膜稳定与肌纤维保护的双重效应, 为水产动物肌肉品质调控提供了新思路。

三种暂养方式在鱼类运输与暂养中各有其优势与局限, 其适用性需基于鱼类生理特性、运输场景及成本效益综合决策。净水暂养通过物理过滤维持水质, 适合短途运输及广温性鱼类, 但依赖高成本设备与持续监测; 低温暂养通过抑制代谢延长存活时间, 是中长途运输冷水性鱼类的首选, 但需防范温度波动与冷应激; 添加剂暂养以化学调控提升抗逆性, 操作灵活且成本低, 但需严格把控药物残留风险。实际应用中, 可结合复合模式如低温+抗氧化剂, 动态调控如分段降温、菌群预培养, 实现效益最大化, 同时需针对物种的生理阈值, 以及地域水质、季节变化等环境变量进行精准适配。未来优化方向应聚焦于智能化监控技术与生态友好型添加剂的研发, 以提升暂养效率并降低生态风险。

4 展望

尽管现有研究已证实暂养技术能有效缓解淡水鱼捕捞后的氧化应激反应, 并通过调节生理代谢提升存活率及肌肉品质, 但当前研究视角仍存在一定局限性。未来研究需着重关注以下方向: 首先, 应系统解析净水暂养对鱼体生理生化机制的动态影响, 特别是应激相关酶系 (如 SOD、CAT 等抗氧化酶) 的活性变化规律及其与能量代谢网络 (如糖酵解、脂质氧化途径) 的交互作用, 同时结合代谢组学等技术揭示暂养过程中关键代谢物的消长规律。其次, 需深入探讨添加剂暂养 (如天然抗氧化剂、离子调节剂、微生物制剂) 对肌肉组织微观结构、质构特性及风味物质形成的双重调控效应, 建立添加剂浓度-暂养时长-品质指标之间的数学模型。此外, 应加强暂养环境参数 (如水温、溶氧、光照周期) 与鱼体应激响应的关联研究, 开发

基于多组学联用的生物标志物筛选体系,为精准制定暂养方案提供理论支撑。

值得注意的是,未来研究应突破单一因素考察的局限,采用响应面分析法等多元统计手段,综合评价暂养方式对生理状态与食用品质的协同影响机制,并着重开展不同鱼种特异性响应的比较研究。通过构建“应激调控-代谢重塑-品质形成”三位一体的理论框架,将有助于开发智能化暂养监控系统,推动淡水鱼保活运输技术向标准化方向发展,最终实现食品安全与产业效益的双重提升。并且后续研究应进一步结合经济学分析与生命周期评价,优化暂养技术的成本效益比及环境友好性,为淡水渔业可持续发展提供科技支撑。

