

# 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\*

彭鹏飞<sup>1,2</sup>, 胡超群<sup>1</sup>, 于宗赫<sup>1</sup>, 李海鹏<sup>1,2</sup>

1. 中国科学院海洋生物资源可持续利用重点实验室, 广东省应用海洋生物学重点实验室, 中国科学院南海海洋研究所, 广东 广州 510301; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049

**摘要:** 通过 2009 年 10 月—2010 年 7 月对深圳大亚湾大鹏澳网箱养殖区、网箱外 0.5km(对照区 1)和网箱外 2km(对照区 2)等 3 个区域的现场调查, 阐明了海水中温度、盐度、pH、溶解氧(dissolved oxygen, DO), 化学需氧量(chemical oxygen demand, COD<sub>Mn</sub>)、叶绿素 a(Chl a)和营养盐等水质因子的时空分布特征及相关性, 并评价了海区的营养状态。结果表明, 与两个对照区域相比较, 大鹏澳网箱养殖对海水中的 COD<sub>Mn</sub>、Chl a 和 SiO<sub>3</sub>-Si 的影响不明显, 对 DO、pH、PO<sub>4</sub>-P、NO<sub>2</sub>-N、NH<sub>4</sub>-N、总氮(total nitrogen, TN)和总磷(total phosphorus, TP)的影响相对较大, 其中对 NH<sub>4</sub>-N 的影响已经扩散到了网箱外 0.5km 区域。网箱养殖区在冬季和春季是中营养水平, 而夏季则是富营养水平。总体来说, 大鹏澳网箱养殖区水质有恶化的趋势, 必须采取一定的有效措施对网箱区环境进行合理调控。

**关键词:** 网箱养殖; 大鹏澳; 水环境; 营养状态; 营养盐

中图分类号: P762.33; P734.44 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2012)02-0110-08

## Analysis of spatial-temporal variation and nutritional status of water environment in the Dapeng Cove

PENG Peng-fei<sup>1, 2</sup>, HU Chao-qun<sup>1</sup>, YU Zong-he<sup>1</sup>, LI Hai-peng<sup>1, 2</sup>

1. Key Laboratory of Marine Bio-resource Sustainable Utilization, Key Laboratory of Marine Biological Application of Guangdong Province, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** Water environment was investigated in three areas, cage culture area, 0.5km (control area 1) and 2km (control area 2) outside the cage in the Dapeng Cove of Daya Bay from October 2009 to July 2010 on a seasonal basis. The spatial-temporal variation and the relevance of temperature, salinity, pH, dissolved oxygen (DO), chemical oxygen demand (COD<sub>Mn</sub>), chlorophyll a (Chl a) and nutrients of seawater in these areas were analyzed and their nutritional status were also evaluated. The results showed that DO, pH, PO<sub>4</sub>-P, NO<sub>2</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N, TN (total nitrogen) and TP (total phosphorus) in the seawater of the Dapeng Cove were affected by the fish farm, while COD<sub>Mn</sub>, Chl a and SiO<sub>3</sub>-Si were less affected. The water inside the cage area was in the middle nutritional level both in winter and spring, while it showed eutrophication in summer. In general, water quality in the cage culture area of the Dapeng Cove was deteriorating, and some effective control measures should be taken to regulate the water environment.

**Key words:** cage culture; Dapeng Cove; water environment; nutritional status; nutrient

收稿日期: 2010-12-18; 修订日期: 2011-03-07。卢冰编辑; 林强校对

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目群项目(KZCX2-YW-Q07-03); 国家科技支撑计划项目(2011BAD13B02)

作者简介: 彭鹏飞(1985—), 男, 湖北省天门市人, 硕士研究生, 主要从事养殖生态及海洋生物资源利用的研究。

E-mail: pengpengfei08@mails.gucas.ac.cn

通信作者: 胡超群, 研究员, 博导。Email: cqhu@scsio.ac.cn

\*感谢中国科学院南海海洋研究所陈浩如、孙丽华和钟瑜等同志在样品采集和分析过程中提供的大力支持和帮助!

网箱养殖是当今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,网箱养殖对环境的影响也受到广泛关注<sup>[1-4]</sup>。在海水网箱养殖过程中,残饵、粪便以及鱼类排泄物等给养殖环境带来了沉重的负担,极易引起养殖区水质恶化等一系列环境问题<sup>[5-7]</sup>。大鹏澳位于深圳大亚湾的西南部,为半封闭式的浅海小内湾,海水交换条件较差,已有 20 余年的网箱养殖历史,目前其养殖面积已超过 30hm<sup>2</sup><sup>[8]</sup>。近年来,大鹏澳渔排及周边常住和流动人口的增加、旅游业的蓬勃发展以及部分养殖户的生产转型,给大鹏澳水环境带来了新的压力,而关于该网箱养殖区生态环境特征的调查基本集中在 2004 年以前<sup>[8-16]</sup>。为了科学评价大鹏澳海水网箱养殖对环境的影响状况,并为促进和维护海水网箱养殖的健康、稳定、可持续发展提供依据,我们于 2009—2010 年分 4 个季节对大鹏澳网箱养殖区的水环境进行了现场调查,监测了温度、盐度、pH、溶解氧(dissolved oxygen, DO),化学需氧量(chemical oxygen demand, COD<sub>Mn</sub>)、叶绿素 a(Chl a)和营养盐等环境指标,并根据有关调查结果,对海区水环境特征进行了阐述。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究海域

