



海洋储碳机制及区域碳氮硫循环耦合对全球变化的响应

谢树成^{1*}, 陈建芳², 王风平³, 荀鲁盈⁴, 汤凯⁵, 翟卫东⁴, 刘纪化⁴, 马文涛⁶

1. 中国地质大学生物地质与环境地质国家重点实验室, 武汉 430074;

2. 国家海洋局第二海洋研究所, 杭州 310012;

3. 上海交通大学生命科学与技术学院, 上海 200240;

4. 山东大学海洋研究院, 青岛 266237;

5. 厦门大学海洋与地球科学学院, 厦门 361005;

6. 同济大学海洋与地球科学学院, 上海 200092

* E-mail: xiecug@163.com

收稿日期: 2016-10-28; 接受日期: 2017-01-12; 网络版发表日期: 2017-02-21

国家重点研发计划专项“全球变化及应对”项目(编号: 2016YFA0601100)资助

1 全球变化过程中海洋储碳需解决的重大前沿科学问题

海洋作为地球表面最大的活跃碳库, 其碳收支在很大程度上决定了全球气候变化的走向. 然而, 海洋碳循环是一个多时空尺度的过程, 相关的碳收支估算存在很大的不确定性, 其控制过程与机理更是一个颇具挑战性的难题(胡敦欣等, 2015), 特别是海洋储碳机制, 是研究全球变化及应对的核心内容之一.

在海洋的主要储碳机制中, 当前国际上已经开展了大量生物泵(BP)研究, 使生源沉降颗粒物通量及其调控机制成为海洋生物地球化学研究中的热点(Honjo等, 2014). 然而, 海洋中溶解有机碳(DOC)碳库占海洋总有机碳库的90%以上, 初级生产过程形成的有机碳只有通过颗粒有机碳沉降到深海或者经由微生物主导的转化形成惰性DOC进入慢速循环, 才能起到储碳作用. 在开展了大量海洋上层生态过程研究的今天,

阐述BP在沉降过程如何与微型生物碳泵(MCP)相互作用, 是研究海洋储碳机制的一大关键. 我国学者在国际上首创MCP的理论框架(Jiao等, 2010), 并发现BP与MCP的相互作用影响了细菌储碳(Jiao等, 2014), 从而引领该领域的国际发展方向. 我国有望在南海等区域的BP与MCP互作研究上得到快速发展, 在未来继续领跑国际上这一领域的发展.

然而, 各种物理过程和海洋生态系统存在频繁的相互作用, 各种微生物地球化学过程在不同时空尺度存在交互影响, 特别是碳、氮、硫循环的耦合过程深刻地影响海洋碳汇. 尤其重要的是, 在BP与MCP的相互作用中, 伴随着碳、氮、硫循环的耦合过程, 这些耦合过程深刻地影响海洋碳汇, 单纯研究碳循环来阐述海洋储碳机制已远不能达到目的. 在当前海洋生物地球化学领域, 那些具有全局性的重大突破无不与碳-氮循环(如厌氧氨氧化作用)、碳-硫循环(如厌氧甲烷氧化作用)之间的耦合密切相关. 碳、氮、硫循环的耦

中文引用格式: 谢树成, 陈建芳, 王风平, 荀鲁盈, 汤凯, 翟卫东, 刘纪化, 马文涛. 2017. 海洋储碳机制及区域碳氮硫循环耦合对全球变化的响应. 中国科学: 地球科学, 47: 378–382, doi: 10.1360/N072016-00328
英文引用格式: Xie S C, Chen J F, Wang F P, Xun L Y, Tang K, Zhai W D, Liu J H, Ma W T. 2017. Mechanisms of carbon storage and the coupled carbon, nitrogen and sulfur cycles in regional seas in response to global change. Science China Earth Sciences, doi: 10.1007/s11430-016-8328-2

合过程贯穿整个海洋,但当前对海洋深部元素循环的认识尤其薄弱.我国学者发现深古菌是海洋沉积物碳循环和生态系统的核心驱动者,有望弥补国际上一些缺环(Meng等, 2014; He等, 2016).因此,碳、氮、硫循环的耦合过程是研究海洋储碳机制的另一个关键而又极其薄弱的环节,有针对性地突破这一重要科学前沿,这在当前取得了大量海洋上层生态系统成果的今天尤其重要.

