

鳙幼鱼4种典型游泳状态特性研究

李 鸿^{1,2}, 郭文韬³, 何 鹏², 刘炫赤², 甘建政², 谭红林^{1,2}, 陈 磊^{1,2}, 石小涛¹, 谭均军¹

(1. 湖北省鱼类过坝技术国际科技合作基地, 三峡大学, 湖北 宜昌 443002;

2. 三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002;

3. 三峡工程鱼类资源保护湖北省重点实验室 中国长江三峡集团有限公司中华鲟研究所, 湖北 宜昌 443100)

摘要:研究鳙(*Hypophthalmichthys nobilis*)游泳行为特性与水流流速变化的响应关系, 补充四大家鱼游泳特性指标, 为四大家鱼资源保护、鱼类洄游通道建设提供参考依据。试验水温(23 ± 0.5)℃, 鳙幼鱼体长5.0~9.0 cm、体重2.5~11.5 g, 游泳水槽300 mm×5 mm×75 mm, 体积5 L。结果表明该体长范围鳙幼鱼的平均临界游泳速度为(0.468 ± 0.161)m/s, 平均突进游泳速度为(0.672 ± 0.154)m/s, 且绝对临界游泳速度和绝对突进游泳速度均随体长的增加而线性增加, 相对突进游泳速度随体长的增加而线性减小; 绝对突进游泳速度与绝对临界游泳速度存在如下关系: $U_{burst}=1.922U_{crit}+56.726$; 鱼类游泳行为随水流流速变化存在4种游泳状态(顶流前进、顶流后退、顶流静止、顺流而下)相互穿插现象。以鳙幼鱼为过鱼对象的鱼道池室主流流速为16.0~46.5 cm/s, 鱼道高流速区的竖缝、孔口等最佳流速为46.5~85.4 cm/s。

关键词:鳙; 突进游泳速度; 临界游泳速度; 游泳特性

中图分类号: Q332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2022)02-0095-07

鳙(*Hypophthalmichthys nobilis*)是我国四大家鱼之一, 是典型的江(河)湖泊半洄游性经济鱼类, 广泛分布于长江、珠江、黑龙江和黄河等流域。半洄游性鱼类产卵和幼鱼的摄食、育肥等生理行为都有洄游需求(何大仁, 1998), 性成熟个体需要洄游到江河流水产卵场进行产卵, 鱼卵随着江河流漂孵化生长, 产卵后的亲鱼和发育中幼鱼需洄游进入支流及通江湖泊中摄食育肥。根据调查资料统计显示, 四大家鱼种群出现了明显退化和衰减(刘飞等, 2019; 郇星晨等, 2019)。

水利工程带来巨大经济效益的同时, 阻隔了河流生态的连通性, 对洄游性鱼类造成的影响尤为突出。过鱼设施是一种协助鱼类恢复其洄游通道的工程措施(陈凯麒等, 2012), 其设计必须与鱼类游泳行为特性相适应(蔡露等, 2018)。因此与过鱼设施设计密切相关的鱼类游泳行为特性研究备受关注。突进游泳速度和临界游泳速度研究对鱼类能否通过鱼道竖缝等高流速区至关重要。突进游泳速度是鱼类在短时间内进行无

氧运动的重要指标, 与鱼类通过具有流速障碍的鱼道进口、竖缝口时密切相关(郑金秀等, 2010; 蔡露等, 2013)。藏木鱼道高流速区的流速设计上限为过鱼对象的最小平均突进游泳速度(曾海钊等, 2017)。根据测得鳙突进游泳速度, 以20 s为爆发时间, 可估测鱼道内鱼能通过的最大流速区域的间隔, 因此设计鱼道内高流速区最大间隔不超过鱼类突进游泳速度的最大突进距离, 可为过鱼设施休息池设计提供参考依据。针对鳙游泳特性, 学者们主要从游泳能力(Newbold et al, 2016)、耗氧率(蔡露等, 2012)、温度(房敏等, 2013; 侯铁群等, 2016)、疲劳后生理及游泳能力变化(袁喜等, 2014; 刘慧杰等, 2016), 以及四大家鱼突进游泳速度比较(熊锋等, 2014; 李会锋等, 2016)进行了研究。但上述均未对鳙幼鱼游泳运动状态进行研究。因此, 本试验重点对鳙幼鱼游泳能力和游泳运动状态进行研究, 以为鱼类资源保护和鱼类洄游通道建设提供参考, 也为鱼类行为学和运动学研究提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 试验鱼

