

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2020101101

西太平洋帕劳砗磲高分辨率氧同位素记录及其指示的气候环境变化

文汉锋^{1,2}, 赵楠钰^{1,2}, 刘成程^{1,2}, 周鹏超^{1,3}, 王国桢^{1,2}, 晏宏¹

1. 中国科学院地球环境研究所, 黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710061

2. 中国科学院大学, 北京 100049

3. 北京师范大学地球科学前沿交叉研究中心, 北京 100875

摘要:砗磲是海洋中最大的双壳类贝壳,其碳酸盐壳体通常具有年纹层和天纹层,是一种理想的高分辨率古气候研究载体。氧同位素是砗磲古气候研究中最常用的指标之一,但在将其应用于古气候重建之前,通常需要对其现代地球化学过程进行准确的校准。帕劳群岛位于西太平洋暖池西北边缘,其珊瑚礁盘具有丰富的砗磲壳体资源,为开展古气候研究提供了丰富的材料。在本次研究中,对来自帕劳群岛的现代活体库氏砗磲(*Tridacna gigas*) PL-1的内层壳体进行了高分辨率氧同位素分析,同时利用该砗磲较为清晰的天生长纹层对氧同位素的年代学框架进行了标定。结果表明,该砗磲壳体的氧同位素没有明显的变化趋势,说明砗磲个体的生命效应对氧同位素没有显著影响;砗磲壳体氧同位素没有清晰的年周期变化,常出现不规则的毛刺状峰值。结合现代器测资料分析发现,帕劳砗磲内层壳体的氧同位素记录了热带太平洋 ENSO 活动对该区域水文气候变化的影响。该研究结果表明,帕劳砗磲内层壳体天生长纹层和氧同位素,具有用于开展高分辨率古气候研究的潜力。

关键词:砗磲;天生长纹层;氧同位素;ENSO

中图分类号:P532, P736.4 文献标识码:A

High-resolution oxygen isotope records of *Tridacna gigas* from Palau, Western Pacific and its climatic and environmental implications

WEN Hanfeng^{1,2}, ZHAO Nanyu^{1,2}, LIU Chengcheng^{1,2}, ZHOU Pengchao^{1,3}, WANG Guozhen^{1,2}, YAN Hong¹

1. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. Interdisciplinary Research Center of Earth Science Frontier (IRCESF), Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: *Tridacna gigas* is the largest marine bivalve, and its hard and dense aragonite shells usually have annual and daily growth lines, which have been demonstrated to be an ideal material for high-resolution paleoclimate research. The oxygen isotope has been widely used in *Tridacna* paleoclimate studies. However, the oxygen isotope of *Tridacna* shells must be accurately calibrated by modern geochemical process before paleoclimate reconstructions. Palau is located in the northwestern edge of the Western Pacific Warm Pool. Long-lived *Tridacna* spp. is a common species in the coral reefs of Palau Islands, which may provide abundant materials for paleoclimate reconstructions. In this study, we present a high-resolution oxygen isotope profile from the inner shell of a modern living *T. gigas* specimen PL-1 from Palau. The high-resolution chronology of the oxygen isotope profile is determined by the clear daily growth layers in the inner shell. The result suggests that the $\delta^{18}\text{O}_c$ profile of the *T. gigas* shell has no obvious trend, indicating that the vital effects have no significant influence on the oxygen isotope of shell. Combining with the instrumental data, we found that the ENSO activities in the tropical Pacific had impacts on the regional hydro-climate changes of Palau, and left some fingerprint in the oxygen isotope of *Tridacna* shell. This study indicates that the daily growth layer and the oxygen isotope in the inner shell of *Tridacna* from Palau have the potential for high-resolution paleoclimate research.

Key words: *Tridacna* spp.; daily growth layers; oxygen isotope; ENSO

资助项目:国家自然科学基金“利用砗磲重建南海北部小时分辨率气候变化初探”(41877399),“地质新时代的人类世:时限、特征与影响”(41991250);中国科学院战略性先导科技专项 B 类(XDB40000000);中国科学院“西部之光”人才培养引进计划

作者简介:文汉锋(1995—),男,硕士研究生,研究方向为砗磲地球化学, E-mail: whfloess2019@163.com

通讯作者:晏宏(1986—),男,研究员,主要从事热带-亚热带气候环境变化研究, E-mail: yanhong@ieccas.cn

收稿日期:2020-10-11; 改回日期:2020-11-07. 蔡秋蓉编辑

气候的季节和年际变化是地球气候系统中的重要组成部分,通常会生态环境及人类生活造成巨大的影响^[1-3]。由于器测资料的短缺,限制了对不同气候背景下季节和年际气候变化的了解^[4-7]。古气候重建记录是对现代器测资料的一个重要补充,有助于了解过去的气候动力学机制及预测未来的气候变化^[8-9]。但大多数古气候载体,如深海沉积物^[10]、黄土^[11]、冰心^[12]等的时间分辨率较低,不足以用于重建过去季节和年际尺度的气候变化。虽然年分辨率的陆地树轮古气候记录在过去几十年里得到了快速发展,但是拥有季节分辨率,能够讨论季节尺度变化的古气候记录,除了少量海洋珊瑚和双壳类外,仍然非常稀少^[13]。因此,发展高分辨率气候研究载体,增加对季节和年际尺度气候变化的了解,是当前古气候研究的重要任务之一^[13]。

砗磲作为海洋中最大的双壳类贝壳,广泛分布于热带印度洋—太平洋区域,自始新世起就是浅海珊瑚礁生态系统的重要组成部分^[14-15]。幼年砗磲在变形发育后,一般会固着在透光较好的浅海环境(珊瑚礁),与虫黄藻共生,进行生长繁殖直至死亡,随后在原地埋藏^[16]。与珊瑚相比,虽然单个砗磲壳体所提供的时间窗口较小,但砗磲有比珊瑚更致密的内层壳体^[17-19],具有较强的抵抗外部侵蚀的能力^[20-21],且砗磲内层壳体通常具有连续的年生长纹层^[22-24]和天生长纹层^[19, 25-27]。此外,砗磲样品的时间连续性较好,死亡后其壳体会直接沉积在珊瑚礁盘中,在珊瑚礁中从上往下采集,可获得到较为连续的化石砗磲沉积序列。相对于其他双壳类,砗磲生长较快,壳体大,生长纹层较宽,有潜力提供高精度的年代学框架和高分辨率的地球化学信息^[25, 28-30],可与其他长尺度的低分辨率古气候资料互补。

砗磲独特的生活习性和特殊的壳体结构,表明其有潜力成为高分辨率的古气候研究载体。这种潜力最近几十年里逐步得到了开发,砗磲年生长速率、天生长速率、氧同位素($\delta^{18}\text{O}_c$)、Sr/Ca、Mg/Ca、Fe/Ca等生物地球化学指标均被尝试用来重建过去海洋气候环境变化^[18, 31-36], $\delta^{18}\text{O}_c$ 则是砗磲古气候研究中最常用的指标。已有研究表明,砗磲壳体的氧同位素体系在沉积过程中与周围海水达到了平衡分馏,壳体 $\delta^{18}\text{O}_c$ 主要受海水氧同位素($\delta^{18}\text{O}_w$)及海表面温度(SST, Sea Surface Temperature)的影响^[25, 27-28, 37-38]。但在不同区域,由于温度和降水的配置差别,壳体氧同位素变化的主控因素及分馏方程,通常也会有一些差异^[9, 23, 25, 33, 39-40]。因此,在利用砗磲氧同位素进行古气候重建之前,通常需要利用现代器测资料,

对砗磲壳体氧同位素分馏进行解析和校准^[28, 41]。

此外,精确的年代学框架是利用砗磲氧同位素进行古气候重建的前提。在以往的砗磲古气候研究中,学者们通常利用砗磲的年生长纹层或者氧同位素的年周期变化来约束年代学框架^[39, 41-43]。然而,在西太平洋暖池区域(WPWP, Western Pacific Warm Pool), SST常呈现双峰模式,且SST的季节性相对较小,导致砗磲在冬夏季的生长差异不明显,壳体内层的年纹层不清晰,很难利用壳体年纹层来确定砗磲氧同位素的年代学框架^[18, 39]。同时,WPWP区域较小的SST季节性也使得SST变化对 $\delta^{18}\text{O}_c$ 的影响减弱,而WPWP区域频繁的对流活动和充沛降水则会使海水表层的 $\delta^{18}\text{O}_w$ 发生较大的变化^[44-45],使得海水 $\delta^{18}\text{O}_w$ 对砗磲内层壳体 $\delta^{18}\text{O}_c$ 产生的变化可能会超过由SST带来的影响,导致难以根据 $\delta^{18}\text{O}_c$ 的年周期变化来约束年代学框架^[46]。因此,在WPWP区域的砗磲古气候研究中,根据砗磲壳体的年生长纹层或 $\delta^{18}\text{O}_c$ 年周期来确定砗磲壳体元素的年代学框架有较大的不确定性。

