

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2011.00703

中国近海生态系统碳循环与生物固碳*

宋金明

中国科学院 海洋研究所, 山东 青岛 266071

摘要: 本文系统总结了近几年来中国近海海-气界面碳通量及控制因素、近海碳循环的关键过程以及近海生物固碳强度的研究进展, 提出了中国近海渔业碳汇过程研究应关注的主要科学问题。近海海-气界面碳通量过程、生物泵过程、颗粒物沉降与释放以及捕捞/养殖碳转移过程是中国近海生态系统碳循环的主要控制过程。中国近海在总体上是大气二氧化碳的汇, 年吸收 3 000 万~5 000 万 t 碳, 但在部分浅海海域如胶州湾、长江口等是大气二氧化碳的源; 中国近海浮游植物的年固碳量可达 6.39 亿 t, 春季和夏季浮游植物固碳占全年的 65.3%。南海浮游植物固碳达 4.16 亿 t, 为渤海、黄海和东海的 2 倍。渔业捕捞与海水养殖可明显增加海洋碳汇, 仅就近几年大型藻养殖而言, 每年可多固定 40 万 t 碳, 如果每年的养殖量增加 5%, 到 2020 年大型藻养殖可固定碳 93 万 t/年, 所以, 为增加渔业捕捞与海水养殖碳汇, 必须加强揭示渔业碳汇海域生态环境、建立渔业碳增汇强度评估方法以及明确渔业资源利用碳再生循环周期等研究。

关键词: 碳循环过程; 浮游植物; 固碳; 渔业捕捞与海水养殖碳汇; 中国近海

中图分类号: X17; F326 文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2011)03-0703-09

随着 2010 年哥本哈根气候会议的召开, 碳的减排又一次成为世界各国关注的热点。中国政府也提出到 2020 年中国单位国内生产总值二氧化碳排放比 2005 年下降 40%~45%的目标, 而要实现这一目标不外乎两种手段: 一是减少工业 CO₂ 排放量, 二是增加自然界对人为产生的 CO₂ 的吸收。海水中的碳约为大气中碳的 50 倍, 陆生植物碳库和大气碳库容量基本相当。虽然海洋初级生产者的含碳量不到陆生植物的 1/200, 但它们的固碳量基本相当, 即陆生植物的净初级生产力约 63×10^9 t(C)/a, 海洋初级生产力为 $(37 \sim 45) \times 10^9$ t(C)/a。可见, 海洋碳库在碳的全球生物地球化学循环中起着重要作用^[1]。

国际地圈生物圈计划(IGBP)的核心计划之一“全球海洋通量联合研究”(JGOFS)经过十余年的

研究, 认为海洋每年大约可从大气吸收人类排放 CO₂ 的 1/3, 近 20×10^8 t 碳。事实上这一结论是对大洋碳通量研究的结果, 没有考虑陆架边缘海对海洋碳循环的贡献。近海生态系统与深海大洋相比, 仅占全球海洋面积的 7%~8%, 其海水中储藏的碳只有 3.1×10^{11} t, 不到深海大洋的 1%, 但其中的初级生产力却占全球海洋系统中的 15%~30%, 有机碳埋藏更是占整个海洋碳埋藏量的 90%, 至少有 50%的颗粒无机碳也沉积于此。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 100 km 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。因此, 陆架边缘海域在全球碳循环中的作用不容忽视^[2-3]。

近海生物固碳主要通过浮游植物的初级生产

收稿日期: 2010-11-22; 修订日期: 2011-01-28.

基金项目: 国家 973 计划项目(2010CB951802); 中国科学院战略性先导科技专项课题(XDA05030402).

作者简介: 宋金明(1964-), 男, 研究员, 博士生导师. E-mail: jmsong@qdio.ac.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.

过程来实现,生物固碳速率除受控于初级生产力水平之外,还主要取决于生源颗粒物向真光层之外的传输,即海洋生物泵的强度和效率。根据对海-气 CO_2 交换的影响,生物泵分为 2 类,一种以真核微藻和蓝细菌等光合自养的浮游植物进行光合固碳形成有机物质;另一种以颗粒有机碳(POC)形式输入到海水深层。大多数输入的有机物质在海水次表层被再矿化为无机碳,只有一小部分被埋藏到沉积物中,这就是有机碳泵(海洋生物碳汇)。钙化浮游植物如颗石藻(*Gephyrocapsa oceanica*)外壳 CaCO_3 的沉降增加海水表层稳态 CO_2 浓度从而促进 CO_2 向大气的释放,这与上述过程正好相反,这就是“碳酸盐泵”(海洋生物碳源)。这 2 个过程的相对强度一定程度上决定了由生物调节的海-气 CO_2 通量^[4-10]。另外,近海养殖大型经济藻类的人为固碳在海洋生物固碳中也起一定作用,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。与海藻养殖前相比较,该海区相对明显缺碳,从而使大气中的 CO_2 向养殖海区转移,养殖海域的储碳能力增加。

