doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.10.012

简易式匙吻鲟循环水养殖系统构建与运行试验

雷　翔[1]　范　豪[1]　王德庆[1]　朱　明[1,2]　高　坚[2,3]　万　鹏[1,2]　李志兵[4]

（1.华中农业大学工学院，武汉 430070；2.农业农村部水产养殖设施工程重点实验室，武汉 430070；
3.华中农业大学水产学院，武汉 430070；4.天门市渔汇水产养殖场，天门 431719）

摘要：针对工厂化循环水养殖系统组成复杂、建设运行成本高，在水产养殖中难以推广应用等问题，本文构建了一种简易式循环水养殖系统。该循环水养殖系统由蓄水池、养殖池、水位控制装置、微滤机、生物滤池和循环泵等组成，基于重力自流原理对各养殖设施设备进行配置，对养殖系统水体循环管道管径配比进行优化，并以匙吻鲟为研究对象开展 90 d 的养殖试验，对系统阶段性运行效果及经济性进行评估。试验结果表明，该系统水体循环稳定；养殖过程中，系统水温、溶解氧质量浓度和 pH 值分别为 12.30～24.57℃、3.96～9.32 mg/L、6.82～7.60，氨态氮质量浓度、亚硝酸盐质量浓度和硝酸盐质量浓度平均值分别为（1.26±0.62）mg/L、（0.38±0.12）mg/L、（72.39±14.94）mg/L；系统对氨态氮和亚硝酸盐去除率分别为 49.07% 和 62.00%；匙吻鲟平均质量从（144.83±15.24）g 增至（437.93±60.98）g，最终养殖密度为 15.48 kg/m^3，饵料系数为 1.08，成活率为 96.16%；以养殖周期为 12 个月进行估算，饲养成本约为 17.57 元/kg。本文构建的简易式循环水养殖系统运行稳定，养殖水体处理能力良好，养殖匙吻鲟能够获得良好的经济效益，为工厂化循环水养殖系统推广应用提供参考。

关键词：水产养殖；循环水养殖系统；简易式；匙吻鲟

中图分类号：S964.9　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2025)10-0119-11　　**OSID**：

Construction and Operation Test of Simple Recirculating Aquaculture System for *Polyodon spathula*

LEI Xiang[1]　FAN Hao[1]　WANG Deqing[1]　ZHU Ming[1,2]　GAO Jian[2,3]　WAN Peng[1,2]　LI Zhibing[4]

(1. *College of Engineering*, *Huazhong Agricultural University*, *Wuhan* 430070, *China*
2. *Key Laboratory of Aquaculture Facilities Engineering*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Wuhan* 430070, *China*
3. *College of Fisheries*, *Huazhong Agricultural University*, *Wuhan* 430070, *China*
4. *Tianmen Yuhui Aquaculture Farm*, *Tianmen* 431719, *China*)

Abstract: Aiming at the problems of complex composition, high construction and operation cost of industrial recirculating aquaculture system, and certain difficulty in popularization and application in aquaculture, a simple recirculating aquaculture system was constructed. The recirculating aquaculture system was composed of a reservoir, a breeding pond, a water level control device, a micro-filter, a biological filter and a circulating pump. Based on the principle of gravity self-flow, the equipment of each breeding facility was configured, and the diameter ratio of the water circulation pipeline of the breeding system was optimized. A 90-day breeding experiment was carried out with the *Polyodon spathula* as the object to evaluate the stage operation effect and economy of the system. The experimental results showed that the water circulation of the system was stable; during the breeding process, the water temperature, dissolved oxygen concentration and pH value of the system ranged from 12.30℃ to 24.57℃, 3.96 mg/L to 9.32 mg/L and 6.82 to 7.60, respectively. The average values of ammonia nitrogen concentration, nitrite nitrogen concentration and nitrate nitrogen concentration were (1.26±0.62) mg/L, (0.38±0.12) mg/L and (72.39±14.94) mg/L, respectively. The removal rates of ammonia nitrogen and nitrite nitrogen were 49.07% and 62.00%, respectively. The average weight of *Polyodon spathula* was increased from (144.83±15.24) g to (437.93±60.98) g. The final culture density was 15.48 kg/m^3, the

收稿日期：2025－08－10　修回日期：2025－08－30

基金项目：国家重点研发计划项目(2022YFD2001705)和湖北省科学技术厅重大科技专项(2023BBA001)

作者简介：雷翔(1997—)，男，博士生，主要从事水产养殖设施装备研究，E-mail：leixiang@webmail.hzau.edu.cn

通信作者：万鹏(1980—)，男，副教授，博士，主要从事水产养殖和水产品加工技术与装备研究，E-mail：wanpeng09@mail.hzau.edu.cn

feed coefficient was 1.08, and the survival rate was 96.16%. Based on the breeding cycle of 12 months, the feeding cost was estimated to be about 17.57 RMB/kg. The simple recirculating aquaculture system constructed ran stably, the treatment capacity of aquaculture water was good, and the cultivation of *Polyodon spathula* can obtain good economic benefits, which can provide reference for the popularization and application of industrial recirculating aquaculture system.

Key words: aquaculture; recirculating aquaculture system; simple style; *Polyodon spathula*

0 引言

工厂化循环水养殖系统作为一种先进的水产养殖模式,具有自动化程度高、节水节地、养殖环境稳定以及环境污染风险小等优势[1-3]。近年来已广泛应用于大西洋鲑、虹鳟、欧洲鳗等高附加值水产品养殖,取得了良好的经济效益[4-6]。在国内,随着水产养殖业对资源节约与环境友好型养殖模式需求不断提高,循环水养殖模式受到广泛关注,并在大口黑鲈、鲟鱼、斑节对虾等品种养殖中进行了初步探索与应用[7-8]。朱明等[9]构建了一套精简式大口黑鲈循环水养殖系统,其最大养殖密度为 42.54 kg/m^3,且显著提升鱼肉品质,运行成本约为 19.15 元/kg。管崇武等[10]设计了一种高效、经济的鲟鱼工厂化循环水养殖系统,养殖密度达到 41.2 kg/m^3。杨菁等[11]建立了斑节对虾循环水养殖系统,最终养殖密度达 3.02 kg/m^3,养殖水体年利润为 69.56 元/m^3。循环水养殖模式在不同水产品种的养殖中具有良好的应用前景和经济效益。

典型的工厂化循环水系统由蓄水池、养殖池、微滤机、生物滤池、循环泵、氧锥、竖流沉淀器、蛋白分离器、紫外消毒和臭氧杀菌装置等构成,组成结构复杂,建造成本与维护成本较高,在一定程度上阻碍了其在水产养殖中的推广应用[12]。因此,基于国内水产养殖发展需求,研发结构简单、建造成本低廉、经济效益良好、易于推广的工厂化循环水养殖系统具有重要意义。

本文设计一种结构简单、配置合理、经济高效的工厂化循环水养殖系统,并以匙吻鲟为研究对象开展养殖试验,以水质参数变化、鱼体生长状况、养殖成本等为评价指标,对系统阶段性的稳定性及经济性进行评估,以期为国内工厂化循环水养殖模式推广提供一定理论依据。

