

林丽芳,余克服,陶士臣,等. 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[J]. 海洋学报, 2018, 40(9):31—42, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2018.09.003

Lin Lifang, Yu Kefu, Tao Shichen, et al. Interdecadal variability of sea surface temperature from 1780 to 2013 recorded in corals from the Huangyan Island in the South China Sea[J]. Haiyang Xuebao, 2018, 40(9):31—42, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2018.09.003

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

林丽芳^{1,2}, 余克服^{1,3*}, 陶士臣¹, 韩韬^{1,2}, 张会领⁴

(1.中国科学院南海海洋研究所 中国科学院边缘海与大洋地质重点实验室, 广东 广州 510301; 2.中国科学院大学, 北京 100049; 3.广西大学 珊瑚礁研究中心, 广西 南宁 530004; 4. 广东海洋大学 工程学院 海洋工程系, 广东 湛江 524088)

摘要: 基于南海中部黄岩岛滨珊瑚生长率与表层海温距平(SSTA)的正相关关系,重建了 1780—2013 年(共 234 年)黄岩岛海域 SSTA 年际变化序列。结果表明,1780—1890 年 SSTA 总体偏低,平均为 -0.2°C , 最低 SSTA 为 -1°C (1837 年),对应于小冰期晚期;1890 年以来 SSTA 总体呈阶段性上升,其中 1971—1998 年升温最快,1998 年达到峰值(2°C),之后 SSTA 略呈下降趋势,冷暖变化与北半球陆地温度变化基本是同步的。频谱分析显示,黄岩岛海域 SSTA 在过去 234 年主要呈现出 26~34 a 的冷暖周期波动,其相位转变基本与太平洋年代际振荡冷—暖位相同步。近 234 年来南海中部黄岩岛海域 SSTA 的年代际变率并不是持续不变的,1890 年以来该海域 SST 年代际变率出现明显增强,可能与全球变暖导致的海洋内部变率的变化有关。考虑到热带西南太平洋 SST 年代际变率同样在 1890 年也发生了一次转变,我们认为这些证据可能指示了整个热带太平洋内部变率在 1890 年以后发生了一次转变。

关键词: 黄岩岛;珊瑚生长率;SSTA;小冰期;年代际变化

中图分类号: P736.22

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2018)09-0031-12

1 引言

热带海洋是全球气候系统的重要组成部分,是全球大气的最主要热源^[1],其中海水表面温度(sea surface temperature, SST)在海气相互作用中扮演着重要的角色^[2],热带海区 SST 的研究对认识全球气候变化机制具有重要意义,尤其是 SST 年代际变化及其驱动因素的研究,对预估未来几十年的气候变化发挥着重要的指导作用^[3];而最近的全球变暖停滞现象,也被认为与海洋的年代际变化有关^[4-6]。SST 的

年代际变化周期长,驱动因素复杂,而器测记录时序较短,大部分局限于过去百年,阻碍了对过去海洋年代际变化以及全球变化的理解,因此迫切需要建立长时间序列高分辨率的 SST 记录。同时,理解 20 世纪气候变暖的机理,区分自然变率和人类活动对气候变化的贡献,需要放在长时间尺度的气候背景下。目前关于长时间高分辨率的海洋年代际变化的研究主要是基于陆地的树轮^[7-9],但这些非海洋指标难以直接响应 SST 变化^[10]。而生长于热带海洋的造礁石珊瑚能够直接响应 SST 变化,同时具有生长速率快、年纹层清楚、连续

收稿日期:2017-10-13;修订日期:2018-03-10。

基金项目:国家自然科学基金重点项目(91428203);国家重大科学研究计划项目(2013CB956102)。

作者简介:林丽芳(1991—),女,福建省莆田市人,主要从事南海珊瑚礁研究。E-mail:linlifang@scsio.ac.cn

* 通信作者:余克服(1969—),男,湖北省公安县人,教授,博士,主要从事南海珊瑚礁地质、生态与环境研究。E-mail:kefuyu@scsio.ac.cn

生长时间长以及适合开展高精度铀系测年等优点^[11-12],成为重建热带海区高分率 SST 记录的理想载体。目前,已有大量学者利用珊瑚开展海洋年代际变化的研究^[13-15],研究显示,一方面低纬海区 SST 的年代际变率受到来自中高纬度海区年代际变化的影响^[13-14],另一方面低纬海区 SST 的年代际变率对其他海区的年代际气候变化产生重要的影响^[15]。由于器测记录较短,南海热带海区的 SST 年代际尺度的研究主要局限于过去百年^[16-17],而来自南海海域长时间序列高分辨率的 SST 重建记录也较少^[18-19],因此利用珊瑚重建长时间高分辨率的 SST 序列具有十分重要的意义。南海中部是南海 SST 变化最显著的海域^[20],盐度变化小^[21],是研究 SST 的理想海区。因此本文选择南海中部黄岩岛海域作为研究区,利用珊瑚生长率与 SST 的关系重建黄岩岛海域近 234 年 SST 年代际变化特征,并进一步对其驱动因素进行探讨。

2 材料与方法

珊瑚生长率是重建热带海洋年际 SST 的良好指标之一。研究显示,珊瑚生长率主要受 SST 影响^[22-24],与 SST 具有显著的相关关系^[22-25]。利用这种相关关系,聂宝符等^[26]等重建了西沙海区近 220 年的温度序列,显示近百年 SST 呈轻微上升;黄博津等^[27]重建了西沙海域罗马暖期中期的海温变化,显示罗马暖期的温度变化并未超过现代暖期;张会领

等^[28]利用西沙海区的滨珊瑚生长率开展了中晚全新世的 SST 海温变化研究,显示中晚全新世以来 SST 呈下降趋势,与中国大陆温度基本同步变化。南海珊瑚生长率的研究主要集中在南海北部^[29]和南部^[30],而南海中部海域尚未开展相关研究。开展南海中部海域珊瑚生长率研究以及 SST 重建,可增强对整个南海海域 SST 年代际变化特征理解,对预测未来气候变化具有重要意义。

2.1 研究区域及采样点

黄岩岛(15°09'N,117°45'E)位于中沙群岛以东偏南,是一个略呈等腰三角形的大环礁(图 1),东西长 15 km,南北宽 10 km,周边长约 55 km,面积约 150 km²,礁坪上除了许多出露的大风暴石外,一般皆位于水下 0.5~3 m^[31]。黄岩岛附近海域缺少长期 SST 器测数据,因此选择英国气象局哈德莱中心(Hadley Center)提供的 HadISST^[32]数据库中黄岩岛附近海域 1°×1°网格 SST 区域的数据(<http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/>)。该海区附近海域多年(1961—2015 年)平均海温为 28.1℃,月均海温度介于 25.6~29.9℃之间。附近海域的多年(1980—2015 年)平均盐度为 33.6,月平均盐度介于 33.4~33.7 之间(<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.godas.html>)。多年(1979—2015 年)年平均降水量为 2 490.8 mm,夏秋季降水较多,冬春季少(<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.cmap.html>)。

