

流速对拟穴青蟹生长、应激压力和糖代谢的影响

赵子键¹, 丁爱侠², 任志明³, 史策¹, 母昌考¹, 王春琳¹, 叶央芳^{1*}

(1. 宁波大学 海洋学院, 浙江 宁波 315832; 2. 宁波大学 土木工程与地理环境学院, 浙江 宁波 315211;

3. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 本文研究了 0、1 和 2 倍体长每秒($\text{BL} \cdot \text{s}^{-1}$)的 3 个流速对拟穴青蟹幼蟹的生长、应激压力和糖代谢的影响。结果发现尽管 30 d 的流水养殖导致了蜕壳相关基因 *EcR* 和 *MIH* 表达的显著提高, 但未对青蟹的生长产生显著影响。在应激压力方面, 流水养殖导致了青蟹血清中的皮质醇和肝胰腺中丙二醛水平的显著降低, 同时 $1 \text{ BL} \cdot \text{s}^{-1}$ 流速显著提高了肝胰腺的总抗氧化能力, 显著降低了抗氧化酶活性水平, 但 $2 \text{ BL} \cdot \text{s}^{-1}$ 流速对这些指标的影响弱于 $1 \text{ BL} \cdot \text{s}^{-1}$ 流速。此外, 在糖代谢方面, 流水养殖导致了青蟹肝胰腺中丙酮酸激酶活性的显著降低, 未引起肌肉中乳酸水平的显著变化, 但 $2 \text{ BL} \cdot \text{s}^{-1}$ 流速导致了肌糖原水平的显著升高。这些研究结果表明, 适度的流水养殖虽然对生长没有显著促进作用, 但可降低青蟹的生理压力, 增强青蟹的抗氧化能力, 提高肌肉中的能量储存。研究结果可为完善青蟹的循环水养殖技术提供新的思路。

关键词: 青蟹; 循环水养殖; 流速

中图分类号: S-3

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2023) 02-0009-06

工厂化循环水养殖因经济和环境友好等优点成为热门的水产集约化养殖方式。在循环水养殖系统的运行过程中, 要设置多种理化参数, 流速是其中较为关键的参数之一。一定的流速可提高鱼的存活率、免疫力和产量^[1]。跑道养殖的大口黑鲈 (*Micropterus salmoides*) 比常规池塘养殖的存活率和不饱和脂肪酸含量更高, 而肝重指数更低, 鱼体更修长, 说明流速提高了水质, 使黑鲈的营养结构更加合理^[2]。1~2 倍体长 (Body Length, BL) 每秒 ($\text{BL} \cdot \text{s}^{-1}$) 的流速可提高齐口裂腹鱼 (*Schizothorax prenanti*) 血清中的溶菌酶活性和吞噬指数, 使其表现出更强的抗病能力; 而在 $2.29 \text{ BL} \cdot \text{s}^{-1}$ 的流速下, 齐口裂腹鱼的特定生长率最高, 生长速度最快^[3]。此外, $0.9 \text{ BL} \cdot \text{s}^{-1}$ 的流速可刺激大菱鲆 (*Scophthalmus maximus*) 的采食量, 增强血浆中碱性磷酸酶和酸性磷酸酶的活性, 从而提高大菱鲆的先天免疫反应和生长性能^[4]。尽管甲壳类动物的游泳能力弱于鱼

类, 但流速促使甲壳类动物逆流游泳, 这样的运动训练可导致肌纤维增粗, 可能提高动物的生长性能, 因此, 有必要研究流速对甲壳类动物的影响。

拟穴青蟹 (*Scylla paramamosain*) 简称青蟹, 属于软甲纲 (Malacostraca)、十足目 (Decapoda)、梭子蟹科 (Portunidae)、青蟹属 (*Scylla*)。青蟹不仅肉质鲜美、生长快, 还是梭子蟹科中体型最大的海产蟹类, 深受我国东南沿海地区消费者的欢迎^[5-6]。在我国, 青蟹的养殖产量远高于海捕产量, 因此市场供给以养殖青蟹为主。在青蟹的人工养殖中, 单体循环水养殖系统可实现青蟹在短期内的快速生长, 被广泛用于培育软壳蟹或育肥等。单体循环水养殖系统的流场不仅关系到系统的自净, 还关系到养殖动物的生长和福利, 因此流场设计是单体养殖系统设计中的重要一环。然而, 在蟹类养殖系统研究中, 还未见流场的相关报道。鉴于此, 本研究主要聚焦于青蟹的生长、应激压力和糖代谢, 旨在揭