试验鱼来源于枝江焦家湖渔场, 运至实验室后饲养于直径2.2 m、深0.5 m的圆形水槽中, 暂养7 d后进行试验。暂养期间每天投饵率5%, 饵料为磨碎的豆饼, 进食5 h后, 及时清理残饵, 每日换水占水体总量的1/4, 全天不间断充氧, 保持溶氧含量 >7 mg/L, 氨氮含量 <0.01 mg/L, 水槽内的光照为自然光, 试验前2 d停

收稿日期: 2020-06-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51709152, 51579136); 国家优秀青年科学基金项目(51922065); 三峡工程鱼类资源保护湖北省重点实验室开放课题(SXSN/4507)。

作者简介: 李鸿, 1992年生, 男, 硕士研究生, 主要从事生态水力学研究。E-mail: 980789464@qq.com

通信作者: 谭均军, 1985年生, 女, 副教授, 主要从事生态水力学研究。E-mail: tanjunjun52@163.com

止喂食。试验鱼体长 5.0~9.0 cm, 体重为 2.5~11.5 g, 试验水温为 (23±0.5)℃。

1.2 试验装置

鱼类游泳能力测试装置为丹麦 Loligo System 公司生产的游泳水槽 SW10050, 测试区尺寸(长×宽×高)为 300 mm×5 mm×75 mm, 体积 5 L(图 1)。该装置由变频器、电机、测试区、整流栅、恒温器等组成。变频器通过控制电机螺旋桨的转速, 来产生不同的流速, 使得水在装置内循环流动, 试验段流速 V 与变频器输出频率 f 的关系为: $V=0.06f-0.437$, 如图 2。在游泳测试区前端放置整流栅, 使水流呈现为均匀、稳定的流场。游泳区末端放置拦网格栅, 避免鱼类游离测试区。鱼类游泳测试区通过潜水泵实现与外部矩形水槽的水交换, 试验过程中保持全封闭状态, 试验水温通过连接恒温机控制为 (23±0.5)℃, 使用该装置配套的手持式数字流量计 AC10000 进行流速测定。在试验装置上方和侧面各安装 1 个摄像头 (25 帧/s, 海康威视 DC-2CD3T35D.I3) 记录试验鱼的全过程游泳行为。



图 1 游泳能力测试水槽实物

Fig.1 Swimming ability test flume

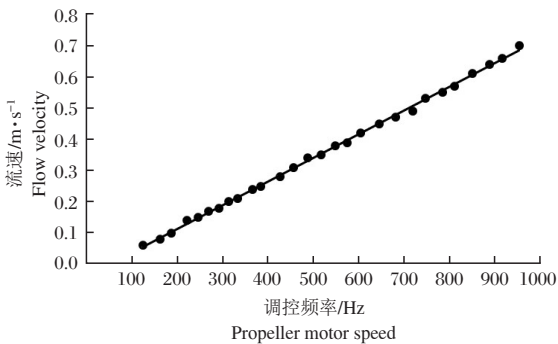


图 2 试验段水流速度与调控频率的关系

Fig.2 Relationship between flume flow velocity and propeller motor speed

1.3 游泳行为特性测试方法

1.3.1 突进游泳速度 突进游泳速度是鱼类所能达到的最大速度(郑金秀等, 2010)。本研究突进游泳速度

测定采用“递增流速法”: 将 1 尾试验鱼置于流速为 1.0 BL/s (体长/s) 的试验区域内适应 1 h, 适应结束后每 20 s 提升 1.0 BL/s。流速增量(Hammer, 1995), 直至试验鱼疲劳为止。鱼疲劳的判定: 试验鱼停靠在下游网上时, 轻拍下游壁面 20 s, 鱼仍不重新游动, 视为疲劳(Beamish, 1978)。本研究试验鱼数量为 46 尾, 突进游泳速度 (U_{burst} , cm/s) 的计算方法为(Reidy et al, 2000):

$$U_{burst}=U_{max}+\frac{t}{\Delta t} \Delta U$$
 ①

式中: U_{max} 表示试验鱼能够完成持续时间(Δt) 的最大游泳速度, Δt 为改变流速的时间间隔 (20 s), t 为在最高流速下游泳的时间(s), ΔU 为速度增量 (1.0 BL/s)。相对突进游泳速度 $U_{burst}=U_{burst}/BL$ 。当试验鱼的截面积大于测试区截面积的 10% 时, 会引起阻挡效应, 但本研究所采用的试验鱼最大截面积均小于测试区截面积的 10%, 故不需校正(Brett, 1967)。

