

## 污水处理与回用

揭亮, 张慧莹, 李华. 大口黑鲈工厂化循环水养殖系统水体动力及水处理效能分析[J]. 净水技术, 2026, 45(1): 73-83.

JIE L, ZHANG H Y, LI H. Analysis of water dynamics and treatment efficiency of recirculating aquaculture system for *Micropterus salmoides*[J]. Water Purification Technology, 2026, 45(1): 73-83.

# 大口黑鲈工厂化循环水养殖系统水体动力及水处理效能分析

揭亮<sup>1</sup>, 张慧莹<sup>1</sup>, 李华<sup>2,3,\*</sup>

(1. 广东恒清环境科技有限公司, 广东广州 510300; 2. 中国水产科学研究院南海水产研究所, 农业农村部南海渔业资源开发利用重点实验室, 广东广州 510300; 3. 三亚热带水产研究院, 海南省深远海渔业资源高效利用与加工重点实验室, 海南三亚 572018)

**摘要** 【目的】 工厂化循环水养殖系统(RAS)具有占地面积小、耗水量少、管理效率高、产品质量好等优点, 是水产养殖的热点和主要发展方向。【方法】 本文从水动力学的角度, 对大口黑鲈商业化 RAS 的水头损失进行了计算和分析, 并对系统进行了 24 h 水质跟踪监测, 研究了水流状态对水处理系统的影响。【结果】 养殖池 24 h 内氨氮和亚硝酸盐氮的质量浓度分别为 1.14~3.56 mg/L 和 0.72~1.10 mg/L。氨氮浓度随饲料投喂而升高, 经生物滤池硝化作用逐渐降低, 亚硝酸盐氮浓度相对稳定。生物滤池氨氮去除率较高的时间为 8:00 和 22:00, 分别达到 57.47% 和 59.45%。其余时间氨氮去除率保持在 20% 左右。水力分析结果表明, 系统内不同排水管径的流速分别为 2.52、1.19 m/s 和 0.49 m/s。流速分布不均匀且变化较大, 导致水处理系统水位未达到设计高度。排水系统管道总长为 24.6 m, 水头损失为 5.73 m 以上, 水流过程中能量损失近 25%。养殖池回流管流速为 0.79 m/s, 低流速难以在养殖池内形成高速流场, 导致固体颗粒集污效果较差。【结论】 为进一步提高系统处理效果增加养殖密度, 可调整统一排水管直径、增加生化池曝气设备等措施。研究结果为 RAS 的运行效能分析提供了新方法, 也为系统优化提供理论基础。

**关键词** 工厂化循环水养殖系统(RAS) 水体动力 给排水管道 水质分析 含氮污染物

**中图分类号:** S964    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1009-0177(2026)01-0073-11

**DOI:** 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.01.009

## Analysis of Water Dynamics and Treatment Efficiency of Recirculating Aquaculture System for *Micropterus salmoides*

JIE Liang<sup>1</sup>, ZHANG Huiying<sup>1</sup>, LI Hua<sup>2,3,\*</sup>

(1. Guangdong Hengqing Environmental Technology Co., Ltd., Guangzhou 510300, China;

2. Key Lab of South China Sea Fishery Resources Exploitation & Utilization, Ministry of Agriculture, South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Science, Guangzhou 510300, China;

3. Key Laboratory of Efficient Utilization and Processing of Marine Fishery Resources of Hainan Province, Sanya Tropical Fisheries Research Institute, Sanya 572018, China)

**Abstract** [Objective] Recirculating aquaculture system (RAS) has the advantages of small area, low water consumption, high

[收稿日期] 2025-09-12

[基金项目] 海南省自然科学基金(323QN332); 中国水产科学研究院南海水产研究所中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助(2024JS03); 广东省重点领域研发计划项目(2021B0202030001); 广东省现代农业产业技术创新团队建设项目(2023KJ150); 海南省科技专项资金资助(ZDYF2022XDNY349); 中国水产科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助(2023TD97); 广东省驻镇帮镇扶村科技特派员项目(KTP20210259); 广州市科技计划项目(2023E04J1231)

[作者简介] 揭亮(1987—), 男, 工程师, 主要从事市政工程等工作, E-mail: 353955206@qq.com。

[通信作者] 李华(1984—), 女, 副研究员, 主要从事养殖尾水处理等工作, E-mail: babybluedaisy@163.com。

management efficiency and good product quality, is the hotspot and main development direction of aquaculture. [Methods] In this paper, from the perspective of water dynamics, the head loss of water supply and drainage pipeline in a commercial RAS for *Micropterus salmoides* was calculated and analyzed. And 24-hour water quality tracking monitoring was carried out for the system. The impact of the water flow state on the removal efficiency of water treatment systems was studied. [Results] The average mass concentration of ammonia nitrogen and nitrite nitrogen in the aquaculture ponds within 24 hours ranged from 1.14 mg/L to 3.56 mg/L, and 0.72 mg/L to 1.10 mg/L. Concentration of ammonia nitrogen increased with daily feeding and gradually decreased with the action of nitrification in the biofilter, and the concentration of nitrite nitrogen was relatively stable. The higher ammonia nitrogen removal rate in the biofilter was at 8:00 and 22:00, reaching 57.47% and 59.45%, respectively. The removal rate of ammonia nitrogen remained at about 20% in the rest time. The result of hydraulic analysis showed that the flow velocity under different drainage pipe diameters in the system was 2.52 m/s, 1.19 m/s, and 0.49 m/s, respectively. The flow velocity distribution was uneven and varied greatly, which induced the water level of the aquaculture pond and the water treatment system were inconsistent. The total length of the drainage system pipeline was 24.6 m, the water head loss was more than 5.73 m, and the energy loss in the water flow process was nearly 25%. The flow velocity of the return pipe of the aquaculture pond was 0.79 m/s, and the low flow rate was difficult to form a high-speed flow field in the aquaculture pond, resulting in the poor effects of solid particles dirty collection in the pond. [Conclusion] To further improve the treatment effect of the system or increase the breeding density, it is necessary to optimize the water treatment system, such as adjusting the diameter of some water supply and drainage pipes and increasing the aeration equipment of biochemical ponds. The research results provide a new method for the operational efficiency analysis of the RAS system and also offer a theoretical basis for system optimization.

