

南海北部深海沉积元素记录的氧同位素 3 期以来千年尺度快速气候波动

谢昕^{①*}, 郑洪波^②, 乔培军^①

① 同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092;

② 南京师范大学地理科学学院, 南京 210097

* 联系人, E-mail: xiexin@tongji.edu.cn

2013-04-19 收稿, 2013-11-11 接受, 2014-02-25 网络版发表

国家自然科学基金(40806021, 40830107, 91128208)和国家重点基础研究发展计划(2007CB815906)资助

摘要 对南海北部 MD05-2903 岩芯进行的高分辨率元素含量测试发现, K/Ti 值可较完整、细致地揭示出氧同位素 3 期(MIS 3)以来的千年尺度快速气候变化, 应是目前从南海深海沉积中获得的该时期分辨率最高、千年尺度气候变化信号最强的古气候记录. 与高纬极地冰芯及北半球中-低纬石笋氧同位素记录的对比发现, MD05-2903 岩芯 K/Ti 值具有类似锯齿状的气候变化特征. 粒度分析发现, K/Ti 值与细端元粒度组含量同步变化; 矿物成分测试表明, 富 K 的伊利石含量在 K/Ti 峰值处明显比低值处增高, 含 Ti 重矿物的含量变化则相反. 因此认为, 在千年尺度上, K/Ti 值反映了以伊利石为主的富 K 细粒风化矿物和含 Ti 重矿物在冰阶和间冰阶对南海北部的输入及沉积变化, 而这受到了东亚季风变迁带来的降雨变化, 以及随之引起的陆地母岩风化产物剥蚀程度及河流搬运能力变化的控制.

关键词

K/Ti

千年尺度气候波动
氧同位素 3 期以来
陆地风化
南海北部
深海陆源碎屑

古气候记录证实, 全球气候系统在晚第四纪冰期旋回中存在着千年级周期性快速冷暖波动^[1-4], 尤以高纬极地冰芯和中-低纬石笋中具高分辨率、显著变化的氧同位素较清晰地揭示出各自记录的快速气候变化过程. 但冰芯和石笋氧同位素记录的应主要是高纬和中-低纬陆地古大气的变化, 为深入了解和探究全球性快速气候波动, 仍需进一步发掘和对比全球不同纬度、不同性质的古气候记录. 因此, 低纬深海沉积中的记录信息应构成进行全球尺度千年级气候变化对比的重要环节. 但目前, 除个别地点外^[5,6], 来自低纬海洋且信号变化连续、明显, 并可与冰芯及石笋氧同位素进行较好比对的千年级变化记录仍较缺乏.

作为西太平洋低纬区最大的边缘海, 南海位处全球最大的季风气候系统——东亚季风区内, 且与暖

池相接, 并承受在季风气候影响下, 大量周边陆地风化剥蚀产物及海洋自生物质的沉积. 对这些深海沉积, 前人已开展了许多工作, 并主要从古海洋学角度发现了一些千年尺度气候变化的记录^[7-11], 但这些记录信号多限于研究分辨率或不够明显的变化幅度而难以清晰地展示所记录的快速气候变化的过程和特征. 本文对采于南海北部的 MD05-2903 号深海沉积岩芯进行了高分辨率元素含量测试, 从中发现了 K 与 Ti 两种元素的比值具有显著的千年尺度快速变化, 其变化幅度和变化特征均与高纬格陵兰冰芯以及中-低纬东亚石笋中的氧同位素变化信号接近. 结合粒度和矿物成分分析, 证实其反映的是南海北部周边地区陆源风化碎屑的沉积, 应受东亚季风变化的控制. 因此, 本文试图通过揭示造成重要元素含量变化的地质过程, 追索南海及周边陆地对快速气候变化

引用格式: 谢昕, 郑洪波, 乔培军. 南海北部深海沉积元素记录的氧同位素 3 期以来千年尺度快速气候波动. 科学通报, 2014, 59: 1006-1015

英文版见: Xie X, Zheng H B, Qiao P J. Millennial climate changes since MIS 3 revealed by element records in deep sea sediments from northern South China Sea. Chin Sci Bull, 2014, 59: 776-784, doi: 10.1007/11434-014-0117-9

的古环境反应, 并通过不同纬度、不同记录材料的信息对比和梳理, 为探讨快速气候变化的发生机制和全球响应, 提供重要信息.

1 材料与方 法

MD05-2903 号岩芯由法国 Marion Dufresne 考察船, 在 2005 年 5 月执行的 IMAGES MD147(MARCO POLO)航次中, 采于南海东北部陆坡(116°15.06'N, 19°27.31'E; 图 1). 岩芯全长 1118 cm, 水深 2047 m, 岩性较均一, 为青灰色泥质或粉砂质黏土, 基本无生物扰动或浊流沉积^[12]. 该岩芯为方柱状重力取样岩芯(Casq Core), 采取过程中不会发生拉伸变形, 采样质量可保证高分辨率研究的准确性.

将岩芯各段表面处理平整后, 铺设专用测试薄膜(ultralene, 厚度 4 μm), 在同济大学海洋地质国家重点实验室利用 AVAATECH 公司生产的 X 荧光光谱岩芯扫描仪(XRF Core Scanner)^[13]进行 1 cm 测试分辨率的元素含量分析, 每个测试点的 X 光斑照射面积 10 mm×16 mm, 计数时间 30 s. 对 ¹³Al~²⁶Fe 元素的测试条件为电压 10 kV, 电流 0.2 mA, 不使用滤光片; 对 ²⁷Co~⁴²Mo 元素的测试条件为电压 30 kV,

电流 0.8 mA, 使用厚 Pb 质滤光片; 对 ⁴³Tc~⁹²U 元素的测试条件为电压 50 kV, 电流 0.2 mA, 使用 Cu 质滤光片. 最终测得岩芯中 ¹³Al~⁹²U 元素全岩相对含量的连续变化, 数值单位: 计数/30 s.

根据岩芯的高分辨率元素含量变化特征, 在发生重要变化的沉积层位采集 151 个样品进行了粒度测试, 12 个样品进行了矿物成分分析. 此外, 还采集了 66 个样品进行了 ICP-AES 和 ICP-MS 的全岩样品主量和微量元素含量分析, 以与 X 荧光光谱岩芯扫描仪的测试结果进行对比.

粒度测试使用同济大学海洋地质国家重点实验室 Beckman Coulter LS 230 型全自动激光粒度仪完成. 仪器测量范围 0.04~2000 μm, 对同一样品平均粒度的重复性测试偏差≤1%. 预处理过程中, 分别利用 H₂O₂、醋酸和 NaOH 去除了样品中的有机质、CaCO₃ 和蛋白石^[14].

