科学通报 2011 年 第 56 卷 第 6 期：414 ~ 422
论 文 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

南海珊瑚礁夏季是大气 CO_2 的源

严宏强[①②], 余克服[①②*], 施祺[①②], 谭烨辉[①②], 张会领[①②], 赵美霞[①②], 李淑[①②], 陈天然[①②], 黄玲英[①②], 汪品先[③]

① 中国科学院边缘海地质重点实验室, 广州 510301;
② 中国科学院南海海洋研究所, 广州 510301;
③ 同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092
* 联系人, E-mail: kefuyu@scsio.ac.cn

2010-05-05 收稿, 2010-11-25 接受
国家重点基础研究发展计划(2007CB815905)、国家自然科学基金(40830852, 41025007)和国家科技支撑计划(2006BAB19B03)资助项目

摘要 分别于 2008 和 2009 年夏季对南海南沙群岛永暑礁(环礁)、西沙群岛永兴岛(岛礁)和海南三亚鹿回头岸礁进行了海-气 CO_2 交换的连续观测. 结果表明: (1) 南海珊瑚礁区表层海水和大气 pCO_2 存在明显的日周期变化, 白天下降, 晚上上升; (2) 不同礁区大气 pCO_2 日变幅小, 而表层海水 pCO_2 日变幅较大, 永暑礁潟湖为~70 μmol mol^{-1}, 鹿回头及永兴岛礁坪分别为 264~579 μmol mol^{-1} 和 420~619 μmol mol^{-1}, 鹿回头礁外为 324~492 μmol mol^{-1}; (3) 不同礁区海-气 CO_2 交换通量也有较大差异, 永暑礁潟湖为 0.4 mmol CO_2 m^{-2} d^{-1}, 永兴岛礁坪为 4.7 mmol CO_2 m^{-2} d^{-1}, 鹿回头湾为 9.8 mmol CO_2 m^{-2} d^{-1}, 表明南海珊瑚礁在夏季是大气 CO_2 的源. 在水深较浅的礁坪, 生物代谢是海水 pCO_2 变化的主要驱动因素, 而较深的潟湖或礁外, 水动力条件和生物代谢共同作用影响海水 pCO_2 的变化. 相对于大洋区, 无机碳代谢对珊瑚礁区海水 pCO_2 的变化有更显著的影响.

关键词
珊瑚礁
pCO_2
碳循环
夏季
南海

1997 年制定的《京都议定书》和 2009 年的"哥本哈根世界气候大会"都把减排 CO_2 作为遏制全球气候变暖的首要方案, CO_2 减排已成为世界各国不可回避的义务. 了解自然过程的 CO_2 吸收与排放有助于评估这一方案的科学性, 也有助于更好地履行这一义务. 分布于热带海洋的珊瑚礁长期以来在全球碳循环中发挥着重要作用[1], 如著名的"珊瑚礁假说"即把 14 ka 前由冰期向间冰期过渡期间大气 CO_2 的突然上升(约 80 μmol mol^{-1})归之于珊瑚礁 $CaCO_3$ 沉积速率的变化[2~4]. 从机理上看, 珊瑚礁参与碳循环可分有机代谢和无机代谢 2 个方面, 其中有机代谢对珊瑚礁碳循环的贡献很小, 无机代谢中钙化作用在珊瑚礁碳循环中起着最主要作用[5~8], 现代每年珊瑚礁 $CaCO_3$ 的产量占到全球 $CaCO_3$ 年产量的 7%~15%[6]. 近年来一些研究通过直接观测珊瑚礁区水-气 CO_2 分压(pCO_2)变化来研究珊瑚礁对大气 CO_2 的实际贡献[6~11], 多数认为珊瑚礁是大气 CO_2 的源[7~16], 也有不少认为珊瑚礁是大气 CO_2 的汇[6,17,18]. Suzuki 等人[6]对热带海区多座珊瑚礁的研究提出不同位置、不同类型的珊瑚礁区对大气 CO_2 的源或汇的作用是不同的. 从生态角度看当珊瑚占优势时, 珊瑚礁一般表现为大气 CO_2 的源, 而当大型藻类占优势时, 珊瑚礁区表现为 CO_2 的汇[6].

南海珊瑚礁分布广泛, 从近赤道的曾母暗沙(约 4°N), 一直到南海北部雷州半岛、涠洲岛(约 20°~21°N)以及台湾南岸恒春半岛(约 24°N)都有分布, 初步估计现代珊瑚礁的面积约 8000 km^2[19], 主要为环礁、岛礁和岸礁等 3 种类型. 但迄今为止, 关于南海珊瑚礁区的 pCO_2 了解并不多, 仅 Dai 等人[20]2006 年春季对西沙永兴岛珊瑚礁坪进行了昼夜观测, 认为

英文版见: Yan H Q, Yu K F, Shi Q, et al. Coral reef ecosystems in the South China Sea as a source of atmospheric CO_2 in summer. Chinese Sci Bull, 2011, 56, doi: 10.1007/s11434-011-4372-8

海水 pCO_2 存在明显的日周期变化，表现为大气 CO_2 的弱源. 本文选择南沙群岛的永暑礁(环礁)、西沙群岛的永兴岛(岛礁)和海南岛三亚鹿回头岸礁开展海-气 pCO_2 的观测研究，旨在了解南海珊瑚礁对大气 CO_2 的实际贡献.

1 礁体环境概况

环礁是南沙群岛最主要的珊瑚礁类型，潟湖是环礁的最主要地貌单元，约占南沙群岛现代珊瑚礁面积的 82%[19]. 南沙群岛永暑礁位于南海南部(112.88°~113.06°E, 9.52°~9.68°N, 图 1)，是一座开放型环礁，呈纺锤形，长约 25 km，宽约 6 km，面积 110 km^2，分礁前坡、礁坪、潟湖坡和潟湖等几个地貌带[21]. 永暑礁受人类活动影响相对较小，2006 年调查发现该区域活珊瑚覆盖度一般在 60%左右. 永暑礁年平均 SST 为 28.6℃，表层海水盐度变化范围为 33.0~33.5，月平均盐度差异<1.0. 6~9 月该区西南季风盛行，平均风速约 6.5 m/s. 11 月至次年 4 月东北季风盛行，平均风速约 8.0 m/s[22].

