

大渡河下游典型鱼类的游泳能力测试

丁少波¹, 施家月², 黄 滨², 赵 爽³

(1.北京中环格亿技术咨询有限公司, 北京 100012;

2.中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122;

3.浙江广播电视大学, 浙江 杭州 310030)

摘要:通过测试鱼类的游泳能力,可为过鱼设施设计和鱼类行为学研究提供基础资料。在水温 18.9~24.3℃和溶解氧 5.58~8.17 mg/L 条件下,采用丹麦 Loligo System 公司的鱼类游泳能力环形试验水槽,以大渡河下游 6 种典型鱼类胭脂鱼(*Myxocyprinus asiaticus*)、长薄鳅(*Leptobotia elongata*)、长鳍吻鮡(*Rhinogobio ventralis*)、异鳔鳅鲃(*Xenophysogobio boulengeri*)、唇鱼骨(*Hemibarbus labeo*)、四川白甲鱼(*Onychostoma angustistomata*)为研究对象,分别测试其感应流速、临界游泳速度和爆发游泳速度。结果显示:(1)测试鱼的平均感应流速:白甲鱼 9.9~12.3 cm/s,唇鱼骨 8.5~11.1 cm/s,异鳔鳅鲃 12.0~17.5 cm/s,胭脂鱼 8.3~13.5 cm/s,长薄鳅 14.7~18.1 cm/s,长鳍吻鮡 14.0~18.6 cm/s;(2)平均临界流速:白甲鱼 106.3~131.1 cm/s,唇鱼骨 67.9~78.4 cm/s,异鳔鳅鲃 72.9~80.5 cm/s,胭脂鱼 78.1~89.9 cm/s,长薄鳅 89.6~109.9 cm/s,长鳍吻鮡 83.1~103.8 cm/s;(3)平均爆发流速:白甲鱼 149.4~159.1 cm/s,唇鱼骨 98.9~128.5 cm/s,异鳔鳅鲃 98.5~141.5 cm/s,胭脂鱼 92.3~125.7 cm/s,长薄鳅 125.4~151.8 cm/s,长鳍吻鮡 128.6~163.8 cm/s。建议过鱼孔口近底边区域流速为 1.0~1.2 m/s,其余高流速区适当放大至 1.4~1.5 m/s;鱼道进口流速为 0.7~1.5 m/s,出口口设置在流速持续不小于 0.3 m/s 的水域,过鱼设施平均流速范围为 0.6~1.0 m/s。

关键词:大渡河;典型鱼类;游泳能力;过鱼设施

中图分类号:Q955 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2020)01-0046-07

大渡河全长 1 062 km,流域面积 7.74 万 km²,系岷江右岸最大支流。大渡河干流四川境内水能资源理论蕴藏量 2 083 万 kW,是国家规划的十二大水电基地之一。历史上大渡河下游河段共有鱼类 107 种(亚种)(叶妙荣和傅天佑,1987)。2007-2009 年,在大渡河下游的沙湾-乐山段干流及大渡河、青衣江、岷江交汇口水域进行的鱼类资源调查,共采集和调查到鱼类 67 种,分别隶属于 4 目、13 科、55 属(常勇,2015)。水电站闸坝的修建将阻断河流连续性,给渔业资源带来负面影响,因此往往需采取增殖放流、修建过鱼设施等措施恢复鱼类种群(Van et al, 2003; Castro-Santos, 2005; Kim et al, 2016)。考虑具有江海洄游及江湖洄游特性的鱼类、受到保护的鱼类、珍稀特有及土著和易危鱼类、具有经济价值的鱼类、其他具有迁徙特征的鱼类等作为过鱼对象的原则,确定胭脂鱼(*Myxocyprinus asiaticus*)、长薄鳅(*Leptobotia elongata*)、长鳍

吻鮡(*Rhinogobio ventralis*)、异鳔鳅鲃(*Xenophysogobio boulengeri*)、唇鱼骨(*Hemibarbus labeo*)、蛇鮡(*Saurogobio dabryi*)、四川白甲鱼(*Onychostoma angustistomata*)为大渡河流域梯级开发中需要重点关注的过鱼种类(中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司,2012)。

