



论文

南海南部美济礁 200 余年滨珊瑚骨骼钙化率变化及其与大气 CO₂ 和海水温度的响应关系

施祺*, 余克服, 陈天然, 张会领, 赵美霞, 严宏强

中国科学院边缘海地质重点实验室, 中国科学院南海海洋研究所, 广州 510301

* E-mail: shiqi@scsio.ac.cn

收稿日期: 2010-12-10; 接受日期: 2011-07-05

中国科学院战略性先导科技专项(编号: XDA05080300)、中国科学院知识创新工程重要方向项目(编号: KZCX2-YW-138)、国家自然科学基金重点项(批准号: 40830852, 41025007)、国家重点基础研究发展计划(编号: 2007CB815905)和国家科技支撑计划项目(编号: 2006BAB19B03)资助

摘要 工业革命以来的大气 CO₂ 浓度上升和全球气候变暖被认为是珊瑚生长的主要威胁. 利用珊瑚骨骼 X 光影像方法分析了美济礁 14 个大型滨珊瑚的骨骼钙化率, 获得了 200 多年来的珊瑚钙化率变化模式. 结果显示珊瑚钙化率的长期变化包括 3 个增长阶段(1770~1830, 1870~1920 和 1980~2000)和 2 个降低阶段(1830~1870 和 1920~1980), 其中 1770~1830 年和 1920~1980 年分别有 200 多年来最大增幅(4.5%)和最大降幅(6.2%), 最近的时段 1980~2000 年间珊瑚钙化率有小幅上升. 珊瑚钙化率与大气 CO₂ 和海水表层温度(SST)响应模式的分析发现, 美济礁珊瑚钙化率与大气 CO₂ 的响应关系不成立, 百年来的大气 CO₂ 浓度增加对珊瑚生长的影响不显著; 珊瑚钙化率则与 SST 具有非线性响应关系, 最大钙化率温度为 27.2℃, 低于和高于该温度, 钙化率降低. 20 世纪早中期的 SST 上升有利于珊瑚生长, 而近 20 年的 SST 持续上升则不利于珊瑚生长.

关键词
骨骼钙化率
大气 CO₂
SST
滨珊瑚
南海

温室气体浓度增加导致的全球气候变暖及其对环境的影响已成为全球关注的焦点^[1]. 对于高生物多样性和高资源生产力的珊瑚礁来说, 大气 CO₂ 浓度上升和全球变暖被认为是有致命的威胁^[2,3]. 多种模式预测认为, 未来 50 年至 100 年大气 CO₂ 上升和全球变暖将导致珊瑚骨骼钙化率显著下降, 估算的下降幅度从百分之十几到百分之八十不等^[2~6], 总之, 珊瑚礁礁体结构将难以维持, 最终将溶解消亡^[2,3]. IPCC^[7]因此预测到本世纪末, 珊瑚礁可能成为因全球变暖而失去的第一个生态系统. 但相反的观点认为, 海洋升温有利于珊瑚钙化率增加, 并且增加幅度要

大于 CO₂ 上升造成的下降幅度, 并预测 2100 年珊瑚礁钙化率将增加 35%, 不存在珊瑚礁灾难之说^[8]. 珊瑚礁未来的发展趋势是否真的走向灭亡、大气 CO₂ 上升和全球气候变暖是否就是珊瑚礁最后的杀手? 认识过去百年乃至更长时间尺度珊瑚生长的历史就显得尤为重要.

早期研究发现澳大利大堡礁珊瑚钙化率与 SST 正相关, 20 世纪以来钙化率增长了 4%^[9,10]; 南太平洋 Moorea 礁近 200 年珊瑚钙化率研究也有相似的结果^[11]; 澳大利亚 Flinders 礁近 300 年珊瑚记录则显示珊瑚保持正常的钙化率变化, 海水 pH 变化对钙化率

英文引用格式: Shi Q, Yu K F, Chen T R, et al. Two centuries-long records of skeletal calcification in massive *Porites* colonies from Meiji Reef in the southern South China Sea and its responses to atmospheric CO₂ and seawater temperature. Sci China Earth Sci, 2012, 55: 1-12, doi: 10.1007/s11430-011-4320-0

没有明显影响^[12]. 这些研究无疑否定 CO₂ 上升和全球变暖对珊瑚生长的负面影响, 但前两项研究的时段限于 20 世纪 80 年代和 90 年代之前, 而后两项研究仅是根据单个珊瑚样品所获得的结论. 大堡礁新的研究集成了上百个珊瑚样品的骨骼钙化率数据, 发现 20 世纪 90 年代以来钙化率有明显下降, 下降幅度可达 14.2%^[13], 超出了过去 400 年的变化幅度, 认为 CO₂ 上升和全球变暖对珊瑚生长有重要的负面影响^[13].

国内模拟研究^[14]认为, 由于大气 CO₂ 上升, 南海南部南沙群岛海域过去百年间珊瑚平均钙化率要下降 12%, 到 2100 年进一步减少到 33%, 珊瑚礁面临灭绝的危险. 但少有研究从长时间尺度珊瑚钙化率记录的角度去认识南海珊瑚生长历史以及对气候变化的响应关系. 最新研究^[15]报道了西沙永兴岛单个珊瑚样品记录的 200 余年骨骼影像灰度与大气 CO₂ 有反相关关系, 认为反映了珊瑚钙化率下降对大气 CO₂ 升高的响应. 但文中存在两个值得商榷的地方: (1) 珊瑚骨骼影像灰度分析中, 影像灰度值越大, 影像越浅, 骨骼密度越低; 灰度值越小, 影像越深, 骨骼密度越高. 该文弄反了影像灰度与骨骼密度的对应关系, 样品灰度值减小的趋势错误地代表了珊瑚骨骼密度下降的趋势. (2) 珊瑚骨骼钙化率是由珊瑚骨骼生长率和骨骼密度的乘积确定^[9,10], 国际和国内的实验研究均发现钙化率主要与生长率正相关, 与骨骼密度关系不显著^[9,10,16,17], 即钙化率主要受生长率控制, 受骨骼密度的影响小. 忽略生长率对钙化率的贡献, 仅用骨骼密度来指代珊瑚钙化率是不成立的. 因此该文珊瑚样品的影像灰度实际上反映出骨骼密度的上升趋势, 并不能指示珊瑚钙化率的变化, 因此不能支持其结论.

本文选择南沙群岛美济礁多个珊瑚样品开展骨骼钙化率的研究, 获得了南海南部珊瑚礁区目前最长 200 多年的珊瑚钙化率记录, 以探讨美济礁 200 余年来的珊瑚生长历史及其对大气 CO₂ 和海水温度变化的响应关系.

1 研究材料与方法

澄黄滨珊瑚(*Porites lutea*)骨骼生长过程中形成连续的高-低密度相间的年生长带, 因此, 珊瑚钙化率可通过测量骨骼年生长带的线性生长率和骨骼密度计算而得, 即, 骨骼钙化率($\text{g cm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)=骨骼生长

率(cm a^{-1}) $\times$ 骨骼密度(g cm^{-3})^[9,10]. 骨骼生长率可通过骨骼 X 光影像中深浅相间的年生长带宽度量算^[18], 骨骼密度则利用生长带 X 影像灰度间接量算^[19-21]. 基于文献[20,21], 利用美济礁滨珊瑚骨骼样品 X 光影像, 通过试验建立了 X 光影像分析方法用于测算珊瑚钙化率.

