

水流刺激对宽鳍鱮幼鱼的游泳和代谢的影响*

刘海生, 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 401331)

摘要:为考查水流刺激对宽鳍鱮(*Zacco platypus*)幼鱼游泳能力和代谢的影响,将60尾实验鱼随机均分为处理组(流水组)和对照组(静水组);然后在相同的条件下饲养6周,分别于(20±1.0)℃条件下进行临界游泳速度(U_{crit})、静止代谢率(RMR)和活跃代谢率(AMR)的测定,并计算不同游泳速度下的代谢率(MR)、单位位移耗能(COT)和最适游泳速度(U_{opt})。结果显示,对照组和处理组的RMR分别为(153.72±7.41)、(197.85±8.00) mgO₂·kg⁻¹·h⁻¹,对照组显著低于处理组($p<0.05$);对照组和处理组的 U_{crit} 分别为(62.90±2.84)、(75.50±4.27) cm·s⁻¹,对照组亦显著低于处理组($p<0.05$);对照组和处理组的AMR没有显著差异;给定游泳速度下对照组的MR显著高于处理组($p<0.05$);在较低游泳速度下对照组的COT亦显著高于处理组($p<0.05$),但这种差异随着游泳速度的上升显著降低($p<0.05$);对照组和处理组的 U_{opt} 分别为54.00、44.00 cm·s⁻¹。研究结果表明,持续水流刺激显著提高了实验鱼的游泳能力,与之上升的游泳效率相关,但代价是维持能量消耗的增加。

关键词:水流刺激;临界游泳速度;单位位移耗能;宽鳍鱮(*Zacco platypus*)

中图分类号:Q175

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2015)01-0035-06

自然水体环境的多样性是导致鱼类在游泳运动和代谢上表现出很大差异的主要原因,其中水体流速是造成这种差异主要因素之一^[1-3]。游泳行为是鱼类日常生理活动的主要实现方式,对于鱼类个体生存和种群繁衍均具有重要意义^[4-6]。鱼类游泳类型一般分为稳定游泳和非稳定游泳^[7]。稳定游泳的方向和速度相对稳定,它主要通过有氧代谢提供能量,常用衡量指标为临界游泳速度(Critical swimming speed, U_{crit})^[8]。鱼类的呼吸和代谢在临界游泳速度的下都可达到峰值,因此鱼类的最大有氧运动能力常用 U_{crit} 来衡量^[9]。鱼体持续游泳运动过程伴随着机体能量的不断消耗,鱼类能量代谢常用的代谢率来评价,研究游泳能力和能量代谢的关系对鱼类的生存对策十分重要^[10]。其中静止代谢率(Resting metabolic rate, RMR)和活跃代谢率(Active metabolic rate, AMR)两个参数不仅影响动物生活史的能量分配^[11],而且与个体的耗能行为和生长性能等方面密切相关^[12]。RMR是指健康动物个体在某一温度、消化后且静止状态下机体的最小能量代谢需求,当动物的能量代谢水平低于该值时其生理功能就会受损^[13];AMR是指动物在特定温度下的最大有氧代谢率(一般采用鱼类在临界运动过程中的最大代谢率),它表示动物可为机体其他生理功能(如消化、排泄、繁殖)提供的最大代谢潜能^[14]。

宽鳍鱮(*Zacco platypus*)隶属于鲤形目(Cypriniformes)鲤科(Cyprinidae),是东亚特有鱼类之一,在中国乌江流域广泛分布^[15]。乌江水系水流湍急、上下游落差大,是研究水流变化对宽鳍鱮影响的一个天然场所;有关野外捕获的该种鱼的游泳能力研究已有报道^[16];然而野外环境十分复杂,影响因素众多。为了考察单一因素流速的影响,本研究以野外捕获的宽鳍鱮幼鱼为实验对象,在人为控制的不同水流条件下测定该鱼游泳性能和能量代谢状况,考察水流对该种鱼的上述能量代谢和游泳能力的影响,以阐述早期生活史中非生物生态因子水流与该鱼运动能力的关联,为鱼类基础科学研究提供数据。

