

多营养层次养殖的海水池塘水体理化因子变化与富营养状况评价

方民杰

(福建省水产研究所,福建 厦门 361013)

摘要:2020年10月至2021年4月,在漳浦县佛昙湾垦区对“鱼-虾-贝”多营养层次养殖的海水池塘水体进行采样分析。研究结果显示,养殖过程中,各池塘水温变动范围为17.8~25.5℃;盐度变动范围为33.1~35.2,偏高且较为稳定;pH值变动范围为7.94~9.46,先下降后趋稳;溶解氧变动范围为7.46~10.43 mg/L,水体溶解氧充足;化学需氧量变动范围为0.57~4.57 mg/L,总体呈上升趋势。无机氮含量变动范围为0.03~0.18 mg/L,均处于低值;活性磷酸盐含量变动范围为0.009~0.208 mg/L,在养殖后期剧增;氮磷比变动范围为0.68~17.22,呈先升后剧降趋势。养殖水体营养状况从初期的贫营养状态演变为后期的氮限制潜在性富营养化。

关键词:海洋化学;多营养层次养殖;海水池塘;水体理化因子;水体富营养状况;评价

DOI: 10.3969/J.ISSN.2095-4972.2023.01.010

中图分类号:P734

文献标识码:A

文章编号:2095-4972(2023)01-0085-08

多营养层次生态养殖(IMTA)模式是一种可持续发展的水产养殖理念^[1],一直受到国内外大力倡导,很多国家视其为未来水产养殖发展的重要方向^[2],并进行广泛实践,在浅海的“鱼-贝-藻”、“鱼-贝-藻-参”和陆基“虾-藻”、“虾-鱼-贝-蟹”等多种多营养层次综合养殖模式等方面取得积极效果^[1],并评估了养殖容量,研究养殖生物的生长和营养物质的利用^[3-5]。我国水产养殖历史悠久,长期以来沿海地区建设大量的围垦区,形成规模庞大的养殖池塘。海水池塘养殖为沿海农村经济社会的发展、保障水产品有效供给等方面做出突出贡献,但也存在基础设施薄弱、池塘老化等问题。池塘养殖尾水未经处理直接排放成为近岸海区氮磷的来源之一^[6],如何优化养殖模式、治理养殖尾水是当前海水养殖业的一项重要任务。

在长期水产养殖科研和生产实践的基础上,福建省漳浦县佛昙湾垦区探索出适宜本地条件的海水池塘“鱼-虾-贝”多营养层次养殖模式。该养殖模式利用鱼类摄食病虾阻断疾病传播、浮游植物吸收水体中营养盐进行生长繁殖、贝类滤食水体中的有机碎屑和浮游植物调节水质的特点^[7],建立池塘生态

健康养殖模式。其中,养殖虾类主要有日本囊对虾(*Marsupenaeus japonicus*)、凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*),贝类主要为菲律宾蛤仔(*Ruditapes philippinarum*),鱼类主要有菊黄东方鲀(*Takifugu flavidus*)、双斑东方鲀(*T. bimaculatus*)、黄鳍鲷(*Acanthopagrus latus*)、褐篮子鱼(*Siganus fuscescens*)等。养殖生物的成活率比单养高出40%以上,经济效益显著^[8]。一般每年养殖2茬,9—10月至次年5—7月为第一茬,养殖东方鲀、褐篮子鱼、日本囊对虾、菲律宾蛤仔;5—7月至9—10月为第二茬,养殖东方鲀、黄鳍鲷、凡纳滨对虾。池塘养殖尾水大多未经处理直排入海。2017年6月佛昙湾及附近海域发生链状裸甲藻(*Gymnodinium catenatum*)赤潮,造成食用贻贝中毒事件^[9],而通常认为赤潮的发生与海域富营养化有关^[10-11]。

为了掌握多营养层次养殖的海水池塘水体环境变动情况,并为池塘多营养层次养殖模式的优化、养殖尾水的治理提供数据支撑和科学依据,本研究于2020年10月、2021年1月和4月,即“鱼-虾-贝”养殖初、中、后期,采集池塘水样进行检测,分析养殖水体理化因子变化规律和水体营养水平状况。

收稿日期:2021-09-03

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2020YFD0900802);福建省种业创新与产业化工程资助项目(2017FJSCZY03)

