

DOI: 10.3724/SP.J.1035.2012.00682

亚成体巨须裂腹鱼游泳能力及活动代谢研究

涂志英 袁喜 王从锋 许晓蓉 刘德富 黄应平

(三峡大学三峡库区生态环境教育部工程研究中心, 宜昌 443002)

摘要: 以野生雅鲁藏布江巨须裂腹鱼(*Schizothorax macropogon*)为对象, 通过自制的鱼类游泳实验装置, 测定了4个温度(5、10、15和18℃)梯度下亚成体巨须裂腹鱼的临界游泳速度(U_{crit})及流速变化对耗氧率的影响, 并通过摄像记录分析了不同游泳速度下的游泳行为。野生亚成体巨须裂腹鱼的临界游速随着温度的变化呈近似线性的递增趋势($P < 0.001$), 4个温度下的绝对临界游速(U_{crit-a})分别为(0.88±0.07)、(1.09±0.07)、(1.24±0.15)和(1.49±0.15) m/s; 若以单位时间内游过的体长倍数(BL/s)表示, 相对临界游速(U_{crit-r})分别为(3.96±0.21)、(4.4±0.16)、(4.9±0.18)和(5.35±0.14) BL/s。根据不同温度及流速下耗氧率的变化情况, 采用非线性拟合得到了4个温度梯度下耗氧率与游泳速度关系的幂函数模型($P < 0.05$)。模型表明耗氧率随游泳速度的增大而增加, 且温度越高耗氧率随游泳速度的变化越显著。4个温度下的速度指数分别为2.4、2.6、2.8及3.1, 表明有氧运动的效率随温度升高有所降低。在自然水温条件下(5—9℃), 摆尾频率(TBF)与流速的关系呈线性正相关($P < 0.001$), 而运动步长(L_s)的变化与流速没有显著关系, 出现由高至低再升高的三个阶段。录像分析表明在流速逐渐增加的过程中, 巨须裂腹鱼采用了三种不同的游泳方式, 以实现降低能量消耗的目的。研究可为鱼道等过鱼设施的设计提供参考, 对数量日益减少的巨须裂腹鱼保护具有较大的意义。

关键词: 巨须裂腹鱼; 游泳能力; 游泳行为; 活动代谢; 鱼道

中图分类号: Q955 文献标识码: A 文章编号: 1000-3207(2012)04-0682-07

为实现水资源的有效利用及调控, 我国在大江大河上修建了许多大坝和堤堰等水利工程。这些水利工程在促进经济发展的同时, 所引起的生态问题也越来越显著。对鱼类而言, 大坝阻碍了鱼类洄游到水库上游进行产卵, 阻碍部分鱼类回归大海, 对鱼类的生长繁殖产生了严重的影响, 其中以对洄游、半洄游性鱼类的影响最大。为了减小影响, 保证鱼类顺利洄游, 需修建鱼道等过鱼设施保护鱼类等水生生物。鱼类的游泳能力及游泳行为是鱼道设计中必须考虑的重要因素, 缺乏对鱼类行为学研究的鱼道设计往往是失败的^[1]。因此鱼类游泳能力及其生态行为学的研究, 不仅具有理论上的意义, 还可以为过鱼、拦鱼和诱鱼等设施的设计提供依据, 保证其水电工程储能设施能够发挥较大的功能。

近十几年来, 由于过度捕捞及外来鱼类的入侵,

导致雅鲁藏布江的渔业资源形势日益严峻^[2], 而如今对雅鲁藏布江水资源的开发利用, 将进一步对当地鱼类产生危害。巨须裂腹鱼(*Schizothorax macropogon*)为雅鲁藏布江中上游特有鱼类, 也是重要的经济鱼类之一, 当地又称“胡子鱼”, 多栖息于河水深处, 春节前后上溯至水流平缓的粗砾石质长滩进行产卵繁殖。目前对于巨须裂腹鱼的研究多侧重于生理、遗传等方面^[3, 4], 而关于其游泳能力的研究尚不多见。此外, 国内有关鱼类游泳能力的研究大多集中在力竭运动前后血液中生理生化指标的变化^[5]或力竭运动后的耗氧变化^[6], 而从临界游速、游泳行为及活动代谢等方面对鱼类游泳能力进行综合评价的研究甚少。本研究利用自行设计的游泳实验装置测定了亚成体巨须裂腹鱼在不同温度下的临界游速及运动过程中摆尾频率、运动步长随流速的变化关

收稿日期: 2011-05-04; 修订日期: 2012-02-25

基金项目: 国家自然科学基金(No.: 50979049, 51179096); 湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划(No.: T200703); 湖北省环保专项(No.: 2008HB08); 水利部公益基金项目(No.: 201201030)资助

