

# 南海南部晚第四纪东亚季风演化的粘土矿物记录\*

刘志飞\*\* C. Colin A. Trentesaux D. Blamart<sup>④</sup>

(① 同济大学海洋地质教育部重点实验室, 上海 200092; ② FRE 2566 Orsayterre, Université de Paris XI, 91405 Orsay, France; ③ UMR PBDS du CNRS, Université de Lille I, 59655 Villeneuve d'Ascq, France; ④ Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, Laboratoire mixte CNRS-CEA, 91198 Gif-sur-Yvette, France)

**摘要** 南海南部湄公河口 MD01-2393 孔晚第四纪 190 ka 以来粘土矿物和氧同位素的高分辨率分析表明, 主要粘土矿物含量表现出明显的冰期-间冰期旋回变化, 伊利石、绿泥石和高岭石含量在冰期时增高, 而蒙脱石含量在间冰期时增高。物源分析表明, 这些粘土矿物主要来源于湄公河流域的直接输入, 其中, 伊利石和绿泥石主要来自湄公河上游变质沉积岩的机械侵蚀作用, 高岭石主要来自中游地区沉积物的再侵蚀作用, 而蒙脱石主要由中下游的偏硅酸盐土壤提供。蒙脱石/(伊利石+绿泥石)和蒙脱石/高岭石比值可以作为东亚季风演化的矿物学标志, 相对高的比值发生在间冰期, 指示强盛的夏季风降雨和减弱的冬季风环流; 相对低的比值对应于冰期, 指示强盛的冬季风和减弱的夏季风。东亚季风演化的强弱与北半球夏季日射量基本呈线性关系, 表明东亚季风演化的天文驱动机制。

**关键词** 粘土矿物 东亚季风 晚第四纪 湄公河 南海

东亚季风是全球气候系统的一个重要组成部分, 控制着亚洲东部季节性变化的风力、降雨量、径流量和陆地植被等气候和环境特征<sup>[1]</sup>。南海作为西太平洋最大的边缘海, 冬季在东北风的驱动下形成逆时针表层洋流, 沉积亚洲内陆风蚀作用带来的粉尘; 而夏季在东南风的驱动下形成顺时针表层洋流, 接受邻近陆地高降雨量产生的风化剥蚀产物<sup>[2,3]</sup>, 夏季风的降雨强度可能代表亚洲地区陆地风化和剥蚀的重要

指标<sup>[4]</sup>。因此, 南海近年来业已成为东亚季风形成和演化古海洋学研究的理想场所之一<sup>[5,6]</sup>。前人针对晚第四纪的研究已经显示, 间冰期, 南海以加强的夏季风和减弱的冬季风为特征; 冰期则以强盛的冬季风和减弱的夏季风为主<sup>[3,5]</sup>。这些研究主要是基于遍布南海的微体古生物学、氧同位素地层学<sup>[3,5]</sup>, 或南海北部的粘土矿物学特征<sup>[6,7]</sup>, 而南海南部地区东亚季风演化的粘土矿物学分析工作以前还很少涉及<sup>[6]</sup>。

2003-03-21 收稿

\* 国家重点基础研究发展规划(批准号: G2000078500)、国家自然科学基金(批准号: 40102010)、上海市青年科技启明星计划(批准号: 03QE14051)和法国科技部资助项目

\*\* E-mail: lzhifei@online.sh.cn

海洋沉积的粘土矿物不仅可以示踪洋流的变化<sup>[7,8]</sup>, 其垂向分布还广泛地解释为物源区陆地同时期的气候变化<sup>[4]</sup>. 南海表层粘土矿物分布的控制因素主要为北部的亚洲大陆和南部的火山岛弧, 分别以物理风化形成的伊利石和绿泥石组合、化学风化产生的蒙脱石和高岭石组合为特征<sup>[9,10]</sup>, 因此南海北部的蒙脱石/(伊利石+绿泥石)垂向序列可以解释为驱动洋流搬运能力的东亚季风季节性变化<sup>[7,11]</sup>. 本文利用“国际海洋过去全球变化研究(IMAGES)”计划于2001年的西太平洋WEPAMA航次, 在南海南部湄公河口附近采集的MD01-2393孔(10°30.15'N, 110°03.68'E, 水深1230 m, 柱长42.55 m)(图1)共计311个沉积物样品(时间分辨率为0.4~1.5 ka), 开展氧同位素地层学和粘土矿物组合的高分辨率分析, 研究南海南部晚第四纪190 ka以来的东亚季风演化历史.

