

鲢鳙幼鱼临界游泳速度的比较研究

刘慧杰¹, 王从锋^{1,2}, 朱良康¹, 陈明明¹

(1. 三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002;

2. 三峡地区地质灾害与生态环境湖北省协同创新中心, 湖北 宜昌 443002)

摘要:通过比较不同鱼类的游泳能力,为鱼道建设和鱼类行为学研究提供基础资料。在 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ 水温下,使用丹麦 Loligo System 公司的鱼类行为视频跟踪系统,采用 Brett 流速递增法,以鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)和鳙(*Aristichthys nobilis*)为研究对象,体长作为划分依据,分别测定不同体长组鲢鳙临界游泳速度。结果表明:(1)鲢鳙绝对临界游泳速度随着体长的增加而增大,相对临界游泳速度随着体长的增大而减小,鲢体长与绝对临界游泳速度拟合方程为: $Y_1 = 0.10X_1^2 - 0.11X_1 + 55.86$ ($R^2 = 0.85$),与相对临界游泳速度拟合方程为: $y_1 = 0.02x_1^2 - 0.87x_1 + 12.86$ ($R^2 = 0.94$),鳙体长与绝对临界游泳速度拟合方程为: $Y_2 = 0.03X_2^3 - 1.29X_2^2 + 21.04X_2 - 29.21$ ($R^2 = 0.85$),与相对临界游泳速度拟合方程为: $y_2 = 0.02x_2^2 - 0.87x_2 + 14.81$ ($R^2 = 0.98$);(2)相近体长组鲢(10.11 $\pm$ 0.24) cm 和鳙(10.78 $\pm$ 1.34) cm 临界游泳速度分别为(65.50 $\pm$ 2.08) cm/s 和(80.89 $\pm$ 4.03) cm/s,可知鳙>鲢,且差异性显著($P < 0.05$);(16.90 $\pm$ 0.55) cm 鲢和(15.39 $\pm$ 0.62) cm 鳙的临界游泳速度为(83.92 $\pm$ 3.03) cm/s 和(91.62 $\pm$ 3.54) cm/s,无显著性差异($P > 0.05$);(3)通过比较鲢鳙临界游泳速度与突进游泳速度能力,发现鲢的突进游泳速度大于鳙,而临界游泳速度小于后者,可知鲢鳙有氧运动和无氧运动能力之间存在权衡作用,临界游泳速度与突进游泳速度不一定呈现正相关关系。鱼类能否顺利完成上溯需求取决于鱼道内水力条件和自身游泳能力。

关键词:鲢;鳙;临界游泳速度;过鱼设施

中图分类号:Q332 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2016)04-0063-07

作为水生生态系统信息和能量循环正常运行的关键因子,鱼类生理和行为研究与水力学结合已成为新的研究领域。水利工程对天然连续性河流的阻隔作用,使得洄游及半洄游性鱼类正常生活节律遭到破坏(Morita & Yamamoto, 2002);过鱼设施发展成为恢复河流联通性同时保护生物资源的重要工程措施(胡望斌等,2008;陈凯麒等,2013)。

实现过鱼设施(鱼道、集运鱼船、鱼闸、升鱼机等)正常高效的运行,水动力条件发挥了决定性作用(闫滨等,2013)。过鱼设施作为保护水生生物种的重要手段,保护对象的生物学信息对其功能成败同样至关重要(Quirós, 1989)。与过鱼设施相关的行为学研究中,鱼类的游泳特性备受关注。鱼类对于流速的响应行为,即鱼类趋流性以及具体的衡量指标-感应流速、偏好流速和极限流速,相关学者进行

了大量研究。对鱼类通过过鱼设施内水流速度障碍能力的定量分析有重要的理论及实际意义,其基础就是研究鱼类游泳能力(Cheong et al, 2006)。游泳速度和游泳时间通常作为衡量鱼类游泳能力的具体指标,游泳速度大致分为巡航游泳速度、突进游泳速度和临界游泳速度(涂志英等,2011),其中巡航游泳速度在鱼类洄游过程中较为重要。过鱼设施设计中,突进游泳速度与临界游泳速度相对而言更为重要(郑金秀等,2010)。目前,国内过鱼设施的保护对象为珍稀鱼类、特有鱼类以及经济鱼类,其中四大家鱼为经济鱼类的代表,本实验拟对四大家鱼中的鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)和鳙(*Aristichthys nobilis*)进行临界游泳速度测定,探究其游泳能力的差异,以为鱼道设计提供一定的科学依据,同时为鱼类行为学研究提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 实验材料

