



Open Access

引用格式:柯海珠,赵崇宇,袁善恒,等.海南方斑东风螺养殖尾水水质特征及其与养殖模式的关系研究[J].海南大学学报(自然科学版中英文),DOI:10.65658/j.hndk.2025090301.

Citation:KE Haizhu, ZHAO Chongyu, YUAN Shanheng, et al. Study on the Water Quality Characteristics of Mariculture Wastewater from *Babylonia areolata* in Hainan and Its Relationship with Aquaculture Models[J]. Natural Science of Hainan University, DOI:10.65658/j.hndk.2025090301.

海南方斑东风螺养殖尾水水质特征及其与养殖模式的关系研究

柯海珠¹, 赵崇宇¹, 袁善恒^{1,2}, 刘树昌¹, 贝伟烈¹, 蔡岩¹,
周永灿¹, 王世锋^{1,2}✉

(1. 海南大学, 海洋生物与水产学院, 海南 海口 570228;

2. 海南金雨海洋产业发展有限公司, 海南 儋州 571745)

摘要: 为了全面了解海南方斑东风螺(*Babylonia areolata*)养殖尾水水质特征及其与养殖模式的关系, 本研究首先对海南省不同养殖模式方斑东风螺养殖场的尾水水质进行了调查; 继而构建实验室模拟系统, 动态监测了模拟完全流水养殖模式下投喂对尾水水质的影响, 并同步解析了模拟半循环水养殖模式尾水水质的变化特征。各水质指标主要参照海南省《水产养殖尾水排放标准》(DB46/475-2023)进行评价。结果显示: 东风螺养殖场的养殖尾水中, 完全流水模式下一级和二级标准达标率均为 87.5%; 半循环水模式一级标准达标率为 80%, 二级标准达标率为 100%。实验室完全流水养殖实验显示, 投喂会导致尾水水质急速恶化, 化学需氧量(Chemical Oxygen Demand, COD_{Mn})等指标水平快速增加至超二级标准; “快速排水”后, 尾水水质好转, 各项指标均恢复到二级标准范围内。实验室半循环水养殖模式实验表明, 其尾水水质随养殖时间增加而逐渐恶化, 但绝大部分指标均保持在二级标准范围内。本研究为方斑东风螺养殖尾水处理技术的研发提供了数据资料和理论依据, 以期为今后方斑东风螺健康养殖提供新思路。

关键词: 方斑东风螺; 养殖尾水; 完全流水养殖模式; 半循环水养殖模式

中图分类号: S949 文献标志码: A

DOI: 10.65658/j.hndk.2025090301 CSTR: 32403.14.hndk.2025090301

Study on the Water Quality Characteristics of Mariculture Wastewater from *Babylonia areolata* in Hainan and Its Relationship with Aquaculture Models

KE Haizhu¹, ZHAO Chongyu¹, YUAN Shanheng^{1,2}, LIU Shuchang¹, BEI Weilie¹, CAI Yan¹,
ZHOU Yongcan¹, WANG Shifeng^{1,2}✉

(1. Hainan University, College of Marine Biology and Fisheries, Haikou, Hainan 570228, China;

2. Hainan Jinyu Marine Industry Development Co. Ltd, Danzhou, Hainan 571745, China)

Abstract: To comprehensively understand the water quality characteristics of aquaculture wastewater in the *Babylonia areolata* and its relationship with aquaculture models, this study first investigated the wastewater

Received: 2025-09-03; Revised: 2025-11-08; Accepted: 2025-11-13;

✉ Corresponding author(s): WANG Shifeng, E-mail: shifeng_15@163.com

quality from *Babylonia areolata* farms under different aquaculture models in Hainan Province. Subsequently, a laboratory simulation system was constructed to dynamically monitor the impact of feeding on wastewater quality under a simulated fully flow-through aquaculture model, while simultaneously analyzing the variations in wastewater quality under a simulated semi-recirculating aquaculture model. The water quality indicators were primarily evaluated according to Hainan Province's "Aquaculture Wastewater Discharge Standard" (DB46/475-2023). The results showed that for the aquaculture wastewater from *Babylonia areolata* farms, the compliance rates for both Level 1 and Level 2 standards under the fully flow-through model were 87.5%; under the semi-recirculating model, the compliance rate for Level 1 was 80%, and for Level 2, it was 100%. Laboratory experiments on fully flow-through aquaculture revealed that feeding led to a rapid deterioration of wastewater quality, with indicators such as Chemical Oxygen Demand (COD_{Mn}) quickly exceeding Level 2 standards. After "rapid drainage," the wastewater quality improved, and all indicators returned to within Level 2 standards. Laboratory experiments on the semi-recirculating aquaculture model indicated that wastewater quality gradually deteriorated over time, but most indicators remained within Level 2 standards. This study provides data and theoretical foundations for the development of wastewater treatment technologies in *Babylonia areolata* aquaculture, offering new insights for the future of healthy *Babylonia areolata* farming.

Keywords: *Babylonia areolata*; Aquaculture wastewater; Fully flow-through aquaculture mode; Semi-recirculating aquaculture mode

方斑东风螺(*Babylonia areolata*)俗称香螺、海猪螺、花螺。东风螺隶属于腹足纲(Gastropoda),前鳃亚纲(Prosobranchia),狭舌目(Stenoglossa),蛾螺科(Buccinidae),东风螺属(*Babylonia*),广泛分布于我国东南沿海地区^[1]。方斑东风螺由于养殖周期短、养殖技术相对简单、养殖经济效益高,且肉质鲜美、脆弹清甜、营养丰富,深受养殖户和消费者的喜爱^[2]。自2000年方斑东风螺育苗和养殖技术取得突破以来,经多年发展,东风螺已成为海南、广东、福建等地主要的海洋经济贝类之一,其中海南方斑东风螺养殖产量占全国的70%^[3,4]。

在投饵型水产养殖生产中,饵料中的营养元素仅有少部分转化成养殖动物机体组成部分,而大部分通过残饵、粪便和代谢物等形式进入养殖尾水^[5]。水产养殖尾水若不经处理直接排放,会导致环境恶化、病原滋生的潜在风险增加,不利于水产养殖产业的健康可持续发展^[6]。当前,水产养殖尾水研究主要从水质特征与分析、水处理技术等方面展开。在尾水特征与分析方面,目前研究揭示了暗纹东方鲀(*Takifugu obscurus*)、罗氏沼虾(*Macrobrachium rosenbergii*)、中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*)等养殖品种及稻虾轮作等养殖模式的总平方和(Total Sum of Squares, TSS)、总磷(Total Phosphorus, TP)、总氮(Total Nitrogen, TN)等主要污染物的排放强度及动态规律,并通过排污系数测算和能值分析等方法评估环境影响与产业可持续性。然而目前方斑东风螺相关的研究仍然聚焦于育苗、营养、病原防控等方面,系统性的尾水水质数据库与排放系数等尾水研究尚属空白^[9]。

