

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^{1,2} 刘振夏¹ 杜德文¹ 余 华^{1,2} 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+TD₂) 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。

EA01 孔 (125°45' 6058'E, 30°22' 6914'N, 水深 67.1 m, 柱长 60.11 m) 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^[8,9]。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以区分 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 SiO₂ 采用硅氟酸钾容量法, FeO: 试样用氢氟酸-硫酸分解, 以饱和和硼酸除去过量氟, 用二苯胺磺酸钠作指示剂, 标准重铬酸钾溶液滴定, Al₂O₃, Fe₂O₃, K₂O, Na₂O, CaO 和 MgO 等及微量元素采用等离子发射光谱测定^[5,7]; 地

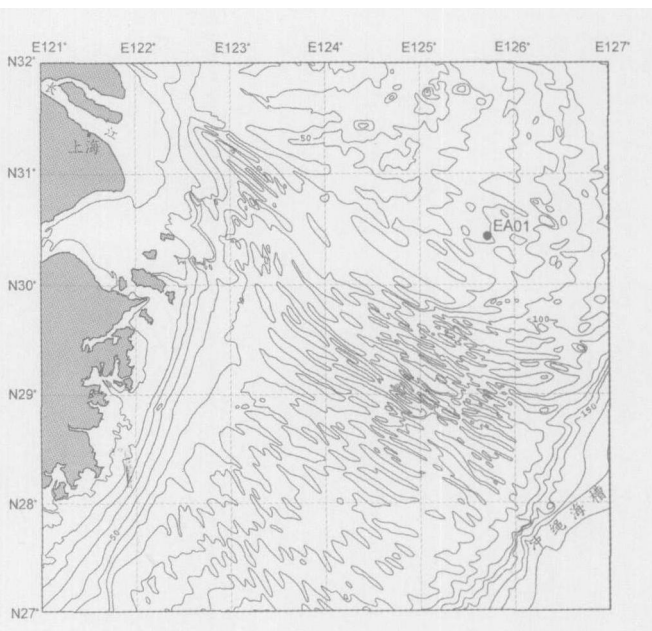


图 1 EA01 孔位置图

Fig 1 Location of Core EA01

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

矿部海洋地质实验测试中心鉴定的 250 个微体古生物样 (有孔虫和介形虫) 以及中国科学院长春分院

析测试中心地理所对 60 个样品进行的孢粉分析。元素对比值可以淡化沉积物粒度对元素丰度的影

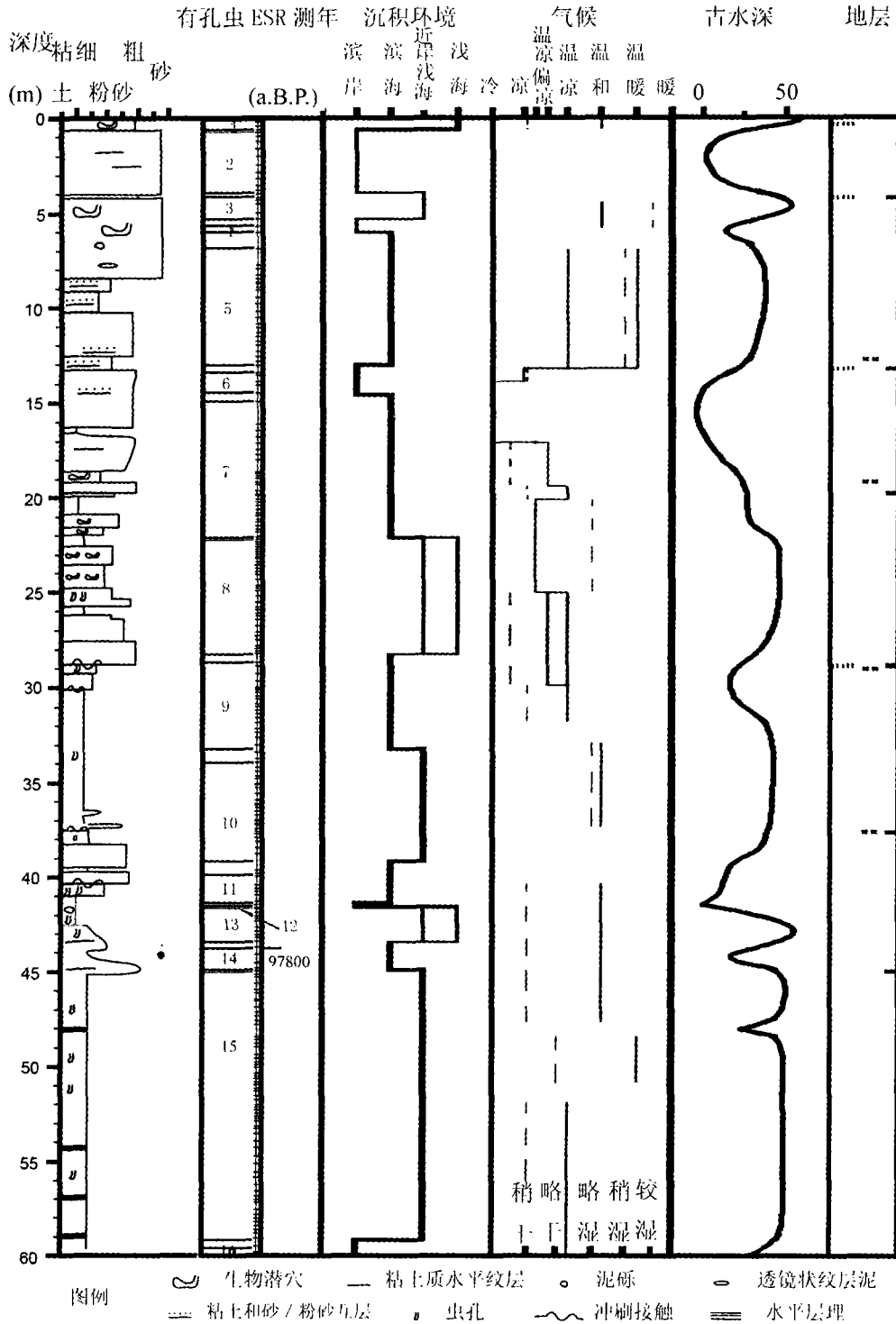


图 2 EA01岩性柱状图 本图综合整理前人资料,有孔虫栏依据其种类和分异度分为 16 个带,右侧为取样位置;气候栏据孢粉资料整理而成,实线为气温,虚线为湿度,实线和虚线同步中断处孢粉颗粒贫乏;地层界线栏左侧为唐保根^[8]数据,中间为李双林^[9]数据,右侧为本文元素地层分层

