



非洲东南纳塔尔海谷MIS12期以来的物质来源和古气候变化：IODP U1474孔黏土矿物记录

宋濠男, 张泳聪, 韩喜彬, 胡铤, 龙飞江

Provenance and climatic changes of the Natal Valley, Southeastern Africa since MIS12: the clay minerals records from Hole U1474, IODP361

SONG Haonan, ZHANG Yongcong, HAN Xibin, HU Bingyao, and LONG Feijiang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2021042001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

渤海沉积记录的末次冰期千年尺度古环境与古气候变化

Millennial-scale paleoenvironment and paleoclimate changes recorded in the Bohai Sea sediments during the last glacial period
海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(3): 61

粒度端元揭示的芝罘剖面末次间冰期—末次冰期气候环境变化特征

Climatic environment changes during the last interglacial-glacial cycle in Zhifu loess section: Revealed by grain-size end-member algorithm
海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(2): 177

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

海底地形特征对东菲律宾海表层黏土矿物分布的影响

IMPACT OF SEAFLOOR TOPOGRAPHY ON DISTRIBUTION OF CLAY MINERALS IN THE EAST PHILIPPINES SEA
海洋地质与第四纪地质. 2017, 37(1): 77

大洋溶解铁的物质来源及其同位素示踪

The sources of dissolved iron in the global ocean and isotopic tracing
海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(5): 46

2.5 Ma以来中国陆地孢粉记录反映的古气候变化

Climate changes on Chinese continent since 2.5 Ma: Evidence from fossil pollen records
海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(4): 175



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2021042001

非洲东南纳塔尔海谷 MIS12 期以来的物质来源和古气候变化:IODP U1474 孔黏土矿物记录

宋濠男^{1,2}, 张泳聪^{1,2}, 韩喜彬^{1,2}, 胡栢铤³, 龙飞江³

1. 自然资源部海底科学重点实验室, 杭州 310012

2. 自然资源部第二海洋研究所, 杭州 310012

3. 成都理工大学沉积地质研究院, 成都 610059

摘要: 氧同位素 (marine isotope stage, MIS) MIS12 期以来的气候环境变化对非洲东南部古人类的迁徙和演化影响甚远。非洲东南外海纳塔尔海谷 U1474 孔由 IODP 361 航次获取, 通过 X 射线衍射法 (XRD) 对前 20 m 共 149 个样品中的黏土矿物组成进行测试分析, 结果显示自 MIS12 期以来 U1474 站位的黏土矿物组成以蒙脱石为主, 平均含量为 39.23%; 其次为伊利石, 平均含量为 26.11%; 高岭石平均含量为 17.79%; 绿泥石含量最低, 平均含量为 17.19%; 伊利石的结晶度较好, 为 $0.35^\circ\Delta 2\theta$ ($< 0.4^\circ\Delta 2\theta$), 而且化学指数较低, 为 0.30 (< 0.43)。其组合特征意味着其主要由非洲东南部三大河流携带输入 (图盖拉河、林波波河和赞比西河)。U1474 孔黏土矿物组成和参数变化自 MIS12 期以来的变化指示了非洲东南部的气候变化, 其变化有着明显的冰期-间冰期旋回特征, 可划分为 5 个阶段, 每个阶段冰期寒冷干燥, 间冰期相对温暖湿润。在每个时期呈现出一定的亚轨道的气候波动异常, 常有冷暖、干湿波动的情形, 这可能受到区域大气环流和临近海流 (如厄加勒斯流) 的影响。

关键词: 物质来源; 古气候; 黏土矿物; 冰期-间冰期旋回; 氧同位素 MIS12 期; 纳塔尔海谷

中图分类号: P736.21

文献标识码: A

Provenance and climatic changes of the Natal Valley, Southeastern Africa since MIS12: the clay minerals records from Hole U1474, IODP361

SONG Haonan^{1,2}, ZHANG Yongcong^{1,2}, HAN Xibin^{1,2}, HU Bingyao³, LONG Feijiang³

1. Key Laboratory of Submarine Geosciences, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China

2. Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China

3. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract: Climatic and environmental changes have rendered great impacts on the migration and evolution of hominid in Southeast Africa, since the Marine Isotope Stage 12(MIS12). Clay mineral assemblages, contents and mineralogy of 149 sediment samples collected from the Hole U1474 by the Expedition 361 of the International Ocean Discovery Program(IODP), have been analyzed and measured with X-ray diffraction(XRD). The hole is located in the Natal Valley of Southeast Africa. The results show that the clay minerals are mainly composed of smectite(39.23% on average), illite (26.11% on average), kaolinite(17.79% on average)and minor chlorite(17.19% on average). The crystallinity of illite in all samples are high and on an average of $0.35^\circ\Delta 2\theta$ ($< 0.4^\circ\Delta 2\theta$), and the illite chemical indices are as low of 0.30(< 0.43 on average). The clay mineral assemblages of the Hole U1474 suggest a riverine source mainly derived from the three major rivers (the Tugela River, the Limpopo River and the Zambezi River)in Southeast Africa. The variation of clay mineral composition and related parameters of the Hole U1474 indicates that the climate changes in the Southeast Africa since MIS12 is obviously characterized by glacial-interglacial cycles and can be divided into five stages. Each stage is cold and dry during the glacial period, and relatively warm and humid during the interglacial period. In each period, there are some abnormal suborbital climate fluctuations, such as cold and warm, dry and wet fluctuations, affected by regional atmospheric circulation and adjacent ocean currents, such as the Agulhas Current.

Key words: provenance; paleoclimate; clay minerals; glacial-interglacial cycle; MIS12 Stage; Natal Valley

资助项目: 南极专项“南极重点海域对气候变化的响应和影响 (IRASCC2020-2022)”；极地考察业务化与科研项目“南大洋重点海域基础环境与海洋生物多样性观测——底质环境”；自然资源部第二海洋研究所基本科研业务费专项资金资助“临安基地样品馆柱状沉积物预处理系统建设”(YJJC2001)，“杭州西湖的形成与演化——基于自然和人文要素的研究”(YJJC2003)；上海交通大学“深蓝计划”基金“深海资源和沉积物的定量化激光诱导分解光谱方法及仪器研制”(SL2002)

作者简介: 宋濠男 (1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事海洋地质研究, E-mail: 494722509@qq.com

通讯作者: 韩喜彬 (1976—), 男, 副研究员, 主要从事海洋地质研究, E-mail: hanxibin@sio.org.cn

收稿日期: 2021-04-20; **改回日期:** 2021-06-14. 文凤英编辑

非洲东南部位于热带与亚热带大气环流系统的交界面上, 是全球气候变化的一个敏感区域^[1], 它的气候和环境变化直接影响到早期人类的迁移路径以及经济体系变化^[2-7], 其对非洲生态系统的影响也可能在人类进化中发挥了关键作用^[8]。特别是深海氧同位素 (Marine Isotope Stages, MIS) MIS12 期是中更新世时期气候的重要转折点, 其前后的全球气候环境特征存在明显的差异^[9-13], 全球的冰期-间冰期循环的振幅在 MIS12 期末期以后大幅增加, 并伴随着海洋中广泛的碳酸盐岩溶解^[14]。非洲东南部岸外的纳塔尔海谷 (Natal Valley) 在莫桑比克脊之西, 为一南北走向的沉积盆地 (图 1), 河流从非洲东南部带来的大量物质在此沉积, 巨厚的沉积物记录了该区域气候、环境和海洋演变的信息^[15-16], 流经此处的厄加勒斯海流控制着热量和盐分从印度-太平洋向大西洋的运输^[17]。Edouard 和 Rosalind 通过 MD 962077 站位记录认为在极为寒冷的 MIS12 和 MIS10 时期, 虽然海平面温度比现代温度低 6 摄氏度, 但生产力达到顶峰, 南半球亚热带锋带 (STF) 的

北移 7° 几乎切断了厄加勒斯海流, 进而调节冰期的气候^[17]。Simon 等利用柱状样 CD 154 10-06 P 的 XRF 岩心扫描数据的 Fe/K 元素比值恢复了气候变化过程, 结果显示非洲东南部区域 270 ka 以来的气候变化主要受控于轨道岁差影响下的当地太阳辐射的变化和高纬度突然的气候驱动强迫^[18]。非洲东南部的气候环境除了受当地太阳辐射外, 在过去的 300 ka 的冰期中, 山地灌木的扩散还受到了厄加勒斯海流海面平面温度的影响^[19]。可以看出, 非洲东南部冰期气候的变化受到了当地太阳辐射变化、南半球亚热带锋带 (STF) 移动和厄加勒斯海流表层温度的变化, 但对于其冰期和间冰期的气候变化特征和控制因素还存在着矛盾和疑惑的地方。

为解决诸如此类问题, IODP 361 航次以南部非洲气候为主题进行岩心提取研究, 以解决以下 4 个问题: ① 评价上新世/更新世转换期厄加勒斯海流 (Agulhas Current) 对气候变化的敏感性及其与高纬气候变化、赤道热平衡和季风之间的关系。② 重建气候变化过程中印度洋-大西洋通道环流动力学

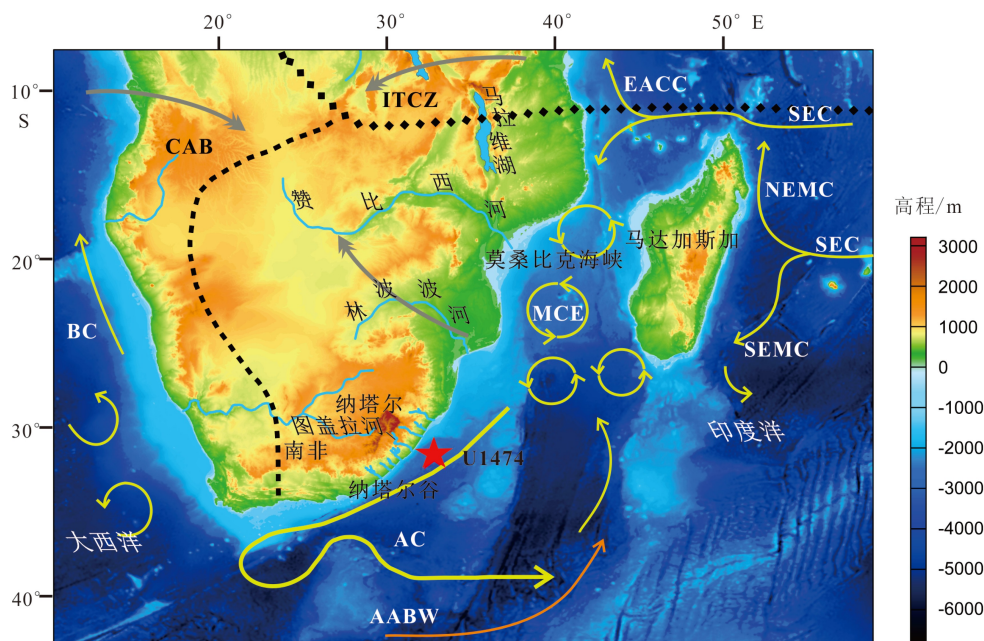


图 1 U1474 孔位置及洋流示意图^[20]

红色五星代表 U1474 孔, 黄色箭头为西南印度洋主要表层流, 橙色箭头为底层流, 灰色箭头为南非在南半球夏季 (12、1—2 月) 的大气环流, 黑色虚线为热带辐合带 (ITCZ) 与刚果气流边界 (CAB)^[21]。AC: 厄加勒斯流, BC: 本格拉流, MCE: 莫桑比克海峡流, SEC: 南赤道流, SEMC: 马达加斯加东南流, NEMC: 马达加斯加东北流, EACC: 东非沿海流, AABW: 南极底层水。

Fig.1 Locations of Hole U1474 and ocean currents^[20]

Red star: Hole U1474, yellow arrows: main surface currents, main undercurrents (orange arrows) and in the southwest Indian Ocean and atmospheric circulation (grey arrows) over southern Africa during austral summer (December, January, February) with approximate position of the Intertropical Convergence Zone (ITCZ) and Congo Air Boundary (CAB) (dashed lines; adapted from Hall et al.^[20]). AC: Agulhas Current, BUC: Benguela Current, MCE: Mozambique Channel Current, SEC: South Equatorial Current, SEMC: South East Madagascar Current, NEMC: North East Madagascar Current, EACC: East Africa Coastal Current, AABW: Antarctic Bottom Water.

