



# 海洋储碳机制及相关生物地球化学过程研究策略

焦念志<sup>1,2\*</sup>, 戴民汉<sup>1</sup>, 翦知湓<sup>3</sup>, 王晓雪<sup>4</sup>, 张锐<sup>1,2</sup>

1. 厦门大学海洋与地球学院, 近海海洋环境科学国家重点实验室, 厦门 361102;

2. 厦门大学碳中和创新研究中心, 福建省海洋碳汇重点实验室, 厦门 361102;

3. 同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092;

4. 中国科学院南海海洋研究所, 中国科学院热带海洋生物资源与生态重点实验室, 广州 510301

\* 联系人, E-mail: jiao@xmu.edu.cn

## 1 碳中和国家战略需要海洋负排放支撑

工业革命以来, 人类活动导致大气CO<sub>2</sub>激增, 加剧了气候变化, 引发一系列社会、经济和环境问题. 第75届联合国大会以来, 习近平总书记在一系列重大场合多次强调, 我国二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值, 努力争取2060年前实现碳中和. 这个重大举措不仅大大提升了我国的国际话语权, 也吹响了我国科技-产业-政策联合攻关的“集结号”. 实现碳中和目标既要寻求替代能源以达到减排目的, 也要增加碳汇, 即增加CO<sub>2</sub>的吸收和储藏, 缓解“发展经济与减少排放”之间的矛盾, 增汇可谓是“不减产的减排”<sup>[1]</sup>. 当前全世界已有130余个国家提出碳中和目标<sup>[2]</sup>. 相比发达国家, 中国在碳达峰和碳中和之间仅隔30年, 减排压力巨大. 按当前的排放趋势乐观地估计, 碳达峰时CO<sub>2</sub>排放量约105亿吨/年<sup>[3]</sup>. 据科学家估计, 即使充分利用了替代能源, 中国碳达峰后每年仍有18~28亿吨CO<sub>2</sub>的负排放缺口<sup>[3]</sup>. 因此, 要实现碳中和目标, 必须充分开发负排放技术.

海洋占地球总表面积近71%, 总储碳量近40万亿吨, 是大气碳库的近50倍、陆地碳库的近20倍, 是地球表面最大的活跃碳库<sup>[4]</sup>. 工业革命以来, 约1/4人类活动排放的CO<sub>2</sub>被海洋吸收<sup>[4]</sup>. 早在2009年, 联合国就发布了《蓝碳报告》, 指出海洋碳汇在调节气候变化和维持生态系统可持续发展中的重大作用<sup>[5]</sup>. 由于受到海洋现场条件的限制, 此后的十多年里, 国内外对海洋碳汇的研究大多局限于看得见摸得着的海岸带蓝碳<sup>[6,7]</sup>. 然而, 这部分蓝碳的总量有限, 无法达到碳中和的目标要求. 而广阔的海洋水体, 蕴含着巨大的负排放潜力, 亟待研发.

中国海洋国土面积约为300万平方公里, 纵跨多个气候带, 拥有广阔的边缘海. 地处热带、亚热带的南海受西太平洋暖池影响, 且具有大洋特征; 地处亚热带-温带的东海拥有宽广的大陆架, 具有生产力高的特点; 北部的黄海是冷暖流交汇的区域; 位于温带的渤海是受人类活动高度影响的半封闭浅海. 上述海域还分别受到珠江、长江、黄河等大江大河



**焦念志** 厦门大学教授, 中国科学院院士、发展中国家科学院院士、美国微生物科学院院士、国家自然科学基金委基础科学中心项目首席科学家. 主要从事海洋微生物及其资源环境效应研究, 在国际上首次提出“海洋微生物碳泵”原创性基础理论. 获何梁何利科学技术(地球科学)奖及国家自然科学二等奖2项.

输入的影响. 多样的自然条件赋予了中国海域多种负排放途径的潜力. 据估算, 中国陆架边缘海的沉积有机碳通量每年约为20百万吨<sup>[8]</sup>. 显然, 与每年18~28亿吨CO<sub>2</sub>的负排放缺口<sup>[3]</sup>相比, 海洋自然碳汇远不足以实现碳中和目标. 因此, 必须研究海洋负排放理论与方法、研发有效的负排放路径与方案<sup>[1,9]</sup>.

## 2 海洋储碳原理与机制

目前已知的海洋储碳机制包括溶解泵(solubility pump, SP)、生物泵(biological carbon pump, BCP)、碳酸盐泵(carbonate carbon pump, CCP)、微型生物碳泵(microbial carbon pump, MCP)<sup>[10]</sup>. SP通常指高纬海区在冷空气和强风的作用下, 表层海水快速降温, 海水中CO<sub>2</sub>溶解度增大, 海洋通过海-气交换从大气中大量吸收CO<sub>2</sub>; 同时随着深层水的形成, 高密度海水携带吸收的CO<sub>2</sub>下沉进入大洋热盐环流, 脱离海-气交换层, 从而实现了大气CO<sub>2</sub>的“封存”. SP涉及大尺度的海洋环流, 人为调控的难度非常大, 所以本文不作详细探讨.

