



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

雷青松¹, 涂志英², 石迅雷¹, 李志敏¹, 谭均军¹,
柯森繁¹, 石小涛¹, 刘国勇^{2*}

(1. 三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002;

2. 三峡大学生物与制药学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 为了探究斑重唇鱼的游泳能力, 给过鱼设施设计和鱼类游泳行为学研究提供基础参数, 本研究以木扎提河野生斑重唇鱼 (全长 $TL=12\sim 16\text{ cm}$) 为研究对象, 测定了其在 $(16.6\pm 1.6)^\circ\text{C}$ 水温下的感应流速、临界游泳速度、爆发游泳速度及持续与耐久游泳能力。结果显示, 斑重唇鱼感应流速为 $(0.18\pm 0.02)\text{ m/s}$, 相对感应流速为 $(1.40\pm 0.23)\text{ BL/s}$ (BL 为体长); 临界游泳速度为 $(1.02\pm 0.15)\text{ m/s}$, 相对临界游泳速度为 $(8.58\pm 1.65)\text{ BL/s}$; 爆发游泳速度为 $(1.39\pm 0.17)\text{ m/s}$, 相对爆发游泳速度为 $(10.92\pm 1.86)\text{ BL/s}$; 最大持续游泳速度为 0.87 m/s , 最大耐久游泳速度为 1.37 m/s , 与平均爆发游泳速度相近。其持续游泳时间与流速呈负相关 ($\lg T = -5.136X + 8.504$)。当以斑重唇鱼为主要过鱼对象时, 建议为吸引鱼类进入鱼道, 进口流速设计为 $1.02\sim 1.39\text{ m/s}$, 休息池主流设计为 $0.20\sim 1.02\text{ m/s}$, 鱼道竖缝处流速宜低于 0.85 m/s 。鱼道长度为 $1\ 000\text{ m}$ 时, 鱼道内平均水流速度应低于 0.78 m/s 。本研究结果可为新疆木扎提河流域鱼类游泳能力研究提供参考, 对保护日益减少的鱼类资源具有重要意义。

关键词: 斑重唇鱼; 感应流速; 临界游泳速度; 爆发游泳速度; 持续游泳速度; 耐久游泳速度; 鱼道设计; 木扎提河

中图分类号: S 956.3

文献标志码: A

目前我国正处于水利水电建设高峰期, 水利工程建设带来巨大的经济效益的同时, 所引起的生态问题也越来越受到关注^[1-3]。水利工程建设阻隔河流连通性, 直接影响到水中生物基因交流^[4], 尤其对鱼类影响最大^[5]。鱼道作为主要过鱼设施之一, 在恢复河流连通性, 满足鱼类正常生活史, 缓解水工建筑物对鱼类造成的影响方面发挥着越来越重要的作用。我国由于在过鱼建筑物的建设和研究方面起步较晚, 造成鱼类游泳能力资料相对匮乏, 在鱼道设计和鱼类游泳能力研究方面缺少经验^[6]。目前, 我国

鱼道发展正处于黄金时期, 游泳能力资料的缺乏已经成为阻碍我国鱼道发展的一个重要原因, 并制约着鱼道运行效果。鱼类游泳能力与行为是过鱼设施设计中的关键因子^[7], 是进行鱼道设计时必须要考虑的重要因素。实践证明, 缺乏鱼类游泳能力与行为研究的鱼道设计往往运行效果不佳^[8-10]。

斑重唇鱼 (*Diptychus maculatus* Steindachner), 属鲤形目 (Cypriniformes), 鲤科 (Cyprinidae), 裂腹鱼亚科 (Schizothoracinae), 又称“黄瓜鱼”、“斑黄瓜”^[11], 主要分布于新疆的伊犁河流域和塔里

收稿日期: 2019-07-03 修回日期: 2020-04-01

资助项目: 国家自然科学基金 (51679126, 51709152); 湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划鱼类过坝技术项目 (T201703); 三峡大学学位论文培优基金 (2019SSPY008)

通信作者: 刘国勇, E-mail: 278113027@qq.com

木河流域的库玛拉克河、托什干河、叶尔羌河等水域^[12]。斑重唇鱼是新疆的特有鱼类，为当地经济性鱼类。2004 年 9 月被列入保护种^[13]，保护级别为Ⅱ级。斑重唇鱼常见于水流较急、水温较低的河道中，5—9 月为繁殖季节，具有短距离的生殖洄游。目前对斑重唇鱼的研究主要集中在形态、遗传、繁殖等方面^[13-15]，关于游泳能力的研究尚未见报道。随着新疆木扎提河流域的开发，水库和拦河闸的大量修建导致鱼类洄游通道阻隔，对河段鱼类生存及繁殖造成较大影响。斑重唇鱼作为木扎提河的土著物种，其资源量逐年下降，保护木扎提河鱼类资源已经刻不容缓^[12]。本研究以木扎提河野生斑重唇鱼为对象，测试其感应流速、临界游泳速度、爆发游泳速度、持续与耐久游泳速度等游泳能力，以为新疆木扎提河流域鱼类行为学的研究提供基础资料，为斑重唇鱼的人工繁育、保护和木扎提河流域鱼道设计提供参考和依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

斑重唇鱼于 2018 年 8 月下旬用地笼和垂钓的方式捕获，捕获地点为新疆维吾尔自治区阿克苏市拜城县境内木扎提河流域阿合布隆渠首上下游 20 km 内，共捕获斑重唇鱼 224 尾，体长范围为 8.6~17.2 cm，体质量范围为 5~56 g；从中挑选未受伤、体质健康的斑重唇鱼作为测试对象，其形态学参数见表 1。为减轻鱼类应激反应，

