

三亚湾海水中 Sr/Ca、Mg/Ca 变化及对珊瑚微量元素温度计的响应

吴伟中^{1,2}, 韦刚健¹, 谢露华¹, 刘颖¹

(1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广东 广州 510640; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 对海南岛南岸三亚湾海水 2008~2009 年周间隔取样, 用全谱直读等离子体原子发射光谱(ICP-AES)分析方法对其 Sr、Mg、Ca 的含量 $m(\text{Sr})$ 、 $m(\text{Mg})$ 、 $m(\text{Ca})$ 进行了测定。结果显示, $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})=8.558\times 10^{-3}\sim 9.227\times 10^{-3}$ 、 $m(\text{Mg})/m(\text{Ca})=4.924\sim 5.403$, 与全球各大洋和主要珊瑚礁区有明显的高异常偏差, 而且在春末夏初和秋末冬初两个过渡期, 三亚湾海水 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 波动幅度比 $m(\text{Mg})/m(\text{Ca})$ 相对较大, 且体现了一定的差异性。在此基础上, 结合海水的 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 、 $m(\text{Mg})/m(\text{Ca})$ 在时间和地域空间上的变化对珊瑚温度计标定的影响, 对不同站点建立的珊瑚 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 温度计进行了重新校正, 并与分配系数法对比分析, 我们认为利用珊瑚的 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 、 $m(\text{Mg})/m(\text{Ca})$ 重建古海水表面温度(SST)记录时必须综合考虑包括海水微量元素比值变化在内的各种影响因素对温度计标定的干扰, 为进一步了解气候环境演变具有重要意义。

关键词: 海水; 造礁珊瑚; Sr 与 Ca、Mg 与 Ca 含量的比值; 微量元素温度计; 三亚湾

中图分类号: P76 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2014)03-0046-10

doi: 10.11759/hyxx20120706003

重建地质时期古海洋气候环境记录对探讨海洋气候环境演化规律具有重要意义。自从 Beck^[1]首次使用高精度同位素稀释质谱仪技术建立珊瑚的 Sr 与 Ca 含量的比值($m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$)温度计以来, 珊瑚的 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 、 $m(\text{Mg})/m(\text{Ca})$ 广泛地被认为是重建海水表面温度(SST)的良好替代指标^[2-12], 用来研究一些重要的地质历史时期诸如末次间冰期, 末次盛冰期, 新仙女木冰期和小冰期的气候变化^[13]。其前提条件是海水的 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 、 $m(\text{Mg})/m(\text{Ca})$ 在空间和时间上的稳定性^[9, 14]。海水中 Sr、Mg、Ca 相应含量分别为 0.41、1.299 和 0.0079g/kg^[15], 在大洋海水中都有相对较长的滞留时间^[16-17], 分别为 1.1、12 和 5.1 Ma。在珊瑚反映 SST 变化的 0.1 Ma 尺度内, 开阔大洋海水的 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 变化仅在 0.45%范围内^[1, 18-19], 这种微小的变化被认为对珊瑚 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 温度计影响很小, 往往可以忽略。但是在某些边缘海或海峡, 如中国的南海^[20]、中国台湾海域^[6]、乔治亚海湾^[18], 珊瑚礁区海水的 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 出现异常值, 且有更大的变化范围, 这些区域的海水可能会对珊瑚的微量元素与 SST 之间的关系有重要的影响。

目前还没有普遍被公认的统一的珊瑚 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 、 $m(\text{Mg})/m(\text{Ca})$ 温度计^[21-22]。在不同区域建立

的珊瑚 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 、 $m(\text{Mg})/m(\text{Ca})$ 温度计之间很少达到一致, 即使是有着相类似生长速率的同种珊瑚^[23-24], 或是不同的珊瑚 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 、 $m(\text{Mg})/m(\text{Ca})$ 温度计运用到同一区域中都会有 1~3℃温度偏差^[7, 21]。海水中 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 的变化或是 $m(\text{Sr})$ 的变化被认为是造成各珊瑚温度计不同的主要原因^[2, 25]。有些学者提出使用 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 在珊瑚和周边海水之间的分配系数来代替单独的珊瑚 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 进行 SST 的计算来减少各种温度计之间的差异^[2, 6]。海水中 $m(\text{Mg})/m(\text{Ca})$ 的变化报道非常少, 主要受控于降雨或是地表淡水注入引起的盐度变化^[26], 从而影响珊瑚 $m(\text{Mg})/m(\text{Ca})$ 的变化。另外, 在晚第四纪冰期和间冰期海水中 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 有多大不同仍然是一个未解决的问题^[27]。所以在高精度高分辨率珊瑚微量元素温度计充分使用前必须要考虑海水中 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 、 $m(\text{Mg})/m(\text{Ca})$ 的变化。

南海是西太平洋的一个半封闭的最大边缘海,

收稿日期: 2012-07-06; 修回日期: 2014-01-21

基金项目: 国家自然科学基金(Y102321001); 海洋石油勘探开发广东高校重点实验室基金(42000-3211101)

作者简介: 吴伟中(1984-), 男, 江西上饶人, 博士研究生, 主要从事海洋地质和石油地质方面的研究, E-mail: 1604222@163.com

在控制东亚季风气候起着重要的作用^[28], 其大量的珊瑚礁为用来重建古气候提供宝贵的材料。近年来, 国内的有些学者相继地利用南海海域滨珊瑚 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 、 $m(\text{Mg})/m(\text{Ca})$ 重建了 SST 的记录^[29-31]。本研究通过对海南岛南岸三亚湾 2008 年 9 月~2009 年 11 月海水的 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 、 $m(\text{Mg})/m(\text{Ca})$ 进行了月、季变化分析, 探讨其各自变化对珊瑚温度计的影响, 为进一步了解气候环境演变的珊瑚地球化学指标的适用性和可靠性打下基础。

1 材料与实验方法

本文所用的全部海水样品于 2008 年 9 月~2009 年 11 月采自海南岛三亚鹿回头(109°28'E, 18°13'N), 位于中国科学院南海海洋研究所海南热带海洋生物实验站前方约 100 m 的海南岛南岸三亚湾海域, 水深在 0.5~1 m 左右。基于传统的水化学颗粒相与液相分离方法^[32], 我们将采集的所有海水样品在测量前均通过 0.45 μm 滤膜过滤, 用 1% 硝酸溶解颗粒物, 标号后放入冰箱冷藏。我们每隔 1 周进行海水定时采样, 获得的 38 个海水样品在中国科学院广州地球化学研究所同位素中心的 Varian Vista 型 ICP-AES 上进行 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 、 $m(\text{Mg})/m(\text{Ca})$ 分析测试。我们分别