试验鱼均购置于湖北宜都水产养殖渔场,鲢体长10.0~17.7 cm,鳙体长9.3~22.0 cm。循环控温水槽中暂养2周,实验前在80 cm $\times$ 60 cm $\times$ 50 cm

收稿日期:2015-11-23

基金项目:水利部公益性行业科研专项(201201030);贵州北盘江电力股份有限公司合作项目(SDHZ2012136)。

作者简介:刘慧杰,1993年生,女,硕士研究生,研究方向为生态水力学。E-mail:lhj200312@163.com

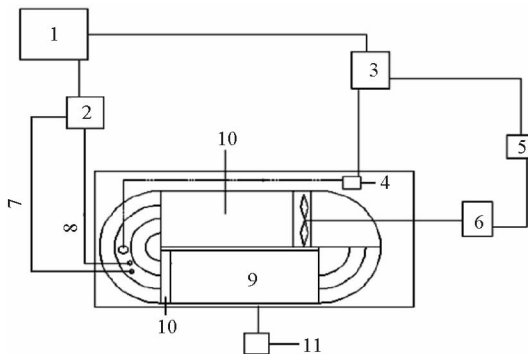
通信作者:王从锋。E-mail:wangcf@ctgu.edu.cn

的自来水箱适应 2 d, 水温控制在 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$, 连续充氧, 保证溶氧含量 $(7.0 \pm 0.2) \text{ mg/L}$, 每天早晚换水 1 次, 光照条件为自然光, 实验前禁止喂食。

1.2 实验装置

游泳速度测定采用丹麦 Loligo System 公司生产的鱼类行为视频跟踪系统(图 1)。相比于自制鱼类行为实验装置, 整个实验过程流速变化、温度溶氧监测和水体交换全部通过计算机软件控制, 降低手动测量对鱼类行为产生的影响, 保证了实验数据的精确性; 整个系统包括环形实验水槽、水泵、电机、动力输出控制器、笔记本电脑、Witrox1 温度溶氧自动探测器、DAQ-M 水泵控制器及摄像头, 仪器配套软件 AutoResp™ 和 uEye Cockpit。

环形实验水槽密封区域体积为 90 L, 鱼类游泳测试断面尺寸为 $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} \times 70 \text{ cm}$ 。通过控制电机转速实现水流速度的变化, 其工作原理为游泳区域内假设水流状态为均匀流, 鱼类在测试区域内顶流运动, 游泳速度与水流速度相等。环形实验水槽全部采用透明树脂玻璃, 侧面和顶部均可以清晰观测鱼类游泳行为。



(1): 笔记本电脑; (2): Witrox1 温度溶氧自动探测器; (3): DAQ-M 水泵控制器; (4): 水泵; (5): 动力输出控制器; (6): 电机; (7): 溶氧探头; (8): 温度探头; (9): 游泳区域; (10): 整流装置; (11): 摄像头

图 1 鱼类游泳能力测定装置

(1) laptop computer; (2) fiber optic to DO probe; (3) pump controller; (4) pump; (5) voltage controller; (6) propeller motor; (7) DO probe; (8) temperature sensor; (9) swimming channel; (10) flow rectifier; (11) camera.

