

蒋乐霞, 华茂圳, 张长峰, 等. 维生素 C 对降温胁迫下大菱鲆生理生化指标及其肉质的影响 [J]. 福建农业学报, 2022, 37 (10): 1256–1265.
JIANG L X, HUA M Z, ZHANG C F, et al. Effects of Vitamin C Pretreatment on Physiology, Biochemistry, and Meat Quality of *Scophthalmus maximus* Under Cold Stress [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2022, 37 (10): 1256–1265.

维生素 C 对降温胁迫下大菱鲆生理生化指标及其肉质的影响

蒋乐霞^{1,2}, 华茂圳^{2,3}, 张长峰^{2,4*}, 黄宝生^{2,4*}, 唐家铭^{1,2}, 张家国^{2,4}

(1. 广东海洋大学食品科技学院, 广东 湛江 524088; 2. 山东商业职业技术学院/山东省农产品贮运保鲜技术重点实验室, 山东 济南 250103; 3. 上海海洋大学水产科学国家级实验教学示范中心, 上海 201306; 4. 国家农产品现代物流工程技术研究中心, 山东 济南 250103)

摘要:【目的】为缓解大菱鲆 (*Scophthalmus maximus*) 在降温过程中的应激反应, 提高肌肉品质, 研究水体中添加维生素 C 对大菱鲆降温胁迫下生理生化指标及肌肉品质的影响。【方法】首先, 将大菱鲆分别放入含 0、25、50、100 mg·L⁻¹ 维生素 C 溶液处理 12 h, 然后经制冷循环水系统降温至 3 ℃, 无水保活 0、12、24、36、48、60、72 h, 观察其存活率并筛选最适维生素 C 浓度; 其次, 以最适浓度维生素 C 处理大菱鲆 12 h 后, 进行降温至 18、13、8、3 ℃, 分别在 4 个温度点取样测定白细胞、肾上腺素、皮质醇等生理生化以及肌肉质构指标。【结果】50 mg·L⁻¹ 维生素 C 溶液处理的大菱鲆无水保活 72 h 存活率最高, 为 40.0%。维生素 C 处理的大菱鲆血液白细胞、红细胞、血红蛋白和血小板浓度均显著高于未处理组 ($P < 0.05$); 降温过程中, 血清肾上腺素、皮质醇、总蛋白等指标含量呈上升趋势, 而血清血糖、肝脏肝糖原、肌肉 pH 呈下降趋势, 维生素 C 处理组生理生化指标变化幅度均显著小于对照组 ($P < 0.05$); 维生素 C 处理组硬度、弹性、咀嚼性等指标明显大于对照组 ($P < 0.05$)。【结论】经 50 mg·L⁻¹ 维生素 C 处理后, 大菱鲆的应激程度及肝肾损伤程度得到缓解, 能量代谢和肌肉品质方面也更为稳定。表明适当的维生素 C 处理可在一定程度上缓解降温胁迫对大菱鲆的负面影响。

关键词: 维生素 C; 大菱鲆; 生理生化指标; 肌肉品质

中图分类号: S 983

文献标志码: A

文章编号: 1008-0384 (2022) 10-1256-10

Effects of Vitamin C Pretreatment on Physiology, Biochemistry, and Meat Quality of *Scophthalmus maximus* Under Cold Stress

JIANG Lexia^{1,2}, HUA Maozhen^{2,3}, ZHANG Changfeng^{2,4*}, HUANG Baosheng^{2,4*}, TANG Jiaming^{1,2}, ZHANG Jianguo^{2,4}

(1. College of Food Science and Technology, Zhanjiang, Guangdong 524088, China; 2. Shandong Institute of Commerce and Technology/Shandong Key Laboratory of Storage and Transportation Technology of Agricultural Products, Jinan, Shandong 250103, China; 3. National Demonstration Center for Experimental Fishery Science Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 4. National Engineering Research Center for Agricultural Products Logistics, Jinan, Shandong 250103, China)

Abstract: 【Objective】Effects of vitamin C addition in water to improve cold-tolerance of turbot (*Scophthalmus maximus*) on the physiology, biochemistry, and muscles of the fish in chilling preservation were studied. 【Method】Live turbot were kept in water containing 0, 25, 50, or 100 mg·L⁻¹ of vitamin C for 12 h prior to chilling to 3 ℃ by circulating the water through a refrigeration system and holding for 0, 12, 24, 36, 48, 60, or 72 h out of water to observe the survival rate of the fish and determine the optimal vitamin C concentration for the pretreatment. In water with the optimized vitamin C concentration,

收稿日期: 2021-11-22 初稿; 2022-05-01 修改稿

作者简介: 蒋乐霞 (1996-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全 (E-mail: 2394715967@qq.com)

* 通信作者: 张长峰 (1976-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 水产品冷链物流 (E-mail: zcf202@163.com); 黄宝生 (1984-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 水产品冷链物流 (E-mail: 18396898921@163.com)

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFD2100504-4); 泰山学者特聘专家项目 (2020-2024 年); 农业农村部淡水渔业与种质资源利用重点实验室开放课题 (XKQKF201901)

turbots were kept for 12 h followed by cooling the water to 18, 13, 8, and 3 °C to measure the physiological and biochemical indexes, such as white blood cells, epinephrine, cortisol, and muscle texture, of the turbots under cold stress. 【Result】 The turbots kept in water containing 50 mg·L⁻¹ vitamin C then chilled to 3 °C for 72 h had the highest survival rate at 40.0%. The white blood cells, red blood cells, hemoglobin, and platelets of the vitamin C-treated fish were significantly higher than those of control ($P<0.05$). During cooling from 18 °C to 3 °C, the contents of serum epinephrine, cortisol, and total protein in fish were on an increasing trend, while serum glucose, liver glycogen, and muscle pH decreasing; the physiological and biochemical indexes changed significantly less on the pretreated turbots than control ($P<0.05$); and the muscle firmness, elasticity, and chewiness of the treatment fish were significantly higher than those of control ($P<0.05$). 【Conclusion】 With a 50 mg·L⁻¹ vitamin C pretreatment, the negative impacts of cold stress on liver and kidney of the chilled turbots were significantly reduced and the energy metabolism and meat quality of the fish relatively unaffected.

Key words: Vitamin C; *Scophthalmus maximus*; physiological and biochemical indexes; muscle quality

