

变速流操作调控循环水养殖系统水质效果研究

沈加正 史明明 阮贇杰 邓亚乐 朱松明

(浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 杭州 310058)

摘要: 为了避免循环水养殖排氨高峰期氨氮和亚硝酸盐积累对养殖动物的毒害,提高生产效率,降低成本,提出了一种循环水养殖系统变速流调控技术。实验分别研究了罗非鱼群排氨规律、生物滤池硝化能力与流量关系以及循环率对循环系统水质的影响,设计了变速流参数并进行验证。研究结果表明,罗非鱼群摄食后 12 h 内 4 ~ 8 h 达到最大排氨速率(0.21 ~ 0.23 g/h),其他时间排氨速率为 0.08 ~ 0.09 g/h;生物滤池的硝化速率基本不受流量的影响,但流量越高出水氨氮和亚硝酸盐质量浓度越低,并且最大氨氧化速率(7.72 g/(m³·h))高于最大亚硝酸盐氧化速率(7.21 g/(m³·h));在实验循环水系统中,375 L/h 循环流量下氨氮和亚硝酸盐质量浓度高于 750 L/h 循环流量下质量浓度,且 12 h 内峰值超过限制质量浓度。根据以上结果设计的 4 ~ 8 h 内增加循环流量的变速流操作将高峰期氨氮和亚硝酸盐质量浓度分别降至 2.03 ~ 2.24 mg/L 和 0.56 ~ 0.62 mg/L,低于罗非鱼限制质量浓度,并且变速流易于实现,在提高养殖水质的同时降低成本,为水质调控和低成本循环水养殖技术提供了参考。

关键词: 变速流调控; 循环水养殖; 排氨; 硝化速率; 循环流量

中图分类号: S959 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)07-0309-06

Effects of Variable Flow Rates on Water Qualities in Recirculating Aquaculture System

Shen Jiazheng Shi Mingming Ruan Yunjie Deng Yale Zhu Songming

(College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: To avoid the harms caused by the peak ammonia and nitrite produced during the ammonia release period, and increase the productivity and reduce the cost, operations under variable flow rates were investigated. To obtain the proper parameters for variable flow rates, the characteristics of tilapia ammonia release were firstly studied. After then, the effects of different flow rates on the nitrification rates and water qualities of recirculating aquaculture system (RAS) were studied. The results showed that during feeding interval, the highest ammonia release rate (0.21 ~ 0.23 g/h) was found in 4 ~ 8 h, while in other stages the ammonia releasing rate was 0.08 ~ 0.09 g/h. Moreover, no obvious effects of flow rates on nitrification abilities were observed and the maximum ammonia oxidizing rate (7.72 g/(m³·h)) was higher than the maximum nitrite oxidizing rate (7.21 g/(m³·h)) in nitrifying biofilm, indicating that mass transfer did not greatly affect the nitrification process. Besides, high flow rate (750 L/h) in RAS produced lower ammonia and nitrite than those of low flow rate (375 L/h), which also exhibited peak values of ammonia (3.26 ~ 3.37 mg/L) and nitrite (1.32 ~ 1.45 mg/L) exceeding the permissive concentrations for tilapia in 12 h. Therefore, the RAS was operated at 750 L/h in 4 ~ 8 h and 375 L/h in other time during feeding interval. Lower ammonia and nitrite concentrations (2.03 ~ 2.24 mg/L and 0.56 ~ 0.62 mg/L) were obtained during the peak stage of ammonia release under variable flow rates. This operation could be achieved just by providing additional pumping for 4 h under 375 L/h during the

收稿日期: 2016-01-22 修回日期: 2016-03-14

基金项目: 浙江重点科技创新团队计划项目(2011R50029)和“十二五”国家科技支撑计划项目(2014BAD08B09)

作者简介: 沈加正(1985—),男,博士生,主要从事工业化水产养殖技术研究, E-mail: jiazheng85@gmail.com

通信作者: 朱松明(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事设施水产养殖工程技术与装备研究, E-mail: zhushm@zju.edu.cn

peak stage of ammonia release, and it could be a reference for economical RAS technique.