数值模型是研究区域通量和碳-氮-硫循环耦合的关键手段,但却是我国生物地球化学研究的一个瓶颈.目前海洋数值模式已由单纯物理模式发展为物理-生态系统模式(Aumont和Bopp, 2006; Shigemitsu等, 2012; Moore等, 2013; Dunne等, 2013),生态系统模式正在向碳、氮循环耦合模拟发展(Xiu等, 2014).但我国的数值模拟要薄弱得多,成为我国生物地球化学方面的一大瓶颈.国内开发出的地球系统模式都没有完整的海洋生态系统模块(Bao等, 2013; Ji等, 2014; Cao等, 2015).需要指出的是,我国学者可以利用在碳、氮、硫循环联动方面的优势,通过古今结合,把MCP与BP相互作用纳入,发展出新一代的海洋生态系统模型,这是我国学者可以做出贡献的关键领域.各种物理过程不仅随时间频繁变化(不同时间尺度),而且在海与陆之间、近海与外海之间均存在频繁的相互作用(不同空间尺度),导致碳循环过程异常复杂,因此将物理过程与生物地球化学过程结合开展研究尤其重要,特别是纳入物理-生态系统的模型,对定量研究区域乃至全球碳循环至关重要.

需要指出的是,现代和未来海洋碳循环过程的诸多要素存在很大的不确定性,其对生态系统的影响更难以准确预测,而古海洋则提供了一个很好的解剖碳循环效应(如对全球变化和生态系统的综合影响)的案例.我国学者在一些关键时期的深时全球变化与古海洋生物地球化学循环方面做出了重要的贡献(Xie等, 2005; Sun等, 2012; Song等, 2013; 谢树成等, 2014).这些古海洋的研究团队与现代海洋研究团队已经进行了多个973项目的联合,引领了国际相关领域的前沿研究.古今结合为解剖海洋碳循环对全球变化的响应及其对生态系统影响提供了关键案例,我国学者有望通过古今结合取得重大突破.在古海洋已经取得了重要成果的今天,古今对比研究尤其迫切.

2 海洋储碳需要重点开展的若干研究内容

为了解决上述重大科学问题,需要以微型生物碳泵和生物泵的互作过程为切入点,重点从碳-氮-硫循环的耦合、不同时空尺度的古今对比这两方面来研究海洋储碳机制及其对全球变化的响应,以解决全球变化背景下海洋碳循环的控制机理及效应这一颇具挑战性的难题.建议研究工作总体框架如图1所示.概括地说,需要分别研究从海洋水柱(研究内容一)到沉积物(研究内容二)的储碳机制,再到关键区域(研究内容三)和关键时期(研究内容三)的碳、氮、硫循环过程对全球变化的响应及其对海洋生态系统的影响.四大研究内容简述如下.