帕劳处于WPWP西北边缘,该区域的年际气候受厄尔尼诺和南方涛动(ENSO, El Niño and Southern Oscillation)的显著影响,在厄尔尼诺活动期间(El Niño),帕劳SST通常较低,降水偏少^[47-50]。帕劳群岛拥有丰富的珊瑚礁资源^[51],其珊瑚礁盘具有丰富的砗磲壳体资源,可为开展古气候研究提供丰富的材料^[52-53]。利用珊瑚和硬骨海绵开展帕劳地区古气候重建的研究已有部分报道^[54-59],但使用海洋双壳类进行高分辨率古气候重建的工作则较为稀少,尤其是尚未开展有效的现代砗磲高分辨率氧同位素的校准工作^[60-62]。Pätzold等^[60]曾通过对帕劳大砗磲的研究发现,帕劳砗磲的内层具有年纹层和天纹层,并根据壳体 $\delta^{18}\text{O}_c$ 的变化和前人建立的 $\delta^{18}\text{O}_c$ -SST公式^[23]对周边SST进行了简单估算,得出帕劳砗磲氧同位素体系在壳体形成过程中可能与周围海水环境达到了同位素分馏平衡,其壳体氧同位素的变化可以反映周围SST和 $\delta^{18}\text{O}_w$ 变化的结论。随后,Jew等^[61]对在帕劳当地考古遗址采集的化石番红砗磲进行了 $\delta^{18}\text{O}_c$ 分析,并结合前人利用其他地区砗磲或海洋生物碳酸盐建立的氧同位素与温度的转换公式^[28],估算了过去600年部分时段帕劳附近海域的SST。但是,该研究存在明显的不足,样品分析的时间分辨率较低,而且没有充分考虑海水 $\delta^{18}\text{O}_w$ 变化对壳体 $\delta^{18}\text{O}_c$ 的影响,导致其重建的SST存在较大不确定性。

针对上述问题,本研究对采自帕劳群岛的现代

库氏砗磲 (*T. gigas*, *Tridacna gigas*) 样本 PL-1 进行了激光共聚焦成像和高分辨率的氧同位素分析。利用激光共聚焦成像获得的壳体天纹层, 得到了该砗磲的生长时间跨度(约 13 年)以及天生长速率的变化。随后, 利用天纹层的约束, 对氧同位素的年代学框架进行了标定, 获得了帕劳砗磲约 13 年的月分辨率 $\delta^{18}\text{O}_c$ 序列(1999—2012 年)。进一步分析发现, 帕劳砗磲内层壳体 $\delta^{18}\text{O}_c$ 在一定程度上记录了 ENSO 活动导致的区域水文气候变化, 表明帕劳砗磲壳体的天纹层和高分辨率的氧同位素有潜力用于重建区域水文气候变化历史, 以及热带太平洋的 ENSO 活动。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

帕劳位于 WPWP 西北部边缘(7°13'N、133°14'E), 菲律宾以东约 700 km, 关岛东南约 1 300 km^[50-51](图 1)。由 8 个主岛, 12 个中型岛屿及数百个小岛组成^[50-51]。科罗尔岛处于西向北赤道流(主岛以北)和东向流北赤道逆流(主岛以南)的交汇处, 11 月至次年 3 月常盛行东北信风, 4 月至 5 月期间风向会发生变化, 6 月至 10 月则盛行南—西南季风, 区域年际尺度气候变化受 ENSO 的影响显著^[47, 50, 63-64]。

为分析帕劳现代气候变化特征, 本次研究收集了帕劳科罗尔机场的降水资料(https://www.ncdc.noaa.gov/IPS/lcd/lcd.html?_page=1&state=PI&stationID=40309&_), 再分析格点数据 IGOSS SST(http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/IGOSS/nmc/Reyn_SmithOIv2/monthly/.sst/), SODA 3.3.1 的盐度资料 (SSS, Sea Surface Salinity, http://apdrc.soest.hawaii.edu/dods/public_data/SODA/soda_3.3.1/) 以及与 ENSO 相关的部分指数, 如南方涛动指数 (SOI, Southern Oscillation Index, <https://psl.noaa.gov/data/climateindices/>), 海洋尼诺指数 (ONI, Ocean Niño Index, https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php), 多元 ENSO 指数 (MEI, Multivariate ENSO Index, <https://www.psl.noaa.gov/enso/mei/>) 等资料。以上数据的时间分辨率均为月, 为更好地分析帕劳年际尺度的气候变化特征, 对 SST、SSS 及 MEI 曲线进行了 12 点滑动平均处理(图 2); 此外, 经分析获得了帕劳 20 年(1995—2015 年)的 SST、SSS 及降水量的平均态(图 3)。

本次用于实验的样品为采自帕劳的现代活体 *T. gigas* PL-1, 采集时间为 2012 年 10 月, 长约 58 cm, 宽约 32 cm。样品 PL-1 自野外采集回来后, 首先用水冲洗壳体表面, 将其在水中浸泡 1~2 天, 用刷子去除其内部残余的软组织, 然后使用去离子水清洗 4~5 遍, 放入烘箱, 在 40 °C 环境下烘干。最后沿壳体的切割线(图 4a), 从铰合区至壳体边缘切下一个 2~3 cm 厚的薄板, 再从薄板中选取内层生长较为规则的部分, 制作薄片进行激光共聚焦图像拍摄和稳定同位素分析(图 4b)。

1.2 样品前处理及激光共聚焦成像

激光共聚焦成像在中国科学院地球环境研究所完成, 使用激光共聚焦显微镜 (A1HD25; A1-SHS-

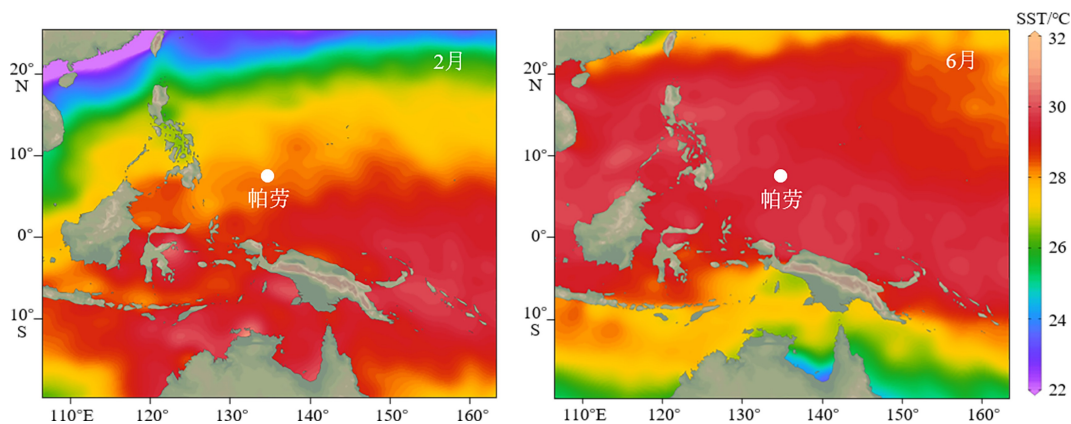


图 1 西北太平洋 2 月(最冷月)与 6 月(最暖月)平均 SST 分布(1955—2017 年)和帕劳位置示意图
图中白色标记点为帕劳, SST 数据来自 WOA: <http://odv.awi.de/data/ocean/>

Fig.1 The monthly average SST of February (coldest month) and June (warmest month) in the northwestern Pacific (1955—2017) and the location of Palau

The location of the Palau is marked by white point, SST data is obtained from WOA: <http://odv.awi.de/data/ocean/>

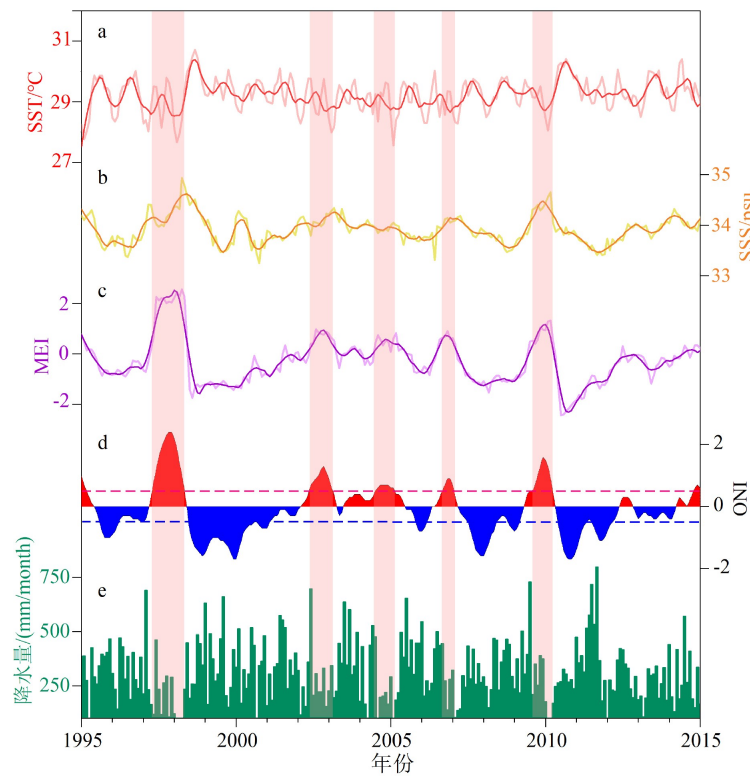


图2 帕劳器测资料和 ENSO 指数的对比 (1995—2015 年)

a. 帕劳月平均 SST 记录, b. 帕劳月平均 SSS 记录, c. MEI 记录, d. ONI 记录, e. 帕劳月平均降水记录; 图中 a、b、c 中的粗实线均为 12 点滑动平均曲线, 图 d 中红色和蓝色虚线分别为 El Niño 事件 (0.5 °C) 和 La Niña 事件 (-0.5 °C) 的检测阈值, 淡红色阴影表示 El Niño 事件。

Fig.2 The comparison of instrumental data of Palau with indices of ENSO (1995—2015)

a. monthly average SST of Palau, b. monthly average SSS of Palau, c. MEI, d. ONI, e. monthly average Precipitation of Palau. The thick lines in Fig.2a, b and c are the 12-point moving average curves; The red and blue dotted lines in the Fig.2d mark the threshold value for El Niño event (0.5 °C) and La Niña event (-0.5 °C), respectively. The light red shading represents El Niño event.

