



南海西沙群岛现代鳞砗磲内外层壳体稳定碳、氧同位素变化特征及其影响因素

梁承德, 韩 韬, 赵楠钰, 文汉锋, 王国桢, 刘成程, 杨昊天, 耿 俊, 晏 宏

Variation and influencing factors of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ in the inner and outer layers of modern *Tridacna squamosa* from the Xisha Islands, South China Sea

LIANG Chengde, HAN Tao, ZHAO Nanyu, WEN Hanfeng, WANG Guozhen, LIU Chengcheng, YANG Haotian, GENG Jun, and YAN Hong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2024012501>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

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

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(1): 1-13

石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 揭示的亚洲夏季风变化及机制综述

Variations and mechanisms of the Asian summer monsoon revealed by stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ records

海洋地质与第四纪地质. 2024, 44(1): 143-155

北大西洋45° N区氧同位素3期以来上层水体性质的变化

Changes of the upper water column at the 45° N North Atlantic since marine isotope stage 3

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(3): 114-123

南海中部全新世以来海山深潜区有孔虫的地球化学记录及反映的气候变化

Geochemical record of foraminifera and its reflection on climate change in the central South China Sea since Holocene

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(2): 100-110

南海琼东上升流区过去1 900年海洋生产力记录

A 1 900-year record of marine productivity in the upwelling area of east continental shelf of Hainan Island, South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(5): 97-106

靖边黄土剖面记录的末次冰期以来的气候变化

Climate change since the last glacial stage recorded in Jingbian loess section

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(3): 162-170



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

梁承德, 韩韬, 赵楠钰, 等. 南海西沙群岛现代鳞砗磲内外层壳体稳定碳、氧同位素变化特征及其影响因素 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2024, 44(4): 41-53.

LIANG Chengde, HAN Tao, ZHAO Nanyu, et al. Variation and influencing factors of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ in the inner and outer layers of modern *Tridacna squamosa* from the Xisha Islands, South China Sea [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2024, 44(4): 41-53.

南海西沙群岛现代鳞砗磲内外层壳体稳定碳、氧同位素变化特征及其影响因素

梁承德^{1,2}, 韩韬¹, 赵楠钰¹, 文汉锋^{1,2}, 王国桢^{1,2}, 刘成程^{1,3}, 杨昊天^{1,4}, 耿璠^{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. 西安地球环境创新研究院, 西安 710061

4. 西安交通大学人居环境与建筑工程学院, 西安 710049

摘要: 砗磲具有清晰的生长纹层, 是记录热带海洋气候变化的良好载体, 其壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 已广泛应用于第四纪古气候研究。然而, 目前大多数研究主要集中在内层壳体, 关于外层壳体的研究十分稀少。本研究通过对采自南海西沙群岛浪花礁一个现代鳞砗磲的内外层壳体进行月分辨率 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 测试和内壳日生长纹层扫描, 分析内外层壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化特征及其影响因素。结果显示该砗磲外壳 $\delta^{18}\text{O}$ 比内壳 $\delta^{18}\text{O}$ 更加偏正, 但是两者都具有十分相似的变化特征, 主要受到海表面温度的控制, 表明砗磲内外层壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 能够可靠地指示气候环境的变化。砗磲内外层壳体 $\delta^{13}\text{C}$ 存在较大的差异, 其中内壳 $\delta^{13}\text{C}$ 具有明显的年周期变化。通过对比分析砗磲内壳 $\delta^{13}\text{C}$ 与日生长速率、气候环境参数, 发现内壳 $\delta^{13}\text{C}$ 的季节变化主要与初级生产力和砗磲自身生命活动有关。砗磲外壳 $\delta^{13}\text{C}$ 相对于内壳 $\delta^{13}\text{C}$ 较为偏负, 表现出持续下降的趋势, 且无季节性变化, 这可能是由采样路径偏离最大生长轴导致的。

关键词: 砗磲; $\delta^{13}\text{C}$; $\delta^{18}\text{O}$; 气候变化; 南海

中图分类号: P736.4

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2024012501

Variation and influencing factors of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ in the inner and outer layers of modern *Tridacna squamosa* from the Xisha Islands, South China Sea

LIANG Chengde^{1,2}, HAN Tao¹, ZHAO Nanyu¹, WEN Hanfeng^{1,2}, WANG Guozhen^{1,2}, LIU Chengcheng^{1,3}, YANG Haotian^{1,4}, GENG Jun^{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. Xi'an Institute for Innovative Earth Environment Research, Xi'an 710061, China

4. School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

Abstract: *Tridacna* shells, known for their distinct growth bands, serve as excellent proxies for recording tropical marine climate changes. The $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ in *Tridacna* shells have been applied in the Quaternary paleoclimate research. However, most previous researches focused on the inner layer, while the outer layer received less attention. We conducted a comprehensive analysis at a monthly resolution $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$ tests on both the inner and outer layers, as well as daily growth band scans on the inner layer of modern *Tridacna squamosa* from the Xisha Islands in the South China Sea. Results reveal that the outer layer exhibited higher $\delta^{18}\text{O}$ values than the inner layer. In addition, both shells displayed similar variation patterns, being primarily influenced by sea surface temperature (SST), and indicating that the $\delta^{18}\text{O}$ of the outer layer could reliably indicate climate and environmental changes. In contrast, significant differences in $\delta^{13}\text{C}$ value were observed between the inner and outer layers.

资助项目: 国家自然科学基金“南海不同种类砗磲内、外层壳体的 $\delta^{13}\text{C}$ 变化特征及其对气候环境的指示意义”(42103083), “砗磲地球化学与古气候古天气学”(42025304), “极端事件及其环境效应的地球化学示踪”(42221003); 中国博士后科学基金面上资助“南海砗磲内、外层壳体碳同位素的变化特征及其环境指示意义”(2021M693149)

作者简介: 梁承德 (1999—), 男, 硕士研究生, 第四纪地质学专业, E-mail: liangchengde@ieecas.cn

通讯作者: 韩韬 (1992—), 男, 博士后, 主要从事珊瑚与砗磲古气候研究, E-mail: hantao@ieecas.cn

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@ieecas.cn

收稿日期: 2024-01-25; 改回日期: 2024-05-07. 文凤英编辑

The inner layer displayed a noticeable annual cycle in $\delta^{13}\text{C}$ value. By comparing the inner layer $\delta^{13}\text{C}$, climatic and environmental parameters, and daily growth rate (DGR), we determined that the seasonal variations in inner layer $\delta^{13}\text{C}$ were linked to the primary productivity and the life activities of *Tridacna*. Meanwhile, the $\delta^{13}\text{C}$ of the outer layer, which is relatively negative compared to the inner layer, exhibited a continuous downward trend without seasonal changes. This discrepancy may be attributed to the sampling path deviating from the maximum growth axis.

Key words: *Tridacna*; $\delta^{13}\text{C}$; $\delta^{18}\text{O}$; climate change; South China Sea

砗磲是海洋中最大的双壳类贝壳,与虫黄藻共生,寿命可达 100 年,自始新世以来一直是热带太平洋-印度洋珊瑚礁的重要组成部分^[1-3]。砗磲拥有致密的碳酸盐壳体,其壳体长度可达 1 m,一般具有清晰的年生长纹层和日生长纹层(图 1d、e)。幼体砗磲的足丝附着在珊瑚礁盘上之后,整个生命周期便不再移动,这些特点使得砗磲成为良好的高分辨率古气候研究载体^[4-10]。砗磲壳体结构分为内层、外层以及转换层(图 1b),三者具有不同的微观结构,其中内层和外层由不同的钙化器官形成^[5,8]。一般情况下,砗磲内层的文石晶体呈棱柱状结构,外层和转换层呈交错层状结构^[11]。虫黄藻主要分布

在砗磲外壳的虹吸外套膜中,外套膜的玻璃体能够聚合光线促进虫黄藻光合作用,而虫黄藻的光合作用产物为砗磲生命活动提供营养物质保障,两者互利共生^[8,12]。砗磲内壳的横向外套膜由于入射光照较少,光合作用相对较弱^[8,12]。近几十年来,科学家们开发了一系列的高分辨率砗磲地球化学指标应用于海洋古气候研究(例如 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 、Sr/Ca、Mg/Ca 和 Fe/Ca 等)^[4-7,10,13-14]。

砗磲壳体氧同位素($\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}}$)是古气候研究最常用的地球化学指标之一,早在 20 世纪 80 年代就有关于砗磲 $\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}}$ 的研究报道。Aharon 等^[15]将巴布亚新几内亚休恩半岛的化石砗磲 $\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}}$ 与珊瑚阶

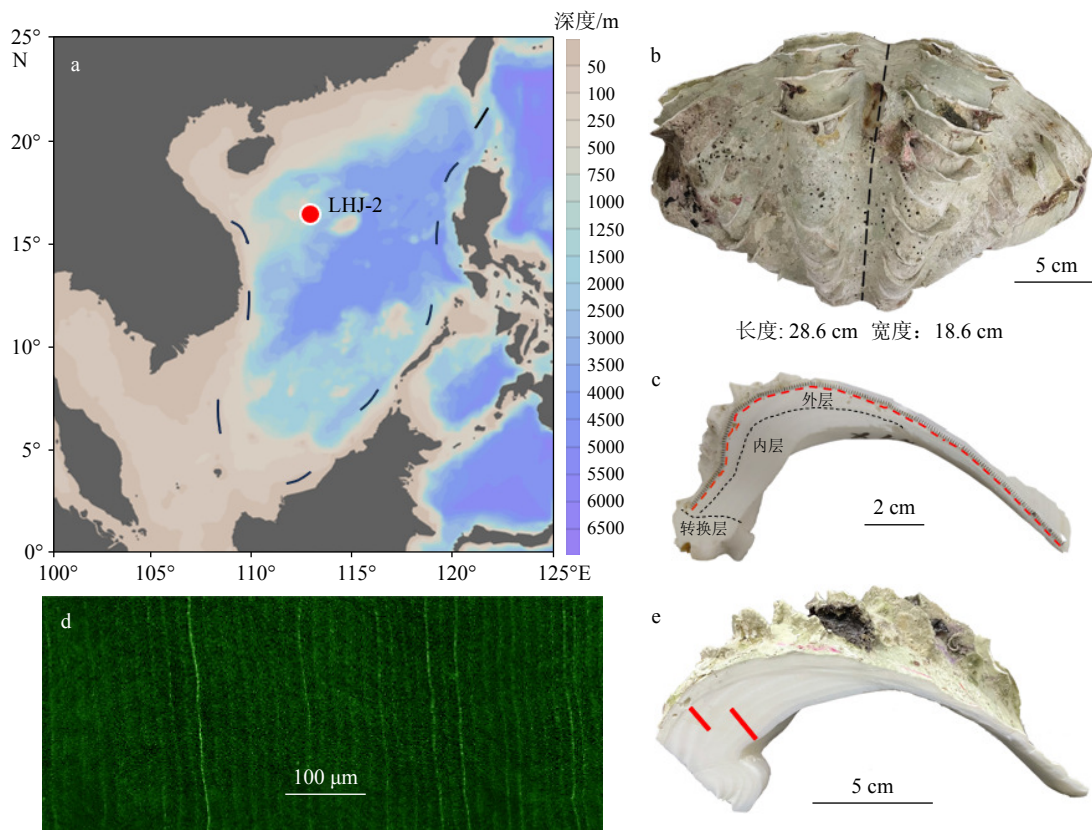


图 1 砗磲样品及其地理位置

a: 浪花礁位置示意图(红点)(图片来源: Ocean Data View); b: 现代鳞砗磲 LHH-2 壳体(黑色虚线为壳体最大生长轴); c: 外壳取样路径(红色虚线), 黑色虚线为内层、外层和转换层的分界线; d: 内壳日生长纹层; e: 内壳取样路径(红色实线)。

