

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20190910003

http://www.yykxjz.cn/

陈梓聪, 陈丕茂, 袁华荣, 冯雪, 佟飞, 陈文静, 龙鑫玲, 张皓铭. 恢复时间对力竭训练后的斑节对虾幼虾的抗氧化功能的影响. 渔业科学进展, 2020, 41(6): 58–65

Chen ZC, Chen PM, Yuan HR, Feng X, Tong F, Chen WJ, Long XL, Zhang HM. Effect of recovery time on antioxidant capacity of juvenile *Penaeus monodon* after exhaustive exercise. Progress in Fishery Sciences, 2020, 41(6): 58–65

# 恢复时间对力竭训练后的斑节对虾幼虾 的抗氧化功能的影响\*

陈梓聪<sup>1,2</sup> 陈丕茂<sup>1,2①</sup> 袁华荣<sup>1</sup> 冯雪<sup>1</sup>  
佟飞<sup>1</sup> 陈文静<sup>1</sup> 龙鑫玲<sup>1,2</sup> 张皓铭<sup>1,2</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 广州 510300; 2. 上海海洋大学海洋科学学院 上海 201306)

**摘要** 力竭运动常出现于虾类养殖过程和野生环境中,斑节对虾(*Penaeus monodon*)是中国沿海重要养殖和增殖放流品种,但尚无关于斑节对虾力竭运动后生理恢复过程报道。该研究以斑节对虾幼虾为实验对象,在室内水槽使用抄网追逐斑节对虾幼虾,模拟迫使其进行力竭运动实验,探究其力竭运动后抗氧化能力恢复过程。结果显示,力竭运动后 0 h,幼虾体内的超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)和谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)的活性,总抗氧化能力(T-AOC)和丙二醛(MDA)含量,均与对照组无显著差异;1~12 h, SOD、CAT、POD 活性、MDA 含量和 T-AOC 持续下降, GSH-Px 活性无显著变化;24 h, SOD、CAT 和 POD 活性显著降低, GSH-Px 活性、MDA 含量和 T-AOC 显著升高;72 h, SOD 和 CAT 活性仍显著低于对照组, GSH-Px、POD 活性和 MDA 含量恢复至对照组, T-AOC 显著高于对照组。在力竭运动过程中,幼虾的酶促抗氧化系统未被激活;幼虾的抗氧化能力在力竭运动后的 24 h 内较低,不宜再次受刺激;幼虾的抗氧化能力在力竭后 24 h 后显著上升,并保持较长时间。

**关键词** 斑节对虾; 抗氧化能力; 力竭运动; 恢复过程

**中图分类号** S917.4 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2020)06-0058-08

力竭运动作为体现游泳能力的标志和特殊的游泳状态,常见于野生水生动物在进行捕食、逃避敌害攻击、穿越激流等场景中。在养殖环境下,常见于水

生动物在抢食、逃避捕捞、高密度暂养运输等环境中(Kieffer, 2000、2010)。对虾类运动能力较强,受到攻击或刺激时强烈收缩腹部肌肉,尾扇张开拨水,迅速

\* 中国水产科学研究院基本科研业务费专项(2016HY-ZD01)和 2019 年农业资源及生态保护资金补助资金(增殖放流)项目(粤农农计[2019]3 号)共同资助 [This work was supported by Special Project of Basic Scientific Research Operating Expenses of Chinese Academy of Fishery Sciences (2016HY-ZD01), and 2019 Agricultural Resources and Ecological Protection Fund Subsidies (Proliferation and Release) Project (Guangdong Nongnongji [2019] No.3)]. 陈梓聪, E-mail: 462290205@qq.com

① 通讯作者: 陈丕茂, 研究员, E-mail: chenpm@scsfri.ac.cn

收稿日期: 2019-09-10, 收修改稿日期: 2019-10-11

后跳, 逃离危险水域(Dall *et al.*, 1990; 张沛东, 2006)。研究表明, 对鱼虾进行适量运动训练可使其抗氧化能力提升, 但过度运动会削弱机体的抗氧化能力, 原因是在力竭运动后一段时间内, 有氧呼吸强度显著升高, 力竭运动积累的乳酸和有氧代谢产生的自由基等对组织器官形成胁迫, 导致机体免疫力下降, 体内抗氧化平衡被破坏(McKenzie *et al.*, 2012; 虞顺年等, 2018; 张海恩等, 2019)。大西洋鲑(*Salmo salar*)遭遇拥挤胁迫时, 肌肉中的乳酸含量显著上升, 糖原含量显著降低, 皮质醇含量上升, 出现机体呼吸代谢增强、细胞受损的迹象(Skjervold *et al.*, 2001); 黑鲷(*Acanthopagrus schlegelii*)在高密度运输过程中, 呼吸代谢水平和 SOD 活性均显著上升(李丹丹等, 2018a)。高密度养殖的斑节对虾(*Penaeus monodon*)与较低密度养殖组相比, 出现耗氧率升高、生长性能低下的现象(Anand *et al.*, 2019)。对虾类属于较为低等的无脊椎动物, 进入力竭状态后相较于脊椎动物, 需要消耗更多能量以调整紊乱的生理代谢状态, 且需要更长时间恢复到生理平衡状态(Berry *et al.*, 2019; 段妍, 2012; 于晓明, 2009)。

