

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2015.04.007

南海西沙海槽 XH-CL16 柱状沉积物 稀土元素特征及其物源

傅飘儿, 庄畅, 刘坚, 陈道华, 张欣, 陈思海

(国土资源部 海底矿产资源重点实验室, 广州海洋地质调查局, 广州 510075)

摘要:西沙海槽是我国南海北部重要的天然气水合物勘探远景区。然而, 目前对西沙海槽区沉积物的物源分析仍然存在众多争议。对西沙海槽 XH-CL16 柱状沉积物的稀土元素地球化学分析, 显示该柱状沉积物的 ΣREE 介于 $131\sim 171\times 10^{-6}$ 之间, 表现为轻稀土相对富集, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 9.5, 具有明显的 Eu 负异常, δEu 值在 0.66~0.79 之间。其稀土元素配分模式显著区别于大洋玄武岩, 具有明显的陆壳特征, 并且该沉积物具有相似于珠江口沉积物、红河沉积物以及黄土的稀土元素配分形态, 暗示西沙海槽区沉积物主要为陆源沉积, 而且可能是多物源多方式传输的结果。此外, 通过该柱状沉积物中 CaCO_3 含量变化特征与同海域标准碳酸盐地层学时标的对比, 显示该柱状沉积物主要为 MIS3 期以来的沉积。而其中 MIS2 期沉积物表现为较 MIS1 和 MIS3 期沉积物更高的 ΣREE 和 Ti 含量, 暗示西沙海槽在 MIS2 期时有更多陆源组分的输入。

关键词: 稀土元素; 海洋沉积物; 物源; 南海; 西沙海槽

中图分类号: P736.4

文献标识码: A

文章编号: 0256-1492(2015)04-0063-09

南中国海(南海)是我国管辖海域中主要的深海区, 也是我国深海资源勘探和科学研究积累最为丰富的海域, 因此, 南海一直被作为我国深海研究的重要突破口^[1,2]。南海位于欧亚板块、菲律宾板块及印度洋板块三大板块交汇处, 是西太平洋最大的边缘海, 其独特的地理位置和复杂的构造环境形成了南海鲜明的区域性沉积特征^[3]。因此, 南海沉积和深海古环境研究也是国际海洋研究的热点之一^[2]。已有的研究指出南海沉积具有丰富的物质来源, 包括经河流输入的陆源物质、周缘火山及海底火山物质, 以及海洋自生物质等^[3]。然而, 由于南海不同区域的沉积物物源、物源区气候及沉积环境等因素存在较大差异导致各区域沉积物组成及化学特征均有所不同^[4-8]。因此, 对于南海各区域沉积特征还有待开展进一步的工作。

西沙海槽区地处南海北部, 是南海的重要组成部分, 也是我国海洋天然气水合物资源勘查的重要远景区^[9]。已有的研究表明, 西沙海槽区的沉积物主要形成于渐新世以来, 具有沉积速率快、沉积厚度大的特点^[10-12]。由于沉积物的组成特征主要受到构

造活动、源区地质背景、气候条件和沉积环境等因素的制约, 因此, 通过对沉积物的地球化学特征的解析可以反演其物质来源、古气候和古环境等关键信息。其中, 稀土元素(REE)作为一组具有相似的化学活动性及稳定性的微量元素组合, 在地表的风化、剥蚀、搬运、沉积和早期成岩作用等过程中通常不易发生不均衡的元素间分馏作用, 因而对揭示沉积物的物质来源、源区特征和环境气候等具有其独特的指示意义^[13-16]。

本文拟通过西沙海槽区 XH-CL16 柱状沉积物的精确稀土元素地球化学分析, 及该区末次间冰期以来的碳酸钙和 Ti 含量沉积变化特征的综合研究, 揭示西沙海槽区沉积物的物源及输送方式等特征, 进而限定该区域古海洋环境和气候变化。

1 区域地质

地处中国南海北部的西沙海槽, 位于海南岛与西沙群岛之间, 属琼东南盆地中部。西沙海槽主要呈东西向展布, 东西长约 350 km, 南北宽约 100 km^[17-18]。其海底地形地貌比较复杂, 水深变化范围较大(350~3 400 m), 根据地貌特征, 可进一步划分为北部斜坡、中部凹陷、南部隆起和东南凹陷等 4 个二级构造单元^[9]。西沙海槽为新生代沉积盆地, 其周缘的华南大陆、印支大陆、台湾岛和海南岛发育有

基金项目: 国土资源部海底矿产资源重点实验室开放基金 (KLMMR-2013-A-33)

作者简介: 傅飘儿(1984—), 女, 工程师, 主要从事海洋地球化学研究, E-mail: fupe@hotmail.com

收稿日期: 2014-09-20; **修订日期:** 2014-10-18. 张光威编辑

众多河流,如红河、珠江、韩江、高屏溪和曾文溪等,为西沙海槽输送了大量的碎屑陆源物质。因此,西沙海槽自形成以来接受了大量浅海相及海陆过渡相沉积,累计沉积厚度较大^[10-12]。

2 样品与方法

XH-CL16 钻孔位于南海北部西沙海槽(图 1),水深 2 449 m。该柱状沉积物总长 502 cm,岩性较为均一,主要由黏土质粉砂组成,局部为粉砂质黏土。对该柱样自顶部以 10 cm 为间距,连续取样 51 个用于地球化学分析。

稀土元素、CaCO₃ 及 Ti 含量分析均在广州海洋地质调查局实验测试所完成。稀土元素分析首先称取 0.1 g 样品于聚乙烯烧杯中,用 HCl+HClO₄+HF 混合试剂加热溶解,将溶液蒸干并用 1:1 HCl 溶液提取备用,分析在 Thermo X2 型电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)上完成,使用国家标准物质 GBW07309、GBW07314 和 GBW07315 监控,相对误差 < 2%^[19]。

CaCO₃ 含量采用 EDTA 容量法,称取 0.3 g 粉末样品用适量稀乙酸溶解,并加热至微沸,冷却过滤除去氯化钙,并调节滤液 pH 为 12,之后加入三乙醇胺溶液,用 EDTA 标准溶液滴定,相对误差 < 1%^[19-20]。TiO₂ 含量分析采用 X-射线荧光熔片法,使用的分析仪器为荷兰 PANalytical 公司 AX-IO5 型 X 射线荧光光谱仪,检测限 0.01 ~ 0.1 wt. %,精密度 RSD ≤ 2%,Ti 含量根据 TiO₂ 含量计算得到。

