

Chen J, Yu L X, Wang M, *et al.* Research on the swimming performance of juvenile *Schizothorax* fish in the Yarlung Zangbo River basin [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2026, 50(3): 032603. [陈俊, 俞立雄, 王敏, 等. 雅鲁藏布江流域不同裂腹鱼幼鱼游泳能力研究 [J]. 水生生物学报, 2026, 50(3): 032603.]

雅鲁藏布江流域不同裂腹鱼幼鱼游泳能力研究

陈俊^{1,2} 俞立雄² 王敏^{2,3} 黄翠² 刘明典² 朱峰跃^{2*} 段辛斌^{2*}

(1. 华中农业大学水产学院, 武汉 430070; 2. 中国水产科学研究院长江水产研究所, 国家农业科学重庆观测实验站, 武汉 430223; 3. 西南大学生命科学学院, 淡水鱼类资源与生殖发育教育部重点实验室, 重庆 400715)

摘要: 本研究以雅鲁藏布江流域的五种裂腹鱼(*Schizothorax* spp.)幼鱼为对象, 探讨其个体游泳能力的种间差异, 旨在为鱼道的科学设计与流域生态保护提供基础数据。研究对象包括异齿裂腹鱼(*Schizothorax oconnori*)、巨须裂腹鱼(*S. macropogon*)、拉萨裂腹鱼(*S. waltoni*)、拉萨裸裂尻鱼(*Schizopygopsis younghusbandi*)和尖裸鲤(*Oxygymnocypris stewartii*), 实验鱼体长依次为(9.2±0.8)、(3.1±0.1)、(8.3±0.8)、(5.8±0.9)和(5.4±0.6) cm。采用流速递增法, 测定了5种裂腹鱼的感应流速(U_{ind})、临界游泳速度(U_{crit})和暴发游泳速度(U_{burst})。结果表明: 绝对感应流速(U_{ind}^a)的平均值为2.3—6.7 cm/s, 相对感应流速(U_{ind}^r)的平均值为0.4—0.8 BL/s; 绝对临界游泳速度(U_{crit}^a)平均值为31.1—60.8 cm/s, 相对临界游泳速度(U_{crit}^r)平均值为6.3—10.4 BL/s; 绝对暴发游泳速度(U_{burst}^a)平均值为39.7—88.1 cm/s, 相对暴发游泳速度(U_{burst}^r)平均值为9.7—14.6 BL/s。单因素方差分析(One-way ANOVA)及体长-游泳能力指标的双变量相关分析(Bivariate correlation)表明, 5种裂腹鱼幼鱼在游泳能力表现上存在一定的差异。其中, 异齿裂腹鱼和拉萨裂腹鱼的感应流速较高, 而尖裸鲤和拉萨裸裂尻鱼的暴发游泳速度具有优势, 这种差异可能反映了其对急流和缓流生境的不同适应策略。本研究获得了高原裂腹鱼类游泳能力的重要参数, 揭示了不同裂腹鱼种类在个体游泳能力方面的差异, 并为雅鲁藏布江流域鱼道的设计与生态保护提供了科学依据。

关键词: 雅鲁藏布江; 裂腹鱼; 游泳能力; 过鱼设施

中图分类号: S917.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-3207(2026)03-032603-09

doi: 10.3724/1000-3207.2025.2025.0198 CSTR: 32229.14.SSSWXB.2025.0198



近年来, 雅鲁藏布江流域梯级水电工程的陆续开发导致河流生境片段化加剧, 引发了高原裂腹鱼类(*Schizothorax* spp.)产卵场萎缩、种群隔离和基因交流受阻等一系列生态问题^[1-3]。在此背景下, 构建过鱼设施, 重建洄游通道, 已成为流域生态修复的核心策略及研究热点^[4]。然而, 部分投入使用的鱼道运行效果评估显示其过鱼效率并不理想^[5, 6],

表明当前鱼道设计在鱼类行为适应性方面仍存在不足。鱼道等过鱼设施的水力设计需紧密结合目标鱼类的游泳能力参数, 以帮助鱼类快速定位入口并顺利通过全程。在通常情况重点关注的游泳参数包括: (1)感应流速(Induction velocity, U_{ind})^[7]是鱼类能够感知并产生趋流反应的最小流速, 为诱导鱼类进入鱼道提供了基础水力门槛^[8]; (2)临界游泳速

收稿日期: 2025-06-12; 修订日期: 2025-10-11

基金项目: 国家重点研发计划课题“长江上游物理生境变化对鱼类影响机理与综合适宜性评价”(2023YFC3205903); 中华人民共和国农业农村部财政专项(西南地区重点水域渔业资源与环境调查); 中国水产科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(2023TD09)资助 [Supported by the National Key R & D Program of China “Impact Mechanisms of Physical Habitat Changes on Fish in the Upper Yangtze River and Integrated Habitat Suitability Assessment” (2023YFC3205903); Finance Special Fund of Chinese Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People’s Republic of China (Fisheries Resources and Environment Survey in the Key Water Areas of Southwest China); Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund, CAFS (2023TD09)]

作者简介: 陈俊(2000—), 男, 硕士研究生; 研究方向为鱼类行为学。E-mail: 15071319108@163.com

通信作者: 朱峰跃, 助理研究员; 主要从事渔业资源、渔业生态、鱼类行为学研究。E-mail: zhufy@yfi.ac.cn 段辛斌, 研究员; 研究方向为渔业资源。E-mail: duan@yfi.ac.cn *共同通信作者

度(Critical swimming speed, U_{crit})反映鱼类可持续克服的最大流速,是评价其有氧运动能力与持久上溯能力的关键指标^[9, 10]; (3)暴发游泳速度(Burst swimming speed, U_{burst})则代表鱼类在短时间内可达到的最高流速,常用于穿越高速水流区或障碍物,是鱼道内高流速段设计的重要上限依据^[11, 12]。科学确定上述参数对鱼道流速的合理布置具有重要指导意义。

我国鱼类游泳能力研究起步于20世纪初,早期多集中于四大家鱼等平原经济鱼类^[13]。近年来虽已开始关注高原裂腹鱼,但相关数据仍较为匮乏,特别是幼鱼阶段游泳能力随发育的变化规律尚不明确^[14–17]。国内对鲤科鱼类体长-流速关系的总结为参数化设计提供了依据^[18];国际上关于鱼类功能形态与游泳性能^[19]及复杂流场中游泳行为^[20]的研究,则为解释物种差异和实验结果外推提供了理论支撑。

