

DOI: 10.12264/JFSC2025-0252

急性操作胁迫对黄条鲷血清生化指标、抗氧化能力、鳃组织形态与体表黏液菌群的影响

郑纪昌, 冯元, 徐永江*, 崔爱君, 姜燕, 王正浩

中国水产科学研究院黄海水产研究所, 海水养殖生物育种与可持续产出全国重点实验室, 山东 青岛 266071

摘要: 黄条鲷(*Seriola aureovittata*)对应激的高敏感性是限制其集约化养殖的重要因素。本研究旨在探究急性操作胁迫对黄条鲷血清生化指标、抗氧化能力、鳃组织形态和体表黏液菌群的影响。实验选取健康 1 龄(体重 463.86 ± 63.86 g、叉长 35.49 ± 0.9 cm)黄条鲷为研究对象, 以连续 10 次拥挤-暴露为急性操作胁迫, 分别在胁迫前(C0, 对照组)、胁迫结束后 0、3、6、12、24 h 采集背外侧黏液、尾静脉血、鳃组织等样品。血清生化分析结果表明, 急性操作胁迫可导致血清皮质醇含量显著升高($P < 0.05$), 随恢复时间延长, 皮质醇呈先升高后降低的趋势, 并在恢复 3 h 时达到峰值, 恢复至 12 h 时降为胁迫前水平; 超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)及丙二醛(MDA)含量与皮质醇变化趋势相似, 但达到峰值的时间为胁迫结束后 6 h, 仅 CAT 活力和 MDA 含量在恢复 24 h 后降至初始水平。鳃组织形态观察发现, 急性操作胁迫可导致鳃小片弯曲肿胀、细胞空泡化及上皮细胞排列紊乱, 胁迫结束后 24 h, 鳃丝形态仍未完全恢复至初始状态。体表黏液微生物组成分析结果表明, 急性操作胁迫加剧了体表黏液菌群失调, 灿烂弧菌(*Vibrio splendidus*)、鳃黏着杆菌(*Tenacibaculum soleae*)和舌齿鲈黏着杆菌(*Tenacibaculum dicentrarchi*)等致病菌丰度均显著升高($P < 0.05$)。综上所述, 黄条鲷从急性操作胁迫中完全恢复的时间超过 24 h, 操作胁迫后的 6 h 内是采取措施缓解应激的关键节点; 调节体表黏液菌群平衡是缓解应激的潜在思路。

关键词: 黄条鲷; 急性操作胁迫; 抗氧化能力; 黏液菌群; 血清生化指标

中图分类号: S917

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2025)12-1749-14

黄条鲷(*Seriola aureovittata*)俗称黄腱牛、黄金鲷, 隶属于鲈形目、鲷科、鲷属(*Seriola*), 其野生群体主要分布于澳大利亚和东亚周边海域, 在中国主要分布于黄渤海和东海^[1]。作为典型的大洋性经济鱼类, 黄条鲷生长速度快、肉质鲜美、多不饱和脂肪酸含量高^[2]。目前, 黄条鲷人工繁育技术已取得突破, 苗种的规模化生产和养殖技术逐步稳定^[3]。然而, 在集约化养殖过程中, 黄条鲷对应激的高敏感性是其产量降低的重要原因。应激是机

体神经-内分泌相互作用的调节过程, 按照反应程度及持续时间, 鱼类应激可被分为初级、次级和三级阶段。初级阶段(警觉阶段)主要通过交感-嗜铬组织系统(SCS)和下丘脑-垂体-肾间组织(HPI)途径来调节机体激素变化来应对刺激^[4]; 次级阶段(抵抗阶段)则主要由肾上腺素和皮质醇等激素改变机体代谢、免疫和抗氧化平衡来对抗应激环境^[5]; 三级阶段(损伤阶段)是在次级应激的基础上, 机体内环境彻底紊乱, 免疫系统受到抑制, 组织器官受

收稿日期: 2025-09-11; 修订日期: 2025-10-10.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2401102); “泰山产业领军人才工程”项目; 山东省重点研发计划项目(2023TZXD050); 青岛市海洋科技创新专项(24-1-3-hygg-22-hy); 中国水产科学研究院基本科研业务费项目(2023TD51, 2024XT0701); 国家海水鱼产业技术体系项目(CARS-47).

作者简介: 郑纪昌, 助理研究员, 研究方向为海水鱼类行为与生理学. E-mail: zhengjc@ysfri.ac.cn

*通信作者: 徐永江, 研究员, 研究方向为海水鱼类设施化养殖技术. E-mail: xuyj@ysfri.ac.cn

到损伤,对生长和健康造成器质性影响^[6]。

在鱼类养殖过程中,其应激源主要分为生物因素(寄生虫、敌害生物等)^[7]、物理因素(水温、盐度等)^[8-9]、化学因素(氨氮、亚硝酸盐等)^[10-11]和管理因素^[12-13]。其中,前三类应激源均可通过升级设备或改善养殖条件来避免;而养殖管理中的必要操作(捕捞、分苗和转运等)通常伴随着机械刺激、鱼体拥挤和空气暴露,可对鱼类产生应激胁迫^[14-15]。一系列研究表明,急性操作胁迫可引发大黄鱼(*Pseudosciaena crocea*)^[16]、四指马鲛(*Eleutheronema tetradactylum*)^[17]、云纹石斑鱼(*Epinephelus moara*)^[18]和刀鲚(*Coilia nasus*)^[19]应激反应,并对其抗氧化能力、免疫力及肝脏结构产生显著负面影响。目前,关于急性操作胁迫对黄条鲷影响的研究尚存在空白。现有关于急性操作胁迫对鱼类影响的研究主要关注血清生化指标、抗氧化能力和免疫力的变化,忽略了养殖鱼类体表黏液菌群的变化特征。本研究通过模拟拉网操作对黄条鲷进行胁迫,分析血清生化指标、抗氧化能力、鳃组织形态及体表黏液微生物的变化,从生理生化、组织形态及微生物生态等多个维度系统探究黄条鲷对急性操作胁迫的应答,以期为黄条鲷低应激、健康高效养殖技术的开发提

供理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验用鱼及暂养处理

本实验于 2022 年 11 月在大连富谷食品有限公司的工厂化养殖车间完成。正式实验前,挑选一批公司自主繁育的(体重 (463.86 ± 63.86) g,叉长 (35.49 ± 0.9) cm)健康 1 龄黄条鲷于养殖池流水暂养 1 周,期间每天换水 1 次,每次换水量 50%。暂养期间,水体溶氧含量为 (7.6 ± 0.4) mg/L,水温为 (23.4 ± 0.5) °C,光照周期设置为 12 h 光照:12 h 黑暗。暂养结束后,随机挑选规格相近且体质健康的 100 尾黄条鲷进行正式实验。

1.2 实验设计

本实验使用尺寸为 1.2 m×0.7 m×0.5 m 的小网箱对黄条鲷进行急性操作胁迫(图 1):实验共设置 3 个独立网箱(即 3 个平行组),每组随机选取 15 条黄条鲷聚拢于网箱内拥挤胁迫 5 s,然后将网箱提出水面,将实验鱼暴露于空气中 5 s,最后再将网箱放入水中 3 min,连续重复 10 次以上操作。依照操作胁迫进程,本研究设计胁迫前对照组 1 个(C0)和实验组 5 个:胁迫结束后 0 h (H0)、3 h (H3)、6 h (H6)、12 h (H12)、24 h (H24)。

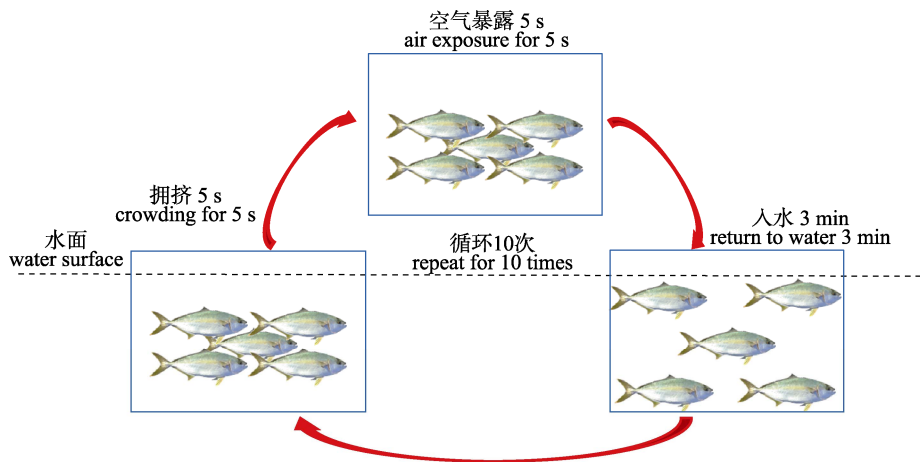


图 1 急性操作胁迫示意图

Fig. 1 Schematic diagram of acute handling stress

1.3 样品采集

对于每个网箱,上述每个节点分别随机取 2 条实验鱼(即每个实验组共取 6 条),并用 MS-222

(浓度为 80 mg/L; Sigma-Aldrich)麻醉 2 min。先用 3%的生理盐水冲刷鱼体表面,然后使用一次性吸水纸轻敷擦去多余水分,再用灭菌树脂棒(先用

75%酒精杀菌,再用无菌水冲洗)将背外侧黏液刮入 1.5 mL 离心管中,用于测定微生物组成。使用 1 mL 注射器从尾静脉取血,置于 1.5 mL EP 管中,静置 12 h 后离心 10 min (3000 g),取上层血清置于液氮中保存。剪取黄条鰺左侧第二鳃弓置于 Davis 固定液中,用于石蜡切片制作,剩余部分鳃组织则置于 1.5 mL 冻存管用于酶活分析。

