

日本鳗鲡游泳能力和游泳行为研究

陈橙, 闫慧, 张挺, 苏燕

(福州大学土木工程学院, 福建 福州 350018)

摘要: 研究日本鳗鲡的游泳能力特性指标和游泳行为, 为日本鳗鲡的保护及渔业管理提供参考。在 $(22 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ 试验水温下, 针对体长为21.4~43.5 cm, 体重11~62 g的日本鳗鲡, 利用自循环明渠变坡水槽, 采用流速递增法开展鱼类感应流速、临界游泳速度和爆发游泳速度的试验研究。结果表明: (1) 闽江流域日本鳗鲡的感应流速为 $(3.3\sim 4.8)\text{cm/s}$, 即 $(0.109\sim 0.196)\text{BL/s}$; 临界游泳速度为 $(49.5\sim 86.5)\text{cm/s}$, 即 $(1.874\sim 2.331)\text{BL/s}$; 爆发游泳速度为 $(86.9\sim 135.9)\text{cm/s}$, 即 $(2.982\sim 4.062)\text{BL/s}$ 。(2) 日本鳗鲡的绝对特征流速随体长的增加而增加, 相对特征流速随体长的增加而减小。(3) 随着流速的递增, 日本鳗鲡游泳形态分为5个阶段: 顺流爬越、逆流转向静止、逆流上溯爬越、逆流冲刺后静止、逆流后退。以日本鳗鲡为主要过鱼对象时, 建议鱼道内最小水流速度应大于 10.0 cm/s , 高流速区最大设计水流大于 70.0 cm/s , 小于 112.0 cm/s 。研究结果可为闽江鱼道水力设计提供依据。

关键词: 日本鳗鲡; 感应流速; 临界游泳速度; 爆发游泳速度; 闽江流域

中图分类号: TV61; Q958 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2022)04-0127-06

鱼类洄游是鱼类为适应环境变化和自身生长需要所进行的周期性、定向性和集群性的一种迁移活动(曹平等, 2017)。日本鳗鲡(*Anguilla japonica*)是闽江主要的经济鱼种之一, 属于典型的暖温性降海洄游性鱼类。亲鱼在每年秋末冬初由淡水水域向河口移动, 随流出海, 进入中国台湾南部深海水域产卵, 仔鳗随海流漂移生长为幼鳗, 鳗苗每年春季聚集于河口, 溯河而上到闽江各干、支流索饵、肥育、生长。游泳能力是鱼类等水生生物能够在大自然中生存的关键能力(Wilson, 2004), 感应流速、临界游泳速度和爆发游泳速度是国内外学者衡量鱼类游泳能力的3个重要指标(曹平等, 2017), 对这些指标的研究不仅可为鱼道设计提供依据, 同时也可提高渔业捕捞效率、保护渔业资源等(Rodríguez et al, 2006)。因此, 研究日本鳗鲡游泳能力、设计建设闽江拦河闸坝鱼道, 对闽江流域渔业资源保护显得尤为重要。

多年来研究者利用各种设施和测量方法对鱼类游泳能力展开了广泛的研究, Bainbridge(1958)利用小型循环管道等设施做试验, 获得了鱼类游泳速度的大量资料; Brett(1964)开创了基于递增流速法和水槽设备条件下的鱼类游泳能力研究的先河。随科技与数学理论的发展, He(1991)和Kim(2003)分别

利用水下摄影机和模糊数学理论对鱼类的游泳能力进行研究。经多重试验, Plaut(2001)和Hammer(1995)对鱼类游泳能力的各种概念进行分类论述。Bae等(2011)对银鱼(*Hemisalanx prognathus*)的游泳能力进行试验, 发现其尾鳍的摆动频率在不同的游泳速度下存在变化规律。乔云贵等(2012)在循环水槽中测量了鲫(*Carassius auratus*)、中国花鲈(*Lateolabrax japonicus*)、罗非鱼(*Oreochromis mossambicus*)的临界游泳速度和爆发游泳速度。在鳗鱼游泳能力的研究上, Lighthill(1970)通过水动力学对“纯鳗形”鱼类游动进行了理论分析; Gray(2012)和Willemse(1975)对鳗鱼游动的运动学进行了初步研究; 1980年McCleave(2006)发现体长为6.9~7.5 cm的鳗鲡的最大游泳速度为3.6~7.2 BL/s, 且游动持续时间随着速度的增快而缩短; Tytell(2004)研究了不同的流速下鳗鲡的游泳运动学和水动力学特征。

