

溶解氧对半滑舌鲷呼吸频率、生理生化指标和组织结构的影响

聂国梁¹, 王庆奎¹, 赵鸿昊¹, 王祯辉², 付建东², 李强¹

(1. 天津农学院 水产学院, 天津 300392; 2. 天津市海发珍品实业发展有限公司, 天津 300450)

摘要: 在循环水养殖系统中由于常出现低氧和高氧的情况, 为了解溶解氧变化对半滑舌鲷 (*Cynoglossus semilaevis*) 的影响, 本试验检测了低溶解氧 (3 mg/L)、对照组 (8 mg/L)、高溶解氧 (14 mg/L、20 mg/L) 条件下半滑舌鲷呼吸、生理生化指标和组织结构的情况。结果表明, 低氧组半滑舌鲷在 24 h 内呼吸频率显著增加, 而高氧组呼吸频率显著降低 ($P<0.05$)。在第七天低氧组呼吸频率与对照组无显著差异 ($P>0.05$), 而高氧组呼吸频率随溶解氧升高而显著降低 ($P<0.05$)。第十四天后, 低氧组呼吸频率与对照组差异不显著, 而高氧组呼吸频率随溶解氧升高而显著降低 ($P<0.05$)。低氧组和高氧组较对照组均出现上皮细胞层增生现象, 高氧组半滑舌鲷组织较对照组出现较多空泡现象。低氧组肝脏组织结构异常, 肝细胞广泛疏松水肿, 细胞轮廓不清晰, 而高氧组肝细胞轮廓清晰, 胞浆红染, 未见明显变性。低氧组血液红细胞数量、血红蛋白含量较对照组增高 ($P>0.05$), 红细胞比积较对照组减少 ($P>0.05$)。高氧组红细胞数量、血红蛋白含量和红细胞比积均高于对照组 ($P>0.05$)。低氧组和高氧组血浆 MDA 含量、SOD 活力及 CAT 活力均显著高于对照组 ($P<0.05$)。结论: 低氧和高氧都对半滑舌鲷产生胁迫, 低氧对半滑舌鲷的胁迫更明显。

关键词: 半滑舌鲷; 溶解氧; 呼吸频率; 血液指标; 组织切片; 酶活性

中图分类号: S917.4

文献标识码: A

Effects of dissolved oxygen on respiratory rate, physiological and biochemical parameter and tissue structure of *Cynoglossus semilaevis*

Nie Guoliang¹, Wang Qingkui¹, Zhao Honghao¹, Wang Zhenhui²,
Fu Jiandong², Li Qiang¹

(1. College of Fisheries, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300392, China; 2. Tianjin Haifa Zhenpin Industrial Development Co., Ltd., Tianjin 300450, China)

Abstract: In order to understand the effects of dissolved oxygen changes on *Cynoglossus semilaevis*, which often occurs in circulating water culture systems with low and high oxygen, this experiment examined the effects of low dissolved oxygen (3 mg/L), control (8 mg/L), and high dissolved oxygen (14 mg/L, 20 mg/L) conditions on the respiration, physiological and biochemical parameter, and tissue structure of *Cynoglossus semilaevis*. The results showed that respiratory rate increased significantly in the hypoxic group and decreased significantly in the hyperoxic group within 24 h ($P<0.05$). At day 7, the respiratory rate of the low oxygen group was not significantly different from that of the control group ($P>0.05$), while the respiratory rate of the high oxygen group decreased significantly with the increase of dissolved oxygen ($P<0.05$). After the 14th day, the respiratory rate of the low oxygen group was not significantly different from that of the control group, while the respiratory rate of the high oxygen group decreased significantly with the increase of dissolved oxygen ($P<0.05$). Both the hypoxic and hyperoxic groups showed proliferation of epithelial cell layers compared to the control group, and the gill tissue in the hyperoxic group showed more vacuolation than the control group in the *Cynoglossus semilaevis*. In the hypoxic group, liver tissue structure was abnormal, with extensive loose edema and unclear cell outline, while the hepatocytes in the hyperoxic group had clear outline and red stained cytoplasm, but no obvious degeneration was observed. The number of erythrocytes and hemoglobin content of blood in the hypoxic group increased compared with the control group ($P>0.05$), and the ratio of erythrocyte volume decreased compared with the control group ($P>0.05$). The erythrocyte count, hemoglobin content and erythrocyte specific volume were higher in the hyperoxia group than in the control group ($P>0.05$). Plasma MDA content, SOD activity and CAT activity were significantly higher in the hypoxic and hyperoxic groups than in the control group ($P<0.05$). In conclusion, both hypoxia and hyperoxia caused stress on *Cynoglossus semilaevis*, and the stress of hypoxia was more obvious on *Cynoglossus semilaevis*.

