

哑铃湾网箱养殖对底层水环境的影响研究

韦献革¹, 温琰茂¹, 王文强¹, 贾后磊^{1,2}, 徐昕荣¹

(1. 中山大学环境科学系, 广东 广州 510275; 2. 国家海洋局南海分局 南海海洋勘察与环境研究院, 广东 广州 510300)

摘要: 采用现场调查的方法, 于 2002 年 4 月—2003 年 1 月对哑铃湾 2 个不同养殖年限的网箱养殖区、对照海区 and 网箱周围海区底层水化学进行了四季采样和结果分析。哑铃湾网箱养殖使底层海水中 TOC、SS、有机污染物和溶解态氮磷营养盐都有不同程度的增加, 春、夏、秋 3 季 DO 有不同程度的下降, SS、COD_{Mn}、NH₄⁺、DIN、DIP 的增加相对更显著, 而对 pH 值、盐度、水温和冬季 DO 的影响较小; 在水质状况上, DO、BOD₅ 受影响最大, 其次是 DIP; 养殖期较长的网箱区底层海水在春、秋 2 季已达到富营养化水平。短期网箱养殖对底层海水的水质影响较小, 长期养殖影响较明显。ANOVA 分析结果显示养殖期较短的网箱邻近海区底层海水营养盐含量与对照点无明显的差异, 网箱养殖对底层海水的影响范围主要局限于网箱下。养殖过程中应提高饵料的利用率、采取轮养或休养等措施, 以利于海水网箱养殖业的可持续发展。

关键词: 环境影响; 底层海水; 网箱养殖; 哑铃湾

中图分类号: X55 文献标识码: A 文章编号: 1672 – 2043(2005)02 – 0274 – 05

Environmental Impact of Cage Culture on Bottom Water in Yaling Bay

WEI Xian-ge¹, WEN Yan-mao¹, WANG Wen-qiang¹, JIA Huo-lei^{1,2}, XU Xin-rong¹

(1. Department of Environmental Science, Sun Yat – sen University, Guangzhou 510275, China; 2. South China Sea Marine Engineering and Environment Institute, South China Branch, SOA, Guangzhou 510300, China)

Abstract: Yaling Bay is a main marine cage culture area in Guang Dong Province, China. Red tide has often been appearing in this region in recent years, due to eutrophication in the seawater. In order to find degree and extent of environmental impact on bottom water from cage culture in Yaling Bay, a field investigation was done from Apr. 2002 to Jan. 2003 in two different cage culture time stations, namely, (S3, more than five years, and S6, more than twenty years), one control (S7), and S3 cage neighbor area (S1, S2, S4, S5). Water depth at sampling sites was 6 ~ 8 m. We have found that concentrations of total organic carbon, suspend substance, organic pollutants, dissolved nitrogen and phosphorus in bottom water of cage culture area were increased, the concentrations of dissolved oxygen were decreased in Spring, Summer and Autumn. The increases of suspend substance, chemical oxygen deplete, NH₄⁺, dissolved nitrogen and phosphorus were relatively significant, but the impacts on pH, dissolved oxygen in winter, water temperature and salinity were little. In comparison with the Marine Water Standard of China, chemical oxygen and biological oxygen demands were the main pollutants with regard to water quality impacted by cage culture, and dissolved phosphorus was the next. The bottom water under a long time cage in Yaling Bay was eutrophic in spring and autumn. The ANOVA results demonstrated that the difference of nutrients in bottom water was little between a short time cage neighbor area and the control. The impact of a short time cage culture on bottom water quality was little, while very markedly for a long time cage culture. The extent of environmental impact on bottom water was limited under the culture cage. Thus it was important for the cage culture to improve the using rate of feed, alternate culture and fallow to reduce the amounts of organic pollutants and nutrient substance into water.

