

造礁石珊瑚记录现代海洋生态环境信息研究进展

符 曲^{1,2}, 黄 晖^{1,*}, 练健生¹, 邱大俊¹

(1. 中国科学院南海海洋研究所, 广州 510301; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:造礁石珊瑚因其独特的生物学和生态学特性,已被广泛用作环境因子的代用指标。过去国内外的研究主要侧重于地质年代环境信息的记录,随着样品分析测试精度的提高,用造礁石珊瑚骨骼研究现代热带的生态环境也逐渐增多,尤其对于影响海洋生态环境的事件信息的记录。许多研究都证明了造礁石珊瑚骨骼中各种示踪剂在监测过去环境变化方面的有效性,对目前和将来的生态监控以及环境研究都具有广阔的前景。目前,珊瑚基础生理学的机制尚未完全探明,进一步了解珊瑚微观结构层次的生理机制是该领域研究的关键所在。我国学者已开展了南海西沙、南沙、台湾岛、海南岛、徐闻和涠洲岛等地区的造礁石珊瑚骨骼多种指标的研究。

关键词:造礁石珊瑚;生态环境信息;指标;海水表面温度(SST);环境污染事件

文章编号:1000-0933(2008)01-0367-09 中图分类号:Q14, Q178 文献标识码:A

Modern marine environment information records in hermatypic coral

FU Qu^{1,2}, HUANG Hui^{1,*}, LIAN Jian-Sheng¹, QIN Da-Jun¹

1 South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China

2 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(1): 0367 ~ 0375.

Abstract: Hermatypic coral has been widely used as proxy of environment factors because of its biological and ecological characteristics. Studies were focused on the paleoclimatic environment information records in the past. With the improved of sample analyse precision, coral skeleton has been more and more used in studies of modern tropical environment information, particularly in records of events which have given great impact on ocean environment. Results have proved that many trace elements in coral skeleton are good indicators in monitoring environment change and will be widely used in environment monitoring and studies in the future. At present, mechanism of coral physiology has not been completely proved up, more unfound details in coral micromechanism are the key of this field. In China, the study of multiform proxies of coral skeleton has been carry on, especially in Xisha Islands, Nansha Islands, Taiwan, Hainan, Xuwen and Weizhou Island.

Key Words: Hermatypic coral; environment information; proxy; Sea Surface Temperature(SST); environmental pollution event

造礁石珊瑚具有独特的生物学和生态学特性,由于对海洋环境物理和化学因素变化的灵敏度高,已被广泛

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30200039);广东省重大资助项目(2003A3050101)

收稿日期:2006-11-02; **修订日期:**2007-04-29

作者简介:符曲(1981~),女,广东省广州市人,硕士生,主要从事珊瑚礁生态与环境研究. E-mail: daisyf_1231@yahoo.com.cn

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: huanghui@scsio.ac.cn

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 30200039); Important Project of Guangdong (No. 2003A3050101)

Received date: 2006-11-02; **Accepted date:** 2007-04-29

Biography: FU Qu, Master candidate, mainly engaged in coral reef biology and environment. E-mail: daisyf_1231@yahoo.com.cn

用作环境因子的代用指标。造礁石珊瑚在生命活动过程中分泌并沉积碳酸钙,形成连续的骨骼生长层。珊瑚对生长条件要求严格,水温、盐度、光照、深度、透明度、基底和水动力条件^[1]等多种因素都对珊瑚的生长有综合性的影响。因此,造礁石珊瑚骨骼生长带详细记录了珊瑚生长历史和环境变化信息,尤其是对某些突发海洋环境事件的记录,是当前具有较高时间分辨率的海洋环境信息载体,具有多种生态环境因子的综合指示意义。

国内外学者对造礁石珊瑚记录环境信息已做了大量研究。过去的研究多侧重于长时间序列的古环境变化研究,对于近代的研究较少。近年来随着样品取样分析测试精度的提高,关于现代热带浅海的生态环境研究也逐渐增多。其中包括利用现生造礁石珊瑚骨骼重建近代高分辨率海洋表面温度(SST)记录、监测陆源输入物质和降水量的变化,尤其是利用造礁石珊瑚骨骼所包含的重金属元素追踪海洋环境的变化及海水污染事件,以及其他痕量元素代用指标记录并反映上升流、海水表面盐度(SSS)变化、新构造运动、影响海洋生态环境的事件、指示海水生产力的变化等方面的研究。我国学者也在南海开展了不少关于造礁石珊瑚骨骼生长率、 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\Delta^{14}\text{C}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 、Sr/Ca、Ba/Ca、Mg/Ca、U/Ca 等指标与南海环境因子关系的研究。

1 造礁石珊瑚骨骼记录的生态环境信息

1.1 热带海洋表面温度

1.1.1 生长率代用指标

温度是影响石珊瑚生长的最主要环境因子,造礁石珊瑚骨骼的生长率、密度和钙化率(生长率与密度的乘积)是研究环境和气候变化最主要和最基本的参数指标。国际上最早研究石珊瑚生长率与水温变化关系的专家是我国台湾的马廷英教授,他发表了《造礁珊瑚的成长率及其海水温度的关系》^[2]等一系列重要著作,提出石珊瑚骨骼生长带的组成模式,根据珊瑚骨骼生长带的宽度变化,可以推算其对应时间段的水温变化。聂宝符等用上述方法测量了西沙群岛和海南岛南部沿岸近百年来滨珊瑚的生长率与 SST 变化的关系,他认为在南海北部,由滨珊瑚的生长带宽后报南海过去的 SST 是行之有效的方法^[1]。何学贤等^[3]利用显微光密度计恢复了时间序列为 1937 ~ 1993 年的南海 SST 记录,结果与历史资料显著正相关。

