

中全新世以来琼东南陆架粘土矿物特征及物质来源

田旭¹, 徐方建^{1*}, 吴淑壮², 张晋³, 郭晨⁴, 董江¹

1. 中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580

2. 中国科学院南海海洋研究所边缘海地质重点实验室, 广东广州 510301

3. 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

4. 中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏徐州 221008

摘要: 以往针对南海北部陆架沉积物物质来源的诸多研究, 在一定程度上忽略了海南岛物质的影响. 基于柱状沉积物样品的岩性、粒度、粘土矿物和 AMS¹⁴C 年代分析, 探讨了琼东南陆架沉积区 X2 站沉积物的物质来源. 结果表明, X2 站沉积物可划分为上、下两段, 下段(I, 240~120 cm)主要为粘土质粉砂, 上段(II, 120~0 cm)主要为粉砂质砂. 粘土矿物主要由伊利石和高岭石组成, 含有少量绿泥石和蒙脱石. 对比分析显示, 伊利石和绿泥石可能主要来自于珠江和台湾岛; 高岭石可能主要来源于海南岛和珠江, 蒙脱石主要来自于近源的雷琼地区, 即海南岛物源对南海北部陆架西段具有一定的影响. 近 4 ka 以来, X2 站沉积物的明显变粗和高岭石含量逐渐增高, 说明海南物质的输入增强, 这可能是由于近 4 ka 以来的气候变化或者人类活动增强所致.

关键词: 南海; 陆架; 粒度; 粘土矿物; 物质来源; 沉积物.

中图分类号: P736.21

文章编号: 1000-2383(2015)09-1497-08

收稿日期: 2015-02-25

Clay Mineral Characteristics and Provenance of Continental Shelf Sediments in Eastern Hainan Island since Middle Holocene

Tian Xu¹, Xu Fangjian^{1*}, Wu Shuzhuang², Zhang Jin³, Guo Chen⁴, Dong Jiang¹

1. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China

2. Key Laboratory of Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China

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

4. School of Resources and Geoscience, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China

Abstract: The influence of Hainan Island has been ignored in the previous researches of sediment provenance in the continental shelf of the northern South China Sea. Therefore, the sediment provenances on the basis of lithology, grain-size, AMS¹⁴C dating, clay mineral analysis that were carried out for Core X2 located in the continental shelf of the Hainan Island in the South China Sea are discussed in the paper. The results show that Core X2 is separated into two stages, namely the upper one and the lower one. The lower one(I, 240-120 cm) is mainly composed of clay silt while the upper one(II, 120-0 cm) consists mainly of silty sand. Clay minerals in Core X2 mainly consist of illite and kaolinite, with associated chlorite and smectite. The comparison of clay mineral assemblages between sediments at Core X2 and other potential provenances indicates that predominant illite and chlorite may have been originated from Taiwan and the Pearl River, whereas kaolinite may have been provided mainly by Hainan Island and the Pearl River; smectite was derived mainly from Leiqiong area. It shows that materials on Hainan Island have certain influence on the continental shelf in the northern South China Sea. The coarsening of the sediment and the higher content of the kaolinite mean that Hainan Island provides more materials than other provenances in stage I, which

基金项目: 国家自然科学基金项目(Nos. 41106040, 41430965); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(Nos. 14CX02038A, 12CX02003A); 青岛市基础科学研究计划项目(No. 13-1-4-197-jch).

作者简介: 田旭(1989-), 男, 硕士研究生, 主要从事海洋沉积与矿物学研究. E-mail: tianxuaq@163.com

* **通讯作者:** 徐方建, E-mail: xufangjiang@163.com

引用格式: 田旭, 徐方建, 吴淑壮, 等, 2015. 中全新世以来琼东南陆架粘土矿物特征及物质来源. 地球科学——中国地质大学学报, 40(9): 1497-1504.

may have been resulted from climatic variation and enhancement from human activities since 4 ka.

Key words: South China Sea; continental shelf; grain size; clay mineral; provenance; sediment.

0 引言

南海作为西太平洋最大的边缘海,其沉积物有效地记录了南海古海洋演化(Wang *et al.*, 2003)、东亚季风演化(Wan *et al.*, 2007b)、区域构造演化(邵磊等, 2009; Meng *et al.*, 2011)等重要信息. 分析南海沉积物的物质来源、迁移途径及各端元的贡献,对于正确理解边缘海物质的迁移、扩散、沉积作用及其所记录的地质与环境信息具有重要意义(蔡观强等, 2011). 近年来对南海海底沉积物物质来源的调查研究已取得了较系统的认识(Liu *et al.*, 2003; 李学杰等, 2006),但主要偏重于广海深域,对陆架区特别是海南岛附近陆架的研究则较为滞后(肖尚斌等, 2006; 张玉兰, 2008). 本文对取自于海南岛东南陆架沉积区的 X2 站进行岩性、粒度、粘土矿物和 AMS¹⁴C 分析,探讨了研究区的物质来源.

1 区域背景

海南岛附近具有热带季风型海洋性气候特色(郭恩华等, 1982),终年高温,年平均气温在 22~26 °C,雨量充沛,年降雨量在 1 000~2 200 mm(吴敏, 2007). 受东亚季风影响,海南岛东岸沿岸流存在季节性变化特点,即夏季由于盛行西南风为东北向流,冬季盛行东北风而盛行西南向流(图 1). 海南岛地势以中部五指山为最高,向四周急剧下降,岛内共有 154 条河流呈辐射状独立直流入海(王宝灿等,

2006; 吴敏, 2007). 此外,海南岛邻近海域也有诸多河流汇入南海.

