

Volume 55 Number 8 August 2012 1217–1390

ISSN 1674-7313 CN 11-5843/P

中国科学：地球科学

SCIENCE CHINA


Earth Sciences


Sponsored by

CHINESE ACADEMY OF SCIENCES
NATIONAL NATURAL SCIENCE FOUNDATION OF CHINA

earth.scichina.com
www.springer.com/scp
www.springerlink.com

**Coral reef at -50 m
in the South China Sea**

 SCIENCE CHINA PRESS

 Springer

自然科学基金项目进展专栏

评述

南海珊瑚礁及其对全新世环境变化的记录与响应

余克服*

中国科学院南海海洋研究所, 广州 510301

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

收稿日期: 2011-12-08; 接受日期: 2012-03-08

国家自然科学基金杰出青年基金(批准号: 41025007)、国家自然科学基金重点项目(批准号: 40830852)、中国科学院战略先导科技专项(编号: XDA05080300)、全球变化研究国家重大科学研究计划课题(编号: 2010CB950101)和中国科学院南海海洋研究所领域前沿项目(编号: LYQY200707)资助

摘要 综述了南海珊瑚礁的生态现状及其对全新世环境历史的记录与响应. 生态监测结果表明, 南海珊瑚礁总体处于退化之中, 主要表现为活珊瑚覆盖度的大幅度下降和珊瑚共生虫黄藻密度的降低, 并导致珊瑚钙化率和珊瑚礁碳酸钙生产力的下降, 这一现象是由全球气候变暖和人类活动的双重影响所致. 作为高分辨率环境记录的载体, 南海珊瑚礁清楚地记录了全新世温度历史和气候突变事件、千年尺度的 El Niño 活动强弱变化、千年-百年尺度的海平面波动、周期性的强风暴活动以及东亚季风、海水酸度和污染状况等. 珊瑚礁对全新世环境变化的响应方面, 南沙群岛珊瑚礁记录显示过去 200 年来曾经多次发生 El Niño 高温引起的珊瑚礁热白化事件; 中全新世高温期块状珊瑚死亡后恢复的时间为 10-20 年; 中全新世高温期曾经周期性地发生低温气候事件导致的珊瑚冷白化, 冷白化后珊瑚礁的恢复期一般为 20-30 年. 这些研究有助于正确认识气候环境的变化过程和珊瑚礁生态系统对环境变化的响应规律.

关键词
珊瑚礁
生态
环境
气候
全新世
南海

作为生物多样性最高、资源最丰富的生态系统^[1,2], 珊瑚礁为全球约 6.5 亿人提供资源服务^[3], 包括食物供给、休闲旅游、海岸保护等. 珊瑚礁的主要构建者珊瑚, 以其对环境变化极其敏感、年生长量大(块状珊瑚每年生长 1~2 cm, 枝状珊瑚则更大)、年际界线清楚(像树轮一样)、连续生长时间长(一般块状珊瑚可连续生长 200~300 年, 最长达 800 年左右)、文石质骨骼适合高精度铀系测年(如(12±1) a)、分布广等特点^[4], 是高分辨率地记录过去环境变化过程的重要载体, 并在揭示低纬度热带海区环境变化过程及其在全球气候变化中的作用等方面发挥着重要功能, 如大堡礁近 420 年的珊瑚记录显示全球小冰期气候

在一定程度上是由于热带太平洋水汽加强向极地传输所致^[5]; 太平洋和印度洋的珊瑚记录也显示热带海区对全球气候变化的驱动作用^[6].

南海珊瑚礁星罗棋布, 从近赤道的曾母暗沙(~4°N), 一直到南海北部雷州半岛、涠洲岛(~20~21°N)以及台湾岛南岸恒春半岛(~24°N)都有分布; 包括环礁、岛礁和岸礁等多种类型; 发育历史可追述至早中新世或晚渐新世^[7]. 与世界其他海域的珊瑚礁一样, 南海珊瑚礁一直在资源供给等方面发挥着重要作用; 近年来南海珊瑚礁在记录高分辨率的过去环境变化过程与珊瑚礁对环境变化的响应规律等方面显示出巨大的潜力.

1 南海珊瑚礁的分布与生态现状

从分布的区域出发, 南海珊瑚礁可大体分为南沙群岛、西沙群岛、中沙群岛、东沙群岛、海南岛、台湾岛、华南大陆沿岸、越南沿岸和菲律宾沿岸 9 大区域(图 1)。初步估计南海现代珊瑚礁的面积约 8000 km²(未包括越南和菲律宾沿岸的珊瑚礁)^[7], 但珊瑚礁碳酸盐台地的面积要大得多, 因为深水碳酸盐台

地和水深 50 m 以下的珊瑚礁面积没有统计进来。

生态监测结果显示, 南海珊瑚礁在过去几十年来处于急剧退化之中。从最能反映珊瑚礁健康状况的活珊瑚覆盖度这一指标来看, 南海北部大亚湾海区活珊瑚覆盖度从 1983/1984 年的~76.6%下降到 2008 年的~15.3%^[8]; 海南三亚鹿回头岸礁从 1960 年的 80%~90%下降到 2009 年的~12%^[9]; 西沙群岛永兴岛从 1980 年的~90%下降到 2008~2009 年的

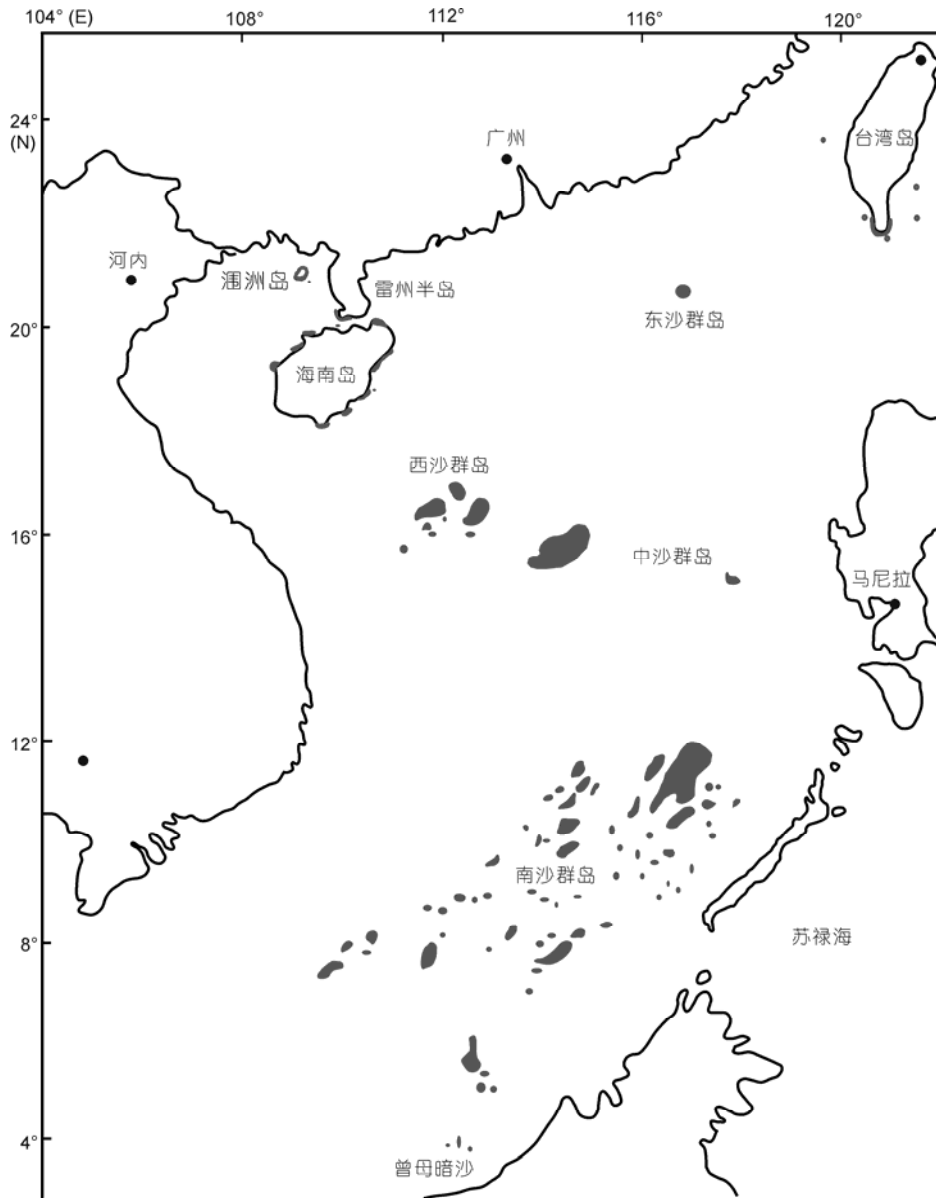


图 1 南海珊瑚礁的分布^[7]

