

# 东海内陆架 EC2005 孔重矿物组合特征及其物源指示意义\*

董江<sup>1,2</sup> 李安春<sup>1</sup> 徐方建<sup>2</sup> 黄朋<sup>1</sup> 张凯棣<sup>1</sup>

(1. 中国科学院海洋研究所海洋地质与环境重点实验室 青岛 266071;

2. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院 青岛 266580)

**摘要** 为探讨东海内陆架 17.3ka BP 以来的重矿物含量变化及其物源指示意义,对东海内陆架南部泥质沉积中心 EC2005 孔的沉积重矿物进行了鉴定和分析。结果表明:(1) 在 0.063—0.25mm 粒级沉积物中,重矿物含量平均值为 27.3%,变化范围为 3.7%—89.6%,重矿物含量较高的部分均出现在自生黄铁矿富集层位;(2) 片状矿物、含铁氧化物、角闪石族矿物、绿帘石族矿物、白云石、辉石族矿物、变质矿物、蚀变矿物和自生黄铁矿占重矿物颗粒总数的 96.0%以上,但其含量变化很大;(3) 以重矿物分布特征为依据将岩心划分为 5 个沉积层段,各层段对应的特征矿物分别为片状矿物、白云石、片状矿物、自生黄铁矿和榍石。结合粒度、AMS<sup>14</sup>C 年代及西太平洋海平面变化等数据对物源进行分析,结果表明:自 17.3ka BP 以来,EC2005 孔沉积物源主要是长江,其次还可能受到瓯江等浙江沿岸河流所输运物质的一定影响。

**关键词** 重矿物;物源;EC2005 孔;东海内陆架

**中图分类号** P736.21+2 **doi:** 10.11693/hyh20141100335

东海大陆架是中国边缘海的重要组成部分,每年来自长江、黄河、台湾河流和浙-闽沿岸河流携带的大量入海物质在此沉积(Liu *et al.*, 2006, 2007; Liu *et al.*, 2010; Xu *et al.*, 2012; Zhou *et al.*, 2014)。特别是全新世高海平面以来,在东海内陆架沉积了大量的以粉砂和粘土粒级为主的细粒物质,形成了东西向宽约 100km、北东-南西向长约 800—1000km 的泥质沉积区(图 1, 秦蕴珊等, 1987; Liu *et al.*, 2006, 2007; Xu *et al.*, 2009a)。因此,东海陆架上的沉积物记录了丰富的地质信息,是追踪源与汇过程和研究海陆相互作用理想区域。

碎屑矿物分析,特别是重矿物分析,是研究沉积物的矿物组成、分布规律及沉积物来源的基本方法。目前在东海陆架沉积物中碎屑矿物方面已取得较多的研究成果。早在 20 世纪 80 年代初陈丽蓉等(2008)

就对东海陆架表层沉积物中的碎屑矿物进行了系统研究,通过碎屑矿物组合特征和分布规律探讨了东海表层沉积物源。近年来, Q 聚类或 R 聚类分析等数理统计方法被广泛用于探讨碎屑矿物组合特征及其分布规律(王先兰等, 1982; 王先兰, 1986; 王昆山等, 2003; 王中波等, 2012); 同时,重矿物组合特征、锆石等单矿物的表面微结构及地球化学等手段也被广泛的应用于对沉积物源的研究中(孙白云, 1985; Chen, 1989; 杨守业, 2000)。此外,一些学者还利用自生黄铁矿等特征矿物来探讨沉积环境(李安春等, 1991; 初凤友等, 1994, 1995; 王昆山等, 2005)。

由此可见,前人对东海陆架碎屑矿物的研究对象主要针对陆架表层和内陆架全新世泥质沉积体,而对末次冰期以来东海内陆架碎屑矿物特别是内陆架重矿物的研究较少。本文通过分析东海内陆架

\* 国家自然科学基金重点项目, 41430965 号; 国家自然科学基金项目, 41106040 号, 41406064 号。董江, 博士研究生, E-mail: fzdongjiang@163.com

通讯作者: 李安春, 博士生导师, 研究员, E-mail: acli@qdio.ac.cn

收稿日期: 2014-11-28, 收修改稿日期: 2015-03-18

南部沉积中心 EC2005 孔(图 1)的重矿物, 并结合已有的 EC2005 孔的岩性描述、沉积物粒度和 AMS<sup>14</sup>C 年代测试等数据(徐方建等, 2009; Xu *et al.*, 2009b, 2011), 探讨末次冰消期以来东海内陆架的物源变化。

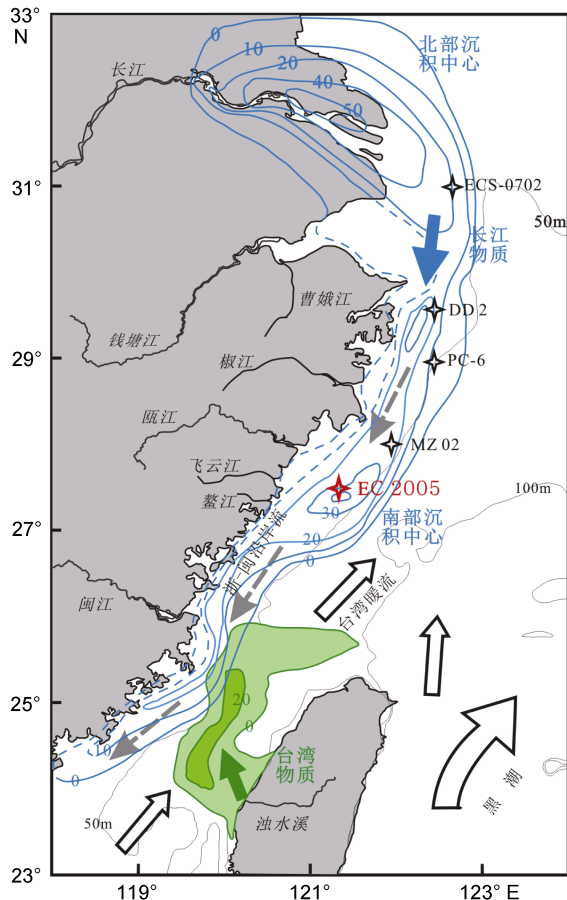


图 1 东海内陆架泥质沉积厚度分布图

Fig.1 Isopach map (in meters) of fine grained sediments area in the inner shelf of the East China Sea

图中蓝色数字为近 7ka BP 以来长江物质在东海内陆架的沉积厚度(m), 蓝色虚线为不确定边界(修改自 Liu *et al.*, 2006, 2007); 绿色数字为近 11ka BP 以来台湾物质在台湾海峡附近的沉积厚度(m)(修改自 Xu *et al.*, 2012); 黑色箭头表征东海主要流系(修改自苏纪兰, 2001; Ichikawa *et al.*, 2002); 黑色四角形为前人研究站点位置, 红色四角星代表 EC2005 孔站点位置

## 1 区域概况

东海大陆架位于西太平洋边缘岛弧与欧亚大陆之间, 是世界上最为宽广平坦的边缘陆架之一, 其在全球陆架研究中占有重要的地位。陈丽蓉(2008)根据东海大陆架的碎屑矿物分布特征将其分为 3 个矿物区: 内陆架矿物区、外陆架矿物区和虎皮礁矿物区(图 2)。在东海陆架重矿物组分以普通角闪石和绿帘石为

主的背景下, 内陆架矿物区因其较高的轻矿物、片状矿物(白云母、黑云母、绿泥石、风化云母和绿色云母)和白云石含量而区别于其它矿物区; 与该区的舟山矿物亚区不同, 长江口矿物亚区碎屑方解石的含量较高。沉积物类型以细砂和粉砂质泥为主的虎皮礁矿物区含有较多的橄榄石。沉积物类型以细砂为主的外陆架矿物区的钾长石和由变质作用形成的典型变质矿物(十字石、蓝晶石、红柱石、夕线石)含量较高, 明显区别于其它矿物区(秦蕴珊等, 1987; 王昆山等, 2003; 陈丽蓉, 2008; 王中波等, 2012)。

