

文章编号: 1000-0615(2017)03-0392-09

DOI: 10.11964/jfc.20160210294

美国红鱼游泳体能分配模型及其在海区选址中的应用

晁帅, 王萍, 娄宇栋, 竺琰, 桂福坤*

(浙江海洋学院国家海洋设施养殖工程技术研究中心, 浙江舟山 316022)

摘要: 以深水网箱养殖的美国红鱼为研究对象, 通过研究其游泳时主要能量物质和代谢产物的变化规律, 构建美国红鱼的游泳体能分配模型, 最后结合特定的潮流规律, 建立养殖海区最大潮流选择的理论方法。结果显示, 美国红鱼游泳过程中, 血糖浓度会显著提高, 肌糖原有少量减少, 肝糖原会显著降低, 鱼类游泳接近疲劳时, 肝糖原浓度亦接近耗尽; 美国红鱼以较高速度游泳过程中, 血乳酸和肌乳酸浓度会有较明显的增加, 表明美国红鱼游泳过程伴随着无氧呼吸和有氧呼吸两种能量物质代谢过程。本实验提出以肝糖原浓度作为判定鱼类持续游泳能力的重要指标, 并建立了基于肝糖原储能消耗的美国红鱼游泳体能分配模型。最后基于美国红鱼体能分配模型, 结合养殖海区潮流规律, 提出了美国红鱼养殖海区最大潮流流速选择的计算方法。研究表明, 本实验提出的鱼类游泳体能分配模型构建方法以及鱼类养殖海区潮流选择论证方法, 可为相关研究提供新的途径, 为深水网箱、浅海围网等海洋养殖模式的海区潮流选址提供科学的参考依据。

关键词: 美国红鱼; 游泳能力; 体能分配模型; 海区选址

中图分类号: Q 958.8; S 931.4

文献标志码: A

美国红鱼(*Sciaenops ocellatus*), 又称红鼓鱼、斑尾鲈等, 学名为眼斑拟石首鱼, 属鲈形目(Perciformes), 石首鱼科(Sciaenidae), 拟石首鱼属(*Sciaenops*), 原产于南大西洋和墨西哥湾沿岸水域, 1991年引入中国, 具有生长快、产量高、食性广以及对环境适应能力强等优点, 现已在浙江、福建等省广泛养殖^[1]。

游泳能力对鱼类和很多水生动物的生存至关重要, 多数鱼类需要通过游泳逃避敌害、猎食、迁徙、求偶、躲避灾害环境^[2-4]。对于鱼类养殖尤其是海洋养殖, 其游泳能力在某种程度上直接影响着养殖成败。鱼类在海洋养殖过程中常被限制于有限的养殖空间, 如网箱养殖、围网养殖等模式, 养殖鱼类需要时刻抵抗潮流的冲击。养殖海区一定的水流有利于促进养殖区内外的水体交换, 保证良好的养殖环境, 但过大的流速却影响鱼类的生长, 甚至可能会因

体能耗尽而导致死亡。科学选择适宜的养殖海区, 是保障养殖成功的重要前提。然而, 当前涉及养殖海区的最大流速选择尽管在诸多养殖规范中有所提及, 但多为经验数值, 未见有关海区最大流速选择条件的科学论证。养殖海区选址与养殖鱼类的游泳能力密切相关, 鱼类游泳能力通常用游泳速度或游泳时间加以描述^[5]。按照鱼类游泳速度可分为最优巡航游泳速度、最大续航游泳速度、临界游泳速度、最大探顶游泳速度、冲刺游泳速度。然而, 一般的海区水流均遵循一定的潮流规律, 流速随时间不断变化, 这使得当前关于鱼类游泳能力的多种定义或测试方法难以在海区流速选址中直接应用。鱼类游泳能力判别常以出现疲劳为标志, 虽然对于引起疲劳的理论假说有多种^[6], 但对于养殖鱼类而言, 一般处于一种长时游泳状态, 能量耗竭学说或代谢产物堆积学说可作为重要

收稿日期: 2016-02-26 修回日期: 2016-09-19

资助项目: 浙江省自然科学基金(Z16E090006); 国家自然科学基金(31602205); 国家级大学生创新创业计划(201410340001)

通信作者: 桂福坤, E-mail: gui2237@163.com

依据, 因此可以主要能量物质(如糖原)的消耗情况或代谢乳酸的积累情况作为标志, 这常被用于有关人体运动方面的研究^[7]。鱼类游泳状态下, 体内的能量物质消耗规律即揭示了体能分配规律, 它可用于预测分析鱼类在不同游泳方式下的最大游泳速度或游泳时间, 即可用于鱼类养殖海域的最大潮流流速的选择。

目前, 关于鱼类游泳能力已有广泛研究, 早在1978年就有关于鱼类游泳能力的专著^[8]。Plaut^[9]和Hammer^[10]对鱼类游泳能力的各种概念作了分类论述, 并就其可能的生物学和生态学意义做了探讨。在鱼类游泳能力影响因素方面, 同样有广泛研究, 如温度影响^[11-12]、溶解氧与氨氮^[13]、实验手段影响^[14]等。然而, 有关鱼类游泳体能分配模型和能量代谢规律的研究少有报道。本实验以一种典型的网箱养殖鱼类——美国红鱼为研究对象, 通过水槽实验研究其在特定流速条件下游泳时的主要能量物质和代谢物, 包括血糖、血液中乳酸、肌糖原、肝糖原和肌肉中的乳酸等的变化规律, 并利用数学分析构建美国红鱼的体能分配模型。最后, 基于体能分配模型, 结合特定海区的潮流规律, 建立养殖海区最大潮流选择的理论方法, 为深水网箱、浅海围网等养殖模式的海区选址提供科学的参考依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