1.3.2 临界游泳速度 临界游泳速度是指鱼在一定的步长和流速增长规律下, 所能达到的最大游泳速度(王萍等, 2010)。本研究中临界游速的测定采用“递增流速法”: 在 1.0 BL/s 流速下适应 1 h 以消除试验鱼在转移过程对鱼体的胁迫, 适应结束后流速每 20 min 提高 1.0 BL/s, 直至试验鱼疲劳, 停止试验。本研究试验鱼数量为 43 尾, 临界游泳速度 (U_{crit} , cm/s) 的计算方法为(Reidy et al, 2000):

$$U_{crit}=U_{max}+\frac{t}{\Delta t} \Delta U$$
 ②

式中: U_{max} 表示试验鱼能够完成持续时间(Δt) 的最大游泳速度, Δt 为改变流速的时间间隔 (20 min), t 为在最高流速下游泳的时间(min), ΔU 为速度增量 (1.0 BL/s)。

1.4 数据分析

试验数据用 SPSS 22.0 进行处理, 对鳊幼鱼游泳状态特性随试验鱼体长和流速增加方进行差分析检验。采用 Excel 2016 作图, 通过回归分析拟合体长与突进、临界游泳速度的关系。统计值用平均值±标准差(Mean±SD)描述, 差异显著水平 $P<0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 突进游泳速度

取 46 尾暂养后的鳊幼鱼进行试验, 试验鱼体长 5.3~9.0 cm, 体重 2.5~10.5 g。突进游泳速度与鱼体长的关系如图 3。可以看出, 绝对突进游泳速度随着鳊幼鱼体长的增加而增加, 突进游泳速度为 (0.672±0.154)m/s, 线性关系如下:

$$U_{burst}=16.194BL+41.214(R^2=0.6417, P<0.05)$$
 ③

相对突进游泳速度随体长的增加而减小, 线性关系如下:

$$U'_{burst} = -1.9477BL + 23.601 (R^2 = 0.6442, P < 0.05) \quad (4)$$

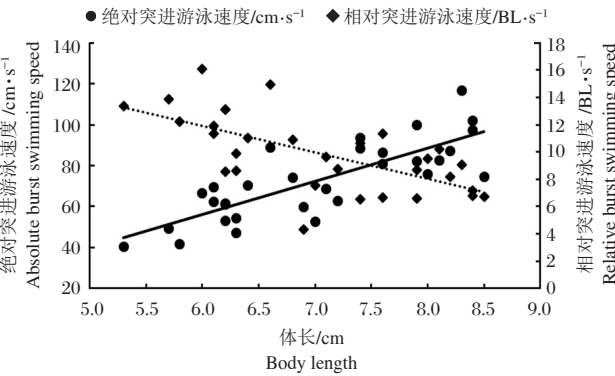


图3 鳊幼鱼突进游泳速度与体长的关系

Fig.3 Relationship between the burst swimming speed and body length of *H. nobilis*

2.2 临界游泳速度

对体长为 5.0~9.0 cm 鳊幼鱼临界游泳速度进行测定, 临界游泳速度(23℃)为(0.468±0.161)m/s, 绝对临界游泳速度随着鱼体长的增加而增加($P < 0.05$), 见公式⑤; 相对临界游泳速度与试验鱼体长无明显线性关系($P = 0.372 > 0.05$), 见图4。

$$U_{crit} = 8.4278BL - 8.0728 (R^2 = 0.5976, P < 0.05) \quad (5)$$

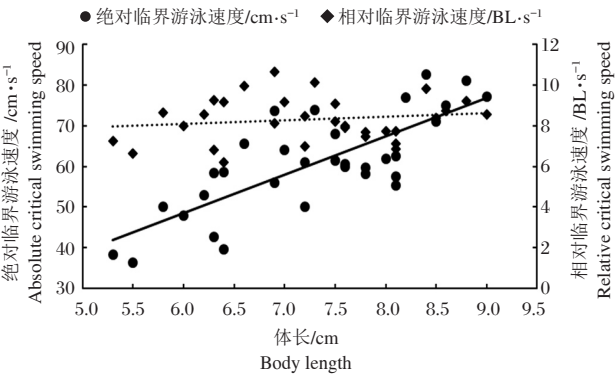


图4 鳊临界游泳速度与体长的关系

Fig.4 Relationship between the critical swimming speed and body length of *H. nobilis*