生长率还被科学家尝试用来评价珊瑚礁的健康状况。Edinger 等^[6]评价了块状造礁石珊瑚骨骼生长率是否是珊瑚礁体健康程度的良好指标。他们发现爪哇海受陆源酸性物质污染的造礁石珊瑚骨骼密度比清洁海区低,但是骨骼钙化率却没有明显降低。他们认为单独的生长率并不是理想的珊瑚礁健康状况的指标,尤其在人为污染导致珊瑚礁退化的地区。高延展率和低骨骼密度可以作为污染海区珊瑚礁健康状况的一个指示,但是用组织同位素分析数据和侵蚀生物的数量作评价指标也许可靠性更高。

由于热带 SST 的年际变化很小且珊瑚骨骼的生长机制不明会带来不小的误差,例如有研究认为温度过高时珊瑚停止生长,导致生长率降低以致不能客观准确地反映 SST 变化^[4]。各种原因造成这类温度计的精度和分辨率总的来说是不高的,多用于时间精度为年的古气候环境 SST 研究。有最新研究利用超声波为造礁石珊瑚骨骼成像,最终可能达到在水下定量测量活珊瑚的骨骼密度的目标^[5],为珊瑚礁监测提供了新的技术支持。

1.1.2 Sr/Ca 值代用指标

Sr 在造礁石珊瑚骨骼中的含量是所有微量元素中最高的,沉淀后受环境影响不大,而海水中的 Ca 也被认为是稳定的,因此 Sr 的集聚基本上能反映骨骼形成的环境^[7]。Smith 等^[8]和 Beck 等^[9]都证明了造礁石珊瑚骨骼 Sr/Ca 值与 SST 间有很好的相关关系。de Villiers 等^[10]报道造礁石珊瑚 Sr/Ca 值随着骨骼生长率增加而减少,但后来的研究都表明造礁石珊瑚的生长率和钙化率对 Sr/Ca 值没有影响。尽管对珊瑚生理机制还有争议,但至今的实验数据都表明珊瑚文石和海水间的 Sr/Ca 分配系数是恒定的,造礁石珊瑚骨骼 Sr/Ca 值同 SST 有很好的线性相关关系。造礁石珊瑚骨骼 Sr/Ca 温度计的应用,被认为是古海洋学方面最突出的进展之一,是恢复过去 SST 记录的一项最有效的方法^[1]。

McCulloch 等^[12]利用 de Villiers 的 Sr/Ca 温度计标准,分析了 1978 ~ 1984 年澳大利亚潘多拉礁高精度(周)的 Sr/Ca 值记录,结果显示 Sr/Ca 记录受 SST 的影响呈季节性变化。在 1982 ~ 1983 年强厄尔尼诺事件

期间, Sr/Ca 值显示冬季 SST 突降至 18.5°C 。结果显示无论极高(引起白化)或极低($<18^{\circ}\text{C}$)的 SST 都会出现 Sr/Ca 的异常低值。刘羿等^[13]研究海南岛东部滨珊瑚 Sr/Ca 值发现海南岛东部 1986 年、1987 年和 1994 年夏季出现的是异常高的 Sr/Ca 比值,而且这 3a 中夏季最高的实测 SST 并没有超过珊瑚正常生长的温度范围。经过分析某些年份夏季和冬季在实测和计算的 SST 值之间有显著差异,提出了该区可能受到异常 ENSO 事件和上升流的影响。因此,造礁石珊瑚骨骼 Sr/Ca 值重建的长序列 SST 变化,除了可以探明海表温度变化的冷期、暖期、幅度和周期性外,还可能反过来研究 ENSO 事件的强度和周期以及上升流的特征和规律。

1.1.3 Mg/Ca 值、U/Ca 值代用指标

由于 Sr/Ca-SST 温度计分析成本昂贵且工作效率较低,很大程度上限制了 Sr/Ca 温度计的推广应用。骨骼中的其他元素比值,如 Mg/Ca、U/Ca 等也是 SST 的良好指示,并且随温度的相对变化率大(分别为约 $+2\%/^{\circ}\text{C}$ 和 $-4\%/^{\circ}\text{C}$ ^[14,15]),所以利用一些经济快速的分析方法,如等离子体质谱(ICP-MS)方法即可获得 1% 左右的分析精度,从而大大提高工作效率,具有较好的应用价值。Mitsuguchi 等^[14]利用等离子体光谱(ICP-AES)方法成功地建立了太平洋西部的滨珊瑚 Mg/Ca 温度计,开拓了这方面的研究领域。韦刚健等^[16]利用 ICP-MS 分析技术建立起适用于南海北部的高精度滨珊瑚 Mg/Ca 温度计,分辨率达 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。但是目前科学家们对控制 Mg 进入珊瑚骨骼的机制还不清楚,对 Mg 在珊瑚骨骼中赋存的状态和珊瑚中 Mg/Ca 值与 SST 正相关关系的解释都存在争议。

造礁石珊瑚 U/Ca 温度计也是具有极高研究价值和实用价值的研究项目。韦刚健等^[17]用同样的分析方法成功测量了取自南海北部的滨珊瑚样品中的微量铀,获得 0.5% 左右的精度,建立起采样地点海南岛三亚湾区的 U/Ca 温度计。有研究指出,海水的 U/Ca 值随环境变化有一定的变化,这种变化同样也影响该生境下生长的造礁石珊瑚骨骼 U/Ca 值,这样 U/Ca 值就不仅仅反映 SST 的变化。由于 Mg 和 U 进入造礁石珊瑚骨骼的机制不是像 Sr^{2+} 取代文石骨骼晶体中 Ca^{2+} 那样简单,因此 Mg/Ca、U/Ca 温度计未被推广使用,尽管如此 Mg/Ca、U/Ca 温度计在一定的精度范围内能满足研究要求,并且使用多种代用指标能互补不足,能对环境变化作出更准确合理的分析。