鱼类游泳能力是过鱼设施参数设计的重要参考依据(Choi et al, 2016);在修建较长的鱼道时,通过鱼类的耐久游泳能力计算其最大游泳距离,以此确定休息池的距离(郭维东等,2015);鱼道内孔口或竖缝的设计流速和进出口高流速区的设计流速,都应小于鱼类的爆发游泳速度(郑金秀等,2010)。目前,国内外很多过鱼设施的运行远没有达到预期效果,部分原因是过鱼对象的游泳能力研究不足,过鱼设施设计时所参考的水力特征参数针对性不强(Castro-Santos et al, 2009; 陈凯麒等,2012)。表征鱼类游泳能力的指标主要为趋流特性和克流能力,其趋流特性主要用于过鱼设施进口流场设计,克流速度则主要用于过鱼设施流速设计(郑金秀等,2010;涂志英等,2011)。鱼类的克流能力通过鱼类游泳能力反推,而鱼类游泳能力依生物代谢模式

收稿日期:2018-05-20

基金项目:浙江省自然科学基金(编号:LQ14G030020)。

作者简介:丁少波,1982年生,男,助理研究员,主要从事水利水电环境保护方面研究。E-mail: 11708878@qq.com

主要分为三类,即持续游泳速度(sustained swimming speed)、耐久游泳速度(prolonged swimming speed)和爆发游泳速度(burst speed)(Plaut, 2001; 王萍等, 2010; 石小涛等, 2011);耐久游泳速度与持续游泳速度的分界被称为临界游泳速度(Hinch et al, 2002)。鱼类游泳速度主要受到鱼种类及其规格尺寸、水温和其他理化指标的影响,在进行鱼类游泳试验时需予以充分考虑(Hasler et al, 2009; Kieffer, 2010; 蔡露等, 2013)。鱼类游泳能力的测量方法有多种,其游泳速度测量用得较多的主要是水槽试验,其中“固定流速法”和“递增流速法”应用较为普遍(于晓明和张秀梅, 2011)。

围绕鱼类生物多样性与渔业资源保护利用,国内学者对一些流域的典型鱼类游泳能力开展过相应的试验研究(涂志英, 2012; 熊锋等, 2014; 汪玲珑等, 2016);但针对大渡河下游鱼类游泳能力研究成果较少。上述 7 种主要过鱼对象中,仅见有关胭脂鱼(石小涛等, 2012)和长薄鳅(叶超, 2014)的游泳行为的报道。因此,本文对大渡河下游典型鱼类的游泳能力进行试验研究,旨在为过鱼设施的设计提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验鱼来源

本次研究按照同时满足大坝上游及下游均有分布或电站运行后有潜在分布可能、大坝上游或下游

存在其重要生境、洄游或迁徙路线经过大坝断面的原则,选择测试对象为胭脂鱼、长薄鳅、长鳍吻鲈、异鳔鳅鲇、唇鱼、蛇鲈、四川白甲鱼。由于样本的可获得性,未进行四川白甲鱼游泳能力测试,而使用分类地位、形态特征相似的白甲鱼(*Onychostoma simum*)进行参考测试。蛇鲈不属于珍稀特有鱼类,目前国内资源量较多、分布范围较广,且研究江段无其他蛇鲈属替代种类,本次未开展相关测试。

为了保证尽可能多的目标种类完成测定要求,本次试验鱼的来源主要有 3 个途径:唇鱼、异鳔鳅鲇取自大渡河乐山段沿江渔民的捕捞渔获物;白甲鱼取自岷江河口宜宾段;胭脂鱼、长薄鳅和长鳍吻鲈取自长江江津段。试验鱼先装袋充氧,然后进行公路运输。

1.2 试验鱼暂养和转运

试验鱼暂养于池中,为减轻鱼类的应激反应,鱼类暂养 24 h 后方可开始试验。暂养池上端敞开,有进水管和出水管路,由于感应流速测试对鱼类不产生疲劳效应,进行感应流速测试的鱼类可以进行其它测试。其它测试中,试验鱼原则上不重复使用,由于有些鱼类可采集的样本数量有限,在保证其健康的状态下,进行一项测试后,在暂养池中恢复 24 h 后进行下一项测试。试验过程中需要对试验鱼进行转运时,使用对鱼损伤较小的细网和带水的水盆进行鱼类转运,以减少对试验鱼的影响。试验对象种类和规格如表 1 所示。

表 1 试验个体规格

Tab.1 Specifications of test fish for each species

| 种类 | 全长/mm | | 体长/mm | | 体重/g | |
|------|-------------|-------|-------------|-------|------------|-------|
| | 范围 | 均值 | 范围 | 均值 | 范围 | 均值 |
| 白甲鱼 | 192.0~257.0 | 220.4 | 149.0~202.0 | 171.6 | 58.7~131.0 | 89.7 |
| 唇鱼 | 110.0~170.0 | 135.7 | 92.0~144.0 | 114.2 | 11.7~44.6 | 23.4 |
| 异鳔鳅鲇 | 89.0~123.0 | 107.4 | 66.0~110.0 | 83.9 | 5.2~21.8 | 9.5 |
| 胭脂鱼 | 125.0~300.0 | 210.9 | 97.0~238.0 | 165.1 | 19.6~284.6 | 106.2 |
| 长薄鳅 | 103.0~257.0 | 202.0 | 121.0~217.0 | 172.0 | 15.0~114.5 | 57.2 |
| 长鳍吻鲈 | 158.0~291.0 | 215.6 | 127.0~235.0 | 174.4 | 29.5~228.0 | 91.8 |