Fig. 1 Schematic diagram of apparatus for testing fish swimming capability

实验开始前利用哈希便携式水质多参分析仪对温度和溶氧探头进行校核, 在 AutoResp™ 程序中采用 2 点校核法, 特定温度下将 2 个已知溶氧含量对应的输入电位正确填写, 完成之后再利用不同溶氧含量水样进行检验。流速校核同样采用点校核, 利

用 ADV 声学多普勒流速剖面仪进行校验。设定流速测量范围为 $0 \sim 138 \text{ cm/s}$ (同时考虑试验鱼种的游泳能力)。实验过程中在仪器上方架设摄像头, 连接 uEye Cockpit 程序观测鱼类游泳行为。

1.3 临界游泳速度测定

实验水温为 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$, 与自来水箱中水体温度基本一致。本实验临界游泳速度的测定采用经典 Brett 流速递增法。实验正式开始之前, 预估鲢鳙各体长组的临界游泳速度 (U_e)。选取 1 尾状况良好且无损伤的鱼放入实验水槽, 以 0.5 BL/s 流速适应 1 h, 消除转移过程对鱼体产生的胁迫, 之后每 2 min 增加 0.4 BL/s , 直至试验鱼疲劳停止游动, 依此确定正式实验时 U_{crit} 的增量 $\Delta U (15\% U_e)$ 。试验鱼被水流冲至游泳观察区域下游且无法继续游动, 贴在拦网处超过 20 s 以上, 视为疲劳达到力竭状态。

正式实验时, 将 1 尾鱼在 0.5 BL/s 的水流速度下适应 1 h 后, 流速控制通过 AutoResp™ 程序实现, 初始流速 1 BL/s 情况下, 每隔 5 min 增加 0.5 BL/s , 直至 $60\% U_e$, 后每隔 20 min 增加 $15\% U_e$, 直至试验鱼疲劳 (石小涛等, 2012)。记录该时间及水流速度下的试验鱼体重及体长。整个实验过程中同步监测溶氧, 利用 DAQ-M 水泵控制器进行环形水槽密封区域和外围区域水体交换, 达到实验溶氧水平 $(7.0 \pm 0.2) \text{ mg/L}$ 的要求。

试验鲢共计 22 尾, 8 尾体长 $16.2 \sim 17.7 \text{ cm}$, 5 尾体长 $12.5 \sim 14 \text{ cm}$, 9 尾体长 $9.8 \sim 10.5 \text{ cm}$; 鳙共计 27 尾, 体长 $18 \sim 22 \text{ cm}$, $14.5 \sim 16.5 \text{ cm}$ 和 $9.3 \sim 12.5 \text{ cm}$ 各 9 尾。由于试验鱼横截面面积不超过游泳区域横截面面积的 10%, 忽略鱼体对水流产生的阻隔效应, 无需进行校正。逐尾计算临界游泳速度 (U_{crit}), 计算公式如下:

$$U_{\text{crit}}^a = U_{i-1} + (T/\Delta T) \times \Delta U \quad (1)$$

$$U_{\text{crit}}^r = U_{\text{crit}}^a / \text{BL} \quad (2)$$

式中: U_{crit}^a 为绝对临界游泳速度, U_{i-1} 为鱼类停止游泳前的次最大游泳速度, T 为鱼类最大游泳速度持续时间 (小于 20 min), ΔT 为 20 min, ΔU 为 $15\% U_e$; U_{crit}^r 为相对临界游泳速度, BL 为实际鲢鳙体长。

1.4 数据分析

实验数据用 SPSS19.0 进行处理, 分析比较不同体长鲢鳙临界游泳速度的差异。采用 Excel 2010 作图, 通过回归分析拟合体长与临界游泳速度之间的关系。统计值用平均值 $\pm$ 标准差 (Mean $\pm$ SE) 描述, 差异显著水平为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 临界游泳速度

据公式(1)、(2)计算得出表 1。对比发现, 体长组相近的鲢(10.11 ± 0.24) cm 和鳙(10.78 ± 1.34) cm, 鳙绝对临界游泳速度大于鲢, 相对临界游泳速度为鳙 > 鲢, 且两者之间差异性显著 ($P < 0.05$); 比较体长为(16.90 ± 0.55) cm 鲢和(15.39 ± 0.62) cm 鳙, 绝对临界游泳速度和相对临界游泳速度均为鳙 > 鲢, 但无显著性差异 ($P > 0.05$)。

