

末次盛冰期末期以来南海北部陆坡的 陆源物质输入及其控制因素*

黄杰^{1,2} 李安春¹ 万世明¹ 徐方建³ 孟庆勇¹

(1. 中国科学院海洋研究所海洋地质与环境重点实验室 青岛 266071; 2. 中国科学院大学
北京 100049; 3. 中国石油大学(华东)地球资源与信息学院 青岛 266555)

提要 通过对南海北部陆坡 KNG5 孔沉积物粒度、粘土矿物和 ¹⁴C 年龄的综合分析,探讨了南海北部陆坡的沉积物来源及其控制因素。物源分析表明, KNG5 孔 17.5—12.5ka BP 的沉积物主要来源于珠江, 12.5ka BP 时粘土矿物组合突然发生改变, 并且自 12.5ka BP 以后, 高岭石含量总体稳定, 说明 12.5ka BP 时海平面已上升到相当的高度, 并且可能当时南海的现代环流系统已开始形成, 西行的广东沿岸流导致向外扩散的珠江物质减少, 由于受北太平洋深层水(NPDW)和黑潮(KC)南海分支的作用, 台湾成为此时沉积物的主要贡献者。KNG5 孔 17.5—11ka BP 时期的粘土矿物和粒度变化主要受控于海平面和洋流系统的变化。全新世早期(11.0—8ka BP)平均粒径达到最细和 1—2.2 μ m 粒级含量达到最高值可能是强盛的夏季风作用的结果。全新世中晚期(8—0ka BP) 1—2.2 μ m 组分含量的减少是 8ka BP 以来东亚夏季风减弱的具体体现, 1—2.2 μ m 粒级含量指示的东亚夏季风变化能和北半球其它季风指标能很好地对应起来, 说明这次季风减弱是北半球各个季风系统的共同现象。

关键词 粒度; 粘土矿物; 物质来源; 控制因素; 南海北部陆坡

中图分类号 P731

南海北靠中国大陆, 南临巽他陆架, 东侧通过巴士海峡与太平洋相连, 西侧紧依中南半岛, 特殊的形态和地理位置决定其对气候、环境变迁的灵敏性(赵泉鸿等, 1999)。冰期旋回中南海曾发生过数次海平面的升降, 物质来源复杂, 沉积环境多变。海洋中的陆源沉积蕴涵着丰富的关于构造沉积演化、大陆风化、东亚季风变迁的信息。但相对于生源物质而言, 对陆源沉积的认识还非常薄弱。

先前基于“国际大洋钻探计划(ODP)”第 184 航次和“国际海洋过去全球变化计划(IMAGES)”航次的岩芯研究认为珠江是南海北部的主要物源(Clift *et al.*, 2002; Boulay *et al.*, 2003; Li *et al.*, 2003), 并且伴随有火山物质的输入(Boulay *et al.*, 2005)。然而, 最近关于粘土矿物和元素地球化学的研究则发现了台湾对

南海北部的重要贡献(邵磊等, 2009; Liu *et al.*, 2010; Wan *et al.*, 2010), 珠江对南海北部细粒物质的贡献并没有以前认为的那么重要(刘志飞等, 2007)。显然有关台湾和珠江来源的陆源碎屑物质在南海的详细影响范围、沉积物传输机制及历史演变, 仍属未解之谜。因此, 有必要对南海北部陆坡的陆源物质输入进行进一步研究。陆源碎屑沉积物的粒度分布特征记录着源区性质、搬运载体、沉积作用等多方面的信息。在北大西洋(Gröger *et al.*, 2003)、北太平洋(Rea *et al.*, 1995)、阿拉伯海(Prins *et al.*, 2000)、非洲西南岸外(Stuut *et al.*, 2002)、东海(徐方建等, 2009)和南海(Boulay *et al.*, 2003)等海区的古海洋学研究中, 沉积物粒度对于追溯源区气候, 探讨季风、海流等古环境演化也提供了重要信息。

* 国家重点基础研究发展规划(973)项目, 2007CB411703 号; 中国科学院海洋地质与环境重点实验室开放基金项目, MGE2011KG02 号。黄杰, 博士研究生, E-mail: huangjie@qdio.ac.cn

通讯作者: 李安春, 研究员, E-mail: acli@qdio.ac.cn

收稿日期: 2010-11-18, 收修改稿日期: 2011-04-27

本文对南海北部陆坡 KNG5 孔进行了 AMS¹⁴C 年代测试、粒度 and 粘土矿物分析, 探讨了南海北部陆坡末次冰期 18ka 以来沉积物的物质来源及其反映的海平面升降、季风演化和洋流运输信息。

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, KNG5 孔位于南海北部陆坡 (19°55.1748'N, 115°8.529'E)(图 1)[修改自万世明等 (2008)], 水深 1085m, 岩芯长 2.43m。本文对 KNG5 孔进行了粒度、粘土矿物分析及 AMS¹⁴C 年代测定。