2 材料与方法

2.1 样品来源

X2 站柱状样由中国石油大学(华东)于 2012 年 9 月~10 月份利用重力取样器采自于海南岛东南侧陆架区(18° 25. 753' N, 110° 17. 079' E, 水深约为 77 m; 图 1), 采样深度为 240 cm. 航次由国家自然科学基金委员会资助,所用考察船为中国科学院南海海洋研究所的“实验 3 号”考察船. 在实验室内笔者对该岩心进行了详细描述和分样.

2.2 分析方法

沉积物粒度样品经体积含量为 30% H₂O₂ 和 1 mol/L HCl 处理去除有机质和钙质后,在中国科学院海洋研究所用法国产 Cilas 940L 激光粒度仪进行了粒度测量. 测量范围为 0. 5~2 000. 0 μm, 重复测试的相对误差小于 2%.

粘土矿物分析采用粘土粒级组分(<2 μm)定向薄片的 X 射线衍射(X-ray diffraction, 简称 XRD)方法(Wan *et al.*, 2006, 2007a). 每个样品取大约 1 cm³, 先后用体积含量为 30% H₂O₂ 和 1 mol/L HCl 反应去除有机质和钙质, 加去离子水离心清洗 2 次. 按 Stokes 原理所确定的沉降时间, 抽取上部小于 2 μm 的悬浮液, 制成定向薄片, 自然风干. XRD 分析在中国科学院海洋研究所采用德国产

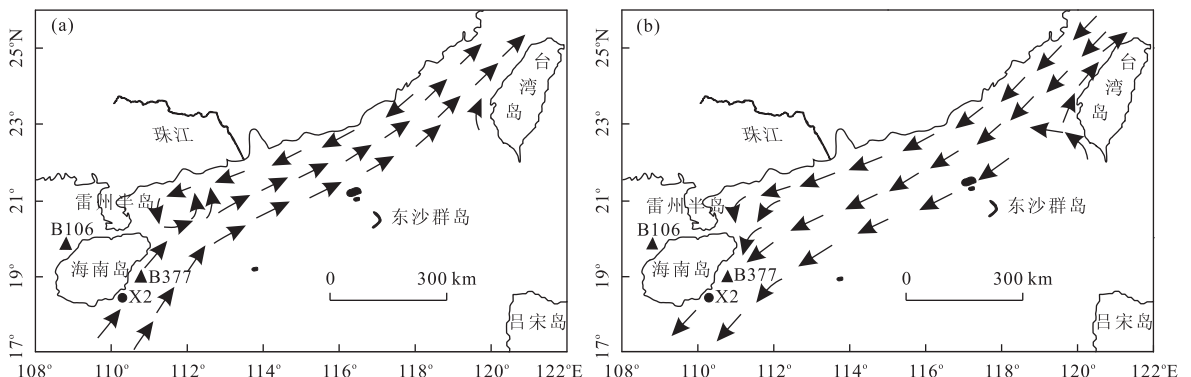


图 1 南海北部季节性流系路径和相关站位

Fig. 1 Seasonal current variations in the northern South China Sea and core locations

a. 夏季; b. 冬季; 箭头代表流系方向; 流系方向据陈丽蓉(2008)、Niino and Emery(1961), B106 和 B377 位置据吴敏(2007)

表 1 X2 孔 AMS¹⁴C 年龄数据
Table 1 AMS¹⁴C dating of Core X2

测试序号	层位(cm)	材料	AMS ¹⁴ C 年龄(a BP)	¹³ C/ ¹² C	日历年龄(a BP, 2σ)
346831	124~126	底栖混合种有孔虫	4 080±30	-0.6‰	4 159 (3 970~4 348)
346832	204~206	底栖混合种有孔虫	6 350±30	-1.0‰	6 642 (6 423~6 860)

D8 Advance 衍射仪进行分析,采用 CuKα 辐射,管压为 40 kV,管流为 40 mA,分别对自然条件、乙二醇蒸气饱和条件下的样品薄片进行测试,扫描角度为 3°~30°,步长为 0.02°。粘土矿物的鉴定和解释主要依据 2 种测试条件下获得的 XRD 叠加图谱的综合对比。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晶面衍射峰的面积比获得。笔者按 Biscaye(1965)的方法计算了 4 种粘土矿物(蒙脱石、伊利石、高岭石和绿泥石)的相对含量:蒙脱石、伊利石采用 17Å 和 10Å 晶面,高岭石、绿泥石采用 7Å 叠加峰,其中高岭石和绿泥石的相对含量是通过拟合 3.58Å/3.54Å 的衍射峰面积来求出,4 种粘土矿物强度权重分别为 1、4、2 和 2,总含量校正为 100%。伊利石结晶度根据 10Å 衍射峰处的半峰宽来确定,伊利石的化学指数通过 5Å/10Å 峰面积比来计算。

粒度和粘土分析测试间隔均为 2 cm,各分析测试 120 个样品。2 个 AMS¹⁴C 年代数据在美国 Beta 实验室完成,原始测年数据经 Beta 实验室校正为日历年龄(表 1)。

3 结果

X2 站沉积物岩性、粒度、粘土矿物组合及粘土矿物特征参数在 120 cm(约 4 ka BP)处均发生了明显的变化,据此可将柱状样分为阶段 I 和阶段 II(图 2 和图 3)。