受资料所限, 越南和菲律宾沿岸的珊瑚礁未标示出来

~10%^[10-12]。南海珊瑚礁的退化主要是由于加剧的人类活动的影响,如海南三亚鹿回头珊瑚礁自 20 世纪 60 年代以来先后经历了礁石挖掘、破坏性捕捞、海上养殖、海岸工程建设和潜水旅游等几个阶段^[9]。受人类活动加剧和全球气候变暖(导致珊瑚白化)的双重影响,近几十年来世界范围内珊瑚礁总体处于严重退化之中,如澳大利亚大堡礁在 1960~2003 年间活珊瑚覆盖度从~50%下降到~20%^[13];加勒比海珊瑚礁区在 1977~2001 年间活珊瑚覆盖度从~50%下降到约 10%^[14]。南海及大堡礁和加勒比海活珊瑚覆盖度的长期变化趋势见图 2。南海各珊瑚礁中,人类活动影响相对较小的南沙群岛美济礁 2007 年的活珊瑚覆盖度约 40%(未发表);但与珊瑚共生的虫黄藻密度研究显示,南沙群岛珊瑚的虫黄藻密度远低于南海北部的珊瑚,与其正常状况相比平均损失了 31%~90%的共生虫黄藻^[15],表明看起来健康的南沙群岛珊瑚礁正经历高温的威胁,实质上也并不健康。迄今为止,世界上几乎没有了处于“原始状态”的珊瑚礁^[16],这正是南海珊瑚礁现代状况的写照。

珊瑚礁的退化严重影响到珊瑚礁生态功能及其在碳循环中的作用,如海南三亚鹿回头珊瑚礁的退化导致其碳酸盐生产力自 1960 年以来下降了 80%~90%^[17];初步估计南海现代珊瑚礁的碳酸盐年产量为 2.12×10^{10} kg,约相当于全球珊瑚礁碳酸盐产量的 1.6%~3.3%^[7],当然与珊瑚礁的面积估算一样,这也是最小估计。

虽然关于珊瑚礁是大气 CO₂ 的“源”或“汇”方面还有不少争议,但一般认为当珊瑚占优势时珊瑚礁区多表现为大气 CO₂ 的源,而当大型藻类占优势时珊瑚礁则表现为 CO₂ 的汇^[18,19]。历史上珊瑚礁可能通过参与碳循环而对调控气候变化起到过关键作用,如珊瑚礁假说提出 14 ka 前冰盖消退过程中大气 CO₂ 含量的增加是由于珊瑚礁沉积速率的变化引起的^[20]。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的海-气 CO₂ 交换的监测结果表明,海水和大气 CO₂ 的分压(P_{CO_2})均存在明显的日周期变化,表现为夜间上升,白天下降;虽然不同礁区海-气 CO₂ 交换通量具有明显的区域差异,南海现代珊瑚礁总体上在夏季是大气 CO₂ 的源^[21]。

大气 CO₂ 含量的增加导致了海水酸化,也影响到了珊瑚的钙化能力。最新的研究发现 20 世纪 90 年代以来大堡礁等海域的珊瑚钙化率明显下降,幅度可达 14%~21%^[22,23],超出了过去 400 a 内的变化幅度,推测是大气 CO₂ 含量上升和全球变暖对珊瑚的影响所致。南海南沙群岛美济礁珊瑚的钙化率研究^[24]显示,近 200 年来珊瑚的钙化率可分 5 个阶段,即 1770~1830, 1870~1920 和 1980~2000 年为钙化率总体增长阶段,1830~1870 和 1920~1980 年为钙化率总体下降阶段;其中 1770~1830 年和 1920~1980 年分别为近 200 多年来的最大增幅(4.5%)和最大降幅(6.2%)时段,最近的时段 1980~2000 年间珊瑚钙化率有小幅上升,钙化率的年代际变化仍维持在历史的变

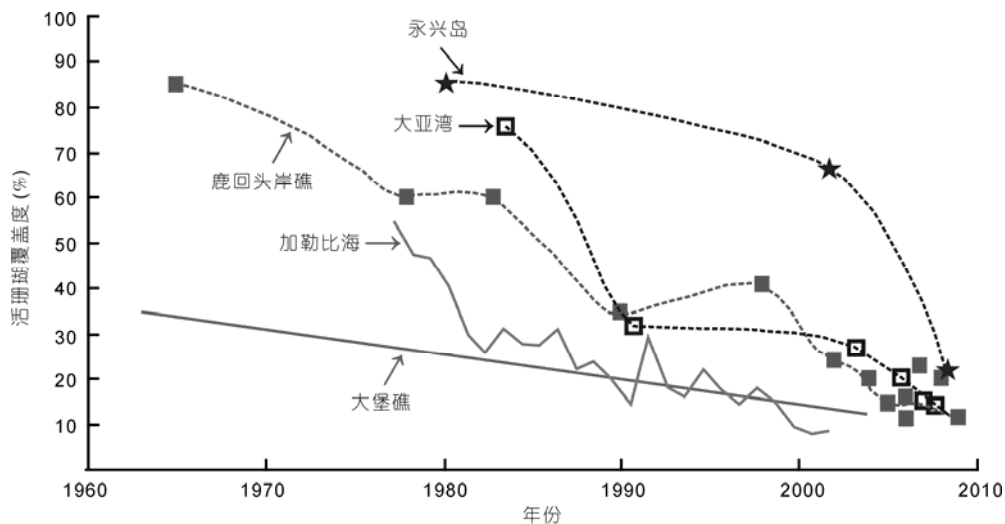


图 2 南海及大堡礁、加勒比海珊瑚礁的退化^[8-14]

动范围之内. 进一步分析显示, 美济礁珊瑚钙化率对大气 CO_2 含量的上升和热带海区水温变暖之间的关系并不显著. 对南海北部大亚湾海区近 46 年珊瑚的钙化率研究^[25]则显示, 在相对高纬度海区, 温度上升对珊瑚钙化率具有促进作用; 但温度持续上升并超过珊瑚适应的温度上限之后, 则会降低珊瑚的钙化率. 可见, 南海珊瑚钙化对大气 CO_2 和海水温度的响应程度也具有明显的区域差异, 这主要受不同珊瑚礁区的气候条件所制约.

2 南海珊瑚礁记录的环境变化过程

对环境变化极其敏感的珊瑚, 其快速生长的骨骼能够清楚地记录其所经历的各种环境变化过程, 如温度的波动、海平面的升降、El Niño 的强弱、风暴活动的频率、海水的酸碱度、洪水泛滥历史等, 因此被广泛应用于热带海区高分辨率的过去环境重建. 星罗棋布地分布于南海的珊瑚礁揭示出了多种环境变化信息, 如全新世高温期存在高频率且大幅度的冬季降温事件、全新世存在千年和百年尺度的相对高海平面波动、强风暴和 El Niño 活动的周期性、东亚季风的强弱变化等.

2.1 南海珊瑚记录之中、晚全新世温度过程与气候事件

迄今已基本建立了南海各主要珊瑚礁区的珊瑚地化指标与温度之间关系式, 包括南沙群岛、西沙群岛、海南岛、雷州半岛和台湾岛等^[26-35], 为进一步开展高分辨率的过去温度重建提供了温度标尺.