**Keywords** recirculating aquaculture system (RAS) water dynamics water supply and drainage pipeline water quality analysis nitrogen pollutant

工厂化循环水养殖系统(RAS)相较于传统池塘养殖模式,具有占地面积小、水资源节约、管理效率高、产品质量好等优点,是水产养殖业的研究热点和主要发展方向<sup>[1-3]</sup>。水处理单元是RAS正常运行的关键,生化池是其核心处理单元。主要利用过滤作用和硝化反应将粪便残饵等固体颗粒物及氨氮、亚硝酸盐氮( $\text{NO}_2^-$ -N)等物质转化为对养殖生物低毒性的硝酸盐氮( $\text{NO}_3^-$ -N)<sup>[4-7]</sup>。

对于RAS,国内外研究人员<sup>[8-10]</sup>从养殖品种的选育、养殖设备的改进及水处理技术等方面展开了大量研究,但对养殖池和水处理系统的水质监测和水动力学综合分析研究较少。养殖池出水的能量来源于水体自身的重力势能,循环水系统的水体交换关系到养殖池内残料、粪便的汇集和排出以及生化池的水处理性能。良好的水力条件有利于污染物的排出和微生物的生长,直接影响循环水系统水质,进而影响养殖鱼类的健康<sup>[11]</sup>。部分养殖场在前期RAS设计的过程中没有考虑到水动力学对系统运行的影响,水力条件不佳导致水处理系统的处理能力下降影响鱼类生长发育,实际投入生产后往往达不到预期的养殖密度。

因此,在设计初期考虑RAS的水体动力以及对

管线设计的合理调整是有必要的。本文针对已投入养殖生产大口黑鲈的RAS,从水质净化循环系统的改造和分析验证工作出发,对系统开展24 h水质跟踪监测,研究该系统的水体动力状况和溶解性污染物的去除效率。计算该系统给排水管道水头损失,分析水流态对水处理系统去除效率的影响,为RAS的运行效能的进一步优化提供新的分析方法和理论基础。

## 1 试验材料和方法

### 1.1 RAS 工艺

大口黑鲈RAS位于广东省韶关市南雄市,其工艺流程及实物图如图1所示。该系统由养殖池、紫外消毒装置、微滤机、蛋白分离器、生化池和蓄水池组成。单个养殖池的直径为6 m,高为1.5 m,水深为1.2 m,养殖水体容积约为34 m<sup>3</sup>,总养殖水体容积为136 m<sup>3</sup>。水处理系统尺寸为6.5 m×2.4 m×2.7 m,处理容积约为42 m<sup>3</sup>。生物过滤单元为5级浸没式生化池,采用立体弹性生物滤料,填充率约为50%,未进行曝气。

养殖池采用热泵维持水温,采用池内曝气及回水管道纯氧增氧,水体溶解氧(DO)质量浓度控制在6.50~8.20 mg/L,pH值控制在6.50~8.00,水温控制在25 ℃左右。养殖池每天排污,并在17:00—

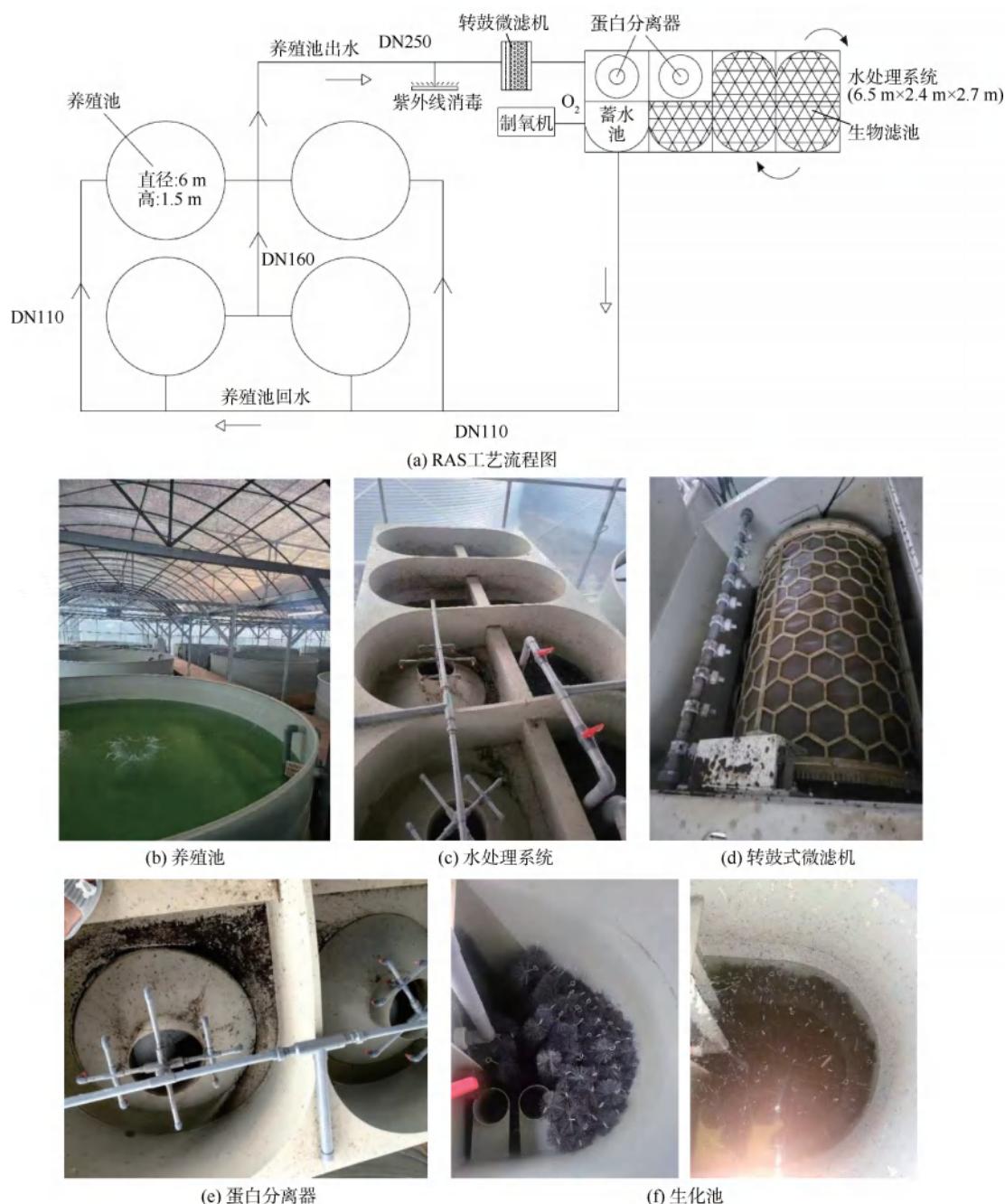


图 1 RAS 工艺流程及实物图

Fig. 1 Process Flow and Physical Diagram of RAS Process

日 8:00 进行补水, 补水量视排污情况而定。2023 年 6 月开始养殖大口黑鲈, 初始体重为 10 g/尾, 投放密度为 150 尾/ $m^3$ , 每天 07:00 和 17:00 投喂配合饲料, 投喂量为鱼体重的 5%。经过 5 个月的养殖, 平均体重从最初的 10 g/尾增长至约为 300 g/尾, 生长状况良好。

