



早更新世帝汶海碳酸盐埋藏和陆源输入记录的古气候变化

王启炜, 徐建, AnnHolbourn, WolfgangKuhnt

Early Pleistocene records of carbonate burial and terrestrial input in the Timor Sea and their paleoclimatic implications

WANG Qiwei, XU Jian, Ann Holbourn, and Wolfgang Kuhnt

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2023121901>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[近2.1 Ma以来帕里西维拉海盆黏土矿物输入变化及其对中更新世气候转型的响应](#)

Variation of clay mineral input in the Parece Vela Basin since the last 2.1 Ma and the response to the mid-Pleistocene climate transition

海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(6): 150-161

[西北孟加拉湾中更新世早期的硅质生物生产力变化](#)

Changes in siliceous paleoproductivity during the early Middle Pleistocene in the Northwest Bay of Bengal

海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(5): 83-93

[晚更新世阿蒙森海生产力和冰筏输入的变化对表层海洋环境和西南极冰盖演化的指示](#)

Changes in productivity and ice-rafting input in the Amundsen Sea during the Late Pleistocene: Implications on the evolution of surface-ocean environment and the West Antarctic Ice Sheet

海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(2): 136-144

[渤海湾西岸晚更新世以来的沉积环境演化及碳埋藏评价](#)

Environmental evolution and carbon burial assessment of the west coast of Bohai Bay since Late Pleistocene

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 194-205

[伶仃洋东岸晚更新世以来硅藻组合及环境意义](#)

Diatom assemblage since late Pleistocene in the east coast of Lingdingyang Bay and its environmental implications

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(2): 126-135

[西沙孤立碳酸盐台地的地震层序及演化模式—以永乐环礁为例](#)

Seismic sequence and evolution model of isolated carbonate platform—A case from Yongle Atoll, Xisha Islands

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(5): 87-96



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王启炜, 徐建, Ann Holbourn, 等. 早更新世帝汶海碳酸盐埋藏和陆源输入记录的古气候变化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2025, 45(2): 121-132.
WANG Qiwei, XU Jian, Ann Holbourn, et al. Early Pleistocene records of carbonate burial and terrestrial input in the Timor Sea and their paleoclimatic implications[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2025, 45(2): 121-132.

早更新世帝汶海碳酸盐埋藏和陆源输入记录的古气候变化

王启炜¹, 徐建¹, Ann Holbourn², Wolfgang Kuhnt²

1. 西北大学地质学系大陆动力学国家重点实验室, 西安 710069

2. Institut für Geowissenschaften, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Kiel D-24118, Germany

摘要: 深海碳酸盐埋藏作为地球表层碳库的重要碳汇, 在地质历史时期与大气二氧化碳浓度变化息息相关。古记录重建显示, 大气二氧化碳浓度并不总是与全球平均气温具有较好的对应关系, 其他因素可能在过去全球变化中起到了重要的作用。本文以澳大利亚西北岸外帝汶海 IODP U1482 站钻孔 2~1.07 Ma 沉积物为研究材料, 测试其碳酸盐和主微量元素含量, 探讨深海碳酸盐埋藏的影响因素。结果显示, 碳酸盐含量与指示河流输入的钾元素含量、指示生产力的铀元素含量和底栖有孔虫 $\delta^{13}\text{C}$ 以及指示风尘输入的 $\log(\text{Zr/Rb})$ 等记录的长期变化趋势均可分为 2~1.63 Ma、1.63~1.31 Ma 和 1.31~1.07 Ma 等 3 个阶段, 可能与沃克环流和哈德莱环流调控的印尼—澳洲地区的干湿条件有关。1.31 Ma 之后钾元素含量的持续降低和碳酸盐含量的增加可能揭示哈德莱环流的加强导致了澳洲西北内陆的干旱化趋势。早更新世 U1482 站碳酸盐含量在轨道时间尺度上主要受以河流输入为主的陆源沉积物稀释的影响; 频谱分析显示其具有显著的 19 ka 和约 29 ka 变化周期, 可能指示该研究时段内除了岁差周期外, 以斜率周期为主导的冰期-间冰期旋回对区域降水和陆源沉积物输入的调控作用。

关键词: 碳酸盐含量; 区域降水; 早更新世; 帝汶海

中图分类号: P736.4

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2023121901

Early Pleistocene records of carbonate burial and terrestrial input in the Timor Sea and their paleoclimatic implications

WANG Qiwei¹, XU Jian¹, Ann Holbourn², Wolfgang Kuhnt²

1. State Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China

2. Institut für Geowissenschaften, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Kiel D-24118, Germany

Abstract: Deep-sea carbonate burial is an important carbon sink of the Earth's surface carbon reservoir. Its variations are closely related to that of atmospheric carbon dioxide. Paleo-environment reconstructions show that changes in atmospheric CO_2 concentration do not always correlate well with past temperature changes, implying that other factors may contribute to the past global change. We examined deep-sea sediments spanning the interval of 2~1.07 Ma retrieved from IODP Site U1482 located offshore northwestern Australia in the Timor Sea. Carbonate and elemental contents were analyzed to investigate the factors that influenced carbonate burial. The early Pleistocene records at Site U1482 indicate that all of our records including carbonate content, potassium content (a proxy of regional precipitation), $\log(\text{Zr/Rb})$ (a proxy of aeolian dust input), benthic foraminiferal $\delta^{13}\text{C}$, and uranium content (proxies of paleoproductivity) show long-term changes punctuated at 1.63 Ma and 1.31 Ma, possibly related to the precipitation pattern over Indonesia-Australia modulated by Walker and Hadley circulations. The continuous decrease in carbonate content and increase in potassium content after 1.31 Ma likely implicate that the intensified aridification in the northwestern Australian hinterland was caused by strengthening of the Hadley circulation. Dilution by terrestrial sediments, mainly of riverine origin, is the predominant factor modifying carbonate content on orbital timescales. Spectral analysis shows that the carbonate record was dominated by 19 ka and 29 ka cycles, likely suggesting the effect of the obliquity-paced glacial/interglacial cyclicity on the regional precipitation and terrestrial input in addition to the precessional control.

Key words: carbonate content; regional precipitation; early Pleistocene; Timor Sea

资助项目: 国家自然科学基金项目“晚中新世以来印度洋-太平洋暖池水体交换过程及其气候效应”(41830539), “北半球冰盖扩大期印尼穿越流古海洋学记录及其意义”(41776060); 西北大学研究生创新项目“早上新世北半球冰盖扩大期印尼穿越流变迁与碳循环”(CX2023007)

作者简介: 王启炜(1999—), 男, 硕士研究生, 地质学专业, E-mail: kezevnez@hotmail.com

通讯作者: 徐建(1977—), 男, 教授, 主要从事古海洋学和古气候学研究, E-mail: jx08@live.cn

收稿日期: 2023-12-19; 改回日期: 2024-02-05. 文凤英编辑

颗石藻和有孔虫等生物的钙质硬体是碳酸盐补偿深度(Carbonate Compensation Depth, CCD)之上深海沉积物中固态碳酸盐的主要成分^[1]。自中生代以来,碳酸盐工厂从大陆架延伸至开阔大洋,深海碳酸盐的溶解作用作为负反馈机制,维持着海洋碱度的平衡,保持着大气CO₂浓度和全球气候在数百万年时间尺度上的稳定状态^[2]。新生代以来,伴随着大气CO₂浓度的持续降低,全球气候趋于变冷^[3]。碳酸盐埋藏作为在构造时间尺度上移除大气与海洋中CO₂的主要途径^[4],其在新生代以来的变化可能对大气CO₂浓度的持续降低和全球变冷形成负反馈^[5-6]。

重建记录显示晚中新世暖期与晚更新世冰期时的大气CO₂浓度基本相当^[7],表明除了大气CO₂之外,全球气候还受其他因素的调控。比如构造变动造成的海陆分布和海道启闭可能影响着大洋间热量的传输^[8]。新生代以来,随着南半球高纬地区德雷克海峡和塔斯马尼亚海道的开启^[9],以及北半球低纬地区特提斯海道和巴拿马海道的关闭^[10],全球大洋之间的热传输变得受限。目前,印尼海道是全球低纬地区的唯一海洋通道,印尼穿越流(Indonesian Throughflow, ITF)穿行而过将温暖海水从热带太平洋输送至东印度洋^[11]。随着澳洲板块向北移动,印尼海道逐渐受限并在4~3 Ma时作为太平洋至印度洋深层水的通道关闭,因此改变了ITF的水源,对区域和全球气候产生了重要的影响^[12]。

近年来,“国际大洋发现计划”(International Ocean Discovery Program; IODP)第356和363航次获得的长时间尺度深海沉积记录,增进了人们对ITF长期变化的理解^[13-14]。本文以位于澳洲西北岸外帝汶海区IODP第363航次U1482站钻孔沉积物为研究对象,重建2~1.07 Ma碳酸盐埋藏历史,结合船测数据,讨论溶解作用、陆源输入和生产力等因素对碳酸盐埋藏的影响;与该站海水温盐等古海洋学记录进行对比,探讨碳酸盐埋藏记录的古海洋学和古气候学意义。