实验鱼捕捞后在暂养池中暂养 24 h。暂养池体积为 8 m³ 开敞式水箱，暂养池日换水量约 20%，期间保持对暂养池充氧，溶解氧含量维持在 7.0 mg/L 以上，暂养用水为木扎提河江水，暂养水温为 15.2~19.6 °C。

1.2 实验装置

实验采用丹麦 LoligoSystem 公司生产的游泳水槽 SW10150 进行鱼类游泳能力测试，测试区(游泳区)尺寸(长×宽×高)为 550 mm×140 mm×140 mm，体积为 30 L(图 1)^[4]。测试区域可密封，也可通过潜水泵与外部矩形水槽进行水体交换。由变频器调节电动机转速，从而调节流速大小，测试区上游的蜂窝状稳流装置可保证测试区域流场均匀稳定。测试期间溶解氧含量及水温测定均采用 LoligoSystem 公司配套设备完成。

1.3 感应流速测试

感应游泳速度的测定采用“递增流速法”，将单尾实验鱼放置于游泳能力测试水槽中，静水下适应 1 h 后，每隔 5 s 以微调的方式逐步增大流速，同时观察鱼的游泳行为。当实验鱼流速随着水流速度缓慢增加，出现游泳姿态摆正至头部朝向来水方向并均匀摆尾，该流速即为实验鱼的感应流速。

1.4 临界游泳速度测试

实验开始前，先将实验鱼放置在流速为 1 BL/s (BL 为实验鱼体长) 的游泳能力测试水槽中适应，

表 1 斑重唇鱼形态学参数

Tab. 1 Morphological parameters of *D. maculatus* Steindachner for experiment

指标 index	感应流速测试 induction velocity	临界游泳速度测试 critical speed	爆发游泳速度测试 burst speed	持续与耐久游泳速度测试 sustained and prolonged speed
实验鱼尾数 number of fish	40	38	34	79
体长/cm body length	12.90±1.55	12.09±1.59	12.88±1.54	13.22±1.35
叉长/cm fork length	14.00±1.50	13.21±1.70	14.08±1.52	14.52±1.60
全长/cm total length	15.42±1.65	14.56±1.87	15.45±1.64	14.52±1.60
体宽/cm body width	1.31±0.23	1.23±0.25	1.30±0.20	1.22±0.20
体高/cm body height	1.69±0.28	1.62±0.25	1.62±0.22	1.56±0.26
体质量/g body weight	21.53±8.08	18.03±8.34	21.48±7.27	17.95±8.20
水温/°C water temperature	18.20±1.22	17.40±1.70	17.30±1.50	15.80±1.50
丰满度/(g/cm ³) condition factor	0.57±0.08	0.55±0.07	0.56±0.06	0.56±0.17

注：丰满度=湿重(g)/全长³(cm)×100

Notes: condition factor=mass(g)/total length³(cm)×100

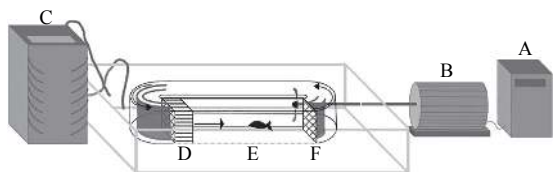


图1 游泳能力测试水槽

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

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

缓解实验鱼的应激反应, 适应时间为 1 h。适应结束后, 采用“流速递增法”进行测试, 每 20 min 递增 1 次流速, 流速增量为 1 BL/s, 直至实验鱼疲劳 (实验鱼停靠在下游网上时, 轻拍下游壁面 20 s, 鱼仍不重新游动, 视为疲劳)^[16]。取出疲劳后的实验鱼并测量体质量及常规形态学参数。相对临界游泳速度 (U_{crit} , BL/s) 按以下公式计算^[17]:

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

式中, U 为鱼能够完成持续时间 Δt 的最大游泳速度, Δt 为改变流速时间的间隔 (20 min), t 为在最高流速下游的时间 (min), ΔU 为速度增量 (1 BL/s)。相对临界游泳速度 (U'_{crit} , BL/s) 为

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

式中, U_{crit} 为绝对临界游泳速度 (cm/s), BL 为实验鱼类体长 (cm)。当实验鱼的最大横截面积大于 10% 的游泳区截面积时, 会造成阻挡效应, 则需要校正, 本研究实验鱼的最大横截面积小于 10% 的游泳区截面积, 不会造成阻挡效应, 不需要校正^[18]。

1.5 爆发游泳速度测定

爆发游泳速度的测定亦采用“递增流速法”, 与临界流速的测试方法基本一致, 只是将流速改变时间间隔改为 20 s, 流速增量仍为 1 BL/s, 鱼体疲劳时对应的流速即为爆发游泳速度^[19]。爆发游泳速度计算公式与临界游泳速度计算公式一致。

