

doi: 10.7541/2016.154

鲢幼鱼在不同水流速度下的暴发-滑行行为策略

梁园园^{1,2} 林晨宇² 陈 廷² 张秋生² 刘国勇^{1,2} 刘德富² 高 柱² 石小涛²

(1. 三峡大学生物与制药学院, 宜昌 443002; 2. 三峡大学三峡库区生态环境教育部工程研究中心, 宜昌 443002)

摘要: 在水温(18±1)℃的条件下, 以全长(11.70±0.57) cm的鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)幼鱼为研究对象, 测定其不同流速(16.5、22.0、27.5、33.0、38.5、44.0、49.5和55.0 cm/s)下的持续游泳时间、调头百分比和暴发-滑行运动数据。结果表明, 鲢的平均持续游泳时间先随流速的增加而减小, 后随流速的增加而增加。当流速33.0 cm/s时, 平均持续时间最短为118.6min, 其中各组试验鱼的最大可持续游泳时间均可达到200min。调头百分比随流速的增加迅速减小, 当流速≥44.0 cm/s时, 不再出现调头行为。暴发-滑行游泳的平均暴发时间随流速的增加呈上升趋势($y=0.03x+2.64$, $R^2=0.92$, $P<0.05$)。平均对地暴发距离均在30—45 cm, 没有显著性差异($P>0.05$), 平均绝对暴发距离存在极显著性差异, 且随流速的增加而增加($y=4.98x-5.63$, $R^2=0.98$, $P<0.001$)。平均对地暴发速度没有显著性差异(平均对地平均速度和最大速度分别在9—12 cm/s、12—16 cm/s, $P>0.05$)。平均绝对暴发速度与水流速度之间存在线性正相关关系(平均绝对平均暴发速度: $y=0.98x+10.74$, $R^2=1.00$, $P<0.001$; 平均绝对最大暴发速度: $y=1.02x+13.75$, $R^2=0.99$, $P<0.001$)。研究表明鲢在不同的流速下采取的暴发-滑行行为策略不同。

关键词: 鲢; 水流速度障碍; 持续游泳时间; 行为策略; 暴发-滑行

中图分类号: Q178.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-3207(2016)06-1187-07

鱼是一种敏感的水生生物, 其行为极易受到光照、温度、水流等外界环境因素的影响^[1-4]。水流速度障碍在自然界中广泛存在, 它是鱼类仅靠有氧呼吸或持续式游泳不能通过的水流, 能够刺激鱼类感觉器官产生相应行为反应, 对其摄食、代谢及生长繁殖造成影响。洄游鱼类一般需要通过不同形式的水流速度障碍才能完成生活史, 如鲑鳟鱼类的生殖洄游就需要克服连续的水流速度障碍才能到达产卵场^[5, 6]。目前, 实验室中普遍采用固定流速法和流速增量法测定鱼类的游泳能力。由于此类研究多集中于均匀流场下游泳能力的测试, 所以尚未见系统的定量方法测定鱼类通过水流速度障碍的能力^[7]。

鱼类的游泳行为较不稳定, 阶段性的持续式游泳、暂停及偶而性的暴发游泳经常相互穿插发生^[8, 9]。

当面临不同速度障碍时, 各种鱼表现出来的游泳行为也不尽相同, 但鱼类除了鱼道进出口等高流速区采用疾冲游泳行为外, 一般情况下都采用暴发-滑行游泳行为^[10-12]。如短吻鲟(*Acipenser brevirostrum*)在对抗高速水流时会采用暴发-滑行、自由游动、侧游、底层掠过和固定体位等方式^[13], 而锦鲤(*Cyprinus carpio koi*)主要采用暴发-滑行游泳方式^[11, 14]。分析大西洋鳕(*Gadus morhua*)游泳行为的高速图像并计算其暴发-滑行游泳和稳态游泳在快速厌氧状态下移动每米做的功, 发现当平均游泳速度远高于最大巡游速度时, 暴发-滑行游泳比稳态游泳做的功少^[15]。在较长的水槽中测定鲤(*Cyprinus carpio*)的临界游泳能力, 发现其可以通过增加暴发-滑行游泳的时间获得更高的临界游泳速度^[11]。单驱动仿生机器鱼的加速-滑行动态特性数值研究, 发现其可以通

收稿日期: 2015-10-20; 修订日期: 2016-03-08

基金项目: 国家自然科学基金(51579136); 国家科技支撑计划项目(2012BAC06B01); 三峡库区生态环境教育部工程研究中心开放基金(2015KF-03)资助 [Supported by the National Natural Science Foundation of China (51579136); the National Science and Technology Support Project of China (2012BAC06B01); Open Fund of Engineering Research Center of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education (2015KF-03)]