3.1 岩性和粒度分布特征

阶段 I (240~120 cm) 主要为粘土质粉砂,粘土、粉砂和砂的平均含量分别为 20%、76% 和 4%。粒度频率分布主要为双峰分布,众数值约为 12 μm 和 40 μm。阶段 II (120~0 cm) 主要为粉砂质砂,粘土、粉砂和砂的平均含量分别为 11%、44% 和 45%。粒度频率分布主要为单峰和双峰分布,众数值约为 13 μm 和 80 μm。阶段 II 较阶段 I 沉积物粒度变大,这可能由于 4 ka 以来水动力变强或者由于近源沉积物输入增多所致。

3.2 粘土矿物组成与分布

XRD 分析结果显示,X2 站柱状样的粘土矿物主要由伊利石(32%~70%,平均 57%)和高岭石(15%~56%,平均 30%)组成,绿泥石(2%~15%,

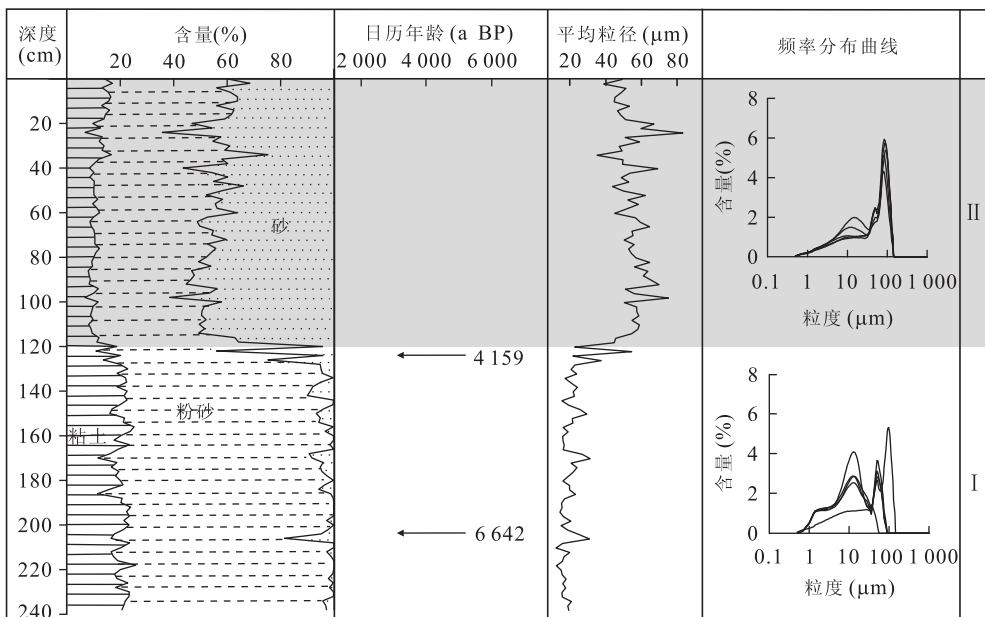


图 2 X2 孔岩性剖面、年代、平均粒径和粒度频率分布曲线

Fig. 2 Lithology, AMS¹⁴C dating, mean grain-size and frequency distribution of Core X2

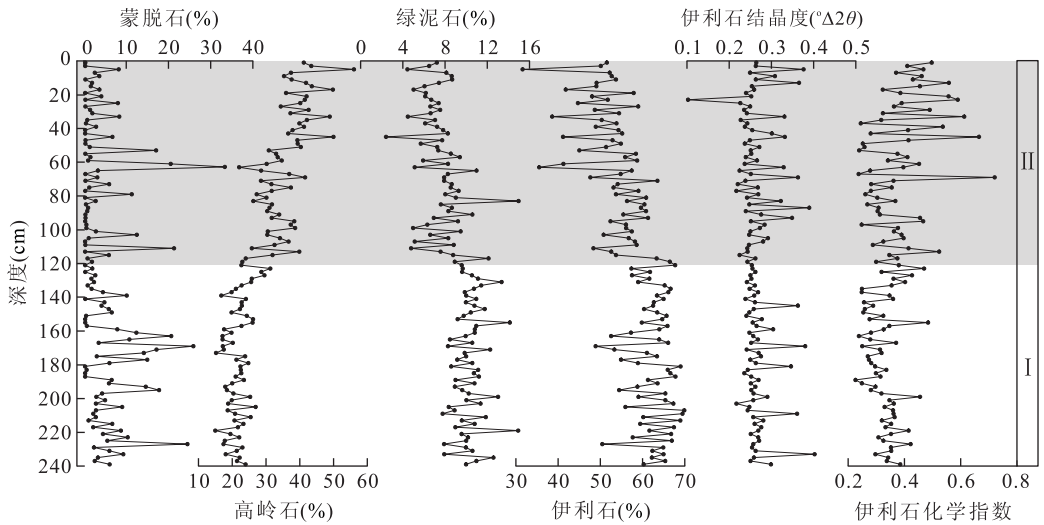


图 3 X2 站粘土矿物组合及特征

Fig. 3 Variation of clay minerals assemblages, crystallinity index, chemical index of Core X2

平均 9%) 和蒙脱石(0%~37%, 平均 4%) 含量较少(图 3). 伊利石化学指数在 0.23~0.72(平均值为 0.36), 且多数小于 0.50; 伊利石结晶度范围为 $0.10^{\circ}\sim 0.40^{\circ}\Delta 2\theta$, 平均值为 $0.27^{\circ}\Delta 2\theta$.

