

精简式大口黑鲈循环水养殖系统设计与试验

朱明^{1,2} 范豪¹ 万鹏^{1,2} 齐悦颖¹ 雷翔¹ 汪荣¹

(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)

摘要: 为探索简洁、稳定、低成本循环水养殖系统的可行性及应用发展价值,通过优化改良进水结构、增氧模式、精简系统组成等方法,构建了一套淡水鱼循环水养殖系统,并开展了为期 90 d 的大口黑鲈养殖试验,验证系统各项指标。结果显示:启动阶段,以成熟滤材、初始滤材比例为 2:3 的模式混合培养,生物膜 18 d 即可挂膜成功;养殖过程中,温度、溶解氧质量浓度、pH 值均值分别为 (27.60 ± 0.30) °C、(10.25 ± 0.23) mg/L、7.10 ± 0.31,氨氮、亚硝酸盐氮质量浓度均值分别为 (0.27 ± 0.14) mg/L、(0.10 ± 0.03) mg/L,硝酸盐氮质量浓度为 7.41 ~ 35.89 mg/L,水体浊度为 (0.25 ± 0.01) NTU (Nephelometric turbidity units);大口黑鲈平均质量从 (61.25 ± 3.06) g 增长至 (256.54 ± 12.84) g,最大养殖密度达到 42.54 kg/m³,饵料系数均值为 1.16,成活率为 98.85% ~ 100%;肌肉质构特性分析发现大口黑鲈肌肉硬度适度增高、弹性增加,提升了鱼肉口感;运行成本大约为 21.16 元/kg,可以获得较好的经济收益。本研究有利于循环水养殖系统推广,也为淡水鱼科学研究提供了可靠的平台。

关键词: 水产养殖; 循环水养殖系统; 水质; 大口黑鲈

中图分类号: S964.9 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2025)03-0414-11

OSID:



Design and Testing of Streamlined Largemouth Bass Recirculating Aquaculture System

ZHU Ming^{1,2} FAN Hao¹ WAN Peng^{1,2} QI Yueying¹ LEI Xiang¹ WANG Rong¹

(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)

Abstract: In order to explore the feasibility and application development value of simple, stable and low-cost recirculating water aquaculture system, a freshwater fish recirculating water aquaculture system was constructed by optimizing and improving the water intake structure, oxygenation mode and streamlining the system composition, and a 90 d largemouth bass aquaculture trial was carried out to verify the system indexes. The results showed that at the start-up stage, the biofilm could be successfully hung in 18 d with a mixed culture in the mode of 2:3 ratio of mature filter media to initial filter media; during the culture process, the mean values of temperature, dissolved oxygen concentration and pH were (27.60 ± 0.30) °C, (10.25 ± 0.23) mg/L and 7.10 ± 0.31, respectively, and the mean values of ammonia nitrogen concentration and nitrite nitrogen concentration were (0.27 ± 0.14) mg/L and (0.10 ± 0.03) mg/L, nitrate nitrogen concentration range was between 7.41 mg/L and 35.89 mg/L, and water turbidity was (0.25 ± 0.01) NTU (nephelometric turbidity units); the average mass of largemouth bass was increased from (61.25 ± 3.06) g to (256.54 ± 12.84) g, and the maximal culture density reached 42.54 kg/m³, with a mean bait coefficient of 1.16 and a survival rate of 98.85% ~ 100%; muscle texture characterization revealed that the muscle hardness of largemouth bass was increased moderately and elasticity was increased, which enhanced the taste of the fish; the running cost was about 21.16 yuan/kg, which could yield a good economic return. The research result was conducive to the popularization of recirculating water aquaculture system and it can provide a reliable platform for freshwater fish scientific research.

Key words: aquaculture; recirculating aquaculture system; water quality; largemouth bass

收稿日期: 2024-08-29 修回日期: 2024-10-17

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: 朱明(1958—),男,研究员,博士生导师,主要从事水产养殖设施装备和农业工程管理研究,E-mail: 13801392760@163.com

通信作者: 万鹏(1980—),男,副教授,博士,主要从事水产养殖设施装备研究,E-mail: wanpeng09@mail.hzau.edu.cn

0 引言

水产食品是世界上贸易量最大的食品之一,其对全球粮食和营养安全的贡献在 2022 年达到新的高度,当年渔业和水产养殖总产量达 $2.23 \times 10^8 \text{ t}^{[1]}$ 。但由于过度捕捞、环境污染等因素导致的水资源短缺、海洋湖泊生物资源不断衰退等问题,威胁着水产养殖业可持续发展。传统水产养殖模式已经面临一个瓶颈,亟待转变^[2]。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,具有节能减排、节水节地、可控性强、低风险集约化、产品质量安全可靠等优点,是当前水产养殖先进生产力的发展方向,符合当前我国提出的水产养殖绿色发展、循环经济及低碳减排的战略需求。

中国工厂化循环水养殖模式从 21 世纪初才开始定向研究和推广应用,发展时间上与国外相关产业相比落后 10 余年,但以大菱鲂为首的鲂鲮类养殖产业取得了一定成果^[3-4]。近年来我国工厂化循环水养殖逐步兴起^[5-6],并占据越来越大的市场份额,这也是水产养殖业发展前行的必然趋势。李华等^[6]构建了间歇式双循环工厂化养殖系统,并进行了石斑鱼(*Epinephelus fuscoguttatus*)高密度养殖试验,最终养殖密度达到 60.78 kg/m^3 ,显示出良好的应用前景和经济效益。王峰等^[7]研究了工厂化循环水养殖模式下,不同放养密度对半滑舌鲷(*Cynoglossus semilaevis*)成鱼生长和肌肉营养成分的影响,发现循环水养殖模式能够有效提高半滑舌鲷生长速度和肌肉品质,说明循环水养殖是适合半滑舌鲷集约化养殖的优势模式。

大口黑鲈(*Micropterus salmoides*),俗称加州鲈,因其适温广、抗病强、肉质鲜美、易于捕捞、生长迅速、鱼肉鲜美少刺等特点,深受养殖者和消费者喜爱,已成为我国继青鱼、草鱼、鲢、鳙四大家鱼之后的第 5 大家鱼^[8-9]。但近年来,在养殖环境较差的情况下,病害爆发率日益增加,严重影响了产业发展^[10-11]。尤其是病原为大口黑鲈蛙虹彩病毒(LMBV)的体表溃疡综合征危害最大,爆发后死亡率最高可达 70%^[12]。与池塘养殖大口黑鲈等模式相比,循环水养殖因为具有环境可控、饵料系数低、生长速度快、利润较高等优点,近年来被广泛关注和研究。倪金金^[13]提到的“池塘工程化循环水养殖系统”,主要包括苗种培育区、生物浮床、流水槽、三角帆蚌和净水区,是一种成本较低且可持续发展的池塘养殖模式。但相较于循环水养殖系统,它存在占地面积较大、水资源要求较多、易受天气和气候条件因素影响、可控性差等缺点。王萍^[14]提到的“工厂

化循环水养殖系统”主要由养殖池、生物滤池、微滤机、蛋白质分离器、紫外杀菌灯、冷暖机、水泵、气泵等装置组成,能为大口黑鲈提供稳定的生长环境。但对养殖加州鲈而言,系统部分结构性价比较低,整体具有成本较高、运行成本昂贵、稳定性差等缺点,不利于推广和使用。

