

文章编号: 1000-0615(2017)03-0401-06

DOI: 10.11964/jfc.20160610427

鲢顶流游泳速度与摆尾行为相关性分析

柯森繁, 陈渴鑫, 罗佳, 胡晓, 金志军,
刘雁, 胡成, 兰佳欣, 石小涛*

(三峡大学三峡库区生态环境教育部工程研究中心, 湖北宜昌 443002)

摘要: 鱼类的顶流游泳行为是过鱼设施水力学设计的关键问题之一, 获取鱼类在顶流游泳过程中的运动学参数将有助于研究目标鱼类的生理特性、游泳能力及其与水力环境因子的响应关系。本研究以鲢为对象, 通过行为学分析软件对鲢在顶流游泳状态下顶流静止和顶流前进的行为中, 水流速度 U 、摆尾频率 f 、相对摆尾振幅 A 、绝对游泳速度 V 和游泳加速度 a 之间进行了相关性分析。结果显示, 鲢在顶流静止状态下, 摆尾频率 f 与水流速度 U 呈现正相关性; 相对摆尾振幅 A 为 $(0.0876 \pm 0.0098)BL$, 但与摆尾频率 f 之间没有明显的相关性; 鲢在顶流前进状态下, 不同水流速度 U 中摆尾频率 f 都要大于顶流静止状态下的摆尾频率, 相对摆尾振幅 A 反而相差不大; 摆尾频率 f 与绝对游泳速度 V 之间有显著的正相关性, 但摆尾频率 f 与相对摆尾振幅 A 之间却没有明显的相关性; 鲢在顶流前进的过程中, 游泳加速度 a 会随着时间的变化而变化, 大多数的游泳加速度为 $0.02 g < a \leq 0.06 g$ (55.84%)。本研究主要在水槽中进行, 流场环境比较单一, 自然的流场环境相对复杂, 复杂流场条件下鱼类行为与流场中水力因子之间的关系还需进一步研究。

关键词: 鲢; 顶流静止; 顶流前进; 摆尾行为

中图分类号: Q 958.8; S 917.4

文献标志码: A

水利设施对河流的阻隔是淡水鱼类丰富度急剧下降的主要原因之一^[1-2], 尤其是对于有洄游需求的鱼类种群。随着人们对水利工程建设所引起的生态问题认识的加深, 兴建过鱼设施、重建洄游通道已成为当前生态水利的研究热点之一。鱼类的游泳行为是过鱼设施设计中必须考虑的重要因素, 缺乏对鱼类行为学研究的鱼道设计难以发挥辅助过鱼的作用^[3], 因此研究鱼类游泳行为学对洄游性鱼类物种多样性的保护具有重要意义。周仕杰等^[4]采用不同半径的环形水道对几种幼鱼的游泳能力进行了比较, 研究分析了游泳速度与环形水道半径之间的关系; 胡运燊等^[5]利用FishXing软件对鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)幼鱼通过水流速度障碍进行模拟, 研究了鲢的游泳行为, 表明鲢在通过水流速度障碍

下的游泳行为需求; 房敏等^[6]以鲢为实验对象, 研究了不同温度对鱼的游泳能力及耗氧率的影响, 并为鱼道流速设计提供了鲢的游泳能力参数。

四大家鱼之一的鲢, 是国内的经济鱼种, 具有广泛的地理分布^[7], 其幼鱼具有明显的洄游需求。鲢在自由游泳时有4种游泳状态: 顶流前进、顶流静止、顶流后退和顺流而下, 其中研究其顶流前进和顶流静止状态更具有实际意义^[8]。目前已有部分关于鲢游泳动力学的研究, 但对于鲢的运动学指标(如摆尾频率 f 、相对摆尾振幅 A 、绝对游泳速度 V 和游泳加速度 a)之间的相关性研究相对比较缺乏。本研究以鲢为对象, 对鲢在顶流游泳状态下顶流静止和顶流前进的行为中, 水流速度 U 、摆尾频率 f 、相对摆尾振幅 A 、绝对游泳速度 V 和游泳加速度 a 之间进行了相

收稿日期: 2016-06-04 修回日期: 2016-09-18

资助项目: 国家自然科学基金(51409151, 51579136, 51179096); 中国电力建设股份有限公司科技项目(DJ-ZDXM-2014-04)

