

砗磲高分辨率 Sr/Ca 温度计:3 种物种的对比分析

邵 达, 晏 宏, 王玉宏, 孙立广

(中国科学技术大学地球和空间科学学院, 极地环境研究室, 安徽合肥 230026)

摘要:对采自南海西沙的3种不同种的现代砗磲(库氏砗磲、鳞砗磲、砗蚝)进行了高分辨率 Sr/Ca 比值分析. 结果表明:库氏砗磲和鳞砗磲的 Sr/Ca 比值呈现出年周期变化并与实测的海表面温度(SST)形成较好的对应;而砗蚝的 Sr/Ca 比值年周期信号较弱且与温度的对应存在较大的不确定性. 通过全年逐月或逐周对应和极端对应, 我们共获得了两种砗磲的4个有效的 Sr/Ca-SST 方程, 并能较好地作为 Sr/Ca 温度计进行温度恢复. 对比不同种类的砗磲, 其 Sr/Ca 分布有所不同, 相应的 Sr/Ca-SST 方程也有一定的区别. 这项研究为选择性地应用砗磲研究全新世气候变化提供了依据.

关键词:砗磲; Sr/Ca; 南海; 海表面温度(SST)

中图分类号:P736 **文献标识码:**A doi:10.3969/j.issn.0253-2778.2012.01.001

引用格式: Shao Da, Yan Hong, Wang Yuhong, et al. High resolution Sr/Ca profiles of three Tridacna specimens and their potential as sea surface temperature proxy[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2012, 42(1):1-9.

邵达, 晏宏, 王玉宏, 等. 砗磲高分辨率 Sr/Ca 温度计:3 种物种的对比分析[J]. 中国科学技术大学学报, 2012, 42(1):1-9.

High resolution Sr/Ca profiles of three Tridacna specimens and their potential as sea surface temperature proxy

SHAO Da, YAN Hong, WANG Yuhong, SUN Liguang

(Institute of Polar Environment, School of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: Three modern Tridacna specimens of different species were collected from Xisha Islands of South China Sea and the high-resolution Sr/Ca ratios of their inner shells were analyzed. Two Sr/Ca profiles of Tridacna (*Tridacna gigas*, *Tridacna squamosa*) display regular seasonal variations and close correlation with the instrumental sea surface temperature (SST) of the studied area. Four statistically significant models were proposed based on the linear regression of the Sr/Ca ratios (monthly or weekly values and extreme values) and the SST. These models could be used to reconstruct the SST of Holocene from the Sr/Ca ratio of Tridacna's inner shells.

Key words: Tridacna; Sr/Ca; South China Sea; sea surface temperature (SST)

收稿日期:2011-09-26;修回日期:2011-12-01

基金项目:国家自然科学基金(41176042),中国科学院战略性先导科技专项(XDA05080302)资助.

作者简介:邵达,男,1990年生,本科生.研究方向:环境地球化学研究. E-mail: shaoda@mail.ustc.edu.cn

通讯作者:孙立广,教授. E-mail: slg@ustc.edu.cn

0 引言

砗磲(*Tridacna*)是始新世以来最大的双壳类,也是西太平洋-印度洋珊瑚礁环境中重要的成员^[1]. 砗磲一般生长在珊瑚礁中,与虫黄藻共生. 砗磲共有 8 种,本研究在南海西沙群岛采集的 3 种砗磲分别为库氏砗磲(又名大砗磲, *Tridacna gigas*)、鳞砗磲(*Tridacna squamosa*)和砗蚝(*Hippopus hippopus*)^[2]. 砗磲壳体均是坚硬的文石,常具有年生长线甚至日生长线^[3-5],是一种非常理想的高分辨率古气候载体.

利用生物成因碳酸盐的元素比值重建古海温是古气候研究的一个重要分支,在高分辨率重建第四纪海洋气候变化方面起到了重要的贡献. 这其中又以珊瑚方面的研究最为成熟,大量的研究表明,在非上升流区域,珊瑚 Sr/Ca 比值可不受盐度变化的影响而准确地反映海表面温度的变化(精度可达 1 °C 之内)^[6-7]. 此外,由于 Sr 和 Ca 在海洋中长时间停留(~4 Ma),海水 Sr/Ca 可视为不变,所以珊瑚 Sr/Ca 温度计基本不用考虑海水变化的影响^[6,8]. 基于珊瑚 Sr/Ca 比值重建我国南海古海温的研究已有不少报道^[9-14],这些研究对于我们了解南海全新世温度变化以及气候系统,如季风、ENSO 等的变化起到了重要作用. 除了珊瑚外,海洋双壳类的高分辨率 Sr/Ca 比值也被大量用来尝试重建海洋古环境变化. 但是这些研究大多发现海洋双壳类高分辨率 Sr/Ca 难以清晰地记录季节性气候变化信号,因此双壳类 Sr/Ca 变化也被认为主要受生长发育以及新陈代谢等的影响,而不是 SST (sea surface temperature, 海表面温度)主导^[15-18]. 有关砗磲高分辨率 Sr/Ca 比值的研究在最近也有出现^[18-19]. Elliot 等^[18]通过对来自 Great Palm Island (18°40'S, 146°34'E), Cocos Island (12°6'S, 96°50'E) 和 Huon Peninsula (6°11'S, 147°42'E) 的 3 种库氏砗磲 Sr/Ca 比值的研究认为,温度、生长速率和新陈代谢作用对砗磲 Sr/Ca 没有影响或影响很小. 对比 3 种砗磲,内壳均比外壳有更好的周期性,而来自 Great Palm Island 的砗磲 Sr/Ca 比值年周期循环的信号要明显强于另外两种砗磲,这说明区域差异对砗磲 Sr/Ca 记录年周期性气候数据有一定的影响. 晏宏等^[19]对采自南海西沙群岛的一种现代大砗磲进行了高分辨率 Sr/Ca 比值研究,结果发现大砗磲 Sr/Ca 具有清晰的年周期信号,并与 SST 变化有较好

的相关性.