《水利水电工程鱼道设计导则》(中华人民共和国水利部, 2013)中给出了国内常见鱼类(包括日本鳗鲡)的部分游泳能力数据, 然而关于日本鳗鲡(特别是闽江流域)游泳能力的研究仍有欠缺。本文选取闽江流域日本鳗鲡作为研究对象, 采用室内自循环明渠变坡水槽开展试验, 测定日本鳗鲡的感应流速、临界流速及爆发流速; 分析鱼体长对游泳能力的影响; 探究不同流速下鳗鲡洄游的上溯行为。研究成果旨在为闽江流域日本鳗鲡的游泳特性指标填补空白, 为闽江鱼道设计和养殖技术提供参考依据。

收稿日期: 2020-12-19 修回日期: 2022-06-23

作者简介: 陈橙, 1988年生, 博士, 副研究员, 主要从事生态水利及河口海岸防灾减灾方面的研究。E-mail: cc@fzu.edu.cn

1 试验方法

1.1 试验鱼

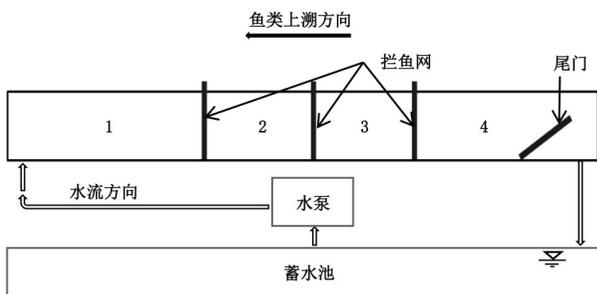
试验鱼日本鳗鲡于福建省闽侯县闽江河口捕捞所得,运至福州大学水利馆试验场。从 50 尾日本鳗鲡中选择 15 尾不同体长的个体用于试验,选取的 15 尾鱼均健康灵活,体长范围为 21.4~43.5 cm,体重范围为 11~62 g。

1.2 试验条件

试验鱼在试验水槽下方蓄水池中暂养 7 d,定期投喂专用饲料(投饵率为),试验水温为(22 ± 0.5)℃,光照采用昼夜自然光周期,蓄水池中的水用曝气 5 d 的自来水与池水以 1:2 混合,模拟自然河道中的水体情况。试验前 2 d 停止喂食,选取健康的个体进行试验。

1.3 试验装置

本试验装置为自循环明渠变坡水槽,由上部明渠水槽、中部水体自循环动力系统、下部蓄水池组成。水槽长约 4.2 m,宽 0.3 m,高 0.3 m,主要由亚克力板与钢架结构制成,水槽底坡可调节,最大坡度为 2.6°。水体自循环动力系统通过水泵将蓄水池中水体抽送至水槽前端,经由槽身流入水槽尾部,经泄水口回到蓄水池实现自循环(图 1)。水槽尾端设开孔闸式尾门,用于控制槽内水深,间接微调水流流速,流速增减幅度为 0.3~0.5 cm/s。



1. 稳定区;2. 观察区;3. 适应区;4. 泄水区

图 1 自循环变坡水槽示意

1. Stable flow area, 2. Observation area, 3. Adaptation area, 4. Drainage area

Fig.1 Schematic diagram of the self-circulating sloped flume.

水体自循环动力系统通过调节水泵功率控制水流流速,水泵最大功率 900 W,最大流量 45 m³/s。预试验可知水槽观察区前中后水流速度相差甚微,槽中水流可视明渠均匀流。从上游到下游将水槽分为稳定区、观察区、适应区与泄水区 4 部分。稳定区用于稳定水槽前端水流流态,减弱观察区内水流紊动;观察区为测试鱼类游泳能力的主要区域;适应区

为鳗鲡提供适应空间,使其在试验前充分适应水流流速变化;泄水区通过调节尾门开度决定水体下泄速度,使水体流回蓄水池。各区域间采用拦鱼网分隔,拦鱼网既形成隔断,也可防止鳗鲡因流速过大被冲走。