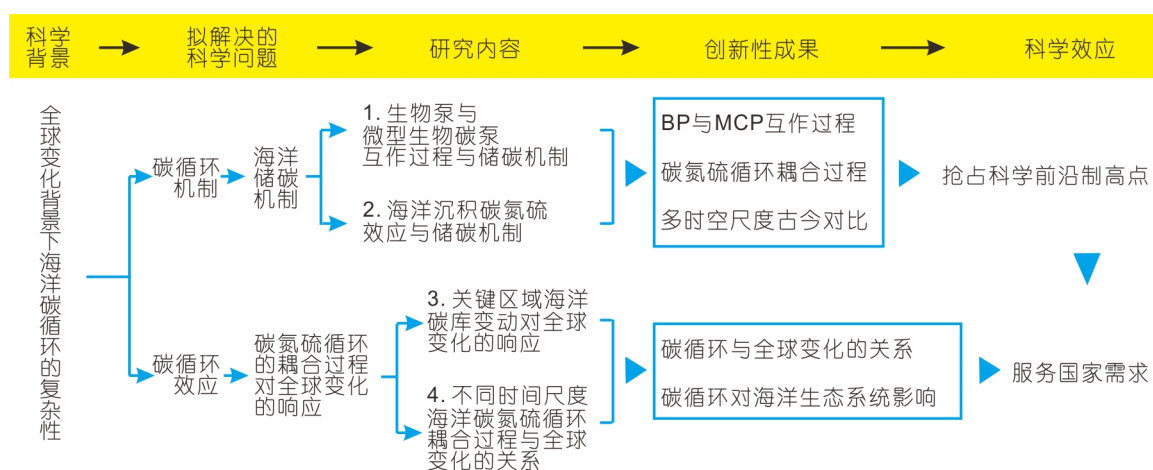


图1 海洋储碳研究的总体框架

2.1 海洋微型生物碳泵与生物泵的互作过程和储碳机制

以海洋两类碳泵互作过程的碳、氮、硫循环为突破口, 研究季风、中尺度过程、台风和沙尘暴事件对生物泵强度和结构的影响; 阐明这些多尺度物理过程如何通过影响营养盐供应来影响浮游植物种群结构, 进而影响生物泵和碳氮硅磷硫生物地球化学循环的机制, 评估多尺度物理过程对海洋生物泵储碳的影响. 研究南海上层的营养盐动力学过程, 考察生物泵强度和结构的垂向变化, 探讨浮游生物群落结构对颗粒通量运输的影响, 研究南海的固氮作用对生物泵的贡献, 研究颗粒物溶解过程及其对营养盐再生及储碳的影响. 选择“河口/海湾-陆架-海盆”及沉积物捕获器样品, 采用高通量组学分析及分子高分辨质谱等技术研究参与储碳等关键微型生物功能群和有机碳的组成、时空分布变化规律及其对微型生物碳泵的生态效应; 模拟原位培养, 结合生理、生化特性研究, 系统解析典型微生物对有机碳转化的代谢过程及细菌与浮游藻类互作的分子机制.

2.2 海洋沉积的碳氮硫效应和储碳机制

以沉积物内部和沉积物-海水界面的碳、氮、硫耦合过程为切入点, 重点聚焦在南海等区域, 研究河口/海湾-大陆架-海盆的沉积特征, 通过分析沉积物及其孔隙水地球化学与同位素组成并结合原位培养实验, 认识不同沉积环境下的有机质保存效率、成岩过程中不同来源有机碳丢失及其制约因素; 厘清沉积物内部发生的主要成岩矿化途径, 重点探讨硫酸盐还原、铁锰异化还原、甲烷产生和氧化、难降解自生和异生芳烃化合物降解等过程发生机制及其之间的耦合关系; 查明这些过程之间的碳氮硫迁移转化及其通量, 揭示它们与沉积环境和孔隙水地球化学组成之间的响应关系. 调查和监测深层海水、沉积物生态系统的组成和结构及其动态变化; 发现驱动碳氮硫循环的关键功能微生物, 重点关注难降解大分子有机质、芳香烃类化合物降解, 甲烷代谢微生物、氮代谢微生物以及硫化物代谢微生物等. 研究新功能和新的类群微生物(群)的代谢途径及调控机制, 阐述微生物介导的元素循环方式, 其在沉积过程和不同地质特征环境中碳氮硫元素循环中的作用. 研究沉积物有机碳的

代谢过程及其与氮、硫元素的偶联, 阐释能量代谢和储存机制与碳氮硫元素循环的耦联机制、储碳机制及其对海洋生态系统的影响. 在此基础上, 建立基于沉积物有机质成岩矿化作用驱动的元素循环模式, 定量评估这些生物地球化学过程对上层海水DIC(溶解无机碳)、DOC、营养盐以及沉积物硫的埋藏贡献及其生态环境效应.