1 区域概况

现代ITF主要源自北太平洋温跃层,其次来自南太平洋温跃层与中层,经由印尼多岛海区进入东印度洋^[11,15-16]。大部分ITF会流经班达海,在此从表层到温跃层乃至中层发生剧烈混合^[11,14,17-19]。北半球冬季来自南海和爪哇海区的低盐表层水进入望加锡海峡南部,会阻滞ITF表层流的南向运移,造

成ITF表层流减弱、温跃层流增强^[15,20]。进入印度洋的ITF大部分向西并最终汇入厄加勒斯流,少部分向南汇入鲁汶流^[11]。

印度洋-太平洋暖池(Indo-Pacific Warm Pool, 简称“印-太暖池”或IPWP)区域丰沛降水形成的表层低盐“盖层”导致印尼海区和澳洲西北岸外现代生产力维持在较低水平^[21-22]。受亚洲-澳洲季风影响,研究区生产力具有显著的季节性波动:南半球冬季(6—8月)较低的表层海水温度以及东南季风驱动的上层水体混合,增加了表层营养盐的补充,区域生产力高(图1c);南半球夏季(12月至次年2月)较高的表层海水温度以及表层充沛的淡水供应,形成了稳定的上层水体分层,抑制了区域生产力(图1b)^[23]。澳洲西北大陆的干湿条件同样具有强烈的季节性。南半球夏季,热带辐合带南移和西北季风的盛行提供了丰沛的水汽供应;高于临界条件的海温也为热带气旋的形成提供了有利条件(图1a)^[24]。澳洲西北大陆丰沛的降水裹挟着陆源碎屑汇入Fitzroy河和Ord河等河流,为帝汶海域提供了丰富的沉积物^[25]。南半球冬季,干旱的澳洲内陆为研究区提供了大量的风媒粉尘,在澳洲岸外帝汶海区的西部形成了长期稳定的风尘沉积带^[24,26-27]。

澳洲西北岸外ITF出口处的沉积物记录着地质历史时期ITF的温盐、上部水体分层和强弱等对区域和全球气候变化的响应。晚第四纪冰期旋回中有两种可能的情形会提高ITF的表层生产力:(1)冰期海平面下降至陆架坡折之下,减少表层低盐海水的覆盖,使得营养跃层变浅,生产力增加;(2)上层海水的强烈混合增加了表层水营养盐的供应,生产力因此增加^[31-32]。这两种情形可能分别在有机碳记录中留下了100 ka和23、19 ka的变化周期^[33]。

沉积物中碳酸盐含量会受到陆源输入的影响。澳洲西北海域陆源输入的多寡与气候干湿密切相关^[24]。冰期时增加的陆源输入的稀释作用会降低近岸地区沉积物中的碳酸盐含量^[34]。然而,陆源输入的营养盐也可能提高生产力水平^[31]。

2 材料与方法

IODP U1482站(15°3.32'S、120°26.10'E,水深1466 m)位于澳洲西北岸外帝汶海区ITF出口的径路上(图1a)。IODP第363航次在该站共钻取4个孔的柱状沉积物岩芯,最大取芯深度达535.86 m^[8]。本研究从4个钻孔的拼接岩芯(SPLICE)上部94.428~120.84 m以10 cm为间隔进行采样,共获

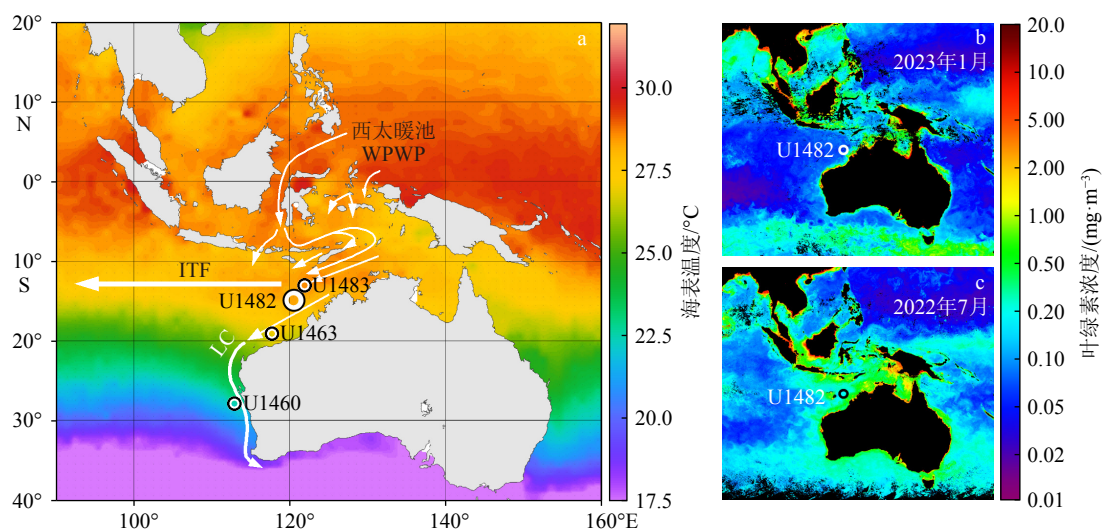


图 1 研究区概况和 IODP U1482 站位图

a: 印澳地区现代表层海水温度^[28]与洋流方向^[11,14]; LC=Leeuwin Current (鲁汶流); 使用 Ocean Data View 制图^[29]; b: 2023 年 1 月表层海水叶绿素浓度; c: 2022 年 7 月表层海水叶绿素浓度^[30]。

Fig.1 Regional oceanographic settings and the location of IODP Site U1482

a: Map of modern sea surface temperature^[28] and ocean currents^[11,14] in the Indo-Pacific region, created using Ocean Data View^[29], with LC representing the Leeuwin Current; b: sea surface chlorophyll concentration in January, 2023; c: sea surface chlorophyll concentration in July, 2022^[30]。

得 259 个沉积物样品。根据已发表的 U1482 站底栖有孔虫氧同位素地层年龄模式^[14], 本次研究样品的年龄跨度为 2~1.07 Ma, 时间分辨率约为 3.6 ka。该站钻孔沉积物以松散的钙质软泥和黏土矿物为主, 研究层位内未见明显的软沉积变形^[8]。

样品的前处理在西北大学地质学系完成。将不超过 2 g 的湿样置于烘箱内在 60 °C 温度下烘干, 然后用玛瑙研钵研磨至 200 目以下, 获得粉末状干样。碳酸盐含量测试在中国科学院地球环境研究所 soli TOC Cube®元素分析仪上完成。测试采用程序升温法, 把样品置于 400 °C 与 900 °C 的氧化环境中充分燃烧, 将产生的二氧化碳气体体积换算为碳元素的总质量, 测定固体中的总有机碳、总无机碳和总氮含量; 最终将总无机碳含量乘以 8.33, 获得碳酸盐含量^[35]。

沉积物样品的 K、U 等元素含量根据船测自然伽马辐射 (Natural Gamma Radiation, NGR) 数据计算而得。NGR 数据下载自 LIMS 数据库 (<https://web.iodp.tamu.edu/LORE/>)。本文使用 De Vleeschouwer 等 (2016) 的 MATLAB 脚本^[36], 将 U1482 站 NGR 数据转换为 K (wt%)、Th (mg/kg)、U (mg/kg) 三种元素在湿样中的相对含量。

本文中各组分的堆积速率 (mass accumulation rate, MAR; 单位: $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{ka}^{-1}$) 通过 $\text{MAR}=\text{wt}\%\cdot\text{SR}\cdot\text{BD}$ 计算获得。其中, wt% 为各组分的百分含量, SR 为

沉积速率 (cm/ka), BD 为沉积物密度 (g/cm^3)。沉积物干样密度用于计算碳酸盐堆积速率, 而湿样密度用于计算 K、Th、U 等元素的堆积速率。沉积速率根据底栖有孔虫氧同位素年代地层框架获得^[14]。干样与湿样密度来自船测数据^[8]。

钻孔岩芯的 X 射线荧光 (X-ray Fluorescence, XRF) 测试在基尔大学 Avaatech XRF 第二代岩芯扫描仪上完成。岩芯扫描间距为 2 cm, 测试电压设置为 30 kV, 计数时长为 10 s。将 XRF 测得的元素数据与前述的碳酸盐和钾元素含量进行对比, 可以交叉印证数据的可靠性。此外, 本文还根据 XRF 数据获得被广泛用于指示风尘活动强度指标的 $\log(\text{Zr}/\text{Rb})$ ^[24]、指示钙质生产力指标的 $\log(\text{Ca}/\text{Ti})$ 以及指示陆源输入的 $\log(\text{Terr}/\text{Ca})$, 其中, “Terr” 指铝、硅、钾、铁、钛 5 种元素的计数之和^[14]。

