

DOI: 10.12264/JFSC2024-0207

秦岭细鳞鲑仔鱼游泳能力及行为

杨宏灿^{1,3}, 刘鹏^{1,3}, 王艺舟¹, 李君轶², 周琼², 王桢璐^{1,3}, 邵俭^{1,3}

1. 贵州大学动物科学学院渔业资源与环境保护实验室, 高原山地动物遗传育种与繁殖教育部重点实验室, 贵阳 550025;
2. 中国水产科学研究院长江水产研究所, 农业农村部淡水生物多样性保护重点实验室, 湖北 武汉 430223;
3. 贵州大学特种水产研究所, 贵州 贵阳 550025

摘要: 游泳能力及行为是鱼类生存与适应环境的重要基础。为探究秦岭细鳞鲑(*Brachymystax tsinlingensis* Li, 1966) 游泳能力及行为特征, 科学解决其苗种培育及人工放流过程中水流速环境选择问题。本研究以人工繁育的秦岭细鳞鲑仔鱼为实验对象, 在水温(11.4±0.17) °C下采用递增流速法测试了秦岭细鳞鲑仔鱼的感应流速、临界游泳速度和爆发游泳速度, 利用固定流速法测定分析了其持续游泳能力及耐久游泳能力。结果显示: 秦岭细鳞鲑仔鱼的感应流速、临界游泳速度及爆发游泳速度分别为(0.03±0.01) m/s、(0.14±0.03) m/s 和(0.22±0.03) m/s; 相对感应流速、相对临界游泳速度及相对爆发游泳速度分别为(1.62±0.29) BL/s、(7.55±1.61) BL/s 和(11.48±1.79) BL/s; 最大持续游泳速度和最大耐久游泳速度分别为 0.13 m/s 和 0.25 m/s; 分别与平均临界游泳速度和平均爆发游泳速度相近。持续与耐久实验发现, 秦岭细鳞鲑仔鱼的持续游泳时间与流速呈负相关($\lg T = -24.48X + 7.09$, $R^2 = 0.79$, $P < 0.01$); 摆尾频率与流速呈线性正相关($TFB = 0.70U + 5.54$, $R^2 = 0.89$, $P < 0.01$), 运动步长与流速呈线性正相关($SL = 0.09U + 0.11$, $R^2 = 0.99$, $P < 0.01$)。因此, 秦岭细鳞鲑苗种培育及人工放流时, 建议水流流速为 0.04~0.14 m/s。本研究结果有助于提升秦岭细鳞鲑人工繁育及放流成效。

关键词: 秦岭细鳞鲑; 仔鱼; 游泳行为; 游泳能力; 增殖放流; 资源养护

中图分类号: S917

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2024)12-1474-10

游泳能力是决定鱼类生存和适应的关键因素, 反映了鱼类觅食、躲避捕食者、迁徙和在水流中保持位置的能力, 主要取决于外界环境条件和鱼类行为活动需要, 不同的游泳行为常与不同的游泳速度相匹配^[1-2]。鱼类可以感知水流流速和方向来调整自身游动方向和速度, 即鱼类趋向性(fish tropism)。鱼类游泳能力常以游泳时间和游泳速度作为表征, 常见基础评价指标为感应流速(induction velocity)、临界游泳速度(critical swimming speed, U_{crit})、爆发游泳速度(burst swimming speed, U_{burst})、持续游泳速度(sustained swimming speed)

和耐久游泳速度(prolonged swimming speed)^[3], 其中感应流速是指鱼类能够辨别水流方向的最小速度^[4], 用于评价鱼类对水流的敏感性, 是鱼类人工驯养及增殖放流水流速环境选择时的关键参考指标^[5]; 临界游泳速度为鱼类最大有氧速度, 以确定鱼类在游泳过程中的最大耗氧量, 用于评价鱼类对外部环境因素(流量、温度、盐度、重金属)和内在因素(鱼类种群、鱼类形态参数)的响应能力, 可评估各种鱼类栖息地环境条件的适宜性以及生态变化对鱼类生存和生命的影响^[6-8]; 爆发游泳速度是鱼类应对环境压力的一种行为, 被

收稿日期: 2024-07-29; 修订日期: 2024-10-11.

基金项目: 国家自然科学基金项目(32002392); 农业农村部淡水生物多样性保护重点实验室开放课题项目(LFBC1109); 贵州省教育厅青年科技人才成长项目(黔教技[2024]37).

作者简介: 杨宏灿(1999-), 男, 硕士研究生, 研究方向为鱼类行为学研究. E-mail: yanghc0607@163.com

通信作者: 邵俭, 博士, 副教授, 研究方向为渔业资源与环境保护. E-mail: shaojian5098@163.com

认为是衡量鱼类可达到的最高速度,使其能穿越激流或鱼类设施的高流速区域、掠食和逃亡等,通常持续时间低于 20 s,以肌肉疲劳结束,一般作为鱼道流速上限的设计准则^[9-11];持续游泳速度和耐久游泳速度分别是指鱼类在固定流速下持续游泳时间大于 200 min 时和介于 20 s~200 min 所对应的水流速度^[12-13]。游泳性能作为影响鱼类生命活动的重要因子,是早期生长发育以及设计和建造鱼类通道设施的重要参考依据,对科学提高鱼苗培育质量和增殖放流成效同样具有重要价值。

秦岭细鳞鲑(*Brachymystax tsinlingensis* Li, 1966)是我国典型的陆封型冷水性山麓鱼类,隶属于鲑形目(Salmoniformes)、鲑科(Salmonidae)、细鳞鲑属(*Brachymystax*),俗称梅花鱼、细鳞鱼,主要分布于陕西黑河、渭水河、石头河和太白河等山区溪流以及甘肃的渭水支流上游^[14]。受气候变化、环境污染及人为干扰等因素影响,导致其自然种群数量急剧锐减,1988 年被列入我国 II 级野生保护动物^[15-16],掌握其人工繁殖技术并实现增殖放流是补充和恢复生物资源最为有效的修复手段^[17]。我国学者经多年科研攻关,于 2021 年突破了秦岭细鳞鲑全人工繁育技术^[18]。近年来,国内多次开展规模化人工繁育及放流工作,但因秦岭细鳞鲑应激性强、生境条件苛刻、生长缓慢等制约着其资源增殖及养护效率^[19-20]。此外,与自然生境相比,人工养殖水体环境相对稳定,秦岭细鳞鲑最适流速、放流规格以及放流区域未有相关科学论证,造成养殖秦岭细鳞鲑苗种进入自然环境后适应性不足,导致其存活率较低。由此可见,在人工增殖放流过程中流速成为影响其生长存活的关键环境因子之一。因此,系统研究秦岭细鳞