Key words: *Cynoglossus semilaevis*; dissolved oxygen; respiratory rate; blood indicators; tissue sections; enzyme activity

收稿日期: 2023-05-11

基金项目: 现代农业产业技术体系专项资金 (CARS-47); 天津市海水养殖产业技术体系创新团队 (ITMRS2021000); 国家重点研发计划“蓝色粮仓科技创新”专项 (2020YFD0900600); 天津市高等学校“创新团队培养计划” (TD13-5089)

作者简介: 聂国梁 (1996—), 男, 硕士在读, 主要从事海水鱼循环水健康养殖方面研究。E-mail: 1020482081@qq.com。

通信作者: 王庆奎 (1978—), 男, 教授, 博士, 主要从事海水鱼循环水健康养殖方面研究。E-mail: wangqk@tjau.edu.cn。

李强 (1979—), 男, 教授, 博士, 研究方向: 水产动物病害快速诊断与免疫防控。E-mail: liqiangntn@tjau.edu.cn。

溶解氧 (Dissolved Oxygen, DO) 是水生生物赖以生存的条件之一, 溶解氧过高和过低均会对水生动物行为、生长、免疫、繁殖造成影响。低溶解氧会导致水生动物行为迟钝、不活跃, 降低游泳能力, 使生长和繁殖率下降^[1], 也会影响免疫系统^[2], 长期生存在低溶解氧环境甚至会导致细胞凋亡^[3]。

低溶解氧环境下, 大菱鲆 (*Scophthalmus maximus*) 会先通过增加呼吸频率以获得更多的氧^[2], 虹鳟 (*Oncorhynchus mykiss*) 在低氧胁迫下通过提高血液中血红蛋白水平来适应低氧环境^[4]。低氧胁迫会使团头鲂 (*Megalobrama amblycephala*) 降低鳃丝的层间细胞团体积, 并且会导致鳃小片表面积增加^[5], 使金鱼 (*Carassius auratus*) 鳃小片充血甚至融合, 恢复正常溶解氧 24 h 后其鳃未见明显好转^[6]。在急性低氧胁迫下, 黄尾平口石首鱼 (*Leiostomus xanthurus*) 鳃组织中超氧化物歧化酶、乳酸脱氢酶等抗氧化酶活力显著提高, 表明低溶解氧会使生活在其中的鱼类组织代谢产生的自由基数量上升, 这些自由基增多, 会诱发抗氧化酶表达, 从而使抗氧化酶活性升高^[7]。

高溶解氧能提高养殖动物的存活率, 但也会对鱼体造成损害。高溶解氧会导致水生动物的行为发生变化, 导致摄食、游泳和交配模式发生变化, 大西洋鲑 (*Salmo salar*) 在较高溶解氧下游泳能力显著增高^[8]。高溶解氧加快鱼类代谢过程, 促进生长和繁殖。吉富罗非鱼 (*Oreochromis niloticus*) 的成活率、末体重、特定生长率、肝体比、脏体比等指标在高溶解氧时得到明显改善, 呈现增高趋势^[9]。氧对鱼类生存、生长至关重要, 但过高的氧会导致鱼类氧化应激, 对细胞和组织造成损害。虹鳟在超饱和溶解氧条件下呼吸紊乱, 血液 CO_2 上升, H_2CO_3 增多, 导致血液 pH 值下降, 引发呼吸性酸中毒, 导致血红蛋白对氧的亲和能力下降^[10]。杂交红点鲑 (*Salvelinus fontinalis* ♀ × *Salvelinus alpinus* ♂) 幼鱼在溶解氧过饱和 (120%~130%) 时, 血红蛋白浓度随溶解氧含量升高而下降^[11]。在 18~20 mg/L 时, 金鱼 (*Carassius auratus*) 体内自由基数量激增, 鳃组织受损严重^[12]。

在循环水养殖系统中, 半滑舌鳎的养殖密度一般较高。为避免饲料随水进入排水管, 喂食期间需停止水循环。高的养殖密度加之无氧气供应,

往往会导致喂食结束时水体溶解氧降到 3 mg/L 左右的低氧状态, 从而对半滑舌鳎造成低氧胁迫。半滑舌鳎非喂食期间, 养殖企业通过向循环水养殖系统中充纯氧以维持水中充足的溶解氧。但过高的溶解氧不仅可能对半滑舌鳎造成胁迫, 也增加了养殖成本。将循环水养殖系统中溶解氧控制在合理水平, 是保障半滑舌鳎正常生长并降低养殖成本的有效途径之一。目前, 溶解氧对半滑舌鳎的影响研究不多, 多高的溶解氧会对半滑舌鳎产生不利影响尚未见报道。本试验通过比较低溶解氧、高溶解氧对半滑舌鳎呼吸频率、生理生化指标和组织结构的影响, 为半滑舌鳎循环水养殖中溶解氧的精准控制提供科学依据, 也为揭示半滑舌鳎对极端溶解氧的适应机制提供线索。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 试验动物

试验用半滑舌鳎 (*Cynoglossus semilaevis*) 均购自天津市海发珍品实业发展有限公司, 体重 (110 ± 10) g, 24 °C 驯养 14 d。

