

南海北部中新世以来粘土矿物特征 及东亚古季风记录

万世明^{1,2}, 李安春¹, 胥可辉³, 尹学明¹

1. 中国科学院海洋研究所海洋地质与环境重点实验室, 山东青岛 266071

2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

3. School of Marine Science, College of William & Mary, Gloucester Pt, VA 23062, USA

摘要: 应用X射线衍射(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)和X射线能谱(EDS)分析技术对南海北部ODP1146站中新世以来(~ 20 Ma)粘土矿物的组成、结晶学特征、微形貌和化学成分进行了研究。分析了粘土矿物的物质来源及其记录的东亚季风演化历史。1146站粘土矿物组合的总体特点是以伊利石和蒙脱石为主,高岭石和绿泥石含量较低。物源分析表明,1146站蒙脱石主要来自于吕宋岛,伊利石和绿泥石来自于珠江和台湾(长江),而高岭石则主要来自于珠江。1146站的粘土矿物不仅被南海周围物源的同时代气候所控制,而且为相互消长的不同传输作用(表层洋流)的强度所影响。1146站(伊利石+绿泥石)/蒙脱石比值可以用来作为东亚季风演化的矿物学标志。指标变化显示出东亚冬季风强度和冬季风相对夏季风的程度在15 Ma、8 Ma和3 Ma左右发生了3次显著加强,结果可以与黄土、北太平洋风尘沉积、南海微体古生物记录等很好对比。青藏高原的阶段性隆升可能促进了东亚季风的这3次加强。

关键词: 粘土矿物; 物源分析; 东亚季风; 中新世; 南海。

中图分类号: P57, P51

文章编号: 1000-2383(2008)03-0289-12

收稿日期: 2008-01-16

Characteristics of Clay Minerals in the Northern South China Sea and Its Implications for Evolution of East Asian Monsoon since Miocene

WAN Shi-ming^{1,2}, LI An-chun¹, XU Ke-hui³, YIN Xue-ming¹

1. Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China

2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

3. School of Marine Science, College of William & Mary, Gloucester Pt, VA 23062, USA

Abstract: Clay mineral assemblages, crystallinity, chemistry and micromorphology of clay particles in sediments from ODP Site 1146 in the northern South China Sea (SCS) were analyzed and used to trace sediment sources and obtain proxy records of past changes in the East Asian monsoon climate since the Miocene based on a multi-approach including X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscope combined with energy dispersive X-ray spectrometer (SEM-EDS). Clay minerals mainly consist of illite and smectite, with associated chlorite and kaolinite. The illite at ODP Site 1146 has very well-to-well crystallinity, and smectite has moderate-to-poor crystallinity. In SEM the smectite particles at ODP Site 1146 often appear cauliflower-like, a typical micromorphology of volcanic smectites. The smectite at ODP Site 1146 is relatively rich in Si element, but poor in Fe, very similar to the smectite from the West Philippine Sea. In contrast, the chemical composition of illite at ODP Site 1146 has no obvious differences from those of the Loess, Yellow River, Yangtze River, and Pearl River. Sediment source studies indicate that smectite originates mainly from Luzon, kaolinite from the Pearl River and illite and chlorite from the Pearl River, Taiwan and/or the Yangtze River respectively. The clay mineral assemblages at ODP Site 1146 were not only controlled by the continental weathering regimes surrounding the SCS but also by the changing strength of the transport processes. The ratios of (illite+chlorite)/smectite at ODP Site 1146 were adopted as proxies for East Asian

基金项目: 国家自然科学基金(No. 40706025); 国家973计划项目(No. 2007CB411703)。

作者简介: 万世明(1978—), 男, 博士, 主要从事海洋沉积和矿物学研究。E-mail: wanshiming@ms.qdio.ac.cn

monsoon evolution. The consistent variation of this clay proxy with those from loess, eolian deposition in the North Pacific and planktonic and benthic foraminifera, and black carbon in the SCS since 20 Ma shows that three profound shifts of the East Asian winter monsoon intensity, aridity in the Asian inland and the intensity of winter monsoon relative to summer monsoon, occurred at \sim 15 Ma, \sim 8 Ma and the youngest at about 3 Ma. The phased uplift of the Himalaya-Tibetan plateau may have played a significant role in strengthening the Asian monsoon at 15 Ma, 8 Ma and 3 Ma.

Key words: clay minerals; sediment source analysis; East Asian monsoon; Miocene; South China Sea

东亚季风是亚洲大陆与“西太平洋暖池”(WP-WP)之间差异加热驱动的热力大气环流系统,它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环境特征(Webster *et al.*, 1998).利用黄土、古土壤的粒度、通量、磁化率和地球化学组成等探讨长时间尺度(>1 Ma)东亚季风演化和亚洲内陆干旱历史已经开展了大量研究(Ding *et al.*, 1999; An *et al.*, 2001; Guo *et al.*, 2002),而南海作为东亚大陆物质剥蚀的主要沉积区,是东亚季风研究的理想场所之一,但由于缺乏长柱样品,相类似工作以往未能开展(Wang *et al.*, 2000).近年来,利用1999年在我国南海实施的大洋钻探ODP184航次所取得的样品,从放射虫(Chen *et al.*, 2003)、有孔虫(Zheng *et al.*, 2004)、稳定同位素(Jia *et al.*, 2003; Tian *et al.*, 2004)、沉积地球化学(Wehausen and Brumsack, 2002)等方面进行长时间尺度东亚古季风的研究渐多,而最近Sun and Wang(2005)更是从大空间和时间尺度的中国古植物分区探讨了季风的起源.但是,利用南海沉积物矿物学资料详细研究东亚季风在构造时间尺度上的长期演化却鲜有报道(Wan *et al.*, 2006).本文拟用X射线衍射(XRD)和扫描电子显微镜-X射线能谱(SEM-EDS)分析技术详细研究ODP1146站粘土矿物的特征和演变,提取出合适的季风代用指标,探讨东亚季风在中新世以来的演化.

1 材料和方法

研究样品为 1999 年在中国南海实施的 ODP184 航次 1146 站柱状沉积物。ODP1146 站 ($19^{\circ}27.40'N$, $116^{\circ}16.37'E$, 水深 2 092 m, 如图 1) 位于南海北部陆坡的一个张裂盆地中, 岩心长 643 mcd (合成深度), 分析样品共计 275 个, 取自 1146A 孔, 其中 $0\sim327.50$ mcd 和 $499.84\sim642.44$ mcd 按 3 m 间距取样, $327.50\sim498.94$ mcd 按 1.5 m 间距取样。样品为粘土—粉砂粒级, 镜下鉴定主要由粘土矿

物、石英和长石组成，并含有大量的有孔虫壳体和少量的硅质放射虫和海绵骨针。年代模式采用重要的浮游有孔虫和超微化石事件以及古地磁极性事件（Wang *et al.*, 2000），然后内插而成。分析样品跨度约 20 Ma，样品分辨率变化为 14~87 ka，平均 71 ka。此外，为了进行物源对比，还选取了 4 个珠江口样品、5 个长江口样品、3 个台湾岛靠近浊水溪河口样品、2 个黄土样品、8 个西菲律宾海样品，如图 1。

粘土矿物分析采用粘土粒级组分($<2\text{ }\mu\text{m}$)定向薄片的X射线衍射方法(Wan *et al.*, 2006, 2007)。每个样品取大约 1 cm^3 , 先后用10% H_2O_2 和0.5 N HCl反应去除有机质和碳酸盐, 加去离子水