选取 318.127、407.771 和 279.553 nm 波长的分析谱线来测量 Sr、Mg、Ca 的含量($m(\text{Sr})$ 、 $m(\text{Mg})$ 、 $m(\text{Ca})$)。为了提高分析效率和精度, 避免基线的漂移, 我们采取韦刚健等^[40]提出的标准-样品-标准的分析模式, 测量时以 5 个或 6 个样品为一组, 在每组测量前后均测量一次监控标准液, 同时采用两个混合标液来进行外部标准校正。混合标准溶液的配制, 仪器工作条件可参考李艳苹等^[33]。全部监控标液的 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 平均值为 $8.866 \times 10^{-3} \pm 0.032 \times 10^{-3}$, 相对标准偏差为 $\pm 0.36\%$, $m(\text{Mg})/m(\text{Ca})$ 平均值为 5.265 ± 0.016 , 相对标准偏差为 $\pm 0.30\%$, 达到了有效的精度范围^[34], 可以降低信号波动引起的偏差。

2 结果及讨论

2.1 三亚湾海水中 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 、 $m(\text{Mg})/m(\text{Ca})$ 月变化

海南岛三亚湾 2008~2009 年珊瑚礁区海水的 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 、 $m(\text{Mg})/m(\text{Ca})$ 平均值分别为 $8.897 \times 10^{-3} \pm 0.141 \times 10^{-3}$, 5.232 ± 0.101 (图 1), 其中 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 的变化范围与全球大洋海水的 $8.487 \times 10^{-3} \sim 8.597 \times 10^{-3}$ ^[35-36] 和主要珊瑚礁区的 $8.464 \times 10^{-3} \sim 8.613 \times 10^{-3}$ ^[1-2, 8] 都有一定的偏差(表 1), 甚至与西沙

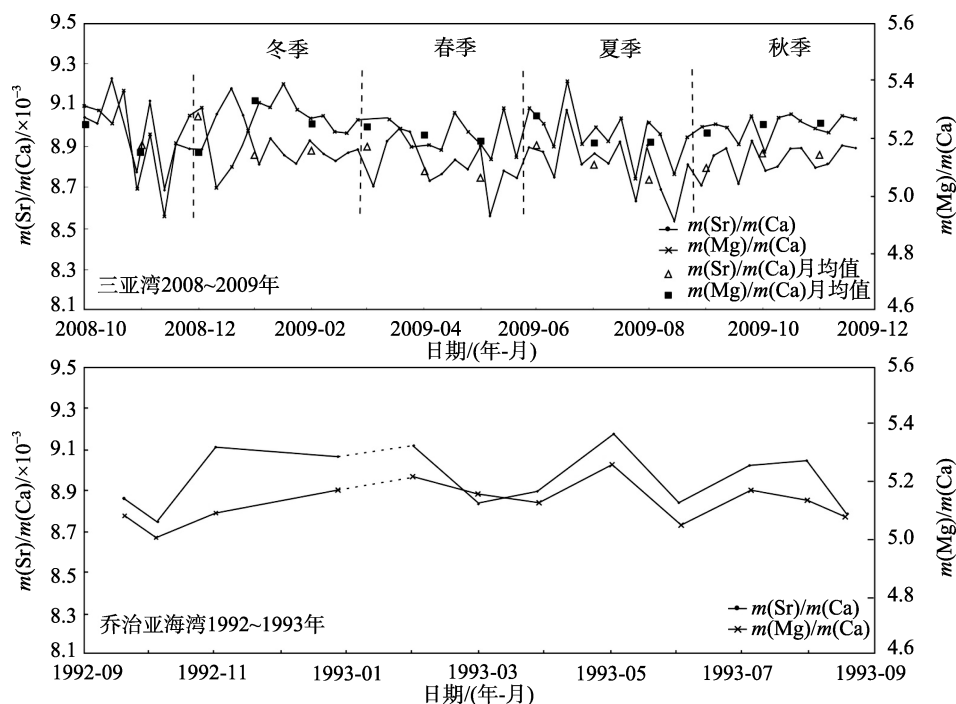


图 1 海水 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 、 $m(\text{Mg})/m(\text{Ca})$ 月变化

Fig. 1 The monthly varieties of Sr/Ca and Mg/Ca ratios in seawater

表 1 全球海水 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 、 $m(\text{Mg})/m(\text{Ca})$ 对比

Tab. 1 Comparison of Sr/Ca and Mg/Ca ratios within in seawater worldwide

采样点	$m(\text{Sr})/m(\text{Ca})(\times 10^{-3})$	$m(\text{Mg})/m(\text{Ca})$	样品数	文献来源
大西洋	8.553(8.493~8.605)	5.178(5.174~5.183)	14	[35-36]
西太平洋	8.527(8.487~8.612)	5.275(5.135~5.417)	10	[35-36]
东太平洋	8.546(8.501~8.597)	/	6	[35]
新喀里多尼亚	8.464	/	2	[1]
加拉帕戈斯群岛	8.613(8.586~8.642)	/	3	[2]
加利福尼亚海湾	8.564	/	2	[2]
夏威夷群岛	8.510	/	5	[2]
阿拜昂环礁(西太平洋)	8.546	/	1	[2]
冲绳群岛	8.512	/	1	[2]
巴巴多斯岛(加勒比海)	8.547	/	1	[2]
中国台湾岛	8.551(8.539~8.572)	/	12	[6]
西沙群岛	8.539	/	1	[25]
东京湾	/	5.234	/	[36]
波罗的海	/	5.119	/	[36]
乔治亚海湾(加拿大)	8.958(8.747~9.174)	5.133(5.012~5.264)	12	[18]
马萨诸塞州(美国)	8.450	5.230	5	[41]
三亚湾	8.897(8.558~9.227)	5.232(4.924~5.403)	38	本研究

注: 括号内为 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 、 $m(\text{Mg})/m(\text{Ca})$ 变化范围; /表示未测或未知

群岛^[25]和中国台湾海域^[6]也有 $0.3 \times 10^{-3} \sim 0.4 \times 10^{-3}$ 的高异常差值。但却与 Klein^[18]在乔治亚海湾测得的 $8.958 \times 10^{-3} \pm 0.133 \times 10^{-3}$ 相一致(图 1), 可能是因为三亚湾和乔治亚海湾都是典型的开阔型进潮口浅海湾, 受到沿岸河流的侵入, 且发育有大量的浮游动植物和双壳类底栖动物, 在控制海水中 $m(\text{Ca}^{2+})$ 、 $m(\text{Sr}^{2+})$ 起着显著的作用^[37]。珊瑚礁区海水的 $m(\text{Mg})/m(\text{Ca})$ 研究较少, 我们测得的海水 $m(\text{Mg})/m(\text{Ca})$ 均值与张正斌等^[36]报道的西太平洋、大西洋和东京湾海水 $m(\text{Mg})/m(\text{Ca})$ 均值相符, 却比其他海域诸如波罗的海^[36]、乔治亚海湾^[18]高出 0.1 左右, 但却是在其变化范围之内(4.924~5.403), 只是出现了部分高值。对于三亚湾的 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 、 $m(\text{Mg})/m(\text{Ca})$ 高异常, 主要是自中国台湾海峡和巴士海峡进入南海北部的冬季西北太平洋深水团和夏季南海上升流影响的结果^[38-39]。那两处高盐分和富营养盐水团导致了海水 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 、 $m(\text{Mg})/m(\text{Ca})$ 的增加, 或是三亚河和鹿回头地区的地表径流共同作用的结果。

