

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*

刘志飞^{①**} A. Trentesaux^② S. C. Clemens^③ 汪品先^①

(^①同济大学海洋地质教育部重点实验室, 上海 200092; ^②UMR PBDS du CNRS, Université des Sciences et Technologies de Lille, 59655 Villeneuve d'Ascq, France; ^③Department of Geological Sciences, Brown University, Providence RI 02912, USA)

摘要 南海北部 ODP1146 站第四纪粘土矿物学分析表明, 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. 蒙脱石/(伊利石+绿泥石)比率和蒙脱石丰度变化可以作为东亚季风演化的矿物学标志. 在万年时间尺度上, 间冰期盛行的西南表层洋流将更多的蒙脱石由南部和东部向北搬运, 表现为加强的夏季风; 冰期盛行的逆时针表层洋流将大量伊利石和绿泥石由台湾以及流经吕宋海峡的长江物源搬运至南海北坡, 表现为强盛的冬季风. 就 10 万年时间尺度而言, 蒙脱石/(伊利石+绿泥石)比率与沉积速率的对应关系, 指示 2000~1200 和 400~0 ka 期间南海北部盛行冬季风, 而 1200~400 ka 期间表现为加强的夏季风. 夏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 沉积速率 东亚季风 第四纪 南海

东亚季风是亚洲大陆与“西太平洋暖池”(WPWP)之间差异加热驱动的热力大气环流系统, 控制着整个亚洲东部地区季节性变化的风力、降雨量、径流量和陆地植被等气候和环境特征^[1,2]. 冬季风以大陆变冷、亚洲北部发育高压和东北风穿过南海为特征, 而夏季风则表现为大陆加热、西藏上空发育低压、南海上空形成西南风以及华南降雨量普遍增高^[3]. 因此, 南海作为西太平洋地区最大的边缘海, 近年来业已成为东亚季风形成和演化研究的理想场所之一^[2,4~7]. 前人针对晚更新世和全新世的研究显示, 在间冰期, 南海以加强的夏季风和减弱的冬季风为特征^[2,7]; 相反, 冰期则以强盛的冬季风和减弱的夏季风为主^[2, 5]. 这些研究主要是基于微体古生物学、氧同位素地层学或地球化学特征, 南海地区东亚季风演化的粘土矿物学工作以前很少涉及^[8].

海洋沉积的粘土矿物不仅可以示踪洋流的变化^[9~11], 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^[12~14], 但是以往南海的粘土矿物研究侧重于对表层沉积物及其物源区的探讨^[15~20]. 本文利用 1999 年在我国南海实施的大洋钻探^[21] ODP1146 站(19°27.40' N, 116°16.37' E, 水深 2092 m)上部 191 mcd(合成深度 m)共计 508 个沉积物样品, 在粘土矿物组合变化分析的基础上^[22], 进一步研究每种矿物的潜在物源区及洋流搬运情况, 详细讨论粘土矿物在东亚季风演化中的意义.

2002-11-14 收稿

* 国家自然科学基金(批准号: 49999560, 40102010)和国家重点基础研究发展规划(批准号: 2000078500)资助项目

** E-mail: lzhidei@online.sh.cn

1 方法和年龄模式

粘土矿物分析使用粘土粒级矿物($<2\ \mu\text{m}$)定向薄片的 X 射线衍射方法(XRD)^[22]. 每个样品取大约 $1\ \text{cm}^3$, 同 0.5% 稀盐酸反应去除碳酸钙, 直至 pH 试纸不断测试后仍为酸性. 静置样品, 使沉积物自然沉淀, 之后用去离子水反复清洗, 直到样品具有抗絮凝作用发生. 根据 Stoke 原理所确定的沉淀时间^[23], 将小于 $2\ \mu\text{m}$ 的颗粒用针管吸出, 采用离心机使其加速沉淀, 用刮片方法制成样品定向薄片每样 2 片, 并自然风干. XRD 分析使用 Philips PW 1710 衍射仪, $\text{CuK}\alpha$ 辐射, Ni 滤波器, 管压 40 kV, 管流 25 mA. 其中, 一片薄片直接进行衍射测试(自然样品), 然后在乙二醇蒸汽中清泡 12 h, 再次测试(乙二醇样品); 另一片薄片在 490°C 烘箱中加热 2 h 后进行测试(加热样品). 抽样电镜观察粘土矿物的晶体形态, 认为主要是陆源碎屑, 可以忽略沉积后的成岩作用影响. 粘土矿物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 1). 加热曲线同自然曲线相比较, 1.4 nm 衍射峰明显减弱、1 nm 衍射峰明显增强, 并在 1~1.4 nm 之间表现为一个平台, 表明伊利石/蒙脱石随机混层矿物的存在; 同时, 0.7 nm 衍射峰也明显减弱, 指示高岭石的存在. 乙二醇曲线同自然曲线相比较, 1.7 nm 衍射峰出现, 1.4 nm 衍射峰明显减弱, 指示蒙脱石的存在; 在 1~1.4 nm 之间没有出现平台或小峰, 表明伊利石/蒙脱石随机