0 引言

【研究意义】大菱鲆 (*Scophthalmus maximus*)，属于鲆形目 (*Pleuronichthys cornutus*)，鲆科 (*Bothidae*)，俗称欧洲比目鱼、多宝鱼，原产于大西洋北部海域，是较名贵的冷水性经济鱼类。因其细腻的肉质和丰富的营养价值，大菱鲆成为餐桌上不可多得的美味^[1]。目前，大菱鲆的运输方式已渐渐从有水运输转变为无水运输。与有水运输相比，无水运输节省用水成本，同时可提高大菱鲆存活率。作为无水运输核心技术，降温诱导休眠法成为当前的研究热点。该方法主要利用降温至鱼类生态冰温点的手段，实现水产品休眠^[2]。大量研究表明，鱼类在达到休眠点时的状态直接决定了无水运输的时长和品质。作为一类变温动物，鱼类因温度波动而产生应激反应、免疫系统受损等，从而影响到达休眠点时的状态^[3]。因此，研究减缓降温至生态冰温点过程的应激反应的处理方法对提高鱼类免疫力和肉质具有重要意义。【前人研究进展】维生素 C (Vitamin C)，又称抗坏血酸，是一种水溶性维生素，通常作为天然抗氧化剂和免疫增强剂添加至水体，以提高鱼类的抗氧化能力，减缓应激反应，增强鱼体免疫力和抗病力^[4]。研究表明，维生素 C 可有效增强团头鲂 (*Megalobrama amblycephala*)、鲤鱼 (*Cyprinus carpio*)、南美白对虾 (*Penaeus vannamei*)、普安银鲫 (*Carassius auratus gibelio*) 运输途中的抗应激能力和抗氧化能力，提高免疫力和代谢水平^[5]；维生素 C 亦可提高氨氮胁迫条件下大鳞鲷幼鱼 (*Barbus capito*)、匙吻鲟仔鱼 (*Polyodon spathula*)、圆斑星鲈幼鱼 (*Verasper variegatus*)、青鱼 (*Mylopharyngodon piceus*) 的抗氧化能力，缓解氨氮胁迫产生的应激反应^[6]。【本研究切入点】目前关于水体中添加维生素 C 减缓大菱鲆降温应激的研究尚鲜有报道。【拟解决的关键问题】本研究以大菱鲆为试验对象，筛

选减缓大菱鲆降温应激的最佳维生素 C 浓度，并探讨维生素 C 对减缓大菱鲆降温应激的影响，为大菱鲆无水保活运输提供研究依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

大菱鲆于山东省昌邑市养殖场捕捞，并运至国家农产品现代物流工程技术研究中。挑选个体初始体重 (930 ± 46) g、健康活跃、体表无损伤、大小均匀的成鱼，暂养于国家农产品现代物流工程技术研究中心水产品控温循环水过滤系统待用。暂养条件：暂养时间为 2 d，水温 (18 ± 1) °C，溶氧量 ≥ 6 mg·L⁻¹，pH 7~8，盐度 28。

1.2 仪器与设备

BK-280 全自动生化分析仪 (山东博科生物产业有限公司)；XT-1800IV 全自动五分类血细胞分析仪 [希森美康医用电子 (上海) 有限公司]；T9S 紫外分光光度计 (北京普析通用仪器有限责任公司)；Multiscan MK3 酶标仪 [赛默飞世尔 (上海) 仪器有限公司]；水产养殖及循环水处理系统 (青岛中科海水处理设备工程有限公司)；笔式 pH 检测计 (希玛仪表集团有限公司)；JPB-607A 型便携式溶解氧分析仪 (上海雷磁仪器电科学仪器股份有限公司)；LS10T 盐度计 (广州市速为电子科技有限公司)。

1.3 试验方法

1.3.1 最优维生素 C 用量的筛选 试验组按维生素 C 质量浓度分别设置为 25、50、100、200 mg·L⁻¹ 处理组，以不添加维生素 (0 mg·L⁻¹) 处理的大菱鲆作为对照组，每组 15 条大菱鲆。将暂养后的大菱鲆分别转入维生素 C (分析纯，纯度 99.0%，购自北京索莱宝科技有限公司) 含量不同的循环水养殖系统处理 12 h，然后梯度降温至 3 °C；在 3 °C 环境条件下开展无水保活，并定期记录成活率。

1.3.2 维生素 C 处理 以筛选出的最适维生素 C 质

量浓度为试验组，以不添加维生素 C 处理的为对照组。处理过程同 1.3.1。降温过程中，分别在 18、13、8、3 ℃ 随机选取 3 尾大菱鲆尾部静脉采血，一部分血样在 4 ℃ 冰箱放置 5 h 后，4 ℃、12 000 r·min⁻¹ 离心 15 min，取上清液放入-80 ℃ 冰箱保存；另一部分加抗凝剂，用于测定血液生理指标。采血后，解剖取肝脏组织和肌肉组织，置于-80 ℃ 冰箱保存待用。

1.3.3 血液生理指标测定 采用全自动五分类血细胞分析仪 (XT-1800IV) 测定白细胞 (White blood cell, WBC)、红细胞 (Red blood cell, RBC)、血红蛋白 (Hemoglobin, HGB)、血小板 (Platelet, PLT) 等血液生理指标。

1.3.4 血清生化指标测定 采用全自动生化分析仪 (BK-280) 测定总蛋白 (Total protein, TP)、白蛋白 (Albumin, ALB)、谷丙转氨酶 (Alanine aminotransferase, ALT)、谷草转氨酶 (Aspartate aminotransferase, AST)、肌酸激酶 (Creatine kinase, CK)、乳酸脱氢酶 (Lactate dehydrogenase, LDH)、葡萄糖 (Glucose)、乳酸 (Lactic acid, LAC)。采用南京建成生物工程研究所相关试剂盒测定皮质醇 (Cortisol)、肾上腺素 (Epinephrine, E)、鱼前蛋白转化酶枯草溶菌素-9 (Proprotein convertase subtilisin/kexin Type 9, PCSK-9) 及糖原 (Glycogen)。

1.3.5 肌肉指标测定 (1) 质构指标。参照王垚等^[7]的方法，剪切鱼肉至 1 cm × 1 cm × 1.5 cm 大小，采用模式 TPA 测定。探头为 TA39，压缩速率为

1 mm·s⁻¹，压缩程度为 50%，测定指标包括弹性、硬度、回复性、胶黏性和咀嚼性。

(2) pH 值测定。取均匀搅碎的鱼肉 5.0 g 加入煮沸冷却的蒸馏水，搅拌均匀定容至 50.0 mL，静置 30 min 后过滤，用 pH 检测计测定滤液 pH 值^[8]。

1.4 数据统计

应用 SPSS 22.0 软件对数据进行分析，数据采用 Duncan 多重比较法进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 最佳维生素 C 用量筛选

由表 1 可知，随着保活时间延长，各组存活率均呈下降趋势。与对照组相比，0~24 h，各处理组存活率下降幅度较小，50、100 mg·L⁻¹ 处理组的大菱鲆存活率最高。无水保活 36 h 时，50 mg·L⁻¹ 处理组大菱鲆休眠状态良好，体色鲜亮，无出血等状况，存活率为 100%，而其他各组存活率均显著下降 ($P<0.05$)。无水保活 72 h 时，50 mg·L⁻¹ 处理组存活率最高，为 42.22%，100 mg·L⁻¹ 处理组次之，对照组、25 mg·L⁻¹、200 mg·L⁻¹ 处理组最低，大菱鲆存活率均降为 0%。这可能是因为过高或过低用量的维生素 C 不利于清除大菱鲆体内氧自由基，进而无法显著提高抗应激能力和免疫力^[9-10]；综上所述，50 mg·L⁻¹ 维生素 C 溶液处理可显著提升大菱鲆的无水保活率，故 50 mg·L⁻¹ 维生素 C 为大菱鲆无水保活的最适用量。

表 1 不同维生素 C 用量处理下大菱鲆无水保活不同时间的存活率

Table 1 Survival rates of turbot pretreated by vitamin C in different concentrations prior to out-of-water chilling

