

力竭运动训练对锦鲤幼鱼无氧代谢能力的影响*

夏伟,付世建,彭姜岚,曹振东

(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 将锦鲤 (*Carassius auratus*) 幼鱼 20 尾随机平均分成训练组和对照组,在 25 °C 水温下每天饱足投喂 1 次;其中训练组实验鱼持续 2 周进行强度为每天 2 次的力竭运动训练,随后分别测量实验鱼力竭运动后的耗氧率并计算过量耗氧 (EPOC),待力竭运动恢复 8 h 后再分别取样测量肌乳酸、肝乳酸的含量和肌肉中乳酸脱氢酶 (LDH)、柠檬酸合成酶 (CS) 的活性。研究发现,力竭运动训练组与对照组的 EPOC 分别为 (166.2 ± 7.2)、(108.0 ± 6.2) mg · kg⁻¹,训练组显著高于对照组 ($p < 0.05$);肌乳酸含量分别是 (17.4 ± 0.8)、(25.4 ± 1.7) μmol · g⁻¹,训练组显著低于对照组 ($p < 0.05$);训练组实验鱼的肝乳酸含量、LDH 和 CS 的活性与对照组之间均无显著差异。研究表明力竭运动训练有助于提高锦鲤幼鱼的无氧代谢能力,无氧代谢能力的提高可能与乳酸清除速率加快有关。

关键词 力竭运动训练;过量耗氧;乳酸;锦鲤

中图分类号:Q591.4

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2011)04-0016-03

鱼类在自发游泳、巡食和洄游等过程中多采用有氧代谢方式^[1]。在面临环境缺氧以及捕食、逃逸等情况时,鱼类常选择无氧代谢方式,这是其对组织缺氧的一种普遍性适应^[2]。力竭运动后过量耗氧 (EPOC)、肌肉中乳酸含量、有关代谢酶(如乳酸脱氢酶、柠檬酸合成酶)的活性的变化是分析鱼类无氧代谢能力的常用指标^[3-5]。

鱼类的运动训练一般也分为有氧运动训练和无氧运动训练^[6],无氧运动训练通常采用以追赶实验鱼至力竭的方法来进行^[3]。多数研究表明有氧运动训练既有助于提高实验鱼有氧运动能力,又可以提高实验鱼的无氧运动能力^[7];但无氧运动训练方面的研究却相对较少,且无氧运动训练对实验鱼的运动能力产生怎样的影响,在已有的研究中也未形成一致结论^[8]。有研究表明,力竭运动训练显著提高了瓦氏黄颡鱼 (*Pelteobagrus vachelli* Richardson) 的有氧运动能力,对其无氧运动能力未产生显著影响^[9],而在虹鳟 (*Oncorhynchus mykiss*) 的有关研究中发现,力竭运动训练使其无氧运动能力得到了显著提高^[10]。

锦鲤 (*Carassius auratus*) 为一种被广泛人工饲养

的杂食性鱼类,目前以此鱼种为对象的研究涉及生物学的多个领域^[11-12]。本研究以 2 周力竭运动训练

的锦鲤幼鱼为训练组,不进行运动训练的锦鲤幼鱼为对照组。在训练完成后,通过测量两组实验鱼力竭运动后相关生理生化指标来研究无氧运动训练对锦鲤幼鱼无氧运动能力的影响,为鱼类运动训练方面的研究提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 材料来源与驯化

实验鱼为重庆市水族市场所购买的锦鲤幼鱼,实验前于实验室自净化水槽中驯化 1 周。驯化期间每天定时于 12:00 饱食投喂 1 次。实验用水为曝气后的自来水,实验水温为 (25.0 ± 1.0) °C,溶氧含量不低于每升 7 mg,日换水量约为驯化水体体积的 10%,光照周期为 14 h 光照:10 h 黑暗。从驯化后的幼鱼中挑选出身体健康、大小接近、体重为 (9.62 ± 0.18) g 的 20 尾鱼作为实验对象。

1.2 实验方案与指标测定

将实验鱼随机分成两组,分别放入用网隔开的自净化水槽两边作为对照组和处理组,每天饱足投

* 收稿日期 2011-03-18 修回日期 2011-04-19 网络出版时间 2011-07-07 17:44:00

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) /重庆市自然科学基金 (No. CSTC2010BB1089)