1.1.2 试剂和仪器

试验试剂有 MnSO_4 溶液、碱性 KI 溶液、浓硫酸 (1:1 稀释硫酸、1 mol/L 硫酸溶液)、 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 标准溶液、铵标准使用液、酒石酸钾钠溶液 (500 g/L)、纳氏试剂、淀粉指示剂、10% 中性福尔马林溶液、肝素钠; 超氧化物歧化酶、过氧化氢酶、丙二醛测定试剂盒均购自南京建成生物工程研究所; 试验仪器有紫外可见分光光度计 (日立 Hitachi UH5300)、全自动动物血细胞分析仪 (优利特 URIT-2900PlusVet)、高速冷冻离心机 (赛默飞世尔 Centrifuge X1R)。

1.2 试验内容

1.2.1 试验设计

在 22 °C、盐度 24 条件下 (此为半滑舌鳎最适温度及盐度), 设置试验期间饱和溶解氧的 40 % (3 mg/L)、95 % (8 mg/L)、160 % (14 mg/L)、250 % (20 mg/L) 4 个溶解氧梯度, 将鱼放入容积为 400 L 的圆形水槽养殖。养殖 3 h、1 d、7 d、14 d 后各组随机取 7 尾鱼放入呼吸室, 观察各试验鱼 10 min 的呼吸情况。养殖 14 d 后检测其血红蛋白含量 (Hb)、红细胞比容 (HCT)、红细胞数量

(RBC)、血液中丙二醛(MDA)含量、血液中过氧化氢酶(CAT)含量、超氧化物歧化酶(SOD)含量,鳃、肝组织结构变化。

1.2.2 试验方法

随机多次测量半滑舌鳎工厂化循环水养殖水中溶解氧含量,平均值为 (8 ± 0.5) mg/L。采用碘量法计算出该溶解氧水平是水温 22 ℃、盐度 17 下海水饱和溶氧的 95%。温度由海水加热棒进行控温。对半滑舌鳎继续进行盐度驯化 14 d,期间每两天上调 1 个盐度,直至盐度为 24。设置当前工厂化养殖条件(温度 22 ℃,气压 101 KPa,盐度 17)下水中饱和溶氧量的 40%(3 mg/L)、95%(8 mg/L)、160%(14 mg/L)、250%(20 mg/L) 4 个溶解氧梯度,通过调节空气、纯氧流速使溶解氧维持在预设试验梯度,使误差在 0.3 以内。对试验鱼进行溶氧驯化,溶解氧每两天升高、降低 1 mg/L。低溶氧组持续向水中充入氮气,待水中溶解氧降至 (3.0 ± 0.3) mg/L后,同时向水中充入氧气,使溶解氧维持在 (3.0 ± 0.3) mg/L;高氧组持续向水中通过纳米气盘充入纯氧。通过气体流量计控制纯氧充入量,使水中溶解氧保持在 (14.0 ± 0.3) mg/L、 (20.0 ± 0.3) mg/L并连续饲养 14 d。

在试验组到达预设溶解氧 3 h、1 d、7 d、14 d 后,各组各选取 7 尾鱼,分别放入呼吸室,控制进入呼吸室内水流速为 40 L/h,使出水口溶解氧含量到达设定梯度并保持相对稳定(± 0.3 mg/L),观察半滑舌鳎口和鳃盖开合 10 min,计算其呼吸频率。于 14 d 观察呼吸频率后 1 h,采集血液、肝脏、鳃组织。

1.2.3 样本采集与检测

组织切片:取鳃于试管中置入 10%中性福尔马林固定 12 h 后,将试管内溶液倒出,重新加入 10%中性福尔马林溶液再固定 24 h。将固定的鳃样进行梯度酒精脱水,经纯酒精、二甲苯(1:1)混合液 30 min、二甲苯 25 min 至组织透明,小心分离近鳃弓中部的鳃丝,将单个鳃丝石蜡包埋,用切片机(徕卡 Leica RM2125 RTS)切成厚 5 μ m 切片,H.E 染色,在光学显微镜(奥林巴斯 CX33)下观察鳃丝结构、拍照。肝脏组织切片方式与上述一致。

血液指标检测:使用 1 mL 注射器从尾静脉取

2 份血液样本(2~3 mL)并加入抗凝剂(肝素钠)。一份血样本使用全自动动物血细胞分析仪检测血液红细胞数(RBC)、白细胞数(WBC)、血红蛋白含量(Hb)和红细胞积压(HCT);另一血样本在 4 ℃静置 1.5 h,4 000 r/min 条件下离心 10 min 制备血浆,存于-80 ℃冰箱中,后续使用南京建成生物试剂盒检测血液中 MDA 含量、CAT 活力和 SOD 活力。

1.2.4 数据处理

试验数据以平均值 \pm 标准差表示。利用 SPSS 软件进行单因素方差分析(ANOVA),采用最小显著差数法(LSD)两两比较, $P < 0.05$ 表示差异显著。

2 试验结果

2.1 呼吸频率

在 3 h、1 d 及 7 d 时,半滑舌鳎的呼吸频率在对照组(8 mg/L)和 14 mg/L 的溶解氧浓度下,均呈上升趋势,在 3 mg/L 和 20 mg/L 的溶解氧浓度下,呈先上升后下降的趋势,各组之间差异显著($P < 0.05$)。养殖至 14 d,各组呼吸频率随溶解氧浓度上升也渐渐趋于稳定,各组之间差异显著($P < 0.05$)(图 1)。