因此,本文自主设计一套工厂化循环水淡水鱼养殖系统,并针对大口黑鲈开展养殖验证试验。从系统启动到稳定运行的不同阶段,研究水质变化情况、鱼类生长情况及其生产应用价值,以期促进国内工厂化循环水养殖系统技术研究和推广应用。

1 材料和方法

1.1 总体思路

精简式循环水养殖系统搭建在华中农业大学工学院研究基地的实验室中。系统设计旨在以较低的装置构建资金和运行成本,实现稳定的系统运行和较好的经济产出,以便在国内推广淡水鱼循环水养殖系统。设计完成后,利用此系统开展养殖试验,以验证系统稳定性、节能性、经济性。

1.2 系统设计与构建

1.2.1 系统构成与材料

精简式循环水养殖系统如图 1、2 所示。系统由养殖池、微滤机、生物池、蓄水池、曝气设备、循环泵、增氧设备、消毒设备以及管道等组成。整个设施呈直线排列,长 6.0 m,宽 1.5 m。系统主要技术参数如表 1 所示。

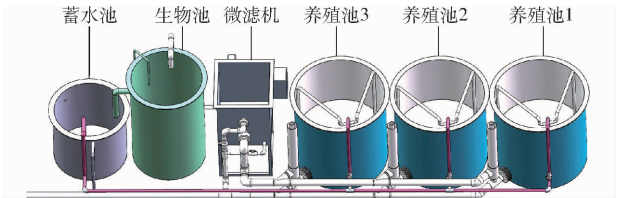


图 1 循环水养殖系统整体示意图

Fig.1 Overall schematic of recirculating water aquaculture system



图 2 3组循环水养殖系统实物图

Fig.2 Physical drawing of three groups of recirculating water aquaculture system

养殖池采用 pp 塑料材质,圆柱池壁、圆锥台池底设计,具有水体混合度高、残饵和粪便等固体颗粒

表 1 主要技术参数
Tab.1 Main technical parameters

参数	数值
养殖水体体积/ m^3	1.50
养殖密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	80
循环量/ $(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})$	3.67
配用功率/ $(\text{kW}\cdot\text{h})$	0.31
系统占地面积/ m^2	9
日换水率/%	3~5

物易排出等优点^[15]。直径为 100 cm,全高为 100 cm,内部深为 70 cm,池底坡度为 10°,圆锥台下底面直径为 10 cm,水深维持在 60 cm,养殖水体体积 0.47 m³。通过外部拔管与养殖池内部连接,进行水位控制。选择适配系统单位流量的转鼓式过滤机,处理能力为 5 m³/h,配备自动反冲洗功能。长×宽×高为 70 cm×65 cm×115 cm,筛网孔径约为 75 μm(200 目)。生物池为 pp 塑料材质的圆形桶。为了提高生物过滤效率、充分利用空间以及保证水流均匀分布,设计为窄长型,直径为 78 cm,高度为 100 cm,有效水体体积 0.34 m³。内部投放生物滤材,填充率为 50%。底部设置曝气盘,全天运行,利于硝化细菌作用后的 CO₂ 气体排出,减少对 pH 值的影响。在桶体上部设计溢流孔和溢流管,溢流作用外兼有虹吸作用,保证出水通畅,同时控制生物过滤池的水位。为了节省能源,要求蓄水池高度小于生物池,故直径为 76 cm,高度为 70 cm,有效水体体积为 0.10 m³。实行自动化管理,内部设计水位感应和自动补水装置,控制水位在 45 cm。当养殖水体 pH 值低于 7.0 时,投加一定量的 NaHCO₃ 溶液进行调节。底部放置可调节功率的潜水泵装置,将内部水体以一定的流速通过管道抽入养殖池。初期,系统有 2 个循环泵,分别位于蓄水池底部和微滤机与生物池之间。蓄水池底部泵额定功率为 22 W。放置于水下进行作业,其可调节运行功率,将蓄水池内部高溶氧水平的水体以一定流速抽入养殖池中。微滤机与生物池之间的泵负责将微滤机中的水体抽入生物过滤池中,额定功率为 0.1 kW。该泵在后期优化设计中,随着微滤机高度提升,利用高度差将其内的水体自然流入生物池,而被移除;抽水泵移除后并不影响系统运行,同时可以减少系统运行功耗。为实现高密度养殖,传统的曝气增氧无法满足养殖水体长时间处于高溶氧浓度,故选用高浓度工业 PSA 制氧机。制氧机提供的氧气浓度为 93% ± 3%,通过硬管连接纳米曝气盘,延伸进蓄水池内进行增氧。根据养殖生物量需求,设备全天运行,流量控制在 5 L/h。为了保证消毒杀菌效率,选用双管紫

外杀菌灯,波长为 253.7 nm,功率为 40 W,长为 46 cm。消毒装置放置于蓄水池中央全天开启。按使用寿命定期更换,以保证消毒杀菌效果。

1.2.2 系统设计
1.2.2.1 系统工艺设计

循环水养殖系统水处理工艺流程如图 3 所示。养殖污水通过管道先流入微滤机,将其内的粪便、残余饵料等固体颗粒物排除。随后,在抽水泵作用下,流入生物池,将其中的氨氮和有机物进行分解,使其达到合适水平(后期抽水泵被移除,通过高度差完成);生物过滤池底部装有曝气盘,鼓风机不停的作业抽入空气曝气,将池内反应产生的 CO₂、H₂S 等有害气体脱除。水体经溢流管的溢流和虹吸双重作用下进入蓄水池,两种出水方式的结合有利于出水通畅、稳定、适应性强。蓄水池内放置曝气盘与制氧机连接,进行纯氧增氧。蓄水池底部的紫外杀菌灯同步工作,将水体内部有害微生物等消灭。养殖池水体溅出、微滤机反冲洗等造成系统水量减少时,蓄水池内补水装置会自动进行工作,补充新水和控制系统水量保持稳定。处理后的水通过蓄水池内潜水泵抽入养殖池内,完成水体循环。

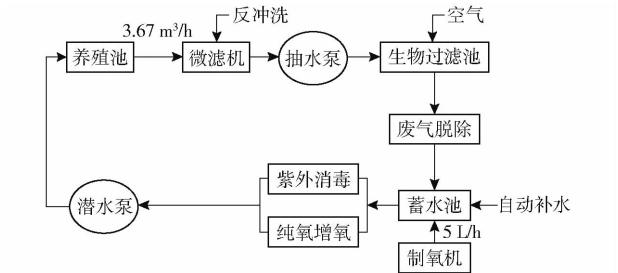


图 3 系统水处理工艺流程图
Fig.3 System water treatment process flow diagram

1.2.2.2 进水管设计

进水管的合理设计是养殖池内获得均匀稳定流场的关键^[8]。尤其对于圆形养殖池来说,在一定的均匀流场下,养殖鱼类的粪便和未吃完的饵料等可在较短时间内通过微滤机被排出到循环水系统外。这种方式减少了集污时间,降低了粪便分解程度,给后续的氨态氮、亚硝酸盐氮、微生物等污染物的处理减轻了压力,以便在原有系统处理能力不变的情况下,提高养殖密度。通过 CFD (Computational fluid dynamics) 仿真设计了一款新型进水管结构,参数如图 4 所示。仿真探究进水管结构中不同进水管角度、不同进水管数量及不同射流孔数量的最佳组合,通过研究养殖池内各种组合进水结构的水动力学特性,利用流速分布均匀系数评价指标来分析不同进水管组合结构的流场特性,得到最佳进水结构,其仿