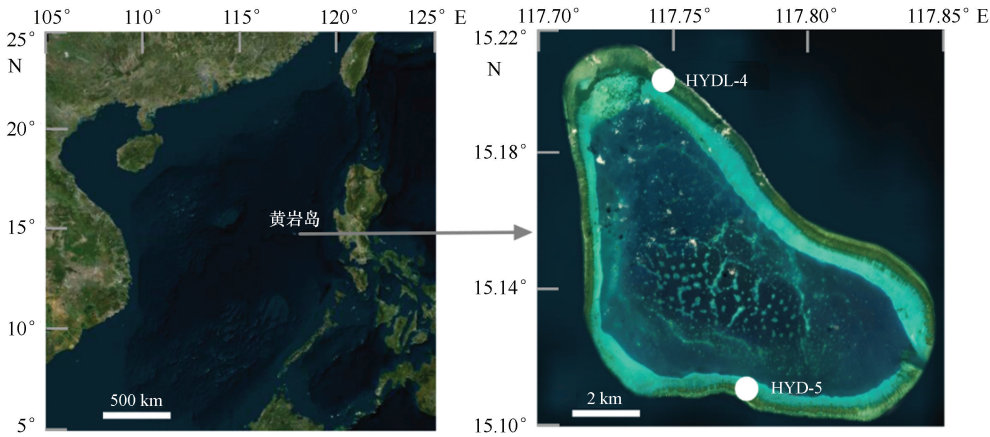


图 1 研究区域位置及采样点
Fig.1 Research area and sample site

2015 年 5 月利用水下液压钻机于黄岩岛南北礁坪 HYDL-4 和 HYD-5 采样点采集样品(图 1)。在实验室将这些珊瑚芯样品切割成约 7 mm 厚的薄板,用

浓度为 5% 的 H₂O₂ 浸泡 48 h 以除去有机质,再用超声波去除残留物质,在 40℃ 环境下烘干,然后用医用 X 光机拍摄珊瑚骨骼 X 光片,使用相关专业软件将珊

瑚骨骼 X 光负片转换为正片以便进一步分析(图 2)。

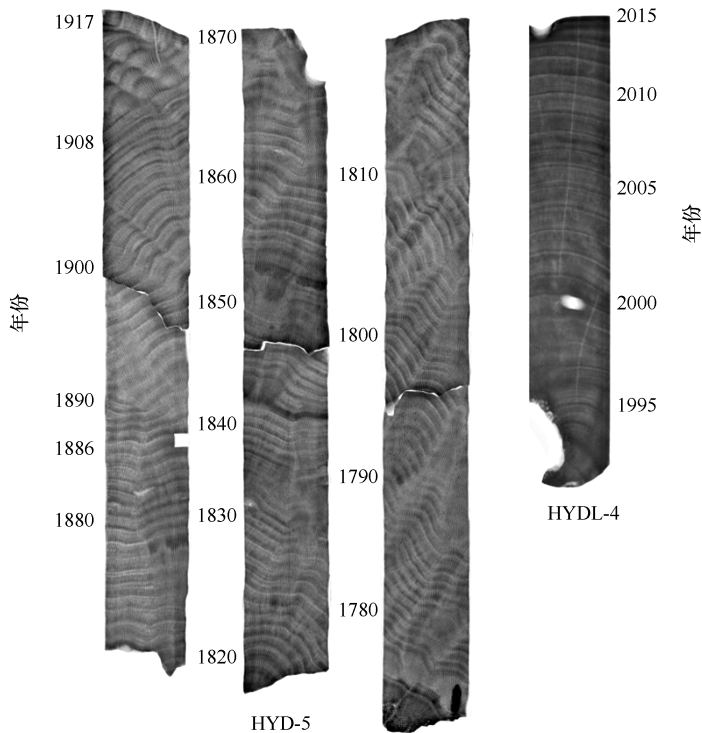


图 2 样品 X 光照片
Fig.2 X-radiography of coral samples

2.2 定年与生长率测量

HYDL-4 采样点采集到的为活珊瑚,顶部年龄即 2015 年,其余年份通过数生长条带确定,生长时段为 1992—2015 年。HYD-5 采样点采集到珊瑚以 U—Th 测年(测年由澳大利亚昆士兰大学完成)为依据(表 1),其余年份再通过数珊瑚年层来确定,覆盖时段为 1778—1917 年。一般珊瑚生长率的定义为相邻年密度条带之间的间隔,即是珊瑚骨骼生长轴上每年的生长宽度,反映了珊瑚的生长速度^[33]。根据 X 光片实

际情况,本文采取直接测量和图像灰度分析相结合的方法^[28]获取骨骼生长率数据。因 HYDL-4 顶部 1~2 cm 和底部 3~4 cm 以及 HYD-5 顶部 5~6 cm 和底部 1~2 cm 位置有钻孔生物虫孔,可能影响了珊瑚的生长,因此本文未使用 HYDL-4 顶部两年(2014—2015 年)和底部 3 年(1992—1994 年)的数据,最终使用了 HYDL-4 样品 1995—2013 年的生长率数据以及 HYD-5 样品 1780—1910 年的生长率数据。

表 1 黄岩岛珊瑚 U—Th 测年
Tab.1 U—Th series ages of corals from the Huangyan Island

样品编号	U 浓度 / 10^{-6}	^{232}Th 浓度 / 10^{-9}	^{230}Th / ^{232}Th	^{230}Th / ^{238}U	^{234}U / ^{238}U	年龄/ka (未校正)	年龄/ka (校正)	$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 初始比
HYD-5	2.3164	0.244	40.4	0.001 40	1.145 7	0.133	0.130	1.145 8

3 结果与讨论

3.1 拼接与校正

黄岩岛的珊瑚生长率分别记录了 1778—1917 年

和 1992—2015 年两个时段(图 2),缺少 1918—1991 年的记录。为了时间序列的完整性以及年代的准确性,本文选用经过 U—Th 定年的西沙样品 YXN1-2 生长率数据^[28]来弥补缺少的记录,同时 YXN1-2 样

品珊瑚生长率有 X 光片作为参照,可进一步比对,而未选用聂宝符等^[34]只经过交叉定年的生长率序列。利用 YXN1-2 样品珊瑚生长率(1885—2007 年)与黄岩岛附近海域 SST 进行相关分析(利用 SPSS 22.0),显示二者具有显著的正相关关系($r=0.501, p<0.01, n=123$),表明 YXN1-2 样品珊瑚生长率记录或许可以填补这一时段的缺失。此外, YXN1-2 与 HYDL-4 样品重叠时段(1995—2007 年)以及 YXN1-2 与 HYD-5 样品重叠时段(1885—1910 年)的峰、谷值具有较好地对应,且均显著正相关(r 分别为 0.70 和 0.68),同时,对 1961—2015 年黄岩岛海域和西沙永兴岛海域的海表温度距平(sea surface temperature anomaly, SSTA)(相对于 1961—1990 年平均值)进行了相关分析,显示二者具有显著正相关关系($r=0.925, p<0.01, n=55$),进一步说明利用 YXN1-2 (1911—1994 年)样品珊瑚生长率填补黄岩岛缺失时段的记录是可行的。尽管上述方法存在不足,但也是

