

短须裂腹鱼有氧游泳能力及其行为的实验研究

张沙龙^{1,2}, 张家波³, 乔 晔¹, 王龙涛³, 侯轶群¹

(1. 水利部中国科学研究院水工程生态研究所 水利部水工程生态效应与生态修复重点实验室, 武汉 430079;
2. 中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司, 北京 100024; 3. 华中农业大学水产学院, 武汉 430070)

摘要:研究短须裂腹鱼的游泳能力、运动生理及游泳行为,为过鱼设施的设计提供参考依据。实验用15尾短须裂腹鱼于2013年7月中旬采自金沙江上游玛曲河口处,体长(23.83 ± 2.47) cm,体重(224.95 ± 76.83) g。游泳能力测试装置采用丹麦 Loligo Systems 公司生产的大型游泳水槽。(1)短须裂腹鱼临界游泳速度为(75.04 ± 7.6) cm/s、(3.17 ± 0.42) BL/s;(2)运动耗氧率与游泳速度呈幂函数关系: $M_{O_2} = 100.00 + 42.61U^{1.81}$ ($R^2 = 0.995$, $P < 0.001$);单位距离耗氧率(COT)与游泳速度的关系也呈幂函数关系: $COT = 0.12U^{-1} + 0.04U^{1.02}$ ($R^2 = 0.898$, $P < 0.001$),最适流速 $U_{opt} = 1.81$ BL/s, $COT_{min} = 0.14$ mg/(kg · m);(3)随着游泳速度的增加,尾摆幅度的变化不显著($P > 0.05$),变化范围为0.17 ~ 0.26 BL、平均(0.21 ± 0.02) BL,而尾摆频率和运动步长都呈线性增加的趋势。

关键词:短须裂腹鱼;临界游泳速度;能量代谢;游泳行为

中图分类号:Q145 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2016)05-0056-07

随着我国的水力开发,过鱼设施的建设需求越来越高,作为基础设计参数的鱼类游泳能力及行为特性成为技术讨论的重要内容,被认为是决定过鱼设施成败的重要因素之一(陈凯麒等,2012)。临界游泳速度(U_{crit})是评价鱼类游泳能力的常用指标,其测定方法由 Brett(1964)首次提出,并因测试时间短、所需样本量少而得到广泛应用。

短须裂腹鱼(*Schizothorax wangchiachii* Fang)隶属于鲤科、裂腹鱼亚科、裂腹鱼属,生活于流水环境,分布于长江上游金沙江、雅砻江等水系,为长江上游的特有鱼类,也是产区一种非常重要的经济鱼类,被世界自然保护联盟 IUCN 红色名录列为“近危”物种。近年来,短须裂腹鱼主要分布水系的金沙江和雅砻江等均在规划建设水电站,各电站均开展了过鱼设施的规划、设计和建设等相关工作,短须裂腹鱼作为主要过鱼对象之一,迫切需要研究其游泳能力及行为。

本实验利用密闭的游泳水槽,测试短须裂腹鱼的临界游泳速度,研究临界游泳运动过程中的能量代谢及尾摆频率、尾摆幅度和运动步长等游泳行为指标,旨在了解短须裂腹鱼的游泳能力、运动生理及游泳行为,为过鱼设施的设计提供参考依据。

1 材料和方法

1.1 实验装置

游泳能力测试装置采用丹麦 Loligo Systems 公司生产的大型游泳水槽(Large swim tunnel) SW10200(图1),水槽内部跑道型结构体积为90 L,可密封也可与外部长方体结构进行水体交换。水槽流速为电动机带动螺旋桨转动产生并通过变频器调节大小。水流经过蜂窝状稳流装置后可保证鱼类测试区域的流场均匀。测试区规格为70 cm × 20 cm × 20 cm,流速变化范围为5 ~ 150 cm/s。长方体结构水体可与暂养池动水循环,水温与暂养池水保持

收稿日期:2014-12-16 修回日期:2015-10-29

基金项目:国家自然科学基金项目(51409175),三峡工程鱼类资源保护湖北省重点实验室主任基金2015年度开放课题项目(SX-SN/4008);鱼道过鱼效果观测技术规范研究项目(204016012);中国电力建设股份有限公司科技项目(DJ-ZDXM-2014-04)。

