文章编号: 1000-0550(2006) 03-0356-09

东海陆架 EA01孔沉积物常微量元素变化及其意义

熊应乾12 刘振夏1 杜德文1 余 华12 李双林3

(1.中国海洋大学海洋地球科学学院 山东青岛 266003,2国家海洋局第一海洋研究所 山东青岛 266061;3 国土资源部青岛海洋地质研究所 山东青岛 266071)

摘 要 以 EA01孔为研究对象,运用元素地球化学数据并辅以古生物、矿物等指标探讨东海中陆架北部的地层划分 及物质来源。首先在前人工作的基础上研究常微量元素垂向变化,发现 EA01孔沉积物元素地球化学地层学信息可 以作为指示地层和古气候信息的良好指标;同时运用因子分析,La/Yb-Ni/Co-Cr/V 三角图和 U/Th-(Zr+Hf)/ (Al₂O₃+TO₂)散点图等多种方法分析了 EA01孔沉积物的物质来源,认为 EA01孔沉积物主要来源于长江,其物质成 分可能部分受到古气候和沉积环境的影响。

关键词 东海陆架 地球化学 物源 EA01

第一作者简介 熊应乾 男 1973年出生 在职博士生 海洋沉积 海底信息技术 中图分类号 P736 21 文献标识码 A

1 引言

东海陆架是世界上最宽阔的陆架之一,陆架坡度 非常平缓,沉降速率大^[1,2],且长江、黄河每年输入巨 量的泥沙^[3,4],因此由东海复杂的水动力条件所塑造 的各种沉积体系都得以保存,对于揭示海陆相互作用 及气候和环境变化等多种信息具有重要的意义。



图 1 EA01孔位置图 Fig 1 Location of Core EA01

EA01 孔 (125°45 6058′E 30°22 6914′N 水深 67.1m,柱长 60.11m)位于东海陆架,青岛海洋地质 研究所和上海海洋地质调查局已对 EA01 孔进行了 大量工作^[5~9],图 2就在他们工作的基础上整理加工 而成。由于依据的指标各不相同,不同的学者对该孔 地层的划分看法不一^[89]。至于 EA01孔沉积物的物 质来源问题,前人的研究表明稀土元素的配分模式在 沉积物从源区向海的搬运和沉积过程中没有发生明 显的分异,该孔沉积物具有相同的物源区^[7],但运用 海洋沉积物中的稀土元素特征难以将来自中国大陆 的物质进一步区分为长江源还是黄河源^[10].且前人 研究表明运用常微量元素的判别函数也难于区分 EA01孔沉积物是属于长江源还是黄河源^[5]。本文 将对 EA01孔的常微量元素和微体古生物组合特征 进行综合分析以进一步探讨该孔的元素地层划分及 其所蕴含的古气候信息,然后通过统计分析和图解等 多种方法判断 EA01孔沉积物的物质来源。

2 方法

本次研究基于青岛海洋地质研究所测试的 80个 样品的常微量元素和稀土元素,其中 SO₂采用硅氟酸 钾容量法, FeO:试样用氢氟酸一硫酸分解,以饱和 硼酸除去过量氟,用二苯胺磺酸钠作指示剂,标准 重铬酸钾溶液滴定,AbO₃, Fe₂O₃, K₂O, Na₂O, CaO 和 MgO 等及微量元素采用等离子发射光谱测定^[57];地

国家自然科学基金 (批准号: 40176018和 40421150011), 课题 (118-03-5-1)和海洋局青年基金 (2005306)资助. 收稿日期: 2005-04-06 收修改稿日期: 2005-09-08



图 2 EA01岩性柱状图 本图综合整理前人资料,有孔虫栏依据其种类和分异度分为 16个带,右侧为取样位置; 气候栏据孢粉资料整理而成,实线为气温,虚线为湿度,实线和虚线同步中断处孢粉颗粒贫乏;

地层界线栏左侧为唐保根^[8]数据,中间为李双林^[9]数据,右侧为本文元素地层分层

Fig 2 Lithostratigraphic log of Core EA01 Synthesis after the previous data, foram in ifer column is divided into 16 segments according to its species and diversity, and the sampling position is on the right climatic column is drawn after pollen data solid lines represent temperature and dash lines represent hum idity, the break of both line means poverty of pollen

响^[11],且研究发现AbO₃,K₂O,MgO,FeO(T), MnO与TO₂(Ti)比值可以较好的反映气候信息,在 南海其高值一般出现在间冰期,而低值出现在冰期, NaO则刚好与此相反^[12],因此本文将主要运用多种 常、微量元素与TO₂(Ti)的比值来研究EA01孔的地 层及其所蕴含的古气候信息。

物源分析在确定沉积物物源位置和性质及沉积 物搬运路径,甚至整个沉积区域的沉积作用和构造演 化时意义重要。沉积物的化学组成在某种程度上可 以示踪源区地壳的组成,但由于元素在水体和沉积物 间的配分行为不同,同源区粒度不同的沉积物化学 成分相差较大,且沉积过程中的粒度分选作用对沉积 物中有关源区组成的记录有改变等原因,选择合适 的元素用于判别物源就非常重要^[13]。

晚第四纪东海宽广而平坦的陆架是长江、黄河所 携带泥沙的主要沉积场所,因此判断东海陆架钻孔中 的陆源物质来源很大程度上就是判别这些沉积物是 否属于长江和 感黄河源^[14-16]。由于长江、黄河源区 物质成分、所处气候带等的不同造成两者沉积物在化 学元素、矿物组成等方面存在着一定的差异,从而使 得对长江、黄河沉积物进行区分成为可能^[3 17-19]。 Zr, Hf是典型的不活泼元素,属于紧密共生的元素 对,黄河沉积物中 Zr, Hf的含量相对长江高; Th活动 性很小,而 U 是地球化学性质活泼的元素, 但沉积物 在沉积阶段吸附的 U 很少, 它也是一种可用的示踪 元素; 稀土元素在成岩一变质阶段其分布形式基本平 行; 过渡金属元素 N į C g Cr, V 在搬运和沉积过程 中活动性都不强, 长江流域由于火成岩明显比黄河流 域发育, 尤其是中上游地区, 使得长江沉积物中这些 过渡金属元素组成显著高于黄河沉积物, 另外长江流 域的强化学风化造成的强淋溶作用也使得沉积物中 碱、碱土金属含量降低, 活动性较小的元素如 Sg T į F g Th, C r进一步富集^[11, 20, 21], 因此这些元素都可以 较好地用于判断物源。