斑节对虾是中国沿海重要养殖虾类和增殖放流品种(吴琴瑟, 2010; 邢诒炫等, 2014)。斑节对虾体内缺少特异性免疫应答反应, 在陷入生理紊乱状态时, 非特异性免疫能力下降, 突然死亡率和疾病感染率升高, 影响养殖或增殖放流的效果(Ratanapo *et al.*, 1992; 陈国福等, 2004)。因此, 研究斑节对虾幼虾在力竭运动后的抗氧化能力恢复过程, 对避免幼虾进入力竭状态和在幼虾进入力竭状态时的处理方法有重要指导意义, 但目前尚未见相关的报道。本研究模拟斑节对虾在生活水体中避敌、抢食等力竭运动情况, 探究其在力竭运动后, 体内相关抗氧化能力指标随恢复时间延长的变动与恢复过程, 以期对斑节对虾养殖生产及增殖放流活动期间幼虾的管护提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

实验使用的斑节对虾幼苗为中国水产科学研究院南海水产研究所深圳基地自行繁育的养殖虾苗, 标粗后, 挑选约1000尾规格相近、体长为(3.0±0.4) cm、体重为(0.20±0.07) g的幼虾进行力竭运动胁迫实验。恢复实验期间, 前24 h禁食, 之后每日分3次(08:00、16:00和23:00)投喂虾苗总体重的3%的零号料

(约2.25 g)。力竭运动实验装置为自行设计的环形水道(外径为1004 mm, 内置隔离装置直径为604 mm, 高为395 mm, 容量为200 L)。

### 1.2 实验方法

力竭实验前, 从未进行力竭运动胁迫的养殖幼虾中随机挑选 12 尾作为空白组, 将其余幼虾分为 7 组, 每组 3 个平行, 分别放入环形水道中进行力竭运动胁迫。胁迫实验期间, 水道中流速保持在 0.25 m/s, 用小抄网从幼虾游泳方向前方惊吓幼虾, 使幼虾持续进行跳跃逃避运动, 当幼虾对刺激无法进行逃避、游泳足摆动频率下降、无法再逆水流游泳的时候即进入力竭状态。此时, 将全部存活幼虾放入室内的暂养池的网箱中恢复, 同时, 挑选 12 尾力竭状态的幼虾, 置于冰冷的取样盘中取样, 并且在未进行捕捞刺激的幼虾中取样作为对照组样品, 经液氮急冻后保存于-80℃环境中, 此为力竭运动后 0 h 的样品。之后在放入恢复水体后开始计时, 在 1、4、8、12、24、48 和 72 h 以同样方法取 12 尾幼虾, 并在取样前观察幼虾的行为。

在所有样品采集完成后, 测定整尾幼虾的超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)、谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)的活性, 总抗氧化能力(T-AOC)、丙二醛(MDA)含量, 以上指标的测定均使用南京建成生物工程研究所的试剂盒。

### 1.3 数据处理

实验数据经 Excel 2016 处理后, 使用 SPSS 21 软件进行分析, 以力竭运动后的恢复时间为自变量, 对各生理指标按取样时间进行单因素方差分析(One-way ANOVA), 若组间出现极显著( $P<0.01$ )或显著差异( $P<0.05$ ), 则用 Duncan 法进行组间差异显著性检验, 数据以平均值±标准差(Mean±SD)表示。

## 2 结果

### 2.1 斑节对虾幼虾力竭运动后不同恢复时间的体内抗氧化相关指标变化

如表 1 所示, 斑节对虾幼虾在力竭运动后, 随恢复时间的延长, 总抗氧化能力、SOD、CAT 和 POD 活性均有显著差异( $P<0.05$ ); MDA 含量存在差异, 但差异不显著( $0.05<P<0.1$ ); GSH-Px 活性不存在差异。

表1 斑节对虾幼虾在力竭运动后各恢复时间点的抗氧化指标单因素分析结果

Tab.1 Analysis of oxidation resistance in juvenile *P. monodon* after exhaustive exercise by one-way ANOVA

因变量 Dependent variable	自由度 df	均方 Mean square	F	P
SOD 活性 SOD activity	8	0.621	42.130	0
CAT 活性 CAT activity	8	$4.926 \times 10^{-9}$	9.171	0
POD 活性 POD activity	8	0.007	2.508	0.047
GSH-Px 活性 GSH-Px activity	8	10.788	0.824	0.592
总抗氧化能力 Total antioxidant capacity	8	0.002	4.749	0.003
MDA 含量 MDA content	8	0.001	2.334	0.065

## 2.2 斑节对虾幼虾在力竭运动后行为学的变化

在力竭运动后恢复的0~4 h期间,斑节对虾幼虾无附壁、游动等行为,基本保持在放入网箱时所处位置,对捕捞刺激无躲避行为;8 h后,幼虾开始躲藏在网箱角落等位置,并有少量附壁行为,并能对捕捞作出反应;12 h后,附壁的幼虾数量增多;24~72 h期间,附壁、游动和爬行的幼虾数量持续增加。

## 2.3 斑节对虾幼虾力竭运动后抗氧化酶活性的变化

**2.3.1 超氧化物歧化酶活性的变化** 如图1A所示,斑节对虾幼虾在力竭运动后的0~1 h内,SOD活性并没有显著变化;4 h时,下降至显著低于对照组的水平( $P<0.05$ );此后,SOD活性持续保持在较低水平,72 h后,SOD活性仍未恢复至对照组水平( $P<0.05$ )。

