

◆海洋科学◆

后水湾深水网箱养殖区水环境的时空变化和营养状态分析*

庞巧珠, 陈丹丹, 陈晓慧, 谢海群, 梁计林**

(海南省海洋与渔业科学院, 海南海口 571126)

摘要:为探究鱼类网箱养殖对水环境的影响,利用后水湾深水网箱养殖海域2018年5月、8月、10月和2019年1月的水环境调查数据,分析网箱区与对照区的环境因子差异,采用有机污染评价指数法和营养指数法对后水湾深水网箱养殖海域水质污染现状进行评价。结果表明,水体的pH值、溶解态无机氮(DIN)、溶解氧(DO)、溶解态无机磷(DIP)和化学需氧量(COD_{Mn})整体符合国家第一类海水水质标准,网箱区与对照区的水环境因子无显著性差异($P>0.05$)。在春季和冬季,后水湾养殖海域较适合浮游植物生长,而在夏季和秋季,浮游植物的生长繁殖会受到DIP限制。有机污染评价指数结果表明,后水湾养殖海域海水水质较好,未出现有机污染的状况。营养指数结果表明,养殖投饵高峰期水体的富营养化程度相对较高,网箱区局部海域富营养化问题较为突出,总磷(TP)和总氮(TN)是主要影响因子。今后应加强对后水湾深水网箱养殖海域的环境监测,避免养殖活动对水质造成长期的污染积累影响。

关键词:后水湾;深水网箱养殖;水环境;富营养化

中图分类号:P76 文献标识码:A 文章编号:1005-9164(2024)04-0742-12

DOI:10.13656/j.cnki.gxkx.20241206.013

目前,网箱养殖是国内外海水鱼类养殖的主要方式之一,是一种高投入和高产出的集约化养殖方式,在带来巨大经济效益的同时,其对环境的影响也受到广泛关注^[1-4]。据报道,海水养殖鱼、虾类等排出的氮、磷废弃物占投喂饲料产生的氮、磷废弃物总量的70%以上^[5,6],这极易造成水体富营养化,导致浮游植物(又称藻华)爆发性生长,并伴随大量有机质降解耗氧,进而造成水体缺氧等环境问题。姜欢欢^[7]的研

究表明渤海湾近岸海域7个养殖区内海水的水质状况一般,污染物主要为无机氮和磷酸盐。黄丽艳等^[8]的研究表明钦州湾水体中的磷含量在养殖期间逐渐升高,高集约化的养殖活动对水环境和沉积物环境质量均有负面影响。李妙聪等^[9]发现乐清湾养殖区水体中的溶解态无机氮(DIN)和溶解态无机磷(DIP)均低于《海水水质标准》(GB 3097-1997)^[10]中的第四类海水水质标准,且大部分时间中站点处于高富营养

收稿日期:2024-04-02

修回日期:2024-05-13

* 海南省自然科学基金项目(419QN254,321QN0960)资助。

【第一作者简介】

庞巧珠(1989-),女,工程师,主要从事海洋生态环境调查与研究,E-mail:1146828156@qq.com。

【**通信作者简介】

梁计林(1981-),男,高级工程师,主要从事海洋生态环境评价与研究,E-mail:4158384@qq.com。

【引用本文】

庞巧珠,陈丹丹,陈晓慧,等.后水湾深水网箱养殖区水环境的时空变化和营养状态分析[J].广西科学,2024,31(4):742-753.

PANG Q Z, CHEN D D, CHEN X H, et al. Temporal-Spatial Variations and Nutrient Status in the Aquatic Environment of Deep-Water Cage Aquaculture in Houshui Bay [J]. Guangxi Sciences, 2024, 31(4): 742-753.

化状态。因此,了解养殖周期内海水质量和营养化水平对海水网箱养殖的可持续发展具有重要意义。

后水湾位于海南省临高县西部,为凹型海岸,湾口向北敞开。自1998年在此地开展深水网箱养殖以来,产业发展迅速,产业规模不断扩大。根据《2023中国渔业统计年鉴》^[11],截至2022年,海南省深水网箱养殖累计达11 770口(折算成40 m周长的标准网箱),规模排名全国第2,临高县的深水网箱有6 841口,约占全省总量的58%,是2011年深水网箱的3.5倍。2013—2022年,海南省深水网箱养殖产量和养殖水体分别增长3.57倍和86.79倍,但单位养殖水体产量下降93%。虽然海南省积极推进深海网箱养殖标准化,但是仍有一些养殖企业盲目扩大生产、增加养殖密度、投放高强度饵料,这不仅增加了水产养殖的风险和成本,而且造成了海洋水生环境污染和鱼类病害^[12]。目前,关于海南省深水网箱养殖对水环境的影响及富营养化的研究报道较少,因此,本研究在不同养殖阶段(2018年5月、8月、10月以及2019年1月)对后水湾的水环境进行调查,分析网箱养殖区和对照区的水环境因子差异,并采用有机污染评价指数法和营养指数法评价后水湾养殖海域的海水质量,旨在为促进和维护深水网箱养殖的健康、可持续发展提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 样品采集

本次调查时间为2018年5月中下旬(春季,投苗初期)、8月中下旬(夏季,投饵高峰期)、10月中下旬(秋季,投饵高峰期)和2019年1月中下旬(冬季,收网后期),以下使用季节代表月份进行表述。在后水湾布设6个调查站位(S1—S6号站位,图1),其中S2—S5号站位为网箱养殖区(以下简称为网箱区)内的采样点,S1号和S6号站位为网箱区外的对照点。采用测深仪(SM-5,广州慧洋信息科技有限公司)测定水深;使用有机玻璃采水器(HQM-1)采集表层(水面以下0.5 m)和底层(距离水底2 m)水样。溶解氧(DO)样品中加入1 mL氯化锰和1 mL碱性碘化钾固定;化学需氧量(COD_{Mn})样品中加入(1+3)硫酸溶液固定,使pH值<2;总磷(TP)和总氮(TN)样品中加入1 mL 50%的硫酸溶液;海水叶绿素 a (Chl- a)样品中加入1 mL碳酸镁溶液固定;其他营养盐样品用0.45 μ m的滤膜过滤,过滤后使用锡箔纸将滤膜包裹,置于液氮罐中保存。所有样品经现场固定或预处理

后运回实验室内分析。

1.2 分析方法

使用塞氏盘测定水样透明度(Trs),使用温盐深仪测定水样盐度(S),使用水温表法测定水样表层温度(T),使用pH计测定水样pH值。采用碱性高锰酸钾法测定COD_{Mn}含量,碘量法测定DO含量,靛酚蓝分光光度法测定氨氮(NH₄-N)含量,锌镉还原法测定硝酸盐氮(NO₃-N)含量,盐酸萘乙二胺分光光度法测定亚硝酸盐氮(NO₂-N)含量,磷钼蓝分光光度法测定DIP含量,紫外-可见分光光度法测定Chl- a 含量,过硫酸钾氧化法测定TP和TN含量。DIN为NO₃-N、NO₂-N和NH₄-N三者之和。除Chl- a 的分析依据《海洋监测规范 第7部分:近海污染生态调查和生物监测》(GB 17378.7—2007)^[13]执行外,其余指标均参照《海洋调查规范 第4部分:海水化学要素调查》(GB/T 12763.4—2007)^[14]和《海洋监测规范 第4部分:海水分析》(GB 17378.4—2007)^[15]的方法进行。Chl- a 的检出限为0.2 μ g/L。COD_{Mn}、DO、NH₄-N、NO₃-N、NO₂-N、DIP、TP和TN的检出限分别为0.15、0.08、0.000 7、0.000 7、0.000 3、0.000 62、0.003和0.053 mg/L。