Fig.1 *Tridacna* samples and the geographical location

a: A schematic diagram of the location of the Bombay Reef (red dot) (Photo source: Ocean Data View); b: the modern *Tridacna* shell LHH-2 (the black dotted line represents the maximum growth axis of the shell); c: outer layer sampling path (red dotted line). The black dotted line is the boundary between the inner layer and the hinge and outer layer; d: daily growth layer of the inner layer; e: inner layer sampling path (red solid line).

地变化相结合,重建了晚第四纪海平面的变化。随后,其指出砗磲 $\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}}$ 与周围海水保持平衡分馏,主要受海水表面温度(sea surface temperature, SST)和海水氧同位素($\delta^{18}\text{O}_{\text{SW}}$)的共同控制,提出了砗磲 $\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}}$ 与 SST 的平衡方程^[15]。后续有大量的研究对此进行了验证^[5,16-20]。目前基于砗磲内壳氧同位素($\delta^{18}\text{O}_{\text{IL}}$)已开展了大量高分辨率气候重建工作,但只有极少数研究涉及砗磲外壳氧同位素($\delta^{18}\text{O}_{\text{OL}}$)。前人研究发现砗磲内外层壳体 $\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}}$ 变化趋势极为相似,但 $\delta^{18}\text{O}_{\text{OL}}$ 比 $\delta^{18}\text{O}_{\text{IL}}$ 更加偏正^[5]。然而,也有研究显示砗磲 $\delta^{18}\text{O}_{\text{OL}}$ 较 $\delta^{18}\text{O}_{\text{IL}}$ 偏负, $\delta^{18}\text{O}_{\text{OL}}$ 重建的温度比 $\delta^{18}\text{O}_{\text{IL}}$ 重建的温度高^[21-22]。Killam 等^[22] 认为内外层壳体 $\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}}$ 的差异与外壳外套膜高太阳辐射和低反射率的微观环境有关,而不是内外层壳体微观结构差异导致的结果。

有关砗磲壳体碳同位素($\delta^{13}\text{C}_{\text{shell}}$)的研究始于 20 世纪 80 年代^[23],但后续研究不多,目前对砗磲 $\delta^{13}\text{C}_{\text{shell}}$ 的影响因素及其气候环境指示意义仍有较大的争议^[5,13,24-26]。一些研究表明,砗磲内壳碳同位素($\delta^{13}\text{C}_{\text{IL}}$)的年周期不明显,认为 $\delta^{13}\text{C}_{\text{IL}}$ 受到的环境因素影响较小^[5,13,24]。但其他研究发现砗磲 $\delta^{13}\text{C}_{\text{IL}}$ 具有明显的年周期信号,并且 $\delta^{13}\text{C}_{\text{IL}}$ 与海表盐度(sea surface salinity, SSS)、叶绿素浓度(chlorophyll a concentration, Chla)等环境因子具有显著相关性^[25-26]。然而,这些研究并未对与虫黄藻光合作用最为密切的外壳进行分析^[13,24-26]。Elliot 等^[5] 认为砗磲外壳碳同位素($\delta^{13}\text{C}_{\text{OL}}$)比内壳以及转换层的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{shell}}$ 更加偏正,且有明显的年周期变化,认为这种差异可能与虫黄藻的光合作用有关,虫黄藻在进行光合作用时会优先利用钙化流体中的 ^{12}C ,因此 $\delta^{13}\text{C}_{\text{OL}}$ 较为偏正。

此外,砗磲 $\delta^{13}\text{C}_{\text{shell}}$ 可能还受个体发育和海水溶解无机碳库(dissolved inorganic carbon, DIC)中 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的影响^[23,26-27]。Jones 等^[23] 研究发现现代长砗磲在 10 岁达到性成熟后, $\delta^{13}\text{C}_{\text{IL}}$ 持续偏负,认为该砗磲在性成熟过程中重新调整了生物矿化所需能量与繁殖所需能量的分配,导致 $\delta^{13}\text{C}_{\text{IL}}$ 降低。然而其他研究并未发现这一现象^[4,13,24]。在长时间尺度上,有研究认为海洋生物碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 的持续下降与人为 CO_2 大量排放导致海洋 DIC 的 $\delta^{13}\text{C}$ 偏负(即 Suess 效应)有关^[28-32]。Yang 等发现近 200 年以来砗磲 $\delta^{13}\text{C}_{\text{IL}}$ 急剧下降,可能与 Suess 效应有关,反映了外界海水 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的变化^[26],但此类现象并未在其他研究中得到报道^[5,13,24-25]。

针对上述相关问题,本研究对采自中国南海西沙群岛浪花礁的现代鳞砗磲(*Tridacna squamosa*)样

品 LHJ-2 内外层壳体进行了高分辨率碳、氧同位素分析。使用激光共聚焦显微镜获得砗磲内壳日生长纹层荧光图像(图 1d),利用日生长纹层对 $\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}}$ 年周期进行校正得到年代学框架。结合南海西沙群岛现代器测资料(如太阳辐射、日照时数、海表风速和 SST 等),探讨砗磲内外层壳体 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化特征及其影响因素。

1 区域概况

中国南海是西太平洋最大的半封闭边缘海之一(图 1a),分布着众多的岛屿和珊瑚礁,珊瑚礁盘中生长着大量的砗磲,为砗磲地球化学与古气候变化研究提供了丰富的材料。

西沙群岛受东亚季风和热带海洋气候的共同影响,气候表现出明显的季节性变化,分为暖湿季和干冷季^[33]。其中 5—11 月为暖湿季, SST 高,降水量充沛;12 月至次年 4 月为干冷季, SST 低,降水量少。SST 在 6 月份达到最大值(30.3℃),在 2 月份最低(24.9℃)(图 2a)。日照时数在 5 月份达到最大值(9.8 h),12 月份最低值(4.5 h)(图 2b)。西沙群岛位于低纬区域,太阳入射角大,平均太阳辐射高。太阳辐射在 4 月达到最大值(353.9 W/m²),5 月开始下降,于 12 月达到最低值(174.9 W/m²)(图 2c)。海表风速和叶绿素浓度在秋季开始增强,冬季达到峰值,春夏季整体偏低(图 2d、e)。降水量主要集中在夏秋季,由西南风为主导(图 2f)。

为了分析浪花礁气候变化特征,本研究收集 2013—2018 年覆盖浪花礁 2°×2° 的网格器测数据。其中, SST 来自于 Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (OISST 2.1), 太阳辐射来自于 Modern-Era Retrospective-analysis for Research and Applications (MERRA2), SSS 来自于 Hadley Centre subsurface temperature and salinity objective analyses (Hadley EN4 2.1), 风速来自于 WindSat monthly data products (WindSat 7.0.1), 降水量来自于 Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), 日照时数来自于永兴岛气象观测站, 叶绿素浓度来自于 NASA 的海洋数据处理系统。

2 材料与方法

2.1 样品采集与前处理

本研究现代鳞砗磲样品 LHJ-2 于 2018 年冬天

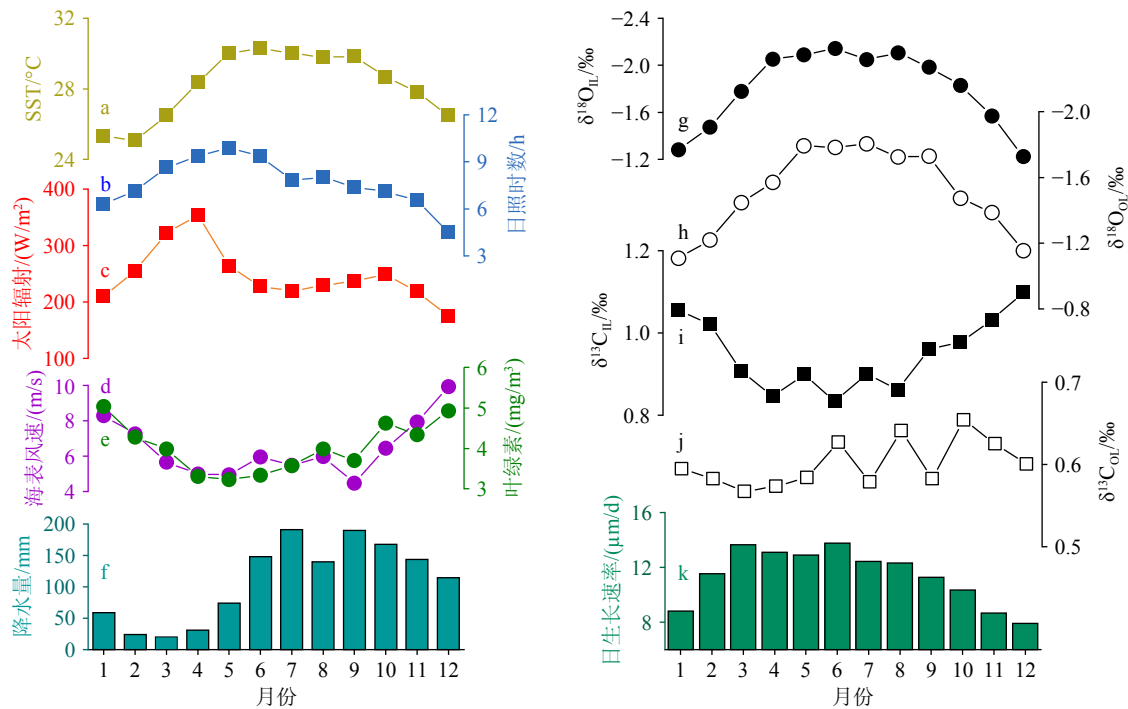


图2 2013—2018年砗磲的月平均碳、氧同位素记录、日生长速率与当地气候环境参数对比

a: 海表面温度, b: 日照时数, c: 太阳辐射, d: 海表风速, e: 叶绿素浓度, f: 降水量, g: 内壳 $\delta^{18}\text{O}_{\text{IL}}$, h: 外壳 $\delta^{18}\text{O}_{\text{OL}}$, i: 内壳 $\delta^{13}\text{C}_{\text{IL}}$, j: 外壳 $\delta^{13}\text{C}_{\text{OL}}$, k: 内壳月均日生长速率。