通信作者: 石小涛, E-mail: sxtshanghai@163.com

关性分析,为过鱼设施的设计提供了游泳动力学参数。

1 材料与方法

1.1 实验对象

实验用鲢均由湖北宜都鱼场提供,通过充氧水包运至三峡大学生态水利学实验室,暂养3 d后进行实验,暂养期间水温为 $(20.00\pm 1.00)^\circ\text{C}$,24 h持续充氧,每2 d换暂养水的30%,每1 d投食饵料和吸粪便、残渣1次,正式实验前禁食24 h,溶解氧保持在6.0 mg/L左右。

1.2 实验方法

实验使用的是长×宽×高为111 cm×22 cm×22 cm的封闭水槽(图1),实验鱼选用体长(BL)为 (10.64 ± 0.48) cm的鲢幼鱼。将实验鱼放入实验水槽先适应30 min后进行实验。实验分8组,在1 BL/s水流速度下适应30 min后,以水流速度为2 BL/s左右为基准,每隔0.5 BL/s递增,水流速度分别为19.13、23.42、27.61、32.18、36.62、41.38、45.97和50.82 cm/s进行实验,每组10条鱼,每条鱼录制视频2 h,白天采用自然光,晚上使用红外光。水槽上部的摄像头采用的是型号为HB771S的汉邦高科高清红外枪型网络摄像机,它能根据需要调整摄像机的帧率,能更好地记录鱼的游泳行为。实验进行过程中,用遮光布将实验水槽四周围住,避免外界光的干扰;实验期间禁止在水槽周围活动,避免声音对实验鱼的干扰。实验记录水流速度 U (cm/s)、水温 $(^\circ\text{C})$,实验鱼

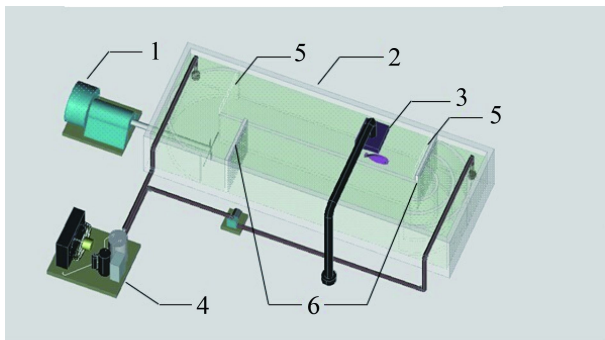


图1 实验装置示意图

1.电动机; 2.水槽; 3.高速摄像机; 4.水温控制器; 5.金属网; 6.遮光布

Fig. 1 Schematic of the experimental setup

1. motor; 2. flume; 3. high-speed camera; 4. water temperature controller; 5. metal mesh; 6. screen

叉长(cm)、全长(cm)、体质量(g)和持续时间(min)。

使用摄像头进行录像,根据每条鱼顶流静止和顶流前进的游泳状态,各随机选取5个1 min的视频进行分析。将提取的视频片段采用手动跟踪技术提取鱼类游泳动力学指标(摆尾频率 f 、相对摆尾振幅 A 、绝对游泳速度 V 和游泳加速度 a)。摆尾频率 f 指的是1 s内鱼摆尾的次数,从鱼尾摆到最高点开始到下一次摆到最高点计为一次;相对摆尾振幅 A 指的是鱼尾侧向摆动的振幅/鱼的体长;绝对游泳速度 V 指的是以头部最前端的运动代表整条鱼的运动,通过手动跟踪技术可获取鱼在每一帧内的运动距离,进而得出每时刻的瞬时速度,最后取所有时刻的平均值得出相对游泳速度 v ,加上水流速度 U 得出绝对游泳速度 V ; t 为鱼在每一帧内运动所需时间;游泳加速度 a 可由 $a=\Delta V/\Delta t$ 计算得出。

1.3 数据分析

实验数据采用SPSS 18.0进行分析,统计值用平均值±标准差(mean±SD)描述,用ORIGIN 8.0软件进行线性拟合,用One-Way ANOVA分析差异性。

