

人工繁殖圆口铜鱼幼鱼游泳能力与游泳行为研究

刘谢驿^{1,2,3}, 黄应平^{1,2,3}, 袁喜^{2,3}, 徐勳^{2,3}, 涂志英^{1,2,3}

(1. 三峡大学 生物与制药学院, 湖北 宜昌 443000;

2. 三峡大学 三峡地区地质灾害与生态环境湖北省协同创新中心, 湖北 宜昌 443002;

3. 三峡大学 三峡库区生态环境教育部工程研究中心, 湖北 宜昌 443002)

摘要:利用鱼类游泳能力测定装置,以人工繁殖的圆口铜鱼(*Coreius guichenoti*)幼鱼为实验对象,体重(3.05±0.99)g,体长(5.94±0.66)cm,采用递增流速法研究其游泳能力与游泳行为。结果表明,在(20±1)℃水温条件下,圆口铜鱼平均相对临界游泳速度(critical swimming speed, U_{crit})为(8.41±1.56)BL/s;其步态转换速度(gait transition speed, U_{chg})与临界游泳速度呈线性正相关: $U_{chg}=0.63U_{crit}+0.21(P<0.01, R^2=0.86)$;摆尾频率(tail beat frequency, TBF)与进口流速(inlet velocity, U_{in})呈线性正相关: $TBF=0.48U_{in}+2.53(P<0.01, R^2=0.95)$;进口流速(inlet velocity, U_{in})与步长(step length, SL)呈线性正相关: $SL=0.11U_{in}+0.41(P<0.01, R^2=0.99)$ 。实验鱼的摆尾幅度(tail beat amplitude, TBA)、冲刺次数、各进口流速下的摆尾时间百分比及稳定摆尾与非稳定摆尾比例,均随进口流速改变而变化。随流速增大,摆尾幅度呈现先增大、再减小、最后又增大的趋势;冲刺次数也是先增加、随后逐渐下降;摆尾时间百分比最初是快速增大,随后基本保持不变,流速增至 8 BL/s 高流速时,再次随流速增加而快速增大。当流速与临界流速比值(U/U_{max})为 0.38 时,实验鱼出现非稳定摆尾行为;比值为 0.58 时,实验鱼稳定摆尾行为与非稳定摆尾行为比例为 1:1;比值增至 0.78 时,稳定摆尾行为消失。人工繁殖的圆口铜鱼游泳能力较强,在不同流速下,通过改变游泳行为以保持更长的游泳时间及距离。研究结果可为以圆口铜鱼为过鱼对象的鱼道建设以及养殖流速优化提供参考。

关键词:人工繁殖;圆口铜鱼;游泳能力;游泳行为

中图分类号:Q332 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2021)02-0094-07

目前,世界各地由于兴建水坝而造成各区域河流生境支离破碎(Nilsson et al, 2005),由此导致河流连通性减低,使得一些鱼类失去了关键的洄游通道,造成其数量急剧减少(Steel, 2006)与基因隔离(Jager et al, 2001);人为制造的阻隔已被认为是鱼类种群繁衍的主要威胁(Rochard et al, 2010)。为了重建洄游通道,修建有效的过鱼设施,进行过鱼效果评价,一直以来都是生态水利领域的研究热点(Katopodis, 2005; Roscoe & Hinch, 2010)。

圆口铜鱼(*Coreius guichenoti*)具有河流洄游习性,其整个生活史均在河道中完成,主要分布于长江上游和金沙江下游以及雅砻江等支流中,是长江上游的特有品种和主要经济鱼类(熊美华等,

2018)。随着 2013 年金沙江溪洛渡水电站和雅砻江官地水电站的建成,对圆口铜鱼上溯产生了明显的阻隔效应(杨志等, 2017)。近年来,圆口铜鱼的产卵地和栖息地生境逐渐缩小,其资源量明显下降。蒋志刚等(2016)在对中国野生脊椎动物濒危状况的评估中,认为圆口铜鱼处于极危等级;刘红萍和周波(2018)研究认为,圆口铜鱼的自然产卵场遭到严重破坏,其资源保护刻不容缓。目前的保护措施主要是建立鱼类资源保护区,禁止捕捞,同时进行增殖放流,增加鱼类资源;此外,修建过鱼通道,使鱼类能够顺利通过人为障碍,也是生境修复的主要措施。