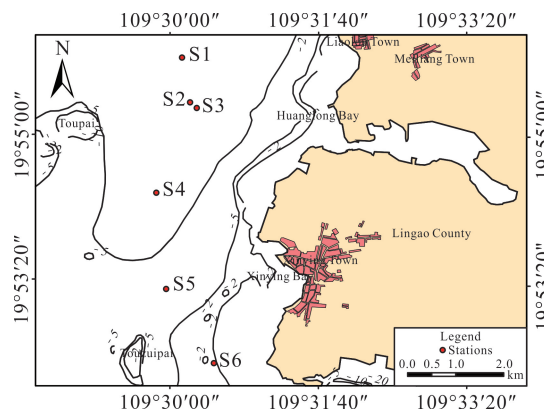


图1 后水湾调查站位

Fig. 1 Sampling stations in Houshui Bay

1.3 评价方法

1.3.1 有机污染评价指数法

有机污染评价指数法是一种评价水体综合污染的方法,它主要根据COD_{Mn}、DIN、DIP和DO等指标来判断水质的污染情况^[16-18]。为了解网箱养殖期间后水湾养殖海域水质污染程度,本研究运用《海洋监测规范 第7部分:近海污染生态调查和生物监测》(GB 17378.7—2007)^[13]中的公式对后水湾养殖海域海水水质污染状况进行评价,即

$$A = \frac{I_{\text{COD}_{\text{Mn}}}}{S_{\text{COD}_{\text{Mn}}}} + \frac{I_{\text{DIN}}}{S_{\text{DIN}}} + \frac{I_{\text{DIP}}}{S_{\text{DIP}}} - \frac{I_{\text{DO}}}{S_{\text{DO}}}$$

式中, A 为有机污染评价指数; $I_{\text{COD}_{\text{Mn}}}$ 、 I_{DIN} 、 I_{DIP} 、 I_{DO} 为 COD_{Mn} 、 DIN 、 DIP 、 DO 的实测值; $S_{\text{COD}_{\text{Mn}}}$ 、 S_{DIN} 、 S_{DIP} 、 S_{DO} 为 COD_{Mn} 、 DIN 、 DIP 、 DO 的评价标准值, 分别为 3、0.1、0.015 和 5 mg/L。当 $A \leq 0$ 时, 水质良好; $0 < A \leq 1$ 时, 水质较好; $1 < A \leq 2$ 时, 水体开始受到污染; $2 < A \leq 3$ 时, 轻微污染; $3 < A \leq 4$ 时, 中度污染; $A > 4$ 时, 严重污染。

1.3.2 营养指数法

水体富营养化是指在一定水体范围内, 水质的营养状况随营养盐污染的增加而发生变化的过程^[19]。为了解 COD_{Mn} 、 TP 和 TN 对水质的影响, 本研究运用《海洋调查规范 第9部分: 海洋生态调查指南》(GB/T 12763.9-2007)^[20] 中的营养指数 (Nutrient index, N_i) 对后水湾养殖海域的海水富营养化压力水平进行评价。计算公式为

$$N_i = \frac{I_{\text{COD}_{\text{Mn}}}}{S_{\text{COD}_{\text{Mn}}}} + \frac{I_{\text{TP}}}{S_{\text{TP}}} + \frac{I_{\text{TN}}}{S_{\text{TN}}} - \frac{I_{\text{Chl-a}}}{S_{\text{Chl-a}}}$$

式中, N_i 为营养指数; $I_{\text{COD}_{\text{Mn}}}$ 、 I_{TP} 、 I_{TN} 、 $I_{\text{Chl-a}}$ 分别为 COD_{Mn} 、 TP 、 TN 和 Chl-a 的实测值; $S_{\text{COD}_{\text{Mn}}}$ 、 S_{TP} 、 S_{TN} 、 $S_{\text{Chl-a}}$ 分别为 COD_{Mn} 、 TP 、 TN 和 Chl-a 的评价标准值, 分别为 3 mg/L、0.03 mg/L、0.6 mg/L、10 $\mu\text{g/L}$ 。采用陈于望^[21] 提出的分级方法来评价后水湾养殖海域的水质营养状况, 当 $N_i > 3$ 时, 为富营养水平; 当 $2 \leq N_i \leq 3$ 时, 为中营养水平; $N_i < 2$ 时, 为贫营养水平。

表 1 网箱区和对照区各季节的 T、S 和 Trs 监测结果

Table 1 Monitoring results of T, S and Trs in cage area and control area in four seasons

指标 Index	区域 Area	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter	全年 Annual
T/°C	Cage area	28.9-30.8	28.3-30.0	26.7-28.1	21.4-21.6	21.4-30.8
	Average	29.8±0.6 ^a	29.0±0.6 ^a	27.5±0.6 ^a	21.5±0.1 ^a	27.8±2.8 ^a
	Control area	29.3-30.7	28.4-30.0	27.0-28.0	21.2-21.8	21.2-30.7
	Average	30.0±0.6 ^a	29.2±0.7 ^a	27.5±0.5 ^a	21.5±0.4 ^a	27.8±2.9 ^a
S	Cage area	33.38-34.33	29.61-30.60	32.73-34.79	32.70-32.86	29.61-34.79
	Average	33.93±0.31 ^a	30.24±0.34 ^a	33.14±0.69 ^a	32.82±0.08 ^a	32.49±1.56 ^a
	Control area	33.40-33.94	28.72-29.22	32.57-35.40	28.75-32.97	28.72-35.40
	Average	33.69±0.22 ^a	28.99±0.21 ^b	33.73±1.31 ^a	32.86±0.16 ^a	32.24±2.25 ^a
Trs/m	Cage area	4.0-7.0	4.0-4.5	2.0-3.5	3.0-3.5	2.0-7.0
	Average	5.1±1.3 ^a	4.3±0.2 ^a	2.5±0.7 ^a	3.4±0.3 ^a	3.8±1.2 ^a
	Control area	3.0-7.0	4.0	2.5-3.5	3.0-4.0	2.5-7.0
	Average	5.0±2.8 ^a	4.0±0.0 ^a	3.0±0.7 ^a	3.5±0.7 ^a	3.9±1.4 ^a

Note: values with same superscript letters within the same column were not significantly different ($P > 0.05$).

1.4 数据处理

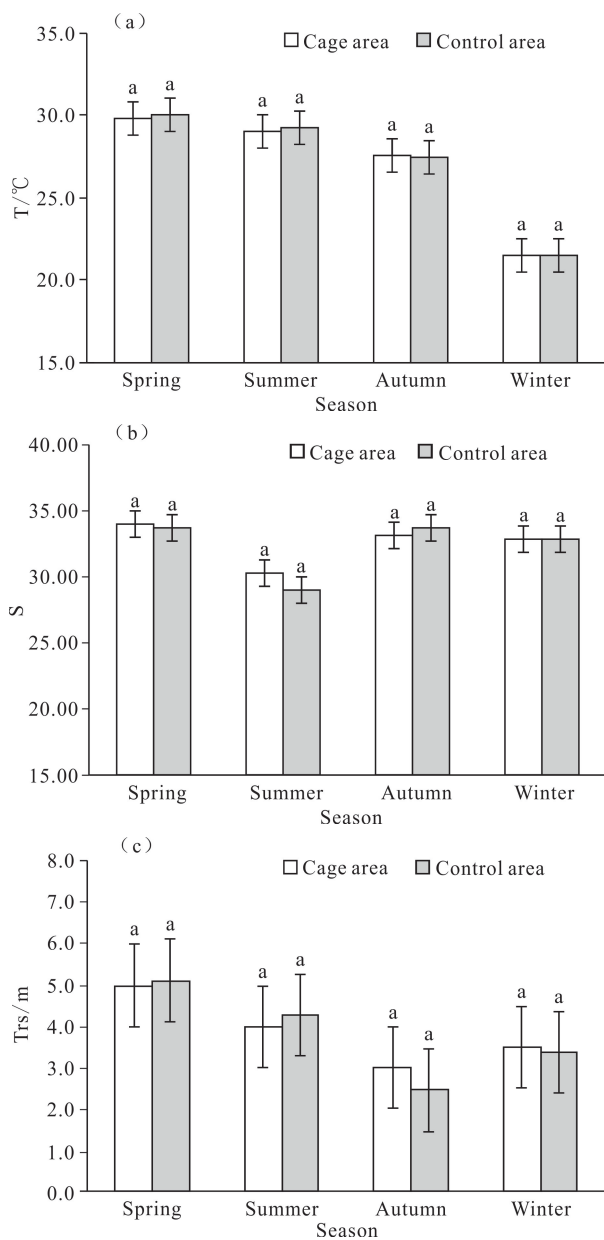
利用 ArcMap 10.8 软件绘制站位图; 使用 WPS 12.1.0 软件进行数据处理和图表制作, 描述性统计值以算数平均值 ± 标准偏差 ($X \pm SD$) 表示; 利用 IBM SPSS Statistics 26 软件对以区域为因素的环境因子进行单因素方差分析, 显著性水平设置为 0.05; 采用 Pearson 相关性分析检验营养指数与水环境因子之间的关系显著性, $P < 0.05$ 视为差异显著。