2 结果

2.1 顶流静止

不同的水流速度下,鱼类游泳动力学的数据分析表明,鲢表现为顶流静止行为时,摆尾频率 f 随水流速度 U 呈线性增长(图2)。鱼的摆尾频率 f 与相对摆尾振幅 A 之间没有明显的相关性,相对摆尾振幅 A 为 (0.0876 ± 0.0098) BL,相对摆尾振幅差异性不显著(图3)。

2.2 顶流前进

不同的水流速度下,通过对鱼类游泳动力学的数据分析表明,鲢表现为顶流前进行为时,不同水流速度 U 中摆尾频率 f 都大于顶流静止状态下的摆尾频率($P<0.05$),相对摆尾振幅 A 反而相差不大($P>0.05$)(图4和图5);绝对游泳速度 V 随着摆尾频率 f 的增大而增大,有显著的正相关性($R^2=0.724$)(图6),但摆尾频率 f 与相对摆尾振幅 A 之间却没有明显的相关性($R^2=0.003$)(图7);鲢在顶流前进的过程中,游泳加速度 a 会随着时间的变化而变化,大多数的游泳加速度为 $0.02\text{ g}<a\leq$

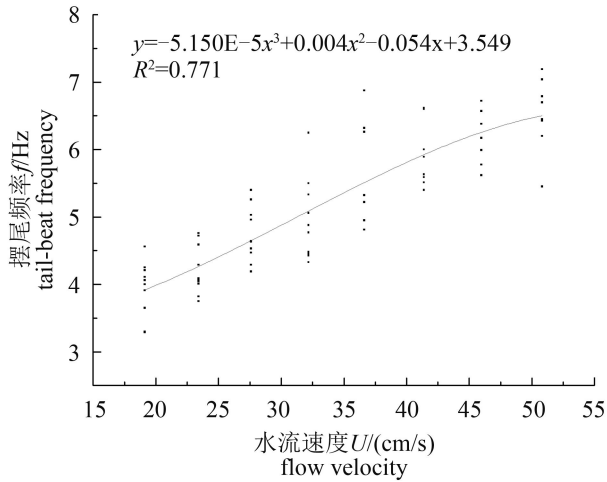


图2 摆尾频率*f*与水流速度*U*的关系

Fig. 2 The relationship of flow velocity and tail-beat frequency

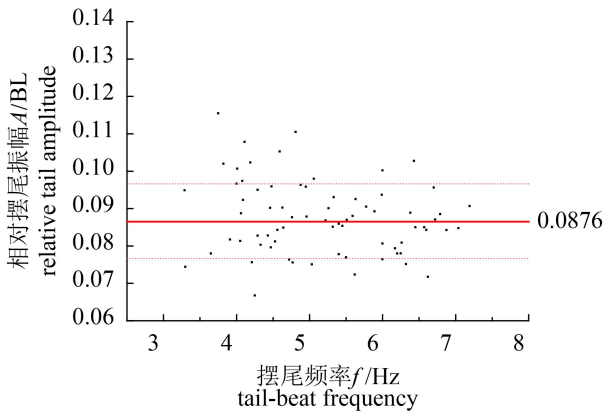


图3 摆尾频率*f*与相对摆尾振幅*A*的关系

Fig. 3 The relationship of tail-beat frequency and relative tail amplitude

