

doi: 10.12131/20180064

## 黑鲷幼鱼力竭运动后代谢酶活性的恢复水平

李丹丹<sup>1,2</sup>, 陈丕茂<sup>1,2</sup>, 朱爱意<sup>2</sup>, 袁华荣<sup>1</sup>, 陈文静<sup>1,2</sup>, 龙鑫玲<sup>1,3</sup>, 王文杰<sup>1,3</sup>

(1. 中国水产科学研究院南海水产研究所, 农业农村部南海渔业资源环境科学观测实验站, 中国水产科学研究院海洋牧场技术重点实验室广东省渔业生态环境重点实验室, 广东省海洋休闲渔业工程技术研究中心, 广东广州 510300; 2. 浙江海洋大学, 浙江舟山 316022; 3. 上海海洋大学, 上海 201306)

**摘要:** 为探讨鱼类力竭运动后代谢水平的恢复情况, 以黑鲷 (*Sparus macrocephalus*) 为实验对象, 用手持续逆流追赶黑鲷幼鱼使其做力竭运动。结果显示, 全长 8.9~9.9 cm 的黑鲷幼鱼力竭运动后, 不同恢复时间血清中的乳酸 (LD) 和血糖 (GLU) 浓度, 以及谷草转氨酶 (AST)、谷丙转氨酶 (ALT)、琥珀脱氢酶 (SDH)、乳酸脱氢酶 (LDH)、丙酮酸激酶 (PK) 和己糖激酶 (HK) 活性均有极显著变化 ( $P<0.01$ )。力竭运动后第 0 小时, 血清中的 LD 和 GLU 浓度及 AST、ALT、SDH、LDH、PK、HK 活性均显著升高 ( $P<0.05$ ); 力竭运动后第 4 小时, 血清中的 LD 浓度基本恢复到对照组水平 ( $P>0.05$ ); 力竭运动后第 16 小时, 血清中的 SDH、HK、PK、AST 活性恢复至对照组水平 ( $P>0.05$ ), 但血清中的 GLU 浓度及 LDH、ALT 活性水平仍低于对照组 ( $P<0.05$ ), 这表明黑鲷幼鱼力竭运动后第 0 到第 4 小时处于应激反应中, 其无氧代谢水平得到短时提高。从血乳酸恢复水平上看, 黑鲷幼鱼在首次力竭运动后 4 h 可再次进行力竭运动, 但血糖检测结果显示此后无氧代谢耐力降低。

**关键词:** 黑鲷; 代谢酶活性; 力竭运动; 恢复水平

中图分类号: S 917.4

文献标志码: A

文章编号: 2095-0780-(2018)06-0059-07

## Recovery level of metabolic enzymes in juvenile black sea bream (*Sparus macrocephalus*) after exhaustive exercise

LI Dandan<sup>1,2</sup>, CHEN Pimao<sup>1,2</sup>, ZHU Aiyi<sup>2</sup>, YUAN Huarong<sup>1</sup>, CHEN Wenjing<sup>1,2</sup>, LONG Xinling<sup>1,3</sup>, WANG Wenjie<sup>1,3</sup>

(1. Scientific Observing and Experimental Station of South China Sea Fishery Resources and Environment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; Key Laboratory of Marine Ranching Technology, Chinese Academy of Fishery Sciences; Guangdong Provincial Key Laboratory of Fishery Ecology and Environment; Guangdong Engineering Technology Research Center of Marine Recreational Fishery; South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China; 2. Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China; 3. Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** Taking black sea bream (*Sparus macrocephalus*) as object, we investigated its recovery level of immune and metabolic enzymes in serum after exhaustive exercise. Results show significant change in the LD and GLU concentrations as well as the activities of AST, ALT, SDH, LDH, PK and HK for juvenile black sea bream (length of 8.9–9.9 cm) with different recovery time after exhaustive exercise ( $P<0.01$ ). At 0<sup>th</sup> hour after exhaustive exercise, the activities of LD, GLU, AST, ALT, SDH, LDH, PK and HK in-

收稿日期: 2018-04-10; 修回日期: 2018-06-26

资助项目: 公益性行业 (农业) 科研专项经费项目 (201003068); 国家科技支撑计划项目 (2012BAD18B02); 中国水产科学研究院基本科研业务费专项资金项目 (2016HY-ZD01); 广东省 2017 年中央海洋经济物种增殖放流效果检验 (2017-C01); 深圳市科技计划项目 (JSGG20141015154342147)

作者简介: 李丹丹 (1991—), 女, 硕士研究生, 从事渔业技术研究。E-mail: 1601843585@qq.com

通信作者: 陈丕茂 (1969—), 男, 研究员, 从事渔业资源保护与利用研究。E-mail: chenpm@scsfri.ac.cn

creased significantly ( $P < 0.05$ ). At 4<sup>th</sup> hour after exhaustive exercise, the LD concentration in the serum almost recovered to the control group's level ( $P > 0.05$ ). At 16<sup>th</sup> hour, the activities of SDH, HK, PK and AST recovered to the control group's level ( $P > 0.05$ ) while the GLU concentration and ALT activity were still lower than the control group's level ( $P < 0.05$ ). It is revealed that exhaustive exercise enhanced the oxidation resistance and aerobic metabolism of juvenile black sea bream within 4-hour stress response of post-exercise, and the fish could do exhaustive exercise again after 4 h, but the blood glucose test shows that the anaerobic metabolism tolerance decreased thereafter.