本研究选取大亚湾大鹏澳网箱养鱼区为主要研究地点。据现场调查,研究海域共有渔排约 400 组,每组有网箱 9—12 个,多为 3m×3m×3m 的浮动式网箱,主要养殖品种有鲑点石斑鱼 *Epinephelus trimaculatus*、红鳍笛鲷 *Lutjanus erythropterus*、军曹鱼 *Rachycentron canadus*、美国红鱼 *Sciaenops ocellatus*、鲈鱼 *Lateolabrax japonicus* 等,目前有部分渔排已转型开展海上旅游业,养鱼以观赏为主要目的。养殖所用饵料主要为冰鲜小杂鱼,人工配合饵料使用较少,日投饵量约为鱼体重的 3%—10%。

### 1.2 站点设置及样品采集

在大鹏澳网箱养鱼区及周边海域共设置 3 个调查区域,共 11 个站位,其中网箱区 6 个站位(1—6 号),对照区 1(网箱外 0.5km)3 个站位(7—9 号),对照区 2(网箱外 2km)2 个站位(10—11 号)。站位设置如图 1。

分别在 2009 年 10 月(秋季),2010 年 1 月(冬季),2010 年 4 月(春季)和 2010 年 7 月(夏季)对大鹏澳网箱养殖区及周边海域的水环境进行了监测。为避免潮汐影响,调查选取在高潮时进行水样采集,用 YSI6920 多功能水质分析仪现场测定采样位置的温

度、盐度、pH、DO 和 Chl a,用透明度盘测定海水透明度,用 Niskin 采水器采集水样:水深小于 5m 的海区采集中层海水;大于 5m 的海区采集表底层海水,取其平均值作为该点的观测值。

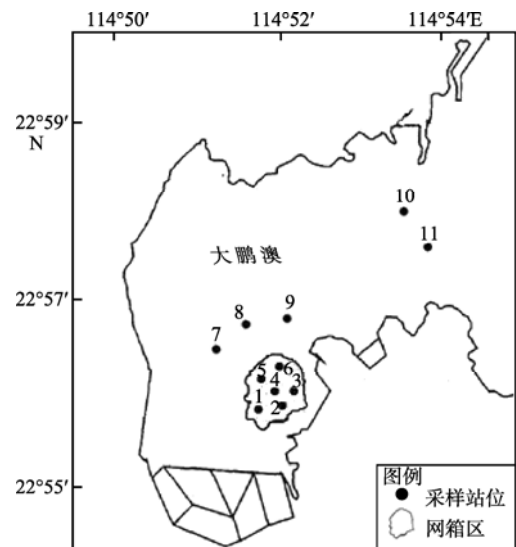


图 1 大鹏澳网箱养殖区采样站位图

Fig. 1 Sampling stations of fish cage aquaculture area in the Dapeng Cove

### 1.3 样品分析

样品采集后立即运回实验室,按照《海洋调查规范》(GB/T 12763-2007)<sup>[17]</sup>和《海洋监测标准》(GB 17378-2007)<sup>[18]</sup>中规定的方法进行水质分析。分析项目及方法如下:1)亚硝酸盐(NO<sub>2</sub>-N)分析用重氮-偶氮法;2)硝酸盐(NO<sub>3</sub>-N)分析用镉还原法;3)氨氮(NH<sub>4</sub>-N)分析用次溴酸钠氧化法;4)活性磷酸盐(PO<sub>4</sub>-P)分析用抗坏血酸还原磷钼蓝法;5)活性硅酸盐(SiO<sub>3</sub>-Si)分析用硅钼黄法;6)总氮(TN)与总磷(TP)分析用过硫酸钾氧化法;7)COD<sub>Mn</sub>分析用碱性高锰酸钾氧化法。溶解性无机氮(dissolved inorganic nitrogen, DIN)为 NO<sub>2</sub>-N、NO<sub>3</sub>-N 和 NH<sub>4</sub>-N 之和。

### 1.4 数据分析方法

采用 SPSS13.0 统计软件对各环境指标按调查区域和采样季节的不同进行 3×4 两因素定量资料方差分析;采用 SAS9.0 统计软件对 NO<sub>2</sub>-N、NO<sub>3</sub>-N、NH<sub>4</sub>-N 和 DIN 进行共线性诊断,并对网箱区的 DO、SiO<sub>3</sub>-Si、PO<sub>4</sub>-P、NO<sub>2</sub>-N、NO<sub>3</sub>-N、NH<sub>4</sub>-N、DIN 与 Chl a 进行逐步多重线性回归分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 海水主要物理指标的时空变化特征

各调查区域海水温度、盐度、pH 和 DO 的监测

结果见图 2。调查海域海水的温度和盐度的时空变化趋势如图 2a、b 所示, 整个调查海域海水温度的全年变化范围是 17.61—30.09℃, 年平均水温是

24.03℃。网箱区、对照区 1 和对照区 2 的盐度季节变化都是春季>夏季>冬季>秋季, 调查海域全年盐度变化范围是 28.83‰—33.26‰, 年平均盐度为 31.43‰。

