

闫慧梅,田旭,徐方建,等. 中全新世以来南海琼东南近岸泥质区物质来源[J]. 海洋学报, 2016, 38(7):97-106, doi: 10.3969/j.issn.0253-4193.2016.07.009

Yan Huimei, Tian Xu, Xu Fangjian, et al. Sediment provenance of offshore mud area of the eastern Hainan Island in South China Sea since the Mid-Holocene[J]. Haiyang Xuebao, 2016, 38(7):97-106, doi: 10.3969/j.issn.0253-4193.2016.07.009

中全新世以来南海琼东南近岸泥质区物质来源

闫慧梅¹, 田旭², 徐方建^{1*}, 胡邦琦³, 杨耀民², 冯建伟¹, 李安春⁴, 郭晨⁵, 刘兆庆¹

(1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580; 2. 国家深海基地管理中心, 山东 青岛 266237; 3. 国土资源部海洋油气资源和环境地质重点实验室, 山东 青岛 266071; 4. 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; 5. 西安科技大学 地质与环境学院, 陕西 西安 710000)

摘要: 对位于南海琼东南近岸泥质区的 X2 站柱状沉积物进行了粒度、Sr-Nd 同位素、常量元素 (Al_2O_3 、 TFe_2O_3 、 K_2O 、 MgO 、 Na_2O 、 TiO_2 、 CaO 、 P_2O_5 、 MnO) 和 AMS^{14}C 年代分析, 探讨了中全新世以来该沉积区的物质来源。结果表明, X2 站沉积物可划分为上 (A2 段, 120~0 cm, 4.0~0 ka BP)、下 (A1 段, 240~120 cm, 7.6~4.0 ka BP) 两个沉积地层单元, A2 段较 A1 段沉积物平均粒径变粗, 已测的 9 种常量元素含量减少。 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 与 ϵ_{Nd} 除异常点外, 总体变化幅度不大。X2 站沉积物主要来源于海南岛和台湾, 珠江贡献较小, 其中 A1 段沉积物主要是海南岛和台湾岛来源物质的混合, A2 段沉积物主要来源于海南岛, 其次珠江物质可能也有影响。据 X2 站研究结果初步表明, 世界级大河 (如珠江) 对南海北部陆架区 (特别是琼东南近岸泥质区) 的贡献以前可能被高估, 而山溪型河流 (如台湾岛、海南岛等河流) 的贡献却可能被低估, 日后研究中应该重视小型河流对陆架区的物质贡献。

关键词: 南海; 陆架; 全新世; 粒度; 常量元素; Sr-Nd 同位素; 物质来源

中图分类号: P736.21⁺2

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2016)07-0097-10

1 引言

南海背靠亚洲大陆, 外绕岛弧, 是西太平洋最大的边缘海^[1], 汇聚了来自周围陆地的巨量沉积物^[2], 其独特的地理位置和复杂的物质来源可为全球古环境和构造演化、特别是亚洲古季风的研究提供良好材料, 因此南海成为了国际海洋研究的热点区域之一^[3-5]。与南海深水区开展的大量工作相比^[6-8], 南海北部陆架区的研究较为薄弱^[9], 其主要是因为过去普遍认为陆架活跃的动力环境不利于沉积记录的保

存。但是, 作为大陆与深海大洋间的过渡地带和陆源物质向深海大洋输送的主要通道, 陆架对海陆相互作用十分敏感, 是研究“源—汇”和海陆相互作用的关键地区^[10-11]。近年来的研究发现, 陆架泥质沉积物沉积后很难再次搬运, 因此能够普遍反映当时的沉积环境以及物源信息, 对研究季风演化和气候突变事件也具有很高的科学价值^[5,12]。

南海北部海南岛东南 (琼东南) 陆架区是我国重要的强上升流区域^[13-14], 其上发育一平行海南岛东侧海岸的泥质条带^[15]。前人通过多种方法对琼东

收稿日期: 2015-09-13; 修订日期: 2015-12-22。

基金项目: 国家自然科学基金 (41430965, 41106040, 41576058); 国家科技重大专项 (2016ZX05047-003, 2011ZX05009-002); 中央高校基本科研业务费专项资金 (12CX02003A); 青岛市基础 Research 计划项目 (13-1-4-197-jch)。

作者简介: 闫慧梅 (1988—), 女, 内蒙古呼伦贝尔人, 主要从事海洋沉积与矿物学研究。E-mail: 498918865@qq.com

* 通信作者: 徐方建 (1982—), 男, 副教授, 主要从事海洋沉积与矿物学研究。E-mail: xufangjiang@163.com

南陆架区表层沉积物来源进行了探索性研究,认为该区物质主要来自于海南岛小型河流输入和沿岸侵蚀搬运^[5,16],或是珠江等大型河流的输入^[7,11]。而 Liu 等^[17]发现由台湾提供的伊利石和绿泥石分别在冬季广东沿岸流和深水洋流的作用下呈两个“舌形”向西南方向运移,极有可能到达琼东南陆架。可见,对琼东南陆架区的物质来源尚存在一定争议。另外,到目前为止,对于该区长时间尺度的物质来源和输运机制研究更为薄弱。因此,本文基于琼东南陆架泥质区 X2 站柱状沉积物的粒度、Sr—Nd 同位素、常量元素和 AMS¹⁴C 等分析,与潜在物源区进行对比,以期揭示该区中全新世以来的物质来源和输运机制。

2 区域背景

海南岛现代气候受热带季风影响,全岛年平均降水量 960~2 140 mm^[18]。其地势以中部五指山为最高,向四周急剧下降,岛内上百条河流每年携带约 4×10^6 t 沉积物呈辐射状独立直流入海^[19]。此外,海南岛邻近海域也有诸多河流汇入南海。南海北部发育复杂的洋流系统,主要包括:表层洋流、深水洋流、以及局部分布的华南近岸流(图 1)。其中,表层洋流在北部陆架和上陆坡区域随季风方向的转变而反向,靠近陆地的华南近岸流不随季节的变化而改变;深水洋流由吕宋海峡进入南海后,大致沿 2 000~2 500 m 深度逆时针方向流动,不具季节性变化^[17]。