矿物分析在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室利用日本理学 D/Max-IIIa 型固定靶 X 射线粉末衍射仪完成. 仪器操作和实验条件参见 Cai 等人^[15]. 其中, 本文样品的预置时间为 2 s. 样品分析前, 利用醋酸去除了其中的 CaCO₃.

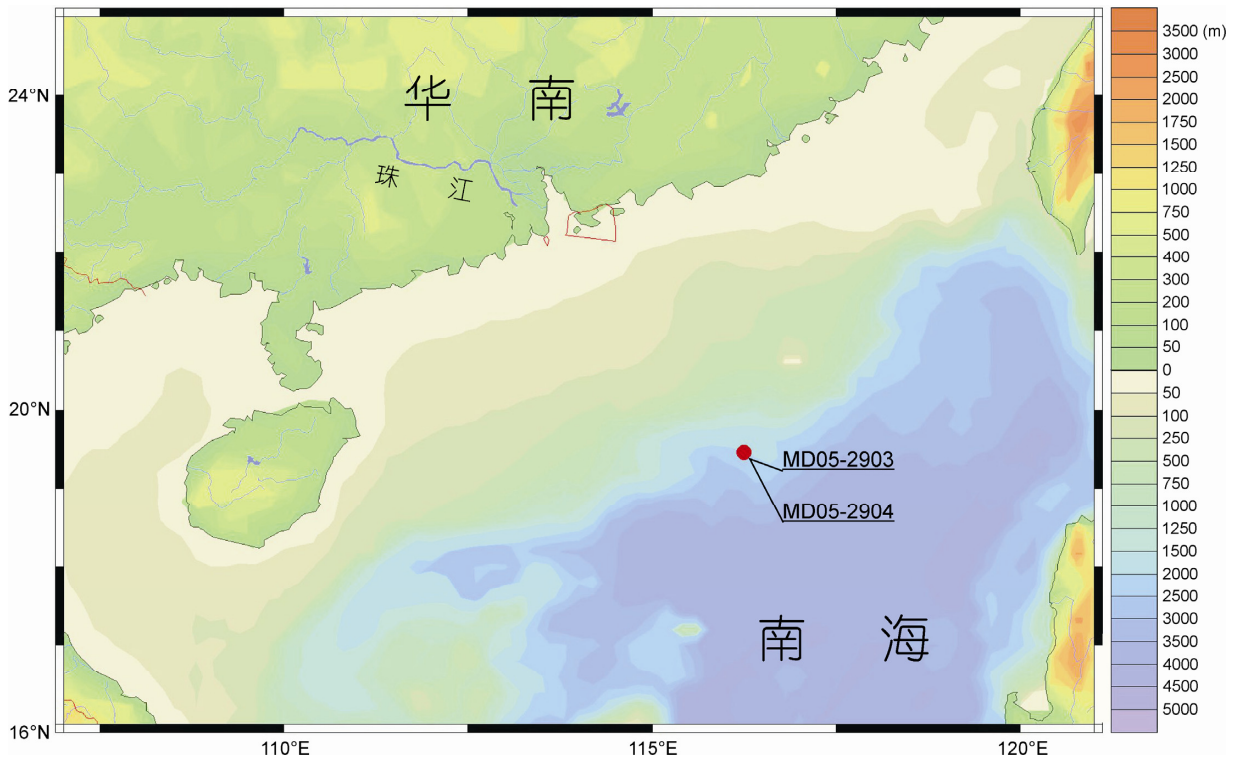


图 1 南海北部和周边地区地形图及 MD05-2903 岩芯采样位置

对 66 个样品的全岩主量和微量元素含量分析在同济大学海洋地质国家重点实验室利用 IRIS Advantage 型 ICP-AES 和 PE Elan 6000 型 ICP-MS 完成. 样品测试前经 600℃ 高温灼烧 3 h, 再用 HF+HNO₃ 进行了溶解预处理. 样品精确度及准确度由国际标样 (GSR25, GSR26, GSD29 和 GSD212) 及空白样品监控.

对 MD05-2903 岩芯所处站位的沉积序列, 已通过同站位 MD05-2904 柱状岩芯 (Calypso Core; 116°15.15'N, 19°27.32'E; 水深 2066 m; 全长 4498 m;

图 1) 的浮游有孔虫 *G. ruber* 氧同位素分析和 AMS ¹⁴C 测年建立起了精确的年龄标尺^[16](图 2). 对 MD05-2904 岩芯以 4 cm 间距采样, 经 600℃ 高温灼烧 3 h, 再用 HF+HNO₃ 进行溶解预处理后, 使用同济大学海洋地质国家重点实验室的 IRIS Advantage 型 ICP-AES 进行分析, 获得包括 CaO 在内的全岩主量元素含量. 样品精确度及准确度同样由国际标样 (GSR25, GSR26, GSD29 和 GSD212) 及空白样品监控.