鱼类的临界游泳速度是评价其游泳能力的重要指标(Johnson & Bennett, 1995);游泳能力与游泳行为是鱼道设计的重要技术参考指标(Shi et al, 2015)。例如:设计鱼道内流速时,需考虑目标鱼类的耐久游泳速度,通过对目标鱼类的耐久游泳能力测试,计算其最大游泳距离,确定休息池的距离;鱼道内孔口或竖缝的流速和进出口区的流速都应当小于目标鱼类的突进游泳速度。因此,了解目标鱼类的游泳能力与游泳行为对评价过鱼设施效果十分重

收稿日期:2019-04-08

基金项目:国家自然科学基金(51679126);湖北省创新群体项目(2015CFA021)及国家重点研发计划(2016YFD0800902)。

作者简介:刘谢驿,1995年生,男,硕士研究生,研究方向为生态水利学。E-mail:120589867@qq.com

通信作者:涂志英,1973年生,女,博士,副教授,主要从事生态水利学教研工作。E-mail:zytu1111@163.com

要。目前,对圆口铜鱼游泳能力与游泳行为的研究较少,本项目组研究过持续游泳能力,且实验对象为驯化过的野生圆口铜鱼(涂志英等,2016);而关于人工繁殖饲养圆口铜鱼幼鱼的游泳能力及游泳行为相关研究尚未见报道。本文通过研究人工繁殖圆口铜鱼在不同进口流速下的摆尾行为、冲刺行为及游泳能力等,旨在详细了解其鱼游泳能力及其在不同流速下的运动行为特性,进而为鱼道设计提供参考数据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

人工繁殖饲养圆口铜鱼幼鱼为湖北省宜昌市三江渔业有限公司善溪基地提供。实验鱼体重(body weight, BW)为 (3.05 ± 0.99) g,体长(body length, BL)为 (5.94 ± 0.66) cm,共27尾。实验前暂养于圆形水泥养殖池内5 d,静水环境,水深1 m,水温设定

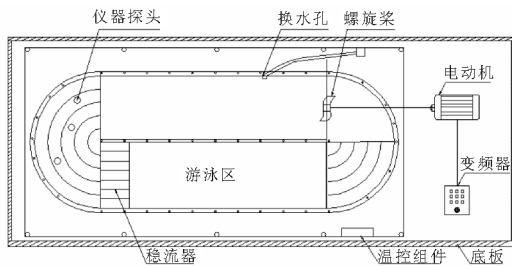


图1 鱼类游泳能力测定装置

Fig.1 Schematic diagram of the swimming ability test device

1.3 实验方法

1.3.1 临界游泳速度与感应流速测定 临界游泳速度主要以有氧代谢提供能量,反映鱼类持续游泳能力。实验共重复27尾实验鱼,将实验鱼放入装置游泳区,在1.0 BL/s流速下适应2 h(Jain et al, 1997),每20 min流速增加1 BL/s(Reidy et al, 2000),直至实验鱼达到运动力竭状态(鱼全身贴网30 s后,被敲击惊吓后仍保持贴网,未出现游泳行为)停止实验。实验结束后将鱼捞出,测量其体长、全长及体重。相对临界游泳速度(U_{crit})为临界游泳速度与体长的比值,计算公式为:

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

式中: T 为流速增加的时间间隔(20 min); U 为能完成持续 T 时间(20 min)的最大游泳速度(鱼力竭前的速度); ΔU 为速度增量(1 BL/s); t 为在疲劳流速下持续的游泳时间(min)。实验用鱼的最大横截面积未达到装置横截面积的10%,忽略水流阻挡效应(Zeng et al, 2009)。

为 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$,自然光周期,与实验前养殖环境相似,能够正常进食,每日定时投喂过量饵料(由养殖场提供),2 h后吸取多余饵料,实验前停食2 d;地点为养殖场内,时间为2018年9-10月。

1.2 实验装置

实验在自制鱼类游泳能力测定装置内进行,该装置横截面积为正方形循环式水槽,装置内置有密封环形水槽,体积为15 L,游泳区尺寸为 $50 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$,游泳区下游设有塑料拦网,上游设置稳流装置(图1)。实验前利用便携式流速仪(LS 300-A)对装置流速进行校正,该仪器稳定可靠,符合国家流量流速测量标准,装置流速范围为 $0.05 \sim 0.80 \text{ m/s}$ 。实验时,用充氧泵充氧,利用换水孔进行内外水流交换,保持游泳区内溶氧高于 7 mg/L 。在装置正上方1 m处放置一个摄像机(康威视DS-2CD3T20D-I3 B,25帧/s),用于记录实验鱼的游泳行为;利用制冷机控制水温在 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ 。