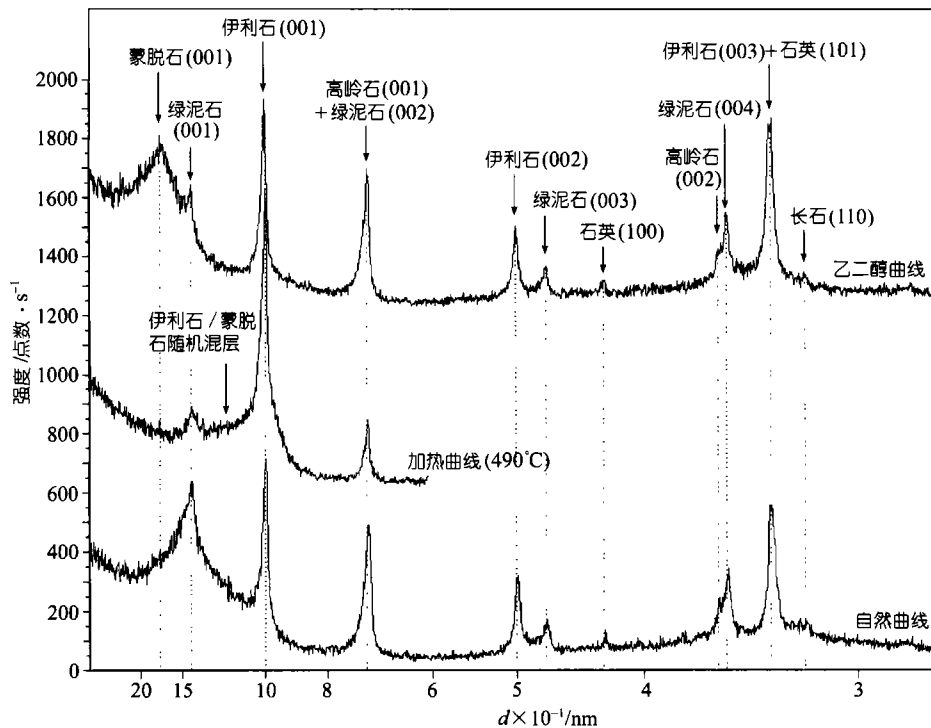


图 1 ODP1146 站典型样品的 X 射线衍射叠加波谱

显示粘土粒级颗粒的鉴定和解释, 混层粘土矿物主要为伊利石/蒙脱石随机混层矿物.

样品为 1146B-12H-4 100~112 cm, 位于 114.9 mcd 处

混层矿物衍射峰移至 1.4~1.7 nm 之间. 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^[23], 他们的相对比例通过拟合 0.357 nm/10.354 nm 峰面积比确定. 同时, 利用乙二醇曲线计算伊利石和蒙脱石矿物学特征. 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^[24]. 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^[12, 25], 这个参数也可用于示踪物源区和搬运路径^[9]. 蒙脱石丰度为 1.7 nm/1 nm 峰高比, 用于表示蒙脱石和伊利石来源的相对重要性^[11].

年龄模式主要采用氧同位素地层学结果^[26], 其中, 0~185 mcd 使用浮游有孔虫 *G. ruber* (white)氧同位素地层年龄, 采用布朗大学 Finrigan MAT 252 稳定同位素质谱仪分析, 分辨率为 2 ka, 从而确定 0~1820 ka 的年龄模式; 185~191 mcd 使用微体古生物数据点, 在 2070 mcd 处的年龄为 2520 ka^[26]. 本站位的氧同位素演化的期次通过对比 ODP677 站底栖有孔虫氧同位素值^[27]的结果获得(图 2).