作者简介:方民杰(1970—),男,高级工程师;E-mail: fmjxm@aliyun.com

1 材料与方 法

1.1 池塘基本情况

本研究池塘位于福建省漳浦县佛昙湾垦区,池塘条件与垦区其他“鱼-虾-贝”养殖池塘相似。共有 3 口池塘,编号为 1、2、3 号,面积分别为 3.0、1.3、2.0 hm^2 。以闸门外进水为对照点,编号为 4 号。池塘开挖环沟,中间形成平整的埕地,埕地上面铺沙。养殖期间,在正常水位时,环沟水深 2.5 m,埕地高于环沟底部 1.5 m;埕地上面构筑贝垄,垄宽 4~5 m,高 0.3 m,贝垄面积约占池塘面积的 15%,用于养殖菲律宾蛤仔。每口池塘各有 1 个进排水闸门,利用潮水涨落进行换水,池内均配备水车式增氧机。

1.2 养殖过程

2020 年 9—10 月对 3 口池塘进行清淤、晒池、消毒,之后,池塘进水并肥水,2020 年 10 月 22—23 日投放菊黄东方鲀大规格苗种和日本囊对虾苗,12 月 31 日投放菲律宾蛤仔大规格苗种。3 口池塘投苗密度基本一致,其中菊黄东方鲀苗约为 1 500 尾/ hm^2 、日本囊对虾苗约为 36 万尾/ hm^2 、菲律宾蛤仔苗约为 60

万个/ hm^2 。鱼虾放苗后的 30 d 内只进水,以后根据天气、水色、水温、投饵等情况适当换水。冬季低温期,一般每 3~5 d 换水 10%,春季水温回升后,每 2~3 d 换水 20%。养殖全程机械增氧。

饲料投喂量、投喂次数根据养殖鱼虾大小、密度、摄食、活动、水温、水质、天气等情况而定。日本囊对虾、菊黄东方鲀、菲律宾蛤仔分别于 2021 年 1—4 月、4—5 月、5—7 月捕捞上市。池塘经清池消毒后,开始第二茬的养殖。

1.3 样品的采集与分析

2020 年 10 月 28 日、2021 年 1 月 25 日、2021 年 4 月 23 日,4 个站位各采样 1 次。于上午 10 时进行,采集表层水样。按照《海洋监测规范》^[12]进行检测,检测项目为无机氮(氨氮、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮之和)、活性磷酸盐、化学需氧量(COD)。现场使用便携式多参数水质测定仪(Multi 3430),测定水温、盐度、pH、溶解氧(DO)含量。

根据《海水水质标准》^[13]、《海水养殖水排放要求》^[14],对化学需氧量、无机氮、活性磷酸盐含量等 3 个主要污染物指标进行评价(表 1)。

表 1 化学需氧量、无机氮、活性磷酸盐含量标准值

Tab. 1 Standard values of C_{COD} , C_{DIN} and $C_{\text{PO}_4^{3-}\text{-P}}$

标准		$C_{\text{COD}}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$C_{\text{DIN}}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$C_{\text{PO}_4^{3-}\text{-P}}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$
GB 3097 标准值 ^[13]	一类	≤ 2	≤ 0.20	≤ 0.015
	二类	≤ 3	≤ 0.30	≤ 0.030
	三类	≤ 4	≤ 0.40	
	四类	≤ 5	≤ 0.50	≤ 0.045
SC/T 9103 标准值 ^[14]	一级	≤ 10	≤ 0.50	≤ 0.05
	二级	≤ 20	≤ 1.00	≤ 0.10

1.4 潜在性富营养化评价方法

郭卫东等(1998)根据中国近岸海域的富营养化普遍受营养盐限制的特征,在潜在性富营养化的概念基础上根据无机氮和活性磷酸盐的含量及

氮磷比值(原子比)提出的一种富营养化分级标准及相应的评价模式^[15],营养级的划分原则见表 2^[15-18]。

表 2 潜在性富营养化评价模式营养级的划分原则

Tab. 2 Rules for the classification of nutrient levels using potential eutrophication assessment model

级别	营养级	$C_{\text{COD}}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$C_{\text{PO}_4^{3-}\text{-P}}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	N/P(原子比)
I	贫营养	< 0.20	< 0.030	8~30
II	中度营养	0.20~0.30	0.030~0.045	8~30
III	富营养	> 0.30	> 0.045	8~30
IV _P	磷限制中度营养	0.20~0.30	—	> 30
V _P	磷中等限制潜在性富营养	> 0.30	—	30~60

续表

级别	营养级	$C_{\text{COD}}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$C_{\text{PO}_4^{3-}\text{-P}}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	N/P(原子比)
VI _P	磷限制潜在性富营养	>0.30	—	>60
IV _N	氮限制中度营养	—	0.030~0.045	<8
V _N	氮中等限制潜在性富营养	—	>0.045	4~8
VI _N	氮限制潜在性富营养	—	>0.045	<4