1.1 研究区与采样点

南沙群岛有大量个体巨大的滨珊瑚, 是开展高分辨率生态和古气候环境研究的理想区域^[22-27], 但关于该区长时间尺度(>100 a)珊瑚生长的研究仍属空白. 美济礁(9°52'~9°56'N, 115°30'~115°35'E)为椭圆形环礁(图 1), 东西长约 9 km, 南北宽约 6 km, 泻湖最大水深约 27 m. 美济礁珊瑚生长茂盛, 具有礁外坡、礁坪和泻湖坡典型的生物地貌分带, 20 世纪 60~70 年代调查记录到珊瑚共 44 种^[28], 2004 年和 2007 年的调查共记录到珊瑚 12 科 32 属 93 种, 礁外坡和礁坪的平均珊瑚覆盖率分别约 51%和 24%, 远高于海南的珊瑚覆盖率, 反映人类活动对珊瑚礁生态的影响相对较小. 在泻湖坡水深 2~7 m 处分布有大量大型块状(直径约 1~2.5 m, 高约 1~4 m)的活体和死亡的澄黄滨珊瑚. 分别于 2004 年和 2007 年 5 月下旬使用水下液压钻机钻取多个活体和死亡滨珊瑚的柱状样, 柱样长度在 30~290 cm 之间.

1.2 骨骼影像灰度校正与骨骼密度转换

珊瑚柱样沿生长方向切割成厚 8 mm 的薄片, 清洗晾干后用 HITACHI 医用 X 光机(58 KV, 50 mA, 0.06 s)照相, 获得骨骼生长带 X 光胶片, 用专业胶片扫描仪(EPSON 4990)扫描获得生长带 X 光灰度数字影像. 生长带影像表现为清晰的深浅相间的高-低密度条带分布, 一对高-低密度条带构成年生长带. 比较珊瑚样品骨骼 X 光影像, 选取生长密度带清晰, 生长完整连续的活体珊瑚样 8 个, 死亡珊瑚样 6 个(图 2), 用于本文骨骼影像灰度分析.

理论上, 空白胶片在 X 光照射下完全感光, 影像应为白色(灰度值=255), 由于不同胶片对 X 光的感光差异, 造成空白胶片出现灰度偏差, 呈浅灰色(灰度值<255). 骨骼影像灰度可通过减去空白部分灰度值进行校正. 此外, X 光机光照强度由中心向边缘减弱, 灰度由中心向边缘减小, 造成影像灰度分布偏差. 通过相同参数下厚度均匀铝板的 X 光照相和影像灰度

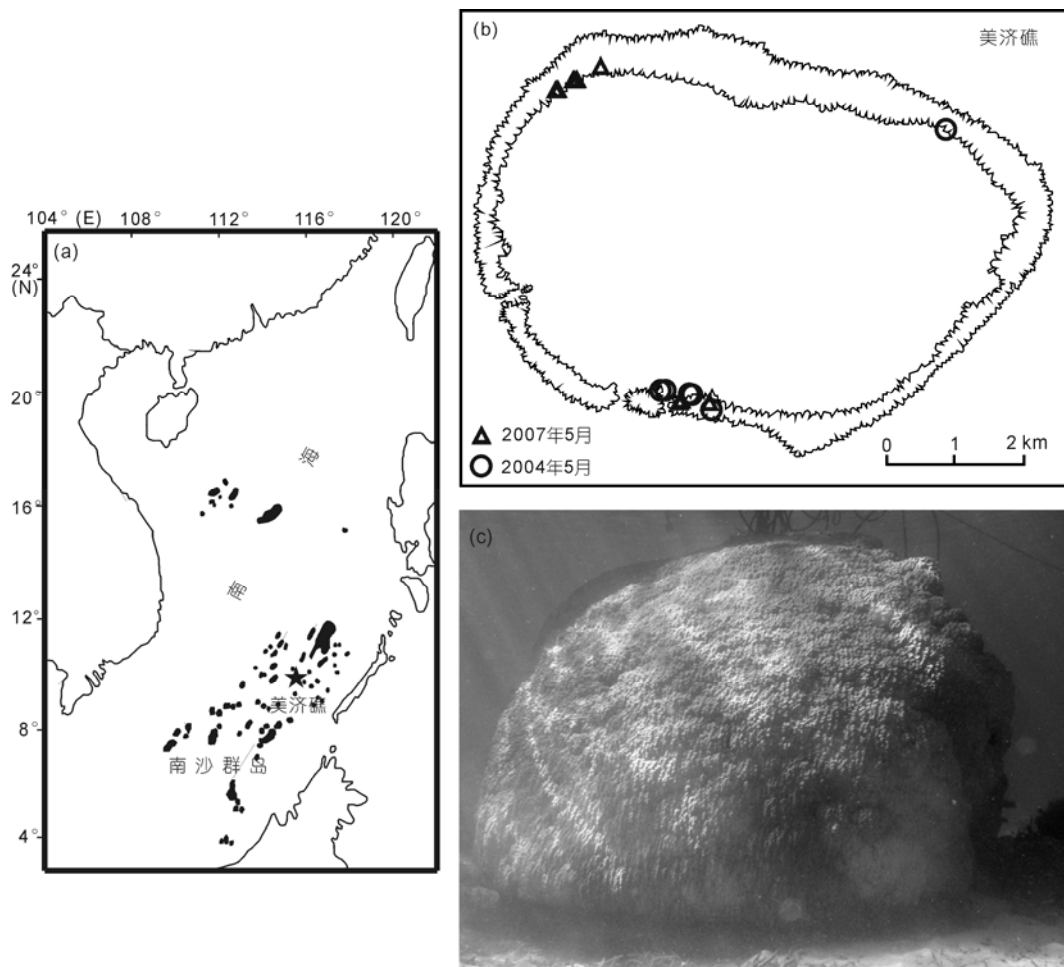


图 1 美济礁位置(a)、滨珊瑚钻样点分布(b)及滨珊瑚个体照片(c)

数据获取,建立了影像中心到边缘灰度衰减的模式(图 3(a)),可对由于光源造成的影像灰度偏差进行校正. 根据 X 光机成像原理,珊瑚 X 光影像灰度反映了骨骼对 X 射线的吸收强度,取决于光照强度、骨骼密度和骨骼厚度. 相同光照强度下,灰度只与样品密度和厚度相关,因此可利用灰度与密度和厚度的关系把影像灰度转换为骨骼密度. 本文沿楔形铝块斜面进行 X 光照相和灰度数据获取,建立了灰度与密度和厚度的乘积的拟合关系(图 3(b)),用于珊瑚骨骼影像灰度与骨骼密度的转换. 影像灰度处于 100~230 时,拟合误差小于 10%,平均误差为 5.8%. 实验样块(方解石、铝块和不同属种珊瑚样块)实测的密度和厚度乘积与灰度的散点沿拟合曲线分布,都位于 95% 置信区间内,拟合值与实测值的相对误差中,质地均匀的方解石和铝块分别为 3% 和 4%,质地不均匀的

珊瑚样块平均为 10.6%. 由于仪器的差异,不同 X 光机获得的影像灰度差别大,因此本文的影像灰度-骨骼密度转换关系并不能通用.

1.3 骨骼年生长带划分与定年

沿样品骨骼生长方向设置截线断面(图 2),利用 MATLAB 软件提取断面的连续影像灰度,经过校正和转换获得生长带连续的骨骼密度序列,具有高、低密度交替的年周期变化. 采用二阶导数法确定高、低密度带转变的拐点作为时间标尺,划分出相邻的一对高、低密度带为一个完整年生长带^[20],进而划分出样品的骨骼生长年份. 活体珊瑚顶部生长带对应于样品采集当年,死亡珊瑚顶部年代通过高精度 TIMS 铀系测年方法测定,由澳大利亚昆士兰大学同位素年代学实验室完成,具体实验方法和数据见文献[26].