南海是西太平洋地区最大的边缘海,其气候变化受到亚洲季风、ENSO 等多个气候系统的影响^[20-21],因此该区域的气候特征以及气候历史对于我们了解亚洲-太平洋地区气候变化机制非常重要. 本研究对采自南海西沙群岛永兴岛和东岛的 3 种不同种的现代砗磲样品进行高分辨率 Sr/Ca 测试,并结合器测资料进行分析,探讨砗磲高分辨率 Sr/Ca 在古气候研究应用中的可行性和不同种砗磲间 Sr/Ca 特征的差异性.

1 材料与方法

3 种砗磲样品分别采自南海西沙群岛的永兴岛和东岛的礁盘上,低潮时水位约 1.5~2 m(图 1),采集时砗磲均为活体样品. 具体采样情况如表 1 所示. 砗磲样品带回实验室后,沿砗磲中间最长肋条部位将砗磲切开(图 2,所示为 YX1 的情况)^[22]. 对所有的样品切面进行观察发现砗磲壳均分为明显的两部分:内壳和外壳. 大多数砗磲均是内壳颜色浅,其中 YX1 和 YX2 可以观察到明显的纹层,宽度比较均匀,应为年生长线;DD3 样品的切面没有明显的生长纹层. 我们沿砗磲截面切取了一个约 5 mm 厚的薄片,由于外壳部分没有明显的纹层且受到较为显著的侵蚀,因此本研究只对内壳进行取样分析. 取样前,对砗磲取样面分别使用 10% H₂O₂, 0.1N HNO₃ 和去离子水超声清洗,以除去表层吸附的物质^[11]. 取样在中国科学院壳幔物质与环境重点实验室高速微钻(Micromill)平台上完成,取样间隔遵循等间距原则从砗磲内部往外部沿生长线(垂直于纹层,没有纹层的 DD3 按照生长的大致趋势,如图 2 所示)进行. 根据年生长线间的距离, YX2 和 DD3 均采用 0.20 mm 的取样间距,取样全过程保持一致. 对于 YX1 为了验证取样距离产生的影响分别使用 0.12 mm 和 0.06 mm(11~13 mm)取样间隔. 取样过程保持环境清洁,样品之间相互不污染;取样量 0.5~3 mg 不等. 取下来的粉末样品用硫酸纸包好烘干,储存在干燥环境中待测.

表 1 砗磲采样情况

Tab. 1 The sampling information of *Tridacna* specimens

编号	采样地点	采样时间	砗磲种属编号
YX1	永兴岛	2005. 3	a 库氏砗磲
YX2	永兴岛	2008. 3	b 鳞砗磲
DD3	东岛	2003. 3	c 砗蚝

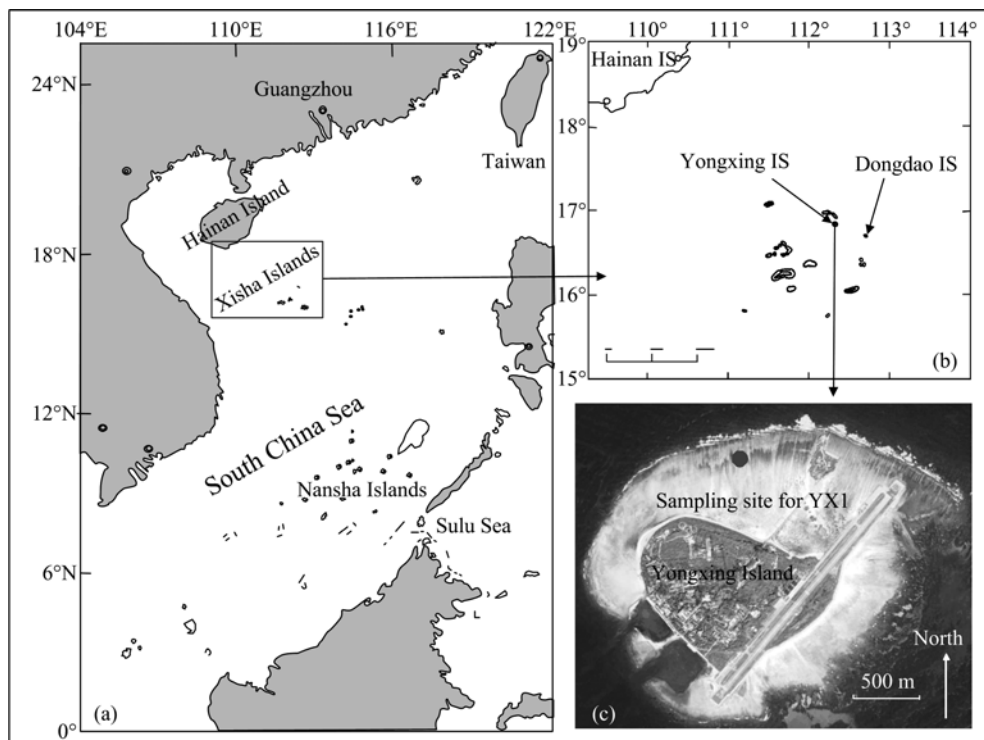


图 1 采样位置示意图

(a) 南海西沙; (b) 永兴岛和东岛; (c) YX1 采样地点

Fig. 1 The map of sampling location

(a) Xisha Islands of South China Sea; (b) Yongxing Island and Dongdao Island; (c) sampling site for YX1

