

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2011.00695

## 国际海洋生物碳汇研究进展\*

刘慧, 唐启升

中国水产科学研究院 黄海水产研究所, 山东 青岛 266071

**摘要:** 海洋是地球上最大的碳库。整个海洋中蓄积的碳总量达到  $39 \times 10^{12}$  t, 占全球碳总量的 93%, 约为大气的 53 倍。这些碳或重新进入生物地球化学循环, 或被长期储存起来; 而其中一部分被永久地储存在海底。根据联合国《蓝碳》报告, 地球上超过一半(55%)的生物碳或是绿色碳捕获是由海洋生物完成的, 这些海洋生物包括浮游生物、细菌、海藻、盐沼植物和红树林。本文综述了近年国际上对海洋生物碳汇的研究结果, 阐述了海洋生物固碳的机制、海洋生物碳汇的现状及其修复措施, 同时评价和论述了海水贝藻养殖作为渔业碳汇的地位与作用。

**关键词:** 碳汇; 海洋生物; 渔业

**中图分类号:** X17; F326

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1005–8737–(2011)03–0695–08

CO<sub>2</sub>对全球气温升高的贡献高达 70%, 居各种温室气体之首<sup>[1–2]</sup>。由于全球气候变化的日益凸显, 世界各国对于温室气体减排、低碳发展和碳汇储量越来越重视。碳源汇的概念有静态和动态之分。静态的碳源是指释放CO<sub>2</sub>的源, 主要是指海洋、土壤、岩石与生物体; 静态的碳汇是指自然界中碳的寄存体, 包括森林、湿地和海洋等。

《联合国气候变化框架公约》(UNFCCC)对碳源做出了动态的解释, 将其定义为“向大气中释放CO<sub>2</sub>的过程、活动或机制”; 同时将碳汇定义为“从大气中清除CO<sub>2</sub>的过程、活动或机制”。不论是静态的还是动态的, 碳源与碳汇都是两个相对的概念。由于《京都议定书》的签订, 世界各国普遍重视森林碳汇及其碳储量, 并且做了大量工作来建立和改进其计量方法。在林业中, 碳汇主要是指植物吸收大气中的CO<sub>2</sub>并将其固定在植被或土壤中, 从而减少大气CO<sub>2</sub>的浓度; 目前广泛采用的森林碳汇计量方法包括生物量法、蓄积量法、生物量清单法等。相对而言, 对于海洋碳汇的研究还不够全面, 到目前为止还没有形成相对系统

和普遍接受的计量方法。

从生物地球化学的角度看, 海洋在全球碳循环中发挥着重要作用。地球上大约有 93%的CO<sub>2</sub>会循环进入海洋, 它们或重新进入生物地化循环, 或被长期储存起来<sup>[3]</sup>。海洋每年吸收的碳大约是 2.0~2.2 Pg(C)<sup>[3]</sup>, 这其中只有一部分被永久地储存在海底。由于温度、流场、盐度和化学成分的差异, 不同海洋生态系统的碳捕获和储存能力也不尽相同。陆架边缘海域的面积不大, 但由于这个区域接纳了大量的上升流和河流携带而来的碳和营养盐, 因而不仅承载了海量的生物活动, 而且在碳的生物地化循环中也发挥了重要作用。大多数的陆架边缘海区都是大气的碳汇, 其碳捕获量是 0.33~0.36 Pg(C)/a, 相当于大洋碳汇总量的 27%~30%; 而沿岸生态系统(包括滩涂、河口等)则是大气的碳源, 每年向大气释放碳的量可多达 0.5 Pg(C)/a<sup>[4]</sup>。根据释放和吸收碳的相对数量的不同, 大洋生态系统也可以分成碳源和碳汇两个部分, 例如 30°N以北的大西洋水域是一个年吸收 0.35 Pg(C)的碳汇, 而热带水域则是一个向大气

收稿日期: 2011–01–12; 修订日期: 2011–03–18.

作者简介: 刘慧(1967–), 研究员, 研究方向为海水养殖科学. E-mail: liuhui@ysfri.ac.cn

通信作者: 唐启升, 中国工程院院士. E-mail: tangqs@public.qd.sd.cn

\* “中国工程院第 109 场工程科技论坛—碳汇渔业与渔业低碳技术”特约综述.

