南海碳循环：通量、调控机理及其全球意义

戴民汉，孟菲菲

厦门大学近海海洋环境科学国家重点实验室，厦门 361102

摘要 基于多年观测研究，南海CO_2源汇及其时空格局的总体特征是：南海海盆是大气CO_2的弱源区，年均海–气CO_2通量为$2.1\pm0.3\ \mathrm{mmol\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}}$；而南海北部陆架是碳汇区，年均$CO_2$通量为$-2.2\pm3.5\ \mathrm{mmol\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}}$；南海总体上每年向大气释放的碳量为1330万±1880万t。由于南海位于陆地–大洋交界带，存在多个界面过程，根据物质交换发生的不同界面，可将南海海盆和北部陆架视为大洋主控型边缘海（OceMar）和河流主控型陆架海（RiOMar）。这两类系统分别接受大洋和河流输入的外源无机碳和营养盐，经由一系列动力过程进入真光层后同时被生物消耗，无机碳和营养盐之间的"竞争"最终决定CO_2源汇格局。在南海海盆，无机碳相对过剩，部分以CO_2形式向大气释放，即为源；而在南海北部陆架，无机碳相对不足，系统需从大气补充CO_2，即为汇。南海碳循环机理及其框架对于更好地理解全球其他陆架边缘海系统具有重要的借鉴意义。

关键词 南海；碳通量；碳源汇格局；大洋主控型边缘海；河流主控型陆架海

边缘海位于陆地–大洋交界带，是地表系统中海–陆–气交互作用最为剧烈的区域，具有独特的地理、地质、物理、化学和生物特征，其中的碳通量及其调控过程具有高度时空变异性，受人类活动的干扰程度也大，因此，边缘海碳循环的研究极具科学挑战性。

南海于南北部拥有宽广陆架，受珠江、湄公河等大河输入的影响显著；东北部则通过2500 m深的吕宋海峡与西菲律宾海进行物质交换（图1），并呈现"三明治"式的交换模态，其中，上层的交换以黑潮分支进入南海为主要特征，深部以密度较高太平洋深层水入侵为主，而南海中层水则以反气旋方向流出吕宋海峡[1]。因此，南海兼具微型大洋与陆架海的双重特征。

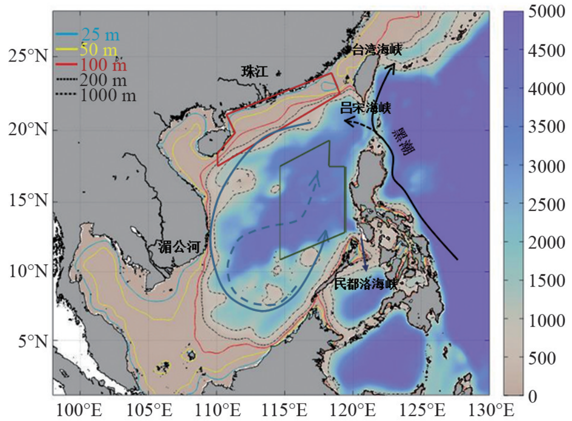
本研究简要总结南海CO_2源汇的时空格局，在此基础上介绍在南海并存的两类边缘海特征系统

收稿日期：2020-05-12；修回日期：2020-07-03

基金项目：国家自然科学基金重大研究计划重点项目（91328202）

作者简介：戴民汉，教授，研究领域为海洋生物地球化学，电子信箱：mdai@xmu.edu.cn

引用格式：戴民汉，孟菲菲．南海碳循环：通量、调控机理及其全球意义[J]. 科技导报，2020, 38(18): 30–34; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2020.18.004



注：红色框所示区域为南海北部陆架，水深小于200 m；绿色框所示区域为南海海盆，水深大于3000 m。冬季南海海盆表层呈现气旋式环流（蓝色实线），夏季南海南部表层呈现反气旋式环流（蓝色虚线）；黑色线为黑潮流径。南海表层环流根据参考文献[2]绘制

