

[引用格式] 胡文凯, 张春晓, 李学山, 等. 饲料中添加辅酶 Q10 对花鲈抗高温胁迫能力的影响[J]. 集美大学学报(自然科学版), 2026, 31(2): 139-150. DOI: 10.19715/j.jmuzr.2026.02.02.

饲料中添加辅酶 Q10 对花鲈抗高温胁迫能力的影响

胡文凯^{1,2}, 张春晓^{1,2}, 李学山^{1,2}, 王 玲^{1,2}, 宋 凯^{1,2}, 鲁康乐^{1,2}

(1. 集美大学水产学院, 福建 厦门 361021; 2. 厦门市饲料质量检测与安全评价重点实验室, 福建 厦门 361021)

[摘要] 为开发提高花鲈 (*Lateolabrax maculatus*) 抗高温胁迫能力的功能性饲料, 在基础饲料中分别添加 0、10、20 mg/kg 的辅酶 Q10, 分别记为 Con、C10 和 C20。在水温为 33 ℃ 的高温胁迫环境中, 用这 3 种饲料分别投喂花鲈 56 d。结果表明, 在高温胁迫下, C10 和 C20 都可显著提高花鲈的增重率 ($P < 0.05$), 并缓解花鲈鳃和肝脏组织结构损伤, 减少肝脏脂肪沉积, 显著提高花鲈总抗氧化能力 (total antioxidant capacity, T-AOC)、超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD) 和过氧化氢酶 (catalase, CAT) 的活性 ($P < 0.05$), 显著降低肝脏丙二醛 (malondialdehyde, MDA) 含量 ($P < 0.05$), 缓解氧化应激。进一步研究发现, C10 和 C20 还能增强花鲈线粒体功能, 显著提高柠檬酸合成酶 (citrate synthase, CS) 和琥珀酸脱氢酶 (succinate dehydrogenase, SDH) 的活性 ($P < 0.05$), 提高线粒体三羧酸循环速率, 并显著上调线粒体自噬和生成相关基因 *pink1*、*mul1*、*atg5*、*pgc-1 α* 、*pgc-1 β* 、*nrf1* 的相对表达量 ($P < 0.05$), 促进线粒体的自我更新与修复, 维持正常的线粒体功能。因此, 在饲料中添加 10 或 20 mg/kg 辅酶 Q10 可以显著提高花鲈抗高温胁迫的能力。

[关键词] 花鲈; 热应激; 辅酶 Q10; 生长性能; 线粒体功能

[中图分类号] S963.73 [文章编号] 1007-7405(2026)02-0139-12 DOI: 10.19715/j.jmuzr.2026.02.02

The Influence of Dietary Coenzyme Q10 on the Resistance of Spotted Seabass (*Lateolabrax maculatus*) to Heat Stress

HU Wenkai^{1,2}, ZHANG Chunxiao^{1,2}, LI Xueshan^{1,2},

WANG Ling^{1,2}, SONG Kai^{1,2}, LU Kangle^{1,2}

(1. Fisheries College, Jimei University, Xiamen 361021, China;

2. Xiamen Key Laboratory for Feed Quality Testing and Safety Evaluation, Xiamen 361021, China)

Abstract: To develop a functional feed that enhances the high-temperature stress resistance of *Lateolabrax maculatus*, this study focused on *L. maculatus* and added 0, 10 and 20 mg/kg of coenzyme Q10 to the basic feed, denoted as Con, C10 and C20, respectively. In a high-temperature stress environment with a water temperature of 33 ℃, these three types of feed were fed to sea bass separately for 56 days. The results demonstrated that adding 10 or 20 mg/kg of coenzyme Q10 to the diet could significantly increase the lower weight gain of spotted seabass under heat stress, and alleviate the morphological damage of gill and liver of spotted seabass,

[收稿日期] 2025-03-02

[基金项目] 福建省杰出青年科学基金项目 (2023J06035)

[通信作者] 鲁康乐, 博士, 教授, 主要从事水产动物营养与饲料研究, E-mail: lukangle@jmu.edu.cn

reduce the fatty deposition of liver, significantly increase the activities of total antioxidant capacity (T-AOC), superoxide dismutase (SOD), and catalase (CAT) of spotted seabass, and significantly decrease the malondialdehyde (MDA) content in liver and alleviate oxidative stress. Further studies revealed that coenzyme Q10 also promoted the mitochondrial function of the spotted seabass, significantly increased the activities of citrate synthase (CS) and succinate dehydrogenase (SDH), increased the rate of the mitochondrial tricarboxylic acid cycle, and significantly up-regulated the relative expression of the mitochondrial autophagy and generation-related genes *pink1*, *mul1*, *atg5*, *pgc-1 α* , *pgc-1 β* and *nrf1*, which promoted the mitochondrial self-renewal and repair, and maintain normal mitochondrial function. So adding either 10 or 20 mg/kg of coenzyme Q10 to the diet could enhance the spotted seabass's ability to withstand heat stress and significantly improve its growth performance.

Keywords: *Lateolabrax maculatus*; heat stress; coenzyme Q10; growth performance; mitochondrial function

0 引言

鱼类作为变温动物,环境温度会直接影响鱼类的生长发育^[1]。当环境温度升高时,鱼类的新陈代谢水平也会随之升高,这可以促进鱼类生长发育^[2]。但是,当环境温度过高超过鱼类的适宜温度范围时,鱼类会发生热应激^[3]。热应激是机体响应高温刺激的一系列非特异性反应的总和,鱼类热应激症状常表现为生长性能下降、饲料系数升高、能量代谢紊乱和脂质异常沉积等^[4]。花鲈 (*Lateolabrax maculatus*) 是中国南方广泛养殖的一种重要经济鱼类,它的最适水温范围为 16 ~ 27 °C^[5]。在夏季,中国南方如福建省和广东省一些水域的水温长时间在 30 °C 以上^[6],这超出了花鲈的适宜温度范围,使花鲈长期处于高温胁迫环境中。

高温胁迫会直接影响鱼类的能量需求^[7],促使鱼类将生长和繁殖的能量进行重新分配,以抵抗高温胁迫,恢复生理平衡^[8-9]。研究表明,高温胁迫会诱发鱼类脂肪肝^[10-11]和脂质过氧化反应,积累大量的活性氧 (reactive oxygen species, ROS),造成机体氧化应激^[12]。线粒体是对各种损伤最敏感的细胞器^[13]。本实验室的前期研究结果表明,高温胁迫会导致花鲈线粒体损伤^[14],线粒体损伤会导致三羧酸循环紊乱,机体能量转化受阻,进而提高饲料系数,降低鱼类生长性能。高温胁迫会大幅降低养殖效益,严重危害水产养殖业的发展,所以如何缓解高温胁迫对水产养殖业造成的危害,已经成为迫在眉睫的问题。