随着方斑东风螺养殖业的发展,东风螺的养殖密度和单位产量逐年升高^[7]。东风螺养殖主要采用离底铺沙流水养殖模式^[10](图1),该模式通常是在海边低潮线下的砂质底区域打砂滤井取水,然后通过泵将水直接送入养殖池,经过养殖池沙层后再排出。海水的盐度一般在35左右,但强降雨会导致海水盐度的短期下降。东风螺养殖主要使用冰鲜鱼等作为饵料,投喂量会根据螺池内螺体总重及螺

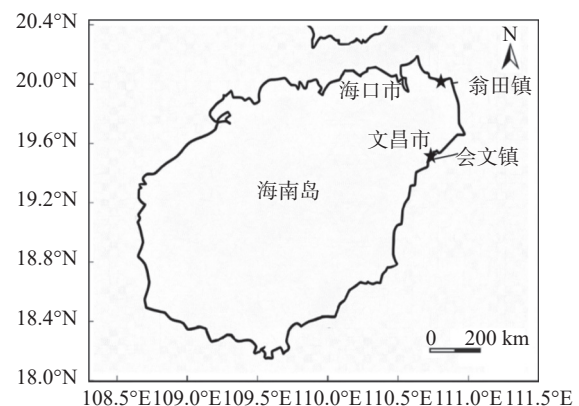


图1 取样点示意图

的摄食情况(如摄食速度等)进行调整。剩余的骨头和残饵等,会在摄食结束后捞出^[11]。目前的离底铺沙流水养殖模式,均为水流垂直渗透沙层,汇集至螺板下,后排出池外,因此沙层就会将残饵、粪便、代谢物等有机物截留并累积到沙层中。为了保持养殖池内水质和沙层的清洁,需要持续大量更换养殖池水,每日换水量达到养殖池水体体积的 8-10 倍,因而产生大量养殖尾水^[8,12]。

近年来,随着沿海各省市对环保需求的提升以及养殖尾水排放标准逐步推进,东风螺养殖行业在原有的完全流水养殖模式基础上进行改进,开发出了一种半循环水养殖模式^[13]。该模式的进排水部分区别于传统模式:即养殖池排出的水首先进入沉淀砂滤池,然后经水泵抽出进入配水池并与新鲜海水混合后,再次流入东风螺养殖池。该养殖模式可降低对海区水资源的消耗,实现养殖场内的循环使用,减少由外部海区不稳定带来的影响。无论采用哪种养殖模式,东风螺养殖都不可避免地需要消耗大量海水资源,并将养殖尾水排放到自然海区。因此,养殖尾水是否能够达到排放标准,是东风螺养殖产业能否实现健康绿色发展的关键^[14]。

为了解海南东风螺养殖尾水水质特征及其与养殖模式的关系,本研究对海南省文昌市方斑东风螺养殖场排放的养殖尾水进行了水质特征调查分析,并利用实验室东风螺养殖系统,监测了方斑东风螺摄食前后的水质变化,以及半循环养殖系统的营养物质累积状况,以期方斑东风螺养殖尾水处理技术研发提供数据资料和理论依据。

1 材料与方法

1.1 养殖尾水来源 本研究的养殖尾水来源有两类:一是采自海南省文昌市翁田镇方斑东风螺集中养殖区(位置见图 1,取样点经纬度信息见附录 1)的排水,涵盖 16 家完全流水式和 10 家半循环式场区;二为本实验室内自建系统所排出的尾水。

1.2 样本采集与处理 水样采集、贮存和运输方法参考 HJ 442.3-2020《近岸海域环境监测技术规范》。用于测定水质指标 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 、 NO_3^--N 和活性磷酸盐(Active Phosphate, $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$)的水样经 $0.45\ \mu\text{m}$ 滤膜过滤后保存于 PE(聚乙烯)瓶中;用于测定 COD_{Mn} 、TP 和 TN 的水样直接保存于 PE 瓶中。将全部样品置于 -20°C 条件下保存并及时测定。

NH_4^+-N 、 NO_2^--N 、 NO_3^--N 、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 和 TP 浓度的测定参照 GB/T 12763.4-2007《海洋调查规范 第 4 部分:海水化学要素调查》,其中 NH_4^+-N 采用次溴酸钠氧化法测定, NO_2^--N 采用重氮-偶氮法测定, NO_3^--N 采用锌镉还原法测定, $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 采用抗坏血酸还原磷钼蓝法测定,TP 采用过硫酸钾氧化法测定;TN 参照 HJ 636-2012《水质 总氮的测定 碱性过硫酸钾紫外分光光度法》测定, COD_{Mn} 参照 GB/T 11892-1989《水质 高锰酸盐指数的测定》测定;溶解氧(Dissolved Oxygen, DO)和酸碱度(Pondus Hydrogenii, pH)分别使用溶解氧测定仪(雷磁 JPB-608)和雷磁 PHB-4 便携式 pH 计进行测定。

1.3 方斑东风螺养殖场养殖尾水水质特征调查 在海南省文昌市翁田镇和会文镇方斑东风螺集中养殖区采集养殖尾水,分别对养殖尾水中的 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 、 NO_3^--N 、TN、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 、TP、pH 值和 COD_{Mn} 浓度进行测定,其中 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 和 NO_3^--N 的总和为 DIN。依据海南省生态环境厅及市场监督管理局颁布的海南省地方标准《水产养殖尾水排放标准》DB46/475-2023(下文简称为“DB2023”)和农业部颁布的中华人民共和国水产行业标准《海水养殖水排放要求》SC/T 9103-2007(下文简称为“SC2007”)对方斑东风螺养殖尾水排放超标状况进行评估,各指标判断标准如表 1 所示。其中,酸碱度(pH)和化学需氧量(COD_{Mn})的浓度合格范围在 DB2023 和 SC2007 的一级标准和二级标准的要求均一致,不作区分;无机氮(DIN)和 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 浓度合格范围参考 DB2023 标准,TP 和 TN 浓度合格范围参考 DB2023 标准。

1.4 投喂对方斑东风螺完全流水养殖模式尾水水质的影响 实验室构建的东风螺完全流水养殖系统如图 2 所示,东风螺实验养殖箱规格为 $50\text{cm}\times 38\text{cm}\times 28\text{cm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高),箱体底部铺设高为 2 cm 的架子,在架子上铺 60 目筛绢网,然后再铺上高 5 cm 左右的沙,养殖期间箱体内水深约 11 cm,箱内养殖水体体积约

23 L。实验养殖期间保持流水养殖, 流量 3.8 L/h, 日换水量约为养殖水体体积的 4 倍, 系统共设置 3 个养殖箱作为重复。每个养殖箱内放入方斑东风螺 160 粒, 平均体质量为 6.25 ± 0.35 g, 暂养及实验养殖期间每隔 2 d 投喂一次冰鲜小杂鱼, 投喂量为 50 g (占箱内东风螺总重的 5%)。因实验持续时间较短, 螺的体重变化不明显, 因此整个实验期间未进行投喂量的调整。暂养及养殖实验期间砂层上方水体不间断曝气增氧, 溶解氧浓度维持在 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上, pH 为 7.98 ± 0.14 , 盐度为 28 ± 0.5 。

