

# 大渡河上游几种典型鱼类克流能力研究及应用

张东亚<sup>1</sup>, 贺春山<sup>2</sup>, 齐国新<sup>3</sup>, 李阳希<sup>4</sup>, 侯轶群<sup>4</sup>, 陶江平<sup>4</sup>

(1. 中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司, 北京 100024;

2. 中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都 610000;

3. 中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司, 云南 昆明 650051;

4. 水利部中国科学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, 湖北 武汉 430079)

**摘要:**探讨多种目标鱼类过鱼设施的流速设计,为大渡河上游集诱鱼设施的过鱼设计提供数据参考。以短尾高原鳅(*Triplophysa brevicauda*)、齐口裂腹鱼(*Schizothorax prenanti*)以及重口裂腹鱼(*Schizothorax davidi*)为研究对象,使用自制 Brett-type 鱼类游泳能力测试水槽对3种鱼类的临界游泳速度以及突进游泳速度进行测量。实验结果表明:(1)短尾高原鳅体长(9.92±1.15)cm,绝对和相对临界游泳速度分别为(0.91±0.13)m/s和(9.30±1.56)BL/s;齐口裂腹鱼体长(22.01±5.17)cm,绝对和相对临界游泳速度分别为(1.09±0.35)m/s和(4.89±0.93)BL/s;重口裂腹鱼体长(28.84±2.57)cm,绝对和相对临界游泳速度分别为(1.45±0.25)m/s和(5.00±0.48)BL/s。2种裂腹鱼绝对、相对临界游泳速度均与体长呈正相关关系,短尾高原鳅与体长并无显著性关系( $P>0.05$ )。(2)短尾高原鳅体长(9.66±1.07)cm,绝对和相对突进游泳速度分别为(1.06±0.12)m/s和(11.11±1.80)BL/s;齐口裂腹鱼体长(26.34±1.11)cm,绝对和相对突进游泳速度分别为(1.29±0.26)m/s和(4.86±0.81)BL/s;重口裂腹鱼体长(28.37±2.30)cm,绝对和相对突进游泳速度分别为(1.50±0.36)m/s和(5.24±0.89)BL/s。2种裂腹鱼绝对、相对突进游泳速度均与体长呈正相关关系,而短尾高原鳅与体长并无显著性关系( $P>0.05$ )。(3)*K-M*曲线表明,90%目标鱼类累计疲劳的临界和突进游泳速度分别为0.81、0.96 m/s。当以短尾高原鳅、齐口裂腹鱼以及重口裂腹鱼为过鱼对象时,建议过鱼设施入口设计流速为0.81~0.96 m/s,过鱼设施内部流速不应小于0.1 m/s,休息区设计流速为0.1~0.81 m/s。

**关键词:**短尾高原鳅;齐口裂腹鱼;重口裂腹鱼;临界游泳速度;突进游泳速度;游泳能力;过鱼设施

**中图分类号:**S917.4;S956 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2024)04-0108-09

大渡河位于四川西部,是岷江水系最大支流,发源于青海省果洛山东麓,分东西两源,东源为脚木足河,西源是绰斯甲河,两源于双江口汇合后始称大渡河。大渡河干流从20世纪50年代开始勘察、规划、设计和建设,到目前已建成猴子岩、黄金坪、长河坝、泸定、瀑布沟、大岗山等一批骨干工程,为国民经济和社会发展作出了巨大贡献。梯级电站的修建在带来大量绿色能源的同时,也对流域水生生态系统尤其是鱼类及其栖息生境造成了不利影响。电站建设形成阻隔,阻碍鱼类的基因交流,电站运行对径流的调节也对鱼类栖息生境造成了影响,而且高密度的梯级建设进一步加剧河流生境的破碎化程度,对

河流生态系统破坏很大,甚至导致某些鱼类种类数量急剧下降甚至灭绝。针对电站建设的阻隔影响,修建过鱼设施可以起到一定的减缓作用(Blake, 2004)。

修建过鱼设施首先需要鱼类的游泳能力数据。为了使鱼类顺利进入集诱鱼口或进鱼口,需要知道过鱼对象的感应流速(Brett et al, 1964);为了使过鱼对象顺利通过过鱼设施内部孔口、竖缝等流速控制处,需要掌握过鱼对象的临界游泳速度和突进游泳速度(王永猛等,2021)。过鱼对象的游泳能力数据可以通过实验水槽测出,不同鱼类的游泳能力不同。以往大多数的研究主要针对单目标鱼种进行(金志军等,2017;李志敏等,2018;李阳希等,2022),而当过鱼设施有多种过鱼对象时,其流速设计就需要综合考虑多种目标鱼类。因此,本文从鱼类的保护等级、濒危程度、洄游习性等方面确定大渡河上游过鱼对象,通过“Kaplan-Meier”(K-M)曲线(蔡露等,2021)来探讨多种目标鱼类的过鱼设施的流速设计,为大渡河上游集诱鱼设施的过鱼设计提供数据参考。

收稿日期:2022-04-18 修回日期:2024-03-08

基金项目:大渡河上游金川至丹巴河段水电开发与鱼类保护研究项目(W2020000522000)。

作者简介:张东亚,1981年生,男,正高级工程师,主要从事水电水利生态环境保护工作。E-mail:251592474@qq.com

通信作者:侯轶群,1986年生,女,副研究员,主要从事生态水力学研究。E-mail: greenhan16@163.com

# 1 材料与方法

## 1.1 研究对象

根据《大渡河金川至丹巴河段水生生物调查与栖息地规划报告》(水利部中科院水工程生态研究内部资料)和《大渡河金川至丹巴河段国家级保护鱼类调查与评估专题报告》(四川省水产研究内部

