

# 人工鱼礁生态系统碳汇机理及潜能分析

李 娇<sup>1</sup> 关长涛<sup>1\*</sup> 公丕海<sup>1,2</sup> 崔 勇<sup>1</sup> 黄 滨<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 农业部海洋渔业可持续发展重点实验室 中国水产科学研究院黄海水产研究所 碳汇渔业实验室, 青岛 266071)

(<sup>2</sup> 上海海洋大学海洋科学学院, 201306)

**摘 要** 人工鱼礁海区作为典型的浅海人工修复增殖生态系统, 其生物群落结构、生态环境均在一定范围内受到人为调控, 因此, 该系统的碳循环过程和固碳能力很大程度上被人类生产活动所影响。本研究根据人工鱼礁生态系统的结构特征, 探讨礁区主要生物固碳因子及其固碳机理, 初步提出礁区生物固碳量的计量方法, 并讨论通过人工鱼礁建设扩增海洋生物固碳的途径与方法。

**关键词** 人工鱼礁 碳汇 固碳潜能

中图分类号 S953.1

文献标识码 A

文章编号 1000-7075(2013)01-0065-05

## Preliminary analysis of carbon sink mechanism and potential of artificial reef ecosystem

LI Jiao<sup>1</sup> GUAN Chang-tao<sup>1\*</sup> GONG Pi-hai<sup>1,2</sup> CUI Yong<sup>1</sup> HUANG Bin<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Carbon-Sink Fisheries Laboratory, Qingdao 266071)

(<sup>2</sup> College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, 201306)

**ABSTRACT** As a typical remediation and enhancement ecosystem, artificial reefs are manipulated to some extent in terms of their biological community structure and ecological environment. Therefore, carbon circulation and carbon-fixation of the reef system are greatly influenced by production activities of human beings. In this study, mechanism of carbon sink of main carbon-fixing biological factors is analyzed according to the structure feature of artificial reefs. Methods for calculating fixed carbon in reef area are discussed, and approaches for promoting carbon-fixing capacity of marine organism through artificial reef construction are analyzed.

**KEY WORDS** Artificial reefs Fishery carbon sinking Potential of carbon fixation

工业生产和能源利用排放的以 CO<sub>2</sub> 为主的温室气体造成全球气温变暖日益严重。减少温室气体排放, 吸收、转化大气中的温室气体成为全球各国发展的战略性选择。海洋作为地球上最大的碳库, 约储存全球 CO<sub>2</sub> 总量的 93%, 而每年通过海洋循环的 CO<sub>2</sub> 量约为 90Pg (González *et al.* 2008; Nellemann *et al.* 2009), 由此可见, 海洋在调节气候变化、促进碳循环、减少空气中 CO<sub>2</sub> 含量等方面发挥着重要作用。海洋渔业作为人们开发利用海洋的重要方式之一, 海水增养殖生产可有效促进水生生物吸收水体中的 CO<sub>2</sub>, 并通过捕获渔业资源的方式把碳以渔业产品的形式移出水体 (唐启升 2011)。因此, 通过渔业生产扩增生物碳汇, 提高海洋在碳循环

公益性行业(农业)科研专项(201003068)和中央级公益性科研院所基本科研业务费(20603022011006; 2010-chb-01)共同资助

\* 通讯作者。E-mail: guanct@ysfri. ac. cn

收稿日期: 2012-09-30; 接受日期: 2012-12-19

作者简介: 李 娇(1982-), 女, 助理研究员, 主要从事渔业工程与装备方面的研究。E-mail: lijiao@ysfri. ac. cn

中的作用,对发挥海洋在气候调节中的作用有重要意义。近几年,我国沿海各地都在大力开展人工鱼礁建设,鱼礁结构、材料等关键指标参数,鱼礁的水动力特性、礁区建设功能及布局方式、礁区建设的生态效果等相关构建技术不断受到政府管理部门、科研人员和建礁企业的重视,但目前对人工鱼礁扩增海洋碳汇方面的研究比较少。本研究针对我国人工鱼礁建设现状初步分析鱼礁生态系统主要生物因子的固碳机理与能力,并初步探讨如何通过人工鱼礁建设扩增近海碳汇作用。