表 1 养殖尾水评价标准中各指标浓度合格范围

水质指标	DB46/475-2023		SC/T 9 103-2007	
	一级标准	二级标准	一级标准	二级标准
酸碱度pH	7.0 ~ 8.5	6.5 ~ 9.0	7.0 ~ 8.5	6.5 ~ 9.0
化学需氧量 $\text{COD}_{\text{Mn}} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	≤ 10	≤ 20	≤ 10	≤ 20
无机氮DIN(以N计)/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	—	—	≤ 0.50	≤ 1.00
总氮TN(以N计)/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	≤ 3.5	≤ 7.0	—	—
活性磷酸盐 $\text{PO}_4^{3-}\text{—P}$ (以P计)/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	—	—	≤ 0.05	≤ 0.10
总磷TP(以P计)/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	≤ 0.50	≤ 1.00	—	—

注: “—” 表示标准中无此项数值。

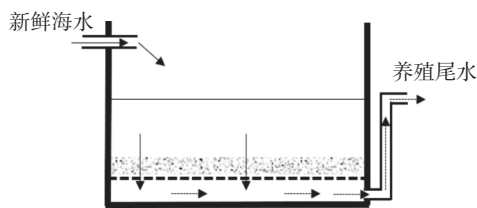


图 2 方斑东风螺离底铺沙流水养殖系统示意图

在投喂前采集系统进水和出水水样, 即实验 0 h 水样。取样后关闭进水, 对方斑东风螺进行投喂。摄食结束后进行一次“快速排水”(即将排水管开口位置降低到池底水平线位置, 使养殖箱内海水快速排掉 2/3), 在排水量达到 1/2 体积容量时采集一个水样^[13]。之后打开进水, 快速加满干净海水后, 调节进水阀门注入干净海水并保持流水状态(流量 3.8 L/h), 养殖箱出水水样每隔 1 h 采集一次; 系统进水水样每 8 h 采集一次, 采样持续 24 h。对水样各水质指标进行检测后, 采用 DB2023 以及 SC2007 尾水排放标准对水质进行评价。

1.5 方斑东风螺半循环水养殖模式尾水水质特征

本研究搭建半循环水模式方斑东风螺养殖系统^[3], 如图 3 所示, 系统基本单元为 3 个养殖箱、1 个沉淀桶和 1 个砂滤桶, 共设 3 个重复。养殖箱规格及搭建同 1.4 实验, 砂滤桶和沉淀桶均为直径 53 cm、高度 63 cm、容积 140 L 的 PP(聚丙烯)桶。其中砂滤桶中间插入直径 20 cm 的 PVC(聚氯乙烯)管作隔断蓄水, 再由下至上分别铺设高 10 cm 的火山石和高 20 cm 的沙。养殖箱箱内养殖水体体积约 70 L, 系统总水体体积约为 250 L。

每个养殖箱内放入方斑东风螺 100 粒, 平均体质量为 10.09 ± 0.13 g, 每隔 1 d 在上午投喂一次冰鲜杂鱼, 养殖箱进水流量控制在 3.8 L/h, 正式实验前在该系统中采用完全流水养殖模式暂养方斑东风螺 14 d。实验开始后, 采用半循环水养殖模式, 即每天更换系统总水量的一半, 砂层上方养殖水体不间断曝气增氧, 溶解氧维持在 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上, pH 为 7.93 ± 0.04 ,

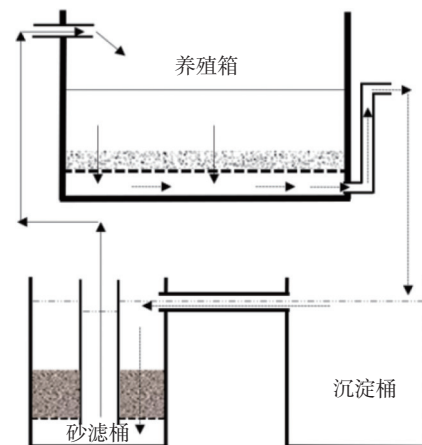


图 3 半循环水模式方斑东风螺养殖系统示意图

盐度 28 ± 0.5 。实验周期为 7 d, 投喂时间为第 2、4、6 d 的上午 9 点, 投喂量为 50 g (占初始箱内东风螺总重的 5%), 因实验持续时间较短, 螺的体重变化不明显, 因此整个实验期间未进行投喂量的调整。每日下午 5 点采集砂滤后水样。对水样各水质指标进行检测并采用 DB2023 以及 SC2007 尾水排放标准对水质进行评价。

1.6 数据处理与分析 对实验结果使用 IBM SPSS Statistics 26.0 进行单因素方差分析, $P < 0.05$ 表示数据差异达到显著。并用 Origin 2021 进行作图。计算所得结果以 (平均值 $\pm$ 标准差) 的方式表示。

2 结 果

2.1 方斑东风螺养殖场养殖尾水水质特征调查 本次调查的 26 家养殖场中, 16 家为完全流水养殖模式, 10 家为半循环水养殖模式, 对两种养殖模式进行对比分析。如表 2 所示, 依据 DB2023 尾水排放标准, 在完全流水养殖模式中, 除 2 家养殖场的尾水因 COD_{Mn} 和 TN 浓度过高, 超二级排放标准外, 其余 14 家养殖场的尾水均达到一级排放标准, 一级和二级达标率均为 87.5%; 在半循环水养殖模式中, 8 家养殖场的尾水达到一级排放标准 (80%), 2 家养殖场 TN、TP 和 COD_{Mn} 超一级排放标准但符合二级排放标准, 二级达标率为 100%。

表 2 方斑东风螺养殖场养殖尾水水质达标率

水质指标	养殖模式	浓度范围	排放达标率/%	
			一级	二级
酸碱度 pH	完全流水养殖	7.26 ~ 8.26	100.00	100.00
	半循环水养殖	7.56 ~ 8.22	100.00	100.00
化学需氧量 $\text{COD}_{\text{Mn}} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	完全流水养殖	5.60 ~ 41.42	87.50	87.50
	半循环水养殖	4.38 ~ 10.89	90.00	100.00
无机氮 DIN (以 N 计) $/ (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	完全流水养殖	0.19 ~ 1.89	31.25	37.50
	半循环水养殖	0.36 ~ 3.19	30.00	80.00
总氮 TN (以 N 计) $/ (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	完全流水养殖	0.50 ~ 9.43	93.75	93.75
	半循环水养殖	1.24 ~ 5.01	90.00	100.00
活性磷酸盐 $\text{PO}_4^{3-}\text{—P} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	完全流水养殖	0.03 ~ 0.92	12.50	62.50
	半循环水养殖	0.07 ~ 0.51	0.00	30.00
总磷 TP (以 P 计) $/ (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	完全流水养殖	0.04 ~ 0.98	93.75	100.00
	半循环水养殖	0.09 ~ 0.56	90.00	100.00

注: 酸碱度以及 COD_{Mn} 达标情况依据 DB2023 和 SC2007 两标准; TN、TP 达标情况依据 DB2023 标准; DIN、 $\text{PO}_4^{3-}\text{—P}$ 达标情况依据 SC2007 标准。

