

李悦儿, 余克服, 颜廷礼, 江蕾蕾. 2023. 中全新世海南潭门滨珊瑚的生长率特征及其气候意义. 热带地理, 43 (10): 1843-1855.

Li Yue'er, Yu Kefu, Yan Tingli, and Jiang Leilei. 2023. Growth Rate of *Porites* Corals from Tanmen, Hainan Island: Climatic Significance during Mid-Holocene. *Tropical Geography*, 43 (10): 1843-1855.

中全新世海南潭门滨珊瑚的生长率特征及其气候意义

李悦儿^{1a,b,c}, 余克服^{1a,b,c,2}, 颜廷礼^{1a,b,c}, 江蕾蕾^{1a,b,c}

[1. a. 广西大学 海洋学院; b. 广西南海珊瑚礁研究重点实验室; c. 珊瑚礁研究中心, 南宁 530004;

2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519080]

摘要: 珊瑚生长率是珊瑚古气候研究的重要指标, 其反映珊瑚生长快慢, 并提供高分辨率的海水表层温度变化信息。中全新世作为当前全球变暖的地质历史相似型, 利用珊瑚生长率重建该时期的气候环境状况对于理解现代气候变化的过程及其机制具有重要的参考价值。文章对采自海南潭门珊瑚岸礁的23段中全新世(6143—4356 a BP)滨珊瑚进行生长率分析, 并基于该区域现代(2005—2021 AD)滨珊瑚生长率与SST的关系重建了中全新世期间共406 a的年均SST序列。结果显示: 1) 中全新世滨珊瑚生长率的变化范围为0.607~1.670 cm/a, 均值为1.079 cm/a, 且存在明显的波动变化过程; 2) 基于生长率重建的中全新世平均SST为25.7±0.54℃, 这与全球变暖程度加剧背景下的现代海温相近; 中全新世年均SST的变化范围为24.7~26.8℃, 其中5860、5660和5160 a BP为3个显著的低温期; 3) 对比现代与中全新世(5427—5394、5243—5209、4515—4456和4404—4356 a BP)珊瑚生长率的频谱周期, 发现现代与中全新世珊瑚的生长率均存在显著的3~7 a ENSO周期, 但中全新世ENSO主周期改变且频率显著降低, 表明中全新世的ENSO活动总体偏弱; 概率密度函数统计进一步显示中全新世期间ENSO变率存在逐渐增强的趋势。

关键词: 海表温度; ENSO; 中全新世; 珊瑚生长率; 南海北部

中图分类号: P736.4

文献标志码: A

文章编号: 1001-5221(2023)10-1843-13

DOI: 10.13284/j.cnki.rddl.003748

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



造礁珊瑚作为理想的重建高分辨率气候记录的海洋资料, 近数十年来珊瑚重建历史时期月-年分辨率气候环境变化的研究取得丰硕成果。其中, 对于珊瑚骨骼生长条带的认识和理解是将珊瑚作为高分辨率气候重建的重要基础。中国珊瑚生长率的研究, 最早始于民国时期, 马廷英(1936; 1937)于1936年4—9月赴东沙群岛调查研究现代造礁石珊瑚成长率, 并指出造礁珊瑚成长率确不失为研究古气候的一个可靠工具; 之后由聂宝符于1984年开始使用“珊瑚生长率”这一术语(聂宝符, 1984),

并系统介绍了珊瑚生长率的研究地点、珊瑚种类的选择、采样要求及生长率获取、测量、拼接方法等(聂宝符等, 1997)。珊瑚生长率是造礁珊瑚最基本的生长参数, 表示珊瑚骨骼生长速率, 即珊瑚骨骼沿最大生长轴每年所增长的量, 以cm/a或mm/a为单位, 在X光片上珊瑚生长率表现为一组黑白条带之间的间隔距离(Knutson et al., 1972)。此外, 珊瑚生长率不受后期成岩作用改变(Reuter et al., 2005), 能提供准确的年分辨率的气候环境变化信息, 并且珊瑚骨骼的地球化学指标分析也需在其构

收稿日期: 2023-04-07; 修回日期: 2023-08-13

基金项目: 国家自然科学基金项目“全新世南海珊瑚礁发育的时-空差异及其对全球变暖的适应机制”(42030502); “印太交汇区代表性物种的生物多样性演变及生态功能”(42090041); 广西研究生教育创新计划项目“海南潭门岸礁珊瑚记录的南海北部中全新世高分辨率气候变化”(YCSW2023085)

作者简介: 李悦儿(1999—), 女, 浙江长兴人, 硕士研究生, 主要从事珊瑚古气候研究, (E-mail) yueeeceer@126.com;

通信作者: 余克服(1969—), 男, 湖北公安人, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事南海珊瑚礁地质和生态环境研究, (E-mail) kefuyu@scsio.ac.cn。

建的年代框架下进行 (Tudhope, 1994), 因此珊瑚生长率的研究发展至今仍具有不可或缺的意义。

珊瑚生长率是诸多因素的综合反映, 表层海水温度 (Sea Surface Temperature, SST)、表层海水盐度 (Sea Surface Salinity, SSS)、光照、水动力条件等都会对珊瑚的生长造成影响 (Lough et al., 1997, 2000, 2011, 2014; 施祺等, 2002; 苏瑞侠等, 2003; Wang et al., 2010)。研究表明, SST 是珊瑚骨骼生长率的关键环境控制因素 (Lough et al., 1997, 2000, 2011, 2014; 施祺等, 2002; 苏瑞侠等, 2003; Cooper et al., 2012; 陈雪霏等, 2023), 并且珊瑚生长率和 SST 存在显著的线性关系, 基于这种关系可以重建有器测资料之前的历史时期 SST 变化 (Nie et al., 1997, 1999; Dang et al., 2020)。南海珊瑚礁星罗棋布、种类繁多、发育历史久, 自 20 世纪 90 年代以来, 南海珊瑚生长率及其与海表温度变化关系的研究迅速发展。如 Nie 等 (1997; 1999) 最早利用滨珊瑚生长率重建西沙海域过去 220 a 以来的 SST 变化; 黄博津 (2013) 和张会领 (2014; 2017) 等也根据西沙海域的滨珊瑚生长率, 重建了罗马暖期和中晚全新世特征时段的 SST 变化, 其结果较好地响应了同期全球的气候变化; 陶士臣等 (2021) 重建过去 500 a (1520—2007 AD) 西沙海域连续的 SST 序列显示, 西沙海温存在 1520—1825 AD 的相对低温期和 1826—2007 AD 的快速升温期 2 个主要时段, 其对赤道西太平洋暖池环境变化响应敏感。此外, 部分学者通过珊瑚生长率的年际和年代际变化重建了南海北部厄尔尼诺-南方涛动 (El Niño-Southern Oscillation, ENSO) 和太平洋多年代际涛动 (Pacific Decadal Oscillation, PDO) 活动的历史 (林丽芳等, 2018; Dang et al., 2020)。

综上, 珊瑚生长率是重建区域 SST 变化的重要代用指标, 同时其年际周期还能揭示历史时期 ENSO 等变化。然而, 受珊瑚自身生长时段和样品采集等因素的限制, 目前基于珊瑚生长率的气候记录主要集中在工业革命以来的时段 (Yu, 2012; Tierney et al., 2015), 极少有年代更早的珊瑚生长率研究。而中全新世时期作为全球变暖背景下气候环境状况的地质历史相似型, 重建中全新世时期的气候变化, 对揭示气候变化机制和提高未来气候预测的准确性具有重要意义。中全新世 (8200—4200 a BP) 是全新世以来最为温暖湿润的时期, 又称为全新世大暖期, 在其最盛期时 (8000—6000 a BP) 全球许多地方都比现在温暖 (施雅风, 1992; de

Menocal et al., 2000)。目前, 基于代用资料记录和古气候模拟重建对于中全新世起止时间、总体气候特征以及大暖期的定义已有丰富的研究成果。来自全球不同地区、不同类型的地质记录, 总体都揭示了中全新世温暖湿润、期间存在气候突变事件等气候特征 (Bond et al., 1997; Chen et al., 2016; Ramos-Román et al., 2016; van Beynen et al., 2017; Badino et al., 2018; Novenko et al., 2019)。而冰心、孢粉、石笋、沉积物等地质记录由于空间分布不均、时间分辨率低及连续性差等特点, 对中全新世期间影响气候的关键大气环流系统和 ENSO 等海气相互作用的研究较为有限 (姜大膀等, 2022)。鉴于热带海洋在气候系统中的独特地位, 中全新世气候变化的研究还需要更多来自热带海区的高分辨率气候记录 (汪品先等, 1999)。

因此, 本文以海南潭门珊瑚岸礁的滨珊瑚为材料, 利用 X 射线照相技术与图像处理方法对珊瑚生长率进行测量与分析, 获得中全新世 (6143—4356 a BP) 海南潭门滨珊瑚的生长率特征, 并基于该区域现代 (2005—2021 AD) 滨珊瑚生长率与海表温度的关系, 重建中全新世期间共 406 a 的年均 SST 序列, 旨在为全面理解中全新世的热带气候特征提供新的信息。

1 材料与方法

1.1 研究区域及采样点

本文所使用的澄黄滨珊瑚 (*Porites lutea*) 岩心样品采自南海北部海南岛东部琼海市潭门镇 (19°15'N、110°38'E) 珊瑚岸礁 (图 1)。该区属热带季风气候, 分明显的旱雨两季, 年均温 24.1°C, 最高气温出现在 7 月, 年均值为 28.3°C, 最低气温出现在 1 月, 年均值为 17.8°C。多年平均降水量为 1 653.4 mm, 全年降水量主要集中在每年夏季季风盛行的雨季 (5—10 月), 占全年降雨量的 76%~81%。潭门海域的年平均表层水温约 25.6°C, 表层盐度约 32.6‰, 海水透明度良好, 这些条件非常适合珊瑚群落的生长发育 (Yan et al., 2019)。