目前较为切实可行的一种校正两条不连续序列之间可能存在偏移量的方法。因此,将 HYDL-4 样品数据作为基准,对 YXN1-2 样品数据进行偏移量校准,先对重叠时段进行均值和标准差校正,再推广到整个序列。对校正后的重叠部分的珊瑚生长率取平均值,进而再合成一条完整的 1780—2013 年南海中部黄岩岛海域的珊瑚生长率序列,即“HYDC”(图 3)。西沙海域的珊瑚生长率与黄岩岛海域珊瑚生长率进行拼接可能会带来一定的误差,两个海域的珊瑚生长率在 1890—1910 年时段虽然峰谷值能够一一对应,但是黄岩岛海域珊瑚生长率在该时段的变化幅度要明显大于西沙海域珊瑚生长率(图 3),可能是由于珊瑚个体差异以及测量时带来的误差造成的,拼接时为了保证序列的连续性,同时保证拼接时段能够最大限度的代表黄岩岛海域的珊瑚生长,在拼接时段选取了二者的平均值,有可能会掩盖黄岩岛海域的局地效应。

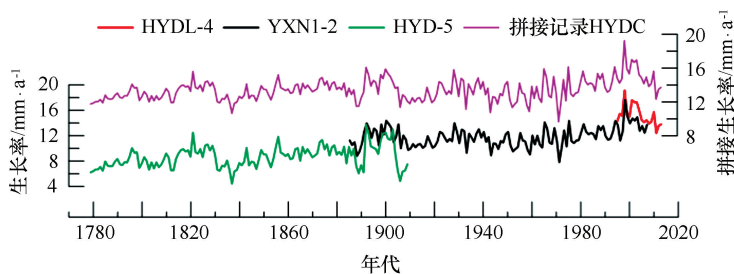


图 3 1780—2013 年黄岩岛海域滨珊瑚生长率记录(红色线为黄岩岛 HYDL-4 样品珊瑚生长率;绿色线为黄岩岛 HYD-5 样品珊瑚生长率;黑色线为永兴岛 YXN1-2 样品珊瑚生长率^[28];粉色线为拼接生长率记录 HYDC)

Fig.3 Records of extension rates of *Porites* in the Huangyan Island from 1780 to 2013 (extension rates of coral HYDL-4 (red line), HYD-5 (green line), YXN1-2^[28] (black line), composite records HYDC (pink line))

3.2 生长率、SSTA 相关性分析

由于缺少 1961 年以前器测记录,而之后的网格 SST 可信度高,同时为了减小误差,因此利用 HYDC 记录的 1961—2013 年时段的年生长率与年平均 SSTA 进行相关分析(图 4),显示二者具有显著的正相关关系($r=0.697, p<0.01, n=53$),相关系数与前人在西沙以及海南岛所计算出的生长率和 SST 相关系数较为类似^[26,28,35—36]。Lough 和 Barnes^[23]研究表明除了温度以外,光照、盐度、大气 CO₂ 浓度等都会对珊瑚生长产生影响,但 SST 仍然是控制珊瑚生长的最主要影响因子。进一步对生长率与 SSTA 进行 10 a 低通滤波处理,分析年代际尺度上生长率与 SSTA 的相关关系,结果显示二者相关系数为 0.837($p<0.01$,

$n=53$),说明在年代际尺度上 SST 是控制黄岩岛珊瑚生长率的最主要影响因子。利用 HYDC 生长率与 SSTA 建立了二者的回归方程,

$$SSTA = 0.349 \cdot G - 4.740$$

$$(r = 0.697, p < 0.01, n = 53), \quad (1)$$

式中, G 为生长率。

进而利用方程(1)以及 HYDC 生长率序列转换为 1961 年以来黄岩岛海域年际 SSTA 序列(图 5)。

3.3 校准与检验

参照 Gorman 等^[37]校准—验证方法,对重建 SSTA 进行可靠性检验(图 5)。利用 1986—2013 年生长率与对应时段 HadISSTA 进行校准:

$$SSTA = 0.327 \cdot G - 4.386$$

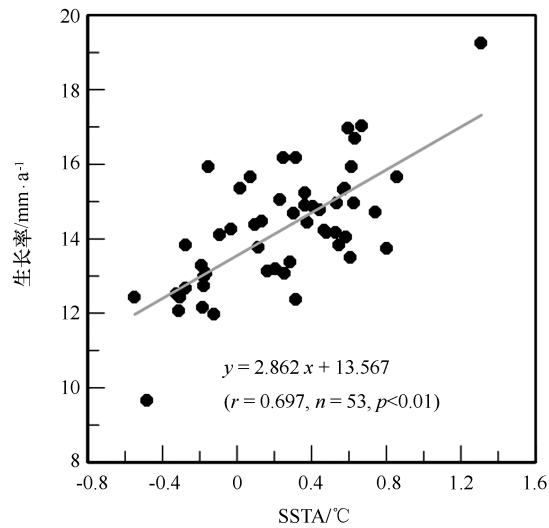


图 4 珊瑚生长率与 SSTA 的关系

Fig.4 Relationship between coral growth rates and SSTA

$(r = 0.596, p < 0.01, n = 28).$ (2)

利用 1961—1985 年时段生长率与对应时段 HadISS-TA 进行验证:

$SSTA = 0.311 \cdot G - 4.252$
 $(r = 0.637, p < 0.01, n = 25).$ (3)

校准时段与验证时段生长率与 SSTA 相关性变化不大,整体上生长率与 SSTA 关系比较稳定。利用方程(1)重建的 SSTA 记录与 HadISSTA(1961—2013

年)平均误差为 0.31℃(最大误差 0.85℃)。进一步利用方程(1)将 SSTA 序列拓展至 1780 年(图 6),黄岩岛海域重建 SSTA 与聂宝符等^[34]重建的西沙海域 SSTA 变化大致是一致的,但在某些时段如(1890—1910 年、1936—1945 年)仍存在差异,导致这种差异的主要原因是珊瑚个体之间的差异所致(在 1890—1910 年时段我们用了两个珊瑚芯(HYD-5、YXN1-2),而聂宝符等在该时段只用了一个珊瑚芯(Sy-7),HYD-5 珊瑚生长率在 1890—1910 年有较大幅度的变化,同样取自西沙的 YXN1-2 样品在该时段本身也与 Sy-7 珊瑚生长率存在一定差异,HYD-5 与 YXN1-2 的拼接放大了两个序列的误差;其次,这种差异可能由于定年误差所致,本文年代序列的确定是基于珊瑚高精度 U—Th 测定年代,而聂宝符等所用 Sy-7 珊瑚的年代框架是基于交叉定年法,即根据不同珊瑚个体在相同的年份具有相似的生长特征这一假设;另一方面是由于测量误差造成的,本文所用的珊瑚生长率是采用直接测量以及图像灰度分析相结合的方法,利用图像处理软件读取的生长率,可精确到 0.01 mm/a,而聂宝符等采用的是直接测量法读取的生长率,只能精确到 1 mm/a;第四个原因则可能是由于珊瑚生长环境的区域差异所致,即西沙群岛与黄岩岛海域之间的系统差异。

