

# 力竭运动锻炼和饥饿对南方鲇静止代谢率及体重的影响

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 400047)

**摘要:**在25℃饥饿和维持日粮(1.5%体重)条件下,测定了连续15 d 无氧运动锻炼(追赶至力竭)及随后5 d 撤消运动锻炼过程中南方鲇 *Silurus meridionalis* 静止代谢率( $VO_{2\text{rest}}$ )的变化。实验以饥饿和维持日粮条件下非运动锻炼组分别作为饥饿及摄食对照组。研究发现:饥饿和摄食对照组的 $VO_{2\text{rest}}$ 在实验过程中显著下降( $P < 0.05$ ),饥饿锻炼组 $VO_{2\text{rest}}$ 在锻炼的4~15 d 显著上升( $P < 0.05$ ),而摄食锻炼组的 $VO_{2\text{rest}}$ 相对稳定;当撤消锻炼后,饥饿和摄食锻炼组 $VO_{2\text{rest}}$ 迅速下降,与对照组无显著差异。研究表明,相对于对照组4~7 d 的无氧运动锻炼导致 $VO_{2\text{rest}}$ 显著上升;而撤消锻炼后,15 d 的锻炼影响在3~5 d 内完全消除。实验还提示,与维持日粮处理比较,饥饿条件下无氧运动锻炼对 $VO_{2\text{rest}}$ 的影响更为显著。

**关键词:**运动锻炼;力竭运动锻炼;静止代谢率;南方鲇

中图分类号:Q493.8,Q955 文献标识码:A 文章编号:0250-3263(2007)06-103-05

## Resting Metabolic Rate and Body Mass Change of *Silurus meridionalis* to Exhaustive Exercise Training and Fasting

FU Shi-Jian CAO Zhen-Dong PENG Jiang-Lan

(Laboratory of Evolutionary Physiology and Behaviour, College of Life Sciences, Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China)

**Abstract** The resting metabolic rate ( $VO_{2\text{rest}}$ ) of *Silurus meridionalis* was measured under treatment of starvation and of maintain ration level (1.5% wt) during 15 d anaerobic exercise training (5 min chasing) and then following 5 d resting at 25℃. Two groups of fish either on fast or feeding at maintain ration level (1.5% wt) but without exercise training were treated as control.  $VO_{2\text{rest}}$  of both feeding and fasting control groups were significant decreased during experiment ( $P < 0.05$ ).  $VO_{2\text{rest}}$  of fasting training group was significantly increased after 4 to 15 days training ( $P < 0.05$ ) while  $VO_{2\text{rest}}$  of feeding training group was relatively unchanged.  $VO_{2\text{rest}}$  of both training groups were significantly decreased to the similar level of the control groups after 3 to 5 days without training. It suggested that  $VO_{2\text{rest}}$  was increased after 4 to 7 days anaerobic exercise training. While the influence of training was eliminated after 3 to 5 days resting. It also suggested that training had more profound effect on  $VO_{2\text{rest}}$  in fasting group than in feeding treatment.

**Key words:** Anaerobic exercise training; Exhaustive exercise training; Resting metabolic rate ( $VO_{2\text{rest}}$ ); *Silurus meridionalis*

**基金项目** 国家自然科学基金项目(No.30371121),重庆市自然科学基金(No.20059014)和重庆市教委科研项目(No.KJ050801)资助;

**第一作者介绍** 付世建,男,博士,副教授;研究方向:鱼类生理生态学;E-mail: shijianfu9@hotmail.com。

收稿日期:2007-02-17,修回日期:2007-06-29

运动锻炼大致可分为有氧锻炼和无氧锻炼,适当运动锻炼可以改善人的心肺功能、提高运动竞技水平及提高基础代谢水平和最大代谢能力<sup>[1]</sup>。运动锻炼不仅广泛应用于体育卫生行业,其研究也一直是运动生理学的热点领域<sup>[2]</sup>。运动锻炼对鱼类的生理影响研究数据较为缺乏,尽管鱼类肌肉以无氧代谢的白肌为主,相关研究的锻炼方式通常为有氧锻炼<sup>[3-5]</sup>,无氧锻炼的研究数据在鱼类中十分缺乏<sup>[6]</sup>。静止代谢率( $VO_{2\text{rest}}$ )指鱼类在安静、饥饿状态下的代谢能量消耗,能够在一定程度上反应鱼体生理状况<sup>[7,8]</sup>。考察无氧运动锻炼对鱼体  $VO_{2\text{rest}}$  的影响,将有助于揭示机体运动锻炼的内在生理学机制,然而至今未见无氧运动锻炼对鱼类  $VO_{2\text{rest}}$  影响的报道。