1 材料与方法

1.1 循环水养殖系统概况

构建的循环水养殖系统位于湖北省天门市某水产养殖场。循环水养殖系统实体构造如图 1 所示。

循环水养殖系统主体为钢架大棚结构,大棚顶部及四周布设移动遮阳布,可根据外界气候条件进行遮光与通风状态调节。该系统结合大棚场地进行设计,养殖场地整体呈长方形布局,整体结构如图 2 所示。



图 1 循环水养殖系统实物图

Fig. 1 Physical map of recirculating aquaculture system

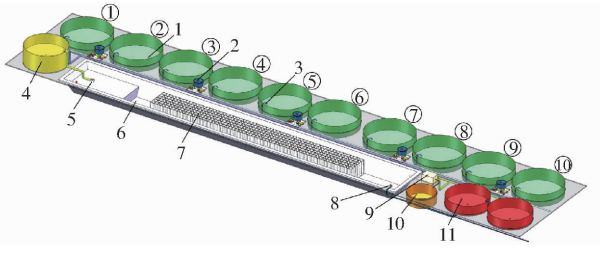

图 2 循环水养殖系统结构分布示意图

Fig. 2 Structure distribution diagram of recirculating aquaculture system

1. 养殖池 2. 水位控制装置 3. 分进水管 4. 蓄水池 5. 循环泵 6. 生物滤池 7. 滤材格栅 8. 补水阀 9. 微滤机 10. 排污池 11. 原水池

循环水养殖系统占地长 80 m,宽 16 m;系统主要由养殖池、水位控制装置、微滤机、原水池、排污池、生物滤池、蓄水池、循环泵以及增氧与曝气设备等组成,根据场地结构成平行直线对称布置,一边为养殖区,一边为水处理区。该布置方式可提高场地利用效率,同时养殖设施排列整齐,有利于系统水流组织与养殖操作的规范化管理。循环水养殖系统主要设计参数见表 1。

表 1 养殖系统主要设计参数

Tab. 1 Main design parameters of aquaculture system

参数	数值
养殖池数量	10
养殖水体体积/m^3	680
循环周期/h	4
生物滤池水体体积/m^3	500
设计养殖密度/(kg·m^{-3})	40
系统配用功率/kW	9.2
日补水率/%	1

该系统中，在养殖区设计 10 个养殖池，单个养殖池直径为 7 m，深度为 1.8 m，采用镀锌板结构搭建并内衬防渗帆布。每 2 个养殖池为 1 组，共用 1 套水位控制装置，以实现养殖池水位与排污的自动调控。

水处理区依次设置蓄水池、循环泵、生物滤池、微滤机、排污池与原水池。其中蓄水池直径为 4 m，与 1 号养殖池平行，池中设置浮球液位开关控制循环泵的启停，维持蓄水池中水位高程；生物滤池分为提水区、曝气区、进水区，其中提水区通过循环泵与蓄水池连接，进水区与微滤机出水管道连接；微滤机为水体固液分离装置，其排污口通过管道与排污池连接；原水池由 2 个直径为 4 m、高度为 2 m 的圆形池组成，用作水体两级静置沉淀池；养殖水体取自地下水，经由原水池两级静置沉淀后进入循环水系统。经静置沉淀处理后养殖水体水质参数为：溶解氧质量浓度 2.76 ~ 4.61 mg/L、pH 值 7.34 ~ 8.20。

1.2　循环水养殖系统设计与构建

1.2.1　系统工艺设计

为提高循环水养殖系统适用性与经济性，以简化系统结构、降低运行能耗和提升运行稳定性为前提，对系统水处理工艺进行设计。循环水养殖系统水处理工艺流程如图 3 所示。

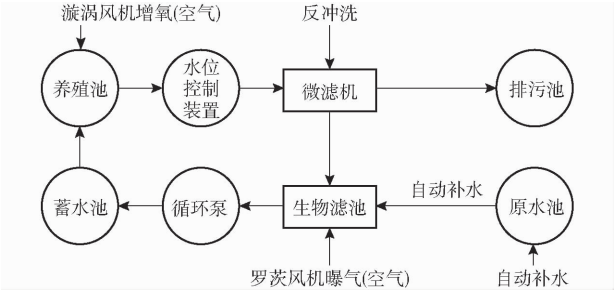

图 3　系统水处理工艺流程图

Fig. 3　System water treatment process flowchart

蓄水池中水体通过重力自流进入养殖池，同时漩涡风机向养殖池内增氧，提高水体溶氧量；养殖池内水体通过水位控制装置进入微滤机，对水体中残饵、粪便等固体颗粒物进行分离，分离出的固体颗粒物流入排污池，分离后的水体流入生物滤池，进行生化处理；系统循环过程中损失的水体由原水池向生物滤池中补充；生物滤池中设置多组滤材格栅，并布设曝气管道，通过罗茨风机向生物滤池中通入空气促进生物滤材翻动，提高水体中氨态氮、亚硝酸盐等有害物的去除效率；经过滤材格栅后的水体经循环泵提升至蓄水池，再通过高差回流至养殖池，以实现水体的循环。

1.2.2　基于重力自流原理的管道配比设计

为了降低循环水养殖系统能耗，基于重力自流原理构建循环水养殖系统。同时，为了保证水体在各养殖单元之间的流动，各养殖单元之间的连接管道应具有良好的管径配比及水体流量。

循环水养殖系统中，蓄水池、养殖池、水位控制装置之间的管道连接如图 4 所示。

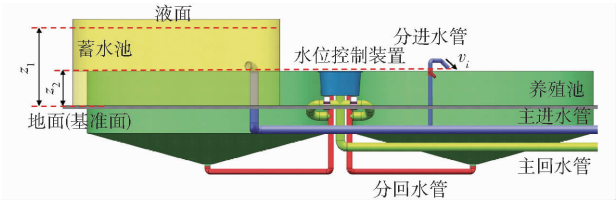

图 4　系统管道连接结构示意图

Fig. 4　System pipeline connection structure diagram

设定由蓄水池向养殖池供水管道为主进水管，连接主进水管与各养殖池管道为分进水管；与水位控制装置出水口连接的管道为主回水管，养殖池与水位控制装置连接管道为分回水管。设定养殖场地面为基准面，蓄水池液面距离基准面高度为 z_1，养殖系统中任意分进水管出水口处距离基准面高度为 z_2。

假定循环水养殖系统水体循环过程为不可压缩黏性流体运动，为了便于优化管道配比，将养殖系统管道分为若干段，则系统中某一段管道内的水体流动过程可由伯努利修正方程表示为[13]

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_i^2}{2g} + h_w \tag{1}$$

式中　p_1——蓄水池液面压力，Pa

p_2——任意分进水管出水口处压力，Pa

g——重力加速度，取 9.81 m/s^2

v_1——蓄水池液面处的平均流速，m/s

v_i——任意分进水管出水口处的平均流速，m/s，i 为 1，2，3，…

h_w——系统总损失水头，m

因蓄水池液面处压力与系统任意分进水管出水口处大气压力基本相等，即 $p_1 \approx p_2$，且蓄水池液面基本静止，即液面平均流速 $v_1 \approx 0$，则由式(1)可得

$$v_i = \sqrt{2g(z_1 - z_2 - h_w)} \tag{2}$$

在流体力学中，总损失水头 h_w 包括沿程损失水头 h_f 和局部损失水头 h_j。

水体沿程损失水头 h_f 是流体在管道中运行时与管壁间的黏性摩擦对运动形成阻力造成的水头损失，其公式为[13]

$$h_{fi} = \lambda_i \frac{l_i}{d_i} \frac{v_i^2}{2g} \tag{3}$$

其中

$$\lambda_i = \frac{0.316\,4}{Re_i^{0.25}} \tag{4}$$

$$Re_i = \frac{v_i d_i}{\upsilon} \tag{5}$$

式中 h_{fi}——系统第 i 段管道损失水头,m

λ_i——系统第 i 段管道沿程损失系数

l_i——系统第 i 段管道长度,m

d_i——系统第 i 段管道直径,m

Re_i——系统第 i 段管道雷诺数

υ——流体运动黏度系数,水温为 20℃,取 1.01×10^{-6} m^2/s[13]