3 结果

依据 EA01孔中常、微量元素与 T D_2 (Ti)比值的 垂向变化特征以 4 10m, 13 2m, 19 88m, 28 78m, 37.65 n和 45m为界,将整个岩芯自上往下分为 7段 (图 3 图 4)。在整个岩芯当中 28 78m是一个明显 的分界线:此线以下 A bO_3 , TFcO, F eO_3 , K $_2O$, L; Th, Cr等元素和氧化物含量与 T D_2 (Ti)比值向上波 动递减, TFcO, M gO, M nO 等氧化物含量与 T D_2 (Ti) 比值相对较高, SO₂ N a_2O , P $_2O_5$, Sr, Zr, H f, Cu Ba等与 T D_2 (Ti)的比值为岩芯中的最低值;此线以 上 S D_3 N a_2O , P $_2O_5$, Sr, Zr, H f, Cu (Ti)比值明显升高, TFcO, M gO, M nO, Li, Th, Cr等 元素和氧化物含量与 T D_2 (Ti)比值降低。

	δ ¹⁸ Ο	Si	O_2/TiO_2Al_2	O ₃ / TiO ₂	TFeO/ TiO	Fe ₂ O ₃ /TiO	$0_2 K_2 O/TiO_2$	Na₂0∕ T	iO ₂ MgO/ T	$\mathrm{TiO}_{2}\mathrm{P}_{2}\mathrm{O}_{5}/\mathrm{TiO}_{5}$	D_2 MnO/TiO ₂
4	-3 -2 -1 0	-5-4-3-2-10 0 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 +			4 567891		3 4	5 2 3 4	5 2	4 0.2 0.3	0.06 0.12 0.18
51111	>	5-10-10-00-00-00-00-00-00-00-00-00-00-00-	10-12	5111	10 1	5- 10-	10-1	10-	10-	10-	10-
15-1-1-	1	15	15-5	15-	15-	15-1	15-	15 2	15-	15-7	15 2
20-	W1	20-20-2	20-2-2	20	20-7	20-3	20	20	20	20	20 3
25-	2000 C	25 - 20	25- 2	25-	25	25	25-	25	25	> 25	25-
30-7	agar	30 J b	30-35	30-	30 -	30-	30-35	30 - 5	30-	5 30 - 5	30 4
35		W2	35-12	35 7	35] 2	35	35-	35	35-	35-	35-
40	0-0-0	W3	40-5	40-	40	40-	40	40-	40	40-	40- 2-
45	000000		45	45 5	45 3	45	45 3	45	45 5	45	45 6
50-	0000		50-	50	50 7	50 7	50-	50	50 -	50-	50
55	ato		55-	55-	55 - 2	55-	55-	55-	55-	55-	55-
603	0,0		60] 4	60 J 7	60 J 5	60	E 603	60 3 5	60 3 7	· 60 3 5	603

图 3 常量元素与 TO₂比值垂向变化 阴影 C1代表 1次冷事件, 阴影 W 1-W 3代表 3次暖事件, 横线表示气候变化的界线 δ^{18} O栏改自李双林¹⁹其中曲线 aA. compressiuscula, 曲线 b为A. beccariwar

Fig 3 Tinom alized ratios of them a jor elements, SD₂, Al₂O₃, TFeO, Fe₂O₃, K₂O, Na₂O, MgO, P₂O₅ and MnO shade area C1 represent cold event W-W 3 represent warm events, horizon tal lines depict the boundary of climate change

$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		$\delta^{18}O$		Li/Ti		U/Ti	Th/T	i	Sr/Ti	Zr/Ti	Hf/Ti	Cu/Ti	Co/Ti	Ba/Ti	Cr/Ti
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	0	1 -3 -2 -1 0	-5-4-3-2-11 0 +1111111	0 50 0 17	100 150 لىبىيلىچ	4 6 0 1 1 1 1 /	* 0 1	30 40	0 1 2	1000 400 700	6 12 18 0 - Junite	0 10 10 0 1 2		55 1000 200 0 juliuul	
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	10	>	10	10-1	2		101	2	10-10-	10-	10-11-2	10	10	10	10
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	15-	10/4	15-	15-5	1	15-5	15-	2	15-	15-	15-	15-	15-	15- 2	15-2
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	20-11-25-2		25-	20	MM	5- W	20-	N	25-5-	25- 4	25- 25-	25-	25-	25-	25- 3
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	30-	0-000	30 ³ 6	30	53	10 5	30-	5	30-1	30-12	30 3	30-5	30	30	30 5 4
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	35-	000 000	W2 W3	35-	5	5-2-	35-	2	35-2	35-	35- 2	35-5	35-	35	35- 2 5
50 50 50 50 50 50 50 50 50 50 50 50 50 5	40	00000		40		15 N	40-	N.	45	40-	40	45 5	4011	40-1-5	40
	50	8000		50	5	S FOI	50	2.	50	50	50-	50	50	50	50
	55	000		55	A.	15-1-1-	55	X	55-	55-	55	55-	55	55-00	55-

图 4 微量元素与 T i比值垂向变化 阴影 C1代表 1次冷事件, 阴影 W 1-W 3代表 3次暖事件, 横线表示气候变化的界线; $\delta^{18}O$ 栏改自李双林^[9] 曲线 a为 A. compressiuscula, 曲线 b为 A. beccariivar