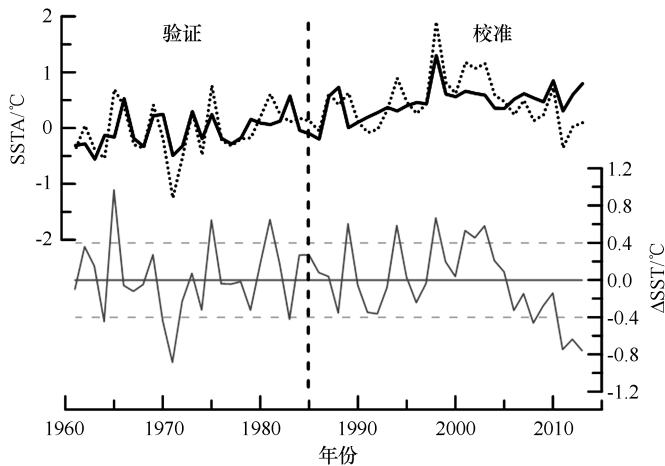


图 5 重建 SSTA 校准(1986—2013 年)与检验(1961—1985 年)

Fig.5 Reconstructed SSTA calibration (1986—2013) and verification(1961—1985)

黑色虚线为重建 SSTA,黑色实线为 HadISSTA,灰色线为重建 SSTA 和 HadISSTA 差值
Black dotted line indicates reconstructed SSTA, black solid line indicates HadISSTA, grey line indicates the misfit between reconstructed SSTA and HadISSTA

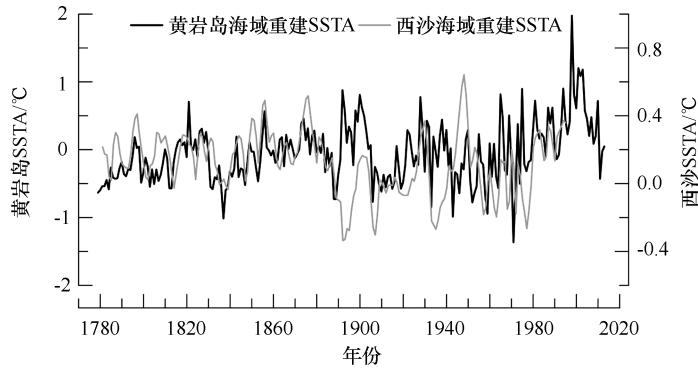


图6 黄岩岛海域重建 SSTA 与西沙海域重建 SSTA^[34]对比

Fig.6 Comparison between reconstructed SSTA in the Huangyan Island (black line) and reconstructed SSTA in the Xisha Island^[34] (grey line)

3.4 黄岩岛海域近 234 年来的 SSTA 变化及其对外强迫的响应

过去 234 年间,重建的黄岩岛海域的 SSTA 整体表现为波动上升趋势(图 7),整体变化趋势与北半球年平均温度^[38]变化基本一致,1780—1890 年升温幅度为 $0.31^{\circ}\text{C}/(100\text{ a})$,1891—2013 年升温幅度为 $0.38^{\circ}\text{C}/(100\text{ a})$,20 世纪的升温幅度略高于小冰期晚期,最高 SSTA 为 2°C (1998 年),年平均为 -0.1°C 。重建序列显示,在 1890 年前后黄岩岛海域 SSTA 有明显的变化,因此重建 SSTA 序列可以分为两段:1780—1890 年对应小冰期晚期 (Little Ice Age, LIA)、1890—2013 年对应 20 世纪现代暖期 (Current Warm Period, CWP)。小冰期晚期 (1780—1890 年),整体温度偏低,年平均 SSTA 为 -0.2°C ,比近 20 年 (1995—2015 年)的低 0.8°C ,最低温度为 -1°C (1837 年),尽管整体上比现代 SSTA 低,还是存在明显的相对冷—暖交替时期,1780—1816 年,1832—1850 年,1883—1891 年这 3 个时段偏冷;1817—1831 年和 1851—1882 年这两个时段偏暖。20 世纪现代暖期虽整体温度上升,但仍存在相对冷—暖时期,具体表现为 1905—1923 年、1941—1977 年相对偏冷;1891—1905 年、1924—1940 年以及 1978—2008 年相对偏暖。

一般来说,SSTA 变化的低频背景成分主要由太阳活动、火山、温室气体等外部强迫驱动^[39]。将重建 SSTA 记录与外强迫对比(图 7),小冰期晚期时太阳活动和火山活动对黄岩岛海域 SSTA 的变化贡献较大,记录中 1814—1815 年、1837 年以及 1890—1892 年的极低值对应火山活动强爆发时期,而 1780—1816 年以及 1832—1850 年相对低温对应于太阳活动道尔

顿极小期 (Dalton Minimum) (图 7),进一步验证了太阳活动和强火山活动是 LIA 气候的主要控制因素^[9,38–40]。小冰期结束后,SSTA 总体呈阶段性上升,温室气体 CO_2 浓度快速上升可能是主要控制因素^[39],升温最快为 1971—1998 年这一时段。对重建 SSTA 进行百年低通滤波,提取 SSTA 的低频部分,对滤波后的 SSTA 与太阳辐射强迫、火山指标、 CO_2 浓度进行多元回归分析,结果显示太阳活动、火山、温室气体等外部强迫可以解释 SSTA 低频背景成分 47.8% 的变化,说明除了外强迫如太阳活动、火山、温室气体外,南海 SST 仍然受到其他因素的影响,如洋流、季风等要素被认为是导致南海 SST 产生变化的直接原因。南海位于东亚季风区,冬季盛行东北季风,夏季盛行西南季风,季风是影响南海 SST 的一个重要因素;而南海环流主要受季风的影响通过与邻近海域的水交换来改变南海的热收支状况^[41],1971 年的显著低温事件,主要与当年冬季风偏强有关^[26]。太阳辐射^[42]、火山^[43]都会对季风产生明显的影响,从而进一步影响 SST,由于各因素之间的复杂的相互作用,很难去评估每个因素的贡献。除以上这些因素,南海 SST 还受到气候系统内部变率的影响,如 1998 年以来 SSTA 呈现下降趋势,而温室气体 CO_2 浓度仍处于上升趋势,这种变暖停滞现象被认为可能和太平洋年代际振荡 (Pacific Decadal Oscillation, PDO) 位相转变有关^[44]。以上说明黄岩岛海域 SST 并非受单一因素驱动,而是多种因素共同作用的结果。

