

DOI: 10.12264/JFSC2022-0405

不同流速下中国鲎稚鲎游泳模式研究

应紫薇^{1,2,3}, 李银康^{1,2,3}, 鲍虞园⁴, 陈晓海^{1,2,3}, 罗梓萌^{1,2,3}, 颜晓勇^{1,3}

1. 中国水产科学研究院南海水产研究所, 农业农村部南海渔业资源开发利用重点实验室, 广东 广州 510300;
2. 上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306;
3. 三亚热带水产研究院, 海南 三亚 570203;
4. 广东省海洋发展规划研究中心, 广东 广州 510322

摘要: 中国鲎(*Tachypleus tridentatus*)资源量近 30 年来骤减, 亟待保护与增殖恢复。为了确定不同水流速度对稚鲎行为的影响, 水温(24±2) °C 条件下, 选择头胸甲宽(0.58±0.02) cm 的增殖放流用中国鲎稚鲎为研究对象, 测定其不同水流速度(0.00 cm/s, 0.06 cm/s, 0.07 cm/s, 0.08 cm/s, 0.10 cm/s, 和 0.12 cm/s)下的书鳃收缩频率、持续游泳时间和暴发-滑行游泳运动指标。结果显示, 稚鲎在不同流速下的书鳃收缩频率随流速增大而增大($y=2.02x-0.23$, $R^2=0.89$, $P<0.05$)。稚鲎持续游泳时间先随流速增加呈先增加后减少的趋势($y=10^6x^3-387726x^2+36885x-1062.80$, $R^2=0.85$, $P<0.05$)。各流速组稚鲎单次最大持续游泳时间均可达 70 s。暴发游泳的平均暴发时间随水流速度增加呈下降趋势($y=-239.53x+32.19$, $R^2=0.90$, $P<0.05$)。平均暴发游泳距离在流速为 0.06~0.07 cm/s 时和 0.08~0.12 cm/s 时与水流速度成反比, 在 0.07~0.08 cm/s 时与水流速度成正比($y=-185351x^2+37240x-1540.10$, $R^2=0.67$, $P<0.05$)。平均对地暴发速度随流速增加先增加后减少($y=3\times10^6x^3-868691x^2+79752x-2285$, $R^2=0.58$, $P<0.05$)。研究结果表明, 稚鲎在不同流速条件下游泳行为策略存在差异, 0.06~0.08 cm/s 为 1 龄稚鲎适宜生存流速, 野外人工放流宜选择风浪较小海湾。本研究也为人工养殖稚鲎水体环境设置提供了理论依据。

关键词: 中国鲎; 流速; 书鳃收缩频率; 持续游泳时间; 暴发-滑行游泳

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2023)02-0169-09

光照、温度和水流等是影响水生生物生长、存活的重要环境因子^[1-3]。超过适宜范围的水流速度被认为是鱼类生长的阻碍因子, 增加鱼类代谢系统负担, 影响鱼类代谢系统对其他环境因子变化的响应^[4]。鱼类游泳行为多样, 表现为阶段性持续游泳、暂停及短暂暴发游泳穿插进行^[3,5]。不同水流速度下, 鱼类游泳行为存在差异。在高流速区, 锦鲤(*Cyprinus carpio koi*)表现为暴发-滑行游泳方式^[6], 而短吻鲟(*Acipenser brevirostrum*)采用暴发-滑行、自由游动、侧游、底层掠过和固定体位等游泳方式^[7]。

中国鲎(*Tachypleus tridentatus*)属鲎科(Limulidae), 东方鲎属(*Tachypleus*), 近三十年来资源量逐年下降, 2021 年被正式列为国家二级保护野生动物^[8-9]。中国鲎自然分布于中国东南沿海(福建、广东、广西和海南)、日本和东南亚等地^[10-11], 其血淋巴制备的鲎试剂是药典规定的医药制品(如疫苗等注射类药品)内毒素检验不可或缺的专用试剂^[12]。在新冠疫情反复暴发的大环境下, 鲎试剂需求量不断增加, 鲎资源保护与种群恢复势在必行。开展鲎人工育苗、选取适宜海区增殖放流幼鲎是目前公认恢复鲎资源的有效措施之一^[13-15], 但鲎苗

收稿日期: 2022-11-15; 修订日期: 2022-12-20.

基金项目: 广东省促进经济高质量发展(海洋经济发展)海洋六大产业专项资金重点支持项目(GDNRC[2021]37); 海南省自然科学基金项目(322MS154); 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项(GML2019ZD0605).

