

不同规格凡纳滨对虾可持续游泳能力比较研究

王 萍,陈凯琳,桂福坤,冯德军

(浙江海洋大学,国家海洋设施养殖工程技术研究中心,浙江 舟山 316022)

摘要:研究对虾可持续游泳能力对工厂化循环水养殖系统中水流流速和持续时间调控具有重要意义。本研究利用循环水槽,分别测定 3 种规格[S1 (5.87±0.53) g、S2 (10.12±0.62) g、S3 (14.28±0.12) g]的凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*) 在 6 种流速(29.4、32.9、37.5、41.2、44.3 和 50.3 cm/s)下的可持续游泳时间,并以此作为指标衡量凡纳滨对虾的可持续游泳能力。结果显示:随着流速的增加,所有规格的对虾可持续游泳时间都呈现降低趋势,降幅随着规格的增大而增大。相同流速下,对虾规格越大,可持续游泳时间越小,且具有明显的个体差异性;采用离散系数表征个体差异性大小,3 种不同规格的对虾,离散系数随水流的增大,整体呈上升趋势,其中大规格对虾 S3 组个体差异性明显大于其他两组;对虾规格对平均可持续游泳时间-流速数学拟合模型的选取基本没有影响,3 种规格对虾的对数模型拟合系数均为最高。研究结果可以为工厂化循环水养殖模式下不同规格对虾养殖池内水流流速的调控提供参考依据。

关键词:凡纳滨对虾;工厂化循环水养殖;水流调控;游泳能力

中图分类号:S967

文献标志码:A

文章编号:10074-9580(2020)05-008-07

凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)是中国甲壳养殖类中最主要的养殖品种之一,其抗病能力强、生长速度快、产肉率高,适合工厂化循环水养殖^[1]。随着中国水产养殖模式升级,工厂化循环水养殖模式逐渐被接受并广泛应用。工厂化循环水养殖主要是通过及时循环更新养殖池内的水体,达到维持池内良好水环境的目的^[2]。然而,池内水流流速和持续时间长短的确定是实际生产中面临的首要问题,流速过大会超过养殖对象的耐流性,流速过小又不能发挥养殖池的自清洗功能。对虾具有逆流游泳的特性,随着水流流速的增大,对虾会加快游泳足的摆动频率,这一过程会使其体能消耗过多,影响对虾的生长,甚至对虾在顶流游泳的过程中会因过度疲劳而死亡^[3],因此研究循环水养殖模式下对虾的可持续游泳能力显得尤为重要。目前,国内外专门针对对虾游泳特性的研究相对较少,而针对鱼类游泳特性方面研究较为广泛。其中,桂福坤等^[4]研究了流速、时间以及加速度这 3 种适应条件对美国红鱼和黑鲷续航游泳能力(续航时间)的影响;刘慧杰等^[5]利用环形水槽实验装

置,采用流速递增法,研究了不同运动状态下鳊幼鱼的游泳特性变化情况;曹平^[6]开展了草鱼幼鱼在均匀流场下鱼类游泳特性指标和特征流场下鱼类上溯行为的研究,为鱼道水力设计提供技术基础;Drucker^[7]提出了泳姿转变游速的测定方法,此方法仅适用于不同流速下可变换泳姿的鱼类。鱼类游泳特性研究为对虾游泳能力研究提供了有益的借鉴。Solis-Ibarra 等^[8]通过凡纳滨对虾对白色物体移动速度而得其游泳速度;Zhang 等^[9-10]主要研究了温度和盐度对凡纳滨对虾游泳能力的影响以及游泳疲劳的生理反应;董瀛等^[11]主要探讨了单一规格南美白对虾耐流性的个体差异性。上述研究主要针对对虾游泳能力的影响因素以及游泳疲劳后的生理反应等方面,关于对不同规格对虾游泳能力的影响研究却鲜有报道。

在已有研究的基础上,分别测定 3 种规格的凡纳滨对虾在 6 种不同流速下的可持续游泳时间,并以此为指标来评估对虾在相应流速下的可持续游泳能力,以期更全面有效地指导对虾养殖池内水流速度和持续时间的设置。

收稿日期:2020-04-06

基金项目:国家自然科学基金“新型工业化循环水矩形对虾养殖池集污水动力特性研究(31902425)” ;舟山市科技项目“高效集污型新型流水养殖虾池研发(2018C21011)”