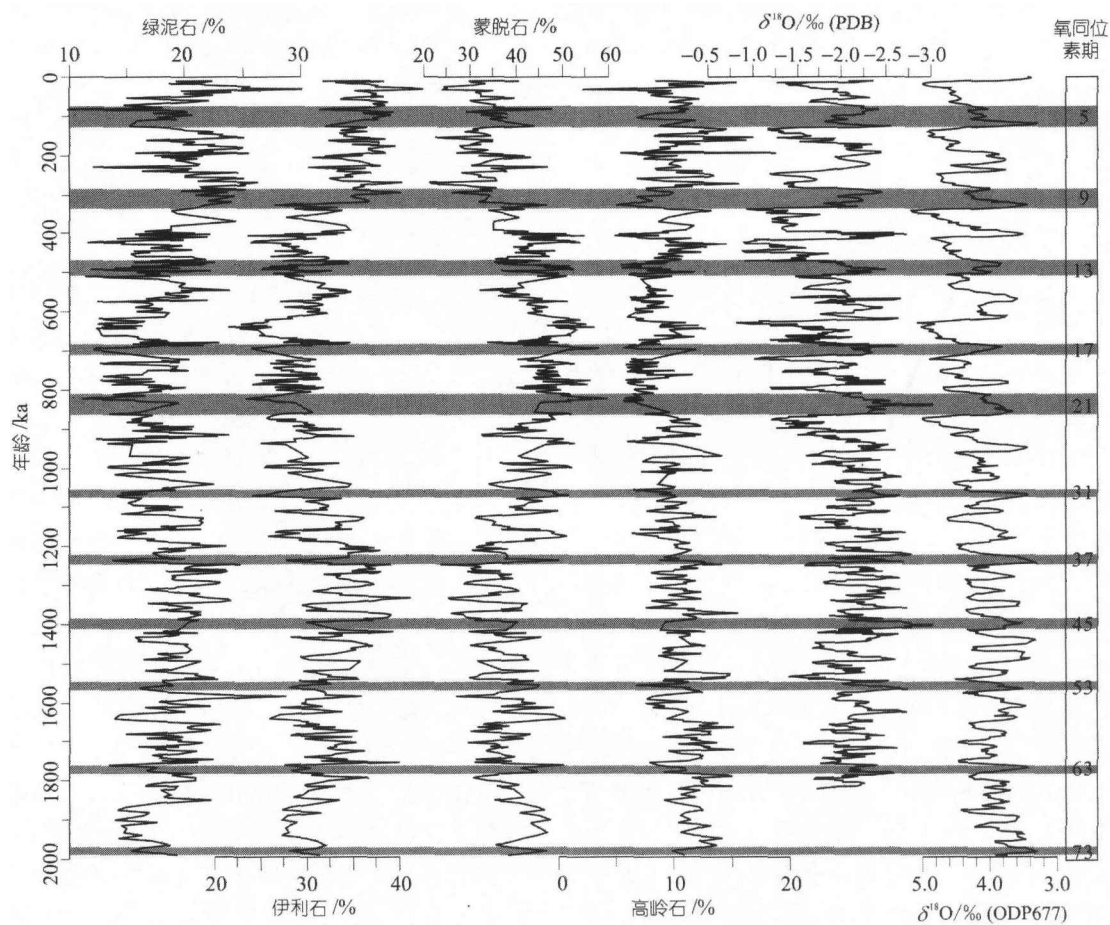


图 2 ODP1146 站 2 Ma 以来粘土矿物组合及浮游有孔虫氧同位素地层

本站氧同位素据文献[26], 经过 3 点高斯平滑; ODP677 站氧同位素据文献[27]

2 结果

南海北坡 ODP1146 站 2 Ma(氧同位素 73~1 期)以来的粘土粒级($< 2 \mu\text{m}$)矿物主要由四种粘土矿物和少量石英、长石碎屑组成(图 1). 其中, 粘土矿物相对含量变化中, 蒙脱石(21%~59%)和伊利石(22%~43%)构成主要成分, 含有绿泥石(10%~30%)和高岭石(2%~18%)(图 2). 粘土矿物含量表现出明显的冰期-间冰期旋回变化^[22], 一般地, 伊利石和绿泥石具有相同的变化型式, 冰期时含量增高, 间冰期时含量降低, 在大约 1200~400 ka 时平均含量降低 6%左右; 而蒙脱石含量呈现相反的变化趋势, 并在大约 1200~400 ka 时平均含量升高 15%以上. 高岭石的含量稳定在 12%左右, 多数冰期时含量增高, 间冰期时含量降低.

伊利石化学指数变化范围为 0.30~0.52, 一般小于 0.50, 表明主要为富 Fe-Mg 伊利石(图 3); 伊利石结晶度变化范围为 $0.17^\circ \sim 0.24^\circ \Delta 2\theta$, 平均为 $0.21^\circ \Delta 2\theta$, 低于黄土高原的黄土伊利石结晶度($0.22 \sim 0.33^\circ \Delta 2\theta$)^[28], 也表明伊利石形成于物理风化较强的气候环境. 伊利石化学指数和结晶度变化复杂, 没有显示出冰期旋回性(图 3), 指示多种物源区或不同的气候环境. 蒙脱石丰度从 0.2 变化到 0.7, 平均为 0.35, 其变化与氧同位素对比呈现较好的一致性, 间冰期时值较高, 而冰期时较低, 这种变化在 1200~400 ka 期间尤为显著(图 3). 本站沉积物的线性沉积速率变化范围为 4~46 cm/ka, 平均约为 15 cm/ka(图 3). 沉积速率的变化在氧同位素 37~11 期(约 1200~400 ka)随间冰期的到来而增加(除 17 和 21 期外), 冰期时降低, 而其他时期(特别是 400~0 ka)却呈现相反的变化趋势.