1.4 样品处理与分析

1.4.1 血清生化指标和鳃组织离子转运酶活力测定 血清生化指标:皮质醇(cortisol)、葡萄糖(Glu)、谷草转氨酶(GOT)和谷丙转氨酶(GPT)等血清转氨酶;谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)、超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、丙二醛(MDA)等血清抗氧化指标;鳃组织离子转运酶:Na⁺/K⁺-ATP (NKA)和 Ca²⁺/Mg²⁺-ATP (CMA),上述指标均使用商业试剂盒(中国南京建成生物工程研究所)测定。

1.4.2 鳃组织石蜡切片 取 Davis 固定的鳃组织,经酒精(75%、80%、95%、100%)梯度脱水、二甲苯透明、常规石蜡包埋,再用显微切片机(RM2235, LEICA)将鳃组织切成 5 μm 薄片。采用苏木精-伊红(H&E)将组织染色,并用中性树胶封片。借助 Panoramic MIDI II 病理扫描仪(上海迈迈生物科技有限公司)对石蜡切片进行观察、拍照,并使用 Image J 软件测量鳃小片长度和间距。

1.4.3 体表黏液微生物组成分析 使用 MagPure Soil DNA LQ 试剂盒(Magan)提取黄条鰺体表黏液 DNA,经 Nano Drop[®] 2000 分光光度计(Thermo Scientific)测定 DNA 纯度和浓度后,利用 1.2%变性琼脂糖凝胶电泳测定 DNA 的完整性。以提取的 DNA 作为模板,根据细菌 V4~V5 区域序列合成引物 338F (5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCAG-3')和 806R (5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3')进行 PCR 扩增。利用 Illumina MiSeq PE300 平台对质检合格的扩增序列进行文库构建、测序和生物信息学分析。

1.5 数据统计与分析

本实验使用 SPSS 26.0 对数据进行统计分析,在数据通过方差齐性和正态性分布检验后,进行单因素方差分析(ANOVA)和 Duncan's 多重比较(显著差异水平设为 P<0.05),数值均以平均值±标准差($\bar{x}\pm SD$)表示。

2 结果与分析

2.1 急性操作胁迫对黄条鰺血清生化指标和转氨酶的影响

与对照组相比,急性操作胁迫导致血清皮质醇(cortisol)含量显著升高(P<0.05)(图 2a)。随恢复时间延长,皮质醇含量先升高后降低,并在恢复 3 h 时最高,在恢复时间达到 12 h 后降为初始水

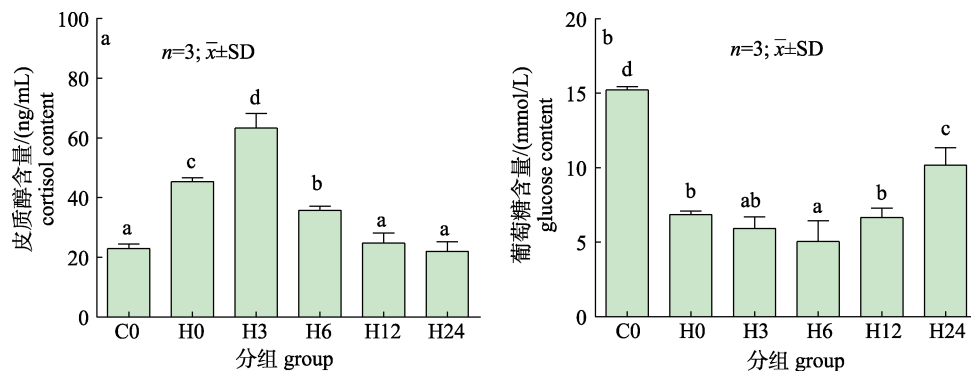


图 2 急性操作胁迫对黄条鰺血清生化指标的影响

a. 皮质醇; b. 葡萄糖. C0: 对照组; H0: 操作胁迫后 0 h; H3: 操作胁迫后 3 h; H6: 操作胁迫后 6 h; H12: 操作胁迫后 12 h; H24: 操作胁迫后 24 h. 各柱形图上方不同小写字母表示组间差异显著(P<0.05).

Fig. 2 Effects of acute handling stress on serum biochemical indices of *Seriola aureovittata*

a. Cortisol; b. Glucose. C0: control group; H0: 0 h after handling stress; H3: 3 h after handling stress; H6: 6 h after handling stress; H12: 12 h after handling stress; H24: 24 h after handling stress. For each panel, different lowercase letters above the columns indicate significant difference between groups (P<0.05).

平。血清葡萄糖(Glu)含量则与皮质醇呈现相反的趋势(图 2b), 其在恢复 6 h 时降低到最低值, 但直到恢复时间达到 24 h 也未升至胁迫前水平。血清谷草转氨酶(GOT)(图 3a)和谷丙转氨酶(GPT)(图 3b)含量变化趋势与皮质醇一致, 其含量均在恢复 6 h 时最高($P<0.05$), 但是直到恢复时间达到 24 h 也未降低至胁迫前水平。以上结果初步说明了胁迫应激及其对机体产生的影响存在非同步性, 且时间差可能是 3 h。

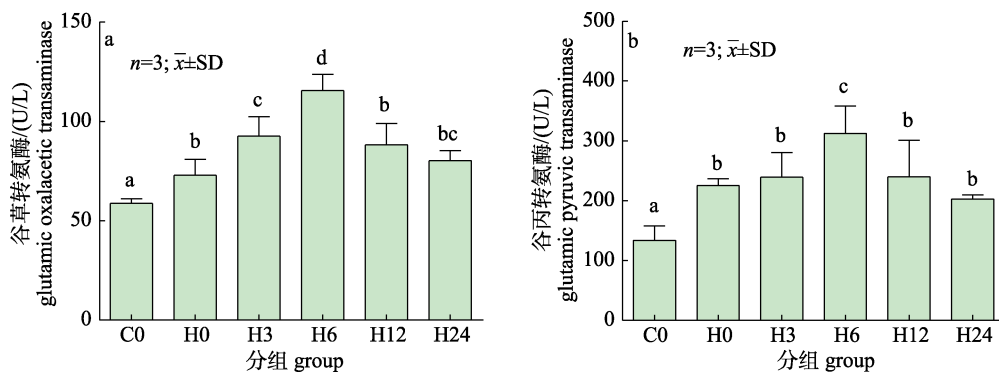


图 3 急性操作胁迫对黄条鲷血清转氨酶活力的影响

a. 谷草转氨酶; b. 谷丙转氨酶. C0: 对照组; H0: 操作胁迫后 0 h; H3: 操作胁迫后 3 h; H6: 操作胁迫后 6 h; H12: 操作胁迫后 12 h; H24: 操作胁迫后 24 h. 各柱形图上方不同小写字母表示组间差异显著 ($P<0.05$).

Fig. 3 Effects of acute handling stress on serum transaminase activity of *Seriola aureovittata*

a. Glutamic oxalacetic transaminase; b. Glutamic pyruvic transaminase. C0: control group; H0: 0 h after handling stress; H3: 3 h after handling stress; H6: 6 h after handling stress; H12: 12 h after handling stress; H24: 24 h after handling stress. For each panel, different lowercase letters above the columns indicate significant difference between groups ($P<0.05$).

2.3 急性操作胁迫对黄条鲷鳃组织形态的影响

急性操作胁迫前, 对照组(C0)鳃小片排列整齐, 细胞饱满且无明显间隙(图 5a~5e)。胁迫刚结束时, 鳃丝两侧的鳃小片有轻微弯曲, 鳃小片间距和长度均显著增加($P<0.05$)(图 6a, 6b)。胁迫后恢复 3 h, 鳃组织损伤明显, 主要表现为鳃小片与细胞之间产生空洞, 细胞出现空泡化现象, 上皮细胞排列紊乱, 其末端出现肿胀, 鳃小片长度显著高于其他各组($P<0.05$)。胁迫后恢复 24 h, 鳃丝仍未完全恢复至初始形态, 鳃小片长度与对照组仍有显著差异($P<0.05$)。

2.4 急性操作胁迫对黄条鲷鳃组织离子转运酶的影响

与对照组相比, 急性操作胁迫可导致黄条鲷鳃 Na^+/K^+ -ATP 酶(NKA)和 $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ -ATP 酶(CMA)活力显著降低($P<0.05$)(图 7a, 7b), 并在胁迫

2.2 急性操作胁迫对黄条鲷血清抗氧化指标的影响

与对照组相比, 急性操作胁迫可导致血清超氧化物歧化酶(SOD)(图 4a)、谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)(图 4b)、过氧化氢酶(CAT)(图 4c)和丙二醛(MDA)(图 4d)含量升高, 并在胁迫结束后的 6 h 达到峰值。在恢复时间达到 24 h 时, 仅 CAT 活力和 MDA 含量降至初始水平, SOD 和 GSH-Px 活力仍显著高于对照组($P<0.05$)。

胁迫结束后的 6 h 达到最低值, 当恢复时间达到 24 h, 仅 NKA 酶活力升至胁迫前水平。

2.5 急性操作胁迫对黄条鲷体表黏液微生物组成的影响

整个胁迫过程, 黄条鲷体表黏液菌群丰富度指数(Chao1、Ace)和多样性指数(Shannon)指标均未产生显著差异($P>0.05$)(图 8a~8c)。根据 β -多样性(图 9a, 9b)和物种组成热图(图 10a, 10b), 急性操作胁迫前(C0)及刚结束时(H0)黄条鲷体表黏液菌群组成更接近。随恢复时间延长, 菌群失调指数(MDI)呈现先升高后降低的趋势, 并在恢复至 6 h 时达到峰值, 恢复至 24 h 时 MDI 降低幅度较小(图 11a~11c)。根据门水平菌群组成, 黄条鲷体表黏液菌群组成以变形菌门(Proteobacteria)、拟杆菌门(Bacteroidota)、疣微菌门(Verrucomicrobiota)及厚壁菌门(Firmicutes)为主(图 12)。根据种水平