## 1 方法和年龄模式

粘土矿物分析使用粘土粒级矿物(< 2 μm)定向薄

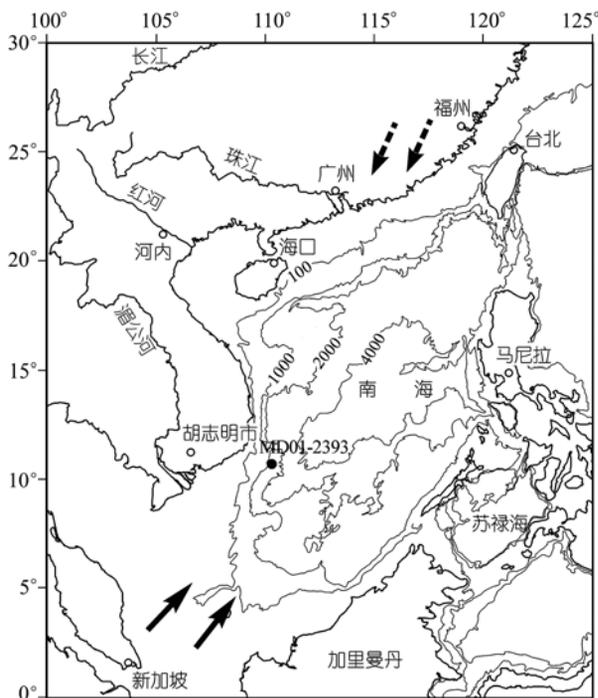


图1 MD01-2393孔的位置  
实线箭头代表夏季风, 虚线箭头代表冬季风

片的X射线衍射方法(XRD)<sup>[12]</sup>. 样品同0.5%稀盐酸反应去除碳酸钙后, 用去离子水反复清洗, 直到具有抗絮凝作用发生. 根据Stoke原理所确定的沉淀时间<sup>[12]</sup>, 将小于2 μm的颗粒吸出, 采用刮片方法制成样品定向薄片. 分析使用Philips PW 1710衍射仪, CuKα辐射, Ni滤波器, 管压40 kV, 管流25 mA, 分别对自然条件、乙二醇条件(12 h)、加热条件(490°C烘箱中加热2 h)预处理过的样品薄片进行测试. 抽样样品的电子显微镜观察认为, 粘土矿物主要是陆源碎屑, 可以忽略沉积后的成岩作用影响. 样品制备和测试在法国里尔科技大学沉积与地球动力学实验室完成.

粘土矿物的鉴定和解释主要依据三种测试条件下获得的XRD叠加波谱的综合对比(图2)<sup>[7,11]</sup>, 每个波峰参数的半定量计算使用MacDiff软件(Petschick R, 2000)在乙二醇曲线上进行. 粘土矿物的相对含量主要使用(001)晶面衍射峰的面积比, 蒙脱石(含伊利石/蒙脱石随机混层矿物)采用1.7 nm(001)晶面, 伊利石采用其1 nm(001)晶面, 高岭石(001)和绿泥石(002)使用0.7 nm叠加峰<sup>[12]</sup>, 他们的相对比例通过拟合0.357 nm / 0.354 nm峰面积比确定. 同时, 根据乙二醇曲线计算出伊利石的矿物学特征. 伊利石化学指数为0.5 nm/1 nm峰面积比, 比值小于0.5代表富Fe-Mg伊利石, 为物理风化结果; 比值大于0.5为富Al伊利石, 代表强烈的水解作用<sup>[13]</sup>. 伊利石结晶度为1 nm半峰宽, 低值代表结晶度高, 指示陆地物源区水解作用弱, 为干冷的气候条件<sup>[14]</sup>.

氧同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 选用浮游有孔虫*G. ruber* (white), 在法国科学研究中心气候与环境科学实验室(LSCE)Finnigan MAT 251 稳定同位素质谱仪上分析, 测试结果经过NSB19标准校正, 并转换为PDB, 平均精度为 $\pm 0.05\%$ . 年龄模式主要采用高分辨率氧同位素地层学结果, 并辅以Toba火山灰层<sup>[15]</sup>和*G. ruber* (pink)末现面的年龄<sup>[16]</sup>, 对比全球底栖有孔虫氧同位素数据库SPECMAP<sup>[17]</sup>来建立, 结果显示MD01-2393孔底部为氧同位素7.0期, 年龄约190 ka.

