

DOI: 10.5846/stxb201912252791

周龙艳, 李秀明, 付世建. 中华倒刺鲃和胭脂鱼游泳行为、应激和免疫能力对短期禁食的响应. 生态学报, 2022, 42(17): 7288-7295.

Zhou L Y, Li X M, Fu S J. The swimming behavior, stress and immune responses of juvenile qingbo and Chinese sucker subjected to short-term fasting. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(17): 7288-7295.

# 中华倒刺鲃和胭脂鱼游泳行为、应激和免疫能力对短期禁食的响应

周龙艳, 李秀明, 付世建\*

重庆师范大学进化生理与行为学实验室, 重庆市动物生物学重点实验室, 重庆 401331

**摘要:**近年来,长江流域鱼类资源急剧下降,而有关鱼类对环境变化的行为和生理响应对于评估环境变化对种群动态的影响具有重要意义,相关研究亟待开展。选取中华倒刺鲃(*Spinibarbus sinensis*)和胭脂鱼(*Myxocyprinus asiaticus*)幼鱼为实验对象,考察两种鱼类在 1—2 周禁食后的自发群体运动时间比、游泳速度、个体间距离、最大匀加速速度、溶菌酶含量、鱼体免疫球蛋白(IgM)水平、血清皮质醇水平和超氧化物歧化酶活性的响应。研究发现:(1)相比之下,胭脂鱼的自发游泳行为表现不太活跃,游泳能力和 IgM 水平更低,超氧化物歧化酶 SOD 水平更高;(2)胭脂鱼在正常摄食条件下比中华倒刺鲃生长更慢,但是在 1—2 周短期禁食条件下其体重下降更少;(3)1—2 周的短期禁食结束后,两种实验鱼的 SOD 活性和游泳能力变化不明显,但是其 IgM 水平和皮质醇都提高,胭脂鱼表现不及中华倒刺鲃;(4)胭脂鱼的溶菌酶含量在 1—2 周短期禁食后明显提高,但是中华倒刺鲃的溶菌酶含量没有受到 1—2 周短期禁食的显著影响。研究表明:(1)相比于中华倒刺鲃,胭脂鱼不太活跃,免疫和运动能力也更低,当食物充足时生长优势不明显,但在食物短缺时,营养物质和能量损失更少;(2)两种实验鱼的生理机能(比如游泳行为和免疫功能)对短期禁食有不同的响应,胭脂鱼更加不敏感(溶菌酶除外)。总体而言,研究表明同样的食物资源波动可能导致同一水域不同鱼类不同的生态后果,更多鱼类的相关研究亟待开展。

**关键词:**食物资源;行为;应激;内环境稳态;非特异免疫;特异免疫;生理响应

## The swimming behavior, stress and immune responses of juvenile qingbo and Chinese sucker subjected to short-term fasting

ZHOU Longyan, LI Xiuming, FU Shijian\*

Chongqing Key Laboratory of Animal Biology, Chongqing Normal University, Laboratory of Evolutionary Physiology and Behavior, Chongqing 401331, China

**Abstract:** Whether fish species can adjust their physiological and behavioral traits well to the change of the environmental condition of their habitats are key for the fate of the local population. The food resource changed profoundly and became unpredictable nowadays in the Yangtze River water system due to the dramatical change of the habitat. The aim of this study is to investigate the behavioral and physiological responses of Chinese sucker (*Myxocyprinus asiaticus*) and qingbo (*Spinibarbus sinensis*) subjected to short-term fasting. To fulfill our goals, we measured the maximum acceleration swimming speed ( $U_{cat}$ ), spontaneous shoal behavior (percent time spent moving, median swimming speed and inter-individual distance), innate immune indicator (serum lysosome activity), specific immune indicator (serum plasma IgM level), and antioxidant defense ability (serum SOD level), as well as the change of body size of either fasted or fed (as control) juveniles of Chinese sucker and qingbo for 1 or 2 week. The main results are as follows: (1) Compared to Chinese sucker, qingbo exhibited stronger swimming ability, more spontaneous activity, and higher level of plasma IgM; (2) Compared to

基金项目:国家自然科学基金项目(31670481)

收稿日期:2019-12-25; 采用日期:2022-04-03

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shijianfu9@cqnu.edu.cn

Chinese sucker, qingbo exhibited more remarkable increase of plasma IgM and cortisol levels after fasting treatment, thus exhibited more loss in body weight after food deprivation but more gain in body weight when fed normally; (2) the SOD level of qingbo was significantly lower than that of Chinese sucker; and (3) The lysosome activity showed no change in fasted qingbo while it increased in fasted Chinese sucker compared to normally fed conspecifics. Therefore, the results of the present study suggested that: (1) Compared to Chinese sucker, qingbo possesses superior performance of physiological function as a consequence of the fast-lifestyle evolved in the fast-flow habitat, which is beneficial to the adaptation to change of food availability; (2) The population dynamics of qingbo and Chinese sucker might be different facing the possible fluctuation in food resources as their functions of antioxidant systems and immunity exhibited diverse reaction norm to short-term food deprivation.