菌群组成, 在急性操作胁迫后 0 h、6 h、24 h, 灿烂弧菌 (*Vibrio splendidus*)、颯黏着杆菌 (*Tenacibaculum soleae*) 和舌齿鲈黏着杆菌 (*Tenacibaculum dicentrarchi*) 丰度均显著升高 ($P <$

0.05)(图 13a~13c)。线性判别分析(LEfSe)显示(图 14), 恢复 6 h 的黄条鲷体表黏液特征菌群包括灿烂弧菌, 恢复至 24 h 的特征菌群则包含黏着杆菌属(*Tenacibaculum*)。

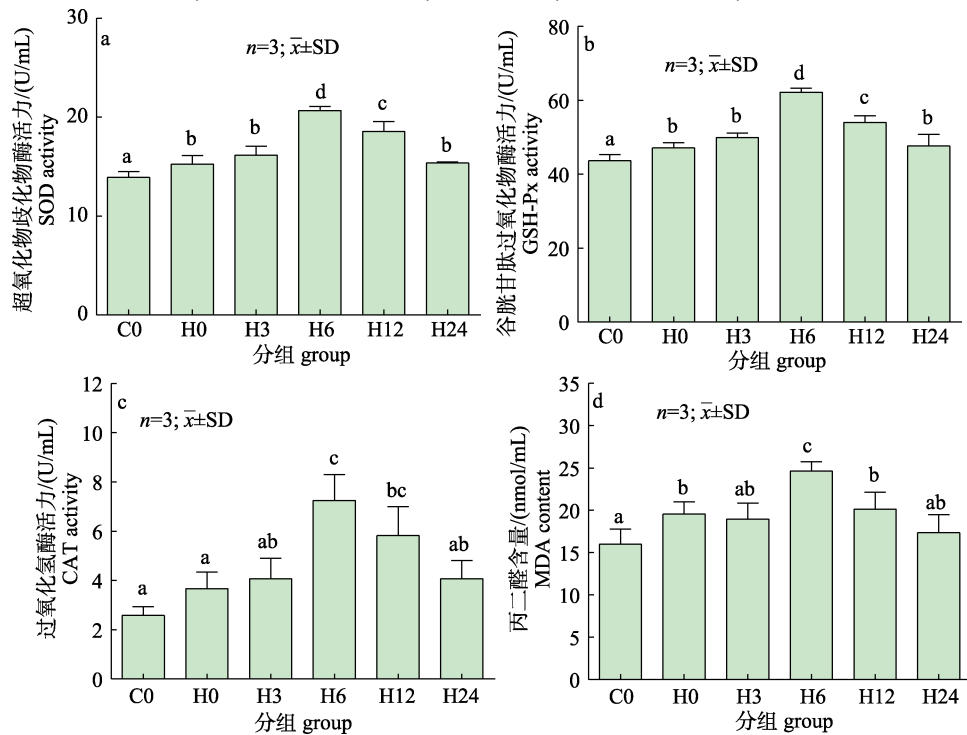


图 4 急性操作胁迫对黄条鲷血清抗氧化指标的影响

a. 超氧化物歧化酶; b. 谷胱甘肽过氧化物酶; c. 过氧化氢酶; d. 丙二醛。C0: 对照组; H0: 操作胁迫后 0 h; H3: 操作胁迫后 3 h; H6: 操作胁迫后 6 h; H12: 操作胁迫后 12 h; H24: 操作胁迫后 24 h。各柱形图上方不同小写字母表示组间差异显著 ($P < 0.05$)。

Fig. 4 Effects of handling stress on serum antioxidant index of *Seriola aureovittata*

a. Superoxide dismutase; b. Glutathione peroxidase; c. Catalase; d. Malondialdehyde. C0: control group; H0: 0 h after handling stress; H3: 3 h after handling stress; H6: 6 h after handling stress; H12: 12 h after handling stress; H24: 24 h after handling stress. For each panel, different lowercase letters above the columns indicate significant difference between groups ($P < 0.05$).

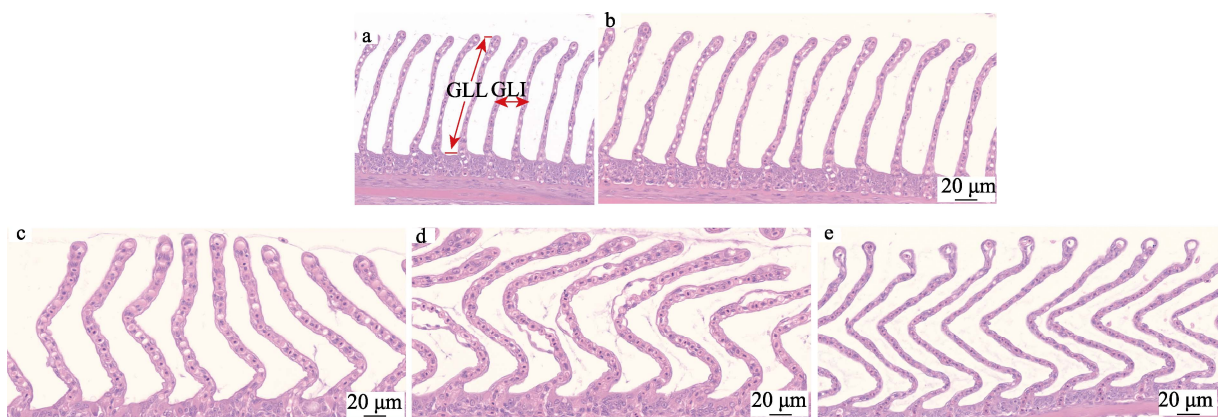


图 5 急性操作胁迫对黄条鲷鳃组织形态的影响

a. 鳃组织结构参数示意图; b. 对照组; c. 操作胁迫后 0 h; d. 操作胁迫后 3 h; e. 操作胁迫后 24 h。

Fig. 5 Effects of acute handling stress on gill histologic morphometry of *Seriola aureovittata*

a. Schematic diagram of gill histologic parameters; b. Control group; c. 0 h after handling stress; d. 3 h after handling stress; e. 24 h after handling stress.

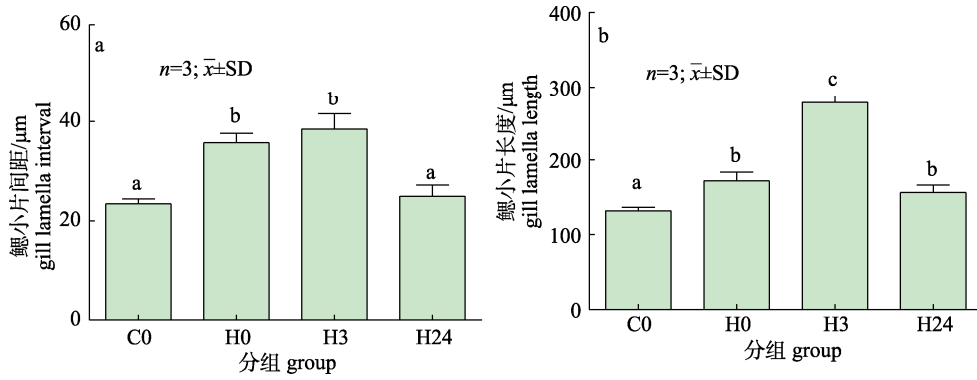


图 6 急性操作胁迫对黄条鲷鳃组织形态参数的影响

a. 鳃小片间距; b. 鳃小片长度. C0: 对照组; H0: 操作胁迫后 0 h; H3: 操作胁迫后 3 h; H24: 操作胁迫后 24 h. 各柱形图上方不同小写字母表示组间差异显著 ($P < 0.05$).

Fig. 6 Effects of acute handling stress on gill histologic parameters of *Seriola aureovittata*

a. gill lamella interval; b. gill lamella length. C0: control group; H0: 0 h after handling stress; H3: 3 h after handling stress; H24: 24 h after handling stress. Different lowercase letters above the columns indicate significant difference between groups ($P < 0.05$).

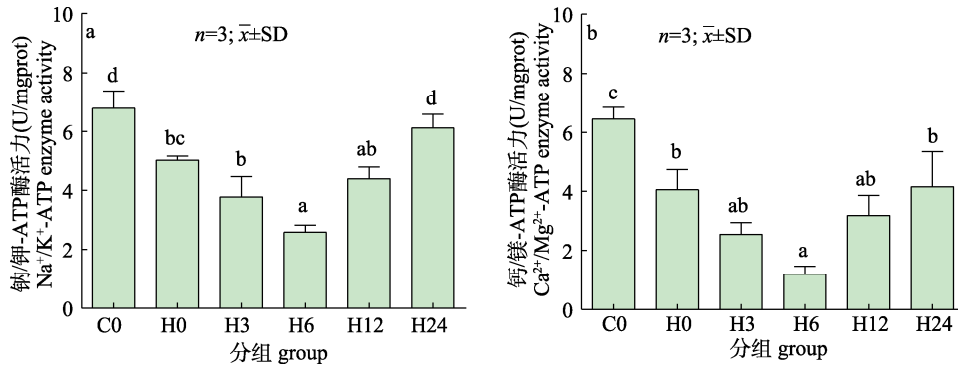


图 7 急性操作胁迫对黄条鲷鳃离子转运酶活力的影响

a. Na⁺/K⁺-ATP 酶; b. Ca²⁺/Mg²⁺-ATP 酶. C0: 对照组; H0: 操作胁迫后 0 h; H3: 操作胁迫后 3 h; H6: 操作胁迫后 6 h; H12: 操作胁迫后 12 h; H24: 操作胁迫后 24 h. 各柱形图上方不同小写字母表示组间差异显著 ($P < 0.05$).