感应流速计算公式与临界游泳速度计算公式①相同。当实验鱼出现趋流行为时,计算此时的流速即为实验鱼的感应流速; U 为出现趋流现象时前一流速阶段; t 为出现趋流现象时的时间(min); T 为流速增加的时间间隔(20 min); ΔU 为速度增量(1 BL/s)。

1.3.2 游泳行为测定 通过视频逐帧慢放分析,得到实验鱼在不同进口流速期间内的摆尾频率(tail beat frequency, TBF)、不同流速下的运动步长(step length, SL)、摆尾幅度(tail beat amplitude, TBA)、冲刺次数、摆尾时间百分比、稳定摆尾运动时间在运动总时间的占比。考虑到改变流速对实验鱼的影响,每个流速从第2 min开始,记录初始3 min、中间3 min及最后3 min的摆尾频率,由3次的平均值得到摆尾频率。计算公式如下:

$$SL = U / TBF \quad (2)$$

式中:SL为运动步长; U 为游泳速度(BL/s);TBF为摆尾频率(次/s)。

步态转换速度(U_{chg})为实验鱼在某流速区间内首次出现连续3次“前冲-后退”行为时的流速,计算方法同相对临界游泳速度计算公式①;其中, U 为出现转换现象时前一流速大小; t 为出现转换现象时间; T 为流速增加的时间间隔(20 min); ΔU 为速度增量(1 BL/s);摆尾幅度 TBA 为尾鳍从一侧摆动到另一侧的最大横向距离。

冲刺次数计数方法如下:实验鱼在高流速(60% U_{crit})下 1 s 内的冲刺距离达到 2 BL 距离时计数 1 次,时间范围设定为调节流速后的第 2 min 至第 19 min(第 1 min 为流速调整后用于流场稳定所需时间)。

摆尾时间百分比统计方法:改变进口流速后,为了消除流速改变对实验鱼的影响,从第 2 min 开始计时,记录鱼类在此区间(19 min)内的总摆尾时间,出现随水流滑行行为或贴底行为时,不记录此时间段。

稳定摆尾运动时间比例统计方法:对视频逐帧慢放分析,统计每尾实验鱼在各流速期间稳定摆尾时间占该流速下运动时间的比值。稳定摆尾定义为能够在一定区域(前后 0.5 BL 范围)内稳定维持自身位置时的摆尾。

1.3.3 数据统计 实验数据采用 Origin 8.0 软件进行线性拟合,SPSS 18.0 进行统计分析,统计值用平均值±标准差(Mean±SD)描述。采用单因素方差分析(One-way ANOVA)差异性,差异显著性水平为 $P < 0.05$ 。采用 Pearson 进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 体长与相对临界速度的关系

对不同体长实验鱼的相对临界游泳速度测定,发现其与体长无显著性关系($P = 0.72$),平均相对临界游泳速度为 (8.41 ± 1.56) BL/s。统计过程中,实验鱼的步态转换速度随相对临界游泳速度增大而增加(图 2),将相对临界游泳速度(U_{crit})与步态转换速度(U_{chg})进行拟合,可得线性方程:

$$U_{\text{chg}} = 0.63 U_{\text{crit}} + 0.21 \quad (P < 0.01, R^2 = 0.86)$$

在进行步态转换前,实验鱼多为稳定连续摆尾运动,极少出现长距离(> 2 BL)的冲刺行为,开始进行步态转换后,实验鱼多为不连续摆尾,多次发生前冲(尾鳍摆动、逆流游动)-滑行(尾鳍不摆动、顺流后退)行为,且大幅度冲刺行为随水流速度增大逐渐增加,步态转换速度多数发生在 $0.63 U_{\text{crit}}$ 。