**Key Words:** food availability; behaviour; stress; homeostasis; non-specific immune; specific immune; physiological response

近些年来,我国长江流域各种鱼类种群数量下降较为严重,其原因主要包括洄游通道阻隔、产卵场消失和过度捕捞等<sup>[1]</sup>。此外,三峡大坝的修建导致水体生境发生巨大变化,鱼类能否在生理和行为上适应这些生境变化直接影响其种群动态以及增殖放流的效果<sup>[1-3]</sup>。先前的研究表明,岩原鲤(*Procypris rabaudi*)、中华倒刺鲃(*Spinibarbus sinensis*)和胭脂鱼(*Myxocyprinus asiaticus*)等长江鱼类的行为特征和生理表现对环境生态因子变化的响应明显不同<sup>[1-2, 4]</sup>。长江流域水生环境食物资源变动剧烈,相关研究鲜见报道。因此,本文旨在研究短期禁食胁迫下不同鱼类的生理和行为响应策略。

在食物资源不足时,生物体面临降低生理功能、减少活动和维持一定活动水平和生理功能去觅食和避敌的两难选择<sup>[1, 4-5]</sup>。鱼类在长期进化历程中为了适应所处生境食物资源变动会形成不同的生理和行为调节策略<sup>[1, 4-7]</sup>。当鱼类遭遇饥饿环境时,其应激反应能力、免疫系统调节和抗氧化能力十分重要<sup>[1, 3]</sup>。在维持应激导致的内环境稳态和基础耗能等方面,皮质醇通常具有显著的作用<sup>[1, 8]</sup>,当饥饿胁迫时,鱼类一般会上调皮质醇水平用以动员能量供给<sup>[1, 9]</sup>,上调溶菌酶相关基因表达水平<sup>[10-13]</sup>;而随着病原体侵入,鱼体免疫球蛋白 M(IgM)等特异性免疫指标也可能明显提高;此外,超氧化物歧化酶(SOD)是鱼体抗氧化系统的主要酶类之一<sup>[14]</sup>。在胁迫条件下由于器官抗氧化物质储存减少和活性氧自由基增加<sup>[15]</sup>,鱼类 SOD 可能上调其基因表达水平<sup>[1, 16-17]</sup>,这将导致更多能量的消耗,假如没有及时且足够的食物资源补充,将会导致其免疫功能的损伤和已有能量的耗尽。当遭遇饥饿胁迫时,鱼体自身相关生理功能和行为调节能力对其生存适合度至关重要<sup>[1, 4-5]</sup>。

为了系统探讨在短期禁食胁迫条件下鱼类行为、免疫和生理等功能的响应及其内在联系,本研究采用中华倒刺鲃和胭脂鱼幼鱼为对象。目前这两种鱼类的野生种群数量稀少<sup>[18]</sup>。中华倒刺鲃是我国特有的一种鲤形目鲤科鱼类,偏好急流且清澈水体生境;胭脂鱼是一种鲤形目亚口鱼科鱼类,是该科分布在我国唯一物种,也是我国的二级保护动物,偏好下层缓流水体生境<sup>[2, 4, 18]</sup>。中华倒刺鲃是以植物为主的杂食性鱼类,而胭脂鱼为底栖动物为主的杂食性鱼类,两种鱼类在食物缺乏时可能表现出不同的行为和生理响应。本研究测定了禁食 1 周和禁食 2 周两种鱼类血清 SOD 活性、皮质醇水平、IgM 水平和溶菌酶含量的变化。由于运动、免疫和机体的应激反应密切相关且均导致机体能量的大量消耗,本研究还测定了短期禁食后两种鱼类游泳能力和群体自发游泳行为。本研究旨在系统探讨中华倒刺鲃和胭脂鱼幼鱼对短期禁食的生理和行为响应机制及其内在联系,以为鱼类养殖实践和资源保护提供必要的参考资料。

## 1 材料与方法

### 1.1 驯养与短期禁食处理

本实验所用的中华倒刺鲃与胭脂鱼幼鱼从重庆市永川区水产养殖场购买获得,每种实验鱼 140 尾,在室内循环水净化控温养殖水槽中驯养 2 周,水体温度控制在 $(25\pm 1)^\circ\text{C}$ ,用商品饲料每天饱足投喂 2 次(09:30 和 17:00),摄食 1h 后清除粪便与剩余饵料<sup>[1]</sup>。用充分曝气并控温后的自来水作为养殖用水,养殖水体溶氧饱

和度控制在 90%以上,每天更换总体水量的 20%<sup>[1]</sup>。驯养 2 周以后,将每种实验鱼随机分成正常摄食 1 周对照组、禁食 1 周处理组、正常摄食 2 周对照组和禁食 2 周处理组,每组 35 尾(3 个重复,分别为 12、12、11 尾),并测量其初始体重和体长。所有实验鱼分别在处理 1 周或 2 周结束后禁食 24h,随后测定相关指标<sup>[1]</sup>。

### 1.2 最大均加速游泳速度( $U_{cat}$ )

本实验采用 Blazka 式鱼类游泳测定仪测定最大均加速游泳速度<sup>[1,3-4,19]</sup>。具体操作简要介绍如下:将单尾实验鱼转入仪器中适应驯化 1 h,仪器中水流速度约为 6 cm/s。随后,将仪器中的水流速度以 0.167 cm/s<sup>2</sup> 的恒定加速度持续增加,直至实验鱼力竭,此时的流速即为鱼的  $U_{cat}$  值<sup>[1]</sup>。当实验鱼无力前进游泳,并停留在仪器末端筛板 20s 以上为力竭状态的评判标准。游泳速度用相对游泳速度(体长/秒,BL/s)表示<sup>[1]</sup>。每组实验鱼测定 9 尾。