近年来的研究表明,大部分陆架海域是大气 CO_2 的汇^[2-3],也有部分海域是大气 CO_2 的源^[11-17],但其强度有很大的不确定性。这主要是因为陆架边缘海受人为影响较大,尤其是在 1840 年以后,由河流输入海洋的营养物质及颗粒有机碳、溶解有机碳和溶解无机碳等明显增加,而且输入的有机质和营养盐大部分沉积于此;另一方面陆架海域的水深较浅,水动力条件比较复杂,二者的共同作用加剧了陆架边缘海碳循环的复杂性。中国拥有世界上最宽阔的陆架海域,中国近海(包括渤海、黄海、东海和南海)是中国海洋生产力较高,对中国社会、经济活动影响较大的海域,其碳源汇强度对中国人为产生 CO_2 吸收量的估算起着不可估量的作用。

本文系统总结了近几年来中国近海海-气界面碳通量及控制因素,近海碳循环的关键过程,

以及近海生物的固碳强度的研究进展,提出了中国近海渔业碳汇过程研究应关注的主要科学问题,这对深层次开展中国近海碳循环过程研究以及增汇技术措施研发具有重要的价值。

1 中国近海海-气界面碳通量及控制因素

海-气界面碳的迁移过程是海洋碳循环最重要的过程,因为水体中无论是生物固碳(生物泵)还是海水碳的溶解(溶解度泵)过程,最终都要通过海-气界面的碳通量来体现。

中国近海海-气界面碳通量研究的历史仅有 20 年的时间,20 世纪 90 年代初,东海少数几个站位测定的海水二氧化碳分压,是中国近海最早海-气界面碳通量研究的数据报道^[18]。其后,有一些零星的调查数据。2004 年,宋金明根据表层海水温度相关分析估算了渤黄东海海-气界面碳通量的季节变化与碳源汇强度^[2,9],相关结果见表 1。近几年,通过走航式表层海水二氧化碳分压测定仪获得了部分中国近海的海-气界面碳通量,实际有报道的数据海域包括南海北部、长江口、胶州湾、北黄海西北部等。其中,2009 年国家海洋局进行的北黄海西北部海-气界面碳通量调查最有代表性,共进行了 5 个航次的调查,获得了这一海域的海-气界面碳通量季节变化数据(图 1,表 2)^[19]。这一海域离岸较近、水深较浅,在年度上这一海域是大气二氧化碳的弱源。

北黄海西北部碳源/汇格局及强度在季节上存在较大差异,3 月份表现为大气 CO_2 的汇;5 月和 7 月均表现为大气 CO_2 的弱源;10 月由于气温降低、风速较大,其源强显著增大;整体而言 2009 年北黄海西北部是大气 CO_2 的弱源,其向大气年释放通量为 $5.78 \times 10^4 \text{ t}$ 碳。由于这一海域有黄海暖流和黄海冷水团等多种水团的作用,生物地球化学过程复杂多变。统计分析表明,夏季与冬季表层海水温度、春季强烈的生物活动、秋季逐步增强的水体垂直混合作用,是控制北黄海西北部海域不同季节表层海水 CO_2 分压及海-气 CO_2 交换通量的主要因素。

表 1 中国近海碳源汇格局
Tab.1 Source/sink of carbon in China marginal seas

研究区域 region	研究者 researcher	源/汇强度*/ ($\times 10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$) source/sink strength	参考文献 reference
渤海 Bohai Sea	宋金明	284	[9]
黄海 Yellow Sea	宋金明	896	[9]
	Kim	600–1200	[10]
东海 East China Sea	胡敦欣等	430	[18]
	宋金明	188	[9]
	Tsunogai 等	3000 **	[10]
	Wang 等	1300–3000 **	[10]
南海 South China Sea	韩舞鹰等	1665	[10]

注: *该列数值表示吸收大气CO₂, 即为大气CO₂的汇; **表示包括部分南黄海海域。
Note: The value means the sea is an atmospheric CO₂ sink; ** indicates including partial area of the Yellow Sea.

表 2 北黄海西北部 2009 年表层海水CO₂分压及海-气CO₂交换通量^[19]
Tab. 2 Fluxes across water-air interface and sea surface P_{CO₂} in northwest regions of North Yellow Sea in 2009^[19]

时间 time	表层海水CO ₂ 分压/(μatm) sea surface P _{CO₂}		海-气CO ₂ 交换通量 */($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) average flux of CO ₂
	范围 range	平均值 average	
3 月 March	261–444	322	−7.2±1.2
5 月 May	330–469	392	0.6±0.6
7 月 July	305–566	405	1.5±1.4
10 月 October	338–534	441	6.3±3.6

注: *该列正值表示海洋向大气释放CO₂, 即碳源; 负值表示海洋吸收大气CO₂, 即碳汇。
Note: The positive number means the sea is an atmospheric CO₂ source; the negative number means the sea is an atmospheric CO₂ sink.