水体局部损失水头 h_j 是流体在管道中运动时遇到局部障碍后造成的水头损失,根据《水力计算手册》中的计算方法,系统第 i 段管道局部损失水头 h_{ji}可按该段管道沿程损失水头 h_{fi}的 20% 进行估算[14]。

故系统第 i 段管道总损失水头 h_{wi}可表示为

$$h_{wi} = h_{fi} + h_{ji} = 1.2h_{fi} \tag{6}$$

系统中总损失水头 h_w 可表示为

$$h_w = \sum h_{wi} \tag{7}$$

水体在第 i 段管道中运动时,水体流量与水体平均流速、管道直径之间关系为

$$Q_i = \frac{\pi d_i^2}{4} v_i \tag{8}$$

式中 Q_i——系统第 i 段管道内水体流量,m^3/h

为确保系统回水通畅并避免养殖池发生溢流风险,在对本系统进行设计时要求回水段回水能力应大于进水段进水能力。在此基础上,为实现循环水养殖系统管道优化配置,主进水管与分进水管过水截面积关系以及主回水管与分回水管过水截面积关系应遵循准则

$$\begin{cases} A_{zj} > nA_{fj} \\ A_{zh} > A_{zj} \\ A_{fh} > A_{fj} \end{cases} \tag{9}$$

式中 A_{zj}——主进水管过水截面积,m^2

A_{fj}——分进水管过水截面积,m^2

A_{zh}——主回水管过水截面积,m^2

A_{fh}——分回水管过水截面积,m^2

n——分进水管数量,取 10

由于水体在管道中流动时,沿程损失水头会随着管道距离的增加而增加,而水体流速随着管道距离的增加而减小;为了使各养殖池分进水管流量相同,则分进水管的过水截面积应逐渐增加。在本系统中,10 号养殖池分进水管距离蓄水池最远,其沿程损失水头最大,因此,10 号养殖池分进水管过水截面积应最大。在设计循环水养殖系统管道配比时,以 10 号养殖池为参照进行设计。

为了使系统各养殖池进水量具备可调节性,各养殖池分进水管的过水截面积应小于分进水管的管道截面积。假定各分进水管水体流量一致,且 10 号养殖池分进水管中过水截面积为管道截面积的 1/2,则分进水管流量 Q_{10}等于主进水管流量 Q_x 的 1/10。

假定养殖系统中养殖水体体积为 V_x,循环周期间为 T,则

$$Q_x = \frac{V_x}{T} \tag{10}$$

式中 Q_x——系统主进水管中水体流量,m^3/h

本养殖系统设计的养殖水体体积 V_x 为 680 m^3,水体循环周期 T 为 4 h,则主进水管流量 Q_x 为 170 m^3/h,10 号养殖池分进水管流量 Q_{10}为 17 m^3/h。

由于 10 号养殖池分进水管中过水截面积为分进水管截面积的 1/2,设 10 号养殖池分进水管水体流速 v_{10}为 1 m/s[9],根据式(8)可得

$$Q_{10} = \frac{1}{2}\frac{\pi d_{10}^2}{4} v_{10} \tag{11}$$

计算可得分进水管直径 d_{10}为 0.109 m;根据现有管道标准,10 号养殖池分进水管选用直径为 0.11 m 的管道,即设计系统中分进水管管径为 0.11 m。

在实际生产中,主进水管道过水截面积 A_{zj}通常为主进水管截面积,根据式(9)可得

$$\frac{\pi d_{zj}^2}{4} > 10 \times \frac{1}{2} \times \frac{\pi d_{fj}^2}{4} \tag{12}$$

式中 d_{zj}——主进水管直径,m

d_{fj}——分进水管直径,m

计算可得主进水管直径 d_{zj}应大于 0.246 m,故主进水管选用直径为 0.25 m 的标准管。在上述条件下,根据式(8)可得主进水管内水体平均流速为 0.96 m/s。

根据建设场地布局设计,循环水养殖系统主进水管长度为 70 m,分进水管长度为 30 m。依据式(3)~(7)计算可得养殖系统总损失水头 h_w 为 0.51 m;根据式(2)计算可得系统中蓄水池液面与分进水管出口间高度差理论值为 0.56 m,即蓄水池中水位与分进水管出口高度差应大于 0.56 m。为了保证养殖系统水循环正常进行,根据养殖池进水高度,将蓄水池内浮球开关的下液位开关设置在高于分进水管出口的 0.56 m 处,当蓄水池液面低于下液位开关时,循环泵启动,将生物滤池中水体抽入蓄水池中;当蓄水池中液面达到浮球开关上液位开关时,停止进水。

根据式(9),并结合现有管道规格标准,最终确定主回水管和分回水管直径均较主进水管和分进水管大一个规格型号,即主回水管直径为 0.315 m,分

回水管直径为 0.16 m。

根据循环水养殖系统中主进水管流量，选用处理能力为 200 m^3/h、功率为 1.5 kW 的转鼓式微滤机。

1.2.3　系统关键环节设计

1.2.3.1　水位控制装置设计

为了维持养殖系统中水体稳定流动，同时排出养殖池内残饵、粪便等固体废弃物，本文设计了水位控制装置。水位控制装置设置于两个养殖池之间，其结构及管道连接图、实物图如图 5 所示。

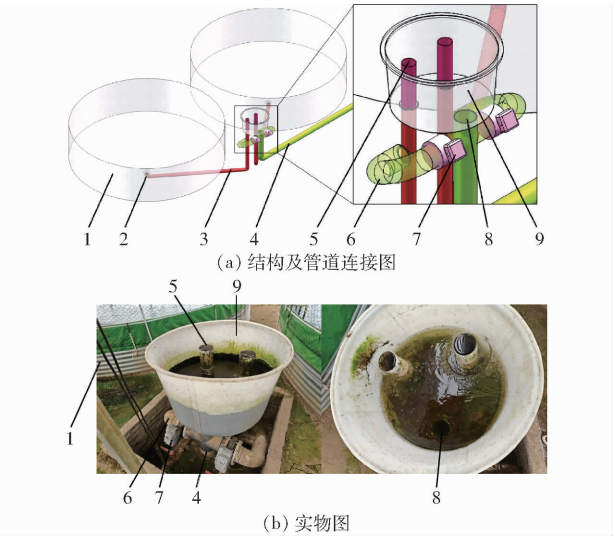

图 5　水位控制装置结构图和实物图

Fig. 5　Structural and physical drawings of water level control device

1. 养殖池　2. 养殖池出水口　3. 分回水管　4. 主回水管　5. 溢流口　6. 速排管　7. 速排阀　8. 溢流出水口　9. 溢流过渡仓

水位控制装置由分回水管、溢流过渡仓、速排管、主回水管及速排阀等部件组成，养殖池底的分回水管一端与养殖池出水口连接，另一端位于溢流过渡仓内；速排管用于连接分回水管和主回水管；速排阀安装于速排管与主回水管之间，可控制各养殖池分回水管与主回水管的通断形成溢流模式和速排模式。