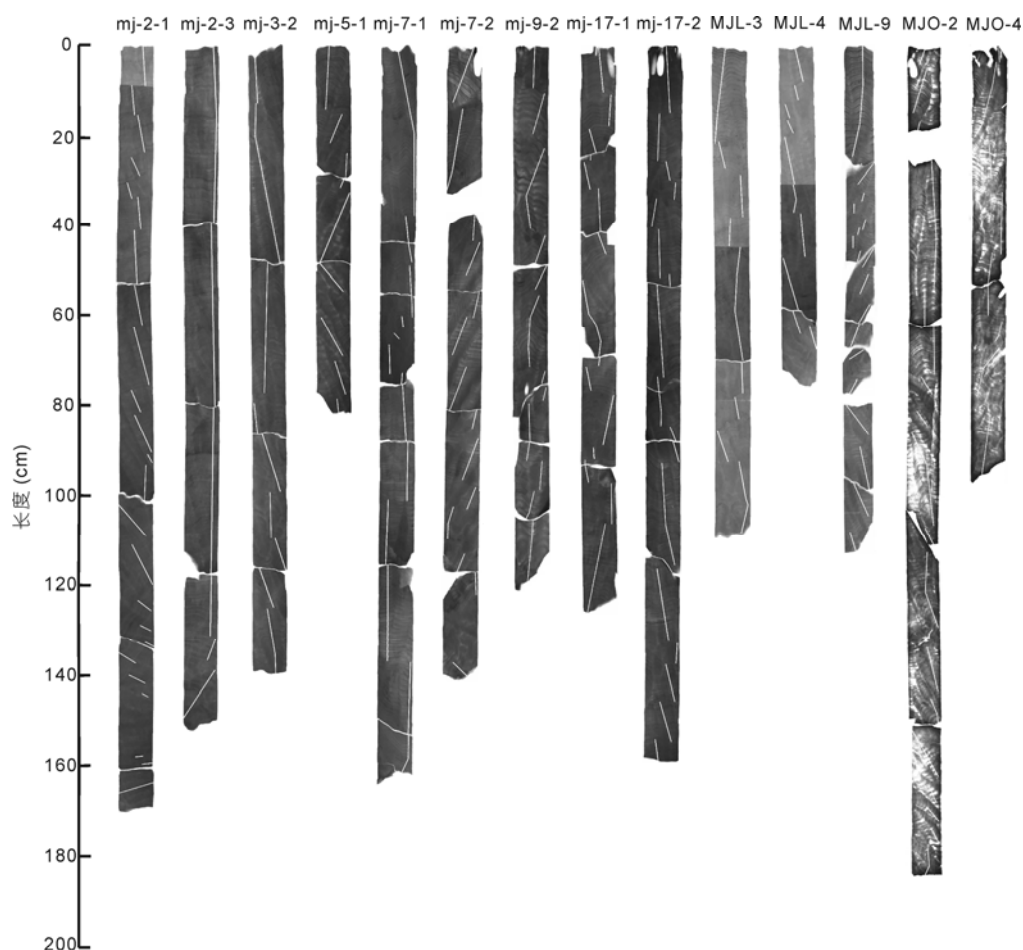


图 2 滨珊瑚骨骼样片 X 光影像及分析截线断面

各活体和死亡珊瑚样品年代范围可依生长带年份逐一推算. 样品 mj-7-2, MJL-9 和 MJO-2 有 3~8 cm 破碎缺失, 缺失部分年代按该样品年平均生长率和缺失长度计算. 同时测算各年生长带的骨骼生长率和骨骼密度, 计算出相应的骨骼钙化率, 获得各样品的骨骼钙化率年代变化序列(图 4).

1.4 珊瑚钙化率变化模式以及对大气 CO₂ 和 SST 响应模式构建

考虑到珊瑚骨骼个别生长带的不规则可能造成年代序列的偏差以及珊瑚生长的个体差异, 对各珊瑚样品钙化率序列进行 3 年高斯平滑和标准化处理^[9]. 多个珊瑚钙化率时间序列分析通常采用平均的方法以揭示珊瑚钙化率的一般变化规律^[9,10], 但不同珊瑚钙化率序列之间既存在着一定的相关性, 也存在个体的差异性, 因此在揭示珊瑚钙化率变化的一般规

律时, 要考虑到个体的差异, 因此可采用线性混合效应模型方法^[13,29]. 线性混合效应模型的构建包括反映具有控制作用的固定效应和反映个体差异和相关性的随机效应. 本文分别以珊瑚钙化率的年代序列、大气 CO₂ 和 SST 构建模型的固定效应, 同时以珊瑚个体构建模型的随机效应, 通过线性混合效应模型分析拟合美济礁滨珊瑚钙化率变化的一般模式, 以及钙化率分别与大气 CO₂ 和 SST 的响应模式. 线性混合效应模型的具体方法见文献[30].

大气 CO₂ 数据分别选自南极冰芯重建的过去近千年大气 CO₂ 浓度^[31]和夏威夷 Mauna Loa 最近 50 年的大气 CO₂ 浓度实测数据. CO₂ 数据引自 NOAA 古气候数据中心(<http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/>)和 NOAA 地球系统研究实验室(<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>)(图 6(a)). 南沙群岛附近海域缺少长期 SST 器测数据, 选择英国 Climate Research