1.3 测试指标与方法

分别对表征鱼类趋流特性的感应流速和表征鱼类克流能力临界游泳速度、爆发游泳速度进行了测试。

测定感应流速时,将试验鱼放入水槽测试区内,适应 5 min 至试验鱼无突然的变向游泳行为。启动电机逐渐提高频率,调节水槽水流速度,至测试鱼调整身体方向开始顶流时的最小水流速度,此时水流速度视为试验鱼的感应流速(蔡露, 2018)。

临界游速测定采用递增流速法。首先对试验鱼的临界游速进行预测,通过 3 次预试验,每次 1 尾,将试验鱼放入水槽测试区内,每隔 2 min 增加 0.4 BL/s,直至鱼疲劳,取 3 次临界游泳速度为预试验流速的平均值。试验鱼疲劳判断标准为试验鱼被水流冲至水槽下游钢丝网处无法游动的超出 20 s。正式试验时,通过控制水槽的水流速度,每隔 5 min 增加 0.5 BL/s,直至达到 60% 的预估临界游泳速度;然后调整水流速度为每隔 20 min 增加

15%的预估临界游泳速度(鲜雪梅等, 2010)直至鱼疲劳, 测试结束。临界流速(U_{crit})的计算公式为:

$$U_{crit} = V_p + (t_f/t_i)V_i$$

式中: V_p - 鱼极限疲劳的前一个水流速度; t_f - 上次增速到达极限疲劳的时间; t_i - 两次增速的时间间隔; V_i - 单位时间内流速增加量大小。

爆发流速测定采用递增流速法。首先对暂养24 h后的试验鱼进行2次爆发流速预估试验, 每次选取1尾鱼放入试验段, 然后每隔20 s使试验流速增加0.4 BL/s, 直至鱼疲劳, 记录此时的流速值, 将2次预估值的平均值作为最终预估值。正式试验时, 将试验鱼放入试验装置, 先将流速在10 s内增至60%的爆发游泳速度预估值, 然后每隔20 s将流速增加15%的爆发游泳速度预估值, 同时观察记录鱼的游泳行为, 直至试验鱼疲劳无法继续游动, 此时结束试验。爆发游泳速度 U_{burst} 的计算公式与 U_{crit} 计算公式相同, 只是计算时的递增时间间隔和递增速度不同。

1.4 试验设备

采用进口的 LOLIGO SYSTEM 公司的 SW10200 封闭水槽 (<https://www.loligosystems.com/>) 进行测试(图1)。测试前的流速标定采用旋浆流速仪。测试期间的溶氧和温度采用美国 YSI 公司 DO200 型溶氧仪测定。

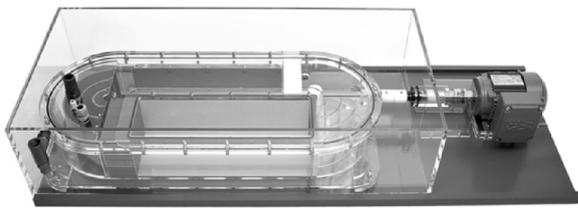


图1 SW10200型鱼类游泳能力测试水槽

Fig.1 The LOGIGO SYSTEM SW10200 test flume for testing fish swimming ability

1.5 试验环境

试验用水为曝气48 h的自来水, 以保证溶氧和水温在鱼类生长的适宜范围。试验期间, 实时监测水温和溶氧, 水温范围控制在18.9~24.3℃, 溶氧控制在5.58~8.17 mg/L。试验鱼需要在1.0 BL/s的流速下适应1 h, 以消除转移过程对鱼体的胁迫。感应流速测试对鱼类不产生疲劳效应, 因此之后可以继续其它测试; 而其它测试中, 试验鱼原则上不重复使用, 且进行一项测试前, 需在暂养池中恢复24 h。试验过程中需要进行转运时, 应使用对鱼损伤较小的细网和水盆, 以减少对试验鱼的影响。