作者简介: 涂志英(1973—), 女, 湖北宜昌人; 博士研究生; 主要从事水污染及水生态研究。E-mail: zytu1111@163.com

通讯作者: 黄应平(1964—), E-mail: chem_ctgu@126.com

系; 同时分析了其运动过程中耗氧率(Oxygen consumption rate, MO_2)随温度及流速的变化情况, 以期进一步了解巨须裂腹鱼的游泳能力及运动生理, 进而为水电站鱼道设计提供参考依据。

1 材料与方 法

1.1 实验材料

用于实验研究的巨须裂腹鱼于 2010 年 12 月上旬用刺网和流刺网采自雅鲁藏布江中游的加查县江段, 共 45 尾。捕获的鱼体长为 19.5—37.2 cm, 体重 135—776.5 g。基于实验装置尺寸考虑, 选择 30 尾未受伤、体长范围 < 30 cm 的巨须裂腹鱼为实验对象。新捕获的实验鱼在体积 2 m³、置于露天环境中的自制水槽中暂养一周。暂养槽水源来自雅鲁藏布江, 日换水量约为 20%, 水温昼夜变化范围 5—9℃。暂养期间连续充氧, 保持水槽内溶解氧大于 6.0 mg/L。

1.2 实验方法

基于历史资料中雅鲁藏布江的年均水温, 设定了 4 个实验温度(5、10、15、18℃)。捕获的巨须裂腹鱼驯化一周后, 将实验鱼按不同驯化温度分为 4 组, 每组 5—7 条鱼, 控制每组的暂养槽水温每天升高 1—2℃, 直至达到设定温度, 在设定温度下再适应 2d。同时将游泳装置中的水温恒定在实验所需温度下。待鱼驯化结束, 将其转移至自行设计的 90 L 循环式游泳呼吸仪中。该装置为一个横截面为正方形的循环式水槽, 由电机带动桨叶旋转控制水流速, 水在整个水槽中循环流动。工作区(80 cm×20 cm×20 cm)上游有一个整流装置, 下游侧为不锈钢网, 鱼在工作区中顶流游动。呼吸仪又被置于一个 248 L(149 cm×64 cm×26 cm)的矩形水槽中, 工作区溶氧不足时,

可以通过潜水泵将密封呼吸仪内的水与矩形槽中的水进行交换, 保证工作区中溶解氧的浓度。水槽上方安装一摄像头, 对鱼的游泳行为进行监测, 实现临界游泳速度(U_{crit})和游泳行为的同步测定。水流速度使用挪威产 Vectrino 三维点式流速仪测定, 水温由加热棒控制, 水中氧气浓度(DO)用溶氧仪(HACH, HQ10)测定, 使用摄像头(25 帧/s)对实验鱼的游泳行为进行录像, 以分析其游泳行为。

临界游泳速度及耗氧率 将一尾驯化后的鱼放入实验装置中, 在 0.5 BL/s 的流速下适应 1h, 然后将装置密封, 每 20min 提高一次流速, 流速增量为 1.0 BL/s。20min 内每 10min 测量 1 次溶解氧的浓度(DO), 直至鱼疲劳。在实验过程中, 当 DO 值低于 6.0 mg/L 时, 通过潜水泵将密封槽内的水与开放矩形槽中的水进行交换, 保证工作区中 DO 值不低于 6.0 mg/L。鱼疲劳的判定: 鱼停靠在下游网上时, 轻拍下游壁面 20s, 鱼仍不重新游动, 视为疲劳。疲劳后取出实验鱼并测量体重及常规形态学参数(表 1), 然后解剖进行性腺观察, 实验鱼均为性腺尚未成熟但外形与成体完全相似的亚成体巨须裂腹鱼。相对临界游泳速度(U_{crit-r} , BL/s)按以下公式计算:

$$U_{crit-r} = U_{max} + \frac{t}{\Delta t} \Delta U \quad (1)$$

其中 U_{max} 为鱼能够完成持续时间(Δt)的最大游泳速度, t 为在最高流速下游泳的时间(min), Δt 为改变流速的时间间隔(20min), ΔU 为速度增量(1.0 BL/s)。绝对临界游泳速度(U_{crit-a} , m/s)由相对临界游泳速度(U_{crit-r})与鱼体长相乘求得。耗氧率 [MO_2 , mgO₂/(kg·h)] 的计算公式如下:

$$MO_2 = V \frac{d(DO)}{dt} / M \quad (2)$$

表 1 实验各处理组亚成体巨须裂腹鱼的形态学参数
Tab. 1 Morphological parameters of subadult *S. macropogon* in each group