Key words: regulation in variable flow rates; recirculating aquaculture system; ammonia release; nitrification rate; flow rate

引言

联合国粮食及农业组织 (FAO) 统计数据显示中国水产养殖的产量呈逐年上升趋势,从 2003 年的 2 508.3 万 t 以平均每年 200 万 t 的幅度增长至 2012 年 4 110.8 万 t^[1]。但占主要地位的传统养殖连续扩张也带来了一系列问题,如水质恶化、传染病爆发、水资源匮乏、抗生素滥用以及重金属超标等,制约水产养殖业的健康发展并威胁食品供应与安全^[2-3]。随着我国水资源短缺以及对环境污染和食品安全防控力度的加大,传统粗放的养殖模式必然向具有生产效率高、养殖周期短、产量高、用水量少、生产环境稳定、不污染环境且产品为无公害绿色食品等优点的工业化循环水养殖技术转变^[4]。

工业化循环水养殖通过多学科综合技术达到循环利用养殖水体、提高单位水体生产力的目的^[5]。然而,鱼类的生长代谢、残饵粪便的冲刷溶失等因素会导致养殖水体溶解性物质如无机氮、重金属离子、蛋白等有机物和颗粒物的增加,其中氨氮对养殖鱼类具有毒性作用,影响鱼类的生长代谢^[6-7],因此循环水养殖技术的核心是利用生物过滤技术降解氨氮,达到养殖水体可循环利用的目的^[4]。

在循环水养殖系统设计工作中,氨氮总排放量可通过经验常数计算得出,再根据氨氮和亚硝酸盐氮的耐受浓度和生物滤池硝化速率计算出生物滤池体积^[8]。但养殖动物的排氮速率随着鱼类活动发生变化,特别是摄食后会出现氨氮排放高峰,而根据平均负荷设计出的生物滤池若不能及时完全地去除高峰期的氨氮,水体氨氮将有超出耐受浓度的风险^[8-9]。在循环水系统中提高循环率可以明显降低循环系统氨氮和亚硝酸盐氮浓度,优化养殖环境,利于鱼类生长^[10];因而在氨氮高峰期提高循环流速理论上同样可以降低高峰期氨氮质量浓度,结合其他时间正常流速操作即构成本文提出的变速流调控技术原理,获得与高循环流量恒定运行相似水质的同时降低运行成本。

本文在研究罗非鱼氨氮排放规律和生物膜硝化特点基础上,了解不同循环率对循环系统水质环境的影响,丰富并验证变速流调控技术,以期为低成本、高效率循环水养殖系统构成提供技术支持。

1 材料与方 法

1.1 实验罗非鱼循环水养殖系统

实验系统为自行设计的罗非鱼循环水养殖系统,包括养殖池、漩涡分离器、机械过滤器、生物滤池、调温池和紫外灭菌器等单元(图 1)。

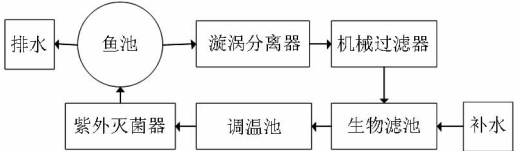


图 1 实验罗非鱼循环水养殖系统流程图
Fig.1 Flow chart of experimental tilapia recirculating aquaculture system

养殖池为圆形玻璃钢池,直径 1.00 m,池深 0.55 m,有效水深 0.5 m,养殖池水体体积约 400 L,鱼池进水通过液体流量计控制水量并与池壁切向呈 30°射流进入鱼池,通过调温池的自动控制维持水温 (28±1)℃,溶解氧 DO 不小于 6.0 mg/L。生物滤池尺寸为 1 m×0.33 m×0.60 m,填料为悬浮多孔填料。生物填料体积为 63 L,生物滤池有效容积为 120 L(填充率为 52.5%)。