CCP是控制海洋碳循环的另一重要过程. 海水碳酸盐系统具有一定的缓冲作用: 一方面, CO<sub>2</sub>进入海水使HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>和CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>之间的比例发生变化而减缓pH的降低; 另一方面, 海水中碳酸盐沉淀的形成会释放CO<sub>2</sub>, 而碳酸盐溶解会从大气吸

收 $\text{CO}_2$ 。在海底沉积物中存在大量的碳酸盐,因此,深海碳酸盐的沉积与溶解就可在长时间尺度上调节大气 $\text{CO}_2$ 浓度。需要指出的是,海洋中的CCP过程并非仅由热力学过程所控制,也涉及诸多生物过程,包括自养生物和异养生物的钙化过程。自养钙化生物的典型代表是颗石藻(*Coccolithophorids*),其藻华可产生巨量的碳酸盐沉积,例如英国多佛的白崖(White Cliffs of Dover)(高>150 m、宽5 km)<sup>[11]</sup>。自养蓝细菌也可形成规模化碳酸盐沉积(如叠层石)<sup>[12]</sup>。由异养钙化生物包括原生动物(如有孔虫*Foraminifera*)和后生动物(如软体动物贝类、腔肠动物珊瑚虫等)形成碳酸盐壳体。此外,海洋中的自生碳酸盐也是重要的CCP机制,特别是在厌氧微生物主导的环境中自生碳酸盐沉积也可达到很大规模<sup>[13]</sup>。

BCP始于海洋真光层,浮游植物吸收海水中的游离 $\text{CO}_2$ 和 $\text{HCO}_3^-$ 进行光合作用,将无机碳转化为有机碳,其中部分

以颗粒有机碳(particulate organic carbon, POC)的形式通过沉降等过程输送至深海<sup>[14,15]</sup>。真光层BCP向下的碳通量(即输出生产力, export production)通常占初级生产力的10%~30%<sup>[16,17]</sup>。需要指出的是,在输送过程中部分有机碳会被再矿化成无机碳释放到周围水体中,导致POC通量随水深的变化呈指数衰减,称为马丁曲线(Martin curve)<sup>[18]</sup>。真正能够到达海底被埋藏而在千年尺度上封存的POC只占初级生产力的0.1%~1%(图1(a))。

MCP指的是微型生物的生理生态过程把有机碳从可降解的活性态碳转化为不易被降解的惰性溶解有机碳(recalcitrant dissolved organic carbon, RDOC)的储碳机制<sup>[19]</sup>(图1(a))。MCP储碳机制包括主动过程和被动过程,前者包括细胞代谢产生的惰性化合物,如聚合化合物、化合物手性转化、羧基化等;后者包括病毒裂解产物和浮游动物摄食代谢等产生