参考文献

- [1] 农业部渔业局.中国渔业年鉴2024[M].北京:中国农业出版社,2024.
- [2] 袁仲瑾,岑剑伟,李来好,等.低温暂养对珍珠龙胆石斑鱼存活、非特异性免疫及抗氧化指标的影响[J].南方水产科学,2022,18(6):118-126.
- [3] 张亮子,黄泽南,尤娟,等.保活运输应激对水产动物肌肉品质影响的研究进展[J].广东海洋大学学报,2024,44(1):35-43.
- [4] 张亮子,黄泽南,尤娟,等.鱼类运输应激反应及其对存活率影响研究进展[J].广东海洋大学学报,2024,44(2):24-31.
- [5] TRBOVIĆ D, MARKOVIĆ Z, MILOJKOVIĆ-OPSENICA D, et al. Influence of diet on proximate composition and fatty acid profile in common carp (*Cyprinus carpio*) [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2013, 31(1): 75-81.
- [6] LI H L, CHEN Y N, LI M J, et al. Effects of temporary rearing with organic selenium on the muscle flavor and texture properties of largemouth bass (*Micropterus salmonides*) [J]. Food Chemistry, 2022, 397: 133747.
- [7] PAN Y Y, LIU C, HONG Y W, et al. Natural versus artificial seawater: Impacts on antioxidant capacity, muscle quality and gut microbiota of *Acanthopagrus schlegelii* during temporary rearing [J]. Aquaculture, 2024, 585(15): 740699.
- [8] 阮秋凤,安玥琦,陈周,等.短时间微流水处理对草鱼鱼肉风味品质的影响[J].食品科学技术学报,2021,39(3):30-42,51.
- [9] 陈周.短时间微流水处理对池塘养殖草鱼鱼肉品质的提升作用[D].武汉:华中农业大学,2020.
- [10] LV H, HU W H, XIONG S B, et al. Depuration and starvation improves flesh quality of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) [J]. Aquaculture Research, 2018, 49(9): 3196-3206.
- [11] 高琴,安玥琦,陈周,等.短时微流水处理对池塘养殖鳊鱼肌肉滋味品质的影响[J].水生生物学报,2021,45(5):1057-1066.
- [12] 胡伟华,吕昊,樊启学,等.净化时间对微流水系统中鳊品质影响的研究[J].水生生物学报,2019,43(5):1056-1061.
- [13] 蔡礼彬,任章睿,吕昊,等.短时间微流水处理对异育银鲫肌肉品质的影响[J].华中农业大学学报,2020,39(4):128-136.
- [14] ZHOU Y, XIONG Y, HE X L, et al. Depuration and starvation regulate metabolism and improve flesh quality of yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*) [J]. Metabolites, 2023, 13(11): 1137.
- [15] 喻亚丽,李清,张浪,等.短期微流水处理对池塘养殖杂交鲂“先锋1号”肌肉品质的影响[J].渔业科学进展,2024,45(2):245-256.
- [16] 孙丽慧,包成荣,李倩,等.工厂化循环水养殖模式对大口黑鲈肌肉营养成分和挥发性风味物质的影响[J].动物营养学报,2024,36(5):3192-3208.
- [17] 周秀珍,张毅,周钦,等.循环水净化养殖过程中大口黑鲈生长及肌肉品质变化[J].食品科学,2024,45(11):75-83.
- [18] 杜瑞雪,叶元士,张玮岚,等.循环水系统短期禁食改善草鱼和斑点叉尾鲴肌肉品质[J].中国渔业质量与标准,2023,13(5):17-30.
- [19] 何静怡,魏涯,岑剑伟,等.活鱼长途运输关键技术及多组学技术在运输应激评价的研究进展[J].食品与发酵工业,2023,49(16):305-313.
- [20] 何静怡,郑伟,黄卉,等.不同温度、盐度条件对草鱼暂养及应激保活的影响[J].大连海洋大学学报,2024,39(4):597-605.
- [21] 何静怡,魏涯,岑剑伟,等.基于梯度降温的草鱼暂养及有水保活运输技术[J].食品科学,2024,45(4):271-278.
- [22] 周文,廖涛,朱子健,等.不同鱼体大小、暂养温度、麻醉方式对黄颡鱼麻醉的影响[J].渔业现代化,2022,49(2):102-112.
- [23] REN X Y, WANG Q, SHAO H X, et al. Effects of low temperature on shrimp and crab physiology, behavior, and growth: a review [J]. Frontiers in Marine Science, 2021, 8: 746177.
- [24] 杨丰.罗氏沼虾保活技术与保鲜工艺的研究[D].上海:上海海洋大学,2020.
- [25] JIANG W D, CHEN L, LIU Y, et al. Impact and consequences of dietary riboflavin deficiency treatment on flesh quality loss in on-growing grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) [J]. Food & Function, 2019, 10(6): 3396-3409.
- [26] 彭玲,尤娟,熊光权,等.物流运输对鱼类肌肉品质影响研究进展[J].肉类研究,2021,35(12):54-63.
- [27] 陈亚楠,李海蓝,鉏晓艳,等.暂养环境因子对斑点叉尾鲴肌肉理化性质与质构特性的影响[J].肉类研究,2021,35(8)9-15.
- [28] 张瑞霞,张娟,熊善柏,等.低温处理对鲫生化特性及肉质的影响[J].华中农业大学学报,2008,4:532-535.
- [29] 杨晓.低温处理对团头鲂肉质及血液生化特性的影响[D].武汉:华中农业大学,2011.
- [30] FANG Y C, CHAN V K S, HINES C W, et al. The effects of salinity and photoperiod on aerobic scope, hypoxia tolerance and swimming performance of coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*) reared in recirculating aquaculture systems [J]. Comparative Biochemistry and Physiology A-Molecular & Integrative Physiology, 2019, 231: 82-90.
- [31] RAZA G A, GHAFFAR A, HUSSAIN R, et al. Nuclear and morphological alterations in erythrocytes, antioxidant enzymes, and genetic disparities induced by brackish water in mrigal carp (*Cirrhinus mrigala*) [J]. Oxidative Medicine and Cellular Longevity, 2022, 16: 4972622.
- [32] AKHTAR M S, PAL A K, SAHU N P, et al. Physiological responses of dietary tryptophan fed Labeo rohita to temperature and salinity stress [J]. Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition, 2013, 97(6): 1075-1083.
- [33] ZHOU T J, MENG Q, SUN R J, et al. Structure and gene expression changes of the gill and liver in juvenile black porgy (*Acanthopagrus*