1.2 养殖管理

实验用鱼为罗非鱼,养殖密度为 47.5 kg/m³,数量为 110 尾。投喂饲料为浮性膨化罗非鱼商品饲料(嘉盛罗非鱼专用饲料),粗蛋白质量分数约为 30%,每天按池内鱼体总质量的 2% 分别于 06:00、18:00 平均投喂饲料,并在投饵后 4 h 从漩涡分离器中排出粪便混合液 15 L,此外系统还进行排水和补水,保持系统总体换水率为 10%~20%;同时更换机械过滤器中的生化棉。养殖过程中限制无机氮质量浓度(c_{TAN})不大于 3 mg/L,亚硝酸盐氮质量浓度(c_{nitrite})不大于 1 mg/L,一旦浓度超标即增大换水率,以降低水体无机氮浓度^[11]。

1.3 实验方法

(1)氨氮排放规律实验

研究罗非鱼群摄食后氨氮排放量的变化,了解氨氮排放分布规律有助于合理选择调控时间段。根据罗非鱼摄食排氮量修正估算公式估计一次摄食后氨氮排放总量为 5.83 g,实验过程中为防止氨氮浓度超标以及硝化降解对氨氮的影响,将生物滤池从循环系统中隔离出并加入一空鱼池(容积 1.2 m³)作为集水池,构成排氮测定系统。鱼池出水经过漩涡

分离器和机械过滤器去除残饵和粪便后进入集水池,通过加热和灭菌后流回鱼池。另外为了最大限度地避免残饵和粪便对测定结果的影响,漩涡分离器每 1 h 收集 1 次粪便,过滤后将滤液倒回鱼池,同时更换生化棉;系统其他条件与循环水养殖系统保持一致。实验中投饵后每 1 h 取样一次,检测水体氨氮浓度和 pH 值。

(2)硝化速率与进水流量关系实验

不同流速可以改变硝化生物膜表面传质效率,影响硝化速率,有利于变速流的设计。从循环水养殖系统中取 8 L 成熟填料置于 15 L 移动床反应器中,改变进水流量,在一系列氨氮负荷下测定移动床反应器稳态时的进出水氨氮和亚硝酸盐质量浓度,并计算出氨氮和亚硝酸盐氮去除速率。进水流量设置 10、30、50 L/h 3 个梯度,利用蠕动泵将氨氮溶液投加到进水管,充分混合后构成进水氨氮负荷。

(3)循环率与循环系统水质关系实验

在 375 L/h 和 750 L/h 循环流量下监测实验系统长期水质和投饵间隔期 12 h 内无机氮转化规律,了解循环率对循环水体水质的调节效果,在此基础上设置变速流调控参数并进行验证。

1.4 分析与统计方法

实验中水样采集后及时进行 0.45 μm 滤膜过滤,然后保存或直接测定氨氮和亚硝酸盐氮含量。氨氮质量浓度采用纳氏试剂分光光度法检测(GB/T

7479—87),亚硝酸盐氮质量浓度采用分光光度法检测(GB 7493—87),实验过程中使用 pH 计(雷磁 PHS-3C)测定 pH 值以确保系统处于合适的 pH 值范围内。

罗非鱼摄食排氮量(单位:g)修正估算公式为^[9,12]

$$P_{TAN}=0.16\times0.32P_F P_p \tag{1}$$

式中 P_F ——每次投喂的饲料量,g

P_p ——饲料中蛋白质含量,%

式(1)中,0.16 表示蛋白质中平均氮质量分数为 16%;0.32 表示假设摄食氮中排泄氮比例为 32%。

2 结果与讨论

2.1 罗非鱼群氨氮排放规律

图 2 为 2 次罗非鱼群氨氮释放规律测定结果,从图中发现,在 12 h 内罗非鱼群氨氮排放量大致可分为 A、B、C 3 个阶段,平均每阶段 4 h;罗非鱼群排氮量 m_{TAN} 与时间 t 关系拟合曲线表明,B 阶段氨氮排放速率(0.21~0.23 g/h)最高,对应于摄食排氮;A、C 阶段氨氮排放速率(0.08~0.09 g/h)相近且较低,可认为是正常排氮速率(表 1)。实验中实际排氮总量为 1.56 g,低于估算的 2.9 g,这可能与实验中投饵次数少、饲料利用率和排泄氮比例较低、生化棉更换频繁、残饵粪便溶失率被最大程度地降低有关。