收稿日期: 2022-03-28.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journal.lg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 浙江省“十四五”育种专项青蟹协作组项目 (021C02069-6); 宁波大学“海洋生物技术与海洋工程”学科群专项项目 (422004582); 浙江省“三农六方”科技协作计划 (2021SNLF029)。

第一作者: 赵子键 (1996-), 男, 河北秦皇岛人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 水产养殖。E-mail: 2539684170@qq.com

*通信作者: 叶央芳 (1974-), 女, 浙江慈溪人, 研究员, 主要研究方向: 水产养殖。E-mail: yeyangfang@nbu.edu.cn

示流速对青蟹幼蟹生长性能的影响,为青蟹的循环水养殖提供技术支持.

1 材料与方法

1.1 实验动物和循环水养殖系统

C5 期的青蟹幼蟹购自宁波市奉化区臭皮匠水产养殖场,在校区中试基地暂养一周,海水盐度为 20‰~26‰,温度为 18~22 ℃,溶解氧 $>5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, pH 8.0~8.5,总氨氮 $<0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 选用规格一致、活力好、附肢健全的幼蟹(甲宽 $(25.51\pm 4.41)\text{ mm}$), 质量 $(3.25\pm 1.68)\text{ g}$, 放入阶梯式流水槽(625 mm $\times$ 117 mm $\times$ 165 mm, 图 1)内. 流水槽材质为亚克力板, 包括 4 个溢流区和 3 个养殖区(125 mm $\times$ 117 mm $\times$ 105 mm), 水由泵从水箱抽到最高层溢流区溢流进养殖区, 然后在养殖区通过带孔的板, 最后从溢流板流出. 阶梯式构造可确保每个养殖区流速基本一致. 阶梯式流水槽置于架子上, 架子下方放置配有潜水泵和气石的水箱, 水箱上放置装有滤材的沥水篮; 每个水槽的进水端配置水阀, 以控制水流流速; 每 3 个水槽用 PVC 管连接起来, 形成独立单元, 每个单元的一端用软管连接在潜水泵上, 另一端用软管连接至沥水篮, 从而形成养殖水体的循环. 用不同功率的潜水泵和水阀共同控制水流流速.

1.2 实验设计

鱼类的最适生长流速约为 $1\text{ BL}\cdot\text{s}^{-1}$ [3-4], “BL $\cdot\text{s}^{-1}$ ” 是鱼类研究中表征养殖水体流速大小的常用单位. 本研究借鉴这一单位用于表征青蟹养

殖水体的流速, 并设置 0、1 和 $2\text{ BL}\cdot\text{s}^{-1}$ 的 3 个流速组. 根据本研究采用的蟹体长, 这 3 个流速相当于 0、2.7 和 $5.4\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$. 每个流速组 5 只蟹, 共 15 只蟹. 每日上午 9:30 投喂一次, 每次投喂 1/2 只冰鲜花蛤, 在蟹进食 2 h 后清除残饵. 记录蟹的蜕壳存活情况. 设备每隔 4 d 换水一次, 换水量为 50%. 养殖 30 d 实验结束, 结束前 24 h 不投喂, 记录蟹的体质量. 用针管在青蟹的游泳足基部软膜处抽取血液, 于 $3000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 下离心 10 min, 取上清, $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下保存备用. 采集青蟹的肌肉和肝胰腺组织, 分别置于冻存管内, 于 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保存备用.

1.3 特定生长率的计算

青蟹的特定生长率为 $Z_{\text{SGR}}=(\ln m_2 - \ln m_1)/t \times 100$, 式中: m_1 、 m_2 为初始、终末质量, g; t 为养殖天数, d.