1.5 数据处理方法

水体理化因子的监测数据采用 Microsoft Excel 2010 进行处理并绘图。氮磷原子比以无机氮、活性磷酸盐的含量换算为摩尔质量浓度后进行计算。

2 结果与讨论

2.1 养殖过程水体理化因子的变化

2.1.1 水温 各池塘水温变动范围为 17.8~25.5℃,水温的波动与季节变化相关,以 1 月水温最低,平均 18.3℃,4 月最高,平均 25.5℃。对照点水温变动情况与池塘相似,但水温略低于池塘(图 1)。

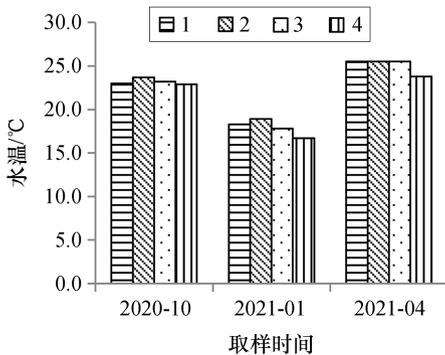


图 1 各池塘与对照点水温变化

Fig. 1 Changes of temperature in ponds and the control point

2.1.2 盐度 各池塘水体盐度变动范围为 33.1~35.2,以 1 月盐度最低,平均 33.9,10 月最高,平均 35.0。池塘水体盐度受进水盐度、换水量、降雨及水分蒸发的影响,养殖期间盐度明显偏高且较为稳定,这与当地长时间干旱,降雨偏少,换水量不大有关。对照点盐度变动情况与池塘相似,但盐度明显低于池塘,变动范围为 30.3~32.4(图 2)。

2.1.3 pH 值 各池塘水体 pH 值变动范围为 7.94~9.46,以 1 月最低,平均 8.01,10 月最高,平均 9.25。总体呈现养殖初期较高,中后期降低的趋势。pH 值是水中理化因子和生物活动的综合结果,养殖初期 pH 值较高,与浮游植物繁盛有关,中后期 pH 值的降低与养殖生物的生命活动、代谢产物的降解转化

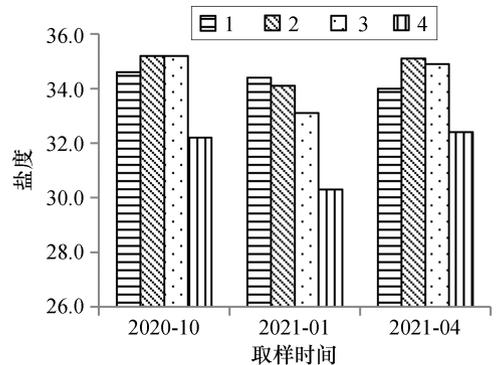


图 2 各池塘与对照点盐度变化

Fig. 2 Changes of salinity in ponds and the control point

有关^[16-17]。对照点 pH 值低于池塘,且相对稳定,波动范围为 7.55~7.96(图 3)。

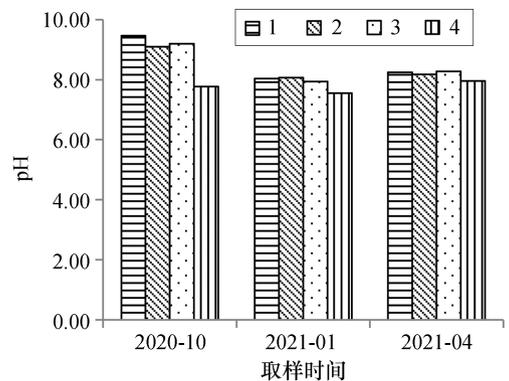


图 3 各池塘与对照点 pH 值变化

Fig. 3 Changes of pH in ponds and the control point

2.1.4 溶解氧 各池塘水体溶解氧含量变动范围为 7.46~10.43 mg/L,以 4 月最低,平均 7.96 mg/L,1 月最高,平均 9.68 mg/L。池塘水体溶解氧含量变化与浮游植物光合作用、水气界面气体交换、养殖生物呼吸及其排泄物代谢产物降解、人工增氧等因素有关。池塘水体溶解氧各测值均高于 5 mg/L,处于较高水平,这与鱼虾养殖密度较低、人工增氧和浮游植物繁盛有关。当溶解氧充足时,池塘中微生物进行有氧呼吸,能较彻底地氧化残饵粪便等有机物,避免产生对养殖生物有害的物质如亚硝酸盐、硫化氢