## 1 人工鱼礁生态系统碳汇机理分析

人工鱼礁是人为投放在海中的工程构件(章守宇等 2010),可为海洋生物提供索饵场、育幼场等生境地,具有环境修复和资源养护的功能。通过在人工鱼礁区进行藻类移植、增殖放流形成规模化的海洋牧场(Mustafa 2003),海洋生物的种类、数量明显增加,且人工鱼礁海区的增殖殖生物以海域天然饵料为食,无须人工投饵,是绿色、低碳渔业生产模式的典型代表。作为一定程度上受人为调控的近海特殊生态系统,人工鱼礁生态系统在增进海洋碳汇方面有着明显的有利因素:修复环境而提升的海区初级生产力、藻类光合作用对 $\text{CO}_2$ 转化量的增加及增殖物种生物体固碳量的增多,都极大地提高了海区的固碳能力(图1)。

海区表层的浮游植物通过光合作用将溶解于水中的 $\text{CO}_2$ 转化成有机碳(Carson *et al.* 2004),同时降低海水中的 $\text{CO}_2$ 的含量,造成空气-海水界面的 $\Delta p\text{CO}_2$ (二氧化碳分压差)增大,促进 $\text{CO}_2$ 从空气向海水扩散。浮游动物的摄食行为将有机碳进一步转化,并通过其垂直洄游将表层的有机碳向海水深层输送(Steinberg *et al.* 2000),为不同水层的海洋动物提供营养。在人工鱼礁增殖殖海区,由于礁体为底栖附着生物提供良好的附着基,牡蛎、海螺、藤壶等自然附着生物大量滋生,软体类附着生物的钙化作用将海水中溶解无机碳转化成 $\text{CaCO}_3$ 壳体,这些被固定的无机碳在礁体上不断积累,在一定时期内形成碳封存。礁区海藻场的修复可有效恢复海区藻类资源,藻类生长过程中光合作用将大量 $\text{CO}_2$ 转化成有机碳,进一步提升海区的碳汇能力;同时藻类作为鲍鱼、海胆等海珍品的营养物质,为礁区增殖放流的海珍品提供天然饵料,从而代替向海洋中投放人工饲料,是符合“碳汇渔业”定义绿色生产模式(唐启升 2011)。而礁区增殖殖物种如经济鱼类、贝类、刺参等的捕获则将大量的生物碳从水体中移出,以经济产品的形式完成对海洋中碳的固定;同时,海洋生物的骨骼、排泄物、分泌物及其残饵等颗粒有机碳的沉降加速碳的沉积(李宁等 2005;宋金明等 2008)。通过对人工鱼礁海区主要固碳生物因子的初步分析,人工鱼礁建设可有效扩增海区的生物固碳能力,增加海洋的碳汇作用。