### 1.3 集群行为

实验鱼集群行为在一个有机玻璃板组成的水槽中进行,水槽的长、宽和高分别为 70cm、37.5cm 和 35cm,水体深度为 6cm<sup>[1,4-5]</sup>。用高清摄像头(与监测器相连)记录其集群行为。用不透明白色纱布将水槽四周围起来,减少外界干扰对实验鱼集群行为的影响<sup>[1]</sup>。每种实验鱼分别随机选取 20 尾(5 个重复,每个重复 4 尾)。先将实验鱼放置于水槽中适应 20min,随后拍摄 20min 视频。用 Idtracer 软件分析视频,获得个体间平均距离(IID)、运动时间比(PTM)和运动时的速度中值<sup>[1,4-5,20-21]</sup>。

### 1.4 皮质醇

随机选取两种实验鱼各 6 尾,置于鱼类麻醉专用药(MS222)(0.1g/mL)中麻醉,断尾取血,高速离心 10min(3000r/min),取上清液备用<sup>[1]</sup>。各个指标取样和样品准备操作相同。采用酶联免疫吸附法(ELISA)原理和 Cayman 试剂盒以及酶标仪测定皮质醇水平<sup>[1]</sup>。

### 1.5 免疫球蛋白(IgM)

采用酶联免疫吸附法(ELISA)原理和南京建成生物研究所生产的试剂盒以及酶标仪测定 IgM 水平<sup>[1]</sup>。

### 1.6 溶菌酶

采用紫外分光光度计(530nm 波长)和南京建成生物研究所生产的试剂盒测定溶菌酶含量<sup>[1]</sup>。公式如下<sup>[1]</sup>:

$$\text{溶菌酶含量}(\mu\text{g/mL}) = (\text{测定透光度 UT}_2 - \text{测定透光度 UT}_0) / (\text{标准透光度 ST}_2 - \text{标准透光度 ST}_0) \times \text{稀释倍数} \times \text{标准品浓度} \quad (1)$$

### 1.7 超氧化物歧化酶(SOD)

采用紫外分光光度计(550nm 波长)和南京建成生物研究所生产的试剂盒测定 SOD 活力<sup>[1]</sup>。公式如下<sup>[1]</sup>:

$$\text{SOD 活力}(U/\text{mL}) = (\text{对照管吸光度} - \text{测定管吸光度}) / \text{对照管吸光度} / 50\% \times \text{稀释倍数} \quad (2)$$

### 1.8 统计分析

本研究数据统计分析采用 Excel(2003)和 SPSS 17.0 软件。采用  $t$ -test 对体重和体长差异进行分析。采用一般线性模型单变量的三因素协方差分析短期禁食、鱼的种类和禁食时间对其他指标的影响(除了游泳速度中值用体长作协变量以外,其它指标用体重作协变量)。群体游泳以短期禁食、鱼的种类和禁食时间为主因子,编号作为随机变量进行线性混合模型统计。假如方差分析检验通过,用 Duncan's 多重比较分析不同的短期禁食组之间、不同的禁食时间点以及不同的鱼类之间的差异。以平均值 $\pm$ 标准误(Mean  $\pm$  SE)表示数据值, $P < 0.05$  为显著性水平。

## 2 结果

### 2.1 短期禁食对两种实验鱼鱼体大小的影响

摄食对照组中华倒刺鲃幼鱼 1 周体长显著增加 3.76%,2 周体长显著增加 6.74% ( $P < 0.001$ ),禁食组中华

倒刺鲃幼鱼体长与实验前没有显著变化;摄食对照组胭脂鱼幼鱼 1 周体长增加 3.47% ( $P=0.008$ ), 2 周体长增加 2.67% ( $P=0.094$ ), 禁食组胭脂鱼幼鱼体长与实验前没有显著变化 ( $P>0.05$ ) (表 1)。

表 1 短期禁食处理对中华倒刺鲃和胭脂鱼幼鱼鱼体大小的影响 (平均值±标准误,  $N=35$ )

Table 1 The effects of short-term fasting on the body mass and body length of *S. sinensis* and *M. asiaticus* (Mean±SE,  $N=35$ )

		体长 Body length/cm					
		中华倒刺鲃 Qingbo			胭脂鱼 Chinese sucker		
时间 Time/week		初始值 Initial	终末值 Final	<i>t</i> -test 结果	初始值 Initial	终末值 Final	<i>t</i> -test 结果
1	摄食对照组	6.92±0.06	7.18±0.17	$P=0.001$	6.31±0.06	6.53±0.07	$P=0.008$
	禁食处理组	6.89±0.06	6.96±0.07	$P=0.441$	6.40±0.06	6.47±0.07	$P=0.452$
2	摄食对照组	6.83±0.06	7.29±0.07	$P<0.001$	6.37±0.07	6.54±0.08	$P=0.094$
	禁食处理组	6.96±0.06	6.88±0.04	$P=0.087$	6.41±0.06	6.55±0.05	$P=0.101$

