

DOI: 10.12264/JFSC2024-0025

流速对卵形鲳鲹游泳行为及运动生理的影响

张静^{1,2}, 胡长圣¹, 刘前¹, 戴佳玥¹, 王学锋^{1,2}, 汤保贵^{1,2}

1. 广东海洋大学水产学院, 广东 湛江 524088;

2. 广东省水产经济动物病原生物学及流行病学重点实验室, 广东 湛江 524088

摘要: 卵形鲳鲹(*Trachinotus ovatus*)是发展深远海养殖的重要可选品种之一。为了初步了解其游泳能力及其应对流速改变的生理生化调节机制, 在(26.99±0.70) °C的条件下, 采用泳道呼吸仪, 选取了小[体长(4.06±0.43) cm, 体重(2.61±0.79) g]、大[体长(11.06±0.70) cm, 体重(56.09±9.99) g]两种规格的卵形鲳鲹进行游泳能力测试实验, 分别测定了其游泳行为、呼吸代谢、生理生化指标。结果表明: 实验测得小、大规格卵形鲳鲹的感应流速分别为(3.90±0.64)和(0.96±0.13) BL/s; 临界游泳速度分别为(91.83±10.97)和(99.78±12.66) cm/s, 暴发游泳速度分别为 112.20 cm/s 和 114.25 cm/s, 两种规格卵形鲳鲹的暴发能力相当。两种规格卵形鲳鲹的摆尾频率与流速均呈显著线性正相关关系。静止耗氧率分别为(899±111) mg/(kg·h)和(525±95) mg/(kg·h), 均高于 20%、40%和 60% U_{crit} 流速组的运动耗氧率; 最小 COT 均出现在 60% U_{crit} 流速组; 肌肉、肝脏和血液中乳酸含量的最低值也出现在 60% U_{crit} 流速组。推荐卵形鲳鲹鱼苗深水网箱养殖的适应流速控制在 1.0 BL/s 以内; 养殖流速不宜超过 100 cm/s; 最佳流速在 54–60 cm/s。

关键词: 卵形鲳鲹; 游泳行为; 流速; 耗氧率; 运动生理

中图分类号: S917

文献标志码: A

文章编号: 1005–8737–(2024)04–0381–10

近年来, 随着经济社会发展, 我国居民对海水产品的需求刚性增加, 但目前近海养殖容量趋于饱和、新增空间非常有限, 捕捞产量也不断下降。为实现我国海水养殖业的持续发展, 减轻近岸养殖对海区的污染, 拓展养殖空间, 国家相继出台了关于深远海养殖的文件和意见^[1–2]。“十四五”以来, 在国家政策支持和各级政府的大力扶持下, 重力式深水网箱、桁架类深远海网箱、养殖工船 3 种深远海养殖类型都有了初步的进展, 但还不成熟^[3–4]。发展深远海养殖, 养殖装备和养殖鱼种是关键。我国现有的主要海水养殖鱼类包括军曹鱼(*Rachycentron canadum*)、鲈鱼(*Lateolabrax japonicus*)、美国红鱼(*Sciaenops ocellatus*)、大黄鱼(*Larimichthys crocea*)、石斑鱼(*Epinephelus* spp.)、

卵形鲳鲹(*Trachinotus ovatus*)等温水性鱼类和牙鲆(*Paralichthys olivaceus*)、大菱鲆(*Scophthalmus maximus*)等冷水性鱼类^[5]。其中, 卵形鲳鲹, 又称金鲳鱼, 能抵抗较强的海流, 全程可投喂人工配合饲料, 养殖周期短, 经济效益高, 冷冻保鲜和加工技术较成熟, 肉质鲜美, 深受百姓喜欢, 是我国南方网箱养殖的主要品种之一。2022 年全国卵形鲳鲹养殖产量达 24.54 万 t, 占全国海水鱼养殖总量的 12.74%, 是拓展深远海养殖空间的重要品种之一^[6]。目前, 卵形鲳鲹的深水网箱养殖一般在水深 20 m 以内的近岸海域^[7–8], 且多选择在湾内或有岛礁遮蔽的海域, 养殖环境条件较好; 但深远海养殖意味着走向更深更远的海域, 流速、风浪、无遮蔽物等环境条件会极大影响养殖鱼类和养

收稿日期: 2024-02-22; 修订日期: 2024-03-14.

基金项目: 国家重点研发计划重点专项(2022YFD2401203); 水产动物种质资源开发利用与健康评价创新团队项目(2022KCXTD013); 南方海洋科学与工程广东省实验室(湛江)项目(ZJW-2019-06).

作者简介: 张静(1977–), 女, 博士, 副教授, 研究方向为渔业生态与环境. E-mail: zjouzj@126.com

通信作者: 汤保贵, 博士, 副教授, 研究方向为鱼类养殖与遗传育种. E-mail: zjtbgt@163.com

殖装备; 鱼类被限制在一定的养殖空间内, 时刻抵抗潮流冲击, 海流流速过大不利于鱼体生长^[9], 甚至会造成鱼体死亡。虽然在近岸网箱养殖和工厂化养殖中已经积累了较多的技术和经验, 但鱼类能否适应深远海的环境并正常生长仍是需要关注的重点。因此, 了解鱼类的游泳能力及其环境适应性是深远海养殖鱼种的选择关键因素之一。

目前, 国内外对卵形鲳鲹的研究主要集中在养殖技术^[8,10]、饲料^[11-13]、基因^[13-15]、生理代谢^[16-18]等方面, 有关卵形鲳鲹养殖海区的建议流速范围虽在部分养殖技术规程中有所提及^[8,19-20], 但多为经验值, 未有相关科学论证。本研究通过设计流速梯度, 观察卵形鲳鲹应对流速的行为反应, 测定不同流速下卵形鲳鲹的耗氧率及肌肉、肝脏和血液中的乳酸、葡萄糖等指标, 旨在了解卵形鲳鲹的游泳能力、游泳行为及运动生理, 初步揭示卵形鲳鲹应对流速改变的生理生化调节机制, 为卵形鲳鲹深远海网箱养殖提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验用鱼取自广东省湛江市海思特水产养殖有限公司养殖的卵形鲳鲹, 挑选优良个体共 426 尾进行实验。实验鱼分为两种规格: 小规格(一般为标粗体长)共 195 尾, 体长(4.06 ± 0.43) cm, 体重(2.61 ± 0.79) g; 大规格(一般为网箱放养体长)共 231 尾, 体长(11.06 ± 0.70) cm, 体重(56.09 ± 9.99) g。为减轻鱼类的应激反应, 将两种规格的实验鱼分别置于 1000 L 养殖桶暂养 7 d。暂养期间, 每天早、晚各喂食一次, 暂养水温为(27.00 ± 1.50) °C, 溶解氧含量保持在 8.0 mg/L 以上, 盐度 30, 光照采用自然光。游泳测定前禁食 48 h, 实验水温为(26.99 ± 0.70) °C, 实验过程中用小水盆转运实验鱼至实验水槽中。

