

doi: 10.3969/j.issn.1673-2227.2010.06.015

· 综述 ·

海洋碳汇研究进展及南海碳汇渔业发展方向探讨

李纯厚, 齐占会, 黄洪辉, 刘永, 孔啸兰, 肖雅元

(农业部海水养殖生态与质量安全重点开放实验室, 广东省渔业生态环境重点实验室,
中国水产科学研究院南海水产研究所, 广东 广州, 510300)

摘要: 二氧化碳 (CO₂) 是温室气体的主要成分, 近代工业化的迅速发展导致碳的排放量不断增长, 自 2005 年 2 月 16 日《京都议定书》正式生效以来, 节能减排、碳“源”、碳“汇”等概念越来越受到关注。海洋占地球面积的 70% 以上, 是最大的“碳库”, 约占全球碳总量的 93%, 约为大气的 50 倍。海洋的固碳机制主要包括碳酸盐体系驱动的“溶解度泵”和浮游生物驱动的“生物泵”过程, 这些过程对大气 CO₂ 的浓度和全球碳循环的系统过程都有重要的影响。同时, 近海由于受人类活动的显著影响, 尤其是近岸的渔业活动, 对碳循环和海洋增汇有着重要的影响。文章对主要的碳源和碳汇以及海洋固碳机制研究进展进行了综述, 并探讨了南海碳汇渔业发展的重点研究方向。

关键词: 碳汇; 碳源; 固碳; 碳汇渔业; 南海

中图分类号: F 307.4

文献标志码: A

文章编号: 1673-2227-(2010)06-0081-06

Review on marine carbon sink and development of carbon sink fisheries in South China Sea

LI Chunhou, QI Zhanhui, HUANG Honghui, LIU Yong, KONG Xiaolan, XIAO Yayuan

(Key Lab. of Mariculture Ecology and Quality Control, Ministry of Agriculture; Guangdong Provincial Key Laboratory of Fishery Ecology and Environment; South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China)

Abstract: Carbon dioxide (CO₂), a main component of greenhouse gases, whose discharge is continually increasing with the development of modern industrialization. More and more attention has been drawn to the "energy-saving", "ejection-decreasing", carbon source and carbon sink, as the Kyoto Protocol came into force on Feb 16, 2005. The ocean, which covers more than 70% of the earth, is the biggest carbon sink, accounting for 93% of the total carbon in the earth, 50 times as that of atmosphere. The processes of solubility pump (SP) and biological pump (BP) driven by carbonate systems or planktons are important carbon fixation mechanisms in ocean. The concentration and global circulation of CO₂ are significantly affected by these processes. The coastal waters are significantly influenced by human activities, especially the mariculture activities greatly affect the coastal carbon cycling and carbon sink capacity. This paper reviews the carbon source, carbon sink and ocean-carbon-fixation mechanisms, and discusses the development of carbon sink fisheries in South China Sea.

收稿日期: 2010-08-31; 修回日期: 2010-09-22

资助项目: 广东省重大科技计划项目 (2009B030600002); 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) 资助项目 (2007ZD07); 广东省科技计划项目 (200636502003, 2006B60202026, 2007A032600004); 广东省海洋渔业科技推广专项项目 (A200899J01)

作者简介: 李纯厚 (1963-), 男, 研究员, 从事渔业生态保护研究。E-mail: seslch@vip.163.com

Key words: carbon sink; carbon source; carbon fixation; carbon sink fisheries; South China Sea

1 海洋碳源与碳汇的研究现状

1.1 碳源、碳汇的概念

联合国气候变化框架公约 (United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC) 将温室气体“源”定义为任何向大气中释放产生温室气体二氧化碳 (CO₂) 和甲烷 (CH₄) 等、气溶胶或其前体的过程、活动或机制。温室气体“汇”为从大气中移走温室气体、气溶胶或其前体的过程、活动或机制。全球碳循环的源与汇是以大气圈为参照系, 以从大气中输出或向大气中输入碳 (C) 为标准来确定。

1.2 全球主要碳源

1) 矿物燃料燃烧

矿物燃料, 亦称化石燃料, 包括煤炭、石油和天然气等。全球工业化的迅速发展导致 C 的排放量不断增长, 20 世纪 80 年代全球由矿物燃料燃烧导致的 CO₂ 平均排放量 (C) 约为 5.4 Gt·a⁻¹ (1 Gt = 10⁹ t), 90 年代增加到约 6.3 Gt·a⁻¹[11], 而 2000~2005 年则达到了 7.2 Gt·a⁻¹[2]