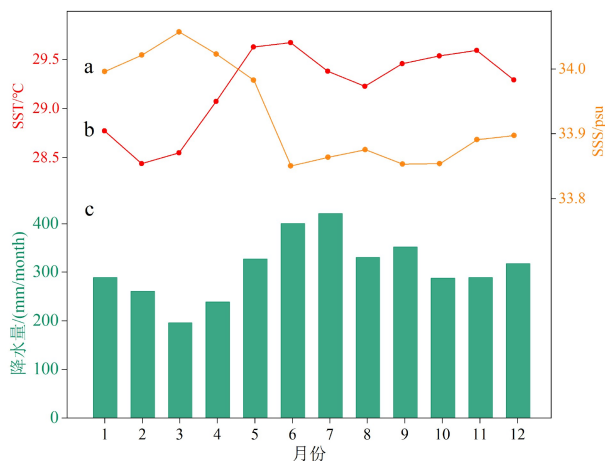


图3 1995—2015 年帕劳多年月平均 SSS (a)、SST (b) 和降水 (c)

Fig.3 The multi-monthly average SSS (a), SST (b) and Precipitation (c) of Palau (1995—2015)

LFOV) 进行图像拍摄。使用磨盘及砂纸将制好的砗磲内层薄片表面磨平, 在样品薄片表面没有明显划痕后, 使用直径为 1 μm 的抛光膏进行抛光, 完成

后将其放入纯水浴中超声清洗 30 min, 并晾干。将处理好的薄片放置于激光共聚焦显微镜载物台上, 选择一个大致垂直生长纹层的方向, 画好标记线, 标示内层边缘至外层方向, 随后对整个样品薄片进行激光共聚焦图像拍摄, 确定砗磲的天纹层数及其天生长速率。在稳定同位素粉末采样完成之后, 再次对样品薄片进行激光共聚焦成像, 确定氧同位素采样的位置及其可能对应的天纹层, 以此建立相对合理的砗磲内层壳体 $\delta^{18}\text{O}_c$ 的年代学框架。

1.3 稳定同位素分析

根据 PL-1 的激光共聚焦图像显示, 该壳体在幼年期生长较快 (约 0.5~0.8 mm/month), 成年期生长较慢 (约 0.3 mm/month); 加上采样条件的限制, 为获得较高分辨率 (至少达到月分辨率) 的粉末样^[52], 本研究设置前 400 个样品的采样间隔为 0.1 mm (成年期), 后 326 个样品的采样间隔为 0.15 mm (幼年期), 取样深度约 0.08 mm, 长度约 2 mm。将样品薄片固定在实验室自主研发的微区取样仪上, 用酒精

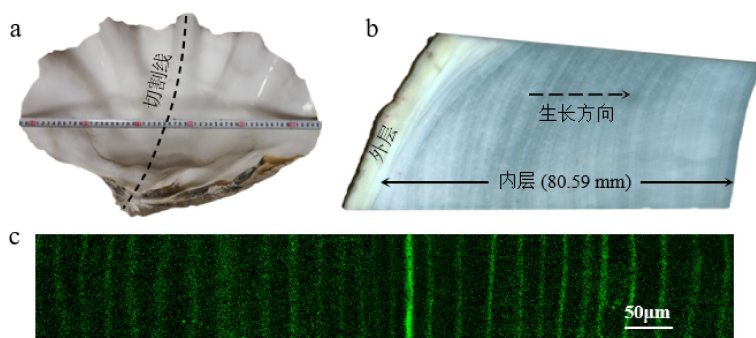


图 4 帕劳砗磲 PL-1 壳体 (a)、内层薄片 (b) 及内层激光共聚焦图像 (c)

Fig.4 Photograph of *T. gigas* PL-1(a), slab of PL-1(b), and laser scanning confocal image of inner shell(c)

将表面清洁干净之后,使用直径为 0.5 mm 的微钻从内层至外层边缘(图 4b),平行于壳体生长方向进行取样。每次采样需尽量保证采样方向与纹层延伸方向垂直,而且要求尽可能少的切换采样方向,以减少重复样品的干扰。在对下一个样品进行采集之前,使用清洁球将上一个样品的残余粉末去除干净,样品采集成功后使用一次性硫酸纸将其转入特制的玻璃瓶中以备稳定同位素分析。

稳定同位素分析测试在中国科学院地球环境研究所完成。使用配备有 Kiel IV 碳酸盐装置的 DEVLTA V ADVANTAGE 同位素比率质谱仪进行测试。选择的实验室标准样品为 GBW04405,结果以相对于 V-PDB 标准的千分之偏差(δ)表示:

$$\delta^{18}\text{O}_c(\text{V-PDB,}\text{‰}) = \left(\frac{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{sample}}}{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{standard}}} - 1 \right) \times 1000 \quad (1)$$

试验的外精度约为 0.102‰ ($n=130, 1\sigma$)。

2 结果

2.1 砗磲内层壳体激光共聚焦成像及年代学框架

砗磲内层壳体的激光共聚焦图像表现为荧光亮带和暗带交替出现,暗带宽度约为亮带的 2~4 倍(图 4c)。此外,壳体共聚焦图像还偶尔会出现荧光超亮带,可能与该地区营养物质的突然增多有关^[35](图 4c)。荧光亮带和暗带可能分别代表沉积较窄的夜晚和沉积较宽的白天,一组荧光亮带和暗带为壳体一天的生长增量,其宽度可通过软件(CooRecorder v9.3)获得^[46]。

为减小天纹层计数及纹层宽度与采样距离之间的误差,由 2 人对天纹层数及宽度进行了共 4 次统计。统计结果表明,帕劳砗磲 PL-1 内层总计有 4 975 个天纹层,约生长了 13.63 a,4 次统计的总纹

层数一倍标准偏差为 41 d,年平均一倍标准偏差约为 3 d/a。内层壳体总生长厚度约为 80.59 mm,日生长速率约为 3~60 $\mu\text{m}/\text{d}$,平均日生长速率约为 16 $\mu\text{m}/\text{d}$ 。平均年生长速率约为 6.52 mm/a,大于大堡礁棕榈岛库氏砗磲的 3 mm/a^[65],与南海南部库氏砗磲的 5.8 mm/a^[46]、苏拉威西岛磷砗磲的第二生长阶段约 6 mm/a 相近^[40]。

采样完成后的共聚焦图像显示,氧同位素粉末样品自内层边缘约 55 层(约 0.67 mm)开始采集,至超出内层约 26 层(约 0.53 mm),重复采样的天纹层约 96 层(约 1.85 mm)。因此,氧同位素粉末样品覆盖的内层天纹层层数约为 4 920 层(约 79.92 mm),共约 13.48 a。扣除重复采样的天纹层数宽度后,实际粉末样采样长度(86.53 mm)与相应覆盖的天纹层长度相差约 6.61 mm,长度误差约为 8.27%(6.61/79.92)。结合天纹层和 PL-1 的采集时间,确定采集的粉末样覆盖时间约为 2012 年 8 月—1999 年 2 月,并据此对帕劳砗磲 PL-1 的氧同位素年代学进行了标定(图 5b),使用软件 AnalySeries 2.0.8 对氧同位素进行 12 点/年插值,得到了月分辨率的氧同位素序列(图 5c)。

2.2 氧同位素

通过高分辨率的稳定同位素分析,得到了 PL-1 的氧同位素记录,采样长度总计约为 88.9 mm,共分析 726 个粉末样品。 $\delta^{18}\text{O}_c$ 的最大值为 -1.327‰,最小值为 -2.665‰,平均值为 -1.935‰, $\delta^{18}\text{O}_c$ 曲线呈现出毛刺状的峰和谷(图 5a)。前人研究认为氧同位素的低值谷和高值峰可能分别对应温暖湿润的夏季和相对凉爽干燥的冬季^[25,37]。Jones 等^[14]在研究 Rose Atoll 的长砗磲时,发现 $\delta^{18}\text{O}_c$ 的变化振幅在其性成熟前后会发生较大的改变,认为是砗磲对能量的利用由早期侧重生长转化到了晚期侧重生殖,导致 $\delta^{18}\text{O}_c$ 波动范围变小。但这一现象在后期的多

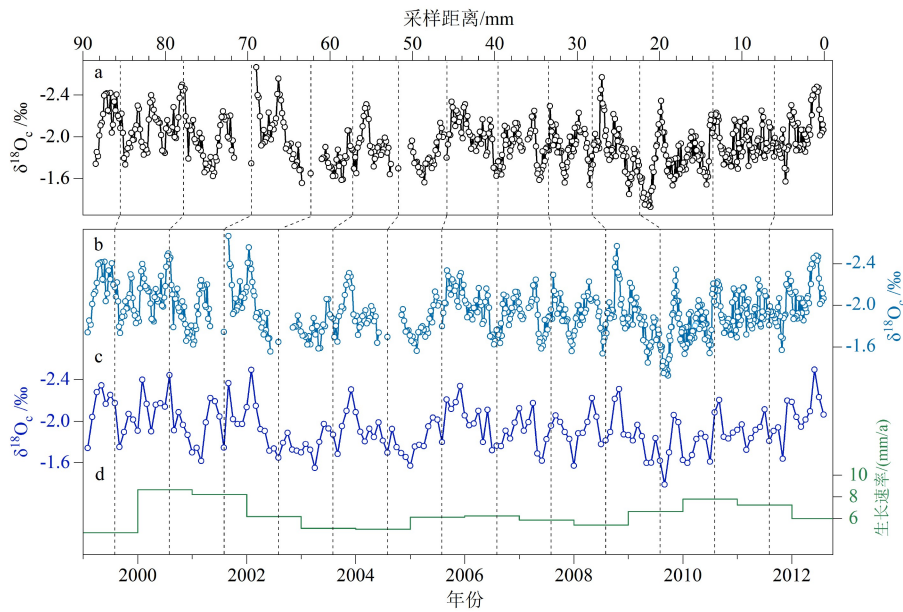


图5 PL-1 内层 $\delta^{18}\text{O}_e$ (a)、 $\delta^{18}\text{O}_e$ 年龄模型 (b)、12 点插值的 $\delta^{18}\text{O}_e$ (c)、内层壳体的年生长速率 (d)

