东海陆架沉积物环境磁学特征及其物源指示意义*

张凯棣[1, 2] 李安春[1①] 卢 健[1] 张 晋[1, 2]

(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. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要 对东海陆架 69 个表层沉积物样品进行了环境磁学测试，并结合重矿物鉴定和粒度分析数据讨论了其磁学特征、影响因素和物源指示意义。结果表明研究区表层沉积物中磁性矿物以磁铁矿为主，同时含有少量的磁赤铁矿和赤铁矿。这一结果与碎屑矿物镜下鉴定结果一致。根据磁学参数 S_{-300} (−300mT 磁场下饱和等温剩磁的矫顽参数)、SIRM/χ (饱和等温剩磁与磁化率之比)及 SIRM (饱和等温剩磁)，将东海陆架表层沉积物分为三类。第一类沉积物主要分布在西部内陆架及研究区东北部的细粒沉积区，磁性矿物含量较高，亚铁磁性矿物所占比例较小，磁性矿物颗粒细；第二类分布在中外陆架，磁性矿物含量低，亚铁磁性矿物比例相对较高，磁性矿物颗粒粗；第三类沉积物分布在研究区东部部分站位，磁性矿物含量高，亚铁磁性矿物含量也高，磁性矿物颗粒粗。沉积物整体的粒度粗细控制了磁性矿物颗粒的大小，且在以现代细粒沉积物为主的第一类沉积物中，磁性矿物含量与粉砂、黏土含量成正相关关系。S_{-100}-SIRM (−100mT 磁场下饱和等温剩磁的矫顽参数-饱和等温剩磁)散点图显示，东海陆架大部分区域沉积物磁学特征与长江沉积物一致，表明物质来源于长江；研究区东北部受到黄海沿岸流搬运来的黄河物质的影响磁学性质呈现出黄河物质特征；闽浙沿岸部分站位受到人类活动及瓯江物质的影响。

关键词 东海陆架；表层沉积物；磁学特征；物源

中图分类号 P736.21+3 doi: 10.11693/hyhz20160900194

磁性矿物在沉积物中普遍存在，且能够灵敏地反映环境的物理化学条件，为古海洋学、古气候学、沉积学等提供有用信息(Thompson *et al*, 1986; Verosub *et al*, 1995; Dekkers, 1997; Maher *et al*, 1999; Evans *et al*, 2003)。磁学特征测量为探明沉积物样品中磁性矿物的种类、含量及磁性矿物颗粒的大小提供了一种有效的方法(Creer *et al*, 1996; Brachfeld *et al*, 2000; Thouveny *et al*, 2000)。环境磁学测量不仅具有快速、无损、经济的特点，还可以检测到沉积环境中的微小变化(Oldfield, 1994; Walden *et al*, 1997; Watkins *et al*, 2003; Hounslow *et al*, 2004; Maher *et al*, 2009)，例如磁学测量可以检测到样品中微量(~1μg/g)的磁性矿物(Robinson *et al*, 2000; Maher *et al*, 2009)。高灵敏度使得磁学测量能够运用不同的磁学特征（磁性矿物含量、颗粒大小及矿物种类）来辨别沉积物来源及运移路径(Oldfield, 1994; Walden *et al*, 1997; Schmidt *et al*, 1999; Wheeler *et al*, 1999; Liu *et al*, 2003; Watkins *et al*, 2007; Zhang *et al*, 2008; Wang *et al*, 2009; Liu *et al*, 2010)。

东海陆架是世界上最宽阔的陆架之一，由于长江的注入、黄河的影响及沿岸等物质的加入等，陆源物质供给特别丰富，复杂水动力条件塑造而成的各种沉积体系都得以保存(Milliman *et al*, 1985, 2014)。尽管前人进行了大量的沉积学、黏土矿物及地球化学

* 国家自然科学基金重点项目，41430965 号；国家自然科学基金青年项目，41506060 号。张凯棣，博士研究生，E-mail: zhang_kaidi528@163.com

① 通讯作者：李安春，研究员，博士生导师，E-mail: acli@qdio.ac.cn

收稿日期: 2016-09-08，收修改稿日期: 2016-11-24

方面的研究(Liu *et al*, 2006; Li *et al*, 2012; 王中波等, 2012; 石学法等, 2015), 对东海陆架沉积物来源仍未取得统一的认识。长江和黄河为中国陆架提供了大量的陆源物质, 因此这两条河流沉积物的磁学性质引起了大量关注。前人研究发现长江及黄河沉积物的磁学特征存在明显差异, 长江沉积物中亚铁磁性矿物含量明显高于黄河, 因此可将磁学特征作为物源示踪的指标之一(王永红等, 2004; 邢云, 2007; 牛军利等, 2008; Zhang *et al*, 2008; Wang *et al*, 2009; Li *et al*, 2012; Luo *et al*, 2016)。对东海陆架东北部泥质区沉积物磁学性质已有较为细致的研究, 其结果表明东北部泥质区沉积物主要来源于长江和老黄河口, 同时台湾暖流或黑潮携带来的台湾物质及朝鲜半岛河流沉积物在磁性特征上也有体现(Liu *et al*, 2003; 刘健等, 2007; Wang *et al*, 2010; Kim *et al*, 2013)。也有学者运用环境磁学对东海北部陆架、长江口外东海陆架区域进行了沉积物分类, 并推断长江口北部受到黄河物质的影响(Liu *et al*, 2010; 周鑫等, 2011; 潘大东等, 2015)。本文研究区涵盖了东海陆架大部分区域, 拟利用东海陆架表层沉积物样品的磁学性质, 对比磁性矿物镜下鉴定及沉积物粒度分析结果, 对研究区进行分类, 探讨磁性特征与粒度的关系, 并进一步阐明东海陆架的物质来源。

1　区域概况

东海宽阔的大陆架北宽南窄, 北缓南陡, 地形自大陆岸线向东南缓缓倾斜, 平均水深 72m(李家彪, 2008)。其西北部有亚洲第一大河长江的注入, 东南部有沿岸小型河流闽江、瓯江等物质的输入, 位于苏北海岸的老黄河口物质对该区域也有一定的影响。而研究区东南部与台湾相邻, 每年有大量的台湾河流物质入海。因此, 东海陆架物质来源十分复杂。控制东海陆架沉积物搬运的流系主要包括黑潮、台湾暖流、黄海暖流、长江冲淡水以及浙闽沿岸流。由于长江物质的快速堆积, 东海内陆架沉积物以黏土、黏土质粉砂、砂质粉砂和粉砂为主。而在广阔的中外陆架则分布以砂和黏土质砂为主的残留沉积。此外在济州岛西南部, 出现一以粉砂质黏土和黏土质粉砂为主的细粒沉积物区(Milliman *et al*,1985)。

2　材料与方法

东海陆架表层沉积物样品于 2011 年国家基金委秋季开放航次中取得(另补充 5 个 2012 年站位, 3 个 2015 年站位), 共计 69 个(图 1)。将样品置于 40°C 以下低温环境烘干后, 用玛瑙研钵轻轻研磨成粉末状, 称取大约 5g 左右样品用聚乙烯保鲜膜包裹后, 置于 2cm×2cm×2cm 塑料样品盒中, 压实固定进行磁性测量。环境磁学实验在青岛海洋地质研究所环境磁学与古地磁学实验室完成。使用英国 Bartington MS2 磁化率仪测量低频(0.47kHz)和高频(4.7kHz)磁场中的磁化率(χ_{lf}、χ_{hf})。剩磁选用 Dtech2000 交变退磁仪、美国 ASC IM-10-30 脉冲磁化仪和捷克 AGICO JR-6A 旋转岩石剩磁测量仪进行测量。磁化率测量完成后进行剩磁测量, 测量过程如下: 首先将样品置于交变磁场峰值 100mT、直流磁场 0.04mT 下处理获得非磁滞剩磁 ARM, 然后经 1.5T 磁场磁化获饱和等温剩磁 SIRM; 最后将具有 SIRM 的样品在强度分别为–20、–100、–300mT 的磁场中退磁后获得等温剩磁 IRM_{-20mT}、IRM_{-100mT} 和 IRM_{-300mT}。上述实验完成后用 AGICO 公司的 KLY-CS3 磁化率仪测量典型样品从 39.9°C 加热至 700°C, 再冷却至 40°C 的体积磁化率-温度(κ-T)曲线, 测量在氩气环境中进行。

