

南海北部陆坡 50 ka 以来黏土矿物来源与运输机制分析

黄 杰^{1,2,3}, 李安春^{1,2}, 万世明^{1,2}

(1. 中国科学院 海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院 海洋地质与环境重点实验室, 山东 青岛 266071; 3. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要: 在 AMS¹⁴C 定年的基础上, 对南海北部 KNG5 站和 KNG7 站柱状沉积物中的粒度和黏土矿物进行了研究。KNG5 孔黏土矿物组合的基本特点是以伊利石、绿泥石和高岭石为主, 蒙脱石含量次之。而 KNG7 孔黏土矿物组合的基本特点是以伊利石、绿泥石和蒙脱石为主, 高岭石含量次之。物源分析进一步表明, KNG5 和 KNG7 孔高岭石主要来自于珠江, 蒙脱石主要由吕宋岛提供, 伊利石和绿泥石分别由珠江和台湾提供。相对于 KNG5 孔而言, KNG7 孔沉积物受珠江影响较小, 而受台西南影响较大。由物源分析推测, 珠江对南海北部的物源供应存在一个明显的界线, 而这一界线可能位于 KNG5 孔和 KNG7 孔之间, 越过这一界线随着离岸距离的增加, 南海北部陆坡陆源沉积物受珠江影响明显减弱, 而主要由台湾贡献。

关键词: 黏土矿物; 物质来源; 洋流搬运; 南海北部陆坡

中图分类号: P67 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2013)01-0017-06

陆源碎屑沉积物中的黏土矿物不仅记录了搬运、再沉积和环境演化的重要信息, 对研究海区的沉积物来源和特征以及对探讨陆源物入海后的运移沉积规律和沉积过程具有指示意义, 而且还反映了源区气候冷、暖周期性旋回, 为古环境再造、古季风变迁提供了有力的证据^[1-2]。过去由于南海周边主要河流黏土矿物组合的不确定性, 致使不同学者对南海北部陆坡的陆源物质输入产生很大偏差。例如, Tamburini 等^[3]和 Boulay 等^[2]根据南海北部 ODP1144 站的研究认为黏土矿物主要来自于珠江, 从而推断珠江提供给该站大部分物源; Wehausen 等^[4]和 Boulay 等^[5]根据附近 ODP1145 站的元素地球化学和黏土矿物研究也得出了类似的结论。近来刘志飞等^[6]和 Liu 等^[7-8]通过观测发现珠江口、台湾及吕宋岛的这三个区域河流悬浮物的黏土矿物组成具有非常明显的差异, 据此推断台湾和吕宋岛为南海北部陆架和陆坡提供了丰富的细粒沉积物; 邵磊等^[9]认为南海北部地区近代沉积物钕同位素分布具有明显的区域性, 其主要受控于珠江源区和闽粤沿海源区以及台湾岛源区。由此可见, 南海北部陆坡的沉积物输入的复杂性是一个不争的事实, 但是对于沉积物源自何方则仍存在明显不同的认识。本文根据对南海北部陆坡柱状沉积物进行 AMS¹⁴C 年代测试、粒度和黏土矿物的分析结果, 探讨了南海北部陆坡海洋沉

积过程中的物质来源变化及其蕴含的运输机制信息, 以此来真正理解南海北部冰期和间冰期时期黏土矿物分布及其反映的古环境演化信息。

1 材料与方法

研究样品取自 2007 年中国近海海洋科学考察开放航次的 KNG5 孔和 KNG7 孔, KNG5 站位位于南海北部陆坡(19°55.1748' N, 115°8.529' E)(图 1, 修改自万世明等^[10], 悬浮物输入量数据来自 Milliman 和 Meade^[11]、Dadson 等^[12]; 表层洋流分布来自 Liu 等^[13]; 北太平洋底层水(NPDW)分布来自 Lüdmann 等^[14]; 黑潮(KC)分布来自 Caruso 等^[15]), 水深 1085 m, 岩芯长 2.43 m。KNG7 站位(19°50.0189' N, 115°11.2956' E)位于 KNG5 站东南侧, 水深 1396 m, 岩芯长 2.68 m。本文对 KNG5 和 KNG7 孔进行了粒度和黏土矿物分析及 AMS¹⁴C 年代测定。

黏土矿物测试与计算方法参照万世明等^[10]。KNG5 孔共计 59 个样品, KNG7 孔共计 65 个样品, 本文采用的实验测试条件和数据解释方法与所引用河

收稿日期: 2011-05-26; 修回日期: 2012-11-28

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(2007CB411703)