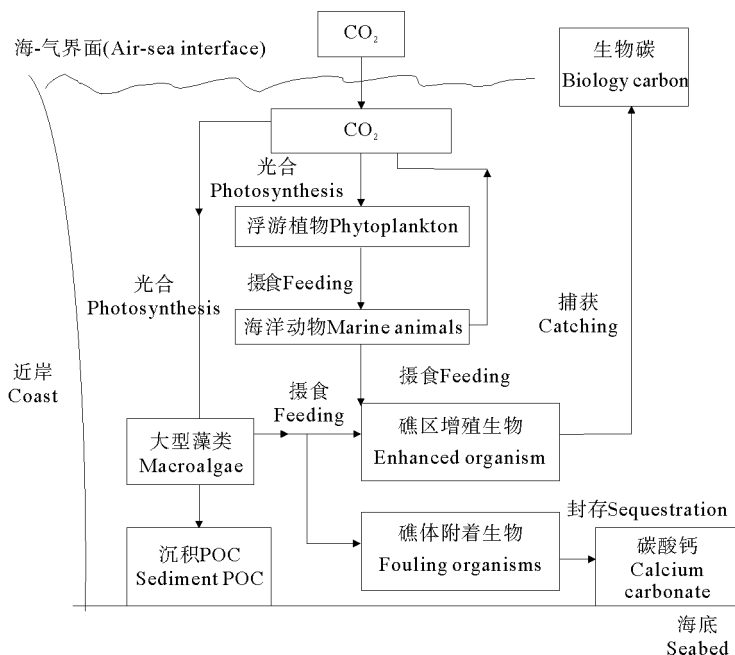


图1 人工鱼礁生态系统碳汇功能

Fig. 1 Scheme of carbon sinking in artificial reef ecosystem

## 2 鱼礁区碳汇因子的固碳机理与潜力分析

### 2.1 人工鱼礁建设对海区初级生产力的提升

浮游植物是海洋生物碳循环的初始环节。作为海洋生态系统的生产者,浮游植物通过光合作用将水中溶

解的  $\text{CO}_2$  转化成有机碳,为自身和其他海洋生物的生长提供物质来源,因此,海区浮游植物种类、数量直接影响该海区吸收转化  $\text{CO}_2$  的能力和初级生产力(Poulton *et al.* 2006; Zunigan *et al.* 2011)。根据对渤海、黄海、东海浮游植物的固碳强度分析结果(Gong *et al.* 2003; Wang *et al.* 2002; Zheng *et al.* 2006),渤、黄、东海的浮游植物固碳强度约为  $2.22\text{G t/yr}$ ,这一结果表明浮游植物在海洋碳汇中的巨大作用。海州湾人工鱼礁区浮游植物调查结果显示(张 硕等 2006),鱼礁区和对照区叶绿素 a 浓度平均值分别为  $6.81$ 、 $6.10\text{mg/m}^3$ ,鱼礁区和对照区浮游植物生物量平均值分别为  $252.95$ 、 $123.69\text{mg/m}^3$ ,鱼礁区和对照区初级生产力的平均值分别为  $455.23$ 、 $276.92\text{mgC/m}^2 \cdot \text{d}$ 。调查数据清晰表明,鱼礁区浮游植物生物量和初级生产力明显高于对照区。按照海区浮游植物年固碳量=平均初级生产力×海区面积×时间,以海州湾海洋牧场初级生产力调查数据计算, $666.67\text{hm}^2$  海洋牧场区每年生成有机碳量  $1\ 113.26\text{tC}$ , $666.67\text{hm}^2$  对照海区每年生成有机碳量是  $677.21\text{tC}$ 。由此可以得出,人工鱼礁建设可显著改善海区环境,有效提高浮游植物密度,提升海区的初级生产力,海区浮游植物固碳能力明显增强。

## 2.2 藻礁与海藻场建设对海洋碳汇能力的扩增作用

大型藻类可直接吸收海水中的  $\text{CO}_2$ ,并通过光合作用将  $\text{CO}_2$  转化有机碳,使海水中  $\text{CO}_2$  溶解量降低,促使空气中  $\text{CO}_2$  向海水中转移。Duarte 等(1999)对海洋大型植物在碳循环中的作用研究证明,海洋大型植物通过光合作用可以有效去除大气中的  $\text{CO}_2$ ,同时利用释放的  $\text{O}_2$  和生成的有机物支持生态系统,并把富余的有机物埋藏在沉积物中,大型植物每年为全球埋藏  $120\sim 329\text{MtC}$ (Duarte *et al.* 1999),由此可见,培养和增殖大型藻类是扩增海洋碳汇的有效途径。Alpert 等(1992)曾对陆架区大型藻类的固碳潜力进行了预测,在  $300\text{\$/tC} \cdot \text{yr}$  的养殖成本保障下,全球陆架区大型藻类的固碳潜力可达  $0.7\text{GtC/yr}$ ,这一量值相当于全球海洋年均净固碳量( $2.0\pm 0.8\text{GtC/yr}$ )总量的  $35\%$ 左右(Alpert *et al.* 1992)。目前大型藻类主要利用筏式养殖进行人工增殖生产,天然藻类却由于无序、过度开发对海底造成的破坏而大量减产,以中国北方沿海为例,鼠尾藻、大叶藻等曾经的优势藻种资源量锐减甚至面临枯竭危险,针对这一现状,进行藻礁和海藻场建设是修复海底生态环境的必行之路。通过投放各种适宜海藻附着的藻礁,以人工方式采集生殖细胞令其附着于藻礁上萌发形成种苗,或人为移栽野生海藻种苗,促使海藻大量繁殖生长而形成茂密的海藻场,有效增加海区藻类生物量,提高海区吸收  $\text{CO}_2$  的能力。由于海洋污染、过度捕捞等原因,莱州湾海区的海藻量锐减,为恢复这片曾经富饶的海域,目前正通过海藻生殖细胞礁体附着、藻苗礁体栽培和成熟海藻的绑苗投石等方法进行鼠尾藻、大叶藻的增殖。不同海区同种藻类体内碳含量无明显差异(Flynn 1991),通过对威海小石岛海域鼠尾藻藻体成分初步分析(姜宏波等 2009),藻体中的碳含量在  $25.6\%\sim 33.0\%$ 之间变动。如以含碳量  $30\%$ 计算,在莱州湾海区完成  $666.67\text{hm}^2$  鼠尾藻场的恢复,鼠尾藻亩产量达到  $1.334\text{t}$ ,海区藻类固碳量可达到  $4\ 000\text{t}$ 。