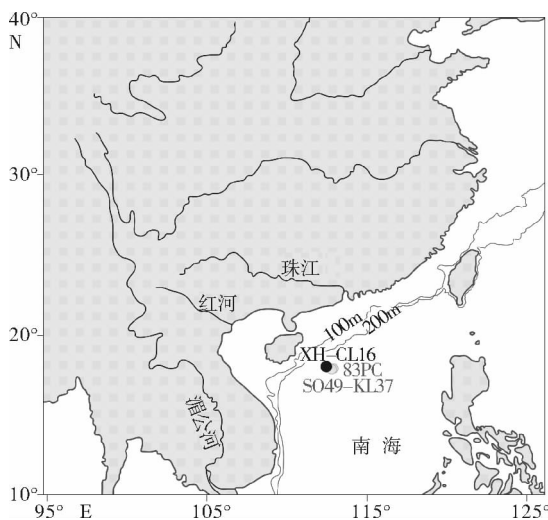


图 1 南海地理概况及取样位置(据文献[17]修改)

Fig. 1 Geographic map of the South China Sea and sample locations (after [17])

3 结果

XH-CL16 柱状沉积物中稀土元素总量(ΣREE)为 $(131\sim171)\times10^{-6}$ (表 1),表现为接近于上陆壳值($\Sigma\text{REE}=148\times10^{-6}$)^[21],并且与具有陆源特征的中国黄土(171×10^{-6})^[22]、珠江口沉积物(272×10^{-6})^[23]、红河沉积物(235×10^{-6})^[24]等稀土元素丰度接近,而明显区别于深海黏土和大洋中脊玄武岩中的稀土丰度(分别为 411 和 36.14×10^{-6})^[25-26]。在球粒陨石标准化稀土元素配分图(图 2)上,XH-CL16 不同深度的沉积物主要表现为轻稀土富集,重稀土含量较均一的右倾模式($(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}=8.7\sim10.8$,平均值为 9.5),同时,具有明显的 Eu 元素负异常($\delta\text{Eu}=\text{Eu}_{\text{N}}/(\text{Sm}_{\text{N}}+\text{Gd}_{\text{N}})$ 为 0.66 ~ 0.79,平均值为 0.71),Ce 元素无明显异常($\delta\text{Ce}=\text{Ce}_{\text{N}}/(\text{La}_{\text{N}}+\text{Pr}_{\text{N}})$ 约为 1)。西沙海槽 XH-CL16 柱状沉积物总体表现为与上陆壳一致的右倾稀土元素配分模式,而明显区别于大洋中脊玄武岩(图 2a)。

XH-CL16 柱状沉积物中 CaCO₃ 和 Ti 的含量分别为 11~31 wt. %和 $(2\,991\sim3\,321)\times10^{-6}$,随深度呈波动性变化(表 1)。表层(0~110 cm)沉积物中具有较高的 CaCO₃ 和较低的 Ti 含量,平均值分别为 25.6 wt. %和 $3\,234\times10^{-6}$ 。120 cm 以下的沉积物中 CaCO₃ 含量快速减小,最小值为 11.57 wt. %,而 Ti 含量快速增加,最大值为 $4\,052\times10^{-6}$ 。但到中下部层位(>250 cm)CaCO₃ 和 Ti 含量又分别缓慢增长或降低,并在 425 cm 处表现为较高的 CaCO₃ (27.24 wt. %)和较低的 Ti($3\,159\times10^{-6}$)。

4 讨论

4.1 主要的物质来源

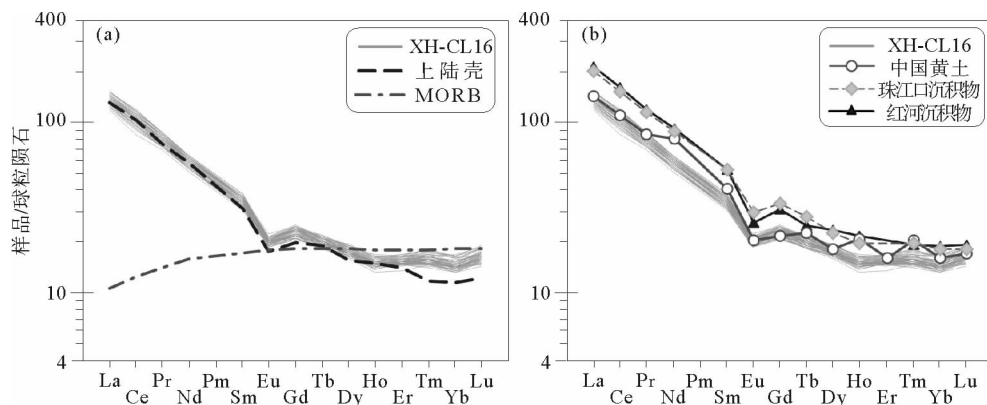
南海沉积物主要由陆源碎屑物质、海底火山物质和海洋自生物质等组成^[3,7-8]。然而,由于南海不同区域表现为不同的沉积物质组成特征,各区域的沉积物质来源目前仍然存在争议^[17,19,27-36]。沉积物中稀土元素的组成及配分形态主要受控于源岩成分,受风化剥蚀、搬运、水动力、沉积、成岩及变质等作用与因素的影响相对较小,因此,沉积物中的稀土元素组成特征通常能够反映其源区的性质^[13,15-16,36-39]。

表 1 南海西沙海槽 XH-CL16 柱状沉积物稀土元素组成
Table 1 Composition of REEs in the sediments from the Core XH-CL16