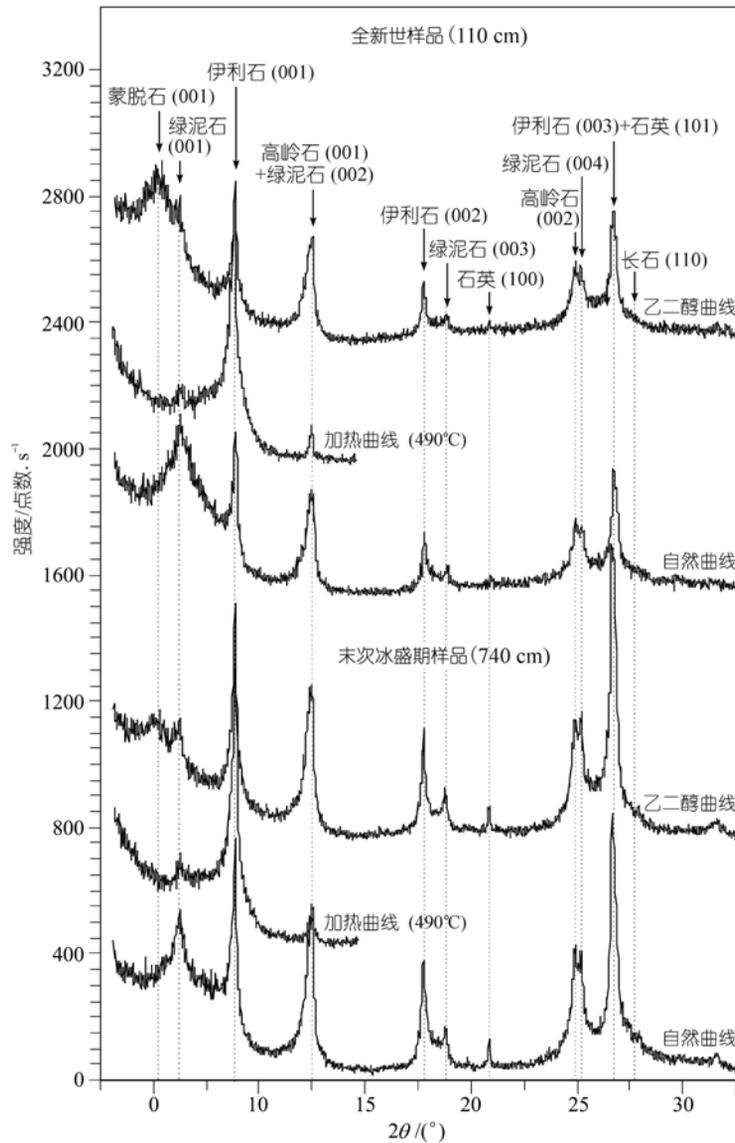


图 2 MD01-2393 孔典型样品的 X 射线衍射叠加波谱

## 2 结果

MD01-2393 孔 190 ka (氧同位素 6~1 期) 以来的粘土粒级 (<2  $\mu\text{m}$ ) 矿物主要由 4 种粘土矿物和少量石英、长石碎屑组成(图 3)。其中, 粘土矿物相对含量变化中, 伊利石(22%~40%)和蒙脱石(20%~50%)构成主要成分, 并含有绿泥石(12%~25%)和高岭石(10%~26%)。粘土矿物含量呈现明显的冰期-间冰期旋回变化。一

般地, 伊利石、绿泥石和高岭石在冰期时含量高, 间冰期时含量低; 而蒙脱石含量与浮游有孔虫氧同位素基本平行, 与伊利石呈镜像关系, 间冰期时含量(30%~40%)比冰期时含量(20%~35%)高。图 2 示全新世和末次冰盛期两种情况典型样品的粘土矿物含量变化, 注意到蒙脱石和伊利石含量的变化特别明显。伊利石化学指数变化范围为 0.35~0.55, 一般小于 0.50, 表明主要为富 Fe-Mg 伊利石; 伊利石结晶度变