2 结果与分析

2.1 水环境因子

2.1.1 T、S 和 Trs 的时空变化特征

如表 1 所示, 网箱区的 T、S 和 Trs 全年变化范围分别为 21.4-30.8 °C、29.61-34.79 和 2.0-7.0 m, 年均值分别为 (27.8±2.8) °C、32.49±1.56 和 (3.8±1.2) m; 对照区的 T、S 和 Trs 全年变化范围分别为 21.2-30.7 °C、28.72-35.40 和 2.5-7.0 m, 年均值分别为 (27.8±2.9) °C、32.24±2.25、(3.9±1.4) m。从季节变化来看, 网箱区和对照区的 T 自春季向冬季均呈下降趋势[图 2(a)], 4 个季节间的差异较小 ($P > 0.05$); S 的季节变化为春季 > 秋季 > 冬季 > 夏季[图 2(b)], 夏季网箱区的 S 显著高于夏季对照区 ($P < 0.05$), 其他季节的区域差异不明显 ($P > 0.05$); Trs 的季节变化为春季 > 夏季 > 冬季 > 秋季[图 2(c)], 4 个季节间的差异较小 ($P > 0.05$)。



Different letters on the bars indicated significant differences ($P < 0.05$).

图2 网箱区和对照区水温、盐度和透明度的时空变化

Fig. 2 Spatial-temporal variations of the water temperature, salinity and transparency in cage area and control area

2.1.2 pH值和DO的时空变化特征

pH值和DO监测结果如表2所示,网箱区的pH值和DO全年变化范围分别为8.00—8.29和6.01—8.18 mg/L,年均值分别为 (8.12 ± 0.06) 和 (7.09 ± 0.62) mg/L。对照区的pH值和DO全年变化范围分别为7.94—8.24和5.93—8.52 mg/L,

年均值分别为 (8.12 ± 0.07) 和 (7.10 ± 0.79) mg/L。网箱区和对照区在4个季节的pH值和DO差异都不明显($P > 0.05$)。根据《海水水质标准》(GB 3097—1997)^[10],网箱区和对照区全年的pH值均符合第一类海水水质标准(7.8—8.5);从季节变化来看,网箱区和对照区冬季的pH值最高,其次是春季,夏季和秋季较低[图3(a)]。除了夏季对照区S6站位的DO符合国家第二类海水水质标准(> 5 mg/L)外,其他站位均达到国家第一类海水水质标准(> 6 mg/L),DO的季节变化为冬季 $>$ 春季 $>$ 夏季 $>$ 秋季[图3(b)]。

2.1.3 营养盐的时空变化特征

如表3所示,网箱区DIN、DIP、TN和TP全年变化范围分别为0.014—0.151、0.001—0.018、0.118—1.840和0.002—0.060 mg/L,年均值分别为 (0.070 ± 0.049) 、 (0.007 ± 0.006) 、 (0.469 ± 0.363) 和 (0.017 ± 0.010) mg/L;对照区DIN、DIP、TN和TP全年变化范围分别为0.014—0.150、0.001—0.022、0.111—1.080和0.004—0.047 mg/L,年均值分别为 (0.073 ± 0.047) 、 (0.007 ± 0.007) 、 (0.370 ± 0.238) 和 (0.016 ± 0.011) mg/L;网箱区和对照区4个季节的DIN、DIP、TN和TP均无显著差异($P > 0.05$)。

网箱区和对照区全年的DIN均符合第一类海水水质标准(≤ 0.20 mg/L);从季节变化来看,网箱区和对照区冬季的DIN最高,其次是春季,夏季和秋季较低;从组成形态来看,2个区域均为 $\text{NO}_3\text{-N}$ 最高,其次是 $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$ 最低[图4(a)]。网箱区和对照区DIP的季节变化规律与DIN一致[图4(b)],除了春季对照区S6号站位(0.022 mg/L)和冬季网箱区S4号站位(0.018 mg/L)、S5号站位(0.016 mg/L)的DIP符合第二类海水水质标准(≤ 0.030 mg/L)外,其余站位的DIP均符合第一类海水水质标准(≤ 0.015 mg/L)。网箱区和对照区TN的季节变化规律与DIN相反,为秋季最高,其次是夏季,春季和冬季较低,只有冬季网箱区 $<$ 对照区,其他季节为网箱区 $>$ 对照区,其中夏季网箱区是夏季对照区的1.9倍[图4(c)]。网箱区和对照区的TP年均值接近,但夏季对照区 $>$ 网箱区,其他季节则是网箱区较高[图4(d)]。

表 2 网箱区和对照区各季节的 pH 值和 DO 监测结果

Table 2 Monitoring results of pH value and DO in cage area and control area in four seasons

指标 Index	区域 Area	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter	全年 Annual
pH value	Cage area	8.06–8.22	8.00–8.17	8.06–8.14	8.05–8.29	8.00–8.29
	Average	8.13±0.04 ^a	8.09±0.06 ^a	8.10±0.02 ^a	8.18±0.08 ^a	8.12±0.06 ^a
	Control area	8.13–8.18	7.94–8.24	8.04–8.16	8.01–8.18	7.94–8.24
	Average	8.14±0.02 ^a	8.12±0.13 ^a	8.10±0.05 ^a	8.13±0.08 ^a	8.12±0.07 ^a
DO/(mg/L)	Cage area	6.66–7.50	6.02–7.66	6.01–7.05	7.78–8.18	6.01–8.18
	Average	7.12±0.24 ^a	6.75±0.47 ^a	6.55±0.36 ^a	7.93±0.13 ^a	7.09±0.62 ^a
	Control area	7.05–8.52	5.93–7.17	6.19–6.58	7.84–8.11	5.93–8.52
	Average	7.52±0.67 ^a	6.57±0.58 ^a	6.37±0.16 ^a	7.94±0.12 ^a	7.10±0.79 ^a

Note: values with same superscript letters within the same column were not significantly different ($P>0.05$).

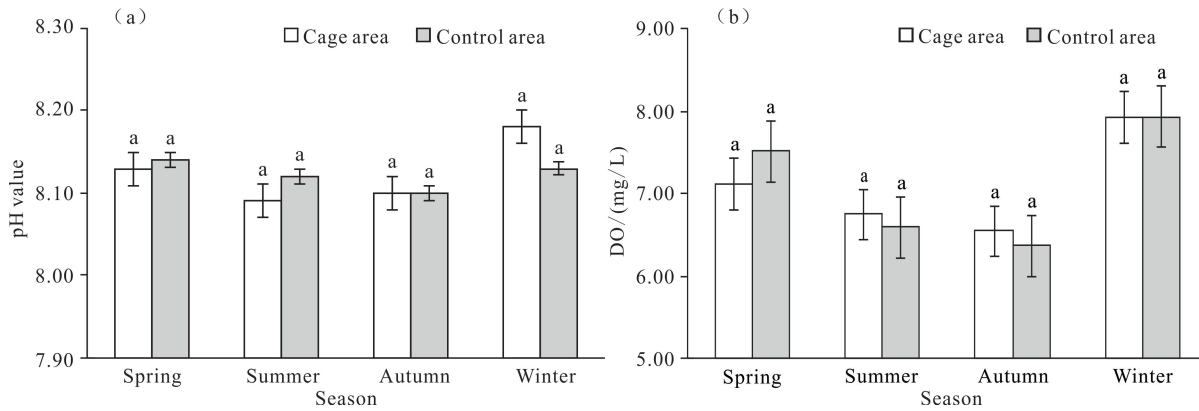


图 3 网箱区和对照区 pH 值、DO 的时空变化

Fig. 3 Spatial-temporal variations of the pH value and DO in cage area and control area