## 2.3 人工鱼礁附着生物固碳能力分析

通过近 3 年对莱州湾石虎嘴海域鱼礁区跟踪调查,礁体表面(除泥沙淤埋和礁体接触部分)基本全部被牡蛎覆盖,投建 1 年的礁体,表面覆盖厚度达到  $100\text{mm}$ 。这种双壳贝类利用钙化作用使海水中的  $\text{HCO}_3^-$  (碳酸氢根)转化成  $\text{CaCO}_3$  (碳酸盐)壳体,从而固定大量的碳(Tang *et al.* 2011),其反应式是:  $\text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^- = \text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ 。虽然每生成  $1\text{mol}$  的碳酸钙,会释放  $1\text{mol}$  的  $\text{CO}_2$ ,但却吸收  $2\text{mol}$  的碳酸氢根,即仍固定了  $1\text{mol}$  的碳,且壳体固着在礁体上不断积累,从长期来看,礁体附着贝类壳体的钙化具有强大的固碳功能。另外,贝类通过滤食海水中的颗粒有机碳(POC)将其转化为自身生长所需的能量,有关滤食性养殖贝类进行碳收支研究结果表明(柴学良等 2006),贝类摄取的有机碳,除部分通过粪便直接排出体外,部分通过自身呼吸作用被消耗掉,极少部分通过代谢排出体外,其余碳即作为生长碳而成为身体的组成成分。尽管贝类的呼吸、钙化等活动会释放一定的  $\text{CO}_2$ ,但其壳体固定的无机碳和用于生长的有机碳仍将大量碳存储在生物体内。根据以上对贝类碳收支的分析,得到礁区附着贝类的碳计量公式(1):

$$C = c_s \times E_s + c_o \times E_o \quad (1)$$

式中,  $C$  为总固碳量,  $c_s$  为贝类壳体含碳系数,  $c_o$  为贝类有机体含碳系数,  $E_s$  为贝类壳体总重,  $E_o$  为贝类有

机体总干重。目前中国多地沿海均开展人工鱼礁建设,由于不同建设海区的自然环境各异,各海区礁体附着生物在具有自身多样性的同时,相互间还存在着物种种类的差异,因此单纯的贝类含碳量计算不能完全体现所有礁区附着生物的固碳能力,通过对附着贝类固碳量计算公式的类推,初步提出礁区附着生物固碳量计算公式(2)。针对具体建礁海区附着生物实际多样性,采用礁体定量取样的方法分析生物种类及各物种生物量,估算礁区总附着面积,计算礁体各种附着生物的生物量,并对不同生物的碳含量系数进行测定,即可代入公式(2)得出礁区附着生物的总固碳量。

$$C_f = \sum_{i=1}^n [c_i \times E_i] \quad (2)$$

式中, $C_f$ 为附着生物总固碳量, $n$ 为附着生物种类数, $c_i$ 为某一附着生物体含碳系数, $E_f$ 为某一附着生物总量。

## 2.4 礁区培养植物种的碳汇能力与固碳量分析

目前人工鱼礁建设的主要目的是进行沿海经济物种的增殖,较深海区的礁体多用于诱集和增殖岩礁性经济鱼类,浅海区人工鱼礁多用于刺参、鲍鱼等海珍品增殖。人工鱼礁投放可明显改善海区生态环境,恢复海区自然物种的资源量,并通过人工增殖放流经济物种扩增生物量,充分发挥礁区生态系统的经济价值。同时,增殖经济物种的捕捞则将大量生物碳以海产品的形式从海样中取出,提升了该海区的生物固碳能力。根据多个地区的调查结果(焦金菊等 2011;袁华荣等 2011),西港小石岛人工鱼礁区鱼类生物量比对照海区增加180%,养马岛生物量增加610%,雷州乌石岛人工鱼礁区游泳生物密度2007年比投礁前增加213%,2010年增加300%。通过以上数据对比可得出,人工鱼礁建设可明显提高礁区生物量。