Fig. 7 Effects of acute handling stress on enzymes related to ion transport in the gills of *Seriola aureovittata*

a. Na⁺/K⁺-ATP enzyme; b. Ca²⁺/Mg²⁺-ATP enzyme. C0: control group; H0: 0 h after handling stress; H3: 3 h after handling stress; H6: 6 h after handling stress; H12: 12 h after handling stress; H24: 24 h after handling stress. For each panel, different lowercase letters above the columns indicate significant difference between groups ($P < 0.05$).

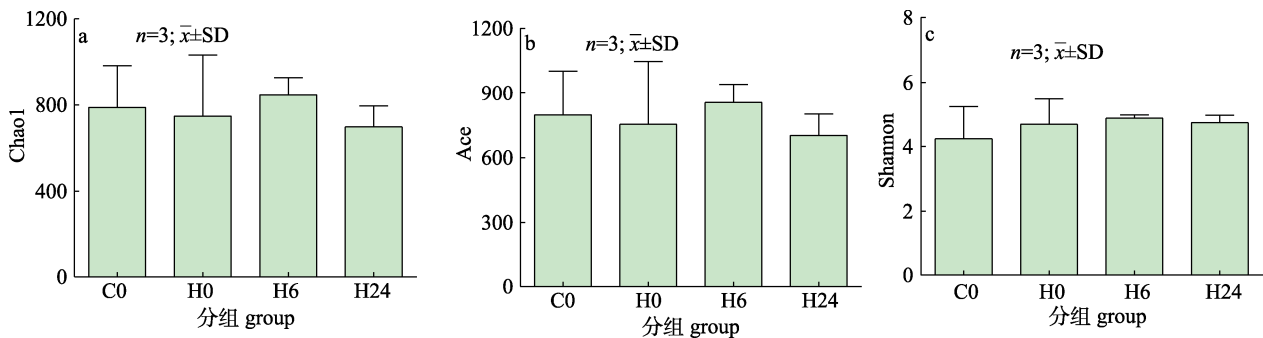


图 8 急性操作胁迫对黄条鲷体表黏液菌群 α-多样性的影响

a. Chao1 指数; b. Ace 指数; c. Shannon 指数. C0: 对照组; H0: 操作胁迫后 0 h; H6: 操作胁迫后 6 h; H24: 操作胁迫后 24 h. 各柱形图上方不同小写字母表示组间差异显著 ($P < 0.05$).

Fig. 8 Effects of acute handling stress on α-diversity of the slime microbial community on *Seriola aureovittata* body surface a. Chao1 index; b. Ace index; c. Shannon index. C0: control group; H0: 0 h after handling stress; H6: 6 h after handling stress; H24: 24 h after handling stress. For each panel, different lowercase letters above the columns indicate significant difference between groups ($P < 0.05$).

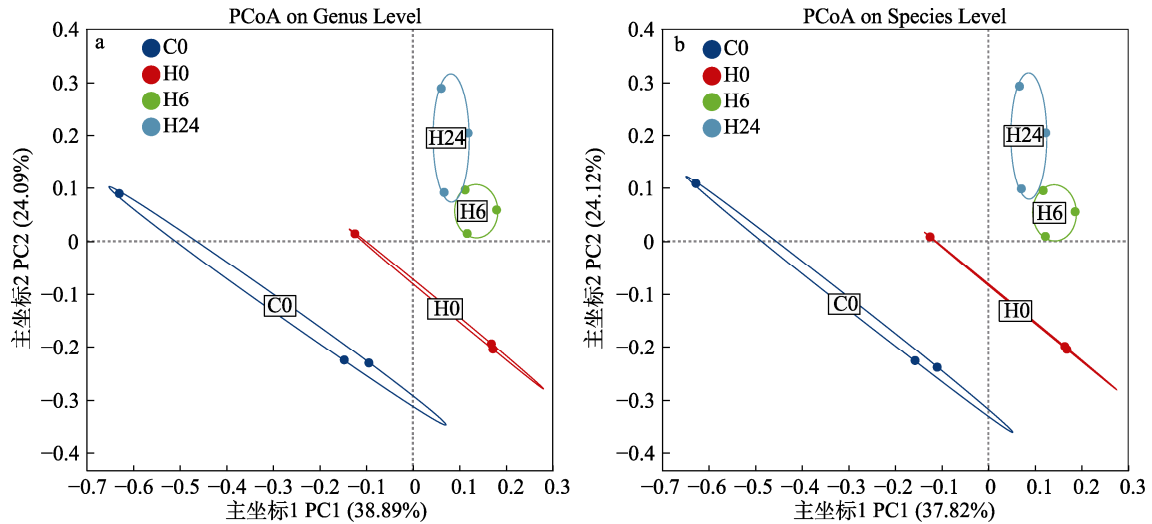
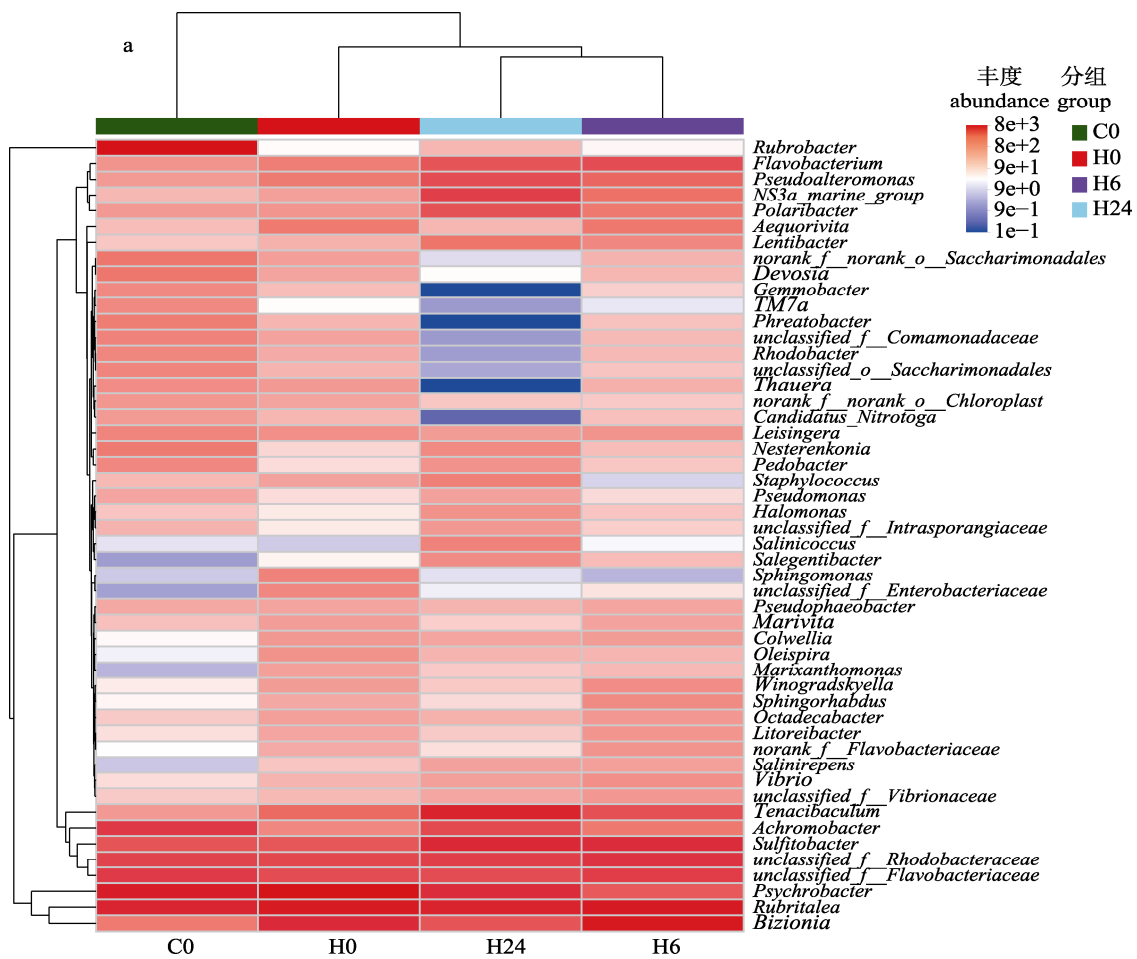


图 9 急性操作胁迫对黄条鲷体表黏液菌群 β -多样性的影响

a. 属水平主坐标分析; b. 种水平主坐标分析. C0: 对照组; H0: 操作胁迫后 0 h; H6: 操作胁迫后 6 h; H24: 操作胁迫后 24 h.

Fig. 9 Effects of acute handling stress on β -diversity of the slime microbial community on *Seriola aureovittata* body surface

a. Principal coordinates analysis on genus level; b. Principal coordinates analysis on species level. C0: control group; H0: 0 h after handling stress; H6: 6 h after handling stress; H24: 24 h after handling stress.



