

大海马游泳行为及游泳能力测定与分析

李响, 徐永健

(宁波大学 海洋学院, 应用海洋生物技术教育部重点实验室, 浙江 宁波 315211)

摘要: 利用自制的鱼类游泳能力测定装置, 观察了大海马垂直和水平方向的最大临界游速, 描述了大海马的游泳行为, 并评估其游泳能力。结果表明: 水温 $25.5^{\circ}\text{C} \pm 1.0^{\circ}\text{C}$ 条件下, 体长 6 cm 个体水平方向的临界游速达到峰值为 $4.23 \text{ cm/s} \pm 0.23 \text{ cm/s}$; 随体长的增加和减少, 临界游速都有所下降, 体长至约 10 cm 时临界游速为 $2.86 \text{ cm/s} \pm 0.02 \text{ cm/s}$ 。该物种在水平游泳时, 游泳速度与尾部的倾斜角度有关, 倾角越大, 速度越大, 当倾角达到 55° 时, 速度达到最大值, 而大于该角度, 身体就失去平衡不能进行逆水流游动。大海马体长在 6 cm 时达到垂直方向的临界游速峰值, 为 $0.372 \text{ cm/s} \pm 0.014 \text{ cm/s}$, 此时的绝对临界速度为 $0.085 \text{ BL/s} \pm 0.010 \text{ BL/s}$ 。至体长增长到 13 cm 时, 基本趋于稳定, 与水平方向游速变化趋势相似。

关键词: 大海马; 水平方向; 竖直方向; 临界速度; 游泳能力

中图分类号: S917.4 文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2016)05-0076-06

doi: 10.11759/hyxx20150714001

鱼类的游泳行为及能力对鱼类的生存有很重要的意义^[1], 为其摄食、避敌、繁殖等生活方式提供了重要保障^[2-3]。人们一般把鱼类的游泳行为大致分为延长性游泳行为(Prolonged swimming)、持续式游泳行为(Sustained swimming)和爆发式游泳行为(Burst swimming)^[4]三种方式。通过这三种行为的研究观察, 进行鱼类游泳行为的测定和游泳能力的分析。由此可用于提高鱼类捕捞效率、完善增养殖设施和保护鱼类资源等^[5]。三种鱼类游泳行为相对应的测定方法也可分为游泳耐久性试验、临界游速试验和爆发游速试验等^[6], 测试所得结果即代表了鱼类的游泳能力。

大海马(*Hippocampus kuda*)与其他鱼类相比, 它的一些形态结构发生了变化, 比如身体竖直、鳍退化^[7], 这些都造成了它特殊的游泳行为。由于海马具有特殊的生活习性, 使得它对于一般鱼类的洄游、迁移、避敌等行为能力的表现不明显。因此, 本实验大海马的游泳能力主要通过临界游速试验和游泳耐久性试验进行评定。通过测量大海马的临界速度和可持续时间, 对其游泳能力进行评价^[1], 为更好地了解其行为生态习性提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验生物材料

实验用大海马(*Hippocampus kuda*)来自于本实验室人工繁殖培育。随机选取不同规格、健康状态

良好的海马个体用于实验, 原则上按每 1 cm 体长设定一个测试点, 共计有 15 个测试点(即 15 个体长组)。实验过程中不投饵。

1.2 实验装置

利用自制的低速循环水水平-垂直流动装置进行测定。自制游泳水槽的观察室规格为 $50 \text{ cm} \times 15 \text{ cm} \times 18 \text{ cm}$ ($L \times W \times H$)。水流速度测定使用 LGY-II 型智能流速仪(南京水利科学研究院研发)。实验期间, 水温 $25.5^{\circ}\text{C} \pm 1.0^{\circ}\text{C}$, 盐度 25 ± 1 , 溶解氧 $> 6.0 \text{ mg}$ ^[8-10]。实验过程中使用 SONY 2216E 摄像机(中国 SONY 公司, 北京)进行全程录像, 用于进一步的观察分析。

1.3 游泳速度的测定及计算方法

1.3.1 水平临界游速及耐久力试验

将不同规格的海马放入观察室, 待适应 1 h 后, 将水槽中的水流流速按照每 10 min 间隔增加 2 cm/s 的速度增量^[11], 一直增至试验海马不能再逆流前进; 与其他鱼类不同, 此时的流速并不是海马的临界游速; 再度增加流速后, 海马身体仍保持不动, 但尾部却逐渐向后倾斜至一定的角度。通过多次试验发现,