作者简介:王萍(1979—),女,博士,副教授,研究方向:鱼类行为。E-mail:wp77319@163.com

通信作者:冯德军(1988—),男,博士,讲师,研究方向:海洋设施养殖工程水动力。E-mail:fengdj88@126.com

1 材料与方法

1.1 试验用虾

试验中使用的不同规格凡纳滨对虾均购于浙江省舟山市定海区旭旺养殖场,采用鱼类活体运输车运回实验室,暂养于室内圆形玻璃钢海水养殖池内10 d。暂养期间,室内为自然光照条件,使用舟山海域自然海水,通过加热器加热水体,使水温保持在 $(27\pm 1)^{\circ}\text{C}$,气石曝气充氧,保持水体溶解氧 $>6.0\text{ mg/L}$ 。每日于07:00和18:00左右投喂天邦牌凡纳滨对虾1号饲料,1 h后吸出池内残饲粪便。根据池内水质适时更换新鲜海水。试验前12 h停止投喂。

1.2 试验装置

试验在国家海洋设施养殖工程技术研究中心设施养殖装备水动力实验室内的多功能双体水槽(图1)中进行。

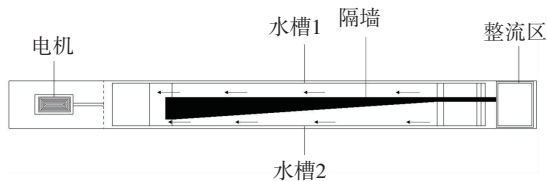


图1 试验用水槽示意图

Fig. 1 Schematic diagram of test flume

水槽主体分为水槽1和水槽2,分别可以进行恒定流速试验和变流速试验,两部分可同时运行,也可通过隔离装置分开而独立运行。本研究独立在水槽1内进行,水槽外侧壁由透明玻璃制成,方便试验观察,试验段长1700 cm,宽50 cm,深80 cm。通过调节水槽一端电机的转速调节水槽内水流速度,最大可造流流速为1.5 m/s。试验时用栅格网将试验段平均分成3段,用来开展平行试验。水槽内试验水深为30 cm,试验前利用小威龙点式流速仪分别测量每段上中下游中心处的流速,然后依次调节电机转速,确保获得目标流速。3台摄像机分别固定在水槽的上方,全程观察记录对虾游泳行为以及触网过程。试验时,使水槽内环境与暂养期间养殖池内的环境保持一致。

1.3 试验方法

正式试验前需要通过预试验确定正式试验中可设置的合适流速范围。在图1所示的水槽中开展预试验,并保持与正式试验环境一致,分别测定不同流速下不同规格凡纳滨对虾的可持续游泳时间。根据

预试结果并参考已有的类似研究^[12],设置6组正式试验水流速度:29.4、32.9、37.5、41.2、44.3和50.3 cm/s。综合对虾体长和体质量,选择3种不同规格的对虾(表1)。

表1 试验对虾的规格

Tab. 1 Size of experimental shrimps

规格编号	平均体长/cm	平均体质量/g
S1	5.37±0.24	5.87±0.53
S2	9.59±0.27	10.12±0.62
S3	13.14±0.42	14.28±0.12

每种规格的对虾180尾,随机分成18组,每组10尾,分别对应18组试验(每种流速工况设3组平行试验),3种规格对虾共计进行54组试验。试验流程:开启摄像机,将对虾放入低流速(25.0 cm/s)水流环境中适应10 min,然后将水槽的流速在1 min之内逐渐调至预设值^[13],直至对虾全部疲劳触网停止游泳,关闭摄像机,结束第一组试验。重复上述操作,直至所有流速工况测试完毕。预试验过程发现,当试验对虾被冲到下游的拦网上且不再继续自主游动时,即使用小抄网将其再次转移到上游也基本不会继续游泳,而是再次被直接冲到下游的拦网上。基于此,本试验中对虾游泳疲劳的判断标准是对虾被冲至下游的拦网上并且不再重新游泳。试验时没有用小抄网再次转移对虾至上游,这样可以减少人为干扰因素,降低外界环境对试验对虾的刺激。