纵观整个年度(图 1), 三亚湾海水的 $m(\text{Mg})/m(\text{Ca})$ 在冬季的1月前期到春季4月中期有平缓降低的趋势, 随后进入增减变化幅度较大的杂乱期直到8月末期, 9月之后的秋季其值波动幅度又开始慢慢放缓, 大体上呈现逐步递增的趋势; 海水的 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 整体上全年的变化趋势与 $m(\text{Mg})/m(\text{Ca})$ 相类似,

这种变化特征在乔治亚海湾区域也有相类似性^[18], 但是在大部分春季和秋末冬初的月份里波动变化幅度明显比 $m(\text{Mg})/m(\text{Ca})$ 的较大, 而且还体现了一定的差异性, 可能是在春末夏初和秋末冬初的两个过渡期里, 三亚地区的强降雨变化幅度较大(图2)^[40], 强降雨和地表径流共同作用直接影响了海水盐度的相对变化, 导致浮游植物增殖或死亡扰乱了 Sr、Mg、Ca 等元素在海水和有机体或沉积物间的分配^[37]。另一方面由于海水的 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 受盐度(S)的影响要高于 $m(\text{Mg})/m(\text{Ca})$ (图3), 初步断定其为两者变化幅度差异性的主要原因。

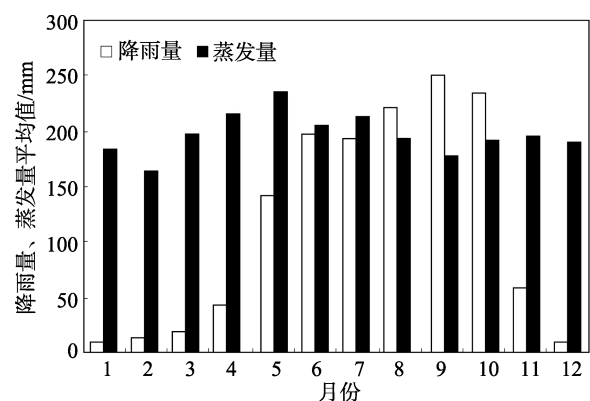


图 2 三亚近 30 年的月平均降雨量和蒸发量分布^[40]
Fig. 2 The distribution of monthly average rainfall and evaporation from during the past 30 yearss in Sanya

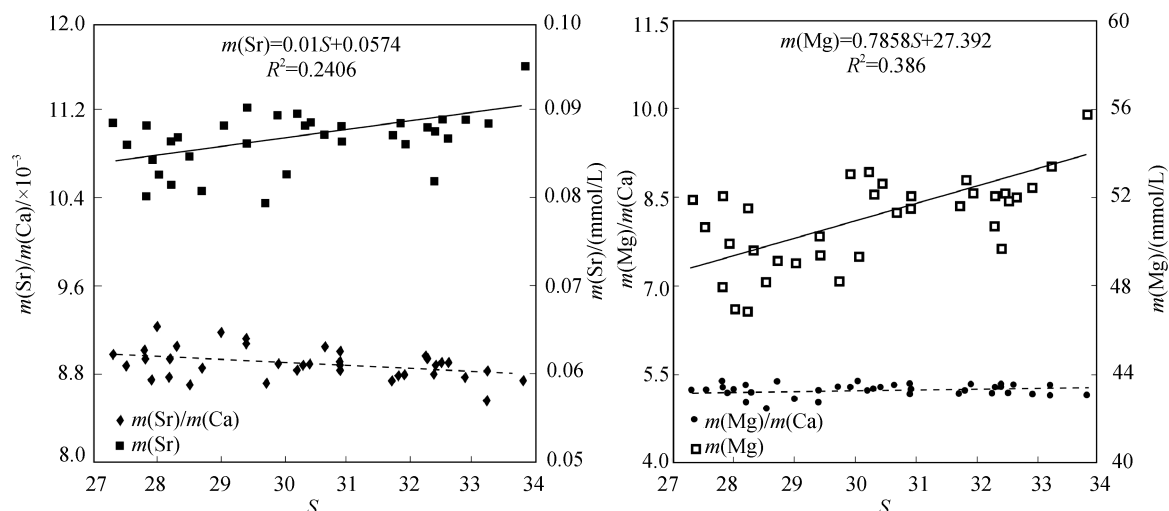


图 3 海水中的 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 、 $m(\text{Mg})/m(\text{Ca})$ 和 $m(\text{Sr})$ 、 $m(\text{Mg})$ 与 S 的相关性
Fig. 3 Correlation between Sr/Ca , Mg/Ca , $m(\text{Sr})$, $m(\text{Mg})$ and salinity in seawater

2.2 对温度计标定的响应

Sr 、 Mg 进入珊瑚文石骨架的过程主要受海水中 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 、 $m(\text{Mg})/m(\text{Ca})$ 和文石与海水之间的 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 、 $m(\text{Mg})/m(\text{Ca})$ 分配系数控制^[42-43]，可以用方程表示为：

$$m(\text{Me})_{\text{珊瑚}}/m(\text{Ca})_{\text{珊瑚}} = D_{\text{Me, 珊瑚}} m(\text{Me})_{\text{海水}}/m(\text{Ca})_{\text{海水}} \quad (1)$$

式中， Me 表示金属元素或是微量元素， $D_{\text{Me, 珊瑚}}$ 表示 $m(\text{Me})/m(\text{Ca})$ 在珊瑚文石骨骼和周围海水之间的分配系数。所有珊瑚的 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 分配系数范围相对较小，Weber 从浅水造礁珊瑚的 47 个种属中算出 $D_{\text{Sr, 珊瑚}}$ 的平均值为 1.01 ± 0.03 ^[44]，Smith 从更多的珊瑚限制条件中给出的 $D_{\text{Sr, 珊瑚}}$ 值为 1.06 ^[42]。对于台湾海域的 *Porites* 珊瑚， $D_{\text{Sr, 珊瑚}}$ 的平均值为 1.056 ± 0.003 ^[6]，而大堡礁中部地区珊瑚 $D_{\text{Sr, 珊瑚}}$ 值为 1.052 ^[45]，而无机沉积文石大约为 1.15 ^[46]。虽然对于 *Porites* 珊瑚其生理过程对骨骼 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 控制机制也有微小的不同，同属种类的 $D_{\text{Sr, 珊瑚}}$ 也会显示出微小的差异，尤其是 *Porites lobata* 和 *Porites lutea* 珊瑚^[47]，但至今的实验数据都表明同种珊瑚文石和海水间的 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 分配系数虽然比无机沉积的要小却是基本恒定的^[14, 42]。珊瑚的 $m(\text{Mg})/m(\text{Ca})$ 分配系数报道较少，Gaetani 利用 *Diploria labyrinthiformis* (脑珊瑚) 实验得出在珊瑚生长的最适宜水温 $25 \sim 30^\circ\text{C}$ 下， $D_{\text{Sr, 珊瑚}}$ 、 $D_{\text{Mg, 珊瑚}}$ 分别处在 $(1.133 \pm 0.008) \sim (1.089 \pm 0.012)$ 、 $(0.00133 \pm 0.00008) \sim (0.00104 \pm 0.00007)$ 范围内变化^[41]。