- schlegelii*) under different salinities [J]. Comparative Biochemistry and Physiology D-Genomics & Proteomics, 2024, 50: 101228.
- [34] SEMRA K C U K. The effects of salinity on growth of goldfish, *Carassius auratus* and crucian carp, *Carassius carassius* [J]. African Journal of Biotechnology, 2013, 12: 16.
- [35] MIGLIO M C, ZAGA B, GASTELU J C, et al. Survival and metamorphosis of giant river prawn *Macrobrachium rosenbergii* larvae in a commercial recirculation system with artificial seawater [J]. Aquaculture Research, 2021, 52(12): 6063-6073.
- [36] OKUTSU T, CHANTHASONE P, PHOMMACHAN P, et al. Use of artificial seawater in the rearing of the fluvial prawn *Macrobrachium yui* larvae [J]. Aquaculture International, 2018, 26(1): 325-335.
- [37] SOLIMAN M M, M A TAWFIK, AND M E RADWAN. Effect of some engineering parameters on the eggs incubation of common carp (*Cyprinus carpio* Linnaeus) [J]. Zagazig Journal of Agricultural Research, 2019, 46: 40955
- [38] HU W J, CAO Y, LIU Q G, et al. Effect of salinity on the physiological response and transcriptome of spotted seabass (*Lateolabrax maculatus*) [J]. Marine Pollution Bulletin, 2024, 203: 116432.
- [39] QIN K X, RUAN T S, CHEN Y H, et al. Effects of temporary rearing time under salinity 7 on the non-volatile flavorings and fatty acids of *Eriocheir sinensis* [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2022, 107: 104366.
- [40] ZHANG L, YIN M Y, ZHENG Y, et al. Short-term rearing in brackish water regulates the taste-related metabolites of abdomen muscle for adult male *Eriocheir sinensis* [J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 142: 110898.
- [41] LONG X W, WU X G, ZHU C S, et al. Salinity can change the lipid composition of adult Chinese mitten crab after long-term salinity adaptation [J]. Plos One, 2019, 14(7): 0219260.
- [42] 王丹青,张龙,吴旭干,等.8‰低盐度海水暂养对中华绒螯蟹雌蟹肌肉滋味品质的影响[J].食品工业科技,2018,39(5):1-6,12.
- [43] WANG S H, GUO K, LUO L, et al. Fattening in saline and alkaline water improves the color, nutritional and taste quality of adult Chinese mitten crab *Eriocheir sinensis* [J]. Foods, 2022, 11(17): 2573.
- [44] CHENG Y, ZHAO J, AYISI C L, et al. Effects of salinity and alkalinity on fatty acids, free amino acids and related substance anabolic metabolism of *Nile tilapia* [J]. Aquaculture and Fisheries, 2022, 7(4): 389-395.
- [45] WENG H J, CADWALLADER K R, BAEK H H, et al. Manipulating the flavor of freshwater crustacea using postharvest seawater acclimation [J]. Flavor and Lipid Chemistry of Seafoods. American Chemical Society, 1997, 674: 120-130.
- [46] QU L T, XIA T, DU X X, et al. Effects of salinity treatment on muscle quality and off-flavour compounds of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) and black carp (*Mylopharyngodon piceus*) [J]. Aquaculture Research, 2022, 53(13): 4823-4831.
- [47] QIU H Y, HUANG L, WANG H Y, et al. Effects of *Lactobacillus acidophilus* AC on the growth, intestinal flora and metabolism of zebrafish (*Danio rerio*) [J]. Fish & Shellfish Immunology, 2024, 149: 109570.