表 3 网箱区和对照区各季节的 DIN、DIP、TN、TP 监测结果

Table 3 Monitoring results of DIN, DIP, TN and TP in cage area and control area in four seasons

Unit: mg/L

指标 Index	区域 Area	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter	全年 Annual
DIN	Cage area	0.044–0.122	0.014–0.059	0.019–0.054	0.134–0.151	0.014–0.151
	Average	0.076±0.025 ^a	0.029±0.014 ^a	0.033±0.011 ^a	0.143±0.005 ^a	0.070±0.049 ^a
	Control range	0.064–0.104	0.028–0.048	0.014–0.057	0.136–0.150	0.014–0.150
	Average	0.080±0.018 ^a	0.035±0.009 ^a	0.037±0.021 ^a	0.142±0.006 ^a	0.073±0.047 ^a
DIP	Cage area	0.002–0.010	0.001–0.002	0.001–0.012	0.011–0.018	0.001–0.018
	Average	0.007±0.003 ^a	0.001±0.000 ^a	0.003±0.004 ^a	0.015±0.002 ^a	0.007±0.006 ^a
	Control area	0.003–0.022	0.001–0.003	0.002–0.005	0.012–0.015	0.001–0.022
	Average	0.011±0.009 ^a	0.002±0.001 ^a	0.002±0.002 ^a	0.014±0.001 ^a	0.007±0.007 ^a
TN	Cage area	0.118–0.412	0.440–1.840	0.450–1.080	0.141–0.274	0.118–1.840
	Average	0.195±0.095 ^a	0.754±0.467 ^a	0.709±0.200 ^a	0.220±0.038 ^a	0.469±0.363 ^a
	Control area	0.111–0.215	0.200–0.520	0.390–1.080	0.212–0.402	0.111–1.080
	Average	0.158±0.048 ^a	0.390±0.144 ^a	0.628±0.315 ^a	0.304±0.082 ^a	0.370±0.238 ^a
TP	Cage area	0.009–0.037	0.017–0.026	0.002–0.060	0.013–0.021	0.002–0.060
	Average	0.016±0.009 ^a	0.021±0.004 ^a	0.015±0.019 ^a	0.016±0.002 ^a	0.017±0.010 ^a
	Control area	0.007–0.011	0.018–0.047	0.004–0.031	0.013–0.015	0.004–0.047
	Average	0.010±0.002 ^a	0.028±0.013 ^a	0.014±0.012 ^a	0.015±0.001 ^a	0.016±0.011 ^a

Note: values with same superscript letters within the same column were not significantly different ($P>0.05$).

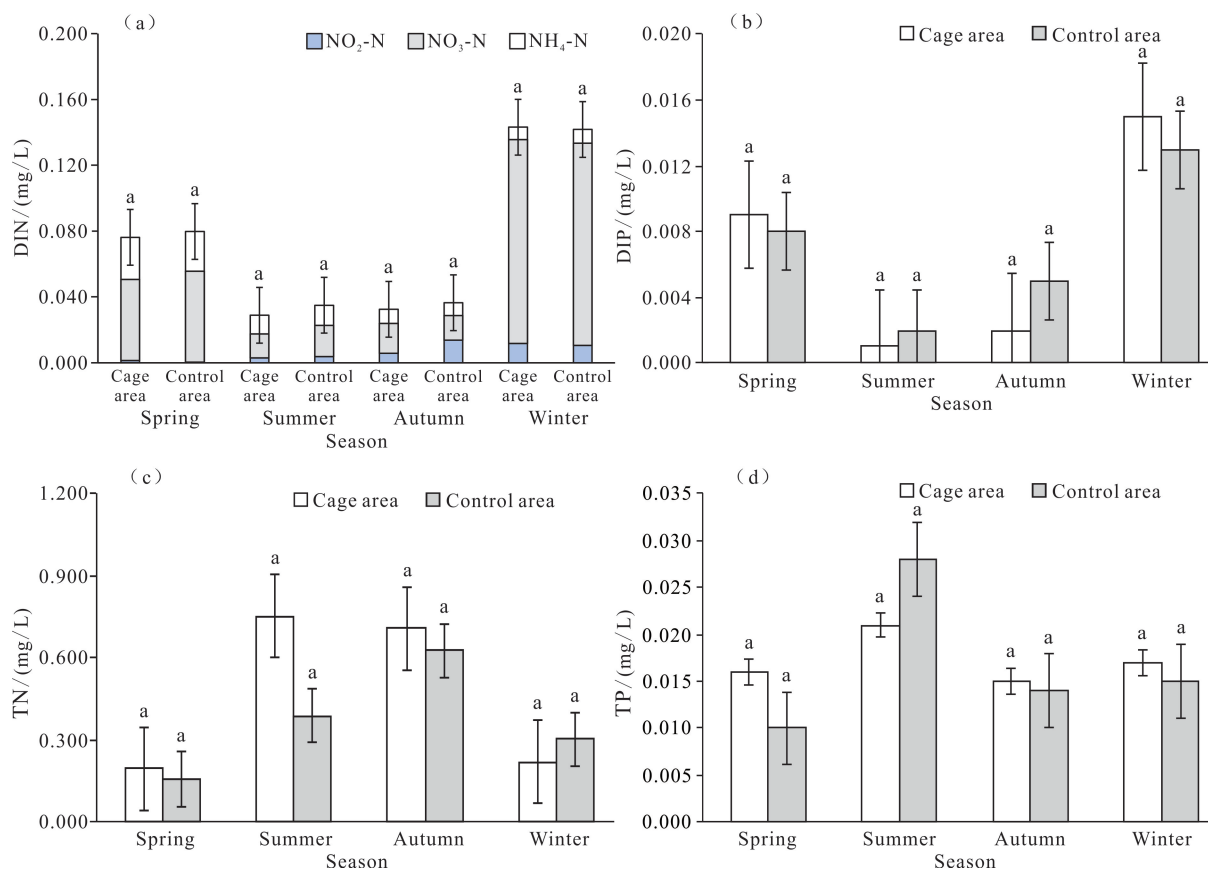


图4 网箱区和对照区 DIN、DIP、TN、TP 的时空变化

Fig. 4 Spatial-temporal variations of DIN, DIP, TN and TP in cage area and control area

2.1.4 COD_{Mn} 和 Chl-*a* 的时空变化特征

COD_{Mn} 是有机污染的一项重要指标。如表 4 所示,网箱区 COD_{Mn} 的全年变化范围为 0.05—3.87 mg/L,年均值为(0.78±0.64) mg/L;对照区 COD_{Mn} 的全年变化范围为 0.35—1.30 mg/L,年均值为(0.73±0.29) mg/L, COD_{Mn} 的区域差异不明($P > 0.05$)。在 4 个季节的调查中,只有秋季网箱区的 S2 号站位(3.87 mg/L)的 COD_{Mn} 超出国家第二类海水水质标准(≤ 3 mg/L),但符合国家第三类海水水质标准(≤ 4 mg/L),其他站位的 COD_{Mn} 均符合第一类

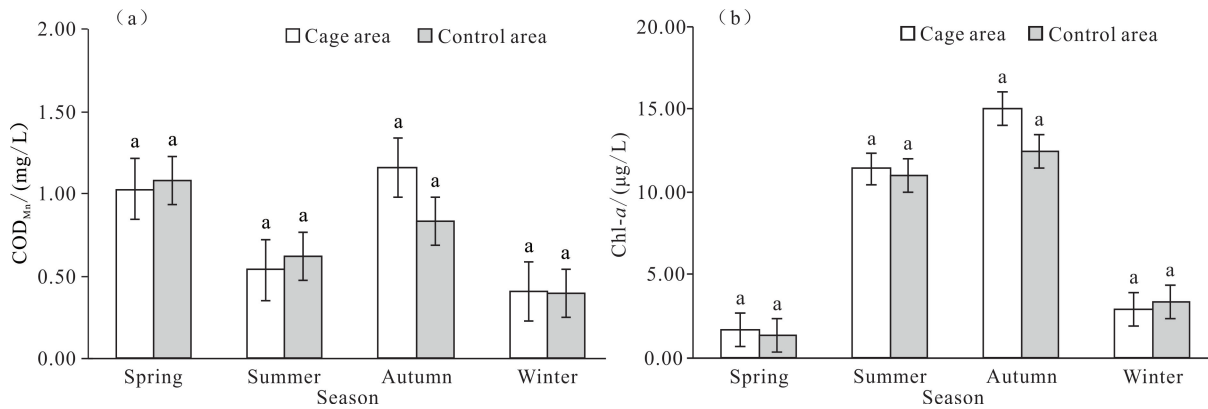
表 4 网箱区和对照区各季节的 COD_{Mn} 和 Chl-*a* 监测结果Table 4 Monitoring results of COD_{Mn} and Chl-*a* in cage area and control area in four seasons