Fig.2 Comparison among the monthly average carbon and oxygen isotope records, daily growth rate of *Tridacna*, and local environmental parameters from 2013 to 2018

a: Sea surface temperature, b: sunlight durations, c: solar radiation, d: sea surface wind speed, e: chlorophyll concentration, f: rainfall, g: inner layer $\delta^{18}\text{O}_{\text{IL}}$, h: outer layer $\delta^{18}\text{O}_{\text{OL}}$, i: inner layer $\delta^{13}\text{C}_{\text{IL}}$, j: outer layer $\delta^{13}\text{C}_{\text{OL}}$, k: average daily growth rate of the inner layer in every month.

(约2018年12月18日至2019年2月28日)采自南海西沙群岛的浪花礁(16°3'N、112°33'E),壳体长28.6 cm,宽18.6 cm(图1b)。首先对采集回来的砗磲壳体表面进行冲洗,然后将其浸泡水中1~2天,去除其内部残余的软组织,使用去离子水清洗4~5遍,放入40℃烘箱烘干。利用金刚石线切割机沿砗磲壳体最大生长轴(图1b)进行切割得到样品薄板,依次使用400、800、1200和2000目的砂纸对砗磲薄板磨平,待薄板没有明显划痕后,使用0.5 μm的抛光膏进行抛光,在去离子水中超声清洗15 min,烘干,用于进行激光共聚焦显微镜拍摄和稳定同位素取样分析。

2.2 稳定同位素分析

砗磲内外层壳体的取样方法不同。对于外壳,我们沿着内外层壳体分界线的方向,使用牙钻以1 mm的间隔对外壳区域进行取样,得到外壳粉末样品(图1c);对于内壳,我们沿着垂直于内壳生长纹层的最大生长轴方向,使用微钻以0.1 mm的间隔对内壳薄板进行取样,得到内壳粉末样品(图1e)。

本研究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稳定同位素质谱仪进行测试。将约70 μg的壳体粉末样品与105%的 H_3PO_4 在70℃恒温下进行反应,对产生的 CO_2 进行纯化后进入质谱仪进行测试。本实验选用的标准样品为GBW04405,结果以相对于V-PDB标准的千分偏差(δ)表示。实验测试的氧同位素外精度为 $\pm 0.14\text{‰}$ ($n=85, 1\sigma$),碳同位素外精度为 $\pm 0.09\text{‰}$ ($n=85, 1\sigma$)。

2.3 砗磲日生长纹层计数

本研究在中国科学院地球环境研究所使用激光共聚焦显微镜(LSCM, A1HD25: A1-SHS-LFOV)对样品LHJ-2内壳进行拍摄,激光发射波长为488 nm。砗磲内壳的荧光图像(图1d)表现为明带和暗带交替出现,这是由于白天和晚上的钙化速率不同导致碳酸盐在物理化学性质上的差异,因此一组明带和暗带的间距为砗磲一天的生长宽度^[10,34-36]。使用CooRecorder v9.3软件(<http://www.cybis.se/forfun/>)

dendro/) 测量 LSCM 图像中明暗带之间的距离, 可获得该砗磲日生长速率变化。为减小砗磲日生长纹层计数、纹层宽度的误差, 进行了 5 次重复测量, 该砗磲内壳总计有 2047 个日生长纹层(5 次重复测量误差为 $\pm 1\%$), 约生长了 5.6 年^[37]。

2.4 年代学框架建立

本研究样品 LHJ-2 的采集时间大致为 2018 年 12 月 18 日至 2019 年 2 月 28 日, 但未记录该砗磲的死亡日期。由于砗磲依靠虫黄藻的光合作用维持生命活动, 当地的太阳辐射直接影响砗磲壳体生长^[10,36,38]。因此, 将太阳辐射值(2018 年 12 月 18 日至 2019 年 2 月 28 日)与最后 30 个日生长速率值(daily growth rate, DGR)(约 1 个月)进行滑动相关性分析, 太阳辐射与最后一个月 DGR 相关性最大的日期被确定为该砗磲的死亡日期。结果显示 2018 年 12 月 18 日的太阳辐射与 DGR 相关性最大, 为 0.47, 并且通过了 0.01 的显著性检验(图 3)^[37]。因此, 该砗磲的死亡日期确定为 2018 年 12 月 18 日。结合内壳日生长纹层数量和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{IL}}$, 获得了内壳年

代学框架, 该砗磲的生命周期为 2013 年 5 月至 2018 年 12 月。由于砗磲外壳没有清晰的生长纹层, 无法通过生长纹层得到外壳的年代学框架。本研究砗磲内外层壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 都具有清晰的年周期变化, 两者呈显著相关($r=0.66, p<0.001, n=68$)(图 4a), 与前人的研究结果一致^[5]。 $\delta^{18}\text{O}_{\text{IL}}$ 和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{OL}}$ 的年周期个数一致, 则 $\delta^{18}\text{O}_{\text{OL}}$ 应适用于 $\delta^{18}\text{O}_{\text{IL}}$ 每个年周期的起止时间, 因此可以建立可靠的外壳年代学框架。内外层壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 每个年周期的样品数量不一致, 不方便与其他环境参数进行相关性等分析。使用软件 Matlab 对内外层壳体碳、氧同位素进行 12 点/年插值分析, 得到内外层壳体月分辨率的碳、氧同位素数据。

3 结果

3.1 砗磲内外层壳体稳定碳、氧同位素

该砗磲内外层壳体稳定碳、氧同位素平均值分别为: $\delta^{13}\text{C}_{\text{IL}}=(0.95\pm 0.13)\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{IL}}=(-1.81\pm 0.37)\text{‰}$,

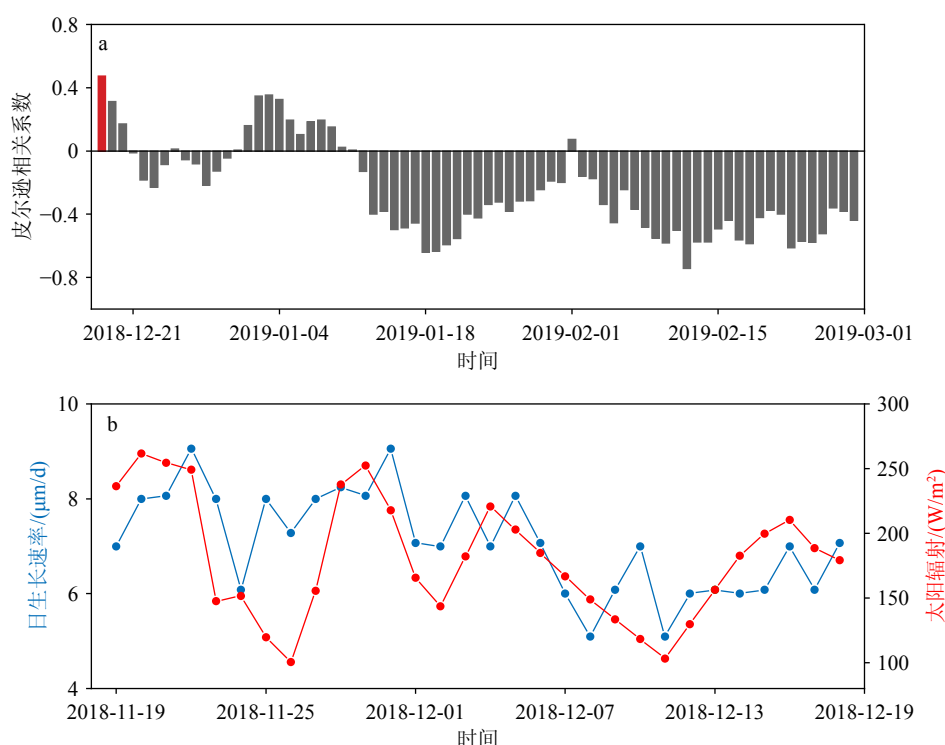


图 3 砗磲日生长速率(DGR)和太阳辐射的关系

a: 2018-12-18—2019-2-28 的太阳辐射与最后 30 个 DGR 的滑动平均相关性分析, 红色条形柱代表的日期为 2018-12-18, 相关系数为 $r=0.47, p<0.5, n=73$; b: 2018-11-19—2018-12-18 的太阳辐射和 DGR 的对比。

Fig.3 The relationship between the daily growth rate (DGR) of *Tridacna* and solar radiation

a: The sliding correlation analysis of the last 30 values of DGR and corresponded solar radiation from 18 December 2018 to 28 February 2019. The date represented by the red bar column is 18 December 2018, and the correlation coefficients are $r=0.47, p<0.5, n=73$; b: comparison between solar radiation and DGR from 19 November 2018 to 18 December 2018.