基于此,本研究选取雅鲁藏布江中上游的优势类群:异齿裂腹鱼(*S. oconnori*)、巨须裂腹鱼(*S. macropogon*)、拉萨裂腹鱼(*S. waltoni*)、拉萨裸裂尻鱼(*S. younghusbandi*)和尖裸鲤(*O. stewartii*)为研究对象,其中拉萨裂腹鱼、巨须裂腹鱼和异齿裂腹鱼主要栖息于干流主槽与滩区急流带;而尖裸鲤和拉萨裸裂尻鱼则更多分布于支流交汇口与岸滩缓流区^[21]。在鱼种筛选过程中,综合考虑了其生态位特征、保护等级、经济价值及种群脆弱性等多维度指标^[22],旨在通过系统测定与分析上述鱼类游泳能力差异,为雅鲁藏布江流域鱼道设计参数的优化和生态保护措施的制定提供科学依据,以期为雅鲁藏布江流域的水生生物栖息生境修复提供数据支持,促进高原河流生态保护实践的发展。

1 材料与方法

1.1 实验用鱼

本研究选用实验对象种类和规格如表1所示。

在开放水槽中进行鱼类行为学实验。实验鱼由西藏尼曲生态渔业有限公司提供,通过充氧水包运输至湖北监利长江四大家鱼老江河原种场,在循环养殖系统中暂养1周,以确保鱼体活性良好。暂养期间,系统持续24h为水体供氧,保持溶解氧饱和度在90%以上,且每日换水量约为暂养水体的40%。整个实验(含暂养和测试阶段)所用养殖用水和实验用水均采用经双层200目滤网过滤的老江河水,水温维持在8—10℃,溶解氧维持在8.0—10.0 mg/L。实验时,随机挑选健康、规格相近的实验鱼作为研究对象,并且每条实验鱼仅使用1次,以确保样本的独立性。

1.2 实验装置

鱼类游泳速度测定实验使用购自丹麦Loligo System公司的实验水槽。水槽主要由电动机、变频器、螺旋桨和游泳室构成。其原理是通过变频器调节电动机转速,驱动螺旋桨旋转,在游泳室内产生可调流速的水流。利用流速仪(LS45A,重庆水文仪器厂)测定不同叶轮转速下水槽游泳区域(尺寸:20 cm×20 cm×70 cm,总容积90 L)的水流速度,据此控制叶轮转速以实现目标游泳速度的设置。使用溶氧仪(YSI550A,上海维赛仪器公司)监测溶解氧浓度。水槽上方安装的海康威视摄像机(DS-2CD3T46WDV3-L)持续拍摄实验鱼(位于游泳室内)的游泳行为视频,供后续分析(图1)。

1.3 实验设计

从每种鱼中随机挑选健康、规格相近的实验鱼60尾,平均分成3组(感应流速组、临界游泳速度组、暴发游泳速度组),每组20尾,进行5次重复实验。在实验开始时,将实验鱼移至实验水槽的测试区域。控制水槽内的环境条件与暂养条件一致,随后让实验鱼在低流速(5 cm/s)下适应2h。

1.4 游泳速度测定方法

感应流速测试 感应流速采用“递增流速

表1 实验个体规格

Tab. 1 Experimental individual specifications

种类 Species	体长 Body length (cm)		全长 Total length (cm)		体重 Body weight (g)	
	范围 Range	均值 Mean	范围 Range	均值 Mean	范围 Range	均值 Mean
尖裸鲤 <i>O. stewartii</i>	4.5—6.0	5.4	5.5—7.2	6.4	1.2—2.3	1.7
拉萨裂腹鱼 <i>S. waltoni</i>	7.3—9.2	8.3	8.9—11.0	9.9	6.5—12.4	9.2
拉萨裸裂尻鱼 <i>S. younghusbandi</i>	5.1—7.1	5.7	6.3—7.8	6.8	1.8—2.3	2.0
巨须裂腹鱼 <i>S. macropogon</i>	2.9—3.5	3.1	3.6—4.4	3.9	0.4—0.7	0.5
异齿裂腹鱼 <i>S. oconnori</i>	8.3—10.5	9.2	9.7—12.5	11.1	8.7—15.4	11.8

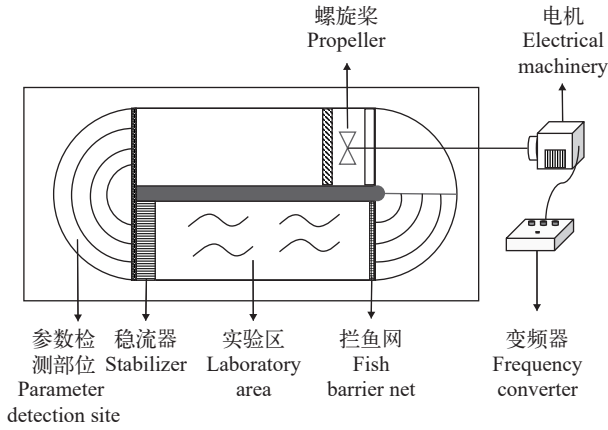


图1 鱼类游泳能力测试水槽

Fig. 1 Annular flume for testing fish swimming capacity

法”测定。将单尾实验鱼放入测试水槽,在静水中适应1h后,先将流速降至0 cm/s。待实验鱼游至拦鱼网一侧(鱼头朝向网)且无突然性游泳行为^[23],以每5s递增一次水流的速度逐步提高流速。当实验鱼对水流做出反应,即调转鱼头朝向水流方向并开始均匀摆尾时,此时的流速即为该鱼的感应流速。实验结束后取出实验鱼,测量包括体长、体重等形态学数据。绝对感应流速(U_{ind}^a , cm/s),相对感应流速(U_{ind}^r , BL/s)的计算公式如下所示,其中BL指Body Length,是一种标准化单位,用于消除鱼类个体大小差异对游泳性能比较的影响^[8]。

$$U_{ind}^r = U_{ind}^a / BL \quad (1)$$

临界游泳速度 临界游泳速度采用“递增流速法”测定。将单尾实验鱼置于1.0 BL/s流速下适应1h。之后,每隔20min按1.0 BL/s的梯度逐级增加流速^[8],直至实验鱼达到疲劳状态(实验鱼尾部接触下游拦网,轻拍水面20s后仍无法恢复自主游动)^[24]。在实验结束后取出实验鱼,测量包括体长、体重等形态学数据。此时的速度为绝对临界游泳速度 U_{crit}^a , cm/s)。

$$U_{crit}^a = U_t + (t/\Delta t)\Delta U \quad (2)$$

式中, U_t 为实验鱼在 Δt 时间段内能维持的最高游泳速度(cm/s); Δt 为相邻两次水流流速改变的间隔时长($\Delta t=20\text{min}$); t 为实验鱼在达到最高流速(U_t)后持续游泳的时间(min); ΔU 为每次水流流速的增量(cm/s)。