以深水网箱养殖的美国红鱼为研究对象, 取自浙江舟山某深水网箱养殖基地, 共200条, 鱼体规格约300~500 g(未逐一测量), 其中实验所用鱼的规格为(403±18.8) g(实验时测量数据)。实验前, 美国红鱼被运输至国家海洋设施养殖工程技术研究中心鱼类行为实验室的暂养池。暂养池共3个, 每个暂养池直径5 m, 有效养殖水体25 m³, 配置自动鼓式微滤机、砂滤系统、蛋白质分离器、生物滤池、塔式臭氧消毒系统。暂养期间, 仅使用其中一个水池, 其余两个作为储水池备用, 水温18℃、光照、盐度均为自然条件, 不作人为控制。每天按鱼总重的1.5%进行饵料投喂。

1.2 实验方法

实验在浙江海洋大学国家海洋设施养殖工

程技术研究中心鱼类行为实验室的垂直循环水槽中进行。水槽全长350 cm, 玻璃观测视窗长180 cm, 断面尺寸30 cm×30 cm, 水流由电机控制, 可实现无极变速, 造流流速范围0~2.0 m/s。实验时为避免人为观测对鱼的游泳产生影响, 在水槽边侧设置监控摄像头, 远程观测并记录鱼的游泳行为。实验装置如图1所示。

美国红鱼的游泳能力测试 鱼类游泳能力常以游泳速度或游泳时间作为指标, 实验室条件下, 一般控制水流流速, 测定其在给定流速下的续航游泳时间。本实验中, 续航游泳时间的测定是下一步开展美国红鱼游泳主要生理指标测量的重要依据。根据王萍等^[15]研究, 美国红鱼具有较强的游泳能力, 本实验参照上述研究成果, 设定5组实验流速为0.8、0.9、1.0、1.1、1.2 m/s。实验时, 首先对垂直循环水槽进行各项参数校正, 调整垂直循环水槽水体环境与暂养池相同。从暂养池中选取规格相近的实验鱼, 放入水槽中进行微水流环境适应1 h, 适应水流速度控制在0.5 BL/s左右。适应结束后, 在1 min之内将流速从适应流速匀加速至设计流速, 之后通过远程监控观测实验鱼游泳状态, 直至鱼触网放弃游泳10 s以上实验结束。每组流速保证具有5次有效实验, 即当实验鱼出现明显异常时, 放弃该组实验, 重新选取实验鱼, 直至具有5次有效实验数据。实验时, 为避免实验鱼相互干扰, 每次只取鱼1条。实验结束后, 测量实验鱼的体质量、体长等规格参数。重复所有实验流速直至结束。

美国红鱼游泳过程主要生理指标测验 本实验主要关注美国红鱼游泳过程中, 与游泳能力密切相关的体内能量物质和代谢物等主要生理指标的变化规律, 主要包括血糖、肝糖原、肌糖原、血乳酸、肌肉乳酸等。本实验从统计学上假设实验鱼的游泳生理指标变化具有一致性, 即不同实验鱼尽管在个体上存在差异, 但在统计学层面上其糖原的消耗和乳酸的积累水平是一致的。

实验环境条件与“美国红鱼的游泳能力测试”的条件一致, 并根据上述实验结果, 选取流速0.9 m/s作为本部分研究的流速条件。该流速条件下, 其平均游泳时间为214.4 min。为测验美国红鱼在整个游泳过程中主要游泳生理指标的变化, 实验设定6个采样时间点, 分别为0、30、