作者简介: 梁园园(1988—), 女, 湖北随州人; 硕士; 主要从事鱼类行为学研究。E-mail: 1051342941@qq.com

通信作者: 石小涛(1981—), 男, 湖北红安人; 博士; 主要从事生态水利学研究。E-mail: sxtshanghai@163.com

过加速时间和滑行时间的组合得到更高的游动效率^[16]。此外,鱼类暴发-滑行游泳的动力学、水力学、能量优势及数值模拟等方面也有学者研究^[17-22]。

鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)属鲤形目,鲤科,是我国著名的四大家鱼之一,广泛分布于我国各大水系,是一种重要的经济鱼,同时其体侧扁,呈梭形,是一种半洄游鱼类。本文拟定量表征鲢幼鱼在不同水流速度下的游泳特征,通过对持续游泳时间、调头百分比及暴发-滑行行为进行分析,理解鱼类应对不同流速的行为学策略,验证暴发-滑行行为在不同流速中发挥不同的作用。

1 材料与方法

1.1 试验材料及其驯化

试验用1龄鲢幼鱼均由宜都渔场提供,体重 (14.62 ± 1.84) g、叉长 (10.28 ± 0.51) cm、全长 (11.70 ± 0.57) cm。试验前在循环控温水槽中(水容量 2 m^3)暂养2周。鲢生活于水上层,主食浮游植物。人工暂养期间试验鱼以水池中的浮游植物为食,同时按池鱼体重的2%—5%投喂米糠。采用曝气自来水,水温控制在 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$,溶氧含量大于 7 mg/L ,氨氮水平小于 0.01 mg/L ,光照为室内自然光。

1.2 试验装置

采用本实验室自行制作的螺旋桨式游泳仪(图1),其工作原理为在密闭空间内,通过调频器改变电机的转速从而改变水流速度。实验区(长 $111 \text{ cm} \times$ 宽 $22 \text{ cm} \times$ 高 22 cm)上游用一个整流器制造相对均匀的流场,下游设置钢丝网避免试验鱼被冲走。整个椭圆形水槽被置于一个大的矩形水槽外箱中。工作时,椭圆形水槽由螺母和密封圈盖紧,防止游泳区上方的水体与矩形水槽中水体的交换而导致的紊流。椭圆形游泳槽与大的矩形水槽外箱通过位于椭圆形水槽两侧弧形转弯处的小孔进行水体交换,以提供游泳区充足的溶解氧。实验区上方安装一个摄像头,对鱼的游泳行为进行监测^[23]。

1.3 试验方法

所有试验均在上述游泳装置中进行。试验前一天,停止投饵,并用ADV声学多普勒流速仪测定实验区流速,建立变频频率与流速之间的关系(图2)。试验时,从暂养水槽随机选取1尾健康状况良好的试验鱼至测试区,盖上测试区顶盖,开动调频电机。在 5.5 cm/s 的流速下适应 30 min 后,将流速调到某一设定值(16.5 、 22.0 、 27.5 、 33.0 、 38.5 、 44.0 、 49.5 和 55.0 cm/s),直至试验鱼达到运动力竭状态(疲劳判定标准:试验鱼被水流冲至游泳槽尾端钢丝网,贴壁超过 3 s)或持续游泳时间达到 200 min ,