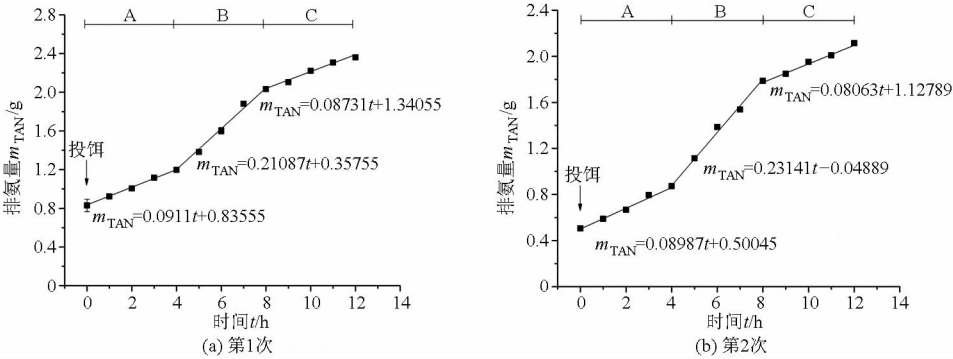


图 2 罗非鱼群氨氮排放规律曲线
Fig. 2 Characteristics curves of ammonia released by tilapia

表 1 罗非鱼群摄食 12 h 内氨氮排放速率

Tab. 1 Ammonia releasing rates by tilapia in 12 h

	after feeding			g/h
测定次数	A 阶段(0~4 h)	B 阶段(4~8 h)	C 阶段(8~12 h)	
1	0.09	0.21	0.09	
2	0.09	0.23	0.08	

2.2 硝化速率与进水流量关系

图 3 为生物膜硝化速率(包含氨氧化速率(ARR)和亚硝酸盐氧化速率(NRR))与进水氨氮负荷(ALR)之间的关系。随着进水氨氮负荷的增加,

生物膜硝化速率先逐渐增大然后趋于稳定,在 12 g/(m³·h)进水氨氮负荷时达到最大氨氧化速率 7.72 g/(m³·h),15.6 g/(m³·h)进水氨氮负荷时达到最大亚硝酸盐氧化速率 7.21 g/(m³·h)。最大氨氧化速率高于最大亚硝酸盐氧化速率,并且前者对应的氨氮负荷低于后者,这可能与 2 种功能菌在生物膜的位置分布有关,有研究认为亚硝酸盐氧化菌(NOB)处于深层位置,因传质阻力的存在获取基质的速率较低,而氨氧化菌(AOB)处于硝化生物膜表层,受传质阻力影响较小^[13-14]。在生物膜反应中,

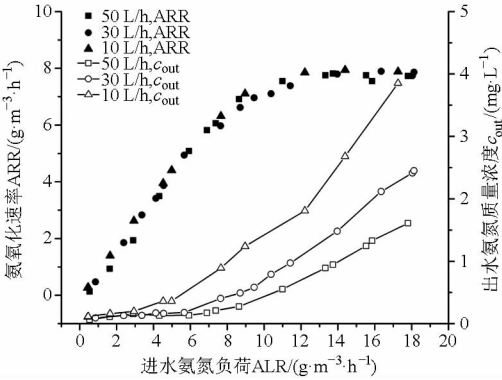


图 3 不同流量对生物滤池硝化能力和水质的影响

Fig. 3 Effects of different flow rates on nitrification abilities and water quality

增大表面流速可以降低外部传质阻力、提高硝化速率^[15],但本实验中氨氮去除速率并没有明显增大,因此氨氮氧化的限速因素可能不是传质阻力,而是生物膜内部反应本身^[16]。