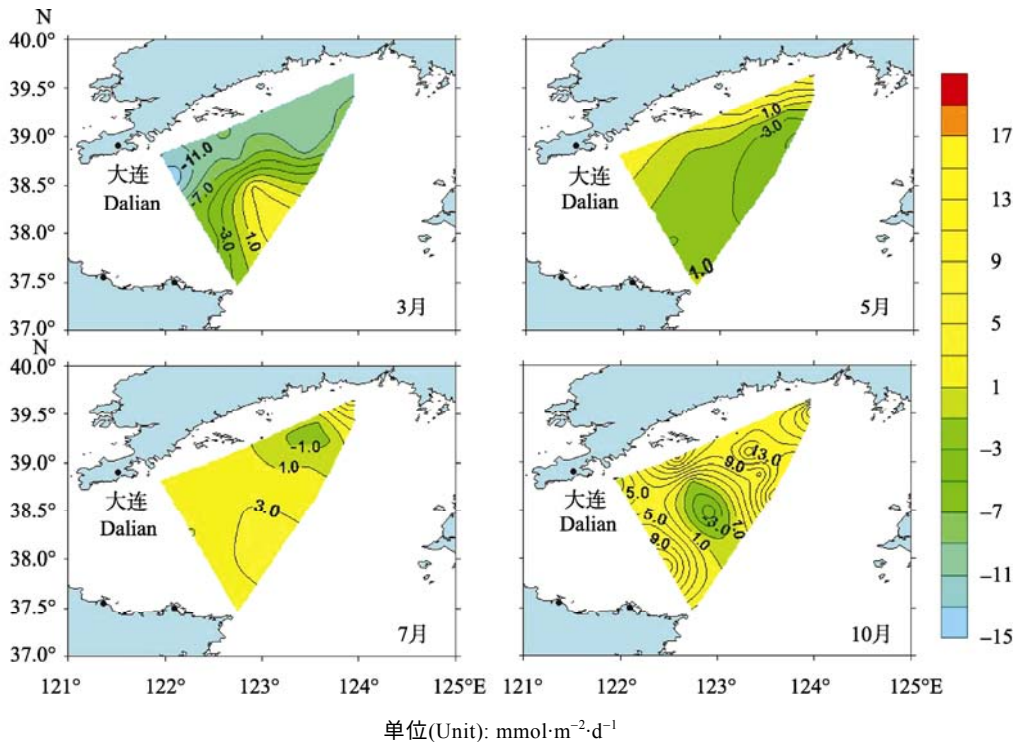


图 1 2009 年北黄海西北部海-气CO₂交换通量分布^[19]

Fig.1 Fluxes across water-air interface in the northwest regions of North Yellow Sea in 2009^[19]

国家海洋局 2009 年还组织了中国管辖海域部分断面的海-气界面的碳通量监测, 其中包括北黄海 5 个航次 5 条断面、渤海海区 1 个航次 6 条断面、南海区 1 个航次 4 条断面、东海区 1 个航次 5 条断面的调查工作, 获取监测数据 68 余万条。发现就所有断面而言, 中国近海是大气 CO_2 的汇。中国近海 CO_2 海-气交换通量夏季航次的初步调查结果如图 2 所示。

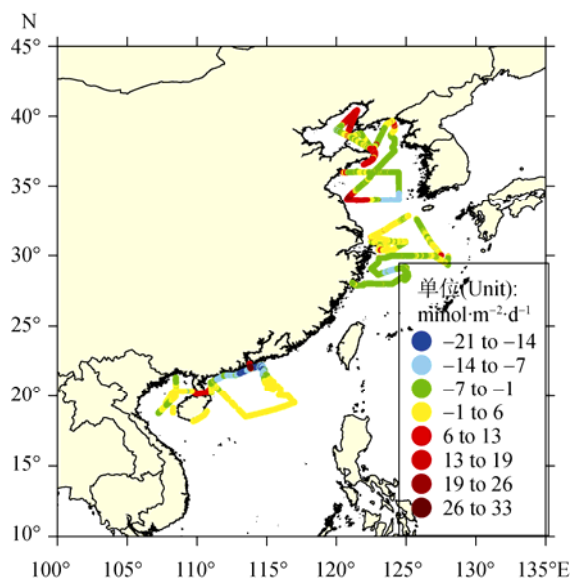


图 2 2009 年夏季中国近海海-气界面二氧化碳通量^[19]

Fig.2 Fluxes across water-air interface in China marginal seas in 2009^[19]

总结目前中国近海海-气界面碳通量的研究成果, 可以得出 3 个结论: 1) 中国近海整体上表现为大气 CO_2 的汇, 也就是说, 中国近海可以吸收大气中的 CO_2 , 吸收的数量应在数千万吨级(以碳计); 2) 大河口区淡水-咸淡水混合区均为大气 CO_2 的源, 在纯海水区, 则为汇。一些海湾也表现为大气 CO_2 的源。这些局部碳源汇的格局对局部气温有重要影响; 3) 中国近海海-气界面碳通量在整体上主要受控于表层海水的温度以及气象条件(主要是风), 但在春季受控于生物过程。

2 中国近海碳循环的关键过程

近海碳循环的过程十分复杂, 简要地可分为海-气界面转移过程(包括溶解度泵)、生物泵过

程、沉积物沉降与释放过程、渔业捕捞与人工养殖碳转移过程等。

2.1 海-气界面转移过程(包括溶解度泵)