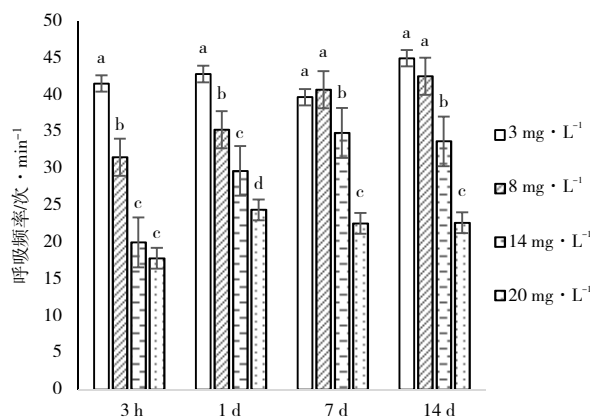


图 1 溶解氧对呼吸频率的影响

2.2 肝脏、鳃组织结构

如图 2 所示,对照组半滑舌鳎的肝细胞胞质均匀,细胞浸润,细胞轮廓清晰。3 mg/L 组肝组织结构异常,肝细胞广泛疏松水肿,细胞轮廓不清晰,如实线箭头所示。14 mg/L 组肝组织结构正常,细胞轮廓清晰,组织未见明显炎症。20 mg/L 组肝组织结构正常,实线箭头所示为肝胰腺,虚线箭头所示为肝细胞,肝细胞轮廓清晰,胞浆红

染, 未见明显变性, 未见明显炎症, 细胞浸润。

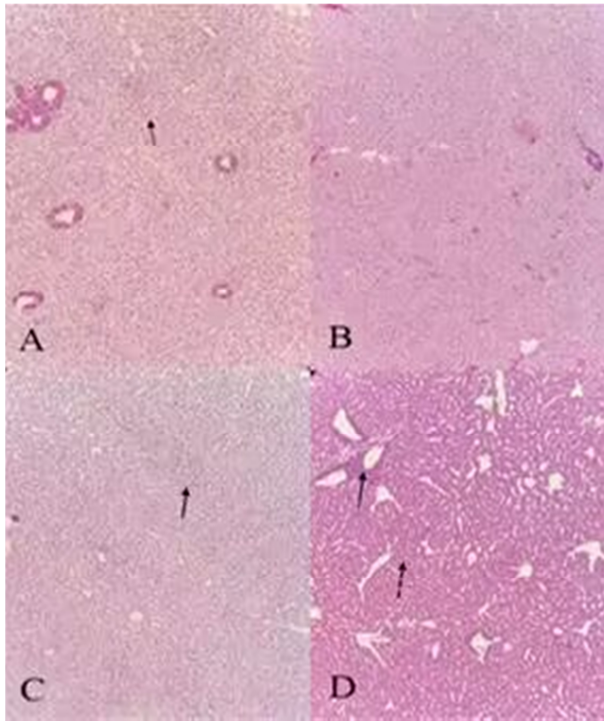


图2 溶解氧对半滑舌鳎肝脏组织结构的影响 (200×)

注: A 为 $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 组, B 为 $8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 组, C 为 $14 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 组, D 为 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 组。下同

如图3所示, 对照组半滑舌鳎的鳃组织结构正常, 实线箭头所示鳃丝上布满毛细血管, 并可见红细胞, 如单虚线箭头所示。双虚线箭头所示软骨无明显变化。各组在试验过程中均可观察到鳃小片末端出现膨大现象, 3 mg/L 组鳃小片上皮细胞层增生, 如实线箭头所示。 14 mg/L 和 20 mg/L 组的鳃组织结构遭到破坏, 鳃小片上空泡现象增加且上皮细胞层普遍增生, 如实线箭头所示。

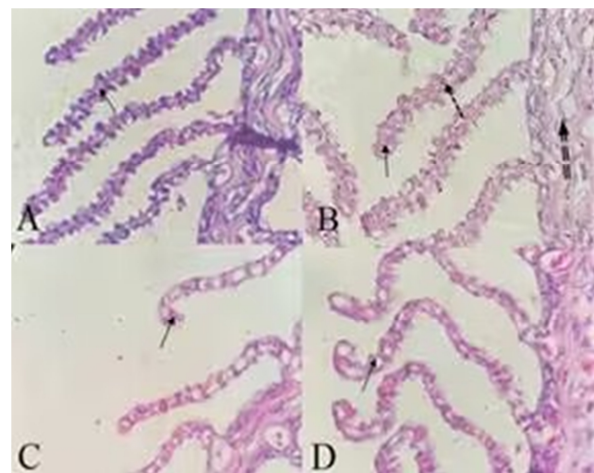


图3 溶解氧对半滑舌鳎鳃组织结构的影响 (1 000×)