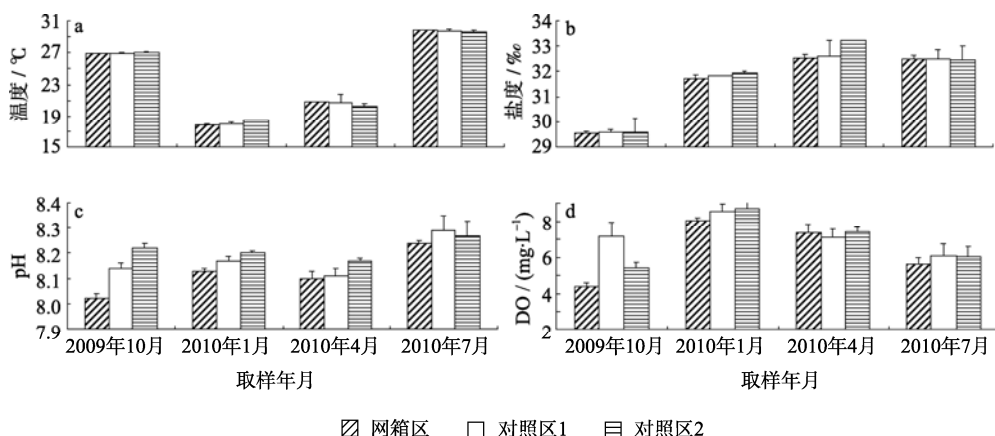


图 2 大鹏澳海域温度、盐度、pH 和 DO 的时空变化

Fig. 2 Spatial-temporal variation of temperature, salinity, pH, and DO in the Dapeng Cove

海水 pH 的时空变化趋势如图 2c 所示, 各调查区域的全年变化是对照区 2>对照区 1>网箱区, 平均值分别为 8.21、8.17 和 8.09; pH 的季节的变化趋势是夏季>冬季>春季>秋季, 平均值分别为 8.27、8.16、8.12 和 8.10。两因素方差分析结果表明, 3 个调查区域的差异都极显著( $P<0.01$ ); 全部调查海域, 秋季和春季的差异不显著( $P>0.05$ ), 其他季节的差异都极显著( $P<0.01$ )。pH 的全年的变化范围是 8.00—8.34, 最低值出现在秋季的网箱养殖区, 最高值出现在夏季的网箱外 2km。究其原因可能是网箱养殖鱼类呼吸作用及养鱼废物的有氧分解消耗大量氧气的同时产生大量  $\text{CO}_2$ , 而且网箱养鱼废物形成的生物沉积, 为硫酸盐还原菌(Sulfate Reducing Bacteria, SRB)的生长提供了有利的环境, SRB 将硫酸根离子还原产生  $\text{H}_2\text{S}$ <sup>[19]</sup>,  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{S}$  溶于海水使海水的 pH 降低, 距网箱区越远, 这种影响越弱。

海水 DO 的时空变化趋势如图 2d 所示, 各调查区域的全年变化是对照区 1>对照区 2>网箱区, 年均值分别为 7.25、6.72 和 5.98 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 调查海区季节变化是冬季>春季>夏季>秋季, 年均值分别为 8.40、7.31、5.95 和 5.33 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。两因素方差分析结果表明, 在全年尺度上, 网箱区 DO 浓度显著低于两个对照区( $P<0.01$ ), 但对照区之间的差异不显著( $P>0.05$ ); 在整个调查海区, 春夏秋冬四季分别都有显著的差异( $P<0.05$ )。全年变化范围为 3.96—8.16 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 冬季和春季的 DO 浓度相对较高, 最低值出现在秋季的网箱区, 秋季网箱区 DO 浓度

都小于第二类海水水质标准( $<5\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )<sup>[20]</sup>; 夏季网箱区的 DO 浓度也较低, 小于第一类海水水质标准( $<6\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )。海水 DO 浓度受季节的变化影响最大, 夏秋季海水温度较高, 网箱养殖鱼类呼吸作用加剧, 养鱼废物和网箱沉积物的氧化分解将大量消耗水体中的溶解氧, 使其浓度降低。大鹏澳网箱养鱼显著降低了养殖区的 DO 浓度, 但这种影响并没有扩散到 0.5km 外。

## 2.2 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、DIN 和 TN 的时空变化特征

图 3a、3b、3c、3d 和 3g 分别为海水营养盐  $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、DIN 和 TN 的调查结果。网箱区  $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$  和  $\text{NH}_4\text{-N}$  的年平均值分别为 0.44、4.93 和 4.48 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ , 对照区 1 分别为 0.60、6.07 和 2.19 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ , 对照区 2 分别为 0.69、3.46 和 0.62 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。全年变化是: 1)  $\text{NO}_2\text{-N}$ : 对照区 2>对照区 1>网箱区; 2)  $\text{NO}_3\text{-N}$ : 对照区 1>网箱区>对照区 2; 3)  $\text{NH}_4\text{-N}$ : 网箱区>对照区 1>对照区 2。 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$  的年平均浓度在各调查区域均以春季的含量最高。两因素方差分析结果表明, 网箱区的  $\text{NO}_2\text{-N}$  浓度与两个对照区均有显著性的差异( $P<0.05$ ), 而对照区之间的差异不显著( $P>0.05$ ); 网箱区的  $\text{NO}_3\text{-N}$  浓度与两个对照区的差异不显著( $P>0.05$ ), 而对照区之间的差异显著( $P<0.05$ ); 3 个调查区域的  $\text{NH}_4\text{-N}$  浓度均有显著性的差异( $P<0.05$ ), 是因为养殖鱼类大部分是排氮动物, 直接使网箱养殖区的  $\text{NH}_4\text{-N}$  浓度显著升高, 从而使网箱区的

