

三沙湾盐田港养殖海域沉积物中的有机碳、氮和磷

韦章良^{1,2,3}, 韩红宾^{1,2,3}, 于克锋^{1,2,3}, 丁平真^{1,2,3}, 胡明^{1,2,3},
霍元子^{1,2,3}, 何培民^{1,2,3}

(1. 上海海洋大学 水产与生命学院, 上海 201306; 2. 上海海洋大学 水域环境生态上海高校工程研究中心, 上海 201306; 3. 上海海洋大学 海洋科学研究院, 上海 201306)

摘要: 于2012年8月(夏季)、11月(秋季)和2013年2月(冬季)、5月(春季)共4个航次对三沙湾盐田港养殖海域表层沉积物组成成分及其变化趋势进行调查分析, 并采用单因子污染指数(P_i)对沉积物质量进行评价。结果表明不同功能区沉积物中有机氮(TN)、总磷(TP)和有机碳(OC)含量差异显著($P < 0.05$), TN和TP含量4季变化范围分别是0.15~1.39 g/kg和0.11~1.08 g/kg, 平均值分别为(0.89±0.36) g/kg和(0.56±0.26) g/kg。OC含量在1.00~14.71 g/kg之间, 平均值为(8.26±3.78) g/kg。各站位沉积物中TN污染指数4季变化范围为0.25~2.53, 4季超标率分别为67%、81%、80%和90%; 各站位TP污染指数4季变化范围为0.18~2.63, 4个季节超标率分别为35%、80%、40%和51%; 各季节OC含量均未超标; OC/N原子比全年变化范围在8.4~10.3之间, 平均值为8.9±0.6。较弱的水流交换条件和海水养殖, 特别是海水网箱养殖, 是造成沉积物污染的主要原因, 开展多营养层次的综合养殖模式是促进盐田港海水养殖可持续发展的有效途径。

关键词: 盐田港; 封闭海湾; 沉积物; 网箱养殖; 大型海藻

中图分类号: Q944.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2016)03-0077-10
doi: 10.11759/hyxx20151105002

海洋沉积物是海洋各种生源要素重要的“源”与“汇”, 其各种组成成分和分布在一定程度上制约着该海域海洋生物的生长和发育^[1-2]。大量的沉积物有机质为底栖异养细菌提供了有利的生存条件^[3]。受污染的沉积物不仅直接危害底栖生物, 其中蓄积的污染物在适当的环境条件下会释放到水体中, 进一步危害到水生生态系统甚至人类健康^[4]。外源污染物输入后在水动力的推动下在不同功能区域产生沉降, 沉积物在物理、化学和生物综合作用下, 以不同形态的营养物质循环到水环境中^[5]。近年来, 我国海水网箱养殖活动给人们带来了可观的经济效益, 但随着网箱养殖数量和密度的增加, 使得养殖海域环境逐渐恶化^[6]。过度投饵使得网箱及周围海底的沉积物中有机质、重金属和硫化物等含量逐渐增加^[7], 给养殖活动和生态环境造成严重威胁。网箱养殖过程产生的沉积物有机质在一定条件下通过间隙水和上覆水之间的交换作用, 增加了养殖水体的营养盐含量^[8], 可能诱发赤潮灾害的频繁爆发^[9]。

三沙湾位于福建省东北部, 是我国著名的“大黄鱼之乡”。福建省拥有我国最大的牡蛎养殖区, 2008

年牡蛎养殖面积占全省养殖面积的27.23%, 仅霞浦县养殖区年产量就有 5.13×10^8 t^[10]。近年来, 随着海水养殖业迅速发展, 海水养殖网箱数量和规模不断增大。盐田港是三沙湾重要港湾组成之一, 受海域周围陆地地形及岛屿的屏障作用, 湾内海水与外界交换周期较长^[11]。由于缺乏合理的规划和科学的养殖方法, 使得盐田港海域生态系统逐渐退化, 严重影响了养殖经济效益^[12]。

本文于2012年—2013年对三沙湾盐田港养殖海域沉积物进行采样调查。分析在各个季节不同养殖区域沉积物质量特征与变化趋势, 并对沉积物的污染状况进行评价, 为今后改善养殖海域水体质量、合理规划养殖模式和防治养殖区病害提供基础资料。

收稿日期: 2015-11-05; 修回日期: 2016-02-23

基金项目: 国家海洋公益性行业科研专项(201205009-5); 国家科技支撑计划课题(2012BAC07B03)

[Foundation: Public Science and Technology Research Funds Projects of Ocean, No.201205009-5; National Science and Technology Support Program, No.2012BAC07B03]

作者简介: 韦章良(1989-), 男, 安徽合肥人, 硕士研究生, 研究方向为海水养殖生态学; Email: 315907746@qq.com; 霍元子, 通信作者, 副教授, Email: yzhuo@shou.edu.cn

1 材料与方法

1.1 研究海域概况

调查期间, 三沙湾盐田港主要养殖的是大黄鱼 (*Pseudosciaena crocea*) 和长牡蛎 (*Crassostrea gigas*), 鱼类网箱养殖规模为 1.15×10^4 个网箱, 养殖周期为 2~3 a, 主要投喂饵料是冰鲜小杂鱼, 鱼类年产量约为 1500 t, 长牡蛎养殖规模是 3.37 km^2 。大型海藻龙须菜 (*Gracilaria lemaneiformis*) 和海带 (*Laminaria japonica*) 根据季节更替轮换栽培。龙须菜栽培主要从 9 月份至来年 2 月份, 栽培面积约为 72.44 km^2 ; 海带在 12 月底至次年 5 月份大规模栽培, 调查期间栽培面积约为 181.89 km^2 。

1.2 采样站位与方法

本研究分别于 2012 年夏季(8 月)、秋季(11 月)和 2013 年冬季(2 月)、春季(5 月)共 4 个航次对福建省三沙湾盐田港 ($119.76^\circ\text{E} \sim 119.83^\circ\text{E}$, $26.72^\circ\text{N} \sim 26.84^\circ\text{N}$) 10 个站位沉积物进行采样调查(图 1), 监测指标包括沉积物中总氮(TN)、总磷(TP)和有机碳(OC)含量。其中, 1 号站位位于非养殖区, 3 号站位位于长牡蛎养殖区, 4 号站位在网箱养殖区, 2 号和 5~10 号站位分别位于大型海藻栽培区。

