

鱼类保活运输及其对肌肉和血液生理生化指标影响研究进展

刘 峰¹, 王舒淇¹, 朱绍彰¹, 张永军², 刘春娥^{1*}

(1. 中国农业大学烟台研究院, 烟台 264670; 2. 山东青年政治学院信息工程学院, 济南 250103)

摘 要: 随着水产品冷链物流技术的发展, 作为其重要组成部分, 保活运输的关键点已不仅是成活率和生理生化指标, 运输过程对水产动物营养和品质的影响也至关重要。本文通过综述不同鱼类在有水保活和无水保活运输方法下, 运输条件对鱼肉蛋白质、脂肪、糖原、pH 的影响机制以及保活运输前后鱼体内主要生理生化指标的变化, 发现温度对保活运输鱼类存活的影响非常大, 最佳存活温度与鱼类品种密切相关; 保活运输过程中, 鱼体的 3 大供能物质及血液生化指标都会发生较大变化, 大多数指标在运输结束鱼体复苏后基本都有所恢复, 恢复的程度取决于鱼种、运输方法、运输温度和运输时长。本文通过对鱼类保活运输品质控制的相关研究进行总结, 为改善鱼类保活运输技术提供重要的参考依据和指导方案。

关键词: 鱼类; 保活运输; 肌肉; 生理生化

Research progress on the live transportation of fish and its effect on muscle and physiological and biochemical indexes of blood

LIU Feng¹, WANG Shu-Qi¹, ZHU Shao-Zhang¹, ZHANG Yong-Jun², LIU Chun-E^{1*}

(1. Institute of Yantai, China Agricultural University, Yantai 264670, China; 2. Information Engineering College, Shandong Youth University of Political Science, Jinan 250103, China)

ABSTRACT: With the development of cold chain logistics technology of aquatic products, the key point of the live transportation is not only the survival rate and biochemical indicators, but also the nutrition and quality of aquatic products affected by the transportation process. This paper reviewed different fish live transport methods with water conservation or not, the influence mechanism of the preservation process on protein, fat, glycogen and pH value of fish and changes of main physiological and biochemical indexes of fish before and the preservation transport, found that temperature was very important to the survival of fish and the best survival temperature was closely related to the fish species. The energy and blood biochemical indicators of fish would change a lot during the live transportation. Most indicators would basically recover after the recovery of the fish at the end of transportation and the degree of recovery depended on the species, transportation methods, transportation temperature and transportation time. This paper summarized the relevant research on fish preservation transportation so as to provide important reference basis and guidance scheme for improving the technology of fish live transportation.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFD0901705)、烟台市科技计划项目(2020XDRH103)

Fund: Supported by the National Key Research and Development Program (2019YFD0901705), and the Technology Development Projects of Yantai (2020XDRH103)

***通信作者:** 刘春娥, 博士, 副教授, 主要研究方向为水产品品质安全。E-mail: lchune@126.com

***Corresponding author:** LIU Chun-E, Ph.D, Associate Professor, Institute of Yantai, China Agricultural University, No.2006, Binhai Middle Road, Laishan District, Yantai 264670, China. E-mail: lchune@126.com

KEY WORDS: fish; live transportation; muscle; physiology and biochemistry

0 引 言

鲜活水产品能更好地满足消费者的消费心理和需求, 因此水产品保活运输相关理论和技术已成为研究热点^[1-4]。对于鱼类保活运输研究, 除了成活率这一直观指标和生化生理指标外, 还应该着重考虑运输过程及为了延长保活期采取的各种手段对鱼类营养和品质的影响。本文总结和分析了保活运输方式和措施对鱼类肌肉 pH、肌肉系水力、脂肪、蛋白质及糖原等肌肉指标以及谷草转氨酶 (glutamic oxalacetic transaminase, GOT)、尿素氮(urea nitrogen, BUN)、乳酸、皮质醇(cortisol, COR)等生化生理指标的影响及机制, 为改善鱼类保活运输手段提供参考。

1 保活运输方法

保活运输包括有水保活运输和无水保活运输。有水保活运输中, 鱼类成活率和肉质指标受品种、水质、水温、运输密度、运输条件等因素的影响, 其中解决水质问题是关键^[5], 如 BATTISTI 等^[6]提出的生物絮团技术以及运输水体中加入硝化古菌等方法^[7]都是为了更有效利用营养物质进而降低水体中氨氮的积聚。在无水保活运输中, 主要利用低温休眠和麻醉等手段对鱼体进行前处理。低温休眠是通过阶梯降温使鱼类进入休眠状态, 从而降低新陈代谢速度, 在此过程中, 阶梯降温速率以及复水时的升温速率对于鱼类的存活率及肉质指标都有重要影响。鱼用麻醉剂种类较多, 分为天然和人工合成麻醉剂, 针对具体鱼类, 麻醉剂的有效剂量选择是关键。