通过爆发游泳速度预测鱼道最大流速区域的间隔距离:

$$D = (U_{burst} - V_f) \times 20 \quad (3)$$

式中, D 为游泳距离 (cm), U_{burst} 为持续游泳 20 s 可达到的最大游泳速度 (cm/s), V_f 水流速度 (cm/s)。

1.6 持续与耐久游泳速度测定

采用“固定流速测试法”, 即在 1 BL/s 流速下适应 1 h 后, 在 1 min 内将水流速度调至设定流速^[20], 设定流速的初始值参考实验鱼的平均临界游泳速度, 记录在设定流速下的游泳时间, 当某设定流速下的游泳时间超过 200 min 时停止实验。每个流速下重复 5~10 尾。根据实验结果, 在该速度的基础上调整下一组鱼的设定流速, 流速改变值为 0.1~0.2 m/s, 本测试中设定的流速分别为 0.87、0.97、1.07、1.17、1.27、1.37、1.39 和 1.47 m/s。当某一流速下有 50% 的实验鱼持续游泳时间不小于 200 min 时, 则此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^[21]。当某一流速下有 50% 的实验鱼持续游泳时间不大于 20 s, 则此流速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。

根据可持续游泳时间可以计算出当鱼通过鱼道时, 鱼道内所允许的最大平均水流速度^[16]:

$$V_{f,max} = \max(V_s - d/E_{vs}) \quad (4)$$

式中, $V_{f,max}$ 为鱼道所允许的水流速度 (cm/s), V_s 为目标鱼的游泳速度 (cm/s), d 为鱼道长度 (m), E_{vs} 为目标鱼在 V_s 下的游泳耐力 (s)。

1.7 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 软件对数据进行处理和绘图。用 SPSS 19.0 统计软件进行线性相关性函数拟合分析, 统计数值均以平均值±标准差 (mean±SD) 表示, 差异显著水平为 $P < 0.05$ 。

2 结果

2.1 感应流速

本实验测得斑重唇鱼绝对感应流速为 (0.18 ± 0.02) m/s, 相对感应流速为 (1.40 ± 0.23) BL/s。绝对感应游泳速度随体长增加变化不明显; 相对感应游泳速度随体长的增加呈降低的趋势 (图 2), 相对感应流速与体长的拟合关系式:

$$y = -0.088x + 2.535 (R^2 = 0.367, P < 0.001) \quad (5)$$

2.2 临界游泳速度

斑重唇鱼 U_{crit} 为 (1.02 ± 0.15) m/s, U'_{crit} 为 (8.58 ± 1.65) BL/s。实验结果表明斑重唇鱼绝对临界游

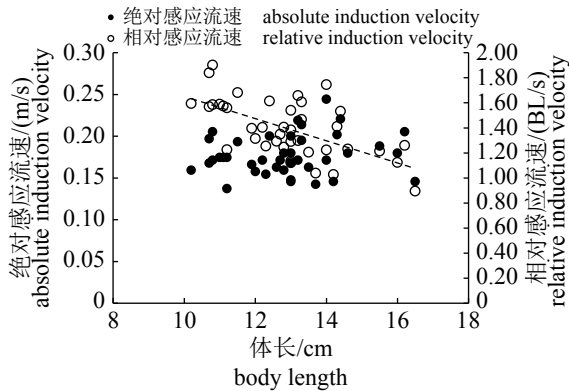


图2 斑重唇鱼绝对感应流速及相对感应流速与体长的关系

Fig. 2 Relationship between absolute and relative induction velocity and body length

泳速度与体长关系不显著, 但相对临界游泳速度随体长增加而减小(图3), 拟合关系式:

$$y = -0.645x + 16.382 (R^2 = 0.390, P < 0.001) (6)$$

2.3 爆发游泳速度

斑重唇鱼的 U_{burst} 为 $(1.39 \pm 0.17) \text{ m/s}$, U'_{burst} 为 $(10.92 \pm 1.86) \text{ BL/s}$, 其绝对爆发游泳速度随体长递增没有明显的线性关系, 相对爆发游泳速度随体长增加呈下降的趋势(图4), 拟合关系式:

$$y = -0.842x + 21.747 (R^2 = 0.484, P < 0.001) (7)$$

斑重唇鱼最小爆发游泳速度为 1.0 m/s , 平均爆发游泳速度为 1.39 m/s , 最大爆发游泳速度为 1.66 m/s 。根据公式(3)可得最大流速区域的间隔距离与水流速度的关系图(图5), 若以最小

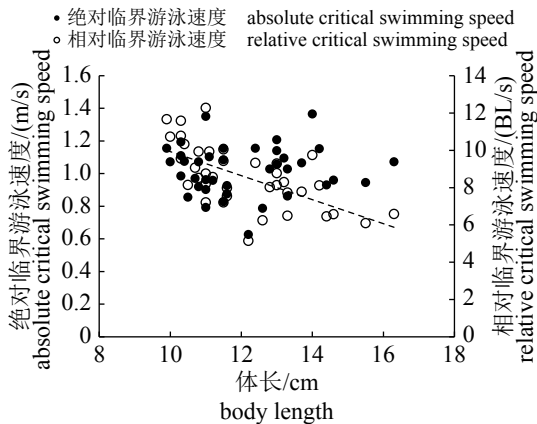


图3 斑重唇鱼绝对临界游泳速度及相对临界游泳速度与体长的关系

Fig. 3 Relationship between absolute and relative critical swimming speed and body length

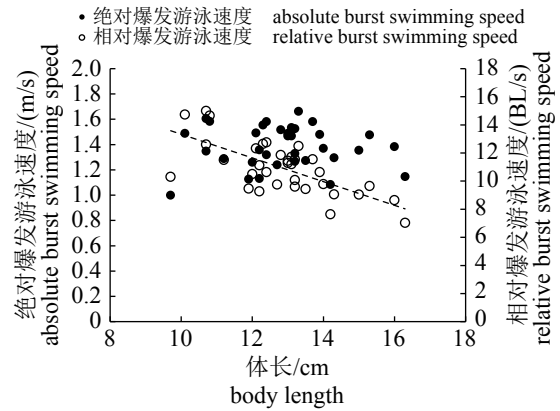


图4 斑重唇鱼绝对爆发游泳速度及相对爆发游泳速度与体长的关系

Fig. 4 Relationships between absolute and relative burst swimming speed and body length