依据建立的温度标尺, 雷州半岛全新世不同时期发育的珊瑚月分辨率的 Sr/Ca 和 $\delta^{18}\text{O}$ 记录^[4]显示, 海水表层温度(SST)自~6800 年前至~1500 年前总体上在波动中呈下降的趋势, 其中 6.8~5.0 ka BP 期间 SST 比现代(20 世纪 90 年代, 本区最暖的 10 年)高 0.9~0.5°C, ~2.5 ka BP 时 SST 与现代相当, ~1.5 ka BP. SST 比现代低约 2.2°C(图 3(a)). 这一温度的总体下降过程同时伴随着有效蒸发量的减少, 导致了海水 $\delta^{18}\text{O}$ 值降低. 但与~6800 年来的总体趋势相反, 20 世纪后期以来珊瑚记录显示温度急剧上升, 与器测记录一致, 可能反映了人类活动导致的温室气体对气候的影响. 雷州半岛珊瑚记录的中全新世高温特征在海南三亚的珊瑚记录中得到了很好的重现, 如距今 6.5~6.1 ka 期间的 3 段珊瑚骨骼 Sr/Ca 记录表明, 当时冬季温度与现代相当, 但夏季温度则高于现代 1~2°C^[32]; 距今约 540 年前的西沙群岛珊瑚 Sr/Ca

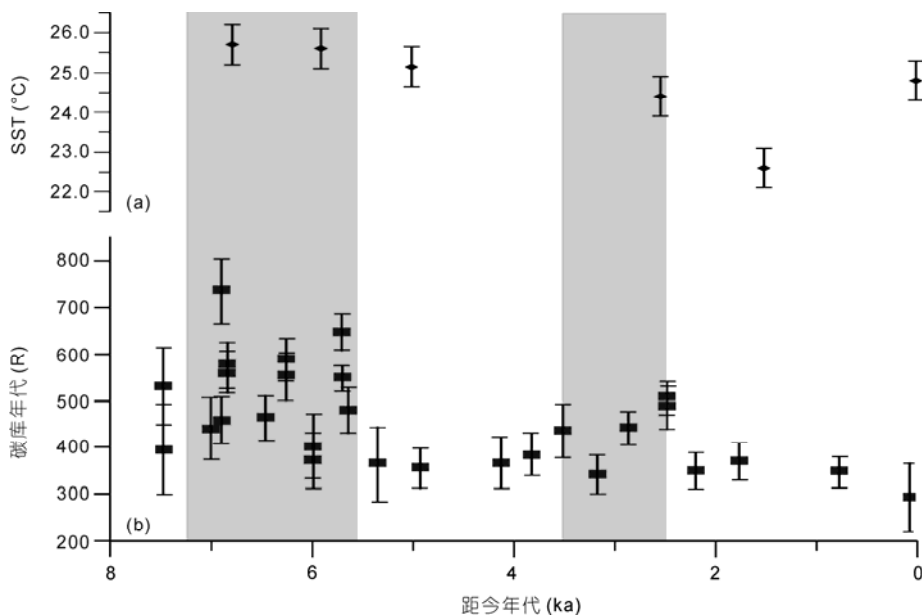


图3 珊瑚记录之中、晚全新世温度过程^[4](a)与碳库年代^[35](b)

7.5 ka 来的碳库年代(R)的总体下降的趋势指示 El Niño 活动是一个总体增强的过程; 7.2~5.6 和 3.5~2.5 ka BP 之间 2 个高碳库年代峰值指示弱 El Niño 活动期

则显示当时温度比现代低约 1℃左右, 对应于历史上的“小冰期”^[28]. 西沙群岛珊瑚生长率^[33]和 Sr 元素含量^[34]则记录了近 100~220 年的温度变暖特征, 总体与器测温度记录一致, 佐证了珊瑚记录温度的可靠性.

6.8~5.0 ka BP 的夏季高温指示当时是一个强夏季风时期^[4,32]. 但在 6.8 ka BP 以前则经历过一段冬季风异常强劲的时期. 南海北部雷州半岛独特发育的角孔珊瑚 Sr/Ca 记录^[27,36]显示, 约 7.5~7.0 ka BP 期间, 当时夏季温度与现代(20 世纪 90 年代)相当, 而冬季温度则比现代低约 2~3℃, 反映当时冬季风强劲. 以角孔珊瑚为绝对优势种构成的面积超过 1 km²而厚逾 4 m 的珊瑚礁是中全新世雷州半岛珊瑚礁的特色, 极高的角孔珊瑚覆盖度(>90%)显示当时的气候环境是珊瑚礁发育的适宜期, 但该珊瑚礁剖面中的多个间断面又指示当时发生过多次环境突变事件. 进一步对间断面附近珊瑚骨骼 Sr/Ca 和骨骼密度等的研究揭示, 20~50 年一次的异常强劲的冬季风所导致大幅度(>7℃)的冬季降温事件, 是导致珊瑚死亡并形成间断面的主要原因. 这种降温事件被称为“雷州事件”, 表明中全新世高温期气候并不稳定, 至少发生过 9 次大幅度的冬季降温事件.

2.2 南海珊瑚记录之中、晚全新世千年尺度的 El Niño 强弱波动

El Niño 活动对南海的影响是多方面的, 其中之一是影响南海海水的 ¹⁴C 含量^[35], 当 El Niño 活动频繁的时候, 东太平洋上升流减弱以及太平洋北赤道流(NEC)向北偏移, 导致 ¹⁴C 含量相对高的表层太平洋水体进入南海, 并记录于珊瑚骨骼之中, 形成低的碳库年代(R); 反之, 当 El Niño 活动弱的时候, 经太平洋北赤道流进入南海的水体 ¹⁴C 含量相对低, 南海珊瑚骨骼记录的碳库年代 (R 高)就高. 根据珊瑚碳库年代与 El Niño 活动之间的关系原理, Yu 等^[35]对 7.5 ka 来不同时间段的 20 个珊瑚样品同时开展了高精度 TIMS U-Th 和 AMS ¹⁴C 年代测定, 建立了南海 7.5 ka 的碳库年代序列, 结果显示 7.5 ka 来南海的碳库年代总体呈下降的趋势, 但有 2 个峰值期, 分别位于 7.2~5.6 和 3.5~2.5 ka BP 之间(图 3(b)). 结合碳库年代与 El Niño 活动的关系, 可以看出 7.5 ka 来 El Niño 活动是一个总体增强的过程, 但其间存在 2 个明显的 El Niño 活动偏弱的时期, 大体呈现千年尺度的波动

周期.

珊瑚碳库年代揭示的中全新世 El Niño 活动偏弱的现象在珊瑚 Sr/Ca 记录中也得到了很好的验证, 如海南中全新世(~6.5~6.1 ka BP 期间)珊瑚高分辨率的 Sr/Ca 显示当时 El Niño 活动甚弱, 主要表现为 El Niño 周期(~2.5~7 a)的缺失或不明显, 估计这种弱的 El Niño 活动是受到了强夏季风的抑制所致^[32]. 南沙群岛珊瑚 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 则记录 1972 年以来 El Niño 气候特征明显朝向暖湿气候发展, 这一记录与器测资料基本一致, 也证明珊瑚对 El Niño 活动记录的可靠性^[29,37].

2.3 珊瑚记录之全新世千年-百年尺度的海平面波动

珊瑚礁被认为是理想的过去海平面的标志物, 主要是因为珊瑚礁发育与海平面变化之间有着密切的关系^[38,39], 如珊瑚仅能够在海水面以下才能生长, 因此珊瑚顶面可指示海平面的最低位置. 另外, 珊瑚礁中经常可见到一种呈环状向外发育的圆盘状珊瑚, 叫做环礁(microatoll), 它的环状结构及其高程是因潮位波动而形成的, 因此能够非常准确地指示海平面的位置及其年际尺度的变化, 被喻为“自然界的潮汐观测站”^[40]. 结合珊瑚在高精度年代测定方面的优势, 珊瑚礁一直在海平面变化历史的研究中发挥着重要作用.