2.3 血液学参数

在养殖 14 d 后, 各试验分组 RBC 含量均高于对照组, 但差异不显著 (图 4A)。如图 4B 所示, 各试验组 Hb 含量均较对照组有所提升, 且高氧组 (14 、 20 mg/L) 较低氧组 (3 mg/L) 含量出现了较大增长, 其中 14 mg/L 组 Hb 含量最高。如图 4C 所示, 3 mg/L 低氧组 HCT 最低, 20 mg/L 高氧组 HCT 最高, 呈现随溶解氧浓度升高 HCT 升高的趋势。RBC、Hb 和 HCT 在各组之间差异不显著 ($P>0.05$)

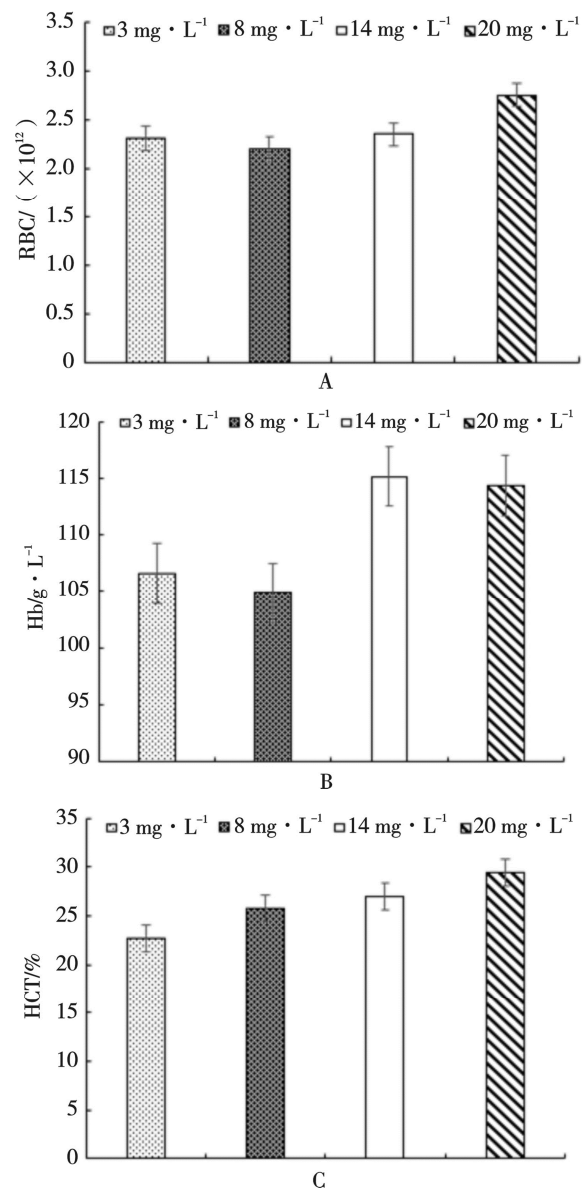


图4 溶解氧对半滑舌鳎血液参数的影响

注: A 为红细胞数 (RBC); B 为血红蛋白含量 (Hb); C 为红细胞比容 (HCT)

2.4 对半滑舌鲷 MDA 含量和抗氧化酶活性的影响

低氧组 (3 mg/L) 的 CAT 含量较对照组及高氧组 (20 mg/L) 均无显著差异, 而高氧组较对照组差异显著 ($P<0.05$), 可能原因是该时段肝脏产生的活性氧 (ROS) 量较少, 为保持体内抗氧化酶平衡, 反而促进了 CAT 的活性。同时, 低氧组 (3 mg/L) 的 SOD 含量较对照组及高氧组 (20 mg/L) 均无显著差异, 而高氧组较对照组差异显著 ($P<0.05$), 与 CAT 含量变化趋势相同。低氧组 (3 mg/L) 的 MDA 含量较高氧组 (20 mg/L) 无显著差异, 各试验组较对照组差异显著 ($P<0.05$)。