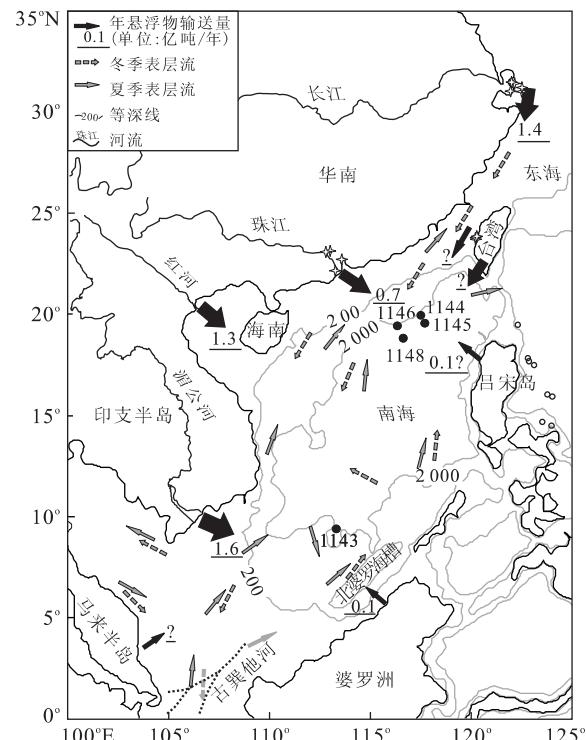


图 1 ODP184 航次站位和南海的陆源物质输入示意图
 Fig. 1 Map showing ODP Leg 184 drilling sites in the SCS and terrigenous materials delivering to the sea.
 图中白色星星表示所取河流样品位置;空心圈表示西菲律宾表层样位置;黑色实体箭头和数字所表示的年悬浮物输送量数据来自 Milliman and Meade (1983)、Milliman and Kao (2005);表层洋流分布来自 Li et al. (2002)。

离心清洗两次,使样品的抗絮凝作用发生。按 Stoke 原理所确定的沉降时间,抽取上部 $<2\text{ }\mu\text{m}$ 的悬浮液,离心,用涂片法制成定向薄片,自然风干。XRD 分析采用德国产 D8 Advance 衍射仪,CuK α 辐射,管压 40 kV,管流 40 mA,分别对自然条件、乙二醇蒸气饱和、加热条件(550 °C, 2 h)的样品薄片进行测试,扫描角度 3°~30°2θ,步长 0.02°。粘土矿物的鉴定和解释主要依据 3 种测试条件下获得的 XRD 叠加图谱的综合对比(Moore and Reynolds, 1997),部分样品中含有极少量的伊利石/蒙脱石混层矿物,由于峰型太弱很难准确定量,实际计算中将其归到 17 Å 蒙脱石。波峰参数的半定量计算使用 Topas2p 软件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。4 种粘土矿物蒙脱石(含少量伊利石/蒙脱石混层矿物)、伊利石、高岭石和绿泥石的相对含量计算按 Biscaye(1965)的方法,17 Å 衍射峰面积×1 为蒙脱石的权重强度;10 Å 衍射峰面积×4 为伊利石的权重强度;7 Å 衍射峰面积×2 为高岭石和绿泥石合计的权重强度,两者的含量比例从绿泥石的(004)(3.54 Å)和高岭石的(002)(3.58 Å)的衍射峰面积求出,四者强度最后校正为含量 100%。

同时,利用乙二醇曲线计算伊利石的化学指数,即 5 Å/10 Å 峰面积比,比值小于 0.4 为富 Fe-Mg 伊利石,代表未风化的云母和伊利石;比值大于 0.4 为富 Al 伊利石,代表高度风化的伊利石。伊利石化学指数相对大小可以指示其风化程度,从而可以用来指示物源和气候变化(Ehrmann, 1998; Liu *et al.*, 2003)。粘土矿物晶格的有序度和晶体颗粒的大小通常用“结晶度”来衡量。伊利石和蒙脱石的结晶度计算有很多方法,前者常用半高宽 FWHM(Kübler 指数),后者常用 v/p 指数(Biscaye, 1965)或 FWHM,但由于蒙脱石 17 Å 峰形态常常很不规则,而且与绿泥石 14 Å 峰是部分重叠,v/p 指数和 FWHM 对于计算蒙脱石的结晶度并不理想。更好的方法是用乙二醇曲线上蒙脱石 17 Å 和伊利石 10 Å 的积分宽度 IB(Integral Breadth)来代替 FWHM(Petschick *et al.*, 1996)。积分宽度 IB 是与目标峰等面积、等高度的一个矩形的宽度,该高度即峰最大强度值,由于峰的积分面积和最大强度很容易得到,从而可求出 IB。

扫描电镜(SEM)和 X 射线能谱(EDS)相结合,不仅能够对粘土矿物的形态进行微观分析,同时又

能对样品中微区成分进行定性一半定量分析。扫描电镜为日本 JEOL 产 JSM-6700F,分辨率为 1 nm,所配 X 射线能谱为英国牛津大学所产 InCA,MnK α 线半高宽优于 133 keV,能谱定量准确度 2%。共分析了 9 个样品,其中 ODP1146 站 5 个、珠江 2 个、黄土 2 个。所分析的样品过 63 μm 湿筛后,用 10% H₂O₂ 和 0.5 N HCl 水浴 60 °C 反应去掉有机质和碳酸盐(离心清洗)。为了均匀分散粘土矿物单矿物颗粒,采用了过滤法,即离心后样品加蒸馏水超声波分散后用 0.45 μm 孔径的醋酸纤维滤膜经真空泵过滤。裁剪下合适大小滤膜后,镀铂上机分析,选择合适的矿物颗粒拍照和 EDS 测量成分。

2 结果

2.1 粘土矿物组成

ODP1146 站沉积物中小于 2 μm 的粘土矿物组分中,蒙脱石(~34%)和伊利石(~45%)是控制组份,并含有少量高岭石(~12%)和绿泥石(~10%)(图 2)。整体上,伊利石和绿泥石的含量变化非常相似,暗示了同一物源或同种气候条件下的产物。从长期变化来看,近 20 Ma 以来,伊利石和绿泥石含量逐渐增加,与此正好相反的是蒙脱石,蒙脱石的含量逐渐降低。与这三者变化均无明显关系的是高岭石的变化,高岭石在 20~7 Ma 有逐渐增加的趋势,但在 7~3 Ma 则急剧减少,3 Ma 以来波动剧烈,但总体无明显变大/变小趋势(图 2)。

2.2 粘土矿物结晶学特征

1146 站伊利石的化学指数变化范围为 0.18~0.40,平均 0.29(图 2),表明伊利石富 Fe-Mg,产于较强烈的物理风化环境;伊利石的结晶度指数半高宽(FWHM)和积分宽度(IB)变化范围分别为 0.12°~0.39°Δ2θ 和 0.24°~0.75°Δ2θ,平均为 0.22°Δ2θ 和 0.37°Δ2θ;蒙脱石的结晶度指数 IB 变化范围为 0.35°~4.13°Δ2θ,平均 1.56°Δ2θ。根据指数 IB 的大小,Ehrmann(1998)给出了结晶度分类,伊利石:结晶程度极好(<0.4)、结晶程度好(0.4~0.6)、结晶程度中等(0.6~0.8)、结晶程度差(>0.8);蒙脱石:结晶程度好(<1.5)、结晶程度中等(1.5~2.0)、结晶程度差(>2.0)。按照这一分类,1146 站伊利石的结晶程度极好—中等,蒙脱石的结晶程度中等偏差。