2.3 鳊突进游泳速度与临界游泳速度的关系

对于体长 5.0~9.0 cm 的鳊幼鱼, 突进游泳速度比临界游泳速度大 2.15~26.2 cm/s, 突进游泳速度约为临界游泳速度的 1.03~1.32 倍, 且随着鱼体长的增加, 突进游泳速度越来越大大于临界游泳速度。由式③减去式⑤得到突进游泳速度与临界游泳速度的差值, 如下式所示:

$$U_{burst} - U_{crit} = 7.767BL + 49.2868 \quad (6)$$

根据图3和图4, 绝对突进游泳速度和绝对临

界游泳速度随体长增加而增加, 其关系分别为 $U_{burst} = 16.194BL + 41.214$ 和 $U_{crit} = 8.4278BL - 8.0728$, 消去体长(BL)得影响到鳊幼鱼临界游泳速度与突进游泳速度的关系为:

$$U_{burst} = 1.922U_{crit} + 56.726 (P < 0.05) \quad (7)$$

2.4 鳊突进游泳行为与流速的响应关系

鱼类游泳行为为一种状态不稳定的运动, 随着水流速度的变化, 鱼类游泳行为显著变化, 伴随有持续性游泳、暂停及偶然爆发性游泳运动等行为(曹平等, 2017)。参考曹平等(2017)分析草鱼的游泳行为, 本文将鳊幼鱼在突进游泳速度的运动过程分为 4 种游泳状态, 分别为顶流前进、顶流静止、顶流后退及顺流而下, 这 4 种游泳状态相互穿插出现, 不同流速条件下各游泳状态所占时间比例各不同。根据游泳行为的变化, 即随着流速的递增, 鱼类游泳行为发生不断变化, 可以将试验过程分为 4 个阶段。第 1 阶段主要表现为: 鱼迅速调整身体状态, 适应水流变化, 在测试区来回游动。第 2 阶段表现为: 鱼体在流速刺激下一直沿着顶流方向前进, 摆尾幅度加快, 肌肉等处于高度紧张状态, 水流对鱼产生了一定的阻碍作用, 这种阻碍作用鱼类能够克服并成功上溯。第 3 阶段表现为: 水流增大使得鱼类处于一种被迫游动状态, 鱼类很难克服水流进行长距离上溯。第 4 阶段表现为: 鱼类尾部慢慢触及贴网, 鱼类已经进入疲劳状态, 很快身体全部贴网。

4 个阶段鱼类游泳状态所占时间比见图 5。第 1 阶段鱼类游泳状态所占比例如图 5(a): 顶流静止所占时间比例为 20%~52%; 顶流前进时间为 30%~60%; 鱼体出现侧身摆尾顶流后退, 其时间为 10%~32%; 顺流而下时间为 5%~12%。

第 2 阶段游泳状态所占比例如图 5(b): 顶流静止时间比例为 16%~48%; 顶流前进为 35%~68%; 顶流后退为 6.5%~15%, 此时水流对鱼类游泳产生了一定的阻碍作用, 但鱼仍能够克服水流障碍顶流前进。

第 3 阶段顶流前进和顶流后退的状态增加, 并且前进冲刺距离明显比前 2 阶段增加, 随着试验鱼体长的增加, 前进冲刺距离也明显增加, 各游泳状态所占时间比例如图 5(c): 顶流前进和顶流后退分别为 24%~56%、21%~46%, 顶流静止所占比例减小到 12%~30%, 水流对试验鱼产生了阻碍作用, 鱼被迫游动。

第 4 阶段鱼不断顶流后退, 其尾部开始触到下游拦网, 试验鱼仍顶流前进和后退 2~3 次后, 接近疲劳状态, 该阶段试验鱼游泳状态如图 5(d), 顶流静止和顶流后退相差不大, 分别为 16%~38%、18%~40%, 顶