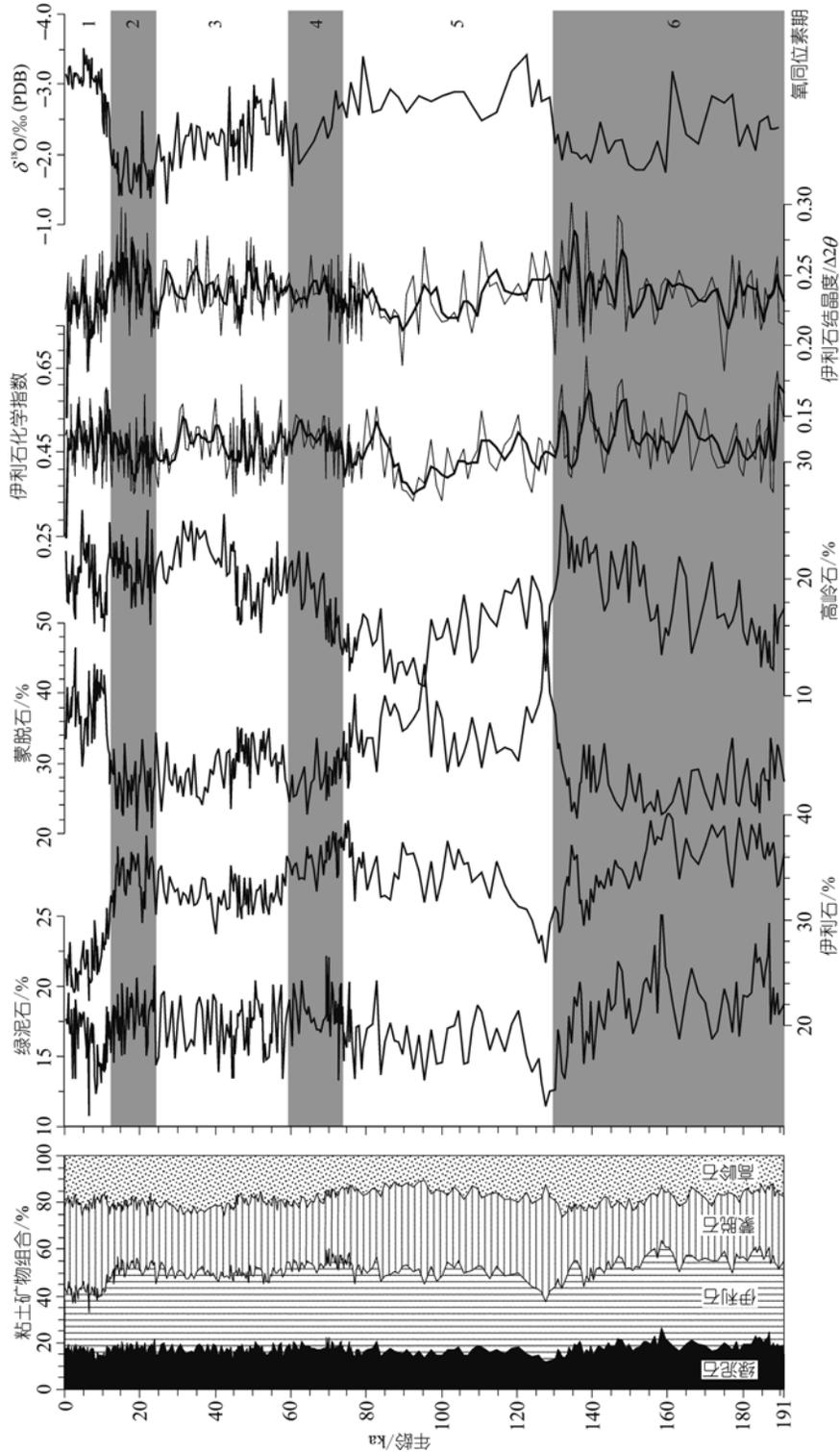


图 3 MD01-2393 孔 190 ka 以来粘土矿物组合及浮游有孔虫氧同位素地层  
伊利石化学指数为 0.5 nm/1 nm 峰面积比, 结晶度为 1 nm 半峰宽, 均在乙二醇曲线上测量; 化学指数和结晶度曲线(灰色细线)经过 3 点移动平均确定其趋势线(黑色粗线)

化范围为  $0.21^{\circ}\sim 0.27^{\circ}\Delta 2\theta$ , 平均为  $0.24^{\circ}\Delta 2\theta$ , 也表明伊利石主要形成于物理风化较强的气候环境(图 3)。

