

# 超高密度全封闭循环水养殖系统设计及运行效果分析

张宇雷, 吴凡<sup>\*</sup>, 王振华, 宋红桥, 单建军, 管崇武

(农业部渔业装备与工程技术重点实验室, 中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所, 上海 200092)

**摘要:** 为进一步研究循环水养殖系统在高密度养殖生产过程中的水质变化情况、鱼类生长情况及应用推广价值, 该文构建了一套超高密度全封闭循环水养殖系统, 设计 3 条水处理环路, 集成了鱼池双排水、竖流沉淀、转鼓式微滤机、移动床生物过滤、多腔喷淋式纯氧混合装置、二氧化碳脱气等高效水处理技术和装备。提出一种基于投饲量的循环水养殖系统设计计算方法, 重点考虑氨氮、溶解氧和总悬浮颗粒物 3 个水质指标。使用该系统养殖吉富罗非鱼 6 个月, 试验研究结果显示: 鱼类生长情况良好, 最高养殖密度 104.2 kg/m<sup>3</sup>。饵料系数 1.4, 成活率 92.2%。水质检测结果显示: 氨氮浓度维持在平均 (1.09±0.55) mg/L; 溶解氧维持在 4~9 mg/L 范围内; pH 值 6.45~7.41。经济性分析研究结果表明, 系统养殖运行成本约为 25 元/kg, 略高于市场价格。但是, 从环境成本考虑, 系统的节水效果显著, 日耗水仅为 0.3~0.5 m<sup>3</sup>。通过适当的精简并挑选合适的养殖品种, 完全可以实现规模化的生产。

**关键词:** 养殖, 水质, 水处理, 罗非鱼

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.15.024

中图分类号: S964.9; S959

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-15-0151-06

张宇雷, 吴凡, 王振华, 等. 超高密度全封闭循环水养殖系统设计及运行效果分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(15): 151-156.

Zhang Yulei, Wu Fan, Wang Zhenhua, et al. Engineering design and performance evaluation of super high density recirculating aquaculture system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(15): 151-156. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

随着社会的发展, 水资源短缺威胁着不少地区和城市的生产和生活。传统的水产养殖生产方式受到种种因素的限制和制约, 各种弊端不断显现, 包括对于水源的污染, 水资源的浪费等<sup>[1]</sup>。循环水养殖模式是水产养殖诸多模式中工业化程度最高的一种生产模式, 它与流水型养殖模式相比, 可节水 90%以上, 节地高达 99%, 而且通过污水处理还可以实现节能减排、环境友好型生产<sup>[2]</sup>。随着世界性的水、土资源日益紧缺和环境污染的加重, 西方发达国家早已普及推广应用了循环水养殖。Yossi Tal 等<sup>[3]</sup>在研究移动床生物滤器生物群落和氮物质流一文中报道称, 系统养殖的金头鲷 (gilthead seabream) 密度达到了 80 kg/m<sup>3</sup>。Steve 等<sup>[4]</sup>设计的北极红点鲑 (arctic char) 全封闭成鱼循环水养殖系统和半封闭苗种循环水养殖系统密度均达到了 100~130 kg/m<sup>3</sup>, 而且水质良好。Ebeling 等<sup>[5]</sup>的报道称海鳟鱼 (sea trout) 全封闭循环水养殖系统最终养殖密度达到了 112 kg/m<sup>3</sup>。21 世纪以来, 中国工厂化养殖加快发展速度, 特别是养殖品种的增加和水处理

技术的创新带动了投资的增加。国家也通过各种科技平台对工厂化循环水养殖的关键技术进行科技攻关<sup>[6]</sup>, 但是, 由于技术成熟度、运行成本和管理水平等原因, 仍鲜有关于超高密度循环水养殖的报道。辛乃宏等<sup>[7]</sup>在海石斑鱼循环水养殖系统的生产应用中养殖密度达到了 25 kg/m<sup>2</sup>。曹广斌等<sup>[8]</sup>研究的虹鳟鱼循环水养殖系统达到了 38 kg/m<sup>3</sup>。本文构建的超高密度全封闭循环水养殖系统以吉富罗非鱼 (tilapia) 为养殖对象, 目的就是为国内工厂化循环水养殖系统技术的深入研究和推广应用提供借鉴。