目前,人们主要通过遗传育种、养殖模式优化和开发功能性饲料等途径来提高鱼类抗高温胁迫能力。其中,功能性饲料因具有开发周期短、简单高效等优势,成为鱼类抵抗高温胁迫的有效方法。辅酶 Q10 (coenzyme Q10, CoQ10) 是一种脂溶性的醌类化合物,广泛存在于动植物的组织器官中,在电子传递链中起关键作用^[15],可增强线粒体功能,是一种优质的线粒体营养素^[16]。同时,辅酶 Q10 也是一种抗氧化剂和自由基清除剂^[17],可保护 DNA、细胞膜和蛋白质免受自由基攻击,并维持健康的能量水平^[18]。研究表明,辅酶 Q10 可以提高鸡心脏抗氧化能力,缓解其在热应激期间的病理损伤,增强鸡抗高温胁迫的能力^[19-20]。另外,辅酶 Q10 可以显著提高尼罗罗非鱼增重率及抗无乳

链球菌侵染的能力^[21]。这些研究结果表明, 辅酶 Q10 作为功能性添加剂潜力巨大, 而关于辅酶 Q10 对鱼类抗高温胁迫能力的影响尚未见报道。因此, 本文以花鲈为研究对象, 探究饲料中添加辅酶 Q10 对花鲈抗高温胁迫能力的影响和提高花鲈抗高温胁迫能力的潜在机制。

1 材料与方法

1.1 实验饲料的制备

根据花鲈的营养需求, 本实验以鱼粉、鸡肉粉、谷朊粉、豆粕为主要蛋白源, 鱼油、豆油、卵磷脂为主要脂肪源, 制备含 44% 蛋白质和 11% 脂肪的基础饲料。在基础饲料中分别添加 0、10、20 mg/kg 的辅酶 Q10, 配制成 3 种实验饲料, 分别记为 Con、C10 和 C20。所有饲料原料均采用风冷吸尘粉碎机 (ZFJ-300, 江阴市睿宗机械制造有限公司) 粉碎后过 60 目筛, 通过逐级扩大混匀法将各原料充分混合, 然后添加饲料质量 30% 的水, 使用双螺旋杆饲料挤条机 (F-76, 广州华工光机电科技有限公司) 挤条后, 制作成粒径为 2 mm 的硬颗粒饲料, 自然风干后储存于 -20 °C 冰箱备用。饲料的具体配方见表 1, 部分饲料原料的主要营养成分见表 2。

表 1 实验饲料配方及营养成分 (干物质基础)

Tab.1 Formulation and nutrition composition of experimental diets (dry matter basis)

		单位: %		
指标	成分	Con	C10	C20
原料	鱼粉	26.85	26.85	26.85
	鸡肉粉	8.47	8.47	8.47
	谷朊粉	7.30	7.30	7.30
	豆粕	25.00	25.00	25.00
	α-淀粉	3.00	3.00	3.00
	面粉	20.03	20.03	20.03
	鱼油	2.00	2.00	2.00
	豆油	2.00	2.00	2.00
	卵磷脂	2.00	2.00	2.00
	维生素 C	0.05	0.05	0.05
	多维 ^a	0.30	0.30	0.30
	多矿 ^b	0.50	0.50	0.50
	氯化胆碱	0.50	0.50	0.50
	磷酸二氢钙	2.00	2.00	2.00
	辅酶 Q10	0	0.001	0.002
营养水平	粗蛋白 ^c	44.59	44.78	44.33
	粗脂肪 ^c	11.58	11.36	11.67
	水分 ^c	10.33	10.23	10.04

注: 上标 a 和 b 为维生素预混料和矿物质预混料的组分, 参考本实验室的已有研究^[22]; 上标 c 为营养水平的实测值。

1.2 养殖管理和样品采集

养殖实验于福建省厦门市集美大学水产试验场进行，实验所用花鲈购自诏安县闽溪水产养殖场培育的同一批鱼苗。鱼苗驯养两周后，将 180 尾健康均匀的花鲈幼鱼（ (4.2 ± 0.1) g）随机分到循环养殖系统的 9 个圆柱形水箱（340 L）中，每个水箱 20 尾。用养殖系统的恒温机以 1 ℃/d 的速度将养殖系统水温提高到 33 ℃，恒温机可以维持水温稳定，养殖时间为 8 周，每天饱食投喂 2 次（8:30 和 17:30）。饲养期间，养殖水体的温度为 33 ℃，pH 6.7~7.0，溶解氧 >8 mg/L。

在实验结束时将所有鱼饥饿 24 h，然后捞出养殖桶中的鱼，用 MS-222 麻醉后称重、测量体长，从每个桶捞出的鱼中随机抽出 10 条鱼进行解剖，对内脏团、肝脏和腹部脂肪进行称重。收集鳃和肝脏样品，将其切割成小块并置于 4%（质量分数）的多聚甲醛溶液中进行固定，用于组织学分析。其余鳃和肝脏样品则在液氮中迅速冷冻，然后转移到 -80 ℃冰箱冷冻保存。

1.3 样品的测定与分析

1.3.1 生长性能指标的计算

鱼类生长性能的指标主要有增重率（WGR）、特定生长率（SGR）、饲料系数（FCR）、腹脂率（AFR）、摄食量（FI）、存活率（SR）等，它们的计算公式分别为： $WGR/\% = (W_f - W_i)/W_i \times 100$ ， $SGR/(\% \cdot d^{-1}) = (\ln W_f - \ln W_i)/t \times 100$ ， $FCR = F/(W_i + W_d - W_0)$ ， $AFR/\% = W_a/W_s \times 100$ ， $FI/(g \cdot 尾^{-1}) = F/N_i$ ， $SR/\% = N_f/N_i \times 100$ 。其中： W_i 为花鲈初均质量（g）； W_f 为花鲈末均质量（g）； W_0 为花鲈初总质量（g）； W_i 为花鲈末总质量（g）； W_d 为死鱼总质量（g）； N_i 为初始花鲈数量； N_f 为终末花鲈数量； W_a 为腹脂质量（g）； W_s 为单尾鱼质量（g）； t 为饲喂天数（d）； F 为摄食饲料总质量（g）。