表 1 鲢鳙临界游泳速度比较

Tab.1 Critical swimming speed of the two fish species			
种类	体长/ cm	绝对临界游泳 速度/cm · s ⁻¹	相对临界游泳 速度/BL · s ⁻¹
鲢	10.11 ± 0.24	65.50 ± 2.08	6.45 ± 0.27
	16.90 ± 0.55	83.92 ± 3.03	4.97 ± 0.14
鳙	10.78 ± 1.34	80.89 ± 4.03	7.57 ± 0.62
	15.39 ± 0.62	87.20 ± 2.53	5.66 ± 0.23
	19.99 ± 1.58	91.62 ± 3.54	4.60 ± 0.26

同种鱼各体长组的组间单因素方差分析表明, 鲢 2 个体长组的组间临界游泳速度差异显著

($P < 0.05$); 体长为(15.39 ± 0.62) cm 和(19.99 ± 1.58) cm 鳙的 2 个体长组之间临界游泳速度无显著差异($P > 0.05$), 且同时与(10.78 ± 1.34) cm 体长组存在显著差异($P < 0.05$)。

2.2 体长与临界游泳速度

由图 2 可知, 鲢鳙绝对临界游泳速度均随着体长的增大而增大, 且体长 10.0 ~ 18.0 cm 鲢的绝对临界游泳速度随着体长增大呈几何型增长, 而体长 12.5 ~ 18.5 cm 鳙的绝对临界游泳速度随着体长增大, 增速并不明显。

鲢鳙绝对临界游泳速度与体长关系如下:

鲢: $Y_1 = 0.10X_1^2 - 0.11X_1 + 55.86$ ($R^2 = 0.94$)

鳙: $Y_2 = 0.03X_2^3 - 1.29X_2^2 + 21.04X_2 - 29.21$ ($R^2 = 0.85$)

鲢鳙相对临界游泳速度均随着体长的增大而减小, 在试验鱼体长范围内, 鳙相对临界游泳速度减小趋势要大于鲢(图 3)。

鲢鳙相对临界游泳速度与体长关系如下:

鲢: $y_1 = 0.02x_1^2 - 0.87x_1 + 12.86$ ($R^2 = 0.94$)

鳙: $y_2 = 0.02x_2^2 - 0.87x_2 + 14.81$ ($R^2 = 0.98$)

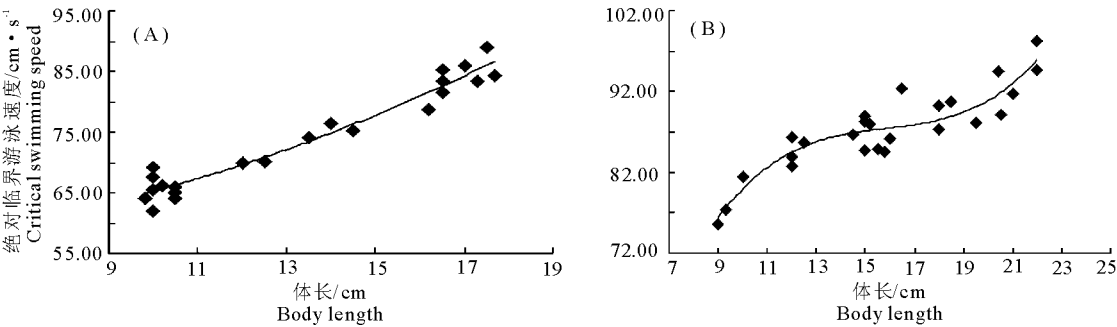


图 2 鲢(A) 鳙(B) 绝对临界游泳速度与体长的关系

Fig.2 Critical swimming speed vs. body length for juvenile silver carp (A) and bighead carp (B)