- [48] COSTA T S, COPATTI C E, DA SILVA J J, et al. Use of *Bacillus subtilis* multiply in the water used for biofloc formation: growth, hemato-biochemistry, intestinal bacteria colonies, and bacterial resistance evaluations of *Nile tilapia* [J]. Aquaculture, 2024, 590: 741039.
- [49] GUPTA A, GUPTA P, DHAWAN A. *Paenibacillus polymyxa* as a water additive improved immune response of *Cyprinus carpio* and disease resistance against *Aeromonas hydrophila* [J]. Aquaculture Reports, 2016, 4: 86-92.
- [50] KORD M I, MAULU S, SROUR T M, et al. Impacts of water additives on water quality, production efficiency, intestinal morphology, gut microbiota, and immunological responses of *Nile tilapia* fingerlings under a zero-water-exchange system [J]. Aquaculture, 2022, 547: 737503.
- [51] HENDAM B M, MUNIR M B, EIISA M E H, et al. Effects of water additive probiotic, *Pediococcus acidilactici* on growth performance, feed utilization, hematology, gene expression and disease resistance against *Aspergillus flavus* of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) [J]. Animal Feed Science and Technology, 2023, 303: 115696.
- [52] GRAM L, MELCHIORSEN J, SPANGGAARD B, et al. Inhibition of vibrio anguillarum by *Pseudomonas fluorescens* AH2, a possible probiotic treatment of fish [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1999, 65(3): 969-973.
- [53] NAYAK S K. Probiotics and immunity: a fish perspective [J]. Fish Shellfish Immunol, 2010, 29(1): 2-14.
- [54] 周秀珍,刘滔,张毅,等.混合益生菌对大口黑鲈生长性能、肉质及肠道健康的影响[J].动物营养学报,2024,36(7):4588-4609.
- [55] 赵怡迪.复合益生菌改善鲤肠道健康、生长性能及肉质研究[D].新乡:河南师范大学,2021.
- [56] 王朝瑾,赖雪萍,康梅花,等.混合益生菌对鲫鱼生长和肌肉营养成分的影响[J].氨基酸和生物资源,2011,33(3):52-55.
- [57] YANG G, CAO H Z, JIANG W H, et al. Dietary supplementation of *Bacillus cereus* as probiotics in Pengze crucian carp (*Carassius auratus* var. Pengze): effects on growth performance, fillet quality, serum biochemical parameters and intestinal histology [J]. Aquaculture Research, 2019, 50(8): 2207-2217.
- [58] CAO H Z, YU R H, ZHANG Y Y, et al. Effects of dietary supplementation with β -glucan and *Bacillus subtilis* on growth, fillet quality, immune capacity, and antioxidant status of Pengze crucian carp (*Carassius auratus* var. Pengze) [J]. Aquaculture, 2019, 508: 106-112.
- [59] WANG Y B, FU L L, LIN J D. Probiotic (*Bacillus coagulans*) cells in the diet benefit the white shrimp *litopenaeus vannamei* [J]. Journal of Shellfish Research, 2012, 31(3): 855-860.
- [60] GHAFARIFARSANI H, HOSEINIFAR S H, ADHAMI B, et al. Dietary gallic acid influences serum enzymatic parameters and immunological responses in *Cyprinus carpio* exposed to crowding stress [J]. Aquaculture Reports, 2023, 30: 101630.
- [61] XIANG, Z., GUAN H., ZHAO X., et al. Dietary gallic acid as an antioxidant: A review of its food industry applications, health benefits, bioavailability, nano-delivery systems, and drug interactions [J]. Food Research International, 2024, 180: 114068.
- [62] MOJADAMI S, AHANGARPOUR A, MARD S A, et al. Diabetic nephropathy induced by methylglyoxal: gallic acid regulates kidney microRNAs and glyoxalase1-Nrf2 in male mice [J]. Archives of Physiology and Biochemistry, 2021, 4: 1-8.