溢流模式工作过程：在该模式下，速排阀关闭，分回水管与主回水管间通过速排管断开，养殖池内水体通过分回水管的溢流口流出，进入到溢流过渡仓内，并通过溢流出水口流入主回水管道。此时通过分回水管的溢流口控制养殖池内水位高度。

速排模式工作过程：在该模式下，速排阀开启，分回水管通过速排管直接与主回水管连接；由于养殖池水位与速排管间形成重力差，可加速水体流动，促使养殖池内水体快速进入主回水管。快速流动的水体有助于养殖池底部聚集污染物排出。

在本循环水养殖系统中，共设置 5 组水位控制装置，配置 10 个速排阀，通过依次开启或关闭速排阀，使 5 组养殖池内水体以速排模式或溢流模式交替流动，流入主回水管中。

1.2.3.2　生物滤池设计

生物滤池是循环水养殖系统中水质净化核心设施，可去除养殖尾水中的氨态氮、亚硝酸盐等有害物质，保障养殖水体的水质安全[15-16]。本循环水养殖系统生物滤池整体结构及设备布置如图 6 所示。

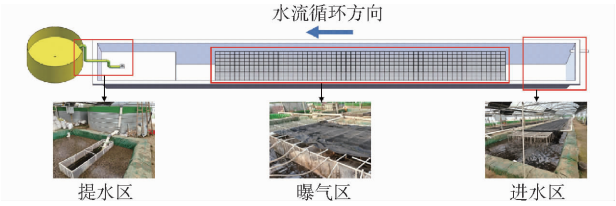

图 6　生物滤池整体结构及设备布置图

Fig. 6　Overall structure and equipment layout of biofilter

生物滤池采用下沉式结构，在地面下挖长方形水池，并铺设防渗帆布构成生物滤池。生物滤池池体长 50 m、宽 6 m、深 2.5 m，有效水体体积 500 m^3，约占系统总养殖水体 73.53%。该设计充分利用场地布局建设，可降低生物滤池建设成本，同时借助地温可以降低生物滤池中水体温度的剧烈波动，维持水处理过程中微生物活性。

生物滤池按照水流循环方向可分为进水区、曝气区和提水区。进水区与微滤机出水口连接，经分离后的水体流入生物滤池进水区。曝气区设置有滤材格栅、生物滤材、曝气设备及遮阳网等设施。为保证生物滤池中生物滤材均匀分布，沿生物滤池中部设置多个规格为 1 m×1 m 的正方形滤材格栅，格栅总长为 30 m，格栅内填充生物滤材；纳米微孔曝气盘设置于滤材格栅底部，通过罗茨风机进行鼓风曝气；为了抑制藻类繁殖，维持生物滤池的水处理效率，在滤材格栅表面铺设遮阳网。提水区设置循环泵，将生物滤池处理后的水体提升至蓄水池。

(1) 生物滤池中水体水力停留时间

生物滤池中水力停留时间是影响水处理系统中生物降解效率的关键参数[17]。生物滤池中水体的水力停留时间、生物滤池中水体体积、水体循环量之间关系为[18]

$$H_{RT}=\frac{V_{\text{biofilter}}}{Q_{\text{TAN}}} \tag{13}$$

式中　H_{RT}——生物滤池中水体水力停留时间，h

$V_{\text{biofilter}}$——生物滤池中水体体积，取 500 m^3

Q_{TAN}——生物滤池中水体循环量，取 170 m^3/h

计算可得生物滤池中水体的水力停留时间 H_{RT} 为 2.94 h，可为养殖尾水中氨态氮、亚硝酸盐等有害物质的降解提供充足的反应时间。

(2)基于氨态氮水平的最大养殖密度

在循环水养殖系统的设计与评价中,最大养殖密度是反映系统可行性与推广潜力的核心指标之一[19-20]。

在循环水养殖系统中,鱼体理论最大养殖量主要受限于系统对氨态氮的处理能力。系统在单位时间内所产生的氨态氮质量主要由养殖过程中饲料的日投饲率、饲料中粗蛋白质量分数和饲料中氨态氮转化比例决定。系统中鱼体理论最大养殖量计算式[21]为

$$B_M = \frac{24R_{TAN}}{r_{feed}C_P a_{TAN}} \tag{14}$$

式中 B_M——系统中鱼体理论最大养殖量,kg

R_{TAN}——系统单位时间内产生的总氨态氮质量,kg/h

r_{feed}——日投饲率,取 2%/d

C_P——饲料中粗蛋白质量分数,取 42%

a_{TAN}——每千克饲料粗蛋白氨态氮转化比例系数,取 0.092[22-23]

养殖过程中,系统中单位时间内产生的总氨态氮质量 R_{TAN} 计算式为[21]

$$R_{TAN} = \frac{V_t f_{rem} S_P}{1\,000} \tag{15}$$

式中 V_t——所需生物填料总体积,m^3

f_{rem}——单位面积滤材氨氮去除速率,根据沸腾式移动床生物过滤池工作性能,取 0.018 75 g/(m^2·h)[9]

S_P——滤材比表面积,取 500 m^2/m^3

系统生物滤池中所需生物滤材总体积 V_t 计算式为[21]

$$V_t = Q_x P_R H_{RT} \tag{16}$$

式中 P_R——生物滤池中滤材填充率,根据沸腾式移动床生物过滤池的工作要求,其值一般为 40% ~50%,取 50%

根据式(14)~(16)计算可得,本文构建的循环水养殖系统中鱼体理论最大养殖量为 63 586.96 kg,换算成养殖密度为 93.51 kg/m^3,高于系统设计的目标养殖密度。

1.2.3.3 曝气增氧装置选型

曝气增氧设备是维持循环水养殖系统中水体溶解氧浓度的关键装备[24]。系统养殖过程中,增氧装置向养殖池内通入的空气量与鱼体养殖量、鱼体耗氧率、空气中的氧气在水体中的溶解率等因素有关。养殖系统配备的曝气增氧设备单位时间内向养殖水体中通入空气量计算式为

$$Q_b = \frac{B_{MS}O}{S_{OTE}} \tag{17}$$

式中 Q_b——曝气增氧设备单位时间向养殖水体中通入空气量,m^3/h

B_{MS}——系统设计的鱼体养殖量,取 2 720 kg

O——鱼体耗氧率,取 0.29 mg/(g·h)[25]

S_{OTE}——空气中的氧气在水体中溶解率,取 4%[26]

计算可得曝气增氧设备单位时间向养殖水体中通入空气量 Q_b 为 148.27 m^3/h,即养殖系统需要配置的曝气增氧设备通风能力应大于 148.27 m^3/h。根据漩涡风机型号标准,选用功率为 1.5 kW、出风量为 263 m^3/h 的漩涡式鼓风机搭配纳米微孔曝气管作为曝气增氧设备,对 10 个养殖池进行曝气增氧。