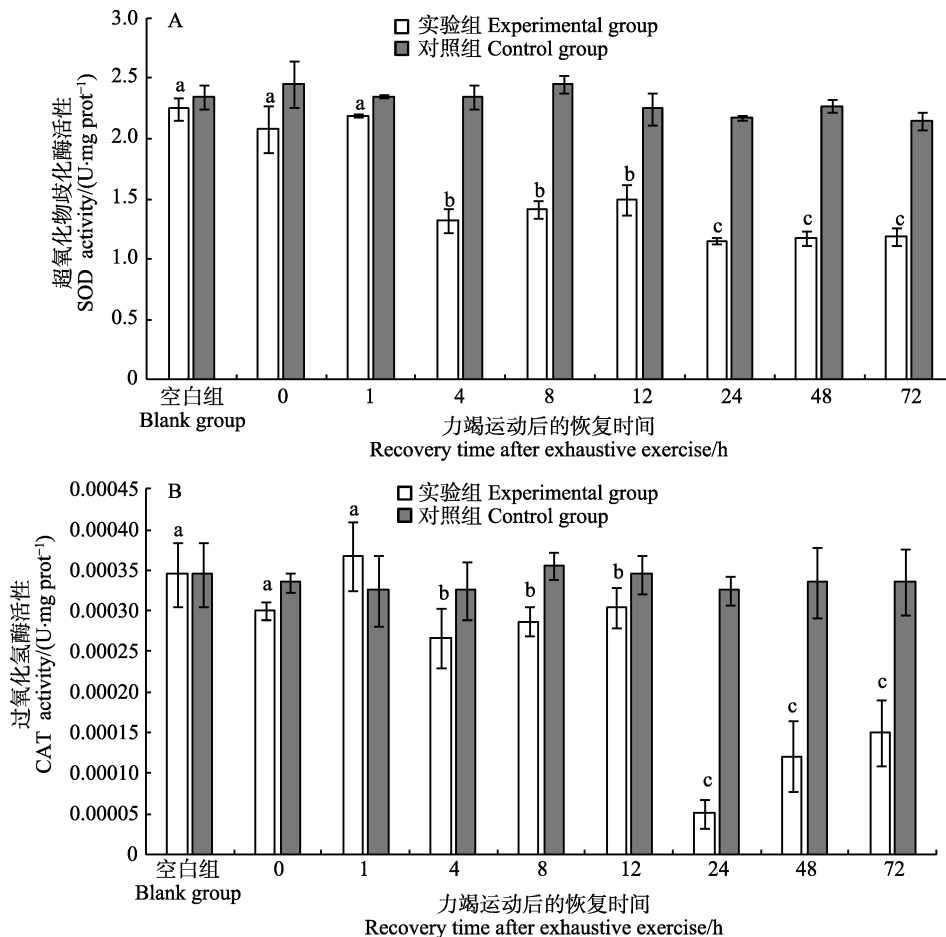


图1 斑节对虾幼虾力竭运动后体内的SOD(A)和CAT(B)活性的变化

Fig.1 SOD (A) and CAT (B) activities in juvenile *P. monodon* after exhaustive exercise

不同字母代表各相邻恢复时间点的实验组间存在显著差异( $P<0.05$ )。下同

There were significant differences among the index groups with different letters representing different recovery time points ( $P<0.05$ ). The same as below

**2.3.2 过氧化氢酶活性的变化** 如图 1B 所示, 斑节对虾幼虾在力竭运动后的 0~12 h 内, CAT 活性并无显著变化; 但 CAT 活性在 12~24 h 内降低至显著低于对照组的水平( $P<0.05$ ), 在 72 h 后开始缓慢恢复。

**2.3.3 过氧化物酶活性的变化** 如图 2A 所示, 斑节对虾幼虾在力竭运动后的 0~1 h 内, POD 活性与对照组水平并无显著差异; 但 POD 活性从 1 h 后开始下降, 并在 8 h 下降至最低点( $P<0.05$ ); POD 活性在第 8 h 后开始缓慢恢复, 在 48 h 后恢复至比对照组的略高的水平( $P<0.05$ )。

**2.3.4 谷胱甘肽过氧化物酶活性的变化** 如图 2B 所示, 斑节对虾幼虾在力竭运动后的 0~1 h 内, GSH-Px 活性上升至显著高于对照组的水平( $P<0.05$ ); 之后在 1~24 h 内波动上升, 在 24 h, 活性上升至显著高于对照组的水平( $P<0.05$ ); 在 24 h 后, GSH-Px

活性开始下降, 并在 72 h 恢复至对照组水平。

## 2.4 斑节对虾幼虾力竭运动后总抗氧化能力的变化

如图 3A 所示, 斑节对虾幼虾在力竭运动后, 体内的总抗氧化能力上升, 但与对照组相比并无显著差异; 在 1 h 后, 总抗氧化能力持续降低, 在 12 h 至最低水平, 显著低于 1 h; 而后, 总抗氧化能力在 24 h 达到最高点并高于对照组( $P<0.05$ ), 并在 72 h 后仍保持较高水平。

## 2.5 斑节对虾幼虾力竭运动后 MDA 含量的变化

如图 3B 所示, 斑节对虾幼虾在力竭运动后 1 h 内, 体内的 MDA 含量上升, 显著高于对照组; 而后在 1~12 h 内持续显著下降, 低于对照组水平( $P<0.05$ ), 之后, 12~24 h 内 MDA 含量显著升高( $P<0.05$ ), 然后又逐渐回落至对照组水平。