除了 SST 以外,造礁石珊瑚骨骼的各种痕量元素值都可能受珊瑚种群、地理位置、生长率、钙化率、海水本身变化、营养物供给、造礁石珊瑚本身的生物化学特征以及淡水注入等各种因素的影响。Fallon 等^[18]比较了 4 种过去研究中被认为是由 SST 控制的基本指标,结果显示 Mg/Ca 值和 U/Ca 值受除温度以外其它因素的影响较大,因此他认为 Sr/Ca 值才是可信度最高的、最接近单一受 SST 控制的代用指标,并且他认为 Sr/Ca 温度计的标准不是不变的,因此不同礁区建立的温度计不能互用。目前国际上还没有统一的造礁石珊瑚骨骼指标温度计,同种指标的温度计在各礁区也差异甚大,探明珊瑚生长机制成为了进一步研究的关键。

1.1.4 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素代用指标

1972 年,Weber 等^[19]首先发现造礁石珊瑚骨骼 $\delta^{18}\text{O}$ 与 SST 之间存在线性的关系,随后的大多数研究都指出,造礁石珊瑚骨骼 $\delta^{18}\text{O}$ 与 SST 之间在各种分辨率(年、季、月和周)的时间尺度上都有很好的相关性,SST 为影响造礁石珊瑚骨骼 $\delta^{18}\text{O}$ 的最主要因素。因此,在表层海水中氧同位素组成保持相对稳定变化的地区,骨骼中的 $\delta^{18}\text{O}$ 作为温度计具有很高分辨率,大约为 0.5°C ^[20,21]。目前,全球已有 100 多个造礁石珊瑚骨骼 $\delta^{18}\text{O}$ 与表层海水温度之间的经验公式,覆盖了世界上大部分的珊瑚礁区。

余克服等^[22]认为雷州半岛珊瑚岸礁区石珊瑚骨骼 $\delta^{18}\text{O}$ 可作为定量研究该礁区 SST 变化的温度计。陈镇东等^[23]研究台湾南部核电站附近海域造礁石珊瑚骨骼所记录的水温,样品 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素分析明确指出,入水口的造礁石珊瑚 $\delta^{18}\text{O}$ 数据与水温变化吻合;所记录的异常值与南海北部异常高温及异常低温出现时段也相符。

Sr/Ca 值和 $\delta^{18}\text{O}$ 指标被认为是目前分辨率最高的 SST 温度计^[24],而其他指标的分辨率亦可达到 0.5°C 左右。可根据研究要求选用不同的指标,方法上通过多种指标的叠加平均法可以进一步降低指标 SST 记录与实测 SST 的温差。造礁石珊瑚骨骼作为获得高精度 SST 记录的手段,对未设置监测站的广大珊瑚礁区的现场监

测具有现实意义。需要注意的是造礁石珊瑚骨骼 $\delta^{18}\text{O}$ 是 SST 和海水氧同位素组成的函数^[25], 后者与 SSS 变化具有同步性。因此在降水、蒸发和洋流等水平衡结果的影响强烈而 SST 季节性变化较小的地区, 利用造礁石珊瑚骨骼可以重建 SSS 和降水^[26]。在年际变化上 SST 是造礁石珊瑚骨骼 $\delta^{18}\text{O}$ 的主控因素, 但有研究表明这种主控作用呈季节性变化, SSS 对造礁石珊瑚 $\delta^{18}\text{O}$ 值的影响不可忽视^[27]。宋少华等^[28] 研究认为海南岛东岸沙老地区造礁石珊瑚 $\delta^{18}\text{O}$ 在季节变化上主要受 SSS 的制约, 在该地区直接用 $\delta^{18}\text{O}$ 对 SST 进行重建会造成一定偏差。

1.2 营养物质变化及陆源物质输入

除了高精度高分辨率造礁石珊瑚温度计的研究热点外, 珊瑚的诸多微量元素含量的变化也蕴含着丰富的生态环境信息。

Ba 在海水中的含量变化与营养物质循环密切相关^[29,30]。生活在海水中的生物, 如珊瑚、有孔虫等其碳酸盐骨骼及壳直接记录了海水中的 Ba 含量变化, 可以作为海水中营养物质的变化的示踪剂^[31]。另一方面, 沿岸海域河水输入对表层海水 Ba 含量的影响较大^[32,33], Ba 的变化也可以反映陆源物质输入的情况。Sinclair 等^[34] 采用 ICP-MS 分析方法研究了大堡礁 20 世纪 60 年代末期至 70 年代中期滨珊瑚样品的 Ba 含量。分析显示出在洪水发生期间, 造礁石珊瑚骨骼样品的 Ba/Ca 值大大增加, 甚至比正常高出 4 倍。韦刚健等^[35] 海南岛南部沿海的滨珊瑚 1976 ~ 1986 年的 Ba/Ca 比值变化(时间的分辨率在月以上), 认为海南岛南部及邻近地区季节降雨的变化所控制的陆源 Ba 输入是这些造礁石珊瑚 Ba/Ca 比值变化的重要控制因素。

可作为多种生态环境因子代用指标的 $\delta^{18}\text{O}$ 同样可用于陆源输入及降水量的研究。由于大量降水和汇入的河川径流可使表层海水的 $\delta^{18}\text{O}$ 显著降低, 造礁石珊瑚骨骼中的 $\delta^{18}\text{O}$ 可用来记录沿岸入海径流量, 建立珊瑚骨骼中 $\delta^{18}\text{O}$ 值与沿岸降水量或入海径流量相关的关系式^[36]。

造礁石珊瑚骨骼切片的荧光特性也广泛用于研究降水和径流量。Smith 等^[37] 研究了佛罗里达海湾的孔星珊瑚骨骼中荧光强度与沙克河湾等流域淡水流量之间有很好的相关性。方力行等^[38] 研究发现台湾南湾等地澄黄滨珊瑚和蜂巢珊瑚的骨骼生长带中相对荧光强度的富啡酸含量与当地降雨之间有很好的相关性。