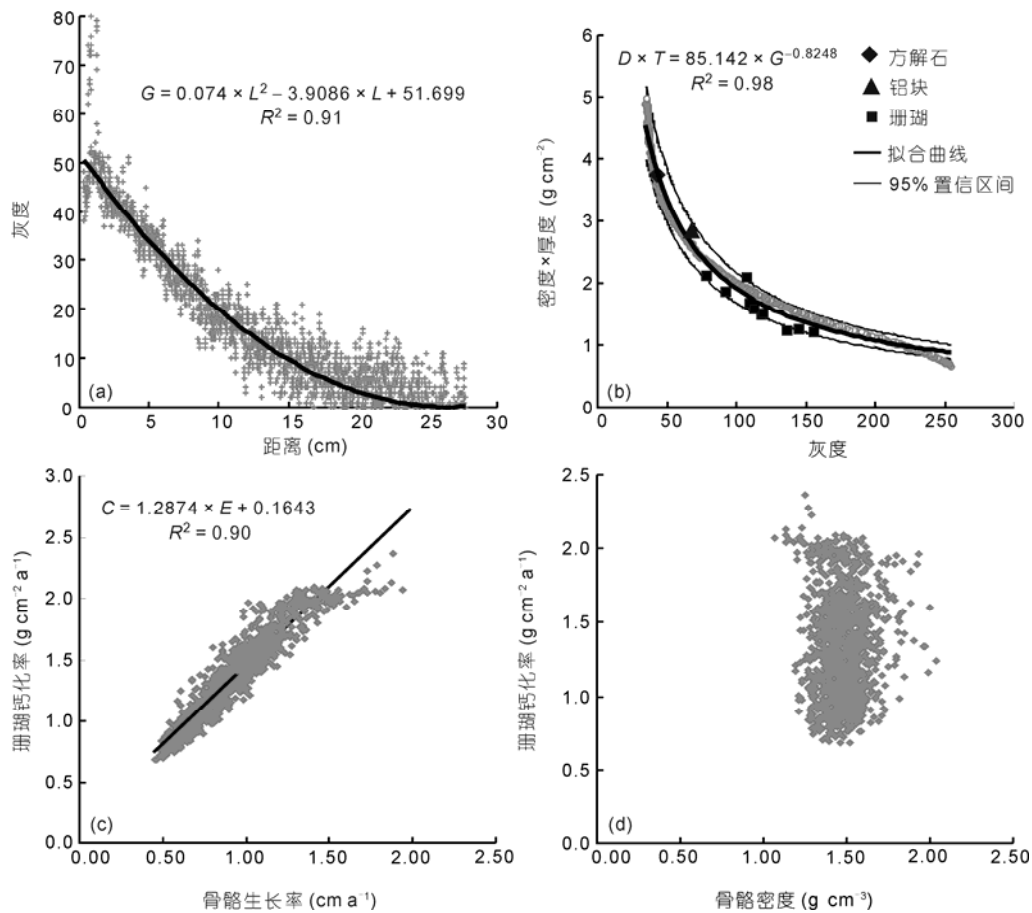


图3 铝板边缘到中心点的影像灰度拟合(a)、楔形铝块斜面影像灰度与密度和厚度乘积拟合(b)和美济礁滨珊瑚样品骨骼钙化率与骨骼生长率(c)和骨骼密度(d)散点图

G , 影像灰度; D , 密度; T , 厚度; L , 边缘距中心点距离; C , 骨骼钙化率; E , 骨骼生长率

Unit 的 HadSST2 数据库中美济礁临近的南沙海域 $5^\circ \times 5^\circ$ 网格区域 ($10^\circ \sim 15^\circ \text{N}$, $110^\circ \sim 115^\circ \text{E}$) 的 SST 数据 (<http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temerature/>) (图 6(b)).

2 结果与讨论

2.1 珊瑚钙化率变化模式

美济礁滨珊瑚样品的平均骨骼生长率为 $(0.91 \pm 0.26) \text{ cm a}^{-1}$, 平均骨骼密度为 $(1.45 \pm 0.15) \text{ g cm}^{-3}$, 平均骨骼钙化率为 $(1.30 \pm 0.35) \text{ g cm}^{-2} \text{ a}^{-1}$. 图 3(c), (d) 显示, 钙化率与生长率有显著的正相关性, 而与骨骼密度关系不显著, 国内其他地点的研究也有相同发现^[16,17], 与澳大利亚大堡礁的研究结果一致^[9,10], 这主要是因为珊瑚生长率的年际变化差异大, 而骨骼密度的年际变化相对较小^[16]. 美济礁滨珊瑚的平

均钙化率 $((1.30 \pm 0.35) \text{ g cm}^{-2} \text{ a}^{-1})$ 与南海北部大亚湾 $(1.40 \text{ g cm}^{-2} \text{ a}^{-1})$ ^[17] 和南太平洋 Moorea 礁滨珊瑚平均钙化率 $((1.26 \pm 0.19) \text{ g cm}^{-2} \text{ a}^{-1})$ ^[11] 差别不大, 但明显小于澳大利亚大堡礁滨珊瑚的平均钙化率 $((1.72 \pm 0.36) \text{ g cm}^{-2} \text{ a}^{-1})$ ^[9].

14 个珊瑚样品钙化率的年际变化显著, 钙化率的变化形式也不尽相同 (图 4). 其中, 1980 年以来, 样品 mj-2-1, mj-2-3, mj-7-1 和 MJL-9 钙化率下降, mj-3-2 和 MJL-3 钙化率上升, MJL-4 钙化率表现为先升后降, mj-5-1 钙化率表现为先降后升, 钙化率变化即存在一定的共性, 也存在个体的差异性. 线性混合模型分析获得了 1716~2005 年间美济礁珊瑚钙化率的一般变化模式, 钙化率显示出准百年尺度的长周期变化特征, 明显可分为 5 个阶段 (图 5(b)).