1.4 数据处理

通过观看摄像机所拍摄视频资料,确定并记录每条对虾可持续游泳时间,用Excel 2016处理相关数据。计算公式如下:

$$P = (T_1 - T_2) / T_1 \times 100\% \quad (1)$$

$$C_v = \sigma_t / \mu_t \quad (2)$$

式中: P —降幅; T_1 ,可持续游泳时间大值,min; T_2 —可持续游泳小值,min; C_v —离散系数; σ_t —每组试验中10条对虾可持续游泳时间的标准差,min; μ_t —每组试验中10条对虾可持续游泳时间的平均值,min。

2 结果与分析

2.1 不同规格对虾可持续游泳时间特性

3种不同规格对虾在6组流速下的可持续游泳时间分别如图2(a~f)所示。

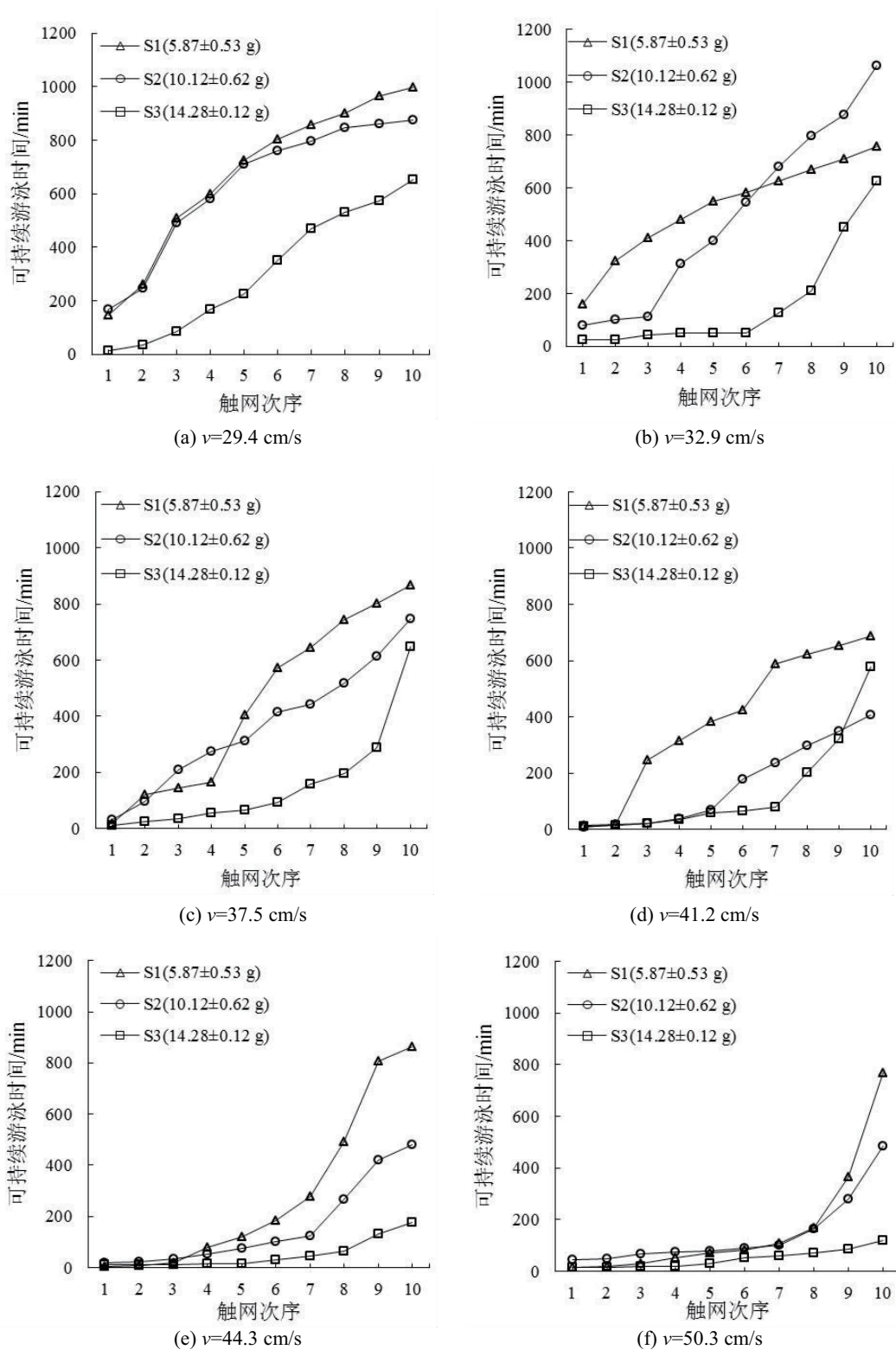


图2 不同流速下3种规格对虾可持续游泳时间

Fig. 2 Swimming time of the three sizes of shrimp at different flow velocities

图2中,横坐标为触网次序,纵坐标代表相应的游泳历经时长。从图2可以看出:(1)不同流速水平下,随着流速的增加,所有规格的对虾可持续游泳时间都呈现降低趋势,所有试验组次中,3种规格对虾的最大可持续游泳时间的最大值和最小值分别为S1(998 min和767 min),S2(877 min和485 min)和S3(651 min和118 min),降幅分别23.15%、44.70%和81.87%,大规格对虾降幅尤为明显;(2)相同流速水平下,除个别数据点外,对虾规格越大,其可持续游泳时间越小;(3)相同流速水平下,所有规格对虾的可持续时间均表现出明显的个体差异性,以37.5 cm/s为例,3种规格对虾的可持续游泳时间的最大值和最小值分别为S1(867 min和17 min),S2(748 min和30 min)和S3(647 min和12 min)。