

不同流速对豹纹鳃棘鲈摆尾频率和血液生理的影响

钱振家^{1,2}, 徐金铖¹, 张成林¹, 余友斌¹, 刘 晃¹

1. 中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所, 上海 200092

2. 上海海洋大学 水产与生命学院, 上海 201306

摘要: 水流是影响鱼类生理和生长的重要生态因子之一, 探究豹纹鳃棘鲈 (*Plectropomus leopardus*) 受流速胁迫呈现的应激水平变化, 掌握其耐受的最大流速, 可为网箱养殖选址、集约化流水养殖和深远海工船养殖提供理论基础。以体长 (11.38±1.48) cm、体质量 (34.71±11.57) g 的豹纹鳃棘鲈为研究对象, 通过自制鱼类游泳实验装置, 设计静水对照组 [0 cm·s⁻¹或0 BL·s⁻¹ (体长·秒⁻¹)] 和3组实验组 (11.4、22.8和34.2 cm·s⁻¹对应1、2和3 BL·s⁻¹), 探究40 min水流刺激对豹纹鳃棘鲈摆尾频率变化、血糖、血液中乳酸和皮质醇含量的影响。结果显示, 摆尾频率与水流速度之间呈线性正相关关系; 血糖和血液中皮质醇含量随摆尾次数增多呈线性增长趋势, 乳酸随摆尾次数增多呈非线性增长趋势。超过2 BL·s⁻¹流速会导致豹纹鳃棘鲈血液中皮质醇含量显著升高 ($P<0.05$)。当流速达3 BL·s⁻¹时, 血液中乳酸和血糖含量显著升高 ($P<0.05$)。综上, 豹纹鳃棘鲈对流速的耐受上限为2 BL·s⁻¹。当养殖水体流速高于2 BL·s⁻¹时, 应激水平和代谢负荷显著增加 ($P<0.05$), 出现胁迫效应。研究结果可为养殖工船制荡和网箱养殖水域选址提供参考。

关键词: 豹纹鳃棘鲈; 水流; 摆尾频率; 血液生理

中图分类号: S 917.4

文献标志码: A

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



Effect of different flow velocity on tail beat frequency and blood physiology of *Plectropomus leopardus*

QIAN Zhenjia^{1,2}, XU Jincheng¹, ZHANG Chenglin¹, YU Youbin¹, LIU Huang¹

1. Fishery Machinery and Instrument Research Institute, Shanghai 200092, China

2. School of Fisheries and Life, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

Abstract: Water flow is one of the important ecological factors that affect the physiology and growth of fish. Studying the stress level changes of *Plectropomus leopardus* under flow velocity stress, and clarifying the maximum flow velocity that the fish can tolerate, can provide a theoretical basis for the cage culture site selection, intensive flow culture and deep-sea aquaculture working vessel. Taking *P. leopardus* [Body length (11.38±1.48) cm, body mass (34.71±11.57) g] as the research object, we designed a hydrostatic control group (0 cm·s⁻¹ or 0 BL·s⁻¹, body length·s⁻¹) and three experimental groups (11.4, 22.8 and 34.2 cm·s⁻¹ corresponding to 1, 2 and 3 BL·s⁻¹) by a self-made fish swimming experimental device, so as to explore the effect of 40-min water flow stimulation on its tail beat frequency change, blood glucose, lactic acid and cortisol content in blood. The results show that there was a linear correlation between the tail beat frequency and water velocity. The blood glucose and cortisol levels increased linearly but the lactic acid increased non-linearly with increasing tail beat times. The flow rate over 2 BL·s⁻¹ resulted in a significant increase in the cortisol in *P. leopardus* blood ($P<0.05$). When the flow rate reached 3 BL·s⁻¹, lactic acid and blood glucose levels increased significantly ($P<0.05$). In conclusion, the upper limit of tolerance to flow velocity of *P. leopardus* was 2 BL·s⁻¹. When the flow velocity of aquaculture water was higher than 2 BL·s⁻¹, the stress level and metabolic load increased significantly

收稿日期: 2022-05-29; 修回日期: 2022-08-03

基金项目: 工业与信息化部高技术船舶科研项目“可移动式养殖工船工程开发及关键系统研制”(工信部装函〔2019〕360号)

作者简介: 钱振家(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为水产养殖工程。E-mail: qianzhenjia0509@163.com

通信作者: 刘 晃(1973—), 男, 研究员, 硕士, 研究方向为水产养殖工程。E-mail: liuhuag@fmiri.ac.cn

and the stress effect appeared ($P<0.05$). The results provide references for the aquaculture working vessel sloshing suppression and the site selection of cage aquaculture waters.

Keywords: *Plectropomus leopardus*; Water flow; Tail beat frequency; Blood physiology

豹纹鳃棘鲈 (*Plectropomus leopardus*) 俗称东星斑, 隶属鲈形目、鲈亚目、鲈科、鳃棘鲈属, 为广盐性鱼类, 主要分布在西太平洋至印度洋海区, 我国海南东岸和南部海区也有少量分布^[1]。其肉质鲜美、营养丰富、颜色鲜艳, 是一种优质经济鱼类。近年来捕捞强度的增加造成野生豹纹鳃棘鲈渔获量日益减少, 然而传统的池塘养殖模式并不适合其大规模养殖, 所以目前豹纹鳃棘鲈主流的养殖方式主要有工厂化流水养殖和网箱养殖两种^[2]。工厂化流水养殖受水流影响较大, 增加了豹纹鳃棘鲈繁育的难度。传统网箱养殖易受自然灾害和水域排污限制, 单位面积产量不高。深远海工船养殖作为一种新兴的养殖模式, 具有大型化、规模化、多元化、智能化等优点^[3]。但在工船养殖中, 船舱晃荡产生的水流对豹纹鳃棘鲈这种暖水性岛礁鱼类生理和生长的影响未知。

水流是影响鱼类生理和生长的重要生态因子之一, 主要通过影响其能量代谢和摄食变化, 抑制其正常生长。近年来不少学者从豹纹鳃棘鲈的体色^[4]、光照^[5]、人工育苗^[6]、营养^[7-8]、消化生理^[9-10]、免疫^[11-12]、温度^[13-14]和盐度^[15]等方面进行了大量研究, 关于水流方面的研究相对较少。国内研究也仅有差异流速下对其肝脏转录组的分析^[16], 对于行为和血液生理的影响鲜有报道。Hou 等^[17]发现适宜的流速可以促进养殖对象的摄食, 使其获得更好的生长。因此, 开展豹纹鳃棘鲈流速胁迫方面的

