

生态净化技术对集中连片海水池塘养殖尾水的处理效果研究——以龙海区紫泥镇甘文农场养殖项目为例

黄清武

福建省环境保护设计院有限公司, 福建 福州 350100

DOI:10.61369/EAE.2025030014

摘 要 : 为探索经济可行的集中连片海水池塘养殖尾水净化技术, 开发了3种基于生态净化技术处理海水池塘养殖尾水, 分别通过构建生态浮床(海马齿)、生态浮床(炭素纤维生态草)及红树林+牡蛎壳生态围隔等措施, 比较了3种不同类型的生态措施对海水养殖尾水的净化效果。结果表明: 通过90d 的系统运行, 3种生态净化技术的出水水质检测结果能达到《福建省水产养殖尾水排放标准》(DB35/2160-2023)表2海水接纳水域养殖尾水排放限值中的一级标准。3种不同类型生态净化措施对集中连片海水池塘养殖尾水的处理能力从高到低依次是红树林+牡蛎壳生态围隔>生态浮床(海马齿)>生态浮床(炭素纤维生态草), 其中红树林+牡蛎壳生态围隔系统对于总磷的去除率可达到57.24%~74.35%、总氮的去除率可达到12.88%~36.23%、CODMn的去除率可达到46.71%~65.46%。研究表明, 基于生态净化技术对于处理集中连片海水池塘养殖尾水具有较好的应用前景。

关 键 词 : 生态净化技术; 海水池塘养殖尾水; 降解效果; 达标排放

Research on the Treatment Effect of Ecological Purification Technology on Effluent from Concentrated Continuous Seawater Pond Aquaculture — A Case Study of the Ganwen Farm Aquaculture Project in Zini Town, Longhai District

Huang Qingwu

Fujian Environmental Protection Design Institute Co., Ltd., Fuzhou, Fujian 350100

Abstract : In order to explore the economically feasible purification technology of centralized contiguous seawater pond aquaculture tailwater, three types of ecological treatment methods were developed based on ecological purification technology to treat seawater pond aquaculture tailwater, and the purification effects of three different types of ecological measures on mariculture tailwater were compared by constructing ecological floating beds (seahorse teeth), ecological floating beds (carbon fiber ecological grasses) and mangrove oyster shell ecological confinement. The results showed that through 90 days of system operation, the effluent quality test results of the three ecological purification technologies could reach the first-level standard in the discharge limit of aquaculture tailwater in the seawater receiving waters in Table 2 of the Fujian Aquaculture Tailwater Discharge Standard (DB35/2160-2023). The treatment capacity of the three different types of ecological purification measures for aquaculture tailwater in contiguous contiguous seawater ponds was > from high to low: mangrove oyster shell ecological enclosure > ecological floating bed (seahorse tooth). The ecological floating bed (carbon fiber ecological grass), among which the removal rate of total phosphorus in the mangrove oyster shell ecological enclosure system could reach 57.24%~74.35%, the removal rate of total nitrogen could reach 12.88%~36.23%, and the removal rate of CODMn could reach 46.71%~65.46%. The results show that ecological purification technology has a good application prospect for the treatment of aquaculture tailwater in contiguous seawater ponds.

Keywords : ecological purification technology; seawater pond aquaculture tailwater; degradation effect; discharge standards

引言

随着集中连片海水池塘养殖场的快速发展,养殖规模持续扩大,养殖密度不断提高,尾水处理压力日益增大。根据刘梅等调查^[1],现有集中连片海水池塘养殖场主要存在问题是无效的养殖尾水处理设施,难以实现达标排放,处理并削减水产养殖尾水中过量的氮、磷、有机物等污染物对环境及养殖本身造成的影响日益受到关注。水产养殖尾水的现有处理方法主要包括物理法(曝气法、过滤法、泡沫分离技术等)、化学法(絮凝沉降、臭氧法等)和生物法(微生物处理、微藻处理、水生动植物调控等)^[2-3]。