Fig.5 The $\delta^{18}\text{O}_e$ profile (a), the chronology of $\delta^{18}\text{O}_e$ profile (b), the 12-point profile of $\delta^{18}\text{O}_e$ (c) and the annual growth rate of inner shell of PL-1 (d)

个砗磲氧同位素研究中均未观测到,可能是因为前述研究者在采样过程中没有考虑砗磲生长速率的变化,采用的采样方法不合理所导致^[14,66]。插值结果显示,帕劳砗磲 PL-1 的 $\delta^{18}\text{O}_e$ 呈现低值双谷模式, $\delta^{18}\text{O}_e$ 的年振幅范围约为 0.39‰~0.84‰, 平均年振幅约为 0.615‰ (图 5c), 且没有观测到数值或振幅随壳体生长而发生明显改变的现象 (图 5a)。因此,可以推断帕劳砗磲 PL-1 的性成熟并不会显著改变其壳体的氧同位素变化。

3 讨论

3.1 确定 $\delta^{18}\text{O}_e$ 的年代学框架

在古气候研究中,确定古气候载体的年代学框架是研究气候变化的前提。Aharon 等^[23]通过透射光发现了巴布亚新几内亚的化石砗磲内层壳体具有明暗交替的条纹,结合氧同位素分析,认为这是内层壳体在冬季有机质积累较多,夏季有机质积累较少而使壳体内层显示出明暗交替的季节性生长纹层^[37]。这种明暗相间的年纹层,通常可以用于相对年代学的标定,为砗磲古气候研究提供准确的年代学框架^[31,41]。

但在本研究中使用的帕劳现代库氏砗磲 PL-1 的生长截面上,并没有观察到这种清晰可见的年纹层 (图 4b)。通过对比分析发现,现代砗磲年纹层的

清晰度可能与砗磲栖息地气候的季节性变化幅度有关,冬夏温差或降水差越大,壳体的年纹层通常越清晰^[18,39,65]。已有研究中,具有清晰年纹层的现代砗磲,通常来自平均 SST 年较差 (SST 最高月与最低月之差) 较大的地区,如日本石垣岛 (约为 10℃)^[24]、琉球群岛 (约为 9℃)^[27,31]、中国南海西沙 (约为 5℃)^[33]、美国萨摩亚群岛 (约为 6℃)^[66]、澳大利亚棕榈岛 (约为 8℃)^[65]、新喀里多尼亚 (约为 9℃)^[25] 等。而来自 SST 年较差小于 3℃ 区域的现代砗磲,如印度尼西亚苏拉威西岛 (约为 1.75℃)^[40]、巴布亚新几内亚 Huon 半岛 (约为 1.5℃)^[18,23,39] 等,则通常难以观察到清晰可见的年纹层。

帕劳处于热带区域,多年月平均 SST 常大于 28.5℃, SST 平均年较差约为 1.6℃ (1995—2015 年)。即使是在 1997—1998 年的 ENSO 事件中,帕劳月平均 SST 的最大振幅也仅约 4℃^[67]。较小的气候季节性差异,导致砗磲内层在不同季节的碳酸盐沉积差异不明显,PL-1 内层薄片仅能观察到模糊的年纹层。因此,如果在本次研究中使用砗磲的年纹层来标定帕劳砗磲 PL-1 氧同位素的年代学框架,可能会导致较大的定年误差。

除了年纹层外,天生长纹层也在部分砗磲中被观测到^[37]。研究人员通过扫描电镜^[60]、光学显微镜^[27,40,43,68]、高频无创瓣膜计^[36]等方法相继发现了砗磲壳体的天纹层。最近 Yan 等^[35]和 Ma 等^[46]使用激光共聚焦成像对南海库氏砗磲壳体进行了观

察分析,发现砗磲内层壳体在显微图像中交替出现荧光亮带和暗带,认为可能分别代表了沉积有机质较多的夜晚和有机质较少的白天,相邻亮带之间的宽度约为 5~60 μm 。此外,通过多种交叉检验发现,南海砗磲壳体的天纹层没有明显的缺层现象^[35,46]。同时,巴布亚新几内亚地区的砗磲壳体内层的天纹层也没有发现明显的缺层现象^[37,40]。

通过激光共聚焦显微成像,发现帕劳砗磲存在较为清晰的天生长纹层,可为标定氧同位素序列的年代学框架提供辅助^[18]。根据激光共聚焦成像和采样记录显示,实际氧同位素采样长度与相应的天纹层宽度相差约 6.61 mm。分析该误差可能来自两个方面:一方面源自统计天纹层宽度时所产生的误差,包括统计平行纹层时产生的累计误差,以及在天纹层延展方向变化较大的区域切换统计纹层的方向所导致的偏差;另一方面来自粉末样的采集,难以保证氧同位素的采样方向与微小天纹层的延展方向完全垂直,使得每个氧同位素粉末样品所代表的天纹层有所重叠,最终导致氧同位素的采样距离比天纹层统计得到的长度略长。在本研究中,采取下述几种方法来减小和校准这种误差:①由两个工作人员对纹层数及宽度进行多次统计,减少纹层天数上的误差;②在统计纹层宽度时,选择天纹层较为清晰、平直的区域,统计时尽可能地保持相邻两个纹层之间相互垂直,并尽量减少切换统计纹层方向的次数,在少量图像不清晰的地方,以相邻纹层宽度为参考,等间距延伸;③选择采集粉末样品的方向尽量与天纹层的延展方向垂直;④结合采样记录,在扣除粉末样品重复覆盖的天纹层宽度后,将两者之间的误差平均分配给 4 920 个天纹层,可得到累计天纹层长度与采样记录长度相同的距离坐标。在完成校准后,利用天纹层,结合活体砗磲样本 PL-1 的采集时间(2012 年 10 月),根据每年 365 天的纹层增量,即可对同位素样品所代表的碳酸盐生长时间点和时间跨度进行标定,获得氧同位素序列的年代学框架(图 5b)。

通常情况下,砗磲的生长速率会随砗磲的生长逐渐降低^[40,43,65]。帕劳砗磲 PL-1 的天纹层结果显示,该砗磲在第一年生长速率较慢,约为 4.66 mm/a。在其 2~4 龄时,生长速率较快,年生长速率平均约为 7.67 mm/a(图 5d)。4 龄以后平均年生长速率约为 6.1 mm/a。壳体氧同位素的年代学标定结果显示,在砗磲幼年期(1~4 a),每个氧同位素粉末样代表的时间跨度约为 6~10 d;在成年期后(约 4 龄以后),每个粉末样代表的时间跨度约为 20~24 d。虽

然每一个氧同位素数据代表的时间跨度有所差别,但是每个氧同位素数据跨越的时间范围基本都在 1 个月以内,数据的真实时间分辨率高于月分辨率。

3.2 壳体 $\delta^{18}\text{O}_c$ 的影响因素

砗磲氧同位素的研究始于 20 世纪 80 年代,Aharon 等^[17]利用巴布亚新几内亚 Huon 半岛的化石砗磲壳体氧同位素,结合珊瑚阶地的相对变化,重建了晚第四纪的海平面变化。随后,作者又发现砗磲内层壳体在形成过程中,其氧同位素体系与周围的海水环境基本保持同位素分馏平衡,砗磲内层壳体 $\delta^{18}\text{O}_c$ 主要受 SST 和 $\delta^{18}\text{O}_w$ 的影响^[23]。这一观点在随后的几十年里被其他多个砗磲研究工作所证实^[25,27-28,38,65]。但是,也有学者认为砗磲内层壳体的氧同位素可能还会受到埋藏成岩矿物相变^[21,23]、生长趋势^[14,32,41,66,69]、大陆河流淡水输入^[32,70]等因素的影响。

在矿物沉积过程中,埋藏成岩矿物蚀变可能会使矿物内部的晶格发生变化,导致砗磲壳体内部的氧同位素组成发生变化^[21,37]。由于本次用于分析的帕劳砗磲 PL-1 为现代活体砗磲,而非化石砗磲,所以并不会受到埋藏过程中成岩矿物相变的影响^[20]。此外,测试结果显示(图 5c), $\delta^{18}\text{O}_c$ 的数值和年振幅没有显示出随个体生长而发生明显变化的趋势。同时,砗磲内层壳体的 $\delta^{18}\text{O}_c$ 年振幅与年生长速率之间也没有观察到显著的相关性(图 6)。这些结果表明,帕劳砗磲 PL-1 的个体生命效应对 $\delta^{18}\text{O}_c$ 没有显著的影响。而且帕劳地处热带开阔大洋,不会受到大陆河流输入的影响,壳体 $\delta^{18}\text{O}_c$ 的变化可能主要受外部气候环境变化的控制。

据 IGOSS STT 记录显示,帕劳 1999 年 2 月—2012 年 8 月期间,SST 平均年较差约为 1.47 $^{\circ}\text{C}$ 。依照前人建立的双壳类文石与 SST 之间的经验公式(2)^[38]:

$$\text{SST} = 21.8 - 4.69 \times (\delta^{18}\text{O}_c - \delta^{18}\text{O}_w) \quad (2)$$