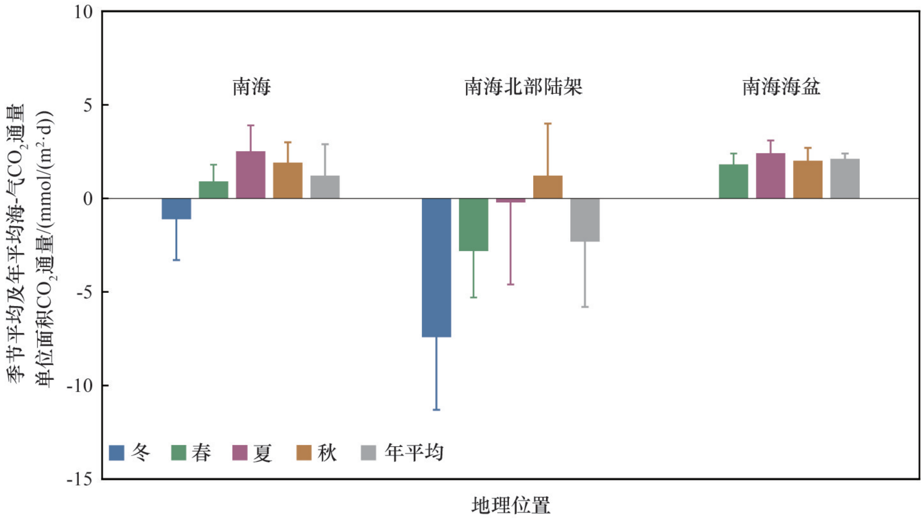
图1　南海地形及表层环流示意

—大洋主控型边缘海（ocean-dominated margin，OceMar）和河流主控型陆架海（river-dominated ocean margin，RiOMar），解析南海海-气CO_2通量的调控机理。

1　南海二氧化碳源汇时空格局

2000—2018年，在南海的大量现场观测数据[3]表明，南海海表CO_2分压（$p\mathrm{CO}_2$）总体上高于大气，是大气CO_2的源，该源汇格局存在时空变异。从季节上看，依据南海不同区域面积加权平均计算，冬季海-气CO_2通量为-1.1±2.2 mmol·m^{-2}·d^{-1}，是大气CO_2的汇；其余季节均为碳源，其中，春季通量为0.9±0.9 mmol·m^{-2}·d^{-1}，夏季为2.5±1.4 mmol·m^{-2}·d^{-1}，秋季为1.9±1.1 mmol·m^{-2}·d^{-1}（图2）。综合各季节通量值，估算南海年平均海-气CO_2通量为1.2±1.7 mmol·m^{-2}·d^{-1}，以南海主体面积为250 km^{2}计算（不包括泰国湾和北部湾），南海每年向大气释放1330万±1880万t碳[3]。

上述季节变化特征在南海的不同区域亦有不同表现[3-4]。在南海北部陆架（图1），夏季海表$p\mathrm{CO}_2$变化最为剧烈，变化幅度为150~650 matm，海-气CO_2通量为-0.4±4.4 mmol·m^{-2}·d^{-1}；冬季则整个区域的海表$p\mathrm{CO}_2$都低于大气（370 matm），海-气CO_2通量为-7.4±3.9 mmol·m^{-2}·d^{-1}；秋季是大气CO_2的弱源，春季是汇，该区域全年平均CO_2通量为-2.2±3.5 mmol·m^{-2}·d^{-1}（图2）。而在南海海盆（图1），春、夏、秋季的海表$p\mathrm{CO}_2$的变化范围为380~500 matm，均高于大气值，季节变化不大，冬季略低，全年平均海-气CO_2通量为2.1±0.3 mmol·m^{-2}·d^{-1}，整体表现为大气CO_2的源[3]（图2）。



注：海-气CO_2通量数据来源于参考文献[3]，为不同区域面积加权平均值

图2　南海、南海北部陆架、南海海盆季节平均及年平均海-气CO_2通量

南海北部陆架是一个典型的季风控制海区，春、秋季为季风转换期，海表温度变化大，CO_2在季节内也呈现剧烈的变化。在春季，3月是碳汇（−6.1±2.1 mmol·m^{-2}·d^{-1}），4月碳汇强度减弱（−3.9±2.9 mmol·m^{-2}·d^{-1}），5月则成为碳源（0.2±1.5 mmol·m^{-2}·d^{-1}）；在秋季，9月是碳源（6.7±4.9 mmol·m^{-2}·d^{-1}），10月碳源强度减弱（0.8±1.5 mmol·m^{-2}·d^{-1}），11月则成为碳汇（−2.1±2.3 mmol·m^{-2}·d^{-1}）[3]。

2 南海CO_2源汇格局的调控机理

南海与邻近海域在吕宋海峡发生的水交换主导了它的物质收支[5]。基于数值模式，Du等[5]综合分析了南海的碳收支：南海上层100 m水体中的无机碳（dissolved inorganic carbon，DIC）主要源于由下而上的垂向输运和西菲律宾海经吕宋海峡的水平输运，相比之下，河流输入的DIC通量几乎可略；在较短时间尺度内，南海通过150 m向上输送的DIC可追溯至西菲律宾海150~430 m的水平输运；在1600 m以深，自西菲律宾海输入的DIC随吕宋海峡“深海瀑布”下沉至南海深部海盆，并在南海西部涌升至中层。因此，南海海盆是典型的OceMar系统。南海与西菲律宾海在深部发生物质交换的净结果是无机碳和营养盐由西菲律宾海输入南海，再通过对流及扩散过程输送至真光层[6]；随后，浮游植物按照Redfield比值[7]（C∶N∶P=106∶16∶1）吸收海水中的DIC和营养盐并合成有机碳（图3）。如果经过这一系列过程后仍有DIC过剩，部分超额无机碳将会以CO_2的形式释放到大气中[6]。