作者从2009年开始在山东莱州石虎嘴海域开展人工鱼礁营造工程、海珍品增殖放流等相关内容的研究,该海域至2011年底已完成66.67 hm<sup>2</sup>人工礁区建设,并在人工鱼礁区开始进行刺参等海珍品的放流增殖,每亩底播刺参80~120kg,每公斤刺参数量20~40头,经过1.5~2年海区自然生长后可达到6~8头/kg的上市规格,以此增殖数据估算,2013年可至少采捕刺参400t,通过测定刺参的干重和体内碳含量,可按公式(3)计算出增殖刺参的碳捕获量:

$$C = c \times (E_i - E_e + E_f) \quad (3)$$

式中, $C$ 为海参采捕移出总量, $c$ 为海参体内含碳系数, $E_e$ 为增殖海参初始生物量, $E_i$ 为增殖海参总移出量, $E_f$ 为自然生长海参总移出量。

根据人工鱼礁增殖业的特征,礁区自然与人工增殖物种皆具有多样性,且生物以海域天然食物为饵料,无需人工投喂,其生长过程中体内积累的碳完全来自海区。因此,按照刺参固碳量计算方法,可得到海区所有增殖生物的总固碳量统计公式(4):

$$C_{it} = \sum_{i=1}^n [c_i \times (E_{it} - E_{ie} + E_{if})] \quad (4)$$

式中, $C_{it}$ 为增殖资源移出总碳量, $n$ 为增殖物种种类数, $c_i$ 为某一增殖物种生物体含碳系数, $E_{it}$ 为某一增殖物种初始生物量, $E_{ie}$ 为某一增殖物种总移出量; $E_{if}$ 为某一自然物种移出量。

## 3 人工鱼礁生态系统碳汇能力的扩增途径

通过对礁区碳汇因子固碳机理分析,人工鱼礁建设可有效增加浮游植物的密度和生物量,提高海区的初级生产力;礁体附着生物的壳体累积在一定时期内实现海底碳封存;海藻床恢复后的光合作用极大地提升了海区对CO<sub>2</sub>的吸收量;而礁区增殖经济生物的捕获将大量的生物碳移出水体。因此,可通过多个途径扩大人工鱼礁生态系统固碳的作用:1)开展废旧物礁体的设计,利用工业生产淘汰的废旧材料、物体进行礁体的制作,实现礁体本身的固碳作用,同时进行低碳、环保型礁体材料的研制;2)增加人工鱼礁建设投入力度,扩大建设面积,恢复近海浮游生物种类多样性,提高海域的初级生产力;3)在鱼礁区开展海藻场的修复工作,通过藻类的光合作用提升海区对温室气体的吸收能力;4)研究礁区增殖物种数量-生态环境容量最佳匹配方式,在保护生态环

境的基础上,开展经济物种的增养殖生产,提高增养殖物种的产量,从而增加每年渔业生产的生物碳移出量。

## 4 结论

海洋作为大气 CO<sub>2</sub> 巨大的汇,其在减缓温室效应中的重要地位已受到国内外学者的密切关注。海洋吸收、封存 CO<sub>2</sub> 的能力及 CO<sub>2</sub> 在海洋中的循环机制已成为当今国际海洋科学领域的前沿内容。虽然国内外研究人员在海洋生物固碳方面做了大量研究,但对渔业活动密集的近海海域碳汇能力的研究还很少,尤其是针对渔业活动对近海碳汇能力影响的研究非常少。人工鱼礁海区作为近海人工修复、调控型生态系统,在提高水产品质量、保护海洋生态环境的同时提升海域固碳能力,是典型绿色、低碳渔业,因此开展人工鱼礁投放、海藻场构建、礁区增殖放流对提升扩增海区生物固碳有重要作用。目前国内多个沿海省市均有开展人工鱼礁建设工作,但由于中国的人工鱼礁修复工作开展较晚,且单个礁区建设范围较小、礁区间的距离较大、建礁后管理体制不完善等问题造成礁区建设效果不明显,存在对人工鱼礁海区的利用不够充分合理的现象。为更好发挥人工鱼礁的生态效果与经济价值,应对人工鱼礁建设进行合理规划、建立监管体系和评价标准,以渔业资源生物量-生态环境耦合为出发点,最大程度获得鱼礁建设生态效益和经济效益,发挥人工鱼礁生态系统对近海海域碳汇能力的生物扩增作用。