维生素C Vitamin C/(mg·L ⁻¹)	不同处理时间的存活率 Survival rates/%						
	0 h	12 h	24 h	36 h	48 h	60 h	72 h
0	100.00±0.00 a	100.00±0.00 a	95.33±3.85 ab	64.45±3.85 d	48.89±3.85 d	8.89±7.70 c	0.00±0.00 c
25	100.00±0.00 a	100.00±0.00 a	91.11±3.85 b	64.45±3.85 d	53.33±0.00 cd	28.89±3.85 b	0.00±0.00 c
50	100.00±0.00 a	100.00±0.00 a	100.00±0.00 a	100.00±0.00 a	91.11±3.85 a	77.77±3.85 a	42.22±3.85 a
100	100.00±0.00 a	100.00±0.00 a	100.00±0.00 a	71.11±3.85 c	62.22±3.85 b	13.33±0.00 c	15.55±3.86 b
200	100.00±0.00 a	100.00±0.00 a	82.22±7.70 c	82.22±3.85 b	55.55±3.95 c	28.89±7.70 b	0.00±0.00 c

同列数据后不同小写字母代表有显著性差异 ($P<0.05$)，相同则无显著性差异 ($P>0.05$)。

Data with different lowercase letters on same column indicate significant differences at $P<0.05$; those with identical letter, no significant difference ($P>0.05$).

2.2 维生素 C 对降温胁迫下大菱鲆血液生理指标的影响

如表 2 所示，对照组和试验组大菱鲆血液红细胞数量随温度的降低呈显著下降趋势，8 ℃、3 ℃ 时试验组显著高于对照组 ($P<0.05$)。对照组和试验

组血红蛋白含量随温度下降呈下降趋势，降温至 8 ℃ 和终点温度 3 ℃ 时达到较低值，试验组显著高于对照组 ($P<0.05$)，表明试验组大菱鲆在应对低温胁迫时，新陈代谢速率更为稳定。试验组与对照组血小板数量随温度的下降而下降，温度下降过程

中，试验组血小板数量始终高于对照组，降温至终点温度 3 ℃，试验组血小板数量较对照组高 79.6% ($P<0.05$)。在对人体降温效果的安全性研究中也发现，温度的降低会导致血小板浓度下降^[11]。大菱鲆在降温过程中，对照组和试验组白细胞呈明显下降趋势，但在降温初期，下降幅度不明显。降温至 8 ℃

时，试验组白细胞数量显著高于对照组 ($P<0.05$)。试验组和对照组大菱鲆白细胞数量在 3 ℃ 均处于最低值，相较于 18 ℃，两组分别下降 2.546×10^9 、 2.652×10^9 个·L⁻¹，表明温度下降会对大菱鲆免疫能力产生一定的影响。

表 2 维生素 C 对降温胁迫下大菱鲆血液中红细胞、血红蛋白、血小板、白细胞的影响
Table 2 Effects of vitamin C pretreatment on red blood cells, hemoglobin, platelets, and leukocytes of turbot under cold stress

指标 Index	组别 Group	温度 Temperature/℃			
		18	13	8	3
红细胞 RBC/ (×10 ¹² 个·L ⁻¹)	对照组 Control	1.67±0.02 a	1.62±0.05 a	1.48±0.06 b	1.23±0.04 b
	试验组 Treatment	1.71±0.01 a	1.65±0.02 a	1.56±0.02 a	1.34±0.03 a
血红蛋白 HGB/ (g·L ⁻¹)	对照组 Control	55.40±0.06 a	51.20±1.13 a	42.00±0.86 b	39.30±0.30 b
	试验组 Treatment	54.80±0.40 a	52.30±1.02 a	46.00±0.41 a	41.10±0.80 a
血小板 PLT/ (×10 ⁹ 个·L ⁻¹)	对照组 Control	15.60±0.28 a	14.70±0.27 b	11.30±0.13 b	8.60±0.01 b
	试验组 Treatment	16.20±0.02 a	16.10±0.41 a	14.30±0.21 a	10.8±0.03 a
白细胞 WBC/ (×10 ⁹ 个·L ⁻¹)	对照组 Control	8.01±0.44 a	7.87±0.12 a	7.35±0.25 b	5.36±0.11 a
	试验组 Treatment	8.06±0.30 a	7.96±0.25 a	7.65±0.21 a	5.51±0.13 a

不同小写字母表示同一指标同一温度下不同处理组之间差异显著 ($P<0.05$)；下同。
Data with different lowercase letters indicate significant differences among groups with identical indices at same temperature under different treatments at $P<0.05$. Same for following tables.

2.3 维生素 C 对降温胁迫下大菱鲆血清皮质醇和肾上腺素质量浓度的影响

如表 3 所示，对照组和试验组皮质醇和肾上腺

素质量浓度随温度下降呈明显升高趋势，降温至 3 ℃ 时达到最大值，除 18 ℃ 外，其余各温度点试验组皮质醇和肾上腺素质量浓度均显著低于对照组 ($P<0.05$)。

表 3 维生素 C 对降温胁迫下大菱鲆血清皮质醇和肾上腺素浓度的影响
Table 3 Effects of vitamin C pretreatment on serum cortisol and epinephrine concentration in turbot under cold stress

指标 Index	组别 Group	温度 Temperature/℃			
		18	13	8	3
皮质醇 Cortisol/ (ng·mL ⁻¹)	对照组 Control	75.6±1.28 a	84.5±1.94 a	89.8±1.56 a	100.5±1.50 a
	试验组 Treatment	74.8±0.75 a	82.3±1.09 b	85.4±1.25 b	89.7±1.06 b
肾上腺素 Adrenaline/ (ng·mL ⁻¹)	对照组 Control	43.6±0.68 a	48.6±0.84 a	55.8±1.24 a	63.4±1.43 a
	试验组 Treatment	41.3±0.78 a	45.6±0.43 b	48.5±0.92 b	52.4±1.14 b

2.4 维生素 C 对降温胁迫下大菱鲆血清总蛋白、白蛋白、谷丙转氨酶、鱼前蛋白转化酶枯草溶菌素-9 的影响

如表 4 所示，对照组和试验组大菱鲆总蛋白含量随温度下降呈先上升后下降的趋势，当温度降至 8 ℃ 时，试验组含量显著低于对照组 ($P<0.05$)；降温至 3 ℃ 时，对照组和试验组总蛋白含量均下降，且试验组显著低于对照组 ($P<0.05$)。对照组

大菱鲆血清白蛋白含量随温度下降呈先上升后下降的趋势，降温至 8 ℃ 时，含量达到最大值，降温至 3 ℃ 时，浓度达到最小值；试验组大菱鲆血清白蛋白质量浓度随温度下降呈上升趋势；降温至 3 ℃ 时，试验组血清白蛋白质量浓度显著高于对照组 ($P<0.05$)。对照组和试验组大菱鲆血清谷丙转氨酶活性随温度降低呈升高趋势，降温至 8、3 ℃ 时，对照组谷丙转氨酶活性显著高于试验组 ($P<$

0.05)。对照组和试验组大菱鲆血清鱼前蛋白转化酶枯草溶菌素-9 含量随温度下降整体呈上升趋势, 温度降至 8、3℃ 时, 对照组大菱鲆血清 PCSK-9 含量显著高于试验组 ($P<0.05$)。

表 4 维生素 C 对降温胁迫下大菱鲆血清 TP、ALB、ALT、PCSK-9 的影响
Table 4 Effects of vitamin C pretreatment on serum TP, ALB, ALT, and PCSK-9 of turbot under cold stress