样品采集、贮存和运输均按照《海洋监测规范》(GB17378.5-2007)中相关要求。沉积物样品的采集使用 Ekman Grab 抓斗式采泥器, 采集表层 0~3 cm 样品, 用聚乙烯封口袋封存, 迅速储存到低温冰箱中待用。分析前将样品经冷冻干燥机干燥后去除各种杂质, 用粉碎机研磨成粉末, 四分法取样过 80 目尼龙筛并储藏于干燥器中备用。沉积物样品中 OC 的测定使用重铬酸钾氧化-分光光度法(GB17378.5-2007), 相对标准偏差为 1.0%; TN 的测定使用过硫酸钾氧化法, 相对标准偏差为 5.0%, TP 的测定是使用钼酸铵分光光度法, 相对标准偏差为 2.0% (GB12763.4-2007)。

1.3 评价方法

根据国家海洋局发布的《海水增养殖区监测技术规范》, 用单因子评价模式对沉积物中碳、氮、磷含量进行评价。评价公式如下:

$$P_i = C_i / C_{i0}$$

式中, P_i 指单因子污染指数, 为第 i 种污染因子的污染指数; C_i 为实测污染因子 i 的浓度; C_{i0} 为实测污染因子 i 的评价标准。

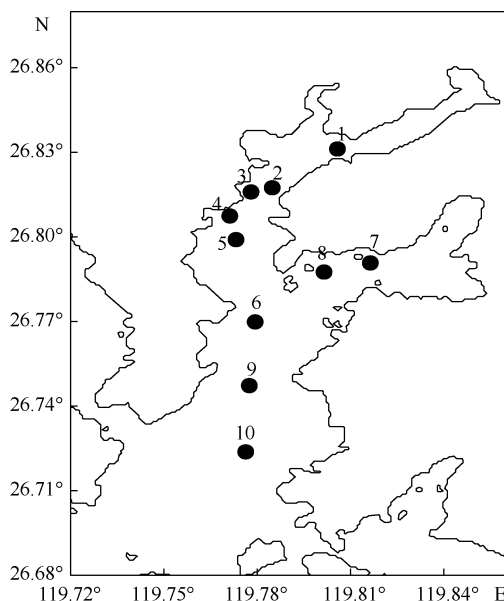


图 1 盐田港调查站位图

Tab. 1 Temporal variations in the content of TN in each functional area

文中对沉积物中 TN 和 TP 的评价标准, 应用“第二次全国海洋污染基线调查技术规程”中指定沉积物的标准, 即 TN 为 550 mg/kg, TP 是 600 mg/kg; 对有机碳(OC)的评价标准, 应用《海洋沉积物质量》(GB18668-2002)(国家质量监督检验检疫总局, GB18668-2002 中华人民共和国海洋沉积物质量)中 I 类沉积物的标准进行污染物状况评价, 1.0 作为 OC 是否对环境产生污染的基本分界线^[13]。

1.4 数据处理

沉积物所有数据用 Excel 2007 进行处理, 数据均用平均值±标准误表示; 应用 SPSS13.0 软件对调查数据进行单因素方差分析(ANOVA), 当 $P < 0.01$ 时为差异极显著, 当 $P < 0.05$ 为差异显著; 应用 Surfer 8.0 软件对调查的站位和相关数据进行作图。

2 结果

2.1 TN 含量的时空变化

调查期间, 盐田港水域表层沉积物中的 TN 含量变化范围为 0.15~1.39 g/kg, 年平均值为 $(0.89 \pm 0.36) \text{ g/kg}$ (表 1)。春季与其余 3 个季度 TN 含量差异显著 ($P < 0.05$), 明显低于其它 3 个季节, 均值为 $(0.73 \pm 0.29) \text{ g/kg}$; 其余 3 个季度之间差异均不显著 ($P > 0.05$), 变化范围在 0.88~0.98 g/kg 之间, 平均值为 $(0.95 \pm 0.43) \text{ g/kg}$ 。

表 1 各功能区总氮含量的季节变化

Tab. 1 Temporal variations in the content of TN in each functional area

区域	总氮含量(g/kg)			
	春季	夏季	秋季	冬季
网箱养殖区	1.02±0.21	1.38±0.01	1.29±0.06	1.32±0.15
牡蛎养殖区	0.94±0.13	1.17±0.04	1.11±0.02	1.12±0.10
海藻栽培区	0.67±0.03	1.13±0.25	0.86±0.25	0.84±0.16
非养殖区	0.15±0.08	0.25±0.10	0.29±0.08	0.34±0.22
平均值	0.73±0.29	0.98±0.49	0.88±0.43	0.96±0.29

同一季节不同站位之间 TN 差异极显著($P<0.01$), 全年中位于盐田港内测的 1 号和 2 号监测站位 TN 低于其余各监测站位(图 2)。春季, 湾内上游区域的贝类养殖区 TN 比平均值高出 0.21 g/kg, 其它 3 个季节 TN 较之网箱养殖区略有降低。网箱养殖区的沉积物 4 季均有较高含量的 TN, 在夏季 TN 含量高达 1.38 g/kg;

与 3 号、4 号水产经济动物养殖区相比, 全年大型海藻养殖区沉积物 TN 含量明显降低, 春季位于海藻养殖区的 2 号站位含量仅为 0.35 g/kg。在夏季, 位于湾口交汇处的站位 TN 含量较其他季节明显增加, 海藻栽培区的 5 号和 6 号站位比春季高出 0.68 g/kg 和 0.38 g/kg。