1.4 酶活性、皮质醇、糖原和乳酸的测定

称取 0.1 g 肝胰腺样品, 加入 900 μL 生理盐水, 再加入适量磁珠, 用高速低温组织研磨仪 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下匀浆, 匀浆物在 $2500\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 下离心 10 min, 取上清. 按试剂盒(南京建成生物工程研究所)说明书操作步骤分别测定丙二醛(MDA, A003-1-1)、总抗氧化能力(T-AOC, A015-2-1)、超氧化物歧化酶(SOD, WST-1)、过氧化氢酶(CAT, A007-1-1)、丙酮酸激酶(PK, A076-1-1)的吸光度, 并计算各物质浓度和酶的活性. 按照 Crab Cortisol ELISA 试剂盒(上海桥杜生物科技有限公司)的说明书操作步骤测定血清中皮质醇的吸光度, 并计算皮质醇含量.

称取 0.1 g 肌肉样品, 按照肝胰腺处理方法将

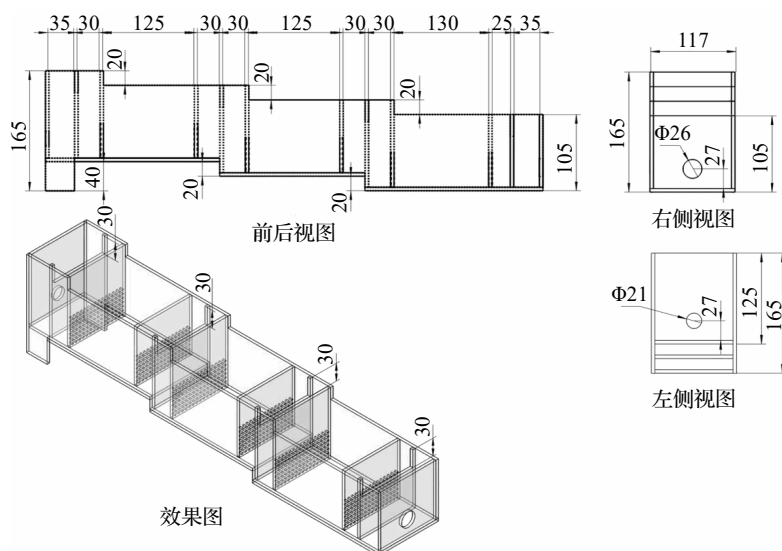


图 1 阶梯式流水槽(单位: mm)

肌肉组织匀浆、离心、取上清, 按照试剂盒(南京建成生物工程研究所)说明书操作步骤, 分别测定肌肉中的肌糖原(A043-1-1)和乳酸(A019-2-1)含量。

1.5 蜕壳相关基因的测定

称取 0.3 g 肌肉组织, 加入 1 mL Trizol 试剂(南京诺唯赞生物科技股份有限公司)以提取肌肉中的总 RNA, 用超微量分光光度计检测 RNA 纯度, 用琼脂糖凝胶电泳法测定 RNA 的完整性。按照 HiFiScript cDNA 试剂盒(TaKaRa 公司)说明书的操作步骤, 将 RNA 反转录为 cDNA。为测定流速对蜕壳相关基因表达的影响, 以 β -actin 作为内参基因, 分别测定蜕壳激素受体基因(*EcR*)和蜕壳抑制激素基因(*MIH*)的表达情况。所用引物序列见表 1。

表 1 靶标基因的 PCR 引物序列

基因	引物序列(5'→3')	参考文献
<i>EcR-F</i>	TCTTCCGTTTCTGTCGCAAC	[7]
<i>EcR-R</i>	CAAGTTTCCAAGGGTTCGCA	
<i>MIH-F</i>	CCGCGCTAACTCCAGATTTT	
<i>MIH-R</i>	TTGCCAGTATCGGTGTGAGA	[8]
β -actin-F	GAGCGAGAAATCGTTCGTGAC	
β -actin-R	GGAAGGAAGGCTGGAAGAGAG	