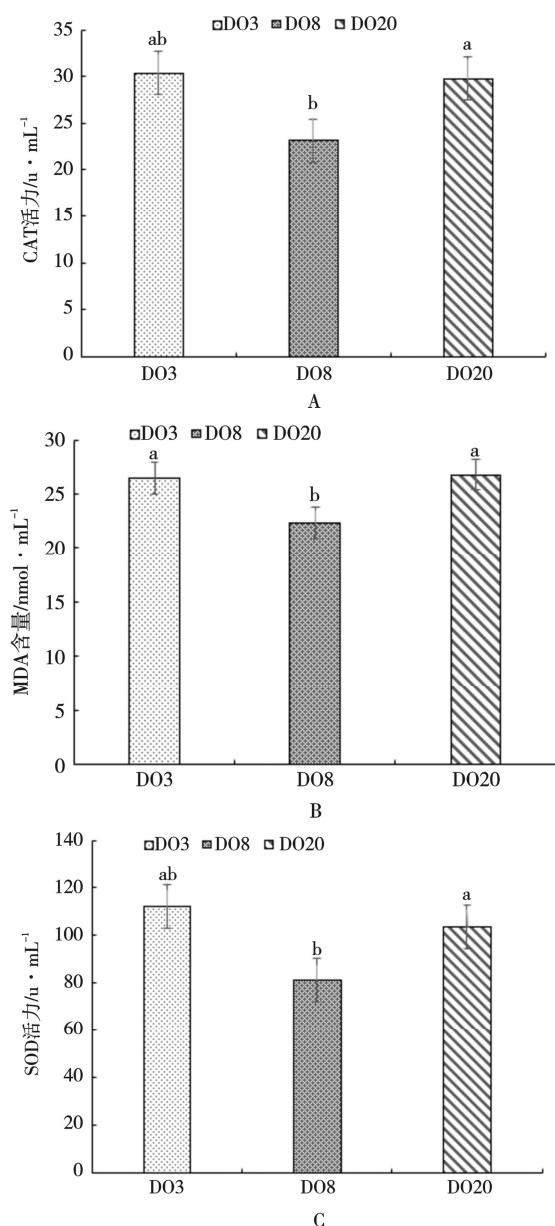


图 5 溶解氧对半滑舌鲷抗氧化酶的影响

注: A 为 CAT 活力; B 为 MDA 含量; C 为 SOD 活力

3 讨论

3.1 半滑舌鲷呼吸频率变化

在本试验开始时, 半滑舌鲷低氧组呼吸频率较对照组显著增加, 表明半滑舌鲷率先通过增加呼吸频率来面临低氧胁迫。高氧组半滑舌鲷的呼吸频率较对照组出现显著降低、鳃盖开合幅度减小的现象, 试验前期高氧组组间呼吸频率无显著差异, 表明半滑舌鲷通过降低呼吸频率、呼吸幅度来适应高溶解氧。在维持溶解氧环境后, 20 mg/L 组较 14 mg/L 组呼吸频率显著降低, 表明长时间暴露于过高溶解氧环境中会导致半滑舌鲷氧化应激。当水中溶解氧水平降低时, 鱼更难获得其代谢所需的氧, 为获得足够的氧, 鱼会增加呼吸频率, 通过鳃过滤更多的水以提取其中的氧, 具体表现为浮头及鳃的开合幅度增大、运动频率提高^[13]。因此, 呼吸频率可作为指示鱼类应对水中溶解氧变化的直观指标。鲤 (*Cyprinus carpio*) 通过增加呼吸频率适应低氧环境^[14]。当在高溶解氧环境时, 鱼类机体对氧的负荷增加, 鱼每次呼吸都能提取足够的氧来满足组织细胞内的氧需要。溶解氧浓度过高时会对大口黑鲈 (*Micropterus salmoides*)、罗非鱼 (*Oreochromis spp*) 的行为造成影响, 且有可能会使其患气泡病^[15-16]。在过饱和和溶解氧环境下, 长时间暴露会导致鱼类组织损伤甚至致死^[17]。以上文章结论与本试验结论相同。

3.2 半滑舌鲷血液指标变化

本试验低氧组较对照组 RBC 和 Hb 含量均有提高, 但结果不显著, 同时高氧组 RBC、Hb 含量较对照组也有提升, 结果不显著。低氧条件下, 为携带和运输更多氧, 鱼类血液中 RBC 和 Hb 含量会显著增高。研究发现, 虹鳟 (*Oncorhynchus mykiss*)、团头鲂 (*Megalobrama amblycephala*) 等通过增加红细胞数量或加强血红蛋白含量和氧气结合能力进而适应低氧胁迫^[18-19]。研究表明, 促红细胞生成素 (EPO) 能增强红细胞膜抗氧化能力及其稳定性^[20]。本试验中高氧组 RBC、Hb 水平升高可能是持续高氧提高了 EPO 水平, 从而提高半滑舌鲷对高氧胁迫的耐受能力。

3.3 半滑舌鲷肝脏组织结构变化

缺氧可导致肝组织结构变化, 如细胞肿胀和坏死, 从而损害肝功能。缺氧和溶解氧过高均可通过诱导活性氧 (ROS) 产生而导致肝组织氧化

应激。ROS 会损害细胞成分, 如脂质、蛋白质和 DNA^[21], 导致肝功能受损。在本试验中, 低氧组 (3 mg/L) 肝脏切片出现了组织结构异常, 肝细胞广泛疏松水肿, 细胞轮廓不清晰的现象, 表现出了明显的肝脏损伤。本试验高氧组 (14 mg/L、20 mg/L) 肝脏切片肝细胞轮廓清晰, 胞浆红染, 未见明显变性。组织未见明显炎症, 细胞浸润。在高氧条件下鱼的肝脏没有明显变化, 这可能与特定物种反应、暴露时间和强度、鱼的健康状况有关。不同的鱼种对高氧有不同的反应^[22-23], 一些鱼可能对氧化应激的耐受性更强, 因此在高氧条件下肝脏组织不会出现明显变化。

3.4 半滑舌鲷鳃组织结构变化

鳃是鱼类的重要器官。鱼类在受到环境胁迫后, 往往最先受到影响。鱼体的氧化应激是影响鳃组织结构变化的主要因素。本试验低氧组和高氧组的鳃组织结构均出现了明显的上皮细胞层增生的现象, 且血液中检测抗氧化酶活性高, 表明低氧高氧均会导致鱼体产生 ROS, 对鳃组织造成氧化损伤, 使得鳃组织上皮细胞层出现增生的现象, 同时高氧条件下, ROS 积累更多导致鳃组织细胞成分被破坏; 细胞脂质过氧化现象更为普遍并引起细胞膜损害, 进而导致空泡现象产生。