利用珊瑚礁发育与海平面之间关系的原理, Zhao 和 Yu^[41]对南海北部雷州半岛珊瑚礁进行了系统的高程测量、高密度样品采集和高精度的 TIMS U-Th 年代测定, 勾画了珊瑚礁年代的面上分布, 发现雷州半岛珊瑚礁总体呈现中间老两侧新的带状分布模式; 结合不同时期珊瑚相对于现代微环礁的顶面的高程, 得出过去 7500 年来存在 6 个相对高海平面时期: 7500~6300, 5700~5850, ~5009, 4156~3675, 2795~2509 和 ~1511 a BP, 大体呈现出千年尺度的波动周期^[41~48]; 其中, 每一高海平面时期的相对海平面分别比现在高约 2.8~1.3 m (图 4(a)). 进一步对高海平面时期发育的微环礁的研究^[42]发现, 千年尺度的高海平面时期又存在多期百年尺度的波动, 如 7050~6600 a BP 期间存在至少 4 次波动, 波动阶段分别为 7050~6920, 6920~6820, 6820~6690 和 6690~? a BP (图 4(b)), 大体呈现百年尺度的周期性, 波动幅度为 20~40 cm. 这种百年尺度的波动也记录于该珊瑚礁

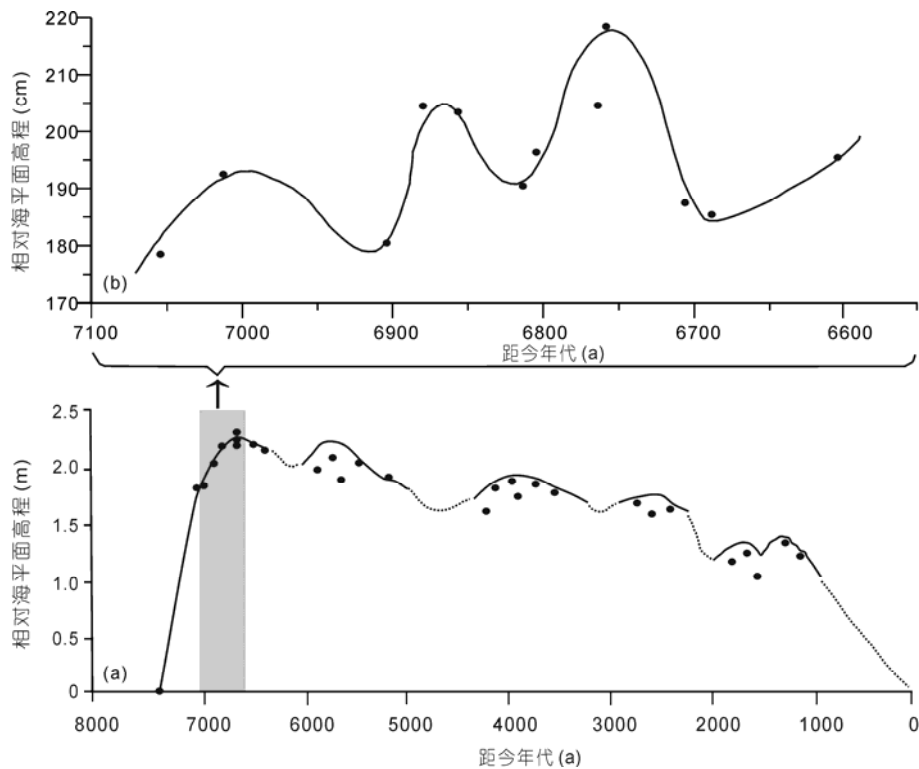


图4 雷州半岛珊瑚记录之千年(a)、百年(b)尺度的海平面波动^[27,41-48]

区的海滩沉积之中,如该区晚全新世(1.7~1.2 ka BP)发育的海滩沉积剖面清楚地记录了至少 2 次海平面周期性波动,时间上对应于 1.7~1.5 和 1.4~1.2 ka BP,海平面下降波动发生在 1.5 ka BP 左右^[43]。

雷州半岛角孔珊瑚礁剖面的研究则进一步揭示海平面在约 7.3 ka BP 时达到了现在的高程,约 7.1 ka BP 时的海平面比现在高约 1.8 m^[27];这一珊瑚礁区的海滩沉积剖面记录约 1.2 ka BP 时的海平面比现在的至少高 128 cm;之后海平面开始下降,至今海岸线后退了约 210 m^[43]。这些全新世南海海平面的变化特征也清楚地记录于海南三亚^[46]、琼海^[47]以及越南沿岸^[48]的珊瑚礁中。

2.4 南海珊瑚礁潟湖沉积记录之近 4000 年的强风暴历史

日益增加的强风暴频率及其带来的巨大损失引起了人们越来越多的关注,如全球范围内过去 10 多年来因为极端气候造成的损失相对于 20 世纪 50 年代增加了 10 倍^[49]。新的 IPCC 报告预测未来强风暴活动的频率和强度都将随着全球气候变化而增加^[50]。但

正如对全球气候变暖的认识一样,因为文献记录的短暂性(一般<150年)和不连续性,拟清楚了解强风暴活动发生的规律及其与人类活动的关系,则必须开展过去千年乃至更长时间序列的古风暴历史重建研究。

在对南海南部南沙群岛珊瑚礁上散布的大型块状(>2 m³)珊瑚进行系统调查的基础上, Yu 等^[51]提出这些大型块状珊瑚是强风暴活动的产物,其表面的年代可指示过去强风暴事件发生的年代。这一论点在经历 2004 年印度洋海啸和澳大利亚台风活动的珊瑚礁区得到了很好的验证;在这些事件中,一些巨大的活珊瑚块在海啸和台风引起的强水动力作用下被运移到珊瑚礁的表面或其它位置堆积而死亡^[52],因此这些珊瑚块的死亡年代,亦即珊瑚块最表面的年代,就是强风暴等发生的年代。根据这一原理, Yu 等^[51]对南沙群岛永暑礁(环礁)表面完好保存的珊瑚块进行了高精度年代测定,识别了过去 1000 年内发生的 6 次强风暴事件,平均为 160 年周期。随后开展的潟湖沉积速率和沉积粒度的研究对上述工作予以了进一步证实。他们在永暑礁潟湖钻取了长 14.2 m

的沉积岩心, 利用沉积岩心中表面完好保存的珊瑚枝的高精度铀系年代和有孔虫的 AMS ^{14}C 年代建立了其高分辨率的年代框架^[53], 这是迄今为止最好的珊瑚礁潟湖沉积年代序列; 根据年代分布计算了其沉积速率, 他们发现永暑礁珊瑚块所指示的过去 1000 年中发生的 6 次强风暴事件在潟湖沉积中都有明显的响应, 表现为相应时间段内沉积速率的大幅增加. 依据潟湖沉积速率的变化, 进一步识别出过去 4000 年内有 2 个强沉积动力或强风暴活动的时期, 即 100~350 AD 和近 1000 年来.

永暑礁潟湖柱状沉积物的粒度分析^[49]显示: 1) 近 4000 年来南海南部至少发生过 20 次强风暴/海啸事件, 其中 13 次发生在最近 1000 年内, 其中~1200 BC, ~400 BC 和~1200 AD 为 3 个风暴活动特别活跃的时期 (图 5); 2) 4000 年来南沙群岛强风暴/海啸事件发生的频率有明显增加的趋势, 但近 1000 年来则相对稳定; 3) 4000 年来南沙群岛强风暴/海啸事件发生的频率显示出明显的周期性, 如 18.7, 23.6, 25, 27, 32, 65, 132 和 195 a, 大体与太阳活动的周期相吻合, 指示太阳活动对强风暴事件发生的制约关系.

总体来看, 珊瑚礁潟湖沉积物的粒度、沉积速率与珊瑚块的组合, 是重建热带珊瑚礁区古风暴活动序列的有效手段.

2.5 南海珊瑚记录之中、晚全新世海水酸化状况

利用珊瑚硼同位素($\delta^{11}\text{B}$ 值)与海水 pH 值的关系, Liu 等^[54]计算了中全新世以来海水的 pH 值变化过程, 得出中晚全新世以来南海海表的 pH 值出现过 2 个低峰值(或酸化), 分别在距今 6 千年前后和工业革命以来; 在这两个时间段之间, 南海海表 pH 值略有增加

趋势. 距今 6 千年前后的酸化, 是因为当时南海夏季风强, 海温和海平面高, 导致南海上升流增加, 使深层低 pH 值的海水上涌, 因此产生了低 pH 值的海洋化学环境. 全球工业革命以后(1840 年以来)的酸化, 则可能是由于大量的化石燃料造成温室气体(主要为 CO_2)的排放增加所致.