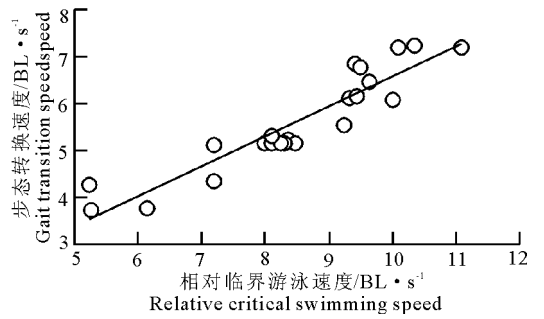


图 2 相对临界游泳速度与步态转换速度的关系

Fig.2 Relationship between the relative critical swimming speed(U_{crit}) and the gait transition speed(U_{chg})

2.2 不同流速下的摆尾频率和幅度及运动步长

本次实验观察表明,实验鱼的进口感应流速范围为 1.00~1.05 BL/s,在 1.0 BL/s 的进口流速下,多数时间实验鱼通过尾鳍的偶尔摆动静止于水槽某一位置,极少数时间出现间歇性快速摆尾的无规则运动行为,故不进行记录。当流速增加至 2.0 BL/s 时,实验鱼立刻表现出趋流性,头部朝向水流进口方向,开始连续摆动鱼鳍,摆尾频率随进口流速增加而增加,达到 8~9 BL/s 进口流速后,摆尾频率开始下降,于 9~10 BL/s 进口流速时再次上升,且由连续摆尾变为不连续摆尾,表现出冲刺-滑行的运动方式,将进口流速(U_{in})与摆尾频率(TBF)拟合(图 3),可得线性方程:

$$\text{TBF} = 0.48 U_{\text{in}} + 2.53 \quad (P < 0.01, R^2 = 0.95)$$

实验鱼游泳过程中运动步长(SL)与进口流速(U_{in})呈正相关(图 4):

$$\text{SL} = 0.11 U_{\text{in}} + 0.41 \quad (P < 0.01, R^2 = 0.99)$$

图 5 可见,实验鱼的摆尾幅度在 2~5 BL/s 时,随进口流速的增加而增大,在 6~8 BL/s 进口流速时,随进口流速增加而减小,随后在 9~10 BL/s 进口流速时,随进口流速增加而增大。

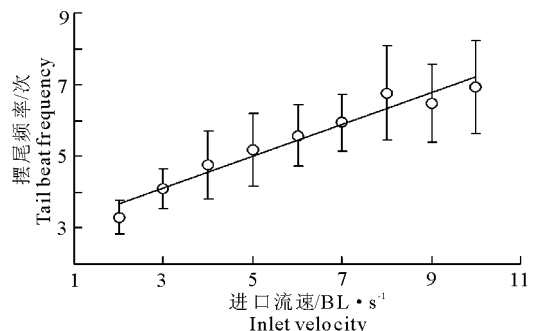


图 3 进口流速与摆尾频率的关系

Fig.3 Relationship between the inlet velocity(U_{in}) and the tail beat frequency(TBF)

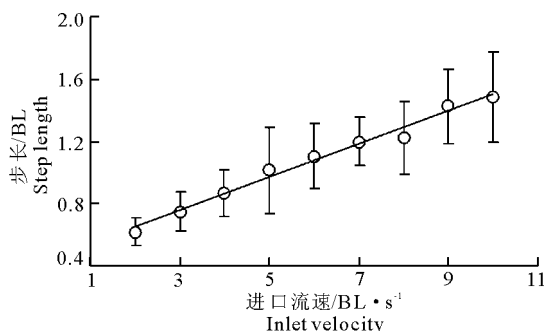


图4 进口流速与步长的关系

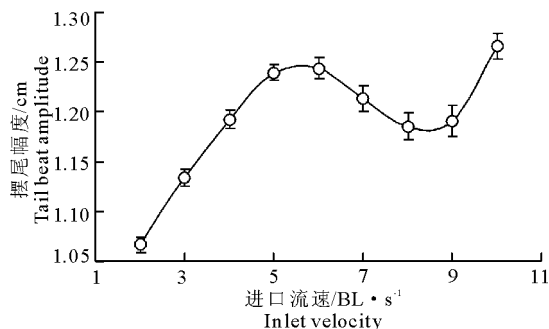
Fig.4 Relationship between inlet velocity (U_{in}) and step length (SL)

图5 进口流速与摆尾幅度的关系

Fig.5 Relationship between inlet velocity (U_{in}) and tail beat amplitude (TBA)