研究非常重要。

血糖、乳酸和皮质醇作为重要的血液生化指标, 随着应激程度的不同呈现规律性变化, 已被广泛用于研究分析机体应激反应的程度^[18]。本文利用水流刺激方式, 通过比较豹纹鳃棘鲈摆尾频率和血液生理的变化, 探究豹纹鳃棘鲈受流速胁迫呈现的应激水平变化, 从而掌握其耐受的最大流速, 为网箱养殖选址、集约化流水养殖和最新的深远海工船养殖提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 实验鱼

本实验所用豹纹鳃棘鲈为同一繁育批次的幼鱼, 养殖于三亚热带水产研究院的工厂化流水养殖车间。实验鱼体长为 (11.38 ± 1.48) cm, 体质量为 (34.71 ± 11.57) g, 共 400 尾。暂养期间, 每天早晚各饱食投喂一次 (9:00 和 17:00), 每日流水交换量为总水体量的 30%, 养殖水温为 (25 ± 1) °C, 溶解氧质量浓度为 (5 ± 0.5) mg·L⁻¹, 自然光照。实验开始前停食 48 h。实验时, 先将实验鱼置于环道池中静水条件适应 3 h, 然后进行行为与生理测定, 期间环境满足其基本生存。

1.2 实验装置

本实验采用的鱼类游泳能力测试装置参考循环式呼吸仪 (专利号 201020136105.7) 进行改造和加工 (图 1)。该环道池长为 2.7 m, 宽为 1.2 m, 中间循

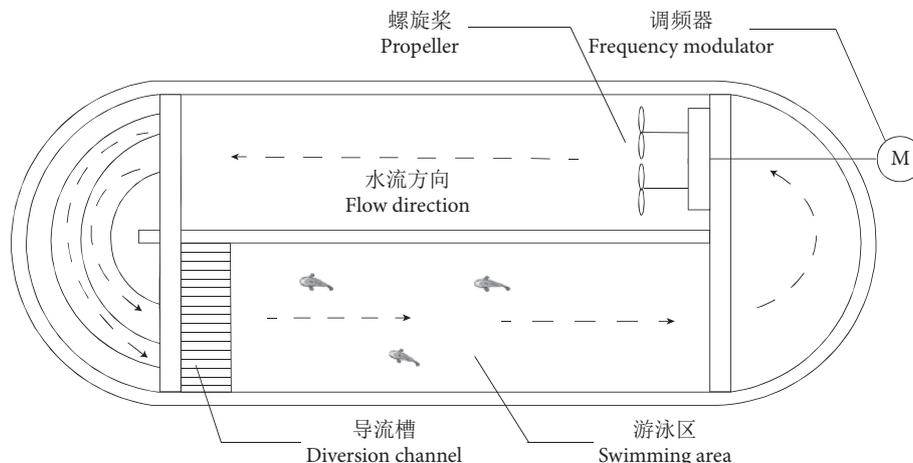


图1 环道池简图

Fig. 1 Schematic diagram of loop tank

环水槽测试区域尺寸为 1 500 mm×500 mm, 容积为 1.84 m³。为防止水体溅出, 环道池内液面低于顶端 35 cm。动力由 2 个 ROV 水下推进器提供, 功率 800 W, 单个推流最大速度为 2.8~3.6 m·s⁻¹。同时该环道在推进器口和测试区域前增设导流槽, 测试区域末端放置挡鱼板以防止实验鱼游入推进器。当启动推进器时, 水通过螺旋桨作用从推流处涌出, 在环形水道内形成稳定的水流, 水流速度通过可调电调控制。双目摄像头采用霸勒思 YH-1.6MP-HDGX10-DOUBLE, 架设在环道池开窗前 1 m 处, 用于观察。

1.3 实验方法

1.3.1 实验设计

1) 行为测定。鱼的游泳能力与体长 (Body length, BL) 有关。参考 Skov 等^[19] 实验方案, 实验中水流速度均采用 BL·s⁻¹ 作为单位。按照流速划分 1、2、3 BL·s⁻¹ (11.4、22.8、34.2 cm·s⁻¹) 3 个实验组和 1 个静水对照组 [0 BL·s⁻¹ (0 cm·s⁻¹)], 每组 20 尾鱼, 共 80 尾。采用双目摄像头进行观察, 对实验鱼的摆尾频率持续记录 40 min。

2) 血液生理测定。每隔 10 min 从对照组和不同流速实验组中各随机捞取 5 尾鱼, 麻醉后采血。为减少环境应激和鱼类个体差异所带来的影响, 对照组结果取 40 min 内的平均值。

1.3.2 样品采集与处理

实验结束后, 采用质量浓度为 150 mg·L⁻¹ 的 MS-222 溶液对实验鱼进行快速麻醉处理。通过尾椎静脉采血, 血样放入肝素钠抗凝采血管中, 于高速离心机在 4 °C 条件下以 8 000 r·min⁻¹ 离心 10 min, 取上层血清保存至无菌冻存管装样, 转移至 -80 °C 冰箱冻存待测。

1.3.3 指标测定及计算

摆尾频率 (Tail beat frequency, TBF) 测定: 根据豹纹鳃棘鲈的习性, 对照组和实验组均采用 4 个时长 10 min 内的鱼体运动视频进行计数, 随机抽取 5 尾实验鱼 1 min 内尾鳍摆动的平均次数作为摆尾频率。

摆尾次数 (Tail swinging times, TST) 测定: 对实验组 (1、2 和 3 BL·s⁻¹) 4 个时长 10 min 内的鱼体运动视频进行计数, 统计其摆尾次数。

血液中葡萄糖 (GLU) 浓度测定: 使用葡萄糖氧化酶法, 检测原理为经葡萄糖氧化酶的作用, 血

液样本中的葡萄糖氧化生成葡萄糖酸和过氧化氢, 过氧化氢在过氧化物酶的作用下, 将还原性 4-氨基安替比林与酚偶联缩合成可被分光光度计测定的醌类化合物, 测定其吸光度, 通过计算得出葡萄糖浓度 (mmol·L⁻¹)。