作者简介: 黄杰(1983-), 男, 湖南常德人, 博士研究生, 从事海洋沉积与矿物学方面的研究, E-mail: huangjie@qdio.ac.cn; 李安春, 通信作者, 电话: 0532-82898521, E-mail: acli@qdio.ac.cn

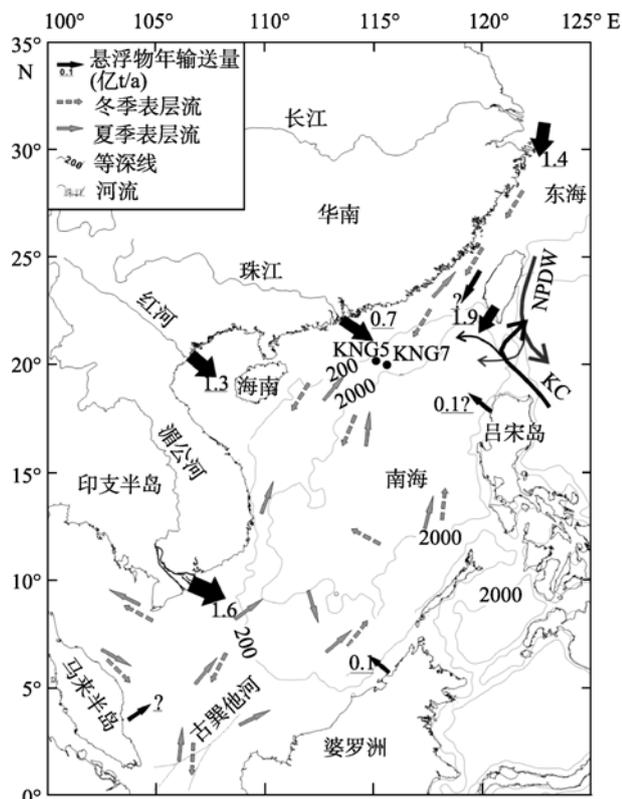


图1 KNG5, KNG7 站位和南海的陆源物质输入示意图
Fig. 1 KNG5 and KNG7 in the South China Sea and terrigenous materials delivering to the sea

流^[10](除吕宋岛河流外^[7])和黄土^[10]沉积物测试方法完全相同, 都是在中国科学院海洋研究所同型号 X 射线衍射仪上测试, 以保证数据的可对比性。粒度分析每 2 cm 等间距取样, KNG5 孔共计 120 个样品, KNG7 孔共计 131 个样品。取样品约 0.3 g, 先后加 10% H₂O₂(30 min)和 1.0 mol/L HCl(60 min) 10 mL 于 60℃水浴反应去掉有机质和碳酸盐, 离心清洗两次。加少许蒸馏水并经超声波分散 1 min 后在中国科学

院海洋研究所用法国产 Cilas940L 激光粒度仪进行粒度测量。其测量范围为 0.5~2 000 μm, 重复测量的相对误差小于 2%。

在完成沉积物黏土矿物分析的基础上, 在主要沉积界面的泥质沉积中选取混合种浮游有孔虫样品送西安加速器质谱中心 AMS¹⁴C 实验室完成年代测定, 原始测年数据利用 CALIB 5.0.1 软件^[16]进行日历年龄校正, 由于 KNG7 孔下面三个层位的 ¹⁴C 年龄较大, 超过了软件的校正限度, 因此本文没有对其进行校正。本文所指的年龄均为日历年龄(表 1)。

2 结果

2.1 KNG5 孔黏土矿物组成

南海北部陆坡 KNG5 站的黏土粒级(<2 μm)矿物主要由四种黏土矿物和少量石英、长石碎屑组成。其中, 黏土矿物主要由伊利石、高岭石、绿泥石和蒙脱石组成(图 2)。伊利石组分含量在 64%~82%范围内, 平均为 72%; 高岭石组分含量为 4%~28%, 平均为 13%; 绿泥石组分含量最高值为 20%, 最低值为 3%, 平均为 11%; 蒙脱石组分含量在 1%~8%范围内变化, 平均为 4%。由图 2 可以看出, 自 2.43~1.50 m, 蒙脱石组分含量总体较稳定, 波动不大; 伊利石和高岭石组分含量波动较大, 但总体增加和减少趋势不明显; 绿泥石组分含量有增加的趋势; 此段沉积物粉砂含量高, 黏土含量低, 平均粒径较大。自 1.50~0.98 m, 蒙脱石组分含量波动较大, 并有增加的趋势; 伊利石和绿泥石组分含量有明显增加的趋势; 高岭石组分含量却明显有减少的趋势; 沉积物粒度急剧减小。自 0.98 m 至顶部, 四种黏土矿物含量都有明显波动, 但总体看变化趋势不明显, 平均粒径总体波动较大。