1.3.2 生理生化指标的测定

采用商业试剂盒（南京建成生物工程研究所）检测花鲈肝脏甘油三酯（triacylglycerol, TG）A110-1-1、总胆固醇（total cholesterol, T-CHO）A111-1-1、丙二醛（malondialdehyde, MDA）A003-1-2、总抗氧化能力（total antioxidant capacity, T-AOC）A015-2-1、超氧化物歧化酶（superoxide dismutase, SOD）A001-3-2、过氧化氢酶（catalase, CAT）A007-1-1、柠檬酸合成酶（citrate synthase, CS）A108-1-2 和琥珀酸脱氢酶（succinate dehydrogenase, SDH）A022-1-1 的活性。

1.3.3 组织学分析

1) 肝脏和鳃组织 H&E 切片的制备。将肝脏和鳃组织切成小的组织块（0.5 cm × 0.3 cm × 0.3 cm），乙醇脱水、二甲苯透明、石蜡透蜡等程序后，将组织块包埋于石蜡中，用旋转式切片机将石蜡块切成厚度为 10 μm 的组织切片，苏木精-伊红染色后，在光学显微镜（徕卡 DM5500B）下观察和拍照。

2) 肝脏油红 O 染色。将肝组织放入 4%（质量分数）多聚甲醛中固定 24 h 后取出，

表 2 部分饲料原料的主要营养成分

Tab.2 Partial feed ingredients and their principal nutritional constituents

单位:%		
原料	粗蛋白	粗脂肪
鱼粉	69.05	11.44
鸡肉粉	72.20	13.30
谷朊粉	77.10	2.62
面粉	13.95	3.36

于 200 g/L 蔗糖溶液中脱水, 然后置于 OTC 包埋剂 (G6059, Servicebio) 中, 在冷冻切片机 (CRYOSTAR NX50, Thermo Scientific) 中于 -20 ℃ 下完成包埋、切片。随后, 使用油红 O 染液 (G1015, Servicebio) 与苏木精染液 (G1004, Servicebio) 对脂滴染色, 在光学显微镜 (徕卡 DM5500B) 下观察和拍照。

1.3.4 实时荧光定量 PCR (qRT-PCR)

使用商业试剂盒 (南京诺唯赞生物科技有限公司) 从肝脏样品中提取总 RNA, 通过 1% (质量分数) 琼脂糖凝胶电泳检测 RNA 的完整性, 并使用 NanoDrop™ One 分光光度计 (Thermo Scientific, USA) 在 260 nm/280 nm 处测定纯度。根据文献 [22] 将总 RNA 逆转录为 cDNA。采用实时

荧光定量 PCR (qRT-PCR) 检测基因表达情况。引物利用 Primer 5.0 软件设计, 由生工生物工程 (上海) 股份有限公司合成。靶基因的相对表达量通过 β -actin 归一化, 并通过 $2^{-\Delta\Delta Ct}$ 方法计算。引物序列见表 3。

1.3.5 数据的统计与分析

采用 SPSS 22.0 统计软件对实验数据进行单因素方差分析。各组间的多重比较采用 Tukey 检验。当 $P < 0.05$ 时, 差异具有统计学意义。

2 结果

2.1 辅酶 Q10 对高温胁迫下花鲈生长性能和饲料利用的影响

由表 4 可见, 在高温胁迫下, 与对照组相比, C10 和 C20 组的增重率显著升高 ($P < 0.05$), 饲料系数和肝体比显著降低 ($P < 0.05$), 且腹脂率有下降趋势, 但未达到显著差异 ($P > 0.05$)。

表 4 辅酶 Q10 对高温胁迫下花鲈生长性能和饲料利用的影响

Tab. 4 Effects of CoQ10 on growth performance and feed utilization of *L. maculatus* under heat stress

指标	Con	C10	C20
WGR/%	668.78 ± 60.08 ^a	796.79 ± 19.11 ^b	819.23 ± 25.69 ^b
SGR/(% · d ⁻¹)	3.83 ± 0.21	4.06 ± 0.04	4.10 ± 0.05
FCR	1.26 ± 0.05 ^b	1.17 ± 0.03 ^a	1.16 ± 0.03 ^a
IFR/%	5.72 ± 0.14	5.43 ± 0.45	5.14 ± 0.32
HSI	1.11 ± 0.03 ^b	1.05 ± 0.04 ^{ab}	0.95 ± 0.07 ^a
摄食量/(g · 尾 ⁻¹)	36.59 ± 3.11	39.64 ± 2.02	40.22 ± 2.26
SR/%	95 ± 5.00	93.33 ± 11.55	100

注: 数据以平均值 ± 标准差表示, 上标字母不同表示差异具有统计学意义 ($P < 0.05$)。

2.2 辅酶 Q10 对高温胁迫下花鲈组织结构的影响

由图 1 可见，在高温胁迫下，对照组的鳃丝排列不整齐，鳃小片发生融合、断裂现象，部分鳃丝与鳃弓间出现间隙，鳃结构严重受损；而 C10 组和 C20 组鳃丝排列整齐，只有少部分出现鳃小片融合。说明辅酶 Q10 显著缓解了高温胁迫下花鲈的鳃组织损伤。

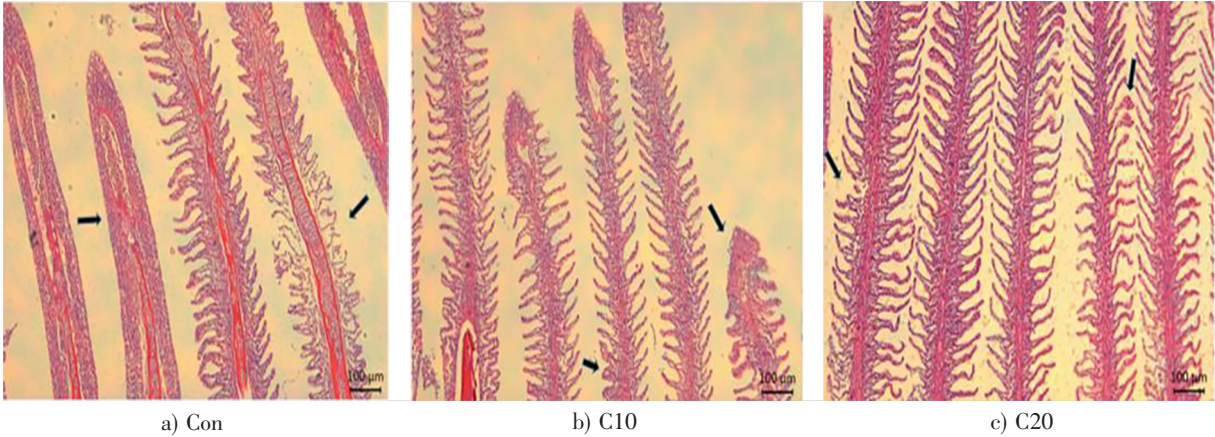


图 1 辅酶 Q10 对高温胁迫下花鲈鳃组织形态的影响(×40)