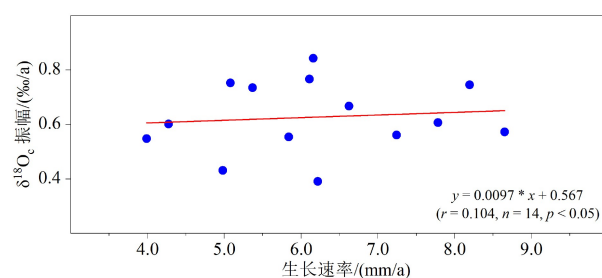


图 6 PL-1 $\delta^{18}\text{O}_c$ 年振幅和年生长速率的相关性

Fig.6 The correlation between the $\delta^{18}\text{O}_c$ annual amplitude and annual growth rate of PL-1

公式(2)中 SST 为海表温度($^{\circ}\text{C}$), $\delta^{18}\text{O}_c$ 为壳体氧同位素(V-PDB, ‰), $\delta^{18}\text{O}_w$ 为海水氧同位素(V-PDB, ‰)。若视海水 $\delta^{18}\text{O}_w$ 不变时, SST 变化对 $\delta^{18}\text{O}_c$ 平均年振幅(0.615‰)的贡献约为 50.9%(图 7a)。SST 在一年之中的两次峰值可能是导致 $\delta^{18}\text{O}_c$ 出现低值双谷的原因(图 5c)。

已有的研究表明,在开放海洋中, $\delta^{18}\text{O}_w$ 的变化常与该区域的 SSS 有着良好的对应关系^[67,71-72]。在海水 $\delta^{18}\text{O}_w$ 未知的区域,可根据观测的 SSS,结合当地建立的 SSS- $\delta^{18}\text{O}_w$ 经验公式来反推 $\delta^{18}\text{O}_w$ 的变化^[32,46]。根据 SODA 1999 年 2 月—2012 年 8 月的 SSS 记录显示,帕劳附近的 SSS 平均年较差(SSS 最高月与最低月之差)约为 0.55 psu,结合当地建立的 SSS- $\delta^{18}\text{O}_w$ 的经验公式(3)^[67]:

$$\delta^{18}\text{O}_w (\text{SMOW}, \text{‰}) = -14.3 + 0.42 \times \text{SSS} \quad (3)$$

公式(3)中, $\delta^{18}\text{O}_w$ 为海水氧同位素(SMOW, ‰), SSS 为海表面盐度(psu)。 $\delta^{18}\text{O}_w$ (V-PDB, ‰)与 $\delta^{18}\text{O}_w$ (SMOW, ‰)之间相差约 0.2‰^[46]。若视 SST 不变, SSS 变化对 $\delta^{18}\text{O}_c$ 平均年振幅(0.615‰)的贡献约为 37.6%(图 7a)。

除格点 SST 与 SSS 资料,我们也根据 1999 年 2 月—2003 年 7 月期间帕劳地区部分实地观测资料^[59,67],对 SST 和 $\delta^{18}\text{O}_w$ 的贡献进行了计算。结果显示,实测 SST 变化(1.45 $^{\circ}\text{C}$)对 $\delta^{18}\text{O}_c$ 平均年振幅(0.615‰)的贡献约为 50.4%(图 7b);实测的 $\delta^{18}\text{O}_w$ 变化(0.302‰)对 $\delta^{18}\text{O}_c$ 平均年振幅的贡献约为 49.1%(图 7b),较根据 SODA SSS 反推的 $\delta^{18}\text{O}_w$ 的贡献(37.6%)略大。该结果说明,若利用 SODA 的 SSS 来反推 $\delta^{18}\text{O}_w$ 的变化,很可能会低估了海水 $\delta^{18}\text{O}_w$ 对 $\delta^{18}\text{O}_c$ 的贡献。实测资料与格点资料推算结果的不一致可能与格点资料的不确定性有关。

因此,认为在帕劳地区, SST 和 SSS 的变化对砗

磬 $\delta^{18}\text{O}_c$ 变化的贡献可能是相当的。这一结果与我国南海西沙、日本琉球群岛等地存在显著差异,在这两个区域, SST 变化对砗磬 $\delta^{18}\text{O}_c$ 变化的贡献值超过了 70%,占主导地位^[9,33]。将砗磬 $\delta^{18}\text{O}_c$ 序列与帕劳当地 SST、SSS 以及降水分别进行回归分析,结果表明,砗磬 $\delta^{18}\text{O}_c$ 序列与 SST、SSS 和降水之间均存在一定的相关性,但相关系数均不高(图 8a、b、c),而经 12 点平滑处理的 $\delta^{18}\text{O}_c$ 与 SST、SSS、降水的相关性略有提升,相关系数分别约为 -0.24, 0.46 及 -0.26 ($n=141, p<0.05$),进一步证明了帕劳砗磬 $\delta^{18}\text{O}_c$ 受到 SST 和海水 $\delta^{18}\text{O}_w$ 的共同控制,而不是其中某一个因子主导。

综上所述,帕劳砗磬内层壳体 $\delta^{18}\text{O}_c$ 主要受周围海水 SST 和 $\delta^{18}\text{O}_w$ 组成的影响,可以记录周围环境水文变化的信息。但该区域较低的 SST 季节性和充沛且不规律的降水使得壳体 $\delta^{18}\text{O}_c$ 的年周期不明显,高分辨率的氧同位素数据常出现毛刺状峰值。同时,本次使用的 SST 为格点再分析数据, SSS 则是由少量观测数据进行网格插值的结果,可能无法准确纪录局地 SST 和 SSS 的快速变化,导致实测的 $\delta^{18}\text{O}_c$ 和 $\delta^{18}\text{O}_c$ 估算值的相关性较低($r=0.275, p<0.05$)。要对帕劳现代砗磬 $\delta^{18}\text{O}_c$ 进行准确的校准,还需要进一步获取更多高精度的原位 SST 及 $\delta^{18}\text{O}_w$ 观测数据。

3.3 $\delta^{18}\text{O}_c$ 与 ENSO 之间的联系

ENSO 是全球气候年际异常的最强信号,对热带太平洋地区的水文气候变化影响尤其显著^[73]。开展不同时间尺度 ENSO 变化的重建,研究其变化规律,是预测未来气候变化的重要基础^[74]。ENSO 活动发生的时间通常从几个月到几年不等,准确重建过去的 ENSO 活动,需要年、最好是月分辨率的古气候记录^[75]。但目前来自热带太平洋的此类高分辨率古气候记录仍然非常稀少,这也导致对过去不同时间尺度 ENSO 活动的认识还存在很大的不确定性,极大地限制了对 ENSO 的理解和预测^[13,74,76]。

帕劳位于 WPWP 西北边缘,区域年际气候变化受 ENSO 活动的显著影响^[50]。根据 1995—2015 年的 IGOSS SST 资料显示,帕劳多年平均 SST 约为 29.2 $^{\circ}\text{C}$, SST 年振幅约为 1.6 $^{\circ}\text{C}$;多年月平均 SST 呈现出双峰模式,第一个峰值常出现在每年 5—6 月,第二个峰值常出现在每年 10—11 月,全年最低温一般出现在每年 2 月(图 3a),双峰模式与一年中太阳越过赤道两次有关^[46]。在 El Niño 期间,帕劳附近的 SST 通常会降低, La Niña 时期则会相对升高(图 2a)。据科罗多尔机场 1995—2015 年的降水记

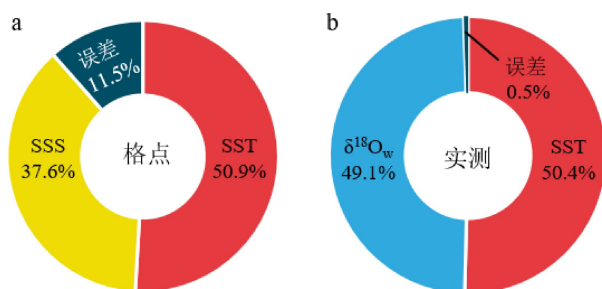


图 7 格点 SST 和 SODA SSS (a)、实测 SST 和 $\delta^{18}\text{O}_w$ (b) 对 $\delta^{18}\text{O}_c$ 年振幅的贡献

Fig.7 The contributions of instrumental SST and SODA SSS (a), suit SST and suit $\delta^{18}\text{O}_w$ (b) to the annual amplitude of $\delta^{18}\text{O}_c$.