以及 $\delta^{13}\text{C}_{\text{OL}} = (0.63 \pm 0.18)\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{OL}} = (-1.52 \pm 0.32)\text{‰}$ 。 $\delta^{18}\text{O}_{\text{OL}}$ 平均值比 $\delta^{18}\text{O}_{\text{IL}}$ 偏正 0.29‰, $\delta^{13}\text{C}_{\text{OL}}$ 平均值比 $\delta^{13}\text{C}_{\text{IL}}$ 偏负 0.32‰。内壳 $\delta^{13}\text{C}_{\text{IL}}$ 与 $\delta^{18}\text{O}_{\text{IL}}$ 存在显著的正相关关系 ($r=0.75$, $p<0.001$, $n=68$), $\delta^{18}\text{O}_{\text{IL}}$ 和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{OL}}$ 存在显著的正相关关系 ($r=0.66$, $p<0.001$, $n=68$), 并且 $\delta^{13}\text{C}_{\text{IL}}$ 、 $\delta^{18}\text{O}_{\text{IL}}$ 和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{OL}}$ 三者都具有明显的年周期变化。 $\delta^{13}\text{C}_{\text{OL}}$ 没有年周期变化, 有持续下降的趋势, 且 $\delta^{13}\text{C}_{\text{OL}}$ 与 $\delta^{18}\text{O}_{\text{OL}}$ 、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{IL}}$ 均无显著相关性 ($r=0$, $p>0.5$, $n=68$; $r=-0.03$, $p>0.5$, $n=68$)。

在季节尺度上, 内外层壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 保持一致变化, 在春夏季偏负, 在秋冬季相对偏正。内外层壳体 $\delta^{13}\text{C}$ 变化差异较大。 $\delta^{13}\text{C}_{\text{IL}}$ 在秋冬季相对于春夏季偏正, 12月达到最大值, 为 1.1‰, 6月达到最低值, 为 0.84‰ (图 2i); $\delta^{13}\text{C}_{\text{OL}}$ 全年波动范围很小, 无明显的季节性周期 (图 2j)。 $\delta^{13}\text{C}_{\text{IL}}$ 在整个生命周期中未表现出明显的变化趋势, 而 $\delta^{13}\text{C}_{\text{OL}}$ 表现出持续下降的趋势 (图 5g), 第 1 年 $\delta^{13}\text{C}_{\text{OL}}$ 为 0.91‰, 与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{IL}}$ 值 (0.98‰) 相当, 从第 2 年开始下降, 在第 6 年达到最低值, 为 0.35‰。

3.2 砗磲 DGR

在该砗磲的整个生命周期中, DGR 平均值为 11.40 $\mu\text{m}/\text{d}$, 最大值为 23.54 $\mu\text{m}/\text{d}$, 最小值为 4 $\mu\text{m}/\text{d}$ 。在年际尺度上, 该砗磲 DGR 年平均值在第 3 年达到最大值为 13.81 $\mu\text{m}/\text{d}$, 第 4 年开始下降, 于第 6 年 DGR 年平均值降到最低, 为 8.13 $\mu\text{m}/\text{d}$ (图 5c)。在季节尺度上, 结果显示砗磲内壳在春夏季生长较快, 于 6 月达到最大值 13.78 $\mu\text{m}/\text{d}$, 秋季开始降低, 于冬季 12 月达到最小值 7.9 $\mu\text{m}/\text{d}$ (图 2k)。该砗磲 DGR 与 SST 呈显著正相关 ($r=0.35$, $p<0.01$, $n=68$) (图 6f), 与太阳辐射呈显著正相关 ($r=0.40$, $p<0.001$, $n=68$) (图 6g), 其中 DGR 与日照时数相关性最为显著 ($r=0.66$, $p<0.001$, $n=56$) (图 6h)。

4 讨论

4.1 砗磲内外层壳体氧同位素的影响因素

砗磲壳体 $\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}}$ 已被广泛应用于海洋古气候研究, 先前的研究表明, 砗磲壳体 $\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}}$ 主要受海水氧同位素 ($\delta^{18}\text{O}_{\text{SW}}$) 和海水表面温度 (SST) 的共同控制, 壳体 $\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}}$ 与周围海水保持分馏平衡^[5,15-20,39]。在本研究中, 我们进一步验证了 SST、 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SW}}$ 和内外层壳体 $\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}}$ 三者之间的关系。利用前人建立南海北部 SSS- $\delta^{18}\text{O}_{\text{SW}}$ 方程 [$\delta^{18}\text{O}_{\text{SW}}$ (‰, SMOW) =

$0.23 \times \text{SSS}(\text{psu}) - 7.78$]^[40], 将现代观测的 SSS 转换得到海水 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SW}}$ (图 4a、b)。 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SW}}$ 平均值为 -0.06‰ , 最大值为 0.07‰, 最小值为 -0.18‰ (图 4c)。将内外层壳体 $\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}}$ 减去 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SW}}$ 得到 $(\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{SW}})$, $(\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{SW}})$ 显示出明显的年周期信号, 并且与 SST 保持同步变化 (图 4d、e), 说明该砗磲内外层壳体 $\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}}$ 都受到了 SST 的影响。本研究结果显示 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SW}}$ 的季节变化范围为 0.06‰, 分别占内壳 $\delta^{18}\text{O}_{\text{IL}}$ 变化 (0.91‰) 的 6.6%, 外壳 $\delta^{18}\text{O}_{\text{OL}}$ 变化 (0.69‰) 的 8.7% (图 4g、i), 表明 SST 是南海西沙群岛砗磲 $\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}}$ 的主控因素。将 SST 与 $(\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{SW}})$ 进行线性回归分析, 得到内壳方程为 $[\text{SST} = (-3.68 \pm 0.37) \times (\delta^{18}\text{O}_{\text{IL}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{SW}}) + (21.36 \pm 0.66)]$ ($r=-0.78$, $p<0.001$, $n=68$), 外壳 $[\text{SST} = (-3.49 \pm 0.54) \times (\delta^{18}\text{O}_{\text{OL}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{SW}}) + (22.75 \pm 0.8)]$ ($r=-0.62$, $p<0.001$, $n=68$)。Wang 等^[20]建立的印度洋-太平洋海域砗磲 (库氏砗磲、无鳞砗磲、鳞砗磲、长砗磲和砗蚝) $\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}}$ -SST 方程为 $[\text{SST} = (-3.56 \pm 1.26) \times (\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{SW}}) + (22.44 \pm 2.77)]$, 与我们的结果十分接近, 表明砗磲的种间差异、生长环境差异以及内外层壳体差异对 $\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}}$ -SST 方程 $[\text{SST} = f(\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{SW}})]$ 的影响十分有限。因此, 南海北部砗磲内外层壳体 $\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}}$ 均能够可靠地重建当地 SST 的变化。

另外一些研究认为砗磲壳体 $\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}}$ 还可能受到个体生长趋势^[7,23,41-42]以及大陆淡水河流输入^[7,27]的影响。本研究结果显示, 随着砗磲壳体生长速率下降, 内外层壳体 $\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}}$ 并未表现出均值和振幅的变化 (图 4a, 图 5c、d), 与前人研究结果一致^[43], 说明砗磲生长速率对壳体 $\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}}$ 的影响很小。由于西沙群岛远离大陆, 本研究地点的 SSS 常年保持在 33.4 psu 以上, 因此该砗磲 $\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}}$ 不受陆地径流的影响。

尽管我们的研究结果显示 $\delta^{18}\text{O}_{\text{IL}}$ 和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{OL}}$ 均具有记录气候信息的能力, 但是两者在平均值上有所差异, 表现为 $\delta^{18}\text{O}_{\text{OL}}$ 平均值比 $\delta^{18}\text{O}_{\text{IL}}$ 偏正 0.29‰ (图 4a)。前人研究也有类似的现象, Elliot 等^[5]发现澳大利亚棕榈岛的现代库氏砗磲 $\delta^{18}\text{O}_{\text{OL}}$ 比 $\delta^{18}\text{O}_{\text{IL}}$ 偏正 0.21‰, 但没有解释此差异的原因。然而, 其他研究发现相反的现象, $\delta^{18}\text{O}_{\text{OL}}$ 比 $\delta^{18}\text{O}_{\text{IL}}$ 偏负, 利用 $\delta^{18}\text{O}_{\text{OL}}$ 重建的 SST 偏高^[21-22]。Killam 等^[22]认为外壳外套膜相对于内壳具有较低的反照率, 并且能够接收到更多的太阳辐射, 导致外壳微环境的 SST 升高, $\delta^{18}\text{O}_{\text{OL}}$ 偏负。由图 4a 所示, $\delta^{18}\text{O}_{\text{OL}}$ 和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{IL}}$ 的差异在夏季更加明显, 如果内外层壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 的差异是由内外层壳体微环境温度差异所导致, 则夏季内壳

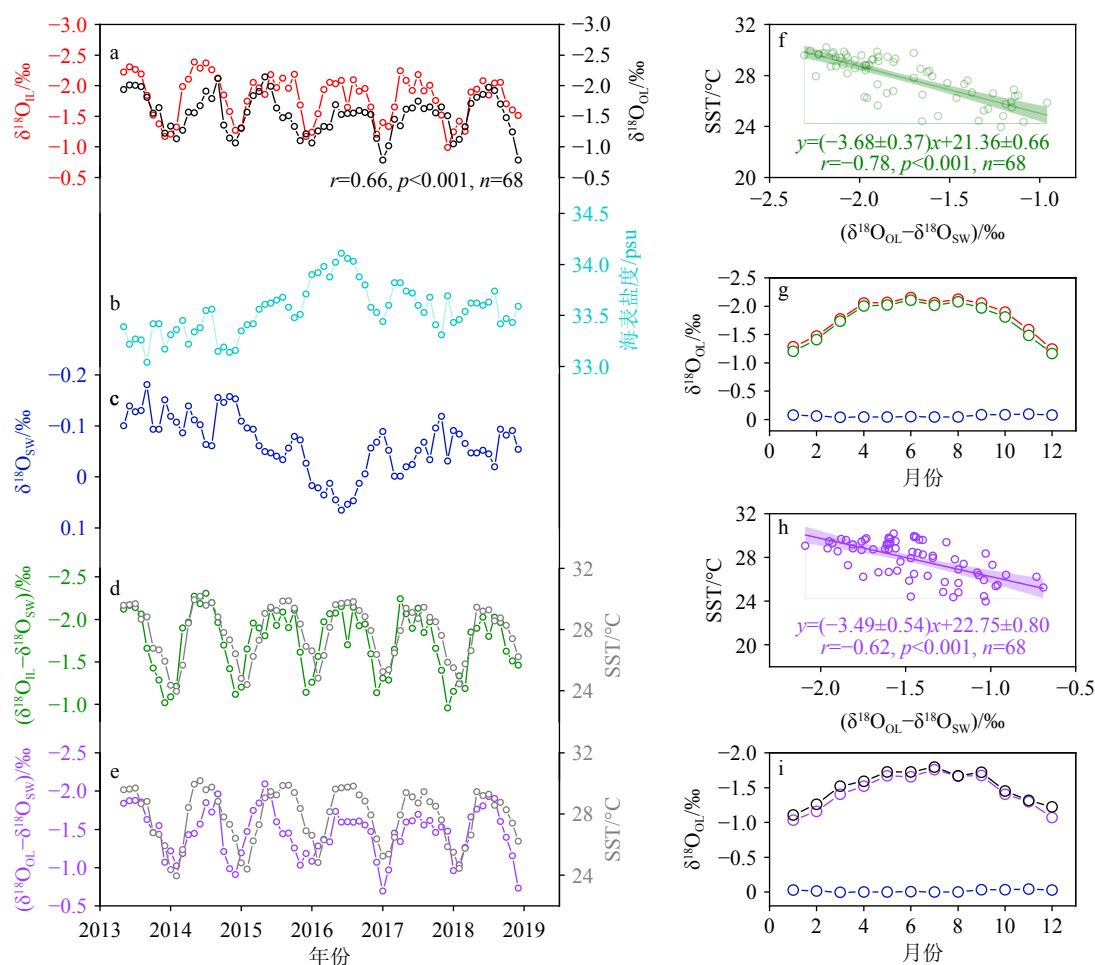


图 4 样品 LHJ-2 内外层壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 、SST 以及 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SW}}$ 之间的关系