2) 土地利用变化

土地利用变化作为碳源, 主要是指土地利用方式改变所引起的 C 储量减少或 C 排放量增加, 即陆地生态系统的净 CO₂ 排放量。目前, 森林向牧场或农田的转换是最主要的土地利用变化形式。在全球范围内主要考虑热带雨林的砍伐和燃烧, 每年砍伐的原始森林面积约 7.5 × 10⁴ km², 次生林约 1.45 × 10⁵ km²[3]。当森林被砍伐时, 大部分地上的生物量被燃烧, 同时 C 释放到大气。过去 150 年中, 由自然系统向人工管理系统的转换已经导致了大约相当于同期矿物燃料燃烧向大气释放的 CO₂ 净通量。目前全球土地利用变化释放的 CO₂ 量约为矿物燃料燃烧释放量的 31.5% [4]。最新的分析表明, 1850~2000 年各种类型的土地利用变化 (主要是森林的破坏) 导致的 CO₂ 净排放量 (C), 全球为 156 Gt。中国在 1980~1990 年因土地利用变化导致的 CO₂ 平均排放量 (C) 为 0.01 Gt·a⁻¹, 而在 1990~2000 年平均排放量增长为 0.03 Gt·a⁻¹[5]。

3) 生物呼吸作用

大气中的 CO₂ 约 7 000 Gt, 每年约有 300 Gt 被陆地上的绿色植物通过光合作用固定到有机物中, 并在食物链中传递, 异养生物的呼吸作用又把固定在有机物中的 C 最终以 CO₂ 的形式重新释放到大气中。

1.3 海洋的碳汇能力

海洋系统是地球上最大的碳汇, 整个海洋含有的总碳量达到 3.9 × 10¹³ t, 占全球总碳量的 93%, 约为大气的 50 多倍。自工业革命以来, 由于人类活动的影响, CO₂ 的浓度

显著增加[6]。目前, 人类每年排入大气中的 CO₂ (C) 为 5.5 Gt, 有约 2.0 Gt 被海洋吸收, 占总排放量的 35%, 而陆地吸收的仅 0.7 Gt [7,8]。

海洋中的 C 大部分是以碳酸盐 (CO₃²⁻) 和碳酸氢盐 (HCO₃⁻) 离子的形式存在。CO₂ 在海水表面和大气圈之间交换的一个重要控制因子是 CO₂ 在海水与大气间的分压差, 其中海水 CO₂ 分压的大小取决于如浮游植物光合作用、洋流涌升、温度、盐度等多种因素[9]。

大气圈-海洋间的碳通量每年约 74 Gt·a⁻¹, 许多学者对大气-海洋间的净碳通量, 即海洋对大气 CO₂ 的净汇进行了研究, 采用厢式模型 (box model, BM) 和普通环流模型 (general circulation model, GCM) 估算的海洋对大气的碳汇为 1.2~2.4 Gt·a⁻¹[10-12]。用环流模型模型预测计算出 2050 年海洋对大气 CO₂ 的吸收将达 5.5 Gt·a⁻¹[13]。由此可见, 海洋是一个仍具有巨大潜力的最为重要的碳汇。

除了海洋水体自身是巨大的碳汇外, 海洋生态系统中的各类生物也在其碳汇功能中起着巨大的作用, 拥有海洋碳汇功能的生物类群或生态系统主要包括浮游生物、大型藻类、贝类、红树林和珊瑚礁生态系统等。

1) 浮游生物

浮游植物和细菌等自养型浮游生物通过光合作用等机制, 将海水中溶解的无机碳转化为有机碳 (DOC), 经食物链传递后沉降到海底储存, 进而降低了海水 CO₂ 分压, 促进了大气 CO₂ 向海水扩散溶解。据估计, 能被海洋光合作用利用的总碳量约为 30~40 Gt·a⁻¹[14], 但这仅代表海洋光合作用的总碳汇, 其对大气的净汇还取决于 DOC 分解后的返回通量, 以及海洋生物呼吸作用产生的 CO₂ 等。有研究指出工业革命以前的大气圈与海洋处于碳循环的动态平衡, 其可溶性 DOC 的生产大约占海洋净初级生产力的 0.2%, 而现在 DOC 生产占海洋净初级生产力的比例已增加了约 25 倍, 在分解率保持不变的前提下, DOC 增量约 2 Gt·a⁻¹, 这与土地利用释放的碳量相当, 可见浮游生物在海洋碳汇中起着十分重要的作用[15]。