Fig 4 Ti-normalized ratios of the trace elements Li U, Th, Sr, Zr, Hf, Cu, Co, Ba and Cr shade area C1 represent cold event W 1-W 3 represent warm events, horizontal lines depict the boundary of climate change

60~45 m A ½O₃, TFeO, K₂O, L ; U, Co, Cr等 元素和氧化物含量与 T O₂ (T i)比值向上波动递减, 其他多数元素含量比值基本保持稳定,其中 S O₂, N ₂O, Sr等元素和氧化物含量与 T O₂ (T i)比值低而 波动幅度小。

45~37.65 m: 各元素和氧化物含量与 T D_2 (Ti) 比值曲线出现高频突变, 其中相对 60~28 78m 段整 体趋势而言 S D_2 , N aO, Sr与 T D_2 (Ti)比值出现两 次高峰值, TF cO, F cO3, Li Th, Co与 T D_2 (Ti)比值 在大致相近的位置则出现两次低峰值, 所有元素和氧 化物含量与 T D_2 (Ti)比值都发生了相应的变化, 但 未改变 60~28 78 m 段整体的变化趋势。

37. 65~ 28 78 m: 各元素和氧化物含量重趋稳 定,波动幅度明显减小。 SD_2 与 TD_2 比值低而稳定, K₂Q, Li Cr与 TD_2 (Ti)比值延续在 60~ 37. 65 m 段 减小的趋势, MnO 与 TD_2 的比值在本段内持续减小, P_2O_5 , U 与 TD_2 (Ti)比值则在本段呈增加趋势。

28. 78~19 88 m: 各元素和氧化物含量与 TO₂ (Ti)比值波动幅度不大, SO₂, K₂O, N₄O, P₂O₅, Sr, Zr, Hf, Cu, Co, Ba, Cr与 TO₂(Ti)比值相对 37. 65~28 78 m段比值增加。M nO 与 TO₂(Ti)的比 值在本段内呈略微上升趋势。

19 88~13.2 m: A ½ O₃, TFeO, Fe₂O₃, K₂O, M gO, L; Cr等元素和氧化物含量与 TO₂(Ti)比值 在本段明显比 28 78~19 88 m 段比值降低, SO₂, N ₂O, P₂O₅, Sr与 TO₂(Ti)的比值则延续 28 78~ 19.88 m 趋势继续升高。 P₂O₅, Zr, Cu 与 TO₂ (Ti) 的比值在本段出现高值, 高峰值为全柱最高。

13 2~4 10 m: TFeO, Fe₂O₃, Li与 TO₂(Ti)的比 值相对 19 88~13 2 m 增加, P₂O₅, M nO, Th, Zr Hf Co与 TO₂(Ti)的比值在本段内呈减小趋势, MgO 在本段比值低于 60~13 2 m 段的比值,且比较 稳定。在 13 2 m处是 Fe₂O₃, MgO, M nO, Li Cr等 元素和氧化物含量与 TO₂(Ti)比值的一个明显的变 化趋势(高低值转换)转折点。

4 10~0m: TFeO, Fe₂O₃, K₂O, MgO, MnO, L; U, Sr, Cr等元素和氧化物含量与 TO₂(Ti)比值在本 段呈上升趋势,只有 Zr Hf含量与 Ti与 TiO₂(Ti)的 比值都呈下降趋势。

4 讨论

4 1 元素比值的古气候意义

依据 EA01 孔元素地球化学组合特征的垂向变 化我们得到 6条气候变化界线 (图 3 图 4), 它们在钻 孔的岩性、有孔虫和/或孢粉含量的变化上都有反映, 这些界线上下的粒度、有孔虫和孢粉等均发生变化 (图 2)。本文 6条气候变化界线中的 1, 2, 4线 (孔深 分别为 4. 10 m, 13 2 m, 28 78 m)与唐保根等^[8]吻 合; 2, 3, 4, 5线 (孔深分别为 13 2 m, 19 88 m, 28 78 m, 37. 65 m)则与李双林等^[9] (相对应的孔深为 12 62 m, 19 08 m, 29 m, 37. 28 m)基本吻合, 这两组 数据之间的差异可能是由不同的取样位置造成的, 相 对于以前的研究本文所用样品数量相对较多,且在钻 孔中分布比较均匀。

由于 EA01孔氧、碳稳定同位素组成数据部分不 连续^[9], 缺乏准确的测年数据, 也没有通过该孔的高 分辨率地震剖面, 关于该孔地层的划分还存在分歧。 前面的分析显示地球化学数据对于地层的划分有良 好的指示意义。 19 88~0m之间单个元素和氧化物 含量比值曲线保持基本一致的变化趋势, SD₂, Fe₂O₃ 与 TO₂的比值向上跳跃式增加, 而 A \downarrow O₃, M gO, P₂ O₅, M nO, L_i Th, Zr, H f等元素和氧化物含量与 TO₂(T₁)比值则减少, K₂O, Na₂O, Co尽管出现高或 低的峰值, 但趋势变化平稳。前人研究也表明 19 88 ~ 0 35 m 为河口沙坝和分流间湾沉积层序, 19 88~ 28.78 m 为前三角洲沉积^[6], 19 88 m 可能是一条由 沉积环境变化造成的地层界线。