1716~1830 年珊瑚钙化率增长, 有近 300 年来最

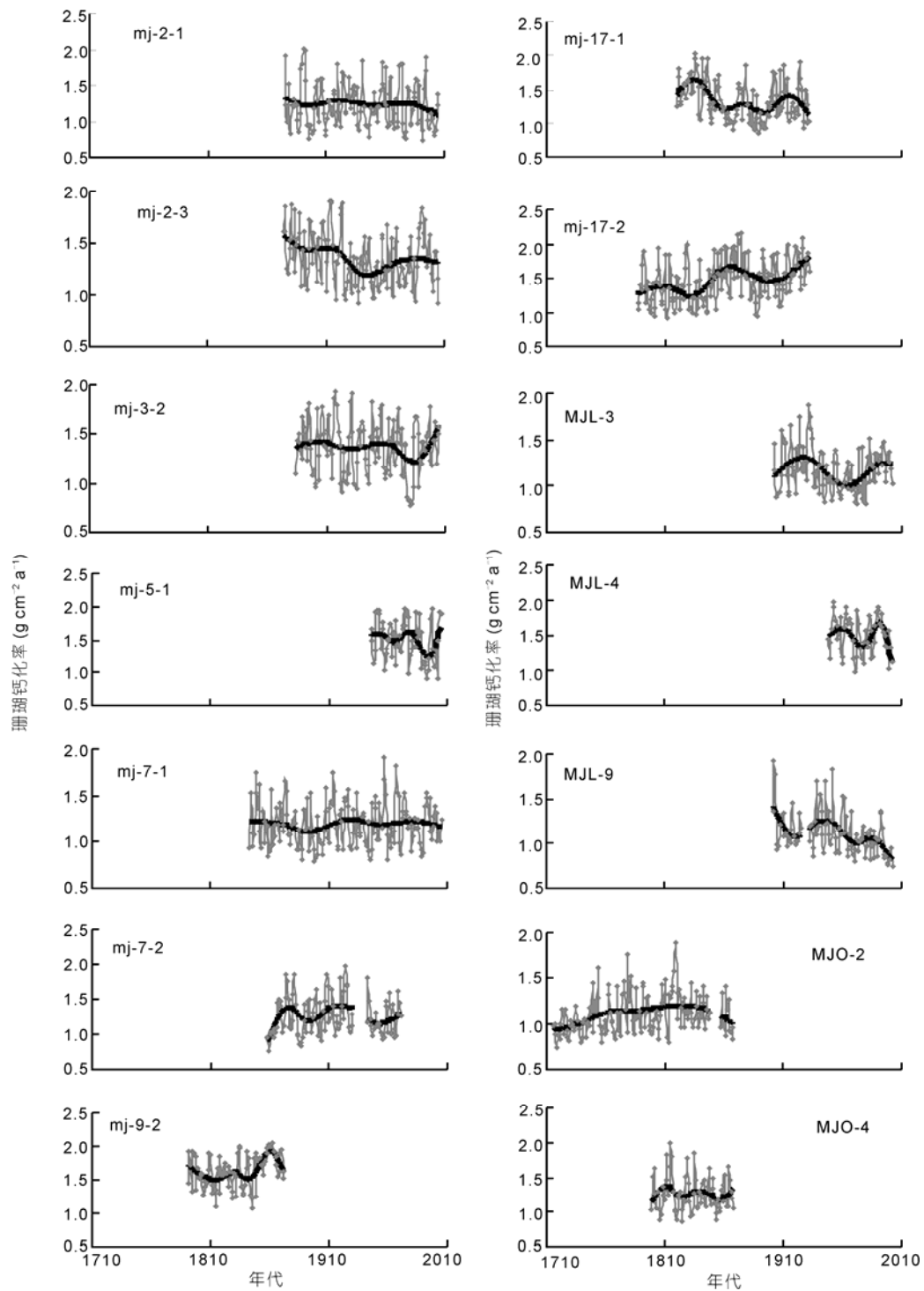


图 4 美济礁滨珊瑚样品骨骼钙化率年代变化序列
粗实线为样条拟合

大的增幅 15.3%(95%置信区间为 8.0%~24.1%, 下同), 但钙化率 95%置信区间的范围相当大, 区间范围差

值达到 16.1%, 主要是因为 1716~1770 年只有一个样品序列(MJO-2), 更多的是反映该样品钙化率的个体

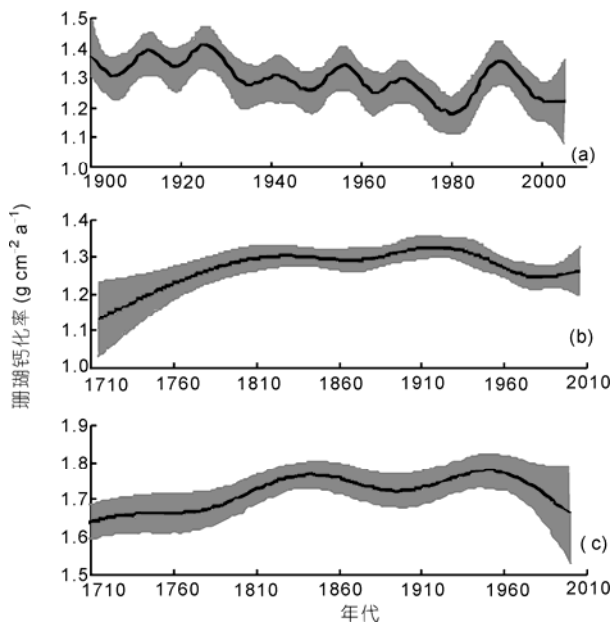


图 5 美济礁珊瑚钙化率变化模式及其与大堡礁^[13]的对比
(a) 美济礁珊瑚钙化率年代际变化模式; (b) 美济礁珊瑚钙化率长期变化模式; (c) 大堡礁珊瑚钙化率长期变化模式. 灰色均为 95% 置信区间

变化, 不具有整体的代表性. 1770~1830 年间则有多个样品序列, 钙化率增幅为 4.5%(3.5%~5.7%), 有 200 余年以来的最大增幅, 代表了这一时段钙化率变化的一般特征.

1830~1870 年钙化率小幅下降, 降幅为 0.9%(0.5%~1.3%); 1870~1920 年钙化率增长, 增幅为 2.7%(2.2%~3.2%); 1920~1980 年钙化率下降, 有 200 余年来的最大降幅 6.2%(5.6%~6.7%). 1830~1870, 1980~1920 和 1920~1980 这三个阶段的钙化率 95% 置信区间的范围相对较小, 区间范围差值为 0.8%~1.2%, 表明这三个阶段各珊瑚样品的钙化率变化具有较大的共性, 较好地反映了 1830~1980 年这一时期美济礁珊瑚钙化率的长期变化规律.

1980~2005 年钙化率有小幅度上升, 增幅为 1.3%(−1.5%~4.0%), 钙化率 95% 置信区间出现负值, 存在钙化率减小的可能, 表明期间某个时段内钙化率变化的个体差异较大, 使得这一时期长期变化趋势存在一定的不确定性. 1900 年以来珊瑚钙化率年代际变化模式的分析发现(图 5(a)), 1980~2005 年钙化率经历两个明显的增长和下降阶段, 其中, 1980~1990 年钙化率显著增大, 有百年以来的最大增幅 14.8%(14.2%~14.9%); 而 1990~2000 年钙化率下降,

降幅为 9.5%(9.1%~9.6%); 2000 年以来钙化率的变化趋势不明显, 反映出珊瑚样品钙化率显著的个体差异. 可见从长趋势变化来看, 1980~2000 年美济礁确实存在珊瑚钙化率的增长变化.

澳大利亚大堡礁珊瑚钙化率长期变化模式显示 18 世纪以来经历了 4 个增长和下降阶段^[13](图 5(c)). 与之相比, 美济礁钙化率变化在时间上要早于大堡礁 20~40 年. 其中, 两地珊瑚钙化率在 20 世纪都有明显降低阶段, 大堡礁钙化率下降出现在 1960~2000 年(图 5(c)), 而美济礁钙化率下降出现在 1920~1980 年, 随后 1980~2000 年间钙化率出现增长(图 5(a)), 这在大堡礁珊瑚钙化率变化中并没有出现. 美济礁与大堡礁珊瑚钙化率 200 余年来的长期变化模式明显不同步, 表明不同海区的珊瑚生长存在着一定的地域差异.

2.2 珊瑚钙化率与大气 CO₂ 的响应关系

海水碳酸盐体系表明, 大气 CO₂ 浓度上升, 海水中 CO₂ 相应增加, 海水酸化增强, 海水 CO₃²⁻ 浓度下降, 降低了海水中碳酸钙矿物饱和度^[32], 会导致包括珊瑚在内的海洋钙质生物钙化率降低^[4,33~38], 即钙化率与大气 CO₂ 有反相关系.

工业革命以来, 化石能源的使用使得 CO₂ 的排放逐渐增加, 大气 CO₂ 浓度整体表现为逐步上升的趋势, 并且近几十年来的 CO₂ 增幅加大(图 6(a)). 对应大气 CO₂ 的变化, 2000 年全球海洋 pH 值较工业革命前下降了 0.1 个单位^[32]. 1900 年以来美济礁珊瑚钙化率长期变化模式在两个时段上与大气 CO₂ 有不同的对应关系(图 6(a)): 1900~1980 年钙化率下降对应于 CO₂ 的上升, 其间 1920~1980 年钙化率有 200 余年来的最大降幅, 而大气 CO₂ 并不是最大增幅; 1980~2000 年 CO₂ 大幅上升, 钙化率反而出现小幅增加. 实际上, 珊瑚钙化率变化还存在年代际的波动(图 6(b)), 但在大气 CO₂ 变化中并不存在. 可见, 百年来美济礁珊瑚钙化率与大气 CO₂ 的变化模式并没有一致的对对应关系.

1900~2000 年珊瑚钙化率与大气 CO₂ 响应模式的线性混合模型分析(图 7(a)), 发现钙化率与 CO₂ 呈非线性对应关系, 大致以 350 ppm 为 CO₂ 临界点, 珊瑚有最小钙化率值, CO₂ 低于临界点时, 钙化率与 CO₂ 为反相关, 随 CO₂ 的上升而明显降低; CO₂ 高于临界点时, 钙化率随 CO₂ 的上升而增加, 与已知的大

