

中国近海碳收支、调控机理及生态效应研究进展

◆ 李春园 杨 爽 许艳苹

厦门大学近海海洋环境科学国家重点实验室, 厦门 361005

摘 要 973 计划“中国近海碳收支、调控机理及生态效应研究”(2009CB421200)项目自2009年正式启动以来,围绕核心科学问题及目标,在中国近海碳通量季节和年际尺度上的分布格局及其变化、碳源汇格局的主要控制过程与机制、海洋酸化生态效应及历史重建、碳循环及海洋酸化生态效应变化趋势等方面取得了一系列重要进展。本文根据该项目部分已发表的研究成果对上述各方面诸多重要研究进展进行了概略性介绍。

关键词: 中国近海 碳收支 调控机理 生态效应 研究进展

中图分类号: P722.6 P722.7 文献标识码: A

文章编号: 1009-2412(2012)06-0029-08

DOI: 10.3969/j.issn.1009-2412.2012.06.006

一、引 言

大气 CO₂ 是地球气候系统的重要控制因子之一,其浓度变化是理解当今气候变化及预测气候未来演变趋势的重要基础之一。近海或陆架边缘海是调控大气 CO₂ 浓度的三大系统之一。然而,迄今近海-大气间的碳通量估算仍然存在着很大的不确定性。除此之外,海洋大量吸收 CO₂ 将会引起海洋酸化,但迄今人们对海洋酸化的实际进程和生态效应尚知之甚少。

中国近海的面积约占世界陆架边缘海总面积的12%,纵跨温带、亚热带和热带,内有长江、珠江等大

收稿日期: 2012-12-2 修回日期: 2012-12-22

研究资助: 973 计划(2009CB421200)。

联系作者: 李春园 教授,研究方向为海洋生物地球化学,ycli@xmu.edu.cn。

河输入,外有黑潮与之交换,并在鲜明季风环流的影响下,海洋上层与深层的物质交换非常复杂,是备受国际关注的典型边缘海区域。因此中国近海碳循环研究兼具区域特色和全球示范意义,是提升我国碳循环研究国际地位、体现我国对全球碳循环前沿研究贡献的一个绝佳选题和难得机遇。鉴于此,国家科技部于2009年启动了题为“中国近海碳收支、调控机理及生态效应研究”的973计划项目。该项目以东海和南海陆架区为重点研究海域,从海气 CO₂ 通量入手,依据东海和南海的比较研究,以期查明中国近海碳通量季节和年际尺度上的分布格局及其变化;厘清中国近海碳源汇格局的主要控制过程与机制;阐明中国近海海洋酸化演变历史及其对近海生态系统的影响;探讨全球气候变化下的中国近海碳循环及海洋酸化生态效应变化趋势。

该项目运行近4年来,立足现场调查,通过涵盖四季的多个现场研究航次和百余项各类生物地球化学参数的现场与室内分析检测以及受控条件实验等,结合历史资料的集成与对比分析,并辅以一系列国内外学术研讨、国内外分析方法比对及项目内数据汇交与共享等管理措施的制订等,围绕项目核心科学问题,在诸多方面取得了重要研究进展,本文将概略地介绍该项目获得的重要研究成果。

二、主要研究进展

1. 中国近海碳通量季节和年际尺度上的分布格局及其变化

该科学问题的厘清主要涉及到以下两个方面:一是中国近海碳通量的时空分布格局,二是表层海水 CO₂ 分压(pCO₂)变化的影响因子。

就第一方面而言,式(1)给出了海气 CO₂ 通量的计算公式。

$$F = k \times s \times (p\text{CO}_{2\text{sw}} - p\text{CO}_{2\text{air}}) \quad (1)$$

式中 F 为海气 CO₂ 交换通量, k 为气体交换速率常数, s 为 CO₂ 在表层海水中的溶解度, pCO_{2sw} 和 pCO_{2air} 分别为 CO₂ 在表层海水和大气中的分压。

由式(1)不难看出,中国近海碳通量时空分布格局的估算涉及到中国近海海气界面 $p\text{CO}_2$ 的大量观测以及适合于中国近海气体交换速率常数的合理界定。

针对海气界面 $p\text{CO}_2$ 的观测,项目首先进行了涵盖春夏秋冬四季的多个中国近海海气界面 $p\text{CO}_2$ 的走航连续观测,并在国家海洋公益项目的联合支持下,启动了东海基于浮标的长时间序列海气 CO_2 通量观测,同时考虑到现场观测时空覆盖率不足的问题,我们还建立了神经网络^[1]和双参数^[2]等的海气 CO_2 通量遥感反演算法。

针对气体交换速率常数,考虑到波浪及其破碎所引起的湍流可以显著提高气体交换速率,与传统的主要基于风速而来的气体交换常数显著不同,本项目基于海-气界面动力和物质交换的相似性,给出了气体交换速率与风速和波高的双参数关系式,为更准确地估算海气界面 CO_2 通量奠定了基础^[3-4]。