作者简介 夏伟,男,硕士研究生,研究方向为鱼类生理生态学 通讯作者 曹振东, E-mail: z. d. cao@hotmail. com

网络出版地址 http://www.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20110707.1744.201104.16_004.html

喂1次。处理组实验鱼在每天9:00和21:00进行力竭运动训练^[4],训练历时2周。训练完成后恢复12h分别对两组实验鱼进行力竭运动,随后测量恢复过程的耗氧率的变化并计算EPOC,此后静息8h再分别取背部肌肉和肝脏于-80℃保存。在25℃下测量肌肉、肝脏中乳酸的含量和肌肉中乳酸脱氢酶(LDH)、柠檬酸合成酶(CS)的活性。

EPOC(单位:mg·kg⁻¹)参照文献[4]的方法,采用流水式水生生物代谢测定仪(专利号:200520010482.5)进行测定。呼吸室的体积约为0.12L,水流速度约为0.3L/min,经计算实验监测系统水体置换率为99%的历时小于2min。每组实验测定10尾鱼,另外一个没有放置实验鱼的呼吸室用于测定空白耗氧率,单尾鱼的耗氧率计算公式为

$$M_{O_2} = \Delta O_2 \times v / m$$

其中 M_{O_2} 为耗氧率(单位:mg·kg⁻¹·h⁻¹,mg为氧气质量单位), ΔO_2 为呼吸室出水口溶氧值与空白溶氧值之差(单位:mg·L⁻¹), v 为相应呼吸室出水口的水流速度(单位:L·h⁻¹)。m为鱼体体重(单位:kg)。EPOC则为实验鱼在测定过程中各个时间点高于运动前耗氧率的差值在时间上的积分。

称取肌肉0.05g左右,取9倍体积pH7.5的匀浆缓冲液,用玻璃匀浆器在冰水浴中匀浆5min后用冷冻离心机在10000g下离心10min。取离心上清液在25℃下用酶标仪(SpectraMax 190, Molecular Devices, USA)测量LDH、CS的活性^[13]。酶活性单位为U·g⁻¹,其活性单位定义和计算方法参见文献[13]。

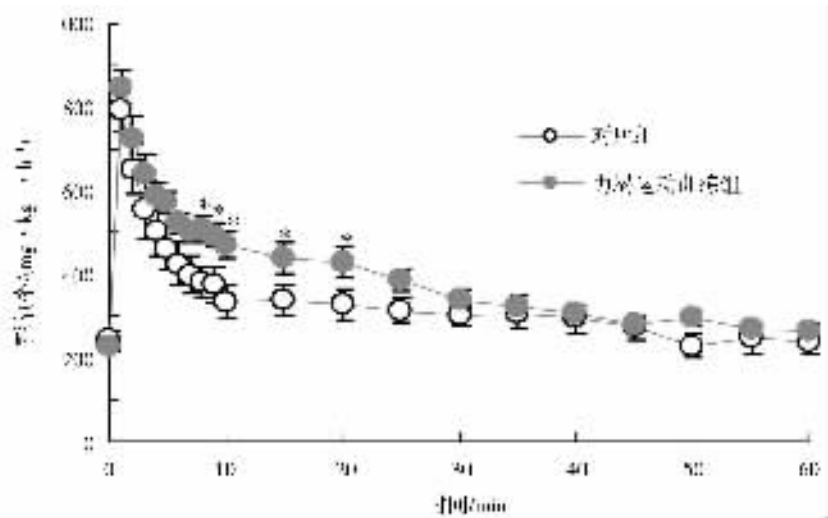
肝脏、肌肉组织中乳酸含量的测定方法为对羟基联苯比色法^[4]。

1.3 数据处理

采用Excel2000软件对数据进行统计处理,组间比较采用SPSS11.5进行t-test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 对锦鲤幼鱼EPOC的影响



注:*表示该处数据与对照组耗氧率有显著差异($p < 0.05$)

图1 力竭运动后训练组、对照组锦鲤幼鱼的耗氧率

Fig. 1 The oxygen consumption rate of the post-exercise in exercise-trained and control juvenile crucian carp