2) 贝类和大型海藻

滤食性贝类具有强大的滤水能力, 可摄食同化海水中的颗粒有机碳, 形成碳酸钙躯壳 (贝壳) 固定 C, 间接减少海水 CO₂ 分压。贝类是产量最大的海水养殖品种, 产量达 1 400 多万 t, 可见其对海洋碳汇能力具有重要的影响。

与浮游植物固定的 CO₂ 原理相似, 大型海藻类通过光合作用将海水中的溶解无机碳转化为 DOC, 并且通过吸收海水中的可溶性营养盐而增加海水的碱度, 在双重作用下降低了海洋水体中的 CO₂ 分压, 从而促使大气碳汇中的 CO₂ 向海洋水体的扩散。目前, 大规模人工养殖的海藻已成为浅海生态系统的重要初级生产者, 具有很高的生产力。在

对全球海洋进行 3-D 模型分析指出, 自然生长条件下, 大型海藻对 CO_2 从大气汇向海洋汇扩散的增加量 (C) 约 $0.2 \text{ Gt}\cdot\text{a}^{-1}$, 而在人工养殖条件下, 保证充足的营养盐供应情况下, 如果不收获海藻, 其可对 CO_2 从大气向海洋的扩散增量 (C) 约 $0.44 \text{ Gt}\cdot\text{a}^{-1}$; 如果对大型海藻进行人为收获, C 则高达 $0.72 \text{ Gt}\cdot\text{a}^{-1}$ [16]。因此, 大型海藻可被视为是增加 CO_2 在大气-海洋界面通量的重要增长因素之一。

3) 红树林生态系统

红树林是典型的沿海湿地生态系统, 具有很高的固碳能力。全球沿海湿地的分布面积大约 $203 \times 10^3 \text{ km}^2$, 而沿海湿地 C 的积累速度约 $210 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 要远远高于泥炭湿地, 沿海湿地每年的固碳量为 $0.0426 \text{ Gt}\cdot\text{a}^{-1}$ [17]。高的 C 积累速率和低的 CH_4 排放量, 使沿海湿地对大气温室效应的抑制作用更加明显。全球分布的红树林湿地的面积 $1.81 \times 10^5 \text{ km}^2$, 是全球 CO_2 的重要吸收源之一 [18]。一方面, 红树林湿地通常分布在沉积性的海岸线, C 沉积速率比较快, 约 $2.9 \sim 7.9 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$; 另一方面, 红树林湿地的植物具有较高生产力, 并且地下根系周转较为缓慢 [19]。高沉积速率和低分解速率导致红树林湿地的固碳能力较高, 大约 60% 输入湿地生态系统的 C 都被固定下来, 固碳速率介于 $99.6 \sim 280.8 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 之间。作为一个潜在的碳汇, 全球的红树林生态系统中, 植物 C 库容量为 4.03 Gt, 其中的 70% 主要分布在纬度 $0^\circ \sim 10^\circ$ 的热带地区。推导到全球尺度上, 红树林生态系统的固碳能力 (C) 约 $0.18 \text{ Gt}\cdot\text{a}^{-1}$, 其中植物 $0.16 \text{ Gt}\cdot\text{a}^{-1}$, 土壤碳库 $0.02 \text{ Gt}\cdot\text{a}^{-1}$ [20]。