Fig.1 Effects of CoQ10 on gill tissue morphological structure of *L. maculatus* under heat stress(×40)

花鲈肝脏肝细胞呈多角形，细胞核大而圆。由图 2 可见，对照组肝细胞肿胀，大部分细胞核消失或处于细胞边缘，细胞界限不清晰；而 C10 组和 C20 组大部分肝细胞正常，未发生肿大，细胞核位于细胞中央，细胞边界清晰，细胞膜没有破裂。

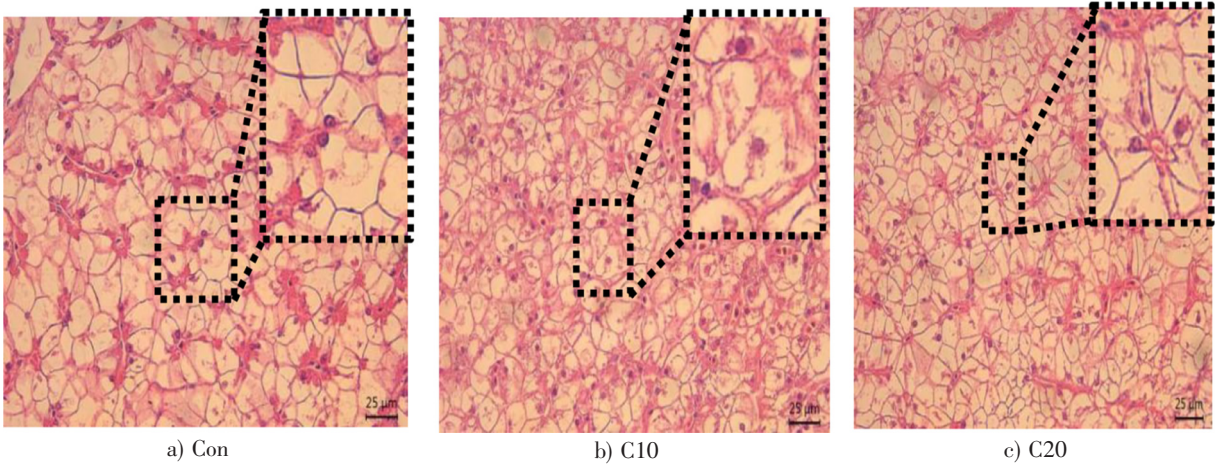


图 2 辅酶 Q10 对高温胁迫下花鲈肝脏组织结构的影响(×400)

Fig.2 Effects of CoQ10 on liver tissue morphological structure of *L. maculatus* under heat stress(×400)

2.3 辅酶 Q10 对高温胁迫下花鲈脂质沉积的影响

由图 3 可见，与对照组相比，C10 和 C20 组肝脏中的甘油三酯（TG）、总胆固醇（T-CHO）含量显著降低（ $P < 0.05$ ）；在肝脏油红 O 染色的结果中也发现，对照组花鲈肝脏中有大量脂滴，而 C10 和 C20 组中的脂滴数量明显少于对照组。

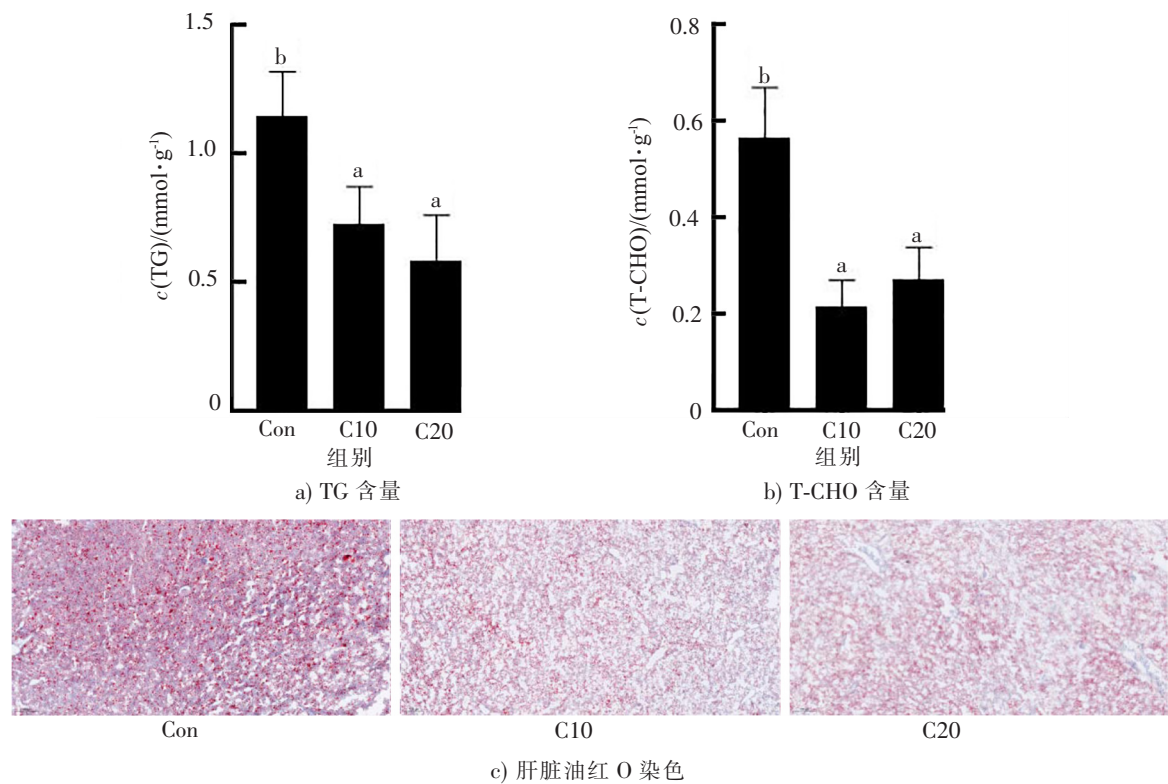


图 3 辅酶 Q10 对高温胁迫下花鲈脂肪沉积的影响

Fig.3 Effects of CoQ10 on fat deposition of *L. maculatus* under heat stress

2.4 辅酶 Q10 对高温胁迫下花鲈肝脏抗氧化能力的影响

由图 4 可见,在高温胁迫下,与对照组相比,C10 组和 C20 组的丙二醛含量显著降低 ($P<0.05$),总抗氧化能力显著增强 ($P<0.05$),过氧化氢酶活性显著升高 ($P<0.05$),C10 组的超氧化物歧化酶活性没有显著变化 ($P>0.05$),而 C20 组超氧化物歧化酶活性显著升高 ($P<0.05$)。