作者简介: 应紫薇(1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向为种质资源保护和海洋生态. E-mail: yy19710227@163.com

通信作者: 颜晓勇, 副研究员, 研究方向为水生动物种质资源. E-mail: xyxie@scsfri.ac.cn

放流相关理论与技术基础研究相对缺乏^[16-17]。当前,野外放流多采用船只携带1龄稚鲎至较深海域洒向海水中^[8]。稚鲎游泳能力极弱,水流如何影响稚鲎游泳行为,稚鲎有哪些相应的游泳策略等对于放流至关重要,但目前尚无水流对稚鲎行为活动影响相关报道。本研究以中国鲎1龄稚鲎为研究对象,研究不同水流速度下中国鲎稚鲎游泳行为习性,为中国鲎1龄稚鲎适宜放流地点选择以及科学放流提供理论参考依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料和实验条件

本实验于2022年4月在湛江中国水产科学研究院南海水产研究所中国鲎研究基地进行。实验所用中国鲎1龄稚鲎暂养于实验室水族缸(40 cm×30 cm×30 cm)适应15 d后,挑选体形完整、活力强的1龄中国鲎180只,头胸甲宽(0.58±0.02) cm,体重(0.03±0.01) g。

采用小型研磨机(CG-8316, long plus)将牡蛎肉打碎,经滤网过滤后取其汁液,暂养期间每天下午18:00泼洒至水族缸,每天换水和排污1次,日换水量80%。养殖用水为经过滤消毒的自然海水,水温(24±2)℃,盐度28±2, pH 7.9±0.1,溶解氧(12.6±1.8) mg/L。实验采用自然光照。

1.2 实验装置及实验方法

采用自行设计的研究不同流速对1龄稚鲎行为影响的实验装置,其基本结构是由两个透明亚克力材料制成的立方体上下拼接而成,下方为储水箱(40 cm×30 cm×30 cm,容积36 L),上方为流场装置(50 cm×20 cm×20 cm,容积50 L),二者通过可调流速水泵输水管和可控流量阀门输水管相连,水流在两装置间循环流动,组成循环水系统(图1)。实验稚鲎在其中可进行长时间自由游泳运动。

鉴于1龄稚鲎游泳能力极弱,实验设定一个0 cm/s静水对照组和0.06 cm/s、0.07 cm/s、0.08 cm/s、0.10 cm/s和0.12 cm/s 5个流速组。通过流场装置侧壁刻度线测定单位时间水泵各档位实际流速。每组设定3个重复。在实验过程中,流场装置中各流速组放30尾受试1龄稚鲎,实验结束后将受试稚鲎放回养殖池,保证无重复受试个

体。实验进行24 h,实验期间使用摄像机从流场装置正前方和正上方拍摄稚鲎游泳行为,单次拍摄持续10 min,每10 s观察记录1次稚鲎书鳃收缩频率。

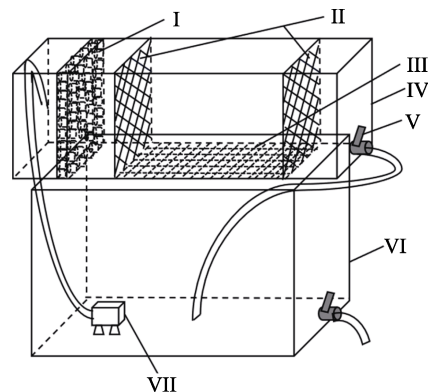


图1 实验装置示意图

I: 孔径2 mm多孔板,缓冲水流; II: 拦网; III: 边长1 cm网格; IV: 流场装置,规格为50 cm×20 cm×20 cm; V: 可控流量水阀; VI: 储水箱,规格为40 cm×30 cm×30 cm; VII: 可调流速水泵。

Fig. 1 Diagram of experimental equipment
I: 2 mm aperture porous plate, buffer water flow;
II: stop nets; III: side length 1 cm grid; IV: flow field equipment, 50 cm×20 cm×20 cm; V: controllable flow water valve; VI: storage tank, 40 cm×30 cm×30 cm;
VII: adjustable flow rate pump.

计算公式如下:

$$\text{TBF}(\text{Hz}) = \text{TBT}/t$$

式中,TBF指稚鲎书鳃收缩频率,TBT指每尾鲎在被观察期间的稚鲎游泳时书鳃收缩次数, t 为观察时间(s)。

1.3 行为特征观测

稚鲎行为主要可划分为趴卧、仰卧、爬行和暴发-滑行游泳4种行为(表1,图2)。暴发游泳和滑行游泳定义如下。

(1) 暴发游泳:包括从静止趴卧稳态到迅速启动至高流速的加速阶段和收缩书鳃维持高流速的匀速阶段。

(2) 滑行游泳:包括从静止趴卧被水流冲行翻滚阶段、高流速阶段逐渐降落至缸底的减速阶段和停止游泳仰卧被水流冲行的滑行阶段。

在计算机上分析录像数据,记录观察期间不同流速下各行为持续时间占总观察时间比例。通

表 1 中国鲈稚鲈行为特征描述
Tab. 1 Description of behavior characteristics of juvenile *Tachypleus tridentatus*

行为 behavior	行为描述 description of behavior
趴卧 lie prone	附肢处于头胸部下方
仰卧 lie supine	附肢处于头胸部上方
爬行 crawl	附肢不停运动, 向前移动
暴发-滑行游泳 burst-coast swimming	受水流刺激后垂直于水面向上游动, 直至力竭后滑行落至缸底; 由一个或多个的暴发游泳和紧随的滑行游泳组成