流向前为20%~42%。

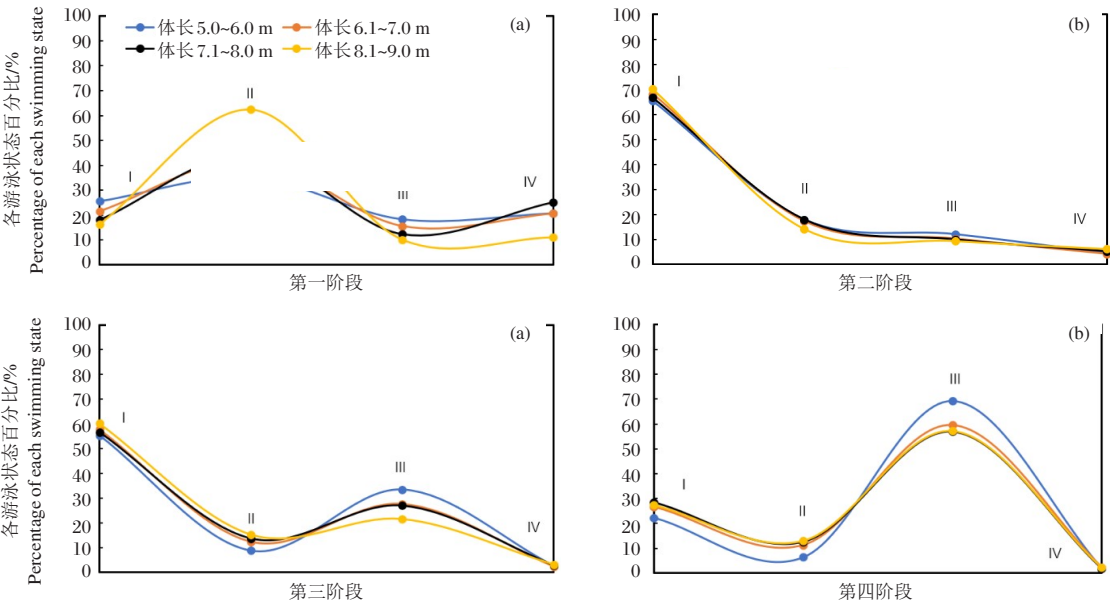
试验鱼在上述4个阶段的最大游速及游泳状态比例见表1和图5。顺流而下游泳状态逐渐减少,而顶流游泳状态先增加最后慢慢减少,鱼类生长具有阶段性,不同发育阶段鱼类的生长速率不同,所呈现的游泳运动状态也不同(何大仁,1998)。将试验鱼按体长大小分为4组,第1组体长5.0~6.0 cm,第2组体长6.1~7.0 cm,第3组体长7.1~8.0 cm,第4组体长8.1~9.0 cm。分别对4组体长进行方差检验,组间体长变化都有显著性差异($P=0.042<0.05$)。随着试验鱼体长和流速的递增,第1阶段到第2阶段顶流前进所占比例呈增加趋势,差异显著($P=0.013<0.05$);顶流静止比例随体长增加而增大,差异显著($P=0.023<0.05$),见图5(a)、图5(b)。由图5(b)(c)(d)可知,第2、3、4阶段随着流速增加顶流静止比例基本保持稳定,无显著性差异($P=0.076>0.05$)。由图5(c)(d)可知,顶流后退比例随着流速的增加所占比例增加,差异显著($P=0.036<0.05$)。鱼类游泳状态随着体长和流速变化而变化,在整个测试过程中,顶流前进比例先增加后减小最后保持稳定,直到试验鱼无法冲刺,达到疲劳状态而贴网。

随着水流速度的增加,鱼类表现出的游泳行为不尽相同,本研究得到鳊幼鱼在不同流速时间段有顶流前进、顶流静止、顶流后退及顺流而下4种游泳状态。根据鱼的游泳状态设计鱼道内休息池、竖缝、孔口的流速,得到以鳊为过鱼对象的鱼道池室主流流速为突

进流速的28%~78%(第1阶段到第2阶段的流速变化范围为16.0~46.5 cm/s),对于鱼道高流速区的竖缝、孔口等最佳流速应为鳊突进流速的78%~92%(第2阶段到第3阶段的流速变化范围为46.5~85.4 cm/s),不宜超过鳊突进流速的92%~96%(第3阶段最大流速85.4 cm/s),否则会造成流速障碍,鱼类无法上溯。

表 1 不同体长鳊幼鱼各游泳阶段最大游泳速度
Tab.1 Maximum swimming speed of juvenile *H. nobilis* for each body length group

体长 /cm	样本量 /尾	游泳阶段	最大游速 /cm·s ⁻¹	最大游速与 U_{burst} 比值 /%
5.0~6.0	10	第1阶段	16.5 ± 1.3	31.5 ± 0.6
		第2阶段	35.5 ± 1.5	65.8 ± 0.8
		第3阶段	48.1 ± 1.2	92.4 ± 0.7
		第4阶段	52.5 ± 3.2	100
6.1~7.0	13	第1阶段	16.0 ± 1.8	28.4 ± 1.2
		第2阶段	46.5 ± 3.2	78.6 ± 0.8
		第3阶段	59.8 ± 2.5	98.2 ± 0.6
		第4阶段	61.2 ± 1.43	100
7.1~8.0	13	第1阶段	26.0 ± 1.8	34.4 ± 1.2
		第2阶段	56.5 ± 3.2	75.6 ± 0.8
		第3阶段	69.8 ± 2.5	93.2 ± 0.6
		第4阶段	75.2 ± 1.43	100
8.1~9.0	10	第1阶段	30.9 ± 1.6	35.4 ± 0.8
		第2阶段	68.8 ± 2.6	77.8 ± 0.7
		第3阶段	85.4 ± 1.5	96.2 ± 0.8
		第4阶段	89.4 ± 1.26	100