东海海域的海流主要由黑潮、台湾暖流以及浙-闽沿岸流组成(图 1)。在近岸水域, 是具有盐度低、水温变化大等特点的浙-闽沿岸流。该流系主要受东亚季风控制: 夏季风盛行时, 流向东北; 冬季风盛行时, 其携带大量悬浮物质, 向西南方向流动(苏纪兰, 2001; 虞兰兰等, 2011; 李伟等, 2012; 李鹏等, 2014)。浙-闽沿岸流以东为台湾暖流, 具有高温高盐的特征, 其与浙-闽沿岸流之间形成锋面。台湾暖流以东为黑潮, 发源于北赤道, 具有流速快、流量大、流幅狭窄和高温高盐等特征(苏纪兰, 2001; Ichikawa *et al.*, 2002; Moon *et al.*, 2014)。

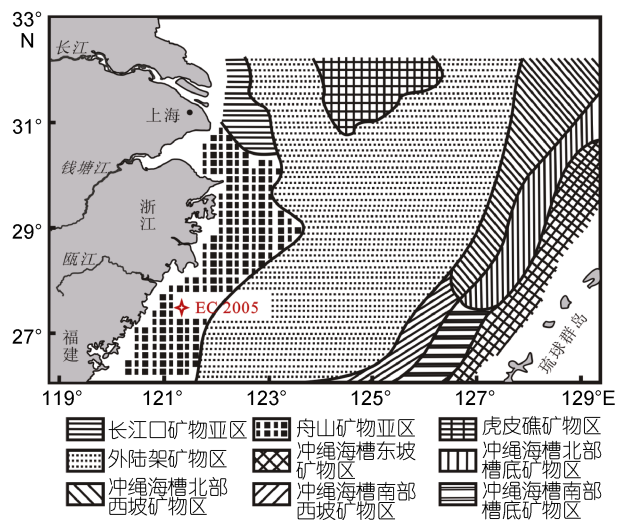


图 2 东海碎屑矿物分区(陈丽蓉, 2008)

Fig.2 Detrital mineral assemblage province in the East China Sea (Chen, 2008)

## 2 材料与方法

研究所用的岩心为中国科学院海洋研究所委托上海海洋石油局第一海洋地质调查大队勘 407 轮于 2005 年 11 月取自东海内陆架浙-闽沿岸泥质区南部沉积中心。

岩心长 60.20m, 站位编号为 EC2005 (121°20.0036'E, 27°25.0036'N, 水深 36m, 见图 1 和图 2)。

重矿物分析平均取样间隔为 1m, 近表层加密, 样品总数共 63 个。将沉积物原样品放入去离子水中浸泡 48h, 然后过孔径为 0.063mm 的水筛, 得到 >0.063mm 的沉积物组分。待样品低温(<60°C)烘干后, 过孔径为 0.25mm 的干筛, 得到 0.063—0.25mm 粒级的样品。称重后对 0.063—0.25mm 粒度样品用比重为 2.80 的三溴甲烷(CHBr<sub>3</sub>)重液(陈丽蓉, 2008)进行轻、重矿物的分离。经过低温烘干后称重, 并对样品的重矿物组分用实体显微镜和偏光显微镜进行鉴定, 其中生物碎屑较少的 41.50—60.20m 层段鉴定矿物 300—400 颗, 生物碎屑较多的 0—41.50m 层段鉴定矿物 400—500 颗。自生黄铁矿以实体显微镜为主, 其它矿物用油浸法在 Leica DMRX 偏光显微镜下鉴定, 重复鉴定的相对误差小于 5%。鉴定工作在中国科学院海洋研究所海洋地质与环境重点实验室完成。

### 3 结果

#### 3.1 矿物形态与组合特征

在 0.063—0.25mm 粒级的重矿物样品中, 共鉴定出重矿物 40 种, 分别为片状矿物、磁铁矿、钛铁矿、赤铁矿、铬铁矿、褐铁矿、普通角闪石、透闪石、钠铁闪石、钠闪石、褐帘石、绿帘石、黝帘石、普通辉

石、透辉石、紫苏辉石、蓝晶石、红柱石、夕线石(硅线石)、白云石、楣石、橄榄石、石榴子石、尖晶石、霓石、电气石、磷灰石、黄长石、天青石、黄玉、硅灰石、重晶石、硬柱石、符山石和蚀变矿物及自生黄铁矿。由于蚀变矿物是完全失去原有矿物光性特征从而无法辨认的矿物, 且其比重大于 2.80, 在此将蚀变矿物作为一类重矿物单独列出。

在上述矿物中, 片状矿物中的白云母和黑云母多为次棱角状—次圆状, 而风化云母则多以灰褐色、土黄色和墨绿色的厚板状的云母类矿物集合体形态出现。磁铁矿形态多为粒状形态出现。普通角闪石和绿帘石形态大多为带绿色调的不完整柱状, 晶型较好, 但边缘部分遭受不同程度的溶蚀, 此外, 普通角闪石矿物中出现褐色角闪石的概率极小。白云石多以白色和淡黄色粒状形态出现。自生黄铁矿具有明显的自生特征, 且在岩心中粒径和形状变化较大: 在 36.5—10.0m 层段出现大量自生黄铁矿, 其粒径较大, 并与其它矿物出现弱胶结现象, 主要形状为长棒状、粒状和块状集合体, 含自生黄铁矿的生物壳体大都被完全充填; 从 10.0m 到岩心顶部, 自生黄铁矿粒径较 36.5—10.0m 中的自生黄铁矿明显偏小, 主要形态为圆球状或粒状集合体, 含自生黄铁矿的生物壳体被少量充填, 此外, 有孔虫等生物壳体及碎屑含量也明显增加。

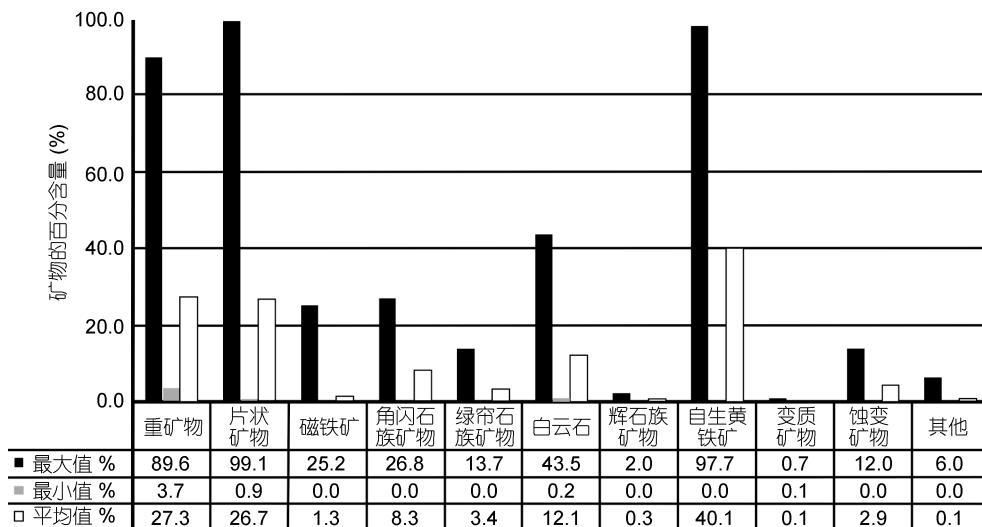


图 3 EC2005 孔沉积物中主要重矿物含量分布图(0.063—0.25mm)