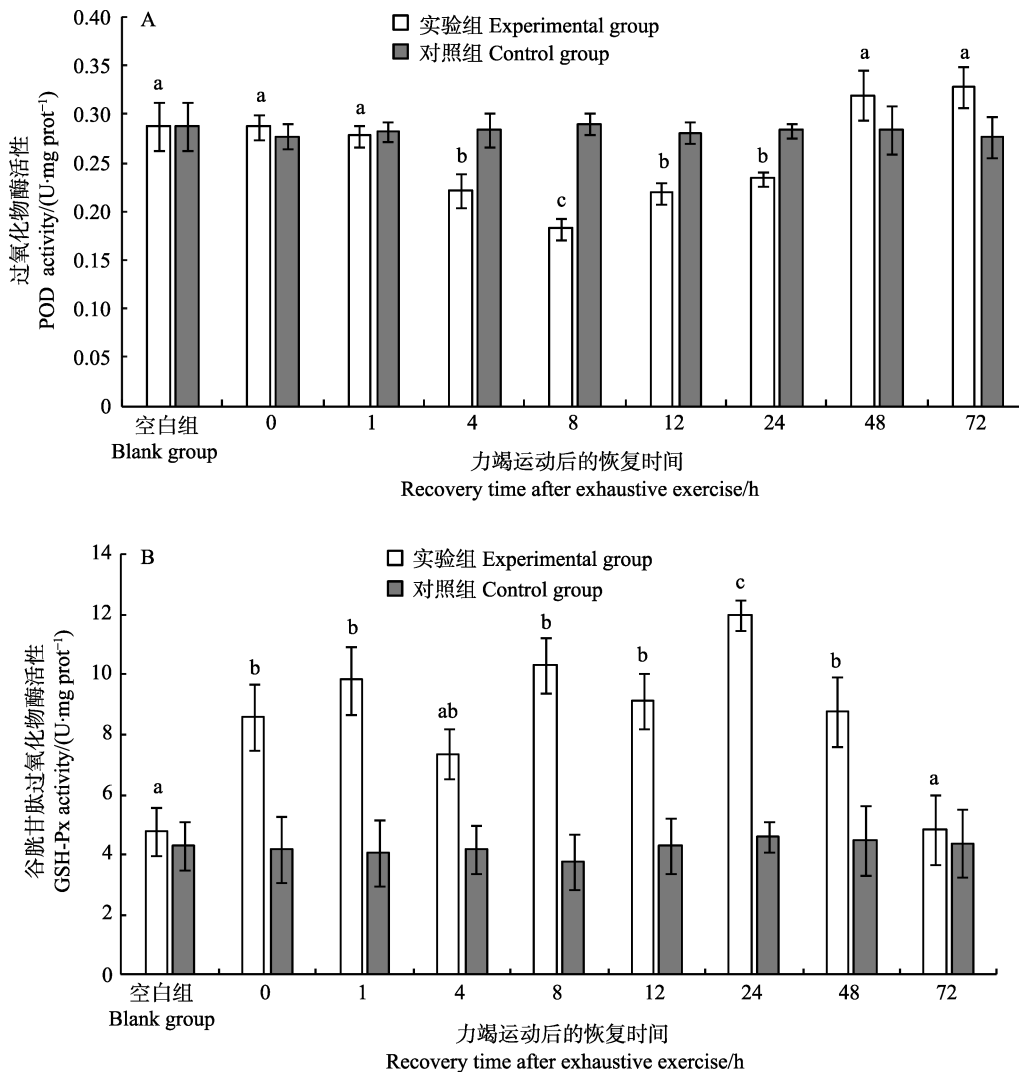


图 2 斑节对虾幼虾力竭运动后体内的 POD (A)和 GSH-Px (B)的变化

Fig.2 POD (A) and GSH-Px (B) activities in juvenile *P. monodon* after exhaustive exercise