X2 站柱状样伊利石和绿泥石具有相同的变化趋势, 而高岭石呈现相反的变化趋势(图 3). 伊利石和绿泥石含量在阶段 I 相对稳定, 平均值分别为 62% 和 10%, 阶段 II 急剧下降, 伊利石变化范围为 32%~66%, 绿泥石变化范围为 2%~15%. 高岭石含量在阶段 I 变化幅度很小, 平均值为 22%, 阶段 II 则急剧增加, 变化范围为 22%~56%. 蒙脱石含量很低, 平均含量仅为 5%. 伊利石化学指数阶段 I 平均为 0.33, 较为稳定; 阶段 II 平均为 0.39, 呈上升趋势, 但波动较大.

4 物源分析

虽然不同学者对南海海平面变化曲线的研究存在较大的差异(图 4), 但是各自的变化曲线均显示出近 7~8 ka 以来南海海平面变化尺度不大, 波动幅度一般不超过 5 m(Yu *et al.*, 2004; 时小军等, 2007, 2008)(图 4), 而 X2 站水深约 77 m, 因此海平面升降对 X2 站物质的输入也影响不大.

大量研究表明, 海南岛以东的南海北部地区主要接受珠江、台湾岛物质的输入(Liu *et al.*, 2007a; 陈丽蓉, 2008; Shao *et al.*, 2009). 珠江每年可以向南海输送 $54.0 \times 10^6 \sim 80.4 \times 10^6$ t 悬浮沉积物(Zhang *et al.*, 2008, 2012). 虽然台湾岛的山区河

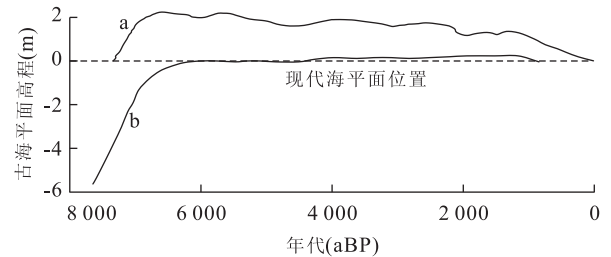


图 4 南海海平面变化

Fig. 4 Relative sea-level of the South China Sea
海平面 a 数据 Yu(2012), 海平面 b 数据 Zong(2004)

流汇水区面积很小, 但由于构造活动和季风/台风降雨的影响, 其径流量和沉积物输送量也非常巨大, 成为南海周边沉积物的重要来源(Liu *et al.*, 2010). 红河来源的沉积物由于受到海南岛的阻隔, 主要沉积在南海西北部(Shao *et al.*, 2009), 吕宋岛入海物质主要分布于其西北海域, 但难以穿越深水盆地进入南海北部陆坡甚至陆架海域(Liu *et al.*, 2011), 而湄公河和越南中部河流物质难以到达南海北部陆架和陆坡区(Wan *et al.*, 2007b; 吴敏, 2007; Liu *et al.*, 2010; 徐方建等, 2010). 值得注意的是, 前人研究多侧重于大江大河, 但对小型河流的重视程度不足. 海南岛独特的地形和气候条件十分有利于地表径流的物质剥蚀和搬运入海, 从而可能为海南岛周边海域提供一定的沉积物质(吴敏等, 2007). 然而, 目前为止, 很少见到关于海南岛及其邻近海域沉积物的研究(吴敏, 2007; 吴敏等, 2007). 实际上, 虽然海南岛东南部的河流物质相对较少, 但由于距离研究站位较近(图 1), 有必要考虑海南岛河流的影

响. 因此,排除红河、吕宋岛、湄公河和越南中部河流的影响,并考虑到地形和流系的因素,海南岛东南部河流、台湾岛以及珠江是 X2 站最为可能的物源区. 实际上,陈丽蓉(2008)通过对碎屑矿物(63~250 μm)的研究认为,海南岛东南近岸区沉积物主要为沿岸冲刷及沿岸河流带来,而对粘土矿物分区研究却表现出与珠江口沉积物相似. 这也说明了本区物质来源的复杂性.

X2 站阶段 I 和阶段 II 粘土矿物组合与上述潜在物源区样品对比显示(图 5),粘土矿物组合更加接近珠江物质. 进一步对比显示,阶段 I 高岭石平均含量为 22%,阶段 II 剧增到 36%(图 5). Liu *et al.* (2007b)研究认为,只有珠江能够提供 46%的高岭石(根据 Biscaye(1965)方法校正,校正后为 37%). 假如高岭石只来自于珠江,这就需要珠江的高岭石全部输送到本研究区. 然而,由于高岭石遇到碱性的海水极易发生絮凝作用而沉降,易在河口处沉积(Wu *et al.*, 2012),随着输送距离增加有含量逐渐降低的趋势(陈丽蓉, 2008). 因此,至少在阶段 II,珠江难以提供如此高含量的高岭石. 海南岛本土粘土矿物中高岭石相对含量可达 80%(阮云泽等, 2009),且向海方向表现为逐渐降低的趋势(吴敏, 2007). X2 站与海南岛距离较近,因此,阶段 II 应该受到了更多海南岛高岭石输入的影响,这与阶段 II

粒度较大相对应(图 2),可能是近源的海南物质输入增多造成的. 特别是阶段 II 砂含量平均为 45%,这只能由较近的物质输入增强造成. 吴敏(2007)在对海南岛附近海域 B106 和 B377 沉积柱状样的研究中也发现(图 1),近 4 ka 以来海南岛水土流失较之前要高,河流可以携带更多物质入海.

