



Open Access

引用格式: 贝伟烈, 蔡岩, 刘浩, 等. 海南文昌罗非鱼不同养殖模式商品鱼阶段水质特征分析 [J]. 海南大学学报 (自然科学版中英文), DOI: 10.65658/j.hndk.2026030601.

Citation: Bei Weilie, Cai Yan, Liu Hao, et al. Analysis of Water Quality Characteristics in Different Aquaculture Modes of Tilapia for Commercial Fish Stages in Wenchang, Hainan[J]. Natural Science of Hainan University, DOI: 10.65658/j.hndk.2026030601.

海南文昌罗非鱼不同养殖模式商品鱼 阶段水质特征分析

贝伟烈^{1,2,3}, 蔡岩^{1,2}, 刘浩², 韩从杰^{1,2}, 王佳文^{1,2}, 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. 海南省热带水生生物技术重点实验室, 海南 海口 570228; 3. 海南省海洋经济发展与资源保护研究院, 海南 海口 571126)

摘要: 为了了解海南罗非鱼养殖商品鱼阶段池塘水体的水质特征以期为养殖尾水处理提供指导建议, 本研究采集海南省文昌市罗非鱼主养区的三类主要养殖模式(低密度不换水 LNC、低密度换水 LC、高密度不换水 HNC)下各 7 口池塘的水样, 检测总氮(TN)、总磷(TP)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})和悬浮物(TSS)指标, 并开展水质评价。结果表明, 调查的 21 口池塘水质均超过《海南省养殖尾水排放标准》二级限值, 各指标污染严重程度依次为 TN>TP>COD_{Mn}>TSS。三种养殖模式中, HNC 的养殖水体污染水平高于其他两种模式。表层水和底层水水质指标均超过《海南省养殖尾水排放标准》二级限值, 底层水的 TSS 与 COD_{Mn} 显著高于表层水($P<0.05$), 而 TN 和 TP 在表、底层水体间无显著性差异。综上结果可见, 海南省文昌市罗非鱼三种养殖模式商品鱼阶段池塘水体的污染程度均较高, 氮磷为主要污染物, 池塘中表、底层水均需进行养殖尾水处理后方可达标排放。本研究为海南罗非鱼养殖尾水排放提供了数据资料, 也为尾水治理提供了理论依据。

关键词: 罗非鱼; 养殖尾水; 水质特征; 海南省

中图分类号: S949 文献标志码: A

DOI: 10.65658/j.hndk.2026030601 CSTR: 32403.14.hndk.2026030601

Analysis of Water Quality Characteristics in Different Aquaculture Modes of Tilapia for Commercial Fish Stages in Wenchang, Hainan

Bei Weilie^{1,2,3}, Cai Yan^{1,2}, Liu Hao², Han Congjie^{1,2}, Wang Jiawen^{1,2}, Wang Shifeng^{1,2}✉

(1. College of Marine Biology and Fisheries, Hainan University, Haikou, Hainan 570228; 2. Hainan Provincial Key Laboratory of Tropical Aquatic Biotechnology, Haikou, Hainan 570228; 3. Hainan Provincial Institute of Marine Economic Development and Resource Protection, Haikou, Hainan 571126)

Abstract: To clarify the water quality characteristics of pond water during the stage of tilapia (*Oreochromis*) reaching the harvestable size in Wenchang, Hainan and provide guidance for aquaculture tailwater treatment, this study collected water samples from 21 ponds (7 per model) under three main culture modes in the main tilapia farming area of Wenchang, Hainan: low-density non-water-exchange (LNC), low-density water-exchange (LC), and high-density non-water-exchange (HNC). Total nitrogen (TN), total phosphorus (TP),

Received: 2025-04-09; Revised: 2025-08-09; Accepted: 2026-03-19.

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

permanganate index (COD_{Mn}), and total suspended solids (TSS) were detected, and water quality assessment was performed. Results showed that water quality of all 21 ponds exceeded the Grade II limits of the 《Discharge standard of water from aquaculture》, with the pollution severity of indicators ranked as $\text{TN} > \text{TP} > \text{COD}_{\text{Mn}} > \text{TSS}$. Among the three modes, HNC had a higher water pollution level than the other two. Both surface and bottom water exceeded the Grade II limits; TSS and COD_{Mn} in bottom water were significantly higher than those in surface water ($P < 0.05$), while no significant differences in TN and TP were found between the two layers. In summary, pond water during the stage of tilapia reaching the harvestable size under all three modes in Wenchang, Hainan is heavily polluted, with nitrogen and phosphorus as the main pollutants. Both surface and bottom water require treatment to meet the discharge standards. This study provides data and a theoretical basis for tilapia aquaculture tailwater discharge and treatment in Hainan.

Keywords: Tilapia; Aquaculture tailwater; Water quality characteristics; Hainan province

0 引言

随着水产养殖技术不断和养殖密度持续增加,水产养殖行业排放的氮、磷等营养盐对环境的压力日益加剧。根据《第二次全国污染源普查公报》数据,2017年水产养殖业化学需氧量排放量为66.60万吨,总氮9.91万吨,总磷1.61万吨,相对于2007年,各项污染物的排放量及其在农业源污染中的占比均呈上升趋势,对养殖水体和外部水域环境构成更大压力^[1,2]。为此,生态环境部发布了《地方水产养殖业水污染物排放控制标准制订技术导则》^[3],全国各地也据此制定了相应的水产养殖尾水排放标准,要求养殖尾水需经处理达标后方可排放。然而,受地区差异、养殖品种及模式等因素影响,养殖尾水的水质特征存在显著差异。因此,依据水质特征选择合适的处理方式是实现养殖尾水高效处理的关键。

