

运动锻炼对鲤鱼幼鱼游泳能力及代谢的影响*

闫东娟, 闫冠杰, 曹振东, 付世建

(重庆师范大学 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:以鲤鱼(*Cyprinus carpio*)幼鱼为研究对象,在25℃条件下将90尾体重为(8.12±1.30)g的实验鱼平均分成0 h锻炼组(对照组)、6 h锻炼组和12 h锻炼组,以60%临界游泳速度(U_{crit})持续运动锻炼15 d,每天锻炼时间分别为0、6和12 h;随后对实验鱼进行 U_{crit} 、耗氧率(M_{O_2})和快速启动(Fast-start)的测定。结果显示,经过运动锻炼鲤鱼幼鱼的 U_{crit} 和Fast-start与对照组相比,均没有显著提高,但6 h锻炼组的实验鱼在30和36 cm·s⁻¹的流速下 M_{O_2} 显著降低,而12 h运动锻炼组的 M_{O_2} 始终处于较高水平。研究认为可能是由于在低于 U_{crit} 流速下的适度的运动锻炼可能会提高鱼类在该流速下的能量利用效率,而高强度的锻炼则会它们的基础代谢处于较高水平。

关键词:运动锻炼;临界游泳速度;快速启动;鲤鱼

中图分类号:Q591.4

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2012)05-0016-04

鱼类运动类型一般分为持续运动、延续运动和爆发运动^[1]。持续游泳速度是指由有氧代谢为鱼供能,并能够维持较长时间(大于240 min^[2])且最终不会力竭的速度;延续游泳也是由有氧代谢供能,但是比持续游泳持续时间短(20 s~200 min)并最终使鱼达到力竭^[1];爆发游泳速度使鱼类能够达到的最大速度,只能维持很短的时间(小于20 s^[1])。其中持续运动通常用临界运动速度(Critical swimming speed, U_{crit})来衡量^[3-5]。最大运动代谢(活跃代谢,Active metabolic rate, $M_{O_{active}}$)表示鱼类在临界运动过程中的最大代谢,一般情况下用于评价鱼类的最大有氧代谢能力;快速启动(Fast-start swimming)是以无氧代谢为主的高能耗爆发运动^[6]。

由于鱼类有逆流游泳的习性,因此它们成为研究运动锻炼的理想材料。以60% U_{crit} 对鲤鱼(*Cyprinus carpio*)幼鱼进行15 d的持续运动锻炼,会使鲤鱼幼鱼的体高、头高降低和尾柄面积增加^[7]。形态是影响鱼类运动能力的一个重要因素,新月形的尾鳍、较窄的尾柄、僵直的身体、流线型的体型及合适的长宽比更有利于持续运动^[8-12];较小的头部、较大的尾柄和奇鳍、柔韧的身体、较大比例的白肌等更

有利于快速启动^[11,13-14]。从形态学方面来看,由于鲤鱼幼鱼经过运动锻炼体高和体高与体长的比率降低有利于持续运动能力的提高,而头高的降低和尾柄面积的增加有利于快速启动能力的增加,因此可以假设运动锻炼会提高鲤鱼幼鱼的持续游泳能力和快速启动能力。基于上述背景,本研究以鲤鱼幼鱼为实验对象,经过60% U_{crit} 流速不同时间的锻炼,通过对 U_{crit} 和快速启动的测量考察运动锻炼对鲤鱼幼鱼运动能力的影响,旨在为相关研究提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 实验鱼的来源与驯养

实验鱼购于重庆市合川水产学校,将鱼放入自净化循环控温水槽(1.2 m×0.55 m×0.55 m,实际水量250 L),以每天2℃的水温变化将水温控制到(25±1)℃并在该温度下温度适应2周。选取体重(8.12±1.30)g、体长(7.0±0.4)cm相近的90尾实验鱼转入10个与水槽水体相连的养殖单元内适应3 d,每个单元内放置实验鱼9尾。实验用水为曝气后的自来水,日换水量约为总水体的10%,用充气泵持续向水体充入空气以使溶氧接近饱和,光照

* 收稿日期:2012-02-06 修回日期:2012-03-10 网络出版时间:2012-9-15 23:19

资助项目:国家自然科学基金(No. 31172096);重庆市自然科学基金(No. 2010BB1089);重庆市科技创新能力建设项目(No. 2110CA1010)

