



室内循环养殖系统中曝气流量对尼罗罗非鱼生长的影响

程香菊^{1*}, 肖耿锋¹, 谢骏², 舒锐³

- (1. 华南理工大学土木与交通学院, 广东 广州 510641;
2. 中国水产科学研究院珠江水产研究所, 广东 广州 510380;
3. 广州观星农业科技有限公司, 广东 广州 511453)

摘要: 曝气流量是曝气推流循环养殖系统的重要控制性因素, 为综合研究不同曝气流量对鱼类生长和鱼肉品质的影响, 参照野外养殖基地, 利用自行设计的室内循环流水养殖模型, 在 0、30 和 50 L/min 三组曝气条件下, 以尼罗罗非鱼 [初始体质量为 (23.61±3.50) g] 为对象, 进行为期 56 d 的研究。结果显示: ① 30 L/min 组中尼罗罗非鱼的最终体质量和特定生长率分别为 (79.56±3.82) g 和 (2.81±0.54)%/d, 其中特定生长率比 0 和 50 L/min 组分别高出 11.07% 和 8.49%, 同时该曝气流量下血清中的总蛋白和甘油三酯浓度较高, 而尿素氮浓度较低, 比如第 56 天时总蛋白浓度比 0 和 50 L/min 组分别高出 57.43% 和 10.43%, 甘油三酯浓度则分别高出 22.19% 和 12.32%, 但尿素氮浓度降低了 39.02% 和 37.50%。葡萄糖浓度受曝气流量影响不显著。50 L/min 组谷丙转氨酶和谷草转氨酶活性高于 0 和 30 L/min 组; ② 第 56 天时 30 L/min 组中鱼肉的硬度、弹性和咀嚼性高于 0 和 50 L/min 组, 硬度分别比 0 和 50 L/min 组高出 27.10% 和 15.85%, 弹性高出 9.10% 和 3.54%, 咀嚼性高出 42.25% 和 24.06%, 而回复性在 50 L/min 组略高于其他两组。研究表明, 低曝气流量 (0 L/min) 下, 由于缺少水流刺激和溶解氧含量不足, 导致尼罗罗非鱼生长速率缓慢; 而高曝气流量 (50 L/min) 下流速过大会加快尼罗罗非鱼体内营养物质的消耗; 中等曝气流量 (30 L/min) 最有利于尼罗罗非鱼的生长和鱼肉品质的提升。

关键词: 尼罗罗非鱼; 曝气流量; 循环养殖系统; 生长; 品质

中图分类号: S 954

文献标志码: A

中国作为水产养殖大国, 2018 年水产养殖产量超过 5 000 万 t, 占全世界总产量的 60% 以上。全国现有池塘养殖面积约 293 万 hm², 约占水产养殖总面积的 39%^[1-2]。传统的水产养殖模式存在日益严重的水资源浪费和对周围水体污染等问题, 使用循环养殖模式能够有效节约养殖用水、促进水体流动、减少能耗和处理养殖废弃物等^[3]。微孔曝气增氧作为不同于叶轮式和水车式等机械增氧的养殖手段, 能够使养殖水体旋转和上下对流, 提高氧传质效率, 同时加快水

体中氨氮和亚硝酸盐氮的氧化^[4], 如李燕等^[5]研究发现, 相比于叶轮机增氧, 使用微孔增氧能够有效提高凡纳滨对虾 (*Litopenaeus vannamei*) 的产量, 同时降低饲料系数; 黄爱华等^[6]发现, 微孔增氧条件下水体中的亚硝酸盐氮、硫化氢等有害物质浓度较低, 同时水体中溶解氧含量和 pH 较高, 有利于鱼类生长。

曝气推流循环养殖系统是将循环养殖模式与微孔增氧技术进行结合, 从水产养殖学、水动力学、水环境学等多学科交叉融合的角度对

收稿日期: 2019-10-09 修回日期: 2019-11-13

资助项目: 国家自然科学基金 (51579106); 广东省促进经济发展专项 (SDYY-2018-07)

通信作者: 程香菊, E-mail: chengxiangju@scut.edu.cn

该新型水产养殖模式进行优化设计,使之更符合渔业生产的实际要求。

以往的研究发现,曝气推流循环养殖系统中,曝气主要引起水体的流速和溶解氧含量的变化^[7-8]。有研究表明,对于趋流性鱼类,水流会改变鱼类在水中的游泳响应、鱼群结构和身体形态,也会影响鱼类的生长和食物利用效率^[9]。刘稳等^[10]通过水槽实验研究不同流速、流速梯度和动能梯度与鲫(*Carassius auratus*)生长的关系,该研究发现流速对鱼类的生长存在胁迫作用且存在适合鲫生长的流速条件(0.20 m/s)。Belal^[11]发现在半循环养殖系统中,尼罗罗非鱼[(8.00±0.07) g]最适宜的生长环境是水体流速为0.35 m/s,此时罗非鱼摄食量较大,且能更好地将饲料转化为自身体质量。鱼类体内90%的生命活动都依赖氧气的参与,溶解氧含量过低时鱼类生长受到抑制甚至死亡,而溶解氧含量过高时将增大鱼类患气泡病风险,水体中溶解氧过饱和导致鱼类死亡的现象在高坝泄流过程中尤为显著^[12]。此外,流速和溶解氧含量还可能影响养殖水体中水质氮素的浓度,间接影响鱼类生长。孙国祥等^[13]通过对封闭循环水养殖大菱鲂(*Scophthalmus maximus*)的研究发现,大菱鲂的生长随流速增大先快速上升后缓升趋稳,水质氮素浓度随流速的增大先快速下降后缓降趋稳;氧气参与硝化和反硝化反应,将对水生生物毒性较强的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 转化为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$,可以降低有毒氮素对鱼类的毒害作用。

然而,目前对曝气推流循环水体养殖模式的研究和应用的主要关注点还在于提高养殖密度上^[14],未从根本上考虑曝气流量改变引起的水环境因子变化对鱼类生长和鱼肉品质的影响。随着人民生活水平的不断提高和物质水平的极大丰富,消费者对于鱼肉的品质提出了更高要求,比如“瘦身鱼”在珠三角地区备受青睐。考虑到室内模型实验能更系统、更精确地测量不同曝气流量下水环境因子并对鱼类生长状态进行评价,因此,本研究参照野外养殖基地,采用自行设计的室内曝气推流循环养殖系统,以尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)为对象,探究56 d养殖周期内尼罗罗非鱼生长指标、血清生化指标和鱼肉质构指标的变化,综合评价循环养殖模式下曝气流量的改变对鱼类生长以及鱼肉品质的影响,为新型水产养殖模式的推广、养殖