表 1 KNG5, KNG7 孔 AMS ¹⁴C 年代数据及沉积速率
Tab. 1 AMS ¹⁴C data and sedimentation rates of Core KNG5 and KNG7

钻孔	深度(cm)	实验室编号	¹⁴ C 年龄(a)	距今日历年龄(a)	δ ¹³ C	层位(cm)	沉积速率(cm/ka)
KNG5	42~44	XA3786	4321±28	4453(4411~4492)	1.15	0~41	9.9
	110~112	XA3787	10955±34	12570(12394~12466)	0.76	41~111	8.3
	150~152	XA3788	12910±37	14649(14466~14845)	0.78	111~151	19.2
	234~236	XA3789	14966±43	17573(17403~17804)	-0.92	151~235	28.7
KNG7	58~60	XA3790	19652±105	22862(22571~23010)	2.21	0~59	2.5
	130~132	XA3791	36891±183	—	1.22	59~131	—
	210~212	XA3792	49579±571	—	0.73	131~211	—
	258~260	XA3793	>50000	—	0.83	211~259	—

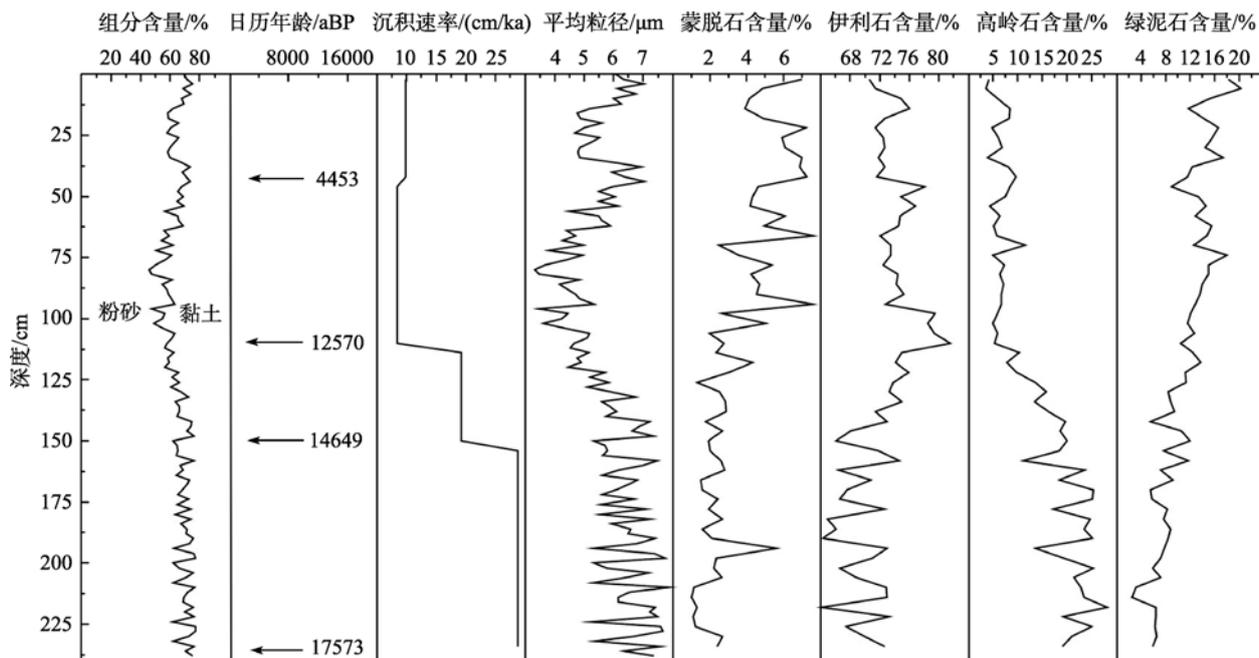


图2 KNG5孔年代、平均粒径和黏土矿物分布曲线

Fig. 2 Chronology, mean grain-size and clay mineral assemblages of Core KNG5

2.2 KNG7孔黏土矿物组成

南海北部陆坡 KNG7 沉积物柱状样的黏土粒级 (<2 μm) 矿物也主要由四种黏土矿物和少量石英、长石碎屑组成。其中, 黏土矿物主要由伊利石、蒙脱石和绿泥石组成(图 3), 高岭石组分含量较少。伊利石