1 材料与方法

1.1 实验鱼及其驯化

将捕获于乌江流域金佛山的宽鳍鱮幼鱼置于实验室自净化循环控温水槽中适应性驯养14 d。驯养期间控

* 收稿日期:2014-03-20 修回日期:2014-09-14 网络出版时间:2015-1-7 16:04

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

作者简介:刘海生,男,研究方向为鱼类生理生化,E-mail: 18108397371@163.com;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.20150107.1604.007.html>

制水温为 $(20 \pm 1.0)^\circ\text{C}$,溶氧水平不低于 90%饱和溶氧,驯养用水为曝气后自来水,每天以商业颗粒饲料和赤虫间隔饱足投喂两次(8:00 和 16:00 各 1 次),驯养水体每日换水 10%以保证水质,光制为自然光照。随后挑选驯养 14 d 后身体健康的 60 尾体质量 (1.55 ± 0.32) g、体长 (4.60 ± 0.19) cm 幼鱼作为实验对象。

1.2 实验方案与操作方法

1.2.1 流水锻炼 实验前挑选的宽鳍鱮幼鱼随机平均分为静水组(对照组)和流水组(处理组)(各组样本量 $n=30$),分别置于 250 L 自净化循环控温鱼类模拟水道装置中,以每天 $2\text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度上升或维持至目标速度(静水组为 $0\text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,流水组为 $20\text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,即 $40\%U_{\text{crit}}$)后持续 6 周。实验处理期间实验鱼的喂养和其他环境条件与驯养时条件相同。相关实验指标测定前先将实验鱼禁食 48 h,随后进行相关指标的测定。

1.2.2 RMR 测定 从各组分别随机选择 10 尾实验鱼,测定前将实验鱼禁食 24 h,然后装入代谢仪^[17]的呼吸室禁食适应 24 h。随后用溶氧仪(HQ10 型,美国 Hach 公司生产)在每天的 09:00、15:00 和 21:00 分别测定单尾鱼的耗氧率,连续测定 2 d,以 6 个耗氧率的平均值作为该尾鱼的 RMR。

1.2.3 U_{crit} 和运动代谢率(MR)测定 采用鱼类运动代谢仪对实验鱼进行 U_{crit} 和 MR 的测定。开始测定前先将单个实验鱼(样本量 $n=10$)放入游泳管(流速为 $10\text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$)中适应 1 h,用以消除转移可能造成的胁迫;然后采用逐步增速法进行 U_{crit} 测定^[18]。测定开始后,起始速度设置为 $10\text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,然后以 $10\text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度增量增加游泳管的水流速度,各个速度挡下维持 20 min 水流速度不变;每次增加流速之前打开游泳管的后盖换一次水,在整个测定过程水体的溶氧水平高于 70%的饱和值,以实验鱼被水流冲到管末端并停靠在运动管末端筛板 20 s 以上作为判断实验鱼达到运动力竭状态的依据^[19],等实验鱼力竭后将其取出并测量封闭运动管细菌耗氧。MR 测定在 U_{crit} 测定的过程中同时进行,每 2 min 记录 1 次运动代谢仪封闭水体中的溶氧值,并以此计算出 MR。溶氧水平通过溶氧仪进行监测。

1.3 参数计算

1) RMR(单位: $\text{mgO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)计算公式为

$$\text{RMR} = \Delta P_{\text{O}_2} \times v \times (1000/m)^b。$$

式中 ΔP_{O_2} 为空白管(无鱼)与呼吸室(有鱼)溶氧水平之差(单位: $\text{mgO}_2 \cdot \text{L}^{-1}$), v 为呼吸室(有鱼)的流量(单位: $\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$)。 m 为单尾鱼的体质量(单位:g), b 为体质量校正系数,取值为 0.75 ^[4]。

2) 利用下式计算 U_{crit} (单位: $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$):

$$U_{\text{crit}} = U + \Delta v \times (t/T)。$$

式中 U 是在设定时间(20 min)内能够完整完成最后一档的最大游泳速度, Δv 是换挡时的速度增量($10.0\text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$), T 是每一个速度挡设定的持续时间(20 min), t 是最后力竭速度挡的实际游泳时间($t < 20\text{ min}$)。实验鱼体横截面积小于游泳管截面积的 10%, U_{crit} 无需作水阻校正^[20]。