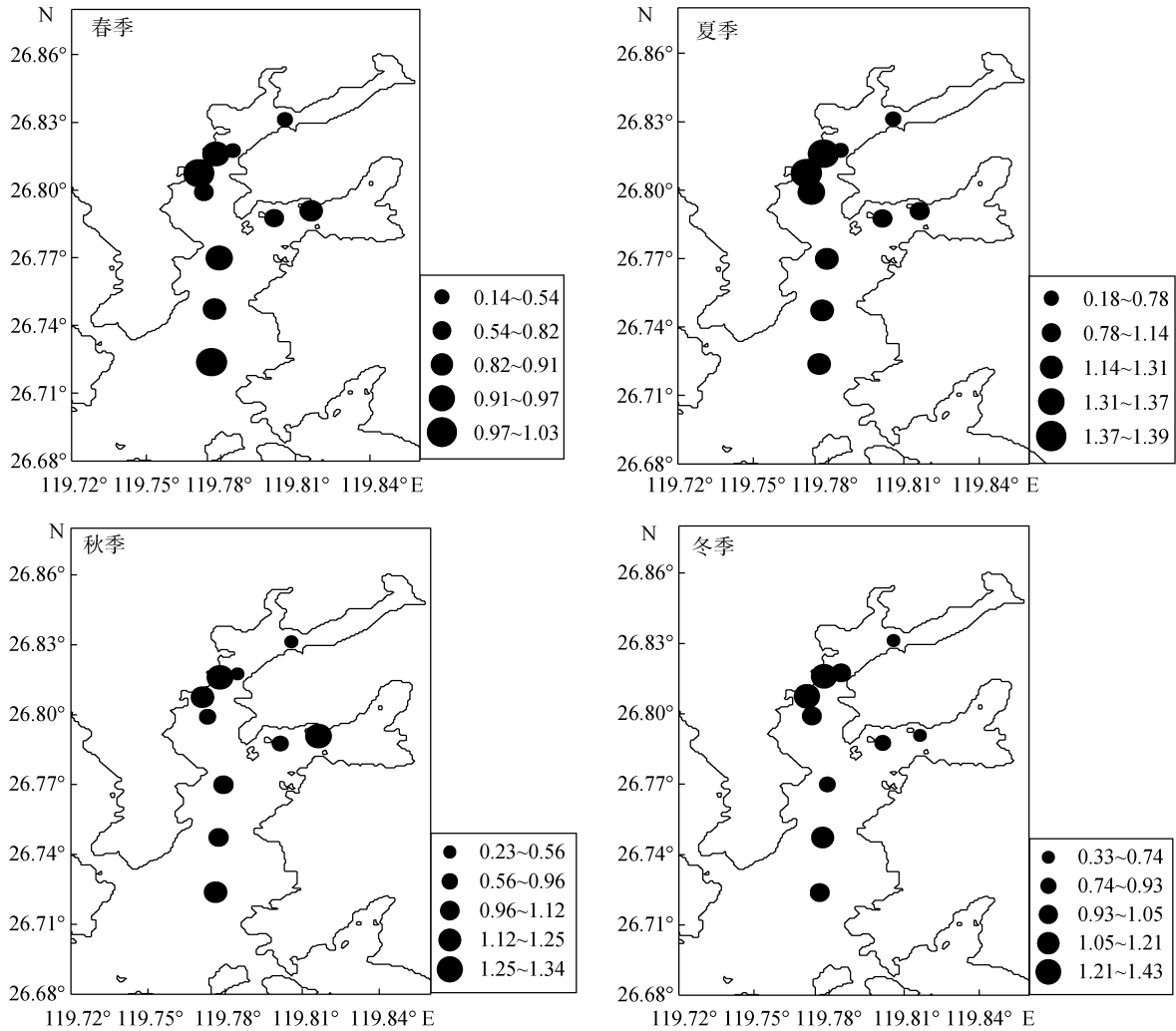


图 2 总氮含量的四季分布图(g/kg)

Fig. 2 The horizontal distribution of TN in different seasons (g/Kg)

2.2 TP 含量的时空变化

在全年调查中, 盐田港养殖水域表层沉积物中的 TP 含量变化范围为 0.11~1.08 g/kg, 年平均值为 (0.56±0.26) g/kg。夏季与其余三个季度 TP 含量的差异显著($P<0.05$), 夏季的 TP 含量最高, 平均值为 (0.75±0.55) g/kg; 而其余 3 个季度之间的差异均不显

著($P>0.05$), 变化范围为 0.43~0.58 g/kg(表 2), 平均值为(0.49±0.12) g/kg。

同一季节不同站位之间 TP 的含量差异极显著($P<0.01$), 海产经济动物养殖区沉积物 TP 含量显著高于海藻栽培区和空白海区(图 3)。网箱养殖区全年都处于较高水平, 年均值为(0.87±0.21) g/kg, 其中,

表 2 各功能区总磷含量的季节变化

Tab. 2 Temporal variations in the content of TP in each functional area

区域	总磷含量(g/kg)			
	春季	夏季	秋季	冬季
网箱养殖区	0.66±0.11	1.08±0.11	0.68±0.04	0.79±0.20
牡蛎养殖区	0.49±0.07	0.82±0.06	0.62±0.13	0.58±0.07
海藻栽培区	0.34±0.13	0.64±0.18	0.48±0.14	0.53±0.11
非养殖区	0.20±0.08	0.27±0.01	0.13±0.03	0.41±0.20
平均值	0.43±0.19	0.75±0.55	0.48±0.24	0.58±0.15

