

# 大亚湾海洋牧场低碳渔业生产效果评价

李纯厚, 贾晓平, 齐占会, 刘永, 陈丕茂, 徐姗楠, 黄洪辉, 秦传新

(农业部南海渔业资源开发利用重点实验室 农业部南海渔业资源与环境野外科学观测试验站 中国水产科学研究院南海水产研究所, 广州 510300)

**摘要:**以基于人工鱼礁为构建主体的大亚湾海洋牧场为研究实例,以2007年4月和2009年5月调查数据为基础,研究了海洋牧场在资源养护和提高海域碳汇能力等方面的作用。结果表明,人工鱼礁型海洋牧场建设提高了海域浮游生物和底栖生物的栖息密度以及渔业资源的数量和质量,底栖生物和游泳生物的生物多样性指数增加,渔业资源优势种中的优质经济鱼类的数量增加。根据海域叶绿素浓度的提高进行计算,海洋牧场建设使海域碳汇增加了937.40 kgC,相当于3.44 t CO<sub>2</sub>。如果同时考虑通过渔业生物收获从海域中移出碳而增加的海域碳汇能力,则其起到的海域碳增汇能力将更高。本研究的结果表明,海洋牧场是一种环境友好型、可持续发展的低碳渔业生产模式,有利于水生生物资源养护和增殖,也是生物碳汇扩增的科学途径。

**关键词:**人工鱼礁;海洋牧场;资源养护;低碳渔业

**中图分类号:**X55 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)11-2346-07

## Effect Evaluation of a Low-carbon Fisheries Production by Marine Ranching in Daya Bay

LI Chun-hou, JIA Xiao-ping, QI Zhan-hui, LIU Yong, CHEN Pi-mao, XU Shan-nan, HUANG Hong-hui, QIN Chuan-xin

(Key Laboratory of South China Sea Fishery Resources Development and Utilization, Ministry of Agriculture; Key Scientific Observation Station for South China Sea Fishery Resources and Environment, Ministry of Agriculture; South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fisheries Sciences, Guangzhou 510300, China)

**Abstract:** The effects of a low-carbon fisheries production by marine ranching on marine resources conservation and marine carbon sink were assessed in Daya Bay, according to the field investigation data of April 2007 and May 2009. The results showed that there was an ecological regulation effect of marine ranching on environment and fishery resources. The densities of phytoplankton, zooplankton and benthos were higher in the marine ranching areas than those in the adjacent waters. There was also an obvious increment of species and quantity of fishery resource. Moreover, the number and biomass of dominant commercial fish with high market value were increased markedly in the area of marine ranching. The carbon sink capability of marine ranching water was increased, approximate more than 937.40 kgC was fixed in the area of marine ranching, which equivalent to 3.44 metric tons of carbon dioxide. The results indicated that the marine ranching not only has positive effects on living aquatic resources, but also provided a new pattern for the development of low-carbon fisheries.

**Keywords:** artificial reef; marine ranching; resources conservation; low-carbon fishery

海洋牧场是指在某一海域内,采用一整套规模化的工程设施和系统化的管理体制,利用自然的海洋生态环境,将人工增殖的海洋生物聚集起来,进行有计

划有目的的海上放养增殖经济海洋物种的大型人工渔场<sup>[1]</sup>。海洋牧场自20世纪60年代由美国首先提出建设计划,1972—1974年在加利福尼亚建成巨藻海洋牧场,目前综合经济效益达300亿美元<sup>[2]</sup>。日本于1978—1987年实施海洋牧场计划,建成了日本黑潮牧场。经过几十年的发展,日本沿岸20%的海床已建成人工鱼礁区,近海渔业年产量持续稳定<sup>[3]</sup>。韩国从1973年开始至今投资5345.5亿韩元建成海洋牧场1200座、14万hm<sup>2</sup>,已建成的统营海洋牧场,渔业资源量大幅增长,比项目初期增长了约8倍,当地渔民

收稿日期:2011-05-14

基金项目:国家高技术研究发展(863)计划(2006AA100303);广东省重大科技计划项目(2009B030600002);科技部科研院所社会公益研究专项资金项目(2005DIB3J020);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(中国水产科学研究院南海水产研究所)(2007ZD003,2007ZD008)

作者简介:李纯厚(1963—),男,研究员,从事渔业生态保护研究。

E-mail:scslch@vip.163.com

收入增长率达26%<sup>[4]</sup>。目前,日本、韩国、美国、挪威、英国、加拿大、俄罗斯、瑞典等国家均把增殖渔业作为振兴海洋渔业经济的战略对策之一,投入大量资金,恢复渔场基础生产力,取得了显著成效。