$\text{NH}_4\text{-N}$  达到较高的水平, 同时, 网箱区高  $\text{NH}_4\text{-N}$  浓度在涨落潮交换水的过程中也显著影响了 0.5km 外的  $\text{NH}_4\text{-N}$  浓度。

海水 DIN 的时空变化趋势如图 3d 所示, 全年变化范围是  $0.52\text{--}38.48\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ , 最小值出现在秋季的对照区 2, 最大值出现在春季的对照区 1; 3 个调查区域的 DIN 浓度都是春季最高, 平均浓度分别为  $32.37$ 、 $26.68$  和  $9.51\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。春季网箱区平均 DIN 浓度已经超过第三类海水水质标准 ( $<28.57\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ), 超标率达 83.33%。春季对照区 1 的各个站位都已经超过第二类海水水质标准 ( $<21.43\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ), 原因可能是春季相对较低的温度使浮游植物的生长受到抑制(Chl a 较低), N、P 营养盐未被消耗而积累<sup>[21]</sup>, 而春季正是鱼苗投放期, 鱼苗生长旺盛, 投饵较多, 未食的饵料、粪便及鱼类的

排泄物等的氧化分解释放大量的无机氮<sup>[22]</sup>。另外, 春季  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  较低, 可能和大量的含氮有机物被分解成无机氮有关, 而且大鹏澳网箱养殖区沉积物中的氮扩散通量也使该海域成为一个极具潜力的污染内源<sup>[23]</sup>, 同时 2010 年春季的降雨较多, 降雨过程中的氮的大气沉降也可能显著影响该海区的 DIN 浓度<sup>[24]</sup>。在以上几个因素的综合作用下, 大鹏澳网箱区春季的 DIN 浓度急剧升高。网箱区 DIN 的季节变化是春季>秋季>冬季>夏季, 平均浓度分别为  $32.37$ 、 $5.22$ 、 $3.73$  和  $2.68\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。两因素方差分析的结果显示, 秋季、冬季、夏季的 DIN 浓度的差异并不显著 ( $P>0.05$ ), 但这 3 个季节与春季的 DIN 浓度有极显著的差异 ( $P<0.01$ ); 网箱区和对照区 1 的 DIN 浓度与对照区 2 的浓度差异显著 ( $P<0.05$ ), 但前二者之间的差异并不显著 ( $P>0.05$ ), 这也说明网箱养殖产生

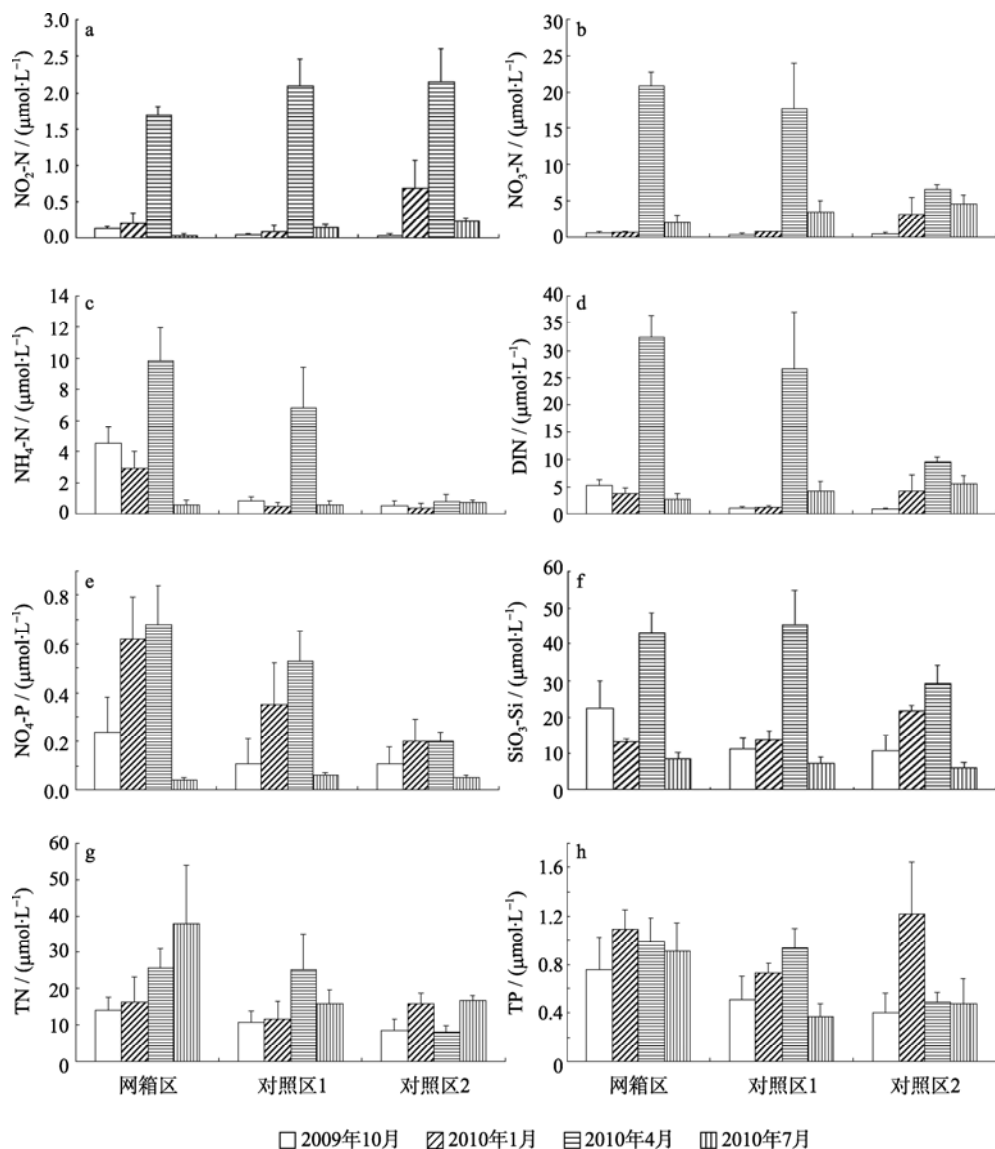


图 3  $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、DIN、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 、TN 和 TP 的时空变化