a: 内壳 $\delta^{18}\text{O}_{\text{IL}}$ (红色圆圈) 和外壳 $\delta^{18}\text{O}_{\text{OL}}$ (黑色圆圈), b: 海表盐度, c: 海水 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SW}}$, d: $(\delta^{18}\text{O}_{\text{IL}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{SW}})$ (绿色圆圈)、SST (灰色圆圈), e: $(\delta^{18}\text{O}_{\text{OL}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{SW}})$ (紫色圆圈), SST (灰色圆圈), f: SST 与 $(\delta^{18}\text{O}_{\text{IL}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{SW}})$ 的线性关系, g: 2013—2018 年月平均 $\delta^{18}\text{O}_{\text{IL}}$ (红色圆圈)、 $(\delta^{18}\text{O}_{\text{IL}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{SW}})$ (绿色圆圈) 和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SW}}$ (蓝色圆圈), h: SST 与 $(\delta^{18}\text{O}_{\text{OL}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{SW}})$ 的线性关系, i: 2013—2018 年月平均 $\delta^{18}\text{O}_{\text{OL}}$ (黑色圆圈)、 $(\delta^{18}\text{O}_{\text{OL}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{SW}})$ (紫色圆圈) 和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SW}}$ (蓝色圆圈)。

Fig. 4 The relationship among $\delta^{18}\text{O}$, SST and $\delta^{18}\text{O}_{\text{SW}}$ in the inner and outer layers of the sample LHJ-2

a: Inner layer $\delta^{18}\text{O}_{\text{IL}}$ (red circle) and outer layer $\delta^{18}\text{O}_{\text{OL}}$ (black circle), b: sea surface salinity, c: seawater $\delta^{18}\text{O}_{\text{SW}}$, d: $(\delta^{18}\text{O}_{\text{IL}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{SW}})$ (green circle), SST (grey circle), e: $(\delta^{18}\text{O}_{\text{OL}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{SW}})$ (purple circle), SST (grey circle), f: the linear relationship between SST and $(\delta^{18}\text{O}_{\text{IL}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{SW}})$, g: the monthly average of $\delta^{18}\text{O}_{\text{IL}}$ (red circle), $(\delta^{18}\text{O}_{\text{IL}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{SW}})$ (green circle) and $\delta^{18}\text{O}_{\text{SW}}$ (blue circle) from 2013 to 2018, h: the linear relationship between SST and $(\delta^{18}\text{O}_{\text{OL}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{SW}})$, i: the monthly average of $\delta^{18}\text{O}_{\text{OL}}$ (black circle), $(\delta^{18}\text{O}_{\text{OL}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{SW}})$ (purple circle) and $\delta^{18}\text{O}_{\text{SW}}$ (blue circle) from 2013 to 2018.

的微环境温度更高。但是, 从砗磲生理学的角度出发, 内壳由砗磲内层的横向外套膜形成, 入射光照少^[8], 其微环境温度理应比外壳低。因此, 本文认为内外层壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 的差异可能由不同生物矿化过程导致的壳体微结构差异所致^[22]。Trofimova 等^[44]在研究北极蛤时发现, 相对于具有交错状结构的外壳内层, 具有棱柱状结构的外壳最外层的 $\delta^{18}\text{O}$ 更加偏负。而 Cusack 等^[45]发现偏顶蛤内壳具有棱柱状结构, 其 $\delta^{18}\text{O}$ 相对于具有珍珠层状结构的外壳更加偏正。目前国内外针对砗磲内外层壳体氧同位素差异的研究非常稀少, 未来需要进一步探讨和验证。

4.2 砗磲壳体 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化特征及其影响因素

海洋碳循环对全球气候变化有着深远的影响, 研究海洋生物碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 是理解海洋碳循环的重要途径^[46]。已有大量研究表明, 海洋生物碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 主要受到海水溶解物理碳库 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 、生命效应、太阳辐射、滤食、繁殖等因素的影响^[22-23, 26, 47-50]。早在 20 世纪 80 年代就有关于砗磲壳体 $\delta^{13}\text{C}$ 的研究报道^[23], 但到目前为止, 对砗磲壳体 $\delta^{13}\text{C}$ 的影响因素仍有较大的争议。

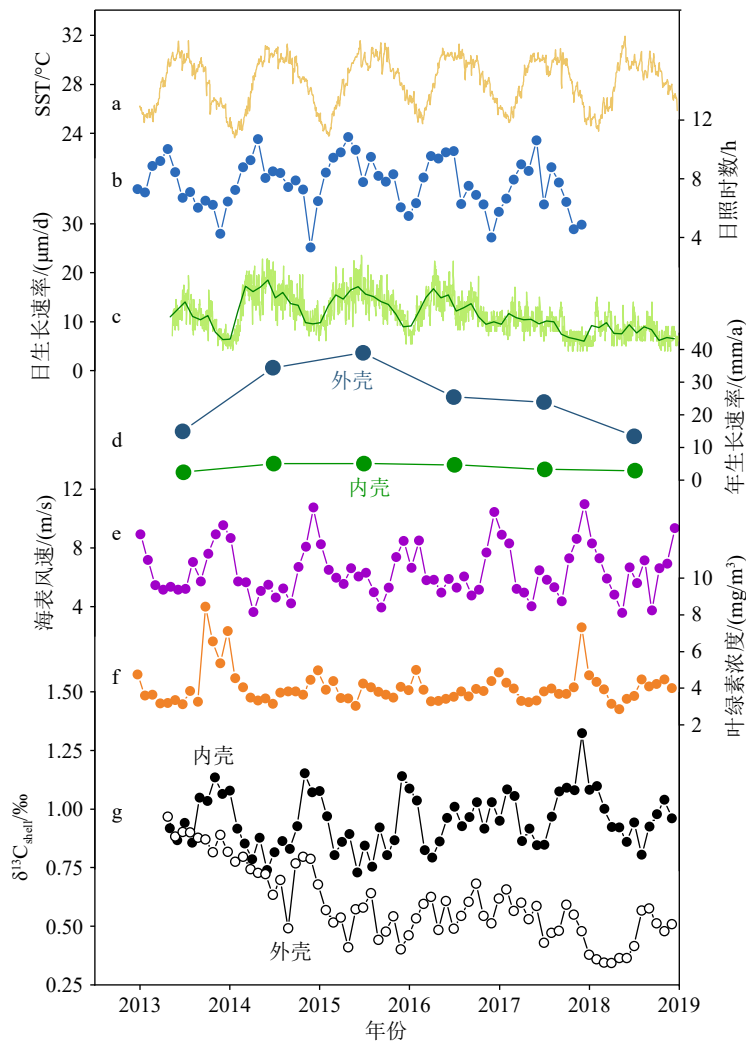


图5 2013—2018年西沙群岛环境参数与样品LHH-2壳体 $\delta^{13}\text{C}$ 的对比

a: SST, b: 日照时数, c: 内壳日生长速率, d: 内外层壳体年生长速率, e: 海表风速, f: 叶绿素浓度, g: 内壳 $\delta^{13}\text{C}$ (黑色实心圆圈)、外壳 $\delta^{13}\text{C}$ (黑色空心圆圈)。

Fig.5 The comparison of environmental parameters with $\delta^{13}\text{C}$ of LHH-2 shell in Xisha Islands from 2013 to 2018

a: SST, b: sunlight durations, c: the daily growth rate of the inner layer, d: the annual growth rate of the inner and outer layers, e: sea surface wind speed, f: chlorophyll concentration, g: the $\delta^{13}\text{C}$ of inner layer (black solid circle), the $\delta^{13}\text{C}$ of outer layer (black hollow circle).