依据 SC2007 尾水排放标准, 在完全流水养殖模式中, 2 家符合一级排放要求, 3 家符合二级排放要求, 11 家 DIN 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{—P}$ 超二级排放要求, 二级达标率为 31.25%; 在半循环水养殖模式中, 3 家达到二级海水养殖水排放标准, 二级达标率为 30%。方斑东风螺养殖尾水调查水质测定结果参考附录。

2.2 投喂冰鲜杂鱼对方斑东风螺完全流水养殖模式尾水水质的影响 投喂冰鲜杂鱼后排放的尾水中, 如图 4 所示, DIN 和 TN 浓度大幅升高, 换水后 (即实验第 2 h) 出现明显下降; 而后 TN 和 DIN 浓度总体呈现先升高后下降的趋势, 与投喂前相比明显升高。其中自摄食后, DIN 浓度均远超出二级尾水排放标准 (依据 SC2007 标准)。TN 浓度在第 20 h 和第 22 h 尾水的 TN 浓度超出一级尾水排放标准, 但符合二级尾水排放标准 (依据 DB2023 标准)。投喂前后水样 TN 中不同成分占比不同, 投喂前水体 TN 中以 $\text{NO}_3^- \text{—N}$ 为主, 占比达到 51.36%。投喂后水体中 TN 逐渐以 $\text{NH}_4^+ \text{—N}$ 为主, 在第 6 h-22 h, 其占比达到 50% 以上。

如图 5 所示, 投喂冰鲜杂鱼后 $\text{PO}_4^{3-}\text{—P}$ 和 TP 变化趋势相似, 均在摄食后大幅升高, 换水后 (即实验第 2 h) 总体呈下降趋势。按照海水养殖水排放要求 (SC/T 9 103—2007), $\text{PO}_4^{3-}\text{—P}$ 浓度在投喂后至实验结

束均远超二级标准(依据 SC2007 标准);TP 浓度在投喂后直至实验第 14 h 内均超出一级尾水排放标准,但符合二级标准(依据 DB2023 标准)。投喂前后水样 TP 组成中以 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 为主,最高占比达到 98.24%。

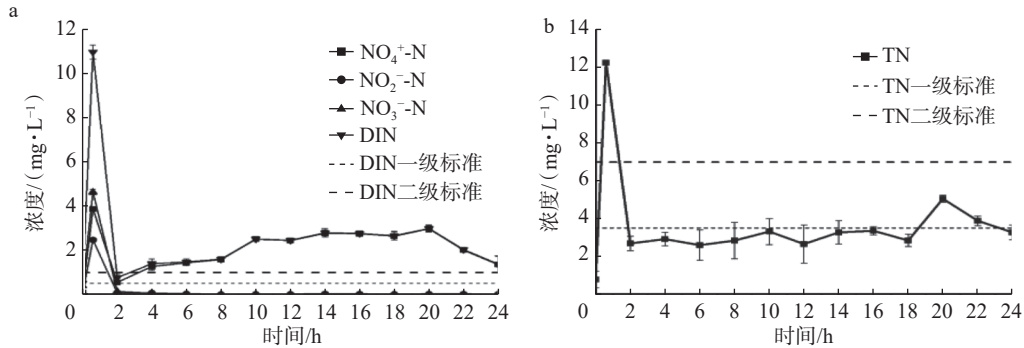


图4 投喂后方斑东风螺养殖尾水中 DIN(a 图)和 TN(b 图)时间变化曲线

注: DIN 达标情况依据 SC2007 标准, TN 达标情况依据 DB2023 标准。

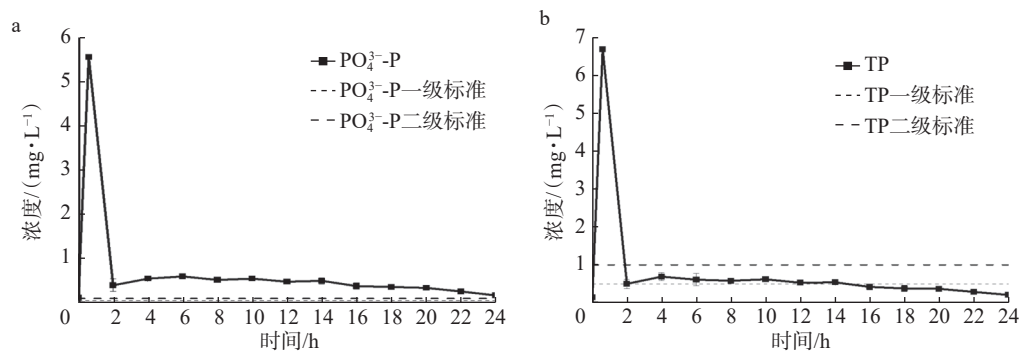


图5 投喂后方斑东风螺养殖尾水中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ (a 图)和 TP(b 图)时间变化曲线

注: $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 达标情况依据 SC2007 标准, TP 达标情况依据 DB2023 标准。

如图 6 所示,投喂后水体 COD_{Mn} 浓度迅速升高,并于第 2 h 达到最大值,之后大幅下降,实验期间水体 COD_{Mn} 浓度均超出一级尾水排放标准,在第 6 h、第 18 h 和第 20 h 则超出二级标准(依据 DB2023 以及 SC2007 标准)。尾水 DO 浓度和 pH 值呈明显下降趋势,其中 DO 浓度在投喂后第 4 h 开始均低于 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,甚至在第 6 h-10 h 达到 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下。