作者简介:闫东娟,女,硕士研究生,研究方向为鱼类生理生态;通讯作者:付世建,E-mail:shijianfu9@hotmail.com

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20120915.2319.201205.16_005.html

周期为光照 12 h : 黑暗 12 h。驯化期间每天以商业颗粒饵料饱足投喂 2 次(10:00、19:00),实验鱼摄食 0.5 h 后清除残饵和粪便。

1.2 实验方案与操作

将 90 尾实验鱼随机均匀地分为 0 h 锻炼组(对照组)、6 h 锻炼组和 12 h 锻炼组。6 h 和 12 h 锻炼组每天的锻炼时间分别为 6 h 和 12 h,均持续锻炼 15 d。两组锻炼开始时间均为上午 9:00,水流速度为预实验测得的 $60\%U_{crit}$ 。锻炼结束后将实验鱼转移到养殖单元中,0 h 锻炼组始终在饲养单元,不进行运动锻炼。3 组实验鱼每日在 8:00 和 24:00 定时饱食投喂,投喂前清除残饵和粪便。15 d 锻炼完成后禁食 1 d,随后对实验鱼进行相关参数的测定。

1.3 测定方法及主要参数

1.3.1 U_{crit} 和运动代谢率(M_{O_2})测定 采用本实验室自行设计的密闭式鱼类运动代谢仪(专利号:200520010485.4)进行测定。实验开始前将实验鱼放入流速为 $5.0\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 的较缓水流的运动管中适应 1 h,以消除转移造成的胁迫;随后采用国际通用方法进行 U_{crit} 测定。测定过程中,采用预实验测得的 $40\%U_{crit}$ 为起始速度,以 $6.0\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 为速度增量增加水流速度,每个流速下持续运动 20 min;在增加流速之前换水 1 次,以确保整个过程中运动代谢仪管内水体的溶氧水平不低于饱和状态的 70% ,直至实验鱼达到运动力竭状态即实验鱼停靠在运动管末端筛板 20 s 以上时^[15],取出实验鱼并封闭运动管测量细菌耗氧。在测定 U_{crit} 的过程中每 2 min 测定 1 次运动代谢仪封闭水体的溶氧值,通过公式计算出每尾实验鱼运动过程的耗氧率即 M_{O_2} 。溶氧水平通过溶氧仪(HQ10 型,美国 Hach 公司生产)进行监测。

1.3.2 快速启动的测定 采用本实验室自行研制的装置^[16]进行快速启动的测定。测定设备包括高速摄像机(A504K 型,德国 BASLER 公司生产)、LED 矩阵光源和水槽(底部刻有 $1\text{ cm}\times 1\text{ cm}$ 网格线);其中水槽四周贴纸遮挡,避免外界环境对实验鱼的干扰^[17]。每组选取 8 尾实验鱼放入测定装置的适应区内(水深 10 cm,溶氧水平接近饱和)适应 1 h,整个过程中水温与驯化温度一致均为 $(25\pm 1)\text{ }^\circ\text{C}$;随后将单尾实验鱼由通道驱赶至实验区,当实验鱼静止于实验区中部时,启动高速摄影机以 $500\text{ 帧}\cdot\text{s}^{-1}$ 的频率进行拍摄并同时给予电刺激,记录实验鱼整个运动的过程,随后测量体重、体长。实验结束后,

先对拍摄的相片进行筛选并用 ACDsee 10 图像处理软件进行处理,然后采用 tpsUtil 和 tpsDig 2 软件对处理过的照片进行数字化处理,最终获得实验鱼逃逸过程中质心的运动轨迹。根据质心运动轨迹的坐标求得实验鱼在第二阶段的最大线加速度(A_{max})、速度(V_{max})、前 120 ms 移动的路程($S_{120\text{ ms}}$)等 3 个指标。

1.4 参数计算

U_{crit} 和 M_{O_2} 的计算公式分别为

$$U_{crit} = U + (t/T)\Delta U \quad (1)$$

$$M_{O_2} = (S_t - S_0) \times 3.45 \times 60 / (W \times 1000) \quad (2)$$

(1)式中 U 是能够完成设定时间即 20 min 的最大运动速度(单位: $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$); ΔU 是速度增量即 $6.0\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$; T 是设定的持续运动时间,历时 20 min; t 是未能完成设定历时的实际持续运动时间,一般小于 20 min。(2)式中 M_{O_2} 以每小时每千克鱼体重所消耗氧气的毫克数为单位($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$); S_t 为每档即 20 min 期间溶氧值随时间变化的斜率; S_0 为空白组的溶氧值变化斜率;3.45 为运动呼吸仪的系统体积(单位:L);60 为时间 60 min; W 表示体重(单位:g)。

