

# 不同时间间隔重复力竭运动对南方鲇幼鱼耗氧率的影响\*

付世建, 曹振东, 彭姜岚

(重庆师范大学 生命科学学院 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 400047)

**摘要** 考察我国特有暖水性伏击取食鱼类南方鲇 (*Silurus meridionalis* Chen) 的重复运动能力, 检验力竭运动后的恢复状态是否对下一次力竭运动代谢恢复过程产生影响。实验仪器采用自制流水式呼吸仪(专利号 ZL 200520010481.0), 南方鲇幼鱼选用体重为 17.64 ~ 48.21 g,  $n = 40$ , 在(25.0 ± 1.0)°C 条件下, 测定了不同时间间隔即 10 min 重复 3 次、30 min 重复 2 次和 24 h 重复 2 次条件下, 重复力竭性运动(驱赶至力竭)后南方鲇幼鱼的耗氧率( $V_{O_2}$ )恢复过程。研究发现在本实验条件下, 南方鲇幼鱼静止耗氧率( $V_{O_{2rest}}$ )为(2.39 ± 0.13) ~ (2.83 ± 0.31)  $\text{mg} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 耗氧率峰值( $V_{O_{2peak}}$ )为(8.36 ± 0.26) ~ (10.39 ± 0.44)  $\text{mg} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 运动后过量耗氧(EPOC)总量为(66.31 ± 6.37) ~ (88.89 ± 4.61)  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。力竭运动后 20 ~ 30 min 耗氧率可达一稳定状态, 经 24 h 恢复回落到运动前水平。无论间隔时间长短, 各处理组第二次力竭运动均导致恢复速率的显著增加( $p < 0.05$ ), 但耗氧峰值和恢复过程的过量耗氧没有显著变化。研究提示力竭性运动能诱导出南方鲇幼鱼的最大耗氧率。

**关键词** 力竭运动 过量耗氧 南方鲇

中图分类号: Q493.8

文献标识码: A

文章编号: 1672-6693(2009)01-0013-04

由于水体环境的特殊性, 游泳运动是鱼类逃逸、捕食、繁殖等行为实现的主要方式, 也是其生存、生长及繁衍的基本保证<sup>[1-2]</sup>。为完成不同的生理功能, 鱼类采用的运动方式可能不同, 运动过程中的物质和能量代谢也存在一定的差异<sup>[3-4]</sup>。其中爆发式游泳运动(burst-type swimming)一定程度上决定了鱼类穿越激流、逃避敌害和有效捕食等生命活动的成功概率, 具有重要的生态学意义, 因此相关研究倍受研究者的关注<sup>[5]</sup>。由于爆发式运动是一种无氧代谢为主的运动方式, 某些环境条件下可能达到力竭状态, 而鱼类达到力竭状态的需要的时间和力竭运动后的代谢恢复过程决定了鱼类短期内的重复运动能力, 对机体的生存具有重要作用<sup>[6]</sup>。耗氧率是鱼类体内各种生理过程在能量代谢上的综合反映, 因此, 研究重复力竭运动过程的耗氧恢复过程可能有助于揭示鱼类代谢恢复机制和考察鱼类重复运动能力。南方鲇为我国特有的大型鱼类, 广泛分布于长江、珠江流域。相关研究发现其运动能力差, 力竭运动后代谢上升幅度小, 恢复过程缓慢<sup>[7-8]</sup>, 在自然界可能

经常面临在代谢恢复过程中进行另一次剧烈运动。为探讨不同代谢恢复阶段会对下一次运动及其恢复过程产生怎样的影响, 本研究选用南方鲇为实验对象, 测定了其运动后不同恢复状况下重复进行力竭运动后的耗氧恢复过程, 以检验运动后的恢复状态是否对下一次力竭运动的代谢恢复过程产生影响。

## 1 材料和方法

### 1.1 实验用鱼来源和驯化

实验用鱼购于重庆当地渔民, 实验前在室内循环水养殖系统驯化 1 个月以上。驯化期间以剪碎的泥鳅 (*Misgurnus anguillicaudatus*) 肉块做饵料, 每 3 d 投喂 1 次, 饱足摄食。驯化水温为(25.0 ± 1.0)°C; 本研究中溶氧量即单位体积水中溶解氧的质量大于 5  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。光照为自然光照。