1.2 实验设备

采用丹麦 Loligo Systems 公司生产的大型游泳水槽 SY28060 (图 1) 进行鱼类游泳行为实验。水槽测试区规格为 40 cm×10 cm×10 cm。实验区的流场均匀稳定, 流速变化范围为 5~120 cm/s。仪器上方加装 Sony 摄像机便于记录及分析实验鱼的游泳行为。

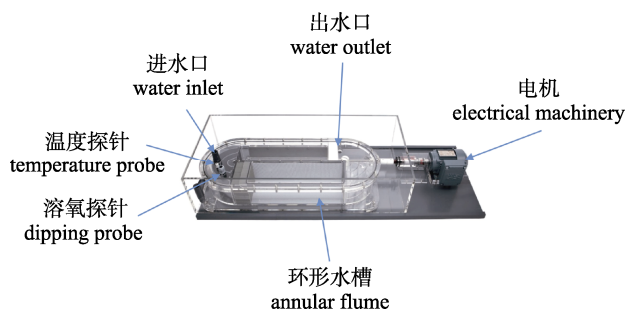


图 1 丹麦 Loligo System 泳道呼吸仪

Fig. 1 Swim tunnel respirometer of Loligo system

1.3 感应流速、临界游泳速度、暴发游泳速度的测定

每次取 1 尾实验鱼置于测试水槽中, 实验鱼头部指向水流顺流方向, 适应 1 h 且实验鱼无突然变向游泳行为后, 采用“流速递增法”: 每隔 5 s 提升 1 cm/s 的流速变化, 在调大测试水域的流速过程的同时观察鱼的游泳行为, 当实验鱼掉转头部方向发生逆流游泳时, 记录此时的流速作为实验鱼的感应流速(U_{induced})^[21]。两种规格实验鱼各测定 30 尾, 分别以 $U_{\text{induced(small)}}$ 和 $U_{\text{induced(large)}}$ 表示。

临界游泳速度(U_{crit})与暴发游泳速度(U_{burst})测定几乎相同, 均采用递增流速法^[22]。每次取 1 尾实验鱼置于水槽测试区域, 流速调至 5 cm/s 适应 1 h 后, 若水流速度每 10 min 增加约 1 BL/s (body length/second), 直至实验鱼游泳疲劳(若实验鱼贴至测试隔网处 20 s 后仍不能重新游动, 则视其为疲劳^[23]), 记录此时水流速度, 经计算得出临界游泳速度; 若水流速度每 20 s 增加约 1 BL/s, 直至实验鱼游泳疲劳, 则计算得出暴发游泳速度。两种流速、两种规格实验鱼各测定 30 尾, 分别以 $U_{\text{crit(small)}}$ 、 $U_{\text{crit(large)}}$ 和 $U_{\text{burst(small)}}$ 、 $U_{\text{burst(large)}}$ 表示。

1.4 摆尾频率的测定

挑选两种规格实验鱼各 64 尾, 根据实验获得的感应流速和临界游泳速度, 设置 20、30、40、50、60、70、80、90 cm/s 共 8 个流速实验组, 每次 1 尾, 每组测试 8 尾。使用录像机对每尾实验鱼的游泳行为持续拍摄记录 10 min, 拍摄过程中用隔板遮挡在水槽周围, 以防外界环境干扰。将录制的视频, 通过 KMPlayer 视频软件进行逐帧分析。计算得到摆尾频率(tail beat frequency, TBF)。

1.5 静止耗氧率和运动耗氧率的测定

在测定耗氧率前, 先进行预实验测定空白溶氧值以确保无其他干扰。经预实验测定空白溶氧值的变化小于1%, 可忽略不计^[24]。

根据实验测定的小规格实验鱼的绝对临界游泳速度设置了静止、20%、40%、60%、80%和100% $U_{crit(small)}$ 共6个处理组, 每组测试6尾, 每次取1尾进行测试, 适应1 h后密封水槽, 测定初始溶解氧值, 然后分别提速至预设的目标流速, 进行6次溶解氧测定(分别在第10、20、30、40、50和60分钟), 并计算静止耗氧率(standard metabolic rate, SMR)和运动耗氧率(activity metabolic rate, AMR)[mg/(kg·h)]:

$$SMR = \Delta O_2 \times Q / M \quad (1)$$

$$AMR = Q \frac{d(DO)}{dt} / M \quad (2)$$

式中, ΔO_2 为呼吸室与空白溶氧的差值[mg/(L·h)]; Q 为游泳装置密封区的体积(L, 本实验为10 L); M 为实验鱼体重(kg); $d(DO)/dt$ 指在目标流速下溶解氧随时间变化的斜率[mg/(L·h)]。

大规格实验鱼的静止耗氧率和运动耗氧率测定方法及尾数与小规格实验鱼相同, 只是绝对临界游泳速度改为 $U_{crit(large)}$ 。

1.6 单位距离耗能的计算

单位距离耗能(cost of transport, COT)[mg/(kg·m)]的计算公式为:

$$COT = AMR / U \quad (3)$$

式中, U 为实验鱼的游泳速度(m/h)。

1.7 生理生化指标的取样与测定

取大规格实验鱼进行生理生化指标的取样和测定。设置20%、40%、60%、80%和100% $U_{crit(large)}$ 共5个处理组和1个静止(0 cm/s)对照组, 每组测定6尾鱼, 每次测定1尾。将每尾实验鱼在目标流速中运动20 min后立即将鱼取出, 转入有丁香酚麻醉液(100 mg/L)的水桶中进行麻醉, 待鱼被完全麻醉后立即测量体长并称重, 随后立即抽取血液(1 mL), 剪取尾部白肌和肝组织。其中, 血液样品用含有肝素钠的EP管收集, 在4℃下静置2 h, 低温离心20 min(4℃, 4000 r/min)后收集上层血浆(0.3~0.5 mL)。将血浆、肝脏和肌肉样品均放入液氮罐中并转置于-80℃超低温冰箱中保存,

乳酸和葡萄糖含量均由上海酶联生物科技有限公司采用试剂盒测定。

1.8 数据分析

感应流速、临界游泳速度和暴发游泳速度的统计采用S-W检验进行正态性检验后, 各速度的测定值以平均值±标准差($\bar{x} \pm SD$)表示; 生理生化指标数据经正态性检验和方差齐性检验满足条件后进行单因素方差分析(one-way ANOVA)法进行分析, 若结果出现组间差异, 则用LSD多重比较法对各组数据的差异进行显著性检验, 显著性水平为 $P < 0.05$; 对摆尾频率、耗氧率、单位距离耗能(COT)与流速的关系进行线性和非线性曲线拟合分析。所有数据采用Excel 2007和SPSS 26.0统计软件进行处理, 图像使用Origin 2019绘制。