1.2.3.4 循环泵选型

根据系统设计循环量、蓄水池高度,选用流量为 200 m^3/h、扬程为 10 m、功率为 4 kW 的油浸式潜水泵。

1.3 运行管理与试验

匙吻鲟(*Polyodon spathula*),又称鸭嘴鲟,是一种大型滤食性淡水经济鱼类,具有肉质细嫩、生长迅速、经济价值高等优点[27-28]。近年来,我国多个地区已开展匙吻鲟养殖生产,目前养殖模式主要依赖池塘、湖泊或大水面网箱等方式[29]。本文以匙吻鲟为养殖对象,开展阶段性养殖试验,以验证所构建循环水养殖系统运行性能,并评估匙吻鲟在循环水养殖条件下的养殖可行性。

循环水养殖系统于 2024 年 9 月 1 日投入运行。试验开始前向 10 个养殖池均匀投放匙吻鲟苗种 2.5×10^4 尾,苗种规格为体长 30 ~40 cm/尾。在养殖过程中,饲料选用鲍鱼膨化配合饲料(粗蛋白含量大于等于 42.0%、粗纤维含量小于等于 6.0%、粗灰分含量小于等于 15.0%、粗脂肪含量大于等于 3.5%、含水率小于等于 12.0%),饲料颗粒规格依据鱼体生长阶段适时调整。日常投喂管理中,遵循日投喂率为鱼体质量的 1% ~3%,在每天 08:00 与 20:00 各投喂一次,并根据鱼体实际摄食情况灵活调节投喂量。匙吻鲟养殖试验周期为 90 d,试验期间,每天记录饲料投喂量以及鱼体死亡数量,计算试验期间鱼体存活率和饵料系数。

1.4 养殖水样采集和检测方法

循环水养殖系统运行试验期间,为有效评估养殖系统的运行性能,本研究在循环水养殖系统中共设置 17 个水质采样点,对系统中养殖池及生物滤池内的水质进行检测,水质检测及采样点位置如图 7

所示。

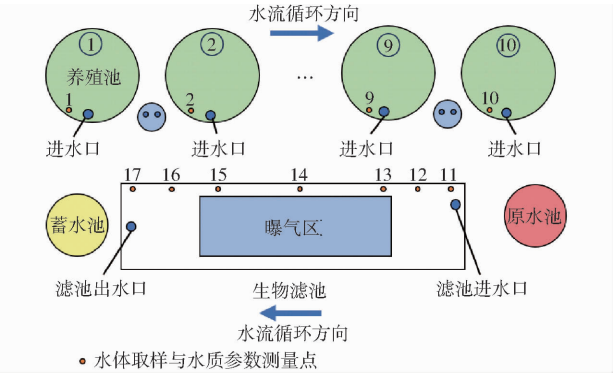

图 7　系统水质检测及采样点位置示意图

Fig. 7　System water quality detection and sampling point location diagram

在系统运行期间，每周定期采集水样并对养殖系统中的主要水质参数进行检测。养殖系统中的水温、溶解氧质量浓度及 pH 值在 07:00—8:00 采样现场即时检测，氨态氮质量浓度、硝酸盐质量浓度及亚硝酸盐质量浓度等指标在采集水样的当日送至实验室内进行检测。各水质参数检测仪器和方法如表 2 所示。

表 2　水质参数检测仪器和方法

Tab. 2　Water quality parameters detection instruments and methods

检测指标	检测仪器和方法
pH 值	CT－6023L 型柯迪达 pH 计
溶解氧质量浓度	AR8406 型希玛溶氧仪
温度	AR8406 型希玛溶氧仪
氨态氮质量浓度	自动分析仪（苯酚-次氯酸盐比色法）
硝酸盐质量浓度	自动分析仪（酚二磺酸分光光度法）
亚硝酸盐质量浓度	自动分析仪（分光光度法）

1.5　数据处理与分析方法

采用 Excel 2019 和 Origin 2021 对水质数据进行统计分析，并绘制图表；各试验指标检测数据以“均值 ± 标准差”形式表示。

2　结果与分析

2.1　养殖池主要水质参数

2.1.1　水温、溶解氧质量浓度及 pH 值

试验期间养殖池水体温度、溶解氧质量浓度和 pH 值变化曲线如图 8 所示。由图 8 可知，养殖过程中，水温为 12.30 ~ 24.57℃，平均值为（19.01 ± 3.68）℃；溶解氧质量浓度为 3.96 ~ 9.32 mg/L，平均值为（5.63 ± 1.64）mg/L；pH 值为 6.82 ~ 7.60，平均值为 7.05 ± 0.23，均处于匙吻鲟适宜生长指标范围内。

在养殖过程中，由于经历季节变化，在前 60 d

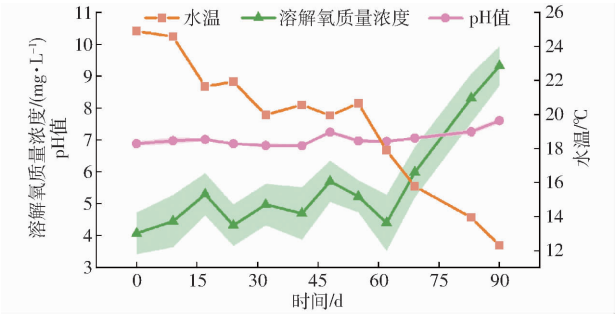

图 8　养殖池中常规水质参数变化曲线

Fig. 8　Variation trend of conventional water quality parameters in aquaculture ponds

内水温呈缓慢下降趋势，在 60 d 后，水温呈快速下降趋势；随着水温变化，水体中溶解氧质量浓度在前 60 d 内呈缓慢增加趋势，在后 30 d 内，呈快速上升趋势，最终溶氧质量浓度超过 9.00 mg/L。当水温超过 20℃ 时，溶解氧质量浓度平均值为（5.50 ± 0.30）mg/L；当水温小于 20℃ 时，溶解氧质量浓度平均值为（7.50 ± 0.50）mg/L。试验期间水体 pH 值较为稳定。

2.1.2　氨态氮、亚硝酸盐及硝酸盐质量浓度

试验期间养殖池水体中的氨态氮、亚硝酸盐和硝酸盐质量浓度变化曲线如图 9 所示。由图 9 可知，养殖池中硝酸盐质量浓度在前 30 d 呈现缓慢上升趋势，最高达到 82.73 mg/L；为了防止硝酸盐质量浓度过高影响鱼类生长，向养殖水体中投入反硝化菌；投入反硝化菌后，硝酸盐质量浓度呈缓慢下降趋势，最终稳定在 73.87 mg/L 以下，试验期间硝酸盐质量浓度平均为（72.39 ± 14.94）mg/L；水体中氨态氮质量浓度呈周期性波动变化，但稳定在 0.25 ~ 2.00 mg/L 范围内，没有升高趋势，养殖期间氨态氮质量浓度均值为（1.26 ± 0.62）mg/L；亚硝酸盐质量浓度相对稳定，整个试验期间均保持在 0.50 mg/L 以下，平均值为（0.38 ± 0.12）mg/L。

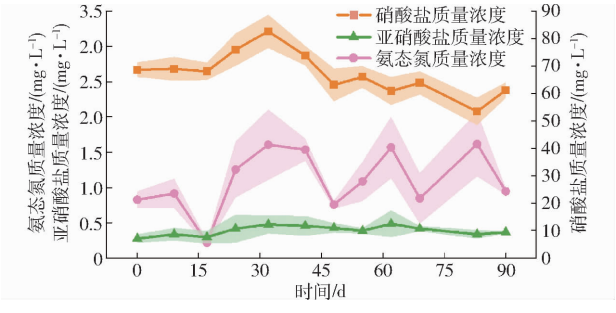

图 9　养殖池中氨态氮、亚硝酸盐和硝酸盐质量浓度变化曲线

Fig. 9　Change trend of ammonia nitrogen, nitrite nitrogen and nitrate nitrogen concentration in aquaculture ponds