2.3 关键区域海洋碳库变动对全球变化的响应特征与机理

在已出现有机质呼吸作用所导致季节性海水酸化的渤海等关键区域, 通过季节调查数据分析有机及无机碳库, 以及溶解氧、氮营养盐、有机硫组分之间的耦合变动, 结合基因测序/分析, 研究自然和人类活动多重胁迫下海洋碳、氮、硫循环及相关微生物生理过程对海水酸化的推动作用与反馈机制; 探索异养细菌硫酸化对浮游生物群体生产力及代谢功能的影响及其关键基因在海洋中的空间分布和表达活性, 解析异养和自养细菌硫酸化在海洋中的生态功能, 综合研究微型生物碳泵和生物泵的联动对各碳库变动的影响机制; 进而通过建立多尺度嵌套的水动力及碳氮硫耦合模型, 借助大体积围隔实验完善过程参数, 研究不同空间尺度海洋碳、氮、硫循环对全球变化、近海富营养化和海水酸化等胁迫的响应特征与机理, 预测我国关键近海海域缺氧酸化的发展趋势.

2.4 不同时间尺度的海洋碳氮硫循环耦合过程与全球变化关系

分别以末次冰消期以来、2.5亿年前、6.3亿年前等典型变暖期为关键解剖时间点, 探索碳、氮、硫循环耦合过程与全球变化的关系以及对海洋生态系统的影响. 重建末次冰消期的海水温度、海水 $p\text{CO}_2$ 、海洋氮同位素和浮游植物/微生物群落的变化历史, 揭示全球变暖、温室气体上升、氮储库变动和海洋生态变化之间的可能联系机制; 建立2.5亿年前高分辨率的生物事件和C-N-S同位素组成的时空分布特征, 探讨C-N-S循环特征及海洋DIC、DOC、沉积有机碳库的变化与全球变化的关系; 探索晚新元古代6.3亿年前古海洋化学空间结构与时间演化以及古生产力波动控制这一时期大型溶解有机碳库的积累和消耗的过程

和机制, 阐述这一时期大型溶解有机碳库如何影响地球气候的机制和过程. 对比研究不同时期海洋酸化、硫化的形成机制及其对海洋生态系统的影响.

以上四大研究内容之间的相互关系、研究内容与科学问题之间的关系、海洋碳循环与全球变化之间的关系如图2所示.

3 未来可能的突破点

海洋碳循环的控制过程与机理是全球变化及应对领域一个颇具挑战性的难题. 结合物理-生态系统模型, 通过多重时空尺度的古今对比、不同海区碳氮硫循环耦合过程的对比来解剖海洋微生物调控的碳循环过程及其对全球变化的响应是未来的两大关键突破点.

首先, 从多个时空尺度的古今对比角度研究碳库变动与全球气候变化的关系, 特别是与全球变暖的关系至关重要, 有望取得重要突破. 例如, 研究内容三是从现代海洋的典型区域出发探索碳库变动与全球变化的关系. 研究内容四将分别从末次冰消期、2.5亿年前的二叠纪-三叠纪之交、6.3亿年前的新元古代开展碳库变动与全球变化关系的研究, 并阐述它们对生态系统的影响. 涉及的三个时期均是地质时期全球变化与生态系统变化最关键的时期. 末次冰消期是离当前最近的一次变暖期; 2.5亿年前则是地球从冰室期向温室期转变过程中发生了最大的一次海洋生态系统的突变(最大的生物灭绝事件), 微生物出现暴发, 碳、氮、硫循环出现异常; 6.3亿年前也是从冷转暖的关键时期, 随后海洋中出现了最大的有机碳库, 比现在海洋有机碳库大100~1000倍. 只有弄清楚这些关键地质时期海洋环境变化过程中, 碳库变动与全球变化的关

系, 才能与现代海洋的研究成果结合, 从而更全面而深刻理解当代海洋碳库变动与全球变化的关系, 也才能更好地预测未来的发展趋势及其对生态系统的影响. 刚刚在美国麻省理工学院召开的气候科学大会上, 突显了2.5亿年前气候和生态系统的变化对全球变化研究的重要性. 相信随着资料的不断积累, 取得突破的可能性增大.

