

鲢幼鱼游泳能力及游泳行为的试验研究

李会锋¹, 蔡德所^{1,2}, 杨培思¹

(1. 广西大学土木建筑工程学院, 南宁 530004; 2. 广西壮族自治区水利厅, 南宁 530023)

摘要:为了探究四大家鱼的游泳能力,指导鱼道水力设计,提高鱼道过鱼成功率,增殖鱼类资源总量,以四大家鱼之一的鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)为试验对象,研究其游泳能力及游泳行为。在(30±1)℃水温下,采用流速递增法,鲢的体长7.3~16.8 cm,体重6.10~66.50 g,按体长将鲢分为(8.17±0.59) cm、(10.09±0.53) cm、(11.84±0.67) cm、(13.94±0.68) cm、(15.90±0.64) cm共计5个试验组。结果表明,鲢的临界游泳速度为52~100 cm/s,相对临界游泳速度为5.90~7.14 BL/s,摆尾频率为98.7~432.2次/min。鲢的临界游泳速度随体长增加而增大,其线性拟合方程为 $U_{crit}=4.908L+17.63$ ($R^2=0.998$);其相对临界游泳速度随体长增加而减小,线性拟合方程为 $U'_{crit}=-0.130L+8.025$ ($R^2=0.979$);在整个试验过程中,根据鱼类对水流速度的游泳行为响应,鲢摆尾频率随水流速度的增大而增加,两者呈线性关系;在相同流速下,较长个体鲢的摆尾频率显著小于较小的个体。

关键词:鲢;游泳能力;游泳行为;临界游泳速度

中图分类号:S956 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2016)03-0088-05

鱼道作为常用的一种生态工程措施,为鱼类等水生生物提供了上下游交流的生态廊道,满足了鱼类生长繁衍的洄游需要,已广泛应用于江河开发的生态保护(陈凯麒等,2012)。流速作为鱼道设计的关键参数,应与过鱼对象的游泳能力相适用,从而保证鱼类能够成功克服水流完成上溯洄游。鱼类游泳能力的研究对于优化鱼道设计至关重要。

鱼类的游泳能力与种类、体长、水温、坡度、溶解氧等多种因素密切相关。如果在鱼道设计中脱离对实际环境的考虑,片面地对过鱼对象游泳能力进行研究,就会缺乏针对性,很难达到良好的过鱼效果。就鱼道设计而言,鱼类临界游泳速度是评价其游泳能力最重要的指标(石小涛等,2011;郑金秀等,2010)。鱼道设计需要以主要过鱼对象的临界游泳速度作为参考依据,使鱼道中水流速度控制在相应鱼类的临界游泳速度以下,从而确保其在长时间持续游泳运动中不会出现过度疲劳。临界游泳速度可以为确定鱼道池室的最大流速和休息池间距提供重要的参考价值。

作为我国内陆流域常见的鱼类种群,四大家鱼在长江、珠江、黑龙江和黄河等流域水系普遍存在,因此其具有重要的生态和经济价值;同时,它们属典型的半洄游性鱼类,如产卵洄游、摄食育肥洄游等。随着水利工程的兴建,四大家鱼种群数量出现了显著的降低。迫切要求针对四大家鱼游泳能力展开研究,指导鱼道水力设计,提高鱼道过鱼成功率,增加鱼类资源总量。有关四大家鱼的游泳能力,已有草鱼(龚丽等,2015)、鳊幼鱼(蔡露等,2012)游泳能力及游泳行为的试验研究。本文以四大家鱼之一的鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)幼鱼为试验对象,研究其游泳能力及游泳行为,旨在积累资料并为鱼道设计提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验鱼于2015年8月10日从广西南宁市水产市场购买,体长7.3~16.8 cm,包括(8.17±0.59) cm、(10.09±0.53) cm、(11.84±0.67) cm、(13.94±0.68) cm、(15.90±0.64) cm共计5个体长组;体重6.10~66.50 g。

将试验鱼放置于2.0 m×0.6 m×0.5 m(长×宽×高)的矩形水槽中暂养2周,暂养期间水为曝气5 d的自来水,水温(30±1)℃,溶解氧控制在7.0 mg/L以上,氨氮浓度在0.01 mg/L以下,光照为室内自然光,试验鱼在试验前2 d禁食。