相对临界游泳速度计算:

$$U_{crit}^r = U_{crit}^a / BL \quad (3)$$

式中, U_{crit}^r 为相对临界游泳速度(BL/s);BL为实验鱼的体长(cm)。

暴发游泳速度 暴发游泳速度的测定同样采用“递增流速法”。将单尾实验鱼置于1.0 BL/s流速下适应1h。随后,每隔20s按1.0 BL/s的梯度逐级增加流速,持续观察实验鱼的游泳行为,直至其疲劳。实验鱼疲劳时对应的水流流速即为其暴发游泳速度^[8, 24]。实验结束后取出实验鱼,测量包括体长、体重等形态学数据。绝对暴发游速(U_{burst}^a , cm/s)计算方法:

$$U_{burst}^a = U + (t/\Delta t)\Delta U \quad (4)$$

式中, ΔU 为每次水流流速增量(cm/s); U 为实验鱼疲劳前水流速度(cm/s); t 为该时段实验鱼持续游泳所用的时间(s); Δt 为相邻两次水流流速改变的间隔时长($\Delta t=20\text{s}$)。

相对暴发游泳速度由绝对暴发速度(cm/s)除以鱼体长(cm)得到:

$$U_{burst}^r = U_{burst}^a / BL \quad (5)$$

式中, U_{burst}^r 为相对暴发游泳速度(BL/s);BL为实验鱼体长(cm)。

1.5 数据分析

实验数据使用Excel 2019进行整理。使用Origin 2024软件进行统计分析。实验鱼的体重、体长、感应流速(U_{ind})、临界游泳速度(U_{crit})和暴发游泳速度(U_{burst})的实验数据采用Shapiro-Wilks函数进行正态检验和方差齐性检验。采用单因素方差分析(One-way ANOVA)实验鱼的感应流速(U_{ind})、临界游泳速度(U_{crit})和暴发游泳速度(U_{burst})的差异性,并使用Tukey法进行事后多重比较和显著性检验。采用双变量相关分析(Bivariate correlation)检验5种裂腹鱼游泳能力指标与其体长之间的关系,并对数据进行线性相关性函数拟合。统计值均以平均值±标准差(mean±SD)表示, $P<0.05$ 表示存在显著性。为避免体长差异对结论的混淆,本文同时呈报绝对速度(cm/s)与相对速度(BL/s)。在解释物种间差异时优先以相对速度为依据进行分析,并在讨论中明确绝对速度比较的适用范围与局限性。

2 结果

2.1 五种裂腹鱼幼鱼感应流速

本研究通过水动力行为实验测定了裂腹鱼亚科5种鱼类的感应流速参数见表2。绝对感应流速平均值为2.3—6.7 cm/s,5种实验鱼的绝对感应流速大小:巨须裂腹鱼<拉萨裸裂尻鱼<尖裸鲤<拉萨裂腹鱼<异齿裂腹鱼。相对感应流速平均值为0.4—0.8 BL/s,5种实验鱼的相对感应流速大小:拉萨裸

裂尻鱼<尖裸鲤<异齿裂腹鱼<巨须裂腹鱼<拉萨裂腹鱼。此外,如图2a和2b所示,拉萨裸裂尻鱼、巨须裂腹鱼、异齿裂腹鱼的绝对感应流速与相对感应流速与体长无显著性关系($P>0.05$),尖裸鲤、拉萨裂腹鱼的绝对感应流速与相对感应流速呈负相关趋势($P<0.05$)。

2.2 五种裂腹鱼幼鱼临界游泳速度

裂腹鱼亚科5种鱼类的临界游泳速度参数见表3。绝对临界游泳速度平均值为31.1—60.8 cm/s, 5种实验鱼的绝对临界游泳速度大小: 巨须裂腹鱼<尖裸鲤<拉萨裂腹鱼<拉萨裸裂尻鱼<异齿裂腹鱼。相对临界游泳速度平均值为6.3—10.4 BL/s, 5种实验鱼的相对临界游泳速度大小: 异齿裂腹鱼<拉萨裂腹鱼<巨须裂腹鱼<拉萨裸裂尻鱼<尖裸鲤。如图2c和2d所示, 5种裂腹鱼的绝对临界游泳速度与体长

无显著性差异($P>0.05$)。尖裸鲤、拉萨裂腹鱼、巨须裂腹鱼、异齿裂腹鱼的相对临界游泳速度与体长无显著性差异($P>0.05$), 拉萨裸裂尻鱼的相对临界游泳速度呈负相关趋势($P<0.05$)。

2.3 五种裂腹鱼幼鱼暴发游泳速度

裂腹鱼亚科5种鱼类的暴发游泳速度参数见表4。绝对暴发游泳速度平均值为39.7—88.1 cm/s, 5种实验鱼的绝对暴发游泳速度大小: 巨须裂腹鱼<尖裸鲤<拉萨裂腹鱼<拉萨裸裂尻鱼<异齿裂腹鱼。相对暴发游泳速度平均值为9.7—14.6 BL/s, 5种实验鱼的相对暴发游泳速度大小: 异齿裂腹鱼<尖裸鲤<拉萨裂腹鱼<巨须裂腹鱼<拉萨裸裂尻鱼。如图2e和2f所示, 拉萨裂腹鱼、巨须裂腹鱼、异齿裂腹鱼的绝对暴发游泳速度与体长均无显著性关系($P>0.05$), 尖裸鲤、拉萨裸裂尻鱼的绝对暴发游泳速度

表2 五种裂腹鱼的感应流速

Tab. 2 Rheotaxis velocities of five *Schizothorax* fishes

种类 Species	体长范围 Body length (cm)	绝对感应流速 U_{ind}^a (cm/s)	平均值 Mean±SD (cm/s)	相对感应流速 U_{ind}^r (BL/s)	平均值 Mean±SD (BL/s)
尖裸鲤 <i>O. stewartii</i>	5.3—6.0	2.0—3.1	2.8±0.45	0.3—0.6	0.5±0.11
拉萨裂腹鱼 <i>S. waltoni</i>	7.3—9.2	6.0—7.0	6.5±0.46	0.7—1.0	0.8±0.12
拉萨裸裂尻鱼 <i>S. younghusbandi</i>	5.1—7.1	2.0—3.0	2.6±0.42	0.4—0.6	0.4±0.09
巨须裂腹鱼 <i>S. macropogon</i>	2.9—3.3	2.0—3.0	2.3±0.44	0.6—0.9	0.8±0.11
异齿裂腹鱼 <i>S. oconnori</i>	8.4—10.5	6.0—7.0	6.7±0.42	0.6—0.8	0.7±0.08