其次, 以寡营养盐、海洋酸化尚不严重的海域(如南海)和因富营养化加剧而已经出现季节性海水酸化现象的海域(如渤海)为重点对比区域, 研究自然和人类活动多重胁迫下海洋酸化过程、生物泵与微型生物碳泵联动的储碳机制及其与氮、硫循环的耦合关系, 也是未来的一个重要突破点. 如前所述, 初级生产力形成的有机碳只有通过颗粒有机碳沉降到深海或者经由微型生物主导转化形成惰性DOC进入慢速循环, 才能起到长时间储碳的作用. 在开展了大量海洋上层生态过程研究的今天, 阐述BP在沉降过程中如何与MCP相互作用, 碳循环如何与氮、硫循环关联, 这是研究海洋储碳过程的一大关键环节. 研究内容一是从南海的BP与MCP互作上阐述海洋储碳机制, 研究内容二则从沉积物-水界面的碳、氮、硫的耦合循环来阐述储碳机制. 研究内容三则以渤海为重点区域, 研究自然和人类活动多重胁迫下海洋酸化过程及其对海洋生态系统的影响. 这些不同侧面的研究为在这一关键环节的突破奠定基础.

综上, 在全球变化背景下, 需要加强古今不同时间尺度的对比研究, 加强不同海区碳、氮、硫循环的耦合过程的对比研究, 只有这样才能尽快突破海洋生态系统的储碳机制及其效应的一些关键环节, 服务于全球变化的应对.