3 讨论

3.1 粘土矿物的物源分析与洋流搬运

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^[29,30]. ODP1146 站粘土矿物的物源区可以根据南海现代表层矿物分布情况和周围河流供给的主要成分来确定^[22]. 从长江口至台湾海峡, 到南海北部陆坡大致 1000 m 水深以浅地区, 伊利石含量从 65%^[31,32]增加到 73%和 84%^[33], 这些地区的绿泥石含量一般在 25%左右, 而蒙脱石含量小于 5%. 但珠江口的伶仃洋表层沉积中高岭石含量 $> 50\%$, 并向陆坡快速降低^[34]. 湄公河口的伊利石含量也在 45%左右, 但向深水区很快降为 30%左右^[15]. 南海东部和南部的火山岛弧海区含有很高的蒙脱石, 一般在 40%以上^[35], 南部巽他陆架的一些地区蒙脱石含量高达 50%以上, 高岭石含量也在 20%左右^[15]. 水深大于 1000 m 的南海中部地区粘土矿物含量变化复杂, 伊利石含量平均为 55%, 绿泥石为 21%, 高岭石和蒙脱石均为 12%^[15].

南海表层粘土矿物分布的控制因素主要为陆源供给^[15,18,20]. 南海周围有两种地质特征明显不同的物源供给区, 北部为亚洲大陆和台湾, 南部和东部为火山岛弧. 亚洲大陆上三条主要河流(长江、湄公河和红河)每年向海洋输送 $768 \times 10^6 \text{ t}$ 悬浮沉积物^[36], 其粘土矿物的主要成分均为伊利石和绿泥石^[31,37], 其中, 长江的悬浮沉积物中有 30%沿海岸向南传输^[38]. 台湾周围的主要河流(如浊水溪、曾文溪、高屏溪、卑南溪、秀姑峦溪和花莲溪)每年向海洋输送大约 $185 \times 10^6 \text{ t}$ 悬浮沉积物^[36], 其粘土矿物的主要成分也为伊利石^[39]. 珠江每年排放沉积物多达 $69 \times 10^6 \text{ t}$ ^[36], 但其粘土矿物的主要成分为高岭石^[34]. ODP1146 站伊利石的结晶度为 $0.17^\circ \sim 0.24^\circ \Delta 2\theta$, 低于中国内陆黄土($0.22 \sim 0.33^\circ \Delta 2\theta$)和古土壤($0.22 \sim 0.42^\circ \Delta 2\theta$)中伊利石的结晶度^[28], 表明南

