

# 黑水河3种鳅科鱼类感应流速的初步研究

张连博<sup>1</sup>, 姚维志<sup>1</sup>, 宋一清<sup>1,2</sup>

(1. 西南大学水产学院, 渔业资源环境研究中心, 水产科学重庆市重点实验室, 重庆 400716;

2. 上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200335)

**摘要:** 感应流速是鱼类游泳特性的关键指标之一, 获取鱼类的感应流速将有助于过鱼设施低流速区的流速设计和增殖放流地点的选择。以黑水河红尾副鳅(*Paracobitis variegates*)、横纹南鳅(*Schistura fasciolatus*)和山鳅(*Oreias dabryi*)为研究对象, 利用递增流速法测试其感应流速。结果显示, 3种鳅科鱼类的绝对感应流速为5.7~13.2 cm/s, 相对感应流速为0.6~1.5 BL/s。红尾副鳅的绝对感应流速显著高于横纹南鳅和山鳅, 相对感应流速显著低于横纹南鳅和山鳅( $P < 0.05$ ), 横纹南鳅与山鳅无显著差异( $P > 0.05$ )。所有测试鱼的绝对感应流速和相对感应流速均与体长呈显著相关关系, 绝对感应流速随体长的增加而增加, 相对感应流速随着体长的增加而减少, 体长可能是影响3种鳅科鱼类感应流速差异的主要原因。所有测试鱼的趋流率与流速呈指数函数, 关系为  $P_R = 97.93e^{-0.91V + 6.34}$ 。研究结果可为金沙江流域鱼类行为学研究提供基础资料, 为黑水河过鱼设施设计和增殖放流地点选择提供参考和依据。

**关键词:** 红尾副鳅; 横纹南鳅; 山鳅; 感应流速; 趋流率; 黑水河

**中图分类号:** X826    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1674-3075(2022)02-0102-06

拦河筑坝水利水电工程直接破坏了河流的连通性, 阻碍上下游物质的运输、鱼类的基因交流和洄游路线(Neraas & Spruell, 2001; Roberts, 2013)。由其导致的河流生境破碎化已经成为鱼类生存的主要威胁之一(Nilsson et al, 2005; Song et al, 2018)。为减缓水利水电工程对鱼类资源的不利影响, 修建过鱼设施是目前有效的生态补偿措施之一(陈凯麒等, 2013; Shi et al, 2015)。过鱼设施主要包括鱼道、仿自然通道、集运鱼设施、鱼闸和升鱼机, 能够辅助鱼类等水生生物通过闸、坝等建筑物或天然障碍, 使其到达产卵场、索饵场或越冬场等重要生活场所, 对促进水生生物基因交流、保证种质资源和维护种群结构具有重要作用(郑金秀和韩德举, 2013; 祁昌军等, 2017)。过鱼设施的成功设计不仅与水力特征的流速和流态相关, 而且与过鱼对象的游泳特性密切相关(Orsborn, 1987; 蔡露等, 2018a)。

黑水河是金沙江下游左岸的一级支流, 位于白鹤滩水电站上游约30 km, 全长173 km, 鱼类资源丰富,

是金沙江下游干流大规模水电开发背景下白鹤滩水库干流鱼类重要的替代生境和优先保护支流(高婷等, 2012; 张雄等, 2014)。目前黑水河干流自上至下有苏家湾、公德房、松新和老木河4个梯级开发的引水式电站, 分别形成2.3、4.0、7.2和3.2 km的减水河段(傅菁菁等, 2016); 这些水利工程是导致黑水河鱼类资源数量和质量显著下降的主要原因(Cheng et al, 2015; Zarfl et al, 2015)。环境保护部对乌东德及白鹤滩两水电站项目的环评批复文件中提出了恢复松新以下河道连通性等措施并进行黑水河鱼类栖息地修复。