收稿日期:2015-10-14

基金项目:国家自然科学基金(51569006)。

作者简介:李会锋,1986年生,男,硕士研究生,研究方向为鱼类游泳能力和鱼道设计。E-mail: 506172951@qq.com

通信作者:蔡德所,1952年生,男,教授,博士生导师,研究方向为光纤传感技术及其应用和鱼类游泳行为研究。E-mail: caidesuo@vip.163.com

1.2 试验方法

试验水温控制在 $(30 \pm 1)^\circ\text{C}$, 试验鱼总样本数

为 55 尾, 其中预试验样本数量为 3 尾, 正式试验样本共 52 尾。试验鱼规格如表 1 所示。

表 1 正式试验鲢幼鱼的生理指标统计
Tab.1 Information on the silver carp tested

样本数/尾	10	11	10	10	11
体长/cm	8.17 ± 0.59	10.09 ± 0.53	11.84 ± 0.67	13.94 ± 0.68	15.90 ± 0.64
叉长/cm	8.86 ± 0.63	11.30 ± 0.32	13.62 ± 0.48	14.52 ± 0.70	16.65 ± 0.56
体重/g	8.03 ± 1.56	16.89 ± 1.86	21.94 ± 4.69	40.00 ± 5.56	61.22 ± 4.84
体高/cm	2.56 ± 0.22	3.01 ± 0.11	3.33 ± 0.21	3.70 ± 0.30	4.94 ± 0.22
肥满度	1.47 ± 0.15	1.65 ± 0.20	1.30 ± 0.08	1.47 ± 0.07	1.53 ± 0.15

注: 肥满度 = 体重 × 100 / 体长³
Note: Condition factor $F = W \times 100 / L^3$

临界游泳速度计算方法采用流速递增法。通过 3 次预试验, 每次 1 尾, 对试验鱼的临界游泳速度进行预测, 试验前需使鲢幼鱼在 1 BL/s 的低流速下适应 1 h (BL 为试验鱼体长), 消除人为转移过程对鱼体的胁迫; 随后每隔 2 min 增加 0.4 BL/s (石小涛等, 2012), 直至鱼疲劳, 记录此时相应的流速, 取 3 次临界游泳速度的粗略值为预试验流速的平均值, 作为正式试验的参考值。试验鱼疲劳判断标准为试验鱼被水流冲至水槽下游钢丝网处无法游动的时间超出 20 s (试验过程中使用摄像机进行录像, 记录鲢幼鱼的游泳行为)。

正式试验时, 将 1 尾试验鱼放入游泳观测区, 为消除人为对鱼体转移过程胁迫作用, 使其在 1 BL/s 的低流速下适应 1 h。试验开始后, 通过控制水槽的水流速度, 每隔 5 min 增加 0.5 BL/s, 直至达到 60% 的预估临界游泳速度; 然后调整水流速度为每隔 20 min 增加 15 % 的预估临界游泳速度 (鲜雪梅等, 2010), 同时观察记录鱼的游泳行为, 当试验鱼符合上述疲劳判断标准时, 则测试结束。记录该时刻水流速度和游泳时间, 试验完成后, 同时记录试验鱼的体长和体重。临界游泳速度按公式 (1) 计算 (Plaut et al, 2001):

$$U_{crit} = U + \Delta U \times t / \Delta t \tag{1}$$

式中: U_{crit} 为临界游泳速度 (cm/s); U 为试验鱼疲劳时对应的最大水流速度 (cm/s); ΔU 为流速增量 (增速 15 % 的临界游泳速度粗略值) (cm/s); t 为该时段鱼疲劳时所用的时间 (min); Δt 为时间间隔 (20 min)。

相对临界游泳速度用鱼类体长来表征其个体的临界游泳速度, 其计算公式如下:

$$U'_{crit} = U_{crit} / BL \tag{2}$$

式中: U'_{crit} 为相对临界游泳速度; BL 为鱼类体长 (cm)。

2 结果与分析

2.1 游泳能力

试验结果表明, 5 种体长范围的鲢幼鱼临界游泳速度分别为 (57.18 ± 3.13) cm/s、 (67.43 ± 2.48) cm/s、 (76.36 ± 3.43) cm/s、 (86.08 ± 3.66) cm/s 和 (95.31 ± 2.69) cm/s, 对应的相对临界游泳速度分别为 (7.01 ± 0.12) BL/s、 (6.69 ± 0.11) BL/s、 (6.45 ± 0.08) BL/s、 (6.18 ± 0.04) BL/s 和 (6.00 ± 0.07) BL/s。