		体重 Body mass/g					
		中华倒刺鲃 Qingbo			胭脂鱼 Chinese sucker		
时间 Time/week		初始值 Initial	终末值 Final	<i>t</i> -test 结果	初始值 Initial	终末值 Final	<i>t</i> -test 结果
1	摄食对照组	6.87±0.16	7.41±0.14	$P=0.014$	5.36±0.16	5.72±0.16	$P=0.108$
	禁食处理组	6.81±0.18	6.50±0.18	$P=0.231$	5.41±0.12	5.23±0.13	$P=0.321$
2	摄食对照组	6.66±0.16	7.52±0.17	$P<0.001$	5.45±0.15	5.70±0.16	$P=0.272$
	禁食处理组	6.54±0.14	5.88±0.10	$P<0.001$	5.58±0.15	5.33±0.15	$P=0.233$

摄食对照组中华倒刺鲃幼鱼体重 1 周显著增加 7.86% ( $P=0.014$ ), 2 周显著增加 12.12% ( $P<0.001$ ), 禁食组中华倒刺鲃幼鱼体重 1 周降低 4.05% ( $P=0.231$ ), 2 周降低 10.09% ( $P<0.001$ ); 摄食对照组胭脂鱼幼鱼体重与实验前相比没有显著性差异, 禁食组胭脂鱼幼鱼 1 周体重降低 3.33% ( $P=0.321$ ), 2 周体重降低 4.48% ( $P=0.233$ ), 但都与实验前没有显著变化。

2.2 短期禁食对两种实验鱼鱼群自发游泳行为和运动能力的影响

胭脂鱼幼鱼的  $U_{cat}$  显著低于中华倒刺鲃幼鱼 ( $P<0.001$ ), 不过短期禁食对两种实验鱼的  $U_{cat}$  都没有产生显著性的影响 (表 2, 图 1)。

表 2 短期禁食、鱼的种类和禁食时间对最大游泳速度、溶菌酶、免疫球蛋白、超氧化物歧化酶和皮质醇的三因素协方差统计分析表

Table 2 The effects of short-term fasting, species and fasting time on the  $U_{cat}$ , lysosome activity, IgM level, SOD level and Cortisol level based on a three-way analysis of covariance (ANCOVA)

	最大游泳速度 $U_{cat}$	免疫球蛋白 M IgM	皮质醇 Cortisol	超氧化物歧化酶 SOD	溶菌酶 Lysozyme
协变量的影响 Covariate effect	$F_{1,63}=0.178$ $P=0.675$	$F_{1,39}=1.380$ $P=0.247$	$F_{1,39}=0.893$ $P=0.350$	$F_{1,39}=0.650$ $P=0.425$	$F_{1,39}=0.152$ $P=0.699$
种类的影响 Species effect (S)	$F_{1,63}=79.631$ $P<0.001$	$F_{1,39}=8.923$ $P=0.005$	$F_{1,39}=0.420$ $P=0.521$	$F_{1,39}=7.608$ $P=0.009$	$F_{1,39}=11.162$ $P=0.002$
禁食的影响 Fasting effect (F)	$F_{1,63}=0.072$ $P=0.790$	$F_{1,39}=29.049$ $P<0.001$	$F_{1,39}=16.690$ $P<0.001$	$F_{1,39}=0.154$ $P=0.696$	$F_{1,39}=2.745$ $P=0.106$
时间的影响 Time effect (T)	$F_{1,63}=1.316$ $P=0.256$	$F_{1,39}=0.043$ $P=0.837$	$F_{1,39}=2.945$ $P=0.094$	$F_{1,39}=2.497$ $P=0.122$	$F_{1,39}=1.093$ $P=0.302$
S×F	$F_{1,63}=3.412$ $P=0.069$	$F_{1,39}=0.018$ $P<0.893$	$F_{1,39}=7.488$ $P=0.009$	$F_{1,39}=0.670$ $P=0.418$	$F_{1,39}=9.322$ $P=0.004$
S×T	$F_{1,63}=2.023$ $P=0.160$	$F_{1,39}=1.902$ $P=0.176$	$F_{1,39}=2.864$ $P=0.095$	$F_{1,39}=0.844$ $P=0.364$	$F_{1,39}=0.006$ $P=0.938$
F×T	$F_{1,63}=2.759$ $P=0.102$	$F_{1,39}=0.120$ $P=0.731$	$F_{1,39}=3.528$ $P=0.068$	$F_{1,39}=0.013$ $P=0.911$	$F_{1,39}=0.474$ $P=0.495$
S×F×T	$F_{1,63}=0.450$ $P=0.505$	$F_{1,39}=1.525$ $P=0.224$	$F_{1,39}=2.758$ $P=0.105$	$F_{1,39}=0.015$ $P=0.903$	$F_{1,39}=0.073$ $P=0.788$