2021 年 7 和 9 月于潭门珊瑚岸礁礁坪处水深 5 m 左右的位置使用手持式液压钻机从顶部钻取珊瑚岩心, 岩心整体呈圆柱状, 长度约为 20~30 cm, 直径为 6 cm。在实验室内用切片机将上述柱状珊瑚岩心切成厚度约为 7~8 mm 的薄板。将切割完成的珊瑚薄板放入质量分数为 5% 的 H₂O₂ 溶液中浸泡 48 h, 再用超声波清洗 4 次, 每次 20 min 以去除残留物质,

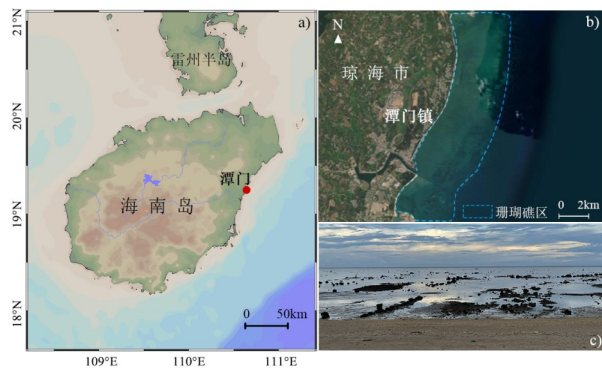


图1 研究区域 (a) 和采样位置 (b. 潭门珊瑚岸礁的分布; c. 潭门礁坪实景)

Fig.1 Study area(a) and locational distribution of coral core samples (b. the distribution of Tanmen coral reefs; c. the photo of Tanmen sea area)

注: a图使用 Ocean Data View 绘制, 底图为全球水深地形模型 ETOPO1 (<https://www.ngdc.noaa.gov>); b图为潭门镇及周围海域的卫星影像图, 截取自谷歌卫星图 (<http://maps.google.com/>); c图为采样现场摄影照片, 黑色部分均为低潮时出露的原生珊瑚礁。

最后将珊瑚薄片放入 40°C 的恒温烘箱中烘干 48 h 以供后续使用。

1.2 定年及生长率测量

珊瑚样品的高精度铀系年代由澳大利亚昆士兰大学放射性同位素实验室测定, 年代介于 6143—4356 a BP (颜廷礼, 2022)。对珊瑚生长率序列分析需以珊瑚薄片上的定年点为基准, 再计数珊瑚骨骼年层建立起生长纹层的年代框架。H1 心为 2021 年 7 月采集的现代活珊瑚样品, 其年代范围以顶面年龄 (2021 AD) 为基准, 再根据生长纹层计年获得。

使用 X 光机对处理后的珊瑚薄片拍摄等比例的 X 光照片 (图 2)。通过 X 光照片可以清晰看出珊瑚骨骼由明暗相间的条纹组成, 这些条纹即珊瑚在不同季节形成的高/低密度生长条带, 相邻的一条亮条带的宽度加上一条暗条带的宽度就是珊瑚一年的生长量。采用图片处理软件作为珊瑚生长率测量的主要工具, 使用医学软件 RadiAnt DICOM Viewer 将 X 光负片灰度图像转化为 X 光正片, 然后使用该软件中的测距工具测量珊瑚年生长率 (cm/a)。在 X 光正片上, 以白色条带中间为起止点, 一对黑-白色条带的宽度作为珊瑚骨骼一年的生长量进行测量。

需要指出的是, 在采样和后期切片过程中, 如果珊瑚岩心样品不是垂直于珊瑚年生长层钻取, 切

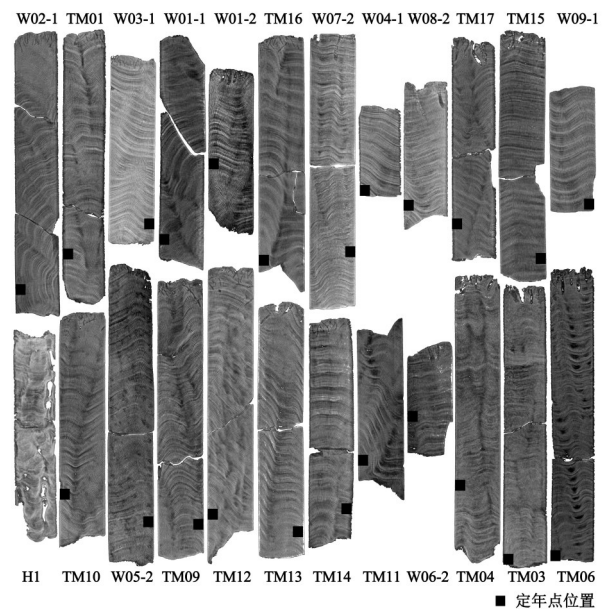


图2 海南潭门珊瑚样品 X 光片及定年点位置

Fig.2 Positive X-ray images of the coral skeletons from Tanmen, and the positions of subsamples used for U-Th dating

片方向不垂直于珊瑚年生长层等, 均可能引起生长率测量的人为偏差 (Saenger et al., 2009)。笔者已经充分认识到取岩心和切片对生长率的可能影响, 在取样过程中已尽量降低人为因素对生长率的影响。与此同时, 为了尽可能减小误差, 对 23 段化石珊瑚的生长率进行 10 次测量, 去除一个最大值和一个最小值后, 求算数平均作为珊瑚骨骼生长率结果。对于取到的唯一的现代珊瑚 H1, X 光片中显示其中分布有若干孔洞, 表明现代珊瑚受生物侵蚀, 相对于其他样品 X 光片的生长条带而言不那么清晰, 但仍能识别出明暗相间的条带。为了保证测量结果的可靠性, 首先对现代珊瑚样品薄片上明显的生长轴进行直接测量, 并重复 10 次, 再对 X 光片使用 DICOM explorer 软件进行 10 次测量, 同时结合 Acycle 软件对图像灰度变化进行分析。

1.3 数据分析方法

通过上述测量与计算获得 1 段现代珊瑚和 23 段中全新世化石珊瑚的生长率数据, 并且利用器测资料获取现代潭门海域的气候环境参数, 其中月均及年均海温数据来自英国气象局哈德利中心提供的 1°×1° 网格全球海温数据集 HadISST^① (Rayner et al., 2003), 年均海表盐度数据来自中国科学院海洋科学数据中心提供的 1°×1° 网格全球海洋温盐现场

① <https://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadisst/>

观测数据集^②，年均太阳辐射数据来自美国国家海洋和大气管理局国家气候数据中心提供的NCEP-NCAR再分析资料的 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 网格净短波辐射通量^③。

为探究潭门珊瑚生长率与气候环境参数的关联，对现代珊瑚生长率与气候环境参数进行Pearson偏相关性分析，在控制其他变量影响的条件下分析变量间的线性相关性；再通过建立一元线性回归模型进一步确定变量之间的因果关系，考虑到样本数量不够大，且数据中存在若干明显异常值，因此，在对比各回归方法并对拟合结果比较后，选择使用稳健的鲁棒回归（Robust Regression）建立模型。Pearson偏相关性分析和鲁棒回归的一元线性回归分析均使用SPSS软件完成。

为探究潭门珊瑚生长率序列与气候环境参数的周期成分及变化规律，对现代珊瑚生长率序列和器测海温进行傅里叶频谱分析，以分离其显著的年际周期。中全新世化石珊瑚生长率序列中有16 a的重叠部分，重叠年代为4381—4385 a BP（共计5 a）、4475—4477 a BP（3 a）、5235—5237 a BP（3 a）和5410—5414 a BP（5 a），重叠部分的珊瑚生长率结果不完全一致，相差范围为0~0.2 cm/a，但生长率变化趋势相对一致，对重叠部分的生长率结果取算术平均值，拼接形成4段连续时间较长的生长率序列：5427—5394 a BP（34 a）、5243—5209 a BP（35 a）、4515—4456 a BP（60 a）和4404—4356 a BP（49 a）；再对以上序列进行连续小波变换，分析这些时段的时频变化特征，以进一步探讨珊瑚生长率在各周期波动的趋势变化。傅里叶频谱分析和连续小波分析均使用Past软件完成。

2 结果分析

各段样品的编号及生长率测量结果见表1所示。现代珊瑚平均生长率为1.260 cm/a，最大生长率为1.400 cm/a，最小生长率为1.150 cm/a；中全新世化石珊瑚的平均生长率为1.079 cm/a，最大生长率为1.670 cm/a，最小生长率为0.607 cm/a；中全新世时期珊瑚生长率总体略低于现代珊瑚0.181 cm/a，而生长率的变化幅度大于现代。中全新世珊瑚生长率序列显示其具有明显的波动变化：在6143—5855 a BP珊瑚生长率波动下降，而后再5774—5691 a BP迅速上升；在5672—5647 a BP珊瑚生长率保持较