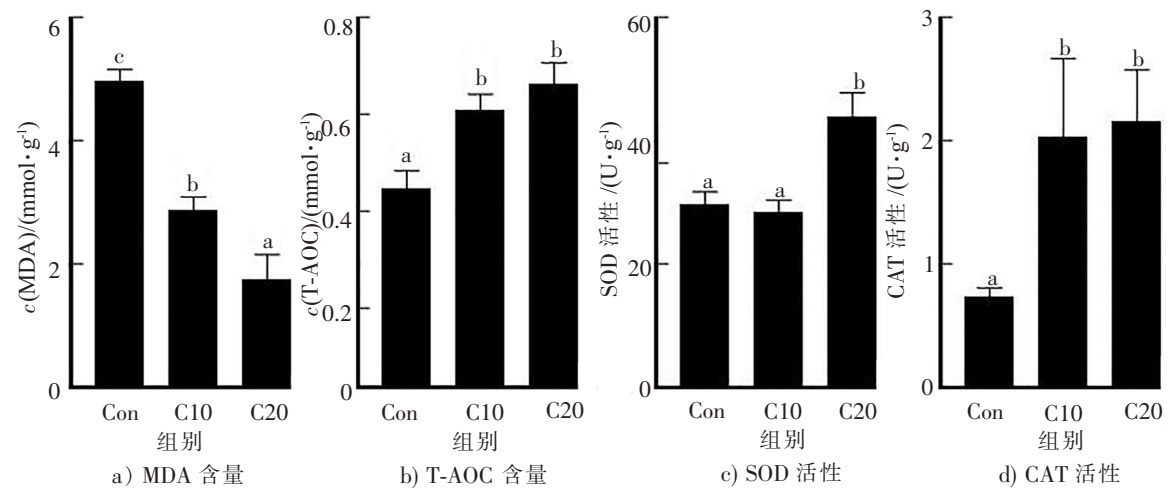


图 4 辅酶 Q10 对高温胁迫下花鲈肝脏抗氧化能力的影响

Fig.4 Effects of CoQ10 on the hepatic antioxidant capacity of *L. maculatus* under heat stress

2.5 辅酶 Q10 对高温胁迫下花鲈肝脏线粒体功能的影响

由图 5 可见，在高温胁迫下，与对照组相比，C10 组和 C20 组的柠檬酸合成酶 (CS)、琥珀酸脱氢酶 (SDH) 活性显著升高 ($P < 0.05$)；C10 组和 C20 组的线粒体自噬相关基因 *pink1*、*mul1* 的相对表达量显著上调 ($P < 0.05$)，C10 组的 *atg5* 的相对表达量没有显著差异 ($P > 0.05$)，C10 组和 C20 组线粒体生成相关基因 *pgc-1 α* 、*pgc-1 β* 、*nrf1* 的相对表达量显著上调 ($P < 0.05$)。

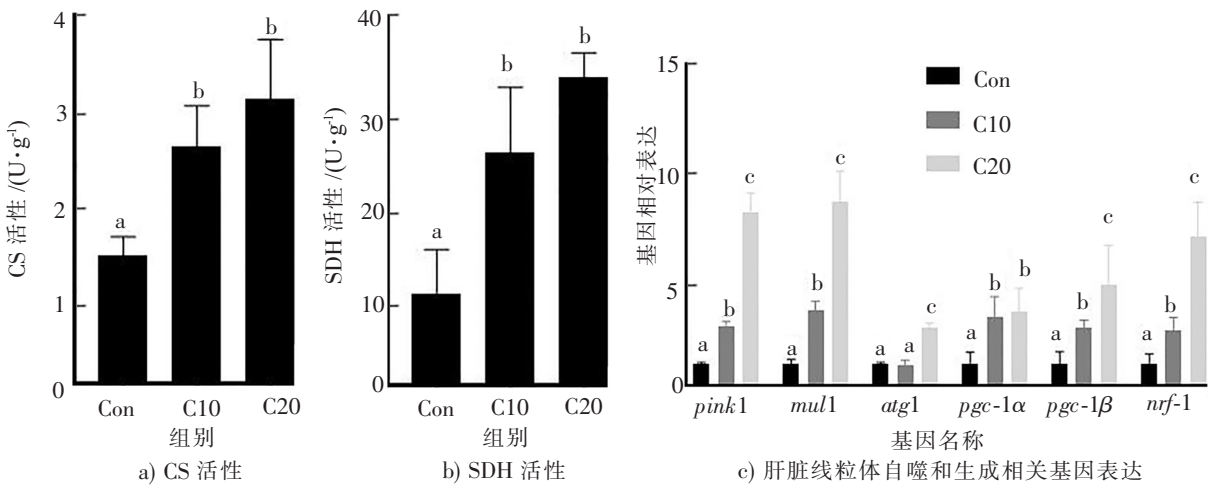


图 5 辅酶 Q10 对高温胁迫下花鲈肝脏线粒体功能和基因表达的影响

Fig.5 Effects of CoQ10 on hepatic mitochondrial function and gene expression of *L. maculatus* under heat stress

3 讨论

研究已多次证实，33 ℃ 的水温会对花鲈造成明显的高温胁迫损伤。例如，以 27 ℃ 为常温对照组，Lu 等^[5]发现，33 ℃ 高温组花鲈的增重率和摄食量显著下降；郭家荣^[23]、刘用平^[24]发现，与 27 ℃ 常温组相比，33 ℃ 高温组花鲈增重率显著下降，饲料系数、丙二醛含量显著升高。所以，本文认为，33 ℃ 水温会对花鲈造成显著的高温胁迫损伤，故设置了 33 ℃ 的高温组。

Mohammed 等^[25]研究表明，在饲料中添加 10、20、30、40 mg/kg 辅酶 Q10 均可显著提高罗非鱼的生长性能，但添加 40 mg/kg 组与 10 mg/kg 组的罗非鱼生长性能无显著差异，推荐辅酶 Q10 的添加量为 20 mg/kg；毛孝江^[26]研究表明，在高脂饲料中分别添加 5、20、80 mg/kg 辅酶 Q10 均可显著提高花鲈的生长性能，且添加 80 mg/kg 组与 20 mg/kg 组生长性能无显著差异。可见，当辅酶 Q10 添加量大于 20 mg/kg 时，功效不呈现剂量依赖性。因此，结合饲料成本问题，本研究只设计了 10 和 20 mg/kg 的添加量。