Keywords: environmental impact; bottom water; cage culture; Yaling Bay

在近岸海域网箱养殖区, 由于海水流动受到阻

碍, 养殖过程中排放的残饵和排泄物等不易转移和扩

散, 导致养殖水体各种理化因子的改变和底泥环境的恶化^[1,2], 污染物质在底泥中的长期积累和分解作用, 会造成养殖海域的“二次污染”^[3]。我国近海网箱养殖多选在沿海半封闭的内湾, 极易发生养殖海域的污染

碍, 养殖过程中排放的残饵和排泄物等不易转移和扩散, 导致养殖水体各种理化因子的改变和底泥环境的恶化^[1,2], 污染物质在底泥中的长期积累和分解作用, 会造成养殖海域的“二次污染”^[3]。我国近海网箱养殖多选在沿海半封闭的内湾, 极易发生养殖海域的污染

收稿日期: 2004 – 07 – 19

基金项目: 国家自然科学基金项目(40071074); 广东省环保局科技研究开发项目(200020262424027)

作者简介: 韦献革(1967—), 男, 讲师, 在职博士生, 主要从事环境生物地球化学、环境影响评价和环境规划的教学与研究。

E – mail: eeswxg@zsu.edu.cn

及养殖自身污染^[5]。哑铃湾是大亚湾西北部的一个半封闭的溺谷湾,是广东一个主要的网箱养殖区。近年来哑铃湾赤潮时有发生,海水中营养盐含量和结构的改变是主要的原因^[5]。开展哑铃湾网箱养殖区水体和沉积物环境质量的调查,研究水体中污染物的来源、迁移转化、物质平衡和沉积物——水界面的物质交换,对保护哑铃湾海洋资源和水产养殖业的可持续发展具有重要意义。

1 材料与方法

在哑铃湾及澳头港设置8个采样点(S1~S8)。S3位于东升村以西的养殖中心网箱(养殖年限>3a),S6位于东升村网箱(养殖年限约20a),S7取在距离网箱区约1km处的非养殖区(对照点),S8位于澳头港衙前村网箱(养殖年限大于20a)。沿潮流方向在距离养殖中心网箱(S3)50m处设2个点(S2、S4),100m处设2个点(S1、S5)。S1和S2位于涨潮上游一侧,S4和S5点位于涨潮下游一侧,详见图1。

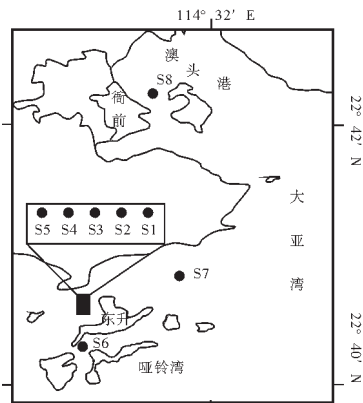


图1 调查海区及采样点

Figure 1 Area of survey and sampling sites

于2002年4月(春季)、7月(夏季)、10月(秋季)和2003年1月(冬季)共进行4次调查。在S3、S6和S7点每个季节进行1次周日采样,其中S3点采样频率为24h12次,S6和S7点采样频率为24h4次,基本对应采样当日的涨落潮时。S1、S2、S4、S5点每季采样1次,S8点仅在冬季采样1次,每次采样于高潮前后1h内完成。用5L采水器在离底0.5m处采集底层海水,并在S3、S6和S7点现场用多功能水质分析仪(美国Alpkem公司)测定离底0.5m处的水温(T)、盐度(S)、pH和溶解氧(DO),检出限分别为0.1℃、0.01‰、0.01、0.01mg·L⁻¹。样品采集后,按《海洋监测规范》^[6]中的方法分析,无规定的采用《海水化学要素调查手册》^[7]中的方法。分析项目包括悬浮物(SS)、

总有机碳(TOC)、生化需氧量(BOD₅)、化学耗氧量(COD_{Mn})、亚硝酸盐氮(NO₂⁻-N)、硝酸盐氮(NO₃⁻-N)、氨氮(NH₄⁺-N)、溶解无机氮(DIN, NO₂⁻-N + NO₃⁻-N + NH₄⁺-N)、溶解无机磷(PO₄³⁻-P, DIP)、溶解态总磷(DTP)。S1、S2、S4、S5和S8点仅分析溶解态氮磷营养盐。