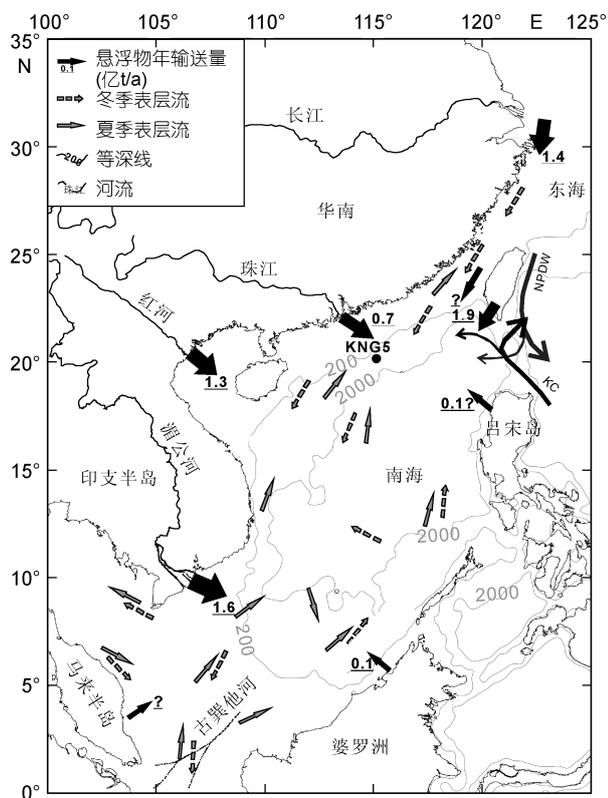


图 1 KNG5 站位和南海的陆源物质输入示意图

Fig. 1 Map showing Core KNG5 and terrigenous materials delivering to the South China Sea

粒度分析每 2cm 等间距取样, 共计 120 个样品。样品为粘土-粉砂粒级, 显微镜下鉴定陆源物质主要

由粘土矿物、石英和长石组成, 约占到将近 100%, 少数层位含有少量的硅质放射虫和海绵骨针(平均约为 2%)。取样品约 0.3g, 先后加 10% H₂O₂ (30min)和 1.0mol/L HCl (60min) 10mL 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 1min 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—2000μm, 重复测量的相对误差小于 2%。

粘土矿物测试与计算方法参照万世明等(2008)。KNG5 孔共计 59 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流[除吕宋岛河流外(Liu *et al*, 2008)]和黄土沉积物测试方法完全相同, 都是在中国科学院海洋研究所的 X 射线衍射仪上进行测试, 保证数据直接对比的可靠性。

在完成沉积物粒度和粘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(Hughen *et al*, 2004)进行日历年龄校正。本文所指的年龄均为日历年龄(表 1)。

2 结果

2.1 岩性和沉积通量

KNG5 孔 2.43—1.50m 层为青灰色粘土质粉砂, 含泥质透镜体, 岩性均一, 无明显层理变化。1.50—0.98m 层主要是青灰色粘土质粉砂和粉砂质粘土互层, 含泥质透镜体, 局部含生物碎屑, 与岩芯底部相比, 此段粉砂含量明显减少, 粘土含量逐渐增多。0.98—0.42m 层主要由青灰色粉砂质粘土组成, 局部可见灰褐色团块及生物碎屑, 岩性均一, 无明显层理变化。自 0.42m 至顶部由黄褐色粘土质粉砂向下渐变为青灰色, 岩性较均一, 无明显层理变化。

从图 2 可以看出: 岩芯自底部至顶部沉积速率和沉积通量都是逐步减少的, 2.43—1.50m 段沉积速率达到 28.7cm/ka, 1.50—1.10m 段沉积速率为 19.2cm/ka, 1.10—0.42m 段沉积速率递减到 8.4cm/ka, 0.42—0m

表 1 KNG5 孔 AMS¹⁴C 年代数据及沉积速率
Tab.1 AMS¹⁴C data and sedimentation rates of Core KNG5

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)
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