血液中乳酸 (LA) 浓度的测定: 测定原理为以烟酰胺嘌呤二核苷酸氧化态 (NAD⁺) 为氢受体, 乳酸脱氢酶 (LDH) 催化乳酸脱氢产生丙酮酸, 使 NAD⁺ 转化为烟酰胺嘌呤二核苷酸还原态 (NADH), 其中吩嗪硫酸甲酯 (PMS) 递氢, 使氯化硝基四氮唑蓝 (NBT) 还原为紫色呈色物, 该物质在 530 nm 时的吸光度与乳酸浓度呈线性关系, 可采用分光光度计测定其乳酸浓度 (mmol·L⁻¹)。

血液中皮质醇 (Cortisol) 质量浓度的测定: 使用酶联免疫法, 原理为应用双抗体夹心法, 对皮质醇浓度进行测定。用纯化的鱼类皮质醇抗体包被微孔板, 制成固相抗体, 加入皮质醇于包被单抗的微孔中, 再与辣根过氧化物酶 (HRP) 标记的皮质醇抗体结合, 形成复合物, 彻底洗涤后加入底物 3,3', 5,5'-四甲基联苯胺 (TMB) 进行显色, 通过 HRP 酶的催化后, TMB 转化为蓝色, 随后于酸的作用下最终转化成黄色。在 450 nm 波长下测定吸光度并计算质量浓度 (ng·mL⁻¹)。

血液中葡萄糖、乳酸和皮质醇均采用南京建成生物工程研究所生产的试剂盒检测, 并使用紫外分光光度计 (DR 3900) 进行分析。

1.4 数据分析

实验数据采用 Excel 2019 软件处理, 使用 SPSS 26.0 软件进行统计与分析, 显著性水平为 $P < 0.05$, 通过 Duncan 氏检验进行多重比较。统计值以“平均值±标准差 ($\bar{X} \pm SD$)”表示。

2 结果

2.1 水流对豹纹鳃棘鲈摆尾频率的影响

本研究在实验设计的工况下结合实验装置对豹纹鳃棘鲈进行流速胁迫, 分析其摆尾频率与水流速度的关系。拟合关系如下:

$$f = 0.648 8u + 0.186 3 (R^2 = 0.983 3, P < 0.05) \quad (1)$$

式中: f 为实验鱼摆尾频率 (Hz); u 为水流速度 (BL·s⁻¹)。

摆尾频率与水流速度呈现线性正相关关系 ($R^2 = 0.983 3$, 图 2)。随着流速的增大, 摆尾频率也

随之升高。游泳速度是鱼类一项重要的行为指标,通过建立摆尾频率与水流速度之间的关系,实现当前豹纹鳃棘鲈游泳速度的观测。

在静水环境下,对照组实验鱼无规律摆尾,均维持较低的频率(表 1)。1 BL·s⁻¹ 流速组在 40 min 内摆尾频率变化不显著($P>0.05$),此流速下实验鱼可通过滑行游泳方式维持自身稳定。2 BL·s⁻¹ 流速组摆尾频率较 1 BL·s⁻¹ 流速组显著增加($P<0.05$),实验鱼需要调整自身方向以适宜水流。当流速达到 3 BL·s⁻¹ 时,前 10 min 内摆尾频率达到最大值,3 BL·s⁻¹ 流速组摆尾频率在各个时间段均显著大于其他各组($P<0.05$),且随时间延长而逐渐降低。

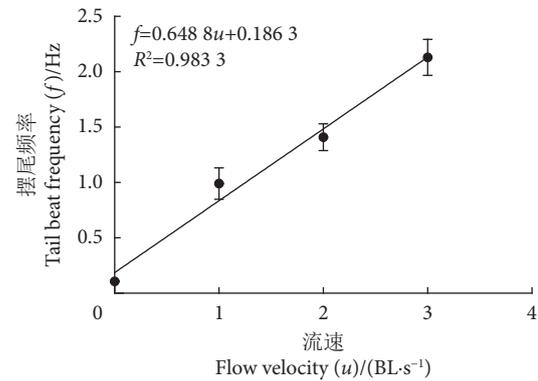


图2 摆尾频率与流速的关系

Fig. 2 Relationship between tail beat frequency and flow velocity

表1 不同实验组在不同时间段摆尾频率情况 (N=5)

Table 1 Tail beat frequency of different groups in different periods (N=5)

时间段 t/min	对照组 Control group	1 BL·s ⁻¹ 流速组 1 BL·s ⁻¹ flow velocity group	2 BL·s ⁻¹ 流速组 2 BL·s ⁻¹ flow velocity group	3 BL·s ⁻¹ 流速组 3 BL·s ⁻¹ flow velocity group
0—10	0.08±0.04 ^d	0.94±0.17 ^{Bc}	1.58±0.16 ^{Ab}	2.30±0.09 ^{Aa}
10—20	0.10±0.08 ^c	1.20±0.12 ^{Ab}	1.35±0.16 ^{Bb}	2.23±0.30 ^{ABa}
20—30	0.16±0.09 ^d	0.88±0.08 ^{Bc}	1.30±0.05 ^{Bb}	1.95±0.21 ^{Ba}
30—40	0.09±0.09 ^d	0.94±0.09 ^{Bc}	1.41±0.18 ^{ABb}	2.04±0.10 ^{ABa}

注: 同一行参数上方不同大写字母表示组内差异显著, 不同小写字母表示组间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Different uppercase letters within the same line indicate significant differences within the group, while different lowercase letters indicate significant differences among the groups ($P<0.05$).