样品编号	深度 /cm	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE	(La/Yb) _N	δEu	CaCO ₃ /wt. %	Ti /×10 ⁻⁶
		/×10 ⁻⁶																		
XH-CL16-1	0~10	28.83	54.25	6.75	24.97	4.83	1.08	4.29	0.68	4.16	0.80	2.51	0.37	2.41	0.40	136.3	8.58	0.73	28.36	3 183
XH-CL16-2	10~20	27.91	51.96	6.54	24.06	4.65	1.08	4.20	0.68	4.09	0.78	2.43	0.40	2.31	0.40	131.5	8.67	0.74	30.09	3 081
XH-CL16-3	20~30	29.27	55.31	6.76	24.82	4.74	1.09	4.40	0.68	4.30	0.80	2.39	0.38	2.41	0.41	137.8	8.69	0.73	28.74	3 087
XH-CL16-4	30~40	29.09	55.67	6.79	25.07	4.83	1.17	4.30	0.70	4.18	0.81	2.42	0.37	2.41	0.37	138.2	8.64	0.79	26.23	3 267
XH-CL16-5	40~50	31.50	60.74	7.34	26.62	5.02	1.14	4.37	0.74	4.30	0.87	2.58	0.40	2.49	0.45	148.6	9.07	0.74	24.22	3 375
XH-CL16-6	50~60	30.18	58.34	6.99	25.85	4.89	1.15	4.25	0.74	4.33	0.84	2.46	0.40	2.40	0.38	143.2	9.03	0.77	22.70	3 351
XH-CL16-7	60~70	29.93	58.31	6.97	25.40	4.97	1.12	4.47	0.71	4.35	0.86	2.43	0.38	2.40	0.40	142.7	8.93	0.73	23.46	3 297
XH-CL16-8	70~80	31.40	60.58	7.24	26.70	5.02	1.09	4.43	0.71	4.21	0.83	2.46	0.39	2.48	0.42	148.0	9.10	0.71	22.96	3 321
XH-CL16-9	80~90	30.75	60.40	7.18	26.15	5.16	1.09	4.51	0.73	4.27	0.85	2.35	0.40	2.36	0.39	146.6	9.35	0.69	23.68	3 219
XH-CL16-10	90~100	30.04	58.43	6.94	25.00	4.77	1.08	4.30	0.68	4.18	0.81	2.40	0.37	2.36	0.42	141.8	9.14	0.73	26.60	3 135
XH-CL16-11	100~110	32.24	62.40	7.41	26.76	5.15	1.16	4.53	0.75	4.48	0.88	2.60	0.41	2.62	0.42	151.8	8.84	0.73	24.52	3 261
XH-CL16-12	110~120	33.05	64.63	7.73	27.54	5.46	1.14	4.80	0.75	4.46	0.85	2.61	0.43	2.72	0.43	156.6	8.73	0.68	23.14	2 991
XH-CL16-13	120~130	33.95	67.72	7.97	28.26	5.55	1.15	4.86	0.76	4.60	0.86	2.56	0.42	2.51	0.44	161.6	9.69	0.68	19.71	3 494
XH-CL16-14	130~140	35.72	72.42	8.25	29.46	5.79	1.17	5.02	0.81	4.80	0.92	2.70	0.46	2.69	0.46	170.7	9.53	0.66	14.99	3 620
XH-CL16-15	140~150	35.72	71.95	8.23	29.32	5.67	1.20	4.90	0.77	4.90	0.91	2.74	0.44	2.76	0.45	170.0	9.29	0.70	15.60	3 596
XH-CL16-16	150~160	35.67	71.46	8.18	29.64	5.58	1.20	4.97	0.80	4.72	0.94	2.72	0.42	2.84	0.47	169.6	9.03	0.70	14.49	3 740
XH-CL16-17	160~170	34.06	68.51	8.04	29.02	5.37	1.11	4.77	0.73	4.49	0.82	2.57	0.41	2.48	0.41	162.8	9.83	0.67	16.65	3 770
XH-CL16-18	170~180	34.93	69.57	8.04	28.61	5.52	1.21	4.90	0.79	4.76	0.90	2.74	0.45	2.77	0.46	165.6	9.04	0.71	11.57	3 992
XH-CL16-19	180~190	35.35	70.58	8.09	29.16	5.59	1.22	5.08	0.78	4.77	0.94	2.72	0.44	2.78	0.47	168.0	9.13	0.70	13.87	3 860
XH-CL16-20	190~200	35.49	70.63	8.29	29.28	5.62	1.27	4.99	0.78	4.73	0.89	2.68	0.45	2.65	0.47	168.2	9.60	0.73	12.94	3 734
XH-CL16-21	200~210	34.29	67.53	7.90	28.30	5.48	1.19	4.84	0.79	4.69	0.87	2.65	0.41	2.52	0.44	161.9	9.77	0.71	12.54	3 926
XH-CL16-22	210~220	36.19	70.12	8.33	29.93	5.75	1.16	4.86	0.81	4.67	0.87	2.68	0.42	2.55	0.43	168.8	10.17	0.67	12.18	4 052
XH-CL16-23	220~230	33.87	66.57	7.79	28.21	5.54	1.19	4.80	0.77	4.59	0.91	2.63	0.40	2.61	0.46	160.3	9.32	0.71	12.83	3 776
XH-CL16-24	230~240	33.91	66.16	7.87	28.55	5.44	1.17	4.81	0.75	4.45	0.83	2.38	0.39	2.30	0.39	159.4	10.57	0.70	18.67	3 500
XH-CL16-25	240~250	33.46	64.77	7.55	27.44	5.00	1.12	4.51	0.73	4.32	0.83	2.51	0.39	2.39	0.44	155.5	10.02	0.72	14.34	3 644