过程中曝气流量优化选择和量化水环境因子与鱼类生长的关系提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 室内曝气推流循环水体养殖模型

本实验设置了3组不同曝气流量(0、30和50 L/min),为了参照对比,制作了3个相同的曝气推流循环水体养殖模型。根据实地考察调研,每个模型尺寸确定为3.70 m×3.10 m×0.75 m(长×宽×高)(图1)。养殖装置主体为钢筋混凝土结构,主要结构组成包括集中养鱼的水槽、曝气推流装置以及净水区域。为了获取同一曝气流量下的3组平行数据,一个模型包括了3组相同的曝气推流装置、3个相同的养殖水槽、净水区和动力系统。养殖水槽尺寸为2.2 m×0.3 m×0.4 m(长×宽×高),前后两端与净水区域连接,水槽三面均为10 cm厚的有机玻璃,槽底坡降*i*为0.01,单个玻璃水槽有效水体积为224.4 L。养殖水槽主要用于集中养鱼,压缩空气通过减压阀、气体流量计、节制阀到达曝气推流装置后,产生大量气泡自下而上推动水槽中的水体从入口到出口流动,通过施加不同大小的曝气流量,形成养殖水槽中不同的水环境条件(图2)。

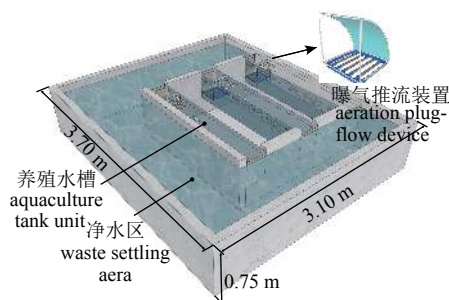


图1 室内曝气推流循环水体养殖模型

Fig. 1 Indoor aeration plug-flow recirculating aquaculture system model

1.2 实验对象

实验用鱼为同一品种同龄尼罗罗非鱼,实验开展前将尼罗罗非鱼在500 L的PE桶中暂养7 d。每日8:30和20:30投喂饲料(粗蛋白 $\geq 31.0\%$,粗脂肪 $\geq 4.0\%$),每次的投喂量为鱼体质量的3%左右,视水质情况每次更换约1/3的养殖用水。养殖用水采用已经充分曝气的自来水,以保证自来水中溶解氯气基本散逸。暂养期间采用气泵

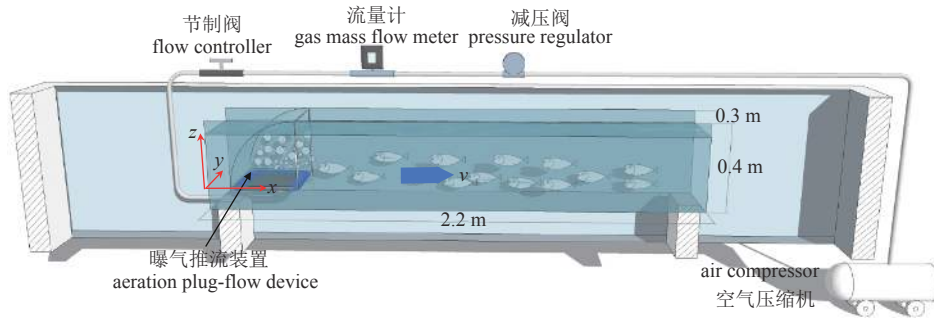


图2 养殖水槽及动力系统

x、y 和 z 表示水槽中三维坐标轴方向, 详见“水槽流速及溶解氧含量变化情况”, 下同

Fig. 2 Aquaculture raceway and the power system

x, y and z represent the directions of three-dimensional coordinate axes in the raceway, as shown in the section “Change of flow rate and DO concentration in the units”, the same below

不间断增氧, 每日监测水质变化情况, 测量指标: 水温 (26.73±1.20) °C, 溶解氧 (7.12±0.20) mg/L, pH 为 7.51±0.21。暂养结束后挑选出 135 条健康有活力且规格相近的幼鱼 [体长 (8.93±0.34) cm, 体质量 (23.61±3.50) g], 平均放入 9 个养殖水槽中。

正式实验时间为 2017 年 12 月 9 日—2018 年 2 月 3 日, 共 56 d。设置 3 组不同曝气流量, 养殖过程 24 h 不间断曝气, 并通过恒温加热棒控制水体温度为 (26.7±1.2) °C, 整个实验期间不更换养殖用水, 仅补充由于蒸发和水质测定损失的水分。喂食情况与暂养期间一致, 尼罗罗非鱼饱食后将剩余饲料捞出, 每周根据鱼的体质量做出喂食量调整。

1.3 水槽水流状态和溶解氧含量实测

水流速度的测量使用挪威 Nortek 公司的声学多普勒三维点式流速仪。沿养殖水槽的长宽高方向建立坐标系 (图 2), 养殖水槽 x-y 平面和 x-z 平面上的测点布置如图 3 所示, 共有 1 512 个测点。流速仪的采样频率设置为 25 Hz, 虽然流场中每个测点的流速方向和大小时刻变化, 但是在足够长的时间内, 其时均值是一个相对稳定的值。为确保数据的真实性, 每个测点筛选出信噪比 (SNR) ≥ 5, 相关系数 (correlation) ≥ 75% 约 500 个有效数据, 取其平均值作为测点流速。通过调节控制阀, 使曝气流量分别达到 0、30 和 50 L/min, 测出不同曝气流量下各测点的流速。

