

# 中国近海生物固碳强度与潜力

宋金明<sup>1</sup>, 李学刚<sup>1</sup>, 袁华茂<sup>1</sup>, 郑国侠<sup>1</sup>, 杨宇峰<sup>2</sup>

(1. 中国科学院海洋研究所, 青岛 266071; 2. 暨南大学水生生物研究所, 广州 510632)

**摘要:**通过现场调查和数据分析,首次探讨了中国近海浮游植物的固碳强度与潜力以及近海人工养殖大型藻类的固碳能力。结果表明,渤、黄、东海的浮游植物固碳强度约为  $2.22 \text{ 亿 t a}^{-1}$ ,固碳量的季节变化从大到小的顺序依次为春季、夏季、秋季、冬季,其中春夏季的固碳量占全年的 65.3%。南黄海 1999~2005 年 10~11 月间浮游植物固碳强度有较大的年际变化,10~11 月份 7a 间其浮游植物最低固碳量为  $3.54 \text{ 万 t d}^{-1}$ ,最高为  $16.58 \text{ 万 t d}^{-1}$ ,平均为  $10.50 \text{ 万 t d}^{-1}$ ,没有明显的年际变化趋势,磷对浮游植物固碳强度的影响最为明显,次之的影响因素是 Chl a 和亚硝氮 ( $\text{NO}_2\text{-N}$ ) 的含量。南海的固碳能力约为渤黄东海的 2 倍,为  $4.16 \text{ 亿 t a}^{-1}$ ,其季节变化和渤黄东海不同,南海浮游植物在冬季的固碳能力最强,在夏季最弱。整个中国近海浮游植物年固碳量达 6.38 亿 t,可占全球近海区域浮游植物年固碳量的 5.77%。实际外海龙须菜的养殖发现,龙须菜每年固定的碳为 8.18 t,养殖密度与方式对其产量和固碳量影响巨大。近几年,我国大型经济藻类养殖产量每年在 120~150 万 t 左右,换算为固碳量为 36~45 万 t,平均每年 40 万 t,如果海藻养殖产量每年增加 5%,到 2010 年,我国大型经济藻类养殖的固碳量可达 57 万  $\text{t a}^{-1}$ ,海藻养殖是海洋增加碳汇有多重价值的重要措施。

**关键词:**固碳;浮游植物;海藻养殖;中国近海

文章编号:1000-0933(2008)02-0551-08 中图分类号:P736.4, Q178 文献标识码:A

## Carbon fixed by phytoplankton and cultured algae in China coastal seas

SONG Jin-Ming<sup>1</sup>, LI Xue-Gang<sup>1</sup>, YUAN Hua-Mao<sup>1</sup>, ZHENG Guo-Xia<sup>1</sup>, YANG Yu-Feng<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China

<sup>2</sup> Institute of Hydrobiology, Jinan University, Guangzhou 510632, China

*Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2): 0551~0558.

**Abstract:** Carbon fixed by phytoplankton and cultured algae is discussed by *in situ* investigation and data analysis in China coastal seas. The results show that the carbon fixed by phytoplankton is about  $2.22 \times 10^8 \text{ t a}^{-1}$  with a clear seasonal variation in the Bohai Sea, the Yellow Sea and the East China Sea, which decreases from spring, summer, autumn to winter in turns and the carbon fixed by phytoplankton in spring and summer occupies 65.3% of that in a year. The carbon fixed by phytoplankton has clear variation in October and November from 1999 to 2005 in the southern Yellow Sea, and the minimum is  $3.54 \times 10^4 \text{ t d}^{-1}$  and the maximum is  $1.66 \times 10^5 \text{ t d}^{-1}$ , with an average of  $1.05 \times 10^5 \text{ t a}^{-1}$ , but the fixed carbon has no regular variation tendency in every year. Among the influence factors for carbon fixed by phytoplankton, the phosphate concentration in seawater is the most important, and then the Chl-a and  $\text{NO}_2\text{-N}$  in seawater. The carbon fixed by phytoplankton is about  $4.16 \times 10^8 \text{ t a}^{-1}$  in the South China Sea, which is twice of that in the Bohai Sea, the Yellow Sea and

**基金项目:**中国科学院知识创新重大工程资助项目(KZCX1-SW-01-17);国家重点基础研究发展资助项目(2007CB407305);青岛市科技英才专项计划资助项目(05-2-JC-90);中国科学院“百人计划”资助项目(2003-202)

**收稿日期:**2006-12-04; **修订日期:**2007-09-17

**作者简介:**宋金明(1964~),男,河北枣强人,研究员,主要从事海洋生物地球化学研究。E-mail:jmsong@ms.qdio.ac.cn

**Foundation item:** The project was financially supported by Knowledge Innovation Program of Chinese Academy of Sciences (No. KZCX1-SW-01-17), the National Key Project for Basic Research of China (No. 2007CB407305), Outstanding Scientist of Qingdao (No. 05-2-JC-90) and the “100 Talents project” of Chinese Academy of Sciences (No. 2003-202)