图 2 还给出了伊利石化学指数,以及伊利石和

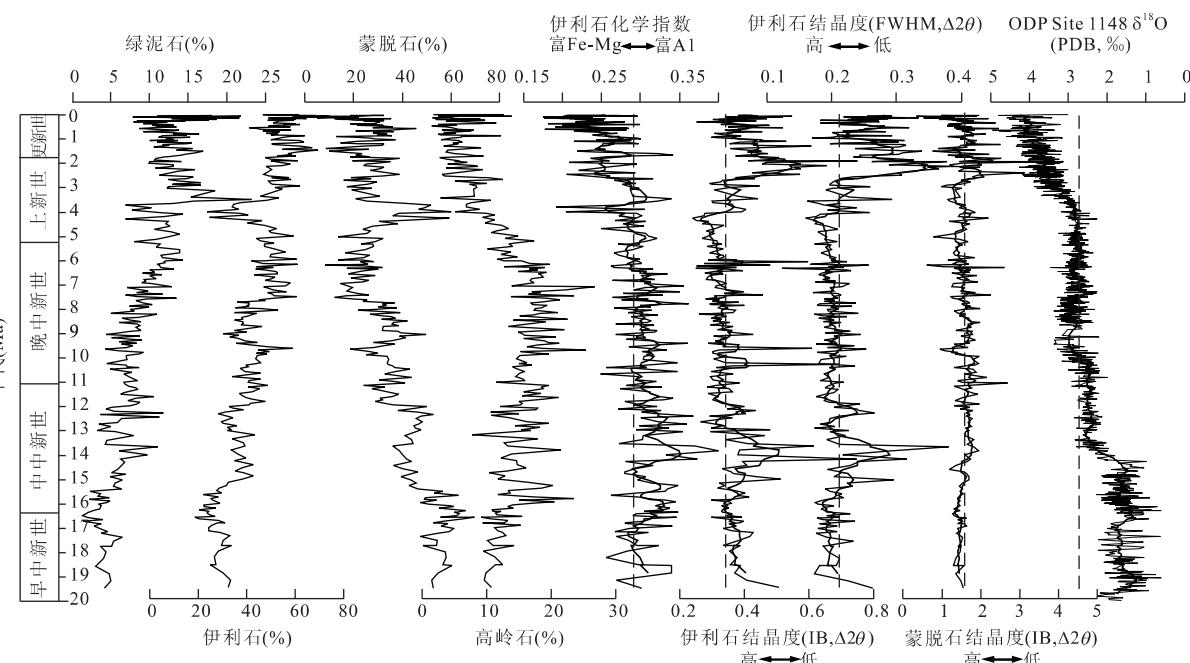


图 2 近 20 Ma 以来 ODP1146 站粘土矿物组成以及结晶度指数的变化

Fig. 2 Variation of clay mineral assemblages and crystallinity index at ODP Site 1146 since about 20 Ma
其中 1148 站 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线经过了 15 点滑动平均, 其余为 3 点平均

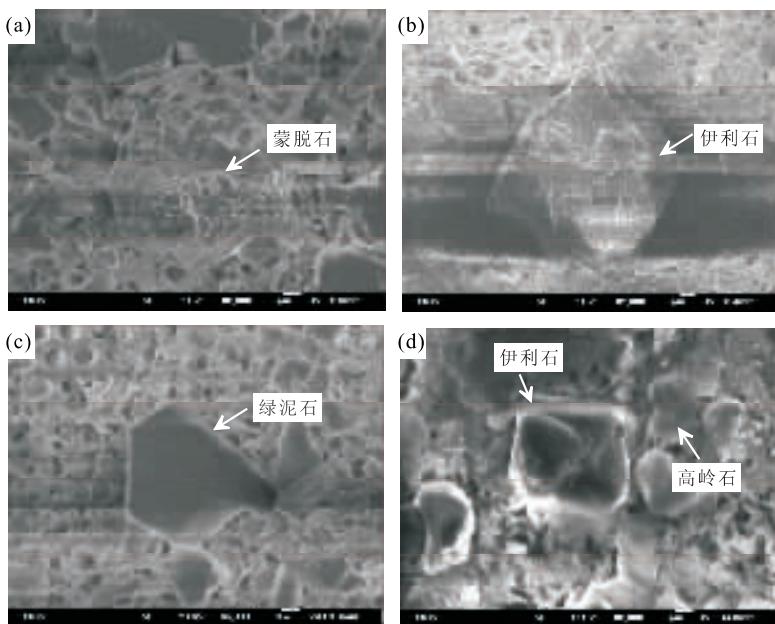


图 3 粘土矿物的扫描电镜照片

Fig. 3 The SEM photos of clay minerals at ODP Site 1146
a. ODP1146 站蒙脱石; b. ODP1146 站伊利石; c. ODP1146 站绿泥石; d. 珠江口伊利石和高岭石

蒙脱石的结晶度指数的长期变化, 可以看出:(1)用两种方法计算出的伊利石结晶度指数 FWHM 和 IB 的长期变化趋势非常相似;(2)粘土矿物的结晶度指数与 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线的长期变化几乎没有相似性;(3)在

20~3 Ma 长达 17 Ma 的时间里, 伊利石和蒙脱石的结晶度指数都基本上没有大的变大或变小的趋势, 而在 3 Ma 以来, 伊利石化学指数明显降低, 伊利石结晶度指数也显著增大, 这说明 3 Ma 以来伊利石

物理风化程度明显加强,其结晶程度显著降低,而同时蒙脱石的结晶度指数在3 Ma以来也有所增大,即结晶程度也有所降低。

2.3 粘土矿物形貌和化学成分

图3为选取的4幅粘土矿物扫描电镜的照片。可以看出,1146站蒙脱石的形状为菜花状,是火山

蚀变成因的典型形貌,大小一般在1~5 μm。伊利石为片状或板状,一般在1~5 μm左右。绿泥石为薄片状,有的为典型的六方片状,镜下常见5~10 μm的大晶体,相对其他几种粘土矿物较大。伊利石和绿泥石的形状和边缘清晰的磨蚀轮廓都表明其陆源成因(石学法等,1995)。1146站的高岭石含量很低,在扫描电镜下没有找到。但在珠江口样品中发现了几颗

表1 ODP1146站、黄土、珠江口沉积物EDS分析结果(%)

Table 1 Chemical compositions of clay minerals in sediments from ODP Site 1146, loess and Pearl River by EDS analysis

分析点/面	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	定名
sn1-1	45.22	17.25	15.50	2.09	14.05	0.85	3.81	0.19	1.04	绿泥石
sn119-1	53.06	17.61	0.00	0.00	25.84	0.00	0.25	3.24	0.00	绿泥石
sn119-2	52.71	30.78	0.00	0.00	6.35	2.90	1.30	5.96	0.00	绿泥石
sn186-1	61.85	25.44	0.00	0.03	9.68	1.07	1.22	0.47	0.24	绿泥石
sn186-6-1	55.59	19.14	0.00	0.00	21.62	0.16	1.61	1.84	0.04	绿泥石
LoeM-1-1	42.43	24.62	19.39	0.00	10.21	0.73	1.65	0.97	0.00	绿泥石
LoeM-1-2	48.64	25.29	12.25	0.00	11.10	0.46	1.93	0.33	0.00	绿泥石
LoeM-2-3	46.38	23.48	16.94	0.00	9.83	0.35	1.52	0.90	0.61	绿泥石
sn1-3	57.10	32.41	5.65	0.67	3.13	0.04	0.10	0.79	0.11	蒙脱石
sn1-6	65.73	23.76	5.54	0.10	3.23	1.15	0.02	0.00	0.47	蒙脱石
sn1-5	49.86	19.40	17.14	1.15	9.26	1.32	0.26	1.35	0.27	蒙脱石
sn1-2	56.29	37.10	3.31	0.00	0.18	0.00	3.13	0.00	0.00	伊利石
sn35-1	41.51	41.53	1.51	1.69	0.00	0.63	9.19	2.87	1.07	伊利石
sn35-6	56.09	21.26	5.18	4.61	2.57	0.00	5.86	1.74	2.67	伊利石
sn119-4	56.26	35.07	0.39	0.00	2.48	0.00	5.14	0.00	0.64	伊利石
sn119-5	67.24	17.04	0.58	0.86	0.14	0.00	12.93	0.99	0.22	伊利石
sn186-2	61.93	25.69	1.70	0.00	3.44	0.90	5.79	0.00	0.55	伊利石
sn186-5	52.23	40.72	0.00	0.31	1.67	0.00	5.05	0.00	0.03	伊利石
sn186-6-2	54.78	35.97	0.00	0.00	5.17	0.17	2.60	0.29	1.02	伊利石
sn186-6-3	58.63	34.32	0.55	0.00	4.01	0.60	1.32	0.00	0.58	伊利石
sn246-1	57.09	34.21	0.34	0.02	3.58	0.00	4.04	0.45	0.27	伊利石
sn246-3	55.68	35.57	0.00	0.00	3.23	0.18	4.74	0.57	0.03	伊利石
sn246-4	52.72	39.64	0.20	0.00	0.84	0.00	5.05	1.49	0.05	伊利石
sn246-6	54.25	36.59	0.70	0.00	0.71	0.30	6.65	0.79	0.00	伊利石
sn35-2	51.91	28.26	11.28	0.00	3.09	0.13	4.38	0.95	0.00	伊利石
sn35-4	56.04	22.83	7.61	1.10	6.02	1.98	4.14	0.29	0.00	伊利石
sn35-5	52.25	21.62	14.82	0.00	3.93	0.42	5.62	1.10	0.25	伊利石
4R92-1-2	55.20	37.83	2.64	0.00	1.88	0.00	1.10	1.33	0.03	高岭石
4R92-1-1	55.99	31.97	1.00	0.00	3.85	0.04	5.59	0.85	0.71	伊利石
4R92-2-1	52.58	39.19	0.41	0.00	1.52	0.25	4.41	1.49	0.16	伊利石
4R92-3-1	55.39	33.61	0.00	0.97	4.70	0.00	5.32	0.00	0.00	伊利石
4R92-6-1	53.36	39.63	0.55	0.33	0.53	0.06	5.21	0.12	0.21	伊利石
4R92-6-2	53.54	40.78	0.20	0.00	1.07	0.34	3.63	0.26	0.17	伊利石
4X127-2-1	54.10	36.57	0.66	0.42	2.63	0.00	5.39	0.22	0.00	伊利石
4X127-3-1	52.44	40.97	0.48	0.00	0.83	0.20	3.84	0.00	1.24	伊利石
4X127-3-2	52.72	31.90	5.94	0.02	2.62	0.57	4.90	0.69	0.65	伊利石
4X127-4-1	54.89	32.44	2.88	0.48	3.36	0.32	2.20	0.46	2.98	伊利石
4X127-4-2	47.92	32.95	5.48	0.15	3.18	0.60	2.48	0.60	6.64	伊利石
LoeM-2-2	54.04	29.44	4.42	0.25	2.88	0.55	6.75	0.60	1.07	伊利石
LoeM-3-1	60.38	31.07	1.28	0.36	0.93	0.00	3.26	2.01	0.72	伊利石
LoeM-1-3	54.66	22.64	9.45	0.08	5.42	0.88	2.70	2.70	1.45	伊利石