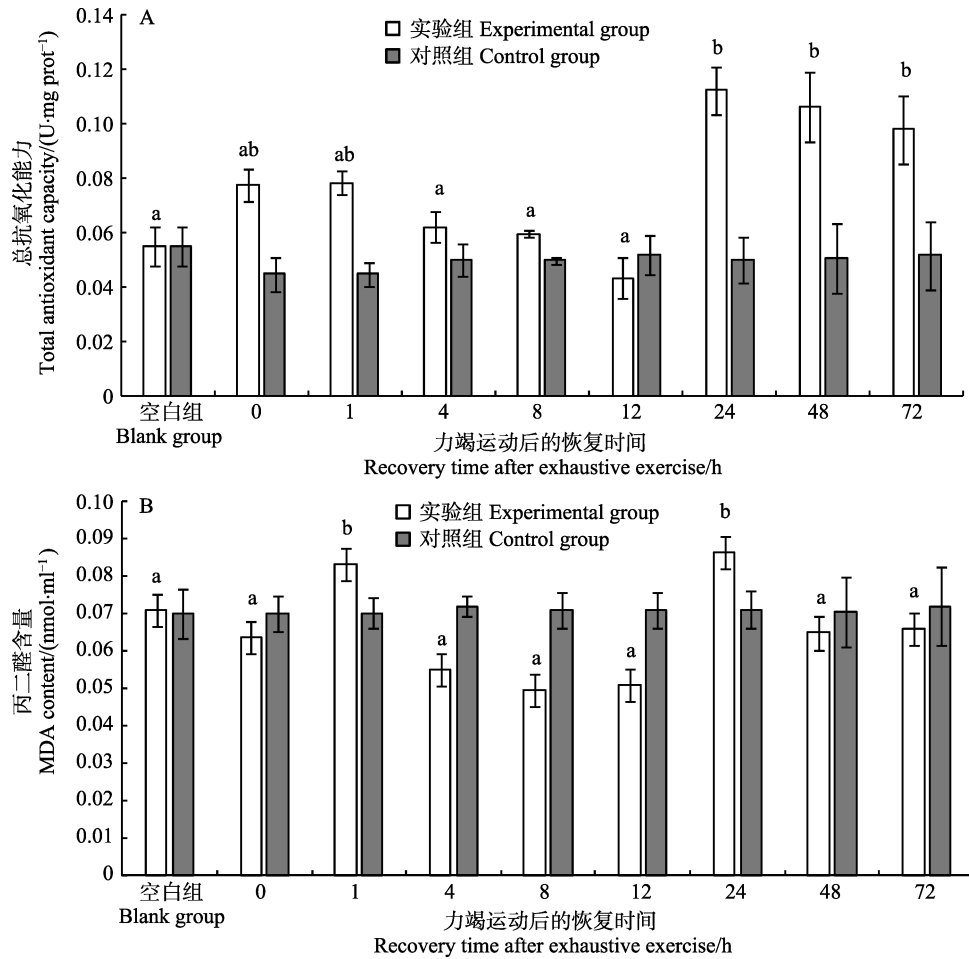


图 3 斑节对虾幼虾力竭运动后体内的 T-AOC 能力(A)和 MDA 含量(B)的变化

Fig.3 Total antioxidant capacity (A) and MDA content (B) in juvenile *P. monodon* after exhaustive exercise

### 3 讨论

#### 3.1 力竭运动后斑节对虾幼虾体内抗氧化酶活性的变化

抗氧化酶分布于机体各个组织,可高效清除细胞内自由基,保护细胞和脂质免于自由基的伤害(陈建波等,1999)。幼虾的能量物质储存量少,相较于成熟个体,免疫力和维稳力更低(陈勇,2016;张海恩等,2019)。超氧化物歧化酶(SOD)通过将生物体内超氧根阴离子( $O_2^-$ )转化成  $H_2O_2$  以清除超氧根阴离子(董亮等,2013),谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)、过氧化氢酶(CAT)和过氧化物酶(POD)通常协同工作,将生物体内的  $H_2O_2$  分解成  $H_2O$  和  $O_2$ 。GSH-Px 除能清除  $H_2O_2$  外,亦有清除能使脂类过氧化的物质( $\cdot OH$ )的功能(刘冰等,2005;任海等,2014;田清涑等,1992)。因此,抗氧化酶活性高低是反映动物机体的抵御氧化应激能力高低的生理指标。有氧代谢强度升高会对机体的抗氧化平衡造成冲击并影响机体健康,中华倒刺鲃(*Spinibarbus sinensis*)在力竭训练后肌肉

组织中的 SOD 活性显著上升(于丽娟,2014);力竭运动会致欧鲢(*Leuciscus cephalus*)的体内出现氧化应激的迹象,但 SOD、GSH-Px 活性并无显著变化,说明抗氧化系统并没有因运动刺激而激活(Aniagu *et al.*, 2006);拥挤使南美白对虾(*Penaeus vannamei*)肌肉中的 SOD、GSH-Px 活性显著降低(王彦波等,2013)。

本研究中,如图 1、图 2 所示,力竭运动后 0~1 h 内,SOD、CAT 和 POD 活性无显著变化,说明力竭运动过程中,幼虾机体酶促抗应激体系并未激活;但在 4 h 后,SOD、CAT 和 POD 活性持续下降,其中,POD 活性在 8 h 后逐渐恢复,并在 48 h 恢复至对照组水平,SOD、CAT 活性 72 h 后仍显著低于对照组水平,说明机体在力竭运动后的 4 h 后,幼虾机体开始出现氧化应激迹象,并消耗机体中常驻的 SOD、CAT 和 POD 进行调节;GSH-Px 活性在力竭运动后前 24 h 内显著上升,与总抗氧化能力的变化趋势接近,说明 GSH-Px 在幼虾的抗氧化体系中占据主要地位。通过观察对虾恢复期间的行为学变化后发现,幼虾在力竭运动后前 4 h 内基本不进行运动,推测此时

机体的主要工作为清除机体中积累  $O_2^-$  和  $H_2O_2$ 。产生氧化应激反应的原因可能是力竭运动后的爆发性有氧代谢(李丹丹等, 2018b), 并且 GSH-Px 活性比其他 3 种抗氧化酶的活性高出几个数量级, 说明在力竭运动恢复过程中的氧化应激反应中, GSH-Px 扮演比其他抗氧化酶更重要的角色; 在 48 h 时, 各抗氧化酶活性恢复到对照组水平, 说明幼虾在力竭运动后的 48 h 后的抗氧化能力足以消除体内的氧化压力, 但机体需要到 72 h 才能使体内的抗氧化能力恢复至新的平衡状态。

### 3.2 斑节对虾幼虾力竭运动后体内总抗氧化能力与 MDA 含量的变化

总抗氧化能力反映了机体清除氧化性物质的能力和免疫与保护能力的高低(郑洁等, 2017)。组成机体总抗氧化能力的 2 个体系为酶促反应体系和非酶促反应体系, 酶促反应为抗氧化酶催化的氧化还原反应链; 非酶促反应包括各类生物还原性物质(陈建波等, 1999; 韩星星等, 2018; 张涛等, 2018)。谢剑华(2008)在日本沼虾(*Macrobrachium nipponense*)日粮中额外添加虾青素, 显著提升了其养殖成活率和抗应激能力。在运动训练后, 黑鲷与中华倒刺鲃组织中的总抗氧化能力均有显著提升(于丽娟, 2014; 虞顺年等, 2018)。

丙二醛作为生物体内脂类过氧化反应的最终产物, 而脂类是生物体内构成膜系统主要的物质和储能物质, 丙二醛含量被认为是反映生物机体受损伤程度的关键指标(宋志明等, 2015; 王彦波等, 2013)。日本沼虾在面对低氧胁迫时, 肝胰腺与肌肉中的 MDA 含量在 0~12 h 内呈逐渐上升的趋势(管越强等, 2010)。养殖密度较高组的中国对虾(*Fenneropenaeus chinensis*)幼虾体内的 MDA 含量比密度较低组更高(张海恩等, 2019)。MDA 含量是反映机体受损伤程度、对胁迫敏感度和反应烈度的直接指标(杨玉姣等, 2006)。