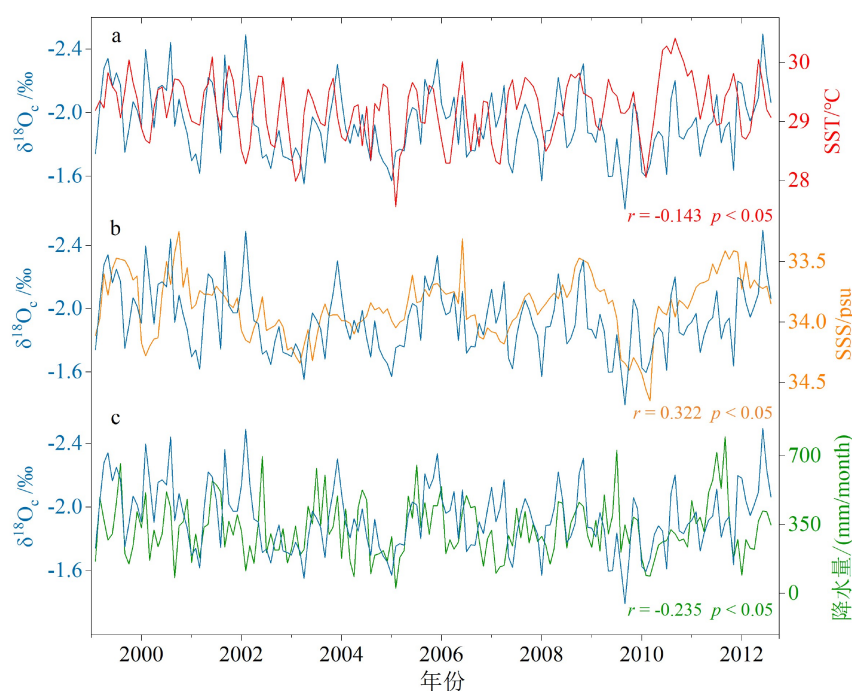


图 8 12 点 $\delta^{18}\text{O}_c$ 与 SST (a), SSS (b), 降水 (c) 之间的对比
蓝色实线为 12 点插值的 $\delta^{18}\text{O}_c$, 红色实线为 SST, 黄色实线为 SSS, 绿色实线为降水。

Fig.8 The comparison of 12-point profile of $\delta^{18}\text{O}_c$ with SST (a), SSS (b), and Precipitation (c)

The blue solid line is the 12-point profile of $\delta^{18}\text{O}_c$, the red solid line is SST, the yellow solid line is SSS, the green solid line is Precipitation.

录显示,该地区年总降水常超过 3 700 mm,降水年平均振幅约为 390 mm。月降水曲线呈较大的波动,如 1997—1998 年、2004—2005 年及 2010 年降水出现极低值,为典型的 El Niño 年;1998—2001 年、2007—2008 年、2010—2011 年出现较大的降水峰值,对应典型的 La Niña 年(图 2e)。多年月平均降水峰值一般出现在每年 6—7 月,最低值常出现在每年 2 月,整体呈一个 W 型(图 3b),与多年月平均 SST 显著正相关($r=0.65, n=12, p<0.05$)。据 SODA 1995—2015 年的 SSS 记录显示,该地区的年平均 SSS 约为 33.93 psu, SSS 平均年振幅约为 0.54 psu。帕劳多年月平均 SSS 最低值一般出现在每年 6 月,约为 33.85 psu,最高值通常出现在每年 3 月,约为 34.05 psu(图 3a),与多年月平均降水显著负相关($r=-0.77, n=12, p<0.05$),SSS 年际变化的峰值和谷值通常与 El Niño 和 La Niña 事件有较好的对应关系(图 2b)。在壳体存活期间,经 12 点平滑处理的 SST,降水及 SSS 与 MEI 的相关性分别约为 -0.66 、 -0.26 、 $0.64(n=141, p<0.05)$ 。

在 El Niño 期间,帕劳周边的 SST 相对降低,降水相对减少,可能会导致海洋生物碳酸盐中的 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏正;在 La Niña 期间,则表现为高温多雨,充沛的降水会导致海水表面 $\delta^{18}\text{O}_w$ 相对偏负,结合

SST 变化,均可能导致海洋生物碳酸盐中的 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏负 [32, 45, 55—59, 67, 74]。据此推测,帕劳砗磲内层壳体 $\delta^{18}\text{O}_c$ 的年际变化有可能能够记录热带太平洋的 ENSO 活动。

我们计算了帕劳砗磲 PL-1 的氧同位素异常值 ($\delta^{18}\text{OA}$) 同期海表面温度异常 (SSTA)、降水异常及海表面盐度异常 (SSSA),并对它们进行一年滑动平均处理,与典型的 ENSO 活动指数 (MEI 和 SOI) 曲线进行了对比(图 9)。

根据 ONI 指数显示,在 1999 年 2 月—2012 年 8 月,共发生了 6 次 La Niña 事件和 4 次 El Niño 事件(图 9)。当 La Niña 发生时,MEI 为负(图 9e),SOI 为正(图 9f),帕劳区域的 SSTA 通常会偏正(图 9b),降水异常偏正(图 9c),SSSA 偏负(图 9d), $\delta^{18}\text{OA}$ 也出现负值高峰(图 9a)。 $\delta^{18}\text{OA}$ 的负值峰成功检测出了 1999—2001、2006、2009 及 2012 年的 La Niña。但 $\delta^{18}\text{OA}$ 对 2008 年 La Niña 的记录不清晰,可能是在 2008 年 La Niña 发展的早、中期,降水并没有发生明显的变化,而发展到末期,才出现了较为明显的降水正异常,导致 $\delta^{18}\text{OA}$ 在后期才出现了明显的负异常;此外, $\delta^{18}\text{OA}$ 虽检测出了 2011 年的 La Niña,但信号较弱,可能是由于 2010 年末期的降水负异常与 2011 年早期的降水正异常经平滑处理后相互抵

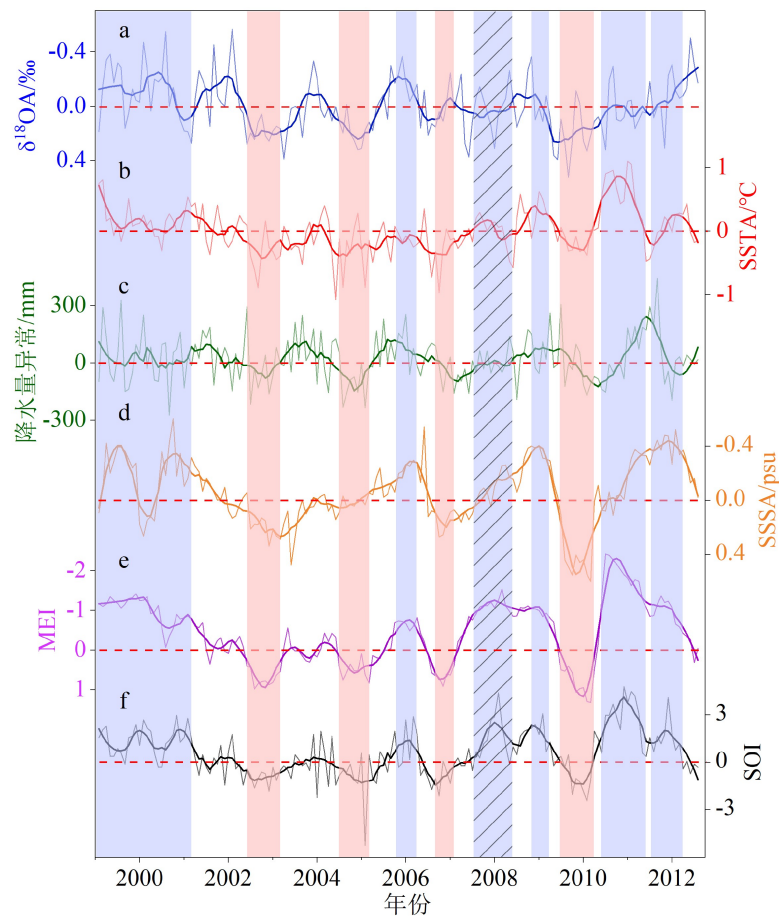


图9 $\delta^{18}\text{O}_a$ (a) 与 SSTA (b)、降水异常 (c)、SSSA (d)、MEI (e)、SOI (f) 的对比
图中粗实线均为 1 年滑动平均曲线; 蓝色和红色阴影分别代表由 ONI 指示的 La Niña 与 El Niño 事件, 带斜杠的蓝色阴影代表 $\delta^{18}\text{O}_a$ 未检测出的 La Niña; $\delta^{18}\text{O}_a$ 、SSSA、MEI 的纵轴为逆序坐标。

Fig.9 The comparison of $\delta^{18}\text{O}_a$ (a) with SSTA (b), Precipitation anomaly (c), SSSA (d), MEI (e), SOI (f)

All of the thick solid lines in the figure are the 1-a moving average curves; the blue and red shadings represent the La Niña and El Niño events indicated by ONI, respectively; the blue bar with slashes represents the La Niña event that is not detected by $\delta^{18}\text{O}_a$; the vertical axes of $\delta^{18}\text{O}_a$, SSSA and MEI are reversed.

消导致(图 9a)。在 2002 年和 2004 年期间, SOI 出现了多次正异常的震荡(图 9f), 虽然没有发展为典型的 La Niña 事件, 但是帕劳地区的降水均出现了显著的正异常(图 9c), 这也导致 $\delta^{18}\text{O}_a$ 明显偏负, 记录到了假的 La Niña 信号。当 El Niño 发生时, MEI 则为正值, SOI 为负值, 帕劳区域的 SST 相对降低, 降水减少, SSS 相对升高, $\delta^{18}\text{O}_a$ 也出现正值高峰。 $\delta^{18}\text{O}_a$ 的正异常较为成功地检测出了 2002—2003、2004—2005、2006—2007 及 2009—2010 年的 El Niño(图 9a)。经 12 点平滑处理的 $\delta^{18}\text{O}_a$ 与 MEI 及 SOI 的相关性分别约为 0.43 和 -0.38($n=141, p<0.05$)。

总体来说, 帕劳砗磲 $\delta^{18}\text{O}_a$ 在一定程度上记录了热带太平洋 ENSO 活动对当地水文气候变化的影响。在 El Niño 事件期间, 帕劳地区温度降低, 降水减少, $\delta^{18}\text{O}_a$ 通常出现正异常; 在 La Niña 事件期间, 则温度偏高, 降水增多, $\delta^{18}\text{O}_a$ 通常出现负异常。

通过对比 $\delta^{18}\text{O}_a$ 对 La Niña 和 El Niño 的检出率发现, 帕劳砗磲的氧同位素变化可能对 El Niño 的响应更为敏感。