续表

样品编号	层位 /cm	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb / $\times 10^{-6}$	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Σ REE	(La/Yb) _N	δ Eu	CaCO ₃ /wt. %	Ti / $\times 10^{-6}$
XH-CL16-26	250~260	34.03	65.61	7.73	28.14	5.22	1.12	4.75	0.75	4.43	0.83	2.52	0.39	2.48	0.42	158.4	9.82	0.69	15.71	3 656
XH-CL16-27	260~270	33.32	64.06	7.67	27.76	5.37	1.16	4.75	0.73	4.40	0.84	2.48	0.40	2.47	0.42	155.8	9.68	0.70	15.17	3 776
XH-CL16-28	270~280	33.51	65.93	7.70	28.04	5.45	1.14	4.79	0.73	4.32	0.78	2.55	0.38	2.23	0.39	157.9	10.79	0.68	16.90	3 572
XH-CL16-29	280~290	34.13	67.66	8.00	28.31	5.57	1.19	4.93	0.77	4.54	0.84	2.57	0.40	2.40	0.40	161.7	10.21	0.69	16.58	3 758
XH-CL16-30	290~300	33.42	65.84	7.67	28.29	5.48	1.19	4.87	0.77	4.55	0.84	2.56	0.39	2.59	0.43	158.9	9.26	0.70	15.89	3 674
XH-CL16-31	300~310	34.51	67.35	8.01	28.82	5.53	1.14	4.86	0.74	4.38	0.85	2.46	0.38	2.42	0.40	161.8	10.23	0.67	20.74	3 536
XH-CL16-32	310~320	35.37	70.47	8.11	29.70	5.80	1.22	5.04	0.76	4.63	0.86	2.60	0.41	2.53	0.43	167.9	10.04	0.69	14.34	3 806
XH-CL16-33	320~330	34.08	67.87	7.80	28.62	5.56	1.18	4.84	0.77	4.56	0.85	2.60	0.41	2.63	0.41	162.2	9.29	0.70	13.87	3 806
XH-CL16-34	330~340	33.08	65.75	7.75	27.81	5.35	1.20	4.80	0.75	4.40	0.84	2.57	0.40	2.34	0.41	157.4	10.12	0.72	15.57	3 638
XH-CL16-35	340~350	32.84	64.29	7.53	27.47	5.26	1.21	4.79	0.74	4.42	0.84	2.56	0.38	2.47	0.42	155.2	9.55	0.74	16.31	3 656
XH-CL16-36	350~360	32.84	64.29	7.49	27.23	5.12	1.15	4.53	0.78	4.44	0.84	2.43	0.40	2.38	0.38	154.3	9.91	0.73	17.77	3 512
XH-CL16-37	360~370	32.50	63.55	7.47	26.92	5.25	1.14	4.48	0.74	4.44	0.81	2.57	0.40	2.43	0.39	153.1	9.58	0.72	19.89	3 465
XH-CL16-38	370~380	32.29	62.41	7.40	27.01	5.22	1.17	4.68	0.72	4.42	0.84	2.52	0.39	2.35	0.42	151.9	9.86	0.73	19.59	3 477
XH-CL16-39	380~390	31.30	60.95	7.26	26.66	4.97	1.11	4.43	0.72	4.32	0.80	2.46	0.37	2.33	0.41	148.1	9.63	0.72	19.10	3 489
XH-CL16-40	390~400	31.12	61.48	7.25	26.75	5.12	1.10	4.71	0.71	4.22	0.80	2.39	0.36	2.32	0.39	148.7	9.62	0.68	18.78	3 435
XH-CL16-41	400~410	29.41	57.21	6.84	25.17	4.73	1.08	4.24	0.67	4.01	0.75	2.23	0.37	2.24	0.36	139.3	9.40	0.74	22.23	3 183
XH-CL16-42	410~420	29.81	57.47	6.85	25.00	4.82	1.15	4.46	0.67	4.13	0.77	2.45	0.38	2.29	0.40	140.6	9.35	0.76	20.50	3 357
XH-CL16-43	420~430	30.16	58.70	7.11	25.38	4.83	1.06	4.27	0.71	4.29	0.84	2.42	0.35	2.24	0.38	142.8	9.66	0.72	27.24	3 159
XH-CL16-44	430~440	31.12	61.03	7.37	26.83	5.05	1.13	4.55	0.70	4.30	0.80	2.48	0.39	2.33	0.40	148.5	9.58	0.72	22.20	3 435
XH-CL16-45	440~450	30.80	60.06	7.24	26.23	5.05	1.09	4.43	0.70	4.31	0.78	2.45	0.38	2.29	0.38	146.2	9.64	0.70	20.58	3 435
XH-CL16-46	450~460	30.05	57.95	7.02	25.51	4.81	1.14	4.50	0.70	4.18	0.82	2.43	0.38	2.39	0.41	142.3	9.02	0.75	22.78	3 327
XH-CL16-47	460~470	31.26	60.41	7.22	26.96	5.23	1.15	4.45	0.71	4.36	0.83	2.51	0.39	2.36	0.40	148.2	9.50	0.73	21.66	3 459
XH-CL16-48	470~480	30.37	59.29	7.12	25.96	4.97	1.15	4.62	0.73	4.17	0.82	2.44	0.40	2.32	0.41	144.8	9.40	0.73	20.11	3 494
XH-CL16-49	480~490	31.63	62.50	7.41	27.06	5.20	1.23	4.73	0.74	4.52	0.83	2.52	0.42	2.48	0.42	151.7	9.15	0.76	19.64	3 483
XH-CL16-50	490~502	32.78	63.41	7.56	27.89	5.49	1.18	4.94	0.74	4.72	0.90	2.68	0.43	2.70	0.42	155.9	8.71	0.70	18.88	3 566



上陆壳数据引自参考文献[21], MORB引自参考文献[26], 中国黄土引自参考文献[22],

珠江口沉积物引自参考文献[23], 红河沉积物引自参考文献[24]

图2 南海西沙海槽 XH-CL16 柱状沉积物球粒陨石标准化稀土元素配分图

Fig. 2 Chondrite-normalized REE distribution patterns of sediments from Core XH-CL16

XH-CL16 柱状沉积物中 ΣREE 为 $131\sim 171\times 10^{-6}$, 接近上陆壳值 (148×10^{-6}) [21], 明显高于大洋中脊玄武岩值 (36.14×10^{-6}) [26], 同时又显著低于深海黏土中的稀土元素丰度 (411×10^{-6}) [25]。不同深度的样品具有相似的稀土元素配分模式, 均表现为轻稀土富集、重稀土元素含量均一、Eu 负异常且 Ce 无明显异常等特点 (图 2), 与平均上陆壳曲线相似, 明显区别于大洋中脊玄武岩, 指示了西沙海槽区沉积物主要具有陆壳来源属性。