罗非鱼原产于非洲,属热带鱼类,俗称:非洲鲫鱼、非鲫等。我国最早引入的罗非鱼养殖品种是莫桑比克罗非鱼(学名: *Oreochromis Mossambicus*),现主要泛指 *Oreochromis* 属、*Sarotherodon* 属和 *Tilapia* 属三个属。由于其产量高、出肉率高等优点,是世界水产业重点发展的淡水养殖鱼类品种之一。海南省是我国罗非鱼养殖的第二大省,2024年产量约42.79万吨,占全省淡水养殖总产量88.45%^[4],养殖区域主要集中在文昌、琼海、定安等地,其中文昌市占海南省罗非鱼总产量的近50%,其养殖模式以池塘精养为主。据调查,文昌市罗非鱼养殖年亩产量普遍能达到4吨,部分高密度养殖池塘甚至可达8-9吨。高密度的精养模式大大增加了日常的饲料投喂量,大量残饵、粪便及代谢物等物质的产生使得池塘内水质易恶化,影响罗非鱼健康。养殖户调控池塘水质最为经济有效的操作就是换水,将池塘内富含营养物质的水直接排放到环境中,再补充新鲜水源。然而,由于海南省罗非鱼产业长期以来就存在着池塘布局不合理,进排水设施不完善的问题,加上近年来随着环保管理要求的加强,相关政策明令禁止养殖户直接外排养殖尾水,海南省罗非鱼养殖产业的急迫通过绿色转型升级,加快尾水治理工作推进从而推动产业可持续发展。

根据水源供应条件和养殖密度的不同,海南省文昌市罗非鱼养殖可分为高密度不换水(HNC)、低密度换水(LC)和低密度不换水(LNC)三种模式。不同养殖模式产生的尾水具有不同的水质特征,进而影响尾水处理工艺的选择。因此,本研究在海南省文昌市针对三种养殖模式商品鱼阶段池塘水体水质特征进行比较分析,以期海南省罗非鱼养殖尾水处理和排放精细化管理提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 实验设计 基于养殖区域水源供应条件和养殖密度的差异,本研究在海南省文昌市选取了具有代表性的罗非鱼池塘养殖地区和模式(表1),分别为昌洒镇的低密度不换水养殖模式(LNC)、冯坡镇的低密度换水养殖模式(LC)和潭牛镇的高密度不换水养殖模式(HNC)。在商品鱼阶段(即养殖罗非鱼已达到商

品规格并被加工厂列入收购计划),上述三种模式均会排放养殖尾水。然而,由于尾水排放时间的不确定性,难以批量采集到实际排放的尾水样本。鉴于此,本研究选择采集该阶段的池塘水体作为研究对象,对其进行测定和比较分析。

表 1 三个地区的罗非鱼养殖模式基本情况

Table 1 Basic situation of tilapia farming models in three regions

地区	采样时间	养殖模式	养殖条件
昌洒	2023年6月28日	低密度不换水(LNC)	养殖水源条件差,一般都依靠雨水补充池塘用水,养殖不换水。养殖密度为2000~3 000尾/亩
冯坡	2023年6月15日	低密度换水(LC)	水源条件较好,有换水条件。养殖密度为2000~4 000尾/亩
潭牛	2023年6月2日	高密度不换水(HNC)	养殖水源条件较差,基本不换水。养殖密度为4 000~7 000尾/亩

三种养殖模式各选取 7 个养殖场,每个养殖场选取 1 口罗非鱼已达到商品规格(1~1.6 斤)的池塘作为采样点,在池塘边向内延伸 4~5 米处采集水样,采样时间为上午 9~12 点,使用有机玻璃采水器采集池塘水体的表层水(水面下 30 cm 处)与底层水(池底上方 30 cm 处)的水样,此外,将相同体积的表层水和底层水混合后代表池塘的整体水样。

表 2 采样池塘基础信息表

Table 2 Basic Information of Sampling Ponds

序号	地区	经度	纬度	池塘面积(亩)	池塘水深(米)	养殖量(尾)	平均规格(斤/尾)
LC-1	冯坡	110.808 5	19.967 4	20	2.0	70 000	1.2
LC-2	冯坡	110.796 6	19.961 5	30	3.0	70 000	1.0
LC-3	冯坡	110.794 8	19.964 5	19	3.0	80 000	1.2
LC-4	冯坡	110.801 9	19.931 2	35	3.0	90 000	1.2
LC-5	冯坡	110.810 7	19.937 3	12	1.2	42 000	1.2
LC-6	冯坡	110.797 7	19.923 1	18	3.0	56 000	1.2
LC-7	冯坡	110.764 3	19.960 1	24	2.8	61 000	1.3
HNC-1	潭牛	110.777 4	19.698 1	6	2.5	30 000	1.3
HNC-2	潭牛	110.779 4	19.695 7	12	2.5	48 000	1.2
HNC-3	潭牛	110.773 1	19.701 8	10	3.0	50 000	1.2
HNC-4	潭牛	110.779 8	19.707 8	9	2.0	49 500	1.2
HNC-5	潭牛	110.783 4	19.707 8	7	1.8	42 000	1.3
HNC-6	潭牛	110.778 6	19.715 8	11	2.0	77 000	1.2
HNC-7	潭牛	110.750 6	19.689 9	9	2.5	54 000	1.2
LNC-1	昌洒	110.880 2	19.825 4	10	2.2	30 000	1.3
LNC-2	昌洒	110.917 6	19.840 7	18	2.2	36 000	1.4
LNC-3	昌洒	110.917 8	19.836 9	20	3.0	54 000	1.3
LNC-4	昌洒	110.920 1	19.837 0	15	1.8	37 500	1.3
LNC-5	昌洒	110.869 8	19.871 6	24	3.0	67 200	1.2
LNC-6	昌洒	110.874 6	19.862 0	20	2.2	46 000	1.3
LNC-7	昌洒	110.907 0	19.824 9	32	3.0	70 000	1.2

1.2 检测与评价方法

1.2.1 检测方法 水样的采集与保存参考 HJ91.1-2019《污水监测技术规范》的要求执行,水质指标检测参考海南省地方标准《水产养殖尾水排放要求》(DB 46/475-2023,后文简称“海南省地方标准”),用于测定总氮(TN)、总磷(TP)、高锰酸钾指数(COD_{Mn})的样品按 1:500 的比例添加浓硫酸,将水样 pH 值调节至 1~