3.5 黄岩岛海域 SSTA 记录的年代际信号

进一步对于重建 SSTA 进行频谱分析(图 8),结果显示 1780 年以来记录了几个显著性的周期:其中包括 26~34 a、2.5~4.8 a 这几个显著周期。一般来

说 ENSO(厄尔尼诺和南方涛动的简称)典型周期为 3~7 a, PDO 的周期一般为 20~30 a^[48]。26~34 a 可能是 PDO 的信号,而 2.5~4.8 a 对应于 ENSO 周期。而接近太阳黑子活动的 9 a 周期并未通过显著性检验,由此来看,太阳黑子活动导致的太阳辐射变化并不是控制 SST 年代际变率的主要因素,南海中部黄岩岛海域 SST 在年代际尺度上可能主要受 PDO 控制。南海其他海域的珊瑚指标同样检测出类似的年

代际信号^[49]。Deng 等^[50]在对海南岛的近 150 年珊瑚 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 序列进行研究时发现二者在年代际尺度上的变化恰好与 PDO 的位相转变相对应,很可能反映了 PDO 对南海区域气候的影响。在南部的 Sr/Ca 记录重建的 SST 中同样检测到了显著的年代际信号,认为与 PDO 有关^[18]。这些都进一步证实了黄岩岛海域 SST 的年代际变化很可能受 PDO 影响。

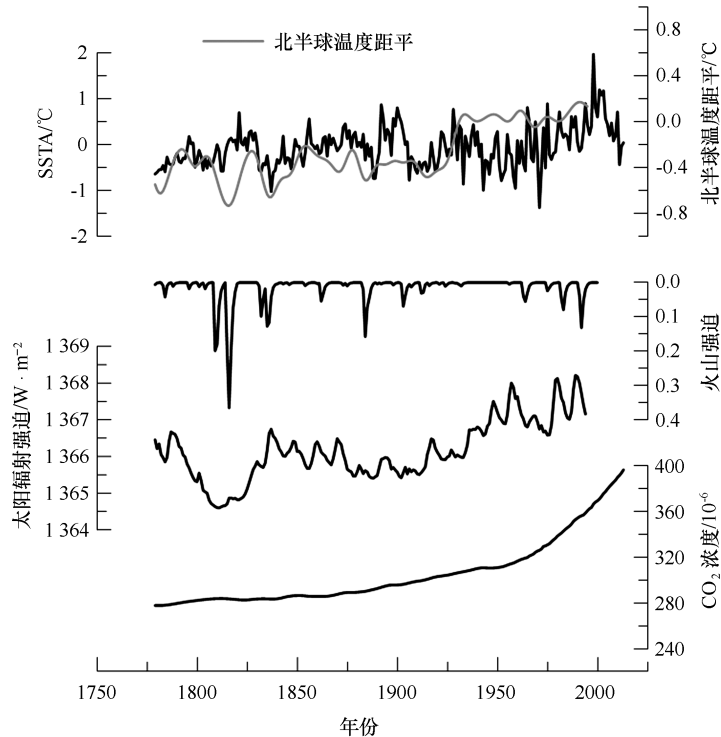


图 7 黄岩岛海域 SSTA 对太阳辐射强迫^[45]、火山活动^[46]、大气 CO_2 ^[47] 的响应

Fig.7 Records of potential forcing (solar radiative forcing proxy reconstructed by Lean et al^[45], volcanic radiative forcing proxy reconstructed by Crowley and Unterman^[46], CO_2 radiative forcing proxy reconstructed by Macfarling Meure et al^[47]) influences on temperature compared to reconstructed SSTA at the Huangyan Island

为进一步验证重建 SSTA 序列记录的年代际信号为 PDO 信号,首先去除线性趋势,将去趋势的 SSTA 以及 PDO 指数 (<http://jisao.washington.edu/pdo/PDO.latest>) 进行 10 a 的低通滤波(趋势去除和低通滤波均通过 Past 软件完成),并开展相关性分析,二者具有显著的正相关关系($r=0.440$, $p<0.01$, $n=113$)。由于器测 PDO 记录较短,为了理解 PDO 在长时间尺度上的变化,前人基于树轮^[7-8,51-52]、珊瑚^[13,53]及其他代用资料^[54]建立了较长尺度的 PDO 序列。将重建的黄岩岛海域 SSTA 与 D'Arrigo 和 Wilson^[52]重建的亚洲区域春季 PDO 指标以及 Shen

等^[54]利用中国东部地区夏季降水指标重建的 PDO 序列进行对比(图 9),SSTA 基本上与重建 PDO 序列同步变化(r 分别为 0.402($p<0.01$, $n=226$)和 0.378($p<0.01$, $n=220$))。同时,重建 SSTA 的几个冷暖位相转变时间(1891 年、1922 年、1943 年、1977 年)接近 PDO 位相转变时间^[48,55],并呈同相变化。而在 LIA 晚期(1780—1890 年),存在 1789 年、1831 年、1855 年、1882 年几个突变时间点,接近于 Shen 等^[54]及 D'Arrigo 和 Wilson^[52]重建 PDO 序列冷—暖位相转变时间。在年代际尺度上,黄岩岛附近海域 SSTA 的变化特征基本与 PDO 呈同步变化。因此,我们推