## 1 材料和方法

### 1.1 基本情况

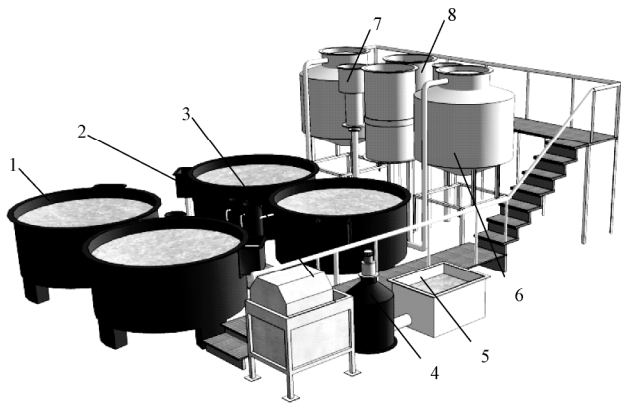
超高密度全封闭循环水养殖试验系统 (以下简称超高密度系统, 图 1 为搭建在中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所下设的农业部渔业装备与工程重点实验室中。于 2009 年建设完成, 2010 年正式投入运行。系统占地面积约 60 m<sup>2</sup>, 由 4 个直径 2 m 深 1 m 的圆形玻璃钢养殖池及相应的水处理设备构成, 总养殖水体约 10 m<sup>3</sup>, 设计最高养殖密度 100 kg/m<sup>3</sup>。系统设计初期, 考虑海/淡水适宜, 但是此次试验养殖对象选择的是具有代表性的淡水吉富罗非鱼。系统主要设计参数如表 1 所示。

收稿日期: 2012-02-07 修订日期: 2012-07-24

基金项目: 国家科技计划课题 (2011BAD13B04); 国家科技计划课题 (2012BAD25B03); 科研院所技术开发研究专项 (2010EG134287)

作者简介: 张宇雷 (1980-), 男, 主要从事渔业设施设备研究。上海 中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所, 200092。

※通信作者: 吴凡 (1973-), 男, 主要从事渔业工程装备技术研究。上海 中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所, 200092。



1.养殖池 2.竖流式固液分离器 3.转鼓式微滤机 4.碎气式机械气浮器  
5.泵池 6.沸腾式移动床生物过滤器 7.多腔喷淋式纯氧混合器 8.二氧化碳  
脱气塔

图1 超高密度全封闭循环水养殖系统

Fig.1 High density closed recirculating aquaculture system

表1 系统主要设计参数

Table 1 Design parameters of super high density closed recirculating aquaculture system

参数/指标	设计值
养殖对象	吉富罗非鱼
总养殖水体/m <sup>3</sup>	10
设计养殖密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	100
最大养殖负荷/kg	1 000
系统循环率/h	1.5~3
日换水率/%	3~5

## 1.2 系统设计

### 1.2.1 工艺设计

超高密度系统水处理工艺流程如图 2 所示。为了给养殖对象提供一个良好的生存环境，同时考虑系统管理操作的灵活性，水处理工艺中除了提供基本的物理过滤、生物过滤和纯氧增氧环节外，另外采用并联形式设计了 2 条支路，分别为脱气支路和热交换支路。

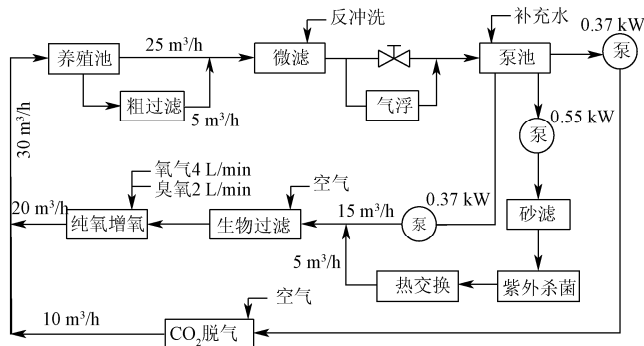


图2 系统水处理工艺流程图

Fig.2 Schematic diagram of super high density closed recirculating aquaculture system

#### 1) 养殖池集排污工艺

每个养殖池设计有 2 路出水，上溢水经由养殖池侧壁上的溢流管流出，占系统总循环量的 85%，约 25 m<sup>3</sup>/h；底排水从养殖池底部流出，占总循环量的 15%，约 5 m<sup>3</sup>/h。

在水力推流作用下水体内的残饵、粪便等大部分颗粒物都会集中到养殖池底部，经由狭缝式颗粒收集器（图 3）进入水处理。该装置借鉴了美国专利 Particle trap<sup>[9]</sup>的设计，并在其基础上进行了优化和改良，实际使用效果良好。

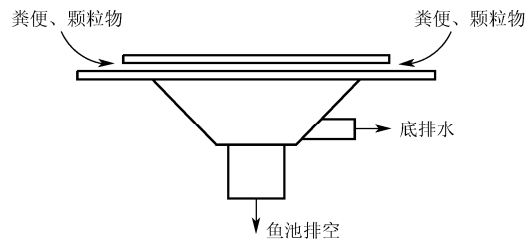


图3 狭缝式颗粒收集器

Fig.3 Particle collector with narrow gap

#### 2) 主循环

系统主要水处理过程，设计流量 15 m<sup>3</sup>/h，包括粗过滤、微滤、气浮、生物过滤和纯氧增氧环节，使用的都是中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所自主设计研发的水处理设施设备。