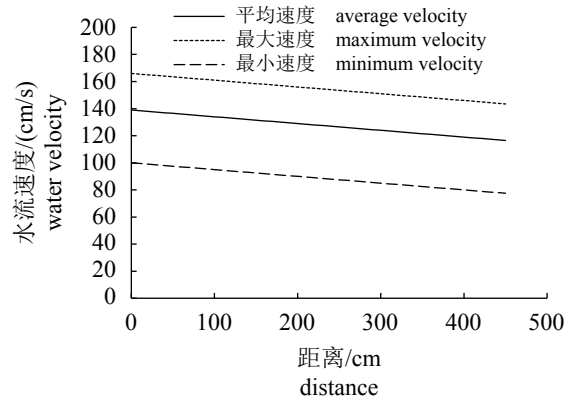


图5 鱼道最大流速区域的间隔距离与所允许的水流速度关系

Fig. 5 Relationship between maximum flow velocity areas distance of fishway and allowable water flow velocity

爆发游泳速度计算, 当鱼道竖缝长度为 30 cm , 鱼道竖缝处流速最大不宜超过 0.85 cm/s , 这样可以保证游泳能力较弱的鱼也能成功通过鱼道。

2.4 持续与耐久游泳速度

通过实验结果可知, 斑重唇鱼的游泳时间随着设定流速的递增明显下降(图6)。初始设定流速接近平均临界游速 (1.07 m/s), 当调节至 0.87 m/s 时, 只有 50% 的实验鱼持续游泳时间大于 200 min ; 当从初始设定流速增至 1.37 m/s 时, 50% 的实验鱼持续游泳时间小于 20 s 。故斑重唇鱼最大持续游泳速度为 0.87 m/s , 最大耐久游泳速度为 1.37 m/s (图6)。拟合斑重唇鱼持续游泳时间 ($T, \text{ s}$) 和流速 ($V, \text{ m/s}$) 的关系:

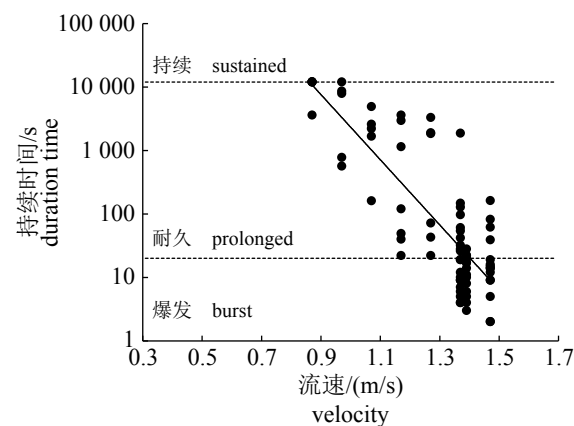


图6 固定流速下斑重唇鱼的持续游泳时间

Fig. 6 Duration time of *D. maculatus* Steindachner at a fixed flow rate

$$\lg T = -5.136V + 8.504 (R^2 = 0.681, P < 0.001) \quad (8)$$

由公式(4)可得鱼道长度与鱼道内最大允许流速关系图(图7)。当鱼道长度 d 为10~1 000 m时,鱼道内所允许最大平均水流速度为0.78~1.03 m/s。

3 讨论

感应流速又称初始流速、起点流速,是鱼刚好能够产生趋流反应的流速值^[22]。本实验测得斑重唇鱼的感应流速与相近水温下厚唇裂腹鱼(*Schizothorax irregularis*)的相对感应流速[(BL: (18.54±4.23) cm, (0.25±0.04) m/s, (1.41±0.28) BL/s)]相近^[23],而二者的绝对感应流速值差别较大。体长是影响绝对感应流速的重要因素^[24],体长越长的鱼具有更大的绝对感应流速。此外,感应流

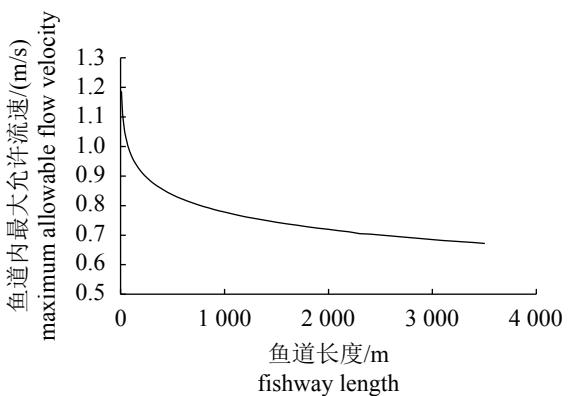


图7 鱼道长度与鱼道内所允许最大平均水流速度的关系

Fig. 7 Maximum allowable flow velocity over fishway length

速与生活习性密切相关^[25],如草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)、鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)、瓦氏黄颡鱼(*Pelteobagrus vachelli*)等江湖洄游性鱼类喜欢静水或者流速较小的区域,对水流的敏感度较低^[22],感应流速远低于喜生活在急流中的斑重唇鱼。

临界游泳速度是鱼类最大可持续有氧运动能力的指标^[17,26],也是游泳能力种间比较的重要参数^[27]。目前国内关于裂腹鱼临界游泳速度的研究较多(表2)。在水温接近的条件下,本实验测得斑重唇鱼与异齿裂腹鱼(*S. oconnori*)、厚唇裂腹鱼、细鳞裂腹鱼(*S. chongi*)及齐口裂腹鱼(*S. prenanti*)的绝对临界游泳速度相近,而大于短须裂腹鱼(*S. wangchiachii*)和长丝裂腹鱼(*S. doli-*

表2 斑重唇鱼与其他裂腹鱼临界游泳能力比较

Tab. 2 Critical swimming capacity of several *Schizothoracids* spp.