**Key words:** black sea bream; metabolic enzymes activities; exhaustive exercise; recovery level

鱼类的游泳运动是维持其捕食、逃避敌害、洄游和生殖等生存活动的根本<sup>[1]</sup>。其中,野生鱼类在捕食、逃逸、穿越急流、洄游等,以及在养殖或增殖放流的捕捞和运输等过程中,通常做爆发性运动,这会导致乳酸(LD)的大量累积和糖原的迅速消耗,属于无氧代谢运动,也称力竭运动或力竭性运动,即一种由白肌糖酵解代谢提供能量,以力竭状态作为运动终点的高强度的游泳运动方式<sup>[2-4]</sup>。相较于哺乳动物,鱼类力竭运动后的代谢紊乱更大,恢复需要的时间更长,因此以鱼类作为模型进行探讨有利于其恢复过程及其调节机制<sup>[5]</sup>的研究。李黎等<sup>[6]</sup>对鲢(*Silurus asotus*)幼鱼力竭运动后的肌肉、血液和肝脏3种组织中乳酸、糖原和葡萄糖的浓度水平进行研究,发现鲢幼鱼力竭运动后肌乳酸和血乳酸浓度均快速上升且即刻达到峰值,而肝乳酸的峰值却出现在运动后1 h。朱晏莘等<sup>[7]</sup>发现瓦氏黄颡鱼(*Pelteobagrus vachelli*)力竭运动后肌组织的乳酸迅速上升同时血糖快速下降。彭姜岚等<sup>[8]</sup>将鲢放入环形水道内,用手不断追逐使其被迫做持续5 min的力竭运动,力竭运动后其耗氧率( $VO_2$ )峰值在第2分钟出现,随后逐渐恢复到稳定状态,表明鱼类体质量的增加可能会使有氧代谢适应性的变化程度降低,而无氧代谢能力却可能有较大提高。He等<sup>[9]</sup>发现鲤(*Cyprinus carpio*)在力竭运动训练后,肌肉中乳酸清除率提高但肝中糖原极度降低。Karlsson-Drangsholt等<sup>[10]</sup>对野生黑线鳕(*Melanogrammus aeglefinus*)进行力竭性游泳训练发现,训练后其血液中血糖和乳酸水平均高于对照组,直至第6小时仍未能恢复。鱼类力竭运动后其恢复速度和恢复程度与其成活率密切相关,然而关于黑鲷(*Sparus inacrocephalus*)力竭运动后代谢能力的恢复情况尚未见报道。

黑鲷隶属于鲈形目、鲷科、鲷属,因其具有广温性、广盐性、杂食性、抗病能力强、生长快且不作长距离洄游等诸多适合养殖的生物学特性,不但

是沿海增殖放流的优良品种之一<sup>[11]</sup>,也是继罗非鱼(*Oreochromis spp.*)之后联合国粮农组织(FAO)向全世界推广的优良品种之一<sup>[12]</sup>。本研究以黑鲷幼鱼为实验对象,研究其力竭运动后在机能恢复期间相关代谢能力的变化,以期为黑鲷养殖生产及增殖放流提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

实验黑鲷幼鱼购于广东大亚湾南澳养殖场,选取128尾健康活泼的幼鱼,全长为8.9~9.9 cm [平均为(9.5±0.3) cm],体质量为15.8~26.3 g [平均为(21.7±2.8) g]。暂养于可控温循环水池中7 d,暂养水体为过滤海水[(26.7±0.5) °C,盐度27, pH 8.04,溶氧(8.8±0.6) mg·L<sup>-1</sup>]。每天8:00投喂一次饵料(金鲷料1号),每天换水50%。力竭运动实验前禁食24 h,整个实验过程中禁食。力竭运动实验装置为自行设计的环形水道(外径为1 004 mm,内置隔离装置直径为604 mm,内置隔离装置高为395 mm,容量为500 L)。