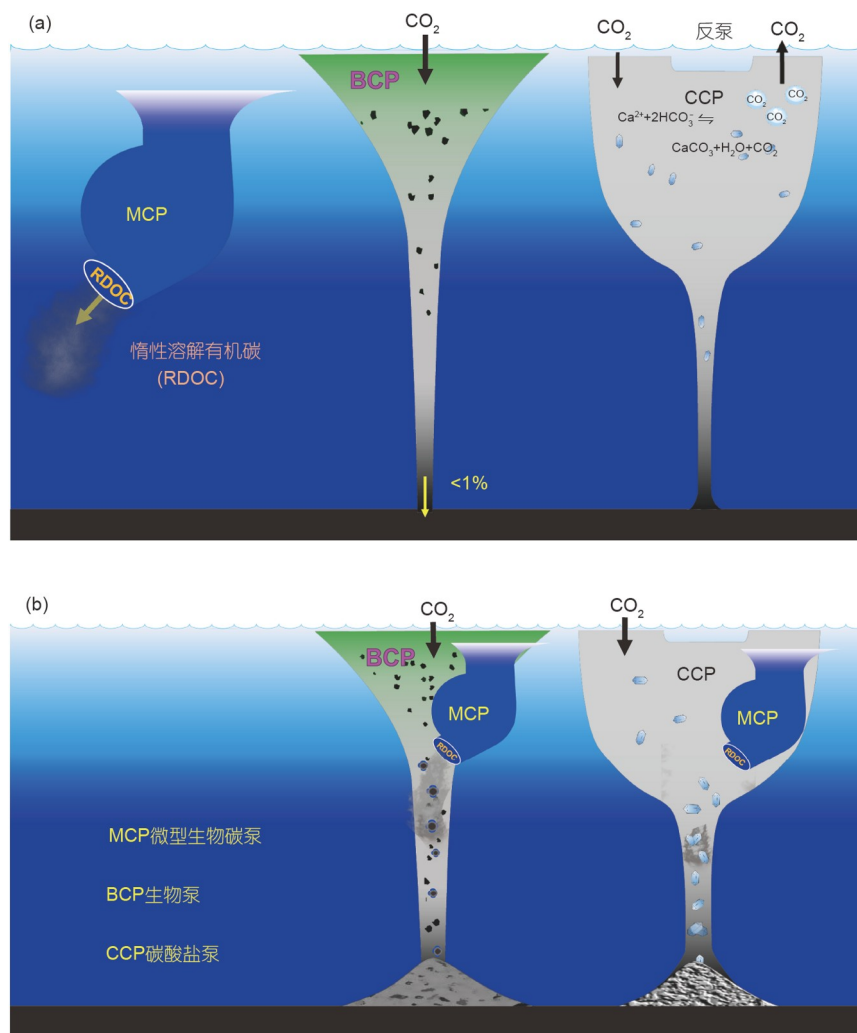


图1 海洋储碳主要机制及其协同作用示意图。(a) MCP、BCP和CCP单独储碳的基本原理; (b) MCP与BCP和CCP的耦合增汇机制  
Figure 1 Main mechanisms of ocean carbon sequestration and their synergistic effects. (a) Mechanisms of MCP, BCP and CCP; (b) synergistic effects of MCP with BCP and CCP

RDOC, 如细胞壁惰性成分等. RDOC可进一步区分为在一定环境条件下的结构惰性化合物(environmental context dependent RDOC, RDOCt)以及由于浓度极低而无法被生物利用而遗留在环境中的化合物(concentration limited RDOC, RDOCc)<sup>[20]</sup>. 早在半个世纪之前, 科学家就认识到海洋中存在一个高达7000亿吨巨大的溶解有机碳库, 年龄在4000~6000年, 但这个碳库的成因未知, 被称为未解之谜(Enigma)<sup>[21]</sup>. MCP机制的提出揭开了这个未解之谜的面纱. 同位素地质记录 and 现代海洋溶解有机碳的分布格局展示了MCP的客观存在<sup>[22-24]</sup>. 大型生态系统模拟实验也表明MCP效率极高<sup>[25]</sup>. 地球历史上一些时期DOC碳库比现代海洋高2~3个数量级<sup>[26]</sup>, 其对气候变化的影响之大可想而知.

海洋储碳不仅在现代气候变化中扮演着重要角色<sup>[27]</sup>, 在地质历史时期的作用也举足轻重. 大气氧化、雪球地球、生命大爆发和生物大灭绝等, 都与海洋生物、碳循环和碳库的消长息息相关<sup>[24,28,29]</sup>. 地球科学两大理论之一的气候演变米兰科维奇理论指出: 地球轨道参数(偏心率、斜率和岁差)控制的地表太阳辐射量驱动气候变化, 即“高纬夏季太阳辐射量的周期性变化控制地表气候变化的冰期旋回”<sup>[30-33]</sup>. 然而, 偏心率对气候变化的贡献理论值不足0.1%<sup>[34]</sup>, 不足偏心率在 $\delta^{13}\text{C}$ 地质记录中的1%. 地球轨道参数的微小差异, 如何引起冰期旋回的巨大变化, 仍属未解之谜. 我国科学家先期根据MCP理论提出了大洋碳循环长周期“溶解有机碳假说”<sup>[35]</sup>. 如果得以验证, 既完善了米兰科维奇理论这个重要理论, 也为海洋碳循环和气候变化的相互作用开辟新的研究前景.

综上, 海洋储碳是关系到全球气候变化及地球系统演变的一个博大命题, 也是高度交叉的研究领域. 从学科上来说, 它涵盖了生物海洋学、物理海洋学、化学海洋学、海洋生物地球化学以及海洋地质学等领域; 从研究手段上说, 它依赖于微生物、分子生物、生物化学、同位素和元素地球化学、遥感、水文、数值模拟等传统和高新技术研究手段; 从空间上说, 它覆盖了河口、近海以及大洋海域; 从时间跨度上来讲, 它贯穿地球历史, 与环境演化相伴为伍, 是阐释气候变化的一把钥匙, 也是反演过去和预测未来的有效途径.

### 3 海洋储碳机制的科学假说和研究内容

虽然人们对海洋储碳机制有了一定的认识, 但迄今仍然遗留若干悬而未决的科学问题, 包括海洋中巨大溶解有机碳库的形成机制、不同碳泵之间的相互作用机制以及海洋碳库与气候演化的关系. 本文提出以下响应的3个科学假说.

(i) 科学假说1: 微型生物碳泵是海洋有机碳库的主要形成机制. 国际学术界有“稀释说”和“惰性说”两个假说解释半个世纪之前提出的“巨大海洋碳库的成因之谜(Enigma)”<sup>[36,37]</sup>. 我国科学家先期研究表明, “稀释说”和“惰性说”的源头都在于微型生物碳泵<sup>[20]</sup>, 并通过大型模拟实验揭开了深海有机碳库之谜的面纱<sup>[25]</sup>. 本文在此基础上突破原有研究的时空局限,

提出微型生物碳泵是海洋有机碳库的主要形成机制科学假说, 有望通过跨学科(生物-化学-地质)深入探究形成海洋巨大溶解有机碳库的复杂生物地球化学过程和调控机制, 以全面揭开深海有机碳库之谜的谜底.