4 结论

(1) 帕劳砗磲 PL-1 内层壳体有清晰的天纹层结构, 天纹层计数和天纹层宽度可用于建立较为准确的相对年代学框架; 帕劳砗磲 $\delta^{18}\text{O}_c$ 的平均年振幅约为 0.615‰, $\delta^{18}\text{O}_c$ 的数值和年振幅没有受到砗磲个体生命效应的显著影响。

(2) 通过现代器测资料的计算表明, 帕劳当地 SST 和海水 $\delta^{18}\text{O}_w$ 变化对砗磲 $\delta^{18}\text{O}_c$ 的季节变化贡献相当, 各约占一半。

(3) 帕劳地区保存完好的砗磲壳体是进行高分辨率古气候研究的良好材料, 其天纹层可以辅助进

行高分辨率年代学框架的构建, 而 $\delta^{18}\text{O}_c$ 则可以记录当地的水文气候变化, 结合更多原位资料, 具有探讨热带太平洋 ENSO 活动变化的潜力。

砗磲生长在珊瑚礁盘, 死亡后其壳体直接沉积在珊瑚礁盘中, 在珊瑚礁中从上往下采集, 通常可获得较为连续的化石砗磲沉积序列, 样品的时间连续性较好。因此, 砗磲和珊瑚的相互结合和交叉检验, 可为重建较长时间序列热带高分辨率气候变化提供重要样本。此外, 砗磲独特的天纹层结构, 还可以提供天生长速率、微量元素变化等天—小时分辨率的生物地球化学记录, 具有开展超高分辨率古天气研究的潜力。

参考文献 (References)

- [1] Andreasson F P, Schmitz B. Temperature seasonality in the early middle Eocene North Atlantic region: Evidence from stable isotope profiles of marine gastropod shells [J]. *GSA Bulletin*, 2000, 112 (4): 628-640.
- [2] Yan H, Sun L G, Shao D, et al. Seawater temperature seasonality in the South China Sea during the late Holocene derived from high-resolution Sr/Ca ratios of *Tridacna gigas* [J]. *Quaternary Research*, 2015, 83 (2): 298-306.
- [3] 林而达, 许吟隆, 蒋金荷, 等. 气候变化国家评估报告(II): 气候变化的影响与适应[J]. *气候变化研究进展*, 2006, 2 (2): 51-56. [LIN Erda, XU Yinlong, JIANG Jinhe, et al. National Assessment Report of Climate Change (II): Climate change impacts and adaptation [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2006, 2 (2): 51-56.]
- [4] Collins M, An S I, Cai W J, et al. The impact of global warming on the tropical Pacific Ocean and El Niño [J]. *Nature Geoscience*, 2010, 3 (6): 391-397.
- [5] Guo Y P, Tan Z M. The Hadley circulation regime change: Combined effect of the Western Pacific warming and increased ENSO amplitude [J]. *Journal of Climate*, 2018, 31 (23): 9739-9751.
- [6] Hongo C, Kurihara H, Golbuu Y. Coral boulders on Melekeok reef in the Palau Islands: An indicator of wave activity associated with tropical cyclones [J]. *Marine Geology*, 2018, 399: 14-22.
- [7] Schöne B R, Castro A D F, Fiebig J, et al. Sea surface water temperatures over the period 1884-1983 reconstructed from oxygen isotope ratios of a bivalve mollusk shell (*Arctica islandica*, southern North Sea) [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2004, 212 (3-4): 215-232.
- [8] Patterson W P, Dietrich K A, Holmden C, et al. Two millennia of North Atlantic seasonality and implications for Norse colonies [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107 (12): 5306-5310.
- [9] Yamanashi J, Takayanagi H, Isaji A, et al. Carbon and oxygen isotope records from *Tridacna derasa* shells: toward establishing a reliable proxy for sea surface environments [J]. *PLoS ONE*, 2016, 11 (6): e0157659.
- [10] Xu J, Kuhnt W, Holbourn A, et al. Indo-Pacific warm pool variability during the Holocene and Last Glacial Maximum [J]. *Paleoceanography*, 2010, 25 (4): PA4230.
- [11] 孙有斌, 郭飞. 中国黄土记录的季风快速变化[J]. *第四纪研究*, 2017, 37 (5): 963-973. [SUN Youbin, GUO Fei. Rapid monsoon changes recorded by Chinese loess deposits [J]. *Quaternary Sciences*, 2017, 37 (5): 963-973.]
- [12] Greenland Ice-core Project (GRIP) Members. Climate instability during the last interglacial period recorded in the GRIP ice core [J]. *Nature*, 1993, 364 (6434): 203-207.
- [13] Neukom R, Steiger N, Gómez-Navarro J J, et al. No evidence for globally coherent warm and cold periods over the preindustrial Common Era [J]. *Nature*, 2019, 571 (7766): 550-554.
- [14] Jones D S, Williams D F, Romanek C S. Life history of symbiont-bearing giant clams from stable isotope profiles [J]. *Science*, 1986, 231 (4733): 46-48.
- [15] Rosewater J. The Family *Tridacnidae* in the Indo-Pacific[M]. The Philippines: Department of Mollusks, Academy of Natural Sciences of Philadelphia, 1965: 374-396.
- [16] Jameson S C. Early life history of the giant clams *Tridacna crocea* Lamarck, *Tridacna maxima* (Roding), and *Hippopus hippopus* (Linnaeus) [J]. *Pacific Science*, 1976, 30 (3): 219-233.
- [17] Aharon P, Chappell J, Compston W. Stable isotope and sea-level data from New Guinea supports Antarctic ice-surge theory of ice ages [J]. *Nature*, 1980, 283 (5748): 649-651.
- [18] Driscoll R E. PaleoENSO reconstructions of the Holocene and Last Glacial Period[D]. Doctor Dissertation of University of Edinburgh, 2015.
- [19] Gannon M E, Pérez-Huerta A, Aharon P, et al. A biomineralization study of the Indo-Pacific giant clam *Tridacna gigas* [J]. *Coral Reefs*, 2017, 36 (2): 503-517.
- [20] 晏宏, 刘成程. 砗磲地球化学与古气候学研究进展[J]. *第四纪研究*, 2017, 37 (5): 1077-1090. [YAN Hong, LIU Chengcheng. Review on *Tridacna* geochemistry and paleoclimate research [J]. *Quaternary Sciences*, 2017, 37 (5): 1077-1090.]
- [21] 梅衍俊, 邵达, 刘文齐, 等. 南海砗磲壳体成分及生物有机特征分析[J]. *中国科学技术大学学报*, 2018, 48 (7): 550-559. [MEI Yanjun, SHAO Da, LIU Wenqi, et al. Analysis of the components and biological organic characteristics of *Tridacna* spp. shells from South China Sea [J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2018, 48 (7): 550-559.]
- [22] 晏宏, 邵达, 王玉宏, 等. 南海西沙大砗磲高分辨率Sr/Ca温度计及其意义[J]. *地球环境学报*, 2011, 2 (2): 381-386. [YAN Hong, SHAO Da, WANG Yuhong, et al. High resolution Sr/Ca profile of *Tridacna gigas* from Xisha Islands of South China Sea and its potential application on sea surface temperature reconstruction [J]. *Journal of Earth Environment*, 2011, 2 (2): 381-386.]
- [23] Aharon P, Chappell J. Carbon and oxygen isotope probes of reef environment histories[M]//Barnes D J. Perspectives on Coral Reefs. Townsville, Australia: Brian Clouston, 1983: 1-15.
- [24] Yoshimura T, Tamenori Y, Suzuki A, et al. Element profile and

