

李悦儿, 余克服. 珊瑚记录的全新世 ENSO 变化及其机制研究进展[J]. 海洋地质前沿, 2024, 40(6): 13-25.

LI Yueer, YU Kefu. Coral records of Holocene ENSO and its revealed mechanism[J]. Marine Geology Frontiers, 2024, 40(6): 13-25.

珊瑚记录的全新世 ENSO 变化及其机制研究进展

李悦儿¹, 余克服^{1,2*}

(1 广西大学海洋学院, 广西南海珊瑚礁研究重点实验室, 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(广州), 广州 511458)

摘要:厄尔尼诺-南方涛动 (El Niño-Southern Oscillation, ENSO) 是地球气候系统中最强烈的年际振荡, 对全球天气及气候有重要影响。全新世作为与人类关系最为密切的地质时段, 重建该时段 ENSO 的活动历史、探索 ENSO 的变化规律, 将有助于提高对未来 ENSO 预测的准确性。本文基于珊瑚这一热带海洋的高分辨率气候记录载体, 首先介绍从珊瑚骨骼指标中提取 ENSO 信号、衡量 ENSO 变率的方法; 再梳理珊瑚记录的 ENSO 变率在早、中、晚全新世的变化历史; 最后总结基于珊瑚记录得出的全新世不同时间尺度的 ENSO 变化机制。结果显示: 珊瑚记录的 ENSO 信号可直接从其环境代用指标的极值变化中识别; 或通过谱分析、滤波等方法提取环境代用指标在时间序列中的 ENSO 周期, 再使用阈值分析、滑动窗口等方法定量分析 ENSO 的频率和振幅变化。珊瑚记录显示, 全新世 ENSO 呈波动变化的特征, 总体呈现自早全新世至中全新世 ENSO 变率不断减弱, 而晚全新世 ENSO 变率持续增强的趋势。基于珊瑚记录得出, 岁差变化引起的地表太阳辐射分布变化是全新世百年-千年尺度 ENSO 变化的主要因子, 而气候系统内部驱动可能是全新世年际-年代际尺度 ENSO 波动的主要原因。与全新世一万多年的时间跨度相比, 珊瑚记录的时间窗口累计仅数百年, 远未达到揭示 ENSO 活动规律和变化机制的程度, 因此未来需要进一步延长珊瑚记录的时间序列长度、扩大珊瑚记录的空间区域来源, 以揭示 ENSO 变化的规律和机制。

关键词: ENSO; 变率; 全新世; 珊瑚; 波动变化

中图分类号: P532; P736

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2023.127

0 引言

厄尔尼诺-南方涛动 (El Niño-Southern Oscillation, ENSO) 是热带太平洋海-气系统在正相位厄尔尼诺 (El Niño) 和负相位拉尼娜 (La Niña) 之间的气候振荡, 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^[1-3]。ENSO 直接影响热带太平洋的海表温度 (Sea Surface Temperature, SST)、海表盐度 (Sea Surface Salinity, SSS)、降水和热带气旋活动, 还能通过海洋与大气的遥相关影响全球范围的天气和气候变化, 造成局部地区的洪水、干旱、热浪等极端事件^[4-7]。统计数据显示, 中国重大旱涝灾害也一般发生在 ENSO 事件的发展与衰减阶段^[8]。因此, 未来迫切需要准确预测 ENSO 变化以预警并规避风险, 但器测资料记录 ENSO 活动的时间尺度远不足以讨论其长期变化的规律性和趋势性并探究不同气候背景下 ENSO 变化机制, 这就需要基于代用资料重建和延长 ENSO 的活动历史, 而全新世作为与人类关系最为密切的最新地质时段, 重建全新世 ENSO 变化对于全面理解过去 ENSO 活动的演化规律、探究 ENSO 变化的驱动机制、评估当前 ENSO 活动的现状以及提高未来 EN-

收稿日期: 2023-05-13

资助项目: 国家自然科学基金“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)

第一作者: 李悦儿 (1999—), 女, 在读硕士, 主要从事珊瑚古气候方面的研究工作. E-mail: yueeeer@126.com

* 通讯作者: 余克服 (1969—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事南海珊瑚礁地质和生态环境方面的研究工作. E-mail: kefuyu@scsio.ac.cn

SO 预测的准确性具有重要的理论及现实意义。

全新世始于末次冰期新仙女木事件(12 807±12 a BP)^[9] 的结束,气候从寒冷干燥中逐渐回暖^[10]。国际年代地层表(2022 年版)根据全新世期间 2 次大规模的气候突变事件(8.2 ka 冷事件^[11] 和 4.2 ka 冷事件^[12]),将全新世分为早期、中期和晚期 3 个时段,各期底部年代分别为 11.7、8.2 和 4.2 ka BP^[13]。数十年来大量研究基于冰芯^[14]、树轮^[15]、石笋^[16]、海洋沉积物^[17] 以及湖泊沉积物^[18] 等地质记录载体,揭示了全新世的 ENSO 活动特征,此外研究还表明,ENSO 变化与太阳辐射的季节性变化、亚洲季风、火山活动和全球变暖等因素密切相关^[19-20],但目前关于全新世 ENSO 活动的演变过程及其驱动机制的认识仍存在较大争议,这主要与各种代用资料之间的时间分辨率和定年误差存在较大差异有关。因此,重建历史时期的 ENSO 活动迫切需要更多来自热带海洋的高分辨率气候记录。

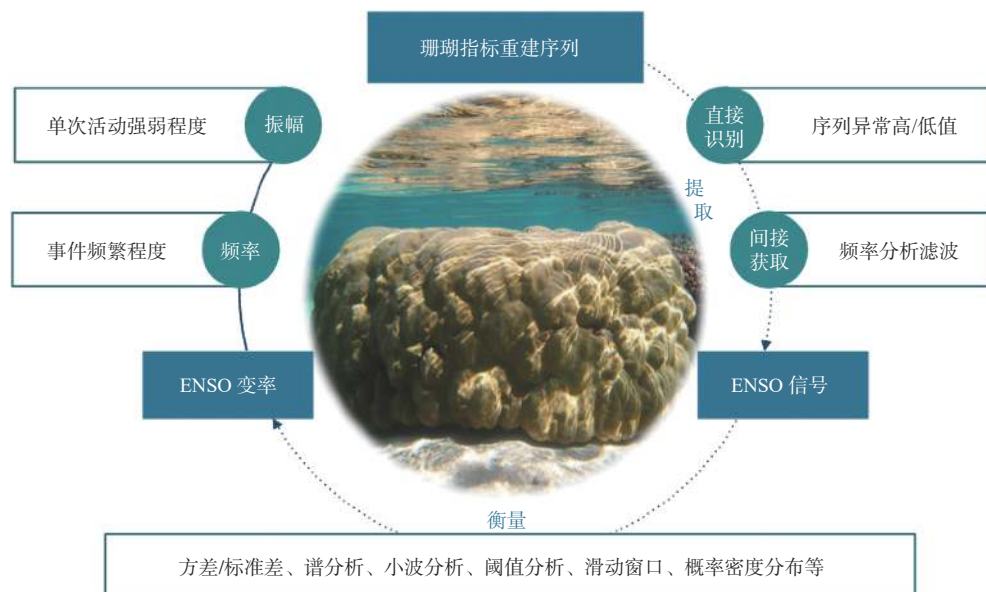
造礁珊瑚作为热带海洋气候环境演变的最佳记录载体之一,已广泛地应用于 ENSO 重建研究。其优势主要表现在:①造礁珊瑚广泛分布在热带海洋中,印度-太平洋区系石珊瑚属种丰富,具有随环境波动而周期性变化的生长模式^[21];②珊瑚骨骼自全新世以来基本上未发生成岩变化,适合高精度铀系定年,同时骨骼具有清晰的年生长纹层,这为气候环境演变研究提供了良好的时间标尺;③造礁珊瑚生长速率达 10~20 mm/a,可获取月甚至更高的时间分辨率记录,能够记录下 ENSO 极端事件的增

长、达峰和衰减的整个过程;④造礁珊瑚持续生长时间达数十年到数百年,可提供序列长且连续的气候环境记录;⑤珊瑚骨骼中一些地球化学指标如 Sr/Ca 值、 $\delta^{18}\text{O}$ 值等与温度、降雨等气候要素具有高度相关性,因此 ENSO 对海洋环境的影响如 SST、SSS、海平面、热带气旋、洋流和上升流等变化,可以被珊瑚骨骼记录下来^[22]。

本文总结珊瑚记录的全新世 ENSO 变化及其机制,包括珊瑚记录 ENSO 的研究方法、珊瑚重建的全新世 ENSO 变化以及全新世不同时间尺度 ENSO 变化的可能原因,以期通过系统梳理珊瑚古气候研究得出的不同时段、不同区域关于 ENSO 的认识,以促进珊瑚记录的 ENSO 变化及其机制的深入研究。