2.3 不同进口流速下的冲刺次数

进口流速增至 4 BL/s 前,实验鱼几乎未出现冲刺行为(图 6),在 5~7 BL/s 进口流速时,冲刺行为开始频繁出现,随后于 8~10 BL/s 进口流速区间内,20 min 内的冲刺次数随流速增大而减小。

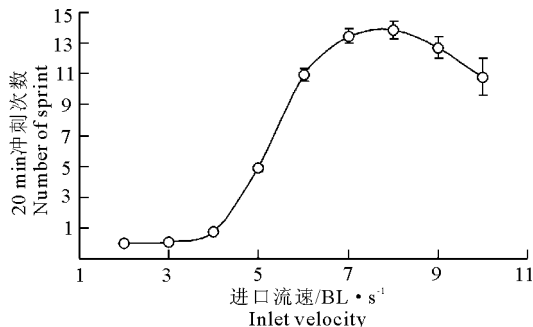


图6 进口流速与冲刺次数的关系

Fig.6 Relationship between inlet velocity (U_{in}) and sprint time

2.4 各进口流速下摆尾时间百分比

图 7 可见,小于 3 BL/s 进口流速,摆尾时间占比随进口流速增加而逐渐升高,在 4~8 BL/s 进口流速区间内,并未有明显改变($P=0.94$),于 9 BL/s 进口流速时明显升高,10 BL/s 进口流速时达到 97%。

对不同进口流速下稳定摆尾运动时间百分比进行统计(图 8),得出稳定摆尾与非稳定摆尾时间比例,横坐标为每组实验鱼的各进口流速 U (如 2 BL/s、3 BL/s, $U > 1$ BL/s) 与此组实验鱼力竭时进口流速 U_{max} (如实验鱼于 9 BL/s 进口流速区间内力竭,则 U_{max} 为 9 BL/s) 的比值,即 U/U_{max} 。图 8 中非稳定摆尾运动首次出现时间为 $0.38 U_{max}$; 随着 U/U_{max} 增加,非稳定摆尾运动比例逐渐增大,稳定摆尾运动比例逐渐减小,并于 $0.58 U_{max}$ 处相交, $0.78 U_{max}$ 后消失,由此计算得出实验组平均 U_{max} 为 (8.23 ± 1.54) BL/s。

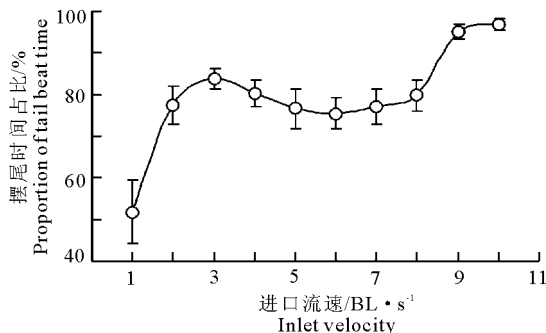


图7 进口流速与摆尾时间百分比的关系

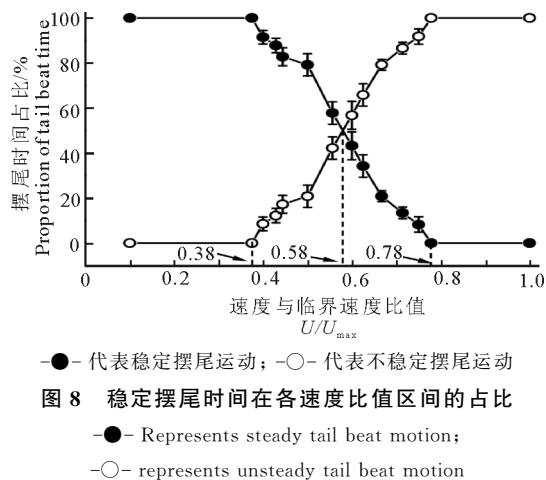
Fig.7 Relationship between inlet velocity (U_{in}) and proportion of tail beat time

图8 稳定摆尾时间在各速度比值区间的占比

●- 代表稳定摆尾运动; ○- 代表不稳定摆尾运动

Fig.8 Proportion of stable tail beat time, in different velocity ranges vs. critical velocity ratio

3 讨论

3.1 不同鱼类的游泳能力与摆尾行为存在差异

本次研究结果表明,实验鱼在一定体长区间内,体长与相对临界游泳速度并未表现出显著性相关关系,在 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ 条件下,平均相对临界游泳速度为 (8.41 ± 1.56) BL/s。在 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ 水温下,体长 (8.50 ± 0.13) cm 草鱼的相对临界游泳速度为 $(7.37$