2 结果与分析

2.1 感应流速、临界游泳速度和暴发游泳速度

实验获得的卵形鲳鲹的感应流速、临界游泳速度和暴发游泳速度的统计结果如表1所示。

除绝对暴发游泳速度外, 两种规格卵形鲳鲹的感应流速、临界游泳速度和相对暴发游泳速度均符合正态分布(S-W检验, $P > 0.05$); 而两种规格卵形鲳鲹的绝对暴发游泳速度均不符合正态性($P < 0.05$), 原因是在实验过程中, 有部分实验鱼的暴发游泳速度超过了测定装置的最高速度测量值(120 cm/s), 记录为 > 120 cm/s, 因此, 绝对暴发游泳速度用中位数表示。

2.2 卵形鲳鲹的摆尾频率

两种规格卵形鲳鲹的摆尾频率与绝对流速($U_{absolute}$)、相对流速($U_{relative}$)的关系如图2所示。可见, 摆尾频率与流速均呈显著的线性正相关关系, 相同绝对流速下小规格卵形鲳鲹的摆尾频率极显著高于大规格卵形鲳鲹的摆尾频率($P < 0.01$)。拟合的线性方程分别为:

$$TBF_{small} = 10.52 U_{absolute} + 99.076 \quad (R^2 = 0.9392, P < 0.05);$$

$$TBF_{large} = 8.0037 U_{absolute} - 31.483 \quad (R^2 = 0.9706, P < 0.05);$$

$$TBF_{small} = 0.7013 U_{relative} + 1.6513 \quad (R^2 = 0.9392, P < 0.05);$$

$$TBF_{large} = 1.3339 U_{relative} - 0.9706 \quad (R^2 = 0.9706, P < 0.05)。$$

表 1 两种规格卵形鲳鲹的感应流速、临界游泳速度和暴发游泳速度
Tab. 1 Induced velocity, critical swimming speed and burst swimming speed of *Trachinotus ovatus*

项目 item			S-W 检验(significance) S-W test (significance)	范围 range	$\mu\pm\sigma$
感应流速 induced velocity	小规格 small scale	绝对 absolute/(cm/s)	0.133	13.00–20.00	15.67±1.85
		相对 relative/(BL/s)	0.103	2.86–5.00	3.90±0.64
	大规格 large scale	绝对 absolute/(cm/s)	0.094	8.00–13.00	10.43±1.33
		相对 relative/(BL/s)	0.776	2.86–5.00	0.96±0.13
临界游泳速度 critical swimming speed	小规格 small scale	绝对 absolute/(cm/s)	0.234	75.08–114.83	91.83±10.97
		相对 relative/(BL/s)	0.596	17.77–31.04	23.60±3.35
	大规格 large scale	绝对 absolute/(cm/s)	0.067	80.41–120.75	99.78±12.66
		相对 relative/(BL/s)	0.145	6.81–11.30	9.00±1.30
暴发游泳速度 burst swimming speed	小规格 small scale	绝对 absolute/(cm/s)	0.001	80.4–124.00	112.20
		相对 relative/(BL/s)	0.182	19.23–38.44	26.50±4.32
	大规格 large scale	绝对 absolute/(cm/s)	0.001	86.00–125.00	114.25
		相对 relative/(BL/s)	0.230	7.59–13.59	10.17±1.59

注：绝对暴发游泳速度以中位数表示，其余速度以平均值±标准差表示。
Note: Median is used to represent absolute burst swimming speed, other kinds of speed are represented by $\bar{x}\pm\text{SD}$.

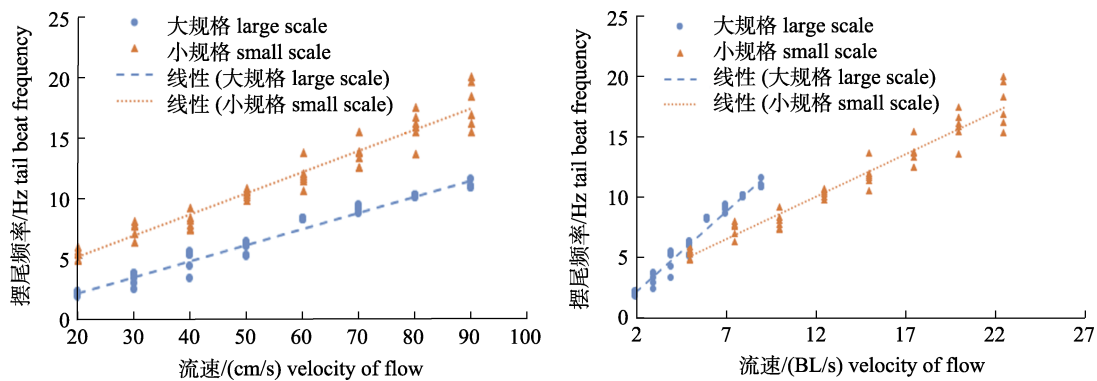


图 2 两种规格卵形鲳鲹摆尾频率与流速的关系
Fig. 2 Relationship between tail beat frequency and velocity of two size of *Trachinotus ovatus*

2.3 耗氧率及其单位距离耗能

实验测得小、大规格卵形鲳鲹的静止耗氧率 (SMR) 分别为 (899±111) mg/(kg·h)、(525±95) mg/(kg·h)。不同流速下，两种规格卵形鲳鲹的运动耗氧率随流速的增大均与相对流速呈幂函数递增关系(图 3)，其方程分别为：

$$\text{AMR}_{\text{small}}=465+0.28 U_{\text{relative}}^{2.504} \quad (R^2=0.997, P<0.05);$$

$$\text{AMR}_{\text{large}}=294+0.508 U_{\text{relative}}^{3.015} \quad (R^2=0.999, P<0.05)。$$

两种规格卵形鲳鲹在不同流速条件下的单位距离耗能 COT 的拟合曲线均呈 U 型(图 4)，拟合方程分别为：

$$\text{COT}_{\text{small}}=193.89 U_{\text{relative}}^{-1}+0.12 U_{\text{relative}}^{1.50} \quad (R^2=0.996, P<0.05);$$

$$\text{COT}_{\text{large}}=48.91 U_{\text{relative}}^{-1}+0.08 U_{\text{relative}}^{2.01} \quad (R^2=0.999, P<0.05)。$$

最小 COT 均出现在约 60% U_{crit} 流速下。

2.4 流速对卵形鲳鲹生理生化的影响

实验测得不同流速下卵形鲳鲹肌肉、肝脏和血液中乳酸和葡萄糖的含量如表 2 所示。结果表明，随着流速的增加，3 种组织中乳酸的含量均大致经历了先升高后降低再升高的变化趋势，即由静水至 40% $U_{\text{crit(large)}}$ 流速时，乳酸含量是先升高的，至 60% $U_{\text{crit(large)}}$ 流速时乳酸含量迅速降低，流速继续增加至 100% $U_{\text{crit(large)}}$ 时乳酸含量再次