### 1.2 实验设计

根据相关研究<sup>[6]</sup>, 力竭运动 20 ~ 30 min 后, 构成 EPOC 的快速成分, 如 ATP 和磷酸肌酸(CrP)的还原基本恢复, 此时一些慢性组成成分如乳酸的清

\* 收稿日期: 2008-08-27

资助项目: 国家自然科学基金(No. 30700087) 重庆市自然科学基金(No. 2007BB1226)

作者简介: 付世建, 男, 博士, 教授, 加拿大安大略省女皇大学访问学者, 研究方向为鱼类生理生态学。

除和糖原合成等还没有完全恢复,而完全恢复可能需要4~8 h,但耗氧率的变化已不再明显,故一般运动后恢复耗氧率的相关研究测定多在30 min左右。因此把重复力竭性运动的时间间隔分别设为10 min(快速成分未完全恢复)、30 min(快速成分恢复,慢性成分未完全恢复)和24 h(完全恢复),而运动后的恢复耗氧率只测定了30 min。具体设计为:1)实验1,把实验鱼(25.04~35.78 g,  $n=10$ )进行2.5 min力竭运动(具体操作方法见后)后测定30 min恢复过程的耗氧率,经过24 h后重新进行一次力竭运动和30 min耗氧率的测定;2)实验2,实验鱼(28.50~48.21 g,  $n=10$ )的处理过程与实验1相似,但间隔时间缩短为30 min;3)实验3,实验鱼(17.64~25.44 g,  $n=20$ )力竭运动的间隔时间缩短为10 min,且进行3次重复测定。

### 1.3 实验设备及耗氧率的测定

耗氧率测定设备为实验室自行设计的流水式呼吸仪<sup>[8]</sup>。实验鱼饥饿2 d后移入呼吸室,再经1 d驯化后测定运动前的耗氧率( $Vo_{2pre-exercise}$ )。力竭运动的操作方法为:待耗氧率测定后,将单尾实验鱼放入环形环道内,用手不断追逐使鱼持续做力竭性运动<sup>[6]</sup>,经过不同时间追赶后立即将实验鱼单独置于呼吸室内进行恢复耗氧测定。在鱼转入呼吸室的2 min开始测定耗氧率,测定时间设定为2、3、4、5、10、15、20、25、30 min。呼吸仪体积约200 mL,水流速度约500 mL·min<sup>-1</sup>,水体置换99%时间小于2 min<sup>[9]</sup>。计算耗氧率的公式为 $Vo_2 = \Delta o_2 \times v/m$ (mg·min<sup>-1</sup>·kg<sup>-1</sup>),其中mg为消耗氧气的质量单位,式中 $\Delta o_2$ 是实验呼吸室和空白溶氧量(mg·L<sup>-1</sup>)差值, $v$ 是实验呼吸室水流速度(mL·min<sup>-1</sup>),用呼吸室出水口1 min水流称重得到, $m$ 为鱼体体重(kg)。溶氧值用溶氧仪(HQ20, Hach Company, Loveland, Colorado, U.S.A.)测定。

### 1.4 实验参数和统计方法

采用了4个参数来描述力竭运动后耗氧率恢复曲线特征。1)运动前耗氧率( $Vo_{2pre-exercise}$ ):实验鱼在实验处理前的耗氧率;2)耗氧率峰值( $Vo_{2peak}$ , mg·min<sup>-1</sup>·kg<sup>-1</sup>):实验鱼在恢复过程中的最大耗氧率;3)耗氧恢复速率(recovery rate of  $Vo_2$ ):实验鱼在运动后前10 min恢复过程的耗氧下降速率;4)过量耗氧(excess  $Vo_2$ , 以消耗的氧气mg数表示):实验鱼在测定过程中各个时间高于第一次运动前耗氧率的差值在时间上的积分。实验数据用

EXCELL进行常规计算后,用STATISTICA 4.5进行 $t$ 检验(实验1和实验2)及单因素方差分析(实验3)。描述统计值均用平均值±标准误(Mean±SE)表示,差异显著性水平为 $p<0.05$ 。