Fig.3 Content of dominant minerals in the sediments of core EC2005 (0.063—0.25mm)

在 EC2005 孔重矿物组分中, 含量较多的重矿物主要为自生黄铁矿、片状矿物、白云石、角闪石族矿物(主要为普通角闪石和透闪石)、绿帘石族矿物(主要

为绿帘石)、蚀变矿物、含铁氧化物(主要为磁铁矿)、辉石族矿物(主要为普通辉石)和变质矿物(图 3)。它们占重矿物总数的 96.0%以上, 但百分含量变化很大。

其余矿物相对百分含量较少, 出现频率较低, 且不连续。岩心中重矿物含量(在 0.063—0.25mm 粒级中重矿物的质量百分含量)的平均值为 27.3%, 变化范围为 3.7%—89.6%, 自生黄铁矿富集的层位重矿物含量较高。

### 3.2 EC2005 孔重矿物变化特征

根据重矿物各组分含量的变化关系, 我们将 EC2005 孔沉积物划分为五个重矿物层段: 自下而上依次为 、 、 、 和 层(图 4)。这些层段的优势重矿物组合和特征矿物变化很大, 如表 1 所示。

表 1 EC2005 孔各层段的优势重矿物组合和特征矿物  
Tab.1 The dominant and diagnostic mineral assemblages in each lithological unit in core EC2005

层段	层段深度(m)	优势重矿物组合	特征矿物
	60.2—56.0	片状矿物—普通角闪石—绿帘石—白云石	片状矿物
	56.0—41.0	白云石—普通角闪石—绿帘石—变质矿物—片状矿物	白云石
	41.0—36.8	片状矿物—普通角闪石—白云石—绿帘石	片状矿物
	36.8—10.0	自生黄铁矿—片状矿物—普通角闪石—白云石—绿帘石	自生黄铁矿
	10.0—0.0	片状矿物—自生黄铁矿—普通角闪石—白云石—绿帘石	楣石

层(60.2—56.0m): 重矿物中片状矿物相对含量最高, 但含量变化不稳定, 向上部呈增加趋势; 白云石、绿帘石、普通角闪石、透闪石、普通辉石、变质矿物和蚀变矿物平均含量很低, 含量变化也比较大, 自下而上有减少的趋势; 磁铁矿含量极少, 且含量变化稳定; 其它矿物含量很少。在本层, 重矿物含量较低, 平均含量 17.3%, 变化范围 5.7—31.2%。

层(56.0—41.0m): 片状矿物含量明显降低; 白云石、绿帘石、普通角闪石、透闪石、普通辉石、变质矿物、楣石、锆石和蚀变矿物的含量明显升高, 但向上部有降低的趋势, 本层段的白云石、普通角闪石、锆石和蚀变矿物在整个岩心中相对含量最高; 磁铁矿含量极少, 且变化平稳。在 41.5m 和 51.0—49.0m 处, 矿物组合发生突变, 具体表现为: 在 41.5m 处自生黄铁矿的大量出现和片状矿物的突然降低; 在 51.0—49.0m 处则表现为片状矿物和自生黄铁矿的含量突然升高, 而其它陆源碎屑矿物含量突然降低。在本层, 重矿物含量较低, 平均含量 20.9%, 变化范围 3.7%—40.5%。

层(41.0—36.8 m): 片状矿物含量明显升高; 白云石、绿帘石、普通角闪石、透闪石、蚀变矿物和变质矿物的含量明显降低; 自生黄铁矿平均含量几乎为零, 其它矿物含量甚微, 且变化较小。该层重矿物含量较低, 平均含量 12.3%, 变化范围 4.2%—25.3%。

层(36.8—10.0 m): 总体表现为自生黄铁矿含量显著升高, 且变化较稳定, 顶部自生黄铁矿含量逐渐降低; 片状矿物含量明显降低, 其含量在整个岩心

中最低; 白云石等其它陆源碎屑矿物含量极少, 且变化相对稳定, 但在顶部, 陆源碎屑矿物含量普遍表现出增加的趋势。值得注意的是, 在 29.0—31.0m 和 22.0—25.0m 处, 其重矿物组分含量明显异于相邻层段, 具体表现为, 在 29.0—31.0m 处, 片状矿物含量明显升高, 自生黄铁矿含量明显降低; 在 22.0—25.0m 处, 片状矿物、普通角闪石、白云石等陆源碎屑矿物含量普遍升高, 而自生黄铁矿含量明显降低。该层段, 由于自生黄铁矿大量存在, 使重矿物相对含量在整个岩心中最高, 重矿物平均含量 41.9%, 变化范围 10.8%—89.6%。

层(10.0—0m): 自生黄铁矿含量明显降低; 片状矿物含量呈增加趋势, 且在 5m 以上增加和波动幅度明显加大; 白云石、绿帘石、普通角闪石、透闪石、锆石、楣石、电气石、蚀变矿物的含量明显上升。值得注意的是, 在表层沉积物中, 磁铁矿含量突然升高。在本层, 重矿物含量较低, 平均含量 12.5%, 变化范围 7.1%—25.0%。

## 4 讨论

### 4.1 重矿物之间的相关性及其分组

为进一步研究重矿物组合特征, 明确重矿物之间的相关关系, 进而找出重矿物之间的内在联系并对矿物进行分类, 我们对 EC2005 孔沉积重矿物组分的相对含量进行了相关性分析(表 2)。并且根据矿物之间的相关系数, 对其进行紧邻联结的一次成群法分析(陈丽蓉, 2008), 得到了 EC2005 孔重矿物群分支状图(图 5)。

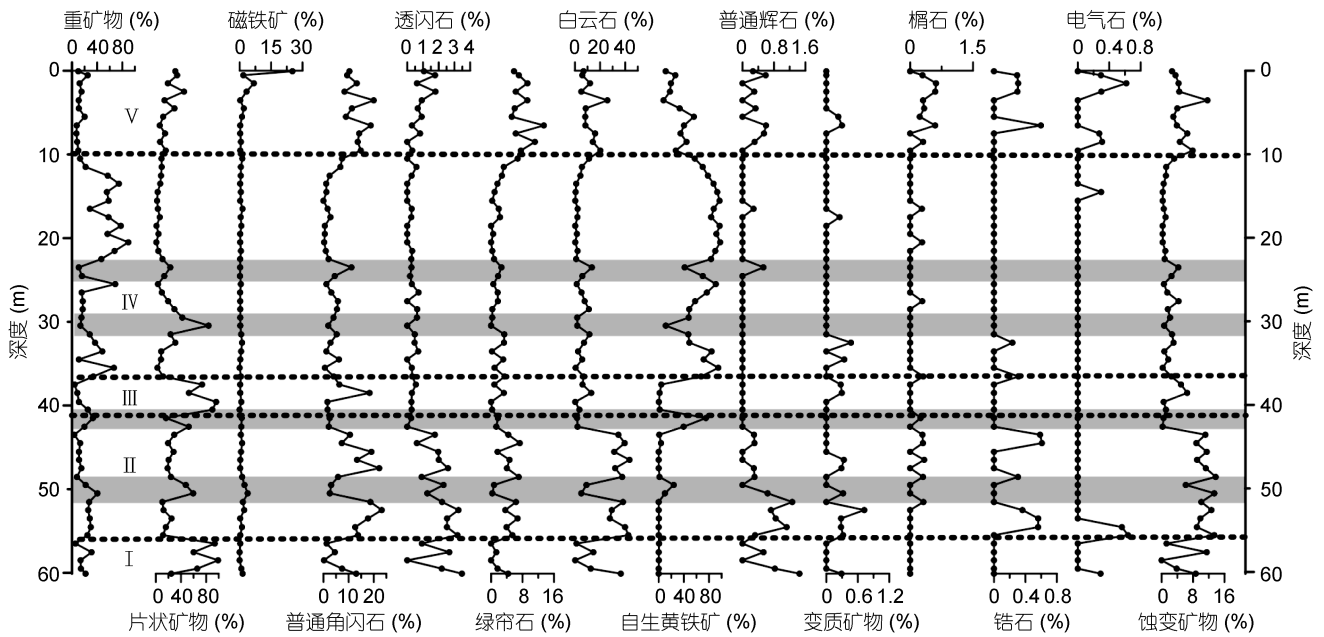


图 4 EC2005 孔中主要重矿物含量的垂向变化特征(灰色条带表示矿物含量异常层)

