

文章编号: 1674 - 5566(2013)02 - 0266 - 08

## 象山港海洋牧场规划区叶绿素 a 分布特征研究

王菲菲, 章守宇, 林 军

(上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306)

**摘 要:** 为了对象山港海洋牧场规划区初级生产力情况进行了解, 并为其牧场建设效果评价提供依据, 在2011年的4月、7月和11月对浙江省象山港海洋牧场规划区内22个站点的叶绿素 a、水体混合稳定度、水温、水体及沉积物中营养盐含量等生态因子进行了现场观测和实验测定, 并进行了相关性分析。结果显示: 调查海区叶绿素 a 分布具有明显的季节变化: 4月( $4.62 \text{ mg/m}^3$ ) > 7月( $3.57 \text{ mg/m}^3$ ) > 11月( $3.11 \text{ mg/m}^3$ )。水平分布上, 各季节叶绿素 a 的分布趋势均为由湾底向湾口逐渐降低; 垂直分布上, 3个月份表、底层叶绿素 a 浓度差为7月( $3.02 \text{ mg/m}^3$ ) > 4月( $1.93 \text{ mg/m}^3$ ) > 11月( $1.61 \text{ mg/m}^3$ )。与环境因子的相关性分析表明: 叶绿素 a 的分布与浊度、水温、盐度及活性磷酸盐的相关性显著, 3个季度的叶绿素 a 含量均与势能异常系数(PEAP)负相关。调查海区表层沉积物氮磷营养盐丰富, 为此探讨了在研究海域建设人工鱼礁可以降低水体混合稳定度, 促进营养盐的再生, 并可能促进浮游植物的生长, 从而有助于海域初级生产力水平的提高。

**研究亮点:** 研究海洋牧场规划区叶绿素 a 水平并与水体混合稳定度进行相关度分析, 可以为牧场建设适宜性评价技术、牧场产出能力评估技术、牧场利用模式尤其是人工鱼礁利用模式等技术实施提供理论依据, 对推动我国海洋牧场建设科学高效实施, 实现近海渔业资源的高效持续开发利用具有重要意义。

**关键词:** 海洋牧场; 叶绿素 a; 势能异常系数; 相关性

**中图分类号:** S 917.3

**文献标志码:** A

海洋牧场是构成增殖型渔业综合生产技术的总称, 它通过开发近海海域初级生产力及其各个构成要素, 并利用增殖放流、建设鱼礁场及海藻场等手段进行控制和管理, 以实现目标生物产出水平的提高和资源可持续利用的目的<sup>[1]</sup>。根据牧场利用原理, 要求建设海区有较高的初级生产力水平以满足目标生物的摄食。叶绿素 a 是浮游植物生物量最重要组成部分以及进行光合作用的主要色素, 研究叶绿素 a 的分布不仅能够了解海域的初级生产力状况而且可以显示海域的各项环境状况<sup>[2]</sup>。象山港位于东经  $120^{\circ}00' \sim 121^{\circ}25'$ , 北纬  $29^{\circ}05' \sim 29^{\circ}46'$ , 为浙江省重要的水产养殖基地<sup>[3]</sup>。全港纵深超过 60 km, 水域面积  $391.8 \text{ km}^2$ , 是我国重要的港湾型海洋牧场建设规划区。历史资料中对象山港叶绿素 a 分布的针对性研究较少, 且多已年代久远<sup>[4-7]</sup>。象山港作为

浙江省最大的水产养殖基地及我国重要的港湾型海洋牧场规划区, 对其海水中叶绿素 a 分布特征及其与环境因子尤其是海水混合稳定度的相关性研究, 不仅可以了解象山港浮游植物量随环境变化的分布特征, 同时也可以为象山港海洋牧场的建设及其效果评价提供参考和依据。根据2011年4月(平水期)、7月(丰水期)和11月(枯水期)9个航次的叶绿素 a、营养盐、表层沉积物粒径组成、总磷、总氮及潮流、水文要素等的现场观测和实验室测定, 运用叶绿素 a、水体混合稳定度的常规计算方法换算, 得到象山港海洋牧场规划区叶绿素 a 浓度及以海水混合稳定度为主的相关环境因子的分布特征。

### 1 材料与方法

象山港海洋牧场规划区位于象山港中底部

收稿日期: 2012-06-13 修回日期: 2012-10-22

基金项目: 国家公益性行业(农业)科研项目(201003068)

作者简介: 王菲菲(1987—), 女, 硕士研究生, 研究方向为海洋生态系统动力学。E-mail: wangfeifei5100@126.com

通信作者: 章守宇, E-mail: syzhang@shou.edu.cn

强蛟群岛海域,其建设核心区位于白石山—中央山—铜山北侧、象山港航道以南 500 m 海域,东至白石山澜头角,西至历试山—铜山嘴连线,海域面积 4.2 km<sup>2</sup>,辐射影响整个象山港中底部,即从双德山、乌沙山以西至狮子口、强蛟以东约 50 km<sup>2</sup> 海域。

### 1.1 调查时间和采样站位

2011 年 4 月、7 月和 11 月对象山港研究海域 (29.4°~29.6°N;121.4°E~121.8°E) 共设置了 7 个南北向断面 (断面 1: D3A, D3B, D3C; 断面 2: St1, St2, St3, St4; 断面 3: St5, St6, St7; 断面 4: St8, St9, St10, St11; 断面 5: St12, St13; 断面 6: D2A, D2B, D2C; 断面 7: D1A, D1B, D1C), 3 个东西向断面 (断面 8: St1, St5, St11; 断面 9: St4, St7, St9; 断面 10: St2, St6, St8, St12) 共 22 个站点,进行了 9 个航次的生物、化学等多学科的综合调查,具体调查海区 and 站位如图 1。