及风场变化和南大洋极锋移动的关系。③ 验证过去 5 Ma 以来厄加勒斯泄流及伴随的涨潮转换和大西洋经向翻转洋流(the Atlantic Meridional Overturning Circulation 或 AMOC)及气候重组之间的关联性。④ 探讨厄加勒斯洋流变化对南部非洲大陆气候,特别是降水和河流流量的影响^[22]。

黏土矿物由母岩经风化和成土作用而形成,是组成黏土岩和土壤的主要矿物,它的形成和转化与其所处的气候和环境密切相关,较小颗粒($< 2 \mu\text{m}$)容易被长距离搬运,是深海沉积物的主要组分。如蒙脱石是一种次生矿物,是在半干旱气候条件下由铝硅酸盐和铁镁矿物经化学风化作用而形成的^[14, 23]。伊利石是一种原生矿物,反映了大陆风化过程中水解作用的减弱和寒冷干旱气候条件下岩石的直接侵蚀作用^[23]。与伊利石类似,绿泥石也是寒冷和干燥条件下直接物理风化的产物。高岭石通常形成于淋滤作用强的热带亚热带地区,在弱酸性、单硅质土壤中很容易发现,其形成主要受控于大陆水解强度,可作为淋滤作用强、降水丰富的指标。因此,黏土矿物的组成、含量及其相互关系可用来推测其形成区和来源区的风化作用类型,以重建古气候环境变化的过程与规律^[24-25]。

本文拟通过纳塔尔海谷 MIS12 期以来沉积物中黏土矿物的系统研究,探讨研究区的物质来源和非洲东南部古气候演化过程。

1 区域概况

IODP361 航次 U1474 站位于非洲东南部纳塔尔海谷北端,纳塔尔海谷位于非洲东南部海岸和莫桑比克脊之间的南北走向沉积盆地,其北侧为莫桑比克广阔的沿海平原,向南进入特兰斯凯盆地^[26](图 1),毗邻莫桑比克海峡,是西南印度洋与南大西洋交汇的重要位置。纳塔尔海谷的沉积物厚度巨大,是非洲大陆东南陆缘剥蚀物质的重要沉积区,其盆地陆源沉积物的供应主要是来自纳塔尔海岸众多短而湍急的河流(如图盖拉河,南非的第二大河)的季节性供给^[27],以及林波波河和赞比西河等河流携带物质的贡献。纳塔尔海谷的表层沉积物扩散受到了靠近陆架边缘向南流动的厄加勒斯海流的强烈影响^[27]。

厄加勒斯海流宽约 100 km,表层速度高达 1.5 m/s,在 32°S 附近的流量可达约 70 Sv^[28]。厄加勒斯海流系统是全球大洋环流的重要组成部分^[29],是一个被忽视的潜在的全球气候变化的触发器或

反馈机制^[30]。研究区底层洋流主要是来自北大西洋冷而密度大的北大西洋深层水(the North Atlantic Deep Water, NADW)经厄加勒斯海峡向北沿大陆斜坡进入到纳塔尔海谷^[31-32]。

研究区受到了热带辐合带(the intertropical convergence zone, ITCZ)和刚果气流边界(congo air boundary, CAB)的影响,同时受到了来自印度洋的东风和来自南大洋西风的影响。位于研究区位置的 ITCZ 和 CAB 主要由 3 个气团汇聚而成,分别是来自西南印度洋的东南信风、来自非洲东北部的季风流以及来自大西洋的西风^[20]。ITCZ 控制着热带低气压带以及热带降雨带的变化,其夏季平均位置在 15°~20°S,与非洲东南部区域夏季最大降雨的时间及位置大致一致^[20]。

2 样品与方法

2.1 样品

本文研究钻孔 U1474(31°13.00'S、31°32.71'E,水深 3045 m)位于南非德班东南的纳塔尔海谷北端(图 1),是“国际大洋发现计划”IODP361 航次于 2016 年 2 月 14—17 日用高级活塞取样器采集,取样船为“乔迪斯—决心号”(JOIDES Resolution),该站获取了 8 个钻孔,样品总长 910.75 m。根据 IODP361 项目组分工和个人申请,本研究获得了 U1474 的 A、D 和 F 三个孔的 676 个子样,这 3 个钻孔的子样是经过样品深度计算和层序关联后得到的 CCSF 深度(core composite depth scales, CCSF)^[20]共 83.082 m,取样间隔为 10 cm。依据 IODP U1474 站位的年代框架^[20],对 MIS12 以来 20 m 以浅深度的样品进行 XRF 化学元素扫描和 149 个黏土矿物样品的测试分析(3.997 和 16.161 m 两个层位样品缺失)。

2.2 年代框架

U1474 孔站位的年代模型主要基于船上的微体古生物学和磁性地层学方法建立^[20]。微体古生物定年主要利用钙质超微化石的生物分带性,通过判断特定种的浮游有孔虫,用底栖有孔虫 *Stilostomella* 的灭绝时间来进行年代判定。古地磁利用吉尔伯特反向极性时、高斯正向极性、松山反向极性时、布容正向极性时和拉斯洽普反向亚时等古地磁时代的边界约束了沉积物的年代,与生物地层学资料相一致。这些数据基于全站的 254.7 m 共 46 个有效年代控制点通过线性拟合的方法得出最后的年

代-深度结果。

2.3 XRF 化学扫描

U1474 岩心在哥伦比亚拉蒙特-多尔蒂地球观测中心采用瑞典 Cox 公司的 Itrax Core Scanner 扫描分析仪^[33]扫描分析完成。样品自样品库取出在实验室放置 30 分钟,剖成两半后进行岩性描述,完成后再用塑料卡片对沉积物表面进行整理,并覆盖一层 4 μm 厚的 Ultralene 塑料薄膜,然后将其放置在扫描分析仪下,通过电脑操作,扫描沿着半管岩心表面中心进行,X 荧光射线照射面积为沿着岩心纵向(顶底方向)宽度 2 mm,岩心横向 2 cm,扫描间隔 2 mm,高压发生器采用 Cr 管,电压 30 kV,电流 55 mA,曝光时间 2s^[34]。

在 XRF 元素扫描结果替代指标的选取上,Simon 等使用在 U1474 附近的站位 CD154 10-06P 的 XRF 元素扫描结果中的 Fe/K 比值有效地重建了夸祖鲁-纳塔尔(南非东部省份,图盖拉河流域覆盖的主要地区) 270 ka 以来的陆地水文气候变化^[18]。同样在夸祖鲁-纳塔尔,由于地处热带湿润地区,较高的降水促使当地基岩发生了较强烈的化学风化,导致当地的土壤具有高风化、富铁的特征,并伴随着河流一起排放入海。而海洋沉积物中 Fe/K 比值较高被认为是由于潮湿环境下大陆发生了较为强烈的土壤侵蚀或者较强的化学风化引起的。由于当地降水量的增加,导致生成了典型的热带与亚热带环境下的高风化土壤,其中由于黏土矿物发生了强烈的化学风化,使得硅酸盐黏土结构发生变化,使剩余土壤变得富含铁氧化物,最终在沉积物中记录为较高的 Fe/K 值。因此,本文选用 Fe/K 比值作为反映物源区降水变化的指标,作为反映非洲东南陆地上由于潮湿气候所导致的高度的土壤侵蚀或加强的化学风化过程替代指标^[18]。

2.4 黏土矿物

黏土矿物样品前处理、分离、制片和 X-射线衍射分析测试均在自然资源部第二海洋研究所海底科学实验室进行。参考《海洋调查规范 GB/T 12763.8-2007》^[35],取约 10 g 样品,经过洗盐、去有机质后过筛,筛出大于 63 μm 的粒级组分,并将剩余样品根据斯托克斯沉降定律提取小于 2 μm 的粒级组分并制成定向片进行 XRD 分析^[14,36]。XRD 分析使用 X'Pert Pro MPD 多晶 X 射线衍射仪,测试参数如下: CuK α 辐射,管流 40 mA,管压 45 kV,对三种不同条件下的定向片进行测试,包括自然条件、

乙二醇蒸汽 35 $^{\circ}\text{C}$ 下 36 h,以及高温 550 $^{\circ}\text{C}$ 下 2 h。扫描角度 3 $^{\circ}$ ~30 $^{\circ}$ (2 θ),步长 0.02 $^{\circ}$,步频 0.5 s/步。黏土矿物图谱的分析与计算使用 Jade 6.0 软件进行,定性分析依据三种定向片衍射峰的特征综合对比完成,半定量分析依据 Biscaye 确定的权重系数使用黏土矿物在乙二醇饱和片的(001)衍射峰的峰面积比计算^[37],蒙脱石(S)为 17 $\text{\AA}$ 衍射峰,伊利石(I)为 10 $\text{\AA}$ 衍射峰,高岭石(K)与绿泥石(C)共同使用 7 $\text{\AA}$ 衍射峰,最后由 3.57 $\text{\AA}$ 与 3.53 $\text{\AA}$ 衍射峰确定高岭石与绿泥石各自的相对含量。伊利石化学指数通过 5 $\text{\AA}$ 与 10 $\text{\AA}$ 峰面积比计算得出。伊利石结晶度使用 Kübler 指数(KI),即 10 $\text{\AA}$ 衍射峰的半高宽,其低值表示结晶度较好,高值表示结晶度较差^[38]。每个样品计算 4 次求取平均值作为最终结果,误差控制在 3% 以内。采用 S/(I+C)比值作为指示源区化学风化和物理侵蚀相对强度的有效指标;采用 K/(I+C)比值作为指示源区风化类型与风化程度的替代指标,其高值指示源区潮湿且化学风化强,低值则为相对干燥且物理风化强的环境。应用黏土矿物比值作为替代指标可以有效地消除其他组分的稀释效应。黏土矿物指标的频谱分析使用 Redfit3.8 软件进行,滤波分析使用 OriginPro 软件进行。