对于海洋而言, 一般笼统地把吸收大气 CO_2 的区域称为“汇”, 把向大气释放 CO_2 区域称为“源”。但目前海洋源与汇研究上有 2 种相互关联但意义不同的内涵^[9]。一种是通过测定表层海水与大气 CO_2 分压, 通过计算海-气界面 CO_2 通量并根据其正负值确定源与汇。用这种方法获得的海洋源与汇, 称为“表观碳源汇”。一般在较短的时间尺度和较小的空间尺度上, 海洋源与汇是用这种方法获得的。这种涵义的源与汇是在表层海水温度及气象要素影响下海洋吸收或释放 CO_2 的直接反映。另一种是通过测定海水中的总二氧化碳(TCO_2), 并利用冰芯或沉积物记录反演人类活动开始显著影响大气 CO_2 前, 即 1840 年前海水中的 TCO_2 , 通过一系列校正与计算后获得的海洋碳源汇, 称为“实际碳源汇”。它反映的是海洋容纳人类排放 CO_2 的量, 可以以它为基础通过一定的模式预测海洋碳源汇的变化趋势。长时间尺度和大洋空间尺度上的源与汇一般是用这种方法获得的。

目前的文献都没有区分海洋源与汇这种涵义上的差别^[2]。“实际碳源汇”可以反映海洋中、深层特别是大洋存储碳的能力, 相对而言, 这种源与汇反映的是相当长时期海洋中的 CO_2 与大气 CO_2 的相互关系; “表观碳源汇”主要反映表层海水中的 CO_2 与大气 CO_2 的相互关系, 具有复杂的时空变化。

海洋碳源汇是动态变化的, 即同一海域碳源汇的方向及强度宏观上会随海况、气象要素、海洋生态环境等的季节变化而变化, 这种变化通常呈周期性, 有一定的规律。目前, 由于观察手段等的限制, 所获得的海洋碳源汇具有相当的不确定性。例如, 根据观测资料和模式估计获得的目前全球海洋每年吸收大气 CO_2 的量可能存在高达 $-32\%\sim 40\%$ 的误差, 而获得的局部海域这一值的误差可能更高。

2.2 生物泵过程

生物活动对于海洋碳循环过程的影响意义重大。浮游植物的初级生产和浮游动物的次级生产将溶解无机碳转化为溶解有机碳(DOC)和颗粒有机碳(POC), 而一部分有机碳又通过生物的呼吸作用和细菌的分解作用而消耗掉。细菌广泛分布于海洋中, 细菌在利用有机碳的过程中又被上层营养级的原生动物等滤食, 转化为更高阶层可被生物利用的颗粒碳。Song等^[3]的研究表明, 在东海陆架区秋季, 细菌消耗的有机碳与浮游植物的初级生产相当, 初级生产无法供应浮游生物呼吸作用所消耗的有机碳, 河流输入和(或)表层沉积物再悬浮是潜在的有机碳补充来源。对长江冲淡水区细菌生产力的研究表明, 该区春季和秋季平均细菌生产力相当于浮游植物初级生产力的23%。秋季表层细菌生产力在 $0.22\sim 3.35 \text{ mg(C)}/(\text{m}^3\cdot\text{h})$, 平均为 $(1.44 \pm 1.30) \text{ mg(C)}/(\text{m}^3\cdot\text{h})$; 春季表层细菌生产力在 $0.56\sim 4.41 \text{ mg(C)}/(\text{m}^3\cdot\text{h})$, 平均为 $(2.43 \pm 1.22) \text{ mg(C)}/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ 。细菌生产力高值区与初级生产力和叶绿素a高值区相吻合。在珊瑚礁潟湖中, 生物因素控制着POC的循环, 其效率很高, 90%以上的POC在进入沉积物之前被释放或重新利用。

中国近海水体中含有丰富的有机碳, 这些丰富的有机碳是海洋生物泵过程的基础。在东海陆架水体中, 有机碳中的DOC平均占87.5%, POC占11%。可以认为东海陆架水中的碳主要来源于海-气界面 CO_2 交换, 然后通过浮游植物的光合作用和浮游动物的次级生产将溶解无机碳转化为DOC和POC。东海陆架物质的垂直通量随海域的水深不同有明显的差别。碳在东海陆架垂直转移主要依赖于POC。POC的垂直分布与水体中的总悬浮颗粒物浓度、陆源沉积物供应和海洋生物作用密切相关。

2.3 颗粒物沉降与释放过程

海洋沉积物是全球碳的重要源与汇, 在碳循环中起着重要的作用。对于东海的研究表明, 虽然东海内陆架区沉积物和有机碳的沉积速率较高, 但从陆架坡到冲绳海槽只有少部分有机碳被埋藏, 大部分被输出或再矿化。但也有研究表明, 冲绳海槽南部是一个重要的有机颗粒物沉积中心, 贴