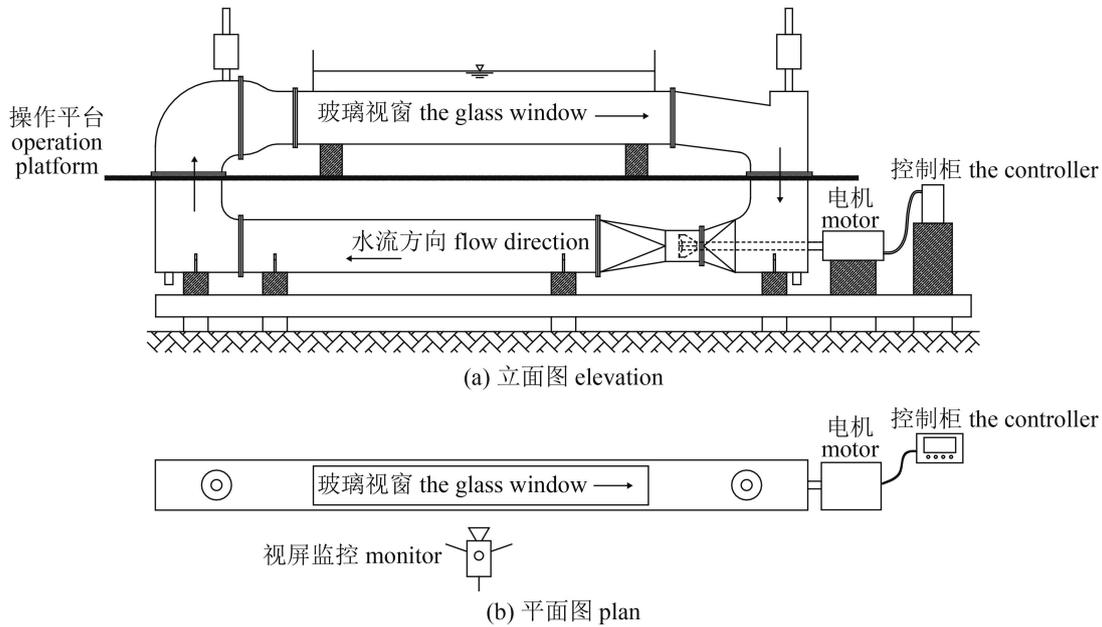


图 1 垂直循环水槽示意图

Fig. 1 Sketch of vertical circulation water channel

60、90、120、150 min。实验时，首先对垂直循环水槽进行各项参数校正，调整垂直循环水槽水体环境与暂养池相同。从暂养池中选取规格相近的实验鱼，放入水槽中进行微水流环境适应1 h，适应水流速度控制在0.5 BL/s左右。适应结束后，在1 min之内将流速从适应流速匀加速至设计流速(即0.9 m/s)，当实验鱼游泳达到设定的采样时间节点时，立刻停止实验，迅速取出实验鱼，进行尾静脉取血，无菌操作取肝脏、背部肌肉，然后将样品进行处理，准备下一步血糖、血液中乳酸、肌糖原、肝糖原和肌肉中的乳酸的测量。每个采样节点至少保证5次以上有效数据，即至少重复5次，实验结果离散较大时，增加测验次数，直至完成所有采样点测验。血糖测量参照国标^[16]，血乳酸浓度和肌肉中的乳酸浓度的测量采用乳酸脱氢酶法。具体方法参照试剂盒[南京建成生物工程研究所，乳酸(lactic acid)测定试剂盒(比色法)，货号：A019-2]。肝糖原和肝糖原的测量方法参照试剂盒(南京建成生物工程研究所，肝/肌糖原测定试剂盒，货号：A043)。

2 结果

2.1 美国红鱼游泳能力

美国红鱼游泳能力以特定流速下的续航游

泳时间为指标，实验结果如图2所示。由图可见，美国红鱼具有较强的游泳能力，即使在1.0 m/s的流速条件下，其平均游泳时间亦可长达约120 min，1.2 m/s的流速条件下，其平均游泳时间也可达到8 min。美国红鱼的续航游泳时间与游泳流速呈幂函数递减关系，采用幂函数进行拟合得以下公式($R^2=0.944$):

$$T = 64.78v^{-11.09} \quad (1)$$

式中， T 为续航游泳时间(min)； v 为游泳速度或水流速度(m/s)。

2.2 美国红鱼游泳主要生理指标

实验对美国红鱼在0.9 m/s(平均流速为3.14 BL/S)流速条件下，不同时刻的血糖、肌糖原、

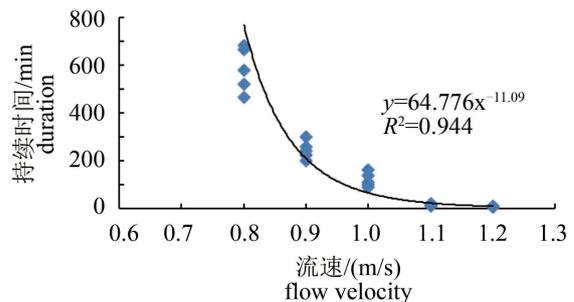


图 2 美国红鱼持续游泳时间与流速的关系

Fig. 2 Relationship between the sustained swimming time and flow velocities for red drum