将 X 荧光光谱岩芯扫描仪测得的 MD05-2903 岩

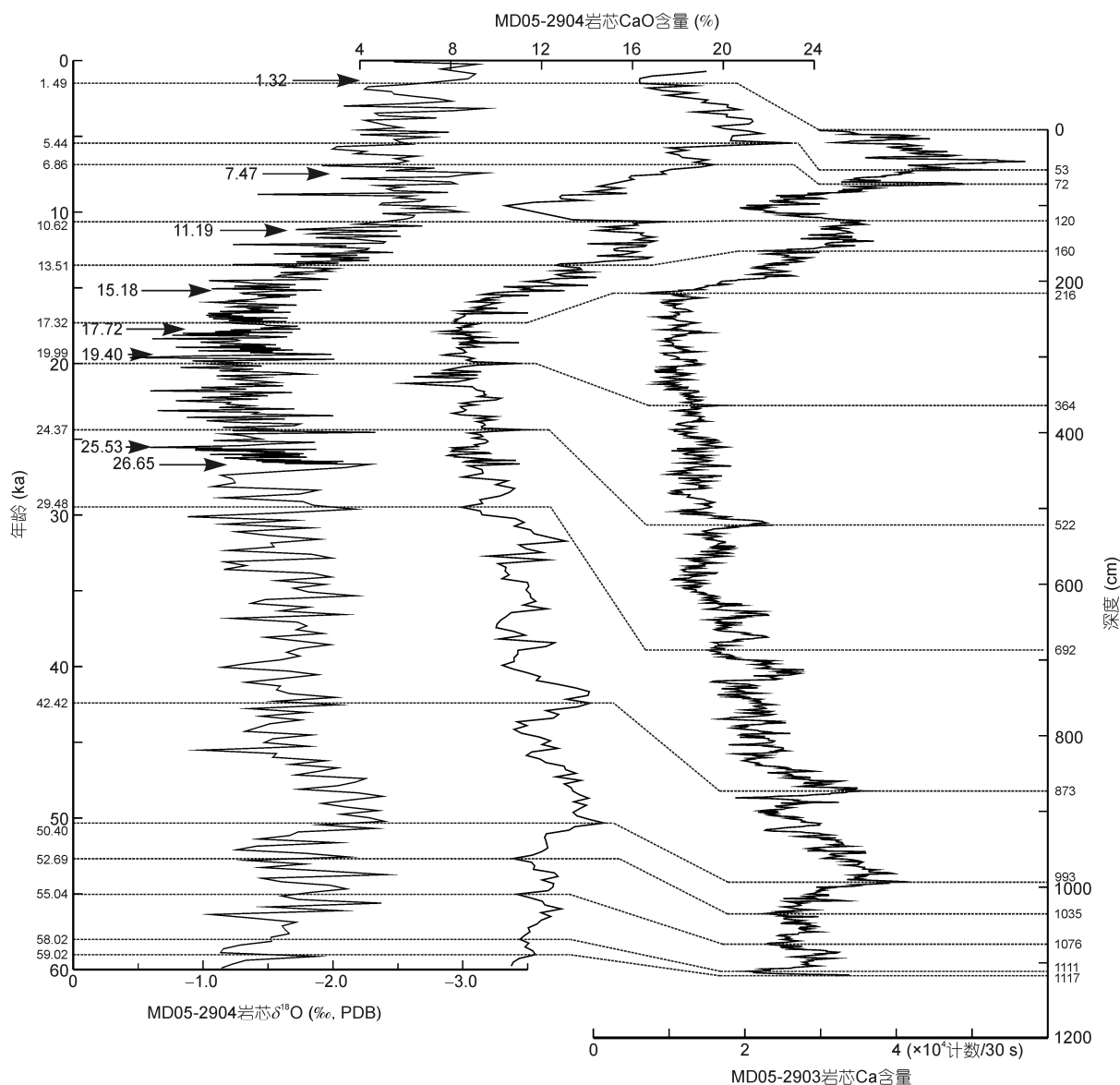


图 2 建立 MD05-2903 岩芯的年龄标尺

有孔虫氧同位素数据及箭头所示的 AMS ¹⁴C 测年数据引自文献[16]; 虚线指示通过比对 MD05-2903 Ca 含量变化与 MD05-2904 CaO 含量变化得到的年龄控制点

芯 Ca 元素含量变化曲线与 MD05-2904 岩芯 CaO 含量变化曲线进行代表性峰、谷之间的层序对应, 得到 MD05-2903 岩芯的年龄控制点(图 2), 随后通过线性内插建立年龄标尺. 由于 MD05-2903 和 MD05-2904 为同站位岩芯, 它们相同层位中的 Ca 元素与 CaO 的含量变化一致(图 2), 因此所建立的 MD05-2903 岩芯年龄标尺具备开展千年尺度变化研究的精确度. 结果表明, MD05-2903 岩芯底部年龄 59.02 ka, 基本是深海有孔虫氧同位素 3 期(MIS 3)的起始年代.

2 元素含量测试结果

X 荧光光谱岩芯扫描仪测得的各元素含量变化与 ICP-AES 和 ICP-MS 测得的对应元素的含量变化基本一致(图略). X 荧光光谱岩芯扫描仪的测试结果显示, 主要赋存在陆源碎屑物质中的几种代表性元素 (Al, Si, K, Ti, Fe, Zr) 在岩芯中的含量变化特征总体相似(图 3(a)~(f)), 各元素的含量最高值及最低值均出现在冰期, 因而冰期时的含量变化幅度均较大; 全新世的变化幅度则明显减小; 同时, 各元素含量均呈现明显的高频波动.

鉴于这些主要来自陆源的元素和基本来自海洋

生源物质(有孔虫、颗石藻等)的元素 Ca(图 3(g)), 在含量变化上基本相反, 说明岩芯中陆源物质和海洋生源物质存在相互稀释作用; 而 X 荧光光谱岩芯扫描仪在测试时, 各元素的 X 荧光信号会受到岩芯含水量及颗粒效应的影响^[17], 因此单一元素的含量变化难以准确反映所经历的地质过程的变化, 而选用合适的元素对比值可基本消除 2 个元素在测试时所同时受到的干扰信息. 根据比较和借鉴前人工作, 发现使用 Ti 元素来对其他元素进行标准化, 具有较好效果. 这是由于 Ti 为难熔元素, 主要赋存在陆壳岩石中^[18], 且在沉积物中对氧化还原作用不敏感, 不易受到成岩作用的影响, 因此该元素常被用来指示海洋沉积物中陆源碎屑物质的输入^[18-21], 而在南海北部 1144 站岩芯的研究中, 也证实了经 Ti 标准化后的多种元素, 能较好反映冰期旋回尺度的变化^[22].

经 Ti 标准化后, MD05-2903 岩芯的 Fe/Ti 和 Zr/Ti 值变化幅度减小, Al/Ti, Si/Ti 和 K/Ti 值则显示出明显的冰期旋回变化和千年尺度的快速波动. 进一步对比发现, K/Ti 曲线的变化与北半球高纬格陵兰 GISP 2 冰芯(<http://www.ngdc.noaa.gov/paleo/icecore/greenland/summit/index.html>)和东亚季风区中-低纬度石笋^[23]的