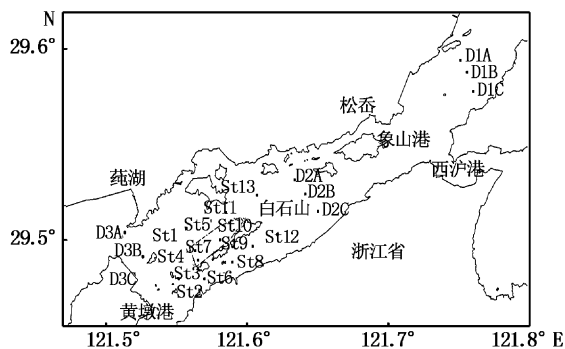


图 1 调查站位分布

Fig. 1 The distribution of investigation stations

图中框形区为海洋牧场建设核心区。

## 1.2 采样和测定方法

### 1.2.1 叶绿素 a 含量的测量与计算方法

使用 SBE 911plus CTD 获取各站点垂直断面的叶绿素 a 浓度,并同步采集表、底层水样进行实验室测定。调查海区水深均在 30 m 以内,因而水样采集采用 WB-SS 不锈钢定深采水器,采集各站点的表层(海面下 0.5 m)和底层(离底 2 m)水各 1 L,周转到干净的聚丙烯样品保存容器中。用于叶绿素测定的水样采集后立即冷冻保藏,并根据水样体积加入一定量的 MgCO<sub>3</sub> 溶液(10 g/dm<sup>3</sup> 饱和上清液)防止叶绿素降解。参照《海洋调查规范》(GB/T 12763.6—2007)于 10 mL 90% 丙酮中低温(4 °C)黑暗萃取 1 h,经 4 000 r/min 离心后于分光光度计以 90% 丙酮作空白对照测

量波长为 750、630、647 和 664 nm 波段的消光值。叶绿素 a 含量的计算采用 JEFFREY 等<sup>[8]</sup>的改进公式:

$$\rho_n = 11.85 \times (E_{664} - E_{750}) - 1.54 \times (E_{647} - E_{750}) - 0.08 \times (E_{630} - E_{750}) \quad (1)$$

$$\rho = \rho_n \times V_1 / V_2 \quad (2)$$

式中: $\rho_n$  为提取液中叶绿素 a 质量浓度; $\rho$  为海水中叶绿素 a 质量浓度; $V_1$  为提取液体积; $V_2$  为过滤海水的体积。

### 1.2.2 海水混合稳定度的测定与估算方法

水体混合稳定度是表征抑制海水垂直水层混合强度的重要指标。通常采用垂直剖面密度变化影响的势能异常系数 (potential energy anomaly parameter, PEAP, 单位 J/m<sup>3</sup>) 来表示水柱的垂向稳定性,其计算公式如下<sup>[9-11]</sup>,采用 SBE 911plus CTD 进行各站点垂向剖面密度的测定。

$$\varphi = \frac{1}{h} \int_h^0 (\bar{\rho} - \rho_z) g_z dz \quad (3)$$

$$\bar{\rho} = \frac{1}{h} \int_h^0 \rho_z dz \quad (4)$$

式中: $\varphi$  为水柱平均垂向混合稳定度; $\rho_z$  为水体 z 水层垂直剖面密度; $\bar{\rho}$  为垂向平均密度; $h$  为水深; $g$  为重力加速度。 $\varphi$  为负值时,表明水体不稳定,水柱混合型较好; $\varphi$  为正值时,值越大表示水柱的层化现象越剧烈,水体稳定性越高。

### 1.2.3 海水及表层沉积物营养盐的测量方法

分表、底层进行海水营养盐的测定,测定前先经用 1% 盐酸浸泡 12 h 的 0.45 μm 混合纤维微孔滤膜过滤。过滤后的水样参照《海洋调查规范》(GB/T 12763.4—2007)进行测定。表层沉积物主要进行总磷、总氮及粒径大小的测定:参照扈传昱法进行总磷测定<sup>[12]</sup>;在《海洋调查规范》(GB 17378.5—2007)的基础上采用 K9840 凯氏定氮法测定总氮。采用 Master size 2000 激光粒度仪进行粒度的分析。

海水的温度、盐度、浊度、透明度、pH 等参数分别用 SBE 911plus CTD、多功能水质检测仪 AAQ1186、透明度盘、pH 计进行现场测定。并进行 24 h 大中小潮时期流速、流向的定点连续观测。

## 2 结果与分析

### 2.1 叶绿素 a 的分布

#### 2.1.1 叶绿素 a 的水平分布及季节变化

水平方向,3 个月份的叶绿素 a 浓度分布范

围与均值见表1:春季(4月),研究海区叶绿素a含量为3个月份中最高,表层浓度范围为1.64~9.14 mg/m<sup>3</sup>,均值为5.58 mg/m<sup>3</sup>,浓度最高区位于近白石山沿岸的站点St9。底层浓度最大值也位于站点St9。夏季(7月),由于受到较强光强以及高水温的影响(T=29.32℃),叶绿素a含量较低,表层浓度范围在2.48~8.24 mg/m<sup>3</sup>之间,均值为4.59 mg/m<sup>3</sup>,叶绿素a浓度高值区位于港中部的St5站点。底层叶绿素a浓度低值区在象山港主航道附近的St11站点。秋季(11月),受短光照时间的限制,叶绿素a的表层浓度范围为1.68~6.01 mg/m<sup>3</sup>,均值为3.91 mg/m<sup>3</sup>,靠近港口的D1A站点叶绿素a浓度最低,11月份叶绿素a高值区基本上都分布在水深较浅海域,底层叶绿素a浓度最低值同7月份也位于St11站点。