F 值下标为自由度

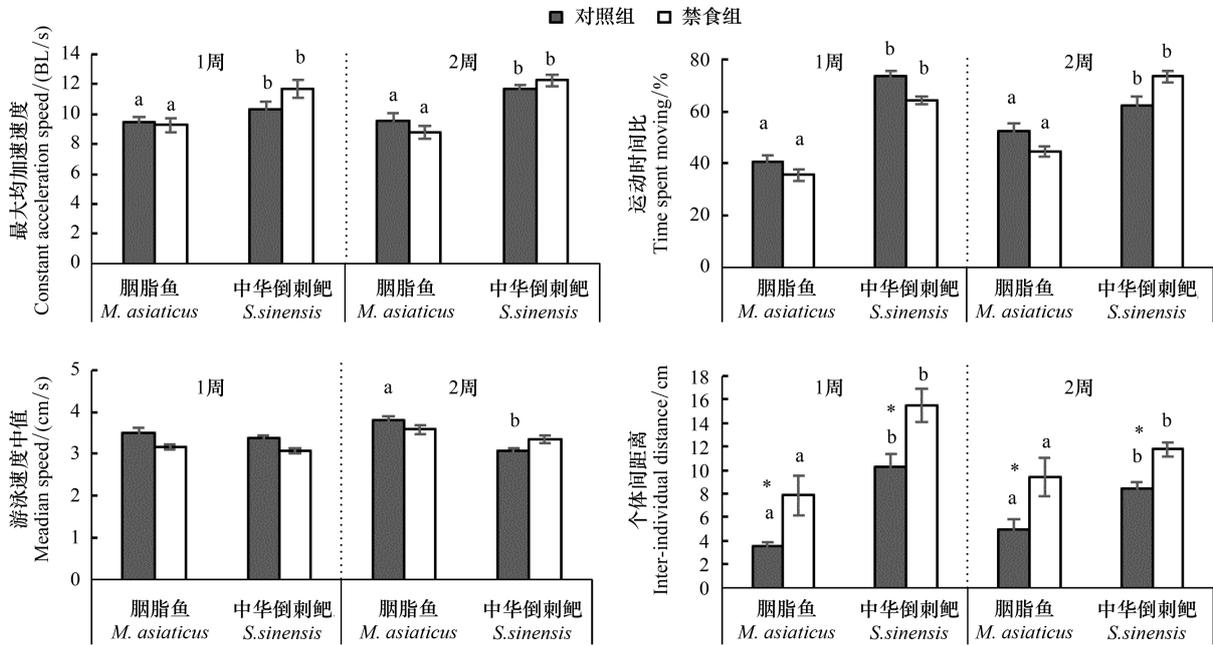


图1 短期禁食对中华倒刺鲃和胭脂鱼幼鱼群体自发游泳行为和运动能力的影响(平均值±标准误,自发行为: $N=5, U_{cat}:N=9$ )

Fig.1 The effects of short-term fasting on variables of maximum acceleration swimming speed and spontaneous shoal behaviour in *S. sinensis* and *M. asiaticus* (Mean±SE,  $N=5$  for spontaneous behaviour and  $N=9$  for  $U_{cat}$ )

a 和 b 表示两种实验幼鱼之间差异显著, \* 表示摄食对照组和禁食处理组实验幼鱼之间差异显著

中华倒刺鲃幼鱼的自发游泳速度中值总体上低于胭脂鱼幼鱼,但仅仅在 2 周对照组实验鱼之间存在显著性差异(表 3,图 1)。胭脂鱼幼鱼的 PTM 显著低于中华倒刺鲃幼鱼,但短期禁食处理对两种实验鱼的 PTM 都没有显著性影响。胭脂鱼幼鱼的 IID 显著短于中华倒刺鲃幼鱼,且两种实验鱼摄食对照组的 IID 都显著小于禁食处理组( $P<0.001$ )。

表 3 短期禁食、鱼的种类和禁食时间对游泳速度中值、个体间距离和运动时间比的线性混合模型统计分析表

Table 3 The effects of short-term fasting, species and sample time on the median speed, inter-individual distance and time spent moving based on a linear mixed model using fish shoal as a random factor

	个体间距离 Inter-individual distance	运动时间比 Time spent moving	游泳速度中值 Median speed
种类的影响 Species effect (S)	$F_{1,32} = 8.037$ $P = 0.0081$	$F_{1,32} = 73.003$ $P < 0.001$	$F_{1,32} = 7.739$ $P = 0.009$
禁食的影响 Fasting effect (F)	$F_{1,32} = 28.919$ $P < 0.001$	$F_{1,32} = 0.863$ $P = 0.360$	$F_{1,32} = 1.894$ $P = 0.178$
时间的影响 Time effect (T)	$F_{1,32} = 0.614$ $P = 0.439$	$F_{1,32} = 2.600$ $P = 0.117$	$F_{1,32} = 2.525$ $P = 0.122$
S×F	$F_{1,32} = 0.010$ $P = 0.921$	$F_{1,32} = 1.704$ $P = 0.201$	$F_{1,32} = 1.656$ $P = 0.207$
S×T	$F_{1,32} = 7.062$ $P = 0.012$	$F_{1,32} = 3.951$ $P = 0.055$	$F_{1,32} = 3.333$ $P = 0.077$
F×T	$F_{1,32} = 0.280$ $P = 0.600$	$F_{1,32} = 2.091$ $P = 0.158$	$F_{1,32} = 3.038$ $P = 0.091$
S×F×T	$F_{1,32} = 0.394$ $P = 0.535$	$F_{1,32} = 4.014$ $P = 0.054$	$F_{1,32} = 1.169$ $P = 0.288$