表1 海南潭门珊瑚生长率测量结果

Table 1 Results of growth rates of corals from Tanmen,

Hainan Island

样品编号	分布时段/a BP	生长长度/a	生长率/(cm·a ⁻¹)		
			最大值	最小值	平均值
W02-1	6143—6131	13	1.400	1.000	1.221
TM01	5969—5952	18	1.550	0.682	1.064
W03-1	5875—5855	21	0.990	0.685	0.822
W01-1	5774—5757	18	1.320	0.924	1.143
W01-2	5710—5704	7	1.280	0.839	1.114
TM16	5703—5691	13	1.100	1.570	1.342
W07-2	5672—5647	26	1.250	0.456	0.882
W04-1	5576—5562	15	1.260	0.964	1.109
W08-2	5447—5437	11	0.832	1.150	1.008
TM17	5427—5410	18	0.927	1.500	1.192
TM15	5414—5394	20	0.906	1.520	1.209
W09-1	5243—5235	9	1.050	1.370	1.188
TM06	5237—5209	29	1.290	0.715	0.963
TM03	5179—5149	31	1.220	0.642	0.862
TM04	5116—5093	24	1.320	0.976	1.112
W06-2	4811—4806	6	1.330	1.050	1.203
TM11	4666—4657	10	1.120	0.696	0.900
TM14	4515—4499	17	1.670	0.782	1.243
TM13	4494—4475	20	1.440	0.761	1.097
TM12	4477—4456	22	1.500	0.806	1.116
TM09	4404—4381	24	1.330	0.607	0.983
W05-2	4385—4364	22	1.490	0.938	1.170
TM10	4367—4356	12	1.200	1.650	1.402
H1	2005—2021 AD	17	1.400	1.150	1.260

低水平，随后在5576—5410 a BP逐渐上升并在5414—5235 a BP保持较高水平；在5237—5209 a BP生长率又下降，直到5179—5149 a BP期间降至最低，接着在5116—4356 a BP生长率又大幅度波动上升。同时，在序列中可见3段连续时间较长的低生长率特征时期，还明显可见4515 a BP之后珊瑚生长率变率显著增大，呈现更为复杂的波动变化。此外，频谱分析显示现代和中全新世珊瑚生长率均存在显著的3~7 a周期信号，但在5427—5394、5243—5209、4515—4456、4404—4356 a BP和现代，期间显著的主周期及频率不断转变。

3 讨论

3.1 海南潭门现代珊瑚生长率与SST的关系

大量研究通过统计学方法以及模型分析法业已表明，南海北部珊瑚生长率主要受温度控制，并据此建立珊瑚生长率与SST的关系（Nie et al., 1997, 1999；施棋等，2002；苏瑞侠等，2003；黄博津等，2013；陈天然等，2013；张会领等，2014）。

② <http://msdc.qdio.ac.cn>

③ <https://psl.noaa.gov/data/gridded/index.html>

目前采用一元线性回归已建立的南海北部珊瑚生长率与 SST 线性关系有：Nie 等（1997；1999）建立海南岛南部滨珊瑚生长率与 SST 的线性回归方程为 $SST=2.52 \times L+24.22$ ($r=0.85$)，西沙群岛滨珊瑚生长率与 SST 的关系为 $SST=2.25 \times L+24.772$ ($r=0.876$)；张会领等（2017）建立西沙永兴岛滨珊瑚生长率与 SST 的线性回归方程为 $SST=2.0 \times L+24.91$ ($R^2=0.61$)；林丽芳等（2018）建立黄岩岛澄黄滨珊瑚生长率与 SST 的关系为 $SST=3.49 \times L+23.058$ ($r=0.697$)；陶士臣等（2021）建立西沙永兴岛滨珊瑚生长率与 SST 的线性回归方程为 $SST=2.25 \times L+24.767$ ($R^2=0.61$)。但因为珊瑚对环境变化的敏感程度在不同种类、不同生长地点存在显著差异，所以珊瑚生长率与温度的回归方程并不完全一致（何学贤等，1999）。

海南潭门海域尚缺乏珊瑚生长率与 SST 关系的构建研究，因此，首先需探究现代海南潭门珊瑚岸礁区珊瑚生长率是受单因子 SST 影响还是受 SSS、光照的联合控制。对现代珊瑚生长率数据与区域气候环境参数采用偏相关分析（表 2），一阶偏相关中，在控制 SSS 不变的条件下，SST 和光照均与珊瑚生长率有显著的正相关关系，但二阶偏相关中，在控制了 SSS 和 SST 后，光照与生长率不显著相关。在所有不同控制变量情况下，SST 与珊瑚骨骼生长率始终保持显著正相关关系，因此 SST 是海南潭门海域滨珊瑚骨骼生长参数变化的主要控制因素。图 3 中 a、b、c 分别为 2005—2021 年潭门海域珊瑚生长率与 SSS、SST 和光照的变化曲线，可知珊瑚生长率变化与 SST 的变化高度相关且通过显著性检验。此外，虽然光照和盐度与珊瑚生长率的相关性不显著，但在变化曲线上存在一定程度的谐调性，所以光照和盐度是海南潭门滨珊瑚骨骼生长的次要影响因素。

由于其他环境因素与珊瑚生长率变化不显著相关，在建立海南潭门现代珊瑚生长率与 SST 的关系时予以忽略。使用鲁棒回归建立的海南潭门海域 L-SST 一元线性回归模型如图 3-d 所示：

$$SST = (2.945 \pm 0.237) \times L + 22.481 \pm 0.301(1 \text{ s.e.}) \quad (1)$$

式中：SST 为潭门海域年均海表温度 ($^{\circ}\text{C}$)；L 为珊瑚年生长速率 (cm/a)；s.e. 为标准误差。根据两者的函数关系，也即珊瑚生长率每增加 1 cm，代表海温上升约 2.7~3.2 $^{\circ}\text{C}$ 。江巧文等（2016）已证实琼东海域澄黄滨珊瑚骨骼生长率与 SST 表现显著正相关关系，这与本文结论一致。因此，海南潭门现代滨珊瑚的生长率能较为准确地反映该区域 SST 变化。

3.2 海南潭门中全新世 SST 总体呈波动变化特征,并存在 3 个显著的 SST 偏低期

考虑到水深对珊瑚生长率也有所影响，南海中全新世的海平面比现代高，在 7.0—5.5 ka BP 时期高出现代海平面 2~3 m（时小军等，2007）。颜廷礼（2022）根据现代珊瑚和中全新世化石珊瑚的铀系年代，并结合珊瑚生长与海平面的关系，重建了潭门海域珊瑚岸礁记录的中全新世海平面波动历史；大型块状滨珊瑚的生长上限充其量只能达到大潮低潮面，因此礁坪面成古高海面的极好标志。在采样过程中采集的样品均为原位、未受外力搬运的珊瑚，现代珊瑚与化石珊瑚均采自于礁坪处；再根据海平面重建结果，中全新世化石珊瑚生长位于平均大潮低潮面和平均小潮低潮面之间，古今珊瑚生长时期的水深基本相似。因此，中全新世与现代的珊瑚生长率具有可比性。

将化石珊瑚的生长率数据带入以上建立的潭门珊瑚岸礁区海表温度与珊瑚生长率的转换方程中，获得海南潭门中全新世（6143—4356 a BP）期间 406 a 的年均 SST，图 4 为定量重建的海南潭门中全

表 2 海南潭门珊瑚生长率与环境参数的偏相关分析结果

Table 2 Partial correlation analysis results of coral growth rate and environmental parameters in Tanmen

偏相关分析		控制变量:SSS		控制变量:SST		控制变量:光照			
一阶偏相关	SST	相关性	0.915	光照	相关性	0.067	SST	相关性	0.843
		显著性	<0.001		显著性	0.805		显著性	<0.001
		自由度	14		自由度	14		自由度	14
	光照	相关性	0.630	SSS	相关性	0.295	SSS	相关性	0.131
		显著性	0.009		显著性	0.267		显著性	0.629
		自由度	14		自由度	14		自由度	14
二阶偏相关	控制变量:SSS、光照			控制变量:SSS、SST		控制变量:SST、光照			
	SST	相关性	0.854	光照	相关性	0.014	SSS	相关性	0.289
		显著性	<0.001		显著性	0.962		显著性	0.297
		自由度	13		自由度	13		自由度	13

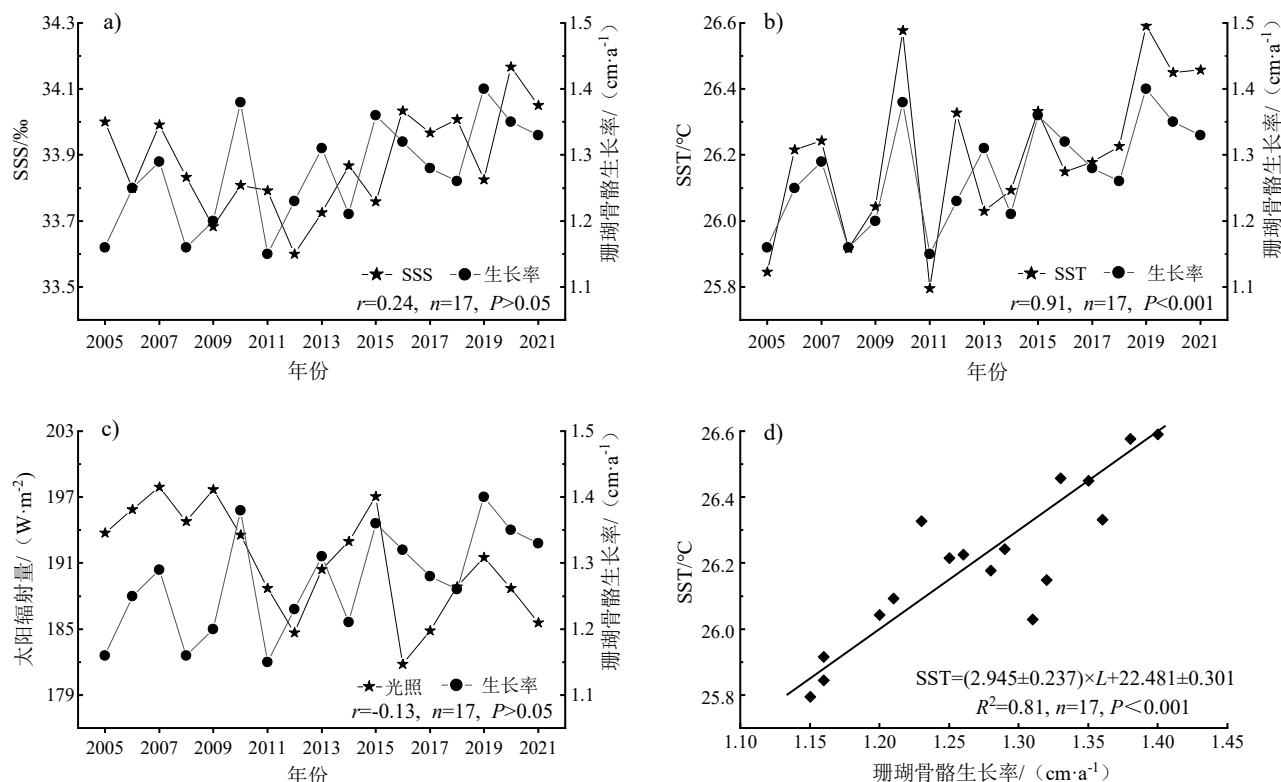


图3 海南潭门现代珊瑚生长率与环境参数 (a. SSS; b. SST; c. 光照) 的变化关系及与 SST 的回归模型 (d)