在上述研究工作基础上,结合历史资料的集成与对比分析,本项目获得了中国近海(南海、东海和黄海)海-气界面碳通量的季节分布模式及中国近海 CO_2 的源汇格局,建成了参数较为齐全的中国海洋碳循环数据库。初步结果已以专报形式上报科技部。

就第二方面而言,利用本项目建立的一维物理-生物地球化学耦合模型,对控制南海北部 $p\text{CO}_2$ 的主要机制及其相对贡献进行了探讨。结果表明,在季节尺度上,海气 CO_2 交换和海表温度对南海北部表层海水 $p\text{CO}_2$ 的贡献最大,而水柱垂直混合及生物过程的贡献相对较小^[5]。除此之外,由于表层海水 $p\text{CO}_2$ 的变化涉及到海洋生物的光合与呼吸、碳酸盐的溶解与沉淀等诸多过程,兼之海水中硅、氮等营养盐及钙离子的量变与上述过程密切相关,因此,为厘清中国近海表层海水 $p\text{CO}_2$ 变化的影响与控制因子,本项目开展了大量海水硅、氮等营养盐及钙离子等的研究^[6-13]。

2. 中国近海碳源汇格局的主要控制过程与机制

近海碳循环是一个非常复杂的体系。从界面上来说,涉及到海-陆、海-气、海-沉积物、表层海水-深层海水、近海-外海等诸多界面。从过程上来说,一系列物理、化学、生物、地质等过程交汇其中。因此该科学问题的厘清涉及到多界面、多过程的综合研究。下面将从陆源碳输入、生物泵、陆架与深层大洋碳输送的层面分述主要研究进展。

(1) 陆源碳输入

河流与地下水是陆源碳向海洋输送的主要途径。然而,在以往的研究中,陆源碳输送的研究主要集中于河流,对地下水的研究相对较少,同时有关台风对陆源碳输送影响的研究也非常少见。鉴于此,本项目不仅系统研究了黄河、长江、珠江等主要河流的碳输送量,开展了地下水碳的入海通量研究,同时还观测到台风对陆源碳输送的显著影响。结果表明,黄河与长江向中国近海分别输送了 $3.20 \times 10^{10} \text{ g}$ 和 $1.58 \times 10^{12} \text{ g}$ 的溶解有机碳(DOC)以及 $3.89 \times 10^{11} \text{ g}$ 和 $1.52 \times 10^{12} \text{ g}$ 的颗粒有机碳(POC)。黄河POC的 ^{14}C 年龄介于4000—8000年之间,远高于长江POC的 ^{14}C 年龄(800—1060年)。而黄河与长江DOC的 ^{14}C 年龄差别不大,介于305—1570年之间,显著低于POC的年龄^[14]。另外,2009年8月7—9日莫拉克台风袭击台湾之后,本项目在据台湾西南180km水深3000—3700m处观测到高温、低盐的浑浊水体,考虑到西太平洋年均爆发23个台风,因此这一发现凸显了由台风诱发的高密度浊流对于陆地碳向海洋输送的重要意义^[15]。

关于地下水陆源碳输送,基于放射性镭同位素及碳酸盐系统参数(碱度、DIC、pH)的估算结果表明,南海北部通过地下水进入海洋的溶解无机碳的量可能高达 $153-347 \times 10^9 \text{ mol yr}^{-1}$,相当于23%—53%的珠江输入量^[16]。

除此之外,基于现场观测及文献资料汇总,本项目重新计算了世界118条主要河流DOC的入海通量,更新的结果为 $0.17 \text{ Pg C yr}^{-1}$ 。这一数值仅比当前普遍认可的边缘海对人为 CO_2 的吸收量($0.2-0.4 \text{ Pg C yr}^{-1}$)略低,因而这些有机碳进入边缘海之后是矿化分解为 CO_2 ,还是进一步运输到深海埋藏,将显著影响边缘海的海-气 CO_2 通量^[17]。

(2) 生物泵

海洋的显著特征是层化现象,而上层海洋吸收大气 CO_2 的容量十分有限,如果不能实现碳的垂向输送,那么上层海洋吸收大气 CO_2 的潜力将很快被耗尽。由此不难看出,碳的垂向输送对于海洋吸收大气 CO_2 至关重要。对于中、低纬度海洋而言,生物泵是实现海洋碳垂向输送的主要方式之一。简言之,生物泵就是海洋生物将无机碳转化为有机碳,然后再主要以POC的方式向深层海洋乃至沉积物输送碳的过程。其核心科学问题主要集中于以下两个方面,一是度量生物泵效率的大小与变化,二是阐明控制生物泵效率大小与变化的因素与机制。围绕上述