总体来看,研究海域水平方向上3个季度的叶绿素a浓度受季节性环境变化影响比较明显,

各站点3个季度的叶绿素a浓度水平表现为4月(4.62 mg/m<sup>3</sup>)>7月(3.57 mg/m<sup>3</sup>)>11月(3.11 mg/m<sup>3</sup>),与刘子琳等同季度的研究结果一致:4月(8.28 mg/m<sup>3</sup>)>7月(2.63 mg/m<sup>3</sup>)>11月(1.54 mg/m<sup>3</sup>)。使用Gri286对研究海域叶绿素a水平分布画等值线图,如图2所示,研究海域叶绿素a的分布趋势为:表、底层上叶绿素a的浓度均为由入海口至湾底部逐渐增加。

表1 4,7和11月表、底层叶绿素a的浓度分布  
Tab.1 Distribution of surface and bottom Chl. a in April, July and November

调查时间	调查水层	范围/(mg/m <sup>3</sup> )	均值/(mg/m <sup>3</sup> )	高值站点	低值站点
4月	表层	1.64~9.14	5.58±3.90	S9	D2C
	底层	1.61~5.90	3.65±2.00	S9	D1A
7月	表层	2.48~8.24	4.59±1.70	S5	D3A
	底层	1.97~3.54	2.56±0.60	D1A	St11
11月	表层	1.68~6.01	3.91±2.20	D3A	D1A
	底层	1.81~2.69	2.30±0.50	S3	St11

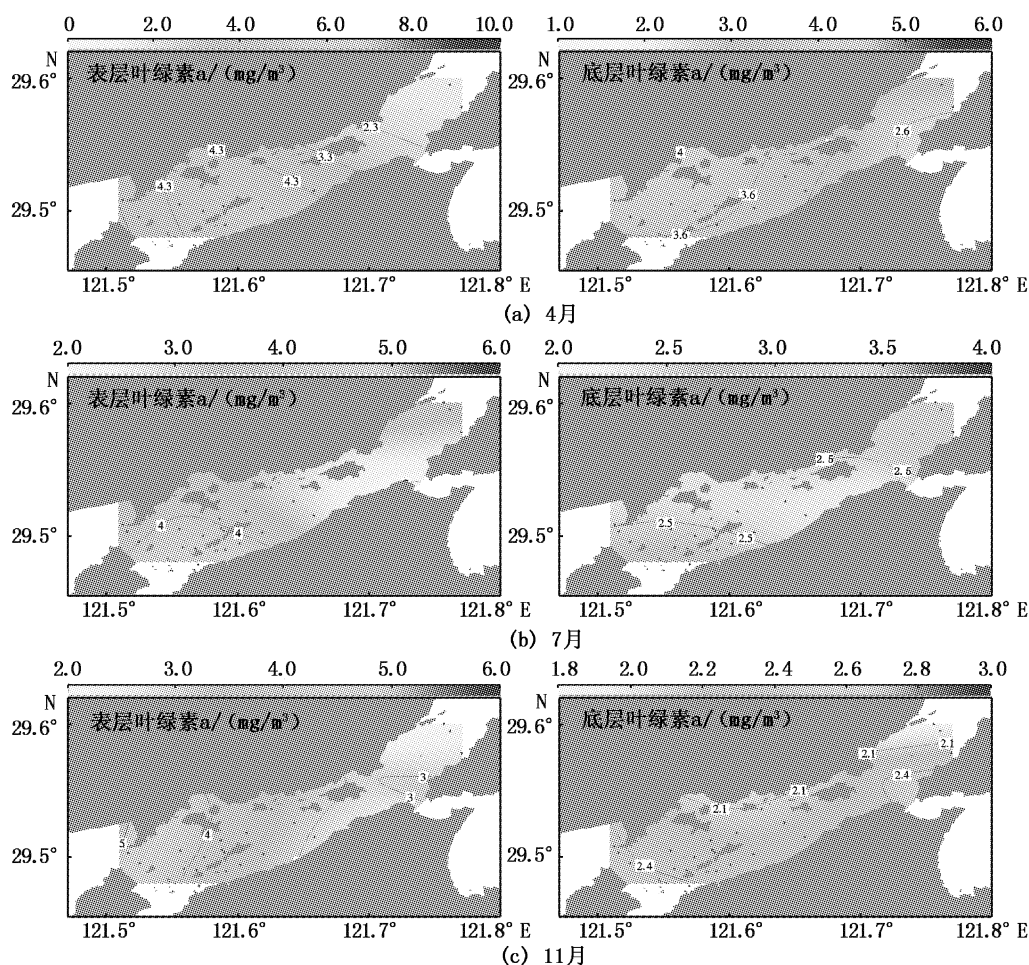


图2 4,7和11月份表、底层叶绿素a分布特征

Fig.2 Distribution characteristics of surface and bottom Chl. a in April, July and November