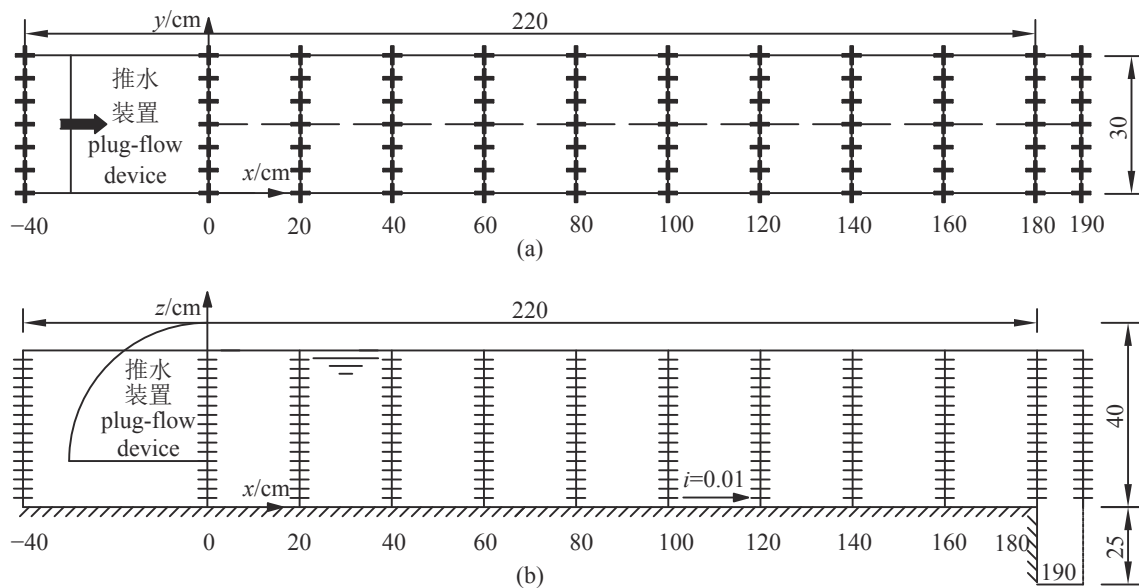


图3 x-y 平面 (a) 和 x-z 平面 (b) 流速测量点布置

Fig. 3 Arrangement of velocity measurement points in x-y plane (a) and x-z plane (b)

在实验开始之前(第0天)及其后,每间隔7天使用美国 YSI Pro ODO 光学 DO 测量仪测量不同曝气流量下溶解氧含量,同一曝气流量下取3个平行水槽和净水区域中各一个测点进行测量,最后计算其平均值作为该曝气流量下的溶解氧含量值。

1.4 鱼类生长和生化指标

生长指标 在实验开始及实验结束时测量每条尼罗罗非鱼的体质量。体质量测量使用精度为 0.01 g 的电子秤。生长指标采用特定生长率(SGR, %/d):

$$SGR = \frac{\ln W_2 - \ln W_1}{t} \times 100\%$$

式中, W_1 为实验开始之前不同曝气流量下鱼的平均体质量(g); W_2 为实验结束时鱼的平均体质量(g); t 为测量周期,本实验中为 56 d。

生化指标 在实验开始之前及其后,每间隔 28 d 测定 1 次生化指标。仪器采用 DP8018 型全自动生化分析仪(中国东唐仪器),测量指标包括谷丙转氨酶(alanine aminotransferase, ALT)、谷草转氨酶(aspartate aminotransferase, AST)、总蛋白(total protein, TP)、总胆固醇(total cholesterol, TCHO)、葡萄糖(glucose, GLU)和尿素氮(blood urea nitrogen, BUN)。测量时从每个水槽中各取 1 个样本,用无菌注射器从尼罗罗非鱼尾部抽取约 1 mL 静脉血,将血液迅速注入含有抗凝剂的离心管中,在 3 500 r/min 的转速下离心 20 min,随后转入生化样品杯进行生化指标分析。每次取血后对样品鱼做好标记,不再取用。

质构指标 鱼肉质构指标的测定与生化指标的测定同时进行。测量时从每个平行水槽中随机选取 1 条尼罗罗非鱼,共 9 条。取鱼中线以上背部的样品,去皮,切成厚 5 mm、长 10 mm、宽 10 mm 的方块。采用 Universal TA 质构分析仪(上海腾拔)进行全质构分析,使用直径为 35 mm 的平底柱形探头。测试条件:测试前探头下降速率为 2 mm/s,测试时探头压缩鱼肉的速率为 1 mm/s,测试后探头上升速率为 5 mm/s,试样压缩量为原高度的 25%,压缩间隔时间为 2 s,触发力值为 8 gf。每个样品测 3 次,取其平均值作为最后的质构指标值。测量参数:硬度(hardness)、弹性(springiness)、咀嚼性(chewiness)和回复性(resilience)。

1.5 数据处理

使用 SPSS Statics 22 统计软件对数据进行处理及统计分析,数据的方差一致性首先进行 Levene 检验,使用单因素方差分析(One-Way ANOVA)检验差异的显著水平,多重比较采用多范围检验(Duncan 氏)。检验显著水平 P 为 0.05,结果用平均值±标准差(mean±SD)表示。

2 结果

2.1 水槽流速及溶解氧含量变化情况

曝气流量为 0 L/min 时,水体接近于静止状态,利用插值法绘出曝气流量为 30 和 50 L/min 下代表断面 $y=20$ cm 处 $x-z$ 面的流速云图(图 4)。可以看出养殖水槽中的水流存在明显的分层和回流现象,最大流速出现在水表层,其中 30 L/min 组最大流速为 21.8 cm/s,50 L/min 组最大流速为 35.0 cm/s。回流区域主要集中在 x 轴方向 0~80 cm 范围内,形成水槽内部水体小循环,同时 50 L/min 组下部回流区域范围相比于 30 L/min 组较小,但流速与 30 L/min 组相近,皆为 9 cm/s。图 5 为养殖期间不同曝气流量下溶解氧含量变化情况,溶解氧含量同样与曝气流量成正相关,整个养殖期间,30 和 50 L/min 组的溶解氧含量基本保持在 5 mg/L 以上,平均值分别为 5.90 和 6.44 mg/L,但 0 L/min 组的溶解氧含量随时间不断下降,平均值仅为 3.26 mg/L,第 42 天时溶解氧含量低于 2 mg/L,不能满足鱼类的正常生长需求。

2.2 生长指标和生化指标

尼罗罗非鱼的初始体质量在曝气流量组间不存在显著差异,但在实验结束时,30 L/min 组的最终体质量和特定生长率均显著高于其他两组($P<0.05$),比如 30 L/min 组的最终体质量为(79.56±3.82)g,分别比 0 和 50 L/min 组高出 26.67% 和 13.98%;特定生长率为(2.81±0.54)%/d,分别比 0 和 50 L/min 组高出 11.07% 和 8.49%(表 1)。生化指标的变化是鱼类摄食、生长情况的内在反映。ALT 和 AST 主要存在于肝脏细胞和心肌细胞中,当相应细胞受损时,二者在血清中的浓度升高;TP、TCHO 和 GLU 作为能源物质,可以用于诊断鱼类的健康和营养状况;BUN 浓度可以比较准确地反映动物体内蛋白质代谢和氨基酸之间的平衡状况,氨基酸平衡良好时尿素