西沙群岛永兴岛(112.34°E, 16.84°N, 图 1)位于南海中部，是西沙群岛最大的岛礁，分礁前坡、礁坪、海滩、沙堤、沙席和干潟湖等几个地貌带[23]，其中礁坪一般宽 400~800 m，最宽达 1500 m，是永兴岛最主要的地貌单元，2002 年活珊瑚覆盖率达 42.1%~

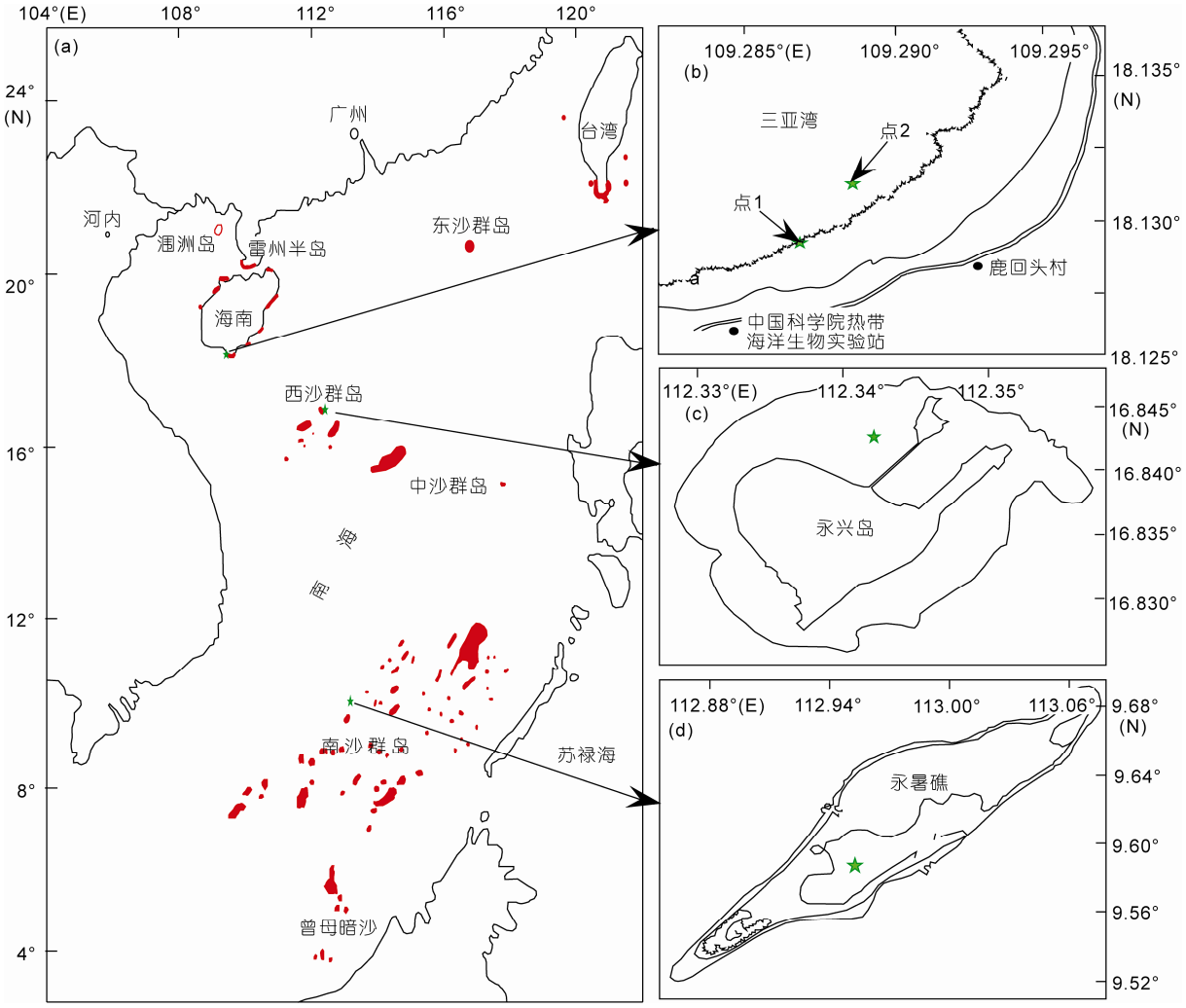


图 1 珊瑚礁海-气 CO_2 观测站点分布

红色区域为南海珊瑚礁的主要分布区[19]，各礁区的五角星代表观测站点，其中三亚鹿回头湾点 1 为礁坪观测点，点 2 为礁外观测点

93.4%[24]. 本区处于热带季风带, 多年平均气温 26.4℃, 月平均最低 23.8℃(1 月), 最高 29.4℃(6, 7 月). 10 月~次年 3 月 NE 向冬季风盛行, 月平均风速 6~9 m/s. 5~8 月 SE-SW 向夏季风盛行, 月平均风速 5~6 m/s[25].

三亚鹿回头珊瑚礁(109.29°E, 18.13°N)位于海南岛南端三亚湾东岸(图 1), 是典型的珊瑚岸礁, 主要分礁坪和礁坡 2 个地貌带, 长约 3 km, 礁坪平均宽约为 250 m, 最大宽度可超过 450 m. 礁坪珊瑚生长稀疏, 珊瑚覆盖度约 5%, 礁坡珊瑚生长较好, 珊瑚覆盖度约 12%. 近年来鹿回头珊瑚岸礁呈明显衰退趋势, 珊瑚覆盖度由 20 世纪 60 年代的 85%下降到 2006 年的 12.2%, 但仍保持较高的生物多样性[26]. 本区属于热带季风气候, 全年平均以东北风和东风为主; 潮汐属不正规日潮混合潮, 以日潮为主, 平均潮位 1.02 m, 平均潮差 0.79 m, 最大潮差 1.89 m. 波浪受季风影响以风浪为主, 冬半年(10 月~次年 4 月)盛行东或东北向浪, 夏半年(5~9 月)以南或西南向浪为主. 多年年平均 SST 为 27.0℃, 最低月平均 SST 为 22.8℃(变化于 20.5~24.7℃之间), 最高月平均 SST 为 29.8℃(变化于 28.7~30.9℃之间)[27].