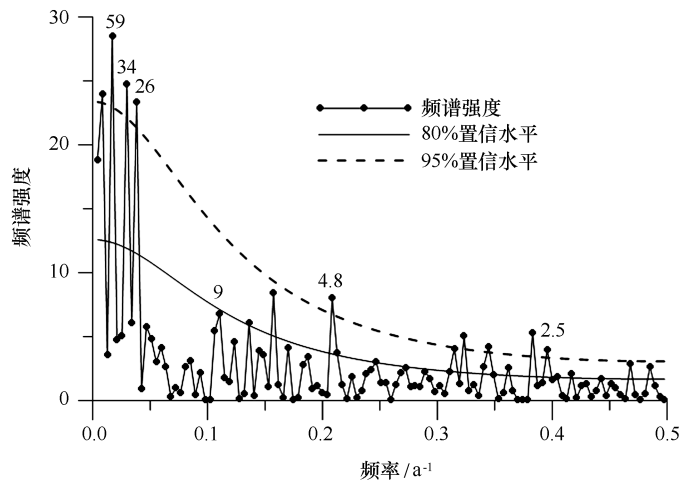


图 8 黄岩岛海域重建 SSTA 频谱分析

Fig.8 Spectral analysis of reconstructed SSTA at the Huangyan Island

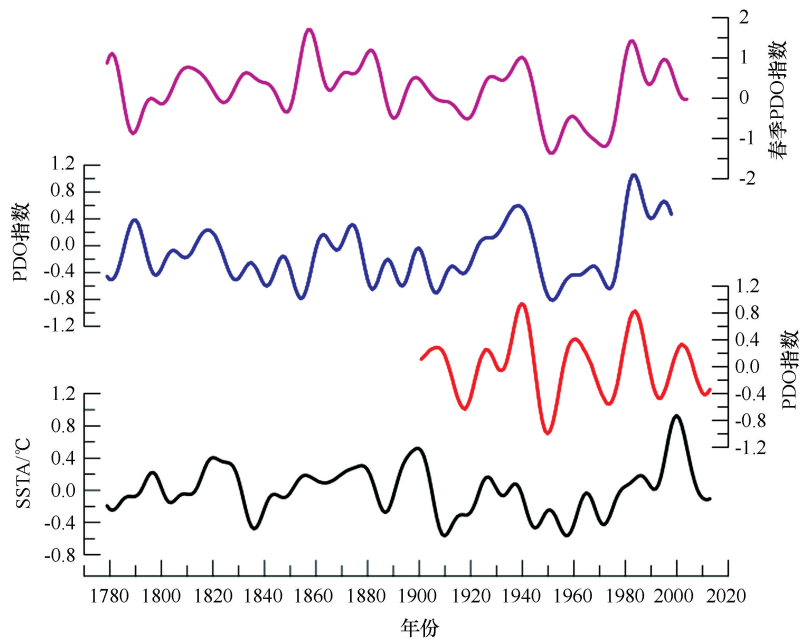


图 9 重建 SSTA (黑色线) 与各重建 PDO 指标对比 (粉色线为 D'Arrigo 和 Wilson^[52] 重建的春季 PDO; 蓝色线为 Shen 等^[54] 重建的 PDO; 红色线为观测 PDO)

Fig.9 A comparison of reconstructed SSTA (black line) with observed PDO (red line) and other reconstructed PDO respectively by D'Arrigo and Wilson^[52] (pink line) and Shen et al^[54] (blue line)

测 PDO 可能是黄岩岛海域 SSTA 年代际变化的主要贡献者。

对黄岩岛附近海域重建 SSTA 进行连续小波分析(图 10),结果显示黄岩岛海域 SST 年代际变率并不是持续不变的,在 1840—1890 年、1910—1970 年、1985—2010 年有显著的年代际变率信号,1890 年以后 SSTA 年代际变率增强,可能和全球变暖有关。而

研究显示 PDO 震荡周期也随着全球变暖发生了变化,Shen 等^[54] 利用中国东部地区夏季降水指标重建的 PDO 序列显示,在 LIA 时 PDO 震荡模式主要受太阳辐射等外强迫控制,以 75~115 a 周期震荡为主, LIA 结束后的 PDO 震荡模式主要受全球变暖影响,以 50~70 a 周期震荡为主。Delong 等^[14] 的研究显示热带西南太平洋 SST 年代际变率周期和强度均在

1893 年以后发生改变,可能指示了该海域的自然变率发生了转变。热带太平洋北部和南部年代际变率在 1890 年之后都发生了改变,可能指示整个热带太

平洋内部海洋变率发生了改变。因此我们推测南海中部黄岩岛海域 SST 年代际周期的变化可能与全球变暖导致的太平洋内部年代际变率变化有关。

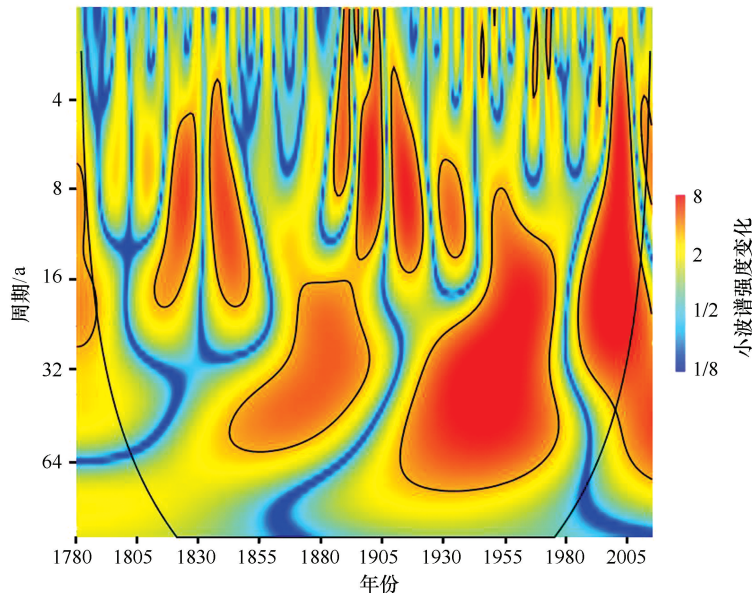


图 10 黄岩岛海域重建 SSTA 连续小波分析(采用墨西哥帽小波(DOG $m=2$))

Fig.10 Wavelet analysis of reconstructed SSTA at the Huangyan Island (using Mexican hat wavelet (DOG $m=2$))

4 结论

本文首次开展了黄岩岛海区滨珊瑚生长率研究,并利用南海中部两个海区(黄岩岛和西沙永兴岛)的滨珊瑚整合了一条 234 年的连续生长率序列,并根据生长率与 SSTA 的关系,重建了 1780—2013 年黄岩岛附近海域的 SSTA 变化。总体上 SSTA 呈波动上升趋势,年平均 SSTA 为 -0.1°C ,升温率为 $0.22^{\circ}\text{C}/(100\text{ a})$,最高 SSTA 为 2°C (1998 年),自 1998 年以来 SSTA 出现下降趋势。LIA 晚期(1780—1890 年)整体偏冷,相对近 20 年(1995—2015 年)的低 0.8°C ,最低 SSTA 为 -1°C (1837 年)。LIA 晚期的显著低温事件可能主要与周围的火山活动以及太阳活

动有关,1890 年以来,可能由于人类活动排放的温室气体影响,SST 快速上升,标志着南海 LIA 结束。频谱分析显示,26~34 a 是黄岩岛海域 SSTA 最显著的年代际周期,类似于 PDO,自 1780 年以来的 SSTA 年代际变化基本与 PDO 冷—暖位相变化一致。南海中部 SSTA 年代际变率在 1890 年之后增强,可能与全球变暖导致的太平洋内部年代际变率变化有关。自 1780 年以来南海中部黄岩岛海域 SSTA 年代际变化并不是持续不变的,可能使未来气候变化更加难以预测。

致谢:感谢澳大利亚昆士兰大学放射性同位素实验室提供年代测试!

参考文献:

- [1] 晏宏. 南海西沙群岛晚全新世高分辨率气候环境变化[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2012.
Yan Hong. High resolution climatic and environmental changes in Xisha Islands of South China Sea during the late Holocene[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2012.
- [2] Trenberth K E, Hurrell J W. Decadal atmosphere-ocean variations in the Pacific[J]. Climate Dynamics, 1994, 9(6): 303—319.
- [3] Liu Z. Dynamics of interdecadal climate variability: a historical perspective[J]. Journal of Climate, 2012, 25(6): 1963—1995.
- [4] Balmaseda M A, Trenberth K E, Källén E. Distinctive climate signals in reanalysis of global ocean heat content[J]. Geophysical Research Letters, 2013, 40(9): 1754—1759.
- [5] Kosaka Y, Xie S P. Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling[J]. Nature, 2013, 501(7467): 403.