肝糖原及血乳酸、肌乳酸等5项主要游泳生理指标进行测试。

糖原含量变化 美国红鱼游泳过程中, 不同时刻的血糖、肌糖原、肝糖原浓度变化实验结果如图3~图5所示, 其中图3和图4中的实线点

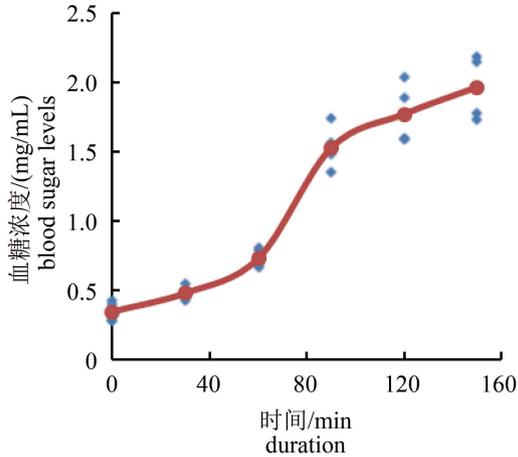


图 3 血糖随时间变化情况

Fig. 3 Blood glucose density over time

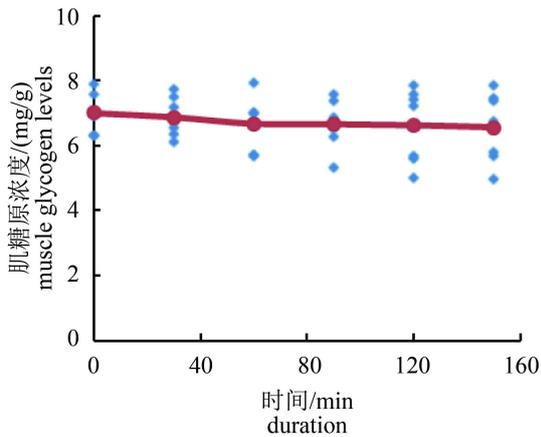


图 4 肌糖原随时间变化情况

Fig. 4 Muscle glycogen density over time

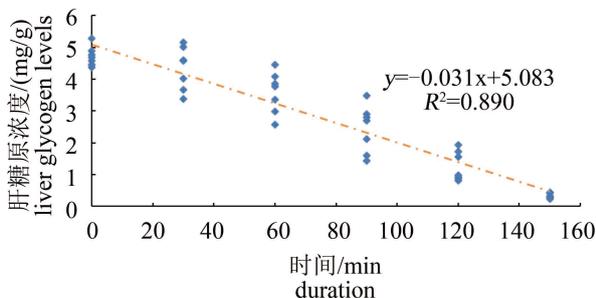


图 5 肝糖原随时间变化情况

Fig. 5 Hepatic glycogen density over time

为平均值线。由图可见, 在游泳过程中, 血糖浓度不仅不降低, 反而不断增加。测试表明, 初始时刻美国红鱼的平均血糖浓度仅0.34 mg/mL, 持续游泳150 min后血糖浓度显著升高至2.21 mg/mL。肌糖原在游泳过程中总体呈缓慢减少趋势, 从初始时刻的平均7.00 mg/g到游泳150 min后的6.54 mg/g, 总量减小不大。肝糖原在游泳过程中几乎与时间呈线性关系迅速消耗, 并且当鱼接近疲劳时, 肝糖原接近消耗殆尽(图5)。对肝糖原浓度随时间变化情况进行线性拟合, 可得拟合公式:

$$C_h(t) = 5.083 - K_v \cdot t \quad (2)$$

式中, $C_h(t)$ 为t时刻美国红鱼体内肝糖原浓度(mg/g); K_v 为肝糖原衰减速率, 与游泳速度v有关, 本实验 $K_v=0.031 \text{ mg/(g}\cdot\text{s)}$; t为时间。

乳酸含量变化 实验测定了美国红鱼游泳过程中的血乳酸和肌乳酸的浓度变化, 如图6和图7所示, 图中实线点为平均值线。由图可见,

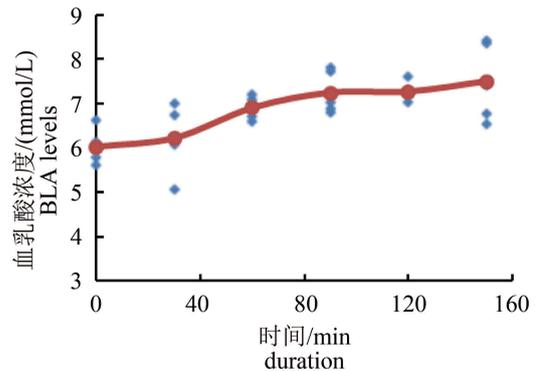


图 6 血乳酸随时间变化情况

Fig. 6 Blood lactate density over time

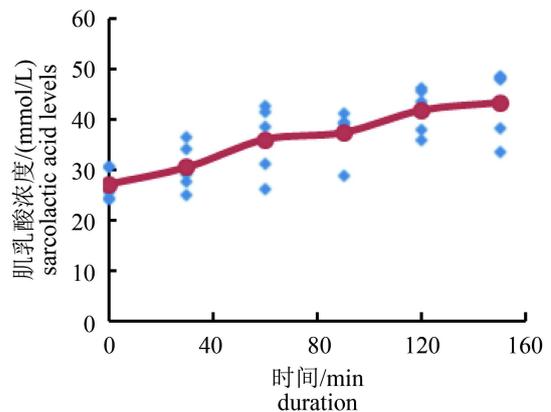


图 7 肌乳酸随时间变化情况

Fig. 7 Muscle lactate density over time

美国红鱼在持续游泳过程中血乳酸和肌乳酸均显著升高。其中,血乳酸浓度在测试周期内平均值从初始时刻的6.02 mmol/L缓慢升高到150 min的7.49 mmol/L,提高了约1.24倍;肌肉中的乳酸从起始时刻的27 mmol/L升高到最后的43 mmol/L,提高了约1.59倍。

3 讨论

3.1 美国红鱼主要游泳生理变化

在流速为0.9 m/s,美国红鱼可进行长时间游泳,主要进行有氧代谢。在游泳过程中,肾上腺素分泌的皮质醇加强^[17-18],促使糖原、肝糖原和肌糖原等能量物质加速分解进入血管进行能量代谢,为了维持高强度游泳运动,血糖浓度持续增高,以满足机体对能量的较高需求。血糖的不断消耗,需要从肝糖原和肌糖原中迅速获得补充。本实验研究表明,美国红鱼的肌糖原在整个游泳过程中只有少量降低,而肝糖原降低迅速,说明肝糖原对于补充美国红鱼血液中的血糖浓度起主导作用。美国红鱼可进行长时间游泳,能量代谢主要以有氧代谢为主,但仍会伴随无氧代谢过程而产生乳酸积累。较剧烈的游泳运动迫使美国红鱼肌肉组织内积累的乳酸能够迅速地扩散到血液中,使肌肉组织的持续运动能力增强。因此在实验中,美国红鱼的血液和肌肉中均表现出明显的乳酸积累。上述规律与人体运动有关理论相似^[19]。