图 3 表明,3 种流量(50、30、10 L/h)下,生物滤池抗冲击能力强,进水氨氮负荷低于 3.3 g/(m³·h)时,出水氨氮保持一致,而亚硝酸盐氮质量浓度存在差异且低于氨氮质量浓度,说明 AOB 对基质的亲和力低于 NOB^[17];当进水氨氮负荷超过 15.3 g/(m³·h)时,10 L/h 流量下水氨氮浓度超过 3 mg/L,并且整个氨氮负荷对应的出水亚硝酸盐氮质量浓度都不超过 1 mg/L,侧面反映出 NOB 对亚硝酸盐氮的强亲和力。尽管流量对硝化速率没有明显影响,却决定了排放氨氮的稀释效率和水体氨氮质量浓度。高流量循环水体对排放氨氮的稀释与生物滤池对氨氮的去除保证了高循环流量对鱼池氨氮的持续稀释作用,降低了养殖过程中氨氮和亚硝酸盐氮的毒害,保证了变速流调控的可行性。

2.3 循环率对循环水系统水质的影响

在实验循环水养殖系统中研究 375、750 L/h 循环流量下循环系统水质变化规律,了解不同循环率下长期水质变化规律和投饵间隔期内无机氮的转化规律。

由图 4 可见,稳定状态下,高循环流量(750 L/h)系统氨氮和亚硝酸盐质量浓度明显低于低循环流量(375 L/h)系统的相应质量浓度。前者 c_{TAN} 为 0.91 ~ 1.16 mg/L, $c_{nitrite}$ 为 0.42 ~ 0.54 mg/L,后者 c_{TAN} 为 1.31 ~ 1.82 mg/L, $c_{nitrite}$ 为 0.56 ~ 0.79 mg/L,可见提高水体循环率可以有效地降低养殖水体无机氮含量。低循环率下氨氮和亚硝酸盐质量浓度波动性大,稳定性低。

图 5 表明,在 375 L/h 循环流量下,12 h 内氨氮质量浓度最高峰为 3.26 ~ 3.37 mg/L,1st和 2nd分别表示两次测定;峰值出现在摄食后第 8 小时,亚硝酸

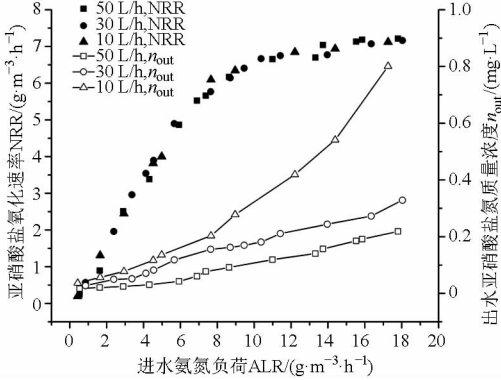


图 4 不同循环流量下循环系统无机氮含量变化曲线

Fig. 4 Changing curves of different flow rates on inorganic nitrogen in RAS

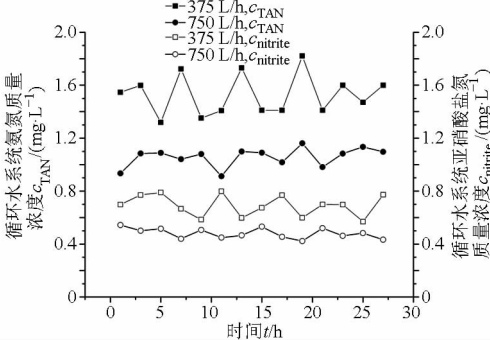


图 5 375 L/h 循环流量下投饵后 12 h 内有害无机氮含量变化曲线

Fig. 5 Changing curves of inorganic nitrogen in 12 h after feeding under 375 L/h flow rate