(ii) 科学假说2: 微型生物碳泵和生物泵的时空分异调控了碳源汇格局. 过去30年来, 边缘海碳循环研究取得了重要进展, 我国科学家基于边缘海-大洋界面的物质交换, 构建了大洋主控型边缘海碳循环理论框架<sup>[38,39]</sup>. 在厘清边缘海 $\text{CO}_2$ 源汇格局之后, 碳汇时空格局的演化机理及调控机制成为新的挑战<sup>[27]</sup>. 本文提出在水团混合的基础上, BCP与MCP的时空分异调控了海区碳源汇格局的科学假说. 在边缘海不同时空范围内以及特定水动力条件下, 随着诸如营养盐浓度、生物群落的变化, BCP和MCP的强弱以及两者对碳汇的贡献会发生动态变化, 它们共同调制边缘海的碳源汇格局和演化, 可望通过现场调查不同环境中BCP和MCP的相对变化规律, 阐释源汇格局的调控机制.

(iii) 科学假说3: 微型生物碳泵放大了地球轨道参数变化引发的气候效应. 米兰科维奇气候演变理论认为, 偏心率对太阳辐射量变化的贡献不足0.1%, 而晚第四纪气候变化中的偏心率周期却占据主导, 是气候变化中频谱能量的主体. 我们认为, 米兰科维奇理论缺失了海洋溶解有机碳汇的认识, 忽略了“海洋中的巨人”——微型生物的作用. 本文发现冰盖增长期和冰期形成过程中, 大洋深部储碳的累积效应可以导致气候逐渐变冷, 而冰消期过程中, 大洋深部储碳可以从海洋上层释放出来, 引起气候快速变暖, 进而提出微型生物碳泵放大了地球轨道参数变化引发的气候效应的科学假说, 有望通过跨时空数据分析和生态系统模拟实验对米兰科维奇理论与实际观测的巨大差异作出解释.

以上3个科学假说在时空尺度上的辩证统一可以进一步推出更为宏观的科学假说——微型生物碳泵是气候变化的双向调节器, 即微型生物碳泵既可在高二氧化碳环境下积累海洋碳汇、减缓全球变暖, 又可在“相对冰期”后释放二氧化碳贡献于气候回暖. 为此, 本文提出以下三方面研究设想.

#### 3.1 海洋碳汇的形成过程和调控机制

针对第一个科学假说——微型生物碳泵是海洋有机碳库的主要形成机制, 需要研究为什么MCP能迅速产生RDOC. MCP过程非常复杂, 是典型的多学科交叉科学命题. 就微生物本身而言, 涉及了自养与异养、原核与真核等功能各异的不同类群. 例如, 浮游植物和蓝细菌是地球上最主要的光合微生物类群, 其在固定 $\text{CO}_2$ 形成自身POC的同时, 释放大量的DOC进入环境<sup>[25]</sup>. 浮游异养细菌和古菌是海洋碳循环的“主角”, 通过吸收、利用DOC推动着海洋食物网的能量和物质流动, 并将DOC转化成RDOC, 贡献于海洋储碳<sup>[19,40]</sup>. 浮游病毒侵染和原生动物摄食调控着海洋浮游植物、细菌和古菌的丰度及动态变化, 不仅链接微食物环与经典食物链以传

递物质与能量,而且贡献于海洋DOC的产生<sup>[19,41]</sup>。DOC与POC在生物学、生态学及生物地球化学的过程和机理差异很大,但二者又是紧密联系和相互影响的。目前上述这些过程尚未明了,若干自然现象及其背后的机理有待回答。例如:POC通量沿水深增加会迅速衰减,除了呼吸产生CO<sub>2</sub>之外,其余“丢失的”碳到哪里去了?不同形态的碳之间是怎样分配?异养的贫营养海区如何能够储碳?浮游植物作为有机碳的生产者,为什么除了近海以外其分布与有机碳浓度的分布趋势并不一致?不同类群的浮游植物其光合系统的进化和有机碳储存形式之间的关系如何?又如何影响海洋DOC和POC碳库?化能自养微生物对海洋初级生产力及储碳的贡献如何?要回答这些问题,需要生物、生态、地球化学、沉积等多学科交叉与融合,需要微观(基因水平)与宏观(生态系统水平)的结合与贯通,需要从可控生态学实验到海上现场原位调查的系统研究与集成分析。