建设过鱼设施可能成为缓解和修复水利工程对黑水河流域鱼类不利影响的有效手段(李志华等, 2009; Ficke et al, 2011)。因此, 掌握黑水河鱼类的游泳特性是过鱼设施成功设计和成功运行的关键; 其中, 感应流速(Induced velocity,  $U_{ind}$ )的测定具有重要的意义, 但相关研究比较匮乏。感应流速是指鱼类能够产生逆向水流行为反应的流速(何大仁和蔡厚才, 1998)。感应流速为过鱼设施的低流速设计提供科学依据, 例如在设计鱼道时, 如果在鱼道进出口或者池室内主流区的流速小于目标鱼类的感应流速, 目标鱼类将在进出口或池室内感受不到水流方向, 无法通过鱼道(白艳勤等, 2013); 此外, 增殖放流也是鱼类资源恢复的重要措施, 在此过程中, 如果选择流速较低的放流地点, 鱼类则会迷失方向, 可能导致其无法存活。

收稿日期: 2020-10-13    修回日期: 2021-11-29

基金项目: 国家自然科学基金(31700346); 西南大学博士基金(含引进人才计划)项目(SWU119046)。

作者简介: 张连博, 1996年生, 男, 硕士研究生, 专业方向为鱼类生态学。E-mail: 68852369@qq.com

通信作者: 宋一清, 1988年生, 女, 博士, 副研究员, 主要从事鱼类生态学研究。E-mail: y-tsing@163.com

红尾副鳅 (*Paracobitis variegates*)、横纹南鳅 (*Schistura fasciolatus*) 和山鳅 (*Oreias dabryi*) 都隶属鲤形目 (Cypriniformes)、鳅科 (Cobitidae)、条鳅亚科 (Nemacheilinae), 分别隶属副鳅属 (*Paracobitis*)、南鳅属 (*Schistura*) 和山鳅属 (*Oreias*), 这3种鳅科鱼类均在金沙江流域分布, 喜栖息在山涧溪流等流水环境 (丁瑞华, 1994)。目前, 对红尾副鳅的研究主要集中在消化系统结构、年龄与生长等生物学和人工繁殖等方面 (周中艳等, 2007; 陶聪等, 2008; 唐勇等, 2012), 尚未见横纹南鳅和山鳅的相关报道, 关于这3种鳅科鱼类感应流速的研究也未见报道。红尾副鳅是黑水河渔获物调查中的优势种 (杨志等, 2017; 宋一清等, 2018); 横纹南鳅和山鳅是黑水河鱼类栖息地生态修复项目的目标鱼类, 其中山鳅是长江上游特有鱼类 (丁瑞华, 1994; 上海勘测设计研究院有限公司, 2018)。本研究以红尾副鳅、横纹南鳅和山鳅为研究对象, 测试其感应流速, 以期为鱼类游泳能力的研究提供基础数据, 并为黑水河过鱼设施流速设计和增殖放流地点选择提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 鱼类样品收集

实验用红尾副鳅、横纹南鳅和山鳅全部来自黑水河地笼收集样品, 暂养于当地鱼类养殖场 (天然河水养殖)。实验前均禁食 24 h, 实验时间为 2018 年 4 月 29 日至 5 月 6 日, 随机选取其中 60 尾 (各 20 尾) 健康样品鱼开展研究。

### 1.2 实验装置

实验装置为封闭的鱼类游泳能力测试水槽 (图 1), 环形槽体积为 90 L, 游泳测试区的体积为 30 L, 规格为 75 cm×20 cm×20 cm。电动机功率 0.55 kW, 连接的变频器可以调节电动机的转数, 从而带动叶轮转动产生特定的流速。在游泳测试区前端设有蜂窝状的稳流装置, 可使流场稳定。变频器的变频范围为 0~50 Hz, 游泳测试区域流速为 5~150 cm/s。通过测量变频器的频率 ( $F$ ) 与游泳测试区的流速 ( $V$ ), 建立对应关系, 制作标准曲线 (图 2)。频率与流速的关系为:  $V = 0.0386F - 0.001$  ( $R^2 = 0.99$ )。