3) MR(单位: $\text{mgO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)的计算公式为

$$\text{MR} = (S_t \times 60 - S_b) \times V/m。$$

式中 S_t (单位: $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$)为每档期间(20 min)代谢仪内水体的溶氧水平随时间变化的斜率,当相关指数 $R^2 > 0.95$ 时的斜率即可参与 MR 的计算。60 为 60 min, S_b 为在 1 h 期间游泳代谢仪内部细菌耗氧的斜率。 V 为减去实验鱼体积后的代谢仪内的水体体积(3.50 L), m 为实验鱼的体质量(单位:kg)^[21]。

4) AMR(单位: $\text{mgO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)为在 U_{crit} 测定过程中出现的最大的 MR 值。

5) 单位移动距离能耗(COT,单位: $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)计算公式为

$$\text{COT} = \text{MR}/v。$$

式中 MR(单位: $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)由氧热当量系数 13.56 计算得到; v 则表示实验鱼游泳速度(单位: $\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$)。

6) 代谢率和游泳速度关系采用以下公式拟合:

$$\text{MR} = \alpha e^{\beta U}。$$

其中 α 和 β 是常数。通过该公式转换,可得到最适游泳速度(U_{opt} ,单位: $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$),即当 COT 最小时的游泳速度

的计算公式^[22]

$$U_{opt} = 1/\beta。$$

1.4 数据处理

数据经 Excel 2007 进行常规计算后采用 SPSS 17.0 进行统计处理,水流刺激对 RMR、AMR 和 U_{crit} 等指标的影响通过 t 检验进行分析,采用双因素协方差方差分析评估游泳速度和流水刺激对 MR 和 COT 的影响(以体质量作为协变量)。所有实验数据都用“平均值±标准误”(Mean±SE)来表示,显著性水平为 $p < 0.05$ 。

2 结果

2.1 水流对 RMR、AMR 和 U_{crit} 的影响

对照组与处理组宽鳍鳃幼鱼的 RMR 分别为 (153.7 ± 7.4) 、 (197.9 ± 8.0) $\text{mgO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$,处理组显著高于对照组(图 1a) ($p < 0.01$)。对照组与处理组宽鳍鳃幼鱼的 AMR 分别为 (932.8 ± 116.4) 、 (917.4 ± 87.3) $\text{mgO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$,二者无显著差异(图 1b)。对照组与处理组宽鳍鳃幼鱼的 U_{crit} 分别为 (62.90 ± 2.84) 、 (75.50 ± 4.27) $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$,处理组显著高于对照组(图 1c) ($p < 0.05$)。

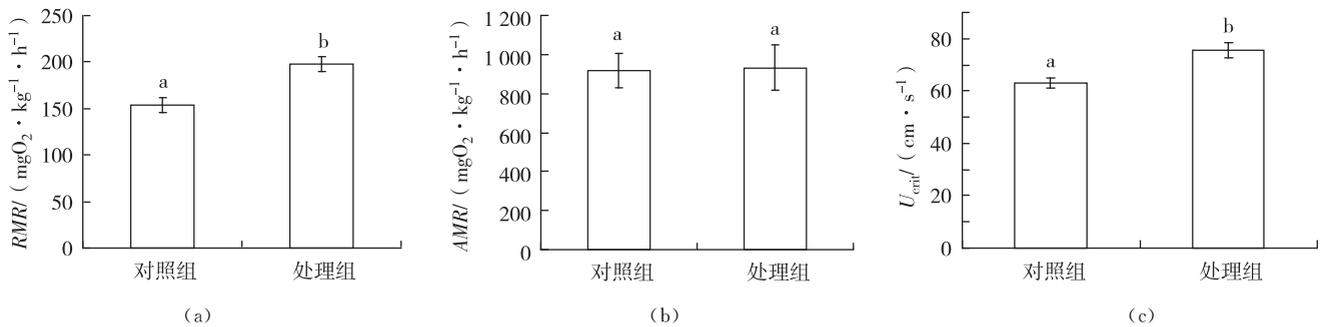


图 1 水流刺激对宽鳍鳃幼鱼 RMR(a)、AMR(b)和 U_{crit} (c) 的影响

Fig. 1 The effect of stimulation on RMR(a), AMR(b) and U_{crit} (c) of juvenile *Z. platypus*