而且对虾可持续游泳时间和触网次序并不是简单的线性关系,说明对虾可持续游泳时间个体差异存在两极分化现象。为了消除平均可持续游泳时间不同对差异性比较的影响,采用离散系数表示个体差异性大小(图3)。3种不同规格的对虾,离散系数随水流的增大具有明显的波动性,但是整体呈上升趋势,而且规格最大的对虾S3其个体差异性明显大于其他两种规格对虾。

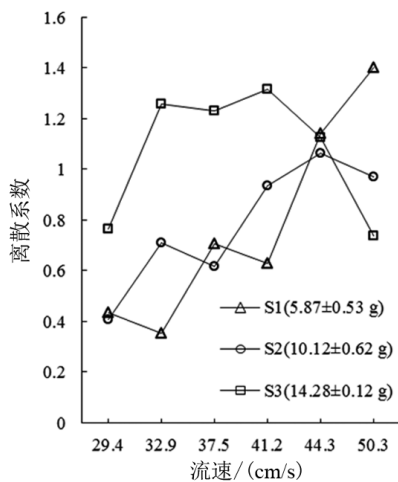


图3 离散系数随流速的变化关系

Fig. 3 Relationship between coefficient of variation and flow velocity

2.2 不同规格对虾平均可持续游泳时间随流速的变化关系

为了研究可持续游泳时间随流速变化的具体关系,将图2中各流速下各规格的10条对虾可持

续游泳时间取平均值,获得相应流速下各规格对虾的平均可持续游泳时间,结果如图4所示。从图4中可以看出,平均可持续游泳时间与流速呈负相关,为了进一步探究两者之间的定量变化关系,分别采用指数函数、幂函数和对数函数3种数学模型拟合平均可持续游泳时间与流速的关系曲线。相应的拟合方程以及决定系数 R^2 见表2,通过 R^2 值可以发现,S3规格对虾的3种模型拟合系数均低于0.9。3种规格对虾中对数模型的拟合系数均为最高,表明对数模型能较好地拟合平均可持续游泳时间和流速关系。

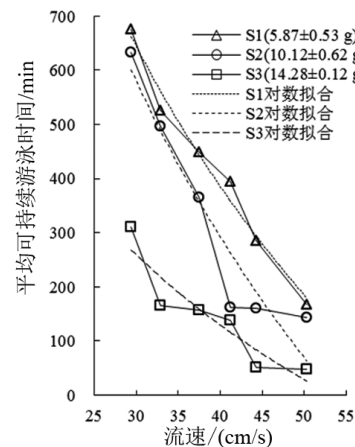


图4 平均可持续游泳时间随流速的变化关系

Fig. 4 Relationship between average swimming time and flow velocity

表2 不同规格凡纳滨对虾平均可持续游泳时间与流速之间的函数关系

Tab. 2 Relationship between average swimming time of *Litopenaeus vannamei* of various sizes and flow velocity