真效果如图 5 所示。进水管结构为 3 个进水管、射流角度为 45°和每个进水管射流孔为 6 个。进水管紧贴养殖池壁,在养殖池成 120°圆周分布;进水管下端开口封闭,侧面开射流孔出水;射流孔出水角度和其养殖池壁切面成 45°;射流孔位置在进水管下端等距排列。

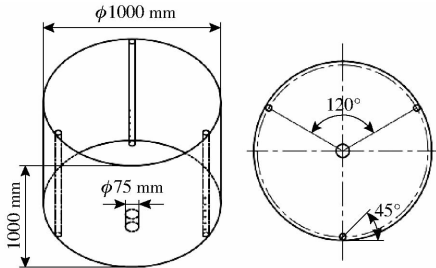


图 4 进水管结构示意图

Fig. 4 Schematic of inlet pipe structure

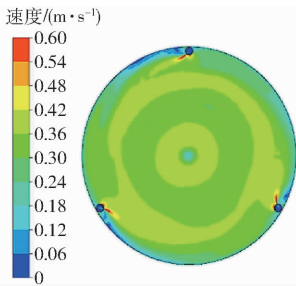


图 5 最佳进水结构仿真效果图

Fig. 5 Simulation of optimal water intake structure

1.2.2.3 增氧设计

充足的水体溶解氧浓度是养殖鱼类生长生存的必要条件,也是满足高养殖密度的关键因素^[15]。向养殖池内充气进行水体增氧的传统方法,难以满足高密度养殖鱼类呼吸耗氧的需要以及生物消化反应对于溶解氧的消耗。因此,系统选用制氧机制造纯氧,通过硬管连接纳米曝气盘向蓄水池内增氧的方式。此方法可保持蓄水池内水体的高溶氧水平,在潜水泵作用下,水体通过进水管结构进入养殖池内,对养殖池进行增氧。优化后进水管结构可增大水体混合程度,提高增氧效率,同时节约设备成本、减少资源浪费。

1.2.3 关键参数计算

1.2.3.1 进水管径设计

目前在循环水养殖系统进水管路设计方面的研究,大多未指出进水管径设计的理论依据和具体指标^[16-17]。养殖池进水管路设计不仅需考虑如何使其进水畅通、水体稳定运行,还要调节养殖池内水体流速以满足养殖鱼类生长需求。不同循环水系统的养殖池形状和进水结构有所差别,这种差别会对池内流速有一定影响。养殖池进水管出水口流速和养殖池内旋转速度存在近似比例关系,具体公式为

$$v_{\text{orif}} = av_{\text{roat}} \tag{1}$$

式中 v_{orif} ——进水管出水口流速, m/s

v_{roat} ——养殖池内池水回转速度, m/s

a ——常数,一般介于 0.15 ~ 0.20 之间^[18]

合理的管径设计既可按需实现养殖池内的水体流速,又可最大程度发挥泵的作用以节省资源和减少浪费。在流体力学中,由流量计算公式可知,循环泵单位流量、进水管内水体流速和进水管径三者满足关系

$$Q = v_{\text{roat}} \pi r^2 \tag{2}$$

式中 Q ——循环泵单位流量, m³/s

r ——养殖池进水管半径, m

本研究中: Q 为 0.000 5 ~ 0.0015 m³/s;进水管结构探索仿真试验中,得到 a 为 0.1,故 v_{roat} 设置为 1 m/s。由此代入计算可得进水管半径为 13 ~ 21 mm。为保证进水通畅,减少堵塞发生,且潜水泵处于合适工作功率,选择进水管直径为 32 mm。

1.2.3.2 系统最大养殖密度计算

循环水养殖系统的设计主要考虑快速将养殖鱼类的粪污排出系统外,减少粪污和水体的混合溶解程度,起到降低水体净化难度,同时提高系统最大养殖密度的效果。基于此,经过仿真试验和探究,设计养殖池内水流速度为 0.1 m/s、系统循环量为 3.67 m³/h 时可以较好地实现上述效果。

系统水体氨氮水平是限制养殖密度的关键因素。根据单位时间内系统水体中的氨氮产生量、日投饲率、氨氮转化系数和饲料中粗蛋白含量之间的关系^[19]

$$R_{\text{TAN}} = B_M r_{\text{feed}} a_{\text{TAN}} P_C / 24 \tag{3}$$

$$V = \frac{1\,000 R_{\text{TAN}}}{f_{\text{rem}} S_p} \tag{4}$$

$$Q_{\text{TAN}} = \frac{V}{P_R H_{RT}} \tag{5}$$

式中 B_M ——系统最大载鱼量, kg

r_{feed} ——日投饲率,取 2% / d

a_{TAN} ——氨氮转化系数(投喂每千克饲料所产生的氨氮质量),取 0.092^[20]

P_C ——饲料中粗蛋白含量,取 48%

R_{TAN} ——单位时间内系统水体中氨氮产生量, kg/h

f_{rem} ——单位面积填料氨氮去除速率, g/(m²·h), 根据沸腾式移动床生物滤器工作性能,取 0.018 75 g/(m²·h)

S_p ——填料比表面积,取 500 m²/m³(AMB 型滤料)

V ——所需生物填料总体积量, m³/h

Q_{TAN} ——系统设计的循环量,取 $3.67\text{ m}^3/\text{h}$
 P_R ——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 $40\% \sim 50\%$,取 50%
 H_{RT} ——生物滤器水力停留时间,一般为 $0.16 \sim 0.33\text{ h}$,取 0.25 h

其中, 24 h/d 为时间换算系数, $1\,000\text{ g/kg}$ 为质量换算系数。可计算 B_M (系统最大载鱼量)为 194.78 kg ,换算为本系统养殖密度为 138.14 kg/m^3 ,远大于系统设计养殖密度。

系统水体溶解氧水平是限制养殖密度的重要因素。系统最大载鱼量、大口黑鲈耗氧率、系统单位时间制氧机纯氧制造量与纯氧在水体内的利用率之间的关系为

$$B_M O_c = Q_{(O_2)} E_{(O_2)} \tag{6}$$

式中 $E_{(O_2)}$ ——纯氧在水体内利用率,取 30% ^[21]
 $Q_{(O_2)}$ ——系统单位时间制氧机纯氧制造量,取 150 L/h
 O_c ——大口黑鲈耗氧率,取 $0.30\text{ mg/(g}\cdot\text{h)}$

计算得 B_M 为 196.5 kg ,换算为本系统养殖密度 139.36 kg/m^3 ,远大于系统设计养殖密度。

1.3 试验方案

1.3.1 试验设计

于2024年4月3日开展试验,由于是试验系统,因此投放的是较大规格的大口黑鲈幼鱼,体质量为 $(61.25 \pm 3.06)\text{ g}$ 、体长为 $(15.50 \pm 0.12)\text{ cm}$ 。大口黑鲈采购于仙桃市湖北中鲈渔业科技有限公司,活水车运往华中农业大学工科试验基地。用适量浓度的氟化碘对鱼进行消毒后,进行为期 15 d 的暂养试验使鱼适应新环境,每日投喂少量饲料进行训食。