组分含量在 54%~70% 范围内, 平均为 62%; 蒙脱石组分含量在 12%~29% 范围内变化, 平均为 20%; 绿泥石组分含量最高值为 15%, 最低值为 8%, 平均为 12%; 高岭石组分含量为 5%~15%, 平均为 7%。自岩芯底部至顶部, 四种黏土矿物含量都有明显波动, 但总体看变化趋势不明显, 其中在柱深 45cm 左

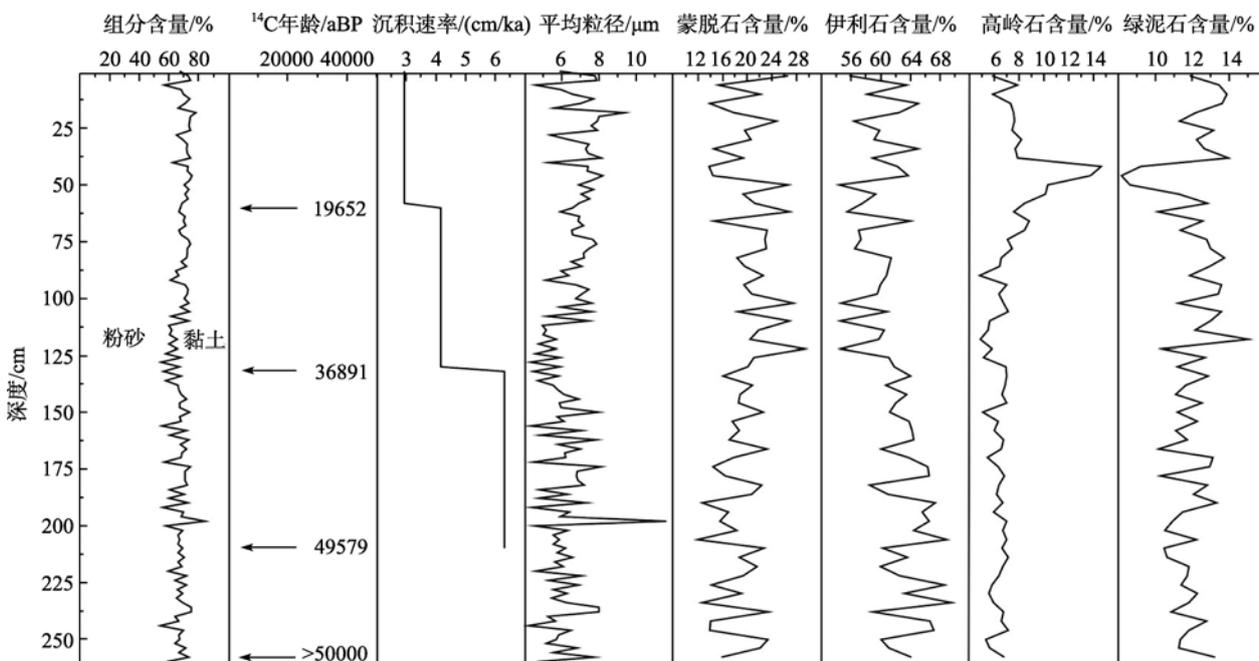


图3 KNG7孔年代、平均粒径和黏土矿物分布曲线

Fig. 3 Chronology, mean grain-size and clay mineral assemblages of Core KNG7

右,高岭石和绿泥石组分含量发生明显变化,高岭石组分含量剧增,最高达到 15%,而绿泥石组分含量则剧减,出现最低值 8%。相对于 KNG5 孔而言,KNG7 孔平均粒径总体偏大,沉积物粉砂含量高,黏土含量偏低。