4) 珊瑚礁生态系统

珊瑚礁是海洋中生产力水平最高的生态系统之一, 其碳循环过程十分复杂, 受到 DOC 代谢 (光合作用和呼吸作用) 和无机碳代谢 (钙化和溶解) 过程的共同作用。珊瑚礁植物的光合作用保证了 DOC 的有效补充, 动物摄食及微生物降解等生物过程驱动了珊瑚礁区 DOC 高效循环, 只有很少部分 (不超过 7%) 的 DOC 进入到珊瑚骨骼孔隙或者被碳酸钙晶体包埋, 形成稳定的结构, 可保存数百年 [21]。全球珊瑚礁区沉积物中被包埋的 DOC (C) 约 $0.03 \text{ Gt}\cdot\text{a}^{-1}$ [22]。珊瑚礁区碳酸盐沉积是全球碳酸盐库的重要组成部分, 全球珊瑚礁区碳酸钙 (CaCO_3) 年累积量为 $0.084 \text{ Gt}\cdot\text{a}^{-1}$, 约占全球碳酸钙年累积量的 23% ~ 26%, 对大气 CO_2 浓度具有重要的影响 [23]。

2 海洋的固碳机制

目前已知的海洋固碳机制主要包括生物泵、物理泵 (溶解度泵) 和碳酸盐 (反向) 泵 (carbonate counter pump) 等 [24]。

2.1 生物泵 (biological pump, BP)

生物泵, 又称有机碳泵 (organic carbon pump), 是基

于生物介导的将 C 由表层向深海以及大洋底沉积环境沉降的过程, 由生产、消费、沉降和分解等一系列过程完成。生物在这个过程中起到一种“通道”的作用, 主要由浮游植物等自养生物吸收 CO_2 将无机碳转化为有机物, 经过物理混合、输送及重力沉降等过程进入沉积环境储存。例如, 浮游植物被滤食性贝类摄食形成碳酸钙躯壳 (贝壳), 产生“压载”效应, 增强了生物泵过程, 促进了 C 的沉降, 最终将 C 在沉积环境中矿化封存 [25, 26]。

“微型生物碳泵” (microbial carbon pump, MCP) 是一种重要的生物碳泵, 主要是微型生物利用溶解态的 DOC, 对其进行修饰、转化, 通过一系列物理化学过程作用形成惰性溶解 DOC, 长期储存在海洋中, 起到封存 C 的作用。由于溶解态有机物约占海洋总有机物的 89%, 因此, MCP 在海洋固碳中起到十分重要的作用。尤其在河口和浅海, 生物泵由于受到再悬浮的影响而严重削弱, 而海洋微食物环参与的 MCP 发挥着不可替代的作用 [27]。在南海某些海域, 微型和超微型的浮游生物贡献的初级生产力可达总量的 60% [28, 29]。由于 MCP 过程不存在化学平衡移动, 其具有不会导致海洋酸化的优点。

生物泵的效率并非是初级生产力的一个简单函数。尽管生物活动是其运转的前提, 但只有表层的 C 为植物和动物吸收, 并被输送到深海后, 该生物泵才是有效的。具体看来, 影响生物泵效率的因素主要有以下几个:

1) 营养盐的限制。在海洋的绝大部分海域, 生物泵效率受主要营养盐, 如 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 、 SiO_3^{2-} 的生物可利用性所调控。但在亚北极太平洋、赤道太平洋和南大洋, 主要营养盐很高而叶绿素很低, 这些区域大约占全球海洋面积的 30%, 现在已提出用铁 (Fe) 的可利用性、光水平和浮游动物的摄食等来解释这种现象。

2) Fe 的作用。海洋中许多区域的低 Fe 浓度对藻类的生长有限制作用。Fe 为藻类生理代谢所需, 供应不足会减缓细胞的生长 [30]。国际地圈生物圈计划 (IGBP) 正在印度洋实施向海水中释放 Fe 元素, 促进浮游植物生长, 达到吸收 CO_2 的目的。

3) 固氮作用。开阔大洋一般被认为是氮 (N) 限制的海域, 然而在一些极端情况下, 某些生物 (如蓝绿藻) 可以利用海水中用之不绝的氮气 (N_2) 作为 N 的来源, 如在亚热带大西洋和太平洋。固氮作用会提高初级生产力水平, 并增加 C 等生源要素向深海的输送通量。

4) 生态系统结构。不同海域、不同季节, 生态系统的结构和功能有很大不同, 对 C 向深海的输送也有明显差别。在沿岸、上升流海域和高纬度海域, 通常较大的藻类, 如硅藻、鞭毛藻等占优势, 其会被较大的浮游动物, 如桡足类、虾、鱼等摄食, 从而产生大的、快速沉降的颗粒物, 导致较大的 C 输出。在寡营养的大洋海域, 如亚热带大西洋、亚热带太平洋、高营养盐低叶绿素 (high-nutrient, low-

chlorophyll, HNLC) 区域等, 生物群体主要由小于 20 μm 的浮游植物占主导, 其被较小浮游动物所摄食, 颗粒 DOC 的输出就较小。

2.2 溶解度泵 (solubility pump, SP)