Fig. 2 Lithostratigraphic log of Core EA01. Synthesis after the previous data, foraminifer 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 humidity, the break of both lines means poverty of pollen.

响^[11],且研究发现 Al_2O_3 , K_2O , MgO , $FeO(T)$, MnO 与 $TiO_2(Ti)$ 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, Na_2O 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 $TiO_2(Ti)$ 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/或黄河源^[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-变质阶段其分布形式基本平行;过渡金属元素 Ni , Co , 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 Sc , Ti , Fe , Th , Cr 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 $TiO_2(Ti)$ 比值的垂向变化特征以 4.10 m, 13.2 m, 19.88 m, 28.78 m, 37.65 m和 45 m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 28.78 m是一个明显的分界线:此线以下 Al_2O_3 , $TFeO$, Fe_2O_3 , K_2O , Li , Th , Cr 等元素和氧化物含量与 $TiO_2(Ti)$ 比值向上波动递减, $TFeO$, MgO , MnO 等氧化物含量与 $TiO_2(Ti)$ 比值相对较高, SD_2 , Na_2O , P_2O_5 , Sr , Zr , Hf , Cu , Ba 等与 $TiO_2(Ti)$ 的比值为岩芯中的最低值;此线以上 SD_2 , Na_2O , P_2O_5 , Sr , Zr , Hf , Cu , Ba 等与 $TiO_2(Ti)$ 比值明显升高, $TFeO$, MgO , MnO , Li , Th , Cr 等元素和氧化物含量与 $TiO_2(Ti)$ 比值降低。