根据上述测量结果计算样品的质量磁化率 χ、非磁滞剩磁磁化率 χ_{ARM}、磁化率频率系数 χ_{fd}%及各种比值参数 χ_{ARM}/χ、χ_{ARM}/SIRM、S_{-100} 等。公式如下:

$$\chi_{fd}\% = [(\chi_{lf}-\chi_{hf})/\chi_{lf}] \times 100\%,$$

$$HIRM=(SIRM+IRM_{-300mT})/2,$$

$$S_{-100}=100\times(SIRM-IRM_{-100mT})/SIRM(\%),$$

$$S_{-300}=100\times(SIRM-IRM_{-300mT})/SIRM(\%)。$$

其中, χ_{fd}%: 磁化率频率系数; χ_{lf}: 低频磁化率; χ_{hf}: 高频磁化率; HIRM: 硬剩磁; SIRM: 饱和等温剩磁; IRM_{-300mT}: –300mT 磁场中退磁获得的等温剩磁; S_{-100}: –100mT 磁场下饱和等温剩磁的矫顽参数; IRM_{-100mT}: –100mT 磁场中退磁获得的等温剩磁; S_{-300}: –300mT 磁场下饱和等温剩磁的矫顽参数。

χ 及 SIRM 可以反映样品中亚铁磁性矿物含量的多寡。χ_{ARM} 与铁磁性矿物中稳定单畴颗粒(SSD)的含量大致成正比, 高的 χ_{ARM} 值指示了高含量的 SSD(Maher ,1988)。χ_{fd}%反映了超顺磁和单畴界限附近细黏滞性超顺磁颗粒对磁化率的贡献。HIRM 反映了不完整反铁磁性矿物(针铁矿和赤铁矿)的含量(Thompson *et al*, 1986)。比值参数 χ_{ARM}/χ 与 χ_{ARM}/SIRM 可以指示亚铁磁性矿物晶粒的大小(Banerjee *et al*, 1981; Maher, 1988)。S_{-100} 和 S_{-300} 则表明了高矫顽力和低矫顽力矿物的相对含量(Bloemendal *et al*, 2005)。

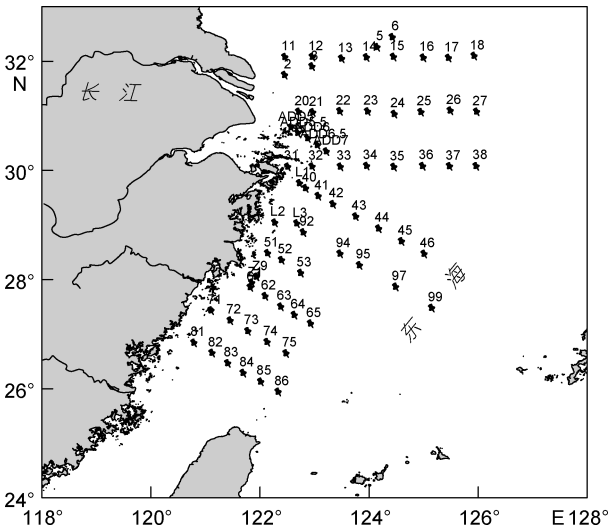

图 1 东海陆架表层沉积物取样站位

Fig.1 Map of sampling stations in the study area

3 结果

3.1 东海陆架表层沉积物磁性物质的类型和含量

χ 及 SIRM 主要与亚铁磁性矿物如磁铁矿的含量有关。东海陆架表层沉积物样品磁化率 χ 值大部分介于 24.5×10^{-8}—$84.8\times10^{-8}m^3/kg$ 之间，最大值出现在研究区东南部达 $164.6\times10^{-8}m^3/kg$，研究区东北部磁化率值最小。研究区西部内陆架，虎皮礁附近以及东南部出现高值区，中部陆架磁化率低，表明中部沉积物中磁性矿物含量最少。SIRM 与 χ 不同，不受顺磁性、抗磁性矿物的影响，但依赖于矿物颗粒大小。东海陆架表层沉积物样品 SIRM 分布趋势与 χ 相似，出现三个高值区(图 2)：内陆架，研究区北部及东南部，最大值为 $10171.4\times10^{-6}Am^2/kg$ 出现在中部内陆架，最小值 $2740.7\times10^{-6}Am^2/kg$ 则出现在研究区东部。SIRM 与 χ 表现出来的差异可能是由于磁性矿物颗粒大小对两者有不同程度的影响，以及抗磁性与顺磁性矿物对 χ 产生影响所导致(Creer *et al*,1996)。HIRM 的分布趋势与 χ 和 SIRM 一致，表明不完整反铁磁性矿物含量多寡与亚铁磁性矿物一致。χ、SIRM 及 HIRM 在内陆架均表现出由陆向海值逐渐降低的趋势，表明了沉积物的沉积分异作用。

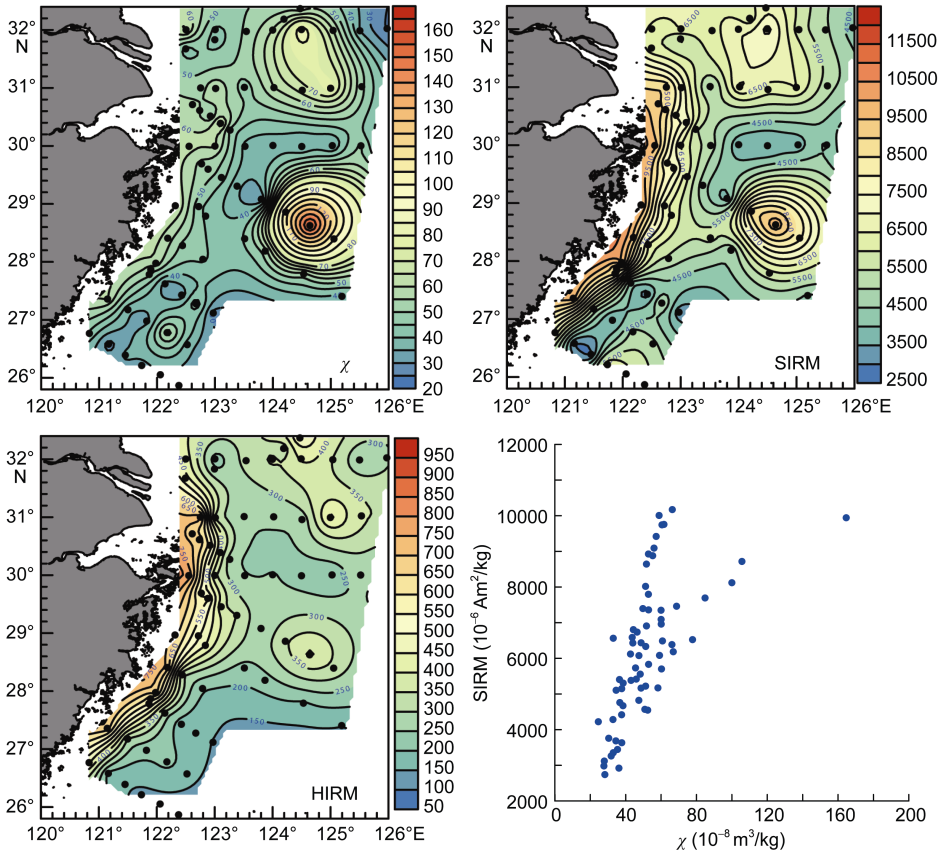

图 2 $\chi(10^{-8}m^3/kg)$、$SIRM(10^{-6}Am^2/kg)$和 $HIRM(10^{-6}Am^2/kg)$的平面分布及 χ 与 SIRM 的相关性