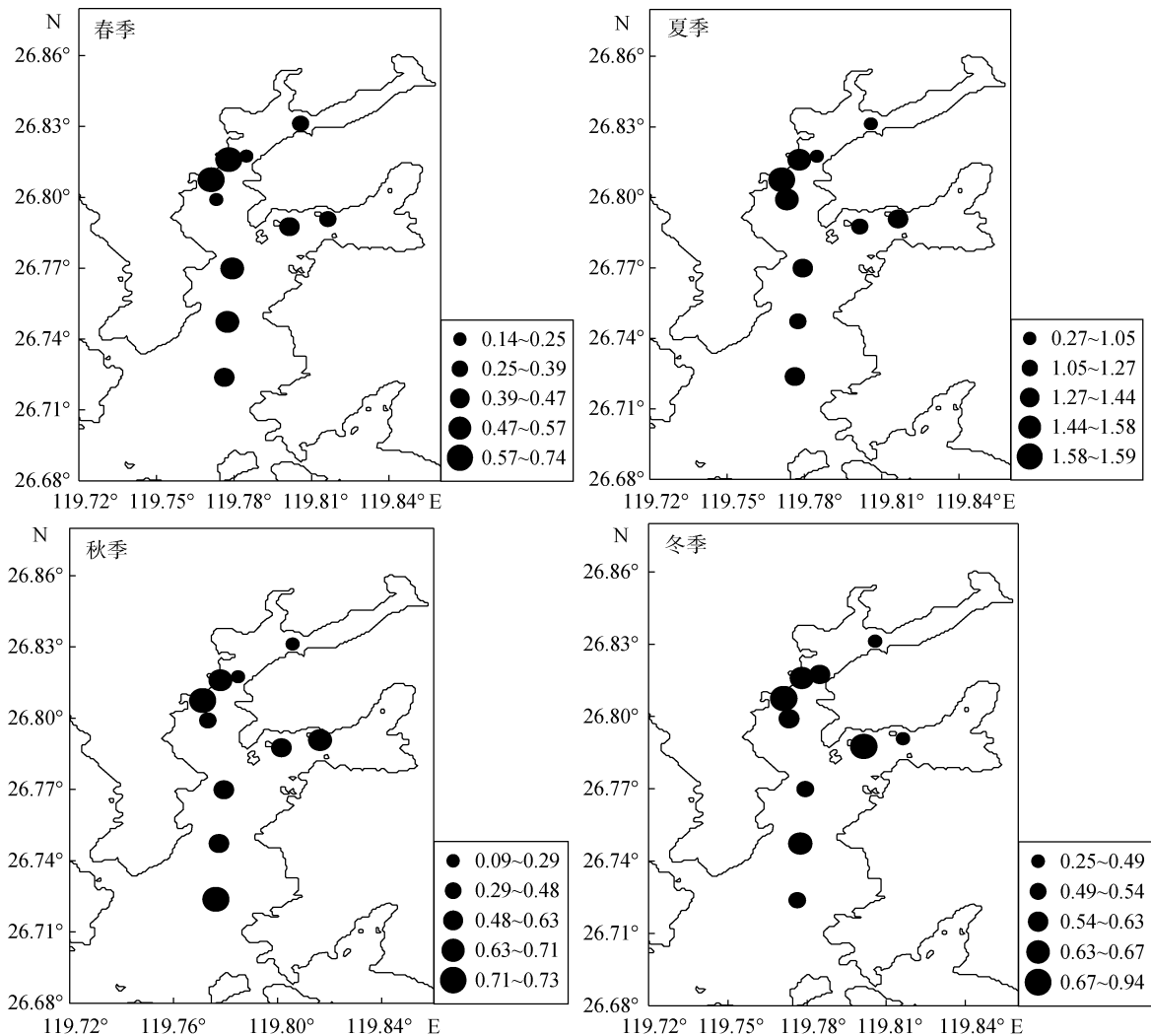


图 3 总磷含量的四季分布图(g/kg)

Fig. 3 The horizontal distribution of TP in different seasons (g/kg)

夏季 4 号站位达到全年中的最高值 1.08 g/kg; 牡蛎养殖区年平均值 TP 含量较网箱养殖区低 15%。大型海藻栽培区 TP 含量季节变化显著, 夏季临近鱼类网箱养殖区的 5 号站位沉积物中 TP 含量较其他 6 个海藻栽培区站位偏低。空白海区全年 TP 含量比其他功能海区都偏低, 在秋季, 1 号站 TP 含量位仅占该季节平均值的 23.45%。

2.3 OC 含量的时空变化

盐田港水域表层沉积物中的 OC 含量变化见表 3。全年沉积物中 OC 含量变化范围为 1.00~14.71 g/kg, 年平均值为(8.26±3.78) g/kg。春季和其余 3 个季度的 OC 含量的差异均显著($P < 0.05$), OC 含量最低, 平均值仅为(5.74±2.04) g/kg; 其余 3 个季度之间的差异均不显著($P > 0.05$), 变化范围是 7.24-9.49 g/kg, 平均值是(8.48±0.45) g/kg。

在春季的 1 号站位 OC 含量最低, 值为(1.50±0.82) g/kg; OC 最高值出现在夏季的 9 号站位, 为 14.7 g/kg。牡蛎养殖区沉积物中年平均 OC 含量为(10.13±3.40) g/kg, 高于网箱养殖区的(10.05±4.45) g/kg 和海藻栽培区的(9.51±4.59) g/kg, 空白对照区 OC 含量最低, 年平均值仅为(1.62±2.64) g/kg。入海口的空白对照区四季 OC 含量均显著低于平均值, 年平均含量为总体均值的 32%。网箱养殖区、牡蛎养殖区和海藻栽培区 4 个季节变化范围在 7.82~12.32 g/kg 之间, 显著高于空白对照区的 1.00~3.12 g/kg(图 4)。

沉积物中的 OC/N 在一定程度上体现了有机物来源的差异性。盐田港养殖海域表层沉积物的 OC/N 变化于 8.4~10.3 之间, 平均值为 8.9±0.6, 表明沉积物中有机质的主要以内源为主, 即海洋浮游动植物和大型海藻, 还有部分水生生物, 陆源有机质对该养殖海域的影响较小。

表 3 各功能区有机碳含量的季节变化

Tab.3 Temporal variations in the content of OC in each functional area

区域	有机碳含量(g/kg)			
	春季	夏季	秋季	冬季
网箱养殖区	8.95±0.37	10.83±0.28	10.48±0.29	9.95±0.36
牡蛎养殖区	8.14±1.13	12.32±3.39	8.43±1.54	11.61±1.36
海藻栽培区	7.82±0.46	10.75±1.15	8.61±2.29	10.28±1.16
非养殖区	1.50±0.25	1.00±0.01	1.44±0.85	3.12±1.94
平均值	5.74±2.04	8.72±5.20	7.24±3.97	9.49±2.35