保活运输过程中适宜的温度和氧气浓度是影响存活率的重要因素^[8]。表 1 和表 2 分别是有水和无水条件下不同鱼类的运输温度和存活时长的关系。可以看出, 温度对鱼类存活的影响非常大, 鲤鱼 5 °C 无水保活时间是 25 °C 保活时间的 3 倍; 珍珠龙胆石斑鱼有水运输 96 h 后, 15 °C 下的存活率为 100%, 而 25 °C 的存活率只有 17%。此外, 鱼类最佳存活温度与品种密切相关, 每种鱼类有其最适温度, 并不是越低越好。保活温度需要根据水产品的运输季节及其种类、规格等因素进行选择^[19]。

2 保活运输过程对鱼类肌肉指标的影响

2.1 肌肉 pH

新鲜鱼类肌肉 pH 偏弱碱性, 很多研究均表明, 保活运输过程会导致鱼类肌肉 pH 降低(表 3)。pH 下降主要是无水运输过程中的无氧代谢增加, 肌肉组织中的糖原发生无氧酵解生成乳酸, 乳酸的积累导致的; 低温运输产生的冷应激

以及运输时肌肉中磷酸肌酸的损耗也会导致 pH 下降^[19]。此外, 有水保活运输过程中, 随着运输时间的延长, 水体中溶解氧降低, 而氨氮、亚硝酸氮浓度逐渐增加, 氨氮胁迫也会使得鱼肉肌肉 pH 下降。随着 pH 下降, 鱼类就出现肌肉硬度降低、肉质松散等品质降低问题。由表 3 可以看出, 无论是有水运输还是无水运输, 除异育银鲫和施氏鲟无水运输 16 h 外, 其他鱼类肌肉 pH 在运输后都明显低于运输前, 且 pH 的下降量随着运输时间的延长而增加。无水保活运输后, 需要对鱼体进行唤醒复苏, 复苏后其 pH 有不同程度的回升。复苏后鱼体开始进行有氧呼吸, 鱼体内的乳酸被乳酸脱氢酶催化转化, 但 pH 都回升不到运输前的初始值。研究表明, 大多数鱼类 pH 在运输后下降并不显著, 因为大部分保活运输都是在低温下进行, 鱼体呼吸强度不高, 不会积累大量乳酸导致 pH 快速下降^[18]。

表 1 鱼类有水保活运输中温度-运输时长-存活率间的关系
Table 1 Relationship between temperature-transportation time-survival rate during live transportation of fish with water

种类	温度/°C	保活运输时长/h	存活率/%
石斑鱼 ^[9]	10	3	0
		3	100
		24	100
	15	48	100
		72	95
		3	100
	27	24	100
		48	95
		72	75
	30	3	100
		24	90
		48	50
哲罗鲑 ^[10]	13~19	72	0
		0	80
	13~15	5	86.7
		8.5	100
	8~12	18	100
大菱鲆 ^[11]	0~4	26	100
		3	100
	21	72	100
		72	95
		72	95
黑鲷幼鱼 ^[12]	23	72	90
		72	90
		72	87.5
	27	72	80
		72	77.5
珍珠龙胆石斑鱼 ^[13]	31	72	72.5
		72	72.5
		72	100
	15	96	100
		15	75
	20	96	75
		25	17

表 2 鱼类无水保活运输中温度-最大保活时间关系
Table 2 Relationship between temperature-maximum survival time during live transportation of fish without water

种类	无水保活温度/℃	最大保活时间/h
黑鲷 ^[14]	-1	3.5
	2	6
	6	2
鲤鱼 ^[15] (专用保活袋)	5	32.9
	15	36.2
	25	10.5
斑点叉尾鲴 ^[16] (CO ₂ 麻醉)	0~8	5
	10	2
	15	0.5
黄颡鱼 ^[17]	-1	7
	0	11
	2	24
彭泽鲫 ^[18]	4	22
	2~3	12
	5~6	22
	8~9	27
	10~12	32
	13~14	33
	15~16	32.5
	17~18	18