2 研究方法

分别于 2008 年 7 月、2009 年 6 月和 2009 年 7~8 月在西沙群岛永兴岛、南沙永暑礁和鹿回头礁区开展了海-气 pCO_2 的连续观测, 时间上对应于夏季. 考虑各地貌带在不同类型珊瑚礁中的代表性, 鹿回头岸礁选择外礁坪及礁外 2 处观测点(图 1(b)), 水深分别约为 1.1 和 9 m, 各进行了 6 d 间隔 1 h 的连续观测. 西沙群岛永兴岛选择北部礁坪为观测点(图 1(c)), 对表层海水进行了 6 d 间隔 2 h 的连续观测. 南沙群岛永暑礁选择潟湖中央为观测点(图 1(d)), 进行了 3 d(两阶段分别为 1 和 2 d)间隔 1 h 的连续观测. 此外, 2009 年 6 月以走航形式对南沙群岛珊瑚礁区附近海域进行了海-气 CO_2 观测, 观测点按预定航线设定.

大气 pCO_2 均采用芬兰维萨拉公司生产的 GM70 手持式 CO_2 测试仪测定. 永兴岛的观测中, 水样温度、盐度使用美国 Myron L 公司生产的手持式 4P 多参数水质观测仪现场测定; 鹿回头湾、永暑礁及大洋巡航表层水样的温度、盐度采用 YSI6920V2 型多参数水质观测仪测定. 表层海水样品取自约 0.5 m(低潮时礁坪水样约取自 0.2 m)水深处, 水样用 500 mL 聚乙烯瓶采集, 并加入 0.1 mL 饱和 $HgCl_2$ 溶液进行固定以便带回实验分析. 水样用来测定 pH 和总碱度(TA). 使用精度为 0.01 的 pH 复合电极测定 pH, pH 计使用 pH 为 6.86 和 9.18 的标准缓冲液进行校正. 用 0.45 μm 的微孔滤膜过滤水样, 通过电位滴定测定 TA. 海水 pCO_2 通过温度、盐度、pH 和 TA, 选择 Mehrbach 等人[28]提出并经 Dickson 和 Millero[29]修订后的常数, 使用 CO_2SYS Program[12,19,30~33]进行计算.

海-气间 CO_2 交换通量直接控制因子是表层海水 pCO_2 与大气 pCO_2 的差(pCO_{2w}–pCO_{2a}), 其通量由 pCO_{2w}–pCO_{2a} 和风速共同计算得到:

$$F=ks(pCO_{2w}-pCO_{2a}), \quad (1)$$

其中, k 是气体传输速率, s 是 CO_2 溶解度(通过温度、盐度计算), pCO_{2w} 和 pCO_{2a} 分别为海水和大气 CO_2 分压. 当 F>0 时, CO_2 由海水进入大气, 海区表现为大气 CO_2 的源, 反之, 则表现为大气 CO_2 的汇. 气体传输速率 k 是风速(u)和斯密特数(Sc)的函数. Wanninkhof[34]在 1992 年对 Liss 的方程进行了补充和修正, 平均风速 u 在 0~12 m/s 范围内时:

$$K=0.31u^2(Sc/660)^{-1/2}, \quad (2)$$

式中, Sc 是 t℃时的斯密特数, 660 是盐度 35‰, 20℃时海水的 Sc. 平均风速采用 NOAA(http://www.cdc.noaa.gov/data/)数据.

3 结果

3.1 珊瑚礁区大气和海水 pCO_2 的日周期变化

表 1 为各珊瑚礁区观测点的表层海水平均的温度、盐度、pH、总碱度、海水 pCO_2 以及大气 pCO_2 概况. 不同珊瑚礁区海水 pCO_2 存在较大差别, 永暑礁潟湖海水 pCO_2 平均值最低, 接近于大气 pCO_2, 且变化幅度也最小, 永兴岛和鹿回头礁坪的海水 pCO_2 变化幅度大; 不同珊瑚礁区大气 pCO_2 相差较小. 从珊瑚礁区大气和海水 pCO_2 日变化曲线来看(图 2), 大气和海水 pCO_2 均存在明显的日周期变化; 大气 pCO_2 表现为夜间上升, 日间下降, 日周期波动幅度相对较小; 珊瑚礁礁坪表层海水 pCO_2 的波动类似于大气 pCO_2, 呈现日间下降夜晚上升规律性的日周期变化, 如永兴岛礁坪表层海水 pCO_2 17:00~19:00 达到最低值(67 μmol mol^{-1}), 7:00~9:00 达到最高值(899 μmol mol^{-1}), 日变幅高达 420~619 μmol mol^{-1}; 鹿回

表 1 观测点的环境参数及海、气 pCO_2[a)]

区域	水深(m)	温度(℃)	盐度 (‰)	pH	TA ($\mu mol\ kg^{-1}$)	海水 pCO_2 ($\mu mol\ mol^{-1}$)	大气 pCO_2 ($\mu mol\ mol^{-1}$)
永兴岛	1.2	29.50±1.60	32.62±0.42	8.23±0.22	2421±142	456±249	387±25
永暑礁	~30	28.68±0.10	33.07±0.19	8.22±0.03	2240±56	395±25	384±21
鹿回头珊瑚礁坪	1.1	26.81±1.43	33.45±0.51	8.07±0.07	2497±71	610±112	382±13
鹿回头珊瑚礁外	9	29.88±0.55	33.27±0.40	8.13±0.05	2375±80	506±81	383±11