**Received date:** 2006-12-04; **Accepted date:** 2007-09-17

**Biography:** SONG Jin-Ming, Professor, mainly engaged in marine biogeochemistry. E-mail:jmsong@ms.qdio.ac.cn

the East China Sea. The seasonal variation of fixed carbon which the highest value appeared in winter and the lowest in summer is clearly different from the east China seas (including the Bohai Sea, the Yellow Sea and the East China Sea). The carbon fixed by phytoplankton in total China coastal seas is about  $6.38 \times 10^8 \text{ t a}^{-1}$  and accounts for 5.77% of that in global margin seas. According to marine aquaculture results, *Gracilaria lemaneiformis* can fix 8.18 t carbon in a year, and the rearing density and models play an important role in its yield and carbon fixation. In recent years, the yield of the large-sized economic seaweeds in China marginal seas is about from  $1.20 \times 10^6$  to  $1.50 \times 10^6 \text{ t a}^{-1}$ , and it is estimated that carbon fixed is about from  $3.6 \times 10^5$  to  $4.5 \times 10^5 \text{ t a}^{-1}$  with an average of  $4.0 \times 10^5 \text{ t a}^{-1}$ . If the seaweed cultured yield increases 5% every year in China marginal seas, carbon fixed by the large-sized economic seaweeds will reach to  $5.7 \times 10^5 \text{ t a}^{-1}$  in 2010. Therefore, algae breeding, which has much benefit, is a very important way for increasing marine carbon sink.

**Key Words:** carbon fixed strength; marine phytoplankton; cultured algae; China coastal seas

海洋覆盖 70% 的地球表面,蕴含着大气 50 倍以上的可溶性无机碳,处于平衡状态时  $\text{CO}_2$  在海洋与大气之间的分配与表层海水的温度、碱度和盐度有关<sup>[1,2]</sup>。海洋是人类活动产生碳的主要汇区之一,海洋与大气间的净  $\text{CO}_2$  通量为  $(2.0 \pm 0.6) \text{ Pg C a}^{-1}$ 。海洋生物类群作为一种碳泵,它们产生颗粒与可溶性的有机物,这些有机物可被输送至深海并分解,据估计,这种颗粒有机物向深海输送的通量为  $4 \sim 20 \text{ Pg C a}^{-1}$ ,而溶解性有机碳(DOC)从表层至深层海水的通量为  $10 \text{ Pg C a}^{-1}$ <sup>[3]</sup>。浮游植物与海藻在海水中进行光合作用消耗海水中溶解  $\text{CO}_2$ ,从而转变为溶解有机碳,经一系列生物泵过程,或进入海洋进行碳的再循环或沉降形成沉积物最终形成大气二氧化碳的汇,所以,海洋是人为二氧化碳的主要汇区,研究探讨海洋储存转移大气人为二氧化碳的强度与潜力有重要的学术意义和实际价值。

近海生态系统与深海大洋相比,它们的面积较小,只占全球海洋面积的 7% ~ 8%,海水中储藏的碳只有  $3.1 \times 10^{11} \text{ t}$ ,不到深海大洋的 1%<sup>[4]</sup>。但其中的初级生产力却占全球海洋系统中的 15% ~ 30%<sup>[5,6]</sup>,有机碳埋藏更是占整个海洋埋藏量的 90%,另外近海海洋环境还受人文活动严重影响,全球大约有 40% 的人口居住在近岸 100km 的范围内,生产活动产生的大量有机质和营养盐通过河流排入并沉积于此<sup>[7]</sup>,近海是人为二氧化碳的重要汇区已被大量事实证明<sup>[8~10]</sup>。

近海生物固碳主要是浮游植物的自然固碳以及近海大型经济藻类养殖的人为固碳,近海养殖的海藻可吸收包括碳在内的多种生源要素,海藻(主要为经济海藻)经采收后在陆地上被利用,这样可从海水中“取出”大量的碳,该海区相对于海藻养殖前就明显缺碳,从而使大气中的二氧化碳向养殖海区转移,养殖海域的储碳能力增加。本文在养殖试验和对有关数据综合分析的基础上,分析探讨了中国近海浮游植物的自然固碳以及近海大型经济藻类养殖的人为固碳的强度与潜力,这对我国制定碳排放与增汇环境政策、应对环境外交有重要的参考价值。