2.2 肌肉持水力

肌肉持水力是影响肌肉色泽的主要因素，肌肉水分含量高，肉色诱人，因此肌肉持水力是评价鱼类肌肉肉质品质的重要指标^[25]。滴水损失(drip loss, DL)、贮存损失(storage loss, SL)、冷冻渗出率、离心损失、蒸煮损失均可以作为肌肉持水力的评价指标。从表 4 可以看出，不同的鱼类无水/有水保活运输后，其肌肉持水力均会下降，运输胁迫导致水分从鱼肉肌肉纤维组织流失，含水量降低。不同的运输温度，对鱼肉的持水力影响不同，从表 4 可以看出，石斑鱼 20 ℃保活运输 72 h 的持水力明显高于 25 ℃条件下的运输；对斑点叉尾鲴^[23]的保活运输研究发现其肌肉 pH 与 DL、SL 均呈显著负相关。在合适的温度条件下运输，可以有效降低肌肉持水力的变化。运输后鱼肉持水力下降的原因是由于肌原纤维蛋白的功能特性消失，肌原纤维蛋白与水分分离，从而导致鱼肉组织中的水分流失^[27]。

2.3 蛋白质和脂肪

保活运输过程中，3 大营养素均有不同程度的降解。对鱼体进行保活运输时，降温速率、时间、温度等运输条件都会影响鱼体蛋白质含量。加州鲈保活研究显示，以 1 ℃/h、5 ℃/h 速率降温和以 3 ℃/h 速率降温相比，前者鱼体粗蛋白含量降低的程度更为显著^[1]。斑点叉尾鲴保活 9 h 后的蛋白质含量显著低于保活 5 h 和 7 h。运输胁迫造成的应激反应也会减少蛋白质合成从而导致肌肉萎缩^[28]。鱼类在饥饿胁迫下，首先利用饱和脂肪酸供能，随后利用单不饱和脂肪酸。荷那龙罗非鱼在低温条件下，随着时间的延长，背侧肌和内脏脂肪组织饱和脂肪酸和单不饱和脂肪酸所占比例显著下降^[29]，彭泽鲫的研究中也发现同样趋势^[30]。

表 3 鱼类保活运输前后肌肉 pH 变化
Table 3 Changes of muscle pH in fish before and after live transportation

种类	运输前 pH		运输后 pH		
异育银鲫 ^[20-21] (4 h)	6.9		7.07		
斑点叉尾鲴 ^[16] (麻醉)	7.76	保活 9 h: 6.98		复苏 24 h: 7.5	
	7.72	保活 11 h: 6.95		复苏 24 h: 7.49	
鳊鱼 ^[22]	7.4	12 h: 7.1		24 h: 6.9	
施氏鲟 ^[2]	6.73(有水)	8 h: 6.6	16 h: 6.65	24 h: 6.58	32 h: 6.57
	6.65(无水)	8 h: 6.72	16 h: 6.73	24 h: 6.56	32 h: 6.58
斑点叉尾鲴 ^[23]	6.22	24 h: 5.97		72 h: 5.90	
黄颡鱼(无水) ^[24]	7.22		7.13		
石斑鱼 ^[13]	7.15	15 °C: 7.1	20 °C: 7.08	25 °C: 7.12	
彭泽鲫 ^[18] (38 h)	6.97		6.88		

2.4 糖 原

糖原主要在肝脏和肌肉中贮存,是能量的重要来源之一^[31]。大多数鱼类在饥饿状态会先消耗糖原来维持机体供能。在无氧运输过程中,糖原被分解用以维持机体新陈代谢,糖原的酵解不仅产生能量,同时产生乳酸,导致机体 pH 下降。鱼类保活运输时基本都处于低温状态,新陈代谢缓慢,糖原分解速度也较慢,然而随着运输时间的延长直至复苏,由于鱼体一直未进食,鱼体糖原含量持续下降,当糖原含量的消耗超过耐受程度时,会出现鱼体死亡^[32]。斑点叉尾鲷的无水保活运输研究中发现,低温保活 5~7 h 时,糖原含量变化不显著,当保活时间达到 9 h 以上时,糖原含量显著降低。由表 5 也可以看出,运输前后不同品种

的鱼类糖原含量的变化都非常明显。大黄鱼幼鱼在运输前就采取断食处理,因此其糖原在运输早期

就开始分解,导致其运输后各组的糖原含量处于较低水平,均显著低于对照组^[34]。

3 鱼类血液生理生化指标

关于保活运输中生理生化指标包括血清 K⁺、血清 Ca²⁺、GOT、谷丙转氨酶(glutamate pyruvate transaminase, GPT)、BUN、乳酸、COR、肌酐(creatinine, Cr)、丙酮酸激酶(pyruvate kinase, Pk)等^[35-36]。其中谷草转氨酶、尿素氮、乳酸、皮质醇是较为重要且研究较多的指标^[37-38]。