Fig.3 Relationship between modern coral growth rate and environmental parameters (a. SSS; b. SST; c. Solar radiation) in Tanmen, and L-SST linear regression model (d)

新世 SST 变化及化石珊瑚生长率序列。中全新世平均 SST 为 $25.7 \pm 0.54^\circ\text{C}$ ，与现代 (2005—2021 AD) 平均 SST 基本接近。中全新世年均 SST 变化范围为 $24.7 \sim 26.8^\circ\text{C}$ ，在重建时段内存在明显的波动变化，存在 3 个维持时间较长的低海温特征时期——5860、

5660、5160 a BP，珊瑚生长率重建的平均 SST 为 $25.0 \pm 0.54^\circ\text{C}$ 。

珊瑚生长率重建的 SST 显示，中全新世 6—4 ka BP 南海北部 SST 与目前全球变暖程度加剧下的现代海温十分接近，这可能表明当时气候温暖程度

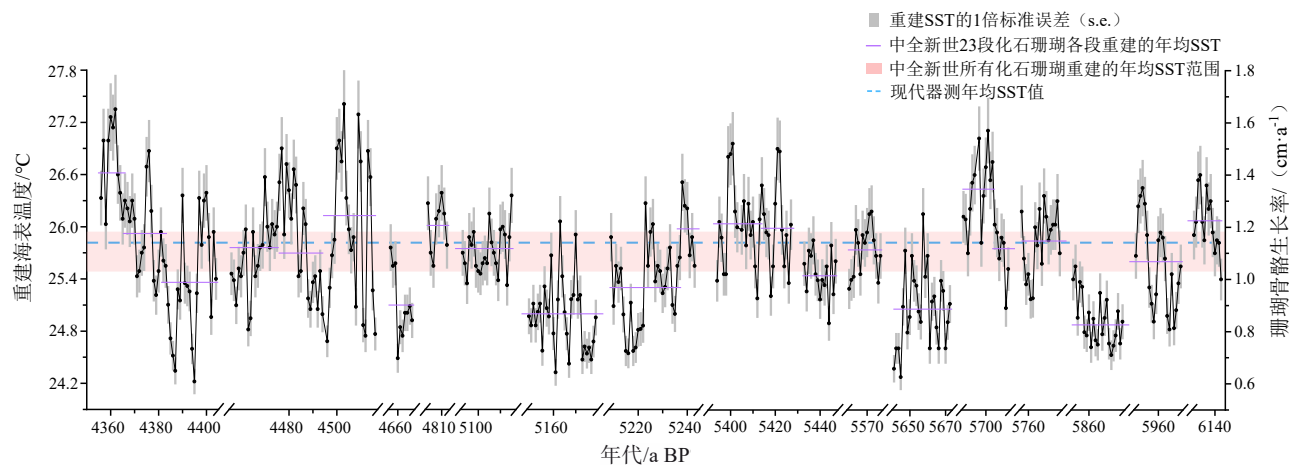


图4 定量重建的海南潭门中全新世 SST 变化及化石珊瑚生长率序列

Fig.4 Coral growth rate-SST in Tanmen during Mid-Holocene and sub-fossil coral growth rate sequence

与现代相当。目前一系列全新世温度集成序列显示,中全新世期间 8.0—6.0 ka BP 时为暖期鼎盛期,而 6.0—4.0 ka BP 总体温度开始呈现下降趋势 (Marcott et al., 2013; Osman et al., 2021; Rao et al., 2022)。南海北部 6 ka BP 之前的珊瑚记录显示中全新世早中期 SST 明显高于现代,如 Yu 等 (2005) 利用雷州半岛全新世不同时期发育的珊瑚月分辨率的 Sr/Ca 和 $\delta^{18}\text{O}$ 记录重建显示,在 6.8—5.0 ka BP 期间 SST 比现代 (20 世纪 90 年代,该区最暖的 10 年) 高 0.9~0.5°C; Wei 等 (2007) 利用海南岛三亚滨珊瑚的月分辨率 Sr/Ca 记录重建中全新世海温记录显示,在 6.5—6.1 ka BP 期间年均 SST 比现代高 0.2~1.5°C。与上述研究相比,本文重建时段的总体 SST 并没有显著高于现代,显示中全新世 6—4 ka BP 南海北部 SST 从鼎盛温暖期开始下降的过程。南海黄岩岛海域珍贝海山底部沉积物中的浮游有孔虫记录也支持该结果,由有孔虫壳体内部 Mg/Ca 比重建的全新世 SST 变化显示,在 9.1—6.3 ka BP, SST 自 24.5°C 迅速升至 29.3°C,达到全新世最大值,温暖程度明显高于现代;而在 6.3—5.3 ka BP, SST 自 27.7°C 降至 24.8°C (杨俊等, 2020)。

值得注意的是,来自全球的不同代用资料总体都揭示了中全新世 8—6 ka BP 比现代更加温暖湿润的气候特征,但对于 6—4 ka BP 区域气候与现代相比如何还存在争议。一些研究认为部分区域在 6—4 ka BP 期间延续了暖期鼎盛期温暖湿润的气候特征,气候温暖程度仍超过现代,如黎广钊等 (1996) 根据孢粉分析、有孔虫氧同位素分析、历史记载及现代气温观测资料综合探讨广西沿海全新世以来的气候变化,结果显示中全新世中期 (6—4 ka BP) 时,气候炎热潮湿,平均气温高于现今 3~5°C; Kong 等 (2014) 利用珠江口 HKUV16 岩心的长链烯酮不饱和指数重建了香港沿海地区 8 ka BP 以来的 SST 变化,结果显示 7.4—2.6 ka BP SST 保持长期稳定且高于现代约 2°C。而也有越来越多的证据表明,全球大部分区域在该时期气候转向寒冷干燥,与现代相比温度可能偏低,如 Magny 等 (2004) 综合了南北半球海洋和陆地的植被、海温、极地冰盖、热带冰心等 44 个替代指标记录,证明 5.6—5.0 ka BP 气候寒冷干燥,且具有全球性; Wanner 等 (2008) 基于全球范围不同种类的气候代用资料,并结合一般环流模型 (GCMs) 和中等复杂性地球系统模型 (EMICs) 结果,建立了从全新世中期到前工业时代的气候变化框架,其中确定 5.4—4.8 ka BP 为新

冰期冰川推进的 8 个时期之一,当时气候突然转冷导致南北半球山地均有冰川前进出现 (Thompson et al., 2006); 侯光良 (2009) 建立的中国东南区 200 a 分辨率温度变化序列中,中全新世 6—4 ka BP 低于现代年均温约 0.3°C; Abram 等 (2009) 利用西太平洋暖池边缘印度尼西亚和巴布亚新几内亚的珊瑚 Sr/Ca 值重建中全新世 SST,结果显示 5.5—4.3 ka BP 间年均 SST 低于现代 (1982—1993 AD) 约 1.2°C; Rodriguez 等 (2019) 利用热带大西洋西部 2 个年代分别为 6427 和 5199 a BP 的化石珊瑚,通过骨骼 Sr/Ca 值和 U/Ca 值获得年分辨率的 Sr-U 记录并重建 SST 序列,结果显示重建的年均 SST 比现代器测记录低 0.5~0.75°C。

高分辨率气候重建序列显示,即使是气候系统稳定性高的中全新世期间仍存在多次冷暖波动。如 Yu 等 (2004) 根据雷州半岛角孔珊瑚礁剖面的生长间断和高分辨率的珊瑚骨骼 Sr/Ca 重建表明,7.0—7.5 ka BP 期间南海北部至少发生 9 次大振幅的冷事件;方修琦等 (2011) 重建的百年尺度全新世温度集成序列表明,全新世大暖期存在多次百年尺度的寒冷事件。本文基于海南潭门珊瑚生长率重建的中全新世温度也呈波动变化的特征:在 6.1—5.7 ka BP, SST 整体偏暖,部分时段温暖程度超过现代,但 5860 a BP 前后出现一个明显的低 SST 时期;在 5.6 ka BP 又出现了低 SST 特征时期,此后数百年温度又小幅度波动回升;在 5.2—4.6 ka BP, SST 整体偏冷,部分时段 SST 比现代低 1°C;在 4.5 ka BP 前后 SST 大幅度波动变化,而 4.4 ka BP 之后 SST 持续波动上升甚至超过现代 1°C,推测之后发生的 4.2 ka BP 气候突变事件打断了这一变暖趋势。