### 1.3 感应流速测定

本研究感应流速的测定采用“递增流速法”。分别选取 20 尾健康个体, 首先测量实验鱼的体长, 然后将其放置于实验水槽的游泳测试区中, 以 0.5 BL/s 的流速使其适应 1 h, 然后将流速调至 0, 使实验鱼的头部朝向与游泳测试区的流速方向相同, 并让实验鱼

稳定 5 s, 然后变频器以 0.5 Hz 为递增量 (即递增速度约为 1 cm/s), 5 s 为递增时间, 调整游泳测试区的水流速度。当实验鱼对水流做出反应调转头方向时 (即实验鱼逆向水流运动时), 记录此时游泳测试区的水流速度, 该流速即为实验鱼的绝对感应流速 (Absolutely induced velocity,  $U_{A-ind}$ , cm/s)。将实验鱼移出设备, 测量体重和全长。实验鱼的相对感应流速 (Relatively induced velocity,  $U_{R-ind}$ , BL/s) = 绝对感应流速/实验鱼体长 (cm)。



图 1 游泳能力测试水槽

Fig.1 Schematic diagram of the swimming velocity test flume

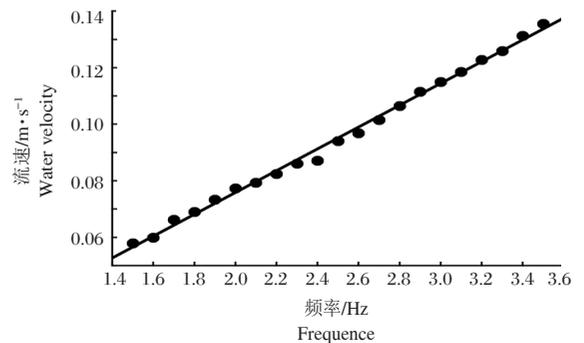


图 2 流速与电动机调节频率的关系

Fig.2 Relationship between water velocity and frequency of propeller

### 1.4 数据分析

趋流率 ( $P_R$ , %) 计算公式为:

$$P_R = N/N_t \times 100$$

式中:  $N$  为在特定流速条件下感受水流后作出逆向反应的实验鱼数量,  $N_t$  为进行测试的所有实验鱼总数。应用 SPSS 软件对趋流率  $P_R$  和流速  $V$  进行拟合 (蔡露等, 2018b)。

使用单因素方差分析 (One-way analysis of variance, ANOVA) 比较红尾副鳅、横纹南鳅和山鳅的感应流速和相对感应流速的差异, 如果有差异, 用 Tukey's post-hoc test 进行两两比较。感应流速与体长的相关性分析用 Pearson 检验。趋流率与流速的关系通过指数函数进行拟合。所有数据均使用 SPSS 20.0 统计软件进行处理, 显著水平为  $P < 0.05$ 。结果用 (平均值 ± 标准差) 表示。

## 2 结果

### 2.1 感应流速

实验统计得出 3 种鳅科鱼类的感应流速见表 1。ANOVA 结果显示, 3 种鳅科鱼类的绝对感应流速和相对感应流速均有显著差异(绝对感应流速:  $F=18.15$ ,  $df=59$ ,  $P<0.05$ ; 相对感应流速:  $F=17.23$ ,  $df=59$ ,  $P<0.05$ ); 两两比较发现, 红尾副鳅的绝对感应流速显著高于横纹南鳅与山鳅( $P<0.05$ ), 横纹南鳅和山鳅无显著差异( $P>0.05$ ); 红尾副鳅的相对感应流速显著低于横纹南鳅与山鳅( $P<0.05$ ), 横纹南鳅和山鳅无显著差异( $P>0.05$ )。

表 1 3 种鳅科鱼类的体指标和感应流速测定

Tab.1 Body length, body mass and induction velocity for the three Cobitidae species