近底层的水平输送被认为是物质输出东海陆架的主要过程。DOC的年输出量几乎相当于POC的4倍, 分别为 414 Gmol/a 和 106 Gmol/a , 比河流输入东海DOC量的2倍还多。在东海陆架的南部, 有机碳浓度虽然不高, 但却具有较高的沉积速率。

底层物质再悬浮对物质通量产生明显影响, 再悬浮中由于再矿化率增高、间隙水与上覆水混合, 大部分生源要素的浓度一般都会得到提高。海洋微生物作为海洋食物链的下层, 对整个海洋生物链具有重要影响。再悬浮对微生物食物网的影响表现在, 通过再悬浮过程中的再矿化及可溶性的营养物和有机颗粒物与水体的混合作用, 沉积物转变为更易被藻类和细菌利用的营养形式, 以及悬浮颗粒的表面积更利于细菌吸附, 因此在再悬浮过程中水体中微微型浮游生物、微型自养生物和异养浮游生物的丰度有明显提高, 并与悬浮物的浓度呈正相关, 海底硅藻和纤足虫与悬浮物浓度也有类似关系。

表层沉积物的再悬浮, 是造成颗粒碳垂直转移量不能准确获得的主要原因。对东海长江口及邻近海域表层沉积物的再悬浮和POC的垂直净通量研究可知, 丰水期表层沉积物的再悬浮比率在表层水为47.4%~79.2%(平均值为65.6%), 底层的再悬浮比率更高, 为72.8%~97.0%(平均值为89.4%)。POC的表观垂直转移通量为 $12.4\sim 148.2 \text{ mg}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$, 而其净通量为 $0.8\sim 117.4 \text{ mg}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。POC净垂直通量的平均值在表层水为 $53.00 \text{ mg}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$, 次表层水为 $117.40 \text{ mg}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$, 中层水为 $8.18 \text{ mg}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$, 底层水为 $5.73 \text{ mg}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。在丰水期, 海水通过海-气交换得到的 CO_2 仅有13%以POC的形式垂直转移形成表层沉积物中的有机碳; 其余87%没有被埋葬的碳, 或通过生物泵过程, 或通过动力过程进入水体再循环, 有一部分还可能将通过复杂的途径以 CO_2 的形式返回到大气中^[9]。

2.4 渔业捕捞与人工养殖碳转移过程

渔业捕捞可以移出海水中碳, 尽管近年来渔业资源的衰退, 使渔业捕捞移出碳的数量有所减少, 但渔业捕捞移出的碳仍然是影响海洋碳循环的重要过程之一。

中国是世界第一水产养殖大国, 海水养殖发

展迅速, 全国海水养殖面积达 $6.65 \times 10^4 \text{ km}^2$, 养殖产量约 $1.25 \times 10^7 \text{ t}$ 。目前在中国的海水养殖中, 贝、藻类是海水养殖的主要品种; 其次为对虾和网箱养殖。海水养殖中的养殖方式、养殖密度、养殖规模、使用的饵料性质及成分、投饵量及饵料利用率等因素都会对周围海域环境造成影响, 进而影响近岸海域的碳循环与收支^[20]。

贝类养殖不需要人工投饵, 但有内源代谢问题。贝类为滤食性生物, 对食物没有严格的选择性, 浮游植物、有机碎屑、泥沙颗粒等都可被贝类滤食。贝类从滤食的浮游植物和有机碎屑中获取物质和能量。摄入体内未被同化的部分物质以粪便的形式排出; 被同化的部分物质则一部分以呼吸和排泄的形式丢失, 其余的部分用于生长。贝类代谢过程排入水中的产物, 80%左右是可溶性物质, 其余为悬浮物。研究表明, 每年每克干重的贻贝(*Mytilus edulis*)产生的粪便量为 1.76 g(干重), 其中含碳 0.13 g; 筏式养殖过程中, 每平方米的面积上此种贻贝每年产生的粪便中含有 8.5 kg碳^[10]。在烟台四十里湾, 壳高 4.11 mm的栉孔扇贝(*Chlamys farreri*)其生物沉积速率最高达 230 mg/(g·d), 生物沉积物中碳的含量(质量分数)为 5.04%。由此可见, 贝类养殖过程中产生的代谢物会与水体中的碳在不同形态之间转变。

对虾养殖和网箱养殖现在主要采用人工投饵为主的精养方式, 而饵料投喂是对海洋环境产生影响的一个重要因素。目前大部分地区对虾养殖中饵料系数一般保持在 1.4~1.7 之间。也就是说生产 1 t 虾, 需要投入 1.4~1.7 t 饵料。饵料的利用率

基本保持在 80%左右, 即大约有 20%的饵料未被利用, 这些残饵和养殖鱼类的排泄物都进入水环境。研究表明, 网箱养鱼过程中以渔产品收获的营养物质一般仅占投喂饵料营养物质总量的 30%左右, 其余部分以颗粒态或溶解态养殖废物的形式排入环境中。每生产 1 t 鱼就有 878~952 kg 的碳进入水柱中, 占碳总输入量的 75%~78%; 也有报道为 750 kg 或 561 kg 不等。有的研究者认为这些碳中大部分以溶解态形式进入水体; 也有人认为 40%以溶解态形式, 44%以颗粒态形式(残饵和粪便等)进入水体。