a) 水深校正到相对平均海平面深度; 海水 pCO_2 由温度、盐度、pH 和 TA 计算而得

头礁坪表层海水 pCO_2 16:00~18:00 达到最低值(340 $\mu mol\ mol^{-1}$), 6:00~8:00 达到最高值(952 $\mu mol\ mol^{-1}$), 日变幅约 264~579 $\mu mol\ mol^{-1}$, 鹿回头礁外观测点海水 pCO_2 日变幅约 386~492 $\mu mol\ mol^{-1}$. 永暑礁潟湖海水 pCO_2 日变化规律不很明显, 但通过线性拟合仍然可以看出其海水 pCO_2 出现日间下降, 夜间上升的变化趋势, 最高值(~430 $\mu mol\ mol^{-1}$)出现在 10:00~12:00, 最低值(~318 $\mu mol\ mol^{-1}$)出现在晚上 22:00~24:00, 相对于永兴岛和鹿回头礁坪海水 pCO_2 峰值有一定的滞后, 这可能与潟湖区珊瑚覆盖度低、远离外礁坪-礁前坡的珊瑚林带、以及水体较深等因素有关. 可见, 由珊瑚礁礁坪到礁外, 表层海水 pCO_2 有明显下降的趋势, 且日波动幅度减弱. 礁区大气 pCO_2 的日变化幅度较小, 故大气 pCO_2 的变化对海-气 pCO_2 交换影响较小, 各礁区海-气 pCO_2 差变化主要受海水 pCO_2 变化的影响.

3.2 海-气 CO_2 交换通量

利用方程式(1)计算了不同礁区海-气 CO_2 交换通量(图 2). 永兴岛礁坪海-气 CO_2 交换通量为−19.9~30.5 mmol CO_2 m^{-2} d^{-1}, 观测期间每日 13:00~23:00 海水 pCO_2 一般低于大气 pCO_2, 平均交换通量为−5.1 mmol CO_2 m^{-2} d^{-1}, 其他时段海水 pCO_2 高于大气 pCO_2, 平均交换通量为 13.7 mmol CO_2 m^{-2} d^{-1}. 鹿回头海气 CO_2 通量为−1.6~26.5 mmol CO_2 m^{-2} d^{-1}, 礁坪海水 pCO_2 值较大, 除了夜间极少时段低于大气 pCO_2 外, 基本高于大气 pCO_2. 永暑礁海气 CO_2 通量变化最小, 为−2.3~2.7 mmol CO_2 m^{-2} d^{-1}, 永暑礁潟湖海水 pCO_2 及大气 pCO_2 的变化波动较大, 且周期性不是很明显, 观测期间 20:00~次日 7:00 海水 pCO_2 较低, 平均交换通量近乎为 0, 其他时段海水 pCO_2 较高, 平均交换通量为 0.8 mmol CO_2 m^{-2} d^{-1}. 各礁区海气 CO_2 的交换通量存在一定的差别, 总的来说, 夜间多表现为负的交换通量, 而日间则多表现为正的交换通量. 平均来看, 观测期间永兴岛海-气 CO_2 通量约为 4.7 mmol CO_2 m^{-2} d^{-1}, 永暑礁海-气 CO_2 通量较低, 约为 0.4 mmol CO_2 m^{-2} d^{-1}, 鹿回头礁坪海-气 CO_2 通量最大, 约为 9.8 mmol CO_2 m^{-2} d^{-1}.

4 讨论

4.1 海水 pCO_2 变化的环境影响

在开放的生态系统中, 海水 pCO_2 的变化受到包括温度、水动力及生物活动等环境因素的调节[20].

温度对海水 pCO_2 变化的影响可利用关系式 $NpCO_2 = (in\ situ\ pCO_2) \times \exp[0.0423(T_{mean}-T_{in\ situ})]$ ($NpCO_2$ 为标准化到平均温度下的 pCO_2, T_{mean} 和 $T_{in\ situ}$ 分别为平均温度和实测温度)来估算[20,35,36]. 将现场实测海水 pCO_2 标准化到平均水温, 包括鹿回头礁坪、永兴岛及永暑礁潟湖表层海水 $NpCO_2$ 变化趋势与实测海水 pCO_2 一致. 定义 δpCO_2($\delta pCO_2=|in\ situ\ pCO_2-NpCO_2|$)以衡量温度对海水 pCO_2 变化的贡献度. 由表 2 可见, 鹿回头和永兴岛礁坪 δpCO_2 较永暑礁潟湖大, 但是与礁区观测期间对应海水 pCO_2 最大日振幅(即日最高值与最低值的差值, ΔpCO_2)的比值均非常小, 最高的鹿回头湾比值仅为 6.17%, 表明水温的变化对珊瑚礁区海水 pCO_2 日周期变化影响很小. 其中, 鹿回头和永兴岛礁坪受温度的影响较永暑礁潟湖稍大, 则是与礁坪水浅, 日照辐射造成水温有较大的温差有关. 总的来说, 温度对珊瑚礁区海水 pCO_2 变化的影响较小.

水动力条件的调控主要通过潮汐作用驱使礁内、外海水交换对礁内海水碳酸盐体系产生影响. 礁内、外海水交换速率及观测点水深都会对海水 pCO_2 变化产生影响, 鹿回头观测点海水 pCO_2 显示由礁坪到礁外降低, 也反映出不同水深受潮汐的影响(表 1). Dai 等人[20] 粗略估算礁内外海水日交换量约为平均潮差/平均水深. 永兴岛、鹿回头礁区及永暑礁潟湖平均水深分别约为 10, 4 和 25 m, 相应的平均潮差分