目前海水的 $m(\text{Me})/m(\text{Ca})$ 在时间上的变化差异对珊瑚 $m(\text{Me})/m(\text{Ca})$ 温度计的影响研究得较少，Shen 通过对 1993 年台湾海域月间隔取样的海水 $m(\text{Sr})/$

$m(\text{Ca})$ 测定，结果显示其 0.033% 的变化范围等同于在温度计的使用上有 $\pm 0.7^\circ\text{C}$ 的不确定^[6]。依据珊瑚 $m(\text{Me})/m(\text{Ca})$ 温度计： $T = A[m(\text{Me})/m(\text{Ca})]_{\text{珊瑚}} + B$ ，考虑到珊瑚文石的 $D_{\text{Me, 珊瑚}}$ 是基本恒定的^[14, 42]，所以得到珊瑚 $m(\text{Me})/m(\text{Ca})$ -SST 的偏差 ΔT ：

$$\Delta T = A[m(\text{Me})/m(\text{Ca})]_{\text{珊瑚}} \left\{ \Delta[m(\text{Me})/m(\text{Ca})]_{\text{海水}} / [m(\text{Me})/m(\text{Ca})]_{\text{海水}} \right\} \quad (2)$$

其中 A 、 B 表示系数， $\Delta[m(\text{Me})/m(\text{Ca})]_{\text{海水}}/[m(\text{Me})/m(\text{Ca})]_{\text{海水}}$ 表示海水中 $m(\text{Me})/m(\text{Ca})$ 的变化率， $[m(\text{Me})/m(\text{Ca})]_{\text{珊瑚}}$ 可用珊瑚的 $m(\text{Me})/m(\text{Ca})$ 平均值代入计算。

近年来，韦刚健等在三亚湾分别建立了两个南海 *Porites* 珊瑚的 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 、 $m(\text{Mg})/m(\text{Ca})$ 温度计来研究南海的气候演化^[9, 29]，并且得到了应用，拟合的 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ -SST 和 $m(\text{Mg})/m(\text{Ca})$ -SST 线性方程为：

$$T = -27.2[m(\text{Sr})/m(\text{Ca})] + 260, R = 0.92 \quad (3)$$

$$T = 17.9[m(\text{Mg})/m(\text{Ca})] - 46.9, R = 0.95 \quad (4)$$

结合方程(2)、(3)、(4)得出，三亚湾海水约 1.2% 的 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 变化(表示单点 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 数据相对于平均值的变化)在计算珊瑚 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ -SST 标定时能引起 $\pm 2.7^\circ\text{C}$ 的 SST 偏差，比实测的 SST 变化(1.4°C)有较大的波动(图 4)，而约 1.5% 的 $m(\text{Mg})/m(\text{Ca})$ 变化在计算珊瑚 $m(\text{Mg})/m(\text{Ca})$ -SST 标定时只有 $\pm 1.2^\circ\text{C}$ 的 SST 偏差(图 4)。但是由于海水的 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 个别异常值，使得 SST 有 $8 \sim 9^\circ\text{C}$ 的波动，而 $m(\text{Mg})/m(\text{Ca})$ 的个别异常值却只有 $2 \sim 4^\circ\text{C}$ ，说明了海水的 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 变化对珊瑚温度计的影响要明显地强于 $m(\text{Mg})/m(\text{Ca})$ 的变化，在重建古 SST 时必须要考虑海水 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 的波动。

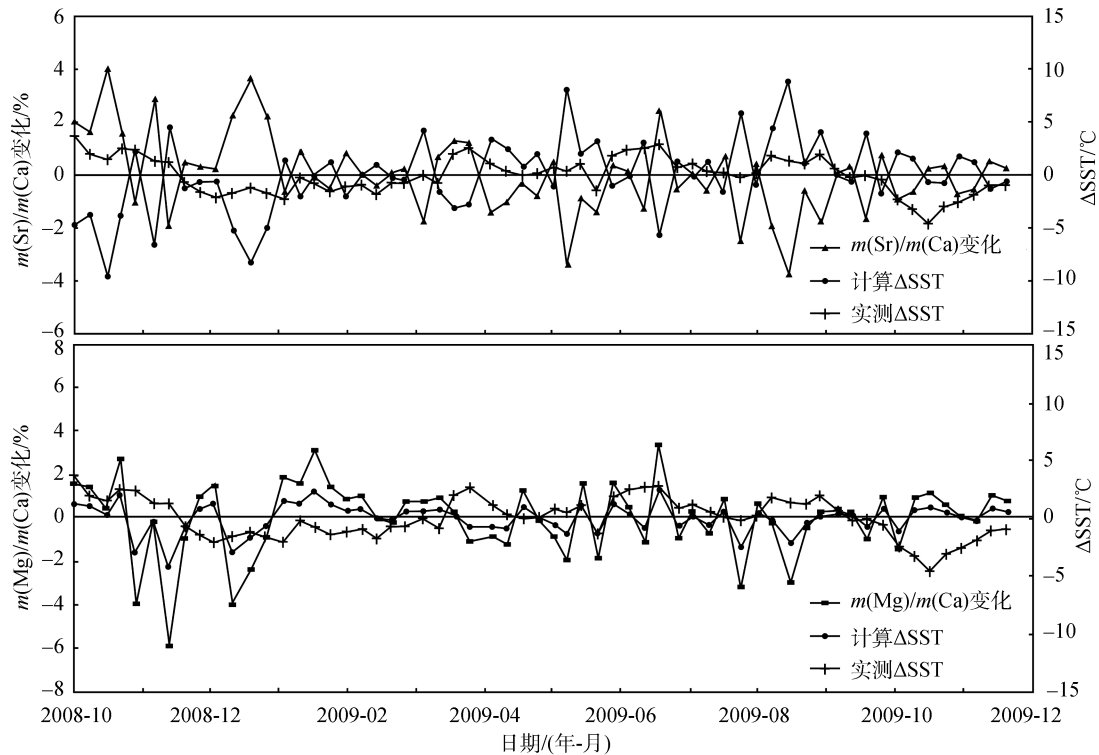


图4 海水 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 、 $m(\text{Mg})/m(\text{Ca})$ 变化对 SST 的影响
Fig. 4 The effect of $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ and $m(\text{Mg})/m(\text{Ca})$ on SST in seawater

在全球范围海水微量元素比值变化在地域空间上的差异对各温度计的影响中 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 研究较多^[2, 22]。de Villiers 指出全球现代海水的 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 在空间上有 2%~3%的不同, 且大洋深层海水 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 相对于表层变化更大, 等同于珊瑚 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 得到的 SST 有 2~3.5℃的偏差^[35]。Sun 则报道了全球主要珊瑚礁区海水 2.4%的 $m(\text{Sr})$ 变化在计算 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ -SST 标定时能引起约 4℃的 SST 变化^[25]。对于超过 30 ka 的海水, $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 的可能变化达到 1%~3%, 相当于珊瑚 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 温度计的有效温度变化 2~6℃^[19]。但是在局部珊瑚礁区(大堡礁的戴维斯岛礁和迈密登岛礁), 海水 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 变化较小, 转化为温度差异仅为约 0.42℃^[8, 48]。许多研究显示 $m(\text{Mg})/m(\text{Ca})$ 相对 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 来说作为 SST 替代指标的实用性较差^[30, 34, 48], 这意味着 $m(\text{Mg})/m(\text{Ca})$ 温度计更容易受珊瑚的生理机能的波动或是环境应力的影响。已报道的器测海水的 $m(\text{Mg})/m(\text{Ca})$ 很少^[18, 36, 41, 49], 很难全面地进行珊瑚礁区海水 $m(\text{Mg})/m(\text{Ca})$ 变化在地域空间上的差异对温度计影响的对比分析。