快速启动参数 A_{max} 、 V_{max} 和 $S_{120\text{ ms}}$ 均由质心轨迹坐标根据物理学基本公式求得。

1.5 数据统计

实验数据以 Excel 软件进行常规计算,然后用 SPSS17.0 软件进行单因素方差分析并进行多重比较(LSD 法)。统计值均以“平均值±标准误”(Mean±SE)表示,显著性水平设置为 $\alpha = 0.05$ 。

2 结果

2.1 对 U_{crit} 的影响

计算得出经过 0、6 和 12 h 锻炼的 3 组鱼的 U_{crit} 分别为 (56.1 ± 1.0) 、 (57.1 ± 1.1) 和 $(57.6\pm 0.6)\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$,单因素方差分析显示 3 组鱼的 U_{crit} 之间均无显著差异。

2.2 对 M_{O_2} 的影响

各实验组 M_{O_2} 的测定结果见表 1。经单因素方差分析发现运动锻炼对鲤鱼幼鱼的 M_{O_2} 有显著影响($p < 0.05$),6 h 锻炼组在 $30\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 流速下的 M_{O_2} 显著小于对照组和 12 h 锻炼组,在 $36\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 流速下的 M_{O_2} 显著小于对照组。

2.3 对快速启动的影响

实验测得 3 组实验鱼的快速启动结果如图 1 所示, V_{max} 、 A_{max} 和 $S_{120\text{ ms}}$ 在组间没有显著差异。单因

素方差分析结果显示运动锻炼对鲤鱼幼鱼的快速启动能力没有显著影响。

表 1 运动锻炼对鲤鱼幼鱼的 M_{O_2} 影响

Tab. 1 The effect of exercise on the M_{O_2} of juvenile common carp $mg \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$

锻炼 时间/h	水流速度/($cm \cdot s^{-1}$)						
	24	30	36	42	48	54	60
0	388±27 ^a	473±35 ^a	576±38 ^a	640±31 ^a	829±41 ^a	1 224±75 ^a	1 526±49 ^a
6	377±46 ^a	377±35 ^b	440±28 ^b	567±42 ^a	797±61 ^a	1 063±70 ^a	1 524±59 ^a
12	437±19 ^a	481±26 ^a	531±29 ^{ab}	654±31 ^a	832±39 ^a	1 168±47 ^a	1 643±48 ^a

注:不同字母表示同列数据差异显著($p < 0.05$)

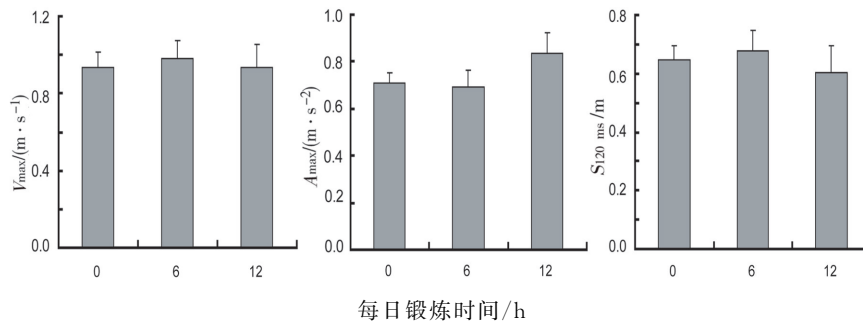


图 1 运动锻炼对鲤鱼幼鱼 V_{max} 、 A_{max} 、 S_{120ms} 等 3 个快速启动能力指标的影响

Fig. 1 The effect of exercise on the three indicators (V_{max} , A_{max} and S_{120ms}) of fast-start performance of juvenile common carp