种类	指标	水温/°C	体长/cm	体重/g	绝对感应流速/cm·s <sup>-1</sup>	相对感应流速/BL·s <sup>-1</sup>
红尾副鳅	范围	19.5~22.1	7.8~13.7	3.2~14.4	6.4~13.2	0.6~1.2
	均值	20.7±0.7	10.6±1.8	8.3±3.1	9.6±1.8	0.9±0.2
横纹南鳅	范围	19.7~21.6	5.0~7.8	1.6~6.2	5.7~9.3	0.9~1.4
	均值	20.3±0.5	6.4±0.9	3.5±1.5	7.5±0.9	1.2±0.1
山鳅	范围	19.6~21.6	5.3~8.2	2.0~8.3	6.2~8.9	0.9~1.5
	均值	20.1±0.5	6.6±1.0	4.4±2.0	7.6±0.9	1.2±0.2

### 2.2 感应流速与体长的关系

除了山鳅, 红尾副鳅和横纹南鳅的绝对感应流速随体长的增加而增加; 除了红尾副鳅, 横纹南鳅和山鳅的相对感应流速随体长的增加而减小。将红尾副鳅、横纹南鳅和山鳅作为整体研究, 发现绝对感应流速和相对感应流速均与体长呈显著相关关系, 绝对感应流速与体长呈显著正相关关系, 相对感应流速与体长呈显著负相关关系。3 种鳅科鱼类的感应流速与体长的相关分析见表 2 和图 3。

表 2 3 种鳅科鱼类的感应流速与体长的相关分析

Tab.2 Correlation analysis between induction velocity and fish body length for three Cobitidae species

种类	绝对感应流速( $U_{A-ind}$ ) 与体长(BL)		相对感应流速( $U_{R-ind}$ ) 与体长(BL)	
	关系式	相关性	关系式	相关性
红尾副鳅	$U_{A-ind}=0.49BL+5.91$	$r=0.50$	-	$r=-0.41$
横纹南鳅	$U_{A-ind}=0.56BL+3.88$	$r=0.58$	$U_{R-ind}=-0.10BL+1.81$	$r=-0.63$
山鳅	-	$r=0.26$	$U_{R-ind}=-0.14BL+2.01$	$r=-0.73$
		$P>0.05$	$(R^2=0.40, P<0.05)$	$P<0.05$

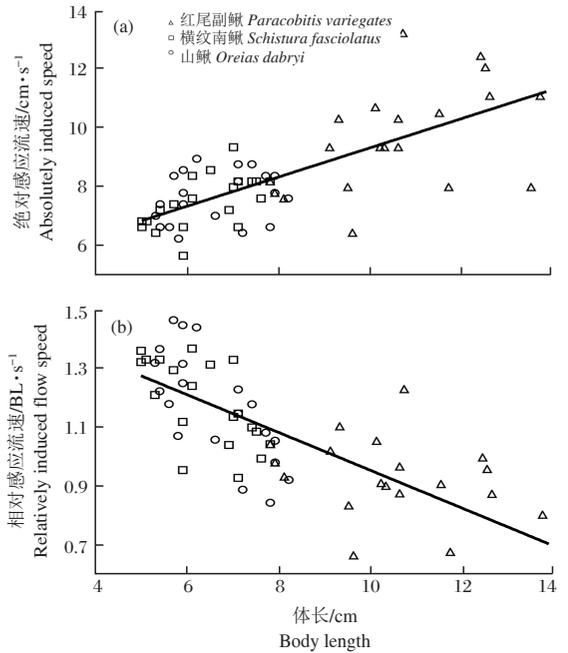


图 3 3 种鳅科鱼类绝对感应流速(a)和相对感应流速(b)与体长的关系

Fig.3 Correlation of absolute and relative induction velocity with body length for three Cobitidae species

### 2.3 趋流率

本研究发现趋流率( $P_R$ )与流速( $V$ )呈指数函数关系(图 4)。关系式为:

$$P_R=97.93e^{-0.91V+6.34} \quad (R^2=0.99, P<0.05)$$

回归分析显示, 3 种鳅科鱼类的趋流率随着流速的增加呈加速增长趋势, 当达到一定流速时(9 cm/s), 加速增长趋势逐渐变慢, 并逐渐接近 100%。当需要一定比例的鱼类在过鱼设施内或者放流地点朝着水流的方向游动时, 则可根据回归曲线找到特定趋流率对应的水流速度。如设定趋流率为 95%, 则本研究中对应的流速为 11 cm/s, 即过鱼设施低流速区或放流地点的最低流速至少应为 11 cm/s。