2.2 水流处理和游泳速度对 MR 和 COT 的影响

对照组与处理组宽鳍鳃幼鱼的 MR 均随游泳速度的增加呈指数上升趋势($p < 0.001$),且特定游泳速度下对照组的 MR 显著高于处理组($p < 0.001$)(图 2a,表 1)。实验鱼临界游泳速度的 MR 与游泳速度关系的拟合方程如图 2a 所示。对照组和处理组宽鳍鳃幼鱼的 COT 随游泳速度的增加呈先下降后上升的变化规律,即存在 COT 的最小值(图 2b)。在低游泳速度下静水组 COT 显著大于流水组,这种差异随着游泳速度的上升而减小($p < 0.05$)。根据计算,对照组和处理组中的 U_{opt} 分别为 54.0 、 44.0 $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$,对应的 COT 分别为 6.42 、 4.78 $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

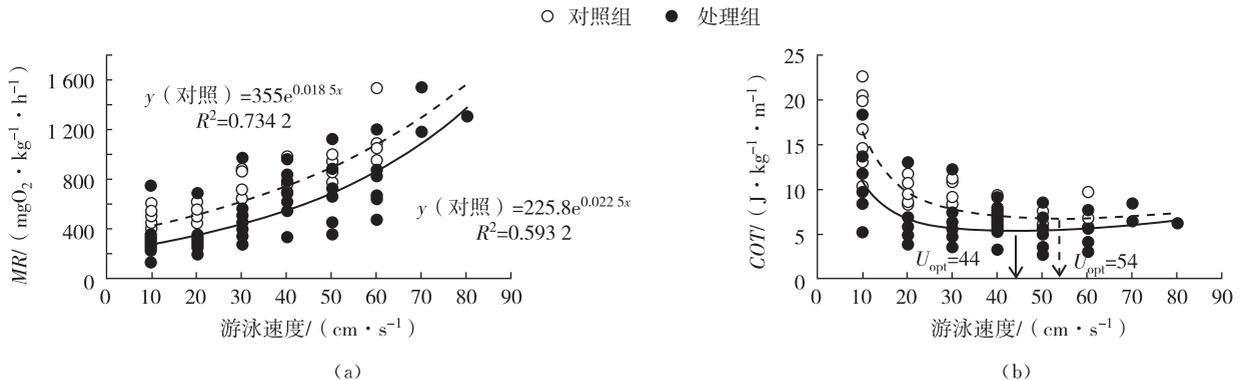


图 2 水流处理和游泳速度对宽鳍鳃幼鱼 MR 和 COT 的影响

Fig. 2 The effect of flow condition and swimming speed on MR and COT of juvenile *Z. platypus*

表 1 游泳速度和水流条件对宽鳍鱲幼鱼 MR 和 COT 影响的双因素协方差分析表

Tab.1 The effect of swimming speed and flow condition on MR and COT of juvenile *Z. platypus* based on a two-way analysis of covariance

	协变量(体质量)	游泳速度	水流条件	交互作用
<i>df</i>	1	7	1	2
MR	$F=13.14, p<0.001$	$F=32.69, p<0.001$	$F=12.31, p=0.001$	$F=1.514, p=0.194$
COT	$F=17.87, p<0.001$	$F=20.77, p<0.001$	$F=14.32, p<0.001$	$F=4.660, p=0.001$