## 1 材料与方法

### 1.1 中国近海浮游植物固碳的研究方法

浮游植物固碳强度与潜力可用初级生产力来表征。近海初级生产力采用实际外海观测获得的叶绿素通过换算而得,其中  $P = PsED/2$ <sup>[11]</sup>,式中  $P$  为初级生产力( $\text{mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ),  $Ps$  为表层水中浮游植物的潜在生产力( $\text{mgC m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ ),  $E$  为真光层的深度(m),  $D$  为白昼时间的长短(h)。其中,表层水(1m 以内)中浮游植物的潜在生产力( $Ps$ )根据表层水中叶绿素 a 的含量计算,其中  $Ps = \text{Chl a} \cdot Q$ <sup>[11]</sup>,式中  $\text{Chl a}$  为表层叶绿素 a 的含量( $\text{mg m}^{-3}$ ),  $Q$  为同化系数( $\text{mgC mg}^{-1} \text{ Chl a} \cdot \text{h}^{-1}$ )。真光层( $E$ )的深度取透明度的 3 倍。同化系数( $Q$ )是指单位叶绿素 a 在单位时间内合成的有机碳量,是用来表征浮游植物光合作用强度的量值。本研究所取  $Q$  值是根据实际外海调查中所获得的磷酸盐浓度,利用费尊乐等<sup>[12]</sup>提出的同化系数与磷酸盐浓度的关系计算获得。

## 1.2 大型藻类养殖试验

2002 年 11 月 17 日~12 月 13 日,在广东汕头深澳海水养殖区,开展了 4 种不同初始密度( $50\text{g m}^{-2}$ ,  $100\text{g m}^{-2}$ ,  $200\text{g m}^{-2}$ ,  $400\text{g m}^{-2}$ )龙须菜栽培实验,研究栽培密度对龙须菜固碳的影响。2002 年 8~10 月,在大连海区栽培龙须菜 10 余亩。2001 年 10 月 2~30 日,在青岛胶州湾红岛区,开展了龙须菜不同栽培深度的实验,研究栽培深度对龙须菜固碳的影响。试验结束后,收集龙须菜,干燥称重,获得藻干重,计算含碳量。

## 1.3 我国经济海藻养殖的数据分析

利用 2000~2005 年《中国海洋年鉴》的统计资料,提取海带、紫菜等主要经济藻类养殖产量后换算为含碳量,计算人为大型经济藻类养殖的固碳量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 中国近海浮游植物的固碳强度及影响因素

#### 2.1.1 南黄海浮游植物的固碳强度及年度变化

1999~2005 年 10~11 月份每年对南黄海进行调查,共计 7 个航次,实际观测海水的透明度、Chl a、T、S、pH、DO、营养盐等环境参数,根据 1.1 中的计算方法,可得 2005 年秋季南黄海初级生产力即浮游植物的固碳强度为  $95\sim 1634\text{mgC m}^{-2}\text{d}^{-1}$ , 平均为  $586\text{mgC m}^{-2}\text{d}^{-1}$ , 其平面分布见图 1。

由图 1 可知,秋季南黄海初级生产力分布存在 2 个高值中心,它们分别在南黄海北部的韩国与中国山东半岛的近岸区。前者是来自高温、高盐、低营养黑潮的北上分支黄海暖流和南下黄海沿岸流汇合之锋面,而后者是南下朝鲜沿岸流和黄海暖流的交汇区。初级生产力分布低值区出现在长江冲淡水作用的外海区,以及黄海暖流以内的贫营养区。研究表明南黄海秋季初级生产力的总体水平与 20 世纪 80 年代的调查结果相比变化不大<sup>[8]</sup>,尤其在海区分布上基本一致,均显示了比较清晰的沿黑潮路径分布的低生产力等值线,而本研究更突出显示锋面区域、沿岸流上升流区域为高生产力区,而靠近河口混浊区、黑潮区域为低生产力区。从图 1 与 Chl a 的数据对比可发现,黄海秋季浮游植物初级生产力分布基本与表层叶绿素 a 分布基本一致,均是由近岸向外海递减,但其最高值区没有出现在叶绿素 a 浓度最高的山东近岸,而是分布在朝鲜半岛近岸,高营养、高叶绿素 a 的长江口外海区成为初级生产力的低值区,这和近岸海水的透明度(图 2)分布特征一致。从图 2 中可以清晰的看出,朝鲜半岛近岸的海水透明度要明显高于山东近岸,长江口外海区海水透明度最低,表明近河口水域初级生产力主要受光的限制<sup>[9]</sup>。2005 年调查中透明度较高的中部海域,其初级生产力却很低,显然在外海,透明度已经不再是浮游植物生产力的主要限制因素。据报道,内河和长江口浮游植物生物量受到光的限制,而到了毗连外海营养盐又成为限制因子<sup>[9]</sup>。海水中适宜的 N/P 比值(16:1)有利于浮游植物的生存与繁殖,反之,其中某种营养元素的缺乏可对生物生长繁殖

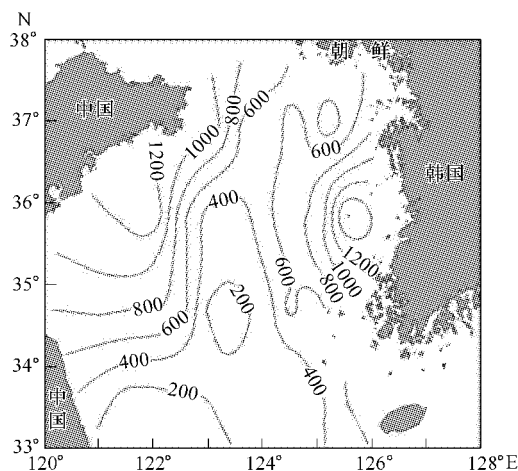


图 1 2005 年 10 月南黄海初级生产力的分布

Fig. 1 Distribution of the primary productivity (PP) of the south Yellow Sea in Oct. 2005 ( $\text{mgC m}^{-2}\text{d}^{-1}$ )