鲑早期游泳能力及游泳行为是目前提高其人工繁育、增殖放流及资源养护效率的重要基础。

鱼类的游泳能力往往因其种类、生活史阶段和生活习性而异。目前,国内外关于鱼类游泳能力及行为开展了大量研究,有关淡水鱼类则多见于虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)^[21]、鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)、鳙(*Aristichthys nobilis*)^[22]及裂腹鱼(*Schizothoracids*)^[23-24]等常见养殖经济鱼类。秦岭细鳞鲑作为我国特有濒危物种,开展了人工增殖及环境因子相关的研究包括:视蛋白基因^[18]、毒理学^[19]、环境选择行为^[20]、亲缘鉴定^[25]及早期发育^[26]等方面,而关于游泳能力(尤其是早期发育阶段的游泳能力)未见系统报道。为掌握秦岭细鳞鲑早期的各项游泳特性指标并了解其行为生态习性,本研究利用密闭的游泳水槽,测试其仔鱼感应流速、临界游泳速度和爆发游泳速度等游泳性能指标,并探究其游泳运动过程中的摆尾频率(tail beat frequency, TBF)及运动步长(stride length, SL)等游泳行为指标,为秦岭细鳞鲑苗种培育、放流规格、放流适宜环境的选择以及过鱼设施设计等提供基础数据,旨在提升秦岭细鳞鲑人工繁育及资源养护效率。

1 材料与方法

1.1 实验鱼

实验鱼于 2023 年 4 月在陕西省太白县白云峡秦岭细鳞鲑人工繁育试验基地通过人工驯养的亲鱼繁育所得。随机挑选同一批次生产、体质健壮的秦岭细鳞鲑仔鱼进行实验,其形态学数据见表 1。为有效减小实验鱼应激,实验前将实验鱼转至暂养池(300 cm×44 cm×26 cm)中使用经充分沉淀过滤的自然河道流水暂养 7 d,暂养期间实验

表 1 用于不同游泳能力测定实验的秦岭细鳞鲑生物学参数

Tab. 1 Biological parameters of *Brachymystax tsinlingensis* for different experiment of swimming capacity

指标 index	实验 experiment			
	感应流速 induction velocity	临界游泳速度 critical speed	爆发游泳速度 burst speed	持续与耐久游泳速度 sustained and prolonged speed
实验鱼尾数 number of fish	35	28	35	56
全长/cm total length	2.10±0.13	2.07±0.11	2.08±0.12	2.13±0.13
体长/cm body length	1.85±0.11	1.84±0.12	1.84±0.11	1.97±0.13
体重/g body weight	0.06±0.01	0.07±0.01	0.08±0.01	0.10±0.02

鱼每日投喂 8 次(投喂时间为 08:00、10:00、12:00、14:00、16:00、18:00、20:00 和 22:00), 投喂饵料为丰年虫 (*Artemia salina*) + 水蚯蚓 (*Limnodrilus hoffmeisteri*), 实验开始前 1 d 停止投喂, 避免摄食因素影响实验结果^[20]。每日下午 17:00 清理残饵, 暂养及实验期间水质参数: 溶解氧为 7.0~8.2 mg/L, 水温为(11.4±0.17) °C。

1.2 实验装置

使用丹麦 LoligoSystem 公司生产的游泳水槽 (SW10050) 对鱼类进行游泳能力测试, 测试区体积为 5 L (图 1), 尺寸(长×宽×高)为: 30 cm×7.5 cm×7.5 cm。通过调节变频器使电动机转动, 实验前使用手持流速仪(Flowtherm NT. 2)标定各频率所对应的流速, 水流经测试区前端的蜂窝状稳流器均匀流入测试区。实验时, 用水泵交换水槽测试区外水体, 用充氧泵充氧, 经换水孔交换测试区内外水体, 保持测试区内溶氧高于 7 mg/L, 同时保持水温恒定。

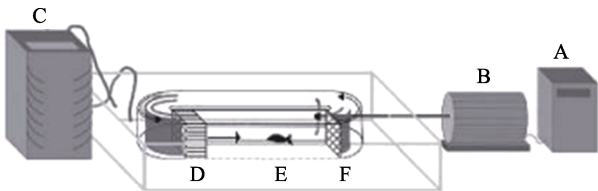


图 1 游泳能力测试水槽^[24]

A. 变频器; B. 电动机; C. 恒温器;
D. 整流器; E. 游泳槽; F. 拦网。

Fig. 1 Swimming ability test flume^[24]

A. variable frequency drive, B. motor, C. thermostat, D. honeycomb matrix for flow alignment, E. swim chamber, F. net.

1.3 游泳能力测试

1.3.1 感应流速 感应流速采用“流速递增法”进行测试, 每次取 1 尾实验鱼放入水槽测试区, 在静水状态下适应 1 h, 避免转运过程中产生的影响。适应结束后, 以微调的方式调节变频器, 当实验鱼游泳姿势摆正至头部朝向来水方向并均匀摆尾, 则认定该流速为实验鱼的感应流速^[5]。

1.3.2 临界游泳速度 采用“流速递增法^[27]对临界游泳速度进行测试, 为消除转运过程中产生的影响, 取 1 尾实验鱼在 1 BL/s (body length, BL) 水流速度下适应 1 h, 适应结束后每隔 20 min 增加

1 BL/s 的流速(实验开始前测量实验鱼体长, 同时结合本实验装置最小流速变量为 1 cm/s, 流速变量设为 2 cm/s), 直至实验鱼不能抵挡水流速度继续游泳, 其尾部或身体贴在下流拦网上且轻拍下游壁面 20 s, 实验鱼仍不重新游动, 则视为力竭, U_{crit} 测试结束。绝对临界游泳速度 (U_{crit} , cm/s) 按照下列公式计算^[28]:

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

式中, U 为实验鱼能持续完成游泳时间 Δt 的游泳速度最大值; Δt 为改变流速的时间间隔(本研究为 20 min); t 为最高水流速度下实验鱼的游泳时间 (min); ΔU 为水流速度的改变量 (1 BL/s)。