净释放CO<sub>2</sub>的碳源<sup>[5]</sup>。

## 1 海洋固碳作用的重要机制

海洋植物的碳捕获能量极为强大和高效,虽然它们的总量只有陆生植物的 0.05%,但它们的碳储量(循环量)却与陆生植物相当。海洋生物生长的地区还不到全球海底面积的 0.5%,却有超过一半或高达 70%的碳被海洋植物捕集转化为海洋沉积物,形成植物的蓝色碳捕集和移出通道。土壤捕获和储存的碳可保存几十年或几百年;而在海洋中的生物碳可以储存上千年。

海洋生态系统通过参与全球碳循环来调控大气CO<sub>2</sub>浓度的变化。海洋生态系统的碳循环过程主要是通过海洋生物泵完成,这一过程又分为有机碳泵和碳酸盐泵<sup>[6]</sup>。通常所说的生物泵仅指有机碳泵,浮游植物及大型藻类等的初级生产是这一过程的起始环节和关键部分。有学者估计,在没有光合作用(初级生产)的情况下,目前大气CO<sub>2</sub>浓度应为 1 000 ppm,而不是 365 ppm;反之,若生物泵发挥最大效率,则大气CO<sub>2</sub>浓度将降至 110 ppm<sup>[7-8]</sup>;这其中,海洋中的初级生产者发挥了巨大的作用。钙化浮游生物所产生的碳酸钙或其他营养级较高的海洋动物碳酸钙质残骸被输送到深海,进而被埋藏的过程就是所谓的碳酸盐泵<sup>[8]</sup>。

### 1.1 生物泵作用(包括有机碳泵、碳酸盐泵)

海洋浮游生物、细菌和病毒占海洋生物总量的 90%<sup>[9-10]</sup>,其生产力则占海洋初级生产力的 95%以上<sup>[11]</sup>。

**1.1.1 海洋微生物固定的碳** 海洋病毒虽然需要依赖其他生物才能生存,但海洋病毒的总生物量却相当于 7 500 万头蓝鲸 (11.25 Gt)。海洋病毒的数量估计为  $1 \times 10^{30}$ ;尽管人们对海洋病毒的了解还不多,但它们的对海洋生物和海洋生物地化过程无疑具有重要意义。海洋病毒与其宿主间的相互作用影响了全球海洋的生物地化循环,它们可以通过宿主选择和细胞溶解控制碳循环<sup>[12]</sup>。海洋中每 1 秒钟都有大约  $1 \times 10^{23}$  次病毒侵染发生,导致每天有 20%~40%的表层原核生物受到感染并

释放出  $10^8 \sim 10^9$  t 碳<sup>[10]</sup>。估计有大约 25%的生物有机碳都是在病毒的作用下得以转化<sup>[13]</sup>。

海洋细菌能在阳光的作用下利用变形菌视紫质(proteorhodopsin)吸收CO<sub>2</sub><sup>[14]</sup>;约有半数海洋细菌都具有变形菌视紫质。了解海洋细菌及其生态学特点,将有助于人类理解CO<sub>2</sub>排放量的增加对海洋以及气候变化的影响。

**1.1.2 浮游植物初级生产固定的碳** 海洋浮游植物每年通过光合作用捕获的CO<sub>2</sub>超过了 36.5 Pg(C)<sup>[15]</sup>。浮游动物的活动是控制大洋海水中颗粒碳沉积的主要因素<sup>[16]</sup>。被浮游生物捕获的CO<sub>2</sub>中,大约有 0.5 Pg(C)/a 沉积并储存在海底<sup>[17]</sup>。以中国黄海为例,其各季节平均初级生产力为 425~502.37 mg/(m<sup>2</sup>·d)<sup>[18-19]</sup>,而黄海海域总面积为  $38 \times 10^4$  km<sup>2</sup><sup>[20]</sup>,因此黄海浮游植物年固碳的总量为 58.91~69.68 Tg(C)<sup>[21]</sup>。中国渤海、黄海、东海的浮游植物固碳强度合计约为 222.0 Tg(C)/a,而整个中国近海浮游植物年固碳量达 638.0 Tg(C)/a,占全球近海区域浮游植物年固碳量的 5.77%<sup>[22]</sup>。

**1.1.3 海岸带植物群落固定的碳** 红树林、盐沼植物和大型海藻具有可与农作物相匹敌的高生产力<sup>[23]</sup>,不仅高度自养,而且能把碳捕获储存起来,所以被称为“蓝碳”<sup>[3]</sup>。被这些植物捕获的碳有的被转移到周边生态系统,有的以腐殖质的形式埋入沉积层并被永久封存起来<sup>[24]</sup>;而海藻丛林的固碳作用最为显著,它们在某些海区能够形成厚达 3 m 的生物沉积层。从全球来看,“蓝碳”每年储存的碳量是 120~329 Tg(C),相当于海洋碳汇年储量的一半左右,显然,“蓝碳”在海洋碳循环过程中的作用十分重要<sup>[25]</sup>。同时,海岸带植物群落的碳捕获速率也非常高,是大洋平均碳捕获速率的 180 倍。

**1.1.4 贝类通过碳酸盐泵固定的碳** 贝类生物通过直接吸收海水中的碳酸氢根(HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)形成碳酸钙(CaCO<sub>3</sub>)来固碳。其反应方程为:



可以看出,通过这一过程,每形成 1 mol CaCO<sub>3</sub>,就可以固定 1 mol 碳。贝类主要成分即为

$\text{CaCO}_3$ 。可以根据贝类壳的质量和贝壳中的总碳含量来估算其固碳量。

对养殖贝类和海区中自然分布的贝类通过碳酸钙泵固定的碳, 可以分别按如下方法计算:

根据 1998 年以来的渔业统计数据, 蛤、牡蛎和扇贝是黄海沿岸 3 省的主要养殖品种, 其产量占贝类总产量的 70% 以上。张继红等<sup>[27]</sup>测定了几种主要养殖贝类(栉孔扇贝、太平洋牡蛎和菲律宾蛤仔)干重与总湿重的比值(干壳重系数), 其平均值为 0.551 4; 而这些贝类的贝壳总碳含量平均为 11.45%<sup>[28]</sup>。养殖贝类通过碳酸钙泵固定的碳量等于当年养殖贝类的产量、养殖贝类的平均干壳重系数和贝壳中总碳的平均含量三者的乘积。2006 年黄海沿岸三省养殖贝类的产量为  $5.17 \times 10^6$  t, 则当年养殖贝类可固定  $3.27 \times 10^5$  t 碳。

根据中国 1998–2000 年黄海底栖生物调查的结果, 自然海区中的贝类全年平均生物量为  $4.28 \text{ g/m}^2$ <sup>[29]</sup>, 按海区自然生长贝类每年更新 10% 计算, 可得黄海自然分布贝类全年平均固碳量为  $1.03 \times 10^4$  t。

### 1.2 溶解泵作用(海–气界面的碳通量)

海洋持有的碳( $38\,000 \text{ Pg}$ )约比大气多 50 倍, 其中大部分是以碳酸盐( $\text{CO}_3^{2-}$ )和碳酸氢盐( $\text{HCO}_3^-$ )离子的形式存在。 $\text{CO}_2$ 在海水表面和大气圈之间交换的一个重要控制因子是 $\text{CO}_2$ 在海水与大气间的分压差, 而海水 $\text{CO}_2$ 分压的大小取决于植物光合作用、洋流涌升、温度、盐度和 pH 值等多种因素<sup>[30]</sup>。

综合植物和贝类的生物泵作用, 黄海海洋生态系统每年可固定碳量为  $7.04 \times 10^7 \text{ t/km}^2$  (浮游植物初级生产力取 1998–2000 年的值)。其中浮游植物初级生产以 98 % 的贡献率占主导地位, 大型海藻和养殖贝类固碳的贡献率分别为 0.56% 和 0.46%, 野生贝类的固碳贡献率仅为 0.02%<sup>[21]</sup>。到目前为止, 黄海沿岸的海水养殖对整个黄海海洋生态系统吸收碳的能力的影响极为有限。黄海浮游植物的初级生产是固碳的主导因素。从数量上看, 生物固碳的量是通过海–气界面物理固碳量

的 7.85 倍。从季节变化趋势上看, 生物泵作用的变化要滞后于 $\text{CO}_2$ 通量的变化。生物泵作用强度春、夏季高, 秋、冬季低。而 $\text{CO}_2$ 通量强度则春季较高, 夏、秋两季低, 冬季又回升到较高水平。

## 2 海洋的固碳能力及其变化

海洋储存了全球二氧化碳总量的 93%, 大约为  $40\,000 \text{ Pg}$ 。另外, 每年通过海洋循环的 $\text{CO}_2$ 量约为  $90 \text{ Pg}$ <sup>[15]</sup>; 海洋将大气中 30% 的碳捕获并移出。红树林、盐沼和海藻等海洋沿岸生态系统每年捕获的 $\text{CO}_2$ 量为  $8.7 \sim 16.5 \text{ Tg}$ , 约等于全球运输业碳年排放量( $37.0 \text{ Tg}$ )的一半。但是, 由于人为破坏和极度缺乏维护, 这些自然碳汇正在以越来越快的速度消失。由 UNEP、FAO、IOC 以及一些著名学者在南非国际海洋月上发布的《蓝碳: 健康海洋的固碳作用》<sup>[3]</sup>报告中比较客观、全面地反映了海洋生物碳汇的现状及其不断减少的趋势, 并呼吁世界各国立即采取行动, 维持和恢复“蓝色碳汇”(即海洋碳汇, 简称“蓝汇”), 保护海岸带生态系统的碳汇功能。