2.2　生物滤池主要水质参数

为检测生物滤池水处理效果，在试验期间，沿水

流方向对生物滤池中水体进行了采样检测。生物滤池中水体温度、溶解氧质量浓度和 pH 值如表 3 所示。由表 3 可知,整个生物滤池中水体温度基本一致;溶解氧质量浓度沿水流方向呈上升趋势,平均值从(5.58 ±1.45) mg/L 上升至(8.39 ±0.72) mg/L;水体 pH 值在流过曝气区后呈一定上升趋势,平均值从(7.01 ±0.24) mg/L 上升至(7.35 ±0.17) mg/L。

表 3 水体中常规理化指标

Tab.3 Conventional physical and chemical indexes of water body

采样点	水温/℃	溶解氧质量浓度/(mg·L^{-1})	pH 值
11	18.95 ±3.59	5.58 ±1.45	7.01 ±0.24
12	18.99 ±3.67	5.79 ±1.48	7.02 ±0.24
13	18.94 ±3.68	6.71 ±1.24	7.05 ±0.23
14	18.98 ±3.65	8.21 ±0.72	7.22 ±0.19
15	18.97 ±3.66	8.57 ±0.67	7.34 ±0.18
16	18.98 ±3.65	8.43 ±0.76	7.36 ±0.17
17	18.97 ±3.64	8.39 ±0.72	7.35 ±0.17

生物滤池中水体氨态氮及亚硝酸盐质量浓度变化情况如图 10 所示。由图 10 可知,生物滤池内水体中氨态氮及亚硝酸盐质量浓度沿水流方向均呈现下降趋势。其中从第 12 采样点到第 15 采样点,氨态氮质量浓度从(1.08 ±0.34) mg/L 下降至(0.55 ±0.14) mg/L;从第 13 采样点到第 15 采样点,亚硝酸盐质量浓度(0.50 ±0.19) mg/L 下降至(0.19 ±0.06) mg/L,可得生物滤池对氨态氮与亚硝酸盐去除率分别为 49.07% 与 62.00%。这表明生物滤池内养殖水体流经生物滤材区过程中氨态氮和亚硝酸盐生物降解效果明显。但在第 16 和第 17 采样点处氨态氮和亚硝酸盐质量浓度略有升高,可能与生物滤池存在水体死角,不能及时进行水体交换有关。

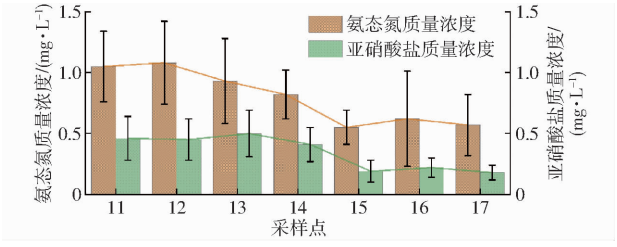

图 10 生物滤池中氨态氮、亚硝酸盐质量浓度沿程变化曲线

Fig. 10 Variation trend of ammonia nitrogen and nitrite nitrogen concentration in biological filter along way

2.3 匙吻鲟生长情况

试验期间,每周从养殖池内随机捕捞 10 尾匙吻鲟样本测定其体长与体质量,统计匙吻鲟的生长情况。养殖试验过程中匙吻鲟生长情况如图 11 所示。

由图 11 可知,在养殖试验期间内,匙吻鲟平均体长从(36.08 ±1.20) cm 增至(54.86 ±0.69) cm,平均体质量从(144.83 ±15.24) g 增至(437.93 ±60.98) g;试验结束时,系统最大养殖密度 15.48 kg/m^3,饲料系数为 1.08,匙吻鲟成活率为 96.16%,表明匙吻鲟生长状态良好,本文构建的简易式循环水养殖系统可以用于匙吻鲟的养殖。

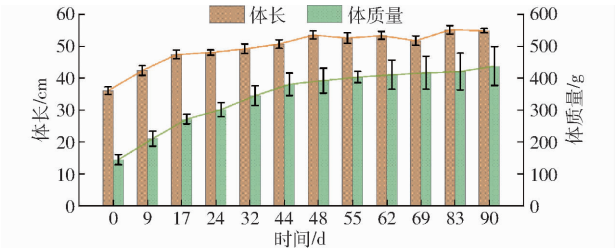

图 11 鱼体平均体长及体质量变化情况

Fig. 11 Changes of average body length and body weight of fish

3 讨论

基于重力自流原理构建了一种简易式循环水养殖系统,并对各养殖设施设备进行配置,对养殖系统水体循环管道管径配比进行优化。循环水养殖系统由蓄水池、养殖池、水位控制装置、微滤机、生物滤池和循环泵等组成,其中微滤机选用处理能力 200 m^3/h、功率 1.5 kW 的转鼓式微滤机;增氧设备选用额定出风量 263 m^3/h、功率 1.5 kW 的漩涡式风机;循环泵选用额定流量 200 m^3/h、扬程 10 m、功率 4 kW 的油浸式潜水泵;确定主进水管管径为 0.25 m、分进水管管径为 0.11 m、主回水管管径为 0.315 m、分回水管管径为 0.16 m,蓄水池液面与分进水管出口间理论高度应高于 0.56 m。以匙吻鲟为研究对象开展 90 d 的养殖试验,对系统运行的稳定性与经济性进行评估。试验结果表明,养殖试验期间,系统运行稳定,养殖水体水质良好,养殖鱼类生长状态较好且存活率高。但是系统未配置反硝化装置,养殖过程中硝酸盐浓度维持在较高水平,可能会对鱼体生理代谢产生不利影响。

3.1 循环水养殖系统阶段性运行情况

在养殖试验过程中,受季节变化影响,养殖池水体温度逐步降低,水中溶解氧质量浓度随之升高,pH 值则保持相对稳定。养殖池水体中硝酸盐平均质量浓度为(72.39 ±14.94) mg/L、氨态氮平均质量浓度为(1.26 ±0.62) mg/L、亚硝酸盐平均质量浓度为(0.38 ±0.12) mg/L。养殖池中氨态氮与亚硝酸盐浓度明显低于生物滤池进水段水体的氨态氮与亚硝酸盐浓度,这是因为水位控制装置通过交替性的速排模式或溢流模式,促进了养殖池水体交换,加快了残饵粪便等固体颗粒物的排出,缩短了残饵

粪便等固体颗粒物在池中的滞留与分解时间，减少了含氮有害物质的形成。

在生物滤池中，沿水体循环流动方向，水体溶解氧质量浓度显著提升，其平均质量浓度由(5.58 ± 1.45) mg/L上升至(8.39 ± 0.72) mg/L，这说明曝气装置性能良好，不仅提供了硝化处理过程中所需的氧气，同时也增加了水体中的溶解氧含量。水体 pH 值在经过曝气区后出现小幅上升，即水体碱性增加，可能是因为曝气导致水体中的 CO_2 逸散，减少了水体酸性物质含量，该结果与黄滨等[30]研究结论相符。生物滤池中水体水力停留时间为 2.94 h，氨态氮与亚硝酸盐去除率分别为 49.07% 与 62.00%，显著优于杨菁等[11]设计的净水设备，这可能是因为在生物滤池中，水体水力停留时间的增加延长了氨态氮与亚硝酸盐硝化反应时间，增强了水体中有害物质的去除效果[31]。