注:其中样品号以sn开头的来自1146站,以LoeM开头的来自马兰黄土,其他为珠江。

表 2 不同地区粘土矿物化学成分比较(%)

Table 2 Comparison of chemical composition of clay minerals from various regions

物源	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	定名	出处*
黄土	56.36	27.72	5.05	0.23	3.08	0.48	4.24	1.77	1.08	伊利石	1
长江	52.99	38.95	2.74	0.00	1.37	0.65	1.97	0.76	0.57	伊利石	2
珠江口	53.47	36.17	1.84	0.22	2.38	0.22	4.01	0.55	1.16	伊利石	1
1146 站	55.75	33.44	1.11	0.58	2.16	0.21	5.50	0.71	0.55	伊利石	1
长江	43.71	23.21	23.36	0.00	2.64	0.67	0.81	5.12	0.48	蒙脱石	2
西菲律宾海盆	60.09	21.20	8.62	0.00	3.18	3.21	1.81	1.00	0.46	蒙脱石	3
1146 站	61.42	28.09	5.60	0.39	3.18	0.60	0.06	0.40	0.29	蒙脱石	1
黄土	45.82	24.46	16.19	0.00	10.38	0.51	1.70	0.73	0.20	绿泥石	1
长江口悬浮体	36.35	26.19	11.50	0.00	15.68	2.59	1.58	5.51	0.60	绿泥石	4
1146 站	53.69	22.04	3.10	0.42	15.51	1.00	1.64	2.34	0.26	绿泥石	1

注: * 数据来源: 1. 本文; 2. 何良彪和刘秦玉, 1997; 3. 石学法等, 1995; 4. 李安春, 1997.

高岭石, 颗粒非常细小($1\text{ }\mu\text{m}$ 左右). 从形貌上, 并未发现 1146 站样品中的伊利石和绿泥石与珠江、黄土有本质区别.

在用扫描电镜选择了较有代表性的矿物颗粒后, 利用电镜配备的 X 射线能谱对矿物颗粒的点或面进行了化学成分的半定量分析. 表 1 为 ODP1146 站、黄土、珠江口沉积物 EDS 分析数据和矿物定名. 表 2 列出了黄河和长江(何良彪和刘秦玉, 1992)、长江口悬浮体(李安春, 1997)、西菲律宾海(石学法等, 1995)、黄土、珠江口、ODP1146 站伊利石、蒙脱石和绿泥石的 EDS 分析化学成分的比较. 1146 站伊利石成分与黄土、黄河、长江、珠江相比, 没有明显差异. 长江为富铁贫硅的蒙脱石, 而 1146 站蒙脱石化学成分与西菲律宾海的非常接近, 都是相对富硅贫铁. 遗憾的是, 由于珠江样品中蒙脱石含量太低, 在电镜下没有找到, 无法与之对比. 但这一结果可以暗示 1146 站的蒙脱石物源与西菲律宾海(吕宋岛弧)更为接近. 此外, 1146 站的绿泥石与黄土和长江口悬浮体相比, 相对较贫铁.

3 讨论

3.1 粘土矿物的物源分析

海底磁异常条带显示南海海底扩张自早渐新世开始, 到早中新世停止($\sim 32 \sim 17\text{ Ma}$; Briais *et al.*, 1993). 由于向南运动的北巴拉望地块与加里曼丹和西菲律宾群岛的碰撞, 南海的海底扩张在 17 Ma 左右停止(Taylor and Hayes, 1983; Lee and Lawver, 1994). 自此西菲律宾群岛附在了北巴拉望地块上一起向北移动, 直至在上新世与欧亚大陆边缘碰撞

(Hall, 2002). 研究区的主要沉积物源是珠江. 伴随着南海在 30 Ma 左右的张开, 古珠江三角洲系统就在南海北部大陆边缘发育(Guong *et al.*, 1989). Clift *et al.* (2002) 和 Li *et al.* (2003) 从 ODP1146 站的 Nd 同位素组成分析认为近 23 Ma 以来通过珠江运输的华南物质是南海北部的主要物源. 现代珠江每年向南海输送 $69 \times 10^6\text{ t}$ 悬浮沉积物(Milliman and Meade, 1983). 其他的大河如湄公河离研究区太远, 而红河物质的输入则被海南岛所阻挡. 但最近粘土矿物和 Nd 同位素组成研究则认为, 吕宋岛和台湾的物质输入也不可忽略(Liu *et al.*, 2003; Boulay *et al.*, 2005).

为了更直观地对比几种潜在物源, 图 4 给出了 1146 站、珠江、台湾、长江、黄土、西菲律宾海(代表吕宋岛)的粘土矿物衍射图谱, 表 3 列出了 4 种粘土矿物的相对百分含量和蒙脱石和伊利石的结晶度. 最为明显的是, 黄土、台湾、珠江、长江的粘土矿物中蒙脱石含量极低($0\% \sim 6\%$), 而且中国东部其他的一些较小河流如闽江和汉江(Boulay *et al.*, 2005)等河流沉积物中蒙脱石含量不到 2%, 许多甚至为 0%, 而 ODP1146 站蒙脱石平均含量高达 34%, 很明显, 即使考虑一些可能存在的絮凝或沉积分异作用差异的因素, 华南或台湾或长江的物质供应也不足以使 1146 站的蒙脱石含量最高达到 70%. 蒙脱石常来自于火山岩的化学风化, 从而含有大量玄武岩的吕宋岛弧因此被认为是南海北部蒙脱石的主要物源(Liu *et al.*, 2003; Boulay *et al.*, 2005). 从蒙脱石—伊利石—高岭石三组分图解(图 5)也可以看出, 西菲律宾海处于富蒙脱石的单元, 台湾、长江、黄土处于极富伊利石的单元, 而珠江口沉积物处于伊