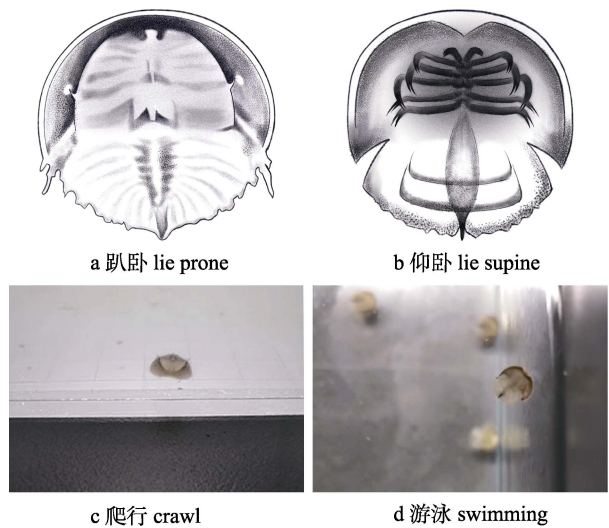


图 2 中国鲈稚鲈 4 种行为
Fig. 2 Four behaviors of juvenile *Tachypleus tridentatus*

过行为学软件 Logger Pro 3.16.2 Demo 逐帧播放监控摄像系统(镭威视安防监控, 18 fps)录像, 确定每帧实验稚鲈头胸部前端中心点所处位置进行描点记录, 分析暴发-滑行游泳行为的暴发游泳时

间(迅速启动加速和维持高流速的总时间)和暴发游泳距离(暴发游泳前进距离), 计算对地暴发游泳速度。计算公式如下:

$$v=s/t$$

式中 v 为对地暴发游泳速度, s 为实验鲈暴发游泳状态下头胸部移动距离(cm), t 为暴发游泳时间(s)。

1.4 数据处理

实验数据用 Excel 进行初步计算后, 用 SPSS 27.0 进行统计分析。检验正态分布和方差齐性后, 采用单因素方差(one-way ANOVA)分析不同水流速度对中国鲈稚鲈不同行为出现概率、书鳃收缩频率、单次持续游泳时间、暴发游泳速度的影响, 并利用 Duncan's 多重比较法分析组间差异。统计数据均用平均值±标准差($\bar{x} \pm SD$)表示, $P<0.05$ 表示差异显著。此外, 采用最小二乘法对书鳃收缩频率和暴发游泳时间与流速分别进行相关性分析。采用多项式构建模型进一步探究流速与持续游泳时间、暴发游泳距离和对地暴发游泳速度间的关系。

2 结果与分析

2.1 不同流速下中国鲈稚鲈行为特征

单因素方差分析显示, 不同水流速度下, 中国鲈 1 龄稚鲈仰卧和游泳行为出现概率差异显著($P<0.05$)(表 2)。仰卧行为出现概率随流速增加而减小, 而游泳行为出现概率先增加后减小。稚鲈在不同流速下趴卧和爬行出现概率无显著差异($P>0.05$)(表 2)。

表 2 不同流速下稚鲈各行为出现比例
Tab. 2 The probability of each behavior of juvenile *Tachypleus tridentatus* at different water flow velocity $\bar{x} \pm SD, \%$

行为 behavior	流速/(cm/s) flow velocity					
	0	0.06	0.07	0.08	0.10	0.12
仰卧 lie supine	51.65±1.65 ^a	17.06±8.30 ^b	15.50±1.78 ^b	14.00±1.70 ^b	11.65±2.65 ^b	6.65±3.35 ^b
趴卧 lie prone	25.00±1.70	27.23±10.00	18.09±2.36	25.24±10.21	18.13±16.22	7.90±0.00
爬行 crawl	23.30±0.00	32.62±1.65	38.06±2.54	27.46±5.23	30.08±4.33	60.00±6.70
游泳 swimming	0.00±0.00 ^c	23.09±0.00 ^c	28.35±1.70 ^{abcd}	33.30±0.00 ^{abc}	40.15±14.67 ^{ad}	25.45±1.70 ^{acd}

注: 右上角不同字母代表数据间差异显著($P<0.05$).
Note: Different letters on the upper right corner represent significant difference ($P<0.05$).

2.2 不同流速下中国鲈稚鲈游泳行为变化

不同水流速度下, 对稚鲈游泳动力学数据进

行分析, 对各流速组稚鲈书鳃收缩频率均值与水流速度进行拟合(图 3), 可得线性方程:

$$y=2.02x-0.23, R^2=0.89$$

稚鲢的平均持续游泳时间随流速增加表现为先增后减($y=10^6x^3-387726x^2+36885x-1062.80$, $R^2=0.85$, $P<0.05$, 图 4)。在不同流速下, 各流速组稚鲢单次最大可持续游泳时间均可达 70 s, 单次最小可持续游泳时间与单次平均持续游泳时间变化趋势一致。静水条件下稚鲢多处于静止趴卧状态。

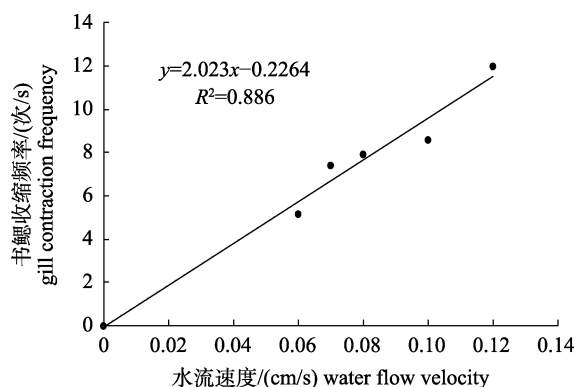


图 3 稚鲢书鳃收缩频率与水流速度相互关系

Fig. 3 The relationship between gill contraction frequency and water flow velocity in *Tachyleas tridentatus*