试验开始时,将规格一致、健康无病的大口黑鲈放入3套循环水养殖系统9个养殖池中,水深控制在 60 cm 。分别设置低密度组(32 条)、中密度组(54 条)和高密度组(78 条),每个养殖密度设置3组平行试验。

1.3.2 养殖管理

试验期间,养殖池每天 $08:00$ 和 $16:00$ 按照投喂率为 $2\% \sim 3\%$ 进行投喂。饲料选择大口黑鲈专用膨化颗粒饲料并根据生长状态投喂不同颗粒大小的饲料(主要营养成分: 48.0% 粗蛋白、 6.0% 粗脂肪和粗纤维、 16.0% 粗灰分 and 12.0% 水分)。饲料粒径根据鱼体规格和生长阶段而定。

循环水系统循环量设置为 $3.67\text{ m}^3/\text{h}$,养殖池水流速度控制在 0.10 m/s ,水体温度为 $23 \sim 29^\circ\text{C}$ 。每天 $08:00$ 给系统换水 3% ,不定期根据水体情况向

蓄水池中投入碳酸氢钠(NaHCO_3)溶液调节水体 pH 值。

养殖周期为 90 d ,试验养殖期间,每天记录饲料的具体投喂量以及鱼体死亡数量便于计算存活率和饵料系数。

1.3.3 生物膜启动方法

生物膜启动选用接种挂膜方法,快速完成构建生物膜反应器。生物池中投入取自健康循环水养殖系统中成熟生物膜填料与新的生物膜填料比例为 $2:3$,生物膜填料总体积占生物池体积的 50% 。从大口黑鲈养殖场收集残饵粪便与饲料并按按照比例 $1:1$ 混合后,加入少量水混匀发酵,进而模拟高氨氮浓度的养殖废水,每天适量投入生物池中;控制水体化学需氧量(COD)为 $2 \sim 7\text{ mg/L}$,pH 值为 $7.5 \sim 7.9$,温度维持在 $20 \sim 25^\circ\text{C}$,溶解氧质量浓度维持在 $8 \sim 10\text{ mg/L}$,进行接种挂膜。每 2 d 取生物池内滤材,拍照记录并在光学显微镜下观察生物膜附着生长情况。

生物池滤材挂膜共历时 18 d ,期间生物膜在滤材上附着生长,填料颜色由白色逐渐变为与成熟生物填料一致的黄褐色。初期填料上附着的生物膜较少,随着培养的进行,滤材上生物膜逐渐增厚。如图6所示,第8天时,滤材颜色变为浅褐色,附着生物膜较薄。第14天时滤材颜色加深,附着生物膜厚度增加。第18天时,滤材颜色已变为深褐色,附着生物膜厚度已达标。

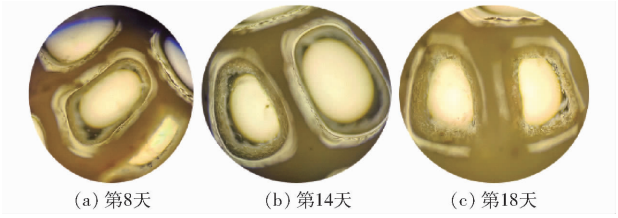


图6 生物池滤材变化示意图

Fig. 6 Schematic of change of filter media in biotank

启动阶段,第10天,氨氮浓度达到最高值;第18天,氨氮质量浓度最高值 1.91 mg/L 下降至 0.15 mg/L ,去除超过 92% 的氨氮。亚硝酸盐氮第10天到第18天质量浓度 3.46 mg/L 下降至 0.04 mg/L ,亚硝酸盐氮去除率达 98% 以上。至此,填料上生物膜生长状况良好,且各项水质指标趋于稳定,表明填料挂膜成功。

1.3.4 检测指标及方法

试验期间,每天 $08:00$ 检测水体温度、pH 值、溶解氧浓度并记录;每 2 d 取一次养殖水体,检测氨态氮、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮浓度并记录;每 $15 \sim 20\text{ d}$ 检测一次鱼体表型特征,记录鱼体质量和体长;每 3 d 测一次水体浊度数据,并且定期检测一天内的水

体浊度变化规律。

养殖中期,随机从每个养殖池挑选 3 条鱼用于肌肉质构相关指标检测。将每条试验鱼的一部分背部肌肉组织切成 3 份大小约 2.0 cm × 1.0 cm × 1.0 cm 的小方块后,采用质构剖面分析法(Texture profile analysis,TPA)进行检测。采用 TMS-PRO 物性测试仪,探头型号为 P8 平底柱形探头;测试前速度、测试后速度和测试速度均设定为 4 mm/s,测定间隔时间 5 s,压缩比 50%;测定 5 个参数:硬度、内聚性、弹性、胶粘性、回复力。检测指标包括水质变化、鱼体生长、水体浊度、鱼体肌肉性状等,用于评价循环水系统的养殖运转情况。

水体 pH 值用柯迪达 pH 计(CT-6023L 型)测量;水体溶解氧浓度和温度用希玛溶氧仪(AR8010 型)测量;水体流速用手持便携式流速测量仪(LS300A 型)测量;用苯酚-次氯酸盐比色法测量氨氮质量浓度(mg/L)、酚二磺酸分光光度法测量硝酸盐氮质量浓度(mg/L)、分光光度法测量亚硝酸盐氮质量浓度(mg/L);用雷磁 WZB-170 型浊度仪测量浊度(NTU)。

生长指标主要为特定生长率(Special growth rate,SGR)、增重率(Weight gain rate,WGR)、饵料系数(Feed coefficient rate,FCR)、成活率(Survival rate,SR)。计算大口黑鲈生长情况,即

$$W_{WGR} = (W_1 - W_0) / W_0 \times 100\% \tag{7}$$

$$S_{SGR} = (\ln W_1 - \ln W_0) / t \times 100\% \tag{8}$$

$$F_{FCR} = F / (W_1 - W_0) \tag{9}$$

$$S_{SR} = N_2 / N_1 \times 100\% \tag{10}$$

式中 W_0 、 W_1 ——初始和最终鱼体平均质量,g

N_1 、 N_2 ——初始和最终鱼苗数量

t ——饲养时间,d

F ——试验过程中饲料投喂量,g

1.3.5 数据处理

试验数据均以平均值 ± 标准误(mean + SE)表示,采用 SPSS 26.0 软件进行方差检验和单因素方差分析,若达到显著水平,则进行 Tukey 氏多重比较,显著水平为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 水质环境因子变化趋势

2.1.1 水温、溶解氧浓度及 pH 值

试验期间养殖池内水体水温、溶解氧浓度、pH 值变化情况如图 7 所示。水体温度变化范围为 22.3 ~ 31.6℃,均值为(27.6 ± 0.3)℃;溶解氧质量浓度变化范围为 7.43 ~ 14.53 mg/L,均值为(10.25 ± 0.23) mg/L;pH 值变化范围为 6.05 ~