图中红点表示各调查站点,下图同。

### 2.1.2 叶绿素 a 的垂直分布及季节变化

垂直断面上,3 个季度水柱平均叶绿素 a 浓度为  $(3.5 \pm 2.10) \text{ mg/m}^3$ 。春季(4 月),各站点水层叶绿素 a 变化不大,水柱平均叶绿素 a 浓度范围为  $2.52 \sim 7.71 \text{ mg/m}^3$ ,均值为  $(5.53 \pm 3.20) \text{ mg/m}^3$ ,叶绿素 a 高值站点为 D3C,低值站点为 D1B;夏季(7 月),水柱平均叶绿素 a 浓度范围为  $2.19 \sim 4.86 \text{ mg/m}^3$ ,均值为  $(3.22 \pm 1.40) \text{ mg/m}^3$ ,高值站点为 D1A,低值站点为 St11;秋季(11 月),水柱平均叶绿素 a 浓度范围为  $1.59 \sim 4.00 \text{ mg/m}^3$ ,均值为  $(2.79 \pm 1.40) \text{ mg/m}^3$ ,高值站点为 D3A,11 月份叶绿素 a 浓度低值站点同 4 月份调查结果相同,也出现在 D1B。

各季节表、底层叶绿素 a 浓度差不同,总体表现为 7 月  $(3.02 \text{ mg/m}^3) > 4$  月  $(1.93 \text{ mg/m}^3) >$

11 月  $(1.61 \text{ mg/m}^3)$ 。春季(4 月)研究海域表、底层叶绿素 a 浓度差为  $1.93 \text{ mg/m}^3$ ;夏季(7 月)表、底层叶绿素 a 浓度差较大,为  $3.02 \text{ mg/m}^3$ ;秋季(11 月)表、底层叶绿素 a 浓度差为  $1.61 \text{ mg/m}^3$ 。各个站点叶绿素 a 浓度的垂直分布趋势一致,皆为随垂直断面水深的增加,叶绿素 a 浓度降低。

### 2.2 水体混合稳定度的季节变化

采用势能异常系数(PEAP)来表示水柱的垂直稳定性,调查显示,3 个月份的 PEAP 分布趋势为:  $PEAP_7 > PEAP_{11} > PEAP_4$ ,由图 6 各个调查位点水体混合稳定度的等值线分布图可以看出,4 月与 11 月在港中部缸片山与大、小德山附近有明显的等值线高值分布,海水混合不强烈,较海域其他地区海水稳定。

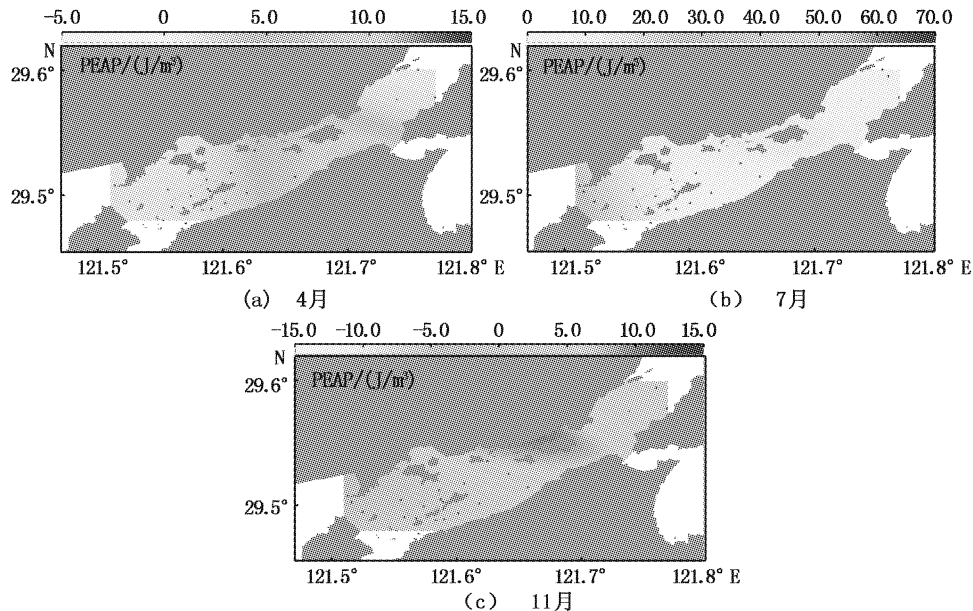


图 3 3 个月份 PEAP 的分布  
Fig.3 The distribution of PEAP in the three months

季节变化上,4 月份 PEAP 的分布范围为  $-1.25 \sim 6.97 \text{ J/m}^3$ ,均值为  $2.21 \text{ J/m}^3$ 。低值位点为叶绿素 a 高值站点 St9,高值位点为 D2C;7 月份 PEAP 的分布范围为  $0.28 \sim 74.10 \text{ J/m}^3$ ,均值为  $16.97 \text{ J/m}^3$ ;同 4 月份,7 月份 PEAP 低值位点为 St9,D3C 具 PEAP 最高值;11 月份 PEAP 的分布范围为  $-2.82 \sim 10.26 \text{ J/m}^3$ ,均值为  $2.47 \text{ J/m}^3$ ,11 月份在叶绿素 a 高值的站点 D3A 具有最低 PEAP 负值,水体混合较好。