3 结果

3.1 岩性描述

U1474 岩芯包含两个岩性单元,第 1 段深度为 0~0.5 m,岩性为带有有孔虫化石的棕色黏土;第 2 段深度为 0.5~254.07 m,岩性为由富有孔虫微体化石的灰绿色黏土与不含有孔虫微体化石的灰绿色黏土间隔交替组成^[20]。富微体古生物化石的黏土在整根岩心中最为常见,在第二段中常见的是深灰色的有孔虫细砂层,厚度从几厘米到小于 2 m,每根长 1.5 m 的岩心中有 1—3 段深灰色的有孔虫细砂层,这些砂层的组成以石英和碳酸盐为主,许多具有侵蚀基底。第 2 段沉积物中还存在由于生物扰动作用产生的深灰色斑纹,这些生物扰动的强度随深度增加而增加。根据 X 射线衍射和涂片的观察结果,第 2 段的沉积物中还包括厚度为毫米到厘米级、含有黄铁矿和海绿石的绿色层。

3.2 年代框架

U1474 站位的年代模型如图 2 所示,不考虑沉积物的固结压实和沉降作用,本站岩芯的沉积速率

为 4.1 cm/ka, 其底部的年代为 476 kaBP, 为深海氧同位素 MIS12 期的早期。

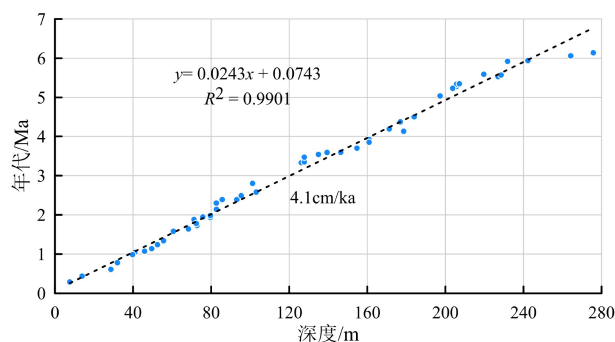


图2 U1474孔地层年代框架

基于主要浮游有孔虫、钙质超微化石、硅藻和古地磁资料^[20]。

Fig.2 The chronological framework of the hole U1474

Age estimates based on a mixture of major planktonic foraminifer, calcareous nannoplankton, diatom, and paleomagnetic datums^[20].

3.3 黏土矿物

3.3.1 黏土矿物组成

U1474孔黏土矿物自然片、乙二醇饱和片和加热片的典型X-射线衍射图谱如图3所示。依据3种不同衍射图谱识别出蒙脱石、伊利石、高岭石和绿泥石4种黏土矿物。非黏土矿物主要为石英, 石英的001衍射峰位于3.33 Å, 与伊利石003衍射峰叠加。蒙脱石的001衍射峰位于17 Å, 而绿泥石的001衍射峰在14 Å附近。伊利石在10 Å和5 Å处分别为001和002衍射峰, 图3自然片中, 10 Å和5 Å处衍射峰都很明显, 乙二醇饱和后衍射峰的位置和强度变化不大, 说明伊利石的存在。高岭石和绿泥石在自然片衍射图谱的7 Å和3.5 Å附近都存在特征峰, 绿泥石的特征峰较小。

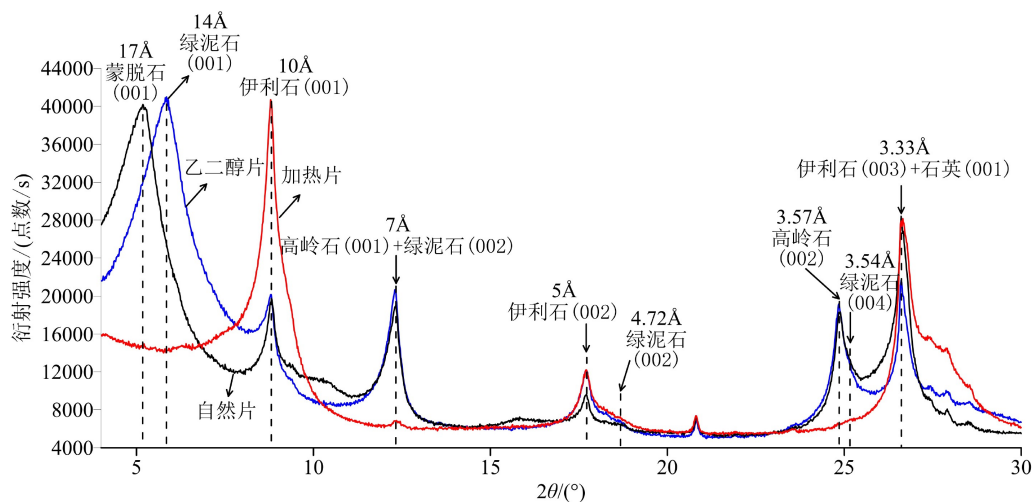


图3 U1474孔黏土矿物X-射线典型衍射图谱(样品深度: 1492~1494 cm)

Fig.3 Typical X-Ray Diffraction(XRD)spectra of clay minerals in the Hole U1474(sample depth: 1492~1494 cm)

U1474孔4种黏土矿物的含量及变化如表1和图4所示。各层位均含有蒙脱石、伊利石、高岭石和绿泥石, 其中蒙脱石含量最高, 含量变化范围27.77%~55.34%, 平均值39.23%; 伊利石次之, 变化范围14.06%~36.21%, 平均值26.11%; 高岭石含量第三, 变化范围为10.86%~23.07%, 平均值17.79%; 绿泥石含量最小, 含量为9.67%~22.88%, 平均值17.19%。故本文黏土矿物的组合类型为蒙脱石-伊利石-高岭石-绿泥石型。伊利石结晶度的KI指数范围为 $0.28^{\circ}\Delta 2\theta \sim 0.51^{\circ}\Delta 2\theta$, 平均值为 $0.35^{\circ}\Delta 2\theta$, 表明本文的伊利石结晶度较好; 伊利石化学指数范围为0.13~0.53, 平均值0.30, 大多低于0.4, 表明伊利石类型为物理风化条件下形成的富铁、镁型伊利石, 且源区的风化条件主要为干冷气候环境下控制的物理风化条件。

由图4可以看出, 蒙脱石与伊利石(图4a)、蒙脱石与高岭石(图4b)、蒙脱石与绿泥石(图4c)都呈现负相关, 高岭石与绿泥石(图4d)、伊利石与绿泥石(图4e)、伊利石与高岭石(图4f)呈现正相关, 但后二者的相关性非常弱。图5中站位的垂向变化也显示出类似的变化。

3.3.2 黏土矿物的冰期-间冰期变化旋回

结合年代框架, 对照全球底栖有孔虫氧同位素曲线LR04^[39], U1474站位黏土矿物自MIS12期以来可以分为5个阶段: MIS12-MIS11, MIS10-MIS9, MIS8-MIS7, MIS6-MIS5, MIS4-MIS1(图5)。

MIS12-MIS11: 本旋回内, 由老到新蒙脱石含量整体处于较高水平, 呈减少趋势, 含量为55%~35%, 平均44%(图5g); 伊利石含量为33%~18%, 平均25%(图5f); 高岭石和绿泥石在MIS12期含量较低, 可

	黏土矿物百分含量/%				伊利石结晶度/(°Δ2θ)	伊利石化学指数
	蒙脱石	伊利石	高岭石	绿泥石		
最大值	55.34	36.21	23.07	22.88	0.51	0.53
最小值	27.77	14.06	10.86	9.67	0.28	0.13
平均值	39.23	26.11	17.79	17.19	0.35	0.30

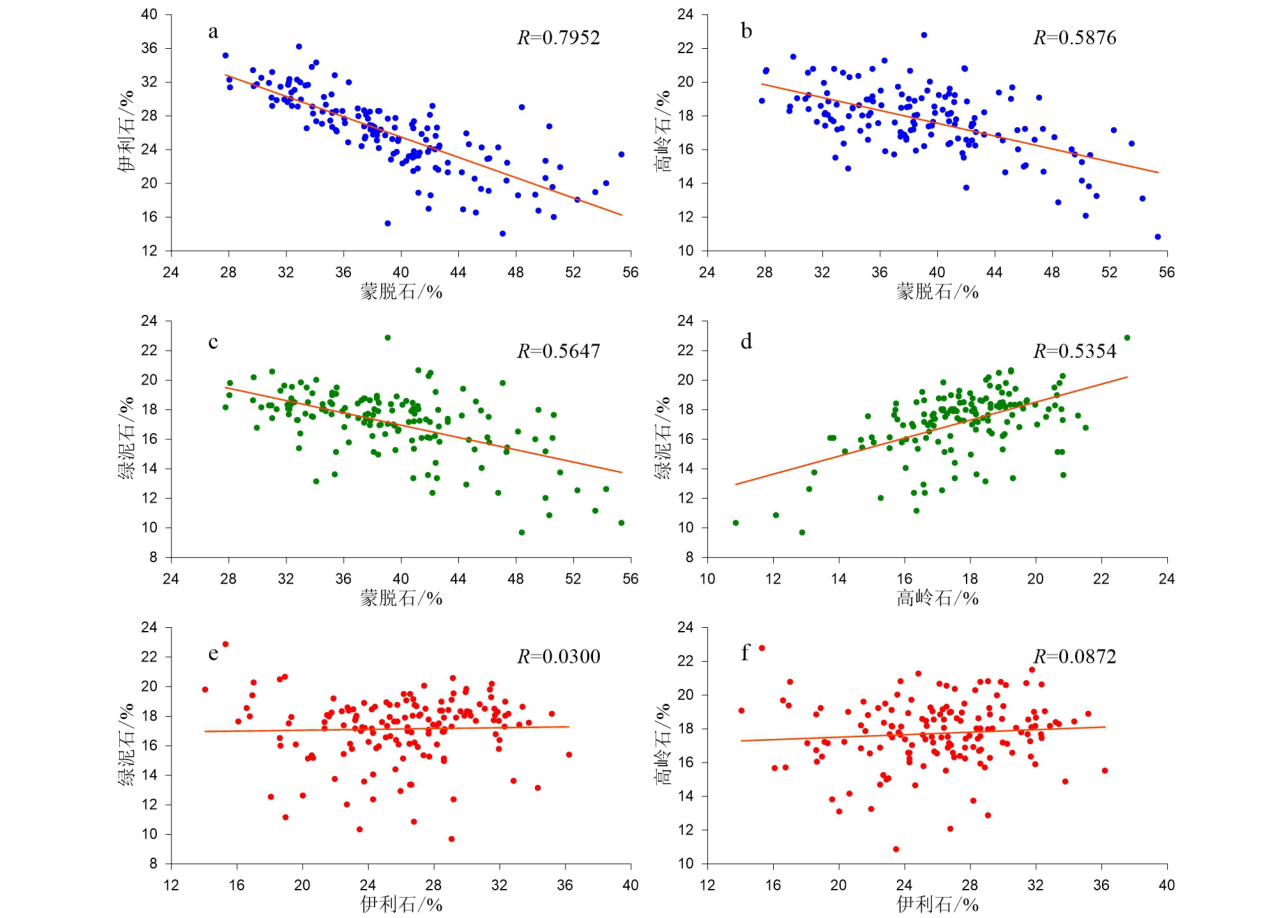


图 4 U1474 孔黏土矿物之间相关性

Fig.4 Correlation diagrams between clay minerals in Hole U1474

能是由于此阶段蒙脱石含量增加导致的。高岭石含量 11%~21%, 平均 17%(图 5e); 绿泥石含量 10%~19%, 平均 15%(图 5d)。伊利石结晶度较为稳定, KI 指数为 0.284~0.382°Δ2θ, 平均值 0.338°Δ2θ, 指示伊利石结晶度较好(图 5c); 伊利石化学指数为 0.158~0.525, 平均值 0.255, 低于 0.4(图 5b), 除在 MIS11 早期含量较高外, 其余均处于低值状态, 指示源区主要风化类型为物理风化。没有发现明显的冰期-间冰期旋回证据。