##### a) 粗过滤

作为第一道物理过滤环节，其主要工艺要求是在不破坏成形颗粒物的前提下予以去除，因此使用的一般都是依靠沉淀或利用密度差原理来进行多相分离的水处理设备。系统在该环节选用的是筒身直径 400 mm 的竖流式固液分离器（radial flow settler）。与同类型的漩涡分离器（swirl separator）相比，其固形颗粒物去除效率更高，可以达到 (77.9±1.6)%<sup>[10]</sup>。

##### b) 微滤

微滤环节国内可供选择的设备不多，国外常用的有转鼓式微滤机（microscreen drum filter）、带式过滤器（belt filter）和微珠过滤器（bead filter）等。考虑到技术成熟度和工艺需求，系统中选用的是较为常用转鼓式微滤机，筛网 200 目，转鼓电机 0.37 kW，反冲洗频率为 2.1 次/h，单次颗粒物去除率可达 50%以上<sup>[11]</sup>。

c) 气浮环节使用的是碎气式机械气浮器，但是由于此次试验养殖对象为淡水罗非鱼，因此没有使用。

##### d) 生物过滤

生物过滤是循环水养殖系统中的核心技术环节，此次系统中选用的沸腾式移动床生物过滤器（boiling type moving bed biofilm reactor）筒身直径 1.2 m，高 1.7 m，内部充填 AMB<sup>[12]</sup>（Assisting Moving Bed）悬浮填料（聚乙烯材质，密度 0.95 g/cm<sup>3</sup>，填充比率为 40%~50%）。正常工作条件下，填料在水流和气流的推力作用下形成一种稳定的移动流化状态，保证废水与载体上的生物膜广泛而频繁地接触，提高系统传质效率的同时，加快生物膜微生物的更新，保持和提高生物膜的活性。

##### e) 纯氧增氧

超高密度系统设计养殖密度 100 kg/m<sup>3</sup>，采用传统的曝气增氧方式已无法满足鱼类呼吸耗氧的需要以及生物硝化反应对于溶解氧的消耗。因此，系统选用了新型的

多腔喷淋式纯氧混合器，使用纯氧源向系统供氧，处理量 10 m<sup>3</sup>/h，在水温 20℃，气液体积比 1：100 条件下，出水溶解氧浓度可达 14 mg/L 左右，氧利用率 70%<sup>[13]</sup>。

3) 脱气支路

高密度循环水养殖系统中由于鱼类呼吸作用以及生物过滤硝化反应的作用，水体中的 CO<sub>2</sub> 浓度会随着时间推移不断累积，甚至达到周围环境饱和浓度的 20~100 倍，其消碱作用使得 pH 值快速下降，对循环水养殖系统的控制造成了非常大的困难<sup>[14]</sup>。因此，系统中设计并联了一条脱气支路（流量 10 m<sup>3</sup>/h），通过 2 台 CO<sub>2</sub> 脱气塔（直径 0.85 m，高 1.5 m）采用强制吹脱的方法对水体进行 CO<sub>2</sub> 去除，单台处理水量 5 m<sup>3</sup>/h，进气量 40 m<sup>3</sup>/h。试验证明，该装置在气液比 1:8 条件下的二氧化碳去除率可以达到 86%~92%<sup>[15]</sup>。

4) 热交换支路

该环路主要在气温过低时用以保证系统水温满足鱼类正常生长需求，主要包括砂滤、紫外杀菌器和板式换热器，间歇使用，流量 5 m<sup>3</sup>/h。

系统主要设备及结构性能参数汇总见表 2。

表 2 系统主要设备及结构性能参数  
Table 2 Main facilities and performance of the system

设备名称	主要结构性能参数
狭缝式颗粒收集器	有效直径 300 mm
竖流式固液分离器	筒身直径 400 mm，最大处理量 2 m <sup>3</sup> /h
转鼓式微滤机	转鼓直径 800 mm，最大处理量 50 m <sup>3</sup> /h，筛网 200 目，转鼓电机 0.37 kW，反冲洗电机 0.55 kW
沸腾式移动床生物滤器	筒身直径 1.2 m，高 1.7 m，最大处理量 10 m <sup>3</sup> /h，滤料填充率 40~50%，进气量 3 m <sup>3</sup> /h
多腔喷淋式纯氧混合器	有效筒身直径 300 mm，高 1 m，最大处理量 10 m <sup>3</sup> /h，氧气标准进气量 2 L/min
二氧化碳脱气塔	筒身直径 850 mm，高 1.5 m，最大处理量 15 m <sup>3</sup> /h，标准进气量 2~2.5 m <sup>3</sup> /min