7.52,均值为 7.10 ± 0.31,各项指标均处于大口黑鲈的适宜生长指标范围内。养殖池水体温度在养殖期间呈逐渐上升趋势,主要是室外温度的影响;不同密度的养殖系统处于同一环境内,水体温度差值变化较小;养殖系统位于室内,水体温度均值变化较小。随着水体温度上升,纯氧气体的溶解效率升高,造成溶解氧浓度在养殖期间呈现上升趋势;养殖前期溶解氧浓度较稳定,养殖中、后期变化较大。不定期调配并泼洒碳酸氢钠溶液,故 pH 值在养殖全期变化不大;不同密度养殖池之间 pH 值有明显差别,高密度养殖池平均值为 6.78、中密度养殖池平均值为 7.21、低密度养殖池平均值为 7.41;说明在一定范围内,养殖密度越高,水体 pH 值下降越快。

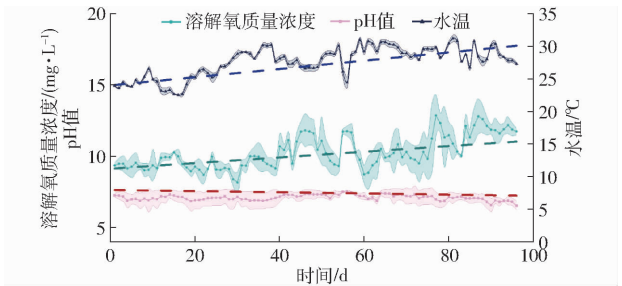


图 7 水温、溶解氧质量浓度、pH 值变化曲线

Fig.7 Curves of change in water temperature, dissolved oxygen concentration, and pH value

2.1.2 总氨氮浓度及亚硝酸盐氮浓度

试验期间养殖池内水体总氨氮浓度和亚硝酸盐氮浓度变化情况如图 8 所示。

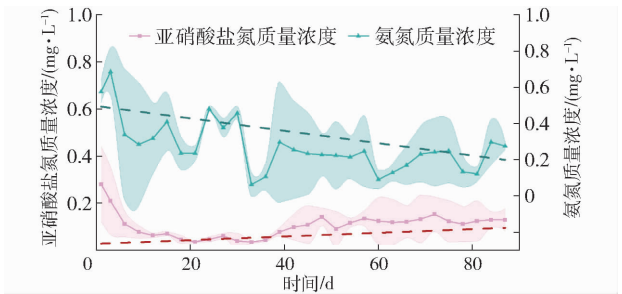


图 8 亚硝酸盐氮、氨氮质量浓度变化曲线

Fig.8 Curves of nitrite nitrogen and ammonia nitrogen concentration changes

亚硝酸盐氮质量浓度范围为 0.05 ~ 0.24 mg/L,均值为(0.10 ± 0.03) mg/L;氨氮质量浓度范围为 0.02 ~ 0.75 mg/L,均值为(0.27 ± 0.14) mg/L。整体情况良好,符合硝化反应规律。系统开始试验前,经过一个周期的生物池启动环节,生物池内滤材生物膜生长良好,故养殖初期养殖池内亚硝酸盐氮浓度和氨氮浓度只是略高,处于养殖要求合理范围内。随着养殖试验的进行,生物池能力逐步适应养殖负荷,亚硝酸盐氮浓度和氨氮浓度逐步下降并趋于稳

定。养殖密度的不同,造成养殖过程中不同密度的养殖负荷变化不同;高密度养殖池负荷最高且增长最快,氨氮质量浓度均值为 0.41 mg/L;中密度均值为 0.23 mg/L;低密度养殖负荷最小且增长最慢,均值为 0.18 mg/L。系统亚硝酸盐氮处理能力较好,不同组之间变化较小,较为稳定。

2.1.3 硝酸盐氮质量浓度及水体浊度

试验期间养殖池内水体硝酸盐氮质量浓度变化曲线如图 9 所示。

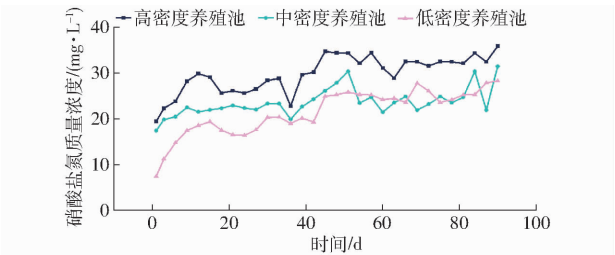


图 9 硝酸盐氮质量浓度变化曲线
Fig.9 Variation of nitrate nitrogen concentration on different dates

由于缺少反硝化环节,在整个养殖过程中,养殖水体硝酸盐氮浓度逐步缓慢增长,增长速度和养殖密度相关。直至养殖试验结束,高密度养殖池水体硝酸盐氮质量浓度从 19.43 mg/L 增长为 35.89 mg/L;中密度养殖池水体从 17.40 mg/L 增长为 31.44 mg/L;低密度养殖池水体从 7.41 mg/L 增长为 28.26 mg/L。

在养殖期间水体浊度变化情况如图 10 所示。

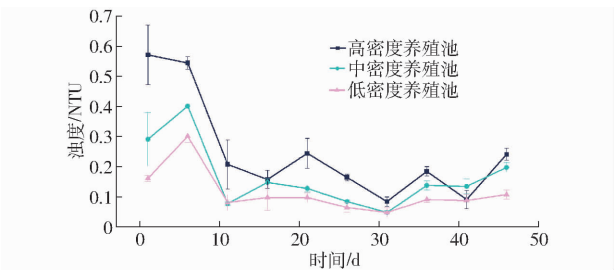


图 10 浊度变化曲线
Fig. 10 Turbidity changes

试验前期系统未达到稳定运行水平、中后期趋于稳定,导致养殖池水体浊度呈逐步下降并趋于稳定。高密度养殖池浊度均值(0.25 ± 0.01) NTU;中密度养殖池浊度均值(0.16 ± 0.02) NTU;低密度养殖池浊度均值(0.11 ± 0.01) NTU。不同养殖密度浊度在初期相差较大,后期差距缩小;水体浊度随养殖密度的增加而升高。

水体浊度在一天内的变化趋势如图 11 所示。

3 组循环水养殖系统浊度随投喂时刻的变化趋势相同。养殖池每次投喂后水体浊度呈现先升高后下降趋势,测得投喂后的 1 h 浊度升高达到峰

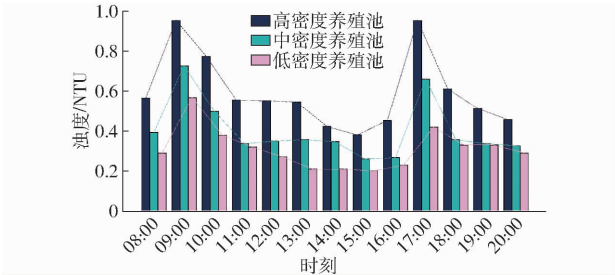


图 11 不同时刻浊度变化
Fig. 11 Turbidity variation at different moments

值后下降。在 09:00 和 12:00 出现两次峰值,均为 0.96 NTU。

2.2 大口黑鲈肌肉质构特性分析

养殖中期随机取样 27 条鱼,得到肌肉质构特性如表 2 所示。

表 2 大口黑鲈肌肉质构特性
Tab.2 Data on textural properties of largemouth bass muscles

参数	本文	文献[23]
硬度/g	542.12 ± 110.88	422.20 ± 115.14
内聚性	0.33 ± 0.04	0.38 ± 0.06
弹性/mm	1.36 ± 0.64	0.81 ± 0.08
胶粘性/g	180.64 ± 30.74	169.82 ± 56.02
回复力	0.16 ± 0.02	0.24 ± 0.04