2.4 沉积物的污染评价

根据单因子评价方法得到盐田港监测站位沉积物中 TN、TP 的污染指数见表 4。从结果可以看出, 沉

积物中 TN 的污染指数变化范围为 0.25~2.53。4 次调查中各个季度的超标率分别达到了 67%、81%、80% 和 90%, 表明除了春季以外, 沉积物中氮的污染严

表 4 沉积物中 TN 和 TP 的单因子污染指数(P_i)

Tab.4 Single factor pollution indices of nitrogen and phosphorus in sediment(P_i)

站位	P_{TN}				P_{TP}			
	春季	夏季	秋季	冬季	春季	夏季	秋季	冬季
1	0.25	0.33	0.42	0.63	0.43	0.45	0.38	0.45
2	0.49	0.58	0.62	1.69	0.25	0.45	0.25	0.91
3	1.86	2.53	2.42	2.21	0.95	2.40	1.09	1.08
4	1.01	2.49	2.25	1.78	0.77	2.63	1.19	1.68
5	0.47	2.40	1.02	1.83	0.48	2.40	0.49	0.91
6	1.21	2.36	1.35	1.69	0.79	2.33	0.78	0.82
7	0.74	2.04	1.75	1.22	0.92	2.33	1.21	1.68
8	1.03	1.42	2.27	1.62	0.66	1.75	1.06	0.97
9	1.22	2.07	1.98	2.15	0.90	1.93	0.95	1.06
10	1.78	2.16	1.51	1.90	0.75	2.12	1.05	0.89
超标率	67%	81%	80%	90%	35%	80%	40%	51%

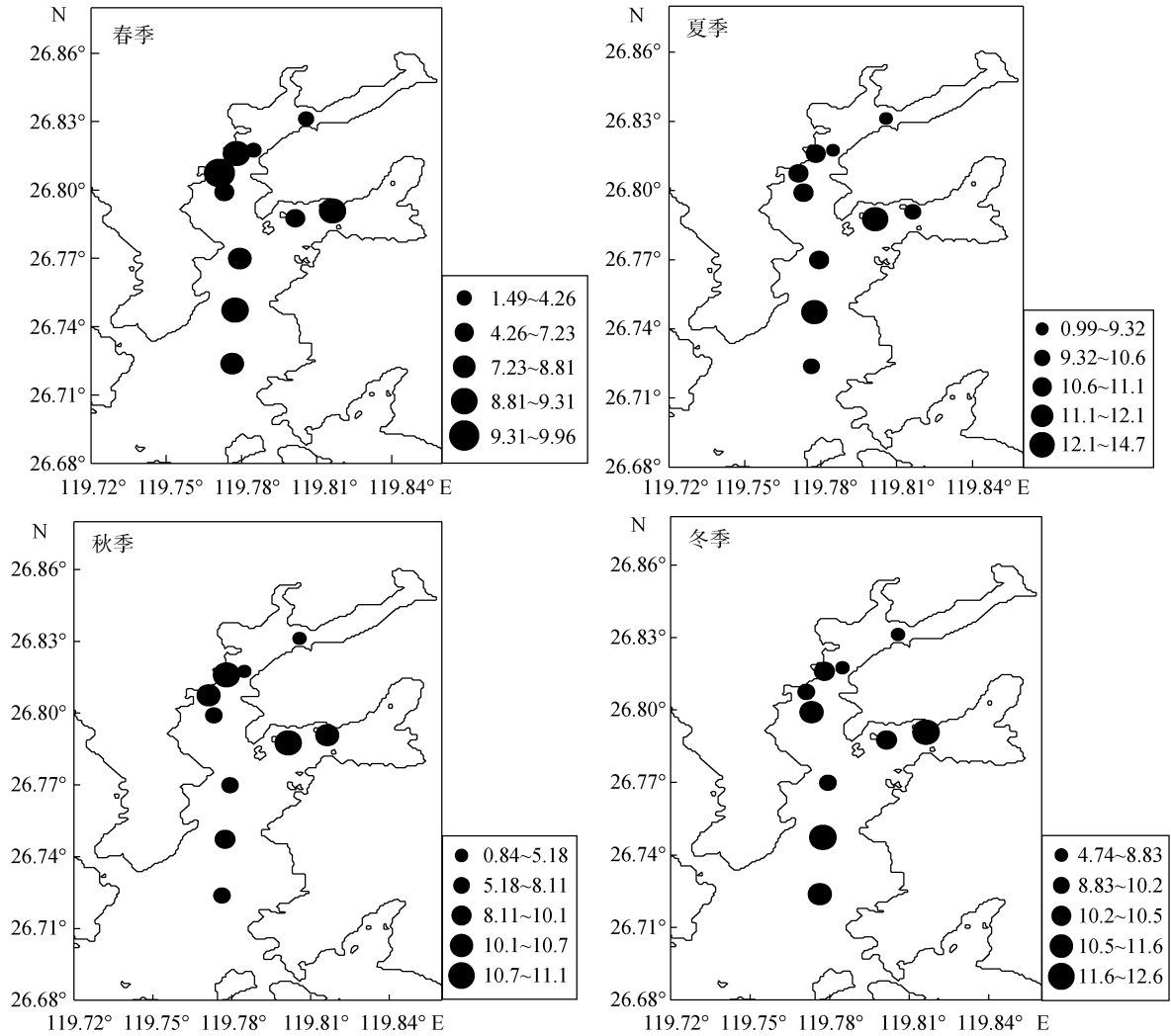


图 4 有机碳含量的四季分布图(g/kg)

Fig. 4 The horizontal distribution of OC in different seasons (g/kg)

重。沉积物 TP 的污染指数变化范围为 0.18~2.63, 4 个季度的超标率分别为 35%、80%、40% 和 51%, 表明夏季盐田港沉积物中磷污染严重, 秋季和冬季污染较小, 而在春季沉积物中的 TP 对环境不构成污染。各功能区全年污染指数均值分布特征与 TN 一致。全年每个站位的沉积物中 OC 污染指数均小于 1, 即 OC 含量水平较低, 没有构成污染。