相对临界游泳速度 (U'_{crit} , BL/s) 的计算:

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

式中, U_{crit} 为绝对临界游泳速度 (cm/s); BL 为实验鱼体长 (cm)。当实验鱼的横截面积大于游泳测试区 20% 的横截面积时, 会产生堵塞效应, 需对测试结果进行纠正。本研究中所用实验鱼均小于游泳测试区的 10%, 不会引起堵塞效应, 因此无需纠正^[29]。

1.3.3 爆发游泳速度 爆发游泳速度同样采用“流速递增法”进行测试, 与临界游泳速度测试方法及计算公式基本一致, 将实验鱼置于游泳测试区内适应 1 h 后, 每隔 20 s 提升 1 BL/s, 直至实验鱼力竭, 此时对应的流速即为该实验鱼的爆发游泳速度^[28]。

相对爆发游泳速度 (U'_{burst} , BL/s) 计算公式为

$$U'_{burst} = \frac{U_{burst}}{BL} \quad (3)$$

式中, U_{burst} 为绝对爆发游泳速度 (cm/s); BL 为实验鱼体长 (cm)。

1.3.4 持续与耐久游泳速度 本实验采用“固定流速法”测试其持续与耐久游泳能力。将实验鱼转移至水槽测试区中并以 1 BL/s 水流速度适应 1 h, 适应结束后, 在 1 min 内调至设定的流速^[30]。设定的水流速度初始值基于所得平均临界游泳速度, 设定流速为 0.11、0.13、0.15、0.17、0.19、0.21、0.23 和 0.25 m/s, 每种流速下重复 7 尾鱼, 直至实

验鱼疲劳或游泳时间超过 200 min。当某一流速下超过 50% 的实验鱼游泳时间大于 200 min, 则该流速为最大持续游泳速度, 小于最大持续游泳速度的流速值都称为持续游泳速度; 当某一流速下超过 50% 的实验鱼游泳时间小于 20 s, 即将该流速认定为最大耐久游泳速度。最大可持续游泳速度至最大耐久游泳速度间的流速范围均为耐久游泳速度^[3]。

1.3.5 游泳行为分析 根据测试所得实验鱼的平均感应流速和平均临界游泳速度, 分别设置 0.02、0.04、0.06、0.08、0.10、0.12 和 0.14 m/s 7 个实验组, 每组 5 尾鱼。实验开始前, 将实验鱼置于水槽测试区中的静水状态下适应 1 h。适应结束后, 迅速调节至设定流速, 并对每尾实验鱼的游泳行为进行拍摄, 拍摄时间为 10 min。为防外界因素干扰受试鱼, 拍摄过程中用隔板遮挡水槽周围。使用 KMPlayer 视频软件将录制的视频进行逐帧分析^[31], 为减小实验误差, 每个流速从第 2 分钟开始, 记录第 2、5、8 分钟的摆尾频率, 由 3 次的平均值得到摆尾频率。计算公式如下^[31-32]:

$$TBF = \frac{TBT}{t} \quad (4)$$

式中, TBF 是实验鱼的摆尾频率(Hz); TBT 是每尾鱼在被观察期间的摆尾次数; t 为观察时间(本研究为 60 s)。

$$SL = \frac{U}{TBF} \quad (5)$$

式中, SL 为运动步长; U 为游泳速度(BL/s); TBF 为摆尾频率(Hz)。

1.4 数据处理

采用 SPSS 25.0 统计软件进行线性相关性函数拟合分析, 用 Microsoft Excel 2019 软件对数据进行处理和绘图, 差异显著水平为 0.05, 结果均以平均值±标准差($\bar{x} \pm SD$)表示。

2 结果与分析

2.1 感应流速

本研究测得秦岭细鳞鲑仔鱼绝对感应流速范围为 0.02~0.04 m/s, 平均值为(0.03±0.01) m/s; 相对感应流速范围为 1.0~2.42 BL/s, 平均值为

(1.62±0.29) BL/s。实验结果显示绝对感应流速与体长增加变化不明显($P>0.05$); 相对感应流速与体长有显著性关系, 随体长的增加而降低(图 2), 相对感应流速与体长的拟合关系式为 $y=-1.2x+3.87$ ($R^2=0.24, P<0.01$)。

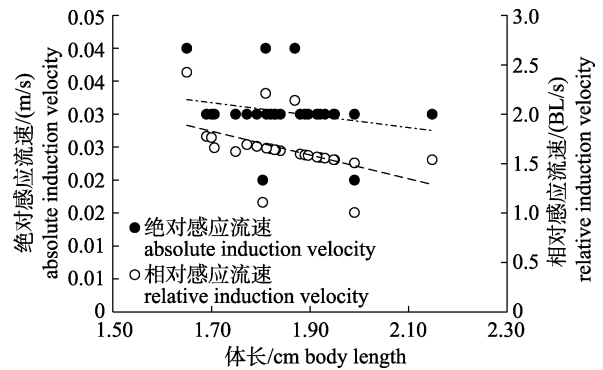


图 2 秦岭细鳞鲑绝对感应流速及相对感应流速与体长的关系

Fig. 2 Relationships between absolute and relative induction velocity and body length of *Brachymystax tsinlingensis*

2.2 临界游泳速度

秦岭细鳞鲑仔鱼绝对临界游泳速度范围为 0.08~0.19 m/s, 平均值为(0.14±0.03) m/s; 相对临界游泳速度范围为 4.40~10.17 BL/s, 平均值为(7.55±1.61) BL/s。实验结果表明绝对临界游泳速度随体长增加变化不明显($P>0.05$); 相对感应流速与体长有显著性关系, 随体长的增加而降低(图 3), 拟合关系式为 $y=-6.69x+19.90$ ($R^2=0.20, P<0.05$)。