## 2 实验结果

### 2.1 实验1——2次重复力竭运动,间隔24 h

经过力竭运动追赶后,南方鲇耗氧率立即显著上升,经过约20 min回落到一相对稳定水平,此值高于运动前的水平。力竭运动后经过24 h的恢复,南方鲇的耗氧率恢复到运动前的水平。此时重复力竭运动耗氧恢复速率显著大于第一次力竭运动( $p<0.05$ ),但耗氧峰值和力竭运动后的过量耗氧没有显著差异(图1,表1)。

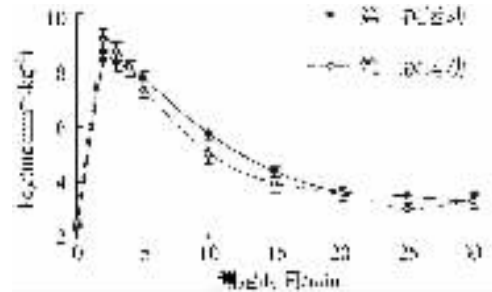


图1 24 h间隔重复力竭运动对南方鲇运动后的恢复耗氧的影响

Fig.1 Effect of repetitive bouts of exhaustive exercise with 24 h interval on oxygen consumption in juvenile southern catfish

### 2.2 实验2——2次重复力竭运动,间隔30 min

重复力竭运动耗氧恢复速率显著大于第一次力竭运动( $p<0.05$ ),但耗氧峰值和力竭运动后的过量耗氧没有显著差异(图2,表1)。

### 2.3 实验3——3次重复力竭运动,间隔10 min

南方鲇力竭运动后经过10 min恢复,耗氧率显著高于运动前水平( $p<0.05$ )。此时重复力竭运动,其耗氧恢复速率显著大于第一次运动( $p<0.05$ ),两次重复运动后的耗氧恢复过程各参数没有显著差异。3次力竭运动后的10 min恢复过程耗氧率峰值和过量耗氧没有显著差异(图3,表1)。

## 3 讨论

以往研究发现经过长期的运动锻炼会导致南方鲇运动后恢复过程的耗氧率峰值显著上升和耗氧恢复速率加快<sup>[10]</sup>,本实验发现即使一次的锻炼也足够造成运动后代谢恢复过程的变化,这在早期虹鳟的

表 1 不同时间间隔重复力竭运动对南方鲇力竭运动后的恢复耗氧的影响

Tab. 1 Effect of repetitive bouts of exhaustive exercise with different interval on oxygen consumption in juvenile southern catfish

间隔时间	24 h		30 min		10 min		
	第 1 次	第 2 次	第 1 次	第 2 次	第 1 次	第 2 次	第 3 次
取样重复/个	10		10		20		
体重/g	29.39 ± 2.74		39.23 ± 2.08		21.37 ± 0.36		
运动前耗氧率 $V_{O_{2pre-exercise}}$ ( $mg \cdot min^{-1} \cdot kg^{-1}$ )	2.39 ± 0.13	2.57 ± 0.15	2.79 ± 0.16 <sup>b</sup>	4.02 ± 0.14 <sup>a</sup>	2.83 ± 0.31 <sup>b</sup>	6.18 ± 0.34 <sup>a</sup>	6.48 ± 0.25 <sup>a</sup>
耗氧率峰值 $V_{O_{2peak}}$ ( $mg \cdot min^{-1} \cdot kg^{-1}$ )	8.36 ± 0.26	9.05 ± 0.35	9.67 ± 0.33	10.34 ± 0.30	9.30 ± 0.36	10.39 ± 0.44	10.24 ± 0.12
恢复速率/( $mg \cdot kg^{-1} \cdot min^{-2}$ )	0.29 ± 0.04 <sup>b</sup>	0.43 ± 0.04 <sup>a</sup>	0.35 ± 0.04 <sup>b</sup>	0.44 ± 0.02 <sup>a</sup>	0.28 ± 0.03 <sup>b</sup>	0.36 ± 0.02 <sup>ab</sup>	0.43 ± 0.03 <sup>a</sup>
EPOC/ $mg \cdot kg^{-1}$	82.97 ± 9.08	66.31 ± 6.37	88.18 ± 3.93	88.89 ± 4.61	47.05 ± 3.97	54.453.17	48.88 ± 3.26