本实验室前期的研究证明，高温胁迫会导致花鲈代谢紊乱，生长性能下降^[5]。在本研究中，C10 组和 C20 组的增重率显著高于对照组，饲料系数显著低于对照组，说明辅酶 Q10 显著提高了花鲈在高温胁迫环境中的生长性能。同时，C10 组和 C20 组的肝体比显著下降，说明辅酶 Q10 可能缓解了花鲈肝脏中脂质的异常沉积，且 C10 组和 C20 组的

腹脂率也具有下降趋势, 但差异不具有统计学意义。这与文献 [27-28] 的结果一致。

鱼类的鳃具有气体交换、离子平衡和排泄等多种功能。由于鳃直接与水环境直接接触, 当水环境变化时, 鳃组织很容易受到损伤。因此, 鳃的形态结构也被作为鱼类应激的标志指标^[29-32]。在本研究中, 高温胁迫导致对照组花鲈鳃小片出现融合、断裂和脱落等现象, 说明花鲈的鳃功能严重受损。而 C10 组和 C20 组的花鲈鳃丝排列整齐, 鳃小片只有轻微的融合, 表明辅酶 Q10 可以缓解高温胁迫对花鲈造成的鳃损伤。

鱼类是变温动物, 水温会直接影响鱼类的生理代谢, 而肝脏是鱼类进行物质代谢和免疫防御的重要器官^[33], 在鱼类抵抗高温胁迫的过程中, 其肝脏组织结构可能受损。在大口黑鲈 (*Micropterus salmoides*)^[34] 中的研究发现, 高温胁迫会造成肝细胞界限模糊、肿胀、空泡化和细胞核消失等, 导致肝脏基本功能受损, 损害机体健康; 在虹鳟 (*Oncorhynchus mykiss*)^[35]、小黄鱼 (*Larimichthys polyactis*)^[36] 和团头鲂 (*Megalobrama amblycephala*)^[37] 中也有相似的研究结果。在本研究中, 对照组肝细胞出现空泡化、肿胀、细胞膜破裂和细胞核偏离细胞质中央等异常现象, 而 C10 组和 C20 组肝细胞结构清晰、细胞核位于细胞中央、肝细胞形态正常, 说明在高温胁迫下饲料中添加辅酶 Q10 可以显著改善花鲈肝脏健康状况。高温胁迫会影响鱼类的能量分配, 从而影响脂代谢和脂肪库的使用^[38]。已有研究证明, 33 ℃ 的高温胁迫会使花鲈出现脂代谢紊乱, 导致肝脏出现更多的脂肪沉积^[39]。而本研究发现, 在饲料中添加辅酶 Q10 可以显著缓解花鲈的脂肪异常沉积, 与对照组相比, C10 组和 C20 组花鲈肝脏的甘油三酯、总胆固醇含量显著降低, 肝脏油红 O 染色结果也说明 C10 组和 C20 组肝脏脂肪沉积更少。

线粒体是存在于大多数真核细胞中的重要细胞器, 是进行三羧酸循环、氧化磷酸化和脂肪酸 β 氧化等生理过程的主要场所^[40]。线粒体的功能与鱼类的生长、抗胁迫能力密切相关, 线粒体呼吸链的效率会直接影响鱼的饲料系数和生长性能。有研究表明, 线粒体是对各种损伤最敏感的细胞器, 线粒体损伤是氧化应激的主要原因^[41-43]。柠檬酸合成酶是线粒体三羧酸循环的关键限速酶, 它负责催化乙酰 CoA 与草酰乙酸缩合合成柠檬酸, 而琥珀酸脱氢酶是电子传递和氧化磷酸化之间的关键连接^[44], 柠檬酸合成酶与琥珀酸脱氢酶是线粒体功能的标志酶^[45]。在本研究中, C10 组和 C20 组的柠檬酸合成酶、琥珀酸脱氢酶活性显著高于对照组, 且 C20 组的活性更高, 说明花鲈在高温胁迫下摄入辅酶 Q10 能够提高线粒体三羧酸循环速率, 改善线粒体功能。线粒体的生成与自噬是线粒体维持正常功能的 2 种重要生理途径^[46], PINK1 通过磷酸化泛素介导自噬受体募集, 诱导线粒体自噬, 而 *pink1*、*mul1* 和 *atg5* 是该通路涉及的相关基因^[47]。本研究结果表明, 在高温胁迫下饲料中添加 10 或 20 mg/kg 辅酶 Q10 都可显著上调花鲈 *pink1* 和 *mul1* 的相对表达量, C20 组 *atg5* 相对表达量也显著上调, 但 C10 组的 *atg5* 相对表达量没有显著变化。这说明, 在高温胁迫下饲料中添加 10 或 20 mg/kg 辅酶 Q10 可激活线粒体自噬, 清除损伤、衰老的线粒体, 改善线粒体功能, 且添加 20 mg/kg 辅酶 Q10 效果更好。在哺乳动物中, PGC-1 α 是线粒体生物发生的主协调器, 它会诱导 NRF-1 的激活^[48], NRF-1 一旦被激活, 将上调线粒体转录因子 A 的表达, 进而增强 mtDNA 的转录和线粒体酶的合成, 从而促进线粒体生物合成^[49], 并且 PGC-1 β 在诱导鱼类线粒体生物合成方面比

PGC-1 α 更有效^[50]。在本研究中,在高温胁迫下饲料中添加 10 或 20 mg/kg 辅酶 Q10 可以显著上调 *pgc-1 α* 、*pgc-1 β* 和 *nrf-1* 的相对表达量,表明在高温胁迫下饲料中添加 10 或 20 mg/kg 辅酶 Q10 可以促进花鲈的线粒体生成,增强花鲈线粒体功能。

线粒体功能损伤会导致电子传递链在产生 ATP 时漏出大量的活性氧,进而诱发氧化应激^[51]。辅酶 Q10 除了作为线粒体营养素增强线粒体功能外,它还是一种强大的脂溶性抗氧化剂,能清除活性氧,缓解氧化应激^[52]。有研究表明,辅酶 Q10 和维生素 C 的交互作用能够显著提高尼罗罗非鱼肝脏超氧化物歧化酶和过氧化氢酶活性,并激活机体中抗氧化酶活性相关基因的表达^[21]。本研究结果表明,在高温胁迫下饲料中添加 10 或 20 mg/kg 辅酶 Q10 可以显著降低花鲈肝脏丙二醛含量,显著提高总抗氧化能力和过氧化氢酶活性,但 C10 组的超氧化物歧化酶活性没有显著变化,而 C20 组的超氧化物歧化酶活性显著升高。这表明,在高温胁迫下饲料中添加 10 或 20 mg/kg 辅酶 Q10 可以提高花鲈的抗氧化能力,且添加 20 mg/kg 辅酶 Q10 效果更好。