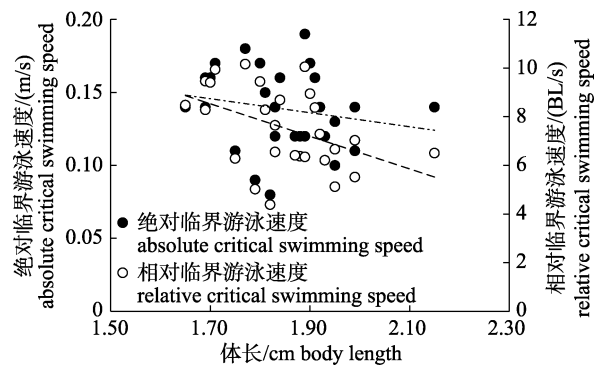


图 3 秦岭细鳞鲑绝对临界游泳速度及相对临界游泳速度与体长的关系

Fig. 3 Relationships between absolute and relative critical swimming speed and body length of *Brachymystax tsinlingensis*

2.3 爆发游泳速度

秦岭细鳞鲑仔鱼绝对爆发游泳速度范围为 0.14~0.28 m/s, 平均值为(0.22±0.03) m/s; 相对爆发游泳速度范围为 7.11~15.38 BL/s, 平均值为(11.48±1.79) BL/s。实验结果显示秦岭细鳞鲑仔鱼绝对爆发游泳速度与体长无显著性关系($P>0.05$)。相对爆发游泳速度与体长呈负相关关系(图 4), 拟合关系式为 $y=-8.32x+27.05$ ($R^2=0.35, P<0.01$)。

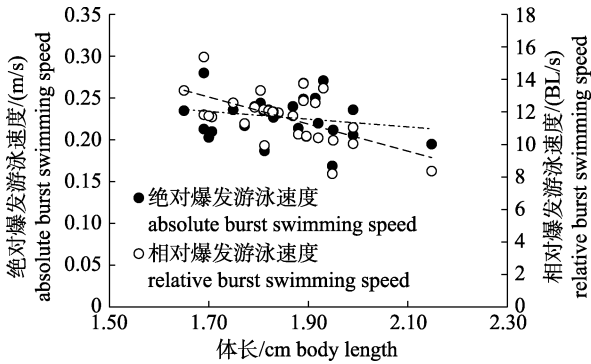


图 4 秦岭细鳞鲑绝对爆发游泳速度及相对爆发游泳速度与体长的关系

Fig. 4 Relationships between absolute and relative burst swimming speed and body length of *Brachymystax tsinlingensis*

2.4 持续与耐久游泳速度

秦岭细鳞鲑仔鱼持续与耐久游泳能力测试发现: 水流速度 V 与游泳时间 T 有显著关系, 游泳时间随着水流速度的递增明显下降(图 5), 拟合关系式为 $y=-24.48x+7.09$ ($R^2=0.79, P<0.01$)。当调节水流速度至 0.13 m/s 时, 超过 50% 的实验鱼游泳时间超过 200 min, 调节至 0.15 m/s 时, 仅有

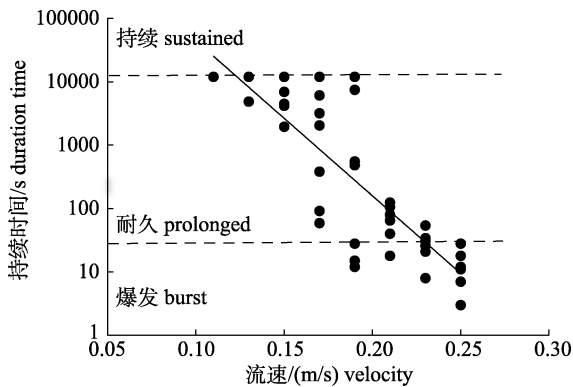


图 5 固定流速下秦岭细鳞鲑的持续游泳时间
Fig. 5 Duration time of *Brachymystax tsinlingensis* at a fixed flow rate

42.9% 的实验鱼游泳时间超过 200 min, 因此, 其最大持续游泳速度为 0.13 m/s, 与平均临界游泳速度相近; 当调节至 0.25 m/s 时, 超过 50% 的实验鱼游泳时间小于 20 s, 故秦岭细鳞鲑仔鱼最大耐久游泳速度为 0.25 m/s, 与平均爆发游泳速度相近。

2.5 游泳行为分析

本次实验观察发现, 实验鱼在 0~0.9 BL/s 流速时, 多数时间尾鳍偶尔摆动或静止于水槽某一位置, 少数时间出现间歇性摆尾的无规则运动。当流速增加至 1.0 BL/s 时, 实验鱼立刻表现出趋流性, 开始连续摆动鱼鳍, 摆尾频率与流速呈线性正相关(图 6), 拟合关系式为 $TFB=0.70U+5.54$ ($R^2=0.89, P<0.01$)。实验鱼游泳过程中运动步长与流速呈线性正相关, 拟合关系式为 $SL=0.09U+0.11$ ($R^2=0.99, P<0.01$)(图 7)。

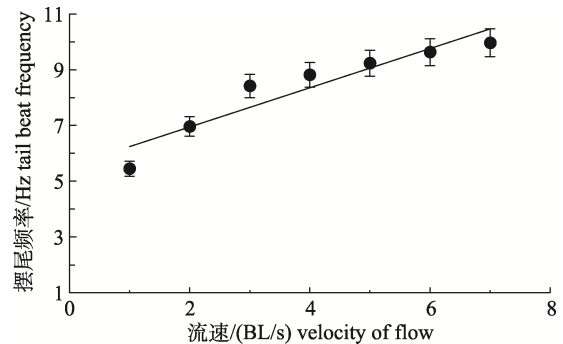


图 6 流速与秦岭细鳞鲑摆尾频率的关系

Fig. 6 Relationship between the velocity and the tail beat frequency of *Brachymystax tsinlingensis*

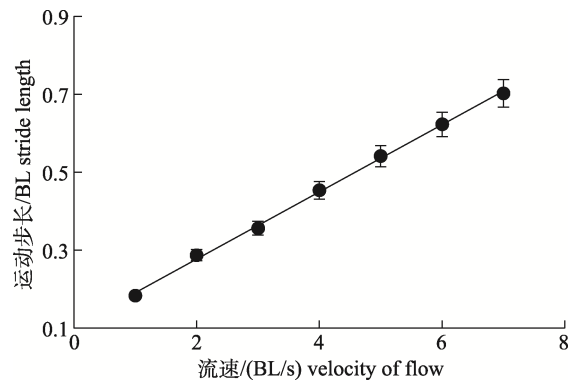


图 7 流速与秦岭细鳞鲑运动步长的关系

Fig. 7 Relationship between the velocity and stride length of *Brachymystax tsinlingensis*