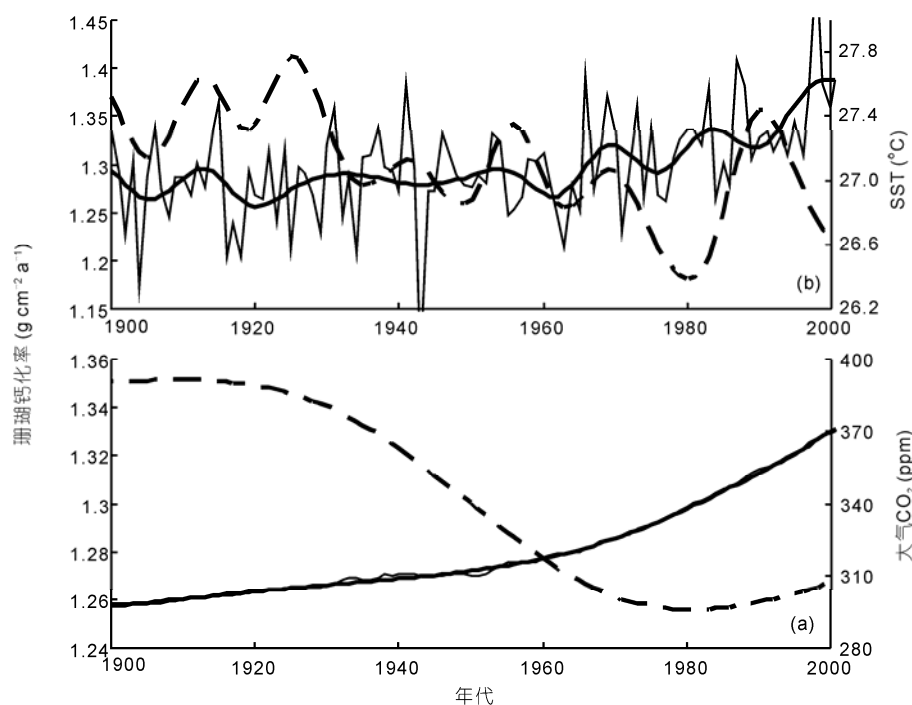


图6 百年来美济礁珊瑚钙化率与大气 CO₂(a)和 SST(b)变化对比

CO₂ 和 SST 数据来源见正文, 粗实线分别为 CO₂ 和 SST 样条拟合, 虚线为珊瑚钙化率长期变化和年代际变化

气 CO₂ 与珊瑚钙化率反相关关系的理论认知和实验模拟相矛盾^[4,33-38]. 因此这样一种响应模式不能代表钙化率与 CO₂ 真实的响应关系, 百年来美济礁珊瑚钙化率变化不能归结于大气 CO₂ 上升的影响. 实际上美济礁珊瑚钙化率 1880 年以来平均仅下降约 2.7%, 要远小于根据大气 CO₂ 的增加幅度模拟计算得到的南海海区珊瑚钙化率 12% 的平均下降幅度^[14], 表明过去百年大气 CO₂ 上升并没有在美济礁珊瑚钙化率变化中得到明显体现.

过去十余年间国际上一些模拟实验发现, 以珊瑚为主的海洋钙质生物在酸化增强的环境下确实存在钙化率的下降^[33-38], 但近年来也有实验发现在模拟 CO₂ 增加酸化增强环境下, 既有生物钙化率的降低, 也有钙化率的增加和正常变化^[39-45]. 有研究认为这反映了生物钙化能力对酸化环境响应和适应的差异^[39-42], 也有研究认为骨骼钙化可能不是海洋酸化影响的关键过程, 生物能改变自身的生物特性, 牺牲其他的生理过程为代价来增强钙化能力以应对海水酸化导致的碳酸钙饱和度下降的影响^[43,44]. 模拟实验多是在短时间(几天至几个月)进行的, 反映出的是海水酸化增强对钙质生物生长影响的短期效应,

即使这种短期效应也揭示出生物对酸化环境存在自我调节和适应. 研究发现封闭、半封闭的环礁泻湖海水 pH 存在显著的日变化, 变化幅度可达到 0.6 个单位^[46-48]. 澳大利亚 Flinders 珊瑚礁半封闭泻湖海水 pH 的年代际变化幅度约 0.3 个单位^[12], 大于工业革命以来大气 CO₂ 上升造成的海水 pH 值 0.1 的降幅^[32], 而珊瑚钙化率并没有明显的降低, 保持在正常变化范围内, 认为珊瑚生长已经适应了海水酸化的短期效应^[12]. 美济礁存在类似的半封闭泻湖环境, 海水 pH 显著的自然变化以及珊瑚在长期生长过程中对海洋酸化环境改变的适应可能是大气 CO₂ 上升对美济礁珊瑚钙化率影响不显著的原因.

2.3 珊瑚钙化率与 SST 的响应关系

珊瑚生长有一定的温度限制, 一般认为最适宜的温度范围为 25~29°C^[49], 超过适宜温度, 珊瑚的能量储备^[50]和组织生物量^[51]相关的生理过程就会受到影响. 此外, 海温异常也会导致与珊瑚共生的虫黄藻或虫黄藻色素丧失, 造成珊瑚白化^[52], 影响到珊瑚的生长. 近 20 年来全球范围内珊瑚白化现象越来越频繁, 与海温的持续升高以及 El Niño 事件造成的海温

异常密切相关^[5].

南海美济礁海域百年来 SST 整体上也呈上升趋势,同时也存在着显著的年代际变化(图 6(b)),美济礁珊瑚钙化率也表现为年代际的变化,与 SST 的变化具有一定的对应关系(图 6(b)).其中,1900~1925 和 1950~1980 年间多个时段存在钙化率与 SST 的正相变化,即钙化率与 SST 的增长和降低同步;但对应于 1990~2000 年 SST 的持续上升,钙化率则出现反相的下降.1900~2000 年珊瑚钙化率与 SST 响应模式的线性混合模型分析发现(图 7(b)),钙化率与 SST 呈非线性的响应关系,大致以 27.2°C 为 SST 临界点,珊瑚有最大钙化率值,当 SST 低于该温度时,钙化率与 SST 正相关,随 SST 的升高而增大;而当 SST 高于该温度时,钙化率与 SST 负相关,随 SST 的升高而降低.这样一种响应关系与钙化率和 SST 在年代际变化上的对应关系相一致,也符合珊瑚生长存在适宜温度的认知.

早期的珊瑚钙化率记录研究认为,钙化率与 SST 有线性的正相关关系,钙化率随海温的升高而升高^[9,11].但这些钙化率记录仅截止到 20 世纪 80 年代^[9]或 90 年代^[11],缺少近 20~30 年的珊瑚钙化率数据,而实际上 90 年代以来全球 SST 显著高于过去百余年间的 SST(<http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/>).新的数据显示,1990~2005 年大堡礁珊瑚钙化率的下降与这一时段海温的上升有关^[13].一些模拟实验发现珊瑚钙化率与温度存在非线性的响应关系^[53~55],

不同珊瑚的最大钙化率温度不同,其中,盔型珊瑚(*Galaxea fascicularis*)为 25°C^[53],蔷薇珊瑚(*Montipora verrucosa*)和石芝珊瑚(*Fungia scutaria*)为 26°C^[54],杯型珊瑚(*Pocillopora damicornis*)则达到 27~31°C^[55].大堡礁相对较高纬度(13°~18°S)近 20 年的滨珊瑚钙化率研究也发现,钙化率与 SST 存在非线性响应关系,最大钙化率温度为 26.7°C,高于或低于该温度,钙化率降低^[29].美济礁珊瑚钙化率对 SST 变化的非线性响应关系与以上的研究结果相似,反映出珊瑚钙化率对 SST 变化响应的一种共性,表明百年来海温变化存在对美济礁珊瑚钙化率的影响.