尽管西沙海槽沉积物质主要表现为陆源特征, 然而沉积物质类型及输送方式并不清楚。南海北部为亚洲大陆和台湾岛, 南临巽他陆架, 西侧紧依中南半岛, 南部和东部为火山岛弧, 其周缘的多个物源供给区通过红河、珠江、韩江、高屏溪和曾文溪等为南海北部及西沙海槽提供充分的供给 [31, 41-42]。在球粒陨石标准化稀土元素配分图上 (图 2b), XH-CL16 柱状沉积物表现为与珠江和红河沉积物相似的稀土元素分布形态, 暗示通过珠江和红河的输送可能是 XH-CL16 柱状沉积物的潜在物源供给方式之一。此外, 已有的研究显示陆源组分也可以通过其他途径进入南海。如 Liu 等 [17] 通过地球化学特征对比指出自 2.6 Ma 以来黄土也是南海北部沉积物的重要物源之一。XH-CL16 柱状沉积物表现为与黄土相似的稀土元素配分形态 (图 2b) 也印证了这一可能性的存在。综合上述讨论, 通过珠江和红河搬运的陆源碎屑及风力搬运的黄土可能都是西沙海槽区沉积物的主要的物质来源, 表现为多物源多传输方式的特征。

4.2 沉积地层及物源变化

海洋沉积物中碳酸钙含量通常随冰期/间冰期

海平面升降而形成旋回性变化, 并且与氧同位素地层相对应 [43-44]。若将柱状沉积物碳酸钙含量变化特征对比同海域标准碳酸盐地层学时标, 可间接推断沉积地层 [43, 45-49]。XH-CL16 沉积物中 CaCO_3 的含量为 $11\sim 31\text{ wt. \%}$, 表现为随深度呈波动性变化。通过与西沙海槽北坡标准碳酸盐地层学时标 SO49-KL37 ($17^\circ 49.0359'\text{N}$, $112^\circ 47.0938'\text{E}$, 水深 2 004 m) [50] 的对比研究, 指示 XH-CL16 柱状沉积物为氧同位素 MIS3 期以来的沉积 (图 3)。沉积物上部 110 和 260 cm 处分别为 MIS1 期和 MIS2 期的底界, 260 cm 以下为 MIS3 期, 该柱状样未见底。根据 MIS1 期和 MIS2 期的底界年龄 (12.41 和 24.28 ka) [20, 51], 可以推算得到 XH-CL16 在 MIS1 期和 MIS2 期平均沉积速率分别为 8.9 和 12.6 cm/ka。MIS3 期的底界年龄约为 54.4 ka [20, 51], 由于 XH-CL16 柱状沉积物的 MIS3 期未见底, 推算其 MIS3 平均沉积速率至少大于 8.0 cm/ka。这一速率与相邻站位的 SO49VKL37 柱状沉积物 [50] 和 83PC 柱状沉积物 [20, 51-52] 给出的 MIS3 平均沉积速率基本一致, 显示该区域氧同位素 MIS3 期的平均沉积速率较 MIS2 期小。

XH-CL16 柱状沉积物中不同阶段的沉积物表现为相似的稀土元素配分模式, 但稀土元素丰度略有差异 (表 1, 图 4)。其中, 氧同位素 MIS1 期沉积物 ΣREE 为 $(131\sim 152)\times 10^{-6}$, 平均为 142×10^{-6} ; MIS2 期沉积物 ΣREE 为 $(155\sim 171)\times 10^{-6}$, 平均为 164×10^{-6} , 明显高于 MIS1 期沉积物; MIS3 期沉积物中 ΣREE 含量略有降低, 为 $(139\sim 168)\times 10^{-6}$, 平均为 152×10^{-6} , 介于 MIS1 和 MIS2 沉积物之间。由于 XH-CL16 柱状沉积物中稀土元素主

要来源于陆源, MIS2 期时较高的 ΣREE 可能指示该期有相对更多的陆源物质输入。

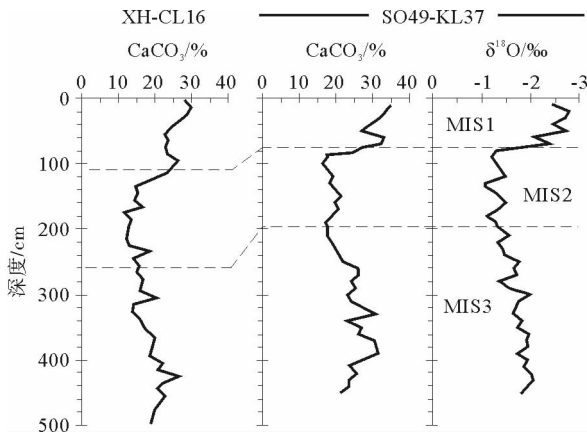


图3 XH-CL16 柱状沉积物与 SO49-KL37 岩心^[50] CaCO_3 含量变化曲线对比

Fig. 3 Comparison of CaCO_3 records between Core XH-CL16 and Core SO49-KL37^[50]

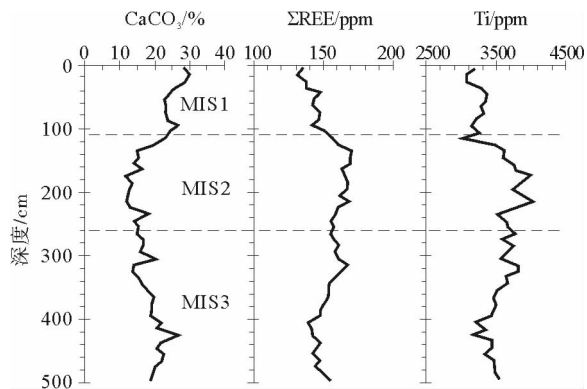


图4 XH-CL16 柱状沉积物 CaCO_3 、 ΣREE 及 Ti 含量变化特征

Fig. 4 Variation in CaCO_3 , ΣREE and Ti contents of sediments from Core XH-CL16

已有的研究表明海洋沉积物中的 Ti 通常全部来源于陆源碎屑, 因此, 根据沉积物中 Ti 的含量能够估算陆源碎屑所占的比例^[53]。XH-CL16 柱状沉积物中的 Ti 含量显示 MIS2 期沉积物含有较 MIS1 和 MIS3 期沉积物更高的 Ti 含量(图 4), 进一步证实 MIS2 期有相对 MIS1 和 MIS3 期更多的陆源物质输入。根据陆壳中 Ti 含量的平均值($4\ 010 \times 10^{-6}$)可进一步估算沉积物中陆源碎屑的比例, 氧同位素 MIS1 期沉积物中 Ti 含量最低, 只有 $3\ 234 \times 10^{-6}$ 左右, 但是, 该期陆源物质输入量可达 82%; MIS2 期沉积物表现出较 MIS1 期沉积物高的 Ti 含量, 并表现出逐渐增高的趋势, 平均值为 $3\ 693 \times 10^{-6}$, 陆源物质输入量约为 92%; MIS3 期沉积物的