1.3 上升流

由于深层较冷、营养盐丰富的海水入侵, 上升流海区的 SST 比当地海区要低而盐度要高, 对该海区生态系统产生重要的影响。海水参数的这些变化都将对造礁石珊瑚骨骼指标记录的数量产生影响。在过去的 20a 里, 已有许多关于表层海水与深层海水交换、主要的环流运动, 还有温跃层深度变化的研究。造礁石珊瑚骨骼记录提供了无论是监测数据或水样示踪分析都难以获得的连续数据。

在各种示踪剂中, $\Delta^{14}\text{C}$ 是研究海洋环流的最有效手段。海水的循环和混合作用是高分辨率的年际或季节尺度造礁石珊瑚骨骼 $\Delta^{14}\text{C}$ 最重要的控制因素。Guilderson 等^[39] 分析了西南太平洋亚热带地区过去 50a 的造礁石珊瑚骨骼高精度 $\Delta^{14}\text{C}$ 记录, 证明了 $\Delta^{14}\text{C}$ 记录存在着与上升流有关的 10‰ ~ 15‰ 的季节性循环。Lea 等^[31] 用东太平洋 Galapagos 岛地区造礁石珊瑚样品骨骼 1965 ~ 1978 年高精度 Ba/Ca 值记录研究当地上升流的强度变化以及与当地季风的关系, 反映该区有垂直上升流, 为表层温暖贫营养海水带来较冷的、营养盐丰富的深层海水。

上升流海区 Sr 含量和 Sr/Ca 比值较高, 尽管 Sr/Ca 值是相当可靠的 SST 代用指标, 但若干学者的研究表明在上升流的影响下, 海水中 Sr/Ca 值的恒定性可能发生改变, 从而影响保存在造礁石珊瑚骨骼内的 Sr/Ca 值信息。de Villiers 等^[40] 和 Marshall 等^[41] 研究海水中微量元素成分, 从海表面到海深 500m, Sr 含量从 87 $\mu\text{mol/kg}$ 上升到 88.5 $\mu\text{mol/kg}$; Sr/Ca 值从 8.48mmol/mol 上升到 8.64mmol/mol。我国南海地区由于其半封闭边缘海的性质, 海水 Sr/Ca 值的分布可能比开放大洋更为不均匀, 相对受到更多的非温度因素的影响^[13]。在研究南海造礁石珊瑚骨骼 Sr/Ca 值与环境变化关系时需要注意考虑沿岸上升流的影响。

1.4 新构造运动

在新构造运动研究中, 珊瑚礁记录将成为后报地震活动和火山活动的一种新方法。20 世纪 80 年代

Taylor 等用造礁石珊瑚研究过去的地震取得了成功,为记录过去的地震活动开辟了一条新的途径^[42]。珊瑚礁的生长上限为低潮面,珊瑚暴露于陆表约 1h 便要死亡,所以地壳升降运动将影响海平面的升降变化,它们两者的变化将直接影响珊瑚礁坪的发育。根据珊瑚因抬升而死亡的时间可以后报过去发生的地震,建立过去地震活动的历史。Taylor 等^[42]详细分析了瓦努阿图岛弧中部(主要是 Santo 和 Malekula 群岛)的珊瑚礁阶地和部分出露的珊瑚,认为珊瑚礁灰岩和珊瑚生长能为 1~1000a 时间尺度的构造运动提供宝贵的信息,肯定了珊瑚礁在构造运动研究中的意义;他利用造礁石珊瑚生长带确定珊瑚出露而死亡的时间,判别出 4 次主要的出露事件,这 4 次出露事件分别与 1946 年、1965 年、1971 年和 1973 年的 4 次地震时空相符。

Edwards 等^[43]通过瓦努阿图岛弧 3 个造礁石珊瑚的生长带和珊瑚出露而死亡所对应的时间证明了²³⁰Th 测年法是一种可靠的高精度测年方法,应用于近代珊瑚礁可测定近代地震发生的时间。南海西北部历史上地震活动也较频繁,1994 年 12 月 31 日和 1995 年 1 月 10 日在雷州半岛西南部海域发生了 6.1 级和 6.2 级地震,这两次地震对该区珊瑚礁的发育有较大的影响。詹文欢等^[44]根据雷州半岛西南部珊瑚礁坪高程测量结果、大型滨珊瑚生长上限及几千年来珊瑚礁被侵蚀的厚度推算,受这两次地震影响的珊瑚礁升降的幅度达 10~20cm。目前国内关于南海近代的新构造运动的研究仍较少,更多的火山活动、地壳升降运动及地震记录则有待今后进一步研究。

1.5 环境污染事件

珊瑚礁区生态环境污染主要来自于未经处理的排污和油气污染等,特别是城市污水和农业用水未经处理而直接排放入海导致浅海水域富营养化,引起珊瑚礁生态群落的退化和藻类爆发^[45]。造礁石珊瑚的骨骼生长带是追踪海水特性、营养盐水平和海洋环境污染物质的有效研究方法。尽管部分学者认为应先了解这些重金属元素进入骨骼的原理,但是用造礁石珊瑚骨骼内痕量元素富集浓度作为监测陆源污染物质输入海洋的一个方法的研究已有超过 30a 研究历史^[46,47],并且随着分析技术的发展,研究的痕量元素范围不断扩大,最常用的示踪剂包括 Al、Ba、Cd、Cu、Cr、Fe、Hg、Mn、Pb、Sn、V 和 Zn^[48~57],其他示踪剂如 P^[58]和亚硫酸盐^[59]也有研究。最近激光消融 ICP-MS (LAICP-MS)技术的进步使科学家们证明了稀土元素(REE)在环境研究中的潜力^[59]。