交叉频谱分析利用 Redfit-X 软件完成^[37]。将碳酸盐、钾元素和铀元素含量的时间序列两两输入软件, 分别得到三组时间序列的自动频谱 (autospectrum) 和任意两组时间序列在某个频率上的相关性与相位差。

3 结果

2~1.07 Ma 期间 U1482 站沉积物中的碳酸盐含量为 32.9%~63.9%, 具有显著的周期性变化, 在多

数冰期比相邻的间冰期高,冰期的平均值为 53.8%, 间冰期的平均值为 52%。2~1.63 Ma 期间,碳酸盐含量逐步下降,8 个数据点滑动平均显示平均值从 1.94 Ma 的 58% 下降到 1.63 Ma 的 42%; 而后快速上升至 62%, 随后在 1.58~1.07 Ma 期间保持稳定在 55% 上下波动,但在约 1.31 Ma 前后具有明显的分

界(图 2a)。

钾元素含量为 1.6%~0.7%, 不具有明显的冰期-间冰期差异,冰期和间冰期的平均值都为约 1.1%。与碳酸盐含量的冰期-间冰期以及长期变化趋势相反,钾元素含量在 2~1.63 Ma 期间逐渐增高; 在 1.63 Ma 开始短暂快速下降后于 1.58~1.07 Ma

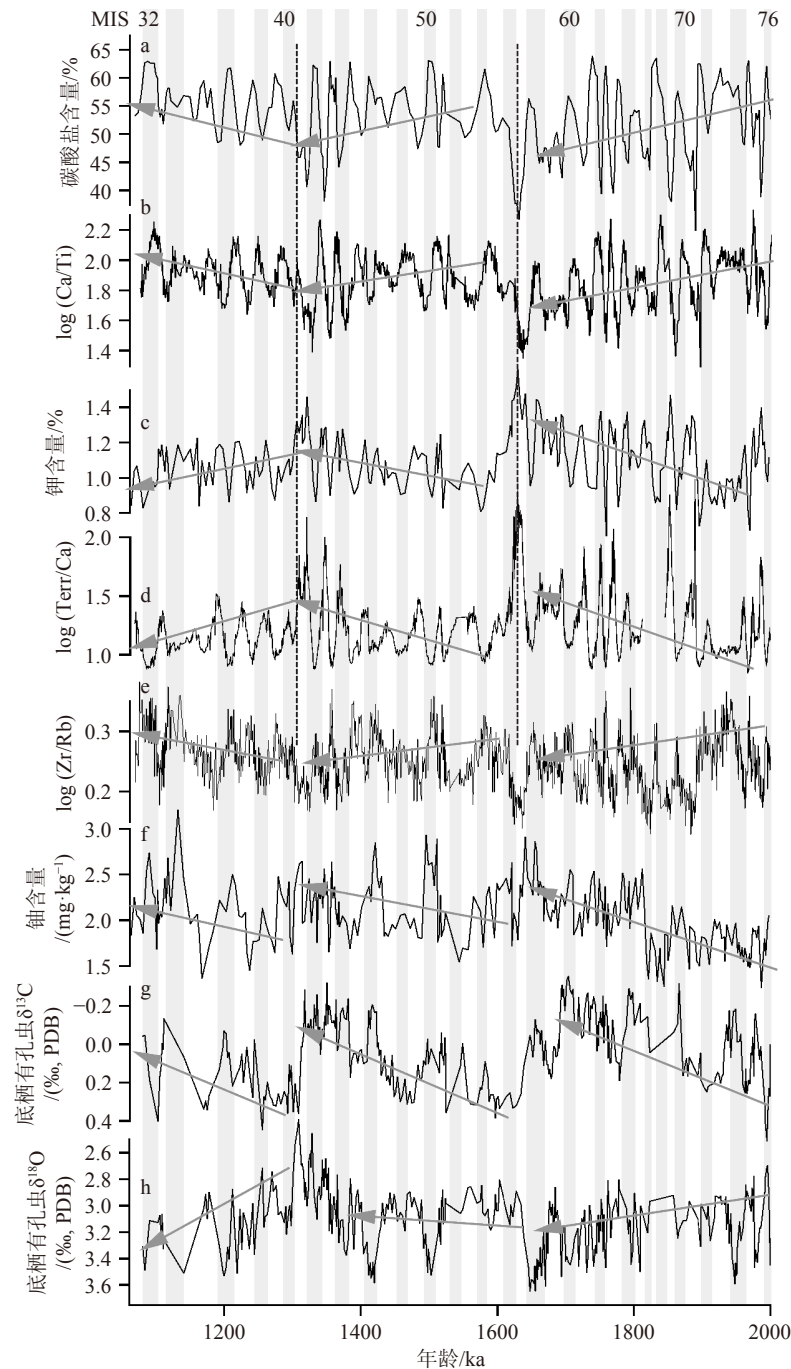


图 2 IODP U1482 站 2~1.07 Ma 期间碳酸盐含量与其他指标对比

a: 碳酸盐含量, b: $\log(\text{Ca}/\text{Ti})$, c: 钾含量, d: $\log(\text{Terr}/\text{Ca})$, e: $\log(\text{Zr}/\text{Rb})$, f: 铀含量, g: 底栖有孔虫 $\delta^{13}\text{C}^{[14]}$, h: 底栖有孔虫 $\delta^{18}\text{O}^{[14]}$ 。

Fig.2 Comparison of carbonate content and other proxies from IODP Site U1482 during 2~1.07 Ma

a: Carbonate content, b: $\log(\text{Ca}/\text{Ti})$, c: potassium content, d: $\log(\text{Terr}/\text{Ca})$, e: $\log(\text{Zr}/\text{Rb})$, f: uranium content, g: benthic foraminiferal $\delta^{13}\text{C}^{[14]}$, h: benthic foraminiferal $\delta^{18}\text{O}^{[14]}$.

期间基本在 1% 上下波动, 此期间在约 1.31 Ma 前后也具有明显的分界(图 2b)。

铀元素含量为 3.2 ~ 1.3 mg/kg, 具有较为明显的冰期-间冰期差异, 总体上在冰期时较高, 平均值为 2.12 mg/kg; 在间冰期时较低, 平均值为 1.99 mg/kg。冰期-间冰期变化上, U1482 站铀元素含量与底栖有孔虫 $\delta^{13}\text{C}$ 有较好的对应关系, 铀元素高值对应底栖 $\delta^{13}\text{C}$ 的负偏(图 2)。两者长期趋势的对应关系较好, 与前述的钾元素和碳酸盐含量一样, 明显具有 2~1.63 Ma、1.63~1.31 Ma 和 1.31~1.07 Ma 三个阶段的变化。2~1.63 Ma 铀元素上升, $\delta^{13}\text{C}$ 呈逐渐负偏的趋势; 在约 1.63 Ma 铀元素含量达到峰值而后降低, $\delta^{13}\text{C}$ 正偏达到短期内的最重值, 之后铀元素含量总体在一些冰期保持较高的水平, $\delta^{13}\text{C}$ 在约 1.31 Ma 逐渐负偏; 约 1.31 Ma 时, $\delta^{13}\text{C}$ 快速正偏, 随后与 1.63~1.31 Ma 期间的趋势一样逐渐负偏, 而铀元素含量也同样在冰期时保持较高的水平, 没有明显的长期变化趋势。铀元素含量和 $\delta^{13}\text{C}$ 两组数据之间长短期趋势较好的一致性为两者作为生产力指标提供

了相互验证。

将 XRF 元素比值与上述碳酸盐含量和钾、铀元素含量等数据进行对比(图 2), 结果显示 $\log(\text{Ca}/\text{Ti})$ 与碳酸盐具有一致的周期性以及长期变化趋势, $\log(\text{Terr}/\text{Ca})$ 与钾含量的变化也基本吻合, 支撑了本文数据的可靠性。 $\log(\text{Zr}/\text{Rb})$ 具有冰期高、间冰期低的周期性以及 3 个阶段的长期变化, 即 2~1.63 Ma 期间逐渐降低, 1.63 Ma 后迅速上升并在 1.58~1.31 Ma 之间小幅下降, 随后在 1.31~1.07 Ma 之间呈现上升的趋势。

频谱分析结果显示, 碳酸盐含量和钾含量均具有显著的约 19 ka 和约 29 ka 周期以及稍弱的约 23 ka 周期(图 3a); 相比较, 铀含量的变化在 ~82 ka 周期上明显, 约 38 ka 的周期信号接近 90% 置信度(图 3b)。碳酸盐含量交叉频谱分析显示它们在约 29、23 和 19 ka 周期上显著相关(图 3c)。其中, 在 29 ka 周期上, 二者的相位差约为 180°; 在岁差周期上, 钾含量滞后于碳酸盐含量约 124°。尽管碳酸盐含量和铀含量的交叉频谱分析显示二者在约 38 ka 和 26 ka