养殖效果方面，匙吻鲟生长状态良好，鱼体体长平均增长 18.78 cm，体质量增加 293.10 g；试验结束时系统养殖密度为 15.48 kg/m^3，饵料系数为 1.08，成活率达 96.16%，说明本文构建的匙吻鲟循环水养殖模式整体养殖效果优于现有的池塘与网箱养殖模式[32-33]，进一步验证了本循环水养殖系统在匙吻鲟养殖应用中的可行性。

3.2　循环水养殖系统阶段性运行经济性

循环水养殖系统经济性包括养殖成本、管理成本等因素，其中养殖对象的经济价值是影响系统经济性的重要因素[34]。在为期 90 d 的匙吻鲟养殖试验中，养殖成本主要包括苗种费、饲料费、养殖投入品费、电力消耗、人工管理费及资产折旧等[35]。苗种按 4 元/条计算；饵料系数按照 1.08 进行计算；电力消耗依据系统装机功率按每天 24 h 运行工况计算；人工管理费用按 5 000 元/(月·人)计算；系统建设成本按 750 000 元计算，则系统月运行成本测算如表 4 所示。

表 4　系统月运行成本测算

Tab.4　Monthly operating cost calculation of system

项目	成本/元	备注
苗种费	8 333	投入 2.5×10^4 尾，按 4 元/尾计
饲料费	21 675	饲料系数 1.08，按 8 500 元/t 计
投入品费	1 440	包括反硝化菌等
电费	3 974	按 24 h 运行，电费 0.6 元/(kW·h)计
人工管理费	5 000	按每人 5 000 元/月计
资产折旧	6 250	系统造价成本 7.5×10^5 元，折旧 10 a 计
总计	46 672	

以养殖规模和月运行成本等相关数据为基础，匙吻鲟养殖周期为 12 个月，鱼体平均质量可达 1.5 kg。按成本测算，养殖一个周期的匙吻鲟，饲养成本约为 17.57 元/kg。结合市场平均售价 60 元/kg，养殖该鱼种具有较好的经济效益。因此，选择合适的养殖品种，采用构建的简易式循环水养殖系统具有实现良好经济效益的潜力。

4　结论

(1)基于重力自流原理构建了一套简易、高效、经济的循环水养殖系统，试验期间，系统养殖池中水体温度、溶解氧质量浓度和 pH 值分别为 12.30 ~ 24.57℃、3.96 ~ 9.32 mg/L、6.82 ~ 7.60，氨态氮质量浓度、亚硝酸盐质量浓度平均值分别为(1.26 ± 0.62) mg/L、(0.38 ± 0.12) mg/L，硝酸盐质量浓度平均值为(72.39 ± 14.94) mg/L；生物滤池对氨态氮和亚硝酸盐平均去除率分别为 49.07% 和 62.00%，表明系统具备良好的水质调控能力，可有效维持养殖水体的生态稳定性。

(2)匙吻鲟生长状态良好，试验结束时平均养殖密度为 15.48 kg/m^3，饵料系数为 1.08，成活率达到 96.16%。以养殖周期 12 个月进行测算，饲养成本约为 17.57 元/kg。构建的简易式循环水养殖系统具备产生良好经济效益的潜力，对于循环水养殖系统的推广应用具有一定的指导意义。

参　考　文　献

[1] TIMMONS M B, EBELING J M. Recirculating aquaculture[M]. 3rd Edition. New York: Ithaca Publishing Company, LLC, 2013.

[2] 雷霁霖，黄滨，刘滨，等. 构建基于水产福利养殖理念的高端养殖战略研究[J]. 中国工程科学，2014，16(3)：14 - 20.
LEI Jilin, HUANG Bin, LIU Bin, et al. Strategic research on the construction of high-end farming industry in China based on the concept of aquatic animal welfare[J]. Strategic Study of CAE, 2014, 16(3): 14 - 20. (in Chinese)

[3] 石庆兰，束金阳，李道亮，等. 基于 BiLSTM - GRU 融合网络的稻虾养殖溶解氧含量预测[J]. 农业机械学报，2023，54(10)：364 - 370.
SHI Qinglan, SHU Jinyang, LI Daoliang, et al. Dissolved oxygen prediction in rice and shrimp culture based on BiLSTM - GRU fusion neural networks [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10): 364 - 370. (in Chinese)

[4] BAER A, SCHULZ C, TRAULSEN I, et al. Analyzing the growth of turbot (*Pseaa maxima*) in a commercial recirculation system with the use of three different growth models[J]. Aquaculture International, 2011, 19: 497 - 511.

[5] DALSGAARD J, LUND I, THORARINSDOTTIR R, et al. Farming different species in RAS in Nordic countries: current status and future perspectives[J]. Aquacultural Engineering, 2013, 53: 2 - 13.

[6] GEDES, MAGDALENA L S, JONATHAN B K, et al. Development of a zero water discharge (ZWD)- recirculating aquaculture system (RAS) hybrid system for super intensive white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) culture under low salinity conditions and its industrial trial in Commercial Shrimp Urban Farming in Gresik, East Java, Indonesia[J]. Aquacultural Engineering, 2018, 82: 12 - 24.

[7] 张晓双,傅玲琳,吕振明,等. 国内外循环式工厂化水产养殖模式研究进展[J]. 饲料工业,2017,38(6):61 - 64.
ZHANG Xiaoshuang, FU Linglin, LÜ Zhenming, et al. Research progress of circulating factory aquaculture model at home and abroad[J]. Feed Industry, 2017, 38(6): 61 - 64. (in Chinese)

[8] 王峰,雷霁霖,高淳仁,等. 国内外工厂化循环水养殖模式水质处理研究进展[J]. 中国工程科学,2013,15(10):16 - 23.
WANG Feng, LEI Jilin, GAO Chunren, et al. Research progress on water quality treatment of factory water recycling aquaculture model at home and abroad[J]. Strategic Study of CAE, 2013, 15(10): 16 - 23. (in Chinese)

[9] 朱明,范豪,万鹏,等. 精简式大口黑鲈循环水养殖系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(3):414 - 424.
ZHU Ming, FAN Hao, WAN Peng, et al. Design and testing of streamlined largemouth bass recirculating aquaculture system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(3): 414 - 424. (in Chinese)

[10] 管崇武,杨菁,宋红桥,等. 鲟鱼工厂化循环水养殖系统设计及运行效果[J]. 渔业现代化,2017,44(4):30 - 36.
GUAN Chongwu, YANG Jing, SONG Hongqiao, et al. Design and operation effects of industrial recirculating aquaculture system for sturgeon[J]. Fishery Modernization, 2017, 44(4): 30 - 36. (in Chinese)

[11] 杨菁,管崇武,宋红桥,等. 斑节对虾循环水养殖系统构建与运行试验[J]. 农业工程学报,2021,37(3):198 - 204.
YANG Jing, GUAN Chongwu, SONG Hongqiao, et al. Construction and operation experiment of *Penaeus monodon* recycling aquaculture system[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(3): 198 - 204. (in Chinese)

[12] 李华,田道贺,刘青松,等. 间歇式双循环工厂化养殖系统构建及其养殖效果[J]. 农业工程学报,2020,36(13):299 - 305.
LI Hua, TIAN Daohe, LIU Qingsong, et al. Construction and effect of sequencing batch double-cycle recirculating aquaculture system[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(13): 299 - 305. (in Chinese)

[13] 赵汉中. 工程流体力学[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2011.