Fig.4 Variations in main heavy mineral content in core EC2005 (The gray area represents the abnormal mineral content)

表 2 EC2005 孔重矿物含量线性回归( $R$  值)分析结果

Tab.2 The linear-regression ( $R$ ) results of heavy mineral compositions in core EC2005

矿物(%)	重矿物	片状矿物	磁铁矿	普通角闪石	透闪石	绿帘石	白云石	自生黄铁矿	普通辉石	变质矿物	蚀变矿物
重矿物	1										
片状矿物	<b>-0.432</b>	1									
磁铁矿	-0.134	0.023	1								
普通角闪石	<b>-0.524</b>	-0.151	-0.104	1							
透闪石	-0.248	-0.080	0.093	<b>0.570</b>	1						
绿帘石	<b>-0.454</b>	<b>-0.298</b>	-0.194	<b>0.695</b>	0.203	1					
白云石	<b>-0.396</b>	-0.140	0.027	<b>0.715</b>	<b>0.707</b>	<b>0.488</b>	1				
自生黄铁矿	<b>0.707</b>	<b>-0.619</b>	-0.111	<b>-0.574</b>	<b>-0.622</b>	<b>-0.317</b>	<b>-0.625</b>	1			
普通辉石	-0.178	-0.013	0.088	<b>0.499</b>	<b>0.686</b>	0.054	<b>0.553</b>	<b>-0.462</b>	1		
变质矿物	-0.099	-0.047	-0.033	<b>0.447</b>	<b>0.448</b>	0.159	<b>0.364</b>	<b>-0.284</b>	<b>0.321</b>	1	
蚀变矿物	<b>-0.400</b>	0.007	0.015	<b>0.710</b>	<b>0.738</b>	<b>0.440</b>	<b>0.853</b>	<b>-0.689</b>	<b>0.536</b>	<b>0.424</b>	1

$\alpha$ (显著性水平)=0.05 时,  $R$ (相关系数)=0.25, 置信度 95%;  $\alpha$ =0.01 时,  $R$ =0.325, 置信度 99%; 表中加粗的数字为置信度 > 95%的  $R$  值

由表 2 和图 5 可以看出, 重矿物与片状矿物、普通角闪石、绿帘石、白云石和蚀变矿物具有较明显的线性负相关; 蚀变矿物、绿帘石、普通角闪石、透闪石、白云石、普通辉石和变质矿物两两之间普遍呈线性正相关; 自生黄铁矿几乎与所有的陆源碎屑矿物呈现明显的负相关性, 而由于自生矿物含量在许多层位中占绝对优势, 所以它与重矿物含量之间呈现明显的正相关性, 且在矿物聚类分析结果中二者关系最近, 从前文重矿物在垂向上的变化曲线也可以看出, 较高的重矿物含量均出现在自生黄铁矿富集

的层位, 最高可达 89.6%(图 4)。因此, 根据重矿物之间的相关性, 我们把 EC2005 孔的重矿物大致分为 4 类: 蚀变矿物、绿帘石、普通角闪石、透闪石、白云石、普通辉石和变质矿物为一类, 片状矿物为一类, 磁铁矿为一类, 另外, 自生黄铁矿单独作为一类。

#### 4.2 物源分析

由于晚更新世冰川的发育, 全球海平面大幅度下降。末次冰期最盛期海平面比现代海平面低约 120—130m(Peltier *et al*, 2006; Clark *et al*, 2009; Lewis *et al*, 2013), 而后全球气候回暖, 海平面上升, 东海

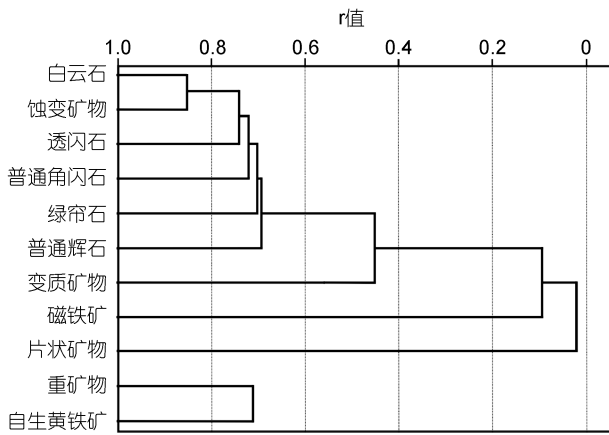


图 5 EC2005 孔重矿物群分枝状图

Fig.5 The tree diagram of heavy mineral group in core EC2005

陆架重新被淹没。EC2005 孔底部年龄为 17.3ka BP (Xu *et al*, 2011), 此时海平面高度约为-120m (Liu *et al*, 2004), 因此, EC2005 孔沉积物不仅记录了全新世全面海侵以来的海相沉积, 还记录了低海平面时期的陆相沉积(徐方建等, 2009)。本文根据 EC2005 孔优势重矿物组合及特征矿物的含量变化, 结合粒度、AMS<sup>14</sup>C 年代和海平面变化等相关数据, 讨论

EC2005 孔的沉积动力和物源变化。

**4.2.1 第 层段 (60.2—56.0m, 17.3—16.4ka BP)**  
 在本层段沉积重矿物中, 比重较大、代表强水动力环境的 ZTR 矿物(Zircon-Rutile-Tourmaline; 锆石-金红石-电气石)和稳定矿物(主要为陆源含铁氧化物)的含量几乎为零, 而不稳定矿物(角闪石族矿物—风化云母—橄榄石—蚀变矿物)和较稳定矿物(绿帘石族矿物—白云母—变质矿物)含量极高(图 6)。在极不稳定矿物和较稳定矿物中片状矿物的含量占绝对优势。片状矿物中含有大量物理和化学性质极不稳定的厚板状风化云母和少量黑云母。这些高含量的片状矿物及大量极不稳定的风化云母表明沉积物经过弱水动力的初步分选, 且距离物源区较近。此外, 高含量的粉砂和粘土、相对较低的沉积速率(图 6)以及大量发育的植物碎屑和水平层理(徐方建, 2009)等均表明此时的沉积水动力较弱。该时期海平面高度低于现代海平面高度约 120m (Liu *et al*, 2004; Lewis *et al*, 2013), 远低于现阶段研究站位的海拔高度, 且该层段样品中未发现海相有孔虫(徐方建, 2009), 为陆相沉积环境。