2.3 珊瑚 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 、 $m(\text{Mg})/m(\text{Ca})$ 温度计的校正

目前还没有普遍被公认的统一的珊瑚 $m(\text{Sr})/$

$m(\text{Ca})$ -SST、 $m(\text{Mg})/m(\text{Ca})$ -SST 关系式^[22, 37], 在不同区域建立的珊瑚微量元素温度计之间很少达到一致, 尤其是在近海岸珊瑚礁区 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 温度计差异大于 2.5℃^[50-51]。先前发表的珊瑚 $m(\text{Me})/m(\text{Ca})$ 温度计只能运用到特殊的且有限的区域(表 2)。为了校正由于海水 $m(\text{Me})/m(\text{Ca})$ 变化在地域空间上的不同造成的 $m(\text{Me})/m(\text{Ca})$ 温度计的差异, 根据 Sun^[25]类推出在不同站点建立的珊瑚 $m(\text{Me})/m(\text{Ca})$ 温度计用三亚海水标准化后的 $T_{\text{校正}} = A[m(\text{Me})/m(\text{Ca})]_{\text{珊瑚}} \{2 - [m(\text{Me})/m(\text{Ca})]_{\text{已建立海水}}/[m(\text{Me})/m(\text{Ca})]_{\text{三亚海水}}\} + B$, 与分配系数法 $D = [m(\text{Me})/m(\text{Ca})]_{\text{珊瑚}}/[m(\text{Me})/m(\text{Ca})]_{\text{海水}}$ ^[2, 6]进行对比分析。

校正后的珊瑚 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 温度计标定与韦刚健等^[29]建立的三亚珊瑚 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 温度计对比(图 5a, b), 结果显示珊瑚 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ -SST 线性方程之间的偏差比未校正前有明显的减少, 尤其是在南海和东海各标定中, 对同一 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 南海和东海站点的 4 个标定(Fallon 等^[45]除外)给出的 SST 差值均 $\leq 2^\circ\text{C}$ 。用分配系数法来校正各标定温度计之间的差异(图 5c), 结果显示大多数的珊瑚 D -SST 线性方程之间的偏差比未校正前有一定的减少, 在太平洋区域的 3 个站点^[1-2, 34]之间表现的尤为明显, 但却与依据韦刚健等^[29]重新标定的 D -SST 温度计之间的偏移量未见有明显的减小, 反而有微小的增大趋势, 主要

表 2 先前发表的珊瑚 $m(\text{Me})/m(\text{Ca})$ -SST 温度计标定Tab. 2 The calibrations of coral Me/Ca paleo-SST proxy published previously

采样点	a	b	珊瑚种属	实验方法	文献来源
新喀里多尼亚(南太平洋)	10.479	-0.06245	<i>Porites lobata</i>	ID-TIMS	[1]
夏威夷群岛(中太平洋)	10.956	-0.07952	<i>Porites lobata</i>	ID-TIMS	[2]
巴布亚新几内亚(南太平洋)	10.70	-0.0620	<i>Porites</i> sp.	ID-TIMS	[3]
留尼旺岛(西印度洋)	10.577	-0.0610	<i>Porites lutea</i>	ID-TIMS	[4]
加拉帕戈斯群岛(东太平洋)	10.55	-0.0514	<i>Porites lutea</i>	ICP-AES	[34]
大堡礁(戴维斯岛礁)	10.48	-0.0615	<i>Porites</i> sp.	ID-TIMS	[8]
大堡礁(戴维斯岛礁 2 段)	10.80	-0.070	<i>Porites mayeri</i>	LA-ICP-MS	[24]
俄耳甫斯岛(大堡礁)	10.731	-0.0638	<i>Porites lutea</i>	ID-TIMS	[50]
迈密登岛礁(大堡礁)	10.40	-0.0575	<i>Porites</i> sp.	ID-TIMS	[14]
大堡礁(澳大利亚)	10.41	-0.058	<i>Porites</i> sp.	LA-ICP-MS	[48]
中国台湾岛	10.286	-0.0514	<i>Porites lutea</i> <i>Porites lobata</i>	ID-TIMS	[6]
日本石恒岛(东太平洋)	10.543	-0.06085	<i>Porites lutea</i>	ICP-AES	[7]
四国岛(日本)	10.76	-0.063	<i>Porites lobata</i>	LA-ICP-MS	[45]
三亚湾	9.559	-0.0368	<i>Porites lutea</i>	ICP-AES	[29]
西沙群岛	10.327	-0.0534	<i>Porites</i> sp.	ID-TIMS	[25]
雷州半岛	9.836	-0.0424	<i>Porites</i> sp.	ICP-AES	[30]
龙湾港(海南岛东部)	10.625	-0.0625	<i>Porites lutea</i>	ICP-AES	[31]
昆仑岛(越南南部)	10.105	-0.04469	<i>Porites</i> sp.	ICP-OES	[37]
日本石恒岛(东太平洋)	1.15	0.129	<i>Porites</i> sp.	ICP-AES	[7]
大堡礁(戴维斯岛礁 2 段)	0.0(0.3)	0.16	<i>Porites mayeri</i>	LA-ICP-MS	[24]
四国岛(日本)	1.38	0.088	<i>Porites lobata</i>	LA-ICP-MS	[45]
三亚(南海北部)	1.60	0.113	<i>Porites</i> sp.	ID-ICP-MS	[9]
波多黎各(加勒比海)	-3.24	0.28	<i>Montastrea faveolata</i>	ICP-AES	[5]
大堡礁(澳大利亚)	1.54	0.098	<i>Porites</i> sp.	LA-ICP-MS	[48]
三亚湾	2.62	0.056	<i>Porites lutea</i>	ICP-AES	[29]

注：第一组采样点从新喀里多尼亚至昆仑岛的标定方程为： $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})=a+bT$ ；第二组采样点从日本石恒岛至三亚湾的标定方程为： $m(\text{Mg})/m(\text{Ca})=a+bT$

是由于三亚湾地区珊瑚的 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 相对较低，而周边海水的 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 又普遍较高造成的。从图 5 中可以看出在给出的温度 23~30℃ 范围内三亚湾珊瑚的 $D_{\text{Sr, 珊瑚}}$ 值维持在 0.94~0.97，明显地小于其他标定(均值为 1.06)，表明了这种方法并不是适合所有站点。