资料)以及相关历史资料记载,大渡河上游金川至丹巴河段分布有19种鱼类,隶属3目6科11属。其中,鲤形目3科8属15种,占评价河段鱼类总种数的78.95%;鲑形目1科2属3种,占总种数的15.79%;鲑形目1科1属1种,占总种数的5.26%。其中,土著鱼类15种,外来鱼类4种,调查河段鱼类种类组成如表1。

表1 调查河段鱼类种类组成

Tab.1 Fish species composition in the investigated river reach

鱼类		现场采集	国家级保护	省级保护	长江上游特有	红色名录	
鲑形目 Salmoniformes	鲑科 Salmonidae	川陕哲罗鲑 <i>Hucho bleereri</i>	-	一级		CR	
鲑形目 Siluriformes	鲟科 Sisoridae	青石爬鮡 <i>Euchiloglanis davidi</i>	+	二级	△	●	EN
		黄石爬鮡 <i>E.kishinouyei</i>	+			●	
	鲟科 Siluridae	大口鲶 <i>Silurus meridionalis</i>	+				
鲤形目 Cypriniformes	鲤科 Cyprinidae	齐口裂腹鱼 <i>Schizothorax prenanti</i>	+			●	VU
		重口裂腹鱼 <i>S.davidi</i>	+	二级	△	●	EN
		长须裂腹鱼 <i>S.prenanti</i>	+			●	CR
		大渡河裸裂尻 <i>Schizopygopsis chengi chengi</i>	+			●	EN
		软刺裸裂尻鱼 <i>S.malacanthus</i>	+				
		鲤 <i>Cyprinus carpio</i>	+				
		鲫 <i>Carassius auratus</i>	+				
	爬鮡科 Balitoridae	大渡河华吸鮡 <i>Sinogastromyzon daduheensis</i>	+				
		斯氏高原鳅 <i>Triplophysa stoliczkae</i>	+				
		东方高原鳅 <i>T.orientalis</i>	+				
	短尾高原鳅 <i>T.brevicauda</i>	+					
	鳅科 Cobitidae	细尾高原鳅 <i>T.stenura</i>	+				
	麻尔柯河高原鳅 <i>T.markehenensis</i>	+				●	
	戴氏山鳅 <i>Claea dabryi</i>	+				●	
	大鳞副泥鳅 <i>Paramisgurnus dabryanus</i>	+					

注: + 采集到标本; - 记录种; CR 极危、EN 濒危、VU 易危。

Note: + denotes collected specimens; - denotes recorded species; CR, EN and VU denote critically endangered, endangered, and vulnerable species.

根据水电开发环境保护的要求,过鱼对象的选择优先考虑本流域保护鱼类、珍稀濒危物种和特有种类。因此,川陕哲罗鲑、齐口裂腹鱼、重口裂腹鱼、长须裂腹鱼、青石爬鮡、黄石爬鮡、大渡河裸裂尻、麻尔柯河高原鳅、戴氏山鳅被确定为主要过鱼对象,短尾高原鳅、细尾高原鳅等鳅类为兼顾过鱼对象。根据现场采集情况,本次主要以齐口裂腹鱼、重口裂腹鱼和细尾高原鳅3种鱼作为实验对象开展游泳能力测试。

3种测试鱼于2020年8月多次在大渡河上游金川至丹巴河段通过地笼、撒网以及垂钓等方式捕获。将捕获的实验鱼在水池中暂养,每天换水1次,暂养时间

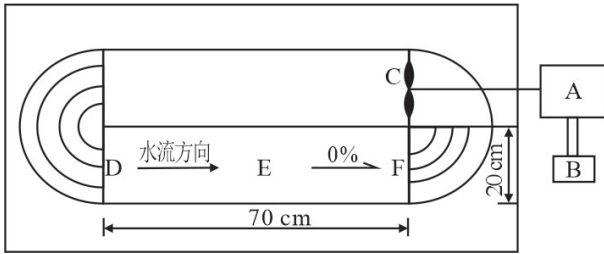
为3~5 d,期间未人工投喂饵料,溶解氧维持在6.0 mg/L以上。选择30尾健康的未受伤的成年鱼(各10尾)作为实验对象,齐口裂腹鱼、重口裂腹鱼和短尾高原鳅体长分别为14.5~31.5、23.6~35.5、7.5~12.8 cm。用曝气后的自来水进行实验,实验槽水温同暂养水温基本保持一致,为12.1~16.1℃。待测试全部结束后,将捕获的鱼类全部放至当地河流中。

## 1.2 实验装置

实验采用自制 Brett-type 游泳能力测试水槽(Cai et al, 2019),见图1。主要结构为一跑道型水槽,水槽一侧的水体由旋浆带动产生流速,经导水板、蜂窝网稳流装置后,进入另一侧。蜂窝结构和拦鱼网之间的区域

为测试区,尺寸(长×宽×高)为70 cm×20 cm×20 cm,体积为28 L、坡率为0。鱼类临界游泳速度及突进游泳速度在此区域下进行测试。

测试前使用挪威 Nortek 公司生产的 Vectrino 声学多普勒三维点式流速仪对装置流速进行标定,以便于推导测试变频器不同频率与其对应的水流速度之间的关系(图2)。针对测试电机频率每升高5 Hz 水槽中的流速进行测试,制作标准曲线,测试时选取测试区域的前、中、后各3个点的数值平均值。频率与流速的关系为: $y=0.0013x-0.0119(R^2=0.9933, P<0.001)$ 。



A: 电机; B: 变频器; C: 螺旋桨; D: 稳流器; E: 测试区; F: 拦网。

图1 自制游泳试验水槽示意

A: Motor; B: Transduce; C: Propeller; D: Multiaperture rectifier; E: Swimming chamber; F: Net.