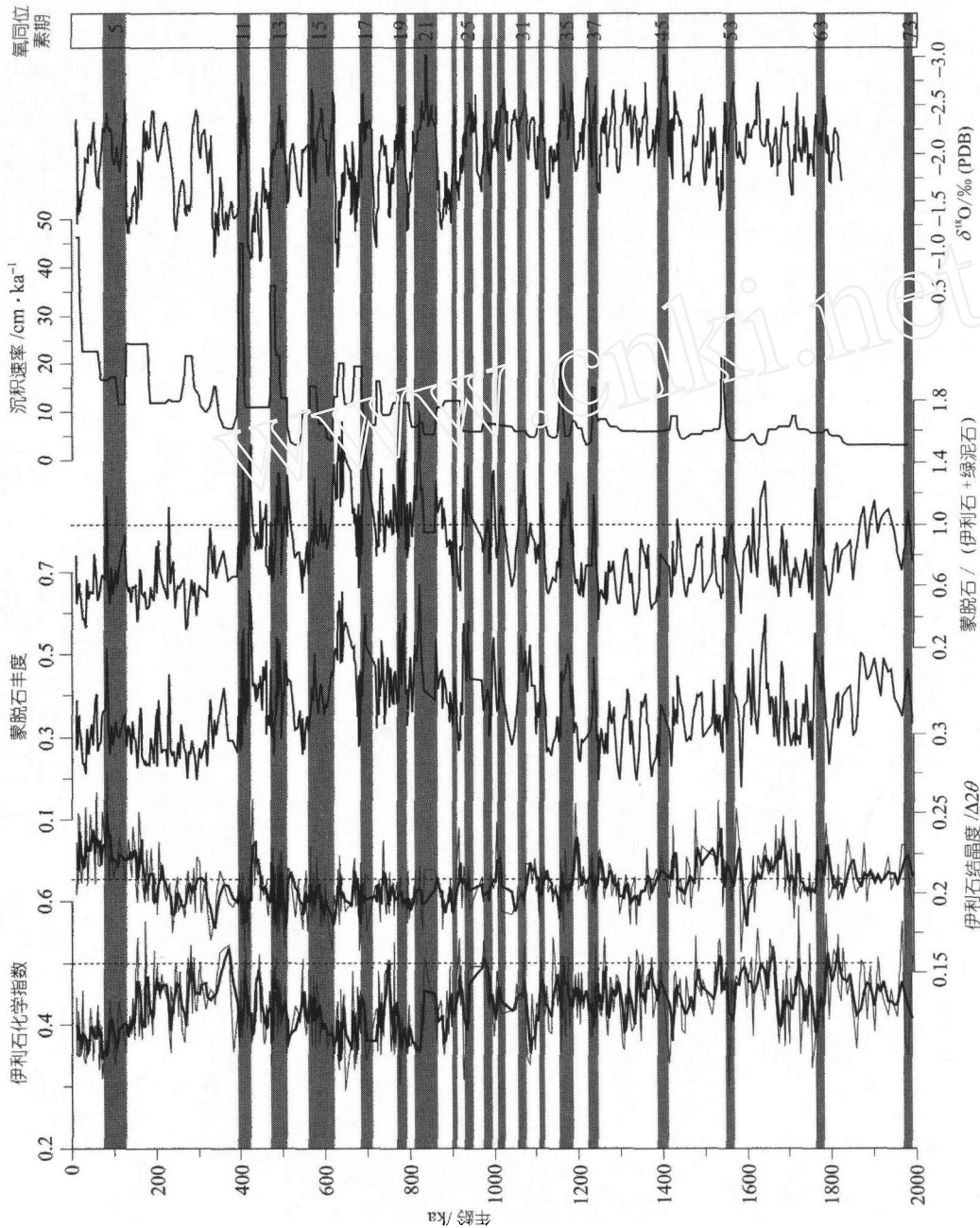


图 3 ODP1146 站伊利石化学指数和结晶度、蒙脱石丰度、蒙脱石/(伊利石 + 绿泥石)比率随沉积速率和氧同位素地层的变化关系

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, 蒙脱石丰度为 1.7 nm/1 nm 峰高比, 均在乙二醇曲线上测量; 伊利石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)

海北部伊利石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, 而且, ODP1146 站伊利石的化学指数(0.30~0.52)远低于南部巽他陆架的化学指数(0.8~1.0)^[11]。

ODP1146 站主要粘土矿物含量表现出明显的冰期-间冰期旋回变化(图 2)。间冰期时,海岸线与现代的位置大致相同,南海大部分地区盛行夏季的西南向表层洋流^[2,40](图 4),这种洋流将南部和东部火山岛弧区的蒙脱石搬运到北部地区,使 ODP1146 站蒙脱石含量增高;由于该站位的伊利石和绿泥石含量的变化同蒙脱石相反(图 2),所以由湄公河和红河供给的伊利石和绿泥石应占次要地位。冰期时,海岸线迁移至现代大致 100 m 等深线位置,南部的婆罗海峡和泰国湾以及北部的台湾海峡都已关闭(图 4)。在冬季风的驱动下,南海表层盛行冬季的逆时针方向洋流^[40]将来自台湾和流经吕宋海峡的长江物源搬运到 ODP1146 站的位置。此期间,红河和湄公河的沉积物由于洋流方向相反不能被搬到南海北坡;古长江口位置向东南方向迁移大约 3500 km,但由于向南搬运的沉积物可能受到台湾东北部的冲绳海槽和向北流动的黑潮影响,所以台湾可能是 ODP1146 站伊利石和绿泥石的主要来源。最近对位于本站东北方向的 ODP1144 站 1.05 Ma 以来沉积物源区的地球化学研究也显示,台湾为主要物源区^[41]。由此可以