X2 站蒙脱石平均含量仅为 4%,部分层位高于 15%(图 5),然而在诸多物源区中,珠江和台湾岛几乎不含蒙脱石或蒙脱石含量很低(Liu *et al.*, 2007a; Li *et al.*, 2012),而吕宋岛中基性火山岩风化形成的蒙脱石难以穿越深水盆地进入南海北部陆坡甚至陆架海域(Liu *et al.*, 2011),只有雷州半岛蒙脱石含量可高达 25%(Liu *et al.*, 2012). 陈丽蓉(2008)的研究认为,海南岛东面的内陆架区较高的蒙脱石含量(一般为 10%~15%)与广泛发育于雷琼地区及其邻近海域中的玄武岩有关. 因此,琼东南陆架 X2 站沉积物中的蒙脱石可能主要来自于近源的雷琼地区.

海南岛粘土矿物中高岭石相对含量可达 80%(阮云泽等, 2009),伊利石和绿泥石相对含量之和不超过 20%,而研究站位的伊利石含量变化范围为 32%~69%,这样只有珠江和台湾岛可以提供足够的伊利石,海南岛也可能会有少量贡献. 虽然珠江和台湾岛河流都提供含量较高的伊利石和绿泥石(两者之和占台湾岛河流全部粘土矿物的 97%,占珠江全部粘土矿物的 62%),但两者的伊利石却是不同的.

伊利石化学指数小于 0.5 为富 Fe-Mg 伊利石,是物理风化的结果;大于 0.5 为富 Al 伊利石,代表强烈的水解作用(Gingele *et al.*, 1998, 2001). 伊利石结晶度低值代表结晶度高,指示陆地物源区水解作用弱,为干冷的气候条件(Krumm and Buggish, 1991; Ehrmann, 1998). 这两个参数可用于示踪物源区和搬运路径(Petschick *et al.*, 1996). 珠江的伊利石由于长期受温暖、潮湿的气候条件影响,化学风化作用强,其伊利石化学指数偏高,为 0.45~0.80(平均为 0.62; Liu *et al.*, 2007b);而台湾岛由于构造活动和季风/台风降雨的影响,物理风化或机械剥蚀作用十分强烈,其伊利石化学指数偏低,在 0.21~0.56 范围内(平均为 0.42; Li *et al.*, 2012). 如图 6a 所示, X2 站的伊利石结晶度与珠江和台湾岛接近. 进一步将 X2 站伊利石化学指数与珠江和台湾岛物质对比,结果显示 X2 站沉积物伊利石化学指数也位于台湾岛和珠江之间(图 6b). 这可能说明 X2 站的伊利石具有台湾岛和珠江的混源性质. X2 站伊利

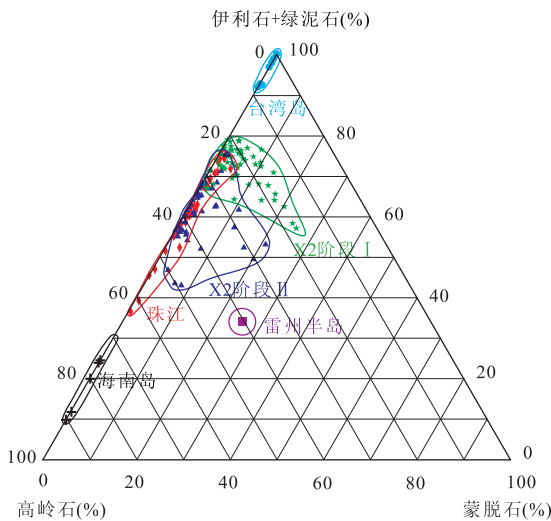


图 5 X2 站与珠江、台湾岛、海南岛以及雷州半岛的粘土矿物含量对比

Fig. 5 Comparison of clay mineral assemblages among Core X2, the Pearl River, Taiwan Island, Hainan Island and Leizhou Peninsula

台湾岛数据据 Li *et al.* (2012), 珠江数据据 Liu *et al.* (2007b), 海南岛数据据阮云泽等(2009), 雷州半岛数据据 Liu *et al.* (2012)

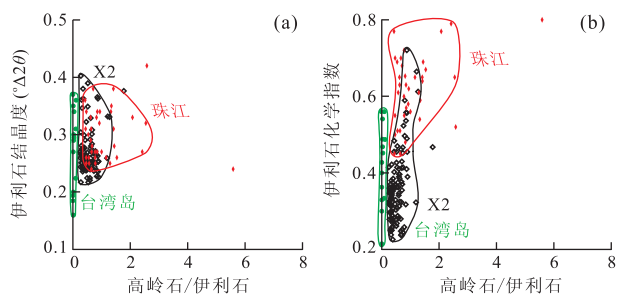


图 6 X2 站与台湾岛、珠江伊利石结晶度(a)、化学指标(b)随高岭石/伊利石比值变化对比

Fig. 6 Correlation of kaolinite/illite ratio with illite crystallinity (a) and illite chemical index (b) in argillaceous sediments from Core X2, Taiwan Island and the Pearl River

对比方法据 Liu *et al.* (2007b); 台湾岛数据据 Li *et al.* (2012); 珠江数据据 Liu *et al.* (2007b)

石和绿泥石含量具有相同的变化型式. 因此, 笔者推断 X2 站的绿泥石同样主要由珠江和台湾岛供给.