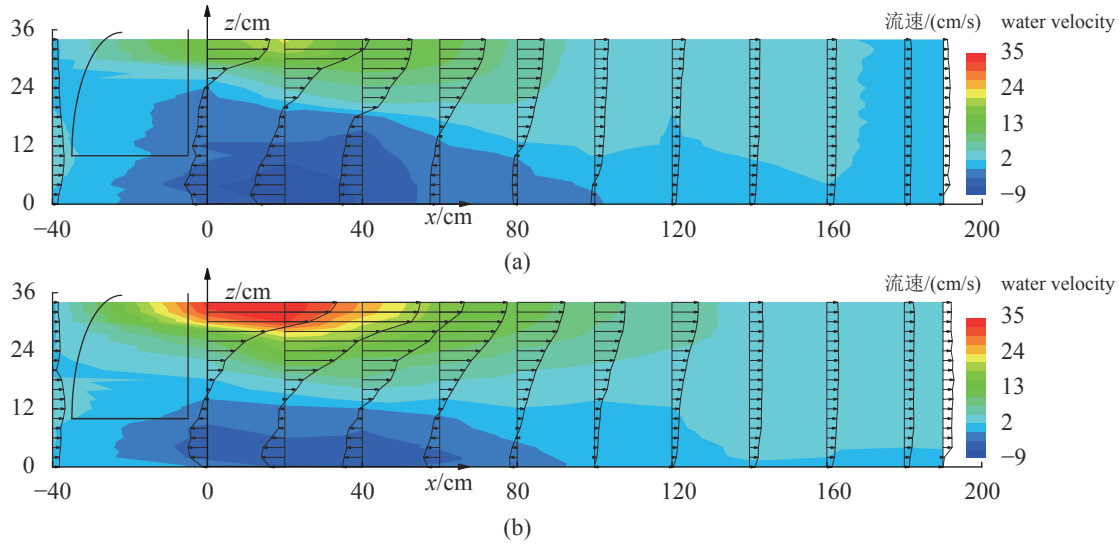


图 4 曝气流量为 30 L/min (a) 和 50 L/min (b) 时 x-z 平面流速分布

Fig. 4 x-z planar velocity distribution at 30 L/min (a) and 50 L/min (b) conditions

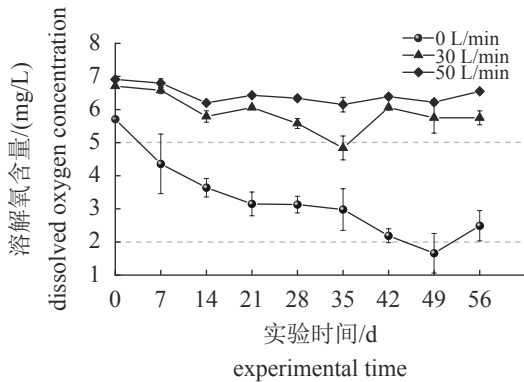


图 5 养殖期间溶解氧含量变化

Fig. 5 Changes of DO concentrations during the experiment

表 1 不同曝气流量下尼罗罗非鱼生长指标的变化情况

Tab. 1 Changes of the growth indices of *O. niloticus* at different aeration flow rates

指标 index	0 L/min	30 L/min	50 L/min
初始体质量/g initial body weight	23.55±3.02	23.70±3.25	23.48±3.79
最终体质量/g final body weight	62.81±2.82 ^b	79.56±3.82 ^a	69.80±5.25 ^{ab}
特定生长率/(%/d) SGR	2.53±0.54 ^c	2.81±0.54 ^a	2.59±0.44 ^{ab}

注: 同行上标的不同字母表示有显著性差异(P<0.05)
Notes: different letters in the same line indicate significant difference (P<0.05)

氮含量下降。3组曝气流量下, ALT、AST、TP和GLU浓度随时间呈现上升的趋势, 但是TCHO和BUN浓度变化趋势为先上升后下降(图6)。在有曝气条件下, ALT和AST浓度增加更为显著,

如50 L/min组的ALT和AST浓度从第0天到第56天分别增加了170.00%和160.47%, 而0 L/min组仅分别增长了104.41%和75.08%, 而且第56天时50 L/min组的ALT浓度比0和30 L/min组分别高出64.30%和24.26%, AST浓度则分别高出95.04%和69.53%。但是30 L/min组的TP、TCHO和GLU浓度增加更为明显, 同时保持BUN浓度处于较低水平, 比如第56天时TP浓度分别比0和50 L/min组高出57.43%和10.43%; TCHO浓度则分别高出22.19%和12.32%, 但BUN浓度反而分别降低了39.02%和37.50%。由此可见鱼类的生长过程中需要合理地曝气, 0和50 L/min组的尼罗罗非鱼生长速率都小于30 L/min组, 尼罗罗非鱼体内的营养物质积累减少。曝气不足对尼罗罗非鱼生长的抑制尤为明显, 过大的曝气流量也会对鱼类的内脏器官造成胁迫。

2.3 鱼肉质构指标

尼罗罗非鱼鱼肉的硬度、回复性和咀嚼性在不同曝气流量下随时间不存在显著差异(P>0.05), 其中硬度、弹性和回复性在不同曝气流量组都随时间先上升后趋于平稳, 而咀嚼性在不同曝气流量下随时间变化较小, 说明适宜的曝气流量对提升鱼肉的硬度、弹性和咀嚼性有一定的作用, 但曝气过大对鱼肉品质的改善不明显, 反而可能降低鱼肉品质(图7)。不同曝气流量对鱼肉品质的影响还表现为除了回复性外, 30 L/min组的硬度、弹性和咀嚼性在实验结束时