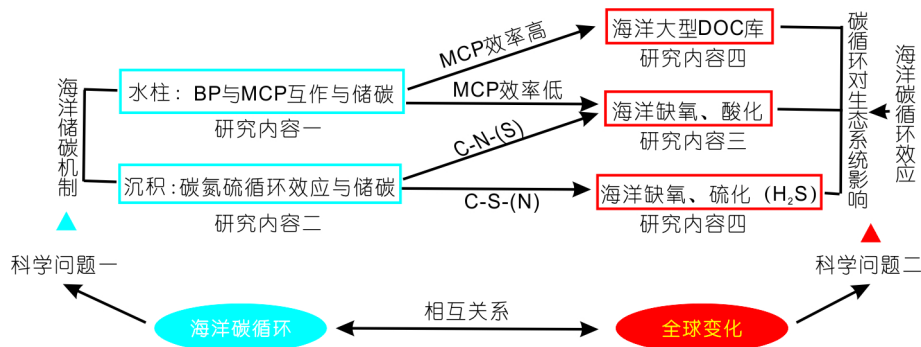


图2 四大研究内容与重大科学问题之间的关系

致谢 感谢焦念志院士、殷鸿福院士、汪品先院士、陈大可院士等对本项研究工作的指导。

参考文献

- 胡敦欣, 王东晓, 王凡, 冯俊乔, 唐晓晖, 杜岩, 管玉平, 陈立奇, 杨海军, 戴民汉, 蔡怡, 高坤山, 程旭华, 严厉, 李丽娟, 石睿. 2015. 海洋对气候变化的作用. 见: 《第三次气候变化国家评估报告》编写委员会. 第三次气候变化国家评估报告. 第六章. 北京: 科学出版社. 168
- 谢树成, 殷鸿福. 2014. 地球生物学前沿: 进展与问题. 中国科学: 地球科学, 44: 1072–1086
- Aumont O, Bopp L. 2006. Globalizing results from ocean *in situ* iron fertilization studies. *Glob Biogeochem Cycle*, 20: GB2017
- Bao Q, Lin P, Zhou T, Liu Y, Yu Y, Wu G, He B, He J, Li L, Li J, Li Y, Liu H, Qiao F, Song Z, Wang B, Wang J, Wang P, Wang X, Wang Z, Wu B, Wu T, Xu Y, Yu H, Zhao W, Zheng W, Zhou L. 2013. The Flexible Global Ocean-atmosphere-land System Model. Spectral Version 2: FGOALS-s2. *Adv Atmos Sci*, 30: 561–576
- Cao J, Wang B, Xiang B, Li J, Wu T, Fu X, Wu L, Min J. 2015. Major modes of short-term climate variability in the newly developed NUIST Earth System Model (NESM). *Adv Atmos Sci*, 32: 585–600
- Dunne J P, John J G, Shevliakova E, Stouffer R J, Krasting J P, Malyshev S L, Milly P C D, Sentman L T, Adcroft A J, Cooke W, Dunne K A, Griffies S M, Hallberg R W, Harrison M J, Levy H, Wittenberg A T, Phillips P J, Zadeh N. 2013. GFDL's ESM2 Global Coupled Climate-carbon Earth System Models. Part II: Carbon System Formulation and Baseline Simulation Characteristics. *J Climate*, 26: 2247–2267
- He Y, Li M, Perumal V, Feng X, Fang J, Xie J, Sievert S M, Wang F. 2016. Genomic and enzymatic evidence for acetogenesis among multiple lineages of the archaeal phylum Bathyarchaeota widespread in marine sediments. *Nat Microbiol*, 1: 16035
- Honjo S, Eglinton T I, Taylor C D, Ulmer K M, Sievert S M, Bracher A, German C R, Edgcomb V, Francois R, Iglesias-Rodriguez M D, van Mooy B, Repeta D J. 2014. Understanding the role of the biological pump in the global carbon cycle: An imperative for ocean science. *Oceanography*, 27: 10–16
- Ji D, Wang L, Feng J, Wu Q, Cheng H, Zhang Q, Yang J, Dong W, Dai Y, Gong D, Zhang R H, Wang X, Liu J, Moore J C, Chen D, Zhou M. 2014. Description and basic evaluation of Beijing Normal University Earth System Model (BNU-ESM) version 1. *Geosci Model Dev*, 7: 2039–2064
- Jiao N, Robinson C, Azam F, Thomas H, Baltar F, Dang H, Hardman-Mountford N J, Johnson M, Kirchman D L, Koch B P, Legendre L, Li C, Liu J, Luo T, Luo Y W, Mitra A, Romanou A, Tang K, Wang X, Zhang C, Zhang R. 2014. Mechanisms of microbial carbon sequestration in the ocean—Future research directions. *Biogeosciences*, 11: 285–5306
- Jiao N, Herndl G J, Hansell D A, Benner R, Kattner G, Wilhelm S W, Kirchman D L, Weinbauer M G, Luo T, Chen F, Azam F. 2010. Microbial production of recalcitrant dissolved organic matter: Long-term carbon storage in the global ocean. *Nat Rev Micro*, 8: 593–599
- Meng J, Xu J, Qin D, He Y, Xiao X, Wang F. 2014. Genetic and functional properties of uncultivated MCG archaea assessed by metagenome and gene expression analyses. *ISME J*, 8: 650–659
- Moore J K, Lindsay K, Doney S C, Long M C, Misumi K. 2013. Marine Ecosystem Dynamics and Biogeochemical Cycling in the Community Earth System Model [CESM1(BGC)]: Comparison of the 1990s with the 2090s under the RCP4.5 and RCP8.5 Scenarios. *J Clim*, 26: 9291–9312
- Shigemitsu M, Okunishi T, Nishioka J, Sumata H, Hashioka T, Aita M N, Smith S L, Yoshie N, Okada N, Yamanaka Y. 2012. Development of a one-dimensional ecosystem model including the iron cycle applied to the Oyashio region, western subarctic Pacific. *J Geophys Res*, 117: C06021
- Song H J, Wignall P B, Tong J, Yin H. 2013. Two pulses of extinction during the Permian-Triassic crisis. *Nature Geosci*, 6: 52–56
- Sun Y, Joachimski M M, Wignall P B, Yan C, Chen Y, Jiang H, Wang L, Lai X. 2012. Lethally hot temperatures during the Early Triassic greenhouse. *Science*, 338: 366–370
- Xie S, Pancost R D, Yin H, Wang H, Evershed R P. 2005. Two episodes of microbial change coupled with Permo/Triassic faunal mass extinction. *Nature*, 434: 494–497
- Xiu P, Chai F. 2014. Connections between physical, optical and biogeochemical processes in the Pacific Ocean. *Prog Oceanography*, 122: 30–53