Fig.1 Schematic diagram of the self-made swimming test flume

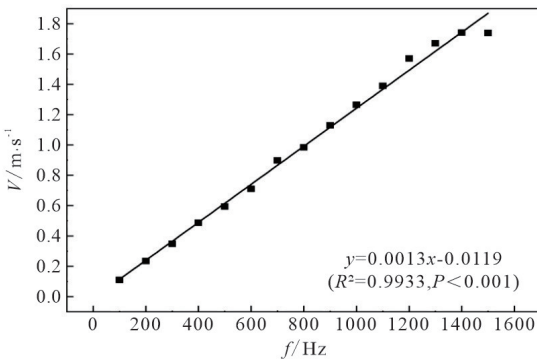


图2 测试段流速与频率的关系

Fig.2 Correlation between velocity and transducer frequency in the swimming chamber

### 1.3 游泳能力测试

1.3.1 临界游泳速度( $U_{crit}$ ) 按照“递增流速法”进行临界游泳速度( $U_{crit}$ )的测定,将单尾试验鱼放置于0.078 m/s的水流速度下适应1 h,然后每隔15 min将水流流速增加20%的流速预估值,当鱼体不能抵抗水流速度继续游泳,其尾部贴在下游筛网且轻拍水面20 s鱼体没有行动反应,则视其达到力竭状态, $U_{crit}$ 测试结束。最后取出疲劳后的试验鱼并测量其体质量及常规形态学参数。绝对临界游泳速度( $U_{crit}$ , cm/s)按照式①进行计算:

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

式中: $U_{max}$ 为试验鱼能够完成持续时间 $\Delta t$ 最大游泳速度, cm/s;  $t$ 为在最高流速下试验鱼游泳的时间(min);  $s$ ;  $\Delta t$ 为改变流速的时间间隔(本研究取15 min), s;  $\Delta U$ 为水流流速的增量, cm/s。

相对临界游泳速度( $U'_{crit}$ , BL/s)按照式②进行计算:

$$U'_{crit} = \frac{U_{crit}}{BL} \quad (2)$$

式中: $U'_{crit}$ 为相对临界游泳速度(BL/s), cm/s; BL为实验鱼的体长, cm。当实验鱼的横截面积大于实验测试区横截面积10.0%时,会引起堵塞效应,则需要对测试结果进行校正。本研究所用试验鱼的最大横截面积均小于测试实验区横截面积的10.0%,故不需要校正。

1.3.2 突进游泳速度( $U_{burst}$ ) 突进游泳速度与临界游泳速度的测试方法和计算公式基本一致,按照“递增流速法”进行 $U_{burst}$ 的测定。只是将流速递增时间间隔改为20 s,流速递增间隔仍为20%的流速预估值,此时鱼类力竭时对应的流速为突进游泳速度(Webb, 1993)。突进游泳速的计算如式③所示。

$$U_{burst} = U + \frac{t}{\Delta t} \Delta U \quad (3)$$

式中: $U_{burst}$ 为绝对突进游泳速度, cm/s;  $U$ 为试验鱼疲劳前水流速度, cm/s;  $\Delta U$ 为流速增量, cm/s;  $t$ 为该时段实验鱼疲劳时所用的时间, s;  $\Delta t$ 为改变流速时间的间隔, s。

相对突进游泳速度按照式④计算:

$$U'_{burst} = \frac{U_{burst}}{BL} \quad (4)$$

式中: $U'_{burst}$ 为相对突进游泳速度, BL/s; BL为实验鱼体长, cm。

待3种实验鱼游泳能力指标全部测试结束后,分别统计每条试验鱼的形态学参数。

### 1.4 数据处理

采用 Origin 2019 软件进行处理和绘图,采用 SPSS 进行双变量相关分析(bivariate correlation)检验试验鱼3种游泳能力指标与其体长之间的关系。使用生存曲线(Kaplan-Meier)表示在临界游泳速度或突进游泳速度测试时的某流速条件下未疲劳鱼类数量的百分比(Brett, 1964)。统计值使用平均值±标准差(mean±SD)表示,差异显著水平为 $P<0.05$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 临界游泳速度

3种实验鱼的绝对、相对临界游泳速度测试结果如表2。3种实验鱼的绝对临界游泳速度大小为:短尾高原鳅<齐口裂腹鱼<重口裂腹鱼。

如图3所示,短尾高原鳅绝对临界游泳速度与体长并无显著关系( $P>0.05$ );齐口裂腹鱼、重口裂腹鱼的绝对临界游泳速度均随体长增大而增大,其拟合关系式分别为: $U_{crit}=0.0522BL-0.0492$  ( $R^2=0.8369, P<0.05$ )、 $U_{crit}=0.0808BL-0.8831$  ( $R^2=0.7744, P<0.05$ ) ( $R^2=0.9091, P<0.05$ )。而齐口裂腹鱼、重口裂腹鱼以及短尾高原鳅的相对临界游泳速度与体长均没有显著