2; 用于测定悬浮物(TSS)的样品采集后直接保存, 样品采集后均在 48h 内完成测定, 检测方法详见表 3。

表 3 水质指标测定方法

Table 3 Methods for Determining Water Quality Indicators

水质指标	测定方法
悬浮物	重量法(GB/T 11 901-1989)
总氮	碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(HJ 636—2012)
总磷	钼酸铵分光光度法(GB/T 11 893-1989)
高锰酸钾指数	酸性高锰酸钾法(GB/T 11 892-1989)

1.2.2 评价方法 本研究采用单项污染指数评价法计算各项水质指标的单项污染指数(公式 1), 采用综合污染指数评价法^[5] 计算罗非鱼养殖池塘的综合污染指数(公式 2)。

$$P_i = C_i / S_i \quad (1)$$

$$P = \sqrt{\frac{P_{\max}^2 + P_{\text{avg}}^2}{2}} \quad (2)$$

式中 P_i 为第 i 项因子的相对污染值; C_i 为第 i 项污染物的实测浓度值; S_i 为第 i 项污染物在海南省地方标准中的淡水二级限值。 P 为水质的综合污染指数, $P_{\max}$ 表示各指标 P_i 的最大值, P_{avg} 表示各指标 P_i 的平均值。根据综合污染指数的数据将养殖尾水的污染分为以下 5 个等级^[6-7], 分级标准见表 4。

表 4 养殖尾水水质分级标准

Table 4 Classification standards for water quality of aquaculture tailwater

等级	综合污染指数	污染程度	污染水平
1	$P_i \leq 0.5$	清洁	清洁
2	$0.5 < P_i \leq 1.0$	尚清洁	标准限量内
3	$1.0 < P_i \leq 2.0$	轻度污染	超出警戒水平
4	$2.0 < P_i \leq 3.0$	中度污染	超出警戒水平
5	$P_i > 3.0$	重度污染	超出警戒水平

1.3 数据分析 利用 IBM SPSS Statistics 26.0 软件, 采用单因素方差分析不同地区之间水质的差异, 采用成对样品 T 检验分析不同水层的水质差异, 以 $P < 0.05$ 作为差异性显著水平。

2 实验结果

2.1 罗非鱼商品鱼阶段养殖水体整体水质情况 本研究检测的 21 口罗非鱼养殖池塘的水质检测结果如表 5 所示。

表 5 罗非鱼商品鱼养殖水体水质达标情况

Table 5 Water Quality Standards for Adult Tilapia Farming

水质指标	平均值(mg/L)	单项污染指数		海南省地方标准限值(mg/L)		达标率	
		范围	平均值	一级	二级	一级	二级
TSS	81±43.12	0.26 ~ 1.67	0.90	≤45.0	≤90.0	10%	67%
TN	16.87±5.05	2.42 ~ 4.97	3.37	≤3.0	≤5.0	0%	0%
TP	1.73±2.38	0.07 ~ 10.52	2.16	≤0.4	≤0.8	14%	34%
COD _{Mn}	38.01±19.20	1.00 ~ 3.16	1.90	≤10.0	≤20.0	0%	2%

参考海南省地方标准, 采用单项判定法评估, 结果显示 21 口池塘的水质均超过该标准的二级标准;

其中,总氮、 COD_{Mn} 、总磷和悬浮物超标率分别为 100%、98%、67% 和 33%。参考表 4 的水质分级标准,海南省文昌市罗非鱼养殖尾水主要污染物为总氮(重度污染),其次为总磷(中度污染)和 COD_{Mn} (轻度污染),悬浮物则属于尚清洁,在标准限量内。

2.2 罗非鱼不同养殖模式养殖水体的水质差异 三种养殖模式的水质检测和污染指数评价结果详见表 6 和表 7。综合污染指数结果显示,高密度不换水养殖模式 HNC 的污染指数最高,平均值达到 4.85,属于重度污染,而低密度不换水养殖模式 LNC 和低密度换水养殖模式 LC 的综合污染指数平均值分别为 2.43 和 2.27,属于中度污染。综上,三种模式的水质污染水平均超出警戒水平。

表 6 罗非鱼商品鱼阶段不同养殖模式池塘水体的水质情况

Table 6 Water Quality of Different Regions in the Farming Water of Tilapia Adult Stage

养殖模式	TSS(mg/L)	TN(mg/L)	TP(mg/L)	COD_{Mn} (mg/L)
LNC	57.97±20.97 ^a	13.03±1.09 ^a	0.85±0.43 ^a	55.77±24.27 ^a
LC	96.93±46.55 ^b	13.96±1.40 ^a	0.83±0.70 ^a	26.32±3.35 ^b
HNC	88.18±48.55 ^{ab}	23.65±1.64 ^b	3.52±3.47 ^b	31.93±6.02 ^b

注:同列中标有不同小写字母者表示组间有显著性差异($P<0.05$),标有相同小写字母者表示组间无显著性差异($P<0.05$),下同。

Note: Means with different letters are significant differences ($P<0.05$), and means with the same letters are not significant differences, et sequentia.

表 7 不同养殖模式水质污染指数评价结果

Table 7 Evaluation results of water pollution index for different aquaculture modes

养殖模式	数值类型	单项污染指数				综合污染指数	评价等级
		TSS	TN	TP	COD_{Mn}		
LNC	范围	0.26 ~ 0.87	2.42 ~ 2.77	0.39 ~ 1.96	1.66 ~ 3.16	2.15 ~ 2.65	中度污染
	均值	0.64	2.61	1.07	2.79	2.43	
LC	范围	0.46 ~ 1.67	2.60 ~ 3.21	0.07 ~ 2.02	1.00 ~ 1.49	2.00 ~ 2.52	中度污染
	均值	1.08	2.79	1.04	1.32	2.27	
HNC	范围	0.55 ~ 1.39	4.27 ~ 4.97	0.71 ~ 10.52	1.37 ~ 2.17	3.33 ~ 8.12	重度污染
	均值	0.98	4.73	4.40	1.60	4.85	

三种罗非鱼养殖模式中,LC 水体悬浮物含量最高(96.93±46.55mg/L)显著高于 LNC(57.97±20.97 mg/L) ($P<0.05$)。LNC 水体 COD_{Mn} 含量最高(55.77±24.27mg/L),显著高于 LC 和 HNC 模式($P<0.05$),悬浮物和 COD_{Mn} 浓度分布情况详见图 1。