科学问题,本项目获得以下重要研究进展。

通过涵盖春夏秋冬四季的多个中国近海航次的现场调查,结合遥感反演,对东海和南海浮游植物光合色素、初级生产力、新生产力(包括分粒级)、POC输出通量(输出生产力)、浮游植物群落和个体水平的磷胁迫、微型浮游动物(异养鞭毛虫、纤毛虫)组成(优势类群或种类)、生物量及摄食、细菌生产力、细菌呼吸速率等进行了深入研究。获得了中国边缘海初级生产力、新生产力、输出生产力、浮游生物群落结构及微生物环的空间分布模式^[18-32],为深入解析陆架边缘海生物泵结构、运作效率及其控制机制奠定了基础。

除此以外,本项目还运用宏蛋白质组学技术研究了南中国海不同水层颗粒有机物和溶解有机物中蛋白质的组成变化。为查明不同水深有机质的来源及厘清有机质在沉降输出过程中的变化提供了重要科学依据^[33-34]。

(3) 物理-生物化学耦合及陆架与深层大洋碳输送

陆架向深海大洋的碳输送是陆架边缘海的特色之一,关系到陆架边缘海对大气 CO₂ 的吸收能力,是全球陆架边缘海碳循环研究必须解决的一个重要科学问题。然而,与生物泵显著不同,陆架边缘海向深海大洋的碳输送是通过海流实现的,同时,海流还是深海丰富营养盐向真光层输送的主要工具,其更控制着海区的营养盐、生物及 pCO₂ 的分布。在很多情况下,物理动力主导的海水运动对生态及 pCO₂ 的收支起着决定性的作用。因此,要评估中国近海向深海大洋的碳输送量及驱动机制,首先必须对中国近海的流场及其控制因素有清晰的了解。基于此,本项目应用温盐深探测仪(CTD)、声学多普勒流速剖面仪(ADCP)和多种传感器等走航综合观测系统和锚碇浮标观测系统,对海流和物质传输进行了大面海区 and 定点时间系列观测。由于海上现场观测受时间和空间限制,因此,在大量现场观测结果的基础上,我们发展了国内首个、世界先进的三维、多时间-空间尺度、高分辨率的物理-生物地球化学耦合数值模式,对中国海(东海、黄渤海、南海及其中的陆架、河口、海湾)的流场及其控制因素和生物化学响应进行了模拟和研究,并对其未来趋势作出预估^[35-53]。其中,我们首次提供了中国近海的粤东和舟山海区显著上升流、珠江河水羽状锋和南海北部下沉流的过程和控制机理,并对它们对营养盐的运输及其生物化学在时间和空间上的响应进行了深入研究,提

出了受物理-生物化学共同制约的中国大陆架生物泵及其 CO₂ 的特性^[5,41-43]。除了受陆架近海固有的耦合的物理-生物化学过程控制,中国海的碳收支同时与西太平洋的水交换紧密相关,特别是与西太平洋流经中国海边沿的强流黑潮的交流。本项目通过确认东海陆架边沿和南海吕宋海峡与西太平洋的通道,估算了深海大洋和中国近海的碳输送^[54],并通过动力-生物化学理论,提出碳循环和输送的机理。上述研究结果为评估中国近海向深层大洋的碳输送量奠定了基础。

3. 中国近海海洋酸化演变历史重建及海洋酸化的生态效应

通过重建中国近海海洋酸化的历史,可以帮助我们深刻理解现今海洋酸化状况并对未来海洋酸化趋势进行预测。除此之外,在海洋酸化的背景下,海洋生态系统会发生哪些可能的变化也是亟待厘清的重大科学命题。本项目围绕上述两个方面开展了大量研究,并取得一些重要进展。

(1) 中国近海海洋酸化历史重建

由于古海水不能再现,因此古海水 pH 值的确定需要利用替代指标进行反演。毋庸置疑,其前提条件是替代指标与海水 pH 值定量函数关系的构建。基于此,本项目在珊瑚礁和重点海域持续进行了海水 pH 值和 Sr/Ca、Mg/Ca、δ¹¹B 等参数的定点及走航观测。迄今,已在三亚湾建立起我国第一个珊瑚礁海水 pH 值变化的时间序列,并探讨了其控制机制,为海水 pH 值的反演奠定了基础。

除了大气 CO₂ 升高驱动的海洋酸化以外,本项目还在近海富营养化引发的酸化问题上取得进展。首次报道了渤海西北部、北部近岸海域底层水的 pH 值可以在 2 个月内下降 0.16—0.29 的现象^[55],并提出了我国北方海域可能是中国近海海洋酸化的重点区域的观点,并已经在黄、渤海海域开展了大量调查,初步探讨了其控制机制。

(2) 海洋酸化的生态效应

围绕海洋酸化生态效应的科学命题,本项目通过一系列模拟实验,探讨了酸化对浮游生物的影响^[56-87]。发现,海水 pCO₂ 升高,促进某些藻类的光合作用与生长,特别是在光能不足的情况下,这种促进效应尤其明显。然而,海水酸性的增加导致钙化藻类钙化量下降,受阳光 UV 辐射的损害增加,威胁其生存^[56,59]。即使非钙化藻类,如某些硅藻类和赤潮藻类, pCO₂ 升高引起的海水酸性增加可降低其耐