图1显示,两组实验鱼力竭运动前的静止耗氧率($M_{O_{2rest}}$)无显著差异,力竭运动后耗氧率迅速上升至峰值,但最大耗氧率($M_{O_{2peak}}$)也无显著差异,随后耗氧率快速下降,至30min后保持较稳定状态,其中7~20min期间的训练组实验鱼的耗氧率显著大于对照组($p < 0.05$)。经计算,训练组和对照组实验鱼的EPOC分别为(166.2±7.2)、(108.0±6.2)mg·kg⁻¹,前者显著高于后者($p < 0.05$)。

2.2 对锦鲤幼鱼乳酸代谢的影响

经测定和计算,力竭运动静息恢复8h后,训练组肌乳酸含量为(17.4±0.8)μmol·g⁻¹,显著低于对照组(25.4±1.7)μmol·g⁻¹的水平($p < 0.05$);训练组、对照组实验鱼的肝乳酸水平分别为(50.6±3.1)、(53.0±2.7)μmol·g⁻¹,均高于肌乳酸水平,但两组肝乳酸水平无显著差异;实验鱼肌肉中LDH、CS的活性在训练组中分别为(106.8±4.5)、(61.3±4.5)U·g⁻¹,在对照组中分别为(111.2±2.5)、(54.6±2.3)U·g⁻¹,两组的LDH活性之间和CS活性之间均不存在显著差异。

3 讨论

考查鱼类无氧运动能力的指标有很多,包括EPOC,肌肉中乳酸清除率、糖原恢复率、pH大小、激素和脂肪酸含量等^[9,14-15],其中EPOC在相关研究中较多地被使用^[9,12]。通常EPOC越大,实验鱼的无氧运动能力则越强。研究发现,无氧运动训练可

以有效提高美洲鳄 (*Alligator mississippiensis*) 的有氧运动能力^[16]; 在力竭运动训练后虹鳟 (*Salmo gairdner*) 偿还氧债的能力是对照组的 3 倍^[10]。笔者所在实验室曾分别以南方鲇 (*Silurus meridionalis* Chen) 和瓦氏黄颡鱼为对象开展了每天 1 次的力竭运动训练的相关研究, 发现力竭运动训练后两种实验鱼的有氧代谢能力均有显著提高, 而无氧代谢能力未见显著变化^[9, 17]。因此可见, 运动训练对不同种类所造成的影响常常不同^[7]。在本研究中锦鲤幼鱼在力竭运动训练 2 周后其 EPOC 增大 1.5 倍 ($p < 0.05$), 表明力竭运动训练能够提高锦鲤幼鱼的无氧代谢能力。力竭运动训练对锦鲤和南方鲇、瓦氏黄颡鱼在无氧代谢能力方面的效果不尽相同, 可能是与锦鲤幼鱼力竭运动训练强度较大 (2 次/d) 有关。

力竭运动后乳酸含量会立即达到峰值, 然后迅速下降^[3-4], 无氧运动训练能有效提高虹鳟的游泳速度、乳酸清除率、糖原合成能力和 ATP 周转率^[18]。多数相关研究发现, 运动训练组力竭运动后肌乳酸峰值含量大于对照组的水平^[10]。如果本研究训练组的力竭运动后肌乳酸峰值也不低于对照组, 同时实验鱼在力竭运动 8 h 后肌乳酸的含量又显著低于对照组 ($p < 0.05$), 那么可以推论, 力竭运动训练能提高实验鱼的乳酸清除率。

参考文献:

- [1] Reidy S P , Kerr S R , Nelson J A . Aerobic and anaerobic swimming performance of individual atlantic cod [J] . J Exp Biol 2000 , 203 : 347-357 .
- [2] Franklin C E , John I A , Batty R S , et al . Metabolic recovery in herring larvae following strenuous activity [J] . J Fish Biol , 1996 , 48 : 207-216 .
- [3] 朱晏苹 , 曹振东 , 付世建 . 力竭性运动后瓦氏黄颡鱼幼鱼乳酸和血糖变化 [J] . 重庆师范大学学报 : 自然科学版 , 2010 , 27(2) : 14-17 .
- [4] 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 .
- [5] Hardewig I L , Vandijk M , Portner H O . High-energy turnover at low temperatures : recovery from exhaustive exercise in antarctic and temperate eelpouts [J] . Am J Physiol , 1998 , 274R : 1789-1796 .
- [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 gairdneri*) [J] . J Exp Biol , 1990 , 149 : 45-60 .
- [7] Davison W , Goldspink G . The effect of prolonged exercise on the lateral musculature of the brown trout (*Salmo trutta*) [J] . J Exp Biol , 1977 , 70 : 1-12 .
- [8] Davison W . The effects of exercise training on teleost fish : a review of recent literature [J] . Comp Biochem Physiol , 1997 , 117A : 67-75 .
- [9] Liu Y , Cao Z D , Fu S J , et al . The effect of exhaustive chasing training and detraining on swimming performance in juvenile darkbarbel catfish (*Pelteobagrus vachelli*) [J] . J Comp Physiol 2009 , 179B : 847-855 .
- [10] Kieffer J D . Limits to exhaustive exercise in fish [J] . Comp Biochem Physiol 2000 , 126A : 161-179 .
- [11] 陈永鹏 , 曹振东 , 付世建 . 锦鲤幼鱼的社群等级地位及其与标准代谢率、血糖和临界游泳能力的关系 [J] . 生态学报 , 2010 , 30(7) : 1940-1945 .
- [12] 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 2009 , 179B : 509-517 .
- [13] Torres J J , Somero G N . Vertical distribution and metabolism in antarctic mesopelagic fishes [J] . Comp Biochem Physiol , 1988 , 90B : 521-528 .
- [14] Milligan C L , Hooke G B , Johnson C . Sustained swimming at low velocity following a bout of exhaustive exercise enhances metabolic recovery in rainbow trout [J] . J Exp Biol 2000 , 201 : 921-926 .
- [15] Walsh P J , Milligan C L . Coordination of metabolism and intracellular acid-base status : ionic regulation and metabolic consequences [J] . Can J Zool , 1989 , 67 : 2994-3004 .
- [16] Eme J , Owerkowicz T , Gwalthney I , et al . Exhaustive exercise training enhances aerobic capacity in american alligator (*Alligator mississippiensis*) [J] . J Comp Physiol 2009 , 179B : 921-931 .
- [17] Cao Z D , Fu S J . The effect of exhaustive exercise training and fasting on post-exercise oxygen consumption rate in southern catfish (*Silurus meridionalis* Chen) [J] . Acta Hydrobiologica Sinica 2009 , 33(5) : 837-843 .
- [18] Pearson M P , Spriet L L , Stevens E D . Effect of spring 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 .

Animal Sciences

The Effect of Exhaustive Exercise Training on the Anaerobic Metabolism for Juvenile Crucian Carp

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

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

Abstract : Twenty juvenile crucian carp were set to two groups (exercise trained group and control group) , and all fish were fed once daily at 25 °C . Exercise-acclimated fish underwent two weeks exhaustive chasing training twice daily . Then the excess post-exercise oxygen consumption (*EPOC*) was measured after a bout of exhaustive chasing in both the exercise-acclimated group and control-acclimated group . The lactic acid content in muscle and liver , the activity of lactate dehydrogenase (*LDH*) and citrate synthase (*CS*) in muscle were also measured 8 hours after exercise . The results revealed that the *EPOC* magnitude of the exercise-trained group (166.2 ± 7.2) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ was significantly larger than that of the control group (108.0 ± 6.2) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ while the content of muscle lactic acid in the exercise-trained group (17.4 ± 0.8) $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ was significantly lower than that in the control group (25.4 ± 1.7) $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ ($p < 0.05$) . Exhaustive chasing training had no significant effect on the either content of liver lactic acid or activities of muscle *LDH* and *CS* . The results suggested that exhaustive chasing training can significantly enhance the anaerobic metabolic capacity for juvenile crucian carp and the elevation of the anaerobic metabolic capacity may be associated with the enhanced clearance rate of lactic acid .

Key words : exhaustive exercise training ; excess oxygen consumption ; lactic acid ; *Carassius auratus*

(责任编辑 方 兴)