回归模型	对虾规格	拟合方程	R^2
指数拟合	S1	$T = 4\,526 \times e^{-0.06v}$	0.957
	S2	$T = 6\,401 \times e^{-0.08v}$	0.886
	S3	$T = 3\,915 \times e^{-0.09v}$	0.861
幂函数拟合	S1	$T = 3 \times 10^6 \times v^{-2.41}$	0.925
	S2	$T = 3 \times 10^7 \times v^{-3.15}$	0.908
	S3	$T = 3 \times 10^7 \times v^{-3.45}$	0.864
对数拟合	S1	$T = -899 \times \ln(v) + 3\,701$	0.982
	S2	$T = -1\,001 \times \ln(v) + 3\,986$	0.912
	S3	$T = -450.8 \times \ln(v) + 1\,792$	0.864

注: T 表示可持续游泳时间, min; v 表示水流流速, cm/s

3 讨论

3.1 工厂化循环水养殖模式下的对虾游泳能力

工厂化循环水养殖是中国陆基水产养殖的重

要发展趋势,与传统的外塘粗放型养殖相比,具有养殖环境可控,产量高,经济效益高等特点,备受业内关注^[14]。近年来,学者针对鱼类游泳特性开展了大量研究工作^[15-16],然而针对对虾游泳特性的相关研究却不多,更鲜有报道工厂化养殖模式下对虾的游泳特性。于晓明等^[17]研究了对虾临界游速、弹跳速度、游泳耐久性、游泳疲劳后的生理反应及水温、盐度、体长对其临界游速的影响。段妍^[18]研究了凡纳滨对虾游泳能力的测定方法及温度、盐度和溶氧对凡纳滨对虾临界游速、持续游泳时间和弹跳速度的影响。上述研究成果主要为对虾耐流性比较、自然环境下对虾捕食和避敌以及对虾拖网捕捞等提供参考。然而这些问题并不是工厂化循环水养殖模式下对虾面临的主要问题。由于工厂化循环水养殖池内的水体一直是循环流动的,因此,如何调控养殖池内的流速,使其能与对虾的耐流性相匹配并能够顺利地除去养殖池内的沉性颗粒,是对虾工厂化循环水养殖模式中需要解决的首要问题。为此,赵乐等^[19]探讨了养殖池内残饲粪便起动聚集相关的流速设置问题。董瀛等^[11]针对小规格(3.62 ± 0.50) g 凡纳滨对虾开展了不同流速下对虾的耐流性试验研究,指出可持续游泳时间可以作为衡量工厂化循环水养殖模式下对虾游泳能力的指标。可持续游泳时间是指在水流速度恒定的情况下测得的最长游泳时间,测量时无需对对虾增加额外的约束,减少外来刺激对对虾的影响,测量结果相对准确。而且,可持续游泳时间的物理意义与工厂化循环水养殖模式下对虾游泳特性研究目的高度切合。因此,基于工厂化循环水养殖模式对虾游泳特性研究的需求,本研究选择对虾可持续游泳时间作为对虾游泳能力的量化指标。

3.2 对虾规格对可持续游泳能力的影响

关于相同规格对虾游泳能力个体差异性以及对工厂化循环水养殖水流调控的意义等在董瀛等^[11]的研究中已经有详细的讨论。值得注意的是,在试验的过程中,部分对虾会在水槽底部角落或者池壁附近游泳或者保持静止,虽然其没有被冲到下游拦网上,但是也并没有完全顶流游泳,这也是造成对虾可持续游泳时间差异性的一个原因。图 2 可以明显地反映出规格对对虾可持续游泳能力有明显的影响。在相同流速下,随着对虾