1 珊瑚记录 ENSO 的研究方法

ENSO 直接影响热带太平洋海区,导致一些异常的海洋环境变化,如热带太平洋东部在 El Niño 事件影响下会出现海表温度升高 2~8 °C、温跃层变深、近岸海流反向、热带气旋频发等现象^[1-6]。广泛分布在热带海洋的珊瑚对 ENSO 导致的环境变化响应非常敏感,高分辨率的珊瑚骨骼地球化学指标能够准确地揭示区域 SST 和 SSS 等变化。如图 1 所示,利用珊瑚重建 ENSO 的主要过程,就是基于珊瑚的年代框架构建环境指标的时间序列,再通过数学与统计学等分析方法从中提取 ENSO 信号并



图中为澄黄滨珊瑚(*Porites lutea*), 图片来源于 <https://www.oceansentry.org>

图 1 珊瑚记录 ENSO 的研究方法示意图

Fig.1 Research methods for coral reconstruction of ENSO

衡量 ENSO 变率。

1.1 珊瑚记录 ENSO 的指标

珊瑚记录的许多指标揭示的气候环境变化都与 ENSO 活动有关。珊瑚的生长指标如骨骼生长率、密度和钙化率, 物理指标如珊瑚骨骼荧光带, 地球化学指标如骨骼 Sr/Ca 值、 $\delta^{18}\text{O}$ 值、 $\delta^{13}\text{C}$ 值等, 这些指标能够指示与 ENSO 相关的 SST、SSS、海平面、洋流和上升流等的变化。其中, 珊瑚骨骼 Sr/Ca 和 $\delta^{18}\text{O}$ 在 ENSO 重建中最常用, 这是因为 ENSO 主要对 SST 和降雨产生影响。珊瑚骨骼 Sr/Ca 是记录 SST 的良好指标之一, 如 ALIBERT 和 MCCULLOCH^[23] 利用澳大利亚大堡礁现代滨珊瑚 Sr/Ca 值重建了 1965、1972 及 1982—1983 年与 El Niño 相关的低温现象。珊瑚骨骼 $\delta^{18}\text{O}$ 值同时受 SST 和海水 $\delta^{18}\text{O}$ 的影响, 其中海水 $\delta^{18}\text{O}$ 可以指示湿润或干燥的气候特征, 如 El Niño 事件期间, 西太平洋暖池向东扩张导致了印度尼西亚低压带东移和降雨增加, 造成中、西赤道太平洋区域珊瑚骨骼的 $\delta^{18}\text{O}$ 明显负异常, 而 La Niña 期间相对干冷的气候条件则造成珊瑚 $\delta^{18}\text{O}$ 的正异常^[24]。因此, 研究中还常用 $\delta^{18}\text{O}$ 与 Sr/Ca 组合揭示与 ENSO 事件相关的温度和降水变化^[25]。

1.2 建立珊瑚指标的时间序列

通过珊瑚记录重建历史时期的 ENSO 活动, 首先需要对珊瑚样品进行测年并建立其年代序列。常用的珊瑚年代测定方法有放射性碳(^{14}C)测年和铀系不平衡(^{230}Th)测年^[26]。 ^{14}C 测年方法受海洋碳库等因素的影响, 近年来在珊瑚的高精度年代测定中应用相对较少^[27]。铀系不平衡测年方法又常称 U-Th 定年, 具有精度高、测年范围大(约为 50 万年以来)等特点, 目前在珊瑚的年代测定中应用越来越多^[28]。因为珊瑚骨骼具有清楚的年纹层、珊瑚骨骼高分辨率的 Sr/Ca 等地球化学指标具有清楚的年周期等特点, 所以对一条完整的珊瑚岩芯通常只需要测定 1 个年代控制点, 之后通过对珊瑚年生长纹层、地球化学指标的年周期等计数, 就可建立起整个珊瑚样品的年代序列^[26]。

1.3 提取 ENSO 信号

ENSO 是全球范围内年际气候变化的最显著信号。在短时间尺度上, ENSO 信号直接表现为持续的海温异常现象, 这些反常的海洋环境会使珊瑚地

球化学指标的时间序列中出现异常高/低值。因此, 利用现代珊瑚的地球化学记录与器测记录的 ENSO 活动进行对照, 通过这些异常的特征直接在珊瑚记录序列中可识别出历史时期发生的 ENSO 事件。如 COLE 和 FAIRBANKS^[24] 利用 2 块塔拉瓦的滨珊瑚建立了 1959—1979 年复合 $\delta^{18}\text{O}$ 序列, 结果显示, 珊瑚记录在 1960—1961、1963、1965、1969、1972—1973、1976 和 1977 年出现 0.5%~0.7% 的负偏移, 而这些年份均与东太平洋 ENSO 事件的发生相对应, 并且偏移程度与 ENSO 事件强度也显著相关。

在年际尺度及更长时间尺度上, ENSO 信号表现为时间序列中显著的 2~7 a 的周期性波动。通过傅里叶变换、小波变换等方法将珊瑚指标时间序列的时域信号转化为频域信号, 再利用频谱分析其中存在的年际变率, 可以使用滤波根据 ENSO 的周期提取信号。在具体重建中使用的频谱分析和滤波会根据实际情况而有所不同, 主要使用的频谱分析有交叉谱分析、奇异谱分析、多窗口谱分析、功率谱分析、小波分析、谐波分析等, 主要使用的滤波有巴特沃斯滤波、高斯滤波、带通滤波、高通滤波、低通滤波等。其中, 普遍使用的带通滤波窗口在前人研究中有差异, 常用的有 2~7 a^[29]、3~7 a^[30] 和 2~8 a^[31], 这是因为需结合其研究区域现代珊瑚所记录的显著 ENSO 周期作为特定频段。

1.4 衡量 ENSO 变率

通过以上方法识别出珊瑚时间序列中的 ENSO 信号后, 需要进一步描述 ENSO 的变化情况, 而 ENSO 变率是时间尺度上 ENSO 变化频率高低和幅度大小的物理量, 在重建过程中主要用一定时段内 ENSO 事件的频率和振幅这两方面来衡量 ENSO 变率。频率是一定时段内 ENSO 周期性变化的次数, 用以描述 ENSO 事件的频繁程度; 振幅是单次 ENSO 事件强度可能达到的最大值, 用以描述 ENSO 事件的强弱程度, 在前人研究中还常将其表述为幅度、方差或强度。

目前研究中常使用滤波后序列的方差或标准差表示 ENSO 振幅, 同时根据现代 El Niño 和 La Niña 事件的阈值水平, 识别序列中的 ENSO 事件并判断 ENSO 活动的强弱状态。如 MCGREGOR 和 GAGAN^[32] 基于 1950 年后 Niño3.4 指数对现代 El Niño 事件的定义, 将现代珊瑚 1950—1997 年偏离 10 a 滑动平均年际 $\delta^{18}\text{O}$ 异常的平均值(0.18 ± 0.06)‰

定义为现代 El Niño 平均异常值,之后将高于现代 El Niño 平均异常值 $\pm 1\sigma$ 的年份定义为中度厄尔尼诺事件,高于现代 El Niño 平均异常值 $+1-2\sigma$ 的年份定义为强 El Niño 事件。阈值分析法在珊瑚记录的 ENSO 研究中应用较多,其中,阈值的选择是关键,需要结合各海区的实际情况分别优化 El Niño 和 La Niña 的阈值定义方法。对滤波后序列的方差和识别出的 ENSO 事件进行滑动窗口计数可以进一步量化 ENSO 频率变化。如 MCGREGOR 等^[33]分别对序列的方差和 ENSO 事件进行了 16 a 和 30 a 滑动窗口的计算,以评估自 1650 年以来的 ENSO 变率。COBB 等^[29]将 30 a 滑动窗口中 El Niño 和 La Niña 事件的数量定义为 ENSO 活动指数,并通过计算 2~7 a 带通滤波序列的 30 a 滑动标准偏差(以 5 a 为步长),以评估帕尔米拉岛珊瑚骨骼 $\delta^{18}\text{O}$ 序列中 ENSO 变率。

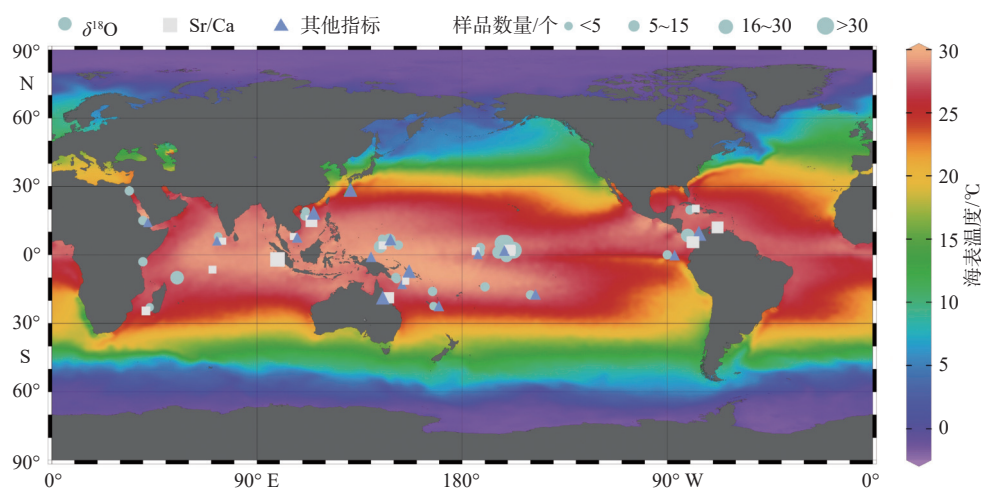
此外,应用功率谱分析、进化谱分析、小波分析等频谱分析以及概率密度函数统计等方法,也可以显示出 ENSO 变率变化。如 COLE 等^[34]对分离年际周期后的 $\delta^{18}\text{O}$ 序列进行进化谱分析,ENSO 在不同周期的振幅变化显示了 1930—1950 年 ENSO 变率变化。LEONARD 等^[35]使用连续小波变换对澳大利亚大堡礁滨珊瑚的荧光强度进行分析,可靠地再现了 1880—1985 年期间的 ENSO 变化。