## 1.2 样品采集与水质检测

每 2 h 取养殖池和水处理系统各级构筑物进出

水, 水样经 0.45  $\mu\text{m}$  滤膜抽滤后带回实验室测定。氨氮的测定方法选用纳氏试剂分光光度法<sup>[12]</sup>;  $\text{NO}_2^-$ -N 的测定方法选用盐酸萘乙二胺分光光度法<sup>[13]</sup>;  $\text{NO}_3^-$ -N 测定方法选用紫外分光光度法<sup>[14]</sup>;  $\text{PO}_4^{3-}$ -P 的测定方法选用钼酸铵分光光度法<sup>[15]</sup>; 化学需氧量 (COD) 选用重铬酸钾氧化法<sup>[16]</sup>; 悬浮物 (SS) 选用重量法<sup>[17]</sup>。DO、pH 采用哈希溶氧仪进行测定。每个指标测定重复 2 次, 结果取平均值。

### 1.3 数据分析

数据统计用 Excel 2019,以平均值±标准差表示,在 SPSS 27.0 软件中用 *t* 检验分析对试验数据进行显著性差异检验,显著性差异设定为  $P < 0.05$ 。

### 1.4 RAS 管道水体动力分析

利用伯努利方程计算系统管道流速和水头损失,对该 RAS 的水力条件进行分析。水力计算公式参照《建筑给水排水设计规范》<sup>[18]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 养殖池水体中污染物浓度随时间的变化

养殖池 24 h 水质变化情况如图 2 所示,水质受

投料影响较大。6:00—8:00 进行第 1 次投喂,氨氮质量浓度从 1.13 mg/L 增长至 2.84 mg/L;经生化池处理 2 h 后氨氮质量浓度于 10:00 降至 1.73 mg/L,此时养殖池及生化池 DO 和 pH 随着硝化作用进行均有所降低。14:00 氨氮质量浓度再次增长至 2.37 mg/L。由图 3 可知,在微滤机、蛋白分离器及生物滤池壁均有颗粒物黏附现象,氨氮浓度上升推测来自未能及时排出的 SS 释放。第 2 次投喂 3 h 后,经生化池硝化作用处理,氨氮质量浓度于 20:00 降至 1.46 mg/L。22:00 出现峰值(3.56 mg/L),随后持续降解至 4:00 的 1.36 mg/L。24 h 期间  $\text{NO}_2^-$ -N 浓度较为平稳,质量浓度为 0.72~1.10 mg/L。

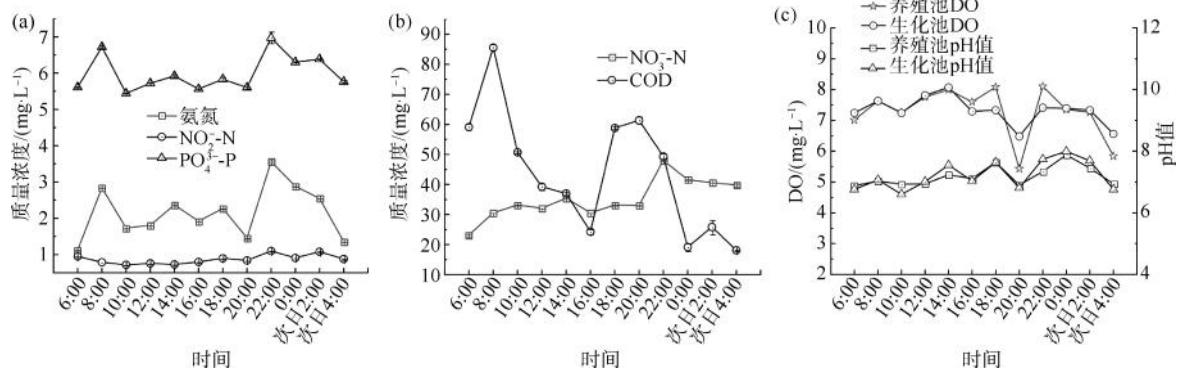


图 2 养殖池及生化池 24 h 内水质变化情况

Fig. 2 Changes in Water Quality of Aquaculture Ponds and Biochemical Ponds within 24 Hours

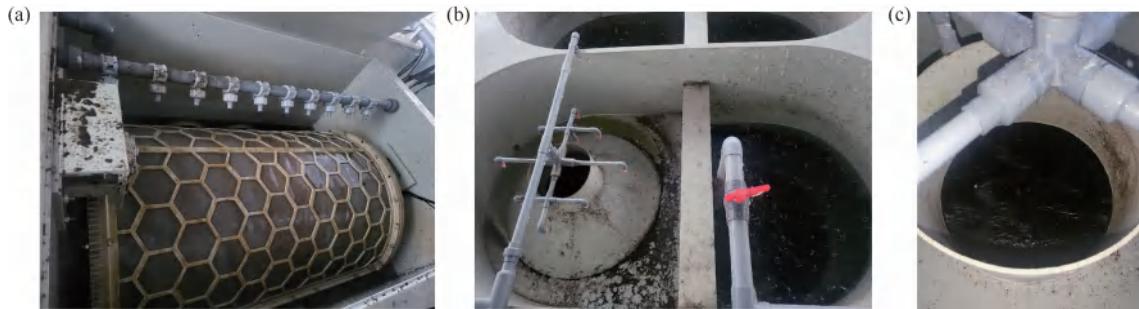


图 3 RAS 中颗粒物黏附现象

Fig. 3 Particulates Adhesion Phenomenon in RAS

养殖池 24 h  $\text{PO}_4^{3-}$ -P 浓度变化趋势与氨氮一致,质量浓度为 5.44~6.97 mg/L;由于水处理系统的硝化作用, $\text{NO}_3^-$ -N 浓度处于持续缓慢上升状态,质量浓度由 23.15 mg/L 升至 40.63 mg/L。养殖池 COD 由饲料颗粒及泼洒芽孢菌剂活化红糖产生,波动较大,生化池硝化细菌对  $\text{PO}_4^{3-}$ -P 降解有限。

### 2.2 生化池处理效果

生化池对污染物的处理效果如图 4 所示,氨氮

去除率在 8:00 和 22:00 时较高,分别达到 57.47% 和 59.45%,这与傅雪军等<sup>[19]</sup>在半滑舌鳎封闭式循环水养殖系统中得到的生化池氨氮去除率(58.13%)相近。其余时间氨氮的去除率维持在 20% 左右。此外,氨氮去除率在 0:00 出现负值(-8.91%)。生化池  $\text{NO}_2^-$ -N 质量浓度为 0.32~1.12 mg/L,去除率于 20:00 达到最高 61.96%,于 14:00 和 2:00 出现负值(-9.66% 和 -3.52%)。由于生化