2.2 水流对豹纹鳃棘鲈血液生理的影响

2.2.1 血糖

不同流速下实验鱼血糖浓度变化见图 3, 在实验 40 min 内 1 和 2 BL·s⁻¹ 流速组实验鱼血糖浓度均呈现不同程度的变化。当水流刺激时长达到 40 min 时, 1 和 2 BL·s⁻¹ 流速组血糖浓度均显著高于其他时长 ($P<0.05$), 各流速组血糖浓度显著高于对照组 ($P<0.05$)。整个实验过程中, 3 BL·s⁻¹ 流速组血糖浓度均高于其他各组, 在第 30 分钟时达到最大值。此流速下鱼体通过加大摆尾频率维持自身稳定, 体内肝糖原和肌糖原迅速分解提供能量。

2.2.2 乳酸

豹纹鳃棘鲈血液内乳酸浓度在受到不同流速刺激后呈现不同程度的变化(图 4)。3 BL·s⁻¹ 流速组在持续 30 和 40 min 水流刺激下乳酸浓度显著高于对照组和其他实验组 ($P<0.05$)。1 和 2 BL·s⁻¹ 流速组乳酸浓度 40 min 内与对照组相比并无显著性变化 ($P>0.05$), 鱼体尚未处于疲劳状态。而在 3 BL·s⁻¹ 流速刺激下, 第 30 分钟时乳酸浓度显著高于对照组和其他实验组 ($P<0.05$)。

2.2.3 皮质醇

受水流刺激, 各流速组实验鱼血液中皮质醇质

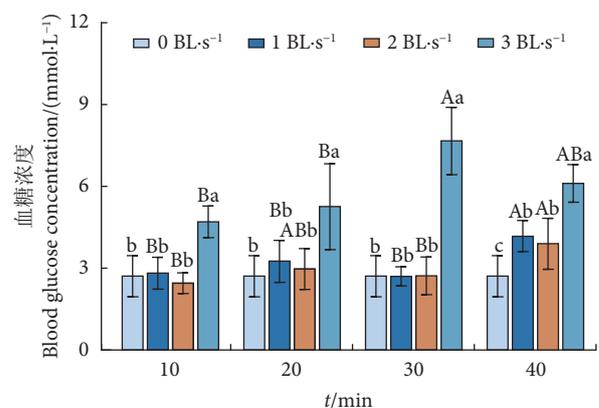


图3 不同流速下豹纹鳃棘鲈血糖浓度变化

注: 图中不同小写字母表示同一时间下不同组间差异显著, 不同大写字母表示不同时间下同一组内差异显著 ($P<0.05$)。

Fig. 3 Change of blood glucose concentration in *P. leopardus* at different flow rates

Note: Different lowercase letters indicate that there are significant differences among different groups at the same time. Different uppercase letters indicate that there are significant differences in the same group at different time ($P<0.05$).

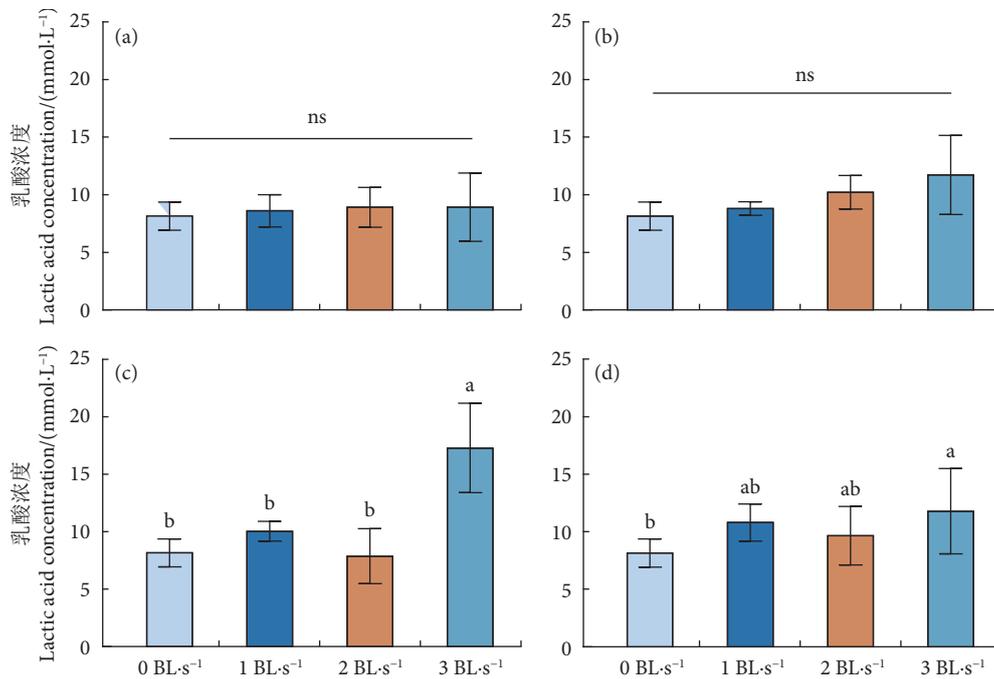


图4 各流速下豹纹鳃棘鲈血液中乳酸浓度变化

注: a. 水流刺激时长 10 min 时 4 种流速下血液中乳酸变化; b. 水流刺激时长 20 min 时 4 种流速下血液中乳酸浓度变化; c. 水流刺激时长 30 min 时 4 种流速下血液中乳酸浓度变化; d. 水流刺激时长 40 min 时 4 种流速下血液中乳酸浓度变化; 图中不同小写字母代表组间差异显著 ($P < 0.05$); ns 代表组间差异不显著 ($P > 0.05$)。

Fig. 4 Change of lactic acid concentration in *P. leopardus* blood at different flow rates

Note: a. The change of lactic acid concentration in blood at four flow velocities with water flow stimulation for 10 min; b. The change of lactic acid content in blood at four flow velocities with water flow stimulation for 20 min; c. The change of lactic acid content in blood at four flow velocities with water flow stimulation for 30 min; d. The change of lactic acid content in blood at four flow velocities with water flow stimulation for 40 min. Different lowercase letters indicate significant differences among the groups ($P < 0.05$); ns represents no significant differences among the groups ($P > 0.05$).