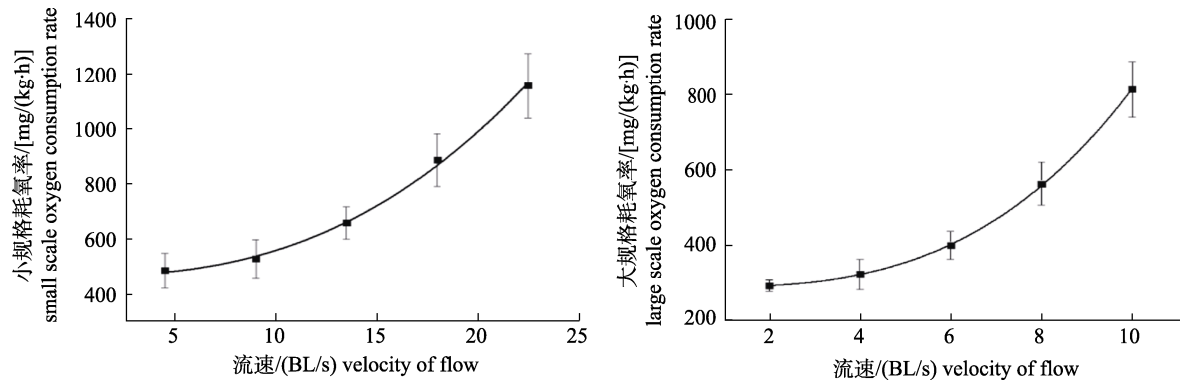


图 3 两种规格卵形鲳鲹在不同流速下的耗氧率

Fig. 3 Activity metabolic rate (AMR) of two size of *Trachinotus ovatus* at different velocities

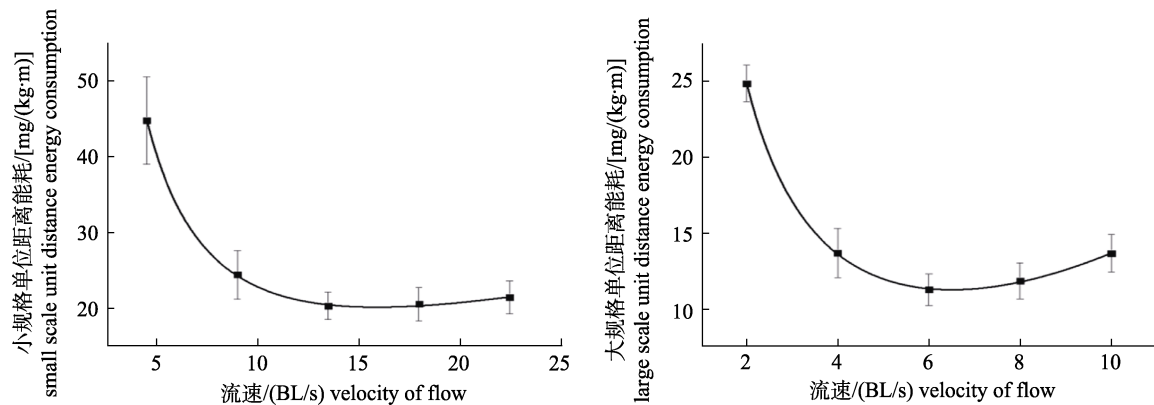


图 4 两种规格卵形鲳鲹在不同流速下的单位距离能耗(COT)

Fig. 4 Cost of transport (COT) of two size of *Trachinotus ovatus* at different velocities

表 2 不同流速下卵形鲳鲹肌肉、肝脏和血液中各代谢物的含量

Tab. 2 Contents of metabolite in muscle, liver and blood of *Trachinotus ovatus* at different velocities

组织 tissues		游泳速度/cm/s swimming speed					
		control	20% $U_{crit(large)}$	40% $U_{crit(large)}$	60% $U_{crit(large)}$	80% $U_{crit(large)}$	100% $U_{crit(large)}$
肌肉 white muscle	乳酸 lactate	412.90±8.04 ^c	531.53±12.58 ^a	550.13±12.16 ^a	439.36±5.58 ^b	445.56±12.50 ^b	543.51±9.99 ^a
	葡萄糖 glycogen	1.50±0.00 ^d	2.02±0.02 ^a	1.84±0.02 ^b	1.74±0.03 ^c	2.04±0.04 ^a	2.00±0.02 ^a
肝脏 liver	乳酸 lactate	447.21±2.11 ^c	439.77±8.25 ^c	569.97±6.10 ^b	507.55±8.18 ^d	593.94±9.28 ^a	537.73±7.32 ^c
	葡萄糖 glycogen	1.90±0.00 ^c	2.09±0.04 ^b	2.15±0.03 ^b	2.31±0.02 ^a	2.36±0.04 ^a	1.97±0.04 ^c
血液 blood	乳酸 lactate	482.76±5.10 ^d	542.69±2.11 ^c	572.03±8.25 ^b	450.10±9.28 ^c	587.74±2.02 ^a	598.48±3.56 ^a
	葡萄糖 glycogen	18.21±0.30 ^d	18.54±0.38 ^d	20.61±0.38 ^b	19.54±0.02 ^c	19.83±0.02 ^c	21.48±0.32 ^a

注: 同一行上标英文字母不同的数值间差异显著($P<0.05$).

Note: There is a significant difference between values with different superscripts in the same line($P<0.05$).

升高并维持一个较高的水平。血液中葡萄糖的含量要远远高于肌肉和肝脏中葡萄糖的含量,而肌肉和肝脏中葡萄糖的含量相差不大。

3 讨论

3.1 卵形鲳鲹的游泳能力

鱼类生活在流水区域中因水流刺激鱼体感觉

器官使其产生趋流性,为应对水流流场变化,鱼类依据不同环境情况调节游泳时的方向、速度,保持逆流游泳状态或持久地停留于某一固定的位置^[25-26]。感应流速是鱼类的趋流性指标之一,是鱼类对水流产生响应的最低游泳速度^[27]。实验测得大规格卵形鲳鲹的相对感应流速约为 0.96 BL/s,低于同为海水鱼的黑鲷(*Acanthopagrus schlegelii*)

(1.4 BL/s)^[28], 这可能是由于卵形鲳鲹为暖水性中上层洄游鱼类, 而黑鲷为浅海底层鱼类, 不作远距离洄游, 故卵形鲳鲹的敏感程度较低可能与其生活在相对复杂的海洋环境有关^[29]。而小规格卵形鲳鲹的相对感应流速约为 3.90 BL/s, 远高于大规格卵形鲳鲹, 是因为随着鱼体的生长, 其鱼体的侧线系统发育更完善, 获取水环境中的信息敏感性更强^[29-30]。根据桂福坤等^[31]对黑鲷的研究, 卵形鲳鲹的适应流速宜控制在 1.0 BL/s 以内以避免测试前鱼类过多的能量损失。