研究表明,生态净化技术对海水池塘养殖尾水的处理具有显著作用,主要是通过培育耐盐植物来处理海水养殖尾水。其中,耐盐植物中海马齿曾用于原位修复养殖水体,氨氮去除率可达到74%~91%、亚硝态氮去除率可达到93%~98%、总氮去除率可达14%~33%、COD去除率可达67%~85%、总磷去除率可达41%~68%,效果优良^[4];水葱生长速率快,对氨氮和磷酸盐去除能力很强;美人蕉耐受能力强,净化能力较弱;芦苇在较高盐度环境下净化能力强^[5-7];据研究^[7-8],碳素纤维生态草因具备附着生物量大、功能性微生物群落丰度高、去除营养物效率高等优势,可成为生态浮岛的理想人工载体。研究报道称^[10-11],红树林同样具有高效净化养殖尾水功能,主要通过其发达的根系能吸收水中的氮、磷,还能过滤陆地径流和内陆带出的污染物等。

本文设计了基于生态净化技术的海水池塘养殖尾水净化模式,选取龙海区紫泥镇甘文农场养殖项目为试验基地,通过分别构建生态浮床(海马齿)、生态浮床(炭素纤维生态草)及红树林+牡蛎壳生态围隔等措施,比较3种不同生态净化技术对氮和磷的降解效果,研究和筛选了具有较好降解效果的生态净化处理技术,为福建地区现有的集中连片海水池塘养殖模式向绿色环保方向转型升级提供技术参考。

一、材料与方法

(一) 试验场地

本工程为龙海区紫泥镇甘文农场集中连片内陆养殖池塘标准化改造和尾水治理项目,位于漳州市龙海区紫泥镇甘文农场沙头口片区,主要的养殖品种为缢蛏,总面积约1000亩。每年9-10月开始投放蛏苗,随后,调水改底、合理投喂,于次年2月份左右开始陆续收获,一直持续到7月份左右,9月再次开启新一轮缢蛏养殖工作。本试验区的养殖取水方式一般采用自设泵抽取或自流的方式,从附近沟渠取水,而沟渠中的水通过水闸以自流的方式,在高潮位时从周边海域补水。经过现场养殖户调研反馈分析,养殖过程每日的置换水量约为10cm(养蛏池),尾水则通过水闸或水泵以自流或电力抽水的形式排入塘边沟渠。

(二) 试验设计

对现有龙海区紫泥镇甘文农场集中连片内陆养殖池塘进行改造,选取3块坡度、塘深、池塘面积基本一致的池塘(片区A~C)进行改造,分别铺设进水管网,设置流量计等。进水管网从塘边沟渠中引养殖尾水。3个试验片区设置生态系统如下:

片区A:设定为生态浮床(海马齿)

生态浮床框体采用0.5m×1.0m×0.05m的长方形高密度聚乙烯板紧密拼接而成,每一水道浮床面积为60m²,底部采用石条通过钢丝条与浮板连接进行固定。剪取平均长度20~30cm、茎节数5~6个、顶生对生叶4~6片的耐盐水生植物(海马齿)进行扦插,种植密度约48株/m²。

片区B:设定为生态浮床(炭素纤维生态草)

采用浮床悬挂式布局,覆盖面积比为1:50(生态草面积:水域面积),深度控制在1.5~2m光补偿层。

片区C:设定为红树林+牡蛎壳生态围隔系统

红树林+牡蛎生态围隔部署进水沟渠中,占地约5亩,有效水深2m,水力停留时间0.5h,其中红树林种植于进水沟渠两侧及池

塘围隔田埂上,牡蛎壳布设于中间。

(三) 样品收集和检测

从蛏苗播种开始,每隔10d采集3组试验片区的进水和出水的水样立即带回实验室参照相关标准进行水质检测。对3组试验蛏池的进口及出水口共计6个采集点采集水质样品,每个采集点收集3个平行样品,每10d取样1次,分别测定pH值、化学需氧量(COD)、总氮(TN)、总磷(TP)、悬浮物(SS)。测定方法按GB17378.4《海洋监测规范第4部分:海水分析》进行^[12]。