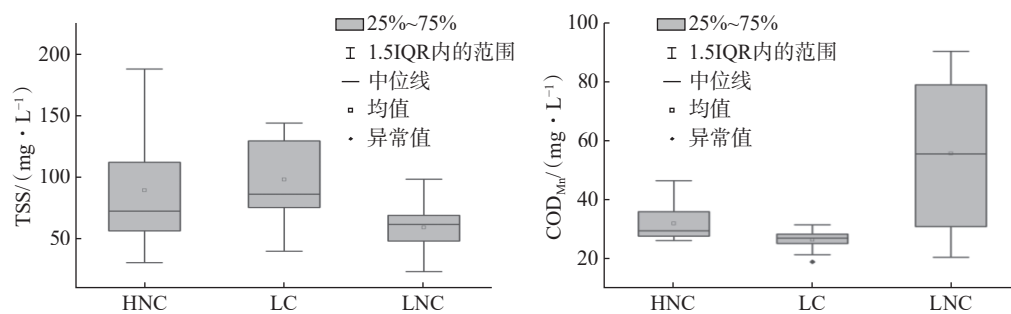


图 1 海南罗非鱼三种养殖模式的 TSS 和 COD_{Mn} 浓度分布

Fig. 1 Distribution of TSS and COD_{Mn} concentration in three aquaculture modes of Hainan tilapia

HNC 水体总氮、总磷含量最高(23.65±1.64mg/L 和 3.52±3.47mg/L),显著高于 LC 和 LNC 模式($P<0.05$),总氮和总磷的浓度分布情况详见图 2。

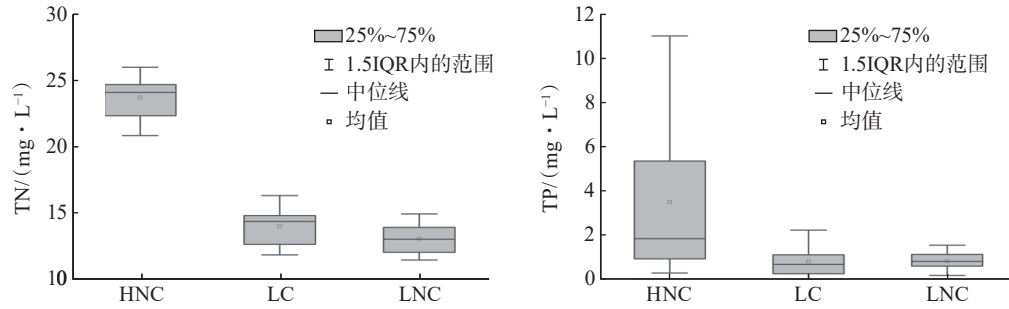


图2 海南罗非鱼三种养殖模式 TN 和 TP 的浓度分布

Fig. 2 Concentration distribution of TN and TP in three aquaculture modes of Hainan tilapia

2.3 罗非鱼不同养殖模式池塘表底层水质差异 三种罗非鱼养殖模式表底层水体的水质检测结果如图3、4所示, LNC模式的底层水 TSS 和 TP 含量均高于表层水, 但无显著性差异($P>0.05$), 而 TN 和 COD_{Mn} 的含量表现为表层显著性高于底层水($P<0.05$)。在 LC 和 HNC 两种模式中, 底层水的 TSS 含量显著高于表层水($P<0.05$), 而底层水的 COD_{Mn} 含量显著低于表层水($P<0.05$), TN、TP 的表底层水含量之间无显著性差异。

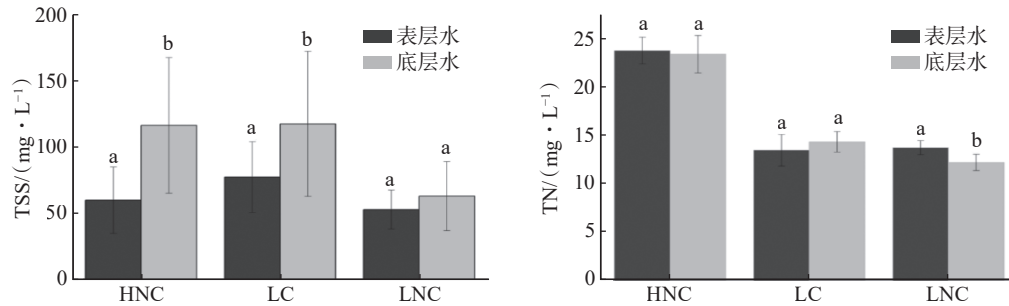
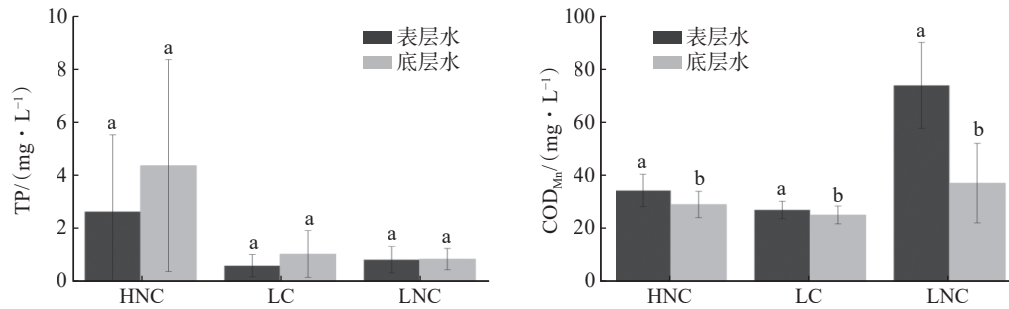


图3 海南罗非鱼三种养殖模式的表底层水之间 TSS 和 TN 浓度差异

Fig. 3 Differences in TSS and TN concentrations between the surface and bottom water of three aquaculture modes of Hainan tilapia

图4 海南罗非鱼三种养殖模式的表底层水之间 TP 和 COD_{Mn} 浓度差异Fig. 4 Differences in TP and COD_{Mn} concentrations between the surface and bottom water of three aquaculture modes of Hainan tilapia