I 为顶流前进, II 为顶流静止, III 为顶流后退, IV 为顺流而下

图5 4个阶段游泳状态变化

I – Swimming forward against the flow; II – Static under the flow; III – Swimming backward against the flow; IV – Swimming with the current

Fig.5 Swimming mode during each of the four stages of the swimming test

3 讨论

3.1 突进游泳速度与临界游泳速度的关系

本研究得出鳙幼鱼临界游泳速度(23℃)为(0.468±0.161)m/s,比蔡露等(2012)在20℃研究得出的鳙幼鱼(体长为9.8~12.3 cm)临界游泳速度(0.51±0.18)m/s小。这可能是由于实验鱼体长(5.0~9.0 cm)偏小的缘故,按公式⑤,绝对临界游泳速度随体长的增加而增加。本研究得出鳙幼鱼的突进游泳速度为(0.672±0.154)m/s,其绝对突进游泳速度随着体长的增加而增加,相对突进游泳速度随着体长的增加呈现下降趋势,与黎采微等(2014)和牛宋芳等(2015)采用惊吓方法测试不同体长鱼类在加速-滑行游泳行为下的最大疾冲速度与体长关系一致。突进游泳速度可以衡量鱼类运动的加速能力(石小涛等,2012),为鱼类修建过鱼设施洄游通道提供技术参考。临界游泳速度是鱼类有氧运动的重要指标,临界游泳速度越大,鱼类所能持续的最大游泳速度越大(石小涛等,2012;刘慧杰等,2016)。本研究显示,突进游泳速度与临界游泳速度之间呈正相关,表达式为 $U_{burst}=1.922U_{crit}+56.726$,与鱼类进行有氧和无氧运动的权衡相关(Reidy et al, 2000),这与曹平等(2017)的研究结果一致。在鱼道水力设计过程中,临界游泳速度和突进游泳速度是决定鱼道池室长度和休息池距离的重要指标(Farrell, 2008; Castro-Santos et al, 2013),因此,需找到鱼类临界游泳速度和突进游泳速度的最优平衡点,这对鱼道内流速设计优化和提高过鱼效果具有重要意义。

3.2 鳙突进游泳速度行为对流速的响应

本文通过改变水流速度研究对不同体长变化下鱼类游泳行为和游泳能力的影响。在突进游泳速度测试中,随着测试流速的增加,鱼类存在着顶流前进、顶流静止、顶流后退和顺流而下4种游泳状态,并相互穿插整个测试过程。在图5(a)中28%~35%突进游泳速度下,随着试验鱼体长的增加,顶流前进与顶流后退比例有所减少,顶流静止比例明显增加,表明鱼类游泳速度与水流速度保持正相关,鱼类在通过鱼道时,不可避免的需要休息,休息时鱼类所处状态大部分为顶流静止状态,因此,本研究可为鱼道休息池水力设计提供参考。第1阶段到第2阶段随着流速增加到65%~78%,鱼类迅速调整游泳状态,用身体前进来抵抗水流,顶流前进比例迅速增加,顶流静止比例迅速减少,顶流后退和顺流而下比

例略微减少;在图5(b)第2阶段,鱼类顶流前进和顶流后退比例增加,与相关研究(蔡露等,2012)结论相似,即鱼类采用爆发-滑行、连续爆发来对抗水流;与林晨宇等(2017)的研究结果一致,即鳙在加速区的顶流时间会随水流速度的增加呈现先增加后减少趋势;第3阶段到第4阶段水流速度达到突进游泳速度过程中,鱼类无法长距离顶流前进,水流速度对鱼类造成一定的流速障碍,顶流后退比例明显增加。由此可见,鱼类会根据水流速度变化随时调整自身的游速和游向,使身体保持在特定游泳状态或长时间停留在某一特定位置(Venditti et al, 2000)。上述游泳行为特性的研究,可为鱼道流速设计提供有效参数指标。

本研究是在封闭水槽恒定流中进行测试,具有一定的局限性(李志敏等,2018),无法真实反映实际水流流态,可能对鳙幼鱼的游泳能力测试有一定的影响。为了更精准测试出自然状态下鳙幼鱼的游泳能力,下一阶段需要开展开放水槽复杂流场下的鳙幼鱼的游泳行为研究。此外,由于本试验中试验鱼体长范围为5.0~9.0 cm,差距较小,使得 U_{crit} 、 U_{burst} 和BL(体长)的关系中相关系数均较低,在今后的试验中将进一步放大试验鱼体长差距,建立更为可信的 U_{crit} 、 U_{burst} 和BL(体长)的关系。