造礁石珊瑚骨骼中痕量金属元素的突然增加通常与当地的人为污染事件有关。Scott 等^[48]研究发现香港受污染河口的造礁石珊瑚骨骼包含铝、镉、铜、铅、铀、钒和钇等重金属元素,不溶解酸性物质含量也偏高,并且含量随着时间和污染的程度增加而升高。大部分研究都说明造礁石珊瑚骨骼能够很好得记录下人为因素诱导的污染^[49~54]。采矿业一直是海水的重要长期污染源之一。如 Fallon 等^[49]发现巴布亚新几内亚造礁石珊瑚骨骼中 3 种 REE 的增加与当地采矿业的运作非常一致。David 研究了菲律宾 Marinduque 岛西部沿岸采矿业尾矿物质污染当地海域的历史记录,认为造礁石珊瑚骨骼重金属含量可以准确反映周围海水受重金属污染的范围和程度^[50]。

铅(Pb)是典型的与工业污染有关的有害元素,造礁石珊瑚骨骼中的 Pb 可以示踪海水的受污染情况。Dodge 等^[51]在 1984 年就研究过维尔京群岛造礁石珊瑚骨骼 Pb 的含量,证明了受污染礁区石珊瑚骨骼 Pb 含量是未受污染礁区的 5 倍以上,并且全球工业化进程以来环境背景的 Pb 增加使未受污染礁区的样品 Pb 含量一直呈明显的增加趋势。Cd 是营养元素,也是与工业污染有关的有害元素。Shen 等^[52]发现 20 世纪海水中 Pb 含量的变化与工业化的进程中 Cd 释放量的增加极为一致。余克服等认为造礁石珊瑚可以记录大亚湾海区重金属的年际变化特征,造礁石珊瑚在海洋环境特别是重金属污染的监测方面是可行的^[53]。

汞(Hg)是其中一种毒性最强的金属元素之一,它广泛存在于各类型海洋生态系统中。Hg 污染物经过长时间的积累已经对许多海区的海洋生态系统产生了严重的影响。Guzman 等^[54]研究了加勒比海地区沿岸 23 个采样点的造礁石珊瑚骨骼,结果显示整个区域的样品 Hg 污染物水平高,说明了 Hg 污染已经影响该地区整个生态系统,证明了造礁石珊瑚骨骼总 Hg 含量可作为环境指示物。他进一步比较发现 Hg 的含量水平与具有明显陆源特征的 Al、Fe 没有相关性,由此推测 Hg 元素的主要来源不是径流带来的陆源物质,而是殖民时期

金矿业、农业化肥的过度使用、森林砍伐等。

石油泄漏事件在世界范围内时有发生,如 1986 年巴拿马的加勒比海石油泄漏引起珊瑚礁、海草床和红树林的大规模破坏。巴拿马地区是世界最大的石油生产地之一,石油污染严重威胁了当地的海洋环境,生态学的证据说明,石油工业是造成该地区珊瑚礁退化的主要原因^[54]。原油泄漏后长达 5a 的生态评价结果表明,石油对造礁石珊瑚有大范围的致死和亚致死效应^[60]。钒(V)是一种原油中富含的元素,可作为追踪石油污染的典型指示物。与其它金属相比,V 用于环境研究的一个主要优点是不会因采样和分析过程中的污染而产生。Guzman 等^[55]分析了加勒比石珊瑚骨骼中 V 的集聚,追踪上世纪巴拿马的石油污染事件,他认为造礁石珊瑚骨骼内 V 含量对石油污染具有指示作用。

在开发海洋的历史进程中,人类一直面临着防除海洋附着生物的问题,在众多防除海洋污损生物的方法中,采用船底防污漆是船舶防污方法中最方便可行的手段。海洋防污漆普遍含有锡(Sn)和铜(Cu)这两种元素并逐渐释放到周围的海水中,尤其是 20 世纪 70 年代以后推出的有机锡高聚物自抛光防污涂料,它能保持缓慢的聚合物溶解性,在有效防除污损生物的同时也引起了严重的环境污染问题。Mayuri 等^[56]研究西太平洋群岛滨珊瑚骨骼 Cu/Ca 值和 Sn/Ca 值较高的时期出现在 20 世纪 60 年代末期至 80 年代末期,这段时间也是有有机锡聚合物防污漆在全世界大量使用的时期。但随着各国(法国、美国、日本和澳大利亚等)陆续颁布法规限制有机锡防污漆的使用,90 年代开始这两种比值明显下降。实验表明造礁石珊瑚骨骼 Sn 和 Cu 含量是可作为海洋污染的又一个重金属代用指标。

除了重金属元素追踪海水污染的研究,同位素分析方法也是研究污染物对珊瑚礁生态影响的一项行之有效的。Guy 等^[61]通过分析巴厘岛和印度尼西亚的滨珊瑚骨骼 $\delta^{15}\text{N}$ 追踪沿岸海域营养物质输入的历史。他认为滨珊瑚骨骼组织 $\delta^{15}\text{N}$ 可以作为追踪记录过去营养物质的来源,并且 $\delta^{15}\text{N}$ 值与降水量负相关,农业方式向西方农业模式转变是导致巴厘岛沿岸珊瑚礁退化的一个原因。

稀土元素因其独特的化学性质成为近几年造礁石珊瑚载体研究中的一个热点。Wyndham 等^[57]认为造礁石珊瑚骨骼中 REE 是海水溶解态 REE 含量良好的代用指标。他利用激光消融术-等离子体-质谱(LA-ICP-MS)分析技术获得了大堡礁滨珊瑚周分辨的 REE、Mn 和 Ba 记录,他指出造礁石珊瑚中 REE 和 Mn 的含量可以用来指示海水生产力的变化,并认为骨骼 REE 和 Mn 记录可认为是沿岸海水生物活性的一个有效指标。

2 研究趋势与展望

造礁石珊瑚有效地记录了全球环境变化的诸多信息,已成为研究过去(如末次间冰期以来)和近代(如数十至数百年来)的气候-环境变率和可预测性(PAGES-CLIVAR)领域重要的环境载体。