指标 Index	组别 Group	温度 Temperature/℃			
		18	13	8	3
总蛋白 TP/(g·L ⁻¹)	对照组 Control	40.4±0.01 a	42.1±0.21 a	45.8±0.29 a	44.5±0.46 a
	试验组 Treatment	39.1±0.06 a	41.6±0.49 a	43.4±0.37 b	42.5±0.28 b
白蛋白 ALB/(g·L ⁻¹)	对照组 Control	17.8±0.10 a	18.5±0.11 b	19.3±0.14 a	18.1±0.08 b
	试验组 Treatment	17.3±0.08 a	19.2±0.09 a	19.3±0.11 a	19.6±0.14 a
谷丙转氨酶 ALT/(U·L ⁻¹)	对照组 Control	4.2±0.13 a	4.5±0.01 a	5.2±0.30 a	5.6±0.30 a
	试验组 Treatment	4.1±0.13 a	4.3±0.12 a	4.5±0.20 b	4.9±0.30 b
鱼前蛋白转化酶枯草溶菌素-9 PCSK-9/(U·L ⁻¹)	对照组 Control	0.3±0.003 a	0.3±0.009 a	0.4±0.001 a	0.6±0.010 a
	试验组 Treatment	0.3±0.003 a	0.2±0.008 a	0.3±0.001 b	0.4±0.001 b

2.5 维生素 C 对降温胁迫下大菱鲆血清谷草转氨酶、肌酸激酶、乳酸脱氢酶活性的影响

如表 5 所示, 对照组和试验组大菱鲆血清谷草转氨酶活性随温度下降呈上升趋势, 温度降至 8℃ 时, 对照组谷草转氨酶活性显著高于试验组 ($P<0.05$), 其余各温度点活性差异不显著 ($P>0.05$)。对照组和试验组血清肌酸激酶活性随温度下降总体呈

上升趋势, 温度降至 3℃ 时, 对照组肌酸激酶活性显著高于试验组 ($P<0.05$)。对照组和试验组大菱鲆血清乳酸脱氢酶随温度下降呈先上升后下降的趋势, 温度为 13℃ 和 8℃ 时, 对照组乳酸脱氢酶活性显著高于试验组 ($P<0.05$); 降温至 3℃ 时, 试验组乳酸脱氢酶活性显著高于对照组 ($P<0.05$)。

表 5 维生素 C 对降温胁迫下大菱鲆血清 AST、CK、LDH 活性的影响
Table 5 Effects of vitamin C pretreatment on serum AST, LDH, and CK activities in turbot under cold stress

指标 Index	组别 Group	温度 Temperature/℃			
		18	13	8	3
谷草转氨酶 AST/(U·L ⁻¹)	对照组 Control	33.9±0.27 a	38.2±0.48 a	45.6±0.46 a	51.6±0.41 a
	试验组 Treatment	34.5±0.41 a	36.7±0.55 a	42.8±0.38 b	50.3±0.30 a
肌酸激酶 CK/(U·L ⁻¹)	对照组 Control	991.3±21.11a	1 123.4±24.44 a	1 756.7±32.22 a	1 849.8±24.44 a
	试验组 Treatment	1 000.3±16.67 a	1 098.6±25.56 a	1 698.2±27.78 a	1 704.3±22.22 b
乳酸脱氢酶 LDH/(U·L ⁻¹)	对照组 Control	2.7±0.06 a	3.9±0.14 a	4.1±0.07 a	3.5±0.11 b
	试验组 Treatment	3.1±0.03 a	3.4±0.14 b	3.8±0.13 b	3.7±0.14 a

2.6 维生素 C 对降温胁迫下大菱鲆血清葡萄糖、肝糖原、乳酸的影响

如表 6 所示, 对照组大菱鲆血清葡萄糖含量随温度下降而下降, 降至 3℃ 时, 含量达到最低值 (1.5 ± 0.08) mmol·L⁻¹; 试验组大菱鲆血清葡萄糖含量随温度下降呈先下降后上升趋势, 降至 8℃ 时, 达到最小值 (1.6 ± 0.056) mmol·L⁻¹; 温度为 13℃

和 8℃ 时, 对照组血清葡萄糖含量显著高于试验组 ($P<0.05$), 温度降至 3℃ 时, 对照组血清葡萄糖含量显著低于试验组 ($P<0.05$)。对照组肝糖原含量随温度下降呈先下降后上升的趋势, 试验组肝糖原含量随温度下降而下降; 温度为 13℃ 和 8℃ 时, 试验组肝糖原含量显著高于对照组 ($P<0.05$), 降温至 3℃ 时, 对照组肝糖原含量显著高于试验组

($P<0.05$)。对照组和试验组大菱鲆血清乳酸浓度随温度下降而升高，降温至 3 ℃ 时，对照组和试验组含量达到最大值，对照组乳酸浓度显著高于试验组 ($P<0.05$)。

表 6 维生素 C 对降温胁迫下大菱鲆血清 GLU、肝糖原、LAC 的影响
Table 6 Effects of vitamin C pretreatment on serum GLU, liver glycogen, and LAC of turbot under cold stress

指标 Index	组别 Group	温度 Temperature/℃			
		18	13	8	3
血清葡萄糖 GLU/ (mmol·L ⁻¹)	对照组 Control	2.4±0.07 a	2.2±0.09 a	1.9±0.04 a	1.5±0.08 b
	试验组 Treatment	2.3±0.00 a	1.8±0.08 b	1.6±0.06 b	1.9±0.04 a
肝糖原 Hepatic glycogen/(mg·g ⁻¹)	对照组 Control	43.2±0.30 a	39.8±0.40 b	35.2±0.30 b	39.4±0.51 a
	试验组 Treatment	43.6±0.39 a	41.8±0.30 a	39.5±0.71 a	36.9±0.50 b
乳酸 LAC/ (mmol·L ⁻¹)	对照组 Control	0.8±0.04 a	1.5±0.03 a	2.1±0.03 a	2.5±0.04 a
	试验组 Treatment	0.9±0.03 a	1.3±0.04 b	1.7±0.03 b	2.0±0.03 b

2.7 维生素 C 对降温胁迫下大菱鲆肌肉质构及 pH 的影响

如表 7 所示，对照组与试验组肌肉的硬度均随温度的下降而呈下降趋势，试验组硬度与对照组差异不显著 ($P>0.05$)。对照组的胶黏性整体随温度下降而上升，试验组的胶黏性整体随温度下降呈先下降后上升的趋势，对照组和试验组胶黏性降温至终点时差异不显著。对照组和试验组的肌肉弹性随温度的下降整体呈下降趋势，降温至 3 ℃ 时试验组显著高于对照组 ($P<0.05$)。对照组肌肉咀嚼性随温度下降整体呈下降趋势，而试验组咀嚼型随温度下降呈先上升后下降趋势，降温至 3 ℃ 时，试验组咀嚼型显著高于对照组 ($P<0.05$)。对照组肌肉回复性随温度下降整体呈先上升后下降趋势，试验组