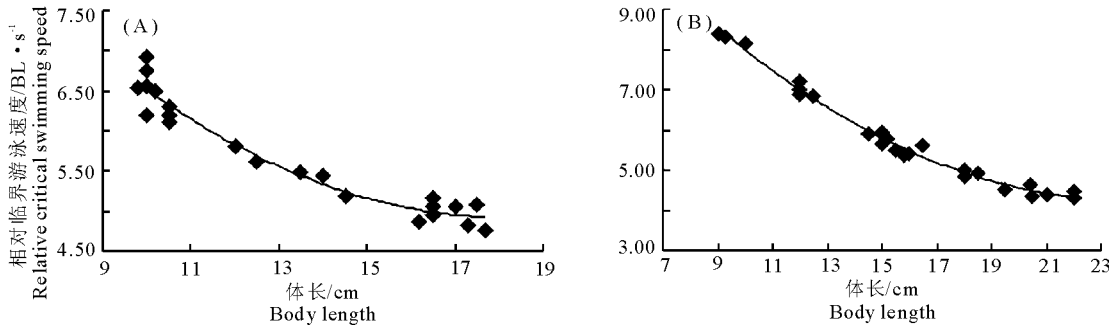


图 3 鲢(A) 鳙(B) 相对临界游泳速度与体长的关系

Fig.3 Relative critical swimming speed vs. body length for juvenile silver carp (A) and bighead carp (B)

3 讨论

3.1 鲢鳙体长与临界游泳速度的关系

本研究中,实验温度控制为(20±1)℃。体长为(10.11±0.24) cm 鲢的临界游泳速度与房敏等(2013)研究结果一致,同时大于(18±1)℃体长相近鲢临界游泳速度。鲢游泳能力符合适宜温度范围内,临界游泳速度随着温度的升高而增大,随着温度的降低而减小(郑金秀等,2010)。由临界游泳速度与体长的关系式可知,鲢鳙绝对临界游泳速度均随着体长增加而增大,相对临界游泳速度则随着体长的增大而减小,与同为鲤科鱼类的草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)研究结果一致(龚丽等,2015)。通过拟合临界游泳速度与体长的关系,可以比较同种鱼不同体长游泳速度的差异,也可以比较不同鱼类在体长相似情况下的游泳速度。如体长为(16.88±1.99) cm 鲫(*Carassias auratus*)的相对临界游泳速度为(7.69±0.59) BL/s(乔云贵等,2012),高于本研究中对对应体长鳙的 U'_{crit} 。

本次实验过程中,发现鲢喜跳跃,而鳙相对安静。鲢鳙虽然均生活于水体的中上层,但鲢性情活泼、善于跳跃,鳙性情温和、行动较迟缓;鲢鳙的食性也不同(Колосов & 张幼敏,1981),同时2种鱼类的体型特征存在差异。笔者因此认为上述原因导致了鲢鳙临界游泳速度具有差异。

3.2 临界游泳速度与突进游泳速度关系

临界游泳速度表征鱼类最大持续游泳能力,为有氧运动的重要指标,突进游泳速度为鱼类无氧游泳能力的评价指标,与鱼类逃避敌害、穿越激流、捕食等活动密切相关(涂志英等,2011)。相关研究表

明,鲢的突进游泳速度大于鳙(熊锋等,2014)。在本研究中,同体长组鳙临界游泳速度大于鲢。由房敏(2014)和熊锋等(2014)研究结果比较得出,相同体长范围,草鱼临界游泳速度大于鲢,而突进游泳速度小于同体长的鲢。国内关于同一种鱼类的2种游泳速度,临界游泳速度与突进游泳速度之间的关系即有氧运动与无氧运动能力关系的研究较少,仅见鲜雪梅等(2010)比较研究了临界游泳速度与高速运动下的耐受能力。研究发现,南方鲇(*Silurus meridionalis*)和瓦氏黄颡鱼(*Pseudobagrus vachelli*)的临界游泳速度小于锦鲤(*Carassius auratus*)和青鱼(*Mylopharyngodon piceus*),而在1.5倍 U_{crit} 条件下的耐受时间均大于锦鲤和青鱼。四大家鱼有氧运动与无氧运动的能力比较见表2。

国外关于鱼类有氧运动和无氧运动能力关系的研究主要以突进游泳速度、临界游泳速度和冲刺游泳速度为衡量指标,不同鱼类或同种鱼类有氧运动能力与无氧运动能力之间定量比较,分析运动能力之间的权衡作用。Ojanguren & Brana(2003)比较了褐鲮(*Salmo trutta*)幼鱼最大游泳速度与耐受时间的关系,结果表明其为负相关关系。有关大西洋鳕(*Gadus morhua*)的研究显示,临界游泳速度与突进游泳速度之间呈负相关,表达式为: $U_{crit} = 105.83 - 0.446U_{burst}$,而临界游泳速度与冲刺速度为正相关关系,表明鱼类的有氧和无氧运动能力存在权衡作用(Reidy et al,2000)。Yan等(2012)发现在不同温度时,6种鱼类的有氧运动能力和无氧运动能力之间同样存在权衡作用。可见一种运动能力的提高可能会导致另一种运动能力的降低,则鱼类突进游泳能力与临界游泳能力并不一定为正相关关系。