60~28 78 m 之间元素和氧化物含量与 TO₂ (Ti)比值变化规律性比较明显: A 1 O₃, Fe₂ O₃, K₂ O₅, K₂, K₂ O₅, K₂, K Li Th, Cr等元素和氧化物含量与 TO₂ (Ti)比值向 上波动递减, TFeO, MgO, MnO 等元素和氧化物含量 与 TO_2 (Ti) 比值相对比较高而基本稳定, SO_2 Na₂ O, P₂O₅, Sr, Zr, Hf, Cu, Ba等与 TO₂(Ti)比值为 岩芯中的最低值,其曲线变化趋势比较平缓,这种化 学元素组合特征主要是受沉积物粒度的影响,有孔虫 分析显示当时海面相对较高,以近岸浅海环境为主, 沉积物粒度较细,主要以细粉砂为主 (图 2),从而导 致那些在细粒级中富集的元素如 A_bO_3 , TF eO_1 , Fe₂ O₃, K₂O, MgO, MnO, Li Cr等含量较高。在 45~ 37. 65 m 之间这些元素和氧化物含量与 $TO_2(T_i)$ 含 量比值曲线出现高频突变,高/低峰值均对应于氧同 位素峰值的变化,有孔虫和孢粉分析显示当时海面曾 有大幅度的降低,导致古水深较小,水动力较强,沉积 物粒度变粗,出现粗粉砂(图 2)。60~28 78 m 段内 45~ 37. 65 m的上下地层中有孔虫和孢粉分析显示当 时海面较高且比较稳定,而此时属于氧同位素 5 期^[8], 种种迹象表明 45 m 和 37.65 m 可能是氧同位 素 5期中相邻两个暖亚期的上下界限。

常微量元素的变化也可以指示较高分辨率的气候事件,如根据图 3和图 4可以在 EA01孔明显识别出 1个冷事件 C1和 3个暖事件 W1-W3(图 3、图 4)。

C1: 4 4~ 3 4 m δ¹⁸ O 值比较高, 峰值为 -0 686‰ SD₂, AbO₃, TFeO, FeO₃, K₂O, NaO, P₂O₅, Ba的含量与 TD₂ (Ti)的比值降低, MgO, MnO, Li U, Th, Sr, Cu, Co, Cr, Zr, Hf的含量与 TO₂(Ti)的比值升高。此时 EA01孔由近岸浅海环 境演变为滨岸环境, 孢粉贫乏 (图 2)也证实了相对寒 冷的气候;

W 3 39.2~38.1 m δ¹⁸ O 值比较低, 峰值为 -2 771‰ SO₂, N₄O, P₂O₅与 T O₂的比值高, A b O₃, TF eO, F eO₃, K₂O, M gO, M nO 与 T O₂的比值低; Sr, Zr, H f Cu, Ba与 T i的比值高, L j U, Th, Cq Cr与 T i的比值低。有孔虫分析表明海面上升, 由滨 海变为近岸浅海环境 (图 2)。此时粒度变粗, 有可能 是由于径流加大的缘故;

W 2 36~ 35 2 m δ⁸ O 值比较低, 峰值为 - 3 5‰, SD₂, A kO₃, TF₆O, Fe₂O₃, K₂O, N aO 与 T D₂的比值低, M gO, P₂O₅, M nO 与 T D₂的比值略有 升高; Li U, Th, Sr, Zr, H f Cu, Co, Ba Cr与 T i 的比值未出现较大幅度的升高或降低, 但在 60~ 28 78 m层位比值不为低。此时 SD₂, N aO 与 T D₂ 的比值未出现高值可能是海面较高, 有孔虫分析表明 为近岸浅海环境, 且孢粉分析显示温度和湿度都比较 高, 为温和略湿气候 (图 2)。

W I: 20~ 19 m δ¹⁸O值小于 - 2‰。 SD₂, A kO₃, K₂O, N_{a2}O, M gO, P₂O₅, M nO 与 TD₂的比值高, TFeO, Fe₂O₃与 TD₂的比值低; U, Sr, Zr, Hf Cu Ba, Cr与 Ti的比值高, Li Th, Co与 Ti的比值低。 此时粒度突然变粗, 孢粉分析显示为温凉气候 (图 2);

发生暖事件时 SD₂, N_aO 含量与 TD₂含量比值 高,而发生冷事件则低,可能与沉积物粒度有一定关 系,在图 2中可见在大的气候和沉积环境背景未变时 粒度变化趋势比较稳定,期间发生冷事件时粒度会出 现变细的现象,发生暖事件时则相对有所加粗(径流 增强可能是其原因之一)。 SO2在砂质沉积物中富 集, NaO可能是赋存于长石中, 粒度偏粗其含量增 加,变细则减少。 P_2O_5 则一般为生物源^[20], 气候相对 寒冷时生物生产力下降, P_2O_5 的含量与 T O_2 比值也 随之下降,温暖时生物生产力上升,P₂O₅的含量比值 也随之上升。发生暖事件时 TFeO, FeO3与 TO2比值 低可能与物质供应量和生物生命活动需要耗铁有关。 SD_2 , N_aO, P₂O₅与 TD₂比值一般都比较高, 但在 W 2时多数元素和氧化物都未出现显著的峰值, SO_{2} NaO, P_2O_5 与 $TO_2(Ti)$ 比值也都偏低, 可能是由于此 时温度和湿度都比较高(图 2),沉积物风化比较彻 底,而海面又相对比较高,岸线远离 EA01孔,导致沉 积物粒度偏细,陆源物质有所减少。