通过相应数据分析可知, 试验鱼临界游泳速度随着其体长的增加而增加, 相对临界游泳速度随着其体长的增加而降低, 且拟合曲线基本符合线性关系, 不同体长鲢幼鱼临界游泳速度关系如图 1 和图 2 所示。

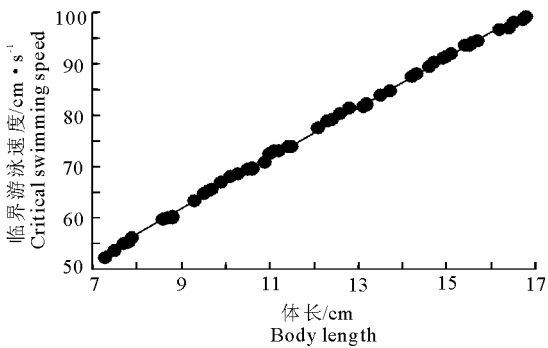


图 1 不同体长鲢幼鱼的临界游泳速度
Fig.1 Correlation between critical swimming speed and body length of juvenile silver carp

不同体长鲢幼鱼临界游泳速度的线性拟合为:
 $U_{crit} = 4.908 L + 17.63$ ($R^2 = 0.998$)

不同体长鲢幼鱼相对临界游泳速度的线性拟合为:
 $U'_{crit} = -0.130 L + 8.025$ ($R^2 = 0.979$)

式中: U_{crit} 为临界游泳速度 (cm/s); U'_{crit} 为相对临界游泳速度 (BL/s); L 为鲢幼鱼体长 (cm)。

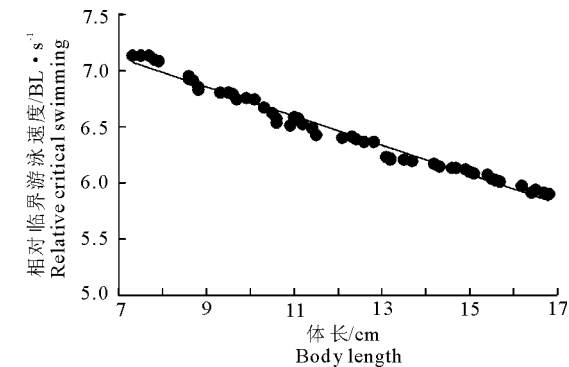


图2 不同体长下鲢幼鱼的相对临界游泳速度

Fig.2 Correlation between relative critical swimming speed and body length of juvenile silver carp

2.2 游泳行为

鲢幼鱼的游泳行为通过试验录像观察分析,同时对5个体长组的鲢幼鱼分别在10~100 cm/s的固定水流速度下的摆尾频率进行统计,得出不同体长鲢幼鱼在固定水流流速的摆尾频率关系(图3)。分析图3可知,鲢幼鱼的摆尾频率随水流速度的增大而增加,且基本呈线性关系,直至达到疲劳。通过

统计分析5个体长组鲢幼鱼摆尾频率均值的变化趋势(表2),得出在同一水流速度下,鲢幼鱼体长较大个体的摆尾频率小于体长较小的个体。

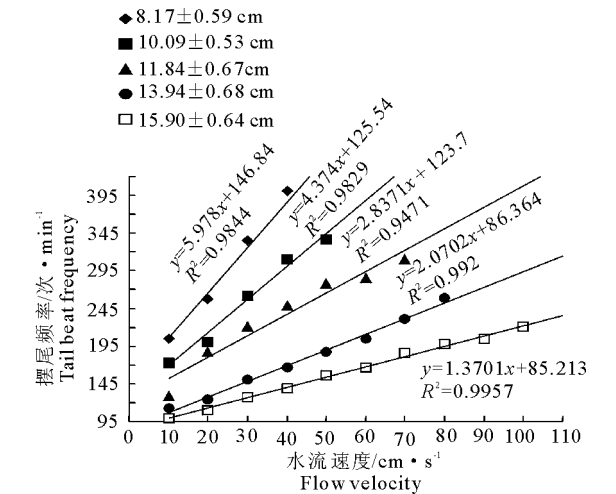


图3 不同体长下鲢幼鱼摆尾频率与水流速度的关系

Fig.3 Variation of silver carp tail beat frequency with body length and flow velocity