4 结论

(1)绝对突进游泳速度随着试验鱼体长的增加而增加,且与体长的关系为: $U_{burst}=16.194BL+41.214$,相对突进游泳速度随体长的增加而减小,其关系式为: $U'_{burst}=-1.9477BL+23.601$;(2)绝对临界游泳速度随试验鱼体长的增加而增加,其关系式为: $U_{crit}=8.4278BL-8.0728$;(3)将鳙幼鱼突进游泳速度与临界游泳速度关系进行对比分析,得到鳙幼鱼临界游泳速度与突进游泳速度的关系为: $U_{burst}=1.922U_{crit}+56.726$;(4)分析突进游泳速度测试过程中试验鱼的4种游泳状态(顶流静止、顶流前进、顶流后退及顺流而下),得到以鳙为过鱼对象的鱼道池室主流流速为突进流速的28%~78%(第1阶段到第2阶段的流速变化范围为16.0~46.5 cm/s),对于鱼道高流速区的竖缝、孔口等最佳流速应为鳙突进流速的78%~92%(第2阶段到第3阶段的流速变化范围为46.5~85.4 cm/s),不宜超过鳙突进流速的92%~96%(第3阶段最大流速85.4 cm/s),否则会造成流速障碍,鱼类无法上溯。本研究成果可为四大家鱼保护、资源恢复和洄游通道建设提供参考。

参考文献

- 蔡露,金瑶,潘磊,等,2018. 过鱼设施设计中的鱼类行为研究与问题[J]. 生态学杂志, 37(11): 3458–3466.
- 蔡露,房敏,涂志英,等,2013. 与鱼类洄游相关的鱼类游泳特性研究进展[J]. 武汉大学学报(理学版), 59(4): 363–368.
- 蔡露,涂志英,袁喜,等,2012. 鳙幼鱼游泳能力和游泳行为的研究与评价[J]. 长江流域资源与环境, 21(S2): 89–95.
- 曹平,穆祥鹏,白音包力皋,等,2017. 与鱼道水力设计相关的草鱼幼鱼游泳行为特性研究[J]. 水利学报, 48(12): 1456–1464.
- 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, 197.
- 房敏,蔡露,高勇,等,2013. 温度对鲢幼鱼游泳能力及耗氧率的影响[J]. 水生态学杂志, 34(3): 49–53.
- 郜星辰,姜伟,张琪,等,2019. 长江宜昌段鳙的繁殖生物学初步研究[J]. 水生态学杂志, 40(6): 92–98.
- 何大仁,1998. 鱼类行为学[M]. 厦门: 厦门大学出版社.
- 侯轶群, Lynda Newbold, 蔡露, 等, 2016. 基于固定流速法的鳙(*Aristichthys nobilis*)幼鱼游泳能力[J]. 生态学杂志, 35(6): 1583–1588.
- 黎采微,路波,陈廷,等,2014. 青鱼逃逸过程中的疾冲–滑行游泳行为[J]. 动物学杂志, 49(6): 860–866.
- 李会锋,蔡德所,杨培思,2016. 鲢幼鱼游泳能力及游泳行为的试验研究[J]. 水生态学杂志, 37(3): 88–92.
- 李志敏,陈明曦,金志军,等,2018. 叶尔羌河厚唇裂腹鱼的游泳能力[J]. 生态学杂志, 37(6): 1897–1902.
- 林晨宇,罗佳,刘德富,等,2017. 鳙幼鱼在下行过程中应对加速流的行为响应研究[J]. 水生生物学报, 41(3): 560–564.
- 刘飞,林鹏程,黎明政,等,2019. 长江流域鱼类资源现状与保护对策[J]. 水生生物学报, 43(S1): 144–156.
- 刘慧杰,王从锋,朱良康,等,2016. 鲢鳙幼鱼临界游泳速度的比较研究[J]. 水生态学杂志, 37(4): 63–69.
- 牛宋芳,路波,罗佳,等,2015. 鲢快速逃逸游泳行为研究[J]. 水生生物学报, 39(2): 394–398.
- 石小涛,陈求稳,刘德富,等,2012. 胭脂鱼幼鱼的临界游泳速度[J]. 水生生物学报, 36(1): 133–136.
- 王萍,桂福坤,吴常文,2010. 鱼类游泳速度分类方法的探讨[J]. 中国水产科学, 17(5): 1137–1146.
- 熊锋,王从锋,刘德富,等,2014. 松花江流域青鱼、草鱼、鲢及鳙突进游泳速度比较研究[J]. 生态科学, 33(2): 339–343.
- 袁喜,李丽萍,涂志英,等,2014. 温度对鳙幼鱼疲劳引起的生理变化和游泳能力的影响研究(英文)[J]. 水生生物学报, 38(3): 505–509.
- 曾海钊,周小波,陈子海,2017. 藏木水电站鱼道设计[J]. 水电站设计, 33(1): 68–71.
- 郑金秀,韩德举,胡望斌,等,2010. 与鱼道设计相关的鱼类游泳行为研究[J]. 水生态学杂志, 31(5): 104–110.
- Beamish F W H, 1979. Swimming capacity[J]. Fish Physiology, 7: 101–187.
- Brett J R, 1967. Swimming performance of sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*) in relation to fatigue time and temperature[J]. Journal of the Fisheries Board of Canada, 24(8): 1731–1741.
- Castro-Santos T, Sanz-Ronda FJ, Ruiz-Legazpi J, et al, 2013. Breaking the speed limit —comparative sprinting performance of brook trout (*Salvelinus fontinalis*) and brown trout (*Salmo trutta*)[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 70(2): 280–293.
- Farrell A P, 2008. Comparisons of swimming performance in rainbow trout using constant acceleration and critical swimming speed tests[J]. Journal of Fish Biology, 72(3): 693–710.
- Hammer C. 1995. Fatigue and exercise tests with fish[J]. Comparative Biochemistry and Physiology, 112(1): 1–20.
- Newbold L R, Shi X T, Hou Y Q, et al, 2016. Swimming performance and behaviour of bighead carp (*Hypophthalmichthys nobilis*): Application to fish passage and exclusion criteria[J]. Ecological Engineering, 95: 690–698.
- 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.
- Venditti D A, Rondorf D W, Kraut J M, et al, 2000. Migratory behavior and forebay delay of radio-tagged juvenile fall chinook salmon in a lower Snake River impoundment[J]. North American Journal of Fisheries Management, 20(1): 41–52.