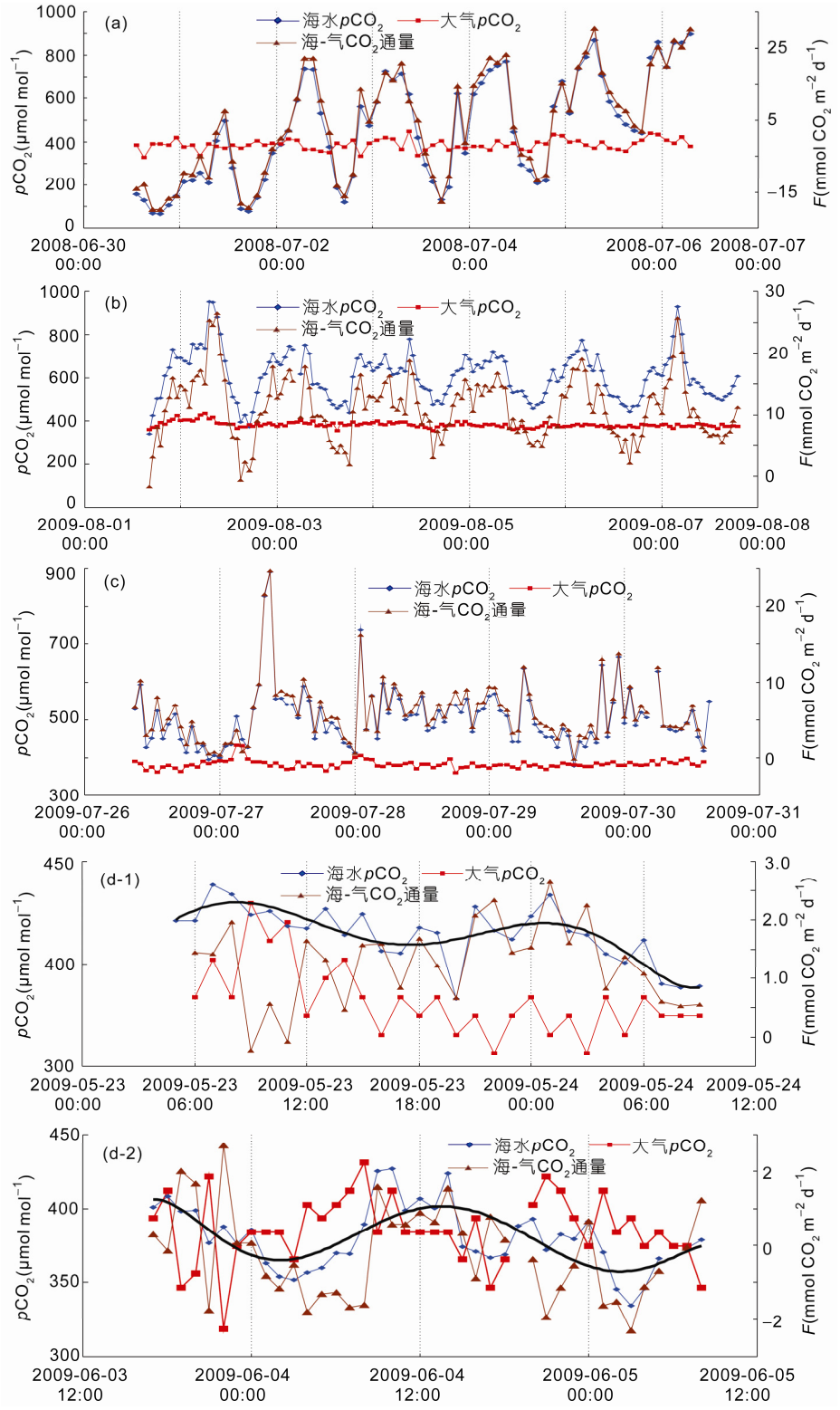


图 2 珊瑚礁区大气、海水 pCO_2 及海-气 CO_2 交换通量日变化

(a) 永兴岛礁坪; (b) 鹿回头礁坪; (c) 鹿回头礁外; ((d-1), (d-2))永暑礁潟湖. 图中横坐标 2009-06-30 00:00 表示 2009 年 6 月 30 日 00:00 的数据, 其他类推

表 2　温度对海水 pCO_2 变化的贡献

位置	δpCO_2(μmol mol^{-1})			ΔpCO_2 (μmol mol^{-1})	$\delta pCO_2/\Delta pCO_2$(%)		
	最小值	最大值	平均值		最小值	最大值	平均值
鹿回头湾	0.0	78.3	25.6	415	0.00	18.86	6.17
永兴岛	1.0	98.8	22.8	525	0.19	18.82	4.34
永暑礁	0.0	8.8	1.6	60	0.00	14.71	2.66

别约为 1, 0.8 和 1.2 m, 则各礁区内外海水交换量分别约占礁内总海水量的 10%, 20%和 4.8%, 表明潮汐并非礁区海水 pCO_2 日周期变化的主要影响因素, 而海水 pCO_2 与对应潮高不存在相关性也进一步证明潮汐对海水 pCO_2 的影响有限.

生物代谢过程对礁区海水 pCO_2 变化有直接影响, 夜间生物呼吸及钙化作用都释放 CO_2, 促进海水 pCO_2 上升; 而日间光合作用吸收 CO_2 的速率要高于呼吸和钙化释放 CO_2 的速率, 从而导致海水 pCO_2 下降. 永兴岛及鹿回头礁坪海水 pCO_2 显示出日间下降夜晚上升的明显日周期变化, 与生物群落代谢变化规律相符, 表明两处礁坪海水碳酸盐体系主要受生物代谢过程的控制[17,20,37].

有研究认为, 礁坪的海水性质决定了其对 CO_2 的吸收能力[38]. Gattuso 等人[9] 描述了海水碳酸盐体系对群落代谢的响应: 钙化过程中, 每生成 1 mol 的 $CaCO_3$ 会消耗 1 mol DIC 且导致 TA 下降 2 mol, 则钙化作用单独存在的情况下, ΔTA/ΔDIC 等于 2/1; 而只有光合作用时 ΔTA/ΔDIC 接近 0. 假定某一钙化/光合过程对应 1 mol 的无机碳代谢和 x mol 的有机代谢, 斜率 ΔTA/ΔDIC 等于 $2/(1+x)$, 因此 $x=(2/\text{斜率})^{-1}$. 图 3 分别为永兴岛、鹿回头礁坪和永暑礁潟湖 TA 和 DIC 数据拟合结果, 可见永兴岛礁坪 ΔTA/ΔDIC 为 0.47, 鹿回头礁坪 ΔTA/ΔDIC 为 0.77, 永暑礁潟湖 ΔTA/ΔDIC