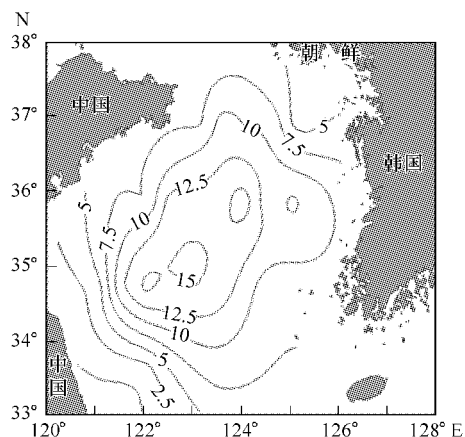


图 2 南黄海 2005 年 10 月透明度的分布

Fig. 2 Transparency distribution of SYS in Oct. 2005 (m)

产生限制。2005 年调查海域的 N/P 比值分布图(图 3)可以看出,在南黄海的中部、北部海区,即黄海暖流区域出现明显的营养盐限制,因而初级生产力呈现低值分布。

南黄海的初级生产力受到诸多因素的影响,为探讨这些影响因素,我们应用 MATLAB6.5 软件对调查站位的初级生产力与可能影响其分布的环境因子[包括海水透明度( $Tr$ )、盐度( $S$ )、温度( $T$ )、pH、溶解氧(DO)、硅酸盐( $SiO_3-Si$ )、硝酸氮( $NO_3-N$ )、亚硝酸氮( $NO_2-N$ )、氨氮( $NH_4-N$ )、磷酸盐( $PO_4-P$ )以及叶绿素 a( $Chla$ )]进行回归分析。结果表明(见表 1),初级生产力与部分环境因子间存在一定的相关性,这些相关性因子主要是海水中的磷酸盐( $PO_4-P$ )、叶绿素 a( $Chla$ )、亚硝酸氮( $NO_2-N$ )等。

考虑到海区环境因子之间可能存在复杂的协同作用,用多元回归分析的方法,确定这些因素与初级生产力的相关程度,即用如下公式进行多元回归:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + \cdots + a_nx_n$$

式中, $y$  是因变量[预测初级生产力值( $PP$ )], $x_n$  是独立变量(代表各环境因子), $a_0$  是常数项。对变量的回归采用因子逐步加入回归法,而最终能保留在模型中的变量将具有最显著的正协同效应,最终获得的模型方程及相关参数如下:

$$PP = 3.8823 + 0.0447Tr + -0.0494S + -0.2327pH + 0.9440(PO_4 - P) + 0.3720(NO_2 - N) + 0.3986Chla \quad (a = 1.0e+003; R = 0.920, n = 27)$$

表 1 初级生产力与各环境因子之间的相关系数( $n = 27$ )

Table 1 Relationship between primary production and environmental factor( $n = 27$ )

参数 Parameters	$Tr$	$S$	$T$	pH	DO	$SiO_3-Si$	$NO_3-N$	$NO_2-N$	$NH_4-N$	$PO_4-P$	$Chla$
相关系数 Relation Coefficients	0.101	-0.563	-0.124	-0.238	0.046	0.081	0.396	0.412	0.168	0.781	0.675

由上述方程可见,南黄海秋季与初级生产力关系较密切的环境因子为海水透明度、盐度、pH、亚硝酸氮( $NO_2-N$ )、磷酸盐( $PO_4-P$ )以及叶绿素 a。在这些因素中,磷对初级生产力的影响最大,这主要是由于 10 月中下旬南黄海的磷是浮游植物生长的限制因子所致<sup>[8]</sup>,次之的影响因素是  $Chla$  和亚硝酸氮( $NO_2-N$ ),这就是说这一时期,控制南黄海初级生产力的因素主要是海水中磷酸盐的含量、 $Chla$  和亚硝酸氮,浮游植物量远没有磷含量对初级生产力重要,这与表 1 的结果一致。另外,多元回归分析还表明秋季溶解氧对初级生产力影响不大,不是浮游植物初级生产的限制因子,这主要是由于 10 月中下旬气候、海况极不稳定,大气中的氧气随动力作用大量溶入海水中,使海水中的溶解氧处于过饱和状态所致<sup>[9]</sup>。

根据 2005 年 10 月对南黄海调查观测获得的数据,结合 1992 年 10~11 月中国科学院海洋研究所与韩国仁荷大学综合海洋调查在北黄海所观测的结果(调查时间同为秋末,其数据具有可比性),可估算出黄海(南黄海与北黄海之和)秋季初级生产力即浮游植物的固碳强度为  $418 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ,即每天固碳量达 15.9 万 t。