4 结论

在高温胁迫下饲料中添加 10 或 20 mg/kg 辅酶 Q10 可以显著提高花鲈生长性能,缓解花鲈鳃组织和肝组织结构损伤,增强花鲈线粒体功能,有效缓解高温胁迫导致的负面影响。因此,在饲料中添加 10 或 20 mg/kg 辅酶 Q10 可以显著提高花鲈抗高温胁迫能力。

[参 考 文 献]

- [1] ISLAM M J, KUNZMANN A, SLATER M J. Responses of aquaculture fish to climate change-induced extreme temperatures: a review[J]. Journal of the World Aquaculture Society, 2022, 53(2): 314-366.
- [2] PERSON-LE R J, BUCHET V, VINCENT B, et al. Effects of temperature on the growth of pollack (*Pollachius pollachius*) juveniles[J]. Aquaculture, 2006, 251(2/4): 340-345.
- [3] OYUGI D O, CUCHEROUSSET J, NTIBA M J, et al. Life history traits of an equatorial common carp *Cyprinus carpio* population in relation to thermal influences on invasive populations[J]. Fisheries Research, 2011, 110(1): 92-97.
- [4] FERNÁNDEZ-MONTERO A, CABALLERO M J, TORRECILLAS S, et al. Effect of temperature on growth performance of greater amberjack (*Seriola dumerili* Risso 1810) juveniles[J]. Aquaculture Research, 2018, 49(2): 908-918.
- [5] LU K L, CAI L S, WANG L, et al. Effects of dietary protein/energy ratio and water temperature on growth performance, digestive enzymes activity and non-specific immune response of spotted seabass (*Lateolabrax maculatus*) [J]. Aquaculture Nutrition, 2020, 26: 2023-2031.
- [6] 张艳杰. 高温对罗非鱼常规代谢和耐低氧能力的影响[D]. 上海: 上海海洋大学, 2022.
- [7] NORAMBUENA F, MORAIS S, EMERY J A, et al. Arachidonic acid and eicosapentaenoic acid metabolism in juvenile Atlantic salmon as affected by water temperature[J]. PLoS ONE, 2015, 10: 0143622.
- [8] BARTON B A, SCHRECK C B. Influence of acclimation temperature on interrenal and carbohydrate stress responses in juvenile chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*) [J]. Aquaculture, 1987, 62(3): 299-310.
- [9] SCHRECK C B, TORT L. The concept of stress in fish[M]. Boston: Academic Press, 2016: 1-34.
- [10] LU K L, JI Z L, RAHIMNEJAD S, et al. De novo assembly and characterization of seabass *Lateolabrax Japonicus* transcriptome and expression of hepatic genes following different dietary phosphorus/calcium levels[J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part D: Genomics and Proteomics, 2017, 24: 51-59.
- [11] HEVRØY E M, WAAGBØR, TORSTENSEN B E, et al. Ghrelin is involved in voluntary anorexia in atlantic salmon raised at

- elevated sea temperatures[J]. General and Comparative Endocrinology, 2012, 175(1): 118-134.
- [12] ZHOU C Q, YANG S W, KA W, et al. Association of gut microbiota with metabolism in rainbow trout under acute heat stress [J]. Frontiers in Microbiology, 2022, 13: 846336.
- [13] DONG W T, LONG L H, DENG Q, et al. Mitochondrial fission drives neuronal metabolic burden to promote stress susceptibility in male mice[J]. Nature Metabolism, 2023, 5: 2220-2236.
- [14] 杨鑫. 高温胁迫对花鲈生理和能量代谢的影响与机制初探[D]. 厦门: 集美大学, 2024.
- [15] HARGREAVES I, HEATON R A, MANTLE D. Disorders of human coenzyme Q10 metabolism: an overview[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2020, 21: 6695.
- [16] CRANE F L. Biochemical functions of coenzyme Q10[J]. Journal of the American College of Nutrition, 2001, 20(6): 591-598.
- [17] HARGREAVES I P. Ubiquinone: cholesterol's reclusive cousin[J]. Annals of Clinical Biochemistry, 2003, 40: 207-218.
- [18] CHEN K, CHEN X, XUE H L, et al. Coenzyme Q10 attenuates high-fat diet-induced non-alcoholic fatty liver disease through activation of the AMPK pathway[J]. Food Function, 2019, 10(2): 814-823.
- [19] XU J, TANG S, SONG E B, et al. Co-enzyme Q10 upregulates Hsp70 and protects chicken primary myocardial cells under *in vitro* heat stress via PKC/MAPK[J]. Molecular and Cellular Biochemistry, 2018, 449: 195-206.
- [20] XU J, TANG S, SONG E B, et al. Hsp70 expression induced by co-enzyme Q10 protected chicken myocardial cells from damage and apoptosis under *in vitro* heat stress[J]. Poultry Science, 2017, 96(5): 1426-1437.
- [21] EL-BASUINIA M F, SHAHIN S A, TEIBA I I, et al. The influence of dietary coenzyme Q10 and vitamin C on the growth rate, immunity, oxidative-related genes, and the resistance against *Streptococcus agalactiae* of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) [J]. Aquaculture, 2021, 531: 735862.
- [22] CAI L S, WANG L, SONG K, et al. Evaluation of protein requirement of spotted seabass (*Lateolabrax maculatus*) under two temperatures, and the liver transcriptome response to thermal stress[J]. Aquaculture, 2020, 516: 734615.
- [23] 郭家荣. 不同温度下花鲈对饲料磷需要量的研究[D]. 厦门: 集美大学, 2023.
- [24] 刘用平. 饲料中添加胆汁酸对花鲈热应激的缓解作用与机制[D]. 厦门: 集美大学, 2024.
- [25] MOHAMMED F, EL BASUINIA, ISLAM I, et al. Assessing the effectiveness of CoQ10 dietary supplementation on growth performance, digestive enzymes, blood health, immune response, and oxidative-related genes expression of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) [J]. Fish & Shellfish Immunology, 2020, 98: 420-428.
- [26] 毛孝江. 辅酶 Q10 对高脂饲料诱导花鲈肝脏脂肪过度沉积的缓解作用与机制[D]. 厦门: 集美大学, 2024.
- [27] EL-SAYED A I, AHMED-FARID O, RADWAN A A, et al. The capability of coenzyme Q10 to enhance heat tolerance in male rabbit: evidence from improved semen quality factor (SQF), testicular oxidative defense and expression of testicular melatonin receptors MT1[J]. Domestic Animal Endocrinology, 2021, 74: 106403.
- [28] EL-SHERBINY H R, ABDELNABY E A, EL-SHAHAT K H, et al. Coenzyme Q10 supplementation enhances testicular volume and hemodynamics, reproductive hormones, sperm quality, and seminal antioxidant capacity in goat bucks under summer hot humid conditions[J]. Veterinary Research Communications, 2022, 46: 1245-1257.
- [29] WEINER A C, ROEGNER M E, WATSON R D. Effect of a chemical dispersant (Corexit 9500a) on the structure and ion transport function of blue crab (*Callinectes sapidus*) gills[J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology, 2021, 247: 109070.
- [30] BALLESTER E, DUTRA F M. Histological alterations in gills of macrobrachium amazonicum juveniles exposed to ammonia and nitrite[J]. Aquatic Toxicology, 2017, 187: 115-123.
- [31] NERO V, FARWELL A, LISTER A, et al. Gill and liver histopathological changes in yellow perch (*Perca flavescens*) and goldfish (*Carassius auratus*) exposed to oil sands process-affected water[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2006, 63(3): 365-377.
- [32] REISER S, SCHROEDER J P, WUERTZ S, et al. Histological and physiological alterations in juvenile turbot (*Psetta maxima* L.) exposed to sublethal concentrations of ozone-produced oxidants in ozonated seawater[J]. Aquaculture, 2010, 307(1/