### 1.2 实验方法

实验黑鲷幼鱼禁食24 h后,随机从暂养池选取16尾黑鲷鱼苗为对照组,分2个平行。随机从暂养池选取112尾为处理组,分7组,每组16尾。将处理组分7批放入环形水道,每批8尾,实验水体流速为0.47 m·s<sup>-1</sup>,用手不断逆流追赶惊吓实验鱼,使鱼做持续力竭运动,观察到其尾部摆动频率明显变慢,机体失去平衡,尾部肌肉僵硬,直至再追逐时不再有明显反应为止。然后立即取出16尾放在冰盘中,用5#无菌注射器在尾静脉取血,此为力竭运动后第0小时的样品。血样装入无菌的1.5 mL离心管,室温静置1.5 h,置于4 °C冷藏8 h后,在4 °C下用高速台式冷冻离心机(TGL-20bR) 3 500 r·min<sup>-1</sup>离心10 min,所得血清置于-80 °C超低温冰箱冻存待测。其他样品的取样方

式为: 将其他力竭运动后的处理组放入暂养池网箱中 [(26.7±0.5) °C, 盐度 27, pH 8.04, 溶氧 (8.8±0.6) mg·L<sup>-1</sup>], 分别在第 0.5、第 1、第 2、第 4、第 8 和第 16 小时取样。对照组为随机从暂养池中选取未经力竭运动实验的黑鲟鱼苗 16 尾, 用 5# 无菌注射器在尾静脉取血。取血时, 用冰水混合物浸后的毛巾轻轻辅助以减少样品鱼的应激反应。取血过程不超过 1 min。

血清中 LD 水平、血糖 (GLU) 水平、谷草转氨酶 (AST) 活性、谷丙转氨酶 (ALT) 活性、琥珀脱氢酶 (SDH) 活性、乳酸脱氢酶 (LDH) 活性、丙酮酸激酶 (PK) 活性和己糖激酶 (HK) 活性, 均采用南京建成生物工程试剂盒测定。

### 1.3 数据处理

实验数据经 Excel 2010 处理后, 以急性力竭运动后恢复时间, 用 SPSS 19.0 软件进行单因素方差分析 (One-Way ANOVA), 如果分析结果出现组间极显著 ( $P<0.01$ ) 或显著 ( $P<0.05$ ) 差异, 则用邓肯 (Duncan) 分析进行组间差异显著性检验。数据以“平均值±标准差 ( $\bar{X}\pm SD$ )”表示。

## 2 结果

### 2.1 力竭运动后不同恢复时间血清中代谢相关酶活性

单因素方差分析显示, 黑鲟幼鱼力竭运动后不同恢复时间对血清中 LD 和 GLU 浓度, 以及 AST、ALT、SDH、LDH、PK 和 HK 活性均有极显著影响 ( $P<0.01$ , 表 1)。

表1 黑鲟幼鱼力竭运动后不同恢复时间下血清中代谢指标单因素分析结果

Tab.1 Analysis of metabolic indices in serum after exhaustive exercise by One-Way ANOVA

因变量 dependent variable	自由度 df	均方 mean square	F	P
LD浓度 LD concentration	7	4.129	20.802	0.000
GLU浓度 GLU concentration	7	3.840	21.465	0.000
AST活性 AST activity	7	37.964	11.280	0.000
ALT活性 ALT activity	7	2.393	33.610	0.000
LDH活性 LDH activity	7	899 051.171	143.657	0.000
SDH活性 SDH activity	7	177.810	35.268	0.000
PK活性 PK activity	7	86.672	6.404	0.001
HK活性 HK activity	7	11 567.016	16.575	0.000

### 2.2 力竭运动后血清中代谢相关指标的变化

2.2.1 血清中 LD 浓度 黑鲟幼鱼力竭运动后第 0 小时, 处理组血清中 LD 浓度显著高于对照组 ( $P<0.05$ ); 力竭运动后的第 0.5 小时升至峰值 [(5.90±0.66) mmol·L<sup>-1</sup>] ( $P<0.05$ ), 而后缓缓下降; 力竭运动后第 4 小时与对照组基本持平 ( $P>0.05$ ), 且第 8 和第 16 小时的 LD 浓度水平无显著差异 ( $P>0.05$ , 图 1-A)。

2.2.2 血清中 GLU 浓度 黑鲟幼鱼力竭运动后第 0 小时, 血清中 GLU 浓度略高于对照组 ( $P<0.05$ ); 力竭运动后的第 0.5、第 1 和第 2 小时处理组血清中 GLU 呈规律性降低; 力竭运动后的第 8 小时降至最低 [(2.41±0.42) mmol·L<sup>-1</sup>] ( $P<0.05$ ), 而在第 16 小时稍有恢复趋势 ( $P>0.05$ , 图 1-B)。

2.2.3 血清中 LDH 活性 黑鲟幼鱼力竭运动后第 0 小时, 处理组血清中 LDH 活性迅速升高 ( $P<0.05$ ); 而在第 0.5 小时快速下降 ( $P<0.05$ ); 在力竭运动后的第 1、第 2、第 4、第 8 和第 16 小时呈缓慢下降趋势, 其中在第 16 小时降至最低 [(1 325.72±42.67) U·L<sup>-1</sup>] ( $P<0.05$ , 图 1-C)。