我国的海洋牧场建设已有30多年的历史,主要以人工鱼礁为主要方式和手段构建。我国大陆1979—1990年曾开展海洋牧场相关的小规模试验研究,共投入人工鱼礁约10万空 $m^3$ <sup>[5]</sup>。2000年起,海洋牧场的试验研究与大规模建设工作开始在全国开展,目前,全国已投放建设的人工鱼礁超过200万空 $m^3$ <sup>[6]</sup>。本文以大亚湾人工鱼礁型海洋牧场为实例,对人工鱼礁区的渔业经济产出、资源增殖效果和生物碳汇等方面进行了探讨,旨在从生态系统角度分析海洋牧场在环境调控和资源增殖养护的效果,并为评价海洋牧场的碳汇功能及探索低碳渔业生产模式提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究地点及站位设置

以广东省大亚湾杨梅坑(E114°30′~114°50′,N22°30′~22°51′)人工鱼礁区为研究海域,该礁区已投放人工鱼礁2272个,构建礁群18个,鱼礁体积共95100

空 $m^3$ ,礁区面积达2.65 $km^2$ 。根据礁区的地理位置及海区水文状况,共设置12个调查站位,其中S7站和S10站分别为已建礁区I和II的中心点,S2、S3、S8和S9站分别位于已建礁区I的4个边界点,S1、S4、S5、S6、S11、S12为附近海域边界,其与礁区边界范围海域视为附近海域,如图1所示。

### 1.2 调查采样

分别于2007年4月23日和2009年5月6日对该区域进行了本底调查和跟踪调查,调查站位见图1。初级生产力、浮游植物、浮游动物、底栖生物和渔业资源调查分析按《海洋调查规范》(GB/T 12763.6—2007)中规定的方法进行。

### 1.3 卫星遥感资料的获取与处理

评估采用的叶绿素a(Chla)浓度资料为MODIS(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer)中分辨率成像光谱仪的水色遥感数据三级产品,来自NASA Goddard Space Flight Center Distributed Active Archive Center(GSFC DAAC),资料空间分辨率为1 $km \times 1 km$ ,全部为白天的数据产品。采用了从2002年7月到2009年12月的MODIS Chla资料,共2749组数据。从中提取杨梅坑人工鱼礁区域(22.50~22.83°N,

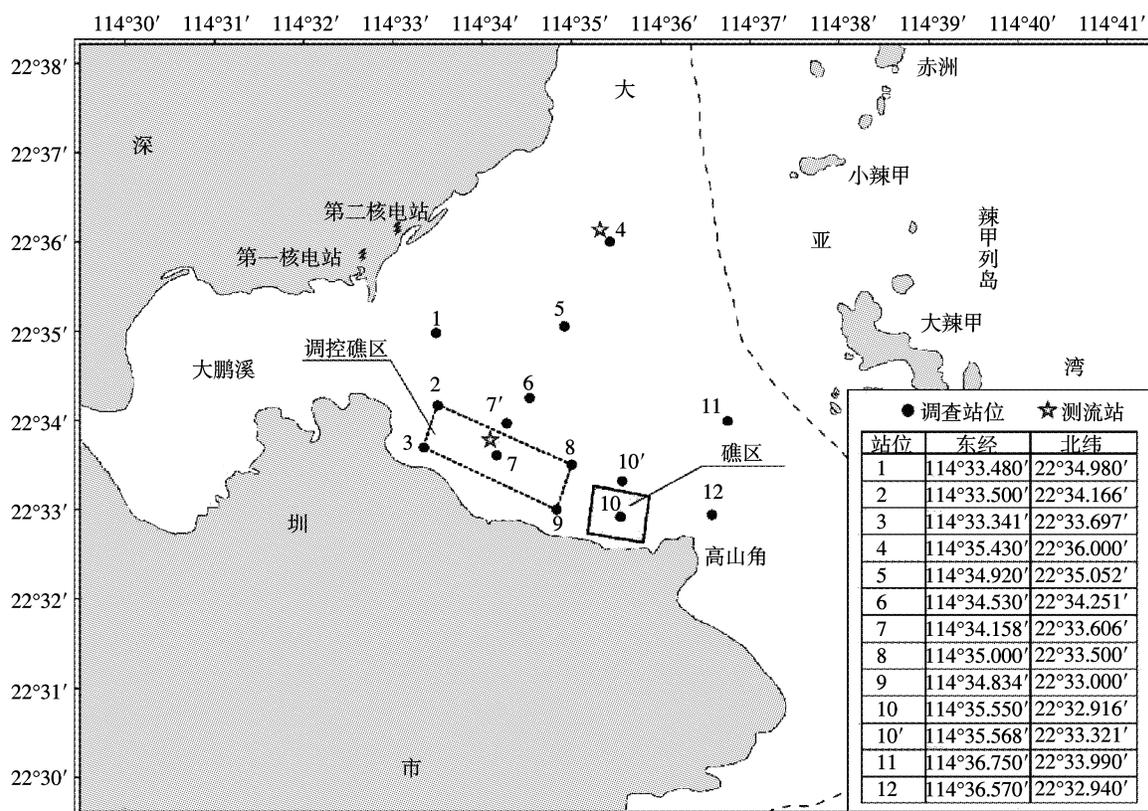


图1 海洋牧场生态环境与渔业资源调查站位

Figure 1 Sampling sites of marine environment and fisheries resources survey in the marine ranching of Daya Bay