Ti 含量介于 MIS1 与 MIS2 期沉积物之间, 平均在 $3\ 526 \times 10^{-6}$ 左右, 指示其陆源物质输入量约为 88%。

5 结论

(1) 西沙海槽区 XH-CL16 柱状沉积物 ΣREE 为 $(131 \sim 171) \times 10^{-6}$, 其球粒陨石标准化稀土元素配分形态表现为轻稀土富集, 重稀土平坦, 轻重稀土分异明显的右倾形态, 并具有明显负 Eu 异常。其稀土元素配分模式具有陆壳特征, 与珠江口沉积物、红河沉积物和黄土的稀土元素分布形态变化基本一致, 暗示黄土、珠江口和红河沉积物均为其潜在物源, 总体表现为多物源多传输方式的特征。

(2) XH-CL16 沉积物主要为 MIS3 期以来的沉积, 不同时期的沉积物中稀土配分模式基本一致, 但稀土总量略有差异, 其中 MIS2 期沉积物的 ΣREE 、 CaCO_3 和 Ti 含量均高于 MIS1 和 MIS3 期沉积物, 指示 MIS2 期沉积物含有较高的陆源物质输入。

致谢: 感谢广州海洋地质调查局实验室人员付出的辛勤劳动。

参考文献 (References)

- [1] Ding Zhongli. The South China Sea: Paleooceanography and Sedimentology [J]. Eos, Transactions American Geophysical Union, 2010, 91(8): 80.
- [2] 汪品先. 南海——我国深海研究的突破口[J]. 热带海洋学报, 2009, 28(3): 1-4. [WANG Pinxian. Toward scientific breakthrough in the South China Sea [J]. Journal of tropical oceanography, 2009, 28(3): 1-4.]
- [3] 郑洪波, 杨文光, 贺娟, 等. 南海的氧同位素 3 期[J]. 第四纪研究, 2008, 28(1): 442-448. [ZHENG Hongbo, YANG Wenguang, HE Juan, et al. Marine isotope stage 3 (MIS3) of South China Sea [J]. Quaternary sciences, 2008, 28(1): 442-448.]
- [4] Clift P, Lee J I, Clark M K, et al. Erosional response of South China to arc rifting and monsoonal strengthening; a record from the South China Sea [J]. Marine Geology, 2002, 184(3): 207-226.
- [5] Li X H, Wei G J, Shao L, et al. Geochemical and Nd isotopic variations in sediments of the South China Sea: a response to Cenozoic tectonism in SE Asia [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2003, 211(3): 207-220.
- [6] Li Q Y, Jian Z M, Su X, et al. Late Oligocene rapid transformations in the South China Sea [J]. Marine Micropaleontology, 2005, 54(1): 5-25.
- [7] 邵磊, 庞雄, 陈长民, 等. 南海北部渐新世末沉积环境及物源突变事件[J]. 中国地质, 2007, 34(6): 1022-1031. [SHAO