3.1 谷草转氨酶

GOT 主要存在于肝脏组织中,当组织器官受损时,GOT 大量释放到血液中^[39],因此其活性可以用于运输鱼类肝功能的检测。斑点叉尾鲷的保活运输研究发现,随着保活时间的延长,GOT 活性增强,保活 11 h 后,GOT 比保活前增高 160.45%,清水复苏后,保活时间低于 11 h 的实验组基本都恢复到对照组水平,而 11 h 组与对照组仍存在显著差异^[16]。无水保活鲫鱼的实验结果也表明,麻醉和低温相结合的保活技术对鲫鱼的肝功能造成了一定程度的损伤^[40]。

3.2 尿素氮

尿素、尿酸是氮化合物分解产物,是反映肾功能代谢的重要指标^[41]。无水保活运输过程中,鱼体内代谢废物无法及时排出,导致 BUN 升高。有水保活运输过程中,鱼体新陈代谢会向水体中排放大量非离子氨,然而水体中氨氮含量增加到一定程度就会抑制鱼类排氨,从而也会导致鱼体内 BUN 升高。保活运输鲢鱼^[42],对照组、充氧处理 15 h 及复苏后 24 h 的 BUN 的含量分别为 8.97、25.64 和 28.21 mmol/L,与对照组相比,运输后鱼体血清中 BUN 含量显著升高,表明肾功能出现障碍或部分受损。花鲈无水保活结果表明,随运输时间的延长,尿素水平持续递增,运输 8 h 达到最高值,运输结束复苏后,尿素水平有所下降,但不能确定鱼体是否受到不可逆损伤^[43]。

表 4 鱼类保活运输前后肌肉持水力变化
Table 4 Change of water-holding capacity of muscle in fish before and after live transportation

种类	持水力/%		
斑点叉尾鲷 ^[25]	0 h: 1.18	24 h: 1.37	72h: 1.05
斑点叉尾鲷 ^[16]	麻醉前: 79.89	保活 11 h: 72.18	复苏 24 h: 72.68
石斑鱼(运输 72 h 后) ^[13]	15 °C: 84.53	20 °C: 90.05	25 °C: 80.24
团头鲂 ^[26]	对照: 96.94	保活 14 h: 96.12	恢复 24 h: 96.49
彭泽鲫(38 h) ^[18]	对照: 95.98	保活: 94.88	

表 5 鱼类保活运输前后糖原含量变化
Table 5 Change of glycogen in fish before and after live transport

种类	运输前糖原/(mg/g)	运输后糖原/(mg/g)				
黄颡鱼 ^[23]	2.1	1.21				
	运输密度/(g/L)	2 h	4 h	6 h	8 h	10 h
	20	0.98	0.90	1.10	0.97	0.98
	40	1.09	1.05	1.07	1.10	1.07
黑尾近红鲷 ^[33]	1.5	0.89	1.03	0.99	1.05	1.00
	80	盐度				
	运输密度/(g/L)	5	10	15	20	25
	4	1.6	1.75	1.85	2.1	2.3
大黄鱼幼鱼 ^[34]	4.4	1.6	1.8	1.9	2.2	2.35
	4	1.7	1.83	2	2.25	2.42
	2					
石斑鱼 ^[13]	1.2	15 °C: 0.81	20 °C: 0.68		25 °C: 0.41	

3.3 乳 酸

乳酸是葡萄糖无氧条件下发生糖酵解的代谢产物, 乳酸含量的增加造成血液中最大氧结合量减少, 即鱼体供氧量减少, 这可能也是限制鱼类保活时长的重要因素之一^[40,44]。在无水保活过程中, 尽管运输袋中充有纯氧, 但由于鱼类呼吸作用微弱, 肌肉中糖原仍会发生无氧酵解生成乳酸。研究表明, 黄颡鱼无水保活运输前后乳酸含量由 0.72 mmol/g prot 升高为 1.01 mmol/g prot^[24]。麻醉等操作会导致鱼类产生应激反应, 乳酸含量升高^[45]。经 MS-222 麻醉后, 大黄鱼体内乳酸含量由对照的 6.5 mmol/prot 上升到 11.29 mmol/prot, 保活运输后乳酸含量进一步升高, 达到 16.75 mmol/prot^[46]。