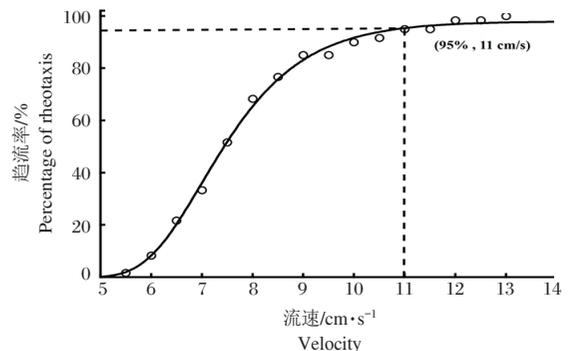


图 4 测试鱼类趋流率与水流速度的关系

Fig.4 Relationship between rheotaxis rate and water velocity

## 3 讨论

### 3.1 不同鱼类的感应流速存在明显差异

鱼类的感应流速与过鱼设施低流速区的设计密切相关(白艳勤等,2013;王博等,2013),但关于低流速区的流速设计研究较为缺乏。本研究结果显示,在水温19.5~22.1℃条件下,3种鳅科鱼类的感应流速较接近且对流速的感应较敏感,感应流速为5.7~13.2 cm/s(相对感应流速:0.6~1.5 BL/s),这与前人研究的光唇裂腹鱼(10.0~23.0 cm/s, 0.4~1.0 BL/s),澜沧裂腹鱼(10.0~18.0 cm/s, 0.4~0.9 BL/s),云南裂腹鱼(9.0~13.0 cm/s, 0.5~0.6 BL/s),灰裂腹鱼(10.0~16.0 cm/s, 0.6~0.8 BL/s),后背鲈鲤(7.0~12.0 cm/s, 0.7~1.2 BL/s)、异齿裂腹鱼(5.5~10.5 cm/s, 0.3~0.5 BL/s)、巨须裂腹鱼(4.9~12.9 cm/s, 0.2~0.5 BL/s)、拉萨裂腹鱼(5.2~10.1 cm/s, 0.4~0.6 BL/s)、拉萨裸裂尻(5.3~13.5 cm/s, 0.3~0.5 BL/s)和黑鲮(10.0~15.0 cm/s)的感应流速范围接近(张硕和陈勇,2005;白艳勤等,2013;蔡露等,2018b;姜昊等,2020)。然而,王晓臣和邢娟娟(2018)对鲤(0.1~9.5 cm/s, 0.0~0.3 BL/s)、鲫(0.3~7.2 cm/s, 0.0~0.3 BL/s)、鲢(0.1~9.5 cm/s, 0.0~0.3 BL/s)、鳊(0.5~4.3 cm/s, 0.0~0.1 BL/s)及蒙古鲌(0.1~3.9 cm/s, 0.0~0.2 BL/s)的感应流速研究发现,这5种鱼对水流变化的敏感程度显著高于其他鱼类。白艳勤等(2013)报道瓦氏黄颡鱼的感应流速在33 cm/s左右,显著高于本研究和其他已报道的鱼类,这些结果表明不同鱼种类之间存在显著差异。

### 3.2 生活环境和生态习性影响鱼类感流敏感度

感应流速的差异性可能与鱼类的生活环境和生态习性有关。例如:蒙古鲌为上层鱼类,游动能力强,游泳速度快;鲢、鳊和草鱼属于江湖洄游性鱼类,也具有较强的游泳能力;瓦氏黄颡鱼为定居型底栖鱼类,一般栖息于湖泊或者河流的缓流或者静水水域,游泳能力较弱(李明锋,2011)。由于各水层具有不同的流速,从上层至下层,水体的流速逐渐降低(杜浩等,2010)。生活在不同水层的鱼类对流速具有相应的适应性,因此上层鱼类对水流具有较高的敏感性;其次,流速的大小是具有洄游习性鱼类寻找洄游路线的依据之一,因此洄游性鱼类对流速的感应也相对敏感(杨宇等,2007;白艳勤等,2013)。本研究的3种鱼类均是底层小型鱼类,多生活在水流湍急的水域,因此对流速的感应相对敏感;同时,身体外部形态构造也是影响感应流速的主要原因之一,瓦氏黄颡鱼具有扁平胸腹部的形态特征,使其更易