3 讨论

3.1 持续水流与 U_{crit} 和 MR 的关系

鱼类生境中许多生态因子如天敌、流速和溶解氧等均存在着较大的差异,这些差异都能对鱼类生理、行为以及代谢活动产生影响^[23-25]。其中水流变化产生的影响可能首先体现为鱼类游泳行为上的差异,而行为的改变常常伴随着代谢的显著波动,进而引起机体能量收支的差异^[24]。 U_{crit} 常作为鱼类生理生态学重要的指标,受到研究者的广泛关注。已有相关研究结果显示一定的水流速度刺激锻炼能够提高鲤鱼(*Cyprinus carpio*)和虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)的 U_{crit} ^[26-27],但对大鳞大马哈鱼(*Oncorhynchus tshawytscha*)的研究发现水流刺激锻炼不能改变它的 U_{crit} ^[28]。然而本实验的结果表明持续水流刺激导致宽鳍鱲幼鱼的 U_{crit} 提高 21%;而处理组宽鳍鱲幼鱼的 RMR 提高 29%。由此可以推测,持续流水刺激提高了宽鳍鱲幼鱼的 U_{crit} ,但代价是水流刺激导致提高了的日常维持能量消耗,这在食物缺乏的条件下可能对机体产生不利影响。值得一提的是若外推有氧代谢曲线(图 2a),游泳组 RMR 却低于对照组。这种差异如果不是实验误差造成的话,则表明对照组鱼类在低游泳速度下代谢上升高于对照组,其中机制值得进一步研究。

3.2 持续流水刺激对游泳能量效率的影响

水流条件变化对鱼类生存、生长和代谢等方面的影响目前已有较多报道^[29-30],而有关水流因子对鱼类游泳运动能力及其与几个关键游泳参数相互关系也有一定的研究资料^[31]。 COT 是机体单位位移所消耗的能量,通常用以估算鱼类运动过程中的能量利用效率,并以此确定机体的最适运动速度^[6,32]。有实验发现,溶氧水平和环境温度的变化均会改变鱼类的游泳效率^[6,33],其中基础代谢的变化是一个重要成分。持续流水刺激对游泳效率的影响也是一个值得关注的问题。本研究发现对照组的 COT 均高于处理组,虽然流水刺激增加了处理组的基础代谢消耗,但是却明显提高了该鱼游泳的能量效率,相关机制值得进一步研究。

参考文献:

- [1] Herskin J, Steffensen J F. Energy savings in sea bass swimming in a school: measurements of tail beat frequency and oxygen consumption at different swimming speeds [J]. *Journal of Fish Biology*, 1998, 53(2): 366-376.
- [2] Gregory T R, Wood C M. Individual variation and interrelationships between swimming performance, growth rate, and feeding in juvenile rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1998, 55(7): 1583-1590.
- [3] Merino G E, Piedrahita R H, Conklin D E. Effect of water velocity on the growth of California halibut (*Paralichthys californicus*) juveniles [J]. *Aquaculture*, 2007, 271(1): 206-215.
- [4] 付世建, 李秀明, 赵文文, 等. 不同溶氧水平下锦鲤的运动和代谢适应对策 [J]. *重庆师范大学学报: 自然科学版*, 2010, 27(3): 14-19.
Fu S J, Li X M, Zhao W W, et al. The locomotive and metabolic strategies of goldfish under different dissolved oxygen level [J]. *Journal of Chongqing Normal University: Natural Science*, 2010, 27(3): 14-19.
- [5] Pang X, Cao Z D, Peng J L, et al. The effects of feeding on the swimming performance and metabolic response of juvenile southern catfish, (*Silurus meridionalis*), acclimated at different temperatures [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 2010, 155(2): 253-258.
- [6] 杨哈, 曹振东, 付世建. 尾鳍缺失对鳊鱼幼鱼游泳能力, 能量效率与行为的影响 [J]. *水生生物学报*, 2013, 37(1): 157-163.
Yang H, Cao Z D, Fu S J. Effect of caudal amputation on swimming capacity, energy expenditure and behavior of juvenile *parabramis pekinensis* [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2013, 37(1): 157-163.
- [7] Fu S J, Peng Z, Cao Z D, et al. Habitat-specific locomotor