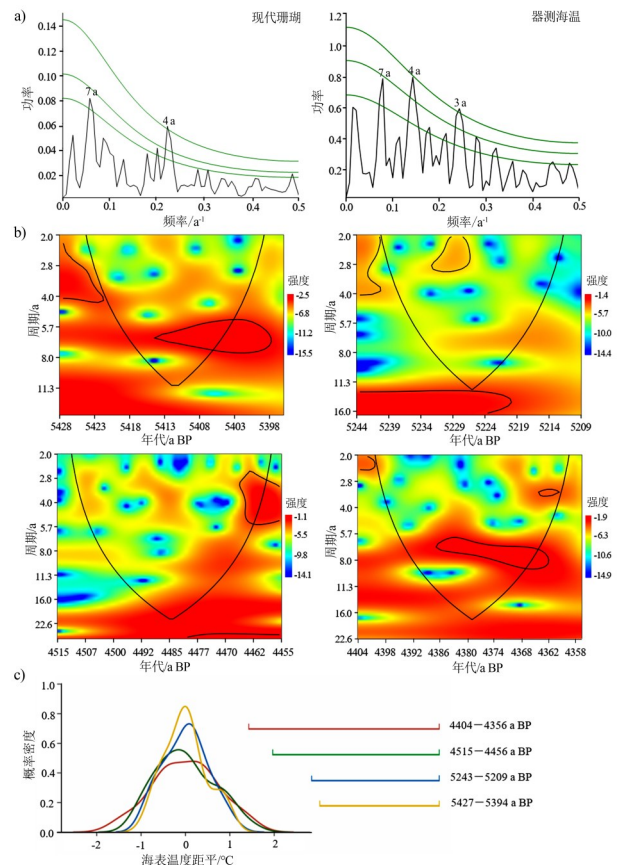
在 5860、5660 和 5160 a BP 显著低海温特征时期,南海北部可能受到规模较大的冷事件影响,在其他代用资料重建的全新世气候变化中也记录了几次冷事件。如瞿文川等 (1997) 利用长江下游西太湖沉积岩心的总有机碳含量、 $\delta^{13}\text{C}$ 、磁化率、色素含量以及氢指数等记录重建全新世的气候变化,结果显示在 7.2—5.7 ka BP 期间,该湖区普遍温暖湿润,而 5.7 ka BP 以来气候转向寒冷干燥。李秋子 (2018) 利用东海陆架泥质区 D03 钻孔的底栖有孔虫组合重建全新世海洋沉积环境变化,结果显示 5.8—5.6 ka BP 为明显的气候变冷时期。牛蕊等 (2017) 利用贵州草海南屯泥炭的腐殖化度和烧失量序列重建中全新世以来的气候变化显示,在 6.0 和 5.0 ka BP 左右出现较为明显的降温事件。Sadler

等(2016)利用热带太平洋西部大堡礁的滨珊瑚 Sr/Ca 值重建中全新世区域 SST, 结果显示 5.2 ka BP 为中全新世的冷事件时期, 重建 SST 比现代(2009—2014 AD)器测平均 SST 低 1.31~2.76°C。Chang 等(2008)利用中国东海东北部沉积岩心中的放射虫重建全新世以来的 SST, 结果显示在 5.1—4.6 ka BP 发生 SST 骤降的冷事件。与此同时, 对 Marcott 等(2013)根据 73 个地质记录集成的全球全新世温度变化序列进行再分析, 发现在 5.8 ka BP 增温短暂停滞, 在 5.5 ka BP 温度明显下降, 在 5.2 ka BP 温度大幅度降低, 这与本文珊瑚记录中的 3 个低海温特征时期基本对应。

3.3 南海北部中全新世 ENSO 活动总体比现代弱, 但 ENSO 变率呈现逐渐增强的趋势

ENSO 是地球气候系统中最强烈的气候振荡, 在年际时间尺度上 (<10 a) 主导着全球大部分地区的气候变化。ENSO 直接影响热带太平洋的 SST、SSS、降水和热带气旋活动, 还能通过大气遥相关影响南海北部海洋环境变化。不少研究表明, 南海北部珊瑚对 ENSO 活动有良好的记录能力, 如邓文峰(2007)利用海南三亚中全新世的珊瑚骨骼 Sr/Ca 重建了月分辨率 SST 序列, 频谱分析显示 SST 存在显著的 ENSO 周期, 表明在中全新世的南海气候受 ENSO 活动影响; Jiang 等(2021a; 2021b; 2023)利用西沙群岛过去 2000 年的珊瑚骨骼 Sr/Ca 重建了罗马暖期、黑暗时代冷期以及中世纪气候异常期月分辨率 SST 序列和 ENSO 变率, 结果显示 ENSO 呈现波动性的演化过程。海南潭门海域现代器测 SST 资料与现代珊瑚生长率的频谱分析结果如图 5-a 所示, 现代观测和珊瑚记录在年际尺度均存在较为显著 3~7 a 的 ENSO 周期, 说明海南潭门海域受到 ENSO 活动的显著影响, 并且该海域的珊瑚生长率能响应 ENSO 活动。

中全新世期间 4 段相对较长的生长率序列(5427—5394、5243—5209、4515—4456 和 4404—4356 a BP) 的小波变换结果如图 5-b 所示, 在 4 个时段中均捕捉到 ENSO 周期, 在 5427—5394 a BP 有一个显著的 5.7~8.0 a 的 ENSO 周期, 在 5243—5209 a BP 仅出现了一个低频的 2.0~2.8 a 的 ENSO 周期, 在 4515—4456 a BP 有一个显著的 2.8~5.5 a 的 ENSO 周期, 在 4404—4356 a BP 出现一个高频的 5.7~8.0 a 的 ENSO 周期和一个低频的 3.2 a 的 ENSO 周期。这表明南海北部中全新世存在 ENSO 活动, 但与现代



图注: b 图中右侧色标指示小波周期图里变化周期的强度, 即红强、蓝弱; c 图中将概率密度曲线的宽度提取表示为右侧线段长度, 线段越长则概率密度曲线越宽, 表征 ENSO 变率越强。

图 5 南海北部中全新世 4 个时段的 ENSO 变率变化分析
(a. 南海北部现代珊瑚与器测资料的频谱分析;
b. 中全新世 4 段拼接较长序列的小波变换;
c. 中全新世 4 个时段的概率密度统计)

Fig.5 Analysis of ENSO variability in four periods during the Mid-Holocene in the northern South China Sea (a. Spectral analysis of modern coral and instrumental data in the northern South China Sea; b. The wavelet transform of 4 long sequences of the Mid-Holocene; c. Probability Density Statistics for 4 Periods of the Mid-Holocene)

相比中全新世珊瑚生长率的 ENSO 主周期改变且频率显著降低, 中全新世南海北部 ENSO 信号较现在弱。

来自南海北部的其他珊瑚证据也显示中全新世 ENSO 活动总体偏弱。Yu 等(2010)基于珊瑚骨骼的铀系年代和 ^{14}C 年代对南海碳库年代与 El Niño 的关系研究表明, 6498—5662 a BP 的高碳库年代, 指示 ENSO 活动明显减弱。Wei 等(2007)利用采自海南岛年代为 6500—6100 a BP 的 3 个澄黄滨珊瑚, 通过月分辨率的骨骼 Sr/Ca 值重建中全新世南海

SST变化,发现序列中存在ENSO活动周期,谐波分析后6324—6299 a BP和6217—6175 a BP的夏季SST序列中分别表现出4.9和7.8 a的ENSO周期,但与现代器测反映的ENSO相比总体偏弱。孙东怀等(2007)利用年代为5400 a BP的澄黄滨珊瑚探究中全新世亚洲季风气候季节性与年际变率,对 $\delta^{18}\text{O}$ 序列的谱分析显示,冬季温度序列存在3.2和2.7 a的ENSO周期,但对比现代冬季温度周期频率较低,而夏季降水序列不存在明显的ENSO周期。

以上4个时段的ENSO周期转变指示中全新世ENSO活动不断发生变化,为了进一步量化ENSO变率,根据珊瑚序列较短的特点采用概率密度函数(Probability Density Function, PDF)统计方法,该方法已被证实量化ENSO变率上具有可靠性,并用于重建西南太平洋中世纪气候异常的部分时期与20世纪早期相似的弱ENSO变率(Lawman et al., 2020)。PDF统计结果显示(图5-c),4515—4456和4404—4356 a BP时段ENSO变率显著增强,中全新世以来(5427—4356 a BP)ENSO变率呈现逐渐增强的态势,中全新晚期4.4 ka BP较5.4 ka BP时期ENSO变率增强40%~60%,表明ENSO系统在中全新世晚期活跃,并可能影响4.2 ka冷事件的发生。

南海北部其他高分辨率的海洋记录也揭示了中全新世晚期ENSO变率逐渐增强的趋势。Sun等(2005)利用采自海南岛东部年代为4.4 ka BP的滨珊瑚骨骼 $\delta^{18}\text{O}$ 重建中全新世的SST和SSS记录,其中冬季SST显示出显著的6.7 a周期,这揭示了4.4 ka BP期间强ENSO对南海冬季SST的影响。Zhou等(2022)利用采自西沙群岛的年代为5—3 ka BP的3个磷砷礁,通过月分辨率的骨骼Sr/Ca值重建中全新世南海北部ENSO变率变化,结果显示全新世中晚期ENSO变率不断增强。

4 结论

本文利用海南潭门珊瑚岸礁采集的1段现代珊瑚岩心和23段中全新世化石珊瑚岩心,通过X射线照相技术与图像处理方法对珊瑚生长率进行测量与分析,获得了中全新世海南潭门滨珊瑚的生长率特征,并基于现代珊瑚生长率影响因素分析建立了海南潭门海域珊瑚生长率与海温的定量转换关系为: $\text{SST} = (2.945 \pm 0.237) \times L + 22.481 \pm 0.301(1 \text{ s.e.})$,在此基础上通过化石珊瑚的年分辨率生长率数据,定量重建了中全新世期间累计406 a的海温序列,结果显示:

1) 中全新世化石珊瑚的平均生长率为1.079 cm/a,变化于0.607~1.670 m/a之间,并且存在明显的波动过程。在序列中可见3段连续时间较长的低生长率特征时期,4515 a BP之后年际变率显著增大,呈现更为复杂的波动变化。

2) 重建中全新世(6143—4356 a BP)的平均SST为 $25.7 \pm 0.54^\circ\text{C}$,在误差范围内与现代(2005—2021 AD)平均SST基本接近;中全新世年均SST变化于 $24.7 \sim 26.8^\circ\text{C}$ 之间,存在明显的冷暖变化,进一步揭示中全新世温度变化的细节;期间5860、5660和5160 a BP是3个显著的SST偏低期。

3) 对比现代与中全新世(5427—5394、5243—5209、4515—4456和4404—4356 a BP)珊瑚生长率的频谱周期,发现现代与中全新世珊瑚的生长率均存在显著3~7 a ENSO周期,但中全新世珊瑚生长率的ENSO主周期改变且频率显著降低,表明中全新世ENSO活动总体偏弱;概率密度函数统计显示,中全新世期间ENSO变率存在逐渐增强的趋势。

致谢:陈雪霏副研究员提供了海南龙湾现代珊瑚的生长率数据,党少华博士研究生帮助测量珊瑚生长率和分析数据,审稿专家和编辑对论文提出了宝贵的修改意见。谨表谢忱!