南方鲇(*Silurus meridionalis*)为我国特有的大型暖水性鱼类,性格温顺。预备实验发现在经历高强度运动锻炼6 h后所有鱼均能正常摄食,因此本研究选取南方鲇为实验对象,考察在饥饿和维持日粮条件下无氧运动锻炼(力竭运动锻炼)对其  $VO_{2\text{rest}}$  的影响。本实验的目的是考察无氧运动锻炼是否对其  $VO_{2\text{rest}}$  产生影响、及饥饿和维持日粮条件下无氧运动锻炼对  $VO_{2\text{rest}}$  的影响是否存在差异。

## 1 材料与方 法

**1.1 实验鱼的来源与驯化** 实验用南方鲇为当地渔民人工繁殖后池塘养殖的幼鱼,实验前于实验室自净化循环控温水槽中驯化1个月。实验用水为曝气后的自来水,实验水温为(25.0 ± 1.0) °C,溶氧水平 ≥ 7 mg/L,日换水量约为驯化水体的10%,光制为14L:10D。从驯养1个月的幼鱼中挑选身体健康、体重接近(21.37 ± 0.36)g的40尾南方鲇作为实验对象。

**1.2 实验方案与操作方法** 将选出的40尾实验鱼单尾放入流水式呼吸仪(呼吸室体积约0.1 L)<sup>[9,10]</sup>,于(25.0 ± 1.0) °C条件下驯化3 d,实验鱼以维持日粮(根据计算为1.5%体重)每天投喂1次(20:00时)。驯化结束时将实验鱼

称重后随机分为4组(每组10尾鱼)。2组实验期间不投喂,其中一组每天早上从呼吸室取出,放入环形环道内(约150 L)用人工驱赶的方法进行5 min的力竭运动锻炼(记作ST组),另一组为饥饿对照组(记作SC组);另外二组继续以维持日粮投喂,其中一组每天进行力竭运动锻炼(记作FT组),另外一组为摄食对照组(记作FC,此组1尾鱼在实验过程中死亡)。经过15 d锻炼后,实验鱼撤消锻炼,在实验室继续驯养5 d(投喂设计不变),15 d锻炼后及实验结束时均对实验鱼称重。实验期间实验鱼每天8:00和18:00时测定耗氧率,以平均值作为静止代谢率( $VO_{2\text{rest}}$ )。溶氧值用溶氧仪(HQ20, Hach Company, Loveland, Colorado, USA)测定。下面是计算代谢率( $VO_2$ , mg O<sub>2</sub>/kg·h)的公式:

$$VO_2 = \Delta O_2 \times v / m$$

式中,  $\Delta O_2$  是实验呼吸室和空白溶氧(mg O<sub>2</sub>/L)的差值,  $v$  是实验呼吸室水流速度(L/h)(水流速度用呼吸室出水口1 min水流称重得到)。  $m$  为每尾鱼的体重(kg)。实验期间未测定鱼体重,由实验不同时间点数据假设体重匀速变化推算得到。

**1.3 数理统计** 实验数据以Excel进行常规计算,采用Statistica 4.5进行单因素方差分析。统计值均以平均值 ± 标准误(Mean ± SE)表示,显著性水平为  $P < 0.05$ 。

## 2 结 果

**2.1 运动锻炼对南方鲇  $VO_{2\text{rest}}$  的影响** 经过15 d的运动锻炼和5 d的恢复期,各实验处理组  $VO_{2\text{rest}}$  变化有显著的差异(图1)。就饥饿实验处理组而言,SC组在实验第1 d上升,第2~5 d迅速下降,随后相对稳定。统计分析表明,运动锻炼1 d的  $VO_{2\text{rest}}$  显著大于实验初始值( $P < 0.05$ ),在恢复4~5 d显著低于实验初始值( $P < 0.05$ )。ST组  $VO_{2\text{rest}}$  在实验第1 d上升,第2~5 d迅速下降,在5~15 d呈上升趋势,锻炼撤除的恢复期1~2 d迅速下降,在随后实验期间(恢复的2~5 d)相对稳定。统计分析表明,