MIS10-MIS9: 本旋回中蒙脱石 32%~50%, 平均值 39%, 整体呈现为由冰期至间冰期含量明显增加, 即 MIS10 阶段含量较低, MIS9 含量升高; 其他

黏土矿物含量波动不明显, 伊利石 17%~36%, 平均值 27%, 相比 MIS12-MIS11 含量有所升高; 高岭石 14%~21%, 平均值 17%, 绿泥石 13%~19%, 平均值 17%。伊利石结晶度与伊利石化学指数也相对稳定, KI 指数 0.300~0.375°Δ2θ, 平均值 0.340°Δ2θ, 结晶度较好; 伊利石化学指数 0.15~0.41, 平均值 0.30, 指示以干冷气候条件下控制的物理风化为主的风化类型。

MIS8-MIS7: 本旋回内各黏土矿物含量均显示在 MIS8 早中期相对稳定, MIS8 晚期(约 270 ka)开始至 MIS7 呈现较为剧烈的波动。蒙脱石 31%~51%, 平均值 40%, 在冰期 MIS8 期间几乎稳定在

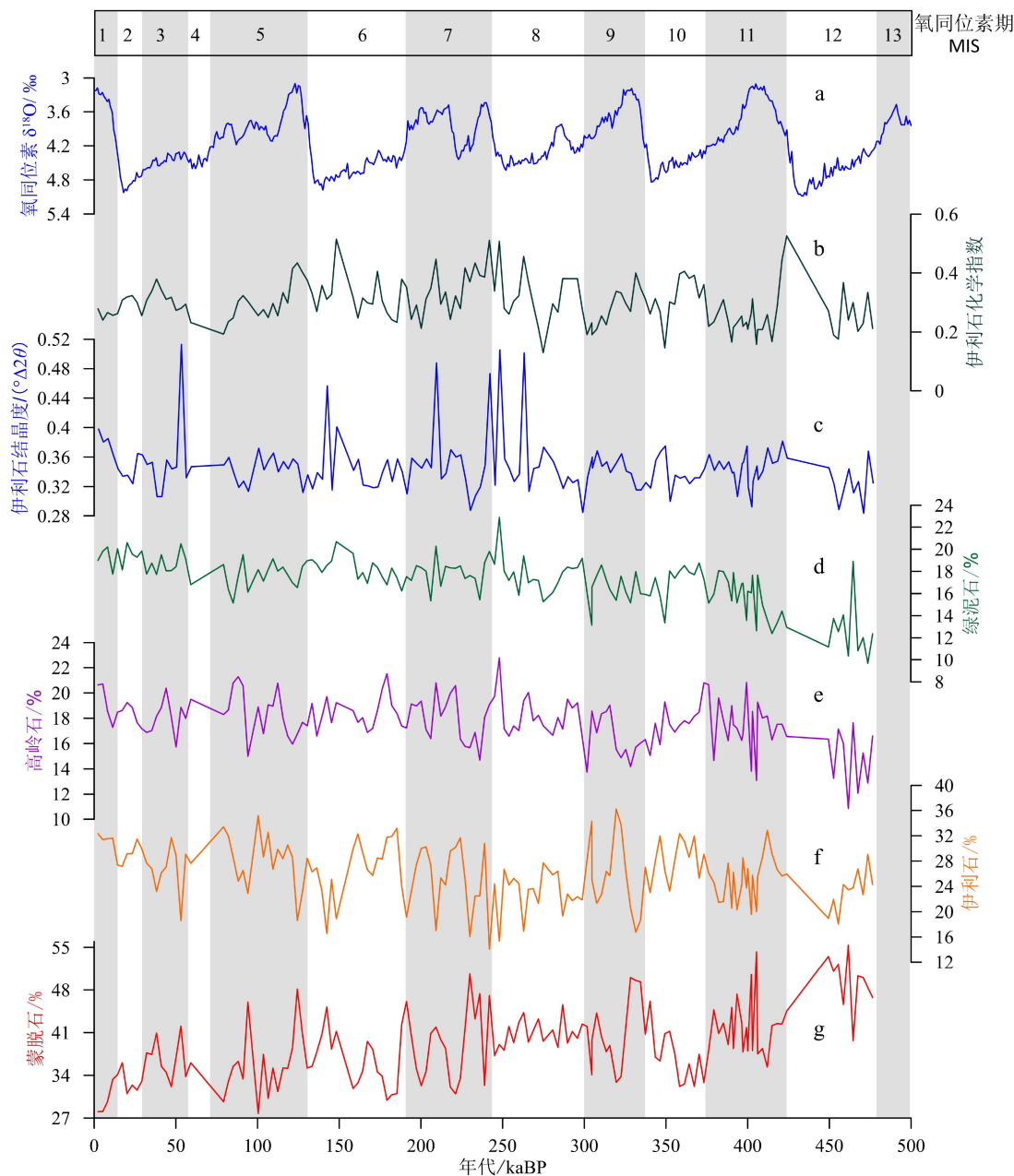


图5 MIS12 期以来 U1474 孔黏土矿物组合特征及其变化
全球底栖有孔虫氧同位素曲线 LR04 数据来自 Lisiecki 和 Raymond^[39], 阴影部分表示间冰期阶段。

Fig.5 Variations of clay mineral assemblages of Site 1474 since MIS12

The MIS is marine isotope stage, the stacked global benthic $\delta^{18}\text{O}$ record of LR04 from Lisiecki 和 Raymond^[39], the shaded bars and numbers indicate marine isotope interglacial periods.

40%左右的平均值上下, MIS7 期间波动相对剧烈;伊利石 14%~32%, 平均值 24%, 相比蒙脱石波动更明显, 其含量值尤其在 MIS8 后期出现了明显的交替变化;高岭石 15%~23%, 平均值 18%, 绿泥石 15%~23%, 平均值 18%。伊利石结晶度与伊利石化学指数也在 MIS8 晚期以后出现了几个明显的高值, KI 指数 $0.284\sim0.506^\circ\Delta 2\theta$, 平均值 $0.353^\circ\Delta 2\theta$, 除

4 个 KI 指数在 0.5 左右的样品指示伊利石结晶度较差以外其余时间段内结晶度较好;伊利石化学指数 $0.13\sim0.51$, 平均值 0.33, 在 210~270 ka 期间可能是受相对暖湿气候影响的化学风化为主, MIS8 至 270 ka 则以物理风化为主。

MIS6-MIS5: 本旋回中蒙脱石 28%~48%, 平均值 36%, 在 MIS6 晚期(约 150 ka)含量明显升高, 整

体上 MIS6 比 MIS5 含量低,且总体上相比之前含量有所下降;伊利石 17%~35%,平均值 28%,在 MIS5-MIS6 之间存在明显低值;高岭石与绿泥石含量相对稳定,高岭石 15%~25%,平均值 18%,绿泥石 15%~21%,平均值 18%。伊利石结晶度与伊利石化学指数在 MIS6 晚期也出现了含量升高的现象, KI 指数 $0.312^{\circ}\Delta 2\theta \sim 0.457^{\circ}\Delta 2\theta$, 平均值 $0.344^{\circ}\Delta 2\theta$, 总体结晶度较好;伊利石化学指数 0.19~0.51, 平均值 0.31, 指示以干冷气候条件下控制的物理风化为主的风化类型。

MIS4-MIS1: 本旋回中蒙脱石为 28%~42%, 平均值 34%, 总体含量为所有阶段中最低, 但发现了明显的冰期-间冰期旋回, 即 MIS2 的蒙脱石含量明显低于 MIS3 和 MIS1; 伊利石 19%~32%, 平均值 28%, 从 MIS3 至 MIS1 逐渐升高; 高岭石含量相对稳定, 为 16%~21%, 平均值 18%, 绿泥石含量相比之下则处于最高, 阶段内相对稳定, 变化不明显, 为 18%~21%, 平均值 19%。伊利石结晶度在 MIS3 早期出现了高值, 指示结晶度较差, 但随后下降, 呈较好的结晶度, KI 指数为 $0.307^{\circ}\Delta 2\theta \sim 0.513^{\circ}\Delta 2\theta$, 平均值 $0.358^{\circ}\Delta 2\theta$; 伊利石化学指数在 150 ka 前后出现高值, 靠近 0.4, 指示风化类型在该时间段内由物理风化主导转为化学风化主导, 其余时间为 0.24~0.38, 平均值 0.30, 均低于 0.4, 指示主体以干冷气候条件下控制的物理风化为主的类型。

4 讨论

4.1 纳塔尔海谷沉积物质的来源

海洋沉积物中黏土矿物及其组成变化是研究陆源碎屑来源、迁移路径和海区古环境古气候变化的重要而有效的指标^[40-44]。前人研究表明纳塔尔海谷是非洲大陆东南部物质剥蚀风化后经河流搬运到海的主要汇聚沉积区域^[15, 20, 34]。分布在非洲东南部地区的主要河流为莫桑比克北部的赞比西河^[20]、莫桑比克南部的林波波河^[45]和流程较短、流速较快的图盖拉河(图 1), 上述流域可能构成了纳塔尔海谷的主要物质来源区。

IODP U1474 站位黏土矿物组合位于图盖拉河、林波波河和赞比西河等三条河流流域黏土矿物的三角图的中间(图 6), 说明该站位黏土矿物组成与三条河流流域表层黏土矿物的组成都较为接近, 但三条主要河流的黏土矿物含量组合分布过于广泛, 不足以对物源区的组成加以约束, 从地形以及