2.2.4 血清中 SDH 活性 黑鲟幼鱼力竭运动后, 处理组的不同恢复时间血清中 SDH 活性先缓慢上升后恢复至对照组水平。首先, 力竭运动后第 0 小时, 处理组血清中 SDH 活性明显增强 ( $P<0.05$ ); 在第 0.5 小时达最高 [(126.67±1.54) U·m L<sup>-1</sup>]; 随后的第 1、第 2、第 4 和第 8 小时逐渐下降; 在力竭运动后的第 16 小时恢复至对照组水平 ( $P>0.05$ , 图 1-D)。

2.2.5 血清中 AST 活性 黑鲟幼鱼力竭运动后, 处理组不同恢复时间血清中 AST 活性呈小幅度波动趋势。其中, 力竭运动后第 0 小时, 处理组血清中 AST 活性明显高于对照组 ( $P<0.05$ ); 力竭运动后的第 0.5、第 1、第 2、第 4 和第 8 小时逐渐降低; 而在力竭运动后的第 16 小时出现回升趋势 (图 1-E)。

2.2.6 血清中 ALT 活性 黑鲟幼鱼力竭运动后, 处理组不同恢复时间血清中 ALT 活性先升后降, 整体维持较低水平。力竭运动后第 0 小时, 处理组血清中 ALT 活性明显高于对照组 ( $P<0.05$ ); 力竭运动后的第 0.5 小时迅速下降 ( $P<0.05$ ); 而力竭运动后的第 1、第 2、第 4、第 8 和第 16 小时未