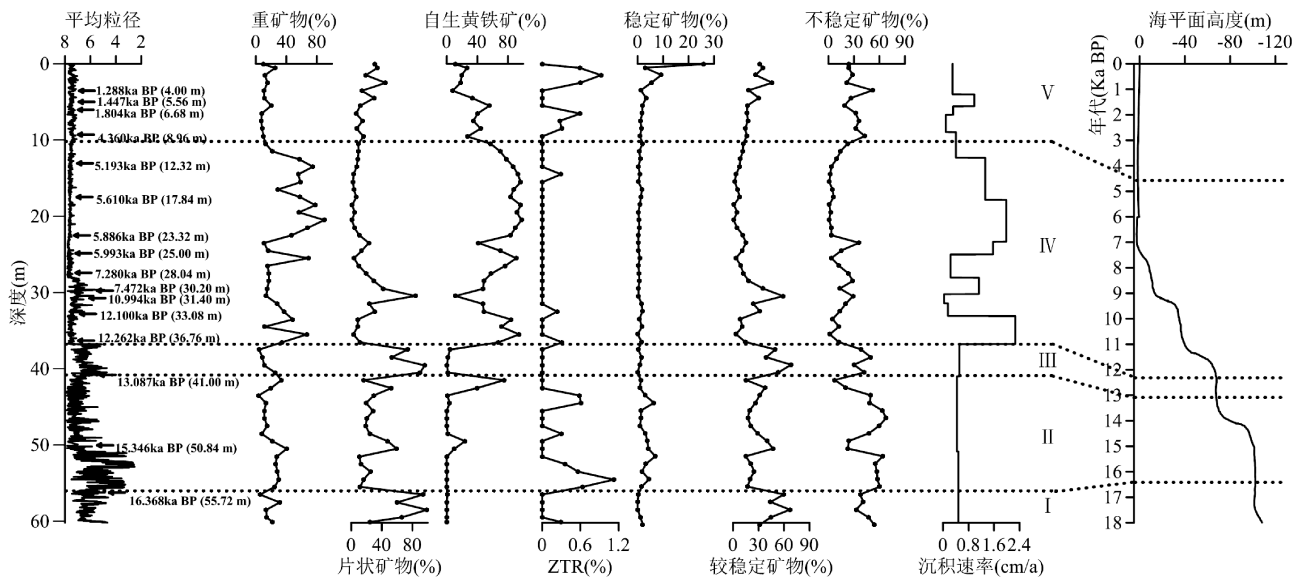


图 6 EC2005 孔重矿物含量变化及其与平均粒径(徐方建等, 2009)、沉积速率(Xu *et al*, 2011)和海平面变化(Liu *et al*, 2004; Zong, 2004; 徐方建等, 2009)的对比

Fig.6 Variations in heavy mineral contents in core EC2005, and comparison with variations in mean grain size (Xu *et al*, 2009), age (Xu *et al*, 2011), and the sea level (Liu *et al*, 2004; Zong, 2004; Xu *et al*, 2009)

在研究站位附近的沉积物可能物源区中, 台湾沿岸河流和浙江沿岸河流中片状矿物的含量普遍较少, 且其中黑云母的含量普遍较高, 普通角闪石含量较少, 而绿帘石含量很高; 与之不同的是, 长江河流

样品中普遍多片状矿物和普通角闪石, 绿帘石含量少, 而黑云母含量甚微(表 3)。在本层段沉积重矿物中片状矿物极高, 普通角闪石含量较高, 而绿帘石和黑云母含量几乎为零(图 7), 这都表明本阶段的沉积

物与近源瓯江等浙江沿岸河流中的重矿物差别很大,而与长江河流沉积重矿物具有较高的相似性。由此,我们认为,在此时期,虽然重矿物和全岩样地球化学数据(Xu *et al.*, 2011)的分析结果都表明 EC2005 孔沉积物源主要是近源的物质,但其沉积物很可能主要来源于长江。

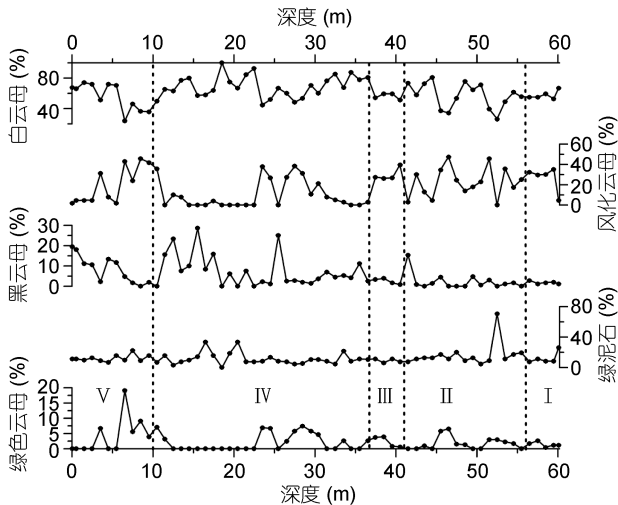


图7 EC2005孔片状矿物中各组分的含量变化特征  
Fig.7 Variation in content of lamellar minerals in core EC2005

**4.2.2 第 层段 (56.0—41.0m, 16.4—13.1ka BP)**  
该层段,白云石、普通角闪石和绿帘石等矿物含量的增加使得不稳定和较稳定的矿物含量增加,稳定矿物含量减少。在粒度较粗的层段(56.00—52.22m, 16.4—15.6ka BP),代表稳定矿物含量增加(图 4),表明此阶段较第 层段,水动力环境明显增强(Morton *et al.*, 1999; Garzanti *et al.*, 2007)。砂和粉砂含量较高、沉积速率较低(图 5)、水平层理以及波状层理和粉砂质透镜体的发育(徐方建等, 2009),均表明该阶段沉积水动力环境较强。在本阶段早期(16.4—15.0ka BP),海平面高度约为-120m (Liu *et al.*, 2004; Lewis *et al.*, 2013),该处为陆相沉积环境。15.0—14.0ka BP 期间,海平面快速上升到-80—-70m (Liu *et al.*, 2004),而此时 EC2005 孔沉积深度低于现今海平面约 80m。由此可见,此时海水可能影响到研究站位附近的沉积作用,但从此阶段的矿物特征来看,其优势矿物组合和特征矿物含量未发生明显变化,且在此阶段的沉积物中未发现海洋有孔虫(徐方建等, 2009),可以判断,虽然在本阶段后期受到海水动力作用,但其对 EC2005 孔的沉积作用甚微,而 15.3ka BP 时期重矿物组合的变化则可能是由于沉积环境的突变造成的。在 13.5—13.1ka BP (42.5—41.0m)时期,出现自生黄铁

矿,指示其沉积水动力环境进一步变弱,为缺氧的还原环境。

在此层段,优势的重矿物组合为白云石—普通角闪石—绿帘石—变质矿物—片状矿物,特征矿物为白云石,其含量在整个岩心中最高,这与其它层段明显不同(图 4)。在 EC2005 孔沉积物附近可能物源区中,长江的沉积重矿物以片状矿物、白云石、普通角闪石、绿帘石和钛铁矿为主。黄河沉积重矿物中同样具有较多的片状矿物、普通角闪石、绿帘石和钛铁矿。白云石和片状矿物中的黑云母是区分两条河流的特征重矿物(表 3)。此外,与长江和黄河的重矿物不同,长江以南、浙-闽沿岸河流的重矿物中陆源含铁氧化物和硫化物含量较高,其中椒江以其锆石含量较高的特征区别于其它河流,台湾西部沿岸河流则变质矿物较多(表 3, 黄文盛等, 1984; 贺松林, 1991; 陈华青, 1993; 徐茂泉, 1996; 陈丽蓉, 2008)。郑喜坤等(2005)通过对浙江河流相沉积土壤的全岩样品 XRD 衍射分析,发现方解石的含量较高,而白云石含量较少且在样品中出现频率较小;我们对取自瓯江的样品进行重矿物鉴定中同样发现白云石含量甚微,且出现概率很小。胡邦琦(2010)对台湾西部河流浊水溪样品进行了分析,在其衍射图谱中未发现白云石的衍射峰,这表明该区域不含或仅含有极少量的白云石,因此,在此时期,EC2005 孔沉积重矿物中存在的大量白云石主要来源于长江。对比可能沉积物源的特征重矿物,发现本层位重矿物中比重轻、易悬浮的黑云母含量极少,可判断本层段的沉积物质几乎不受来自黄河的物质影响,而高含量的性质较稳定的白云母则可能来自长江和近源的瓯江等浙江沿岸河流。相对第 层段,比重较大、不易被搬运的变质矿物、磁铁矿等含铁氧化物和 ZTR 含量较高,这些矿物同样在长江和瓯江等浙江沿岸河流沉积物中含量较高,故目前,尚无直接矿物证据表明本层段沉积物受到来自闽江和台湾物质的影响。