Fig.2 The contour map of $\chi(10^{-8}m^3/kg)$, $SIRM(10^{-6}Am^2/kg)$, $HIRM\ (10^{-6}Am^2/kg)$ and the correlation between χ and SIRM

注：图中 χ 为磁化率，SIRM 为饱和等温剩磁，HIRM 为硬剩磁

SIRM 主要取决于铁磁性矿物的类型和含量却不受顺磁性矿物和抗磁性矿物的影响, 能很好地指示样品的磁性物质含量。研究区 χ 和 SIRM 呈现出很好的正相关性(图 2), 由于 SIRM/χ 同时受到磁性矿物种类和颗粒大小的影响, 当一个参数固定时可以指示另一个参数的变化, 因此图中表现出两组线性相关关系。*SIRM* 与 χ 的正相关关系表明尽管受到顺磁性、抗磁性矿物的影响, 在东海陆架 χ 仍可以作为指示磁性矿物含量的指标。考虑到赤铁矿的磁性比磁铁矿小数个数量级, 可以认为研究区 χ 的变化代表了样品中磁铁矿含量的变化。

S_{-100} 和 S_{-300} 的值反映了样品中亚铁磁性矿物(如磁铁矿)和不完整反铁磁性矿物(如针铁矿和赤铁矿)的比例, 亚铁磁性矿物含量越高, S_{-100} 和 S_{-300} 的值越高(Kim *et al*, 2013)。当 S_{-100} 值大于 70%或者 S_{-300} 大于 90%时表明样品中亚铁磁性矿物占主导地位(王双, 2014)。东海陆架表层沉积物中 S_{-100} 平均值为 86.5%, 所有样品 S_{-100} 值均大于 70%。S_{-300} 变化范围为 91.9%—97.9%, 平均值达到 94.2%, 即经–300mT 磁场磁化后, 样品所携带的剩磁已接近饱和, 说明样品中亚铁磁性矿物占主导, 同时存在不完整反铁磁性矿物。

κ-T 曲线可以通过居里温度来有效地判断磁性矿物的种类(Geissman, 2004; 王双, 2014; 王双等, 2016)。图 3 表明东海陆架典型表层沉积物样品从室温加热至 700°C, 磁化率呈缓慢增长趋势, 直至 500°C 附近有一明显增长, 到达 530°C 时磁化率急剧下降, 在 580°C 附近下降接近 0, 这一温度与磁铁矿的居里温度相一致。在冷却过程中, 磁化率在 580—400°C 之间急剧增加, 表明在加热过程中产生了大量的磁铁矿。

研究区北部表层沉积物样 15 及杭州湾附近内陆架的表层沉积物样 31, κ-T 曲线变化趋势一致, 从室温加热至约 250°C, κ 非常缓慢的增加; 从 250°C 加热至约 300°C, 磁化率有小幅度下降; 从 300°C 左右至 400°C, κ 值明显增大; 400°C 加热至 440°C 左右, κ 又出现小幅度下降表明了磁赤铁矿的存在, 因为在这一温度区间磁赤铁矿会转变为弱磁性的赤铁矿(Dunlop *et al*, 2001); 当温度从 440°C 上升至 530°C 左右, κ 值明显增大, 表明在这一温度区间内可能有弱磁性矿物(含铁硅酸盐矿物或黏土矿物)加热转化形成强磁性矿物(磁铁矿等); 在约 530°C 之后, κ 值急剧下降, 到 590°C 左右下降至只有室温的 1/10 左右, 这是由于样品中磁铁矿加热至居里温度出现解阻所致; 从 590°C 至约 670°C, κ 缓慢降低趋近于零, 表明样品中有赤铁矿的存在。在冷却过程中 κ 在 590°C 下降至 400°C 过程中快速升高, 表明在加热过程中有大量的磁铁矿形成, 温度从 400°C 降至室温, κ 值持续下降, 可能表明磁铁矿转化成了弱磁性的赤铁矿或者单畴磁性颗粒在降温过程中被解阻(刘健等, 2007)。室温下, 加热后样品的 κ 值约是加热前 κ 值的 4 倍也证实了在加热过程中形成了大量的强磁性矿物。

研究区东南部样品 45 的 κ-T 曲线变化相对简单, 从室温加热至 400°C 左右 κ 值缓慢增长, 400°C 至 440°C 左右略有下降, 从 440°C 加热至 530°C 左右 κ 值明显增加; 在约 530°C 之后, κ 值急剧下降; 从 590°C 至约 670°C, κ 缓慢降低趋近于零。降温曲线 κ 在 590°C 下降至 400°C 过程中快速升高, 温度从 400°C 降至室温过程中, κ 值持续下降。表明样品中磁性矿物主要为磁铁矿和磁赤铁矿, 同时存在赤铁矿。

闽浙沿岸泥质区样品 61 和 71 的 κ-T 曲线同样表明样品中磁性矿物以磁铁矿和磁赤铁矿为主, 同时含少量的赤铁矿。

3.2　东海陆架表层沉积物磁性物质的磁畴特征

频率磁化率 χ_{fd}%反映了超顺磁和单畴界限附近细黏滞性超顺磁颗粒对磁化率的贡献。研究区西部内陆架及东北部济州岛西南泥质区样品 χ_{fd}%>3%, 表明这些区域表层沉积物矿物颗粒中超顺磁颗粒含量较多, 而其他区域 χ_{fd}%<3%则表明超顺磁颗粒在磁性颗粒中含量很少(Maher *et al*, 1999)(图 4)。

χ_{ARM} 对单畴晶粒比较敏感, 研究区 χ_{ARM} 内陆架及研究区东北部出现高值, 中外陆架值相对较低, 表明内陆架及东北部沉积物中单畴颗粒含量高。比值参数 χ_{ARM}/χ 可以指示亚铁磁性矿物晶粒的大小, 高值反映了较多的单畴颗粒, 低值则表明含有较多的多畴或超顺磁颗粒。χ_{ARM}/SIRM 与 χ_{ARM}/χ 类似, 但不受超顺磁颗粒的影响, 低值反映了高含量的较粗的多畴颗粒(Oldfield, 1994)。由图 4 可以看出, 东海陆架 χ_{ARM}/χ 和 χ_{ARM}/SIRM 有一致的分布趋势, 在研究区西部内陆架及研究区东北部 $\chi_{ARM}/\chi>10$, $\chi_{ARM}/\mathrm{SIRM}>60\times10^{-5}$m/A, 表明在这两个区域沉积物磁性矿物晶粒中单畴和准单畴颗粒占主导地位, 而在其他区域 $\chi_{ARM}/\chi<10$, $\chi_{ARM}/\mathrm{SIRM}<60\times10^{-5}$m/A 则说明沉积物中磁性矿物晶粒以较粗的准单畴和多畴颗粒为主。在

29°N 附近 χ_{ARM}/χ 和 χ_{ARM}/SIRM 均出现一向东延伸的舌状高值区。

综上所述，磁学参数 χ_{fd}%、χ_{ARM}、χ_{ARM}/χ 及 χ_{ARM}/SIRM 值的分布都表明在内陆架及研究区东北部磁性矿物颗粒以单畴颗粒为主，而在中外陆架则以准单畴和多畴颗粒为主。