以上从珊瑚记录中提取 ENSO 变化信息的方法是重建历史时期 ENSO 活动的重要前提,其优势在于能够提供特定地点高分辨率 ENSO 活动演化

过程的最稳定结果。近来的研究着重于改善显著性检验方法,以降低误差估计并提高数据分析结果的可靠性^[29]。但受珊瑚自身生长的限制,珊瑚记录仅提供受单一 ENSO 类型影响的区域气候信息,并且其重建的连续序列较短,结果重现性也较差,因此,仍需要更多来自热带太平洋中心地区的高分辨率珊瑚记录来延长重建序列,并验证重建结果^[36]。

2 珊瑚记录的全新世 ENSO 变化

目前,年代最早的珊瑚记录显示在 350 ka BP 之前就已经存在 ENSO 活动^[37]。但末次冰盛期全球海平面比现代低约 120 m,现代难以采集当时的珊瑚记录,并且珊瑚礁在形成过程中及沉积后易受成岩作用改造,因此现有的珊瑚古 ENSO 研究集中在全新世时期。由全新世 ENSO 活动的珊瑚记录分布图(图 2)可见,来自热带太平洋中部和西部的珊瑚记录远远超过其他海区,特别是热带太平洋的中部因位于 ENSO 活动的中心源地,该区域的高分辨率珊瑚记录是重建历史时期 ENSO 活动的理想载体^[38]。事实上热带太平洋的东部也受到 ENSO 活动的直接影响,但该地区受到上升流系统的控制,其水文气候环境条件不适宜珊瑚的生存,因此东太平洋珊瑚对全新世 ENSO 活动的重建记录较少。此外,由于 ENSO 是热带太平洋最显著、影响最广泛的年际变异模态,来自 ENSO 活动遥相关地区如西太平洋、印度洋、大西洋等的珊瑚也有着良好的



绿色圆形为基于珊瑚骨骼 $\delta^{18}\text{O}$ 的 ENSO 重建研究,灰色方形为基于珊瑚骨骼 Sr/Ca 的 ENSO 重建研究,紫色三角形为基于其他指标的 ENSO 重建研究;图形大小表示使用的珊瑚样品数量多少,图例中以 $\delta^{18}\text{O}$ 为例,其余两类同样适用;数据均来源于已公开发表的珊瑚重建全新世 ENSO 的研究,详见附件 1;图片使用 Ocean Data View 软件绘制,底图为 2018 年世界海洋地图集(World Ocean Atlas 2018)年均海表温度数据,

数据来源于 <https://odv.awi.de/data/ocean/>

图 2 全新世 ENSO 活动的珊瑚记录分布

Fig.2 Coral records of Holocene ENSO

记录能力。以下按照全新世的时间顺序并对比不同区域的珊瑚记录以总结 ENSO 在全新世不同时段的变化过程。

2.1 早全新世的 ENSO 变率可能较强

早全新世(11.7~8.2 ka BP)时期,气候从寒冷干燥的冰期逐渐恢复。但此时期海平面较低,当时发育的珊瑚现在基本都在水下或被后来发育的礁体所覆盖,难以采集这一时期的珊瑚样品,相应地珊瑚记录也很不充分。目前仅有的早全新世 ENSO 的珊瑚记录来自西南热带太平洋,该区域快速的构造抬升使早全新世发育的珊瑚礁出露,因此采集到了少量的早全新世珊瑚^[39]。

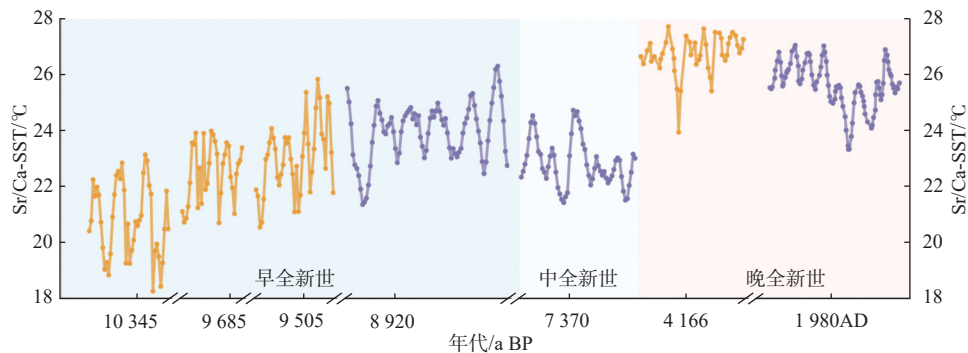
BECK 等^[40]利用瓦努阿图的滨珊瑚 Sr/Ca 值重建早全新世 3 个时段(10 344、9 688 和 9 509 a BP)月分辨率的 SST 序列,结果显示,10 344 a BP 时段 SST 比现代值低了 6.5 °C,但在随后的 1 500 a 内不断上升;与晚全新世 4 166 a BP 的珊瑚记录和现代器测海温记录相比,早全新世 SST 的季节振幅较大。BECK 等^[40]基于现代 El Niño 事件常造成西太平洋暖池区域 SST 降低,并由此加剧该区域 SST 季节性变化幅度的观察事实,推测珊瑚记录的强季节性振幅指示早全新世西太平洋受 ENSO 影响显著。MCCULLOCH 等^[41]利用周分辨率的滨珊瑚 Sr/Ca 值重建了巴布亚新几内亚早全新世时期 8 920 a BP 的 SST 序列,时间跨度约 5 a,结果表明当时的 SST 低于现代且存在更显著的季节性变化(± 2 °C 的偏移),这与 1982—1983 年强 El Niño 事件发生后 SST 显著降低 2 °C 的变化模式类似,由此推测早全新世时期强 El Niño 事件的发生比现代更频繁。图 3 将以上 4 段早全新世的 SST 记录与中、晚全新世的珊瑚记录进行比较,可以看出早全新世 SST 的振幅

明显大于后期阶段,推测早全新世的 SST 存在更加显著的季节性变化,当时的 ENSO 活动强度更大。此外,从各段序列中异常值出现的频率来看,早全新世珊瑚记录相比晚全新世及现代记录出现更多的大幅偏移,推测早全新世强 ENSO 事件发生的频率更高。

以上热带太平洋西部的珊瑚记录揭示了早全新世 ENSO 变率总体较强,这也得到了来自同一海域高分辨率砗磲记录的支持^[42-43]。但是其他地质记录和模式模拟重建的跨越整个全新世的 ENSO 变化显示,在早全新世 ENSO 变率较弱而后在中晚全新世增强^[44],因此目前对于早全新世的 ENSO 重建结果仍然是不确定的。而现有的早全新世珊瑚记录太短、太少,对其重建结论的重现性和可信度也难以评估,暂时无法对早全新世及其内部的 ENSO 变率变化进行准确地描述。

2.2 中全新世的 ENSO 变率总体最弱,但其内部呈现波动变化

中全新世(8.2~4.2 ka BP)气候温暖湿润,珊瑚礁发育广泛^[45]。珊瑚记录普遍显示,在中全新世气候背景下,ENSO 系统趋于稳定、平静,El Niño 事件的频率低、强度小,中全新世的 ENSO 变率在整个全新世是最弱的^[32,46],其他代用资料记录如厄瓜多尔安第斯山脉湖泊沉积物^[47-48]、秘鲁海岸贝壳记录^[49]、马来西亚婆罗洲洞穴石笋^[50]、南海西沙群岛砗磲^[43]等记录也基本支持珊瑚重建结论。虽然目前研究普遍认为中全新世 ENSO 系统不活跃,但高分辨率的珊瑚记录显示中全新世内部的 ENSO 变率存在波动变化。这里以中全新世 2 次较大规模冷事件发生的时间,将中全新世时期划分为 8.2~6.8、6.8~5.5 和 5.5~4.2 ka BP 3 个时间段进



图中黄色为 BECK 等^[40]的珊瑚记录;紫色为 MCCULLOCH 等^[41]的珊瑚记录

图 3 早全新世以来热带太平洋西部珊瑚 Sr/Ca 记录的 ENSO 活动

Fig.3 ENSO activity of coral Sr/Ca reconstruction since the Early Holocene in the western Tropical Pacific