4.2.1 砗磲内层壳体 $\delta^{13}\text{C}$ 的影响因素

前人研究发现,砗磲虹吸外套膜的上皮细胞利用壳体和外套膜之间的钙化流体(extrapallial fluid, EPF)构建文石壳体^[8,12,51]。与砗磲共生的虫黄藻主要分布在外壳的虹吸外套膜中,虫黄藻可以通过代谢作用(呼吸作用和光合作用)调节砗磲内部DIC储库 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的变化。因此,EPF的 $\delta^{13}\text{C}$ 主要受外界海水 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 和代谢作用的共同影响^[23,42,52]。

生命效应对生物碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 的影响可分为动力分馏和代谢分馏^[47-49,53]。动力分馏指的是 CO_2 水合和羟基化过程导致骨骼中的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 与周围海水发生不平衡分馏,例如珊瑚骨骼生长快导致较强的动力分馏,骨骼中的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 同时偏负^[47]。本研

究砗磲 $\delta^{13}\text{C}_{\text{IL}}$ 和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{IL}}$ 表现出显著的正相关性($r=0.75, p<0.001, n=68$), $\delta^{13}\text{C}_{\text{IL}}$ 与DGR显示出显著的负相关性($r=-0.67, p<0.001, n=68$)(图6e),这与动力分馏的特征相似。但是,考虑到海洋双壳类壳体 $\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}}$ 一般与周围海水环境保持平衡分馏^[5,15-17,54],因此在海洋双壳类中的动力分馏作用的影响有限,代谢作用引起的 $\delta^{13}\text{C}$ 不平衡分馏可能更大^[55-56]。代谢分馏对内部DIC储库 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的影响有两种方式:砗磲个体自身的代谢和共生虫黄藻的光合作用^[48,57]。砗磲在达到性成熟(8~10年)后,壳体的生长速率下降,生物矿化和繁殖所需的能量会重新分配,导致 $\delta^{13}\text{C}_{\text{IL}}$ 下降^[23,58]。本研究的现代鳞砗磲LHH-2只有6年的生命周期(图4),尚处于幼年阶段,因此不

考虑性成熟对壳体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{shell}}$ 的影响。一般情况下, 砗磲自身呼吸产生富集 ^{12}C 的 CO_2 可能会使得内部 DIC 储库 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 更加偏负, 导致壳体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{shell}}$ 偏负^[12]。砗磲的滤食作用会摄入有机物, 这也可能对壳体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{shell}}$ 造成影响, 但是目前尚无关于这方面的确切证据。虫黄藻通过光合作用优先利用 DIC 储库较轻的 ^{12}C , 使得内部 DIC 储库 ^{13}C 富集, 导致壳体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{shell}}$ 偏正^[47,59]。本研究结果显示, 砗磲 DGR 与日照时数的正相关性最为显著(图 6h), 说明 DGR 主要受日照时长控制。春夏季日照充足, SST 高, 砗磲生长快, 其壳体的钙化速率高, 对碳的需求量增加; 秋冬季日照时间减少, SST 低, 砗磲生长慢, 其壳体的钙化速率低, 对碳的需求量减少。共生的虫黄藻主要分布在砗磲外壳的虹吸外套膜中, 其吸收光能进行光合作用, 为砗磲提供生长发育的能量, 而内壳的横向外套膜由于入射光线较少, 虫黄藻分

布稀少, 此处的光合作用不活跃^[8,12]。因此, 光照对砗磲的生长至关重要, 虫黄藻在不同光照条件下进行光合作用的能力不同, 提供给砗磲的能量也有所差异^[60-62]。本研究砗磲 $\delta^{13}\text{C}_{\text{IL}}$ 与太阳辐射和日照时数呈显著负相关性($r=-0.43$, $p<0.001$, $n=68$; $r=-0.50$, $p<0.001$, $n=56$), 表明 $\delta^{13}\text{C}_{\text{IL}}$ 并不直接受到虫黄藻光合作用的影响; 另一方面, $\delta^{13}\text{C}_{\text{IL}}$ 与 SST 之间的显著负相关($r=-0.50$, $p<0.001$)(图 6a), 说明春夏季期间海表温度升高, 增强了砗磲自身的呼吸作用^[63-64], 呼吸产生的 CO_2 降低内部 DIC 储库 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{IL}}$ 偏负。因此, 砗磲自身的呼吸作用能够影响 $\delta^{13}\text{C}_{\text{IL}}$ 。

除了生命效应, 外界海水 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 变化也会影响砗磲 $\delta^{13}\text{C}_{\text{shell}}$ 。本研究结果显示, $\delta^{13}\text{C}_{\text{IL}}$ 与海表风速呈显著正相关($r=0.60$, $p<0.001$, $n=68$)(图 6d), 与叶绿素浓度呈显著正相关($r=0.52$, $p<0.001$, $n=68$)(图 6c), 说明 $\delta^{13}\text{C}_{\text{IL}}$ 与风速和叶绿素浓度有密切的

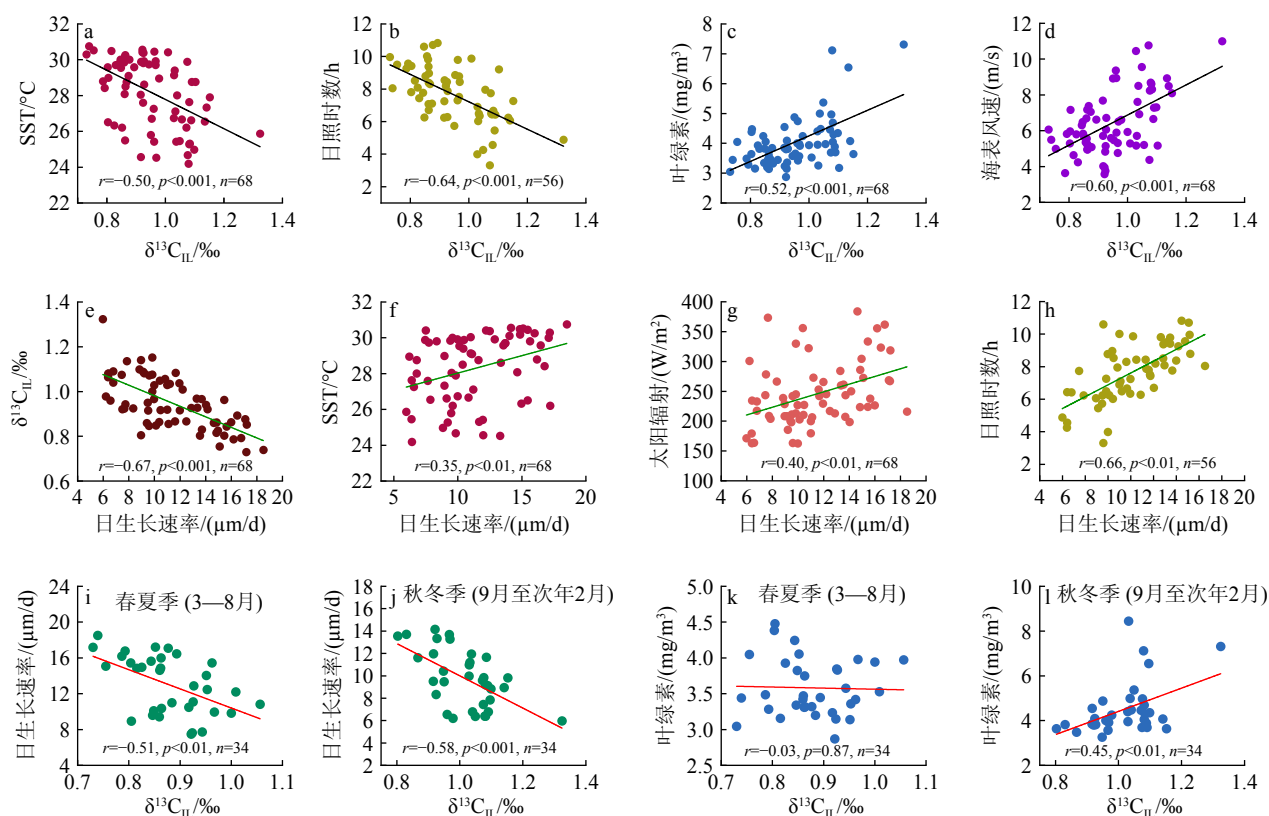


图 6 样品 LHI-2 内壳 $\delta^{13}\text{C}_{\text{IL}}$ 、日生长速率以及各环境参数之间的相关性

a: $\delta^{13}\text{C}_{\text{IL}}$ 与 SST, b: $\delta^{13}\text{C}_{\text{IL}}$ 与日照时数, c: $\delta^{13}\text{C}_{\text{IL}}$ 与叶绿素浓度, d: $\delta^{13}\text{C}_{\text{IL}}$ 与海表风速, e: DGR 与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{IL}}$, f: DGR 与 SST, g: DGR 与太阳辐射, h: DGR 与日照时数, i: $\delta^{13}\text{C}_{\text{IL}}$ 与 DGR 在春夏季, j: $\delta^{13}\text{C}_{\text{IL}}$ 与 DGR 在秋冬季, k: $\delta^{13}\text{C}_{\text{IL}}$ 与叶绿素浓度在春夏季, l: $\delta^{13}\text{C}_{\text{IL}}$ 与叶绿素浓度在秋冬季。

Fig.6 The correlations of $\delta^{13}\text{C}_{\text{IL}}$ and daily growth rate of the LHI-2 inner layer to the environmental parameters

a: $\delta^{13}\text{C}_{\text{IL}}$ and SST, b: $\delta^{13}\text{C}_{\text{IL}}$ and sunlight durations, c: $\delta^{13}\text{C}_{\text{IL}}$ and chlorophyll concentration, d: $\delta^{13}\text{C}_{\text{IL}}$ and sea surface wind speed, e: DGR and $\delta^{13}\text{C}_{\text{IL}}$, f: DGR and SST, g: DGR and solar radiation, h: DGR and sunlight durations, i: $\delta^{13}\text{C}_{\text{IL}}$ and DGR in spring and summer, j: $\delta^{13}\text{C}_{\text{IL}}$ and DGR in autumn and winter, k: $\delta^{13}\text{C}_{\text{IL}}$ and chlorophyll concentration in spring and summer, l: $\delta^{13}\text{C}_{\text{IL}}$ and chlorophyll concentration in autumn and winter.