作者简介:张沙龙,1988年生,男,硕士研究生,研究方向为渔业资源保护。E-mail: zhangshalong@yeah.net

通信作者:侯轶群,1986年,女,硕士,助理研究员,主要从事生态水力学方面工作。greenhan16@163.com

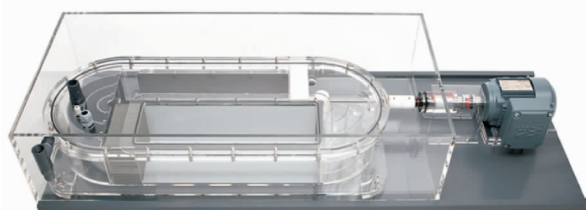


图1 SW10200 游泳水槽(丹麦 Loligo Systems 公司)

Fig. 1 Swim tunnel respirometer

(Loligo Systems SW10200, Denmark)

一致。

YSI Ecosense DO200A 溶解氧测定仪测定溶解氧,挪威 Nortek 公司产 Vectrino 声学多普勒三维点式流速仪测定流速, Sony HDR-SR12 摄像机 (25 帧/s) 摄像。

1.2 流速标定

为了便于实验操作,需建立调速器频率与测试区域流速之间的关系。测试电机频率每升高 5 Hz 水槽中的流速,制作标准曲线,测试时选取测试区域前、中、后各 3 个点的平均值。频率 (x , Hz) 与流速 (y , cm/s) 的关系为:

$$y = 3.3231x \quad R^2 = 0.9937 \quad (1)$$

1.3 实验对象

实验用 15 尾短须裂腹鱼于 2013 年 7 月中旬采自金沙江上游玛曲河河口处,体长 (23.83 ± 2.47) cm,体重 (224.95 ± 76.83) g。暂养于与支流浪荡河连通的水池中,暂养期 3 d (测试时间跨度为 2 d),暂养期间不投喂。暂养水与河水保持动水循环,溶解氧保持在 7.0 mg/L 以上,水温变化范围为 12.1 ~ 16.1℃。

1.4 临界游泳速度测定

将 1 尾鱼置于水槽测试段 (预先测其体长),流速调至 0.5 BL/s 适应 1h,适应结束后,水流速度每 20 min 增加 0.5 BL/s,直到实验鱼游泳疲劳结束测试,记录最高游泳速度及其持续时间。

游泳疲劳的确认:实验鱼停于测试区尾部,轻拍下游壁面 20 s 实验鱼仍然不能重新游动,则视为疲劳 (涂志英等,2012)。取出疲劳后的鱼进行体重及常规形态学参数的测定。实验全程从顶部摄像。

临界游泳速度 (U_{crit}) 的计算方法:

$$U_{crit} = v + \frac{t}{\Delta t} \Delta v \quad (2)$$

式中, Δt 为各流速下的持续时间 (本实验取 20 min); t 为在最高流速下的持续时间 (min); Δv 为速度增量 (本实验取 0.5 BL/s), v 为鱼能够完成持续时间 Δt 的最大游泳速度。当实验鱼的横截面积大于测试区截面积的 10% 时,会引起阻挡效应,导致临界游泳速度的测试结果偏小,需校正;反之则不需校正 (Jain & Farrell, 2003)。

1.5 耗氧率

1.5.1 耗氧率测试 在临界游泳速度的测试过程中,在每个 Δt (20 min) 时间间隔内,前 3 min 用水泵对内外水槽进行水体交换,保证内部水槽溶解氧浓度高于 7 mg/L,之后将内部跑道型水槽密封,进行 3

次溶解氧测定 (分别在第 5 min, 第 10 min 和第 15 min)。

1.5.2 耗氧率计算 不同流速下实验鱼的耗氧率 [M_{O_2} , mg / (kg · h)] 的计算公式为:

$$M_{O_2} = Q \frac{d(DO)}{dt} / M \quad (3)$$

式中, Q 为密封游泳装置的体积 (L, 本实验为 90 L), $d(DO)/dt$ 为设定流速下溶解氧随时间变化的斜率 [$(\text{mg} / (\text{L} \cdot \text{h}))$], M 为实验鱼体重 (kg)。

单位距离耗氧率 (Cost of transport, COT) 计算公式为:

$$COT = M_{O_2} / U \quad (4)$$

式中, COT 单位为 mg / (kg · m); U 为实验鱼的游泳速度 (m/h); M_{O_2} 为耗氧率。

1.5.3 最适游泳速度计算 将单位距离耗氧率公式进行一阶求导,并令其为 0,可求得最适游速 (Optimum swimming speed, U_{opt}),即耗能最小 (Minimum energy cost) 的游泳速度。将 U_{opt} 带入公式 (4) 可得 COT_{min} 。