1.2.2 循环量计算

超高密度系统的设计主要基于几个关键水质指标，包括：氨氮(TAN)、溶解氧(DO)和总悬浮颗粒物(TSS)。

1) 基于氨氮(TAN)的循环量计算

基于氨氮的循环量计算可根据填料填充率和生物滤器设计水力停留时间，按照式(1)计算

$$Q_{TAN}=V/PR/HRT \quad (1)$$

式中， $Q_{TAN}$  为基于氨氮的系统循环量计算值，m<sup>3</sup>/h； $PR$  为生物滤器填料填充率，%，根据沸腾式移动床生物滤器工作要求，其值为 40%~50%； $HRT$  为生物滤器水力停留时间，h，设计值一般为 10~20 min； $V$  为所需生物填料总体积量，m<sup>3</sup>/h，按照式(2)计算

$$V=R_{TAN} \cdot 1000 / f_{rem} / SP \quad (2)$$

式中，1000 为质量换算系数，g/kg； $f_{rem}$  为单位面积填料的氨氮去除速率，g/m<sup>2</sup>·d。根据沸腾式移动床生物滤器工作性能，其值为 0.45g/m<sup>2</sup>·d； $SP$  为填料比表面积，AMB 型滤料比表面积为 500 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>； $R_{TAN}$  为单位时间内系统水体中的氨氮产生量，kg/h，按照式(3)计算<sup>[16]</sup>

$$R_{TAN}=BM \cdot r_{feed} \cdot a_{TAN} \cdot PC / 24 \quad (3)$$

式中， $BM$  为系统设计最大载鱼量，设计为 1000 kg； $r_{feed}$  为日投喂率，1.2%/d； $a_{TAN}$  为氨氮转化系数（投喂每千克饲料所产生的氨氮质量），根据 Timmons 等<sup>[16]</sup>的研究结果，此处取 0.092； $PC$  为饲料中粗蛋白含量，%；24 为时间换算系数，h/d。

计算结果为： $Q_{TAN}=14.3 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

2) 基于溶解氧的循环量计算

基于溶解氧的循环量按照式(4)计算

$$Q_{DO}=R_{DO} \cdot 1000 / \Delta DO \quad (4)$$

式中， $Q_{DO}$  为基于溶解氧的系统循环量计算值，m<sup>3</sup>/h； $\Delta DO$  为养殖池进出水溶解氧差值，mg/L，根据多腔喷淋式纯氧混合装置工作性能，其设计值为 9 mg/L<sup>[13]</sup>；1000 为质量换算系数，g/kg； $R_{DO}$  为单位时间内的系统总耗氧量，kg/h，按照式(5)计算

$$R_{DO}=BM \cdot r_{feed} \cdot a_{DO} / 24^{[16]} \quad (5)$$

式中， $a_{DO}$  为耗氧系数（投喂每公斤饲料所导致消耗的溶解氧质量），此处由于移动床生物滤器本身处于剧烈曝气环境条件下，不需要考虑硝化反应耗氧，因此  $a_{DO}$  取 0.25<sup>[16]</sup>；24 为时间换算系数，h/d。

计算结果为： $Q_{DO}=13.9 \text{ m}^3/\text{h}$

3) 基于总悬浮颗粒物的循环量计算

基于总悬浮颗粒物的循环量按照式(6)计算

$$Q_{TSS}=R_{TSS} \cdot 1000 / (TSS_{out} \cdot (1-E_{TSS})) \quad (6)$$

式中， $Q_{TSS}$  为基于总悬浮颗粒物的系统循环量计算值，m<sup>3</sup>/h； $TSS_{out}$  为养殖池出水中的 TSS 浓度，mg/L，此处设定养殖池内 TSS 浓度不超过 25 mg/L； $E_{TSS}$  为物理过滤环节对于悬浮颗粒物的去除效率，%。此处参考宿墨等<sup>[11]</sup>对于转鼓式微滤机的研究结果，取 54%；1000 为质量换算系数，g/kg； $R_{TSS}$  为单位时间内的系统产生的 TSS 总质量，kg/h，按照式(7)计算

$$R_{TSS}=BM \cdot r_{feed} \cdot a_{TSS} / 24^{[16]} \quad (7)$$

式中， $a_{TSS}$  为 TSS 转化系数（投喂每公斤饲料所产生的 TSS 总质量），此处取 0.25。

计算结果为： $Q_{TSS}=10.9 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

计算结果显示  $Q_{TAN} > Q_{DO} > Q_{TSS}$ ，因此超高密度系统主环路的循环量设计为 15 m<sup>3</sup>/h，根据系统养殖水体量 10 m<sup>3</sup>，在该循环量工作条件下系统循环率可达 1.5 次/h。

1.3 系统管理

2010 年 7 月系统正式投入运行，由于是试验系统，因此投放的是较大规格的罗非鱼成鱼（300~700 g）。选用的饲料为浮性混合颗粒饲料（饲料组成成分见表 3），日投喂量为体质量的 1%，每天分 2 次投喂，分别为 9:00 和 16:30。系统中需要人工干预管理的主要是竖流式固液分离器，固定每天定时排污至分离器底部不存在明显污物，时间分别为 9:00、13:30 和 17:00。其他水处理设备包括鱼池保证每周进行一次排污工作。

表3 饲料组成成分  
Table 3 Feed composition

成分	质量分数/%	成分	质量分数/%	成分	质量分数/%
粗蛋白	38.0	钙	5.0	赖氨酸	1.0
粗灰	18.0	总磷	0.8	脂肪	4.0
粗纤维	8.0	食盐	4.0		