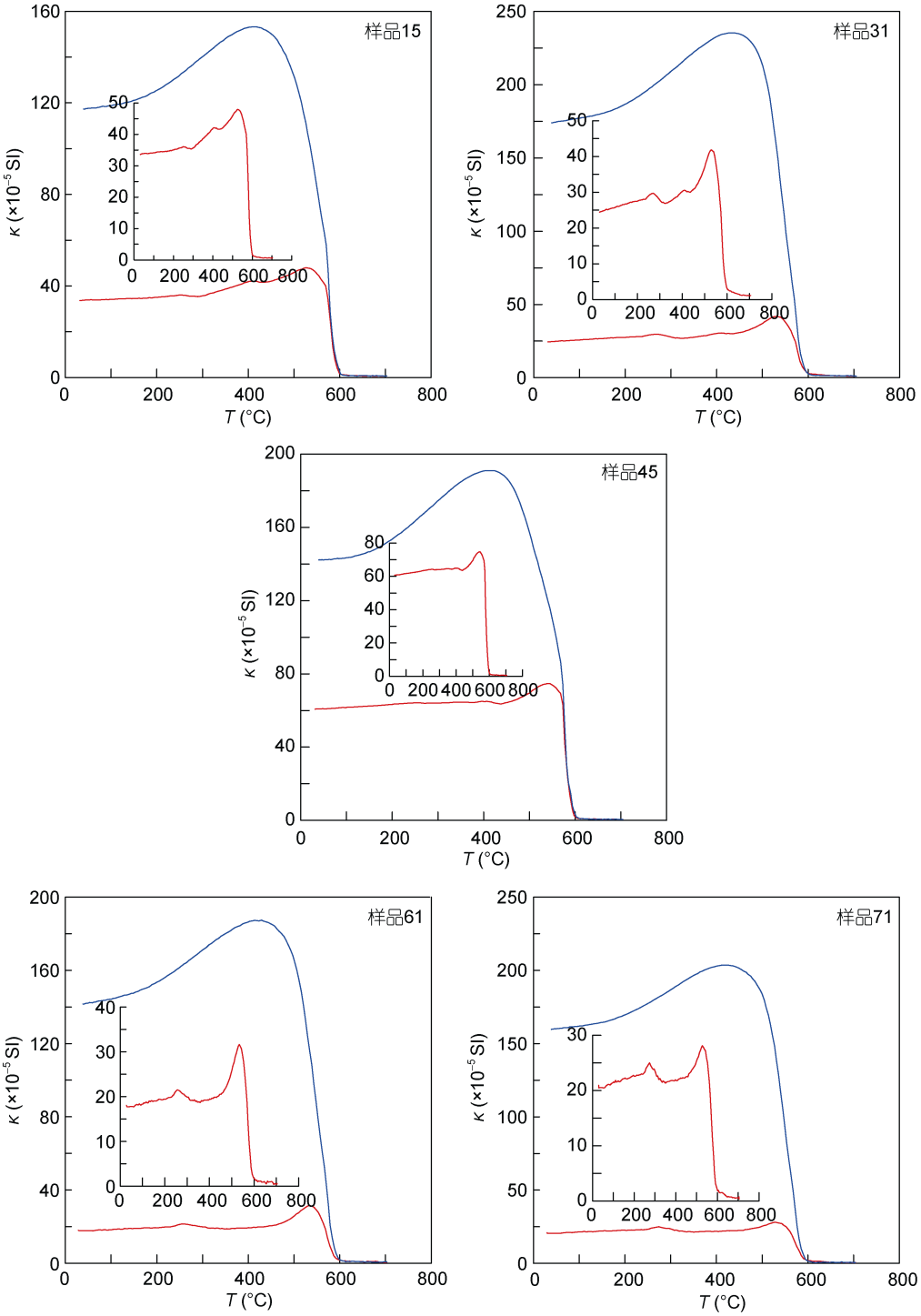

图 3 东海典型表层沉积物样品的 κ-T 曲线

Fig.3 The κ-T curve of typical samples of the East China Sea

注：红色曲线为加热曲线，蓝色曲线为冷却曲线，小插图为加热退磁曲线

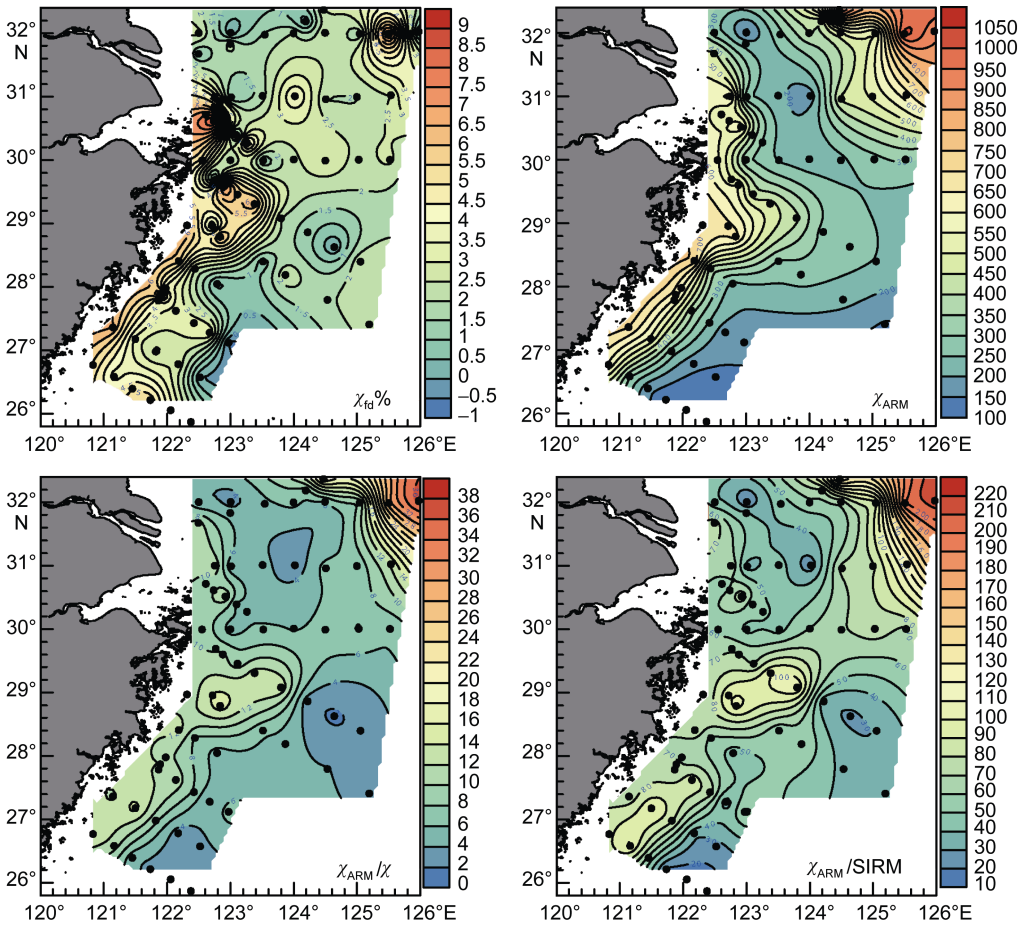

图 4　东海表层沉积物 χ_{fd}%(单位: %)、χ_{ARM}($10^{-8}m^3/kg$)、χ_{ARM}/χ 和 χ_{ARM}/SIRM($10^{-5}m/A$)等值线分布图