性关系( $P>0.05$ )。

### 2.2 突进游泳速度

3种实验鱼的绝对、相对突进游泳速度测试结果如表3。3种实验鱼的绝对突进游泳速度大小为:短尾高原鳅<齐口裂腹鱼<重口裂腹鱼。

如图4所示,齐口裂腹鱼、重口裂腹鱼的绝对突进游泳速度以及相对突进游泳速度均随体长增大而增大,拟合关系分别为  $U_{burst}=0.2275BL-4.703$  ( $R^2=0.9194, P<0.05$ )、 $U_{burst}=0.1211BL+0.8379$  ( $R^2=0.9523, P<0.05$ ) 和  $U'_{burst}=0.6835BL-13.141$  ( $R^2=0.8746, P<0.05$ )、 $U'_{burst}=0.3379BL-4.3477$  ( $R^2=0.774, P<0.05$ )。而短尾高原鳅的绝对、相对突进游泳速度与体长均没有显著性关系( $P>0.05$ )。

表2 3种实验鱼的绝对/相对临界游泳速度

Tab.2 Absolute and relative critical swimming speed of the three tested fish species

鱼种	水温/°C	体长/cm	绝对临界游泳速度/m·s <sup>-1</sup>	相对临界游泳速度/BL·s <sup>-1</sup>
齐口裂腹鱼	14.03±1.35	22.01±5.17	1.09±0.35	4.89±0.93
重口裂腹鱼	14.14±1.15	28.84±2.57	1.45±0.24	5.00±0.48
短尾高原鳅	14.10±1.28	9.92±1.15	0.91±0.13	9.30±1.56

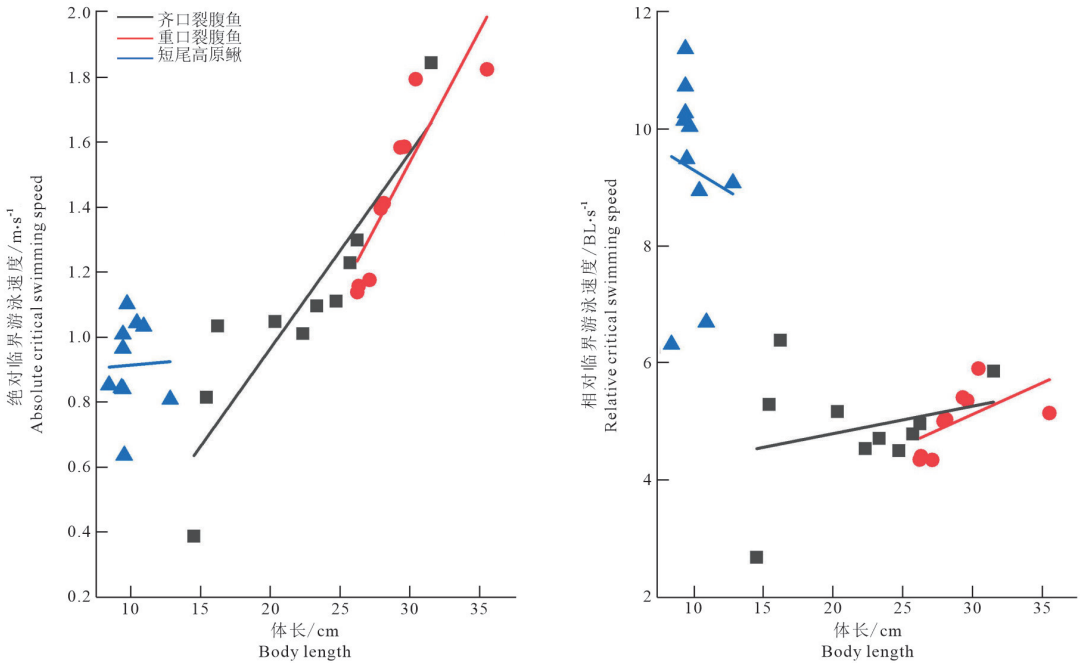


图3 3种实验鱼绝对/相对临界游泳速度与体长相关关系

Fig.3 Relationship between absolute/relative critical swimming speed and body length of the three tested fish species

表3 3种实验鱼绝对/相对突进游泳速度

Tab.3 Absolute / relative burst swimming speed of the three tested fish species

鱼种	水温/°C	体长/cm	绝对突进游泳速度/m·s <sup>-1</sup>	相对突进游泳速度/BL·s <sup>-1</sup>
齐口裂腹鱼	12.9±0.77	26.34±1.11	1.29±0.26	4.86±0.81
重口裂腹鱼	13.2±1.04	28.37±2.30	1.50±0.36	5.24±0.89
短尾高原鳅	13.0±1.07	9.66±1.07	1.06±0.12	11.11±1.8