3.4 皮质醇

皮质醇是肾上腺在应激反应里产生的类激素, 作为激素反应链的最后一项激素, 其变化可以作为生物体应激状态的重要指标^[47-48]。冷驯化及运输过程都会导致鱼类产生应激反应, 且皮质醇含量随应激强度的增加而上升^[49]。在黑尾近红鲷的运输测试中, 皮质醇含量均呈现出先升高后降低的趋势, 运输 4 h 和 6 h 时显著高于其他运输时间^[33], 先上升后下降的趋势表明鱼类已慢慢适应了新环境。血液中皮质醇的变化会引起血液中乳酸、血糖、Cl⁻、Na⁺含量的变化, 也会影响到鱼体鳃盖处离子交换及 Na⁺、K⁺-ATPase 活力^[50]。此外, 在低温无水运输条件下, 过度表达的皮质醇能够增强糖酵解途径, 维持一段时间的分解代谢和能量代谢。

鱼类血液生化指标与无水保活时长密切相关。正常状态下, 血液中 GOT 活性较低, 当鱼体受到强烈刺激时, 组织细胞发生损伤, 引起血液内转氨酶活性增强, 肝脏的损伤进一步影响肾脏和心肌细胞的代谢, 导致血清中 BUN 活性的增加, 同时无氧代谢导致的乳酸含量升高, 也会进一步加剧体内代谢废物排不出去。

4 结束语

保活运输过程中, 鱼体的肌肉指标以及血液生理生化指标均会发生变化, 大多数指标在运输结束鱼体复苏后, 基本都能向正常水平恢复, 恢复的程度取决于鱼种、运输方法、运输温度以及运输时长。运输时长和温度控制尤为关键, 长时间的不适宜温度的保活运输极易对鱼体肾脏、肝脏造成不可逆损伤, 进而导致鱼类复苏后存活时间较短。

3 大供能物质以及与肝、肾损伤相关的血液生化指标是鱼类保活运输中最常测定的指标, 此外, 随着消费者对水产品品质要求的提高, 保活运输的研究范围需进一步扩大到有机酸、游离氨基酸等与鱼类风味密切相关的小分子营养物质的变化。

参考文献

- [1] 王彩霞, 白嫔, 李宁, 等. 不同降温速率休眠的加州鲈无水保活品质比较[J]. 现代食品科技, 2020, 36(5): 129-137, 41.
WANG CX, BAI C, LI N, *et al.* Comparison of dormancy at different cooling rates on the survival of micropterus salmoides without water [J]. Mod Food Sci Technol, 2020, 36(5): 129-137, 41.
- [2] WANG W, ZHANG Y, LIU Y, *et al.* Effects of waterless live transportation on survivability, physiological responses and flesh quality in Chinese farmed sturgeon (*Acipenser schrenckii*) [J]. Aquaculture, 2020, 518: 734-834.
- [3] FLAVIA DFS, CAROLINA AF. An overview of stress physiology of fish transport: Changes in water quality as a function of transport duration [J]. Fish Fish, 2016, 17(4): 1055-1072.
- [4] 谢晶, 曹杰. 渔用麻醉剂在鱼类麻醉保活运输中应用的研究进展[J]. 上海海洋大学学报, 2021, 30(1): 189-196.
XIE J, CAO J. Research progress on application of fishing anesthetic in fish anesthesia keep alive transportation [J]. J Shanghai Ocean Univ, 2021, 30(1): 189-196.
- [5] DAS PC, MISHRA B, PATI BK, *et al.* Critical water quality parameters affecting survival of *Labeo rohita* (Hamilton) fry during closed system transportation [J]. Indian J Fish, 2015, 62(2): 39-42.
- [6] BATTISTI EK, RABAIOLI A, UCZAY J, *et al.* Effect of stocking density on growth, hematological and biochemical parameters and antioxidant status of silver catfish (*Rhamdia quelen*) cultured in a biofloc system [J]. Aquaculture, 2020, (524): 735213.
- [7] URAKAWA H, SIPOS AJ. Application of the consortia of nitrifying archaea and bacteria for fish transportation may be beneficial for fish trading and aquaculture [J]. Aquac Res, 2020, 51(8): 3429-3442.
- [8] HUR JW, KANG YJ. Effect of acute air exposure on the hematological characteristics and physiological stress response of olive flounder (*Paralichthys olivaceus*) and Japanese croaker (*Nibea japonica*) [J]. Aquaculture, 2019, 502: 142-147.
- [9] 吴波, 谢晶. 石斑鱼有水活运工艺中温度、盐度的优化[J]. 食品科学, 2019, 40(16): 235-241.
WU B, XIE J. Optimization of water temperature and salinity for live transportation of grouper [J]. Food Sci, 2019, 40(16): 235-241.
- [10] 包玉龙, 张涛, 刘圣聪. 大规模哲罗鲑活鱼运输的研究[J]. 安徽农学通报, 2017, 23(18): 87-89.
BAO YL, ZHANG T, LIU SC. Study on the transportation of living large Hucho taimen [J]. Anhui Agric Sci Bull, 2017, 23(18): 87-89.
- [11] 刘伟东, 薛长湖, 殷邦忠, 等. 低温下大菱鲆有水和无水保活过程中生理生化变化的研究[J]. 渔业科学进展, 2009, 30(5): 69-74.
LIU WD, XUE CH, YIN BZ, *et al.* Physiological and biochemical change of *Scophthalmus maximus* kept alive at low temperature with or without water [J]. Prog Fish Sci, 2009, 30(5): 69-74.
- [12] 朱越, 王凯, 吴松, 等. 水温 and 摇晃对黑鲷幼鱼运输生存状态的影响[J]. 上海海洋大学学报, 2020, 29(4): 533-541.
ZHU Y, WANG K, WU S, *et al.* Preliminary studies on the effects of the temperature and shaking on transport and survival of juvenile black seabream (*Acanthopagrus schlegelii*) [J]. J Shanghai Ocean Univ, 2020, 29(4): 533-541.
- [13] 范秀萍, 秦小明, 章超桦, 等. 温度对有水保活石斑鱼代谢与鱼肉品质的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(14): 241-248.