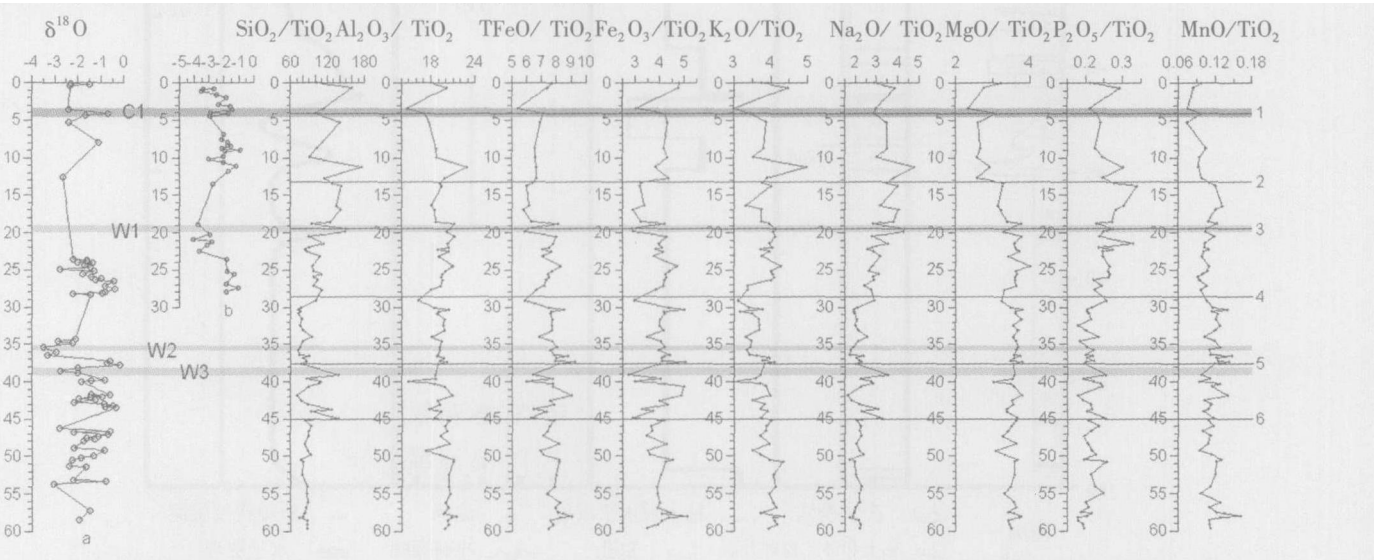


图 3 常量元素与 TiO_2 比值垂向变化 阴影 C1代表 1次冷事件,阴影 W1-W3代表 3次暖事件,横线表示气候变化的界线

$\delta^{18}O$ 栏取自李双林^[9]其中曲线 aA. compressiuscula, 曲线 b为 A. beccariivar

Fig 3 T-normalized ratios of the major elements SiO_2 , Al_2O_3 , $TFeO$, Fe_2O_3 , K_2O , Na_2O , MgO , P_2O_5 and MnO shade area C1 represent cold event W-W 3 represent two warm events horizontal lines depict the boundary of climate change