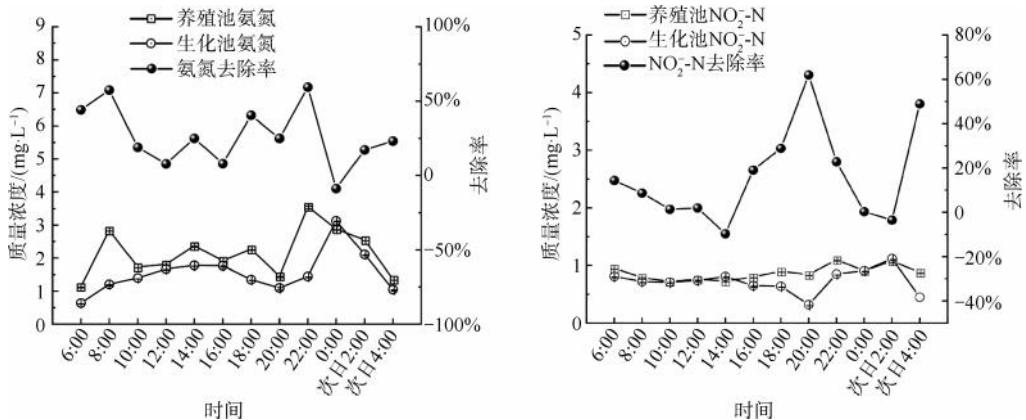


图 4 养殖池、生化池 24 h 内对污染物的去除效果

Fig. 4 Removal Efficiency of Pollutants by Aquaculture and Biochemical Ponds within 24 Hours

池未进行曝气,加上弹性立体填料的截留作用,颗粒物在生化池累积,持续分解释放氨氮和 NO<sub>2</sub>-N,去除率出现负值。

### 2.3 蓄水池运行效果

在水质检测中发现,蓄水池内氨氮及 NO<sub>2</sub>-N 浓度在大部分时间都高于生化池,具体数值如表 1 所示。生化池对氨氮的平均去除率为 26.49%,经蓄水池后去除率降低至 11.81%;NO<sub>2</sub>-N 平均去除率为 16.25%,经蓄水池后去除率降低至 6.44%。说明蓄水池存在死角,SS 无法及时去除,生化池出水受到污染。

### 2.4 养殖池水质 5 d 变化情况

选择污染物浓度较高时间点,即每日 8:00 及 22:00 连续监测养殖池氨氮、NO<sub>2</sub>-N 及 SS 浓度,考察污染物浓度变化以及对鱼类的影响。图 5 为 2023 年 11 月 12 日—16 日 8:00 及 22:00 测得的养殖池水质变化情况。由图 5 可知,在前 3 d(11 月 12 日—14 日),养殖池的氨氮和 NO<sub>2</sub>-N 浓度保持稳定,氨氮平均质量浓度为 2.61 mg/L、NO<sub>2</sub>-N 平均质量浓度为 0.86 mg/L,与 24 h 跟踪测试的结果相近,水处理系统运行稳定。

从第 4 d(11 月 15 日)开始,投料量由 25 kg/d 增加至 28 kg/d。此时养殖池的氨氮平均质量浓度由前 3 d 的 2.61 mg/L 升至最高 4.00 mg/L,此时有少量死鱼出现,系统对负荷冲击耐受较低。养殖池水体 SS 浓度一直保持较低水平,在现有负荷下系统对 SS 去除效果较好。

### 2.5 RAS 管道水体动力分析

该 RAS 运行过程中,生化池水位存在波动现

象,大部分时间水处理系统水位低于设计水位,水体流速较慢。水流动力特性与养殖系统动力供给和管线布置相关,通过计算系统管道的流速和水头损失,对该 RAS 的水力条件进行分析。

图 6 为养殖池排水示意图,养殖池水深为 1.2 m,池底有 1 根长为 5.25 m 的底水管,初始行进流速  $v_0$  忽略不计,选取水面 1-1 和底水管出口 2-2 点为大气压强。根据《建筑给水排水设计规范》<sup>[18]</sup>,管道的沿程阻力系数  $\lambda$  取 0.036,弯头的局部阻力系数  $\xi$  为 1。对池面 1-1 和底水管出口 2-2 由伯努利方程(能量公式)计算相关参数[式(1)~式(2)]。

$$H + \frac{P_0}{\rho g} + \frac{v_0^2}{2g} = 0 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + h_w \quad (1)$$

$$h_w = h_f + h_j = \lambda \frac{L_1}{d_1} \times \frac{v_1^2}{2g} + \xi \frac{v_1^2}{2g} \quad (2)$$

其中:  
 $H$ —水深,m;

$L_1$ —底水管管长,m;

$d_1$ —底水管管径,m;

$P_0$ —水面 1-1 处压强,Pa;

$P_1$ —底水管 2-2 出口压强,Pa;

$\frac{P_0}{\rho g}, \frac{P_1}{\rho g}$  均为 0;

$v_0, v_1$ —初始行进流速、流速, $v_0$  取值为 0, m/s;

$\rho$ —密度,kg/m<sup>3</sup>;

$g$ —重力加速度,9.8 m/s<sup>2</sup>, m/s<sup>2</sup>;

$h_w$ —管道的水头损失,包含总沿程水头损失  $h_f$  和局部水头损失  $h_j$ ,m。

表 1 生化池与蓄水池水质  
Tab. 1 Water Quality of Biochemical Ponds and Reservoirs

时间	氨氮/(mg·L <sup>-1</sup> )		NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N/(mg·L <sup>-1</sup> )	
	生化池	蓄水池	生化池	蓄水池
6:00	0.640±0.005	0.865±0.008 ↑	0.812±0.004	0.823±0.003 ↑
8:00	1.210±0.020	1.516±0.006 ↑	0.724±0.003	0.680±0.006
10:00	1.402±0.007	1.534±0.009 ↑	0.712±0.003	0.707±0.003
12:00	1.668±0.006	2.196±0.083 ↑	0.745±0.001	0.759±0.002 ↑
14:00	1.778±0.004	1.805±0.001 ↑	0.806±0.005	0.752±0.006
16:00	1.771±0.021	2.718±0.059 ↑	0.650±0.007	0.786±0.007 ↑
18:00	1.353±0.004	1.557±0.003 ↑	0.641±0.003	0.605±0.007
20:00	1.096±0.036	1.013±0.033	0.320±0.001	0.737±0.003 ↑
22:00	1.445±0.010	1.986±0.013 ↑	0.853±0.001	1.098±0.004 ↑
0:00	3.133±0.012	2.744±0.001	0.910±0.006	0.879±0.004
次日 2:00	2.113±0.015	2.718±0.006 ↑	1.119±0.001	1.269±0.003 ↑
次日 4:00	1.045±0.022	1.452±0.006 ↑	0.451±0.001	0.744±0.002 ↑