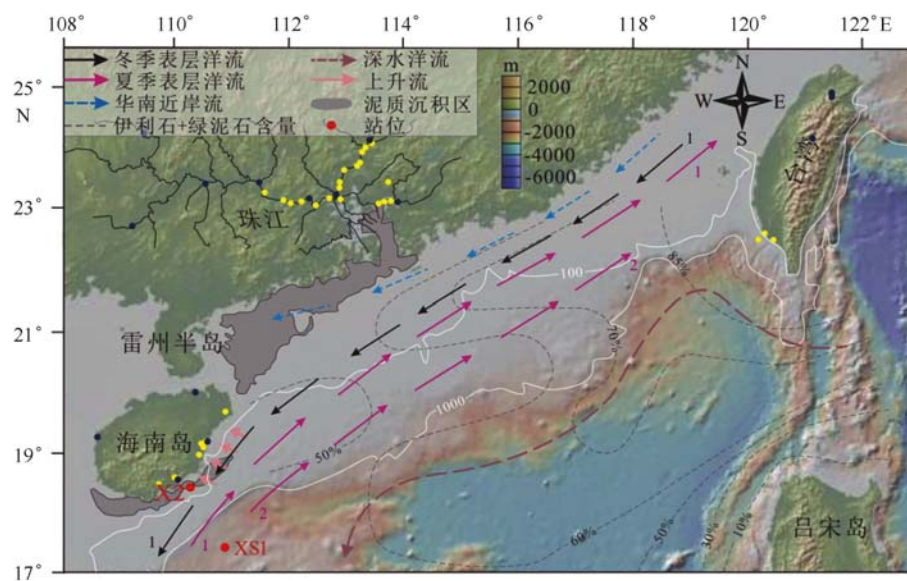


图 1 南海北部流系和站位图

Fig. 1 The ocean currents in the northern South China Sea and core locations

流系:1. 广东沿岸流;2. 南海暖流。泥质区分布引自文献[15]。流系和小于 $2 \mu\text{m}$ 沉积物中伊利石+绿泥石含量(%)等值线引自文献[17]。蓝色实心圆点代表各潜在物源区 Sr—Nd 同位素数据样品站位,黄色实心圆点代表各潜在物源区化学数据样品站位。其中台湾岛沉积物化学数据引自文献[20],Sr—Nd 同位素数据引自文献[21],珠江沉积物化学和 Sr—Nd 同位素数据引自文献[22],海南岛沉积物 Sr—Nd 同位素数据引自文献[3]。XS1 站位引自文献[23]

Numbers for surface current: 1. Guangdong Coastal Current; 2. SCS Warm Current. Distribution of the muddy depositional areas cite reference [15]. The current systems and content contours of illite+chlorite of sediment ($< 2 \mu\text{m}$) cite reference [17]. The blue dots represent locations of Sr—Nd isotope data samples from all potential provenances, yellow dots represent locations of chemical data samples from all potential provenances. Data of Taiwan sediment cite reference [20], data of Sr—Nd isotope cite reference [21], chemical data and Sr—Nd isotope data of Pearl River cite reference [22], Sr—Nd isotope data of Hainan rivers cite reference[3]. XS1 cite reference[23]

3 材料与方法

3.1 样品来源

研究所用的 X2 站柱状样于 2012 年 9 月利用重

力取样器采自于琼东南陆架区($18^{\circ}25.753' \text{N}$, $110^{\circ}17.079' \text{E}$,水深 77 m,图 1),岩心长度 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”。在实验室

内对该岩心进行了详细描述和分样。

3.2 分析方法

粒度测试在中国科学院海洋研究所完成,取样间隔为 2 cm,测试样品 120 个,测试前经 30%双氧水和 1 mol/L 盐酸处理以去除有机质、生物贝壳和有孔虫,测试仪器为法国产 Cilas 940L 激光粒度仪,测试范围为 0.5~2 000 μm,重复测试的相对误差小于 2%。样品粒度分级按照黏土(小于 4 μm)、粉砂(4~63 μm)、砂(63~2 000 μm)划分^[24]。

沉积物 Sr—Nd 同位素测试前,筛选出样品中小于 63 μm 组分,分别经 15%双氧水和 25%醋酸处理去除有机质和钙质,60℃烘干后研磨至 200 目以下,在国家海洋局第一海洋研究所地质综合测试实验室利用多接收电感耦合等离子体质谱(Nu Plasma HR—MC—ICP—MS)进行测试。取样间隔约为 20 cm,

测试样品 11 个。 ϵ_{Nd} 的计算公式: $\epsilon_{Nd} = [(^{143}Nd/^{144}Nd_{sample}) / (^{143}Nd/^{144}Nd_{CHUR}) - 1] \times 10\ 000$,其中, $^{143}Nd/^{144}Nd_{sample}$ 为实际测得的 $^{143}Nd/^{144}Nd$ 值, $^{143}Nd/^{144}Nd_{CHUR} = 0.512\ 638$ 为球粒陨石的 $^{143}Nd/^{144}Nd$ 值(CHUR 指球粒陨石均一储库)^[25]。

沉积物常量元素测试样品经 30%双氧水和 1 mol/L 盐酸处理去除有机质、生物贝壳和有孔虫,60℃烘干后研磨至 200 目以下,在中国科学院海洋研究所使用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP—OES)进行测试,使用标准样品 GBW07315、GBW07316、BCR-2、BHVO-2 做质量监控。测定结果在误差允许范围内(表 1)。取样间隔为 4 cm,测试样品 60 个。为方便物源对比,对海南岛河流表层沉积物样品进行了测试,样品个数为 10 个(图 1)。

表 1 元素测试值与标准值对比

Tab. 1 Certified and measured values of element concentrations in the standard reference materials									
		Al ₂ O ₃ /%	CaO/%	TFe ₂ O ₃ /%	K ₂ O/%	MgO/%	MnO/%	Na ₂ O/%	P ₂ O ₅ /%
GBW07315	测试值	11.37	5.75	5.89	2.32	3.01	0.59	4.4	0.48
	标准值	11.41±0.22	5.74±0.22	5.93±0.16	2.32±0.11	3.02±0.10	0.59±0.03	4.43±0.20	0.48±0.03
GBW07316	测试值	8.21	22.5	4.33	1.66	2.18	0.454	3.72	0.37
	标准值	7.7±0.3	22.6±0.6	3.81±0.14	1.61±0.12	2.04±0.07	0.40±0.02	3.75±0.14	0.33±0.01
BCR-2	测试值	13.8	6.87	14.8	1.78	3.71	0.218	3.05	0.374
	标准值	13.5±0.2	7.12±0.11	13.8±0.2	1.79±0.05	3.59±0.05	0.152±0.006	3.16±0.11	0.35±0.02
BHVO-2	测试值	14.2	11.2	13.6	0.534	7.58	0.189	2.2	0.283
	标准值	13.5±0.2	11.4±0.2	12.3±0.2	0.52±0.01	7.23±0.12	0.129±0.004	2.22±0.08	0.27±0.02