3 讨论

感应流速是鱼类应对水流时刚好能产生趋流

行为反应的流速值^[33]; 与过鱼设施低流速区的设计密切相关^[7], 同时也是鱼类增殖放流时所必须参考的流速, 且放流水域的主流流速应大于鱼的感应流速^[4]。本研究结果显示, 在水温(11.4±0.17) °C 条件下, 秦岭细鳞鲑仔鱼的绝对感应流速为[2~4 cm/s, (0.03±0.01) m/s], 相对感应流速为[1.01~2.42 BL/s, (1.62±0.29) BL/s], 其绝对感应流速与体长增加变化不明显($P>0.05$), 这可能是因实验鱼属同一批次生产且鱼体体长范围较小, 导致感应流速变化较小^[5]。本实验结果与体长相近的鲫(*Carassius auratus*)稚鱼、麦穗鱼(*Pseudorasbora parva*)^[34]所得绝对、相对感应流速相近。与蔡露等^[5]所报道的光唇裂腹鱼(*Schizothorax lissolabiatu*s)、澜沧裂腹鱼(*Schizothorax lantsangensis*)、云南裂腹鱼(*Schizothorax yunnanensis*)、灰裂腹鱼(*Schizothorax griseus*)及后背鲈鲤(*Percocypris retrodorslis*)等鱼类相比, 秦岭细鳞鲑体长均小于上述鱼类, 其绝对感应流速亦小于

上述鱼类。有研究表明, 体长是影响绝对感应流速的重要因素^[33]; 且蔡露等^[5]认为由于鱼类有与生俱来的逆流习性, 当鱼类通过侧线器官感受到水流时开始逆流运动, 根据流体力学原理, 在流速一定的条件下, 体积越大的类似形状物体, 其单位重量所受的水流推动力越小, 在单位重量条件下所受的水流推进力越大, 因而体长较小的鱼更易被水流推动, 从而表现出更小的绝对感应流速。因此, 推测秦岭细鳞鲑仔鱼体长较小也是导致其绝对感应流速较小的原因之一。此外, 秦岭细鳞鲑与同喜急流生境的斑重唇鱼(*Diptychus maculatus* Steindachner)^[3]等鱼类的相对感应流速接近, 而高于草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)、鲢^[35]等喜静水鱼类, 这说明感应流速也与其生活习性及其自然生境特征密切相关^[7]。根据所得实验结果, 仔鱼培育阶段流速应控制在 0.04 m/s 为宜; 放流区域和过鱼设施低流速区流速应大于 0.04 m/s (表 2)。

表 2 秦岭细鳞鲑与其他鱼类感应流速比较

Tab. 2 Comparison of induction velocity between *Brachymystax tsinlingensis* and other fish

种类 specie	体长/cm induction velocity	水温/°C water temperature	绝对感应流速/(m/s) absolute induction velocity	相对感应流速/(BL/s) relative induction velocity	参考文献 reference
秦岭细鳞鲑 <i>Brachymystax tsinlingensis</i>	1.85±0.11	11.4±0.17	0.03±0.01	1.62±0.29	本研究
鲫 <i>Carassius auratus</i>	1.75±0.21	13.2~15.4	0.03±0.01	1.78±0.43	[34]
麦穗鱼 <i>Pseudorasbora parva</i>	2.27±0.46	17.71±0.83	0.04±0.01	1.71±0.51	[34]
光唇裂腹鱼 <i>Schizothorax lissolabiatu</i> s	15.5~34.2	11.1~12.4	0.10~0.23	0.43~0.96	[5]
澜沧裂腹鱼 <i>Schizothorax lantsangensis</i>	17.4~31.4	12.2~13.4	0.10~0.18	0.40~0.89	[5]
云南裂腹鱼 <i>Schizothorax yunnanensis</i>	14.6~24.9	19.1~22.6	0.09~0.13	0.50~0.64	[5]
灰裂腹鱼 <i>Schizothorax griseus</i>	13.9~24.4	11.5~12.9	0.10~0.16	0.55~0.77	[5]
后背鲈鲤 <i>Percocypris retrodorslis</i>	9.5~11.2	13.5~14.6	0.07~0.12	0.71~1.18	[5]
斑重唇鱼 <i>Diptychus maculatus</i> Steindachner	12.90±1.55	18.20±1.22	0.18±0.02	1.40±0.23	[3]
草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>	6.81±0.88	21±1	0.08±0.02	1.13±0.35	[35]
鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	7.94±0.38	21±1	0.07±0.01	0.82±0.07	[35]

临界游泳速度在 1964 年由 Brett^[28]首次提出后,学者们先后对鱼类进行大量研究,其中大多数被应用于过鱼设施设计^[3,11,36]及评价鱼类最大有氧游泳速度^[37],也是游泳能力种间比较的重要参数^[38]。本研究测得秦岭细鳞鲑仔鱼绝对临界游泳速度为(0.14±0.03) m/s,相对临界游泳速度为(7.55±1.61) BL/s。不同鱼类以相对临界游泳速度类比分析发现,在水温相近的条件下,秦岭细鳞鲑仔鱼的相对临界游泳速度与斑重唇鱼(8.58±1.65) BL/s^[3]及厚唇裂腹鱼(*Schizothorax irregularis*)(6.04±1.21) BL/s^[23]相近,而显著大于长丝裂腹鱼(*Schizothorax dolichonema*)(3.04~4.93) BL/s^[39]和短须裂腹鱼(*Schizothorax wangchiachii*)(3.17±0.42) BL/s^[37],可能是鱼的有氧运动能力随着鱼体长的变化而异向变化,这表明较小的鱼可能会比较大的鱼表现出更高的相对游泳能力^[40]。通过拟合体长与游泳速度之间的关系,可直观的比较相同体长不同物种或相同物种不同体长之间游泳速度的差异。秦岭细鳞鲑仔鱼的相对临界游泳速度与体长呈负相关,这与暗色唇鲮(*Semilabeo obscurus*)、华南鲤(*Cyprinus carpio rubrofusculus*)、红鲃(*Bagarius rutilus*)^[36]、长丝裂腹鱼和齐口裂腹鱼(*Schizothorax prenanti*)^[24]等结果一致。当放流区域流速为 0.04~0.14 m/s 时,此规格仔鱼苗适合在该区域放流。