指标 Index	区域 Area	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter	全年 Annual
COD _{Mn} / (mg/L)	Cage area	0.70—1.30	0.05—0.84	0.59—3.87	0.24—0.54	0.05—3.87
	Average	1.03±0.25 ^a	0.54±0.31 ^a	1.16±1.10 ^a	0.41±0.12 ^a	0.78±0.64 ^a
	Control area	0.90—1.30	0.35—0.77	0.66—1.09	0.35—0.44	0.35—1.30
	Average	1.08±0.17 ^a	0.62±0.19 ^a	0.84±0.19 ^a	0.40±0.04 ^a	0.73±0.29 ^a
Chl- <i>a</i> / (μg/L)	Cage area	0.40—3.46	7.20—14.04	10.70—20.33	2.22—3.72	0.40—20.33
	Average	1.65±1.07 ^a	11.39±2.69 ^a	15.04±3.18 ^a	2.91±0.57 ^a	7.75±6.08 ^a
	Control area	0.16—2.59	7.75—14.20	10.19—14.71	2.04—4.38	0.16—14.71
	Average	1.36±1.36 ^a	10.96±2.64 ^a	12.44±2.06 ^a	3.34±1.08 ^a	7.02±5.20 ^a

Note: values with same superscript letters within the same column were not significantly different ($P > 0.05$).

海水水质标准(≤ 2 mg/L);网箱区和对照区 COD_{Mn} 的季节变化为春季和秋季高于夏季和冬季 [图 5(a)]。

网箱区 Chl-*a* 全年变化范围为 0.40—20.33 μg/L,年均值为(7.75±6.08) μg/L;对照区变化范围为 0.16—14.71 μg/L,年均值为(7.02±5.20) μg/L,网箱区 Chl-*a* 年均值高于对照区,但未达到显著水平($P > 0.05$)。网箱区和对照区 Chl-*a* 的季节变化为秋季>夏季>冬季>春季,其中冬季对照区>网箱区,其他季节则是网箱区较高[图 5(b)]。

图5 网箱区和对照区 COD_{Mn}、Chl-a 的时空变化Fig. 5 Spatial-temporal variations of COD_{Mn} and Chl-a in the cage area and control area

2.2 N/P 摩尔比

海水中的氮磷比值(即 N/P 摩尔比)可用于考察后水湾养殖海域的营养盐结构。如表 5 所示,网箱区 N/P 摩尔比的全年变化范围为 15.7—106.3,年均值为 34.7 ± 27.4 ;对照区 N/P 摩尔比的全年变化范围为 16.1—61.3,年均值为 30.3 ± 15.0 ;网箱区 N/P 摩尔比的年均值高于对照区,但未达到显著水平($P > 0.05$)。网箱区 N/P 摩尔比的季节变化为夏季 > 秋季 > 冬季 > 春季,夏季和秋季的 DIN 虽低于春季和冬季,但由于 DIP 含量较低,测定值接近方法检出限,因此网箱区夏季和秋季的 N/P 摩尔比较高;对照区 N/P 摩尔比的季节变化为夏季 > 冬季 > 春季 > 秋季;除了秋季网箱区明显高于秋季对照区外,其他季节 2 个区域的 N/P 摩尔比接近(图 6)。

表 5 网箱区和对照区各季节的 N/P 摩尔比、有机污染评价指数和营养指数

Table 5 N/P ratio, organic pollution index and eutrophication index of cage area and control area in four seasons

指标 Index	区域 Area	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter	全年 Annual
N/P ratio	Cage area	15.7—25.4	16.1—106.3	20.7—91.9	19.5—23.3	15.7—106.3
	Average	20.4 ± 5.2^a	54.9 ± 38.2^a	41.9 ± 33.6^a	21.4 ± 1.6^a	34.7 ± 27.4
	Control area	16.1—30.6	42.1—61.3	16.1—27.3	23.3—26.0	16.1—61.3
	Average	23.4 ± 10.3^a	51.7 ± 13.6^a	21.7 ± 3.9^a	24.6 ± 1.8^a	30.3 ± 15.0
A	Cage area	-0.22—0.85	-0.89—0.66	-0.70—0.06	0.88—1.00	-0.89—1.00
	Average	0.27 ± 0.44^a	-0.79 ± 0.10^a	-0.45 ± 0.35^a	0.94 ± 0.05^a	-0.01 ± 0.73^a
	Control area	0.17—0.19	-0.75—0.57	-0.72—0.06	0.78—0.85	-0.75—0.85
	Average	0.18 ± 0.01^a	-0.66 ± 0.13^a	-0.33 ± 0.55^a	0.81 ± 0.05^a	0.00 ± 0.63^a
N _i	Cage area	1.04—2.10	2.63—4.34	2.98—4.82	1.28—1.40	1.04—4.82
	Average	1.35 ± 0.51^a	3.26 ± 0.77^a	3.57 ± 0.85^a	1.34 ± 0.06^a	2.38 ± 1.23^a
	Control area	0.89—1.25	2.86—2.89	3.02—3.05	1.35—1.62	0.89—3.05
	Average	1.07 ± 0.25^a	2.88 ± 0.02^a	3.04 ± 0.02^a	1.48 ± 0.19^a	2.12 ± 0.92^a

Note: values with same superscript letters within the same column were not significantly different ($P > 0.05$).

2.3 有机污染评价指数

如表 5 所示,网箱区(S2—S5 站位)A 值的全年变化范围为 -0.89—1.00,年均值为 -0.01 ± 0.73 ,对照区(S1、S6 站位)变化范围为 -0.75—0.85,年均值为 0.00 ± 0.63 ,网箱区和对照区的 A 值差异不明显($P > 0.05$)。图 7 展示了各站位的 A 值分布,春季 S3 号站位水质良好($A < 0$),其他站位水质较好($0 < A \leq 1$);夏季 S1—S6 号站位的水质良好($A < 0$);秋季 S2 号和 S6 号站位水质较好($0 < A \leq 1$),其他站位水质良好($A < 0$);冬季 S1—S6 号站位的水质较好($0 < A \leq 1$)。整体来看,网箱区和对照区季节变化特征相同,为冬季 > 春季 > 秋季 > 夏季,冬季和春季水质较好($0 < A \leq 1$),夏季和秋季水质良好($A < 0$)。