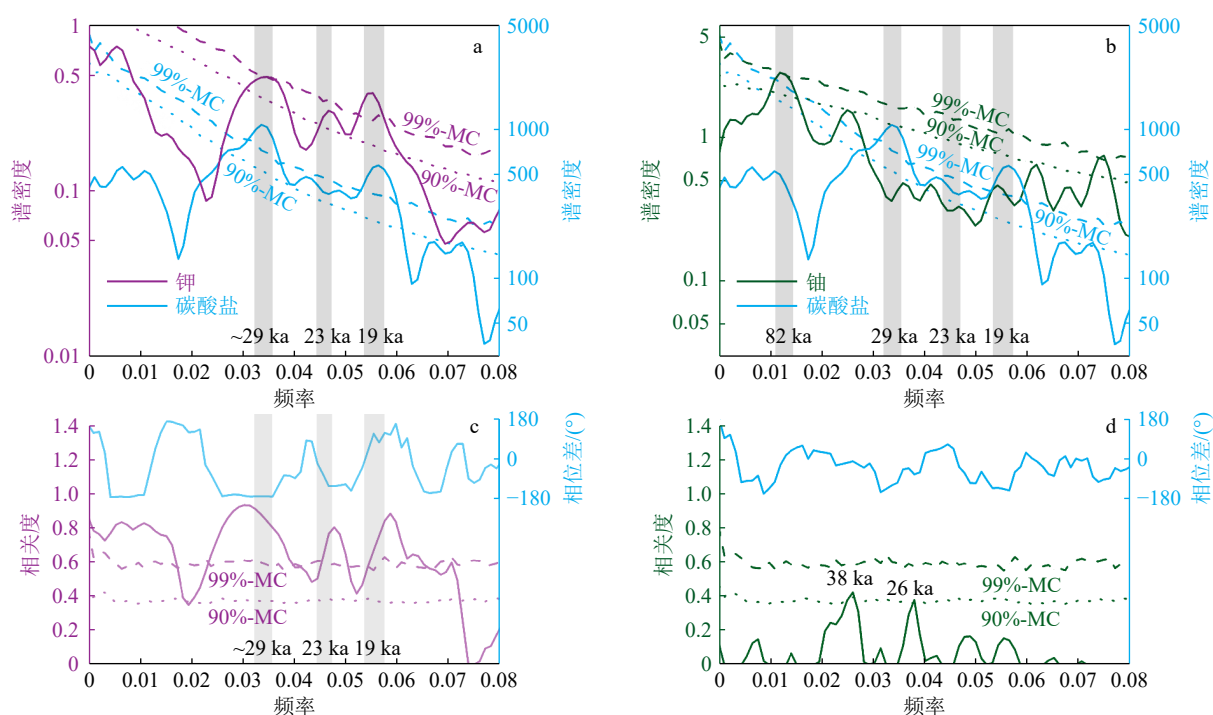


图 3 IODP U1482 站 2~1.07 Ma 期间碳酸盐含量与钾、铀元素记录的周期相关性以及相位关系

a: 碳酸盐含量频谱(灰色)与钾元素含量频谱(黑色), b: 碳酸盐含量频谱(灰色)与铀元素含量频谱(黑色), c: 碳酸盐含量与钾元素含量的频谱相关性与相位关系, d: 碳酸盐含量与铀元素含量的频谱相关性与相位关系。频谱分析采用 Redfit-X 软件^[37]。

Fig.3 Spectral coherence and phase relationship between carbonate content and elemental records of potassium and uranium from IODP Site U1482 during 2~1.07 Ma

a: Spectra of carbonate content (gray) and potassium content (black), b: spectra of carbonate content (gray) and uranium content (black), c: coherence and phase relationship between carbonate content and potassium content, d: coherence and phase relationship between carbonate content and uranium content. Spectral analyses were performed using Redfit-X^[37].

周期上微弱相关(超过 90% 置信度),但二者各自的频谱排除它们在这两个周期上相关的有效性。

4 讨论

4.1 表层生产力、陆源输入稀释和溶解作用对碳酸盐含量的影响

深海沉积物中碳酸盐含量主要受碳酸盐溶解、陆源输入稀释和表层生产力等 3 个因素的影响^[38],而这 3 个因素自身也反映着海洋环境与气候的变化。因此,为了探讨沉积物中碳酸盐含量变化的古海洋学意义,我们首先对这 3 个因素进行剖析。

4.1.1 碳酸盐溶解作用

碳酸盐在海洋中的溶解主要发生在两个层位:水深 1000 m 之上的海洋上层^[39]和溶跃面深度之下水层^[40]。海洋上层的碳酸盐溶解主要发生于溶解度较大的碳酸盐种类,例如文石和镁方解石^[41]。由于碳酸盐溶解度随着水深的增加而增大,在溶跃面之下碳酸盐开始溶解,至碳酸盐补偿深度(carbonate compensation depth; CCD)以下,碳酸盐则被溶解殆尽^[4]。U1482 站位水深为 1466 m,位于印度洋溶跃面之上^[41];因此,该站有孔虫方解石壳体的溶解应尚未开始。

总体上,本文研究时段的 U1482 站钻孔岩芯中碳酸盐的保存状况良好。一方面,沉积物中保存有少量代表着文石质碳酸盐沉积的翼足类壳体及其碎片;另一方面,航次船测(扫描电镜)结果显示,U1482 站 A 孔 345.24 m 以上岩芯中浮游有孔虫 *Trilobatus trilobus* 和底栖有孔虫 *Planulina wuellerstorfi* 的壳体均保存良好,壳体表面呈玻璃光泽,内壁光滑,壳壁截面保存着典型的生物成因微颗粒结构,未见重结晶作用或溶解作用(图 4)^[8]。此外,Liu 等对比帝汶海区不同水深站位碳酸盐含量记录,发现间冰期时 3000 m 水深以下站位的碳酸盐溶解较为显著,而之上站位则相对轻微^[35]。结合 U1482 站水深,本文认为研究时段内的碳酸盐溶解较弱。

4.1.2 陆源输入的稀释作用

澳大利亚西北海域的陆源沉积物以河流输入为主,风尘输入为辅^[25,42]。澳大利亚西北部的降水量具有南高北低的梯度,随着河流输入量向南递减,在大陆边缘形成了东北高、西南低的沉积速率梯度。U1482 站靠近澳大利亚风尘输送带的北缘,在晚更新世的间冰期时,风尘对该站陆源沉积物的贡献通常大于 10%^[24]。因此,总体上澳洲夏季降水

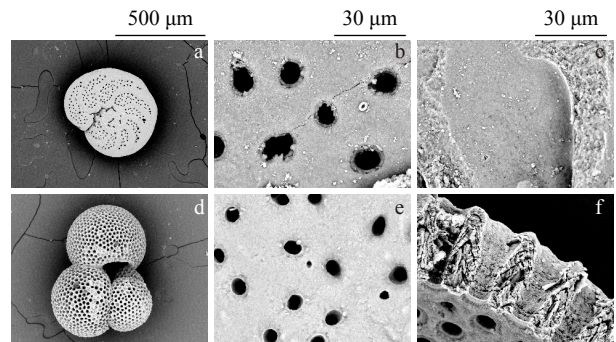


图 4 IODP U1482 站有孔虫壳体 and 碎片扫描电镜照片^[8]
a—c: *Planulina Wuellerstorfi*, d—f: *Trilobatus Trilobus*。样品取自 A 孔岩芯 145.12~145.17 m CCSF 处。

Fig. 4 Scanning electron microscope images of foraminiferal tests and fragments of IODP Site U1482

Tests and fragments of *Planulina Wuellerstorfi* (a-c) and *Trilobatus Trilobus* (d-f) are retrieved from Hole A between depths of 145.12 m and 145.17 m CCSF.