参数 Parameters	温度 Temperature (°C)			
	5	10	15	18
重复数 No. of fish	5	7	5	6
湿重 Weight (g)	196.8±5.9	235.0±6.9	246.8±5.8	245.8±5.9
体长 Body length (cm)	23.4±2.0	24.6±2.6	25.4±2.0	25.0±2.3
全长 Total length (cm)	27.9±1.9	29.1±2.7	30.5±1.7	29.7±2.1
体宽 Body wide (cm)	3.5±0.6	3.4±0.7	3.6±0.4	3.3±0.3
体高 Body height (cm)	5.0±0.7	5.6±0.5	5.9±0.8	5.6±0.3
丰满度 Condition factor*	0.906	0.953	0.870	0.938

*Condition factor = [weight(g)×total length⁻³(cm)]×100^[7]

V 为游泳装置体积(L), $d(DO)/dt$ 为某流速下 DO 值随时间变化的斜率[$\text{mgO}_2/(\text{L}\cdot\text{h})$], M 为鱼的重量(kg)。

鱼体的截面积会引发阻挡效应, 但当实验鱼的最大横截面积小于 10% 的游泳区截面积时, 测定的临界游泳速度可以不用校正^[8]。本研究的实验鱼鱼体最大截面积均小于 10% 的游泳区截面积。

游泳行为的测定 在测量临界流速的过程中, 同时用摄像头记录鱼在游动时的摆尾情况。通过视频慢放记录鱼在某流速下 1min 内的摆尾次数(Tail beat frequency, TBF)及不同流速下的运动步长(Stride length, L_s)。运动步长的计算公式为:

$$L_s = \frac{U}{BL \cdot f} \quad (3)$$

U 为游泳速度(cm/s), BL 为鱼体长(cm), f 为摆动频率(Hz)。

1.3 统计方法

实验数据用 spss11.5 软件进行统计分析, 采用单因素方差分析(one-way ANOVA), 并利用 LSD 多重比较法比较各组差异。统计值用平均数 \pm 标准差(Mean \pm SD)描述, 差异显著性水平为 $P < 0.05$ 。

2 结果

2.1 温度对临界流速的影响

在 5—18 $^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内, 巨须裂腹鱼的相对临界流速($U_{\text{crit-r}}$, BL/s)及绝对临界流速($U_{\text{crit-a}}$, m/s)都随着温度的升高而增大(图 1、图 2)。相对临界流速($U_{\text{crit-r}}$)与温度的关系可拟合为: $U_{\text{crit-r}} = -1.3 \times 10^{-3}T^2 + 0.12T + 3.39$ ($r^2 = 0.79$, $P < 0.001$), 绝对临界流速($U_{\text{crit-a}}$)与温度的关系拟合为: $U_{\text{crit-a}} = -1.3 \times 10^{-5}T^2 + 0.04T + 0.70$ ($r^2 = 0.73$, $P < 0.001$)。由图及拟合方程可知, 临界流速与温度的关系近似呈直线关系。在 5、10、15、18 $^{\circ}\text{C}$ 四个水温条件下, 体长为 21—29 cm 的巨须裂腹鱼相对临界流速分别为(3.96 \pm 0.21)、(4.4 \pm 0.16)、(4.9 \pm 0.18)和(5.35 \pm 0.14) BL/s, 绝对临界流速分别为(0.88 \pm 0.07)、(1.09 \pm 0.07)、(1.24 \pm 0.15)和(1.49 \pm 0.15) m/s。

2.2 流速及温度与耗氧率的关系

据观察, 在小于 2 BL/s 流速时, 鱼基本停靠在下游或静止, 极少摆尾游动, 耗氧率变化较小, 故实验从 2 BL/s 开始记录 DO 值。在设定的 4 个温度下, 巨须裂腹鱼的耗氧率随着流速的增加而增加(图 3)。温度越高, 耗氧率随流速增大的趋势越明显。且接近临界流速时, 鱼采用冲刺-滑行的游动方式, 耗

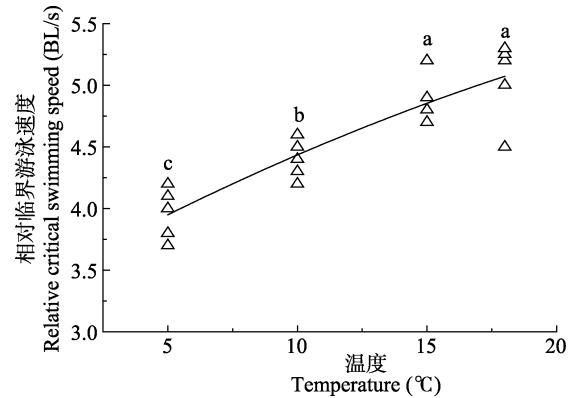


图 1 温度对巨须裂腹鱼相对临界流速的影响

Fig. 1 Effects of temperature on relative critical swimming speed
鱼体长范围: 21—29 cm; 湿重范围: 176—324 g
BL: 21—29 cm; wet mass: 176—324 g