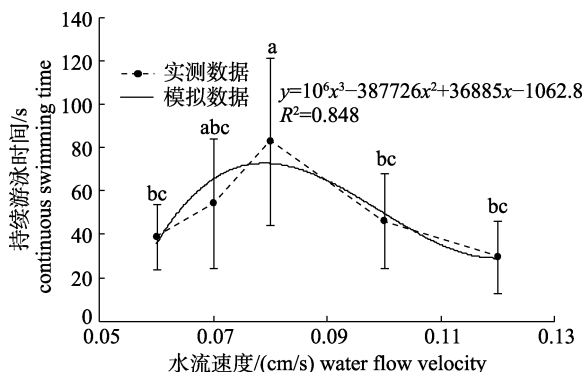


图 4 不同流速下稚鲢持续游泳时间变化
线上不同字母代表差异显著($P<0.05$)。

Fig. 4 Swimming durations of juvenile *Tachyleas tridentatus* at different water flow velocity
Different letters on the line represent significant difference ($P<0.05$).

2.3 暴发游泳时间和距离与流速的关系

在不同流速下, 稚鲢单次暴发游泳时间差异显著, 且随水流速度增加而减少($y=-239.53x+32.19$, $R^2=0.90$, $P<0.05$, 图 5)。在低流速 0.06 cm/s 和 0.07 cm/s 条件下, 稚鲢平均暴发时间较长; 0.07~0.10 cm/s 流速条件下, 稚鲢平均暴发时间骤减。平均暴发游泳距离有显著差异, 最小值为

7.28 cm, 最大值为 541.16 cm, 在 0.06~0.07 cm/s 时和 0.08~0.12 cm/s 时与水流速度成反比, 在 0.07~0.08 cm/s 时与水流速度成正比($y=-185351x^2+37240x-1540.10$, $R^2=0.67$, $P<0.05$, 图 6)。

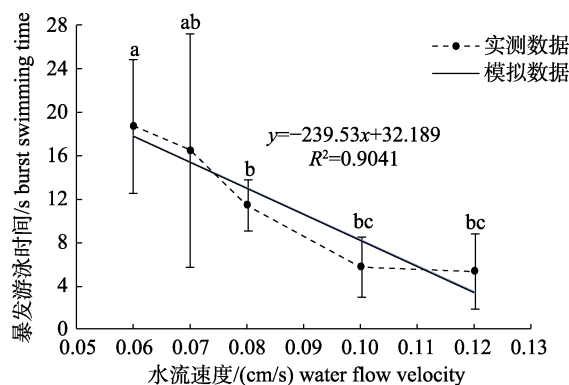


图 5 不同流速下稚鲢单次暴发游泳时间变化
线上不同字母代表差异显著($P<0.05$)。

Fig. 5 Changes of single burst swimming time of juvenile *Tachyleas tridentatus* at different water flow velocity
Different letters on the line represent significant difference($P<0.05$).

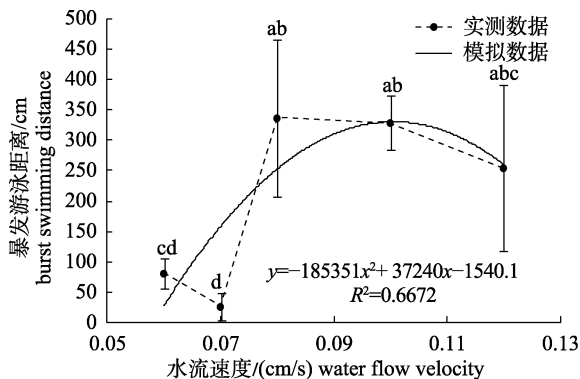


图 6 不同流速下稚鲢暴发游泳距离变化
线上不同字母代表差异显著($P<0.05$)。

Fig. 6 Changes of burst swimming distance of juvenile *Tachyleas tridentatus* at different water flow velocity
Different letters on the line represent significant difference($P<0.05$).

2.4 对地暴发游泳速度与流速的关系

不同流速下, 稚鲢平均对地暴发游泳速度差异显著($P<0.05$, 图 7), 范围在 20~120 cm/s 之间, 0.06~0.07 cm/s 水流条件下稚鲢对地暴发游泳速度显著上升, 0.07~0.12 cm/s 时又逐渐下降。采用多项式对对地暴发游泳速度和流速构建模型, 得到方程 $y=3\times 10^6x^3-868691x^2+79752x-2285$, $R^2=0.58$, $P<0.05$ 。

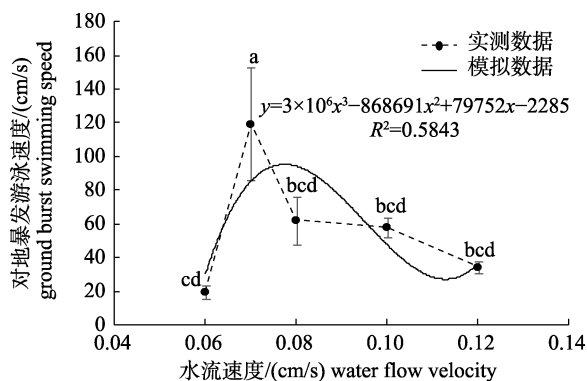


图7 不同流速下稚鲎平均对地暴发游泳速度变化($P<0.05$)

线上不同字母代表差异显著。

Fig. 7 Changes of ground burst swimming speed of juvenile *T. tridentatus* at different water flow velocity ($P<0.05$)

Different letters on the line represent significant difference.