X2 站 4 个 AMS¹⁴C 年代测试在美国 Beta 实验室完成。原始测年数据利用 CALIB 7.0.2 软件^[26]进行日历年龄校正(现代年龄数据用(−23±52) a 的碳储库年龄进行校正,7.5~5.6 ka BP 之间的数据用(151±85) a 的碳储库年龄进行校正^[27]),其他深度年代数据通过内插或是外推获得(本文所指的年龄均为日历年龄)。

4 结果

4.1 年代结果

依据 AMS¹⁴C 测年结果(表 2),结合沉积速率线性外插法获得该柱状沉积物底部 240 cm 的年龄约为 7.6 ka BP。建立了年代与深度的关系,可以看出,该站位沉积速率较为稳定,约为 30 cm/ka(图 2)。

表 2 X2 站 AMS¹⁴C 年龄数据

Tab. 2 AMS ¹⁴ C dating of core X2					
测试序号	层位/cm	材料	¹³ C/ ¹² C	AMS ¹⁴ C 年龄/a BP	日历年龄/(cal a BP, 2σ)
350316	36~38	底栖混合种有孔虫	−0.2‰	2 120±30	1 720(1 569~1 872)
346831	124~126	底栖混合种有孔虫	−0.6‰	4 080±30	4 159(3 790~4 348)
380798	172~176	底栖混合种有孔虫	−0.4‰	5 560±30	5 774(5 585~5 962)
346832	204~206	底栖混合种有孔虫	−1.0‰	6 350±30	6 642(6 423~6 860)

4.2 粒度特征

X2 站沉积物平均粒径在 120 cm 处发生了明显的变化,据此可将柱状样分为上(A2 段,120~0 cm)、下(A1 段,240~120 cm)两个沉积地层单元(图 2)。A1 段沉积物平均粒径为 $20.34\ \mu\text{m}$,主要为黏土质粉砂,黏土、粉砂、砂的平均含量分别为 20%、76%、4%。

A2 段沉积物平均粒径为 $54.75\ \mu\text{m}$,主要为粉砂质砂,黏土、粉砂、砂平均含量分别为 11%、44%、45%。A2 段较 A1 段沉积物平均粒径明显变粗,表明 X2 站沉积环境在 120 cm(约 4.0 ka BP)以上发生了显著的变化。

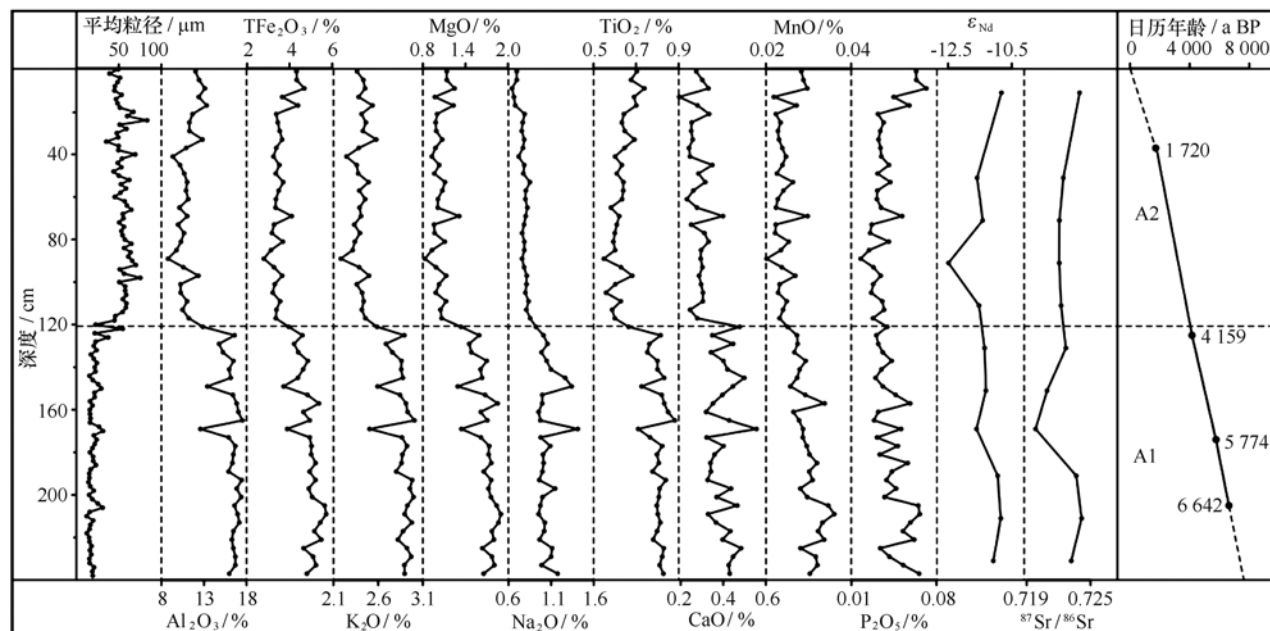


图 2 X2 站平均粒径、常量元素、Sr—Nd 同位素和年代控制点

Fig. 2 Vertical distributions of mean grain size, major elements, Sr—Nd isotopic compositions, and AMS¹⁴C dating of core X2

4.3 Sr—Nd 同位素特征

X2 站沉积物⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 变化范围 0.709 34~0.724 16,平均值为 0.721 38;¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 变化范围为 0.511 998~0.512 083,平均值为 0.512 053; ϵ_{Nd} 变化范围为 -12.484 4~-10.826 4,平均值为 -11.361 9。⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 与 ϵ_{Nd} 除异常点外,总体变化幅度不大(图 2)。

4.4 常量元素特征

X2 站柱状沉积物中常量元素主要由 Al_2O_3 (13.635%)、 TFe_2O_3 (4.197%)、 K_2O (2.642%)、 MgO (1.367%)、 Na_2O (0.924%)、 TiO_2 (0.716%)、 CaO (0.347%)、 P_2O_5 (0.039%)、 MnO (0.027%) 等 9 种组成。除 P_2O_5 之外,其他 8 种常量元素含量随深度的变化趋势类似,均在 120 cm 处发生了突变。A1 段各常量元素含量普遍高于 A2 段,其中在 20~0 cm 处除 K_2O 和 Na_2O 降低外,其他各元素均有不同程度的增高,特别是 TFe_2O_3 、 MnO 和 P_2O_5 明显升高(图 2)。