回复性随温度下降而呈现先下降后上升趋势，对照组和试验组无显著差异 ($P>0.05$)。对照组与试验组大菱鲆肌肉 pH 值随温度下降而下降，降温至 3 ℃ 时，对照组和试验组 pH 值达到最低值，温度为 18 ℃ 和 13 ℃ 时，对照组和试验组肌肉 pH 值无显著差异 ($P>0.05$)，温度降至 8 ℃ 和 3 ℃ 时，对照组大菱鲆肌肉 pH 值显著低于试验组 ($P<0.05$)。表明温度的降低，导致氧气的摄入量减少，部分器官出现无氧代谢，使肌肉乳酸增加，pH 下降。有研究表明^[12]，乳酸主要在肝脏和肾脏中清除，本试验持续降温条件对肝脏和肾脏造成了一定程度的损伤，对比可得，维生素 C 缓解了肝脏肾脏的损伤程度，因此试验组肌肉 pH 高于对照组。

表 7 维生素 C 对降温胁迫下大菱鲆肌肉质构及 pH 的影响
Table 7 Effects of vitamin C pretreatment on meat texture and pH of turbot under cold stress

指标 Index	组别 Group	温度 Temperature/℃			
		18	13	8	3
硬度 Hardness/N	对照组 Control	6.84±0.24 a	6.80±0.15 a	6.76±0.23 a	6.72±0.17 a
	试验组 Treatment	6.83±0.13 a	6.82±0.18 a	6.80±0.17 a	6.77±0.09 a
胶黏性 Gumminess/N	对照组 Control	0.38±0.02 b	0.42±0.02 a	0.43±0.01 a	0.43±0.02 a
	试验组 Treatment	0.41±0.02 a	0.39±0.05 b	0.44±0.02 a	0.44±0.03 a
弹性 Springiness/mm	对照组 Control	0.51±0.02 a	0.50±0.04 a	0.45±0.07 b	0.41±0.04 b
	试验组 Treatment	0.52±0.02 a	0.50±0.02 a	0.48±0.04 a	0.45±0.02 a
咀嚼性 Chewiness/mJ	对照组 Control	0.30±0.03 a	0.31±0.02 a	0.27±0.01 a	0.25±0.01 b
	试验组 Treatment	0.29±0.02 a	0.32±0.04 a	0.29±0.04 a	0.28±0.02 a
回复性 Reversibility/mm	对照组 Control	0.20±0.01 a	0.23±0.03 a	0.19±0.02 a	0.20±0.01 a
	试验组 Treatment	0.22±0.02 a	0.21±0.01 a	0.18±0.04 a	0.22±0.02 a
pH 值 pH value	对照组 Control	7.15±0.03 a	6.91±0.06 a	6.53±0.04 b	6.32±0.05 b
	试验组 Treatment	7.21±0.08 a	6.93±0.03 a	6.79±0.07 a	6.57±0.08 a

3 讨论

3.1 维生素 C 对降温胁迫下大菱鲆血液生理指标的影响

红细胞和血红蛋白是鱼体内输送氧气最主要的媒介,当鱼体应对低温天气或环境变化时,二者数量和浓度会发生变化^[13]。大菱鲆进行降温后,对照组与试验组中红细胞数量和血红蛋白均随温度降低而减少,这与纪利芹^[11]研究的大菱鲆血液生理变化的趋势一致,认为温度降低减缓了机体新陈代谢的速率,使得氧气消耗量降低,导致血液中红细胞数量和血红蛋白浓度下降。也有研究指出,鱼体的血液生理参数与温度耐受性有关^[14]。通过本研究可以得出,维生素 C 处理后的大菱鲆耐低温能力更强。血小板是成熟的巨核细胞脱落的小块胞质,仅占有核细胞的 0.05%,在鱼类机体中主要参与止血功能,当鱼类发生创伤时,血小板迅速黏附于窗口处,形成血栓栓子^[15]。在降温过程中,对照组大菱鲆出现局部出血现象,多出现于鳍部与尾部,这解释了对照组血小板浓度下降显著的现象。相较于对照组,试验组大菱鲆会轻微在下颌吻软骨处出现充血,这表明维生素 C 处理后的大菱鲆血小板凝血止血及修补破损血管的能力高于对照组。白细胞因其独特的活跃可移动能力,参与机体的防御反应,包括细胞介导的免疫反应和吞噬作用^[16]。降温过程,对照组和试验组白细胞数量明显下降,表明温度下降会对大菱鲆免疫能力产生一定的影响,这与 Slater^[17]提出急性温度变化会对免疫指标产生抑制作用的结论一致。

3.2 维生素 C 对降温胁迫下大菱鲆血清生化指标的影响

当鱼类受到刺激、损伤或死亡信号等指令,头和肾作为主要组织,由嗜铬细胞释放大量的儿茶酚胺类激素(Catecholamine),导致血液中肾上腺素(EPI)含量显著升高,使心跳加速、呼吸加快、血压升高,为鱼体活动提供更多能量并将血压及时输送至重要器官;而后脑垂体受下丘脑释放的促肾上腺皮质激素释放因子(Corticotrophin releasing factor)刺激,分泌促肾上腺皮质激素(Adrenocorticotrophic hormone)传递给肾间组织,由肾间组织产生以皮质醇(Cortisol)为主的皮质类固醇,并释放到血液中,血液中皮质醇含量的升高,可以加强能量动员,提高血糖水平,短期内增强机体非特异性免疫功能,相反,皮质醇分泌过多,也会抑制机体免疫能力,导致机体受损。因此肾上腺素和皮质醇的检测是机体发生应激反应后的常规检测,也是直接判断是否发生应激反应和机体应激反应程度的重要指标^[18]。本研究中,降温结束,对照组和试验组血清肾上腺素均显著上升,说明大菱鲆受低温胁迫,嗜

铬细胞释放肾上腺素提供能量,抵御低温,维持生命活动。孟振等^[19]研究急性热应激对大菱鲆血液生化指标影响时,发现温度变化会使大菱鲆产生应激,导致肾上腺素浓度升高,这与本试验结果一致。降温过程,试验组各温度点大菱鲆血清肾上腺素均显著低于对照组,表明大菱鲆在经过 12 h 维生素 C 处理后,机体的免疫能力得到一定的增强。作为应激反应链最后一项激素,皮质醇浓度变化可以反映鱼体应激状态^[20],浓度的显著上升表明大菱鲆在降温过程中出现了强烈的应激反应,且降温结束后神经内分泌反应不能及时恢复到应激前的状态。对比看出,试验组大菱鲆血清皮质醇浓度始终低于对照组,表明维生素 C 维持了大菱鲆机体平衡。有研究表明^[21-22],维生素 C 也在儿茶酚胺和其他激素的合成和调控中发挥重要作用,维持足够的组织灌注,这与本研究结果一致。维生素 C 调控皮质醇的合成,使其处于稳定浓度,减缓大菱鲆应对降温胁迫的应激反应。