2.6 南海珊瑚对季风的记录

中国的天气、气候异常与亚洲季风异常有着密切的关系, 因此季风在珊瑚中的记录一直是研究的热点之一. 南沙群岛永暑礁珊瑚 (1953~1997 年) $\delta^{18}\text{O}$ 与冬季风指数(WMI)的比较分析^[29], 得出珊瑚冬季 $\delta^{18}\text{O}$ 与 WMI 之间存在显著的正相关关系, 冬季珊瑚 $\delta^{18}\text{O}$ 越低(SST 越高), 表征东亚季风越弱; 反之, 冬季珊瑚 $\delta^{18}\text{O}$ 越高(SST 越低), 表征东亚季风越强. 海南岛珊瑚 $\delta^{18}\text{O}$ 也发现能够比较好地指示冬季风的强度^[55-57]; 海南岛约 4400 a BP 的珊瑚 $\delta^{18}\text{O}$ 则指示当时冬季温度偏低、季风偏强、并导致强的海水蒸发和 $\delta^{18}\text{O}$ 富集^[58]. 此外, 利用冬季温度与季风之间的关系, 海南珊瑚 Sr/Ca 记录了近百年(1905~1996 年)来冬季风的减弱趋势^[59].

南海珊瑚也提供了不少夏季风的信息, 如南海北部雷州半岛中、晚全新世以来温度的总体下降过程记录着夏季风的总体减弱^[4]; 近 7500 年来南海碳库年代的总体降低也记录着夏季风减弱导致的上升流减弱过程^[35]; 中全新世偏弱的 El Niño 活动则是受到强夏季风的抑制所致^[32]等.

2.7 南海珊瑚对其他环境要素的记录

珊瑚也广泛用来监测水体环境的变化, 其中对海洋环境污染方面的监测是国际上非常关注的主题

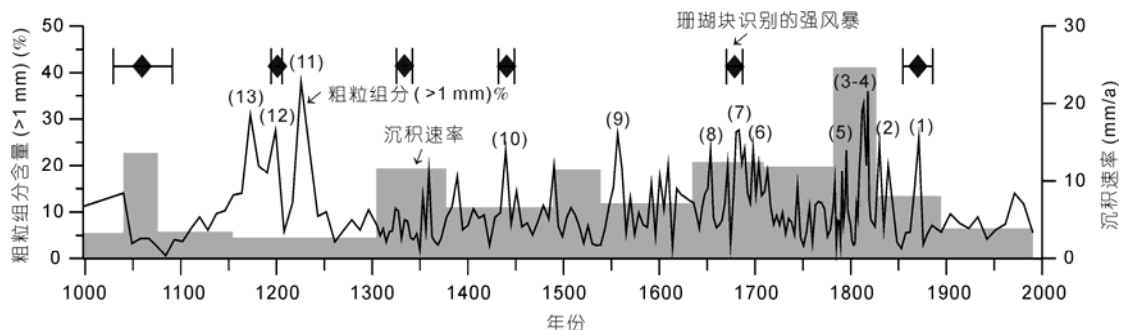


图 5 南沙群岛珊瑚礁记录之近 1000 年来的强风暴活动历史^[49,51,53]

之一, 如珊瑚中 Pb 和 Cd 等含量的变化清楚地记录了工业化进程对海洋环境的污染状况^[60]. 南海北部大亚湾珊瑚(1976~1998年)研究^[61]显示其能够比较好地记录大亚湾海域重金属含量的年际变化, 并识别出 1979 和 1991 年为 2 个重金属含量比较高的年份. 大亚湾珊瑚(1976~2007年)Fe/Ca, Mn/Ca, Zn/Ca, P/Ca 和 Ba/Ca 的研究^[62-64]则显示, 珊瑚 Fe/Ca 和 Mn/Ca 比值的增加清楚地记录了大亚湾核电站修建过程中大量陆源物质对水体环境的影响; Zn/Ca 的增加则显示工业排污增加对水体环境的影响; 珊瑚 P/Ca 能指示海水的磷含量以及营养化状况; Ba/Ca 则记录了低温压力对相对高纬度珊瑚生长的抑制作用. 室内模拟实验则研究了 Cu 和 Zn 含量增加对珊瑚虫黄藻密度和光合作用的影响^[65,66], 显示重金属污染对珊瑚共生藻的光合作用有明显的抑制作用, 最终导致珊瑚死亡.

对海南万泉河口和香港靠近珠江口附近水域珊瑚稀土元素的含量研究^[67]则发现, 珊瑚稀土元素含量与海平面变化升高之间有明显的负相关关系, 这是因为当海平面快速上升时, 河口附近的珊瑚受到来自河流的陆源物质影响减弱, 而受到海水中低 REE 含量和相对富集的重稀土的配分模式影响显著. 南沙群岛永暑礁珊瑚 $\delta^{13}\text{C}$ 则发现可以反映日照时数、总云量和降雨量等的变化^[37].

3 南海珊瑚礁对历史时期气候变化的响应规律

全球珊瑚礁在退化已是不争的事实, 如 2008 年全球仅 46% 的珊瑚礁处于相对健康状态^[3]. 全球而言, 珊瑚礁退化的最主要原因是珊瑚礁白化, 即五彩缤纷的珊瑚失去共生虫黄藻或虫黄藻失去色素而变白的一种生态现象^[68]. 目前研究一致认为 El Niño 加剧、全球变暖导致的海水温度上升是珊瑚礁白化的最主要原因^[69], 如 1998 年 El Niño 高温导致世界珊瑚礁退化了 16%, 几乎影响到了世界所有珊瑚礁区, 在大堡礁一些连续生长了约 1000 年的珊瑚也在这一事件中死亡^[70]. 有生态学者预测到 2100 年热带海洋升温 1~3°C, 珊瑚礁很可能是因为全球环境变化导致珊瑚礁白化而失去的第一个生态系统^[70]. 但包括珊瑚记录在内的大量证据显示, 中全新世海温比现在高 1~2°C^[4,71], 而当时珊瑚并没有因为高温而灭绝, 因

此了解珊瑚对过去高温等气候环境的响应规律将有助于更好地了解现代高温与珊瑚白化的关系. 南海珊瑚礁的研究^[27,72]显示, 不管高温导致的珊瑚礁热白化还是低温导致的冷白化, 历史上都曾经反复出现过, 珊瑚礁并没有因此而灭绝, 显示珊瑚本身对极端气候事件的潜在的适应能力.

3.1 近 200 年来南海南部珊瑚礁的热白化历史

现代高温导致的珊瑚礁热白化最早报道于 1982 年^[73], 对此之前珊瑚对高温的响应知之甚少^[74]. 为了寻找指示历史时期珊瑚礁白化的标志, 珊瑚礁研究者在南海展开了一系列的研究, 包括珊瑚共生虫黄藻的密度、珊瑚对极端温度的抵抗力等. 对南海珊瑚共生虫黄藻的研究^[75]发现, 珊瑚共生虫黄藻密度的种间差异是导致珊瑚抵抗白化能力的重要因素: 枝状珊瑚共生虫黄藻密度低, 因此容易白化; 而块状珊瑚共生虫黄藻密度高, 因此不容易白化; 叶片状珊瑚的虫黄藻密度和抵抗白化的能力均介于二者之间. 这一结论在野外观察和室内模拟实验中获得了很好的验证^[76,77], 即块状珊瑚对高温表现出最强的适应能力, 最不容易白化, 这也许可以部分解释为什么块状珊瑚可连续生长数百年. 从这个意义上说, 大型块状珊瑚的死亡可指示过去极端环境事件^[78].