美济礁珊瑚钙化率与 SST 虽然存在非线性的响应关系,但在一些时段上钙化率变化在时间和变化幅度上并不完全对应于 SST 的变化.根据响应关系,由 SST 造成的钙化率变化要小于钙化率实际的变化幅度.例如,1980~1990 年钙化率在年代际变化上有百年来的最大增幅 14.8%,这一时段钙化率基本随 SST 升温而增大,SST 的最大升温约为 0.3°C,即形成约 1.2%的钙化率增长,远小于钙化率实际增幅;1990~2000 年钙化率在年代际变化上降低 9.5%,这一时段钙化率随 SST 升温而降低,SST 的最大升温约为 0.4°C,即形成约 3.6%的钙化率降低,也低于钙化率实际降幅.因此,过去百年美济礁珊瑚钙化率的变化并不完全归因于海温的影响.除了海温和海水碳酸钙饱和度之外,珊瑚生长还会受到其他诸多环境

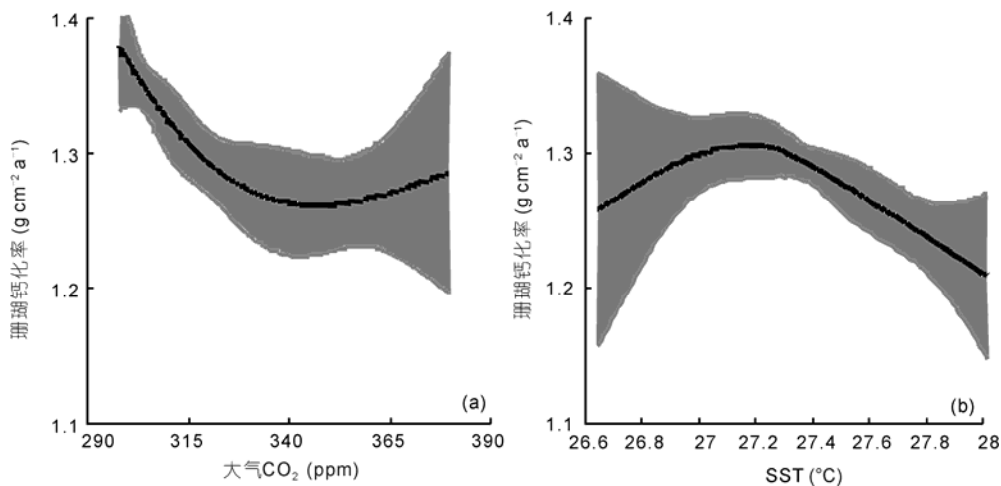


图 7 美济礁珊瑚钙化率与大气 CO₂(a)与 SST(b)的响应模式

灰色区域为 95%置信区间

因素的影响, 包括水质、盐度、光照、营养、海水动力条件等^[29], 这些因素的影响往往会因珊瑚礁的位置、地貌形态等不同而形成区域或局地的差异. 目前还缺少对美济礁环礁及泻湖现代气候水文环境的详细调查, 因此还无法就美济礁珊瑚生长的其他环境影响因素展开更深入的讨论.

3 结语

珊瑚骨骼生长是一个典型的生物过程, 个体的生长及其对气候环境影响的适应能力都是有差异的, 表现出珊瑚个体钙化率的不同. 单个珊瑚样品的钙化率仅能反映珊瑚个体的生长特征, 难以反映珊瑚整体的生长变化, 仅根据单个样品来探讨珊瑚生长及其与气候环境的响应关系会存在很大的风险^[15], 多个珊瑚样品的集成才具有统计意义和区域的代表性^[13]. 本文利用美济礁 14 个珊瑚样品对珊瑚钙化率变化模式的研究, 揭示出 200 多年来珊瑚钙化率存在 5 个主要变化阶段: 1770~1830, 1870~1920 和 1980~2000 年为钙化率增长阶段, 1830~1870 年和 1920~

1980 年为钙化率下降阶段, 反映了 200 余年来美济礁珊瑚生长整体的变化趋势.

大气 CO₂ 和海水温度对以珊瑚为主的海洋钙质生物骨骼生长有着极其重要的影响. 百年来美济礁珊瑚钙化率与 SST 和 CO₂ 的变化以及响应模式的分析揭示出, 钙化率与 SST 则存在非线性响应模式, 20 世纪早中期的 SST 上升有利于珊瑚生长, 而近 20 年的 SST 持续上升则对珊瑚生长不利. 由此看来, 未来海温的上升将会对美济礁珊瑚生长造成持续的负面影响. 百年来珊瑚钙化率与大气 CO₂ 的响应关系则不成立, 大气 CO₂ 浓度上升对珊瑚生长的影响并不显著. 但未来大气 CO₂ 的增加将导致海水酸化的进一步增强, 考虑到海水 pH 周期性变化, 海水 pH 值在未来一些时段内会有大幅度下降, 超过过去历史时期的海水 pH 的自然变化幅度^[12], 有可能对珊瑚生长造成不利影响. 因此, 珊瑚礁区海水 pH 自然变化的频率和幅度以及对大气 CO₂ 增加后海水 pH 的响应对认识海洋酸化对珊瑚生长的影响以及预测未来珊瑚礁发展趋势具有重要意义, 而南海珊瑚礁海区古海水 pH 重建研究还有待进一步深入开展.

致谢 感谢审稿专家提出的宝贵意见.

参考文献

- 1 IPCC. Climate change 2007 Synthesis Report. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate change, 2008
- 2 Hoegh-Guldberg O, Mumby P J, Hooten A J, et al. Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification. *Science*, 2007, 318: 1737–1742
- 3 Silverman J, Lazar B, Cao L, et al. Coral reefs may start dissolving when atmospheric CO₂ doubles. *Geophys Res Lett*, 2009, 36: L05606, doi: 10.1029/2008GL036282
- 4 Kleypas J A, Buddemeier R W, Archer D, et al. Geochemical consequences of increased atmospheric carbon dioxide on coral reefs. *Science*, 1999, 284: 118–120
- 5 Hoegh-Guldberg O. Climate change, coral bleaching and the future of the world's coral reefs. *Mar Freshw Res*, 1999, 50: 839–866
- 6 Andersson A J, Mackenzie F T, Ver L M. Solution of shallow-water carbonates: An insignificant buffer against rising atmospheric CO₂. *Geology*, 2003, 31: 513–516
- 7 Wilkinson C. Status of Coral Reefs of the World: 2004. Townsville, Australia: Australian Institute of Marine Science Press, 2004. 1–301
- 8 McNeil B I, Matear R J, Barnes D J. Coral reef calcification and climate change: The effect of ocean warming. *Geophys Res Lett*, 2004, 31: L22309, doi: 10.1029/2004GL021541
- 9 Lough J M, Barnes D J. Several centuries of variation in skeletal extension, density, and calcification in massive *Porites* colonies from the Great Barrier Reef: A proxy for seawater temperature and a background of variability against which to identify unnatural change. *J Exp Mar Biol Ecol*, 1997, 211: 29–67
- 10 Lough J M, Barnes D J. Environmental controls on growth of the massive coral *Porites*. *J Exp Mar Biol Ecol*, 2000, 245: 225–243
- 11 Bessat F, Buigues D. Two centuries of variation in coral growth in a massive *Porites* colony from Moorea (French Polynesia): A response of ocean-atmosphere variability from south central Pacific. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2001, 175: 381–392
- 12 Pelejero C, Calvo E, McCulloch M T, et al. Preindustrial to modern interdecadal variability in coral reef pH. *Science*, 2005, 309: 2204–