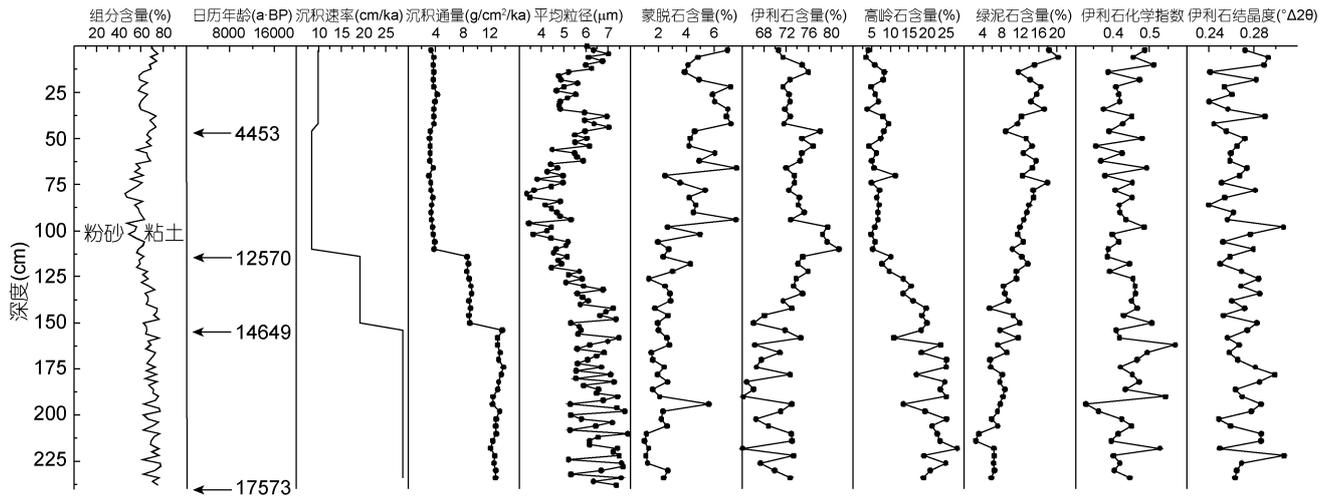


图2 KNG5孔年代、平均粒径和粘土矿物分布曲线

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

段沉积速率有所回升,为 9.9cm/ka。2.43—1.50m 段沉积通量的变化范围为 11.9—13.8g/(cm²/ka),平均为 12.8g/(cm²/ka); 1.50—1.10m 段沉积通量在 3.8—9.2g/(cm²/ka)之间变化,平均为 8.3g/(cm²/ka); 1.10—0.42m 段沉积通量的变化范围为 3.0—3.9g/(cm²/ka),平均为 3.4g/(cm²/ka); 其中,2.43—1.50m 段沉积通比 0.42—0m 段沉积通量(最大 4.2g/(cm²/ka),最小 3.0g/(cm²/ka),平均 3.5g/(cm²/ka)约高 4 倍。

2.2 粘土矿物

南海北部陆坡 KNG5 站的粘土粒级(<2μm)矿物主要由四种粘土矿物和少量石英、长石碎屑组成。其中,粘土矿物主要由伊利石、高岭石、绿泥石和蒙脱石组成(图 2)。伊利石含量在 64%—82%之间,平均为 72%;高岭石含量为 4%—28%,平均为 13%;绿泥石含量最高值为 20%,最低值为 3%,平均为 11%;蒙脱石含量在 1%—8%之间变化,平均为 4%。由图 2 可以看出,粘土矿物含量的垂直变化可分为 3 个特征阶段。自 17.5ka BP 至 14.5ka BP,蒙脱石含量总体较稳定,波动不大;伊利石和高岭石含量波动较大,但总体无增加和减少的趋势;绿泥石含量有增加的趋势。自 14.5ka BP 至 11.0ka BP,蒙脱石含量波动较大,并有增加的趋势;伊利石和绿泥石含量有明显增加的趋势;高岭石含量却明显有减少的趋势。自 11.0ka BP 至 0ka BP,四种粘土矿物含量都有明显波动,但总体看变化趋势不明显。伊利石化学指数变化范围为 0.57—0.33,一般小于 0.50(图 2),表明其主要为富 Fe-Mg 伊利石,产于较强烈的物理风化环境;伊利石结晶度变化范围为 0.24°—0.31°Δ2θ,平均为 0.26°Δ2θ。

2.3 粒度

从 KNG5 孔的粒度频率分布曲线(图 3)可以看出,其形态十分相似,都具有双峰(双众数)特征,所不同的是上下层段的峰高和峰的位置存在差异,尤其是粗端的峰,表明它们可能来自同一个物源但在不同的沉积动力过程作用下最终按不同比例混合而成,也可能是由不同的物源和不同的沉积动力条件综合作用的结果。因此,只有从多组分混合沉积物中分离

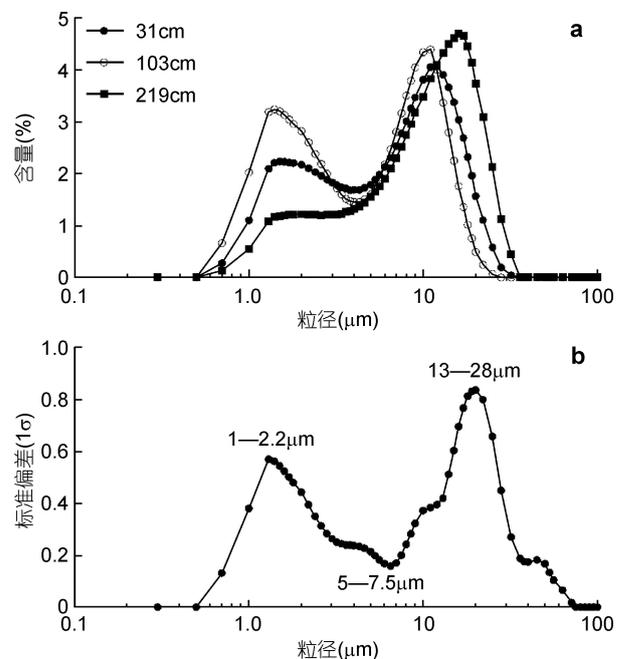


图3 KNG5孔粒度分析结果

Fig.3 Result of grain-size analysis in Core KNG5
a. KNG5孔粒度频率分布曲线; b. KNG5孔粒级-标准偏差曲线