海流变化条件上来考虑, 由于赞比西河排放入海的沉积物向南移动的过程中受到莫桑比克海脊的阻隔, 同时较为强力的莫桑比克涡流流向也对其沉积物的运移有较大影响, 致使到达纳塔尔海谷的海洋沉积物含量极少。林波波河由于其河口入海位置有宽缓陆架形成的海底沉积平原, 导致大量的沉积物汇聚于此, 对 U1474 孔的沉积物影响较小。图盖拉河排放入海的沉积物则属于近源排放, 使得搬运到 U1474 钻孔的沉积物没有受到地形的阻隔以及涡流的扰动, 因此图盖拉河沉积物占据了 U1474 孔沉积物的主要部分, 图盖拉河也是影响本区域内沉积物中黏土矿物含量变化的最主要源区。这与 U1474 孔邻近的 CD154 10-06P 钻孔 ($30^{\circ}10.36'S$ 、 $32^{\circ}8.91'E$) 元素指标结果显示的图盖拉河流域物源相一致^[18], 指示本区域内的物源区主要为图盖拉河, U1474 孔的黏土矿物指标可以用于讨论非洲东南部图盖拉河流域的气候变化历史。

4.2 非洲东南部图盖拉河流域 MIS12 期以来的气候变化

黏土矿物携带了一定的源区气候信息, 纳塔尔海谷的黏土矿物组成及其参数变化可以反映其源区非洲东南部图盖拉河流域的气候变化。结合黏土矿物参数进行频谱和滤波分析可以有效地反映出轨道周期对区域内气候的影响程度(图 7、8)。图 9 显示纳塔尔海谷 U1474 孔黏土矿物(图 9b—g)和 XRF 扫描的 Fe/K 元素比值(图 9h)自氧同位素 MIS12 期以来的变化与全球底栖有孔虫氧同位素变化(图 9a)、全球海平面变化(图 9i)、南纬 30° 太阳光照(图 9k 中蓝实线)、地球轨道偏心率(图 9k 中粉色实线)等变化有很好的总体对应关系和变化趋势, 尤其在 SST 呈现高值时分别对应了 S/(I+C)与 K/(I+C)的高值部分, 这意味着纳塔尔海谷 U1474 孔反映的自 MIS12 期以来的气候环境有着轨道尺度旋回特征, 但部分时期变化又不尽相同, 具体如下:

MIS12-MIS11: MIS12 期间, 蒙脱石(图 9g)含量在此期间处于高位, 蒙脱石本身属于化学风化的产物, 是伊利石在半干旱气候条件下由铝硅酸盐和铁镁矿物化学风化形成的^[48], 整体上伊利石化学指数 ICI 低于 0.4(图 9b), 伊利石结晶度 KI 指数处于较低值(图 9c), 说明伊利石结晶度较好, 其意味着非洲东南以物理风化为主。良好的伊利石结晶度也指示了 MIS12 时期较低的气温条件, 这与 MD962077 站位记录的海水表层温度低值的气候背景一

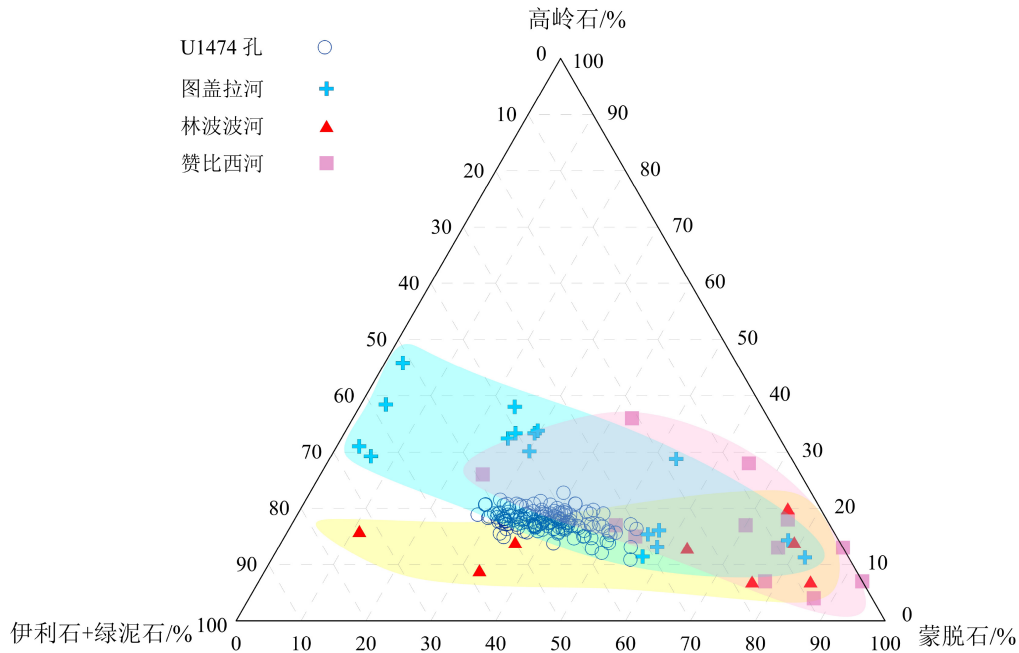


图 6 U1474 站位黏土矿物物源分析三角图

图盖拉河流域据 Cass 和 Johnston^[46] 修改, 林波波河和赞比西河流域据 Setti 等^[47] 修改。蓝色区域为纳塔尔土壤黏土矿物指示的图盖拉河流域, 黄色区域表示林波波河流域, 紫色区域表示赞比西河流域。

Fig. 6 The ternary figure for provenance analysis at Site U1474

The Tugela river from Cass and Johnston^[46], Zambezi River and Limpopo River from Setti et al^[47]. Blue Shading: Natal Soils, Yellow Shading: Limpopo River, Purple Shading: Zambezi River.

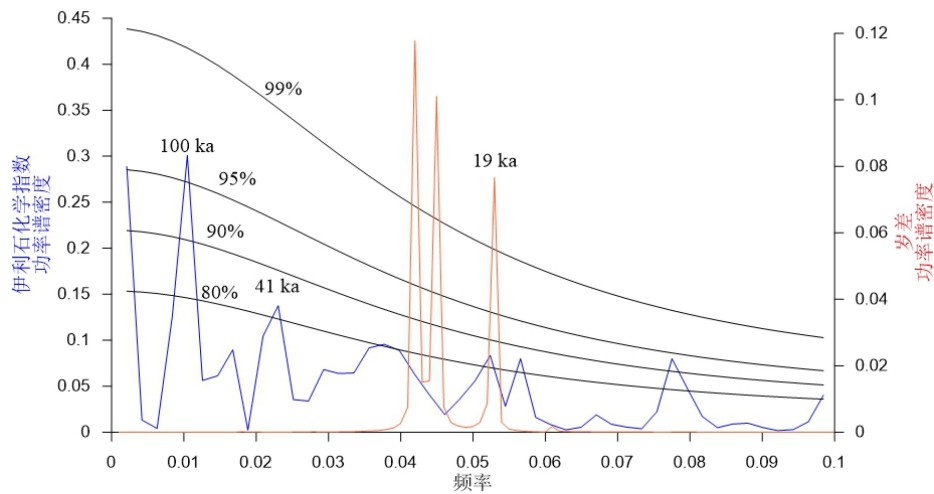


图 7 U1474 孔伊利石化学指数频谱分析图

蓝色线: 伊利石化学指数频谱图, 红色线: 岁差频谱图。

Fig. 7 Spectrum analysis of illite chemical index and precession

Blue line: Spectrum analysis of illite chemical index, red line: Spectrum analysis of precession.

致^[18]。这两个指标 ICI 与 KI 值显示在 MIS12 中期 (约 460 kaBP) 存在升高的波动, 沉积物中 XRF 扫描的 Fe/K 元素比值也能反映气候变化^[49], 其与伊利石化学指数和伊利石结晶度呈现相同的变化趋势, 说明此时间段内非洲东南部相对潮湿。MIS12 期间这似乎与良好的伊利石结晶度指示的冷湿气候变

化有些冲突。图 9g 显示蒙脱石含量在此期间上升的同时, 伊利石含量下降, 说明蒙脱石含量的异常升高确实可能与相对潮湿情况下伊利石在加强的淋滤作用下淋失 K⁺ 从而转化为蒙脱石有关。在间冰期 MIS11 期, 伊利石 ICI 和 KI 指数有短暂高值, 指示源区有短暂的化学风化加强过程, 同样相对高

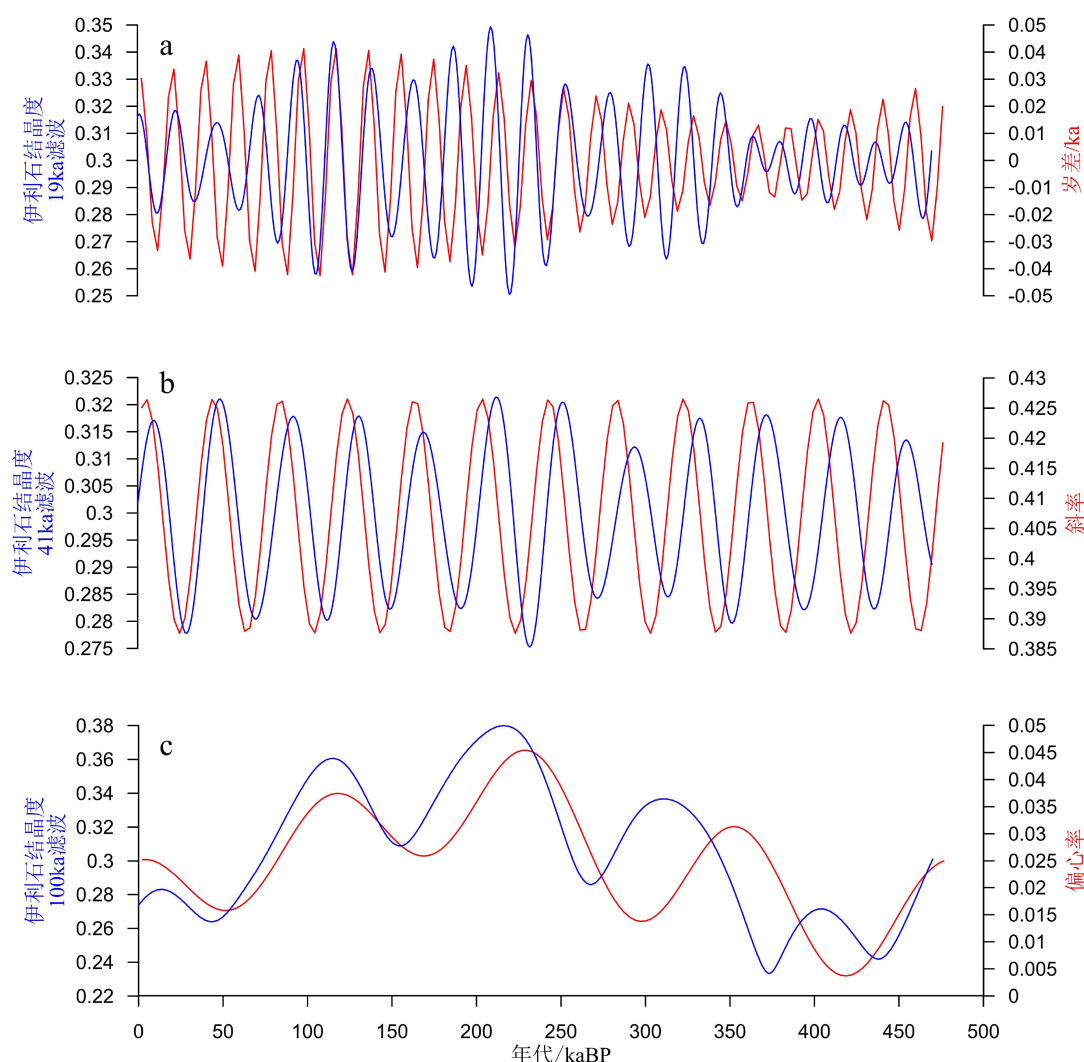


图 8 U1474 孔不同频率滤波曲线与轨道参数曲线对比

a: 伊利石结晶度 19 ka 低通滤波曲线与岁差曲线对比, 中心频率=0.0526, 带宽=0.0026; b: 伊利石结晶度 41 ka 低通滤波曲线与斜率曲线对比, 中心频率=0.0244, 带宽=0.0012; c: 伊利石结晶度 100 ka 低通滤波曲线与偏心率曲线对比, 蓝色线为伊利石结晶度滤波曲线, 红色线为轨道参数曲线。