2 结果和讨论

2.1 网箱区及对照点底层海水的水质分析

2.1.1 盐度、水温、pH值和DO

pH值季节变化范围为7.78~8.10,各点均为冬季最高,夏季最低,见图2(a)。单因子变量分析(ANOVA)结果显示,季节间的差异显著(F:38.37, sig.:4.06, α:0.05),采样点间的差异不明显(F:0.13, sig.:4.26, α:0.05)。从年平均值看,网箱区仅稍低于对照点(7.97),东升村(7.92)又稍低于养殖中心(7.95),相对于检出限,差异极小。除夏季东升村和对照点略低于一、二类海水水质标准^[8]外,均达到一类标准要求。在一般的海水养殖区,由于养殖生物的呼吸作用和养殖过程中产生的残饵和排泄物沉积并在底泥表层发生分解,其产物会导致底层海水pH值下降^[9]。但在本研究区底层海水的pH值下降并不明显,养殖区与非养殖区的差别也不显著,与甘居利等^[10]在柘林湾网箱养殖区的研究也类似。显示哑铃湾网箱养殖对底层海水的pH值的影响极小。

DO的季节变化范围为4.18~8.87mg·L⁻¹,各点均为冬季最高,其他3季接近,见图2(b)。ANOVA分析结果显示,季节间的差异显著(F:5552.5, sig.:4.06, α:0.05),采样点间的差异不明显(F:0.0008, sig.:4.26, α:0.05)。相对于检出限,年平均值网箱区仅比对照点低0.04~0.06mg·L⁻¹,2个网箱的差别也较小。冬季均达到一类海水标准要求,夏、秋季仅达到三类海水标准要求(超二类标准10%~16.4%)。比王小平等^[11]于1994年秋季和1995年春季在本区的调查结果低,秋季也比黄洪辉等^[12]在大鹏湾网箱养殖区的同期调查结果(5.60mg·L⁻¹)低,显示哑铃湾网箱养殖海区底层海水的DO在春、夏、秋3季已受养殖活动的影响,而且这种影响通过海水交换已扩大到非养殖区(对照点)。

网箱区和对照点的水温和盐度各季节和年平均值的差别均很小,见图2(c)~(d)。水温的变化没有超出一类海水水质标准规定的范围,显示哑铃湾网箱养殖对底层海水的水温和盐度的影响极小。

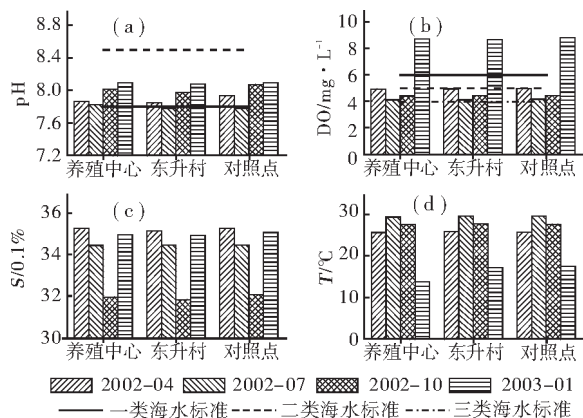


图 2 底层海水 pH、DO、盐度和温度的季节变化

Figure 2 Seasonal change of pH, DO, S and T in bottom water under cage farms and control site in Yaling Bay

2.1.2 BOD₅、COD_{Mn}、TOC 和 SS

COD_{Mn} 和 BOD₅ 是反映水体中有机物多小的重要指标^[13]。BOD₅ 的季节变化范围为 0.26 ~ 2.22 mg · L⁻¹, 年平均值为 1.03 ~ 1.17 mg · L⁻¹, 见图 3(a), 东升村比养殖中心和对照点分别高 13.6% 和 5.4%。春、秋季达一类海水标准, 夏、冬季和年平均值达二类海水标准。COD_{Mn} 的变化范围为 0.86 ~ 1.82 mg · L⁻¹, 年平均浓度为 1.24 ~ 1.46 mg · L⁻¹, 见图 3(b), 东升村比养殖中心和对照点分别高 15.9% 和 17.7%, 各季节及年平均含量均达一类海水水质。COD_{Mn} 的调查结果略高于何悦强等^[14] 1988 年在本区的调查结果, 反映网箱养殖会造成底层海水中 COD_{Mn} 和 BOD₅ 有一定程度的累积。但从哑铃湾网箱养殖区的底层水质来看, 尚未形成有机污染, 影响程度较轻, 对 BOD₅ 的影响相对较大。养殖区与对照点 TOC 的差别较小, 见图 3(c), 网箱区 SS 明显高于对照点, 夏季最明显, 见图 3(d)。体现哑铃湾网箱养殖对海水 TOC 含量的影响较小, 夏季对 SS 的影响较大。