收稿日期: 2015-07-14; 修回日期: 2015-10-15

基金项目: 国家自然科学基金(41276123)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41276123]

作者简介: 李响(1994-), 女, 本科生, 主要对海马游泳能力与游泳生理方面研究, E-mail: 873915185@qq.com; 徐永健, 通信作者, E-mail: xuyongjian@nbu.edu.cn

海马身体倾角达 30° 且尾部倾角在 $50^\circ \sim 55^\circ$ 时海游速最大, 即为水平方向的临界游泳速度 (cm/s)。每一规格测试 6~8 尾, 同时记录在该流速下每尾海马持续游泳的累计时间 (s) 即为该规格海马的耐久时间^[11]。

1.3.2 竖直临界游速及耐久力试验

方法基本同水平临速测定, 获得竖直方向的临界流速 (cm/s)。临界游速的单位可以用绝对临界速度 (cm/s) 或相对临界游速 (BL/s), 相对临界游速 (BL/s) = 绝对临界游速 (cm/s) / 实验鱼体全长 (cm)。同时, 记录该规格海马在该流速下的耐久时间 (s)。并用摄像机记录下海马游泳全过程, 用于分析海马的游泳行为特性^[12]。

1.4 数据分析

不同规格各方向实验海马的临界速度、可持续时间与体长之间的相互关系分析使用曲线回归求算^[13]。利用 Excel 软件和 SPSS 分析软件采用单因素方差分析方法对各试验进行显著性检验, 如果 $F > F_{\text{crit}}$ 说明各组数据间差异显著; 若 $F < F_{\text{crit}}$ 说明各组数据间差异不显著。结果均以平均值 \pm 标准误 (Mean \pm SE) 表示。

2 结果

2.1 大海马的游泳行为描述

大海马由于特殊的形态结构, 使得自身形成了独特的游泳行为方式—身体直立游动。通过试验观察, 不同流速下大海马呈现不同的泳姿。静水时, 大海马一般尾部攀缠在一个地方休息。受刺激后, 尾部展开, 背鳍高速摆动, 瞬间快速移动, 至另一处静息。当流速较小时, 大海马相对放松, 尾部卷曲, 通过鳍 (胸鳍和背鳍) 的摆动游动, 身体呈竖直状态, 上下或左右移动。随着流速增大, 背鳍摆动频率也随之加快, 身体慢慢倾斜产生倾角。尾部逐渐打开, 先尾部倾斜而后躯体也发生倾斜。

实验中还观察到, 海马除明显的水平和竖直方向的运动外, 还展现较为常见的斜方向移动。主要通过改变胸鳍的拨动幅度与角度进行调节速度与方向。大海马的胸鳍并不是与身体垂直或平行, 而是与身体存在一定的角度, 这样更有利于其进行斜方向运动。

2.2 水平临界游速及耐久力

临界角度判断与测定: 海马在快速游动时, 尾部由卷曲状态而逐渐打开, 并与身体形成一定角度。

海马运动的动力主要来自于胸鳍和背鳍, 加速游动时身体前倾。由于背鳍的推动, 躯体前倾到一定程度后将不再增加, 否则将失去平衡; 而尾部将进一步倾斜。经测定 (图 1), 当海马的躯体倾斜角度约 30° 、尾部倾角不超过 55° 时海马的游速最大。一旦大于 55° , 海马身体会失去平衡而失速被水流冲走。把这个角度叫做临界角度。

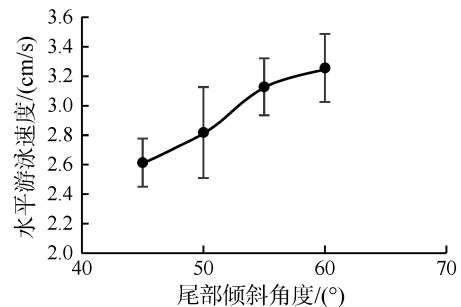


图 1 尾部倾斜角度与临界速度关系图

Fig. 1 Relationship between the tail inclination angle and critical velocity

处于临界角度时, 海马的游泳速度为水平临界游速。海马的水平临界速度 V (cm/s) 随着海马体长的变化如图 2 ($F > F_{\text{crit}}$), 经测定, 当海马体长约 6 cm 时, V (cm/s) 达最大值, 为 $4.23 \text{ cm/s} \pm 0.23 \text{ cm/s}$ 。随着体长的增加或减少, 水平临速都有所降低, 在约 10 cm 时, V (cm/s) 维持在 $2.86 \text{ cm/s} \pm 0.02 \text{ cm/s}$ 。