另外, 养殖区的网箱、筏架等养殖工具还会对海流等水文状况产生影响。桑沟湾贝类悬浮式养殖使潮流速度比养殖前减小 35%~40%; 蓬莱芦洋湾浅海筏式养殖面积从 1976 年的 18 km² 扩大到 1990 年的 47.7 km² 后, 同期同区域大潮期 5 m 水层最大和最小流速分别从 46 cm/s和 16 cm/s降至 16 cm/s和 2 cm/s。海流减弱直接对水体交换产生影响, 从而不可避免地对碳循环的某些环节产生影响。总之, 大规模人工养殖对于近海碳循环的影响不可小视。

根据《中国海洋年鉴》所统计的中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%, 就可以估算出中国近海经济海藻的固碳量(表 3)^[21]。

从表 3 可知, 近几年, 中国大型经济藻类养

表 3 中国近海大型经济藻类养殖产量与固碳强度^[21]
Tab.3 Yield and carbon fixation strength of cultured algae in China marginal seas ^[21] t

参数 parameter		年份 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 other	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 other	94065	98243	107662	113045	118019	123920

总量 total 366344 363130 388591 408020 425973 447272

殖产量每年在 120 万~150 万 t, 换算为固碳量为 36 万~45 万 t, 平均每年 40 万 t, 如果被吸收的碳全部从大气中获得, 则中国仅人工养殖经济海藻就可多从大气中吸收 40 万 t 的碳; 如果海藻养殖产量每年增加 5%, 则到 2020 年, 其固碳量可达 93 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。

3 中国近海浮游植物的固碳强度

近海浮游植物的固碳是最基础的海洋“生物泵”过程, 是海洋生物固碳占据份额最大的部分。海洋真光层浮游植物通过光合作用吸收 CO_2 转化为有生命颗粒有机碳, 这些有机碳通过食物链逐级转移到大型动物, 并通过浮游动物的垂直洄游和大量非生命颗粒有机碳(如各级产品的死亡残体、各级动物产生的粪团、蜕皮)的沉降一起构成有机物由表层向深层转移的“生物泵”过程。据估算, 作为其初始阶段的浮游植物光合作用每年的固碳量超过 300 亿 t, 是当前人类活动年释放量的 5 倍多。由此可见, 海洋浮游植物光合作用在全球碳通量变化中扮演着一个十分重要的角色。因此, 在人类了解和变更海洋环境时, 浮游植物的生物量、初级生产力及其固碳量的定量评价问题就显得格外重要。

研究表明, 2005 年秋季南黄海浮游植物的固碳强度变化在 $95 \sim 1634 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 之间, 平均为 $586 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ^[22], 其平面分布见图 3。

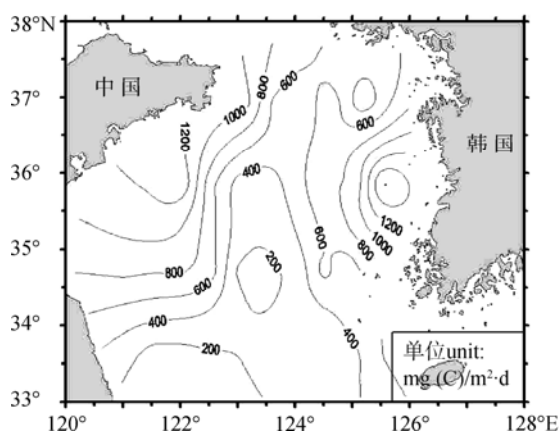


图3 南黄海浮游植物固碳强度的分布图^[22]

Fig.3 Distribution of carbon fixed by phytoplankton in southern Yellow Sea in autumn of 2005^[22]

逐步加入回归分析表明, 最终能保留在模型中的影响因素与浮游植物固碳强度具有最显著的正协同效应, 关系如下:

$$\begin{aligned} \text{浮游植物固碳强度} = & 3.882 \text{ 3} + 0.044 \text{ 7Tr} \\ & - 0.049 \text{ 4S} - 0.232 \text{ 7pH} + 0.944 \text{ 0}(\text{PO}_4\text{-P}) \\ & + 0.372 \text{ 0}(\text{NO}_2\text{-N}) + 0.398 \text{ 6Chl.a} \\ (R = 0.920, n = 27) \end{aligned}$$

由上述关系可知, 南黄海秋季与浮游植物固碳强度关系比较密切的环境因子为海水透明度(Tr)、盐度(S)、pH、亚硝氮($\text{NO}_2\text{-N}$)、磷酸盐($\text{PO}_4\text{-P}$)以及叶绿素a(Chl.a)。在这些因素中, 磷酸盐的影响最大, 显然 10 月中下旬南黄海的磷是浮游植物生长的限制因子, 次之的影响因素是叶绿素a和亚硝氮($\text{NO}_2\text{-N}$)。