于贴合水底,受到更小的水流推动,从而展现出更大的感应流速(蔡露等,2018b);此外,体表神经丘的数量和亲缘关系等鱼类生理学和遗传学等方面亦对感应流速有影响,但还需要进一步分析和验证(王晓臣等,2020)。

### 3.3 体长是影响鳅科鱼类感应流速差异的主因

本研究中,3种鳅科鱼类的绝对感应流速总体上随着体长的增加而增加,与体长呈正相关关系;相对感应流速随着体长的增加而降低,与体长呈负相关关系,这与前期学者的研究结果类似(王博等,2013;蔡露等,2018b;王晓臣等,2020)。鱼类具有逆流而动的习性,可通过侧线器官感受水流方向,当流速到达特定值使其向下游动时,鱼类将逆水流运动。流体力学研究表明,在相同的流速条件下,体积越大的类似性状物体,其单位重量所受到的水流推动力越小,从而可以推断出水流更容易推动体长较小的鱼类个体,即具有较小的绝对感应流速,呈现出同一种鱼类的绝对感应流速随着体长的增加而增加,呈正相关关系(蔡露等,2018b)。本研究显示,红尾副鳅的绝对感应流速显著高于横纹南鳅和山鳅,从表1可以看出,红尾副鳅的体长显著大于另外两种鱼类,这也可能是红尾副鳅感应流速较高的原因。由此可见,体长可能是影响3种鳅科鱼类感应流速差异的主要原因。但本研究结果也显示,山鳅的绝对临界游泳速度以及红尾副鳅和横纹南鳅的相对临界游泳速度与体长无显著相关关系,这与白艳勤等(2013)报道的草鱼、鲢和瓦氏黄颡鱼的研究结果相似,这可能是由于体长差异小或者种类差异所致。王晓臣等(2020)指出,相对感应流速与体长呈负相关关系,主要是由于实验鱼体长增加的速率大于绝对感应流速增加的速率,其生理学原因还有待进一步探究。根据本研究3种鳅科鱼类的绝对感应流速与体长的相关关系,可以对较难捕获的实验样本或仅可捕获极少量样本的鱼类感应流速预测具有一定的指导意义。

### 3.4 感应流速可应用于过鱼设施设计和增值放流

感应流速是过鱼设施流速设计的关键参数之一,有助于过鱼设施的水力学设计。根据本研究结果,在鱼道设计过程中应考虑不同过鱼对象之间感应流速的差异。将所有实验鱼作为统一整体来看,假设以本研究的3种鳅科鱼类作为黑水河过鱼设施的目标鱼类,则通过拟合这3种鳅科鱼类的趋流率,可为该过鱼设施内低流速设计提供理论参考数据。适宜的过鱼设施设计流速将有助于减小工程设计难度和节约工程成本。因此,构建趋流率与流速的关系将为

平衡鱼类通过过鱼设施的需求和适宜的流速设计提供科学参考。在一定的过鱼设施设计难度和施工成本条件下,以提高过鱼设施运行效率为前提,根据本研究趋流率与流速关系的结果,过鱼设施内主流速区的最低流速设计至少为 11 cm/s 才能够保证 95% 的目标鱼类朝着正确的方向成功上溯;同时,在进行这 3 种鳅科鱼类的增殖放流时,保证所有放流鱼类均能找到方向时放流地点的流速应高于 13 cm/s。