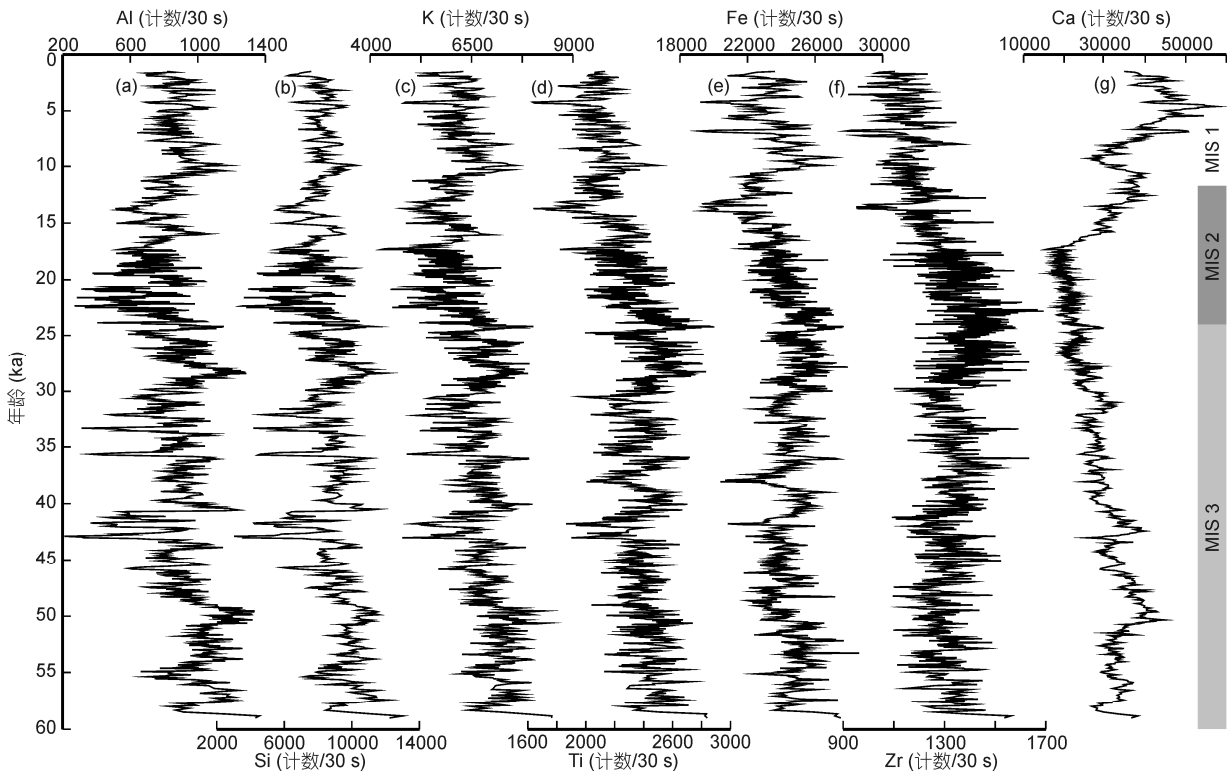


图 3 MD05-2903 代表性元素含量变化曲线

记录最为接近(图 4), 而 Al/Ti 和 Si/Ti 曲线反映的千年级变化相对不够突出. 这可能是该海区沉积物中存在少量海洋生物化学成因的“过剩 Al”^[25,26]和生物 Si, 从而造成全岩 Al, Si 含量不能完全反映陆源物质

信息; 此外, Al 和 Si 是 X 荧光光谱岩芯扫描仪能测得的原子量最轻的 2 种元素, 它们被入射 X 射线激发出的 X 荧光信号值较低而造成其含量分析较易受岩芯中含水量变化的影响^[17]. 而 K 和 Ti 的原子序数较

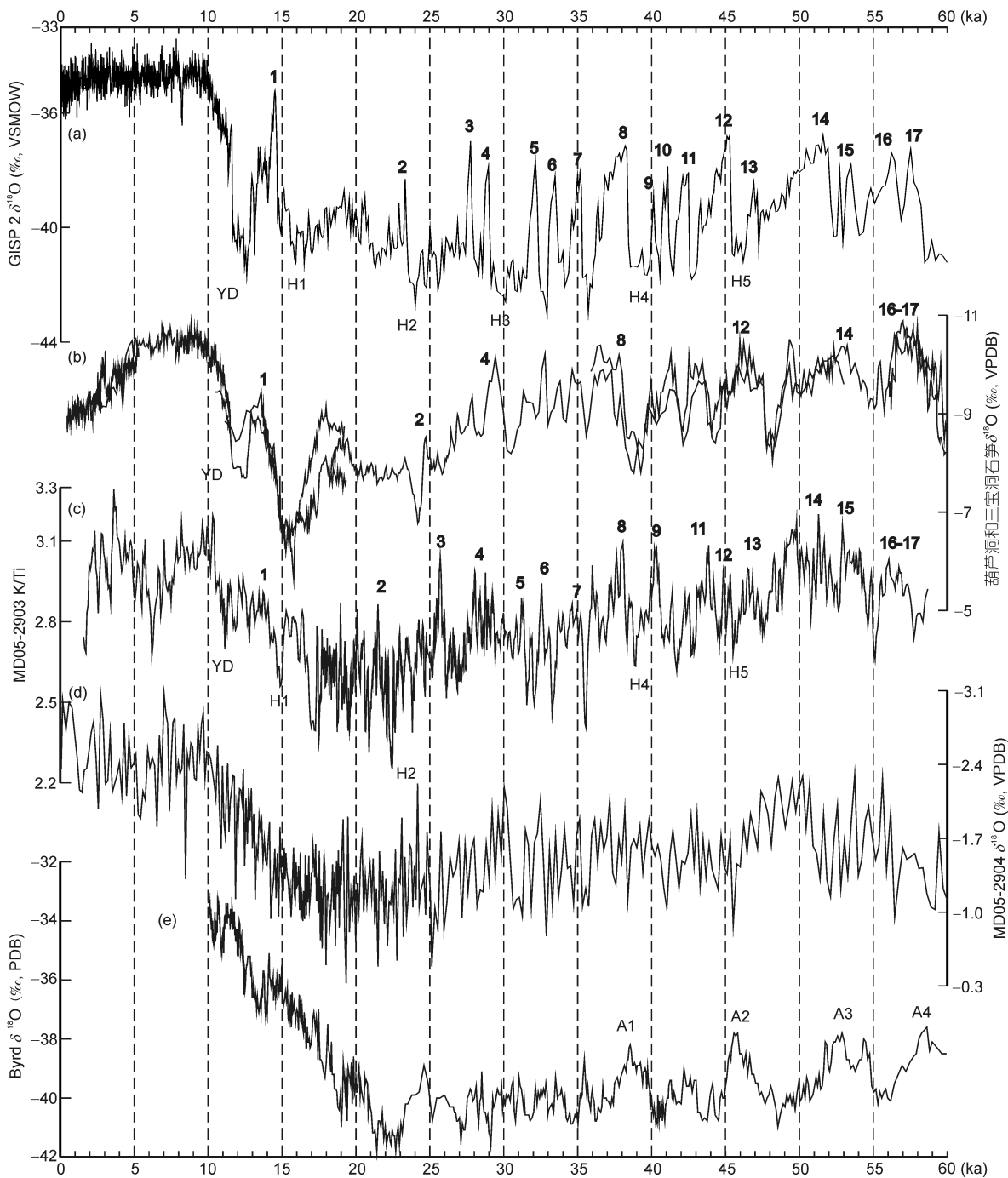


图 4 MD05-2903 岩芯 60 ka 以来的 K/Ti 变化与不同纬度气候变化记录的对比

(a) 格陵兰 GISP 2 冰芯氧同位素(<http://www.ngdc.noaa.gov/paleo/icecore/greenland/summit/index.html>); (b) 葫芦洞和三宝洞石笋氧同位素^[23]; (c) MD05-2903 岩芯 K/Ti, 经 3 点平滑; (d) MD05-2904 岩芯有孔虫 *G. ruber* 氧同位素^[16]; (e) 南极 Byrd 冰芯氧同位素^[24]

大,被激发出的X荧光信号值相对较强;且均为主要元素,仪器对其测试条件一致;同时,两种元素所受到的颗粒效应、岩芯含水量等因素的干扰程度接近,因而其比值可基本消除这些影响.据 ICP-AES 的测试结果得到的 K/Ti 变化,与据 X 荧光光谱岩芯扫描仪得到的 K/Ti 变化基本一致,也证明对于 MD05-2903 岩芯,选用 K/Ti 可较真实地反应出 X 荧光光谱岩芯扫描仪测得的代表性元素比值变化.