总之，珊瑚礁区 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 温度计的影响因素很多，除了海水的 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 变化以外，珊瑚内部生物因素(珊瑚种属、生长率和骨骼中微量元素浓度^[6, 29]、珊瑚礁生态系统的环境因素^[52])和光照强度，补给微粒的组分^[53]，无机营养盐的输入^[47]，河流淡水的注入，大洋水流方式(上升流、环流、边界涌流)^[6, 37]以及实验方法的不同(比如 SST、珊瑚样品的取样位置和测定方法^[45, 50]、样品预处理方式^[2, 6]、室内实验误差^[22, 34])等都可能造成 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 温度计的干扰，必须综合考虑来分析各珊瑚 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 温度计差异的原因。

目前对 $m(\text{Mg})/m(\text{Ca})$ 同 SST 正相关关系存在两

种不同解释^[17, 46]。 Mg^{2+} 的活度随着沉积流体和晶体表面组分的变化相当敏感，经过实验室 HNO_3 和 H_2O_2 的处理会有约 0.3% 的丢失^[7]。生物因素可能在控制珊瑚骨骼对 Mg 的吸收起着重要的作用^[10-11, 44]，海水 $m(\text{Mg})/m(\text{Ca})$ 季节性的波动也会影响 $m(\text{Mg})/m(\text{Ca})$ 温度计^[21, 37]。已报道的器测海水的 $m(\text{Mg})/m(\text{Ca})$ 很少^[18, 36, 41, 49]，很难进行珊瑚礁区海水 $m(\text{Mg})/m(\text{Ca})$ 变化在地域空间上的差异对温度计的影响。从 $m(\text{Mg})/m(\text{Ca})$ -SST 标定对比中(图 5d)可以看出在日本石恒岛^[7]和四国岛^[45]2 个标定与在三亚湾标定的 $m(\text{Mg})/m(\text{Ca})$ 温度计之间有较大的偏差，即使是在同一珊瑚礁区域的标定^[9]也与之有一定的偏移，可能主要是由不同的珊瑚内在因素(种属差异)(表 2)，生长率或钙化率变化^[7, 45]引起的。其他环境参数(温度、盐度，营养盐的浓度和性质(无机的或是有机的))^[24, 34]和生物作用因素(生物的新陈代谢，有性生

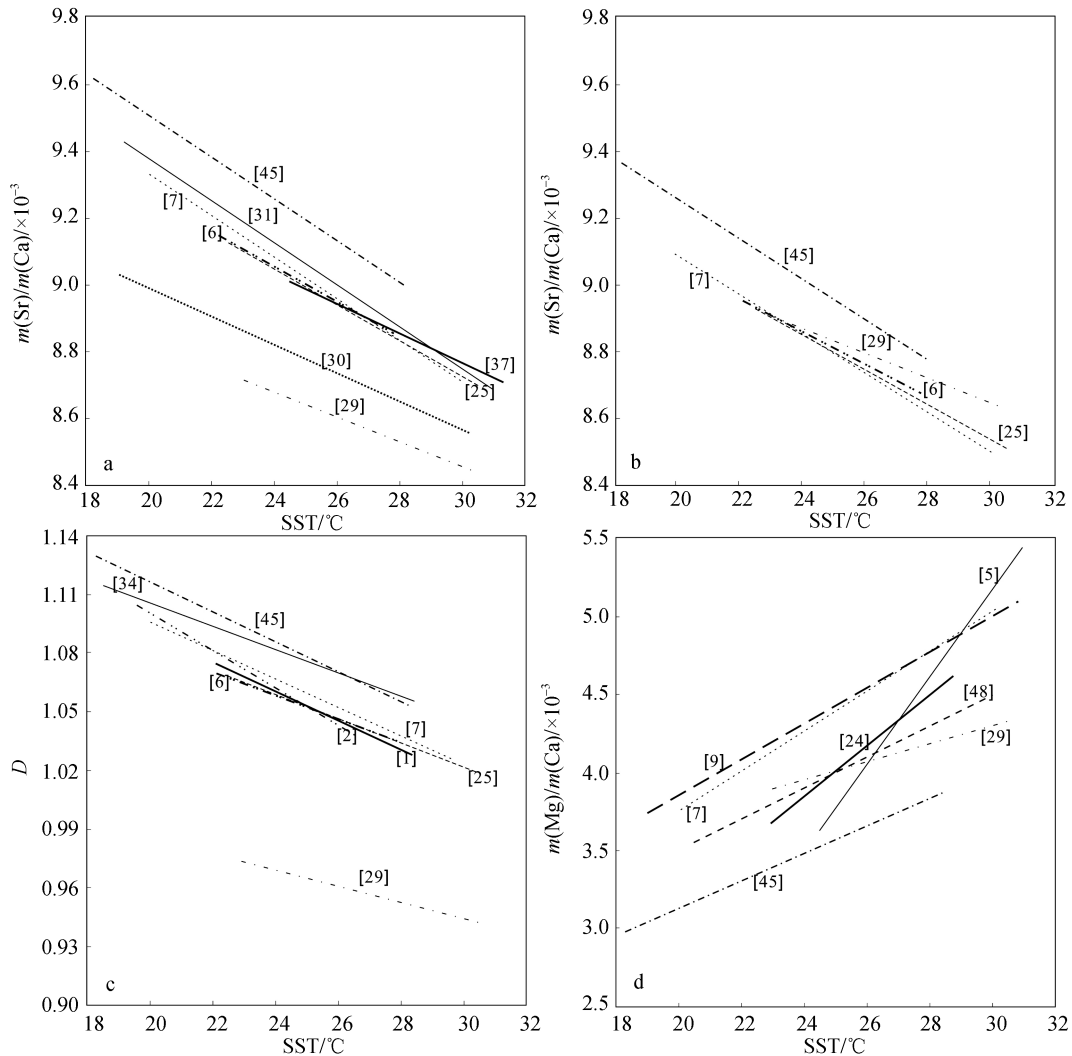


图 5 不同区域珊瑚 $m(\text{Me})/m(\text{Ca})$ -SST 温度计标定对比

Fig. 5 Comparison of the coral Me/Ca-SST calibrations in different sites

a. 南海、东海和三亚湾珊瑚 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ -SST 对比; b. 海水校正后的 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ -SST 对比; c. $D[m(\text{Sr})/m(\text{Ca})]$ -SST 对比; d. 先前发表的珊瑚 $m(\text{Mg})/m(\text{Ca})$ -SST 对比; [45]等为参考文献顺序号

a. the coral Sr/Ca-SST calibrations from the South China Sea and the East China Sea with Sanya; b. the Sr/Ca-SST calibrations by normalized to the seawater Sr/Ca ratios of Sanya; c. the corresponding $D[\text{Sr/Ca}]$ -SST relationships; d. the previously published coral Mg/Ca-SST calibrations

殖等)^[12, 44]都能影响珊瑚骨骼的钙化作用和微量元素组分, 有效地影响 $m(\text{Mg})/m(\text{Ca})$ 作为 SST 记录的重建。

3 结论

采用全谱直读的 ICP-AES 分析方法, 测定了海南岛南岸三亚湾海水 2008 年 9 月~2009 年 11 月周间隔取样的 Sr、Mg、Ca 的含量 $m(\text{Sr})$ 、 $m(\text{Mg})$ 、 $m(\text{Ca})$, 结果表明海水中 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 变化与全球各大洋和主要珊瑚礁区海水都有明显的高异常偏差, 而它们之间的 $m(\text{Mg})/m(\text{Ca})$ 变化的差异性却较小。整体上三亚湾地区全年的海水 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 变化趋势与