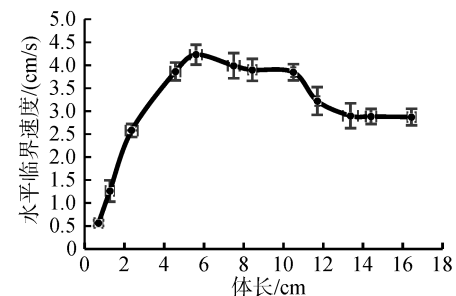


图 2 水平临界速度与体长之间的关系

Fig. 2 Relationship between the horizontal critical speed and total length

在水平临界速度下各种规格海马的游泳持久时间 (耐久力) 如图 3。随体长的增加, 耐久力也不断增长, 从小规格的 (体长约 2 cm) 约 10 s ($10.2 \text{ s} \pm 0.12 \text{ s}$), 逐渐增长至 15 s ($15.1 \text{ s} \pm 0.23 \text{ s}$, 体长 $> 10 \text{ cm}$)。

2.3 竖直临界游速及耐久力

大海马的竖直临界速度类似于水平临界速度 (图 4)。从图中看, 体长 6 cm 的竖直临速达最大值, 为

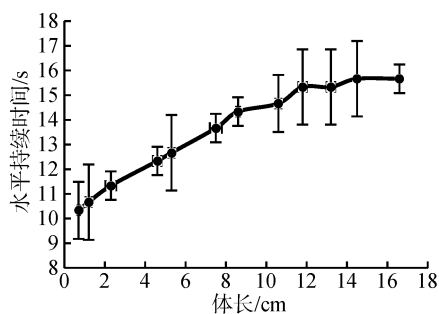


图3 水平方向的持久时间

Fig. 3 Permanence time in the horizontal direction

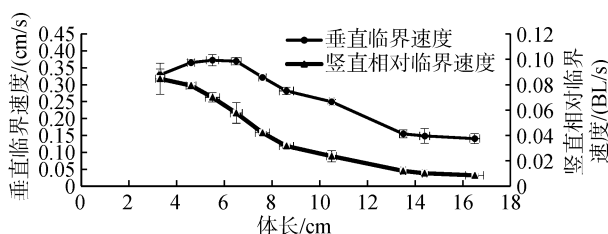


图4 竖直临界速度与竖直相对临界速度

Fig. 4 Vertical velocity and absolute critical velocity

0.372 cm/s \pm 0.014 cm/s。随后, 逐渐呈现缓慢下降的趋势, 直至体长为 13 cm 时逐渐平稳($F > F_{\text{crit}}$), 为 0.173 cm/s \pm 0.012 cm/s。最大的相对临界速度(BL/s)为 0.085 BL/s \pm 0.010 BL/s。

在竖直临界速度下各种规格海马的游泳持久时间(耐力)如图 5。从海马的生活状态为底层生活时期开始测量, 即体长约为 3~4 cm。随体长的增加, 耐力也不断增长, 从小规格的(体长约 3 cm)约 4 s(3.8 s \pm 0.84 s), 逐渐增长, 大规格海马(体长约为 17 cm)时, 耐久时间可达到 8 s(8.4 s \pm 1.94 s)。

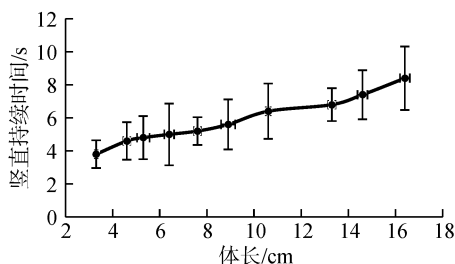


图5 竖直方向的持久时间

Fig. 5 Duration in the vertical direction

2.4 斜向运动

在实验中, 还观察到大海马的斜向运动。与一般鱼类不同, 大海马的斜向上的游泳速度并不是简单的水平运动与竖直运动的加成。经测定, 斜向移动速

度远远高于其水平运动与竖直运动的拟合速度(图 6), 与水平临界速度最为接近。以体长 7.6 cm \pm 0.21 cm 为例, 其水平临界速度为 3.59 cm/s \pm 0.24 cm/s, 其斜向实际测量速度为 4.00 cm/s \pm 0.17 cm/s。从数值上看, 相同规格的大海马, 其斜向实际速度约为实际水平临速的 1.0~1.3 倍。