±0.11)BL/s,草鱼相对临界游泳速度与体长呈负相关(徐劭等,2018);根据相关性推测,在(20±1)℃水温条件下,与实验鱼体长相近的草鱼,其相对临界游泳速度与实验鱼的相对临界游泳速度相近。目前,仅有Tu等(2012)对野生圆口铜鱼临界游泳速度进行测定,在20℃时,体长为(17.33±1.20)cm的野生圆口铜鱼,临界游泳速度为(6.54±0.60)BL/s;陈永祥等(2009)研究认为,养殖组齐口裂腹鱼血液中甘油三酯浓度显著高于野生组,因其在养殖条件下可以获得更多的能源物质供给,脂肪在鱼类细胞内主要是以甘油三酯的形式存在,其为鱼类脂类代谢的主要物质,所以养殖组齐口裂腹鱼可以维持较高的代谢水平。可以推测人工养殖的圆口铜鱼游泳能力强于野生圆口铜鱼,其摆尾频率与进口流速之间呈线性正相关,摆尾频率与进口流速的直线斜率为0.48;Ohlberger等(2010)对拟鲤(*Rutilus rutilus*)与鲤(*Cyprinus carpio*)等鲤科鱼类的研究发现,摆尾频率与进口流速关系的斜率分别为1.30与1.31,均显著高于本研究圆口铜鱼的0.48;说明在相同的游泳速度下,圆口铜鱼的摆尾频率远低于其他几种鱼。实验鱼摆尾幅度最大为1.26cm,过鱼设施的设计需考虑过鱼对象的摆尾幅度,如过竖缝式过鱼设施最小缝隙宽度需大于过鱼对象的最大摆尾幅度。

3.2 不同流速区间圆口铜鱼的游泳行为特征

实验鱼的稳定摆尾运动流速区间为0~3.13 BL/s(0~0.38 U_{max}),表现为先缓慢摆动胸鳍且未摆动尾部,而后逐渐转换为采用联合胸鳍与尾部摆动的方式进行运动,摆尾幅度逐渐增加,极少出现冲刺行为,在各进口流速下的摆尾运动时间占整个区间时间的比例逐渐增加。在3.13~6.42 BL/s(0.38~0.78 U_{max})进口流速区间,实验鱼开始出现步态转换,目的是为了节省体能(Peake & Farrell, 2006),逐渐由稳定摆尾运动转换为冲刺-滑行的非稳定摆尾运动,转换过渡时具体行为表现为大幅度摆尾短距离前冲,此期间摆尾幅度增加,之后逐渐变为小幅度摆尾短距离冲刺,最终转换为小幅度快速摆尾长距离冲刺,发生冲刺的频率逐渐增加。在此区域各进口流速下,摆尾运动时间所占整个区间时间的比例逐渐降低。步态转换区间,实验鱼偶尔会出现贴底行为,即头部与胸鳍紧贴底部,而胸鳍根部至尾末端则离开底部水平面,与水平面所成角度小于30°,尾部随水流进行被动缓慢摆动,身体缓慢后退。这种特殊节省体力的行为,与其生活环境息息

相关。圆口铜鱼多生活于水流湍急、险滩密布、河床多砾石的水域,高速水流下的贴底行为,使其能在高速水流下保持自身位置,对其生存极为有利。从6.42 BL/s(0.78 U_{max})至实验结束,实验鱼主要表现为冲刺行为,此时无法再稳定保持自身位置,开始多次大幅度冲刺-滑行,摆尾幅度逐渐增大,到达前端拦网后,随水流后退至下游拦网,再次进行下一次冲刺,但随流速增加,冲刺次数逐渐减少,为了维持自身位置,摆尾运动时间所占整个区间时间的比例逐渐增加;此外,在此流速区间内,实验鱼步长增大,因较大的步长有利于减小游动阻力,具有能量利用及水动力学上的优势(Yanase & Arimoto, 2007),能够通过更大流速的水域。