114.50~114.82°E)的 Chla 数据,通过 MATLAB 7.0.1 软件包处理成 ASCII 格式数据,然后将这些 ASCII 格式数据处理成月平均值,并做长时间序列线性分析。为了除掉季节信号,本研究以 2002—2009 年每月水体 Chla 的平均浓度作为基准,以 2008—2009 年每月水体 Chla 的平均值减去前 8 年每月水体 Chla 的平均值作为建礁后 Chla 的变化值。采用 SeaDAS 专业水色遥感处理软件进行遥感数据提取和绘图,以此对比分析建礁前后春、夏、秋、冬 4 个季节的平均 Chla 的浓度分布。

#### 1.4 评价方法

##### 1.4.1 水生生物群落特征

多样性指数( $H'$ ):Shannon-Weaner 多样性指数<sup>[7]</sup>,计算公式为:

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \log_2 P_i \quad (1)$$

式中: $S$ 为采集样品中的种类总数; $P$ 为第  $i$  种的个体数( $n_i$ )与样品中的总个体数( $N$ )的比值。

##### 1.4.2 渔业资源

渔业资源密度采用底拖网扫海面积法估算(GB/T 12763.6 海洋调查规范 第 6 部分:海洋生物调查)。渔业资源拖网调查,均使用“粤汕尾 11092”拖网渔船进行。调查船主机功率 135 kW,船长 15.59 m,船宽 5.60 m,吨位 50 t;虾拖网桁杆长 2.5 m、网长 4.5 m、网身网目 40~50 mm、网囊网目 25 mm。每站拖约 15 min,平均拖速约 2.5 kn。各站的渔获样品在现场全部进行分析和测定。渔业资源密度计算公式为:

$$D = \frac{C}{qa}$$

式中: $D$ 为渔业资源密度,尾·km<sup>-2</sup>或 kg·km<sup>-2</sup>; $C$ 为平均每小时拖网渔获量,尾·网<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup>或 kg·网<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup>; $q$ 为网具捕获率; $a$ 为每小时网具取样面积,km<sup>2</sup>·网<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup>。

##### 1.4.3 海洋牧场碳增汇潜力评估

水体叶绿素含量提高即浮游植物数量增加,水域固碳数量提高,扩增了水体的碳汇能力<sup>[8]</sup>,以此计算海洋牧场建设对海域碳汇潜力的影响。

根据公式:

$$TC = \Delta C_{POC} \times S \times h \quad (2)$$

$$\Delta C_{POC} = C_{POC \text{ 投礁后}} - C_{POC \text{ 投礁前}} \quad (3)$$

$$C_{POC} = C_{\text{chla}} \times 60 \quad (4)$$

式中: $TC$ 代表颗粒有机碳总质量; $C_{POC \text{ 投礁前}}$ 和  $C_{POC \text{ 投礁后}}$ 分别为投礁前后水体颗粒有机碳的平均浓度,μg·L<sup>-1</sup>; $C_{\text{chla}}$ 为叶绿素的浓度,μg·L<sup>-1</sup>; $S$ 为叶绿素增高的礁区

面积; $h$ 为颗粒有机碳在礁区水体中可以分布到的平均深度,m。根据 1997—2002 年开展的国家海洋勘测专项“南海专属经济区和大陆架渔业资源及其栖息环境调查”(HY 126—2002)的研究结果,南海海域颗粒有机碳在礁区水体中可以分布到的平均深度约为水体透明度的 3 倍。根据文献[8,16-17],水体颗粒有机碳含量与叶绿素浓度换算系数约值以 60 计算。

## 2 结果

### 2.1 水生生物生态特征

#### 2.1.1 叶绿素 a 含量变化

分别取建礁前后调查的表、底层 Chla 含量的平均值进行对比,结果如图 2 和图 3 所示。在本底调查中,整个海域 Chla 的分布较为均匀,大部分水域的含量均低于 1.8 mg·m<sup>-3</sup>,其高值区分布于礁区水域及其东南部水域(图 2)。在建礁后跟踪调查中,整个调查海域的 Chla 含量出现一定程度的上升,特别是礁区水域的升幅更为明显,同时礁区的北部水域也出现一高值区。建礁前后相比,建礁后礁区及其周围水域的 Chla 含量比建礁前明显升高(图 3)。