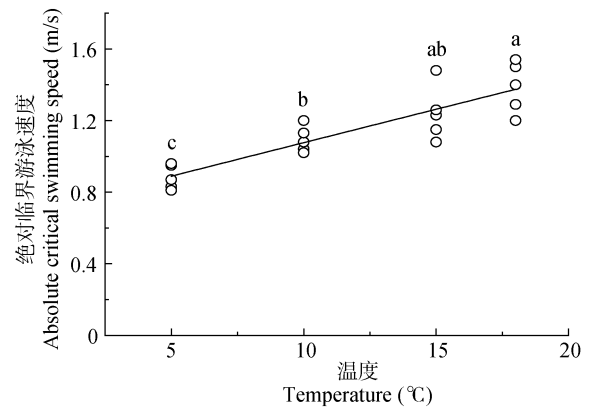


图 2 温度对巨须裂腹鱼绝对临界流速的影响

Fig. 2 Effects of temperature on absolute critical swimming speed
鱼体长范围: 21—29 cm; 湿重范围: 176—324 g
BL: 21—29 cm; wet mass: 176—324 g

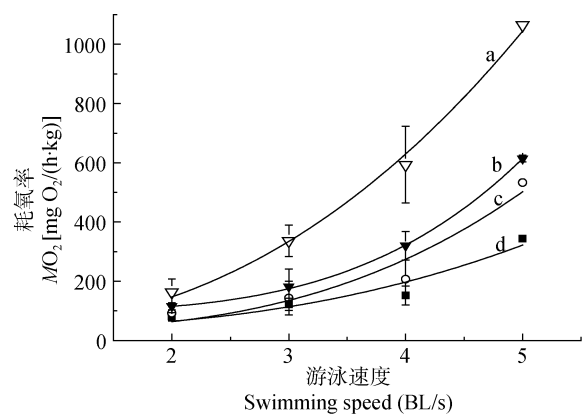


图 3 巨须裂腹鱼在不同温度及流速条件下的耗氧率

Fig. 3 The oxygen consumption rate (MO_2) at different temperature and swimming speed
a 表示 18 $^{\circ}\text{C}$; b 表示 15 $^{\circ}\text{C}$; c 表示 10 $^{\circ}\text{C}$; d 表示 5 $^{\circ}\text{C}$; 鱼体长范围: 20—26 cm; 湿重范围: 198—216 g
a. 18 $^{\circ}\text{C}$; b. 15 $^{\circ}\text{C}$; c. 10 $^{\circ}\text{C}$; d. 5 $^{\circ}\text{C}$; BL: 20—26 cm; wet mass: 198—216 g

氧率的增加幅度加剧。采用非线性曲线拟合法, 得到各温度下巨须裂腹鱼的耗氧率与游速关系的幂函数模型(表 2)。

2.3 流速对摆尾频率的影响

小于 2 BL/s 流速时, 鱼极少摆尾, 实验从 2 BL/s 开始记录摆尾频率(TBF)。如图 4 所示 TBF 随游泳速度的提高而增大, 游泳速度与 TBF 呈线性关系, 二者拟合方程为 $TBF=40.5 \times U-9.22$ ($r^2=0.67$, $P<0.001$)。而运动步长(L_s)随流速变化的规律与摆尾频率不同(图 5), 流速为 2 BL/s 时 L_s 值较大, 但当流速继续增加至 3 BL/s 时, L_s 显著下降, 随后流速增至 4 BL/s 后, L_s 随着流速的增加而增加。

表 2 不同温度下耗氧率的非线性回归模型
Tab. 2 Nonlinear regress model based on MO_2 and swimming speed at different temperature

温度 Temperature (°C)	样本数 No. of fish	回归方程 Regression equation	R^2	P
5	5	$MO_2=29.8+22.9U^{2.4}$	0.931	<0.05
10	7	$MO_2=32.5+3.9U^{2.6}$	0.944	<0.05
15	5	$MO_2=38.67+4.31U^{2.8}$	0.999	<0.05
18	6	$MO_2=98.55+1.25U^{3.1}$	0.996	<0.05