规格的增大,对虾可持续游泳时间明显变短。这与三文鱼幼鱼耐流性研究结果恰好相反,三文鱼主要靠尾鳍和胸鳍的摆动来获得前进的推进力以及保持身体平衡,而规格大的三文鱼的尾鳍和胸鳍也长,这能大幅度提高三文鱼摆动幅度和身体平衡能力^[20]。对虾可持续游泳时间的长短主要取决于两个方面:游泳时水流作用于对虾的水阻力以及对虾克服该水阻力所需要消耗的能量。对虾在恒定流速水流中运动,其所受水阻力大小主要与对虾的外在形状、水流作用的横截面积以及水流速度大小相关,并正比于对虾胸腔直径的平方以及水流速度的平方^[21]。而对虾主要靠游泳足的摆动来获得前进的推动力,游泳足肌肉质量和效率以及可用能量储备和代谢是影响其前进推动力的主要因素。因此,出现本研究中试验结果的一个可能原因是,对虾规格差异对水阻力造成的影响大于对游泳足及能量造成的影响。也就是说小规格对虾由于与水流的作用横截面积小,受到的水阻力变小,但是其游泳足及质量、尺寸、摆动频率以及对虾整体具有的能量等与游泳能力密切相关的变量的降低却不是很明显。因此,小规格对虾反而可持续游泳时间长、可持续游泳能力强。从图 2 还可以发现,不同流速水平下,随着流速的增大,3 种规格对虾的可持续游泳时间均减小,但是降幅却随着规格的增大而增大。这也说明小规格对虾抵抗外界流速变化的能力高于大规格对虾。

3.3 对虾规格对平均可持续游泳时间-流速数学拟合模型选取的影响

平均可持续游泳时间-流速数学拟合模型的选取对计算对虾游泳能力指数(Swimming Ability Index)具有重要的影响^[22],同时可以根据拟合曲线,外延预测其他流速下的可持续游泳时间。从表 2 可以看出,本研究中,对虾规格对数学拟合模型的选取基本没有影响,3 种规格对虾对数模型的拟合系数均为最高。拟合结果与 Zhang 等^[9]的研究结果不同,与 Yu 等^[23]的研究结果相同。这可能与试验中流速组次偏少以及对虾个体性差异较大有关,尤其缺少高流速和低流速区域的数据点。因为低流速时对虾可持续游泳时间很长,往往超过 24 h 或者更长,而一般的水槽不能产生较高的水流。

4 结论

以可持续游泳时间作为衡量对虾可持续游泳能力的关键指标,测量不同规格对虾在不同流速下的可持续游泳时间,探讨对虾规格对其可持续游泳能力的影响。不同流速下,随着流速的增加,所有规格的对虾可持续游泳时间都呈现降低趋势,其中大规格对虾 S3 组降幅尤为明显;相同流速下,对虾规格越大,可持续游泳时间越小,且具有明显的个体差异性。采用离散系数表征个体差异性大小,3 种不同规格的对虾,离散系数随水流的增大,整体呈上升趋势,其中大规格对虾 S3 组个体差异性明显大于其余规格对虾。研究表明,规格大小可明显影响对虾的可持续游泳能力。在工厂化循环水养殖模式下,建议根据不同对虾规格的可持续游泳时间,相应地调控养殖池内水流流速和持续时间,以防对虾因游泳疲劳而死亡。□