无论在发达国家或发展中国家,沿岸地区仍然是最敏感、受人类影响最强烈的,珊瑚礁区和沿岸海区的污染是全球许多地区都存在的现象。人类活动诱发近岸环境污染会导致海洋环境中某些痕量元素浓度大大增加,由于热带地区的强降水可以产生含大量沉积物的入海冲淡水,因此这种情况在热带地区尤为典型。对于沿岸区域的管理来讲,长期监测这些痕量元素的污染是非常重要的。由于海陆边缘区域快速的物理化学变化,生态环境监测工作在许多热带海区珊瑚礁仍然处于起步阶段。尽管各种元素进入造礁石珊瑚骨骼的机制尚未完全揭晓,但是自从 Howard 和 Brown 评价珊瑚礁中的重金属以来,许多研究都证明了造礁石珊瑚骨骼中各种示踪剂在监测过去环境变化方面的有效性,其内含的指标与多种环境因子的关系公式业已广泛运用,在目前和将来的生态监控以及环境研究都具有广阔的前景。为了获得真正高精度的监测工具急待解决的问题是了解各种元素如何进入造礁石珊瑚骨骼中的机制^[62],尤其在虫黄藻如何调节总金属元素浓度的问题上存在分歧,造成了造礁石珊瑚骨骼中各种代用指标与环境因子之间关系的不确定。因此,该领域的复杂性使领域研究由生态系统层次进入到微观结构层次。仪器和技术的不断更新改进对进一步了解珊瑚基础生理学的机制。热带造礁石珊瑚作为海洋生物地球化学与生态系统整合研究(MBER)的主要载体,将成为未来 10~20a 内我国海洋生态系统基础研究的重要发展方向之一^[13]。

在全球环境变化研究中,为了能够建立更好的厄尔尼诺预测模型,有必要追溯上几个世纪厄尔尼诺现象

发生的记录,因此时间序列较长的造礁石珊瑚记录被应用于重建有仪器监测前的热带海洋气候变化。海水盐度、大洋环流对 ENSO 事件研究非常重要,利用造礁石珊瑚骨骼内含的各种指标可以得到长时间序列的盐度及水循环资料,为研究热带海洋 SST 的变化和相关的海-气相互作用等全球变化事件打下了坚实的基础,弥补了实验室仪器对气象记录的不足。并且尽管近代海洋监测点的增多使我们较之前更容易获得丰富的数据资料,但是监测仪器的分布也不可能遍布珊瑚礁区的每个角落。赤道太平洋地区造礁石珊瑚代用指标 SST 记录和珊瑚数据监测设点问题的解决,说明即使用少量设置位置好的取样点也足以解决全球 SST 变化的主导模式^[63]。

我国诸多学者已开展了南海西沙、南沙、台湾岛、海南岛、徐闻和涠洲岛等地区的造礁石珊瑚骨骼多种指标的研究,主要集中研究各代用指标与 SST 变化关系,而记录其他生态环境因子的研究方兴未艾。目前我国南海造礁石珊瑚信息载体的工作相对落后,首先是要建立南海各地区目前国际上较为成熟的气候代用指标 $\delta^{18}\text{O}$ 和 Sr/Ca 比值记录数据库,为气候模拟提供必要的数据基础^[13]。环境变化、保护珊瑚礁意识的增加、珊瑚礁保护区以及珊瑚礁长期监测网络的建立^[45],成为该领域的发展的强大推动力。

References:

- [1] Nie B F, Chen T G, Liang M T. The Relationship Between Reef Coral and Environmental Changes of Nansha Islands and Adjacent Regions. In: Zhong R S ed. Beijing: Science Press, 1997. 52—58.
- [2] Ma T Y H. The growth rate of reef corals and its relation to sea water temperature. *Palaeontol Sinica*, Ser. B, 1937, 16 (1): 1—226.
- [3] He X X, Peng Z C, Wang Z R, et al. Reconstructing of Sea Surface Temperature in South China Sea by Using Image Density of Coral X-ray Photograph. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55 (2): 183—190.
- [4] John F M, Malcolm T M. An assessment of the Sr/Ca ratio in shallow water hermatypic corals as a proxy for sea surface temperature. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2002, 66 (18): 3263—3280.
- [5] Cleveland R O, Cohen A L, Roy R A, et al. Imaging coral II. using ultrasound to image coral skeleton. *Subsurface Sensing Technologies and Applications*, 2004, 5: 43—61.
- [6] Edinger E N, Limmon G V, Jompa J, Widjajmoko W, et al. Normal coral growth rates on dying reefs: are coral growth rates good indicators of reef health? *Marine Pollution Bulletin*, 2000, 40: 404—425.
- [7] Houck J E, Buddemeier R W, Smith S V, et al. The response of coral growth rate and skeletal strontium content to light intensity and water temperature. *Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Science*, 1977, 2: 426—431.
- [8] Smith S V, Buddemeier R W, Redalje R C, et al. Strontium-Calcium thermometry in coral skeletons. *Science*, 1979, 204: 404—407.
- [9] Beck J W, Edwards R L, Ito E, et al. Sea surface temperature from coral skeletal strontium/calcium ratios. *Science*, 1992, 257: 644—647.
- [10] de Villiers S, Nelson B K, Chivas A R. Biological controls on coral Sr/Ca and O reconstructions of Sea Surface Temperatures. *Science*, 1995, 269: 1247—1249.
- [11] Sun Y, Sun M, Lee T, Nie B. Influence of seawater Sr content on coral Sr/Ca and Sr thermometry. *Coral Reefs*, 2005, 24: 23—29.
- [12] 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 1982-83 El Niño. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1994, 58: 2747—2754.
- [13] Liu Y, Peng Z C, Cheng J M. The relationship between Sr/Ca values of *Porites* coral and SST values in eastern Hainan Island at the north of South China Sea and its influence factors. *Quaternary Sciences*, 2006, 26 (3): 470—476.
- [14] Mitsuguchi T, Matsumoto E, Abe O, et al. Mg/Ca thermometry in coral skeletons. *Science*, 1996, 274: 961—963.
- [15] Shen G T, Dunbar R B. Environmental controls on uranium in reef corals. *Geochim Cosmochim Acta*, 1995, 59: 2009—2024.
- [16] Wei G J, Li X H, Nie B F, et al. High-resolution Mg/Ca thermometry of *Porites* corals from northern South China Sea. *China Science Bulletin*, 1998, 43 (15): 1658—1661.
- [17] Wei G J, Li X H, Liu H C, Sun M. Analyses of trace uranium of coral samples by ID-ICP-MS method and applications to high resolution U/Ca thermometer. *Geochimica*, 1998, 27 (2): 125—131.
- [18] Fallon S J, McCulloch M T, Alibert C. Examining water temperature proxies in *Porites* corals from the Great Barrier Reef: a cross-shelf comparison. *Coral Reefs*, 2003, 22 (8): 389—404.
- [19] Weber J N, Woodhead P M J. Temperature dependence of Oxygen-18 concentration in reef coral carbonates. *Journal of Geophysical Research*, 1972, 77 (3): 463—473.