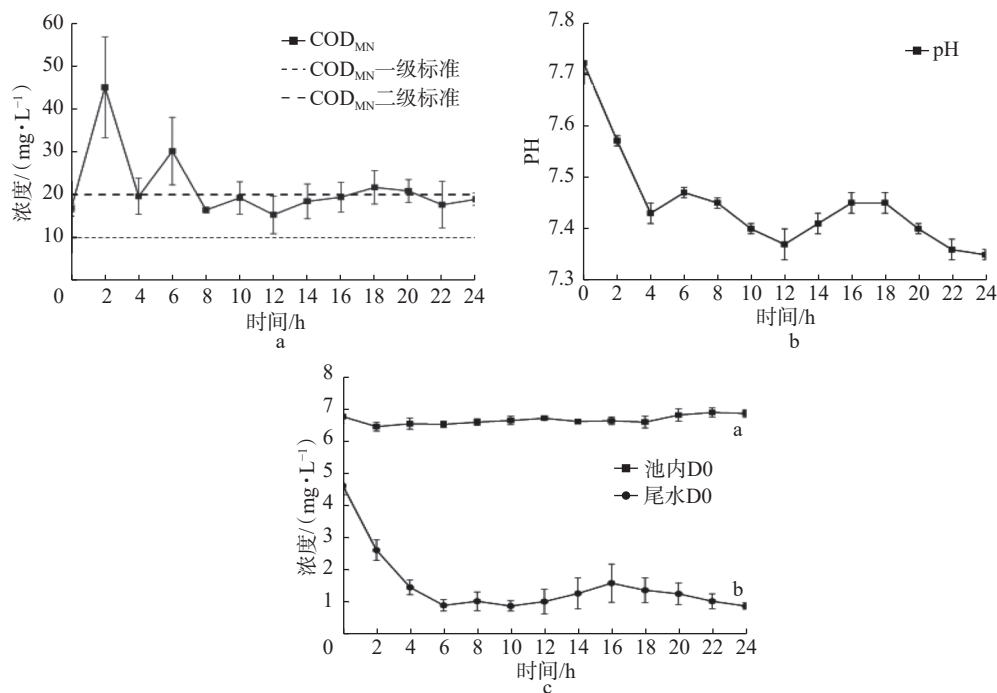


图6 投喂后方斑东风螺养殖尾水中 COD_{Mn}(a图)、pH(b图)和 DO(c图)时间变化曲线

注: COD_{Mn}、pH 达标情况依据 DB2023/SC2007 两标准; c 图中的 a, b 代表显著性差异 ($P < 0.05$)。

2.3 方斑东风螺半循环水养殖系统养殖尾水水质测定 在实验期间,如图7所示,系统中 DIN 浓度呈上升趋势, DIN 浓度均远超出二级尾水排放标准(依据 SC2007 标准), TN 浓度分别于实验第 2 d 超出一级尾水排放标准,在第 6 d-7 d 超出二级尾水排放标准(依据 DB2023 标准)。

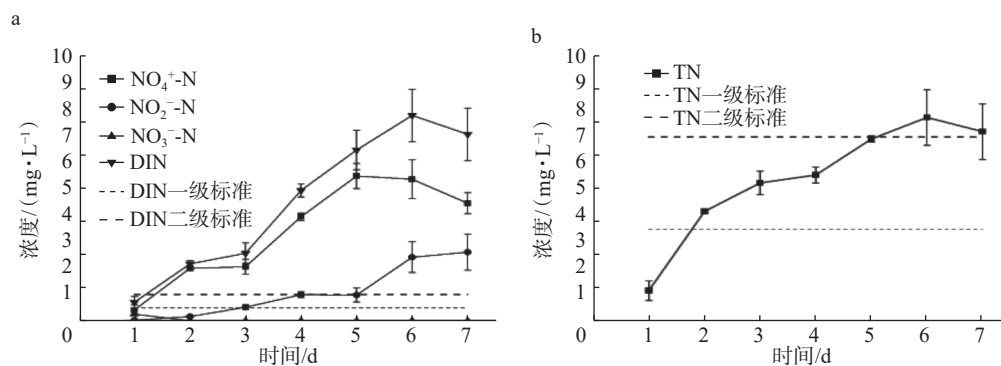


图7 方斑东风螺半循环水养殖模式下养殖尾水中 DIN(a图)和 TN(b图)时间变化曲线

注: DIN 达标情况依据 SC2007 标准, TN 达标情况依据 DB2023 标准。

在实验期间,如图8所示,PO₄³⁻-P 和 TP 变化趋势基本一致,均于实验投喂第 2 d 后,出现大幅升高,之后呈现小范围内波动,其中 PO₄³⁻-P 浓度均远超出二级尾水排放标准(依据 SC2007 标准),TP 浓度维持在较高数值但符合一级标准(依据 DB2023 标准)。

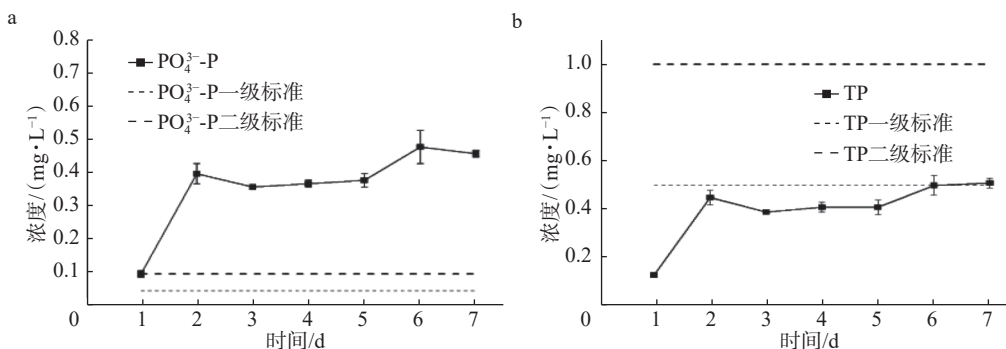


图8 方斑东风螺半循环水养殖模式下养殖尾水中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ (a图)和TP(b图)时间变化曲线

注: $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 达标情况依据 SC2007 标准, TP 达标情况依据 DB2023 标准。

如图9所示, COD_{Mn} 浓度自实验开始急速上升, 于第2 d后超出一级尾水排放标准, 实验第3 d后呈稳定趋势, 并于实验第5 d达至最大值, 但符合二级排放标准(依据 DB2023 以及 SC2007 标准)。在养殖箱内 DO 维持在 $(7.34 \pm 0.29) \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的条件下, 养殖箱出水 DO 浓度显著低于养殖箱内的浓度 ($P < 0.01$), 在实验第2 d下降到 $2 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, 最低值出现在第5 d, 为 $0.79 \pm 0.19 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。在实验期间, pH 值呈稳定下降趋势, 由初始的 8.2 ± 0.02 下降到实验结束时 (7.4 ± 0.03), 系统水体出现酸化。