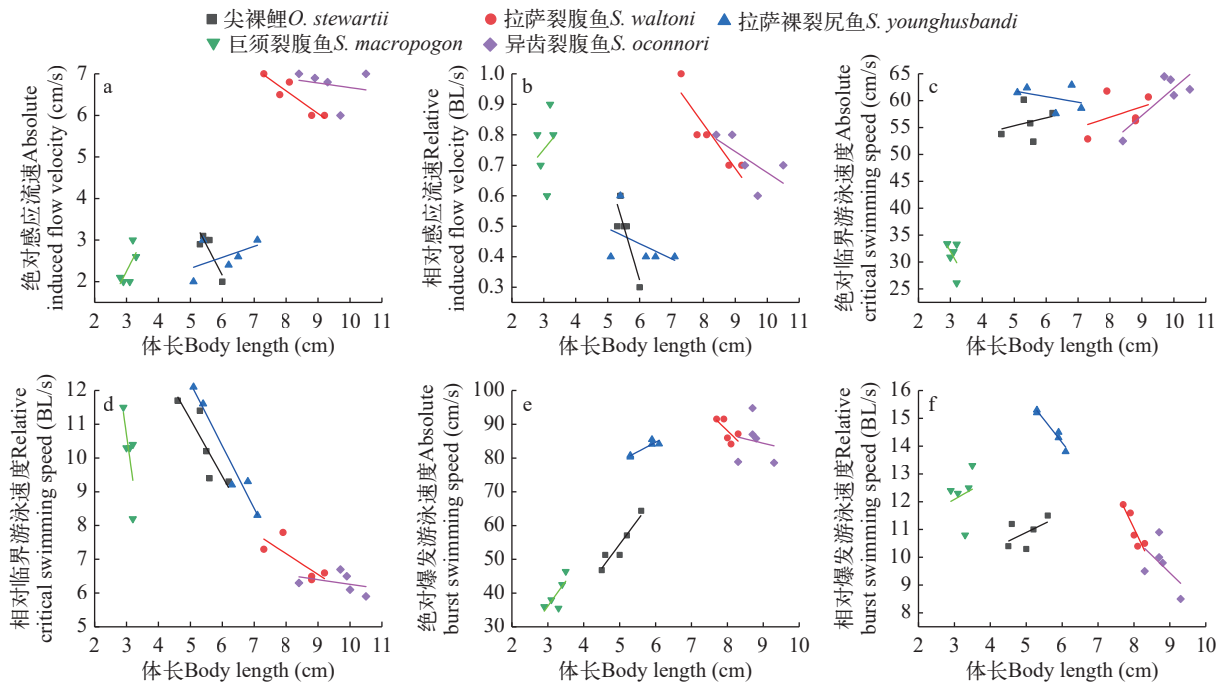


图2 五种裂腹鱼绝对、相对游泳速度与体长关系

Fig. 2 Relationship of absolute/relative swimming speeds to body length in five *Schizothorax* species

均呈正相关趋势($P<0.05$), 拟合关系式见表 5。尖裸鲤、拉萨裂腹鱼、巨须裂腹鱼、异齿裂腹鱼的相对暴发游泳速度与体长均无显著性差异($P>0.05$), 拉萨裸裂尻鱼的相对暴发游泳速度呈负相关趋势($P<0.05$), 拟合关系式见表 5。

3 讨论

3.1 五种裂腹鱼幼鱼感应流速比较分析

为有效引导鱼类产生溯河行为, 鱼道进口设计流速需超过目标鱼类的感应流速^[12]。本研究发现,

拉萨裂腹鱼与异齿裂腹鱼的绝对感应流速高于其他实验鱼种(图 3a), 这可能与实验鱼的体长差异有关。李阳希等^[25]发现, 齐口裂腹鱼(*Schizothorax prenanti*)和短尾高原鳅(*Triplophysa breviceauda*)的绝对感应流速均随体长增大而增大, 与本研究结果一致。在相对感应流速分析中, 拉萨裂腹鱼、巨须裂腹鱼、异齿裂腹鱼的相对感应流速显著高于其他实验鱼种($P<0.05$; 图 3a)。该结果与 Lin 等^[26]的研究相符, 表明水流选择压力对鱼类趋流行为存在塑造作用。Xie 等^[27]发现拉萨裂腹鱼、巨须裂腹鱼和

表 3 五种裂腹鱼的临界游泳速度

Tab. 3 Critical swimming speeds of five *Schizothorax* species

种类 Species	体长 Body length (cm)	绝对临界游泳速度 U_{crit}^a (cm/s)	平均值 Mean±SD (cm/s)	相对临界游泳速度 U_{crit}^r (BL/s)	平均值 Mean±SD (BL/s)
尖裸鲤 <i>O. stewartii</i>	4.6—6.2	52.4—60.2	56.0±3.10	9.3—11.7	10.4±1.11
拉萨裂腹鱼 <i>S. waltoni</i>	7.3—9.2	52.9—61.8	57.7±3.59	6.4—7.8	6.9±0.61
拉萨裸裂尻鱼 <i>S. younghusbandi</i>	5.1—7.1	57.6—62.9	60.6±2.36	8.3—12.1	10.1±1.65
巨须裂腹鱼 <i>S. macropogon</i>	2.9—3.2	26.1—33.4	31.1±2.99	8.2—11.5	10.1±1.20
异齿裂腹鱼 <i>S. oconnori</i>	8.4—10.5	52.5—64.5	60.8±4.85	5.9—6.7	6.3±0.32

表 4 五种裂腹鱼的暴发游泳速度

Tab. 4 Burst swimming speeds of five *Schizothorax* species

种类 Species	体长 Body Length (cm)	绝对暴发游泳速度 U_{burst}^a (cm/s)	平均值 Mean±SD (cm/s)	相对暴发游泳速度 U_{burst}^r (BL/s)	平均值 Mean±SD (BL/s)
尖裸鲤 <i>O. stewartii</i>	4.5—5.6	46.8—64.4	54.2±6.78	10.3—11.5	10.9±0.52
拉萨裂腹鱼 <i>S. waltoni</i>	7.7—8.3	84.2—91.6	88.1±3.35	10.4—11.9	11.0±0.67
拉萨裸裂尻鱼 <i>S. younghusbandi</i>	5.3—6.1	80.3—85.5	83.0±2.29	13.8—15.3	14.6±0.63
巨须裂腹鱼 <i>S. macropogon</i>	2.9—3.5	35.5—46.4	39.7±4.66	10.8—13.3	12.2±0.91
异齿裂腹鱼 <i>S. oconnori</i>	8.3—9.3	78.6—94.8	85.0±6.69	8.5—10.9	9.7±0.87