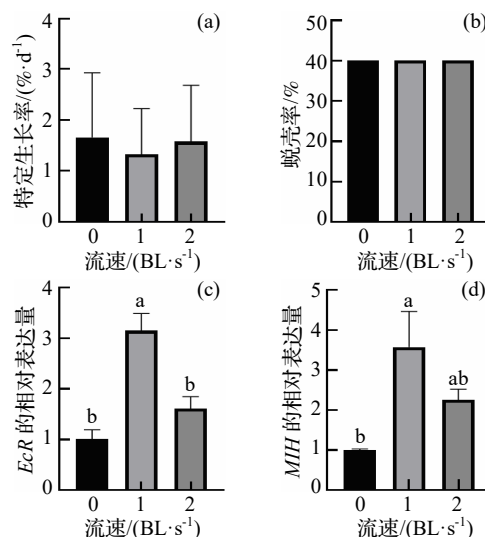
将反转录的 cDNA 在荧光定量 PCR 仪(LightCycler®480, 瑞士 Roche 公司)上进行 PCR 扩增, 反应总体系为 20 μ L: TB Green 10 μ L、primerF 0.8 μ L、primerR 0.8 μ L、DyeII 0.4 μ L、cDNA 2 μ L、ddH₂O 6 μ L。PCR 反应程序: 95 $^{\circ}$ C 预变性 5 s; 95 $^{\circ}$ C 15 s, 59 $^{\circ}$ C 15 s, 72 $^{\circ}$ C 15 s, 72 $^{\circ}$ C 1 s, 40 个循环; 40 $^{\circ}$ C 10 s。根据 $2^{-\Delta\Delta C_t}$ 方法对定量数据进行分析^[9]。利用 GraphPad Prism 8.0.1 软件对各流速组数据进行单因素方差分析(One way ANOVA), 以 $P < 0.05$ 为差异显著。

2 结果与分析

2.1 流速对青蟹生长的影响

在不同流速下养殖 30 d 后, 各组间青蟹的特定生长率无显著差异(图 2(a))。每组青蟹各有 2 只蜕壳, 各组间青蟹的蜕壳率相同(图 2(b)), 但流速显著影响了蜕壳相关基因的表达。具体表现在 1 BL·s⁻¹ 流速显著激活了肌肉中 *EcR* 基因的相对表达($P < 0.05$), 但 2 BL·s⁻¹ 流速与对照组无显著差异

(图 2(c))。与此类似, 1 BL·s⁻¹ 流速显著激活了肌肉中 *MIH* 基因的相对表达($P < 0.05$), 但 2 BL·s⁻¹ 流速与对照组无显著差异(图 2(d))。