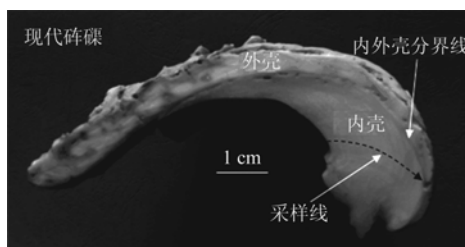


图 2 现代砗磲 YX1 切面及采样线

Fig. 2 The radial section of modern *Tridacna* specimen YX1 and the sampling line

将分取出来的微量砗磲样品 (< 3 mg) 用约 1 mL 1 : 1 的 HCl 溶解, 然后近似稀释到 10 mL (样品量较少时用 0.5 mL 1 : 1 HCl 溶解并稀释到约 5 mL). 元素比值分析在中国科学技术大学极地环境研究室的 Perkin Elmer 公司 2100DV 型电感耦合等离子体发射光谱仪 ICP-OES 上进行. Ca 和 Sr 测量波长分别选用 317.933 nm 和 407.771 nm. 样品的 Sr/Ca 比值通过分析一系列标准溶液以外标准校正的方法获得, 具体方法参照 Wei 等^[11]. 所用的测定校准样品 Sr/Ca 为 10 mmol/mol, 相对标准偏差为 $\pm 0.46\%$, 总体误差小于 1%, 符合讨论的

Sr/Ca 温度计所需要的精度.

南海西沙的 SST 数据采用美国大气海洋局的再分析资料 (NOAA NCEP EMC CMB GLOBAL Reyn_SmithOIv2 data). 周分辨率数据从 1981 年 11 月 8 日开始, 月分辨率数据从 1981 年 11 月开始, 空间分辨率 $1^\circ \times 1^\circ$. 西沙选用格点 (16.5°N , 112.5°E) 的数据.

2 结果与讨论

2.1 砗磲 Sr/Ca 的变化与种属间的差异

一些针对热带珊瑚的研究表明, 在利用珊瑚 Sr/Ca 比值进行 SST 重建时, 其优点是基本不受盐度变化和生长速率变化的影响, 缺点是存在区域性差别和种属差别等^[23-24]. 因而基于珊瑚的 Sr/Ca 温度计的使用需要对不同区域的不同样品进行严格的标定, 在针对砗磲的研究中也应该如此.

本研究中砗磲样品的取样地点均集中在西沙群岛, 可以认为样品间基本没有区域差异, 因而 Sr/Ca 的差异应体现在种属的差别上. 比较 3 种砗磲的平均值和极值 (表 2), 种属之间有着超过 10% 的差异, 说明在 Sr/Ca 分布上存在着种类的特异性. 这表明

Sr/Ca 比值也可以作为我们鉴别砗磲种属的一种辅助手段.

表 2 砗磲 Sr/Ca 统计情况 (mmol/mol)

Tab. 2 The statistics of *Tridacna* Sr/Ca profiles (mmol/mol)

砗磲编号	样品个数	可见的年周期数	平均值	最大值	最小值	标准差
YX1-a	194	11	2.235	2.440	2.041	0.103
YX2-b	90	4	1.784	1.986	1.620	0.108
DD3-c	164	1.5*	1.958	2.273	1.611	0.131

【注】 * 为大致数.

此外我们发现砗磲的 Sr/Ca 比值 (YX1 为 2.041~2.440 mmol/mol, YX2 为 1.620~1.986 mmol/mol, DD3 为 1.611~2.273 mmol/mol) 比珊瑚 (7.5~9.5 mmol/mol) 要低得多^[10-11, 13-14, 25]. 说明砗磲和珊瑚的 Sr 分配系数 D_{Sr} ($D_{Sr} = [Sr/Ca]_{壳} / [Sr/Ca]_{海水}$) 差别很大, 近似为 0.25 : 1, 这可能是离子吸收机制导致的差异^[18].

2.2 砗磲 Sr/Ca 比值的年周期信号

研究结果表明(图 3), 选取的 3 个样品的 Sr/Ca 比值变化均有一定的周期性, 这是以往对于砗磲的研究中极为少见的. 其中 YX1, YX2 周期较多(分别有 11 个和 4 个), 且每个周期的极值较为近似, 因而我们可以认为这两种砗磲(库氏砗磲和鳞砗磲)具有较好的年周期性. 观察其 Sr/Ca 曲线可发现其年周期变化由一个宽谷和一个窄峰组成. 宽谷指示的夏季(生长速率快)对应较低的 Sr/Ca 比值, 窄峰指示的冬季(生长速率慢)对应较高的 Sr/Ca, 说明库氏砗磲和鳞砗磲的 Sr/Ca 比值与温度呈反相关关系,

这一点与珊瑚一致^[11].

对于 DD3, 表面看起来其含有 1.5 个周期, 但由于其 Sr/Ca 比值随着年龄增长整体呈下降的趋势, 对应每个周期的极值也有较大变化, 因此对其是否存在年周期还不确定(后文按照其有一定的年周期进行讨论). 而观察其 Sr/Ca 比值曲线, 若按前两种砗磲类似的方法分析, 其表现为宽峰窄谷, 夏季对应较高 Sr/Ca, 冬季对应较低 Sr/Ca, 即与温度成正相关关系. 至于为何 DD3(砗蚝)会出现与其他两种砗磲相反的对对应关系(即正相关), 一种可能的解释是 DD3 对 Sr 离子的吸收模式与其他种的砗磲不同^[18].