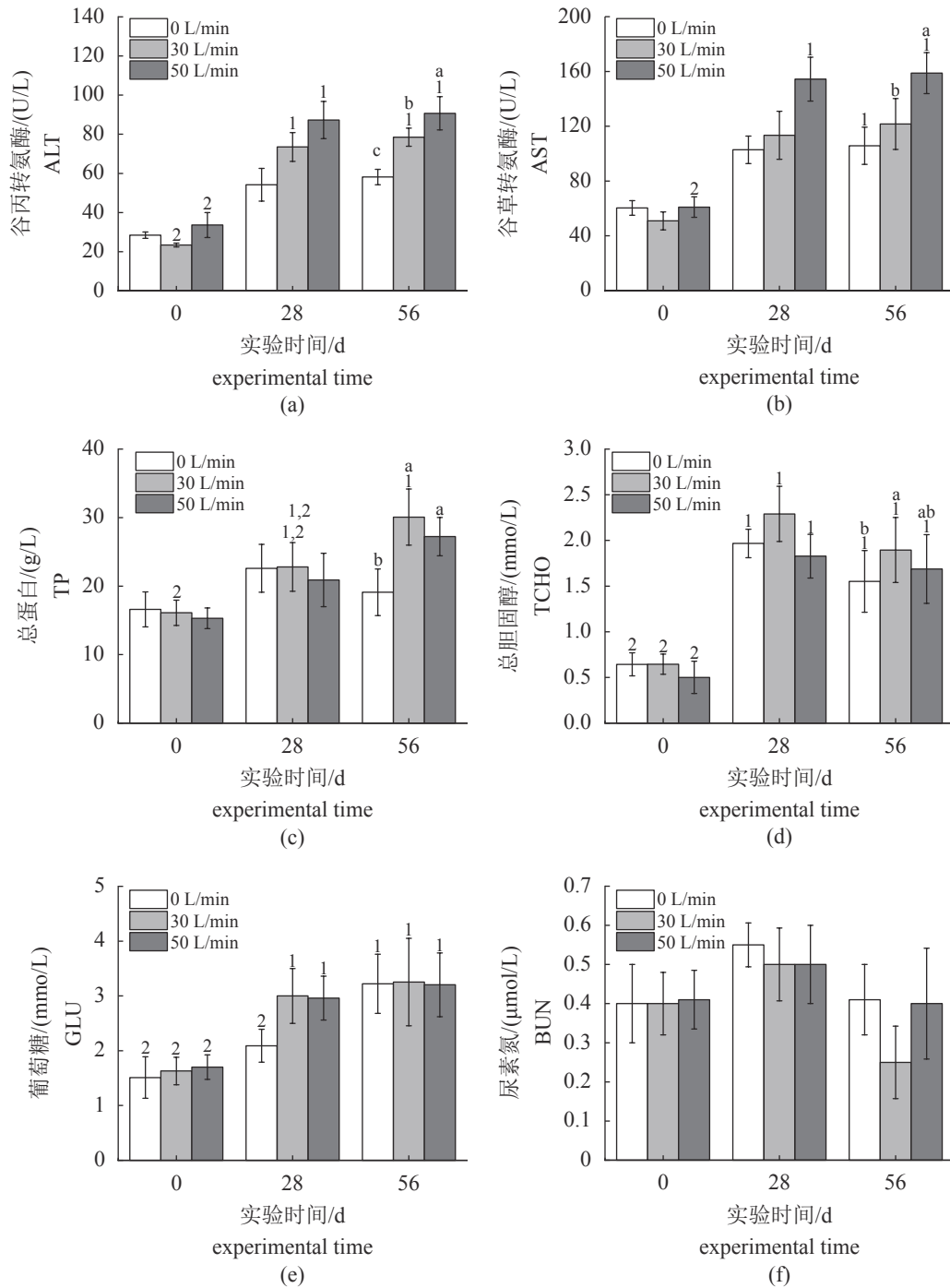


图 6 不同曝气流量下尼罗罗非鱼血清生化指标的变化情况

上标不同数字表示相同曝气流量组在不同时间存在显著差异 ($P < 0.05$), 上标不同字母表示相同时间不同曝气流量组之间存在显著差异 ($P < 0.05$), 下同

Fig. 6 Changes of the serum biochemical indices of *O. niloticus* at different aeration flow rates

Different superscript numbers indicate that significant differences exist at single aeration flow rate at different time ($P < 0.05$), and different superscript letters mean that there is a significant difference between groups with different aeration flow rates at the same time, the same below ($P < 0.05$)

都显著高于其他两组, 比如硬度在 30 L/min 组比 0 和 50 L/min 组分别高出 27.10% 和 15.85%, 弹性分别高出 9.10% 和 3.54%, 咀嚼性分别高出 42.25% 和 24.06%。回复性在 50 L/min 组略高于

其他两组, 第 56 天时回复性在 50 L/min 组分别比 0 和 30 L/min 组高出 4.05% 和 6.57%, 30 L/min 组的回复性最小。值得注意的是, 咀嚼性作为鱼肉品质评价的综合指标, 在第 28 和第 56 天,