出每一单组分的含量和众数值,才有可能更深入地探讨每一粒度组分所对应的沉积动力过程。

粒度-标准偏差曲线(图 3)展示了 KNG5 岩芯 120 个样品的标准偏差随粒级的变化,曲线呈现出典型的“双峰分布”,大约以 $6.5\mu\text{m}$ 为界线,表示 KNG5 站岩芯有两个对环境敏感的粒度组分,其峰值分别为 $1.3\mu\text{m}$ 和 $20\mu\text{m}$,所对应的敏感粒度范围分别为 $1\text{—}2.2\mu\text{m}$ 和 $13\text{—}28\mu\text{m}$ 。对环境比较不敏感的粒度范围为 $5\text{—}7.5\mu\text{m}$ 。作者还计算了 KNG5 站陆源物质的平均粒径, $13\text{—}28\mu\text{m}$, $1\text{—}2.2\mu\text{m}$ 两个粒度组分所占的体积百分含量(图 4)。从图 4 可以看出, KNG5 站陆源物质平均粒径与 $13\text{—}28\mu\text{m}$ 百分含量的变化几乎完全一致,而与 $1\text{—}2.2\mu\text{m}$ 百分含量变化正好相反。这表明,陆源物质的平均粒径实际上主要是受粗粒度组分 $13\text{—}28\mu\text{m}$ 的含量变化所控制的。

粒径范围在 $1\text{—}2.2\mu\text{m}$ 的颗粒主要是粘土矿物,粒径范围为 $13\text{—}28\mu\text{m}$ 的颗粒属于细粉砂,该区间也是陆源碎屑的主要组成部分,主要由长石、石英等轻矿物组成。虽然在南海海域没有量化的粉尘数据可供参考,但是普遍认为南海陆源物质的输入主要是靠河流输入,而风尘只占较小的比例(Clift *et al.*, 2002;

Li *et al.*, 2003)。根据现代大气矿物气溶胶通量值 [$0.5\text{g}/(\text{cm}^2\cdot\text{ka})$](Duce *et al.*, 1991)和南海北部 ODP1145 站 450ka 以来的陆源物质堆积速率大小 [$10\text{g}/(\text{cm}^2\cdot\text{ka})$], Boulay 等(2005)估计其站位有 5% 的风尘输入。而在 KNG5 站, 17.5ka 以来的平均陆源物质堆积速率为 $7.7\text{g}/(\text{cm}^2\cdot\text{ka})$, 据此风尘贡献可达 6% [$0.5\text{g}/(\text{cm}^2\cdot\text{ka})/7.7\text{g}/(\text{cm}^2\cdot\text{ka})$]。这种估计方法显然很不精确,但也说明了在南海风尘输入与河流输入相比是很小的。因此,作者将 $1\text{—}2.2\mu\text{m}$ 组分解释为河流泥, $13\text{—}28\mu\text{m}$ 组分解释为河流细粉砂。

3 讨论

3.1 物源分析

海洋沉积物中粘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(Liu *et al.*, 2003)。KNG5 孔的粘土矿物均为陆源碎屑,可以忽略成岩作用的影响。据 Liu 等(2008)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(Liu *et al.*, 2003; Wan *et al.*, 2007)。最近根据长江口至台湾岛海峡表层沉积物粘土矿物

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(Xu *et al.*, 2009)。因此,本文考虑提供给 KNG5 粘土矿物的物源区主要包括珠江、台湾岛和吕宋岛。

为了更直观地对比末次冰期 18ka 以来研究区几种可能的物源,图 5 给出了 KNG5 站、ODP1146 站、珠江、长江、黄土、吕宋岛的蒙脱石-伊利石+绿泥石-高岭石三组分图解,表 2 列出了 4 种粘土矿物的相对百分含量。由图 5 和表 2 可以看出,