Fig.4　The distribution of χ_{fd}% (unit: %), χ_{ARM} ($10^{-8}m^3/kg$), χ_{ARM}/χ, and χ_{ARM}/SIRM ($10^{-5}m/A$) contours of the East China Sea

3.3　东海陆架表层沉积物磁学特征分类

SIRM/χ 可以指示磁性矿物颗粒的大小，随着矿物颗粒的减小而增大；S_{-300} 的值则代表了样品中亚铁磁性矿物和不完整反铁磁性矿物的比例，亚铁磁性矿物含量越高 S_{-300} 越大。通过对东海陆架表层沉积物的 SIRM/χ-S_{-300} 散点图分析可以将研究区沉积物划分为三种类型(图 5)。第一种类型沉积物磁性矿物粒度最细，SIRM/χ 值介于 12×10^3—17×10^3A/m 之间，S_{-300} 最小，范围为 92%—94%；第二类沉积物磁性矿物粒度中等，SIRM/χ 值介于 8×10^3—15×10^3A/m 之间，S_{-300} 值分布范围最广为 92%—98%；第三类沉积物磁性矿物粒度最大，SIRM/χ 介于 6×10^3—9×10^3A/m 之间，S_{-300} 较大，为 95%—97%。沉积物的 SIRM/χ-SIRM 散点图同样将研究区沉积物分成了三类，第一类沉积物中磁性矿物含量较多且粒度最细，SIRM 值介于 6121×10^{-6}—$10171\times10^{-6}Am^2/kg$ 之间；第二类沉积物中磁性矿物含量最少且颗粒较粗，SIRM 值介于 2740×10^{-6}—$7693\times10^{-6}Am^2/kg$ 之间；第三类沉积物中磁性矿物含量高且颗粒最粗，SIRM 值介于 8120×10^{-6}—$9942\times10^{-6}Am^2/kg$ 之间。

根据 SIRM/χ-S_{-300}，SIRM/χ-SIRM 散点图分析并结合沉积物粒度特征及沉积环境，将东海陆架表层沉积物磁学特征进行了分类(图 6)。类型一主要分布在内陆架及研究区东北部，这两个区域的沉积物磁性矿物粒度细，磁性矿物含量多，亚铁磁性矿物比例相对较低；中外陆架的大部分沉积物都属于第二类沉积物，其磁性矿物粒度中等，磁性矿物含量最少，但亚铁磁性矿物所占比例要比类型一高；在研究区东部，出现与类型一二都不同的几个沉积物站位，其磁性矿物颗粒粗，含量高，亚铁磁性矿物比例也高。

4　讨论

4.1　磁学特征与粒度的关系

东海陆架表层沉积物平均粒径在 2.00—7.73Φ 之

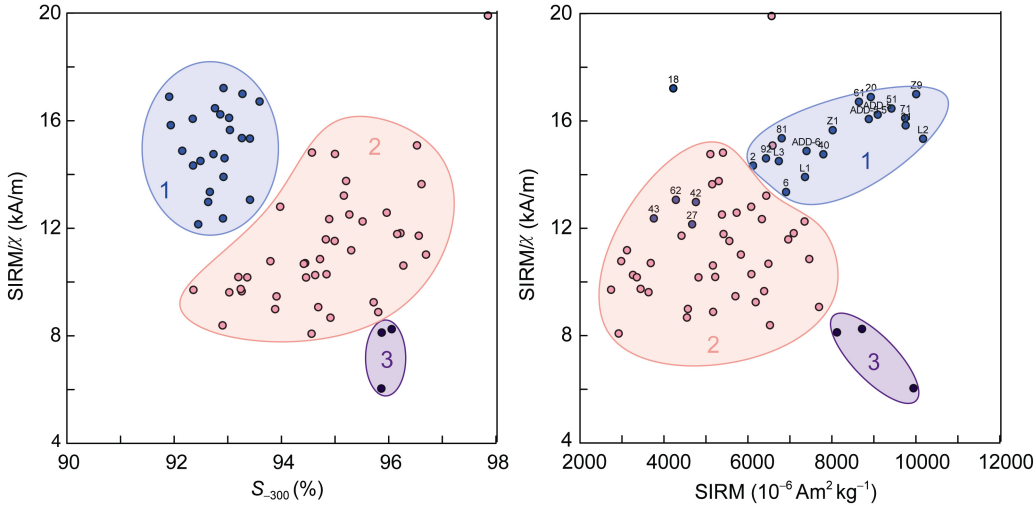

图 5 东海陆架表层沉积物磁学参数散点图

Fig.5 The scatter diagram of magnetic parameters of surface sediments in the East China Sea

注: 1、2、3 分别代表第一、二、三类沉积物

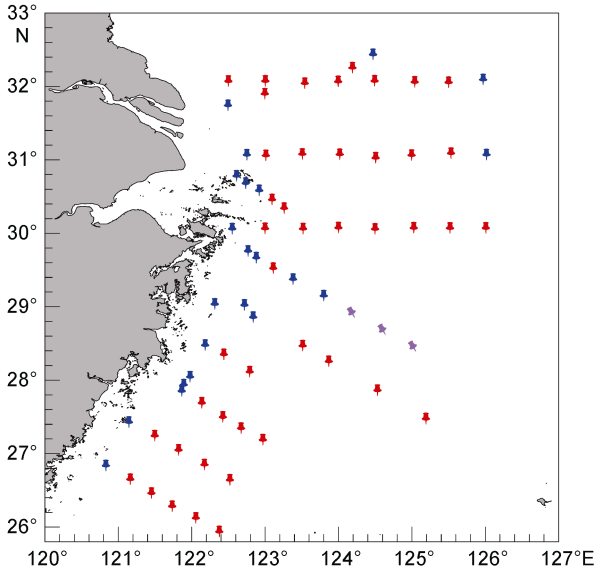

图 6 东海陆架表层沉积物磁学特征分类

Fig.6 Classification of magnetic characteristics of surface sediments in the East China Sea

注: 蓝色: 第一类沉积物; 红色: 第二类沉积物; 紫色: 第三类沉积物

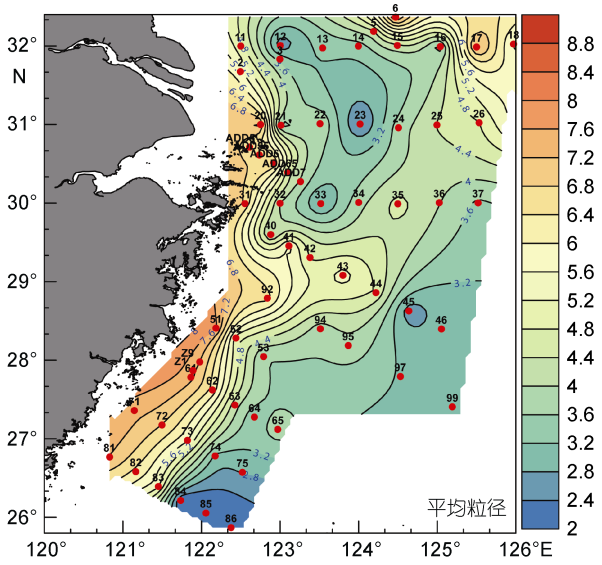

图 7 东海表层沉积物平均粒径(Φ)等值线分布

Fig.7 The contour map of mean grain size of surface sediments in the East China Sea (Φ)

间, 平均值为 4.73Φ, 最小值出现在研究区南部为 2.00Φ, 最大值为 7.73Φ, 出现在浙江沿岸内陆架(图 7)。在内陆架及研究区东北部, 沉积物粒度细, 现代物质来源丰富。中外陆架沉积物粒度粗, 缺乏现代细粒物质的输入且长期受到黑潮等强动力流的冲刷。在 29°N 附近出现一从内陆架向东延伸的舌状细粒沉积物高值区, 表明了细粒沉积物的跨陆架输送。