#### 2.1.2 浮游生物

经鉴定,本底调查浮游植物共发现 112 种(含 13 变种及变型),以硅藻门出现种类最多,占总种类数的 77.68%,其次是甲藻类,占 20.54%,蓝藻占 1.78%。结果显示,鱼礁建设后礁区及其附近海域浮游植物密度均有所升高,高值区分布于礁区附近的东南部水域,密度高于 400×10<sup>4</sup> cell·m<sup>-3</sup>(表 1)。

本底调查中,共鉴定浮游动物 76 种,分属 14 个不同类群,其中,以桡足类种类最多,有 26 种,占总种类数的 34.2%;毛颚类和磷虾类均出现 7 种,其他类群种类数较少。建礁后,调查共发现浮游动物 98 种,桡足类数量最多为优势类群,毛颚类、水螅水母类和管水母类数量也上升为主要类群。建礁前,浮游动物的生物量均低于 200 mg·m<sup>-3</sup>,而建礁后,浮游动物生物量提高,大部分海域均大于 200 mg·m<sup>-3</sup>,高值区分布于西侧礁区及其东南部水域,其生物量高于 300 mg·m<sup>-3</sup>。与建礁前的本底调查数据相比,整个海域浮游动物的多样性指数均有所降低(表 2)。

#### 2.1.3 底栖生物

本底调查共鉴定出底栖生物 19 种,其中以软体动物种数最多,为 11 种,占总种数的 57.89%,其次是环节动物,为 4 种,占总种数的 21.05%。建礁两年后出现的种数为 37 种,其中软体动物最多,为 16 种,占