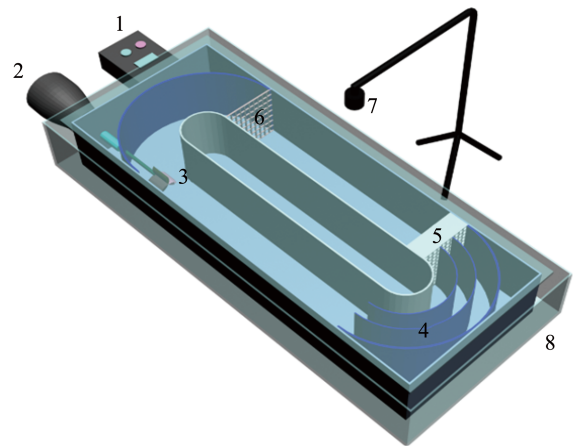


图1 螺旋桨式游泳仪示意图

Fig. 1 Sketch map of propeller-type swim tunnel

1. 变频器; 2. 电动机; 3. 螺旋桨; 4. 导流栅; 5. 整流器; 6. 拦网; 7. 摄像头; 8. 水槽

1. Frequency controller; 2. Pump; 3. Propeller; 4. Flow-diversion barriers; 5. Flow streamer; 6. Net; 7. Camera; 8. Tank

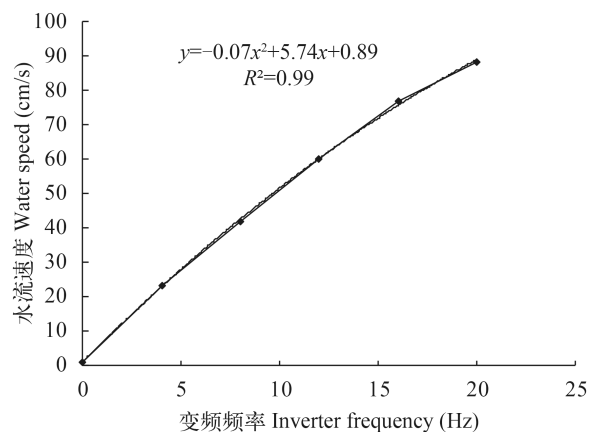


图2 变频频率与水流速度的关系

Fig. 2 The relation between frequency and water speed

记录试验鱼的持续游泳时间。每组试验重复10次,共80尾。整个游泳过程溶解氧含量不低于 7 mg/L 。控温装置将水槽内温度控制在 $(18 \pm 1)^\circ\text{C}$ 。记录试验鱼的力竭时刻,并将其从游泳管中取出,测定体重、叉长、全长。

其中,持续游泳时间采用每组10尾鱼的平均值。调头次数百分比是每组出现调头行为鱼的数目除以该组鱼的总数。暴发-滑行游泳行为的分析,首先从每组10尾鱼中随机选取3尾鱼,然后再随机截取每尾鱼疲劳前的实验视频(各取3段,每段 10 min),最后对视频中的暴发-滑行行为进行数据处理取平均值。

1.4 行为分析

暴发-滑行游泳由一个或多个连续的暴发游泳和紧随的滑行游泳组成。暴发游泳包括从稳态迅

速增加到高流速的快速启动阶段和尾鳍等幅摆动维持高流速的匀速阶段。滑行游泳包括从高流速逐渐降到相对水流静止的减速阶段和停止游泳被水流往后冲的滑行阶段。

行为学轨迹分析软件Logger Pro 3.8处理试验鱼的游泳视频^[24], 收集和分析其暴发-滑行游泳的暴发时间(快速启动和维持高流速的时间)和暴发距离(暴发游泳前进的距离)数据, 计算得到暴发速度(对地暴发游泳速度)。数据通过视频逐帧播放收集, 每秒30帧, 通过逐帧点击试验鱼头部固定位置, 可获得试验鱼头部移动距离即游泳距离 S , 每帧时间间隔为 t , 则游泳速度 $V=S/t$, 对地暴发游泳速度加上对应的水流速度, 可得到绝对暴发游泳速度。整个移动过程所用时间即游泳时间 T 。

在试验过程中, 还观察到一个非常有趣的现象: 试验鱼在低流速下会出现顺着水流往下漂, 在快要接近游泳槽尾端钢丝网时, 突然调头往前游泳的现象。定义试验鱼的头部由顺流时与水流方向保持一致, 迅速变为逆流时与水流方向相反为一次调头。可通过肉眼分析人工计数的方法, 统计每组试验鱼中出现该现象的尾数, 获得不同流速下调头现象出现的百分比。

1.5 数据处理

试验数据用SPSS 17.0 软件分析处理。统计值用平均数 $\pm$ 标准差(Mean $\pm$ SD)描述, 差异显著水平为 $P<0.05$ 。拟合相关关系采用线性回归分析。

2 结果

2.1 持续游泳时间和调头百分比与流速的关系

鲢的平均持续游泳时间先随流速的增加而减小, 后随流速的增加而增加(图3)。在不同流速下, 每组试验鱼的最大可持续游泳时间均可达到200min, 最小可持续游泳时间与平均可持续游泳时间的趋势相同。当流速 <44.0 cm/s时, 调头现象出现的百分比随流速的增加迅速减小, 当流速 ≥ 44.0 cm/s时, 调头百分比一直为零即不再出现调头现象(图4)。