1.5.4 耗氧率与游速的关系模型

幂函数模型 (Ohlberger et al, 2006; Steinhausen et al, 2005):

$$M_{O_2} = a + bU^c \quad (5)$$

线性函数模型 (Macy et al, 1999):

$$M_{O_2} = a + bU \quad (6)$$

指数函数模型 (Macy et al, 1999):

$$M_{O_2} = ae^{bU} \quad (7)$$

对数函数模型 (Sepulveda et al, 2007):

$$\log M_{O_2} = a + bU \quad (8)$$

1.6 游泳行为分析

将临界游泳速度测定过程中录制的视频,通过 KMPlayer 视频软件进行逐帧分析,得出实验鱼在各游泳速度下以 min 为单位时长的尾摆频率 (Tail beat frequency, TBF)、尾摆幅度 (Tail beat amplitude, TBA) 和运动步长 (Stride length, L_s),分析方法如图 2。

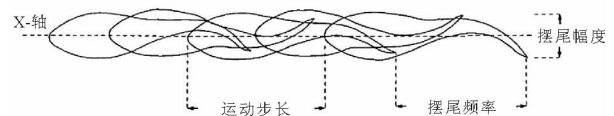


图 2 游泳行为的测定示意 (Archer & Johnston, 1989)

Fig. 2 Diagram illustrating the determination of swimming behavior

运动步长的计算公式 (Videler & Wardle, 1991):

$$L_s = \frac{U}{BL \cdot f} \quad (5)$$

式中, U 为鱼类的游泳速度 (cm/s), BL 为实验鱼的体长 (cm), f 是以 s 为单位时长的尾摆频率。

1.7 统计方法

M_{O_2} 与游泳速度之间的关系采用多种回归分析方法进行比较分析, COT 与游泳速度的关系根据 M_{O_2} 拟合关系确定后进行相关分析。TBF、 L_s 与游泳速度之间的关系采用线性回归分析方法, 统计软件为 Origin 8.5。差异显著性水平为 $P < 0.001$ 。

2 实验结果

2.1 临界游泳速度

在水温 $12.1 \sim 16.1^\circ\text{C}$ 的条件下, 短须裂腹鱼 ($n = 15$ 尾) 的临界游泳速度为 (75.04 ± 7.6) cm/s、 (3.17 ± 0.42) BL/s。

2.2 能量代谢与游泳速度的关系

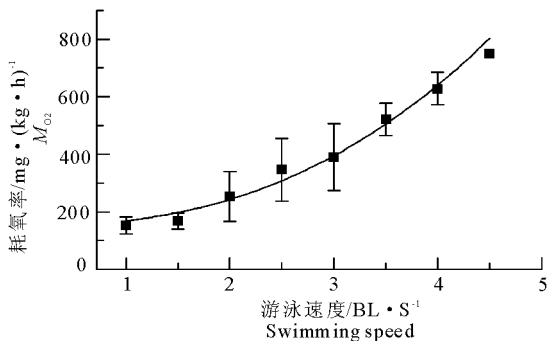
建立的耗氧率与游速的关系模型相关参数比较见表 1。

表 1 各函数模型相关参数比较

Tab.1 Comparison of parameters for each mathematical model

函数模型	方程系数	相关系数 r	相关显著性
线性函数	$a = -78.611, b = 174.47$	$r = 0.97$	$P < 0.001$
指数函数	$a = 93.888, b = 0.4765$	$r = 0.98$	$P < 0.001$
对数函数	$a = 1.9726, b = 0.2069$	$r = 0.98$	$P < 0.001$
幂函数	$a = 100, b = 42.61, c = 1.81$	$r = 0.995$	$P < 0.001$

幂函数的拟合度最高 ($r = 0.995$), 幂函数的关系式为: $M_{O_2} = 100.00 + 42.61U^{1.81}$ ($R^2 = 0.995$, $P < 0.001$) (图 3)。



$n = 9$ 尾, 温度 $12.1 \sim 16.1^\circ\text{C}$, 体长 (25.4 ± 1.8) cm, 湿重 (267.1 ± 72.2) g

图 3 短须裂腹鱼在不同游泳速度条件下的耗氧率

Samples: $n = 9$; Temperature: $12.1 \sim 16.1^\circ\text{C}$; Body length: (25.4 ± 1.8) cm; Wet mass: (267.1 ± 72.2) g

Fig.3 Variation of oxygen consumption rate (M_{O_2}) with swimming speed

根据 COT 同 M_{O_2} 的相关关系, 设定 COT 同 U (BL/s) 的函数模型为 $COT = aU^{-1} + bU^c$, 拟合得到 $COT = 0.12U^{-1} + 0.04U^{1.02}$ ($R^2 = 0.898$, $P < 0.001$) (图 4)。求导得出最适游速为 $U_{opt} = 1.81$ BL/s, 该游速下的单位距离耗氧率 $COT_{min} = 0.14$ mg/(kg·m)。