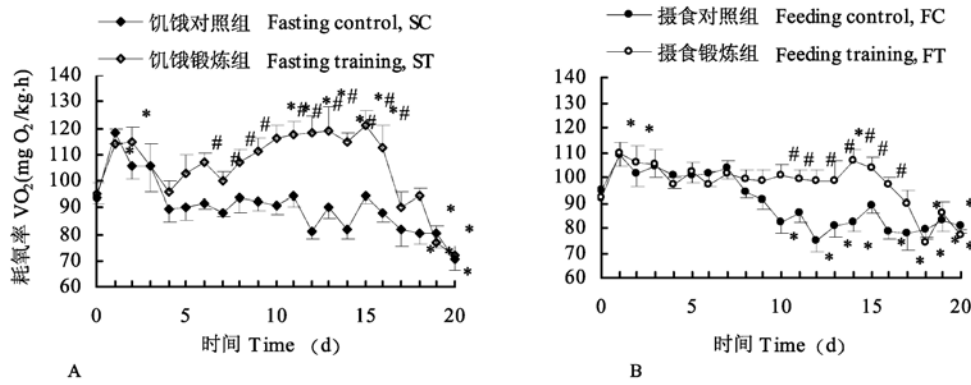


图1 饥饿(A)和维持日粮(B)条件下无氧运动锻炼对南方鲇静止代谢率的影响

Fig. 1 The effect of anaerobic exercise training on  $VO_{2\text{ rest}}$  in fasting and feeding *Silurus meridionis*

\* 表示该数值与该实验处理组静止代谢率初始值有显著差异 ( $P < 0.05$ ) ;

# 表示该取样时间点驯化组静止代谢率与对照组有显著差异 ( $P < 0.05$ ) 。

\* Indicated  $VO_{2\text{ rest}}$  was significantly different from the initial value (0 day) ( $P < 0.05$ ) ;

# Indicated  $VO_{2\text{ rest}}$  was significantly different from the value of control groups at a given time ( $P < 0.05$ ) .

表1 实验过程中南方鲇体重(g)的变化

Table 1 Body mass of Southern Catfish during experiment

	饥饿对照组 Fasting control SC	饥饿锻炼组 Fasting training ST	摄食对照组 Feeding control FC	摄食锻炼组 Feeding training FT
重复数 Number of replications	10	10	9	10
初始体重 Initial body mass	20.94 ± 0.87	20.48 ± 0.60	22.44 ± 0.49	22.91 ± 0.75
15 d 锻炼后体重 Body mass after 15 d training	19.44 ± 0.71 <sup>b*</sup>	18.59 ± 0.51 <sup>b*</sup>	22.16 ± 0.48 <sup>a</sup>	22.83 ± 0.74 <sup>a</sup>
终末体重 Final body mass	19.08 ± 0.70 <sup>b*</sup>	18.66 ± 0.48 <sup>b*</sup>	22.64 ± 0.50 <sup>a</sup>	23.52 ± 0.70 <sup>a</sup>
锻炼期鱼体重变化 Weight gain of 15 d training	1.49 ± 0.24 <sup>c</sup>	-1.90 ± 0.29 <sup>c</sup>	0.72 ± 0.13 <sup>a</sup>	-0.08 ± 0.16 <sup>b</sup>
恢复期鱼体重变化 Weight gain of 6 d resume	-0.37 ± 0.10 <sup>c</sup>	0.07 ± 0.12 <sup>b</sup>	0.48 ± 0.11 <sup>a</sup>	0.69 ± 0.10 <sup>a</sup>

a, b, c 表示同一行数据上标字母不同者差异显著; \* 表示体重显著低于实验开始值。

a, b, c values in the same row with different superscripts are significantly different ( $P < 0.05$ ); \* body mass was significantly lower than initial value.

静止代谢率在运动锻炼的1 d、10~15 d 和恢复期的第1 d 显著大于实验初始值 ( $P < 0.05$ ), 在恢复期的第4~6 d 显著低于实验初始值 ( $P < 0.05$ )。其中ST 组静止代谢率在运动锻炼的第10~15 d, 恢复期的第1 d 显著大于SC 组 ( $P < 0.05$ )。

就维持日粮实验处理组而言, FC 组在实验第1 d 有所上升, 第2 d 有所下降, 在2~7 d 相对稳定, 在7~12 d 迅速下降, 在随后实验期间相对稳定。统计分析表明, 运动锻炼的第10 d、12~14 d 和恢复期所有  $VO_{2\text{ rest}}$  均显著小于实验初始值 ( $P < 0.05$ )。FT 组  $VO_{2\text{ rest}}$  在实验第1 d

上升,然后开始下降,在3~15 d 相对稳定,锻炼撤除的恢复期1~3 d 迅速下降,在随后实验期间(恢复的3~5 d)相对稳定。统计分析表明,运动锻炼的第1 d 和2 d 的 $VO_{2\text{rest}}$ 显著大于实验初始值( $P < 0.05$ ),在恢复期的第3、5、6 d 显著低于实验初始值( $P < 0.05$ )。其中FT 组 $VO_{2\text{rest}}$ 在运动锻炼的第10~15 d,恢复期的第1 d 显著大于FC 组( $P < 0.05$ )。