海洋碳汇及其赖以存在的生态系统正在以惊人的速度消失, 其消失的速度远远高于其他生态系统。最近的一项研究显示, 全球大约有 1/3 的海藻床已经消失了, 并且其消失的速度正在逐年增加: 在 20 世纪 70 年代, 海藻床消失的速度是  $0.9\%/a$ , 而 2000 年之后则高达  $7\%/a$ <sup>[31]</sup>。全球大约有 25% 的盐沼也消失了<sup>[32]</sup>, 其每年消失的速率是  $1\% \sim 2\%$ <sup>[33]</sup>。Valiela 等<sup>[34]</sup>估计, 1940 年以来, 全球有大约 35% 的红树林已经消失, 而东南亚地区有 90% 的红树林消失了; 目前红树林每年消失的速率是  $1\% \sim 3\%$ 。综上所述, 全球目前每年平均有  $2\% \sim 7\%$  的“蓝汇”消失, 是其 50 年前消失速率的 7 倍。海洋植物群落, 亦即“蓝汇”, 正在遭受最为严重的生态威胁, 它正在全球范围内以高于热带雨林 2~15 倍的速率消失<sup>[35]</sup>。“蓝汇”的消失不仅意味着生物多样性和海岸带生态环境受到威胁, 还意味着自然碳汇的丧失, 从而削弱了生物圈消除人类排放的 $\text{CO}_2$ 的能力。因此, 保护海

洋“蓝汇”、维护生态平衡,就成为了沿海国家应对气候变化的关键措施。

### 3 改善“蓝汇”固碳能力的措施

沿海水域只占全球海洋总面积的 7%。然而,如珊瑚礁这些生态系统的生产力与固碳能力却很高,因而在这个狭小的地区形成了世界上主要的渔场,提供世界渔业产量的大约 50%。它们为近 30 亿人提供重要的营养,为世界上最不发达国家的 4 亿人民提供了 50% 的动物蛋白质和矿物质。在沿海地区,植物群落所形成的“蓝汇”是最主要的生产力,为人类社会提供了广泛的服务,包括为各种动物提供索饵场和繁育场、降低沿海污染、保护海岸免受侵蚀和缓冲极端天气的影响等。

沿海生态系统的服务价值估计已超过 25 万亿美元/年,是所有生态系统中经济价值最高的。但是,这些生态系统中的大部分已经退化,这不仅是由于不可持续性地开发利用自然资源,还是因为流域、海岸带发展规划不合理,大规模围填海等海岸工程建设以及废物和垃圾的随意丢弃等。只有通过完善管理机制,开展综合治理,全面协调地保护和恢复沿海地区的生态服务功能,才能维持“蓝汇”生态系统的存在与发展。具体措施应该包括控制入海污染物和海水富营养化、大力发展以藻类为主的清洁海水养殖业、推广和完善以建立海藻礁和海草场为主的生态修复和资源增殖技术。这样的一些做法,不仅有助于恢复“蓝汇”,而且还将在改善沿海居民健康、提高渔业劳动生产率和保障食物安全生产等方面取得成效。

### 4 强化和恢复海洋蓝色碳汇的服务功能

人们正越来越认识到自然生态系统服务功能的重要性,因为它是延缓气候变化、保障人类福利、保证经济可持续发展的重要手段<sup>[36]</sup>。“蓝汇”是天然海洋碳库的重要组成部分。20 世纪 40 年代以来,随着各种海岸带植物群落的消失,“蓝汇”的固碳能力可能已经大大降低了。在极端天气状况愈演愈烈、对人类生产和生活的影响越来越严重的今天,世界各国都应该把恢复“蓝汇”

作为当前应对气候变化的基本策略之一,大力开展海岸带植物群落修复行动。在开展这些行动的过程中,应该把生态系统水平的管理作为核心思想,把恢复“蓝汇”与恢复生态系统的服务功能相结合,兼顾食品安全、居民福利和海岸带的可持续开发<sup>[3]</sup>。

大量证据表明,扭转海岸带植被退化的趋势和恢复“蓝汇”能大大改善全球海岸带环境的生态状况,恢复沿岸生态系统的重要服务功能,如提供高溶氧海水、作为动物保育场、帮助恢复野生鱼类种群或者保护海岸线免受风暴和极端气候的影响等<sup>[37-38]</sup>。同时,通过避免海岸带植物群落的进一步退化,还可以重建一个重要的自然碳汇,从而减少 CO<sub>2</sub> 排放和延缓气候变化。

因为“蓝汇”广布于除南极洲之外的世界各地,所以拥有广阔沿岸水域的沿海国家和地区,如中国、印度、东南亚、黑海、西非、加勒比地区、地中海和俄罗斯等地,可以探索通过保护和修复“蓝汇”来实现 CO<sub>2</sub> 减排和恢复自然资源。与现有的重建热带雨林政策相比,扩大“蓝汇”具有更大的优越性,因为它是一个双赢策略,它能帮助各国履行联合国框架下的生物多样性和气候变化公约。比如,中国正在履行的《国家湿地保护公约行动计划》要求每年增加碳捕获量 6.57 Gg<sup>[39]</sup>。Andrews 等<sup>[40]</sup>通过计算证明,如果英国把 26 km<sup>2</sup> 的围填海区域还原为潮间带海区,则每年可以固碳 800 t。扩大“蓝汇”可能需要采取如下一些具体步骤:

第一步是保护重要的“蓝汇”栖息地,这在欧美一些国家已经开始实施。主要措施是依法制止破坏“蓝汇”的一切活动,包括围填海、砍伐红树林、农田过量施肥以及城市有机污染物的排放、砍伐森林造成的水土流失、过渡捕捞和海岸带开发导致的岸线变更等<sup>[41-42]</sup>。同时,对于如何维护这些生态系统健康和保护其功能,也有一些“蓝汇”管理的良好操作规范可供参考<sup>[43-45]</sup>。

第二步是大规模修复已经丧失的“蓝汇”栖息地,这些消失的“蓝汇”区域的面积可能与现存的“蓝汇”区域面积相当<sup>[31,42]</sup>。在一些国家,红

树林的大规模修复计划已经取得了成功; 其中最大的项目可能是越南湄公河三角洲的红树林修复计划。这片区域曾在 20 世纪 70 年代因种植柑橘而被彻底毁坏, 但现在已得到恢复<sup>[46]</sup>。中国广西山口红树林保护区经过十多年的保护和恢复, 现已扩大 12%, 面积达到约 4 000 hm<sup>2</sup>; 目前该保护区已加入联合国教科文组织世界生物圈保护网络, 并被列入国际重要湿地。盐沼的恢复也是可行的, 并且在欧洲和美国已经大规模开展<sup>[47]</sup>。

海藻床的恢复则比较困难。因为需要在水下移植或种植海藻, 所以需要一些特殊的技术, 并且需要较高的费用。这也限制了海藻床恢复项目的规模和成效。已经恢复完成的海藻床往往只有几公顷大小, 而数量也较少。但海藻床修复具有战略意义, 即便是小规模修复工作也有可能促进大片藻床的自然恢复。不过, 如果不采取一些辅助措施, 如减轻环境压力等, 藻床的修复将非常缓慢<sup>[48]</sup>。从长期效果来看, 海藻床向四周蔓延生长的能力非常强, 所以即便是很小的修复努力都可能收到意想不到的效果。

每个海洋生态系统的固碳能力都不尽相同, 也并非所有的“蓝汇”都同样有效。按单位面积计算, 盐沼的固碳速率最高, 其次是红树林和海藻。从目前所了解的情况看, “蓝汇”生态系统的固碳效能取决于是否具有较高的生物量和生产力, 亦即植物是否能生产过量的有机碳<sup>[49]</sup>; 以及它们所处的地理位置, 是否能截留陆源营养物质用于自身的过量生长, 进而实现较高的碳储存速率<sup>[50]</sup>。修复“蓝汇”的计划必须集中在那些具有较高碳捕获能力的种类上; 同时还要充分考虑上述种种因素, 以综合开发整个生态系统的碳汇潜力。

迄今为止, 保护海岸带植被和保护关键种类的植物栖息地始终是海岸生态保护计划的主要目的, 而大多数“蓝汇”的修复都是作为附带结果<sup>[38,47,51]</sup>。今后应该从生态、社会和经济效益上全面评价“蓝汇”修复的意义, 并采取更有针对性的措施。

## 5 海水贝藻养殖——有待拓展的蓝色碳汇

海洋占地球表面 70%以上, 是地球上最大、

最活跃的碳汇。海洋吸收阳光的比例比土地多得多, 特别是在土地稀缺的热带和亚热带。对于水产养殖工作者而言, 海洋是广袤的、尚待开垦的处女地, 拥有充足的阳光、空气和水。近年来, 水产养殖迅猛发展, 海水养殖业生产的“蓝色食物”正在以指数方式增长。

FAO(2009)<sup>[52]</sup>的统计数字表明, 水产养殖已经超过捕捞渔业成为水产品的重要来源。从 20 世纪 50 年代初年产量不到 100 万 t 发展到 2006 年的 5 170 万 t, 已经增长了 60 倍; 产值达到 788 亿美元, 年增长率近 7%。2004 至 2006 年间世界水产养殖产量年增长率为 6.1%, 产值增长为 11.0%。此外, 水产养殖直接或间接地解决了世界上千百万人的就业。最近几十年, 渔业从业人数的增加主要来自水产养殖业的发展。2006 年, 约有 900 万人从事水产养殖, 其中 94%在亚洲。水产养殖尤其是发展中国家的重要食物和经济来源; 全球 91.5%的水产品是在亚太地区出产的。

