

体重对大鳍鱩力竭性运动后过量耗氧的影响*

曹振东,彭姜岚,付世建

(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 过量耗氧(EPOC)是衡量动物无氧代谢能力的重要生理指标,为揭示不同体重鱼类在EPOC方面的适应机制,在25℃条件下对体重范围分别为低于20g、20~30g、30~50g和高于50g的大鳍鱩(*Mystus macropterus* Bleeker)力竭性运动后EPOC进行了测定。结果显示:实验鱼单位体重的静止耗氧率随体重的增加而显著下降($p < 0.05$),分别为2.44、2.25、2.05和1.71 $\text{mg} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$;力竭运动后实验鱼耗氧率迅速上升,然后缓慢回落到一稳定水平;其力竭性运动后耗氧率峰值出现时间随体重的上升而后延,分别为1.31、1.53、1.89和4.50 min;其单位体重的耗氧率峰值随体重的增加而显著下降($p < 0.05$),分别为12.36、11.07、10.27和7.20 $\text{mg} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$,该数值分别为处理前的5.36、5.04、5.23和4.22倍;各体重重组耗氧率下降到稳定水平的时间分别为20、20、25和20 min,在此时间段高于静止耗氧率水平的耗氧量分别为69.25、64.89、62.15和49.07 mg。研究表明大鳍鱩无氧代谢能力随体重的增加而上升。

关键词 大鳍鱩 体重 力竭性运动 过量耗氧

中图分类号:Q591.4

文献标识码:A

文章编号:1672-6693(2009)04-0017-03

运动后过量耗氧(Excess post-exercise oxygen consumption, EPOC)指动物运动后恢复期内超过静止状态耗氧水平的额外耗氧量^[1],是研究动物无氧代谢能力的重要生理学指标^[2]。一般认为EPOC的大小在一定程度上决定鱼类的非稳定游泳能力,进而决定鱼类穿越激流、捕食饵料和逃避敌害的能力^[3]。相关研究表明运动后ATP、CrP的还原、代谢底物的更新和产物的清除以及循环系统、呼吸系统机能和内环境平衡的恢复等生理生化过程构成了EPOC的主要组分,而这些组分随着个体发育的进程和体重的不断增加而相应地发生改变^[2]。大鳍鱩(*Mystus macropterus* Bleeker)是中国常见的肉食性经济鱼类,本研究选取其作为实验对象,通过连续监测其力竭运动后的耗氧水平,分别考察体重对大鳍鱩EPOC总量和持续时间等参数的影响,旨在揭示不同体重的鱼类在EPOC方面的适应机制,为鱼类生理生态学的相关研究提供基础资料。

1 材料和方法

1.1 实验用鱼来源与驯化

实验用鱼购于重庆当地渔民,于重庆师范大学进化生理与行为学实验室自净化循环控温水槽中驯

化3 d。实验用水为曝气后的自来水,实验水温(25.0 ± 1.0)℃,溶氧量(单位体积水中溶解氧的质量)高于 $7 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,每天光照期14 h,黑暗期10 h。从驯养3 d后的幼鱼中挑选健康、体重不同(13.95~159.26 g)的49尾幼鱼作为实验对象,并将其4个实验组,体重范围分别为低于20g、20~30g、30~50g和高于50g。

1.2 实验方法

将选出的实验鱼单尾放入本实验室自行设计的流水式呼吸仪,在(25.0 ± 1.0)℃驯化1 d,呼吸仪结构和使用方法详见文献[4]。随后连续两次测定耗氧率作为实验鱼的静止耗氧率。再将实验鱼放入外径、内径分别为52、28 cm,容量150 L的环形水道内,采用国际通用的方法用手不断追逐使鱼被迫持续5 min的力竭性运动^[3,4],然后立即将力竭性状态的实验鱼放回呼吸室内进行恢复耗氧的测定。在进行恢复耗氧的测定时,较小实验鱼(体重低于30g)所使用的呼吸室体积为100 mL,水流速度约为 $500 \text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$,较大实验鱼(体重高于30g)呼吸室体积为250 mL,水流速度为 $600 \text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 。监测实验鱼耗氧率的数据采集时间分别设定为1、2、3、4、5、10、15、20、25、30、40 min。耗氧率由各设定

* 收稿日期 2009-04-14 修回日期 2009-05-31

资助项目:国家自然科学基金(No. 30700087)、重庆市高校优秀人才支持计划(2009)、重庆市教委科研项目(No. KJ080823)