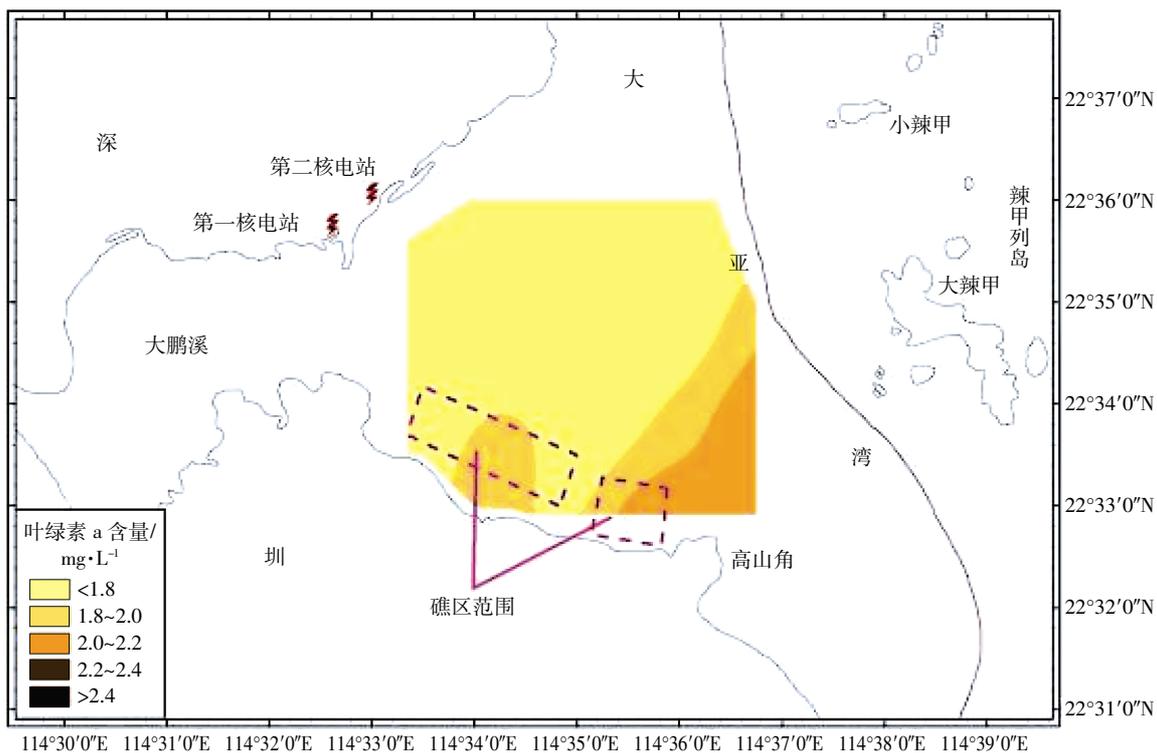


图2 建礁前 Chla 平均值的平面分布

Figure 2 Horizontal distribution of Chla before artificial reef construction

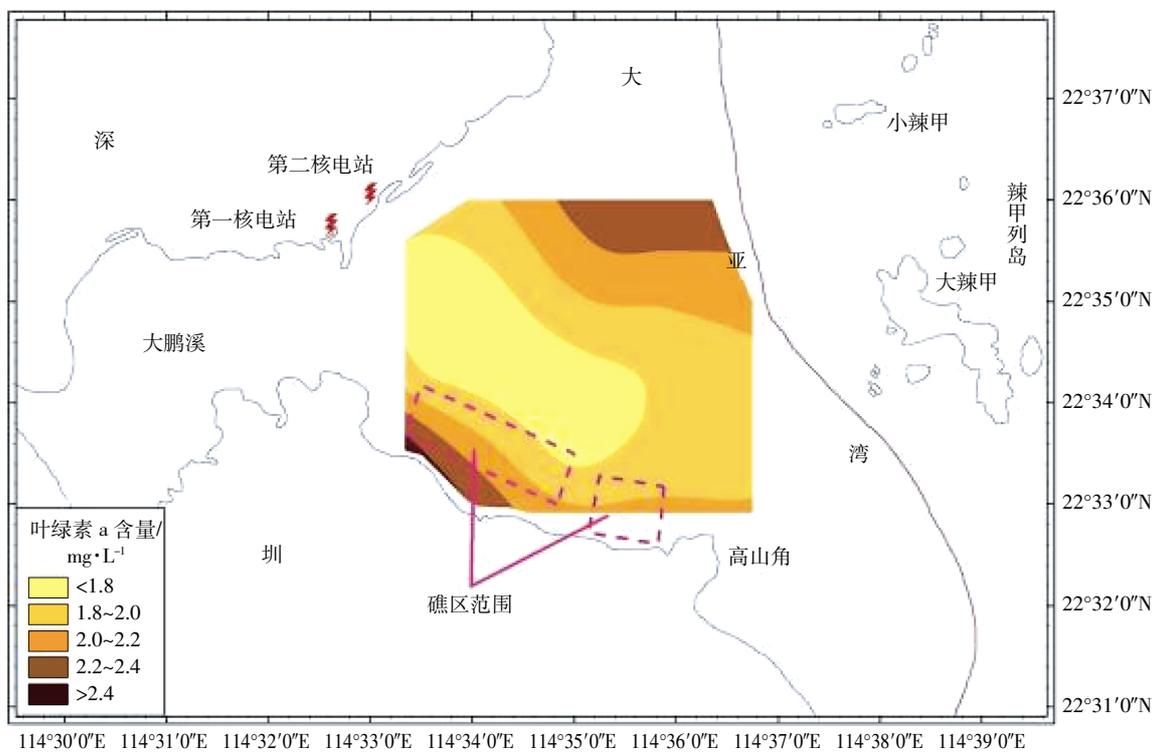


图3 建礁后 Chla 平均值的平面分布

Figure 3 Horizontal distribution of Chla after artificial reef construction

种类总数的 43.2%,其次为环节动物,为 15 种,占种类总数的 40.5%。礁区水域底栖生物的栖息密度比建

礁前有了明显的提高,生物多样性指数也明显高于附近海域(表 3)。

表1 投礁前后浮游植物的栖息密度与多样性指数

Table 1 The density and biodiversity of phytoplankton before and after artificial reefs construction

项目	栖息密度/ $\times 10^4$ cell $\cdot$ m $^{-3}$		多样性指数/H'		
	投礁前	投礁后	投礁前	投礁后	
礁区	范围	20.38~223.13	14.28~731.83	2.41~3.45	1.70~4.13
	平均值	99.35	263.33	2.85	2.58
附近水域	范围	21.87~104.57	192.38~582.96	2.82~3.69	1.12~3.11
	平均值	82.00	313.63	3.13	2.13
全海域	范围	20.38~223.13	14.28~731.83	2.41~3.69	1.12~4.13
	平均值	90.68	288.48	2.99	2.35

表2 建礁前后浮游动物的生物量与多样性指数

Table 2 The biomass and biodiversity of zooplankton before and after artificial reefs construction

项目	生物量/mg $\cdot$ m $^{-3}$		多样性指数/H'		
	建礁前	建礁后	建礁前	建礁后	
礁区	范围	30.53~158.33	129.95~431.90	3.63~3.94	2.06~3.03
	平均值	69.50	286.93	3.77	2.58
附近海域	范围	27.34~108.39	123.10~379.65	3.45~4.05	1.36~2.82
	平均值	52.12	256.05	3.81	2.16
全海域	范围	27.34~158.33	123.10~431.90	3.45~4.05	1.36~3.03
	平均值	60.81	271.49	3.79	2.37

表3 投礁前后底栖生物的栖息密度与多样性指数

Table 3 The density and biodiversity of benthos before and after artificial reefs construction

项目	栖息密度/ind $\cdot$ m $^{-2}$		多样性指数/H'		
	投礁前	投礁后	投礁前	投礁后	
礁区	范围	20~300	60~300	0~2.32	1.71~2.11
	平均值	83	143	1.31	1.90
附近海域	范围	110~1 555	40~150	0~2.04	0.86~1.97
	平均值	529	108	0.68	1.44
全海域	范围	20~1 555	40~300	0~2.32	0.86~2.11
	平均值	306	126	0.99	1.67