2 结果与分析

2.1 感应流速

本次试验获得测试对象感应流速见表2。根据试验获得的数据, 以95%置信水平估计了各种鱼类平均感应流速的置信区间; 其中, 白甲鱼的平均感应流速在9.9~12.3 cm/s, 唇鱼在8.5~11.1 cm/s, 异鳔鳅在12.0~17.5 cm/s, 胭脂鱼在8.3~13.5 cm/s, 长薄鳅在14.7~18.1 cm/s, 长鳍吻鲈在14.0~18.6 cm/s(图2)。据此反应不同鱼类感应流速大小为: 唇鱼 < 胭脂鱼 < 白甲鱼 < 异鳔鳅 < 长薄鳅 < 长鳍吻鲈。感应流速的阈值可能反应了鱼类栖息环境的差异。

表2 试验鱼的感应流速

Tab.2 Induced velocity for each fish species

| 种类 | 体长范围/ cm | 感应流速/ $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ | 平均值/ $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ | 相对感应流速/ $\text{BL} \cdot \text{s}^{-1}$ | 平均值/ $\text{BL} \cdot \text{s}^{-1}$ |
|------|-------------|--|---|--|---|
| 白甲鱼 | 14.9~20.2 | 6.4~18.1 | 11.1 | 0.4~1.0 | 0.7 |
| 唇鱼 | 9.2~13.6 | 7.1~11.3 | 9.8 | 0.6~1.1 | 0.9 |
| 异鳔鳅 | 6.6~9.5 | 10.1~20.9 | 14.7 | 1.3~3.0 | 1.9 |
| 胭脂鱼 | 15.8~23.8 | 6.1~15.8 | 10.9 | 0.4~0.7 | 0.6 |
| 长薄鳅 | 12.3~21.2 | 12.6~26.0 | 16.4 | 0.6~1.7 | 1.0 |
| 长鳍吻鲈 | 12.7~18.7 | 6.1~22.7 | 16.3 | 0.4~1.2 | 1.0 |

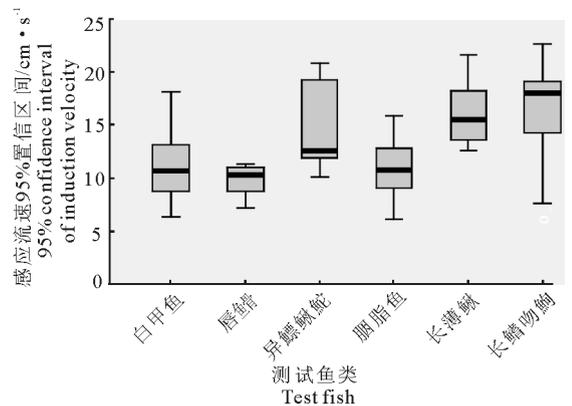


图2 测试鱼类的感应流速比较

Fig.2 Comparison of induced velocity among fish species

2.2 临界游泳速度

本次试验获得测试对象临界游泳速度见表3。根据试验获得的数据, 以95%置信水平估计了各种鱼类平均临界游泳速度的置信区间; 其中, 白甲鱼的平均临界游泳速度在106.3~131.1 cm/s, 唇鱼在67.9~78.4 cm/s, 异鳔鳅在72.9~80.5 cm/s, 胭脂鱼在78.1~89.9 cm/s, 长薄鳅在89.6~109.9 cm/s, 长鳍吻鲈在83.1~103.8 cm/s(图3)。临界游泳速度大小为: 唇鱼 < 异鳔鳅 < 胭脂鱼 < 长鳍吻鲈 < 长薄鳅 < 白甲鱼。

表 3 试验鱼的临界游泳速度

Tab.3 Critical swimming speed for each fish species

| 种 类 | 体长 范围/ cm | 临界游 泳速度/ cm · s ⁻¹ | 平均 值 /cm · s ⁻¹ | 相对临界 游泳速度/ BL · s ⁻¹ | 平均 值/ BL · s ⁻¹ |
|------|--------------|----------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|
| 白甲鱼 | 16.2~18.2 | 98.0~151.3 | 118.7 | 5.8~9.2 | 7.0 |
| 唇鱼骨 | 9.5~13.5 | 62.6~79.2 | 73.2 | 5.3~8.1 | 6.5 |
| 异鳔鳅鲇 | 7.4~8.2 | 65.8~85.5 | 76.7 | 8.4~10.7 | 9.9 |
| 胭脂鱼 | 15.8~23.8 | 70.3~95.1 | 84.0 | 4.0~5.4 | 4.5 |
| 长薄鳅 | 13.9~21.7 | 83.5~121.7 | 99.8 | 3.9~7.4 | 5.7 |
| 长鳍吻鲈 | 16.3~18.5 | 73.4~115.4 | 93.4 | 4.2~6.5 | 5.4 |