盐氮质量浓度从 0 h 的 0.27 ~ 0.35 mg/L 开始逐渐增大到 10 h 的最大值 1.32 ~ 1.45 mg/L,12 h 内循环系统的氨氮和亚硝酸盐氮质量浓度超过罗非鱼的限制浓度。此结果一方面是因为 375 L/h 的循环流量不能将鱼群高峰期排出的氨氮及时从鱼池排至生物滤池进行硝化降解,因而高峰期氨氮可能超出限制浓度,同时残饵、粪便的排放与溶失会增加氨氮负荷,加剧氨氮的积累;另一方面氨氮氧化速率通常高于亚硝酸盐氮氧化速率并且亚硝酸盐的氧化通常滞后于氨氮氧化速率,因此实验中亚硝酸盐氮出现积累并且峰值滞后于氨氮峰值^[13]。

在 750 L/h 循环流量下,氨氮质量浓度峰值为

1.41 ~ 1.43 mg/L,峰值出现在摄食后 5 ~ 7 h,亚硝酸盐氮质量浓度稳定在 0.13 ~ 0.33 mg/L 之间(图 6)。750 L/h 循环流量将高峰期氨氮及时排出处理,降低了鱼池氨氮积累量,缩短了积累期;高循环流量与硝化作用降低了循环系统低氨氮和亚硝酸盐氮质量浓度,并起到稳定水质的作用。

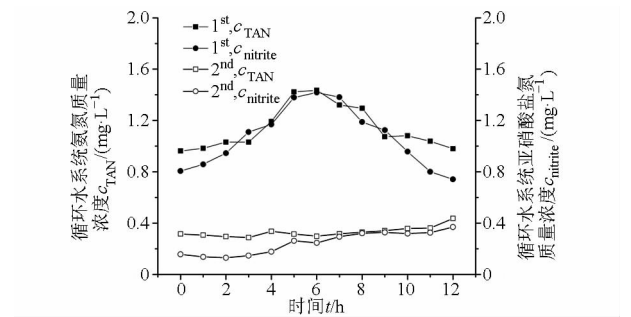


图 6 750 L/h 循环流量下投饵后 12 h 内有害无机氮含量变化曲线

Fig.6 Changing curves of inorganic nitrogen in 12 h after feeding under 750 L/h flow rate

2.4 变速流对水质的调控作用

通过不同循环率对循环系统水质的影响研究发现,375 L/h 循环流量下,除了排氨高峰期以外,其他阶段氨氮质量浓度处于安全范围,而 750 L/h 循环流量下,即便在排氨高峰期,氨氮质量浓度仍低于 3 mg/L。因此本实验中变速流操作为:0 ~ 4 h 和 8 ~ 12 h 时间段循环流量为 375 L/h,4 ~ 8 h 时间段循环流量为 750 L/h。监测变速流下 12 h 内系统水体的氨氮和亚硝酸盐氮的变化规律,并与 375 L/h 和 750 L/h 恒速流下的无机氮浓度变化规律进行对比,有助于了解变速流操作对循环系统水质的调节效果。

由图 7 发现,在变速流运行模式下 0 ~ 4 h 和 8 ~ 12 h 的氨氮质量浓度与 375 L/h 循环流量下相同时间段的质量浓度相近(1 ~ 2 mg/L),而在 4 ~ 8 h 内氨氮峰值质量浓度降低(2.03 ~ 2.24 mg/L),不超过 3 mg/L 限制浓度,并且第 6 小时出现峰值。亚硝酸盐氮质量浓度从 0 h 的 0.27 ~ 0.34 mg/L 一直增至 8 ~ 9 h 的峰值 0.56 ~ 0.62 mg/L,随后持续降低至 0.34 ~ 0.38 mg/L,不超过限制浓度 1 mg/L。变速流通过增大循环流量降低高峰期鱼池氨氮质量浓度,并通过硝化作用维持系统氨氮和亚硝酸盐的低质量浓度,减轻对罗非鱼的毒害,并且变速流容易