### 3 讨论

#### 3.1 粘土矿物的物源分析

海洋沉积中粘土矿物的古气候解释要求了解每种矿物的潜在物源区及其各自的搬运方式<sup>[18,19]</sup>。MD01-2393 孔的粘土矿物均为陆源碎屑, 可以忽略成岩作用的影响, 这样, 粘土矿物含量的冰期-间冰期旋回性变化可能形成于: (1) 河流搬运或风成沉积贡献的比例变化, (2) 洋流和河流搬运的比例变化, (3) 物源区化学风化和机械侵蚀之间的平衡, (4) 全球或地区海平面的变化以及上述几种因素的结合。下面分别讨论。

(i) 风成沉积的影响 南海北部以前报道风成沉积对沉积物的总量贡献比较大<sup>[3,6,20]</sup>, 而南部则以河流或洋流沉积物为主。MD01-2393 孔全新世的线性沉积速率(LSR)为  $40.7\text{ cm/ka}$ , 碳酸钙平均含量为 16%, 平均干密度为  $0.592\text{ g/cm}^3$ (采用南海南部大洋钻探ODP1143 站相同碳酸钙含量的沉积物值<sup>[21]</sup>), 这样陆源碎屑的堆积速率可以估计为  $20\text{ g/cm}^2/\text{ka}$ 。假设MD01-2393 孔全新世的风成沉积量等于或小于现今值( $0.5\text{ g/cm}^2/\text{ka}$ )<sup>[22]</sup>, 则风成沉积的贡献约为沉积物总量的 2.5%。而且, ODP1143 站去碳酸钙的  $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  比率也显示风成沉积在南海南部的贡献量可以忽略<sup>[23]</sup>。另外, 研究样品的伊利石结晶度为  $0.21^{\circ}\sim 0.27^{\circ}\Delta 2\theta$ (图 3), 低于中国内陆黄土( $0.22^{\circ}\sim 0.33^{\circ}\Delta 2\theta$ )和古土壤( $0.22^{\circ}\sim 0.42^{\circ}\Delta 2\theta$ )中伊利石的结晶度<sup>[24]</sup>, 表明南海南部粘土矿物即使在冬季风强盛的冰期也不是主要来源于风成黄土, 而是通过河流或洋流搬运。

(ii) 南部巽他陆架的影响 南部巽他陆架表层沉积物含有较高的蒙脱石和高岭石, 蒙脱石含量高达 50%以上, 高岭石含量也在 20%左右<sup>[9]</sup>。印度尼西亚岛弧地区的表层沉积物蒙脱石含量一般也在 30%~40%<sup>[25]</sup>。如果MD01-2393 孔沉积物中的蒙脱石主要来自于巽他陆架及其南部的印度尼西亚岛弧地区, 其高岭石含量应该与蒙脱石含量同步变化; 而且, 研究样品的伊利石化学指数范围为  $0.35\sim 0.55$ , 远低

于南部巽他陆架的化学指数( $0.8\sim 1.0$ )<sup>[25]</sup>。因此, 可以排除研究孔位的主要粘土矿物源于南部巽他陆架地区。

(iii) 湄公河主要物源区 湄公河长 4880 km, 汇水面积  $790\times 10^3\text{ km}^2$ , 现今每年向南海排放  $160\times 10^6\text{ t}$  悬浮沉积物, 为世界第 10 大河流<sup>[26]</sup>。MD01-2393 孔在间冰期时距湄公河口约 400 km, 末次冰盛期时南海南部海平面下降约 116 m<sup>[27]</sup>, 该孔位置距湄公河口仅约 80 km(图 1), 因此, 湄公河应该是研究孔位的主要物源区。湄公河上游是青藏高原东部地区, 岩石类型主要由中生代的变质砂岩、页岩、板岩和千板岩组成, 中游由古生代-中生代沉积岩和火成岩(主要为花岗岩)组成, 而下游则由中生代沉积岩、冲积平原和少量玄武岩组成<sup>[28]</sup>。伊利石和绿泥石属于原始矿物, 反映干冷气候条件下弱的水解作用和强的基岩直接侵蚀作用, 因此, 湄公河口沉积的伊利石和绿泥石主要来自湄公河上游变质沉积岩的机械侵蚀作用。高岭石多发育于热带土壤中, 指示暖湿气候条件下强烈的水解作用, 但由于研究孔位的高岭石含量与伊利石和绿泥石基本一致, 表明高岭石主要来源于中游地区沉积物的再侵蚀作用, 这样, MD01-2393 孔高岭石含量的垂向变化不能代表同时期的气候变化, 而指示潜在的机械侵蚀能力。蒙脱石是暖湿气候条件下铁镁质硅质岩化学风化的次生矿物。在湄公河流域中, 蒙脱石主要分布在中下游的偏硅酸盐土壤中, 这个地区年降雨量(2000~4000 mm)的 85%~90%发生在夏季风时期<sup>[28]</sup>, 有利地促进蒙脱石的形成和发育。同时, 蒙脱石还可能来源于湄公河下游玄武岩的化学风化作用, 但由于这些玄武岩的体积较小, 因此产生的蒙脱石量可以忽略。