1.4 特征流速测量方法

3 种特征流速测定均采用递增流速法(Hammer, 1995)。为避免鱼类之间产生互相学习的情况(An et al, 2019),试验中采取单条鱼进行分别试验。选取试验鱼 15 尾,每尾鱼重复 3 次试验,3 种特征流速试验总次数共计 135 次。感应流速、临界游泳速度、爆发游泳速度的测定条件有所不同。

(1)感应流速的测定:以 5 s 为时间间隔、1 cm/s 为流速增量调节流速。当试验鱼开始调转身体方向朝上游时,即测得其感应流速。为消除鱼个体体型影响,可采用相对感应流速表示:

$$U_i' = U_i/L \quad (1)$$

式中: U_i' 为相对感应流速, BL/s; U_i 为感应流速, cm/s; L 为试验鱼体长, cm。

(2)临界游泳速度的测定:以感应流速为起始速度,持续时间为 20 min,流速增量为 5 cm/s,游泳速度不断增加直至试验鱼达到疲劳状态(停止游动并触及后方拦鱼网时),即可得其临界游泳速度(Brett, 1964):

$$U_{cr}^i = U_i + \left[\left(\frac{t_i}{t} \right) \times \nabla v \right] \quad (2)$$

式中: U_{cr}^i 为临界游泳速度, cm/s; U_i 为试验鱼能够持续游泳 20 min 的最高流速, cm/s; ∇v 为水流流速增幅, 5 cm/s; t_i 为试验鱼最高水流流速下持续游泳时间, s; t 为时间增量, 1200 s。为消除鱼个体体型影响,可采用相对临界游泳速度表示:

$$U_{cr}' = U_{cr}/L \quad (3)$$

式中: U_{cr}' 为相对临界游泳速度, BL/s; U_{cr} 为临界游泳速度, cm/s; L 为试验鱼体长, cm。

(3)爆发游泳速度的测定:以临界游泳速度为基底,以 25 s 为时间间隔、5 cm/s 为流速增量刺激试验鱼,直至试验鱼上溯行为持续时间小于 20 s 时,试验结束,可得试验鱼的爆发游泳速度(官之梅等, 1981):

$$U_{bu} = U_w + S/t \quad (4)$$

式中: U_{bu} 为爆发游泳速度, cm/s; U_w 为水流速度, cm/s; S 为试验鱼所游的距离, cm; t 为试验鱼游段距离时所需时间, s。为消除鱼个体体型影响,可采用相对爆发游泳速度表示:

$$U_{bu}' = U_{bu}/L \quad (5)$$

式中: U_{bu}' 为相对爆发游泳速度, BL/s, U_{bu} 为爆

发游泳速度,cm/s, L 为鱼体长,cm。

1.5 数据处理

试验数据取不同工况下3组重复试验的平均值,并结合鱼体长、体重对数据进行线性相关性函数拟合分析。

2 结果与分析

2.1 感应流速

用于感应流速测定的试验用鱼共15尾,分为3组。表1展示了本研究中不同体长鳎感应流速的相关数据。其中第1组的试验用鱼体长21.4~29.0 cm,体重11~32 g,测得感应流速为3.8 cm/s,相对感应流速为0.153 BL/s。第2组试验用鱼体长31.6~38.3 cm,体重40~60 g,测得感应流速为4.5 cm/s,相对感应流速为0.127 BL/s。第3组试验用鱼体长41.3~43.5 cm,体重59~62 g,测得绝对感应流速为4.6 cm/s,相对感应流速为0.108 BL/s。

表1 日本鳎不同体长感应流速比较

Tab.1 Comparison of induction velocity of *A. japonica* of different body length

| 体长范围/cm | 体重/g | 感应流速/cm·s ⁻¹ | 平均值/cm·s ⁻¹ | 相对感应流速/BL·s ⁻¹ | 平均值/BL·s ⁻¹ |
|-----------|-------|-------------------------|------------------------|---------------------------|------------------------|
| 21.4~29.0 | 11~32 | 3.3~4.2 | 3.8 | 0.122~0.196 | 0.153 |
| 31.6~38.3 | 40~60 | 4.2~4.8 | 4.5 | 0.115~0.133 | 0.127 |
| 41.3~43.5 | 59~62 | 4.4~4.8 | 4.6 | 0.109~0.110 | 0.108 |