F 值下标为自由度

### 2.3 短期禁食对两种实验鱼免疫指标和皮质醇的影响

两种实验鱼皮质醇水平之间无显著性差异,但是 1—2 周短期禁食对血清皮质醇水平有显著性的影响

( $P < 0.001$ ) (图 2)。两种实验鱼短期禁食后皮质醇水平整体上升,但胭脂鱼幼鱼上升幅度不及中华倒刺鲃幼鱼(交互作用; $P = 0.009$ )。胭脂鱼幼鱼血清的 IgM 水平显著低于中华倒刺鲃幼鱼( $P = 0.005$ ),1—2 周短期禁食导致中华倒刺鲃和胭脂鱼幼鱼的 IgM 水平都显著性提高( $P < 0.001$ ),并且胭脂鱼 IgM 水平提高没有中华倒刺鲃明显( $P = 0.018$ ) (图 2)。1—2 周短期禁食对溶菌酶的影响在两种实验鱼之间存在差异( $P = 0.004$ ):两种实验鱼对照组之间没有显著性不同,1—2 周短期禁食对中华倒刺鲃幼鱼血浆溶菌酶水平的影响不显著,但是使胭脂鱼幼鱼溶菌酶水平显著提高;1—2 周短期禁食组胭脂鱼幼鱼溶菌酶水平显著低于中华倒刺鲃幼鱼(图 2)。中华倒刺鲃幼鱼的 SOD 水平显著低于胭脂鱼幼鱼( $P = 0.009$ ),中华倒刺鲃和胭脂鱼幼鱼 SOD 水平没有受到短期禁食处理的影响(图 2)。

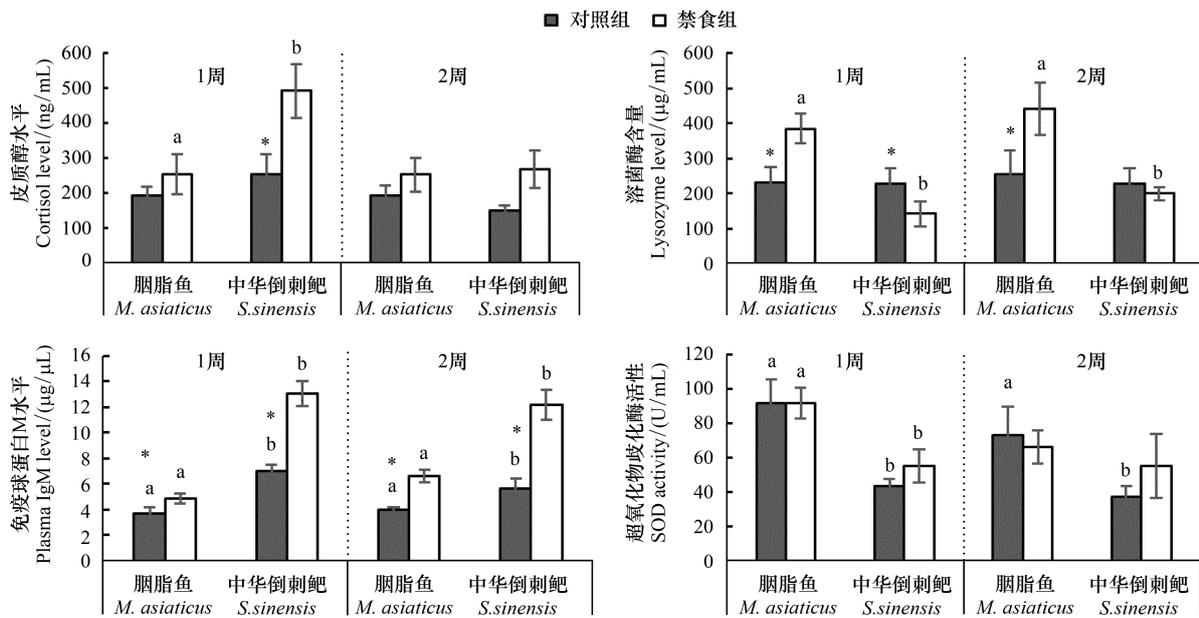


图 2 短期禁食对中华倒刺鲃和胭脂鱼幼鱼抗氧化和免疫指标的影响(平均值±标准误, $N=6$ )

Fig.2 The effects of short-term fasting on antioxidant and immune variables of *S. sinensis* and *M. asiaticus* (Mean±SE,  $N=6$ )

### 3 讨论

#### 3.1 中华倒刺鲃和胭脂鱼的种间差异

中华倒刺鲃和胭脂鱼在行为特征和生理功能上差异明显<sup>[1,4,11,20]</sup>。中华倒刺鲃幼鱼的游泳速度比胭脂鱼幼鱼高出 10%—20%,PTM 和 IID 都高出 100%左右。由此表明,胭脂鱼拥有更低的游泳能力和不太活跃的行为特点<sup>[1,2,6,11]</sup>。胭脂鱼较差的游泳能力可能与其体背较高,游泳阻力相对比较大有关<sup>[1—3]</sup>。胭脂鱼还表现出更低的 IgM 水平,IgM 和皮质醇对 1—2 周短期禁食胁迫的响应不太明显。由此表明,作为一种偏好缓流的鱼类,胭脂鱼生理功能可能并没有维持在较高的基础状态<sup>[1,22]</sup>。即使在食物供给充足的情况下,胭脂鱼生长相对缓慢,但是其体重在食物缺乏情况下损失较小<sup>[1]</sup>。不过,胭脂鱼的 SOD 活性比中华倒刺鲃高。由此表明,相比之下胭脂鱼幼鱼生理功能侧重对氧化自由基的处理。这可能与两种鱼类的生理特点、生存环境和生态习性差异有关<sup>[1,4,11,20,23—24]</sup>。