5 讨论

大量研究表明,海南岛以东的南海北部地区主要接受珠江、台湾岛以及由洋流搬运而来的吕宋岛沉积物^[28-30]。其中珠江作为注入南海北部最大的河流之一,现代平均每年向南海输送 $69 \times 10^6\ \text{t}$ 悬浮物质^[31]。虽然台湾的山区河流汇水区面积很小,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,仅台湾西南部主要河流现代平均每年向南海的直接输沙量就达 $187 \times 10^6\ \text{t}$ ^[32]。现代红河平均每年向北部湾输送 $100 \times 10^6 \sim 130 \times 10^6\ \text{t}$ 沉积物,但是自全新世以来这些沉积物主要沉积在三角洲海岸处^[23,33],再者由于受到海南岛的阻隔,红河来源的沉积物很难到达海南岛的东侧^[34],而吕宋岛入海物质主要分布于其西北海域,难以穿越深水盆地进入南海北部陆坡甚至陆架海域^[35]。长江沉积物对南海的贡献一直存在争议^[36-37],部分研究结果表明,长江

现代物质难以越过台湾海峡进入南海^[38],因此推测,其难以到达数千千米外的南海西部(X2站)。因此,本文不考虑红河、吕宋岛和长江的物质影响。

长期以来,前人研究多侧重于大江大河对海洋沉积物的贡献^[9,39-41],对小型河流的重视程度相对不足,但是研究表明,小型河流对海洋沉积物的贡献是不容忽视的^[42-43]。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,从而也可能为海南岛周边海域提供一定的沉积物质^[19]。然而,到目前为止,关于海南岛物质对邻近海域贡献的研究仍然较少^[5]。

5.1 Sr-Nd 同位素物源示踪

以放射性成因的 Sr、Nd 同位素为代表的同位素体系有两个鲜明特征,即源区示踪和长周期时标,相比之下,以元素地球化学反演理论为主的方法则具有机制示踪和短周期时标的特点^[44]。与¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 主要指示源区母岩相比,⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值还可能受到风化过程和分选作用的影响,但二者的联用仍是判断海底混合源沉积物物源属性的有效“成因指纹”,目前 ϵ_{Nd} 及⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值被广泛应用于多物源示踪识别中^[3,45]。在 ϵ_{Nd} -⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 交会图中,X2 站位于珠江、海南和台湾之间(图 3),显示了 X2 站沉积物可能具有以上三端元混源的特性。

5.2 常量元素物源示踪

利用 SPSS19.0 软件计算了 9 种常量元素与黏土(小于 4 μm)、粉砂(4~63 μm)、砂(大于 63 μm)的百分含量以及平均粒径的相关性,结果表明(表 3),9 种

常量元素与黏土和粉砂含量呈正相关,与砂含量和平均粒径呈负相关,说明这 9 种常量元素趋于赋存在黏土和粉砂中,符合“元素的粒度控制律”^[46],而沉积物粒径主要反映了水动力强弱,说明水动力对该区域元素的迁移及富集具有重要的作用。化学性质较稳定的 TFe₂O₃、Al₂O₃、K₂O、MgO 和 TiO₂ 之间相关系数达到了 0.9 以上,说明以上 5 种元素应该具有相同或相似的物源。

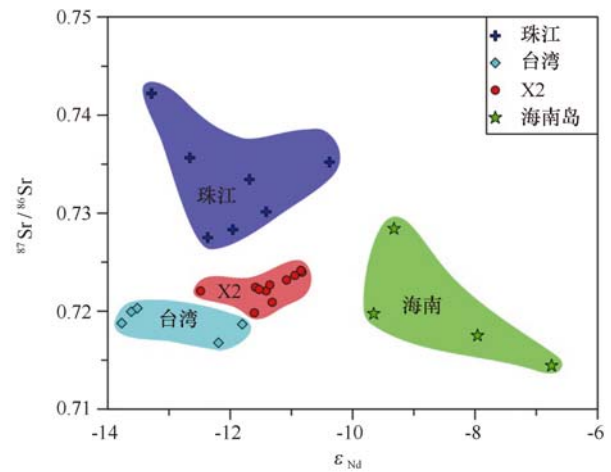


图 3 X2 站及各潜在物源区 Sr-Nd 同位素组成
Fig. 3 Sr-Nd isotopic composition of sediments from core X2 and potential provenances

台湾河流数据引自文献[21],珠江数据引自文献[22],海南岛
河流数据引自文献[3]
Data of Taiwan rivers cite reference [21], data of Pearl River cite
reference [22], data of Hainan rivers cite reference [3]

表 3 X2 站沉积物常量元素以及粒度相关性
Tab. 3 Correlations between major element and grain size in core X2

	小于 4 μm	4~63 μm	大于 63 μm	平均粒径 /μm	Al ₂ O ₃	CaO	TFe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅
4~63 μm	0.89											
大于 63 μm	-0.93	-0.99										
平均粒径/μm	-0.93	-0.98	0.99									
Al ₂ O ₃	0.93	0.90	-0.92	-0.91								
CaO	0.63	0.73	-0.72	-0.69	0.60							
TFe ₂ O ₃	0.85	0.82	-0.85	-0.84	0.93	0.55						
K ₂ O	0.9	0.90	-0.92	-0.90	0.98	0.61	0.90					
MgO	0.90	0.91	-0.93	-0.92	0.96	0.67	0.96	0.96				
MnO	0.73	0.73	-0.74	-0.74	0.81	0.56	0.94	0.77	0.89			
Na ₂ O	0.68	0.81	-0.80	-0.76	0.67	0.83	0.53	0.70	0.70	0.51		
P ₂ O ₅	0.36	0.30	-0.32	-0.32	0.41	0.27	0.64	0.32	0.48	0.74	0.12	
TiO ₂	0.92	0.87	-0.90	-0.89	0.98	0.61	0.91	0.95	0.93	0.78	0.67	0.42

A—CN—K 三角图经常被用于判断沉积物源岩成分、化学风化程度和分选作用等^[47-49]。X2 站沉积物 A1 段和 A2 段在 A—CN—K 图中的投点分为截然不同的两部分(图 4),但均处于蒙脱石—伊利石基线附近(该基线处 CIA 值为 75,反映中等的化学风化程度;CIA 为化学蚀变指数),其中 A1 段的部分层位和 A2 段大部分层位位于蒙脱石—伊利石基线之下,表明除长石之外还有其他富铝硅酸盐矿物存在。A1 段较 A2 段含有较高的 Al_2O_3 和较少的 K_2O ,并且 A2 段更接近于斜长石—钾长石基线(该基线处 CIA 值为 50,反映低等的化学风化程度),这可能是由于分选作用导致不同层位之间长石和黏土矿物含量不同