研究表明, 一些海洋双壳类的 Sr/Ca 明显受到生长速率的影响, 从幼年到成年, 随着生长速率的减小, Sr/Ca 比值也减小^[16-17, 26-27]. 本研究中, YX1, YX2 这两种砗磲没有明显受生长速率影响, 这与 Elliot 在南半球研究的 3 种砗磲的情况类似^[18], 这说明库氏砗磲和鳞砗磲基本不受生长速率的影响. 对于 DD3, 按我们假定的周期特征, 在其大致的 1.5 个周期中, 两年冬季的 Sr/Ca 值表现为前一年比后一年高(在极值点约高 0.2 mmol/mol). 结合 SST 数据和采样时间, 该砗蚝对应的前一年冬季(2001 年末)没有出现相对低温(相对 2002 年末), 因此这种 Sr/Ca 随时间降低的情况说明砗蚝的 Sr/Ca 比值在一定程度上受到生长速率和新陈代谢的影响. 以上两点也就表明砗蚝的年周期信号相比库氏砗磲和鳞砗磲更不明显也不准确.

2.3 砗磲 Sr/Ca 序列的年代标定

根据砗磲样品的采样时间和年周期信号, 我们可以对砗磲的 Sr/Ca 序列进行年代标定(图 3). 样品采集时均为活体样品, 因而可以将采样时间近似定为大致的死亡时间, 也就是生物地球化学指标封闭的大致时间. 分析 1982~2009 年的 SST 显示, 南海西沙地区夏季时间较长(5~9 月的平均 SST 分别为 29.3, 29.4, 29.4, 29.2 和 29 °C)而冬季时间较短(1 月 SST 最小为 24.7 °C), 结合砗磲的生长特点, 我们可以根据 Sr/Ca 的极值进行年代标定. YX1, YX2 这两个砗磲年周期较多且其 Sr/Ca 与 SST 呈反相关, 因此我们将 Sr/Ca 年周期中的最大值定位到 1 月, 在两个相邻的 1 月之间的 Sr/Ca 值的年龄由线性内插得到, 进一步可将 Sr/Ca 调整到对应的月分辨率; 对于 DD3, 因其年周期少且样品量较大, 我们采用周分辨率的对应方式. 选择两个对

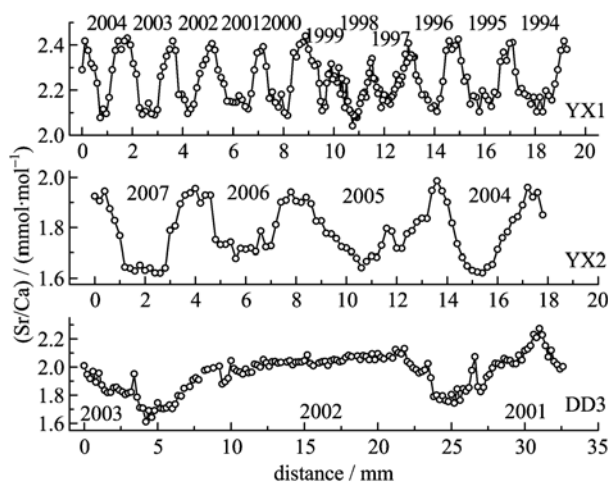


图 3 各种砗磲的 Sr/Ca 分布及其年龄序列

Fig. 3 The Sr/Ca ratio profiles and chronologies of the studied *Tridacna* samples

应的年周期的 Sr/Ca 比值最小点, 分别与对应年份中温度最低的周对应, 再按照这两个时间点间的时间长度, 同样通过线性插值进行周分辨率的对应, 但由于其年周期性不如前两者, 如此标定可能存在着较大误差.

2.4 砗磲 Sr/Ca 比值与 SST 的关系

为了得到精确的温度计方程, 首先需要将地球化学指标和器测资料进行准确的年代对应. 本研究中, 所选取的 SST 序列严格按时间间距测量, 而 Sr/Ca 比值按等间距取样. 在时间标定时, 除了 1 月 (或温度最低周) 的 Sr/Ca 直接与器测温度对应外, 其他时间点的 Sr/Ca 都是通过线性内插获得的. 这里我们用到了一个计算前提, 即认为砗磲在一年内是等速生长的. 但对生物碳酸盐的研究表明其年内生长速度是不等的, 一般夏季快, 冬季慢^[18, 28-29]. 因此, 通过使用年最低温对应的方法将 Sr/Ca 序列与 SST 序列进行年代对应, 只能消除砗磲不同年份间生长速率的影响, 但仍然存在季节生长速率变化引入的误差. 这可能会使温度计方程出现一定的偏差, 从而导致后报温度和器测温度出现较大的差值. 此外需要说明的一点是, 对于那些处在两端边界点以外的数据, 我们并未使用线性外推的方法确定时间而是直接将其舍去. 这是因为一方面舍去的数据量并不多, 不影响整体情况; 另一方面基于上述生长速率改变的原因, 通过外推获得的边界年份外的数据将无法消除年际生长速率改变的误差, 使得可靠性降低, 因而我们只使用完整年份的数据进行时间对应和后续的计算. 对比插值结果和 SST 的对应关系 (图 4), 我们更明显地看到了 YX1 与 YX2 两个月分辨率的砗磲, 我们还使用了极端对应的方法进行拟合, 即将冬季 (1 月) 和夏季 (6, 7, 8 月) 的 Sr/Ca 与相应的 SST 对应, 进行回归拟合 (图 6), 得到两个方程

在本研究中, 我们使用两种方法来拟合温度计方程:

方法 1——全年对应 即将调整到月 (或周) 分辨率的 Sr/Ca 序列直接与月 (周) 分辨率的 SST 序列对应, 进行回归拟合 (图 5), 得到以下的线性方程

$$\begin{aligned} \text{YX1-a: Sr/Ca (mmol/mol)} = & 3.595 - 0.0487 \times \text{SST}(\text{°C}), \\ & (R^2 = 0.6978, n = 133); \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{YX2-b: Sr/Ca (mmol/mol)} = & 3.166 - 0.0503 \times \text{SST}(\text{°C}), \\ & (R^2 = 0.8624, n = 49); \end{aligned} \quad (2)$$