关于运动疲劳目前有多种理论^[6],学术界虽未取得一致,但其中的能量耗竭学说和代谢产物堆积学说被较多采纳。代谢产物堆积学说中,主要以肌乳酸积累为核心。血液和肌肉组织中的乳酸大量积累,会造成血液和肌肉组织的pH值降低,使参与呼吸代谢的各种酶的活性降低,从而引起运动疲劳。但乳酸积累到何种程度才会导致疲劳等问题,学术界尚无明确共识。能量耗竭学说则以体内主要供能物质(包括血糖、肌糖原、肝糖原、脂肪、蛋白质等)的消耗为核心。由于脂肪和蛋白质功能常在较长时间、较低强度的持续运动情况下才慢慢得以体现^[7],因此对于美国红鱼游泳能力测试这种较高强度的游泳运动而言,脂肪和蛋白质作为能量供应的作用体现较小,而应以糖原有氧代谢供能为主。本研究发现,美国红鱼游泳过程中血糖浓

度不断升高,肌糖原只有少量降低,而肝糖原降低显著并在鱼接近疲劳时已接近耗尽,由此可以认为肝糖原是控制美国红鱼游泳运动疲劳的关键因子。

3.2 美国红鱼游泳运动的体能分配模型

由于实验是在持续的顶流游泳情况下测量,实验鱼从水中提取的氧气量以及相应释放的热量(转化为动能的能量)与水的温度有关。在实际实验过程中,由于水体量很大,鱼体释放的热量,受到螺旋桨与水体摩擦和水体与池壁摩擦热影响很大。故没有采用此数据构建体能分配模型。

美国红鱼游泳疲劳由肝糖原含量控制,本实验将以肝糖原作为关键因子,根据美国红鱼游泳过程中的肝糖原变化情况,构建美国红鱼游泳运动的体能分配模型。模型构建时,作以下假设:一是美国红鱼在游泳过程中,肝糖原的外源补充忽略不计;二是不同游泳速度下,美国红鱼游泳时的肝糖原消耗模型相同。美国红鱼游泳时,能量物质消耗产生的能量供应,一部分用于抵抗游泳阻力做功,另一部分用于满足自身的生理需求,因此能量消耗是综合产生的结果。

假设用于实验的美国红鱼平均肝重为 Gg ,每毫克肝糖原有氧代谢产生的能量为 $\bar{e}J$,则美国红鱼在游泳过程中,不同时刻的肝脏储能 $E(t)$:

$$E(t) = G \cdot C_h \cdot \bar{e} \quad (3)$$

将(2)式代入(3)式,于是有:

$$E(t) = E_0 - K_E \cdot t \quad (4)$$

式中, E_0 为美国红鱼肝糖原初始时刻的储能, $E_0 = 5.083 G \bar{e}$; K_E 为肝糖原的储能变化率, $K_E = G \bar{e} K_v$ 。对于特定规格的美国红鱼,平均肝重 G 为常数,肝糖原的有氧代谢产能 \bar{e} 亦为定值,因此 E_0 为常数。由于 K_v 与游泳速度有关,因此储能变化率 K_E 也与游泳速度有关。理论上,当美国红鱼的肝糖原储能耗尽(或接近耗尽),其在给定流速条件下的理论最大续航游泳时间:

$$t_{\max}(v) = \frac{E_0}{K_E} \quad (5)$$

将(4)式两边除以 E_0 可得:

$$\frac{E(t)}{E_0} = 1 - \frac{K_E}{E_0} \cdot t \quad (6)$$

即,

$$\bar{E}(t) = 1 - \bar{K}_E \cdot t \quad (7)$$

根据式(1)、(5)和(7), 并利用实验关于美国红鱼在不同游泳速度下的肝糖原消耗模型相同的假设, 可建立基于肝糖原消耗模型的美国红鱼在不同游泳速度条件下的体能分配曲线(图8)。不同游泳速度下, 美国红鱼的最长持续游泳时间 t_{max} 可通过式(1)计算获得。

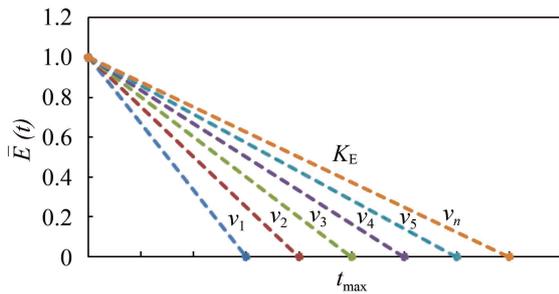


图8 美国红鱼在不同游泳速度条件下的体能分配曲线

Fig. 8 Physical endurance curve for red drum at different swimming speed

3.3 美国红鱼体能分配模型在养殖海区选址中的应用

海洋养殖中, 养殖海区的海流条件对养殖至关重要, 如何进行合理选择涉及养殖对象的品种、规格、水质环境、海流规律等多方面因素。从保障养殖对象的耐流生存角度, 需要科学的确定养殖海区的最大潮流流速。一般海区潮流遵循全日潮、半日潮或混合潮等潮流规律, 但无论何种规律, 均可对不同时刻的潮流流速进行预测。简单起见, 本实验以规则半日潮为例, 利用美国红鱼的游泳体能分配模型, 建立美国红鱼养殖海区最大潮流流速分析方法, 为科学选址提供依据。