#### 3.2 中华倒刺鲃和胭脂鱼对短期禁食的行为反应和生理响应

本研究发现,短期禁食(1—2 周)导致中华倒刺鲃和胭脂鱼幼鱼的体重下降约 4%—7%,但促使两种鱼类自发游泳时 IID 都增加,可能是因为其增加搜索食物等行为导致群体凝聚力的降低<sup>[1,4—5,19—20]</sup>。中华倒刺鲃和胭脂鱼的游泳能力( $U_{cat}$ )和 PTM 在 1—2 周短期禁食后没有显著性变化,这种研究结果在以往的研究中也

被发现<sup>[1, 4, 20, 25]</sup>。鱼类在短期食物缺乏的条件下维持其游泳能力有利于觅食等生理功能的实现,进而提高其生存适合度<sup>[1, 4-5]</sup>。此外,胭脂鱼在短期禁食后其 SOD 酶活性并没有显著变化,甚至溶菌酶和 IgM 也有所增加。这可能有利于胭脂鱼动员免疫和抗氧化功能维持其体内环境的稳定<sup>[1, 9, 26-29]</sup>。皮质醇在机体能量动员方面起着重要的作用<sup>[30]</sup>,1—2 周短期禁食导致中华倒刺鲃和胭脂鱼的皮质醇水平都出现增加的趋势,且胭脂鱼的皮质醇上升显著低于中华倒刺鲃,由此表明胭脂鱼在面临短期食物不足时对能量的动员可能不如中华倒刺鲃<sup>[1]</sup>。这也可以从短期禁食导致胭脂鱼 IgM 水平的上升显著低于中华倒刺鲃的结果得到佐证<sup>[1, 31-32]</sup>。本研究发现,在 1—2 周短期禁食条件下胭脂鱼幼鱼溶菌酶含量明显增加,这可能与其底栖生活环境中病原体比较多有关<sup>[1, 33]</sup>。

禁食胁迫可能导致鱼类溶菌酶含量、皮质醇水平和 SOD 活性下降、不变或者上升<sup>[1, 8, 10-12]</sup>,这可能与鱼类禁食时间长短和不同鱼类应激反应、抗氧化功能和免疫水平的种间差异相关<sup>[1]</sup>。本研究发现中华倒刺鲃和胭脂鱼幼鱼应对 1—2 周短期禁食胁迫时在生理响应和行为反应上种间差异明显。这可能与两种鱼类之间基础生理状态和饥饿胁迫下应激调节的差异相关,进而可能导致中华倒刺鲃和胭脂鱼在相同的环境因子变动条件下出现不同的种群数量变动<sup>[1, 11]</sup>。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 周龙艳. 长江流域几种珍稀鱼类对环境因子胁迫的生理与行为响应研究. 重庆:重庆师范大学, 2020.
- [ 2 ] 吴霞. 胭脂鱼 IgM 单克隆抗体的制备及应用研究. 重庆:西南大学, 2019.
- [ 3 ] Zhou L Y, Yan X Y, Li X M, Fu X, Xia J G, Fu S J. Effect of exercise training on swimming performance, survival under predation and hypoxia tolerance in an endangered fish species in China. *Marine and Freshwater Behaviour and Physiology*, 2019, 52(2): 67-82.
- [ 4 ] 覃英莲. 饥饿胁迫对中华倒刺鲃行为、能量代谢及其关联的影响[D]. 重庆:重庆师范大学, 2017.
- [ 5 ] 凌鸿. 营养状态和代谢范围对锦鲤集群行为的影响. 重庆:重庆师范大学, 2020.
- [ 6 ] Liu H T, Labonne J, Coste P, Huchet E, Plagnes-Juan E, Rives J, Veron V, Seiliez I, Bolliet V. Looking at the complex relationships between migration behavior and conditional strategy based on energy metabolism in the European glass eel (*Anguilla anguilla*). *Science of the Total Environment*, 2019, 696: 134039.
- [ 7 ] Darcy A P, Raby G D, Johnson T B, Pitcher T E, Fisk A T. Effects of intracoelomic transmitter implantation on metabolic rate, swimming performance, growth and survival in juveniles of two salmonids. *Journal of Fish Biology*, 2019, 95(4): 1094-1106.
- [ 8 ] Bermejo-Poza R, Fernández-Muela M, De La Fuente J, Pérez C, De Chavarri E G, Díaz M T, Torrent F, Villarreal M. Physio-metabolic response of rainbow trout during prolonged food deprivation before slaughter. *Fish Physiology and Biochemistry*, 2019, 45(1): 253-265.
- [ 9 ] 王海珊. 游泳训练对异育银鲫“中科 3 号”肌肉品质与甲状腺激素代谢的影响. 湖北:华中农业大学, 2019.
- [ 10 ] Tettweiler G T, Miron M, Jenkins M, Sonenberg N, Lasko P F. Starvation and oxidative stress resistance in *Drosophila* are mediated through the eIF4E-binding protein, d4E-BP. *Genes & Development*, 2005, 19(16): 1840-1843.
- [ 11 ] 周龙艳;李秀明;付世建. 捕食驯化对胭脂鱼和中华倒刺鲃游泳行为、应激和免疫功能的影响. *水生生物学报*, 2021, 45(3): 1112-1119.
- [ 12 ] 王晶. 环境胁迫对尼罗罗非鱼抗无乳链球菌免疫应答的影响研究. 广东:中山大学, 2019.
- [ 13 ] 许娜. 运动训练对草鱼生长性能和肌肉蛋白质代谢的影响. 湖北:华中农业大学, 2021.
- [ 14 ] 曹科伟. 一株北极小球藻的温度适应性及其优化培养的研究. 江苏:南京农业大学, 2015.
- [ 15 ] Filho D W. Reactive oxygen species, antioxidants and fish mitochondria. *Frontiers in Bioscience-Landmark*, 2007, 12(4): 1229-1237.
- [ 16 ] 李洪娟. 低氧环境下军曹鱼的氧化应激响应与肝脏 miRNA 变化的研究. 广东:广东海洋大学, 2020.
- [ 17 ] Dar S A, Srivastava P P, Varghese T, Nazir M I, Gupta S, Krishna G. Temporal changes in superoxide dismutase, catalase, and heat shock protein 70 gene expression, cortisol and antioxidant enzymes activity of *Labeo rohita* fingerlings subjected to starvation and refeeding. *Gene*, 2019, 692: 94-101.
- [ 18 ] 张春光, 赵亚辉. 胭脂鱼的早期发育. *动物学报*, 2000, 46(4): 437-447.
- [ 19 ] 叶乐, 王海山, 杨超杰, 陈治, 胡清雨. 饥饿对眼斑双锯鱼 (*Amphiprion ocellaris*) 幼鱼形态性状与体质量相关性的影响. *生态学报*, 2020, 41(2): 761-768.
- [ 20 ] 杨亚. 代谢表型和环境类型对中华倒刺鲃集群行为的影响. 重庆:重庆师范大学, 2019.
- [ 21 ] 覃英莲, 柏杨, 彭姜岚, 李秀明, 付世建. 高体鲫幼鱼集群行为研究. *水生态学杂志*, 2017, 38(4): 71-76.
- [ 22 ] Pang X, Shao F, Ding S H, Fu S J, Zhang Y G. Interspecific differences and ecological correlations of energy metabolism traits in freshwater fishes.