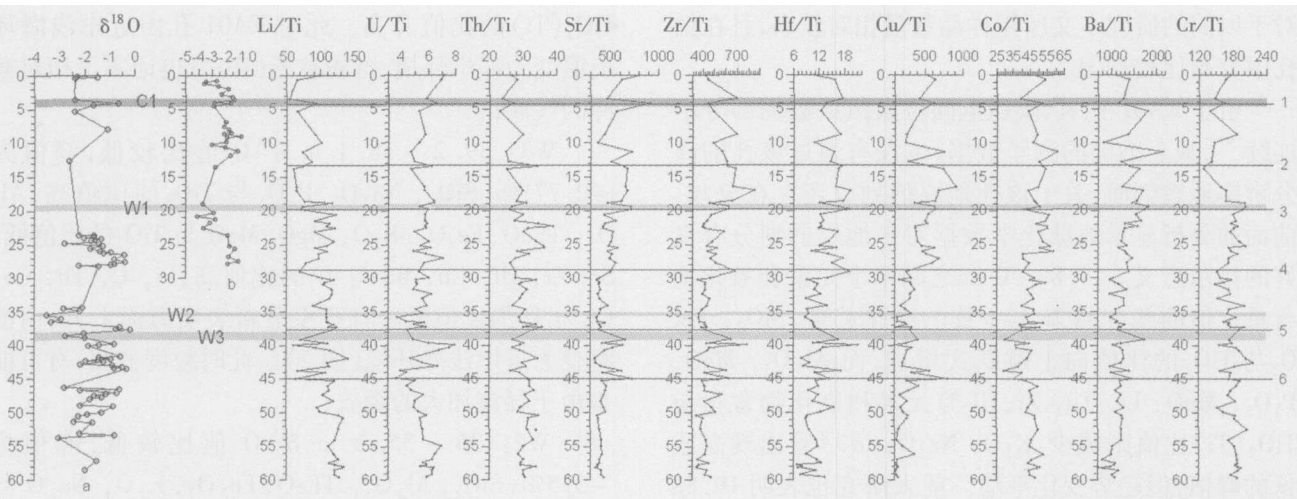


图 4 微量元素与 Ti 比值垂向变化 阴影 C1 代表 1 次冷事件, 阴影 W1-W3 代表 3 次暖事件, 横线表示气候变化的界线;

$\delta^{18}\text{O}$ 栏改自李双林^[9] 曲线 a 为 *A. compressiuscula*, 曲线 b 为 *A. beccarii* var

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, W1-W3 represent warm events, horizontal lines depict the boundary of climate change

60~45 m: Al_2O_3 , TFeO , K_2O , Li, U, Co, Cr 等元素和氧化物含量与 TiO_2 (Ti) 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 SD_2 , Na_2O , Sr 等元素和氧化物含量与 TiO_2 (Ti) 比值低而波动幅度小。

45~37.65 m: 各元素和氧化物含量与 TiO_2 (Ti) 比值曲线出现高频突变, 其中相对 60~28.78 m 段整体趋势而言 SD_2 , Na_2O , Sr 与 TiO_2 (Ti) 比值出现两次高值, TFeO , Fe_2O_3 , Li, Th, Co 与 TiO_2 (Ti) 比值在大致相近的位置则出现两次低值, 所有元素和氧化物含量与 TiO_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 TiO_2 比值低而稳定, K_2O , Li, Cr 与 TiO_2 (Ti) 比值延续在 60~37.65 m 段减小的趋势, MnO 与 TiO_2 的比值在本段内持续减小, P_2O_5 , U 与 TiO_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 TiO_2 (Ti) 比值波动幅度不大, SD_2 , K_2O , Na_2O , P_2O_5 , Sr, Zr, Hf, Cu, Co, Ba, Cr 与 TiO_2 (Ti) 比值相对 37.65~28.78 m 段比值增加。 MnO 与 TiO_2 (Ti) 的比值在本段内呈略微上升趋势。

19.88~13.2 m: Al_2O_3 , TFeO , Fe_2O_3 , K_2O , MgO, Li, Cr 等元素和氧化物含量与 TiO_2 (Ti) 比值在本段明显比 28.78~19.88 m 段比值降低, SD_2 , Na_2O , P_2O_5 , Sr 与 TiO_2 (Ti) 的比值则延续 28.78~

19.88 m 趋势继续升高。 P_2O_5 , Zr, Cu 与 TiO_2 (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 , Fe_2O_3 , Li 与 TiO_2 (Ti) 的比值相对 19.88~13.2 m 增加, P_2O_5 , MnO, Th, Zr, Hf, Co 与 TiO_2 (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 Fe_2O_3 , MgO, MnO, Li, Cr 等元素和氧化物含量与 TiO_2 (Ti) 比值的一个明显的变化趋势 (高低值转换) 转折点。