表2 四大家鱼有氧运动与无氧运动能力比较

Tab.2 Burst and critical swimming speeds of the four major Chinese carp species					
鱼名	温度/ ℃	体长/ cm	临界游泳速度/ BL·s ⁻¹	突进游泳速度/ BL·s ⁻¹	参考文献
鳙	20±1	10.78±1.34	7.57±0.62	/	本研究
	21±2	21.29±7.01	/	5.05±0.94	熊锋等,2014
鲢	20±1	10.11±0.24	6.45±0.27	/	本研究
	18±1	11.20±0.30	5.87±0.25		房敏,2014
	21±2	20.70±7.63	/	6.60±1.62	熊锋等,2014
草鱼	18±1	9.10±1.41	7.11±0.60	/	房敏,2014
	21±2	21.57±6.10	/	5.98±1.41	熊锋等,2014
青鱼	25±0	7.93±0.08	5.25±0.18	/	鲜雪梅等,2010
	21±2	19.90±6.09	/	5.67±1.22	熊锋等,2014

3.3 鱼类游泳速度与鱼道设计的最优平衡点

鱼道内的设计流速通常为临界游泳速度,对于鱼道的高流速区,如鱼道的孔口和竖缝处多采用突

进游泳速度作为设计上限流速。鱼类采用突进游泳速度时,通过厌氧获得较大能量,长时间使用突进游泳速度就会疲劳致死。国内多根据经验公式估算鱼

类游泳速度,且存在临界游泳速度与突进游泳速度正相关的误区;此时,若过鱼对象的临界游泳速度与突进游泳速度呈负相关关系,就会导致鱼道设计浪费甚至失败。实际工程运用中,鱼道内的水力设计需要考虑其带来的影响,找到最优平衡点;同时,临界游泳速度和突进游泳速度也决定了鱼道池室的长度及休息池的距离。

3.4 鱼类运动能力权衡作用的影响因素

相关学者研究了2种运动能力存在权衡作用的影响因素,其中生存环境和鱼类运动肌肉组成占据主导作用(Losos et al,1993; Langerhans,2009)。鱼类游泳能力的强弱是生理因素与环境因素共同作用的结果,突进游泳速度与温度和溶氧无关,而临界游泳速度受温度影响较大(Colavecchia et al,1998; Farrell et al,2001; Dickson et al,2002; Lyon et al,2008;郑金秀等,2010)。本次研究中,实验温度在19~21℃时存在一定波动,笔者认为这可能是体长(15.39±0.62)cm与(19.99±1.58)cm鳙的临界游泳速度差异不显著的部分原因。除此之外,体长大于20cm鳙的实验数据不足,不能精确描述较大鱼类临界游泳速度与体长的函数关系。不同体长组之间鳙临界游泳速度差异性不同,原因尚不明确,需进一步从鱼类生理学方面进行探求。

3.5 现行过鱼设施效率偏低的原因

在恢复鱼类栖息地连通性方面,现今的过鱼设施并没有实现其重要的作用。最近的分析报告指出,鱼道的平均上行和下行的通过效率分别为40%和70%,低于目标水平(Noonan et al,2012)。鱼道内水力设计以鱼类临界游泳速度作为参考指标,但在自主运动下,鱼类自由选择游泳方式,整个上溯过程鱼类分别采用爆发速度、耐久式速度及临界游泳速度;实验室内鱼类在一定空间内被迫游动,自然界中为自发运动,实验条件与自然条件存在一定差异且由于鱼类使用不同游泳类型,能量利用过程有很大区别(Steinhausen et al,2010)。上述原因是过鱼设施运行不理想的重要因素,后期鱼类与水力结合实验过程中将会重点考虑。