3 讨论

3.1 运动锻炼与 U_{crit} 和 M_{O_2} 的关系

在鱼类运动生理方面, U_{crit} 作为一个重要指标得到广泛的关注。有实验结果显示运动锻炼可以提高鱼的 U_{crit} [18-19], 也有实验结果显示运动锻炼不改变 U_{crit} [20-21]。本实验的结果表明运动锻炼对鲤鱼幼鱼的 U_{crit} 没有显著影响, 这与运动锻炼使鲤鱼幼鱼体形的变化将有利于持续运动能力提高的假设不符。6 h 锻炼组在 30、36 $cm \cdot s^{-1}$ 流速下的 M_{O_2} 显著小于 0 h 组, 其它流速下 3 组实验鱼的 M_{O_2} 没有显著差异。12 h 锻炼组的 M_{O_2} 始终处于较高的水平, 可能是由于高强度的锻炼提高了实验鱼的基础代谢水平, 致使与 6 h 锻炼组有不同的 M_{O_2} 反应。由此可以推测, 运动锻炼之所以没有提高鲤鱼幼鱼的 U_{crit} , 是因为在低于 U_{crit} 的流速下对鲤鱼进行运动锻炼, 鲤鱼红肌的效率得到提高, 然而在高流速下鲤鱼红肌的能力却并没有加强。

3.2 运动锻炼与快速启动的关系

由于快速启动是高能耗的爆发运动 [6], 主要由

ATP 直接供能, 因此有关无氧运动锻炼对快速启动影响的研究较为常见。经过 9 周无氧锻炼以后, 虹鳟 (*Salmo gairdneri*) 的爆发游泳能力(追赶 2 min 鱼移动的距离)得到提高, 白肌中肝糖原的积累和乳酸的增加得到加强 [22], 但快速启动的 V_{max} 和 A_{max} 均没有显著变化 [23]。对小型鲤科 (Cyprinidae) 鱼类的研究显示, 运动锻炼使这些鱼类的红肌、粉肌和白肌中线粒体密度有增加的趋势, 但不显著 [24]。鲈鱼 (*Notolabrus fucicola*) 经过运动锻炼红肌和白肌中线粒体的密度没有变化 [25]。可见无氧运动锻炼不能提高这些鱼的快速启动能力。然而, 本实验中经过有氧运动锻炼的鲤鱼幼鱼, 尽管头高降低、尾柄面积增加 [7], 但快速启动能力也没有显著变化。其内在机制还有待进一步探讨。

参考文献:

- [1] Beamish F W H. Swimming capacity [J]. *Fish Physiol*, 1978, 7: 101-187.
- [2] Beamish F W H. Swimming endurance of some north-west Atlantic fishes [J]. *J Fisher Res Bd Can*, 1966, 23: 341-347.
- [3] Brett J R. The respiratory metabolism and swimming performance of young sockeye salmon [J]. *J Fish Res Bd Can*, 1964, 21: 1183-1226.
- [4] 赵文文, 曹振东, 付世建. 持续时间对南方鱼占游泳性能测定结果的影响 [J]. *重庆师范大学学报: 自然科学版*, 2010, 27(4): 12-15.
- [5] 鲜雪梅, 曹振东, 付世建. 4 种幼鱼临界游泳速度和运动耐受时间的比较 [J]. *重庆师范大学学报: 自然科学版*, 2010, 27(4): 16-20.
- [6] Domenici P D, Blake R W. Escape trajectories in angel-fish (*Pterophyllum eimekei*) [J]. *J Exp Biol*, 1993, 177: 253-272.
- [7] 闫冠杰, 曹振东, 彭姜岚, 等. 运动锻炼对鲤鱼幼鱼形态参数的影响 [J]. *重庆师范大学学报: 自然科学版*, 2011, 28(3): 18-21.
- [8] Wu T Y. Hydromechanics of swimming propulsion. Part 1. Swimming of a two-dimensional flexible plate at variable forward speeds in an inviscid fluid [J]. *J Fluid Mech*,