4.2 物质来源

4.2.1 因子分析

以所测元素和氧化物为变量,进行主成分分析, 提取大于 1的特征值, 按最大方差法进行因子旋转, 并剔除有缺值的观测量,最后得到 5个主因子,其方 差贡献占总方差贡献的 84% 以上 (表 1)。F1因子主 要由在表生条件下地球化学性质稳定的元素和氧化 物组成,如 $A_{b}O_{3}$, $F_{e}O_{3}$, TO_{2} 等惰性组分,以及与它 们相关性较强的 V, Li Rh Cr Th Zn ORG(有机 质), ORGC(有机碳), Ni Co U, Pb, Cu等, 它们 的相关系数全部大于 0 5(表 2)。本组合中也包含 了 SD₂, NaO, Cu 但是因子负载为负数,其含量变 化与其它元素和氧化物含量变化呈消长关系, 起稀释 作用。这组化学成分主要为陆源成因,其方差贡献达 55. 893%, 说明 EA01孔沉积物以陆源物质为主。F2 因子包括 CaCO₃, CaO 和 Sr 其中 CaCO₃, CaO 的相 关系数很大(0.985),接近于1(表 2),说明CaO主要 包含于 CaCO3中。 CaCO3, CaO和 Sr的相关系数较 大,应为生物成因,且同时与粗粒沉积物 $(1 \sim 2\phi, 2 \sim$ 3⁽⁴⁾] 呈明显正相关 (相关系数全部大于 0 77), 而粗 粒沉积物少(见图 2 所有 80个样品中有 63个样品 其小干 0.125 mm 的粒级含量大干 95%. 仅有 13个 样品大于 0 125 mm 粒级的含量多于 10%), 与本组 物质的方差贡献远比陆源物质小相吻合; F3因子包 括 B, P₂O₅, C₉, N₁, P₂O₅一般为生物源^[20], P₂O₅, C_0 N i三者成正相关,本因子应属于生源因子。 P_2 Os, Co Ni主要与粘土成较强的正相关,但与后两者 相关的粒级相对更细; F4因子的代表性元素 Zr H f 主要为陆源,它们主要在 $3 \sim 4\phi$ 粒级中富集; F5因子 的代表性元素 Ba比较特殊, 它与 CaCO₃, CaO 和 Sr 的相关系数小.且与其他所有元素和氧化物的相关系 数也很小(表 2),可能来源比较分散。

综上所述, EA01孔沉积物主要为陆源物质。

表 1 主成分分析结果

Table 1	The analytical	results	ofmain	components

主因子	代表性元素和氧化物	方差贡献
	V, TF ϵ O, L i M gO, F ϵ O, A $\frac{1}{2}$ O ₃ , T i ₂ O, SO ₂ , R h,	
F1	Cr, Th, MnO, K_2O , Zn, ORG, Fe_2O_3 , Na_2O ,	55. 893%
	ORGC, Ni, Co, U, Ph, Cu	
F2	CaCO ₃ , CaO, Sr	9 946%
F3	\mathbf{B} $\mathbf{P}_2 \mathbf{O}_5$, $\mathbf{C} \mathbf{q}$ N i	7.847%
F4	Zr H f	6 874%
F5	Ba	3 947%

322 三角图和散点图

由于获得与本钻孔样品同时代的长江和黄河沉 积物样品的化学成分的平均值比较困难,本文中的长 江和黄河沉积物样品化学成分的平均值用其河口地 区表层沉积物化学成分平均值代替。对长江沉积物 而言,如果排除污染及海洋动力因素改造等的影响, 长江冰后期沉积物与表层沉积物的元素平均组成非 常接近^[22],而黄河沉积物自黄河贯通时起大多数元 素含量及其比值和现代黄河三角洲沉积物接近^[23], 因此用长江和黄河河口区表层沉积物化学成分平均 值代替不同时代沉积物样品化学成份的平均值具有 可行性。

过渡金属元素 N i Co Cr V 在搬运和沉积过程 中活动性都不强, 和 La Yb一样都具有比较相似的 化学性质而具有相近的富集规律, 因而可以较好地用 于判断物源。本文选用 N i/Co Cr/V, La/Yb元素比 值作三角图来进行物源判别。 N i/Co-La/Yb-Cr/V 三角图 (图 5)中可见长江样品平均值点落在 EA01 孔沉积物样品点群中, EA01孔沉积物样品点群大致 以 28 78 m 为界线分为上下两部分, 与图 3 图 4吻 合, 而黄河样品平均值点落在 EA01孔沉积物样品点 群外的左上侧。

另以微量元素 U, Th, Zr, Hf作指标,以 U/Th 为纵轴,(Zr+Hf)/(AbO₃/TO₂)为横轴作散点图 (图 6)(AJ Ti都是较典型的不活动元素)。EA01孔 沉积物可大致分为上中下三段,其中 0~19.88 m段 样品分布在长江样品平均值周围,28.78~60.11 m 段样品相对长江样品平均值而言基本以东海表层砂 粒级沉积物均值为中心分布,19.88~28.78 m段样 品作为二者的过渡而略偏向东海表层砂粒级沉积物。 尽管 EA01孔样品点比较分散,但整体而言所有沉积 物样品明显远离黄河样品均值而靠近长江样品平均 值。由于 EA01孔化学元素数据由全岩样测得,因此 图 5和图 6中所用长江、黄河样品均值均采用赵一阳 数据^[24]。

综上所述, EA 01 孔沉积物主要来源于长江。与 图 3,图 4一样,图 5和图 6中沉积物数据也表现出明 显的分段性,且长江沉积物样品代表点分别更接近 EA 01 孔下部或上部的沉积物,这可能是由于图 5和 图 6所使用指标不同,元素地球化学行为有异;同时 也说明了在沉积物物质来源不变的情况下,气候和沉 积环境的变化会对沉积物化学元素组成进行一定程 度的改造和再分配。