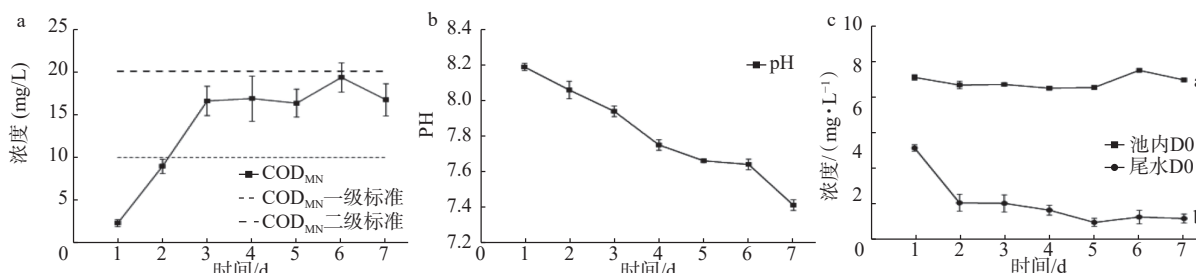


图9 方斑东风螺半循环水养殖模式下养殖尾水中 COD_{Mn} (a图)、pH(b图)和DO(c图)时间变化曲线

注: COD_{Mn} 、pH 达标情况依据 DB2023/SC2007 两标准; c 图中的 a、b 代表显著性差异 ($P < 0.05$)。

3 讨论

水产养殖尾水中存在蛋白质、脂肪等有机物污染物, 也包含氨氮、亚硝酸盐、硝酸盐、活性磷酸盐等无机污染物, 这些污染物中富含氮、磷等营养元素^[15]。《第二次全国污染源普查公报》数据估计, 2017 年我国水产养殖业的总氮、总磷和化学需氧量排放量分别达 9.91 万吨、1.61 万吨和 66.60 万吨。若养殖尾水未加处理直接排放到自然水域, 极易引发湖泊、河流和海洋等水体的富营养化, 进而导致生态系统失衡, 严重时可诱发海洋水华和赤潮等灾害^[16]。基于此, 开展养殖尾水特征研究对生态环境保护具有重要的理论价值与实践指导意义。本研究通过对海南方斑东风螺养殖场所的尾水调查发现, 完全流水养殖模式与半循环水养殖模式下的尾水水质整体表现良好; 半循环水养殖模式的水质稳定性略优于完全流水养殖模式。参照《海南省养殖尾水排放标准》(DB2023), 如表2所示, 两种模式下均有 $\geq 87.5\%$ 的养殖场各项水质指标达到一级排放标准。其中, 半循环水养殖模式养殖场的水质指标一级、二级排放标准达标率分别达 $\geq 90\%$ 和 100% ; 完全流水养殖模式养殖场的一级、二级排放标准达标率均为 $\geq 87.5\%$ 。从养殖模式特征来看, 完全流水养殖是目前国内东风螺养殖的主导模式, 其核心特征为一次性进水与排水; 半循环水养殖模式的显著特点则是养殖尾水经处理后, 与海区新鲜海水混合再循环进入养殖池。与半循环水养殖模式相比, 完全流水养殖模式存在排水量大、耗水率高的突出缺陷——东风螺完全流水养殖的日换水量通常为养殖水体容积的 8~10 倍^[12], 大量尾水排放会加剧对周边水环境的污染负荷^[17]。相关研究表明, 东风螺半循环水养殖模式的用水量较传统完全流水养殖模式下降 50% 以上^[12]。加之本研究证实半循环水养殖模式在尾水水质及稳定性方面均优于完全流水养殖模式, 因此, 半循环水养殖模式可作为海南方斑

东风螺养殖的推荐模式。

目前,东风螺养殖以投喂冰鲜鱼为主。有研究显示,在池塘养殖中投喂的冰鲜鱼有多达 30% 不能被食用^[18],因此冰鲜鱼作为饵料具有溶解损失率高,易污染养殖水体并造成养殖水域水质富营养化的缺点^[19]。在方斑东风螺养殖生产中,为了维持养殖池内良好水质环境,通常在投喂结束后采用“快速排水”操作将池内的水排出,之后再保持连续进水的流水模式。为了检测冰鲜鱼投喂及“快速排水”操作对养殖水体水质的影响,本研究在实验室条件下模拟养殖生产,在投喂冰鲜鱼结束后立即采集尾水样品测定水质指标,发现 TN、TP、COD_{Mn}、活性磷酸盐和无机氮等均大幅升高,均远超海南养殖尾水二级排放标准或海水养殖水排放要求,水质极差;经过“快速排水”后,在流水条件下所排养殖尾水符合二级或超二级排放标准,如图 4、图 5 所示,其中 TN 和 TP 浓度分别在第 20-22 h 和第 2-14 h 浓度超出一级标准,符合二级标准;如图 6 所示, COD_{Mn} 浓度在实验期间均超一级标准,在第 2-6 h 以及第 18-20 h 超出二级排放标准;经过 24 h 的流水作用后即在第 24 h 时排放的尾水才符合海南省《水产养殖尾水排放标准》DB46/475-2023 一级标准。在实验室条件下模拟流水养殖所测养殖尾水水质明显低于本研究对东风螺养殖尾水调查结果。目前生产上日换水量为养殖水体 8~10 倍^[12],而本研究仅为 4 倍,如按照比例对所测指标换算后,则投喂试验所测各项指标在绝大多数时间均可达到一级标准要求,与养殖生产尾水的测定结果基本一致。此外,养殖尾水中溶解氧和 pH 均明显下降,这意味着养殖尾水各项水质指标受到方斑东风螺生理活动与代谢^[20,21],以及沙层中截留的有机物及其在微生物作用下的分解和代谢有关。

在实验室构建的方斑东风螺半循环水养殖系统中,水体中 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 、DIN、TN、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 、TP、COD_{Mn} 等关键水质指标随养殖时间的延长呈持续升高趋势。值得注意的是,本实验系统各项水质指标均劣于实际生产中半循环水养殖模式的尾水质量,推测主要由以下两方面因素导致。其一,系统净化功能受限是核心原因。本研究构建的半循环水养殖系统仅依赖物理沉淀和微生物分解矿化作用,缺少单细胞藻类、大型水生植物等的吸收同化作用^[22-24],导致有机物和氮、磷等营养元素无法通过生物途径有效移除,进而在系统中持续累积,加剧水质恶化。其二,实验装置与实际生产的差异可能产生叠加影响。模拟系统养殖箱内砂层上方水深较实际养殖场偏浅。尽管该水深条件未对实验东风螺造成影响,但可能会导致砂层上方水质指标偏高的问题。鉴于实验室模拟养殖系统与实际养殖场景不可避免的差异性,为了提高饲料氮磷营养元素的利用率,降低养殖尾水直排对海区环境的污染风险,未来研究需重点关注三方面内容:一是基于真实的养殖场景,系统解析东风螺不同生产阶段的尾水特征,尤其强化对尾水中悬浮物形态、组分等重点参数的监测;二是探索多营养层次综合养殖模式在东风螺养殖中的适配性,通过引入功能生物构建生态净化体系;三是验证“三池两坝”等尾水治理技术在东风螺养殖场景的应用效果,为制定针对性的尾水净化方案提供理论与实践支撑。

参考文献:

- [1] 梁晶,邢诒炫,吕布,等.底砂粒径对方斑东风螺生长、消化、抗氧化及底质的影响[J].水产科技情报,2023,50(3): 137-145.
- [2] LIANG J, XING Y X, LYU B, et al. Effects of grain size of bottom sand on growth, digestion, anti-oxidation capacity and bottom quality in *Babylonia areolata* culture[J]. Fisheries Science & Technology Information, 2023, 50(3): 137-145.
- [3] 刘永.方斑东风螺的养殖技术[J].水产养殖,2006,27(1): 22-24. (查阅网上资料,未找到本条文献英文翻译信息,请确认补充)
- [4] 董杨,符书源,王国福.海南省方斑东风螺养殖业的发展及其前景展望[J].科学养鱼,2011(12): 39-40. (查阅网上资料,未找到本条文献英文翻译信息,请确认)
- [5] 方斑东风螺“海泰 1 号”长速提高优良性状稳定[J].海洋与渔业,2019(10): 46-48. (查阅网上资料,未找到本条文献英文翻译和作者信息,请确认)
- [6] 李健,陈钊,常志强,等.海水养殖池塘营养物质转化与多营养层次生态养殖[J].水生生物学报,2024,48(12):

Haizhu KE et al. Study on the Water Quality Characteristics of Mariculture Wastewater from *Babylonia areolata* in Hainan and Its Relationship with Aquaculture Models

Natural Science of Hainan University (ISSN 1004-1729)