在急性低氧胁迫 (0.7 ± 0.05 mg/L) 下, 杂交黄颡鱼 (*Pelteobagrus fulvidraco* ♀ × *Pelteobagrus vachelli* ♂) 血清中出现了脂质过氧化现象^[24], 说明低氧情况也会导致鱼体产生自由基, 进而造成鳃组织肿大、上皮细胞增生或上皮细胞坏死等损伤^[25-27]。海鲈 (*Dicentrarchus labrax*) 鳃小片会出现较多增生、肥大、末端膨大的情况^[28]。

而在高氧 (9 mg/L) 情况下, 海鲈鳃小片的中柱细胞结构会发生改变, 其血管腔会出现增大的现象。在高氧条件下, 鱼体会产生较多的自由基。如在溶氧条件为 18~20 mg/L 的情况下, 金鱼体内会产生大量自由基, 这些自由基会对鳃组织结构造成破坏^[12]。团头鲂 (*Megalobrama amblycephala*) 鳃小片宽度增加会减少其暴露在水中的呼吸面积^[27]。

3.5 低氧和高氧对半滑舌鲷的氧化胁迫作用

在本试验中低氧组的血液中 MDA 含量、SOD 及 CAT 活力均显著高于对照组 ($P < 0.05$), 缺氧可导致线粒体氧气供应减少, 这可损害其功能并导致 ROS 产生增加^[29]。这可能导致 MDA 水平增加,

在缺氧条件下, 鱼可能经历抗氧化防御机制减少, 包括 SOD 和 CAT, 为保护心脏或大脑这类对生存起重要作用的组织, 各个器官的血液会重新分配以减轻低氧带来的压力^[30], 这可能导致血液中这些酶水平增加, 作为对氧化压力的补偿反应。高氧组血液中 MDA 含量、SOD 及 CAT 活力也均显著高于对照组 ($P < 0.05$)。

高溶解氧水平可提高鱼类的新陈代谢率, 导致 ROS 水平升高^[31], 引起脂质过氧化损伤并产生 MDA。鱼类通过增加抗氧化酶 (如 CAT 和 SOD) 活力以应对氧化应激^[32-34]。本试验中高氧组 MDA、CAT 和 SOD 显著高于对照组, 说明高氧造成了半滑舌鲷氧化损伤, 半滑舌鲷启动了其抗氧化系统。

3.6 小结

低氧胁迫下, 半滑舌鲷通过提高呼吸频率、增大鳃盖开合幅度、增加 RBC 数量和 Hb 含量以增加氧的摄入量。高氧胁迫下, 半滑舌鲷呼吸频率显著降低。高氧和低氧均损伤半滑舌鲷鳃组织结构, 并引发鱼体产生氧化应激反应。

参考文献:

- [1] 王维政, 曾泽乾, 黄建盛, 等. 低氧胁迫对军曹鱼幼鱼生长、血清生化和非特异性免疫指标的影响[J]. 海洋学报, 2021, 43 (2): 49-58.
- [2] VALÉRIE M, PICHAVANT K, BOEUF G, et al. Effects of hypoxia on respiratory physiology of turbot, *Scophthalmus maximus*[J]. Fish Physiology & Biochemistry, 2000, 22 (1): 51-59.
- [3] PAPOUTSOGLOU S E, KARAKATSOULI N, PIZZONIA G, et al. Effects of rearing density on growth, brain neurotransmitters and liver fatty acid composition of juvenile white sea bream *Diplodus sargus* L[J]. Aquaculture Research, 2006, 37 (1): 87-95.
- [4] NIKINMAA M, SOIVIO A. Blood oxygen transport of hypoxic *Salmo gairdneri*[J]. Journal of Experimental Zoology, 1982, 219 (2): 173-178.
- [5] 钱辰颖, 郑国栋, 陈杰, 等. 溶解氧对团头鲂耐低氧新品系 F₃ 代的鳃组织形态及各组织酶活性的影响[J]. 渔业科学进展, 2021, 42 (4): 73-82.
- [6] JØRUND S, GÖRAN E N. Plasticity of respiratory structures—Adaptive remodeling of fish gills induced by ambient oxygen and temperature[J]. Respiratory Physiology & Neurobiology, 2006, 154 (1): 241-251.
- [7] ARU C, BLM C, BMA F, et al. Hypoxia-induced metabolic and antioxidant enzymatic activities in the estuarine fish *Leiostomus xanthurus*[J]. Journal of