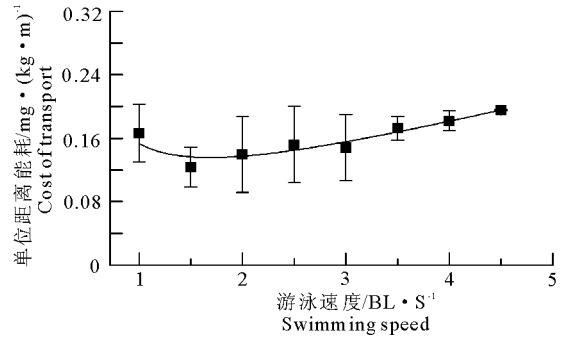


图 4 单位距离能耗与游泳速度的关系

Fig.4 Cost of transport at different swimming speeds

2.3 游泳行为

在温度 $12.1 \sim 16.1^\circ\text{C}$ 条件下, 实验鱼的尾摆频率与游泳速度呈现显著的线性关系, 通过线性回归分析, 尾摆频率与游泳速度的线性关系式为 $TBF = 66.60 + 61.98U$ ($R^2 = 0.990$, $P < 0.001$) (图 5)。

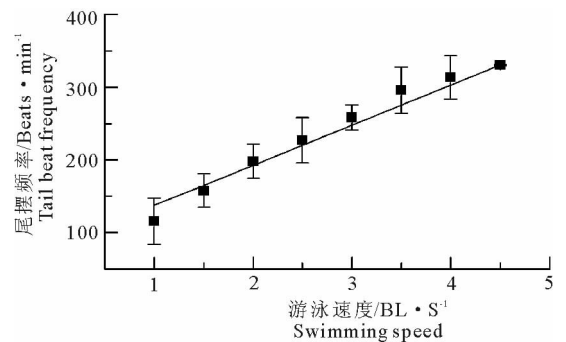


图 5 尾摆频率与游泳速度的关系

Fig.5 Tail beat frequency at different swimming speeds

不同游泳速度的条件下, 实验鱼的尾摆幅度的变化不显著 ($P > 0.05$)。随着游泳速度的增加, 尾摆幅度有稍增加的趋势 (图 6)。尾摆幅度的变化范围为 $0.17 \sim 0.26$ BL、平均 (0.21 ± 0.02) BL。

3 讨论

3.1 临界游泳速度

15 尾体长 (23.83 ± 2.47) cm 短须裂腹鱼的临界游泳速度为 (75.04 ± 7.6) cm/s [(3.17 ± 0.42) BL/s]。由于没有短须裂腹鱼游泳能力的相关研究报道, 无法将测试结果同已有研究进行直接类比。但有研究报道了裂腹鱼属其他种的游泳速

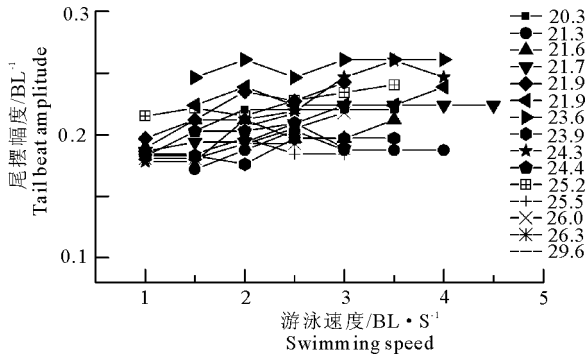


图 6 尾摆幅度与游泳速度的关系

Fig. 6 Tail beat amplitude at different swimming speeds

度,如涂志英等(2012)测得巨须裂腹鱼(*Schizothorax macropogon*)(体长 21 ~ 29 cm)的临界游泳速度为 109 cm/s(10℃)、张沙龙等(2014)测得长丝裂腹鱼(*Schizothorax dolichonema* Herzenstein)的临界游泳速度为 60.13 ~ 97.5 cm/s(体长约 20 cm,温度 12.1 ~ 16.1℃)。本实验鱼短须裂腹鱼和张沙龙等(2014)实验鱼长丝裂腹鱼均采自金沙江上游河段,栖息环境和生活习性较为接近,临界游泳速度也较为接近;而涂志英等(2012)实验鱼为来自雅鲁藏布江的巨须裂腹鱼,具有较高的临界游泳速度。

运动步长与游泳速度呈显著线性关系,随游泳速度的增加运动步长相应增加。运动步长与游泳速度关系的拟合方程: $L_s = 0.47 + 0.08U$ ($R^2 = 0.994$, $P < 0.001$)(图 7)。