## 参 考 文 献

- 李 宁, 李学刚, 宋金明. 2005. 海洋碳循环研究的关键生物地球化学过程. 海洋环境科学, 24(2):75-80
- 张 硕, 朱孔文, 孙满昌. 2006. 海州湾人工鱼礁区浮游植物的种类组成和生物量. 大连水产学院学报, 21(2):135-140
- 姜宏波, 田相利, 董双林, 缪国荣, 邹吉新, 包 杰. 2009. 鼠尾藻生长、藻体成分及其生境的初步研究. 海洋湖沼通报, (2):59-66
- 柴学良, 张炯明, 方 军, 陆荣茂, 谢起浪, 林志华, 宁修仁, 乐清湾. 2006. 三门湾主要滤食性养殖贝类碳收支的研究. 上海水产大学学报, 15(1):52-58
- 袁华荣, 陈丕茂, 李辉权, 黎小国, 唐振朝, 秦传新, 余 景, 舒黎明. 2011. 雷州乌石人工鱼礁渔业资源增殖效果初步评价. 上海海洋大学学报, 20(6):883-888
- 唐启升. 2011. 碳汇渔业与又好又快发展现代渔业. 江西水产科技, (2):5-7
- 章守宇, 许 敏, 汪振华. 2010. 我国人工鱼礁建设与资源增殖. 渔业现代化, 37(3):55-58
- 宋金明, 李学刚, 袁华荣, 郑国侠, 杨宇峰. 2008. 中国近海生物固碳强度与潜力. 生态学报, 28(2):551-558
- 焦金菊, 潘永玺, 孙利元, 杨宝清, 邱盛尧. 2011. 人工鱼礁区的增殖鱼类资源效果初步研究. 水产科学, 30(2):79-82
- Alpert SB, Spencer DF, Hidy G. 1992. Biospheric options for mitigating atmospheric carbon dioxide levels. Energy Conversion and Management 33(5-8):729-736
- Caron G, Michel C, Gosselin M. 2004. Seasonal contributions of phytoplankton and fecal pellets to the organic carbon sinking flux in the North Water (northern Baffin Bay). Marine Ecology Progress Series 283:1-13
- Duarte CM, Chiscano CL. 1999. Seagrass biomass and production: A reassessment. Aquatic Botany 65:159-174
- Flynn KJ. 1991. Algal carbon-nitrogen metabolism: A bio-chemical basis for modeling the interactions between nitrate and ammonium uptake. Journal of Plankton Research 13(2):373-387
- González JM, Fernandez-Gomez B, Fernandez-Guerra A and 13 others. 2008. Genome analysis of the proteorhodopsin-containing marine bacterium *Polaribacter* sp. MED152 (Flavobacteria). Proc Natl Acad Sci USA 105: 8724-8729
- Gong GC, Wen YH, Wang BW, Liu GJ. 2003. Seasonal variation of chlorophyll a concentration, primary production and environmental conditions in the subtropical East China Sea. Deep-Sea Research II 50:1219-1236
- Mustafa S. 2003. Stock enhancement and sea ranching: objectives and potential. Reviews in Fish Biology and Fisheries 13: 141-149
- Nellemann C, Corcoran E, Duarte CM. 2009. Blue Carbon [R/OL]. A rapid response assessment. United Nations environment programme, GRID-Arendal, <http://www.grida.no>.
- Poulton AJ, Hollogan PM, Hickm A and 6 others. 2006. Phytoplankton carbon fixation, chlorophyll-biomass and diagnostic pigments in the Atlantic Ocean. Deep-Sea Research II 53:1593-1610
- Steinberg DK, Carlson CA, Bates NR and 3 others. 2000. Zooplankton vertical migration and the active transport of dissolved organic and inorganic carbon in the Sargasso Sea. Deep-Sea Research I 47:137-158
- Tang QS, Zhang JH, Fang JG. 2011. Shellfish and seaweed mariculture increase atmospheric CO<sub>2</sub> absorption by coastal ecosystems. Marine Ecology Progress Series 424:97-104
- Wang J, Li HZ. 2002. Study on chlorophyll and primary production in inshore waters of the Bohai Sea. Marine Fisheries Res 23(1):22-28
- Zunigan D, Alonso-Perez F, Castro CG. 2011. Seasonal contribution of living phytoplankton carbon to vertical fluxes in a coastal upwelling system (Ria de Vigo, NW Spain). Continental Shelf Res 31:414-424
- Zheng GX, Song JM, Dai JC, Wang YM. 2006. Distributions of chlorophyll a and carbon fixed strength of phytoplankton in autumn of the Southern Huanghai sea waters. Acta Oceanologica Sinica 25(3):68-81