### 3.2 中国海碳源汇格局的演化、物理-生物地球化学调控和生态环境效应

针对第二个科学假说——微型生物碳泵和生物泵的时空分异调控了碳源汇格局,亟须全面刻画边缘海碳收支时空格局,系统评估其中的环流动力机制、地球化学过程及其耦合过程,预测不同全球变化场景下边缘海碳演化格局的变化趋势<sup>[27]</sup>。相关的关键科学问题包括:在系统水平上,边缘海在年际及更长时间尺度上的CO<sub>2</sub>源汇格局及其演化趋势如何?BCP、MCP和CCP如何调控源汇格局及其演化?边缘海碳循环受人类活动干扰的程度如何?边缘海的碳汇格局及其演变的生态效应,亦即与海洋酸化、富营养化及脱氧的协同效应如何?南海等边缘海的碳循环过程与机理的全球意义如何?全球变化下边缘海碳循环及其生态环境效应的发展趋势如何?因此,可以南海作为示范体系,融合现场观测与数值模拟等手段,综合运用物理-生物地球化学、无机碳-营养盐耦合分析和定量解析新方法,从碳和营养盐(包括常量和微量营养盐)入手,探讨边缘海与开阔大洋界面、陆海界面的交换,突破外源输入及系统内固有的生物地球化学(如BCP与MCP)两个关键过程,解析大洋主控型边缘海(OceMar)和河流主控型陆架海(RiOMar)两大边缘海系统的固碳、储碳机理,定量评估其中的碳源汇通量、变化趋势及其生态效应,并深入系统地开展全球边缘海碳循环过程和机理的比较研究,从而完善边缘海碳循环理论框架,为预测边缘海碳演化奠定基础。

### 3.3 海洋碳汇对气候变化的响应与反馈

针对第三个科学假说——微型生物碳泵放大了地球轨道参数变化引发的气候效应,需要深入研究海洋碳库在地球气候系统多时间尺度变化中的作用:冰期旋回和跨越冰期旋回中海洋碳库与海气CO<sub>2</sub>交换格局到底如何变化?其调控因素是什么?其中BCP、MCP和CCP各自的贡献如何?需要采

用古今结合的思路、地质记录与现代观测相结合的手段以及多学科交叉的方法,研究新生代不同时间尺度上海洋碳汇的过程与机制,重点探索深海碳循环偏心率长周期的机制和冰期旋回中海气CO<sub>2</sub>交换,解答传统米兰科维奇理论的难题,实现海洋碳循环演变机制的理论突破,为预测未来气候系统自然变化趋势提供科学依据。为解决上述地质尺度上的科学问题,需要通过将海洋碳汇在地质历史时期的气候效应与现代海洋生态环境效应相比较,确定典型古今海洋环境情景下碳源汇转变的边界条件。一方面,开展中大尺度的情景模拟和长时间序列海洋观测。我们前期实验结果已经证实,MCP不仅存在而且效率大大超过预期,不用千百年时间,一年期实验就足以观测到微生物转化生成RDOC<sup>[25]</sup>,也就是说,如果保持条件不变,RDOC将稳定储存和积累,完全可以实现大规模的碳转化调节碳库消长。因此,MCP造就的巨大RDOC碳库消长可调控大气CO<sub>2</sub>,可能是冰期旋回CO<sub>2</sub>升降的机制之一。亟须定量研究何种因素的变动可能触发RDOC转化为CO<sub>2</sub>并释放?多大程度的变动影响POC和DOC相互转化?另一方面,深入研究地质关键期海洋碳库演化及其生态环境效应,并采用多时间尺度的海洋碳循环气候模式进行检验。这些过程机制的研究和验证将极大地提高人们对海洋碳汇的气候环境响应与反馈机制的认识,对于现代海洋增汇研发与其气候和生态效应的预测、研究也具有重要意义。

## 4 未来研究的关键突破口

在认识上述海洋碳汇机制的基础上,通过生物、化学、地质学科的交叉融合深入解析多种储碳机制的协同作用,可望建立负排放最大化的理论框架<sup>[9]</sup>,其内涵包括以下三方面。

(1) MCP-BCP协同作用机制。BCP与MCP存在时空的耦合与分异。如果新生产力提高,BCP即增加,并影响MCP。而MCP对BCP有两种效应:包裹(coating)效应、聚合(aggregation)效应<sup>[20]</sup>,前者即POC在沉降过程中与RDOC分子碰撞、结合乃至被RDOC包裹,从而起到增大和保护POC的作用;后者指的是RDOC分子通过聚合作用形成POC加入到BCP中。这种情形下,水体POC组分产生“分馏”,并可能进一步改变沉积物中POC的年龄结构,由于RDOC的平均年龄约为5000年,即便是RDOC占POC的绝对量不大,其所造成的同位素定年误差也可能很大<sup>[20]</sup>。

(2) MCP-CCP协同作用机制。MCP对CCP的作用主要有两方面:凝结核(condensation nuclei, CN)效应、微型生物代谢过程的碱度效应。前者在水柱中意义重大,MCP的产物RDOC对CCP的促进作用恰似没有云的凝结核,即使空气中水汽含量再高也难以降雨。Ca<sup>2+</sup>在海水中是过饱和的,也不缺少HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>,但并非总有CaCO<sub>3</sub>析出<sup>[42]</sup>。MCP过程产生的RDOC有机大分子不易被降解,其CN作用促使CaCO<sub>3</sub>结晶形成。微型生物代谢的碱度效应在沉积物中意义重大。厌氧环

境中微生物不仅高效产生RDOC, 而且产生 $\text{HCO}_3^-$ 碱度, 促进自生碳酸盐的形成. 地球历史上曾经出现过自生碳酸盐大量沉积的现象, 对气候变化产生了重要影响<sup>[13]</sup>.