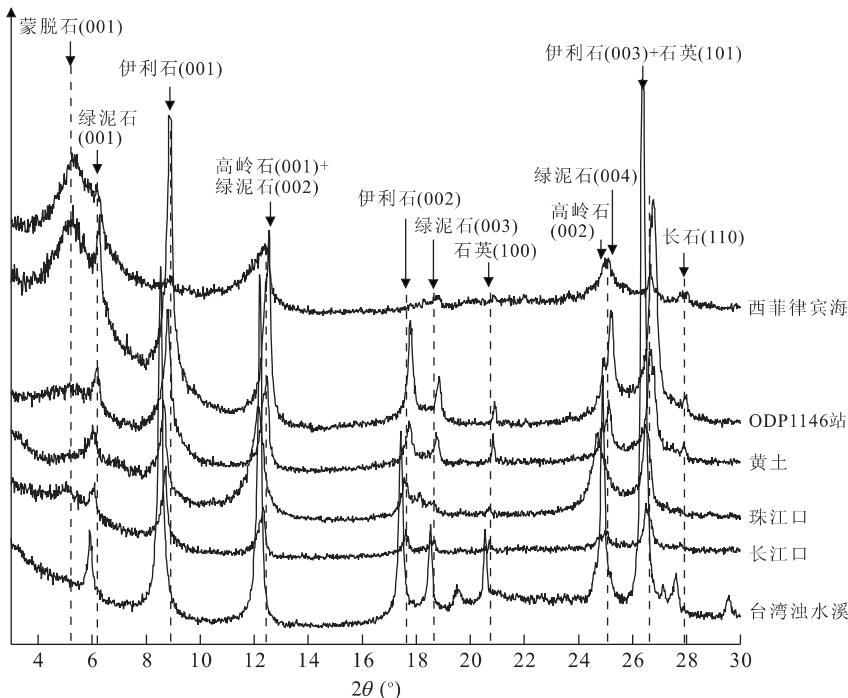


图4 不同地区的粘土矿物XRD图谱(乙二醇饱和条件)对比

Fig. 4 Comparison of XRD diagrams (EG) of clay minerals from various regions

表3 不同地区的粘土矿物组成和结晶度指数

Table 3 Mineral assemblages and crystallinity index of clays from various regions

物源	蒙脱石(%)	伊利石(%)	高岭石(%)	绿泥石(%)	蒙脱石 IB	伊利石 IB
1146 站	34	45	12	10	1.56	0.37
珠江	1	52	39	8	0.34	0.31
黄土	1	78	6	15	0.49	0.46
长江	5	69	9	16	0.56	0.31
台湾浊水溪	0	69	1	30	\	0.25
西菲律宾海	46	21	9	24	1.33	0.33

利石和高岭石控制的单元,相比之下,1146站沉积物并不属于任何一个单元之内,其富蒙脱石和伊利石,看来是多物源混合的结果。此外,台湾是南海北部的又一重要潜在物源(邵磊等,2001; Liu et al., 2003; Boulay et al., 2005)。台湾样品含有高含量的伊利石(50%~60%)和绿泥石(30%~40%)以及很少的蒙脱石和高岭石(如表3)。东海沉积物与台湾的粘土矿物组成非常接近(表3),也被认为可以由冬季盛行的东北方向洋流将流经台湾海峡的长江物源搬运到1146站(Liu et al., 2003)。但由于台湾海峡和常年向北流动的黑潮阻挡,从东海进入南海的物质可能很有限。另外,珠江沉积物的(伊利石+绿泥石)/高岭石的比值为1左右,而1146和1145站沉积物的比值则都在5~6。很明显,如果台湾和/

或东海没有提供有高含量伊利石和绿泥石的物质给研究区,就很难解释。因此,正如Liu et al. (2003)基于南海表层粘土分布和洋流搬运所认为,1146站的蒙脱石可能来自于吕宋岛,伊利石和绿泥石来自于珠江和台湾,而高岭石则主要来自于珠江。

此外,不同地区的蒙脱石结晶度指数(积分宽度IB)的对比(表3)也表明,珠江、长江、黄土的蒙脱石结晶度指数非常接近(0.5左右),而西菲律宾海(代表吕宋岛)的蒙脱石结晶度指数很高(~1.33),相比之下,1146站的蒙脱石结晶度指数更高(~1.56)。由于积分宽度IB与矿物结晶程度成反比,IB越大,结晶程度越差,相反则越好。一般来说,来自基性火山物质蚀变而成的蒙脱石结晶程度都很差(Jeong et al., 2004)。从结晶度指数再结合化学成分,可以说

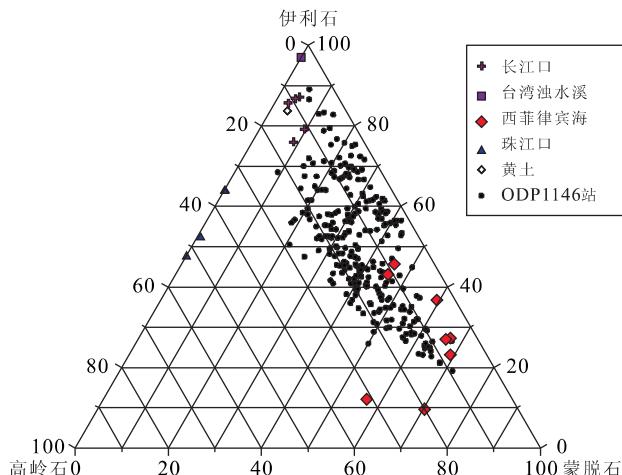


图 5 不同地区的粘土矿物三组分图解

Fig. 5 Ternary diagram showing extent of variation in clay-mineral composition of clays from various regions

明 1146 站蒙脱石的亲缘性与代表吕宋岛的西菲律宾海更近,而与华南和台湾的就疏远多了。并且,扫描电镜下也清楚显示,1146 站的蒙脱石单矿物颗粒都为典型的菜花状(如图 3a),结晶程度很差。而相比之下,这几个地区伊利石的结晶度指数(IB)和化学指数(表 3)则没有非常明显的差异规律,说明伊利石和蒙脱石的物质来源是不同的。

此外,从图 2 可以看出,近 20 Ma 以来 ODP1146 站伊利石和蒙脱石结晶度指数的长期变化与暗示气候变化的 1148 站底栖有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 变化之间几乎没有什么相似性。我们知道,粘土矿物的结晶学特征主要受物源和气候双重控制(Ehrmann, 1998)。毫无疑问,在 20~3 Ma 长达 17 Ma 的时间里,东亚气候经历了巨大的变化(总体上变冷变干)(如图 2 中 1148 站氧同位素曲线),但伊利石和蒙脱石的结晶度指数却没有表现出明显的变化趋势,这可能说明:(1) 20~3 Ma 伊利石和蒙脱石的物质来源没有发生大的变化;(2) 20~3 Ma 间的气候变化对伊利石和蒙脱石的矿物学特征没有显著影响。相反,对于 3 Ma 以来伊利石物理风化程度明显加强和结晶程度显著降低以及蒙脱石结晶程度微弱降低这一事件则要慎重解释,它可能是物源发生变化的结果,也可能是 3 Ma 以来全球气候开始恶化/冬夏季风加强的结果。从前面的分析知道 1146 站的蒙脱石可能来自于吕宋岛,而伊利石则来自于珠江和台湾。虽然台湾被认为是吕宋弧与欧亚大陆边缘碰撞的结果,但目前对于原始台湾形成的地质时间界定

却争议很大。一个比较认同的时间为至少 6 Ma 以前(Sibuet and Hsu, 2004)。但是,台湾的强烈造山活动则可能始于 3 Ma 左右(Teng, 1990)。根据南海北部的地震剖面解译,Lüdmann *et al.* (2001) 提出可能台湾在 5~3 Ma 和 3~0 Ma 的构造活动导致了东沙群岛的两期隆起,进而引起南海北部陆源输入在 3 Ma 和 0.25 Ma 急剧增加。而邵磊等(2001)通过对 ODP1144 站稀土元素地球化学研究,认为近 1 Ma 以来南海北部陆坡高速堆积体的物质来源可能为台湾。因此,3 Ma 以来台湾强烈的造山活动可能导致台湾的物质向南海北部的输送强度急剧增加,而大规模的构造和火山活动,自然代表了物理风化程度加强,产生了结晶程度很低的伊利石。但是,另外一种解释就是 3 Ma 以来全球气候的恶化。Zhang *et al.* (2001) 在全球 30 多个大型沉积盆地,如孟加拉扇、琼东南盆地、临夏盆地、北海、密西西比河盆地、Williston 盆地、Scotian 盆地等,均发现在 2~4 Ma 沉积速率和粒度快速增加,他们将这解释为由于气候偏移:从相对稳定的气候阶段(地表达到了一个稳定的状态)转为急剧波动的气候阶段(温度、降水和植被覆盖快速变化导致河流和冰川系统不能建立起一个稳定的状态)所引起的全球性事件。3 Ma 以来全球气候的恶化不仅体现在近 3 Ma 以来全球大陆侵蚀速率增强、温度急剧变冷且波动幅度明显增加,还表现在近 3 Ma 以来全球海平面变化的频率要远大于 3 Ma 以前的变化频率(Zhang *et al.*, 2001)。因此,3 Ma 以来全球气候的变化也可能是伊利石物理风化程度明显加强和结晶程度显著降低的原因。