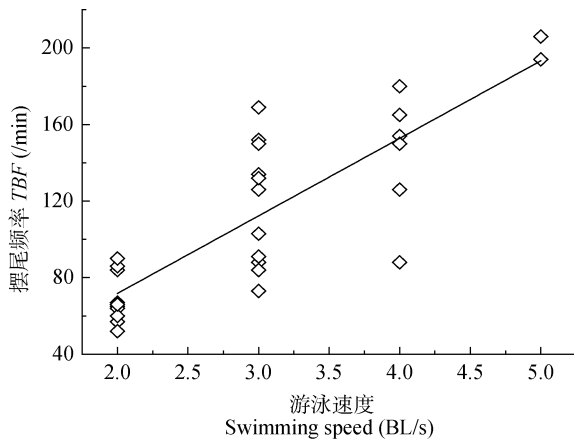


图 4 巨须裂腹鱼摆尾频率与游速的关系
Fig. 4 Relationship between TBF and swimming speed
鱼体长范围: 22—26 cm; 温度: 5.6—9.7°C
BL: 22—26 cm; Temperature: 5.6—9.7°C

3 讨论

3.1 温度对临界游泳速度的影响

临界游泳速度是由 Brett 提出, 用于检测鱼类最大可持续有氧运动能力的指标之一。在测定过程中, 随着流速的增加鱼类因不断消耗能量物质, 同时体内大量积累乳酸等代谢产物, 最终达到疲劳状态^[9]。

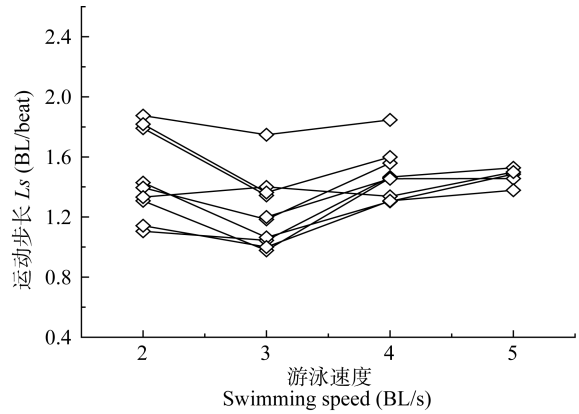


图 5 巨须裂腹鱼运动步长与游速的关系
Fig. 5 Relationship between stride length (L_s) and swimming speed
鱼体长范围: 22—26 cm; 温度: 5.6—9.7°C
BL: 22—26 cm; Temperature: 5.6—9.7°C

温度是影响鱼类游泳能力的一个重要因子。水温改变时, 鱼类将调解自身的生理及生化过程以适应新的环境^[10]。大量研究结果表明, 鱼类的临界游速与温度呈近似线性上升的变化趋势^[8, 11]或呈“钟形”变化趋势, 即先随着温度增加而上升, 随后随温度上升反而下降^[7, 12]。本文研究表明, 在 5—18°C 的温度范围内, 亚成体巨须裂腹鱼的相对临界游速(U_{crit-r} , BL/s)随温度的升高呈近似线性上升的变化趋势, 没有出现文献中“钟形”曲线的拐点。原因可能是在 18°C 的水温条件下, 巨须裂腹鱼的临界游速还未达到最大值。据文献报道鱼类最大临界游速一般出现在 20°C 以上^[12]。如乌鲷鱼(*Sparus aurata*)在 25°C 时临界游速达到最大^[13], 黑鲈(*Dicentrarchus labrax*)在 24.4°C 时达到最大临界游速^[14]。南方大口鲶(*Silurus meridionalis*)的最大临界游速对应温度为 28.4°C^[10]。在 5—10°C 及 10—15°C 之间, 巨须裂腹鱼相对临界游速的温度系数(Q_{10})值分别为 1.24 和 1.23, 而在 15—18°C 之间的 Q_{10} 值为 1.14, 表明随温度增加, 巨须裂腹鱼的温度敏感性降低, 临界游速随温度变化趋于平稳。据相关文献报道, 不同种类的鱼, 临界游速对温度的敏感性有不同的表现。褐鲟(*Salmo trutta*)在水温达到 14—18°C 之间时, 临界游速对温度变化不敏感^[15], 虹鲟(*Oncorhynchus mykiss*)在 14—17°C 之间对温度不敏感^[12]。不敏感的原因可能是当水温越接近鱼类的最适游泳温度, 即重要的生理功能作用于最佳条件附近时, 游泳能力随温度的变化幅度越小。