3 讨论

3.1 不同流速下中国鲎稚鲎行为动态变化

水流是水生动物最重要的生态环境因子之一^[18]。对于水流变化,水生动物通常率先表现为行为上的响应^[4]。摆尾角度和摆尾频率等鱼类游泳动力学指标有助于解释鱼类游泳姿态转换和运动能量消耗^[19]。李会锋等^[20]发现鲢幼鱼的摆尾频率随水流速度增大而增大且呈线性相关。本研究结果与鲢幼鱼结果相似,中国鲎稚鲎的书鳃收缩频率随水流速度的增加而增加,且书鳃收缩频率与水流速度均取对数后呈线性关系。该现象出现的主要原因是书鳃既是鲎的呼吸器官也是其游泳动力器官,腹肢摆动在腹部形成水流从书鳃流过,进而进行呼吸作用,同时也使鲎获得向前游动的动力^[21]。1龄稚鲎仅2对鳃书,每蜕一次壳增加1对鳃书,直至生长到4龄出现5对完整鳃书为止^[21]。当水流速度增加时,稚鲎在水中为维持自身稳定,需要增大动力,导致书鳃收缩频率不断加快。不同水流速度下,中国鲎1龄稚鲎仰卧和游泳行为出现概率差异显著($P<0.05$)。其中,仰卧行为出现概率随流速增加而减小,原因为低流速稚鲎可以维持机体静止在固定位置,而高流速产生的冲击力对体型和体重极小的稚鲎带来巨大影响,使其被水流冲行翻滚。在0.06~0.08 cm/s流速下游泳行为出现概率上升,而在0.08~0.12 cm/s流速下出现概率下降,其原因可能是低流速下水流产生的阻

力较小,稚鲎通过加快收缩腹肢以获得游泳启动动力,但高流速水流产生较大阻力,稚鲎即使加快收缩腹肢也难以抗衡。

资料显示,适度游泳运动能够缓解鱼的应激反应,提高鱼对环境的适应能力^[22]。通过增加水流速度驯化可提高鱼类游泳能力,改变其行为方式^[23-24]。人工养殖时过高的水流速度会造成水生动物产生应激反应和厌氧代谢过度,影响其正常生长发育,因此探究稚鲎生长的适宜流速极为重要。本研究行为观察结果显示,在0~0.08 cm/s流速下,稚鲎游泳行为连贯顺畅,单次持续游泳时间在0.08 cm/s达到最大值;而在0.10 cm/s和0.12 cm/s流速下,稚鲎应激较明显,暴发游泳前常被水流冲行翻滚,无法在短时间内保持自身稳定,且游泳力竭后被水流冲行至下游拦网。结合流速与书鳃收缩频率、持续游泳时间、暴发游泳时间、暴发游泳距离和对地暴发游泳速度模型模型结果,0.06~0.08 cm/s为1龄稚鲎适宜生存流速,该结果可为稚鲎人工养殖水体环境设置提供参考依据。据资料显示,南海海域海流受季风影响,在夏季西南季风盛行时平均流速为10.3~25.7 cm/s;在冬季东北季风盛行时平均流速为25.7~51.4 cm/s^[25],两季节海流流速远远高于1龄稚鲎适宜生存流速。而传统常用增殖放流方式是直接将1龄稚鲎运至远离岸边的海域直接放入海水,在正常海水流速下稚鲎游泳时身体垂直向上游动一方面消耗体能,另一方面由于稚鲎游泳能力极弱且体质量较轻,易被海水冲散,增大被捕食概率,降低稚鲎生存概率,故传统放流方法不合理亟待改进。稚鲎栖息于潮间带^[15],具有潜沙习性^[18],放流时宜投放于退潮后的中高潮区小水洼中,使其能够在不脱水的状态下钻入底质埋栖。流速对稚鲎能量消耗和生长方面的影响需进一步研究。

3.2 不同流速下中国鲎稚鲎暴发-滑行游泳策略

游泳行为是水生动物最主要的生命活动内容,鱼类在水体里进行觅食、洄游、生殖和躲避敌害等活动均有赖于游泳行为^[26]。此外,游泳动力学研究有助于构建鱼类生物学仿真模型^[27]。梭子蟹最后一对步行足进化为扁平游泳桨(桨形游泳足),游泳时利用桨形指节和掌节与水作用产生

推力^[28]。暴发-滑行游泳行为是鱼类躲避敌害和越过障碍物的一种策略,在鱼类上溯游泳时起重要作用。淡水鱼类如鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)^[3]和齐口裂腹鱼(*Schizothorax prenanti*)^[29]游泳时常出现暴发-滑行行为。与鱼类暴发-滑行游泳行为相似,稚鲢游泳时收缩腹肢提供动力维持机体停留在某一水平位置上,力竭后被水流冲行至拦网或自由落体至缸底。但不同的是,稚鲢高流速下游泳行为总体呈现“滑行-暴发-滑行”策略。稚鲢游泳时身体垂直于水面向上游动,不似鱼类与水面平行游动,且在向上游动前往往往会随水流短暂翻滚滑行,其原因可能是水流冲击下稚鲢难以维持机体停留在某一水平位置,短暂失衡。