如图 3 所示, 斑节对虾幼虾在力竭运动结束后的 72 h 内, 体内的 MDA 含量的变化呈双峰形状, 第 1 个峰值出现在 1 h 处, 第 2 个峰值出现在 24 h 处。幼虾力竭运动前后 MDA 水平并无显著差异, 说明力竭运动过程并没有对幼虾机体造成伤害, 但总抗氧化能力已出现上升趋势, 说明机体的非酶抗氧化体系已经激活。如上文所述, 力竭运动前后各抗氧化酶活性与对照组水平无显著差异, 说明在力竭运动后恢复的 1 h 内, 机体中的非酶还原物质提供了一定的抗氧化能力。1 h 时, 幼虾的体内 MDA 含量出现较明显的升高, 总抗氧化能力与 MDA 含量同步上升, 说明在短时间内

幼虾的抗氧化系统感受到体内出现氧化应激并作出响应, 但 MDA 含量的上升反映了机体的非酶体系无法在短时间内消除氧化物质对机体的损伤; 在 1~12 h 期间, 幼虾体内的 MDA 含量和总抗氧化能力逐渐降至最低点, 均显著低于最高点的 1 h 的水平, 说明幼虾通过消耗体内的抗氧化物质, 合成和消耗相关抗氧化酶维持了体内的抗氧化平衡, 并且幼虾在 12 h 后恢复了常见的附壁和游泳等行为; 12~24 h 期间, 由于凌晨时幼虾开始恢复游泳摄食行为, 呼吸代谢活动增强, 抗氧化平衡再次波动, MDA 含量显著升高, 抗氧化体系被持续激活, 机体通过合成 GSH-Px 等抗氧化酶提升机体总抗氧化能力; 24~72 h, 幼虾体内的 MDA 含量恢复到对照组水平, 总抗氧化能力仍高于对照组水平, 说明幼虾机体的抗氧化能力恢复过程存在过量补充的“矫枉过正”现象, 使机体存在消除此前的氧化应激并应对潜在氧化应激的可能。

## 4 小结

斑节对虾幼虾在力竭运动过程中, 体内不会产生氧化应激反应, 但在力竭运动后恢复过程中, 由于有氧代谢补偿性增强, 导致机体氧化压力升高, 首先激活了幼虾的非酶氧化应激反应, 在非酶抗氧化体系无法消除氧化压力后, 激活酶促抗氧化应激体系。而后, 较长时间内幼虾体内的抗氧化能力显著高于对照组水平, 之后缓慢下降, 抗氧化应激体系在 48 h 时以足以消除因力竭运动而影响的内环境失衡产生的氧化应激, 但幼虾保持体内的高抗氧化能力至 72 h, 以应对具有潜在可能的下一次氧化应激。

在实际的斑节对虾养殖和增殖放流过程中, 应避免频繁捕捞和持续高密度暂养。在捕捞或运输之前, 增加日粮中的维生素 D、类胡萝卜素、虾青素等非酶抗氧化添加剂, 铜、锌和硒等合成抗氧化酶的元素含量, 在暂养和运输水体中添加抗应激剂。在对虾类放流苗种育苗过程中尝试进行运动训练, 增强幼虾的抗氧化能力, 保障增殖放流效果和养殖效益。

## 参 考 文 献

- Anand SPS, Balasubramanian CP, Christina L, *et al.* Substrate based black tiger shrimp, *Penaeus monodon* culture: Stocking density, aeration and their effect on growth performance, water quality and periphyton development. *Aquaculture*, 2019, 507: 411–418
- Aniagu SO, Day N, Chipman JK, *et al.* Does exhaustive exercise result in oxidative stress and associated DNA damage in the chub (*Leuciscus cephalus*)? *Environmental and Molecular Mutagenesis*, 2006, 47(8): 616–623