表4 投礁前后游泳生物资源密度及多样性比较

Table 4 Comparison of the nekton density before and after artificial reefs construction

海域	资源密度/kg $\cdot$ km $^{-2}$		多样性指数/H'	
	投礁前	投礁后	投礁前	投礁后
礁区	424.896	570.524	3.22	3.91
附近海域	35.662	297.059	3.50	3.71

### 2.1.4 渔业资源

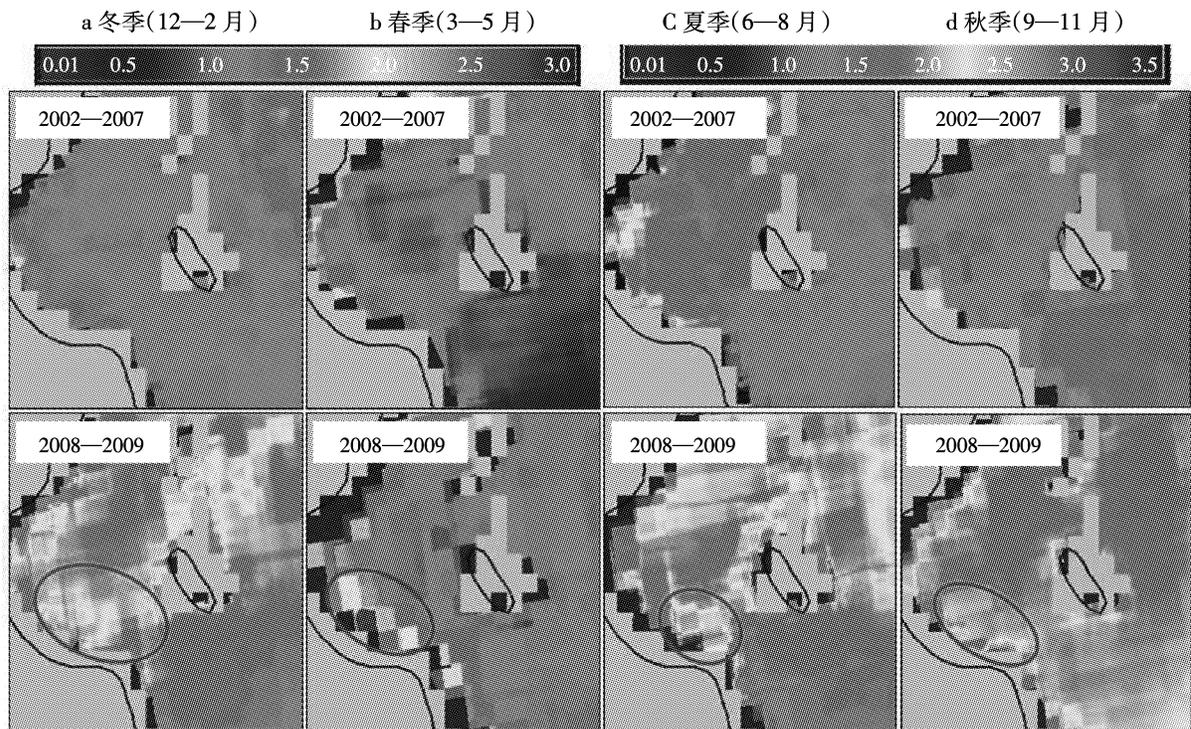
建礁后,礁区渔业资源总量有所增加,调查共采获渔业资源生物 167 种,其中鱼类 74 种,虾类 16 种,蟹类 30 种,虾蛄类 4 种,头足类 8 种,贝类 35 种。建礁后,经济种类的数量和比例也有所上升,鱼类优势种以二长棘鲷、长蛇鲻、李氏鱼衔等优质经济鱼类为主,资源密度合计为 570.52 kg $\cdot$ km $^{-2}$ ,是附近海域的 1.92 倍。建礁后,游泳生物多样性指数较附近海域有所提高(表 4)。

### 2.2 海域碳增汇潜力评估

对 Chla 含量的遥感结果做线性拟合分析,结果显示,投礁前(2002—2007)Chla 含量每月以 0.012 mg $\cdot$ m $^{-3}$  的速度增加;投礁后 Chla 含量以更快的速度增

加,平均每月增加 0.023 mg $\cdot$ m $^{-3}$ ,而且处于较高的水平(>2.0 mg $\cdot$ m $^{-3}$ )。投礁前后季节平均 Chla 浓度的空间分布对比分析表明,投礁后(2008—2009 年)每个季节的 Chla 含量相对于投礁前(2002—2007 年)均有不同程度升高,升高范围为 0~0.5 mg $\cdot$ m $^{-3}$ 。投礁后(2008—2009 年),在人工鱼礁区出现了一个高的 Chla 含量区域(图 4)。Chla 高值区面积在冬季、春季、夏季和秋季分别为 7、6、4.5 km $^2$  和 5 km $^2$ 。Chla 含量升高幅度最大的季节在夏季,最小在冬季。