#### 1.4 水质检测及数据统计方法

水温、溶解氧和 pH 值等常规水质参数使用 YSI-556 多参数水质测定仪检测；氨氮 (TAN) 和亚硝酸盐 ( $\text{NO}_2^-$ -N) 的测量采用纳氏试剂光度法；二氧化碳浓度的测量采用酸碱滴定法 (NaOH)；体质量和体长的测量分别使用磅秤和直尺，结果以平均值±标准差表示。

数据统计分析与作图使用 Excel2010 软件处理。

表4 鱼类生长情况

Table 4 Growth and survival of tilapia

日期	1#养殖池			2#养殖池			3#养殖池			4#养殖池		
	平均 体质量/g	平均 体长/cm	尾数	平均 体质量/g	平均 体长/cm	尾数	平均 体质量/g	平均 体长/cm	尾数	平均 体质量/g	平均 体长/cm	尾数
2010-09-11	776.3±104.7	30.7±2.0	173	388.5±77.4	24.2±1.8	698	393.4±59.2	24.9±1.3	574	350.7±58.8	24.1±2.2	623
2010-10-18	854.5±112.0	31.7±1.4	170	415.4±71.4	24.7±1.5	696	515.0±100.6	27.2±1.8	570	480.0±49.6	26.8±0.9	620
2011-12-10	933.1±216.9	32.4±2.4	158	489.5±92.0	26.8±1.8	652	551.5±59.5	28.0±1.0	536	490.3±117.2	26.3±2.1	589
2011-03-24	962.5±147.3	33.2±1.7	151	485.3±77.9	26.4±1.4	645	558.2±76.5	28.1±1.3	531	495.9±114.3	28.0±2.2	580

#### 2.2 氨氮 (TAN) 和亚硝酸盐 ( $\text{NO}_2^-$ -N)

系统运行期间，每 2~4 d 从泵池取一定量水样进行氨氮和亚硝酸盐浓度的检测，变化情况如图 4 所示。整体情况良好，符合硝化反应规律。从图中可以明显的看出，在系统运行的前 2 个月，滤料表面的生物膜尚未成熟，而且系统负荷在逐步增加，因此水体内的氨氮情况极不稳定，变化范围在 0.42~9.07 mg/L 范围内。直到 2 个月后情况才有所好转，从 9 月到 5 月的半年时间内基本控制在 0.4~3.14 mg/L 范围内，平均 (1.09±0.55) mg/L。亚硝酸盐的变化情况与理论规律稍有差别，累积期时间较短，仅经过不到 1 个月的时间，就基本维持在 1 mg/L 以下，平均 (0.18±0.15) mg/L。分析原因，认为是初期系统运行不是很稳定，换水较多的缘故。

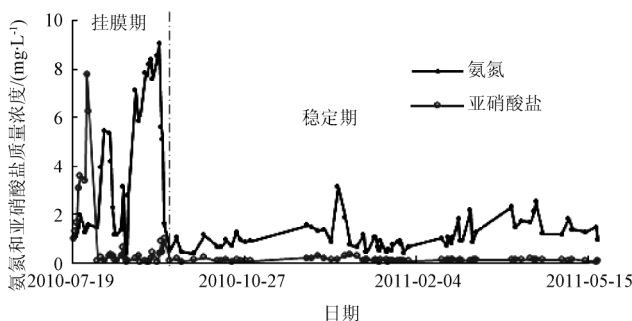


图4 养殖周期内氨氮和亚硝酸盐变化情况

Fig.4 Change of TAN and nitrite nitrogen during rearing period

#### 2.3 水温和溶解氧

系统正常运行情况下，鱼类对于溶解氧的需求主要依靠 2 台多腔喷淋式纯氧混合器来保证，除特殊情况外，

## 2 结果与分析

### 2.1 生长情况

系统于 2010 年 7 月 19 日开始运行，考虑到生物滤器的挂膜周期，初期投放大、中规格淡水吉富罗非鱼 1 000 余尾，运行 1 个月后再投放 800 尾，半个月后再投放 300 尾，到 2010 年 9 月 11 日，投放罗非鱼总尾数达到 2 068 尾，密度达到 85 kg/m<sup>3</sup>。表 2 显示了 2010 年 9 月至 2011 年 3 月 6 个月时间内罗非鱼体长和体质量增长情况及死亡情况。从表中可以看出，经过 6 个月时间的养殖，系统负荷总量从 850 kg 增长到了 1 042 kg，饵料系数 1.4，平均养殖密度达到 104.2 kg/m<sup>3</sup>。整个养殖试验周期鱼类存活率为 92.2%。