(待续 to be continued)

(续图 10 Fig. 10 continued)

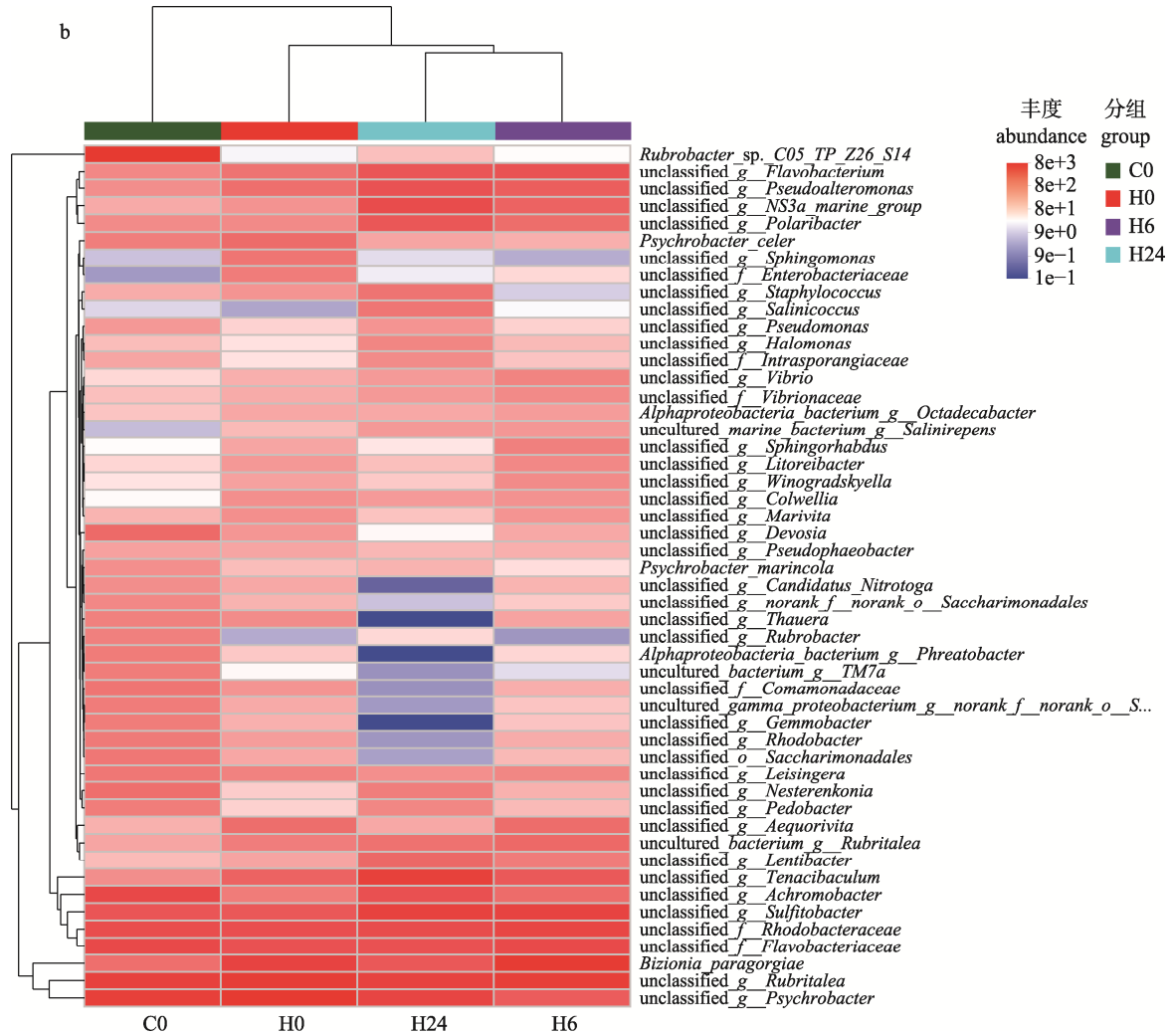


图 10 黄条鲷体表黏液菌群组成热图分析

a. 属水平; b. 种水平. C0: 对照组; H0: 操作胁迫后 0 h; H6: 操作胁迫后 6 h; H24: 操作胁迫后 24 h.

Fig. 10 Heatmap analysis of slime microbiota profile on the body surface of *Seriola aureovittata*

a. Genus level; b. Species level. C0: control group; H0: 0 h after handling stress; H6: 6 h after handling stress; H24: 24 h after handling stress.

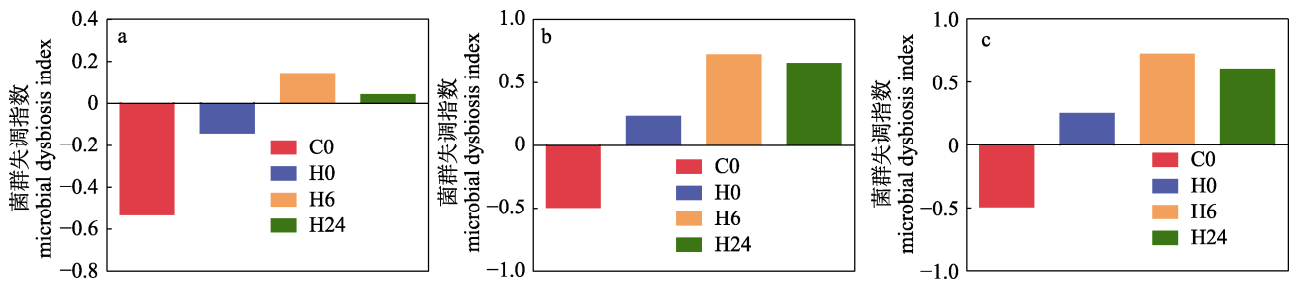


图 11 黄条鲷体表黏液菌群失调指数分析

a. 门水平; b. 属水平; c. 种水平. C0: 对照组; H0: 操作胁迫后 0 h; H6: 操作胁迫后 6 h; H24: 操作胁迫后 24 h.

Fig. 11 Microbial dysbiosis index analysis of slime microbiota on the body surface of *Seriola aureovittata*

a. Phylum level; b. Genus level; c. Species level. C0: control group; H0: 0 h after handling stress; H6: 6 h after handling stress; H24: 24 h after handling stress.

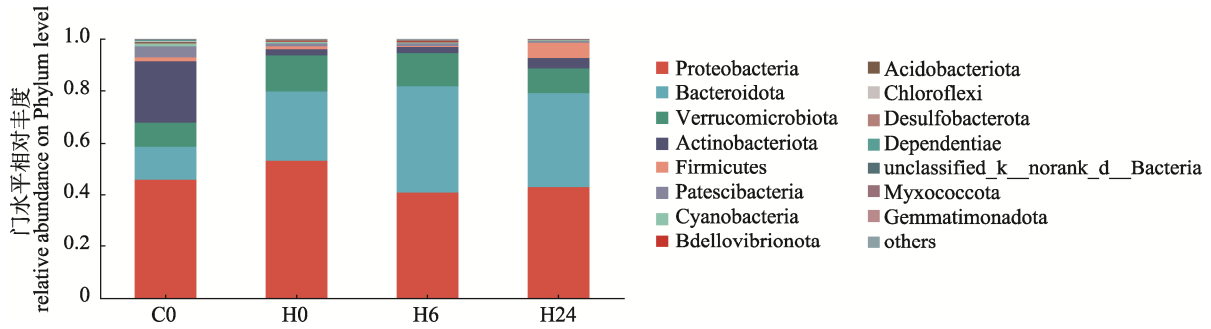


图 12 黄条鲷体表黏液菌群组成(门水平)

C0: 对照组; H0: 操作胁迫后 0 h; H6: 操作胁迫后 6 h; H24: 操作胁迫后 24 h.

Fig. 12 Slime microbiota profile on the body surface of *Seriola aureovittata* (on phylum level)

C0: control group; H0: 0 h after handling stress; H6: 6 h after handling stress; H24: 24 h after handling stress.