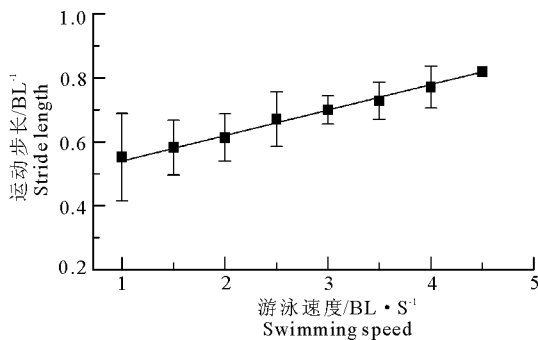


图 7 运动步长与游泳速度的关系

Fig. 7 Stride length at different swimming speeds

3.2 能量代谢与游泳速度的关系

在本研究中,对耗氧率及游泳速度分别进行了线性函数、指数函数、对数函数及幂函数 4 种函数关系的拟合,拟合度最高的方程为幂函数方程,因此采用幂函数方程来描述耗氧率与流速之间的关系。在相关文献(Videler & Wardle, 1991)中,幂函数模型使用也较多。

在幂函数模型 $M_{O_2} = a + bU^c$ 中,速度指数 c 的

取值在 1.1 ~ 3.0 (Videler & Nolet, 1990)。本研究中,短须裂腹鱼的速度指数 c 为 1.81,在上述取值范围之内。速度指数反映的是鱼类有氧运动过程中的能量利用效率(Webb, 1993),值越大,函数关系曲线越陡,能量利用效率越低。研究表明,高水阻形态比低水阻形态鱼类的速度指数大,并且速度指数的差异可以从形态学特征来解释。Beamish (1978)研究了几种硬骨鱼类的速度指数,其平均值为 2.3,另有草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)的速度指数为 2.53 (Ohlberger et al, 2006)、黑鲈的为 2.44 (Claireaux et al, 2006)。与上述草鱼和黑鲈的速度指数比较,短须裂腹鱼的速度指数较小,说明其游泳效率高于草鱼和黑鲈,这可能是由于:(1)其生存在高流速的水环境中,饵料食物较少,必须以较少的能耗产生较高的游速捕食食物 (Schulz et al, 2003);(2)其体型较草鱼和黑鲈的水阻小。

单位距离耗氧率反映整个运动过程中的能量效率状况,其值越低,运动的效率就越高。本研究中短须裂腹鱼的单位距离耗氧率与游泳速度的关系呈“J”形曲线(图 4),这与很多研究的结果 (Claireaux et al, 2006; Tu et al, 2011; Tu et al, 2012) 相似。在实验开始的低流速下,单位距离耗氧率的值较大,这可能是由于标准代谢率(对处于标准生理状态的动物个体,在一定环境条件下所测定的醒觉和静止时的代谢率)占整个代谢量的比例较大。随着游泳速度的增加,由于标准代谢率对整个耗氧量的贡献逐渐减低,单位距离耗氧率首先呈现下降的趋势,当单位距离能耗达到一个最小值后,随着游泳速度的继续增加,单位距离能耗也随运动耗氧率的增加而增加 (Claireaux et al, 2006)。

最适流速(U_{opt})是鱼类游泳能力的一个重要参数,鱼类在 U_{opt} 下,单位距离耗氧率最小。 U_{opt} 具有重要的生态学意义,因为跟其他很多水生动物一样,鱼类在自然环境中都倾向于以接近 U_{opt} 的速度游动,如觅食和长距离洄游 (Fish, 1998)。但是在洄游过程中,穿过湍急的水流或障碍物的时候,鱼类通常不会采取这种节省能量的游速,而是改变为另外的节省能量的游泳策略,如采取暴发-滑行等游泳方式 (Hinch & Bratty, 2000)。Videler (1993) 总结前人相关研究得出不同种类鲑的 U_{opt} 为 0.8 ~ 2.8 BL/s, 本研究中短须裂腹鱼的 U_{opt} 为 1.81 BL/s, 在此范围之内。草鱼的 U_{opt} 为 1.42 BL/s (Ohlberger et al, 2006), 比短须裂腹鱼的小,可能是由于短须裂腹鱼生活在急流环境中而草鱼喜生活于

静水或缓流水体中,因此在自然状态下短须裂腹鱼游泳速度比草鱼快。

3.3 游泳行为

在稳定游速下,鱼类通过身体和尾鳍产生驱动力来提高游速。前人研究发现多种硬骨鱼类尾摆频率与游泳速度呈线性正相关关系(Dickson et al, 2002; Tu et al, 2011; 蔡露等, 2013; Cai et al, 2013),本研究中短须裂腹鱼也得出与此相同的趋势关系(图5)。