作者简介:曹振东,男,教授,研究方向为鱼类生态学。

采集数据时刻的呼吸室出水口溶氧水平与空白溶氧水平之差和呼吸室水流速度的乘积求得^[5-7]本文中其单位为 $\text{mg} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ 其中 mg 为消耗氧的质量单位 kg 为实验鱼鲜重。

1.3 数据统计

采用主要参数定义分别为:1)静止耗氧率,即实验鱼在力竭运动前的耗氧率;2)耗氧率峰值,即实验鱼在恢复过程中的最大耗氧率;3)恢复时间,即当恢复过程中耗氧率下降到与静止耗氧率无显著差异的时间;4)过量耗氧,即实验鱼在测定过程中高于静止耗氧率的耗氧;5)耗氧上升倍率,即最大耗氧率和静止耗氧率的比值。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和曲线拟合。统计值均以平均值 \pm 标准误差 (Mean \pm SE) 表示,显著性水平为 $p < 0.05$ 。

2 结果

4 个实验体重组大鳍鲮的平均体重分别为 17.43、23.44、36.59 和 101.85 g (表 1)。实验鱼单位体重耗氧率随体重的增加则显著下降 ($p < 0.05$),分别为 2.44、2.25、2.05 和 1.71 $\text{mg} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。实验鱼力竭运动后耗氧率迅速上升,然后缓慢回落到一个稳定水平(图 1)。大鳍鲮力竭性运动恢复的耗氧率峰值出现时间随体重的上升而延后,分别为 1.31、1.53、1.89 和 4.50 min。每尾鱼单位体重的耗氧率峰值随体重的增加而显著下降 ($p < 0.05$),分别为 12.36、11.07、10.27 和 7.20 $\text{mg} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。分别为处理前的 5.36、5.04、5.23 和 4.22 倍。各体重组耗氧率下降到稳定水平的时间分别为 20、20、25 和 20 min。在此时间段高于静息水平的耗氧量(以消耗氧的毫克数表示)分别为 69.25、64.89、62.15 和 49.07 mg,其中体重高于 50 g 的体重组显著小于体重低于 20 g 和体重为 20~30 g 的体重组。各体重组回落的稳定水平的耗氧率分别为 3.47、3.22、3.18 和 3.12 $\text{mg} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$,分别为处理前的 1.49、1.45、1.61 和 1.86 倍。

3 讨论

大鳍鲮静止耗氧率为 1.71~2.44 $\text{mg} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$,高于在相似实验条件下测定的同水域的其它鲇形目鱼类^[8-9],这应与其生活环境,觅食习性和天敌状况等相关。大鳍鲮一般栖息于水流较急的江河干支流,而瓦氏黄颡鱼(*Pelteobagrus vachelli*)、中华鲇(*Silurus asotus*)和南方鲇(*Silurus meridionalis*)更

表 1 体重对大鳍鲮运动后过量耗氧特征的影响

Tab.1 Effect of body weight on characteristic of post-exercise oxygen consumption in *Mystus macropterus*.

体重范围	低于 20.0 g	20.0~30.0g	30.0~50.0g	高于 50.0g
样本数/个	16	20	9	4
体重/g	17.43 \pm 0.52	23.44 \pm 0.57	36.59 \pm 1.25	101.85 \pm 22.76
静止耗氧率/ ($\text{mg} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$)	2.44 \pm 0.17 ^a	2.25 \pm 0.08 ^b	2.05 \pm 0.17 ^b	1.71 \pm 0.14 ^c
耗氧率峰值/ ($\text{mg} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$)	12.36 \pm 0.45 ^a	11.07 \pm 0.41 ^b	10.27 \pm 0.21 ^b	7.20 \pm 0.49 ^c
峰值到达时间/ min	1.31 \pm 0.12 ^b	1.53 \pm 0.16 ^b	1.89 \pm 0.20 ^b	4.50 \pm 0.29 ^a
恢复时间/min	20	20	25	20
过量耗氧/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	69.25 \pm 4.14 ^a	64.89 \pm 2.94 ^a	62.15 \pm 2.50 ^{ab}	49.07 \pm 3.3 ^b
耗氧上升倍率	5.36 \pm 0.33	5.04 \pm 0.25	5.23 \pm 0.34	4.22 \pm 0.18