2006 年全球海藻养殖产量约为 1404 万 t, 价值约 70 亿美元, 其中的 99.8%来自亚太地区, 特别是中国、日本和韩国。中国养殖大型经济藻类产量为 1 090 万 t(湿重), 占全球养殖产量的 72%<sup>[52]</sup>; 以中国养殖海藻每年固碳量 0.4 Tg<sup>[22]</sup>计算, 则全球藻类养殖固碳量约为 0.56 Tg/a。这个数量占整个海洋碳汇的比例, 尤其是占海洋“蓝汇”的比例还很低。今后应该大力发展海藻养殖业, 使碳汇渔业在人类减排 CO<sub>2</sub> 和应对气候变化的努力中发挥更大的作用。

大型海藻的筏式养殖目前已经有比较成熟的技术, 而且养殖范围可以拓展到离岸深水区。海藻不仅是食物, 也是肥料、动物饲料的主要成分和生产藻胶的原材料。此外, 它也可以成为生物燃料。与野生海藻不同的是, 大量收获养殖海藻用于生物能源不会对大气 CO<sub>2</sub> 浓度造成明显的影响, 而且也不必担心对海岸带生物群落造成破坏。生物燃料源于光合作用, 基本上是碳中性的, 因为它们燃烧释放的碳都是它们从大气中吸收的碳。

养殖贝类也能从海水中移出大量的碳, 并利用贝壳形成较为持久的碳汇。以 2002 年中国养殖

贝类总产量 840 万 t 计算, 通过收获养殖贝类从海水中移出的总碳量约为 0.86 Tg/a, 其中, 贝壳中的碳含量约为 0.67 Tg<sup>[27]</sup>; 据此计算, 2006 年全球贝类养殖产量为 1 300 多万 t, 则其固碳总量为 1.36 Tg/a。

1999 年到 2008 年间, 中国海水贝藻养殖每年从水体中移出的碳量为 1.0~1.37 Tg, 相当于每年移出 CO<sub>2</sub> 4.4 Tg; 10 年合计移出约 44 Tg CO<sub>2</sub>。如果按照林业使用碳的算法计量, 中国海水贝藻养殖每年固定 CO<sub>2</sub> 的量相当于造林 500 000 hm<sup>2</sup><sup>[53]</sup>。可见, 以贝藻养殖为代表的渔业碳汇的固碳潜力已经显现, 并将随着海水养殖技术的进步和产业的发展不断扩大其影响与贡献。

综上所述, 全球目前化石燃料燃烧、热带林破坏等因素导致的 CO<sub>2</sub> 释放总量是 7.2~10.0 Pg(C)/a<sup>[36]</sup>。其中的 2.0~3.4 Pg(C)/a 进入大气层<sup>[54]</sup>, 2.0~2.2 Pg(C)/a 被海洋吸收<sup>[3]</sup>, 陆地生物圈与大气圈之间的碳循环处于平衡状态。通过保护、修复和强化管理措施, 在全球范围内恢复海洋“蓝汇”, 将增加固碳量 450 Tg(C)/a, 相当于 10% 的必需减排量(即为避免气候急剧变化而需要减少的排放量)<sup>[3]</sup>; 将这些海洋“蓝汇”与通过减少砍伐森林而获得的“绿色碳汇”相结合, 则可以提供高达 25% 的必需减排量。而从渔业和水产的角度看, 进一步发展贝藻养殖和增殖渔业, 通过渔业生产修复和增加海洋碳汇则具有重要的战略意义。