本层段的沉积物类型主要为砂和粉砂。而在沉积物类型相近的长江口表层沉积物及与研究站位临近的外陆架表层沉积物中,重矿物组合中都含有高含量的普通角闪石、绿帘石、白云石、ZTR 矿物和变质矿物,基本与长江矿物组合一致(表 3, 陈丽蓉, 2008; 王中波等, 2012),这说明陆架的沉积物质主要由源于长江的物质供给(陈丽蓉, 2008; 周晓静等, 2010),而在此时期,EC2005 孔沉积重矿物中优势重矿物组合与外陆架沉积优势重矿物组合具有很高的相似性,

表 3 EC2005 孔与物源区的主要陆源矿物  
Tab.3 The main terrigenous heavy minerals in core EC2005 and the provenance

物源区	样品数 (个)		片状矿物										其它矿物	参考文献											
	矿物	相对含量(%)	黑云母		白云母		绿泥石		其它		普通角闪石	绿帘石			辉石	白云石	变质矿物	陆源含铁氧化物	锆石	榍石	电气石				
			白云母	黑云母	白云母	黑云母	绿泥石	其它																	
长江	13	8.1	4.6	15.3	24.2	8.0	2.1	26.0	0.2	3.6	0.2	0.5	7.2												
黄河	40	28.0	18.5	4.5	0	16.3	11.7	4.2	5.1	0.2	0.7	10.8													陈丽蓉, 2008
东海内陆架	45		25.5		24.7	10.3	1.9	17.1	0.1	6.0	0.4	0.9	13.1												
东海外陆架	173		10.7		38.7	16.2	2.7	9.1	0.4	11.7	0.5	1.8	8.2												王中波等, 2012
浙江中部沿海	360		0.7		56.7	16.6	2.5		0.8		0.3		22.4												贺松林, 1991
钱塘江	2	9.9	2.2	9.6	19.5	26.4				19.4	15.8	0.4	13.1												
曹娥江	2	27.5	4.7	8.6	44.2	24.1				10.6	3.0	0.4	16.8												
椒江	4	2.8	3.0	6.5	8.9	40.0				23.4	0.3	1.6	3.9												
飞云江	4	3.9	1.9		3.4	35.5				17.0			3.3												
甌江	4	4.6	0.6	2.1	6.1	33.3				40.1	15.8	0.2	3.0												黄文盛等, 1984
鳌江	4	5.0	0.8	0.4	2.5	22.0				51.3	0.1		1.9												
台湾西部近岸	4		6.4		4.8	30.4				66.1	3.3	1.2	4.6												贺松林, 1991
闽江	14		5.2		15.5	26.5	9.5			56.5	0.8	0.1	1.2												黄文盛等, 1984
第 I 层段	12	1.5	39.7	7.0	21.9	5.5	0.6	13.5	0.1	19.2	0.5	0	20.4												陈华胄, 1993
第 II 层段	27	0.6	16.3	3.7	6.6	12.3	0.4	29.3	0.2	46.6	2.3	0	15.1												徐茂泉, 1996
第 III 层段	4	1.8	44.2	7.4	25.8	7.1	0	5.8	0.2	0.5	0	0	8.1												本研究
第 IV 层段	15	0.7	9.4	1.3	2.9	3.2	≈0	4.4	≈0	0.6	≈0	≈0	≈0												本研究
第 V 层段	5	2.4	14.9	3.1	2.8	12.9	0.3	11.7	0.1	5.6	0.1	0.3	75.8												本研究

其它矿物中含自生黄铁矿



可判断此时期 EC2005 孔沉积物质主要来源于长江。此外,对本层段的沉积物进行常量和微量元素等地球化学数据物源分析,发现本层段的沉积物还受到瓯江等浙江沿岸河流的影响(Xu *et al.*, 2011)。由此,在现有资料的基础上,我们认为该时期 EC2005 孔沉积物源主要来源于长江,其次还受到浙江沿岸河流携带物质的影响。

**4.2.3 第 层段 (41.0—36.8m, 13.1—12.3ka BP)** 该层段,粉砂和粘土质粉砂含量较高,平行层理和粉砂质透镜体大量发育(徐方建等, 2009),沉积速率相对较低,以白云母为代表的较稳定矿物含量增加,自生黄铁矿含量的突然降低(图 7)都表明该层段沉积水动力环境比 13.5—13.1ka BP 时期强。结合前文讨论,我们认为,在此时期海平面到达研究站位附近,海水动力开始大范围影响此时期研究站位的沉积作用,而大量不稳定风化云母的存在可能是由于后期的快速沉积作用(图 7)使其得不到充分改造的结果。

本层段的沉积物类型为粘土质粉砂。与同为细粒沉积类型的长江非主航道沉积物和东海内陆架泥质沉积表层沉积重矿物比较可知,它们的优势矿物组合一致,均为片状矿物—普通角闪石—白云石—绿帘石(陈丽蓉, 2008),且片状矿物和白云石含量较高(表 3),说明本段沉积物与长江物质有较高的亲缘性,表明在此时期,EC2005 孔沉积物质主要来源于长江。同时,对其地球化学数据的物源分析也表明本层段的沉积物还受到瓯江等浙江沿岸河流的影响(Xu *et al.*, 2011)。

**4.2.4 第 层段 (36.8—10.0m, 12.3—4.7ka BP)** 该层段粒度在岩心中最细,以粘土质粉砂和粉砂质粘土为主。沉积速率明显较第 层段明显升高。陆源碎屑矿物含量显著下降,在整个岩心中含量最低。相反,代表缺氧还原环境的自生黄铁矿含量明显升高,在整个岩心中含量最高(图 4)。对比海平面高度,我们认为该时期的沉积环境为低能还原的浅海环境。

在 9.7—7.4ka BP (31.0—29.0m)和 6.3—6.0ka BP (25.0—23.0m)时期,矿物含量明显不同,主要表现为以片状矿物为代表的陆源碎屑急剧增加,自生黄铁矿明显降低。对自生黄铁矿研究表明,草莓状自生黄铁矿的大量富集代表富氧水体与局部还原微环境的存在,指示该处有较强的上升流活动和不同水体的混合作用,并且上升流的存在能加剧不同水体的混合作用,从而导致 Fe 元素的沉淀,进而在早期成岩阶段与 H<sub>2</sub>S 相互作用形成自生黄铁矿(初凤友等,

1994, 1995)。而对 MZ02 孔底栖有孔虫丰度变化的分析表明,9.0—7.8ka BP 和 6.4—6.2ka BP 时期,上升流减弱,营养元素减少,水体含氧量增加,导致代表富养低氧环境中内生种底栖有孔虫含量的降低,表生种有孔虫含量增加(李小艳等, 2012)。由此,我们认为,在 9.7—7.4ka BP 和 6.3—6.0ka BP,自生黄铁矿含量降低可能是由于上升流强度减弱,下层水体中 Fe 元素的物质供给量减少,含氧量增加,从而导致自生黄铁矿含量降低。