等^[17]。对照点溶解氧含量波动范围为 7.40~8.98 mg/L(图 4)。

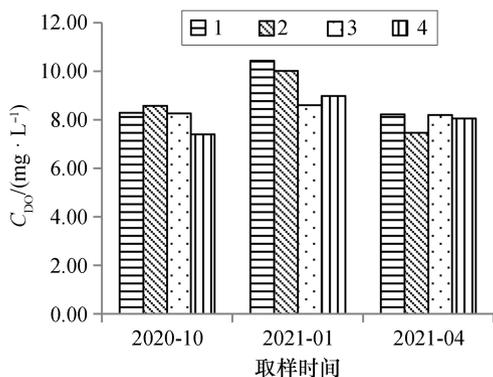


图 4 各池塘与对照点溶解氧含量变化

Fig. 4 Changes of DO in ponds and the control point

2.1.5 化学需氧量 各池塘水体化学需氧量变动范围为 0.57~4.57 mg/L,以 10 月最低,平均 0.70 mg/L,4 月最高,平均 4.07 mg/L;10 月符合海水水质一类标准,1 月和 4 月符合二类至四类标准^[13],但均符合海水养殖水排放一级标准^[14]。对照点化学需氧量波动范围为 0.63~4.76 mg/L,1、10 月化学

需氧量相近,均处于低值,符合海水水质一类标准;10 月含量与池塘相近,1 月含量远低于池塘,但 4 月大幅升高,并高于所有 3 口池塘,达到海水水质四类标准(表 3)。

2.1.6 无机氮 各池塘水体无机氮含量变动范围为 0.03~0.18 mg/L,以 10 月最低,平均 0.05 mg/L,1 月最高,平均 0.13 mg/L,均处于低值,且达到海水水质一类标准。对照点无机氮含量波动范围为 0.44~0.86 mg/L,呈先升后降趋势,均超过海水水质三类标准(表 3)。

2.1.7 活性磷酸盐 各池塘水体活性磷酸盐含量变动范围为 0.009~0.208 mg/L,以 10 月最低,平均 0.020 mg/L,4 月最高,平均 0.165 mg/L,10、1 月均处于低值,除 1 月 1 号池略超过海水水质四类标准外,其他均符合二类标准,但 4 月 3 口池塘的活性磷酸盐含量均出现大幅度升高现象,并远高于对照点,全部超过海水水质四类标准和海水养殖水排放二级标准。对照点活性磷酸盐含量波动范围为 0.057~0.081 mg/L,呈逐渐降低趋势,均超过海水水质四类标准(表 3)。

表 3 各池塘与对照点化学需氧量、无机氮、活性磷酸盐含量测定

Tab. 3 Measured values of C_{COD} , C_{DIN} and $C_{PO_4^{3--P}}$ in ponds and the control point

取样时间	取样编号	$C_{COD}/(mg \cdot L^{-1})$		$C_{DIN}/(mg \cdot L^{-1})$		$C_{PO_4^{3--P}}/(mg \cdot L^{-1})$	
		测值	与对照点比较	测值	与对照点比较	测值	与对照点比较
2020-10	1	0.61	-	0.07	-	0.009	-
	2	0.93	+	0.03	-	0.024	-
	3	0.57	-	0.05	-	0.028	-
	4	0.63	-	0.59	-	0.081	-
2021-01	1	4.57	+	0.09	-	0.047	-
	2	4.22	+	0.18	-	0.023	-
	3	2.83	+	0.13	-	0.014	-
	4	0.69	-	0.86	-	0.064	-
2021-04	1	4.41	-	0.10	-	0.124	+
	2	4.36	-	0.08	-	0.208	+
	3	3.43	-	0.05	-	0.163	+
	4	4.76	-	0.44	-	0.057	-

注:“+”表示升高,“-”表示降低。

2.1.8 理化因子评价 养殖期间各池塘水温随季节更替,出现较大变化。受到长期干旱少雨和池水蒸发的影响,盐度偏高。养殖初期 pH 值最高,中后期较低。溶解氧含量均高于 5 mg/L。总体上水温、盐度、pH 值均在养殖生物适应范围内,而较高的溶

解氧含量有利于养殖生物的生长和水体环境的改善。池塘水体化学需氧量较低,无机氮含量均处于低值,而活性磷酸盐含量在养殖初期、中期大多符合海水水质二类标准,后期则出现超标现象。化学需氧量、无机氮、活性磷酸盐含量的变化与饲料投喂、