- Lei, PANG Xiong, CHEN Chang-min, et al. Terminal Oligocene sedimentary environments and abrupt provenance change event in the northern South China Sea [J]. *Geology in China*, 2007, 34(6): 1022-1031.]
- [8] 刘志飞, 李夏晶, Christophe C, 等. 南海北部末次冰盛期以来高分辨率黏土矿物记录及其时间序列物源区分析[J]. *科学通报*, 2010, 55(29): 2852-2862. [LIU Zhifei, LI Xiajing, Christophe 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 Bull*, 2010, 55,(29): 2852-2862.]
- [9] 杨涛, 蒋少涌, 葛璐, 等. 南海北部陆坡西沙海槽 XS-01 站位沉积物孔隙水的地球化学特征及其对天然气水合物的指示意义[J]. *第四纪研究*, 2006, 26(3): 442-448. [YANG Tao, JIANG Shaoyong, GE Lu, et al. Geochemical characteristics of sediment pore water from site XS-01 in the Xisha Trough of South China Sea and their significance for gas hydrate occurrence [J]. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(3): 442-448.]
- [10] 冯文科, 薛万俊, 杨达源, 等. 南海北部晚第四纪地质环境[M]. 广州: 广东科技出版社, 1988. [FENG Wenke, XUE Wanjuan, YANG Dayuan, et al. *Geoenvironment of northern South China Sea in Late Quaternary* [M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 1988.]
- [11] 陈铃, 彭学超, 廖宛岑. 南海北部陆坡区地震地层解释[C]// 南海地质研究(七). 武汉: 中国地质大学出版社, 1995. [CHEN Ling, PENG Xuechao, MIU Wancen. Stratigraphic interpretation in northern slope of South China Sea [C]// *Geology of South China Sea* (7). China University of Geosciences Press, Wuhan, 1995.]
- [12] 王淑红, 颜文, 宋海斌. 末次盛冰期以来西沙海槽天然气水合物储库变化及其对环境的影响[J]. *地球科学-中国地质大学学报*, 2008, 33(1): 74-82. [WANG Shuhong, YAN Wen, SONG Haibin. The change of gas hydrate reservoir and its effect on environment in Xisha Trough since the last glacial maximum [J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2008, 33(1): 74-82.]
- [13] Hannigan R E, Sholkovitz E R. The development of middle rare earth element enrichments in freshwaters: weathering of phosphate minerals [J]. *Chemical Geology*, 2001, 175(3-4): 495-508.
- [14] Munksgaard N C, Lim K, Parry D L. Rare earth elements as provenance indicators in North Australian estuarine and coastal marine sediments [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2003, 57(3): 399-409.
- [15] 高爱国, 陈志华, 刘炎光, 等. 楚科奇海表层沉积物的稀土元素地球化学特征[J]. *中国科学 D 辑*, 2003, 33(2): 148-153. [GAO aiguo, CHEN Zhihua, LIU Yanguang, et al. Rare earth elements geochemical characteristics of the Chukchi Sea surface sediments [J]. *Science China (D)*, 2003, 33(2): 148-153.]
- [16] 苗卫良, 邵磊, 庞雄, 等. 南海北部渐新世以来的稀土元素地球化学特征及其意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2008, 28(2): 71-78. [MIAO Weiliang, SHAO Lei, PANG Xiong, et al. REE geochemical characteristics in the northern South China Sea since the Oligocene [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2008, 28(2): 71-78.]
- [17] Liu B L, Wang Y P, Su X, et al. Elemental geochemistry of northern slope sediments from the South China Sea: Implications for provenance and source area weathering since Early Miocene [J]. *Chemie der Erde*, 2013, 73: 61-74.
- [18] 熊斌辉. 构造控制下的西沙海槽沉积模式[J]. *海洋石油*, 2013, 33(1): 1-6. [XIONG Huibin. Xisha trough depositional model under controlling by structure [J]. *Offshore oil*, 2013, 33(1): 1-6.]
- [19] 刘坚, 陆红锋, 苏新, 等. 南海北部 BY1 钻孔沉积物元素地球化学特征及其古环境意义[J]. *热带海洋学报*, 2012, 31(5): 6-11. [LIU Jian, LU Hongfeng, SU Xin, et al. Element geochemistry of Core BY1 from the northern South China Sea and its paleoenvironmental implication [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2012, 31(5): 6-11.]
- [20] 蔡观强, 彭学超, 陈泓君, 等. 南海西沙海槽 83PC 柱状沉积物组成特征及其古环境意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2012, 32(1): 77-84. [CAI Guanqiang, PENG Xuechao, Chen Hongjun, et al. The component characteristics and paleoenvironmental significances for sediments in Core 83PC from the Xisha Trough, South China Sea [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2012, 32(1): 77-84.]
- [21] Rudnick R L, Gao S. Composition of the continental crust [J]. *Treatise on Geochemistry*, 2003, 3: 1-64.
- [22] 文启忠. 中国黄土地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1989. [WEN Qizhong. *Geochemistry of Chinese loess* [M]. Beijing: Science Press, 1989.]
- [23] 刘岩, 张祖麟, 洪华生. 珠江口伶仃洋海区表层沉积物稀土元素分布特征及配分模式[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1999, 19(1): 103-107. [LIU Yan, ZHANG Zhulin, HONG Huasheng. Distribution characters and model of rare earth element(REE) in surface sediments from Lingdingyang area of Pearl river estuary [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 1999, 19(1): 103-107.]
- [24] Gaillardet J, Dupré B, Allegre J. Geochemistry of large river suspended sediments: Silicate weathering or recycling tracer? [J] *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(23-24): 4037-4051.
- [25] 沈华梯. 深海沉积物中的稀土元素[J]. *地球化学*, 1990, 4: 340-348. SHEN Huati. Rare Earth elements in deep-sea sediments [J]. *Geochimica*, 1990, 4: 340-348.
- [26] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1989, 42(1): 313-345.
- [27] Boulay S, Colin C, Trentesaux A, et al. Mineralogy and sedimentology of Pleistocene sediment in the South China Sea (ODP Site 1144)[C]// *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*. 2003, 184(211): 1-21.
- [28] Lüdmann T, Wong H K, Berglar K. Upward flow of North Pacific Deep Water in the northern South China Sea as de-