联系。将春夏季和秋冬季期间的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{IL}}$ 与叶绿素浓度进行相关性分析, 结果发现, 春夏季 $\delta^{13}\text{C}_{\text{IL}}$ 与叶绿素浓度无显著相关性 ($r=-0.03, p=0.87, n=34$) (图 6k), 秋冬季 $\delta^{13}\text{C}_{\text{IL}}$ 与叶绿素浓度呈显著正相关 ($r=0.45, p<0.01, n=34$) (图 6l), 说明秋冬季的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{IL}}$ 主要受叶绿素浓度的影响。西沙群岛的海表初级生产力主要受到季风的控制: 冬季风引起海表风速增强, 加强了上下层水体的混合, 下层水体的微量元素 (如 Cd) 和营养物质上涌, 使得表层海水的初级生产力升高^[65]; 冬季风从中国大陆 (如黄土高原) 携带大量含富营养物质的气溶胶粉尘进入南海, 增强了海表初级生产力^[66]。表层浮游光合植物优先利用 ^{12}C ^[50], 使得表层海水 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 偏正, 从而导致冬季时砗磲 $\delta^{13}\text{C}_{\text{IL}}$ 偏正。

4.2.2 砗磲外壳 $\delta^{13}\text{C}$ 的影响因素

大多数砗磲 $\delta^{13}\text{C}_{\text{shell}}$ 的研究都是基于内壳开展, 很少关注 $\delta^{13}\text{C}_{\text{OL}}$ 的变化, 目前对其影响因素仍存在较大的争议。Elliot 等^[5]对砗磲的内壳、外壳以及转换层的 $\delta^{13}\text{C}$ 分析发现, 随着年龄的增长, 只有 $\delta^{13}\text{C}_{\text{OL}}$ 表现出上升的趋势和类似年周期的变化, 认为外壳与虫黄藻的关系更为密切, 虫黄藻通过光合作用优先利用 ^{12}C , 导致 $\delta^{13}\text{C}_{\text{OL}}$ 升高。然而, 本研究显示不同的结果, 该砗磲 $\delta^{13}\text{C}_{\text{OL}}$ 没有年周期变化,

但有明显的下降趋势 (图 2j 和图 5g)。

砗磲内外层壳体由不同的钙化器官形成, 可能导致碳同位素分馏存在差异。本研究砗磲外壳的生长速率远大于内壳, 说明 $\delta^{13}\text{C}_{\text{OL}}$ 可能受到动力分馏的影响更大。但是外层壳体在肉眼和激光共聚焦成像均观察不到清晰的生长纹层, 故无法确定外壳的最大生长轴路径。因此, 本研究推测外壳的采样路径可能偏离了其最大生长轴, 导致 $\delta^{13}\text{C}_{\text{OL}}$ 没有明显的年周期。在一些珊瑚的研究中也可观察到类似现象。Guo 等^[67]对同一个珊瑚以两种不同的取样路径进行取样, 结果表明, 两种不同取样路径得到的氧同位素保持高度一致, 都具有明显的年周期变化, 而碳同位素的变化却相差较大。此外, Linsley 等^[68]也发现动力分馏会覆盖珊瑚碳同位素中的季节信号, 可通过沿样品最大生长轴取样的方法来尽量减少动力分馏带来的影响。

大量的研究表明, 珊瑚骨骼、海洋双壳类、海绵骨针以及海洋沉积物等载体能够记录 Suess 效应^[26,30-31,69-70]。2013—2018 年西沙群岛的大气 CO_2 浓度 ($p\text{CO}_2$) 升高 11.81×10^{-6} (图 7a), 大气 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 下降 0.13‰ (图 7b), 本研究砗磲 $\delta^{13}\text{C}_{\text{OL}}$ 下降 0.47‰ (图 7c)。虽然 $\delta^{13}\text{C}_{\text{OL}}$ 与大气 $p\text{CO}_2$ 呈显著负相关 (图 7d), 与大气 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 呈显著正相关 (图 7e),

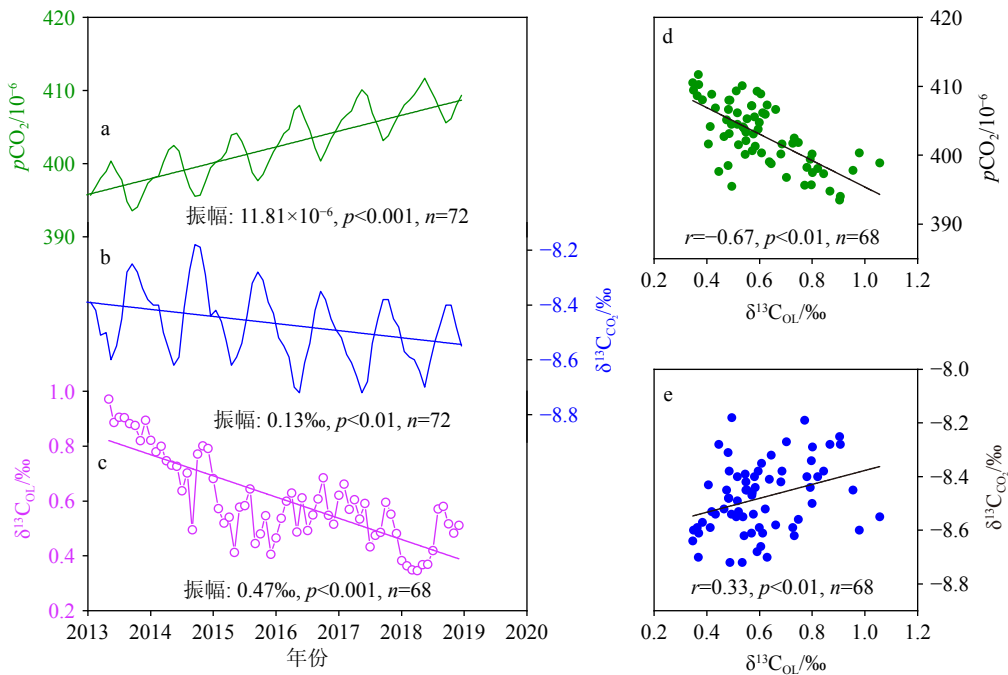


图 7 样品 LHI-2 外壳 $\delta^{13}\text{C}_{\text{OL}}$ 与 $p\text{CO}_2$ 及其 $\delta^{13}\text{C}$ 的对比

a: 大气 CO_2 浓度, b: 大气 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$, c: $\delta^{13}\text{C}_{\text{OL}}$, d: $\delta^{13}\text{C}_{\text{OL}}$ 与 $p\text{CO}_2$ 的相关性, e: $\delta^{13}\text{C}_{\text{OL}}$ 与大气 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 的相关性。

Fig.7 Comparison among $\delta^{13}\text{C}_{\text{OL}}$ in the LHI-2 outer layer, $p\text{CO}_2$, and $\delta^{13}\text{C}$ of atmosphere

a: $p\text{CO}_2$, b: $\delta^{13}\text{C}$ of atmospheric CO_2 , c: $\delta^{13}\text{C}_{\text{OL}}$, d: the correlation between $\delta^{13}\text{C}_{\text{OL}}$ and $p\text{CO}_2$, e: the correlation between $\delta^{13}\text{C}_{\text{OL}}$ and $\delta^{13}\text{C}$ in atmospheric CO_2

但是 $\delta^{13}\text{C}_{\text{OL}}$ 的下降幅度远大于大气 CO_2 中 $\delta^{13}\text{C}$ 的下降幅度,因此,Suess效应不足以解释砗磲 $\delta^{13}\text{C}_{\text{OL}}$ 下降的原因。由图5d所示,2013—2015年期间 $\delta^{13}\text{C}_{\text{OL}}$ 下降了0.36‰,外壳的生长速率突然上升,本研究认为砗磲 $\delta^{13}\text{C}_{\text{OL}}$ 的快速下降趋势可能与壳体生长速率有关,并且由于该砗磲的生长年份太短,内外层壳体 $\delta^{13}\text{C}$ 的趋势可能受到年际变化和生理活动的影响,导致其偏离Suess效应。

5 结论

本文以南海西沙浪花礁的现代磷砗磲为研究对象,对其进行稳定同位素分析,探讨砗磲内外层壳体碳、氧同位素的差异及其影响因素。研究结果表明,该砗磲内外层壳体 $\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}}$ 极为相似,但 $\delta^{18}\text{O}_{\text{OL}}$ 相对于 $\delta^{18}\text{O}_{\text{IL}}$ 偏正0.29‰,推测可能与砗磲的生理活动有关。砗磲内外层壳体 $\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}}$ 主要受到SST的调控,表明砗磲内外层壳体 $\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}}$ 均能够可靠地重建当地的SST。

该砗磲内外层壳体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{shell}}$ 之间存在较大的差异。 $\delta^{13}\text{C}_{\text{IL}}$ 具有明显的年周期变化,主要受到外界海水 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 和砗磲自身的呼吸作用共同控制。春夏季期间,砗磲自身的呼吸作用降低了内部DIC储库 $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{IL}}$ 偏负;秋冬季期间,受东亚冬季风的影响,表层海水 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 富集, $\delta^{13}\text{C}_{\text{IL}}$ 偏正。砗磲 $\delta^{13}\text{C}_{\text{OL}}$ 无年周期变化,可能与取样过程偏离主生长轴有关, $\delta^{13}\text{C}_{\text{OL}}$ 随年龄增长而持续下降,Suess效应不能够充分解释此原因,可能还存在其他复杂的影响因素。

致谢: 感谢中国科学院地球环境研究所孢粉与热带气候变化实验室团队的支持。

参考文献 (References)