2.2 暴发时间和暴发距离与流速的关系

在不同流速下, 鲢的平均暴发时间有显著性差异, 且随流速的增加而增加($y=0.03x+2.64$, $R^2=0.92$, $P<0.05$, 图5)。当流速不大于27.5 cm/s时平均暴发时间较短, 当流速超过44.0 cm/s时平均暴发时间较长。鲢的平均对地暴发距离没有显著性差异, 均在30—45 cm($P>0.05$)。平均绝对暴发距离有极显著性差异, 最小值和最大值分别为91和280 cm, 且随流速的增加呈上升趋势($y=4.98x-5.63$, $R^2=0.98$, $P<0.001$, 图6)。

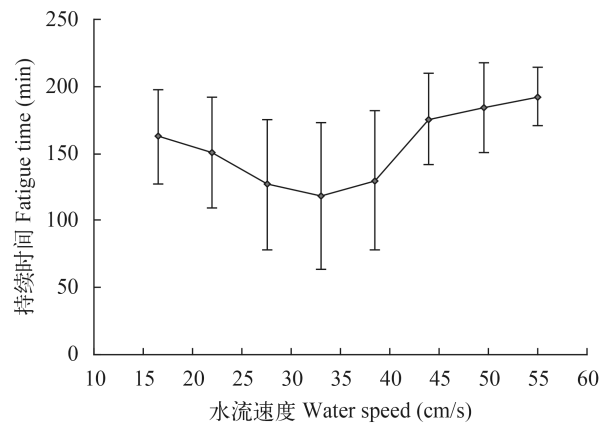


图3 不同流速下鲢持续游泳时间的变化

Fig. 3 Durations of silver carp at different water speeds

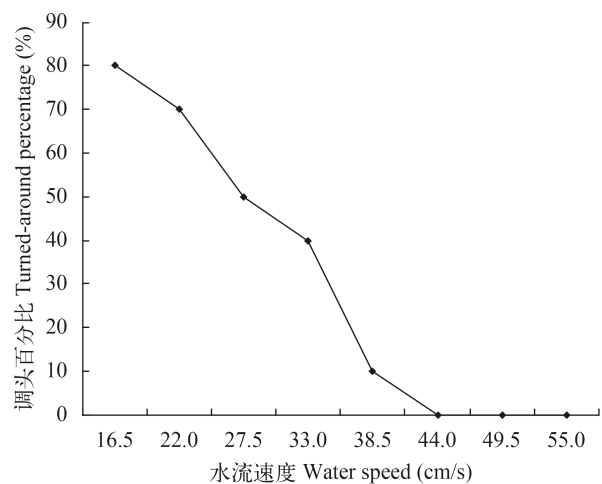


图4 不同流速下鲢调头百分比的变化

Fig. 4 Percentages of Turned-around of silver carp at different water speeds

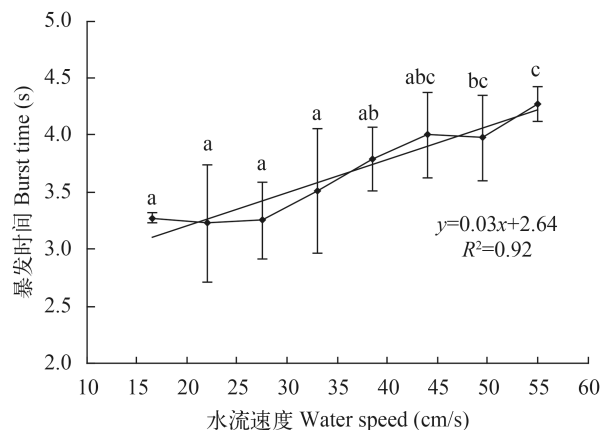


图5 不同流速下鲢暴发时间的变化

Fig. 5 Burst time of silver carp at different water speeds

线上不同字母表示差异显著性, 相同字母表示差异不显著性, 差异显著 $P<0.05$, 差异不显著 $P>0.05$

Letters in each line indicate the extent of significant difference. The same letter indicates the difference is not significant. Significant difference $P<0.05$, and insignificant difference $P>0.05$

2.3 暴发速度与流速的关系

对地暴发速度与流速的关系 在不同流速下, 鲢的平均对地平均暴发速度和平均对地最大暴发速度都没有显著性差异($P>0.05$, 图 7、图 8), 其暴发-滑行对抗不同水流速度障碍的平均对地平均暴发速度和平均对地最大暴发速度分别在9—12 cm/s 和12—16 cm/s。

绝对暴发速度与流速的关系 鲢的平均绝对平均暴发速度和平均绝对最大暴发速度均有极显著性差异, 且与水流速度呈线性正相关关系($P<0.001$, 图 9)。拟合关系式如下, 平均绝对平均暴发速度: $y=0.98x+10.74$, $R^2=1.00$; 平均绝对最大暴发速度: $y=1.02x+13.75$, $R^2=0.99$ 。