- chemical environment of sulfur in a giant clam shell: Insights from μ -XRF and X-ray absorption near-edge structure [J]. *Chemical Geology*, 2013, 352: 170-175.
- [25] Aubert A, Lazareth C E, Cabioch G, et al. The tropical giant clam *Hippopus hippopus* shell, a new archive of environmental conditions as revealed by sclerochronological and $\delta^{18}\text{O}$ profiles [J]. *Coral Reefs*, 2009, 28 (4): 989-998.
- [26] Warter V, Erez J, Müller W. Environmental and physiological controls on daily trace element incorporation in *Tridacna crocea* from combined laboratory culturing and ultra-high resolution LA-ICP-MS analysis [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2018, 496: 32-47.
- [27] Watanabe T, Oba T. Daily reconstruction of water temperature from oxygen isotopic ratios of a modern *Tridacna* shell using a freezing microtome sampling technique [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1999, 104 (C9): 20667-20674.
- [28] Duprey N, Lazareth C E, Dupouy C, et al. Calibration of seawater temperature and $\delta^{18}\text{O}_{\text{seawater}}$ signals in *Tridacna maxima*'s $\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}}$ record based on in situ data [J]. *Coral Reefs*, 2015, 34 (2): 437-450.
- [29] Komagoe T, Watanabe T, Shirai K, et al. Geochemical and microstructural signals in giant clam *Tridacna maxima* recorded typhoon events at Okinotori Island, Japan [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2018, 123 (5): 1460-1474.
- [30] Bayer S, Beierlein L, Morán G A, et al. Late Quaternary climatic variability in northern Patagonia, Argentina, based on $\delta^{18}\text{O}$ of modern and fossil shells of *Amiantis purpurata* (Bivalvia, Veneridae) [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2020, 560: 110012.
- [31] Watanabe T, Suzuki A, Kawahata H, et al. A 60-year isotopic record from a mid-Holocene fossil giant clam (*Tridacna gigas*) in the Ryukyu Islands: physiological and paleoclimatic implications [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2004, 212 (3-4): 343-354.
- [32] Ayling B F, Chappell J, Gagan M K, et al. ENSO variability during MIS 11 (424-374 ka) from *Tridacna gigas* at Huon Peninsula, Papua New Guinea [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, 431: 236-246.
- [33] Yan H, Shao D, Wang Y H, et al. Sr/Ca profile of long-lived *Tridacna gigas* bivalves from South China Sea: A new high-resolution SST proxy [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2013, 112: 52-65.
- [34] Hori M, Sano Y, Ishida A, et al. Middle Holocene daily light cycle reconstructed from the strontium/calcium ratios of a fossil giant clam shell [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 8734.
- [35] Yan H, Liu C C, An Z S, et al. Extreme weather events recorded by daily to hourly resolution biogeochemical proxies of marine giant clam shells [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117 (13): 7038-7043.
- [36] Schwartzmann C, Durrieu G, Sow M, et al. In situ giant clam growth rate behavior in relation to temperature: A one-year coupled study of high-frequency noninvasive valvometry and sclerochronology [J]. *Limnology and Oceanography*, 2011, 56 (5): 1940-1951.
- [37] Aharon P, Chappell J. Oxygen isotopes, sea level changes and the temperature history of a coral reef environment in New Guinea over the last 10⁵ years [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1986, 56 (3-4): 337-379.
- [38] Grossman E L, Ku T L. Oxygen and carbon isotope fractionation in biogenic aragonite: temperature effects [J]. *Chemical Geology*, 1986, 59: 59-74.
- [39] Welsh K, Elliot M, Tudhope A, et al. Giant bivalves (*Tridacna gigas*) as recorders of ENSO variability [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 307 (3-4): 266-270.
- [40] Arias-Ruiz C, Elliot M, Bézou A, et al. Geochemical fingerprints of climate variation and the extreme La Niña 2010-11 as recorded in a *Tridacna squamosa* shell from Sulawesi, Indonesia [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2017, 487: 216-228.
- [41] Duprey N, Galipaud J C, Cabioch G, et al. Isotopic records from archeological giant clams reveal a variable climate during the southwestern Pacific colonization ca. 3.0 ka BP [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2014, 404: 97-108.
- [42] Yan H, Liu C C, Zhang W C, et al. ENSO variability around 2000 years ago recorded by *Tridacna gigas* $\delta^{18}\text{O}$ from the South China Sea [J]. *Quaternary International*, 2017, 452: 148-154.
- [43] Hu Y, Sun X M, Cheng H, et al. Evidence from giant-clam $\delta^{18}\text{O}$ of intense El Niño-Southern Oscillation-related variability but reduced frequency 3700 years ago [J]. *Climate of the Past*, 2020, 16 (2): 597-610.
- [44] Conroy J L, Noone D, Cobb K M, et al. Paired stable isotopologues in precipitation and vapor: A case study of the amount effect within western tropical Pacific storms [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, 121 (7): 3290-3303.
- [45] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation [J]. *Tellus*, 1964, 16 (4): 436-468.
- [46] Ma X L, Yan H, Fei H B, et al. A high-resolution $\delta^{18}\text{O}$ record of modern *Tridacna gigas* bivalve and its paleoenvironmental implications [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2020, 554: 109800.
- [47] Colin P L. Ocean Warming and the Reefs of Palau [J]. *Oceanography*, 2018, 31 (2): 126-135.
- [48] Bruno J, Siddon C, Witman J, et al. El Niño related coral bleaching in Palau, Western Caroline Islands [J]. *Coral Reefs*, 2001, 20 (2): 127-136.
- [49] Martin L E, Dawson M N, Bell L J, et al. Marine lake ecosystem dynamics illustrate ENSO variation in the tropical western Pacific [J]. *Biology Letters*, 2006, 2 (1): 144-147.
- [50] Colin P L. *Marine Environments of Palau* [M]. San Diego: Indo-Pacific Press, 2009: 15-25.
- [51] Golbuu Y, Bauman A, Kuarteri J, et al. The state of coral reef ecosystems of Palau [J]. *The state of coral reef ecosystems of the United States and Pacific freely associated states*, 2005, 2005: 488-507.
- [52] Hardy J T, Hardy S A. *Ecology of Tridacna in Palau* [J]. *Pacific Science*, 1969, XXIII: 467-472.
- [53] Colin P L. *Marine Environments of Palau* [M]. San Diego: Indo-Pacific Press, 2009: 365-366.

- [54] Grottoli A G. Monthly resolved stable oxygen isotope record in a Palauan sclerosponge *Acanthocheatetes wellsi* for the period of 1977-2001 [C]//Proceedings of the 10th International Coral Reef Symposium. Okinawa, Japan, 2006: 572-579.
- [55] Iijima H, Kayanne H, Morimoto M, et al. Interannual sea surface salinity changes in the western Pacific from 1954 to 2000 based on coral isotope analysis [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(4): L04608.
- [56] Osborne M C, Dunbar R B, Mucciarone D A, et al. Regional calibration of coral-based climate reconstructions from Palau, West Pacific Warm Pool (WPWP) [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2013, 386: 308-320.
- [57] Wu H C, Grottoli A G. Stable oxygen isotope records of corals and a sclerosponge in the Western Pacific warm pool [J]. *Coral Reefs*, 2010, 29(2): 413-418.
- [58] Osborne M C, Dunbar R B, Mucciarone D A, et al. A 215-yr coral $\delta^{18}\text{O}$ time series from Palau records dynamics of the West Pacific Warm Pool following the end of the Little Ice Age [J]. *Coral Reefs*, 2014, 33(3): 719-731.
- [59] Grottoli A G, Adkins J F, Panero W R, et al. Growth rates, stable oxygen isotopes ($\delta^{18}\text{O}$), and strontium (Sr/Ca) composition in two species of Pacific sclerosponges (*Acanthocheatetes wellsi* and *Astrosclera willeyana*) with $\delta^{18}\text{O}$ calibration and application to paleoceanography [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2010, 115(C6): C06008.
- [60] Pätzold J, Heinrichs J P, Wolschendorf K, et al. Correlation of stable oxygen isotope temperature record with light attenuation profiles in reef-dwelling *Tridacna* shells [J]. *Coral Reefs*, 1991, 10(2): 65-69.
- [61] Jew N P, Dodrill T, Fitzpatrick S M. Evaluating the efficacy of the mollusc *Tridacna crocea* for reconstructing ancient sea-surface temperatures in the Rock Islands of Palau, Micronesia [J]. *Archaeology in Oceania*, 2019, 54(2): 107-119.
- [62] Dodrill T N, Lassuy M G, Jew N P, et al. Stable Oxygen Isotope ($\delta^{18}\text{O}$) Analyses and Paleoenvironmental Reconstructions from Mollusks in Palau, Micronesia [C]//Proceedings of the 81st Annual Meeting of the Society for American Archaeology. Orlando, FL, 2016.
- [63] Maes C. Salinity variability in the equatorial Pacific Ocean during the 1993-98 period [J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(11): 1659-1662.
- [64] Barkley H C, Cohen A L. Skeletal records of community-level bleaching in *Porites* corals from Palau [J]. *Coral Reefs*, 2016, 35(4): 1407-1417.
- [65] Elliot M, Welsh K, Chilcott C, et al. Profiles of trace elements and stable isotopes derived from giant long-lived *Tridacna gigas* bivalves: Potential applications in paleoclimate studies [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2009, 280(1-2): 132-142.
- [66] Romanek C S, Grossman E L. Stable Isotope Profiles of *Tridacna maxima* as Environmental Indicators [J]. *Palaios*, 1989, 4(5): 402-413.
- [67] Morimoto M, Abe O, Kayanne H, et al. Salinity records for the 1997-98 El Niño from Western Pacific corals [J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(11): 35-1-35-4.
- [68] Warter V, Müller W. Daily growth and tidal rhythms in Miocene and modern giant clams revealed via ultra-high resolution LA-ICPMS analysis - A novel methodological approach towards improved sclerochemistry [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2017, 465: 362-375.
- [69] Yan H, Wang Y H, Sun L G. High resolution oxygen isotope and grayscale records of a medieval fossil giant clam (*Tridacna gigas*) in the South China Sea: physiological and paleoclimatic implications [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 33(8): 18-25.
- [70] Romanek C S, Jones D S, Williams D F, et al. Stable isotopic investigation of physiological and environmental changes recorded in shell carbonate from the giant clam *Tridacna maxima* [J]. *Marine Biology*, 1987, 94(3): 385-393.
- [71] Fairbanks R G, Evans M N, Rubenstone J L, et al. Evaluating climate indices and their geochemical proxies measured in corals [J]. *Coral Reefs*, 1997, 16(5): S93-S100.
- [72] 洪阿实, 洪鹰, 王庆春, 等. 1994年夏季南海东北部海水氧同位素分布特征 [J]. *热带海洋*, 1997, 16(2): 82-90. [HONG Ashi, HONG Ying, WANG Qingchun, et al. Distributive characteristics of O isotope of the northeastern South China Sea in the summer of 1994 [J]. *Tropic Oceanology*, 1997, 16(2): 82-90.]
- [73] Diaz H F, Hoerling M P, Eischeid J K. ENSO variability, teleconnections and climate change [J]. *International Journal of Climatology*, 2001, 21(15): 1845-1862.
- [74] Bellenger H, Guilyardi E, Leloup J, et al. ENSO representation in climate models: from CMIP3 to CMIP5 [J]. *Climate Dynamics*, 2014, 42(7-8): 1999-2018.
- [75] Versteegh E A A, Vonhof H B, Troelstra S R, et al. Seasonally resolved growth of freshwater bivalves determined by oxygen and carbon isotope shell chemistry [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2010, 11(8): Q08022.
- [76] 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.