3 讨论

海洋沉积物中黏土矿物的古环境应用要求了解每种矿物的主要物源区及其在海洋中的搬运路径^[13, 17]。KNG5 和 KNG7 孔的黏土矿物均为陆源碎屑,可以忽略成岩作用的影响。据 Liu 等^[7]的研究认为南海东北部的陆源碎屑沉积物主要来源于珠江、台湾西南部河流以及吕宋岛河流。此外,在珠江、台湾岛和吕宋岛河流 3 个主要物源区之外,长江沉积物的贡献一直存在争议^[13, 18]。最近根据长江口至台湾岛海峡表层沉积物黏土矿物的研究基本排除了长江的物质贡献,认为长江现代沉积物不能越过台湾岛海峡^[19]。因此,本文考虑提供给 KNG5 和 KNG7 孔黏土矿物的物源区主要包括珠江、台湾岛和吕宋岛。

为了更直观地对比几种潜在的物源,图 4 给出了 KNG5 站、KNG7 站、ODP1146 站、珠江、长江、黄土和吕宋岛的蒙脱石-伊利石+绿泥石-高岭石三组分图解及伊利石化学指数和结晶度的对比,表 2 列出了 4 种黏土矿物的相对百分含量。由图 4 和表 2 可以看出,珠江口至南海北部陆坡的黏土矿物组合特征明显不同,珠江口以含大量高岭石为特征,南海北部陆坡 ODP1146 站位 4 万 a 以来的沉积物以含高的蒙脱石为特征,而 KNG5 站和 KNG7 站的蒙脱石含量介于其间,并且自珠江口至南海北部陆坡,高岭石含量是明显减少的,表明珠江流域向南海北部贡献大量高岭石矿物,很少提供蒙脱石。从表 2 也

可以明显看出,黄土、台湾物质、珠江沉积物和长江沉积物的黏土矿物中蒙脱石含量极低(0%~6%),并且中国东部其它的一些较小河流如闽江和汉江^[5]等河流沉积物中蒙脱石含量不到 2%,许多甚至为 0 值,而 KNG5 站、KNG7 站和 ODP1146 站蒙脱石平均含量高达 4%,20%和 34%,越是向东,水深越大含量越高。很明显,华南或台湾或长江不可能向南海北部提供如此高含量的蒙脱石,蒙脱石常来自于基性火山岩的化学风化,因此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^[5, 13]。伊利石和绿泥石在南海有相同的分布模式^[5, 13, 18]两者都指示了强烈的物理风化条件。因此,下面讨论的伊利石物源分析也同样适用于绿泥石。图 4 也列出了 KNG5, KNG7 孔和其它可能物源区的伊利石化学指数和结晶度,这两个参数不仅指示了伊利石的水解条件^[20],也可以用来进行源区和运移路径分析。高的伊利石化学指数对应低的伊利石结晶度(高值)指示了强烈的水解条件,反之亦然。从伊利石化学指数和结晶度图我们可以看出,珠江和台西南实际上是伊利石水解条件和物源的两个端元。KNG5 和 KNG7 孔沉积物的伊利石位于这两个端元之间,而 KNG7 孔的伊利石要更接近于台西南端元,指示了相对于 KNG5 孔而言,KNG7 孔沉积物受珠江影响较小,而受台西南影响较大。从图 3 可以看出,海平面的变化对 KNG7 孔黏土矿物组成的影响不大。而 Huang 等^[21]通过 KNG5 站粒度和黏土矿物分析认为 KNG5 孔沉积物源主要受海平面变化的影响,低海平面时,珠江是 KNG5 孔陆源沉积物的主要贡献者,随着海平面的上升,南海北部洋流系统逐步形成,台湾则为 KNG5 孔提供了大量的陆源沉积物。由上述物源分析推测,珠江对南海北部的物源供应存在一个明显的

表 2 不同地区的黏土矿物组成

Tab. 2 Clay mineral assemblages from various regions

物源	黏土矿物组成(%)				出处
	蒙脱石	伊利石	高岭石	绿泥石	
KNG5 站	4	72	13	11	本文
KNG7 站	20	62	7	11	本文
ODP1146 站	34	45	12	10	[12]
珠江口	1	52	39	8	[12]
黄土	1	78	6	15	[12]
长江	5	69	9	16	[12]
台湾浊水溪	0	69	1	30	[12]
吕宋岛	88	2	10	0	[7]