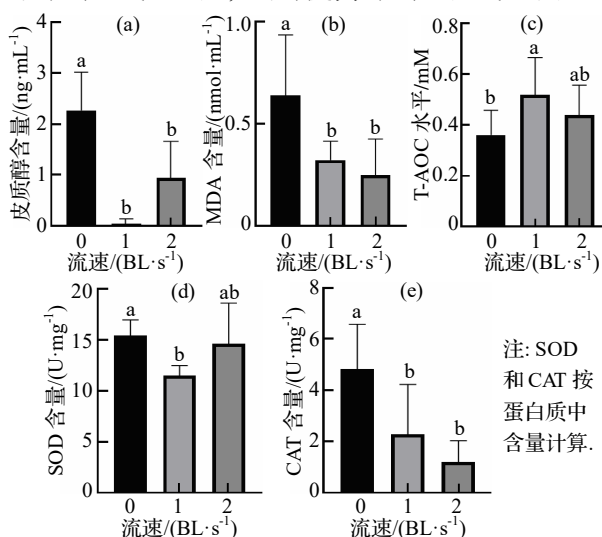


注: 不同字母表示两组间存在显著差异($P < 0.05$), 下同。

图 2 流速对青蟹生长的影响

2.2 流速对青蟹生理应激压力的影响

养殖 30 d 后, 流速导致了青蟹血清中皮质醇含量显著降低($P < 0.05$)(图 3(a)), 表明流速降低了外界环境对青蟹的应激压力。在氧化压力方面, 流动水体可显著降低肝胰腺中的 MDA 水平($P < 0.05$)(图 3(b)), 与此同时, 1 BL·s⁻¹ 流速显著提高了肝胰腺的 T-AOC 水平, 显著降低了 SOD 和 CAT 水平($P < 0.05$), 但 2 BL·s⁻¹ 流速对这些指标的影响弱于 1 BL·s⁻¹ (图 3(c)~(e))。这些结果表明, 流速可降低对青蟹的氧化压力, 同时提高青蟹的抗氧化能力。



注: SOD 和 CAT 按蛋白质含量计算。

图 3 流速对青蟹生理应激压力的影响

2.3 流速对青蟹糖代谢的影响

在不同流速下养殖 30 d 后, 流动水体导致青蟹肝胰腺中 PK 活力的显著降低($P<0.05$), 但未引起肌肉中乳酸水平的显著变化。值得注意的是, $2 \text{ BL}\cdot\text{s}^{-1}$ 流速导致了肌糖原水平的显著升高($P<0.05$) (图 4)。

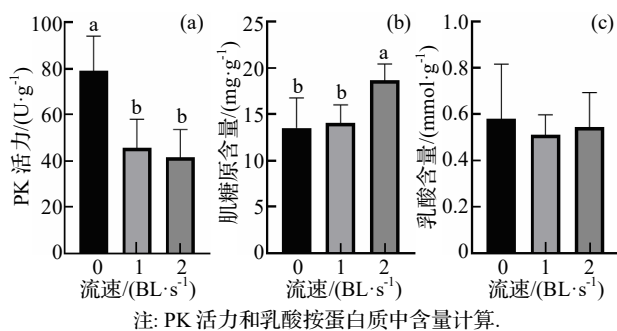


图 4 流速对青蟹糖代谢的影响

3 讨论

在循环水养殖中, 适宜的流速不仅能促进鱼、虾的生长和存活, 还能提高鱼的福利^[4]。如流速能促进大西洋鲑(*Atlantic salmon*)幼鱼的体重增加, $1 \text{ BL}\cdot\text{s}^{-1}$ 流速是大西洋鲑福利的最佳流速^[10]。又如, 水平水流可促进凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)的生长和存活, 而且对虾规格更整齐^[11]。但本研究中, 不同流速下青蟹的生长表型无显著变化, 可能与青蟹这一物种的活动特性有关, 在大多数情况下, 青蟹都潜伏在养殖槽角落不活动, 削弱了水流对蟹的运动训练。尽管如此, 在分子水平上, 流速激活了蜕壳相关基因的表达。其中, *EcR* 是一种转录因子基因, 属于核受体超家族。 *EcR* 表达的蜕壳激素受体可与蜕壳激素结合, 促进青蟹蜕壳^[12]。而 *MIH* 属于高血糖激素家族基因, 能表达蜕壳抑制激素, 可与蜕壳激素互为拮抗, 以抑制青蟹蜕壳^[12]。这两种基因的表达产物功能不同, 所导致的蜕壳结果也不同, 但在流速刺激下呈现出相似的表达变化。这种现象在暴露于 $0.065 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 草甘膦 7 d 后的雄性斜纹沼虾(*Macrobrachium potiuna*)中也被观察到^[13]。de Melo 等^[13]认为, 草甘膦可作用于斜纹沼虾的 YO 器官, 引起蜕皮激素 20-羟基蜕皮甾酮(20-HE)水平的提高, 20-HE 正向调控 *EcR* 的合成。20-HE 上调 *EcR* 的转录现象已在钩虾(*Gammarus pulex*)中被证实^[14]。但另一方面, 提高的 20-HE 可

导致钩虾和太平洋黄道蟹(*Cancer antennarius*)中 *MIH* 表达水平的提高^[14-15], 从而负反馈刺激了 *MIH* 的释放。因此, 在流动水体中, *EcR* 表达的上调促进青蟹蜕壳, 但同时 *MIH* 表达的上调又对青蟹蜕壳有抑制作用。在这双重调控作用下, 青蟹的蜕壳表型变化不显著。