注:↑表示蓄水池浓度较生化池升高。

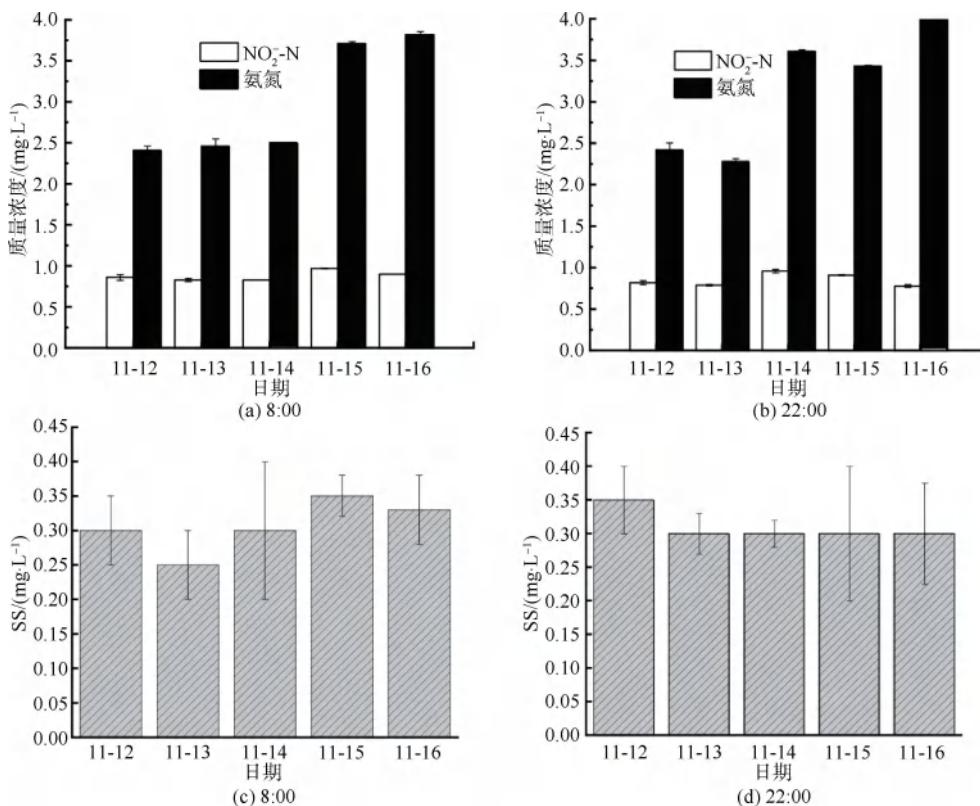


图 5 养殖池水质及 SS 5 d 内变化情况

Fig. 5 Changes of Water Quality and SS in Aquaculture Ponds within 5 days

由式(1)和式(2)计算得  $v_1 = 2.52 \text{ m/s}$ 。

流量计算如式(3)。

$$Q = A_1 v_1 = \frac{\pi \times 0.11^2}{4} \times 2.52 = 0.024 \text{ m}^3/\text{s} \quad (3)$$

其中:  $Q$ ——流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;

$A_1$ ——底水管截面积,  $\text{m}^2$ 。

循环水养殖系统的  $Q$  为  $0.024 \text{ m}^3/\text{s}$ , 出水管流速  $v_2$ 、出水总管流速  $v_3$  计算如式(4)和式(5)。计

算结果分别为 1.19、0.49 m/s。

$$v_2 = \frac{Q}{A_2} \quad (4)$$

$$v_3 = \frac{Q}{A_3} \quad (5)$$

其中: $v_2$ ——出水管流速, m/s;

$v_3$ ——出水总管流速, m/s;

$A_2$ ——出水管截面积,  $\text{m}^2$ ;

$A_3$ ——出水总管截面积,  $\text{m}^2$ 。

循环水养殖系统维持 24 h 不间断运行, 管道内的水体状态处于均匀流, 根据达西公式, 沿程水头损失计算如式(6)。

$$h_f = \lambda \frac{l}{d} \times \frac{v^2}{2g} \quad (6)$$

其中: $l$ ——管长, m;

$d$ ——管径, m;

$v$ ——流速, m/s。

管道的雷诺数计算如式(7)。

$$Re = \frac{vd}{\gamma} \quad (7)$$

其中: $Re$ ——雷诺数;

$\gamma$ ——水的运动黏度, 常温下为  $1 \times 10^{-6}$   $\text{m}^2/\text{s}$ ,  $\text{m}^2/\text{s}$ 。

3 种管径的雷诺数计算如式(8)~式(10), 计算结果分别为  $2.77 \times 10^5$ 、 $1.90 \times 10^5$ 、 $1.23 \times 10^5$ 。

$$Re_1 = \frac{v_1 d_1}{\gamma} \quad (8)$$

$$Re_2 = \frac{v_2 d_2}{\gamma} \quad (9)$$

$$Re_3 = \frac{v_3 d_3}{\gamma} \quad (10)$$

其中: $Re_1$ ——底水管雷诺数;

$Re_2$ ——出水管雷诺数;

$Re_3$ ——出水总管雷诺数。

聚氯乙烯管(PVC)管的相对粗糙度  $\epsilon/d$  为 0.01, 根据《建筑给水排水设计规范》<sup>[18]</sup>查莫迪图得出不同管径的沿程阻力系数: 底水管沿程阻力系数  $\lambda_1 = 0.036$ , 出水管沿程阻力系数  $\lambda_2 = 0.032$ , 出水总管沿程阻力系数  $\lambda_3 = 0.028$ 。

由图 6 可知, 沿程水头损失包含了底水管、出水管和出水总管的损失。其中单根底水管长度为 5.25 m; 单根出水管长度为 0.8 m; 出水总管长度为 2 m。

沿程水头损失计算如式(11)~式(14)。

单根底水管水头损失计算如式(11), 结果为 0.557 m。

$$h_{f1} = \lambda_1 \frac{l_1 v_1^2}{d_1 2g} \quad (11)$$

其中: $h_{f1}$ ——底水管水头损失, m;

$d_1$ ——底水管直径, m。

单根出水管水头损失计算如式(12), 结果为 0.012 m。

$$h_{f2} = \lambda_2 \frac{l_2 v_2^2}{d_2 2g} \quad (12)$$

其中: $h_{f2}$ ——出水管水头损失, m;

$d_2$ ——出水管直径, m。

出水总管水头损失计算如式(13), 结果为 0.003 m。

$$h_{f3} = \lambda_3 \frac{l_3 v_3^2}{d_3 2g} \quad (13)$$

其中: $h_{f3}$ ——出水总管水头损失, m;