- variation among Chinese hook snout carp (*Opsariichthys bidens*) along a river[J]. *PLoS one*, 2012, 7(7): e40791.
- [8] Brett J R. The respiratory metabolism and swimming performance of young sockeye salmon[J]. *Journal of the Fisheries Board of Canada*, 1964, 21(5): 1183-1226.
- [9] 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.
- Xian X M, Cao Z D, Fu S J. The Comparison of critical swimming speed and endurance at high speed of four species of juvenile fish[J]. *Journal of Chongqing Normal University: Natural Science*, 2010, 27(4): 16-20.
- [10] Brett J R, Glass N R. Metabolic rates and critical swimming speeds of sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*) in relation to size and temperature[J]. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 1973, (30): 379-387.
- [11] Norin T, Malte H. Repeatability of standard metabolic rate, active metabolic rate and aerobic scope in young brown trout during a period of moderate food availability [J]. *The Journal of Experimental Biology*, 2011, 214(10): 1668-1675.
- [12] Biro P A, Stamps J A. Do consistent individual differences in metabolic rate promote consistent individual differences in behavior? [J]. *Trends in Ecology and Evolution*, 2010, 25(11): 653-659.
- [13] Priede I G. *Metabolic scope in fishes*[M]//Tytler P, Calow P. *Fish energetics; new perspectives*. London: Croom Helm, 1985: 33-64.
- [14] O'Connor K I, Taylor A C, Metcalfe N B. The stability of standard metabolic rate during a period of food deprivation in juvenile Atlantic salmon[J]. *Journal of Fish Biology*, 2000, 57(1): 41-51.
- [15] 李红敬,常红军,李先文. 宽鳍鱮鉴定的初步探讨[J]. *信阳师范学院学报:自然科学版*, 2003, 3(16): 305-306.
- Li H J, Chang H J, Li X W. Study on external appearance of *Zacco platypus* [J]. *Journal of Xinyang Teachers College: Natural Science Edition*, 2003, 3(16): 305-306.
- [16] Fu S J, Cao Z D, Yan G J, et al. Integrating environmental variation, predation pressure, phenotypic plasticity and locomotor performance [J]. *Oecologia*, 2013, 173(2): 343-354.
- [17] Fu S J, Xie X J, Cao Z D. Effect of fasting on resting metabolic rate and postprandial metabolic response in *Silurus meridionalis* [J]. *Journal of Fish Biology*, 2005, 67(1): 279-285.
- [18] 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]. *The Journal of Experimental Biology*, 2003, 206(18): 3253-3260.
- [19] Lee C G, Farrell A P, Lotto A, et al. The effect of temperature on swimming performance and oxygen consumption in adult sockeye (*Oncorhynchus nerka*) and coho (*O. kisutch*) salmon stocks [J]. *The Journal of Experimental Biology*, 2003, 206(18): 3239-3251.
- [20] Alsop D H, Wood C M. The interactive effects of feeding and exercise on oxygen consumption, swimming performance and protein usage in juvenile rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. *The Journal of Experimental Biology*, 1997, 200(17): 2337-2346.
- [21] 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[J]. *动物学杂志*, 2007, 42(2): 111-115.
- Fu S J, Cao Z D, Peng J L. Effects of chase and air exposure on oxygen consumption and respiration frequency in *Silurus meridionalis* [J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2007, 42(2): 111-115.
- [22] Fitzgibbon Q P, Srawbridge A S, Seymour R S. Metabolic scope, swimming performance and the effects of hypoxia in the mullet, *Argyrosomus japonicus* (Pisces: Sciaenidae) [J]. *Aquaculture*, 2007, 270(1/2/3/4): 358-368.
- [23] Pang X, Cao Z D, Peng J L, et al. The effects of feeding on the swimming performance and metabolic response of juvenile southern catfish, *Silurus meridionalis*, acclimated at different temperatures [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology A*, 2010, 155(2): 253-258.
- [24] Zhang W, Cao Z D, Fu S J. The effects of dissolved oxygen levels on the metabolic interaction between digestion and locomotion in Cyprinid fishes with different locomotive and digestive performances [J]. *Journal of Comparative Physiology B*, 2012, 182(5): 641-650.
- [25] Caputo F, Oliveira M F M, Denadai B S, et al. Intrinsic factors of the locomotion energy cost during swimming [J]. *Revista Brasileira de Medicina do Esporte*, 2006, 12(6): 399-404.
- [26] 闫东娟,闫冠杰,曹振东,等. 运动锻炼对鲤鱼幼鱼游泳能力及代谢的影响[J]. *重庆师范大学学报:自然科学版*, 2012, 29(5): 16-19.
- Yan D J, Yan G J, Cao Z D, et al. The Effect of exercise training on the swimming performance and metabolic rate in juvenile common carp (*Cyprinus carpio*) [J]. *Journal of Chongqing Normal University: Natural Science*, 2012, 29(5): 16-19.
- [27] Farrell A P, Johansen J A, Steffensen J F, et al. Effects of exercise training and coronary ablation on swimming performance, heart size, and cardiac enzymes in rainbow