这种能够指示过去极端环境事件的死亡了的大型块状珊瑚在南海南部南沙群岛的珊瑚礁中广泛分布. Yu 等^[72]对这些死亡的大型块状珊瑚进行了细致的生态调查, 并分别从永暑礁和美济礁钻取 27 个死亡的块状珊瑚样品进行高精度年代测定, 进而确定了它们的死亡年代, 也就是这些死亡的、顶面完好保存的块状珊瑚最表面的年代. 结果表明, 这 27 个珊瑚的死亡都发生在过去 200 年内; 在定年误差范围内这些珊瑚的死亡年代基本上与历史上已知的 El Niño 高温年份相对应(图 6). 分析各种可能导致珊瑚死亡的原因, 包括低温、淡水、火山活动、珊瑚天敌、珊瑚疾病和人类影响(污染、旅游、养殖、过度捕捞、炸鱼等等), Yu 等^[72]提出这些珊瑚的死亡是历史时期强白化的产物, 也就是说高温引起的现代珊瑚热白化其实并不是新的生态现象, 而是至少在过去 200 年来反复发生的珊瑚对环境变化的一种自然响应. 但迄今为止还没有发现更早以前发生过珊瑚礁热白化的证据.

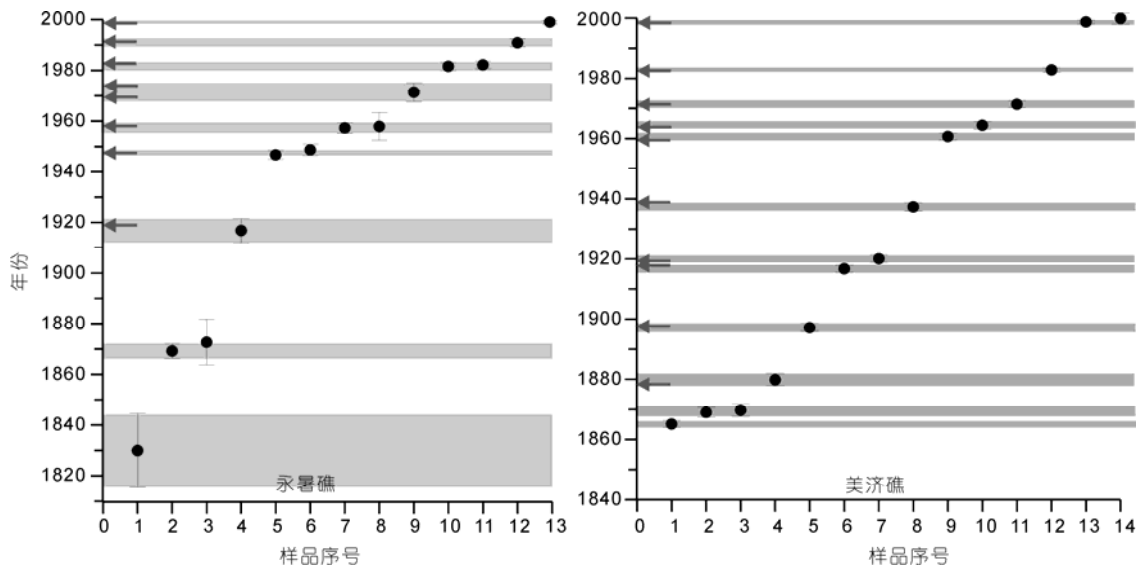


图 6 南沙群岛珊瑚记录之近 200 年来的珊瑚热白化事件^[72]

3.2 中全新世高温期南海北部珊瑚冷白化事件

冷白化是指低温导致的珊瑚礁白化现象. 2003 年 7 月在澳大利亚大堡礁南部曾经出现过低温导致珊瑚礁大面积白化^[79], 这是在现代暖期中发生的异常生态现象. 但南海北部雷州半岛的珊瑚礁记录显示, 这种异常的珊瑚礁冷白化现象在中全新世高温期曾经反复发生.

记录中全新世高温期冷气候事件(雷州事件)的角孔珊瑚礁剖面^[27,36], 由至少 9 层覆盖度>90%的角孔珊瑚组成, 层与层之间的间断面清楚而平整. 角孔珊瑚 Sr/Ca 和骨骼密度的研究揭示, 这些珊瑚的死亡和间断面的形成是大幅度(>7°C)的冬季降温事件所致, Sr/Ca 温度显示当时的最低温很可能在 10.7°C 以下. 结合现代珊瑚热白化的特点, 即珊瑚失去共生的虫黄藻或虫黄藻失去色素而变白, Yu 等^[27]提出中全新世雷州半岛大片角孔珊瑚的死亡必然会导致虫黄藻的丢失、必然会导致大面积的珊瑚变白, 因此是一种严重的白化现象; 这种白化是由冬季突然降温引起的, 因此是冷白化. 这是第 1 个关于历史时期珊瑚礁冷白化的证据. 该剖面显示 7.5~7.0 ka BP 期间的高温期珊瑚冷白化每 20~50 年发生一次, 至少发生过 9 次, 白化后珊瑚礁的恢复一般需要 20~30 年.

2008 年初华南经历了近 50 年来罕见的极端低温事件, 持续 32 天. 南海北部大亚湾海区 2008 年 2 月

平均 SST 低于 14°C, 连续多天最低 SST 为 12.3°C 左右. 生态调查结果显示这样的低温抑制了大亚湾海区珊瑚的生长活动, 但并没有产生致命的影响^[8], 显然还需要更大幅度的降温才会导致大面积珊瑚的白化和死亡, 这也佐证更大幅度的降温(如低达珊瑚 Sr/Ca 记录的 10.7°C)是导致中全新世雷州半岛珊瑚冷白化和死亡的原因.

3.3 中全新世高温期珊瑚的死亡与恢复

为了了解中全新世高温期珊瑚的死亡与恢复. Yu 等^[78]对海南三亚中全新世(6000~7000 a BP) 2 块保存有死亡间断面和 1 块保存了死亡面的块状珊瑚进行了深入研究, 包括测定珊瑚死亡和恢复的年代、死亡的季节和死亡前的温度状况等. 结果表明这 2 个大型块状珊瑚死亡后恢复的时间分别为(41±18)和(31±28) a, 大体表明中全新世高温期珊瑚死亡后在约 10~20 年的时间内可以恢复生长(图 7). 珊瑚骨骼 Sr/Ca, Mg/Ca 和生长率显示, 这 3 块珊瑚分别死亡于春季和秋季, 与当时的夏季高温 (Sr/Ca SST≈31~32°C)没有明显的关系, 显示块状珊瑚对中全新世高温的适应性.

4 结论

(1) 广泛分布的南海珊瑚礁在近 50 年来处于严重退化之中, 其中活珊瑚覆盖度下降~80%, 系加剧

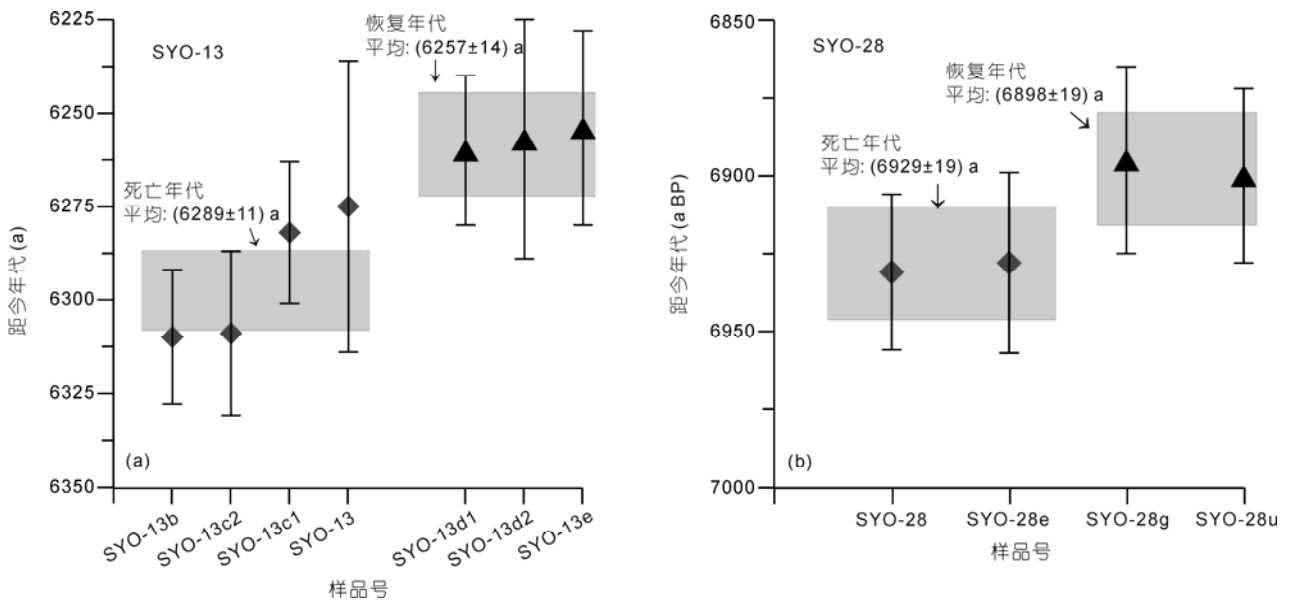


图7 中全新世高温期海南珊瑚死亡与恢复的年代^[78]