量浓度均有增加, 但相同流速组内无显著性差异 ($P > 0.05$, 图 5)。其中 $3 \text{ BL}\cdot\text{s}^{-1}$ 流速组实验鱼血液中皮质醇质量浓度显著高于对照组和 $1 \text{ BL}\cdot\text{s}^{-1}$ 流速组 ($P < 0.05$); $2 \text{ BL}\cdot\text{s}^{-1}$ 流速组显著高于对照组 ($P < 0.05$), 与 $3 \text{ BL}\cdot\text{s}^{-1}$ 流速组无显著性差异 ($P > 0.05$);

$1 \text{ BL}\cdot\text{s}^{-1}$ 流速组在第 40 分钟时较对照组显著上升 ($P < 0.05$)。综上, 受高流速胁迫影响, 高于 $2 \text{ BL}\cdot\text{s}^{-1}$ 流速对于豹纹鳃棘鲈血液中皮质醇质量浓度影响显著 ($P < 0.05$)。

2.3 摆尾次数与血液生理关系

通过对豹纹鳃棘鲈 40 min 内血液生理变化与摆尾次数进行拟合, 结果显示, 血糖和皮质醇浓度与摆尾频率之间均呈线性正相关关系, 乳酸浓度与摆尾次数之间呈非线性正相关关系 (图 6)。在静水状态下摆尾次数较少, 血糖、乳酸和皮质醇浓度处于最低水平。随着流速增大, 摆尾次数逐渐增加, 鱼体血糖和皮质醇浓度呈平稳增长趋势。

3 讨论

对于水流变化产生的刺激, 鱼类外在表现为游泳行为上的变化^[20], 内在则通过引起机体能量需求的变化, 从而影响体内血液生理的变化。

摆尾频率可从侧面反映鱼类对水流的适应性变化情况, 大多数利用尾鳍推进的鱼类会通过增加摆尾频率来提高游泳速度^[21-22]。通过本实验得知豹纹

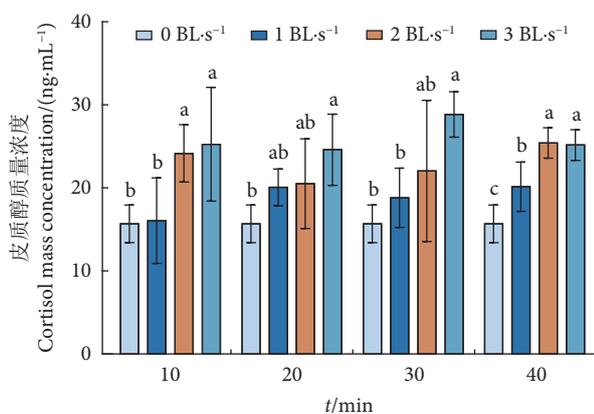


图5 不同流速组豹纹鳃棘鲈血液中皮质醇质量浓度变化
注: 图中不同小写字母代表组间差异显著 ($P < 0.05$)。

Fig. 5 Changes of cortisol mass concentration in *P. leopardus* blood in different flow velocity groups

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among the groups ($P < 0.05$).

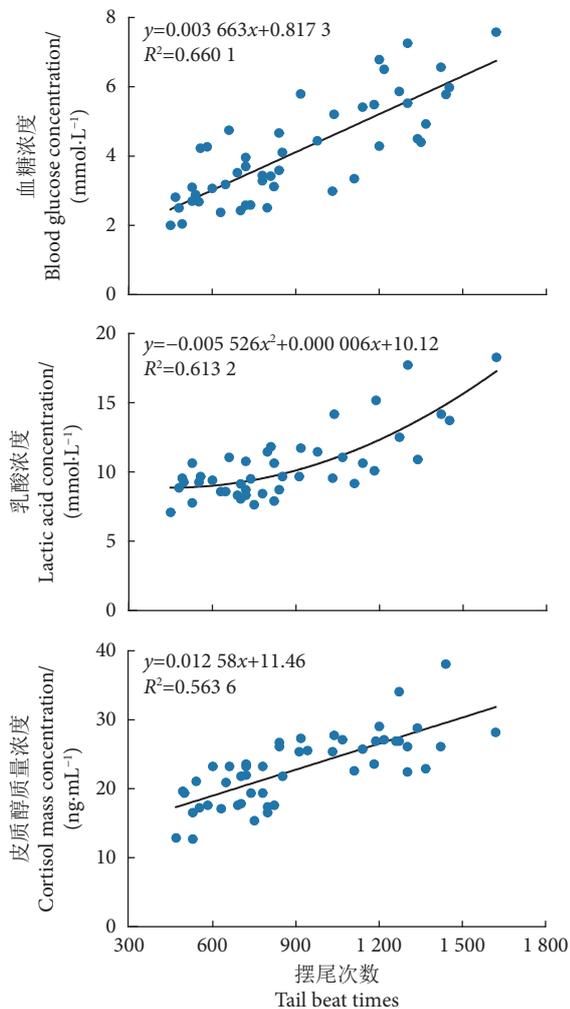


图6 实验组摆尾次数对豹纹鳃棘鲈血液生理的影响

Fig. 6 Effect of tail beat times of experimental group on blood physiology of *P. leopardus*

鳃棘鲈的摆尾频率与其游泳速度呈正相关关系，与草鱼 (*Ctenopharyngodon idella*)^[23]、巨须裂腹鱼 (*Schizothorax macropogon*)^[24]、杂交鲟 (*Huso duricus* ♂ × *Acipenser schrencki* ♀)^[25] 等的研究结果一致。在静水环境中豹纹鳃棘鲈的摆尾频率变化无规律且个体差异较大。伴随着水流刺激，豹纹鳃棘鲈摆尾频率随水流速度的增大而升高，趋于稳定。摆尾频率与游泳速度之间的拟合斜率在一定程度上是鱼体运动能力的反应，不同鱼类在长期自然选择下具有与其自身结构相适宜的能力^[26]。本实验中豹纹鳃棘鲈幼鱼拟合斜率为 0.648 8，低于鳙 (*Aristichthys nobilis*)^[27] 幼鱼，但尾鳍的大小、形状和刚性也会影响其游泳性能^[28]，某些鱼类的摆尾幅度也会随着游泳速度的变化而变化^[21]。所以拟合斜率不能说明豹纹鳃棘鲈的运动能力强于鳙，仅能反映随流速增加摆尾频率的增幅小于鳙，具体游泳能力强弱需要

结合多方面指标判断。

同时摆尾频率与鱼体自身的游泳状态和运动方式存在一定相关性^[27,29]。在较低流速下豹纹鳃棘鲈通过胸鳍摆动与腹鳍支撑，维持自身稳定。在较高流速下借助尾鳍摆动实现顶流前进或静止，顶流前进状态下的摆尾频率高于顶流静止状态。本实验中豹纹鳃棘鲈在低流速下出现不连续游动行为，能够更好地保持自身位置。相关研究表明，在不同流速下的不连续游动能够降低能量消耗^[30]，因此不连续游动可作为指标侧面反映鱼类对水流适应能力的强弱。不连续游动行为出现的频率越高，实验鱼对该流速的适应能力越强。