<https://hndk.hainanu.edu.cn>

- 2155–2161.
- LI J, CHEN Z, CHANG Z Q, et al. Nutrients transformation and ecological multi-trophic level aquaculture in seawater ponds[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2024, 48(12): 2155–2161.
- [6] 孙涛. 水产养殖尾水治理关键技术研究 [J]. *山西化工*, 2025, 45(2): 254–256.
- SUN T. Research on key technologies for tail water treatment in aquaculture[J]. *Shanxi Chemical Industry*, 2025, 45(2): 254–256.
- [7] 谭凡民. 方斑东风螺高效养殖技术 [J]. *中国水产*, 2011(8): 23–25. (查阅网上资料, 未找到本条文献英文翻译信息, 请确认)
- [8] 刘国锋, 徐跑, 吴霆, 等. 中国水产养殖环境氮磷污染现状及未来发展思路 [J]. *江苏农业学报*, 2018, 34(1): 225–233.
- LIU G F, XU P, WU T, et al. Present condition of aquaculture nitrogen and phosphorus environmental pollution and future development strategy[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2018, 34(1): 225–233.
- [9] 王筱, 洗健安, 张秀霞, 等. 方斑东风螺人工养殖、环境生理和营养需求研究进展 [J]. *中国饲料*, 2024(3): 83–88, 117.
- WANG X, XIAN J N, ZHANG X X, et al. Advances in research on breeding, environment physiology and nutrition requirements of *Babylonia areolate*[J]. *China Feed*, 2024(3): 83–88, 117.
- [10] 张扬波, 杨章武. 东风螺水泥池养殖两种铺沙方式的比较 [J]. *福建水产*, 2011, 33(4): 27–30.
- ZHANG Y B, YANG Z W. Comparison of two sanded ways of aquaculture *Babylonia* in cement pond[J]. *Journal of Fujian Fisheries*, 2011, 33(4): 27–30.
- [11] 林越超, 周宸, 林清海, 等. 露天水泥池方斑东风螺养殖技术探讨 [J]. *福建水产*, 2011, 33(4): 23–26.
- LIN Y J, ZHOU C, LIN Q H, et al. Study on culture technique for spotted babylon, *Babylonia aerolata* in outdoor concrete tanks[J]. *Journal of Fujian Fisheries*, 2011, 33(4): 23–26.
- [12] 翁文明, 蔡岩, 卢明辉, 等. 方斑东风螺工厂化半循环水养殖试验 [J]. *科学养鱼*, 2021(3): 64–65.
- WENG W M, CAI Y, LU M H, et al. Experiment on industrialized semi-recirculation culture of areola *Babylon*[J]. *Scientific Fish Farming*, 2021(3): 64–65.
- [13] 赵崇宇, 蔡岩, 朱力, 等. 大型海藻对方斑东风螺养殖尾水净化效果比较 [J]. *海南大学学报(自然科学版)*, 2023, 41(4): 359–368.
- ZHAO C Y, CAI Y, ZHU L, et al. Comparison of purification effects of macroalgae on the tail water from *Babylonia areolate* culture[J]. *Natural Science of Hainan University*, 2023, 41(4): 359–368.
- [14] 马晓娜, 翟堂芳, 吴子恒, 等. 国外养殖尾水排放要求对中国水产养殖业绿色发展的启示 [J]. *大连海洋大学学报*, 2024, 39(2): 337–348.
- MA X N, ZHAI T F, WU Z H, et al. Revelation of green development of aquaculture industry in China from foreign provision of aquaculture tailwater discharge: a review[J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2024, 39(2): 337–348.
- [15] 迟赛赛, 李秋芬, 罗梓峻, 等. 北美海蓬子对养殖尾水盐度和营养盐水平的适应能力研究 [J]. *渔业科学进展*, 2025, 46(2): 248–257.
- CHI S S, LI Q F, LUO Z J, et al. The adaptability of *Salicornia bigelovii* to salinity and nutrient levels in aquaculture effluent[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2025, 46(2): 248–257.
- [16] ZHAO J J, PENG L C, MA X M. Innovative microalgae technologies for mariculture wastewater treatment: single and combined microalgae treatment mechanisms, challenges and future prospects[J]. *Environmental Research*, 2025, 266: 120560.
- [17] 李秀辰, 张国琛, 聂丹丹, 等. 水产养殖固体废弃物减量化与资源化利用 [J]. *水产科学*, 2007, 26(5): 300–302.
- LI X C, ZHANG G C, NIE D D, et al. Reduction and reuse of solid wastes in aquaculture system[J]. *Fisheries Science*, 2007, 26(5): 300–302.
- [18] 胡庚东, 宋超, 陈家长, 等. 池塘循环水养殖模式的构建及其对氮磷的去除效果 [J]. *生态与农村环境学报*, 2011, 27(3): 82–86.
- HU G D, SONG C, CHEN J Z, et al. Modeling of water circulating pond aquaculture system and its N & P removal effect[J].

- Journal of Ecology and Rural Environment, 2011, 27(3): 82–86.
- [19] 刘丽杰, 彭凯. 水产配合饲料替代冰鲜杂鱼的研究进展 [J]. 饲料研究, 2021, 44(21): 141–144.
- LIU L J, PENG K. Research progress on substitution of iced trash fish with aquatic compound feed[J]. *Feed Research*, 2021, 44(21): 141–144.
- [20] DUARTE J A, VILLANUEVA R, SEJO J C, et al. Ocean acidification effects on aquaculture of a high resilient calcifier species: a bioeconomic approach[J]. *Aquaculture*, 2022, 559: 738426.
- [21] DUONG D N, STONE D A J, QIN J G, et al. Energy budgets for Greenlip Abalone (*Haliotis laevis* Donovan) fed graded dietary crude protein levels at seasonal water temperatures[J]. *Aquaculture*, 2021, 536: 736499.
- [22] 王成强, 相智巍, 黄炳山, 等. 3 种耐盐植物对水产养殖废水净化效果 [J]. 广东海洋大学学报, 2022, 42(3): 25–32.
- WANG C Q, XIANG Z W, HUANG B S, et al. Effects of three varieties of halophytes on the purification of aquaculture waste water[J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2022, 42(3): 25–32.
- [23] YUAN H M, LUKWAMBE B, WANG Y C, et al. Sea Purslane's (*Sesuvium portulacastrum*) role in nutrient removal and microbial community dynamics of the mariculture wastewater bioremediation systems[J]. *Aquaculture*, 2025, 594: 741388
- [24] ZHAO J J, PENG L C, MA X M. Innovative microalgae technologies for mariculture wastewater treatment: single and combined microalgae treatment mechanisms, challenges and future prospects[J]. *Environmental Research*, 2025, 266: 120560.
- (查阅网上资料, 本条文献与第 16 条文献重复, 请确认)

作者贡献声明

柯海珠: 论文撰写、数据收集与处理、数据分析与解释; 赵崇宇: 数据收集与处理; 袁善恒: 数据分析与解释; 刘树昌: 数据收集与处理; 贝伟烈: 数据收集与处理; 蔡岩: 论文撰写、评审与修改、指导与监督; 周永灿: 经费与资源支持、指导与监督; 王世锋: 研究构思与设计、经费与资源支持、指导与监督、评审与修改。

利益冲突声明

作者声明, 不存在已知的可能影响本论文所报告工作的竞争性经济利益或个人关系。

数据可用性

支持论文结论所需的所有数据均已包含在稿件中。如需获取与本文相关的其他数据, 可向通信作者提出申请。

致 谢

本文得到海南省重点研发专项(ZDYF2022XDNY234; ZDYF2024YJGG004-19)支持。

This work was supported by the Hainan Provincial Key R&D Program Fund(ZDYF2022XDNY234; ZDYF2024YJGG004-19)

作者简介

柯海珠(2000—), 女, 汉族, 海南三亚人, 海南大学渔业发展专业, 2022 级硕士研究生, 研究方向: 水产微生物生态与健康养殖, E-mail: 15798955883@163.com



This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0, <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

© The Author(s) 2026. Published by Journal Editorial Department of Hainan University.