1999~2005 年 10~11 月对南黄海 7 次调查计算获得的浮游植物固碳强度结果见表 2。可见浮游植物的固碳强度有较大的年际变化,在这 7a 间的 10~11 月份其浮游植物最低固碳量为  $3.54 \text{ 万 t d}^{-1}$ ,最高为  $16.58 \text{ 万 t d}^{-1}$ ,平均为  $10.50 \text{ 万 t d}^{-1}$ ,但年际变化趋势并不明显。

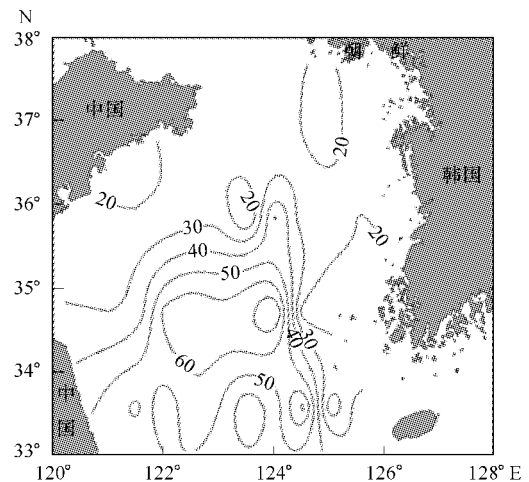


图 3 南黄海 2005 年 10 月 N/P 比的分布

Fig. 3 N/P ratio distribution of SYS in Oct. 2005

### 2.1.2 渤海、黄海、东海和南海不同季节浮游植物的固碳强度

表3是对渤海、黄海、东海和南海各季节浮游植物固碳量的估算结果,其中,2005年10月是对南黄海进行的实际调查获得的数据,渤海、黄海、东海的初级生产力的数据分别来自费尊乐等<sup>[12]</sup>、宁修仁等<sup>[13]</sup>及Li等<sup>[14]</sup>的调查结果。

表2 南黄海1999~2005年10~11月间浮游植物固碳强度及Chl a的年际变化

Table 2 Carbon fixed by phytoplankton and Chl a of the SYS in autumn during 1999~2005

参数 Parameter	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
浮游植物固碳强度 Carbon fixed by phytoplankton ( $\times 10^{10} \text{ gC d}^{-1}$ )	16.58	10.95	13.03	9.04	3.54	11.43	8.92
Chl a ( $\text{mg m}^{-3}$ )	0.61	0.50	0.55	0.45	0.46	0.16	0.40

表3 渤海、黄海和东海不同季节浮游植物的固碳强度

Table 3 Seasonal variation of carbon fixed by phytoplankton in the Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea

海域 Region	面积 Area ( $\times 10^3 \text{ km}^2$ )	各季节初级生产力( $\text{mgC m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ )及日固碳量( $\times 10^4 \text{ t d}^{-1}$ ) Primary production of each season and daily fixation carbon								年初级生产力 ( $\text{gC m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ) 及固碳量( $\times 10^6 \text{ t a}^{-1}$ ) PP and fixation carbon	
		春 Spring	夏 Summer	秋 Autumn	冬 Winter						
渤海 Bohai Sea	77	309	2.38	468	3.60	305	2.35	151	1.16	112	8.62
黄海 Yellow Sea	380	623	23.67	596	22.65	418	15.88	111	4.22	159	60.42
东海 East China Sea	752	625	47.00	612	46.02	527	39.63	475	35.72	204	153.41
南海 South China Sea	3500	260	91	190	66.5	280	98	550	192.5	408	416.64
合计 Total	4709	164.05		138.77		155.86		233.60		639.09	

从表3可知,整个东中国海域春季浮游植物固碳量的最高值出现在黄海和东海,渤海的最高值出现在夏季,这与北方春季水温仍较低有关。渤海初级生产力及浮游植物固碳量的季节变化趋势(由大到小)是夏季、春季、秋季、冬季,而黄海和东海均为春季、夏季、秋季、冬季。渤海初级生产力多年调查研究结果大体一致,即渤海叶绿素a浓度和初级生产力以莱州湾最高,在季节上则是夏季出现最高值;海区的营养盐、流系特征、季风和跃层对海水垂直混合的影响和浮游动物的摄食是制约渤海初级生产力季节和空间变化的主要因素<sup>[8,9]</sup>。黄海与东海的初级生产力分布特征与该海域的水系特点密切相关。受黑潮水系影响的东部和南部海域初级生产力终年较低,而且年较差小,季节变化不显著,这与寡营养型的黑潮水系理化性质相对稳定相关;黄、东海西部近岸区及冷暖水交汇的中部海域,初级生产力相对较高,年较差大,季节变化较显著,这与大陆沿岸水,特别是长江冲淡水的消长密切相关<sup>[8]</sup>。此外,黑潮沿大陆坡流动,次表层水沿坡爬升,形成稳定的上升流。在九州西南的对马暖流源区,五岛列岛附近及台湾以北等海域,均有次表层水逆坡涌升现象,上升流把深层水中丰富的营养盐带至陆架的真光层,促进浮游植物的增长,形成高生产力区<sup>[8]</sup>。在黄海暖流和黄海沿岸流交汇处的海洋锋区也出现生产力的高值,而在黄海中部由于营养盐的限制,叶绿素和初级生产力较低,由于此营养盐的限制可由季节性的黄海冷水团作用而得到缓解<sup>[8]</sup>,因此该海域的初级生产力分布也具有明显的季节性。初级生产力的水平直接反映了浮游植物的固碳强度,因此,浮游植物的固碳强度的受控因素与以上海域影响初级生产力的因素一致。