种类 species	体长/cm body length	水温/℃ water temperature	绝对临界游泳速度/(cm/s) absolute critical swimming speed	相对临界游泳速度/(BL/s) relative critical swimming speed	参考文献 references
斑重唇鱼 <i>D. maculatus</i>	12.09±1.59	17.4±1.7	102±15	8.58±1.65	本研究
厚唇裂腹鱼 <i>S. irregularis</i>	20.13±3.86	11.5~16.0	117.64±12.34	6.04±1.21	[23]
异齿裂腹鱼 <i>S. oconnori</i>	20.96±2.66	14.6±1.1	101.01±20.86	-	[28]
异齿裂腹鱼 <i>S. oconnori</i>	26.6±11.0	16±1	79.70~144.00	3.07~6.20	[19]
细鳞裂腹鱼 <i>S. chongi</i>	10.60±0.54	26±1	110.28±2.02	11.5±0.5	[29]
巨须裂腹鱼 <i>S. macropogon</i>	24.6±2.6	10	109±7	4.40±0.16	[30]
齐口裂腹鱼 <i>S. prenanti</i>	14.0~17.5	25	-	7.87±0.35	[31]
齐口裂腹鱼 <i>S. prenanti</i>	30.0±1.0	16.2~18.2	65~109	-	[32]
短须裂腹鱼 <i>S. wangchiachii</i>	23.83±2.47	12.1~16.1	75.04±7.60	3.17±0.42	[33]
长丝裂腹鱼 <i>S. dolichonema</i>	19.78±2.32	12.1~16.1	60.13~97.50	3.04~4.93	[34]

注:“-”表示内容不详

Notes:“-”means the content is unknown

chonema)。可能除了与几种鱼的栖息地条件不同外^[23], 还与测试的温度^[35]、实验装置^[36-37]、实验方法^[38]有关。斑重唇鱼的相对临界游泳速度与体长呈显著负相关, 其相互关系可用于比较同种鱼不同体长游泳速度的差异, 也可比较不同鱼类在体长相似情况下的游泳速度^[18, 39]。根据本研究的拟合结果, 可预测相同体长的细鳞裂腹鱼的游泳能力略强。

持续式游泳运动是代谢产物维持在一个较低水平的有氧运动方式。鱼类在洄游和自然状态下的自发游泳多采用该游泳类型^[40]。耐久游泳是运动至疲劳的游泳类型, 在自然界中, 常与持续式游泳运动和偶而性的爆发游泳运动相互穿插发生^[41]。实验得到斑重唇鱼的最大持续游泳速度约为 0.87 m/s, 即为最大有氧运动速度。但当前多采用临界游泳速度 [斑重唇鱼, (1.02±0.15 m/s)] 作为最大有氧运动能力的指标, 这是由于当流速达到 U_{crit} 时, 无氧代谢的贡献常可以忽略, 故可采用临界游泳速度作为近似考察最大有氧运动能力的指标^[21]。

爆发游泳速度是鱼类在短时间内可以达到的最大速度。鱼类经常使用爆发游泳速度捕获猎物, 逃避猎食者^[42]。鱼的爆发游泳速度一般大于 10 BL/s^[10], 本研究得到斑重唇鱼相对爆发流速与细鳞裂腹鱼接近^[16], 但显著大于巨须裂腹鱼^[37]。

在鱼道设计时应充分考虑过鱼对象的游泳能力。例如鱼道内水流速度应大于过鱼对象的感应流速, 否则鱼类进入鱼道内会迷失方向。此外, 鱼类增殖放流时, 放流点的主流流速应大于鱼的感应流速^[43]。根据本实验的研究结果, 在以斑重唇鱼为主要过鱼对象时, 建议鱼道内设计流速不应低于 0.2 m/s。鱼道内孔口或者竖缝处的流速和进出口高流速区的流速都应小于鱼的爆发流速^[37]。斑重唇鱼的爆发游泳速度为 (1.39±0.17) m/s, 斑重唇鱼最小爆发游泳速度为 1.00 m/s, 最大可达 1.66 m/s, 由图 5 可知, 当鱼道竖缝长度为 30 cm, 为保证爆发游泳速度最小的斑重唇鱼可以成功通过竖缝, 建议鱼道竖缝处最大水流速度不宜超过 0.85 m/s。此外, 还可以根据公式 (3) 检验鱼道最大流速区域的间隔距离设置是否会对鱼类上溯造成水流速度障碍。为了帮助鱼类快速找到并成功通过鱼道进口, 在鱼道进口处一般采用较大的流速吸引鱼类, 但进口流速需要在鱼类的耐受范围之内, 通常是大于临