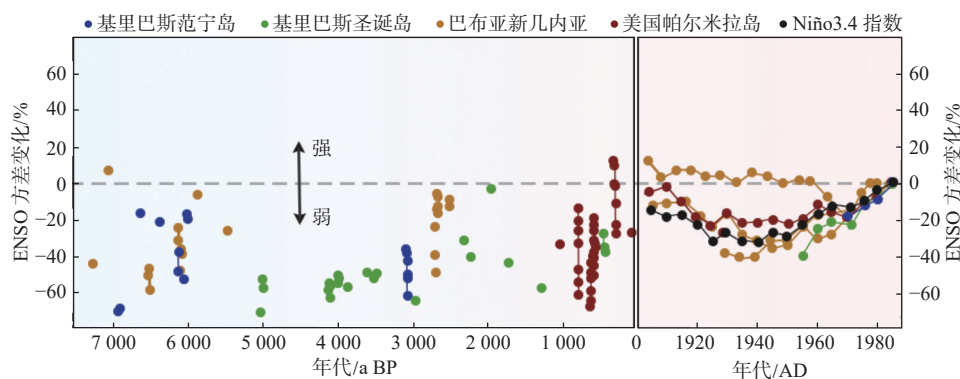
行阐述。

(1) 8.2~6.8 ka BP

此阶段气候逐渐从 8.2 ka 冷事件中恢复,但仍处于中全新世大暖期之前相对较冷的时期。中全新世早期的珊瑚记录数量仍然较少,但目前仅有的研究得出 ENSO 变率由强逐渐减弱的结论相对一致。ABRAM 等^[51] 基于印度尼西亚和巴布亚新几内亚的 48 段滨珊瑚的 Sr/Ca 重建显示 7 550~6 800 a BP 时段平均 SST 与现代(1982—1993 AD)相比低约 1.2 °C;同时现代观测表明,在 El Niño 事件期间温跃层变浅导致表层暖水与深层水混合使 SST 下降 1 °C,从而推测这种偏冷的气候条件指示中全新世早期的气候背景仍维持早全新世以来的 El Niño 态,在此背景下有利于 ENSO 事件的发生发展,因此中全新世早期 ENSO 变率可能较强。MCGREGOR 等^[52] 基于巴布亚新几内亚 8 个化石珊瑚的铀系年代和¹⁴C 年代重建了 7 550~7 030 a BP 西太平洋碳库年代变化,现代观测表明 El Niño 事件期间由于温跃层变浅使表层¹⁴C 年代较年轻的水体与深层¹⁴C 年代较老的水体混合使海水碳库年代显著偏高,而重建显示在 7 550 a BP 珊瑚骨骼出现明显偏高的碳库年代,这表明当时气候背景以类似 El Niño 现象占主导地位,之后 7 215~7 030 a BP 较低的碳库年代指示气候背景转变为 La Niña 态。南海碳库年代的变化也指示了 ENSO 活动自 7 510 a BP 逐渐减弱^[53]。以上珊瑚记录重建显示,在 8.2~6.8 ka BP 时段是一个明显的过渡阶段,气候背景态由早期的类 El Niño 态逐渐转变为类 La Niña 态,ENSO 变率存在逐渐减弱的过程。但是在此阶段的珊瑚记录数量不充分并且仅来自西太平洋区域,同时也缺乏高分辨率的重建结果。

(2) 6.8~5.5 ka BP

此阶段处于全新世大暖期的最盛期,气候普遍温暖湿润,非常适宜珊瑚生长发育,因此采集到的珊瑚样品数量增加,且来自整个热带太平洋海域的珊瑚记录都显示在全新世大暖期期间 ENSO 变率达到最低。图 4 所示 COBB 等^[54] 通过莱恩群岛北部的珊瑚骨骼 $\delta^{18}\text{O}$ 重建了赤道太平洋中部 6 860~5 958 a BP 的 ENSO 变率,其中 6 860 a BP 的 ENSO 变率与现代(1968—1998 年)相比减弱了约 70%。在东太平洋,TOOTH 等^[56] 通过巴拿马孔塔多拉岛岩芯中珊瑚化石及骨骼的多种地球化学指标重建了中全新世 6 761 a BP 以来东太平洋珊瑚礁发育状况,并探讨了珊瑚礁发育速率与 ENSO 的关系,重建结果显示,在 6 761 a BP 弱 ENSO 活动影响下珊瑚礁开始发育,东太平洋气候相对凉爽且湿润,气候背景维持类 La Niña 态。在西太平洋,巴布亚新几内亚珊瑚重建 SST 显示,6.6~6.3 ka BP 比现代更温暖,西太平洋暖池进一步增暖且范围扩大,ENSO 事件难以形成并发展^[51];瓦努阿图滨珊瑚 $\delta^{18}\text{O}$ 和 Sr/Ca 重建 SST 和 SSS 显示,6.7~6.5 ka BP 的 ENSO 变率比 1928—1992 年弱 20%~30%,当时气候比现代更加温暖干燥,气候平均态类似 La Niña 态^[57];重建西太平洋的碳库年代在 6 025~5 830 a BP,普遍较年轻,也指示当时 El Niño 事件的频率和振幅均降低并以类 La Niña 态占主导^[52];南海珊瑚重建的碳库年代也指示了 6 498~5 662 a BP 期间 ENSO 活动偏弱^[53]。此外, Sr/Ca 重建 SST 序列中的 ENSO 周期与现代器测记录相比周期长且频率低,这也表明南海北部中全新世 ENSO 变率显著减弱^[58]。以上珊瑚记录重建显示,在 6.8~5.5 ka BP 时段 ENSO 变率显著减弱,表现为 ENSO 事件频率低、



据 COBB 等^[54] 研究改绘,巴布亚新几内亚珊瑚 $\delta^{18}\text{O}$ 数据来源于 TUDHOPE 等^[46]、MCGREGOR 和 GAGAN^[32];基里巴斯范宁岛数据来源于 COBB 等^[54];基里巴斯圣诞岛数据来源于 WOODROFFE 等^[55]、COBB 等^[54];美国帕尔米拉岛数据来源于 COBB 等^[29]

图 4 中全新世以来热带太平洋珊瑚 $\delta^{18}\text{O}$ 重建的 ENSO 变率

Fig.4 ENSO variability of coral $\delta^{18}\text{O}$ reconstruction since the Mid-Holocene in the Tropical Pacific

振幅小, 且 ENSO 周期相对较长, 气候背景态为稳定且持续的 La Niña 态。

(3) 5.5~4.2 ka BP

此阶段气候系统稳定性降低, 中全新世晚期气候发生波动变化, 在地质记录中广泛识别出多次冷事件的发生。增多的珊瑚记录揭示了不同时期 ENSO 变化的细节, 值得注意的是在相同时间段内出现了不同的重建结论。在 5.5 ka 冷事件期间, 西太平洋珊瑚重建显示 ENSO 变率增强、El Niño 事件频率增加^[52,59], 而此后数百年 ENSO 变率开始逐渐减弱, 如 LEONARD 等^[35] 通过澳大利亚大堡礁珊瑚荧光强度变化重建 5.2~4.3 ka BP 的 ENSO 变率显示, 在约 5.2 ka BP 时, 珊瑚骨骼荧光强度在 5~8 a 的周期显著并且方差类似于现代 ENSO 活动强度, 在 5.2~4.3 ka BP 的 ENSO 变率总体减弱、期间还存在着波动变化。在 4.9 ka BP 之后, ENSO 变率的珊瑚重建记录结论存在差异, 来自中太平洋和西南太平洋的珊瑚记录显示 4.9 ka BP ENSO 变率弱, 甚至没有记录到显著的 ENSO 活动^[35,54]; 而来自东太平洋和南海的珊瑚记录显示 4.9 ka BP 增强的 ENSO 变率, El Niño 事件的振幅大、频率高^[53-56]。在约 4.3 ka BP, 赤道太平洋中部、西南热带太平洋及南海北部珊瑚重建均显示 ENSO 变率减弱^[31,35], 气候背景以持续性的 La Niña 态为主^[60]。以上珊瑚记录重建显示在 5.5~4.2 ka BP 时段是一个明显的 ENSO 变率波动变化的阶段, 呈现出先减弱、后增强、再减弱的变化过程。虽然总体 ENSO 变率仍低于现代, 但是波动变化显示了 ENSO 系统趋于活跃, 此阶段的气候背景态在 El Niño 态和 La Niña 态之间变化。对于其中重建结论的不同, 则需要考虑研究区域环境以及重建序列的时间跨度和分辨率的差异, 并且每一珊瑚样品都是独一无二的, 它们真实记录了生长当时的区域海洋环境变化。因此仍然需要大量的珊瑚记录以补充未能重建的时段, 同时在空间上需要更多来自 ENSO 活动影响显著的海区以客观真实地反映 ENSO 变率变化。