就整个东中国近海而言,浮游植物固碳量的季节变化趋势从大到小是春季、夏季、秋季、冬季,年总固碳量约为 $222 \times 10^6 \text{ t}$ ,约为东中国近海通过海-气界面总表观碳汇强度每年1369万t的16.2倍<sup>[8]</sup>。这其中在不同的海域,浮游植物固碳是其通过海-气界面总表观碳汇强度的倍数不同,其中渤海为3.0倍,黄海为6.7倍,东

海为 81.6 倍。这就是说,东海浮游植物固碳对其碳汇储库容量的调控能力远大于黄海、渤海。当然,近海碳汇储库容量的受控因素很多,海域的气象动力条件、流系特征、营养盐水平、光照条件、浮游植物的种群与生物量以及跃层对海水垂直混合等都对碳汇储库容量有重要影响。目前,据已有的估计结果,海洋浮游植物固碳量每年约  $36.8 \times 10^9 \text{ tC}$ ,与陆地的初级生产力总量相近,其中,近海区域只占海洋总面积的 10%,据此可获得浮游植物年固碳量占海洋浮游植物总固碳量的 30%<sup>[6]</sup>,作为典型边缘海的东中国近海,其浮游植物年固碳量占全球近海区域浮游植物年固碳量的 2.0%。

在南海,李小斌等<sup>[15]</sup>利用 SeaWiFS 资料分析了 1998 ~ 2002 年南海初级生产力的月际变化和年际变化,发现在这 5a 内南海海域初级生产力年平均值变化并不是很明显,只有 1998 年初级生产力较其它 4 年要低,年平均值为  $217.1 \text{ g C m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ,而其它 4a 的年平均值都在  $230 \text{ g C m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  以上。但南海初级生产力的季节变化非常明显,其最高值出现在冬季,最低值出现在夏季。从冬季到夏季初级生产力逐渐降低,然后又逐渐增加。与初级生产力相似,南海浮游植物的固碳量也存在一样的规律,即其固碳能力在冬季最强夏季最弱。Liu 等<sup>[16]</sup>结合现场调查和 SeaWiFS 资料也得出类似的结论。Chen 等<sup>[17]</sup>2000 ~ 2003 年间对南海的调查发现,南海大陆架海域的初级生产力要高于南海海盆,而南海海盆的初级生产力在春、夏、秋、冬四季依次为 260、190、280、550  $\text{mg C m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ,依此可计算出南海浮游植物在不同季节的固碳强度(表 3)。与渤、黄、东海相比,虽然南海的初级生产力不是很高,但由于其面积巨大,其浮游植物的固碳强度也非常可观,整个南海每年至少可固定  $4.16 \times 10^8 \text{ t}$  碳,可占全球近海区域浮游植物年固碳量的 3.77%。

## 2.2 近海大型经济藻类养殖的固碳强度与潜力

近海大型海藻养殖可明显改善水质环境,对海水富营养化去除的效果十分明显,这与农田种植会带来面源污染截然相反,这已被大量的事实证明<sup>[8,18]</sup>,所以,通过在近海养殖大型经济海藻在去除海水富营养化的同时,通过收获海藻,可使大量的碳被固定下来,从而成为提高近海固碳潜力的重要措施之一,下面的结果就证明了这一点。

### 2.2.1 龙须菜养殖固碳结果的分析

广东近海龙须菜养殖的结果表明,初始密度为  $400 \text{ g m}^{-2}$  的实验处理组,获得的海藻生产量最大( $2512.5 \text{ g m}^{-2}$ ),但  $50 \text{ g m}^{-2}$  实验组的特异生长率最高( $11.71\% \text{ d}^{-1}$ )。青岛胶州湾红岛区域龙须菜不同栽培深度的实验结果表明,海水表面水平栽培与栽培深度 1 ~ 2m,海水表面水平栽培与栽培深度 1.5 ~ 2.5 m 两种实验处理,龙须菜的特异生长率有显著差异,28d 栽培期表面水平栽培的净生物量增加 49.3 倍,0 ~ 1.0、0.5 ~ 1.5、1.0 ~ 2.0 m 和 1.5 ~ 2.5 m 深度栽培生物量分别增加 33.2、37.7、26.6、23.2 倍,即随着深度的增加,由于光合作用的限制,其龙须菜的生物量减少,所以从大型经济藻养殖来说,加大海平面的养殖面积可更有效提高海藻养殖产量,从而增加固碳量。