受高光胁迫的能力^[70,82],加大光抑制,且增加其呼吸作用^[64,84]。因此,海洋酸化究竟会导致海洋光固碳量增加还是减少,取决于酸化与CO₂浓度升高“双刃剑”效应的平衡^[85],也取决于海洋酸化与其它因子的复合效应。

过去4个航次的酸化效应研究中,多次的研究结果均表明,高pCO₂条件下浮游植物群落的光固碳量明显低于低pCO₂条件下的量。高CO₂浓度下的微生物生态系统中,浮游植物的群落结构发生了变化,硅藻类的相对比例明显下降,而定鞭藻类相对丰度则表现出增加。同时,在酸化条件下浮游植物的非光化学猝灭明显升高,反映出在高CO₂、pH下降条件下浮游植物耐受高光的能力下降^[77]。根据以上航次的实验结果(在高CO₂的微生物生态环境中,硅藻在浮游植物群落中所占的比例和初级生产力均下降),我们选择了3种常见的硅藻(三角褐指藻、海链藻和骨条藻),模拟由深到浅的不同深度,在5%、10%、18%、30%、55%和100%的阳光(PAR)下,在室外进行半连续培养(每24h稀释一次),比较酸化(1000 μatm CO₂)与非酸化(390 μatm CO₂)条件下细胞对光变的响应,探讨了其潜在机制。结果发现,这3种硅藻在低光照和酸化条件下的生长速率均高于非酸化条件下的生长速率;而高光条件下则相反。高CO₂浓度下,细胞具有较高的光利用效率,生长速率达到最高时的光强水平下降了。随着PAR水平的升高,高CO₂下生长的细胞,有效光量子产率降低,NPQ较快增长,显示在酸化条件下,PS II活性受到抑制,光保护机制受到促进。高CO₂条件下,这些硅藻的NPQ与航次浮游植物群落NPQ的变化类似,表明海洋酸化增加了浮游植物细胞的光胁迫。进一步的实验证明,海洋酸化可以刺激硅藻类的光呼吸和线粒体呼吸,显示海水酸度增加导致额外的碳流失^[76]。

海洋酸化可影响硅藻类的元素组分,导致C/N比例升高,并对浮游动物产生间接的影响。例如某些桡足类在酸化条件下,呼吸与摄食率均增加,排便量也增加^[79]。从生态系统水平上来看,海洋酸化会通过食物链影响物种间的相互作用及生态系统的稳定性。

4. 中国近海碳循环及海洋酸化生态效应变化趋势

数值模拟是海洋研究中不可缺少的工具,它不仅弥补了现场观测的时空限制,同时为海洋科学研究提供了其它手段所不能达到的诊断、分析和预报能力。中国近海碳循环及海洋酸化生态效应,其主

要过程和控制机理由中国近海物理输运混合、生物和化学循环过程以及它们间的相互作用共同控制。基于此,本项目在归纳中国近海基本物理、生物地球化学过程的基础上,发展了三维、多时空尺度中国海环流数值模拟系统,对包括黑潮的南海海盆、广阔的南海和东海陆架及珠江/长江河口环流的基本动力进行了系统有序的研究,并取得了重要进展和新的发现。基于扎实的环流动力学理解,且结合现场多学科观测资料和耦合数值模型,我们进行了物理-生物地球化学耦合研究。我们已用此新发展的中国海物理-生物化学耦合、多时空尺度的数值模拟系统,对海区的三维陆架环流-生态耦合过程和物理-生物-pCO₂的时间序列进行了研究,并为区域生物化学过程对物理强迫的响应提供了科学解析^[5,41-43,50]。基于模拟-观测资料的比对和科学认知的提高,我们利用所发展的数值模拟系统,为中国海未来百年的碳收支及变化趋势进行了诊断、分析和预估,从而为国家的环境及气候战略提供了科学依据。另外,综合酸化效应研究的结果可预测,未来南海浮游植物初级生产力的变化取决于浮游植物分布水层的深浅及天气情况,若上部混合层随着海洋升温趋向变浅,上部混合层内的浮游植物,接受的平均光强增加,其耐受的光胁迫增大,这将导致初级生产力下降^[76]。

三、结语及展望

近4年来,973计划项目“中国近海碳收支、调控机理及生态效应研究”(2009CB421200)围绕核心科学问题及目标,组织实施了预演航次、春季航次、夏季航次、秋季航次、冬季航次、南海北部过程航次等大型综合性科考航次,每个航次分析检测项目多达百余项。在大量观测结果的基础上,项目在中国近海碳通量季节和年际尺度上的分布格局及其变化、碳源汇格局的主要控制过程与机制、海洋酸化生态效应及历史重建、碳循环及海洋酸化生态效应变化趋势等方面取得了一系列重要研究进展,本文只是就部分已发表研究成果进行了概略性介绍。相信随着对大量观测结果理解的深入,有更多进展会不断地获得并发表。

致谢:

本文介绍的研究成果(详见本文参考文献)主要是在973计划项目“中国近海碳收支、调控机理及生态效应研究”(2009CB421200)资助下完成的,谨致

谢忱。论文写作过程中,项目首席科学家戴民汉及课题负责人高坤山、甘剑平、翟惟东等提出了宝贵的修改意见,在此一并表示感谢。另外,本项目更多研究进展及研究团队的相关信息等详见网页: <http://973oceanarbon.xmu.edu.cn/index.asp>。

参考文献

- [1] Young-Heon Jo, Dai Minhan, Zhai Weidong, Yan Xiaohai, Shang Shaoling. On the variations of sea surface pCO₂ in the northern South China Sea: A remote sensing based neural network approach, *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117: C08022
- [2] Zhu Y, Shang S L, Zhai W D, Dai M H. Satellite-derived surface water pCO₂ and air-sea CO₂ fluxes in the northern South China Sea in summer. *Progress in Natural Science*, 2009, 19(6): 775—779
- [3] Zhao D L, Xie L. A Practical Bi-parameter Formula of Gas Transfer Velocity Depending on Wave States. *Journal of Oceanography*, 2010, 66: 663—671
- [4] Li S, Zhao D L, Zhou L, Liu B. Dependence of mean square slope on wave state and its application in altimeter wind speed retrieval. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34(1): 264—275
- [5] Lu Z M, Gan J P, Dai M H. Modelling seasonal and diurnal pCO₂ variations in the northern South China Sea. *Journal of Marine Systems*, 2011, 92(1): 30—41
- [6] Cao Z M, Dai M H. Shallow-depth CaCO₃ dissolution: evidence from excess calcium in the South China Sea and its export to the Pacific Ocean. *Global Biogeochemical Cycles*, 2011, 25: GB2019
- [7] Cao Z M, Dai M H, Zheng N, et al. Dynamics of the carbonate system in a large continental shelf system under the influence of both a river plume and coastal upwelling. *Journal of Geophysical Research—Biogeosciences*, 2011, 116: G02010
- [8] Han A Q, Dai M H, Kao S J, et al. Nutrient dynamics and biological consumption in a large continental shelf system under the influence of both a river plume and coastal upwelling. *Limnology and Oceanography*, 2012, 57(2): 486—502
- [9] Yan X L, Zhai W D, Hong H S, et al. Distribution, fluxes and decadal changes of nutrients in the Jiulong River Estuary, Southwest Taiwan Strait. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(18): 2307—2318
- [10] Jia G D, Li Z Y. Easterly denitrification signal and nitrogen fixation feedback documented in the western Pacific sediments. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38: L24605
- [11] Kao S J, Yang J Y, Liu K K, et al. Isotope constraints on particulate nitrogen source and dynamics in the upper water column of the oligotrophic South China Sea. *Global Biogeochemical Cycles*, 2012, 26: GB2033
- [12] Huang Y M, Yuan D X, Dai M H, Liu Y X. Reverse flow injection analysis method for catalytic spectrophotometric determination of iron in estuarine and coastal waters: A comparison with normal flow injection analysis. *Talanta*, 2012, 93: 86—93
- [13] Cao Z M, Frank M, Dai M H, et al. Silicon isotope constraints on sources and utilization of silicic acid in the northern South China Sea. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2012, 97: 88—104
- [14] Wang X C, Ma H Q, Li R H, et al. Seasonal fluxes and source variation of organic carbon transported by two major Chinese Rivers: The Yellow River and Changjiang (Yangtze) River. *Global Biogeochemical Cycles*, 2012, 26: GB2025
- [15] Kao S J, Dai M H, Selvaraj K, et al. Cyclone-driven deep sea injection of freshwater and heat by hyperpycnal flow in the subtropics. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37: L21702
- [16] Liu Q, Dai M H, Chen W F, et al. How significant is submarine groundwater discharge and its associated dissolved inorganic carbon in a river-dominated shelf system? *Biogeosciences*, 2012, 9: 1777—1795
- [17] Dai M H, Yin Z Q, Meng F F, et al. Spatial distribution of riverine DOC inputs to the ocean: an updated global synthesis. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2012, 4: 170—178
- [18] Chen B Z, Liu H B. Relationships between phytoplankton growth and size in surface oceans: interactive effects of temperature, nutrients, and grazing. *Limnology and Oceanography*, 2010, 55(3): 965—972
- [19] Chen B Z, Liu H B. Comment: Unimodal relationship between phytoplankton-mass-specific growth rate and size: A reply to the comment by Sal and Lopez-Urrutia. *Limnology and Oceanography*, 2011, 56(5): 1956—1958
- [20] Chen B Z, Wang L, Song S Q, et al. Comparisons of picoplankton abundance, size, and fluorescence between summer and winter in northern South China Sea. *Continental Shelf Research*, 2011, 31(14): 1527—1540
- [21] Kong L L, Takafumi K H J, Sun J, et al. Phylogenetic diversity and spatio-temporal distribution of nitrogenase genes (nifH) in the northern South China Sea. *Aquatic Microbial Ecology*, 2011, 66: 15—27
- [22] Guo C, Yu J, Ho T Y, et al. Dynamics of phytoplankton community structure in the South China Sea in response to the East Asian aerosol input. *Biogeosciences*, 2012, 9: 1519—1536
- [23] Chen B Z, Liu H B, Huang B Q. Environmental controlling mechanisms on bacterial abundance in the South China Sea inferred from generalized additive models (GAMs). *Journal of Sea Research*, 2012, 72: 69—76
- [24] 孙军. 海洋浮游植物与生物碳汇. *生态学报*, 2011, 31(18): 5372—5378
- [25] 马威, 孙军, 田伟. 2009年冬季南海北部网采浮游植物