MD05-2903 岩芯 K/Ti 值的变化在冰期旋回尺度上可明显看出(图 4(c)),在全新世时期(10~0 ka)最高, MIS 2 期(24~10 ka)最低,在 MIS 3 期(59~24 ka)则介于两者之间,与北极格陵兰冰芯(GISP 2; 图 4(a)) (<http://www.ngdc.noaa.gov/paleo/icecore/greenland/summit/index.html>)、中-低纬度东亚季风区石笋(图 4(b))^[23]、南极冰芯(Byrd; 图 4(e))^[24]以及 MD05-2904 岩芯的有孔虫氧同位素(图 4(d))^[16]的冰期尺度变化记录相同.

在千年尺度上(图 4), MD05-2903 岩芯 K/Ti 值呈现多个显著峰值,且基本均能与格陵兰 GISP 2 冰芯和东亚中-低纬度石笋揭示的各次 Dansgaard/Oeschger 事件(D/O 事件)在年龄标尺上及波动幅度上相对应,尤其是 MIS 3 期的 D/O 3, 8, 9, 11 和 14 的 K/Ti 峰值最为明显,并接近全新世时段内的 K/Ti 峰值,这与 GISP 2 冰芯和石笋氧同位素在 MIS 3 期中的千年级波动幅度相同;而 K/Ti 曲线呈现的 D/O 16, 17 事件的发生过程势态与石笋氧同位素的对应变化较相似.一系列 Heinrich 和新仙女木等变冷事件在 K/Ti 曲线上也有反映,并与 GISP 2 中的记录对应,尤以 H1 和 H2 最为显著;此外,在 K/Ti 曲线的 D/O 6 和 5 之间, D/O 8 和 7 之间, D/O 16 之后均有明显的低值事件,也与 GISP 2 氧同位素的对应变化相符.需指出的是, K/Ti 曲线上的 D/O 8, 11 和 14 表现出类似格陵兰冰芯的锯齿状变化,如 D/O 8 旋回中, K/Ti 值由 H4 上升到峰值用时 0.86 ka, 而由 D/O 8 峰值下降到 D/O 8 和 7 之间的低值用时 2.43 ka, GISP 2 氧同位素的对应变化时间分别为 1 和 2.45 ka; 因此,两者均有先快速上升,再波动下降的变化特征. K/Ti 曲线上多数 D/O 事件的锯齿状特征不够明显,可能是它们的持续时间较短而难以分辨,或深海沉积过程复杂造成记录不够清晰.全新世阶段, MD05-2903 岩芯 K/Ti 值的千年级波动幅度比冰期时偏低,但明显高于 GISP 2 和石笋氧同位素的相应变化幅度;同站

MD05-2904 岩芯浮游有孔虫氧同位素(图 4(d)), 以及与本站位接近的 17940 岩芯表层海水盐度^[7], 在全新世也有较大幅度高频变化,可能暗示全新世南海北部及周边地区的区域性气候和环境变化相较于其他纬度有较大波动.

3 K/Ti 值变化机理及反映的千年尺度气候变化信息

3.1 K/Ti 值变化机理分析

对 MD05-2903 号岩芯 K/Ti 曲线显示各 D/O 事件暖期峰值和冷期低值所在沉积层位,以及全新世较明显的暖、冷事件峰值和低值所在沉积层位进行采样;同时,对持续时间较长的 D/O 8, 11~14 进行 3 cm 间隔的采样,共获得 151 个样品.

对这些样品进行粒度测试,并对测得数据进行标准偏差端元分析,提取岩芯沉积序列中对沉积环境变化敏感的粒度组分^[27,28],结果得到 2 个粒度组端元(图 5).其中,细端元组分的粒径介于 3~5 μm ,粗端元组分的粒径介于 13~16 μm .将粗、细粒径端元的百分含量变化与 K/Ti 变化进行对比,发现在冰期旋回尺度上,粗粒径端元的含量变化与 K/Ti 变化相反,而细粒径端元的含量变化与 K/Ti 的变化相似,呈现全新世含量较高,冰期含量较低的特征;在千年尺度上,细粒径端元的含量变化幅度明显较低(图 6(b)).但对细粒径端元的含量变化幅度放大观察,发现该端元的含量变化实际上与 K/Ti 同步(图 6(a)):当 K/Ti 呈现峰值时,细粒径端元的含量也达到峰值,如 D/O 9, 11~17;在 K/Ti 降至低值时,细粒径端元的含量也降低,如 H4 和 H5;当 K/Ti 值逐步下降时,细粒径端元的含量也同步下降,如从 D/O 14 变化至该旋回的低值.因此,细粒径端元的百分含量与 K/Ti 实际上在同时变化,只是在变化幅度上有所差别.需说明的是,虽然图 6(a)仅显示了岩芯中具有较高采样密度的 40 ka 之前的上述变化,但在岩芯其他层位中,细端元粒度组分的含量与 K/Ti 也具同步变化.