注:同一行数据上标字母不同者差异显著( $p < 0.05$ )

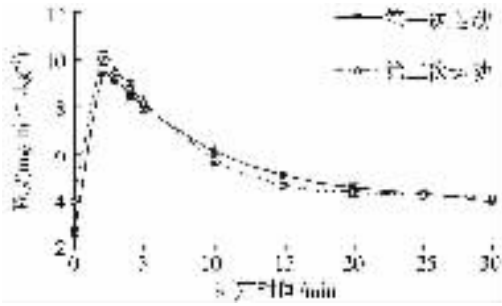


图 2 30 min 间隔重复力竭运动对南方鲇运动后的恢复耗氧的影响

Fig. 2 Effect of repetitive bouts of exhaustive exercise with 30 min interval on oxygen consumption in juvenile southern catfish

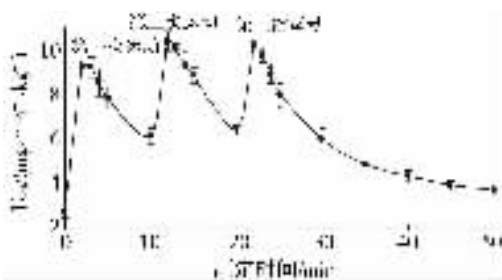


图 3 10 min 间隔重复力竭运动对南方鲇运动后的恢复耗氧的影响

Fig. 3 Effect of repetitive bouts of exhaustive exercise with 10 min interval on oxygen consumption in juvenile southern catfish

研究也得到相同的结果<sup>[11]</sup>。Scaragello 认为运动后的恢复代谢(即运动后过量耗氧, excess post-exercise oxygen consumption, EPOC)包括与鱼类心理因素有关的“非特异成分”(non-specific component), 由于学习的原因, 非特异成分在第二次运动时下降, 造成代谢恢复加快和 EPOC 的下降。本研究中, 发现虽然耗氧率恢复速率加快, 但 EPOC 并没有显著的差异, 其可能的原因是南方鲇性格温顺, 与心理因素相关的非特异成分小, 不易检测出来。

早期的研究者通常会把 EPOC 成分大致分为快速成分和慢性成分<sup>[11]</sup>, 前者包括 ATP 和 CrP 更新、血红蛋白的氧化等, 后者包括乳酸的代谢和糖原的合成等<sup>[8]</sup>。上述导致能量代谢率升高的大部分因素, 即快速成分可在很短时间内完全恢复<sup>[12]</sup>。本实验恢复时间设置中, 24 h 应视为所有成分得到恢复; 30 min 为快速成分得到恢复, 慢性成分没有得到完全恢复, 而 10 min 为快速成分没有完全得到恢复。显然对于 10 min 和 30 min 重复运动, 由于运动恢复代谢未完全完成, 必然会对第二次运动过程产生影响, 但此时重复运动恢复耗氧没有叠加的现象。由于本研究的主要目的是探讨力竭运动后不同恢复状态对下一次力竭运动后恢复过程耗氧率的影响, 虽然没有对运动能力进行定量研究, 但观测发现 10 min 间隔处理运动能力明显下降。以上说明力竭运动基本诱导出了最大耗氧率。

参考文献:

[1] Graham J B, Dewar H, Lai N C, et al. Aspects of shark swimming performance determined using a large water tunnel[J]. J Exp Biol, 2004, 151: 175-192.  
 [2] Bernal D, Donley J M, Shadwick R E. Mammal-like muscles power swimming in a coldwater shark[J]. Nature, 2005, 437: 1349-1352.  
 [3] Katz S L, Syme D A, Shadwick R E. High-speed swimming: Enhanced power in yellowfin tuna[J]. Nature, 2001, 410: 770-771.  
 [4] Clark T D, Seymour R S. Cardiorespiratory physiology and swimming energetics of a high-energy-demand teleost, the yellowtail kingfish (*Seriola lalandi*)[J]. J Exp Biol, 2006, 209: 3940-3951.  
 [5] Kieffer J D. Limits to exhaustive exercise in fish[J]. Comp Biochem Physiol, 2000, 126A: 161-179.