- FAN XP, QIN XM, ZHANG CH, *et al.* Effects of temperature on metabolism function and muscle quality of grouper during process of keeping alive with water [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2018, 34(14): 241–248.
- [14] 田标, 陈申如, 杨远帆, 等. 黑鲟无水保活技术的初步研究[J]. 集美大学学报(自然科学版), 2004, (3): 221–225.
- TIAN B, CHEN SR, YANG YF, *et al.* A primary study on the keeping-alive technique of *Sparus macrocephalus* by waterless method [J]. *J Jimei Univ (Nat Sci)*, 2004, (3): 221–225.
- [15] 陆有飞, 郑艳波, 马瑞宁, 等. 延长鲢鱼和鲤鱼无水保活时间的条件研究[J]. 农村经济与科技, 2019, 303(14): 23, 29.
- LU YF, ZHENG YB, MA RN, *et al.* Study on the conditions of prolonging the time of keeping alive without water of *Cirrhinus molitorella* and *Cyprinus carpio* [J]. *Rural Econ Sci Technol*, 2019, 303(14): 23, 29.
- [16] 李宁, 白嫒, 熊光权, 等. 无水保活时间对斑点叉尾鲟血液生化和肌肉品质的影响[J]. 现代食品科技, 2018, 34(12): 74–81, 11.
- LI N, BAI C, XIONG GQ, *et al.* Effects of waterless keep alive time on physiological and biochemical index of *Ictalurus punctatus* [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2018, 34(12): 74–81, 11.
- [17] POPOVIC NT, PEROVIC IS, RAKOVAC RC, *et al.* Tricaine methane-sulfonate (MS-222) application in fish anaesthesia [J]. *J Appl Ichthyol*, 2012, 28(4): 553–564.
- [18] 秦旭. 彭泽鲫的低温休眠保活运输技术研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2018.
- QIN X. Study on the low temperature dormancy and survival transportation technology of pengze crucian carp (*Carassius auratus* var. *Penze*) [D]. Nanchang: Nanchang University, 2018.
- [19] 吕飞, 陈灵君, 丁玉庭. 鱼类保活及运输方法的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2012, 33: 225–228.
- LV F, CHEN LJ, DING YT. Research advances in alive-keeping and transportation of fish [J]. *Food Res Dev*, 2012, 33: 225–228.
- [20] DONALDSON MR, COOKE SJ, PATTERSON DA, *et al.* Cold shock and fish [J]. *J Fish Biol*, 2010, 73(7): 1491–1530.
- [21] 张玉平, 刘昊昆, 金俊琰, 等. 模拟运输对异育银鲫血液生理生化指标、体色和肉质的影响[J]. 水生生物学报, 2019, 43(1): 86–93.
- ZHANG YP, LIU HK, JIN JY, *et al.* Effects of simulative transportation on the plasma biochemical indices, body color and fillet quality of gibel carp [J]. *Acta Hydrobiol Sin*, 2019, 43(1): 86–93.
- [22] 丁亚涛. 鳊鱼保活运输技术的研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2019.
- DING YT. Study on the keep-alive transportation technology for bream [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2019.
- [23] REFAEY MM, TIAN X, TANG R, *et al.* Changes in physiological responses, muscular composition and flesh quality of channel catfish *Ictalurus punctatus* suffering from transport stress [J]. *Aquaculture*, 2017, 478: 9–15.
- [24] 白艳龙, 谭昭仪, 邸向乾, 等. 黄颡鱼无水保活技术研究[J]. 食品工业科技, 2013, 34(1): 334–337.
- BAI YL, TAN ZY, DI XQ, *et al.* Research of the keep-alive technology without water of yellow catfish [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2013, 34(1): 334–337.
- [25] 田兴. 运输应激对黄颡鱼和斑点叉尾鲟血液生化指标和肌肉品质的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016.