- Experimental Marine Biology and Ecology, 2002, 279(1): 1–20.
- [8] SPENCE B C, LOMNICKY G A, HUGHES R M, et al. An ecosystem approach to salmonid conservation[M]. Corvallis: ManTech Environmental Research Services Corp., 1996.
- [9] 陈德举, 强俊, 陶易凡, 等. 不同溶氧水平对吉富罗非鱼幼鱼生长、血液生化、脂肪酸组成及其抗海豚链球菌病的影响[J]. 淡水渔业, 2019, 49(4): 83–89.
- [10] PELSTER B, DECKER H. The Root effect—a physiological perspective[J]. Micron, 2004, 35(1): 73–74.
- [11] PROKEŠOVÁ M, GEBAUER T, MATOUŠEK J, et al. Effect of temperature and oxygen regime on growth and physiology of juvenile *Salvelinus fontinalis* × *Salvelinus alpinus* hybrids[J]. Aquaculture, 2020, 522: 735119.
- [12] LUSHCHAK V I, LUSHCHAK L P, MOTA A A, et al. Oxidative stress and antioxidant defenses in goldfish *Carassius auratus* during anoxia and reoxygenation[J]. American Journal of Physiology Regulatory, Integrative and Comparative Physiology, 2001, 280(1): 100–107.
- [13] ABDALLAH S J, THOMAS B S, JONZ M G. Aquatic surface respiration and swimming behaviour in adult and developing zebrafish exposed to hypoxia[J]. The Journal of Experimental Biology, 2015, 218(11): 1777–1786.
- [14] DHILLON R S, YAO L, MATEY V, et al. Interspecific differences in hypoxia—Induced gill remodeling in carp[J]. Physiological and Biochemical Zoology, 2013, 86(6): 727–739.
- [15] 李学军, 金华, 张艳红. 罗非鱼鱼苗气泡病的发生与预防[J]. 水利渔业, 2004, 24(1): 63–64.
- [16] 彭天辉, 潘连德, 唐绍林. 大口黑鲈慢性气泡病的组织病理观察以及水体分层对发病的影响[J]. 大连海洋大学学报, 2013, 28(6): 578–584.
- [17] EBEL W J, RAYMOND H L, MONAN G E, et al. Effect of atmospheric gas supersaturation caused by dams on salmon and steelhead trout of the snake and columbia rivers[M]. Washington: Northwest Fisheries Center Review, 1975.
- [18] VAL A, LESSARD J, RANDALL D. Effects of hypoxia on rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*): Intraerythrocytic phosphates[J]. Journal of Experimental Biology, 1995, 198(2): 305–310.
- [19] 沈晓民, 童合一. 团头鲂血液指标与水环境的关系[J]. 生态学报, 1991, 11(1): 92–94.
- [20] 吴志昊, 尤锋, 王英芳, 等. 低氧和高氧对大菱鲆幼鱼红细胞核异常及氧化抗氧化平衡的影响[J]. 上海海洋大学学报, 2011, 20(6): 808–813.
- [21] 秦勇. 细胞内 ROS 水平改变对细胞活性及相关信号传导途径的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [22] MCARLEY T J, SANDBLOM E, HERBERT N A. Fish and hyperoxia—From cardiorespiratory and biochemical adjustments to aquaculture and ecophysiology implications[J]. Fish and Fisheries, 2021, 22(2): 324–355.
- [23] 苏柯, 张和森, 肖保强, 等. 封闭式循环海水系统大菱鲆高密度养殖研究[J]. 渔业现代化, 2003(5): 9–12.
- [24] 裴雪莹. 杂交黄颡鱼“黄优 1 号”应对低氧胁迫的生理响应及基因表达研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2020.
- [25] 高云涛, 高云红, 李明月, 等. 许氏平鲉低氧耐受能力及血液学和鳃组织学变化[J]. 水产学报, 2023, 47(9): 40–51.
- [26] 罗辉玉, 吴水清, 郑乐云, 等. 溶解氧对线纹海马幼鱼氨氮耐受性的影响及氨氮胁迫下鳃、肝脏组织结构的变化[J]. 生态学杂志, 2020, 39(3): 872–879.
- [27] 钱辰颖. 低氧和高氧对团头鲂 F₃新品系鳃组织形态变化及各组织酶活性的影响[D]. 上海: 上海海洋大学, 2020.
- [28] BOSCH-BELMAR M, GIOMI F, RINALDI A, et al. Concurrent environmental stressors and jellyfish stings impair caged European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) physiological performances[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 27929.
- [29] SCHERZ-SHOVAL R, ELAZAR Z. Regulation of autophagy by ROS physiology and pathology[J]. Trends Biochem Sci, 2011, 36(1): 30–38.
- [30] 张国松. 瓦氏黄颡鱼 (*Pelteobagrus vachelli*) 应对低氧胁迫的分子机制研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2017.
- [31] 杜开开. 水体中过饱和溶解气体释放因素探究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2017.
- [32] SHI X, ZHOU B. The role of Nrf2 and MAPK pathways in PFOS-induced oxidative stress in zebrafish embryos[J]. Toxicological Sciences, 2010, 115(2): 391–400.
- [33] 马粒雅, 王闻, 迟雯丹, 等. 溶解氧变化对中华乌塘鳢酶活的影响及其低氧耐受力研究[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(3): 91–94.
- [34] 吴鑫杰, 陈楠, 黄春筱, 等. 低氧对团头鲂心肌细胞凋亡及抗氧化酶活性的影响[J]. 华中农业大学学报, 2016, 35(3): 108–113.

责任编辑: 张爱婷