所致,即 A2 段平均粒径较大,含有较多的长石,A1 段平均粒径较小,含有较多的细粒黏土矿物。A1 段以几乎与 A—CN 平行的趋势向 A—K 边靠近,而远离钾长石—斜长石基线,风化趋势与 Nesbitt 和 Young^[50]所预测的理论风化趋势线相吻合,其可能是由于与钾长石和石英相比,斜长石较易风化,Ca、Na 比 K 更易被淋滤,从而生成高岭石^[49]。因此,推测 X2 站 A1 段不同层位之间化学组成的差异主要由风化作用所致,而 A2 段风化趋势线与理论风化趋势线相交,结合 A2 段沉积物粒度较大(图 2),推测 A2 段期间水动力较强,分选作用对其沉积物化学组成产生了一定的影响。

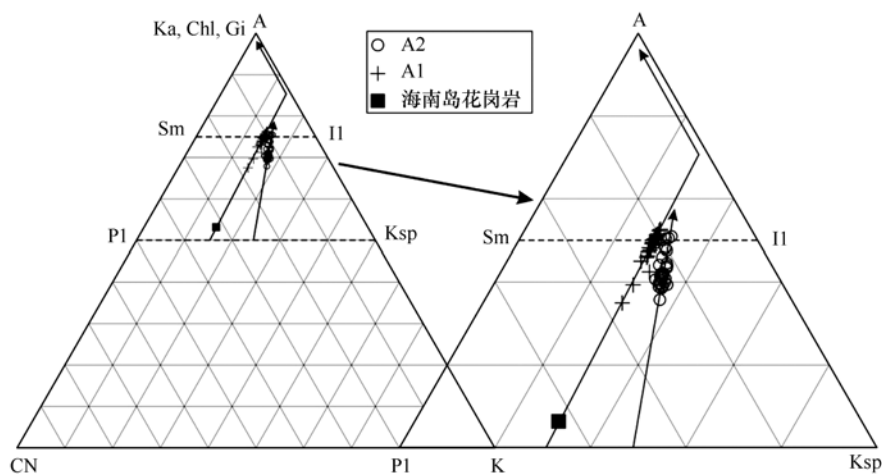


图 4 X2 站和海南岛花岗岩 A—CN—K 图

Fig. 4 A—CN—K diagram of core X2 and granite of Hainan Island

Ka. 高岭石;Chl. 绿泥石;Gi. 三水铝土;Sm. 蒙脱石;Il. 伊利石;Pl. 斜长石;Ksp. 钾长石;A. Al_2O_3 ;

CN. $\text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O}$, CaO^* 表示样品硅酸盐中的 CaO ; K. K_2O 。海南岛花岗岩数据引自文献^[51]

Ka. kaolinite; Chl. chlorite; Gi. gibbsite; Sm. Smectite; Il. illite; Pl. plagioclase; Ksp. K-feldspar; A. Al_2O_3 ;

CN. $\text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O}$, CaO^* represents CaO in the silicate; K. K_2O . Data of granite of Hainan Island cite reference ^[51]

在 A—CN—K 图中可见,A1 段风化趋势反向延长线恰好穿过海南岛花岗岩(图 4),表明海南岛花岗岩很可能是 X2 站 A1 段的主要源岩,而 A2 段沉积物粒度较大,其中大于 $63\ \mu\text{m}$ 的砂含量平均为 45%,而这也只能由较近的物质(海南岛物质)输入造成,进而推测 A2 段期间 X2 站主要物源区同样为海南岛。因此,虽然海南岛河流入海物质相对较少^[19],但其距离研究站位较近(图 1),海南岛河流对邻近陆架区的贡献理应得到一定的重视^[5]。

如表 3 所示, TiO_2 、 Al_2O_3 、 TFe_2O_3 、 MgO 四者之间均呈极显著相关,相关系数均在 0.9 以上,且 Ti 元素在边缘海沉积物中一般不参与生物介质,基本代表

碎屑来源物质^[52],因此这 4 种元素代表相同来源的碎屑物质,可以用来示踪 X2 站沉积物来源。典型化学组分之间的相互关系一定程度上反映出沉积物的性质,但 X2 站各元素与平均粒径相关性较大(表 3),因此需要通过元素比值淡化沉积物粒度对元素丰度的影响,且元素比值用以示踪物源已较为成熟,并取得了一系列成果^[53-54]。在 $\text{TiO}_2/\text{MgO}-\text{TFe}_2\text{O}_3/\text{MgO}$ 、 $\text{MgO}/\text{TiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 散点图中(图 5),X2 站沉积物与海南岛和台湾较为相似,而与珠江物质差别较大,其中 A1 段处于海南岛和台湾之间,A2 段则主要靠近海南岛,且向珠江方向偏移。这似乎表明,X2 站物质主要来源于海南岛,其次是台湾,而珠江贡

献可能较小。其中 X2 站在 A1 段沉积物应该主要来源于海南岛和台湾, A2 段沉积物主要来源于海南岛, 而珠江对 A2 段可能有一定影响。

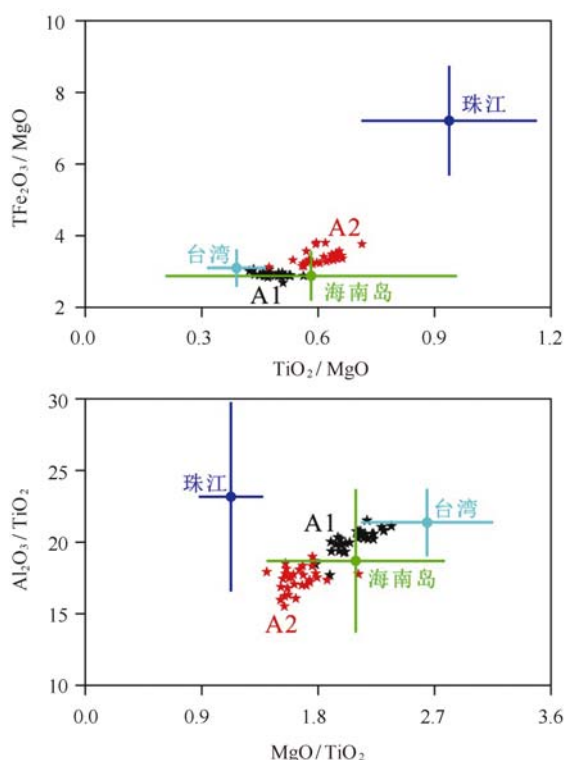


图5 X2 站及各潜在物源区 $\text{TiO}_2/\text{MgO}-\text{TFe}_2\text{O}_3/\text{MgO}$ 对比图(a), $\text{MgO}/\text{TiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 对比图(b)
Fig. 5 Discrimination plot of TiO_2/MgO vs $\text{TFe}_2\text{O}_3/\text{MgO}$ (a) and MgO/TiO_2 vs $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ (b) in core X2 and potential provenances

台湾数据引自文献[20], 珠江数据引自文献[22]

Data of Taiwan rivers cite reference [20], data of Pearl River cite reference [22]