Fig. 3 Spatial-temporal variation of  $\text{NO}_2\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{NH}_4\text{-N}$ , DIN,  $\text{PO}_4\text{-P}$ ,  $\text{SiO}_3\text{-Si}$ , TN and TP

的无机氮已经影响到了网箱外 0.5km 区域,但对网箱外 2km 的影响不大。用 SAS9.0 对网箱区的  $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$  和 DIN 进行共线性诊断,结果显示这 4 者之间有极强的共线性关系,说明它们有共同的来源,即网箱养殖产生的溶解性无机氮是该区域无机氮的主要来源。

海水 TN 的时空变化趋势如图 3g 所示,网箱区 TN 的季节变化趋势是夏季>春季>冬季>秋季,相比两个对照区,网箱区的 TN 浓度在各个季节都是最大的。大鹏澳的网箱养殖是春季放苗,秋冬季收获,春季放苗后投饵较多,残饵的积累增大了网箱区 TN 的浓度;夏季投饵量更大,鱼类的排泄和排遗及未食的饵料也相对增加,使夏季的 TN 浓度更大;而秋冬季,部分鱼类收获或死亡,投饵及排泄和排遗相对减少,海水的 TN 浓度降低。两因素方差分析结果表明,网箱区的 TN 浓度与对照区 1 的差异显著 ( $P<0.05$ ),与对照区 2 的差异极显著 ( $P<0.01$ ),而对照区之间的差异不显著 ( $P>0.05$ )。因为大鹏澳的水交换较弱,网箱养殖产生的非溶解性含氮废物大部分都直接沉降到网箱区,对网箱外 0.5km 和 2km 的影响较弱。

### 2.3 $\text{PO}_4\text{-P}$ 和 TP 的时空变化特征

海水  $\text{PO}_4\text{-P}$  的时空变化趋势如图 3e 所示。经两因素方差分析检测,海水  $\text{PO}_4\text{-P}$  浓度的全年分布特征是网箱区>对照区 1>对照区 2,网箱区与对照区 1 的差异显著 ( $P<0.05$ ),与对照区 2 的差异极显著 ( $P<0.01$ ),对照区之间的差异显著 ( $P<0.05$ );调查海域的  $\text{PO}_4\text{-P}$  季节变化特征是春季>冬季>秋季>夏季,春季网箱区的磷浓度较高,超第一类海水水质标准 ( $<0.484\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ),超标率达 83.3%;春季和冬季的浓度差异不显著,秋季与夏季的浓度差异也不显著 ( $P>0.05$ ),但前两者与后两者的差异极显著 ( $P<0.01$ )。全年最高浓度出现在春季的网箱区

( $0.86\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ),最低值出现在夏季,可能是由于夏季的海水水温适合浮游植物的生长,浮游植物的增殖吸收了大量的溶解性无机磷,使其浓度显著降低。调查海域全年有部分站位磷浓度超出第一类海水水质标准 ( $<0.484\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ),超标率为 15.7%。网箱养殖对磷的浓度有一定的影响,高密度的鱼类养殖常造成环境中 P 浓度的净增加<sup>[25]</sup>,但大鹏澳海域本身磷较匮乏<sup>[26]</sup>,因而总体上网箱区磷酸盐浓度并不高。

海水 TP 的时空变化趋势如图 3h 所示。网箱区 TP 的季节变化是冬季>春季>夏季>秋季,海水 TP 浓度网箱区与两个对照区的差异都极显著 ( $P<0.01$ ),但对照区之间的差异不显著 ( $P>0.05$ )。与 TN 的调查结果一致,网箱养殖产生的非溶解性含磷废物大部分都直接沉降到网箱区,对网箱外 0.5km 和 2km 的影响较弱。

### 2.4 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 的时空变化特征

海水  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  的时空变化趋势如图 3f 所示。全年变化范围是  $5.35\text{—}61.61\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ,在各个调查区域都是春季的浓度最高, $\text{SiO}_3\text{-Si}$  在整个调查海域都是比较充足的营养盐。网箱区、对照区 1 和对照区 2 的年平均浓度分别为  $21.90$ 、 $19.42$  和  $16.27\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。大鹏澳海域的硅酸盐主要来自于地表径流<sup>[27]</sup>,降雨给整个海域补充了大量的硅酸盐,网箱周围的河流携带大量硅酸盐进入网箱区,使得网箱区的硅酸盐浓度较高,本年度春季的降雨较多,相对增加了海区的硅酸盐浓度。

### 2.5 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 和 Chl a 的时空变化

图 4 为海水  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  和 Chl a 的调查结果。对于  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ ,整个调查区域全年的平均值为  $0.73\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,波动范围是  $0.28\text{—}1.37\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,最高值出现在夏季的网箱区,符合第一类海水水质标准。两因素方差分析结果表明,网箱区的  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  浓度与两个对照区