[14] 李炜. 水力计算手册[M]. 北京:中国水利水电出版社,2006.

[15] 李婷,李家练,艾为党,等. 种养结合 BAF 工艺对密闭循环养殖水净化效果分析[J]. 农业工程学报,2019,35(12):217 - 223.
LI Ting, LI Jialian, AI Weidang, et al. Analysis on purification effect of closed circulating aquaculture water by planting and aquaculture combined with BAF process[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(12): 217 - 223. (in Chinese)

[16] 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 Zheng, WANG Yingeng, CAO Lei, et al. Pilot-scale test for biofilm rapid formation in biofilter of recirculating mariculture system[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(15): 157 - 162. (in Chinese)

[17] 张世羊,张胜花,张翔凌,等. 组合生物滤池对养殖废水的净化效率及影响因素分析[J]. 环境科学,2017,38(6):2419 - 2428.
ZHANG Shiyang, ZHANG Shenghua, ZHANG Xiangling, et al. Purification efficiency and influencing factors of combined bio-filters for aquaculture wastewater[J]. Environmental Science, 2017, 38(6): 2419 - 2428. (in Chinese)

[18] 杨菁,管崇武,宋红桥,等. 基于物质平衡的对虾高位池循环水养殖系统设计与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(14):217 - 222.
YANG Jing, GUAN Chongwu, SONG Hongqiao, et al. Design and test of mass balance-based recirculating aquaculture system for higher place shrimp pond[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(14): 217 - 222. (in Chinese)

[19] 黄一心,鲍旭腾,徐皓. 中国渔业装备科技研究进展[J]. 渔业现代化,2023,50(4):1 - 11.
HUANG Yixin, BAO Xuteng, XU Hao. Research progress of fishery equipment science and technology in China[J]. Fishery Modernization, 2023, 50(4): 1 - 11. (in Chinese)

[20] 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)

[21] 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. Design and operation effect analysis of ultra-high density fully enclosed recirculating water culture system[J]. Transactions of the CSAE,2012,28(15):151 - 156. (in Chinese)

[22] TIMMONS M B, EBELING J M, WHEATON F W, et al. Recirculating aquaculture systems[M]. 2nd Edition. NewYork: Cayuga Aqua Ventuers, 2002.

[23] TIMMONS M B, LOSORDO T M. Aquaculture water reuse systems: engineering design and management[M]. Amsterdam: Elsevier Science, 1994.

[24] 周新辉,黄琳,樊宇星,等. 基于建模预测与关系规则的养殖水体溶解氧含量调控方法[J]. 农业机械学报,2022,53(6):318 - 326.
ZHOU Xinhui, HUANG Lin, FAN Yuxing, et al. Dissolved oxygen control method based on modeling prediction and relation

rule database[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(6):318 – 326. (in Chinese)

[25] 徐连伟,董宏伟,邹作宇,等.匙吻鲟幼鱼耗氧率与窒息点的研究[J].大连水产学院学报,2009,24(4):359 – 361.
XU Lianwei, DONG Hongwei, ZOU Zuoyu, et al. Oxygen consumption and asphyxiation point in juvenile paddlefish *Polyodon spathula*[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2009, 24(4): 359 – 361. (in Chinese)

[26] 程香菊,谢宇宁,朱丹彤,等.微孔扩散器形状对曝气增氧性能影响的试验[J].农业工程学报,2017,33(16):226 – 233.
CHENG Xiangju, XIE Yuning, ZHU Dantong, et al. Experiment on effects of microporous diffuser types on aeration oxygenation performance[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(16): 226 – 233. (in Chinese)

[27] BEMIS W E, FINDEIS E K, GRADE L. An overview of acipenseriformes[J]. Environmental Biology of Fishes, 1997, 48(1): 25 – 71.

[28] 刘阳洋,于海波,武文一,等.饲料脂肪水平对匙吻鲟生长、体组成、消化酶活性、血清生化及抗氧化性能的影响[J].水产学报,2018,42(12):1940 – 1956.
LIU Yangyang, YU Haibo, WU Wenyi, et al. Effects of dietary lipid levels on growth, body composition, digestive enzyme activities, serum biochemical indexes and antioxidant performance of *Polyodon spathula*[J]. Journal of Fisheries of China, 2018, 42(12): 1940 – 1956. (in Chinese)

[29] 朱明,谭鹤群,牛智有,等.我国淡水渔业转型升级路径与工程科技创新重点研究[J].华中农业大学学报,2024,43(2):1 – 9.
ZHU Ming, TAN Hequn, NIU Zhiyou, et al. Transformation and upgrading path of freshwater fishery in China and the focus of engineering science and technology innovation[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2024, 43(2): 1 – 9. (in Chinese)

[30] 黄滨,雷霁霖,翟介明,等.封闭循环水系统生物滤池气水比对水质净化效能的影响[J].中国水产科学,2013,20(6):1266 – 1273.
HUANG Bin, LEI Jilin, ZHAI Jieming, et al. Effect of the air-to-liquid ratio on treatment efficiency of wastewater in multistage BAF in a recirculating aquaculture system[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2013, 20(6): 1266 – 1273. (in Chinese)

[31] 柳婷婷,李丽,蒋雯雯,等.循环水养殖系统六级生物滤池运行效果分析[J].环境工程学报,2019,13(4):902 – 909.
LIU Tingting, LI Li, JIANG Wenwen, et al. Performance evaluation of a six-stage bio-filter in recirculating aquaculture system [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13(4): 902 – 909. (in Chinese)

[32] 袁美云,邹作宇,刘双凤,等.养殖密度对网箱养殖匙吻鲟稚鱼生长的影响[J].渔业现代化,2012,39(4):33 – 36.
YUAN Meiyun, ZOU Zuoyu, LIU Shuangfeng, et al. Effects of stocking density on growth of juvenile *Polyodon spathula* reared in net cage[J]. Fishery Modernization, 2012, 39(4): 33 – 36. (in Chinese)

[33] 李修峰,杨汉运,黄道明,等.池塘主养匙吻鲟商品鱼技术[J].水利渔业,2004(6):32 – 33.

[34] 牛化欣,常杰,雷霁霖,等.构建设施型精准化循环水养殖系统的技术研究[J].中国工程科学,2014,16(9):106 – 112.
NIU Huaxin, CHANG Jie, LEI Jilin, et al. Study on the construction of the facility type precision recirculating aquaculture system[J]. Strategic Study of CAE, 2014, 16(9): 106 – 112. (in Chinese)

[35] 徐琰斐,单建军,顾川川,等.菜–鱼复合设施种养系统构建与运行试验分析[J].农业工程学报,2023,39(2):150 – 156.
XU Yanfei, SHAN Jianjun, GU Chuanchuan, et al. Constructing and operating synergy model of aquaponic system integrated with soil-based cultivation[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(2): 150 – 156. (in Chinese)