综上所述, 虽然 X2 站沉积物粘土矿物组合更加接近珠江物质, 但是考虑到絮凝沉降等作用, 高岭石主要来源于海南岛和珠江, 伊利石和绿泥石主要来源于珠江和台湾岛, 蒙脱石可能主要来自于近源的雷琼地区. 4 ka 以来海南岛相对于其他物源区对 X2 站物质贡献增大. 由图 1 可知, 南海北部沿岸流受东亚季风的影响, 夏季由于盛行西南风而为东北向流, 冬季盛行东北风而盛行西南向流. 冬季在东北风的驱动下形成的西南向广东沿岸流可以将伊利石、绿泥石和高岭石从台湾岛和珠江搬运至 X2 站, 源自雷琼地区的蒙脱石亦可通过相同的机制搬运到 X2 站. 受季节性降雨影响, 海南岛东部河流可以直接入海, 为研究区提供一定量的高岭石.

5 结论

笔者对位于海南岛东南陆架的 X2 站沉积物进行了岩性、粒度、粘土矿物和 AMS¹⁴C 年代分析, 并与其他潜在物源区的粘土矿物成分和特征进行了对比, 得出以下结论:

(1) X2 站沉积物可划分为上、下两段. 阶段 I (240~120 cm) 主要为粘土质粉砂, 粒径较小, 平均为 20 μm; 阶段 II (120~0 cm) 主要为粉砂质砂, 粒径较大, 平均为 55 μm. 阶段 II 较阶段 I 沉积物粒度变大可能是由于水动力增强或是近源物质输入增多引起的.

(2) X2 站沉积物粘土矿物主要由伊利石

(32%~70%, 平均 57%) 和高岭石 (15%~56%, 平均 30%) 组成, 含有少量绿泥石 (2%~15%, 平均 9%) 和蒙脱石 (0%~37%, 平均 4%). 伊利石化学指数为 0.23~0.72, 平均值为 0.36, 结晶度范围为 0.10°~0.40°Δ2θ, 平均值为 0.27°Δ2θ. 与各潜在物源区的对比显示, 高岭石可能主要来源于海南岛和珠江, 伊利石和绿泥石可能主要来自于珠江和台湾岛, 蒙脱石主要来自于近源的雷琼地区. 以往针对南海北部陆架沉积物物质来源的诸多研究, 在一定程度上忽略了海南岛河流的影响. 对海南岛东南 X2 站沉积物的研究则表明, 海南岛物质对南海北部陆架具有一定的影响.

(3) 近 4 ka 以来, X2 站沉积物的明显变粗和高岭石含量逐渐增高, 说明海南物质的输入增强, 这可能是由于近 4 ka 以来的气候变化或者人类活动增强所致, 这有待进一步研究.

致谢: 感谢中国科学院南海海洋研究所“实验 3 号”考察船全体船员、队员的大力配合; 特别感谢中国科学院南海海洋研究所施小斌研究员、中国石油大学(华东)张星同学等对采样工作的帮助; 中国科学院海洋研究所帮助进行了沉积物粘土矿物、粒度测试; 审稿专家提供的宝贵意见和建议使本文得以很大提高, 谨致谢忱.

References

- Biscaye, P. E., 1965. Mineralogy and Sedimentation of Recent Deep-Sea Clay in the Atlantic Ocean and Adjacent Seas and Oceans. *Geological Society of America Bulletin*, 76 (7): 803–832. doi: 10.1130/0016-7606(1965)76[803:MASORD]2.0.CO;2
- Cai, G. Q., Peng, X. C., Zhang, Y. L., 2011. The Significances of and Advances in the Study of Sediment Sources in the South China Sea. *Advances in Marine Science*, 29 (1): 113–121 (in Chinese with English abstract).
- Chen, L. R., 2008. Sedimentary Mineralogy of the China Seas. China Ocean Press, Beijing (in Chinese).
- Ehrmann, W., 1998. Implications of Late Eocene to Early Miocene Clay Mineral Assemblages in McMurdo Sound (Ross Sea, Antarctica) on Paleoclimate and Ice Dynamics. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 139 (3–4): 213–231. doi: 10.1016/S0031-0182(97)00138-7
- Gingele, F. X., Deckker, P. D., Hillenbrand, C. D., 2001. Clay Mineral Distribution in Surface Sediments between Indonesia and NW Australia—Source and Transport by Ocean Currents. *Marine Geology*, 179 (3–4): 135–146. doi: 10.1016/S0025-3227(01)00194-3