- [20] McConnaughey T A. $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ isotopic disequilibria in biological carbonates: I Patterns. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1989, 53: 151 — 162.
- [21] Wellington G M, Dunbar R B, Merlen G. Calibration of stable oxygen isotope signatures in Galapagos corals. *Paleoceanography*, 1996, 11: 467 — 480.
- [22] Yu K F, Huang Y S. A monthly resolution $\delta^{18}\text{O}$ thermometer of a *Porites Lutea* coral from Leizhou Peninsula. *Quaternary Sciences*, 1999, 1: 67 — 71.
- [23] Chen Z D, Wang Z H, Song K Y, *et al.* Water temperature records from corals near the nuclear power plant in southern Taiwan. *Science in China (Series D)*, 2000, 30(6): 663 — 668.
- [24] Stephens C L, Quinn T M, Taylor F W, *et al.* Assessing the reproducibility of coral-based climate records. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(10): 1029.
- [25] Gagan M K, Ayliffe L, Beck J W, *et al.* New views of tropical paleoclimates from corals. *Quaternary Science Reviews*, 2000, 19: 45 — 64.
- [26] Le Bec N, Juillet-Leclerc A, Corregge T, *et al.* A coral $\delta^{18}\text{O}$ record of ENSO driven sea surface salinity variability in Fiji (south-western tropical Pacific). *Geophysical Research Letters*, 2000, 27: 3897 — 3900.
- [27] Fells T, Pätzold J, Loya Y, *et al.* A coral oxygen isotope record from the northern Red Sea documenting NAO, and North Pacific teleconnections on Middle East climate variability since the year 1750. *Paleoceanography*, 2000, 15(6): 679 — 694.
- [28] Song S H, Zhou W J, Peng Z C, *et al.* Response to environmental Conditions of coral $\delta^{18}\text{O}$ of *Porites Lutea* from Shalao, Hainan island. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2006, 26(4): 23 — 28.
- [29] Falkner K K, Klinkhammer G P, Bowers T S, *et al.* The behavior of barium in anoxic marine waters. *Geochim Cosmoch Acta*, 1993, 57: 537 — 554.
- [30] Dymond J, Suess E, Lyle M. Barium in deep sea sediment: A proxy geochemical proxy for paleoproductivity. *Paleoceanography*, 1992, 7: 163 — 181.
- [31] Lea D W, Shen G T, Boyle E A. Coralline barium records temporal variability in equatorial Pacific upwelling. *Nature*, 1989, 340: 373 — 376.
- [32] Coffey M, Dehairs F, Collette O, *et al.* The behavior of dissolved barium in estuaries. *Estuarine Coastal Shelf Sci.*, 1997, 45: 113 — 121.
- [33] Shaw T J, Moore W S, Kloepfer J, *et al.* The flux of barium to the coastal waters of the southeastern USA: The importance of submarine groundwater discharge. *Geochim Cosmoch Acta*, 1998, 62: 3047 — 3054.
- [34] Sinclair D J, McCulloch M T. Corals record low mobile barium concentrations in the Burdekin River during the 1974 flood: evidence for limited Ba supply to rivers? *Palaeogeography*, 2004, 214: 155 — 174.
- [35] Wei G J, Li X H, Nie B F, *et al.* Seasonal ventilation of the Ba/Ca of the *Porites* corals from northern South China Sea: Patterns and their environmental implication. *Geochimica*, 2001, 29(1): 67 — 72.
- [36] Cole J E, Fairbanks R G, Shen G T. Recent variability in the Southern Oscillation: Isotopic results from a Tarawa Atoll coral. *Science*, 1993, 260: 1790 — 1793.
- [37] Smith T J, Hudson J H, Robblee M B, *et al.* Freshwater flow from the everglades to Florida Bay: A historical reconstruction based on fluorescence banding in the coral *Solenastrea bournoni*. *Bull. Mar. Sci.*, 1989, 44: 274 — 282.
- [38] Fang L S, Chou Y C. Concentration of fulvic acid in the growth bands of hermatypic corals in relation to local precipitation. *Coral Reefs*, 1992, 11: 187 — 191.
- [39] Guilderson T P, Schrag D P, Goddard E, Kashgarian M, *et al.* Southwest subtropical Pacific surface water radiocarbon in a high-resolution coral record. *Radiocarbon*, 2000, 42: 249 — 256.
- [40] de Villiers S. Seawater strontium and Sr/Ca variability in the Atlantic and Pacific oceans. *Earth and Planetary Science Letters*, 1999, 171(4): 623 — 634.
- [41] 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. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2002, 66(18): 3263 — 3280.
- [42] Taylor F W, Jouannic C, Bloom A L. Quaternary uplift of the Tortes Islands, Northern New Hebrides Frontal Arc: Comparison with Santo and Malekula Islands, Central New Hebrides Frontal Arc. *Geology*, 1985, 93: 419 — 438.
- [43] Edwards R L, Taylor F W, Wasserburg G J. Dating earthquakes with high-precision thorium -230 ages of very young corals. *Earth and Planetary Science Letters*, 1988, 90(4): 371 — 381.
- [44] Zhan W H, Zhu Z Y, Yao Y T, *et al.* Neotectonic movement recorded in coral reefs in the northwestern South China Sea. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(1): 77 — 84.
- [45] Zhao M X, Yu K F, Zhang Q M. Review on coral reefs biodiversity and ecological function. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26: 186 — 194.
- [46] Barnard L A, Macintyre I G, Pierce J W. Possible environmental index in tropical reef corals. *Nature*, 1974, 252: 219 — 220.