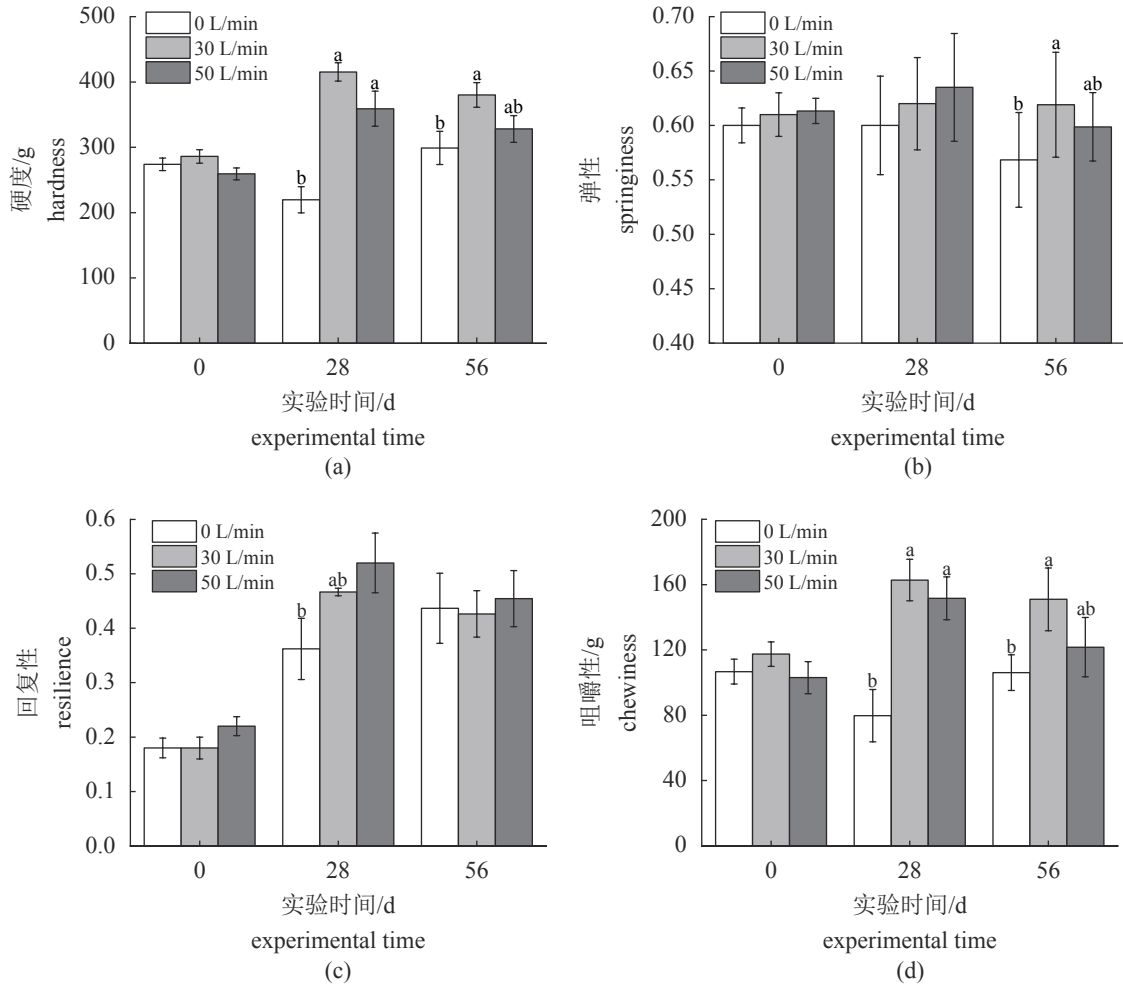


图7 不同曝气流量下尼罗罗非鱼肉质构指标变化情况

Fig. 7 Changes of the texture indices of *O. niloticus* at different aeration flow rates

其在 0 L/min 组显著低于其他两组, 说明无曝气环境中鱼肉的品质最差。

3 讨论

曝气推流循环养殖系统中, 曝气流量越大, 产生的气泡量越多, 气泡上升和向前运动过程中推动水体的流动强度越大, 同时气泡在与水体接触过程中, 由于气泡—水界面的质量传递以及自由水表面的湍动作用加强, 溶解到水中的氧气越多^[15]。

相比于其他流量组, 30 L/min 的曝气流量能够显著促进尼罗罗非鱼体质量的增加, 特定生长率也在该条件下达到最大, 50 L/min 组尼罗罗非鱼的生长情况次之, 0 L/min 组最差。有研究表明水流可以促进鱼类游泳运动, 刺激鱼类的生长。生活在静水中的鱼类, 由于无法做出感应水流的行为反应和方向判断, 鱼类活动强度

降低, 新陈代谢减慢, 导致生长速率下降^[16]。水流的刺激被认为能够促进鱼体的各项代谢活动和肠道的消化吸收功能, 导致鱼的摄食量增大、生长加快。但有研究发现, 当流速超过鱼类生长的适宜流速时, 大西洋鲑 (*Salmo solar*) 为了克服水流的冲击, 鱼会加强趋流行为和摆尾频率, 导致能量消耗增多, 生长速率减慢^[17], 这也解释了 50 L/min 组的尼罗罗非鱼血清中 ALT 和 AST 浓度相对于 30 L/min 组较高、但 TP 和 TCHO 浓度较低的原因, 因为长时间对抗水流冲击的游泳活动消耗大量营养物质, 同时对肝脏、心脏等器官造成胁迫, 内脏细胞容易损伤^[18]。但是 Belal^[11] 研究发现尼罗罗非鱼 [(8±0.07) g] 的适宜生长流速可以达到 35 cm/s, 这与本研究中的 50 L/min 组最大流速接近, 说明循环流水养殖系统中, 流速大小可能不是影响鱼类生长的单一环境因素。

溶解氧含量对于用鳃呼吸的水生生物维持

新陈代谢等生命活动至关重要, 水体中的氧气不仅可以直接影响鱼类的生命活动, 也可以通过影响养殖水体中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 等水质氮素的反应过程间接影响鱼类生长^[19]。0 L/min组在实验中后期的养殖水体溶解氧含量显然不能满足尼罗罗非鱼生长的要求, Tran-Duy等^[19]发现尼罗罗非鱼在低溶解氧含量下(3.0 mg/L)摄食量减少, 并且不能通过血液指标的调整来适应溶解氧的变化, 但其他鱼类, 如大菱鲆能够调整其生理活动, 在一定时间后适应低氧环境^[20]。更多的研究则发现低氧情况会抑制鱼类的摄食消化水平, 代谢活动能量损耗加快并且排泄过程中更多氮元素流失, 导致饲料系数升高甚至出现内脏氧化损伤^[21]。鱼类克服这种不利影响的途径之一是降低有氧活动的代谢强度和细胞中的脂质和蛋白质含量^[22], 这可能导致血清中TP和TCHO浓度降低, 而BUN浓度增大, 类似的结果也出现在对许氏平鲷(*Sebastes schlegelii*)的研究中^[23]。溶解氧含量过高时, 虽然对鱼类也存在不利影响^[24], 但是30和50 L/min组溶解氧含量差异较小, 且都大于5 mg/L, 因此推断在本实验中, 0 L/min组中流速和溶解氧含量过低是抑制尼罗罗非鱼生长的重要因素, 而50 L/min组中水体流速过大是造成尼罗罗非鱼生长迟滞和内脏器官损伤的重要因素。可见循环水养殖模式中存在着最适宜的曝气流量, 该曝气流量可以促进尼罗罗非鱼对于营养物质的吸收转化, 在满足自身消耗需求的同时获得最佳的生长情况。

鱼的增产是养殖户普遍关心的问题, 但是消费者往往更关心鱼肉的品质。鱼肉质构参数是通过模拟口腔咀嚼对鱼肉做出评价的一种方法。在本实验中, 30 L/min组的硬度、弹性和咀嚼性在实验结束时都显著高于其他两个曝气组, 而50 L/min组的回复性略高于其他两组, 说明对水体适当曝气可以改善鱼肉品质。这是因为持续的水流作用有利于增大鱼肉肌纤维密度, 同时鱼类对抗水流冲击, 自身运动能力也得到强化^[25]; 而长期处于低氧(约70%氧饱和度)的环境中鱼类会变得富有攻击性, 鱼群之间容易因为频繁接触造成机体损伤^[26], 鱼肉品质变差。此外, 林婉玲等^[27]认为水分、脂肪和蛋白质是影响鱼类肌肉质构特性的因素, 所以50 L/min组鱼肉的硬度、弹性和咀嚼性小于30 L/min组可能是由于尼罗罗非鱼肌肉细胞吸收营养物质减少所