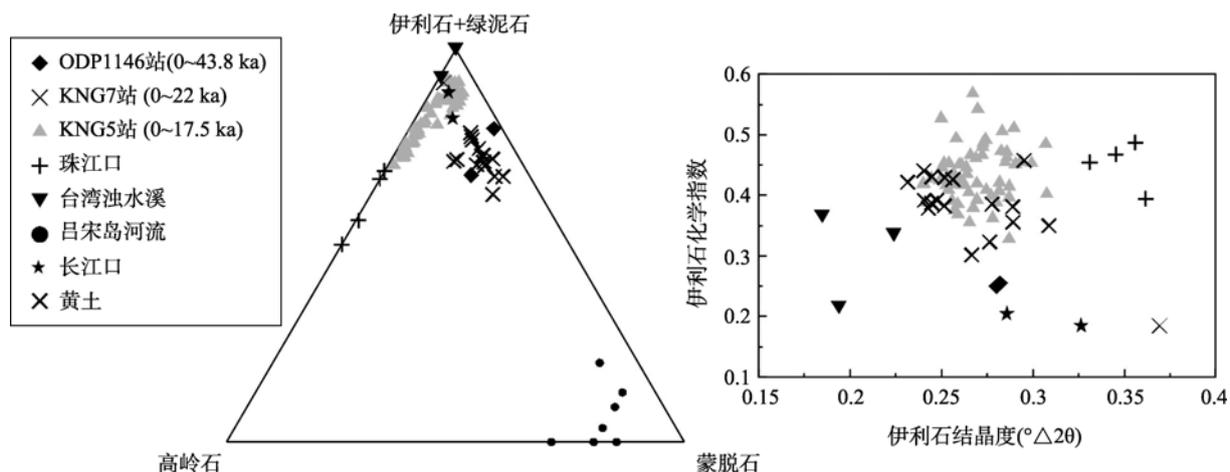


图4 不同地区的黏土矿物组成图解

Fig. 4 Variation in clay mineral composition from various regions

界线, 而这一界线可能位于 KNG5 孔和 KNG7 孔之间, 越过这一界线随着离岸距离的增加, 南海北部陆坡陆源沉积物受珠江影响明显减弱, 而主要由台湾贡献, 关于这个推测还有待于进一步开展工作。

4 结论

在 AMS¹⁴C 定年的基础上, 对南海北部 KNG5 和 KNG7 孔沉积物中的黏土矿物和粒度进行了研究。KNG5 孔黏土矿物组合的基本特点是以伊利石、绿泥石和高岭石为主, 蒙脱石含量次之。而 KNG7 孔黏土矿物组合的基本特点是以伊利石、绿泥石和蒙脱石为主, 高岭石含量较低。物源分析进一步表明, KNG5 和 KNG7 孔高岭石主要来自于珠江, 蒙脱石主要由吕宋岛提供, 伊利石和绿泥石分别由珠江和台湾提供。相对于 KNG5 孔而言, KNG7 孔沉积物受珠江影响较小, 而受台西南影响较大。由物源分析推测, 珠江对南海北部的物源供应存在一个界线, 而这一界线可能位于 KNG5 孔和 KNG7 孔之间, 越过这一界线随着离岸距离的增加, 南海北部陆坡陆源沉积物受珠江影响明显减弱, 而主要由台湾贡献。

致谢: 中国科学院海洋研究所科学一号全体船员和中国近海海洋科学开放航次工作人员在 2007 年 9~10 月期间为采集样品付出辛勤劳动、西安加速器质谱中心的卢雪峰老师在年代测定实验中给予了很大帮助, 谨致谢忱。

参考文献:

[1] Butt F A, Elverhoi A, Solheim A, et al. Deciphering Late Cenozoic development of the western Svalbard margin from ODP Site 986 results[J]. *Marine Geology*, 2000, 169: 373-390.

- [2] Boulay S, Colin C, Trentesaux A, et al. Mineralogy and sedimentology of Pleistocene sediment in the South China Sea (ODP Site 1144)[C]//Prell W L, Wang P, Blum P, et al. *Proceeding of the Ocean Drilling Program Scientific Results*, 184. College Station: TX (Ocean Drilling Program), 2003: 1-21.
- [3] 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[J]. *Marine Geology*, 2003, 201: 147-168.
- [4] Wehausen R, Brumsack H J. Astronomical forcing of the East Asian monsoon mirrored by the composition of Pliocene South China Sea sediments[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 201: 621-636.
- [5] Boulay S, Colin C, Trentesaux A, et al. Sediment sources and East Asian monsoon intensity over the last 450 ky. Mineralogical and geochemical investigations on South China Sea sediments[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2005, 228: 260-277.
- [6] 刘志飞, Colin C, 黄维, 等. 珠江流域盆地表层沉积物的黏土矿物及其对南海沉积物的贡献[J]. *科学通报*, 2007, 52(4): 448-456.
- [7] Liu Zhifei, Tuo Shouting, Colin C, et al. Detrital fine-grained sediment contribution from Taiwan to the northern South China Sea and its relation to regional ocean circulation[J]. *Marine Geology*, 2008, 255: 149-155.
- [8] Liu Zhifei, Zhao Yulong, Colin C, et al. Chemical weathering in Luzon, Philippines from clay mineralogy and major-element geochemistry of river sediments[J]. *Applied Geochemistry*, 2009, 24: 2195-2205.
- [9] 邵磊, 乔培军, 庞雄, 等. 南海北部近代沉积物钕同位素分布及意义[J]. *科学通报*, 2009, 54(1): 98-103.