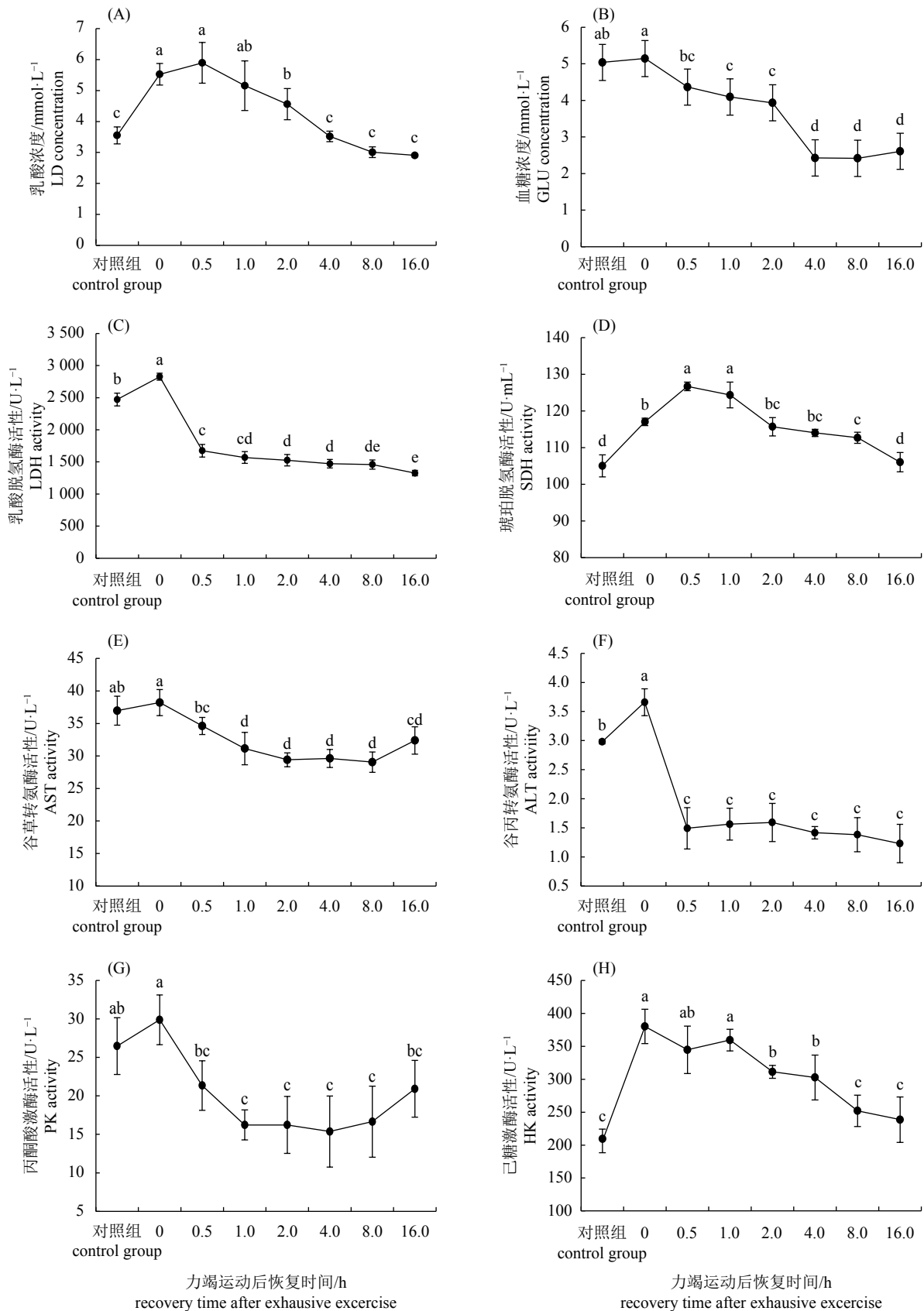


图1 黑鲷幼鱼力竭运动后血清中代谢相关指标的变化

不同小写字母表示不同恢复时间指标有显著性差异 ( $P < 0.05$ )

Fig.1 Indices of metabolic enzymes activities in serum after exhaustive exercise

Different lowercase letters indicate significant difference in different recovery time after exhaustive exercise ( $P < 0.05$ ).



有显著变化且维持较低水平 ( $P>0.05$ , 图 1-F)。

**2.2.7 血清中 PK 活性** 整体上看, 黑鲷幼鱼力竭运动后, 处理组不同恢复时间血清中 PK 活性呈小幅度波动趋势。力竭运动后第 0 小时, 处理组血清中 PK 活性明显高于对照组 ( $P<0.05$ ); 而在力竭运动的第 0.5 小时迅速降低且显著低于对照组 ( $P<0.05$ ); 在力竭运动后的第 1、第 2、第 4 和第 8 小时保持了较低水平 ( $P>0.05$ ); 至第 16 小时出现恢复趋势, 但略低于对照组 ( $P<0.05$ , 图 1-G)。

**2.2.8 血清中 HK 活性** 黑鲷幼鱼力竭运动后, 处理组不同恢复时间血清中 HK 活性先迅速升高后缓缓下降, 且在实验时间内恢复至对照组水平。力竭运动后第 0 小时, 处理组血清中 HK 活性迅速升高 ( $P<0.05$ ); 随后在第 0.5、第 1、第 2 和第 4 小时有微小波动; 而在力竭运动后第 8 小时已恢复至对照组水平 ( $P>0.05$ ), 且在第 16 小时也与对照组水平相近 ( $P>0.05$ , 图 1-H)。

### 3 讨论

#### 3.1 黑鲷幼鱼力竭运动后血乳酸浓度的变化

鱼类对组织缺氧有一种普遍的适应机制, 即以无氧代谢的方式代替有氧代谢产能。在此过程中由于没有氧气作为最终电子受体, 体内葡萄糖在代谢过程中产生的中间产物乳酸会被累积<sup>[13]</sup>。研究证明, 鱼类乳酸的产生和清除主要在肌组织<sup>[14]</sup>。诸多研究将力竭运动训练作为揭示机体无氧代谢机制的重要实验方法, 而乳酸的相关参数则是反映机体无氧代谢能力的一个重要指标<sup>[15]</sup>。另外, Moraes 等<sup>[16]</sup>根据力竭运动后血乳酸是否上升将鱼类划分为“乳酸非释放 (lactate non-releasers)”和“乳酸释放 (lactate releasers)” 2 种类型。许多鱼类力竭运动后乳酸浓度立刻升至峰值, 其峰值水平是衡量该鱼种无氧运动能力的重要指标<sup>[7]</sup>。本研究中, 黑鲷幼鱼力竭运动后血乳酸浓度迅速上升, 力竭运动后的第 0.5 小时升至峰值  $[(5.90\pm 0.66) \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}]$ , 推测是因为血乳酸相对肌乳酸有一定滞后性。乳酸透过肌纤维细胞膜进入血液, 稀释了局部肌乳酸浓度, 使黑鲷避免了高浓度乳酸可能造成的伤害, 为肝脏等其他组织清除乳酸提供了可能, 这表明黑鲷属于“乳酸释放”型鱼类, 该“乳酸泄漏”现象有利于提高黑鲷的无氧代谢能力和生存适合度<sup>[6,16]</sup>。此外, 本研究中黑鲷血清中乳酸峰值水平高于鲈幼鱼, 力竭运动后第 4 小时, 黑鲷幼鱼血清中的乳酸浓度基

本恢复至对照组水平, 这与鲈相同<sup>[6]</sup>, 说明黑鲷在首次力竭的第 4 小时后, 可再次做力竭运动。但鲈 (*Katsuwonus pelamis*) 的血乳酸清除所需时间更短, 这是由于黑鲷和鲈都喜栖于沙泥底部和礁石, 黑鲷是不做长距离洄游的沿岸性鱼类, 而鲈是有季节洄游的大洋性鱼类, 为捕食或逃避敌害需经常做无氧运动且无氧代谢速度快<sup>[17]</sup>。