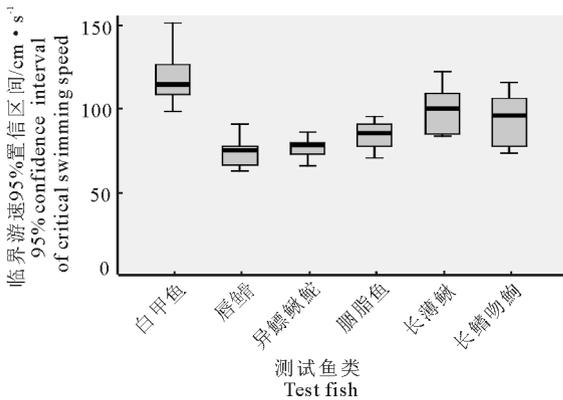


图 3 测试鱼类的临界游速比较

Fig.3 Comparison of critical swimming speed among fish species

2.3 爆发游泳速度

本次试验获得测试对象爆发游泳速度见表 4。根据试验获得的数据,以 95%置信水平估计了各种鱼类平均爆发游泳速度的置信区间。其中,白甲鱼的平均爆发游速在 149.4~159.1 cm/s,唇鱼骨在 98.9~128.5 cm/s,异鳔鳅鲇在 98.5~141.5 cm/s,胭脂鱼在 92.3~125.7 cm/s,长薄鳅在 125.4~151.8 cm/s,长鳍吻鲈在 128.6~163.8 cm/s(图 4)。几种鱼类的爆发游速大小为:胭脂鱼<唇鱼骨<异鳔鳅鲇<长薄鳅<长鳍吻鲈<白甲鱼。

表 4 试验鱼的爆发游泳速度

Tab.4 Burst swimming speed for each fish species

| 种 类 | 体长 范围/ cm | 爆发游 泳速度/ cm · s ⁻¹ | 平均 值/ cm · s ⁻¹ | 相对爆发游 泳速度/ BL · s ⁻¹ | 平均 值/ BL · s ⁻¹ |
|------|--------------|----------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|
| 白甲鱼 | 14.9~20.2 | 142.5~160.0 | 154.9 | 7.4~9.9 | 9.0 |
| 唇鱼骨 | 10.9~14.4 | 88.5~150.0 | 113.7 | 6.2~14.3 | 9.4 |
| 异鳔鳅鲇 | 9.0~11.0 | 98.3~150.0 | 120.0 | 10.3~14.6 | 12.1 |
| 胭脂鱼 | 9.7~15.5 | 84.8~143.3 | 109.0 | 7.1~12.0 | 8.9 |
| 长薄鳅 | 21.1~20.6 | 97.5~155.0 | 133.3 | 6.5~11.3 | 8.3 |
| 长鳍吻鲈 | 12.7~23.5 | 114.8~160.0 | 139.3 | 6.1~9.2 | 8.7 |

国外学者(Beach, 1984)通过研究得到鱼类的游泳能力拟合公式 $U = aL^\beta$,鲤科鱼类 $\beta = 0.35 \sim$

0.75,且主要集中在 0.5 附近。因此,游泳速度 U 与 $L^{0.5}$ 成正比。根据游泳速度测试值排序,由于胭脂鱼测试个体体长明显小于性成熟个体体长,因此其爆发速度不作为限制值。唇鱼骨的爆发速度在 98.9~128.5 cm/s,最小性成熟个体体长为 147~184 mm,爆发速度测试个体体长范围为 109~144 mm,根据游泳速度与鱼类体长的比例关系,推测唇鱼骨最小性成熟个体爆发速度在 110~147 cm/s。异鳔鳅鲇在 98.5~141.5 cm/s,无最小性成熟个体资料,且异鳔鳅鲇体型小,因此爆发速度限制值取异鳔鳅鲇的 98.5~141.5 cm/s,50%的异鳔鳅鲇爆发速度大于 126.8 cm/s。