鉴于 D/O 8 在格陵兰冰芯氧同位素和 MD05-2903 岩芯 K/Ti 曲线上均有较突出且持续时间较长的记录,并均表现出较明显的锯齿状变化特征(图 4(a), (c)),因此,根据岩芯的 K/Ti 值变化,在 D/O 8 旋回中具有代表性变化的 4 处沉积层位采集了样品,在去除碳酸盐后进行了 X 射线衍射(XRD)矿物分析.结

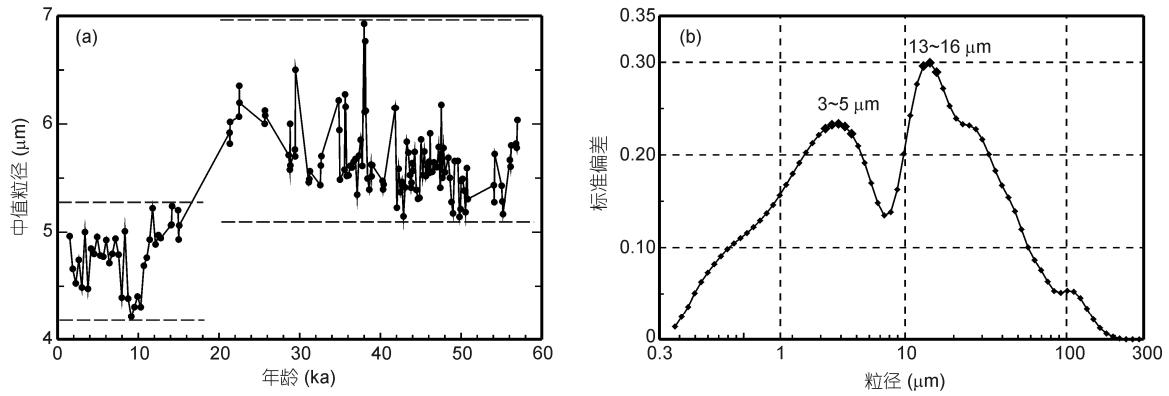


图5 MD05-2903岩芯粒度分析结果

(a) MD05-2903岩芯粒度的中值粒径变化; (b) MD05-2903岩芯粒度的标准偏差端元分析

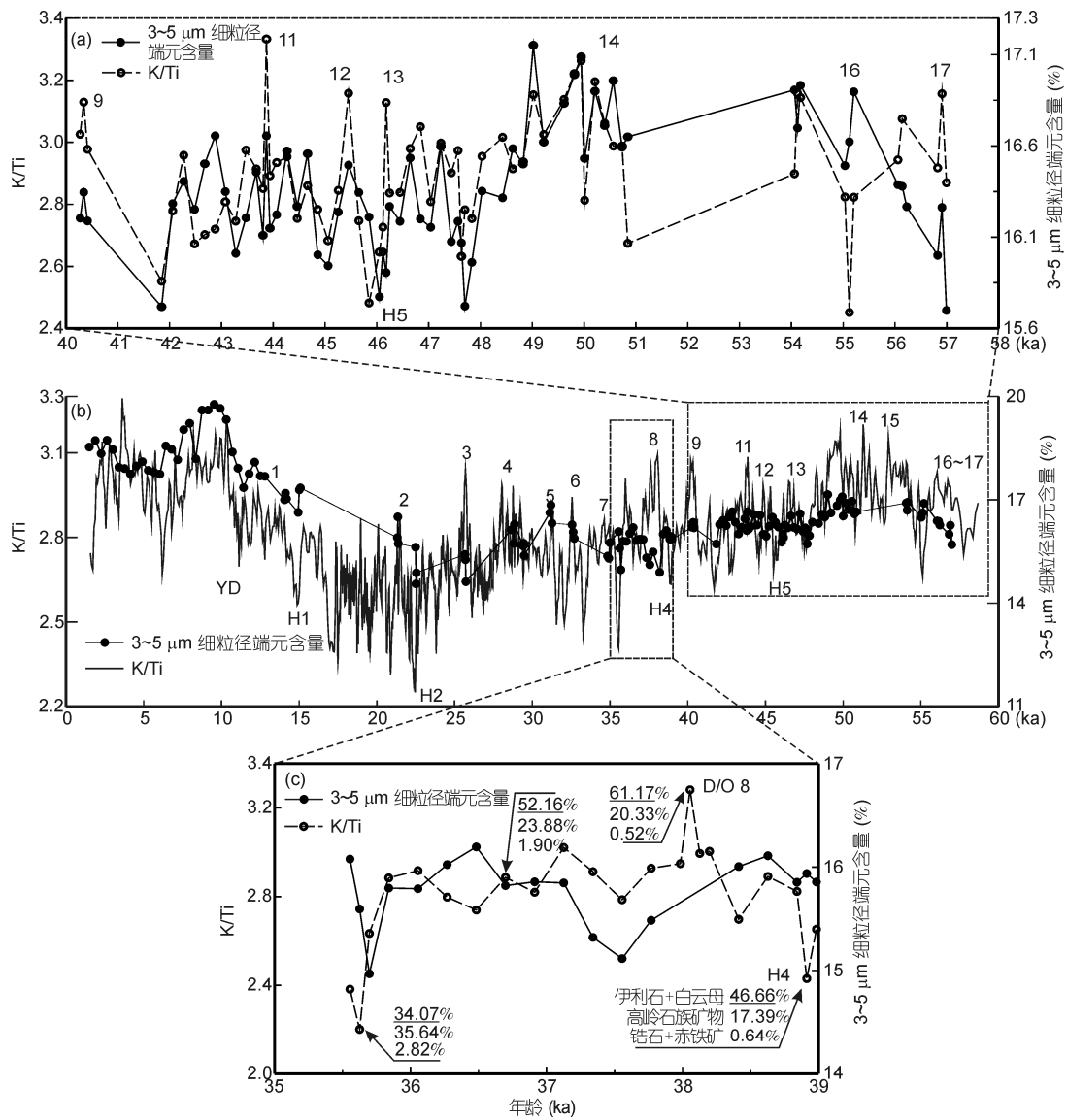


图6 MD05-2903岩芯细端元粒度组分含量变化及矿物成分变化与K/Ti的对比

果表明(表 1; 图 6(c)), 在 K/Ti 指示的 H4 事件发生处, 富 K 的伊利石($K_{0.75}(Al_{1.75}R)[Si_{3.5}Al_{0.5}O_{10}](OH)_2$)和白云母($KA_2[Si_3AlO_{10}](OH,F)_2$)的全部含量为 46.66%, 高岭石族矿物(表 1 中的钠脱石和高岭石)含量为 17.39%, 以锆石和赤铁矿为代表的重矿物含量则为 0.64%; 在 D/O 8 暖期峰值时, 伊利石和白云母的含量显著增高至 61.17%, 高岭石族矿物含量 20.33%, 锆石和赤铁矿含量则下降至 0.52%; 在 36.70 ka 时(暖、冷过渡期), 伊利石和白云母的含量下降至 52.16%, 高岭石族矿物含量则升至 23.88%, 锆石和赤铁矿含量也增至 1.90%; 在 36.63 ka 时(D/O 7 和 8 之间较明显的冷事件), 伊利石和白云母的含量下降到 34.07%, 高岭石族矿物含量升高到 35.64%, 锆石和赤铁矿含量则达到 2.82%。因此, 可明显看出, 当气候处于暖期, 富 K 的伊利石和白云母, 尤其是伊利石的含量增高, 而高岭石族矿物和重矿物的含量降低; 当气候处于冷期, 则相反; 当气候介于冷暖之间, 各种矿物的含量则均介于其冷、暖期对应含量之间。