<https://www.china-fishery.cn>

致。本实验中, 0 L/min组中流速过低和溶解氧不足会导致鱼肉品质降低, 而50 L/min组中流速过大导致尼罗罗非鱼体内营养物质消耗加快也对鱼肉品质产生不良影响, 但是确定曝气流量对鱼肉品质的影响还可以从鱼肉的持水力、灰分和氨基酸等因素进行分析^[25], 本研究受限于实验条件, 未能对鱼肉的参数进行测量。

4 结论

通过在曝气推流循环养殖系统中设置不同的曝气流量(0、30和50 L/min), 研究曝气过程中养殖水槽水环境因子的变化及其对尼罗罗非鱼生长和鱼肉品质的影响, 发现曝气流量为30 L/min时, 尼罗罗非鱼最终体质量和特定增长率都显著高于其他曝气流量组($P<0.05$), 同时血清中总蛋白和总胆固醇的浓度也高于其他曝气流量组, 但尿素氮浓度较低。而谷丙转氨酶和谷草转氨酶浓度在50 L/min组中最大。

30 L/min组中鱼肉的硬度、弹性和咀嚼性在实验结束时都显著高于其他两组($P<0.05$), 鱼肉的回复性在50 L/min组略高于其他曝气组, 无曝气条件下最不利于鱼肉品质的提升。

综上, 曝气推流循环养殖系统的室内模型实验中, 曝气流量为30 L/min时可以提供适宜的水流条件和充足的溶解氧, 最有利于尼罗罗非鱼的生长和鱼肉品质的提升。此外, 曝气流量与鱼肉营养价值之间的关系还需进一步研究。虽然室内实验与实际养殖生长存在一定的差距, 但可以借鉴该结论, 利用模型之间的几何比尺关系, 外推到野外现场。

参考文献:

- [1] Wang Q D, Cheng L, Liu J S, *et al.* Freshwater aquaculture in PR China: trends and prospects[J]. *Reviews in Aquaculture*, 2015, 7(4): 283-302.
 - [2] FAO. The state of world fisheries and aquaculture 2018-meeting the sustainable development goal[R]. Licence: FAO, 2018.
 - [3] 程香菊, 具家琪, 胡佳纯, 等. 循环水养殖模式下鱼生长对水环境因子的响应模型构建[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(11): 188-194.
- Cheng X J, Ju J Q, Hu J C, *et al.* Response model construction of fish growth to water environmental factors in recirculating aquaculture mode[J]. *Transactions of the 中国水产学会主办 sponsored by China Society of Fisheries*

- Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(11): 188-194(in Chinese).
- [4] 张巧鸽. 微孔增氧技术在池塘养殖中的应用[J]. 河南水产, 2016(2): 11-12.
Zhang Q G. Application of micropore oxygen aeration technology on pond aquaculture[J]. Henan Fisheries, 2016(2): 11-12(in Chinese).
- [5] 李燕, 李建忠, 叶军强, 等. 微孔曝气增氧与叶轮增氧机增氧在南美白对虾池塘养殖的应用比较[J]. 渔业现代化, 2012, 39(6): 21-25.
Li Y, Li J Z, Ye J Q, et al. Comparison the effects of using microporous oxygen aerator and impeller oxygen aerator on the *Penaeus vannamei* culturing in the ponds[J]. Fishery Modernization, 2012, 39(6): 21-25(in Chinese).
- [6] 黄爱华, 朱锦超. 黄颡鱼池塘养殖中使用微孔增氧技术与使用增氧机的效果分析[J]. 渔业致富指南, 2014(13): 59-62.
Huang A H, Zhu J C. Comparison of the effects of using microporous aeration with mechanical aeration in the pond culture of banded catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*)[J]. Fishery Guide to be Rich, 2014(13): 59-62(in Chinese).
- [7] Xiao R C, Wei Y G, An D, et al. A review on the research status and development trend of equipment in water treatment processes of recirculating aquaculture systems[J]. Reviews in Aquaculture, 2019, 11(3): 863-895.
- [8] 程香菊, 曾映雪, 谢骏, 等. 微孔曝气流量与曝气管长度对水体增氧性能的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(22): 209-217.
Cheng X J, Zeng Y X, Xie J, et al. Impact of microporous aeration flow and aeration tube length on oxygen transfer performance in water[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(22): 209-217(in Chinese).
- [9] Merino G E, Piedrahita R H, Conklin D E. Effect of water velocity on the growth of California halibut (*Paralichthys californicus*) juveniles[J]. Aquaculture, 2007, 271(1-4): 206-215.
- [10] 刘稳, 诸葛亦斯, 欧阳丽, 等. 水动力学条件对鱼类生长影响的试验研究[J]. 水科学进展, 2009, 20(6): 812-817.
Liu W, Zhuge Y S, Ouyang L, et al. Experimental study of the effect of hydrodynamic conditions on fish growth[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(6): 812-817(in Chinese).
- [11] Belal I E H. Effect of water velocity on tilapia *Oreochromis niloticus* fingerlings growth parameters and body composition[J]. Journal of Medical and Bioengineering, 2015, 4(6): 457-460.
- [12] 袁娜, 袁佺, 王远铭, 等. 总溶解气体过饱和对长薄鳅的急性和慢性致死效应研究[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(S2): 56-61.
Yuan Y, Yuan Q, Wang Y M, et al. Acute and chronic lethality of total dissolved gas supersaturated water on *Leptobotia elongata*[J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49(S2): 56-61(in Chinese).
- [13] 孙国祥, 李勇, 田喆, 等. 流速对封闭循环水养殖大菱鲆生长、摄食及水质氮素的影响[J]. 海洋科学, 2011, 35(5): 53-60.
Sun G X, Li Y, Tian Z, et al. Effects of flow rate on the growth, feed intake and water nitrogen in a closed recirculation aquaculture system of turbot (*Scophth maximus* L.)[J]. Marine Sciences, 2011, 35(5): 53-60(in Chinese).
- [14] Yao Y, Xiong C X, Xu L Q, et al. Application effect of micropore aeration technique in rearing process of summer fingerlings of *Silurus asotus* from Poyang lake[J]. Agricultural Biotechnology, 2016, 5(5): 30-32.
- [15] 李尔. 微孔曝气最优气泡群理论及其在复氧工程中的应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
Li E. Theory of optimal bubble group for fine bubble aeration and its application to reaeration engineering[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007(in Chinese).
- [16] Hockley F A, Wilson C A M E, Brew A, et al. Fish responses to flow velocity and turbulence in relation to size, sex and parasite load[J]. Journal of the Royal Society Interface, 2014, 11(91): 20130814.
- [17] Solstorm F, Solstorm D, Oppedal F, et al. Fast water currents reduce production performance of post-smolt Atlantic salmon *Salmo salar*[J]. Aquaculture Environment Interactions, 2015, 7(2): 125-134.
- [18] 宋波澜. 水流因子对红鳍银鲫 (*Barbodes schwanenfeldi*) 游泳行为、生长和生理生态影响的研究[D]. 广州: 暨南大学, 2008.
Song B L. Effects of water current on swimming activ-