3 讨论

游泳行为是鱼类生命活动的主要内容之一, 鱼类在水中进行搜索、洄游、逃避敌害、聚集、生殖等活动都离不开游泳^[25]。在低氧下, 大西洋鳕的

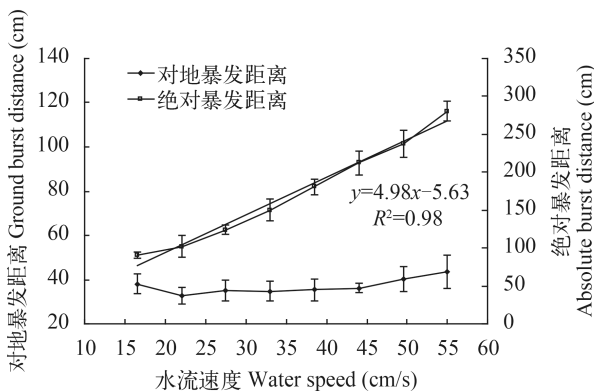


图 6 不同流速下鲢暴发距离的变化

Fig. 6 Burst distances of silver carp at different water speeds

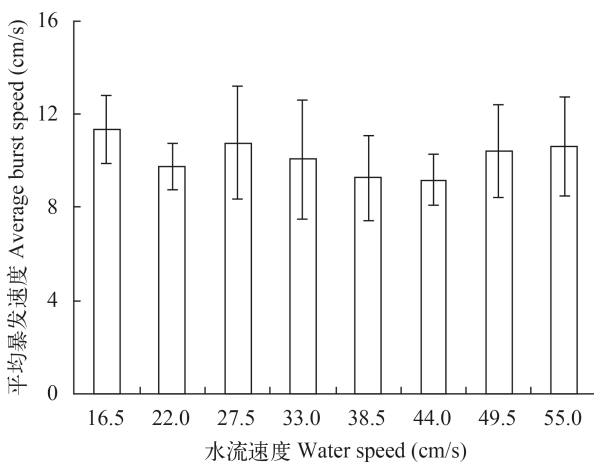


图 7 不同流速下鲢对地平均暴发速度的变化

Fig. 7 The burst speeds of silver carp relative to the ground at different water speeds

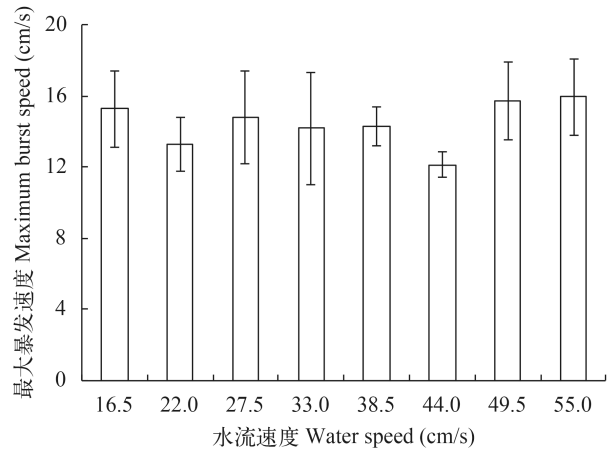


图 8 不同流速下鲢对地最大暴发速度的变化

Fig. 8 The maximum burst speeds of silver carp relative to the ground at different water speeds