爆发游泳速度指鱼类在短时间内可以达到的最大速度,是鱼类在短时间内进行无氧运动的重要指标,持续时间小于 20 s,常用于掠食及逃亡^[9-11];鱼的爆发游泳速度一般大于 10 BL/s^[41],这与本实验结果一致[(0.22±0.03) m/s, (11.48±1.79) BL/s]。秦岭细鳞鲑仔鱼与齐口裂腹鱼(11.75±2.77) BL/s^[24]和细鳞裂腹鱼(*Schizothorax chongi*)(11.5±0.5) BL/s^[42]的平均相对爆发游泳速度相接近,这可能是其均为冷水习性鱼类且喜溪流环境适应的结果。根据所得爆发游泳速度,应用于过鱼设施设计中其竖缝区或高流速区应低于 0.22 m/s。

持续游泳速度为鱼类可以持续游泳 20 s 到 200 min 最后疲劳的流速,可能是鱼类洄游期间最常用的流速;耐久游泳速度是鱼类可以持续游泳 200 min 以上不会疲劳的流速,可能是鱼类日

常活动中最常用的流速^[43]。本研究测得秦岭细鳞鲑仔鱼最大持续游泳速度约为 0.13 m/s,即最大有氧速度,这与实验得到的临界游泳速度(0.14±0.03) m/s 相近;最大耐久游泳速度为 0.25 m/s,同样相近于爆发游泳速度(0.22±0.03) m/s。在水温、鱼体长相近的实验条件下,秦岭细鳞鲑仔鱼与鲫^[34]稚鱼所得持续游泳速度 0.12 m/s 和耐久游泳速度 0.28 m/s 相近。

鱼类摆尾频率越大则证明鱼类活动越剧烈,其游泳速度相应较高,能量消耗会增大^[38]。摆尾频率与流速的拟合斜率反映了鱼体运动能力,斜率值越小说明运动过程中单位鱼体耗能越少,其能效就越高^[44]。本研究中秦岭细鳞鲑仔鱼摆尾频率和运动步长均与游泳速度呈正相关关系,摆尾频率与相对流速的拟合方程斜率为 0.7036,相比于鳊幼鱼 0.74^[22]、鲤(*Cyprinus carpio*)1.31^[45]、鲢幼鱼 0.98^[46]的斜率小,据此可见秦岭细鳞鲑仔鱼游泳耗能低于上述鱼类,说明其具有较高的游泳效率;而耗能与小规格卵形鲳鲀(*Trachinotus ovatus*)0.7013 相近^[31],这可能是两者均为肉食性鱼类的原因,需更高的能效参与掠食。

综上所述,本研究结果表明在秦岭细鳞鲑苗种培育仔鱼阶段,水流速应控制在 0.04~0.14 m/s;当放流区域流速为 0.04~0.14 m/s 时,此规格鱼苗可适应放流区域流速。这可为秦岭细鳞鲑人工繁育及增殖放流中早期仔鱼阶段适宜流速提供科学参考。需要说明的是,本研究中秦岭细鳞鲑仔鱼游泳能力测试在室内的封闭水槽内完成,与自然生境中空间宽阔、流场波动的水体相比,封闭水槽空间有限且流场较为均匀稳定,两类水体中的流场存在差异,这可能会改变其游泳喜好限制游泳行为从而影响实验测试值;此外,本研究仅选择同一批次仔鱼时期开展实验,而不同鱼体规格需匹配相应测试水槽,因此,后续有必要从环境因素及鱼体规格等角度对秦岭细鳞鲑游泳能力及行为进行研究。

参考文献:

- [1] Palstra A P, Planas J V. Fish under exercise[J]. *Fish Physiology and Biochemistry*, 2011, 37(2): 259-272.