- Functional Ecology, 2020, 34(3): 616-630.
- [23] Clotfelter E D, Lapidus S J H, Brown A C. The effects of temperature and dissolved oxygen on antioxidant defences and oxidative damage in the fathead minnow *Pimephales promelas*. *Journal of Fish Biology*, 2013, 82(3): 1086-1092.
- [24] 石小涛, 王博, 王雪, 陈求稳, 白艳勤, 高柱, 涂志英, 刘德富. 胭脂鱼早期发育过程中集群行为的形成. *水产学报*, 2013, 37(5): 705-710.
- [25] 彭韩柳依, 曹振东, 付世建. 饥饿对鲫鱼幼鱼游泳能力的影响. *生态学杂志*, 2014, 33(10): 2756-2760.
- [26] 谢雨欣, 张木子, 黎明, 袁莉霞, 李冰, 陈雨诗, 王日昕. 氮氮胁迫下饥饿和再投喂对黄颡鱼幼鱼生长性能、血液健康、抗氧化能力及免疫应答的影响. *动物营养学报*, 2018, 30(8): 3073-3081.
- [27] Rubio V C, Sánchez E, Cerdá-Reverter J M. Compensatory feeding in the sea bass after fasting and physical stress. *Aquaculture*, 2010, 298(3/4): 332-337.
- [28] 王维政, 曾泽乾, 黄建盛, 郭志雄, 李洪娟, 陈刚. 低氧胁迫对军曹鱼幼鱼抗氧化、免疫能力及能量代谢的影响. *广东海洋大学学报*, 2020, 40(5): 12-18.
- [29] Davis K B, Gaylord T G. Effect of fasting on body composition and responses to stress in sunshine bass. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 2011, 158(1): 30-36.
- [30] 吴瑞敏, 黄杰. 眼镜蛇人蛰前、蛰眠期和出蛰后血清 T<sub>3</sub>、T<sub>4</sub> 和皮质醇与能量物质代谢的关系. *动物学报*, 1990, 3(4): 438-439.
- [31] Bilbo S D, Nelson R J. Photoperiod influences the effects of exercise and food restriction on an antigen-specific immune response in Siberian hamsters. *Endocrinology*, 2004, 145(2): 556-564.
- [32] Philip A M, Jørgensen E H, Maule A G, Vijayan M M. Extended fasting does not affect the liver innate immune response in rainbow trout. *Developmental & Comparative Immunology*, 2018, 79: 67-74.
- [33] Li T T, Qi M T, Gatesoupe F J, Tian D C, Jin W H, Li J, Lin Q, Wu S J, Li H. Adaptation to fasting in crucian carp (*Carassius auratus*): gut microbiota and its correlative relationship with immune function. *Microbial Ecology*, 2019, 78(1): 6-19.