稚鲢暴发-滑行游泳平均单次暴发游泳时间与鲢幼鱼^[3]和鲤(*Cyprinus carpio* L.)^[30]暴发-滑行游泳平均暴发时间趋势相反,随水流速度增大而减少。同时,本研究显示稚鲢平均对地暴发速度随流速先增大后减小,这可能是由于 1 龄稚鲢较幼鱼体型小得多,低流速下稚鲢几乎无应激反应,自由游泳,而高流速条件下稚鲢游泳时难以抵御水流产生的阻力,短时间内即达到力竭状态。而鲢幼鱼平均对地暴发速度不受水流速度影响,与其自身形状、大小、发育程度等生理因素和水温、溶氧、水流、光照等环境因素有关^[3]。书鳃收缩频率随水流速度增加而增加,需消耗稚鲢体内越来越多能量。此外,体型是影响鱼类运动能力的因素之一,窄尾柄、流线型体型和适宜长宽比有利于持续运动^[31];头部小、尾柄大、身体柔韧有助于快速启动^[32]。对虾游泳时频繁摆动游泳足,依靠尾扇维持身体平衡^[33]。但 1 龄稚鲢剑尾尚未长出^[21],头胸部较大,难以维持躯体平衡,这也是导致其平均持续暴发游泳时间随流速增加而减小的原因之一。另外,还有较多研究表明体长影响鱼类游泳能力^[34-37]。本研究针对 1 龄稚鲢游泳行为策略开展了相关研究,后续宜对不同生长阶段中国鲢游泳能力变化情况进行更为深入的探索。

参考文献:

- [1] Silva A T, Santos J M, Ferreira M T, et al. Effects 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 Applications*, 2011, 27(3): 360-373.

- [2] Kemp P S, Russon I J, Vowles 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 Applications*, 2011, 27(4): 488-498.
- [3] Liang Y Y, Lin C Y, Chen T, et al. Strategies of burst-coast swimming behavior of juvenile silver carp at different flow velocities[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2016, 40(6): 1187-1193. [梁园园, 林晨宇, 陈廷, 等. 鲢幼鱼在不同水流速度下的暴发-滑行行为策略[J]. *水生生物学报*, 2016, 40(6): 1187-1193.]
- [4] Yuan X, Tu Z Y, Han J C, et al. Effects of flow rate on swimming behavior and energy consumption of *Schizothorax chongi*[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2012, 36(2): 270-275. [袁喜, 涂志英, 韩京成, 等. 流速对细鳞裂腹鱼游泳行为及能量消耗影响的研究[J]. *水生生物学报*, 2012, 36(2): 270-275.]
- [5] Kieffer J D. Perspective—Exercise in fish: 50+years and going strong[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A, Molecular & Integrative Physiology*, 2010, 156(2): 163-168.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Zhu J H, Wu Z, Feng B B, et al. Global conservation of *Tachypleus tridentatus*: Present status and recommendations[J]. *Biodiversity Science*, 2020, 28(5): 621-629. [朱俊华, 吴宙, 冯炳斌, 等. 全球中华鲎资源保护现状及对策建议[J]. *生物多样性*, 2020, 28(5): 621-629.]
- [9] Li Y, Zhong J, Bao Y, et al. Path analysis and allometric growth of morphological character and body mass of juvenile *Tachypleus tridentatus*[J/OL]. *Journal of Fisheries of China*, [2021-12-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1283.S.20211223.1053.004.html> [李银康, 钟金香, 鲍虞园, 等. 中国鲎幼鲎形态性状与体质量的通径分析及异速生长研究[J/OL]. *水产学报*, [2021-12-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1283.S.20211223.1053.004.html>]
- [10] Cai L Z, Chen X W, Fu S J, et al. Population dynamics and benthic environment of *Tachypleus tridentatus* in the inter-