### 2.3 营养盐的分布状况

#### 2.3.1 海水中营养盐的分布状况

研究海域海水中营养盐的调查显示:4 月份,无机氮的变化范围为  $0.502 \sim 0.639 \text{ mg/L}$ ,均值为  $0.57 \text{ mg/L}$ ;活性磷酸盐变化范围为  $0.035 \sim 0.074 \text{ mg/L}$ ,均值为  $0.056 \text{ mg/L}$ ;活性硅酸盐变化范围为  $0.70 \sim 0.94 \text{ mg/L}$ ,均值为  $0.781 \text{ mg/L}$ 。7 月份,无机氮变化范围为  $0.73 \sim 1.38 \text{ mg/L}$ ,均值为  $0.96 \text{ mg/L}$ ;活性磷酸盐变化范围为  $0.076 \sim$

0.015 mg/L,均值为 0.085 mg/L;活性硅酸盐变化范围为 1.21 ~ 1.51 mg/L,均值为 1.31 mg/L。11 月份无机氮的含量较高,变化范围为 0.859 ~ 1.390 mg/L,均值为 1.047 mg/L;活性磷酸盐值也较高,变化范围为 0.093 ~ 0.225 mg/L,均值为 0.130 mg/L;11 月活性硅酸盐变化范围为 0.550 ~ 1.760 mg/L,均值为 1.646 mg/L。营养盐的季节性变化上整体表现为 11 月 > 7 月 > 4 月,且 N/P 为 24.8。象山港海域氮磷含量丰富,营养指数高,N/P 随季节变化不大,并受到磷的限制<sup>[13]</sup>。

### 2.3.2 表层沉积物营养盐的分布状况

研究海区表层沉积物中总磷(TP)和总氮(TN)含量具有明显的季节性差异(图7):4 月份 TP 含量较高,均值为 642.54  $\mu\text{g/g}$ ,变化范围为

529.18 ~ 736.58  $\mu\text{g/g}$ ;7 月份 TP 均值为 390.92  $\mu\text{g/g}$ ,范围为 345.803 ~ 662.352  $\mu\text{g/g}$ ;11 月份 TP 均值为 502.73  $\mu\text{g/g}$ ,范围为 436.77 ~ 553.92  $\mu\text{g/g}$ ,调查表明象山港湾中部总磷含量明显高于湾口部和底部;4 月份表层沉积物中 TN 含量较高,均值为 754.83  $\mu\text{g/g}$ ,最大值为 845.60  $\mu\text{g/g}$ ,最小值为 695.10  $\mu\text{g/g}$ ;7 月份 TN 均值为 787.93  $\mu\text{g/g}$ ,范围为 508.9 ~ 943.6  $\mu\text{g/g}$ ;11 月份 TN 均值为 807.58  $\mu\text{g/g}$ ,最小值为 472.5  $\mu\text{g/g}$ ,最大值为 997.5  $\mu\text{g/g}$ 。同尹维翰等<sup>[14]</sup>、郑云龙等<sup>[15]</sup>同季度调查结果(TN = 530.70  $\mu\text{g/g}$ ;TP = 464.76  $\mu\text{g/g}$ )一致,本次调查也得出表层沉积物具有较高的 TP、TN 含量,象山港表层沉积物中较高的氮、磷含量,已对底栖生物产生了生态毒性<sup>[16]</sup>。

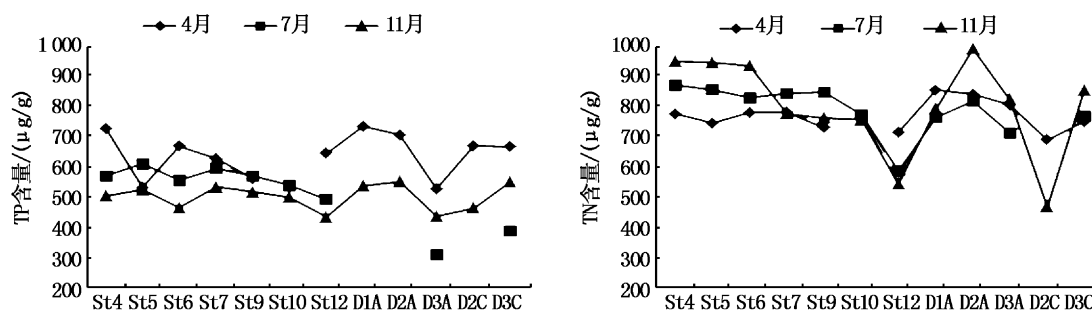


图4 3 个月份表层沉积物中总磷和总氮分布

Fig. 4 The distribution of TP and TN in sediment in the three months

图中缺少4月份 St10,7月份 D1A,D2A 和 D2C 站位的数据。

### 2.4 叶绿素 a 分布与环境因子的关系分析

根据与叶绿素 a 取样同步测定的 PEAP、浊度、盐度、水温、溶解氧和营养盐等参数的值,采用 SPSS 16.0 进行叶绿素 a 与相关环境因子之间的 Pearson 相关性分析。研究海域叶绿素 a 浓度分布与季节性环境因子之间具有较好的相关性,3 个季度的浊度皆与叶绿素 a 分布呈显著负相关性( $r = -0.47$ ;  $r = -0.48$ ;  $r = -0.6$ ),盐度、PEAP 与叶绿素 a 的分布呈负相关,活性磷酸盐为研究海域浮游植物生长的限制性营养盐。

春季的相关性分析显示:PEAP、浊度、盐度、硝酸盐、铵盐和硅酸盐与叶绿素 a 具有负相关性,其中浊度与叶绿素 a 在  $P \geq 0.01$  处负相关性显著( $r = -0.47$ ),盐度与叶绿素 a 浓度在  $P \leq 0.05$  处负相关性显著( $r = -0.45$ )。温度、亚硝酸盐及活性磷酸盐与叶绿素 a 浓度具有正相关性,其中,温度与叶绿素 a 浓度在  $P \leq 0.05$  处正相关性显著