测试指标包括硬度、内聚性、弹性、胶粘性和回复力。周秀珍等^[23]研究了利用循环水系统进行净化养殖,分析不同时间段大口黑鲈肌肉质构变化,以其养殖 0 d 的数据为例进行对比。两系统各项指标存在一定差异,内聚性、回复力、胶粘性方面差异较小,硬度、弹性两个指标差异较大。总体来看,本系统大口黑鲈硬度和弹性明显较大,可能和养殖密度、水体流速等因素相关。

2.3 大口黑鲈生长情况与分析

如表 3 所示,于 2024 年 4 月 20 日开始为期 90 d 的养殖试验,分别于 5 月 16 日、6 月 14 日、7 月 21 日抽样测量 3 次大口黑鲈体质量和体长等指标数据。试验期间大口黑鲈能够很快适应环境和饲料,未出现病害和明显死亡,成活率 98.85% ~ 100%。大口黑鲈由初始平均体质量(61.25 ± 3.06) g 增长至(256.54 ± 12.84) g,高、中、低养殖密度饵料系数分别为 1.18、1.17、1.08。其中,不同密度养殖池最终平均体质量存在显著差异($P < 0.05$),说明不同密度会影响鱼类生长情况。不同阶段大口黑鲈生长速度和饵料系数有所变化,高密度养殖池变化明显,其特定生长率和增重率明显下降,饵料系数逐渐上升;中、低密度养殖池特定生长率变化不明显,增重率逐步下降,饵料系数逐步缓慢上

表 3 大口黑鲈生长指标

Tab.3 Largemouth bass growth indicator data

分组	日期	平均体质量/g	平均体长/cm	特定生长率/%	增重率/%	饵料系数	成活率/%
高密度养殖池	2024-05-16	123.01±3.41	19.50±0.14	2.58	101.00	1.03	100
	2024-06-14	181.06±11.58	21.98±0.27	1.33	47.19	1.04	100
	2024-07-21	243.88±14.00	24.41±0.55	0.80	34.70	1.44	100
中密度养殖池	2024-05-16	125.38±6.62	19.12±0.42	2.65	104.87	1.01	100
	2024-06-14	180.38±7.34	22.28±0.28	1.25	43.87	1.14	100
	2024-07-21	256.36±24.96	24.46±0.46	0.95	42.12	1.31	100
低密度养殖池	2024-05-16	120.56±3.89	19.00±0.67	2.51	96.99	1.01	100
	2024-06-14	185.82±15.22	22.32±0.58	1.49	54.13	1.03	100
	2024-07-21	269.38±16.07	24.50±0.83	1.00	44.97	1.19	98.85

升。试验结束时,高、中、低养殖池密度分别为42.54、32.79、20.67 kg/m³。

2.4 系统经济性评价

循环水养殖系统设备经多年研究推广,其创新研发已成为重点研究方向,受到更多学者关注^[24]。水产养殖是一个长期过程,使得系统的运行成本、管

理成本成为评估系统经济型的重要一环。以本系统为例,运行成本主要包括饲料、电费、管理费、投资折旧等。饵料系数按照养殖数据得到的1.16计算;耗电部分按照系统装机功率,每天24 h运行;本系统构成清晰、操作简单,每个管理人员能够同时管理5套系统计算。系统月运行成本如表4所示。

表 4 系统运行成本

Tab.4 System running costs

项目	数量	单价	总价/元	备注
饲料成本	0.063 t	10 000 元/t	630	饵料系数 1.16
耗电成本	223.2 kW·h	0.55 元/(kW·h)	123	装机功率 0.31 kW,每天 24 h 运行
人工成本	1 人	3 000 元/月	600	按照每人能够同时管理 5 套系统计算
折旧成本	1 套	10 000 元	84	系统造价 1 万元,按照 10 a 报废计
合计/元			1 437	

大口黑鲈养殖6个月可达到上市规格。按照成本正常运行一个周期,可得每公斤鱼饲养运行成本大约为21.16元(鱼苗成本按照市场价0.30元/条计)。按照市场价40.00元/kg,除去运行成本后,每公斤鱼利润为18.84元,经济收益较好。

3 讨论

本试验系统设计通过优化改良进水结构、增氧模式等方法,达到降低水体处理成本的效果,在此基础上精简系统结构组成,实现了降低运行成本和构建成本的目的。90 d养殖试验初步验证该系统运行成功,试验期间水质良好,养殖鱼类生长较好、存活率高,经济收益可观。但系统也存在一些问题,例如,养殖水体内小颗粒固体悬浮物难去除、絮团状固体颗粒物易沉积堵塞管道等问题有待解决。

养殖试验开始前,进行生物池启动试验。生物池中投入取自健康循环水养殖系统中成熟生物膜填料与新的生物膜填料比例为2:3,在合适的水质条件下,定期投喂模拟的高氨氮浓度养殖废水,可以快速启动生物池。与文献[6]生物池启动时间为22 d相比,本系统为18 d,加快了启动速度。试验开始

后,本系统亚硝酸盐氮和氨氮浓度仅略高,经历不到7 d分别降低到0.10、0.20 mg/L左右,侧面证明了生物池启动成功和稳定性。该系统采用了在蓄水池增氧,获取高溶氧水体,再通过经仿真试验确定的养殖池进水管结构,可使养殖池内水体形成稳定的流场、可控的流速,快速将鱼类的粪污排除养殖池外,减少分解时间,降低后续的水体处理难度;同时,也为养殖鱼体营造了一个适宜的生存环境。养殖水体浊度较低,维持在0.2 NTU左右,水体流速稳定在0.1 m/s左右也说明了这一点是可行的^[25]。但由于系统缺乏小型固体颗粒物去除组件,造成试验后期养殖池水体中有较多清晰可见的小颗粒固体悬浮物,可能会增加养殖鱼体生存负荷,影响其健康。

鱼肉营养品质受到消费者广泛关注,而质构特性是评价鱼肉品质的关键指标^[26]。多项研究指出鱼肉硬度适度增大、弹性较强时,其口感会有所提升^[27-29];内聚性是鱼肉组织在受压后保持其结构的能力,大小适中时的鱼肉通常被认为更鲜嫩^[30];回复力是反映肌肉弹性的主要因子,能够体现出鱼类肌肉中肌纤维和结缔组织致密性^[31]。循环水养殖系统大多为高密度养殖模式,不合理的养殖水体流

场与流速可能会减少鱼类的运动量,从而影响鱼肉的肌肉品质^[32]。本研究中,通过对进水结构的合理设计适度提高了养殖水体流速,对大口黑鲈进行游泳训练,提高了鱼肉的口感,这与文献[33]一致。同时,肌肉质构特性受品种、养殖方式、饲料配方和处死方式等外在因素的影响^[34]。因此,在养殖过程中可通过优化养殖方式^[32]、饲料成分、处死方法等调控大口黑鲈的肌肉质构特性,得到更加符合消费者口味的鱼肉,以提高经济效益。