- 群落结构. 海洋科学, 2011, 35(9): 8—13
- [26] 郭术津, 田伟, 戴民汉, 刘志亮, 孙军. 2009年夏季东海浮游植物群集. 海洋科学进展, 2011, 29(4): 474—486
- [27] 郭术津, 孙军, 汪岷. 夏季东海PN断面浮游植物群集. 海洋科学, 2011, 35(11): 101—107
- [28] 宫相忠, 马威, 田伟, 孙军. 2009年夏季南海北部的网采浮游植物群落. 中国海洋大学学报, 2012, 42(4): 48—54
- [29] 郭术津, 孙军, 戴民汉, 刘志亮. 2009年冬季东海浮游植物群集. 生态学报, 2012, 32(10): 3266—3278
- [30] Shang S L, Li L, Li J, et al. Phytoplankton bloom during the north-east monsoon in the Luzon Strait bordering the Kuroshio. Remote Sensing of Environment, 2012, 124: 38—48
- [31] Dong Q, Shang S L, Lee Z P. An algorithm to retrieve absorption coefficient of chromophoric dissolved organic matter from ocean color. Remote Sensing of Environment, 2013, 128: 259—267
- [32] Lei H, Pan D L, Bai Y, et al. HAB detection based on absorption and backscattering properties of phytoplankton. Proc. of SPIE, 2011, 817581751F
- [33] Dong H P, Wang D Z, Dai M, et al. Characterization of particulate organic matters in the water column of the South China Sea using a shotgun proteomic approach. Limnology and Oceanography, 2010, 55(4): 1565—1578
- [34] Wang D Z, Dong H P, Xie Z X, et al. Metaproteomic characterization of dissolved organic matter in the water column of the South China Sea. Limnology and Oceanography, 2011, 56(5): 1641—1652
- [35] Qiu Y, Li L, Yu W. Behavior of the Wyrki Jet observed with surface drifting buoys and satellite altimeter. Geophysical Research Letters, 2009, 36: L18607
- [36] Qiu Y, Li L, Chen C T, Guo X G, et al. Currents in the Taiwan Strait as observed by surface drifters. Journal of Oceanography, 2011, 67(4): 395—404
- [37] Yang D Z, Yin B S, Liu Z L, et al. Numerical study of the ocean circulation on the East China Sea shelf and a Kuroshio bottom branch northeast of Taiwan in summer. Journal of Geophysical Research-Oceans, 2011, 116: C05015
- [38] Yang D Z, Yin B S, Liu Z L, et al. Numerical study on the pattern and origins of Kuroshio branches in the bottom water of southern East China Sea in summer. Journal of Geophysical Research, 2012, 117: C02014
- [39] 刘志亮, 胡敦欣. 黄海夏季近岸海区环流的初步分析及其与风速的关系. 海洋学报, 2009, 31(2): 1—7
- [40] 邱云, 李燕初, 李立, 许德伟. 印度洋-太平洋暖池海域表层海温分析. 台湾海峡, 2010, 29(4): 547—554
- [41] Gan J P, Cheung A, Guo X, et al. Intensified upwelling over a widened shelf in the northeastern South China Sea. Journal of Geophysical Research-Oceans, 2009, 114: C09019
- [42] Swapna P, Gan J, Lau A, et al. On the warm/cold regime shift in the South China Sea: Observation and modeling study. Deep Sea Research I, 2009, 56(7): 1039—1056
- [43] Gan J P, Lu Z M, Dai M H, et al. Biological response to intensified upwelling and to a river plume in the northeastern South China Sea: A modeling study. Journal of Geophysical Research, 2010, 115: C09001
- [44] Hu J Y, Kawamura H, Li C Y, et al. Review on current and seawater volume transport through the Taiwan Strait. Journal of Oceanography, 2010, 66(5): 591—610
- [45] Lu Z M, Gan J P, Dai M H, et al. The influence of coastal upwelling and a river plume on the subsurface chlorophyll maximum over the shelf of the northeastern South China Sea. Journal of Marine Systems, 2010, 82: 35—46
- [46] Pi Q L, Hu J Y. Analysis of sea surface temperature fronts in the Taiwan Strait and its adjacent area using an advanced edge detection method. Science China (Earth Sciences), 2010, 53(7): 1008—1016
- [47] Hu J Y, Gan J P, Sun Z Y, et al. Observed three-dimensional structure of a cold eddy in the southwestern South China Sea. Journal of Geophysical Research-Oceans, 2011, 116: C05016
- [48] Sun Z Y, Hu J Y, Zheng Q A, et al. Strong near-inertial oscillations in geostrophic shear in the northern South China Sea. Journal of Oceanography, 2011, 67(4): 377—384
- [49] Liu Z, Gan J. Variability of the Kuroshio in the East China Sea derived from satellite altimetry data. Deep Sea Research Part I, 2012, 59: 25—36
- [50] Gan J P, Ho H, Liang L L. Dynamics of intensified downwelling circulation over a widened shelf in the northeastern South China Sea. Journal of Physical Oceanography, 2012, DOI: 10.1175/JPO-D-12-02.1
- [51] 黄志达, 胡建宇. 利用Argo浮标资料分析横跨吕宋海峡20.5°N断面的水文特征. 台湾海峡, 2010, 29(4): 539—546
- [52] 姜良红, 胡建宇. 吕宋冷涡的季节变化特征及其风应力的关系. 台湾海峡, 2010, 29(1): 114—121
- [53] 苗馨, 胡建宇. 用沿岸上升流指数分析中国东南沿岸风生上升流的特征. 海洋通报, 2011, 321—328
- [54] Dai M H, Meng F F, Tang T T, et al. Excess total organic carbon in the intermediate water of the South China Sea and its export to the North Pacific. Geochemistry Geophysics Geosystems, 2009, 10: Q12002
- [55] Zhai W D, Zhao H D, Zheng N, et al. Coastal acidification in summer bottom oxygen-depleted waters in northwestern-northern Bohai Sea from June to August in 2011. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(9): 1062—1068
- [56] Gao K S, Ruan Z, Villafane V E, et al. Ocean acidification exacerbates