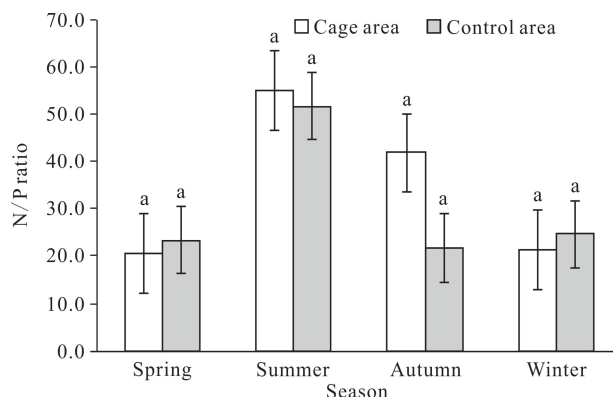


图6 网箱区和对照区 N/P 摩尔比的时空变化

Fig. 6 Spatial-temporal variation of N/P ratio in cage area and control area

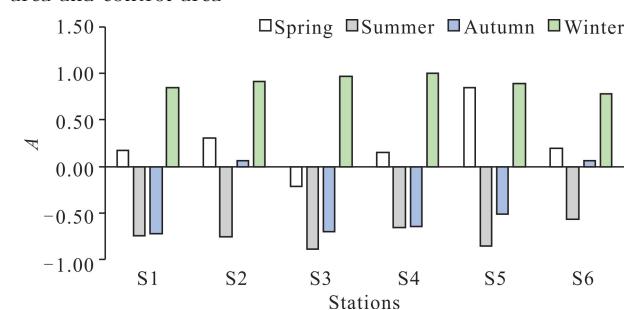


图7 各调查站位的 A 值分布

Fig. 7 Distribution of A value of sampling stations

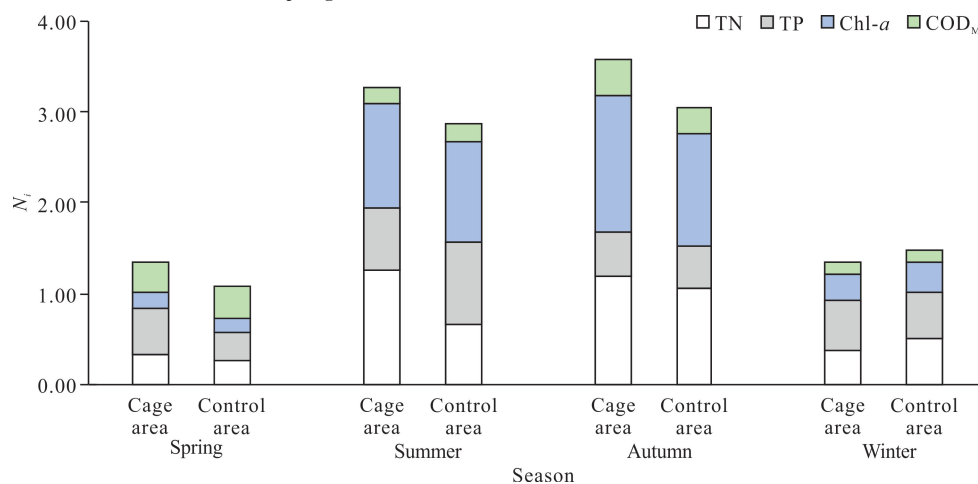
图8 网箱区和对照区各季节的 N_i 值分布Fig. 8 Distribution of N_i value in cage area and control area in four seasons

表6 营养指数与环境因子的相关性分析

Table 6 Correlation analysis between eutrophication index and environmental factors

季节 Season	透明度 Transparency	盐度 Salinity	温度 Temperature	pH 值 pH value	DO	COD _{Mn}	DIP	TP	DIN	TN	Chl-a
Spring	0.328	-0.098	-0.146	0.788	0.257	0.777	-0.156	0.920**	0.434	0.983**	0.250
Summer	0.276	0.129	-0.363	-0.103	0.296	0.140	-0.371	0.288	0.519	0.587	0.320
Autumn	-0.305	-0.484	0.045	-0.477	-0.719	0.926**	0.931**	0.950**	0.049	0.582	0.585
Winter	-0.616	-0.238	0.639	-0.057	-0.479	0.111	0.186	0.111	-0.852*	0.915*	0.793

Note: * represents significant correlation ($P < 0.05$), ** represents extremely significant correlation ($P < 0.01$).

2.4 营养化状况

如表5所示,网箱区 N_i 值的全年变化范围为 1.04—4.82, 年均值为 2.38 ± 1.23 , 对照区 N_i 值的全年变化范围为 0.89—3.05, 年均值为 2.12 ± 0.92 , 网箱区和对照区的 N_i 值无明显差异 ($P > 0.05$)。在4个季节调查中,春季网箱区和对照区均为贫营养水平 ($N_i < 2$); 夏季网箱区为富营养水平 ($N_i > 3$), 对照区为中营养水平 ($2 \leq N_i \leq 3$); 秋季网箱区和对照区均为富营养水平 ($N_i > 3$), 冬季网箱区和对照区均为贫营养水平 ($N_i < 2$)。从季节变化来看,网箱区和对照区 N_i 值的季节变化特征相似,为秋季最高,其次是夏季,春季和秋季较低(图8)。从全年范围来看,夏季和秋季 Chl-a 对网箱区 N_i 值的贡献最大,其次是 TN 和 TP, COD_{Mn} 的贡献较小。后水湾海域的 N_i 值与环境因子的相关性分析表明,春季与 TN、TP 呈极显著正相关,秋季与 COD_{Mn}、DIP、TP 呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 冬季与 TN 为显著正相关 ($P < 0.05$), 与 DIN 为显著负相关(表6)。

3 讨论

3.1 与国内其他养殖海域的水环境因子比较

后水湾网箱养殖的主要品种为卵形鲳鲹 (*Trachinotus ovatus*), 通常在每年春季末投苗, 夏、秋季为养殖高峰期, 并开始陆续收捕, 在冬季基本完成网箱收捕, 到次年春季又开始新一轮养殖。通过对养殖周期内的水环境因子分析发现, 后水湾海水的 DIN、COD_{Mn}、DIP、DO、pH 值基本符合第一类海水水质标准, 网箱区和对照区水环境因子的差异不明显, 即使是在养殖投饵高峰期, 2 个区域内的水质仍然较好, 这与李俊峰等^[22] 历年研究发现该海域水质较好的结果一致, 说明网箱养殖活动对该海域水环境因子影响较小。本研究中, 网箱区和对照区 DIN 在 4 个季节的主要形态均为 NO₃-N, 与蓝文陆等^[23] 和李慧莹^[24] 的研究结果相同, 说明后水湾海水环境具有

表 7 后水湾养殖海域与其他养殖海域的水环境因子比较

Table 7 Comparison of water environmental factors between Houshui Bay and other aquaculture sea areas

海域 Sea area	年份 Year	DO/ (mg/L)	COD _{Mn} / (mg/L)	DIN/ (mg/L)	DIP/ (mg/L)	TN/ (mg/L)	TP/ (mg/L)
Houshui Bay (this study)	2018—2019	7.09	0.78	0.070	0.007	0.469	0.017
Qingzhou Bay ^[8]	2022	5.91			0.020		
Yueqing Bay ^[9]	2016—2018	6.51		0.830	0.052		
Maniao Bay ^[24]	2019	6.41		0.128	0.007	0.257	0.012
Wanning Xiaohai ^[25]	2011	6.13	0.55	0.092	0.040		
Xiangshan Bay ^[26]	2010	3.66—7.01	1.06	0.907	0.060		

Note: the data of Houshui Bay aquaculture sea is the annual average of cage area.

3.2 水环境因子的季节变化特征分析

海水环境因子的季节变化受到多种因素影响, 如海洋环流、气候条件、生物活动和人类活动等。本研究表明后水湾网箱区和对照区 T、S 和 Trs 的季节变化相同, 2 个区域春季的 T、S 和 Trs 均值最高, 冬季的 T 最低, 夏季的 S 最低, 秋季的 Trs 最低, 这些因子的季节变化可能与海南岛的海洋性热带季风气候特点有关。海南岛干湿分明, 5—10 月多雨, 降水量为 1 312 mm, 达到全年的 80%, 其中 8—9 月降水量最多, 因此夏季的 S 最低; 春季光照增强, 气温升高, T 和 S 也相应较高; 在秋季, 台风频发导致的沉积物再悬浮、藻类繁殖加快、鱼类活动和代谢增强可能是引起水体 Trs 降低的主要原因。本研究中, 后水湾网箱区和对照区夏季、秋季的 DO、pH 值、DIP 和 DIN 含量低于春季、冬季, TN 和 Chl-a 则高于春季、冬季, TP 在夏季最高。其中 DO 和 pH 值的季节变