3.2 东亚季风演化记录

粘土矿物的古气候解释不仅需要知道其潜在物源,而且要了解物源的输送方式和强度(Liu *et al.*, 2003; Wan *et al.*, 2007)。1146 站的多物源和输送途径表明,1146 站的陆源物质不仅被南海周围物源的同时代气候所控制,而且为相互消长的不同传输作用的强度所影响(Liu *et al.*, 2003; Boulay *et al.*, 2005)。南海北部的粘土矿物记录已被用来追溯控制南海表层洋流的冬夏季风的变率(Liu *et al.*, 2003; Boulay *et al.*, 2005)。当冬季风盛行时,由冬季风驱动的东北表层流将更多的伊利石和绿泥石从台湾和长江物源搬运到 1146 站;相反,当夏季风盛行时,由夏季风驱动的西南表层流将更多的蒙脱石从东南部吕宋岛搬运到北部(Liu *et al.*,

2003). 从另一方面,伊利石和绿泥石作为原生矿物,其含量增加被认为反映大陆风化水解条件的减弱以及在干冷气候条件下物理风化的增强,而蒙脱石则是一种次生矿物,常常来自火山岩的化学风化。那么,若冬季风加强,华南和台湾将产生更多的伊利石和绿泥石,而吕宋岛则可能产生更少的蒙脱石。因此,1146站(伊利石+绿泥石)/蒙脱石比率可以作为东亚冬、夏季风相对强度变化的一个矿物学指标。高比值指示冬季风相对夏季风的加强,而低比值则暗示夏季风相对冬季风的加强。如图6所示,(伊利石+绿泥石)/蒙脱石比值的变化反映了东亚冬季风的强度相对夏季风在~15 Ma、8 Ma 和 3 Ma 以来发生了3次显著加强。不过,对于(伊利石+绿泥石)/蒙脱石比率在~3 Ma 以来的高值也可能包含了台湾造山活动加强或者全球气候恶化的信号,当然也可能是三者的复合信号。

南亚季风(印度季风)在 8 Ma 加强的证据来自于阿拉伯海上升流的加强(Kroon et al., 1991; Prell et al., 1992)以及巴基斯坦植被类型从 C₃ 森

林向 C₄ 草原的转变(Quade et al., 1989)。相比之下,有关东亚季风的长期演化主要来自于中国黄土和最近南海 184 航次的研究结果。中国黄土高原风成红粘土普遍堆积的底界年龄大约在 8 Ma(Ding et al., 1999; An et al., 2001; 吕连清等, 2001)。亚洲干旱被认为开始于 22 Ma(Guo et al., 2002),而大尺度中国气候和植被带在渐新世—中新世以来就一直稳定(Sun and Wang, 2005),这暗示着季风的形成可能要远远早于以前所认为的 8 Ma。但无论如何,黄土(Guo et al., 2002)和北太平洋风尘(Rea et al., 1998)堆积速率在 15 Ma、8 Ma 和 3 Ma 的增加,以及在中国西部和北部的其他记录(方小敏等, 1997; 马玉贞等, 1998)均表明亚洲干旱在 15 Ma、8 Ma 和 3 Ma 的加剧,而这反过来也暗示着当时冬季风的强盛。我们的东亚季风粘土矿物代用指标(图 6)也表明东亚冬季风强度相对夏季风的急剧加强始于 8 Ma,这和自 8 Ma 起亚洲干旱和黄土的普遍堆积相一致。在南海,N. dutertrei(%)被用来作为一种典型的冬季风强度指标,其在 8 Ma 左右突然增

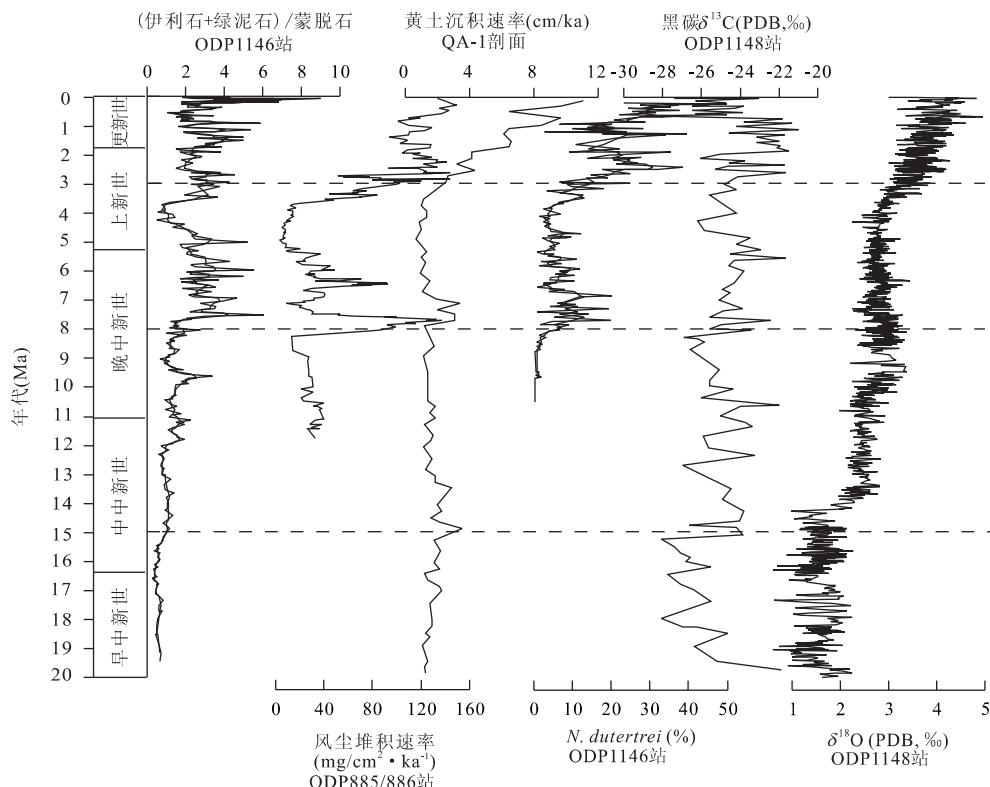


图 6 近 20 Ma 以来东亚季风演化的海洋和陆地记录

Fig. 6 Marine and terrestrial records of the East Asian monsoon evolution since 20 Ma

其中:北太平洋 ODP885/886 站风尘堆积速率来自 Rea et al. (1998);祁南 QA-1 剖面黄土沉积速率来自 Guo et al. (2002);1146 站 N. dutertrei(%) 来自 Zheng et al. (2004);ODP1148 底栖有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 来自 Cheng et al. (2004)。粗线表示经过了三点滑动平均

加,在 3 Ma 以来进一步增加,表明了冬季风强度的两次加强(Zheng *et al.*, 2004)(图 6). 南海黑碳中的 $\delta^{13}\text{C}$ 已被用来作为 C_4 植物的代用指标,1148 站黑碳中的 $\delta^{13}\text{C}$ 在 15 Ma、8 Ma、3 Ma 左右的相对变重被认为指示东亚季风的加强(Jia *et al.*, 2003)(图 6). 此外,东亚季风在 8 Ma 左右加强的证据在南海的放射虫(Chen *et al.*, 2003)和矿物学记录(Wan *et al.*, 2006)中也有发现. 而 3 Ma 左右东亚季风的加强则在陆上黄土(Ding *et al.*, 1999; An *et al.*, 2001; Guo *et al.*, 2002)和南海沉积物(Wehausen and Brumsack, 2002; Tian *et al.*, 2004; Zheng *et al.*, 2004; Wan *et al.*, 2006)中均有明显的记录.