- [ 6 ] Milligan C L. Metabolic recovery from exhaustive exercise in rainbow trout[ J ]. *Comp Biochem Physiol* , 1996 , 113 A : 51-60.
- [ 7 ] Fu S J , Cao Z D , Peng J L. Effect of feeding and fasting on excess post-exercise oxygen consumption in juvenile southern catfish ( *Silurus meridionalis* Chen )[ J ]. *Comp Biochem Physiol* , 2007 , 146A : 435-439.
- [ 8 ] 付世建 , 曹振东 , 彭姜岚. 追赶和空气曝露时间对瓦氏黄颡鱼耗氧率的影响[ J ]. *动物学杂志* , 2007 , 42( 2 ) : 111-115.
- [ 9 ] Steffensen J F. Some errors in respirometry of aquatic breathers : how to avoid and correct for them[ J ]. *Fish Physiol Biochem* , 1989 , 6 : 49-59.
- [ 10 ] 付世建 , 曹振东 , 彭姜岚. 力竭运动锻炼和饥饿对南方鲇静止代谢率和体重的影响[ J ]. *动物学杂志* , 2007 , 42( 6 ) : 103-107.
- [ 11 ] Scarabello M , Heigenhauser G J F , Wood C M. Gas exchange , metabolite status and excess post-exercise oxygen consumption after repetitive bouts of exhaustive exercise in juvenile rainbow trout[ J ]. *J Exp Biol* , 1992 , 167 : 155-169.
- [ 12 ] Wakefield A M , Cunjak R A , Kieffer J D. Metabolic recovery in Atlantic salmon fry and parr following forced activity [ J ]. *J Fish Biol* , 2004 , 65 : 920-932.

## Effect of Repetitive Bouts of Exhaustive Exercise with Different Interval on Oxygen Consumption in Juvenile Southern Catfish

FU Shi-jian , CAO Zhen-dong , PENG Jiang-lan

( College of Life Science , Laboratory of Evolutionary Physiology and Behavior ,

Chongqing Key Laboratory of Animal Biology , Chongqing Normal University , Chongqing 400047 , China )

**Abstract :** The paper is to investigate the repeating locomotive capacity of warmwater sit-and-wait southern catfish ( *Silurus meridionalis* Chen ) and to test whether post-exercise recovery status has some effects on the next bout of exhaustive exercise metabolic recovery process. The oxygen consumption (  $V_{O_2}$  ) of juvenile southern catfish ( 17.64 ~ 48.21 g ,  $n = 40$  ) after repetitive bouts of exhaustive exercise ( widely accepted hand-chasing method ) with different intervals ( 10 min interval for a series of 3 bouts , 30 min interval for a series of 2 bouts and 24 h interval for a series of 2 bouts ) was investigated at (  $25.0 \pm 1.0$  ) °C by using flow through respirometer made by laboratory of evolutionary physiology and behaviour ( Patent No. ZL 200520010481.0 ). The resting oxygen consumption rate (  $V_{O_{2rest}}$  ) is (  $2.39 \pm 0.13$  ) to (  $2.83 \pm 0.31$  )  $mg \cdot min^{-1} \cdot kg^{-1}$  , the peak oxygen consumption rate (  $V_{O_{2peak}}$  ) is (  $8.36 \pm 0.26$  ) to (  $10.39 \pm 0.44$  )  $mg \cdot min^{-1} \cdot kg^{-1}$  and the magnitude of EPOC is (  $66.31 \pm 6.37$  ) to (  $88.89 \pm 4.61$  )  $mg \cdot kg^{-1}$  . It is found that oxygen consumption can reach a relative stable status at 20 ~ 30 min after exhaustive exercise. The pre-exercise status can achieve after 24 h recovery. The recovery rates of post-exercise oxygen consumption are higher in the second and the third bouts of exhaustive exercise compared with the first bout in all interval treatments. However , there are no significant differences in peak oxygen consumption and EPOC magnitude among different bouts of exhaustive exercise. It suggests that exhaustive exercise can elicit the maximum oxygen consumption in juvenile southern catfish.

**Key words :** exhaustive exercise ; excess post-exercise oxygen consumption ( EPOC ) ; *Silurus meridionalis* Chen

( 责任编辑 方 兴 )