SIRM 反映了沉积物中磁性矿物的多寡, 将 SIRM 与砂、粉砂、黏土含量做相关性分析(图 8)。发现第一类沉积物中磁性矿物的含量与粒度相关性最高, 与砂含量成负相关, 与粉砂、黏土含量呈明显正相关。而第二、三类沉积物 SIRM 与粒度参数无明显相关性。第一类沉积物主要分布在内陆架及研究区东北部, 内陆架沉积物以现代长江来源的细粒沉积物为主, 研究区东北部则有黄海沿岸流搬运来的老黄河物质的影响, 这一类型沉积物整体粒度较细、分选程度较低, 磁性矿物含量最高(SIRM 值大), 由于磁

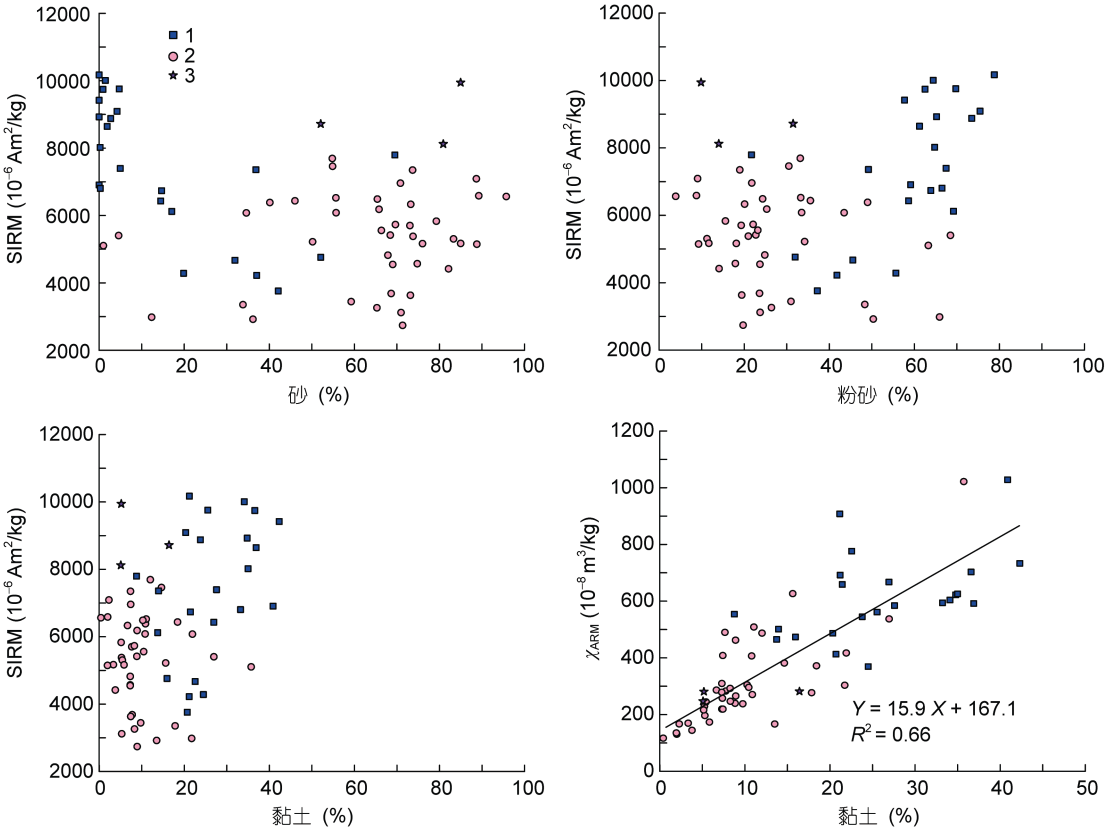

Fig.8　东海陆架表层沉积物磁学参数与粒度的关系

Fig.8　Relationships between magnetic parameters and particle size of surface sediments in the East China Sea continental shelf

注: 1、2、3 分别代表第一、二、三类沉积物

性矿物主要分布在细粉砂粒级中(Zhang *et al*, 2003, 2008; Liu *et al*, 2010), 因此磁性矿物含量随粉砂含量的增加而明显增加(图 8)。第二类沉积物广泛分布在东海中外陆架, 长期受到台湾暖流等较强水动力的冲刷, 且相对缺乏现代细粒陆源物质的供应, 因此粒度较粗分选程度高, 磁性矿物含量较低(SIRM 值小), 所以磁性矿物含量与粒度粗细并没有明显的相关性。第三类沉积物其粒度特征、沉积环境与第二类沉积物相似, 但其磁性矿物含量很高, 应该是由地形变化及沉积物在搬运过程中差异性沉积引起的, 在 75m 等深线东南部, 地形起伏不平造成矿物含量的变化, 石榴石、钛铁矿、磁铁矿、锆石等比重较大的稳定和较稳定矿物形成与地形起伏一致的小斑块高值区分布(陈丽蓉, 2008)。

对比平均粒径及反映沉积物中磁性矿物磁畴颗粒的参数 χ_{fd}%、χ_{ARM}、χ_{ARM}/χ 及 χ_{ARM}/SIRM 的分布, 发现它们具有很好的一致性(图 4, 图 7), 由于沉积物的分选作用均表现出近岸值高向海逐渐降低的趋势。选取 χ_{ARM} 与粒度参数进行相关性分析, 发现两者具有一定的相关性(图 8), 黏土含量越高, χ_{ARM} 值越大, 即沉积物磁性矿物中单畴颗粒越多, 表明沉积物的粒度对磁畴颗粒的大小具有控制作用。第一、二、三类沉积物在图 8 中被很好的区分出来。在内陆架及研究区东北部, 沉积物粒度细, 沉积物中的磁性矿物以单畴为主, 属于第一类型的沉积物。在研究区的中外陆架沉积物粒度较粗, 磁性矿物以准单畴和多畴为主, 属于第二类型的沉积物。在 χ_{fd}%、χ_{ARM}、χ_{ARM}/χ 及 χ_{ARM}/SIRM 的平面等值线分布图中也存在 29°N 附近从内陆架向东延伸的舌状高值区,与粒径分布一致(图 4, 图 7), 这一舌状高值区表明了现代细粒物质的跨陆架输运, 向东可延伸至 124.5°E 附近。前人研究认为东海存在明显的跨陆架锋(CPFs), CPFs 的存在对内陆架物质向外陆架的输送具有重要意义(Wang *et al*, 2008; He *et al*, 2010; Yuan *et al*, 2010), 因此本文认为研究区中部单畴颗粒向东延伸的舌状高值区的形成与跨陆架锋的存在有直接关系。

4.2　磁学特征与碎屑矿物鉴定的对比

研究区表层沉积物碎屑矿物的分离及镜下鉴定

结果表明，磁性矿物主要由磁铁矿、钛铁矿和赤铁矿组成，此外有部分嵌有磁铁矿的角闪石颗粒。磁学参数 χ、SIRM、S_{-100} 和 S_{-300} 及 κ-T 曲线表明研究区磁铁矿对沉积物磁性贡献最大，同时表明有赤铁矿及磁赤铁矿的存在。经鉴定磁铁矿在 0.063—0.25mm 粒级中颗粒平均百分含量为 0.8%，在研究区西南部，东部及虎皮礁附近出现高值区(图 9)，与 χ 及 SIRM 具有很好的一致性。在碎屑矿物鉴定结果中，研究区北部内陆架磁铁矿等磁性矿物含量较低，但 χ 及 SIRM 均出现高值。推断原因一是在研究区沉积物碎屑矿物中含有较多的嵌有磁铁矿颗粒的角闪石，部分单颗粒角闪石中嵌有多颗磁铁矿，按惯例在碎屑矿物鉴定过程中并未将其归入磁铁矿，但这部分矿物颗粒对沉积物的磁学性质起到了不可忽略的作用。其次碎屑矿物鉴定只鉴定了 63—250μm 粒级的矿物含量，而沉积物磁性测量包含了所有粒级，因此二者结果存在一定的差异。对比碎屑矿物镜下鉴定结果与沉积物磁学参数发现，环境磁学参数可以较好的反映沉积物中磁性矿物的含量高低，尤其是亚铁磁性矿物(磁铁矿)的含量。