(四) 数据处理和分析

检测数据结合福建省《水产养殖尾水排放标准》(DB35/2160-2023)中表2海水接纳水域养殖尾水排放限值来评估养殖尾水达标情况。采用SPSS statistics19.0对实验数据进行单因素方差分析,统计养殖尾水不同污染因子的平均浓度、标准偏差,判断各养殖方式对养殖尾水污染因子浓度是否有显著性影响,P<0.05表示存在显著性差异。采用Origin 2021软件进行作图。

二、结果与讨论

(一) 水质变化分析及达标情况

对3个养殖尾水处理试验片区出水进行水质跟踪检测,从蛏苗播种后开始,每隔10d进行1次进出水水质监测,持续至90d的养殖周期,共进行9次监测,每个试验片区共有9组监测数据。从监测结果来看(表1和图1),3个试验片区,养殖尾水经生态净化处理后,出水中总磷、总氮、COD_{Mn}均能达到《福建省水产养殖尾水排放标准》(DB35/2160-2023)表2海水接纳水域养殖尾水排放限值中的一级标准。其中,试验片区A-生态浮床(海马齿)总磷、总氮及COD出水浓度分别为0.068±0.02mg·L⁻¹、1.65±0.52mg·L⁻¹、2.03±0.37mg·L⁻¹;试验片区B-生态浮床(炭素纤维生态草)总磷、总氮及COD出水浓度分别为0.140±0.03mg·L⁻¹、1.89±0.35mg·L⁻¹、2.85±0.60mg·L⁻¹

¹；试验片区C-红树林+牡蛎壳生态围隔系统总磷、总氮及COD出水浓度分别为 $0.072 \pm 0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $1.61 \pm 0.32 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $1.61 \pm 0.28 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

由于缢蛏苗播种3d后，饵料培养池开始向养蛏池供应饵料。考虑水质的稳定性，一般养蛏池每次排出池水1/2左右，然后饵料培养池向其排放池水供给饵料，接着饵料培养池补充海水，随着养殖时间增加会追加肥料，因此进出水水质会随着时间推移逐渐增大，约养殖到50d进出水水质 COD_{Mn} 会达到最大，70d进出水水质总氮会达到最大。养殖到80d左右会进行到缢蛏收获时间，进而减少换水频次及减少肥料追加，因此进出水水质会出现下降的一个趋势。如图1所示，项目的污染物出水浓度会随着养殖时间的增加而增大，在50~70d达到最大，后会逐渐出现浓度下降的趋势。

表1 各试验区出水监测点污染因子的实测值(平均值 ± 标准差)
Table 1 Measured values of pollution factors at effluent monitoring points in each experimental area (mean ± standard deviation)

		总磷 / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	总氮 / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	COD_{Mn} / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
A-生态浮床 (海马齿)	进水	0.188 ± 0.05	1.88 ± 0.52	3.48 ± 0.69
	出水	0.068 ± 0.02	1.65 ± 0.52	2.03 ± 0.37
B-生态浮床 (炭素纤维生态草)	进水	0.188 ± 0.05	1.99 ± 0.34	3.64 ± 0.79
	出水	0.140 ± 0.03	1.89 ± 0.35	2.85 ± 0.60
C-红树林+牡蛎壳生态围隔系统	进水	0.199 ± 0.05	2.19 ± 0.52	3.68 ± 0.65
	出水	0.072 ± 0.02	1.61 ± 0.32	1.61 ± 0.28