3.2 流速及温度对耗氧率的影响

鱼类的游泳行为受到许多环境因子的影响, 如

饵料、光照、季节、溶氧及温度等,所以对鱼类能量代谢的研究应考虑多重因素。但已有学者研究发现,影响鱼类能量代谢的最重要因素为鱼的体重、游泳速度及温度^[16, 17]。本研究中的亚成体巨须裂腹鱼体长、体重相近,主要考察了温度及流速对耗氧率(MO_2)的影响。在同一温度下,耗氧率随着流速的提高显著增加,且在不同温度下,采用幂函数模型较好的拟合了耗氧率与流速的关系(图3、表2)。文献报道的关于耗氧率与流速的关系除了幂函数模型 $MO_2 = a + bU^c$ ^[18-20]外,还有指数函数模型 $MO_2 = ae^{bU}$ ^[21, 22], 对数函数模型 $\log MO_2 = a + bU$ ^[23]等。也有文献认为在各种相关模型中,幂函数模型的拟合效果最佳^[19]。在幂函数模型中的速度指数 c 值,反应了耗氧率随流速增加而增加的快慢程度,同时也反应好氧游泳过程中的能量利用效率,值越小表明能量的利用率高。亚成体巨须裂腹鱼在 5—18℃ 的 4 个温度条件下, c 平均值分别为 2.4、2.6、2.8 和 3.1,说明随着温度增加,耗氧率随流速增加的变化率也增大,与文献报道的速度指数范围 1.4—3.0 之间基本相符^[12]。本研究得到的巨须裂腹鱼速度指数偏高,估计是由于巨须裂腹鱼正处于越冬期不喜活动,导致游泳的能量利用效率较低。

3.3 游泳行为

在不同流速下的游泳行为也是鱼道设计的参考数据之一。本实验研究表明摆尾频率(TBF)与流速变化近似呈线性关系(图4),即随着流速的提高 TBF 呈线性增加,与多数文献报道的结果一致^[24-26]。也有文献报道 TBF 与流速关系满足幂函数方程^[20]。而运动步长(L_s)的变化与流速没有显著关系,呈现出由高至低再升高的三个阶段(图5)。这与在流速增加过程中,巨须裂腹鱼采用了三种不同的游泳方式有关。在低流速下鱼的游动表现为不连续性,即采用摆尾-滑行的游泳方式。随着流速增加鱼开始连续游动,而当流速增加至接近临界流速时,鱼的游动又开始表现为不连续游动,采用冲刺-滑行的方式,因而随流速增加,运动步长出现了三种不同的变化规律。研究结果与 Swanson, *et al.*^[27]报道的三角洲银白鱼(*Hypomesus transpacificus*)在流速增加过程中的表现相似。已有研究表明,鱼在低流速及高流速条件下的不连续游动行为,可优化肌肉纤维的能量输出,并降低能量消耗^[28]。如鱼在滑行时的尾鳍呈僵硬状态,可减小游动过程中的阻力。Pon, *et al.*^[29]

实验发现,红鲑鱼(*Oncorhynchus nerka*)在通过鱼道中的高流速区时,极少采用连续游动的方式,而大多采用冲刺-滑行的方式通过鱼道。

实验研究表明,巨须裂腹鱼是一种游泳能力较强的鱼类,亚成体鱼的绝对临界流速可达到 1.5 m/s 以上。这与其纺锤形形态,喜急流的生态特征相适应。流速及温度对巨须裂腹鱼的耗氧率有显著的影响。温度越高,流速对耗氧率的影响越显著,且游泳过程中的能量利用效率降低。巨须裂腹鱼在流速逐渐增加的过程中,表现出三种不同的游泳方式,有利于降低洄游过程中的能量消耗。本研究为设计合适的鱼道,如鱼道中的适宜流速、鱼道尺寸等提供了参考依据,对鱼类的保护具有较大的意义。

致谢:

三峡大学的石小涛、李建华、杨波以及西藏山南地区加查县政府的领导,在野外实验工作中提供了大力帮助,使实验得以顺利完成,谨致谢忱。

参考文献:

- [1] Zheng J X, Han D J, Hu W B, *et al.* Fish swimming performance related to fishway design [J]. *Journal of Hydroecology*, 2010, 3(5): 104—110 [郑金秀, 韩德举, 胡望斌, 等. 与鱼道设计相关的鱼类游泳行为研究. 水生生态学杂志, 2010, 3(5): 104—110]
- [2] Chen F, Chen Y F. Investigation and protection strategies of fishes of Lhasa River [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2010, 34(2): 278—285 [陈峰, 陈毅峰. 拉萨河鱼类调查及保护. 水生生物学报, 2010, 34(2): 278—285]
- [3] Zhu X F, Chen Y F. Preliminary study on the age and growth characteristics of *Schizothorax macropogon* [J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2009, 44(3): 76—82 [朱秀芳, 陈毅峰. 巨须裂腹鱼年龄与生长的初步研究. 动物学杂志, 2009, 44(3): 76—82]
- [4] Ji Q. The study on the morphology of feeding organs and the feeding habits of six *Schizothoracine* fishes [D]. Thesis for Master of Science. Huazhong Agricultural University, Wuhan. 2008 [季强. 六种裂腹鱼类摄食消化器官形态学与食性的研究. 硕士学位论文, 华中农业大学, 武汉. 2008]
- [5] Li L, Cao Z D, Fu S J. Lactate, glycogen and glucose levels of juvenile catfish (*Silurus asotus* Linnaeus) in response to exhaustive exercise [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2007, 31(6): 880—885 [李黎, 曹振东, 付世建. 力竭性运动后鲶鱼幼鱼乳酸、糖原和葡萄糖水平的变动. 水生生物学报, 2007, 31(6): 880—885]
- [6] Peng J L, Cao Z D, Fu S J. Excess post-exercise oxygen consumption in *Silurus asotus* Linnaeus and its relationship