2.1.3 溶解态氮磷营养盐

网箱区和对照点 DIN 春、夏、秋季以 NH₄⁺ - N 为主, 冬季以 NO₃⁻ - N 为主, 但 NO₃⁻ - N 和 NO₂⁻ - N 含量均较低。DIN 和 NH₄⁺ - N 在网箱区的年平均含量分别为 0.067 ~ 0.089 mg · L⁻¹ 和 0.046 ~ 0.066 mg · L⁻¹, 在对照点分别为 0.043 和 0.027 mg · L⁻¹, 网箱区分别是对照点的 1.56 ~ 2.1 倍和 1.7 ~ 2.4 倍, 东升村分别是养殖中心的 1.3 和 1.4 倍, 见图 4(a) ~ (d)。溶解态磷 (DTP) 以 DIP 为主, DIP 在网箱区的含量范围为 0.0067 ~ 0.0221 mg · L⁻¹, 年平均值为 0.0123 ~ 0.0153 mg · L⁻¹, 东升村是养殖中心的 1.2 倍; DIP 在对照点的含量范围为 0.0031 ~ 0.0108 mg · L⁻¹,

年平均值为 0.0073 mg · L⁻¹, 网箱区分别是对照点的 1.68 ~ 2.1 倍。春、秋季含量较高, 夏、冬季含量相对较低, 见图 4(e) ~ (f)。

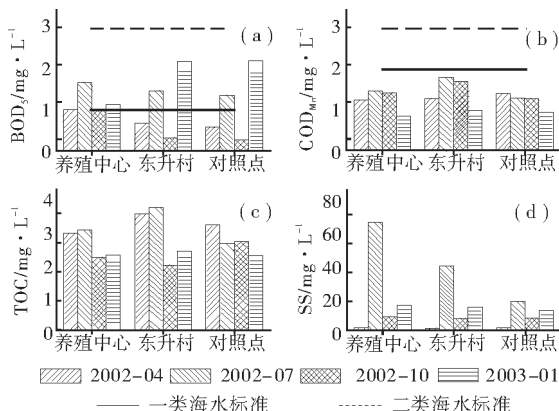


图 3 底层海水 BOD、COD、TOC 和 SS 的季节变化

Figure 3 Seasonal changes of BOD, COD, TOC and SS in bottom water under cage farms and control site in Yaling Bay

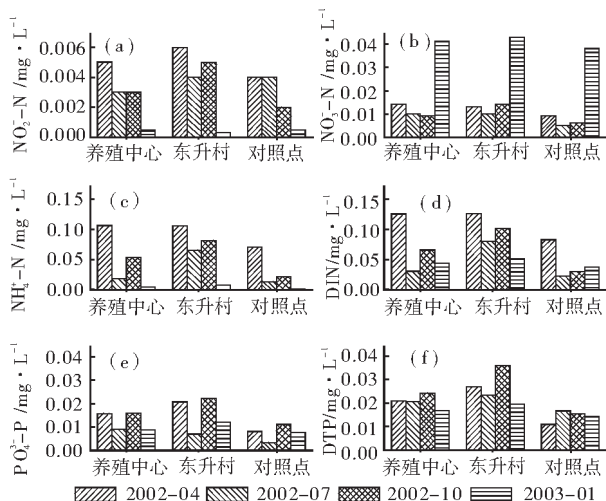


图 4 底层海水溶解态氮磷的季节变化

Figure 4 Seasonal changes of dissolve nitrogen and phosphorus in bottom water under cage farms and control site