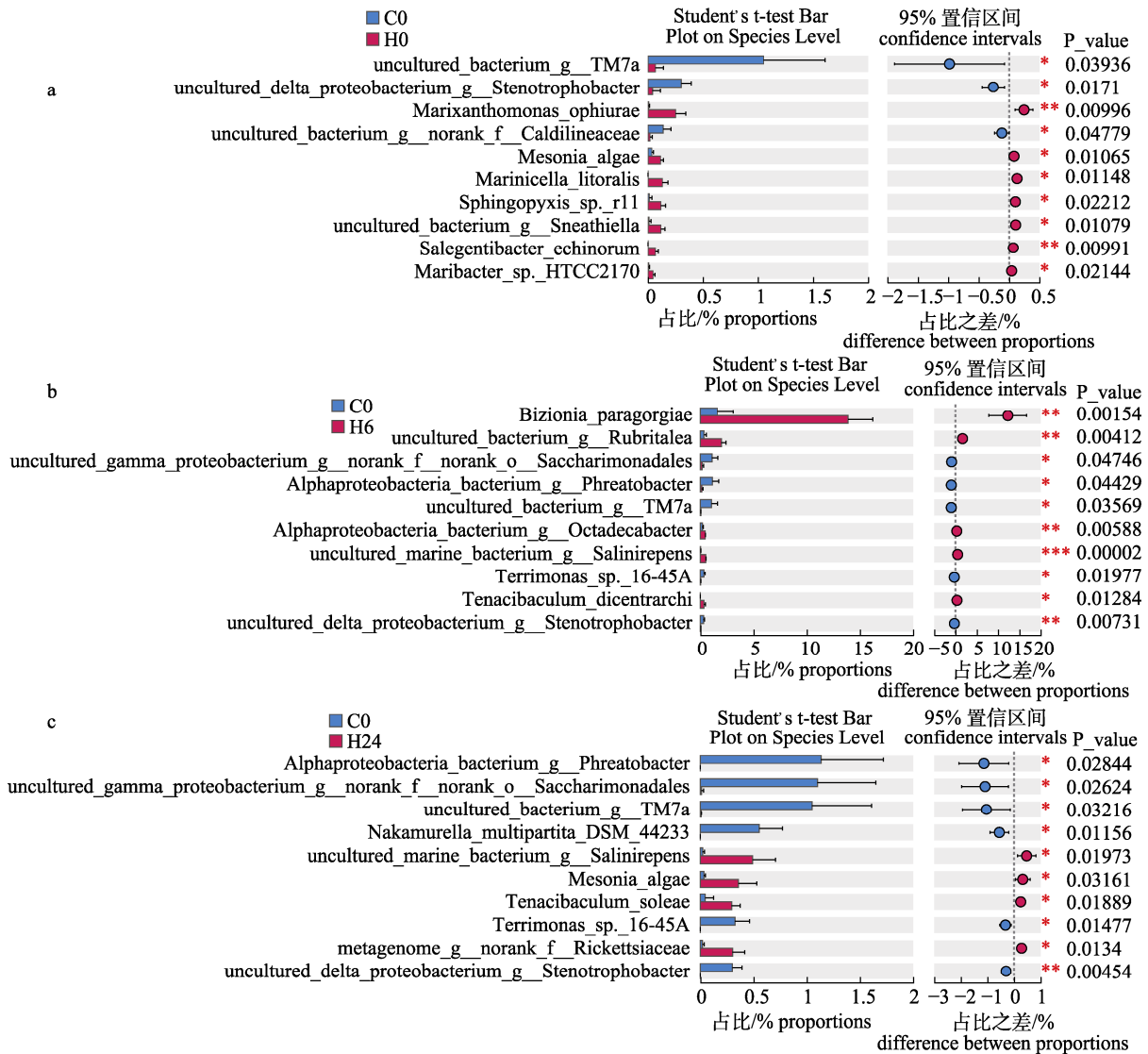


图 13 黄条鲷体表黏液菌群组成差异分析

a. C0 与 H0 之间差异分析; b. C0 与 H6 之间差异分析; c. C0 与 H24 之间差异分析. C0: 对照组;

H0: 操作胁迫后 0 h; H6: 操作胁迫后 6 h; H24: 操作胁迫后 24 h.

Fig. 13 Differences analysis for the slime microbiota profile on the body surface of *Seriola aureovittata*

a. Analysis between C0 and H0; b. Analysis between C0 and H6; c. Analysis between C0 and H24. C0: control group;

H0: 0 h after handling stress; H6: 6 h after handling stress; H24: 24 h after handling stress.

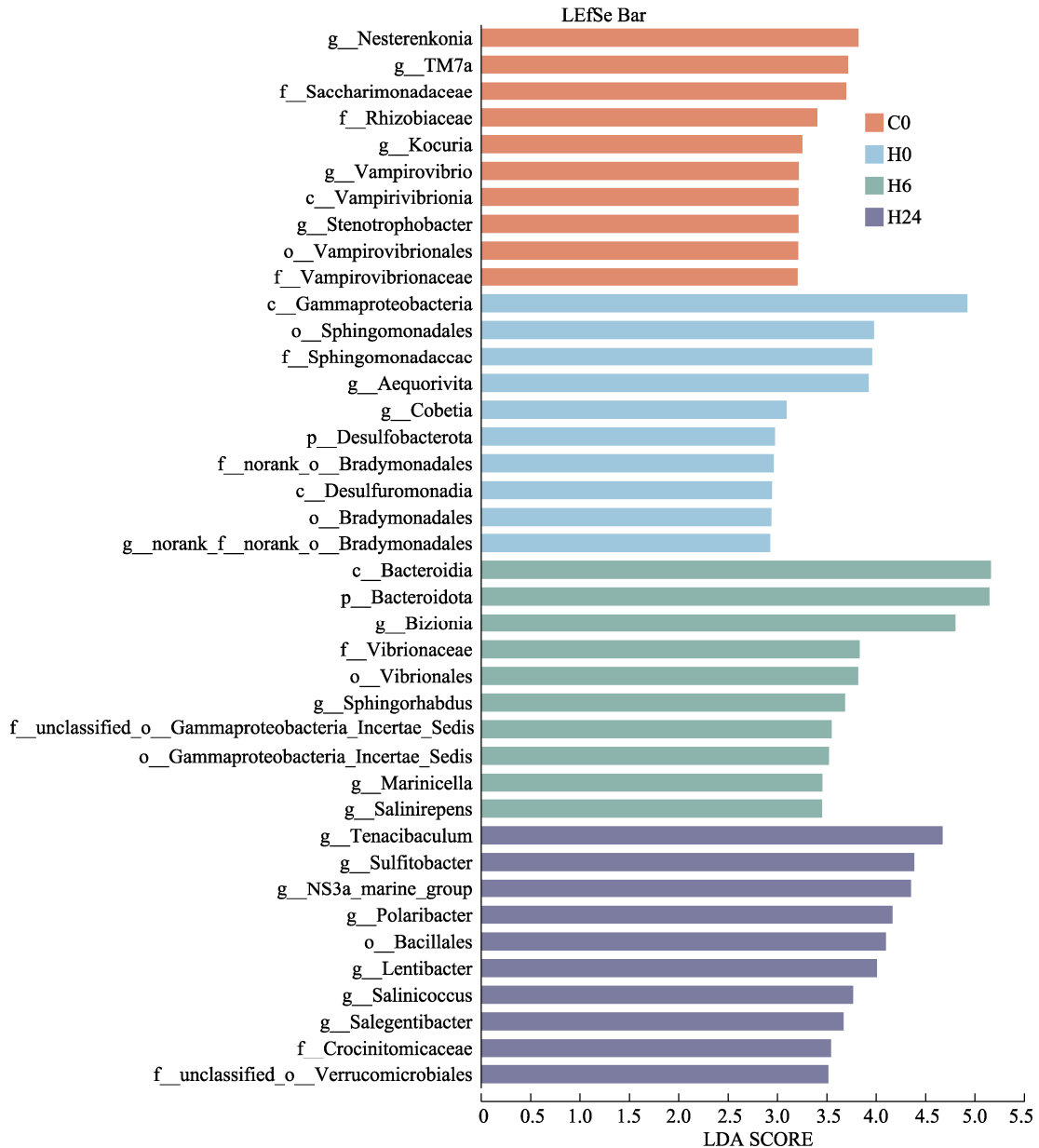


图 14 黄条鲷体表黏液菌群线性判别分析

C0: 对照组; H0: 操作胁迫后 0 h; H6: 操作胁迫后 6 h; H24: 操作胁迫后 24 h.

Fig. 14 LEfSe (linear discriminant analysis effect size) analysis for slime microbiota profile from the body surface of *Seriola aureovittata*

C0: control group; H0: 0 h after handling stress; H6: 6 h after handling stress; H24: 24 h after handling stress.

3 讨论

3.1 急性操作胁迫影响黄条鲷血清生化指标

日常的捕捞、转运和分苗等操作均可引发鱼类应激反应, 过度应激会扰乱鱼类正常的行为和生理活动, 导致生长抑制、抗氧化能力降低及繁殖受损, 影响其养殖福利^[20-21]。当鱼类受到胁迫后, 其下丘脑会激活交感神经系统, 从而释放皮

质醇、儿茶酚胺和肾上腺素等激素, 其中皮质醇可促进糖原分解成葡萄糖^[22], 进而提高鱼类在应激状态下的能量供应效率^[23], 因此血清皮质醇和葡萄糖是反映鱼体应激的关键指标。在本研究中, 急性操作胁迫可导致血清皮质醇含量显著升高。随恢复时间延长, 皮质醇含量呈现先升高后降低的趋势, 并在恢复 3 h 时达到峰值, 恢复至 12 h 时降为胁迫前水平, 这与在刀鲚^[19]上的实验结果

相似。一系列研究表明, 氨氮胁迫^[24]、高温胁迫^[25]和拥挤胁迫^[26]可导致血清葡萄糖含量升高。但是, 本研究结果显示, 黄条鲮血清葡萄糖含量随恢复时间延长呈现先降低后升高的趋势, 其含量在恢复至 6 h 时降到谷值。考虑到本实验设计, 黄条鲮在操作胁迫中要反复经历拥挤-暴露, 大量的葡萄糖可能在此过程中被消耗供能, 从而导致胁迫后的血糖含量降低。因此, 后续在设计相关实验时可增加胁迫进行时的取样节点, 从而更全面阐明血糖的变化特征。

3.2 急性操作胁迫影响黄条鲮血清抗氧化指标和转氨酶活力

急性操作胁迫对鱼类氧化平衡具有重要影响。MDA 作为脂质过氧化反应产物, 是反映机体氧化水平的重要指标^[27]。SOD、CAT 和 GSH-Px 作为机体重要的抗氧化酶, 可通过分解超氧自由基或过氧化物来降低细胞氧化损伤^[28-29]。在本研究中, 急性操作胁迫可导致 SOD、GSH-Px、CAT 和 MDA 含量升高, 且随恢复时间延长, 以上指标均呈现先升高后降低的趋势, 并在恢复至 6 h 时达到峰值, 这与在云纹石斑鱼^[18]和四指马鲛^[17]上的研究结果相似。以上现象说明急性操作胁迫可导致黄条鲮氧化应激, 机体为了维持氧化平衡也相应的提高了抗氧化酶活力。当恢复时间持续至 24 h, 仅 CAT 活力和 MDA 含量降至初始水平, SOD 和 GSH-Px 活力仍显著高于对照组, 这意味着急性操作胁迫对不同抗氧化酶系统的影响存在差异, 且黄条鲮完全恢复氧化平衡的时间超过 24 h。肝脏受损可导致 GOT 和 GPT 进入血液, 因此血清转氨酶是反映肝脏健康的重要指标^[30]。在本研究中, 随恢复时间延长, 黄条鲮血清 GOT 和 GPT 含量先升高后降低, 并在恢复 6 h 时显著最高, 说明急性操作胁迫对肝脏造成了一定损伤, 这与大黄鱼在转运胁迫中的反应一致^[31]。当恢复时间持续到 24 h, GOT 和 GPT 含量有所降低, 但仍显著高于胁迫前水平, 说明黄条鲮肝脏健康完全恢复的时间超过 24 h。