表2 不同体长下鲢幼鱼摆尾频率

Tab.2 Variation of silver carp tail beat frequency with body length

样本数/尾	10	11	10	11	11
体长/cm	8.17 ± 0.59	10.09 ± 0.53	11.8 ± 0.67	13.94 ± 0.68	15.90 ± 0.64
摆尾频率/次 · min ⁻¹	326.2 ± 95.3	256.8 ± 69.8	237.2 ± 63.0	179.5 ± 50.9	160.5 ± 41.6

3 讨论

3.1 体长对鲢游泳能力的影响

有研究表明,鱼类绝对临界游泳速度与体长呈正相关关系,而相对临界游泳速度则与体长呈负相关关系(Stobutzki et al, 1998; Winger et al, 1999; Peterson et al, 2001)。据文献报道,在20℃水温下,体长9.8~12.3 cm 鳙的临界游泳速度 $U_{crit} = 4.57L \pm 0.56$ (蔡露等, 2012); 在25℃水温下,体长为(7.93 ± 0.08)青鱼的临界游泳速度 $U_{crit} = 5.25L \pm 0.18$ (鲜雪梅等, 2010)。

本试验研究中,在(30 ± 1)℃水温下,体长7.3~16.8 cm 鲢幼鱼的临界游泳速度为52~100 cm/s,且临界游泳速度随体长增加呈线性增大,其关系式为: $U_{crit} = 4.908L + 17.63$; 鲢幼鱼的相对临界游泳速度随体长增加呈在线性减小,其关系式为: $U'_{crit} = -0.130L + 8.025$ 。可见本次试验结果与上述研究基本一致。分析鲢游泳能力随体长变化趋势可知,

鲢肌肉是随体长的增加按比例增加的,其克服单位体重的推进功率与体长大小呈反比关系。

3.2 体长对鲢游泳行为的影响

诸多研究表明,鱼类的尾摆频率与游泳速度呈线性正相关关系(Dickson et al, 2002; Svendsen et al, 2003; Tu et al, 2011; Cai et al, 2013; 蔡露等, 2013); 同一种个体、不同体长鱼类的尾摆频率存在一定差异,一般情况下,在同一水流速度下,体长较大个体的尾摆频率小于较小的个体(Webb, 1975; Videler et al, 1984; Webb et al, 1984; Dewar et al, 1994)。本研究中,鲢幼鱼的摆尾频率随水流速度的增大而增加,且基本呈线性关系;在同一水流速度下,鲢幼鱼体长较大个体的摆尾频率小于较小的个体。

水温是影响鱼类游泳能力及游泳行为至关重要的因素(Lyonn et al, 2008)。由于本次研究只考虑在单一水温下测定,忽略了温度变化对其产生的影响,因此下一步应研究温度等多种因素对鱼类游泳能力及游泳行为的影响。