- [1] Bonham K. Growth rate of giant clam *Tridacna gigas* at Bikini Atoll as revealed by radioautography[J]. *Science*, 1965, 149(3681): 300-302.
- [2] Rosewater J. The family tridacnidae in the Indo-Pacific[J]. *Indo-Pacific Mollusca*, 1965, 1: 347-396.
- [3] Neo M L, Eckman W, Vicentuan K, et al. The ecological significance of giant clams in coral reef ecosystems[J]. *Biological Conservation*, 2015, 181: 111-123.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Yan H. Daily growth bands of giant clam shell: a potential paleoweather recorder[J]. *Solid Earth Sciences*, 2020, 5(4): 249-253.
- [10] 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.
- [11] Lin A Y M, Meyers M A, Vecchio K S. Mechanical properties and structure of *Strombus gigas*, *Tridacna gigas*, and *Haliotis rufescens* sea shells: a comparative study[J]. *Materials Science and Engineering: C*, 2006, 26(8): 1380-1389.
- [12] Norton J H, Jones G W. The Giant Clam: An Anatomical and Histological Atlas[M]. Canberra, Australia: Australian Centre for International Agricultural Research, 1992.
- [13] Aharon P. Recorders of reef environment histories: stable isotopes in corals, giant clams, and calcareous algae[J]. *Coral Reefs*, 1991, 10(2): 71-90.
- [14] Sano Y, Kobayashi S, Shirai K, et al. Past daily light cycle recorded in the strontium/calcium ratios of giant clam shells[J]. *Nature Communications*, 2012, 3(1): 761.
- [15] Aharon P. 140, 000-yr isotope climatic record from raised coral reefs in New Guinea[J]. *Nature*, 1983, 304(5928): 720-723.
- [16] Grossman E L, Ku T L. Oxygen and carbon isotope fractionation in biogenic aragonite: temperature effects[J]. *Chemical Geology: Isotope Geoscience section*, 1986, 59: 59-74.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] Wang G Z, Yan H, Liu C C, et al. Oxygen isotope temperature calibrations for modern *Tridacna* shells in western Pacific[J]. *Coral Reefs*, 2022, 41(1): 113-130.
- [21] 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.
- [22] Killam D, Thomas R, Al - Najjar T, et al. Interspecific and intrashell stable isotope variation among the red sea giant clams[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2020, 21(7): e2019GC008669.
- [23] 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.
- [24] Yamanashi J, Takayanagi H, Isaji A, et al. Carbon and oxygen isotope records from *Tridacna dera* shells: toward establishing a reliable proxy for sea surface environments[J]. *PLoS One*, 2016, 11(6): e0157659.
- [25] 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.
- [26] Yang Z K, Shao D, Mei Y J, et al. The controlling mechanism of mid-to late Holocene carbon isotopic variations of *Tridacnidae* in the South China Sea[J]. *Marine Geology*, 2019, 415: 105958.
- [27] 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.
- [28] Suess H E. Natural radiocarbon and the rate of exchange of carbon dioxide between the atmosphere and the sea[J]. *Nuclear Processes in Geologic Settings*, 1953, 43: 52-56.
- [29] Keeling C D. The Suess effect: ^{13}C - ^{14}C interrelations[J]. *Environment International*, 1979, 2(4-6): 229-300.
- [30] Swart P K, Greer L, Rosenheim B E, et al. The ^{13}C Suess effect in scleractinian corals mirror changes in the anthropogenic CO_2 inventory of the surface oceans[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(5): L05604.
- [31] Deng W F, Chen X F, Wei G J, et al. Decoupling of coral skeletal $\delta^{13}\text{C}$ and solar irradiance over the past millennium caused by the oceanic Suess effect[J]. *Paleoceanography*, 2017, 32(2): 161-171.
- [32] Dassie E P, Lemley G M, Linsley B K. The Suess effect in Fiji coral $\delta^{13}\text{C}$ and its potential as a tracer of anthropogenic CO_2 uptake[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2013, 370: 30-40.
- [33] Yan H, Soon W, Wang Y H. A composite sea surface temperature record of the northern South China Sea for the past 2500 years: a unique look into seasonality and seasonal climate changes during warm and cold periods[J]. *Earth-Science Reviews*, 2015, 141: 122-135.
- [34] 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.
- [35] Agbaje O B A, Thomas D E, Dominguez J G, et al. Biomacromolecules in bivalve shells with crossed lamellar architecture[J]. *Journal of Materials Science*, 2019, 54(6): 4952-4969.
- [36] Zhao N Y, Yan H, Yang Y J, et al. A 23.7-year long daily growth rate record of a modern giant clam shell from South China Sea and its potential in high-resolution paleoclimate reconstruction[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2021, 583: 110682.
- [37] Zhao N Y, Yan H, Luo F, et al. Daily growth rate variation in *Tridacna* shells as a record of tropical cyclones in the South China Sea: palaeoecological implications[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2023, 615: 111444.
- [38] 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.
- [39] Aharon P, Chappell J. Oxygen isotopes, sea level changes and the temperature history of a coral reef environment in New Guinea over the last 10^5 years[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1986, 56(3-4): 337-379.
- [40] 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.]
- [41] Yan H, Shao D, Wang Y H, et al. Sr/Ca differences within and among three *Tridacnidae* species from the South China Sea: implication for paleoclimate reconstruction[J]. *Chemical Geology*, 2014, 390: 22-31.
- [42] Romanek C S, Grossman E L. Stable isotope profiles of *Tridacna maxima* as environmental indicators[J]. *Palaos*, 1989, 4(5): 402-413.
- [43] 文汉锋, 赵楠钰, 刘成程, 等. 西太平洋帕劳劳碌碌高分辨率氧同位素记录及其指示的气候环境变化[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2021, 41(1): 1-13. [WEN Hanfeng, ZHAO Nanyu, LIU Chengcheng, et al. High-resolution oxygen isotope records of *Tridacna gigas* from Palau, Western Pacific and its climatic and environmental implications[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2021, 41(1): 1-13.]
- [44] Trofimova T, Milano S, Andersson C, et al. Oxygen isotope composition of *Arctica islandica* aragonite in the context of shell architectural organization: implications for paleoclimate reconstructions[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2018, 19(2): 453-470.
- [45] Cusack M, Parkinson D, Freer A, et al. Oxygen isotope composition in *Modiolus modiolus* aragonite in the context of biological and crystallographic control[J]. *Mineralogical Magazine*, 2008, 72(2): 569-577.
- [46] 殷建平, 王友绍, 徐继荣, 等. 海洋碳循环研究进展[J]. *生态学报*, 2006, 26(2): 566-575. [YIN Jianping, WANG Youshao, XU Jirong, et al. Advances of studies on marine carbon cycle[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(2): 566-575.]
- [47] McConnaughey T. ^{13}C and ^{18}O isotopic disequilibrium in biological carbonates: I. Patterns[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1989, 53(1): 151-162.
- [48] McConnaughey T A, Burdett J, Whelan J F, et al. Carbon isotopes in biological carbonates: respiration and photosynthesis[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, 61(3): 611-622.
- [49] Lorrain A, Paulet Y M, Chauvaud L, et al. $\delta^{13}\text{C}$ variation in scallop shells: increasing metabolic carbon contribution with body size?[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, 68(17): 3509-3519.
- [50] Ma X L, Yan H, Ma W T, et al. Symbiotic zooxanthellae drive the $\delta^{13}\text{C}$

- changes of *Tridacna gigas* shell in the southern South China Sea[J]. [Journal of Geophysical Research: Biogeosciences](#), 2023, 128(6): e2022JG007337.
- [51] Klein R T, Lohmann K C, Thayer C W. Sr/Ca and $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios in skeletal calcite of *Mytilus trossulus*: covariation with metabolic rate, salinity, and carbon isotopic composition of seawater[J]. [Geochimica et Cosmochimica Acta](#), 1996, 60(21): 4207-4221.
- [52] McConnaughey T A, Gillikin D P. Carbon isotopes in mollusk shell carbonates[J]. [Geo-Marine Letters](#), 2008, 28(5-6): 287-299.
- [53] McConnaughey T A. Sub-equilibrium oxygen-18 and carbon-13 levels in biological carbonates: carbonate and kinetic models[J]. [Coral Reefs](#), 2003, 22(4): 316-327.
- [54] Chauvaud L, Lorrain A, Dunbar R B, et al. Shell of the great scallop *Pecten maximus* as a high-frequency archive of paleoenvironmental changes[J]. [Geochemistry, Geophysics, Geosystems](#), 2005, 6(8): Q08001.
- [55] Grottoli A G, Wellington G M. Effect of light and zooplankton on skeletal $\delta^{13}\text{C}$ values in the eastern Pacific corals *Pavona clavus* and *Pavona gigantea*[J]. [Coral Reefs](#), 1999, 18(1): 29-41.
- [56] Gillikin D P, Lorrain A, Meng L, et al. A large metabolic carbon contribution to the $\delta^{13}\text{C}$ record in marine aragonitic bivalve shells[J]. [Geochimica et Cosmochimica Acta](#), 2007, 71(12): 2936-2946.
- [57] Heikoop J M, Dunn J J, Risk M J, et al. Separation of kinetic and metabolic isotope effects in carbon-13 records preserved in reef coral skeletons[J]. [Geochimica et Cosmochimica Acta](#), 2000, 64(6): 975-987.
- [58] Soo P, Todd P A. The behaviour of giant clams (Bivalvia: Cardiidae: Tridacninae)[J]. [Marine Biology](#), 2014, 161(12): 2699-2717.
- [59] Swart P K. Carbon and oxygen isotope fractionation in scleractinian corals: a review[J]. [Earth-Science Reviews](#), 1983, 19(1): 51-80.
- [60] Lucas J S, Nash W J, Crawford C M, et al. Environmental influences on growth and survival during the ocean-nursery rearing of giant clams, *Tridacna gigas* (L.)[J]. [Aquaculture](#), 1989, 80(1-2): 45-61.
- [61] Jantzen C, Wild C, El-Zibdah M, et al. Photosynthetic performance of giant clams, *Tridacna maxima* and *T. squamosa*, Red Sea[J]. [Marine Biology](#), 2008, 155(2): 211-221.
- [62] Rossbach S, Saderne V, Anton A, et al. Light-dependent calcification in Red Sea giant clam *Tridacna maxima*[J]. [Biogeosciences](#), 2019, 16(13): 2635-2650.
- [63] Blidberg E, Elfving T, Plantman P, et al. Water temperature influences on physiological behaviour in three species of giant clams (Tridacnidae)[C]//Proceedings of the 9th International Coral Reef Symposium. Bali, 2000.
- [64] Elfving T, Plantman P, Tedengren M, et al. Responses to temperature, heavy metal and sediment stress by the giant clam *Tridacna squamosa*[J]. [Marine and Freshwater Behaviour and Physiology](#), 2001, 34(4): 239-248.
- [65] Huang C Y, Wu S F, Zhao M X, et al. Surface ocean and monsoon climate variability in the South China Sea since the last glaciation[J]. [Marine Micropaleontology](#), 1997, 32(1-2): 71-94.
- [66] Liu Y, Liu W G, Peng Z C, et al. Instability of seawater pH in the South China Sea during the mid-late Holocene: evidence from boron isotopic composition of corals[J]. [Geochimica et Cosmochimica Acta](#), 2009, 73(5): 1264-1272.
- [67] Guo Y R, Deng W F, Wei G J, et al. Exploring the temperature dependence of clumped isotopes in modern *Porites* corals[J]. [Journal of Geophysical Research: Biogeosciences](#), 2020, 125(1): e2019JG005402.
- [68] Linsley B K, Messier R G, Dunbar R B. Assessing between-colony oxygen isotope variability in the coral *Porites lobata* at clipperton atoll[J]. [Coral Reefs](#), 1999, 18(1): 13-27.
- [69] Böhm F, Joachimski M M, Lehnert H, et al. Carbon isotope records from extant Caribbean and South Pacific sponges: evolution of $\delta^{13}\text{C}$ in surface water DIC[J]. [Earth and Planetary Science Letters](#), 1996, 139(1-2): 291-303.
- [70] 陈法锦, 陈建芳, 金海燕, 等. 南海表层沉积物与沉降颗粒物中有机碳的 $\delta^{13}\text{C}$ 对比研究及其古环境再造意义 [J]. 沉积学报, 2012, 30(2): 340-345. [CHEN Fajin, CHEN Jianfang, JIN Haiyan, et al. Correlation of $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ in surface sediments with sinking particulate matter in South China Sea and implication for reconstructing paleo-environment[J]. [Acta Sedimentologica Sinica](#), 2012, 30(2): 340-345.]