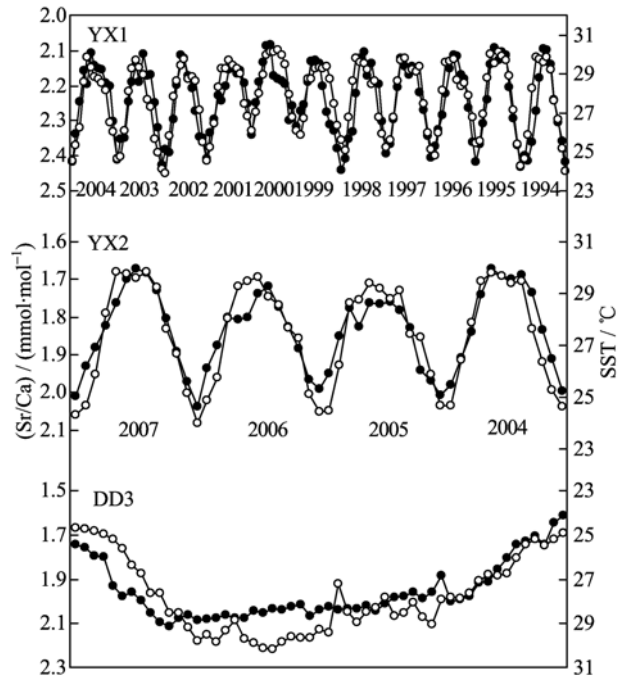


图 4 各砗磲 Sr/Ca 比值的插值结果 (实心点) 与 SST (空心点) 的对应关系

Fig. 4 The correlation between the Sr/Ca profiles (solid dots) and the SST series (hollow dots) of the studied *Tridacna* samples

$$\begin{aligned} \text{DD3-c: Sr/Ca (mmol/mol)} = & 0.2086 + 0.0629 \times \text{SST}(\text{°C}), \\ & (R^2 = 0.6849, n = 53). \end{aligned} \quad (3)$$

方法 2——极端对应 对于 YX1, YX2 两个月分辨率的砗磲, 我们还使用了极端对应的方法进行拟合, 即将冬季 (1 月) 和夏季 (6, 7, 8 月) 的 Sr/Ca 与相应的 SST 对应, 进行回归拟合 (图 6), 得到两个方程

$$\begin{aligned} \text{YX1-a: Sr/Ca (mmol/mol)} = & 3.842 - 0.0578 \times \text{SST}(\text{°C}), \\ & (R^2 = 0.9474, n = 45); \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{YX2-b: Sr/Ca (mmol/mol)} = & 3.347 - 0.0569 \times \text{SST}(\text{°C}), \\ & (R^2 = 0.9473, n = 17). \end{aligned} \quad (5)$$

这些方程的斜率即表示温度每上升 1 °C 砗磲的 Sr/Ca 下降 (或上升, 如 DD3) 的数值变化量. 这里我们看到, 除了 DD3 的式 (3) 以外, 其他砗磲的斜率分别为 -0.0487, -0.0503, -0.0578, -0.0569, 这些数值与在南海地区, 特别是西沙地区珊瑚的 Sr/Ca 温度计的斜率还是较为接近的 (西沙 -0.051^[9], 雷州半岛 -0.042^[14], 三亚 -0.046^[11]). 而对于

DD3,因为没有参照,因而无法与其他的生物碳酸盐进行比较。

利用以上 5 个方程,我们后报了这些砗磲对应时间的 SST. 这里,我们分别后报了全年平均 SST 和冬夏两季(1,6,7,8 月 4 个月)的 SST,我们使用 SST 差值(后报温度—实测温度)来衡量后报温度的准确性(各方程全年平均的后报差值已绘制在图 5、图 6 中). 从 SST 差值的总体结果来看(表 3):对于 YX1 和 YX2,两种方法在后报全年平均 SST 上差距不大;在后报极端温度上,对于同一个砗磲,极端对应(式(4)和式(5))显然更为准确. 另外,对于

DD3,从其 SST 差值的分布图上我们看到明显的下降趋势(图 5(c)),这从另一个角度说明了其 Sr/Ca 比值随着时间减小,也说明通过该砗磲得到的 Sr/Ca-SST 方程的后报准确性相对较差. 因而式(3)不能作为有效的 SST 恢复方程。

2.5 砗磲 Sr/Ca 温度计的可靠性

目前对于砗磲 Sr/Ca 温度计的研究还不多见,因此其对于古海温的记录的可信性还存在着不确定因素,同时关于本研究所关注的不同种间的砗磲 Sr/Ca 温度计的差异也有待进一步深入研究。