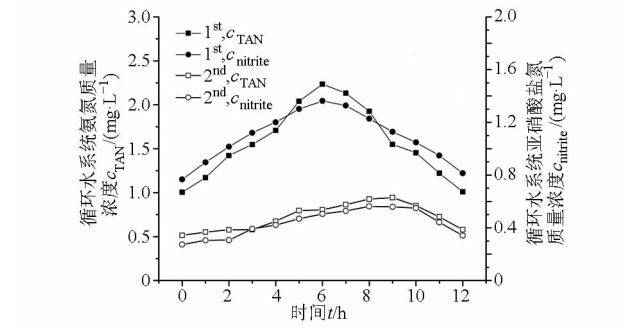


图 7 变速流调控下 12 h 内氨氮和亚硝酸盐质量浓度变化曲线

Fig.7 Changing curves of ammonia and nitrite in 12 h under variable flow rates

实现且成本低。

养殖过程中增大流速可以改善鱼池水质,减轻胁迫作用,促进鱼群生长^[18]。流速还会对鱼群的游泳行为和活动代谢产生影响:流速在一定范围内决定了罗非鱼趋流率和摆尾频率以及代谢的氧氮比,最终决定了饵料的利用和鱼群氨氮排放^[19]。另外养殖系统流速决定了鱼耗氧量^[20]以及养殖池流场分布,变速流操作可能引起溶氧浓度和鱼池流场的剧烈变化,导致罗非鱼的行为和生长代谢的紊乱,因此需要对变速流进行深入的研究。变速流调控技术不仅可以调节生物滤池处理效果,还可以与水处理新技术,如电解水^[21]结合应用,提高水质、降低余氯风险和运行成本,为低成本循环水养殖提供参考。

3 结论

- (1)罗非鱼群排氨速率具有不同的阶段,摄食后 12 h 内 0 ~ 4 h 和 8 ~ 12 h 为氨氮排放低谷期,而 4 ~ 8 h 为氨氮排放高峰期。
- (2)生物滤池硝化能力基本不受进水流量的影响,但流量越高出水氨氮与亚硝酸盐氮质量浓度越低。
- (3)罗非鱼低循环流量(375 L/h)下无机氮质量浓度高于高循环流量(750 L/h)下质量浓度,且摄食后 12 h 内氨氮和亚硝酸盐氮峰值超出限制浓度。
- (4)在排氨高峰期增加循环流量的变速流可以降低高峰期氨氮和亚硝酸盐质量浓度,峰值不超过限制浓度;同时变速流易于实现且成本低,可以为系统水质调控和低成本养殖技术提供参考。

参考文献

1 FAO. Fishery and aquaculture statistics [R]. Rome: FAO fisheries and Aquaculture Department, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2012.

2 董双林. 高效低碳——中国水产养殖业发展的必由之路[J]. 水产学报, 2011,35(10): 1595 – 1600.

DONG Shuanglin. High efficiency with low carbon: the only way for China aquaculture to develop [J]. Journal of Fisheries of