- TIAN X. The effect of transport stress on flesh quality and blood biochemical parameters of yellow catfish *Pelteobagrus fulvidraco* and channel catfish *Ictalurus punctatus* [D]. Wuhai: Huazhong Agricultural University, 2016.
- [26] 刘骁, 谢晶, 杨茜, 等. 无水保活条件下团头鲂生理应激及鱼肉品质的变化[J]. 农业工程学报, 2016, 32(3): 295–300.
- LIU X, XIE J, YANG Q, *et al.* Change of physiological stress and flesh quality of *Megalobrama amblycephala* during suitable waterless keep alive conditions [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2016, 32(3): 295–300.
- [27] FLORES J, BERMELL S. Propiedades funcionales de las proteínas miofibrilares: Capacidad de retención de agua [J]. *Revista De Agroquímica Y Tecnología De Alimentos*, 1984, 24(2): 151–158.
- [28] JULIA TV, RAUL LH, TERESA GG, *et al.* Mechanisms of stress-related muscle atrophy in fish: An ex vivo approach [J]. *Mech Dev*, 2018, 154: 162–169.
- [29] 葛仲昆, 陈彦君, 陈刚, 等. 低温胁迫对荷那龙罗非鱼内脏组织脂肪酸变化的影响[J]. 甘肃畜牧兽医, 2016, 46(1): 69–72.
- GE ZX, CHEN YJ, CHEN G, *et al.* Effects of low temperature stress on fatty acids of intestinal hemorrhage of *Oreochromis hornorum* [J]. *Gansu Anim Husband Vet*, 2016, 46(1): 69–72.
- [30] 陈文静, 丁立云, 邓勇辉, 等. 饥饿胁迫对彭泽鲫幼鱼形体指标、肌肉脂肪酸组成和肝脏脂蛋白脂酶基因表达的影响[J]. 动物营养学报, 2020, 32(6): 2782–2790.
- CHEN WJ, DING LY, DENG YH, *et al.* Effect of starvation stress on physical indices, muscle fatty acid composition and liver lipoprotein lipase gene expression of juvenile crucian carp (*Carassius auratus* var. *Pengze*) [J]. *Chin J Anim Nutr*, 2020, 32(06): 2782–2790.
- [31] ZHANG Y, XIAO X, YAN L, *et al.* Survival prediction system for waterless live Chinese sturgeon transportation based on temperature related glucose changes [J]. *J Food Process Eng*, 2018, 41(2): e12646. DOI: 10.1111/jfpe.12646
- [32] MI H, QIAN C, MAO L. Quality and biochemical properties of artificially hibernated crucian carp for waterless preservation [J]. *Fish Physiol Biochem*, 2012, 38(6): 1721–1728.
- [33] 李佩, 陈见, 余登航, 等. 运输密度和时间对黑尾近红鲷皮质醇、乳酸、糖元含量的影响[J]. 水生生物学报, 2020, 44(2): 415–422.
- LI P, CHEN J, YU DH, *et al.* Effects of transportation density and time on cortisol, lactate and glycogen of *Ancherythroculter nigrocauda* [J]. *Acta Hydrobiol Sin*, 2020, 44(2): 415–422.
- [34] 张伟, 王有基, 李伟明, 等. 运输密度和盐度对大黄鱼幼鱼皮质醇、糖元及乳酸含量的影响[J]. 水产学报, 2014, 38(7): 973–980.
- ZHANG W, WANG YJ, LI WM, *et al.* Effects of transportation density and salinity on cortisol, glycogen and lactate of large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) juveniles [J]. *J Fish China*, 2014, 38(7): 973–980.
- [35] JIA X, FAN Y, WANG Y, *et al.* Physiological and energy metabolism responses of Chinese loach *Paramisgurnus dabryanus* (Dabry de Thiersant, 1872) to waterless preservation during [J]. *Transport*, 2018, 19: 279–287.
- [36] 谢晶, 王琪. 水产动物保活运输中环境胁迫应激及生理调控机制的研究进展[J]. 食品科学, 2021, 42(1): 319–325.
- XIE J, WANG Q. Progress in understanding environmental stress and physiological regulation mechanism in aquatic animals during live transportation [J]. *Food Sci*, 2021, 42(1): 319–325.
- [37] SHARMA J, SINGH SP, CHAKRABARTI R. Effect of temperature on