- [2] Zhao Z L, Liang R F, Wang Y M, et al. Study on the swimming ability of endemic fish in the lower reaches of the Yangtze River: A case study[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 22: e01014.
- [3] Lei Q S, Tu Z Y, Shi X L, et al. Swimming ability of *Diptychus maculatus* Steindachner in the Muzati River for fishway design[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2020, 44(10): 1718-1727. [雷青松, 涂志英, 石迅雷, 等. 应用于鱼道设计的新疆木扎提河斑重唇鱼的游泳能力测试[J]. *水产学报*, 2020, 44(10): 1718-1727.]
- [4] He D R, Cai H C. Fish Behavior[M]. Xiamen, China: Xiamen University Press, 1998. [何大仁, 蔡厚才. 鱼类行为学[M]. 厦门: 厦门大学出版社, 1998.]
- [5] Cai L, Wang W Y, Wang H L, et al. Response of induced flow speed to fish body length and its application in flow design of fish passage facilities[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(2): 176-181. [蔡露, 王伟营, 王海龙, 等. 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*, 2018, 34(2): 176-181.]
- [6] Fisher R, Wilson S K. Maximum sustainable swimming speeds of late-stage larvae of nine species of reef fishes[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2004, 312(1): 171-186.
- [7] Plaut I. Critical swimming speed: Its ecological relevance[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 2001, 131(1): 41-50.
- [8] Nelson J A, Gotwalt P S, Reidy S P, et al. Beyond U crit: Matching swimming performance tests to the physiological ecology of the animal, including a new fish 'drag strip'[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 2002, 133(2): 289-302.
- [9] Shi X T, Ke S F, Tu Z Y, et al. Swimming capability of target fish from eight hydropower stations in China relative to fishway design[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2022, 79(1): 124-132.
- [10] Li J T, Liu H X, Xiao Z, et al. Swimming performance of *Cyprinus carpio* (carp) in China[J]. *Heliyon*, 2023, 9(6): e17014.
- [11] Wang H T, Jiang X T, Liu K J, et al. Swimming ability of schizothoracinae fishes in Yarlung Zangbo River of China[J]. *Journal of Fish Biology*, 2024, 105(1): 95-109.
- [12] Webb P W. Hydrodynamics and energetics of fish propulsion[J]. *Bulletin of the Fisheries Research Board of Canada*, 1975, 190: 150-159.
- [13] Beamish F W H. Swimming capacity[M]//Fish Physiology. Amsterdam: Elsevier, 1978: 101-187.
- [14] Li S Z. Discussion on the geographical distribution of Salmonidae in China[J]. *Chinese Journal of Zoology*, 1984, 19(1): 34-37. [李思忠. 中国鲑科鱼类地理分布的探讨[J]. *动物学杂志*, 1984, 19(1): 34-37.]
- [15] Yue P Q, Chen Y Y. China red data book of endangered animals[M]. Beijing: Science Press, 1998. [国家环境保护局, 中华人民共和国濒危物种科学委员会. 中国濒危动物红皮书-鱼类[M]. 北京: 科学出版社, 1998.]
- [16] Zhao Y H, Zhang C G. Threatened fishes of the world: *Brachymystax lenok* tsinlingensis Li, 1966 (Salmonidae)[J]. *Environmental Biology of Fishes*, 2009, 86(1): 11-12.
- [17] Shao J. Study on the cultivation biology of four endemic fishes in the plateau [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2016. [邵俭. 四种高原土著鱼类养殖生物学研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016.]
- [18] Guo X C, Wang Y Z, Zhang L, et al. Retinal structure and opsin expression characteristics of the second filial generation and wild population of *Brachymystax tsinlingensis* Li, 1966[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2023, 30(12): 1445-1456. [郭星辰, 王艺舟, 张林, 等. 秦岭细鳞鲑子二代与野生群体视网膜结构及视蛋白基因表达特征[J]. *中国水产科学*, 2023, 30(12): 1445-1456.]
- [19] Guo X C, Chu Z P, Song R Q, et al. Toxicity of common biocides used in aquaculture to embryos and larvae of *Brachymystax tsinlingensis* Li[J]. *Journal of Fish Biology*, 2024, 104(2): 463-472.
- [20] Zhang L, Lan K Y, Song R Q, et al. Selective behavior of juvenile *Brachymystax tsinlingensis* depends on substrate color, light intensity, and light color[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2023, 44(4): 179-187. [张林, 兰开勇, 宋荣群, 等. 秦岭细鳞鲑稚鱼对底质颜色、光照强度及光色的选择行为[J]. *渔业科学进展*, 2023, 44(4): 179-187.]
- [21] Pagnotta A, Brooks L, Milligan L. The potential regulatory roles of cortisol in recovery from exhaustive exercise in rainbow trout[J]. *Canadian Journal of Zoology*, 1994, 72(12): 2136-2146.
- [22] Liu H J, Wang C F, Zhu L K, et al. Comparative study of critical swimming speeds for juvenile silver and bighead carp[J]. *Journal of Hydroecology*, 2016, 37(4): 63-69. [刘慧杰, 王从锋, 朱良康, 等. 鲢鳙幼鱼临界游泳速度的比较研究[J]. *水生态学杂志*, 2016, 37(4): 63-69.]
- [23] Li Z M, Chen M X, Jin Z J, et al. Swimming ability of *Schizothorax irregularis* ddy in Yarkand River[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(6): 1897-1902. [李志敏, 陈明曦, 金志军, 等. 叶尔羌河厚唇裂腹鱼的游泳能力[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(6): 1897-1902.]
- [24] Wang Y M, Li Z M, Tu Z Y, et al. Fishway design based on

- the swimming ability of two *Schizothorax* species in the Yalung River, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(8): 2785-2792. [王永猛, 李志敏, 涂志英, 等. 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, 2020, 31(8): 2785-2792.]
- [25] Shao J, Luo W, Wei Q, et al. Assignment of parentage by microsatellite analysis in the endangered *Brachymystax lenok* tsinlingensis (Salmonidae)[J]. Aquatic Biology, 2017, 26: 69-73.
- [26] Shi D L, Wei Q W, Sun Q L, et al. Early ontogenesis of *Brachymystax lenok* tsinlingensis[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2012, 19(4): 557-567. [施德亮, 危起伟, 孙庆亮, 等. 秦岭细鳞鲑早期发育观察[J]. 中国水产科学, 2012, 19(4): 557-567.]
- [27] Jain K E, Hamilton J C, Farrell A P. Use of a ramp velocity test to measure critical swimming speed in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)[J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology, 1997, 117(4): 441-444.
- [28] Brett J R. The respiratory metabolism and swimming performance of young sockeye salmon[J]. Journal of the Fisheries Research Board of Canada, 1964, 21(5): 1183-1226.
- [29] Smit H, Amelink-Koutstaal J M, Vijverberg J, et al. Oxygen consumption and efficiency of swimming goldfish[J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology, 1971, 39(1): 1-28.
- [30] Yu X M, Zhang X M. Research progress on measurements of fish swimming ability[J]. South China Fisheries Science, 2011, 7(4): 76-84. [于晓明, 张秀梅. 鱼类游泳能力测定方法的研究进展[J]. 南方水产科学, 2011, 7(4): 76-84.]
- [31] Zhang J, Hu C S, Liu Q, et al. Effect of flow velocity on swimming behavior and exercise physiology of *Trachinotus ovatus*[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2024, 31(4): 381-390. [张静, 胡长圣, 刘前, 等. 流速对卵形鲳鲹游泳行为及运动生理的影响[J]. 中国水产科学, 2024, 31(4): 381-390.]
- [32] Liu X Y, Huang Y P, Yuan X, et al. Swimming ability and behavior of artificially propagated largemouth bronze gudgeon (*Coreius guichenoti*)[J]. Journal of Hydroecology, 2021, 42(2): 94-100. [刘谢驿, 黄应平, 袁喜, 等. 人工繁殖圆口铜鱼幼鱼游泳能力与游泳行为研究[J]. 水生态学杂志, 2021, 42(2): 94-100.]
- [33] Wang X C, Xing J J. Comparison of induction velocities for five fish species[J]. Journal of Hydroecology, 2018, 39(2): 77-81. [王晓臣, 邢娟娟. 5 种鱼感应流速比较分析[J]. 水生态学杂志, 2018, 39(2): 77-81.]
- [34] Zhong Z Y. Study on the correlation of swimming ability indexes of typical fishes in Jinghe and Honghe River basins[D]. Yichang: China Three Gorges University, 2020. [仲召源. 泾河、红河流域典型鱼类各游泳能力指标的相关性研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2020.]
- [35] Bai Y Q, Lu B, Luo J, et al. Induction velocity of juvenile grass carp, silver carp, and darkbarbel catfish[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(8): 2085-2089. [白艳勤, 路波, 罗佳, 等. 草鱼、鲢和瓦氏黄颡鱼幼鱼感应流速的比较[J]. 生态学杂志, 2013, 32(8): 2085-2089.]
- [36] Wang Y M, Ke S F, Lin C Y, et al. Investigation of the swimming ability of typical fish in the Red River(Yuanjiang)basin and its application to the design of fish passage facilities[J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33(6): 1820-1831. [王永猛, 柯森繁, 林晨宇, 等. 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, 2021, 33(6): 1820-1831.]
- [37] Zhang S L, Zhang J B, Qiao Y, et al. Experimental study on aerobic swimming performance and behavior of *Schizothorax wangchiachii* Fang[J]. Journal of Hydroecology, 2016, 37(5): 56-62. [张沙龙, 张家波, 乔晔, 等. 短须裂腹鱼有氧游泳能力及其行为的实验研究[J]. 水生态学杂志, 2016, 37(5): 56-62.]
- [38] Ye C. Effect of flow velocity on swimming behavior and energy metabolism of *Leptobotia elongates*[D]. Chongqing: Southwest University, 2014. [叶超. 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, 2014.]
- [39] Zhang S L, Hou Y Q, Wang L T, et al. Swimming performance and swimming behavior of *Schizothorax dolichonema* Herzenstein[J]. Freshwater Fisheries, 2014, 44(5): 32-37. [张沙龙, 侯铁群, 王龙涛, 等. 长丝裂腹鱼的游泳能力和游泳行为研究[J]. 淡水渔业, 2014, 44(5): 32-37.]
- [40] Ke S F, Li Z M, Jiang Z W, et al. Effect of a vertical half cylinder on swimming of silver carp, *Hypophthalmichthys molitrix*: Implications for microhabitat restoration and fishway design[J]. River Research and Applications, 2019, 35(4): 436-441.
- [41] Zheng J X, Han D J, Hu W B, et al. Fish swimming performance related to fishway design[J]. Journal of Hydroecology, 2010, 31(5): 104-110. [郑金秀, 韩德举, 胡望斌, 等. 与鱼道设计相关的鱼类游泳行为研究[J]. 水生态学杂志, 2010, 31(5): 104-110.]
- [42] Yuan X, Tu Z Y, Han J C, et al. Effects of flow rate on swimming behavior and energy consumption of *Schizothorax chongi*[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2012, 36(2): 270-275. [袁喜, 涂志英, 韩京成, 等. 流速对细鳞裂腹鱼游泳行为及能量消耗影响的研究[J]. 水生生物学报, 2012, 36(2): 270-275.]