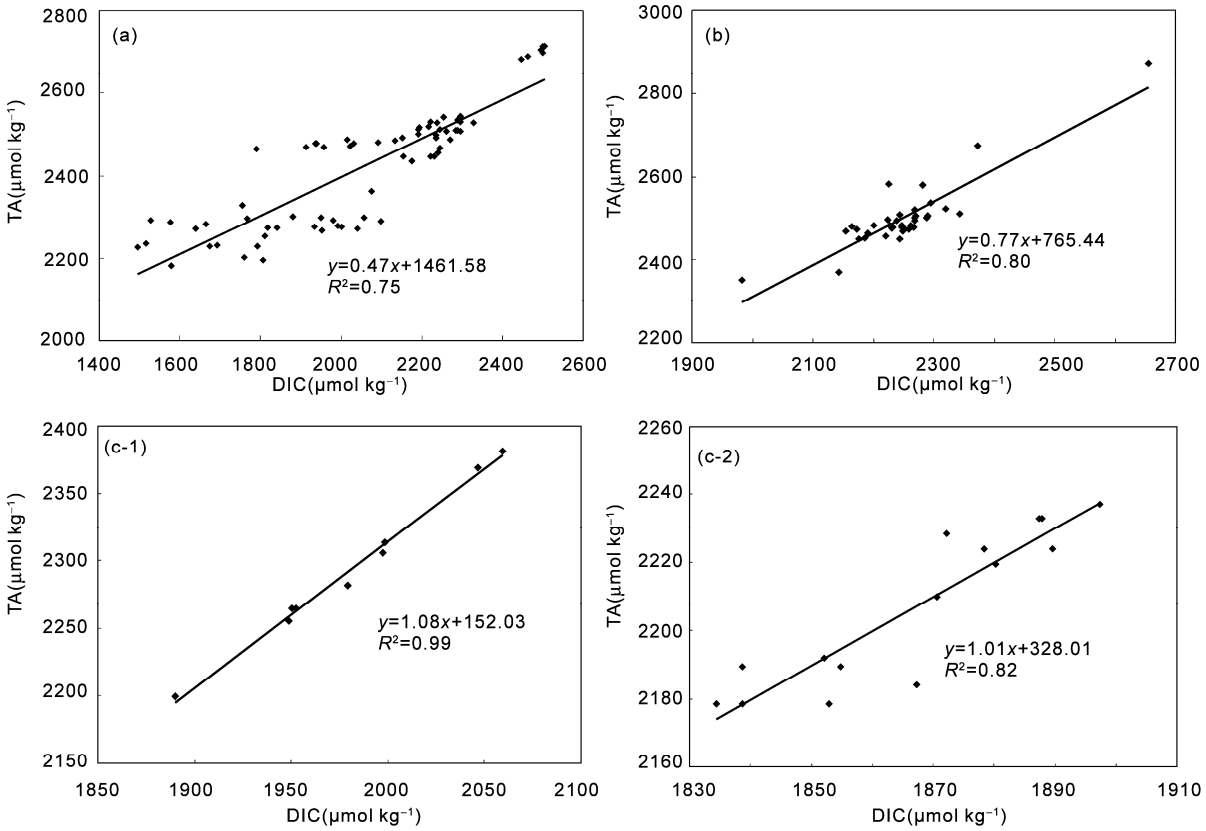


图 3　各礁区海水 TA 与 DIC 关系

(a) 为永兴岛礁坪; (b) 为三亚鹿回头礁坪; (c-1)和(c-2)分别为永暑礁 2009-05-23~2009-05-24 和 2009-06-03~2009-06-05 两阶段监测结果

为 1.05((1.08+1.01)/2); 则永兴岛无机碳生产力/有机碳生产力约为 1∶3.3, 鹿回头礁坪约为 1∶1.6, 永暑礁潟湖表层约为 1∶0.9. 鹿回头礁坪要高于永兴岛, 表明鹿回头礁坪碳酸钙生产力较永兴岛更为明显. 钙化过程伴随着 CO_2 的释放, 鹿回头礁区对大气 CO_2 源的作用应更强, 这与计算出的海-气 CO_2 通量结果一致. 而永暑礁比值最高而源的作用最弱, 可能与永暑礁潟湖水最深有关. Cao 等人[37]2005 年对南海的观测结果约为 1∶14, 低于南海珊瑚礁区, 表明无机碳代谢在南海珊瑚礁生态系代谢过程中占据更为显著的作用, 这也是引起珊瑚礁区海水 pCO_2 具有较大日变幅的重要原因.

4.2 珊瑚礁内、外海水 pCO_2 的差异

在有较深潟湖的环礁, 礁外海水与潟湖海水的交换会影响到对珊瑚礁区海-气 CO_2 通量的准确判断[7,39,40]. 通过比较潟湖海水与礁外海水 pCO_2 值来判断珊瑚礁生态系在海-气 CO_2 交换过程中的作用, 定义潟湖海水与礁外海水 pCO_2 差值(δpCO_2)为

$$\delta pCO_2 = pCO_{2L} - pCO_{2O}, \quad (3)$$

pCO_{2L} 和 pCO_{2O} 分别代表潟湖海水 pCO_2 和礁外海水 pCO_2. 当潟湖海水 pCO_2 平均值高于礁外海水 pCO_2 平均值(即 $\delta pCO_2>0$)时, 珊瑚礁总的来说是大气 CO_2 潜在的源; 反之, 则为大气 CO_2 的汇. 潮汐作用使得珊瑚礁内潟湖海水对珊瑚礁外海域的海水碳酸盐体系产生一定影响, 影响范围可达 4 km 左右[40]. 据此, 以距永暑礁 4 km 以上的 18 个站位表层海水 pCO_2 平均值(370 μmol mol^{-1})代表礁外海水 pCO_2, 则永暑礁 δpCO_2 为 25 μmol mol^{-1}, 即珊瑚礁潟湖海水 pCO_2 高于珊瑚礁外海水, 因此永暑礁为大气 CO_2 的源. 永兴岛及鹿回头礁区无潟湖, 通过比较礁坪海水 pCO_2 与礁外海水 pCO_2 平均值来判断礁区在海-气 CO_2 交换过程中的作用. 以距永兴岛礁外 4 km 以外的 18 个站位表层海水 pCO_2 平均值(379 μmol mol^{-1})代表永兴岛礁外海水 pCO_2, 则永兴岛 δpCO_2 为 77 μmol mol^{-1}, 也是大气 CO_2 的源. 鹿回头珊瑚礁礁坪、礁外两个点表层海水 pCO_2 平均值分别为 610 和 506 μmol mol^{-1}, 均高于礁区 4 km 以外的南海北部开阔海区 18 个站位表层海水平均值(约 381 μmol mol^{-1}), 表明永兴岛和鹿回头礁区均为大气 CO_2 的源.