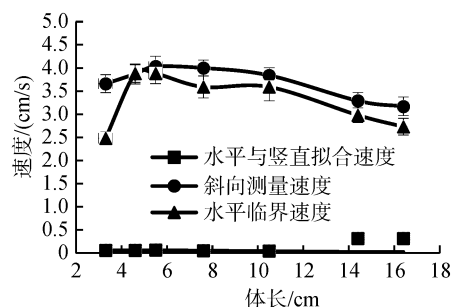


图6 3种速度比较

Fig. 6 Comparison of three speeds

3 讨论

海马是近陆浅海小型鱼, 生活习性较为特别。在大多数情况下, 成年后的海马以尾部卷曲悬挂在海藻或是其他物体上保持静止休息^[14]。海马的生活方式也不同于一般鱼类, 它们几乎总是昂立着身体, 依靠小而透明的鳍拨动, 可任意移动但速度缓慢。凭借体色伪装及硬化成皮状的皮肤以逃避掠食^[14]。

在适宜环境下, 海马只消耗较少部分能量用于维持正常生理活动, 剩下的都提供生长所需^[8]。海马的生活状态在幼年和成年差异很大, 幼年期呈浮游状态, 一般生活于水表层; 成年生活状态类似于底栖生活, 其生活于水底层, 在正常游动过程中躯干与尾巴都不运动, 仅依靠鳍摆动移动。一般情况下, 鱼类的动力来自于鳍和尾巴推动^[15], 但海马鳍退化, 腹鳍与尾鳍消失^[14]。这与海马游泳能力有很大关系。经观察发现, 海马游泳的动力主要来自于胸鳍和背鳍的推动作用, 而胸鳍和臀鳍的拨动方向决定着海马前进方向。

本实验主要测定了大海马的游泳能力。大海马水平临界流速为 4.23 cm/s \pm 0.23 cm/s, 远小于其他鱼类^[16-19]。如鲫鱼幼鱼的临界游速度为 26.29 cm/s \pm 1.85 cm/s^[20], 黑斑小丑鱼 14.59 cm/s^[5]。观察海马的游泳行为, 海马的游动距离和时间极其灵活, 但与其他鱼类相比耐力较差。前者靠速度来捕获食物, 而海马进行的是“守株待兔”的生活方式, 生活习性的不同造成了游泳能力的差异^[21]。试验测定, 海马在体

长达 6 cm 时,有着最大的水平临速,该阶段恰是海马生活习性转变的过程(即由浮游的生活方式转为底层生活),也许饵料的变化要求海马有了一定的游泳能力。当海马渡过这一阶段而转为底层生活后,主要以悬挂休息为主,水平临速也略有降低,约 12 cm (大致性成熟体长),速度趋于稳定。

海马竖直方向的最大临界速度为 $0.37 \text{ cm/s} \pm 0.014 \text{ cm/s}$,远小于水平游速。其直立的生活习性区别于其他物种,其竖直运动在鱼类中也并不常见^[22]。同时,海马产生了特殊的斜向运动行为,并在速度上表现优异。海马的斜向速度不是简单的水平与竖直速度的加合,其更接近于水平的游速,且运动路径比两方向相加的位移要短得多。这一运动方式可能与进化有关,且需进一步研究海马的胸鳍结构,探讨这一运动特性。

基于以上几方面,作者认为海马的游速慢,游泳能力差。其游泳行为主要表现为摄食,避敌则是主要通过改变体色等拟态行为来完成。在实验过程中发现,海马的游泳行为与生物学及生态行为学有关,可以进一步对海马的感觉器官以及吻部等生理特征及形态结构进行深入研究,得到幼体海马养殖中饵料投喂密度、养殖水流速度等一系列生态行为参数,这对海马的繁殖与存活影响极大。现阶段海马养殖过程中^[23],人们对其生态习性、周边环境的控制只能得到大致的范围,并不能精准的进行调控。因此,我们对海马游泳行为及游泳能力进行深入了解,能为生产者提供科学详实的理论基础,为海马的研究和生产开发奠定了良好的基础。

参考文献:

- [1] He Pingguo. Swimming behaviour of winter flounder (*Pleuronectes americanus*) on natural fishing grounds as observed by an underwater video camera[J]. Fish Res, 2003, 60(2/3): 507-514.
- [2] Fisher R, Wilson S K. Maximum sustainable swimming speeds of late-stage larvae of nine species of reef fishes[J]. J Exp Mar Biol Ecol, 2004, 312(1): 171-186.
- [3] PLAUT I. Critical swimming speed: its ecological relevance[J]. Comp Biochem Physiol, 2001, 131A: 41-50.
- [4] 涂志英, 袁喜, 韩京成, 等. 鱼类游泳能力研究进展[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(Z1): 59-65.
Tu Zhiying, Yuan Xi, Han Jingcheng, et al. The research progress of fish swimming ability[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2011, 20(Z1): 59-65.

- [5] 于晓明, 张秀梅. 鱼类游泳能力测定方法的研究进展[J]. 南方水产科学, 2011, 7(4): 76-84.
Yu Xiaoming, Zhang Xiumei. Research progress on measurements of fish swimming ability[J]. South China Fisheries Science, 2011, 7(4): 76-84.
- [6] 于晓明, 张秀梅, 张沛东. 凡纳滨对虾的游泳能力及游泳疲劳后的生理反应[J]. 中国水产科学, 2009, 16(4): 533-540.
Yu Xiaoming, Zhang Xiumei, Zhang Peidong. Swimming ability and physiological response to swimming fatigue in *Litopenaeus vannamei*[J]. Journal of Fisheries sciences of China, 2009, 16(4): 533-540.
- [7] 关之梅, 刘文郁, 陈佩薰. 鱼类学论文集[C]. 北京: 科学出版社, 1981: 133-139.
Guan Zhimei, Liu Wenyu, Chen Peixun. Ichthyology Proceedings[C]. Beijing: Science Press, 1981: 133-139.
- [8] 孙彬, 陈舜, 徐永健, 等. 温度突变对大海马 (*Hippocampus kuda*) 幼体生长、组分及酶活力的影响[J]. 海洋与湖沼, 2012, 43(1): 67-72.
Sun Bin, Chen Shun, Xu Yongjian, et al. Effect of temperature mutations the growth, body composition and enzyme activities of juvenile (*Hippocampus kuda*) [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2012, 43(1): 67-72.
- [9] Kazutaka Y, Steve E, Takafumi A. Influence of water temperature and fish length on the maximum swimming speed of sand flathead, *Platycephalus bassensis*: Implications for trawl selectivity[J]. Fisheries Research, 2007, 84: 180-188.
- [10] Dickson K A, Donley J M, Sepulveda C, et al. Effects of temperature on sustained swimming performance and swimming kinematics of the chub mackerel (*Scomber japonicus*) [J]. J Exp Biol, 2002, 205: 969-980.
- [11] 井爱国, 张秀梅, 李文涛. 花鲈、许氏平鲉游泳能力的初步实验研究[J]. 中国海洋大学学报, 2005, 35(6): 973-976.
Jing Aiguo, Zhang Xiumei, Li Wentao. A preliminary experiment on swimming ability of *Lateolabrax maculatus* and *Sebastes schlegelii* [J]. Periodic of Ocean University of China, 2005, 35(6): 973-976.
- [12] 徐永健, 陆慧贤, 卢光明. 三斑海马的人工生态养殖[J]. 渔业科学进展, 2011, 32(5): 38-43.
Xu Yongjian, Lu Huixian, Lu Guangming. Study on the artificial eco-aquaculture of the three-spot seahorse, *Hippocampus trimaculatus* Leach [J]. Progress in Fishery Sciences, 2011, 32(5): 38-43.
- [13] 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 Shijie, He Daren, Wu Qingtian. Comparative study on curve swimming ability of some young fishes [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1993, 24(6): 621-626.