参考文献

- [1] 梁萌青,王士稳,王家林,等. 海水养殖与低盐养殖凡纳滨对虾生长性能、酶活及 RNA/DNA 比值的差异[J]. 海洋水产研究,2008(4):69-73.
- [2] 臧维玲,戴习林,徐嘉波,等. 室内凡纳滨对虾工厂化养殖循环水调控技术与模式[J]. 水产学报,2008(5):749-757.
- [3] TU V M,ZHANG V M,ZHANG P D,et al,Critical swimming speed, tail-flip speed and physiological response to exercise fatigue in kuruma shrimp, *Marsupenaeus japonicus* [J]. Comp Biochem Physiol A Mol Integr Physiol, 2009, 153(2):120-124.
- [4] 桂福坤,王萍,吴常文. 适应条件对鱼类续航游泳能力的影响[J]. 水产学报,2010,34(8):1227-1235.
- [5] 刘慧杰,王从锋,刘德富,等. 不同运动状态下鳊幼鱼的游泳特性研究[J]. 南方水产科学,2017,13(2):85-92.
- [6] 曹平. 基于鱼类游泳行为特性的鱼道水力学研究[D]. 北京:中国水利水电科学研究院,2018.
- [7] DRUCKER E G. The use of gait transition speed in comparative studies of fish locomotion[J]. Am Zool,1996,36(6):555-566.
- [8] SOLIS-IBARRA R, RENDON-RODRIGUEZ S. Laboratory observations on displacement speed of the white shrimp *Penaeus vannamei* (Crustacea:Decapoda) [J]. Marine Ecology-progress Series,1994,103:309-310.
- [9] ZHANG P D,ZHANG X M,LI J,et al. Swimming ability and physiological response to swimming fatigue in whiteleg shrimp, *Litopenaeus vannamei* [J]. Comparative Biochemistry & Physiology Part A Molecular & Integrative Physiology, 2006, 145(1):26-32.
- [10] ZHANG P D,ZHANG X M,LI J,et al,The effects of temperature and salinity on the swimming ability of whiteleg shrimp, *Litopenaeus vannamei* [J]. Comparative Biochemistry & Physiology Part A Molecular & Integrative Physiology, 2007, 147(1):64-69.
- [11] 董瀛,刘威,桂福坤,等. 应用于工厂化养殖的凡纳滨对虾耐流性研究[J]. 渔业现代化,2018,45(6):32-37.
- [12] 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.
- [13] 王克行. 南美白对虾工厂化养殖技术(1) [J]. 齐鲁渔业,2003,20(1):47-48.
- [14] 赵晨. 大菱鲆工厂化循环水养殖与流水养殖经济效益比较研究[D]. 上海:上海海洋大学,2015.
- [15] 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.
- [16] 金志军,陈小龙,王从锋,等. 应用于鱼道设计的马口鱼 (*Opsariichthys bidens*) 游泳能力 [J]. 生态学杂志,2017,36(9):2678-2684.
- [17] 于晓明. 三种对虾游泳能力及其游泳生理的比较实验研究 [D]. 青岛:中国海洋大学,2009.
- [18] 段妍. 凡纳滨对虾游泳行为生理生态学实验研究 [D]. 青岛:中国海洋大学,2012.
- [19] 赵乐,张清靖,李宏伟,等. 循环水养殖系统管式射流集污特性试验研究[J]. 渔业现代化,2016,43(4):16-21.
- [20] OJANGUREN A F,BRANA F. Effects of size and morphology on swimming performance in juvenile brown trout (*Salmo trutta* L.) [J]. Ecology of Freshwater Fish,2003,12(4):241-246.
- [21] 王树青,梁丙臣. 海洋工程波浪力学 [M]. 青岛:中国海洋大学,2013.
- [22] TSUKAMOTO K,KAJIHARA T,NISHIWAKI M. Swimming ability of fish [J]. Nippon Suisan Gakkaishi, 1975, 41(2):167-174.
- [23] YU X M,ZHANG X M,ZHANG P D,et al. Swimming ability and physiological response to swimming fatigue in kuruma shrimp, *Marsupenaeus japonicus* [J]. African Journal of Biotechnology,2009,8(7):1316-1321.

Comparative study on swimming ability of *Litopenaeus vannamei* of various sizes

WANG Ping, CHEN Kailin, GUI Fukun, FENG Dejun

(National Engineering Research Center for Marine Aquaculture,
Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, Zhejiang, China)

Abstract: The study on swimming ability of shrimp is of great significance to the regulation of flow velocity and duration in the industrial recirculating aquaculture system. In this study, the swimming time of 3 sizes [S1 (5.87 ± 0.53) g, S2 (10.12 ± 0.62) g and S3 (14.28 ± 0.12) g] of *Litopenaeus vannamei* was measured in circulating flume at 6 kinds of flow velocity (29.4, 32.9, 37.5, 41.2, 44.3 and 50.3 cm/s), and taken as the index to measure the swimming ability of *Litopenaeus vannamei*. The results showed that with the increase of flow velocity, the swimming time of all sizes of shrimp showed a decreasing trend, and the decrement increased with the increase of the size. Under the same flow velocity, the larger the shrimp size, the shorter the swimming time, with obvious individual variation; the coefficient of variation was used to characterize the individual variation. The coefficient of variation showed an overall upward trend with the increase of flow velocity for all the 3 sizes of shrimp. Among them, the individual variation of shrimp of S3 was obviously greater than that of shrimp of other sizes; the shrimp size basically has no effect on the selection of the mathematical fitting model of average swimming time -flow velocity, and the logarithmic model fitting coefficient of the three sizes of shrimp is the highest. The results can provide a reference for the regulation of flow velocity for shrimps of variable sizes in industrial recirculating aquaculture system.

Key words: *Litopenaeus vannamei*; industrial aquaculture; flow control; swimming ability