界游泳速度, 小于爆发流速^[44]。建议以斑重唇鱼为主要过鱼对象的鱼道进口流速设计为 1.02~1.39 m/s。鱼道尺寸、休息池距离的设计需考虑过鱼对象的持续游泳时间^[45]。根据游泳时间与游泳速度关系的耐力曲线, 可计算得到鱼类在特定水流速度下的游泳时间和游泳距离, 从而估算不同长度鱼道内所允许的最大平均水流速度 (图 7), 作为鱼道尺寸及流速设计的重要参考。如当鱼道长度为 1 000 m 时, 建议鱼道内所允许的最大平均流速小于 0.78 m/s。鱼道休息池主流设计应介于感应流速和临界流速之间^[23], 建议以斑重唇鱼为主要过鱼对象的休息池主流设计为 0.20~1.02 m/s, 有利于鱼在通过鱼道的过程中快速恢复体力。

本研究中斑重唇鱼游泳能力测试是在封闭水槽内进行的, 水槽内的流场接近均匀流, 与自然水体中的流场有较大差异^[35], 此外水槽的有限空间阻碍了鱼的游泳行为, 造成鱼类游泳能力测试值可能偏小^[30, 46-48], 接下来将在开放水槽内开展鱼类游泳能力测试。此外, 实验时发现斑重唇鱼擅跳跃, 鱼的跳跃能力也是鱼道设计的重要参考内容^[49], 为了更好地为鱼道设计提供可靠资料, 有必要对斑重唇鱼的游泳能力及游泳行为进一步探究。

参考文献 (References):

- [1] 陈凯麒, 葛怀凤, 郭军, 等. 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, 2013, 34(4): 1-6.
Chen K Q, Ge H F, Guo J, et al. Study on the situation analysis of fish passages and the key issues of adaptive management in China[J]. Journal of Hydroecology, 2013, 34(4): 1-6(in Chinese).
- [2] 王思莹, 杨文俊, 黄明海, 等. 我国鱼类洄游通道和生境恢复技术研究现状分析[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(8): 11-17.
Wang S Y, Yang W J, Huang M H, et al. Fish passage and habitat restoration techniques in China: state of the art[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(8): 11-17(in Chinese).
- [3] 王义川, 王煜, 林晨宇, 等. 鱼道过鱼效果监测方法述评[J]. 生态学杂志, 2019, 38(2): 586-593.
Wang Y C, Wang Y, Lin C Y, et al. A review on monitoring methods for the effectiveness of fishway[J].

- Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(2): 586-593(in Chinese).
- [4] Laborde A, González A, Sanhueza C, *et al.* Hydropower development, riverine connectivity, and non-sport fish species: criteria for hydraulic design of fishways[J]. *River Research and Applications*, 2016, 32(9): 1949-1957.
- [5] 倪欢, 戎贵文, 郑青辉, 等. 鱼道设计与运行过程中影响过鱼效率的相关问题分析[J]. *人民珠江*, 2019, 40(4): 76-81.
- Ni H, Rong G W, Zheng Q H, *et al.* Analysis on fish passing efficiency problems in design and operation of fishways[J]. *Pearl River*, 2019, 40(4): 76-81(in Chinese).
- [6] Shi X T, Kynard B, Liu D F, *et al.* Development of fish passage in China[J]. *Fisheries*, 2015, 40(4): 161-169.
- [7] 蔡露, 金瑶, 潘磊, 等. 过鱼设施设计中的鱼类行为研究与问题[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(11): 3458-3466.
- Cai L, Jin Y, Pan L, *et al.* Issues on fish behaviors in the design of fish passage facilities[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(11): 3458-3466(in Chinese).
- [8] 王博, 石小涛, 周琛琳, 等. 北盘江两种鱼感应流速[J]. *北华大学学报(自然科学版)*, 2013, 14(2): 223-226.
- Wang B, Shi X T, Zhou C L, *et al.* Induced velocity of two species of fishes in Beipan River[J]. *Journal of Beihua University (Natural Science Edition)*, 2013, 14(2): 223-226(in Chinese).
- [9] 欧昌雪, 张羽, 王二平, 等. 面向鱼道设计的模型鱼洄游特征流速试验研究[J]. *中国农村水利水电*, 2018(10): 69-72, 76.
- Ou C X, Zhang Y, Wang E P, *et al.* Experimental research on the characteristic water-flow velocity for the upstream migration of model fish oriented to fishway design[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2018(10): 69-72, 76(in Chinese).
- [10] 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, 3(5): 104-110.
- Zheng J X, Han D J, Hu W B, *et al.* Fish swimming performance related to fishway design[J]. *Journal of Hydroecology*, 2010, 3(5): 104-110(in Chinese).
- [11] 任波, 马燕武, 吐尔逊, 等. 新疆渭干河土著鱼类[J]. *水产学杂志*, 2005, 18(2): 53-58.
- Ren B, Ma Y W, Tu E X, *et al.* Autochthonous fishes in Weigan river of Xinjiang Autonomous Region[J]. *Chinese Journal of Fisheries*, 2005, 18(2): 53-58(in Chinese).
- [12] 李国刚, 冯晨光, 汤永涛, 等. 新疆内陆河土著鱼类资源调查[J]. *甘肃农业大学学报*, 2017, 52(3): 22-27.
- Li G G, Feng C G, Tang Y T, *et al.* Survey of native fish resources in inland river system in Xinjiang[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2017, 52(3): 22-27(in Chinese).
- [13] 新疆维吾尔自治区人民政府. 新疆维吾尔自治区重点保护水生野生动物名录 [R]. 乌鲁木齐: 新疆维吾尔自治区人民政府, 2004.
- The People's Government of the Xinjiang Uygur Autonomous Region. List of Xinjiang Uygur autonomous region key protected aquatic wildlife[R]. Urumqi: The People's Government of the Xinjiang Uygur Autonomous Region, 2004(in Chinese).
- [14] 杨天燕, 孟玮, 马燕武, 等. 基于线粒体 *COI* 和 *Cyt b* 基因序列对新疆两水系斑重唇鱼遗传结构的分析[J]. *淡水渔业*, 2014, 44(4): 41-47.
- Yang T Y, Meng W, Ma Y W, *et al.* Genetic structure analysis of *Diptychus maculatus* between two water systems in Xinjiang based on mitochondrial *COI* and *Cyt b* gene sequences[J]. *Freshwater Fisheries*, 2014, 44(4): 41-47(in Chinese).
- [15] 蔡林钢, 牛建功, 李红, 等. 巩乃斯河新疆裸重唇鱼和斑重唇鱼产卵场微环境研究[J]. *干旱区研究*, 2013, 30(01): 144-148.
- Cai L G, NIU J G, Li H, *et al.* Study on micro-environment at the spawning fields of *Gymnodiptychus dybowskii* and *Diptychus maculates* in the Kunes River[J]. *Arid Zone Research*, 2013, 30(01): 144-148(in Chinese).
- [16] 涂志英. 雅砻江流域典型鱼类游泳特性研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2012.
- Tu Z Y. Research of swimming performance of several typical fish in the Yalong River[D]. Wuhan: Wuhan University, 2012 (in Chinese).
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 叶超, 王珂, 黄福江, 等. 异齿裂腹鱼游泳能力初探[J]. *中国水产学会主办 sponsored by China Society of Fisheries*