根据遥感的结果,建礁后 Chla 的浓度约比投礁前升高 0~0.5 mg $\cdot$ m $^{-3}$ ,本研究海域 Chla 浓度改变按平均值 0.25 mg $\cdot$ m $^{-3}$  计算,建礁后叶绿素升高的区域面积全年平均为 5.63 km $^2$ ,调查海区透明度平均为 3.7 m。根据公式  $TC=(C_{投礁后}POC-C_{投礁前}POC)\times S\times h$ ,计算人工渔礁投放后,礁区的固碳能力提高了 937.40 kgC,约相当于 3.44 tCO $_2$ 。



灰色部分表示陆地, 黑色线表示海岸线  
The gray color represents the land, the black represents the coastline.

图4 投礁前后季度平均 Chla 分布

Figure 4 The seasonal distribution of Chla before and after artificial reefs construction

### 3 讨论

海洋牧场是保证渔业可持续发展的有效生产方式之一。随着水产养殖业的快速发展,因养殖密度过大和养殖结构不合理等所致的养殖自身污染 (self-pollution) 日益突出,已严重制约了水产养殖产业的可持续发展<sup>[9-12]</sup>。本研究的结果显示人工鱼礁型的海洋牧场建成后,不需要额外投入物质和能量,就可以起到资源养护和增值的效果,显示海洋牧场是一种环境友好的、低碳的渔业生产模式,可以保证近海渔业的可持续发展。

海洋牧场碳增汇潜力的评估。水体颗粒有机物含量的主控因子是叶绿素 (Chla) 的含量,而叶绿素又是海洋中主要初级生产者——浮游植物现存量的一个良好指标<sup>[13]</sup>。因此,颗粒有机碳 (POC) 总量及其变化主要由浮游植物控制,可以认为人工鱼礁区叶绿素升高,主要是由于浮游植物的光合作用生产所致,POC 中的碳元素的量值可以近似代表该海域浮游植物通过光合作用吸收的无机碳的总量。

根据 IPCC (2007 年)<sup>[14]</sup> 的定义,碳汇是指从大气中移走二氧化碳、甲烷等温室气体、气溶胶或它们初

期形式的任何过程、活动和机制。碳汇渔业<sup>[15]</sup>是指可以把能够发挥碳汇功能、具有直接或间接降低大气二氧化碳浓度效果的渔业生产活动。海洋牧场建设后,海域叶绿素升高,主要是由于浮游植物的光合作用生产所致,也相当于促进了海洋对 CO<sub>2</sub> 的吸收,相当于提高了海域的碳汇能力。

水体中 POC 和 Chla 含量存在较显著的线性回归相关性。李骞<sup>[8]</sup>研究了东海赤潮发生海域 POC 和 Chla 的关系,发现两者的线性回归关系为:  $POC = 180.59 (\pm 11.42) + 62.89 (\pm 1.43) Chla$ , 相关系数为 0.81 ( $P < 0.0001$ ), 说明两者存在很好的线性关系。Eppley 等<sup>[16]</sup>研究报道太平洋海域 POC/Chla 的比值约为 58。Parsons<sup>[17]</sup>的研究也认为浮游植物碳和叶绿素的比值约为 60。这些研究说明可以根据水体中叶绿素的含量推算颗粒有机碳总量,本文按 POC 和 Chla 的比值为 60 估算建设人工鱼礁型海洋牧场,对海域碳汇能力的影响。

根据本研究的结果,人工鱼礁投放后,使海域碳汇增加了 937.40 kg C, 相当于 3.44 tCO<sub>2</sub>, 说明人工鱼礁型海洋牧场的构建大大提高了海域碳汇能力。由浮游植物光合作用生产的颗粒有机物一部分被浮游动

物或滤食性生物取食,进入食物链进行循环,另一部分(约15%)在死亡后,无生命的颗粒有机物从真光层中向下输出,沉降到海底最终成为沉积物的一部分,这一过程可以实现浮游植物生产的颗粒有机物的埋藏,起到“固碳”的作用,进而减少了表层水体中碳的含量,并通过吸收营养盐使海水碱度升高,促进了大气CO<sub>2</sub>向海水中的溶解,并对海-气界面CO<sub>2</sub>通量产生一定的影响。