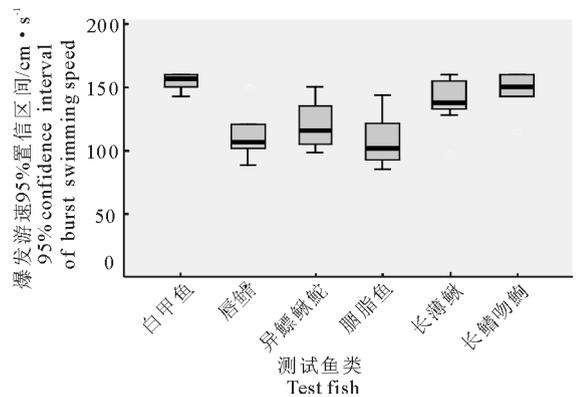


图 4 测试鱼类的爆发游速比较

Fig.4 Comparison of the burst swimming speed among fish species

3 讨论

3.1 鱼道设计参数应考虑鱼类的最小性成熟指标

本次研究采集的试验鱼样本数量有限,体长也相对集中,未能呈现明显的相关关系,所以未对造成种间、种内差异的原因进行分析,也未与相关研究(胭脂鱼、长薄鳅)进行比较。但是,为实现过鱼设施促进鱼类遗传交流的目标,过鱼对象通常考虑最小性成熟型(表 5)。

表 5 测试对象的最小性成熟型

Tab.5 Minimum age and body length at sexual maturity for each fish species tested

| 种 类 | 性 别 | 最小性成熟 年龄 | 最小性成熟 体长/mm |
|------|-----|----------|-------------|
| 白甲鱼 | ♂ | 3 | 255~371 |
| | ♀ | 4 | 281~399 |
| 唇鱼骨 | | 2 | 147~184 |
| 胭脂鱼 | | 5 | >800 |
| 长薄鳅 | | 3 | 230~282 |
| 长鳍吻鲈 | ♂ | 3 | 165 |
| | ♀ | 3 | 190 |

受实验材料限制,本次试验中除长鳍吻鲋外,其它鱼类的测试规格均小于性成熟个体。因此,在确定实际过鱼设施流速设计指标时,本文在鱼类的相对游泳速度上,依据经验公式进行了换算。总体上,应用95%置信水平估计的结果对于给出鱼道设计参数建议仍具有较强的意义和价值。在实际情况中,主要过鱼对象可能仍为未达到初次性成熟的个体。本研究所开展的鱼类游泳能力测试工作,在主要过鱼季节时,利用工程河段现场捕获的个体进行测试,不仅可以提供相关鱼类的游泳能力指标,同时可以提供主要过鱼对象的体长分布,其结果具有一定的应用价值。

3.2 鱼类游泳能力指标在过鱼设施设计中的应用

3.2.1 过鱼孔口流速 过鱼设施的最大流速一般出现在孔口或竖缝处。鱼类在通过过鱼设施孔口或竖缝时,一般都是高速冲刺、短时间通过,通过高流速区时间一般在5~20 s,因此竖缝流速主要参考鱼类的爆发速度。测试结果表明,异鳔鳅鮠爆发游泳速度最低(胭脂鱼测试个体体长明显小于性成熟个体体长,爆发速度不作为限制值),本研究以异鳔鳅鮠爆发游泳速度作为孔口或竖缝处最大控制流速,即98.5~141.5 cm/s。由于实测50%的异鳔鳅鮠爆发速度大于126.8 cm/s,建议孔口流速最大值为126.8 cm/s;此外,在过鱼设施或自然河道中,由于边壁及底部的摩阻,流速分布在靠近分界面时较低,可供中下层游泳能力较弱的鱼类通过,本研究过鱼孔口流速设计的边界条件为保证过鱼孔近底边壁有0.2~0.25 m的低流速区域,此区域流速在1.0~1.2 m/s的范围内,其余高流速区的流速可适当放大至1.4~1.5 m/s。

3.2.2 进口流速 为保证鱼道进口对鱼类的吸引作用,应将感应流速上限值作为进口流速最低流速设计值,此工况一般为下游水位最高工况。根据本研究感应流速测试结果,过鱼季节各种水情下的鱼道进口流速应不小于0.2 m/s。一般最佳的诱鱼流速范围在临界流速和爆发流速之间,其流速越大,水流影响范围越大。本研究根据临界流速和爆发流速测试结果,建议进口流速值为0.7~1.5 m/s,特殊水情下可采取相应的补水措施以提高进口流速。

3.2.3 出口流速和位置 过鱼设施出口应保持有一定的流速,以便于鱼类游出过鱼设施后不影响其正常的洄游行为,出口位置不可布置在完全静水的地方,这样鱼类就无法感应到流速,容易迷失方向,因此过鱼通道的出口流速宜大于鱼的感应流速,本