在此层段,虽然重矿物组分含量发生较大变化,但其优势陆源重矿物组合未发生明显改变。优势重矿物组合与第 层段和沉积物类型相近的长江非主航道的细粒沉积物和现代东海内陆架表层泥质沉积基本一致(表 3),说明其主要沉积物源与内陆架表层泥质沉积物源相同,都来自长江。而物理和化学性质不稳定的风化云母含量的明显降低和较稳定的白云母含量的升高(图 7),表明其距离现代物源区较远,近源浙江沿岸河流所携带物质对本层段沉积物质的影响较第 层段明显减弱。目前,地球化学(Lin *et al.*, 2002; Xu *et al.*, 2011; 徐方建等, 2011; Youn *et al.*, 2011)、陆源碎屑矿物(陈丽蓉, 2008)、地球物理(Liu *et al.*, 2006; Xu *et al.*, 2012)、粒度和粘土矿物(Liu *et al.*, 2006, 2008; Xu *et al.*, 2009a)等方面的数据均表明,东海内陆架全新世泥质沉积物主要形成于长江的物质经冬季沿岸流以悬浮方式输送沉积。根据范德江等(2002)提出的物源定量识别的非线性规划数学模型,前人分别计算出东海内陆架的 DD2 孔、PC-6 孔(图 1)和 EC2005 孔泥质沉积部分中长江物源的平均贡献率分别为 83%—85%(肖尚斌等, 2005)、87.5%(肖尚斌等, 2009)和 87%—99%(徐方建等, 2011)。因此,结合前文讨论,我们认为,在此阶段,EC2005 孔沉积物中长江物质占绝对优势。

**4.2.5 第 层段 (10.0—0m, 4.7—0ka BP)** 在本层段,沉积物以粘土质粉砂为主,并伴有碎贝壳和生物螺等生物碎屑(徐方建, 2009)。该层段粒度较上一层有变粗的趋势,沉积速率较第 层段明显降低(图 6),自生黄铁矿含量明显降低,陆源碎屑含量明显升高(图 4; 图 6),表明其沉积环境为沿岸流较强的浅海相。

自生黄铁矿含量从 4.7ka BP(10.0m)开始快速下降,且其含量变化较大。对 MZ02 孔(图 1)沉积物中有孔虫的统计分析表明,在 4.5—0ka BP,指示上升流增强的内生种底栖有孔虫含量低,表明上升流强度

减弱(李小艳等, 2012), 这在时间上与自生黄铁矿含量开始稳定下降相对应, 而在前文讨论中, 我们认为上升流的强度减弱导致自生黄铁矿的含量降低, 这表明在 4.7ka BP 以后, 自生黄铁矿含量降低与上升流的减弱有关。虽然自生黄铁矿用来指示早期成岩的环境(初凤友等, 1994, 1995), 但是, 在适宜的条件下自生黄铁矿的形成速率很快(李安春等, 1991), 而在东海内陆架表层沉积物中含有较高含量的自生黄铁矿同样说明这一点(陈丽蓉, 2008)。在该孔沉积物组成相似的第 层段, 下部自生黄铁矿含量低于上部, 可以说明成岩作用对自生黄铁矿含量的影响微乎其微。换言之, 自生黄铁矿自 4.7ka BP 以后含量逐渐下降主要是由沉积环境变化造成的。

在此阶段, 优势陆源碎屑重矿物组合与第 层段和第 层段的优势重矿物组合基本一致(表 3), 说明沉积物源一致, 其沉积物质主要来自长江物质的供给, 另外, 还可能受到浙江沿岸河流所携带物质的影响(Xu *et al.*, 2012; Liu *et al.*, 2014)。虽然东海内陆架泥质沉积北部的 ECS-0702 孔(图 1)的地球化学数据表明其上部泥质沉积受到黄河改道的影响(Liu *et al.*, 2010), 而通过对南部表层粘土矿物以及长石/石英和钾长石/钠长石分布特征的分析也表明台湾海峡中泥质沉积受到长江和台湾物质的共同影响(图 1, Liu *et al.*, 2008; Xu *et al.*, 2009a), 但尚无重矿物方面的直接证据表明该时期 EC2005 孔沉积物受到台湾和黄河物质的影响。

## 5 结论

东海内陆架 EC2005 孔 63 个 0.063—0.25mm 粒级沉积物中共鉴定出 40 种重矿物, 主要为自生黄铁矿、片状矿物、白云石、角闪石族矿物、绿帘石族矿物、蚀变矿物、含铁氧化物、辉石族矿物和变质矿物。以上矿物占重矿物总数的 96.0% 以上, 其余矿物相对百分含量较少, 出现频率较低且不连续。岩心中重矿物含量的平均值为 27.3%, 变化范围为 3.7%—89.6%, 自生黄铁矿富集的层位重矿物含量较高。根据重矿物含量、组合及其分布特征将该岩心划分 五个沉积层段, 各层段的其特征矿物分别为片状矿物、白云石、片状矿物、自生黄铁矿和楣石。

本文结合水动力环境和可能物源区的重矿物组合含量, 讨论了各层段的沉积物来源, 发现虽然不同时期的沉积水动力环境不同, 但其沉积物源一致, 都具有很强的长江物源特征。

致谢 感谢上海海洋石油局第一海洋地质调查大队勘 407 轮全体船员在 EC2005 孔钻探中的帮助; 感谢中科院海洋研究所申顺喜研究员在重矿物鉴定中给予的大力帮助; 感谢中国石油大学(华东)吕洪波教授的宝贵意见; 感谢审稿专家的宝贵建议。

## 参 考 文 献

- 王中波, 杨守业, 张志珣等, 2012. 东海西北部陆架表层沉积物重矿物组合及其沉积环境指示. 海洋学报, 34(6): 114—125
- 王先兰, 1986. 重矿物在东海全新统分层和研究中的应用. 东海海洋, 4(4): 19—31
- 王先兰, 梁景周, 1982. 从统计分析看控制东海重矿物分布的因素. 海洋学报, 4(1): 65—77
- 王昆山, 石学法, 李 珍等, 2005. 东海 DGKS9617 岩心重矿物及自生黄铁矿记录. 海洋地质与第四纪地质, 25(4): 41—45
- 王昆山, 石学法, 林振宏, 2003. 南黄海和东海北部陆架重矿物组合分区及来源. 海洋科学进展, 21(1): 31—40
- 孙白云, 1985. 东海沉积物中某些重矿物特征及其意义. 海洋地质与第四纪地质, 5(3): 109—116
- 苏纪兰, 2001. 中国近海的环流动力机制研究. 海洋学报, 23(4): 1—16
- 李 伟, 王玉衡, 汪嘉宁等, 2012. 2011 年春、夏季黄、东海水团与水文结构分布特征. 海洋与湖沼, 43(3): 615—623
- 李 鹏, 杨世伦, 陈沈良, 2014. 浙南近岸海流季节变化特征. 海洋学报, 36(3): 19—29
- 李小艳, 翦知潜, 石学法等, 2012. 全新世东海内陆架泥质区有孔虫特征及其古环境意义. 海洋地质与第四纪地质, 32(4): 61—71
- 李安春, 陈丽蓉, 申顺喜, 1991. 南黄海 H-106 岩柱中自生黄铁矿的硫同位素研究. 科学通报, (12): 928—930
- 杨守业, 李从先, 朱金初等, 2000. 长江与黄河沉积物中磁铁矿成分标型意义. 地球化学, 29(5): 480—484
- 肖尚斌, 李安春, 刘卫国等, 2009. 闽浙沿岸泥质沉积的物源分析. 自然科学进展, 19(2): 185—191
- 肖尚斌, 李安春, 蒋富清等, 2005. 近 2ka 闽浙沿岸泥质沉积物物源分析. 沉积学报, 23(2): 268—274
- 初凤友, 陈丽蓉, 申顺喜等, 1994. 南黄海沉积物中自生黄铁矿的形态标型研究. 海洋与湖沼, 25(5): 461—467
- 初凤友, 陈丽蓉, 申顺喜等, 1995. 南黄海自生黄铁矿成因及其环境指示意义. 海洋与湖沼, 26(3): 227—233
- 陈华胄, 1993. 台湾海峡表层沉积物中重矿物特征及其物质来源. 台湾海峡, 12(2): 136—144
- 陈丽蓉, 2008. 中国海沉积矿物学. 北京: 海洋出版社, 12—174
- 范德江, 杨作升, 孙效功等, 2002. 东海陆架北部长江、黄河沉积物影响范围的定量估算. 青岛海洋大学学报, 32(5): 748—756
- 周晓静, 李安春, 万世明等, 2010. 东海陆架表层沉积物粘土