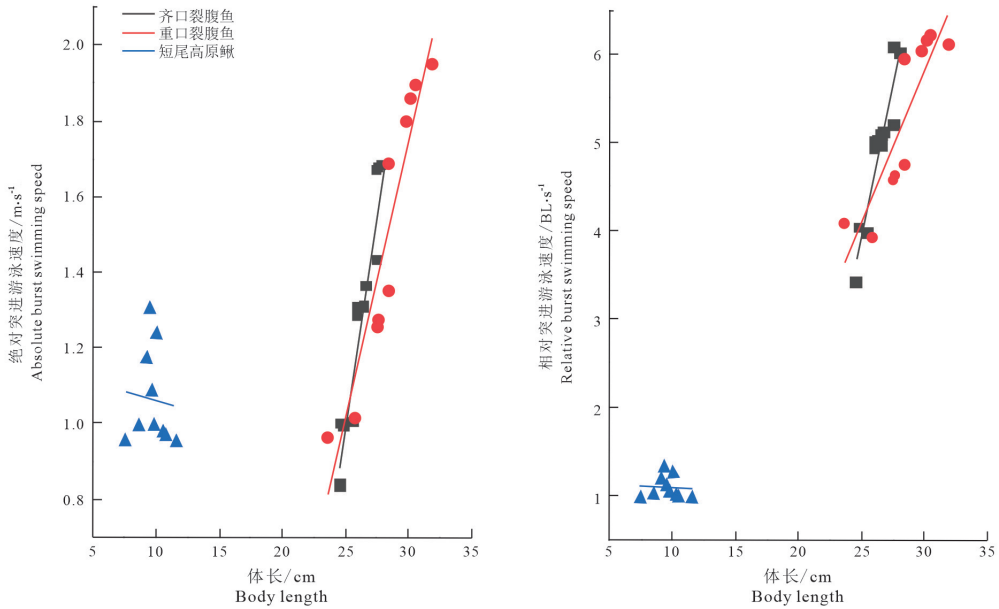


图 4 3 种实验鱼绝对/相对突进游泳速度与体长相关关系

Fig.4 Relationship between absolute/ relative burst swimming speed and body length of the three tested fish species

### 2.3 3 种鱼类游泳能力累计疲劳率与流速关系

通过“生存分析”方法导出的 Kaplan-Meier 曲线, 得出 3 种实验鱼在水流中的累积疲劳(临界游泳速度和突进游泳速度)百分比曲线, 如图 5 所示。结果表明, 当百分比为 90 时的临界游泳速度以及突进游泳速度分别为 0.81、0.96 m/s。

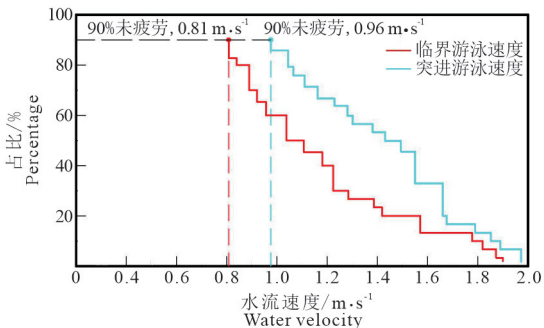


图 5 3 种实验鱼临界游泳速度和突进游泳速度的累计疲劳率与水流流速的关系

Fig.5 Relationship between cumulative fatigue rate and velocity in critical swimming speed test and burst swimming speed test of the three tested fish species

## 3 讨论

### 3.1 影响鱼类游泳能力的因素

临界游泳速度通常用来评价鱼类在大自然中的稳定游泳状态, 是鱼类有氧运动的重要评价指标 (Brett, 1964)。在自然水体中, 鱼类的稳定游泳是一

种常见的游泳类型, 包括日常巡游、食物搜寻、栖息生境的寻找、鱼体维持及洄游等生命活动 (Plaut, 2001; Blake, 2004); 而突进游泳速度通常用来评价鱼类在大自然中的非稳定游动, 是鱼类无氧运动的重要评价指标。在自然界中, 鱼类的非稳定游泳与求偶展示、种内竞争、逃避敌害和猎物捕获及穿越激流等行为有关 (Boisclair, 1993)。影响鱼类游泳能力因素有很多, 主要有生物因素以及非生物因素。生物因素主要有鱼类的体长、种类以及体型等, 而非生物因素主要是指水体的温度、水流流速以及声音、光等。本文的实验结果表明尽管齐口裂腹鱼和重口裂腹鱼均生活在急流峡谷河段且均为裂腹鱼属, 但重口裂腹鱼的绝对临界游泳速度和突进游泳速度均大于齐口裂腹鱼, 其原因可能在于体长差异。本次实验测试的重口裂腹鱼体长是齐口裂腹鱼的 1.3 倍, 一般认为体长越大的鱼类其游泳能力越强 (Blake et al, 1983), 此外, 3 种实验鱼的绝对临界游泳速度以及绝对突进游泳速度均随体长增大而增大也进一步说明体长对鱼类游泳能力的影响。其次短尾高原鳅绝对临界游泳速度以及绝对突进游泳速度均小于 2 种裂腹鱼, 产生这样的原因除了体长的影响外, 还可能由于种属的不同。不同种属鱼类之间形态结构不同, 鱼类游泳能力也会有一定差异。鱼类肌肉质量与拖拽力之间有着复杂的关系, 并且是随着鱼类的形态和大小而变化。当鱼体表面积和肌肉质量增大, 鱼类的绝对游泳速度也会增大 (蔡露

等,2021)。不少学者对封闭式水槽的准确性提出了质疑(Peake & Farrell, 2004), Morita & Yamamoto (2002)认为封闭式水槽测试区域相对较小,空间的限制会降低鱼类常规游泳率。而雷青松(2020)的研究也表明,鱼类在开放水槽式中测试的游泳速度比在封闭水槽中测试的大。

### 3.2 不同种属鱼类游泳能力比较

不同种属鱼类之间游泳能力有所不同,本文统计了裂腹鱼亚科、鳅科以及鲤亚科游泳能力值(表4),并拟合了其与体长的关系(图6)。尽管鳅科体长整体小于裂腹鱼亚科以及鲤亚科,但是体长为15.58~28.84 cm的裂腹鱼亚科绝对临界游泳速度(0.81~1.45 m/s)与体