的人类活动与变暖的气候共同作用所致；迄今为止南海几乎没有原始状态的珊瑚礁；南海珊瑚钙化率和碳酸钙生产力均下降；南海珊瑚礁在夏季表现为大气 CO₂ 的源。

(2) 南海珊瑚礁记录了全新世多种环境信息，如中、晚全新世高分辨率的温度过程与极端低温气候事件、千年尺度的 El Niño 活动强弱变化、千年-百年尺度的多期相对高海平面的波动、近 4000 年来周期性的强风暴活动、东亚季风的强弱、海水酸度和污染状况等，这些信息将有助于认识过去及

现代气候环境变化的规律性。

(3) 野外观察和实验模拟都显示南海块状珊瑚对极端环境事件有最强的抵抗力，原因之一是因为块状珊瑚有相对高的共生虫黄藻密度。以块状珊瑚的死亡年代为指示强白化事件的标志，得出高温引起的珊瑚礁白化在过去 200 年来在南海南部曾经多次发生。低温引起的珊瑚礁冷白化在全新世高温期也曾经反复发生，并显示 20~50 a 的周期性，冷白化后的恢复一般为 20~30 a。中全新世高温期块状珊瑚死亡后的恢复约 10~20 a。

致谢 感谢陈颢院士的约稿，感谢中国珊瑚礁研究队伍近年来在南海珊瑚礁与环境关系研究中的不懈努力。

参考文献

- 1 Moore F, Best B. Coral reef crisis: Causes and Consequences. In: Best B, Bornbusch A, eds. Global Trade and Consumer Choices: Coral Reefs in Crisis. Washington D C: American Association for the Advancement of Science, 2001. 5-10
- 2 赵美霞, 余克服, 张乔民. 珊瑚礁区的生物多样性及其生态功能. 生态学报, 2006, 26: 186-194
- 3 Wilkinson C. Status of coral reefs over the world: 2008. Townsville: Global Coral Reef Monitoring Network and Reef and Rainforest Research Centre, 2008. 1-296
- 4 Yu K F, Zhao J X, Wei G J, et al. Middle late Holocene monsoon climate retrieved from seasonal Sr/Ca and δ¹⁸O records of *Porites lutea* corals at Leizhou Peninsula, northern coast of South China Sea. Glob Planet Change, 2005, 47: 301-316
- 5 Hendy E J, Gagan M K, Alibert C A, et al. Abrupt decrease in tropical Pacific Sea surface salinity at end of Little Ice Age. Science, 2002, 295: 1511-1514
- 6 Linsley B K, Wellington G M, Schrag D P. Schrag, Decadal sea surface temperature variability in the subtropical South Pacific from 1726 to 1997 AD. Science, 2000, 290: 1145-1148

- 7 Yu K F, Zhao J X. Coral Reefs. In: Wang P X, Li Q Y, eds. The South China Sea—Paleoceanography and Sedimentology. Dordrecht: Springer, 2009. 229–254
- 8 陈天然, 余克服, 施祺, 等. 大亚湾石珊瑚群落近 25 年的变化及其对 2008 年极端低温事件的响应. 科学通报, 2009, 54: 812–820
- 9 Zhao M X, Yu K F, Zhang Q M, et al. Long-term decline of a fringing coral reef in the northern South China Sea. J Coastal Res, 2011, doi: 10.2112/JCOASTRES-D-10-00172.1
- 10 王国忠. 南海珊瑚礁区沉积学. 北京: 海洋出版社, 2001. 171–192
- 11 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学研究. 海洋与湖沼, 2004, 35: 176–182
- 12 施祺, 严宏强, 张会领, 等. 西沙群岛永兴岛礁坡石珊瑚覆盖率的空变化. 热带海洋学报, 2011, 30: 10–17
- 13 Bellwood D R, Hughes T P, Folke C, et al. Confronting the coral reef crisis. Nature, 2004, 429: 827–833
- 14 Gardner T A, Cote I M, Gill J A, et al. Long-term region-wide declines in Caribbean corals. Science, 2003, 301: 958–960
- 15 李淑, 余克服, 陈天然, 等. 珊瑚共生虫黄藻密度结合卫星遥感分析 2007 年南沙群岛珊瑚热白化. 科学通报, 2011, 56: 756–764
- 16 Hodgson G. A global assessment of human effects on coral reefs. Mar Pollut Bull, 1999, 38: 345–355
- 17 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
- 18 严宏强, 余克服, 谭焯辉. 珊瑚礁区碳循环研究进展. 生态学报, 2009, 29: 6207–6215
- 19 Suzuki A, Kawahata H. Reef water CO₂ 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: Terraphub, 2004. 229–248
- 20 Berger W H. Increase of carbon dioxide in the atmosphere during deglaciation: The cora reef hypothesis. Naturwissenschaften, 1982, 69: 87–88
- 21 严宏强, 余克服, 施祺, 等. 南海珊瑚礁夏季是大气 CO₂ 的源. 科学通报, 2011, 56: 412–422
- 22 De'ath G., Lough J M, Fabricius K E. Declining coral calcification on the great barrier reef. Science, 2009, 323: 116–119
- 23 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 Biol, 2008, 14: 529–538
- 24 施祺, 余克服, 陈天然, 等. 南沙群岛美济礁 200 余年滨珊瑚骨骼钙化率变化及其与大气 CO₂ 和海温的响应关系. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2012, 42: 71–82
- 25 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
- 26 Yu K F, Zhao J X, Wei G J, et al. $\delta^{18}\text{O}$, Sr/Ca and Mg/Ca records of *Porites lutea* corals from Leizhou Peninsula, northern South China Sea, and their applicability as paleoclimatic indicators. Palaeogeogr Palaeoclimat Palaeoecol, 2005, 218: 57–73
- 27 Yu K F, Zhao J X, Liu T S, et al. High-frequency winter cooling and reef coral mortality during the Holocene climatic optimum. Earth Planet Sci Lett, 2004, 224: 143–155
- 28 韦刚健, 余克服, 李献华, 等. 南海北部珊瑚 Sr/Ca 和 Mg/Ca 温度计及高分辨率 SST 记录重建尝试. 第四纪研究, 2004, 24: 325–331
- 29 余克服, 陈特固, 黄鼎成, 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
- 30 Wei G J, Sun M, Li X H, et al. Mg/Ca, Sr/Ca and U/Ca ratios of a *Porites* coral from Sanya Bay, Hainan Island, South China Sea and their relationships to sea surface temperature. Palaeogeogr Palaeoclimat Palaeoecol, 2000, 162: 59–74
- 31 Shen C C, Lee T, Chen C Y, et al. The calibration of $D[\text{Sr}/\text{Ca}]$ versus sea surface temperature relationship for *Porites* corals. Geochim Cosmochim Acta, 1996, 60: 3849–385
- 32 Wei G J, Deng W F, Yu K F, et al. Sea surface temperature records in the northern South China Sea from middle Holocene coral Sr/Ca ratios. Paleoceanography, 2007, 22, PA3206, doi: 10.1029/2006PA001270
- 33 聂宝符, 陈特固, 彭子成. 由造礁珊瑚重建南海西沙海区近 220 a 海面温度序列. 科学通报, 1999, 44: 2094–2098
- 34 Sun Y L, Sun M, Wei G J, et al. Strontium contents of a *Porites* coral from Xisha Island, South China Sea: A proxy for sea-surface temperature of the 20th century. Paleoceanography, 2004, doi: 10.1029/2003PA00959
- 35 Yu K F, Hua Q, Zhao J X, et al. Holocene marine ¹⁴C reservoir age variability: Evidence from ²³⁰Th-dated corals in the South China Sea. Paleoceanography, 2010, PA3205, doi: 10.1029/2009PA001831
- 36 余克服, 刘东生, 沈承德, 等. 雷州半岛全新世高温期珊瑚生长记录的环境突变事件. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2002, 32: 149–156
- 37 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: 63–67
- 38 Yu K F, Zhao J X. U-series dates of Great Barrier Reef corals suggest at least +0.7 m sea level ~7000 years ago. Holocene 2010, 20: 161–168
- 39 Chappell J. Evidence for smoothly falling sea-level relative to North Queensland, Australia, during the past 6000 yr. Nature, 1983, 302: 406–408