- ity, growth and ecophysiological aspect of young *Barbodes schwanenfeldi*[D]. Guangzhou: Jinan University, 2008(in Chinese).
- [19] Tran-Duy A, Schrama J W, van Dam A A, *et al.* Effects of oxygen concentration and body weight on maximum feed intake, growth and hematological parameters of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*[J]. *Aquaculture*, 2008, 275(1-4): 152-162.
- [20] Pichavant K, Person-Le-Ruyet J, Le Bayon N, *et al.* Effects of hypoxia on growth and metabolism of juvenile turbot[J]. *Aquaculture*, 2000, 188(1-2): 103-114.
- [21] Filho D W, Torres M A, Zaniboni-Filho E, *et al.* Effect of different oxygen tensions on weight gain, feed conversion, and antioxidant status in piapara, *Leporinus elongatus* (Valenciennes, 1847)[J]. *Aquaculture*, 2005, 244(1-4): 349-357.
- [22] Magnoni L J, Eding E, Leguen I, *et al.* Hypoxia, but not an electrolyte-imbalanced diet, reduces feed intake, growth and oxygen consumption in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 4965.
- [23] 张亚晨, 蔺玉珍, 温海深, 等. 溶解氧对许氏平鲷血细胞和血清生化组分的影响 [EB/OL]. 北京: 中国科技论文在线 [2019-08-29]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201308-335>.
- Zhang Y C, Lin Y Z, Wen H S, *et al.* Effect of dissolved oxygen on blood cells and serum biochemical components of *Sebastes schlegeli*[EB/OL]. Beijing: Science paper Online[2019-08-29]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201308-335>. (in Chinese).
- [24] Ineno T, Kodama R, Taguchi T, *et al.* Growth and maturation in sterlet *Acipenser ruthenus* under high concentrations of dissolved oxygen[J]. *Fisheries Science*, 2018, 84(4): 605-612.
- [25] Li X M, Yuan J M, Fu S J, *et al.* The effect of sustained swimming exercise on the growth performance, muscle cellularity and flesh quality of juvenile qingbo (*Spinibarbus sinensis*)[J]. *Aquaculture*, 2016, 465: 287-295.
- [26] Waldrop T, Summerfelt S, Mazik P, *et al.* The effects of swimming exercise and dissolved oxygen on growth performance, fin condition and precocious maturation of early-rearing Atlantic salmon *Salmo salar*[J]. *Aquaculture Research*, 2018, 49(2): 801-808.
- [27] 林婉玲, 关熔, 曾庆孝, 等. 影响脆肉鲩鱼背肌质构特性的因素[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2009, 37(4): 134-137.
- Lin W L, Guan R, Zeng Q X, *et al.* Factors affecting textural characteristics of dorsal muscle of crisp grass carp[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2009, 37(4): 134-137(in Chinese).

Influence of aeration flow rates on *Oreochromis niloticus* growth in indoor recirculating aquaculture system

CHENG Xiangju^{1*}, XIAO Gengfeng¹, XIE Jun², SHU Rui³

(1. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;

2. Pearl River Fisheries Research Institution, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510380, China;

3. Guangzhou Guanxing Agriculture Technology Co., Ltd., Guangzhou 511453, China)

Abstract: Aeration flow rate is the crucial controlling factor for aerated push-flow recirculating aquaculture system. In order to explore the effects of aeration flow rates on fish growth and flesh quality, a 56-days experiment was conducted with self-designed indoor recirculating aquaculture system model at 3 aeration flow rates (0, 30 and 50 L/min, respectively), where the growth performance and flesh quality of tilapia (*Oreochromis niloticus*) were monitored. The results showed: ① the final body weight and specific growth rate of tilapia in the 30 L/min condition were (79.56±3.82) g and (2.81±0.54)%/d, while the specific growth rate was 11.07% and 8.49% higher than those in the 0 and the 50 L/min conditions. At the same time, the total protein and triglyceride concentrations in the 30 L/min condition were higher but the urea nitrogen concentration was lower, e.g., on the 56th day, the TP concentrations were 57.43% and 10.43% higher than those in the 0 and 50 L/min conditions, as for TCHO concentration, the increments were 22.19% and 12.32%, respectively. However, the BUN concentration decreased by 39.02% and 37.50%. Furthermore, the glucose concentration was not significantly affected by the aeration flow rates, but the alanine aminotransferase and aspartate aminotransferase concentrations in the 50 L/min condition were higher than those in the other conditions; ② the hardness, springiness and chewiness of the fish in the 30 L/min condition were significantly higher than those in the 0 L/min condition on the 56th day, e.g., the hardness was 27.10% and 15.85% higher than that in the 0 and 50 L/min conditions, as for the springiness and the chewiness, the increments were 9.10% and 3.54%, 42.25% and 24.06% respectively, but the resilience was slightly higher in the 50 L/min condition than that in the other groups. Through analysis of test results, the growth rate of *O. niloticus* was slow due to lack of water stimulation and dissolved oxygen concentration at the low aeration flow rate (0 L/min), while the consumption of nutrients of tilapia was accelerated at the high aeration flow rate (50 L/min), only at the moderate aeration rate flow (30 L/min), the tilapia attained better growth performance and flesh quality.

Key words: *Oreochromis niloticus*; aeration flow rate; recirculating aquaculture system; growth performance; flesh quality

Corresponding author: CHENG Xiangju. E-mail: chengxiangju@scut.edu.cn

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (51579106); Special Fund for Fishery Economic Development of Guangdong Province (SDYY-2018-07)