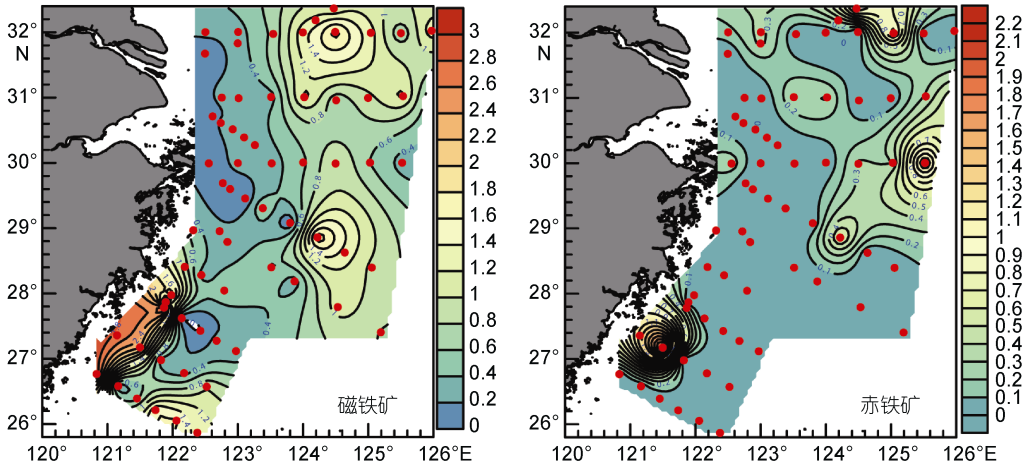

图 9 东海陆架表层沉积物中磁铁矿和赤铁矿颗粒百分含量(%)分布

Fig.9 Contour map in content of magnetite and hematite (unit: %)

4.3 磁学特征的物源指示

前人研究表明，长江和黄河沉积物的磁学特征具有明显的区别，长江沉积物磁性较黄河沉积物强(王永红等，2004；邢云，2007；牛军利等，2008)，S_{-100}-SIRM 散点图(图 10)中长江沉积物和黄河沉积物明显位于不同的区域。将研究区沉积物投点在 S_{-100}/SIRM 散点图上，发现大部分东海陆架表层沉积物与长江沉积物磁学性质更相似。第一类沉积物与长江物质一致，表明这类沉积物主要来源于长江，长江入海物质在长江冲淡水和闽浙沿岸流的作用下向西南扩散，由于台湾暖流的阻挡作用主要分布在内陆架。第二类沉积物与长江物质磁学性质相似但 SIRM 有所减小，结合陈丽蓉(2008)测年及碎屑矿物组合结果认为该类沉积物以古长江物质为主，由于缺乏现代细粒物质输入，沉积物粒度较粗而导致 SIRM 值变小。第三类沉积物在 S_{-100}/SIRM 图中完全分布在长江物质区域，具有沉积物粒度粗，磁性矿物含量高的特点，地形起伏变化和沉积物分选是造成其与第二类沉积物磁性矿物含量不同的主要因素。第一、二类沉积物中各有部分站位 S_{-100}/SIRM 值与长江沉积物存在差异(图 10)，这部分站位主要分布在研究区东北部及西南部闽浙沿岸。研究区东北部沉积物磁学性质更接近黄河物质特征是受到黄海沿岸流搬运来的老黄河口侵蚀再悬浮沉积物的影响。在碎屑矿物鉴定中发现西南部闽浙沿岸磁铁矿矿物形态表现为片状，表面有铁锈存在因此判断为近岸人类活动影响造成。同时由于瓯江磁铁矿含量较高(平均值为 21.1%)，闽浙沿岸附近站位沉积物有可能受到瓯江物质的影响。此外，某些站位早期成岩作用也会导致沉积物中磁性矿物含量降低改变其磁性特征以致出现磁学性质与长江差异较大的现象。综上磁学特征表明东海陆架沉积物主要来源于长江，同时部分受到黄河物质的影响，人类活动及小河流物质的输入在近岸也起到了一定控制作用，这与前人在沉积学、地球化学等方面的研究结论相一致(Liu *et al*, 2006；王中波等，2012；Li *et al*, 2012；石学法等，2015)。

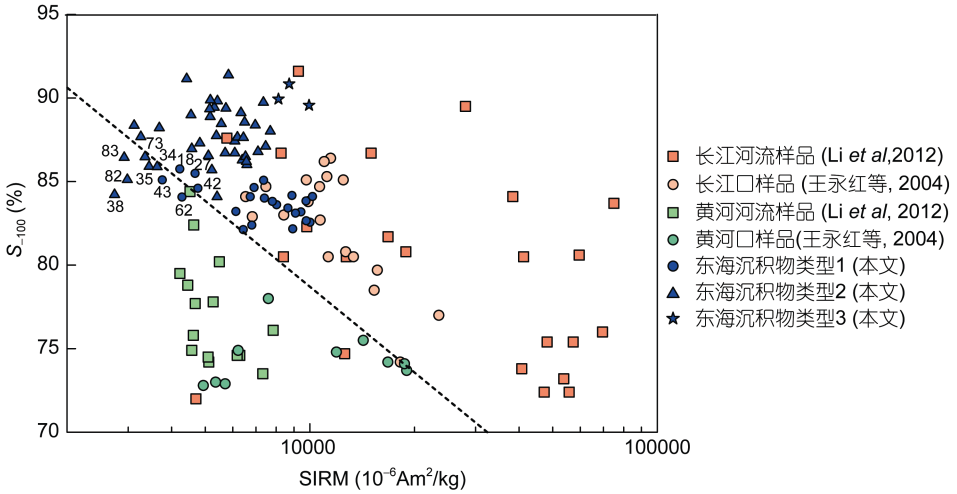

图 10　研究区与长江、黄河沉积物磁学参数对比

Fig.10　S_{-100}/SIRM of the sediments in the study area, the Changjiang (Yangtze) River and the Huanghe (Yellow) River

5　结论

(1) 东海陆架表层沉积物中的磁性矿物主要有磁铁矿、磁赤铁矿和赤铁矿，其中磁铁矿主导了研究区沉积物的磁学性质。研究区西部内陆架及东北部济州岛西南泥质区沉积物中磁性矿物颗粒细，以单畴、准单畴为主，同时含有较多的超顺磁颗粒。而在研究区中外陆架，磁性矿物颗粒较粗以准单畴和多畴为主，很少出现超顺磁颗粒。

(2) 根据东海陆架表层沉积物的磁学参数 S_{-300}、SIRM/χ 及 SIRM 的特征将沉积物分为三类。第一类沉积物主要分布在西部内陆架及研究区东北部，以现代细粒沉积物为主，磁性矿物含量高且磁性矿物含量与粉砂黏土含量成正相关关系；第二类分布在中外陆架，以较粗的残留沉积物为主，磁性矿物含量低，磁性矿物含量与粒度大小并无明显相关性；第三类沉积物分布在研究区东部具有磁性矿物含量高，粒度粗的特征。沉积物颗粒一定程度上控制了磁性矿物颗粒的大小，不同区域沉积物中磁性矿物的含量与粒度大小相关性不同。