- Berry SE, Simon CJ, Foote AR, *et al.* Evaluation of baseline haemolymph biochemistry, volume and total body energetics to determine an accurate condition index in the black tiger shrimp, *Penaeus monodon*. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology*, 2019, 228: 1–9
- Chen GF, Huang J, Song XL. General situation of the immunological capability of shrimp. *Journal of Fisheries of China*, 2004, 28(2): 209–215 [陈国福, 黄健, 宋晓玲. 对虾免疫机能研究概况. *水产学报*, 2004, 28(2): 209–215]
- Chen JB, Xia CG, Yu CL, *et al.* Advances in research on mechanism and kinetics of peroxidase catalysis. *Journal of Molecular Catalysis(China)*, 1999, 13(4): 312–320 [陈建波, 夏春谷, 尉迟力, 等. 过氧化物酶催化反应机理和动力学研究进展. *分子催化*, 1999, 13(4): 312–320]
- Chen Y. Effect of stocking density on survival rate and immune enzyme in liver of *Procambarus clarkii*. *Hubei Agricultural Sciences*, 2016, 16(55): 4237–4240 [陈勇. 饲养密度对克氏原螯虾成活率和肝胰腺三种免疫酶的影响. *湖北农业科学*, 2016, 16(55): 4237–4240]
- Dall W, Hill BJ, Rothlisberg PC, *et al.* The biology of the *Penaeidae*. *Advances in Marine Biology*, 1990, 27(6): 1–461
- Dong L, He YZ, Wang YL, *et al.* Research progress on application of superoxide dismutase (SOD). *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2013, 15(5): 53–58 [董亮, 何永志, 王远亮, 等. 超氧化物歧化酶(SOD)的应用研究进展. *中国农业科技导报*, 2013, 15(5): 53–58]
- Duan Y. Experimental studies on the swimming performance and physio-ecology of whiteleg shrimp *Litopenaeus vannamei*. Doctoral Dissertation of Ocean University of China, 2012 [段妍. 凡纳滨对虾游泳行为生理生态学实验研究. *中国海洋大学博士研究生学位论文*, 2012]
- Guan YQ, Li L, Wang HC, *et al.* Effects of hypoxia on respiratory metabolism and antioxidant capability of *Macrobrachium nipponense*. *Journal of Hebei University (Natural Science)*, 2010, 30(3): 301–306 [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. *河北大学学报(自然科学版)*, 2010, 30(3): 301–306]
- Han XX, Wang QR, Ye K, *et al.* Effect of xanthophylls and astaxanthin on the skin color and antioxidant capacity of large yellow croaker (*Larimichthys crocea*). *Journal of Fisheries Research*, 2018, 40(2): 104–110 [韩星星, 王秋荣, 叶坤, 等. 叶黄素和虾青素对大黄鱼体色及抗氧化能力的影响. *渔业研究*, 2018, 40(2): 104–110]
- Kieffer JD. Limits to exhaustive exercise in fish. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular and Integrative Physiology*, 2000, 126(2): 161–179
- Kieffer JD. Perspective—Exercise in fish: 50+years and going strong. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular and Integrative Physiology*, 2010, 156(2): 163–168
- Li DD, Chen PM, Zhu AY, *et al.* Impacts of transport densities stress on survival rate and immune enzyme activities of black seabream. *Journal of Southern Agriculture*, 2018a, 49(7): 1439–1446 [李丹丹, 陈丕茂, 朱爱意, 等. 密度胁迫对黑鲷运输存活率及免疫酶活性的影响. *南方农业学报*, 2018a, 49(7): 1439–1446]
- Li DD, Chen PM, Zhu AY, *et al.* Recovery level of metabolic enzymes in juvenile black sea bream (*Sparus macrocephalus*) after exhaustive exercise. *South China Fisheries Science*, 2018b, 14(6): 59–65 [李丹丹, 陈丕茂, 朱爱意, 等. 黑鲷幼鱼力竭运动后代谢酶活性的恢复水平. *南方水产科学*, 2018b, 14(6): 59–65]
- Liu B, Liang CJ. Recent advances of catalase in organism. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, 21(5): 223 [刘冰, 梁婵娟. 生物过氧化氢酶研究进展. *中国农学通报*, 2005, 21(5): 223]
- McKenzie DJ, Höglund E, Dupont-Prinet A, *et al.* Effects of stocking density and sustained aerobic exercise on growth, energetics and welfare of rainbow trout. *Aquaculture*, 2012, 338–341: 216–222
- Ratanapo S, Chulavatnatol M. Monodin-induced agglutination of *Vibrio vulnificus*, a major infective bacterium in black tiger prawn (*Penaeus monodon*). *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Comparative Biochemistry*, 1992, 102(4): 855–859
- Ren H, Li J, Li JT, *et al.* Effects of acute ammonia stresses on antioxidant enzyme activities and GPx gene expression in *Exopalaemon carinicauda*. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(4): 647–655 [任海, 李健, 李吉涛, 等. 急性氨胁迫对脊尾白虾(*Exopalaemon carinicauda*)抗氧化系统酶活力及 GPx 基因表达的影响. *农业环境科学学报*, 2014, 33(4): 647–655]
- Skjervold PO, Fjæra SO, Østby PB, *et al.* Live-chilling and crowding stress before slaughter of Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Aquaculture*, 2001, 192(2–4): 265–280
- Song ZM, Liu JY, Zhuang P, *et al.* Influence of low-temperature stress on the antioxidant enzymes activities and malondialdehyde contents in liver of juvenile *Siganus guttatus*. *Marine Fisheries*, 2015, 37(2): 142–150 [宋志明, 刘鉴毅, 庄平, 等. 低温胁迫对点篮子鱼幼鱼肝脏抗氧化酶活性及丙二醛含量的影响. *海洋渔业*, 2015, 37(2): 142–150]
- Tian QL, Yin Y, Li YL. Study on the relationship between glutathione peroxidase and animal aging. *Chinese Journal of Gerontology*, 1992, 12(1): 50–52 [田清涿, 殷莹, 李云兰. 谷胱甘肽过氧化物酶和动物衰老关系的研究. *老年学杂志*, 1992, 12(1): 50–52]
- Wang YB, Li HJ, Wang TZ, *et al.* Changes in the muscle quality and enzyme activity of white shrimp, *Penaeus vannamei*, induced by crowding. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2013, 13(4): 138–142 [王彦波, 李宏吉, 王特樟, 等. 拥挤应激对南美白对虾肌肉品质和酶的影响. *中国食品学报*, 2013, 13(4): 138–142]
- Wu QS. Discussion on remediation and protection of large prawn population resources in the South China Sea. *Fisheries Science and Technology*, 2010(1): 25–28 [吴琴瑟. 南海大型对虾种群资源修复与保护的探讨. *水产科技*, 2010(1): 25–28]
- Xie JH. The effect of astaxanthin on the physiological and biochemical characters in *Macrobrachium nipponensis*. Master's Thesis of Hebei University, 2008 [谢剑华. 虾青素对日本沼虾生理生化特征的影响. *河北大学硕士学位论文*, 2008]
- Xing YX, Zhang YX, Fu ZD, *et al.* Study on breeding techniques of large-scale seedlings for proliferation and release of *Penaeus monodon*. *Hebei Fisheries*, 2014(6): 44–45, 51 [邢诒炫, 张羽翔, 符致德, 等. 斑节对虾增殖放流大规模苗种培育技术研究. *河北渔业*, 2014(6): 44–45, 51]
- Yang YJ, Wang GL, Jin S, *et al.* The effect of environmental stress on shrimp immune system. *Fisheries Science*, 2006, 25(12): 652–655 [杨玉姣, 王国良, 金珊, 等. 环境胁迫对对虾免疫系统的影响研究. *水产科学*, 2006, 25(12): 652–655]
- Yu LJ. The effects of exercise training on growth, antioxidative ability and immune function in juvenile *Spinibarbus sinensis*. Master's Thesis of Southwest University, 2014 [于丽娟. 运动训练对中华倒刺鲃幼鱼生长、抗氧化及免疫力