(iv) 海平面变化的影响 南海南部在冰期与间冰期, 海平面差距约为 100 m, 其中, 末次冰盛期海平面下降约 116 m<sup>[27]</sup>, 而MD01-2393 孔位置与湄公河口的距离由间冰期的约 400 km减为冰期的约 80 km, 因此, 海平面变化将对粘土矿物组合造成一定影响。间冰期, 湄公河口距离研究孔位较远, 这时部分悬浮沉积物将沉积在陆架浅水区, 粘土矿物中相对较小的蒙脱石可以传输更远的距离<sup>[29]</sup>, 更多地堆积在较

深水区;冰期,湄公河口与研究孔位的距离大大缩短,以机械侵蚀为特色的伊利石和绿泥石很容易地到达研究孔位.但是,最近通过位于湄公河口浅水区孔位 MD97-2150(10°11.76'N, 119°31.51'E, 水深 292 m)的粘土矿物组合研究,发现与 MD01-2393 孔的粘土矿物组合类似,从而证明海平面变化对于该孔位粘土矿物组合的影响并不重要.

### 3.2 东亚季风演化记录

由上述讨论可知,伊利石和绿泥石组合反映同时期的干冷气候条件,高岭石指示机械侵蚀能力,而蒙脱石则代表暖湿气候条件下的降雨量,指示了夏季风的演化.考虑到不同物源区和粘土矿物之间的稀释效应,一般不采用单个粘土矿物含量指示古气

候变化,而使用几种矿物含量的比值<sup>[19]</sup>.本文采用蒙脱石/(伊利石+绿泥石)和蒙脱石/高岭石比值作为东亚季风演化的矿物学标志.这两种标志具有相似的演化过程(图 4),高比值指示间冰期,而低比值指示冰期,这个结果同南海北部粘土矿物标志相一致<sup>[7,11]</sup>.

夏季日射量加大时可以增强海陆受热对比,从而提高陆地的降雨量和径流量以及海陆之间的风力变化<sup>[11,20]</sup>.我们使用 65°N 夏季平均日射量<sup>[30]</sup>对比湄公河口 MD01-2393 孔的晚第四纪东亚季风的演化过程,发现它们基本呈线性关系(图 4),日射量的最大值对应于东亚季风的指数蒙脱石/(伊利石+绿泥石)和蒙脱石/高岭石比值的最大值,表明东亚季风演化的天文驱动机制.