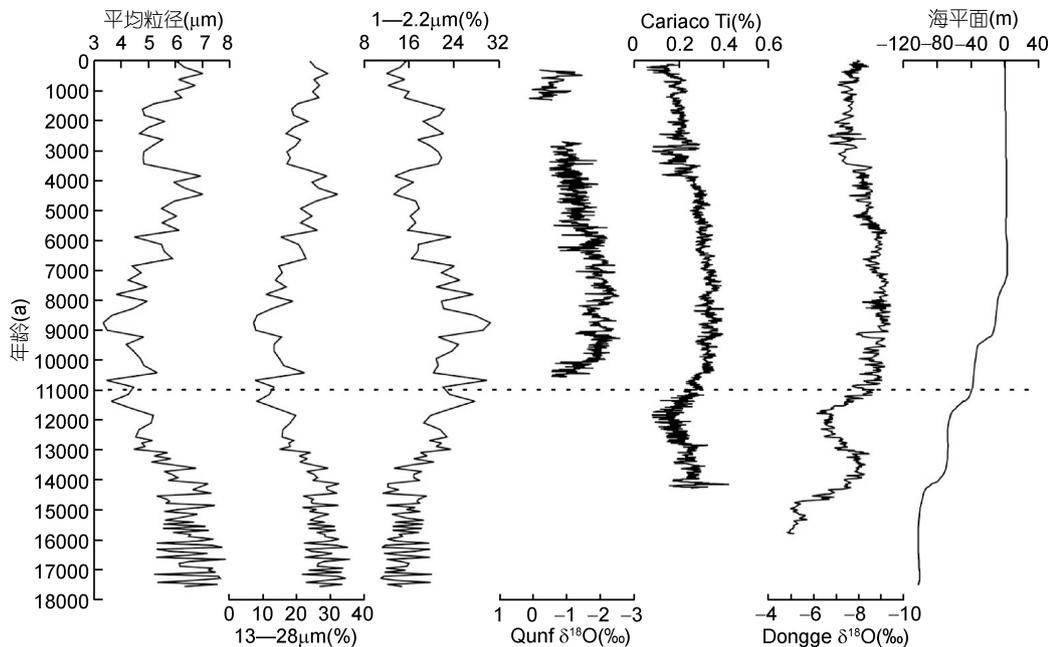


图 4 粒度数据与全新世北半球夏季风指标的对比

Fig. 4 Comparison of the proxies of the Northern Hemisphere Summer Monsoon in Holocene
注: KNG5 站陆源碎屑的平均粒径、 $13\text{—}28\mu\text{m}$ 组分含量、 $1\text{—}2.2\mu\text{m}$ 组分含量与阿曼南部石笋的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录(Fleitmann *et al.*, 2003)(南亚季风)、委内瑞拉 Cariaco 盆地 ODP1102 孔 Ti 百分含量记录(Haug *et al.*, 2001)(北美季风)、华南董哥洞石笋的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录(Dykoski *et al.*, 2005)(东亚季风)和海平面变化(Liu *et al.*, 2004)对比

珠江口与南海北部陆坡的粘土矿物组合特征存在一定差异, 珠江口以含大量高岭石为特征, 南海北部陆坡下部 ODP1146 站以含高的蒙脱石为特征, 位于陆坡上部的 KNG5 站蒙脱石含量较低。通过珠江、台湾和吕宋岛主要河流粘土矿物含量与其近岸和南海北部表层粘土矿物含量的对比研究, Liu 等(2010)认为南海北部高岭石主要源自珠江, 蒙脱石就主要源自吕宋岛, 而伊利石和绿泥石主要分别源自台湾和珠江。从表 2 也可以明显看出, 黄土、台湾、珠江、长江的粘土矿物中蒙脱石含量极低(0%—6%), 并且中国东部其它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%, 而 KNG5 站和 ODP1146 站蒙脱石平均含量高达 4%、20%和 34%, 随水深的增加其含量明显增加。华南、台湾及长江均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, 含有大量玄武岩的吕宋岛弧被认为是南海北部蒙脱石的主要物源(Liu *et al.*, 2003; Boulay *et al.*, 2005), 最近研究认为从吕宋海峡侵入南海的黑潮分支是南海北部蒙脱石来源的主要传输机制(Liu *et al.*, 2010)。

通过 KNG5 孔粘土矿物组合与主要物源区的对比(图 5), 显示出该站粘土矿物的多物源供给、并呈

阶段性变化的特征。KNG5 孔粘土矿物组合可以明显的分为两个阶段, 即分别对应时间段 17.5ka BP—12.5ka BP 和 12.5ka BP—0ka BP, 其中, 17.5ka BP—12.5ka BP 阶段样品粘土矿物组合更接近珠江物源区粘土矿物组合, 并且随着时间由老变新呈现出逐渐远离珠江物源区的变化趋势; 而 12.5ka BP—0ka BP 阶段样品粘土矿物组合更接近伊利石和绿泥石物源区(台湾物源区)。伊利石+绿泥石和高岭石分别是台湾西南部河流及珠江的特征性矿物(Liu *et al.*, 2008), 因此可以用(伊利石+绿泥石)/高岭石来判别这两个物源端元对研究站位粘土矿物的主要贡献情况(Wan *et al.*, 2010)。KNG5 孔 17.5ka BP—12.5ka BP(低海平面)以较低的(伊利石+绿泥石)/高岭石(-5)为特征, 粘土矿物组合与珠江口粘土矿物组合较为接近(图 5), 暗示了此时研究站位的沉积物主要来源于珠江; 全新世以来(12.5ka BP—0ka BP)KNG5 孔以较高的(伊利石+绿泥石)/高岭石(-15)为特征, 与台湾西南部的河流吻合的很好, 粘土矿物组合要更接近于台湾西南部河流的粘土矿物组合, 表明此时台湾已成为研究站位沉积物的主要贡献者, 但也部分由珠江提供。Liu 等(2010)通过对南海东北部粘土矿物空间分布的研究, 认为粘土矿物的空间分布与当地的洋流系统有密切

表 2 不同地区的粘土矿物组成
Tab.2 Clay mineral assemblages from various regions

物源	蒙脱石(%)	伊利石(%)	高岭石(%)	绿泥石(%)	资料来源
KNG5 站	4	72	13	11	本文
ODP1146 站	34	45	12	10	万世明等, 2008
珠江口	1	52	39	8	万世明等, 2008
黄土	1	78	6	15	万世明等, 2008
长江	5	69	9	16	万世明等, 2008
台湾浊水溪	0	69	1	30	万世明等, 2008
吕宋岛	88	2	10	0	Liu <i>et al.</i> , 2008