控制的河流输入和冬季信风带来的风尘输入对 U1482 站的陆源沉积物均有贡献。河流输入与风尘输入的相对贡献,可以通过沉积物地球化学指标进行定性判断。

U1482 站岩芯沉积物以灰绿色富黏土的微体化石软泥为主,其成分大体上由两类物质组成:海洋生物成因的碳酸钙壳体软泥和陆源的黏土矿物^[8]。二者此消彼长,因此它们的替代性指标也应当呈现反相关关系。钾作为活性较强的元素,在沉积物中的含量常被用于探讨降水量与河流输入的多寡^[43]。钾元素与碳酸盐含量记录显示二者在冰期-间冰期以及长时间尺度上均具有相反的变化趋势(图 2a、b);它们的交叉频谱分析结果也显示在约 29ka 和岁差周期上具有显著的反相关关系,相位差分别为约 180°和-124°(图 3)。作为指示风尘的常用指标^[44],log(Zr/Rb) 总体上在冰期-间冰期旋回中与指示河流输入的钾元素含量负相关,而与指示海洋生源的碳酸盐含量正相关(图 2)。这个结果一方面揭示了澳大利亚西北地区干湿的周期性旋回,即河流输入增加(钾含量高)时风尘输入降低(log(Zr/Rb)低),另一方面也显示陆源风尘输入与海洋碳酸盐生产同步增加,间接地指示了风尘输入可能不是 U1482 站陆源沉积物的主要成分。

碳酸盐与钾元素含量的负相关意味着海洋碳酸盐产量和陆源输入存在着相互稀释的可能性。碳酸盐和钾元素含量与其二者对应的堆积速率对比显示,碳酸盐堆积速率与其含量之间的相关性较弱,而钾元素的堆积速率与其含量具有明显的相关

关系(图 5), 表明钾元素含量对陆源输入的良好指示以及陆源输入对碳酸盐含量的强烈稀释。碳酸盐与钾元素含量均具有显著的岁差周期并强烈相关(图 3), 可能指示当太阳辐射较强时, 随着澳洲西北降水量的增加, 河流输入的稀释作用加强, 因而碳酸盐含量降低。

4.1.3 表层生产力对碳酸盐含量的贡献

深海沉积物中的铀主要由碎屑铀和自生铀构成。其中, 碎屑铀可能来自澳大利亚内陆广泛出露的火成岩, 并通过风尘搬运至澳大利亚近海^[45]。自生铀在还原态的海洋环境下生成。由于表层沉积物中有机碳的多寡控制了沉积物-海水界面的氧化还原环境, 自生铀的多寡也可能指示了澳洲岸外沉积物中有机质的含量^[46-48]。因此, U1482 站铀含量可能指示了风尘输入强度或者有机质的生产力。

指示风尘输入的 $\log(\text{Zr/Rb})$ 与铀元素含量均具有冰期高、间冰期低的周期性, 这一方面可能指示了风尘输入对铀元素含量的影响, 另一方面也可能指示这两个记录均受斜率周期上冬季风变化的影

响。 $\log(\text{Zr/Rb})$ 具有强烈的岁差信号(图 6), 而铀元素的岁差周期不明显(图 3b), 可能表明风尘输入与铀元素含量在岁差周期上不具有相关性。而在长期变化上, $\log(\text{Zr/Rb})$ 与铀元素的相关程度较差, 甚至变化相反, 比如 2~1.63 Ma 期间 $\log(\text{Zr/Rb})$ 的降低与铀元素含量的增加以及 1.58~1.31 Ma 期间 $\log(\text{Zr/Rb})$ 的升高与铀元素含量的降低。U1483 站的总氮含量指示了该站的有机质含量^[48], 将其与铀元素含量进行对比, 结果显示二者均在 2~1.63 Ma 期间呈现上升趋势, 且周期性变化也比较一致(图 7b)。因此, 铀元素含量的长期变化可能与风尘输入的关系较弱, 而与沉积物中有机质含量具有更强的相关性, 这一点与澳洲西部岸外 U1483 站和 U1460 站记录的情况类似^[48-49]。

U1482 站早更新世底栖 $\delta^{13}\text{C}$ 显示出不同于全球底栖 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化趋势^[14], 可能反映了该站底层水的营养水平, 其值偏负(即 ^{12}C 富集)指示底层水溶解有机碳含量高。铀元素含量和底栖 $\delta^{13}\text{C}$ 具有相似的冰期-间冰期以及长期变化的趋势(图 2), 可能指

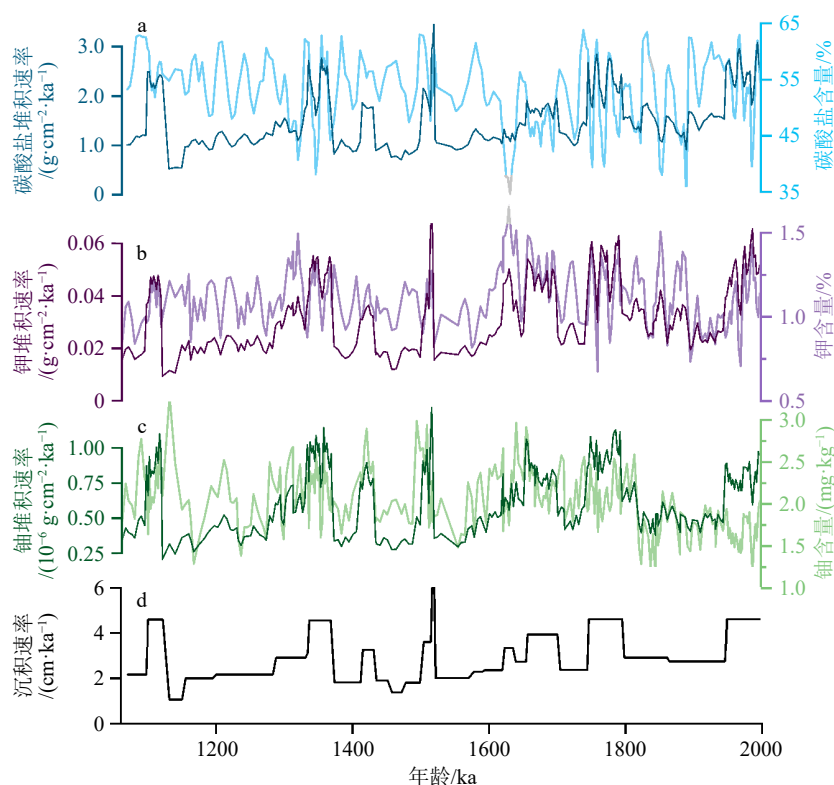


图 5 IODP U1482 站 2~1.07 Ma 期间碳酸盐、钾和铀元素含量及其堆积速率

a: 碳酸盐含量(灰色线)与堆积速率(黑色线), b: 钾元素含量(灰色线)与堆积速率(黑色线), c: 铀元素含量(灰色线)与堆积速率(黑色线), d: U1482 站线性沉积速率。

Fig.5 Mass accumulation rates and contents of carbonate, potassium, and uranium of IODP Site U1482 during 2~1.07 Ma

a: Carbonate content (grey) and mass accumulation rate (black), b: potassium content (grey) and mass accumulation rate (black), c: uranium content (grey) and mass accumulation rate (black), d: linear sedimentation rate at Site U1482.

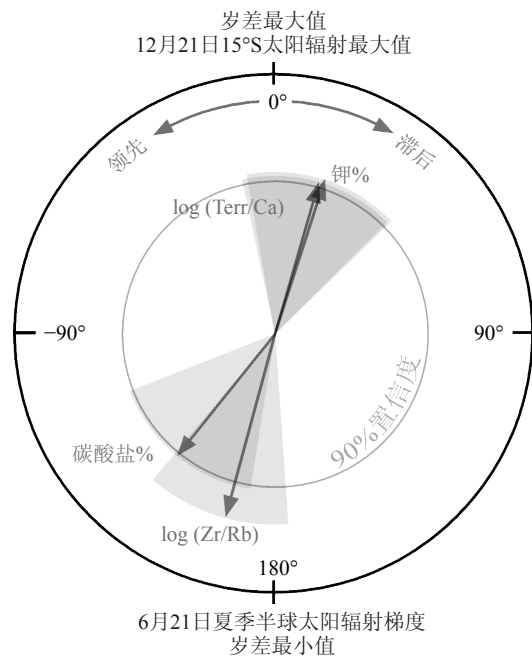


图6 IODP U1482站2~1.07 Ma期间碳酸盐含量和陆源输入记录与岁差的相位关系

0相位设在岁差最大值。深灰色箭头长度与外圈半径之比为各记录在23 ka周期上与岁差的相关度。浅灰色扇形指代相位误差。6月21日夏季半球太阳辐射梯度为23°N与23°S之间太阳辐射量的差值。交叉频谱分析采用Redfit-X软件^[37]。

Fig.6 Relationship in phase between carbonate content and terrestrial input records on the precessional band from IODP Site U1482 during 2~1.07 Ma

Phase zero was set at the precessional maxima. The ratio of the length of each vector to the radius of the outer circle corresponds to coherency. Shadings denote uncertainties of phase relationship. Summer intertropical insolation gradient on June 21 is the difference of June 21 insolation between at 23°N and 23°S. Cross-spectral analyses were performed using Redfit-X^[37].