溶解度泵是由物理过程, 如热通量、涡动、扩散等为媒介的 C 的物理交换过程, 驱动力来自海洋缓慢的环流及冷水中 CO_2 溶解度高于温暖水体。在高纬度海域, 特别是北大西洋和南大洋, 冷的、密度较大的水团在沉降至海洋内部前吸收大气的 CO_2 , 为其他海域的上升流所平衡。上升海水到达海洋表层时变暖, CO_2 溶解度降低, 因而部分 CO_2 会释放回大气中, 但其综合效应是将大气 CO_2 泵入海洋内部。深度 (即混合层深度) 和涡度扩散系数是影响溶解度泵作用和 C 垂直扩散模式以及 C 的海气通量的 2 个关键参数。北大西洋、北太平洋等海域是“溶解度泵碳汇”发生作用的主要海域, 主要是由于湾流和北大西洋横穿流将温暖的表层水向北输送, 其冷却后从大气中吸收 CO_2 。南大洋是另一个重要的 CO_2 吸收区域, 那里同样存在寒冷表层水的沉降。

2.3 碳酸盐(反向)泵 (carbonate counter pump)

贝类、珊瑚虫和有孔虫等形成躯壳 (贝壳、珊瑚钙等) 的主要成分是碳酸钙。水体中 CO_2 的赋存形态很多, 如: CO_2 (气), H_2CO_3 , HCO_3^- , CO_3^{2-} 等, 且各种形式之间存在相互迁移转换。碳酸钙形成的方程式为 $\text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^- = \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$, 形成碳酸钙会吸收 C, 是碳的“汇”, 但同时这过程又会释放出 CO_2 , 形成碳的“源”^[31-33]。碳酸盐泵实质上是向大气净释放 CO_2 的, 生成 1 mol 碳酸钙最终会有 0.67 mol CO_2 释放到大气中去。这 2 个相反的过程可以决定钙化过程对海洋表层 CO_2 是“源”或“汇”, 通常用雨率 (rain ratio) (雨率 = $\text{PIC} / \text{POC} = \text{CaCO}_3 / \text{Corg}$), 即在输出真光层的生源颗粒物中无机碳和 DOC 的比率来表示。如果光合作用固碳大于净释放 CO_2 , 雨率高于 1.5, 才能看作碳汇。碳酸钙的沉积不仅仅是简单的将海洋中溶解无机碳结合到颗粒态碳酸钙中, 同时会降低水体的碱度而改变水体中溶解无机碳体系的平衡, 其保存与溶解影响大洋的酸碱度, 进而可能对全球大气浓度的变化起着重要作用^[34]。

3 南海碳汇渔业发展的重点研究方向

世界上渔业养殖活动主要集中在亚洲地区, 中国的养殖产量占全世界总产量的 70% 左右, 而其他欧洲、北美和日本等国家的渔业养殖产量不到 10%^[35]。由于国外很少从事贝藻等养殖活动, 其对于碳汇渔业的研究则较少。碳汇渔业是指通过渔业生产活动促进水生生物吸收水体中的 CO_2 , 并通过收获把这些 C 移出水体的过程和机制, 也被称为“可移出的碳汇”。这个过程和机制, 实际上提高了水体

吸收大气 CO_2 的能力^[36]。因此, 碳汇渔业不仅包括藻类和贝类等养殖生物通过光合作用和大量滤食浮游植物从海水中吸收 C 元素的过程和生产活动, 还包括以浮游生物和贝类、藻类为食的鱼类、头足类、甲壳类和棘皮动物等生物资源种类通过食物网机制和生长活动所使用的 C。虽然这些较高营养层次的生物可能同时又是碳源, 但其以海洋中的天然饵料为食, 在食物链的较低层大量消耗和使用了浮游植物, 对它们进行捕捞和收获, 实质上是从海洋中净移出了相当量的 C。根据中国贝藻等养殖水产品的产量以及贝藻的 C 含量计算, 2002 年近海的贝藻养殖活动从水体中移出的 C 约 $120 \times 10^4 \text{ t}$, 因此渔业养殖活动对海洋的碳循环具有显著的影响^[37]。