- trout, *Oncorhynchus mykiss* [J]. Canadian Journal of Zoology, 1990, 68(6): 1174-1179.
- [28] 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.
- [29] Merino G E, Piedrahita R H, Conklin D E. Effect of water velocity on the growth of California halibut (*Paralichthys californicus*) juveniles [J]. Aquaculture, 2007, 271 (1): 206-215.
- [30] Herskin J, Steffensen J F. Energy savings in sea bass swimming in a school: measurements of tail beat frequency and oxygen consumption at different swimming speeds [J]. Journal of Fish Biology, 1998, 53(2): 366-376.
- [31] 李丹, 林小涛, 李想, 等. 水流对杂交鲟幼鱼游泳行为的影响 [J]. 淡水渔业, 2008, 38(6): 46-51.
- Li D, Lin X T, Li X, et al. Effects of water velocities on swimming behavior of hybrid sturgeon [J]. Freshwater Fisheries, 2008, 38(6): 46-51.
- [32] Ware D M. Growth, metabolism, and optimal swimming speed of a pelagic fish [J]. Journal of the Fisheries Board of Canada, 1975, 32(1): 33-41.
- [33] Hinch S G, Rand P S. Swim speeds and energy use of up-river-migrating sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*): role of local environment and fish characteristics [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1998, 55 (8): 1821-1831.

Animal Sciences

Effects of Flow Stimulation on the Swimming Performance and Metabolism in Juvenile *Zacco platypus*

LIU Haisheng, CAO Zhendong, FU Shijian

(Laboratory of Evolutionary Physiology and Behaviour, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China)

Abstract: To investigate the effect of water flow stimulation on swimming performance and metabolism of juveniles *Zacco platypus*, 60 fish were randomly divided into either treatment group (water flow group) and control group (hydrostatic group) and reared under prescribed condition for six weeks at $(20 \pm 1.0) ^\circ\text{C}$, respectively. Then, the critical swimming speed (U_{crit}), optimal swimming speed (U_{opt}), resting metabolic rate (RMR), active metabolic rate (AMR), metabolic rate (MR) and cost of transport (COT) at any given swimming speed were measured. RMR were $(153.72 \pm 7.41) \text{ mgO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ and $(197.85 \pm 8.00) \text{ mgO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ while U_{crit} were $(62.90 \pm 2.84) \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ and $(75.50 \pm 4.27) \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ in control and treatment group, with those of the control group were significantly lower than the treatment group ($p < 0.05$). However, there was no significant difference in AMR between two groups. Fish in control group showed significantly higher MR at any given swimming speed. Furthermore, fish in control group also showed significantly higher COT when swam under low swimming speed ($p < 0.05$), but the difference decreased at high swimming speed ($p < 0.05$). The calculated U_{opt} values based on COT curve were $54.00 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ and $44.00 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, respectively in control and treatment groups. The present study showed that continuous water stimulation improved swimming ability of experimental fish significantly partly due to improved swimming efficiency with the cost of higher maintenance energy expenditure.

Key words: water flow stimulation; critical swimming speed; const of transport; *Zacco platypus*

(责任编辑 方 兴)