哑铃湾养殖海区底层海水溶解态氮磷均表现为网箱区高于对照点, 养殖长的网箱大于养殖期短的网箱, DIN 和 DIP 的含量均低于甘居利等^[10] 1998 夏季在柘林湾网箱养殖区和王宪等^[15] 1998 年 4 月—1999 年 2 月在厦门西港网箱养殖区的调查结果, 即使考虑大亚湾海域营养盐偏低的特点, DIP 含量也低于浮游植物的一般需要量 (0.016 mg · L⁻¹^[9])。从水质看, DIN 满足一类海水标准, DIP 年平均含量也基本满足一类海水标准 (0.0015 mg · L⁻¹, 东升村超一类标准 2%)。因此, 就哑铃湾在调查期内的养殖密度和水动力条件而言, 养殖活动对底层海水溶解营养盐含量水平的影响还相对较小, 低于柘林湾、厦门西港等网箱

养殖区的影响,季节变化上,春、秋季的影响大于夏、冬季。

衙前村网箱(S8)的养殖历史与东升村相近,规模化网箱养殖已停止多年,冬季底层海水溶解态营养盐含量与养殖中心相近,低于东升村。说明网箱养殖对底层水环境的影响是个长期的过程。

2.1.4 各项水化学指标的相关性分析

COD 和 DO、pH 值呈显著的负相关关系,与盐度呈负相关的趋势,与溶解态氮磷呈正相关的趋势(表 1),表明水体中 DO 的提高有助于降低 COD 的含量,本次调查冬季 DO 含量最高而 COD 含量最低也印证了这一点。BOD 和盐度、DO 均呈显著正相关,与 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、DIN、DIP 呈负相关的趋势,显示 BOD 的变化与水文条件的关系较大。但 BOD 的升高并未导致溶解态氮磷的升高,而是呈负相关的趋势,与 COD 相反,反映哑铃湾网箱养殖区底层海水的有机物降解化学作用强于生化作用。

表 1 有机污染物和营养盐与环境因子的相关分析
Table 1 Relation analysis of organic pollutants and nutrients with environmental factors

项目	S	pH	DON	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	DIN	DIP
BOD	0.625*	0.015	0.588*	-0.551	-0.392	-0.517
COD	-0.432	-0.630*	-0.838**	0.530	0.323	0.207
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	-0.018	-0.470	-0.539			
DIN	0.123	-0.290	-0.251	0.948**		
DIP	-0.382	0.102	-0.172	0.665*	0.724**	

注: $n = 12$; * 显著水平 0.05; ** 显著水平 < 0.01 。

溶解态氮磷与盐度、pH、DO 的相关性较差, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、DIN 和 DIP 相互之间呈显著的正相关关系,显示溶解态氮磷具有相同的来源。

2.2 网箱区和对照点底层海水营养状态评价

海水水质状况由多个指标来决定,国内许多研究者采用营养指数 $E = \text{COD}(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}) \times \text{DIN}(\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}) \times \text{DIP}(\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}) / 1\,500$ 来研究海域富营养化和有机污染问题^[16],当营养指数 E 值大于 1 时,即为富营养化, E 值越大,富营养化程度越高。哑铃湾网箱养殖区底层海水的营养指数 E 值,见表 2。

由表 2 可知,对照点各季和网箱区夏、冬季底层

表 2 哑铃湾网箱区及对照点底层海水营养指数
Table 2 The nutrient index in bottom water under cage farms and control site in Yaling Bay

采样点	2002-04	2002-07	2002-10	2003-01	年平均
养殖中心	1.67	0.27	0.99	0.22	0.69
东升村	2.21	0.65	2.52	0.41	1.32
对照点	0.60	0.06	0.28	0.19	0.26

海水的 E 值均小于 1;东升村春、秋季 E 值达 2.21 ~ 2.52,春季养殖中心 E 值也大于 1。从季节变化和年平均值来看, E 值均表现为网箱区大于对照点,东升村大于养殖中心,春、秋季大于夏、冬季。哑铃湾养殖区底层海水在春、秋两季已达到富营养化水平,养殖期越长,富营养化程度越高,夏、秋两季水质尚好,未达到富营养化水平。