养殖生物生命活动、残饵粪便降解、浮游植物吸收、日常换水等因素有关。

海水池塘多营养层次养殖为一种高效、生态、健康的养殖模式,符合水产养殖绿色发展的需要,已在沿海地区得到广泛推广。该养殖模式合理搭配不同营养级生物,充分利用养殖水域的物质和能量,使系统具有较高的养殖容纳量和经济产出^[1,19]。“鱼-虾-贝”多营养层次养殖池塘中,养殖动物排泄物、残饵等废弃物经降解后成为浮游植物生长繁殖的营养来源,而菲律宾蛤仔摄食浮游植物,起到循环促进者的作用^[1],整个养殖系统从而实现物质和能量的高效利用和较低的污染物排放,发挥了贝类养殖的碳汇作用。

2.2 水体营养状况评价

根据潜在性富营养化评价方法,对 3 口池塘和对照点进行营养级别评定,结果见表 4。评价结果表明,10 月,3 口池塘无机氮含量均低于 0.20 mg/L,活性磷酸盐含量均低于 0.030 mg/L,水体营养级均为 I,呈现贫营养状态;1 月,1 号池氮磷比为 4.24,无机氮含量低于 0.20 mg/L,活性磷酸盐含量高于 0.045 mg/L,水体营养级为 V_N ,属氮中等限制潜在性富营养,2 号、3 号池塘无机氮含量均低于 0.20 mg/L,活性磷酸盐含量均低于 0.030 mg/L,水体营养级均为 I,呈现贫营养状态;4 月池塘氮磷比为 0.68~1.79,小于 4,无机氮含量低于 0.20 mg/L,活性磷酸盐含量高于 0.045 mg/L,水体营养级均为 VI_N ,属氮限制潜在性富营养。可见,养殖初期、中期池塘水体大多呈现为贫营养状态,养殖后期水体由于活性磷酸盐含量的升高呈现氮限制。对照点氮磷比为 16.13~29.75,无机氮含量高于 0.30 mg/L,活性磷酸盐含量高于 0.045 mg/L,水体营养级为 III,呈现富营养状态。

2.3 营养盐含量的变化特征

在整个养殖过程中,无机氮含量变动范围为 0.03~0.18 mg/L,活性磷酸盐含量变动范围为 0.009~0.208 mg/L;3 口池塘水体无机氮含量均处于低值,而活性磷酸盐含量在初期、中期基本处于低值,但在养殖后期剧增,出现氮磷比失衡现象,属氮限制潜在性富营养化,这与菲律宾蛤仔在生长过程中代谢排放及浮游植物对氮磷吸收的不平衡有关。袁秀堂等(2011)实验测定菲律宾蛤仔的排氮率及排磷率分别为 0.02~0.40、0.01~0.39 mg/(ind·d)^[20],可见菲律宾蛤仔对氮、磷的排放量相近,而浮游植物对营养盐的吸收利用大致遵循氮磷原子比为 16:1 (质量比为 7.2:1.0)的 Redfield 定律^[21],池塘水体

中浮游植物生长繁殖对氮的需求量远大于磷,因此导致池水中磷的积累。

表 4 潜在性富营养化评价结果

Tab. 4 Results of the potential eutrophication assessment

取样时间	取样编号	N/P(原子比)	营养级
2020-10	1	17.22	I
	2	2.77	I
	3	3.95	I
	4	16.13	III
2021-01	1	4.24	V_N
	2	17.33	I
	3	20.56	I
	4	29.75	III
2021-04	1	1.79	VI_N
	2	0.85	VI_N
	3	0.68	VI_N
	4	17.09	III

池塘水体中的氮磷来源于养殖过程投入的饲料、肥料、动物排泄和一些化学药品,过量饲料投喂是水体氮磷主要来源^[22]。在对虾单养的池塘及高位池中,后期水体高氮低磷,大多属磷中等限制潜在性富营养化、磷限制潜在性富营养化状态^[17-18]。赵亚波(2018)在池塘“虾(凡纳滨对虾)-贝(泥蚶)”养殖实验中,也发现水体总磷和磷酸盐含量高于对虾单养对照组^[23]。骆云慧等(2020)研究发现,在“凡纳滨对虾-缢蛭”生态循环养殖前中期,养虾塘中活性磷酸盐含量高于养蛭塘,而养殖后期则相反^[24]。本研究中,在“鱼-虾-贝”多营养层次养殖期间,池塘水体无机氮含量均处于低值,日常换水不会增加周边海域的氮负荷;活性磷酸盐含量在后期剧增,大幅度超过海水水质四类标准,日常换水将增加周边海域的磷负荷,影响海域富营养化程度。