表 5 五种裂腹鱼的 U_{ind} 、 U_{crit} 、 U_{burst} 与体长相关性分析

Tab. 5 Correlation analysis of U_{ind} , U_{crit} , and U_{burst} with body length in five *Schizothorax* species

种类 Species	U_{ind}^a & BL	U_{ind}^r & BL	U_{crit}^a & BL	U_{crit}^r & BL	U_{burst}^a & BL	U_{burst}^r & BL
尖裸鲤 <i>O. stewartii</i>	$U_{ind}^a = -1.47BL + 10.99$ $R^2 = 0.77; P < 0.05$	$U_{ind}^r = -0.36BL + 2.46$ $R^2 = 0.77; P < 0.05$	$U_{crit}^a = 1.47BL + 47.96$ $R^2 = 0.08; P > 0.05$	$U_{crit}^r = -1.68BL + 19.55$ $R^2 = 0.76; P > 0.05$	$U_{burst}^a = 14.30BL - 17.06$ $R^2 = 0.90; P < 0.05$	$U_{burst}^r = 0.63BL + 7.75$ $R^2 = 0.30; P > 0.05$
拉萨裂腹鱼 <i>S. waltoni</i>	$U_{ind}^a = -0.55BL + 10.95$ $R^2 = 0.83; P < 0.05$	$U_{ind}^r = -0.15BL + 2.00$ $R^2 = 0.83; P < 0.05$	$U_{crit}^a = 1.95BL + 41.35$ $R^2 = 0.18; P > 0.05$	$U_{crit}^r = -0.62BL + 12.09$ $R^2 = 0.62; P > 0.05$	$U_{burst}^a = -10.30BL + 170.52$ $R^2 = 0.47; P > 0.05$	$U_{burst}^r = -2.70BL + 32.64$ $R^2 = 0.80; P > 0.05$
拉萨裸裂尻鱼 <i>S. younghusbandi</i>	$U_{ind}^a = 0.26BL + 1.00$ $R^2 = 0.26; P > 0.05$	$U_{ind}^r = -0.05BL + 0.74$ $R^2 = 0.21; P > 0.05$	$U_{crit}^a = -1.05BL + 67.02$ $R^2 = 0.15; P > 0.05$	$U_{crit}^r = -1.86BL + 21.50$ $R^2 = 0.95; P < 0.05$	$U_{burst}^a = 5.64BL + 50.82$ $R^2 = 0.85; P < 0.05$	$U_{burst}^r = -1.64BL + 23.98$ $R^2 = 0.95; P < 0.05$
巨须裂腹鱼 <i>S. macropogon</i>	$U_{ind}^a = 1.50BL - 2.25$ $R^2 = 0.49; P > 0.05$	$U_{ind}^r = 0.13BL + 0.37$ $R^2 = 0.05; P > 0.05$	$U_{crit}^a = -10.56BL + 63.64$ $R^2 = 0.21; P > 0.05$	$U_{crit}^r = -6.71BL + 30.79$ $R^2 = 0.53; P > 0.05$	$U_{burst}^a = 14.80BL - 8.28$ $R^2 = 0.58; P > 0.05$	$U_{burst}^r = 0.72BL + 9.91$ $R^2 = 0.04; P > 0.05$
异齿裂腹鱼 <i>S. oconnori</i>	$U_{ind}^a = -0.11BL + 7.77$ $R^2 = 0.04; P > 0.05$	$U_{ind}^r = -0.07BL + 1.37$ $R^2 = 0.43; P > 0.05$	$U_{crit}^a = 5.09BL + 11.47$ $R^2 = 0.68; P > 0.05$	$U_{crit}^r = -0.14BL + 7.64$ $R^2 = 0.12; P > 0.05$	$U_{burst}^a = -2.59BL + 107.71$ $R^2 = 0.02; P > 0.05$	$U_{burst}^r = -1.25BL + 20.72$ $R^2 = 0.27; P > 0.05$