- 1971,46:337-355.
- [9] Lighthill M J. Mathematical biofluid dynamics [M]. Philadelphia: Society for Applied and Industrial Mathematics, 1975.
- [10] Webb P W. Hydrodynamics and energetics of fish propulsion [J]. Bull Fish Res Board Can, 1975, 190: 1-159.
- [11] Blake R W. Fish locomotion [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1983.
- [12] Fisher R, Hogan J D. Morphological predictors of swimming speed: a case study of pre-settlement juvenile coral reef fishes [J]. J Exp Biol, 2007, 210: 2436-2443.
- [13] Blake R W. Fish functional design and swimming performance [J]. J Fish Biol, 2004, 65: 1193-1222.
- [14] Walker J A. Ecological morphology of lacustrine threespine stickleback *Gasterosteus aculeatus* L. (Gasterosteidae) body shape [J]. Biol J Linn, 1997, 61: 3-50.
- [15] Lee C G, Farrell A P, Lotto A, et al. Excess post-exercise oxygen consumption in adult sockeye (*Oncorhynchus nerka*) and coho (*O. kisutch*) salmon following critical speed swimming [J]. J Exp Biol, 2003, 206: 3253-3260.
- [16] 王芳, 曹振东, 付世建, 等. 中华倒刺鲃幼鱼的快速启动与逃逸行为 [J]. 生态学杂志, 2010, 29: 2181-2186.
- [17] Webb P W. The effect of size on the fast-start performance of rainbow trout *Salmo gairdneri*, and a consideration of piscivorous predator-prey interactions [J]. J Exp Biol, 1976, 65: 157-177.
- [18] Farrell A P, Johansen J A, Steffensen J F, et al. Effects of exercise training and coronary artery ablation on swimming performance, heart size, and cardiac enzymes in rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* [J]. Can J Zool, 1990, 68: 1174-1179.
- [19] Houlihan D F, Laurent P. Effects of exercise training on the performance, growth, and protein turnover of rainbow trout (*Salmo gairdneri*) [J]. Can J Fish Aquat Sci, 1993, 44: 1614-1621.
- [20] Dougan M R C. Growth and development of Chinook salmon, *Oncorhynchus tshawytscha*: Effects of exercise training, and seawater transfer [D]. Christchurch: University of Canterbury, 1993.
- [21] Farrell A P, Johansen J A, Suarez R K. Effects of exercise training on cardiac performance and muscle enzymes in rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* [J]. Fish Physiol Biochem, 1991, 9: 303-312.
- [22] Pearson P, Spriet L, Steverson D. Effect of sprint training on swim performance and white muscle metabolism during exercise and recovery in rainbow trout (*Salmo gairdneri*) [J]. J Exp Biol, 1990, 149: 45-60.
- [23] Gamperl A K, Schnurr D L, Stevens E D. Effect of a sprint training protocol on acceleration performance in rainbow trout (*Salmo gairdneri*) [J]. Can J Zool, 1991, 69: 578-582.
- [24] Sanger A M. Effects of training on axial muscle of two cyprinid species: *Chondrostoma nasus* (L.) and *Leuciscus cephalus* (L.) [J]. J Fish Biol, 1992, 40: 637-646.
- [25] Davison W. Exercise training in the banded wrasse *Notolabrus fucicola* affects muscle fiber diameter but not muscle mitochondrial morphology [J]. New Zealand Nat Sci, 1994, 21: 11-16.

Animal Sciences

The Effect of Exercise Training on the Swimming Performance and Metabolic Rate in Juvenile Common Carp (*Cyprinus carpio*)

YAN Dong-juan, YAN Guan-jie, CAO Zhen-dong, FU Shi-jian

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

Abstract: To investigate the effect of exercise training on the swimming performance and metabolic rate during swimming in juvenile common carp (*Cyprinus carpio*), 90 juvenile fish (8.12 ± 1.30) g was forced to swim under 60% critical swimming speed (U_{crit}) for 0 h (control), 6 h and 12 h daily for 15 d. Then three groups of fish were underwent both an U_{crit} and fast-start measurement. The oxygen consumption rate (M_{O_2}) at different swimming speed was also measured. Neither U_{crit} nor fast-start performance as indicated by maximum velocity (V_{max}), maximum acceleration velocity (A_{max}) and travel distance during first 12 ms ($S_{120\text{ms}}$) significantly changed after 15 d training in juvenile common carp. However, the M_{O_2} at 20 and 36 cm s^{-1} of fish in 6 h training group were significantly lower than those in control group while the M_{O_2} at all swimming speed of fish in 12 h training group were significantly higher than those of control group ($p < 0.05$). It suggested that the cost of transport decrease after moderate exercise training (6 h), however, high intensity training (12 h) may impair the cost of transport by increased basal metabolic rate.

Key words: exercise training; critical swimming speed; fast-start; *Cyprinus carpio*

(责任编辑 方 兴)