Fig.8 Comparison of filtering curves of illite crystallinity and curves of orbital parameters of Site U1474

a: 19 ka low pass filtering curve of illite chemical index and precession filtering curve, center frequency = 0.0526, bandwidth = 0.0026, b: 41 ka low pass filtering curve of illite chemical index and obliquity filtering curve, center frequency = 0.0244, bandwidth = 0.0012, c: 100 ka low pass filtering curve of illite chemical index and eccentricity filtering curve, blue line: filtering curves of illite chemical index, red line: curves of orbital parameters.

值在蒙脱石/(伊利石+绿泥石): $S/(I+C)$ (图 9d) 中也可以发现, 而高岭石/(伊利石+绿泥石): $K/(I+C)$ (图 9e) 则无明显高值, 说明此时期淋滤作用弱, 更倾向于半干旱条件下的化学风化作用强烈。其后伊利石 ICI 和 KI 指数持续处于低值, 以物理风化为主, 但 $S/(I+C)$ 与 $K/(I+C)$ 出现了强烈的波动且整体位于高值, 指示了相对温暖且干湿交替的气候条件, 这与全球海平面升高 (图 9i) 和临近海表温度 (图 9j 中绿色实线) 变化有很好的对应。

MIS10-MIS9: 伊利石 ICI 均低于 0.4 (图 9b), 指示主体以物理风化为主。在本阶段的冰期-间冰期循环中, 蒙脱石含量及其 $S/(I+C)$ 比值均显示了在

冰期 MIS10 的低值以及间冰期 MIS9 的高值。MIS10 早期, 伊利石 KI 指数、 $S/(I+C)$ 以及 $K/(I+C)$ 均处于低值, 伊利石结晶度较好, 说明此时源区的物理风化强烈且气候寒冷干燥。MIS10 后期约 350 kaBP, 此时各黏土矿物指标含量均明显上升, 说明气候由寒冷干燥转为相对温暖湿润, 其后的间冰期 MIS9 则进一步上升, 进入相对温暖的时期, 这与 MD962077 的 SST 记录的高值相对应^[17] (图 9j 中绿色实线), 而湿润的气候条件与 MD96-2048 站位所记录的于 MIS10 和 MIS9 转换时期出现的罗汉松 (*podocarpus*) 花粉百分比最大值相对应^[5]。罗汉松适合生长在湿润的山地森林^[3], 这与该时期的温暖

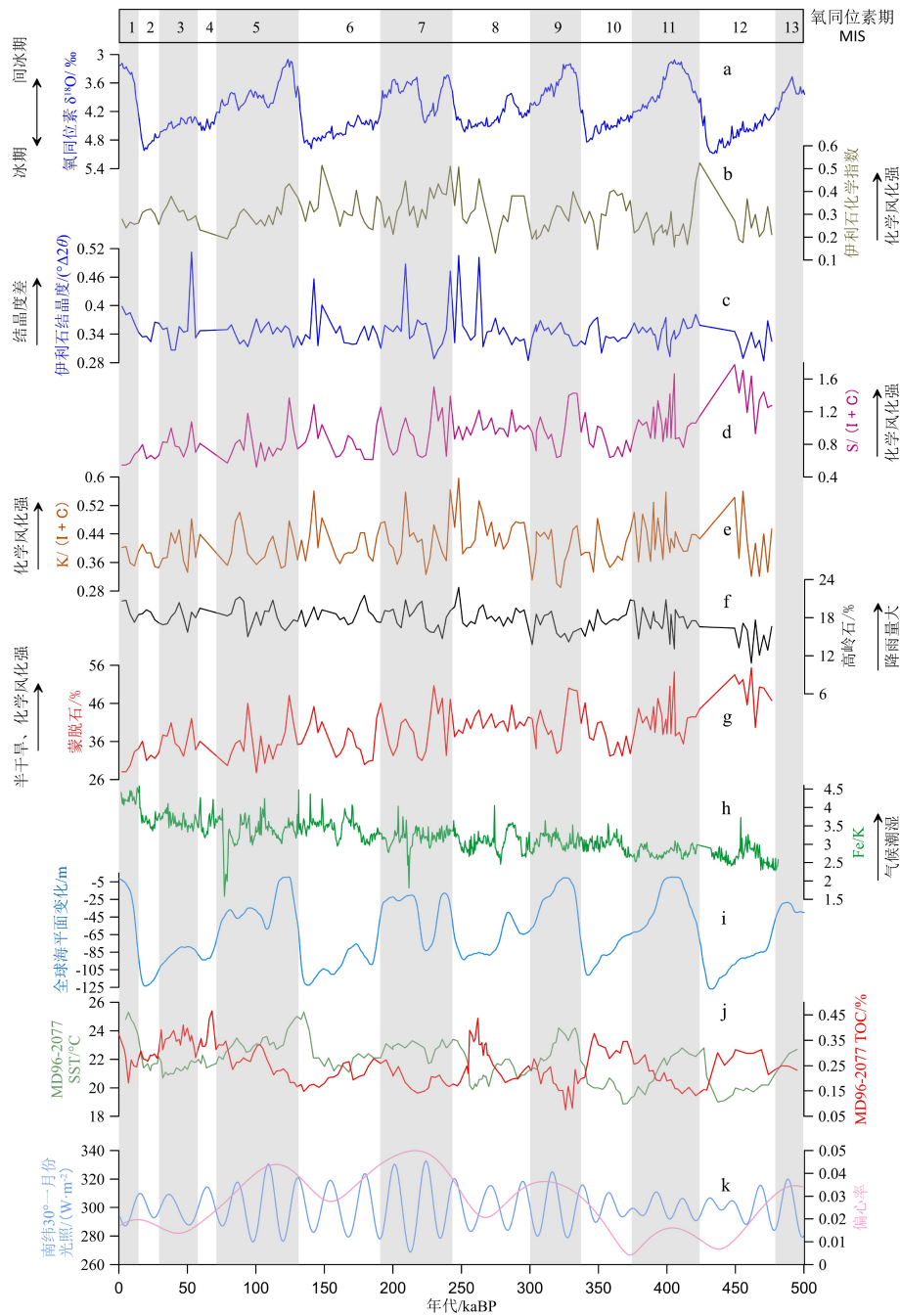


图9 U1474 孔黏土矿物组成、XRF 扫描 Fe/K 元素比值、全球海平面变化、MD962077 孔的海表温度总有机碳、南纬 30° 太阳光照及地球公转轨道偏心率变化对比

a: 全球底栖有孔虫氧同位素变化(数据来自 Lisiecki 和 Raymond^[39]), b: 伊利石化学指数, c: 伊利石结晶度, d: 蒙脱石/(伊利石+绿泥石), e: 高岭石/(伊利石+绿泥石), f: 高岭石, g: 蒙脱石, h: 化学元素 XRF 扫描 Fe/K(数据来自 Dabin 等^[34]), i: 全球海平面变化(数据来自 Bintanja 等^[10]), j: MD962077 孔的海表温度(SST)和总有机碳(TOC)(数据来自 Bard 和 Rickaby^[17]), k: 南纬 30° 一月份光照(蓝色实线)和地球公转轨道偏心率(Eccentricity)(粉色实线)(数据来自 Laskar 等^[50])。

Fig.9 the comparison of clay mineral proxies, XRF element scanning Fe/K ratio, global sea level change, the SST, total organic carbon, solar insolation and the earth orbit eccentricity of 30°S

a: Global benthic foraminiferal oxygen isotope stage MIS(from Lisiecki and Raymond^[39]), b: illite chemical index, c: illite crystallinity, d: Smectite/(Illite + Chlorite) ratio, e: Kaolinite/(Illite + Chlorite) ratio, f: kaolinite, g: smectite, h: XRF element scanning Fe/K ratio(from Dabin et al.^[34]), i: global sea level change(from Bintanja et al.^[10]), j: percentage of total organic carbon(TOC) and sea surface temperature(SST) of Core MD962077(from Bard and Rickaby^[17]), k: the January insolation of 30°S(the blue dashed line), Eccentricity(the pink dashed line) (from Laskar et al.^[50]).