3.3 急性操作胁迫影响黄条鲮鳃组织形态和离子转运酶活力

鳃既是鱼类呼吸的主要器官, 也在调节机体

渗透压平衡中发挥关键作用^[32]。在本研究中, 黄条鲮鳃组织形态在急性操作胁迫中发生了显著变化, 主要表现为鳃小片弯曲肿胀、细胞空泡化及上皮细胞排列紊乱等, 这与在美洲鲮 (*Alosa sapidissima*)^[33]、四指马鲛^[34]上的胁迫结果相似。急性操作胁迫也会导致鳃小片间距和长度显著增加, 这与大黄鱼^[31]在转运过程中的反应一致, 推测以上变化可能有利于提高鱼类在应激状态下的氧气摄取效率。在操作胁迫恢复 24 h 后, 黄条鲮鳃丝仍未完全恢复至初始形态, 鳃小片长度与对照组存在显著差异, 表明急性操作胁迫可破坏黄条鲮鳃组织形态, 且鳃结构恢复时间超过 24 h。NKA 酶和 CMA 酶是细胞膜束缚酶, 其可通过调节细胞膜内外的 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 离子浓度来保持机体渗透压平衡, 维持神经信号传递、肌肉收缩等活动的正常进行, 从而保证机体适应生存环境的变化^[35]。本研究显示, 急性操作胁迫可导致黄条鲮 NKA 酶和 CMA 酶活力显著降低, 随恢复时间延长, NKA 酶和 CMA 酶活力均呈现先降低后升高的趋势, 并在恢复 6 h 时达到谷值, 这与在云纹石斑鱼^[18]和大黄鱼^[31]上的实验结果相似, 说明急性操作胁迫会降低鱼类渗透压调节能力。当恢复时间达到 24 h 时, 仅 NKA 酶活力升至胁迫前水平, CMA 酶活力依然显著低于胁迫前, 进一步说明了黄条鲮鳃渗透压调节功能完全恢复的时间超过了 24 h。

3.4 急性操作胁迫影响黄条鲮体表黏液菌群组成

鱼类体表黏液菌群是附着在皮肤黏液层中的微生物群落, 其在维持体表微生态平衡、辅助宿主代谢和调节免疫中发挥重要作用^[36]。Cámara-Ruiz 等^[37]认为体表黏液微生物组成特征可以直接反映鱼体健康状态。郑跃平等^[38]进一步研究发现, 亚健康状态下的中华鲟 (*Acipenser sinensis*) 体表黏液致病菌丰度显著升高。本研究显示, 急性操作胁迫并未对黄条鲮体表黏液菌群组成 α -多样性造成显著影响, 但是加剧了菌群失调。对于 β -多样性, 恢复 6~24 h 的菌群组成与对照组聚类关系较远, 意味着急性操作胁迫对黄条鲮体表黏液菌群构成改变较大, 且这种变化在胁迫结束后的 24 h 也未恢复。根据各组菌群在门水

平的组成,操作胁迫导致黄条鲷体表黏液变形菌门、拟杆菌门和疣微菌门丰度升高,其中变形菌门是判断疾病的潜在标志^[39],其丰度升高可能导致宿主免疫功能失调及营养代谢紊乱^[40]。根据种水平菌群组成,急性操作胁迫后的 0~24 h,灿烂弧菌、鲷黏着杆菌、舌齿鲈黏着杆菌的丰度均显著高于对照组,其中灿烂弧菌是水产动物常见病原体,可通过溶血素引发水产动物皮肤溃烂及内脏出血^[41-42],舌齿鲈黏着杆菌可通过侵入鳃部导致鱼类急性感染^[43]。而关于鲷黏着杆菌的研究较少,其最初由患病塞内加尔鲷(*Solea senegalensis* Kaup)中分离得到,可能是鱼类潜在的致病菌^[44]。因此,操作胁迫可破坏黄条鲷体表黏液菌群平衡,使致病菌丰度增加,且黏液菌群结构恢复正常的时间超过 24 h。

4 结论

黄条鲷受到拥挤-暴露操作胁迫后,其血清生化指标、抗氧化平衡、肝脏健康、鳃组织形态和体表黏液菌群组成均受到负面影响,且这种影响在操作胁迫结束后的 6 h 最严重。随恢复时间延长,黄条鲷各项指标趋向胁迫前水平,但是血清转氨酶、鳃组织形态、体表黏液菌群组成等在胁迫 24 h 后均未完全恢复。研究结果表明,黄条鲷从急性操作胁迫中完全恢复的时间超过 24 h,胁迫后的 6 h 内是采取措施缓解应激的关键节点;调节体表黏液菌群是缓解应激的潜在思路。

参考文献:

- [1] Ai Q Y, Sang L L, Tan H X, et al. Genetic and morphological differences between yellowtail kingfish (*Seriola lalandi*) from the Bohai Sea, China and the Southern Ocean, Australia[J]. *Aquaculture and Fisheries*, 2021, 6(3): 260-266.
- [2] Mechaly A S, Elizur A, Escobar-Aguirre S, et al. Advances in reproduction, nutrition and disease research in the yellowtail kingfish (*Seriola lalandi*) aquaculture[J]. *Reviews in Aquaculture*, 2025, 17(3): e70034.
- [3] Xu Y J, Zhang Z R, Liu X Z, et al. Morphometric characteristics of the embryonic and postembryonic development of yellowtail kingfish, *Seriola aureovittata*[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2019, 26(1): 172-182. [徐永江, 张正荣, 柳学周, 等. 黄条鲷早期生长发育特征[J]. *中国水产科学*, 2019, 26(1): 172-182.]
- [4] Wendelaar Bonga S E. The stress response in fish[J]. *Physiological Reviews*, 1997, 77(3): 591-625.
- [5] Reid C H, Patrick P H, Rytwinski T, et al. An updated review of cold shock and cold stress in fish[J]. *Journal of Fish Biology*, 2022, 100(5): 1102-1137.
- [6] Fast M D, Hosoya S, Johnson S C, et al. Cortisol response and immune-related effects of Atlantic salmon (*Salmo salar* Linnaeus) subjected to short- and long-term stress[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2008, 24(2): 194-204.
- [7] Grabner D, Rothe L E, Sures B. Parasites and pollutants: Effects of multiple stressors on aquatic organisms[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2023, 42(9): 1946-1959.
- [8] Evans T G, Kültz D. The cellular stress response in fish exposed to salinity fluctuations[J]. *Journal of Experimental Zoology Part A: Ecological and Integrative Physiology*, 2020, 333(6): 421-435.
- [9] Zarantonello M, Bortoletti M, Olivotto I, et al. Salinity, temperature and ammonia acute stress response in seabream (*Sparus aurata*) juveniles: A multidisciplinary study[J]. *Animals*, 2021, 11(1): 97.
- [10] Xu Z K, Zhang H Z, Guo M J, et al. Analysis of acute nitrite exposure on physiological stress response, oxidative stress, gill tissue morphology and immune response of large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) [J]. *Animals*, 2022, 12(14): 1791.
- [11] Yan X B, Chen Y, Dong X H, et al. Ammonia toxicity induces oxidative stress, inflammatory response and apoptosis in hybrid grouper (♀ *Epinephelus fuscoguttatus* × ♂ × ♂ *E. lanceolatus*) [C]// *Proceedings of the Frontiers in Marine Science*, 2021
- [12] Bortoletti M, Fonsatti E, Leva F, et al. Influence of transportation on stress response and cellular oxidative stress markers in juvenile meagre (*Argyrosomus regius*) [J]. *Animals*, 2023, 13(20): 3288.
- [13] Philippe C, Vergauwen L, Huyghe K, et al. Chronic handling stress in zebrafish *Danio rerio* husbandry [J]. *Journal of Fish Biology*, 2023, 103(2): 367-377.
- [14] Gabriel U U, Akinrotimi O A. Management of stress in fish for sustainable aquaculture development [J]. *Researcher*, 2011, 3(4): 28-38.
- [15] Stevens C H, Croft D P, Paull G C, et al. Stress and welfare in ornamental fishes: What can be learned from aquaculture? [J]. *Journal of Fish Biology*, 2017, 91(2): 409-428.
- [16] Weng Z H, Wang Z Y, Xie F J, et al. Effect of handling stress on fingerlings of large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea* Richardson) [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2008, 15(1): 100-105. [翁朝红, 王志勇, 谢芳靖, 等. 操作胁迫对大黄鱼幼鱼的影响 [J]. *中国水产科学*, 2008, 15(1): 100-105.]
- [17] Liu Q Q, Wen J F, Ou Y J, et al. Effects of acute handling