- bates the effect of UV radiation on the calcifying phytoplankter *Emiliana huxleyi*. *Limnology and Oceanography*, 2009, 54 (6): 1855—1862
- [57] Li G, Wu Y P, Gao K S. Effects of Typhoon Kaemi on coastal phytoplankton assemblages in the South China Sea, with special reference to the effects of solar UV radiation. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114: G04029
- [58] Xu Z, Gao K. Impacts of UV radiation on growth and photosynthetic carbon acquisition in *Gracilaria lemaneiformis* (Rhodophyta) under phosphorus-limited and replete conditions. *Functional Plant Biology*, 2009, 36(12): 1057—1064
- [59] Gao K S, Zheng Y Q. Combined effects of ocean acidification and solar UV radiation on photosynthesis, growth, pigmentation and calcification of the coralline alga *Corallina sessilis* (Rhodophyta). *Global Change Biology*, 2010, 16(8): 2388—2398
- [60] Guan W, Gao K. Impacts of UV radiation on photosynthesis and growth of the coccolithophore *Emiliana huxleyi* (Haptophyceae). *Environmental and Experimental Botany*, 2010, 67(3): 502—508
- [61] Guan W C, Gao K S. Enhanced calcification ameliorates the negative effects of UV radiation on photosynthesis in the calcifying phytoplankter *Emiliana huxleyi*. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55 (7): 588—593
- [62] Ma Z, Li W, Gao K. Horizontal migration of *Acartia pacifica* Steuer (copepoda) in response to UV-radiation. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 2010, 101: 233—237
- [63] Wu Y, Gao K S, Riebesell U. CO₂-induced seawater acidification affects physiological performance of the marine diatom *Phaeodactylum tricorutum*. *Biogeosciences*, 2010, 7(9): 2915—2923
- [64] Wu Y P, Gao K S. Combined effects of solar UV radiation and CO₂-induced seawater acidification on photosynthetic carbon fixation of phytoplankton assemblages in the South China Sea. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(32): 3680—3686
- [65] Xu J, Gao K. Use of UV A Energy for Photosynthesis in the Red Macroalga *Gracilaria lemaneiformis*. *Photochemistry and photobiology*, 2010, 86(3): 580—585
- [66] Xu J, Gao K. UV-A enhanced growth and UV-B induced positive effects in the recovery of photochemical yield in *Gracilaria lemaneiformis* (Rhodophyta). *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 2010, 100: 117—122
- [67] Xu Z G, Zou D H, Gao K S. Effects of elevated CO₂ and phosphorous supply on growth, photosynthesis and nutrient uptake in the marine macroalga *Gracilaria lemaneiformis* (Rhodophyta). *Botanica Marina*, 2010, 53: 123—129
- [68] Zou D, Gao K. Acquisition of inorganic carbon by *Endarachne binghamiae* (Scytosiphonales, Phaeophyceae). *European Journal of Phycology*, 2010, 45(1): 117—126
- [69] Zou D H, Gao K S. Photosynthetic acclimation to different light levels in the brown marine macroalga, *Hizikia fusiformis* (Sargassaceae, Phaeophyta). *Journal of Applied Phycology*, 2010, 22(4): 395—404
- [70] Chen S W, Gao K S. Solar ultraviolet radiation and CO₂ induced ocean acidification interacts to influence the photosynthetic performance of the red tide alga *Phaeocystis globosa* (Prymnesiophyceae). *H • robiologia*, 2011, 675(1): 105—117
- [71] Li G, Gao K S, Gao G. Differential Impacts of Solar UV Radiation on Photosynthetic Carbon Fixation from the Coastal to Offshore Surface Waters in the South China Sea. *Photochemistry and Photobiology*, 2011, 87(2): 329—334
- [72] Xu K, Gao K, Villafane V E, et al. Photosynthetic responses of *Emiliana huxleyi* to UV radiation and elevated temperature: roles of calcified coccoliths. *Biogeosciences*, 2011, 8(6): 1441—1452
- [73] Zou D H, Gao K S, Chen W Z. Photosynthetic carbon acquisition in *Sargassum henslowianum* (Fucales, Phaeophyta), with special reference to the comparison between the vegetative and reproductive tissues. *Photosynthesis Research*, 2011, 107(2): 159—168
- [74] Zou D H, Gao K S, Luo H J. Short- and long-term effects of elevated CO₂ on photosynthesis and respiration in the marine macroalga *Hizikia fusiformis* (Sargassaceae, Phaeophyta) grown at low and high N supplies. *Journal of Phycology*, 2011, 47(1): 87—97
- [75] Zou D H, Gao K S, Xia J R. Dark respiration in the light and in darkness of three marine macroalgal species grown under ambient and elevated CO₂ concentrations. *Acta Oceanologica Sinica*, 2011, 30(1): 106—112
- [76] Gao K S, Xu J T, Gao G, et al. Rising CO₂ and increased light exposure synergistically reduce marine primary productivity. *Nature Climate Change*, 2012, 2: 519—523
- [77] Gao K S, Xu J T, Zheng Y Q, et al. Measurement of benthic photosynthesis and calcification in flowing-through seawater with stable carbonate chemistry. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2012, 10: 555—559
- [78] Li G, Gao K S. Variation in UV irradiance related to stratospheric ozone levels affects photosynthetic carbon fixation of winter phytoplankton assemblages from surface coastal water of the South China Sea. *Marine Biology Research*, 2012, 8: 670—676
- [79] Li W, Gao K S. A marine secondary producer respire and feeds more in a high CO₂ ocean. *Marine pollution bulletin*, 2012, 64 (4): 699—703
- [80] Liu Y T, Xu J T, Gao K S. CO₂-driven seawater acidification increases photochemical stress in a green alga. *Phycologia*, 2012, 51: 562—566
- [81] Wu X J, Gao G, Giordano M, et al. Growth and photosynthesis of a diatom grown under elevated CO₂ in the presence of solar UV radi-