Haizhu KE et al. Study on the Water Quality Characteristics of Mariculture Wastewater from *Babylonia areolata* in Hainan and Its Relationship with Aquaculture Models

Natural Science of Hainan University (ISSN 1004-1729)

<https://hndk.hainanu.edu.cn>

王世锋(1977—),男,汉族,河北沧州人,教授,博士,研究方向:水产微生物生态与健康养殖, E-mail: shifeng_15@163.com

(责任编辑:王玖琪)

附录:

表 S2 方斑东风螺养殖尾水调查水质结果										
养殖方式	养殖场编号	氨氮/ (mg·L ⁻¹)	亚硝酸盐/ (mg·L ⁻¹)	硝酸盐/ (mg·L ⁻¹)	无机氮/ (mg·L ⁻¹)	总氮/ (mg·L ⁻¹)	活性磷酸盐/ (mg·L ⁻¹)	总磷/ (mg·L ⁻¹)	pH	COD _{Mn} / (mg·L ⁻¹)
半循环水 养殖模式	SRAS-1号	0.317±0.004	0.029±0.001	0.157±0.004	0.503±0.002	2.692±0.007	0.244±0.013	0.241±0.004	7.557±0.038	6.42±0.002
	SRAS-2号	0.122±0.004	0.031±0.003	0.207±0.002	0.360±0.008	1.723±0.010	0.170±0.005	0.204±0.005	7.957±0.032	9.1±0.008
	SRAS-3号	0.323±0.010	0.063±0.004	0.181±0.005	0.566±0.006	1.723±0.009	0.255±0.010	0.285±0.006	7.863±0.035	8.85±0.009
	SRAS-4号	0.061±0.002	0.004±0.002	0.492±0.003	0.557±0.004	4.738±0.003	0.108±0.003	0.110±0.005	8.003±0.015	6.005±0.002
	SRAS-5号	0.044±0.007	0.004±0.002	0.563±0.003	0.611±0.002	1.400±0.021	0.074±0.007	0.092±0.006	7.973±0.021	7.226±0.004
	SRAS-6号	0.197±0.003	0.058±0.003	1.116±0.001	1.371±0.010	1.508±0.003	0.243±0.009	0.265±0.004	8.005±0.035	6.005±0.004
	SRAS-7号	0.448±0.016	0.139±0.003	2.603±0.005	3.190±0.009	5.008±0.003	0.507±0.004	0.566±0.005	8.013±0.006	4.784±0.008
	SRAS-8号	0.190±0.003	0.009±0.001	0.293±0.002	0.492±0.006	1.508±0.018	0.094±0.002	0.111±0.001	8.200±0.010	4.377±0.010
	SRAS-9号	0.179±0.004	0.014±0.005	0.519±0.004	0.513±0.005	1.885±0.005	0.083±0.002	0.104±0.006	8.220±0.012	10.891±0.001
	SRAS-10号	0.190±0.003	0.014±0.005	0.316±0.003	0.520±0.005	1.958±0.005	0.123±0.005	0.124±0.003	8.220±0.010	8.835±0.005
完全流水 养殖模式	TFM-1号	0.199±0.010	0.013±0.003	1.544±0.006	1.756±0.010	1.906±0.002	0.077±0.004	0.096±0.010	7.773±0.006	8.448±0.005
	TFM-2号	0.110±0.002	0.005±0.001	1.650±0.005	1.767±0.004	2.068±0.017	0.111±0.004	0.121±0.001	8.005±0.021	7.634±0.034
	TFM-3号	0.162±0.006	0.013±0.002	1.679±0.001	1.854±0.014	1.821±0.005	0.100±0.013	0.085±0.006	7.963±0.015	7.226±0.118
	TFM-4号	0.084±0.004	0.003±0.003	1.710±0.009	1.796±0.027	1.982±0.012	0.102±0.016	0.130±0.013	8.083±0.006	7.634±0.040
	TFM-5号	0.160±0.005	0.009±0.001	1.721±0.003	1.900±0.051	1.608±0.015	0.108±0.004	0.144±0.006	8.083±0.006	7.634±0.029
	TFM-6号	0.055±0.003	0.004±0.002	1.668±0.003	1.747±0.031	1.608±0.004	0.049±0.006	0.049±0.006	8.083±0.006	28.80±0.256
	TFM-7号	0.127±0.009	0.011±0.001	1.607±0.001	1.845±0.045	1.820±0.016	0.049±0.006	0.049±0.006	8.083±0.006	8.835±0.006
	TFM-8号	0.132±0.005	0.011±0.001	1.680±0.006	1.524±0.134	2.391±0.021	0.049±0.006	0.049±0.006	8.083±0.006	6.89±0.033
	TFM-9号	0.128±0.003	0.010±0.002	1.378±0.003	1.516±0.046	2.391±0.021	0.109±0.006	0.109±0.004	8.113±0.006	6.005±0.017
	TFM-10号	0.115±0.005	0.011±0.001	1.318±0.005	1.445±0.080	2.078±0.019	0.096±0.005	0.113±0.008	8.133±0.025	6.005±0.003
	TFM-11号	0.243±0.008	0.007±0.002	0.264±0.007	0.515±0.035	0.603±0.066	0.103±0.011	0.123±0.004	8.147±0.006	8.448±0.059
	TFM-12号	0.137±0.003	0.009±0.001	0.091±0.007	0.238±0.001	1.249±0.016	0.051±0.004	0.063±0.004	7.777±0.006	6.89±0.033
	TFM-13号	0.085±0.005	0.005±0.001	0.044±0.001	0.044±0.001	0.044±0.001	0.044±0.001	0.044±0.001	0.044±0.001	7.634±0.040
	TFM-14号	0.074±0.006	0.004±0.001	0.141±0.001	0.249±0.021	0.249±0.021	0.044±0.001	0.044±0.001	0.044±0.001	6.89±0.033
	TFM-15号	0.118±0.002	0.018±0.002	0.141±0.001	0.249±0.021	0.249±0.021	0.044±0.001	0.044±0.001	0.044±0.001	6.42±0.001
	TFM-16号	0.059±0.001	0.015±0.002	0.279±0.018	0.353±0.015	9.454±0.115	0.923±0.042	0.982±0.010	8.120±0.010	41.425±0.325