湿润环境是一致的。MIS9 中期 325 kaBP, $S/(I+C)$ (图 9d) 与 $K/(I+C)$ (图 9e) 指标明显下降, 指示此时源区可能出现了干冷的气候波动事件, 其后指标上升并回归到相对温暖的气候条件下, 此时相应的罗汉松花粉也回到了最大值^[5]。

MIS8-MIS7: 本旋回黏土矿物组成及参数(图 9b—g) 在 MIS8 期早、中期的变化相对稳定, 伊利石 ICI 低于 0.4, KI 指数处于低值, 伊利石结晶度较好, 整体上为寒冷干燥气候下的物理风化环境, 旋回内黏土矿物比值较低, 但相比 MIS10 期则有相对上升, 说明本阶段源区的冰期寒冷程度相对 MIS10 期有所减弱, 由 MD962077 的 SST(图 9j 中绿色实线) 结果在此期间的小幅上升也可以验证。MIS8 期晚期(约 270 kaBP) 开始至 MIS7 期各指标所指示的气候波动较为剧烈, 各黏土矿物指标出现高值(图 9b—g), 伊利石 ICI 此时大于 0.4(图 9b), 伊利石 KI 指数(图 9c) 出现了第一个峰值, 源区出现了化学风化为主的风化类型, 且此时期高岭石含量(图 9f) 也较高, 说明此时降雨量丰富, 源区变得温暖湿润, 同期 MD96-2048 的喜潮湿的罗汉松花粉百分比出现最大值, 与我们的黏土矿物记录一致^[5]。而其后的时期又出现了各指标大幅度下降的情形, 源区寒冷干燥且以物理风化为主, 继而各指标开始了较为剧烈的波动一直到 MIS7 期结束, 指示此阶段气候变化以暖湿气候与干冷气候交替、化学风化与物理风化交替的特征。

MIS6-MIS5: 在 MIS6 期早期(190~150 kaBP) 伊利石 ICI 低于 0.4(图 9b), 指示源区风化类型以物理风化为主, 伊利石 KI 指数(图 9c) 较低, 伊利石结晶度较好。同期其他黏土矿物比值也稳定在低值, 与冰期的寒冷气候相吻合。其中在 170~160 kaBP 期间, Fe/K 比值存在部分高值, 与蒙脱石含量的增加相对应, 同时伊利石化学指数升高, 可能是由于降水量增加引起的淋滤作用增强导致伊利石 K^+ 淋失转化为蒙脱石, 这一点由同期内 K_2O 的高值与伊利石的低值相吻合可以证明。150 kaBP 以后, 多种黏土矿物指标显示气候相比 MIS6 期早期温度与湿度变化幅度增加, 伊利石 ICI 和 KI 值的升高指示区域内物理风化减弱以及伊利石结晶度变差, $S/(I+C)$ (图 9d) 与 $K/(I+C)$ 值(图 9e) 波动剧烈且明显高于前期。另外, 多黏土指标以及 XRF 扫描 Fe/K 元素比值(图 9h) 同步变化趋势明显, 均在 150、122 以及 93 kaBP 出现峰值, 说明此阶段研究区呈暖湿(高值) 与干冷气候交替的气候特征与 MIS6 期末期及 MIS5d、5a 和 5b 时期出现的罗汉松花粉最大值相

对应。

MIS3-MIS1: 本旋回伊利石 ICI 值低于 0.4(图 9b), 指示源区风化类型以物理风化为主。 $S/(I+C)$ (图 9d)、 $K/(I+C)$ (图 9e) 和蒙脱石(图 9g) 值变低, 指示源区化学风化作用减弱。其冰期-间冰期旋回变化特征较为明显, 即间冰期(MIS1 期与 MIS3 期) 相比冰期(MIS2 期) 呈高值, 但其化学风化的强度整体相比更早的间冰期减弱, 与偏心率(图 9k 中粉色线) 和当地光照度(图 9k 中蓝色线) 的减弱一致, 可能与 70 kaBP 以来的末次冰期有关。MIS3 期早期(52 kaBP) 伊利石含量出现低值, KI 指数升高(图 9c), 伊利石结晶度较差, 对应 $S/(I+C)$ (图 9d) 与 $K/(I+C)$ (图 9e) 的高值, 说明在此时期可能出现了短暂的化学风化增强的过程, 由于高岭石指标(图 9f) 与 Fe/K 指标(图 9h) 无明显峰值, 说明此阶段可能为温暖、半干旱条件下的化学风化增强。此后各指标保持在相对高位, 指示温暖、湿润的间冰期气候。MIS2 期早期黏土矿物指标稳定在低值, 指示了明显的受控于低温干燥气候的物理风化条件。MIS2 期末期至 MIS1 期, 此阶段伊利石 KI 指数、高岭石含量、 Fe/K 比值出现了明显的峰值, 伊利石结晶度变差, 源区降雨量增加。相比 MIS2 早期各黏土矿物指标的升高也指示了化学风化强度的增加, 气候趋于温暖湿润。

整体来看, 黏土矿物替代指标在轨道尺度的变化模式上显示出较为明显的约 19 ka 的岁差周期。为了验证这一结果, 我们以岁差周期波动较为明显的伊利石化学指数作为主要研究对象, 对伊利石化学指数进行了频谱分析以及滤波分析(图 7、图 8)。结合岁差变化的频谱图可以发现, 伊利石化学指数在频谱图上表现出明显的 19 ka 的岁差周期(置信区间 80%), 此外还具有 41 ka 的斜率周期(置信区间 80%) 以及 100 ka 的偏心率周期(置信区间 95%)。伊利石结晶度的 19、41 和 100 ka 滤波曲线分别与岁差、斜率和偏心率曲线也吻合较好, 表明非洲东南部海洋沉积记录明显受控于地球轨道参数的影响^[18-19]。经过比对发现, 伊利石结晶度 KI、 $S/(I+C)$ 和 $K/(I+C)$ 三个指标与当地夏季日照的波动密切相关, 但可能由于年代框架不够完善或其他未知因素影响, MIS 5 期以前的变化与夏季日照波动出现了差异甚至部分反相波动, 但仍保持约 19 ka 的岁差周期波动, 结合 CD154 10-06 P 站位的结果也呈现了类似的变化模式^[18], 说明非洲东南部区域自 MIS12 以来的岁差控制的夏季日照变化是驱动区域内气候变化的主要因素之一。位于西南印度洋

(26°S)的 MD96-2048 站位的低地森林百分比也显示了同步于岁差周期的波动情况,与本文的结果较为吻合^[5]。

除轨道参数的影响以外,还受到了区域诸如热带辐合带(ITCZ)、刚果气流边界(CAB)和附近海流如厄加勒斯海流^[51]等亚轨道因素的影响。ITCZ 的南北位置对半球间温度对比的变化有响应^[52]。北半球冷事件发生,引起 ITCZ 向南移动,致使降雨最大值的增加,并导致赞比西河流域降雨量以及陆地径流量的增加;但值得注意的是,印度洋海表温度并没有对赞比西河流域的降水产生明显的影响;另外当地夏季日照量增加时,降雨量也会增加^[53-54]。Lewis 等通过模拟北大西洋注入淡水后热盐环流的关闭,以模拟海因里希事件。结果显示,在南亚和中非季风区的大部分地区有较高的降水带来的 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素值,与 ITCZ 向南迁移引起的降水增加相对应^[55]。当北半球进入极度变冷的阶段时,南非东部向更湿润气候的快速变化可能是由阿古拉斯暖流的变暖和副热带反气旋的移动共同驱动的^[18, 56],即在北大西洋冷事件发生时,ITCZ 协同着赤道与近赤道的降雨带共同向南移动^[57],同时推动副热带反气旋向南移动,使得位于大陆东部的西南印度洋的水汽向陆移动从而使区域内气候变得潮湿^[58]。在岁差最大值的时期,夸祖鲁-纳塔尔省降水量增加是由于当地蒸发增加和从莫桑比克海岸向南非东部输送的水分增加共同作用的结果^[18]。气候模拟结果显示,厄加勒斯海流变冷可以导致非洲东南部上空形成冷干气团,降水减少^[59]。从 U1474 孔的黏土矿物结果中可以发现,当 MD962077 孔 SST 升高时,伴随着明显的伊利石化学指数和 $S/(I+C)$ 的上升,这也与厄加勒斯流的变暖对图盖拉河流域的气候影响有直接关联。

因此,非洲东南部图盖拉河流域的气候变化在亚轨道尺度上可能主要受到两个方面的直接影响,即 ITCZ 的移动和厄加勒斯暖流的热量调节。

ITCZ 的向南移动主要有两种原因:一种可能是在诸如末次冰盛期的寒冷阶段,北半球冰盖扩张,迫使 ITCZ 协同着其他大气环流共同南移;另一种可能是像 HS1 时期那样,当北半球的冰川融化时,融化的冰川水注入到北大西洋中,使北大西洋突然冷却,连同着北大西洋经向翻转环流共同降温,引起其上方的哈德利环流向南扩张,推动 ITCZ 的南移。

厄加勒斯海流变暖可能与北半球冷却时期引起的两极跷跷板效应有关。这种跷跷板效应主要是由于半球间异常的能量输送引起的,南北半球由

于海陆面积不同而导致热容不同,北半球海洋面积小,热容小,南半球则相反。由于北大西洋进入冷却期,其上部气团降温导致北半球气压增大,将原先的热量输送至南半球,导致南半球热量增加,引起南半球暖化从而使 AC 变暖。

5 结论

(1)IODP 361 航次 U1474 站位的黏土矿物主要以蒙脱石为主,其次是伊利石、高岭石和绿泥石。

(2)纳塔尔海谷 U1474 站位沉积物中的黏土矿物主要来源于临近的非洲大陆东南部图盖拉河流域的河流输入。

(3)自 MIS12 期以来,非洲东南部的气候变化呈现出明显的以岁差旋回为主的轨道驱动特征,可分为 5 个变化阶段,每个阶段内冰期寒冷干燥,间冰期相对温暖湿润。但每个冰期和间冰期都呈现出一定的亚轨道气候波动特征,常存在冷暖、干湿交替的情形。

(4)非洲东南部区域自 MIS12 期以来的气候变化除受到地球轨道岁差驱动的当地夏季日照和偏心率的影响外,还受到了以 ITCZ 和厄加勒斯海流为主的区域大气环流和附近海流的影响。

致谢: 本文研究样品是由“国际大洋发现计划 (IODP)”提供。感谢所有参加“IODP 361”航次“决心号”船上科学家、全体船员和实验室人员的努力和支持。感谢中国 IODP 办公室的资助和帮助。

参考文献 (References)

- [1] Kirtman B, Power S B, Adedoyin J A, et al. Near-term climate change: projections and predictability [M]//IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2013: 953-1028.
- [2] Castañeda I S, Werne J P, Johnson T C. Wet and arid phases in the southeast African tropics since the Last Glacial Maximum [J]. *Geology*, 2007, 35 (9): 823-826.
- [3] Beuning K R M, Zimmerman K A, Ivory S J, et al. Vegetation response to glacial-interglacial climate variability near Lake Malawi in the southern African tropics [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2011, 303 (1-4): 81-92.
- [4] Brown E T, Johnson T C, Scholz C A, et al. Abrupt change in tropical African climate linked to the bipolar seesaw over the past 55,000 years [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34 (20): L20702.
- [5] Dupont L. Orbital scale vegetation change in Africa [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2011, 30 (25-26): 3589-3602.