2.3 网箱邻近海区底层海水的水质差异及季节变化

养殖中心网箱、对照点及邻近海区底层海水溶解态氮磷年平均含量的比较如图 5 所示。S1 和 S2 点位于养殖中心网箱涨潮上游方向,距离网箱边界分别为 100 m 和 50 m; S4 和 S5 点位于养殖中心网箱涨潮下游方向,距离网箱边界分别为 50 m 和 100 m; 该区为养殖中心网箱与其他网箱之间,与其他网箱之间的距离在 200 m 以上。网箱区与 S1 和 S2 点比较, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 较近(0.9 ~ 1 倍),其他指标是 S1 点的 1.5 ~ 2 倍,是 S2 点的 1.2 ~ 2.9 倍,其中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 下降相对较明显,网箱区 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 分别是 S1 和 S2 点的 2 倍和 2.9 倍。网箱区与 S4 和 S5 点比较,除 DTP 稍低(0.8 倍)、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 较近(0.9 ~ 1 倍)外,其他指标是 S4 点的 1.0 ~ 1.6 倍,是 S5 点的 1.1 ~ 1.3 倍。总体上底层海水溶解态氮磷 S1 和 S2 点与对照点相近,低于网箱区, S4 和 S5 点略高于对照点,稍低于网箱区。说明网箱养殖对底层海水的影响随着与网箱距离的增加而降低。甘居利等^[10]在柘林湾网箱养殖区的研究显示, DIP 随着与网箱距离的增加而降低,与本研究结果相似,但 DIN 与距离呈较显著的正相关,与本研究的结果相反,可能与该研究中采样选择在夏季,与网箱的距离较远(0.8 ~ 3.5 km)有关,还有待进一步研究。

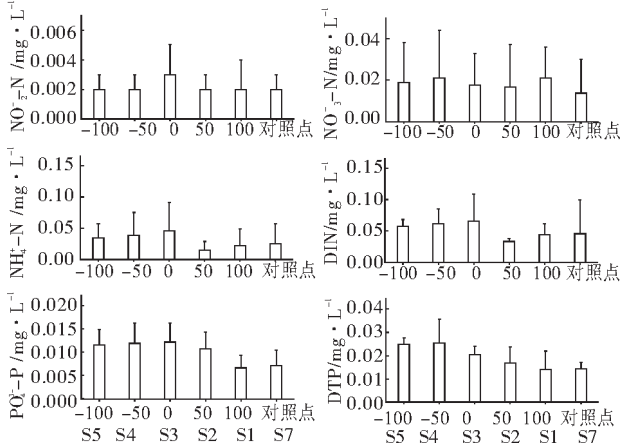


图 5 S3 点及邻近海区底层海水溶解态氮磷含量比较
Figure 5 Comparison of dissolve nitrogen and phosphorus in bottom water between S3 station and nearby region at cage culture area in Yaling Bay

选择 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、DIN 和 DIP 5 项指标对养殖中心网箱邻近海区和对照点 (S1、S2、S4、S5、S7) 进行单因子变量分析 (ANOVA), 结果见表 3。基于非养殖网箱区的底层海水溶解营养盐各指标的差异性不显著, 但溶解态磷的差异相对大于溶解态氮的差异。进一步 t 检验的结果显示, 养殖中心网箱邻近海区和对照点之间均无显著差异。表明短期网箱养殖尚未引起邻近非养殖海区底层海水营养盐含量与对照点出现明显的差异。可以认为, 哑铃湾短期网箱养殖对该海区底层海水营养盐含量的影响较小。

表 3 溶解态氮磷的单因子变量分析结果 (ANOVA)

Table3 Results of ANOVA with dissolve nitrogen and phosphorus in bottom water

项目	$\text{NO}_2^- - \text{N}$	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	DIN	DIP	DTP
F	0.168	0.102	0.2	0.603	1.4	2.607
Sig.	0.915	0.957	0.894	0.629	0.305	0.116

3 结论

(1) 哑铃湾网箱养殖使底层海水中 TOC、SS、有机污染物和溶解态氮磷营养盐都有不同程度的增加, 春、夏、秋 3 季 DO 有不同程度的下降, 而对 pH 值、盐度、水温和冬季 DO 的影响较小。在数量变化上, SS、 COD_{Mn} 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、DIN、DIP 的增加相对更显著; 在水质状况上, DO、 BOD_5 受影响最大, 其次是 DIP。网箱养殖对底层海水的水质影响随着养殖时间的推移而逐渐加剧, 短期网箱养殖对底层海水的水质影响较小, 长期养殖对底层海水的水质影响较明显。