- with body weight [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2008, **32**(3): 380—386 [彭姜岚, 曹振东, 付世建. 鲈鱼力竭性运动后的过量耗氧及其体重的影响. 水生生物学报, 2008, **32**(3): 380—386]
- [7] Anttila K, Järvilehto M, Mänttari S. The swimming performance of brown trout and whitefish: the effects of exercise on Ca^{2+} handling and oxidative capacity of swimming muscles [J]. *Journal of Comparative and Physiology B*, 2008, **178**(4): 465—475
- [8] Jain K E, Farrell A P. Influence of seasonal temperature on the repeat swimming performance of rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* [J]. *The Journal of Experimental Biology*, 2003, **206**(20): 3569—3579
- [9] Beamish F W H. Swimming Capacity. Fish Physiology (Vol. 7) [M]. New York: Academic Press. 1978, 163
- [10] Zeng L Q, Cao Z D, Fu S J, *et al.* Effect of temperature on swimming performance in juvenile southern catfish (*Silurus meridionalis*) [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology A*, 2009, **153**(2): 125—130
- [11] Lindstrom M, Fortelius W. Swimming behaviour in *Monoporeia affinis* (Crustacea: Amphipoda)-dependence on temperature and population density [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2001, **256**(1): 73—83
- [12] Randall D, Brauner C. Effects of environmental factors on exercise in fish [J]. *The Journal of Experimental Biology*, 1991, **160**(1): 113—126
- [13] Koumoundouros G, Ashton C, Xenikoudakis G, *et al.* Ontogenetic differentiation of swimming performance in Gilthead seabream (*Sparus aurata*, Linnaeus 1758) during metamorphosis [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2009, **370**(1): 75—81
- [14] Koumoundouros G, Sfakianakis D G, Divanach P, *et al.* Effect of temperature on swimming performance of sea bass juveniles [J]. *Journal of Fish Biology*, 2002, **60**(4): 923—932
- [15] Altamiras, J, Axelson, M, Claireaux, G, *et al.* Cardiorespiratory status of triploid brown trout during swimming at two acclimation temperatures [J]. *Journal of Fish Biology*, 2002, **60**(1): 102—116
- [16] Boisclair D, Tang M. Empirical analysis of the influence of swimming pattern on the net energetic cost of swimming in fishes [J]. *Journal of Fish Biology*, 1993, **42**(2): 169—183
- [17] Ohlberger J, Staaks G, Holker F. Effects of temperature, swimming speed and body mass on standard and active metabolic rate in vendace (*Coregonus albula*) [J]. *Journal of Comparative and Physiology B*, 2007, **177**(8): 905—916
- [18] Videler J J, Nolet B A. Cost of swimming measured at optimum speed: scaling effects, differences between swimming styles, taxonomic groups and submerged and surface swimming [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology A*, 1990, **97**(2): 91—99
- [19] Ohlberger J, Staaks G, Holker F. Swimming efficiency and the influence of morphology on swimming costs in fishes [J]. *Journal of Comparative Physiology B*, 2006, **176**(1): 17—25
- [20] Steinhausen M F, Steffensen J F, Andersen N G. 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*, 2005, **148**(1): 197—204
- [21] Behrens J W, Præbel K, Steffensen J F. Swimming energetics of the Barents Sea capelin (*Mallotus villosus*) during the spawning migration period [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2006, **331**(2): 208—216
- [22] Macy W K., Durbin A G., Durbin E G. Metabolic rate in relation to temperature and swimming speed, and the cost of filter feeding in Atlantic menhaden, *Brevoortia tyrannus* [J]. *Fish Bulletin*, 1999, **97**(2): 282—293
- [23] Sepulveda C A, Graham J B, Bernal D. Aerobic metabolic rates of swimming juvenile mako sharks, *Isurus oxyrinchus* [J]. *Marine Biology*, 2007, **152**(5): 1087—1094
- [24] Yanase K, Eayrs S, Arimoto T. Influence of water temperature and fish length on the maximum swimming speed of sand flathead, *Platycephalus bassensis*: Implications for trawl selectivity [J]. *Fisheries Research*, 2007, **84**(2): 180—188
- [25] Lin P J, Ni I H, Huang B Q. *Onychostoma Barbatula* (Cyprinidae) and applications to fishway design for rapid streams in Taiwan [J]. *Raffles Bulletin of Zoology*, 2008, **19**(1): 273—284
- [26] Ohlberger J, Staaks G, Holker F. Estimating the Active Metabolic Rate (AMR) in fish based on tail beat frequency (TBF) and body mass [J]. *Journal of Experimental Zoology A*, 2007, **307**(5): 296—300
- [27] Swanson C, Young P S, Cech J J Jr. Swimming performance of delta smelt: maximum performance, and behavioral and kinematic limitations on swimming at submaximal velocities [J]. *The Journal of Experimental Biology*, 1998, **201**(3): 333—345
- [28] Videler J J, Weihs D. Energetic advantages of burst-and-coast swimming of fish at high speeds [J]. *The Journal of Experimental Biology*, 1982, **97**(4): 169—178
- [29] Pon L B, Hincin S G, Cooke S J, *et al.* Physiological, energetic and behavioural correlates of successful fishway passage of adult sockeye salmon *Oncorhynchus nerka* in the Seton River, British Columbia [J]. *Journal of Fish Biology*, 2009, **74**(6): 1323—1336