- stress on liver tissue and oxidative stress of juvenile *Eleutheronema tetradactylum*[J]. *South China Fisheries Science*, 2017, 13(5): 103-109. [刘奇奇, 温久福, 区又君, 等. 急性操作胁迫对四指马鲛幼鱼肝脏组织结构和氧化应激的影响[J]. *南方水产科学*, 2017, 13(5): 103-109.]
- [18] Sun P, Yin F, Wang J J, et al. Effects of handling stress on activities of antioxidant enzymes in liver and $\text{Na}^+\text{-K}^+$ ATPase in gill of *Epinephelus moara*[J]. *Marine Fisheries*, 2014, 36(3): 247-251. [孙鹏, 尹飞, 王健建, 等. 操作胁迫对云纹石斑鱼肝脏抗氧化和鳃 $\text{Na}^+\text{-K}^+$ ATPase 活力的影响[J]. *海洋渔业*, 2014, 36(3): 247-251.]
- [19] Wang Y, Lu D Q, Li W P, et al. The effect of acute handling stress on the stress-related neuroendocrine factor in *Coilia nasus*[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2014, 38(6): 803-812. [王宇, 卢丹琪, 李伟萍, 等. 急性操作胁迫对刀鲚应激反应相关神经内分泌因子的影响[J]. *水产学报*, 2014, 38(6): 803-812.]
- [20] Conte F S. Stress and the welfare of cultured fish[J]. *Applied Animal Behaviour Science*, 2004, 86(3-4): 205-223.
- [21] Abdel-Tawwab M, Monier M N, Hoseinifir S H, et al. Fish response to hypoxia stress: Growth, physiological, and immunological biomarkers[J]. *Fish Physiology and Biochemistry*, 2019, 45(3): 997-1013.
- [22] Ganesh C B. The stress-Reproductive axis in fish: The involvement of functional neuroanatomical systems in the brain[J]. *Journal of Chemical Neuroanatomy*, 2021, 112: 101904.
- [23] Fabbri E, Capuzzo A, Moon T W. The role of circulating catecholamines in the regulation of fish metabolism: An overview[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Pharmacology, Toxicology and Endocrinology*, 1998, 120(2): 177-192.
- [24] Shan N, Lin T T, Lai Q F, et al. Effects of four environmental stresses on biochemical indexes in the plasma of gibel carp *Carassius auratus gibelio*[J]. *Marine Fisheries*, 2017, 39(2): 162-172. [单娜, 林听听, 来琦芳, 等. 4 种环境源性胁迫对异育银鲫血浆生化指标的影响[J]. *海洋渔业*, 2017, 39(2): 162-172.]
- [25] 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. [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.]
- [26] Jiang Y, Wang W X, Xu Y J, et al. Effects of industrial stocking density on the growth and physiological characteristics of *Seriola lalandi*[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2022, 29(9): 1290-1299. [姜燕, 王维鑫, 徐永江, 等. 工厂化养殖密度对黄条鲮生长和生理特性的影响[J]. *中国水产科学*, 2022, 29(9): 1290-1299.]
- [27] Wang Z M, He Z F, Emara A M, et al. Effects of malondialdehyde as a byproduct of lipid oxidation on protein oxidation in rabbit meat[J]. *Food Chemistry*, 2019, 288: 405-412.
- [28] Zengil S, Laloğlu E. The effect of major depressive disorder comorbidity on ischemia-modified albumin levels, a marker of oxidative stress, and antioxidant defense system in patients with obsessive compulsive disorder[J]. *Frontiers in Psychiatry*, 2024, 15: 1469640.
- [29] Sarıkaya B, Kolay E, Guney-Coskun M, et al. The effect of black chokeberry (*Aronia melanocarpa*) on human inflammation biomarkers and antioxidant enzymes: A systematic review of randomized controlled trials[J]. *Nutrition Reviews*, 2025, 83(6): 1083-1098.
- [30] Ghanem A S, Tóth Á, Takács P, et al. Flexible parametric survival modeling of transaminases as predictive biomarkers for non-alcoholic fatty liver disease: A retrospective longitudinal study (2012-2022)[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2025, 26(11): 5057.
- [31] Zheng J C, Feng Y, Xu Y J. The effects of 5-Hydroxymethylfurfural in mitigating transportation stress of large yellow croaker (*Larimichthys crocea*)[J]. *Aquaculture*, 2025, 600: 742235.
- [32] Sackville M A, Gillis J A, Brauner C J. The origins of gas exchange and ion regulation in fish gills: Evidence from structure and function[J]. *Journal of Comparative Physiology B*, 2024, 194(5): 557-568.
- [33] Zhang Y, Xu G C, Du F K, et al. Effects of acute handling stress on serum biochemical parameters and HSP70 gene expression in *Alosa sapidissima* broodstocks[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2016, 25(5): 652-658. [张勇, 徐钢春, 杜富宽, 等. 急性操作胁迫对美洲鲷亲鱼血清生化指标及 HSP70 基因表达的影响[J]. *上海海洋大学学报*, 2016, 25(5): 652-658.]
- [34] Liu Q Q, Wen J F, Ou Y J, et al. Effects of acute operation stress out of water on tissue structure and oxidative stress of juvenile *Eleutheronema tetradactylum*[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2017, 38(6): 48-55. [刘奇奇, 温久福, 区又君, 等. 急性离水操作胁迫对四指马鲛(*Eleutheronema tetradactylum*)幼鱼组织结构和氧化应激的影响[J]. *渔业科学进展*, 2017, 38(6): 48-55.]
- [35] Liu Y, Tian J, Song H, et al. Osmoregulation and physiological response of largemouth bass (*Micropterus salmoides*) juvenile to different salinity stresses[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2025, 26(8): 3847.
- [36] Wang J G, Hu C H, Tong X J, et al. Microbial communities associated with the skin, gill, and gut of large yellow croaker (*Larimichthys crocea*)[J]. *BMC Microbiology*, 2025, 25(1): 16.
- [37] Cámara-Ruiz M, Cerezo I M, Guardiola F A, et al. Alteration of the immune response and the microbiota of the skin during a natural infection by *Vibrio harveyi* in European seabass (*Dicentrarchus labrax*)[J]. *Microorganisms*, 2021,

- 9(5): 964.
- [38] Zheng Y P, Liu J H, Jin S, et al. Analysis on the difference of microbial composition between body surface mucus and habitat of *Acipenser sinensis* in different physiological states[J]. Progress in Fishery Sciences, 2024, 45(2): 150-161. [郑跃平, 刘杰豪, 金审, 等. 不同生理状态中华鲟体表黏液与生境微生物组成差异分析[J]. 渔业科学进展, 2024, 45(2): 150-161.]
- [39] Shin N R, Whon T W, Bae J W. *Proteobacteria*: Microbial signature of dysbiosis in gut microbiota[J]. Trends in Biotechnology, 2015, 33(9): 496-503.
- [40] Carvalho F A, Koren O, Goodrich J K, et al. Transient inability to manage proteobacteria promotes chronic gut inflammation in TLR5-deficient mice[J]. Cell Host & Microbe, 2012, 12(2): 139-152.
- [41] Zhang W W, Li C H. Virulence mechanisms of vibrios belonging to the Splendidus clade as aquaculture pathogens, from case studies and genome data[J]. Reviews in Aquaculture, 2021, 13(4): 2004-2026.
- [42] Song M S, Zhang S S, Xiao K, et al. Intestinal microbiota protects *Vibrio splendidus* induced intestinal epithelium damage by inhibiting apoptosis and promoting proliferation in *Apostichopus japonicus*[J]. Aquaculture, 2024, 588: 740924.
- [43] Klakegg Ø, Abayneh T, Fauske A K, et al. An outbreak of acute disease and mortality in Atlantic salmon (*Salmo salar*) post-smolts in Norway caused by *Tenacibaculum dicentrarchi*[J]. Journal of Fish Diseases, 2019, 42(6): 789-807.
- [44] Piñeiro-Vidal M, Carballas C G, Gómez-Barreiro O, et al. *Tenacibaculum soleae* sp. nov., isolated from diseased sole (*Solea senegalensis* Kaup)[J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2008, 58(Pt 4): 881-885.

Effects of acute handling stress on serum biochemical parameters, antioxidant capacity, gill morphology, and surface-slime microbial community of *Seriola aureovittata*

ZHENG Jichang, FENG Yuan, XU Yongjiang*, CUI Aijun, JIANG Yan, WANG Zhenghao

State Key Laboratory of Mariculture Biobreeding and Sustainable Goods, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China

Abstract: In this study, we investigated the effects of acute handling stress on serum biochemical indicators, antioxidant capacity, gill morphology, and surface slime microbial community of *Seriola aureovittata*. The experiment was conducted using *S. aureovittata* individuals (body weight: 463.86 ± 63.86 g). During the experiment, crowding-air exposure was repeated 10 times. Samples were collected before acute handling stress (C0, control group) and at 0, 3, 6, 12, and 24 h after stress. The results showed that acute handling stress significantly increased serum cortisol levels ($P < 0.05$). With the extended recovery time, cortisol levels initially increased and subsequently decreased, peaking at 3 h and returning to baseline at 12 h. Superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT), glutathione peroxidase (GSH-Px) activities and malondialdehyde (MDA) content followed a similar trend to that of cortisol; however, they peaked at 6 h after handling stress. After 24 h of recovery, only CAT activity and MDA content returned to their initial levels. In addition, acute handling stress caused bending and swelling of gill lamellae, cell vacuolation, and disordered epithelial arrangement. After 24 h of recovery, gill filament morphology had not fully returned to its original state. Moreover, acute handling stress exacerbated slime microbiota dysbiosis on the body surface, significantly increasing pathogenic bacteria abundance, including *Vibrio splendidus*, *Tenacibaculum soleae*, and *Tenacibaculum dicentrachi* ($P < 0.05$). In conclusion, *S. aureovittata* requires more than 24 h to fully recover from acute handling stress. The optimal window for stress-alleviating interventions occurs within the first 6 h post-handling stress. Regulating slime microbiota balance on the body surface may represent a promising strategy for mitigating acute handling stress.

Key words: *Seriola aureovittata*; acute handling stress; antioxidant capacity; slime microbiota; serum biochemical parameter

*Corresponding author: XU Yongjiang. E-mail: xuyj@ysfri.ac.cn