2.4 多营养层次养殖模式的减排效果

多营养层次养殖的海水池塘是由不同营养级生物组成的综合养殖系统,可充分利用输入其中的营养物质和能量,提高池塘养殖容纳量,具有综合效益高、养殖环境稳定、生态健康的特点^[1-2]。“鱼-虾-贝”多营养层次养殖模式中,以菊黄东方鲀、日本囊对虾、菲律宾蛤仔为主要养殖对象,并进行合理搭配,其中东方鲀、对虾需要人工投饵,并经过一系列生理生化过程释放营养盐,浮游植物利用水体中营养盐进行生长繁殖,而菲律宾蛤仔以浮游植物为食,输入池塘养殖系统中的营养物质得到循环利用。除

养殖中期池中化学需氧量、后期活性磷酸盐的含量高于进水对照点外,其他采样时间的无机氮、活性磷酸盐含量和化学需氧量均低于对照点。

李卓佳等(2010)研究发现在凡纳滨对虾高位池养殖过程中,水体中无机氮、活性磷酸盐含量和化学需氧量均出现快速积累现象,养殖中期水体已经出现富营养化,最高值分别达到 5.98、0.39、12.20 mg/L^[17]。本实验中,3 口池塘水体无机氮、活性磷酸盐含量、化学需氧量最高值分别为 0.18、0.208、4.57 mg/L,与高位池养殖相比,处于较低水平。由此可见,多营养层次养殖池塘水体的水质较为稳定优良,无机氮、活性磷酸盐含量、化学需氧量较低,在养殖过程中换水量不大,尾水排放量小,节能减排效果明显,符合水产养殖业绿色发展的要求。在长期生产实践和科研成果之上,总结而成的“海水池塘多营养层次生态健康养殖技术”已经列入农业农村部农业主推技术目录^[19]。

本研究中,养殖后期池塘水体活性磷酸盐含量明显超标,属氮限制潜在性富营养化,出现池塘排水增大海区环境磷负荷的问题,因此有必要对现有的“鱼-虾-贝”养殖模式进行优化调整,采取减少菲律宾蛤仔的投苗量、施加除磷微生物制剂^[25]等措施以缓解池塘水体磷的积累。并根据《全国池塘养殖尾

水治理专项建设规划》^[6]的要求,对海水池塘进行整体的规划改造,池塘尾水经沉淀、生物净化、消毒达标后排放。

3 结论

(1)“鱼-虾-贝”多营养层次养殖过程中,各池塘水体理化因子变动范围分别为:水温 17.8~25.5℃;盐度 33.1~35.2,pH 值 7.94~9.46,溶解氧含量 7.46~10.43 mg/L,化学需氧量 0.57~4.57 mg/L,无机氮含量 0.03~0.18 mg/L,活性磷酸盐含量 0.009~0.208 mg/L。水体环境适宜养殖生物的生长。

(2)各池塘水体无机氮含量均处于低值;活性磷酸盐含量在初期、中期基本处于低值,后期剧增;氮磷比变动范围为 0.68~17.22,呈先升后剧降趋势。养殖水体营养状况从初期的贫营养状态演变为后期的氮限制潜在性富营养化,这与菲律宾蛤仔在生长过程中代谢排放及浮游植物对氮磷吸收的不平衡有关。

(3)多营养层次养殖池塘水体的水质较为稳定良好,无机氮、活性磷酸盐含量、化学需氧量相对较低。多营养层次养殖模式在养殖尾水排放方面,具有较为显著的减排效果。

参考文献:

- [1] 方建光,蒋增杰,房景辉.中国海水多营养层次综合养殖的理论与实践[M].青岛:中国海洋大学出版社,2020.
FANG J G, JIANG Z J, FANG J H. Theory and practice of integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) in China[M]. Qingdao: China Ocean University Press, 2020.
- [2] 韩枫,常志强,高勇,等.多营养层次生态养殖模式简析[J].水产养殖,2021,42(4):24-30.
HAN F, CHANG Z Q, GAO Y, et al. Analysis of the integrated multi-trophic aquaculture model[J]. Journal of Aquaculture, 2021, 42(4): 24-30.
- [3] 史洁,魏皓,赵亮,等.桑沟湾多元养殖生态模型研究:Ⅲ 海带养殖容量的数值研究[J].渔业科学进展,2010,31(4):43-52.
SHI J, WEI H, ZHAO L, et al. Study on ecosystem model of multi-species culture in Sanggou Bay: Ⅲ Numerical study on the kelp culture carrying capacity[J]. Progress in Fishery Sciences, 2010, 31(4): 43-52.
- [4] HANDÅ A, FORBORD S, WANG X X, et al. Seasonal-and depth-dependent growth of cultivated kelp (*Saccharina latissima*) in close proximity to salmon (*Salmo salar*) aquaculture in Norway[J]. Aquaculture, 2013, 414/415: 191-201.
- [5] NEORI A, SHPIGE M, GUTTMAN L, et al. Development of polyculture and integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) in Israel: a review[J]. Israeli Journal of Aquaculture-Bamidgeh, 2017, 69: 1-19.
- [6] 农业农村部渔政管理局.全国池塘养殖尾水治理专项建设规划(2020—2025)[R].北京:农业农村部渔政管理局,2020.
Bureau of Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs. National special construction plan for waste water treatment of pond aquaculture (2020-2025)[R]. Beijing: Bureau of Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, 2020.
- [7] 李健,李鲁晶,景福涛,等.海水池塘多营养层次生态健康养殖技术[J].中国水产,2015(7):51-52.
LI J, LI L J, JING F T, et al. Multi-trophic ecological health culture technology in seawater ponds[J]. China Fisheries, 2015(7): 51-52.
- [8] 曾凡荣.海水池塘多营养层次健康养殖技术[J].科学养鱼,2018(7):50-51.
ZENG F R. Multi-trophic healthy culture technology in seawater ponds[J]. Scientific Fish Farming, 2018(7): 50-51.
- [9] 陈火荣.2017年福建海域链状裸甲藻赤潮事件应急处置与思考[J].渔业研究,2018,40(4):308-314.
CHEN H R. Emergency treatment and reflection of red tide event of *Gymnodinium catenatum* in Fujian sea area in 2017[J]. Journal of Fisheries Research, 2018, 40(4): 308-314.
- [10] 谷颖,项有堂.象山港海域富营养化与赤潮的关系[J].海洋环境科学,2002,21(3):67-69.
GU Y, XIANG Y T. Relationship of red tide and eutrophication in Xiangshan Harbour area[J]. Marine Environmental Science, 2002, 21(3):

67-69.