短须裂腹鱼尾摆幅度的变化范围为0.17 ~ 0.26 BL(图6),平均尾摆幅度为(0.21 ± 0.02) BL。Webb(1986)通过总结得出硬骨鱼类尾摆幅度在不同游速下基本稳定在0.2 BL左右,如黄鳍金枪鱼(*Thunnus albacares*)(Dewar & Graham, 1994)、北方蓝鳍金枪鱼(*Thunnus thynnus*)(Wardle et al, 1989)、虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)(Webb et al, 1984)以及细鳞裂腹鱼(Tu et al, 2011)。在过鱼设施设计中,尾摆幅度是重要的参考因素之一,如在垂直竖缝式鱼道中,竖缝的宽度不能小于鱼的尾摆幅度。如对于体长30 cm的短须裂腹鱼来说,竖缝的最小宽度为0.26 cm × 30 cm(TBAmx)(Lin et al, 2008)。

短须裂腹鱼运动步长与游泳速度呈线性正相关关系(图7),这与其他很多硬骨鱼类的研究结果一致,如史氏鲟幼鱼(*Acipenser schrenckii*)(Cai et al, 2013)、(*Caranx caballus*)(Dickson et al, 2012)、太平洋竹鱼(Hunter & Zweifel, 1971)和黄鳍金枪鱼(Dewar & Graham, 1994)等。Videler(1993)研究表明,很多鱼在低游速下用展开的胸鳍制动,减小运动步长;而在高游速下,鱼类会收起它们的胸鳍,增加运动步长。也有人发现鲭(*Scomber scombrus*)(He & Wardle, 1986)在低游速下身体与水流保持一个角度前行,这种游泳行为可能会降低运动步长。然而本研究中,通过实验过程中的观察以及全程录像的回放分析,发现短须裂腹鱼在设定的低游速和高游速下均保持胸鳍展开,身体也与水流方向基本保持在一条直线上。因此,短须裂腹鱼在高游速下运动步长增加的原因既不是胸鳍收展与否也不是身体方向改变与否,有待进一步探究。

本文对短须裂腹鱼游泳速度及其行为的测试分析结果可为金沙江和雅砻江上正在规划设计和建造的过鱼设施提供参考依据,对保护短须裂腹鱼野生种群具有一定的意义。本实验的水温变化范围为12.1 ~ 16.1℃,由于实验条件受限未能对该因子的

影响进行有效控制和分析,而温度对鱼类的游泳能力影响也较大,可通过进一步实验,探究温度对短须裂腹鱼游泳能力的影响。

参考文献

- 蔡露,刘国勇,Rachel Taupier,等,2013. 齐口裂腹鱼幼鱼疲劳后游泳特性恢复状况研究[J]. 水生生物学报,37(6): 993 - 998.
- 陈凯麒,常仲农,曹晓红,等,2012. 我国鱼道的建设现状与展望[J]. 水利学报, 43(2): 182 - 188.
- 涂志英,袁喜,王从锋,等,2012. 亚成体巨须裂腹鱼游泳能力及活动代谢研究[J]. 水生生物学报,36(4): 682 - 688.
- 叶超,王珂,黄福江,等,2013. 异齿裂腹鱼游泳能力初探[J]. 淡水渔业,43: 33 - 37.
- 张沙龙,侯铁群,王龙涛,等,2014. 长丝裂腹鱼的游泳能力和游泳行为研究[J]. 淡水渔业,5(44): 32 - 37.
- Archer S D, Johnston I A, 1989. Kinematics of labriform and subcarangiform swimming in the Antarctic fish *Notothenia neglecta* [J]. *Journal of Experimental Biology*, 143: 195 - 210.
- Beamish F W H, 1978. Swimming capacity[M]// Hoar W S, Randall D J. *Fish Physiology* (Vol. VII: Locomotion). New York: Academic Press: 101 - 87.
- Boisclair D, Tang M, 1993. Empirical analysis of the influence of swimming pattern on the net energetic cost of swimming in fishes [J]. *Journal of Fish Biology*, 42(2): 169 - 183.
- Brett J R, 1964. The respiratory metabolism and swimming performance of young Sockeye Salmon [J]. *Journal of Fisheries Research Board of Canada*, 21(5): 1184 - 1226.
- Cai L, Taupier R, Johnson D, et al, 2013. Swimming capability and swimming behavior of juvenile *Acipenser schrenckii* [J]. *Journal of Experimental Zoology A*, 319(3): 149 - 155.
- Claireaux G, Couturier C, Groison AL, 2006. Effect of temperature on maximum swimming speed and cost of transport in juvenile European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) [J]. *Journal of Experimental Biology*, 209(17): 3420 - 3428.
- Dewar H, Graham J B, 1994. Studies of tropical tuna swimming performance in a large water tunnel. III. Kinematics [J]. *Journal of Experimental Biology*, 192: 45 - 59.
- Dickson K A, Donley J M, Hansen M W, et al, 2012. Maximum sustainable speed, energetics and swimming kinematics of a tropical carangid fish, the green jack *Caranx caballus* [J]. *Journal of fish Biology*, 80(7): 2494 - 2516.
- Dickson K A, Donley J M, Sepulveda C, et al, 2002. Effects of temperature on sustained swimming performance and swimming kinematics of the chub mackerel *Scomber japonicas* [J]. *Journal of Experimental Biology*, 205(7): 969 -