$d_3$ ——出水管直径, m。

总沿程水头损失计算如式(14), 结果为 2.255 m。

$$h_f = 4h_{f1} + 2h_{f2} + h_{f3} \quad (14)$$

管道中的弯头、阀门和突然扩大的管段都会造成局部水头损失, 局部水头损失计算如式(15)。

$$h_j = \zeta \frac{v^2}{2g} \quad (15)$$

其中: $\frac{v^2}{2g}$ ——流速水头, m。

根据《建筑给水排水设计规范》<sup>[18]</sup>, 局部损失系数: 弯头  $\zeta_{\text{弯}} = 1$ , 三通  $\zeta_{\text{三}} = 1$ , 四通  $\zeta_{\text{四}} = 2$ 。当管径由 110 mm 扩大到 160 mm 时, 突扩局部损失系数  $\zeta_1$  由式(16)计算, 结果为 1.25; 管径由 160 mm 扩大到 250 mm 时, 突扩局部损失系数  $\zeta_2$  由式(17)计算, 结果为 2.08。

$$\zeta_1 = \left( \frac{A_2}{A_1} - 1 \right)^2 \quad (16)$$

$$\zeta_2 = \left( \frac{A_3}{A_2} - 1 \right)^2 \quad (17)$$

由图 6 可知,在该管道系统中:单根底水管共有 1 个弯头,1 个三通,1 个突扩,底水管局部水头损失计算如式(18),结果为 0.738 m。

$$h_{j1} = h_{j\text{弯}} + h_{j\text{三}} + h_{j\text{扩}} = \zeta_{\text{弯}} \frac{v_1^2}{2g} + \zeta_{\text{三}} \frac{v_1^2}{2g} + \zeta_2 \frac{v_2^2}{2g} \quad (18)$$

其中:  
 $h_{j1}$ ——底水管局部水头损失,m;  
 $h_{j\text{弯}}$ ——底水管弯头局部水头损失,m;  
 $h_{j\text{三}}$ ——底水管三通局部水头损失,m;  
 $h_{j\text{扩}}$ ——底水管突扩局部水头损失,m。

单根出水管共有 1 个三通,1 个四通,1 个突扩,出水管局部水头损失计算如式(19),结果为 0.243 m。

$$h_{j2} = h_{j\text{三}} + h_{j\text{四}} + h_{j\text{扩}} = \zeta_{\text{三}} \frac{v_2^2}{2g} + \zeta_{\text{四}} \frac{v_2^2}{2g} + \zeta_2 \frac{v_3^2}{2g} \quad (19)$$

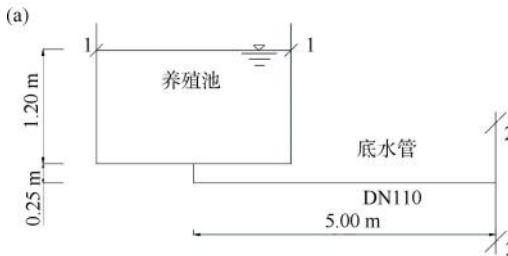


图 6 出水系统管线布置  
Fig. 6 Pipes Arrangement of Effluent System

0.0075 m<sup>3</sup>/s。如图 7 所示,单根回水管共有 5 个弯头,测得的不同管长分别为 7.7、10.0、9.5、5.8 m。水头损失采用 2.5 节的方法计算。

单根回水管流速计算如式(23),结果为 0.79 m/s。

$$v = \frac{Q}{A} \quad (23)$$

回水管总沿程水头损失计算如式(24),结果为 0.344 m。

其中:  
 $h_{j2}$ ——出水管局部水头损失,m;  
 $h_{j\text{三}}$ ——出水管三通局部水头损失,m;  
 $h_{j\text{四}}$ ——出水管四通局部水头损失,m;  
 $h_{j\text{扩}}$ ——出水管突扩局部水头损失,m。

出水总管共有 1 个三通,2 个弯头,出水总管局部水头损失计算如式(20),结果为 0.037 m。

$$h_{j3} = h_{j\text{三}} + 2h_{j\text{弯}} = \zeta_{\text{三}} \frac{v_3^2}{2g} + 2\zeta_{\text{弯}} \frac{v_3^2}{2g} \quad (20)$$

其中:  
 $h_{j3}$ ——出水总管局部损失,m;  
 $h_{j\text{弯}}$ ——出水总管弯头局部损失,m;  
 $h_{j\text{三}}$ ——出水总管三通局部损失,m。

总局部水头损失计算如式(21),结果为 3.475 m。

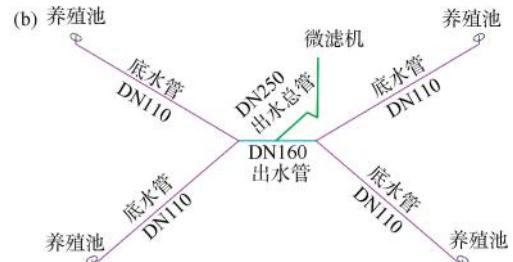
$$h_j = 4h_{j1} + 2h_{j2} + h_{j3} \quad (21)$$

其中:  
 $h_j$ ——总局部水头损失,m。

管道总水头损失为沿程损失和局部损失之和计算如式(22),结果为 5.730 m。

$$h = h_f + h_j \quad (22)$$

水处理系统处理后的水由 3 台水泵通过回水管(DN110)送往各个养殖池,单台水泵的流量为 0.015 m<sup>3</sup>/s,扬程为 4 m。日常运行保持 2 台开启,总流量为 0.03 m<sup>3</sup>/s,4 根供水管每根的流量为



$$h_f = \lambda_1 \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} \quad (24)$$

回水管总局部水头损失计算如式(25),结果为 0.636 m。

$$h_j = 4 \times 5\zeta_{\text{弯}} \frac{v^2}{2g} = 4 \times 5 \times 1 \times \frac{0.79^2}{2 \times 9.8} = 0.636 \text{ m} \quad (25)$$

回水管总水头损失计算如式(26),结果为 0.980 m。

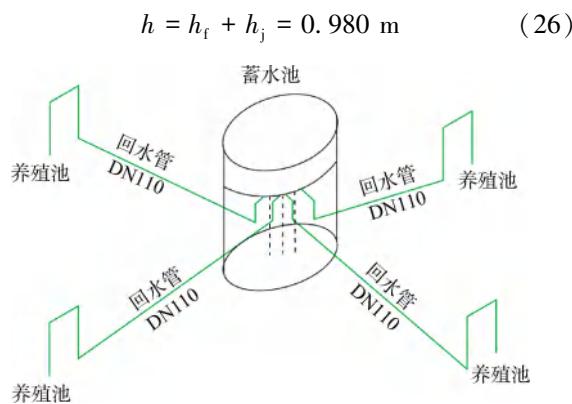


图 7 回水系统管线布置

Fig. 7 Pipes Arrangement of Backflow System

### 3 讨论

#### 3.1 RAS 水质检测讨论

该 RAS 投料 2 h 后,在固体颗粒物分解及鱼类代谢的作用下系统氨氮浓度升高,随后经微滤机及生化池处理后浓度逐渐下降。水处理系统主要发生硝化反应,对  $\text{PO}_4^{3-}$ -P 去除效率较小,且存在  $\text{NO}_3^-$ -N 累积现象<sup>[20]</sup>。硝化反应与硝化细菌数量及活性息息相关,但该系统生化池中立体弹性填料填充率较低,仅为 50%,且氨氮和  $\text{NO}_2^-$ -N 浓度较低,氨氮平均质量浓度为 2.61 mg/L、 $\text{NO}_2^-$ -N 平均质量浓度为 0.86 mg/L;此外,生化池未进行曝气,污染物扩散传质效果较差也会导致处理效率降低<sup>[21]</sup>。污染物浓度较低,生化池传质较差以及水位波动,使硝化细菌活性受到影响,导致生化池对氨氮的去除率最高只有 59.45%<sup>[22]</sup>。