国外实验鱼对象相对广泛,本研究仅发现草鱼、鲢、鳙有氧与无氧运动能力之间存在权衡作用,其他实验鱼种值得期待。有氧与无氧运动能力研究过程中,呼吸代谢作为鱼类游泳能力一个重要表征指标,耗氧率和标准代谢率等指标同步比较对于权衡作用的描述有重要意义。将冲刺游泳速度、临界游泳速度、突进游泳速度纳入考量范围,在上述研究基础

上,定量评价有氧运动能力与无氧运动能力权衡作用,同时考虑温度等环境因素对其权衡作用的影响是今后本研究的主攻方向。

参考文献

- 陈凯麒,葛怀凤,郭军,等,2013.我国过鱼设施现状分析及鱼道适宜性管理的关键问题[J].水生生态学杂志,34(4):1-6.
- 房敏,蔡露,高勇,等,2013.温度对鲢幼鱼游泳能力及耗氧率的影响[J].水生生态学杂志,34(3):49-53.
- 房敏,2014.几种鲤科鱼游泳能力研究及竖缝式鱼道模拟与评价[D].宜昌:三峡大学.
- 龚丽,吴一红,白音包力皋,等,2015.草鱼幼鱼游泳能力及游泳行为试验研究[J].中国水利水电科学研究院学报,13(3):211-216.
- 胡望斌,韩德举,高勇,等,2008.鱼类洄游通道恢复:国外的经验及中国的对策[J].长江流域资源与环境,17(6):898-903.
- 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):116-119.
- 石小涛,陈求稳,刘德富,等,2012.胭脂鱼幼鱼的临界游泳速度[J].水生生物学报,36(1):133-136.
- 涂志英,袁喜,韩京成,等,2011.鱼类游泳能力研究进展[J].长江流域资源与环境,20(S1):59-65.
- 鲜雪梅,曹振东,付世建,2010.4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),27(4):16-20.
- 熊锋,王从锋,刘德富,等,2014.松花江流域青鱼、草鱼、鲢及鳙突进游速比较研究[J].生态科学,33(2):339-343.
- 闫滨,王铁良,刘桐渤,2013.鱼道水力特性研究进展[J].长江科学院院报,30(6):35-42.
- 郑金秀,韩德举,胡望斌,等,2010.与鱼道设计相关的鱼类游泳行为研究[J].水生生态学杂志,31(5):104-110.
- Колосов С К,张幼敏,1981.齐姆良水库白鲢的习性和分布[J].水库渔业,(2):62-63.
- Cheong T S, Kavvas M L, Anderson E K, 2006. Evaluation of adult white sturgeon swimming capabilities and applications to fishway design[J]. Environmental biology of fishes, 77(2):197-208.
- Colavecchia M, Katopodis C, Goosney R, et al, 1998. Measurement of burst swimming performance in wild Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) using digital telemetry[J]. Regulated Rivers: Research & Management, 14(1):41-51.
- Dickson K A, Donley J M, Sepulveda C, et al, 2002. Effects of temperature on sustained swimming performance and swimming kinematics of the chub mackerel *Scomber japonicus* [J]. Journal of experimental biology, 205(7):969-980.