2207

- 13 De'ath G, Lough J M, Fabricius K E. Declining coral calcification on the Great Barrier Reef. *Science*, 2009, 323: 116–119
- 14 张远辉, 陈立奇. 南沙珊瑚礁对大气 CO₂ 含量上升的响应. *台湾海峡*, 2006, 25: 68–76
- 15 王鑫, 王东晓, 高荣珍, 等. 南海珊瑚灰度记录中反映人类引起的气候变化信息. *科学通报*, 2010, 55: 1304–1310
- 16 施祺, 赵美霞, 张乔民, 等. 海南三亚鹿回头造礁石珊瑚碳酸盐生产力的估算. *科学通报*, 2009, 54: 1471–1479
- 17 陈天然, 余克服, 施祺, 等. 全球变暖和核电站温排水对大亚湾滨珊瑚钙化的影响. *热带海洋学报*, 2011, 30: 1–9
- 18 施祺, 张叶春, 孙东怀. 海南岛三亚滨珊瑚生长率特征及其与环境因素的关系. *海洋通报*, 2002, 21: 31–38
- 19 Chalker B E, Barnes D, Isdale P. Calibration of X-ray densitometry for the measurement of coral skeletal density. *Coral Reefs*, 1985, 4: 95–100
- 20 Helmle K P, Kohler K E, Dodge R E. Relative optical densitometry and the coral X-radiograph densitometry system: CoralXDS presented poster, Int Soc Reef Studies 2002 European Meeting, Cambridge, England, Sept. 4–7, 2002
- 21 Carricart-Ganivet J P, Barnes D J. Densitometry from digitized images of X-radiographs: Methodology for measurement of coral skeletal density. *J Expe Mar Biol Ecol*, 2007, 344: 67–72
- 22 余克服, 陈特固, 黄鼎城, 等. 中国南沙群岛滨珊瑚 $\delta^{18}\text{O}$ 的高分辨率气候记录. *科学通报*, 2001, 46: 1199–1203
- 23 余克服, 刘东生, 陈特固, 等. 中国南沙群岛滨珊瑚高分辨率 $\delta^{13}\text{C}$ 的环境记录. *自然科学进展*, 2002, 12: 67–71
- 24 Yu K F, Zhao J X, Kenneth D, et al. Storm cycles in the last millennium recorded in Yongshu Reef, southern South China Sea. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2004, 210: 89–100
- 25 Yu K F, Zhao J X, Wang P X, et al. High-precision TIMS U-series and AMS ^{14}C dating of a coral reef lagoon sediment core from southern South China Sea. *Quat Sci Rev*, 2006, 25: 2420–2430
- 26 Yu K F, Zhao J X, Shi Q, et al. U-series dating of dead *Porites* corals in the South China Sea: Evidence for episodic coral mortality over the past two centuries. *Quat Geochronol*, 2006, 1: 129–141
- 27 Yu K F, Zhao J X, Shi Q, et al. Reconstruction of storm/tsunami records over the last 4000 years using transported coral blocks and lagoon sediments in the southern South China Sea. *Quat Int*, 2009, 195: 128–137
- 28 曾昭璇, 梁景芬, 丘世钧. 中国珊瑚礁地貌研究. 广州: 广东人民出版社, 1997. 197–200
- 29 Cooper T F, De'ath G, Fabricius K E, et al. Declining coral calcification in massive *Porites* in two nearshore regions of the northern Great Barrier Reef. *Glob Change Bio*, 2008, 14: 529–538
- 30 De'ath G, Lough J M, Fabricius K E. Declining coral calcification on the Great Barrier reef supporting online material. 2009 www.sciencemag.org/cgi/content/full/323/5910/116/DC1
- 31 Etheridge D M, Steele L P, Langenfelds R L, et al. Natural and anthropogenic changes in atmospheric CO₂ over the last 1000 years from air in Antarctic ice and firn. *J Geophys Res*, 1996, 101: 4115–4128
- 32 Caldeira K, Wickett M E. Anthropogenic carbon and ocean pH. *Nature*, 2003, 425: 365
- 33 Feely R A, Sabine C L, Lee K, et al. Impact of anthropogenic CO₂ on the CaCO₃ system in the oceans. *Science*, 2004, 305: 362–366
- 34 Orr J C, Fabry V J, Aumont, et al. Anthropogenic ocean acidification over the twenty first century and its impact on calcifying organisms. *Nature*, 2005, 437: 681–686
- 35 Gattuso J P, Frankignoulle M, Bourge I, et al. Effect of calcium carbonate saturation of seawater on coral calcification. *Glob Planet Change*, 1998, 18: 37–46
- 36 Langdon C, Takahashi T, Sweeney C, et al. Effect of calcium carbonate saturation on the calcification rate of an experimental coral reef. *Glob Biogeochem Cycle*, 2000, 14: 639–654
- 37 Leckercq N, Gattuso J P, Jaubert J. CO₂ partial pressure controls the calcification rate of a coral community. *Glob Change Biol*, 2000, 6: 329–334
- 38 Reynaud S, Leclercq N, Romanine-Lioud S, et al. Interacting of CO₂ partial pressure and temperature on photosynthesis and calcification in scleractinian coral. *Glob Change Biol*, 2003, 9: 1660–1668
- 39 Ries J B, Cohen A L, McCorkle D C. Marine calcifiers exhibit mixed responses to CO₂-induced ocean acidification. *Geol Soc Am Bull*, 2009, 121: 1131–1134
- 40 Wood H L, Spicer J I, Widdicombe S. Ocean acidification may increase calcification rates, but at cost. *Proc R Soc B*, 2008, 275: 1767–1773
- 41 Hii Y S, Bolong A M A, Yang T T, et al. Effect of elevated carbon dioxide on two scleractinian corals: *Porites cylindrical* (Dana, 1846) and *Galaxea fascicularis* (Linnaeus, 1767). *J Mar Biol*, 2009, doi: 10.1155/2009/215196
- 42 Gutowska M A, Poertner H O, Melzner F. Growth and calcification in the cephalopod *Sepia officinalis* under elevated seawater pCO₂. *Mar*

- Ecol Prog Ser, 2008, 373: 303–309
- 43 Niehhuys S, Palmer A R, Harley C D G. Elevated CO₂ affects shell dissolution rate but not calcification rate in a marine snail. *Proc R Soc B*, 2010, 27: 2553–2558
- 44 Findlay H S, Wood H L, Kendall M A, et al. Calcification, a physiological process to be considered in the context of the whole organism. *Biogeosci Discuss*, 2009, 6: 2267–2284
- 45 Rodolfo-Metalpa R, Martin S, Ferrier-Pages C, et al. Response of the temperate coral *Cladocora caespitosa* to mid- and long-term exposure to pCO₂ and temperature levels projected in 2100. *Biogeosci Discuss*, 2009, 6: 7103–7131
- 46 Suzuki A, Makamori T, Kayanne H. The mechanism of production enhancement in coral reef carbonate system: Model and empirical results. *Sediment Geol*, 1995, 99: 259–280
- 47 Ohde S, Woesik R V. Carbon dioxide flux and metabolic processes of a coral reef, Okinawa. *Bul Mar Sci*, 1999, 65: 559–576
- 48 Yates K K, Halley R B. CO₂³⁻ concentration and pCO₂ thresholds for calcification and dissolution on the Molokai reef flat, Hawaii. *Biogeosci Discuss*, 2006, 3: 123–154
- 49 Wells J W. Scleractinia. In: Moore R C, ed. *Treatise on Invertebrate Paleontology, Part F*. Kansas: University of Kansas Press, 1956. 328–444
- 50 Anthony K R N, Connolly S R, Hoegh-Guldberg O. Bleaching, energetics, and coral mortality risk: Effects of temperature, light, and sediment regime. *Limnol Oceanogr*, 2007, 52: 716–726
- 51 Fitt W K, McFarland F K, Warner M E, et al. Seasonal patterns of tissue biomass and densities of symbiotic dinoflagellates in reef corals and relation to coral bleaching. *Limnol Oceanogr*, 2000, 45: 677–685
- 52 李淑, 余克服. 珊瑚礁白化研究进展. *生态学报*, 2007, 27: 2059–2069
- 53 Marshall A T, Clode P. Calcification rate and the effect of temperature in a zooxanthellate and an azooxanthellate scleractinian reef coral. *Coral Reefs*, 2004, 23: 218–224
- 54 Jokiel P L, Coles S L. Effects of temperature on the mortality and growth of Hawaiian reef corals. *Mar Biol*, 1978, 43: 201–208
- 55 Clausen C D, Roth A A. Effect of temperature and temperature adaption on calcification rate in the hermatypic coral *Pocillopora damicornis*. *Mar Biol*, 1975, 33: 93–100