表4 裂腹鱼亚科、鳅科以及鲤亚科游泳能力比较

Tab.4 Comparison of swimming performance of Schizothorax, Cobitidae and Cyprinidae species

鱼类	水温/℃	体长/cm	绝对临界游泳速度/m·s <sup>-1</sup>	体长/cm	突进游泳速度/m·s <sup>-1</sup>	参考文献	
裂腹鱼亚科 Schizothoracinae	大渡河软刺裸裂尻鱼 <i>S.malacanthus</i>	11.31 ±0.5	15.58±3.4	0.896±0.177	15.21±3.3	1.255±0.1	李阳希等, 2022
	异齿裂腹鱼 <i>S.oconnori</i>	16.00±1.0	27.00±4.0	0.95±0.09	30.90±3.9	1.53±0.24	Hou et al, 2018
	长丝裂腹鱼 <i>S.dolichonema</i>	15.67 ±1.4	17.86±4.5	0.81±0.20	15.9±3.94	1.49±0.26	王永猛等, 2020
	厚唇裂腹鱼 <i>S.irregularis</i>	12.3~15.6	20.13±3.9	1.17±12.3	19.71±4.0	2.1±3.9	李志敏等, 2018
鳅科 Cobitidae	红尾副鳅 <i>P.variegatus</i>	18.87±1.9	10.05	0.98±0.12	9.1	1.16±0.15	雷青松, 2020
	长身高原鳅 <i>Triplophysa tenuis</i>	17.38±1.4	10.95	0.95±0.23	10.25	1.16±0.21	
鲤亚科 Cyprininae	三角鲤 <i>Cyprinus multitaeniata</i>	29.1zz~31.8	26.30±1.5	0.94±0.10	-	1.16±0.11	蔡露等, 2021
	海南华鲮 <i>Sinibrama melrosei</i>	29.1~31.8	10.20±0.8	0.76±0.13	-	1.02±0.15	
	海南石鲮 <i>Sinibrama melrosei</i>	29.1~31.8	4.80±0.2	0.78±0.12	-	0.92±0.12	
	日本鳊鲃 <i>Anguilla japonica</i>	29.1~31.8	22.00±2.5	0.60±0.05	-	0.75±0.12	
	锯齿海南鲮 <i>Hainania serrata</i>	29.1~31.8	16.10±0.7	0.85±0.15	-	1.11±0.18	

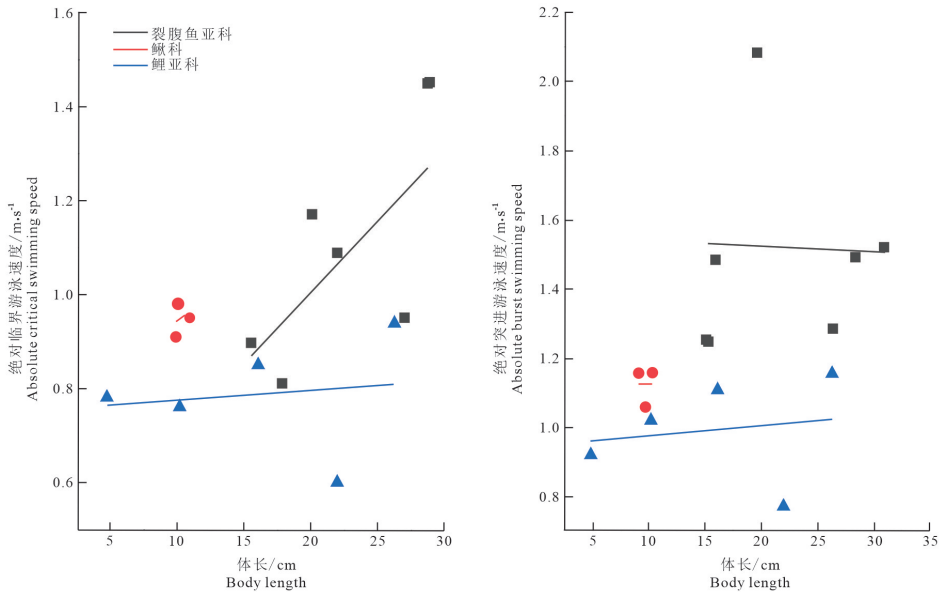


图6 裂腹鱼亚科、鳅科以及鲤亚科临界、突进游泳速度与体长关系

Fig.6 Correlations of the absolute critical (a) and the absolute burst (b) swimming speed with body length for species of Schizothorax, Cobitidae and Cyprinidae species

长为 9.1~10.95 cm 的鳅科绝对临界游泳速度(0.91~0.98 m/s)整体相差不大,而均大于蔡露等(2021)测试的 5 种鲤亚科鱼类(体长 4.6~27.5 cm,临界游泳速度 0.56~1.17 m/s)。究其原因,体长并不是影响鱼种属间游泳能力差异的主要因素,鱼类的栖息环境也是导致鱼类之间游泳能力差异的原因之一。本文研究的 3 种鱼类以及参考文献中的裂腹鱼亚科和鳅科均生活在高山急流区。鱼类在长期的进化与适应过程中形成了与环境相适宜的生理代谢特征以及形态特征,导致其具有更强的抗水流冲击能力(王猛和罗恩,2020),即游泳能力更强。裂腹鱼亚类突进游泳速度均大于鲤亚科和鳅科,突进游泳速度可以反映鱼类的加速能力。具有纺锤形体型的鱼类(如本研究以及参考文献中裂腹鱼)具有更强的加速能力,而具有侧扁形的鱼类,如三角鲤(*Cyprinus multitaenia-ta*)、海南华鳊(*Sinibrama melrosei*)、海南石鲂(*Anguilla japonica*)和锯齿海南鳅(*Hainania serrata*)和棒形鱼类,如日本鳗鲡(*Anguilla japonica*),加速能力相对较弱,可能是体型的影响导致 3 种鱼属突进游泳速度之间具有一定的差异性。