参考文献 (References):

- Abram N J, McGregor H V, Gagan M K, Hantoro W S, and Suwargadi B W. 2009. Oscillations in the Southern Extent of the Indo-Pacific Warm Pool during the Mid-Holocene. *Quaternary Science Reviews*, 28(25/26): 2794-2803.
- Badino F, Ravazzi C, Vallè F, Pini R, Aceti A, Brunetti M, Champvillair E, Maggi V, Maspero F, Perego R, and Orombelli G. 2018. 8800 Years of High-Altitude Vegetation and Climate History at the Rutor Glacier Forefield, Italian Alps. Evidence of Middle Holocene Timberline Rise and Glacier Contraction. *Quaternary Science Reviews*, 185: 41-68.
- Bond G, Showers W, Cheseby M, Lotti R, Almasi P, deMenocal P, Priore P, Cullen H, Hajdas I, and Bonani G. 1997. A Pervasive Millennial-Scale Cycle in North Atlantic Holocene and Glacial Climates. *Science*, 278(5341): 1257-1266.
- Chang F M, Li T G, Zhuang L H, and Yan J. 2008. A Holocene Paleotemperature Record Based on Radiolaria from the Northern Okinawa Trough (East China Sea). *Quaternary International*, 183 (1): 115-122.
- Chen F H, Jia J, Chen J H, Li G Q, Zhang X J, Xie H C, Xia D S, Huang W, and An C B. 2016. A Persistent Holocene Wetting Trend in Arid Central Asia, with Wettest Conditions in the Late Holocene, Revealed by Multi-Proxy Analyses of Loess-Paleosol Sequences in Xinjiang, China. *Quaternary Science Reviews*, 146:

- 134-146.
- 陈天然, 郑兆勇, 莫少华, 周雄, 陈特固. 2013. 涠洲岛滨珊瑚骨骼生长率变化对气候变暖和极端事件增加的响应. *热带海洋学报*, 32 (5): 79-84. [Chen Tianran, Zheng Zhaoyong, Mo Shaohua, Zhou Xiong, and Chen Tegu. 2013. Variation of Skeletal Extension Rate for *Porites* Corals around Weizhou Island in Response to Global Warming and Increase of Extreme Events. *Journal of Tropical Oceanography*, 32(5): 79-84.]
- 陈雪霏, 邓文峰, 韦刚健. 2023. 工业革命以来南海珊瑚钙化生长对海洋升温的响应. *第四纪研究*, 43 (2): 448-457. [Chen Xuefei, Deng Wenfeng, and Wei Gangjian. 2023. Coral Calcification History in the South China Sea since the Industrial Era and its Response to Ocean Warming. *Quaternary Sciences*, 43 (2): 448-457.]
- Cooper T F, O'Leary R A, and Lough J M. 2012. Growth of Western Australian Corals in the Anthropocene. *Science*, 335(6068): 593-596.
- Dang S H, Yu K F, Tao S C, Han T, Zhang H L, and Jiang W. 2020. El Niño/Southern Oscillation during the 4.2 ka Event Recorded by Growth Rates of Corals from the North South China Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 39(1): 110-117.
- deMenocal P, Ortiz J, Guilderson T, and Sarnthein M. 2000. Coherent High- and Low-Latitude Climate Variability during the Holocene Warm Period. *Science*, 288(5474): 2198-2202.
- 邓文峰. 2007. 南海北部中全新世气候演变的珊瑚地球化学记录. 北京: 中国科学院大学. [Deng Wenfeng. 2007. *Mid-Holocene Climate Changes in the Northern South China Sea Reconstructed from Coral Geochemical Proxies*. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences.]
- 方修琦, 侯光良. 2011. 中国全新世气温序列的集成重建. *地理科学*, 31 (4): 385-393. [Fang Xiuqi, and Hou Guangliang. 2011. Synthetically Reconstructed Holocene Temperature Change in China. *Scientia Geographica Sinica*, 31(4): 385-393.]
- 何学贤, 彭子成, 王兆荣, 聂宝符, 安芷生. 1999. 珊瑚的古环境信息研究进展. *地球科学进展*, 14 (5): 505-512. [He Xuexian, Peng Zicheng, Wang Zhaorong, Nie Baofu, and An Zhisheng. 1999. Advance in Study on Paleo Environmental Information in Coral. *Advance in Earth Science*, 14(5): 505-512.]
- 侯光良. 2009. 中国全新世百年分辨率温度序列的集成重建. 北京: 北京师范大学. [Hou Guangliang. 2009. *Synthesis Reconstruction of Holocene Temperature with Centennial Resolution of China*. Beijing: Beijing Normal University.]
- 黄博津, 余克服, 张会领, 施祺, 陈天然, 陶士臣, 严宏强, 刘国辉. 2013. 利用珊瑚生长率重建西沙海域罗马暖期中期海温变化. *热带地理*, 33 (3): 237-241. [Huang Bojin, Yu Kefu, Zhang Huiling, Shi Qi, Chen Tianran, Tao Shichen, Yan Hongqiang, and Liu Guohui. 2013. Sea Surface Temperature Variations during the Middle Rome Warm Period as Reconstructed by *Porites* Coral Growth Rates in the Xisha Islands. *Tropical Geography*, 33(3): 237-241.]
- 姜大膀, 田芝平, 王娜, 张冉. 2022. 末次冰盛期和中全新世气候模拟分析进展. *地球科学进展*, 37 (1): 1-13. [Jiang Dabang, Tian Zhiping, Wang Na, and Zhang Ran. 2022. Progress of Last Glacial Maximum and Mid-Holocene Climate Modeling Analyses. *Advances in Earth Science*, 37(1): 1-13.]
- Jiang L L, Yu K F, Han T, Tao S C, and Zhang H L. 2021a. Coral Perspective on Temperature Seasonality and Interannual Variability in the Northern South China Sea during the Roman Warm Period. *Global and Planetary Change*, 207: 103675.
- Jiang L L, Yu K F, Tao S C, Wang S P, Han T, and Jiang W. 2021b. ENSO Variability during the Medieval Climate Anomaly as Recorded by *Porites* Corals from the Northern South China Sea. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 36(4): e2020PA004173.
- Jiang L L, Yu K F, Tao S C, Li Y E, and Wang S P. 2023. Abrupt Increase in ENSO Variability at 700 CE Triggered by Solar Activity. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 128: e2022JC019278.
- 江巧文, 曹志敏, 王道儒, 李元超, 倪建宇. 2016. 琼东海域橙黄滨珊瑚骨骼生长特性及其主要影响因素. *应用生态学报*, 27 (3): 953-962. [Jiang Qiaowen, Cao Zhimin, Wang Daoru, Li Yuanchao, and Ni Jianyu. 2016. Growth Characteristics of *Porites Lutea* Skeleton in East Sea Area of Hainan Island, China and Affecting Environmental Factors. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 27(3): 953-962.]
- Knutson D W, Buddemeier R W, and Smith S V. 1972. Coral Chronometers: Seasonal Growth Bands in Reef Corals. *Science*, 177(4045): 270-272.
- Kong D M, Zong Y Q, Jia G D, Wei G J, Chen M T, and Liu Z H. 2014. The Development of Late Holocene Coastal Cooling in the Northern South China Sea. *Quaternary International*, 349: 300-307.
- Lawman A E, Quinn T M, Partin J W, Thirumalai K, Taylor F W, Wu C, Yu T, Gorman M K, and Shen C. 2020. A Century of Reduced ENSO Variability During the Medieval Climate Anomaly. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 35(4): e2019PA003742.
- 黎广钊, 梁文, 廖思明, 方国祥. 1996. 广西沿海全新世以来气候变化. *海洋地质与第四纪地质*, 116 (3): 49-59. [Li Guangzhao, Liang Wen, Liao Siming, and Fang Guoxiang. 1996. Climatic Changes since Holocene along Guangxi Coast. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 116(3): 49-59.]
- 李秋子. 2018. 东海陆架底栖有孔虫记录的冰消期以来的快速气候变化. 北京: 中国地质大学. [Li Qiuzi. 2018. *Benthic Foraminifera in the East China Sea Shelf that Recorded Rapid Climate Change since the Deglaciation*. Beijing: China University of Geosciences.]
- 林丽芳, 余克服, 陶士臣, 韩韬, 张会领. 2018. 南海黄岩岛珊瑚记录的1780—2013年的表层海温年代际变化特征. *海洋学报*, 40 (9): 31-42. [Lin Lifang, Yu Kefu, Tao Shichen, Han Tao, and Zhang Huiling. 2018. Interdecadal Variability of Sea Surface Temperature from 1780 to 2013 Recorded in Corals from the Huangyan Island in the South China Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 40(9): 31-42.]
- Lough J M, and Barnes D J. 1997. Several Centuries of Variation in Skeletal Extension, Density and Calcification in Massive *Porites* Colonies from the Great Barrier Reef: A Proxy for Seawater Temperature and a Background of Variability against which to