一般情况下机体中的血糖浓度处于动态平衡。适当的运动能够调节血糖水平^[31]。本实验中 2 BL·s⁻¹ 流速组实验鱼血糖浓度低于 1 BL·s⁻¹ 流速组，短期内 2 BL·s⁻¹ 流速能够提高能量代谢效率。而当流速超过 2 BL·s⁻¹ 时，摆尾频率增加，机体供能不足，体内肝糖原迅速分解产生葡萄糖，为机体提供能量。此时，血糖浓度出现显著性变化 ($P < 0.05$, 图 3)。这与虞顺年等^[32] 的研究结果相似，此时流速超过机体承受限度，对机体造成损伤并消耗自身储能，血糖代谢功能紊乱，所以血糖浓度迅速上升。

一些学者通过对鱼类机体深入研究，发现鱼类运动疲劳的最主要原因是体内乳酸大量积累^[33-35]。在较低的流速下摆尾次数较小，血液中乳酸维持在较低水平。随着流速增大，摆尾次数逐渐增加，血液中乳酸呈非线性快速增长 (图 6)。长时间剧烈的游泳运动迫使肌肉组织中的乳酸迅速扩散到血液中，提高肌肉组织的运动能力^[31]。但血液中乳酸积累会使机体内的 pH 降低，导致部分代谢酶的活性降低，减弱机体代谢能力^[36]。本实验中，受 3 BL·s⁻¹ 高流速胁迫作用，实验鱼增加摆尾频率以维持鱼体稳定。此时机体通过糖酵解途径产生能量，血液中乳酸浓度显著升高 ($P < 0.05$)。彭士明等^[18] 在对银鲟 (*Pampus argenteus*) 的研究中发现，运输胁迫均会导致鱼体组织和血清中的乳酸浓度升高，与本研究结果一致。但是徐力文等^[37] 研究发现，高盐度急性胁迫并未导致军曹鱼 (*Rachycentron canadum*) 血液中乳酸浓度明显升高。虽然不同种类的应激源对鱼体生理反应的影响存在一定差异，但可以肯定高流速作为一种应激源会对豹纹鳃棘鲈血液生理产生胁迫作用，血液中乳酸浓度显著升高 ($P < 0.05$)。

皮质醇在控制新陈代谢和能量分配等方面发挥着重要作用^[38]。鱼类对应激的生理反应主要表现为受到外界刺激信号后迅速分泌肾上腺素, 刺激头肾组织释放皮质醇, 调动体内的能量调节渗透压^[39]。暴露于应激源期间, 鱼类将经历一系列生理变化, 大致分为一级、二级和三级反应。初级阶段是一种交感神经激活和儿茶酚胺的分泌, 同时激活下丘脑-垂体-肾间组织轴, 最终分泌皮质醇。第二阶段是体内矿物质失衡和能量调动^[40]。血浆皮质醇和血糖水平通常用作暴露于应激源的指标, 并认为是应激源严重程度的重要指标^[41]。本实验中高流速胁迫会引起实验鱼的应激反应, 机体内皮质醇浓度上升, 促进肝糖原加速分解, 血糖浓度不断上升, 以保障鱼体经受高流速冲击。当流速达到 $2 \text{ BL}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 血液中皮质醇浓度显著高于静水组和 $1 \text{ BL}\cdot\text{s}^{-1}$ 流速组 ($P < 0.05$), 这与范雯等^[42]的研究结果相似。在 $2 \text{ BL}\cdot\text{s}^{-1}$ 流速下, 豹纹鳃棘鲈血液中皮质醇浓度显著上升 ($P < 0.05$)。皮质醇对流速变化响应迅速, 可作为应激发生时的关键指标。大菱鲆 (*Scophthalmus maximus*) 幼鱼在高流速 ($1.8 \text{ BL}\cdot\text{s}^{-1}$) 时, 生长和采食量下降, 应激程度进一步加深^[43]。血液中皮质醇浓度也与应激源刺激时长有关, 并可能不具备累加效益。大黄鱼 (*Larimichthys crocea*) 幼鱼在受到单次刺激后血浆中皮质醇浓度达到最大峰值, 多次刺激后反而有所下降^[44]。长期的高流速胁迫对大口黑鲈 (*Micropterus salmoides*) 血液中皮质醇水平并无显著影响 ($P > 0.05$)^[45]。Woodward 等^[46] 研究发现, 长期持续运动能够降低虹鳟 (*Oncorhynchus mykiss*) 血液中皮质醇水平。因为长期慢性胁迫下, 鱼类能够适应这些刺激, 使下丘脑-垂体-肾间组织轴产生负反馈调节, 致使血液中的皮质醇能够稳定在某一较低的水平^[47]。随着水流刺激时间的延长, 会增加实验鱼对高流速的耐受能力, 此时皮质醇浓度不再增加。本研究基于短期流速胁迫, 所以血液中皮质醇浓度并未出现降低趋势。

水温会影响豹纹鳃棘鲈的运动模式和活动范围, 迫使其减少游泳运动或改变活动模式来应对更高的温度^[48-49]。此外豹纹鳃棘鲈体内糖酵解、三羧酸循环和嘌呤物质代谢呈现昼夜节律变化^[50]。本实验持续时间较短, 环道池中水体量较大, 水温变化不大, 所以水温变化和生理代谢昼夜节律对实验

鱼的影响暂未考虑。但若需长期养殖, 水温变化和生理代谢昼夜节律变化对养殖鱼的影响需要重点考虑。

本实验中 $2 \text{ BL}\cdot\text{s}^{-1}$ 流速下豹纹鳃棘鲈血糖和乳酸浓度的变化不显著, 皮质醇质量均变化显著 ($P < 0.05$)。超过 $2 \text{ BL}\cdot\text{s}^{-1}$ 流速时, 血糖、乳酸和皮质醇均变化显著 ($P < 0.05$)。较高流速对实验鱼血液生理具有胁迫作用, 导致实验鱼应激反应程度增加。综合考虑, 豹纹鳃棘鲈能够适应低于 $2 \text{ BL}\cdot\text{s}^{-1}$ 流速的水流环境。经本课题组工船现场实验得知, 一般海况下 (恶劣海况除外) 工船鱼舱内水体流速多在 $2.5 \text{ BL}\cdot\text{s}^{-1}$ ($40 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$) 以内, 所以工船养殖豹纹鳃棘鲈建议控制水体流速在 $2 \text{ BL}\cdot\text{s}^{-1}$ 以内, 以减小水流对其生长和生理上的刺激。