如前文所说,生长速率对库氏砗磲和鳞砗磲两

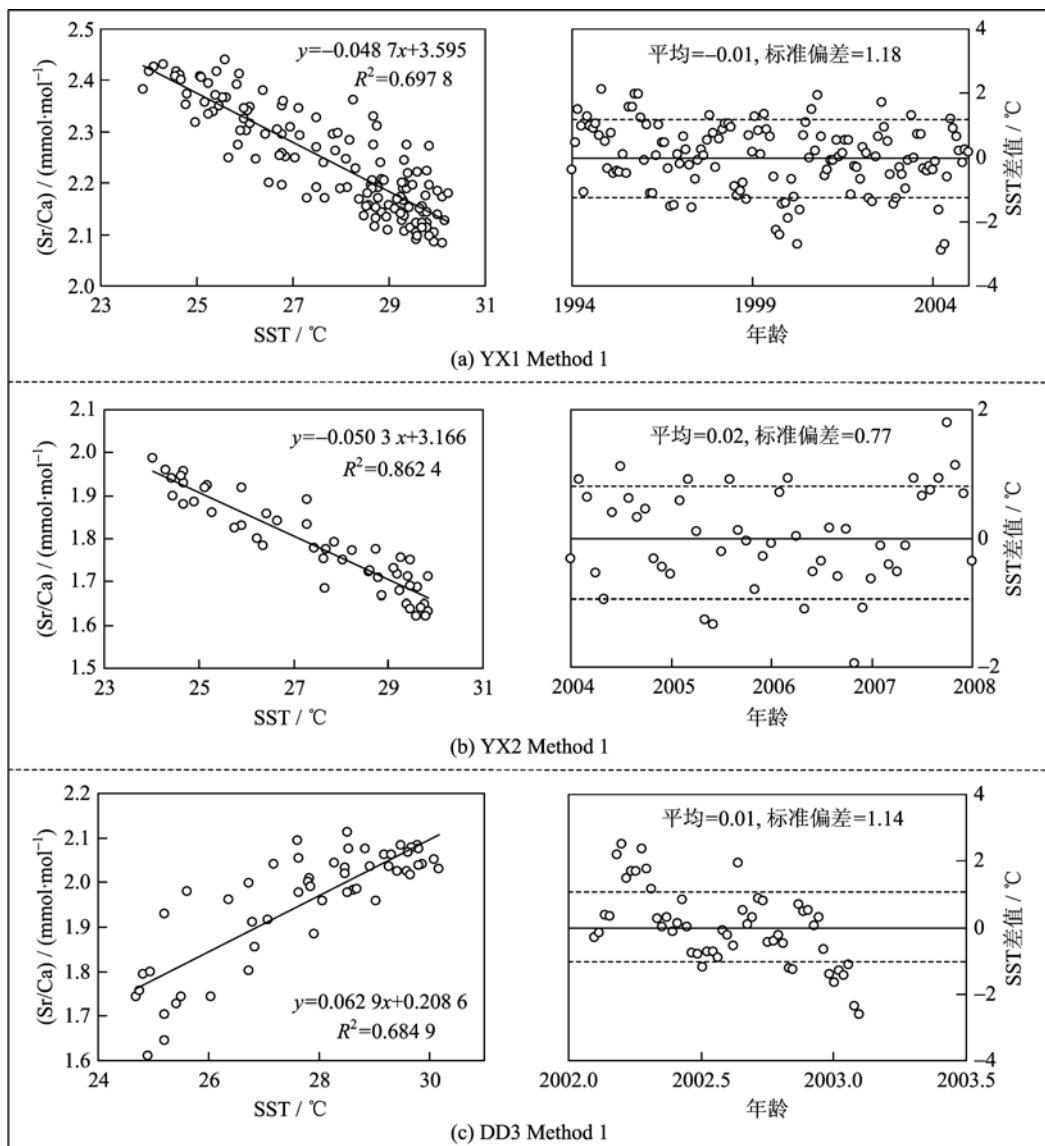


图 5 各个砗磲全年对应(方法 1)的 Sr/Ca-SST 线性拟合(左)以及后报 SST 与实测 SST 的差值序列(右)
Fig. 5 Linear regression between Sr/Ca ratio and SST of the studied *Tridacna* specimen using method 1 (left) and residual SST (right, calculated by subtracting measured SST from estimated SST)

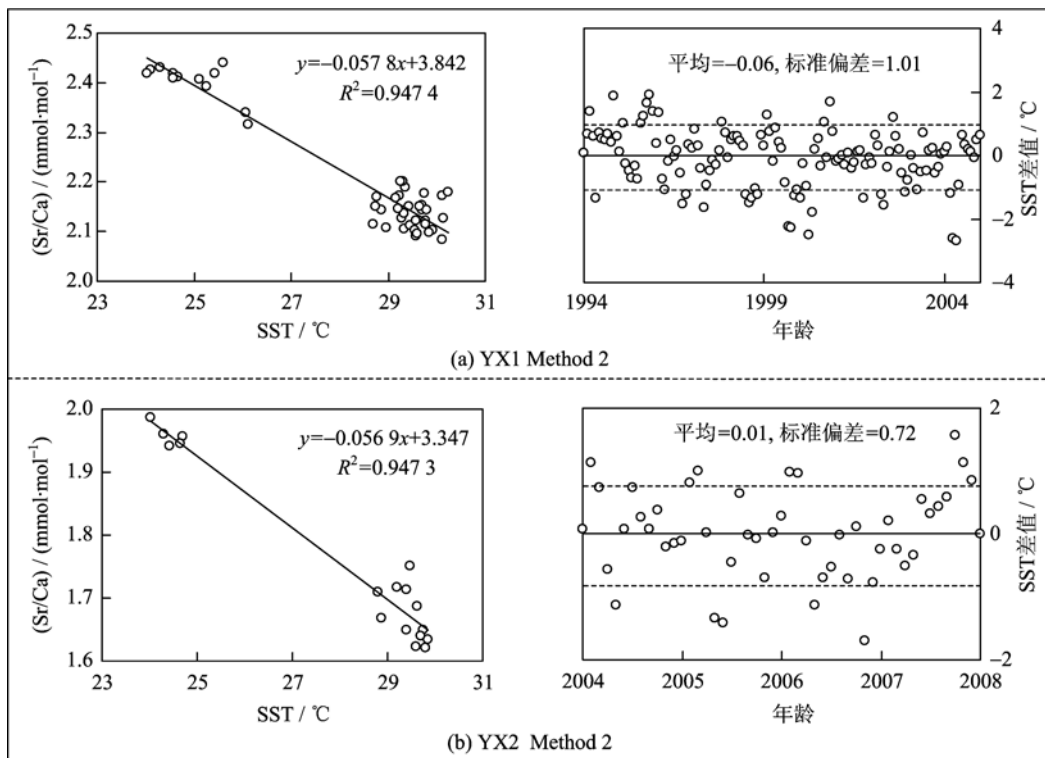


图 6 各个砗磲极端对应(方法 2)的 Sr/Ca-SST 线性拟合(左)以及后报 SST 与实测 SST 的差值序列(右)
 Fig. 6 Linear regression between Sr/Ca ratio and SST of the studied Tridacna specimen using method 2 (left) and residual SST (right, calculated by subtracting measured SST from estimated SST)