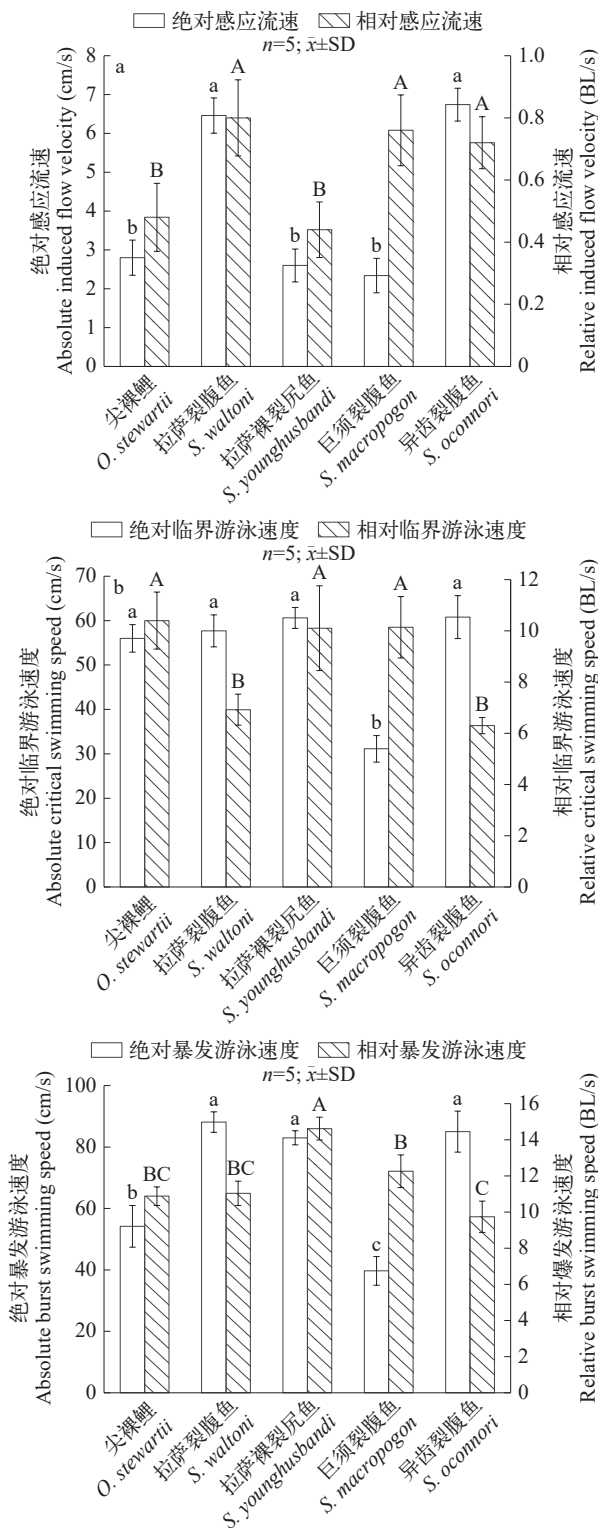


图3 五种裂腹鱼游泳速度比较

Fig. 3 Comparison of swimming speeds among five *Schizothorax* species

不同小写字母表示五种裂腹鱼绝对游泳速度差异显著 ($P < 0.05$); 不同大写字母表示五种裂腹鱼相对游泳速度差异显著 ($P < 0.05$)

Different lowercase letters indicate significant differences in absolute swimming speeds ($P < 0.05$); Different uppercase letters indicate significant differences in relative swimming speeds ($P < 0.05$)

异齿裂腹鱼主要栖息于干流深水区急流环境, 其发达的侧线系统和强健的偶鳍结构, 通过降低机械感受器敏感度来适应高湍流生境。而尖裸鲤和拉萨裸裂尻鱼偏好沙质底质的缓流区^[28]。Hou等^[29]还发现急流栖息物种的感应流速值普遍比静水物种高42%—65%。在本研究中, 尖裸鲤作为高等特化种, 侧线系统发达, 且毛细胞密度较高, 可感知较低的流速刺激^[27], 易受水流影响而发生运动行为, 而原始特化等级的拉萨裂腹鱼、巨须裂腹鱼、异齿裂腹鱼三种鱼类则适应于急流区的生境条件^[15], 需要更高的流速刺激才会发生运动行为。在开展雅鲁藏布江中上游以拉萨裂腹鱼、巨须裂腹鱼、异齿裂腹鱼、尖裸鲤和拉萨裸裂尻鱼为过鱼对象的鱼道设计时, 为确保对主要过鱼对象的有效吸引, 建议过鱼设施进口流速设定不低于0.4 BL/s。

3.2 五种裂腹鱼幼鱼临界游泳速度比较分析

临界游泳速度作为评估鱼类持续有氧游泳能力的重要指标, 其生理基础主要源于红肌纤维的有氧代谢水平, 能够有效表征鱼类在自然水流环境中的运动适应策略^[30, 31]。已有研究表明, 临界游泳速度与物种的系统发育地位和地理种群特征密切相关^[32, 33]。本研究结果表明, 巨须裂腹鱼的绝对临界游泳速度值相对其他鱼种较低。考虑到本研究中使用样本间存在显著的体长差异(表4), 该绝对差异部分可由体长差异解释。为减少体长带来的干扰, 本文进一步采用相对临界游泳速度来比较种间差异。通过对比不同鱼种的相对临界游泳速度, 发现尖裸鲤、拉萨裸裂尻鱼和巨须裂腹鱼显著高于拉萨裂腹鱼和异齿裂腹鱼 ($P < 0.05$; 图3b)。这一差异模式与Hammer^[34]提出的鱼类游泳能力异速生长模型高度一致。本研究发现拉萨裂腹鱼和异齿裂腹鱼体型较大, 可能导致其单位体长游泳效能降低, 这与Verhille等^[35]对鲟幼鱼的研究结果一致。体型较大的个体(如异齿裂腹鱼)其单位体长肌肉功率输出显著降低, 需调动更多肌群维持游泳, 导致其相对临界游泳速度(6.3 BL/s)低于小体型物种(尖裸鲤, 10.4 BL/s; $P < 0.05$)。这种单位体长运动效能下降的现象, 符合鱼类代谢的异速增长规律, 即体型增长时, 肌肉有氧代谢功率的提升幅度小于体质量的增幅^[36, 37]。

3.3 五种裂腹鱼幼鱼暴发游泳速度比较分析

暴发游泳速度作为反映鱼类瞬时逃逸能力的关键指标, 其生理学基础主要源于快缩型白肌纤维的瞬时功率输出特性。McClelland^[38]认为鱼类白肌纤维的高肌浆网密度和快速钙离子释放通道, 能够实现毫秒级的收缩响应, 这种以无氧代谢为主导的能量供给模式虽持续时间有限, 却为躲避天敌或发

起捕食提供了关键的生存适应机制。在绝对暴发游泳速度的比较中,尖裸鲤和拉萨裸裂尻鱼的绝对暴发游泳速度均随体长增大而升高,表明体长对鱼类游泳能力存在显著影响(图 2c)。Zhu 等^[39]的栖息地调查显示,尖裸鲤作为肉食性鱼种,主要栖息于底质粗糙的缓流区,其伏击式捕食策略降低了对高速追击的生态需求。这一现象也反映出不同类群在相似生境压力下的趋同进化规律^[11]。从相对暴发游泳速度来看,拉萨裸裂尻鱼的值表现出显著高于其他实验鱼种($P < 0.05$; 图 2c),这可能源于形态适应特征对运动性能的调控作用。已有研究表明,拉萨裸裂尻鱼的流线型体高比和发达的尾柄肌肉群,可有效降低水流阻力并提升推进效率^[12, 25],此特征与其在主河道急流区的栖息习性形成良好的生态适应耦合。

3.4 展望与局限

本研究获取的游泳能力基础数据可为雅鲁藏布江流域内鱼道工程设计参数的优化提供科学依据,对提升水利工程的生态保护效能具有重要意义。然而,本研究仍存在一定的局限性。由于实验鱼样本获取有限,不同物种的实验鱼在体长范围上存在差异,且重叠有限。为此,本研究使用相对速度来标准化体型效应,但这种体长差异仍可能对种内相关性分析(如体长与游泳速度的关系)产生一定影响。因此,本文的相关结论主要适用于本研究所涵盖的特定体长范围的幼鱼。未来的研究可进一步扩大样本量,涵盖更连续和重叠的体长范围以及成鱼阶段,以期更系统地揭示裂腹鱼游泳能力的种内和种间变化规律。