- [10] 万世明, 李安春, 胥可辉, 等. 南海北部中新世以来黏土矿物特征及东亚古季风记录[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2008, (3): 289-300.
- [11] Milliman J D, Meade R H. World wide delivery of river sediment to the oceans[J]. *Journal of Geology*, 1983, 91(1): 1-21.
- [12] Dadson S J, Hovius N, Chen H, et al. Links between erosion, runoff variability and seismicity in the Taiwan orogeny[J]. *Nature*, 2003, 426: 648-651.
- [13] Liu Zhifei, 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.
- [14] Lüdmann T, Wong H K, Berglar K. Upward flow of North Pacific Deep Water in the northern South China Sea as deduced from the occurrence of drift sediments[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32: L05614.
- [15] Caruso M J, Gawarkiewicz G G, Beardsley R C. Inter-annual variability of the Kuroshio intrusion in the South China Sea[J]. *Journal of Oceanography*, 2006, 62: 559-575.
- [16] Hughen K A, Baillie M G, Bard E, et al. Marine04 marine radiocarbon age calibration, 0-26 cal kyr BP[J]. *Radiocarbon*, 2004, 46(3): 1059-1086.
- [17] 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[J]. *Marine Geology*, 2001, 179: 135-146.
- [18] Wan Shiming, Li Anchun, Clift P D, et al. Development of the East Asian monsoon: Mineralogical and sedimentologic records in the northern South China Sea since 20 Ma[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2007, 254: 561-582.
- [19] Xu Kehui, Milliman J D, Li Anchun, et al. Yangtze- and Taiwan-derived sediments on the inner shelf of East China Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 2009, 29: 2240-2256.
- [20] Krumm S, Buggisch W. Sample preparation effects on illite crystallinity measurements: grain size gradation and particle orientation[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 1991, 9: 671-677.
- [21] Huang Jie, Li Anchun, Wan Shiming. Sensitive grain-size records of Holocene East Asian summer monsoon in sediments of northern South China Sea slope[J]. *Quaternary Research*, 2011, 75: 734-744.

Clay minerals in core sediments of the northern South China Sea slope since 50 ka and their indication to sources and transport

HUANG Jie^{1, 2, 3}, LI An-chun^{1, 2}, WAN Shi-ming^{1, 2}

(1. Institute of Oceanology, the Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Key Laboratory of Marine Geology and Environment, the Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 3. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Received: May, 26, 2011

Key words: clay minerals; sediment source; current transport; northern slope of the South China Sea

Abstract: Precise dating by Accelerator Mass Spectrometry ¹⁴C, grain sizes and clay minerals of the sediments of Core KNG5 and KNG7 from the northern slope of the South China Sea (SCS) were analyzed. Clay minerals of Core KNG5 mainly consisted of illite, chlorite and kaolinite, with minor smectite, whereas clay minerals of Core KNG7 mainly consisted of illite, chlorite and smectite, with minor kaolinite. Sediment source investigations indicated that kaolinite mainly from the Zhujiang River, smectite mainly from the Luzon River, and illite and chlorite were mainly derived from the Zhujiang River and Taiwan, respectively. Sediment of KNG7 was less affected by the Zhujiang River, but mainly affected by Taiwan compared with KNG5. We speculated from sediment source researches that there was a significant border of the Zhujiang River source supply, and this border may be located between KNG5 and KNG7, and across this line, with the offshore distance increasing, terrigenous sediments in the northern slope of the South China Sea was mainly from Taiwan, while the sediment from the Zhujiang River was severely decreased.

(本文编辑: 刘珊珊)