- 矿物组成分布特征及来源. 海洋与湖沼, 41(5): 667—675
- 郑喜坤, 汪庆华, 鲁安怀等, 2005. 浙江土壤矿物组成特征. 地质通报, 24(8): 761—766
- 胡邦琦, 2010. 中国东部陆架海泥质沉积区的物源识别及其环境记录. 青岛: 中国海洋大学博士学位论文, 42—44
- 贺松林, 1991. 东海近岸带沉积物陆源矿物组份的比较研究. 华东师范大学学报(自然科学版), (1): 78—86
- 秦蕴珊, 赵一阳, 陈丽蓉等, 1987. 东海地质. 北京: 科学出版社, 1—290
- 徐方建, 李安春, 李铁刚等, 2011. 中全新世以来东海内陆架泥质沉积物来源. 中国石油大学学报(自然科学版), 35(1): 1—6, 12
- 徐方建, 李安春, 肖尚斌等, 2009. 末次冰消期以来东海内陆架古环境演化. 沉积学报, 27(1): 118—127
- 徐茂泉, 1996. 闽江口表层沉积物中 0.125—0.250mm 粒级重矿物的分布与组合特征. 台湾海峡, 15(3): 229—234
- 黄文盛, 黄月法, 1984. 浙江省河口重矿物及其组合特征. 杭州大学学报, 11(4): 496—504
- 虞兰兰, 江文胜, 2011. 黄、东海悬浮细颗粒物浓度和粒径分布变化研究. 海洋与湖沼, 42(4): 474—481
- Chen L R, 1989. A study on mineral assemblages in sediments of the Bohai Sea, the Yellow Sea and the East China Sea. Marine Sciences, (2): 1—8
- Clark P U, Dyke A S, Shakun J D *et al*, 2009. The last glacial maximum. Science, 325(5941): 710—714
- Garzanti E, Andò S, 2007. Chapter 20 heavy mineral concentration in modern sands: implications for provenance interpretation. Developments in Sedimentology, 58: 517—545
- Ichikawa H, Beardsley R C, 2002. The current system in the Yellow and East China Seas. Journal of Oceanography, 58(1): 77—92
- Lewis S E, Sloss C R, Murray-Wallace C V *et al*, 2013. Post-glacial sea-level changes around the Australian margin: a review. Quaternary Science Reviews, 74: 115—138
- Lin S, Hsieh I J, Huang K M *et al*, 2002. Influence of the Yangtze River and grain size on the spatial variations of heavy metals and organic carbon in the East China Sea continental shelf sediments. Chemical Geology, 182(2—4): 377—394
- Liu J P, Li A C, Xu K H *et al*, 2006. Sedimentary features of the Yangtze River-derived along-shelf clinoform deposit in the East China Sea. Continental Shelf Research, 26(17—18): 2141—2156
- Liu J P, Liu C S, Xu K H *et al*, 2008. Flux and fate of small mountainous rivers derived sediments into the Taiwan Strait. Marine Geology, 256(1—4): 65—76
- Liu J P, Milliman J D, Gao S *et al*, 2004. Holocene development of the Yellow River's subaqueous delta, North Yellow Sea. Marine Geology, 209(1—4): 45—67
- Liu J P, Xu K H, Li A C *et al*, 2007. Flux and fate of Yangtze River sediment delivered to the East China Sea. Geomorphology, 85(3—4): 208—224
- Liu J, Saito Yoshiki, Kong X H *et al*, 2010. Sedimentary record of environmental evolution off the Yangtze River estuary, East China Sea, during the last ~13, 000 Years, with special reference to the influence of the Yellow River on the Yangtze River delta during the last 600 years. Quaternary Science Reviews, 29(17—18): 2424—2438
- Liu S F, Shi X F, Fang X S *et al*, 2014. Spatial and temporal distributions of clay minerals in mud deposits on the inner shelf of the East China Sea: Implications for paleoenvironmental changes in the Holocene. Quaternary International, 349: 270—279
- Moon J-H, Hirose N, 2014. Seasonal response of the southern East China Sea shelf water to wind-modulated throughflow in the Taiwan Strait. Progress in Oceanography, 121: 74—82
- Morton A C, Hallsworth C R, 1999. Processes controlling the composition of heavy mineral assemblages in sandstones. Sedimentary Geology, 124(1—4): 3—29
- Peltier W R, Fairbanks R G, 2006. Global glacial ice volume and Last Glacial Maximum duration from an extended Barbados sea level record. Quaternary Science Reviews, 25(23—24): 3322—3337
- Xu F J, Li A C, Li T G *et al*, 2011. Rare earth element geochemistry in the inner shelf of the East China Sea and its implication to sediment provenances. Journal of Rare Earths, 29(7): 702—709
- Xu F J, Li A C, Xu K H *et al*, 2009b. Cold event at 5500a BP recorded in mud sediments on the inner shelf of the East China Sea. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 27(4): 975—984
- Xu K H, Li A C, Liu J P *et al*, 2012. Provenance, structure, and formation of the mud wedge along inner continental shelf of the East China Sea: A synthesis of the Yangtze dispersal system. Marine Geology, 291—294: 176—191
- Xu K H, Millian J D, Li A C *et al*, 2009a. Yangtze-and Taiwan-derived sediments on the inner shelf of East China Sea. Continental Shelf Research, 29(18): 2240—2256
- Youn J, Kim T-J, 2011. Geochemical composition and provenance of muddy shelf deposits in the East China Sea. Quaternary International, 230(1—2): 3—12
- Zhou L Y, Liu J, Saito Y *et al*, 2014. Coastal erosion as a major sediment supplier to continental shelves: example from the abandoned Old Huanghe (Yellow River) delta. Continental Shelf Research, 82: 43—59
- Zong Y Q, 2004. Mid-Holocene sea-level highstand along the Southeast Coast of China. Quaternary International, 117(1): 55—67

## HEAVY MINERAL ASSEMBLAGES IN CORE EC2005 IN THE INNER SHELF OF EAST CHINA SEA AND THE ORIGIN

DONG Jiang<sup>1,2</sup>, LI An-Chun<sup>1</sup>, XU Fang-Jian<sup>2</sup>, HUANG Peng<sup>1</sup>, ZHANG Kai-Di<sup>1</sup>

(1. *Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China;*  
2. *College of Earth Science and Technology, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China*)

**Abstract** Heavy minerals in the bore hole EC2005, located in the southern center of mud area in the inner shelf of East China Sea, was identified and analyzed for their significance of provenances since 17.3ka BP. The results show that in the sediment of grain size 0.063—0.25mm, the average content of heavy minerals is 27.26% in range of 3.66%—89.62%. High content of heavy minerals appears in the horizon of rich authigenic pyrite. The heavy minerals included lamellar mineral, metallic mineral, amphibole, epidote, dolomite, pyroxene, typical metamorphic minerals, altered minerals and authigenic pyrite, and they altogether took more than 96.00% of the total amount, but varied in content through core EC2005. The distribution of heavy minerals can be divided into five units from the Unit to Unit from bottom to top; the characteristic minerals are lamellar minerals, dolomite, lamellar minerals, authigenic pyrite, and titanite. In combination with AMS<sup>14</sup>C dating and the sea level data in the west Pacific Ocean, we analyzed the provenance of the sediment. Results show that, during 17.3—0ka BP, the place of the core received primarily from Changjiang (Yangtze) river, and also some from along-coast current off Zhejiang Province.

**Key words** Heavy mineral; provenance; bore-hole EC2005; inner shelf of the East China Sea