( $r = 0.4$ )。

夏季的相关性分析显示:PEAP、浊度、盐度、温度、硝酸盐、铵盐与叶绿素 a 浓度具有负相关性,其中,浊度、温度和盐度与叶绿素 a 浓度在  $P \geq 0.01$  处具有显著负相关性( $r = -0.48$ ;  $r = -0.51$ ;  $r = -0.55$ ),硝酸盐与叶绿素 a 浓度在  $P \leq 0.05$  处具有显著的负相关性( $r = -0.55$ )。活性磷酸盐及活性硅酸盐与叶绿素 a 浓度具有正相关性,但相关性均不明显。

秋季的相关性分析显示:PEAP、海水浊度、盐度、水温与叶绿素 a 浓度具有负相关性,浊度与叶绿素 a 浓度在  $P \geq 0.01$  处显著负相关( $r = -0.6$ )。秋季的相关性研究表明,营养盐与叶绿素 a 浓度皆具有正相关性,其中活性磷酸盐在  $P \geq 0.01$  处与叶绿素 a 浓度的分布显著正相关( $r = 0.52$ ),活性硅酸盐在  $P \leq 0.05$  处与叶绿素 a 浓度的分布相关性也显著( $r = 0.46$ )。

### 3 讨论

#### 3.1 营养盐对叶绿素 a 的影响及其牧场利用启示

营养盐(N、P、Si)是海洋浮游植物生长繁殖所必需的成分,是影响浮游植物生长的一个重要因素。本次研究中调查海域叶绿素 a 的分布与 5 项营养盐中氮营养盐(硝态氮与氨氮)呈负相关,与活性磷酸盐呈正相关性,且 11 月份叶绿素 a 分布与活性磷酸盐、活性硅酸盐呈显著正相关性。海洋浮游植物通常按照 Redfield 比值:N/P 为 16:1 的比例吸收营养盐<sup>[17]</sup>,N/P > 16 表明 P 相对不足,调查海域海水中 N/P 比值为 24.8 > 16,表明磷是象山港海域浮游植物生长的主要限制性营养盐。海水和沉积物中丰富的氮磷元素,说明海区富营养化水平较高。张丽旭等<sup>[18]</sup>指出象山港海域水质处于富营养化状态,富营养化是赤潮发生的物质基础,因而湾内赤潮发生频繁,需要谋求生态修复的相关途径来减少海域中氮磷元素的含量,改善生态环境质量。海水中营养盐的水平及结构对浮游植物的生长具有重要作用,沉积物中营养物质的再生,对于水体中营养盐的收支循环动力学和初级生产力的维持有着极其重要的作用<sup>[19-20]</sup>。20 世纪 80 年代,科学家们就发现在海域中投放人工鱼礁后,该海域原有的流态会受到扰动形成不同流速和产生滞流带的礁区流场<sup>[21-22]</sup>,在礁体的迎流面产生一定程度的上升流,促进礁区附近水体的垂直交换,加快垂直方向营养盐的循环速度,并引起浮游生物的增加和水质的改善<sup>[23-25]</sup>。王伟定等<sup>[26]</sup>和 VOLKER 等<sup>[27]</sup>对嵊泗海域进行连续 3 年的研究指出人工鱼礁投放区海水中营养盐特别是 P 营养盐会得到富集,对促进浮游植物的生长和再生生产力水平的提高影响较大。因而在研究海域投放人工鱼礁可能会使沉积物中的 P 营养盐再生,提高海域的初级生产力水平,同时海水中再生的营养盐可以为海洋牧场中大型经济海藻的养殖提供丰富的有机肥料<sup>[28]</sup>。大型海藻在光合作用中能够大量吸收 N、P 等营养盐修复海域富营养化<sup>[29]</sup>,降低赤潮发生的条件,同时也会提高海域的经济产出能力。

#### 3.2 水体稳定度对叶绿素 a 的影响及其牧场利用启示

对叶绿素 a 分布产生影响的通常有盐度、光

照、水温和营养盐等环境因素。盐度决定着不同种类浮游植物的适盐性分布范围;季节、纬度和海水浑浊度的光照条件,决定着叶绿素 a 含量的空间分布;水温是决定叶绿素 a 浓度高低周期性变化的主要因素;海水的混合与层化直接影响着海水的水温、盐度、浊度以及营养盐的垂直性分布,因而叶绿素 a 的含量可能与水体混合稳定度有关。春季,随着光照时间以及光照强度的增加,研究海域水温( $T = 13\text{ }^{\circ}\text{C}$ )上升,表底层温差小( $0.27\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),海水混合稳定性低,垂直混合性好,在 3 个季度的调查中,春季叶绿素 a 浓度最高。夏季,研究海域温度较高,浮游植物的生长受温度影响较大,海水 PEAP 具有最高值,说明海水稳定性较强,底层和近底层低温、高盐富营养的海水不能涌升至表层。蔡平河等<sup>[30]</sup>和林军等<sup>[31-32]</sup>指出在浮游植物生长受温度影响较大的海域,浮游植物的生长与水体混合稳定度具有直接的关系,夏季高 PEAP 值说明海水稳定性高,海水层化严重,表底层温差大可能是限制研究海域浮游植物生物量的主要因素。秋季,研究海域具有较低的 PEAP 值,海水混合程度相对较好而叶绿素 a 为 3 个月份最低,可能是受到较短光照时间的影响。研究显示浊度与 PEAP 呈不显著的负相关性( $r = -0.38$ ),说明垂直混合程度的增加,可能会伴随着海水浊度的增加,即在一定范围内降低海水混合稳定度可以有助于促进浮游植物的生长。陈勇等<sup>[33]</sup>指出人工鱼礁根据设计的形状不同会产生不同的流场效应,例如圆筒形、四角形的鱼礁模型周围可产生 3 级流态:a 级流、b 级流及 c 级流。鱼礁不同的设置位置、间隔和重叠等状态下的 b、c 级流的体积,称为“流体力学的阴影”,简称流影。单个鱼礁的流影和鱼礁群的流影,会由于流的相互干涉呈现较大范围的复杂变化。因而在象山港海洋牧场规划区中建设人工鱼礁区,其投放鱼礁的形状、礁群的位置等应充分考虑在该海域的流场特点下其所能引起水体混合稳定度的降低程度进行设置,以期达到海域初级生产力水平的最大提高。本文中受现场调查条件的限制,对浮游植物的组成等内容未能进行研究,应加入今后的探讨内容中。