示生产力高时有机碳的生产和埋藏增加,微生物呼吸作用增强,降低了底层水和沉积物表层孔隙水中的氧含量,自生铀含量增加。频谱分析显示铀元素与碳酸盐含量不具有一致的周期性(图3)。因此,碳酸盐含量受生产力的影响应当较弱。

近年来沉积物中铀元素含量被广泛用作底层水与沉积物界面的营养水平指标^[46-48]。当沉积物孔隙水的氧含量降低,易溶的六价铀被还原为不易溶的四价铀;受水体缺氧而沉淀下来的固态铀化合物被称为“自生铀”,用以区别于碎屑来源的铀^[46]。大陆架与大陆坡上沉积物-海水界面的Eh值往往接近于促使自生铀生成的值,使得大陆边缘沉积物中固态铀含量的变化对孔隙水含氧量的变化十分敏感^[46]。与此同时,海水中溶解态的铀离子往往倾向于与颗粒态有机碳结合^[47]。因此,当沉积物中的有机碳含

量增加,沉积物中细菌的呼吸作用随之增强,降低了孔隙水中的含氧量,有利于铀离子还原为固态的化合物;同时,与颗粒态有机碳结合的铀离子也随之增多,进一步提高了沉积物中的铀含量。综上,本文在澳洲西北岸外大陆边缘获得的铀含量记录应当较好地体现了自生铀与有机碳的变化趋势。此外,U1482站底栖 $\delta^{13}\text{C}$ 与铀元素含量变化的相似性(图2),以及澳洲西北岸外U1460站更新世沉积记录中的铀含量与总有机碳含量的相似性^[49],进一步显示出铀元素含量指示本地区有机生产力的可行性。

4.2 陆源输入和碳酸盐含量的阶段性变化及其对区域气候的响应

U1482站碳酸盐含量、钾元素含量、 $\log(\text{Zr/Rb})$ 、底栖 $\delta^{13}\text{C}$ 和铀元素含量,均以约1.63 Ma和约1.31 Ma为界呈现3个阶段的长期变化趋势(图2),表明海洋表层生产力、底层水营养水平、澳洲河流和风尘输入等在长期变化上都受某个或几种共同因素的影响。其中,底层水营养水平不完全取决于但间接地与海洋表层生产力相关,而作为海洋表层生产力指标的碳酸盐含量自身却受河流携带而至的陆源输入稀释的影响。考虑到钾元素指示的澳洲河流输入和 $\log(\text{Zr/Rb})$ 指示的风尘输入存在着大致类似的阶段性趋势,并在冰期-间冰期时间尺度上显示出相反的变化(图2),它们在约1.63 Ma和1.31 Ma的明显转折,应当指示了澳洲干湿气候的阶段性事件。

印尼海道的收缩与巴拿马海道的关闭分别促进了西北太平洋暖水的堆积和赤道东太平洋冷舌的发育,进而导致纬向沃克(Walker)环流的逐步增强^[50]。同时,随着北半球冰盖的扩张与南北温度梯度的增加,经向哈德莱(Hadley)环流逐渐增强,可能进一步影响印尼—澳洲地区干湿条件的变化^[51]。人们通常将南海表层海水温度的南北梯度视为哈德莱环流强度的指标,将赤道太平洋东西温度梯度看作沃克环流强度的指标。1.63 Ma之前,赤道太平洋纬向温度梯度以及南海经向温度梯度均有所增加^[52](图7),可能指示沃克环流和哈德莱环流的增强。U1482站1.63 Ma之前钾元素含量的持续增加可能指示了大气环流对澳洲西北降水的影响:一方面,沃克环流增强,印尼—澳洲地区水汽供应增多,河流输入增加,导致沉积物中钾含量增加(图7b);另一方面,哈德莱环流增强,可能导致澳洲内陆进一步干旱,从而解释钾埋藏速率相对于钾含量而言不甚显著的变化(图5b)。与此同时,印尼—澳洲地

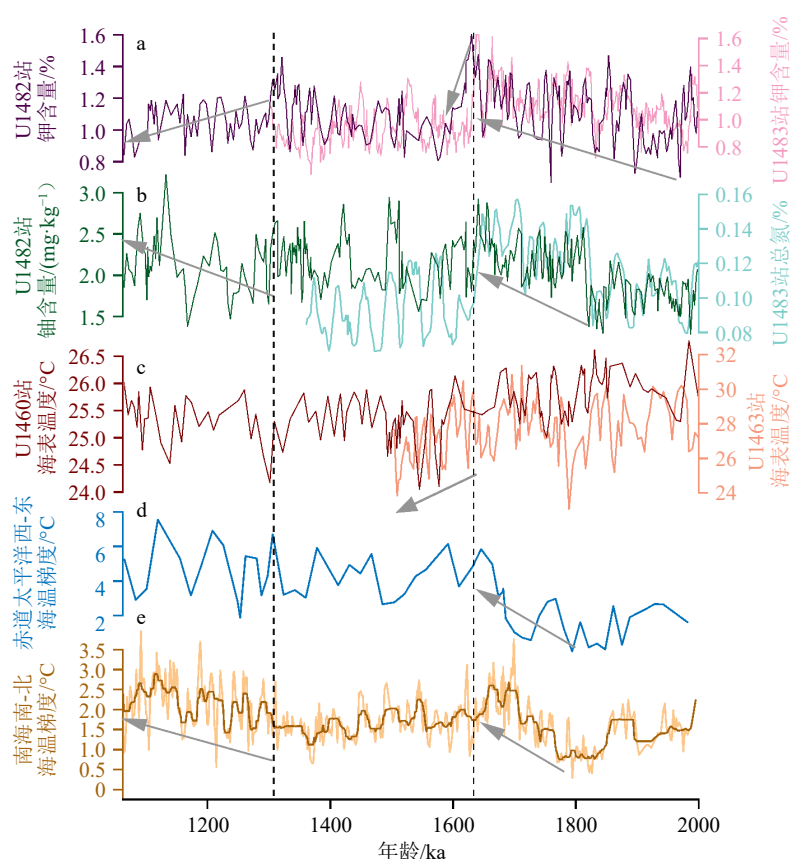


图 7 U1482 站和邻近站位古海洋记录与太平洋经向和纬向温度梯度对比

a: U1482 站与 U1483 站钾元素含量对比^[48], b: U1482 站铀元素含量与 U1483 站总氮含量对比^[48], c: U1460 站^[53]与 U1463 站表层海水温度^[54]记录, d: 赤道太平洋纬向温度梯度^[55], e: 南海经向温度梯度^[52,56]。

Fig.7 Comparison of paleoceanographic records of Site U1482 and its neighboring sites with meridional and zonal temperature gradients of the Pacific Ocean

a: Comparison in potassium contents between Sites U1482 and U1483^[48], b: comparison between U1482 uranium content and U1483 total nitrogen content^[48], c: sea surface temperature records from Sites U1460^[53] and U1463^[54], d: zonal temperature gradient in the equatorial Pacific Ocean^[55], e: meridional temperature gradient in the South China Sea^[52,56].

区丰沛的降水增加了区域河流淡水的输入,可能加强了淡水盖层的稳定性及其对生产力的抑制作用,导致这一时期碳酸盐含量与堆积速率的下降。

1.63~1.58 Ma 期间, U1482 站钾元素含量突然降低,可能指示澳洲内陆短暂的干旱化趋势,这一点与 U1483 站的情况类似(图 7a)。同时期,鲁汶流的表层海水温度也突然降低(图 7c),可能与 ITF 的收缩有关^[53-54]。ITF 的收缩减少了南向的热量与水汽输送,导致降水减少与干旱加剧。1.58~1.31 Ma 期间,太平洋与南海温度梯度均显示出相对平稳持续降低的变化趋势;南海温度梯度的小幅下降可能引起澳洲下沉气流的减弱,导致钾含量在 1.58~1.31 Ma 期间小幅度的上升趋势。

在 1.31~1.07 Ma 期间,钾元素含量与埋藏速率均下降, $\log(\text{Zr}/\text{Rb})$ 上升,显示这一时期澳洲西北部的干旱化趋势,可能与这一时期哈德莱环流的加强

而沃克环流变化不大有关(图 7)。这一短期的干旱化趋势折射出早更新世以来澳洲北部气候的长期趋势,即长期的、不可逆的干旱化^[57-58]。一方面,更新世以来全球二氧化碳浓度与平均气温逐渐下降,可能减少了印尼—澳洲地区水汽的蒸发,同时削弱了东南印度洋热带气旋的活动,从而减少了澳洲西北部的降水活动;另一方面,随着经向温度梯度的增加,哈德莱环流日益增强,强化了副热带澳洲内陆的大气下沉作用,促进了澳洲内陆的干旱化^[13,59]。这一时期干旱化的加强,降低了陆源输入的稀释作用,因而 U1482 站的碳酸盐含量呈增加的趋势(图 2、图 7)。