表 2 常微量元素相关系数

Table 2 Coefficients of major and trace elements

Th	.560																															
B	218	255																														
Zr	007	- 176	046																													
Pb	.469	.575		- 144																												
Cr	.613	.860	275	- 271	.650																											
H	.007			.731	- 143	279																										
Ba	097	182	.208	017	.148	.154	098																									
Cu	- 447	- 476	.047	- 061	374	559	148	.102																								
Co	.517	.736	.449		.535	.650	- 275	.150	-,293																							
teli	440	.777	.471	311	.581	.711	309	201		.855																						
Zn	.542	.895	.252	372	.600	.852	341	226		.768	.824																					
Sr	175	470		.112	303	472	.246	207	.454	- 364	364																					
V	.609	.909	.260	328	.610	.895	- 354	.164	528	.738	.788	.931	-,522																			
Li	.612	.903	,269	344	.650	.908	398	.129	-,655	.782	.797	.920	-,515	.965																		
Rb	.571	.889	.224	360	.646	.873	368	.151	520	.752	.763	.892	530	.931	.974																	
S102	693	882	366	322	592	875	.318	- 158	.425	744	775	910	306	927	936	890	-															
AbO2	.681	.899	.305	- 312	.651	.884	- 369	158	546	.792	.821	.896	585	.958	.979	.960	905															
TFeO	.617	.892	276	- 352	.599	,891	385	.115	-,548	.771	.787	.917	- 494	.976	.968	.926	931	.953														
FeO	.522	,844	.169	- 316	.548	.861	- 379	132	567	.657	.684	,852	- 499	,909	.913	.891	-,900	.884	.927													
Fe ₂ O ₂	.623	.820	339		.568	,803	- 340	.085	458	.776	.780	.857	425	.910	.892	.838	-,838	,891	.937	.738												
K20	.546	.859	.192	367	.599	.841	-,434	.108	564	.745	.730	.847	585	.909	.959	.971	842	.951	.910	.843	.853											
Na20	419	656	.074	.375	- 471	693	.381		.425	374	506	700	.291	766	710	-,696	.700	679	748	801	601	635										
CaO	015	- 057	.193	.045	- 074	050	206	.002	.286	140	065	.000	.690	091	-,137	185	- 194	- 200	- 104	002	189	- 302	- 098	110								
MgO	512	.900	.319	- 285	.600	188.	-2/1	.200	453	./19	.780	.906	- 440	.951	,923	188,	903	,920	.939	.926	.829	.832	-/61	116	aral							
P208	222	382	.319	010	.132	254	1000	268	040	.578	.575	.391	221	377	.305	.288	- 333	352	293	214	329	285	- 006		353	000						
1102	000	.889	359	- 067	.617	.800	~ 145	.138	•,593	,144	.180	000.	-,409	.921	.906	300	-808	.911	.921	.852	608.	.820	012	- 084	.902	300	024					
IVINO REVE	.535	747	.190	209	.535	,183	318	.079	490	.014	,700	,011	-:414	600,	,800	.805	•,803	804	.901	310	.808	.118	122	+.007	1881	244	.834	740				
1.17986	1.482	111	C96.	1.320	444	.123	- 2/1	,130	-232	.599	.000	113	-,033	.148	.759	040	0.25	200.	.109	.004	.000	.020	001	400	.040	213	.011	.143	000			
DRG	.063	.114	228	- 341	040	.191	400	.099	*.D29	.046	680.	.710	-450	.848	.880	.846	-,035	100.	100.	.024	.194	.832	009	- 104	.810	222	.184	.110	.096	610		
Laure	045	.045	206	- 030	-019	005	101	.009	.411	058	.012	112	.021	028	007	002	319	- 081	724	129	- 082	- 110	194	.980	228	.005	010	.111 CAT	.003	013	0.24	1
PRGE	488	.023	1055	- 309	415	.083	344	.130	-,414	,039	.0U2	.041	314	.090	.129	.106	-113	.113	121	.080	800.	.014	- 460	- 1068	810.	1/1	.028	.041	.031 35:01	010.	.031	-
1	101	In	Ø	41	MO	Cr	11	Da	CU	CO	INI	Zn	21	V	LI	RD		Al203	IneQ.	FeO	-e2O3	K20	145 ⁵ 0	CSO	mgO	M205	1102	MUO	N.32.26	URG	CarO3	

323 其他证据

EA01钻孔中榍石除下部少数地层断续分布以 外,其它地层含量虽然不高,但分布基本连续,另外, 十字石含量虽然较低,但出现频率较高,兰晶石在本 孔也有分布,这三种矿物都是长江的特征矿物^[25,26], 这从另一个角度证明了钻孔沉积物主要来源于长江 入海物质。



图 5 La/Yb—Ni/Co—Cr/V三角图(空心向上三角形 代表上部 28 78 m的样品,实心向下三角形代表下部 样品,五角星形代表长江样品,菱形代表黄河样品, 长江、黄河平均样品数值来自赵一阳^[24])

Fig 5 La/Yb-Ni/Co-Cr/V temary diagram (hollow triangle represents samples of the upper 28 78m, solid triangle represents the samples of the lower part pentacle is sample from the Changjiang River and diamond from the Yellow River Data of the Changjiang and Yellow River from Zhao^[24])



图 6 U/Th-(Zr+Hf)/(A ½O₃ + T O₂)散点图(空心圆 代表最上部 19.88米的样品,空心三角形代表 19.88 ~ 28.78m样品,实心圆代表下部 28.78~60.11m样品, 五角星形代表长江样品平均值,方块代表黄河样品 平均值,五边形代表东海沉积物平均值(实心和 空心分别代表沉积物全样和砂粒级部分平均值), 长江、黄河及东海沉积物样品平均含量来自赵一阳^[24])

Fig 6 U/Th— (Zr+H f) /(A l_2O_3 + TO₂) distribution scatter diagram (holbw circle represents samples from the uppermost 19.88m, hollow triangle from 19.88~ 28.78m and solid circle from 28.78~ 60.11m, pentacle is average sample from the Changjiang River, solid diamonds from the Yellow River and pentagon from the China shallow marine (using hollow and solid to show the average of whole sample and its sandy part accordingly), data of the Changjiang, Yellow River and the East China Sea from Zhad²⁴) 此外,位于 EA01 孔东北部的 EY02—1 孔 (126° 34′E, 30°34′N,水深 90 m,柱长 70 2 m)底栖有孔虫 的定量分析表明该孔附近的陆架在氧同位素 3期以 来主要受长江冲淡水水团影响^[27],它也间接地说明 EA01孔物质应主要来源于长江而不是黄河。

5 结论

(1) EA 01 孔元素地球化学信息对于地层的划分 有良好的指示意义。本文 6条气候变化界线分别与 前人研究中的氧同位素地层划分界限吻合,其中 19.88 m是一条主要由沉积环境变化造成的分界线, 而 45 m和 37.65 m则可能是氧同位素 5期中相邻两 个亚期的上下界限。