- 能的影响. 西南大学硕士研究生学位论文, 2014]
- Yu SN, Wei XL, Wei FS, *et al.* Wei FS, *et al.* Effects of different exercise intensity on growth and serum and liver antioxidant indices of *Sparus macrocephalus*. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2018, 42(2): 255–263 [虞顺年, 魏小岚, 韦芳三, 等. 不同运动强度对黑鲷生长、血清和肝脏抗氧化指标的影响. *水生生物学报*, 2018, 42(2): 255–263]
- Yu XM. Comparative study of swimming ability and swimming physiology of three penaeid shrimp. Master's Thesis of Ocean University of China, 2009 [于晓明. 三种对虾游泳能力及其游泳生理的比较实验研究. 中国海洋大学硕士研究生学位论文, 2009]
- Zhang HE, He YY, Li J, *et al.* Effects of stocking density on growth, water quality, and antioxidant system of juvenile *Fenneropenaeus chinensis*. *Progress in Fishery Sciences*, 2020, 41(2): 140–149 [张海恩, 何玉英, 李健, 等. 密度胁迫对中国对虾幼虾生长、抗氧化系统功能及水质指标的影响. *渔业科学进展*, 2020, 41(2): 140–149]
- Zhang PD. Experimental studies on the behavior and physiology of penaeid shrimps. Master's Thesis of Ocean University of China, 2006 [张沛东. 对虾行为生理生态学的实验研究. 中国海洋大学硕士研究生学位论文, 2006]
- Zhang T, Zhao JH, Cao JM, *et al.* Effect of astaxanthin on free radicals in kidney of aging rats. *Science and Technology Information*, 2018(17): 214–215 [张涛, 赵佳晖, 曹建民, 等. 虾青素对衰老大鼠肾脏自由基的影响. *科技资讯*, 2018(17): 214–215]
- Zheng J, Meng YT, Liu GJ. Advances in bacterial Mn(II) oxidation by animal haem peroxidases. *Acta Microbiologica Sinica*, 2017, 57(7): 969–977 [郑洁, 孟佑婷, 刘桂君. 动物血红素过氧化物酶参与细菌氧化 Mn(II)的研究进展. *微生物学报*, 2017, 57(7): 969–977]

(编辑 陈 辉)

## Effect of Recovery Time on Antioxidant Capacity of Juvenile *Penaeus monodon* After Exhaustive Exercise

CHEN Zicong<sup>1,2</sup>, CHEN Pimao<sup>1,2①</sup>, YUAN Huarong<sup>1</sup>, FENG Xue<sup>1</sup>, TONG Fei<sup>1</sup>,  
CHEN Wenjing<sup>1</sup>, LONG Xinling<sup>1,2</sup>, ZHANG Haoming<sup>1,2</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; 2. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306)

**Abstract** Exhaustive exercise often occurs in shrimp farming and in the wild. Giant tiger prawn (*Penaeus monodon*) is an important species in aquaculture and proliferation in China's coastal areas. The study used dip nets to chase juvenile *P. monodon* in the indoor sink, simulated the exhaustive exercise experiment, and explored the recovery process of antioxidant capacity after exhaustive exercise; however, there was no report on the physiological recovery process after the exhaustive exercise of *P. monodon*. The results showed the activities of superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT), peroxidase (POD) and glutathione peroxidase (GSH-Px), total antioxidant capacity (T-AOC), and malondialdehyde (MDA) content in juvenile *P. monodon* at 0 h after exhaustive exercise. No significant difference from the control group was observed. At 1–12 h, the activities of SOD, CAT, POD, MDA content, and T-AOC continued to decrease, whereas the activity of GSH-Px did not change significantly. At 24 h, the activities of SOD, CAT, and POD were significantly lower than those of the control group, and the activity of GSH-Px, MDA content, and T-AOC were significantly higher than those of the control group. At 72 h, the activities of SOD and CAT were still significantly lower than those in the control group. The activities of GSH-Px, POD, and MDA content were restored in the control group, and T-AOC activity was still significantly higher compared to that in the control group. This indicated that the enzymatic antioxidant system of *P. monodon* was not activated during exhaustive exercise. At 24 h after exhaustive exercise, the antioxidant capacity at 72 h was still at a high level. It was observed that the enzymatic antioxidant system was not activated in juvenile *P. monodon* during exhaustive exercise. The antioxidant capacity of juvenile *P. monodon* is lower within 24 h after exhaustive exercise, then increases significantly after 24 h of exhaustion and remained at that level for a long time. Within 24 h after exercise, further stimulation of juvenile *P. monodon* should be avoided.

**Key words** Giant tiger prawn (*Penaeus monodon*); Oxidation resistance; Exhaustive exercise; Recovery process

① Corresponding author: CHEN Pimao, E-mail: chenpm@scsfri.ac.cn