4.3 陆源输入和碳酸盐含量变化的周期性及其影响因素

碳酸盐含量、钾元素含量和 $\log(\text{Zr}/\text{Rb})$ 均具有

强烈的岁差周期(图3a、图6)。考虑到碳酸盐含量受生产力的影响可能较弱,因此这一岁差周期更可能来自陆源输入的周期性变化。相对于岁差最小值, $\log(\text{Zr/Rb})$ 滞后约 17.6° (图6), 可能指示当夏季半球太阳辐射梯度达到最高时, 澳洲冬季风达到最强, 带来了更多的风尘输入。相对于岁差最大值, 钾元素含量滞后约 17.9° , 可能反映当南半球低纬度夏季辐射量达到最大值时, 区域内热带气旋的活跃程度增加, 增加了短时强降水的频次, 进而增强了河流输入。这与U1482站晚更新世的降水记录类似^[24], 但与晚更新世不同的是, 早更新世更高的大气二氧化碳浓度可能形成了更高的表层海水温度, 使得热带东印度洋的海温长期高于 $26\sim 27^\circ\text{C}$ 的温度阈值(图7c), 导致热带气旋的活动不局限于间冰期。

值得注意的是, 碳酸盐与钾元素含量均具有强烈的29 ka周期(图3)。碳酸盐含量的频谱分析显示其在35 ka和29 ka上的置信程度均高于95%。其中, 35 ka周期曾被认为是斜率周期与岁差周期的叠加 ($1/35\text{ ka} = 1/19\text{ ka} - 1/41\text{ ka}$), 而29 ka则被理解为斜率周期与偏心率周期的叠加 ($1/29\text{ ka} = 1/100\text{ ka} + 1/41\text{ ka}$)^[60]。29 ka的周期广泛出现在赤道附近的钻孔沉积物中^[35,60-61]。赤道太平洋颗石藻埋藏的30 ka周期被解释为受二氧化碳波动控制的生产力变化^[61]; 而孟加拉湾陆源沉积中的29 ka周期被解释为亚洲夏季风与大陆风化强度的波动^[60]。如前述讨论, U1482站沉积物中的碳酸盐含量主要受陆源输入的影响。因此, 该站碳酸盐与钾元素含量的29 ka周期可能指示了陆源输入的周期性变化, 反映区域降水受某种气候因素的调控。

区域气候除了受地球轨道参数调控的太阳辐射量影响之外, 也受全球或区域海平面变化的调控。间冰期时海平面升高, 印尼—澳洲地区海域面积增加, 蒸发量增大, 促进了区域降水形成; 冰期时海平面降低, 大陆架裸露面积增加, 蒸发量减少, 抑制了降水^[62-63]。印尼—澳洲地区广袤的巽他陆架和萨胡尔陆架使得海平面升降对气候的调控作用成为可能。此外, 区域降水量的多寡也可能与大气二氧化碳浓度以及气温的高低有关。大气二氧化碳浓度达到高值时, 区域平均气温升高, 蒸发量与降水增加; 反之, 气温降低, 降水减少。大气二氧化碳浓度与全球海平面之间具有较强相关性, 在研究时间范围内具有强烈的41 ka斜率周期^[64]。因此, 两者可能在斜率周期上调节太阳辐射量在岁差周期上调控的蒸发量, 从而在沉积记录中留下了29 ka

周期的混合信号。

5 结论

(1) U1482站早更新世沉积物中碳酸盐含量受到陆源沉积物的稀释作用较为明显, 而受到碳酸盐溶解作用和表层生产力的影响则较弱。

(2) 本文分析的所有记录, 包括碳酸盐含量、钾元素含量、 $\log(\text{Zr/Rb})$ 、铀元素含量以及底栖有孔虫 $\delta^{13}\text{C}$ 等均呈现 $2\sim 1.63\text{ Ma}$ 、 $1.63\sim 1.31\text{ Ma}$ 和 $1.31\sim 1.07\text{ Ma}$ 等3个阶段性的长期变化趋势。与赤道太平洋纬向温度梯度和南海经向温度梯度的对比揭示, 印尼—澳洲地区干湿的变化可能受控于沃克环流和哈德莱环流。自1.31 Ma开始, 哈德莱环流的加强可能导致澳洲西北内陆的干旱化趋势, 降低了通过河流向U1482站的陆源输入, 使得钾元素含量呈现下降, 而碳酸盐含量呈现增加的趋势。

(3) 碳酸盐含量呈现冰期-间冰期周期性变化的特征, 而钾含量不具有明显的冰期旋回性; 频谱分析显示二者均具有显著的19 ka岁差和约29 ka的变化周期, 可能指示该研究时段内以斜率周期为主导的冰期-间冰期旋回对区域降水和陆源沉积物输入的调控作用。

致谢: 感谢中国科学院地球环境研究所樊惠敏、西北大学地质学系可菲、孙金梁在样品测试环节提供的帮助; 同时感谢IODP 363航次科学家提供的样品。

参考文献 (References)

- [1] Zeebe R E, Westbroek P. A simple model for the CaCO_3 saturation state of the ocean: the "Strangelove," the "Neritan," and the "Cretan" Ocean[J]. *Geochemistry*, 2003, 4(12): 1104.
- [2] Ridgwell A. A Mid Mesozoic Revolution in the regulation of ocean chemistry[J]. *Marine Geology*, 2005, 217(3-4): 339-357.
- [3] Zhang Y G, Pagani M, Liu Z H, et al. A 40-million-year history of atmospheric CO_2 [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 2013, 371(2001): 20130096.
- [4] Ridgwell A, Zeebe R E. The role of the global carbonate cycle in the regulation and evolution of the earth system[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 234(3-4): 299-315.
- [5] Raymo M E, Ruddiman W F, Froelich P N. Influence of late Cenozoic mountain building on ocean geochemical cycles[J]. *Geology*, 1988, 16(7): 649-653.
- [6] Berner R A, Lasaga A C, Garrels R M. The carbonate-silicate geochemical cycle and its effect on atmospheric carbon dioxide over the past 100 million years[J]. *American Journal of Science*, 1983, 283(7):