根据 2002 年龙须菜养殖的实验结果,龙须菜的实际产量为  $126.9 \text{ t hm}^{-2} 155 \text{ d}^{-1}$ 。龙须菜的平均含水量为 90%,其含碳量用海藻干重中碳的平均含量 27.39% 计算<sup>[18]</sup>,即为光合作用所固定的碳,所以龙须菜养殖每年固定的碳为  $8.18 \text{ t hm}^{-2}$ 。

其它海藻的光合生产力褐藻的岩衣藻 *Ascophyllum nodosum* 为  $1179 \text{ g Cm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、海带 *Laminaria japonica* 为  $2200 \text{ g Cm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、*Laminaria longicruris* 为  $3400 \text{ g Cm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、铜藻 *Sargassum horneri* 为  $1496 \text{ g Cm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。红藻类的江蓠 *Gracilaria chilensis* 为  $1800 \text{ g Cm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、*Gracilaria tikvahiae* 为  $3683 \text{ g Cm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ <sup>[8]</sup>。可见,经济海藻的养殖均可增加海洋的碳汇。

### 2.2.2 中国近海大型经济藻类养殖的固碳潜力

根据《中国海洋年鉴》所统计的我国人工大型经济海藻的养殖量,利用海带干重中碳的平均含量 31.2%,海藻干重中碳的平均含量 27.39%<sup>[18]</sup>,就可以估算出我国近海经济海藻的固碳量(表 4)。从表 4 可知,近几年,我国大型经济藻类养殖产量每年在 120 ~ 150 万 t 左右,换算为固碳量为 36 ~ 45 万 t,平均每年 40 万 t,如果被吸收的碳全部从大气中获得,则我国仅人工养殖经济海藻可多从大气中吸收 40 万 t 的碳,如果海藻养殖

产量每年增加 5%, 则到 2010 年, 其固碳量可达 57 万 t, 可见这一措施对增加大气二氧化碳的汇具有重要意义。

表 4 我国近海大型经济藻类养殖产量与固碳强度 (t)

Table 4 Yield and fixation carbon of cultured algae in China marginal seas (t)

参数 Parameter		年 Year					
		2000	2001	2002	2003	2004	2005
经济海藻的养殖产量 Production of cultured algae	海带 Kelp	830410	797730	841540	883617	922496	968621
	紫菜 laver	48159	58399	67062	70415	73513	77189
	其他 Others	343429	358681	393071	412724	430884	452428
	总量 Total	1221998	1214810	1301673	1366756	1426893	1498238
养殖经济海藻的固碳量 Carbon fixed by cultured algae	海带 Kelp	259088	248892	262560	275689	287819	302210
	紫菜 laver	13191	15995	18368	19287	20135	21142
	其他 Others	94065	98243	107662	113045	118019	123920
	总量 Total	366344	363130	388591	408020	425973	447272

### 3 结语

海洋是地球上大气二氧化碳最大的碳汇, 生物泵过程是海洋碳汇最重要的驱动力之一, 尽管人为因素可加速其过程或增加其总量, 但对如此大面积的海洋来说, 并非易事, 但近海是人类开发利用最广的区域, 通过人为的方式, 增加近海碳汇量, 有其实际价值和可操作性, 本文通过实际外海调查和数据分析, 以东中国近海为例分析探讨了中国近海浮游植物的固碳强度与潜力以及近海人工养殖大型藻类的固碳能力, 主要的结论如下:

(1) 渤黄东海的浮游植物的固碳量  $2.22 \text{ 亿 t a}^{-1}$ , 固碳量的季节变化从大到小依次为春季、夏季、秋季、冬季, 其中春夏季的固碳量占全年的 65.3%。南黄海 1999 ~ 2005 年 10 ~ 11 月间浮游植物固碳强度有较大的年际变化, 10 ~ 11 月份 7a 间其浮游植物最低固碳量为  $3.54 \text{ 万 t d}^{-1}$ , 最高为  $16.58 \text{ 万 t/d}$ , 平均为  $10.50 \text{ 万 t d}^{-1}$ , 没有明显的年际变化趋势, 磷对浮游植物固碳强度的影响最大, 次之的影响因素是 Chl a 的含量和亚硝氮 ( $\text{NO}_2\text{-N}$ ) 的含量。南海的固碳能力约为渤黄东海的 2 倍, 为  $4.16 \text{ 亿 t a}^{-1}$ , 其季节变化和渤黄东海不同, 南海浮游植物在冬季的固碳能力最强, 在夏季最弱。整个中国近海浮游植物年固碳量达  $6.38 \text{ 亿 t a}^{-1}$ , 可占全球近海区域浮游植物年固碳量的 5.77%。