(3) BCP-CCP协同作用机制. BCP对CCP的作用有两方面: 一是钙质浮游生物(如*Coccolithophores*和*Foraminifera*)不仅形成POC还形成碳酸盐壳体, 同时产生BCP和CCP输出. 尤其是颗石藻在发生藻华的时候, 可以产生大量的碳酸盐一同沉积到海底, 其影响之大甚至可以改变地貌<sup>[11]</sup>. 另一方面, 碳酸盐形成过程释放出来的 $\text{CO}_2$ 微环境可能有利于颗石藻的光

合作用, 起到相辅相成的效应<sup>[43]</sup>. 伴随藻华, BCP将有机质输送至海底, 大量有机物质降解导致氧气消耗而产生缺氧环境, 厌氧微生物的活动产生碱度, 从而有利于碳酸盐的沉积. 由微生物介导的碳酸盐沉积过程在自然界中广泛存在, 如叠层岩和冷泉碳酸盐岩<sup>[44,45]</sup>.

综上, 通过学科交叉研究, 整合MCP、BCP、CCP的耦合储碳机制, 可望突破单一储碳机制的局限性, 实现海洋储碳最大化. 同时, 形成基于生态系统平衡和可持续发展理念的海洋储碳理论体系.

**致谢** 感谢厦门大学蔡阮鸿博士和肖喜林博士在文章写作过程中的贡献及Joint ICES/PICES WG on Ocean Negative Carbon Emissions(ONCE)成员的贡献; 感谢国家自然科学基金(42188102)资助.

## 推荐阅读文献

- Jiao N Z. Developing ocean negative carbon emission technology to support national carbon neutralization (in Chinese). *Bull Chin Acad Sci*, 2021, 36: 179–187 [焦念志. 研发海洋“负排放”技术 支撑国家“碳中和”需求. 中国科学院院刊, 2021, 36: 179–187]
- Zhang S, Chen W. Assessing the energy transition in China towards carbon neutrality with a probabilistic framework. *Nat Commun*, 2022, 13: 87
- Working Group on the Annual Report of China's Carbon Neutralization and Plot Air Synergy Pathway. China Carbon Neutralization and Plot Air Synergy Pathway 2021 (in Chinese). Beijing: China Clean Air Policy Partnership, 2021 [中国碳中和与情节空气协同路径年度报告工作组. 中国碳中和与情节空气协同路径2021. 北京: 中国清洁空气政策伙伴关系, 2021]
- Friedlingstein P, O'Sullivan M, Jones M W, et al. Global carbon budget 2020. *Earth Syst Sci Data*, 2020, 12: 3269–3340
- Nellemann C, Corcoran E, Duarte C, et al. Blue Carbon—The role of healthy oceans in binding carbon. In: Nellemann C, Corcoran E, Duarte C, et al., eds. *Blue Carbon. A Rapid Response Assessment*. Arendal: United Nations Environment Programme, 2009
- Wang F M, Tang J W, Ye S Y, et al. Blue carbon sink function of Chinese coastal wetlands and carbon neutrality strategy (in Chinese). *Bull Chin Acad Sci*, 2021, 36: 1–11 [王法明, 唐剑武, 叶思源, 等. 中国滨海湿地的蓝色碳汇功能及碳中和对策. 中国科学院院刊, 2021, 36: 1–11]
- Atwood T B, Connolly R M, Almahasheer H, et al. Global patterns in mangrove soil carbon stocks and losses. *Nat Clim Chang*, 2017, 7: 523–528
- Jiao N Z, Liang Y T, Zhang Y Y, et al. Carbon pools and fluxes in the China Seas and adjacent oceans. *Sci China Earth Sci*, 2018, 61: 1535–1563 [焦念志, 梁彦韬, 张永雨, 等. 中国海及邻近区域碳库与通量综合分析. 中国科学: 地球科学, 2018, 48: 1393–1421]
- Jiao N Z, Liu J H, Shi T, et al. Deploying ocean negative carbon emissions to implement the carbon neutrality strategy (in Chinese). *Sci China Earth Sci*, 2021, 51: 632–643 [焦念志, 刘纪化, 石拓, 等. 实施海洋负排放践行碳中和战略. 中国科学: 地球科学, 2021, 51: 632–643]
- Hansell D A, Carlson C A. *Biogeochemistry of Marine Dissolved Organic Matter*. 2nd ed. Boston: Academic Press, 2015. 1–20
- Reitner J, Thiel V. *Encyclopedia of Geobiology*. Dordrecht: Springer, 2011. 277–278
- Reid R P, Visscher P T, Decho A W, et al. The role of microbes in accretion, lamination and early lithification of modern marine stromatolites. *Nature*, 2000, 406: 989–992
- Schrag D P, Higgins J A, Macdonald F A, et al. Authigenic carbonate and the history of the global carbon cycle. *Science*, 2013, 339: 540–543
- Jiao N Z, Wang R. The structure of marine primary production (in Chinese). *Oceanol Liminol Sin*, 1993, 24: 340–344 [焦念志, 王荣. 海洋初级生产力的结构. 海洋与湖沼, 1993, 24: 340–344]
- Jiao N Z, Wang R, Li C L. Primary production and new production in spring in the East China Sea (in Chinese). *Oceanol Liminol Sin*, 1998, 29: 135–140 [焦念志, 王荣, 李超伦. 东海春季初级生产力与新生产力的研究. 海洋与湖沼, 1998, 29: 135–140]
- Ducklow H, Steinberg D, Buesseler K. Upper ocean carbon export and the biological pump. *Oceanography*, 2001, 14: 50–58
- Siegel D A, Buesseler K O, Doney S C, et al. Global assessment of ocean carbon export by combining satellite observations and food-web models. *Glob Biogeochem Cycle*, 2014, 28: 181–196
- Martin J H, Knauer G A, Karl D M, et al. VERTEX: Carbon cycling in the Northeast Pacific. *Deep Sea Res Part A Oceanogr Res Pap*, 1987, 34: 267–285
- Jiao N, Herndl G J, Hansell D A, et al. Microbial production of recalcitrant dissolved organic matter: Long-term carbon storage in the global ocean. *Nat Rev Microbiol*, 2010, 8: 593–599
- Jiao N, Robinson C, Azam F, et al. Mechanisms of microbial carbon sequestration in the ocean—Future research directions. *Biogeosciences*, 2014,