较强氧化能力和较好自净能力。与国内其他海域相比(表 7), 后水湾网箱区的 DO 处于较高水平, 而钦州湾^[8]、乐清湾^[9]、马袅湾^[24]、万宁小海^[25]、象山港^[26] 养殖海域的 DO 较低。本研究中, 网箱区 COD_{Mn} 的年均值为 0.78 mg/L, 该值低于象山港网箱养殖海域^[26], 但稍高于万宁小海海域^[25], 最大值是秋季网箱区的 S2 站位, 达到第三类海水水质标准 (≤ 4 mg/L), 该站位 COD_{Mn} 异常可能受饵料影响。网箱区 DIN 的年均值低于其他养殖海域^[9, 24-26], 并且不足象山港养殖海域^[26] 的 1/10, DIP 与马袅湾养殖海域^[24] 相同, 低于钦州湾^[8]、乐清湾^[9]、万宁小海^[25] 和象山港^[26] 养殖海域。尽管乐清湾^[9] 和象山港^[26] 养殖海域未测定海水 TN 和 TP 含量, 但根据其 DIN 和 DIP 浓度可以推测后水湾养殖海域的 TN 和 TP 处于中等水平。

化与大鹏澳海域^[27] 研究结果一致, 而 DIP 和 DIN 则与大鹏澳海域春季、冬季高于夏季、秋季的研究结果相反。后水湾养殖海域夏季、秋季的 DO 和 pH 值相对较低, 这主要有两方面的原因: 一方面是气温升高; 另一方面, 夏季和秋季是鱼类生长关键期, 此时海洋生物呼吸作用增强, 以及养殖残饵、排泄物中的有机物分解消耗水中的 DO, 并同时释放二氧化碳^[28]。夏季、秋季是对海域养殖鱼类输出影响最大的季节, 水中 DIP 和 DIN 含量反而低于春季、冬季, 原因可能是夏季、秋季的水温适宜、光照充足, 促进浮游植物生长, 对 DIN 和 DIP 的消耗增加; 而春季浮游植物活动较弱, 对 DIN 和 DIP 的需求较少, 冬季浮游植物消亡使得水中营养盐得到补充。庞巧珠等^[29] 研究发现, 黎安港海域浮游植物生长旺盛的季节, 水中 DIN 和 DIP 含量也较低。本研究中 TN 的季节变化特征与 DIN 相反, 为夏季、秋季相对较高, 夏季网箱区的 TN

含量是对照区的 1.9 倍;TP 在夏季最高,夏季对照区是网箱区的 1.3 倍。TN 和 TP 的季节变化除了受浮游植物影响外,还受到以下两方面的影响:一方面受网箱养殖鱼类自身产生的污染影响;另一方面可能与降雨输入的陆源污染物中富含有机氮和有机磷有关。

3.3 营养盐限制情况分析

浮游植物生长需按照一定比例吸收生源要素,浮游植物对营养盐 DIP 和 DIN 的需求阈值分别为 0.014 0 和 0.003 1 mg/L,以此作为绝对限制标准^[23,30,31]。当营养盐浓度低于浮游植物对营养盐的需求阈值时,其为影响海区浮游植物生长的绝对限制因子;当营养盐含量高于阈值时,按照郭卫东等^[32]的分级标准来确定限制因子,即 N/P 摩尔比 >30 ,存在磷限制,N/P 摩尔比 <8 ,则存在氮限制。本研究中,后水湾网箱区和对照区夏季、秋季的 DIP 含量低于浮游植物对营养盐的需求阈值,故海区出现绝对的磷限制;春季和冬季的 DIP 和 DIN 含量均高于浮游植物对营养盐的需求阈值,因此需要考虑这 2 个季节的潜在氮磷限制情况。网箱区春季和冬季的 N/P 摩尔比均值分别为 20.4 ± 5.2 和 21.4 ± 1.6 ,对照区春季和冬季的 N/P 摩尔比均值分别为 23.4 ± 10.3 和 24.6 ± 1.8 ,说明 2 个区域春季和冬季浮游植物生长不受氮磷限制。后水湾网箱区全年 N/P 摩尔比为 15.7—106.3,均值为 33.2 ± 23.7 ,网箱区和对照区的 N/P 摩尔比无明显差异($P > 0.05$)。从全年均值来看,后水湾养殖海域整体上出现氮相对过剩和磷不足的状况,这与张际标等^[33]研究发现海南岛近岸海域整体表现出磷限制的结果一致。本研究中,后水湾养殖海域营养盐限制的季节性差异与浮游植物的生长阶段密切相关,夏季和秋季浮游植物的活动增强,消耗水中的营养盐,使得海区出现由于磷限制引起的 N/P 摩尔比失衡现象;而春季的生物活动较弱,致使营养盐在水中积累,在冬季,生物消亡使得水中营养盐得到补充,因此磷限制状况消失。

3.4 有机污染水平分析

韩芳^[26]研究发现象山网箱养殖海域水体有机物污染严重,原因在于以小杂鱼为饵料的利用率低,致使大量残饵产生,这些残饵是海水有机物污染的重要根源。本研究中后水湾养殖海域水质状况较好,监测期间未出现受到有机物污染的情况,网箱区和对照区的 A 值差异不明显($P > 0.05$)。这与梁庆洋等^[28]的研究结果相似,夏季和秋季是鱼类养殖投饵高峰期,

A 值反而较低,原因可能与深水网箱养殖输出的粪便和残饵等污染物较少,养殖鱼类所带来的营养物质很快被消耗掉有关。网箱养殖鱼类产生的有机污染物主要是残饵和粪便^[34]。相较于万宁小海^[25]、象山港网箱养殖区^[26]和海南东寨港海域^[35],本研究中后水湾养殖海域水体的有机污染等级较低。主要原因有以下两方面:一方面是后水湾深水网箱养殖鱼类全程投喂人工配合饲料,相比以鲜杂鱼作为饵料的传统养殖模式,鱼类在吞食人工配合饲料时产生的有机碎屑较少;另一方面是深水网箱布设在水深较深的海域,水动力作用较强,能较好地稀释和扩散养殖产生的有机颗粒物。因此深水网箱养殖对后水湾养殖海域的有机污染影响较小。

3.5 富营养化水平分析

温玉娟等^[36]研究发现北部湾铁山港养殖区中绝大部分站位为中度富营养水平。王宪等^[37]研究表明养殖水体内具有较高浓度的活性磷酸盐和较大的化学耗氧量是造成水体富营养化的主要原因,表现为水中有较高的 Chl-*a* 含量,造成这种富营养化的水质状况与养殖周期的长短、季节的变化密切相关。彭鹏飞等^[38]研究发现大鹏澳海水鱼类网箱养殖海域秋季的水质为贫营养水平,而网箱区冬季和春季是中营养水平,夏季是富营养水平。本研究中,后水湾养殖海域在春季和冬季的水质处于贫营养水平;在夏季和秋季处于富营养水平,而且网箱区局部海域的富营养化问题较为突出。可见养殖高峰期在提升后水湾养殖海域生产力的同时,也带来较大的水体富营养化压力。夏季和秋季的 Chl-*a*、TP 及 TN 对网箱区 N_i 值的贡献较高,而 COD_{Mn} 的贡献较小。结合相关性分析结果可知,TP、TN 是造成夏、秋季水体富营养化的主要原因。

4 结论

后水湾养殖海域在养殖周期内的水质状况较好,未出现受到有机污染的情况,水体中 DO、pH 值、DIN、DIP 和 COD_{Mn} 等基本符合第一类海水水质标准,网箱区与对照区的水环境因子差异不明显。在整个调查周期中,后水湾养殖海域 DO、pH 值、DIN 和 DIP 的季节变化为春季、冬季高于夏季、秋季,TN 和 Chl-*a* 则是夏季、秋季较高。与国内其他养殖海域相比,在后水湾养殖海域中,水体的 DO 较高,DIN 和 DIP 较低, COD_{Mn} 、TP 和 TN 为中等水平。本研究中,春季、冬季浮游植物生长不受氮磷限制,后水湾海

域处于贫营养化水平,而夏季、秋季浮游植物生长受到磷限制,后水湾养殖海域处于富营养化水平,而且网箱区局部海域的富营养化问题较为突出,其中TP、TN是影响水体富营养化水平的重要因子。因此,应加强对后水湾养殖海域的环境监测工作,避免长期的环境积累效应导致水质状况下降,并及时防范由此产生的生态环境灾害给养殖业带来的损失。