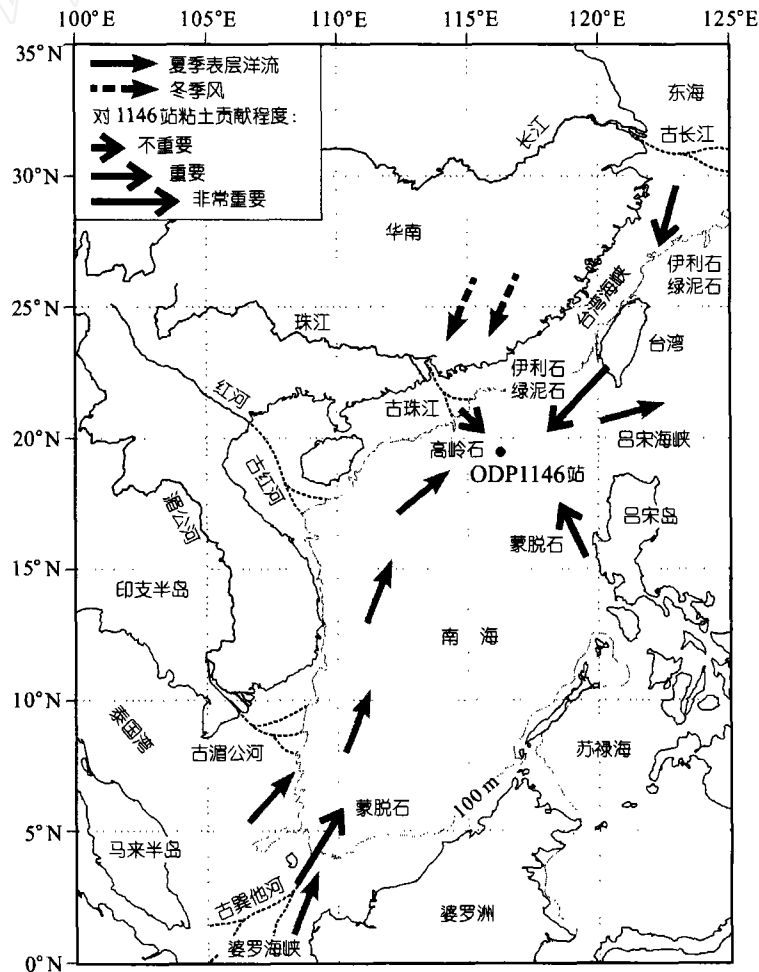


图 4 ODP1146 站粘土矿物的源区分析和洋流搬运

间冰期的海岸线与现代的位置大致相同,冰期的海洋线迁移至现代大致 100 m 等深线位置(点线),发育在出露陆架上的河流称为古河流(虚线)。夏季表层洋流和冬季风资料据文献^[2]

推断, ODP1146 站的伊利石和绿泥石主要来自台湾和长江流域, 高岭石主要来自珠江, 而蒙脱石则主要来自东部和南部的火山岛弧(图 4)。

3.2 东亚季风演化的矿物学标志

ODP1146 站伊利石的化学指数和结晶度虽然显示物源区经历较强的物理风化, 但其变化不具有冰期-间冰期旋回特征(图 3)。这可以解释为, 由于长江流域十分广阔(面积达 $1.94 \times 10^6 \text{ km}^2$), 包涵了多种气候条件和多种时代的风化剖面, 所以显示出多种物源区或不同的气候效应。珠江流域供给的高岭石主要来自华南红土风化剖面^[42], 这是火山岩在不同时代的风化产物, 不具有粘土矿物沉积时的气候特征。蒙脱石矿物在有充足水供给的情况下就能由火山岩形成, 可以不依赖于特定的气候条件^[12]。比如, 北极附近的冰岛和南极西部的岛屿含有高达 40% 的蒙脱石^[43]。因此, ODP1146 站粘土矿物种类直接反映的是物源区和洋流的变化, 而不是同时代的气候条件。但是, 南海表层洋流主要受东亚季风气候环流控制^[2,7,41]。这样, ODP1146 站粘土矿物组合实际上反映了南海海区盛行的季风变化, 间冰期盛行西南表层洋流将更多的蒙脱石从南部和东部搬运到北部; 冰期盛行的逆时针表层洋流将更多的伊利石和绿泥石从台湾和流经吕宋岛的长江物源搬运到 ODP1146 站的位置, 即伊利石和绿泥石含量高时代表盛行冬季风, 蒙脱石含量高时代表盛行夏季风。

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或洋流变化, 而使用几种矿物含量的比率^[30]。本文采用蒙脱石/(伊利石+绿泥石)比率和蒙脱石丰度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 3), 在万年时间尺度上, 相对高的比率和丰度对应于间冰期, 指示加强的夏季风环流和减弱的冬季风环流; 相反, 相对低的比率和低丰度发生在冰期, 指示强盛的冬季风和减弱的夏季风。这个结果同前人对晚更新世的研究相一致^[2,5,7]。沉积速率的变化与冰期-间冰期旋回变化具有一定对应性(图 3)。在 1200~400 ka 期间, 沉积速率在间冰期时与蒙脱石含量同时增加, 表明大量增加的蒙脱石(相对高的蒙脱石/(伊利石+绿泥石)比率)可以成为沉积物总量的主要成分, 而蒙脱石的增加是由加强的夏季风驱动的。在 2000~1200 和 400~0 ka 期间, 沉积速率在冰期时增加, 这时伊利石和绿泥石(相对低的蒙脱石/(伊利石+绿泥石)比率)可能成为沉积物总量的主要成分, 代表强盛的冬季风。因此, 就 10 万年时间尺度而言, 2000~1200 和 400~0 ka 期间南海北部盛行冬季风, 而 1200~400 ka 期间表现为加强的夏季风。

南海东亚夏季风的演化通常与北半球夏季日射量呈线性关系^[2,44], 因为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。我们使用 65°N 夏季平均日射量^[45]对比 ODP1146 站在 1200~400 ka 期间夏季风的演化过程, 发现他们基本呈线性对比关系(图 5), 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))的最大值(代表盛行夏季风), 说明在此期间夏季风驱动南海表层西南洋流将更多的蒙脱石向北搬运, 表明东亚季风演化的天文驱动机制。

4 结论

南海北部 ODP1146 站第四纪粘土矿物组合主要由蒙脱石(21%~59%)和伊利石(22%~43%)组成, 并含有绿泥石(10%~30%)和高岭石(2%~18%)。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。