研究建议过鱼设施出鱼口设置在流速持续不小于0.3 m/s的水域;同时,流速超过鱼类临界游速时,鱼类容易被吸入泄水闸而被带入下游,出口位置也不可太贴近泄水建筑物。

3.2.4 整体平均流速 一般情况下,鱼类会通过调节其身体和尾鳍摆动频率与摆幅来减缓速度或加速,以保持加速-滑行(burst-and-coast)的游泳方式。鱼类通过连续水流障碍时,同时需用到耐久式游泳和持续性游泳,为使鱼类不产生疲劳,建议鱼道平均流速在鱼类持续游泳速度范围内。根据测试结果和国内外研究成果(Clay, 1995),持续游泳速度在80%临界游速附近。本研究根据临界游速测试结果,建议过鱼设施平均流速范围为0.6~1.0 m/s。为使过鱼设施内尽量创造适宜鱼类上溯的流速和微生境,建议鱼道底部进行加糙处理,铺以鹅卵石或砾石块。石块粒径可为10~30 cm,对底栖型鱼类具有一定的亲鱼性,还可减缓鱼道底部流速。

4 结语

(1)采用丹麦 Loligo System 公司的鱼类游泳能力环形试验水槽,以胭脂鱼、长薄鳅、长鳍吻鲋、异鳔鳅鮠、唇鳃、四川白甲鱼为对象,分别对测试其感应流速、临界游泳速度和爆发游泳速度。

(2)建议过鱼孔口近底边区域流速为1.0~1.2 m/s,其余高流速区适当放大至1.4~1.5 m/s;鱼道进口流速值为0.7~1.5 m/s,出鱼口设置在流速持续不小于0.3 m/s的水域,过鱼设施平均流速为0.6~1.0 m/s。

(3)测试水槽内鱼类存在被迫运动,而自然界中为自主运动,测试条件和自然条件存在一定差异,由于试验鱼样本数量有限,体长也相对集中;后期应强化鱼类游泳能力试验,开展鱼道过鱼效果监测和适应性管理。

参考文献

- 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,王伟营,王海龙,等,2018. 鱼感应流速对体长的响应及在过鱼设施流速设计中的应用[J]. 农业工程学报, 34(2): 176-181.
- 常勇,2015. 某水电站生态鱼道建设关键技术研究[D]. 杭州:浙江工商大学.
- 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.

- 郭维东,孟文,熊守纯,等,2015.同侧竖缝式鱼道结构优化数值模拟研究[J].长江科学院院报,32(2):48-52.
- 石小涛,陈求稳,黄应平,等,2011.鱼类通过鱼道内水流速度障碍能力的评估方法[J].生态学报,31(22):6967-6972.
- 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.
- 涂志英,袁喜,韩京成,等,2011.鱼类游泳能力研究进展[J].长江流域资源与环境,20(S1):59-65.
- 汪玲珑,王从锋,寇方露,等,2016.北盘江四种鱼类临界游泳速度研究[J].三峡大学学报(自然科学版),38(1):15-19.
- 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.
- 鲜雪梅,曹振东,付世建,2010.4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),27(4):16-20.
- 熊锋,王从锋,刘德富,等,2014.松花江流域典型鱼类的游泳能力比较实验研究[J].三峡大学学报(自然科学版),36(4):14-18.
- 叶超,2014.流速对长薄鳅游泳行为及运动能量代谢的影响[D].重庆:西南大学.
- 叶妙荣,傅天佑,1987.四川大渡河的鱼类资源[J].资源开发与市场,(2):37-40.
- 于晓明,张秀梅,2011.鱼类游泳能力测定方法的研究进展[J].南方水产科学,7(4):76-84.
- 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.
- 中国电建集团华东勘测设计研究院,2012.大渡河安谷电站水生态影响评价专题研究报告[R].杭州:中国电建集团华东勘测设计研究院.
- Beach M H, 1984. Fish pass design criteria for the design and approval of fish passes and other structures to facilitate the passage of migratory fishes in rivers[R]. Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, Directorate of Fisheries Research Lowestoft, Fisheries Research Technical Report.
- Castro-Santos T, 2005. Optimal swim speeds for traversing velocity barriers: an analysis of volitional high-speed swimming behavior of migratory fishes[J]. The Journal of Experimental Biology, 208(3):421-432.
- Castro-Santos T, Cotel A, Webb P W, 2009. Fishway evaluations for better bioengineering-an integrative approach [J]. American Fisheries Society Symposium, 69:557-575.
- Choi J W, Park C S, An K G, 2016. Development of Fishway Assessment Model based on the Fishway Structure, Hydrology and Biological Characteristics in Lotic Ecosystem[J]. Journal of Ecology & Environment, 39(1):71-80.
- Clay C H, 1995. Design of fishways and other fish facilities [M]. London: CRC Press.
- Hasler C T, Suski C D, Hanson K C, et al, 2009. Effect of water temperature on laboratory swimming performance and natural activity levels of adult largemouth bass[J]. Canadian Journal of Zoology, 87(7):589-596.
- Hinch S G, Standen E M, Healey M C, et al, 2002. Swimming patterns and behaviour of upriver-migrating adult pink (*Oncorhynchus gorbuscha*) and sockeye (*O. nerka*) salmon as assessed by EMG telemetry in the Fraser River, British Columbia, Canada [J]. Hydrobiologia, 483:147-160.
- Kieffer J D, 2010. Perspective-Exercise in fish: 50+ years and going strong [J]. Comparative Biochemistry & Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology, 156(2):163-168.
- Kim J H, Yoon J D, Baek S H, et al, 2016. Estimation of optimal ecological flowrates for fish habitats in a nature-like fishway of a large river[J]. Journal of Ecology & Environment, 39(1):43-49.
- Plaut I, 2001. Critical swimming speed: its ecological relevance[J]. Comparative Biochemistry & Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology, 131(1):41-50.
- Van d O R, Beyer J, Vermeulen N P, 2003. Fish bioaccumulation and biomarkers in environmental risk assessment: a review[J]. Environmental Toxicology & Pharmacology, 13(2):57-149.