根据综合污染指数评估结果显示, LNC 模式的表层水的污染指数高于底层水, 而 LC 和 HNC 模式呈相反趋势。参考表4的水质分类标准, LNC 底层和 LC 的表、底层水处于中度污染水平, LNC 表层和 HNC 表、底层水处于重度污染水平。所有鱼塘的表、底层水检查结果均超过海南省地方标准的二级限值。

3 讨论

3.1 罗非鱼商品鱼阶段养殖水体水质情况分析 本研究检测的 21 口罗非鱼塘水体中污染水平均处于中度污染和重度污染, 各指标单项污染指数 $P_{\text{TN}} > P_{\text{TP}} > P_{\text{COD}_{\text{Mn}}} > P_{\text{TSS}}$, 除 P_{TP} 外, 其它因子的排序与连云港市^[8]

淡水池塘研究结果一致,表明 TN 是首要污染因子,而 P_{TP} 受池塘扰动影响较大,因此稳定性较差。与国内其他地区相比,本研究污染物浓度高于湖北省^[9]、湖南省^[10]、山东省^[11]、江苏省无锡市^[12] 及华南某地市^[13] 已报道的淡水养殖尾水浓度。其中氮、磷的污染尤为突出,一方面是由于鱼类的饲料中氮、磷的添加通常高于其他品种^[14],另一方面海南省罗非鱼生产过程换水频次少或不换水,污染物在养殖周期内持续累积,并于出鱼时集中排放。值得关注的是,氮、磷的富集会导导致水体氮磷比(N:P)偏离适宜范围,进而诱发蓝藻等有害藻类增殖^[15],当氮、磷超过池塘的承载能力,将进一步恶化水质^[16],若此类尾水未经有效处理直接排放,将进一步加剧受纳水体的富营养化风险,威胁区域水生态安全。此外,高氮负荷的水体^[17] 还会增加 N_2O 的排放,加剧全球变暖的趋势。

表 8 不同水层水质污染指数评价结果

Table 8 Evaluation results of water quality pollution index for different water layers

养殖模式	水层	综合污染指数			评价等级
		范围	标准差	平均值	
LNC	表层水	2.12 ~ 3.51	0.50	3.03	重度污染
	底层水	1.80 ~ 2.39	0.21	2.10	中度污染
LC	表层水	1.91 ~ 2.54	0.24	2.16	中度污染
	底层水	1.95 ~ 2.62	0.25	2.37	中度污染
HNC	表层水	3.41 ~ 8.14	1.68	4.41	重度污染
	底层水	3.25 ~ 10.52	2.83	5.44	重度污染

表 9 不同地区淡水养殖尾水的污染物浓度

Table 9 Pollutant concentrations in freshwater aquaculture effluent from different regions

地区	TSS(mg/L)	TN(mg/L)	TP(mg/L)	COD _{Mn} (mg/L)	参考文献
湖北省	40.13	2.05	0.30	6.53	[9]
湖南省	≤50	/	/	≤15	[10]
山东省	/	3.49	0.48	/	[11]
江苏省无锡市	52	2.79	0.23	10.47	[12]
华南某地市	/	2.57	0.33	8.2	[13]
海南省文昌市	81	16.87	1.73	38.01	本研究

梁利权^[18] 在太湖流域监测四大家鱼混养系统发现,其最终产量与海南罗非鱼养殖产量相当,为 1 083 ~ 1 555 kg/亩;且渔获期尾水总氮浓度为 4.45 ~ 23.50 mg/L,超标率>90%;与本研究数据相近,但该区域 TP 与 COD_{Mn} 达标率>90%,整体浓度低于海南罗非鱼养殖系统。Liu^[19] 等研究表明,鲈鱼、鳊鱼等肉食性鱼类对饲料和水体中的氮磷利用率较低,其污染物排放系数高于草鱼、鲢鱼等植/滤食性鱼类,滤食性的鲢、鳙对富营养化水体中的氮磷和藻类有良好的去除效果^[20],而罗非鱼等杂食性鱼类排污系数则处于中游。值得注意的是,凡纳滨对虾^[14] 在对饲料中氮磷的利用率可达到 39% 和 35%,显著高于鱼类的利用率。进一步佐证养殖品种类型与生物代谢特性可能是主导水体污染物特征及区域差异性的核心因素。

3.2 罗非鱼不同养殖模式商品鱼阶段养殖水体的水质差异分析 本研究采用了综合污染指数评价法对三种罗非鱼养殖模式的商品鱼阶段水体进行评估,结果表明综合污染指数从高到低依次为 HNC、LNC 和 LC,分别为 4.85、2.43 和 2.27, HNC 模式达重度污染,其余两种模式为中度污染,说明水体污染程度受养殖区域、养殖模式等因素影响^[21]。

HNC 模式的污染严重主要是由于总氮、总磷含量高,显著高于其余两种模式,这与其养殖密度远高于 LNC 与 LC 模式密切相关。相关研究显示,海南罗非鱼养殖池塘系统中的 89% ~ 93% 的 N 和 91% ~ 94% 的 P 来源于饲料投喂^[22]。HNC 模式因高密度养殖依赖大量饲料投喂,加之鱼类对饲料中氮、

磷的利用率较低,分别为 10%~49% 和 17%~40%^[14],导致养殖水体中 N、P 含量显著升高,其余两种模式因密度相近,总氮、总磷无显著性差异。而周玲^[23]曾发现海南罗非鱼在养殖后期时,换水养殖模式总氮与总磷明显低于不换水的养殖模式,但本研究中 LC 与 LNC 污染水平趋同,可能与近年环保政策收紧致换水频次减少有关。

COD_{Mn} 在三个模式的浓度排序为 LNC>HNC>LC, LNC 显著高于其余两种模式,而悬浮物浓度排序与 COD_{Mn} 相反,两者的含量呈负相关趋势,该结果与佛山淡水池塘的研究结果一致^[24]。郭赣林等^[25]在淡水鱼塘系统中的研究结果表明,浮游植物占浮游生物量 94.22%,故悬浮物含量过低反应池塘中浮游植物生物量少,导致池塘对有机物的净化能力有限。这一发现强调养殖管理中藻类调控的核心价值——维持适宜藻类丰度可有效抑制 COD_{Mn} 累积,减轻尾水处理负荷。