4.3 南海珊瑚礁区为大气 CO_2 源

根据海气 CO_2 交换通量计算, 当交换通量为正值时, 指示 CO_2 由海水进入大气, 珊瑚礁区为大气 CO_2 的源; 反之, 当交换通量为负值时, 指示 CO_2 由大气进入海水, 珊瑚礁区为大气 CO_2 的汇[6~18]. 本文观测的结果(图 2)显示, 鹿回头礁坪是大气 CO_2 的强源; 永兴岛观测期间每日 13:00~23:00 表现为大气 CO_2 的汇, 其他时段则主要表现为大气 CO_2 的源; 永暑礁潟湖观测期间 20:00~次日 7:00 表现为大气 CO_2 的汇, 其他时段为大气 CO_2 的源; 总的来说, 夏季南海珊瑚礁夜间多表现为大气 CO_2 的汇, 而日间则多表现为大气 CO_2 的源. 平均计算结果显示所调查的南海北部鹿回头岸礁、西沙群岛永兴岛岛礁和南海北部南沙群岛永暑礁环礁 3 个礁区夏季都表现为大气 CO_2 的源. 但因为珊瑚礁区物理、化学环境及珊瑚礁生物代谢的季节性差异, 不同季节珊瑚礁区海气 CO_2 交换通量通常是变化的[12], 如 Dai 等人[20]曾于 2006 年观测过西沙群岛永兴岛春季的海气 CO_2 通量约为 1.48 mmol CO_2 m^{-2} d^{-1}, 远低于我们在 2008 年夏季观测到的 4.7 mmol CO_2 m^{-2} d^{-1} 的海气 CO_2 通量, 表明永兴岛夏季对大气 CO_2 源的作用更强. 从这个角度说, 还需要对南海各大珊瑚礁区不同季节的海气 CO_2 通量进行研究, 以全面评估南海珊瑚礁对大气 CO_2 的实际贡献, 以及热带海区在全球气候变化中的作用.

5 结论

通过对南海南部南沙群岛永暑礁(环礁)、南海中北部西沙群岛永兴岛(岛礁)和南海北部海南三亚鹿回头珊瑚岸礁海-气 CO_2 交换的连续观测, 发现:

(1) 南海珊瑚礁区海水 pCO_2 存在明显的日周期变化, 日间下降, 夜间上升, 其中以珊瑚生长相对较多的礁坪(鹿回头、永兴岛)海水 pCO_2 周期性最为明显, 潟湖(永暑礁)和礁外(鹿回头)等珊瑚覆盖度低或无珊瑚生长区域的海水 pCO_2 周期性相对较弱, 存在明显的波动.

(2) 南海不同珊瑚礁区表层海水 pCO_2 变幅较大, 永暑礁潟湖为~70 μmol mol^{-1}, 鹿回头及永兴岛礁坪分别为 264~579 和 420~619 μmol mol^{-1}, 鹿回头湾珊瑚礁外为 324~492 μmol mol^{-1}.

(3) 在水深较浅的礁坪, 生物代谢是海水 pCO_2 变化的主要驱动因素, 而较深的潟湖或礁外, 水动力条件和生物代谢共同作用影响海水 pCO_2 的变化. 相对于大洋区, 无机碳代谢对珊瑚礁区海水 pCO_2 的变化有更显著的影响.

(4) 海-气 CO_2 交换通量显示南海珊瑚礁在夏季是大气 CO_2 的源, 其中永暑礁潟湖海-气 CO_2 通量约为 0.4 mmol CO_2 m^{-2} d^{-1}, 永兴岛礁坪海-气 CO_2 通量约为 4.7 mmol CO_2 m^{-2} d^{-1}, 鹿回头湾海-气 CO_2 通量约为 9.8 mmol CO_2 m^{-2} d^{-1}.

致谢 感谢海南省西沙群岛、南沙群岛、中沙群岛工作委员会, 中国科学院三亚热带海洋生物实验站和三亚珊瑚礁自然保护区对海上工作给予的支持.