- 980.
- Fish F E, 1998. Comparative kinematics and hydrodynamics of odontocete cetaceans: morphological and ecological correlates with swimming performance [J]. *Journal of Experimental Biology*, 201: 2867 – 2877.
- Hammer C, 1995. Fatigue and exercise tests with fish [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology A*, 112(1): 1 – 20.
- He P, Wardle C S, 1986. Tilting behaviour of the Atlantic mackerel, *Scomber scombrus*, at low swimming speeds [J]. *Journal of Fish Biology*, 29: 223 – 232.
- Hinch S G, Bratty J, 2000. Effects of swim speed and activity pattern on success of adult sockeye salmon migration through an area of difficult passage [J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 129(2): 598 – 606.
- Hunter J R, Zweifel J R, 1971. Swimming speed, tail beat frequency, tail beat amplitude, and size in jack mackerel, *Trachurus symmetkm*, and other fishes [J]. *Fish Bulletin*, U. S., 69: 253 – 266.
- Jain K E, Farrell A P, 2003. Influence of seasonal temperature on the repeat swimming performance of rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* [J]. *Journal of Experimental Biology*, 206(20): 3569 – 3579.
- Lin P J, Ni I H, Huang B Q, 2008. Evaluation of the swimming ability of wild caught *Onychostoma barbatula* (Cyprinidae) and applications to fishway design for rapid streams in Taiwan [J]. *Raffles Bulletin of Zoology*, 19: 273 – 284.
- MacNutt M J, Hinch S G, Lee C G, et al, 2006. Temperature effects on swimming performance, energetics, and aerobic capacities of mature adult pink salmon (*Oncorhynchus gorbuscha*) compared with those of sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*) [J]. *Canadian Journal of Zoology*, 84(1): 88 – 97.
- Macy W K, Durbin A G, Durbin E G, 1999. Metabolic rate in relation to temperature and swimming speed, and the cost of filter feeding in Atlantic Menhaden, *Brevoortia tyrannus* [J]. *Fish Bulletin*, 97(2): 282 – 293.
- Ohlberger J, Staaks G, Holker F, 2006. Swimming efficiency and the influence of morphology on swimming costs in fishes [J]. *Journal of Comparative Physiology B*, 176(1): 17 – 25.
- Schulz M, Kasprzak P, Anwand K, et al, 2003. Diet composition and food preference of vendace (*Coregonus albula* (L.)) in response to seasonal zooplankton succession in Lake Stechlin [J]. *Archives Hydrobiology Special Issues Advances Limnology*, 58: 215 – 226.
- Sepulveda C A, Graham J B, Bernal D, 2007. Aerobic metabolic rates of swimming juvenile mako sharks, *Isurus oxyrinchus* [J]. *Marine Biology*, 152(5): 1087 – 1094.
- Steinhausen M F, Steffensen J F, Andersen N G, 2005. Tail beat frequency as a predictor of swimming speed and oxygen consumption of saithe (*Pollachius virens*) and whiting (*Merlangius merlangus*) during forced swimming [J]. *Marine Biology*, 148(1): 197 – 204.
- Tu Z, Li L, Yuan X, et al, 2012. Aerobic swimming performance of juvenile Largemouth bronze gudgeon (*Coreius guichenoti*) in the Yangtze River [J]. *Journal of Experimental Zoology A*, 317(5): 294 – 302.
- Tu Z, Yuan X, Han J, et al, 2011. Aerobic swimming performance of juvenile *Schizothorax chongi* (Pisces, Cyprinidae) in the Yalong River, southwestern China [J]. *Hydrobiologia*, 675(1): 119 – 127.
- Tucker V A, 1970. Energetic cost of locomotion in animals [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology*, 34: 841 – 846.
- Videler J J, Nolet B A, 1990. Costs of swimming measured at optimum speed: scale effects, differences between swimming styles, taxonomic groups and submerged and surface swimming [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology A*, 97(2): 91 – 99.
- Videler J J, Wardle C S, 1991. Fish swimming stride by stride: speed limits and endurance [J]. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 1: 23 – 40.
- Videler J J, 1993. *Fish swimming* [M]//fish and fisheries Series 10. London: Chapman and Hall.
- Wardle C S, Videler J J, Arimoto T, et al, 1989. The muscle twitch and the maximum swimming speed of giant bluefin tuna, *Thunnus thynnus* [J]. *Journal of Fish Biology*, 35: 129 – 137.
- Webb P W, Kostecki P T, Stevens D E, 1984. The effect of size and swimming speed on locomotor kinematics of rainbow trout [J]. *Journal of Experimental Biology*, 109: 77 – 95.
- Webb P W, 1986. Kinematics of lake sturgeon, *Acipenser fulvescens*, at cruising speeds [J]. *Canadian Journal of Zoology*, 64: 2137 – 2141.
- Webb P W, 1993. *Swimming* [M]// Evans D H. the physiology of fishes. CRC Press, Boca Raton, FL: 47 – 73.