$m(\text{Mg})/m(\text{Ca})$ 相类似, 但是在大部分春季和秋末冬初的月份里波动变化幅度明显比 $m(\text{Mg})/m(\text{Ca})$ 的较大, 且体现了一定的差异性, 可能是在春末夏初和秋末冬初的两个过渡期里, 三亚的强降雨和地表径流共同作用引起的海水盐度变化导致了两者变化幅度的差异性。海水中约 1.2% 的 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 变化在计算珊瑚 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ -SST 标定时能引起 $\pm 2.7^\circ\text{C}$ 的 SST 偏差, 而约 1.5% 的 $m(\text{Mg})/m(\text{Ca})$ 变化只有 $\pm 1.2^\circ\text{C}$ 的 SST 偏差, 说明海水的 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 变化对珊瑚温度计的影响要明显地强于 $m(\text{Mg})/m(\text{Ca})$ 的变化, 在重建古 SST 时必须要考虑海水 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 的波动。在此基础上,

对不同站点建立的珊瑚 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 温度计进行了重新校正, 各标定之间的偏差明显地减小, 但各不相同, 南海和东海 4 个站点的 SST 差值均 $\leq 2^\circ\text{C}$ 。与分配系数法校正各标定温度计的对比分析, 表明了利用珊瑚的 $m(\text{Sr})/m(\text{Ca})$ 、 $m(\text{Mg})/m(\text{Ca})$ 重建古 SST 记录时必须综合考虑包括海水微量元素比值变化在内的各种影响因素对温度计标定的干扰。

致谢: 中国科学院南海海洋研究所海南热带海洋生物实验站的胡友木协助了部分样品的采集和测试工作, 在此表示衷心的感谢。

参考文献:

- [1] Beck J W, Edwards R L, Ito E, et al. Sea-surface temperature from coral skeletal strontium/calcium ratios[J]. *Science*, 1992, 257: 644-647.
- [2] de Villiers S, Shen G T, Nelson B K. The Sr/Ca-temperature relationship in coralline aragonite: influence of variability in $(\text{Sr}/\text{Ca})_{\text{seawater}}$ and skeletal growth parameters[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1994, 58: 197-208.
- [3] McCulloch M T, Gagan M K, Mortimer G E, et al. A high-resolution Sr/Ca and $\delta^{18}\text{O}$ coral record from the Great Barrier Reef, Australia, and the 1982-1983 El Niño[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1994, 58: 2747-2754.
- [4] Heiss G A, Camoin G F, Eisenhauer A, et al. Stable isotope and Sr/Ca-signals in corals from the Indian Ocean [C]//Lessios H A, Macintyre L G. *Proceedings of the 8th International Coral Reef Symposium(2)*. Panama: Smithsonian Tropical Research Institute, 1997: 1713-1718.
- [5] Watanabe T, Winter A, Oba T. Seasonal changes in sea surface temperature and salinity during the Little Ice Age in the Caribbean Sea deduced from Mg/Ca and $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ratios in coral[J]. *Marine Geology*, 2001, 173: 21-35.
- [6] 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[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1996, 60: 3849-3858.
- [7] Mitsuguchi T, Matsumoto E, Abe O, et al. Mg/Ca thermometry in coral skeletons[J]. *Science*, 1996, 274: 961-963.
- [8] Alibert C, McCulloch M T. Strontium/calcium ratios in modern *Porites* corals from the Great Barrier Reef as a proxy for sea surface temperature: calibration of the thermometer and monitoring of ENSO[J]. *Paleoceanography* 1997, 12: 345-363.
- [9] Wei G J, Sun M, Li X H, et al. Mg/Ca, Sr/Ca, U/Ca ratios of a *Porites* coral from Sanya Bay, Hainan Island, South China Sea and their relationships to sea surface temperature[J]. *Paleoceanography*, 2000, 162: 59-74.
- [10] Allison N, Finch A A, Sutton S R, et al. Strontium heterogeneity and speciation in coral aragonite: implications for the strontium paleothermometer[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2001, 65: 2669-2676.
- [11] Cohen A L, Layne G D, Hart S R. Kinetic control of skeletal Sr/Ca in a symbiotic coral: implications for the paleotemperature proxy[J]. *Paleoceanography*, 2001, 16: 20-26.
- [12] Allison N, Finch A A. High temporal resolution Mg/Ca and Ba/Ca records in modern *Porites lobata* corals[J]. *Geochim Geophys Geosyst*, 2007, 8: 1029-1477.
- [13] Guilderson T P, Fairbanks R G, Rubenstone J L. Tropical temperature variations since 20,000 years ago: modulating interhemispheric climate change[J]. *Science*, 1994, 263: 663-665.
- [14] Marshall J F, McCulloch M T. An assessment of the Sr/Ca ratio in shallow water hermatypic corals as a proxy for sea surface temperature[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2002, 66(18): 3263-3280.
- [15] Wilson T R S. Salinity and the major elements of sea water[C]//Rilly J P, Skirrow G. *Chemical Oceanography*. New York: Academy Press, 1975: 365-414.
- [16] Goldberg E D, Arrhenius G O S. Chemistry of Pacific pelagic sediments[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1973, 13: 153-212.
- [17] Swart P K. The strontium, magnesium and sodium composition of recent scleractinian coral skeletons as standards for palaeoenvironmental analysis[J]. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 1981, 34: 115-136.
- [18] Klein R T, Lohmann K C, Thayer W C. Sr/Ca and $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ in ratios in skeletal calcite of *Mytilus trossulus*: covariation with metabolic rate, salinity, and carbon isotopic composition of seawater[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1996, 60: 4207-4221.
- [19] Stoll H M, Schrag D P. Effects of Quaternary sea level cycles on strontium in seawater[J]. *Geochimica et*