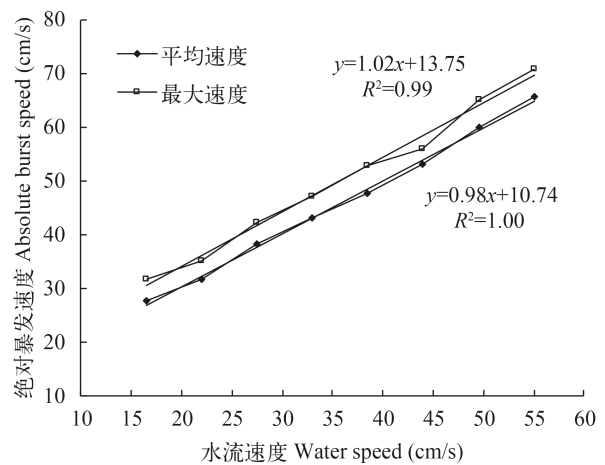


图 9 不同流速下鲢绝对暴发速度的变化

Fig. 9 The absolute burst speeds of silver carp at different water speeds

临界游泳能力会受到暴发-滑行行为策略的影响^[21]。说明鱼类迁徙洄游过程中, 能否采取正确的行为策略, 将影响其游泳能力和通过速度障碍的成功率。各种游泳行为模式构成了鱼类行为策略。在鱼类的各种游泳行为中, 暴发-滑行游泳行为是重要的行为方式, 在鱼类上溯游泳过程中发挥重要作用, 常常作为游泳能力的指示指标。淡水鱼类如锦鲤的常规游泳中也经常出现暴发-滑行行为。暴发-滑行行为的早期研究多集中于探究鱼体运动时流型的变化和该行为是否节能^[12, 15], 试验多在高流速下进行。本试验重在研究低流速下鱼类的暴发-滑行游泳行为, 旨在比较不同流速下鱼类的行为学策略及其发挥的不同作用, 相关研究在国内外文献中较为少见。尽管如此, 暴发-滑行行为作为重要的行为学指标引起了国外学者的广泛关注。相关研究进展表明, 暴发-滑行行为可间接替代临界流速等

指标作为临界游泳能力的指示指标^[11,21]。

本研究发现鲢在不同流速下采取的调头行为和暴发-滑行游泳行为不同,并最终导致不同流速下的持续游泳时间不一,证明了鲢在不同的流速下采用了不同的行为策略。为了进一步了解鲢幼鱼的游泳能力,后续试验又在相同实验装置中测定了叉长(10.12±0.64) cm 鲢幼鱼的临界流速(42.80±7.83) cm/s。研究结果表明,随着水流速度逐渐增大但小于临界流速时,调头行为出现的百分比逐渐减小,当水流速度大于临界流速时,调头行为不再出现。这种现象可能与试验鱼的供能方式或位置保持有关。在低流速下,鱼类以红色肌肉有氧呼吸供能,可以较为自主的游泳,调头现象经常出现。当流速逐渐增大到接近或大于鲢幼鱼的临界流速时,其除了利用红色肌肉有氧呼吸供能,还利用白色肌肉无氧呼吸供能以克服水流速度障碍^[15],同时,较高流速的刺激可能对鱼产生了一定的胁迫作用,迫使其不断游泳以防止被水流冲走,此时调头现象逐渐减少直至不再出现。宋波澜等^[26]等对不同流速下红鳍银鲫趋流行为的研究也发现静水下其游泳活动表现出随机而无特定的方向性,当流速达到0.3 m/s 以上则呈现很强的趋流性。本研究发现的鱼类调头频次随水流增加而减小的现象有待进一步分析,挖掘调头频次改变与水流特征的关系将有助于游泳行为特征(如游泳能力)的定量表征。

此外,鲢幼鱼暴发-滑行游泳的平均对地暴发速度,可能只与其自身属性有关并不受水流速度的影响,验证了Castro-Santos 最大探顶策略预测模型,即鱼类在对抗不同水流速度时,为了达到最大的游泳距离会在一个恒定的对地速度下游泳^[5,27]。鲢幼鱼暴发-滑行游泳的平均暴发时间与鲤临界流速测定试验中暴发-滑行游泳的平均暴发时间趋势相同,均随流速的增加而增加^[11]。鲢幼鱼平均绝对暴发距离和平均绝对暴发速度与流速呈线性正相关关系,表明暴发-滑行行为可在一定程度上指示鱼类的游泳速度,侧面反映鱼体游泳能力。

游泳行为是鱼类行为学研究的重要内容,通过对鲢幼鱼暴发-滑行游泳行为的研究,可以了解鱼类应对不同流速的行为学策略,探索暴发-滑行行为在不同流速中发挥的不同作用,在工程应用上可以为鱼道、集运鱼船等过鱼设施的水力学设计提供一定的理论基础。但是,鱼类行为容易受到形状、大小、发育程度等生理因素和水温、溶氧、光照等环境因素的影响^[28-31]。本文只针对不同流速下鲢的暴发-滑行游泳行为进行了研究,其他因素尚未考虑。因此相关内容的进一步研究需考虑

鱼体本身的特性、环境因子和能量代谢等因素。此外,暴发-滑行的生理耗能理论依据如游泳前后耗氧率、运动代谢率、乳酸含量的变化,单摆尾、多摆尾产生流态的变化,运动学数据的分析,理论模型的建立和数值模拟等方面也需要更加深入的研究。

参考文献:

- [1] Kemp P S, Williams J G. Illumination influences the ability of migrating juvenile salmonids to pass a submerged experimental weir [J]. *Ecology of Freshwater Fish*, 2009, **18**(2): 297—304
- [2] Han J C, Cao T T, Huang Y P, *et al.* Effects of temperature and flow velocity on the respiratory metabolism of *Schizothorax prenanti* juveniles [J]. *Journal of Wuhan University (Natural Science Edition)*, 2010, **56**(1): 81—86 [韩京成, 曹婷婷, 黄应平, 等. 温度和流速对齐口裂腹鱼幼鱼呼吸代谢的影响. 武汉大学学报(理学版), 2010, **56**(1): 81—86]
- [3] Kemp P S, Russon I J, Vowle A S, *et al.* The influence of discharge and temperature on the ability of upstream migrant adult river lamprey (*Lampetra fluviatilis*) to pass experimental overshot and undershot weirs [J]. *River Research and Application*, 2011, **27**(4): 488—498
- [4] Silva A T, Santos J M, Ferreira M T, *et al.* Effect of water velocity and turbulence on the behaviour of Iberian barbel (*Luciobarbus bocagei*, Steindachner 1864) in an experimental pool-type fishway [J]. *River Research and Application*, 2011, **27**(3): 360—373
- [5] Theodore C S. Optimal swim speeds for traversing velocity barriers: an analysis of volitional high-speed swimming behavior of migratory fishes [J]. *Journal of Experimental Biology*, 2005, **208**(3): 421—432
- [6] Webb P W. Hydrodynamics and energetics of fish propulsion [J]. *Bulletin of the Fisheries Research Board of Canada*, 1975, **190**: 1—159
- [7] Shi X T, Chen Q W, Huang Y P, *et al.* Review on the methods to quantify fish's ability to cross velocity barriers in fish passage [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, **31**(22): 6967—6972 [石小涛, 陈求稳, 黄应平, 等. 鱼类通过鱼道内水流速度障碍能力的评估方法. 生态学报, 2011, **31**(22): 6967—6972]
- [8] Kieffer J D. Perspective-Exercise in fish: 50+ years and going strong [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology*, 2010, **156**(2): 163—168
- [9] Plaut I. Critical swimming speed: its ecological relevance [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology*, 2001, **131**(1): 41—50
- [10] Webb P W. Body form, locomotion and foraging in aquatic vertebrates [J]. *American Zoologist*, 1984, **17**: 107—120

- [11] 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
- [12] Videler J J, Weihs D. Energetic advantages of burst-and-coast swimming of fish at high speeds [J]. *Journal of Experimental Biology*, 1982, **97**: 169—178
- [13] Kieffer J D, Arsenault L M, Litvak M K. Behaviour and performance of juvenile shortnose sturgeon *Acipenser brevirostrum* at different water velocities [J]. *Journal of Fish Biology*, 2009, **74**(3): 674—682
- [14] Yang Y, Wu G H, Yu Y L, *et al.* A study on flow physics of burst-and-coast swimming of koi carp (*Cyprinus carpio koi*) based on measurements and numerical simulations [J]. *Journal of Aero Aqua Bio-Mechanisms*, 2010, **1**(1): 30—38
- [15] Videler J J. Swimming movements, body structure and propulsion in Cod (*Gadus morhua*) [J]. *Symposium of the Zoological Society of London*, 1981, **48**: 1—27
- [16] Wan H, Wang X S. A numerical study on the dynamics responses of a single actuated bio-mimetic robotic fish during burst-and-coast swimming [J]. *Robot*, 2012, **34**(4): 411—417 [万宏, 王兴松. 单驱动仿生机器鱼加速-滑行动态特性的数值研究. 机器人, 2012, **34**(4): 411—417]
- [17] Wu G H, Yang Y, Zeng L J. Kinematics, hydrodynamics and energetic advantages of burst-and-coast swimming of koi carps (*Cyprinus carpio koi*) [J]. *Journal of Experimental Biology*, 2007, **210**: 2181—2191
- [18] Frank E F, Jennifer F F, Cindy J X. Burst-and-coast swimming in schooling fish (*Notemigonus crysoleucas*) with implications for energy economy [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology*, 1991, **100**(3): 633—637
- [19] Blake R W. Functional design and burst-and-coast swimming in fishes [J]. *Canadian Journal of Zoology*, 1983, **61**(11): 2491—2494
- [20] Chung M H. On burst-and-coast swimming performance in fish-like locomotion [J]. *Bioinspiration and Biomimetics*, 2009, **4**(3): 1—12
- [21] Dutil J D, Sylvestre E L, Gamache L, *et al.* Burst and coast use, swimming performance and metabolism of Atlantic cod *Gadus morhua* in sub-lethal hypoxic conditions [J]. *Journal of Fish Biology*, 2007, **71**(2): 363—375
- [22] Stocker S, Weihs D. Optimization of energetic advantages of burst swimming of fish [J]. *Mathematical Methods in the Applied Sciences*, 2001, **24**(17—18): 1387—1400
- [23] 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. 水生生物学报, 2012, **36**(1): 133—136]
- [24] Lu B, Liu W, Liang Y Y, *et al.* The burst-coast swimming behavior of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) during fast-start [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2014, **38**(6): 69—74 [路波, 刘伟, 梁园园, 等. 草鱼快速启动过程的加速-滑行游泳行为. 水产学报, 2014, **38**(6): 69—74]
- [25] Li X, Lin X T, Song B L, *et al.* Effects of water velocity on swimming performances of juvenile Tinfoil barb *Barbodes schwanenfeldi* [J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2010, **45**(2): 126—133 [李想, 林小涛, 宋波澜, 等. 流速对红鳍银鲫幼鱼游泳状态的影响. 动物学杂志, 2010, **45**(2): 126—133]
- [26] Song B L, Lin X T, Wang W J, *et al.* Effects of water velocities on rheotaxis behaviour and oxygen consumption rate of tinfoil barbs *Barbodes schwanenfeldi* [J]. *Acta Zoologica Sinica*, 2008, **54**(4): 686—694 [宋波澜, 林小涛, 王伟军, 等. 不同流速下红鳍银鲫趋流行为与耗氧率的变化. 动物学报, 2008, **54**(4): 686—694]
- [27] Castro-Santos T. Modeling the effect of varying swim speeds on fish passage through velocity barriers [J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 2006, **135**(5): 1230—1237
- [28] He D R. Fish Behavior [M]. Xiamen: Xiamen University Publisher. 1998, 141 [何大仁. 鱼类行为学. 厦门: 厦门大学出版社. 1998, 141]
- [29] 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. 水生态学杂志, 2010, **3**(5): 104—110]
- [30] 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
- [31] Calles O, Olsson I C, Comoglio C, *et al.* Size-dependent mortality of migratory silver eels at a hydropower plant, and implications for escapement to the sea [J]. *Freshwater Biology*, 2010, **55**(10): 2167—2180