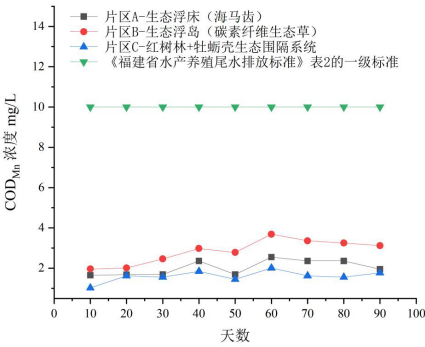


图1(a) 各试验区CODMn监测因子的实测浓度变化

Fig. 1(a) Changes in measured concentrations of CODMn monitoring factors in each experimental area

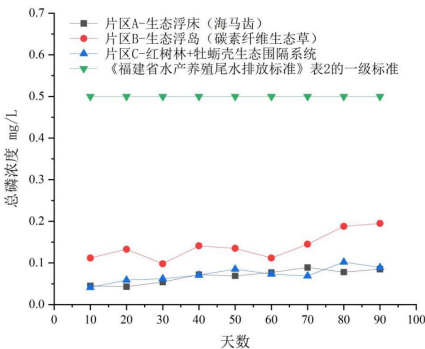


图1(b) 各试验区总磷监测因子的实测浓度变化

Fig. 1(b) Changes in the measured concentrations of total phosphorus monitoring factors in each experimental area

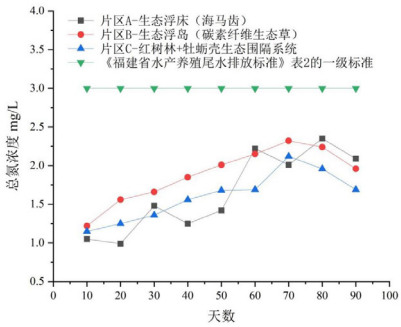


图1(c) 各试验区总氮监测因子的实测浓度变化

Fig. 1(c) Changes in measured concentrations of total nitrogen monitoring factors in each experimental area

(二) 不同类型生态净化技术对养殖尾水中特征污染物的净化效果

1. 总氮的净化作用分析

不同类型生态净化技术对养殖尾水的TN的净化效果如图2(a)及表1所示，红树林+牡蛎壳生态围隔系统去除率能达到12.88%~36.23%，均高于生态浮床(海马齿)及生态浮床(炭素纤维生态草)系统。但3种工艺技术对于总氮的去除效果较低，基本约处于20%的水平范围；主要原因可能是牡蛎壳结构能在其表面形成一层钙化的生物膜，此外其微孔结构提供了微生物(硝化、反硝化细菌)栖息地，牡蛎壳内的微生物可以通过其生物化学过程转化水中的氮，将无机氮化合物转化为氮气，从而减少了水体的总氮含量^[3]。而生态浮床(炭素纤维生态草)系统总氮TN去除效率较低，主要原因可能是人工炭素纤维生态草它由高比表面积的炭素纤维材料制成，能够为水中的微生物提供了极佳的附着环境，这些微生物在炭素纤维生物膜上形成稠密的生物膜，但人工炭素纤维生态草运行一段时间后，生物膜系统局部可能会形成堵塞，导致系统孔隙率变小，弱化了浮床、炭素纤维生态草及附着微生物各自独立及协同作用对氮的去除效果，从而影响了净化系统的运行^[4]。综上所述，TN在经过红树林+牡蛎壳生态围隔系统的红树林根系吸收转化、牡蛎壳吸附固持及微生物降解转化等作用后，比生态浮床(海马齿)及生态浮床(炭素纤维生态草)系统有更显著的去除效果。