(2) EA01孔沉积物清晰地记录了 1个冷事件和 3个暖事件。发生暖事件时, δ^{18} O值比较低, TF₄O, F₂O₃与 TO₂比值低, SO₂, N₂Q, P₂O₅与 TO₂比值 高;发生冷事件时, δ^{18} O值升高, SO₂, N₂O, P₂O₅与 TO₂比值低, F₂O₃与 TO₂比值一般都比较高。发生 冷事件时沉积物粒度相对变细,发生暖事件时则变 粗,粗粒沉积物中 SO₂和 N₂O 含量增加,细粒沉积 物中含微量元素较多,它们与 TO₂的比值相应升高。 P₂O₅为生物源,发生冷事件时 P₂O₅与 TO₂比值下降, 发生暖事件时上升。

(3) EA 01孔沉积物主要为来自长江的陆源物 质,且沉积物的化学成分可能部分受到气候和沉积环 境的影响而有所不同。

致谢 国家海洋局第一海洋研究所孟宪伟研究员和同济大学海洋与地球科学学院杨守业副教授在本文成文过程中给予了不少帮助,在此一并表示感谢,同时向对 EA01 孔进行取样和实验分析的 个人和单位致以衷心的感谢。

参考文献(References)

- 1 Liu Z X, Berne Ş Saito Y, et al Quaternary seism ic stratigraphy and paleoenvironments on the continental shelf of the East China Sea Journal of A sian Earth Sciences 2000, 18, 441~452
- 2 Benne S, Vagner P, Liu Z X, et al Pleistocene forced regressions and sand ridges in the East China Sea Marine Geology 2002 18& 293~ 315
- 3 陈静生,王飞越,程成旗,等. 中国东部主要河流颗粒物的元素组成. 北京大学学报(自然科学版), 1996, 32(2): 206~214[Chen J S W ang FY, Cheng C Q. *et al.* E km en tal composition of river partieulates in the East China Journal of Beijing University (Natural Science E dition), 1996, 32(2): 206~214]
- 4 程天文,赵楚年.我国主要河流入海径流量、输沙量及对沿岸的影

响. 海洋学报, 1985, 7(4): 460~471[Cheng TW and Zhao CN Runoff volumes and sediment discharges of large rivers in China and their influence on the coastal zone A cta O ceanologica Sinica, 1985, 7 (4): 460~471]

- 5 李双林,李绍全,孟祥君.东海陆架晚第四纪沉积物化学成分及物 源示踪.海洋地质与第四纪地质,2002,22(4):21~28[LiShuanglin, LiShaoquan, Meng Xiangjun, Chemical composition and source tracing of late quatemary sed in ents in the East China Sea shelf Marine Geo bgy& Quatemary Geo bgy 2002, 22(4):21~28]
- 6 李绍全,李双林,陈正新,等. 东海外陆架 EA01 孔末次冰期最盛期 的三角洲沉积. 海洋地质与第四纪地质, 2002, 22(3): 19-25[Li Shaoquan, LiShuanglin, Chen Zhengxin, et al. The delta sed in ent of the Maximum Last Glacial of core EA01 from the out continental shelf in the East China Sea Marine Geobgy & Quatemary Geobgy, 2002, 22(3): 19~25]
- 7 李双林. 东海陆架 HY 126 EA1 孔 沉积物稀土元素地球化学.海 洋学报, 2001, 23 (3): 127-132 [Li Shuanglin Geochem is try of rare earth element in sediments at HY 126EA1 hole in the continental shelf of the East China Sea ActaO ceanologica Sinica, 2001, 23(3): 127 ~ 132]
- 8 唐保根,陈裕迅,张异彪,等. 黄海、东海晚第四纪地层划分、特征 及其沉积环境演化的研究. 我国专属经济区和大陆架勘测研究论 文集, 2002. 178~191[Tang Baogen, Chen Yuxun, Zhang Yibiao, et al. The sequences, it's characteristic and the evolution of the environment during the late Qualemary in the Huanghai Sea and the East China Sea. Transactions of the Survey of Exclusive E conomic Zone and Continental Shelf. 2002. 178~191]
- 9 李双林,李绍全,杨文达. 东海陆架 HY126EA1孔有孔虫壳体的 氧、碳同位素记录.海洋学报,2002 24(3):81~87[Li Shuang lin, Li Shaoquan, Yang Wenda, et al Oxygen and carbon isotopic record of foraminiferal crusts from HY126EA1 hole in the continental shelf of the East China Sea ActaO cean obgica Sinica 2002 24(3): 81~87]
- 10 刘娜. 稀土元素在冲绳海槽沉积物物质来源和古海洋环境研究 中的应用[硕士论文].国家海洋局第一海洋研究所. 2002[Liu Na The application of REE in the study of the material source and paleo-environment on the deposit from the Okinawa Trough. The First In stitute of O ceanography, SOA. 2002]
- 11 杨守业,李从先. 长江与黄河现代表层沉积物元素组成及其示踪 作用. 自然科学进展, 1999, 9(10): 930~937[Yang Shouye, Li Congxian The composition and its tracing meaning of the surficial sediments from the Chang jiang and Huanghe River Advances of Natunal Sciences, 1999, 1(10): 930~937]
- 12 Gang jian Wei Ying Liu, Xianhua Li, et al Major and trace element variations of the sed in ents at ODP Site 1144. South China Sea during the last 230 ka and their paleoclimate implications. Palaeo-geography, Palaeoclimatology, Palaeoeclogy, 2004, 212, 331~342
- 13 赵红格,刘池洋. 物源分析方法及研究进展. 沉积学报, 2003, 21 (3): 409-415[Zhao Hongge Liu Chiyang Approaches and prospects of provenance analysis Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 21 (3): 409~415]
- 14 余华, 刘振夏, 熊应乾, 等. 东海 DGKS9617岩芯物源研究. 沉