临界游泳速度是鱼类有氧运动和游泳能力的重要参考指标^[32-33], 对鱼体的各项生理活动有重要意义^[33-35]。实验测得大规格卵形鲳鲹[体长(11.06±0.70) cm]的临界游泳速度为(99.78±12.66) cm/s, 高于相近规格黑鲷[体长(12.38±0.69) cm, 0.76 cm/s]和大黄鱼^[36][体长(14.13±1.24) cm, 0.42 cm/s]的临界游泳速度; 柴若愚等^[37]研究证明体长差异不显著的美国红鱼(80 cm/s)比黑鲷(60 cm/s)具有更强的持续游泳能力。因此, 可以得出几种海水鱼的持续游泳能力为卵形鲳鲹>美国红鱼>黑鲷>大黄鱼。而海南省地方标准卵形鲳鲹深远海网箱养殖技术规程中建议卵形鲳鲹的养殖海域流速小于 100.00 cm/s 是合适的^[20]。

暴发游泳速度指鱼类在短时间内可以达到的最大速度, 是鱼类在短时间进行无氧运动的重要指标, 可通过厌氧代谢得到较大能量^[38], 反应了鱼类在极短时间内逃避敌害和越过水流障碍的能力^[39], 也常在鱼类捕食、受到刺激后的应激过程中体现^[40]。从绝对流速的角度看, 两种规格卵形鲳鲹的暴发能力相当, 分别为 112.20 cm/s 和 114.25 cm/s。可见, 在卵形鲳鲹生长过程中其暴发能力并没有较大的改变。有研究表明, 鱼的暴发游泳速度一般大于 10 BL/s^[38], 本研究实验结果与其一致。汤保贵等^[28]研究相近规格黑鲷的暴发游泳速度约为 114 cm/s, 可见, 卵形鲳鲹和黑鲷的短时应激能力相当。

在鱼体前进过程中尾鳍对鱼体游泳行为产生的推力最大, 通常用摆尾频率作为衡量鱼类运动强度的指标^[26]。鱼类摆尾频率越快证明鱼类活动越

剧烈, 其游泳速度相应较高, 能量消耗会增大^[35]。摆尾频率与流速的拟合斜率反映了鱼体运动能力, 斜率值越小说明运动过程中单位鱼体耗能越少, 其能效就越高^[41]。实验测得小、大规格卵形鲳鲹的摆尾频率与相对流速的拟合方程斜率分别为 0.7013 和 1.3339, 说明小规格卵形鲳鲹单位鱼体耗能能效比大规格卵形鲳鲹要高很多, 接近 2 倍。可见, 尽管采用了相对流速, 但在同种鱼的不同规格中, 其单位鱼体耗能能效也会表现出很大的差别。

3.2 卵形鲳鲹的运动生理

鱼类在不同生长阶段的代谢活动是不同的, 幼鱼时期的单位体重在单位时间内耗氧率相对较高, 而成鱼的相对较低^[42-43]。实验测得小、大规格卵形鲳鲹的静止耗氧率分别约为 899 和 525 mg/(kg·h), 均高于 20%、40%和 60% U_{crit} 流速组的运动耗氧率, 而 Farrell 等^[44]也观察到虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)最低耗氧率大约发生在 30% U_{crit} 处。相近流速下小规格卵形鲳鲹的运动耗氧率明显高于大规格卵形鲳鲹的运动耗氧率, 实验结果符合同一物种体重增加、耗氧量增加而耗氧率相对减小的规律^[45-47]。单位距离能耗常用来估算运动过程中的效率以确定最佳运动速度^[48]。实验中随着游泳速度增大, 两种规格卵形鲳鲹的 COT 值呈先降低后上升的“U”型趋势, 研究结果与鲫(*Oncorhynchus mykiss*)^[49]、瓦氏黄颡鱼(*Pelteobagrus vachelli*)^[50]、鳊(*Parabramis pekinensis*)^[51]、虹鳟^[52]等的结果一致; 两种规格卵形鲳鲹的最小 COT 均出现在 60% U_{crit} 流速组。同样的结果还出现在乳酸的变化中, 随着流速的增加, 3 种组织中乳酸的含量均大致经历了先升高后降低再升高的变化趋势, 最低值也出现在 60% U_{crit} 流速时。由上述分析可知, 流速卵形鲳鲹最大有氧功率输出约在 60% U_{crit} 处; 同时有研究表明黑鲷的约在 57%~65% U_{crit} 处^[28]、三文鱼的约在 80% U_{crit} 处^[53]。

综上, 根据实验结果, 推荐卵形鲳鲹鱼苗深水网箱养殖的适应流速控制在 1.0 BL/s 以内; 养殖流速不宜超过 100 cm/s; 最佳流速在 54~60 cm/s。几种海水鱼的持续游泳能力为卵形鲳鲹>美国红

鱼>黑鲷>大黄鱼。

参考文献:

- [1] National Food and Strategic Reserves Administration. The No. 1 Central Document of 2023: Opinions of the Central Committee of the Communist Party of China and the State Council on the key work of comprehensively promoting rural revitalization in 2023[EB/OL]. (2023-01-02)[2024-02-21]. http://www.lswz.gov.cn/html/xinwen/2023-02/13/content_273655.shtml. [国家粮食和物资储备局. 2023 年中央一号文件: 中共中央 国务院关于做好 2023 年全面推进乡村振兴重点工作的意见[EB/OL]. (2023-01-02)[2024-04-21]. http://www.lswz.gov.cn/html/xinwen/2023-02/13/content_273655.shtml.]
- [2] Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Ministry of Industry and Information Technology, National Development and Reform Commission, et al. Opinions of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs and eight other departments on accelerating the development of deep and distant sea aquaculture[EB/OL]. (2023-06-12)[2024-04-21]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202306/content_6886007.htm. [农业农村部, 工业和信息化部, 国家发展和改革委员会, 等. 农业农村部等八部门关于加快推进深远海养殖发展的意见[EB/OL]. (2023-06-12)[2024-04-21]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202306/content_6886007.htm.]
- [3] Xu H, Liu H, Huang W C. Advances and outlook of offshore aquaculture equipment technology[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2023, 32(5): 893-902. [徐皓, 刘晃, 黄文超. 深远海设施养殖装备技术进展与展望[J]. 上海海洋大学学报, 2023, 32(5): 893-902.]
- [4] Wu K K, Li Q S, Huang H P, et al. Deep-sea aquaculture progress and development measures in China[J]. Ocean Development and Management, 2022, 39(10): 11-18. [吴侃侃, 李青生, 黄海萍, 等. 我国深远海养殖现状及发展对策[J]. 海洋开发与管理, 2022, 39(10): 11-18.]
- [5] Xu H, Liu H, Xu Y F. Current situation and prospect of China's far-reaching marine aquaculture[J]. China Fisheries, 2021, 547(6): 36-39. [徐皓, 刘晃, 徐琰斐. 我国深远海养殖发展现状与展望[J]. 中国水产, 2021, 547(6): 36-39.]
- [6] Chinese Academy of Fishery Sciences. Zhang Dianchang, deputy director and researcher of the South China Sea Institute: *Trachinotus ovatus*, the first choice for deep-sea aquaculture[EB/OL]. (2023-10-09)[2024-04-21]. <https://www.southchinafish.ac.cn/info/1075/24656.htm>. [中国水产科学研究院. 南海所副所长、研究员张殿昌: 卵形鲳鲹, 深远海养殖之首选[EB/OL]. (2023-10-09)[2024-04-21]. <https://www.southchinafish.ac.cn/info/1075/24656.htm>.]
- [7] Li Y H, Peng S F, Zhou Q Y, et al. Research on deep-water net cage aquaculture technology of *Trachinotus ovatus*[J]. Scientific Fish Farming, 2014(5): 44-45. [李样红, 彭树锋, 周全耀, 等. 卵形鲳鲹深水网箱养殖技术研究[J]. 科学养鱼, 2014(5): 44-45.]
- [8] Liang Q C, Dai J H. Deep water anti wind and wave net cage aquaculture technology for *Trachinotus ovatus*[J]. Scientific Fish Farming, 2020(5): 61-62. [梁前才, 戴建洪. 深水抗风浪网箱养殖卵形鲳鲹技术[J]. 科学养鱼, 2020(5): 61-62.]
- [9] Ying Z W, Li Y K, Bao Y Y, et al. Swimming patterns of juvenile *Tachypleus tridentatus* at different water flow velocities[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2023, 30(2): 169-177. [应紫薇, 李银康, 鲍虞园, 等. 不同流速下中国鲎稚鲎游泳模式研究[J]. 中国水产科学, 2023, 30(2): 169-177.]
- [10] Yu W, Li X, Lin H Z, et al. Effects of different densities of golden pompano *Trachinotus ovatus* on economic and ecological benefits in polyculture of Pacific white leg shrimp *Litopenaeus vannamei* with golden pompano[J]. Chinese Journal of Fisheries, 2021, 34(2): 86-93. [虞为, 李欣, 林黑着, 等. 不同密度的卵形鲳鲹与凡纳滨对虾混养效果研究[J]. 水产学杂志, 2021, 34(2): 86-93.]
- [11] Ding Z R, Chen F, Zhang G R, et al. Evaluation of high efficiency and low fish meal diets for golden pompano (*Trachinotus ovatus*) in deep-sea cage culture[J]. Progress in Fishery Sciences, 2023, 44(5): 45-55. [丁志荣, 陈芳, 张关荣, 等. 卵形鲳鲹高效低鱼粉配合饲料在深海网箱养殖中的应用效果评估[J]. 渔业科学进展, 2023, 44(5): 45-55.]
- [12] Yue R, Huang X L, Tan X H, et al. Effects of enzymolytic chicken hemoglobin meal replacing fish meal on growth performance, antioxidant capacity, immunity and intestinal flora of juvenile *Trachinotus ovatus*[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2023, 35(3): 1910-1925. [岳茹, 黄小林, 谭小红, 等. 酶解鸡血球蛋白粉替代鱼粉对卵形鲳鲹(*Trachinotus ovatus*)幼鱼生长性能、抗氧化能力、免疫力及肠道菌群的影响[J]. 动物营养学报, 2023, 35(3): 1910-1925.]
- [13] Zhong W Q, Yu J, Li Y X, et al. Effects of dietary fat levels on muscle quality, antioxidant capacity and expression of related genes of golden pompano (*Trachinotus ovatus*)[J]. Feed Industry, 2023, 44(4): 98-106. [钟宛清, 余杰, 李苡萱, 等. 饲料脂肪水平对卵形鲳鲹肌肉品质、抗氧化能力及相关基因表达的影响[J]. 饲料工业, 2023, 44(4): 98-106.]
- [14] Mao M Q, Lan Z Y, Huang F P, et al. Cloning, expression analysis, and subcellular localization of the TLR13 gene of golden pompano (*Trachinotus ovatus*)[J]. Progress in Fishery Sciences, 2023, 44(3): 85-96. [毛美琴, 蓝桢宇, 黄凤萍, 等. 卵形鲳鲹 TLR13 基因的克隆、表达分析和亚细胞定位研究[J]. 渔业科学进展, 2023, 44(3): 85-96.]
- [15] Bian Z C, Chen J A, Wang Y D, et al. Transcriptomic analysis of the spleen of *Trachinotus ovatus* infected with *Streptococcus agalactiae*[J]. Biological Chemical Engineering, 2023, 9(3): 17-21, 25. [卞泽昌, 陈健安, 王亚丹, 等. 无乳链球菌感染卵形鲳鲹脾脏转录组学分析[J]. 生物化工, 2023, 9(3): 17-21, 25.]
- [16] Liu J X, Guo H Y, Zhu K C, et al. Effects of cysteine addition to low-fishmeal diets on metabolism of lipid and