- Identify Unnatural Change. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 211: 29-67.
- Lough J M, and Barnes D J. 2000. Environmental Controls on Growth of the Massive Coral *Porites*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 245(2): 225-243.
- Lough J M, and Cooper T F. 2011. New Insights from Coral Growth Band Studies in an Era of Rapid Environmental Change. *Earth-Science Reviews*, 108(3/4): 170-184.
- Lough J M, and Cantin N E. 2014. Perspectives on Massive Coral Growth Rates in a Changing Ocean. *Biological Bulletin*, 226(3): 187-202.
- 马廷英. 1936. 造礁珊瑚与中国沿海珊瑚礁的成长率. 地质论评, 1 (3): 293-300. [Ma Tingying. 1936. Reef Building Corals and the Growth Rate of Coastal Coral Reefs in China. *Geological Review*, 1(3): 293-300.]
- 马廷英. 1937. 造礁珊瑚的成长率与海水温度的关系//葛利普. 中国古生物志乙种 16 号第 1 册. 北京: 国立北平研究院地质学研究所 [Ma Tingying. 1937. On the Growth Rate of Reef Corals and Its Relation to Sea Water Temperature. In: Grabau A W. *Palaeontologia Sinica Series B. Vol. 16*. Beijing: Geological Survey of China.]
- Magny M, and Haas J N. 2004. A Major Widespread Climatic Change around 5300 cal. yr BP at the Time of the Alpine Iceman. *Journal of Quaternary Science*, 19(5): 423-430.
- Marcott S A, Shakun J D, Clark P U, and Mix A C. 2013. A Reconstruction of Regional and Global Temperature for the Past 11,300 Years. *Science*, 339(6124): 1198-1201.
- 聂宝符. 1984. 从 X——射线照片探讨我国几种造礁石珊瑚的年成长率. 热带地貌, 5 (1): 20-27. [Nie Baofu. 1984. Exploring the Annual Growth Rate of Several Reef Building Corals in China by X-Ray Photos. *Tropical Geomorphology*, 5(1): 20-27.]
- 聂宝符, 陈特固, 梁美桃, 钟晋樑, 余克服. 1997. 南沙群岛及其邻近礁区造礁珊瑚与环境变化的关系. 北京: 科学出版社, 52-61. [Nie Baofu, Chen Teguo, Liang Meitao, Zhong Jinliang, and Yu Kefu. 1997. *The Relationship between Reef Coral and Environmental Changes of Nansha Islands and Adjacent Regions*. Beijing: Science Press, 52-61.]
- Nie B F, Chen T G, Liang M T, Wang Y Q, Zhong J L, and Zhu Y Z. 1997. Relationship between Coral Growth Rate and Sea Surface Temperature in the Northern Part of South China Sea during the Past 100 a. *Science in China*, 40(2): 173-182.
- Nie B F, Chen T G, and Peng Z C. 1999. Reconstruction of Sea Surface Temperature Series in the Last 220 Years by Use of Reef Corals in Xisha Waters, South China Sea. *Chinese Science Bulletin*, 44(22): 2094-2098.
- 牛蕊, 周立旻, 孟庆浩, 王琳, 孙诚诚, 刘婷, 王振, 郑祥民. 2017. 贵州草海南屯泥炭记录的中全新世以来的气候变化. 第四纪研究, 37 (6): 1357-1369. [Niu Rui, Zhou Limin, Meng Qinghao, Wang Lin, Sun Chengcheng, Liu Ting, Wang Zhen, and Zheng Xiangmin. 2017. The Paleoclimate Variations of the Nantun Peat in the Caohai Area since the Middle Holocene. *Quaternary Sciences*, 37(6): 1357-1369.]
- Novenko E Y, Zyuganova I S, Volkova E M, and Dyuzhova K V. 2019. A 7000-Year Pollen and Plant Macrofossil Record from the Mid-Russian Upland, European Russia: Vegetation History and Human Impact. *Quaternary International*, 504: 70-79.
- Osman M B, Tierney J E, Zhu J, Tardif R, Hakim G J, King J, and Poulsen C J. 2021. Globally Resolved Surface Temperatures since the Last Glacial Maximum. *Nature*, 599(7884): 239-244.
- 瞿文川, 薛滨, 吴艳宏, 王苏民, 吴瑞金, 张平中, 陈践发. 1997. 太湖 14000 年以来古环境演变的湖泊记录. 地质力学学报, 3 (4): 53-61. [Qu Wenchuan, Xue Bin, Wu Yanhong, Wang Sumin, Wu Ruijin, Zhang Pingzhong, and Chen Jianfa. 1997. Record of Paleoenvironmental Evolution of Taihu Lake in the Past 14000 Years. *Journal of Geomechanics*, 3(4): 53-61.]
- Ramos-Román M J, Jiménez-Moreno G, Anderson R S, García-Alix A, Toney J L, Jiménez-Espejo F J, and Carrión J S. 2016. Centennial-Scale Vegetation and North Atlantic Oscillation Changes during the Late Holocene in the Southern Iberia. *Quaternary Science Reviews*, 143: 84-95.
- Rao Z G, Tian Y P, Guang K Y, Wei S K, Guo H C, Feng Z X, Zhao L, and Li Y X. 2022. Pollen Data as a Temperature Indicator in the Late Holocene: A Review of Results on Regional, Continental and Global Scales. *Frontiers in Earth Science*, 10: 2296-6463.
- Rayner N A, Parker D E, Horton E B, Folland C K, Alexander L V, Rowell D P, Kent E C, and Kaplan A. 2003. Global Analyses of Sea Surface Temperature, Sea Ice, and Night Marine Air Temperature since the Late Nineteenth Century. *Geophysical Research*, 108(14): 4407.
- Reuter M, Brachert T C, and Kroeger K F. 2005. Diagenesis of Growth Bands in Fossil *Scleractinian* Corals: Identification and Modes of Preservation. *Facies*, 51(1/4): 146-159.
- Rodriguez L G, Cohen A L, Ramirez W, Oppo D W, Pourmand A, Edwards R L, Alpert A E, and Mollica N. 2019. Mid-Holocene, Coral-Based Sea Surface Temperatures in the Western Tropical Atlantic. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 34(7): 1234-1245.
- Sadler J, Webb G E, Leonard N D, Nothdurft L D, and Clark T R. 2016. Reef Core Insights into Mid-Holocene Water Temperatures of the Southern Great Barrier Reef. *Paleoceanography*, 31(10): 1395-1408.
- Saenger C, Cohen A L, Oppo D W, Halley R B, and Carilli J E. 2009. Surface-Temperature Trends and Variability in the Low-Latitude North Atlantic since 1552. *Nature Geoscience*, 2(7): 492-495.
- 施祺, 张叶春, 孙东怀. 2002. 海南岛三亚滨珊瑚生长率特征及其与环境因素的关系. 海洋通报, 21 (6): 31-38. [Shi Qi, Zhang Yechun and Sun Donghui. 2002. Characteristics of Growth Rate of *Porites* Coral from Sanya, Hainan Island and Its Relationship to Environmental Variables. *Marine Science Bulletin*, 21(6): 31-38.]
- 时小军, 余克服, 陈特固. 2007. 南海周边中全新世以来的海平面变化研究进展. 海洋地质与第四纪地质, 27 (5): 121-132. [Shi Xiaojun, Yu Kefu, and Chen Teguo. 2007. Progress in Researches on Sea-Level Changes in South China Sea since Mid-Holocene. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 27(5): 121-132.]
- 施雅风. 1992. 中国全新世大暖期气候与环境. 北京: 海洋出版社. [Shi Yafeng. 1992. *The Dimates and Environments of the*