南海北部陆架碳循环受季风影响显著，冬季东北季风盛行时，混合层加深，增加了输入真光层的营养物质，初级生产增强[8]；另外，闽浙沿岸流驱动下的跨海区营养物质输送对南海北部陆架冬季的生产力也有较大的贡献[9]。夏季西南季风盛行时，雨水丰沛，河流径流量增大，形成河流冲淡水，通常具有较高的营养盐通量和较低的无机碳与营养盐比值（也存在有机碳输入，但其量级显著小于DIC），因而存在较强的浮游植物生产过程，常常是大气CO_2的潜在汇区，是典型的RiOMar系统。

综上，南海不同区域分别展示出OceMar和RiOMar的特征。两类系统均存在外源无机碳和营养盐的输入，但其间的比例不同，相关的动力调控机制迥异，各自固有的生物新陈代谢亦不同，从而形成了各具特色的边缘海碳循环关键动力、生物地球化学过程以及两者的耦合（图3）。

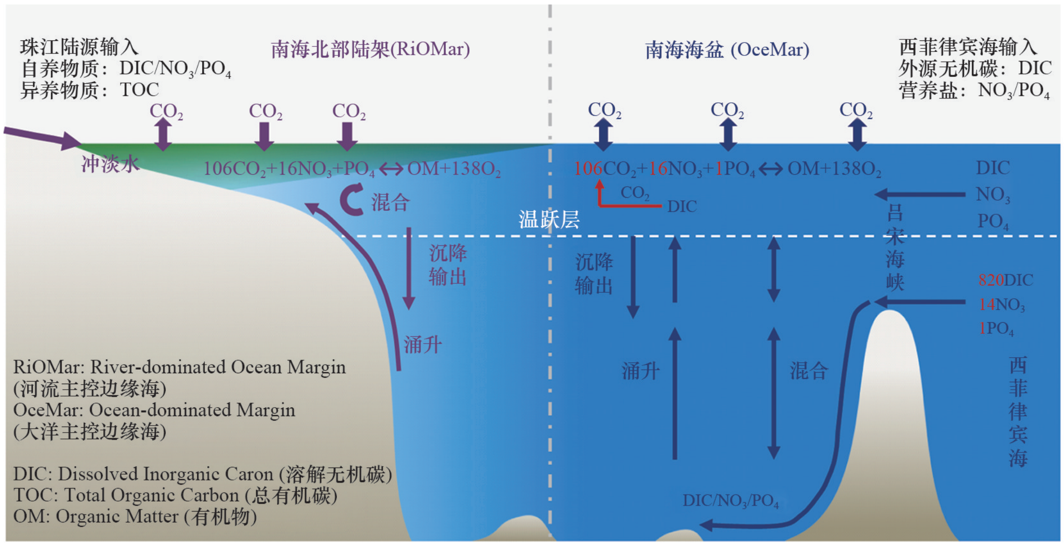


图3 大洋主控型边缘海（OceMar）和河流主控型陆架海（RiOMar）碳循环概念框架（根据参考文献[11]绘制）

3　结论

南海整体上是大气CO_2的源，每年向大气释放1330万±1880万t碳。需要指出的是，其中的变化范围高达1880万t，源于有限调查区域数据的外推所引入的不确定性，但主要反映的是南海CO_2固有的时空变化[10]。

南海深部经吕宋海峡与西菲律宾海进行的物质交换，为南海海盆向大气释放CO_2提供了主要碳源。相反，在季风、河流输入等过程的影响下，南海北部陆架整体上是碳汇。

作为边缘海，南海最大的特征是同时受陆-海、洋-海交互作用的影响，其间由物理动力驱动的物质交换在很大程度上决定了边缘海的碳循环速率，而以热力学和生物泵为核心的生物地球化学过程则是驱动碳循环的内因。在边缘海这种复杂的碳循环背景下，OceMar和RiOMar等概念的提出有助于构建边缘海碳循环研究框架。它们从河流-边缘海-开阔大洋连续体这一传统一维框架出发，强调了边缘海与陆地河流、开阔大洋间的相互作用应从三维角度同时进行物理和生物地球化学过程的检验。该类概念框架下的物理-生物地球化学耦合诊断方法已成功应用至典型陆架边缘海碳源汇过程和控制机制的解析，包括阿拉伯海[11]、加勒比海[6]、俄勒冈-加利福尼亚沿岸[12]、日本海[13]等OceMar系统，并有望延用至亚马逊冲淡水、密西西比河冲淡水等典型RiOMar系统。

致谢：杜川军博士和曹知勉博士在撰稿过程中提供帮助。

参考文献(References)

[1] Liu Z Q, Gan J P. Three-dimensional pathways of water masses in the South China Sea: A modeling study[J]. Journal of Geophysical Research-Oceans, 2017, 122(7): 6039-6054.