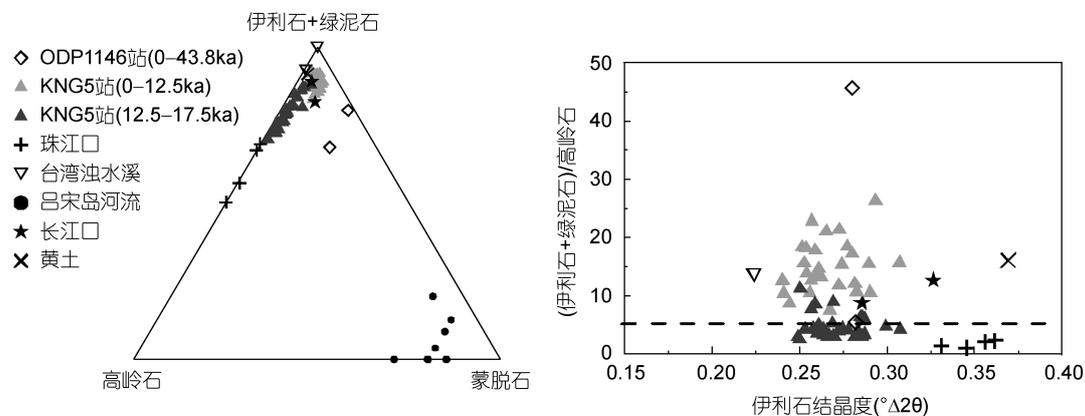


图 5 不同地区的粘土矿物组成图解

Fig.5 Diagram showing variation in clay mineral composition from various regions

的关系,即蒙脱石主要是通过侵入南海的黑潮分支传输,而下陆坡和洋盆的伊利石和绿泥石主要是通过北太平洋深层水(NPDW)传输,冬季西行的广东沿岸流是控制陆架伊利石和绿泥石及高岭石空间分布的主要因素。上述研究表明,北太平洋深层水不仅在下陆坡发育(Liu *et al*, 2010; Wan *et al*, 2010),在中部陆坡同样也存在,它可以将台湾西南部河流沉积物输运到研究站位。因此,KNG5 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。KNG5 孔 17.5ka BP—12.5ka BP 的沉积物主要来源于珠江,而全新世以来(12.5ka BP—0ka BP),由于受到北太平洋深层水(NPDW)或黑潮南海分支的作用,台湾成为研究站位沉积物的主要贡献者。

3.2 沉积环境演化

结合末次冰期 18ka 以来的海平面变化,沉积物粘土矿物组合和粒度组成可作为沉积环境演变的代用指标。KNG5 孔 18ka 以来的沉积环境可划分为四个阶段进行讨论。

(1) 17.5ka BP—14.5ka BP

年代数据显示,KNG5 孔底部年龄为 17.5ka BP,研究表明,此时华南气候温凉略干,植被稀少,地层剥蚀强烈,陆源碎屑物增多,沉积物供给更加丰富,并且海平面此时低于现代海平面约 100m,南海北部陆架大面积出露,珠江口向陆架区延伸,陆源物质搬运至 KNG5 站的距离大大缩短,从而有利于大量陆源物质向陆坡的输运,13—28 μm 粉砂级碎屑也就更容易被搬运到该站位。此时,水动力条件最强,距离较短,所以平均粒径最大。在此阶段,珠江物质的大量输入使得 KNG5 站高岭石平均含量高达 21%。总体上讲,海平面低,陆架出露广阔,一方面陆源物质供应充足,另一方面,物源与研究站位距离较近,从而使得更多的陆源物质尤其是珠江携带物质输入至 KNG5 站。此时的沉积速率和总物质堆积速率也是最高的(图 2)。

(2) 14.5ka BP—11.0ka BP

进入末次冰消期后,海平面快速上升,陆架逐渐被淹没,其出露面积随之变小,由于离岸距离的增加该站陆源物质供应量相应减少,沉积速率和总物质堆积速率也相应减小。随着海平面的上升,KNG5 站的水深不断增加,水动力条件相应减弱,加上输运距离增加,粗颗粒陆源物质不容易到达研究区,因而细颗粒陆源物质得到富集,因此 KNG5 站陆源物质的平

均粒径和 13—28 μm 河流细粉砂含量不断减少,而 1—2.2 μm 河流泥含量不断增加,形成了向上变细的正粒序。由图 3 可以看出,高岭石含量在此阶段不断减少,而伊利石和绿泥石呈不断增加的趋势,暗示了珠江来源沉积物的减少,而台湾对研究站位贡献量的增加。随着海平面的上升,珠江入海口向后撤退,珠江物质搬运到 KNG5 站的距离增长,并且由于有台湾和吕宋岛物质的稀释作用,导致 KNG5 站主要来自于珠江的高岭石在末次冰消期时总体呈减少的趋势。在 12.5ka BP 处粘土矿物成分突然发生改变,并且自 12.5ka BP 以后,高岭石含量总体稳定,说明当时海平面已上升到相当的高度,约在现在海平面以下 -60m 左右,海岸线已接近内陆架,暗示当时南海的现代环流系统已开始形成,西行的广东沿岸流导致向外扩散的珠江物质减少。这与东海的情况相一致,东海闽浙沿岸流在 12.3ka BP 左右开始形成(徐方建等, 2009)。

(3) 11.0ka BP—8ka BP

全新世全球性的气候转为温热潮湿,植被广为发育,风化剥蚀范围减少,风化层变薄,陆源物质骤然减少,加上海平面上升,海岸线向陆推移,沉积物供给量锐减,从图 2 也可以看出此时的沉积速率和总物质堆积速率也是最低的。而全新世早期是东亚季风的强盛期(Dykoski *et al*, 2005),强盛的夏季风必然带来大量的降雨,使得河流供给能力加强,从而给 KNG5 站带来大量的细颗粒组分。强盛的夏季风作用可能是 KNG5 站全新世早期平均粒径达到最低值和 1—2.2 μm 河流泥含量达到最高值的主要原因。进入全新世后,海平面增幅减小,伊利石、绿泥石和高岭石含量相对比较稳定,伊利石、绿泥石含量要明显高于高岭石,指示了台湾成为此阶段陆源物质的主要贡献者。