### 参考文献

- 白艳勤,路波,罗佳,等,2013. 草鱼、鲢和瓦氏黄颡鱼幼鱼感应流速的比较[J]. 生态学杂志, 32(8):2085-2089.
- 蔡露,金瑶,潘磊,等,2018a. 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,王伟营,王海龙,等,2018b. 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.
- 陈凯麒,葛怀凤,郭军,等,2013. 我国过鱼设施现状分析及鱼道适宜性管理的关键问题[J]. 水生态学杂志, 34(4):1-6.
- 丁瑞华,1994. 四川鱼类志[M]. 成都:四川科学技术出版社.
- 杜浩,班璇,张辉,等,2010. 天然河道中鱼类对水深、流速选择特性的初步观测[J]. 长江科学院院报, 27(10):70-74.
- 傅菁菁,黄滨,芮建良,等,2016. 生境模拟法在黑水河鱼类栖息地保护中的应用[J]. 水生态学杂志, 37(3):70-75.
- 高婷,李翀,廖文根,2012. 实施支流生境替代保护的基本原则[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 10(4):267-272.
- 何大仁,蔡厚才,1998. 鱼类行为学[M]. 厦门:厦门大学出版社.
- 姜昊,陆波,蔡跃平,2020. 4种高原裂腹鱼类对水流和底质的趋性研究[J]. 安徽农业科学, 48(9):117-120, 124.
- 李明锋,2011. 瓦氏黄颡鱼研究进展及前景展望[J]. 现代渔业信息, 26(1):5-12
- 李志华,王珂,刘绍平,2009. 鱼道一设计、尺寸及监测[M]. 北京:中国农业出版社.
- 祁昌军,曹晓红,温静雅,等,2017. 我国鱼道建设的实践与问题研究[J]. 环境保护, 45(6):47-51.
- 上海勘测设计研究院有限公司,2018. 黑水河鱼类栖息地生态修复项目总体设计报告[R].
- 宋一清,成必新,胡伟,2018. 黑水河鱼类优先保护次序的定量分析[J]. 水生态学杂志, 39(6):65-72.
- 唐勇,张红,杨兵,等,2012. 红尾副鳅的生物学性状及人工驯养研究[J]. 安徽农业科学, 40(22):11296-11298.
- 陶聪,李春涛,冯华久,等,2008. 红尾副鳅消化系统结构研究[J]. 安徽农业科学, 36(23):9987-9989.
- 王博,石小涛,周琛琳,等,2013. 北盘江两种鱼感应流速[J]. 北华大学学报(自然科学版), 14(2):223-226.
- 王晓臣,吕彬彬,邢娟娟,等,2020. 黄河上游 2 种裂腹鱼感应流速及其与体长的关系[J]. 南方水产科学, 16(4):47-53.
- 王晓臣,邢娟娟,2018. 5 种鱼感应流速比较分析[J]. 水生态学杂志, 39(2):77-81.
- 杨宇,严忠民,乔晔,2007. 河流鱼类栖息地水力学条件表征与评述[J]. 河海大学学报(自然科学版), 35(2):125-130.
- 杨志,龚云,董纯,等,2017. 黑水河下游鱼类资源现状及其保护措施[J]. 长江流域资源与环境, 26(6):847-855.
- 张硕,陈勇,2005. 黑鲟幼鱼趋流性的初步研究[J]. 上海水产大学学报, 14(3):282-287.
- 张雄,刘飞,林鹏程,等,2014. 金沙江下游鱼类栖息地评估和保护优先级研究[J]. 长江流域资源与环境, 23(4):496-503.
- 郑金秀,韩德举,2013. 高坝过鱼设施在长江流域的应用探讨[J]. 环境科学与技术, 36(12):218-222.
- 周中艳,严太明,马恒东,2007. 红尾副鳅生物学初步研究[J]. 四川农业大学学报, 25(3):352-356.
- Cheng F, Li W, Castello L, et al, 2015. Potential effects of dam cascade on fish: lessons from the Yangtze River[J]. Reviews in Fish Biology and Fisheries, 25(3): 569-585.
- Ficke A D, Myrick C A, Jud N A, 2011. The swimming and jumping ability of three small great plains fishes: implications for fishway design[J]. Transactions of the American Fisheries Society, 140(6):1521-1531.
- Neraas L P, Spruell P, 2001. Fragmentation of riverine systems: the genetic effects of dams on bull trout (*Salvelinus confluentus*) in the Clark Fork River system[J]. Molecular Ecology, 10(5):1153-1164.
- 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.
- Orsborn J F, 1987. Fishways—historical assessment of design practices[J]. American Fisheries Society Symposium, 1: 122-130.
- Roberts J H, Angermeier P L, Hallerman E M, 2013. Distance, dams and drift: what structures populations of an endangered, benthic stream fish? [J]. Freshwater Biology, 58(10):2050-2064.
- Shi X T, Kynard B, Liu D F, et al, 2015. Development of fish passage in China[J]. Fisheries, 40(4):161-169.
- Song Y, Cheng F, Murphy B R, et al, 2018. Downstream effects of the Three Gorges Dam on larval dispersal, spatial distribution, and growth of the four major Chinese carps call for reprioritizing conservation measures[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 75(1):141-151.
- Zarfl C, Lumsdon A E, Berlekamp J, et al, 2015. A global boom in hydropower dam construction[J]. Aquatic Sciences, 77(1):161-170.