气流量一般控制在 200 L/h。图 5 显示了养殖试验过程中水温和水体内的溶解氧浓度变化情况。溶解氧取样点设在每个养殖池的上溢水出水口处，取 4 个养殖池溶解氧浓度的平均值作为指标值。从图 5 中可以看出，溶解氧质量浓度基本控制在 4~9 mg/L 范围内，上下波动较为频繁。温度对溶解氧的影响较大，当水温在 25℃ 以上时 (2010 年 7 月 26 日至 2010 年 9 月 25 日)，溶解氧平均值仅为 (5.6±1.0) mg/L；当水温降至 25℃ 以下时 (2010 年 9 月 26 日至 2011 年 5 月 8 日)，溶解氧平均值达到了 (6.4±1.5) mg/L。需要说明的是，图示数据均为上午测得，但是根据试验人员的检测数据表明，系统溶解氧浓度上、下午的变化不超过 1 mg/L。

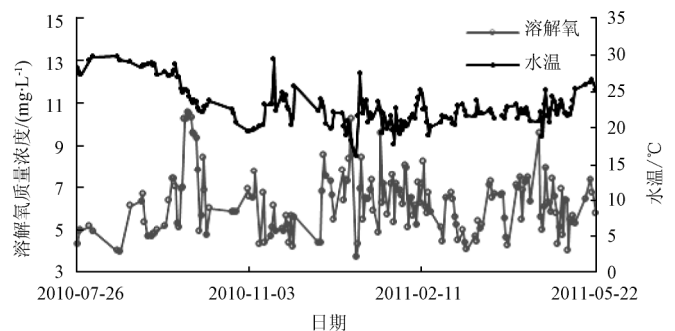


图5 养殖周期内水温和溶解氧变化情况

Fig.5 Change of temperature and DO during rearing period

### 2.4 二氧化碳和 pH 值

超高密度系统水处理环节中 CO<sub>2</sub> 脱气装置主要用于控制水体中的二氧化碳含量，除此之外，由于沸腾式移动床生物滤器工作在曝气条件下，因此也具有一定的 CO<sub>2</sub>

吹脱效果。在这两道环节的强化作用下, 系统水体内的二氧化碳质量浓度控制的较好, 根据阶段性测量结果显示, 该数值一直稳定在 10 mg/L 以下。因此, 对于二氧化碳浓度没有采取连续监测。对于水体 pH 值的控制主要通过定期往泵池内添加碳酸氢钠 ( $\text{NaHCO}_3$ ) 溶液实现, 监测数据如图 6 所示。试验前期数据波动较大, 主要原因在于没有掌握合适的添加量, 仅仅依靠管理人员的经验添加。试验后期 (2011 年 1 月 6 日以后), 在参考了一些研究数据以后, 按照投喂每公斤饲料添加 130 g 碳酸氢钠的比例<sup>[17]</sup>, pH 值基本能够控制在 6.45~7.41 之间, 平均值  $7.03 \pm 0.17$ 。

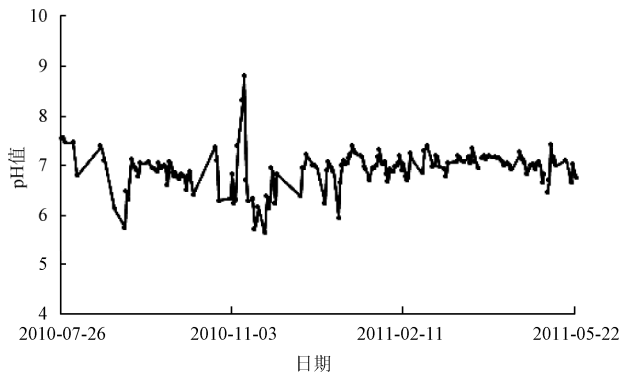


图 6 养殖周期内 pH 值变化情况

Fig.6 Change of pH during rearing period

### 3 系统经济性评价

由于运行成本、管理成本等因素, 循环水养殖系统的经济性在国内一直没有得到广泛的认可。在淡水领域缺乏名贵品种的情况下该问题显得尤为突出。以超高密度系统为例, 其运行成本主要包括 3 个部分: 耗电、耗氧以及饲料消耗。耗电部分按照系统装机功率, 每天 24 h 运行; 耗氧部分以系统平均每小时消耗纯氧 400 L 计 (每台多腔喷淋式纯氧混合器额定进气量为 200 L/h), 24 h 运行; 饲料消耗按照饵料系数 1.4 进行换算。系统的月运行成本如表 4 所示。

表 5 系统月运行成本  
Table 5 Running cost of the system per month

成本内容	数量	单价	总价/ (元·月 <sup>-1</sup> )	说明
耗电成本	1 500 kW·h	0.55 元/(kW·h)	825	装机功率 2.04 kW, 每天 24h 运行
液氧成本	0.2 t	1 300 元/t	260	氧气流量 400 L·h <sup>-1</sup>
饲料成本	0.28 t	6 000 元/t	1 680	饵料系数 1.4
人工成本	1 人	1 500 元/人	1 500	系统管理
折旧成本			650	总投资 7.8 万元, 按 10 a 报废计
合计			4 915	