#### 参考文献:

- [1] Melillo J M, Callaghan T V, Woodward F I. Effects on ecosystems[M]//Houghton J T, Jenkins G J, Ephraums J J. Climate change: the IPCC scientific assessment. Cambridge: Cambridge University Press, 1990: 283–310.
- [2] IPCC. Climate Change 2007: The physical science basis[M]//Solomon S, Qin D, Manning M, et al. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 996.
- [3] Nellemann C, Corcoran E, Duarte C M, et al. Blue Carbon[R/OL]. A rapid response assessment. united nations environment programme, GRID-Arendal, 2009. <http://www.grida.no>.
- [4] Chen C A, Borges A V. Reconciling opposing views on carbon cycling in the coastal ocean: Continental shelves as sinks and near-shore ecosystems as sources of atmospheric CO<sub>2</sub> [J]. Deep-Sea Res II, 2009, 56: 578–590.
- [5] Drange H. A 3-dimensional isopycnal coordinate model of the seasonal cycling of carbon and nitrogen in the atlantic ocean[J]. Phys Chem Earth, 1996, 21 (5-6): 503–509.
- [6] Riebesell U, Zondervan I, Rost B. Reduced calcification in marine planktonic response to increased atmospheric CO<sub>2</sub>[J]. Nature, 2000, 407:364–367.
- [7] 陈泮勤. 地球系统碳循环[M]. 北京:科学出版社, 2004: 17–19.
- [8] 宋金明, 徐永福, 胡维平, 等. 中国近海与湖泊碳的生物地球化学[M]. 北京:科学出版社, 2008.
- [9] Sogin M L, Morrison H G, Huber J A, et al. Microbial diversity in the deep sea and the underexplored “rare biosphere” [J/OL]. PNAS, 2006 103(32): 12115–12120. [www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0605127103](http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0605127103)
- [10] Suttle C A. Marine viruses - major players in the global ecosystem[J]. Nat Rev Microbiol, 2007, 5: 801–812.
- [11] Pomeroy L R, Williams P J, Azam F, et al. The microbial loop. In a sea of microbes[J] Oceanography, 2007, 20(2): 28.
- [12] Wigginton N. Critical zone blog: Viruses aplenty?[Z/OL]. Nature Network, 2008[2010-03-27] <http://network.nature.com/people/wigginton/blog/2008/02/06/viruses-aplenty>.
- [13] Hoyle B D, Robinson R. Microbes in the ocean[M/OL]. Water: Science and Issues, 2003 [2010-03]. [http://findarticles.com/p/articles/mi\\_gx5224/is\\_2003/ai\\_n19143480](http://findarticles.com/p/articles/mi_gx5224/is_2003/ai_n19143480).
- [14] Beja O, Spudich E N, Spudich J L, et al. Proteorhodopsin phototrophy in the ocean[J]. Nature, 2001, 411:786–789.
- [15] González J M, Fernandez-Gomez B, Fendandez-Guerra A, et al. Genome analysis of the proteorhodopsin-containing marine bacterium *Polaribacter* sp. MED152 (Flavobacteria): A tale of two environments[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2008, 105: 8724–8729.
- [16] Bishop J K B, Wood T J. Year-round observations of carbon biomass and flux variability in the Southern Ocean[J]. Global Biogeochem Cycles, 2009, 23: 3206–3216.
- [17] Seiter K, Hensen C, Zabel M. Benthic carbon mineralization on a global scale[J]. Global Biogeochem Cycles, 2005, 19: 3173
- [18] 朱明远, 毛兴华, 吕瑞华, 等. 黄渤海区的叶绿素 a 和初级生产力[J]. 黄渤海海洋, 1993, 11(3): 38–51.

- [19] 金显仕, 赵宪勇, 孟田湘, 等. 黄、渤海生物资源与栖息环境[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [20] 中国科学院《中国自然地理》编委会. 中国自然地理—海洋地理[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [21] 王其翔. 黄海海洋生态系统服务评估[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
- [22] 宋金明, 李学刚, 袁华茂, 等. 中国近海生物固碳强度与潜力[J]. 生态学报, 2008, 28(2): 551–558.
- [23] Duarte C M, Chiscano C L. Seagrass biomass and production: A reassessment[J]. Aquat Bot, 1999, 65: 159–174.
- [24] Mateo M A, Romero J, Pérez M, et al. Dynamics of millenary organic deposits resulting from the growth of the Mediterranean seagrass *Posidonia oceanica*[J]. Estuar Coastal Shelf Sci, 1997, 44: 103–110.
- [25] Duarte C M, Middelburg J, Caraco N. Major role of marine vegetation on the oceanic carbon cycle[J]. Biogeosciences, 2005, 2: 1–8.
- [26] 张朝晖, 周骏, 吕吉斌, 等. 海洋生态系统服务的内涵与特点[J]. 海洋环境科学, 2007, 26(3): 259–263.
- [27] 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): 359–365.
- [28] 周毅, 杨红生. 烟台四十里湾浅海养殖生物及附着生物的化学组成, 有机净生产量及其生态效应[J]. 水产学报, 2002, 26(1): 21–27.
- [29] 李荣冠. 中国海陆架及邻近海域大型底栖生物[M]. 北京: 海洋出版社, 2003.
- [30] 严国安, 刘永定. 水生生态系统的碳循环及对大气CO<sub>2</sub>的汇[J]. 生态学报, 2001, 21(5): 827–833.
- [31] Waycott M, Duarte C M, Carruthers T J B, et al. Accelerating loss of seagrasses across the globe threatens coastal ecosystems[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2009, 106: 12377–12381.
- [32] Bridgman S D, Megonigal J P, Keller J K, et al. The carbon balance of North American wetlands[J]. Wetlands, 2006, 26: 889–916.
- [33] Duarte C M, Dennison W C, Orth R J W, et al. The charisma of coastal ecosystems: addressing the imbalance[J]. Estuaries Coasts, 2008, 31(2): 233–238.
- [34] Valiela I, Bowen J L, Cork J K. Mangrove forests: One of the world's threatened major tropical environments[J]. Bioscience, 2001, 51: 807–815.
- [35] Achard F, Eva H D, Stibig H J, et al. Determination of deforestation rates of the World's Humid Tropical Forests[J]. Science, 2002, 297: 999–1002.
- [36] Trumper K, Bertzky M, Dickson B, et al. The Natural Fix? The role of ecosystems in climate mitigation[R/OL]//A UNEP rapid response assessment. United Nations Environment Programme, UNEPWCMC, Cambridge, UK, 2009. [http://www.unep.org/pdf/BioseqRRA\\_scr.pdf](http://www.unep.org/pdf/BioseqRRA_scr.pdf)
- [37] Hemminga M A, Duarte C M. Seagrass Ecology[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [38] Danielsen F, Sørensen M K, Olwig M F, et al. The Asian tsunami: A protective role for coastal vegetation[J]. Science, 2005, 310: 643.
- [39] Xiaonana D, Xiaoke W, Lua F, et al. Primary evaluation of carbon sequestration potential of wetlands in China[J]. Acta Ecol Sin, 2008, 28: 463–469.
- [40] Andrews J E, Samways G, Shimmield G B. Historical storage budgets of organic carbon, nutrient and contaminant elements in saltmarsh sediments: Biogeochemical context for managed realignment, Humber Estuary, UK[J]. Sci Total Environ, 2008, 405: 1–13.
- [41] Duarte C M. The future of seagrass meadows[J]. Environ Conserv, 2002, 29: 192–206.
- [42] Duarte C M. Global loss of coastal habitats: Rates, causes and consequences[M/OL]. Madrid: FBBVA, 2009: 181 (<http://www.fbbva>).
- [43] Borum J, Duarte C M, Krause-Jensen D. European seagrasses: an introduction to monitoring and management[R]. Copenhagen: The M&MS project, 2004: 95.
- [44] Hamilton L S, Snedaker S C. Handbook for mangrove area management[M]. Hawaii, USA: East-West Environment and Policy Institute, 1984: 123.
- [45] Melana D M, Atchue J, Yao III C E, et al. Mangrove Management Handbook[R]. Cebu City, The Philippines: Department of Environment and Natural Resources, Manila, Philippines, Coastal Resource Project, 2000: 96.
- [46] Arnaud-Haond S, Duarte C M, Teixeira S, et al. Genetic recolonization of mangrove: genetic diversity still increasing in the Mekong Delta 30 years after Agent Orange[J]. Mar Ecol Prog Ser, 2009, 390: 129–135.
- [47] Boorman L, Hazelden J. Salt marsh creation and management for coastal defence[M]//Healy M G, Doody J P. Directions in European coastal management. John Wiley & Sons, 1995: 175–183.
- [48] Duarte C M, Fourqurean J W, Krause-Jensen D, et al. Dynamics of seagrass stability and change[M]//Larkum A W D, Orth R J, Duarte C M. Seagrasses: Biology, Ecology and Conservation. London: Springer, 2005: 271–294.