4.10~0 m: TFeO , Fe_2O_3 , K_2O , MgO, MnO, Li, U, Sr, Cr 等元素和氧化物含量与 TiO_2 (Ti) 比值在本段呈上升趋势, 只有 Zr, Hf 含量与 Ti 与 TiO_2 (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 88~0 m 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,SO₂, Fe₂O₃ 与 TD₂ 的比值向上跳跃式增加,而 Al₂O₃, MgO, P₂O₅, MnO, Li, Th, Zr, Hf 等元素和氧化物含量与 TD₂ (Ti) 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 TD₂ (Ti) 比值变化规律性比较明显: Al₂O₃, Fe₂O₃, K₂O, Li, Th, Cr 等元素和氧化物含量与 TD₂ (Ti) 比值向上波动递减, TF₂O, MgO, MnO 等元素和氧化物含量与 TD₂ (Ti) 比值相对比较高而基本稳定, SO₂, Na₂O, P₂O₅, Sr, Zr, Hf, Cu, Ba 等与 TD₂ (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 Al₂O₃, TF₂O, Fe₂O₃, 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 TD₂ (Ti) 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 δ¹⁸O 值比较高,峰值为 -0.686‰, SO₂, Al₂O₃, TF₂O, Fe₂O₃, K₂O, Na₂O, P₂O₅, Ba 的含量与 TD₂ (Ti) 的比值降低, MgO, MnO, Li, U, Th, Sr, Cu, Ca, Cr, Zr, Hf 的含量与

TD₂ (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;

W3: 39.2~38.1 m δ¹⁸O 值比较低,峰值为 -2.771‰, SO₂, Na₂O, P₂O₅ 与 TD₂ 的比值高, Al₂O₃, TF₂O, Fe₂O₃, K₂O, MgO, MnO 与 TD₂ 的比值低; Sr, Zr, Hf, Cu, Ba 与 Ti 的比值高, Li, U, Th, Co, Cr 与 Ti 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;

W2: 36~35.2 m δ¹⁸O 值比较低,峰值为 -3.5‰, SO₂, Al₂O₃, TF₂O, Fe₂O₃, K₂O, Na₂O 与 TD₂ 的比值低, MgO, P₂O₅, MnO 与 TD₂ 的比值略有升高; Li, U, Th, Sr, Zr, Hf, Cu, Ca, Ba, Cr 与 Ti 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 SO₂, Na₂O 与 TD₂ 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)。

W1: 20~19 m δ¹⁸O 值小于 -2‰, SO₂, Al₂O₃, K₂O, Na₂O, MgO, P₂O₅, MnO 与 TD₂ 的比值高, TF₂O, 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 SO₂, Na₂O 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, Na₂O 可能是赋存于长石中,粒度偏粗其含量增加,变细则减少。P₂O₅ 则一般为生物源^[20],气候相对寒冷时生物生产力下降, P₂O₅ 的含量与 TD₂ 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 TF₂O, Fe₂O₃ 与 TD₂ 比值低可能与物质供应量和生物生命活动需要耗铁有关。SO₂, Na₂O, P₂O₅ 与 TD₂ 比值一般都比较低,但在 W2 时多数元素和氧化物都未出现显著的峰值, SO₂, Na₂O, P₂O₅ 与 TD₂ (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 Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 等惰性组分, 以及与他们相关性较强的 V, Li, Rb, Cs, 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 SiO_2 , Na_2O , 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 $CaCO_3$, CaO 和 Sr, 其中 $CaCO_3$, CaO 的相关系数很大(0.985), 接近于 1(表 2), 说明 CaO 主要包含于 $CaCO_3$ 中。 $CaCO_3$, 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(1~2 ϕ , 2~3 ϕ)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 个样品其小于 0.125 mm 的粒级含量大于 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, P_2O_5 , Co, Ni, P_2O_5 一般为生物源^[20], P_2O_5 , Co, Ni 三者成正相关, 本因子应属于生源因子。 P_2O_5 , 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, Hf 主要为陆源, 它们主要在 3~4 ϕ 粒级中富集; F5 因子的代表性元素 Ba 比较特殊, 它与 $CaCO_3$, 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 of main components

主因子	代表性元素和氧化物	方差贡献
	V, TFeO, Li, MgO, FeO, Al_2O_3 , Ti_2O , SiO_2 , Rb,	
F1	Cs, Th, MnO, K_2O , Zn, ORG, Fe_2O_3 , Na_2O ,	55.893%
	ORGC, Ni, Co, U, Pb, Cu	
F2	$CaCO_3$, CaO, Sr	9.946%
F3	B, P_2O_5 , Co, Ni	7.847%
F4	Zr, Hf	6.874%
F5	Ba	3.947%