注:每行平均值后上标字母不同表示差异显著 ($p < 0.05$)。

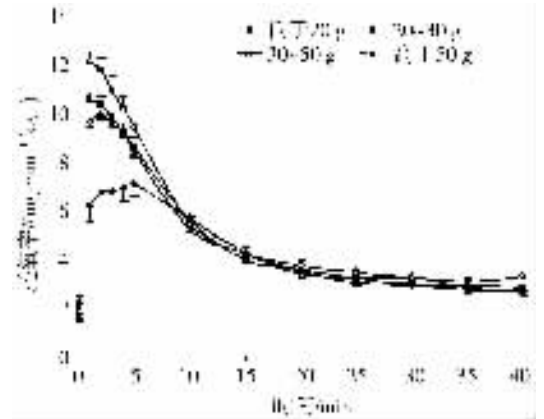


图 1 不同体重大鳍鲮力竭运动后耗氧率恢复曲线

Fig.1 The post-exercise oxygen consumption rate curve in *Mystus macropterus* with different body weight

喜栖息于静水或水流较缓处。相对于后面 3 种鲇形目鱼类,大鳍鲮觅食活动更为频繁^[10],被捕食的概率也较高,因此大鳍鲮有较强的运动能力,日常支付的能量也更多,表现为较高的静止耗氧率。随着体重增加大鳍鲮静止耗氧率下降,说明大鳍鲮的有氧代谢能力随个体生长而下降。这是因为随个体增大,机体相对代谢活性较高的器官如心脏、肝脏、鳃相对比例下降,体表面积占体重比例下降导致与外界物质能量交换率下降、机体血管系统运输能力下降等原因造成的^[8]。

有关鱼类力竭性运动后过量耗氧研究发现耗氧率一般在力竭后即刻达到最大值,然后呈负指数下降^[3,11-12],本实验小体重组大鳍鲮也发现相同现象,只是大体重组峰值后延,出现在运动后的 4.50 min,

这与伏击取食的南方鲇的力竭性运动后耗氧曲线相似^[3],而后者有氧化代谢能力低,高速运动中无氧代谢比例较高。这提示随体重增加,大鳍鱮可能增加无氧代谢能力作为有氧代谢能力下降的补偿。大鳍鱮力竭性运动后耗氧率上升倍率约为4.22~5.36,大于南方鲇^[3]、中华鲇^[8]、黄颡鱼^[3]、大西洋鲑(*Salmo salar*)^[12]和鲟鱼(*Acipenser oxyrinchus*)^[11](一般为2~4倍);力竭运动后过量耗氧总量为49.07~69.25 mg·kg⁻¹,也高于大多数研究结果(一般为10~50 mg·kg⁻¹)。其具体原因还有待进一步研究。

值得注意的是,由于随体重增加有氧代谢能力下降,鱼类会通过酸碱调节能力的增强^[13],白肌相对比例提高和组织糖原含量上升^[12]来提高无氧代谢能力,以应对可能的逆境能量需求。因此,鱼类作为无氧代谢重要衡量指标之一的过量耗氧应随体重增加而增加,然而本实验发现过量耗氧随体重增加反而有所下降。这种现象在中华鲇的研究中也有类似报道^[5]。本研究认为这现象的原因是:无氧代谢运动恢复的部分组分如ATP和CrP的更新均可在很短时间内完全恢复,但有些因素,如乳酸的代谢和糖原的合成则需要更长的恢复时间^[14]。尽管目前鱼类监测力竭运动后耗氧率的时间多采用30~40 min,此时鱼体耗氧率不再有显著的变化,然而运动后代谢率完全恢复至运动前状态可能需要更长的时间。小鱼有氧代谢高,糖原含量低,大部分无氧代谢组分能在短期恢复,而大体重鱼,由于力竭运动消耗糖原相对较多,乳酸积累较高,因此有较大的过低估计。

参考文献:

[1] Lee C G, Devlin R H, Farrell A P. Swimming performance, oxygen consumption and excess post-exercise oxygen consumption in adult transgenic and ocean-ranched coho salmon [J]. *J Fish Biol* 2003, 62: 753-766.

[2] Hancock T V, Gleeson T T. Metabolic recovery in the desert iguana (*Dipsosaurus dorsalis*) following activities of varied intensity and duration [J]. *Funct Ecol* 2002, 16: 40-48.