(2) 哑铃湾养殖区底层海水在春、秋两季已达到富营养化水平, 养殖期越长, 富营养化程度越高; 而在夏、秋 2 季水质尚好, 未达到富营养化水平。

(3) 哑铃湾网箱养殖区底层海水的有机物降解化学作用强于生化作用, 溶解态氮磷具有相同的来源。

(4) 养殖期较短的网箱养殖尚未引起网箱邻近海区底层海水营养盐含量与对照点出现明显的差异。哑铃湾短期网箱养殖对该海区底层海水营养盐含量的影响较小。

以上结论表明, 海水网箱养殖区底层水中耗氧有

机物和溶解态营养盐含量的增加, 不仅对养殖业本身产生影响, 还导致养殖海区存在赤潮发生的潜在危险。为了减少进入水体中的营养物质, 促进海水网箱养殖业的可持续发展, 在海水网箱养殖过程中, 应提高饵料的利用率, 减少进入水体的残饵量; 采取轮养或休养等措施, 使养殖区底泥得到恢复。

参考文献:

[1] Merceron M, Kempf M, Bentley D, et al. Environmental impact of a salmonid farm on a well flushed marine site: I. Current and water quality [J]. *J Appl Ichthyol*, 2002, 18: 40 – 50.

[2] Kempf M, Merceron M, Cadour G, et al. Environmental impact of a salmonid farm on a well flushed marine site: II. Biosedimentology [J]. *J Appl Ichthyol*, 2002, 18: 51 – 56.

[3] McGhie T K, Crawford C M, Mitchell I M, et al. The degradation of fish cage waste in sediments during fallowing [J]. *Aquaculture*, 2000, 187: 351 – 366.

[4] 计新丽, 林小涛, 等. 海水养殖自身污染机制及其对环境的影响 [J]. 海洋环境科学, 2000, 19(4): 66 – 71.

[5] 林祖享, 梁舜华. 探讨影响赤潮的物理因子及其预报 [J]. 海洋环境科学, 2002, 21(2): 1 – 5.

[6] GB17378.4 – 1998, 海洋监测规范 (第 4 部分: 海水分析) [S].

[7] 韩舜鹰, 等. 海水化学要素调查手册 [M]. 北京: 海洋出版社, 1986.

[8] GB3097 – 1997, 海水水质标准 [S].

[9] 郭锦宝. 化学海洋学 [M]. 厦门: 厦门大学出版社, 1997.

[10] 甘居利, 林 钦, 李纯厚, 等. 柘林湾网箱养殖场不同区域环境因子的强度变化 [J]. 浙江海洋学院学报 (自然科学版), 2000, 20(1): 18 – 22.

[11] 王小平, 蔡文贵, 林 钦, 等. 大亚湾水域营养盐的分布变化 [J]. 海洋湖沼通报, 1996(4): 20 – 26.

[12] 黄洪辉, 王寓平. 大亚湾网箱养殖区生物——化学特性与营养状况的周日变化 [J]. 湛江海洋大学学报, 2001, 21(2): 35 – 43.

[13] 韦蔓新, 童万平, 赖廷和, 等. 广西北海湾 COD 与水文生物要素及不同形态氮磷的关系 [J]. 台湾海峡, 2002, 21(2): 162 – 166.

[14] 何悦强, 郑庆华, 温伟英, 张银英. 大亚湾海水网箱养殖与海洋环境相互影响研究 [J]. 热带海洋, 1996, 15(2): 22 – 27.

[15] 王 宪, 邱海源, 郑盛华. 厦门西港网箱养殖区底层水体污染状况分析 [J]. 台湾海峡, 2003, 22(3): 325 – 327.

[16] 陈于望, 王宪蔡, 明 宏. 湄洲湾海域营养盐状评价 [J]. 海洋环境科学, 1999, 18(3): 39 – 42.