规则半日潮的潮流大小和方向呈周期性变化, 潮流大小受半日周期和半月周期控制, 可用下式表示^[20]:

$$V_t = V_{mn} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T_C} t\right) + K \cdot V_{mn} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T_{mn}} t\right) \quad (8)$$

式中, V_t 为任意时刻流速大小; 右端第一项为半日周期流速变化, 第二项为半月周期流速变化; $T_C=12.4\text{ h}$, 为半日周期。对鱼类游泳而言, 无需

考虑长周期的流速变化, 因此式(8)可仅考虑右端第一项, 且用大潮最大流速代替平均流速 V_{mn} , 即:

$$V_t = V_m \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T_C} t\right) \quad (9)$$

在整个半日周期 $t \in (0, T_C)$ 内, 流速出现两次最大值, 数值相等但方向相反, 因此只需考虑 $t \in (0, T_C/2)$ 时间段, 在这一时段内, 流速由零增长至最大值后再降至零。在上式中, V_m 即是实验寻求的最大潮流流速。

研究表明, 鱼类的最大续航时间与续航速度满足幂函数关系^[21-22]:

$$T = aV^b \quad (10)$$

式中, V 为游泳速度; T 为对应的最大续航时间; a, b 为系数, 通过实验测定。本实验研究结果同样符合这一关系, 本实验 $a=64.78, b=-11.09$, 参见式(1)。

由式(5)可得肝糖原储能消耗速率:

$$K_E = E_0/T \quad (11)$$

另据式(4)可知, 鱼类在单位时间 dt 内, 以速度 v 游泳所消耗的能量:

$$dE = K_E \cdot dt \quad (12)$$

将式(9)、(10)、(11)代入式(12), 可得:

$$dE = \frac{E_0}{aV_m^b \sin^b\left(\frac{2\pi}{T_C} t\right)} dt \quad (13)$$

上式采用无量纲形式如下:

$$d\bar{E} = \frac{1}{aV_m^b \sin^b\left(\frac{2\pi}{T_C} t\right)} dt \quad (14)$$

假设鱼在 $(0, T_C/2)$ 时间段内游泳, 肝糖原储能全部消耗, 即对上式在 $(0, T_C/2)$ 时间段进行积分, 最终结果即为肝糖原储能总值1, 即:

$$\int_0^{T_C/2} \frac{1}{aV_m^b \sin^b\left(\frac{2\pi}{T_C} t\right)} dt = 1 \quad (15)$$

采用数值积分方法对上式进行求解, 获得 V_m 即为养殖海区理论最大潮流流速。由上式可见, 欲求 V_m , 只需知道参数 a 和 b 的数值, 参数 a 和 b 与鱼的种类和规格等因素有关, 可通过续航游泳实验测定获得。将参数 $a=64.78, b=-11.09, T_C=12.4\text{ h}=744\text{ min}$ 代入(15)式, 可得在规则半日潮海区, 本实验研究的美国红鱼养殖海区的最大

大潮流速应不大于 $V_m=0.973$ m/s。图9为美国红鱼在最大流速 $V_m=0.973$ m/s的规则半日潮条件下, 能量消耗曲线。由图可见, 能量消耗主要集中在中间的AD时间段内(约占总时段的43%), 此段内能量消耗比例达98%, 对应起止流速约为0.76 m/s。在BC时间段内(约占总时段的27%), 能量消耗比例达80%, 对应起止流速约为0.90 m/s。

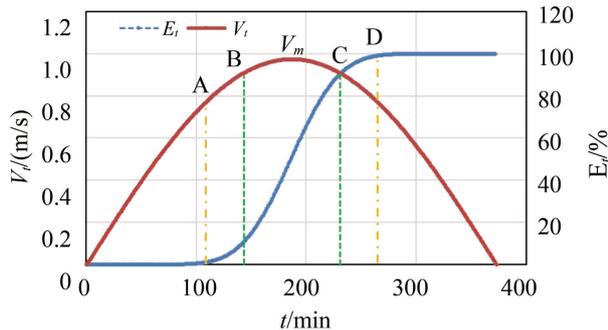


图9 美国红鱼游泳体能消耗历时曲线
Fig. 9 Curve of energy consumption over time for red drum

对养殖生产而言, 需要知道不同的最大潮流流速条件下, 美国红鱼的体能消耗情况。为此需要建立最大潮流流速与肝糖原储能消耗比例关系(图10)。由图可见, 在高流速段(0.8~1.0 m/s), 最大潮流流速细小的变化会导致较大的能量消耗比例变化。对生产养殖而言, 鱼类为保留较多的能量用于生长, 其用于顶流游泳而消耗的能量应越小越好。为此, 实验建议顶流消耗的能量最好不要超过10%, 即对应的最大潮流流速不超过0.8 m/s。