大量数值模拟表明,青藏高原在 9~8 Ma 和 3.6~2.6 Ma 的阶段性隆升可能促进了东亚季风的两次加强(Ruddiman and Kutzbach, 1989; An *et al.*, 2001). 笔者的研究结果倾向于支持这一结论. 此外,东亚冬季风相对夏季风在 15 Ma 左右的加强和亚洲干旱度的增加可能与全球变冷和南极冰盖发育有关(Zachos *et al.*, 2001),当然也可能与青藏高原南部和中部在当时的隆升有关(Copeland, 1997; Harris, 2006). 此外,由于季风强度和北半球冰川在 3 Ma 左右的耦合发展(图 6 中的季风变化替代指标和 1148 站氧同位素在 3 Ma 的变化),因此,在目前阶段还不知道 3 Ma 左右冬季风的加强是青藏高原的隆升驱动还是北半球冰川扩展的结果,或者是二者共同作用的结果(Wang *et al.*, 2005). 当然,也可能青藏高原北部在 4~3 Ma 左右的隆升驱动了北半球大冰期的开始(安芷生等,1998),而这两者又加强了西伯利亚高压,导致了冬季风的加强和亚洲内陆的干旱.

4 结论

(1) 应用 X 射线衍射(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)和 X 射线能谱(EDS)分析技术对南海北部ODP1146 站中新世以来粘土矿物的组成、结晶学特征、微形貌和化学成分进行了研究,分析了粘土矿物的物质来源及其记录的东亚季风演化历史.

(2) 1146 站粘土矿物组合的基本特点是以伊利石和蒙脱石为主,高岭石和绿泥石含量较低. 其中伊利石的结晶程度极好—中等,蒙脱石的结晶程度中等偏差. 蒙脱石的形状为菜花状,是火山蚀变成因的

典型形貌. 与长江相比,1146 站蒙脱石化学成分与西菲律宾海的非常接近,都是相对富硅贫铁,而伊利石成分与黄土、黄河、长江、珠江相比,没有明显差异. 物源分析进一步表明,1146 站蒙脱石主要来自于吕宋岛,伊利石和绿泥石来自于珠江和台湾(长江),而高岭石则主要来自于珠江.

(3) 1146 站的粘土矿物不仅被南海周围物源的同时代气候所控制,而且为相互消长的不同传输作用的强度所影响. 我们选取该站(伊利石+绿泥石)/蒙脱石比值作为东亚冬、夏季风相对强度变化的一个矿物学指标. 高比值指示冬季风相对夏季风的加强,而低比值则暗示夏季风相对冬季风的加强. 指标变化显示出东亚冬季风强度和冬季风相对夏季风的强度在 15 Ma、8 Ma 和 3 Ma 左右发生了 3 次显著加强,结果可以与黄土、北太平洋风尘沉积、南海微生物古生物记录等很好对比. 青藏高原的阶段性隆升可能促进了东亚季风的这 3 次加强.

致谢:本研究所用的样品由国际大洋钻探计划(ODP)提供,ODP 由美国国家科学基金会(NSF)和所参与的国家和地区资助,并在联合海洋研究所(JOI)的管理下运行. 感谢 ODP184 航次的全体科学家和船员的辛勤劳动. 青岛科技大学纳米材料中心的彭红瑞老师在扫描电镜—X 射线能谱实验时给予了很大帮助,谨致谢忱.

References

- An, Z. S., Kutzbach, J. E., Prell, W. L., et al., 2001. Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalaya-Tibetan plateau since Late Miocene times. *Nature*, 411:62—66.
- An, Z. S., Wang, S. M., Wu, X. H., et al., 1998. Eolian evidence from the Chinese Loess Plateau: The onset of the Late Cenozoic great glaciation in the northern hemisphere and Qinghai-Xizang plateau uplift forcing. *Science in China (Series D)*, 28(6):481—490 (in Chinese).
- Biscaye, P. E., 1965. Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay in the Atlantic Ocean and adjacent seas and oceans. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 76:803—831.
- Boulay, S., Colin, C., Trentesaux, A., et al., 2005. Sediment sources and East Asian monsoon intensity over the last 450ka. Mineralogical and geochemical investigations on South China Sea sediments. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 228(3—4):260—277.
- Briais, A., Patriat, P., Tapponnier, P., 1993. Updated interpretation of magnetic anomalies and seafloor spreading stages in the South China Sea: Implications for the Tertiary tectonics

- of SE Asia. *J. Geophys. Res.*, 98(B4):6299–6328.
- Chen, M. H. , Wang, R. J. , Yang, L. H. , et al. , 2003. Development of East Asian summer monsoon environments in the Late Miocene: Radiolarian evidence from Site 1143 of ODP Leg 184. *Mar. Geol.* , 201:169–177.
- Cheng, X. R. , Zhao, Q. H. , Wang, J. , et al. , 2004. Data report: Stable isotopes from sites 1147 and 1148. In: Prell, W. L. , ed. , *Proc. ODP Sci. Results*, 184: 1–12.
- Clift, P. , Lee, J. I. , Clark, M. K. , et al. , 2002. Erosional response of South China to arc rifting and monsoonal strengthening: A record from the South China Sea. *Mar. Geol.* , 184(3–4):207–226.
- Copeland, P. , 1997. The when and where of the growth of the Himalaya and the Tibetan plateau. In: Ruddiman, W. F. , ed. , *Tectonic uplift and climate change*. Plenum Press, New York, 19–40.
- Ding, Z. L. , Xiong, S. F. , Sun, J. M. , et al. , 1999. Pedostratigraphy and paleomagnetism of a ~7.0 Ma eolian loess-red clay sequences at Lingtai, Loess Plateau, north-central China and implications for paleomonsoon evolution. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* , 152:49–66.
- Ehrmann, W. , 1998. Implications of Late Eocene to Early Miocene clay mineral assemblages in McMurdo Sound (Ross Sea, Antarctica) on paleoclimate and ice dynamics. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* , 139:213–231.
- Fang, X. M. , Xi, X. X. , Li, J. J. , et al. , 1997. Discovery of the Late Miocene aridity events in West China and its significance. *Chinese Sci. Bull.* , 42(23):2521–2524 (in Chinese).
- Guo, Z. T. , Ruddiman, W. F. , Hao, Q. Z. , et al. , 2002. Onset of Asian desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in China. *Nature* , 416:159–163.
- Guong, Z. , Jin, Q. , Qiu, Z. , et al. , 1989. Geology, tectonics and evolution of the Pearl River Mouth basin. In: Zhu, X. , ed. , *Chinese sedimentary basins*. Elsevier Sci. Publ. , Amsterdam, 181–196.
- Hall, R. , 2002. Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific: Computer-based reconstructions, model and animations. *J. Asian Earth Sci.* , 20:353–431.
- Harris, N. , 2006. The elevation history of the Tibetan plateau and its implications for the Asian monsoon. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* , 241(1):4–15.
- He, L. B. , Liu, Q. Y. , 1997. Chemical character of clay minerals in the Yellow River and Yangtze River. *Chinese Sci. Bull.* , 42(7):730–734 (in Chinese).
- Jeong, G. Y. , Yoon, H. I. , Lee, S. Y. , 2004. Chemistry and microstructures of clay particles in smectite-rich shelf sediments, South Shetland Islands, Antarctica. *Mar. Geol.* , 209:19–30.
- Jia, G. D. , Peng, P. A. , Zhao, Q. H. , et al. , 2003. Changes in terrestrial ecosystem since 30 Ma in East Asia: Stable isotope evidence from black carbon in the South China Sea. *Geol.* , 31:1093–1096.
- Kroon, D. , Steens, T. , Troelstra, S. R. , 1991. Onset of monsoonal related upwelling in the western Arabian Sea as revealed by planktonic foraminifers. In: Prell, W. L. , Niituma, N. , eds. , *Proc. ODP Sci. Results*, 117:257–263.
- Lee, T. Y. , Lawver, L. A. , 1994. Cenozoic plate reconstruction of the South China Sea region. *Tectonophysics* , 235:149–180.
- Li, A. C. , 1997. A study on fluxes and composition characteristics of mineral aerosols from the low atmosphere of the eastern China Seas: [Dissertation]. PhD Thesis, Chinese Academy of Sciences, China. 53 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. H. , Wei, G. J. , Shao, L. , et al. , 2003. Geochemical and Nd isotopic variations in sediments of the South China Sea: A response to Cenozoic tectonism in SE Asia. *Earth Planet. Sci. Lett.* , 211(3–4):207–220.
- Liu, Z. F. , Trentesaux, A. , Clemens, S. C. , et al. , 2003. Clay mineral assemblages in the northern South China Sea: Implications for East Asian monsoon evolution over the past 2 million years. *Mar. Geol.* , 201(1–3):133–146.
- Lü, L. Q. , Fang, X. M. , Mason, J. A. , et al. , 2001. The evolution of coupling of Asian winter monsoon and high latitude climate of northern hemisphere—Grain evidence from 8.1 Ma loess-red clay sequence on the Chinese central Loess Plateau. *Science in China (Series D)* , 44:185–191 (in Chinese).
- Lüdemann, T. , Wong, H. K. , Wang, P. X. , 2001. Plio-Quaternary sedimentation processes and neotectonics of the northern continental margin of the South China Sea. *Mar. Geol.* , 172:331–358.
- Ma, Y. Z. , Li, J. J. , Fang, X. M. , 1998. Vegetation and climate evolution from 30.6–5.0 Ma recorded in red beds at Linxia. *Chinese Sci. Bull.* , 43(3):301–304 (in Chinese).
- Milliman, J. D. , Kao, S. J. , 2005. Hyperpycnal discharge of fluvial sediment to the ocean: Impact of super-typhoon Herb (1996) on Taiwanese Rivers. *J. Geol.* , 113(5):503–516.
- Milliman, J. D. , Meade, R. H. , 1983. World wide delivery of river sediment to the oceans. *J. Geol.* , 91(1):1–21.
- Moore, D. M. , Reynolds, R. C. J. , 1997. X-ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals. Oxford University Press, Oxford.
- Petschick, R. , Kuhn, G. , Gingele, F. , 1996. Clay mineral distribution in surface sediments of the South Atlantic: Sources, transport, and relation to oceanography. *Mar. Geol.* , 130(3–4):203–229.
- Prell, W. L. , Murray, D. W. , Clemens, S. C. , et al. , 1992.