- Cosmochimica Acta, 1998, 62: 1107-1118.
- [20] Guo L F, Zhu Y Z, Zhao H T. Contents of some elements in the seawater of the reef zone and adjacent sea area in Nansha Islands, the South China Sea[C]// Zhao H T, Song C J, Huang C L. Collection of Research Papers on Geophysics and Coral Reef of the Nansha Islands and their Adjacent Regions. Beijing: Science Press, 1992: 95-107.
- [21] Wei G J, Li X H, Nie B F, et al. High resolution Mg/Ca thermometer in *Porites lutea* from north of the South China Sea[J]. Chinese Science Bulletin, 1998, 15: 1658-1662.
- [22] Gagan M K, Ayliffe L K, Beck J W, et al. New views of tropical paleoclimates from corals[J]. Q Sci Rev, 2000, 19: 45-64.
- [23] de Villiers S, Nelson B K, Chivas A R. Biological controls on coral Sr/Ca and $\delta^{18}\text{O}$ reconstructions of sea surface temperature[J]. Science, 1995, 269: 1247-1249.
- [24] Sinclair D J, Kinsley L P J, McCulloch M T. High resolution analysis of trace elements in corals by laser ablation ICP-MS[J]. Geochim Cosmochim Acta, 1998, 62: 1889-1901.
- [25] Sun Y, Sun M, Lee T, et al. Influence of seawater Sr content on coral Sr/Ca and Sr thermometry[J]. Coral Reefs, 2005, 24: 23-29.
- [26] Schifano G. Temperature-magnesium relations in the shell carbonate of some modern marine gastropods[J]. Chem Geol, 1982, 35: 321-332.
- [27] Stoll H M, Schrag D P, Clemens S C. Are seawater Sr/Ca variations preserved in Quaternary foraminifera? [J] Geochim Cosmochim Acta, 1999, 63: 3535-3547.
- [28] Wang P X. Response of Western Pacific marginal seas to glacial cycles: paleoceanographic and sedimentological features[J]. Mar Geol, 1999, 156: 5-39.
- [29] 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[J]. 第四纪研究, 2004, 24(3): 325-331.
- [30] 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[J]. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 2005, 218(1-2): 57-73.
- [31] 刘羿, 彭子成, 程继满, 等. 海南岛东部海域滨珊瑚 Sr/Ca 比值温度计及其影响因素初探[J]. 第四纪研究, 2006, 26(3): 470-476.
- [32] Goldberg E D, Backer M, Fox D L. Microfiltration in oceanographic research [J]. Mar Res, 1952, 11: 194-204.
- [33] 李艳苹, 潘献辉, 刘小骐. ICP - AES 法测定海水中钾、钠、钙、镁、锂、锶、锰[J]. 中国给水排水, 2010, 26(4): 86-88.
- [34] Schrag D P. Rapid analysis of high-precision Sr/Ca ratios in corals and other marine carbonates[J] Paleoceanography, 1999, 14: 97-102.
- [35] de Villiers S. Seawater strontium and Sr/Ca variability in the Atlantic and Pacific oceans[J]. Earth Planet Sci Lett, 1999, 171: 623-634.
- [36] 张正斌, 陈镇东, 刘莲生, 等. 海洋化学原理和应用 [M]. 北京: 海洋出版社, 1999: 45-46.
- [37] Mitsuguchi T, Dang P X, Kitagawa H, et al. Coral Sr/Ca and Mg/Ca records in Con Dao Island off the Mekong Delta: Assessment of their potential for monitoring ENSO and East Asian monsoon[J]. Global and Planetary Change, 2008, 63: 341-352.
- [38] Sun Y, Sun M, Wei G, et al. Strontium contents of a *Porites* coral from the Xisha Island, South China Sea: a proxy for sea surface temperature of the 20th century[J]. Paleoceanography, 2004, 19: 1-10.
- [39] 吴日升, 李立. 南海上升流研究概述[J]. 台湾海峡, 2003, 22(2): 269-277.
- [40] 张黎明, 魏志远, 漆智平. 近 30 年海南不同地区降雨量和蒸发量分布特征研究[J]. 中国农学通报, 2006, 22(4): 403-407.
- [41] Gaetani G A, Cohen A L. Element partitioning during precipitation of aragonite from seawater: A framework for understanding paleoproxies[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2006, 70: 4617-4634.
- [42] Smith S V, Buddemeier R W, Redalje R C, et al. Strontium-calcium thermometry in coral skeletons[J]. Science, 1979, 204: 404-407.
- [43] 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: 331-333.
- [44] Weber J N. Incorporation of strontium into reef coral skeletal carbonate[J]. Geochim Cosmochim Acta, 1973, 37: 2173-2190.
- [45] Fallon S J, McCulloch M T, vanWoesik R, et al. Corals at their latitudinal limits: laser ablation trace element

- systematics in *Porites* from Shirigai Bay, Japan[J]. Earth Planet Sci Lett, 1999, 172: 221-238.
- [46] Kinsman D J J, Holland H D. The co-precipitation of cations with CaCO_3 -IV. The co-precipitation of Sr^{2+} with aragonite between 16°C and 96°C [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1969, 33: 1-17.
- [47] Marshall J F. Decadal-scale, high resolution records of sea surface temperature in the eastern Indian and southwestern Pacific oceans from proxy records of the strontium/calcium ratio of massive *Porites* corals[D]. Canberra: Research School of Earth Sciences, the Australian National University, 2000.
- [48] Fallon S J, McCulloch M T, Alibert C. Examining water temperature proxies in *Porites* corals from the Great Barrier Reef: a cross-shelf comparison[J]. Coral Reefs, 2003, 22: 389-404.
- [49] Gagnon A C, Adkins J F, Fernandez D P, et al. Sr/Ca and Mg/Ca vital effects correlated with skeletal architecture in a scleractinian deep-sea coral and the role of Rayleigh fractionation[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2007, 261: 280-295.
- [50] Gagan M K, Ayliffe L K, Hopley D, et al. Temperature and surface-ocean water balance of the Mid-Holocene tropical western Pacific[J]. Science, 1998, 279: 1014-1020.
- [51] McCulloch M T, Esat T. The coral record of last interglacial sea levels and sea surface temperatures[J]. Chem Geol, 2000, 169: 107-129.
- [52] Sinclair D J. High-spatial resolution analysis of trace elements in corals using laser ablation ICP-MS[D]. Canberra: Research School of Earth Sciences, the Australian National University, 1999.
- [53] Grottoli A G. Effect of light and brine shrimp on skeletal $\delta^{13}\text{C}$ in the Hawaiian coral *Porites compressa*: a tank experiment[J]. Geochim Cosmochim Acta, 2002, 66: 1955-1967.

Variations of Sr/Ca, Mg/Ca ratios in seawater of the Sanya Bay and response of coral trace element thermometer

WU Wei-zhong^{1, 2}, WEI Gang-jian¹, XIE Lu-hua¹, LIU Ying¹

(1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 2. Graduate School of China Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Received: Jul., 6, 2012

Key words: sea water; *Porites*; Sr/Ca and Mg/Ca ratios; trace elements thermometer; the Sanya Bay

Abstract: The contents of trace elements (Sr, Mg, Ca) in seawater obtained weekly, 2008 to 2009 from the Sanya Bay, the South Hainan Island were examined using, inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (ICP-AES). The results showed that the variation range of seawater Sr/Ca, Mg/Ca ratios were $8.558 \times 10^{-3} \sim 9.227 \times 10^{-3}$, and 4.924~5.403, respectively, which had an obviously high abnormal deviation compared with the global oceans and the main coral reef. Moreover, during the late spring, early summer and late autumn and early winter, the fluctuation amplitude of the seawater Sr/Ca ratios was relatively bigger than Mg/Ca ratios, and both showed some differences. At the same time, influence of variations of Sr/Ca, Mg/Ca ratios on the coral thermometer calibration, in time and regional space was analyzed. Based on this, the coral Sr/Ca thermometer established in different site was re-corrected and it was also compared with the distribution coefficient method. We believe that all kinds of factors including the seawater trace element ratio changes could cause interference to the thermometer calibrations and should be comprehensively considered when reconstructing the SST records by using the *Porites* corals Sr/Ca, Mg/Ca ratios, which has great significance for further understanding of the climate changes.

(本文编辑: 刘珊珊 李晓燕)