- tidal zone of eyu islet in Xiamen[J]. Wetland Science & Management, 2021, 17(1): 14-18. [蔡立哲, 陈昕韩, 傅素晶, 等. 厦门鳄鱼屿潮间带中国鲎的种群动态与底栖环境[J]. 湿地科学与管理, 2021, 17(1): 14-18.]
- [11] Bao Y Y, Ye G L, Li Y K, et al. Histological observations on the development of digestive tract in *Tachypleus tridentatus*[J]. Marine Fisheries, 2021, 43(2): 184-193. [鲍虞园, 叶国玲, 李银康, 等. 中国鲎消化道发育组织学观察[J]. 海洋渔业, 2021, 43(2): 184-193.]
- [12] Chinese Pharmacopoeia Commission. Pharmacopoeia of People's Republic of China: volume 4[M]. Beijing: China Medical Science Press, 2020: 178-181. [国家药典委员会. 《中华人民共和国药典: 四部》[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2020: 178-181.]
- [13] Hsieh H L, Chen C P. Current status of *Tachypleus tridentatus* in Taiwan for red list assessment: Changing global perspectives on horseshoe crab biology[C]//Ruth H C, Mark L B, Paul K S S, Siu G C. Changing global perspectives on horseshoe crab biology, conservation and management. New York: Springer International Publishing Switzerland, 2015: 383-396.
- [14] Xu P, Bai H W, Xie X Y, et al. Tri-spine horseshoe crab aquaculture, ranching and stock enhancement: Perspectives and challenges[J]. Frontiers in Marine Science, 2021, 8: 608155.
- [15] Ying Z W, Bao Y Y, Li Y K, et al. Impact of different diets on adult tri-spine horseshoe crab, *Tachypleus tridentatus*[J]. Journal of Ocean University of China, 2022, 21(3): 541-548.
- [16] Ying Z W, Lin W Y, Xiao X B, et al. Dynamics of *Carciniscorpius rotundicauda* population at Shankou mangrove ecological and natural reserve, Guangxi[J]. Chinese Journal of Ecology, 2022, 41(5): 973-978. [应紫薇, 林吴颖, 肖晓波, 等. 山口红树林保护区圆尾蝎鲎种群动态[J]. 生态学杂志, 2022, 41(5): 973-978.]
- [17] Ying Z W, Li Y K, Xie X Y. Behavior preference of juvenile *Tachypleus tridentatus* on different substrates[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2022, 53(5): 1242-1249. [应紫薇, 李银康, 颜晓勇. 中华鲎(*Tachypleus tridentatus*)稚鲎对不同比例泥沙类型选择行为特征[J]. 海洋与湖沼, 2022, 53(5): 1242-1249.]
- [18] Yu L J, Li X M, Yi J H, et al. Effects of different water velocities on the free radical metabolism of juvenile *Spinibarbus sinensis*[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2014, 21(1): 101-107. [于丽娟, 李秀明, 易建华, 等. 不同水流速度对中华倒刺鲃幼鱼自由基代谢的影响[J]. 中国水产科学, 2014, 21(1): 101-107.]
- [19] Li G, Müller U K, van Leeuwen J L, et al. Body dynamics and hydrodynamics of swimming fish larvae: A computational study[J]. The Journal of Experimental Biology, 2012, 215(Pt 22): 4015-4033.
- [20] Li H F, Cai D S, Yang P S. Swimming ability and behavior of different sized silver carp[J]. Journal of Hydroecology, 2016, 37(3): 88-92. [李会锋, 蔡德所, 杨培思. 鲢幼鱼游泳能力及游泳行为的试验研究[J]. 水生态学杂志, 2016, 37(3): 88-92.]
- [21] Hong S G. Biology of horseshoe crabs, *Tachypleus tridentatus*[M]. Xiamen, China: Xiamen University Press, 2011. [洪水根. 中国鲎生物学研究[M]. 厦门: 厦门大学出版社, 2011.]
- [22] DePasquale C, Leri J. The influence of exercise on anxiety-like behavior in zebrafish (*Danio rerio*)[J]. Behavioural Processes, 2018, 157: 638-644.
- [23] Gorle J M R, Terjesen B F, Mota V C, et al. Water velocity in commercial RAS culture tanks for Atlantic salmon smolt production[J]. Aquacultural Engineering, 2018, 81: 89-100.
- [24] Voorhees J M, Huysman N, Krebs E, et al. Influence of water velocity and vertically-suspended structures on rainbow trout rearing performance[J]. Open Journal of Animal Sciences, 2020, 10(1): 152-161.
- [25] Hainan Provincial Local Records Office. Hainan provincial local records (II)- Book of the sea[OL]. Haikou: Nan Hai Publishing Company, 2006. <https://www.hnszw.org.cn/xiangqing.php?ID=44809>. [海南省地方志办公室. 海南省志—第二卷—海洋志[OL]. 海口: 南海出版公司, 2006. <https://www.hnszw.org.cn/xiangqing.php?ID=44809>.]
- [26] Li X, Lin X T, Song B L, et al. Effects of water velocities on swimming performances of juvenile tin foil 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[J]. 动物学杂志, 2010, 45(2): 126-133.]
- [27] Ke S F, Gao Z, Liu G Y, et al. The analysis of fish swimming dynamics based on the Matlab[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2016, 40(5): 985-991. [柯森繁, 高柱, 刘国勇, 等. 基于 Matlab 的鱼类游泳动力学分析[J]. 水生生物学报, 2016, 40(5): 985-991.]
- [28] Wang H L, Wang G, Chen X, et al. Hydrodynamic analysis and experimental research on swimming leg of crablike robot[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(8): 75-83. [王海龙, 王刚, 陈曦, 等. 仿海蟹机器人游泳足水动力学分析与实验研究[J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(8): 75-83.]
- [29] Li Q Z, Deng Y X, Tang X L, et al. Response of "burst and gliding" behavior to hydrodynamic conditions during upstreaming in the *Schizothorax prenanti*[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2022, 46(6): 811-819. [李沁芝, 邓月曦, 唐锡