- 621-626.
- [14] 张璐, 李静, 魏万权. 海马的生物学特性及其增养殖技术[J]. 中国水产, 2004(7): 62-63.
Zhang Lu, Li Jing, Wei Wanquan. The biological characteristics of hippocampus and aquaculture technology[J]. China Fisheries, 2004(7): 62-63.
- [15] Flammang B E, Lauder G V. Caudal fin shape modulation and control during acceleration, braking and backing maneuvers in bluegill sunfish, *Lepomis macrochirus*[J]. J Exp Biol, 2009, 212: 277-286.
- [16] Adams S R, Hoover J J, Killgore K J. Swimming endurance of juvenile pallid sturgeon (*Scaphirhynchus albus*)[J]. Copeia, 1999, 3: 802-807.
- [17] Sepulveda C, Dickson K A. Maximum sustainable speeds and cost of swimming in juvenile kawakawa tuna (*Euthynnus affinis*) and chub mackerel (*Scomber japonicus*)[J]. J Exp Biol, 2000, 203(20): 3089-3101.
- [18] He P, Wardle C S. Endurance at intermediate swimming speeds of Atlantic mackerel (*Scomber scombrus* L.) herring (*Clupea harengus* L.) and saithe (*Pollachius virens* L.) [J]. J Fish Biol, 1988, 33: 255-266.
- [19] 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.
Xuan Xuemei, Cao Zhendong, Fu Shijian. 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.
- [20] 蔡露, 涂志英, 袁喜, 等. 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, 2012, 21(Z2): 89-95.
Cai Lu, Tu Zhiying, Yuan Xi, et al. Swimming capability and swimming behaviour of juvenile *Aristichthys nobilis*[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012, 21(Z2): 89-95.
- [21] Bellwood D R, Fisher R. Relative swimming speeds in reef fish larvae[J]. Mar Ecol Prog Ser, 2001, 211: 299-303.
- [22] 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 Jinxiu, Han Dejun, Hu Wangbin, et al. Fish swimming performance related to fishway design[J]. Journal of Hydroecology, 2010, 3(5): 104-110.
- [23] 吴善. 海马的人工养殖与发展前景[A]//2005 年全国学术年会农业分会场论文专集. 北京: 中国农学会, 2005: 3.
Wu Shan. The hippocampus of artificial breeding and development prospects[A]//2005 National Annual Conference Venue Agricultural Papers Album. Beijing: Chinese Association of Agricultural Science Societies, 2005: 3.

Determination and analysis of swimming behavior and swimming ability of yellow seahorse, *Hippocampus kuda* Bleeker

LI Xiang, XU Yong-jian

(Key Laboratory of Applied Marine Biotechnology, Ministry of Education, Marine College, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Received: Jul. 14, 2015

Key words: *Hippocampus kuda* Bleeker, Horizontal direction, Vertical direction, Critical velocity of swimming, Body Length

Abstract: In this study, we used a self-made fish swimming capability analysis device to determine and analyze the critical swimming velocity in the horizontal and vertical directions of the yellow seahorse, *Hippocampus kuda*. Moreover, we describe its swimming behavior and evaluate its swimming ability. The results showed that under different flow velocities, the seahorse adopts different swimming poses. In low flow velocity, the animal moved around with ease with its tail curled. As the flow velocity increased, the tail opened and extended, slowly inclined, and its tilt angle became bigger and bigger in the vertical plane. The critical horizontal swimming velocity was observed to be closely related to the tilt angle. For the yellow seahorse, when the tail angle was between 55° and 60° , its horizontal swimming velocity was at maximum; when the angle was more than 60° , the animal lost its body balance. We observed that the motion power of the seahorse originates from the fins, especially, the pectoral fins, which determine the speed and direction of swimming via different stroke frequencies and water-shifting directions. We observed that when the stroke frequency was between 0.5 and 11 times·s⁻¹, it was in proportion to its swimming velocity. We also observed the relationship between body length and the swimming critical velocity at a temperature of $25.5^\circ\text{C} \pm 1.0^\circ\text{C}$. Moreover, we found that in the horizontal direction, the yellow seahorse had the greatest velocity of $4.23 \text{ cm/s} \pm 0.23 \text{ cm/s}$, with its body length varying from 4 to 6 cm, after which the velocity decreased to $2.86 \pm 0.02 \text{ cm/s}$ for more than 12 cm body length. In the vertical direction, similar to the horizontal direction, the greatest velocity was $0.372 \text{ cm/s} \pm 0.014 \text{ cm/s}$ with its body length of approximately 6 cm, and the maximum absolute critical velocity was $0.085 \text{ BL/s} \pm 0.010 \text{ BL/s}$. When the body length was more than 13 cm, the velocity was stable. Judging from its swimming behavior and critical velocity, the swimming ability of the yellow seahorse is not strong.

(本文编辑: 康亦兼)