[3] Fu S J, Zeng L Q, Li X M, et al. Effect of meal size on excess post-exercise oxygen consumption in fishes with different locomotive and digestive performance [J]. *J Comp Physiol B* 2009, 179(4): 509-517.

[4] 付世建, 曹振东, 彭姜岚. 不同时间间隔重复力竭运动对南方鲇幼鱼耗氧率的影响 [J]. *重庆师范大学学报(自然科学版)* 2009, 26(1): 13-16.

[5] 汤洪芬, 曹振东, 付世建. 饥饿对鲇鱼幼鱼静止代谢率的影响 [J]. *重庆师范大学学报(自然科学版)*, 2007, 24(1): 72-75.

[6] 刘云, 曹振东, 付世建. 不同麻醉剂量灌喂对南方鲇幼鱼代谢的影响 [J]. *重庆师范大学学报(自然科学版)*, 2009, 26(1): 17-21.

[7] Fu S J, Xie X J, Cao Z D. Effect of dietary composition on specific dynamic action in southern catfish, *Silurus meridionalis* cher [J]. *Aqua Res* 2005, 36: 1384-1390.

[8] 彭姜岚, 曹振东, 付世建. 鲇鱼力竭性运动后的过量氧耗及其体重的影响 [J]. *水生生物学报* 2008, 32(3): 380-386.

[9] Fu S J, Zeng L Q, Li X M, et al. The behavioural, digestive and metabolic characteristics of fishes with different foraging strategies [J]. *J Exp Biol* 2009, 212: 2296-2302.

[10] 陈娟, 谢小军. 大鳍鱮成鱼静止代谢率的初步研究 [J]. *西南师范大学学报(自然科学版)* 2002, 27(6): 927-931.

[11] Kieffer J D, Wakefield A M, Litvak M K. Juvenile sturgeon exhibit reduced physiological responses to exercise [J]. *J Exp Biol* 2001, 204: 4281-4289.

[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.

[13] Ferguson P A, Kieffer J D, Tufts B L. The effects of body size on the acid-base and metabolite status in the white muscle of rainbow trout before and after exhaustive exercise [J]. *J Exp Biol* 1993, 180: 195-207.

[14] 李黎, 曹振东, 付世建. 力竭性运动后鲇鱼幼鱼乳酸、糖原和葡萄糖水平的变动 [J]. *水生生物学报* 2007, 31(6): 880-885.

Effect of Body Weight on Excess Post-Exercise Oxygen Consumption in *Mystus macropterus*

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

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

Abstract : The elevated oxygen consumption following exhaustive exercise , termed “ excess post-exercise oxygen consumption ” (EP-OC) can be used to assess the non-aerobic oxygen cost of exercise. To investigate the relationship between body weight and non-aerobic oxygen capacity , the effect of body weight (below 20 g , 20 ~ 30 g , 30 ~ 50 g and above 50 g) on EPOC was studied in largespin longbarbel catfish (*Mystus macropterus*) at 25 °C by using a open-flow respirometer. The results show that resting oxygen consumption rates decrease significantly with the increase of body weight ($p < 0.05$) and the values are 2.44 , 2.25 , 2.05 and 1.71 $\text{mgO}_2 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ for below 20 g , 20 ~ 30 g , 30 ~ 50 g and above 50 g body weight groups , respectively. Time to peak oxygen consumption rate increases with body size , which are 1.31 , 1.53 , 1.89 and 4.50 min for below 20 g , 20 ~ 30 g , 30 ~ 50 g and above 50 g body weight groups respectively. Peak oxygen consumption rates decrease significantly with the increase of body weight ($p < 0.05$) and the values are 12.36 , 11.07 , 10.27 and 7.20 $\text{mg} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ for below 20 g , 20 ~ 30 g , 30 ~ 50 g and above 50 g body weight groups respectively , which are 5.36 , 5.04 , 5.23 and 4.22 that of resting oxygen consumption rate. The durations of post-exercise oxygen consumption to return to post-exercise stable level are 20 , 20 , 25 and 20 min respectively. The excess post-exercise oxygen consumption above resting oxygen consumption during this period are 69.25 , 64.89 , 62.15 and 49.07 mg respectively. This study show that the anaerobic metabolic capacity increased with the body weight in largespin longbarbel catfish.

Key words : *Mystus macropterus* ; body weight ; exhaustive exercise ; excess post-exercise oxygen consumption (EPOC)

(责任编辑 方 兴)