- [43] Hinch S G, Standen E M, Healey M C, et al. 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[M]//Aquatic Telemetry. Dordrecht: Springer Netherlands, 2002: 147-160.
- [44] Cai L, Tu Z Y, Yuan X, et al. Swimming capability and swimming behaviour of juvenile *Aristichthys nobilis*[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012, 21(S2): 89-95. [蔡露, 涂志英, 袁喜, 等. 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, 2012, 21(S2): 89-95.]
- [45] Ohlberger J, Staaks G, Hölker F. Effects of temperature, swimming speed and body mass on standard and active metabolic rate in vendace (*Coregonus albula*)[J]. Journal of Comparative Physiology B, Biochemical, Systemic, and Environmental Physiology, 2007, 177(8): 905-916.
- [46] Wang Y, Wang C F, Liu H J, et al. Energy metabolism of juvenile silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*)[J]. Journal of Hydroecology, 2019, 40(4): 101-107. [王瑶, 王从锋, 刘慧杰, 等. 鲢幼鱼运动能量代谢研究[J]. 水生态学杂志, 2019, 40(4): 101-107.]

Swimming ability and behavior of *Brachymystax tsinlingensis* Li, 1966 larvae

YANG Hongcan^{1,3}, LIU Peng^{1,3}, WANG Yizhou¹, LI Junyi², ZHOU Qiong², WANG Zhenlu^{1,3}, SHAO Jian^{1,3}

1. Laboratory of Fishery Resources and Environmental Protection, College of Animal Science; Key Laboratory of Animal Genetics, Breeding and Reproduction in the Plateau Mountainous Region, Guizhou University, Guiyang 550025, China;
2. Key Laboratory of Freshwater Biodiversity Conservation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangtze River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuhan 430223, China;
3. Special Fisheries Research Institute, Guizhou University, Guiyang 550025, China

Abstract: This study used artificially bred *Brachymystax tsinlingensis* Li (1966) larvae [body weight: (0.06±0.02) g, body length: (1.85±0.11) cm] as experimental subjects to explore the swimming ability and behavioral characteristics of *B. tsinlingensis* larvae and scientifically solve the problems of water velocity environment selection, during processes such as seedling cultivation and artificial release. The induced velocity, critical swimming speed, and burst swimming speed were measured using the increasing velocity method at (11.4±0.17) °C, and the sustained swimming ability and durable swimming ability were measured using the fixed velocity method. The results showed that the induced velocity, critical swimming speed, and burst swimming speed were (0.03±0.01) m/s, (0.14±0.03) m/s, and (0.22±0.03) m/s, respectively. Relative induced velocity, relative critical swimming speed and relative burst swimming speed were (1.62±0.29) BL/s, (7.55±1.61) BL/s, and (11.48±1.79) BL/s, respectively. The maximum sustained swimming speed and the maximum durable swimming speed were 0.13 m/s and 0.25 m/s, respectively. This was similar to the mean critical swimming speed and mean burst swimming speed. Continuous and endurance experiments showed that the swimming duration of *B. tsinlingensis* larvae was negatively correlated with flow rate ($\lg T = -24.48X + 7.09$, $R^2 = 0.79$, $P < 0.01$), tail beat frequency was positively and linearly correlated with flow rate ($\text{TFB} = 0.70U + 5.54$, $R^2 = 0.89$, $P < 0.01$), and stride length was linearly and positively correlated with flow rate ($\text{SL} = 0.09U + 0.11$, $R^2 = 0.99$, $P < 0.01$). Therefore, artificial breeding and release were performed at a flow rate of 0.04–0.14 m/s. The results of this study contribute to improving the survival rate of artificial cultivation and release effectiveness of *B. tsinlingensis* and provide a reference for the selection of resource conservation and utilization environments.

Key words: *Brachymystax tsinlingensis*; larvae; swimming behavior; swimming ability; stock enhancement; resource conservation

Corresponding author: SHAO Jian. E-mail: shaojian5098@163.com