血清总蛋白主要包括白蛋白和球蛋白,前者在肝脏内制造,当肝功能受损时白蛋白减少^[23]。后者由机体免疫器官制造,当机体内存在不利因子或外界环境恶劣时,免疫器官会增加球蛋白的制造^[24]。温度降低,大菱鲆处于应激状态,肝脏加速应激蛋白的合成,可能是此时的温度已经超过了大菱鲆的耐受范围,肝脏开始受损,各种代谢酶的活性受到抑制,这与王彩霞等^[25]、管维良^[26]的观点一致。反观白蛋白含量,对照组在 8℃ 开始下降,表明机体受低温胁迫,免疫器官制造白蛋白的能力下降,而试验组白蛋白浓度继续上升,表明免疫器官一直处于活跃状态,增强大菱鲆抵御低温胁迫的能力。以上结果表明,维生素 C 在一定程度上减缓肝脏受损程度的同时,保证免疫器官的正常工作。谷丙转氨酶是鱼体细胞内重要的功能酶^[27],是鱼类代谢过程中必不可少的催化剂,主要存在于肝细胞中,当肝细胞受损时,细胞膜通透性增加,ALT 会被释放到血液中。降温终点,对照组和试验组大菱鲆血清 ALT 活性均上升,表明两组试验鱼肝细胞出现不同程度的损伤,这与珍珠龙胆石斑鱼^[3]的研究一致。降温过程中,试验组 ALT 活性显著低于对照组,表明维生素 C 的添加平衡了肝细胞细胞膜的通透性,减缓肝细胞的受损程度。PCSK-9 是一种肝源性分泌蛋白^[28],可进入体循环影响血脂水平,还可以参与细胞的凋亡,当 PCSK-9 被激活后,细胞凋亡率也有所升高。降温过程中,PCSK-9 活力呈先下降后上升的趋势,结果与花鲈^[29]的研究一致。下降原因可能是 PCSK-9 通过消耗自身来切割半胱氨酸蛋白酶-3(Caspase-3)前体,激活 Caspase-3 活力使肝细胞凋

亡^[30]。降温至 3 ℃ 时, PCSK-9 活性显著增加, 且对照组活性高于试验组, 表明肝细胞出现不同程度的凋亡, 对照组凋亡程度较试验组更严重。以上结果表明维生素 C 可以降低 PCSK-9 的活力, 抑制肝细胞的凋亡。

医学上把谷草转氨酶、乳酸脱氢酶和肌酸激酶等 3 种酶称为心肌酶。通常情况下, 心肌酶主要分布在心肌细胞中, 血清中含量极低, 心肌细胞细胞膜系统受损后, 心肌酶会渗透到血液中, 使血液中心肌酶活性升高, 因此可以通过检测血液中心肌酶的活性来判断心肌细胞是否受损^[31]。在降温过程中, 对照组和试验组的 AST 和 CK 均随温度降低而升高, 表明低温胁迫使得大菱鲆心脏收缩力加强, 心肌细胞代谢加快, 从而使心肌细胞受损, 通透性增加。3 ℃ 时对照组和试验组大菱鲆血清 AST 和 CK 活性均达到最大值, 且无下降趋势, 表明心肌细胞受损程度已不可逆, 继续降温会使受损程度加剧。降温过程中, 试验组大菱鲆血清 AST 和 CK 活性均低于对照组, 表明维生素 C 对大菱鲆应对低温胁迫时的心脏代谢频率有一定的稳定作用。降温过程, 对照组和试验组大菱鲆血清乳酸脱氢酶随温度降低, 呈现先上升后下降的趋势, 这与纪利芹等^[32]研究连续降温对大菱鲆乳酸脱氢酶活性的变化趋势一致, 说明降温初期对心肌细胞产生了一定的影响。可能是维生素 C 对乳酸脱氢酶活性的升高有一定的抑制作用^[33], 防止机体生成大量乳酸。本试验中 LDH 显著升高后又下降, 表明乳酸脱氢酶的活性与大菱鲆对低温的适应能力相关, 说明维生素 C 增加了大菱鲆对低温的耐受力。

血糖作为血液中最重要能源物质, 是鱼类各种生命活动所需能量的直接来源。血糖常态下会保持在一个正常范围, 发生应激反应时, 肝糖原会分解为葡萄糖, 使鱼体血糖含量升高^[34]。降温过程中, 鱼类为了保持正常状态, 以血糖代谢为主, 将糖原物质转化为葡萄糖, 使葡萄糖含量增加, 以此抵御寒冷。当温度降至鱼类临界点时, 葡萄糖会被进一步分解提供能量, 此时葡萄糖浓度下降, 机体与肝脏组织抵抗寒冷的能力也下降^[35]。在降温终点, 大菱鲆血糖的对照组和试验组均随温度降低而降低, 但试验组血糖浓度显著高于对照组, 表明持续的降低温度, 促使大菱鲆通过血糖代谢来适应低温, 增加产热量以抵御寒冷, 这与黑鲷^[36]的研究一致。而维生素 C 的添加提高了试验组大菱鲆对低温的忍耐力, 因此含量高于对照组。对照组大菱鲆无法适应当前温度, 肝脏增加肝糖原的合成, 并分解成葡萄糖供能, 以此维持基础生命活动。试验组大菱鲆经维生素 C 的处理, 适应低温能力变强。在降温终点, 对照组和试验组肝糖原的变化趋势与血糖

基本一致, 原因可能是血清葡萄糖浓度的降低意味着需要更多的糖原分解提供葡萄糖, 而鱼体内血清葡萄糖一般是由肝糖原分解提供^[37], 所以为满足血清葡萄糖含量的增加, 肝脏也加速了肝糖原分解。表明为了维持机体生命活动, 肝脏开始合成肝糖原, 以此应对低温胁迫^[38]。对比对照组, 维生素 C 处理后的大菱鲆耐低温能力更强。乳酸是反应机体细胞是否缺氧的敏感标志物, 只能在肝脏和肾脏中清除, 当肝、肾受损时, 会导致细胞膜通透性增高, 血清乳酸含量升高^[39]。对照组和试验组血清乳酸含量随温度降低而升高。刘伟东^[40]研究发现, 大菱鲆在低温保活时, 随着时间的延长, 呼吸频率和鳃动幅度明显降低, 导致氧气的摄入量减少, 部分器官出现无氧代谢, 使肌肉乳酸增加。此时肝、肾组织在长时间的低温环境下, 出现不同程度损伤, 细胞膜通透性增加, 导致血液中乳酸含量增加。持续的低温使新陈代谢水平降低, 乳酸无法及时清除, 导致血清中乳酸持续升高, 这与本试验研究结果一致。试验组血清乳酸含量显著低于对照组, 李勇男^[41]研究维生素 C 缓解鲤鱼氨氮胁迫发现, 添加维生素 C 的鲤鱼组, 体内乳酸含量低于未添加组, 表明维生素 C 对清除体内自由基以及减缓肝脏受损程度有一定的效果, 与本试验研究结果一致。

3.3 维生素 C 对降温胁迫下大菱鲆肉质品质指标的影响

鱼肉的硬度、弹性、胶黏性、咀嚼性、回复性等是衡量其品质的重要指标, 能客观反映肉质随外界环境变化的情况^[42]。对照组与试验组肌肉的硬度、弹性、咀嚼性均随温度下降而下降, 而胶黏性和回复性随温度的下降而变化不显著。相较于试验组, 对照组由于持续低温胁迫, 肌肉组织中肌纤维蛋白变性, 形成凝胶能力下降^[43], 导致肌肉硬度、弹性、咀嚼性下降, 说明维生素 C 能够影响肌肉组织, 促进部分肌原纤维蛋白结晶, 这与鲫鱼^[44]的研究结果一致。鱼类肌肉 pH 在常规情况下呈弱碱性, 当外界环境改变, 鱼类遭受胁迫反应, 新陈代谢加快, 运动量增大, 体内酶作用和体细胞无氧呼吸产生大量乳酸, pH 下降。