2.3 晚全新世的 ENSO 变率总体增强, 且其内部呈现更为复杂的波动变化

晚全新世始于 4.2 ka BP 冷事件的结束, 自此全球气候系统发生了显著变化, 并出现多次明显的冷暖波动。晚全新世以来全球范围的珊瑚记录数量大幅增多, 总体都揭示了晚全新世 ENSO 变率增强的趋势^[54], ENSO 活动的强度、相位转变、周期等特征很快呈现出如今 ENSO 的状态。其他地质记

录如厄瓜多尔安第斯山脉湖泊沉积物^[47-48]、墨西哥西南部石笋^[61]、南海西沙群岛砗磲^[43,62]、南加州圣巴巴拉盆地沉积物^[63]、南极冰芯^[64] 等记录也揭示了晚全新世以来增强的 ENSO 变率。同时晚全新世内部 ENSO 变率也是不断变化的, 尤其是 2 ka BP 以来 ENSO 变率频繁波动。为具体描述晚全新世内部 ENSO 变率变化, 将晚全新世时期划分为 4.2~2.0 和 2.0 ka BP 至今 2 个时间段进行阐述。

(1) 4.2~2.0 ka BP

此阶段气候逐渐从 4.2 ka 冷事件中恢复, 但相比晚全新世其他阶段较冷。在热带中太平洋海区, 赤道太平洋中部的珊瑚记录揭示了 4.2~2.0 ka BP ENSO 变率增强的过程, 在 3.8~2.8 ka BP 时段内, 由 ENSO 控制的海温和降水年际变化较弱, 表明 ENSO 变率不如现代强烈, 但在约 3 ka BP ENSO 变率增强, 并在 1.7 ka BP 时比现代更为强烈^[55]。来自热带东太平洋的珊瑚礁发育过程也显示在 4.2 和 3.8~3.2 ka BP 期间的强 ENSO 活动使巴拿马珊瑚礁出现发育间断, 指示了当时更频繁或更强的 La Niña 事件^[56,65]。在热带西太平洋海区, 瓦努阿图滨珊瑚显示在 4 150 a BP 出现强 El Niño 事件, 并且当时 ENSO 的周期与现代基本相同^[66]; 南海珊瑚重建显示在 4.0 ka BP 前后 SST 在呈现大幅度冷暖波动, 迅速增强的 ENSO 活动使气候在 La Niña 态和 El Niño 态之间频繁转换^[60]; 南海碳库年代在 4 156~2 220 a BP 总体降低, 也表明 ENSO 变率不断增强^[53]。在热带太平洋之外的其他海区, 强 ENSO 活动通过大气桥的遥相关作用对其他区域的气候环境产生不可忽视的影响, 大西洋博奈尔岛石珊瑚 (*Diploria strigosa*) 记录显示, 2 347 a BP 以来 SST 年际变化显著并表现为稳定的 5.2 a 周期, 指示晚全新世以来 ENSO 变率增强并加强了对热带大西洋气候变化的影响^[67]。来自全球不同区域的珊瑚记录重建显示, 在 4.2~2.0 ka BP 时段 ENSO 变率显著增强, 表现为 ENSO 事件频率增加、振幅增大, 并且 ENSO 活动周期与现代 ENSO 的周期基本相同, 此阶段的气候背景态在 El Niño 态和 La Niña 态之间高频转换, 在此背景下 ENSO 系统活跃。

(2) 2.0 ka BP 至今

晚全新世近 2 ka BP 以来的气候也出现过多次明显波动, 该时段的特征气候时段包括罗马暖期 (RWP)、黑暗时代冷期 (DACP)、中世纪气候异常期 (MCA)、小冰期 (LIA) 及现代暖期 (CWP)^[10]。目前关于 2 ka BP 以来气候重建的研究成果丰硕, 珊

瑚记录也比之前时段数量更多、来源更广、分辨率更高,重建显示 ENSO 变率在这段时期呈现出更加复杂的波动变化。

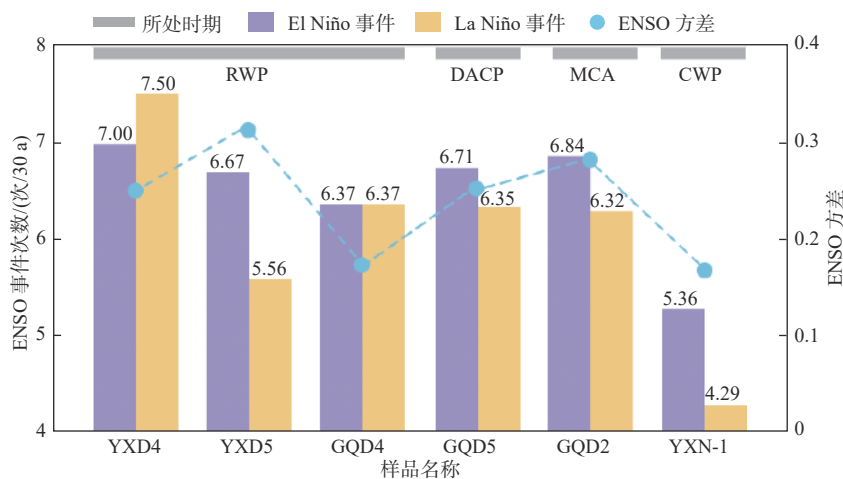
在中太平洋,COBB 等^[25,54]通过拼接来自帕尔米拉岛的滨珊瑚月分辨率 $\delta^{18}\text{O}$ 重建 1 684 a BP—1998 AD 的 ENSO 变化,结果显示 12 世纪和 14 世纪的 ENSO 变率显著低于 20 世纪,而 17 世纪中期 ENSO 变率最强,ENSO 振幅和频率均超过现代。现代暖期的珊瑚记录大量增加,总体都揭示了波动增强的 ENSO 变率,表现为稳定的 ENSO 周期由年代际周期转变为短周期^[34,68],同时在短时间内识别出多次极端 El Niño 事件^[69-70],尤其是过去 50 a 的 ENSO 变率比工业化前时期强约 25%^[71],在人类活动影响下未来的 ENSO 变率可能会进一步增大并加剧气候变化的脆弱性。东太平洋珊瑚重建结果与以上中太平洋结论一致,ENSO 变率在罗马暖期相对减弱而在小冰期增强,在现代暖期 ENSO 变率进一步增强^[72-74]。在西太平洋,JIANG 等^[75-77]利用南海北部西沙群岛滨珊瑚 Sr/Ca 重建了过去两千年特征时期的 ENSO 变率,总体显示过去两千年 ENSO 变率增强且呈现波动性演化的特征,其中在 RWP 时期 ENSO 振幅先持续性增强至比现代(1980—2014AD)高一倍再波动性地下降至与现代基本相当;在 DACP 时期 ENSO 变率总体比现代高 39%;在 MCA 晚期 ENSO 变率进一步增强(图 5)。而在现代暖期南海北部和西南太平洋巴布亚新几内亚滨珊瑚重建显示,ENSO 活动在 1930s—1960s 减弱^[30,78],在约 1960 年之后,赤道西太平洋气候与南方涛动的耦合程度的年际变化出现了时间间隔

约为 4 a、振幅为 0.3%~0.5% 的周期变化,表明海-气相互作用在快速变化和重组^[79]。ENSO 遥相关的印度洋海区珊瑚记录也显示了自小冰期 17 世纪以来增强的 ENSO 变率,到 20 世纪末 El Niño 和 La Niña 事件发生更加频繁^[80],并且推测在全球变暖背景下未来的 ENSO 频率和振幅将进一步增加^[81]。

以上来自不同区域的珊瑚记录重建结果显示,2 ka BP 至今 ENSO 变率呈现出更加复杂的波动变化,但是对于不同特征时期的 ENSO 变率变化还没有定论,需要特别指出的是,对于现代暖期多样本、多区域、多指标的珊瑚重建显示 ENSO 变率在近代显著增强,并以频率更高、振幅更大的 El Niño 活动为代表,同时存在复杂的波动变化,此阶段的气候背景态在 El Niño 态和 La Niña 态之间高频转换。与此同时,ENSO 变率在未来会进一步增强,ENSO 活动更加难以预测。

3 基于珊瑚记录得出的全新世 ENSO 变化机制

ENSO 活动对全球气候和人类社会有着深远的影响,揭示其活动规律、探索其活动机制一直是众多学者正在努力的方向。其中,重建长时间序列的 ENSO 活动历史是揭示其变化规律和机制的前提。迄今珊瑚记录在全新世 ENSO 变化的现象描述方面取得了较大进展,但因为每一个记录的时间偏短、而不同记录之间又具有区域差异,所以基于珊瑚记录而开展的 ENSO 变化机制方面的探索仍十分有限。



图据文献^[75-77]改绘

图 5 过去 2000a 南海珊瑚 Sr/Ca 重建的 ENSO 变率

Fig.5 ENSO variability of coral Sr/Ca reconstruction since the last two thousand years from South China Sea