2.2 临界游泳速度

绝对临界游泳速度为49.5~86.5 cm/s,均值为70.0 cm/s;相对临界游泳速度为1.874~2.331 BL/s,均值为2.163 BL/s。试验得到的试验鱼体长与绝对临界游泳速度的关系如图2,日本鳎绝对临界游泳速度随着体长的增加而增加,两者呈现线性相关,可得线性拟合关系($P<0.05$):

$$U_{cr} = 1.7726L + 12.16 (R^2 = 0.9500) \quad \text{⑥}$$

试验鱼体长与相对临界游泳速度的关系如图3,日本鳎相对临界游泳速度随着体长的增加而减小,两者呈现线性相关,可得线性拟合关系($P<0.05$):

$$U_{cr}' = -0.0114L + 2.5335 (R^2 = 0.5448) \quad \text{⑦}$$

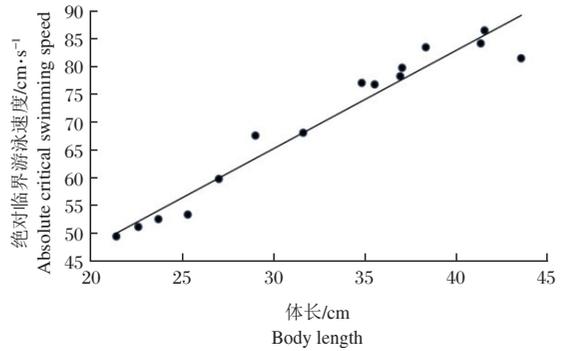


图2 日本鳎绝对临界游泳速度与体长的关系

Fig.2 Relationship between absolute critical swimming speed and body length of *A. japonica*

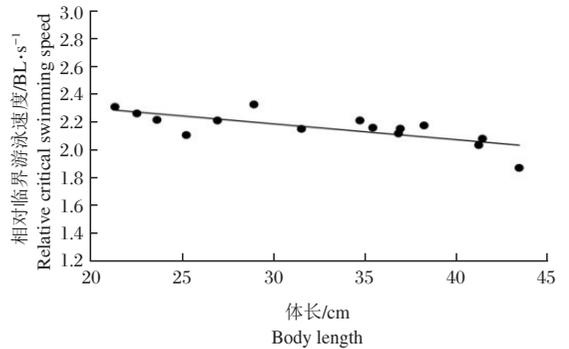


图3 日本鳎相对临界游泳速度与体长的关系

Fig.3 Relationship between the relative critical swimming speed and body length of *A. japonica*

2.3 爆发游泳速度

在本研究中,水温为(22±0.5)℃,20~30cm鳎的 U_{bu} 为86.9~108.5 cm/s, U_{bu}' 为3.638~4.062 BL/s;30~40 cm鳎的 U_{bu} 为113.9~123.6 cm/s, U_{bu}' 为3.227~3.604 BL/s;40~45 cm鳎的 U_{bu} 为136.5~135.9 cm/s, U_{bu}' 为2.982~3.275 BL/s。

2.4 日本鳎的游泳行为

通过视频回放对日本鳎在不同水流条件下的游泳行为进一步分析,水流速度递增量为5 cm/s且从0~150 cm/s的变化过程中,日本鳎上溯形态分为5

表2 本研究以及参考文献中鱼类爆发游泳速度的对比

Tab.2 Comparison of burst swimming speed of *A. japonica* with similar fish

| 种类 | 体长范围/cm | 体重/g | 绝对爆发游泳速度/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 | 数据来源 |
|-----|-----------|--------|-----------------------------|------------------------|-----------------------------|------------------------|------------------------|
| 幼鳎 | 5~10 | | 45~50 | - | - | - | (中华人民共和国水利部,2013) |
| | 21.4~29.0 | 11~32 | 86.9~108.5 | 95.4 | 3.638~4.062 | 3.858 | |
| 日本鳎 | 31.6~28.3 | 40~60 | 113.9~123.6 | 119.5 | 3.227~3.604 | 3.347 | (本研究) |
| | 41.3~43.5 | 59~62 | 136.5~135.9 | 130.7 | 2.982~3.275 | 3.106 | |
| 欧洲鳎 | 77.3±3.7 | 905.67 | 167±4.0 | - | - | - | (Christian et al,2015) |