4 结论

本研究通过流速胁迫的方法, 测定豹纹鳃棘鲈摆尾频率和血液生理指标, 探究摆尾频率的变化规律和对应流速下血液生理变化情况, 结果表明: 1) 水流对于豹纹鳃棘鲈的摆尾频率影响显著, 呈线性正相关关系。可通过建立摆尾频率与水流速度之间的关系, 实现对豹纹鳃棘鲈游泳速度的观测。2) 血糖和皮质醇浓度与摆尾次数之间呈线性正相关关系, 乳酸浓度与摆尾次数呈非线性正相关关系。随着摆尾次数的增加, 血糖、乳酸和皮质醇浓度均有增加。3) 短期内, 豹纹鳃棘鲈能够耐受 $2 \text{ BL}\cdot\text{s}^{-1}$ 的流速。此时血液中皮质醇浓度显著升高 ($P < 0.05$), 对生理具有一定的胁迫作用。考虑到对其生理的影响, 建议控制水体流速低于 $2 \text{ BL}\cdot\text{s}^{-1}$ 。4) 本实验结果基于短期流速胁迫, 还需要长期生长实验验证, 对于实验对象个体差异、代谢昼夜节律变化和环道池水温变化所带来的影响也应纳入考虑范围。

参考文献:

- [1] FRISCH A J, CAMERON D S, PRATCHETT M S, et al. Erratum to: key aspects of the biology, fisheries and management of coral grouper[J]. Rev Fish Biol Fish, 2016, 26: 303-325.
- [2] 涂志刚, 蒋玉峰, 邱名毅. 三亚崖州区豹纹鳃棘鲈养殖现状与发展建议 [J]. 中国水产, 2019(12): 42-43.
- [3] 徐皓, 湛志新, 蔡计强, 等. 我国深远海养殖工程装备发展研究 [J]. 渔业现代化, 2016, 43(3): 1-6.
- [4] 周可欣, 文鑫, 邓成, 等. 豹纹鳃棘鲈体色变异的色素细胞差异分析 [J]. 水生生物学报, 2021, 45(5): 1164-1170.