- China, 2011,35(10):1595 – 1600. (in Chinese)
- 3 张福绥. 近现代中国水产养殖业发展回顾与展望[J]. 世界科技研究与发展, 2003, 25(3): 5 – 13.
ZHANG Fusui. China aquaculture industry development in modern times and contemporary age: status and prospects [J]. World Sci-tech R&D, 2003, 25(3):5 – 13. (in Chinese)
- 4 刘鹰. 海水工业化循环水养殖技术研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2011,13(5): 50 – 53.
LIU Ying. Research progress on marine industrial recirculating aquaculture technology [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2011,13(5):50 – 53. (in Chinese)
- 5 王峰,雷霖霖,高淳仁,等. 国内外工厂化循环水养殖研究进展[J]. 中国水产科学, 2013, 20(5): 1100 – 1111.
WANG Feng, LEI Jilin, GAO Chunren, et al. Review of industrial recirculating aquaculture research at home and abroad [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2013, 20(5):1100 – 1111. (in Chinese)
- 6 RANDALL D J, TSUI T K N. Ammonia toxicity in fish [J]. Marine Pollution Bulletin, 2002,45:17 – 23.
- 7 BARBIERI E, BONDIOLI A C V. Acute toxicity of ammonia in Pacu fish (*Piaractus mesopotamicus*, Holmberg, 1887) at different temperatures levels [J]. Aquaculture Research, 2015, 46(3): 565 – 571.
- 8 EDING E H, KAMSTRA A, VERRETH J A J, et al. Design and operation of nitrifying trickling filters in recirculating aquaculture: a review[J]. Aquacultural Engineering, 2006, 34(3): 234 – 260.
- 9 刘晃,陈军,倪琦,等. 基于物质平衡的循环水养殖系统设计[J]. 农业工程学报,2009,25(2): 161 – 166.
LIU Huang, CHEN Jun, NI Qi, et al. Design of a recirculating aquaculture system based on mass balance[J]. Transactions of the CSAE, 2009,25(2):161 – 166. (in Chinese)
- 10 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 Guoxiang, LI Yong, TIAN Zhe, et al. Effects of flow rate on the growth, feed intake and water nitrogen in a closed recirculation aquaculture system of turbot (*Scophthalmus maximus* L.) [J]. Marine Sciences, 2011, 35(5):53 – 60. (in Chinese)
- 11 TIMMONS M B, EBELING J M. Recirculating aquaculture[M]. Ithaca: Ithaca Publishing Company, 2013.
- 12 王振华,刘晃. 循环水养殖罗非鱼氮收支及对水质影响的初步研究[J]. 渔业现代化, 2011,38(5): 12 – 16.
WANG Zhenhua, LIU Huang. Nitrogen budget and water quality of tilapia in recirculating aquaculture system [J]. Fishery Modernization, 2011,38(5):12 – 16. (in Chinese)
- 13 ZHANG S, WANG Y, HE W, et al. Linking nitrifying biofilm characteristics and nitrification performance in moving-bed biofilm reactors for polluted raw water pretreatment [J]. Bioresource Technology, 2013,146: 416 – 425.
- 14 REGMI P, THOMAS W, SCHAFFRAN G, et al. Nitrogen removal assessment through nitrification rates and media biofilm accumulation in an IFAS process demonstration study [J]. Water Research, 2011, 45(20): 6699 – 6708.
- 15 RITTMANN B E, MCCARTY P L. Environmental biotechnology: principles and applications [M]. Noida, India: Tata McGraw-Hill Education, 2012.
- 16 LEE C O, HANSEN R B, MUSOVIC S, et al. Effects of dynamic operating conditions on nitrification in biological rapid sand filters for drinking water treatment[J]. Water Research, 2014,64: 226 – 236.
- 17 FANG F, NI B, LI X, et al. Kinetic analysis on the two-step processes of AOB and NOB in aerobic nitrifying granules[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2009, 83(6): 1159 – 1169.
- 18 田喆,张延青,刘鹰,等. 不同水循环率对大菱鲆生长和水质的影响研究[J]. 渔业现代化, 2010,37(6): 1 – 5.
TIAN Zhe, ZHANG Yanqing, LIU Ying, et al. Impact of different water refreshment rates on growth of turbo (*Scophthalmus maximus*) and water quality [J]. Fishery Modernization, 2010,37(6):1 – 5. (in Chinese)
- 19 李丹. 流速对杂交鲟和罗非鱼幼鱼游泳行为及活动代谢的影响[D]. 广州:暨南大学,2009.
LI Dan. Effects of water current on swimming performance and active metabolism in juvenile hybrid sturgeon and GIFT strain Nile tilapia [D]. Guangzhou: Jinan University, 2009. (in Chinese)
- 20 SEGOVIA E, MUNOZ A, FLORES H. Water flow requirements related to oxygen consumption in juveniles of *Oplegnathus insignis* [J]. Latin American Journal of Aquatic Research, 2012, 40(3): 766 – 773.
- 21 吴照学,李海军,杨智良,等. 电解与紫外协同去除工厂化养殖循环水中氨氮效果研究[J]. 农业机械学报,2016,47(4): 272 – 279.
WU Zhaoxue, LI Haijun, YANG Zhiliang, et al. Removal effect of ammonia in RAS using electrochemical process combined with UV irradiation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(4):272 – 279. (in Chinese)