- 淡水渔业, 2013, 43(3): 33-37.
- Ye C, Wang K, Huang F J, *et al.* Swimming capability of *Schizothorax oconnori*[J]. *Freshwater Fisheries*, 2013, 43(3): 33-37(in Chinese).
- [20] 于晓明, 张秀梅, 张沛东. 凡纳滨对虾的游泳能力及游泳疲劳后的生理反应[J]. *中国水产科学*, 2009, 16(4): 533-540.
- Yu X M, Zhang X M, Zhang P D. Swimming ability and physiological response to swimming fatigue in *Litopenaeus vannamei*[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2009, 16(4): 533-540(in Chinese).
- [21] Hammer C. Fatigue and exercise tests with fish[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology-Part A: Physiology*, 1995, 112(1): 1-20.
- [22] 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.
- 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(in Chinese).
- [23] 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.
- 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(in Chinese).
- [24] 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.
- Wang X C, Xing J J. Comparison of induction velocities for five fish species[J]. *Journal of Hydroecology*, 2018, 39(2): 77-81(in Chinese).
- [25] Plaut I. Critical swimming speed: its ecological relevance[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology-Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 2001, 131(1): 41-50.
- [26] Zeng L Q, Cao Z D, Fu S J, *et al.* Effect of temperature on swimming performance in juvenile southern catfish (*Silurus meridionalis*)[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology-Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 2009, 153(2): 125-130.
- [27] 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.
- Ye C. Effect of flow velocity on swimming behavior and energy metabolism of *Leptobotia elongates*[D]. Chongqing: Southwest University, 2014 (in Chinese).
- [28] Ke S F, Tu Z Y, Li Z M, *et al.* Effects of acute temperature changes on the swimming abilities and oxygen consumption of *Ptychobarbus kaznakovi* from the Lancang River[J]. *Journal of Applied Ichthyology*, 2019, 35(3): 755-761.
- [29] 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.
- 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(in Chinese).
- [30] 涂志英, 袁喜, 王从锋, 等. 亚成体巨须裂腹鱼游泳能力及活动代谢研究[J]. *水生生物学报*, 2012, 36(4): 682-688.
- Tu Z Y, Yuan X, Wang C F, *et al.* Swimming capability and activity metabolism of subadult *Schizothorax macropogon*[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2012, 36(4): 682-688(in Chinese).
- [31] 蔡露, 刘国勇, Taupier R, 等. 齐口裂腹鱼幼鱼疲劳后游泳特性恢复状况研究[J]. *水生生物学报*, 2013, 37(6): 993-998.
- Cai L, Liu G Y, Rachel T, *et al.* The recovery of swimming performance of juvenile *Schizothorax prenanti* after fatigue[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2013, 37(6): 993-998(in Chinese).
- [32] 傅菁菁, 李嘉, 安瑞冬, 等. 基于齐口裂腹鱼游泳能力的竖缝式鱼道流态塑造研究[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2013, 45(3): 12-17.
- Fu J J, Li J, An R D, *et al.* Study of creating vertical slot fishway flow field based on swimming ability of *Schizothorax prenanti*[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2013, 45(3): 12-17(in Chinese).
- [33] 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.
- 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(in Chinese).
- [34] 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.
- 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(in Chinese).
- [35] 涂志英, 袁喜, 韩京成, 等. 鱼类游泳能力研究进展[J]. *长江流域资源与环境*, 2011, 20(S1): 59-65.
- Tu Z Y, Yuan X, Han J C, *et al.* Research advances on fish swimming capability[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2011, 20(S1): 59-65(in Chinese).
- [36] Kern P, Cramp R L, Gordos M A, *et al.* Measuring U_{crit} and endurance: equipment choice influences estimates of fish swimming performance[J]. *Journal of Fish Biology*, 2018, 92(1): 237-247.
- [37] Tudorache C, Vianen P, Blust R, *et al.* Longer flumes increase critical swimming speeds by increasing burst-glide swimming duration in carp *Cyprinus carpio*, L.[J]. *Journal of Fish Biology*, 2007, 71(6): 1630-1638.
- [38] 田凯, 曹振东, 付世建. 速度增量及持续时间对瓦氏黄颡鱼幼鱼临界游泳速度的影响[J]. *生态学杂志*, 2010, 29(3): 534-538.
- Tian K, Cao Z D, Fu S J. Effects of velocity increment and duration on critical swimming speed of juvenile darkbarbel catfish[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(3): 534-538(in Chinese).
- [39] 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.
- 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(in Chinese).
- [40] Reidy S P, Kerr S R, Nelson J A. Aerobic and anaerobic swimming performance of individual Atlantic cod[J]. *The Journal of Experimental Biology*, 2000, 203(2): 347-357.
- [41] 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.
- [42] 金志军, 马卫忠, 张袁宁, 等. 异齿裂腹鱼通过鱼道内流速障碍能力及行为[J]. *水利学报*, 2018, 49(4): 512-522.
- Jin Z J, Ma W Z, Zhang Y N, *et al.* Assessing the swimming ability and performance of *Schizothorax oconnori* to cross velocity barriers in fishway[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 49(4): 512-522(in Chinese).
- [43] 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.
- 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(in Chinese).
- [44] 丁少波, 施家月, 黄滨, 等. 大渡河下游典型鱼类的游泳能力测试[J]. *水生态学杂志*, 2020, 41(01): 46-52.
- Ding S B, Shi J Y, Huang B. Swimming capability of six typical fish species from the lower Dadu River[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 41(01): 46-52(in Chinese).
- [45] 涂志英, 李丽萍, 袁喜, 等. 圆口铜鱼幼鱼可持续游泳能力及活动代谢研究[J]. *淡水渔业*, 2016, 46(1): 33-38.
- Tu Z Y, Li L P, Yuan X, *et al.* Endurance swimming capability and activity metabolism of *Coreius guichenoti* juvenile[J]. *Freshwater Fisheries*, 2016, 46(1): 33-38(in Chinese).
- [46] Castro-Santos T, Sanz-Ronda F J, Ruiz-Legazpi J. Breaking the speed limit - comparative sprinting performance of brook trout (*Salvelinus fontinalis*) and brown trout (*Salmo trutta*)[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2013, 70(2): 280-293.
- [47] Peake S. An evaluation of the use of critical swimming speed for determination of culvert water velocity criteria for smallmouth bass[J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 2004, 133(6): 1472-1479.
- [48] Peake S J, Farrell A P. Fatigue is a behavioural response in respirometer - confined smallmouth bass[J]. *Journal of Fish Biology*, 2006, 68(6): 1742-1755.
- [49] Shi X T, Jin Z J, Liu Y, *et al.* Can age-0 silver carp cross laboratory waterfalls by leaping?[J]. *Limnologica*, 2018, 69: 67-71.