(4) 8ka BP—0ka BP

全新世 8ka BP 之后,海平面基本较为稳定,其对应的沉积动力条件与沉积环境应该与现今基本一致。从图 5 可以看出,1—2.2 μm 粘土粒级的含量自 8ka BP 以来总体是减少的,自 8ka BP 以来海平面基本没发生大的变化,南海也没有大的构造运动发生,所以 1—2.2 μm 组分含量的减少说明自 8ka BP 以来河流供给能力降低,由于河流供给能力主要受东亚夏季风降雨影响的河流流量控制,因此 1—2.2 μm 很可能指示了东亚夏季风的变化。随着近年来全新世高分辨率气候记录的增加,全球季风的变化趋势显得愈加清

晰。无论是阿曼南部 Qunf 岩洞的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ (Fleitmann *et al*, 2003) 和阿拉伯海沉积中浮游有孔虫 *Globigerina bulloides* 百分含量 (Gupta *et al*, 2003) 所记录的印度季风, 还是西非岸外热带大西洋 ODP658C 孔陆源矿物百分含量所记录的非洲季风 (deMenocal, 1995), 或者委内瑞拉北岸外 Cariaco 盆地纹层中的 Ti% 所记录的北美季风 (Haug *et al*, 2001), 以及华南董歌洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 反映的东亚季风 (Dykoski *et al*, 2005), 全都揭示 8ka BP 以来北半球夏季风逐渐减弱的趋势。南海 KNG5 孔 8ka BP 以来 1—2.2 μm 组分含量曲线能与这些季风指标很好地对比, 验证了自 8ka BP 以来东亚夏季风是减弱的, 进而暗示这是北半球各个季风系统的共同现象。

4 结论

在 AMS¹⁴C 定年的基础上, 对南海北部 KNG5 孔末次冰期 18ka 以来沉积物的敏感粒度、粘土矿物进行了研究, 得出以下结论:

(1) KNG5 孔粘土矿物组合的基本特点是以伊利石、绿泥石和高岭石为主, 蒙脱石含量较低。其中伊利石化学指数变化范围一般小于 0.50, 属于富 Fe-Mg 伊利石, 表明主要产于较强烈的物理风化环境。物源分析进一步表明, KNG5 孔高岭石主要来自于珠江, 蒙脱石主要由吕宋岛提供, 伊利石和绿泥石主要由台湾和珠江提供。KNG5 孔 17.5ka BP—12.5ka BP 的沉积物主要来源于珠江, 而在 12.5ka BP 时, 粘土矿物成分突然发生改变, 说明当时海平面已上升到相当的高度, 并且可能当时南海的现代环流系统已开始形成, 西行的广东沿岸流导致向外扩散的珠江物质减少, 由于受到北太平洋深层水 (NPDW) 以及黑潮南海分支的作用, 台湾成为研究站位 12.5ka BP—0ka BP 沉积物的主要贡献者。

(2) KNG5 孔 17.5ka BP—11ka BP 粘土矿物和粒度变化主要受控于海平面的变化。全新世早期 (11.0ka BP—8ka BP) 平均粒径达到最细和 1—2.2 μm 粒径含量达到最高值可能是强盛的夏季风作用的结果, 而全新世中晚期 (8ka BP—0ka BP) 1—2.2 μm 组分含量的减少是 8ka BP 以来东亚夏季风减弱的具体体现, 1—2.2 μm 粒径含量指示的东亚夏季风变化能和北半球其它季风指标能很好地对比, 说明这次季风减弱是北半球各个季风系统的共同现象, 展现了全新世以来季风变化的全球性。

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了辛勤劳动; 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

- 万世明, 李安春, 胥可辉等, 2008. 南海北部中新世以来粘土矿物特征及东亚古季风记录. 地球科学-中国地质大学学报, (3): 289—300
- 刘志飞, Colin C, 黄 维等, 2007. 珠江流域盆地表层沉积物的粘土矿物及其对南海沉积物的贡献. 科学通报, 52(4): 448—456
- 邵 磊, 乔培军, 庞 雄等, 2009. 南海北部近代沉积物钆同位素分布及意义. 科学通报, 54(1): 98—103
- 赵泉鸿, 汪品先, 1999. 南海第四纪古海洋学研究进展. 第四纪研究, (6): 481—501
- 徐方建, 李安春, 肖尚斌等, 2009. 末次冰消期以来东海内陆架古环境演化. 沉积学报, 27(1): 118—127
- Boulay S, Colin C, Trentesaux A *et al*, 2003. Mineralogy and sedimentology of Pleistocene sediment in the South China Sea (ODP Site 1144). Proc ODP Sci Results, 184: 1—21
- Boulay S, Colin C, Trentesaux A *et al*, 2005. Sediment sources and East Asian monsoon intensity over the last 450 ky. Mineralogical and geochemical investigations on South China Sea sediments. Paleogeogr Paleoclimatol Paleoecon, 228: 260—277
- 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: 207—226
- deMenocal P B, 1995. Plio-Pleistocene African climate. Science, 270: 53—59
- Duce R, Liss P, Merrill J *et al*, 1991. The atmospheric input of trace species to the world ocean. Glob Biogeochem Cycle, 5: 193—259
- Dykoski C A, Edwards R L, Cheng H *et al*, 2005. A high-resolution, absolute-dated Holocene and deglacial Asian monsoon record from Dongge Cave, China. Earth Planet Sci Lett, 233(1—2): 71—86
- Fleitmann D, Burns S J, Mudelsee M *et al*, 2003. Holocene forcing of the Indian monsoon recorded in a stalagmite from Southern Oman. Science, 300: 1737—1739
- Gröger M, Henrich R, Bickert T *et al*, 2003. Glacial-interglacial variability in lower North Atlantic deep water: Inference from silt grain-size analysis and carbonate preservation in the western equatorial Atlantic. Mar Geol, 201: 321—332
- Gupta A K, Anderson D M, Overpeck J T, 2003. Abrupt changes in the Asian southwest monsoon during the Holocene and their links to the North Atlantic Ocean. Nature, 421: 354—357
- Haug G H, Hughen K A, Sigman D M *et al*, 2001. Southward migration of the Intertropical Convergence Zone through the Holocene. Science, 293: 1304—1308
- Hughen K A, Baillie M G, Bard E *et al*, 2004. Marine04 marine