2):157-164.

- [33] HUANG J, BORENSZTAJN J, REDDY J K. Hepatic lipid metabolism[M]. Boston:Springer,2011:133-146.
- [34] 陆健,张佳佳,周国勤,等. 急性高温胁迫对大口黑鲈“优鲈3号”组织损伤及 HSPs 基因表达的影响[J]. 水产科学, 2021,40(4):508-515.
- [35] 李姗姗,韩世成,刘英杰,等. 高温胁迫下虹鳟肝脏代谢组学研究[J]. 中国水产科学,2022,29(8):1168-1178.
- [36] 何雨,刘峰,张天乐,等. 高温胁迫对小黄鱼肝脏组织结构和细胞凋亡的影响[J]. 浙江农业学报,2024,36(1):58-66.
- [37] LIU B, XU P, BROWN P B, et al. The effect of hyperthermia on liver histology, oxidative stress and disease resistance of the Wuchang bream, *Megalobrama amblycephala*[J]. Fish Shellfish Immunol,2016,52:317-324.
- [38] BALBUENA-PECINO S, RIERA-HEREDIA N, VÉLEZ E J, et al. Temperature affects musculoskeletal development and muscle lipid metabolism of gilthead sea bream (*Sparus aurata*) [J]. Frontiers in Endocrinology,2019,10(2):459-467.
- [39] GUO J R, WANG L, SONG K, et al. Physiological response of spotted seabass (*Lateolabrax maculatus*) to different dietary available phosphorus levels and water temperature: changes in growth, lipid metabolism, antioxidant status and intestinal microbiota[J]. Antioxidants,2023,12:2128.
- [40] BOTTJE W, TANG Z X, IQBAL M, et al. Association of mitochondrial function with feed efficiency within a single genetic line of male broilers[J]. Poultry Science,2002,81(4):546-555.
- [41] MAYEVSKY A, KUTAI-ASIS H, TOLMASOV M. Mitochondrial function and brain metabolic score (BMS) in ischemic stroke: evaluation of “neuroprotectants” safety and efficacy[J]. Mitochondrion,2020,50:170-194.
- [42] DONG Y Z, LI L, ESPE M, et al. Hydroxytyrosol attenuates hepatic fat accumulation via activating mitochondrial biogenesis and autophagy through the AMPK pathway[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry,2020,68:9377-9386.
- [43] XIA T, MAO X J, ZHANG J, et al. Effects of quercetin and hydroxytyrosol supplementation in a high-fat diet on growth, lipid metabolism, and mitochondrial function in spotted seabass (*Lateolabrax maculatus*) [J]. Aquaculture,2024,582:1-11.
- [44] CECCHINI G. Function and structure of complex II of the respiratory chain[J]. Annual Review of Biochemistry,2003,72(1):77-109.
- [45] ZHANG L, ZHENG X C, HUANG Y Y, et al. Carbonyl cyanide 3-chlorophenylhydrazone induced the imbalance of mitochondrial homeostasis in the liver of *Megalobrama amblycephala*: a dynamic study[J]. Comparative Biochemistry Physiology Part C: Toxicology Pharmacology,2021,244:109003.
- [46] PALIKARAS K, LIONAKI E, TAVERNARAKIS N. Balancing mitochondrial biogenesis and mitophagy to maintain energy metabolism homeostasis[J]. Cell Death and Differentiation,2015,22(9):1399-1401.
- [47] LAZAROU M, SLITER D A, KANE L A, et al. The ubiquitin kinase PINK1 recruits autophagy receptors to induce mitophagy[J]. Nature,2015,524(7565):309-314.
- [48] YU E P K, BENNETT M R. The role of mitochondrial DNA damage in the development of atherosclerosis[J]. Free Radical Biology and Medicine,2016,100:223-230.
- [49] MAO S, LEONE T C, KELLY D P, et al. Mitochondrial transcription factor a is increased but expression of ATP synthase beta subunit and medium-chain acyl-CoA dehydrogenase genes are decreased in hearts of copper-deficient rats[J]. Journal of Nutrition,2000,130(9):2143-2150.
- [50] BREMER K, KOCHA K M, SNIDER T, et al. Sensing and responding to energetic stress: the role of the AMPK-PGC1 α -NRF1 axis in control of mitochondrial biogenesis in fish[J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology,2016,199:4-12.
- [51] NOLFI-DONEGAN D, BRAGANZA A, SHIVA S. Mitochondrial electron transport chain: oxidative phosphorylation, oxidant production, and methods of measurement[J]. Redox Biology,2020,37:101674.
- [52] SIFUENTES-FRANCO S, SÁNCHEZ-MACÍAS D C, CARRILLO-IBARRA S, et al. Antioxidant and anti-inflammatory effects of coenzyme Q10 supplementation on infectious diseases[J]. Healthcare,2022,10(3):487.

(责任编辑 马建华 英文审校 黄力行)