按照目前的运行情况, 以 5 个月为一个周期<sup>[18-19]</sup>, 从 100 g 饲养到 500 g, 每公斤鱼的饲养运行成本大约为 25 元 (鱼苗成本按 0.2 元/尾计, 共 2 000 尾)。运行成本与市场比较相对较高 (2011 年 3 月北京地区市场价为 15.5~22 元/kg<sup>[20]</sup>)。当然, 其中有部分原因是作为一套

试验系统, 在设计时将其重点放在了水处理效果上, 经济性次之, 因此系统配置相对较高, 水处理设计也相对复杂。但是, 也必须承认, 目前国内市场普遍认可的几种淡水鱼类市场价格都相对偏低, 缺少适合于高密度养殖而经济附加值又相对较高的养殖品种。相对而言, 该问题在海水市场上要缓和得多, 以大菱鲆为主的海水鲆鳎鱼类, 如牙鲆、半滑舌鳎等都具有较高的附加值。

从运行成本上来看, 超高密度系统的经济性还没有达到令人满意的地步, 但是从社会效益的角度考虑, 循环水养殖的发展对于节水、节地 and 环境保护都具有非常重要的意义。与传统养殖方式相比, 循环水养殖生产每单位水产品可以节约 50~100 倍的土地和 160~2 600 倍的水, 比传统养殖节约 90%~99% 的水和 99% 的土地, 并且几乎不污染环境<sup>[21]</sup>, 并且使得水产养殖业在内陆缺水地区的发展成为可能。因此, 在选择合适的养殖品种的前提下, 对系统结构予以适当的精简, 循环水养殖系统仍然具有广阔的应用前景。

### 4 结论

以试验研究为目的构建一套淡水罗非鱼超高密度全封闭循环水养殖系统, 选用了竖流式固液分离器、转鼓式微滤机、沸腾式移动床生物滤器、多腔喷淋式纯氧混合装置、二氧化碳脱气塔等先进水处理设施设备。经过 6 个月时间的养殖试验, 最终养殖密度达到 104.2 kg/m<sup>3</sup>, 日换水量在 5% 以下, 水质情况良好, 氨氮平均 (1.09 ± 0.55) mg/L, 亚硝酸盐平均 (0.18 ± 0.15) mg/L, 溶解氧在 4~9 mg/L 范围内。罗非鱼摄食和生长情况正常, 平均体质量增加 148.3 g, 存活率 92.2%。

#### [参 考 文 献]

- [1] 陈中祥, 曹广斌, 刘永, 等. 低温工厂化养殖水体氨氮处理微生物的初步研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(8): 132-136.  
Chen Zhongxiang, Cao Guangbin, Liu Yong, et al. Preliminary study on ammonia nitrogen treatment of microorganism in industrialized culture water at cold temperature[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2005, 21(8): 132-136. (in Chinese with English abstract)
- [2] 倪琦, 雷霖霖, 张合森, 等. 我国鲆鳎类循环水养殖系统的研制和运行现状[J]. 渔业现代化, 2010, 38(4): 1-9.  
Ni Qi, Lei Jilin, Zhang Hesen, et al. Developing progress and status analysis on flatfishes recirculating aquaculture system in China[J]. Fisheries Modernization, 2010, 38(4): 1-9. (in Chinese with English abstract)
- [3] Tal Y, Watts J E, Schreier S B, et al. Characterization of the microbial community and nitrogen transformation processes associated with moving bed bioreactors in a closed recirculated mariculture system[J]. Aquaculture, 2003, 215(1/2/3/4): 187-202.
- [4] Summerfelt S T, Wilton G, Roberts D, et al. Developments in recirculating systems for Arctic char culture in North America[J]. Aquacultural Engineering 2004, 30(1/2): 31-71.
- [5] James M. Ebeling, Reginald B. Blaylock, Douglas G. Drennan II, et al. Engineering design of a commercial spotted