- Gingele, F. X., Müller, P. M., Schneider, R. R., 1998. Orbital Forcing of Freshwater Input in the Zaire Fan Area—Clay Mineral Evidence from the Last 200 kyr. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 138 (1–4): 17–26. doi:10.1016/S0031-0182(97)00121-1
- Guo, E. H., Wang, D. X., Chen, L., 1982. The Relationship between Rainfall and Monsoon in Hainan Island. *Tropical Geography*, 2(1): 15–20, 64 (in Chinese).
- Krumm, S., Buggisch, W., 1991. Sample Preparation Effects on Illite Crystallinity Measurements: Grain-Size Gradation and Particle Orientation. *Journal of Metamorphic Geology*, 9 (6): 671–677. doi:10.1111/j.1525-1314.1991.tb00557.x
- Li, C. S., Shi, X. F., Kao, S. J., et al., 2012. Clay Mineral Composition and Their Sources for the Fluvial Sediments of Taiwanese Rivers. *Chinese Science Bulletin*, 57 (6): 673–681. doi:10.1007/s11434-011-4824-1
- Li, X. J., Wang, P. X., Xu, C. Z., et al., 2006. Clay Minerals in Surface Sediments in Western South Sea: Distribution and Their Provenance. National Conference on Marine Geology, Mineral Resources & Environments, Guangzhou (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. G., Xiang, R., Chen, M. H., et al., 2011. Influence of the Kuroshio Current Intrusion on Depositional Environment in the Northern South China Sea: Evidence from Surface Sediment Records. *Marine Geology*, 285 (1–4): 59–68. doi:10.1016/j.margeo.2011.05.010
- Liu, J. G., Yan, W., Chen, Z., et al., 2012. Sediment Sources and Their Contribution along Northern Coast of the South China Sea: Evidence from Clay Minerals of Surface Sediments. *Continental Shelf Research*, 47 (15): 156–164. doi:10.1016/j.csr.2012.07.013
- Liu, Z. F., Colin, C., Huang, W., et al., 2007a. Clay Minerals in Surface Sediments of the Pearl River Drainage Basin and Their Contribution to the South China Sea. *Chinese Science Bulletin*, 52 (8): 1101–1111. doi:10.1007/s11434-007-0161-9
- Liu, Z. F., Colin, C., Huang, W., et al., 2007b. Climatic and Tectonic Controls on Weathering in South China and Indochina Peninsula Clay Mineralogical and Geological Investigations from the Pearl, Red and Mekong Drainage Basins. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 8 (5): 1525–2027. doi:10.1029/2006GC001490
- Liu, Z. F., Li, X. J., Colin, C., et al., 2010. A High-Resolution Clay Mineralogical Record in the Northern South China Sea since the Last Glacial Maximum, and Its Time Series Provenance Analysis. *Chinese Science Bulletin*, 55(35): 4058–4068. doi:10.1007/s11434-010-4149-5
- 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. *Marine Geology*, 201 (1–3): 133–146. doi:10.1016/S0025-3227(03)00213-5
- Meng, X. W., Xia, P., Zheng, J., et al., 2011. Evolution of the East Asian Monsoon and Its Response to Uplift of the Tibetan Plateau since 1.8 Ma Recorded by Major Elements in Sediments of the South China Sea. *Chinese Science Bulletin*, 56 (6): 547–551. doi:10.1007/s11434-010-4258-1
- Niino, H., Emery, K. O., 1961. Sediments of Shallow Portions of East China Sea and South China Sea. *Geological Society of America Bulletin*, 72(5): 731–762. doi:10.1130/0016-7606-(1961)72[731:SOSPOE]2.0.CO;2
- Petschick, R., Kuhn, G., Gingele, F., 1996. Clay Mineral Distribution in Surface Sediments of the South Atlantic: Sources, Transport, and Relation to Oceanography. *Marine Geology*, 130 (3–4): 203–229. doi:10.1016/0025-3227(95)00148-4
- Ruan, Y. Z., Luo, W., Jian, S. F., et al., 2009. Clay Mineralogy and the Amount of Charge of Rubber Plantation Soils in Hainan. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 30 (5): 620–625 (in Chinese with English abstract).
- Shao, L., Pang, X., Zhang, G. C., et al., 2009. Late Oligocene Tectonic Event in the Northern South China Sea and Its Implications. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34(5): 717–724 (in Chinese with English abstract).
- Shao, L., Qiao, P. J., Pang, X., et al., 2009. Nd Isotopic Variations and Its Implications in the Recent Sediments from the Northern South China Sea. *Chinese Science Bulletin*, 54 (2): 311–317. doi:10.1007/s11434-008-0453-8
- Shi, X. J., Yu, K. F., Chen, T. G., 2007. Progress in Researches on Sea-Level Changes in South China Sea since Mid-Holocene. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 27 (5): 121–132 (in Chinese with English abstract).
- Shi, X. J., Yu, K. F., Chen, T. G., et al., 2008. Mid- to Late-Holocene Sea Level Highstands: Evidence from Fringing Coral Reefs at Qionghai, Hainan Island. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 28(5): 1–9 (in Chinese with English abstract).
- 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. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 241(1): 139–159. doi:10.1016/j.palaeo.2006.06.013
- Wan, S. M., Li, A. C., Clift, P. D., et al., 2007a. Development of the East Asian Monsoon: Mineralogical and Sedimentologic Records in the Northern South China Sea since 20 Ma.

- Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 254 (3-4): 561-582. doi:10.1016/j.palaeo.2007.07.009
- Wan, S. M., Li, A. C., Jan-Berend, W. S., et al., 2007b. Grain-Size Records at ODP Site 1146 from the Northern South China Sea: Implications on the East Asian Monsoon Evolution since 20 Ma. *Science in China (Series D)*, 50(10): 1536-1547. doi:10.1007/s11430-007-0082-0
- Wang, B. C., Chen, S. L., Gong, W. P., et al., 2006. The Formation and Evolution of the Bay Coast in Hainan Island, China Ocean Press, Beijing (in Chinese).
- Wang, P. X., Jian, Z. M., Zhao, Q. H., et al., 2003. Evolution of the South China Sea and Monsoon History Revealed in Deep-Sea Records. *Chinese Science Bulletin*, 48(23): 2549-2561. doi:10.1360/03wd0156
- Wu, J. W., Liu, Z. F., Zhou, C., 2012. Late Quaternary Glacial Cycle and Precessional Period of Clay Mineral Assemblages in the Western Pacific Warm Pool. *Chinese Science Bulletin*, 57(28-29): 3748-3760. doi:10.1007/s11434-012-5277-x
- Wu, M., 2007. Clay Mineralogical Study on Environmental Change of Hainan Island Offshore (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Wu, M., Li, S. R., Chu, F. Y., et al., 2007. The Assemblage and Environmental Significance of Clay Minerals in the Surficial Sediment around Hainan Island. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 27(2): 101-107 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, S. B., Chen, M. H., Lu, J., et al., 2006. New Evidence for Remnant Deposits Recorded by Columnar Sediments in the Shelf of the Northern South China Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 26(3): 1-5 (in Chinese with English abstract).
- Xu, F. J., Chen, S. Y., Cao, Y. C., et al., 2010. Geochemical Records and Geological Significance of the Continental Shelf Sediments in the Northern South China Sea since 4 400 a. *Acta Sedimentologica Sinica*, 28(6): 1198-1205 (in Chinese with English abstract).
- Yu, K. F., 2012. Coral Reefs in the South China Sea: Their Response to and Records on Past Environmental Changes. *Science China Earth Sciences*, 55(8): 1217-1229. doi:10.1007/s11430-012-4449-5
- Yu, K. F., Zhao, J. X., Liu, T. S., et al., 2004. High-Frequency Winter Cooling and Reef Coral Mortality during the Holocene Climatic Optimum. *Earth and Planetary Science Letters*, 224(1-2): 143-155. doi:10.1016/j.epsl.2004.04.036
- Zhang, S. R., Lu, X. X., Higgitt, D. L., et al., 2008. Recent Changes of Water Discharge and Sediment Load in the Zhujiang (Pearl River) Basin, China. *Global and Planetary Change*, 60(3-4): 365-380. doi:10.1016/j.gloplacha.2007.04.003
- Zhang, W., Wei, X. Y., Zheng, J. H., et al., 2012. Estimating Suspended Sediment Loads in the Pearl River Delta Region Using Sediment Rating Curves. *Continental Shelf Research*, 38: 35-46. doi:10.1016/j.csr.2012.02.017
- Zhang, Y. L., 2008. Sporopollen and Algae in Core C4 of Northern South China Sea and Its Paleoenvironment. *Journal of Tropical Oceanography*, 27(6): 44-48 (in Chinese with English abstract).
- Zong, Y. Q., 2004. Mid-Holocene Sea-Level Highstand along the Southeast Coast of China. *Quaternary International*, 117(1): 55-67. doi:10.1016/s1040-6182(03)00116-2
- ### 附中文参考文献
- 蔡观强, 彭学超, 张玉兰, 2011. 南海沉积物物质来源研究的意义及其进展. *海洋科学进展*, 29(1): 113-121.
- 陈丽蓉, 2008. 中国海沉积矿物学. 北京: 海洋出版社.
- 郭恩华, 王鼎祥, 陈俐, 1982. 海南岛降水与季风的关系. *热带地理*, 2(1): 15-20, 64.
- 李学杰, 汪品先, 徐彩珍, 等, 2006. 南海西部表层沉积物粘土矿物分布与物源分析. 广州: 海洋地质、矿产资源与环境学术研讨会.
- 阮云泽, 罗微, 简少芬, 等, 2009. 海南岛橡胶园土壤粘土矿物组成与土壤电荷量. *热带作物学报*, 30(5): 620-625.
- 邵磊, 庞雄, 张功成, 等, 2009. 南海北部渐新世末的构造事件. *地球科学——中国地质大学学报*, 34(5): 717-724.
- 时小军, 余克服, 陈特固, 2007. 南海周边中全新世以来的海平面变化研究进展. *海洋地质与第四纪地质*, 27(5): 121-132.
- 时小军, 余克服, 陈特固, 等, 2008. 中一晚全新世高海平面的琼海珊瑚礁记录. *海洋地质与第四纪地质*, 28(5): 1-9.
- 王宝灿, 陈沈良, 龚文平, 等, 2006. 海南岛港湾海岸的形成与演变. 北京: 海洋出版社.
- 吴敏, 2007. 海南岛周边海域环境变化的粘土矿物学研究(博士学位论文). 北京: 中国地质大学.
- 吴敏, 李胜荣, 初凤友, 等, 2007. 海南岛周边海域表层沉积物中粘土矿物组合及其气候环境意义. *矿物岩石*, 27(2): 101-107.
- 肖尚斌, 陈木宏, 陆钧, 等, 2006. 南海北部陆架柱状沉积物记录的残留沉积. *海洋地质与第四纪地质*, 26(3): 1-5.
- 徐方建, 陈世悦, 操应长, 等, 2010. 近 4400 年来南海北部陆架沉积地球化学记录及其地质意义. *沉积学报*, 28(6): 1198-1205.
- 张玉兰, 2008. 南海北部海域柱状沉积的孢粉、藻类及其古环境意义. *热带海洋学报*, 27(6): 44-48.