## Preliminary Study on the Induction Velocity of Three Cobitidae Species in Heishui River

ZHANG Lian-bo<sup>1</sup>, YAO Wei-zhi<sup>1</sup>, SONG Yi-qing<sup>1,2</sup>

- (1. Key Laboratory of Aquatic Science of Chongqing, Research Central of Fishery Resources and Environment, College of Fisheries, Southwest University, Chongqing 400716, P.R. China;  
2. Shanghai Investigation, Design and Research Institute CO., Ltd, Shanghai 200335, P.R. China)

**Abstract:** The induction velocity, the lowest water flow velocity that induces a fish to begin actively swimming, is a key characteristic of fish swimming behavior. Induction velocity data is necessary for setting the design velocity in low flow areas of fish passage facilities and selecting suitable locations for releasing fish. In this study, the induction velocity of *Paracobitis variegates*, *Schistura fasciolatus*, and *Oreias dabryi* from Heishui River was measured using a stepped velocity test. The test was carried out in a closed fish swimming flume (75 cm×20 cm×20 cm) from April 29 to May 6 of 2018. All test fish were collected from Heishui River using cages and acclimated for 1 h at a flow speed of 0.5 BL/s before testing began at an initial speed of 0 BL/s. Results show that the absolute induction velocity and relative induction velocity of the three Cobitidae species were all significantly different (absolute induction velocity:  $F=18.15$ ,  $df=59$ ,  $P<0.05$ ; relative induction velocity:  $F=17.23$ ,  $df=59$ ,  $P<0.05$ ). The range of absolute induction velocities ( $U_{A-ind}$ ) of the three species was 5.7–13.2 cm/s, and the range of relative induction velocities ( $U_{R-ind}$ ) was 0.6–1.5 BL/s. The  $U_{A-ind}$  of *Paracobitis variegates* was significantly higher than that of *Schistura fasciolatus* and *Oreias dabryi*. Conversely,  $U_{R-ind}$  of *Paracobitis variegates* was significantly lower than that of the other two species ( $P<0.05$ ). There was no significant difference in absolute induction velocity or relative induction velocity between *Schistura fasciolatus* and *Oreias dabryi* ( $P>0.05$ ). The induction velocity for all fish tested was significantly correlated with fish body length.  $U_{A-ind}$  increased with body length, while  $U_{R-ind}$  decreased with body length. Body length was the major factor affecting the induction velocity for all three species. The rheotaxis rate of the three fishes presented an exponential relationship with the water velocity, and the function was described as  $P_R=97.93e^{-e^{-0.91V+6.34}}$ . This investigation provided fundamental data on fish swimming behavior, and a reference for setting velocity criteria for fish passage facilities and selecting appropriate locations for fish release.

**Key words:** *Paracobitis variegates*; *Schistura fasciolatus*; *Oreias dabryi*; induction velocity; rheotaxis; Heishui River