南海是中国面积最大的海, 据计算每年南海可吸收 C $1665 \times 10^4 \text{ t}$, 在海洋碳循环中发挥着重要作用^[38-40]。除海外, 近海由于受人类活动的显著影响、具有上升流与陆地边界流以及淡水的季节性大量输入等特征, 具有更高的初级生产力, 近海的海洋碳汇有着比大洋更为丰富的内涵。尤其是近岸的渔业活动, 对碳循环和海洋增汇有着重要的影响, 因此对近海渔业活动的增汇机理、碳汇渔业的模式和技术进行深入研究具有重要的意义。

3.1 外海渔业固碳技术

南海具有海域广阔、光热充足、生物多样性丰富等有利的自然环境条件, 相对于近海富营养化趋势的不断扩展, 占中国海域面积 60% 以上的外海海域一直处于贫营养水平, 水体终年层化、表层营养盐匮乏、由于受到营养元素限制而导致初级生产力低下, 与中西太平洋“暖池”洋区类似, 堪称“海洋沙漠”。如果能提供适量的 N、磷 (P)、Fe 等限制性元素 (海洋施肥), 则有可能提高初级生产力的水平, 减轻海洋上层酸化, 将贫瘠外海海域变成渔业产量丰富的高固碳区域, 提高中国渔业固碳能力^[41-45]。必须指出的是, 虽然陆地的农业施肥技术已经很完善, 但海洋施肥的技术和效果以及是否会对环境造成其他负面影响, 还需要尤其是在海区现场进行深入的试验研究。

3.2 近海养殖系统增汇技术

海水养殖是碳汇渔业的主体部分, 有望成为发展绿色的、低碳的战略性新兴产业, 对减排 CO_2 , 推动蓝色经济的发展等均具有重要的影响。基于生态系统水平 (ecosystem-based) 的多营养层次综合养殖 (integrated multi-trophic aquaculture, IMTA) 是一种高效、健康和可持续发展的海水养殖模式, 需要对其关键技术, 如养殖系统中物质和能量的循环过程, C、N、P 等重要生源要素的生物地球化学过程, 养殖生物尤其是滤食性贝类和大型藻类在浅海生态系统碳循环中的生态功能及其固碳潜力评估等进行深入的研究。

3.3 海洋牧场渔业低碳技术

海洋牧场是人为地在特定海域营造适合海洋生物生长

与繁衍的优良生境, 利用生物群体控制技术, 结合现代化管理技术, 建立可控海洋生态系统, 在保护与恢复自然生态系统的同时, 又使渔业资源得到增殖。开展海洋牧场技术开发与应用, 使传统渔业从“采捕型”转为服从人工控制管理的“放牧型”、“管理型”, 是实现资源养护与低碳渔业生产的可靠途径。大力建设海洋牧场, 通过增殖来增加海洋生物产量, 并通过海洋生物种类的增加和产量的提高, 丰富海洋生物多样性, 调节海洋生物食物链, 达到水生生物资源养护与渔业低碳生产的目的。

3.4 典型生态系统碳循环过程及固碳技术

红树林、珊瑚礁和海草床是具有高生产力和高生物多样性的生态系统, 是南海典型的生态系统类型。需要对对这些生态系统中C的流通循环途径进行研究, 例如, 从碎屑食物链和营养动力过程的角度, 分析生源要素的生物地化动力循环过程以及浮游生物、底栖生物、鱼类和甲壳类等生态系统群落结构等指标, 评价这些生态系统的固碳功能和潜力, 深入研究南海典型海洋生态系统的构建与保护技术, 以及提高固碳效率的人工调控技术。

参考文献:

- [1] HOUGHTON R A. Terrestrial carbon sinks; uncertain explanations [J]. *Biologist*, 2002, 49 (4): 155-160.
- [2] IPCC: 气候变化2007: 综合报告. 政府间气候变化专门委员会第四次评估报告第一、第二和第三工作组的报告 [R]. 日内瓦: IPCC, 2007: 104.
- [3] CHAPIN F S, MASTON P A, MCONEY H A. Principles of terrestrial ecosystem ecology [M]. New York: Springer-verlag Berlin Heidelberg, 2002.
- [4] MARLAND G, BODEN T A, ANDRES R J. Global, regional and national fossil fuel CO₂ emissions. In trends: a compendium of data on global change [M]. Oak Ridge, Tenn., U. S. A: Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U. S. Department of Energy, 2008.
- [5] HOUGHTON R A. Revised estimates of the annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use and land management 1850~2000 [J]. *Tellus*, 2003, 55 (2): 378-390.
- [6] KEELING C D, BACASTO W R B, BAINBRIDGE A E, et al. Atmospheric carbon dioxide variations at Mauna Loa Observatory, Hawaii [J]. *Tellus*, 1976, 28 (6): 538-551.
- [7] RIEBESELL U, SCHULZ K G, BELLERBY R G J, et al. Enhanced biological carbon consumption in a high CO₂ ocean [J]. *Nature*, 2007, 450 (7169): 545-548.
- [8] RATTAN L. Carbon sequestration [J]. *Philos Trans R Soc B*, 2008, 363: 815-830.
- [9] 严国安, 刘永定. 水生生态系统的碳循环及对大气CO₂的汇 [J]. *生态学报*, 2001, 21 (5): 827-833.
- [10] ORR J C. Accord between ocean models predicting uptake of anthropogenic CO₂ [J]. *Water Air Soil Poll*, 1993, 70 (1/4): 465-481.
- [11] GOUDRIAAN J. Modeling biosphere control of carbon fluxes between atmosphere, ocean, and land in view of climatic change [M] // BERGER A, SCHNEIDER S, DUPLESSY J C. *Climate and Geo-Sciences: A Challenge for Science in the 21st Century*. Dordrecht, Boston: Kluwer Academic, 1989: 481-499.
- [12] SIEGENTHALER U, JOOS F. Use of a simple model for studying the past 200 years reconstructed by deconvolution of ice core data [J]. *Tellus*, 1992, 39 (44): 104-154.
- [13] SARMIENTO J L, ORR J C, SIEGENTHALER U. A perturbation simulation of CO₂ uptake in an ocean general circulation model [J]. *J Geophys Res*, 1992, 97 (3): 3621-3645.
- [14] RITSCHARD R L. Marine algae as a CO₂ sink [J]. *Water Air Soil Poll*, 1992, 64 (1/2): 289-303.
- [15] GORSHKOV V G. Oceanic dissolved organic carbon in the main sink of atmospheric CO₂ [J]. *World Resource Rev*, 1997, 9 (2): 153-169.
- [16] ORR J C, SARMIENTO J L. Potential of marine macroalgae as a sink for CO₂: constraint from a 3-D general circulation model of the global ocean [J]. *Water Air Soil Poll*, 1992, 64 (1/2): 405-421.
- [17] CHMURA G L, ANISFELD S C, CAHOON D R, et al. Global carbon sequestration in tidal saline wetland soils [J]. *Global Biogeochem Cycles*, 2003, 17 (4): 1-22.
- [18] SPALDING M D, BLASCO F, FIELD C D. *World mangrove atlas* [M]. Okinawa, Japan: International Society for Mangrove Ecosystems, 1997: 176-178.
- [19] CHOI Y, WANF Y. Dynamics of carbon sequestration in a coastal wetland using radiocarbon measurements [J]. *Global Biogeochem Cycles*, 2004, 18 (GB4016): 4016-4017.
- [20] TWILEY R R, CHEN R H, HARGIS T. Carbon sinks in mangroves and their implications to carbon budget of tropical coastal ecosystems [J]. *Water Air Soil Poll*, 1992, 64 (1/2): 265-288.
- [21] INGALLS A E, LEE C. Preservation of organic matter in mound-forming coral skeletons [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2003, 67 (15): 2827-2841.
- [22] GROSSLAND C J, HATCHER B G, SMITH S V. Role of coral reefs in global ocean production [J]. *Coral Reefs*, 1991, 10 (2): 55-64.
- [23] SUZUKI A, KAWAHATA H. Reef water CO₂ system and carbon production of coral reefs: topographic control of system-level performance [Z]. *Global Environmental Change in the Ocean and Land*, 2004: 229-248.
- [24] POST W M, PENG T H, EMANUEL W R, et al. The global carbon cycle [J]. *Am Sci*, 1990, 78 (4): 310-326.
- [25] ARMSTRONG R A, LEE C, HEDGES J I, et al. A new, mechanistic model for organic carbon fluxes in the ocean based on the quantitative association of POC with ballast minerals [J]. *Deep Sea Res II: Topical Studies in Oceanography*, 2001, 49 (1/3): 219