- [63] SOHRABI F, DIANAT M, BADAVIDI M, et al. Gallic acid suppresses inflammation and oxidative stress through modulating Nrf2-HO-1-NF- κ B signaling pathways in elastase-induced emphysema in rats [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(40): 1-13.
- [64] OJEABURU S I, ORIAKHI K. Hepatoprotective antioxidant and anti-inflammatory potentials of gallic acid in carbon tetrachloride-induced hepatic damage in Wistar rats [J]. Toxicology Reports, 2021, 8: 177-185.
- [65] SINGLA E, DHARWAL V, NAURA A S. Gallic acid protects against the COPD-linked lung inflammation and emphysema in mice [J]. Inflammation Research, 2020, 69(5): 423-434.
- [66] BELLEZZA I, GIAMBANCO I, Minelli A, et al. Nrf2-Keap1 signaling in oxidative and reductive stress [J]. Biochimica Et Biophysica Acta Molecular Cell Research, 2018, 1865(5): 721-733.
- [67] CAI H Y, LIU H M, et al. Protective mechanism of humanin against oxidative stress in aging-related cardiovascular diseases [J]. Frontiers in Endocrinology, 2021, 12: 683151.
- [68] TANAKA M, KISHIMOTO Y, SASAKI M, et al. *Terminalia bellirica* (Gaertn.) roxb. extract and gallic acid attenuate LPS-induced inflammation and oxidative stress via MAPK/NF- κ B and Akt/AMPK/Nrf2 pathways [J]. Oxidative Medicine & Cellular Longevity, 2018, 2018: 1-15.
- [69] 李勇男.水中添加维生素C缓解鲤鱼运输应激的研究[D].无锡:江南大学,2016.
- [70] 刘佳,卢玉婷,王楠,等.饲料中添加维生素C对鱼类生长、免疫及抗应激能力影响的研究进展[J].水产科技情报,2020,47(5):289-291,300.
- [71] PENG S M, SHI Z H, FEI Y, et al. Effect of high-dose vitamin C supplementation on growth, tissue ascorbic acid concentrations and physiological response to transportation stress in juvenile silver pomfret, *Pampus argenteus* [J]. Journal of Applied Ichthyology, 2013, 29(6): 1337-1341.
- [72] OKUMURA D, ARAUJO F G, LOGATO P V R, et al. Effect of vitamin C over the haematocrit and glycemia of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) alevins in simulated transport [J]. Arquivo Brasileiro De Medicina Veterinaria E Zootecnia, 2007, 59(4): 883-888.
- [73] MING J, XIE J, XU P, et al. Effects of emodin and vitamin C on growth performance, biochemical parameters and two HSP70s mRNA expression of Wuchang bream (*Megalobrama amblycephala* Yih) under high temperature stress [J]. Fish & Shellfish Immunology, 2012, 32(5): 651-661.
- [74] 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.
- [75] YANG W L, JIANG S, YANG Q B, et al. Effects of vitamin C on transport of *Penaeus monodon* [J]. Israeli Journal of Aquaculture-Bamidgeh, 2023, 75: 75186.
- [76] 吴金平,阮瑞,陈细华,等.饲料维生素C添加水平对杂交鲟幼鱼生长性能、肌肉品质和抗氧化指标的影响[J].动物营养学报,2020, 32(1):455-462.
- [77] 徐慧君.维生素C对生长中期草鱼生产性能、肠道、机体和鳃健康以及肉质的作用及其作用机制[D].成都:四川农业大学, 2016.
- [78] 吴凡,文华,蒋明,等.饲料维生素C水平对吉富罗非鱼生长性能、肌肉品质和抗氧化功能的影响[J].中国水产科学,2015,22(1):79-87.
- [79] 孙敬诚.维生素E和水温对花鲈生长、免疫、抗氧化及耐低氧胁迫的影响[D].厦门:集美大学,2020.
- [80] DANDAPAT J, CHAINY G B, RAO K J. Dietary vitamin E modulates antioxidant defence system in giant freshwater prawn, *Macrobrachium rosenbergii* [J]. Comparative Biochemistry and Physiology Toxicology & Pharmacology: CBP, 2000, 127(1): 101-115.
- [81] MONTERO D, TORT L, ROBAINA L, et al. Low vitamin E in diet reduces stress resistance of gilthead seabream (*Sparus aurata*) juveniles [J]. Fish & Shellfish Immunology, 2001, 11(6): 473-490.
- [82] HUANG C H, HUANG S L. Effect of dietary vitamin E on growth, tissue lipid peroxidation, and liver glutathione level of juvenile Hybrid tilapia, *Oreochromis niloticus* $\times$ *O. aureus*, fed oxidized oil [J]. Aquaculture, 2004, 237(1-4): 381-389.
- [83] 饶盛达.不同维生素组合和饲养密度对肉鸡生产性能、健康和肉质质的影响研究[D].成都:四川农业大学,2015.
- [84] 唐家铭,蒋乐霞,张长峰,等.维生素E对鲫鱼生理生化、肌肉质构及风味的影响及其缓解降温胁迫作用研究[J].食品与发酵工业,2023,49(19):226-234.
- [85] 唐家铭,蒋乐霞,张长峰,等.维生素E对鲫鱼降温胁迫下脑组织氧化应激、抗氧化指标及肌肉组织结构的影响[J].食品与发酵工业,2024,50(13):217-222.
- [86] WU F, JIANG M, WEN H, et al. Dietary vitamin E effects on growth, fillet textural parameters, and antioxidant capacity of genetically improved farmed tilapia (GIFT), *Oreochromis niloticus* [J]. Aquaculture International, 2017, 25(2): 991-1003.