因此, MD05-2903 岩芯的 K/Ti 值与细端元粒度组分的百分含量同步变化(图 6(a)), 在它们达到峰值时, 在对应的沉积层位出现较多的伊利石和白云母, 以及较低含量的重矿物; 而在它们达到低值时则相反(图 6(c))。这说明 K/Ti 值实际主要反映细粒且富 K 的矿物在沉积岩芯中的含量变化, 其中, 富 K 矿物的含量变化以伊利石的变化为主(表 1)。另需指出, K/Ti 值的变化幅度明显高于细端元粒度组分含量的变化幅度(图 6(b)), 应是由于 Ti 元素通常在重矿物中更为富集, 而重矿物的风化、搬运、沉积过程显然与细粒、轻质的风化物不同。在气候暖湿期, 即间冰阶, 应有大量细粒、富 K 风化物形成并输入南海沉积, 同时造成重矿物相对沉积量的减少; 反之亦然。因此, 岩芯中重矿物的含量与富 K 矿物的含量变化相反, 从而造成 K 与 Ti 元素的比值将古气候的变化信号放

大, 使得 K/Ti 曲线具有较为突出的千年尺度变化。

3.2 K/Ti 值反映的千年尺度气候变化信息

对于南海深海沉积记录的千年尺度气候变化, 已开展了不少研究工作^[7-9,11,16,29]。但限于研究分辨率和所用指标的信号变化幅度, 这些记录仅是反映出南海深海沉积对高纬发生的快速气候突变有所响应, 但变化细节难以展现, 因而无法与其他纬度的高分辨率记录进行深入对比。另一方面, 现有的南海快速气候变化研究多利用有孔虫氧同位素等指标从古海洋学角度开展^[7-9,11,16], 而南海深海沉积物中近 80%为周边的陆源碎屑物质^[22,30], 虽其风化、搬运和沉积过程较为复杂, 但显然应具有更多的快速气候波动背景下陆源区环境变化信息。

MD05-2903 岩芯的 K/Ti 高分辨率变化曲线较明显地展示出了自氧同位素 3 期以来的历次 D/O 事件和 Heinrich 事件(除 D/O 10 及 H3, 图 4(c)), 并可与格陵兰冰芯和东亚季风区石笋的记录较好对应; 同时, 若干典型 D/O 事件(如 D/O 8 和 14)的记录呈现 K/Ti 值先快速上升, 再阶段性逐步波动下降的特征, 与格陵兰冰芯氧同位素的锯齿状变化特征(图 4(a))相似, 而与南极冰芯氧同位素曲线呈现的气温先逐步上升再逐步下降的变化形态(图 4(e))明显不同。但需注意的是, MD05-2903 岩芯的陆源碎屑物质应来自南海以北周边陆地, 因此 K/Ti 的变化应与东亚季风区石笋氧同位素共同说明, 至少南海以北的中-低纬地区呈现出与北半球高纬地区类似的千年尺度气候变化特征。

而对于南海深海沉积的陆源碎屑矿物, 尤其是黏土矿物, 前人已做了大量工作^[27,31-38], 并证明南海东北部陆坡沉积的伊利石主要来源于台湾山区河流和珠江的输入^[33,35,38]。在这些伊利石的形成、剥蚀、搬运和沉积过程中, 无疑会受到大气暖湿变化、河流及洋流搬运能力、洋流流向、海平面升降等一系列东亚季风区或全球性气候、环境变化的复杂控制。

表 1 MD05-2903 岩芯样品 XRD 矿物成分分析结果

年龄 (ka)	深度 (cm)	石英 (%)	伊利石 (%)	白云母 (%)	钠长石 (%)	绿泥石 (%)	钠脱石 ^{a)} (%)	高岭石 ^{b)} (%)	蒙脱石 (%)	赤铁矿 (%)	锆石 (%)
35.63	778	7.42	24.40	9.67	8.19	10.06	34.24	1.40	1.80	2.08	0.74
36.70	793	5.84	34.42	17.74	9.63	4.91	21.56	1.82	2.16	1.48	0.42
38.06	812	5.01	48.71	12.46	6.06	5.41	18.28	2.05	1.51	0.46	0.06
38.91	824	6.30	25.78	20.88	3.78	23.58	15.97	1.42	1.36	0.53	0.11

a)为高岭石族晶体结构最为稳定的矿物; b)为样品中除钠脱石之外的其余高岭石族矿物

MD05-2903 岩芯的 K/Ti 曲线与东亚季风区石笋氧同位素在整体变化形态, 以及多数 D/O 事件上均有较好对应(图 4(b), (c)), 可能暗示在千年尺度上, 东亚季风变迁带来的降雨变化, 以及随之引起的陆地母岩风化产物剥蚀程度及河流搬运能力的变化, 是控制以伊利石为代表的富 K 风化矿物在南海东北部陆坡沉积的主要因素。

4 结论

本文对南海北部 MD05-2903 岩芯进行了高分辨率元素含量测试, 及重要沉积层位的陆源碎屑物粒度和矿物成分分析, 并通过与该海区以及全球其他纬度记录材料的对比, 得到以下主要结论。

(1) 南海北部 MD05-2903 岩芯的高分辨率 K/Ti 值曲线较完整、细致地揭示出近 60 ka 以来的千年尺度气候变化信息, 应是日前从该海区, 乃至整个南海深海陆源碎屑沉积中获得的分辨率最高、变化信号最为明显的 MIS 3 以来的古气候记录。

(2) 以伊利石为主的富 K 细粒风化矿物在间冰阶对南海北部的输入和沉积相对增多, 冰阶则相对减少; 含 Ti 重矿物的输入和沉积变化与之相反; 造成了该站位沉积序列中 K/Ti 值的变化。

(3) 在千年尺度上, 东亚季风变迁带来的降雨变化, 以及随之引起的陆地母岩风化产物剥蚀程度及河流搬运能力的变化, 可能控制了伊利石等风化矿物在南海东北部陆坡的沉积。

致谢 本次研究所用样品由国际海洋过去全球变化计划(IMAGES)的 MARCO POLO 航次提供, 同济大学翦知潜教授与作者进行了有益的讨论, 两位评审专家提供了宝贵修改意见, 在此一并致谢。