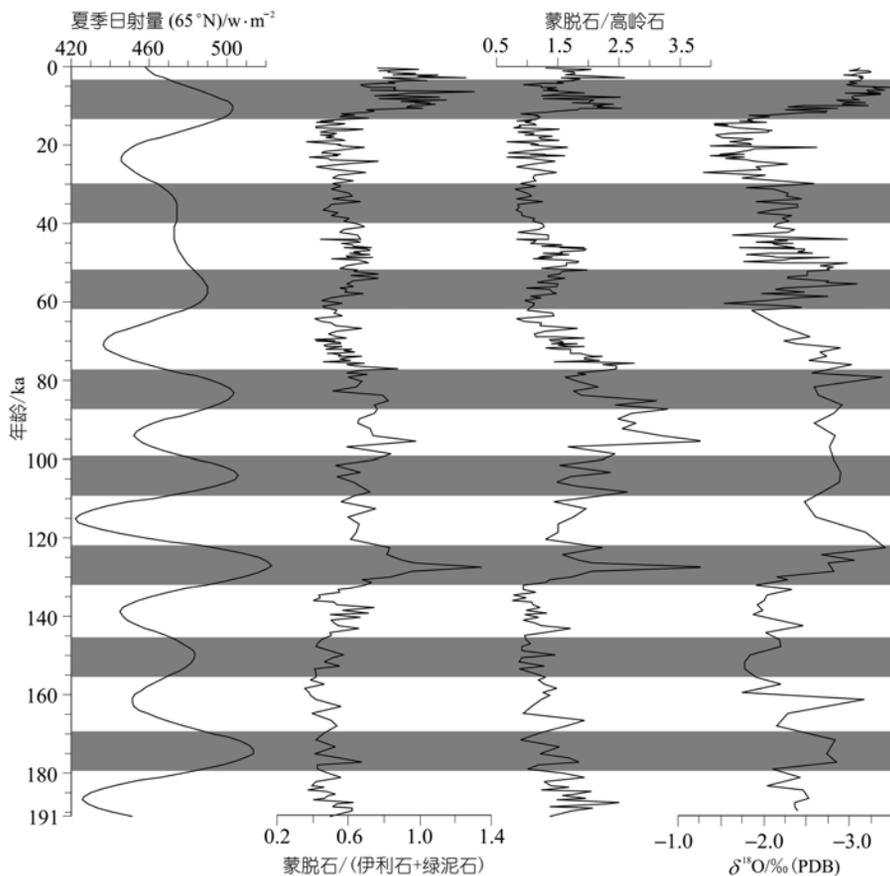


图 4 MD01-2393 孔 190 ka 以来蒙脱石/(伊利石+绿泥石)和蒙脱石/高岭石比率与北半球夏季日射量和浮游有孔虫氧同位素对比

夏季日射量为 65°N 处 6~7 月的平均日辐射量,根据 Laskar<sup>[30]</sup> 方案并运用 Analyserie 软件<sup>[31]</sup> 生成

## 4 结论

南海南部湄公河口 MD01-2393 孔粘土矿物组合主要由伊利石(22%~40%)和蒙脱石(20%~50%)组成,并含有绿泥石(12%~25%)和高岭石(10%~26%)。主要粘土矿物含量表现出明显的冰期-间冰期旋回变化,伊利石、绿泥石和高岭石含量在冰期增高,而蒙脱石含量在间冰期增高。物源分析表明,这些粘土矿物主要来源于湄公河流域的直接输入,其中,伊利石和绿泥石主要来自湄公河上游变质沉积岩的机械侵蚀作用,高岭石主要来源于中游地区沉积物的再侵蚀作用,而蒙脱石主要由中下游的偏硅酸盐土壤提供。蒙脱石/(伊利石+绿泥石)和蒙脱石/高岭石比值可以作为东亚季风演化的矿物学标志,相对高的比值发生在间冰期,指示强盛的夏季风降雨和减弱的冬季风环流;相对低的比值对应于冰期,指示强盛的冬季风和减弱的夏季风。东亚季风演化的强弱与北半球夏季日射量基本呈线性关系,表明东亚季风演化的天文驱动机制。