个阶段:顺流爬越、逆流转向静止、逆流上溯爬越、逆流冲刺后静止、逆流后退。

第 1 阶段:水流速度为 0~4 cm/s, 73% 的鳗鲡头部向上, 剧烈摆动尾部, 从拦鱼网上方直接越过进入适应区, 继续顺着水流向下游动。

第 2 阶段:流速为 4~20 cm/s, 鳗鲡身体垂直水流方向、贴网静止, 既不顺从水流向下游动也不逆流向上溯游。达到个体感应流速值后, 调转头部后静止。

第 3 阶段:流速为 20~60 cm/s, 试验鱼贴底迅速上溯, 到达拦鱼网, 开始游动到试验水槽上部, 向上跃起, “爬行”到稳定区内, 后继续逆流向上游动。

第 4 阶段:流速为 60~90 cm/s, 试验鱼在水深深度 1/2 处上溯至稳定区前拦鱼网处, 开始头部朝向稳定区, 尾部不停摆动保持位置不变。

第 5 阶段:流速增大到 90~135 cm/s, 试验鱼开始剧烈摆动, 适应水流条件后开始上溯, 游动到观察区 1/2~2/3 区域后, 开始后退, 尾部触到下游拦鱼网后再次上溯。试验鱼反复出现逆流上溯和顺流后退 2 种行为, 上溯距离也不断缩小, 直至接近力竭状态, 贴网静止不动。

3 讨论

3.1 对基础感应流速的探讨

为描述日本鳗鲡个体间相对感应流速的差异, 将公式①转换为:

$$U_{in} = U_{in}' \times L \quad (8)$$

当鱼体长足够小 L 接近于 0, 而感应流速 U_{in} 不可能无限逼近 0, 此时将存在鱼类的基础感应流速。基于试验数据, 改进为绝对感应流速等于基础感应流速加鱼体长线性增长部分的感应流速:

$$U_{in} = U_0 + U_{in}' \times L \quad (9)$$

式中: U_0 为基础感应流速, cm/s。经拟合(图 4)得日本鳗鲡感应流速与体长的关系为:

$$U_{in} = 2.6511 + 0.0481 \times L \quad (10)$$

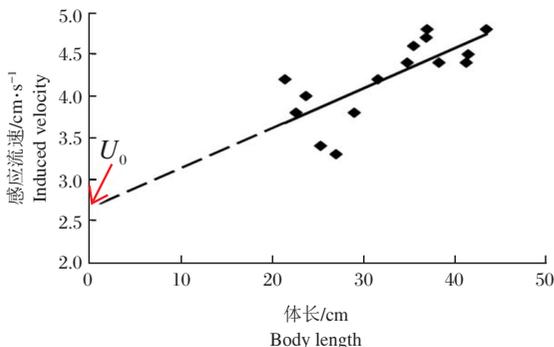


图 4 日本鳗鲡基础感应流速的推算

Fig. 4 Estimation of the basal induction velocity of *Anguilla japonica*

即当鱼体长 L 无限小时, 日本鳗鲡的基础感应流速为 2.6511 cm/s。需要注意的是, 本试验中日本鳗鲡的基础感应流速是试验数据初步推得, 而对于实际工程中所存在的体长为 0~20 cm 的日本鳗鲡, 有待于今后更系统的试验进行补充和修正。