#### 3.2 黑鲷幼鱼力竭运动后血糖浓度的变化

Franklin 等<sup>[13]</sup>认为, 鱼类肌乳酸的清除需要通过 3 种途径: 合成肌糖原、合成葡萄糖或被彻底氧化并提供能量。而血乳酸代谢则是通过氧化, 如在心脏和肝等场所氧化供能<sup>[26-27]</sup>。已有研究显示, 肌乳酸下降的同时糖原和葡萄糖浓度会有不同程度的上升, 因此乳酸清除的主要途径是合成糖原<sup>[18]</sup>, 但血乳酸会被肌肉重新摄取, 主要被用于糖原再合成过程中的氧化供能, 但再次摄取的血乳酸和肌乳酸的代谢在肌肉中有分隔现象<sup>[1]</sup>。本研究中, 黑鲷幼鱼血清中血糖浓度在力竭运动后第 0 小时略有上升, 其后一直低于对照组水平, 推测黑鲷幼鱼力竭运动后血清中的乳酸清除主要是被其他有氧代谢组织 (如心脏、红肌) 氧化<sup>[5]</sup>。同时, 黑鲷幼鱼在力竭运动后第 4 小时血糖浓度降至最低, 至第 16 小时血清中血糖维持较低水平, 可能是因为黑鲷喜躲在水底礁石后方伏击捕食, 这对能量的快速储存需要较少。血糖水平低下可导致中枢供能不足, 并引发中枢疲劳, 因此推测黑鲷幼鱼力竭运动后第 4 至第 16 小时, 可能出现严重的代谢疲劳现象<sup>[19]</sup>, 且未能在本实验恢复期恢复, 说明虽然黑鲷在力竭运动后第 4 小时可再次做力竭运动, 但其无氧运动能力会降低, 力竭状态出现更快。

#### 3.3 黑鲷幼鱼力竭运动后血清中相关代谢酶活性的变化

研究表明, 力竭运动训练还会对鱼体有氧或无氧代谢酶活性产生显著影响, 如无氧运动训练后虹鳟 (*Oncorhynchus mykiss*) 肌肉糖酵解酶系中 PK 活性增加<sup>[20]</sup>, 斑马鱼 (*Barchydanio rerio* var) LDH 活性显著增强, 乌鳢 (*Channa argus*) 红肌中 SDH 水平显著增加<sup>[17]</sup>等。本研究中, 黑鲷幼鱼力竭运动后第 0 小时, 血清中 LDH、HK、PK 和 SDH 活性也显著升高。HK 和 PK 均为无氧糖酵解过程中的限速酶和调控酶, 而 LDH 是衡量无氧酵解能力的重要指标, 是无氧代谢终产物乳酸的直接催化酶。LDH 作为无氧代谢的标志酶, 可使 PK 和 LD 之间

相互转化,其活性高低在一定程度上反映了无氧代谢能力的高低<sup>[21]</sup>。SDH 则是有氧代谢中唯一嵌在线粒体内膜上的酶,催化琥珀酸氧化生成延胡索酸释放 ATP<sup>[22]</sup>。本研究结果显示,黑鲟幼鱼力竭运动后第 0 小时,血清中 HK、PK 和 LDH 活性显著升高,说明其限速酶在糖酵解过程中有效地调控了糖酵解速度,使其产生了适应性变化。力竭运动训练促使糖酵解能力加强,同时使得细胞内氧分压降低,LDH 合成加快,活力增强<sup>[23]</sup>,而且有研究表明,爆发式游泳后鳙 (*Aristichthys nobilis*) 的有氧代谢能力短期内会降低,说明该阶段黑鲟的代谢方式为无氧代谢<sup>[24]</sup>。本研究结果表明,在第 0 小时往后的恢复时间中,LDH 活性不断下降且低于对照组水平,而 SDH 活性变化幅度较小且略高于对照组水平,说明黑鲟幼鱼在力竭运动后的第 0.5 至第 16 小时的有氧代谢能力得到了提高。表明低氧条件下,有氧代谢受到抑制而无氧代谢增强;恢复后期有氧代谢恢复,无氧代谢受到抑制<sup>[25]</sup>,推测这也与黑鲟生活习性相关,力竭运动训练后有洄游习性的虹鳟,无氧代谢能力显著升高,而黑鲟和瓦氏黄颡鱼 (*Pseudobagrus vachellii*)<sup>[25]</sup>、南方鲶 (*Peltebagrus vachelli*)<sup>[26]</sup> 等喜栖息于沙泥无需洄游鱼类的有氧代谢能力升高,无氧代谢无显著性变化。