11: 5285–5306

- 21 Barber R T. Dissolved organic carbon from deep waters resists microbial oxidation. *Nature*, 1968, 220: 274–275
- 22 Hansell D A, Carlson C A. Localized refractory dissolved organic carbon sinks in the deep ocean. *Glob Biogeochem Cycle*, 2013, 27: 705–710
- 23 Hansell D, Carlson C, Repeta D, et al. Dissolved organic matter in the ocean: A controversy stimulates new insights. *Oceanography*, 2009, 22: 202–211
- 24 Rothman D H, Hayes J M, Summons R E. Dynamics of the Neoproterozoic carbon cycle. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2003, 100: 8124–8129
- 25 Jiao N, Cai R, Zheng Q, et al. Unveiling the enigma of refractory carbon in the ocean. *Natl Sci Rev*, 2018, 5: 459–463
- 26 Ridgwell A. Evolution of the ocean’s “biological pump”. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2011, 108: 16485–16486
- 27 Dai M H, Su J Z, Zhao Y Y, et al. Carbon fluxes in the coastal ocean: Synthesis, boundary processes and future trends. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2022, 50, <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-032320-090746>
- 28 Tziperman E, Halevy I, Johnston D T, et al. Biologically induced initiation of Neoproterozoic snowball-Earth events. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2011, 108: 15091–15096
- 29 Sexton P F, Norris R D, Wilson P A, et al. Eocene global warming events driven by ventilation of oceanic dissolved organic carbon. *Nature*, 2011, 471: 349–352
- 30 Hays J D, Imbrie J, Shackleton N J. Variations in the Earth’s orbit: Pacemaker of the Ice Ages. *Science*, 1976, 194: 1121–1132
- 31 Kerr R A. Milankovitch climate cycles through the Ages. *Science*, 1987, 235: 973–974
- 32 Karner D B, Muller R A. A causality problem for Milankovitch. *Science*, 2000, 288: 2143–2144
- 33 Ganopolski A, Winkelmann R, Schellnhuber H J. Critical insolation—CO<sub>2</sub> relation for diagnosing past and future glacial inception. *Nature*, 2015, 529: 200–203
- 34 Clemens S C, Tiedemann R. Eccentricity forcing of Pliocene-Early Pleistocene climate revealed in a marine oxygen-isotope record. *Nature*, 1997, 385: 801–804
- 35 Wang P X, Li Q Y, Tian J, et al. Long-term cycles in the carbon reservoir of the Quaternary ocean: A perspective from the South China Sea. *Natl Sci Rev*, 2014, 1: 119–143
- 36 Arrieta J M, Mayol E, Hansman R L, et al. Dilution limits dissolved organic carbon utilization in the deep ocean. *Science*, 2015, 348: 331–333
- 37 Jiao N, Legendre L, Robinson C, et al. Comment on “Dilution limits dissolved organic carbon utilization in the deep ocean”. *Science*, 2015, 350: 1483
- 38 Dai M H, Cao Z M, Guo X H, et al. Why are some marginal seas sources of atmospheric CO<sub>2</sub>? *Geophys Res Lett*, 2013, 40: 2154–2158
- 39 Cao Z, Yang W, Zhao Y, et al. Diagnosis of CO<sub>2</sub> dynamics and fluxes in global coastal oceans. *Natl Sci Rev*, 2019, 7: 786–797
- 40 Herndl G J, Reinthaler T. Microbial control of the dark end of the biological pump. *Nat Geosci*, 2013, 6: 718–724
- 41 Zhao Z, Gonsior M, Schmitt-Kopplin P, et al. Microbial transformation of virus-induced dissolved organic matter from picocyanobacteria: Coupling of bacterial diversity and DOM chemodiversity. *ISME J*, 2019, 13: 2551–2565
- 42 Chave K E, Suess E. Calcium carbonate saturation in seawater: Effects of dissolved organic matter. *Limnol Oceanogr*, 1970, 15: 633–637
- 43 Thierstein H R, Young J R. *Coccolithophores: From Molecular Processes to Global Impact*. Berlin: Springer, 2004. 31–49
- 44 Grotzinger J P, Rothman D H. An abiotic model for stromatolite morphogenesis. *Nature*, 1996, 383: 423–425
- 45 Hinrichs K U, Hayes J M, Sylva S P, et al. Methane-consuming archaeobacteria in marine sediments. *Nature*, 1999, 398: 802–805