系统可行性分析包括系统运行稳定性分析和系统经济性分析。90 d 的养殖试验证明了本系统稳定性较高,养殖水体处于良好的水质下能够长期稳定运行^[35]。同时,得到了一套适合本系统的养殖管理方案,包括换水量、水体流速控制、水质调控方法等。本系统显著降低了构建成本和运行期间的耗电成本,可以在较低的运行成本下进行养殖。试验得到的大口黑鲈养殖期间运行成本约为 21.16 元/kg,相当于市场价格的一半,这明显低于文献[19]的超高密度

全封闭循环水养殖系统,取得了较好的经济收益。因此,选择合适的养殖品种对循环水系统结构进行适当的精简与优化,具有广阔的应用前景。

4 结束语

本淡水鱼循环水养殖系统经过试验证明,能够较好地处理养殖污水使水质在合理范围内。溶解氧质量浓度均值维持在 10.25 mg/L,pH 值 7.10 左右,水温均值 27.6℃;系统正常运行后,氨氮、亚硝酸盐氮质量浓度分别维持在 0.27、0.10 mg/L,为大口黑鲈提供了理想的生存环境。经过 90 d 养殖,大口黑鲈没有出现病害和明显死亡,成活率在 98.85% ~ 100% 之间;由初始平均体质量(61.25 ± 3.06) g 增长至(256.54 ± 12.84) g,饲料系数 1.16,显著高于传统养殖方式。此外,该系统结构精简、设计合理,具备初期构建资金需求少、易于管理、运行成本低、利于养殖鱼类生长等优点,也为淡水鱼科学研究提供了可靠的平台。

参 考 文 献

[1] Fisheries and Aquaculture Department, FAO. The state of world fisheries and aquaculture[J]. Rome Italy Fao,2024,4(1): 40-41.

[2] 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. Research on transformation and upgrading path of freshwater fisheries and key directions of engineering science and technology innovation in China[J]. Journal of Huazhong Agricultural University,2024, 43(2):1-9. (in Chinese)

[3] 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 development review of recirculating aquaculture mode in China and abroad[J]. Feed Industry,2017,38(6):61-64. (in Chinese)

[4] 王峰,雷霖霖,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 Chinese Academy of Engineerng,2013,15(10):16-23. (in Chinese)

[5] 王海姮,侯昊晨,刘鹰.循环水养殖系统的研究进展及发展趋势[J].水产科学,2023,42(4):735-741.

WANG Haichou,HOU Haochen,LIU Ying. Research progress and development trend of recirculating aquaculture systems[J]. Aquatic Science,2023,42(4):735-741. (in Chinese)

[6] 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)

[7] 王峰,雷霖霖.工厂化循环水养殖模式放养密度对半滑舌鲷成鱼生长和肌肉营养成分的影响[J].中国工程科学,2015, 17(1):19-26.

WANG Feng,LEI Jilin. Effects of stocking density on growth and quality in muscle *Cynoglossus semilaevis* Günther adult fish in industrial recirculating aquaculture[J]. Strategic Study of Chinese Academy of Engineerng,2015,17(1):19-26. (in Chinese)

[8] 张韵桐,何幼发.大口黑鲈养殖研究[J].湛江水产学院报,1994,14(1):23-28.

ZHANG Yuntong, HE Youfa. Research on the culture of largemouth bass[J]. Journal of Zhanjiang Aquatic College,1994, 14(1):23-28. (in Chinese)

[9] 陈震雷.循环水养殖中水流速度对大口黑鲈幼鱼的影响研究[D].杭州:浙江大学,2021.

CHEN Zhenlei. Effect of flow velocity on largemouth bass (*Micropterus salmoides*) juveniles in recirculating aquaculture systems [D]. Hangzhou: Zhejiang University,2021. (in Chinese)

[10] SHIMAHARA Y, HUANG, YF, TAI A, et al. Immune response of largemouth bass, *Micropterus salmoides*, to whole cells of different *Nocardia seriolae* strains[J]. Fish. Sci., 2010,76:489-494.

[11] GODAHEWA GI,LEE S,KIM J,et al. Analysis of complete genome and pathogenicity studies of the spring viremia of carp virus isolated from common carp (*Cyprinus carpio*) and largemouth bass (*Micropterus salmoides*): an indication of SVC disease threat in Korea[J]. Virus Res. , 2018,255:105 – 116.

[12] 李秋语. 大口黑鲈虹彩病毒中药筛选模型建立及有效中药的筛选[D]. 长春:吉林农业大学,2022.
LI Qiuyu. Establishment of in vitro and in vivo screening model for iridovirus of largemouth bass and screening of effective Chinese medicine[D]. Changchun: Jilin Agricultural University,2022. (in Chinese)

[13] 倪金金. 池塘工程化循环水养殖模式下养殖密度对大口黑鲈生长与生理机能的影响[D]. 上海:上海海洋大学,2020.
NI Jinjin. Effects of stocking density on growth and physiology of *Micropterus salmoides* reared in in-pond raceway culture systems[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University,2020. (in Chinese)

[14] 王萍. 工厂化循环水大口黑鲈苗种培育最适光照条件研究[D]. 武汉:华中农业大学,2022.
WANG Ping. The optimal lighting conditions for largemouth bass seedlings cultivation in industrial recirculating aquaculture systems[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University,2022. (in Chinese)

[15] 朱放,桂福坤,胡佳俊,等. 进水管设置角度对圆形循环水养殖池自清洗能力的影响[J]. 水产学报,2024,48(3):174 – 183.
ZHU Fang, GUI Fukun, HU Jiajun, et al. Effect of inlet pipe setting angle on the self-cleaning performance of circular recirculating aquaculture tank[J]. Journal of Fisheries of China,2024,48(3):174 – 183. (in Chinese)

[16] 胡佳俊,朱放,姚榕,等. 基于 STAR – CCM + 的圆形循环水养殖池进水管布设位置优化[J]. 农业工程学报,2021,37(21):244 – 251.
HU Jiajun, ZHU Fang, YAO Rong, et al. Optimization of the inlet pipe layout of circular recirculating water aquaculture tank based on STAR – CCM + [J]. Transactions of the CSAE,2021,37(21):244 – 251. (in Chinese)

[17] PAUL T C,SAYAL S K,SAKHUJA V S,et al. Vortex-settling basin design considerations[J]. Hydraul. Eng. ,1991,117:172 – 189.

[18] 魏武. 循环水圆形养殖池数值模拟及结构优化[D]. 湛江:广东海洋大学,2013.
WEI Wu. Numerical simulation and structure optimization of circular culture tank for recirculating aquaculture systems[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University,2013. (in Chinese)

[19] 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 CSAE,2012,28(15):151 – 156. (in Chinese)

[20] TIMMONS M B,EBELING J M,WHEATON F W,et al. Recirculating *Aquaculture systems* (2nd Edition) [M]. Newyork: Cayuga Aqua Ventuers,2002.