- [5] 王辉, 时慧中. 不同光照强度对豹纹鳃棘鲈生长和体色变化的影响 [J]. 河北渔业, 2021(5): 4-8.
- [6] 尤颖哲, 蔡葆青, 陈何东, 等. 豹纹鳃棘鲈人工育苗技术 [J]. 中国水产, 2009(11): 41-43.
- [7] XIA S D, SUN J H, LI M, et al. Influence of dietary protein level on growth performance, digestibility and activity of immunity-related enzymes of leopard coral grouper, *Plectropomus leopardus* (Lacépède, 1802)[J]. Aquac Nutr, 2020, 26: 242-247.
- [8] ZHU X W, HAO R J, ZHANG J P, et al. Improved growth performance, digestive ability, antioxidant capacity, immunity and *Vibrio harveyi* resistance in coral trout (*Plectropomus leopardus*) with dietary vitamin C[J]. Aquac Rep, 2022, 24: 101111.
- [9] 张杰, 王永波, 李向民, 等. 工厂化养殖条件下豹纹鳃棘鲈消化系统组织学的观察 [J]. 海洋渔业, 2015, 37(3): 233-243.
- [10] QU M, DING S X, XU X J, et al. Ontogenetic development of the digestive system and growth in coral trout (*Plectropomus leopardus*)[J]. Aquaculture, 2012, 334/335/336/337: 132-141.
- [11] 姚学良, 徐晓丽, 张振奎, 等. 豹纹鳃棘鲈病原曼利斯顿氏菌的分离鉴定及生物学特性研究 [J]. 中国海洋大学学报 (自然科学版), 2015, 45(5): 39-45.
- [12] 徐晓丽, 邵蓬, 李灏, 等. 豹纹鳃棘鲈致病性哈维氏弧菌的分离鉴定与系统发育分析 [J]. 华中农业大学学报, 2014, 33(4): 112-118.
- [13] 姚学良, 蔡琰, 张振奎, 等. 温度对豹纹鳃棘鲈幼鱼呼吸代谢的影响 [J]. 天津农学院学报, 2014, 21(1): 23-27.
- [14] 杨明秋, 王永波, 符书源, 等. 温度、盐度和 pH 值对豹纹鳃棘鲈早期发育的影响 [J]. 热带生物学报, 2012, 3(2): 104-108.
- [15] 尤宏争, 孙志景, 张勤, 等. 盐度对豹纹鳃棘鲈幼鱼摄食生长及体成分的影响 [J]. 大连海洋大学学报, 2013, 28(1): 89-93.
- [16] 高进, 王永波, 刘金叶, 等. 豹纹鳃棘鲈差异流速下肝脏转录组分析 [J]. 南方水产科学, 2022, 18(1): 107-117.
- [17] HOU X G, MEI J X, GUO Z S. Shelter selection by juvenile Pacific abalone (*Haliotis discus hannai* Ino) as a function of food distribution and water flow velocity[J]. Aquac Res, 2020, 51(10): 4113-4121.
- [18] 彭士明, 施兆鸿, 李杰, 等. 运输胁迫对银鲟血清皮质醇、血糖、组织中糖元及乳酸含量的影响 [J]. 水产学报, 2011, 35(6): 831-837.
- [19] SKOV P V, LUND I, PARGANA A M. No evidence for a bioenergetic advantage from forced swimming in rainbow trout under a restrictive feeding regime[J]. Front Physiol, 2015, 6: 31.
- [20] 袁喜, 黄应平, 郭文韬, 等. 温度和重复运动对中华鲟游泳行为的影响 [J]. 水生生态学杂志, 2018, 39(1): 63-68.
- [21] DONLEY J M, DICKSON K A. Swimming kinematics of juvenile kawakawa tuna (*Euthynnus affinis*) and chub mackerel (*Scomber japonicus*)[J]. J Exp Biol, 2000, 203: 3103-3116.
- [22] LAUDER B. Speed effects on midline kinematics during steady undulatory swimming of largemouth bass, *Micropterus salmoides*[J]. J Exp Biol, 1995, 198(Pt2): 582-602.
- [23] 龚丽, 吴一红, 白音包力皋, 等. 草鱼幼鱼游泳能力及游泳行为试验研究 [J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2015, 13(3): 211-216.
- [24] 涂志英, 袁喜, 王从锋, 等. 亚成体巨裂腹鱼游泳能力及活动代谢研究 [J]. 水生生物学报, 2012, 36(4): 682-688.
- [25] 李丹, 林小涛, 李想, 等. 水流对杂交鳊幼鱼游泳行为的影响 [J]. 淡水渔业, 2008, 38(6): 46-51.
- [26] 王瑶, 王从锋, 刘慧杰, 等. 鲢幼鱼运动能量代谢研究 [J]. 水生生态学杂志, 2019, 40(4): 101-107.
- [27] 刘慧杰, 王从锋, 刘德富, 等. 不同运动状态下鲢幼鱼的游泳特性研究 [J]. 南方水产科学, 2017, 13(2): 85-92.
- [28] PLAUT I. Effects of fin size on swimming performance, swimming behaviour and routine activity of zebrafish *Danio rerio*[J]. J Exp Biol, 2000, 203: 813-820.
- [29] 柯森繁, 陈滔鑫, 罗佳, 等. 鲢顶流游泳速度与摆尾行为相关性分析 [J]. 水产学报, 2017, 41(3): 401-406.
- [30] 刘谢驿, 徐劭, 袁喜, 等. 鲢幼鱼非疲劳贴网及姿态转换行为研究 [J]. 水生生态学杂志, 2020, 41(4): 96-101.
- [31] 魏园杰. 两种典型鱼道布置下鲢游游泳行为与生理变化差异研究 [D]. 宜昌: 三峡大学, 2021: 67-68.
- [32] 虞顺年, 魏小岚, 韦芳三, 等. 不同运动强度对黑鲟生长、血清和肝脏抗氧化指标的影响 [J]. 水生生物学报, 2018, 42(2): 255-263.
- [33] 刘谢驿. 开放与封闭水槽环境下草鱼幼鱼生理代谢及游泳特性研究 [D]. 宜昌: 三峡大学, 2020: 55-56.
- [34] MILLIGAN C L. Metabolic recovery from exhaustive exercise in rainbow trout[J]. Comp Biochem Physiol A, 1995, 113(1): 51-60.
- [35] 夏伟, 付世建, 彭姜岚, 等. 力竭运动训练对锦鲤幼鱼无氧代谢能力的影响 [J]. 重庆师范大学学报 (自然科学版), 2011, 28(4): 16-18, 22.
- [36] 陈巨星, 孙祥明, 张元兴. 乳酸对海水鱼类细胞系 CHSE 生长和代谢的影响 [J]. 华东理工大学学报 (自然科学版), 2005(3): 290-295.
- [37] 徐力文, 苏友禄, 刘广锋, 等. 急性盐度胁迫下军曹鱼稚鱼应激反应的血清学指标 [J]. 华南农业大学学报, 2007, 28(2): 91-94.
- [38] MOMMSEN T P, VIJAYAN M M, MOON T W. Cortisol in teleost dynamics, mechanisms of action, and metabolic regulation[J]. Rev Fish Biol Fish, 1999, 9(3): 211-268.
- [39] 张云龙, 贺亚蒙, 袁娟, 等. 运输过程中水质和鱼类生理指标的变化及运输控制策略 [J]. 水生生物学报, 2018, 42(2): 439-450.
- [40] CHEN Z L, YE Z Y, JI M D, et al. Effects of flow velocity on growth and physiology of juvenile largemouth bass (*Micropterus salmoides*) in recirculating aquaculture systems[J]. Aquac Res, 2021, 52(7): 3093-3100.
- [41] WENDELAAR B S E. The stress response in fish[J]. Physiol Rev, 1997, 77(3): 591-625.
- [42] 范雯, 刘永, 魏小岚, 等. 不同运动强度和训练时间对紫红笛鲷幼鱼血清生理生化指标的影响 [J]. 海洋渔业, 2020, 42(5): 618-633.
- [43] LI X, JI L Q, WU L L, et al. Effect of flow velocity on the growth, stress and immune responses of turbot (*Scophthalmus maximus*)

- in recirculating aquaculture systems[J]. *Fish Shellfish Immun*, 2019, 86: 1169-1176.
- [44] 林听听, 刘鑫, 王昌勃, 等. 船舶噪声声压级对大黄鱼幼鱼游泳、摄食行为及免疫生理指标的影响 [J]. *海洋渔业*, 2020, 42(1): 61-72.
- [45] 陈震雷. 循环水养殖中水流速度对大口黑鲈幼鱼的影响研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2021: 30-33.
- [46] WOODWARD J J, SMITH L S. Exercise training and the stress response in rainbow trout, *Salmo gairdneri* Richardson[J]. *J Fish Biol*, 2010, 26(4): 435-447.
- [47] 麦康森, 艾庆辉, 徐玮, 等. 水产养殖中的环境胁迫及其预防——营养学途径 [J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2004, 34(5): 767-774.
- [48] JOHANSEN J L, MESSMER V, COKER D J, et al. Increasing ocean temperatures reduce activity patterns of a large commercially important coral reef fish[J]. *Glob Chang Biol*, 2013, 20(4): 1067-1074.
- [49] PRATCHETT M S, SCOTT M E, HEUPEL M R, et al. Latitudinal and seasonal variation in space use by a large, predatory reef fish, *Plectropomus leopardus*[J]. *Funct Ecol*, 2019, 33(4): 670-680.
- [50] MEKUCHI M, SAKATA K, YAMAGUCHI T, et al. Trans-omics approaches used to characterise fish nutritional biorhythms in leopard coral grouper (*Plectropomus leopardus*)[J]. *Sci Rep*, 2017, 7(1): 9372.