3.1 全新世百年-千年尺度 ENSO 变化机制

目前为数不多基于珊瑚记录探讨 ENSO 变化机制的研究, 主要集中在中全新世 ENSO 显著减弱的归因, 并得出地球轨道参数变化导致的岁差改变是全新世百年-千年尺度 ENSO 变化的主要驱动因子。TUDHOPE 等^[46]重建的赤道太平洋西部珊瑚记录显示, ENSO 活动在中全新世减弱甚至消失, 再对比 CLEMENT 等^[82]建立的 Zebiak-Cane 海气耦合模型, 结果支持了模拟研究显示在末次冰期-间冰期旋回中 ENSO 变率由地轴进动控制的结论。

珊瑚记录显示中全新世期间热带太平洋对岁差强迫的响应过程具体如图 6 所示: 中全新世期间岁差改变使北半球的季节性增强^[56], 赤道辐合带 (Intertropical Convergence Zone, ITCZ) 和南太平洋辐合带向北移动^[54,59], 同时西太平洋区域海洋热量积累、温跃层加深、东亚季风和印度季风显著增强, 这些因素加强了沿岸离岸流和沃克环流^[31]。强离岸流使东太平洋海域上升流加强, 抑制了 El Niño 的发展; 强沃克环流使东西太平洋的气压差不断扩大, 并维持类 La Niña 的大气环流^[83]。千年时间尺度的气候变化, 主要受地球轨道参数变化引起的太阳辐射分布变化的影响^[84], 特别是岁差的改变导致到达地表的太阳辐射量变化是百年-千年时间尺度全新世 ENSO 变化的主要因子, 但目前研究对于 ENSO 具体如何响应岁差机制尚且不明确。以往大量模拟和重建均表明, ENSO 在中全新世减弱的根本原因在于轨道强迫引起入射太阳辐射的季节循环发生变化, 但是内在的动力学过程仍无定论。

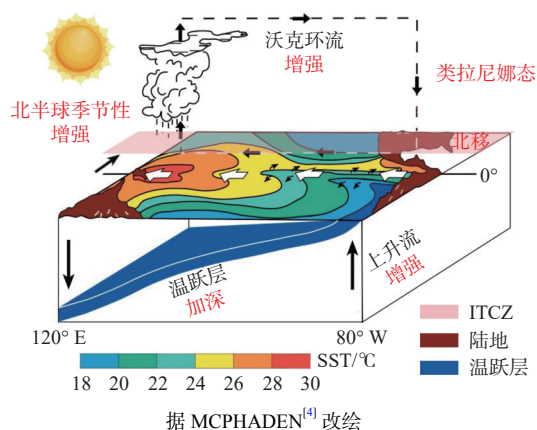


图 6 中全新世期间热带太平洋对岁差强迫的响应

Fig.6 Schematic illustration of the response of sea surface temperature in the tropical Pacific to precession forcing during the mid-Holocene

3.2 全新世内部年际-年代际时间尺度的 ENSO 波动机制

晚全新世的珊瑚记录显示 ENSO 变率频繁波动变化, 但以上讨论的全新世百年-千年时间尺度 ENSO 变化的岁差机制显然不能解释短时间尺度 ENSO 波动变化。基于珊瑚记录重建的 ENSO 波动机制探讨, 包括对气候系统外强迫因子的检验、内部因子的反馈等, 其中气候系统外强迫因子有 3 种自然强迫 (轨道要素、火山活动和太阳活动) 以及人类活动, 而气候系统内部因子主要指内部各成员的物理状态及其之间复杂的反馈作用, 如海-气相互作用、陆-气相互作用和少数大范围环流模态等。目前认为气候系统内部驱动是全新世短时间尺度 ENSO 波动的主要因子。

不少研究对珊瑚记录重建的 ENSO 变率与 3 种自然强迫进行检验。珊瑚记录与轨道要素强迫的气候模型对比显示, 晚全新世 ENSO 变率与轨道改变之间缺乏显著相关性^[85], 尤其是 3 ka BP 以来 ENSO 变率增强的程度也超出了模式模拟岁差改变的结果, 可能是南方涛动和太平洋热带辐合带之间的相互作用增强, 导致 ENSO 振幅突然非线性增加^[55]。珊瑚记录与火山活动强迫的相关性分析显示, 赤道太平洋珊瑚 $\delta^{18}\text{O}$ 对 ENSO 的变率和平均态变化表现出高度的敏感性, 但不同程度的火山喷发对珊瑚 $\delta^{18}\text{O}$ 的影响并不显著^[86], 不支持模式模拟显示火山爆发引起赤道东太平洋类 El Niño 现象的结论^[29,86-87]。珊瑚记录与太阳活动强迫的相关性分析显示, 过去千年的 ENSO 变率与太阳活动之间的对应关系也十分微弱。综上所述, 外强迫因子不是年际-年代际时间尺度上 ENSO 变化的主导因素, 从而推测气候系统内部驱动是 ENSO 波动的主要因子^[29,65,68], 但目前这一结论尚缺乏直接证据。

4 结论与展望

珊瑚记录显示全新世不同时期的 ENSO 呈波动变化的特征。从 ENSO 在整个全新世的变化趋势来看, ENSO 变率总体呈现先减弱再增强的趋势, 中全新世 (8.2 ka BP) 以来 ENSO 变率显著减弱, 约在全新世大暖期 (8~6 ka BP) 期间 ENSO 变率最弱, 晚全新世 (4.2 ka BP) 以来 ENSO 变率显著增强, 现代暖期 (1850 AD 至今) 的 ENSO 变率可能是最强的。ENSO 在全新世内部的不同阶段也呈现波动变化, 如中全新世 ENSO 变率在 6.8 ka BP 之后持续

减弱,但在 5.5 ka BP 冷事件后开始增强,4.2 ka BP 前后又明显减弱;晚全新世 ENSO 变率在 4.2~2 ka BP 持续增强,而后在 2 ka BP 至今呈现频繁波动变化。基于珊瑚记录得出,岁差变化引起的地表太阳辐射量变化是全新世百年-千年尺度 ENSO 变化的主要因子,而气候系统内部的变化可能是全新世内年际-年代际尺度 ENSO 波动的主要原因。在气候系统的内部变率和自然外部强迫的双重影响之下,全新世的 ENSO 活动多变;而现代及未来在内部变率、自然和人为外强迫的影响下,ENSO 变率将增强、极端事件将增加,ENSO 活动也更加难以预测。

虽然珊瑚在记录全新世 ENSO 变化方面取得了显著进展,但仍存在以下问题:①珊瑚记录时间序列较短,远未达到揭示 ENSO 活动规律和变化机制的程度;②珊瑚记录空间分布不均,难以探究 ENSO 空间多样性的演变过程;③缺乏不同时间尺度(如季节性、年均、年际及年代际等)气候变化间相互作用的探讨;④关于 ENSO 变化机制的探究还十分缺乏,特别是区分气候系统内部变率和外部强迫对 ENSO 的影响等方面。突破上述局限性需要补充更多高分辨率且长时间序列的珊瑚记录,而中国南海作为西太平洋最大的边缘海,不仅珊瑚礁星罗棋布,而且区域气候对全球变化的响应迅速,因此是进一步研究全新世 ENSO 变化值得关注的重要海区。

参考文献:

- [1] CANE M A, ZEBIAK S E. A theory for El Niño and the Southern Oscillation [J]. *Science*, 1985, 228((4703)): 1085-1087.
- [2] ROPELEWSKI C F, HALPERT M S. Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño Southern Oscillation [J]. *Monthly Weather Review*, 1987, 115((8)): 1606-1626.
- [3] TRENBERTH K E. The definition of El Niño[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1997, 78(12): 277-2777.
- [4] MCPHADEN M J. Playing hide and seek with El Niño [J]. *Nature Climate Change*, 2015, 5((9)): 791-795.
- [5] ALEXANDER M A, BLADE I, NEWMAN M, et al. The atmospheric bridge: the influence of ENSO teleconnections on air-sea interaction over the global oceans [J]. *Journal of Climate*, 2002, 15((16)): 2205-2231.
- [6] MCPHADEN M J, ZEBIAK S E, GLANTZ M H. ENSO as an integrating concept in Earth science [J]. *Science*, 2006, 314((5806)): 1740-1745.
- [7] CAI W J, SANTOSO A, COLLINS M, et al. Changing El Niño-Southern Oscillation in a warming climate [J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2021, 2((9)): 628-644.
- [8] FENG X R, LI M J, LI Y L, et al. Typhoon storm surge in the southeast Chinese mainland modulated by ENSO [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11((1)): 10137-10137.
- [9] REINIG F, WACKER L, JÖRIS O, et al. Precise date for the Laacher See eruption synchronizes the Younger Dryas[J]. *Nature*, 2021, 595(7865): 66-69.
- [10] LAMB H H. Climatic history and the future, Volume 2: climate: present, past and future [M]. London, England: Methuen and Co. Ltd, 1977, 1-835.
- [11] ALLEY R B, MAYEWSKI P A, SOWERS T, et al. Holocene climatic instability: a prominent widespread event 8200a ago [J]. *Geology*, 1997, 25((6)): 483-486.
- [12] WALKER M J C, BERKELHAMMER M, BJÖRCK S, et al. Formal subdivision of the Holocene Series/Epoch: a discussion paper by a working group of INTIMATE (Integration of ice-core, marine and terrestrial records) and the Subcommission on Quaternary Stratigraphy (International Commission On Stratigraphy) [J]. *Journal of Quaternary Science*, 2012, 27(7): 649-659.
- [13] COHEN K M, HARPER D A T, GIBBARD P L. ICS International Chronostratigraphic Chart 2022/02. International Commission on Stratigraphy, IUGS. www. Stratigraphy. Org, 2022.
- [14] THOMPSON L G, MOSLEY-THOMPSON E, DAVIS M E, et al. Annually resolved ice core records of tropical climate variability over the past ~ 1800 years [J]. *Science*, 2013, 340((6135)): 945-950.
- [15] COOK E R, ANCHUKAITIS K J, BUCKLEY B M, et al. Asian monsoon failure and megadrought during the last millennium [J]. *Science*, 2010, 328((5977)): 486-489.
- [16] THEAKER C M, CAROLIN S A, DAY C C, et al. Borneo Stalagmite evidence of significantly reduced El Niño-Southern Oscillation variability at 4.1 ky BP[J]. *Geophysical Research Letters*, 2024, 51: e2023GL107111.
- [17] FORD H L, RAVELO A C, POLISSAR P J. Reduced El Niño-Southern Oscillation during the Last Glacial Maximum [J]. *Science*, 2015, 347((6219)): 255-258.
- [18] JENNY B, VALERO-GARCÉS B L, VILLA-MARTÍNEZ R, et al. Early to mid-Holocene aridity in central Chile and the southern westerlies: the Laguna Aculeo record (34°S) [J]. *Quaternary Research*, 2002, 58((2)): 160-170.
- [19] ROSENTHAL Y, BROCCOLI A J. In search of Paleo-ENSO[J]. *Science*, 2004, 304(5668): 219-221.
- [20] CANE M A. The evolution of El Niño, past and future[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 230(2/3): 227-240.
- [21] MA T Y. On the growth rate of reef corals and its relation to sea water temperature[J]. *Palaeontologia Sinica (Series B)*, 1937, 6: 21-22.
- [22] 余克服. 南海珊瑚礁及其对全新世环境变化的记录与响应 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2012, 42(8): 1160-1172.
- [23] ALIBERT C, MCCULLOCH M T. Strontium/Calcium ratios in modern *Porites* corals from the Great Barrier Reef as a proxy for

- sea surface temperature: calibration of the thermometer and monitoring of ENSO[J]. *Paleoceanography*, 1997, 12(3): 345-363.
- [24] COLE J E, FAIRBANKS R G. The Southern Oscillation recorded in the $\delta^{18}\text{O}$ of corals from Tarawa atoll[J]. *Paleoceanography*, 1990, 5(5): 669-683.
- [25] MCCULLOCH M T, GAGAN M K, MORTIMER G E, et al. A high-resolution Sr/Ca and $\delta^{18}\text{O}$ coral record from the Great Barrier Reef, Australia, and the 1982-1983 El-Niño[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58(12): 2747-2754.
- [26] 丁仲礼. 固体地球科学研究方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2013: 566-579.
- [27] 张剑, 刁少波, 贺行良, 等. 西沙群岛珊瑚礁测年与解析 [J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(10): 64-69.
- [28] 李献华, 李扬, 李秋立, 等. 同位素地质年代学新进展与发展趋势 [J]. 地质学报, 2022, 96(1): 104-122.
- [29] COBB K M, CHARLES C D, CHENG H, et al. El Niño Southern Oscillation and tropical Pacific climate during the last millennium[J]. *Nature*, 2003, 424(6946): 271-276.
- [30] HAN T, YU K F, YAN H, et al. Coral $\delta^{18}\text{O}$ -based reconstruction of El Niño-Southern Oscillation from the northern South China Sea since 1851 AD[J]. *Quaternary International*, 2020, 550: 159-168.
- [31] MCGREGOR H V, FISCHER M J, GAGAN M K, et al. A weak El Niño/Southern Oscillation with delayed seasonal growth around 4, 300 years ago[J]. *Nature Geoscience*, 2013, 6(11): 949-953.
- [32] MCGREGOR H V, GAGAN M K. Western Pacific coral $\Delta^{18}\text{O}$ records of anomalous Holocene variability in the El Niño-Southern Oscillation[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(11): L11204.
- [33] MCGREGOR S, TIMMERMAN A, TIMM O. A unified proxy for ENSO and PDO variability since 1650[J]. *Climate of the Past*, 2010, 6(1): 1-17.
- [34] 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): 617-619.
- [35] LEONARD N D, WELSH K J, LOUGH J M, et al. Evidence of reduced Mid-Holocene ENSO variance on the Great Barrier Reef, Australia[J]. *Paleoceanography*, 2016, 31: 1248-1260.
- [36] COMBOUL M, EMILE-GEAY J, HAKIM G J, et al. Paleoclimate sampling as a sensor placement problem[J]. *Journal of Climate*, 2015, 28(19): 7717-7740.
- [37] KILBOURNE K H, QUINN T M, TAYLOR F W. A fossil coral perspective on western tropical Pacific climate ~ 350 ka[J]. *Paleoceanography*, 2004, 19(1): 63-79.
- [38] HEREID K A, QUINN T M, OKUMURA Y M. Assessing spatial variability in El Niño-Southern Oscillation event detection skill using coral geochemistry[J]. *Paleoceanography*, 2013, 28(1): 14-23.
- [39] CHAPPELL J, POLACH H. Post-glacial sea-level rise from a coral record at Huon Peninsula, Papua New Guinea[J]. *Nature*, 1991, 349(6305): 147-149.
- [40] BECK J W, RÉCY J, TAYLOR F, et al. Abrupt changes in early Holocene tropical sea surface temperature derived from coral records[J]. *Nature*, 1997, 385(6618): 705-707.
- [41] MCCULLOCH M, MORTIMER G, ESAT T, et al. High-resolution windows into Early Holocene climate: Sr/Ca coral records from the Huon Peninsula[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1996, 138(1/4): 169-178.
- [42] DRISCOLL R E. Reconstructions of the Holocene and Last Glacial Period[D]. Edinburgh: The University of Edinburgh, 2014.
- [43] SHAO D, MEI Y J, YANG Z K, et al. Holocene ENSO variability in the South China Sea recorded by high-resolution oxygen isotope records from the shells of *Tridacna* spp.[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 3921.
- [44] LIU Z Y, LU Z Y, WEN X Y, et al. Evolution and forcing mechanisms of El Niño over the past 21, 000 years[J]. *Nature*, 2014, 515(7528): 550-553.
- [45] MA Y F, QIN Y M, YU K F, et al. Holocene coral reef development in Chenhang Island, northern South China Sea, and its record of sea level changes[J]. *Marine Geology*, 2021, 440: 106593.
- [46] TUDHOPE A W, CHILCOTT C P, MCCULLOCH M T, et al. Variability in the El Niño-Southern Oscillation through a glacial interglacial cycle[J]. *Science*, 2001, 291(5508): 1511-1517.
- [47] ROBBELL D T, SELTZER G O, ANDERSON D M, et al. An $\sim 15,000$ -year record of El Niño-driven alluviation in southwestern Ecuador[J]. *Science*, 1999, 283(5401): 516-520.
- [48] MOY C M, SELTZER G O, ROBBELL D T, et al. Variability of El Niño/Southern Oscillation activity at millennial timescales during the Holocene epoch[J]. *Nature*, 2002, 420(6912): 162-165.
- [49] CARRÉ M, SACHS J P, PURCA S, et al. Holocene history of ENSO variance and asymmetry in the eastern tropical Pacific[J]. *Science*, 2014, 345(6200): 1045-1048.
- [50] CHEN S, HOFFMANN S S, LUND D C, et al. A high-resolution speleothem record of western equatorial Pacific rainfall: implications for Holocene ENSO evolution[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2016, 442(1): 61-71.
- [51] ABRAM N J, MCGREGOR H V, GAGAN M K, et al. Oscillations in the southern extent of the Indo-Pacific Warm Pool during the Mid-Holocene[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2009, 28(25/26): 2794-2803.
- [52] MCGREGOR H V, GAGAN M K, MCCULLOCH M T, et al. Mid-Holocene Variability in the marine ^{14}C reservoir age for northern coastal Papua New Guinea[J]. *Quaternary Geochronology*, 2008, 3(3): 213-225.
- [53] YU K F, HUA Q A, ZHAO J X, et al. Holocene marine ^{14}C reservoir age variability: evidence from ^{230}Th -dated corals in the South China Sea[J]. *Paleoceanography*, 2010, 25(3): PA3205.
- [54] COBB K M, WESTPHAL N, SAYANI H R, et al. Highly variable El Niño-Southern Oscillation throughout the Holocene[J].