3.2 日本鳗鲡特征流速与体长的关系

本研究中, 日本鳗鲡的绝对感应流速、绝对临界游泳速度、绝对爆发游泳速度和体长均呈现正相关关系, 研究得出, 体长 (77.3 ± 3.7) cm 成年欧洲鳗的绝对临界游泳速度为 (167 ± 4) cm/s (Christian 等, 2015)、体长 5~10 cm 鳗鲡 Ubu 为 45~50 cm/s (中华人民共和国水利部, 2013), 也恰好遵循这一关系。相对感应流速、相对临界游泳速度、相对爆发游泳速度和体长呈现负相关关系。这与蔡露等(2018)王博等(2013)报道鱼类相对、绝对游泳速度与体长所呈现出的相关关系一致。鱼类利用侧向器官感知, 通过水流推动与自身波动实现逆流运动 (Sullivan, 1954)。根据流体力学原理, 鱼类在流场中受到摩擦阻力和压差阻力, 负压差阻力被称为推进力, 由于压差阻力远大于摩擦阻力, 推动力使鱼类向与水流相反方向移动。当水流速度一定时, 长细比越大的物体, 其单位长度所受水流推动力越小, 即本研究中的日本鳗鲡体长越小, 其单位长度所受水流推动力越大。因而体长越小的日本鳗鲡逆向移动所需的水流推动力越小, 对微弱的水流速度感应更为敏锐, 从而表现出较小的绝对感应流速, 即随着体长的增长, 鱼类的绝对感应流速也不断增大。同理, 不同体长的鱼类对其绝对游泳速度和绝对爆发游泳速度的感知不同, 并与体长呈正相关。日本鳗鲡的相对特征游泳速度和体长呈现负相关关系, 具体原因有待进一步生理学分析, 可能是由于随着水流速度的增加, 鱼体所受水流阻力增加, 导致鱼体摆动频率增加, 自身消耗更多的能量维持自身平衡, 推进幅度降低。而王永猛等(2020)测得长丝裂腹鱼与齐口裂腹鱼感应流速随着体长增加均呈现出先增大后平稳的趋势, 这是由于鱼类在一定体长范围对水流条件较为敏感, 后随着体长的增长敏感度减弱。

3.3 日本鳗鲡特征流速对闽江鱼道水力设计的影响

感应流速可用来确定鱼类是否产生上溯行为。在设计鱼道时, 需确保鱼道进口区域及过鱼孔区域水流流速大于鱼类感应流速, 这样更方便鱼类辨别洄游方向。通过感应流速测定试验可知, 试验鱼体长为 21.4~43.5 cm, 感应流速变化为 3.30~4.80 cm/s, 按照王永猛等(2020)得出感应流速随着体长增加均

呈现出先增大后平稳的趋势,假设鳗鲡达到目前所知最大体长 150 cm,按照公式⑩计算可得所有日本鳗鲡的感应流速在平稳后的最大值应小于 9.87 cm/s。则以日本鳗鲡为主要过鱼对象时,建议鱼道内最小水流速度应大于 10.0 cm/s。

临界游泳速度是常用来评价鱼类游泳能力的重要指标之一,可为鱼道内池室主流流速设计阈值提供参考。爆发流速是指鱼类在捕食、逃避敌害、受到惊吓以及在强水流中游泳时所产生的极限流速。通过爆发游泳能力测定试验可知,试验鱼体长为 21.4~43.5 cm,绝对临界游泳速度为 49.5~86.5 cm/s,均值为 70.0 cm/s,绝对爆发游泳速度为 86.9~135.9 cm/s,均值为 112 cm/s。鱼类能否通过鱼道高流速区主要与其爆发游泳速度相关,而鱼道进口的流速、鱼道内孔口或竖缝的设计流速均应小于鱼类的爆发游泳速度。一般情况下为吸引鱼类通常采用较大流速的水流,因此,在设计以日本鳗鲡为主要过鱼对象时,建议闽江鱼道高流速区最大设计水流应小于爆发流速 112.0 cm/s,同时大于临界游泳速度 70.0 cm/s。

基于鳗鲡具有的特殊攀爬能力,可在闽江鳗鲡聚集的河口等地将鱼道设置为合适攀缘介质的斜坡,提高日本鳗鲡上溯率。

参考文献

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.

乔云贵,黄洪亮,黄妙芬,等,2012.不同淡水鱼类游泳速度的初步研究[J].湖南农业科学,15:124-127.

官之梅,刘文郁,陈佩熏,1981.几种淡水经济鱼类游泳能力的研究[C]//鱼类学论文集.北京:科学出版社:133-137.

中华人民共和国水利部,2013.水利水电工程鱼道设计导则:GB/SL 609-2013[S].北京:中国水利水电出版社.

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.

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.

An R D, Li J, Yi W M, et al, 2019. Hydraulics and swimming behavior of schizothorax prenanti in vertical slot fishways [J]. Journal of Hydrodynamics, 31(1):169-176.

Bae J H, Lee K H, Shin J K, et al, 2011. Measurement of swim-

ming ability of silver fish (*Plecoglossus altivelis*) using a Particle Imaging Velocimetry[J]. Bulletin of the Korean Society of Fisheries Technology, 47(4):411-418.

Bainbridge R, 1958. The speed of swimming of fish as related to size and to the frequency and amplitude of the tail beat[J]. Journal of experimental biology, 35(1):109-133.