5.3 物质运输机制

综合沉积物粒度、Sr—Nd 同位素和常量元素分析认为, X2 站物质主要来自于海南岛, 其次是台湾, 珠江贡献相对较小, 4.0 ka BP 以来海南岛粗粒物质贡献较此前变大。X2 站邻近海南岛, 受季节性降雨和地形的影响, 海南岛东部河流可以直接入海, 从而为 X2 站提供一定量的物质。Liu 等^[17]发现由台湾提供的伊利石和绿泥石分别在冬季广东沿岸流和深水洋流的作用下呈两个“舌形”向西南方向运移(图 1)。因此, 虽然距离 X2 站较远, 但是台湾物质可以在冬季广东沿岸流的作用下向西南方向运移。近期的研究发现, 台湾物质在深水洋流作用下也可以输送到上千千米以外的西沙海槽(XS1 站, 图 1)^[23], 这也进一步

印证了台湾物质对南海西北部陆架和陆坡的贡献。7.6~4.0 ka BP 期间, 珠江河流物质主要在河口内(内古海湾)堆积充填^[55-56], 随着前期沉积物的充填, 三角洲沉积空间不断减小, 河流下泄的沉积物被输运到外海的比例不断增加。因此, 4.0 ka BP 以来, X2 站沉积物略向珠江倾斜, 这可能对应了三角洲的前展和珠江物质的向外海输运。由于珠江属于少沙型河流^[57], 其入海物质主要沉积于珠江口至海南岛东北侧之间^[58], 并被局限于沿海陆架区(水深小于 50 m)^[59], 在珠江口至雷州半岛之间形成了一条平行海岸线的全新世泥质条带^[9, 15, 59], 因此, 珠江物质较难到达琼东南陆架区。近 4.0 ka BP 以来, X2 站沉积物不同来源物质的贡献率发生变化, 这可能是由于近 4.0 ka 以来的气候变化或者人类活动增强所致^[60-62], 这有待进一步研究。

6 结论

(1) 根据常量元素含量和粒度曲线变化特征, X2 站柱状沉积物以 120 cm 为界可划分为上(A2 段, 120~0 cm, 4.0~0 ka BP)、下(A1 段, 240~120 cm, 7.6~4.0 ka BP)两个沉积地层单元, A2 段较 A1 段沉积物平均粒径变粗, 已测的 9 种常量元素含量减少。⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 与 ϵ_{Nd} 除异常点外, 总体变化幅度不大。

(2) X2 站沉积物主要来源于海南岛, 其次是台湾, 而珠江贡献较小。A1 段(7.6~4.0 ka BP)主要来源于海南岛和台湾, A2 段(4.0~0 ka BP)主要来源于海南岛, 其次珠江物质可能也有一定的影响。该研究结果表明世界级大河(如珠江)对南海北部陆架区的贡献以前可能被高估, 而山溪型河流(如台湾岛、海南岛等河流)的贡献却可能被低估, 日后研究中应该重视小型河流对陆架区的物质贡献。

(3) 台湾物质可以在冬季广东沿岸流的作用下向西南方向运移达上千千米以上, 而在深水洋流的作用下, 台湾物质也可以输送到上千千米以外的西沙海槽(XS1 站), 因此, 台湾物质对南海西北部陆架和陆坡的贡献应当引起足够的重视。

致谢: 感谢在南海 X2 站岩心取样中全体船员、科考队员的大力支持; 同位素测试由国家海洋局第一海洋研究所完成; 年代测试由美国 Beta 实验室完成; 3 位审稿专家和编辑老师提供的宝贵意见和建议使本文得以很大提高, 谨致谢忱!

参考文献:

- [1] 张功成,王璞珺,吴景富,等. 边缘海构造旋回:南海演化的新模式[J]. 地学前缘,2015,22(3):27—37.
Zhang Gongcheng, Wang Pujun, Wu Jingfu, et al. Tectonic cycle of marginal oceanic basin: a new evolution model of the South China Sea[J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(3): 27—37.
- [2] Milliman J D, Farnsworth K L. River discharge to the coastal ocean: A Global Synthesis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013: 1—382.
- [3] Wan S M, Toucanne S, Clift P D, et al. Human impact overwhelms long-term climate control of weathering and erosion in southwest China[J]. Geology, 2015, 43(5): 439—442.
- [4] Clift P D, Wan S M, Blusztajn J. Reconstructing chemical weathering, physical erosion and monsoon intensity since 25 Ma in the northern South China Sea: A review of competing proxies[J]. Earth-Science Reviews, 2014, 130: 86—102.
- [5] Hu B Q, Li J, Cui R Y, et al. Clay mineralogy of the riverine sediments of Hainan Island, South China Sea: Implications for weathering and provenance[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2014, 96: 84—92.
- [6] 陆红锋,刘坚,吴庐山,等. 南海天然气水合物钻孔自生黄铁矿硫同位素特征[J]. 地学前缘,2015,22(2):200—206.
Lu Hongfeng, Liu Jian, Wu Lushan, et al. Sulfur isotopes of authigenic pyrites in the sediments of gas-hydrate drilling sites, Shenhu area, South China Sea[J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(2): 200—206.
- [7] Liu J G, Xiang R, Chen Z, et al. Sources, transport and deposition of surface sediments from the South China Sea[J]. Deep-Sea Research Part I, 2013, 71: 92—102.
- [8] Wei G J, Li X H, Liu Y, et al. Geochemical record of chemical weathering and monsoon climate change since the early Miocene in the South China Sea[J]. Paleogeography, 2006, 21(4), doi:10.1029/2006PA001300.
- [9] Liu Y L, Gao S, Wang Y P, et al. Distal mud deposits associated with the Pearl River over the northwestern continental shelf of the South China Sea[J]. Marine Geology, 2014, 347: 43—57.
- [10] Xu F J, Li A C, Li T G, et al. Rare earth element geochemistry in the inner shelf of the East China Sea and its implication to sediment provenances[J]. Journal of Rare Earths, 2011, 29(7): 702—709.
- [11] Wang S H, Zhang N, Chen H, et al. The surface sediment types and their rare earth element characteristics from the continental shelf of the northern South China Sea[J]. Continental Shelf Research, 2014, 88: 185—202.
- [12] Wang K, Zheng H B, Tada R, et al. Millennial-scale East Asian Summer Monsoon variability recorded in grain size and provenance of mud belt sediments on the inner shelf of the East China Sea during mid-to late Holocene[J]. Quaternary International, 2014, 349: 79—89.
- [13] Su J, Pohlmann T. Wind and topography influence on an upwelling system at the eastern Hainan coast[J]. Journal of Geophysical Research, 2009, 114(C6), doi:10.1029/2008JC005018.
- [14] Jing Z Y, Qi Y Q, Hua Z L, et al. Numerical study on the summer upwelling system in the northern continental shelf of the South China Sea[J]. Continental Shelf Research, 2009, 29(2): 467—478.
- [15] 石学法. 中国近海海洋—海洋底质[M]. 北京:海洋出版社,2014:1—561.
Shi Xuefa. China ocean offshore-ocean bottom material[M]. Beijing: China Ocean Press, 2014: 1—561.
- [16] Huang D K, Du J Z, Deng B, et al. Distribution patterns of particle-reactive radionuclides in sediments off eastern Hainan Island, China: Implications for source and transport pathways[J]. Continental Shelf Research, 2013, 57: 10—17.
- [17] Liu Z F, Colin C, Li X J, et al. Clay mineral distribution in surface sediments of the northeastern South China Sea and surrounding fluvial drainage basins: Source and transport[J]. Marine Geology, 2010, 277(1/4): 48—60.
- [18] Long X Y, Ji J F, Balsam W. Rainfall-dependent transformations of iron oxides in a tropical saprolite transect of Hainan Island, South China: Spectral and magnetic measurements[J]. Journal of Geophysical Research, 2011, 116(F3), doi:10.1029/2010JF001712.
- [19] Zhang J, Wang D R, Jennerjahn T, et al. Land-sea interactions at the east coast of Hainan Island, South China Sea: A synthesis[J]. Continental Shelf Research, 2013, 57: 132—142.
- [20] Selvaraj K, Chen C T A. Moderate chemical weathering of subtropical Taiwan: Constraints from solid-phase geochemistry of sediments and sedimentary rocks[J]. The Journal of Geology, 2006, 114(1): 101—116.
- [21] Lan C Y, Lee C S, Shen J J S, et al. Nd—Sr isotopic composition and geochemistry of sediments from Taiwan and their implications[J]. Western Pacific Earth Sciences, 2002, 2(2): 205—222.
- [22] Liu Z F, Colin C, Huang W, et al. Climatic and tectonic controls on weathering in south China and Indochina Peninsula: Clay mineralogical and geochemical investigations from the Pearl, Red, and Mekong drainage basins[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2007, 8(5): 1—18.
- [23] Liu J G, Clift P D, Yan W, et al. Modern transport and deposition of settling particles in the northern South China Sea: Sediment trap evidence adjacent to Xisha Trough[J]. Deep-Sea Research Part I, 2014, 93: 145—155.
- [24] Wentworth C K. A scale of grade and class terms for clastic sediments[J]. The Journal of Geology, 1922, 30(5): 377—392.
- [25] Hamilton P J, Onions R K, Bridgwater D, et al. Sm—Nd studies of Archean metasediments and metavolcanics from West Greenland and their implications for the Earth's early history[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1983, 62(2): 263—272.
- [26] Hughen K A, Baillie M G L, Bard E, et al. Marine04 marine radiocarbon age calibration, 0—26 cal kyr BP[J]. Radiocarbon, 2004, 46(3): 1059—1086.
- [27] Yu K, Hua Q, Zhao J, et al. Holocene marine ^{14}C reservoir age variability: Evidence from ^{230}Th -dated corals in the South China Sea[J]. Paleocene

- ography, 2010, 25(3), doi:10.1029/2009PA001831
- [28] Liu Z F, Colin C, Huang W, et al. Clay minerals in surface sediments of the Pearl River drainage basin and their contribution to the South China Sea [J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(8): 1101—1111.
- [29] Shao L, Qiao P J, Pang X, et al. Nd isotopic variations and its implications in the recent sediments from the northern South China Sea [J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(2): 311—317.
- [30] 徐方建, 陈世悦, 操应长, 等. 近 4 400 年来南海北部陆架沉积地球化学记录及其地质意义 [J]. 沉积学报, 2010, 28(6): 1198—1205.
Xu Fangjian, Chen Shiyue, Cao Yingchang, et al. Geochemical records and geological significance of the continental shelf sediments in the northern South China Sea since 4 400 a [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(6): 1198—1205.
- [31] Milliman J D, Meade R H. World-wide delivery of river sediment to the oceans [J]. The Journal of Geology, 1983, 91(1): 1—21.
- [32] Liu Z F, Li X J, Colin C, et al. A high-resolution clay mineralogical record in the northern South China Sea since the Last Glacial Maximum, and its time series provenance analysis [J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(35): 4058—4068.
- [33] Tanabe S, Saito Y, Vu Q L, et al. Holocene evolution of the Song Hong (Red River) delta system, northern Vietnam [J]. Sedimentary Geology, 2006, 187(1/2): 29—61.
- [34] Clift P D, Long H V, Hinton R, et al. Evolving east Asian river systems reconstructed by trace element and Pb and Nd isotope variations in modern and ancient Red River-Song Hong sediments [J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2008, 9(4), doi:10.1029/2007GC001867
- [35] Liu J G, Xiang R, Chen M H, et al. Influence of the Kuroshio current intrusion on depositional environment in the northern South China Sea; Evidence from surface sediment records [J]. Marine Geology, 2011, 285(1/4): 59—68.
- [36] Liu Z F, 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.
- [37] Wan S M, Li A C, 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(3/4): 561—582.
- [38] Xu K H, Milliman J D, Li A C, et al. Yangtze- and Taiwan-derived sediments on the inner shelf of East China Sea [J]. Continental Shelf Research, 2009, 29(18): 2240—2256.
- [39] Liu J P, Xue Z, Ross K, et al. Fate of sediments delivered to the sea by Asian large rivers: Long-distance transport and formation of remote along-shore clinothems [J]. SEPM—The Sedimentary Record, 2009, 7(4): 4—9.
- [40] 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 [J]. Continental Shelf Research, 1985, 4(1/2): 37—45.
- [41] Yang Z S, Liu J P. A unique Yellow River-derived distal subaqueous delta in the Yellow Sea [J]. Marine Geology, 2007, 240(1/4): 169—176.
- [42] Milliman J D, Syvitski J P M. Geomorphic/tectonic control of sediment discharge to the ocean: The importance of small mountainous rivers [J]. The Journal of Geology, 1992, 100(5): 525—544.
- [43] Liu J P, Liu C S, Xu K H, et al. Flux and fate of small mountainous rivers derived sediments into the Taiwan Strait [J]. Marine Geology, 2008, 256(1/4): 65—76.
- [44] 周新华. 大陆岩石圈深部过程的多元同位素制约研究——以中国东部为例 [J]. 地球学报, 1997, 18(S): 1—2.
Zhou Xinhua. Multiple isotope constraint on deep processes of continental lithosphere: A case study in eastern China [J]. Acta Geoscientia Sinica, 1997, 18(S): 1—2.
- [45] Lupker M, France-Lanord C, Galy V, et al. Increasing chemical weathering in the Himalayan system since the Last Glacial Maximum [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2013, 365: 243—252.
- [46] 赵一阳. 中国海大陆架沉积物地球化学的若干模式 [J]. 地质科学, 1983(4): 307—314.
Zhao Yiyang. Some geochemical patterns of shelf sediments of the China Seas [J]. Scientia Geologica Sinica, 1983(4): 307—314.
- [47] Nesbitt H W, Young G M, McLennan S M, et al. Effects of chemical weathering and sorting on the petrogenesis of siliciclastic sediments, with implications for provenance studies [J]. The Journal of Geology, 1996, 104(5): 525—542.
- [48] Yang S Y, Li C X, Yang D Y, et al. Chemical weathering of the loess deposits in the lower Changjiang Valley, China, and paleoclimatic implications [J]. Quaternary International, 2004, 117(1): 27—34.
- [49] Nesbitt H W, Young G M. Formation and diagenesis of weathering profiles [J]. The Journal of Geology, 1989, 97(2): 129—147.
- [50] Nesbitt H W, Young G M. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1984, 48(7): 1523—1534.
- [51] 许德如, 梁新权, 陈广浩, 等. 海南岛中元古代花岗岩地球化学及成因研究 [J]. 大地构造与成矿学, 2001, 25(4): 420—433.
Xu Deru, Liang Xingquan, Chen Guanghao, et al. Research on the geochemistry and genesis of mesoproterozoic granites on Hainan Island [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2001, 25(4): 420—433.
- [52] Wei G J, Liu Y, Li X H, et al. High-resolution elemental records from the South China Sea and their paleoproductivity implications [J]. Paleoceanography, 2003, 18(2): 1054.
- [53] Yang S Y, Jung H S, Li C X. Two unique weathering regimes in the Changjiang and Huanghe drainage basins: geochemical evidence from river sediments [J]. Sedimentary Geology, 2004, 164(1): 19—34.
- [54] Yang S Y, Yim W W S, Huang G Q. Geochemical composition of inner shelf Quaternary sediments in the northern South China Sea with implica-