表 3 利用全年对应和极端对应两种方法后报的全年平均、冬季(1 月)和夏季(6, 7, 8 月 3 个月)SST 与实测 SST 的差值(℃)

Tab. 3 Residual SST based on method 1 and method 2 (calculated by subtracting measured SST from estimated SST) (℃)

砗磲编号	所用后报式	全年平均	冬季	夏季
YX1-a	YX1 全年对应(1)式	-0.01±1.18	-0.49±0.58	0.41±0.73
	YX1 极端对应(4)式	-0.06±1.01	-0.07±0.54	-0.02±0.64
YX2-b	YX2 全年对应(2)式	0.02±0.77	-0.39±0.22	0.26±0.73
	YX2 极端对应(5)式	0.01±0.72	0.00±0.19	-0.01±0.65
DD3-c	DD3 全年对应(3)式	0.01±1.14	—	—

种砗磲似乎没有明显影响,但是从砗蚝来看,有着较为明显的影响,这一点会严重地影响砗磲 Sr/Ca 温度计的可靠性.因而砗蚝不宜作为 Sr/Ca 温度计.在 YX1 的研究中我们采用了两种取样间距,结果表明取样间距对整体 Sr/Ca 温度计影响不大,但取样过少会影响线性插值的精确性.本研究中每一段线性插值样品的数量均大于需要插值的数量,这在进行 Sr/Ca 温度计的恢复上是足够的;从后报温度的结果看,极端对应获得的方程有着更广泛的适用性,因而也有着相对更高的可靠性;YX1, YX2 两个砗磲的 4 个方程都是较为可靠的南海西沙气候记录信

息,可以用于在一定范围内探讨南海地区古海温以及一些气候系统的变化,也能提供人类活动的背景.至于通过一两个砗磲建立出的某一个种的砗磲 Sr/Ca 温度计能否直接应用到古气候研究中,种内差异和种间差异对砗磲 Sr/Ca-SST 关系的影响,生长速率的变化影响 Sr/Ca 比值是否是个别种的特征,以及今后能否将砗磲 Sr/Ca 温度计进行跨区域的推广等一些问题,都需要进行更深入的研究.

3 结论

本研究对采自南海西沙的 3 种现代砗磲进行了

高分辨率采样和 Sr/Ca 比值分析. 结果表明, 不同种砗磲间 Sr/Ca 的分布有所不同(其差距可超过 10%), 这一点可以作为砗磲种属鉴定的辅助依据. 这些砗磲的 Sr/Ca 比值均显示年周期变化, 这是以往砗磲研究中很少见的, 其中库氏砗磲和鳞砗磲两种砗磲几乎不受生理过程影响而与实测的 SST 也形成较好的对应, 而砗蚝则对应关系较差. 这对应用海洋双壳类进行古气候研究具有非常重要的意义. 通过全年逐月或逐周对应和极端对应, 我们共获得了 5 个相关的 Sr/Ca-SST 方程, 其中 YX1, YX2 的各两个方程是能够较好反映南海温度变化情况的. 这一点表明砗磲的碳酸盐壳体也能同珊瑚一样敏感地反映海温变化, 其 Sr/Ca 是一种良好的 SST 指示剂. 针对研究中不同种的砗磲间的比较, 我们发现不同种砗磲的 Sr/Ca-SST 方程有所不同, 极端对应方程相比全年对应方程有着更好的适用性; 而受生长速率和新陈代谢影响较为明显的砗蚝虽也存在不太清晰的年周期性, 但若将其作为 SST 的温度计则缺乏可靠性. 相比珊瑚, 砗磲在热带和亚热带均有分布, 且采集便捷. 利用不同种间砗磲的 Sr/Ca 的特征可以更好地进行古气候的研究, 也给全新世古海温的重建提供了依据.

致谢 感谢刘晓东、吴自军、黄婧、刘毅、罗雨涵、周拜、张少龙等在采样过程中的帮助. 感谢合肥工业大学的陈彤老师在样品切割过程中的帮助, 感谢梁有庆老师在样品分析过程中的指导.

参考文献(References)