4 结论

本研究通过研究水体中添加维生素 C 以缓解大菱鲆的降温胁迫及肌肉品质试验, 得出 50 mg·L⁻¹ 维生素 C 处理后的大菱鲆, 应激及肝肾脏损伤程度得到缓解, 能量代谢和肌肉品质也更稳定, 大菱鲆可以通过维生素 C 处理方式缓解诱导休眠产生的胁迫。下一步可以借助现代分子生物学手段, 研究鱼类应激诱导生命体征波动与温度的动态关联机制。

参考文献:

- [1] NIE X B, ZHANG F, WANG T T, et al. Physiological and morphological changes in Turbot (*Psetta maxima*) gill tissue during waterless storage [J]. *Aquaculture*, 2019, 508: 30–35.
- [2] 曹杰, 王琪, 梅俊, 等. 有水与无水保活运输对大菱鲆生理应激及鱼肉品质的影响 [J]. 水产学报, 2021, 45 (7): 1034–1042.
CAO J, WANG Q, MEI J, et al. Effects of transport in water and waterless transport on physiological stress and flesh quality of turbot (*Scophthalmus maximus*) [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2021, 45 (7): 1034–1042. (in Chinese)
- [3] 范秀萍. 珍珠龙胆石斑鱼低温休眠无水保活的胁迫响应与机制研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2019.
FAN X P. Stress response and mechanism of waterless preservation after low-temperature induced dormancy on pearl gentian grouper (*♀Epinephelus fuscoguttatus* × *♂Epinephelus lanceolatus*)[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2019. (in Chinese)
- [4] 梁俊平, 张静, 覃宝利, 等. 维生素C对氨氮胁迫下大鳞鲂幼鱼存活及鳃抗氧化酶活性的影响 [J]. 河南农业科学, 2020, 49 (1): 157–164.
LIANG J P, ZHANG J, QIN B L, et al. Effects of vitamin C on the survival and antioxidant enzyme activities of juvenile *Barbus capito* under ammonia-N stress [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2020, 49 (1): 157–164. (in Chinese)
- [5] WANG J, REN T J, WANG F Q, et al. Effects of dietary cadmium on growth, antioxidants and bioaccumulation of sea cucumber (*Apostichopus japonicus*) and influence of dietary vitamin C supplementation [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, 129: 145–153.
- [6] YIN Y L, ZHANG P J, LIU J, et al. Amelioration of Cd-induced oxidative stress, MT gene expression, and immune damage by vitamin C in grass carp kidney cells [J]. *Biological Trace Element Research*, 2020, 194 (2): 552–559.
- [7] 王垚, 傅新鑫, 潘锦锋, 等. 大菱鲆背部肌肉基本组成、质构及加工特性 [J]. 食品科学, 2015, 36 (23): 64–69.
WANG Y, FU X X, PAN J F, et al. Chemical composition, texture and processing characteristics of dorsal and abdominal muscles of turbot (*Scophthalmus maximus*) [J]. *Food Science*, 2015, 36 (23): 64–69. (in Chinese)
- [8] 吴胜泽, 熊波, 黄钟标, 等. 无水保活下鲫鱼生理生化指标的变化 [J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9 (15): 3992–3998.
WU S Z, XIONG B, HUANG Z B, et al. Changes of physiological and biochemical properties of Crucianauratus waterless keep-alive during the transportation [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2018, 9 (15): 3992–3998. (in Chinese)
- [9] ZHAO Y, ZHAO J X, ZHANG Y, et al. Effects of different dietary vitamin C supplementations on growth performance, mucus immune responses and antioxidant status of loach (*Misgurnus anguillicaudatus* Cantor) juveniles [J]. *Aquaculture Research*, 2017, 48 (8): 4112–4123.
- [10] CHING B, CHEW S F, WONG W P, et al. Environmental ammonia exposure induces oxidative stress in gills and brain of *Boleophthalmus boddarti* (mudskipper) [J]. *Aquatic Toxicology*, 2009, 95 (3): 203–212.
- [11] 纪利芹. 连续降温对大菱鲆血液生理生化指标的影响及分子机制[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
JI L Q. Effect of continuous cooling on blood physiological and biochemical indexes of turbot and its molecular mechanism[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014. (in Chinese)
- [12] 黄湘涓, 黄和, 秦小明, 等. 纯氧及气调无水保活下珍珠龙胆石斑鱼存活情况及机理变化比较[J/OL]. 食品科学: 1-12[2022-08-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20220107.1530.002.html>.
HUANG X M, HUANG H, QIN X M, et al. Comparison of survival condition and mechanism changes of grouper (*♀Epinephelus fuscoguttatus* × *♂Epinephelus lanceolatus*) under pure oxygen group and controlled atmosphere group during waterless live transportation[J]. *Food Science*, 1-12[2022-08-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20220107.1530.002.html>.
- [13] AKBARIAN A, MICHIELS J, DEGROOTE J, et al. Association between heat stress and oxidative stress in poultry; mitochondrial dysfunction and dietary interventions with phytochemicals [J]. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 2016, 7 (1): 37.
- [14] WEBER J, BOCHI V C, RIBEIRO C P, et al. Effect of different cooking methods on the oxidation, proximate and fatty acid composition of silver catfish (*Rhamdia quelen*) fillets [J]. *Food Chemistry*, 2008, 106 (1): 140–146.
- [15] 蒋红英, 朱亮, 余曦, 等. 富血小板血浆干预脊髓损伤患者压力性损伤的作用 [J]. 中国组织工程研究, 2021, 25 (8): 1149–1153.
JIANG H Y, ZHU L, YU X, et al. Effect of platelet-rich plasma on pressure ulcers after spinal cord injury [J]. *Chinese Journal of Tissue Engineering Research*, 2021, 25 (8): 1149–1153. (in Chinese)
- [16] 刘慧兰, 陈晓梅, 曾小峰. 白细胞介素-17A在脊柱关节炎骨代谢中的作用 [J]. 中华风湿病学杂志, 2021 (10): 688–691.
LIU H L, LENG X M, ZENG X F. Role of interleukin-17A in bone metabolism of spinal arthritis [J]. *Chinese Journal of Rheumatology*, 2021 (10): 688–691. (in Chinese)
- [17] SLATER C H, SCHRECK C B. Testosterone alters the immune response of Chinook salmon, *Oncorhynchus tshawytscha* [J]. *General and Comparative Endocrinology*, 1993, 89 (2): 291–298.
- [18] 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.
LIU J, LU Y T, WANG N, et al. Effects of dietary vitamin C on growth, immunity and antistress capability of fish: A review [J]. *Fisheries Science & Technology Information*, 2020, 47 (5): 289–291, 300. (in Chinese)
- [19] 孟振, 张鸿丽, 刘新富, 等. 急性热应激对大菱鲆血液生化指标的影响 [J]. 海洋科学, 2020, 44 (1): 122–131.
MENG Z, ZHANG H L, LIU X F, et al. Effect of acute heat stress on plasma biochemical indexes in turbot *Scophthalmus maximus* [J]. *Marine Sciences*, 2020, 44 (1): 122–131. (in Chinese)
- [20] 刘峰, 王舒淇, 朱绍彰, 等. 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 [J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12 (16): 6310–6316.
LIU F, WANG S Q, ZHU S Z, et al. Research progress on the live transportation of fish and its effect on muscle and physiological and biochemical indexes of blood [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2021, 12 (16): 6310–6316. (in Chinese)
- [21] HONORE P M, JACOBS R, HENDRICKX I, et al. Adjuvant vitamin