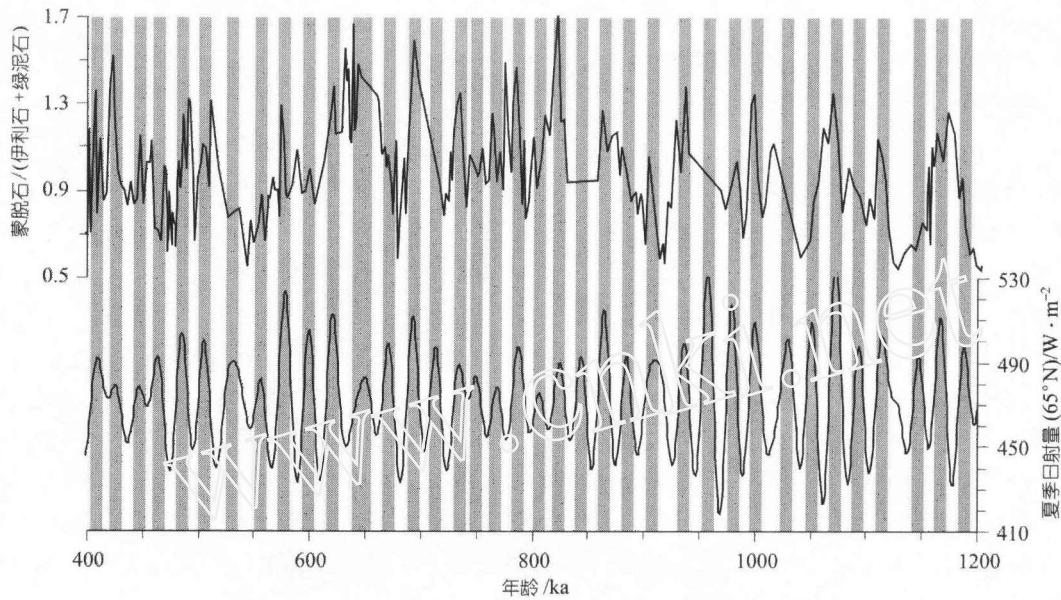


图 5 ODP1146 站 1200~400 ka 期间蒙脱石/(伊利石+绿泥石)比率与北半球夏季日射量对比
夏季日射量为 65°N 处 6~7 月的平均日辐射量, 根据 Laskar^[45]方案并运用 Analyse^{146]}软件生成

无论是在冰期还是间冰期, 这些矿物都有其相对固定的物源区和搬运方式. 间冰期时, 南海表层盛行的西南洋流将更多的蒙脱石向北搬运; 冰期时, 盛行的逆时针表层洋流将大量伊利石和绿泥石由台湾以及流经吕宋海峡的长江物源搬运至南海北坡; 而高岭石则主要由珠江提供. 南海表层洋流的变化主要由东亚季风气候环流驱动, 因此, 蒙脱石/(伊利石+绿泥石)比率和蒙脱石丰度变化可以作为东亚季风演化的矿物学标志. 在万年时间尺度上, 间冰期表现为加强的夏季风; 冰期时表现为强盛的冬季风. 就 10 万年时间尺度而言, 蒙脱石/(伊利石+绿泥石)比率与沉积速率的对应关系, 指示 2000~1200 和 400~0 ka 期间南海北部盛行冬季风, 而 1200~400 ka 期间表现为加强的夏季风. 夏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.

致谢 邵磊、黄宝琦、Christophe Colin 和 Sébastien Boulay 参加有益的讨论, Philippe Récourt 和 Deny Malengros 在实验中给予帮助, 本文使用的全部样品由大洋钻探(ODP)提供, 作者一并表示谢忱.

参 考 文 献

- 1 Webster P.J. The role of hydrological processes in ocean-atmosphere interactions. *Rev Geophys*, 1994, 32: 427~476
- 2 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
- 3 Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull Am Meteorol Soc*, 1996, 77: 437~471
- 4 Wang P. Late Cenozoic environment evolution in China: marine factors and records. In: *Proc 4th Int Conf Evolution of the East Asian Environment*, Hong Kong, 1997. 264~274