综上所述,本实验主要研究人工繁殖饲养的圆口铜鱼幼鱼在20℃条件下的游泳能力与游泳行为,为以圆口铜鱼为对象的过鱼通道设计提供基础数据,且实验鱼具有增殖放流的价值,目前对于鱼类增殖放流前的野化训练多为食性野化(胡光源等,2011);还应考虑水温与水流速在野化训练过程中对人工繁殖饲养的圆口铜鱼游泳能力及游泳行为的影响。为了实验数据更加具有合理性,并考虑提高其增殖放流存活率,不仅需要研究温度与水流速对其游泳能力与行为的影响,还应深入研究温度与水流速对人工繁殖饲养圆口铜鱼野化训练的影响。

参考文献

- 陈永祥,肖玲远,严太明,等,2009.野生和养殖裂腹鱼血液学指标的比较研究[J].水生生物学报,33(5):905-910.
- 胡光源,王云山,张忠亮,等,2011.黑龙江鲟鱼人工放流及野化训练[J].河北渔业,(6):12-13.
- 蒋志刚,江建平,王跃招,等,2016.中国脊椎动物红色名录[J].生物多样性,24(5):500-551.
- 刘红萍,周波,2018.圆口铜鱼的生物学研究现状、问题与对策[J].植物医生,31(1):37-38.
- 涂志英,李丽萍,袁喜,等,2016.圆口铜鱼幼鱼可持续游泳能力及活动代谢研究[J].淡水渔业,46(1):33-38.
- 徐劭,袁喜,靖锦杰,等,2018.水体铅暴露下草鱼幼鱼游泳行为和代谢响应[J].生态学杂志,37(5):1426-1431.
- 熊美华,邵科,赵修江,等,2018.长江中上游圆口铜鱼群体遗传结构研究[J].长江流域资源与环境,27(7):1536-1543.
- 杨志,唐会元,龚云,等,2017.向家坝和溪洛渡蓄水对圆口铜鱼不同年龄个体下行移动的影响[J].四川动物,36(2):161-167.
- Jager H I, Chandler J A, Lepla K B, et al, 2001. A Theoretical Study of River Fragmentation by Dams and its

- Effects on White Sturgeon Populations[J]. Environmental Biology of Fishes, 60(4): 347 - 361.
- Jain K E, Hamilton J C, Farrell A P, 1997. Use of a Ramp Velocity Test to Measure Critical Swimming Speed in Rainbow Trout (*Onchorhynchus mykiss*)[J]. Comparative Biochemistry & Physiology Part A Physiology, 117(4): 441 - 444.
- Johnson T P, Bennett A F, 1995. The thermal acclimation of burst escape performance in fish: An integrated study of molecular and cellular physiology and organismal performance[J]. Journal of Experimental Biology, 198(10):2165 - 2175.
- Katopodis Christos, 2005. Developing a toolkit for fish passage, ecological flow management and fish habitat works[J]. Journal of Hydraulic Research, 43(5):451 - 467.
- Nilsson C, Reidy C A, Dynesius M, et al, 2005. Fragmentation and Flow Regulation of the World's Large River Systems[J]. Science, 308:405 - 408.
- Ohlberger J, Staaks G, Holker F, 2010. Estimating the active metabolic rate(AMR) in fish based on tail beat frequency(TBF) and body mass[J]. Journal of Experimental Zoology Part A Ecological Genetics & Physiology, 307A(5):296 - 300.
- Peake S J, Farrell A P, 2006. Fatigue is a behavioural response in respirometer-confined smallmouth bass [J]. Journal of Fish Biology, 68(6): 1742 - 1755.
- Reidy S P, Kerr S R, Nelson J A, 2000. Aerobic and anaerobic swimming performance of individual Atlantic cod [J]. Journal of Experimental Biology, 203(2): 347 - 357.
- Rochard E, Castelnaud G, Lepage M, 2010. Sturgeons(Pisces: Acipenseridae); threats and prospects[J]. Journal of Fish Biology, 37(sA):123 - 132.
- Roscoe D W, Hinch S G, 2010. Effectiveness monitoring of fish passage facilities: historical trends, geographic patterns and future directions[J]. Fish & Fisheries, 11(1):12 - 33.
- Shi X, Kynard B, Liu D, et al, 2015. Development of Fish Passage in China[J]. Fisheries, 40(4):161 - 169.
- Steel E A, 2006. Lost Watersheds: Barriers, Aquatic Habitat Connectivity, and Salmon Persistence in the Willamette and Lower Columbia River Basins[J]. Transactions of the American Fisheries Society, 135(6):1654 - 1669.
- Tu Z T, Li L P, Yuan X, et al, 2012. Aerobic Swimming Performance of Juvenile Largemouth Bronze Gudgeon (*Coreius guichenoti*) in the Yangtze River[J]. Journal of Experimental Zoology Part A Ecological Genetics & Physiology, 317(5):294 - 302.
- Yanase K, Arimoto T, 2007. A hydro-mechanical approach to the scaling of swimming performance in the sand flat-head *Platycephalus bassensis* Cuvier: effects of changes in morphological features based on fish size[J]. Journal of Fish Biology, 71(6):1751 - 1772.
- Zeng L Q, Cao Z D, Fu S J, et al, 2009. Effect of temperature on swimming performance in juvenile southern catfish(*Silurus meridionalis*)[J]. Comparative Biochemistry & Physiology. Part A, Molecular & Integrative Physiology, 153(2):125 - 130.