- 641-683.
- [7] Pagani M, Liu Z H, LaRiviere J, et al. High Earth-system climate sensitivity determined from Pliocene carbon dioxide concentrations[J]. *Nature Geoscience*, 2010, 3: 27-30.
- [8] Rosenthal Y, Holbourn A E, Kulhanek D K, et al. Western Pacific Warm Pool[M]. College Station: International Ocean Discovery Program, 2018.
- [9] Straume E O, Nummelin A, Gaina C, et al. Climate transition at the Eocene-Oligocene influenced by bathymetric changes to the Atlantic-Arctic oceanic gateways[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2022, 119(17): e2115346119.
- [10] Wei J L, Liu H L, Zhao Y, et al. Simulation of the climate and ocean circulations in the middle Miocene climate optimum by a coupled model FGOALS-g3[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2023, 617: 111509.
- [11] Gordon A L. Oceanography of the Indonesian seas[J]. *Oceanography*, 2005, 18(4): 13.
- [12] Cane M A, Molnar P. Closing of the Indonesian seaway as a precursor to east African aridification around 3-4 million years ago[J]. *Nature*, 2001, 411(6834): 157-162.
- [13] He Y X, Wang H Y, Liu Z H. Development of the Leeuwin Current on the northwest shelf of Australia through the Pliocene-Pleistocene period[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2021, 559: 116767.
- [14] Chen Y X, Xu J, Liu J, et al. Climatic and tectonic constraints on the Plio-Pleistocene evolution of the Indonesian Throughflow intermediate water recorded by benthic $\delta^{18}\text{O}$ from IODP site U1482[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2022, 295: 107666.
- [15] Gordon A L, Susanto R D, Vranes K. Cool Indonesian throughflow as a consequence of restricted surface layer flow[J]. *Nature*, 2003, 425(6960): 824-828.
- [16] Kuhnt W, Holbourn A, Hall R, et al. Neogene history of the Indonesian throughflow[M]//Clift P, Kuhnt W, Wang P, et al. *Continent - Ocean Interactions Within East Asian Marginal Seas*. Washington: American Geophysical Union, 2004: 299-320.
- [17] Talley L D, Sprintall J. Deep expression of the Indonesian Throughflow: Indonesian intermediate water in the South Equatorial Current[J]. *Journal of Geophysical Research:Oceans*, 2005, 110(C10): C10009.
- [18] Sprintall J, Wijffels S E, Molcard R, et al. Direct estimates of the Indonesian Throughflow entering the Indian Ocean: 2004-2006[J]. *Journal of Geophysical Research:Oceans*, 2009, 114(C7): C07001.
- [19] Rosenthal Y, Linsley B K, Oppo D W. Pacific Ocean heat content during the past 10, 000 years[J]. *Science*, 2013, 342(6158): 617-621.
- [20] 李铁刚, 熊志方, 贾奇. 晚中新世以来印度洋-太平洋暖池水体交换过程及其气候效应 [J]. *海洋科学进展*, 2020, 38(3): 377-389. [LI Tiegang, XIONG Zhifang, JIA Qi. Water exchange between western Pacific warm pool and Indian warm pool and its climatic effects since the late Miocene[J]. *Advances in Marine Science*, 2020, 38(3): 377-389.]
- [21] Furnas M J, Carpenter E J. Primary production in the tropical continental shelf seas bordering northern Australia[J]. *Continental Shelf Research*, 2016, 129: 33-48.
- [22] Marin M, Feng M. Intra-annual variability of the North West Shelf of Australia and its impact on the Holloway Current: excitement and propagation of coastally trapped waves[J]. *Continental Shelf Research*, 2019, 186: 88-103.
- [23] Condie S A, Dunn J R. Seasonal characteristics of the surface mixed layer in the Australasian region: implications for primary production regimes and biogeography[J]. *Marine and Freshwater Research*, 2006, 57(6): 569-590.
- [24] Pei R J, Kuhnt W, Holbourn A, et al. Monitoring Australian Monsoon variability over the past four glacial cycles[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2021, 568: 110280.
- [25] Sarim M, Xu J, Zhang P, et al. Late quaternary clay mineral and grain-size records from northwest Australia and their implications for paleoclimate, ocean currents, and paleodrainage of the Bonaparte basin[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2023, 610: 111353.
- [26] Hesse P P, McTainsh G H. Australian dust deposits: modern processes and the Quaternary record[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2003, 22(18-19): 2007-2035.
- [27] Kuhnt W, Holbourn A, Schönfeld J, et al. Cruise report Sonne 257, WACHEIO - Western Australian climate history from eastern Indian ocean sediment archives[R]. Darwin-Fremantle: Institut für Geowissenschaften, Christian-Albrechts-Universität Kiel, 2017.
- [28] Boyer T P, Garcia H E, Locarnini R A, et al. World Ocean Atlas 2018: sea surface temperature[DB/OL]. NOAA National Centers for Environmental Information. [2022-10-24]. <https://www.ncei.noaa.gov/archive/accession/NCEI-WOA18>.
- [29] Schlitzer R. Ocean data view[CP/DK]. [2023-10-25]. <https://odv.awi.de>.
- [30] NASA. SeaWiFS Mission page[DB/OL]. [2023-04-07]. <https://ocean-color.gsfc.nasa.gov/>.
- [31] Murgese D S, de Deckker P. The Late Quaternary evolution of water masses in the eastern Indian Ocean between Australia and Indonesia, based on benthic foraminifera faunal and carbon isotopes analyses[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2007, 247(3-4): 382-401.
- [32] de Deckker P, Barrows T T, Rogers J. Land-sea correlations in the Australian region: post-glacial onset of the monsoon in northwestern Western Australia[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2014, 105: 181-194.
- [33] Holbourn A, Kuhnt W, Kawamura H, et al. Orbitally paced paleoproductivity variations in the Timor Sea and Indonesian Throughflow variability during the last 460 kyr[J]. *Paleoceanography*, 2005, 20(3): PA3002.
- [34] Lo Giudice Cappelli E, Holbourn A, Kuhnt W, et al. Changes in Timor Strait hydrology and thermocline structure during the past 130 ka[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2016, 462: 112-124.
- [35] Liu W, Baudin F, Moreno E, et al. Comparison of 240 ka long organic carbon and carbonate records along a depth transect in the Timor Sea: primary signals versus preservation changes[J]. *Paleoceanography*, 2014, 29(5): 389-402.
- [36] de Vleeschouwer D, Dunlea A G, Auer G, et al. Quantifying K, U, and Th contents of marine sediments using shipboard natural gamma radi-

- ation spectra measured on DV *JOIDES Resolution*[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2017, 18(3): 1053-1064.
- [37] Ólafsdóttir K B, Schulz M, Mudelsee M. REDFIT-X: cross-spectral analysis of unevenly spaced paleoclimate time series[J]. *Computers & Geosciences*, 2016, 91: 11-18.
- [38] 汪品先. 西太平洋边缘海的冰期碳酸盐旋回 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1998, 18(1): 1-11. [WANG Pinxian. Glacial carbonate cycles in western Pacific marginal seas[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1998, 18(1): 1-11.]
- [39] Feely R A, Sabine C L, Lee K, et al. In situ calcium carbonate dissolution in the Pacific Ocean[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, 16(4): 1144.
- [40] Fischer G, Wefer G. Use of Proxies in Paleoceanography: Examples from the South Atlantic[M]. Berlin: Springer, 1999: 255-284.
- [41] Sulpis O, Jeansson E, Dinuer A, et al. Calcium carbonate dissolution patterns in the ocean[J]. *Nature Geoscience*, 2021, 14(6): 423-428.
- [42] Kuhnt W, Holbourn A, Xu J, et al. Southern Hemisphere control on Australian monsoon variability during the late deglaciation and Holocene[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 5916.
- [43] Zhang P, Xu J, Holbourn A, et al. Obliquity induced latitudinal migration of the Intertropical Convergence Zone during the past ~ 410 kyr[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(21): e2022GL100039.
- [44] Liu L W, Chen J, Chen Y, et al. Variation of Zr/Rb ratios on the Loess Plateau of Central China during the last 130000 years and its implications for winter monsoon[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(15): 1298-1302.
- [45] Schofield A. Uranium Content of Igneous Rocks of Australia 1:5000000 Maps—Explanatory Notes and Discussion[M]. Canberra: Geoscience Australia, 2009: 20.
- [46] McManus J, Berelson W M, Klinkhammer G P, et al. Authigenic uranium: relationship to oxygen penetration depth and organic carbon rain[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, 69(1): 95-108.
- [47] Auer G, Hauzenberger C A, Reuter M, et al. Orbitally paced phosphogenesis in Mediterranean shallow marine carbonates during the middle Miocene Monterey event[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2016, 17(4): 1492-1510.
- [48] Zhang Y, Andrade T, Ravelo A C, et al. Aridification of northwest Australia and nutrient decline in the Timor sea during the 40 Kyr world[J]. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 2023, 38(10): e2023PA004683.
- [49] Auer G, Petrick B, Yoshimura T, et al. Intensified organic carbon burial on the Australian shelf after the Middle Pleistocene transition[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2021, 262: 106965.
- [50] Lea D W, Pak D K, Spero H J. Climate impact of late quaternary equatorial pacific sea surface temperature variations[J]. *Science*, 2000, 289(5485): 1719-1724.
- [51] Etourneau J, Schneider R, Blanz T, et al. Intensification of the Walker and Hadley atmospheric circulations during the Pliocene-Pleistocene climate transition[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 297(1-2): 103-110.
- [52] Herbert T D, Peterson L C, Lawrence K T, et al. Tropical ocean temperatures over the past 3.5 million years[J]. *Science*, 2010, 328(5985): 1530-1534.
- [53] Petrick B, Martínez-García A, Auer G, et al. Glacial Indonesian throughflow weakening across the mid-Pleistocene climatic transition[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 16995.
- [54] Smith R A, Castañeda I S, Groeneveld J, et al. Retracted: Plio-Pleistocene Indonesian throughflow variability drove eastern Indian ocean sea surface temperatures[J]. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 2020, 35(10): e2020PA003872.
- [55] Wara M W, Ravelo A C, Delaney M L. Permanent El Niño-like conditions during the Pliocene warm period[J]. *Science*, 2005, 309(5735): 758-761.
- [56] Li L, Li Q Y, Tian J, et al. A 4-Ma record of thermal evolution in the tropical western Pacific and its implications on climate change[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 309(1-2): 10-20.
- [57] Stuu J B W, De Deckker P, Saavedra-Pellitero M, et al. A 5.3-million-year history of monsoonal precipitation in northwestern Australia[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(12): 6946-6954.
- [58] Christensen B A, Renema W, Henderiks J, et al. Indonesian Throughflow drove Australian climate from humid Pliocene to arid Pleistocene[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(13): 6914-6925.
- [59] Fedorov A V, Brierley C M, Lawrence K T, et al. Patterns and mechanisms of early Pliocene warmth[J]. *Nature*, 2013, 496(7443): 43-49.
- [60] Chen H J, Xu Z K, Lim D, et al. Geochemical records of the provenance and silicate weathering/erosion from the eastern Arabian sea and their responses to the Indian summer monsoon since the mid-Pleistocene[J]. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 2020, 35(4): e2019PA003732.
- [61] Beaufort L, de Garidel-Thoron T, Mix A C, et al. ENSO-like forcing on oceanic primary production during the Late Pleistocene[J]. *Science*, 2001, 293(5539): 2440-2444.
- [62] Di Nezio P N, Timmermann A, Tierney J E, et al. The climate response of the Indo-Pacific warm pool to glacial sea level[J]. *Paleoceanography*, 2016, 31(6): 866-894.
- [63] Windler G, Tierney J E, DiNezio P N, et al. Shelf exposure influence on Indo-Pacific Warm Pool climate for the last 450, 000 years[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2019, 516: 66-76.
- [64] Liautaud P, Huybers P. Uniformitarian prediction of early-Pleistocene atmospheric CO₂[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(20): e2022GL100304.