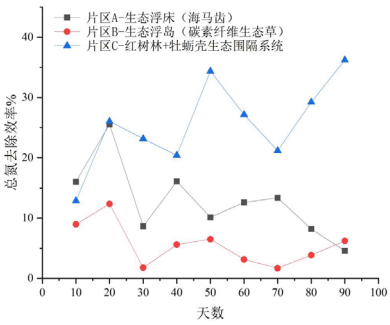


图2 各试验区总氮去除效果

Fig.2 Total nitrogen removal effect in each test area

2. 总磷的净化作用分析

如图3及表1所示，不同类型生态净化技术对养殖尾水的总磷去除率结果来看：红树林+牡蛎壳生态围隔系统与生态浮床

(海马齿)去除效果较为接近,去除率分别为57.24%~74.35%、53.85%~59.50%,但生态浮床(炭素纤维生态草)去除率仅为2.76%~51.52%;在生物净化系统中TP的降解主要通过基质吸附、微生物群落降解和植物根系吸收。但本文研究重点处理含盐的养殖尾水,主要技术重点是在于筛选一种净化含盐尾水的植物。已有研究表明^[12],红树林处理养殖不同盐度海水效果都很明显,其主要是通过红树植物通过其发达的通气根系(如支柱根、呼吸根)从沉积物孔隙水中吸收溶解性的磷酸盐,并将其转化为有机磷形式,固定在植物的根、茎、叶等组织中,达到净化水质的目的。同样研究表明^{[4][15]},海马齿净化盐度15尾水中的N、P元素效果优良,盐度为30的全海水下均能健康生长,适应性较强,可以从无根到有根的生长时间,只需要4~6 d,说明其适应性强,生命力顽强。因此海马齿通过其发达的水生根系,直接从水体中吸收溶解性的活性磷酸盐(PO_4^{3-}),并将其转运至茎、叶等部位,同化为自身的有机磷化合物。此外海马齿庞大的根系网络表面附着了大量的微生物(包括细菌、真菌、藻类等),形成生物膜。微生物群落将水体中的颗粒态有机磷、溶解性有机磷分解矿化,部分供自身利用,部分成为无机磷后被植物吸收或由聚磷菌固定。从而达到净化水质目的。

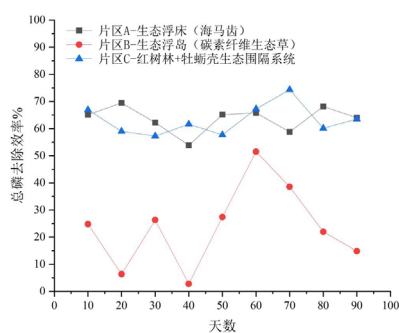


图3 各试验区总磷去除效果

Fig.3 Total phosphorus removal effect in each experimental area

3. COD_{Mn} 净化作用分析

COD去除率结果来看,如图4及表1所示:去除效果最优的为红树林+牡蛎壳生态围隔系统,能达到46.71%~65.46%,生态浮床(海马齿)为23.61%~54.20%,生态浮床(炭素纤维生态草)去除率仅为14.47%~29.62%。考虑养殖成本及早期设计的缺陷,龙海区紫泥镇甘文农场本身并没有底排污系统,且养殖种类又属于缢蛏,所以会养殖过程中会出现残饲和粪便沉积于池底,水体的COD处于较高水平。而红树林+牡蛎壳生态围隔系统、生态浮床(海马齿)、生态浮床(炭素纤维生态草)可以将水体中的残饲和粪便等固态有机物通过吸附等作用分离出来,同时利用微生物群落,将水体中大分子的有机物降解成小分子的有机物或者无机物的过程,可产生一定量的无机氮和无机磷,因此,该环节COD显现下降趋势^[16-17]。

三、结论

本文采用3中不同类型生态净化技术对集中连片海水水产养殖外排废水的污染物进行转化和降解,取得了较好的生态净化效果。红树林+牡蛎壳生态围隔系统去除效率优于生态浮床(海马齿)显著优于生态浮床(炭素纤维生态草)。其中红树林+牡蛎壳生态围隔系统对于总磷的去除率可达到57.24%~74.35%、总氮的去除率可达到12.88%~36.23%、 COD_{Mn} 的去除率可达到46.71%~65.46%。分析可得:生态浮床上附着的微生物作用是氮去除主要的归趋途径,红树林+牡蛎壳及生态浮床填料吸附是磷去除的主要归趋途径。综上可得,红树林+牡蛎壳生态围隔系统及生态浮床(海马齿)净化技术在沿海地区含盐水产养殖尾水生态修复应用中具有较好的应用潜力。