3 2 2 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 Ni, 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 Ni/Co, Cr/V, La/Yb 元素比值作三角图来进行物源判别。Ni/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, $(Zr+Hf)/(Al_2O_3/TiO_2)$ 为横轴作散点图(图 6)(Al, 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, EA01 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 EA01 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。

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) EA01 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, $\delta^{18}\text{O}$ 值比较低, TFeO , Fe_2O_3 与 TD_2 比值低, SD_2 , Na_2O , P_2O_5 与 TD_2 比值高; 发生冷事件时, $\delta^{18}\text{O}$ 值升高, SD_2 , Na_2O , P_2O_5 与 TD_2 比值低, Fe_2O_3 与 TD_2 比值一般都比较低。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 SD_2 和 Na_2O 含量增加, 细粒沉积物中含微量元素较多, 它们与 TD_2 的比值相应升高。 P_2O_5 为生物源, 发生冷事件时 P_2O_5 与 TD_2 比值下降, 发生暖事件时上升。

(3) EA01 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 ZX, Beme S, Saito Y, *et al*. Quaternary seismic stratigraphy and paleoenvironments on the continental shelf of the East China Sea. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2000, 18: 441~452
- 2 Beme S, Vagner P, Liu ZX, *et al*. Pleistocene forced regressions and sand ridges in the East China Sea. *Marine Geology*, 2002, 188: 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 JS, Wang FY, Cheng CQ, *et al*. Elemental composition of river particulates in the East China. *Journal of Beijing University (Natural Science Edition)*, 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. *Acta Oceanologica 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 [Li Shuanglin, Li Shaoquan, Meng Xiangjun. Chemical composition and source tracing of late quaternary sediments in the East China Sea shelf. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 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, Li Shuanglin, Chen Zhengxin, *et al*. The delta sediment of the Maximum Last Glacial of core EA01 from the outer continental shelf in the East China Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2002, 22(3): 19~25]
- 7 李双林. 东海陆架 HY126 EA1 孔沉积物稀土元素地球化学. *海洋学报*, 2001, 23(3): 127~132 [Li Shuanglin. Geochemistry of rare earth element in sediments at HY126EA1 hole in the continental shelf of the East China Sea. *Acta Oceanologica 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 of characteristic and the evolution of the environment during the late Quaternary in the Huanghai Sea and the East China Sea. *Transactions of the Survey of Exclusive Economic 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 Shuanglin, 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. *Acta Oceanologica 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 [硕士学位论文]. 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 Institute of Oceanography, 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 Changjiang and Huanghe River. *Advances of Natural Sciences*, 1999, 1(10): 930~937]
- 12 Gangjian Wei, Ying Liu, Xianhua Li, *et al*. Major and trace element variations of the sediments at ODP Site 1144, South China Sea during the last 230 ka and their paleoclimate implications. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 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*

- 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. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004, 22(4): 651~657]
- 15 金秉福. 末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 Shouye, Li Congxian, 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 [Xiong Y Q, Yang Z S, Liu Z 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. Mineralogical assemblages and chemical characteristics of clays from sediment of the Yellow, Changjiang and Pearl Rivers 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.* Discrimination 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*. Beijing: 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 [Dai Dajing, Tang Zhengsong, Chen Xintang *et al.* The geochemistry characteristic of U and its response in well logging application in oil gas exploration. *Natural Gas Industry*, 1995, 15(5): 21~24]
- 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 S Y, Cai J G, Li C X, *et al.* New discussion about the run-through time of the Yellow River. *Marine Geology & Quaternary 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. Detrital mineral assemblages in the Yellow, Changjiang and Pearl River delta sediments. *Marine Geology & Quaternary 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. *海洋地质与第四纪地质*, 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 Quaternary Period in the North Continental Shelf of the East China Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 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 Oceanography, SOA, Qingdao, Shandong 266061;

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 China Sea with 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 important index for the sequence and paleoclimate, 1 cold event and 3 warm events are identified. Many methods including factor analysis, La/Yb-Ni/Co-Cr/V ternary diagram and U/Th-(Zr+Hf)/(Al₂O₃+TiO₂) distribution scatter diagram are used to determine 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 China Sea, geochemistry, material source, EA01