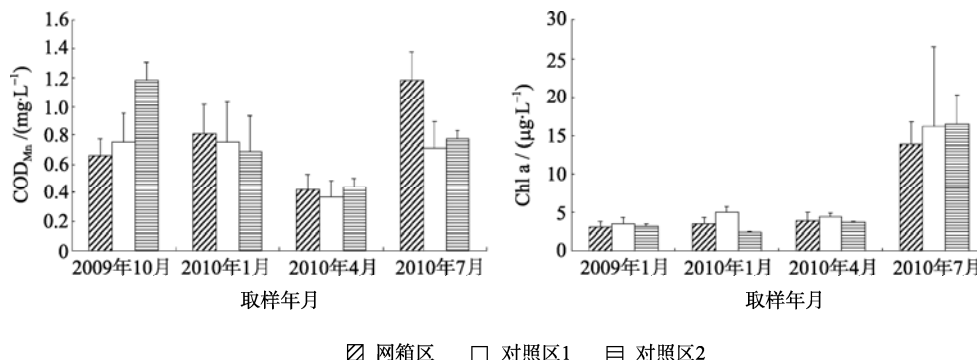


图 4 大鹏澳海域 COD 和 Chl a 的时空变化

Fig. 4 Spatial-temporal variation of COD and Chl a in the Dapeng Cove

的浓度都没有显著性的差异( $P>0.05$ ), 网箱区、对照区 1 和对照区 2 的年平均值分别为 0.75、0.65 和  $0.81\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 符合第一类海水水质标准; 秋季、冬季和夏季的  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  浓度均没有显著性的差异( $P>0.05$ ), 但春季的浓度显著低于这 3 个季节( $P<0.05$ )。大鹏澳网箱区水环境的有机物浓度总体较低, 原因可能是网箱养殖产生的有机废物大部分以较大的颗粒态形式沉积到海底, 存留在水体中的部分在异养细菌及浮游动物的作用下以较快的速度消耗, 使海水的  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  显著降低, 氮、磷浓度增加。

对于 Chl a, 经两因素方差分析检验, 海水 Chl a 的浓度在冬季、春季、秋季的差异不显著( $P>0.05$ ), 但在夏季显著升高( $P<0.01$ ), 原因可能是夏季的水温及营养状况适合浮游植物的生长, 使得浮游植物大量增殖, 吸收了大量的营养盐(表现为夏季的 DIN 和  $\text{PO}_4\text{-P}$  平均浓度在 2009—2010 年度都处于较低值); Chl a 的浓度在各个调查区域的差异均不显著( $P>0.05$ ), 网箱区、对照区 1 和对照区 2 的年平均浓度分别为  $4.85$ 、 $7.21$  和  $6.00\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 说明 Chl a 的浓度主要受季节因素的影响, 网箱养殖对海区浮游植物的现存量的影响并不大, 这也与黄洪辉等<sup>[8]</sup>的调查结果一致。用 SAS 统计学软件对网箱区的 DO、 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、DIN 与 Chl a 进行逐步多重线性回归分析, 可知 DO、 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、DIN 对 Chl a 的浓度的影响均有统计学意义( $F=6.37$ ,  $P=0.0017$ )。用条件数和方差分量对自变量进行共线性诊断, 条件数为  $4893.61>30$ , 显示自变量间存在极强的多重共线性关系; 方差分量的结果显示自变量之间的共线性关系主要表现在  $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$  和 DIN 上。再用逐步回归法对自变量进行变量

筛选, 得出决定系数  $R^2=0.8402>0.5$ , 表明 DO、 $\text{NH}_4\text{-N}$  与 Chl a 的相关性较大, 多重线性回归方程为:

$$Y_{\text{Chl a}}=2.15X_{\text{DO}}-1.21X_{\text{NH}_4\text{-N}}$$

式中,  $Y_{\text{Chl a}}$  表示 Chl a 的浓度,  $X_{\text{DO}}$  表示 DO 的浓度,  $X_{\text{NH}_4\text{-N}}$  表示  $\text{NH}_4\text{-N}$  的浓度。

浮游植物的增殖将吸收大量的营养盐, 使营养盐的浓度降低, 而网箱养殖鱼类释放的营养盐主要为  $\text{NH}_4\text{-N}$ ; 浮游植物的光合作用将释放大量的  $\text{O}_2$ , 使水中的 DO 浓度升高, 所以用 DO 和  $\text{NH}_4\text{-N}$  的浓度来评价 Chl a 的浓度具有较大的实用价值。

## 2.6 营养状态分析

评价海水富营养化压力的方法有许多种, 常用的有单因子法、综合指数法、模糊数学理论评价法、潜在富营养化评价法等<sup>[28-29]</sup>。《海洋调查规范——第九部分: 海洋生态调查指南》<sup>[17]</sup>收录了两种营养状态指数法。第一种方法考虑  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、TN、TP 和 Chl a, 第二种方法考虑  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、DIN 和  $\text{PO}_4\text{-P}$ 。考虑到本次调查海域的 Chl a 的浓度较高, 而  $\text{PO}_4\text{-P}$  相对较低, 本文采用第一种方法评价大鹏澳网箱养殖区的富营养化压力, 这也是仲裁方法。计算公式如下:

$$\text{NI} = C_{\text{COD}}/S_{\text{COD}} + C_{\text{TN}}/S_{\text{TN}} + C_{\text{TP}}/S_{\text{TP}} + C_{\text{Chl a}}/S_{\text{Chl a}}$$