[2] Wong G T F, Ku T L, Mulholland M, et al. The South East Asian Time-series study (SEATS) and the biogeochemistry of the South China Sea: An overview[J]. Deep Sea Research-Part II, 2007, 54(14): 1434-1447.

[3] Li Q, Guo X H, Zhai W D, et al. Partial pressure of CO_2 and air-sea CO_2 fluxes in the South China Sea: Synthesis of an 18-year dataset[J]. Progress in Oceanography, 2020, 182, doi.org/10.1016/j.pocean.2020.102272.

[4] Zhai W D, Dai M H, Chen B S, et al. Seasonal variations of air-sea CO_2 fluxes in the largest tropical marginal sea (South China Sea) based on multiple-year underway measurements[J]. Biogeosciences, 2013, 10: 7775-7791.

[5] Du C J, Gan J P, Hui R C, et al. Dynamics of dissolved inorganic carbon in the South China Sea: A modeling study[J]. Progress in Oceanography, 2020, 186: 102367.

[6] Dai M H, Cao Z M, Guo X H, et al. Why are some marginal seas sources of atmospheric CO_2[J]. Geophysical Research Letter, 2013, 40(10): 2154-2158.

[7] Redfield A C, Ketchum B H ,Richard F A. The influence of organisms on the composition of sea-water[J]. The Sea, 1963, 2: 26-77.

[8] Chen Y L. Spatial and seasonal variations of nitrate-based new production and primary production in the South China Sea[J]. Deep Sea Research I, 2005, 52(2): 319-340.

[9] Han A Q, Dai M H, Gan J P, et al. Inter-shelf nutrient transport from the East China Sea as a major nutrient source supporting winter primary production on the northeast South China Sea shelf[J]. Biogeosciences, 2013, 10 (12): 8159-8170.

[10] Wang G Z, Dai M H, Shen S S P, et al. Quantifying uncertainty sources in the gridded data of sea surface CO_2 partial pressure[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2014, 119(8), doi: 10.1002/2013JC009577.

[11] Cao Z M, Yang W, Zhao Y Y, et al. Diagnosis of CO_2 dynamics and fluxes in global coastal oceans[J]. National Science Review, 2020, 7(4): 786-797.

[12] Cao Z M, Dai M H, Evans W, et al. Diagnosing CO_2 fluxes in the upwelling system off the Oregon-California coast[J]. Biogeosciences, 2014, 11(22): 6341-6354.

[13] Chou W C, Tishchenko P, Chuang K Y, et al. The contrasting behaviors of CO_2 systems in river-dominated and ocean-dominated continental shelves: A case study in the East China Sea and the Peter the Great Bay of the Japan/East Sea in summer 2014[J]. Marine Chemistry, 2017, 195, doi: 10.1016/j.marchem.2017.04.005.

Carbon cycle in the South China Sea: Flux, controls and global implications

DAI Minhan, MENG Feifei

State Key Laboratory of Marine Environmental Sciences, Xiamen University, Xiamen 361102, China

Abstract This paper reviews the spatially and temporally varied air-sea CO_2 fluxes in the South China Sea (SCS), to show that its basin area is a weak source to the atmospheric CO_2, while its northern shelf is a CO_2 sink. On an annual average basis, the SCS emits carbon of $(1.33\pm1.88)\times10^{10}$ g. The northern shelf includes a River-dominated Ocean Margin (RiOMar) during the peak discharges, and an SCS basin as an Ocean-dominated Margin (OceMar). The OceMar is characterized by dynamic exchange with the open ocean via a two-dimensional or even three-dimensional process, i.e., the horizontal intrusion of the open ocean water and the subsequent vertical mixing and upwelling. Depending on the different ratios of the dissolved inorganic carbon (DIC) and nutrients from the source waters into the margins, the relative consumption or removal between the DIC and the nutrients, while being transported into the euphotic zones taken over by biogeochemical processes, determines the CO_2 fluxes. Thus, the excess DIC relative to the nutrients in the upper layer will lead to the CO_2 degassing. Similar diagnosis can also be made to the RiOMar systems with typical features of significant excess nutrients relative to the DIC. It is suggested that the framework of the carbon cycle revealed from the SCS has important implications in better understanding world's other coastal systems.

Keywords South China Sea; carbon fluxes; CO_2 source-sink nature; Ocean-dominated Margin; River-dominated Ocean Margin

（责任编辑 祝叶华）