- [1] Rosewater J. The family Tridacnidae in the Indo-Pacific[J]. *Indo-Pacific Mollusca*, 1965, 1: 347-396.
- [2] Australian Centre for International Agricultural Research, Giant Clams in Asia and the Pacific [M]. Copland J W and Lucas J S. Canberra; Press Etching (Qld) Pty Ltd, Brisbane, 1988.
- [3] Aharon P, Chappell J. Oxygen isotopes, sea level changes and the temperature history of a coral reef environment in New Guinea over the last 105 years[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 1986, 56(3/4): 337-379.
- [4] Patzold J, Heinrichs J P, Wolschendorf K, et al. Correlation of stable oxygen isotope temperature record with light attenuation profiles in reef-dwelling Tridacna shells[J]. *Coral Reefs*, 1991, 10(2): 65-69.
- [5] Watanabe T, Oba T. Daily reconstruction of water temperature from oxygen isotopic ratios of a modern Tridacna shell using a freezing microtome sampling technique [J]. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 1999, 104(C9): 20 667-20 674.
- [6] Beck J W, Edwards R L, Ito E, et al. Sea-surface temperature from coral skeletal strontium/calcium ratios[J]. *Science*, 1992, 257(5070): 644.
- [7] Mitsuguchi T, Matsumoto E, Abe O, et al. Mg/Ca thermometry in coral skeletons [J]. *Science*, 1996, 274(5289): 961.
- [8] Smith S V, Buddemeier R W, Redalje R C, et al. Strontium-calcium thermometry in coral skeletons[J]. *Science*, 1979, 204: 404-407.
- [9] Sun Y, Sun M, Wei G, et al. Strontium contents of a Porites coral from Xisha Island, South China Sea: A proxy for sea-surface temperature of the 20th century [J]. *Paleoceanography*, 2004, 19(2): PA2004; doi: 10.1029/2003PA000959.
- [10] Wei G, Deng W, Yu K, et al. Sea surface temperature records in the northern South China Sea from mid-Holocene coral Sr/Ca ratios [J]. *Paleoceanography*, 2007, 22(3): PA3206; doi: 10.1029/2006PA001270.
- [11] Wei G, Sun M, Li X, 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 [J]. *Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology*, 2000, 162(1/2): 59-74.
- [12] Yu K F, Zhao J X, Liu T S, et al. High-frequency winter cooling and reef coral mortality during the Holocene climatic optimum [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 224(1/2): 143-155.
- [13] Yu K F, Zhao J X, Wei G J, et al. Mid-late Holocene monsoon climate retrieved from seasonal Sr/Ca and delta O-18 records of Porites lutea corals at Leizhou Peninsula, northern coast of South China Sea [J]. *Global and Planetary Change*, 2005, 47(2/4): 301-316.
- [14] Yu K F, Zhao J X, Wei G J, et al. delta O-18, Sr/Ca and Mg/Ca records of Porites lutea corals from Leizhou Peninsula, northern South China Sea, and their applicability as paleoclimatic indicators [J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2005, 218(1/2): 57-73.
- [15] Klein R T, Lohmann K C, Thayer C W. Sr/Ca and 13C/12C ratios in skeletal calcite of Mytilus trossulus: Covariation with metabolic rate, salinity, and carbon isotopic composition of seawater [J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 1996, 60(21): 4 207-4 221.

- [16] Takesue R K, Van Geen A. Mg/Ca, Sr/Ca, and stable isotopes in modern and holocene *Protothaca staminea* shells from a northern California coastal upwelling region [J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 2004,68(19): 3 845-3 861.
- [17] Gillikin D P, Lorrain A, Navez J, et al. Strong biological controls on Sr/Ca ratios in aragonitic marine bivalve shells [J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2005,6(Q05009): 1-15.
- [18] Elliot M, Welsh K, Chilcott C, et al. Profiles of trace elements and stable isotopes derived from giant long-lived *Tridacna gigas* bivalves: Potential applications in paleoclimate studies [J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2009, 280 (1/2): 132-142.
- [19] Yan Hong, Shao Da, Wang Yuhong, et al. High resolution Sr/Ca profile of *Tridacna gigas* from Xisha Islands of South China Sea and its potential application on sea surface temperature reconstruction[J]. *Journal of Earth Environment*, 2011,2(2): 381-386.
晏宏, 邵达, 王玉宏, 等. 南海西沙大砗磲高分辨率 Sr/Ca温度计及其意义[J]. *地球环境学报*, 2011,2(2): 381-386.
- [20] YAN Hong, SUN Liguang, LIU Xiaodong, et al. Relationship between ENSO events and regional climate anomalies around the Xisha Islands during the last 50 years[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2010, 29(5): 29-35.
晏宏, 孙立广, 刘晓东, 等. 近 50 年来南海西沙群岛海域气候异常的 ENSO 效应[J]. *热带海洋学报*, 2010, 29(5): 29-35.
- [21] Yan H, Sun L, Oppo D W, et al. South China Sea hydrological changes and Pacific Walker Circulation variations over the last millennium [J]. *Nature Communications*, 2011,2: 293.
- [22] Watanabe T, Suzuki A, Kawahata H, et al. A 60-year isotopic record from a mid-Holocene fossil giant clam (*Tridacna gigas*) in the Ryukyu Islands: Physiological and paleoclimatic implications [J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2004, 212 (3/4): 343-354.
- [23] de Villiers S, Shen G T, Nelson B K. The-temperature relationship in coralline aragonite: Influence of variability in and skeletal growth parameters [J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 1994, 58 (1): 197-208.
- [24] Cohen A L, Owens K E, Layne G D, et al. The effect of algal symbionts on the accuracy of Sr/Ca paleotemperatures from coral[J]. *Science*, 2002, 296 (5566): 331-333.
- [25] Corregge T. Sea surface temperature and salinity reconstruction from coral geochemical tracers [J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2006,232(2/4): 408-428.
- [26] Stecher H A, Krantz D E, Lord C J, et al. Profiles of strontium and barium in *Mercenaria mercenaria* and *Spisula solidissima* shells [J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 1996,60(18): 3 445-3 456.
- [27] Vander Putten E, Dehairs F, Keppens E, et al. High resolution distribution of trace elements in the calcite shell layer of modern *Mytilus edulis*: Environmental and biological controls [J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 2000,64(6): 997-1 011.
- [28] Goodwin D H, SCHONE B R, Dettman D L. Resolution and fidelity of oxygen isotopes as paleotemperature proxies in bivalve mollusk shells: models and observations [J]. *Palaios*, 2003, 18(2): 110.
- [29] Cardinal D, Hamelin B, Bard E, et al. Sr/Ca, U/Ca and delta O-18 records in recent massive corals from Bermuda: Relationships with sea surface temperature [J]. *Chemical Geology*, 2001,176(1/4): 213-233.