- [47] St John B E. Heavy metals in the skeletal carbonates of scleractinian corals. In: Cameron, A M. Proc. 2nd Int. Coral Reef Symp, 1974. 461—469.
- [48] P J B Scott. Chronic pollution recorded in coral skeletons in Hong Kong. *Experimental Marine Biology and Ecology*, 1990, 139(1~2): 51—64.
- [49] Fallon S J, White J C, McCulloch M. Porites corals as recorders of mining and environmental impacts: Misima Island, Papua New Guinea. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2002, 66: 45—62.
- [50] David C P. Heavy metal concentrations in growth bands of corals: a record of mine tailings input through time (Marinduque Island, Philippines). *Mar. Pollut. Bull.*, 2003, 46: 187—196.
- [51] Dodge R E, Gilbert T R. Chronology of lead pollution contained in banded coral skeletons. *Marine Biology*, 1984, 82(1): 9—13.
- [52] Shen G T, Boyle E A. Determination of lead, cadmium and other trace metals in annually-banded corals. *Chem. Geol.*, 1988, 67, 47—62.
- [53] Yu K F, Chen T G, Lian J S, *et al.* Annual changes of heavy metals in coral *Platygyra* in Daya bay and their marine environment implication, 2002, 22(3): 231—235.
- [54] Guzman H M, Jackson J B C Weil, *et al.* Short-term ecological consequences of a major oil spill on Panamanian subtidal reef corals. *Coral reefs*, 1991, 1: 1—12.
- [55] Guzman H M, Jarvis K E. Vanadium century record from Caribbean Reef corals: A tracer of oil pollution in Panama. *Ambio*, 1996, 25: 523—526.
- [56] Mayuri Inouea, Atsushi Suzukib, Masato Noharab, *et al.* Coral skeletal tin and copper concentrations at Pohnpei, Micronesia: possible index for marine pollution by toxic anti-biofouling paints. *Environmental Pollution*, 2004, 129: 399—407.
- [57] Wyndham T, McMulloch M, Fallens, *et al.* High-resolution coral records of rare Earth elements in coastal seawater. Biogeochemical cycling and a new environmental proxy. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, 68(9): 2067—2080.
- [58] Dodge R E, Jickells T D, Knap A H, Boyd, *et al.* Reef-building coral skeletons as chemical pollution (phosphorus) indicators. *Mar. Pollut. Bull.*, 1984, 15: 178—187.
- [59] Tsukamoto S, Heikoop J M. Sulfite radicals in banded coral. *Appl. Radiat. Isotopes*, 1996, 47: 1437—1441.
- [60] Guzman H M, Burns K A, Jackson J B C. Injury, regeneration and growth of Caribbean reef corals after a major oil spill in Panama. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 1994, 105: 231—241.
- [61] Guy S Marion, Robert B Dunbar, David A Mucciarone. Coral skeletal $\delta^{15}\text{N}$ reveals isotopic traces of an agricultural revolution. *G S Marion et al. Marine Pollution Bulletin*, 2005, 50: 931—944.
- [62] Cohen A L, McConnaughey T A. Geochemical perspectives on coral mineralization. *Rev mineral. Geochem*, 2003, 54: 151—187.
- [63] Evans M E. Sea Surface Temperature Field Reconstruction from Coral Data: Methodology and Application. Ph. D. Thesis, Columbia University, 1999. 177.

参考文献:

- [1] 聂宝符, 陈特固, 梁美桃, 等. 南沙群岛及邻近礁区造礁珊瑚与环境变化的关系. 北京: 科学出版社, 1997. 52~58.
- [2] 马廷英. 造礁珊瑚的成长率及其海水温度的关系. *古生物学*, 1937, 16(1): 1~226.
- [3] 何学贤, 彭子成, 王兆荣等. 利用珊瑚的影响密度恢复南海海表温度. *地理学报*, 2000, 55(2): 183~190.
- [13] 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. *第四纪研究*, 2006, 26(3): 470~476.
- [16] 韦刚健, 李献华, 聂宝符, 等. 南海北部滨珊瑚高分辨率 Mg/Ca 温度计. *科学通报*, 1998, 43(15): 1658~1661
- [17] 韦刚健, 李献华, 刘海臣, 等. 珊瑚中微量铀的 ID-ICP-MS 高精度测定及其在珊瑚 U/Ca 温度计研究中的应用. *地球化学*, 1998, 27(2): 125~131.
- [22] 余克服, 黄耀生, 陈特固, 等. 雷州半岛造礁珊瑚 *Porites lutea* 月分辨率的 $\delta^{18}\text{O}$ 温度计研究. *第四纪研究*, 1999, 1: 67~71.
- [23] 陈镇东, 汪中和, 宋克义, 王冰洁. 台湾南部核能电厂附近海域珊瑚所记录的水温. *中国科学(D 辑)*, 2000, 30(6): 663~668.
- [27] 宋少华, 周卫健, 彭子成, 等. 海南岛滨珊瑚 $\delta^{18}\text{O}$ 对环境条件的响应. *海洋地质与第四纪地质*, 2006, 26(4): 23~28.
- [44] 詹文欢, 朱照宇, 姚衍桃, 等. 南海西北部珊瑚礁记录所反映的新构造运动. *第四纪研究*, 2006, 26(1): 77~84.
- [45] 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.
- [53] 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(3): 231~235.