(责任编辑 张俊友)

Experimental Study on Aerobic Swimming Performance and Behavior of *Schizothorax wangchiachii* Fang

ZHANG Sha-long^{1,2}, ZHANG Jia-bo³, QIAO Ye¹, WANG Long-tao³, HOU Yi-qun¹

(1. Key Laboratory of Ecological Impacts of Hydraulic-Projects and Restoration of Aquatic Ecosystem of Ministry of Water Resources, Institute of Hydroecology, Ministry of Water Resources and Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430079, P. R. China;

2. Power-China Beijing Engineering Corporation Limited, Beijing 100024, P. R. China;

3. College of Fisheries, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, P. R. China)

Abstract: *Schizothorax wangchiachii* Fang, endemic to the upper Yangtze River, is an important economic fish in the Jinsha and Yagong Rivers. With hydropower development on these rivers, wild *Schizothorax wangchiachii* Fang populations are threatened by habitat fragmentation and it has become the primary species targeted for fish passage. To provide basic data for the design of fish pass facilities, we examined the swimming performance, energetic and kinematic characteristics of wild *Schizothorax wangchiachii* Fang in a swim tunnel respirometer. Test fish were captured in the upper Jinsha River with body length of (23.83 ± 2.47) cm and body mass of (224.95 ± 76.83) g. The fish were acclimated for three days at $12.1 - 16.1^\circ\text{C}$ and DO of 7.0 mg/L. The swim tunnel had a large swim channel ($70\text{ cm} \times 20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$) and the circulating water was taken from the fish storage pond. At the beginning of the test, one fish was put in the swim chamber at a flow velocity of 0.5 BL/s and acclimated for 1 h. The flow velocity was then increased 0.5 BL/s each 20 min until the fish was exhausted. During each time interval, the water was exchanged for the first three min to maintain $\text{DO} > 7$ mg/L, the respirometer was then sealed and the DO was measured three times at 5, 10 and 15 min. Results show that: (1) The critical swimming speed (U_{crit}) of *Schizothorax wangchiachii* Fang is (75.04 ± 7.6) cm/s (3.17 ± 0.42 BL/s). (2) Oxygen consumption, as a function of swimming speed, was fit to the equation: $M_{\text{O}_2} = 100.00 + 42.61U^{1.81}$ ($R^2 = 0.995$, $P < 0.001$), and the relationship between cost of transport and swimming speed was described as: $\text{COT} = 0.12U^{-1} + 0.04U^{1.02}$ ($R^2 = 0.898$, $P < 0.001$). The optimum swimming speed (U_{opt}) was 1.81 BL/s and the corresponding energetic cost was 0.14 mg/(kg · m). (3) The tail beat frequency (TBF) and stride length (L_s) both increased linearly with the swimming speed: $\text{TBF} = 66.60 + 61.98U$ ($R^2 = 0.990$, $P < 0.001$) and $L_s = 0.47 + 0.08U$ ($R^2 = 0.994$, $P < 0.001$). Tail beat amplitude did not change significantly with swimming speed ($0.17 - 0.26$ BL, $P > 0.05$) and average tail beat amplitude (TBA) was (0.21 ± 0.02) BL. This research provides basic data for the design of fish passage facilities, of great importance for the conservation of wild *Schizothorax wangchiachii* Fang.

Keywords: *Schizothorax wangchiachii* Fang; critical swimming speed; energy cost of transport; swimming behavior