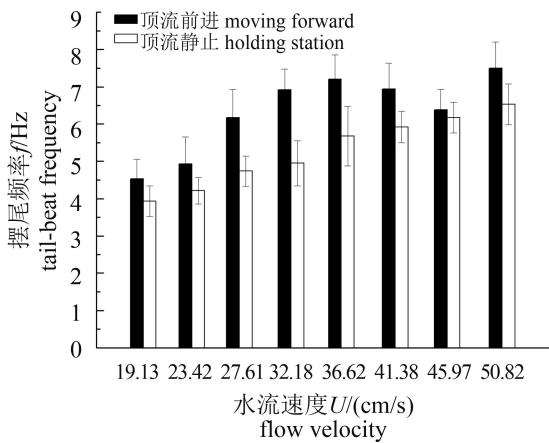


图4 不同水流速度*U*与摆尾频率*f*的关系

Fig. 4 The relationship of flow velocity and tail-beat frequency

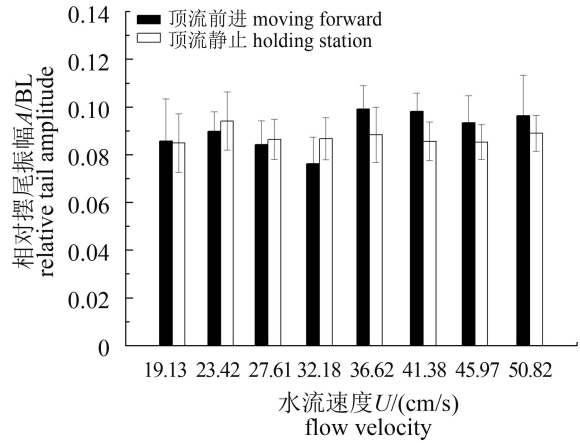


图5 不同水流速度*U*与相对摆尾振幅*A*的关系

Fig. 5 The relationship of flow velocity and relative tail amplitude

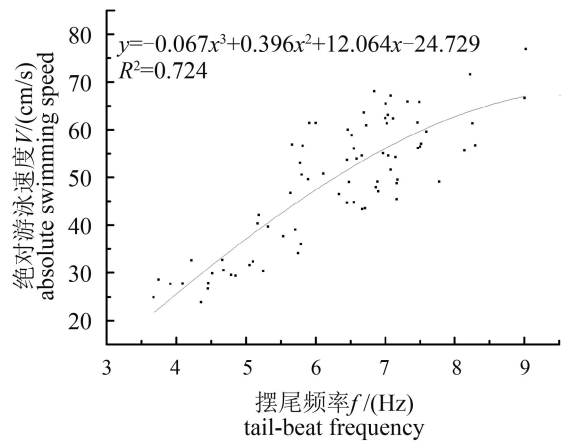


图6 摆尾频率*f*与绝对游泳速度*V*的关系

Fig. 6 The relationship of tail-beat frequency and absolute swimming speed

0.06 g(55.84%)(图8)。

3 讨论

近年来, 鱼类游泳运动学研究受到了国内外广泛关注, 建立鱼类游泳运动学参数之间的关系有助于建立鱼类生物学仿真模型, 为传统过鱼设施设计提供依据。郑金秀等^[9]简述了鱼类游泳行为在鱼道设计中的应用, 针对鱼道设计对鱼类游泳能力和游泳运动学进行分析, 得出了鱼道中鱼类游泳速度既受生物个体影响也受环境因素影响的结论; 李丹等^[8]研究了逆流前进和静止状态下杂交鲟(*Huso duricus*♂×*Acipenser schrencki*♀)幼鱼的游泳行为与其摆尾频率和游泳速度之间呈现显著的线性正相关; Videler等^[10]分