(责任编辑 万月华)

Swimming Capability of Six Typical Fish Species from the Lower Dadu River

DING Shao-bo¹, SHI Jia-yue², HUANG Bin², ZHAO Shuang³

1. Beijing Zhong Huan Ge Yi Technology Consulting CO., Ltd., Beijing 100012, P.R.China;
2. Power China Huadong Engineering Corporation, Hangzhou 311122, P.R.China;
3. Zhejiang Radio & Television University, Hangzhou 310030, P.R.China)

Abstract: The swimming ability of target fish species provides an important reference for fish passage design. In this study, the swimming ability of six typical fish species from the lower reaches of Dadu River were tested by measuring the induced velocity, critical swimming speed and burst swimming speed. The objective was to study fish behavior and provide basic data for fish passage design. The swimming ability test was carried out in a LOGIGO SYSTEM SW10200 loop test flume (water temperature, 18.9–24.3°C; dissolved oxygen, 5.58–8.17 mg/L). Prior to testing, fish were acclimated for 1h at 1.0 BL/s to relieve the stress of transfer to the flume. The six species tested were *Myxocyprinus asiaticus*, *Leptobotia elongata*, *Rhinogobio ventralis*, *Xenophysogobio boulengeri*, *Hemibarbus labeo* and *Onychostoma angustistomata*. Because the samples of *Onychostoma angustistomata* were not collected, the similar species *Onychostoma simum* was selected as the substitution of *Onychostoma angustistomata* for the test. Results are as follows: (1) The average induced velocity of *Onychostoma simum*, *Hemibarbus labeo*, *Xenophysogobio boulengeri*, *Myxocyprinus asiaticus*, *Leptobotia elongata*, *Rhinogobio ventralis* were, respectively, 9.9–12.3 cm/s, 8.5–11.1 cm/s, 12.0–17.5 cm/s, 8.3–13.5 cm/s, 14.7–18.1 cm/s and 14.0–18.6 cm/s; (2) The average critical swimming speeds were 106.3–131.1 cm/s for *Onychostoma simum*, 67.9–78.4 cm/s for *Hemibarbus labeo*, 72.9–80.5 cm/s for *Xenophysogobio boulengeri*, 78.1–89.9 cm/s for *Myxocyprinus asiaticus*, 89.6–109.9 cm/s for *Leptobotia elongata* and 83.1–103.8 cm/s for *Rhinogobio ventralis*; (3) The ranges of average burst swimming speed for *Onychostoma simum*, *Hemibarbus labeo*, *Xenophysogobio boulengeri*, *Myxocyprinus asiaticus*, *Leptobotia elongata*, *Rhinogobio ventralis* were 149.4–159.1 cm/s, 98.9–128.5 cm/s, 98.5–141.5 cm/s, 92.3–125.7 cm/s, 125.4–151.8 cm/s and 128.6–163.8 cm/s, respectively. Based on results for the species tested, we recommend a flow velocity of 1.0–1.2 m/s near the bottom of the fish passage and a higher velocity of 1.4–1.5 m/s in other areas, an entrance velocity of 0.7–1.5 m/s, an exit velocity of no less than 0.3 m/s, giving an average flow velocity for the fish passage of 0.6–1.0 m/s.

Key words: Dadu River; typical fish species; swimming ability; fish passage facility