- Science, 2013, 339(6115): 67-70.
- [55] WOODROFFE C D, BEECH M R, GAGAN M K. Mid-Late Holocene El Niño variability in the Equatorial Pacific from coral microatolls[J]. Geophysical Research Letters, 2003, 30(7): 1358.
- [56] TOTH L T, ARONSON R B, COBB K M, et al. Climatic and biotic thresholds of coral-reef shutdown[J]. Nature Climate Change, 2015, 5(4): 369-374.
- [57] DUPREY N, LAZARETH C E, CORRÈGE T, et al. Early Mid-Holocene SST variability and surface-ocean water balance in the southwest Pacific[J]. Paleoceanography, 2012, 27(4): PA4207.
- [58] WEI G J, DENG W F, YU K F, et al. Sea surface temperature records in the northern South China Sea from Mid-Holocene coral Sr/Ca ratios[J]. Paleoceanography, 2007, 22(3): PA3206.
- [59] LAZARETH C E, ROSELL M B, TURCQ B, et al. Mid-Holocene climate in New Caledonia (southwest Pacific): coral and PMIP models monthly resolved results[J]. Quaternary Science Reviews, 2013, 69: 83-97.
- [60] DANG S H, YU K F, TAO S C, et al. El Niño/Southern Oscillation during the 4.2 ka event recorded by growth rates of corals from the north South China Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2020, 39(1): 110-117.
- [61] BERNAL J P, LACHNIET M, MCCULLOCH M, et al. A speleothem record of Holocene climate variability from southwestern Mexico[J]. Quaternary Research, 2011, 75(1): 104-113.
- [62] ZHOU P C, YAN H, HAN T, et al. Mid to late Holocene ENSO variability reconstructed by high-resolution *Tridacna* Sr/Ca records from the northern part of the South China Sea[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2022, 601: 111117.
- [63] DU X J, HENDY I, HINNOV L, et al. High-resolution interannual precipitation reconstruction of Southern California: implications for Holocene ENSO evolution[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2021, 554: 116670.
- [64] NIE S Y, XIAO W S, WANG R J. Mid-Late Holocene climate variabilities in the Bransfield Strait, Antarctic Peninsula driven by insolation and ENSO activities[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2022, 601: 111140.
- [65] TOTH L T, ARONSON R B. The 4.2 ka event, ENSO, and coral reef development[J]. Climate of the Past, 2019, 15(1): 105-119.
- [66] CORRÈGE T, DELCROIX T, RÉCY J, et al. Evidence for stronger El Niño–Southern Oscillation (ENSO) events in a Mid-Holocene massive coral[J]. Paleoceanography, 2000, 15(4): 465-470.
- [67] GIRY C, FELIS T, KÖLLING M, et al. Mid- to Late Holocene changes in tropical Atlantic temperature seasonality and interannual to multidecadal variability documented in southern Caribbean corals[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2012, 331(1): 187-200.
- [68] URBAN F E, COLE J E, OVERPECK J T. Influence of mean climate change on climate variability from a 155-year tropical Pacific coral record[J]. Nature, 2000, 407(6807): 989-993.
- [69] SANCHEZ S C, WESTPHAL N, HAUG G H, et al. A continuous record of central tropical Pacific climate since the midnineteenth century reconstructed from Fanning and Palmyra Island corals: a case study in coral data reanalysis[J]. Paleoceanography, 2020, 35(8): e2020PA003848.
- [70] THOMPSON D M, COLE J E, SHEN G T, et al. Early twentieth-century warming linked to Tropical Pacific wind strength[J]. Nature Geoscience, 2015, 8(2): 117-121.
- [71] GROTHE P R, COBB K M, LIGUORI G, et al. Enhanced El Niño–Southern Oscillation variability in recent decades[J]. Geophysical Research Letters, 2020, 47(7): 1-8.
- [72] TOTH L T, ARONSON R B, VOLLMER S V, et al. ENSO drove 2500-year collapse of eastern Pacific coral reefs[J]. Science, 2012, 337(6090): 81-84.
- [73] GUILDERSON T P, SCHRAG D P. Abrupt shift in subsurface temperatures on the tropical Pacific associated with changes in El Niño[J]. Science, 1998, 281(5374): 240-243.
- [74] DUNBAR R B, WELLINGTON G M, COLGAN M W, et al. Eastern Pacific sea surface temperature since 1600 A.D.: the $\delta^{18}\text{O}$ record of climate variability in Galápagos Corals[J]. Paleoceanography, 1994, 9(2): 291-315.
- [75] JIANG L L, YU K F, HAN T, et al. Coral perspective on temperature seasonality and interannual variability in the northern South China Sea during the Roman Warm Period[J]. Global and Planetary Change, 2021, 207: 103675.
- [76] JIANG L L, YU K F, TAO S C, et al. Abrupt increase in ENSO variability at 700 CE triggered by solar activity[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2023, 128(1): e2022JC019278.
- [77] JIANG L L, YU K F, TAO S C, et al. ENSO Variability during the medieval climate anomaly as recorded by *Porites* corals from the northern South China Sea[J]. Paleoceanography and Paleoclimatology, 2021, 36(4): e2020PA004173.
- [78] QUINN T M, TAYLOR F W, CROWLEY T J. Coral-based climate variability in the Western Pacific Warm Pool since 1867[J]. Journal of Geophysical Research, 2006, 111: C11006.
- [79] TUDHOPE A W, SHIMMIELD G B, CHILCOTT C P, et al. Recent changes in climate in the far western equatorial Pacific and their relationship to the Southern Oscillation; oxygen isotope records from massive corals, Papua New Guinea[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1995, 136(3): 575-590.
- [80] LEUPOLD M, PFEIFFER M, WATANABE T K, et al. El Niño–Southern Oscillation and internal sea surface temperature variability in the tropical Indian Ocean since 1675[J]. Climate of the Past, 2021, 17(1): 151-170.
- [81] TARIQUE M, RAHAMAN W, THAMBAN M, et al. Surface pH Record (1990–2013) of the Arabian Sea from Boron isotopes of Lakshadweep corals: trend, variability, and control[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2021, 126(7): e2020JG006122.
- [82] CLEMENT A C, SEAGER R, CANE M A. Suppression of El Niño during the Mid-Holocene by changes in the Earth's

- orbit[J]. *Paleoceanography*, 2000, 15(6): 731-737.
- [83] DANG H W, JIAN Z M, WANG Y, et al. Pacific Warm Pool subsurface heat sequestration modulated Walker Circulation and ENSO activity during the Holocene[J]. *Science Advances*, 2020, 6(42): eabc0402.
- [84] 汪品先. 地球系统与演变 [M]. 北京: 科学出版社, 2018: 291-415.
- [85] EMILE-GEAY J, COBB K M, CARRÉ M, et al. Links between tropical Pacific seasonal, interannual and orbital variability during the Holocene[J]. *Nature Geoscience*, 2016, 9(2): 168-173.
- [86] DEE S G, COBB K M, EMILE-GEAY J, et al. No consistent ENSO response to volcanic forcing over the last millennium[J]. *Science*, 2020, 367(6485): 1477-1481.
- [87] ZHU F, EMILE-GEAY J, ANCHUKAITIS K J, et al. A re-appraisal of the ENSO response to volcanism with paleoclimate data assimilation[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 747.

Coral records of Holocene ENSO and its revealed mechanism

LI Yueer¹, YU Kefu^{1,2*}

(1 Guangxi Laboratory on the Study of Coral Reefs in the South China Sea, Coral Reef Research Center of China, School of Marine Sciences, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2 Southern Marine Sciences and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, China)

Abstract: The El Niño-Southern Oscillation (ENSO) is the strongest interannual oscillation in the Earth's climate system, which has a significant impact on global weather and climate. The Holocene is the geological time most closely related to humans, and reconstructing the activity history of ENSO and exploring the change pattern of ENSO in this period will help to improve the accuracy of future ENSO prediction. In this regard, based on coral, a high-resolution climate record carrier of tropical oceans, we firstly introduce the method of extracting ENSO signal from coral skeleton index and measuring ENSO variability; then compares the history of ENSO variability in early, middle and late Holocene; and finally summarizes the mechanism of ENSO variability in different time scales in Holocene based on coral record. The results show that the ENSO signals in the coral records can be directly identified from the extreme changes of their environmental proxies; or the ENSO cycles of the environmental proxies on the time series can be extracted by spectral analysis and filtering, and then the frequency and amplitude changes of ENSO can be quantitatively analyzed by using threshold analysis and sliding window methods. The coral records show that the Holocene ENSO is characterized by fluctuating changes, with a general trend of decreasing ENSO variability from the early to middle Holocene and increasing ENSO variability in the late Holocene. Based on the coral record, it is concluded that the change in surface solar radiation distribution due to the age difference is the main factor of the century-millennium scale ENSO variation in the Holocene, while the internal drive of the climate system may be the main reason for the interannual-interdecadal scale ENSO fluctuation in the Holocene. However, compared with the long time span of the Holocene, the accumulated time window of the coral record is only a few hundred years, which is far from revealing the patterns and mechanisms of ENSO activity. Therefore, it is necessary to further extend the time series and increase the spatial area of the coral record in the future to reveal the patterns and mechanisms of ENSO variability.

Key words: ENSO; variability; Holocene; coral; fluctuation