对中国近海浮游植物固碳强度的研究结果见表 4^[22]。从表中可知, 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依次是夏季、春季、秋季、冬季, 而在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, 在季节上则是夏季初级生产力出现最高值。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。南海浮游植物固碳强度占中国近海浮游植物总固碳强度的 65.2%, 其在中国近海中浮游植物固碳强度最大。

就整个渤海、黄海和东海而言, 各季节浮游植物固碳量由大到小依次是春季、夏季、秋季、冬季, 年总固碳量可达 $222 \times 10^6 \text{ t}$, 约为东中国近海通过海-气界面总表观碳汇强度($1.369 \times 10^7 \text{ t/a}$)的 16.2 倍。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。也就是说, 东海浮游植物固碳对其碳汇库容量

的调控能力远大于黄、渤海。

量每年约 36.8×10^9 t, 与陆地的初级生产力总量相

据已有的估计结果, 全球海洋浮游植物固碳

表 4 中国近海不同季节浮游植物的固碳强度^[22]

Tab.4 Seasonal variation of carbon fixed by phytoplankton in China marginal seas^[22]

海域 region	面积/ ($\times 10^3 \text{ km}^2$) area	各季节初级生产力/[$\text{mg}(\text{C}) \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$]/日固碳量/($10^4 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$) primary production of each season/daily fixed carbon				年碳生产 /[$\text{g}(\text{C}) \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$]/年固碳 量/($10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$) PP/annual fixed 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	260/91.0	190/66.5	280/98.0	550/192.5	408/416.64
合计 total	4709	164.05	138.77	155.86	233.60	639.09

近; 其中, 近海区域只占海洋总面积的 10%, 其浮游植物年固碳量可占海洋浮游植物总固碳量的 30%; 而作为典型边缘海的中国近海, 其浮游植物年固碳量可占全球海洋浮游植物固碳量的 1.74%, 占全球近海区域浮游植物年固碳量的 5.79%, 可见中国近海在全球海洋固碳过程中起着重要作用^[4]。

4 中国近海渔业碳汇过程研究应关注的主要科学问题

人类大量使用石化燃料等致使大气中CO₂含量不断升高, 并造成全球变暖与海平面上升已是不争的事实, 如何降低大气中CO₂的含量成了遏制全球变暖的中心问题。实际上最近十几年来, 海洋碳循环一直是国际研究的热点, 其重要原因之一就是海洋直接决定了涉及大气CO₂作用下全球气候的变化趋势。近年来的研究表明, 人类每年向大气排放的CO₂约有一半为海洋所吸收, 吸收进入海洋的碳经复杂的生物地球化学过程转化为不同形式的碳, 或在海洋中循环或被转化为其他形式的碳参与生物代谢, 或形成颗粒物被最终埋葬或重新被释放进入大气。尽管增暖减少了海洋对CO₂的吸收, 但是预计在大气CO₂浓度继续升高的情况下, 海洋的净碳吸收至少要坚持到 21 世纪, 况且碳从海洋表层到深海的迁移要花费几百年, 而与海洋沉积物达到平衡则需要几千年, 所以, 海洋储碳的能力是巨大的。但人们最终关心的还是海洋究竟能吸收多大量的人为排放的CO₂, 以及能否用人为的方法和技术增加海洋吸

收CO₂的能力。

渔业捕捞和近海养殖都可取出海洋中包括碳在内的多种生源要素, 这些捕捞物和养殖产品经采收后在陆地上被利用, 这样可从海水中“取出”大量的碳, 该海区相对于捕捞或养殖前就明显缺碳, 从而使大气中的CO₂向这一海域转移, 海域的储碳能力增加, 这是渔业碳汇的基础。初步估算表明, 中国仅海藻养殖就可每年多固定 40 万~50 万t大气中的碳^[21]

渔业碳汇技术可明显地增加海洋碳汇, 探明中国近海渔业碳汇过程是开发渔业碳汇技术的前提。因此, 中国近海渔业碳汇过程研究应重点关注以下 3 个科学问题: 1) 首先要查明渔业碳汇海域的生态环境状况, 揭示海域生物地球化学循环的途径, 阐明海域物流与能流通量, 这是进行渔业碳汇研究的基础; 2) 基于渔业资源生物量-生态环境耦合, 从环境容量-渔业资源容量(捕捞或养殖)出发的从点到面渔业碳增汇强度评估技术方法的构建, 强化人工调控技术措施, 评估渔业碳增汇强度; 3) 渔业资源利用碳再生循环周期及循环周期加长技术研发, 评估海洋渔业“净碳汇”强度, 开发渔业碳增汇长效技术。

参考文献:

[1] 孙云明, 宋金明. 中国海洋碳循环生物地球化学过程研究的主要进展[J]. 海洋科学进展, 2002, 20(3): 110-118.