参考文献

- 1 Heinrich H. Origin and consequences of cyclic ice rafting in the northeast Atlantic Ocean during the past 130000 years. *Quat Res*, 1988, 29: 142–152
- 2 Dansgaard W, Johnsen S J, Clausen H B, et al. Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. *Nature*, 1993, 364: 218–220
- 3 McManus J F, Oppo D W, Cullen J L. A 0.5-million-year record of millennial-scale climate variability in the North Atlantic. *Science*, 1999, 283: 971–975
- 4 Voelker Antje H L. Global distribution of centennial-scale records for Marine Isotope Stage (MIS) 3: A database. *Quat Sci Rev*, 2002, 21: 1185–1212
- 5 Peterson L C, Haug G H, Hughen K A, et al. Rapid changes in the hydrologic cycle of the tropical Atlantic during the last glacial. *Science*, 2000, 290: 1947–1951
- 6 Haug G H, Hughen K, Sigman D M, et al. Southward migration of the intertropical convergence zone through the Holocene. *Science*, 2001, 293: 1304–1308
- 7 Wang L, Sarnthein M, Erlenkeuser H, et al. East Asian monsoon climate during the Late Pleistocene: High-resolution sediment records from the South China Sea. *Mar Geol*, 1999, 156: 245–284
- 8 陈木宏, 涂霞, 郑范, 等. 南海南部近 20 万年沉积序列与古气候变化关系. *科学通报*, 2000, 45: 542–548
- 9 Huang E Q, Tian J, Steinke S. Millennial-scale dynamics of the winter cold tongue in the southern South China Sea over the past 26 ka and the East Asian winter monsoon. *Quat Res*, 2011, 75: 196–204
- 10 翦知潜, 黄维. 快速气候变化与高分辨率的深海沉积记录. *地球科学进展*, 2003, 18: 673–680
- 11 郑洪波, 杨文光, 贺娟, 等. 南海的氧同位素 3 期. *第四纪研究*, 2008, 28: 68–78
- 12 Laj C, Wang P X, Balut Y, et al. MD147-Marco Polo IMAGES XII Cruise Report. France: Institut Paul-Emile Victor (IPEV), 2005
- 13 Jansen J H F, Gaast S J, Koster B, et al. CORTEX, a shipboard XRF-scanner for element analyses in split sediment cores. *Mar Geol*, 1998, 151: 143–153
- 14 谢昕, 郑洪波, 陈国成, 等. 海洋沉积物粒度测试的预处理方法研究. *沉积学报*, 2007, 25: 511–520
- 15 Cai Y F, Li X, Hu X M, et al. Paleoclimatic approach to the origin of the coloring of Turonian pelagic limestones from the Vispi Quarry section (Cretaceous, central Italy). *Cretaceous Res*, 2009, 30: 1205–1216
- 16 葛黄敏, 李前裕, 成鑫荣, 等. 南海北部晚第四纪高分辨率浮游氧同位素地层学及其古气候信息. *地球科学*, 2010, 35: 515–525
- 17 Tjallingii R, Röhl U, Kölling M, et al. Influence of the water content on X-ray fluorescence core-scanning measurements in soft marine sediments. *Geochem Geophys Geosyst*, 2007, 8: 1–12

- 18 Taylor S R, McLennan S M. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Oxford: Blackwell, 1985. 312
- 19 Yarincik K M, Murray R W. Climatically sensitive eolian and hemipelagic deposition in the Cariaco basin, Venezuela, over the past 578000 years: Results from Al/Ti and K/Al. *Paleoceanography*, 2000, 15: 210–228
- 20 Bahr A, Lamy F, Arz H, et al. Late glacial to Holocene climate and sedimentation history in the NW Black Sea. *Mar Geol*, 2005, 214: 309–322
- 21 Lebreiro S M, Voelker A H L, Vizcaino A, et al. Sediment instability on the Portuguese continental margin under abrupt glacial climate changes (last 60 kyr). *Quat Sci Rev*, 2009, 28: 3211–3223
- 22 Wei G J, Liu Y, Li X H, et al. Major and trace element variations of the sediments at ODP Site 1144, South China Sea, during the last 230 ka and their paleoclimate implications. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2004, 212: 331–342
- 23 Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. Millennial- and orbital-scale changes in the East Asian monsoon over the past 224000 years. *Nature*, 2008, 451: 1090–1093
- 24 Blunier T, Chappellaz J, Schwander J, et al. Asynchrony of Antarctic and Greenland climate change during the last glacial period. *Nature*, 1998, 394: 739–743
- 25 Murray R W, Leinen M. Scavenged excess aluminum and its relationship to bulk titanium in biogenic sediment from central equatorial Pacific Ocean. *Geochim Cosmochim Acta*, 1996, 60: 3869–3878
- 26 韦刚健, 刘颖, 李献华, 等. 南海沉积物中过剩铝问题的探讨. *矿物岩石地球化学通报*, 2003, 22: 23–25
- 27 Boulay S, Colin C, Trentesaux A, et al. Sedimentary responses to the Pleistocene climatic variations recorded in the South China Sea. *Quat Res*, 2007, 68: 162–172
- 28 孙有斌, 高抒, 李军. 边缘海陆源物质中环境敏感粒度组分的初步分析. *科学通报*, 2003, 48: 83–86
- 29 罗运利, 孙湘君. 末次冰期以来南海北部孢粉记录的植被演化及千年尺度气候事件. *科学通报*, 2005, 50: 691–697
- 30 黄维, 汪品先. 渐新世以来的南海沉积量及其分布. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2006, 36: 822–829
- 31 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. *Mar Geol*, 2003, 201: 133–146
- 32 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. *Geochem Geophys Geosyst*, 2007, 8: 1–18
- 33 Liu Z F, Tuo S T, Colin C, et al. Detrital fine-grained sediment contribution from Taiwan to the northern South China Sea and its relation to regional ocean circulation. *Mar Geol*, 2008, 255: 149–155
- 34 Liu Z F, Zhao Y L, Colin C, et al. Chemical weathering in Luzon, Philippines from clay mineralogy and major-element geochemistry of river sediments. *Appl Geochem*, 2009, 24: 2195–2205
- 35 Liu Z F, Colin C, Li X J, et al. Clay mineral distribution in surface sediments of the northeastern South China Sea and surrounding fluvial drainage basins: Source and transport. *Mar Geol*, 2010, 277: 48–60
- 36 Boulay S, Colin C, Trentesaux A, et al. Sediment sources and East Asian monsoon intensity over the last 450 ka: Mineralogical and geochemical investigations on South China Sea sediments. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2005, 228: 260–277
- 37 Wan S M, Li A C, Clift P D, et al. Development of the East Asian monsoon mineralogical and sedimentologic records in the northern South China Sea since 20 Ma. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2007, 254: 561–582
- 38 刘志飞, 李夏晶, Colin C, 等. 南海北部末次冰盛期以来高分辨率黏土矿物记录及其时间序列物源区分析. *科学通报*, 2010, 55: 2852–2862