### 4 小结

本次研究显示象山港海洋牧场规划区叶绿

素 a 的分布具有明显的季节性特征,表现为春季 > 夏季 > 秋季。相关性分析表明,叶绿素 a 的季节性分布差异主要受到浊度、温度以及活性磷酸盐的影响,浮游植物生长具有明显的磷营养盐限制,且 3 个季度的叶绿素 a 含量均与 PEAP 成负相关关系。营养盐的调查显示研究海域具有丰富的氮、磷营养盐,说明海区富营养化水平较高,需要谋求生态修复的相关途径来减少海域中氮磷元素的含量,改善生态环境质量。在海域投放人工鱼礁后该海域原有的流态会受到扰动,在礁体的迎流面产生一定程度的上升流,加快礁区附近水体的垂直交换,在提高海水垂直混合程度的同时促进沉积物中营养盐的再生,因而在研究海域投放人工鱼礁有可能会促进浮游植物的生长,提高海域的初级生产力水平,同时海水中再生的营养盐又是大型经济海藻的有机肥料,可以为海洋牧场中大型经济海藻的养殖提供基础,大型海藻在光合作用过程中大量吸收利用 N、P 等营养盐在改善海域富营养化程度的同时也将提高海域的经济产出能力。

数据的采集得到了中国水产科学研究院东海水产研究所,宁波市海洋与渔业研究院的大量帮助,感谢汪振华、王凯、赵静、龚甫贤等给予的帮助。

#### 参考文献:

- [1] 张国胜,陈勇,张沛东,等. 中国海域建设海洋牧场的意义及可行性[J]. 大连水产学院学报,2003,18(2): 14 - 144.
- [2] CULVER M E, SMITH W. Effects of environmental variation on sinking rates of marine phytoplankton [J]. *Phycology*, 1989, 25: 262 - 270.
- [3] 罗益华. 象山港海域水质状况分析与污染防治对策[J]. 环境研究与监测,2008(3): 88 - 90.
- [4] 宁修仁,刘子琳,蔡昱明. 象山港潮滩底栖微型藻类现存量 and 初级生产力[J]. 海洋学报,1999,21(3): 98 - 105.
- [5] 刘子琳,蔡昱明,宁修仁. 象山港中西部秋季浮游植物粒径分级,叶绿素 a 和初级生产力[J]. 东海海洋,1998,16(3): 18 - 24.
- [6] 刘子琳,宁修仁,史君贤,等. 象山港对虾增殖放流区浮游植物现存量 and 初级生产力[J]. 海洋学报,1997,16(6): 109 - 115.
- [7] 吴瑞,蓝东兆,高亚辉,等. 象山港潮间带底栖硅藻的分布及其与环境关系探讨[J]. 台湾海峡,2008,27(4): 445 - 451.
- [8] JEFFREY S W, HUMPHREY G F. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a1, b1, c1 and c2 in higher plants, algae and natural phytoplankton [J]. *Biochemie und Physiologie der Pflanzen*, 1975, 167: 191 - 194.
- [9] MARRE T F, SCOUR S E. Control of modern dinoflagellate cyst distribution in the Irish and Celtic seas by seasonal stratification dynamics [J]. *Marine Micropaleontology*, 2002, 47: 101 - 116.
- [10] SHI J Z, LU L F. A short note on the dispersion mixing stratification and circulation within the plume of the partially-mixed Changjiang River Estuary, China [J]. *Journal of Hydro-Environment Research*, 2011, 5(2): 111 - 126.
- [11] 林军,朱建荣,张经,等. 长江口外海区浮游植物生物量分布及其与环境因子的关系[J]. 水产学报,2011,35(1): 74 - 87.
- [12] 扈传昱,王正方,吕海燕. 海水和海洋沉积物中总磷的测定[J]. 海洋环境科学,1999(3): 48 - 52.
- [13] 祝翔宇,周晓燕,冯辉强. 象山港水质季节变化特征及评价[J]. 广西轻工业,2011(12): 107 - 108.
- [14] 尹维翰,曹志敏,蓝东兆,等. 象山港表层沉积物中营养元素的分布特征及影响因素[J]. 环境化学,2007,26(3): 388 - 391.
- [15] 郑云龙,朱红文,罗益华. 象山港海域水质状况评价[J]. 海洋环境科学,2000,19(1): 56 - 59.
- [16] 翟滨,曹志敏,蓝东兆,等. 象山港养殖海域水体和沉积物中营养元素的分布特征及其控制过程的初步研究[J]. 海洋湖沼通报,2007(3): 49 - 56.
- [17] 孙丕喜,王波,张朝晖,等. 莱州湾海水中营养盐分布与富营养化的关系[J]. 海洋科学进展,2006,24(3): 329 - 335.
- [18] 张丽旭,蒋晓山,蔡燕红. 象山港海水中营养盐分布与富营养化特征分析[J]. 海洋环境科学,2008,27(5): 489 - 491.
- [19] MACINTYRE H L, GEIDER R J, MILLER D C. Microphytobenthos: The ecological role of the "secret garden" of unvegetated, Shallow-water marine habitats. 1. Distribution, abundance and primary production [J]. *Estuaries*, 1996, 19(2): 186 - 201.
- [20] VAN LUIJ L F, VANDER MOLWEN D T, LUTTNER W J, et al. Influence of benthic diatoms on the nutrient release from sediments of shallow lakes recovering from eutrophication [J]. *Water Science and Technology*, 1995, 32(4): 89 - 97.
- [21] CHANG K H, LEE S C, SHAO K T. Evaluation of artificial reef efficiency based on the studies of model reef fish community installed in northern Taiwan [J]. *Bull institute of Zoology, Academic Sinica*, 1977, 16(1): 37 - 48.
- [22] 王宏,陈丕茂,章守宇,等. 人工鱼礁对渔业资源的影响[J]. 广东海洋科学,2009(8): 18 - 21.
- [23] 林军,章守宇. 人工鱼礁稳定性及其生态效应的研究进展[J]. 海洋渔业,2006, 28(3): 257 - 262.
- [24] MAGI M, CASARETO B E, SUZUKI T, et al. Evaluating the effectiveness of artificial marine structures as upwelling-generators to enhance oceanic CO<sub>2</sub> sinks [J]. *International*

- Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, 2004 (1):212-220.
- [25] WILLIAM S J. Artificial reef evaluation: with application to natural marine habitats [M]. Boca Raton: CRC Press, 2000:51-94.
- [26] 王伟定,梁君,章守宇. 人工鱼礁建设对浙江嵊泗海域营养盐与水质的影响[J]. 水生生物学报,2010,34(1):78-87.
- [27] VOLKER H S, ALBERTO C, NAVERIA G, et al. Mesoscale frontal dynamics: shaping the environment of primary production in the Antarctic Circumpolar Current [J]. Deep Sea Research II, 2002, 49:3735-3769.
- [28] 陈兴群,余汉生,李国庭. 副热带环流区叶绿素 a 分布和理化过程的变异[C]. 中国海洋学文集,2000(12): 144-150.
- [29] 邹定辉,夏建荣. 大型海藻的营养盐代谢及其与近岸海域富营养化的关系[J]. 生态学杂志,2011,30(3):589-595.
- [30] 蔡平河,黄奕普,沈国英,等. 南沙海域初级生产力与水柱垂直稳定度的关系[J]. 海洋学报,2000,22(5): 137-140.
- [31] 林军,章守宇,龚甫贤. 象山港海洋牧场规划区选址评估的数值模拟研究:滨海电厂温排水温升的影响[J]. 上海海洋大学学报,2012,21(5):816-824.
- [32] 林军,章守宇,龚甫贤. 象山港海洋牧场规划区选址评估的数值模拟研究:水动力条件和颗粒物滞留时间[J]. 上海海洋大学学报,2012,21(3):452-459.
- [33] 陈勇,于长清,张国胜,等. 人工鱼礁的环境功能与集鱼效果[J]. 大连水产学院学报,2002, 17(1):64-69.

## Study of chlorophyll a distribution in marine ranching planning area of Xiangshan Bay

WANG Fei-fei, ZHANG Shou-yu, LIN Jun

(College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** In order to realize the state of primary productivity in marine ranching planning area of Xiangshan Bay and provide basis for the effect evaluation of marine ranching construction, seasonal investigations of 22 sites in Zhejiang Province were carried out in April, July and November of 2011. Experiment results about ecological factors, such as Chlorophyll a concentration, stability of water, temperature, nutrient contents in water and sediment, were analyzed with correlation analysis method. Results presented an obvious seasonal variation of Chlorophyll a in the study area, for the Chlorophyll a concentrations were 4.62 mg/m<sup>3</sup> in April, 3.57 mg/m<sup>3</sup> in July and 3.11 mg/m<sup>3</sup> in November (April > July > November). The horizontal distribution of Chlorophyll a was gradually reduced from the bottom to the mouth of the bay and in the vertical direction, the Chlorophyll a concentrations were 3.02 mg/m<sup>3</sup> in July, 1.93 mg/m<sup>3</sup> in April and 1.61 mg/m<sup>3</sup> in November (July > April > November). Results also showed Chlorophyll a concentration got remarkably positive correlations with turbidity, water temperature, salinity and active phosphate, while presented a negative correlation with the stability of water. Sediment in this research area was rich in nitrogen and phosphorus nutrients, and it is supposed to reduce PEAP when artificial reefs are reconstructed, to help promote the regeneration of nutrients, which will be conducive to the growth of phytoplankton and the elevation of primary productivity level.

**Key words:** marine ranching; chlorophyll a; potential energy anomaly parameter (PEAP); correlation