公式中 NI 即营养指数;  $C_{\text{COD}}$ 、 $C_{\text{TN}}$ 、 $C_{\text{TP}}$  和  $C_{\text{Chl a}}$  分别为水体中化学耗氧量、总氮、总磷和叶绿素 a 的实测浓度;  $S_{\text{COD}}$ 、 $S_{\text{TN}}$ 、 $S_{\text{TP}}$  和  $S_{\text{Chl a}}$  分别为水体中化学耗氧量、总氮、总磷和叶绿素 a 的评价标准浓度, 其中  $S_{\text{COD}}$  为  $3.0\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $S_{\text{TN}}$  为  $0.6\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $S_{\text{TP}}$  为  $0.03\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $S_{\text{Chl a}}$  为  $10\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。采用陈于望<sup>[30]</sup>提出的分级方法来分析调查海域的营养状况。当  $\text{NI}>3$  时, 为富营养化水平;  $2\leq\text{NI}\leq 3$  时, 为中营养水平;  $\text{NI}<2$  时, 为贫营养水平。

图 5 显示了所调查海域 NI 值的时空变化。各个

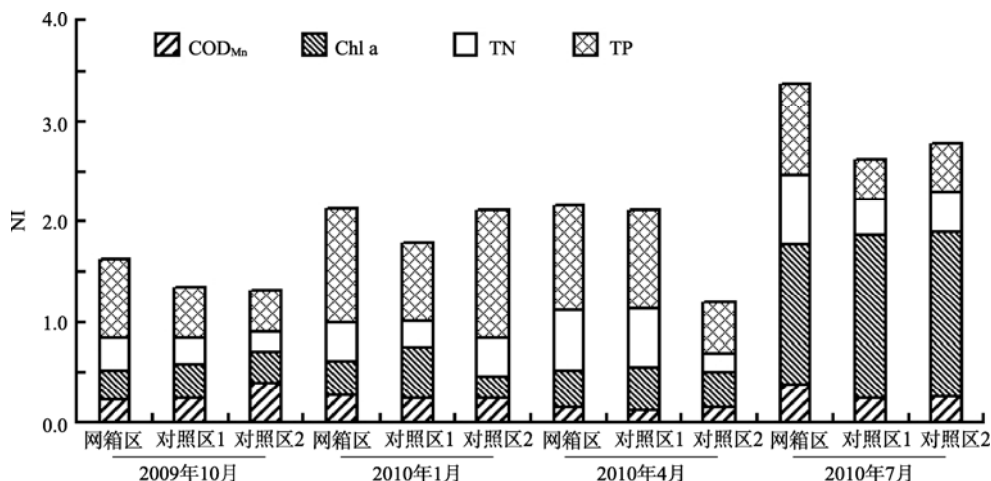


图 5 NI 值的时空变化

Fig. 5 Spatial-temporal variation of NI

调查区域全年的 NI 平均值变化趋势是网箱区>对照区 1>对照区 2, 分别是 2.09、1.97 和 1.79。两因素方差分析的结果显示, 秋季、冬季和春季的 NI 值没有显著性的差异( $P>0.05$ ), 但夏季的 NI 值要显著高于这三个季节( $P<0.05$ ); 三个调查区域 NI 值的差异都不显著, 但各个季节网箱区的 NI 值都要大于两个对照区。就营养水平而言, 网箱区在秋季是贫营养, 冬季和春季是中营养, 夏季已是富营养; 对照区 1 秋季和冬季是贫营养, 春季和夏季是中营养; 对照区 2 秋季、冬季和春季都是贫营养, 夏季是中营养。在网箱区, 秋季、冬季和春季的 TP 的浓度对 NI 值的贡献最大, 夏季的 Chl a 的贡献最大, 全年范围来看,  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  和 TN 对 NI 值的贡献都较小。这说明大鹏澳网箱养殖区有机污染和氮污染较小, 而水中 TP 的含量将严重影响到水体的营养水平; 夏季适宜的水温和充足的营养带来高生产力的同时, 也对水体的富营养化带来较大的压力, 浮游植物大量增殖, Chl a 迅速增加, 也使网箱外 0.5km 和 2km 区域达到中营养水平。

### 3 结论

1) 大鹏澳网箱养殖使网箱区海水的 DO 和 pH 值显著降低, 使网箱区海水的 DIN、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、TN 和 TP 的浓度显著升高。其中秋季网箱养殖区的 DO 浓度

已小于第二类海水水质标准, 超标率达 100%; 春季网箱养殖区的 DIN 浓度已超第三类海水水质标准,  $\text{PO}_4\text{-P}$  浓度已超第一类海水水质标准, 超标率都为 83.33%, 而夏季、秋季和冬季的 DIN 和  $\text{PO}_4\text{-P}$  浓度都符合第一类海水水质标准。大鹏澳网箱养殖对 DIN 的影响已经从网箱区扩散到了网箱外 0.5km 区域, 但对网箱外 2km 区域的影响不大; 对 TN 和 TP 的影响暂未扩散到网箱外 0.5km 区域, 大鹏澳网箱养殖产生的非溶解性含氮含磷废物大部分都直接沉降到网箱区, 对网箱外 0.5km 和 2km 的影响较弱。