另外,本研究仅从水体Chla升高的角度考虑了海洋牧场建设对海域碳汇扩增的影响。研究结果显示海洋牧场建成后没有外源投饵,而渔业资源量增加明显,收获增殖的鱼、贝和藻类等都相当于从海域中移出了碳<sup>[18-19]</sup>。因此,如果同时考虑海洋牧场在渔业资源养护和增殖方面的作用,其起到的海域碳增汇能力将更高。本研究的结果显示海洋牧场是一种环境友好型、可持续发展的低碳渔业生产模式。

#### 参考文献:

- [1] 黄宗国. 海洋生物学辞典[M]. 北京:海洋出版社, 2002:224.  
HUANG Zong-guo. Marine biology dictionary[M]. Beijing: Ocean Press, 2002:224.
- [2] Chapman A. The ecology of macroscopic marine algae[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1974, 5:65-80.
- [3] Japanese Society of Fisheries Science. Kelp Coast & Forests in Sea. Tokyo: Koseisha Koseikaku Press, 2000:12-47.
- [4] Seong Kwac Pak, Jai Dong Roh. Republic of Korea fishery industry profile(Post Harvest Sector)[J]. *Korea: Published by Globefish Research Programme*, 2006, 88:1-72.
- [5] 中国科学技术协会. 海洋高技术 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1994:120-145.  
China Association for Science and Technology. Marine high technology [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1994:120-145.
- [6] 杨 齐, 刘同渝, 黄汝堪. 中国人工鱼礁理论与实践[M]. 广州: 广东科技出版社, 2005:89-110.  
YANG Lin, LIU Tong-yu, HUANG Ru-kan. Theory and practice of artificial reefs in China[M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 2005:89-110.
- [7] Shannon C E, Weaver W. The mathematical theory of communication [M]. Urbana: University of Illinois Press, 1963, 1-117.
- [8] 李 骞. 春夏季东海赤潮高发区颗粒有机物的来源、含量变化及其与固碳作用的关系[D]. 青岛: 中国海洋大学硕士论文, 2007.  
LI Qian. The sources and variation of particulate organic matter and their relationship with the carbon fixation in the frequent harmful algal blooms areas of the East China Sea[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2007.
- [9] Folke C, Kautsky N, Troell M. The costs of eutrophication from salmon farming: Implications for policy[J]. *Environmental Management*, 1994, 40(2):173-182.
- [10] Wu R S. The environmental impact of marine fish culture: Towards a sustainable future[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 1995, 31:159-166.
- [11] Páez-Osuna F, Guerrero-Galván S R, Ruiz-Fernández A C. The environmental impact of shrimp aquaculture and the coastal pollution in Mexico[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 1998, 36(1):65-75.
- [12] Phillips M J, Beveridge M C M, Ross L G. The environmental impact of salmonid cage culture on inland fisheries: present status and future trends[J]. *Fishery Biology*, 2006, 27:123-137.
- [13] 夏 滨, 吕瑞华, 孙丕喜. 2000年秋季黄、东海典型海区叶绿素 a 的时空分布及其粒径组成特征[J]. 黄渤海海洋, 2001, 19(4):37-42.  
XIA Bin, LÜ Rui-hua, SUN Pi-xi. Spatial-temporal distributions and size compositions of chlorophyll-a in the typical areas of the Yellow Sea and East China Sea in the autumn of 2000[J]. *Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas*, 2001, 19(4):37-42.
- [14] Denman K L, Brasseur G, Chidthaisong A, et al. Couplings Between Changes in the Climate System and Biogeochemistry[C]// Solomon S, Qin D, Manning M, et al. Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007: 500-568.
- [15] 李纯厚, 齐占会, 黄洪辉, 等. 海洋碳汇研究进展及南海碳汇渔业发展方向探讨[J]. 南方水产, 2010, 6(6):81-86.  
LI Chun-hou, QI Zhan-hui, HUANG Hong-hui, et al. Review on marine carbon sink and development of carbon sink fisheries in South China Sea[J]. *South China Fisheries Science*, 2010, 6(6):81-86.
- [16] Eppley R W, Chavez F P, Barber R T. Standing stocks of particulate carbon and nitrogen in the equatorial in the Pacific at 150°W[J]. *Geophysical Research*, 1992, 97:655-661.
- [17] Parsons T R, Riley J P, Skirrow G. Particulate organic carbon in the sea [J]. *Chemical Oceanography*, 1975, 2:365-383.
- [18] 张继红, 方建光, 唐启升. 中国浅海贝藻养殖对海洋碳循环的贡献 [J]. 地球科学进展, 2005, 20(3):359-366.  
ZHANG Ji-hong, FANG Jian-guang, TANG Qi-sheng. The contribution of shellfish and seaweed mariculture in China to the carbon cycle of coastal ecosystem[J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(3):359-366.
- [19] Tang Q S, Zhang J H, Fang J G. Shellfish and seaweed mariculture increase atmospheric CO<sub>2</sub> absorption by coastal ecosystems[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2011, 424:97-104.