- Evolution and variability of the Indian Ocean summer monsoon: Evidence from the western Arabian Sea drilling program. In: Duncan, R. A., Rea, D. K., Kidd, R. B., et al., eds., Synthesis of results from scientific drilling in the Indian Ocean. *Geophysical Monograph*, 70: 447–469.
- Quade, J., Cerling, T. E., Bowman, J. R., 1989. Development of the Asian monsoon revealed by marked ecologic shift during the latest Miocene of northern Pakistan. *Nature*, 342: 163–166.
- Rea, D. K., Snoeckx, H., Joseph, L. H., 1998. Late Cenozoic eolian deposition in the North Pacific: Asian drying, Tibetan uplift, and cooling of the northern hemisphere. *Paleoceanography*, 13(3): 215–224.
- Ruddiman, W. F., Kutzbach, J. E., 1989. Forcing of Late Cenozoic northern hemisphere climate by plateau uplift in southern Asia and the American West. *J. Geophys. Res.*, 94(D15): 18409–18427.
- Shao, L., Li, X. H., Wei, G. J., et al., 2001. Provenance of a prominent sediment drift on the northern slope of the South China Sea. *Science in China (Series D)*, 44: 919–925 (in Chinese).
- Shi, X. F., Chen, L. R., Li, K. Y., et al., 1995. Study on mineralogy of the clay sediment in the west of Philippine Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 15(2): 61–72 (in Chinese with English abstract).
- Sibuet, J. C., Hsu, S. K., 2004. How was Taiwan created? *Tectonophysics*, 379(1–4): 159–181.
- Sun, X. J., Wang, P. X., 2005. How old is the Asian monsoon system?—Palaeobotanical records from China. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 222: 181–222.
- Taylor, B., Hayes, D. E., 1983. Origin and history of the South China Sea basin. In: Hayes, D. E., ed., The tectonic and geologic evolution of southeast Asian Seas and islands, 2. *Geophysical Monograph*, 27: 23–56.
- Teng, L. S., 1990. Geotectonic evolution of Late Cenozoic arc-continent collision in Taiwan. *Tectonophysics*, 183(1–4): 57–76.
- Tian, J., Wang, P. X., Cheng, X. R., 2004. Development of the East Asian monsoon and Northern Hemisphere glaciation: Oxygen isotope records from the South China Sea. *Quaternary Sci. Rev.*, 23: 2007–2016.
- Wan, S. M., Li, A. C., Clift, P. D., et al., 2006. Development of the East Asian summer monsoon: Evidence from the sediment record in the South China Sea since 8.5 Ma. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 241(1): 139–159.
- Wan, S. M., Li, A. C., Clift, P. D., et al., 2007. Development of the East Asian monsoon: Mineralogical and sedimentologic records in the northern South China Sea since 20 Ma. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 254(3–4): 561–582.
- Wang, P. X., Clemens, S., Beaufort, L., et al., 2005. Evolution and variability of the Asian monsoon system: State of the art and outstanding issues. *Quaternary Sci. Rev.*, 24(5–6): 595–629.
- Wang, P. X., Prell, W. L., Blum, P., et al., 2000. Proceeding of the ocean drilling program, scientific results, 184 [CD-ROM]. Ocean Drilling Program, Texas A&M University, College Station, TX 77845–9547, USA, 1–77.
- Webster, P. J., Magana, V. O., Palmer, T. N., et al., 1998. The monsoons: Processes, predictability, and the prospects for prediction, in the TOGA decade. *J. Geophys. Res.*, 103: 14451–14510.
- Wehausen, R., Brumsack, H. J., 2002. Astronomical forcing of the East Asian monsoon mirrored by the composition of Pliocene South China Sea sediments. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 201(3–4): 621–636.
- Zachos, J., Pagani, M., Sloan, L., et al., 2001. Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present. *Science*, 292: 686–693.
- Zhang, P. Z., Molnar, P., Downs, W. R., 2001. Increased sedimentation rates and grain sizes 2–4 Myr ago due to the influence of climate change on erosion rates. *Nature*, 410(6831): 891–897.
- Zheng, H. B., Powell, C. M., Rea, D. K., et al., 2004. Late Miocene and mid-Pliocene enhancement of the East Asian monsoon as viewed from the land and sea. *Global and Planetary Change*, 41: 147–155.
- ### 附中文参考文献
- 安芷生,王苏民,吴锡浩,等,1998.中国黄土高原的风积证据:晚新生代北半球大冰期开始及青藏高原的隆升驱动.中国科学(D辑),28(6):481–490.
- 方小敏,奚晓霞,李吉均,等,1997.中国西部晚中新世气候变干事件的发现及其意义.科学通报,42(23):2521–2524.
- 何良彪,刘秦玉,1997.黄河与长江沉积物中粘土矿物的化学特征.科学通报,42(7):730–734.
- 李安春,1997.中国东部海域上空矿物气溶胶通量和组成研究.中国科学院博士论文.
- 吕连清,方小敏,Mason, J. A., 等,2001.8.1 Ma以来朝那黄土—红黏土剖面粒度揭示的冬季风与北半球高纬气候的耦合演化.中国科学(D辑),31(增刊):149–154.
- 马玉贞,李吉均,方小敏,1998.临夏地区30.6~5.0 Ma红层孢粉植物群与气候演化记录.科学通报,43(3):301–304.
- 邵磊,李献华,韦刚健,等,2001.南海陆坡高速堆积体的物质来源.中国科学(D辑),31(10):828–833.
- 石学法,陈丽蓉,李坤业,等,1995.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,15(2):61–72.