### 3.3 过鱼设施的流速设计建议

基于鱼类游泳能力测试结果,本文针对过鱼设施的流速设计提出如下建议。

(1)进口流速:过鱼设施的入口流速不应过小,过小对鱼类的吸引力不足,过大则又会妨碍鱼类进入。因此过鱼设施入口的流速设计应大于临界游泳速度且小于突进游泳速度(王永猛等,2020)。基于 *K-M* 百分比曲线,为了保证 90% 的鱼类能顺利进入过鱼设施入口,建议入口的流速为 0.81~0.96 m/s。

(2)过鱼设施整体平均流速:鱼类成功进入过鱼设施入口后到达过鱼设施内部,其流速不能低于鱼类的感应流速,否则会失去趋流性,因此建议过鱼设施整体的平均流速应大于感应流速且小于鱼类的临界游泳速度。当过鱼对象为本研究的 3 种实验鱼时,为保证 90% 的鱼类能顺利在过鱼设施通道内不迷失方向,建议过鱼设施内部的整体平均流速应大于鱼类的感应流速即 0.1 m/s(李阳希等,2021),小于临界游泳速度 0.81 m/s。

(3)过鱼设施休息区流速:在过鱼设施休息区中,鱼类为了通过较长的过鱼设施,必须保持足够的体能,因此过鱼设施流速的设计需要考虑鱼类是否会产生疲劳。过鱼设施内部流速不能过大,否则会导致鱼类经常使用“加速-滑行”这种非稳定的模式(Fish et al, 1991; Wu et al, 2007)。鱼类非稳定模式

能量来源主要由白肌无氧代谢供能(Marras et al, 2013),假如鱼类经常使用非稳定模式,则会导致体内产生大量乳酸从而导致鱼类迅速疲劳。故在过鱼设施内部应提供低流速区的休息场所,待鱼类恢复体能后能继续上溯,但是过鱼设施内部流速也不能太低,否则鱼类会迷失方向。因此当过鱼对象为齐口裂腹鱼、重口裂腹鱼以及短尾高原鳅时,建议休息区内的流速应介于感应流速与临界游泳速度之间,即 0.1~0.81 m/s。

(4)过鱼设施孔口流速:临界游泳速度以及突进速度是鱼类能否通过鱼道孔口或竖缝等高流速区的关键。一般认为鱼类通过过鱼设施高流速区时运用的是突进游泳速度,则过鱼设施孔口流速,应介于临界游泳速度与突进游泳速度之间(Blake, 1983),即 0.81~0.96 m/s。

(5)过鱼设施出口流速:为了使鱼类游出过鱼设施后不影响其在上游的正常洄游,过鱼设施的出口处应比较平稳,因此过鱼设施的出口位置应该布置在流速相对稳定的水域。其次为了保证鱼类不会失去趋流性,迷失方向,过鱼设施出口流速仍然需要大于鱼类的感应流速。因此,为保证 90% 鱼类顺利游出过鱼通道,建议过鱼设施出口位置应设置在流速不小于 0.1 m/s 的水域。

### 参考文献

- 蔡露,侯铁群,金瑶,等,2021. 鱼游泳能力对体长的响应及其在鱼道设计中的应用[J]. 农业工程学报,37(5):209-215.
- 金志军,陈小龙,王从锋,等,2017. 应用于鱼道设计的马口鱼(*Opsariichthys bidens*)游泳能力[J]. 生态学杂志,36(9):2678-2684.
- 雷青松,2020. 典型裂腹鱼和鳅类游泳能力测试研究及鱼道初步设计[D]. 宜昌:三峡大学.
- 李阳希,侯铁群,陶江平,等,2021. 大渡河下游 3 种鱼感应流速比较[J]. 生态学杂志,40(10):3214-3220.
- 李阳希,朱正强,侯铁群,等,2022,张东亚. 大渡河软刺裸裂尻鱼(*Schizopygopsis malacanthus*)游泳能力研究[J]. 水生态学杂志,43(3):121-127.
- 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.
- 王猛,罗恩,2020. 我国鲤科鱼类游泳能力综述[J]. 江西水产科技, (4):32-36.
- 王兴勇,郭军,2005. 国内外鱼道研究与建设[J]. 中国水利水电科学研究院学报,3(3):222-228.
- 王永猛,李志敏,涂志英,等,2020. 基于雅砻江两种裂腹鱼游泳能力的鱼道设计[J]. 应用生态学报,31(8):2785-2792.
- 王永猛,柯森繁,林晨宇,等,2021. 红河(元江)流域的典型鱼