3.3 罗非鱼不同养殖模式商品鱼阶段养殖水体表底层的水质差异分析 本研究结果发现,三种养殖模式在 TSS 和 COD_{Mn} 的表底层水质差异的趋势基本相同,TSS 均是表层水低于底层水,其中 LC 和 HNC 模式差异显著。主要原因是悬浮物在重力作用下自然沉淀。LNC 的 TSS 表底层含量差异最小则是因其悬浮物浓度低致使沉降速率慢的结果^[26]。相反,COD_{Mn} 均呈现表层水显著高于底层水($P<0.05$),COD_{Mn} 表层水含量高主要由于是本研究采样时间中在白天上午至中午的时间段,浮游生物因趋光性富集于表层水。隋聚艳^[27]等研究也表明在环境水体中有机碳和菌类的含量在垂直分布上均呈现出随深度增加而递减的趋势。梁利权^[18]的研究还发现在排放池塘底部 20~30cm 的养殖尾水时各项指标骤升。此现象在海南省罗非鱼养殖尾水排放和污染治理时趋势应当一致,因此在治理时还需额外关注。

TP 分布均表现为底层水含量均高于表层水,相关研究表明,养殖系统中总磷大部分被底泥吸附或金属离子螯合形成不溶性的沉淀物。在虾塘中发现系统中的磷最终有 84% 底泥的形式存在^[28]。在鱼类养殖池塘中,也有 76~80% 的磷通过底泥沉积^[29]。而罗非鱼封闭的池塘系中有 54.24~67.51% 的总磷以底泥沉积的形式存在^[23],其释放受底泥上覆水的流速、水深和水质变化影响^[30]。正常情况下,溶解态的磷因增氧机促进上下层水体充分交换,使得表底层差异不大。但底泥受到扰动时,会先释放磷到底层水。此外,池塘有机质和铁结合态磷的含量也会促进底泥中磷的释放^[15]。三种模式中 HNC 模式的表底层,差值最大主要是由于其养殖密度高,总磷本底值更高和鱼群对塘底的搅动更大。

根据污染指数评估结果显示,三种养殖模式的表底层水均处于中度污染到重度污染水平因此,区别于其他省市可能仅需处理底层水的情况,海南罗非鱼商品鱼阶段的表、底层水均需经过处理后方可达标排放。

4 结 论

本研究对海南省罗非鱼养殖尾水排放集中期的商品鱼阶段的养殖水体进行检测,21 口鱼塘的样品均超过海南省地方标准二级限值。其中 TN、TP 和 COD_{Mn} 单项污染指数依次为 3.37, 2.16 和 1.90, 污染水平高于其他省市的淡水养殖。通过对比海南省三个典型的养殖模式发现,高密度养殖的 HNC 模式水体中的 TN、TP 显著高于其余两个密度较低的模式。COD_{Mn} 则受养殖密度影响较小,主要呈现出与悬浮物浓度呈负相关的影响,判断主要是受养殖水体中浮游生物的影响较大。本研究采集的海南省文昌市罗非鱼商品鱼阶段的表、底层水样品均未能达到海南省地方标准,需处理后方可达标排放。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国环境保护部,中华人民共和国国家统计局,中华人民共和国农业部. 第一次全国污染源普查公报 [N]. 人民日报, 2010-02-10(016).
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, National Bureau of Statistics of the People's Republic of China, Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. First national pollution source census report[N]. People's Daily, 2010-02-10(016). (查阅网上资料,未找到本条文献英文翻译,请确认)
- [2] 中华人民共和国环境保护部. 第二次全国污染源普查公报 [J]. 环境保护, 2020, 48(18): 8-10. (查阅网上资料,未找到本贝伟烈等. 海南文昌罗非鱼不同养殖模式商品鱼阶段水质特征分析
Natural Science of Hainan University (ISSN 1004-1729)

条文献作者信息, 请确认)

- Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. The second national pollution source census bulletin[J]. Environmental Protection, 2020, 48(18): 8–10.
- [3] HJ 1217—2023 地方水产养殖业水污染物排放控制标准制订技术导则 [S].
HJ 1217—2023 Technical guideline for the development of local discharge and control standards of water pollutants for aquaculture[S].
- [4] 农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 2025 中国渔业统计年鉴 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2025: 33.
Bureau of Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. 2025 China Fishery Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2025: 33.
- [5] 刘太胜, 杨波, 何宁, 等. 茂名市海水养殖尾水污染综合评价研究 [J]. 生态科学, 2021, 40(4): 195–201.
LIU T S, YANG B, HE N, et al. Assessment on the pollutants of mariculture wastewater in Maoming City[J]. *Ecological Science*, 2021, 40(4): 195–201.
- [6] NY/T 396—2000 农用水源环境质量监测技术规范 [S].
NY/T 396—2000 Procedural regulations regarding the environment quality monitoring of water for agricultural use[S].
- [7] 刘乾甫, 赖子尼, 杨婉玲, 等. 珠三角地区密养淡水鱼塘水质状况分析与评价 [J]. 南方水产科学, 2014, 10(6): 36–43.
LIU Q F, LAI Z N, YANG W L, et al. Assessment of water quality of intensive ponds in the Pearl River Delta region[J]. *South China Fisheries Science*, 2014, 10(6): 36–43.
- [8] 王政委, 于飞, 杨程, 等. 连云港地区养殖池塘水质监测与评价 [J]. 中国农学通报, 2025, 41(28): 155–164.
WANG Z W, YU F, YANG C, et al. Water quality monitoring and evaluation of aquaculture ponds in Lianyungang Area[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2025, 41(28): 155–164.
- [9] 王琪, 徐光志, 孙刚, 等. 湖北省水产养殖水质现状及尾水排放管控标准研究 [J]. 环境科技, 2023, 36(5): 46–51, 79.
WANG Q, XU G Z, SUN G, et al. Research on the situation of aquaculture water quality and tailwater discharge management standard in Hubei Province[J]. *Environmental Science and Technology*, 2023, 36(5): 46–51, 79.
- [10] 钟宇, 许友泽, 谢丽霞, 等. 湖南省水产养殖尾水污染物分析及氮磷排放量估算研究 [J]. 湘潭大学学报(自然科学版), 2020, 42(1): 59–68.
ZHONG Y, XU Y Z, XIE L X, et al. Analysis and estimation of nitrogen and phosphorus discharge amount in aquaculture tail water in Hunan Province[J]. *Journal of Xiangtan University (Natural Science Edition)*, 2020, 42(1): 59–68.
- [11] 马国红, 李壮, 张明磊, 等. 山东省淡水池塘养殖尾水现状调查与分析 [J]. 山东师范大学学报(自然科学版), 2022, 37(4): 355–361.
MA G H, LI Z, ZHANG M L, et al. Investigation and analysis of the quality of freshwater pond aquaculture wastewater in Shandong[J]. *Journal of Shandong Normal University (Natural Science)*, 2022, 37(4): 355–361.
- [12] 刘颖, 殷文健, 何俊, 等. 无锡地区水产养殖尾水排放达标情况分析 [J]. 科学养鱼, 2022(8): 83. doi:10.14184/j.cnki.issn1004-843x.2022.08.007.
Liu Y, Yin W J, He J, et al. Analysis of the compliance of aquaculture tailwater discharge in Wuxi Area[J]. *Scientific Fish Farming*, 2022(8): 83. doi:10.14184/j.cnki.issn1004-843x.2022.08.007.(查阅网上资料, 未找到本条文献英文翻译, 请确认)
- [13] 陈亮东, 江达均, 关歆, 等. 华南地区尾水治理设施养殖场水质综合评价 [J]. 淡水渔业, 2023, 53(4): 106–112.
CHEN L D, JIANG D J, GUAN X, et al. Comprehensive water quality evaluation of the aquaculture wastewater treatment system in South China[J]. *Freshwater Fisheries*, 2023, 53(4): 106–112.
- [14] GAO J Q, FU Y A, LU K X, et al. Contaminated characteristics variation in different aquaculture modes: a case study in northern China[J]. *Water*, 2025, 17(2): 200.
- [15] BAI D, LI X W, LIU Z H, et al. Nitrogen and phosphorus turnover and coupling in ponds with different aquaculture species[J].

- Aquaculture*, 2023, 563: 738997.
- [16] LI K, JIANG R T, QIU J Q, et al. How to control pollution from tailwater in large scale aquaculture in China: a review[J]. *Aquaculture*, 2024, 590: 741085.
- [17] DENG M, YEERKEN S, WANG Y R, et al. Greenhouse gases emissions from aquaculture ponds: different emission patterns and key microbial processes affected by increased nitrogen loading[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 926: 172108.
- [18] 梁利权. 太湖流域高密度水产养殖污染排放特征及其环境影响研究 [D]. 上海: 华东理工大学, 2023. doi:10.27148/d.cnki.ghagu.2023.000178.
- Liang L Q. Study on pollution emission characteristics and environmental risk of high-density aquaculture in Taihu Lake Basin[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2023. doi:10.27148/d.cnki.ghagu.2023.000178.
- [19] LIU X G, SHAO Z Y, CHENG G F, et al. Ecological engineering in pond aquaculture: a review from the whole-process perspective in China[J]. *Reviews in Aquaculture*, 2021, 13(2): 1060–1076.
- [20] 司楠, 李文红, 程光平, 等. 不同鲢鳙配比对池塘浮游植物群落结构特征及水质的影响 [J]. *扬州大学学报(农业与生命科学版)*, 2024, 45(1): 114–122.
- SI N, LI W H, CHENG G P, et al. Effects of different proportions of silver carp and bighead carp on phytoplankton community structure and water quality in ponds[J]. *Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Science Edition)*, 2024, 45(1): 114–122.
- [21] 朱泽伟. 长三角地区水产养殖尾水污染特征及处理效果 [J]. *水产科学*, 2025, 44(2): 284–294.
- ZHU Z W. Pollution characteristics and treatment effects of aquaculture wastewater in the core area of Changjiang River Delta[J]. *Fisheries Science*, 2025, 44(2): 284–294.
- [22] 钟全福. 罗非鱼为主多品种混养池塘氮磷收支 [J]. *广东海洋大学学报*, 2019, 39(6): 48–53.
- ZHONG Q F. The nitrogen and phosphorus budgets in polyculture ponds of tilapia as the main species[J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2019, 39(6): 48–53.
- [23] 周玲. 两种罗非鱼精养模式的氮、磷收支研究 [D]. 湛江: 广东海洋大学, 2010. doi:10.7666/d.y1804248.
- Zhou L. Study on nitrogen and phosphorus budget of intensive tilapia ponds in two culture models[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2010. doi:10.7666/d.y1804248.
- [24] 杨婉玲, 赖子尼, 刘乾甫, 等. 不同养殖品种池塘化学耗氧量(COD_{Mn})变化趋势及环境影响因素 [J]. *广东农业科学*, 2014, 41(8): 161–165.
- YANG W L, LAI Z N, LIU Q F, et al. Changing trend of chemical oxygen demand (COD_{Mn}) in different breeding pond and its influence factors[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2014, 41(8): 161–165.
- [25] 郭赣林, 赵文. 淡水鱼池生态系统的悬浮物结构及有机碳库储量 [J]. *大连水产学院学报*, 2006, 21(2): 127–130.
- GUO G L, ZHAO W. The seston structure and storage of organic carbon pools in freshwater fish ponds[J]. *Journal of Dalian Fisheries University*, 2006, 21(2): 127–130.
- [26] 向军, 逢勇, 李一平, 等. 浅水湖泊水体中不同颗粒悬浮物静沉降规律研究 [J]. *水科学进展*, 2008, 19(1): 111–115.
- XIANG J, PANG Y, LI Y P, et al. Hydrostatic settling suspended matter of large shallow lake[J]. *Advances in Water Science*, 2008, 19(1): 111–115.
- [27] 隋聚艳, 李丹丹, 肖海红, 等. 三峡库区水体溶解性有机物和颗粒物垂直分布特征及来源分析 [J]. *中国农村水利水电*, 2020(12): 122–126, 133.
- SUI J Y, LI D D, XIAO H H, et al. Vertical variation and sources of dissolved organic matter and particulate matter in waters Three Gorges Reservoir[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2020(12): 122–126, 133.
- [28] FUNGE-SMITH S J, BRIGGS M R P. Nutrient budgets in intensive shrimp ponds: implications for sustainability[J]. *Aquaculture*, 1998, 164(1/2/3/4): 117–133.
- [29] 孙云飞, 王芳, 刘峰, 等. 草鱼与鲢、鲤不同混养模式系统的氮磷收支 [J]. *中国水产科学*, 2015, 22(3): 450–459.
- SUN Y F, WANG F, LIU F, et al. Nitrogen and phosphorus budgets in grass carp, silver carp, and common carp culture

systems[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2015, 22(3): 450–459.