4 结论

在本研究所涵盖的幼鱼体长范围内,5种裂腹鱼在游泳能力表现上存在一定差异:拉萨裂腹鱼和异齿裂腹鱼感应流速较高,而尖裸鲤和拉萨裸裂尻鱼在暴发游速上更具优势,相对临界游速则以巨须裂腹鱼、尖裸鲤和拉萨裸裂尻鱼表现更优。由于不同物种体长差异较大,绝对游速的比较可能受到体型影响,因此相对速度指标更能反映物种间的真实差异。总体而言,5种裂腹鱼呈现出与其生境适应相一致的游泳策略,本研究结果可为雅鲁藏布江优势鱼类过鱼设施的设计与优化提供参考。

(作者声明本文符合出版伦理要求)

参考文献:

- [1] Van der Oost R, Beyer J, Vermeulen N P E. Fish bioaccumulation and biomarkers in environmental risk assessment: a review [J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2003, **13**(2): 57-149.
- [2] Choi J W, Park C S, An K G. Development of fishway assessment model based on the fishway structure, hydrology and biological characteristics in the lotic ecosystem [J]. *Journal of Ecology and Environment*, 2016, **39**(1): 71-80.
- [3] Castro-Santos T. Optimal swim speeds for traversing velocity barriers: an analysis of volitional high-speed swimming behavior of migratory fishes [J]. *The Journal of Experimental Biology*, 2005, **208**(Pt 3): 421-432.
- [4] 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]. 水生生态学杂志, 2018, **39**(2): 77-81.]
- [5] Wen J Y, Chen A, Cao N, et al. A review of effectiveness assessment and monitoring technologies for fish passage facilities [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2019, **39**(5): 49-55. [温静雅, 陈昂, 曹娜, 等. 国内外过鱼设施运行效果评估与监测技术研究综述 [J]. 水利水电科技进展, 2019, **39**(5): 49-55.]
- [6] Chen K Q, Chang Z N, Cao X H, et al. Status and prospection of fish pass construction in China [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, **43**(2): 182-188. [陈凯麒, 常仲农, 曹晓红, 等. 我国鱼道的建设现状与展望 [J]. 水利学报, 2012, **43**(2): 182-188.]
- [7] 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.
- [8] Cai L, Katopodis C, Johnson D, et al. Case study: Targeting species and applying swimming performance data to fish lift design for the Huangdeng Dam on the upper Mekong River [J]. *Ecological Engineering*, 2018(**122**): 32-38.
- [9] 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.]
- [10] Kokita T, Mizota T. Male secondary sexual traits are hydrodynamic devices for enhancing swimming performance in a monogamous filefish *Paramonacanthus japonicus* [J]. *Journal of Ethology*, 2002, **20**(1): 35-42.
- [11] Dockery D R, McMahon T E, Kappenman K M, et al. Swimming performance of sauger (*Sander canadensis*) in relation to fish passage [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2017, **74**(12): 2035-2044.
- [12] 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. [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]. 水生生态学杂志, 2010, 3(5): 104-110.]
- [13] Zhou S J, He D R, Wu Q T. Comparative study on curve swimming ability of some young fishes [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1993, 24(6): 621-626. [周仕杰, 何大仁, 吴清天. 几种幼鱼曲线游泳能力的比较研究 [J]. 海洋与湖沼, 1993, 24(6): 621-626.]
- [14] 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. 基于雅鲁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.]
- [15] 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.]
- [16] Ye C, Wang K, Huang F J, *et al.* Swimming capability of *Schizothorax oconnori* [J]. *Freshwater Fisheries*, 2013, 43(3): 33-37. [叶超, 王珂, 黄福江, 等. 异齿裂腹鱼游泳能力初探 [J]. 淡水渔业, 2013, 43(3): 33-37.]
- [17] 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. [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.]
- [18] Cai L, Christos K, Jin Y, *et al.* Comprehensive analysis and application of Chinese Cyprinidae swimming ability [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2022, 34(6): 1788-1801. [蔡露, Katopodis Christos, 金瑶, 等. 中国鲤科鱼类游泳能力综合分析和应用 [J]. 湖泊科学, 2022, 34(6): 1788-1801.]
- [19] Blake R W. Fish functional design and swimming performance [J]. *Journal of Fish Biology*, 2004, 65(5): 1193-1222.
- [20] Liao J C. A review of fish swimming mechanics and behaviour in altered flows [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2007(362): 1973-1993.
- [21] Liu H P, (Mou/Mu) Z B, Zeng B H. The Maintenance System for *Schizothorax* Fishes Distributed in Yarlung Zangbo River and Their Typical Habitat Identification [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2023: 33. [刘海平, 牟振波, 曾本和. 雅鲁藏布江裂腹鱼类养护体系及典型生境识别 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2023: 33.]
- [22] Yao F, Jiang H, Liu F, *et al.* Preliminary study on fish passing effect of vertical-slot fishway in ZM hydropower station [J]. *Water Resources and Power*, 2023, 41(9): 107-111. [姚凡, 姜昊, 刘峰, 等. 藏木水电站竖缝式鱼道过鱼效果初探 [J]. 水电能源科学, 2023, 41(9): 107-111.]
- [23] Hu J, Wang P, Chen H, *et al.* Effects of the diversity of flow velocity on the upstream migration behavior of grass carp in the reaches of spur dikes [J]. *Water*, 2023, 15(17): 3091.
- [24] Cai L, Hou Y, Johnson D, *et al.* Swimming ability and behavior of *Mrigal carp* *Cirrhinus mrigala* and application to fishway design [J]. *Aquatic Biology*, 2018(27): 127-132.
- [25] Li Y X, Hou Y Q, Tao J P, *et al.* Comparison of inductive velocity of three fish species in the lower reaches of Dadu River [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(10): 3214-3220. [李阳希, 侯轶群, 陶江平, 等. 大渡河下游3种鱼感应流速比较 [J]. 生态学杂志, 2021, 40(10): 3214-3220.]
- [26] Lin X J, Yu L X, Wu C J, *et al.* Effect of fasting on the swimming exercise ability of eight juvenile species [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2023, 30(12): 1457-1467. [林小菊, 俞立雄, 吴池杰, 等. 禁食对8种幼鱼游泳运动能力的影响 [J]. 中国水产科学, 2023, 30(12): 1457-1467.]
- [27] Xie C X, Huo B, Wei K J, *et al.* Biology and Resource Conservation of *Schizothoracinae* Fishes in the Middle Reaches of the Yarlung Zangbo River [M]. Beijing: Science Press, 2019. [谢从新, 霍斌, 魏开建, 等. 雅鲁藏布江中游裂腹鱼类生物学与资源保护 [M]. 北京: 科学出版社, 2019.]
- [28] Huo B. Study on the biology and population dynamics of *Oxygymnocypris stewartii* [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2014: 71. [霍斌. 尖裸鲤个体生物学和种群动态学研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2014: 71.]
- [29] Hou Y, Cai L, Wang X, *et al.* Swimming performance of 12 *Schizothoracinae* species from five rivers [J]. *Journal of Fish Biology*, 2018, 92(6): 2022-2028.
- [30] Cao W X, Chen Y Y, Wu Y F, *et al.* Origin and Evolution of *Schizothoracinae* Fishes and Their Relationship with the Uplift of the Qinghai-Tibet Plateau [C]//Comprehensive Scientific Expedition Team to the Qinghai-Tibet Plateau, Chinese Academy of Sciences. The Timing, Magnitude, and Forms of the Uplift of the Qinghai-Tibet Plateau. Beijing: Science Press, 1981: 118-119. [曹文宣, 陈宜瑜, 武云飞, 等. 裂腹鱼类的起源和演化及其与青藏高原隆起的关系[C]//中国科学院青藏高原综合科学考察队. 青藏高原隆起的时代、幅度和形式问题. 北京: 科学出版社, 1981: 118-119.]
- [31] Qiao Y G, Huang H L, Huang M F, *et al.* The preliminary study on swimming speed of different freshwater fishes [J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2012(15): 116-119. [乔云贵, 黄洪亮, 黄妙芬, 等. 不同淡水鱼类游泳速度的初步研究 [J]. 湖南农业科学, 2012(15): 116-119.]
- [32] Xian X M, Cao Z D, Fu S J. The comparison of critical swimming speed and endurance at high speed of four species of juvenile fish [J]. *Journal of Chongqing Normal University (Natural Science)*, 2010, 27(4): 16-20. [鲜雪