参考文献

- [1] KARAKASSIS I, TSAPAKIS M, HATZIYANNI E, et al. Impact of cage farming of fish on the seabed in three Mediterranean coastal areas [J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2000, 57(5): 1462-1471.
- [2] YOKOYAMA H. Environmental quality criteria for fish farms in Japan [J]. *Aquaculture*, 2003, 226(1/2/3/4): 45-56.
- [3] 韦献革, 温琰茂, 王文强, 等. 哑铃湾网箱养殖区底层水营养盐的分布与评价[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2005, 44(4): 115-119.
- [4] 黄长江, 杜虹, 陈善文, 等. 2001—2002年柘林湾大量营养盐的时空分布[J]. *海洋与湖沼*, 2004, 35(1): 21-29.
- [5] DU J, ZHAO H X, WANG Y, et al. Presence and environmental risk assessment of selected antibiotics in coastal water adjacent to mariculture areas in the Bohai Sea [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 177: 117-123.
- [6] 车潇炜, 孔宪喻, 刘艳芳, 等. 基于支持向量机的渤海富营养化快速测评技术研究[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2017, 47(7): 72-78, 95.
- [7] 姜欢欢. 渤海湾近岸海域海水增养殖区富营养化评价[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- [8] 黄丽艳, 黄鹤, 廖日权. 钦州湾近岸网箱养殖期磷的分布特征研究[J]. *广西科学*, 2023, 30(5): 910-921.
- [9] 李妙聪, 刘文胜, 江锦花. 乐清湾海水养殖环境水质质量时空变化及富营养化状况评价[J]. *海洋环境科学*, 2021, 40(5): 724-731.
- [10] 国家环境保护局. 海水水质标准: GB 3097—1997 [S]. 北京: 环境科学出版社, 2004.
- [11] 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. 2023中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2023.
- [12] 闫玉科, 魏紫珊, 林志豪. 海南省深水网箱养殖业发展研究: 以临高县为例[J]. *渔业信息与战略*, 2021, 36(1): 9-15.
- [13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 海洋监测规范 第7部分: 近海污染生态调查和生物监测: GB 17378.7—2007 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 海洋调查规范 第4部分: 海水化学要素调查: GB/T 12763.4—2007 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 海洋监测规范 第4部分: 海水分析: GB 17378.4—2007 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [16] FERTIG B, KENNISH M J, SAKOWICZ G P, et al. Mind the data gap: identifying and assessing drivers of changing eutrophication condition [J]. *Estuaries and Coasts*, 2014, 37(S1): 198-221.
- [17] MOZUMDER C, TRIPATHI N K, TIPDECHO T. Ecosystem evaluation (1989—2012) of Ramsar wetland Deepor Beel using satellite-derived indices [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, 186(11): 7909-7927.
- [18] LAI J X, JIANG F J, KE K, et al. Nutrients distribution and trophic status assessment in the northern Beibu Gulf, China [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2014, 32(5): 1128-1144.
- [19] MEYER-REIL L A, KÖSTER M. Eutrophication of marine waters: effects on benthic microbial communities [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2000, 41(1/2/3/4/5/6): 255-263.
- [20] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 海洋调查规范 第9部分: 海洋生态调查指南: GB/T 12763.9—2007 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [21] 陈于望. 厦门港海域营养状况的分析[J]. *海洋环境科学*, 1987, 6(3): 14-19.
- [22] 李俊峰, 薛东梁, 李洋, 等. 临高后水湾水质环境分析及评价[J]. *广东化工*, 2017, 358(44): 84-86.
- [23] 蓝文陆, 彭小燕. 2003~2010年铁山港湾营养盐的变化特征[J]. *广西科学*, 2011, 18(4): 380-384, 391.
- [24] 李慧莹. 海南马袅湾网箱养殖海域海水营养盐与表层沉积物重金属的含量分布及污染评价[D]. 海口: 海南大学, 2021.
- [25] 朱志雄, 骆丽珍, 陈石泉, 等. 海南小海海水富营养化和重金属特征分析与评价[J]. *海洋湖沼通报*, 2020(5): 131-138.
- [26] 韩芳. 象山港网箱养殖富营养化状况及鱼藻生态修复模式研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2012.
- [27] 黄洪辉, 林钦, 王文质, 等. 大鹏澳海水鱼类网箱养殖对水环境的影响[J]. *南方水产*, 2005, 1(3): 9-17.

- [28] 梁庆洋, 齐占会, 巩秀玉, 等. 大亚湾鱼类深水网箱养殖对环境的影响[J]. 南方水产科学, 2017, 13(5): 25-32.
- [29] 庞巧珠, 骆丽珍, 曾广锐, 等. 黎安港海水和沉积物中叶绿素 *a* 含量及与环境因子的关系分析[J]. 海洋湖沼通报, 2021(1): 133-141.
- [30] 阚文静, 张秋丰, 石海明, 等. 近年来渤海湾营养盐变化趋势研究[J]. 海洋环境科学, 2010, 29(2): 238-241.
- [31] NELSON D M, BRZEZINSKI M A. Kinetics of silicic acid uptake by natural diatom assemblages in two gulf stream warm-core rings [J]. Marine Ecology Progress Series, 1990, 62(3): 283-292.
- [32] 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.
- [33] 张际标, 张鹏, 戴培东, 等. 海南岛近岸海域溶解无机磷时空分布及富营养化[J]. 中国环境科学, 2019, 39(6): 2541-2548.
- [34] 蒋增杰, 方建光, 毛玉泽, 等. 宁波南沙港网箱养殖水域营养状况评价及生物修复策略[J]. 环境科学与管理, 2010, 35(11): 162-167.
- [35] 李鹏山, 谢跟踪, 李巧香, 等. 东寨港红树林国家级自然保护区海水水质状况分析与评价[J]. 海洋湖沼通报, 2010(4): 53-60.
- [36] 温玉娟, 徐轶肖, 黎慧玲, 等. 广西北部湾近岸海域营养盐与富营养化状态研究[J]. 广西科学, 2022, 29(3): 541-551.
- [37] 王宪, 张晓萍, 李燕云, 等. 养殖水体营养状态及自净能力的分析[J]. 台湾海峡, 2000, 19(2): 177-181.
- [38] 彭鹏飞, 胡超群, 于宗赫, 等. 大鹏澳海水鱼类网箱养殖区水环境的时空变化及营养状态分析[J]. 热带海洋学报, 2012, 31(2): 110-117.

Temporal-Spatial Variations and Nutrient Status in the Aquatic Environment of Deep-Water Cage Aquaculture in Houshui Bay

PANG Qiaozhu, CHEN Dandan, CHEN Xiaohui, XIE Haiqun, LIANG Jilin^{* *}

(Hainan Academy of Ocean and Fisheries Sciences, Haikou, Hainan, 571126, China)

Abstract: The effects of cage aquaculture on the aquatic environment of Houshui Bay were studied. The data from aquatic environment surveys for deep-water cage aquaculture that were conducted in May, August, October 2018 and January 2019 were collected. The environmental factors were compared between the cage area and control area. The organic pollution index and eutrophication index were adopted to evaluate the eutrophication level of the marine area with deep-water cage aquaculture and explore the relationship between eutrophication and environmental factors. The results showed that pH values, Dissolved Inorganic Nitrogen (DIN), Dissolved Oxygen (DO), Dissolved Inorganic Phosphorus (DIP), and Chemical Oxygen Demand (COD_{Mn}) met the standards of class I seawater quality. There was no significant difference in environmental factors between the cage area and the control area ($P > 0.05$). Spring and winter were more suitable for the growth of phytoplankton, while in summer and autumn, phytoplankton growth and reproduction were limited by DIP. The organic pollution index indicated that the seawater in Houshui Bay had good quality and no organic pollution. The eutrophication index indicated that the eutrophication level was high during the peak period of feeding in aquaculture, and the eutrophication was serious in the cage area, which was mainly influenced by Total Phosphorus (TP) and Total Nitrogen (TN). In the future, efforts should be made to strengthen the environmental monitoring of deep-water cage aquaculture in Houshui Bay, so as to avoid the long-term cumulative impact of aquaculture on the water quality.

Key words: Houshui Bay; deep-water cage aquaculture; aquatic environment; eutrophication

责任编辑: 梁 晓, 于子涵