- 良, 等. 齐口裂腹鱼上溯过程中“冲刺-滑行”行为对水动力的响应[J]. 水生生物学报, 2022, 46(6): 811-819.]
- [30] Tudorache C, Viaenen 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.
- [31] Yan D J, Yan G J, Cao Z D, et al. The effect of exercise training on the swimming performance and metabolic rate in juvenile common carp (*Cyprinus carpio*)[J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2012, 29(5): 16-19. [闫东娟, 闫冠杰, 曹振东, 等. 运动锻炼对鲤鱼幼鱼游泳能力及代谢的影响[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2012, 29(5): 16-19.]
- [32] Blake R W. Fish functional design and swimming performance[J]. Journal of Fish Biology, 2004, 65(5): 1193-1222.
- [33] Zhang P D, Zhang X M, Li J. Research advances in behavioral ecology of penaeid shrimps I. Behavior of penaeid shrimps[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(1): 127-130. [张沛东, 张秀梅, 李健. 对虾的行为生态学研究进展 I. 对虾的行为习性[J]. 应用生态学报, 2006, 17(1): 127-130.]
- [34] Wang F, Cao Z D, Fu S J, et al. Fast-start and escape performance of juvenile *Spinibarbus sinensis*[J]. Chinese Journal of Ecology, 2010, 29(11): 2181-2186. [王芳, 曹振东, 付世建, 等. 中华倒刺鲃幼鱼的快速启动与逃逸行为[J]. 生态学杂志, 2010, 29(11): 2181-2186.]
- [35] 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. [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.]
- [36] 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): 829-834. [路波, 刘伟, 梁圆圆, 等. 草鱼快速启动过程的加速—滑行游泳行为[J]. 水产学报, 2014, 38(6): 829-834.]
- [37] Niu S F, Lu B, Luo J, et al. Swimming performance of fast escapement of silver carp[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2015, 39(2): 394-398. [牛宋芳, 路波, 罗佳, 等. 鲢快速逃逸游泳行为研究[J]. 水生生物学报, 2015, 39(2): 394-398.]

Swimming patterns of juvenile *Tachypleus tridentatus* at different water flow velocities

YING Ziwei^{1,2,3}, LI Yinkang^{1,2,3}, BAO Yuyuan⁴, CHEN Xiaohai^{1,2,3}, LUO Zimeng^{1,2,3}, XIE Xiaoyong^{1,3}

1. Key Laboratory of South China Sea Fishery Resources Exploitation & Utilization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China;
2. College of Fisheries Science and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
3. Sanya Tropical Fisheries Research Institute, Sanya 570203, China;
4. Guangdong Center for Marine Development Research, Guangzhou 510322, China

Abstract: The limulus reagent prepared from hemolymph of horseshoe crab (*Tachypleus tridentatus*) is the standard method for endotoxin detection domestically and internationally. However, Chinese resources have plummeted in the past 30 years and need urgent protection and recovery. Artificial breeding and selecting suitable sea areas for proliferation and release of juvenile horseshoe crabs are currently recognized as effective measures to restore horseshoe crab resources. However, there is a relative lack of basic research on the theory and technology of horseshoe crab seedling release. At present, field release to deeper waters is mostly done by boats to sprinkle into the seawater. Whether water flow affects the normal behavior and survival of juvenile *T. tridentatus* urgently needs to be explored. We selected first instar *T. tridentatus* with prosomal width of (0.58 ± 0.02) cm for the study, at water temperatures of (24 ± 2) °C. The gill contraction frequency, swimming duration, and burst-coast swimming indexes of juvenile *T. tridentatus* under different water flow velocities (0.00, 0.06, 0.07, 0.08, 0.10, and 0.12 cm/s) were measured. During the experiment, thirty first instar *T. tridentatus* were placed in each water flow velocity

group in the flow field device. After the experiment, the juvenile horseshoe crabs were put back into the culture pond to ensure that no test individual was repeated. The experiment was conducted for 24 h. During the experiment, cameras were used to take photograph for the swimming behavior of juvenile *T. tridentatus* from the front and top of the flow velocity device. The results showed that the gill contraction frequency of first instar *T. tridentatus* increased with the rise in water flow velocity ($y=2.02x-0.23$, $R^2=0.89$, $P<0.05$). The swimming duration of juvenile horseshoe crab increased initially and then decreased with increasing water flow velocity ($y=10^6x^3-387726x^2+36885x-1062.80$, $R^2=0.85$, $P<0.05$). The single maximum swimming duration of juvenile *T. tridentatus* was up to 70 s at different water flow velocities. The mean burst swimming time of first instar horseshoe crab demonstrated a decreasing trend with increasing water flow velocity ($y=-239.53x+32.19$, $R^2=0.90$, $P<0.05$). With the increase in water flow velocity, the average burst swimming distance first decreased (0.06–0.07 cm/s), then increased (0.07–0.08 cm/s), and decreased again (0.08–0.12 cm/s) ($y=-185351x^2+37240x-1540.10$, $R^2=0.67$, $P<0.05$). The mean ground burst swimming speed of first instar *T. tridentatus* increased initially and then decreased as the water flow velocity increased ($y=3\times 10^6x^3-868691x^2+79752x-2285$, $R^2=0.58$, $P<0.05$). The suitable survival velocity of first instar *T. tridentatus* was 0.06–0.08 cm/s, which provides a theoretical basis for the environmental setting of artificial breeding of juvenile horseshoe crabs and the selection of field release sites. The results indicated that the swimming behavior strategies of juvenile *T. tridentatus* were different at different water flow velocities, and a bay with less wind and waves should be selected for field release.

Key words: *Tachypleus tridentatus*; water flow velocity; gill contraction frequency; swimming duration; burst-coast swimming

Corresponding author: XIE Xiaoyong. E-mail: xyxie@scsfri.ac.cn