- 236.
- [26] KLAAS C, ARCHER D E. Association of sinking organic matter with various types of mineral ballast in the deep sea: implications for the rain ratio [J]. *Global Biogeochem Cycles*, 2002, 16 (4): 1116 - 1130.
- [27] 宋金明. 海洋碳的源与汇 [J]. *海洋环境科学*, 2003, 22 (2): 75 - 80.
- [28] 洪华生, 丘书院, 阮五崎, 等. 闽南—台湾浅滩渔场上升流区生态系研究 [M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [29] 洪华生, 阮五崎, 黄邦钦, 等. 台湾海峡初级生产力及其调控机制 [M] // 中国海洋学文集 (7). 北京: 海洋出版社, 1997: 1 - 15.
- [30] MARTIN J, FITZWATER S, GORDON R. Iron deficiency limits phyto-plankton growth in Antarctic waters [J]. *Global Biogeochem Cycles*, 1990, 4 (1): 5 - 12.
- [31] BERGER W H. Increase of carbon dioxide in the atmosphere during deglaciation: the coral reef hypothesis [J]. *Naturwissenschaften*, 1982, 69 (2): 87 - 88.
- [32] FRANKIGNOULLE M, CANON C, GATTUSO J P. Marine calcification as a source of carbon dioxide: positive feedback of increasing atmospheric CO₂ [J]. *Limnol Oceanogr*, 1994, 39 (2): 458 - 462.
- [33] RIDGWELL A, ZONDERVAN I, HARGREAVES J C, et al. Assessing the potential long-term increase of oceanic fossil fuel CO₂ uptake due to CO₂-calcification feedback [J]. *Biogeosciences*, 2007, 4 (4): 481 - 492.
- [34] FRANKIGNOULLE M. A complete set of buffer factors for acidbase CO₂ system in seawater [J]. *J Mar Sys*, 1994, 5 (2): 111 - 118.
- [35] FAO. Food and Agricultural Organization Aquaculture Production Statistics 1988 - 1997 [R]. Rome: Food and Agricultural Organization, 1999.
- [36] 肖乐, 刘禹松. 碳汇渔业对发展低碳经济具有重要和实际意义碳汇渔业将成为新一轮渔业发展的驱动力——专访中国科学技术协会副主席, 中国工程院院士唐启升 [J]. *中国水产*, 2010 (8): 4 - 8.
- [37] 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.
- [38] 韩舞鹰, 林洪瑛, 蔡艳雅. 南海的碳通量研究 [J]. *海洋学报*, 1997, 19 (1): 50 - 54.
- [39] ZHAI Weidong, DAI Minhan, CAI Weijun, et al. The partial pressure of carbon dioxide and air-sea fluxes in the northern South China Sea in spring, summer and autumn [J]. *Mar Chem*, 2005, 96 (1): 87 - 97.
- [40] ZHAI Weidong, DAI Minhan, CAI Weijun, et al. High partial pressure of CO₂ and its maintaining mechanism in a subtropical estuary: the Pearl River estuary, China [J]. *Mar Chem*, 2005, 93 (1): 21 - 32.
- [41] HARRISON P J, HU M H, YANG Y P, et al. Phosphate limitation in estuarine and coastal waters of China [J]. *J Exp Mar Biol Ecol*, 1990, 140 (2): 79 - 87.
- [42] 林洪瑛, 韩舞鹰. 南沙群岛海域营养盐分布的研究 [J]. *海洋科学*, 2001, 25 (10): 12 - 14.
- [43] 王勇, 焦念志. 胶州湾浮游植物对营养盐添加的响应关系 [J]. *海洋科学*, 2002, 26 (4): 8 - 13.
- [44] 袁梁英. 南海北部营养盐结构特征 [D]. 厦门: 厦门大学, 2005.
- [45] 郑国侠, 宋金明, 孙云明, 等. 南海深海盆表层沉积物氮的地球化学特征与生态学功能 [J]. *海洋学报*, 2006, 28 (6): 44 - 52.