Swimming ability of *Diptychus maculatus* Steindachner in the Muzati River for fishway design

LEI Qingsong¹, TU Zhiying², SHI Xunlei¹, LI Zhimin¹, TAN Junjun¹,
KE Senfan¹, SHI Xiaotao¹, LIU Guoyong^{2*}

(1. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. College of Biological & Pharmaceutical Sciences, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: In order to explore the swimming ability of *Diptychus maculatus* Steindachner, provide reliable parameters and data for the design of fish facilities and the study of fish swimming behavior, the swimming capability of wild *D. maculatus* Steindachner (total length TL=12-16 cm) from the Muzati River in Xinjiang was measured at (16.6±1.6) °C water temperature. Results showed that the induction velocity was (0.18±0.02) m/s [relative induction velocity was (1.40±0.23) BL/s]; the critical swimming speed was (1.02±0.15) m/s [relative critical swimming speed was (8.58±1.65) BL/s]; the burst swimming speed was (1.39±0.17) m/s [relative burst swimming speed was (10.92±1.86) BL/s]; the maximum sustained swimming speed was 0.87 m/s and the maximum prolonged swimming speed was 1.37 m/s, which was close to the average burst swimming speed. The swimming time was negatively related to swimming velocity ($\lg T = -5.136X + 8.504$). When the target fish of fishway is *D. maculatus* Steindachner, it is recommended the flow rate at entrance should be from 1.02 to 1.39 m/s for attracting fish into the fishway, and the main flow rate in the rest pool should range from 0.20 to 1.02 m/s. The highest velocity in the fishway should be less than 0.85 m/s. When the length of the fishway is 1 000 m, the average water flow velocity in the fishway should be less than 0.78 m/s. This investigation provided a reference for the study of swimming capability of fish in the Xinjiang Muzhati River and is of great significance for the protection of endangered fish.

Key words: *Diptychus maculatus* Steindachner; induction velocity; critical swimming speed; burst swimming speed; sustained swimming speed; prolonged swimming speed; fishway design; the Muzati River

Corresponding author: LIU Guoyong. E-mail: 278113027@qq.com

Funding projects: National Nature Science foundation of China(51679126, 51709152); University Superior Mid-Age Technology Innovation Team Plan of Fish Passing Dam Program in Hubei Province(T201703); Research Fund for Excellent Dissertation of China Three Gorges University(2019SSPY008)