(责任编辑 郑金秀)

Four Swimming Modes of Juvenile *Hypophthalmichthys nobilis*

LI Hong^{1,2}, GUO Wen-tao³, HE Peng², LIU Xuan-chi², GAN Jian-zheng²,
TAN Hong-lin^{1,2}, CHEN Lei^{1,2}, SHI Xiao-tao¹, TAN Jun-jun¹

(1. Hubei International Science and Technology Cooperation Base of Fish Passage,
China Three Gorges University, Yichang 443002, P.R. China;

2. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University,
Yichang 443002, P.R. China;

3. Hubei Key Laboratory of Three Gorges Project for Conservation of Fishes,
Chinese Sturgeon Research Institute, China Three Gorges Corporation, Yichang 443100, P.R. China)

Abstract: *Hypophthalmichthys nobilis* (bighead carp) is one of the four major Chinese carps and data shows that their populations have declined sharply because of hydraulic projects. Fish passages are often incorporated into hydraulic projects that interfere with fish migration and their design is based on fish swimming behavior. In this study, we explored the swimming ability of juvenile *H. nobilis* (5.0–9.0 cm, 2.5–11.5 g) and analyzed the relationship of swimming behavior to flow velocity. Swimming behavior was studied in a flume (300 mm×5 mm×75 mm) using stepped-velocity tests at a water temperature of (23±0.5)°C. The mean absolute critical swimming speed (U_{crit}) of the test fish was (0.468±0.161) m/s and the average burst swimming speed (U_{burst}) was (0.672±0.154) m/s. Both speeds increased linearly with body length while relative burst swimming speed, measured as body lengths per second (BL/s), decreased linearly with increasing body length. The relationship between absolute burst swimming speed and absolute critical swimming speed was described as $U_{burst}=1.922U_{crit}+56.726$. During the burst swimming test, the fish used four swimming modes: swimming forward against the flow, swimming backward against the flow, static (not swimming) and swimming with the current. In fishways targeting bighead carp, we recommend a flow velocity range 16.0–46.5 cm/s in fishway pools and slot and orifice velocities in the range 46.5–85.4 cm/s. The results of this study add to our knowledge about the swimming characteristics of bighead carp and provide a reference for protecting the four major Chinese carps and construction of fish migration channels.

Key words: *Hypophthalmichthys nobilis*; burst swimming speed; critical swimming speed; swimming characteristics