**2.2 运动锻炼对南方鲇体重的影响** 饥饿组(ST 和SC 组)体重显著下降( $P < 0.05$ )(表1),维持日粮实验处理组(FT 和FC 组)在整个实验过程体重没有显著变化,在15 d 运动锻炼结束及恢复实验结束时的体重显著低于同期FT 和FC 组( $P < 0.05$ )。

经过15 d 的运动锻炼期FC 组体重增长显著大于FT 组,而后者显著大于SC 和ST 组( $P < 0.05$ )。5 d 恢复期FC 和FT 组体重增长显著大于ST 组,而后者大于SC 组( $P < 0.05$ )。

### 3 讨论

运动锻炼是否对机体产生重要生理影响取决于锻炼量(单次锻炼的强度和持续时间)和锻炼持续时间。相对于有氧锻炼,无氧锻炼对鱼类生理影响鲜见报道。Pearson 等<sup>[6]</sup>曾发现无氧锻炼导致虹鳟(*Salmo gairdner*)游泳速度、乳酸清除、糖原合成能力和ATP 周转率增强。本研究发现南方鲇饥饿和摄食对照组在实验过程中 $VO_{2\text{rest}}$ 都出现不同程度下降,这种类似的现象在蜥蜴(*Amphibolurus nuchalis*)的研究中也有报道<sup>[11]</sup>,可能与实验日粮水平低(或无)、呼吸仪体积小(约100 ml)、环境稳定等导致囚禁效应(captivity effect)有关。而锻炼组不仅在实验7~10 d 的 $VO_{2\text{rest}}$ 显著大于对照组,而且在实验某些时期显著大于实验初始值,这说明无氧锻炼能够显著提高 $VO_{2\text{rest}}$ ,但锻炼组在实验过程中的锻炼作用在一定程度上被“囚禁效应”抵消。

南方鲇的 $VO_{2\text{rest}}$ 对无氧锻炼敏感性较高,相对于对照组摄食锻炼组 $VO_{2\text{rest}}$ 有30%的上升,而饥饿锻炼组有40%上升。对于维持日粮

处理组,这种差异在锻炼的第8 d 开始出现,第10 d 差异显著;对于饥饿处理,这种差异在第4 d 开始出现,第6 d 差异显著。值得注意的是这种影响可塑性强,在撤消锻炼后,这种差异随即减小。无论维持日粮组还是饥饿组,在撤消锻炼的第2 d 差异就不再显著,而真正恢复也只需要3~4 d。这种运动锻炼 $VO_{2\text{rest}}$ 的增加可能与机体物质周转速率加快、非脂肪肌肉组织增加等有关<sup>[6]</sup>。另外我们有关力竭运动锻炼对南方鲇 $VO_{2\text{max}}$ 及运动后恢复代谢(EPOC)的研究表明(未发表资料),锻炼导致 $VO_{2\text{max}}$ 增加,运动后代谢恢复速率加快,而这些身体结构和功能的改善都需要更多的维持能量消耗,导致 $VO_{2\text{rest}}$ 上升。

以往研究表明,南方鲇的 $VO_{2\text{rest}}$ 与营养状况显著相关<sup>[8、9]</sup>,摄食组需要维持一定的消化系统功能,应该有更大的 $VO_{2\text{rest}}$ 。然而本实验发现对于不进行锻炼的摄食对照组和饥饿对照组,二者在整个实验过程中差异均不显著(摄食组 $VO_{2\text{rest}}$ 仅在第4~7 d 稍大于饥饿组),这说明在本实验条件下,二者 $VO_{2\text{rest}}$ 的差异仅仅反应在对实验条件的适应快慢不同。这可能因为维持日粮组的日粮水平低,消化功能维持能量低<sup>[9]</sup>。而有趣的是,对于锻炼组,饥饿组的静止代谢率反而显著大于摄食组(图1),其机理值得进一步探讨。其可能的原因之一是对于摄食组,锻炼消耗的高能磷酸物质、糖原和葡萄糖,部分可以直接从消化食物更新获得;而饥饿组每天消耗的物质则需要从机体储存的物质,甚至结构物质分解得到,能量消耗可能更大。另一个原因可能是随着实验进程,饥饿组脂肪组织减少、肌肉组织增加,体重减轻、内脏代谢活性组织相对比增加,导致单位体重 $VO_{2\text{rest}}$ 上升。