[30] 李君. 杭州市运河水系氮磷污染及底泥磷释放水动力学研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2006.

Li J. Research on nitrogen and phosphorus pollution of the great canal in Hangzhou City and hydrodynamics of phosphorus release from the sediments[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.

作者贡献声明

本研究的所有作者均对成果做出了实质性贡献: 贝伟烈、蔡岩与王世锋共同负责研究构思与实验设计; 贝伟烈、韩从杰及王佳文承担数据采集、处理与实验实施; 贝伟烈与刘浩完成数据分析、可视化及结果解读; 贝伟烈主导论文初稿撰写、修订与语言润色; 王世锋提供研究经费、实验设备及关键资源; 王世锋和蔡岩对研究全程进行学术指导与方向把控; 王世锋与蔡岩对论文终稿提出核心修改意见并参与逻辑调整。

利益冲突声明

作者声明, 其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。

AI 使用声明

本文未使用 Deepseek V3.1 对论文内容表述进行润色, 使用豆包生成论文图片摘要。”

伦理声明

不适用: 本文不涉及人类或动物的生物学研究。

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/Acknowledgements

本文得到海南省重点研发项目(ZDYF2021XDNY276)支持。

This work was supported by the Key Research and Development Project of Hainan Province (ZDYF2021XDNY276)

作者简介

贝伟烈(1994—), 男, 籍贯广东汕头人, 海南大学渔业发展专业, 2021 级硕士研究生, 现任海南省海洋经济发展与资源保护研究院专业技术岗, 研究方向为水产养殖尾水治理、渔业产业经济。E-mail: 18320367211@163.com。

蔡岩(1978—), 女, 正高级实验师, 本科毕业于厦门大学海洋生物专业, 硕士毕业于美国 Texas A&M 大学野生动物与渔业专业, 博士毕业于海南大学水生生物专业。曾在厦门大学环境科学学院任教, 为海南省高层次人才、中国生态学会微生物生态专业委员会会员。主要从事热带水生生物健康养殖与病害控制研究, 包括(1)鱼类免疫增强剂的开发利用, 如中草药、益生元、益生菌; (2)鱼类细菌性疾病的防治: 鱼类细菌性病原的分离及鉴定、细菌性病原致病机制和细菌性疾病的防治方法; (3)鱼类营养代谢类疾病的致病机理及防治方法等。承担国家级课题 1 项、省部级课题 2 项; 发表 SCI 论文 20 余篇, 出版学术著作 1 部。

刘浩(1996—), 男, 目前在海南省海洋经济发展与资源保护研究院工作。2014 年起在广东海洋大学学习, 先后获得农业资源与环境学士学位、水产硕士学位, 水产博士学位。其研究聚焦于水产动物营养与饲料, 特别是在石斑鱼、多鳞鳕等经济鱼类的精准营养需求、新型蛋白源(如低棉酚棉籽粕)开发应用、以及黄曲霉毒素 B1 毒性机制与营养干预(如水飞蓟宾的保护作用)等领域有深入研究。作为学术骨干或主持人参与了多项国家级、省部级科研项目, 并取得了丰硕的学术成果, 在硕士和博士期间以第一作者身份累计发表了 11 篇学术论文, 其中多篇发表于《Aquaculture》、《Animal Nutrition》等中科院一区 TOP 期刊。在学期间表现优异, 曾荣获 2024 年博士研究生国家奖学金、多次获得一等学业奖学金, 其硕士毕业论文被评为校级优秀硕士论文, 并在第十二届世界华人水产鱼虾营养学术研讨会上荣获“研究生论坛优秀报告奖”。

韩从杰(1996—),男,海南大学水产专业 2025 级博士研究生,研究方向:热带水产动物健康养殖与疾病控制。

王佳文(1999—),男,青岛农业大学海洋资源与环境专业本科生,海南大学 2021 级水产养殖专业硕士,研究方向:水产动物健康养殖与病害防控,所获奖项:海南大学优秀研究生干部。

王世锋(1977—),男,汉族,河北沧州人,厦门大学海洋生物学博士,海南大学水产养殖教授,博士生导师,入选海南省拔尖人才,中国畜牧兽医学会动物微生态学分会第六届理事,海南文昌东风螺科技小院首席专家,海南省科技特派员等。主讲本科生《养殖水化学》和《养殖水化学实验》课程。研究方向为水产微生物生态与健康养殖,主要利用微生物学、免疫学等原理和方法技术等,开展水产动物疾病的诊断、水产动物体内外微生物生态及其调控技术研究、微生物制剂和中草药等免疫增强剂的研发与应用、生态养殖模式构建等。主持国家自然科学基金、海南省重点研发专项、海南省自然科学基金创新团队、横向项目等 20 余项,发表论文 110 余篇,其中以第一作者或通讯作者在《Aquaculture》、《Fish & Shellfish Immunology》、《Aquaculture Reports》、《Probiotics and Antimicrobial Proteins》等期刊发表论文 40 余篇;主编或参编著作 6 部;获海南省科技进步奖一等奖 1 项(第三完成人),海南省科技进步奖三等奖 1 项(第三完成人)。E-mail: shifeng_15@163.com。

(责任编辑:王玖琪)



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.

贝伟烈等. 海南文昌罗非鱼不同养殖模式商品鱼阶段水质特征分析

Natural Science of Hainan University (ISSN 1004-1729)

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