Summary for “海洋储碳机制及相关生物地球化学过程研究策略”

# Research strategies for ocean carbon storage mechanisms and effects

Nianzhi Jiao<sup>1,2\*</sup>, Minhan Dai<sup>1</sup>, Zhimin Jian<sup>3</sup>, Xiaoxue Wang<sup>4</sup> & Rui Zhang<sup>1,2</sup><sup>1</sup> State Key Laboratory of Marine Environmental Science, College of Ocean and Earth Sciences, Xiamen University, Xiamen 361102, China;<sup>2</sup> Fujian Key Laboratory of Marine Carbon Sequestration, Innovation Research Center for Carbon Neutralization, Xiamen University, Xiamen 361102, China;<sup>3</sup> State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China;<sup>4</sup> Key Laboratory of Tropical Marine Bio-resources and Ecology, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China\* Corresponding author, E-mail: [jiao@xmu.edu.cn](mailto:jiao@xmu.edu.cn)

The ocean, being the largest carbon reservoir on the Earth surface, plays an irreplaceable role in regulating climate change and also has great potential for negative emissions. Here, we briefly review the ocean carbon storage processes and mechanisms that have been recognized to date, including the solubility pump (SP), carbonate counter pump (CCP), biological carbon pump (BCP), and microbial carbon pump (MCP). However, several scientific questions remain: How is the huge dissolved organic carbon pool in the ocean formed? What are the biogeochemical processes and regulatory mechanisms of the ocean carbon sink? How are they involved in regulating climate change? Three scientific hypotheses are thus proposed: The MCP is the main mechanism responsible for the formation of the oceanic organic carbon pool; the spatial and temporal partitioning of the MCP and the BCP substantially regulates the carbon source-sink patterns; the MCP amplifies the climate effects induced by changes of the Earth's orbital parameters. Synthesis of the three hypotheses on spatial and temporal scales can lead to a more general scientific hypothesis: The MCP is a two-way regulator of climate change, that is, it can both accumulate an ocean carbon sink under a high CO<sub>2</sub> environment and thus slow down global warming and also release CO<sub>2</sub> after an “ice age” contributing to the return of a warm world.

Toward address these hypotheses, the following research contents should be conducted: (1) The roles of key microbial functional groups in representative marine environments and their contributions to marine carbon sink, including production, decomposition, transformation, and sequestration of dissolved and particulate organic carbon; (2) the evolution, physical-biogeochemical regulation, and environmental effects of carbon source-sink patterns in the China Seas, including the quantification of the sea-atmosphere CO<sub>2</sub> flux and its evolution at marginal seas, the physical and biogeochemical processes and mechanisms controlling the carbon cycle and a comparison of BCP, MCP, and the impacts of carbon cycling processes on eutrophication, acidification, and anoxia formation; and (3) the responses and feedbacks of ocean carbon sinks to climate change, linking the changes in ocean carbon pools with the ice age cyclone, exploring boundary conditions for MCP, BCP, and CCP processes toward potential maximum outputs of carbon sequestration.

We recommend working toward integration of the coupled carbon storage mechanisms of MCP, BCP, and CCP through cross-disciplinary research, which would overcome the limitation of considering only individual carbon storage mechanisms and facilitate maximization of ocean carbon storage. For example, the coating and aggregation effects of RDOC on POC shows the synergistic effects of MCP with BCP; the role of RDOC as condensation nuclei and the increase of alkalinity during microbial processes shows the synergistic effects of MCP with BCP; the sinking and production of CaCO<sub>3</sub> of *Coccolithophores* and *Foraminifera* shows the synergistic effects of BCP with CCP. Simultaneously, a theoretical system of ocean carbon storage based on the concepts of ecological balance and sustainable development will form and may serve as a key to interpreting climate change and an effective way to understand the past and predict the future of global climate.

**biological carbon pump, microbial carbon pump, carbonate counter pump, carbon neutralization, ocean negative carbon emission, marine carbon sink**

doi: [10.1360/TB-2022-0057](https://doi.org/10.1360/TB-2022-0057)