- [11] 徐宁, 段舜山, 李爱芬, 等. 沿岸海域富营养化与赤潮发生的关系[J]. 生态学报, 2005, 25(7): 1 782-1 787.
XU N, DUAN S S, LI A F, et al. The relationships between the occurrences of red tides (HABs) and eutrophication in coastal waters[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(7): 1 782-1 787.
- [12] 国家海洋局. 海洋监测规范 第3部分: 样品采集、贮存与运输: GB 17378.3—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
State Oceanic Administration. The specification for marine monitoring—Part 3: Sample collection, storage and transportation; GB 17378.3—2007 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [13] 国家环境保护局, 国家海洋局. 海水水质标准: GB 3097—1997[S]. 北京: 国家环境保护局, 1997.
State Environmental Protection Administration, State Oceanic Administration. Sea water quality standard; GB 3097—1997[S]. Beijing: State Environmental Protection Administration, 1997.
- [14] 中华人民共和国农业部. 海水养殖水排放要求: SC/T 9103—2007[S]. 北京: 中华人民共和国农业部, 2007.
Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Water drainage standard for sea water mariculture; SC/T 9103—2007[S]. Beijing: Ministry of Agriculture of the People's Republic of China, 2007.
- [15] 郭卫东, 章小明, 杨逸萍, 等. 中国近岸海域潜在性富营养化程度的评价[J]. 台湾海峡, 1998, 17(1): 64-70.
GUO W D, ZHANG X M, YANG Y P, et al. Potential eutrophication assessment for Chinese coastal waters[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 1998, 17(1): 64-70.
- [16] 钱健, 陈立红, 贾怡然, 等. 象山港口门海域水体富营养化评价及空间分布特征分析[C]//中国环境科学学会年会, 中国光大国际有限公司. 2015年中国环境科学学会年会论文集. 深圳: 中国环境科学学会, 2015: 1 935-1 940.
QIAN J, CHEN L H, JIA Y R, et al. Evaluation of water eutrophication and analysis of spatial distribution characteristics in Xiangshan Port entrance sea area[C]//Chinese Society For Environmental Sciences, China Everbright International Limited. Proceedings of 2015 annual meeting of Chinese Society For Environmental Sciences, 2015: 1 935-1 940.
- [17] 李卓佳, 李奕雯, 曹煜成, 等. 凡纳滨对虾海水高位池养殖水体理化因子变化与营养状况分析[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(10): 2 025-2 032.
LI Z J, LI Y W, CAO Y C, et al. Analysis of physical-chemical factors variation and nutritional status of *Litopenaeus vannamei* high level seawater ponds[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(10): 2 025-2 032.
- [18] 陈伟珍, 林轩, 杨桂珍, 等. 湛江港沙湾对虾养殖场虾池水质状况分析[J]. 水产科学, 2004, 23(10): 12-15.
CHEN W Z, LIN X, YANG G Z, et al. Water quality in shrimp ponds at Shawan Bay in Zhanjiang Port[J]. Fisheries Science, 2004, 23(10): 12-15.
- [19] 陈学洲, 李健, 高浩瀚, 等. 多营养层次综合养殖技术模式[J]. 中国水产, 2020(10): 76-78.
CHEN X Z, LI J, GAO H Y, et al. Integrated multi-trophic aquaculture technology model[J]. China Fisheries, 2020(10): 76-78.
- [20] 袁秀堂, 张升利, 刘述锡, 等. 庄河海域菲律宾蛤仔底播增殖区自身污染[J]. 应用生态学报, 2011, 22(3): 785-792.
YUAN X T, ZHANG S L, LIU S X, et al. Self-pollution in *Ruditapes philippinarum* bottom-cultured area of Zhuanghe coast[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(3): 785-792.
- [21] 黄伟, 朱旭宇, 曾江宁, 等. 氮磷比对东海浮游植物群落生长影响的微宇宙实验[J]. 环境科学, 2012, 33(6): 1 832-1 838.
HUANG W, ZHU X Y, ZENG J N, et al. Microcosm experiments on the influence of different N/P ratios on phytoplankton community growth in the East China Sea[J]. Environmental Science, 2012, 33(6): 1 832-1 838.
- [22] 王申, 高珊珊, 蒋力, 等. 水产养殖系统氮磷营养盐收支及其生态影响研究[J]. 水产学杂志, 2018, 31(5): 50-57.
WANG S, GAO S S, JIANG L, et al. A review of budget and ecological impact of nutrients nitrogen and phosphorus in an aquaculture ecosystem [J]. Chinese Journal of Fisheries, 2018, 31(5): 50-57.
- [23] 赵亚波. 池塘虾贝综合养殖系统中有机碳、氮和磷收支的研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2018.
ZHAO Y B. Study on budget of organic carbon, nitrogen and phosphorus in shrimp-clam integrated aquaculture system[D]. Ningbo: Ningbo University, 2018.
- [24] 骆云慧, 李来国, 赵淳朴, 等. 凡纳滨对虾-缢蛭生态循环养殖池塘中浮游植物群落结构与水质因子相关性研究[J]. 海洋与湖沼, 2020, 51(2): 378-387.
LUO Y H, LI L G, ZHAO C P, et al. Relationship between phytoplankton structure and water quality factors in culture ponds of *Litopenaeus vannamei* and *Sinonovacula constricta*[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2020, 51(2): 378-387.
- [25] 郭丽芸, 王庆, 姜伟, 等. 固定化微生物制剂应用于水产养殖的研究进展[J]. 水产养殖, 2018(11): 23-26.
GUO L Y, WANG Q, JIANG W, et al. Research progress of application of immobilized microbial preparations application on aquaculture[J]. Journal of Aquaculture, 2018(11): 23-26.

Changes of physical-chemical factors and assessment of eutrophication status in integrated multi-trophic mariculture ponds

FANG Minjie

(Fisheries Research Institute of Fujian, Xiamen 361013, China)

Abstract: From October 2020 to April 2021, the fish-shrimp-shellfish integrated multi-trophic mariculture ponds in Fotan Bay reclamation area of Zhangpu County were investigated. The results showed that the water temperature of each pond varied from 17.8 °C to 25.5 °C and salinity which is high and stable varied from 33.1 to 35.2. The pH varied from 7.94 to 9.46, and it decreased at first and then stabilized. The range of dissolved oxygen varied from 7.46 mg/L to 10.43 mg/L and the dissolved oxygen was sufficient. The range of chemical oxygen demand varied from 0.57 mg/L to 4.57 mg/L, showing an increasing pollution trend. The range of inorganic nitrogen varied from 0.03 mg/L to 0.18 mg/L, which was low comparatively. The active phosphate ranged from 0.009 mg/L to 0.208 mg/L and it increased remarkably in the later stage of aquaculture. The range of N/P ratio varied from 0.68 to 17.22 and it increased first and then decreased sharply. It shows that the nutritional status of pond water evolved from oligotrophic in the first stage, and then, to the potential eutrophication status with nitrogen limitation in the later stage.

Key words: marine chemistry; integrated multi-trophic aquaculture; seawater ponds; physical-chemical factors; eutrophication status; water quality

DOI: 10.3969/J.ISSN.2095-4972.2023.01.010

(责任编辑:肖 静)