研究<sup>[23]</sup>表明:在水产养殖普遍的低氨氮浓度下,硝化动力学符合一级动力学模型,硝化速率随底物浓度的增加呈线性增加。因此养殖池在 8:00 和 22:00 氨氮浓度较高时,生化池的氨氮氧化速率较高,随之去除率达到最高,而当养殖池氨氮浓度下降时,氨氮氧化速率下降去除率也随之下降。水质数据显示,系统水体 SS 浓度较低,但系统内存在死角引起颗粒物淤积形成污染物延后释放现象。此外水位波动导致水处理系统未实现满负荷运行,RAS 整体水处理效率低且抗冲击性能较差<sup>[24]</sup>。

#### 3.2 RAS 水力条件讨论

生化池内水流速度分布不均对填料上的微生物生长不利,同时会引起污染物的堆积,长期运行,系统对污染物的处理效果将变差<sup>[25]</sup>。养殖池的出水管道总长度为 24.6 m,而水头损失超过 5.73 m,在

水体流动过程中能量损失接近 25%,能量损耗过大对养殖场的长期运行和经济效益造成不利影响。生产车间给排水管道的经济流速通常为 1.5~2.0 m/s<sup>[19]</sup>。经计算,该系统底水管流速为 2.52 m/s,流速过高会在管内形成水锤,会对管材耐久度造成影响,应适当增大管径降低流速;同时出水总管流速为 0.49 m/s,管径选择不合理导致管道末端水体流速过低。养殖池排水能量损失和流速的降低导致设计的水位差未能将养殖池水排入水处理系统,造成生化池水位未能达到设计水位,且会随着养殖池水位的变化而波动。

另一方面,回水管道的水头损失超过 0.98 m,且出水管的水流速度为 0.79 m/s。养殖池回水在较低的流速下无法于池内形成高流速的流场,流场会影响养殖池中固体颗粒物的汇集与排污,是其自清洁能力的主要驱动来源<sup>[26]</sup>。Plew 等<sup>[27]</sup>研究表明:养殖池的污染物排出能力受池壁、池底的流速的影响,两者呈显著正相关。当流场无法形成时,SS 便无法排出,养殖池内氨氮等溶解性污染物浓度随之上升。受回水管路水头损失和低流速的影响,水处理系统和养殖池的水体交换受到限制。

#### 3.3 RAS 优化建议

养殖池曝气集中在中心排污区域,对粪便有破碎作用不利于集污,且系统平面布置及管道设计弯头较多,管径设置不合理,水头损失较大。针对该系统优化,可将养殖池底排污管径统一至 160 mm,消除流速差异;回水管径缩小至 90 mm,布置减少弯头,减少水头损失。另外,在生物滤池中适量增加填料,提高曝气提升处理效率。定期清理微滤机及蓄水池各角落,减少颗粒物累积。最后养殖池内曝气可采用纯氧陶瓷纳米曝气盘,减少因曝气带来的颗粒物破碎,同时不影响养殖池集污效果。

### 4 结论

从水体动力学角度分析大口黑鲈 RAS,发现该系统管道流速分布不均匀,水头损失超过 5.73 m,水体流动过程中能量损失接近 25%。较大的水头损失及较低的流速使系统内水体动力条件不佳,养殖池内无法形成高速流场导致固体颗粒物无法自净;生化池水位波动导致溶解性污染物的处理受到影响;蓄水池内存在死角,3 个因素共同导致养殖池内水质较差。在不改变原有水力条件的前提下,增