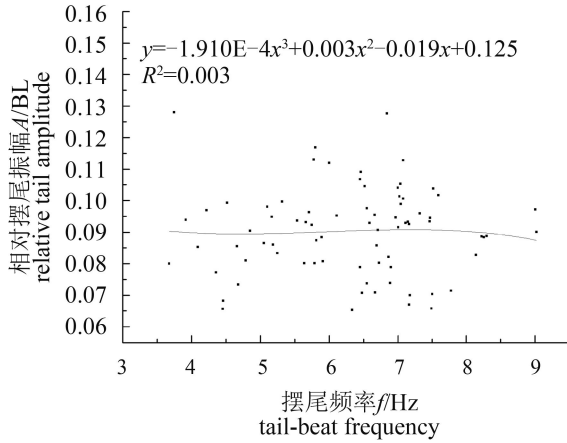


图7 摆尾频率*f*与相对摆尾振幅*A*的关系

Fig. 7 The relationship of tail-beat frequency and relative tail amplitude

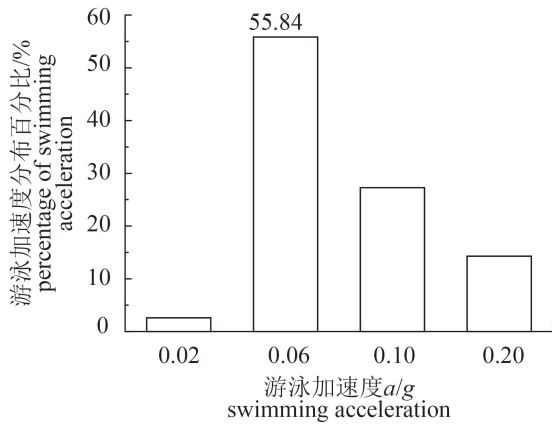


图8 游泳加速度*a*分布百分比

Fig. 8 Percentage of swimming acceleration

析了鱼的爆发滑行式游泳，发现在爆发阶段的摆尾幅度比平稳游泳时大很多，这也解释了爆发滑行式的游泳需要通过大的摆幅，才能获得更多的能量，产生大的推力，使鱼能顺利地向前游；张沙龙等^[1]在对长丝裂腹鱼(*Schizothorax dolichonema*)的游泳能力和游泳行为研究中得出当游泳速度增加时摆尾频率呈现线性增长，但摆尾幅度变化不显著的结果，这与本研究中的结论基本一致。

本研究通过分析鲢在顶流游泳状态下顶流静止和顶流前进的行为，建立了水流速度*U*、摆尾频率*f*、相对摆尾振幅*A*、绝对游泳速度*V*和游泳加速度*a*之间的相关关系，分析了鱼在响应不同的水流条件下，游泳形态的变化。鲢在顶流静止和顶流前进的状态下，随着水流速度的增加，摆尾频率大致呈现增加的趋势；但在顶流

前进状态下，水流速度为41.38~45.97 cm/s时摆尾频率有所下降，主要原因是在此水流梯度下，鲢在顶流前进的过程中出现了多次顶流滑行为，没有产生摆尾，导致总体的摆尾频率下降；不同的水流速度下，顶流前进状态下的摆尾频率比顶流静止状态下快，主要原因是尾部作为鱼主要的动力来源^[12]，当流速增加时，鱼为了保持自身稳定甚至顶流前进，需要更大的动力，因此摆尾频率会不断加快。在顶流前进状态下，鱼始终保持加速向前的过程，与顶流静止状态相比较，摆尾频率普遍偏大。本研究通过分析表明，不同的水流速度下，两种游泳状态间相对摆尾振幅差异性不大，相对摆尾振幅无明显变化并且摆尾频率和相对摆尾振幅之间相关性也不显著。说明鲢在顶流的过程中主要靠增大摆尾频率获得游泳动力来抵抗流速增大的影响，摆尾振幅的大小对鱼类抵抗水流速度的增大没有起到关键作用；鱼游泳加速度大多数为0.02 g < *a* ≤ 0.06 g，说明鲢在顶流前进的过程中喜好以0.02~0.06 g加速度前进，这将为过鱼设施水力设计提供数据参考。

本研究仅分析了鱼类顶流静止和顶流前进的行为，实际上鱼类行为具有多样性，顶流后退、顺流而下、转弯掉头和爆发滑行等行为还需要进一步研究；本实验在室内水槽中进行，流场环境相对稳定，然而自然条件下的流场环境十分复杂，研究复杂流场条件下，鱼类游泳行为与流场间水力因子的响应关系是未来发展的必然趋势。将流场结构与鱼的游泳行为、生理机制及能量代谢相结合进行探讨，找到影响目标鱼通过水流屏障的关键水力因子是下一步需要研究的工作，这都将为目标鱼类安全通过过鱼设施提供重要依据。

参考文献:

[1] Lucas M C, Frear P A. Effects of a flow-gauging weir on the migratory behaviour of adult barbell, a riverine cyprinid[J]. Journal of Fish Biology, 1997, 50(2): 382-396.

[2] Cowx I G, Welcomme R L. Rehabilitation of Rivers for Fish: A Study Undertaken by the European Inland Fisheries Advisory Commission[M]. Rome: Food & Agriculture Organization of the United Nations, 1998.