SWIMMING CAPABILITY AND ACTIVITY METABOLISM OF SUBADULT *SCHIZOTHORAX MACROPOGON*

TU Zhi-Ying, YUAN Xi, WANG Cong-Feng, XU Xiao-Rong, LIU De-Fu and HUANG Ying-Ping

(Engineering Research Center of Eco-Environment in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education,
China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: *Schizothorax macropogon* (locally known as Huzi Yu), a fish species commonly found in Yaluzangbujiang River, has been declining quickly in recent years. Overfishing is one of the important factors. Hydropower projects that will be built on the river will lead to more significant decline in this species. Building fish passage incorporated into dams together with other fisheries management actions would help maintain local fish fisheries. The swimming capability within specific habitats is likely to be very important data that might be applied to the design of a fishway for *S. macropogon*. To obtain data that can be applied to the design of a fishway for *S. macropogon* and other species in the community, a laboratory study on the swimming capability and activity metabolism of wild subadult *S. macropogon* was conducted in a self-designed apparatus with a video camera system recording their swimming behavior at four acclimation temperature (5, 10, 15 and 18°C) to reflect seasonal water temperature. Specimens of wild *S. macropogon* [body length (BL) ranging from 20–29 cm, body mass ranging from 176–324 g] were selected and their critical swimming speed (U_{crit}), oxygen consumption rate [MO_2 , mgO₂/(kg·h)], tail beat frequency (TBF, /min), and stride length (L_s , /beat) were measured and compared during steady swimming at varying flow rates. Both absolute critical swimming speeds (U_{crit-a} , m/s) and relative critical swimming speeds (U_{crit-r} , BL/s) of subadult *S. macropogon* increased with the temperature from 5°C to 18°C and the relation was approximately linearity ($P < 0.001$). The U_{crit-a} were 0.88±0.07, 1.09±0.07, 1.24±0.15, 1.49±0.15 m/s and U_{crit-r} were 3.96±0.21, 4.4±0.16, 4.9±0.18 and 5.35±0.14 BL/s respectively at four different temperatures. The maximum U_{crit} did not appear during the temperature from 5°C to 18°C. Power function models at four different temperatures well described the correlation between MO_2 and swimming speed with high correlation coefficient ($P < 0.05$). The derived models showed that MO_2 increased with the increase of swimming speed and the increase was more significant as the temperature was higher. The speed exponents of the power fit at four different temperatures were 2.4, 2.6, 2.8 and 3.1, which means the efficiency of aerobic swimming decreased with the increase of temperature and temperature had a significant effect on swimming performance in subadult *S. macropogon*. There was a significant positive linear correlation between TBF and swimming speed ($P < 0.001$) at natural water temperature (5–9°C) which was in accord with most reference data, but stride length (L_s) was only weakly correlated with swimming speed and showed three different stages. Recording analyses indicated that *S. macropogon* depended on caudal fin to generate forward thrust and employed three velocity-dependent swimming modes during the increase of swimming speed: a discontinuous ‘stroke-and-glide’ swimming behavior at low velocity, a continuous swimming behavior as velocity increase and a discontinuous ‘burst-and-glide’ swimming behavior at velocities near U_{crit} . This has been shown to be an energy-saving swimming behavior and may benefit the fish by optimizing muscle fiber power output and efficiency. This investigation provided data on the swimming capability and energetics of wild subadult *S. macropogon* that would add to the basic science required for fishway design and contribute to the protection of this species.

Key words: *Schizothorax macropogon*; Swimming capability; Swimming behavior; Activity metabolism; Fishway