- tions for provenance discrimination and paleoenvironmental reconstruction[J]. *Global and Planetary Change*, 2008, 60(3): 207–221.
- [55] 韦惺, 吴超羽. 全新世以来珠江三角洲的地层层序和演变过程[J]. *中国科学: D 辑*, 2011, 41(8): 1134–1149.
Wei Xing, Wu Chaoyu. Holocene delta evolution and sequence stratigraphy of the Pearl River delta in South China[J]. *Science China (Series D)*, 2011, 41(8): 1134–1149.
- [56] 韦惺, 莫文渊, 吴超羽. 珠江三角洲地区全新世以来的沉积速率与沉积环境分析[J]. *沉积学报*, 2011, 29(2): 328–335.
Wei Xing, Mo Wenyuan, Wu Chaoyu. Analysis on the sedimentation rates and depositional environment of the Pearl River delta area since Holocene[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(2): 328–335.
- [57] 邵磊, 李献华, 韦刚健, 等. 南海陆坡高速堆积体的物质来源[J]. *中国科学: D 辑*, 2001, 31(10): 828–833.
Shao Lei, Li Xianhua, Wei Gangjian, et al. Provenance of a prominent sediment drift on the northern slope of the South China Sea[J]. *Science China (Series D)*, 2001, 31(10): 828–833.
- [58] Liu J G, Chen M H, Chen Z, et al. Clay mineral distribution in surface sediments of the South China Sea and its significance for in sediment sources and transport[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2010, 28(2): 407–415.
- [59] Ge Q, Liu J P, Xue Z, et al. Dispersal of the Zhujiang River (Pearl River) derived sediment in the Holocene[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 33(8): 1–9.
- [60] Yuan D X, Cheng H, Edwards R L, et al. Timing, duration, and transitions of the last interglacial Asian monsoon[J]. *Science*, 2004, 304(5670): 575–578.
- [61] Dykoski C A, Edwards R L, Cheng H, et al. A high-resolution absolute-dated Holocene and deglacial Asian monsoon record from Dongge Cave, China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 233(1/2): 71–86.
- [62] 吴文祥, 刘东生. 4 000 a B. P. 前后降温事件与中华文明的诞生[J]. *第四纪研究*, 2001, 21(5): 443–451.
Wu Wenxiang, Liu Dongsheng. 4 000 a B. P. event and its implication for the origin of ancient Chinese civilization[J]. *Quaternary Sciences*, 2001, 21(5): 443–451.

Sediment provenance of offshore mud area of the eastern Hainan Island in South China Sea since the Mid-Holocene

Yan Huimei¹, Tian Xu², Xu Fangjian¹, Hu Bangqi³, Yang Yaomin², Feng Jianwei¹, Li Anchun⁴,
Guo Chen⁵, Liu Zhaoqing¹

(1. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China; 2. National Deep Sea Center, Qingdao 266237, China; 3. Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environmental Geology, Ministry of Land and Resources, Qingdao 266071, China; 4. Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 5. School of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710000, China)

Abstract: The sediment provenances were discussed in this paper based on grain-size, Sr–Nd isotopes, major element (Al_2O_3 , TFe_2O_3 , K_2O , MgO , Na_2O , TiO_2 , CaO , P_2O_5 , and MnO) and AMS¹⁴C dating for core X2, which was retrieved from the offshore mud area of the eastern Hainan Island in the South China Sea (SCS). Results showed that core X2 can be divided into two sedimentary strata units (unit A1 and unit A2). Compared with unit A1 (240–120 cm, 7.6–4.0 ka BP), sediment mean grain size in unit A2 (120–0 cm, 4.0–0 ka BP) became coarser and the content of major elements decreased. In addition to the abnormal value, the trends of ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr and ϵ_{Nd} in core X2 were relatively stable. The sediments of core X2 were mainly derived from Hainan and Taiwan islands, and partly Pearl River. The sediments in unit A1 were primarily a mixture of Hainan and Taiwan islands. In unit A2, the sediments were mainly from Hainan Island, and partly Pearl River. The results suggested that the contribution of world-class river (i. e., the Pearl River) to the continental shelf of the northern SCS may be overestimated, while the influence of small rivers (i. e., Taiwan and Hainan islands) may be underestimated in the previous studies. Therefore, more attention should be paid to the contribution of small rivers to the continental shelf area in the future studies.

Key words: South China Sea; continental shelf; Holocene; grain size; major element; Sr–Nd isotopes; provenance