[21] 管崇武,单建军,宋红桥,等. 管道式微孔增氧装置的增氧性能研究[J]. 渔业现代化,2023,50(2):25 – 31.
GUAN Chongwu, SHAN Jianjun, SONG Hongqiao, et al. Study on oxygenation performance of pipeline microporous oxygenation device[J]. Fishery Modernization,2023,50(2):25 – 31. (in Chinese)

[22] 杨斯琪,郑洪武,孙颖,等. 氨氮、温度和体重对大口黑鲈(*Micropterus salmoides*) 幼鱼耗氧率和窒息点的影响[J]. 海洋与湖沼,2019,50(6):1328 – 1333.
YANG Siqi, ZHENG Hongwu, SUN Ying, et al. Effects of ammonia nitrogen, temperature and body weight on oxygen consumption rate and choking point of larval largemouth bass (*Micropterus salmoides*) [J]. Journal of Oceanology and Limnology,2019,50(6):1328 – 1333. (in Chinese)

[23] 周秀珍,张毅,周钦,等. 循环水净化养殖过程中大口黑鲈生长及肌肉品质变化[J]. 食品科学,2024,45(11):75 – 83.
ZHOU Xiuzhen, ZHANG Yi, ZHOU Qin, et al. Changes in growth and muscle quality of largemouth bass (*Micropterus salmoides*) reared in recirculating aquaculture system[J]. Food Science,2024,45(11):75 – 83. (in Chinese)

[24] 孙龙启,刘慧. 国内外循环水养殖专利分析及启示[J]. 中国工程科学,2016,18(3):115 – 120.
SUN Longqi, LIU Hui. Patent anal patent analysis on recirculating aquaculture system between home and abroad and countermeasures for China[J]. Strategic Study of Chinese Academy of Engineerng,2016,18(3):115 – 120. (in Chinese)

[25] 徐永江,王开杰,姜燕,等. 三种鲷属鱼类肌肉质构特性及营养成分比较分析[J]. 中国水产科学,2022,29(7):1022 – 1032.
XU Yongjiang, WANG Kaijie, JIANG Yan, et al. Comparative analysis of the muscle texture characteristics and nutrient compositions among three *Seriola* fishes[J]. Journal of Fishery Sciences of China,2022,29(7):1022 – 1032. (in Chinese)

[26] 胡芬,李小定,熊善柏,等. 5 种淡水鱼肉的质构特性及与营养成分的相关性分析[J]. 食品科学, 2011, 32(11): 69 – 73.
HU Fen, LI Xiaoding, XIONG Shanbo, et al. Texture properties of freshwater fish and their correlation with nutritional components[J]. Food Science,2011,32(11): 69 – 73. (in Chinese)

[27] YANG F,JING D,DIAO Y,et al. Effect of immersion freezing with edible solution on freezing efficiency and physical properties of obscure pufferfish (*Takifugu obscurus*) fillets[J]. LWT—Food Science and Technology, 2020, 118: 108762.

[28] LI C T,SHANG M,HU X S,et al. Evaluation of a new select-breeding carp variety with high fillet quality[J]. Aquaculture Research, 2018, 49(8): 2653 – 2663.

[29] 张春晋,孙西欢,李永业,等. 螺旋流起旋器内部流场水力特性数值模拟与验证[J]. 农业工程学报,2018,34(1):53 – 62.
ZHANG Chunjin,SUN Xihuan,LI Yongye, et al. Numerical simulation and verification of hydraulic characteristics of internal

flow field in spiral flow generator[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(1):53–62. (in Chinese)

[30] 钟金香,李俊伟,颀晓勇,等. 短期饥饿处理对卵形鲳鲹鱼肉品质的影响[J]. 暨南大学学报(自然科学与医学版),2018,39(5):394–401.

ZHONG Jinxiang,LI Junwei,JIE Xiaoyong,et al. Effects of short-term starvation on meat quality of *Trachinotus ovatus*[J]. Journal of Jinan University(Natural Science and Medicine Edition),2018,39(5):394–401. (in Chinese)

[31] 李文倩,李小勤,冷向军,等. 鳊鱼肌肉品质评价的初步研究[J]. 食品工业科技,2010,31(9):114–117.

LI Wenqian, LI Xiaoqin, LENG Xiangjun,et al. Preliminary study on flesh quality evaluation of *Siniperca chuatsi*(Basilewsky)[J]. Science and Technology of Food Industry,2010,31(9):114–117. (in Chinese)

[32] 徐立鸿,黄志尊,龙伟,等. 基于 MobileViT–CBAM–BiLSTM 的开放式养殖环境鱼群摄食强度分类模型[J]. 农业机械学报,2024,55(11):147–153.

XU Lihong,HUANG Zhizun, LONG Wei,et al. Classification model of fish feeding intensity based on MobileViT–CBAM–BiLSTM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(11):147–153. (in Chinese)

[33] ZHU Tingyao, YANG Ru, XIAO Runguo,et al. Effect of swimming training on the flesh quality in Chinese perch (*Siniperca chuatsi*) and its relationship with muscle metabolism[J]. Aquaculture,2023,577:739926.

[34] 刘婧懿,赵前程,程少峰,等. 鱼肉质构的影响因素及测定方法研究进展[J]. 食品安全质量检测学报,2020,11(9):3035–3043.

LIU Jingyi,ZHAO Qiancheng,CHENG Shaofeng,et al. Research progress on the influencing factors and determination methods of fish muscle texture[J]. Journal of Food Safety & Quality,2020,11(9):3035–3043. (in Chinese)

[35] 魏天娇,胡祝华,范习禹. 水产养殖中水质与鱼类行为双向映射模型构建[J]. 农业机械学报,2024,55(3):290–299.

WEI Tianjiao,HU Zhuhua,FAN Xiyu. Construction of bidirectional mapping model between water quality and fish behavior in aquaculture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(3):290–299. (in Chinese)

(上接第 413 页)

[22] ZHANG R, LIAN S, LI L, et al. Design and experiment of a binocular vision-based canopy volume extraction system for precision pesticide application by UAVs[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 213: 108197.

[23] WANG A, QIAN W, LI A, et al. NVW–YOLO v8s: an improved YOLO v8s network for real-time detection and segmentation of tomato fruits at different ripeness stages[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 219: 108833.

[24] HE K, SUN J, TANG X. Single image haze removal using dark channel prior[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2010, 33(12): 2341–2353.

[25] BOCHKOVSKIY A, WANG C Y, LIAO H Y M. YOLO v4: optimal speed and accuracy of object detection[J]. arXiv Preprint, arXiv:2004.10934, 2020.

[26] LIU S, QI L, QIN H, et al. Path aggregation network for instance segmentation[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2018: 8759–8768.

[27] MA X, DAI X, BAI Y, et al. Rewrite the stars[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2024: 5694–5703.

[28] TAN M, PANG R, LE Q V. Efficientdet: scalable and efficient object detection[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2020: 10781–10790.

[29] TIAN Z, CHU X, WANG X, et al. Fully convolutional one-stage 3D object detection on LiDAR range images[J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2022, 35: 34899–34911.

[30] CHEN Z, HE Z, LU Z M. DEA–Net: single image dehazing based on detail-enhanced convolution and content-guided attention[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2024, 33: 1002–1015.