- radiocarbon age calibration, 0—26 cal kyr BP. *Radiocarbon*, 46(3): 1059—1086
- Li X H, Wei G, 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: 207—220
- Liu J P, Milliman J D, Gao S *et al*, 2004. Holocene development of the Yellow Rivers subaqueous delta, North Yellow Sea. *Mar Geol*, 209: 45—67
- Liu Z F, Colin C, Li X J *et al*, 2010. Clay mineral distribution in surface sediments of the northeastern South China Sea and surrounding fluvial drainage basins: Source and transport. *Mar Geol*, 277: 48—60
- 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
- Liu Z F, Tuo S T, Colin C *et al*, 2008. Detrital fine-grained sediment contribution from Taiwan to the northern South China Sea and its relation to regional ocean circulation. *Mar Geol*, 255: 149—155
- Prins M A, Postma G, Cleveringaa J *et al*, 2000. Controls on terrigenous sediment supply to the Arabian Sea during the late Quaternary. *The Indus Fan Mar Geol*, 169: 327—349
- Rea D K, Hovan S A, 1995. Grain size distribution and depositional processes of the mineral component of abyssal sediments: Lessons from the North Pacific. *Paleoceanography*, 12: 251—258
- Stuut J B W, Prins M A, Schneider R R *et al*, 2002. A 300-kyr record of aridity and wind strength in southwestern Africa: Inferences from grain-size distributions of sediments on Walvis Ridge, SE Atlantic. *Mar Geol*, 180: 221—233
- 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. *Paleogeogr Paleoclimatol Paleoecol*, 254: 561—582
- Wan S M, Li A C, Clift P D *et al*, 2010. Increased contribution of terrigenous supply from Taiwan to the northern South China Sea since 3 Ma. *Mar Geol*, 278: 115—121
- Xu K, Milliman J D, Li A *et al*, 2009. Yangtze- and Taiwan-derived sediments on the inner shelf of East China Sea. *Cont Shelf Res*, 29: 2240—2256

TERRIGENOUS INPUT TO THE NORTHERN SLOPE OF THE SOUTH CHINA SEA AND ITS CONTROLLING FACTOR SINCE THE LAST PHASE OF THE LAST GLACIAL MAXIMUM

HUANG Jie^{1,2}, LI An-Chun¹, WAN Shi-Ming¹, XU Fang-Jian³, MENG Qing-Yong¹

(1. Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 266071; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049; 3. College of Geo-resources and Information, China University of Petroleum (East China), Qingdao, 266555)

Abstract AMS¹⁴C, dating grain size and clay minerals of Core KNG5 sediments taken from the northern slope of the South China Sea were analyzed to discuss the evolution of provenances and controlling factors since 18ka. Sediment source studies indicate that the sediment source of Core KNG5 was mainly from the Zhujiang (Pearl) River during 17.5—12.5ka BP, while the clay assemblages sudden change at 12.5ka BP indicated that the sea level had risen to a considerable height, the modern circulation system of South China Sea had begun to form, and the Guangdong Coast Current should have been the main contributor to the kaolinite spatial distribution prograding southward once entering the shelf. The main contributor was later changed to Taiwan Island during 17.5—12.5ka BP owing to the influence of the North Pacific Deep Water (NPDW) and South China Sea Branch of Kuroshio. Grain size and clay minerals of Core KNG5 during 17.5—11ka BP were controlled by sea level change. The strong East Asian Summer Monsoon might be responsible for the minimum of mean grain size and the maximum contents of fluvial mud (1—2.2 μ m) in the Early Holocene. The decrease of fluvial mud (1—2.2 μ m) in the Middle and Late Holocene (8ka BP—0ka BP) well reflected the weak of East Asian Summer Monsoon since 8ka BP; and the content of fluvial mud (1—2.2 μ m) showed the evolution of East Asian Summer Monsoon, which corresponded well with other indexes of the Northern Hemisphere monsoon, showing that the weakened monsoon was the common phenomenon in each monsoon system of the Northern Hemisphere and also the monsoon evolution since Holocene in the global scale.

Key words grain size; clay minerals; sediment source; controlling factor; Northern Slope of the South China Sea