AST 和 ALT 是氨基酸代谢中的 2 个关键酶,其活性强弱不仅反映了氨基酸代谢程度的强弱,也可显示肝功能是否正常<sup>[27-28]</sup>。转氨酶 (AST 和 ALT) 主要作用是催化氨基酸生成酮酸,进而保持机体稳态<sup>[29]</sup>。正常情况下,ALT 和 AST 主要存在于细胞内,血清中极少;一般情况下,各组织器官中以心肌细胞和肝细胞内的活性最高,但当这些组织细胞受损时,便可能有大量的 AST 和 ALT 从细胞内进入血液,使血清中的 2 种转氨酶活性升高<sup>[30]</sup>。因此,血清中转氨酶活性的变化,是目前判断肝脏等组织器官功能状况的最具特异性和应用最广泛的指标<sup>[31]</sup>。张全江等<sup>[32]</sup> 研究发现,小鼠 (*Mus musculus*) 在力竭运动后其血清中的 AST 和 ALT 活性明显升高;王转丁等<sup>[33]</sup> 发现,小鼠进行不同强度游泳后血清中 AST 和 ALT 活性也明显上升。本研究结果与以上实验结果一致,黑鲟幼鱼很快恢复且至实验时间结束 AST 和 ALT 活性仍保持低于对照组水平,说明其力竭运动后心肌和肝脏细胞受到一定的损伤,但机体代谢能够及时有效地恢复。

## 4 小结

黑鲟幼鱼力竭运动后,不同恢复时间血清中相关代谢因子均存在极显著差异。黑鲟幼鱼力竭运动后处于应激反应中,其无氧和有氧代谢能力得以短时增强。在力竭运动后的第 4 小时,黑鲟鱼苗已出现代谢疲劳现象,至力竭运动后的第 16 小时仍未能完全恢复;从乳酸水平上看,力竭运动后第 4 小时后可再次进行力竭运动,但血糖检测结果显示,再次进行力竭运动的耐力下降;从氨基酸代谢水平上看,黑鲟幼鱼力竭运动后心肌和肝脏有一定损伤,但能够迅速恢复。综上,在实际的黑鲟养殖生产或增殖放流过程中,应尽量避免或减少短时间内的多次捕捞、追赶等活动,以保障黑鲟健康,获得更好的放养成活率。

## 参考文献:

- [1] 刘明镜. 无氧运动诱导的斑马鱼代谢及相关酶适应性变化[D]. 重庆: 西南大学, 2010: 7-17.
- [2] BOUTILIER R G, FERGUSON R A, HENRY R P, et al. Exhaustive exercise in the sea lamprey (*Petromyzon marinus*): relationship between anaerobic metabolism and intracellular acid-base balance[J]. *J Exp Biol*, 1993(1): 71-88.
- [3] BALDWIN J, SEYMOUR R S, WEBB G J W. Scaling of anaerobic metabolism during exercise in the estuarine crocodile (*Crocodylus porosus*)[J]. *Comp Biochem Phys A*, 1995, 112(2): 285-293.
- [4] 于丽娟, 李秀明, 易建华, 等. 力竭追赶训练对中华倒刺鲃自由基清除能力的影响[J]. *淡水渔业*, 2013, 43(3): 28-32.
- [5] 李可贵. 摄食、力竭性运动及其交互作用对鲈鱼幼鱼代谢及酸碱状态的影响[D]. 重庆: 重庆师范大学, 2010: 4-6.
- [6] 李黎, 曹振东, 付世建. 力竭性运动后鲈鱼幼鱼乳酸、糖原和葡萄糖水平的变动[J]. *水生生物学报*, 2007, 31(6): 880-885.
- [7] 朱晏苹, 曾振东, 付世建. 力竭性运动后瓦氏黄颡鱼幼鱼乳酸和血糖变化[J]. *重庆师范大学学报(自然科学版)*, 2010, 27(2): 14-17.
- [8] 彭姜岚, 曹振东, 付世建. 鲈鱼力竭性运动后的过量耗氧及其体重的影响[J]. *水生生物学报*, 2008, 32(3): 380-386.
- [9] HE W, XIA W, CAO Z D, et al. The effect of prolonged exercise training on swimming performance and the underlying biochemical mechanisms in juvenile common carp (*Cyprinus carpio*)[J]. *Comp Biochem Physiol A*, 2013, 166(2): 308-305.
- [10] KARLSSON-DRANGSHOLT A, SVALHEIM R A, AAS-HANSEN Ø, et al. Recovery from exhaustive swimming and its effect on fillet quality in haddock (*Melanogrammus aeglefinus*)[J]. *Fish Res*, 2018, 197(2): 96-104.
- [11] 龙章强. 黑鲟 (*Acanthopagrus schlegelii*) 幼鱼对氨氮胁迫的生理