2) 大鹏澳网箱养殖对海水有机物浓度和浮游植物现存量的影响都很小。调查海域全年的  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  浓度都较低, 符合第一类海水水质标准。海水 Chl a 的浓度在夏季显著高于其他三个季节, 但网箱区、网箱外 0.5km 和网箱外 2km 的差异并不显著, 可以用 DO 和  $\text{NH}_4\text{-N}$  的浓度来评价 Chl a 的浓度, 多重线性回归方程为  $Y_{\text{Chl a}} = 2.15X_{\text{DO}} - 1.21X_{\text{NH}_4\text{-N}}$ 。

3) 大鹏澳整个调查区域秋季的水质都是贫营养水平, 而网箱养殖区冬季和春季是中营养水平, 夏季是富营养水平, 夏季的富营养化主要由较高的 Chl a 贡献, 其次是 TP, 贡献较小的是  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  和 TN, 这说明浮游植物在夏季的大量繁殖将严重威胁大鹏澳网箱养殖区的水环境, 必须采取一定的措施对网箱区环境进行合理调控, 以防止赤潮等生态灾难的发生。

### 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(1-4): 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(01): 21-29.
- [5] 李成高, 崔毅, 陈碧鹃, 等. 唐岛湾网箱养殖区底层水营养盐变化及营养状况分析[J]. 海洋水产研究, 2006, 27(5): 56-61.
- [6] FOY R H, ROSELL R. Loadings of nitrogen and phosphorus from a Northern Ireland fish farm[J]. Aquaculture, 1991, 96(1): 17-30.
- [7] ACKEFORS H, ENELL M. Discharge of nutrients from Swedish fish farming to adjacent sea areas[J]. Ambio, 1990, 19(1): 28-35.
- [8] 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.
- [9] 彭云辉, 陈浩如, 陈玲娣. 大亚湾大鹏澳海区水化学特征[J]. 海洋通报, 1996, 15(6): 27-34.
- [10] 王肇鼎, 彭云辉, 孙丽华, 等. 大鹏澳网箱养鱼水体自身污染及富营养化研究[J]. 海洋科学, 2003, 27(2): 77-81.
- [11] 黄洪辉, 林钦, 甘居利, 等. 大鹏澳海水鱼类网箱养殖对沉积环境的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(1): 75-80.
- [12] 李纯厚, 林钦, 张汉华, 等. 大亚湾大鹏澳网箱养殖水域的浮游植物生态特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(4): 784-789.
- [13] 蔡树群, 韦桂峰, 王肇鼎. 外源输入对大亚湾大鹏澳浮游生物影响的模拟研究[J]. 生态科学, 2004, 23(2): 101-105.
- [14] 黄洪辉, 林钦, 林燕棠, 等. 大亚湾网箱养殖海域大型底栖动物的时空变化[J]. 中国环境科学, 2005, 25(4):

- 412-416.
- [15] 李占东, 林 钦, 黄洪辉, 等. 大鹏澳网箱养殖海域水质评价及因子分析[J]. 海洋水产研究, 2005, 26(3): 35-40.
- [16] 宋星宇, 黄良民, 张建新, 等. 大鹏澳浮游植物现存量 and 初级生产力及 N: P 值对其生长的影响[J]. 热带海洋学报, 2004, 23(5): 34-41.
- [17] 国家技术监督局. GB/T 12763.4-2007 海洋调查规范-第四部分: 海水化学要素调查[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007:13-28.
- [18] 国家技术监督局. GB 17378.4-2007 海洋监测规范-第四部分: 海水分析[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 101-121.
- [19] 胡德蓉, 林钦, 柯常亮. 大鹏澳网箱养殖区沉积物硫酸盐还原菌(SRB)及其与环境因子关系的初步研究[J]. 南方水产, 2007, 3(5): 14-18.
- [20] 国家环境保护局. GB 3097-1997 海水水质标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998: 15-21.
- [21] 彭云辉, 王肇鼎. 大亚湾大鹏澳养殖海区水化学指标的变化与营养状况分析[J]. 台湾海峡, 1999, 18(1): 26-32.
- [22] 彭云辉, 王肇鼎, 高红莲, 等. 大亚湾大鹏澳养殖网箱水体无机氮的生物地球化学[J]. 海洋通报, 2001, 20(2): 16-24.
- [23] 黄小平, 郭 芳, 黄道建. 大亚湾典型养殖区沉积物—海水界面营养盐扩散通量及其环境意义[J]. 海洋环境科学, 2008, 27(A02): 6-12.
- [24] 韦桂峰. 大亚湾浮游植物对营养盐结构变化的响应和机制[D]. 北京: 中国科学院研究生院博士学位论文, 2003: 58-60.
- [25] 徐永健, 钱鲁闽. 海水网箱养殖对环境的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(3): 532-536.
- [26] 王友绍, 王肇鼎, 黄良民. 近 20 年来大亚湾生态环境的变化及其发展趋势[J]. 热带海洋学报, 2004, 23(5): 85-95.
- [27] 何玉新, 黄小平, 黄良民, 等. 大亚湾养殖海域营养盐的周年变化及其来源分析[J]. 海洋环境科学, 2005, 24(4): 20-23.
- [28] 林荣根. 海水富营养化水平评价方法浅析[J]. 海洋环境科学, 1996, 15(2): 28-31.
- [29] 郭卫东, 章小明, 杨逸萍, 等. 中国近海海域潜在性富营养化程度的评价[J]. 台湾海峡, 1998, 17(1): 64-70.
- [30] 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.