- Holocene Megathermal in China*. Beijing: China Ocean Press.]
- 苏瑞侠, 孙东怀. 2003. 南海北部滨珊瑚生长的影响因素. 地理学报, 58 (3): 442-451. [Su Ruixia, and Sun Donghuai. 2003. The Influencing Factors of Coral *Porites* in the Northern Part of the South China Sea. *Acta Geographica Sinica*, 58(3): 442-451.]
- Sun D H, Gagan M K, Cheng H, Scott-Gagan H, Dykoski C A, Edwards R L, and Su R X. 2005. Seasonal and Interannual Variability of the Mid-Holocene East Asian Monsoon in Coral $\Delta^{18}\text{O}$ Records from the South China Sea. *Earth and Planetary Science Letters*, 237(43467): 69-84.
- 孙东怀, 苏瑞侠, 程海, 陈小明. 2007. 中全新世 (5400 a BP) 亚洲季风气候季节性年际变率的南海珊瑚氧同位素记录. 自然科学进展, 17 (8): 1078-1090. [Sun Donghuai, Su Ruixia, Cheng Hai, and Chen Xiaoming. 2007. Seasonal and Interannual Variability of the Asian Monsoon Climate during the Middle Holocene (5400 a BP): Oxygen Isotope Records of Coral in the South China Sea. *Progress in Natural Science*, 17(8): 1078-1091.]
- 陶士臣, 张会领, 余克服, 施祺, 孟敏, 严宏强, 刘国辉, 陈特固. 2021. 近 500 年西沙群岛海面温度年际变化的珊瑚记录及其环境意义. 第四纪研究, 41 (2): 411-423. [Tao Shichen, Zhang Huiling, Yu Kefu, Shi Qi, Meng Min, Yan Hongqiang, Liu Guohui, and Chen Tegu. 2021. Annual Resolution Sea Surface Temperature Reconstructed Quantitatively by *Porites* Coral Growth Rate in the Xishaqundao Islands during the Past Five Centuries and Their Environmental Significance. *Quaternary Sciences*, 41(2): 411-423.]
- Thompson L G, Mosley-Thompson E, Brecher H, Davis M, León B, Les D, Lin P N, Masiotta T, and Mountain K. 2006. Abrupt Tropical Climate Change: Past and Present. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 103 (28): 10536-10543.
- Tierney J E, Abram N J, Anchukaitis K J, Evans M N, Giry C, Kilnourne K H, Saenger C P, Wu H C, and Zinke J. 2015. Tropical Sea Surface Temperatures for the Past Four Centuries Reconstructed from Coral Archives. *Paleoceanography*, 30(3): 226-252.
- Tudhope A W. 1994. Extracting High-Resolution Climatic Records from Coral Skeletons. *Geoscience*, 4: 17-20.
- van Beynen P, Polk J S, Asmerom Y, and Polyak V. 2017. Late Pleistocene and Mid-Holocene Climate Change Derived from a Florida Speleothem. *Quaternary International*, 449: 75-82.
- 汪品先, 翦知湣. 1999. 寻求高分辨率的古环境记录. 第四纪研究, 19 (1): 1-17. [Wang Pinxian, and Jian Zhimin. 1999. Searching High-Resolution Paleoenvironmental Records: A Review. *Quaternary Sciences*, 19(1): 1-17.]
- Wang X, Wang D X, Gao R Z, and Sun D H. 2010. Anthropogenic Climate Change Revealed by Coral Gray Values in the South China Sea. *Chinese Science Bulletin*, 55(13): 1304-1310.
- Wanner H, Beer J, Bütikofer J, Jonathan B, Thomas C J, Ulrich C, Jacqueline F, Hugues G, Martin G, Fortunat J, Jed K O, Marcel K, Simon M A, Prentice I C, Olga S, Thomas F S, Pavel T, Mayke W, and Martin W. 2008. Mid- to Late Holocene Climate Change: An Overview. *Quaternary Science Reviews*, 27(19/20): 1791-1828.
- Wei G J, Deng W F, Yu K F, Li X H, Sun W D, and Zhao J X. 2007. Sea Surface Temperature Records in the Northern South China Sea from Mid-Holocene Coral Sr/Ca Ratios. *Paleoceanography*, 22 (3): PA3206.
- Yan H Q, Shi Q, Yu K F, Tao S C, Yang H Q, Liu Y, Zhang H L, and Zhao M X. 2019. Regional Coral Growth Responses to Seawater Warming in the South China Sea. *Science of the Total Environment*, 670: 595-605.
- 颜廷礼. 2022. 海南潭门镇珊瑚岸礁的铀系年代及其对中全新世海平面变化的记录. 南宁: 广西大学. [Yan Tingli. 2022. *Records of Sea Level Changes over the Mid-Holocene from U-Series Ages of Shore Reefs in Tanmen, Hainan Island*. Nanning: Guangxi University.]
- 杨俊, 赵彦彦, 吴佳庆, 魏浩天, 龙海燕, 李三忠, 毕乃双. 2020. 南海中部全新世以来海山深潜区有孔虫的地球化学记录及反映的气候变化. 海洋地质与第四纪地质, 40 (2): 100-110. [Yang Jun, Zhao Yanyan, Wu Jiaqing, Wei Haotian, Long Haiyan, Li Sanzhong, and Bi Naishuang. 2020. Geochemical Record of Foraminifera and Its Reflection on Climate Change in the Central South China Sea since Holocene. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 40(2): 100-110.]
- Yu K F, Zhao J X, Liu T S, Wei G J, Wang P X, and Collerson K D. 2004. High-Frequency Winter Cooling and Coral Mortality during the Holocene Climatic Optimum. *Earth and Planetary Science Letters*, 224(1/2): 143-155.
- Yu K F, Zhao J X, Wei G J, Cheng X R, and Wang P X. 2005. Mid-Late Holocene Monsoon Climate Retrieved from Seasonal Sr/Ca and $\Delta^{18}\text{O}$ Records of *Porites Lutea* Corals at Leizhou Peninsula, Northern Coast of South China Sea. *Global and Planetary Change*, 47(2): 301-316.
- Yu K F, Hua Q, Zhao J X, Hodge E, Fink D, and Barbetti M. 2010. Holocene Marine ^{14}C Reservoir Age Variability: Evidence from ^{230}Th -Dated Corals in the South China Sea. *Paleoceanography*, 25 (3): PA3205.
- Yu K F. 2012. Coral Reefs in the South China Sea: Their Response to and Records on Past Environmental Changes. *Science China: Earth Sciences*, 55(8): 1217-1229.
- 张会领, 余克服, 施祺, 严宏强, 刘国辉, 陈特固. 2014. 珊瑚生长率重建西沙海域中晚全新世海温变化. 第四纪研究, 34 (6): 1296-1305. [Zhang Huiling, Yu Kefu, Shi Qi, Yan Hongqiang, Liu Guohui, and Chen Tegu. 2014. Sea Surface Temperature Variations during the Mid-Late Holocene Reconstructed by *Porites* Coral Growth Rates in the Xisha Islands. *Quaternary Sciences*, 34(6): 1296-1305.]
- 张会领, 余克服, 施祺, 陶士臣, 严宏强, 刘国辉. 2017. 利用珊瑚生长率重建西沙海域工业革命以来的海温变化. 热带地理, 37 (5): 701-707. [Zhang Huiling, Yu Kefu, Shi Qi, Tao Shichen, Yan Hongqiang, and Liu Guohui. 2017. Sea Surface Temperature Variations since the Industrial Revolution as Reconstructed by *Porites* Coral Growth Rate in Xisha Waters. *Tropical Geography*, 37(5): 701-707.]

Zhou P C, Yan H, Han T, Liu C C, Yang H T, Luo F, Liu S, Wang Z, Shen X Y, Shi G, Dodson J, and Zhou W J. 2022. Mid to Late Holocene ENSO Variability Reconstructed by High-Resolution *Tridacna* Sr/Ca Records from the Northern Part of the South China Sea. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 601: 111117.

作者贡献声明:

李悦儿: 负责论文撰写、修改与校对, 获取并分析珊瑚生长率数据;

余克服: 论文思路和结构设计, 论文修改;

颜廷礼: 样品采集, 珊瑚岩心切片和 X 光照相;

江蕾蕾: 参与论文数据分析。

Growth Rate of *Porites* Corals from Tanmen, Hainan Island: Climatic Significance during Mid-Holocene

Li Yue'er^{1a,b,c}, Yu Kefu^{1a,b,c,2}, Yan Tingli^{1a,b,c}, and Jiang Leilei^{1a,b,c}

[1. a. School of Marine Sciences, Guangxi University; b. Guangxi Laboratory on the Study of Coral Reefs in the South China Sea; c. Coral Reef Research Center of China, Nanning 530004, China; 2. Southern Marine Sciences and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519080, China]

Abstract: Coral growth rate is a physical index that is particularly closely associated with climatic factors such as Sea Surface Temperature (SST). The growth rate is minimally affected by environmental changes and serves as a high-resolution indicator in the study of climatic and environmental variation, making it a useful tool in paleoclimatic coral research. However, previous research on coral growth rate has primarily focused on the modern period, with limited investigation of the Mid-Holocene, which shares similar climatic characteristics with the current warm period. It is especially important to understand the climate and environmental conditions during the Mid-Holocene to gain insight into contemporary climate change processes and mechanisms. To address this gap, we first collected a modern *Porites* coral core and 23 Mid-Holocene subfossil coral cores from Tanmen, located on the eastern coast of Hainan Island. Using X-ray radiography and image processing methods, we measured and analyzed the coral growth rates of all cores, resulting in the identification of growth rate patterns during the Mid-Holocene. Additionally, by analyzing the environmental factors that impact modern coral (2005-2021 AD), we established a linear relationship between coral growth rate (L) and SST in Tanmen, expressed as $SST = (2.945 \pm 0.237) \times L + 22.481 \pm 0.301 (1 \text{ s.e.})$. By applying this equation, we reconstructed an annual average SST sequence of 406 years during the Mid-Holocene (6,143-4,356 a BP). The results indicate that the average coral growth rate during the Mid-Holocene was 1.079 cm/a, ranging from 0.607 to 1.670 cm/a, with noticeable fluctuations. The coral growth rate sequence also revealed three consecutive periods of low growth rate, accompanied by a significant increase in interannual variability after 4,515 a BP, resulting in more complex fluctuations. Moreover, the reconstructed SST sequence based on coral growth rate data shows that the mean SST of the Mid-Holocene was $25.7 \pm 0.54^\circ\text{C}$, which is comparable to the modern SST in the context of global warming. The average annual SST varied from 24.7 to 26.8°C in the Mid-Holocene, exhibiting considerable fluctuations between warm and cold periods, and with three distinct periods of low SST at 5,860, 5,660, and 5,160 a BP. This provides detailed insights into the temperature variations during the Mid-Holocene. In addition, a comparison of the spectral cycles of coral growth rates between the modern and Mid-Holocene periods (5,427-5,394, 5,243-5,209, 4,515-4,456, and 4,404-4,356 a BP) revealed significant ENSO cycles of three to seven years, observed in both modern and Mid-Holocene corals. During the Mid-Holocene, the primary ENSO cycle changed: its frequency decreased considerably, indicating that ENSO activity was weaker than that observed in the modern period. However, further statistical analysis utilizing the Probability Density Function (PDF) demonstrated a gradual increase in ENSO variability during this period. The results of this study offer novel insights into tropical climate characteristics of the Mid-Holocene.

Keywords: sea surface temperature; ENSO; Mid-Holocene; coral growth rate; Northern South China Sea