- 梅, 曹振东, 付世建. 4种幼鱼临界游泳速度和运动耐受时间的比较 [J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2010, 27(4): 16-20.]
- [33] Shi X T, Chen Q W, Liu D F, *et al.* Critical swimming speed of young Chinese sucker (*Myxocyprinus asiaticus*) [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2012, 36(1): 133-136. [石小涛, 陈求稳, 刘德富, 等. 胭脂鱼幼鱼的临界游泳速度 [J]. 水生生物学报, 2012, 36(1): 133-136.]
- [34] Hammer C. Fatigue and exercise tests with fish [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology*, 1995, 112(1): 1-20.
- [35] Verhille C E, Poletto J B, Cocherell D E, *et al.* Larval green and white sturgeon swimming performance in relation to water-diversion flows [J]. *Conservation Physiology*, 2014, 2(1): cou031.
- [36] Davie P S, Wells R M, Tetens V. Effects of sustained swimming on rainbow trout muscle structure, blood oxygen transport, and lactate dehydrogenase isozymes: evidence for increased aerobic capacity of white muscle [J]. *The Journal of Experimental Zoology*, 1986, 237(2): 159-171.
- [37] Shi X, Ke S, Tu Z, *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.
- [38] McClelland G B. Muscle remodeling and the exercise physiology of fish [J]. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 2012, 40(3): 165-173.
- [39] Zhu T B, Chen L, Yang D G, *et al.* Distribution and habitat character of Schizothoracinae fishes in the middle Yarlung Zangbo River [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(10): 2817-2823. [朱挺兵, 陈亮, 杨德国, 等. 雅鲁藏布江中游裂腹鱼类的分布及栖息地特征 [J]. 生态学杂志, 2017, 36(10): 2817-2823.]

RESEARCH ON THE SWIMMING PERFORMANCE OF JUVENILE *SCHIZOTHORAX* FISH IN THE YARLUNG ZANGBO RIVER BASIN

CHEN Jun^{1,2}, YU Li-Xiong², WANG Min^{2,3}, HUANG Cui², LIU Ming-Dian², ZHU Feng-Yue² and DUAN Xin-Bin²

(1. College of Fisheries of Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. National Agricultural Science Observing and Experimental Station of Chongqing; Yangtze River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuhan 430223, China; 3. Key Laboratory of Freshwater Fish Reproduction and Development, Ministry of Education, School of Life Science, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: The design of fish passage facilities in hydropower projects primarily relies on the swimming ability parameters of target fish species. This study investigated interspecific differences in the individual swimming capacities of juvenile fish from five *Schizothorax* species in the Yarlung Zangbo River basin, aiming to provide a scientific basis for fishway design and ecological conservation. The subjects comprised juveniles of five species: *Schizothorax oconnori*, *S. macropogon*, *S. waltoni*, *Schizopygopsis younghusbandi*, and *Oxygymnocypris stewartii*. The mean body lengths of experimental fish were (9.2±0.8), (3.1±0.1), (8.3±0.8), (5.8±0.9), and (5.4±0.6) cm, respectively. Using an incremental velocity test, the induced flow velocity (U_{ind}), critical swimming speed (U_{crit}), and burst swimming speed (U_{burst}) of the five species were measured. Results revealed that the mean U_{ind}^a varied between 2.3 and 6.7 cm/s, while the mean U_{ind}^r varied between 0.4 and 0.8 BL/s. The mean U_{crit}^a varied between 31.1 and 60.8 cm/s, and the mean U_{crit}^r ranged from 6.3 to 10.4 BL/s. The mean U_{burst}^a varied between 39.7 and 88.1 cm/s, with the mean relative U_{burst}^r varied between 9.7 and 14.6 BL/s. One-way ANOVA and bivariate correlation analysis (body length & swimming capacity metrics) demonstrated significant differences were observed in the swimming performance among the five studied *Schizothoracinae* fish species at juvenile stages. *Schizothorax oconnori* and *Schizothorax waltoni* exhibited higher response flow velocities, whereas *Oxygymnocypris stewartii* and *Schizopygopsis younghusbandi* demonstrated advantages in burst swimming speed. This difference is primarily reflected in their adaptation strategies to torrential and slow-flow habitats. Within the body length range studied, body size was found to influence certain performance metrics. The results provide crucial data support for understanding the swimming capabilities of *Schizothoracinae* fish and for the design effective fishways in the Yarlung Zangbo River basin, revealing interspecific differences in individual swimming performance and offering to scientifically informed ecological conservation.

Key words: Yarlung Zangbo River; *Schizothorax* spp.; Swimming capacity; Fish passage facilities