[3] Quirós R. Structures Assisting the Migrations of Non-

- salmonid Fish: Latin America[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1989.
- [4] 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.
- 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 (in Chinese).
- [5] 胡运燊, 石小涛, 陈求稳, 等. 鲢幼鱼通过水流速度障碍的模拟[J]. 生态学报, 2015, 35(8): 2652-2658.
- Hu Y S, Shi X T, Chen Q W, *et al.* The simulation of silver carp crossing through velocity barriers[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(8): 2652-2658 (in Chinese).
- [6] 房敏, 蔡露, 高勇, 等. 温度对鲢幼鱼游泳能力及耗氧率的影响[J]. 水生态学杂志, 2013, 34(3): 49-53.
- Fang M, Cai L, Gao Y, *et al.* Effect of temperature on swimming capability and oxygen consumption of juvenile *Hypophthalmichthys molitrix*[J]. *Journal of Hydroecology*, 2013, 34(3): 49-53 (in Chinese).
- [7] 李思发, 蔡正纬, 陆伟民, 等. 长江水系鲢鱼和珠江水系鲢鱼的生长差异[J]. 水产学报, 1984, 8(3): 211-218.
- Li S F, Cai Z W, Lu W M, *et al.* On the growth rate of silver carps from different sources of Changjiang River and Zhujiang River[J]. *Journal of Fisheries of China*, 1984, 8(3): 211-218 (in Chinese).
- [8] 李丹, 林小涛, 李想, 等. 水流对杂交鲟幼鱼游泳行为的影响[J]. 淡水渔业, 2008, 38(6): 46-51.
- Li D, Lin X T, Li X, *et al.* Effects of water current on swimming performance of juvenile hybrid sturgeon (*Huso duricus* Georgi ♂×*Acipenser schrencki* Brandt♀)[J]. *Freshwater Fisheries*, 2008, 38(6): 46-51 (in Chinese).
- [9] 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).
- [10] Videler J J. Swimming movements, body structure and propulsion in cod *Gadus morhua*[C]//Day M H. *Vertebrate Locomotion* (Symp. Zool. Soc. Lond.). London: Academic Press, 1981: 1-27.
- [11] 张沙龙, 侯轶群, 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).
- [12] Gibb A C, Dickson K A, Lauder G V. Tail kinematics of the chub mackerel *Scomber japonicus*: testing the homocercal tail model of fish propulsion[J]. *Journal of Experimental Biology*, 1999, 202(18): 2433-2447.

Correlation analysis between upstream swimming speed and tail-beat behavior of *Hypophthalmichthys molitrix*

KE Senfan, CHEN Kexin, LUO Jia, HU Xiao, JIN Zhijun,
LIU Yan, HU Cheng, LAN Jiabin, SHI Xiaotao*

(Engineering Research Center of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education,
Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: One of the key problems of the hydraulic design of fish pass structure is the fish first orient to the flow. Obtaining fish behavior parameter in the process of upstreaming is beneficial to the research of target fish physiological characteristics, swimming capability and its response to hydraulic environmental factors. In this paper, taking the *Hypophthalmichthys molitrix* as the research object, the correlation among flow velocity U , tail-beat frequency f , relative tail-beat amplitude A , absolute swimming speed V and swimming acceleration a was analysed in the state of holding station and moving forward during upstream by behavioral analysis software. Result showed tail-beat frequency and flow velocity were in a positive relationship during holding station; relative tail-beat frequency A was (0.0876 ± 0.0098) BL, while there was no clear relation between tail-beat frequency f and relative tail-beat amplitude A ; during moving forward, tail-beat frequency f was greater than that during holding station, while in contrast, little difference lay in relative tail-beat amplitude A ; tail-beat frequency f and absolute swimming velocity V were in definite positive relation, while there was no obvious relationship between tail-beat frequency and relative tail-beat amplitude A ; in the process of *H. molitrix* moving forward, swimming acceleration a changed as time went by, and most of swimming acceleration varied from 0.02 g to 0.06 g [55.84%]. In the paper, experiments are conducted in the flume and we had a single flow field, but the flow field is relatively complex in natural environment. The relationship between fish behavior and hydraulic factor requires further research.

Key words: *Hypophthalmichthys molitrix*; holding station; moving forward; tail-beat behavior

Corresponding author: SHI Xiaotao. E-mail: sxtshanghai@163.com

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (51409151,51779136,51179096); POWERCHINA Limited Science and Technology Project (DJ-ZDXM-2014-04)