- seatrout recirculating aquaculture production system[R]. New Orleans, LA, Aquaculture Systems Technologies, LLC, 2002.
- [6] 李连春, 梁日东, 张广海, 等. 中国淡水工厂化循环水养殖的发展现状与趋势[J]. 科学养鱼, 2011(7): 4—5.
- [7] 辛乃宏, 于学权, 吕志敏, 等. 石斑鱼和半滑舌鳎封闭循环水养殖系统的构建与运用[J]. 渔业现代化, 2009, 36(3): 21—25.  
Xin Naihong, Yu Xuequan, Lü Zhimin, et al. Setup and operation of recirculation aquaculture system for Malabar grouper and half-smooth tongue-sole[J]. Fishery Modernization, 2009, 36(3): 21—25. (in Chinese with English abstract)
- [8] 曹广斌, 蒋树义, 韩世成, 等. 冷水性鱼类循环水养殖系统设计及养殖虹鳟试验研究[J]. 水产学杂志, 2010, 23(3): 44—48.  
Cao Guangbin, Jiang Shuyi, Han Shicheng, et al. Aquaculture recirculating system of cold water fish and rainbow trout culture test[J]. Chinese Journal Fisheries, 2010, 23(3): 44—48. (in Chinese with English abstract)
- [9] Lunde T, Skybakmoen S, Schei I. Particle trap[P]. 美国专利: 5636595, 1997-06-10.
- [10] Davidson J, Summerfelt S T. Solids removal from a coldwater recirculating system: comparison of a swirl separator and a radial-flow settler[J]. Aquacultural Engineering, 2005, 33(1): 47—61.
- [11] 宿墨, 刘晃, 宋红桥, 等. 转鼓式微滤机颗粒去除率及能耗的运行试验研究[J]. 渔业现代化, 2009, 36(3): 26—30.  
Su Mo, Liu Huang, Song Hongqiao, et al. Study on the TSS removal efficiency and energy consumption of micro screen drum filter[J]. Fishery Modernization, 2009, 36(3): 26—30. (in Chinese with English abstract)
- [12] Pfeiffer T J, Wills P S. Evaluation of three types of structured floating plastic media in moving bed biofilters for total ammonia nitrogen removal in a low salinity hatchery recirculating aquaculture system[J]. Aquacultural Engineering, 2011, 45(2): 51—59.
- [13] 张宇雷, 倪琦, 徐皓, 等. 低压纯氧混合装置增氧性能的研究[J]. 渔业现代化, 2008, 35(3): 1—5.  
Zhang Yulei, Ni Qi, Xu Hao, et al. Research on the performance of Low Head Oxygenator[J]. Fishery Modernization, 2008, 35(3): 1—5. (in Chinese with English abstract)
- [14] Colta J, Watten B, Pfeiffer T. Carbon dioxide stripping in aquaculture-Part II: Development of gas transfer models[J]. Aquacultural Engineering, 2012, 47: 38—46.
- [15] Hu Yongmei, Ni Qi, Wu Yanxiang, et al. Study on CO<sub>2</sub> removal method in recirculating aquaculture waters[C]// Procedia Engineering. US: Elsevier Ltd, 2011: 4780—4789.
- [16] Timmons M B, Ebeling J M, Wheaton F W, et al. Recirculating Aquaculture Systems(2nd Edition)[M]. New York: Cayuga Aqua Ventures, 2002.
- [17] Timmons M B, Losordo T M. Aquaculture Water Reuse Systems: Engineering Design and Management[M]. Amsterdam: Elsevier Science B.V, 1994.
- [18] 李胜忠, 孙建, 邵勇钢, 等. 工业化养殖罗非鱼的生长特性[J]. 水利渔业, 2006(5): 48—49.
- [19] 唐章生, 林勇, 杨慧赞, 等. 吉富罗非鱼生长模型研究[J]. 广东农业科学, 2011(18): 104—107.  
Tang Zhangsheng, Lin Yong, Yang Huizan, et al. Growth model of GIFT strain tilapia(*Oreochromis niloticus*)[J]. Guangdong Agriculture Sciences, 2011(18): 104—107. (in Chinese with English abstract)
- [20] 中国水产养殖网. 3-24 全国水产市场罗非鱼批发价格 [http://www.shuichan.cc/news\\_view-51307.html](http://www.shuichan.cc/news_view-51307.html)[EB/OL]. 2011-03-24/2012-02-02.
- [21] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(2): 161—166. (in Chinese with English abstract)

## Engineering design and performance evaluation of super high density recirculating aquaculture system

Zhang Yulei, Wu Fan\*, Wang Zhenhua, Song Hongqiao, Shan Jianjun, Guan Chongwu

(Laboratory of Fishery Equipment and Engineering, Fishery Machinery and Instrument Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Ministry of Agriculture, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** In order to research the change of water quality, growth of fish and economic benefits of the recirculating aquaculture system (RAS) under high density rearing conditions, a super high density RAS was developed. The system consists of three parallel water treatment branch equipped with some new technology, such as culture tank dual drain technology, radial flow settler, micro-screen drum filter, boiling type moving bed biofilm reactor, multiple chamber spraying oxygenator, CO<sub>2</sub> degassing tower and etc. The paper also put forward a RAS design method which is based on three main water quality parameters, total ammonia nitrogen(TAN), dissolved oxygen concentration (DO) and total suspended solids(TSS). Using tilapia as the rearing object, 6 months experiment showed that the growth of tilapia was good, the highest culture density reached up to 104.2 kg/m<sup>3</sup>, the feed coefficient was 1.4 and the survival rate was 92.2%. During this period, TAN could be controlled at average (1.09±0.55) mg/L, DO 4-9 mg/L, pH 6.45-7.41. Economic evaluation results showed that the running cost of the system was about 25Yuan/kg fish, which was a little higher than the market price of tilapia. But considering the environment cost, the water saving effect of the system is significant, which is only about 0.3-0.5 m<sup>3</sup> water per day, based on the measurement of the researchers. So, by properly simplifying the system and choosing some more suitable fish variety, recirculating aquaculture system will be valuable in the future.

**Key words:** aquaculture, water quality, water treatment, tilapia