- [49] Duarte C M, Cebrián J. The fate of marine autotrophic production[J]. *Limnol Oceanogr*, 1996,41: 1758–1766.
- [50] Bouillon S, Borges A V, Castañeda-Moya E, et al. Mangrove production and carbon sinks: A revision of global budget estimates[J]. *Global Biogeochem Cycles*, 2008, 22:3052–3063.
- [51] Fonseca M S, Julius B E, Kenworthy W J. Integrating biology and economics in seagrass restoration: How much is enough and why?[J]. *Ecol Eng*, 2000, 15: 227–237.
- [52] FAO. The state of world fisheries and aquaculture-2008[R]. Rome: FAO Fisheries and Aquaculture Department, 2009.
- [53] 唐启升. 发展碳汇渔业 抢占蓝色低碳经济的技术高地[N]. *科学时报*, 2010–07–15.
- [54] Houghton R A. 2007. Balancing the global carbon budget[J]. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 35: 313–347.

## Review on worldwide study of ocean biological carbon sink

LIU Hui, TANG Qisheng

Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China

**Abstract:** Ocean is the biggest carbon sink in the world. The total carbon load of the ocean is  $39 \times 10^{12}$  t, which is 93% of total global carbon load, and about 53 times of carbon load of the atmosphere. Carbon in the ocean will either join in the biogeochemical cycle again, or be preserved for long periods; while some of the carbon will be stored in the seabed forever. According to the Blue Carbon report by UN, about 55% global biological carbon or green carbon capture is accomplished by marine organisms. These marine organisms include phytoplankton, bacteria, seaweeds, salt marshes and mangroves. Marine plants or flora have high capacity and efficiency for carbon sequestration. The findings on marine biological carbon sink by worldwide studies are reviewed in this paper. Major mechanisms governing the marine biological carbon sink are described, along with its present status and approaches for its restoration. Additionally, the function of seaweed and bivalves mariculture as components of fisheries carbon sink is evaluated.

**Key words:** carbon sink; marine organism; fishery

**Corresponding author:** TANG Qisheng. Academician of Chinese Academy of Engineering.

E-mail: tangqs@public.qd.sd.cn