- Farrell A P, Thorarensen H, Axelsson M, et al, 2001. Gut blood flow in fish during exercise and severe hypercapnia [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 128(3): 549 – 561.
- Langerhans R B, 2009. Trade-off between steady and unsteady swimming underlies predator-driven divergence in *Gambusia affinis* [J]. *Journal of evolutionary biology*, 22(5): 1057 – 1075.
- Losos J B, Walton B M, Bennett A F, 1993. Trade-offs between sprinting and clinging ability in Kenyan chameleons [J]. *Functional Ecology*, 7: 281 – 286.
- Lyon J P, Ryan T J, Scroggie M P, 2008. Effects of temperature on the fast-start swimming performance of an Australian freshwater fish [J]. *Ecology of Freshwater Fish*, 17(1): 184 – 188.
- Morita K, Yamamoto S, 2002. Effects of habitat fragmentation by damming on the persistence of stream-dwelling charr populations [J]. *Conservation Biology*, 16(5): 1318 – 1323.
- Noonan M J, Grant J W A, Jackson C D, 2012. A quantitative assessment of fish passage efficiency [J]. *Fish and Fisheries*, 13(4): 450 – 464.
- Ojanguren A F, Brana F, 2003. Effects of size and morphology on swimming performance in juvenile brown trout (*Salmo trutta* L) [J]. *Ecology of Freshwater Fish*, 12(4): 241 – 246.
- Quirós R, 1989. Structures assisting the migrations of non-salmonid fish: Latin America [R]. FAO.
- Reidy S P, Kerr S R, Nelson J A, 2000. Aerobic and anaerobic swimming performance of individual Atlantic cod [J]. *Journal of Experimental Biology*, 203(2): 347 – 357.
- Steinhausen M F, Fleng Steffensen J, Gerner Andersen N, 2010. The effects of swimming pattern on the energy use of gilthead seabream (*Sparus aurata* L) [J]. *Marine and Freshwater Behaviour and Physiology*, 43(4): 227 – 241.
- Yan G, He X, Cao Z, et al, 2012. The trade-off between steady and unsteady swimming performance in six cyprinids at two temperatures [J]. *Journal of Thermal Biology*, 37(6): 424 – 431.

(责任编辑 万月华)

Comparative Study of Critical Swimming Speeds for Juvenile Silver and Bighead Carp

LIU Hui-jie¹, WANG Cong-feng^{1,2}, ZHU Liang-kang¹, CHEN Ming-ming¹

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

2. Collaborative Innovation Center for Geo-hazards and Eco-Environment in Three Gorges Area,
Hubei Province, Hubei Yichang 443002, P. R. China)

Abstract: Fish passageways are an important means of maintaining wild populations when rivers are dammed. Designing hydraulic conditions in passageways to match the swimming ability of target fish species is critical for successful migration. To better understand the swimming behavior of two of the four major Chinese carp species and provide data for fish passage design, the critical swimming speeds of juvenile silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) and juvenile bighead carp (*Aristichthys nobilis*) were measured using a stepped-velocity test (20 ± 1) °C and differences in swimming performance were analyzed. Three groups of silver carp (16.2 – 17.7 cm, 12.5 – 14 cm, 9.8 – 10.5 cm) and bighead carp (18 – 22 cm, 14.5 – 16.5 cm, 9.3 – 12.5 cm) were tested and swimming was recorded during testing with a video tracking system. Results show: (1) The absolute critical swimming speed of juvenile silver carp and bighead carp both increased linearly with body length, according to the equations: $Y_1 = 0.10X_1^2 - 0.11X_1 + 55.86$ ($R^2 = 0.85$) and $Y_2 = 0.03X_2^3 - 1.29X_2^2 + 21.04X_2 - 29.21$ ($R^2 = 0.85$), but there was a negative linear relationship between relative critical swimming speed and body length: $y_1 = 0.02x_1^2 - 0.87x_1 + 12.86$ ($R^2 = 0.94$), $y_2 = 0.02x_2^2 - 0.87x_2 + 14.81$ ($R^2 = 0.98$); (2) The critical swimming speed of bighead carp (80.89 ± 4.03 cm/s) in the body length group (10.78 ± 1.34 cm) was significantly higher than that of silver carp (65.50 ± 2.08 cm/s) with similar body length (10.11 ± 0.24 cm), while the difference in critical swimming speed of juvenile silver carp (16.90 ± 0.55) cm and bighead carp (15.39 ± 0.62 cm) was not significant (83.92 ± 3.03 cm/s and 91.62 ± 3.54 cm/s, respectively); (3) The burst swimming speed of juvenile silver carp was faster than that of bighead carp, while the critical swimming speed of juvenile silver carp was slower, indicating a trade-off between aerobic and anaerobic swimming for the two species. Results also indicate a negative correlation between burst swimming speed and critical swimming speed for silver carp and bighead carp. Our results provide information necessary to match fish swimming capability with hydraulic conditions in fish passageways.

Key words: *Hypophthalmichthys molitrix*; *Aristichthys nobilis*; critical swimming speed; fish passage facilities