参考文献

- 蔡露, 刘国勇, Rachel Taupier, 等, 2013. 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, 37(6): 993–998.
- 蔡露, 涂志英, 袁喜, 等, 2012. 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, 21(2): 89–95.
- 陈凯麒, 常仲农, 曹晓红, 等, 2012. 我国鱼道的建设现状与展望[J]. 水利学报, 43(2): 182–188.
- 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.
- 石小涛, 陈求稳, 刘德福, 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.
- 石小涛, 陈求稳, 黄应平, 等, 2011. 鱼类通过鱼道内水流速度障碍能力的评估方法[J]. 生态学报, 31(22): 6967–6972.
- 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.
- 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]. 水生态学杂志, 31(5): 104–110.
- Cai L, Taupier R, Johnson D, et al, 2013. Swimming capability and swimming behavior of juvenile *Acipenser schrenckii* [J]. J Exp Zool Part A, 319(3): 149–155.
- Dewar H, Graham J B, 1994. Studies of tropical tuna swimming performance in a large water tunnel III. Kinematics[J]. J Exp Biol, 192: 45–59.
- Dickson K A, Donley J M, Sepulveda C, 2002. Effects of temperature on sustained swimming performance and swimming kinematics of the chub mackerel *Scomber japonicus* [J]. J Exp Biol, 205(7): 989–980.
- Lyonn J P, Ryan T J, Scroggie M P, 2008. Effects of temperature on the fast-start performance of an Australian freshwater fish[J]. Ecology of Fresh water Fish, 17: 184–188.
- Peterson R H, Harmon P, 2001. Swimming ability of pre-feeding striped bass larvae [J]. Aquaculture International, 9(5): 361–366.
- Plaut I, 2001. Critical swimming speed: its ecological relevance [J]. Comparative Biochemistry and Physiology, 131(A): 41–50.
- Stobutzki I C, 1998. Interspecific variation in sustained swimming ability of latepelagic stage reef fish from two families (Pomacentridae and Chaetodontidae) [J]. Coral Reefs, 17(2): 111–119.
- Svendsen J C, Skov J, Bildsoe M, et al, 2003. Intra-school positional preference and reduced tail frequency in trailing positions in schooling roach under experimental conditions [J]. J Fish Biol, 62(4): 834–846.
- Tu Z, Yuan X, Han J C, et al, 2011. Aerobic swimming performance of juvenile *Schizothorax chongi* (Pisces, Cyprinidae) in the Yalong River, Southwestern China [J]. Hydrobiologia 675(1): 119–127.
- Videler J J, Hess F, 1984. Fast continuous swimming of two pelagic saithe (*Pollachius virens*) and mackerel (*Scomber scomberus*): a kinematic analysis [J]. J Exp Biol, 109: 209–228.
- Webb P W, 1975. Hydrodynamics and energetics of fish propulsion [J]. Bull Fish Res Bd Can, 190: 1–159.
- Webb P W, Kostectki P T, Stevens D E, 1984. The effect of size and swimming speed on locomotor kinematics of rainbow trout [J]. J Exp Biol, 109: 77–95.
- Winger P D, He P, Walsh S J, 1999. Swimming endurance of American plaice (*Hippoglossoides platessoides*) and its role in fish capture [J]. ICES Journal of Marine Science, 56(3): 252–265.

(责任编辑 万月华)

Swimming Ability and Behavior of Different Sized Silver Carp

LI Hui-feng¹, CAI De-suo^{1,2}, YANG Pei-si¹

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, P. R. China;

2. Guangxi Water Conservancy Department, Nanning 530023, P. R. China)

Abstract: In hydraulic engineering, the fish passageway is regarded as an ecological corridor and its design is based on the critical swimming speed of target fish species. Populations of the four major Chinese carp species, the most common fish in China's rivers, have decreased sharply as the number of hydraulic engineering projects has increased. In order to explore the swimming ability of a carp species and provide a technical reference for the design of fish passageways, we carried out research on the swimming ability and behavior of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*). Silver carp, in the weight range of 6.10 – 66.50 g, were divided into five groups according to the body length (BL): (8.17 ± 0.59) cm, (10.09 ± 0.53) cm, (11.84 ± 0.67) cm, (13.94 ± 0.68) cm, (15.90 ± 0.64) cm. The swimming ability and behavior of the silver carp were determined using a stepped-velocity test at (30 ± 1) °C. The critical swimming speed (U_{crit}) of silver carp range was 52 – 100 cm/s, the relative critical swimming speed (U'_{crit}) range was 5.90 – 7.14 BL/s and the tail beat frequency (TBF) range was 98.7 – 432.2 min⁻¹. Critical swimming speed increased linearly with body length, according to the equation, $U_{crit} = 4.908L + 17.63$ ($R^2 = 0.998$), but there was a negative linear correlation between the relative critical swimming speed and body length, $U'_{crit} = -0.130L + 8.025$ ($R^2 = 0.979$). The tail beat frequency of silver carp increased linearly with flow velocity and, at a given velocity, TBF decreased with body length.

Key words: silver carp; swimming ability; swimming behavior; critical swimming speed