- C treatment in sepsis-how many oranges a day keep (vasopressor-dependent) septic shock away? [J]. *Journal of Thoracic Disease*, 2016, 8 (9): E993-E995.
- [22] BERGER M M, OUDEMANS-VAN STRAATEN H M. Vitamin C supplementation in the critically ill patient [J]. *Current Opinion in Clinical Nutrition and Metabolic Care*, 2015, 18 (2): 193-201.
- [23] 阮振婷, 王留超, 吴志伟, 等. 竹叶黄酮对萧山鸡公鸡精液品质和血液生理生化指标的影响 [J]. *中国畜牧杂志*, 2022, 58 (3): 109-114.
- RUAN Z T, WANG L C, WU Z W, et al. Effects of bamboo leaves on Semen quality and blood physiological and biochemical indexes of Xiaoshan chickens [J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2022, 58 (3): 109-114. (in Chinese)
- [24] ANTONY P A, PAULO S C M, AHMADZADEH M, et al. Interleukin-2-dependent mechanisms of tolerance and immunity *In vivo* [J]. *The Journal of Immunology*, 2006, 176 (9): 5255-5266.
- [25] 王彩霞, 白婵, 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 C X, BAI C, LI N, et al. Comparison of dormancy at different cooling rates on the survival of *Micropterus salmoides* without water [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2020, 36 (5): 129-137, 41. (in Chinese)
- [26] 管维良. 南美白对虾无水保活及其生化和肉质的应激响应[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- GUAN W L. Keeping *Penaeus vannamei* alive without water and its biochemical and meat stress response[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020. (in Chinese)
- [27] 杜浩, 危起伟, 甘芳, 等. 美洲鲈应激后皮质醇激素和血液生化指标的变化 [J]. *动物学杂志*, 2006, 41 (3): 80-84.
- DU H, WEI Q W, GAN F, et al. Changes in serum cortisol and blood biochemical parameters after stress in American shad [J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2006, 41 (3): 80-84. (in Chinese)
- [28] ALBORN W E, CAO G Q, CARESKEY H E, et al. Serum proprotein convertase subtilisin kexin type 9 is correlated directly with serum LDL cholesterol [J]. *Clinical Chemistry*, 2007, 53 (10): 1814-1819.
- [29] 张玉晗, 谢晶. 低温休眠预处理对花鲈无水保活效果的影响 [J]. *食品科学*, 2018, 39 (23): 221-226.
- ZHANG Y H, XIE J. Effect of precooling treatment on survival of *Lateolabrax maculatus* during live transportation without using water [J]. *Food Science*, 2018, 39 (23): 221-226. (in Chinese)
- [30] LAN H, PANG L, SMITH M M, et al. Proprotein convertase subtilisin/kexin type 9 (PCSK9) affects gene expression pathways beyond cholesterol metabolism in liver cells [J]. *Journal of Cellular Physiology*, 2010, 224 (1): 273-281.
- [31] 宋志明, 刘鉴毅, 庄平, 等. 低温胁迫对点篮子鱼幼鱼肝脏抗氧化酶活性及丙二醛含量的影响 [J]. *海洋渔业*, 2015, 37 (2): 142-150.
- SONG Z M, LIU J Y, ZHUANG P, et al. Influence of low-temperature stress on the antioxidant enzymes activities and malondialdehyde contents in liver of juvenile *Siganus guttatus* [J]. *Marine Fisheries*, 2015, 37 (2): 142-150. (in Chinese)
- [32] 纪利芹, 张明明, 王雷, 等. 连续降温对大菱鲆(*Scophthalmus maximus*)成鱼血清生化指标及Wap65-1基因表达的影响 [J]. *海洋与湖沼*, 2015, 46 (2): 432-439.
- JI L Q, ZHANG M M, WANG L, et al. Effect of continuous cooling on serum biochemical parameters and wap65-1 expression of adult turbot *Scophthalmus maximus* [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2015, 46 (2): 432-439. (in Chinese)
- [33] 韦力, 王海燕, 邵伟伟, 等. 葡萄糖和维生素C对镇海林蛙蝌蚪生长及其三种酶活性的影响 [J]. *动物学杂志*, 2020, 55 (2): 229-237.
- WEI L, WANG H Y, SHAO W W, et al. Effects of glucose and vitamin C on growth and activities of three enzymes of *Rana zhenhaiensis* tadpoles [J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2020, 55 (2): 229-237. (in Chinese)
- [34] BARCELLOS L G, WOEHL V M, WASSERMANN G F, et al. Plasma levels of cortisol and glucose in response to capture and tank transference in *Rhamdia quelen* (Quoy & Gaimard), a South American catfish [J]. *Aquaculture Research*, 2001, 32 (2): 121-123.
- [35] PANKHURST N W. The endocrinology of stress in fish: An environmental perspective [J]. *General and Comparative Endocrinology*, 2011, 170 (2): 265-275.
- [36] 吴云辉, 邱松林, 蔡真珍, 等. 温度对黑鲟无水保活工艺的影响 [J]. *热带生物学报*, 2016, 7 (3): 314-317.
- WU Y H, QIU S L, CAI Z Z, et al. Effects of temperatures on waterless storage of live black seabream [J]. *Journal of Tropical Biology*, 2016, 7 (3): 314-317. (in Chinese)
- [37] AXELROD J, REISINE T D. Stress hormones: Their interaction and regulation [J]. *Science*, 1984, 224 (4648): 452-459.
- [38] YUE X, HUAN P, HU Y H, et al. Integrated transcriptomic and proteomic analyses reveal potential mechanisms linking thermal stress and depressed disease resistance in the turbot *Scophthalmus maximus* [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8 (1): 1896.
- [39] KUCHERENKO I S, TOPOLNIKOVA Y V, SOLDATKIN O O. Advances in the biosensors for lactate and pyruvate detection for medical applications: A review [J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2019, 110: 160-172.
- [40] 刘伟东. 大菱鲆(*Scophthalmus maximus*)保活的基础研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
- LIU W D. Basic research on keep-alive of turbot (*Scophthalmus maximus*) [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009. (in Chinese)
- [41] 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.
- LI Y N. Study on alleviation of transport stress in *Cyprinus carpio* by adding vitamin C to water [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2016. (in Chinese)
- [42] KNIERBEIN M, VENHUIS M, HELD C, et al. Thermodynamic properties of aqueous osmolyte solutions at high-pressure conditions [J]. *Biophysical Chemistry*, 2019, 253: 106211.
- [43] 钱攀. 液体快速冻结对鲢鱼品质影响的研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2017.
- QIAN P. Study on the quality of bighead carps after liquid quick freezing [D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2017. (in Chinese)
- [44] 李卢, 张长峰, 吴佳静, 等. 高压对鲫鱼无水保活的影响 [J]. *食品工业科技*, 2020, 41 (20): 261-265.
- LI L, ZHANG C F, WU J J, et al. Effect of high pressure on the water-free survival of crucian carp [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41 (20): 261-265. (in Chinese)

(责任编辑: 张梅)