STRATEGIES OF BURST-COAST SWIMMING BEHAVIOR OF JUVENILE SILVER CARP AT DIFFERENT FLOW VELOCITIES

LIANG Yuan-Yuan^{1,2}, LIN Chen-Yu², CHEN Ting², ZHANG Qiu-Sheng², LIU Guo-Yong^{1,2}, LIU De-Fu², GAO Zhu² and SHI Xiao-Tao²

(1. College of Biological and Pharmaceutical Science, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Engineering Research Center of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: At the water temperature of $(18\pm1)^{\circ}\text{C}$, the current study investigated the strategies of burst-coast swimming behavior of juvenile Silver carps *Hypophthalmichthys molitrix* (at full length of 11.70 ± 0.57 cm) such as swimming duration, percentage of turned-around, burst time, distance and speed in the burst-coast performance at different flow velocities (16.5, 22.0, 27.5, 33.0, 38.5, 44.0, 49.5 and 55.0 cm/s). Results showed that the average swimming duration of silver carps first decreased and then increased with the increasing flow velocity. The shortest duration time is 118.6min when fish swim at 33.0 cm/s. The maximum duration of swimming in each group was more than 200min. The percentage of turned-around quickly decreased with the increasing flow velocity, while no turned-around behavior occurred at the flow velocity ≥ 44.0 cm/s. The average burst time of burst-coast swimming of silver carp were positively associated with flow velocity ($y=0.03x+2.64$, $R^2=0.92$, $P<0.05$). Average burst distances relative to the ground for each group were at the range of 30—45 cm without significant difference ($P>0.05$). However, the average absolute burst distances increased significantly with the increase of flow velocity ($y=4.98x-5.63$, $R^2=0.98$, $P<0.001$). The average mean burst velocities relative to the ground and average maximum burst velocities relative to the ground had no significant difference ($P>0.05$), which were at the range of 9—12 cm/s and 12—16 cm/s, respectively. There was a positive linear relationship between average absolute burst velocity and flow velocity (absolute average mean burst speed: $y=0.98x+10.74$, $R^2=1.00$, $P<0.001$). The absolute average maximum burst speed formulated by $y=1.02x+13.75$, $R^2=0.99$, $P<0.001$). These data proved that silver carp took different burst-coast behavior strategies at different flow velocities.

Key words: Silver carp; Velocity barrier; Swimming duration; Behavior strategy; Burst-coast