大投料量会对该水处理系统造成压力。进一步提升该系统处理效果或增加养殖密度,需对水处理系统进行优化改造,如调整部分给排水管道管径、增加生化池曝气设备等。

## 参考文献

- [ 1 ] 蔡青霖, 韩庆富. 国内外工厂化循环水养殖技术发展现状及趋势[J]. 南方农业, 2023, 17(17) : 247-251.  
CAI Q L, HAN Q F. Development status and trends of industrialized circulating water aquaculture technology at home and abroad[J]. South China Agriculture, 2023, 17(17) : 247-251.
- [ 2 ] VAN RIJN J. Waste treatment in recirculating aquaculture systems[J]. Aquacultural Engineering, 2013, 53: 49 - 56. DOI: 10.1016/j.aquaeng.2012.11.010.
- [ 3 ] 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.
- [ 4 ] 陈奇, 宋协法, 周广军, 等. 鲢鱼循环水养殖系统中生物滤池的水质变化及微生物群落结构响应[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2022, 52(11) : 56-66.  
CHEN Q, SONG X F, ZHOU G J, et al. Response of microbial community structure in biofilter of recirculating aquaculture system of sturgeon to water quality change[J]. Periodical of Ocean University of China, 2022, 52(11) : 56-66.
- [ 5 ] 刘晃, 管崇武, 倪琦, 等. 生物膜法SBR(BSBR)在循环养殖水处理中影响因素分析[J]. 南方水产, 2008, 4(4) : 55-59.  
LIU H, GUAN C W, NI Q, et al. Analysis of factors of water treatment with biofilm sequence batch reactor in recirculating aquaculture systems[J]. South China Fisheries Science, 2008, 4(4) : 55-59.
- [ 6 ] HAN M, ZHAO Z W, GAO W, et al. Study on the factors affecting simultaneous removal of ammonia and manganese by pilot-scale biological aerated filter (BAF) for drinking water pre-treatment[J]. Bioresource Technology, 2013, 145: 17 - 24. DOI: 10.1016/j.biortech.2013.02.101.
- [ 7 ] MERIAC A, EDING E H, SCHRAMA J, et al. Dietary carbohydrate composition can change waste production and biofilter load in recirculating aquaculture systems [ J ]. Aquaculture, 2014, 420: 254 - 261. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2013.11.018.
- [ 8 ] 张俊, 高阳, 陈聪聪, 等. 工厂化循环水养殖池水动力学研究进展[J]. 上海海洋大学学报, 2023, 32(5) : 903-910.  
ZHANG J, GAO Y, CHEN C C, et al. Hydrodynamic characteristics of industrialized recirculating aquaculture systems: A comprehensive review [ J ]. Journal of Shanghai Ocean University, 2023, 32(5) : 903-910.
- [ 9 ] XUE B R, ZHAO Y P, BI C W, et al. Investigation of flow field and pollutant particle distribution in the aquaculture tank for fish farming based on computational fluid dynamics [ J ]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 200: 107243. DOI: 10.1016/j.compag.2022.107243.
- [ 10 ] 车宗龙, 任效忠, 张倩. 循环水养殖系统中水动力特性及其与鱼类相互影响研究进展[J]. 大连海洋大学学报, 2021, 36(5) : 886-898.  
CHE Z L, REN X Z, ZHANG Q. Research progress on hydrodynamics in a recirculating aquaculture tank system: A review[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2021, 36(5) : 886-898.
- [ 11 ] GORLE J M R, TERJESEN B F, SUMMERFELT S T. Hydrodynamics of octagonal culture tanks with Cornell-type dual-drain system [ J ]. 2018, 151: 354 - 364. DOI: 10.1016/j.compag.2018.06.012.
- [ 12 ] 周波, 沈阿丹. 纳氏试剂分光光度法测定水质氨氮分析[J]. 低碳世界, 2017, 7(8) : 4-4.  
ZHOU B, SHEN A D. Determination of ammonia nitrogen in water quality by Nessler's reagent spectrophotometric method[J]. Low Carbon World, 2017, 7(8) : 4-4.
- [ 13 ] 韩国萍, 戴永生. 盐酸萘乙二胺分光光度法测定大气中二氧化氮浓度[J]. 环境与发展, 2018, 30(4) : 127-128.  
HAN G P, DAI Y S. Spectrophotometric determination of nitrogen dioxide in the atmosphere with naphthylethylenediamine hydrochloride [ J ]. Inner Mongolia Environmental Sciences, 2018, 30(4) : 127-128.
- [ 14 ] 马鹏飞. 紫外分光光度法测定水中硝酸盐氮研究[J]. 化工管理, 2018(33) : 121-122.  
MA P F. Study on the determination of nitrate nitrogen in water by UV spectrophotometry[J]. Chemical Enterprise Management, 2018(33) : 121-122.
- [ 15 ] 国家环境保护局. 水质总磷的测定 钼酸铵分光光度法: GB 11893—1989[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 1989.  
State Environmental Protection Administration. Water quality—Determination of total phosphorus—Ammonium molybdate spectrophotometric method [ S ]. Beijing: China Environmental Sciences Press, 1989.
- [ 16 ] 林国辉. 重铬酸钾光度法快速测定水中化学需氧量[J]. 化学分析计量, 2021, 30(10) : 37-41.  
LIN G H. Rapid determination of chemical oxygen demand in water by potassium dichromate spectrophotometry [ J ]. Chemical Analysis and Meterage, 2021, 30(10) : 37-41.
- [ 17 ] 章文华, 徐锡梅, 余沛芝, 等. 重量法测定污水厂进出水中悬浮物的影响因素[J]. 净水技术, 2020, 39(12) : 13-18.  
ZHANG W H, XU X M, YU P Z, et al. Influencing factors of gravimetric method for determination of suspended solids in influent and effluent of WWTP [ J ]. Water Purification

- Technology, 2020, 39(12) : 13–18.
- [18] 中国工程建设标准化协会. 建筑给水排水设计规范 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- China Association for Engineering Construction Standardization. Code for design of building water supply drainage [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007.
- [19] 傅雪军, 马绍赛, 朱建新, 等. 封闭式循环水养殖系统水处理效率及半滑舌鳎养殖效果分析 [J]. 环境工程学报, 2011, 5(4) : 745–751.
- FU X J, MA S S, ZHU J X, et al. Analysis of the efficiency of water treatment and the cultured effect of *Cynoglossus semilaevis* Günther in closed re-circulating aquaculture systems [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2011, 5(4) : 745–751.
- [20] 刘鑫, 康建平, 林岗, 等. 东星斑循环水养殖系统的水体营养盐及微生物群落结构特征 [J]. 福建农业学报, 2022, 37(6) : 754–764.
- LIU X, KANG J P, LIN G, et al. Nutrients and microbial community in recirculating aquaculture system for *Plectropomus leopardus* aquaculture [J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2022, 37(6) : 754–764.
- [21] 蒋磊, 刘铭羽, 李希, 等. 曝气对生物基质技术处理养殖废水脱氮除磷效果的影响特征及机理 [J]. 水处理技术, 2021, 47(9) : 71–76.
- JIANG L, LIU M Y, LI X, et al. Characteristics and mechanism of the effect of aeration on nitrogen and phosphorus removal from swine wastewater treated by biological matrix technology [J]. Technology of Water Treatment, 2021, 47(9) : 71–76.
- [22] 张正, 王印庚, 曹磊, 等. 海水循环水养殖系统生物膜快速挂膜试验 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(15) : 157–162.
- ZHANG Z, WANG Y G, CAO L, et al. Pilot-scale test for biofilm rapid formation in biofilter of recirculating mariculture system [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(15) : 157–162.
- [23] CHEN S L, LING J, BLANCHETON J P. Nitrification kinetics of biofilm as affected by water quality factors [J]. Aquacultural Engineering, 2006, 34(3) : 179–197.
- [24] BAO W J, ZHU S M, GUO S R, et al. Particle size distribution mathematical models and properties of suspended solids in a typical freshwater pond [J]. Environmental Pollution, 2018, 241 : 164–171. DOI: 10.1016/j.envpol.2018.05.063.
- [25] DAVIDSON J, SUMMERFELT S. Solids flushing, mixing, and water velocity profiles within large (10 and 150 m<sup>3</sup>) circular ‘Cornell-type’ dual-drain tanks [J]. Aquacultural Engineering, 2004, 32(1) : 245–271.
- [26] LABATUT R A, EBELING J M, BHASKARAN R, et al. Effects of inlet and outlet flow characteristics on mixed-cell raceway (MCR) hydrodynamics [J]. Aquacultural Engineering, 2007, 37(2) : 158–170.
- [27] PLEW D R, KLEBERT P, ROSTEN T W, et al. Changes to flow and turbulence caused by different concentrations of fish in a circular tank [J]. Journal of Hydraulic Research, 2015, 53(3) : 364–383.

(上接第 72 页)

- [21] KE G, MENG Q, FINLEY T, et al. LightGBM: A highly efficient gradient boosting decision tree [J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2017(30) : 3146–3154.
- [22] PROKHORENKOVA L, GUSEV G, VOROBIEV A, et al. CatBoost: Unbiased boosting with categorical features [J]. arXiv preprint arXiv:1706.09516, 2018.
- [23] SALINAS D, FLUNKERT V, GASTHAUS J, et al. DeepAR: Probabilistic forecasting with autoregressive recurrent networks [J]. International Journal of Forecasting, 2020, 36(3) : 1181–1191.
- [24] BORIS O N, CARP D, CHAPADOS N, et al. N-BEATS: Neural basis expansion analysis for time series forecasting [J]. arXiv preprint arXiv: 1905.10437, 2020.