Brett J R, 1964. The respiratory metabolism and swimming performance of young sockeye salmon[J]. Journal of the Fisheries Board of Canada, 21(5):1183-1226.

Christian T, Erik B, Sebastiaan B, et al, 2015. Comparison of swimming capacity and energetics of migratory European eel (*Anguilla anguilla*) and New Zealand short-finned eel (*A. australis*) and New Zealand short-finned eel (*A. australis*), 6:256.

Gray J, 2012. Studies in animal locomotion I. The movement of fish with special reference to the eel[J]. Journal of experimental biology, 10:88-104.

Hammer C, 1995. Fatigue and exercise tests with fish[J]. Comparative Biochemistry & Physiology A, 112(1):1-20.

He P, 1991. Swimming endurance of the Atlantic cod, *Gadus morhua* L, at low temperatures[J]. Fisheries Research, 12(1):65-73.

Kim Y H, 2003. Numerical modeling of chaotic behavior for small-scale movements of demersal fishes in coastal water[J]. Fisheries Science, 69:535-546.

Lighthill M J, 1970. Aquatic animal propulsion of high hydro-mechanical efficiency[J]. Journal of Fluid Mechanics, 44(2):265-301.

Mccleave J D, 2006. Swimming performance of European eel (*Anguilla anguilla* (L.)) elvers[J]. Journal of Fish Biology, 16(4):445-452.

Rodríguez T T, Agudo J P, Mosquera L P, et al, 2006. Evaluating vertical-slot fishway designs in terms of fish swimming capabilities[J]. Ecological Engineering, 27(1):37-48.

Sullivan C M, 1954. Temperature reception and responses in fish[J]. Journal of the Fisheries Research Board of Canada, 11(2):153-170.

Tytell, E D, 2004. The hydrodynamics of eel swimming II. Effect of swimming speed[J]. Journal of Experimental Biology, 207(19):3265-3279.

Willemse J J, 1975. Some remarks on the structure and function of the musculus lateralis in the European eel, *Anguilla anguilla* (L.) (pisces, teleostei) [J]. Zoomorphology, 81:195-208.

Wilson R S, 2004. Temperature influences the coercive mating and swimming performance of male eastern mosquitofish[J]. Animal Behaviour, 70(6):1387-1394.

Swimming Ability and Behavior of *Anguilla japonica*

CHEN Cheng, YAN Hui, ZHANG Ting, SU Yan

(College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, P.R. China)

Abstract: *Anguilla japonica*, a typical warm-temperature catadromous fish, is the primary economic fish species of the Minjiang River basin. In this study, we explored the swimming ability and behavior of *A. japonica* by measuring the induction velocity, critical swimming speed and burst swimming speed, and analyzed the effect of body length on swimming ability. Our aim was to determine baseline swimming characteristics of *A. japonica* to provide guidance for the hydraulic design of fish passages. The test fish were collected from the Minjiang River, with a body length range of 21.4–43.5 cm and body weigh range of 11–62 g. The test was conducted by the stepped velocity method in a self-circulating sloped flume at a water temperature of $(22\pm 0.5)^{\circ}\text{C}$. Results show: (1) The induction velocity range of *A. japonica* in Minjiang River basin was (3.3–4.8) cm/s, i.e. (0.109–0.196) BL/s (BL: body length). The critical swimming speed was (49.5 – 86.5) cm/s, i.e. (1.874–2.331) BL/s. The burst swimming speed was (86.9–135.9) cm/s, i.e. (2.982–4.062) BL/s. (2) The absolute induction velocity, critical swimming speed and the burst swimming speed of *A. japonica* correlated positively with body length, while the relative induction velocity, critical swimming speed and the burst swimming speed were negatively correlated with body length. (3) *A. japonica* displayed five gaits as flow velocity increased: downstream swimming, countercurrent swimming turning to static immobility, upstream swimming, countercurrent sprinting, and countercurrent retreating. Based on the results, we recommend that flow velocity in the fish passage should not be lower than 10 cm/s when *A. japonica* is a target species, and that the highest flow velocity in the high flow area be maintained in the range of 70.0 cm/s – 112.0 cm/s.

Key words: *Anguilla japonica*; induction velocity; critical swimming speed; burst swimming speed; Minjiang River basin