- duced from the occurrence of drift sediments[J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32(5), doi:10.1029/2004GL021967
- [29] Tamburini F, Adatte T, F?llmi K, et al. Investigating the history of East Asian monsoon and climate during the last glacial-interglacial period (0-140 000 years): mineralogy and geochemistry of ODP Sites 1143 and 1144, South China Sea [J]. Marine Geology, 2003, 201(1): 147-168.
- [30] 刘宝林, 王亚平, 王吉中, 等. 南海北部陆坡海洋沉积物稀土元素及物源和成岩环境[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2004, 24(4): 17-23. [LIU Baolin, WANG Yaping, WANG Jizhong, et al. Geochemical characters of REE in the seafloor sediment in northern continental slope of the south China Sea and analysis of source of material and diagenesis environment [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2004, 24(4): 17-23.]
- [31] 刘志飞, Trentesaux A, Clemens S C, et al. 南海北坡 ODP1146 站第四纪粘土矿物记录: 洋流搬运与东亚季风演化[J]. 中国科学 D 辑, 2003, 33(3): 271-280. [LIU Zhifei, Trentesaux A, Clemens S C, et al. Quaternary clay mineral record of ODP1146 station in the northern South China Sea: ocean currents transport and East Asian monsoon evolution [J]. Science China (D), 2003, 33(3): 271-280.]
- [32] 刘志飞, 黄维, 陈忠, 等. 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[J]. 科学通报, 2007, 52(4): 448-456. [LIU Zhifei, HUANG Wei, CHEN Zhong, et al. Clay minerals of surface sediments in Pearl River drainage basin and their contribution to the South China Sea sediments [J]. Chinese Science Bull, 2007, 52(4): 448-456.]
- [33] 栾锡武, 彭学超, 邱燕. 南海北部陆坡高速堆积体的构造成因[J]. 现代地质, 2009, 23(2): 183-199. [LUAN Xiwu, PENG Xuechao, QIU Yan. Tectonic control on the formation of high-deposition-rate sediment drift in the northern slope of the South China Sea [J]. Geoscience, 2009, 23(2): 183-199.]
- [34] 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. The material sources of high speed stacking body in the South China Sea [J]. Science China (D), 2001, 31(10): 828-833.]
- [35] 邵磊, 李学杰, 耿建华, 等. 南海北部深水底流沉积作用[J]. 中国科学: D 辑, 2007, 37(6): 771-777. [SHAO Lei, LI Xuejie, GENG Jianhua, et al. Deep water underflow deposition in the northern South China Sea [J]. Science China (D), 2007, 37(6): 771-777.]
- [36] 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(2): 311-317. [SHAO Lei, QIAO Peijun, PANG Xiong, 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.]
- [37] 李双林, 李绍全. 黄海 YA01 孔沉积物稀土元素组成与源区示踪[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2001, 21(3): 51-56. [LI Shuanglin, LI Shaoquan. REE composition and source tracing of sediments from core YA01 Yellow Sea [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2001, 21(3): 51-56.]
- [38] 朱赖民, 高志友, 尹观, 等. 南海表层沉积物的稀土和微量元素丰度及其空间变化[J]. 岩石学报, 2007, 23(11): 2963-2980. [ZHU Laimin, GAO Zhiyou, YIN Guan, et al. Content and spatial change of rare earth element and trace element of surficial sediment in the South China Sea [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(11): 2963-2980.]
- [39] 谢锦龙, 余和中, 唐良民, 等. 南海新生代沉积基底性质和盆地类型[J]. 海相油气地质, 2010, 15(4): 35-47. [XIE Jinlong, YU Hezhong, TANG Liangmin, et al. The Basement Features and Basin Types of Cenozoic Sediments in South China Sea [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2010, 15(4): 35-47.]
- [40] 杨文光, 谢昕, 郑洪波, 等. 南海北部陆坡高速堆积体沉积物稀土元素特征及其物源意义[J]. 矿物岩石, 2012, 32(1): 74-81. [YANG Wenguang, XIE Xi, ZHENG Hongbo, et al. Rare earth elements characteristics of sediments from high-deposition-rate sediment in the north slope of South China Sea and its provenance significance [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2012, 32(1): 74-81.]
- [41] 刘昭蜀, 范时清, 赵焕庭. 南海地质[M]. 北京: 科学出版社, 2002. [LIU Zhaoshu, FAN Shiqing, ZHAO Huanting. Geology of South China Sea [M]. Beijing: Science Press, 2002.]
- [42] 张富元, 张霄宇, 杨群慧, 等. 南海东部海域的沉积作用和物质来源研究[J]. 海洋学报, 2005, 27(2): 79-90. [ZHANG Fuyuan, ZHANG Xiaoyu, YANG Qunhui, et al. Research on sedimentations and material sources in the eastern South China Sea [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2005, 27(2): 79-90.]
- [43] Miao Q, Thunell R C, Anderson D M. Glacial-Holocene carbonate dissolution and sea surface temperatures in the south China and Sulu seas [J]. Paleoceanography, 1994, 9(2): 269-290.
- [44] 汪品先. 西太平洋边缘海的冰期碳酸盐旋回[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1998, 18(1): 1-9. [WANG Pinxian. Glacial carbonate cycles in western pacific marginal seas [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 1998, 18(1): 1-9.]
- [45] Hays J D, Saito T, Opdyke N D, Burckle L H. Pliocene-Pleistocene sediments of the equatorial Pacific: Their paleomagnetic, biostratigraphic, and climatic record [J]. Geological Society of America Bulletin, 1969, 80(8): 1481-1514.
- [46] Vincent E. Neogene carbonate stratigraphy of Hess Rise (central North Pacific) and paleoceanographic implications [J]. Initial Rep. Deep Sea Drill. Proj, 1981, 62: 571-606.
- [47] Pisias N G, Rea D K. Late Pleistocene paleoclimatology of the central equatorial Pacific: Sea surface response to the southeast trade winds [J]. Paleoceanography, 1988, 3(1): 21-37.
- [48] Chuey J M, Rea D K, Pisias N G. Late Pleistocene paleoclimatology of the central equatorial Pacific: A quantitative record of eolian and carbonate deposition [J]. Quaternary Re-

- search, 1987, 28(3): 323-339.
- [49] Farrell J W, Prell W L. Pacific CaCO_3 preservation and $\delta^{18}\text{O}$ since 4 Ma: paleoceanic and paleoclimatic implications[J]. *Paleoceanography*, 1991, 6(4): 485-498.
- [50] 钱建兴. 晚第四纪以来南海古海洋学研究[M]. 北京:科学出版社, 1999. [Qian Jianxing. *Paleoceanography research of the south China sea Since the late quaternary* [M]. Beijing: Science Press, 1999.]
- [51] Yang X Q, Friedrich H, Wu N Y, et al. Geomagnetic paleointensity dating of South China Sea sediments for the last 130 kyr [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 284 (1): 258-266.
- [52] 庄畅, 陈芳, 张金鹏, 等. 南海西沙海槽近 120ka 以来的浮游有孔虫特征及其古气候意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2013, 33(5):89-96. [ZHUANG Chang, Chen Fang, Zhang Jinpeng, et al. Planktonic foraminifera in the Xisha Trough of the South China Sea during the last 120ka and their paleoclimatic implications [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2013, 33(5):89-96.]
- [53] Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: its composition and evolution [M]. Oxford: Blackwell Scientific, 1985.

RARE EARTH ELEMENTS GEOCHEMISTRY AND PROVENANCE OF THE SEDIMENTS FROM CORE XH-CL16 IN THE XISHA TROUGH, SOUTH CHINA SEA

FU Piaoer, ZHUANG Chang, LIU Jian, CHEN Daohua, ZHANG Xin, CHEN Sihai

(Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Ministry of Land and Resources,
Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510075, China)

Abstract: The Xisha Trough is an important gas hydrate exploration prospect in the northern South China Sea. The provenance of Xisha Trough sediments remains controversial. The sediment from Core XH-CL16 in the Xisha Trough are characterized by relatively high total rare earth element contents ($\Sigma\text{REE} = 131 \sim 171$ ppm), slightly enriched light REE ($[\text{La}/\text{Yb}]_{\text{N}} = 9.5$) and clearly negative Eu anomalies ($\delta\text{Eu} = 0.66 \sim 0.79$). Their chondrite-normalized REE patterns are similar to the upper continental crust and the sediments from Chinese loess, the Pearl River and Mekong River, but different from the normal middle oceanic ridge basalt (N-MORB) and deep-sea clay. Thus, the sediments of the Xisha Trough show terrestrial affinity, which probably result from multi-provenance and multi-transmission. Contrasting with the standard carbonate formation in the Xisha Trough, the variations in CaCO_3 contents for the sediments from Core XH-CL16 suggests that they were deposited since approximately MIS3. In addition, sediments in MIS2 have higher ΣREE , CaCO_3 and Ti contents than those of sediments in MIS1 and MIS3, which may indicate more continental contribution during the MIS2.

Key words: rare earth elements; marine sediments; sediment provenance; South China Sea; Xisha Trough