**致谢** 感谢曾令清、肖明春和罗颖同学协助工作,谨此致谢。

### 参 考 文 献

- [1] Pang M Y, Eng J J, Dawson A S, et al. The use of aerobic

- exercise training in improving aerobic capacity in individual with stroke: a meta-analysis. *Clinical Rehabilitation* 2006 **20**: 97 ~ 111.
- [ 2 ] Braun W A, Hawthorne W E, Markofski M M. Acute EPOC response in women to circuit training and treadmill exercise of matched oxygen consumption. *Europe Journal of Apply Physiology* 2005 **94**: 500 ~ 504.
- [ 3 ] Bagatto B, Pelster B, Burggren W W. Growth and metabolism of larval zebrafish: effect of swim training. *Journal of Experimental Biology* 2001 **204**: 335 ~ 343.
- [ 4 ] Pelster B, Sanger A M, Segele M, et al. Influence of swim training on cardiac activity, tissue capillarization, and mitochondrial density in muscle tissue of zebrafish larvae. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*, 2003 **285**: R339 ~ R347.
- [ 5 ] Anttila K, Minttari S, Jarvilehto M. Effects of different training protocols on Ca<sup>2+</sup> handling and oxidative capacity in skeletal muscle of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.). *Journal of Experimental Biology* 2006 **209**: 971 ~ 978.
- [ 6 ] Pearson M P, Spriet L L, Stevens E D. Effect of sprint training on swim performance and white muscle metabolism during exercise and recovery in rainbow trout (*Salmo gairdner*). *Journal of Experimental Biology* 1990 **149**: 45 ~ 60.
- [ 7 ] Fu S J, Xie X J. Nutritional homeostasis in carnivorous southern catfish (*Silurus meridiondis* Chen): is there a mechanism for increased energy expenditure during carbohydrate overfeeding? *Comparative Biochemistry Physiology A* 2004 **139**: 359 ~ 363.
- [ 8 ] Fu S J, Xie X J, Cao Z D. Effect of fasting and repeat feeding on metabolic rate in southern catfish, *Silurus meridiondis* Chen. *Marine and Freshwater Behaviour and Physiology*, 2005 **31**: 191 ~ 198.
- [ 9 ] Fu S J, Xie X J, Cao Z D. Effect of dietary composition on specific dynamic action in southern catfish, *Silurus meridiondis*. *Aquaculture Research* 2005 **36**: 1384 ~ 1390.
- [ 10 ] 付世建, 曹振东, 彭姜岚. 追赶和空气暴露时间对瓦氏黄颡鱼耗氧率的影响. *动物学杂志*, 2007 **42**(2): 111 ~ 115.
- [ 11 ] Garland T, Else P L, Hilbert A J, et al. Effects of endurance training and captivity on activity metabolism of lizards. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 1987 **252**: R450 ~ R456.

## 第23 届国际保护生物学大会将于2009 年7 月在北京举行

“第21 届国际保护生物学大会”于2007 年7 月1 ~ 5 日在南非南部的伊丽莎白港市举行,以中国科学院动物研究所动物生态学及保护生物学院重点实验室为主的近20 人的中国代表团参加了本届大会。经过2 年的申办过程,最终国际保护生物学会执委会决定“第23 届国际保护生物学大会”于2009 年7 月11 ~ 16 日在中国北京举行,由中国科学院动物研究所主办。

国际保护生物学大会是国际保护生物学界最高水平的会议,每年举办一次。大会的主题涉及气候变化及环境保护、濒危物种保护、生物多样性保护、海洋生物保护、生态经济学等各个方面。第23 届国际保护生物学大会是首次在亚洲国家举行,预计与会代表将超过2 000 人,将具有重要的国际影响。作为保护生物学的国际学术盛会,它将促进和扩大我国学者与国际同行之间的交流与合作,推动我国保护生物学研究和实践的发展,增强我国在国际保护生物学界的话语权和影响力。同时,通过大会各项面对公众的展览和活动,对提高我国公民的生态与环境保护素质、实现经济社会全面协调可持续发展、构建社会主义和谐社会、建设生态文明,都具有十分重要的意义。

“第23 届国际保护生物学大会”组织委员会和科学委员会已经组成,大会组织委员会主席由中国科学院副院长李家洋院士担任,秘书长由中国科学院动物研究所孙悦华研究员担任;大会科学委员会主席由国家自然科学基金委员会主任陈宜瑜院士担任,秘书长由中国科学院动物研究所魏辅文研究员担任。

孙悦华

(中国科学院动物研究所 北京 100101)