- [6] Meehl G A, Hu A, Arblaster J M, et al. Externally forced and internally generated decadal climate variability associated with the interdecadal Pacific oscillation[J]. *Journal of Climate*, 2013, 26(18): 7298—7310.
- [7] Biondi F, Gershunov A, Cayan D R. North Pacific decadal climate variability since 1661[J]. *Journal of Climate*, 2001, 14(1): 5—10.
- [8] D'arrigo R, Villalba R, Wiles G. Tree-ring estimates of Pacific decadal climate variability[J]. *Climate Dynamics*, 2001, 18(3/4): 219—224.
- [9] Mann M E, Zhang Z, Rutherford S, et al. Global signatures and dynamical origins of the Little Ice Age and Medieval Climate Anomaly[J]. *Science*, 2009, 326(5957): 1256—1260.
- [10] D'arrigo R, Wilson R, Liepert B, et al. On the 'divergence problem' in northern forests: a review of the tree-ring evidence and possible causes[J]. *Global and Planetary Change*, 2008, 60(3): 289—305.
- [11] Yu K F, Zhao J X, Wei G J, et al. 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[J]. *Global and Planetary Change*, 2005, 47(2/4): 301—316.
- [12] Yu K F. Coral reefs in the South China Sea: Their response to and records on past environmental changes[J]. *Science China Earth Sciences*, 2012, 55(8): 1217—1229.
- [13] Linsley B K, Zhang P, Kaplan A, et al. Interdecadal-decadal climate variability from multicoral oxygen isotope records in the South Pacific Convergence Zone region since 1650 AD[J]. *Paleoceanography*, 2008, 23(2): PA2219.
- [14] Delong K L, Quinn T M, Taylor F W, et al. Sea surface temperature variability in the southwest tropical Pacific since AD 1649[J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2(11): 799—804.
- [15] Cole J E, Dunbar R B, Mcclanahan T R, et al. Tropical pacific forcing of decadal SST variability in the western indian ocean over the past two centuries[J]. *Science*, 2000, 287(5453): 617—620.
- [16] 李娟, 左军成, 李艳芳, 等. 南海海表温度的低频变化及影响因素[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2011, 39(5): 575—582.
Li Juan, Zuo Juncheng, Li Yanfang, et al. Low-frequency variation and influence factors of sea surface temperature in South China Sea[J]. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2011, 39(5): 575—582.
- [17] 张秀芝, 裘越芳, 吴迅英. 近百年中国近海海温变化[J]. 气候与环境研究, 2005, 10(4): 799—807.
Zhang Xiuzhi, Qiu Yuefang, Wu Xunying. The long-term change for sea surface temperature in the last 100 years in the offshore sea of China[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2005, 10(4): 799—807.
- [18] 林紫云, 余克服, 施祺, 等. 三沙市美济礁滨珊瑚记录的近百年海面温度变化[J]. 热带地理, 2016, 36(1): 27—33.
Lin Ziyun, Yu Kefu, Shi Qi, et al. Sea surface temperature variations during the last 100 years recorded in a *Porites* coral from the Mischief Reef of Sansha City[J]. *Tropical Geography*, 2016, 36(1): 27—33.
- [19] Sun Y, Sun M, Wei G, et al. Strontium contents of a *Porites* coral from Xisha Island, South China Sea: A proxy for sea-surface temperature of the 20th century[J]. *Paleoceanography*, 2004, 19(2): 1—10.
- [20] 蔡榕硕, 张启龙, 齐庆华. 南海表层水温场的时空特征与长期变化趋势[J]. 台湾海峡, 2009, 28(4): 559—568.
Cai Rongshuo, Zhang Qilong, Qi Qinghua. Spatial and temporal oscillation and long-term variation in sea surface temperature field of the South China Sea[J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2009, 28(4): 559—568.
- [21] 王道静. 南海海表盐度的分布特征[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
Wan Daojing. Distribution characteristics of the sea surface salinity of the South China Sea[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
- [22] Nie B F, Chen T G, Liang M T, et al. Relationship between coral growth rate and sea surface temperature in the northern part of South China Sea during the past 100 a[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 1997, 40(2): 173—182.
- [23] Lough J M, Barnes D J. Environmental controls on growth of the massive coral *Porites*[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2000, 245(2): 225—243.
- [24] Saenger C, Cohen A L, Oppo D W, et al. Surface-temperature trends and variability in the low-latitude North Atlantic since 1552[J]. *Nature Geoscience*, 2009, 2(7): 492—495.
- [25] Vázquez-Bedoya L F, Cohen A L, Oppo D W, et al. Corals record persistent multidecadal SST variability in the Atlantic Warm Pool since 1775 AD[J]. *Paleoceanography*, 2012, 27(3): PA3231.
- [26] 聂宝符, 陈特固, 梁美桃, 等. 近百年来南海北部珊瑚生长率与海面温度变化的关系[J]. 中国科学: D辑, 1996, 26(1): 59—66.
Nie Baofu, Chen Tegu, Liang Meitao, et al. Relationship between coral growth rate and sea surface temperature in the northern part of South China Sea during the past 100 a[J]. *Science in China: Series D*, 1996, 26(1): 59—66.
- [27] 黄博津, 余克服, 张会领, 等. 利用珊瑚生长率重建西沙海域罗马暖期中期海温变化[J]. 热带地理, 2013, 33(3): 237—241.
Huang Bojin, Yu Kefu, Zhang Huiling, et al. Sea surface temperature variations during the Middle Rome Warm Period as reconstructed by *Porites* coral growth rates in the Xisha Islands[J]. *Tropical Geography*, 2013, 33(3): 237—241.
- [28] 张会领, 余克服, 施祺, 等. 珊瑚生长率重建西沙海域中晚全新世海温变化[J]. 第四纪研究, 2014, 34(6): 1296—1305.
Zhang Huiling, Yu Kefu, Shi Qi, et al. Sea surface temperature variations during the Mid Late Holocene reconstructed by *Porites* coral growth rates in the Xisha Islands[J]. *Quaternary Sciences*, 2014, 34(6): 1296—1305.
- [29] 苏瑞侠, 孙东怀. 南海北部滨珊瑚生长的影响因素[J]. 地理学报, 2003, 58(3): 442—451.
Su Ruixia, Sun Donghuai. The influencing factors of corals *Porites* in the northern part of the South China Sea[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(3): 442—451.