- 40 Woodroffe C, McLean R. Microatolls and Recent sea-level change on coral atolls. *Nature*, 1990, 344: 531–534
- 41 Zhao J X, Yu K F. Millennial-, century- and decadal-scale oscillations of Holocene sea-level recorded in a coral reef in the northern South China Sea. *Quat Int*, 2007, 167–168: 473
- 42 Yu K F, Zhao J X, Done T, et al. Microatoll record for large century-scale sea-level fluctuations in the middle Holocene. *Quat Res*, 2009, 71: 354–360
- 43 余克服, 陈特固. 南海北部晚全新世高海平面及其波动的海滩沉积证据. *地学前缘*, 2009, 16: 138–145
- 44 黄德银, 施祺, 张叶春. 海南岛鹿回头珊瑚礁与全新世高海平面. *海洋地质与第四纪地质*, 2005, 25: 1–7
- 45 时小军, 余克服, 陈特固, 等. 琼海中晚全新世高海平面的珊瑚礁记录. *海洋地质与第四纪地质*, 2008, 28: 1–9
- 46 Nguyen A D. Climate and environmental reconstruction based on Holocene coral reefs on central Vietnamese coast, western South China Sea. Dissertation for the Doctoral Degree. Brisbane: The University of Queensland, 2011. 1–241
- 47 赵建新, 余克服. 南海雷州半岛造礁珊瑚的质谱铀系年代及全新世高海面. *科学通报*, 2001, 46: 1734–1738
- 48 余克服, 钟晋梁, 赵建新, 等. 雷州半岛珊瑚礁生物-地貌带与全新世多期相对高海面. *海洋地质与第四纪地质*, 2002, 22: 27–34
- 49 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
- 50 Jansen E, Overpeck J, Briffa K R, et al. Palaeoclimate. In: Solomon S D, Qin D H, Manning M, et al, eds. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis-Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 463–497
- 51 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
- 52 Gilmour J P, Smith L D. Category 5 cyclone at Scott Reef, Northwestern Australia. *Coral Reefs*, 2006, 25: 200–200
- 53 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
- 54 Liu Y, Liu W, Peng Z, et al. Instability of seawater pH in the South China Sea during the middle late Holocene: Evidence from boron isotopic composition of corals. *Geochim Cosmochim Acta*, 2009, 73: 1264–1272
- 55 Su R, Sun D, Chen H, et al. Evolution of Asian monsoon variability revealed by oxygen isotopic record of middle Holocene massive coral in the northern South China Sea. *Quat Int*, 2010, 213: 56–68
- 56 Peng Z C, Chen T G, Nie B F, et al. Coral $\delta^{18}\text{O}$ records as an indicator of winter monsoon intensity in the South China Sea. *Quat Res*, 2003, 59: 285–292
- 57 Deng W F, Wei G J, Li X H, et al. Paleoprecipitation record from coral Sr/Ca and $\delta^{18}\text{O}$ during the mid Holocene in the northern South China Sea. *Holocene*, 2009, 19: 811–821
- 58 Sun D H, Gagan M K, Cheng H, et al. Seasonal and interannual variability of the Middle Holocene East Asian monsoon in coral $\delta^{18}\text{O}$ records from the South China Sea. *Earth Planet Sci Lett*, 2005, 237: 69–84
- 59 Liu Y, Peng Z, Chen T, et al. The decline of winter monsoon velocity in the South China Sea through the 20th century: Evidence from the Sr/Ca records in corals. *Glob Planet Change*, 2008, 63: 79–85
- 60 Shen G T, Boyle E A. Lead in corals—Reconstruction of historical industrial fluxes to the surface ocean. *Earth Planet Sci Lett*, 1987, 82: 289–304
- 61 余克服, 陈特固, 练健生, 等. 大亚湾扁脑珊瑚中重金属的年际变化及其海洋环境指示意义. *第四纪研究*, 2002, 22: 230–235
- 62 Chen T R, Yu K F. P/Ca in coral skeleton as a geochemical proxy for seawater phosphorus variation in Daya Bay, northern South China Sea. *Mar Pollut Bull*, 2011, 62: 2114–2121
- 63 Chen T R, Yu K F, Li S, et al. Anomalous Ba/Ca signals associated with low temperature stresses in *Porites* corals from Daya Bay, northern South China Sea. *J Environ Sci*, 2011, 23: 1452–1459
- 64 Chen T R, Yu K F, Li S, et al. Heavy metal pollution recorded in *Porites* corals from Daya Bay, northern South China Sea. *Mar Environ Res*, 2010, 70: 318–326
- 65 周洁, 余克服, 李淑, 等. 重金属铜污染对石珊瑚生长影响的实验研究. *热带海洋学报*, 2011, 30: 57–76
- 66 黄玲英, 余克服, 施祺, 等. 锌胁迫下两种鹿角珊瑚虫黄藻荧光值的变化. *热带地理*, 2010, 30: 357–362
- 67 Liu Y, Peng Z, Wei G, et al. Interannual variation of rare earth element abundances in corals from northern coast of the South China Sea and its relation with sea-level change and human activities. *Mar Environ Res*, 2010, 71: 62–69
- 68 李淑, 余克服. 珊瑚礁白化研究进展. *生态学报*, 2007, 27: 2059–2069
- 69 Hoegh-Guldberg O. Climate change, coral bleaching and the future of the world's coral reefs. *Mar Freshwater Res*, 1999, 50: 839–866

- 70 Wilkinson C. Status of coral reefs over the world: 2004. Townsville: Global Coral Reef Monitoring Network and Reef and Rainforest Research Centre, 2004. 1–316
- 71 Gagan M K, Ayliffe L K, Hopley D, et al. Temperature and surface-ocean water balance of the middle Holocene tropical Western Pacific. *Science*, 1998, 279: 1014–1018
- 72 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
- 73 Glynn P W. Extensive ‘bleaching’ and death of reef corals on the Pacific coast of Panama. *Environ Conserv*, 1983, 10: 149–154
- 74 Stone L, Huppert A, Rajagopalan B, et al. Mass coral reef bleaching: A recent outcome of increased El Nino activity? *Ecol Lett*, 1999, 2: 325–330
- 75 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: 2655–2662
- 76 李淑, 余克服, 施祺, 等. 造礁石珊瑚对低温的耐受能力及响应模式. *应用生态学报*, 2009, 20: 2289–2295
- 77 李淑, 余克服, 施祺, 等. 海南岛鹿回头石珊瑚对高温响应行为的实验研究. *热带地理*, 2008, 28: 534–539
- 78 Yu K F, Zhao J X, Lawrence M G, et al. Timing and duration of growth hiatuses in middle Holocene massive *Porites* corals from the northern South China Sea. *J Quat Sci*, 2010, 25: 1284–1292
- 79 Hoegh-Guldberg O. Low temperatures cause coral bleaching. *Coral Reefs*, 2004, 23: 444