尽管流速对青蟹生长的影响不显著, 但对青蟹的生理造成了一定的影响。首先在生理应激压力上, 流速引起了血清中皮质醇水平的显著下降。皮质醇是一种肾上腺皮质激素^[16], 能表征生物体的生理压力, 已被广泛应用于指示光照、氨和养殖容器等多种外界因子对水产动物的生理压力^[17-19]。皮质醇水平越高, 表明水产动物受到的生理压力越大^[20]。因此, 本研究中皮质醇水平的显著降低可能指示着流动水体消减了外界环境对青蟹的生理压力。其次, 在氧化压力上, 流速降低了青蟹体内的氧化损伤, 表现在 MDA 水平的显著下降。MDA 是活性氧自由基(ROS)攻击生物膜中的磷脂、酶和不饱和脂肪酸时形成的脂质过氧化物, 其大小可反映机体内脂质过氧化水平和机体细胞受自由基攻击的损伤程度^[21]。如高流速可显著降低大口鲈鱼(*Micropterus salmoides*)的 MDA 水平, 这是由于流速加快了鱼的新陈代谢, 从而加快了 ROS 的清除^[22]。尽管青蟹在流动水体中的运动不活跃, 但流水的冲击可能提高了青蟹的新陈代谢, 从而降低了 MDA 的水平。与此同时, 提高的 T-AOC 和降低的抗氧化酶活性进一步佐证了这个猜测。T-AOC 是衡量生物体抗氧化能力的综合性指标, 其大小可反映生物体抗氧化酶系统和非酶系统对外界刺激的适应、补偿能力以及生物体自由基代谢的状态^[23]。显然, 流动水体提高了青蟹抵御外界氧化胁迫的能力。SOD 和 CAT 是生物体清除体内 ROS 的抗氧化酶系统。SOD 负责把 ROS 歧化为氧和过氧化氢, CAT 负责把过氧化氢分解成水和氧气^[24-25]。这两个酶活性的降低表明流动水体确实可降低对青蟹的氧化胁迫。最后, 流速影响了青蟹的糖代谢。在糖酵解中, PK 负责催化磷酸烯醇式丙酮酸转化为丙酮酸, 同时产生 ATP^[26]。一定的流速显著降低了 PK 活性, 表明青蟹在流动水体中的糖酵解代谢能力下降。Lemos 等^[27]认为 PK 活性高是无氧代谢增强的标志, 由此推断流动水体改善了静水条件下

青蟹的缺氧状态。此外, 乳酸被认为是机体的通用能量来源, 只有在运动过于剧烈或持久的情况下, 才作为代谢废物被释放出来^[28]。青蟹的生活习性决定了相对较少的自主活动, 因此很难使青蟹因为活动而达到过度疲劳状态, 这可能也是流速对青蟹肌肉中乳酸水平影响不大的原因。而且相比于静水状态, 流水减少了青蟹的活动, 特别在高流速条件下, 青蟹躲避在流速相对较小的角落中, 可能正是活动的减少导致了肌肉中存储了更多的能量物质——肌糖原^[29], 这可能意味着流水养殖的青蟹会变得更肥满, 尽管在本研究时间内未观察到青蟹体质量的明显增加。

4 结论

本研究发现尽管 30 d 的流水养殖导致了蜕壳相关基因 *EcR* 和 *MIH* 表达的上调, 但未对青蟹幼蟹的生长产生显著影响; 在生理上, 流速增加了幼蟹肌肉中的能量储存, 但影响了糖代谢。与其他两个流速相比较, $1 \text{ BL} \cdot \text{s}^{-1}$ 流速显著降低了幼蟹的应激反应, 提高了其抗氧化能力, 这可为青蟹循环水养殖技术的优化提供理论参考。

参考文献:

- [1] Brown E J, Bruce M, Pether S, et al. Do swimming fish always grow fast? Investigating the magnitude and physiological basis of exercise-induced growth in juvenile New Zealand yellowtail kingfish, *Seriola lalandi* [J]. *Fish Physiology and Biochemistry*, 2011, 37(2):327-336.
- [2] Yuan J L, Ni M, Liu M, et al. Analysis of the growth performances, muscle quality, blood biochemistry and antioxidant status of *Micropterus salmoides* farmed in in-pond raceway systems versus usual-pond systems[J]. *Aquaculture*, 2019, 511:734241.
- [3] Liu G, Wu Y, Qin X, et al. The effect of aerobic exercise training on growth performance, innate immune response and disease resistance in juvenile *Schizothorax prenanti* [J]. *Aquaculture*, 2018, 486:18-25.
- [4] Li X, Ji L, Wu L, et al. Effect of flow velocity on the growth, stress and immune responses of turbot (*Scophthalmus maximus*) in recirculating aquaculture systems[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2019, 86:1169-1176.
- [5] 彭慧婧, 邹杰, 蔡德建, 等. 拟穴青蟹幼体变态与弧菌浓度的动态变化关系[J]. *水产科技情报*, 2011, 38(3): 131-135.
- [6] 宋振荣. 水产动物病理学[M]. 厦门: 厦门大学出版社, 2009.
- [7] Zhou M, Jia X, Wan H, et al. miR-34 regulates reproduction by inhibiting the expression of *MIH*, *CHH*, *EcR*, and *FAMeT* genes in mud crab *Scylla paramamosain* [J]. *Molecular Reproduction and Development*, 2019, 86(2):122-131.
- [8] Yang Y N, Ye H H, Huang H Y, et al. Characterization and expression of *SpHsp60* in hemocytes after challenge to bacterial, osmotic and thermal stress from the mud crab *Scylla paramamosain*[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2013, 35(4):1185-1191.
- [9] Livak K J, Schmittgen T D. Analysis of relative gene expression data using real-time quantitative PCR and the $2^{-\Delta\Delta C_T}$ method[J]. *Methods*, 2001, 25(4):402-408.
- [10] Timmerhaus G, Lazado C C, Cabillon N A R, et al. The optimum velocity for *Atlantic salmon* post-smolts in RAS is a compromise between muscle growth and fish welfare [J]. *Aquaculture*, 2021, 532:736076.
- [11] 戴习林, 臧维玲, 张韬. 水流对凡纳滨对虾幼虾生长和存活的影响[J]. *上海水产大学学报*, 2008, 17(1):52-57.
- [12] 梁萌萌. 拟穴青蟹 miR-34/miR277/miR279 的表达特征及其对眼柄重要基因的调控[D]. 厦门: 集美大学, 2017.
- [13] de Melo M S, Nazari E M, Joaquim-Justo C, et al. Effects of low glyphosate-based herbicide concentrations on endocrine-related gene expression in the decapoda *Macrobrachium potituna*[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(21):21535-21545.
- [14] Gismondi E. Identification of molt-inhibiting hormone and ecdysteroid receptor cDNA sequences in *Gammarus pulex*, and variations after endocrine disruptor exposures [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 158: 9-17.
- [15] Mattson M P, Spaziani E. Evidence for ecdysteroid feedback on release of molt-inhibiting hormone from crab eyestalk Ganglia[J]. *The Biological Bulletin*, 1986, 171(1):264-273.
- [16] Gregory T R, Wood C M. The effects of chronic plasma cortisol elevation on the feeding behaviour, growth, competitive ability, and swimming performance of juvenile rainbow trout[J]. *Physiological and Biochemical Zoology*, 1999, 72(3):286-295.
- [17] Li N, Zhou J, Wang H, et al. Effect of light intensity on digestion and immune responses, plasma cortisol and amino acid composition of *Scylla paramamosain* during indoor overwintering[J]. *Aquaculture Research*, 2020,