- digestive physiology, immune-modulatory parameters, and expression level of HSP and LDH genes in *Catla catla* (Hamilton, 1822) [J]. Aquaculture, 2017, 479: 134–141.
- [38] SUN JL, ZHAO LL, LIAO LL, *et al.* Interactive effect of thermal and hypoxia on largemouth bass (*Micropterus salmoides*) gill and liver: Aggravation of oxidative stress, inhibition of immunity and promotion of cell apoptosis [J]. Fish Shellfish Immun, 2020, 8: 923–936.
- [39] REFAEY MM, LI D, TIAN X, *et al.* High stocking density alters growth performance, blood biochemistry, intestinal histology, and muscle quality of channel catfish *Ictalurus punctatus* [J]. Aquaculture, 2018, 492: 73–81.
- [40] 米洪波. 鲫鱼和中国对虾的无水保活及冰温保鲜技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- Mi HB. Study on waterless preservation and controlled freezing-point storage of crucian carp and Chinese white shrimp (*Fenneropenaeus chinensis*) [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [41] 王彩霞, 白婵, 熊光权, 等. 丁香酚麻醉辅助加州鲈无水活运的效果[J]. 食品科学, 2021, 42(5): 228–236.
- WANG CX, BAI C, XIONG GQ, *et al.* Effect of eugenol anesthesia on waterless live transportation of *Micropterus salmoides* [J]. Food Sci, 2021, 42(5): 228–236.
- [42] 胡鑫, 丁晨雨, 叶勤, 等. 二氧化碳麻醉对鲢鱼生理生化指标及神经调控相关基因表达的影响[J]. 淡水渔业, 2020, 50(1): 9–14.
- HU X, DING CY, YE Q, *et al.* Effects of carbon dioxide anesthesia on physiological and biochemical indexes and genes expression related to nerve regulation in silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) [J]. Freshw Fish, 2020, 50(1): 9–14.
- [43] 张玉晗, 谢晶. 保护液结合暂养工艺对花鲈无水活运效果的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(23): 262–268.
- ZHANG YH, XIE J. Effect of protective solution combined with temporary culture on waterless live transportation of *Lateolabrax maculatus* [J]. Food Sci, 2019, 40(23): 262–268.
- [44] LORENZO RA, TAPELLA FM, ROMERO C. Transportation methods for Southern king crab: From fishing to transient storage and long-haul packaging [J]. Fish Res, 2020, 223(105441): 1–10.
- [45] WANG JQ, XIONG GQ, BAI C, *et al.* Anesthetic efficacy of two plant phenolics and the physiological response of juvenile *Ictalurus punctatus* to simulated transport [J]. Aquaculture, 2021, 538: 1–6.
- [46] 张丽. 大黄鱼保活运输及冰温保鲜的研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2011.
- ZHANG L. Study on technology of keeping alive and super-chilling preservation of *Pseudosciaena Crocea* [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2011.
- [47] 朱乾峰, 陈鹏文, 范秀萍, 等. 珍珠龙胆石斑鱼低温有水保活条件优化[J]. 食品工业科技, 2018, 39(22): 276–282.
- ZHU QF, CHEN PW, FAN XP, *et al.* Optimization of low temperature water conservation for ♀*Epinephelus fuscoguttatus* × ♂*Epinephelus lanceolatus* [J]. Sci Technol Food Ind, 2018, 39(22): 276–282.
- [48] SCHVEZOV N, LOVRICH GA, TAPELLA F, *et al.* Effect of the temperature of air exposure on the oxidative stress status of commercial male southern king crab *Lithodes santolla* [J]. Fish Res, 2019, 212: 188–195.
- [49] 李勇男, 刘海英, 苏从毅. 鱼类的运输应激反应诱发因素、影响及缓解措施[J]. 食品工业科技, 2015, 36(23): 391–394.
- LI YN, LIU HY, SU CY. Induced factors, effects and mitigation measures of stress response of fish during transportation [J]. Sci Technol Food Ind, 2015, 36(23): 391–394.
- [50] 周翠平. 罗非鱼二氧化碳麻醉无水保活技术研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2015.
- ZHOU CP. Study on the keep-alive technology without water of tilapia anesthetized by carbon dioxide [D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2015.

(责任编辑: 郑丽于梦娇)

作者简介



刘峰, 博士, 教授, 主要研究方向为水产营养品质。

E-mail: liufeng2008@cau.edu.cn



刘春娥, 博士, 副教授, 主要研究方向为水产品品质安全。

E-mail: lchune@126.com