## 参 考 文 献

- Webster P J. The role of hydrological processes in ocean-atmosphere interactions. *Rev Geophys*, 1994, 32: 427~476[DOI]
- Wang P, Wang L, Bian Y, et al. Late Quaternary paleoceanography of the South China Sea: surface circulation and carbonate cycles. *Mar Geol*, 1995, 127: 145~165[DOI]
- 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[DOI]
- Colin C, Turpin L, Bertaux J, et al. Erosional history of the Himalayan and Burman ranges during the last two glacial-interglacial cycles. *Earth Planet Sci Lett*, 1999, 171: 647~660[DOI]
- Jian Z, Huang B, Kuhnt W, et al. Late Quaternary upwelling intensity and East Asian Monsoon forcing in the South China Sea. *Quat Res*, 2001, 55: 363~370[DOI]
- Tamburini F, Adatte T, Föllmi K, et al. Investigating the history of East Asian monsoon and climate during the last glacial interglacial period (0~140000 years): mineralogy and geochemistry of ODP Sites 1143 and 1144, South China Sea. *Mar Geol*, 2003, 201: 147~168[DOI]
- Liu Z, 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[DOI]
- Petschick R, Kuhn G, Gingele F. Clay mineral distribution in surface sediments of the South Atlantic: sources, transport, and relation to oceanography. *Mar Geol*, 1996, 130: 203~229[DOI]
- Chen P-Y. Minerals in bottom sediments of the South China Sea. *Geol Soc Am Bull*, 1978, 89: 211~222
- 何良彪. 中国海及其邻近海域的粘土矿物. *中国科学*, B 辑, 1989, (1): 75~83
- 刘志飞, Trentesaux A, Clemens S C, et al. 南海北坡ODP1146 站第四纪粘土矿物记录: 洋流搬运与东亚季风演化. *中国科学*, D辑, 2003, 33 (3): 271~280 [摘要] [PDF]
- Holtzapffel T. Les Minéraux Argileux: Préparation, Analyse Diffractométrique et Détermination. *Soc Géol Nord Publ* 12, Paris, 1985. 1~136
- Esquevin J. Influence de la composition chimique des illites sur-cristallinite. *Bull Centre Rech Rau-SNPA*, 1969, 3 (1): 147~153
- Krumm S, Buggisch W. Sample preparation effects on illite crystallinity measurements: grain size gradation and particle orientation. *J Metam Geol*, 1991, 9: 671~677
- Bühning C, Sarnthein M. Leg 184 Shipboard Scientific Party. Toba ash layers in the South China Sea: evidence of contrasting wind directions during eruption ca. 74 ka. *Geology*, 2000, 28: 275~278[DOI]
- Thompson P R, Bé A W H, Duplessy J C, et al. Disappearance of pink-pigmented Globigerinoides ruber at 120000 yr BP in the Indian and Pacific Oceans. *Nature*, 1979, 280: 554~558
- Martinson D G, Pisias N G, Hays J D, et al. Age dating and the orbital theory of the ice ages: development of a high-resolution 0 to 3000000-year chronostratigraphy. *Quat Res*, 1987, 27: 1~29
- Diekmann B, Petschick R, Gingele F X, et al. Clay mineral fluctuations in late Quaternary sediments of the southeastern South Atlantic: implications for past changes of deepwater advection. In: Wefer G, Berger W H, Siedler G, et al. *The South Atlantic: Present and Past Circulation*. Berlin: Springer, 1996. 621~644
- Gingele F X, Müller P M, Schneider R R. Orbital forcing of freshwater input in the Zaire Fan area—clay mineral evidence from the last 200 kyr. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 1998, 138: 17~26[DOI]
- Wehausen R, Brumsack H-J. Astronomical forcing of the East Asian monsoon mirrored by the composition of Pliocene South China Sea sediments. *Earth Planet Sci Lett*, 2002, 201: 621~636[DOI]
- Shipboard Scientific Party. Leg 184 summary: exploring the Asian monsoon through drilling in the South China Sea. In: Wang P, Prell W L, et al, eds. *Proc ODP, Init Repts 184*. College Station TX (Ocean Drilling Program), 2000, 1~77
- Duce R A, Liss P S, Merrill J T, et al. The atmospheric input of trace species to the world ocean. *Global Biogeochem Cycles*, 1991, 5: 193~259
- Wehausen R, Tian J, Brumsack H-J, et al. Geochemistry of Pliocene sediments from ODP Site 1143 (southern South China Sea). In: Prell W L, Wang P, et al, eds. *Proc ODP, Sci Results*, 2003. 184: 1~21
- Ji J, Chen J, Lu H. Origin of illite in the loess from the Luochuan

- area, Loess Plateau, Central China. *Clay Miner*, 1999, 34: 525~532
- 25 Gingele F X, Deckker P D, Hillenbrand C-D. Clay mineral distribution in surface sediments between Indonesia and NW Australia —source and transport by ocean currents. *Mar Geol*, 2001, 179: 135~146[DOI]
- 26 Milliman J D, Meade R H. World-wide delivery of river sediment to the oceans. *J Geol*, 1983, 91: 1~21
- 27 Hanebuth T, Stattegger K, Grootes P M. Rapid flooding of the Sunda Shelf: a late-glacial sea-level record. *Science*, 2000, 288: 1033~1035[DOI]
- 28 Gupta A, Hock L, Huang X, et al. Evaluation of part of the Mekong River using satellite imagery. *Geomorphology*, 2002, 44: 221~239[DOI]
- 29 Gibbs R J. Clay mineral segregation in the marine environment. *J Sediment Petrol*, 1977, 47: 237~243
- 30 Laskar J. The chaotic notion of the solar system: a numerical estimate of the size of the chaotic zones. *Icarus*, 1990, 88: 266~291 [DOI]
- 31 Paillard D, Labeyrie L, Yiou P. Analyseries 1.0: a Macintosh software for the analysis of geographical time-series. *Eos*, 1996, 77: 379