3 讨论

不同海域对氮、磷等营养元素的环境容量有所区别, 黄海和东海沉积物中 TN 背景值为 0.47 g/kg, TP 背景值为 0.42 g/kg^[14]。根据本文研究, 盐田港沉积物中的氮和磷的污染指数已经超标, 造成这种现象的主要原因是水产养殖, 较弱的水流交换条件使得沉积污染物易富集。盐田港属于封闭型海湾, 溶解

无机氮和溶解无机磷处于高度富营养化水平, 快速发展的养殖活动和不合理的布局是主要原因^[11]。过分密集网箱布局严重阻挡水流, 养殖水体与外海的水交换受到限制。养殖向水体输入的废物大大超过了水体的自净能力, 造成病害频发^[15]。网箱养殖区和牡蛎养殖区处于盐田港的湾内, 水流交换量相对下游的海藻栽培区差, 沉积物容易富集, 这可能也是导致这两个功能区沉积物中 TN 和 TP 持续偏高的原因。胡明等^[12]调查时发现, 盐田港养殖海域海水营养状态质量指数 *NQI* 月平均值在 3.47~7.32 之间, 已处于严重的富营养化状态, 造成该海域浮游植物长期大量生长、繁殖, 加之大型海藻大规模栽培时也有腐烂和残留, 而网箱养殖投喂饵料多为海产冰鲜小杂鱼, 所造成的残饵、粪便、代谢产物和其它水生生物残体常年积累, 因此, 沉积物中 OC/N 原子比偏低。

密集的海水网箱养殖产生大量的以悬浮碎屑形式存在的颗粒有机物质,主要包括投喂的残饵和养殖鱼类产生的粪便^[16]。王肇鼎等^[17]对大鹏澳网箱养殖研究时认为网箱放养密度、水温及网箱内外水交换条件与养殖海域水体的富营养化程度相关。现阶段,该海区网箱养殖一般是投喂小杂鱼饵料,人工配合饲料使用率较低。研究表明,海水网箱养殖投喂的饵料被鱼类摄食同化一般不到 30%,其他部分多以残饵、鱼类排泄物和代谢废物等形式进入海洋环境中^[18-19],造成底泥中营养元素的富集。网箱养殖源有机质的水平位移最多可达 400 m,养殖废物是养殖水域沉积物有机污染的主要来源^[20]。双壳贝类养殖一般靠自然饵料,不需要人工投饵,但长年大规模养殖的贝类产生的生物沉积物将聚积于海底,改变了表层沉积物的数量和质量,进而影响底栖生物群落的生存和生长,甚至导致养殖海域贝类的大批死亡^[21]。Kuatsky N 等在日本广岛牡蛎养殖区研究牡蛎排泄量在 200 m²的筏架上生长 10 个月所排粪和假粪干重可达 19.3 t^[22]。

盐田港春季多为雨季,是全年径流最大的季节,湾内、外水体交换量加大^[23],沉积颗粒物随水流动,不易富集,且春季水温升高,微生物分解活动加剧,会导致沉积物中有机质含量的减少,养殖海域沉积物中总氮和总磷含量偏高,除入海口的空白对照区沉积物含量较低,其它三个功能区含量较高且分布比较均匀。夏季鱼类生长迅速,生命代谢旺盛,投饵和排泄物比其它季节增加,使该海域水体富营养化程度增加,产生的溶解性无机氮和无机磷为浮游植物的生长提供重要来源^[24],且夏季为大型海藻栽培间歇期,为赤潮的爆发提供可能^[25]。三沙湾海域年平均风速可达 3.2 m/s,夏季和初秋台风盛行,盐田港水深较浅,大风浪搅动海底沉积物,沉积物通过再悬浮过程中的再矿化及营养物颗粒有机物与水体的混合作用,有利于浮游植物的吸收和细菌吸附^[26]。再悬浮稳定沉积后氮、磷元素在生物、pH 和 DO 等环境因子作用下发生形态转化,向下沉积或者释放到水体中,以满足大型海藻生长的需要^[27]。

开展多营养层次综合养殖(Integrated Multi-trophic Aquaculture, IMTA)可实现系统内营养物质的高效利用,在减轻环境压力的同时,使系统具有较高的容纳量和食物产出能力。Chopin 等^[28]进行大西洋鲑、贻贝及海带的综合养殖研究结果表明,综合养殖区海带生长速率增加了 46%,贻贝增加了 50%。长牡蛎

能够有效地利用鲑鱼养殖过程中产生的残饵和粪便等有机废物,混养区牡蛎的生长速度远高于非混养区^[29]。以大型海藻为基础的综合养殖生态系统已逐步发展和完善,利用大型海藻和养殖动物在生态位上的互补性,即应用双壳贝类滤食颗粒污染物,再通过大型海藻吸收去除溶解性营养盐^[30-31]。盐田港大规模栽培的龙须菜和低温大型海带具有季节上的互补性,对该海域养殖环境起到一定的调控作用。然而,如何合理的布局养殖网箱,建立科学的综合养殖匹配模式,将是今后研究的主要方向。

4 结论

通过对三沙湾盐田港养殖海域表层沉积物时空分布规律特征的研究,并对沉积物质量进行评价,分析了沉积物中 TN、TP 和 OC 的主要来源及其控制因素,指出开展综合养殖是该海域可持续发展的有效途径。主要结论如下:

(1) 盐田港沉积物中 TN 和 TP 平均含量为 0.15~1.39 g/kg 和 0.11~1.08 g/kg,4 个季节沉积物中氮磷污染严重,内源负荷高。网箱养殖区和牡蛎养殖区位于海湾内部,相对于下游的海藻栽培区水流交换条件差,残饵、粪便等其它代谢产物易富集,污染尤其突出。

(2) 沉积物中 4 季 OC 含量均未超标,年平均值为(8.26±3.78) g/kg。全年各站位 OC/N 平均值低于 10,养殖水体的富营养化促进浮游动植物和海藻大量生长、繁殖,网箱养殖投喂产生的残饵和生物残体分解,表现出沉积物中有机质多为内源污染物。

(3) 盐田港较差的水动力条件和长期的海产经济动物养殖活动是造成该海域沉积物有机质污染的主要原因,合理布置养殖网箱,利用大型海藻和养殖动物在生态位上的互补性,科学的开展多营养层次综合养殖是实现该养殖海域可持续发展的的重要途径。

参考文献:

- [1] 吕晓霞. 黄海沉积物中氮的粒度结构及在生物地球化学循环中的作用[D]. 北京: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2003.
Lü Xiaoxia. Forms of nitrogen in different grain size sediments and its functions in biogeochemical cycling of the Yellow Sea[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Chinese Academy of Sciences Institute of Oceanography), 2003.
- [2] Cahoon L B, Nearhoof J E, Tilton C L. Sediment grain size effect on benthic microalgal biomass in shallow aquatic ecosystems[J]. Estuaries, 1999, 22 (3B): 735-741.