[2] Song J. Progress in the studies of marine biogeochemical process in China[R]//1995-1998 China national report on physical sciences of the oceans and on hydrologic science for

- the X X II nd general assembly of IUGG (Birmingham, UK. July 1999). Beijing: China Meteorological Press, 1999: 73–84.
- [3] Song J. Biogeochemical processes of biogenic elements in China marginal seas[M]. Hangzhou: Springer-Verlag GmbH & Zhejiang University Press, 2010: 1–662.
- [4] 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: 1–533.
- [5] 宋金明, 赵卫东, 李鹏程, 等. 南沙珊瑚礁生态系的碳循环[J]. 海洋与湖沼, 2003, 34(6): 586–592.
- [6] Gao X, Song J. Main geochemical characteristics and key biogeochemical processes of carbon in the East China Sea waters[J]. J Coastal Res, 2006, 22(6): 1330–1339.
- [7] Song J. Oceanic iron fertilization: one of strategies for sequestration atmospheric CO₂[J]. Acta Oceanol Sin, 2003, 22(1): 57–68.
- [8] 宋金明. CO₂的温室效应与全球气候及海平面的变化[J]. 自然杂志, 1991, 14(9): 649–653.
- [9] 宋金明. 中国近海生物地球化学[M]. 山东科技出版社, 2004: 1–591.
- [10] 高学鲁, 宋金明, 李学刚, 等. 中国近海碳循环研究的主要进展及关键影响因素分析[J]. 海洋科学, 2008, 32(3): 83–90.
- [11] 高学鲁, 宋金明, 李学刚, 等. 长江口及杭州湾邻近海域夏季表层海水中的溶解无机碳[J]. 海洋科学, 2008, 32(4): 61–67.
- [12] 高学鲁, 宋金明, 李学刚, 等. 南黄海秋季溶解无机碳的分部特征[J]. 海洋环境科学, 2009, 28(1): 17–21.
- [13] Li X, Li N, Gao X, et al. Dissolved inorganic carbon and CO₂ fluxes across Jiaozhou Bay air-water interface[J]. Acta Oceanol Sin, 2004, 23(2): 279–285.
- [14] Li X, Song J, Niu L, et al. Role of the Jiaozhou Bay as a source /sink of CO₂ over a seasonal cycle[J]. Sci Mar, 2007, 71(3): 441–450.
- [15] Gao X, Song J. Dissolved oxygen and CO₂ flux across water-air interface of the Changjiang Estuary in May 2003[J]. J Mar Syst, 2008, 74: 343–350.
- [16] Gao X, Song J, Li X, et al. pCO₂ and carbon fluxes across sea-air interface in the Changjiang Estuary and Hangzhou Bay[J]. Chin J Oceanol Limnol, 2008, 26(3): 289–295.
- [17] Gao X, Song J, Li X, et al. Spatial and temporal variations in pH and total alkalinity at the beginning of the rainy season in the Changjiang Estuary, China[J]. Acta Oceanol Sin, 2005, 24(5): 68–77.
- [18] 胡敦欣, 杨作升. 东海海洋能量关键过程[M]. 北京: 海洋出版社, 2001: 1–204.
- [19] 国家海洋局. 2009 年国家海洋环境质量公报[R]. 2010.
- [20] 杨宇峰, 宋金明, 林小涛, 等. 大型海藻栽培及其在近海环境的生态作用[J]. 海洋环境科学, 2005, 24(3): 77–80.
- [21] 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.
- [22] 郑国侠, 宋金明, 戴纪翠, 等. 南黄海秋季叶绿素 a 的分布特征与浮游植物的固碳强度[J]. 海洋学报, 2006, 28(3): 109–118.

Carbon cycling processes and carbon fixed by organisms in China marginal seas

SONG Jinming

Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Sciences, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China

Abstract: In the paper, carbon cycling processes and carbon fixed by organisms in China marginal seas are reviewed. The carbon cycling processes include CO₂ fluxes between atmosphere and seawater, carbon biological pump process, carbon sink/release in particulates and carbon transfer in fishing/culture. China marginal sea is a sink area of CO₂ in the air, but some coastal parts are source areas such as the Jiaozhou Bay and the Changjiang estuary. The mean annual sink strength of atmospheric CO₂ in China marginal seas is about 30 million ton carbon per year. The source/sink strength is controlled by sea surface temperature(SST), phytoplankton production and seawater mixing process in different sea-regions and seasons. The amount of fixed carbon by phytoplankton is about 6.39×10^8 t/a in China marginal seas, in which 65.3% carbon is fixed in spring and summer. The carbon fixation ability of the South China Sea is about 4.16×10^8 t/a, which is double of that in Bohai Sea, the Yellow Sea and the East China Sea. Fishing and culture can increase carbon sink strength. In recent years, the yield of large-size economic seaweeds in China marginal seas is about $1.20\text{--}1.50 \times 10^6$ t/a, so their fixed carbon is about 4.0×10^5 t/a. If the seaweed yield amount increase by 5% every year in China marginal seas, carbon fixed amount of the large-sized economic seaweeds may reach to 9.3×10^5 t/a up to 2020. Therefore, algae breeding is an important technique for increasing marine carbon sink with multi-values. To reveal the fishing/culture eco-environment, establish the

method for grading the carbon sink of fishing/culture and study the recycling period of fishing/culture carbon sink are very important in the future.

Key words: carbon cycling process; carbon fixation; phytoplankton; fishing/culture carbon sink; China marginal seas