参考文献

1 严宏强, 余克服, 谭烨辉. 珊瑚礁区碳循环研究进展. 生态学报, 2009, 29: 6207–6215
2 Berger W H. Increase of carbon dioxide in the atmosphere during deglaciation: The coral reef hypothesis. Naturwissenschaften, 1982, 69: 87–88
3 Opdyke B N, Walker J C. Return of the coral reef hypothesis: Basin to shelf partitioning of $CaCO_3$ and its effect on atmospheric CO_2. Geology, 1992, 20: 733–736
4 Mylroie J E, Opdyke B N, Walker J C. Return of the coral reef hypothesis: Basin to shelf partitioning of $CaCO_3$ and its effect on atmospheric CO_2: Comment and reply. Geology, 1993, 21: 475–476
5 Crossland C J, Hatcher B G, Smithe S V. Role of coral reefs in global ocean production. Coral Reefs, 1991, 10: 55–64
6 Suzuki A, Kawahata H. Reef water CO_2 system and carbon production of coral reefs: topographic control of system-level performance. In: Shiyomi M, Kawahata H, Koizumi H, et al, eds. Global Environmental Change in the Ocean and on Land. Tokyo: Terrapub, 2004. 229–248
7 Kawahata H, Suzuki A, Goto K. Coral reef ecosystems as a source of atmospheric CO_2: Evidence from pCO_2 measurements of surface waters. Coral Reefs, 1997, 16: 261–266
8 Ware J R, Smith S V, Reaka-Kudla M L. Coral reefs: Sources or sinks of atmospheric CO_2. Coral Reefs, 1991, 11: 127–130
9 Gattuso J P, Frankignoulle M, Smith S V. Measurement of community metabolism and significance in the coral reef CO_2 source-sink debate. Proc Natl Acad Sci USA, 1999, 96: 13017–13022
10 Gattuso J P, Pichon M, Jaubert J, et al. Primary production, calcification and air-sea CO_2 fluxes in coral reefs: organism, ecosystem and global scales. Bull Institut Oceanogr, 1996, 14: 39–46
11 Kawahata H, Yukino I, Suzuki A. Terrestrial influences on the Shiraho fringing reef, Ishigaki island, Japan: High carbon input relative to phosphate. Coral Reefs, 2000, 19: 172–178
12 Fagan K E, Mackenzie F T. Air-sea CO_2 exchange in a subtropical estuarine-Coral reef system, Kaneohe Bay, Oahu, Hawaii. Mar Chem, 2007, doi: 10.1016/j.marchem.2007.01.016
13 Frankignoulle M, Gattuso J P, Biondo R, et al. Carbon fluxes in coral reefs. Ⅱ. Eulerian study of inorganic carbon dynamics and measurement of air-sea CO_2 exchanges. Mar Ecol Prog Ser, 1996, 145: 123–132
14 Gattuso J P, Pichon M, Delesalle B, et al. Community metabolism and air-sea CO_2 fluxes in a coral reef ecosystem (Moorea, French Polynesia). Mar Ecol Prog Ser. 1993, 96: 259–267
15 Kawahata H, Suzuki A, Goto K. Coral reefs as source of atmospheric CO_2–spatial distribution of pCO_2 in Majuro atoll. Geochem J, 1999, 33: 295–303
16 Kawahata H, Suzuki A, Ayukai T, et al. Distribution of the fugacity of carbon dioxide in the surface seawater of the Great Barrier Reef. Mar Chem, 2000, 72: 257–272
17 Kayanne H, Suzuka A, Saito H. Diurnal changes in the partial pressure of carbon dioxide in coral reef water. Science, 1995, 269: 214–216
18 Suzuki A. Combined effects of photosynthesis and calcification on the partial pressure of carbon dioxide in the seawater. J Oceanogr, 1998, 54: 1–7
19 Wang P X, Li Q Y. The South China Sea: Paleoceanography and Sedimentology. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. 229–243
20 Dai M H, Lu Z M, Zhai W D, et al. Diurnal variations of surface seawater pCO_2 in contrasting coastal environments. Limnol Oceanogr, 2009, 54: 735–745
21 余克服, 赵建新, 施祺, 等. 永暑礁西南礁镯生物地貌与沉积环境. 海洋地质与第四纪地质, 2003, 23: 1–7

22 Yu K F, Zhao J X, Collerson K D, et al. Storm cycles in the last millennium recorded in Yongshu Reef, southern South China Sea. Palaeogeogr Palaeoclimat Palaeoecol, 2004, 210: 89–100
23 余克服, 宋朝景, 赵焕庭. 西沙群岛永兴岛地貌与现代沉积特征. 热带海洋, 1995, 14: 24–31
24 李颖虹, 黄小平, 岳维忠, 等. 西沙永兴岛珊瑚礁与礁坪生物生态系研究. 海洋与湖沼, 2004, 35: 176–182
25 聂宝符, 陈特固, 梁美桃, 等. 南沙群岛及其邻近礁区造礁珊瑚与环境保护的关系. 北京: 科学出版社, 1997. 20–21
26 赵美霞, 余克服, 张乔民, 等. 近 50 年来三亚鹿回头岸礁活珊瑚覆盖率的动态变化. 海洋与湖沼, 2010,41: 440–447
27 李淑, 余克服, 施祺, 等. 南海北部珊瑚共生虫黄藻密度的种间与空间差异及其对珊瑚礁白化的影响. 科学通报, 2007, 52: 2655–2622
28 Mehrbach C, Culberson C H, Hawley J E, et al. Measurement of the apparent dissociation constants of carbonic acid in seawater at atmospheric pressure. Limnol Oceanogr, 1973, 18: 897–907
29 Dickson A G, Millero F J. A comparison of the equilibrium constants for the dissociation of carbonic acid in seawater media. Deep-Sea Res A, 1987, 34: 1733–1743
30 Lewis E, Wallace D. Program developed for CO_2 system calculations. Oak Ridge Natl Lab, Carbon Dioxide Info Anal Cent, ORNL/CDIAC^{-1}05 US Dept of Energy. 1998
31 Watanabe A, Kayanne H, Hata H, et al. Analysis of the seawater CO_2 system in the barrier reef-lagoon system of Palau using total alkalinity-dissolved inorganic carbon diagrams. Limnol Oceanogr, 2006, 51: 1614–1628
32 McGillis W R, Wanninkhof R. Aqueous CO_2 gradients for air-sea flux estimates. Mar Chem, 2006, 98: 100–108
33 Kraines S, Suzuki Y, Omori T, et al. Carbonate dynamics of the coral reef system at Bora Bay, Miyako Island. Mar Ecol Prog Ser, 1997, 156: 1–16
34 Wanninkhof R. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean. J Geophys Res, 1992, 97: 7373–7382
35 Takahashi T, Sutherland S C, Sweeney C, et al. Global sea-air CO_2 flux based on climatological surface ocean pCO_2, and seasonal biological and temperature effects. Deep-Sea Res Ⅱ, 2002, 49: 1601–1622
36 Bates N R, Samules L, Merlivant L. Biogeochemical and physical factors influencing seawater fCO_2 and air-sea CO_2 exchange on Bermuda coral reef. Limnol Oceanogr, 2001, 46: 838–846
37 Cao Z M, Dai M H, Lu Z M, et al. $CaCO_3$ to organic carbon ratio in the South China Sea. In: Ip W H, Gyan P S, Oh J H, et al. eds. Advances in Geosciences: Ocean Science (OS). Singapore: World Scientific Publishing, 2009. 109–125
38 Ohde S. Calcium carbonate production and carbon dioxide flux on a coral reef, Okinawa. In: Sakai H, Nozaki Y, eds. Biogeochemical Processes and Ocean Flux in the Western Pacific. Tokyo: Terra Scientific Publishing Company(TERRAPUB), 1995: 93–98
39 Suzuki A, Kawahata H. Carbon budget of coral reef systems: An overview of observations in fringing reefs, barrier reefs and atolls in the Indo-pacific regions. Tellus, 2003, 55B: 428–444
40 Suzuki A, Kawahata H. Partial pressure of carbon dioxide in coral reef lagoon waters: comparative study of atolls and barrier reefs in the indo-pacific oceans. J Oceanogr, 1999, 55: 731–745