- [30] 施祺, 余克服, 陈天然, 等. 南海南部美济礁 200 余年滨珊瑚骨骼钙化率变化及其与大气 CO₂ 和海水温度的响应关系[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(1): 71—82.
- Shi Qi, Yu Kefu, Chen Tianran, et al. Two centuries-long records of skeletal calcification in massive *Porites* colonies from Meiji Reef in the southern South China Sea and its responses to atmospheric CO₂ and seawater temperature[J]. Science China: Earth Sciences, 2012, 42(1): 71—82.
- [31] 黄金森. 南海黄岩岛的一些地质特征[J]. 海洋学报, 1980, 2(2): 112—123.
- Huang Jinsen. Some geological features of the Huangyan Dao (Huangyan Island), South China Sea[J]. Haiyang Xuebao, 1980, 2(2): 112—123.
- [32] Rayner N A, Parker D E, Horton E B, et al. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2003, 108(D14): 1063—1082.
- [33] Lough J M, Barnes D J. 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[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 1997, 211(1): 29—67.
- [34] 聂宝符, 陈特固, 彭子成. 由造礁珊瑚重建南海西沙海区近 220 a 海面温度序列[J]. 科学通报, 1999, 44(17): 1885—1889.
- Nie Baofu, Chen Tegu, Peng Zicheng. Sea surface temperature series in the Xisha sea area of the South China Sea by reef-building corals over the last 220 years[J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 44(17): 1885—1889.
- [35] 施祺, 张叶春, 孙东怀. 海南岛三亚滨珊瑚生长率特征及其与环境因素的关系[J]. 海洋通报, 2002, 21(6): 31—38.
- Shi Qi, Zhang Yechun, Sun Donghuai. Characteristics of growth rate of Porite coral from Sanya, Hainan Island and its relationship to environmental variables[J]. Marine Science Bulletin, 2002, 21(6): 31—38.
- [36] 江巧文, 曹志敏, 王道儒, 等. 琼东海域橙黄滨珊瑚骨骼生长特性及其主要影响因素[J]. 应用生态学报, 2016, 27(3): 953—962.
- Jiang Qiaowen, Cao Zhimin, Wang Daoru, et al. Growth characteristics of *Porites* lutea skeleton in east sea area of Hainan Island, China and main affecting environmental factors[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(3): 953—962.
- [37] Gorman M K, Quinn T M, Taylor F W, et al. A coral-based reconstruction of sea surface salinity at Sabine Bank, Vanuatu from 1842 to 2007 CE [J]. Paleoceanography, 2012, 27(3): PA3226.
- [38] Mann M E, Zhang Z, Hughes M K, et al. Proxy-based reconstructions of hemispheric and global surface temperature variations over the past two millennia[J]. The National Academy of Sciences of the USA, 2008, 105(36): 13252—13257.
- [39] Hegerl G C, Crowley T J, Allen M, et al. Detection of human influence on a new, validated 1500-year temperature reconstruction[J]. Journal of Climate, 2007, 20(4): 650—666.
- [40] Jones P D, Mann M E. Climate over past millennia[J]. Reviews of Geophysics, 2004, 42(2): RG2002.
- [41] Dong D P, Zhou W D, Yang Y, et al. On outflow passages in the South China Sea[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2010, 27(1): 60—68.
- [42] Sagawa T, Kuwae M, Tsuruoka K, et al. Solar forcing of centennial-scale East Asian winter monsoon variability in the mid- to late Holocene[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2014, 395: 124—135.
- [43] Man W, Zhou T. Response of the East Asian summer monsoon to large volcanic eruptions during the last millennium[J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(31): 4123—4129.
- [44] Meehl G A, Arblaster J M, Fasullo J T, et al. Model-based evidence of deep-ocean heat uptake during surface-temperature hiatus periods[J]. Nature Climate Change, 2011, 1(7): 360—364.
- [45] Lean J, Beer J, Bradley R S. Reconstruction of solar irradiance since 1610: Implications for climate change[J]. Geophysical Research Letters, 1995, 22(23): 3195—3198.
- [46] Crowley T J, Unterman M B. Technical details concerning development of a 1200 yr proxy index for global volcanism[J]. Earth System Science Data, 2013, 5(1): 187—197.
- [47] Macfarling Meure C, Etheridge D, Trudinger C, et al. Law dome CO₂, CH₄ and N₂O ice core records extended to 2000 years BP[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(14): L14810.
- [48] Mantua N J, Hare S R, Zhang Y, et al. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1997, 78(6): 1069—1079.
- [49] 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.
- Liu Yi, Peng Zicheng, Cheng Jiman, et al. 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[J]. Quaternary Sciences, 2006, 26(3): 470—476.
- [50] Deng W, Wei G, Xie L, et al. Variations in the Pacific Decadal Oscillation since 1853 in a coral record from the northern South China Sea[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2013, 118(5): 2358—2366.
- [51] Macdonald G M, Case R A. Variations in the Pacific Decadal Oscillation over the past millennium[J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32(8): L08703.
- [52] D'arrigo R, Wilson R. On the Asian expression of the PDO[J]. International Journal of Climatology, 2006, 26(12): 1607—1617.
- [53] Felis T, Suzuki A, Kuhnert H, et al. Pacific Decadal Oscillation documented in a coral record of North Pacific winter temperature since 1873[J]. Geophysical Research Letters, 2010, 37(14): L14605.
- [54] Shen C, Wang W C, Gong W, et al. A Pacific Decadal Oscillation record since 1470 AD reconstructed from proxy data of summer rainfall over eastern China[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(3): L03702.

- [55] Minobe S. A 50—70 year climatic oscillation over the North Pacific and North America[J]. *Geophysical Research Letters*, 1997, 24(6): 683—686.

Interdecadal variability of sea surface temperature from 1780 to 2013 recorded in corals from the Huangyan Island in the South China Sea

Lin Lifang^{1,2}, Yu Kefu^{1,3}, Tao Shichen¹, Han Tao^{1,2}, Zhang Huiling⁴

(1. *Key Laboratory of Ocean and Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China*; 2. *University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China*; 3. *Coral Reef Research Center of China, Guangxi University, Nanning 530004, China*; 4. *Department of Ocean Engineering, Faculty of Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China*)

Abstract: The relationship between coral growth rate and sea surface temperature anomaly (SSTA) was used to reconstruct the SSTA in the central South China Sea Since 1780. Our reconstruction shows that SSTA over the period 1780—1890, which correspond to the latter part of Little Ice Age, was cold relatively, the average SSTA was -0.2°C , the coldest SSTA was -1°C in 1837. After 1890, the SSTA increased most fast between 1971 to 1998, the highest SSTA was 2°C in 1998, but there was a downward trend after 1998, which is basically synchronous with the change of land temperature in Northern Hemisphere. The spectral analysis shows a significant period of 26—34 a for the SSTA in the central of South China Sea, with the phase transitions correspond to the decadal shifts of the Pacific Decadal Oscillation. The wavelet analysis indicated that the interdecadal oscillation of the SSTA in the central South China Sea was not stable over the past 234 years. After entering the Current Warm Period, the interdecadal variability has enhanced distinctly, which may be related to the changes in the internal variability of the ocean associated with the global warming. Our result, together with the change in the decadal-scale SST variability of the tropical southwest Pacific in the 1890, suggested that the internal variability of the tropical Pacific has changed since 1890.

Key words: Huangyan Island; coral growth rate; SSTA; Little Ice Age; interdecadal variability