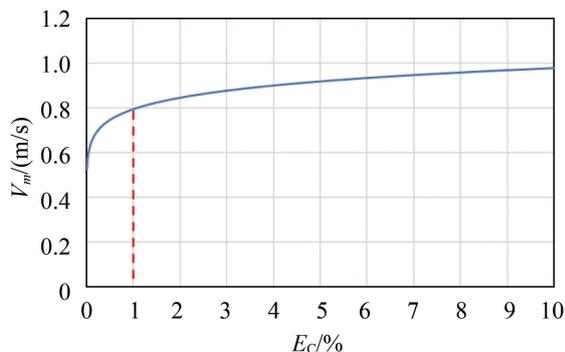


图10 最大潮流流速与能力消耗比例关系

Fig. 10 Relationship between maximum tidal current and energy consumption

4 结论

海洋养殖包括网箱养殖、围网养殖等, 是我国海洋渔业生产活动的重要形式。鱼类在海洋养殖过程中需时刻抵抗潮流的冲击, 合理地进行养殖海区选址, 科学地确定养殖海区允许的最大潮流流速, 成为保障养殖成功的重要前提。本实验以深水网箱养殖美国红鱼为研究对象, 通过研究其游泳时的主要能量物质和代谢产物的变化规律, 构建美国红鱼的游泳体能分配模型, 最后结合特定的潮流规律, 建立了养殖海区最大潮流选择的理论方法。研究形成以下主要结论:

①美国红鱼最大续航游泳时间与游泳速度呈幂函数关系, 游泳速度越大, 最大续航游泳时间越短。这一关系是构建美国红鱼游泳体能分配模型的重要基础。

②美国红鱼在以较高速度游泳的过程中, 血糖浓度会显著提高, 肌糖原有少量减少, 肝糖原有显著降低。鱼类游泳接近疲劳时肝糖原浓度亦接近耗尽, 因此美国红鱼的肝糖原浓度可作为判定鱼类持续游泳能力的重要指标。

③美国红鱼在以较高速度游泳的过程中, 血乳酸和肌乳酸浓度会有较明显的增加, 表明美国红鱼较高速度游泳过程伴随着无氧呼吸和有氧呼吸两种能量物质代谢过程。

④利用鱼类的肝糖原等分析运动能力的研究很多, 但是本实验成功建立了基于肝糖原储能消耗的美国红鱼游泳体能分配模型。体能分配模型显示, 美国红鱼恒速游泳过程中, 体能分配与时间呈线性关系, 且与游泳速度有关。

⑤本实验基于美国红鱼体能分配模型, 结合养殖海区潮流规律, 提出了美国红鱼养殖海区最大潮流流速选择的计算方法。本方法亦可为其他种类和规格的养殖鱼类的海区潮流选址提供参考。

本实验仅针对一种规格的美国红鱼游泳体能分配模型进行了研究, 尽管体能分配模型中不涉及鱼的规格参数, 但该模型针对不同规格的美国红鱼以及不同种类的适应性, 仍需要进一步验证。其次, 在构建游泳体能分配模型时, 假设不同游泳速度条件下, 肝糖原储能消耗模型是相同的, 这一假设同样需要开展更多组次的流速实验作进一步验证。另一方面, 本

实验研究尚处于实验室研究, 未考虑养殖网箱等设施内部的复杂水流等因素影响。鱼类游泳能力及体能分配模型的研究是一项复杂的、长期的研究工作, 需要更多的学者长期不懈的努力。

参考文献:

- [1] 刘世禄, 王波, 张锡烈, 等. 美国红鱼的营养成分分析与评价[J]. 海洋水产研究, 2002, 23(2): 25-32.
Liu S L, Wang B, Zhang X L, *et al.* Analysis and evaluation of nutrition composition of red drum (*Sciaenops ocellatus*)[J]. Marine Fisheries Research, 2002, 23(2): 25-32(in Chinese).
- [2] Stobutzki I C, Bellwood D R. An analysis of the sustained swimming abilities of pre- and post-settlement coral reef fishes[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 1994, 175(2): 275-286.
- [3] Watkins T B. Predator-mediated selection on burst swimming performance in tadpoles of the pacific tree frog, *Pseudacris regilla*[J]. Physiological Zoology, 1996, 69(1): 154-167.
- [4] Drucker E G. The use of gait transition speed in comparative studies of fish locomotion[J]. American Zoologist, 1996, 36(6): 555-566.
- [5] 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.
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(in Chinese).
- [6] 张进, 孙昭君. 运动性疲劳及其产生机制的研究进展[J]. 科技资讯, 2012(22): 215.
Zhang J, Sun Z J. The study of the generation mechanism of exercise fatigue and its progress[J]. Science & Technology Information, 2012(22): 215(in Chinese).
- [7] 王步标, 华明. 运动生理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 316-322.
Wang B B, Hua M. Sports[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 316-322(in Chinese).
- [8] Beamish F W H. Swimming capacity[M]/Hoar W H, Randall D J. Fish Physiology. New York: Academic Press, 1978: 101-187.
- [9] Plaut I. Critical swimming speed: Its ecological relevance[J]. Comparative Biochemistry and Physiology-Part A: Molecular & Integrative Physiology, 2001, 131(1): 41-50.
- [10] Hammer C. Fatigue and exercise tests with fish[J]. Comparative Biochemistry and Physiology-Part A: Molecular & Integrative Physiology, 1995, 112(1): 1-20.
- [11] 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.
- [12] Bernatchez L, Dodson J J. Influence of temperature and current speed on the swimming capacity of lake whitefish (*Coregonus clupeaformis*) and cisco (*C. artedii*)[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1985, 42(9): 1522-1529.
- [13] Jones D R. The effect of hypoxia and anaemia on the swimming performance of rainbow trout (*Salmo gairdneri*)[J]. Journal of Experimental Biology, 1971, 55(2): 541-551.
- [14] 桂福坤, 王萍, 吴常文. 基于氮和磷平衡的负责任养殖模式下的养殖海区规划[J]. 南方水产科学, 2011, 7(4): 69-75.
Gui F K, Wang P, Wu C W. A model for planning culturing sites based on responsible farming concept of nitrogen-phosphorus balance[J]. South China Fisheries Science, 2011, 7(4): 69-75(in Chinese).
- [15] 王萍, 桂福坤, 吴常文. 美国红鱼(*Sciaenops ocellatus*)、鲈鱼(*Lateolabrax maculatus*)、斜带髯鲷(*Hapalogenys nitens*)耐流性试验研究[J]. 海洋与湖沼, 2010, 41(6): 923-929.
Wang P, Gui F K, Wu C W. Swimming ability of *Sciaenops ocellatus*, *Lateolabrax maculatus* and *Hapalogenys nitens*[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2010, 41(6): 923-929(in Chinese).
- [16] ISO 26642-2010食品—血糖生成指数(GI)的测定及食物分类建议[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
ISO 26642-2010 Food products—Determination of the glycaemic index (GI) and recommendation for food classification GI determination and classification of food advice[S]. Beijing: China Standards Press, 2010(in Chinese).
- [17] Pagnotta A, Brooks L, Milligan L. The potential regulatory roles of cortisol in recovery from exhaustive exercise in rainbow trout[J]. Canadian Journal of Zoology, 1994, 72(12): 2136-2146.

- [18] Eros S K, Milligan C L. The effect of cortisol on recovery from exhaustive exercise in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*): Potential mechanisms of action[J]. *Physiological Zoology*, 1996, 69(5): 1196-1214.
- [19] 侯文才, 张春玲, 马先芝. 试论身体运动的物质能量供应[J]. *高师理科学刊*, 2000, 20(1): 60-62.
- Hou W C, Zhang C L, Ma X Z. On the course of energy supply of human body in sports[J]. *Journal of Science of Teachers' College and University*, 2000, 20(1): 60-62(in Chinese).
- [20] 郑志南. 海洋潮流能的估算[J]. *海洋通报*, 1987, 6(4): 70-75.
- Zheng Z N. The estimation of ocean tidal current energy[J]. *Marine Science Bulletin*, 1987, 6(4): 70-75(in Chinese).
- [21] Fisher R, Bellwood D R. The influence of swimming speed on sustained swimming performance of late-stage reef fish larvae[J]. *Marine Biology*, 2002, 140(4): 801-807.
- [22] Fisher R, Wilson S K. Maximum sustainable swimming speeds of late-stage larvae of nine species of reef fishes[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2004, 312(1): 171-186.

The physical distribution model in red drum (*Sciaenops ocellatus*) and its application to ocean fisheries location

CHAO Shuai , WANG Ping , LOU Yudong , ZHU Yan , GUI Fukun *

(National Engineering Research Center For Marine Aquaculture, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316000, China)

Abstract: In this paper, red drum (*Sciaenops ocellatus*) in deep water aquaculture was used as the research object. By studying the main energy material and the change rule of the metabolite during swimming, the physical distribution model in Red Drum was constructed. Then, combined with the specific law of ocean currents to establish the theory of ocean fisheries location. The results showed that in the swimming of red drum, the blood glucose level was significantly increased, the muscle glycogen was reduced slightly, and the liver glycogen was decreased obviously. When the fish swimming closed to fatigue, the liver glycogen level was nearly exhausted. In the process of high speed swimming, the concentration of blood lactic acid and muscle lactic acid was increased obviously, which indicated that red drum swimming process was accompanied by two kinds of energy metabolism processes (anaerobic respiration and aerobic respiration). This study proposed that liver glycogen concentration was used as an important index to determine the swimming ability of fish, and physical distribution model of red drum swimming based on liver glycogen storage energy consumption was established. Finally, based on the physical distribution model of red drum and the law of ocean currents in aquaculture area, the paper put forward the calculation method of selecting maximum flow velocity in red drum aquaculture area. The research showed that the physical distribution model building method of fish swimming and demonstration method of ocean current selection in aquaculture area could provide a new way for the related research, and provide scientific reference for the ocean current selection of marine aquaculture model (deep water cage, shallow sea fence, ect.).

Key words: *Sciaenops ocellatus*; swimming ability; physical distribution model; fishery location

Corresponding author: GUI Fukun. E-mail: gui2237@163.com

Funding projects: Natural Science Foundation of Zhejiang province (Z16E090006); National Natural Science Foundation of China (31602205); National Undergraduate Training Program for Innovation and Entrepreneurship (201410340001)