- 响应及其维生素 C 的营养需求研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2008: 1-15.
- [12] 曹建久, 龚建国, 刘坤. 淡水黑鲟生物学特性及池塘健康养殖技术[J]. 水产养殖, 2008, 29(6): 19-20.
- [13] FRANKLIN C E, JOHNSTON I A, BATTY R S, et al. Metabolic recovery in herring larvae following strenuous activity[J]. J Fish Biol, 1996, 48(2): 207-216.
- [14] SHARPE R L, MILLIGAN C L. Lactate efflux from sarcolemmal vesicles isolated from rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* white muscle is via simple diffusion[J]. J Exp Biol, 2003, 206 (Pt 3): 543.
- [15] VIRANI N A, REES B B. Oxygen consumption, blood lactate and inter-individual variation in the gulf killifish, *Fundulus grandis*, during hypoxia and recovery[J]. Comp Biochem Physiol A, 2000, 126(3): 397-405.
- [16] MORAES G, CHOUDHURI J V, SOUZA R H, et al. Metabolic effects of exercise in the golden fish *Salminus maxillosus* "dourado" (Valenciennes, 1849)[J]. Braz J Biol, 2004, 64(3B): 1519-6984.
- [17] 刘明镜, 于丽娟, 皇甫加清, 等. 无氧运动诱导的斑马鱼代谢及适应性变化[J]. 水生生物学报, 2013, 37(6): 1153-1157.
- [18] WANG Y, HEIGENHAUSER G J, WOOD C M. Integrated responses to exhaustive exercise and recovery in rainbow trout white muscle: acid-base, phosphogen, carbohydrate, lipid, ammonia, fluid volume and electrolyte metabolism[J]. J Exp Biol, 1994, 195(1): 227-258.
- [19] 李黎. 力竭性运动后鲈鱼幼鱼生理生化指标的变动[D]. 重庆: 重庆师范大学, 2006: 2-8.
- [20] PETERSEN J K, PETERSEN G I. Tolerance, behaviour and oxygen consumption in the sand goby, *Pomatoschistus minutus* (Pallas), exposed to hypoxia[J]. J Fish Biol, 2010, 37(6): 921-933.
- [21] VIRU M. Differences in effects of various training regimens on metabolism of skeletal muscles[J]. J Sport Med Phys Fit, 1994, 34(3): 217-227.
- [22] COHEN A, NUGEGODA D, GAGNON M M. Metabolic responses of fish following exposure to two different oil spill remediation techniques[J]. Ecotoxi Environ Saf, 2001, 48(3): 306-310.
- [23] 管越强, 李利, 王慧春, 等. 低氧胁迫对日本沼虾呼吸代谢和抗氧化能力的影响[J]. 河北大学学报(自然科学版), 2010, 30(3): 301-306.
- [24] 刘慧杰, 王从锋, 刘德富, 等. 不同运动状态下鲮幼鱼的游泳特性研究[J]. 南方水产科学, 2017, 13(2): 85-92.
- [25] KIEFFER J D. Limits to exhaustive exercise in fish[J]. Comp Biochem Physiol A, 2000, 126(2): 161-179.
- [26] LIU Y, CAO Z D, FU S J, et al. The effect of exhaustive chasing training and detraining on swimming performance in juvenile darkbarbel catfish (*Peltebagrus vachelli*)[J]. J Comp Phys B, 2009, 179(7): 847-855.
- [27] 王桂芹, 李子平, 牛小天, 等. 饲料能量和维生素 B<sub>6</sub> 对乌鳢生长和蛋白质代谢酶活性的影响[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2011, 50(4): 96-99.
- [28] YAN Q, XIE S, ZHU X, et al. Dietary methionine requirement for juvenile rockfish, *Sebastes schlegelii*[J]. Aquacult Nutr, 2007, 13(3): 163-169.
- [29] BRÄER S. Amino acid transport across mammalian intestinal and renal epithelia[J]. Physiol Rev, 2008, 88(1): 249-286.
- [30] 唐龙. 饲料添加光合细菌对卵形鲳鲹生长性能、肝脏、血清指标的影响及其各部位蛋白质营养价值评价[D]. 南宁: 广西大学, 2014: 1-8.
- [31] 陈晨, 黄峰, 舒秋艳, 等. 共轭亚油酸对草鱼生长、肌肉成分、谷草转氨酶及谷丙转氨酶活性的影响[J]. 水生生物学报, 2010, 34(3): 647-651.
- [32] 张全江, 李秋霞, 熊正英. 耐力训练后再力竭运动对小鼠血液部分生化指标的影响[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2004, 32(1): 98-101.
- [33] 王转丁, 杨晶晶, 李刘安, 等. 不同强度游泳应激对小鼠血清 ALT、AST 和 ALP 活性的影响[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2013, 11(21): 164-166.