- [6] Compton J S. Pleistocene sea-level fluctuations and human evolution on the southern coastal plain of South Africa [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2011, 30 (5-6): 506-527.
- [7] Ziegler M, Simon M H, Hall I R, et al. Development of Middle Stone Age innovation linked to rapid climate change [J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 1905.
- [8] Konecky B L, Russell J M, Johnson T C, et al. Atmospheric circulation patterns during late Pleistocene climate changes at Lake Malawi, Africa [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 312 (3-4): 318-326.
- [9] Yin Q Z, Berger A. Insolation and CO₂ contribution to the interglacial climate before and after the Mid-Brunhes Event [J]. *Nature Geoscience*, 2010, 3 (4): 243-246.
- [10] Bintanja R, Van De Wal R S W, Oerlemans J. Modelled atmospheric temperatures and global sea levels over the past million years [J]. *Nature*, 2005, 437 (7055): 125-128.
- [11] Lambeck K, Esat T M, Potter E K. Links between climate and sea levels for the past three million years [J]. *Nature*, 2002, 419 (6903): 199-206.
- [12] Augustin L, Barbante C, Barnes P R F, et al. Eight glacial cycles from an Antarctic ice core [J]. *Nature*, 2004, 429 (6992): 623-628.
- [13] Lüthi D, Floch M L, Bereiter B, et al. High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present [J]. *Nature*, 2008, 453 (7193): 379-382.
- [14] Chen H J, Xu Z K, Clift P D, et al. Orbital-scale evolution of the Indian summer monsoon since 1.2 Ma: Evidence from clay mineral records at IODP Expedition 355 Site U1456 in the eastern Arabian Sea [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, 174: 11-22.
- [15] Martin A K, Goodlad S W, Salmon D A. Sedimentary basin in-fill in the northernmost Natal Valley, hiatus development and Agulhas Current palaeo-oceanography [J]. *Journal of the Geological Society*, 1982, 139 (2): 183-201.
- [16] Fairbanks D H K, Bunn G A. Identifying regional landscapes for conservation planning: a case study from KwaZulu-Natal, South Africa [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2000, 50 (4): 237-257.
- [17] Bard E, Rickaby R E M. Migration of the subtropical front as a modulator of glacial climate [J]. *Nature*, 2009, 460 (7253): 380-383.
- [18] Simon M H, Ziegler M, Bosmans J, et al. Eastern South African hydroclimate over the past 270, 000 years [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 18153.
- [19] Dupont L M, Caley T, Kim J H, et al. Glacial-interglacial vegetation dynamics in South Eastern Africa coupled to sea surface temperature variations in the Western Indian Ocean [J]. *Climate of the Past*, 2011, 7 (4): 1209-1224.
- [20] Hall I R, Hemming S R, LeVay L J, et al. Site U1474[R]//Proceedings of the International Ocean Discovery Program Volume 361. College Station: TX: International Ocean Discovery Program, 2017.
- [21] Reason C J C, Landman W, Tennant W. Seasonal to decadal prediction of southern African climate and its links with variability of the Atlantic Ocean [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2006, 87 (7): 941-956.
- [22] 张虎才. 参加国际大洋发现计划IODP 361的启示[J]. *地球科学进展*, 2016, 31 (4): 422-427. [ZHANG Hucai. Inspirations from IODP Expedition 361 [J]. *Advances in Earth Science*, 2016, 31 (4): 422-427.]
- [23] Liu Z F, Colin C, Huang W, et al. Climatic and tectonic controls on weathering in south China and Indochina Peninsula: clay mineralogical and geochemical investigations from the Pearl, Red, and Mekong drainage basins [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2007, 8 (5): Q05005.
- [24] Liu Z F, Trentesaux A, Clemens S C, et al. Clay mineral assemblages in the northern South China Sea: implications for East Asian monsoon evolution over the past 2 million years [J]. *Marine Geology*, 2003, 201 (1-3): 133-146.
- [25] Ginge F X. Holocene climatic optimum in Southwest Africa—evidence from the marine clay mineral record [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1996, 122 (1-4): 77-87.
- [26] Dingle R V, Goodlad S W, Martin A K. Bathymetry and stratigraphy of the northern Natal Valley (SW Indian Ocean): a preliminary account [J]. *Marine Geology*, 1978, 28 (1-2): 89-106.
- [27] Wiles E, Green A, Watkeys M, et al. The evolution of the Tugela canyon and submarine fan: a complex interaction between margin erosion and bottom current sweeping, southwest Indian Ocean, South Africa [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 44: 60-70.
- [28] Beal L M, Bryden H L. The velocity and vorticity structure of the Agulhas Current at 32°S [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1999, 104 (C3): 5151-5176.
- [29] Lutjeharms J R E. The Agulhas Current[M]. Berlin: Springer, 2006.
- [30] Beal L M, De Ruijter W P M, Biastoch A, et al. On the role of the Agulhas system in ocean circulation and climate [J]. *Nature*, 2011, 472 (7344): 429-436.
- [31] Gruetznier J, Espejo F J J, Lathika N, et al. A new seismic stratigraphy in the Indian - Atlantic Ocean gateway resembles major Paleo - oceanographic changes of the last 7 Ma [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2019, 20 (1): 339-358.
- [32] Schlüter P, Uenzelmann-Neben G. Indications for bottom current activity since Eocene times: the climate and ocean gateway archive of the Transkei Basin, South Africa [J]. *Global and Planetary Change*, 2008, 60 (3-4): 416-428.
- [33] Croudace I W, Rindby A, Rothwell R G. ITRAX: description and evaluation of a new multi-function X-ray core scanner [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 2006, 267 (1): 51-63.
- [34] Babin D P, Franzese A M, Hemming S R, et al. Data report: X-ray fluorescence core scanning of IODP Site U1474 sediments, Natal Valley, Southwest Indian Ocean, Expedition 361[R]//Proceedings of the International Ocean Discovery Program Volume 361. College Station, TX: International Ocean Discovery Program, 2020.
- [35] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T12763.8-2007 海洋调查规范 第8部分: 海洋地质地球物理调查[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007: 88. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB/T12763.8-2007 Specifications for oceanographic survey—Part 8: Marine geology and geophysics survey[S]. Beijing: Standards Press of

- China, 2007: 88.]
- [36] Zhao S H, Liu Z F, Colin C, et al. Responses of the East Asian summer monsoon in the low - latitude South China Sea to high - latitude millennial - scale climatic changes during the last glaciation: evidence from a high - resolution clay mineralogical record [J]. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 2018, 33 (7): 745-765.
- [37] Biscaye P E. Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay in the Atlantic Ocean and adjacent seas and oceans [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1965, 76 (7): 803-832.
- [38] Kübler B. Les argiles, indicateurs de métamorphisme [J]. *Revue de l'Institut Francaise du Pétrole*, 1964, 19: 1093-1113.
- [39] Lisiecki L E, Raymo M E. A Pliocene - Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records [J]. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 2005, 20 (1): PA1003.
- [40] 周怀阳, 叶瑛, 沈忠悦. 南海南部沉积物中黏土矿物组成变化及其古沉积信息记录初探[J]. *海洋学报*, 2004, 26 (2): 52-60. [ZHOU Huaiyang, YE Ying, SHEN Zhongyue. On the variation of clay minerals and their paleosedimentary records in the sediment cores in the southern area of the South China Sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2004, 26 (2): 52-60.]
- [41] 蓝先洪, 张志珣, 李日辉, 等. 长江口外表层沉积物黏土矿物分布特征[J]. *海洋地质前沿*, 2011, 27 (11): 1-7. [LAN Xianhong, ZHANG Zhixun, LI Rihui, et al. Distribution of clay minerals in surface sediments off Yangtze River estuary [J]. *Marine Geology Letters*, 2011, 27 (11): 1-7.]
- [42] 孙庆峰, 陈发虎, Colin C, 等. 粘土矿物在气候环境变化研究中的应用进展[J]. *矿物学报*, 2011, 31 (1): 146-152. [SUN Qingfeng, CHEN Fahu, Colin C, et al. Application progress of clay minerals in the researches of climate and environment [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2011, 31 (1): 146-152.]
- [43] 王颖, 乔淑卿, 葛晨东, 等. 预处理对海洋黏土矿物XRD测试结果的影响[J]. *海洋科学进展*, 2018, 36 (2): 242-252. [WANG Ying, QIAO Shuqing, GE Chendong, et al. The influence of pretreatment on the XRD analysis results of clay minerals in marine sediment [J]. *Advances in Marine Science*, 2018, 36 (2): 242-252.]
- [44] Robert C, Diester-Haass L, Paturel J. Clay mineral assemblages, siliciclastic input and paleoproductivity at ODP Site 1085 off Southwest Africa: a late Miocene-early Pliocene history of Orange river discharges and Benguela current activity, and their relation to global sea level change [J]. *Marine Geology*, 2005, 216 (4): 221-238.
- [45] Schüürman J, Hahn A, Zabel M. In search of sediment deposits from the Limpopo (Delagoa Bight, southern Africa): deciphering the catchment provenance of coastal sediments [J]. *Sedimentary Geology*, 2019, 380: 94-104.
- [46] Cass A, Johnston M A. Physical and clay mineralogical properties of some Natal and eastern Transvaal soils [J]. *South African Journal of Plant and Soil*, 1985, 2 (2): 79-84.
- [47] Setti M, López-Galindo A, Padoan M, et al. Clay mineralogy in southern Africa river muds [J]. *Clay Minerals*, 2014, 49 (5): 717-733.
- [48] Liu Z H, Pagani M, Zinniker D, et al. Global cooling during the eocene-oligocene climate transition [J]. *Science*, 2009, 323 (5918): 1187-1190.
- [49] Nace T E, Baker P A, Dwyer G S, et al. The role of North Brazil Current transport in the paleoclimate of the Brazilian Nordeste margin and paleoceanography of the western tropical Atlantic during the late Quaternary [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2014, 415: 3-13.
- [50] Laskar J, Robutel P, Joutel F, et al. A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2004, 428 (1): 261-285.
- [51] Simon M H, Arthur K L, Hall I R, et al. Millennial-scale Agulhas Current variability and its implications for salt-leakage through the Indian-Atlantic Ocean Gateway [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 383: 101-112.
- [52] Broccoli A J, Dahl K A, Stouffer R J. Response of the ITCZ to Northern Hemisphere cooling [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33 (1): L01702.
- [53] Schefuß E, Kuhlmann H, Mollenhauer G, et al. Forcing of wet phases in southeast Africa over the past 17, 000 years [J]. *Nature*, 2011, 480 (7378): 509-512.
- [54] Wang Y V, Larsen T, Leduc G, et al. What does leaf wax δD from a mixed C_3/C_4 vegetation region tell us? [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2013, 111: 128-139.
- [55] Lewis S C, LeGrande A N, Kelley M, et al. Water vapour source impacts on oxygen isotope variability in tropical precipitation during Heinrich events [J]. *Climate of the Past*, 2010, 6 (3): 325-343.
- [56] Vellinga M, Wood R A. Global climatic impacts of a collapse of the Atlantic thermohaline circulation [J]. *Climatic Change*, 2002, 54 (3): 251-267.
- [57] Stouffer R J, Yin J, Gregory J M, et al. Investigating the causes of the response of the thermohaline circulation to past and future climate changes [J]. *Journal of Climate*, 2006, 19 (8): 1365-1387.
- [58] Reason C J C, Mulenga H. Relationships between South African rainfall and SST anomalies in the southwest Indian Ocean [J]. *International Journal of Climatology*, 1999, 19 (15): 1651-1673.
- [59] Reason C J C. Evidence for the influence of the Agulhas Current on regional atmospheric circulation patterns [J]. *Journal of Climate*, 2001, 14 (12): 2769-2778.