- 类游泳能力探究及在过鱼设施流速设计中的应用[J]. 湖泊科学,33(6):1820-1831.
- 周兴华,向泉,陈建,2006. 重口裂腹鱼肌肉营养成分的分析[J]. 营养学报, (6):536-537.
- 朱松泉,1989. 中国条鳅志[M]. 南京:江苏科学技术出版社.
- Blake R W,1983. Functional design and burst- and- coast swimming in fishes[J]. Canadian Journal of Zoology, 61(11): 2491-2494 .
- Blake R W, 2004. Fish functional design and swimming performance[J]. Journal of Fish Biology,65(5):1193-1222.
- 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 the Fisheries Research Board of Canada, 21(5): 1183-1226.
- Cai L, Zhang P, Johnson D M, et al, 2019. Effects of prolonged and burst swimming on subsequent burst swimming performance of *Gymnocypris potanini firmispinatus* (Actinopterygii, Cyprinidae)[J]. Hydrobiologia, 843(1):201-209.
- Fish F E , Fegely J F , Xanthopoulos C J, 1991. Burst-and-coast swimming in schooling fish (*Notemigonus crysoleucas*) with implications for energy economy[J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology, 100 (3):633-637.
- Hou Y,Cai L , Wang X , et al, 2018. Swimming performance of 12 Schizothoracinae species from five rivers [J]. Journal of Fish Biology, 92(6):2022-2028.
- Marras S, Killen S S, Domenici P, et al, 2013. Relationships among traits of aerobic and anaerobic swimming performance in individual European Sea bass *Dicentrarchus labrax*[J]. PLoS One, 8(9):e72815.
- Morita K, Yamamoto S, 2002. Effects of habitat fragmentation by damming on the persistence of stream-dwelling charr populations [J]. Conservation Biology, 16(5):1318-1323.
- Peake S J, Farrell A P, 2004. Locomotory behaviour and post-exercise physiology in relation to swimming speed, gait transition and metabolism in free-swimming smallmouth bass (*Micropterus dolomieu*)[J]. The Journal of Experimental Biology,207(Pt 9): 1563-1575.
- Plaut I, 2001. Critical swimming speed: its ecological relevance [J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part A, Molecular & Integrative Physiology, 131(1):41-50.
- Webb P W, 1993. Swimming[M]//Evans D H. The Physiology of Fishes. Boca Raton:CRC Press: 47-73.
- Wu G H, Yang Y, Zeng L J, 2007. Kinematics, hydrodynamics and energetic advantages of burst-and-coast swimming of koi carps (*Cyprinus carpio koi*)[J]. The Journal of Experimental Biology, 210(Pt 12):2181-2191.

(责任编辑 郑金秀)



## Measurement and Application of Swimming Capability for Three Typical Fish Species of the Upper Dadu River

ZHANG Dong-ya<sup>1</sup>, HE Chun-shan<sup>2</sup>, QI Guo-xin<sup>3</sup>, LI Yang-xi<sup>4</sup>, HOU Yi-qun<sup>4</sup>, TAO Jiang-ping<sup>4</sup>

(1. Beijing Survey, Planning, Design and Research Institute of China Power Construction Group,

Beijing 100024, P. R. China;

2. China Seventh Engineering Bureau of Water Resources and Hydropower Co.,

Ltd. Chengdu 610000, P. R. China;

3. Power China Kunming Engineering Co., Ltd., Kunming 650051, P. R. China;

4. 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)

**Abstract:** In this study, we investigated the swimming performance of three fish species typical of Dadu River and recommended flow velocity criteria for fish passages designed to target the species. Our aim was to provide data to support fish passage design for the upper Dadu River. *Triplophysa breviceauda*, *Schizothorax prenanti* and *Schizothorax davidi* were selected for study, and the three test species were collected in the Jinchuan-Danba section of Dadu River in August 2020, with respective average body lengths of 14.5–31.5, 23.6–35.5 and 7.5–12.8 cm. After acclimation for 3–5 days, 10 healthy fish of each species were selected for critical and burst speed swimming tests conducted in a self-made Brett-type swimming flume using the stepped velocity test protocol. Results show: (1) The body length, absolute and relative critical swimming speed of the three species were (9.92±1.15) cm, (0.91±0.13) m/s and (9.30±1.56) BL/s for *T. breviceauda*; (22.01±5.17) cm, (1.09±0.35) m/s and (4.89±0.93) BL/s for *S. prenanti*; (28.84±2.57) cm, (1.45±0.25) m/s and (5.00±0.48) BL/s for *S. davidi*. The absolute critical swimming speed of the two *Schizothorax* species were positively correlated with body length, but the relative critical swimming speeds were not and there was no significant correlations between absolute and relative critical swimming speed and body length of *T. breviceauda* ( $P>0.05$ ). (2) The body length, absolute and relative burst swimming speed of the three species were as follows: (9.66±1.07) cm, (1.06±0.12) m/s and (11.11±1.80) BL/s for *T. breviceauda*; (26.34±1.11) cm, (1.29±0.26) m/s and (4.86±0.81) for *S. prenanti*; (28.37±2.30) cm, (1.50±0.36) m/s and (5.24±0.89) BL/s for *S. davidi*. The absolute and relative burst swimming speeds of the two *Schizothorax* species were positively correlated with body length, but the same correlations were not significant for *T. breviceauda* ( $P>0.05$ ). (3) The Kaplan-Meier (*K-M*) curves show that the critical and burst swimming speeds of target fish at a 90% cumulative fatigue rate were 0.81 and 0.96 m/s, respectively. Thus, if the target fish species are *T. breviceauda*, *S. prenanti* and *S. davidi*, we recommend an entrance flow velocity of 0.81–0.96 m/s, a fish passage velocity not less than 0.1 m/s, and a rest area flow velocity of 0.1–0.81 m/s.

**Key words:** *Triplophysa breviceauda*; *Schizothorax prenanti*; *Schizothorax davidi*; critical swimming speed; burst swimming speed; swimming ability; fish passage