- 51(12):5005-5014.
- [18] Zeitoun M M, El-Azrak K E D M, Zaki M A, et al. Effects of ammonia toxicity on growth performance, cortisol, glucose and hematological response of Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*)[J]. Aceh Journal of Animal Science, 2016, 1(1):21-28.
- [19] Yu K, Shi C, Liu X, et al. Tank bottom area influences the growth, molting, stress response, and antioxidant capacity of juvenile mud crab *Scylla paramamosain*[J]. Aquaculture, 2022, 548:737705.
- [20] Barcellos L J G, Marqueze A, Trapp M, et al. The effects of fasting on cortisol, blood glucose and liver and muscle glycogen in adult *jundiá Rhamdia quelen*[J]. Aquaculture, 2010, 300(1/2/3/4):231-236.
- [21] 曹洪, 张颖, 张功礼. 丹参注射液预防深静脉血栓形成的实验研究[J]. 时珍国医国药, 2008, 19(5):1146-1148.
- [22] Chen Z, Ye Z, Ji M, et al. Effects of flow velocity on growth and physiology of juvenile largemouth bass (*Micropterus salmoides*) in recirculating aquaculture systems[J]. Aquaculture Research, 2021, 52(7):3093-3100.
- [23] 郭婷. 铬暴露对草鱼的氧化损伤及抗氧化能力的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2013.
- [24] 朱秀敏. 超氧化物歧化酶的生理活性[J]. 当代医学, 2011, 17(15):26-27.
- [25] 毛佳楠. 朱瑾缓慢捻进针法对衰老模型大鼠肝肾组织 SOD、CAT 等的表达及细胞凋亡的影响[D]. 南宁: 广西中医药大学, 2021.
- [26] Gómez-Milán E, Cardenete G, Sánchez-Muros M J. Annual variations in the specific activity of fructose 1, 6-bisphosphatase, alanine aminotransferase and pyruvate kinase in the *Sparus aurata* liver[J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology, 2007, 147(1):49-55.
- [27] Lemos D, Salomon M, Gomes V, et al. Citrate synthase and pyruvate kinase activities during early life stages of the shrimp *Farfantepenaeus paulensis* (Crustacea, Decapoda, Penaeidae): Effects of development and temperature[J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology, 2003, 135(4):707-719.
- [28] Rabinowitz J D, Enerbäck S. Lactate: The ugly duckling of energy metabolism[J]. Nature Metabolism, 2020, 2(7): 566-571.
- [29] 魏守刚, 杨则宜, 高红. 不同运动训练方式和补剂对大鼠肌糖原生物合成的影响[J]. 中国运动医学杂志, 2003, 22(1):35-40.

Effects of flow velocity on growth, stress and glucose metabolism of mud crab *Scylla paramamosain*

ZHAO Zijian¹, DING Aixia², REN Zhiming³, SHI Ce¹, MU Changkao¹, WANG Chunlin¹, YE Yangfang^{1*}

(1.School of Marine Sciences, Ningbo University, Ningbo 315832, China;

2.School of Civil & Environmental Engineering and Geography Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

3.Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: The current study was designed to examine the effect of flow velocity on growth performance, stress, and glucose metabolism of mud crab *Scylla paramamosain*. Juvenile crabs were subjected to recirculating water at different velocities including 0, 1, and 2 body length (BL)·s⁻¹ for 30 days. The results showed that flow velocity had no significant effect on crab growth despite the significantly increased expression of molting-related genes including ecdysteroid receptor gene and molt-inhibiting hormone gene. Further, flow velocity produced a significant decrease in the levels of serum cortisol and hepatopancreas malonaldehyde. Especially, the 1 BL·s⁻¹ velocity significantly improved hepatopancreas total antioxidative capacity and inhibited the antioxidative enzymes, as compared with the 2 BL·s⁻¹ velocity. In addition, flow velocity resulted in a depressed activity of hepatopancreas pyruvate kinase and had no major effect on muscle lactate level. The 2 BL·s⁻¹ velocity led to a highly elevated level of muscle glycogen. These findings suggest that the moderate flow velocity reduces the physiological and oxidative stress, enhances antioxidative capacity, and increases muscle energy storage without the alteration of mud crab growth performance.

Key words: *Scylla paramamosain*; recirculating aquaculture; flow velocity

(责任编辑 韩 超)