(责任编辑 万月华)

Swimming Ability and Behavior of Artificially Propagated Largemouth Bronze Gudgeon(*Coreius guichenoti*)

LIU Xie-yi^{1,2,3}, HUANG Ying-ping^{1,2,3}, YUAN Xi^{2,3}, XU Meng^{2,3}, TU Zhi-ying^{1,2,3}

(1.College of Biology and Pharmacy, China Three Gorges University, Yichang 443002,P.R.China;
2.Cooperative Innovation Center for Geological hazards and Ecological Environment in the Three Gorges Area of Hubei Province, China Three Gorges University, Yichang 443002,P.R.China;
3.Engineering Research Center of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education,China Three Gorges University, Yichang 443002,P.R.China)

Abstract: Largemouth bronze gudgeon (*Coreius guichenoti*), a typical anadromous fish, is an important economic fish species once commonly found in Yangtze River, but populations have been rapidly declining in recent years. One of the important factors is the interruption of the natural connection of the rivers by dams. Swimming is crucial for the survival and reproduction of fish and, in this study, we characterized the swimming ability and behavior of the artificially propagated *C. guichenoti* using a stepped velocity test. The objectives were to better understand *C. guichenoti* swimming and provide data for the design of effective fishways. Artificially propagated juvenile *C. guichenoti* of body weight (3.05 ± 0.99) g and body length (5.94 ± 0.66) cm were tested at $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ in a flume-type respirometer equipped with a high speed video camera system to record swimming behavior. The average relative critical swimming speed (U_{crit}) was (8.41 ± 1.56) BL/s and the gait transition speed (U_{chg}) of $0.63 U_{\text{crit}}$ was positively correlated with the critical swimming speed, $U_{\text{chg}} = 0.63U_{\text{crit}} + 0.21$ ($P < 0.01$, $R^2 = 0.86$). The tail beat frequency (TBF) was positively correlated with inlet velocity, (U_{in}); $\text{TBF} = 0.48U_{\text{in}} + 2.53$ ($P < 0.01$, $R^2 = 0.95$), as was step length (SL), $\text{SL} = 0.11U_{\text{in}} + 0.41$ ($P < 0.01$, $R^2 = 0.99$). Tail beat amplitude (TBA), sprint time, percentage of tail beat time and the ratio of stable tail beat to unstable tail beat all varied with inlet velocity. With increasing flow velocity, the TBA increased first, then decreased and finally increased; the number of sprints increased first and then decreased gradually; the percentage of tail beat time increased rapidly at first, then remained basically unchanged, and increased rapidly again at the flow velocity of 8 BL/s; the unstable tail beat appeared when the ratio of flow velocity to critical swimming velocity (U/U_{max}) was 0.38. The ratio of stable tail-beat to unstable tail-beat was 1 : 1, when U/U_{max} was 0.58. When the ratio (U/U_{max}) increased to 0.78, the stable tail-beat behavior disappeared, and the swimming behaviour was mainly sprint. In general, the swimming ability of the propagated largemouth bronze gudgeon was stronger than that of the wild ones, and the swimming behavior was significantly correlated with flow velocities. *C. guichenoti* can alter swimming behavior in order to swim longer and farther at different flow velocities. The results can provide reference for the fishway construction of largemouth bronze gudgeon and the optimization of aquaculture velocity.

Key words: artificial propagation; *Coreius guichenoti*; swimming ability; swimming behavior