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

积学报, 2004 22 (4): 651 ~ 657 [Yu Hua, Liu Zhenxia, Xiong Yingqian, *et al.* Provenance study of Core DGKS9617 in the East China Sea, A cta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(4): 651~657]

- 15 金秉福. 未次冰期东海南部沉积物特征和物源分析 [博士论文]. 中国海洋大学, 2003 [Jin Bingfu The characteristics and provenance of the sediment in the Southern East China Sea during the Last Glacial Age Ocean University of China 2003
- 16 杨守业,李从先,张家强. 苏北滨海平原冰后期古地理演化与沉积物物源研究.古地理学报, 2000 2(2):65~72[Yang Shouyę LiCongxin, Zhang Jiaqiang Palaeogeographic evolution of coastal plain and provenance study of postglacial sediments in North Jiangsu Province Journal of Palaeogeography, 2000, 2(2):65~72]
- 17 熊应乾,杨作升,刘振夏. 长江、黄河沉积物物源研究综述. 海洋 科学进展,2003,21(3):355~362[XiongYQ,YangZS,LiuZ X A review of source study of the Changjiang and Yellow river sediments Advance in Marine Science, 2003, 21(3):355~362]
- 18 杨作升.黄河、长江、珠江沉积物中粘土的矿物组合、化学特征及 其与物源区气候环境的关系.海洋与湖沼, 1988, 19(4): 336 ~ 346[Yang Z S M in erabgical assemblages and chem ical characteristics of clays from sediment of the Y ellow, Changjiang and Pearl R ivers and their relations to the climate environments in their sediment source areas Oceanologia et Limnologia Sinica, 1988, 19(4): 336~ 346]
- 19 Yang S Y, Li C X, Jung H S, et al D iscrimination of geochemical compositions between the Changjiang and the Huanghe sediments and its application for the identification of sediment source in the Jiangsu coastal plain, China Marine Geology, 2002, 186 229~ 241
- 20 赵振华. 微量元素地球化学原理. 北京:科学出版社, 1995 [Zhao Zhenhua Geochemical Principles of Trace Elements, Beijng Science Press, 1995]
- 21 代大经,唐正松,陈鑫堂,等. 铀的地球化学特征及其测井响应在 油气勘探中的应用. 天然气工业, 1995, 15(5): 21~ 24[DaiDar jing TangZhengsong Chen Xintang et al. The geochem istry char-

acteristic of U and its response in well bgging application in oil gas exploration N atural Gas Industry, 1995, 15(5): $21 \sim 24$]

- 22 杨守业,李从先,赵泉鸿,等. 长江口冰后期沉积物的元素组成特征. 同济大学学报,2000,28 532~ 536[Yang S Y, Li C X, Zhao Q H, et al Characteristics of element composition of postglacial sediment in the Changjiang River estuary Journal of Tongji University, 2000, 28(5): 532~ 536]
- 23 杨守业,蔡进功,李从先,等. 黄河贯通时间的新探索. 海洋地 质与第四纪地质,2001,21(2):15~20[Yang SY, Cai JG, Li C X, et al. New discussion about the run-through time of the Yellow River Marine Geology & Quatemary Geology, 2001,21(2):15~ 20]
- 24 赵一阳, 鄢明才. 中国浅海沉积物地球化学. 北京: 科学出版 社, 1994[Zhao Yiyang Yan Mingcai Geochemistry of Sediments of the China Shelf Sea Beijing Science Press, 1994]
- 25 孙白云.黄河、长江和珠江三角洲沉积物中碎屑矿物的组合特征.海洋地质与第四纪地质, 1990, 10(3): 23~34 [Sun B Y. Detrita lm ineral assemblages in the Yellow, Changjiang and Pearl R iver delta sed in ents Marine Geology & Quatemary Geology, 1990, 10 (3): 23~34]
- 26 罗曼云,石斯器,林锦英.南黄海西部表层沉积物中重矿物分 布特征及其组合分区.海洋地质与第四季地质,1983,3(1):55~ 64[Luo Manyun, Shi Siqi Lin Jinying Heavy mineral assemblage and its distribution in the surface sediments of the western south Yellow sea Marine Geology & Quaternary Geology, 1983,3(1):55 ~ 64]
- 27 庄丽华,李铁刚,常凤鸣,等. 东海中陆架晚第四纪底栖有孔虫定量分析. 海洋地质与第四纪地质, 2004, 24(1): 43~50[Zhuang-Lihua, Li Tiegang, Chang Fengming *et al* Quantitative analysis on the benthic foraminifer fauna in Late Quatemary Period in the North Continental Shelf of the East China Sea Marine Geobgy & Quatemary Geobgy 2004 24(1): 43~50]

Variation and Its Implication of Major and Trace Elements of EA01 from the Continental Shelf of the East China Sea

XIONG Ying-qian^{1, 2} LIU Zhen-xia¹ DU De-wen¹ YU Hua^{1, 2} LI Shuang-lin³ (1 Ocean University of China Qingdao Shandong 266003, 2 First Institute of Ocean ography, SOA, Qingdao Shandong 26606 k, 3 Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao, Shandong 266071)

Abstract There are only a few long cores drilled and studied on the outer continental shelf of the East Ch ina Seaw ith water depth more than 50m, core EA01 is one of them with many indexes analyzed The present study mainly utilizes geochemical data to study the sequence and material source of the core The down core variation of geochemical data is an inportant index for the sequence and paleoclimate, 1 cold event and 3 warm events are identified M anymethods including factor analysis, La/Yb—Ni/Co—Cr/V ternary diagram and U/Th—(Zr+Hf)/(A bO_3 + T O_2) distribution scatter diagram are used to determ ine the material source of core EA01, and it is found that the material of core EA01 mainly come from the Changjiang River which may vary partly according to different climate and environment **Key words** continental shelf of the East Ch ina Sea, geochemistry, material source, EA01