参考文献

- [1]刘梅,原居林,倪蒙,等. "三池两坝"多级组合工艺对内陆池塘养殖尾水的处理[J]. 环境工程技术学报, 2021, 11(1): 97-106. DOI: 10.12153/j.issn.1674-991X.20200153.
- [2]冯丽娟,肖耿峰,程香菊,等. 基于AQUATOX模型的集装箱养殖尾水净化塘生态系统模拟及调控预测[J]. 环境工程学报, 2022, 16(5): 1525-1536. DOI: 10.12030/j.cjee.202201082.
- [3]曾宪磊,魏宝成,刘兴国,等. 基于Ecopath模型的复合养殖池塘构建[J]. 水产学报, 2018, (5). DOI: 10.11964/jfc.20170410796
- [4]冀碧霞,黄建荣,李连春,等. 海马齿对海水养殖系统中氮、磷的移除效果研究[J]. 水生态学杂志, 2011, 32(05): 94-99. DOI: 10.15928/j.1674-3075.2011.05.012.
- [5]张力. 耐盐植物对含盐污水净化效果及生理生化响应[D]. 浙江海洋学院, 2013.
- [6]张海耿,崔正国,马绍赛,等. 人工湿地净化海水养殖外排水影响因素与效果实验研究[J]. 海洋环境科学, 2012, 31(01): 20-24+52.
- [7]WU Hailu, XU Kaiqin, HE Xiaojuan, et al. Removal of nitrogen by three plant species in hydroponic culture: Plant uptake and microbial degradation[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2016, 227(9): 1-11.
- [8]Zhang R, Qian X, Li H, et al. Selection of optimal river water quality improvement programs using QUAL2K: A case study of Taihu Lake Basin, China[J]. Science of The Total Environment, 2012, 431(none): 278-285. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.05.063.
- [9]朱文婷,刘植植,丁闯,等. 3种新型生态净化材料的脱氮效率及机理分析[J]. 环境工程, 2019, 37(06): 52-57+63. DOI: 10.13205/j.hjgc.201906011.
- [10]仇建标,陈琛,彭欣,等. 红树林人工湿地-养殖耦合系统构建与净化效果[J]. 浙江农业科学, 2019, 60(11): 2073-2077. DOI: 10.16178/j.issn.0528-9017.20191144.
- [11]虞丹君,罗海忠,徐志进,等. 不同红树处理海水养殖尾水效果初探[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(07): 271-274.
- [12]国家海洋环境监测中心. GB 17378.4-2007 海洋监测规范 第4部分: 海水分析[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [13]B N P A, A N T S, B V A T. Constructed Floating Wetlands: A review of research, design, operation and management aspects, and data meta-analysis[J]. Chemical Engineering Journal, 2017, 308: 1120-1132. DOI: 10.1016/j.cej.2016.09.140.
- [14]赵倩,庄林岚,盛芦,等. 潜流人工湿地中基质在污水净化中的作用机制与选择原理[J]. 环境工程, 2021, 039(009): 14-22.
- [15]张艳琳,范伟,蔡元保,等. 海马齿对不同比例淡水海水组培的生长和生理响应[J]. 西北植物学报, 2009, 29(06): 1240-1245.
- [16]宋颖,黄玉婷,葛川,等. 多介质土壤滤层系统(MSL)与潜流式人工湿地技术处理海水养殖废水的效能比较[J]. 环境科学, 2014(9): 7. DOI: 10.13227/j.hjkk.2014.09.026.
- [17]程果锋,刘晃,吴凡. 海水对虾养殖塘排放废水生态处理设计[J]. 渔业现代化, 2010, 37(05): 13-18.