- 5 Huang C-Y, Liew P-M, Zhao M, et al. Deep sea and lake records of the Southeast Asian paleomonsoons for the last 25 thousand years. *Earth Planet Sci Lett*, 1997, 146: 59~72
- 6 Chen M-T, Huang C-Y. Ice-volume forcing of winter monsoon climate in the South China Sea. *Paleoceanography*, 1998, 13: 622~633
- 7 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
- 8 Clift P, Lee J I, Clark M K, et al. Erosional response of South China to arc rifting and monsoonal strengthening: a record from the South China Sea. *Mar Geol*, 2002, 184: 207~226
- 9 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
- 10 Gingele F X. Holocene climatic optimum in Southwest Africa—evidence from the marine clay mineral record. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 1996, 122: 77~87
- 11 Gingele F X, Deckker F 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
- 12 Chamley H. *Clay Sedimentology*. Berlin: Springer, 1989. 1~623
- 13 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
- 14 Foucault A, Mélières F. Palaeoclimatic cyclicity in central Mediterranean Pliocene sediments: the mineralogical signal. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2000, 158: 311~323
- 15 Chen P-Y. Minerals in bottom sediments of the South China Sea. *Geol Soc Am Bull*, 1978, 89: 211~222
- 16 吴文中, 朱袁智. 南海的粘土矿物. *热带海洋*, 1983, 2(1): 20~27
- 17 何锦文, 唐志礼. 南海东北部海区的粘土矿物. *热带海洋*, 1985, 4(3): 46~51
- 18 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
- 19 何良彪. 南海沉积岩芯中粘土矿物的研究. *青岛海洋大学学报*, 1992, 22(3): 73~81
- 20 唐志礼, 王有强. 南海北部海域粘土矿物分布特征. *海洋学报*, 1992, 14(1): 64~72
- 21 Wang P, Prell W L, Blum P, et al. Proc ODP Init Rep, V 184 [CD-ROM]. Ocean Drilling Program, Texas A&M University, College Station, 2000
- 22 Trentesaux A, Liu Z, Colin C, et al. Pleistocene paleoclimatic cyclicity of Southern China: Clay mineral evidence recorded in the South China Sea (ODP site 1146). In: Prell W L, Wang P, Blum P, et al. Proc ODP Sci Res, V184 (CD-ROM). Ocean Drilling Program, Texas A & M University, College Station, 2003
- 23 Holtzapffel T. Les Minéraux Argileux: Préparation, Analyse Diffractométrique et Détermination. *Soc Géol Nord Publ* 12, 1985, 1~136
- 24 Esquevin J. Influence de la composition chimique des illites surcrystallinité. *Bull Centre Rech Rau-SNPA*, 1969, 3(1): 147~153
- 25 Krumm S, Buggisch W. Sample preparation effects on illite crystallinity measurements: grain size gradation and particle orientation. *J Metam Geol*, 1991, 9: 671~677
- 26 Clemens S C, Prell W L. Data report: preliminary oxygen and carbon isotopes from site 1146, northern South China Sea. In: Prell W L, Wang P, Blum P, et al. Proc ODP Sci Res, V184[CD-ROM]. Ocean Drilling Program, Texas A & M University, College Station, 2003
- 27 Shackleton N J, Berger A, Peltier W R. An alternative astronomical calibration of the lower Pleistocene timescale based on ODP Site 677. *Trans R Soc Edinburgh Earth Sci*, 1990, 81: 251~261
- 28 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
- 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

- 30 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
- 31 王允菊, 张志忠, 黄文盛, 等. 长江口南槽水化学特性与悬沙粘土矿物. *海洋通报*, 1995, 14(3): 106~113
- 32 郭志刚, 杨作升, 王兆祥, 黄. 东海海域水团发育对底质沉积物分布的影响. *青岛海洋大学学报*, 1995, 25(1): 75~64
- 33 游仲华, 唐锦龙, 廖连招. 台湾海峡西部柱状沉积物粘土矿物的分析. *台湾海峡*, 1993, 12(1): 1~7
- 34 陈跃泰, 谭惠忠. 珠江口伶仃洋表层沉积的粘土矿物. *热带地理*, 1991, 11(1): 39~44
- 35 石学法, 王宗良. 西菲律宾海西部海域粘土沉积物的成因矿物学研究. *海洋地质与第四纪地质*, 1995, 15(2): 61~72
- 36 Milliman J D, Meade R H. World-wide delivery of river sediment to the oceans. *J Geol*, 1983, 91: 1~21
- 37 Nguyen H U, Egashira K. Clay mineralogical composition of some fluvioest in Vietnam. *Clay Sci*, 2000, 11: 205~217
- 38 Milliman J D, Shen H-T, Yang Z-S, et al. Transport and deposition of river sediment in the Changjiang estuary and adjacent continental shelf. *Continental Shelf Res*, 1985, 4: 37~45
- 39 Dorsey R J, Buchovetsky E J, Lundberg N. Clay mineralogy of Pliocene-Pleistocene mudstones, eastern Taiwan: combined effects of burial diagenesis and provenance unroofing. *Geology*, 1988, 16: 944~947
- 40 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
- 41 邵磊, 李献华, 韦刚健, 等. 南海陆坡高速堆积体的物质来源. *中国科学, D 辑*, 2001, 31(10): 828~833
- 42 徐义芳, 朱照宇. 英峰岭剖面红土的粘土矿物和化学特征与成土环境关系. *地球化学*, 1999, 28(3): 281~288
- 43 Rateev M A, Gorbunova Z N, Lisitzyn A P, et al. The distribution of clay minerals in the oceans. *Sedimentology*, 1969, 13: 21~43
- 44 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
- 45 Laskar J. The chaotic notion of the solar system: a numerical estimate of the size of the chaotic zones. *Icarus*, 1990, 88: 266~291
- 46 Paillard D, Labeyrie L, Yiou P. Analyseries 1.0: a Macintosh software for the analysis of geographical time-series. *Eos*, 1996, 77: 379