- tion. *Fundamental and Applied Limnology*, 2012, 18(4): 279—290
- [82] Xu K, Gao K S. Reduced Calcification Decreases Photoprotective Capability in the Coccolithophorid *Emiliana huxleyi*. *Plant Cell Physiology*, 2012, 53: 1267—1274
- [83] Xu Z G, Gao K S. NH_4^+ enrichment and UV radiation interact to affect the photosynthesis and nitrogen uptake of *Gracilaria lemaneiformis* (Rhodophyta). *Marine pollution bulletin*, 2012, 64(1): 99—105
- [84] Yang G Y, Gao K S. Physiological responses of the marine diatom *Thalassiosira pseudonana* to increased pCO_2 and seawater acidity. *Marine Environmental Research*, 2012, 79: 142—151
- [85] 高坤山. 海洋酸化正负效应: 藻类的生理学响应. *厦门大学学报*, 2011, 50(2): 411—417
- [86] 陈善文, 高坤山. 二氧化碳加富与阳光紫外辐射对球形棕囊藻的耦合效应. *海洋学报*, 2011, 33(4): 1—8
- [87] 吴亚平, 高坤山. 夏季南海浮游植物光合固碳对不同波长阳光紫外辐射的响应. *海洋学报*, 2011, 33(5): 146—151

A Brief Introduction to Research Progresses of China Ocean Carbon Cycle

Li Chunyuan, Yang Shuang, Xu Yanping

State Key Laboratory of Marine Environmental Science,
Xiamen University, Xiamen 361005

Supported by a 973 program, Carbon Cycling in China Seas—budget, controls and ocean acidification (# 2009CB421200), a series of important research progresses have been made since 2009. The research progresses were focused on: (1) assessment of the variability of carbon sources and sinks in China seas at a seasonal and inter-annual time scales; (2) processes and mechanisms that control the carbon budget; (3) the history record and ecological response of ocean acidification; (4) future trends of carbon budget and ocean acidification in response to global climate changes. Here the main research progresses of the 973 program were reviewed in this paper.

Keywords: China seas; carbon sources and sinks; controlling mechanism; ecological response; research progress