(2) 实际外海龙须菜的养殖发现, 每年固定的碳为  $8.18 \text{ t hm}^{-2}$ 。近几年, 我国大型经济藻类养殖产量每年在 120 ~ 150 万 t 左右, 换算为固碳量为 36 ~ 45 万 t, 平均每年约 40 万 t, 如果海藻养殖产量每年增加 5%, 则到 2010 年, 我国大型经济藻类养殖的固碳量可达  $57 \text{ 万 t a}^{-1}$ , 海藻养殖是近海增加碳汇的有多重价值的重要措施。

### References:

- [ 1 ] Sarmiento J L, Le Quere. Oceanic carbon dioxide uptake in a model of century-scale global warming. *Science*, 1996, 274: 1346 — 350.
- [ 2 ] Broecker W S. Thermohaline circulation, the Achilles heel of our climate system: will man-made  $\text{CO}_2$  upset the current balance? *Science*, 1997, 278: 1582 — 1588.
- [ 3 ] Siegenthaler U, Sarmiento J L. Atmospheric carbon dioxide and the ocean. *Nature*, 1993, 365: 119 — 125.
- [ 4 ] Fasham M J R, Balifio B M, Bowfs M C. A new vision of ocean biogeochemistry after a decade of the joint Global Ocean Flux Study (JGOFS). *AMBIO (special Report)*, 2001, 10: 4 — 31.
- [ 5 ] Wollast R. Interactions of carbon and nitrogen cycles in the coast zone. *Interactions of C, N, P, and S biogeochemical cycles and global change*, NATOASI Series. Berlin: Springer, 1993. 14.
- [ 6 ] Longhurst A, Sathyendranath S, Platt T, *et al.* An estimate of global primary production in the ocean from satellite radiometer data. *Journal of Plankton Research*, 1995, 7: 1245 — 1271.

- [ 7 ] Mackenzie F T. Our changing planet (3rd edn). Upper Saddle River. NJ: Pearson Education Inc. , 2003.
- [ 8 ] Song J M. Biogeochemistry of the China Seas. Ji'nan: Shandong Science and Technology Press, 2004. 1—591.
- [ 9 ] Song J M. Oceanic iron fertilization: one of strategies for sequestration atmospheric CO<sub>2</sub>. *Acta Oceanologica Sinica*, 2003, 22(1):57—68.
- [10] Zheng G X, Song J M, Dai J C, *et al.* Distributions of chlorophyll *a* and carbon fixed strength of phytoplankton in autumn of the South Huanghai waters. *Acta Oceanologica Sinica*, 2006, 25(3): 68—81.
- [11] Wang J, Li H Z. Study on chlorophyll and primary production in inshore waters of the Bohai Sea. *Marine Fisheries Research*, 2002, 23 (1): 22—28.
- [12] Fei Z L, Mao X H. Distribution feature of chlorophyll *a* and primary productivity in the Kuroshio of the East China Sea. *Kuroshio Investigation Collected Papers*. Beijing: China Ocean Press, 1987. 256—266.
- [13] Ning X R, Liu Z L, Shi J X. Primary productivity and estimation of potential fish catch in the Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 1995, 17(3): 72—83.
- [14] Li G S, Gao P, Wang F, Liang Q. Estimation of ocean primary productivity and its spatio-temporal variation mechanism for East China Sea based on VGPM model. *Journal of Geographical Sciences*, 2004, 14(1): 32—40.
- [15] Li X B, Chen C Q, Shi P, *et al.* Estimation of primary production of South China Sea from 1998 to 2002 by remote sensing and its spatio-temporal variation mechanism. *Journal of Tropical Oceanography*, 2006, 25(3): 57—62.
- [16] Liu K K, Chao S Y, Shaw P T, *et al.* Monsoon-forced chlorophyll distribution and primary production in the South China Sea: observations and a numerical study. *Deep-Sea Research I*, 2002, 49: 1387—1412.
- [17] Chen Yuh-ling Lee. Spatial and seasonal variations of nitrate-based new production and primary production in the South China Sea. *Deep-Sea Research I*, 2005, 52: 319—340.
- [18] Zhang J H, Fang J G, Tang Q S. The contribution of shellfish and seaweed mariculture in china to the carbon cycle of coastal ecosystem. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(3): 359—365.

#### 参考文献:

- [ 8 ] 宋金明. 中国近海生物地球化学. 济南: 山东科技出版社, 2004. 1~591.
- [11] 王俊, 李洪志. 渤海近岸叶绿素和初级生产力研究. *海洋水产研究*, 2002, 23 (1): 22~28.
- [12] 费尊乐, 毛兴华. 东海黑潮区叶绿素 *a* 和初级生产力的分布特征. *黑潮调查研究论文集*. 北京: 海洋出版社, 1987. 256~266.
- [13] 宁修仁, 刘子琳, 史君贤. 渤、黄、东海初级生产力和潜在渔业生产量的评估. *海洋学报*, 1995, 17 (3): 72~83.
- [15] 李小斌, 陈楚群, 施平, 等. 南海 1998~2002 年初级生产力的遥感估算及其时空演化机制. *热带海洋学报*, 2006, 25(3): 57~62.
- [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. *地球科学进展*, 2005, 20(3): 359~365.