- protein in juvenile *Trachinotus ovatus*[J]. South China Fisheries Science, 2023, 19(4): 116-125. [刘佳兴, 郭华阳, 朱克诚, 等. 低鱼粉饮食中添加半胱氨酸对卵形鲳鲹幼鱼脂质和蛋白质代谢的影响[J]. 南方水产科学, 2023, 19(4): 116-125.]
- [17] Wu Y, Huang Q Q, Yu W, et al. Effects of dietary supplementation of *Clostridium butyricum* on growth performance, serum biochemical indexes and intestinal flora and short-chain fatty acid contents of juvenile *Trachinotus ovatus*[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2023, 35(9): 5904-5918. [吴杨, 黄倩倩, 虞为, 等. 饲料中添加丁酸梭菌对卵形鲳鲹幼鱼生长性能、血清生化指标及肠道菌群和短链脂肪酸含量的影响[J]. 动物营养学报, 2023, 35(9): 5904-5918.]
- [18] Liu J X. Effects of exogenous taurine and cysteine on growth, metabolism, antioxidation and immune function of juvenile *Trachinotus ovatus*[D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2023. [刘佳兴. 外源牛磺酸、半胱氨酸对卵形鲳鲹幼鱼生长、代谢、抗氧化及免疫功能的影响[D]. 大连: 大连海洋大学, 2023.]
- [19] Anti wind and wave net cage aquaculture technology (cultivation of *Rachycentron canadum* and *Trachinotus ovatus*)[J]. Marine and Fisheries, 2020(6): 87-88. [抗风浪网箱养殖技术(军曹鱼、卵形鲳鲹养殖)[J]. 海洋与渔业, 2020(6): 87-88.]
- [20] Local Standards in Hainan Province. DB46/T195-2023 Technical regulations for aquaculture of Oval Pomfret in deep sea cages[S]. Haikou: Hainan Provincial Administration for Market Regulation, 2023. [海南省地方标准. DB46/T195-2023 卵形鲳鲹深远海网箱养殖技术规程[S]. 海口: 海南省市场监督管理局, 2023.]
- [21] Cai L, Wang W Y, Wang H L, et al. Response of induced flow speed to fish body length and its application in flow design of fish passage facilities[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(2): 176-181. [蔡露, 王伟营, 王海龙, 等. 鱼感应流速对体长的响应及在过鱼设施流速设计中的应用[J]. 农业工程学报, 2018, 34(2): 176-181.]
- [22] 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.
- [23] Tu Z Y, Yuan X, Wang C F, et al. Swimming capability and activity metabolism of subadult *Schizothorax macropogon*[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2012, 36(4): 682-688. [涂志英, 袁喜, 王从锋, 等. 亚成体巨须裂腹鱼游泳能力及活动代谢研究[J]. 水生生物学报, 2012, 36(4): 682-688.]
- [24] Steinhausen M F, Steffensen J F, Andersen N G. Tail beat frequency as a predictor of swimming speed and oxygen consumption of saithe (*Pollachius virens*) and whiting (*Merlangius merlangus*) during forced swimming[J]. Marine Biology, 2005, 148(1): 197-204.
- [25] He D R, Cai H C. Fish ethology[M]. Xiamen: Xiamen University Press, 1998: 5-8. [何大仁, 蔡厚才. 鱼类行为学[M]. 厦门: 厦门大学出版社, 1998: 5-8.]
- [26] Zhong J X, Zhang Q, Li X R, et al. Effects of water velocity on the swimming behavior of *Anabarrilius grahami*[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(3): 655-660. [钟金鑫, 张倩, 李小荣, 等. 不同流速对鳊(鱼良)白鱼游泳行为的影响[J]. 生态学杂志, 2013, 32(3): 655-660.]
- [27] Li Y X, Zhu Z Q, Hou Y Q, et al. Swimming ability of *Schizopygopsis malacanthus* from Dadu River[J]. Journal of Hydroecology, 2022, 43(3): 121-127. [李阳希, 朱正强, 侯轶群, 等. 大渡河软刺裸裂尻鱼(*Schizopygopsis malacanthus*)游泳能力研究[J]. 水生态学杂志, 2022, 43(3): 121-127.]
- [28] Tang B G, Chen X C, Hu C S, et al. Flow velocity effects on swimming behavior and exercise physiology of juvenile *Acanthopagrus schlegelii*[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2023, 47(12): 1993-2002. [汤保贵, 陈秀灿, 胡长圣, 等. 流速对黑鲷幼鱼游泳行为及运动生理的影响[J]. 水生生物学报, 2023, 47(12): 1993-2002.]
- [29] Wang X C, Lyu B B, Xing J J, et al. Induced flow speed and its relationship to body length of two *Schizothoracinae* fishes in upper reaches of Yellow River[J]. South China Fisheries Science, 2020, 16(4): 47-53. [王晓臣, 吕彬彬, 邢娟娟, 等. 黄河上游2种裂腹鱼感应流速及其与体长的关系[J]. 南方水产科学, 2020, 16(4): 47-53.]
- [30] Qi L, Yang Y, Wang Y, et al. Fish behavior characteristics in response to change of hydrodynamic environment[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2012, 40(4): 438-445. [齐亮, 杨宇, 王悦, 等. 鱼类对水动力环境变化的行为响应特征[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012, 40(4): 438-445.]
- [31] Gui F K, Wang P, Wu C W. Influence of acclimation conditions on fish's sustainable swimming performance[J]. Journal of Fisheries of China, 2010, 34(8): 1227-1235. [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.]
- [32] Yu Y, Xie M Y. Research status of evaluation indicators and measurement methods for fish swimming ability[J]. Agriculture and Technology, 2021, 41(19): 116-118. [于洋, 谢明原. 鱼类游泳能力评价指标及其测定方法研究现状[J]. 农业与技术, 2021, 41(19): 116-118.]
- [33] Zeng L Q, Cao Z D, Fu S J, et al. Effect of temperature on swimming performance in juvenile southern catfish (*Silurus meridionalis*)[J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology, 2009, 153(2): 125-130.
- [34] Wang J W, Cao Z D, Fu S J. The constant acceleration swimming performance in juvenile Chinese bream (*Parabramis pekinensis*)[J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2015, 32(2): 13-17. [王健伟, 曹振东, 付世建. 鳊鱼匀加速游泳能力的研究[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2015, 32(2): 13-17.]