- [3] Turley C M. Bacteria in the cold deep-sea benthic boundary layer and sediment-water interface of the NE-Atlantic[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2000, 33: 89-99.
- [4] 钟文珏, 曾毅, 祝凌燕. 水体沉积物质量基准研究现状[J]. *生态毒理学报*, 2013, 08(3): 285-294.
Zhong Wenjue, Zeng Yi, Zhu Lingyan. Current research status of sediment quality criteria[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2013, 08(3): 285-294.
- [5] 王圣瑞, 焦立新, 金相灿, 等. 长江中下游浅水湖泊沉积物总氮、可交换态氮与固定态铵的赋存特征[J]. *环境科学学报*, 2008, 28(1): 37-43.
Wang Shengrui, Jiao Lixin, Jin Xiangcan, et al. Distribution of total exchangeable and fixed nitrogen in the sediments from shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(1): 37-43.
- [6] 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.
Xu Yongjian, Qian Lumin. Impacts of cage culture on marine environment[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(3): 532-536.
- [7] Sarg, Scilipoti D, Mazzola A, et al. Effects of fish farming waste to sedimentary and particulate organic matter in a southern Mediterranean area (Gulf of Castellammare, Sicily): a multiple stable isotope study (^{13}C and ^{15}N)[J]. *Aquaculture*, 2004, 234: 199-213.
- [8] 蒋增杰, 方建光, 毛玉泽, 等. 宁波南沙港养殖水域沉积物-水界面氮磷营养盐的扩散通量[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(12): 2413-2419.
Jiang Zengjie, Fang Jianguang, Mao Yuze, et al. Diffusion fluxes of dissolved inorganic nitrogen and phosphorus across sediment-water interface in Nansha aquaculture area, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(12): 2413-2419.
- [9] 房月英. 三都湾赤潮监控区海水富营养化与赤潮发生的关系研究[D]. 福建师范大学, 2008.
Fang Yueying. Relationship between eutrophication and the occurrences of red tide in red tide-monitoring area of Sandu Bay[D]. Fujian Normal University, 2008.
- [10] 曾志南, 宁岳. 福建牡蛎养殖业的现状、问题与对策[J]. *海洋科学*, 2011, 35(9): 112-118.
Zeng Zhinan, Ning Yue. History, status and future of oyster culture in Fujian China[J]. *Marine Sciences*, 2011, 35(9): 112-118.
- [11] 叶海桃, 王义刚, 曹兵. 三沙湾纳潮量及湾内外的水交换[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2007, 35(1): 96-98.
Ye Haitao, Wang Yigang, Cao Bing. Tidal prism of Sansha Bay and its water exchange with the open sea[J]. 2007, 35(1): 96-98.
- [12] 胡明, 韦章良, 韩红宾, 等. 三沙湾盐田港海水养殖海域水质调查与评价[J]. *上海海洋大学学报*, 2014, 23(4): 582-587.
Hu Ming, Wei Zhangliang, Han Hongbin, et al. The survey and assessment of water environmental quality in the mariculture area in the enclosed Sansha Bay[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2014, 23(4): 582-587.
- [13] 徐恒振, 周传光, 马永安, 等. 中国近海近岸海域沉积物环境质量[J]. *交通环保*, 2000, 21(3): 16-18, 46.
Xu Hengzhen, Zhou Chuanguang, Ma Yongan, et al. Environmental quality of deposits in offshore zone of China[J]. *Environmental Protection in Transportation*, 2000, 21(3): 16-18, 46.
- [14] 王菊英, 马德毅, 鲍永恩, 等. 黄海和东海海域沉积物的环境质量评价[J]. *海洋环境科学*, 2003, 22(4): 21-24.
Wang Juying, Ma Deyi, Bao Yongen, et al. Evaluation on sediment quality in Yellow Sea and East China Sea[J]. *Marine Environmental Science*, 2003, 22(4): 21-24.
- [15] 舒廷飞, 罗琳, 温琰茂. 海水养殖对近岸生态环境的影响[J]. *海洋环境科学*, 2002, 21(2): 74-79.
Shu Tingfei, Luo Lin, Wen Yanmao. Effects of mariculture on coastal ecological environment[J]. *Marine Environmental Science*, 2002, 21(2): 74-79.
- [16] Ye L, Ritz D A, Fenton G E, et al. Tracing the influence on sediments of organic waste from a salmonid farm using stable isotope analysis[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1991, 145, 161-174.
- [17] 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.
Wang Zhaoding, Peng Yunhui, Sun Lihua, et al. Secf-pollution and eutrophication in area of fish cage-farming in Dapengao Cave[J]. *Marine Sciences*, 2003, 27(2): 77-81.
- [18] Hall P O J, Anderson L G, Holby O, et al. Chemical flux and mass balances in a marine fish cage farm I. Carbon[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1990, 61, 61-73.
- [19] Holby O, Hall P O J. Chemical flux and mass balances in a marine fish cage farm II. Phosphorus [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1991, 70: 263-272.
- [20] 蒋增杰, 方建光, 毛玉泽, 等. 海水鱼类网箱养殖水域沉积物有机质的来源甄别[J]. *中国水产科学*, 2012, 19(2): 348-354.
Jiang Zengjie, Fang Jianguang, Mao Yuze, et al. Identification of aquaculture-derived organic matter in the sediment associated with coastal fish farming[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2012, 19(2): 348-354.
- [21] 周毅, 杨红生, 张福绥. 海水双壳贝类的生物沉积及其生态效应[J]. *海洋科学*, 2003, 27(2): 23-26.
Zhou Yi, Yang Hongsheng, Zhang Fusui. Biodeposition by seawater bivalve mollusk[J]. *Marine Sciences*, 2003, 27(2): 23-26.
- [22] Kautsky N, Evans S. Role of biodeposition by *Mytilus edulis* in the circulation of matter and nutrients in a Baltic coastal ecosystem[J]. *Mar Ecol Prog Ser*,

- 1987(38): 201-212.
- [23] 林永添. 三沙湾赤潮种类与理化要素关系的初步探讨[J]. 现代渔业信息, 2010, 25(6): 11-15.
Lin Yongtian. Preliminary Study on Relationship between Red Tide Species and Physical and Chemical Factors in Sansha Bay[J]. Modern Fisheries Information, 2010, 25(6): 11-15.
- [24] Fanning K A, Carder K L, Betzer P R. Sediment resuspension by coastal waters: a potential mechanism for nutrient re-cycling on the ocean's margins[J]. Deep Sea Research. 1982, 29: 953-965.
- [25] 翁焕新, 陈立红, 楼竹山, 等. 沿海沉积营养物质对引发赤潮的潜在影响[J]. 浙江大学学报(理学版), 2004, 31(5): 595-600.
Weng Huanxin, Chen Lihong, Lou Zhushan, et al. Potential harm of coastal sedimentary nutrient in inducing red tide[J]. Journal of Zhejiang University (Science Edition), 2004, 31(5): 595-600.
- [26] 高学鲁, 宋金明, 李学刚, 等. 中国近海碳循环研究的主要进展及关键影响因素分析[J]. 海洋科学, 2008, 32(3): 83-90.
Gao Xuelu, Song Jinming, Li Xuegang, et al. A review of the major progress on carbon cycle researches in the Chinese marginal seas and the analysis of the key influence factor[J]. Marine Sciences, 2008, 32(3): 83-90.
- [27] 潘齐坤, 罗专溪, 邱昭政, 等. 九龙江口湿地表层沉积物氮的形态分布特征[J]. 环境科学研究, 2011, 24(6): 673-678.
Pan Qikun, Luo Zhuaxi, Qiu Zhaozheng, et al. Distribution Characteristics of Nitrogen Forms in Surface Sediments of Jiulongjiang Estuary Wetland[J]. Research of Environmental Sciences, 2011, 24(6): 673-678.
- [28] Chopin T, Buschmann A H, Halling C, et al. Integrating seaweeds into marine aquaculture systems: A key toward sustainability[J]. Journal of Phycology, 2001, 37(6): 975-986.
- [29] Lefebvre S, Barilléb L, Clerca M. Pacific oyster (*Crassostrea gigas*) feeding responses to a fish-farm effluent[J]. Aquaculture, 2000, 187(1-2): 185-198.
- [30] Vandemeulen H, Gordin H. A ammonium uptake using *Ulva* (Chlorophyta) in intensive fishpond systems: mass culture and treatment of effluent[J]. J Appl Phycol, 1990, 2: 363-374.
- [31] Neori A, Cohen I, Gordin H. *Ulva* lactucabiofilters for marine fishpond effluents: II. Growth rate, yield and C:N ratio[J]. Bot Mar, 1991, 34: 483-489.

The content of carbon, nitrogen and phosphorus in the surface sediment at the mariculture area in the enclosed Sansha Bay

WEI Zhang-liang^{1, 2, 3}, HAN Hong-bin^{1, 2, 3}, YU Ke-feng^{1, 2, 3}, DING Ping-zhen^{1, 2, 3}, HU Ming^{1, 2, 3}, HUO Yuan-zi^{1, 2, 3}, HE Pei-min^{1, 2, 3}

(1. College of Fisheries and Life Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Water Environment and Ecology Engineering Center of Shanghai Institute of Higher Education, Shanghai 201306, China; 3. Marine Scientific Research Institute, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Received: Nov. 5, 2015

Key words: Yantian Bay; Enclosed bay; Sediment; Cage fish farming; Macroalgae

Abstract: An investigation has been carried out into the environmental quality of sediment in the enclosed Yantian bay, located inside the Sansha Bay, from August 2012 to July 2013. Testing was carried out at ten sampling sites, which were evenly distributed in different mariculture functional areas, during four different research trips. The single factor contaminant index (P_i) methodology was used to evaluate the environmental quality of sediment. The results showed that the concentration of total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) and organic carbon (OC) varied significantly between different seasons ($P < 0.05$). The concentration of TN ranged from 0.15 to 1.39 g/Kg and the concentration of TP ranged between 0.11 to 1.08 g/Kg. The concentration of OC was in the range of 1.00 to 14.71 g/Kg with an average value of (8.26 ± 3.78) g/Kg, and was found to be the highest in the oyster aquaculture area. The OC concentration in the macro-algae aquaculture area was lower than in the fish cage area, but higher than that in the control area. The P_i of TN was 1.23, 1.84, 1.56 and 1.67 in spring, summer, autumn and winter, respectively. The con-

centration of TN in the sediment exceeded the first class standard for marine sediment quality for fisheries in China by 67 %, 81 %, 80 % and 90 % in every season. The P_i of TP ranged from 0.18 to 2.63 during the period of study. Based on the P_i result, the concentration of TP exceeded the first class standard for marine sediment quality for fisheries in China by 35 %, 80 %, 40 % and 51 % in spring, summer, autumn and winter, respectively. For all four seasons, the concentration of OC was lower than the first class standard for marine sediment quality for fisheries in China. The results detailed in this study indicate that the poor hydrological exchange and mariculture, especially the cage fish farming, have heavily polluted the sediment environment in the Yantian bay. The spatiotemporal change of TN, TP and OC appeared to be related to the mariculture mode. Macro-algae showed high bioextraction efficiencies with nutrients and were able to balance the nutrient produced by marine aquatic animal farming in an Integrated Multi-trophic Aquaculture (IMTA) system.

(本文编辑: 康亦兼)