- [35] Ye C. Effect of flow velocity on swimming behavior and energy metabolism of *Leptobotia elongates*[D]. Chongqing: Southwest University, 2014. [叶超. 流速对长薄鳅游泳行为及运动能量代谢的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2014.]
- [36] Lou Y D, He J J, Zhu Y, et al. Study of three species of common fishes' swimming preferences[J]. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science), 2018, 37(3): 228-232, 241. [娄宇栋, 何娇娇, 竺琰, 等. 3 种常见养殖鱼类的游泳喜好研究[J]. 浙江海洋大学学报(自然科学版), 2018, 37(3): 228-232, 241.]
- [37] Chai R Y, Yin H, Huo R M, et al. Sustained swimming on the endurance time and physiological metabolism of *Acanthopagrus schlegelii* and *Sciaenops ocellatus*[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2023, 47(5): 723-731. [柴若愚, 尹恒, 霍润明, 等. 水流速度对黑鲷和美国红鱼续航游泳能力及生理代谢的影响[J]. 水生生物学报, 2023, 47(5): 723-731.]
- [38] Zheng J X, Han D J, Hu W B, et al. Fish swimming performance related to fishway design[J]. Journal of Hydroecology, 2010, 31(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[J]. 水生态学杂志, 2010, 31(5): 104-110.]
- [39] Wang P, Gui F K, Wu C W. Classification of fish swimming speed[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2010, 17(5): 1137-1146. [王萍, 桂福坤, 吴常文. 鱼类游泳速度分类方法的探讨[J]. 中国水产科学, 2010, 17(5): 1137-1146.]
- [40] 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.]
- [41] Cai L, Tu Z Y, Yuan X, et al. Swimming capability and swimming behavior of juvenile *Aristichthys nobilis*[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012, 21(S2): 89-95. [蔡露, 涂志英, 袁喜, 等. 鳊鱼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(S2): 89-95.]
- [42] Huang Y Y. Oxygen consumption of the early developmental stages of the red and the common carp (*Cyprinus carpio*), the silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) and the Chinese bream (*Parabramis pekinensis*)[J]. Current Zoology, 1975, 21(1): 78-88. [黄玉瑶. 鲤鱼、白鲢、鳊鱼的鱼苗、鱼种耗氧量的研究[J]. 动物学报, 1975, 21(1): 78-88.]
- [43] Zhang Z Y, Hu M, Wu F H. Preliminary study on the oxygen consumption of *Tilapia nilotica*[J]. Journal of Fisheries of China, 1982, 6(4): 369-378. [张中英, 胡玫, 吴福煌. 尼罗罗非鱼耗氧率的初步研究[J]. 水产学报, 1982, 6(4): 369-378.]
- [44] Farrell A P, Steffensen J F. An analysis of the energetic cost of the branchial and cardiac pumps during sustained swimming in trout[J]. Fish Physiology and Biochemistry, 1987, 4(2): 73-79.
- [45] Zhou Y H, Cao F J, Luo J, et al. Influence of temperature and body weight on oxygen consumption and ammonia excretion of *Boleophthalmus pectinirostris*[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2017, 48(2): 392-397. [周银环, 曹伏君, 罗杰, 等. 不同温度梯度和规格体重对大弹涂鱼 (*Boleophthalmus pectinirostris*) 耗氧率(R_O)和排氨率(R_N)的影响[J]. 海洋与湖沼, 2017, 48(2): 392-397.]
- [46] Xian W W, Zhu X H. Effects of temperature and body weight on standard metabolism and endogenous nitrogen excretion of mullet *Liza haematocheila* (T. et S.) [J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 2002, 32(3): 368-374. [线薇薇, 朱鑫华. 梭鱼标准代谢、内源氮排泄与体重和温度的关系[J]. 青岛海洋大学学报(自然科学版), 2002, 32(3): 368-374.]
- [47] Zhang Q, Yuan C G, Ruan C X, et al. The oxygen consumption rate of *Sebastiscus marmoratus* in different circumstances of body weight, salinity and temperature[J]. Journal of Fujian Fisheries, 2007, 29(4): 12-16. [张倩, 袁重桂, 阮成旭, 等. 褐菖鲉的耗氧率与温度、盐度和体重的关系[J]. 福建水产, 2007, 29(4): 12-16.]
- [48] Zhang S L, Zhang J B, Qiao Y, et al. Experimental study on aerobic swimming performance and behavior of *Schizothorax wangchiachii* Fang[J]. Journal of Hydroecology, 2016, 37(5): 56-62. [张沙龙, 张家波, 乔晔, 等. 短须裂腹鱼有氧游泳能力及其行为的实验研究[J]. 水生态学杂志, 2016, 37(5): 56-62.]
- [49] Zhao W W, Cao Z D, Xiao Y J, et al. The swimming capacity and energy expenditure of juvenile crucian carp *Carrasius auratus* at low temperature[J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2011, 28(1): 13-17. [赵文文, 曹振东, 肖月吉, 等. 低温条件下鲫鱼幼鱼的游泳能力及其能量消耗[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2011, 28(1): 13-17.]
- [50] Zhu Y P, Cao Z D, Fu S J. Aerobic and anaerobic metabolism in response to different swimming speed of juvenile darkbarbel catfish (*Pelteobagrus vachelli* Richardson)[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2010, 34(5): 905-912. [朱晏苹, 曹振东, 付世建. 不同游泳速度条件下瓦氏黄颡幼鱼的有氧和无氧代谢反应[J]. 水生生物学报, 2010, 34(5): 905-912.]
- [51] Yang H, Cao Z D, Fu S J. Effect of caudal amputation on swimming capacity, energy expenditure and behavior of juvenile *Parabramis pekinensis*[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2013, 37(1): 157-163. [杨晗, 曹振东, 付世建. 尾鳍缺失对鳊鱼幼鱼游泳能力、能量效率与行为的影响[J]. 水生生物学报, 2013, 37(1): 157-163.]
- [52] Nelson J, Tang Y, Boutilier R. The effects of salinity change on the exercise performance of two Atlantic cod (*Gadus morhua*) populations inhabiting different environments[J]. Journal of Experimental Biology, 1996, 199(Pt 6): 1295-1309.
- [53] Jones D R. Anaerobic exercise in teleost fish[J]. Canadian Journal of Zoology, 1982, 60(5): 1131-1134.

Effect of flow velocity on swimming behavior and exercise physiology of *Trachinotus ovatus*

ZHANG Jing^{1,2}, HU Changsheng¹, LIU Qian¹, DAI Jiayue¹, WANG Xuefeng^{1,2}, TANG Baogui^{1,2}

1. Fishery College, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China;

2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Pathogenic Biology and Epidemiology for Aquatic Economic Animals, Zhanjiang 524088, China

Abstract: *Trachinotus ovatus* is one of the important species considered for deep-sea aquaculture due to its unique characteristics and significant contribution to marine fish aquaculture in China. Currently, deep-water net cage aquaculture of *Trachinotus ovatus* typically occurs in nearshore waters (<20 m depth), often in bays or areas with island and reef cover, offering favorable aquaculture environmental conditions. However, transitioning to deep-sea aquaculture entails moving into deeper, more exposed waters where environmental factors such as flow velocity, wind, and waves can significantly impact fish farming and equipment. Fish are confined to specific aquaculture spaces and must constantly contend with tidal forces; excessive ocean currents can be detrimental, even leading to fish mortality. Therefore, understanding fish swimming ability and environmental adaptability is crucial when selecting species for deep-sea aquaculture. This study focused on *Trachinotus ovatus*, using a lane breathing apparatus to study its swimming ability under different flow velocities [at a temperature of (26.99±0.70) °C]. Small [body length: (4.06±0.43) cm, weight: (2.61±0.79) g] and large [body length: (11.06±0.70) cm, weight: (56.09±9.99) g] sizes of *Trachinotus ovatus* were selected for the experiment, and their swimming behavior, respiratory metabolism, and physiological and biochemical indicators were measured. The study aimed to understand *Trachinotus ovatus*' swimming ability, behavior, and exercise physiology, as well as to reveal its physiological and biochemical responses to changes in flow velocity, providing a technical reference for deep-sea net cage aquaculture of *Trachinotus ovatus*. The results showed that the induced velocities of small and large-sized *Trachinotus ovatus* were (3.90±0.64) and (0.96±0.13) BL/s, respectively. The critical swimming speeds were (91.83±10.97) and (99.78±12.66) cm/s, respectively, and the burst swimming speeds were about 112.20 and 114.25 cm/s. There was a significant linear positive correlation between tail wagging frequency and flow velocity. Under the same absolute flow velocity, the tail wagging frequency of small-sized *Trachinotus ovatus* was significantly higher than that of large-sized *Trachinotus ovatus* ($P<0.01$). The static oxygen consumption rates were about (899±111) mg/(kg·h) and (525±95) mg/(kg·h) for small and large *Trachinotus ovatus*, respectively, higher than the exercise oxygen consumption rates of the 20%, 40%, and 60% U_{crit} flow rate groups. The exercise oxygen consumption rate and flow rate of both sizes of *Trachinotus ovatus* showed a power function increasing relationship. The minimum COT was observed in the 60% U_{crit} flow rate group. In summary, it is recommended to control the adaptive flow velocity for deep-water net cage aquaculture of *Trachinotus ovatus* to within 1.0 BL/s, with an aquaculture flow velocity not exceeding 100 cm/s, and the optimal flow velocity range of 54–60 cm/s. The sustained swimming abilities of several marine fish are as follows: *Trachinotus ovatus* > *Sciaenops ocellatus* > *Acanthopagrus schlegelii* > *Larimichthys crocea*.

Key words: *Trachinotus ovatus*; swimming behavior; flow velocity; oxygen consumption rate; exercise physiology

Corresponding author: TANG Baogui. E-mail: zjtbgi@163.com