(3) 磁学参数 χ、SIRM 的高值区与碎屑矿物鉴定中磁铁矿的高含量区一致。此外碎屑矿物镜下鉴定发现部分角闪石中嵌有磁铁矿颗粒，这部分矿物对沉积物磁学特征的影响不可忽视。

(4) S_{-100}-SIRM 散点图显示，东海陆架大部分区域沉积物磁学特征与长江沉积物一致，表明物质来源于长江。研究区东北部受到黄海沿岸流搬运来的黄河物质的影响,因此磁学性质呈现出黄河物质特征。闽浙沿岸部分站位受到早期成岩作用，人类活动及瓯江物质的影响沉积物磁学特征与长江物质存在差异。

致谢　感谢孙承武等老师参加航次样品采集，感谢青岛海洋地质研究所王双老师在试验中的帮助。科学三号考察船全体船队员在调查航次中付出了辛勤劳动，在此一并致谢。

参　考　文　献

王　双, 2014. 黄渤海表层沉积物磁学特征及其环境指示意义. 青岛: 中国海洋大学硕士学位论文, 32—48

王　双, 王永红, 2016. 黄渤海表层沉积物环境磁学特征分类及物源诊断. 第四纪研究, 36(1): 216—226

王中波, 杨守业, 张志珣等, 2012. 东海陆架中北部沉积物粒度特征及其沉积环境. 海洋与湖沼, 43(6): 1039—1049

王永红, 沈焕庭, 张卫国, 2004. 长江与黄河河口沉积物磁性特征对比的初步研究. 沉积学报, 22(4): 658—663

牛军利, 杨作升, 李云海等, 2008. 长江与黄河河口沉积物环境磁学特征及其对比研究. 海洋科学, 32(4): 24—30

邢　云, 2007. 基于磁性特征的长江口和黄河口表层沉积物比较研究. 上海: 华东师范大学硕士学位论文, 28—58

刘　健, 秦华峰, 孔祥淮等, 2007. 黄东海陆架及朝鲜海峡泥质沉积物的磁学特征比较研究. 第四纪研究, 27(6): 1031—1039

李家彪, 2008. 东海区域地质. 北京: 海洋出版社, 1

陈丽蓉, 2008. 中国海沉积矿物学. 北京: 海洋出版社, 123—137

周　鑫, 刘　毅, 程文翰等, 2011. 黄东海陆架区表层沉积物磁化率空间分布及其影响因素分析. 地球环境学报, 2(2): 356—361

潘大东, 王张华, 陈　艇等, 2015. 长江口表层沉积物矿物磁

性分区特征及其沉积环境指示意义. 海洋学报, 37(5): 101—111

石学法, 刘升发, 乔淑卿等, 2015 中国东部近海沉积物地球化学: 分布特征、控制因素与古气候记录. 矿物岩石地球化学通报, 34(5): 885—894

Banerjee S K, King J, Marvin J, 1981. A rapid method for magnetic granulometry with applications to environmental studies. Geophysical Research Letters, 8(4): 333—336

Bloemendal J, Liu X M, 2005. Rock magnetism and geochemistry of two plio-pleistocene Chinese loess-palaeosol sequences-implications for quantitative palaeoprecipitation reconstruction. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 226(1—2): 149—166

Brachfeld S A, Banerjee S K, 2000. Rock-magnetic carriers of century-scale susceptibility cycles in glacial-marine sediments from the Palmer Deep, Antarctic Peninsula. Earth and Planetary Science Letters, 176(3—4): 443—455

Creer K M, Morris A, 1996. Proxy-climate and geomagnetic palaeointensity records extending back to Ca. 75000 BP derived from sediments cored from Lago Grande di Monticchio, Southern Italy. Quaternary Science Reviews, 15(2—3): 167—188

Dekkers M J, 1997. Environmental magnetism: an introduction. Geologie en Mijnbouw, 76(1—2): 163—182

Dunlop D J, Özdemir Ö, 2001. Rock Magnetism: Fundamentals and Frontiers. New York: Cambridge University Press, 1—573

Evans M E, Heller F, 2003. Environmental Magnetism: Principles and Applications of Enviromagnetics. San Diego: Academic Press, 299

Geissman J, 2004. Environmental magnetism: principles and applications of enviromagnetics. EOS, Transactions American Geophysical Union, 85(20): 202

He L, Li Y, Zhou H *et al*, 2010. Variability of cross-shelf penetrating fronts in the East China Sea. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 57(19—20): 1820—1826

Hounslow M W, Morton A C, 2004. Evaluation of sediment provenance using magnetic mineral inclusions in clastic silicates: comparison with heavy mineral analysis. Sedimentary Geology, 171(1—4): 13—36

Kim W, Doh S J, Yu Y *et al*, 2013. Magnetic evaluation of sediment provenance in the northern East China Sea using fuzzy *c*-means cluster analysis. Marine Geology, 337: 9—19

Li C, Yang S Y, Zhang W G, 2012. Magnetic properties of sediments from major rivers, aeolian dust, loess soil and desert in China. Journal of Asian Earth Sciences, 45: 190—200

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, Zhu R X, Li G X, 2003. Rock magnetic properties of the fine-grained sediment on the outer shelf of the East China Sea: implication for provenance. Marine Geology, 193(3—4): 195—206

Liu S M, Zhang W G, He Q *et al*, 2010. Magnetic properties of East China Sea shelf sediments off the Yangtze Estuary: influence of provenance and particle size. Geomorphology, 119(3—4): 212—220

Luo C, Zheng Y, Zheng H B *et al*, 2016. Temporal and spatial variations in magnetic properties of suspended particular matter in the Yangtze River drainage and their implications. Journal of Asian Earth Sciences, 124: 204—213

Maher B A, 1988. Magnetic properties of some synthetic sub-micron magnetites. Geophysical Journal International, 94(1): 83—96

Maher B A, Thompson R, 1999. Quaternary Climates, Environments and Magnetism. Cambridge: Cambridge University Press, 390

Maher B A, Watkins S J, Brunskill G *et al*, 2009. Sediment provenance in a tropical fluvial and marine context by magnetic 'fingerprinting' of transportable sand fractions. Sedimentology, 56(3): 841—861

Milliman J D, Shen H T, Yang Z S *et al*, 1985. Transport and deposition of river sediment in the Changjiang estuary and adjacent continental shelf. Continental Shelf Research, 4(1—2): 37—45

Milliman J D, Yang Z S, 2014. Chinese-U.S. sediment source-to-sink research in the east China and Yellow Seas: a brief history. Continental Shelf Research, 90: 2—4

Oldfield F, 1994. Toward the discrimination of fine-grained ferrimagnets by magnetic measurements in lake and near-shore marine sediments. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 99(B5): 9045—9050

Robinson S G, Sahota J T S, Oldfield F, 2000. Early diagenesis in North Atlantic abyssal plain sediments characterized by rock-magnetic and geochemical indices. Marine Geology, 163(1—4): 77—107

Schmidt A M, von Dobeneck T, Bleil U, 1999. Magnetic characterization of Holocene sedimentation in the South Atlantic. Paleoceanography, 14(4): 465—481

Thompson R, Oldfield F, 1986. Environmental Magnetism. London: Allen & Unwin

Thouveny N, Moreno E, Delanghe D *et al*, 2000. Rock magnetic detection of distal ice-rafted debries: clue for the identification of Heinrich layers on the Portuguese margin. Earth and Planetary Science Letters, 180(1—2): 61—75

Verosub K L, Roberts A P, 1995. Environmental magnetism: past, present, and future. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 100(B2): 2175—2192

Walden J, Slattery M C, Burt T P, 1997. Use of mineral magnetic measurements to fingerprint suspended sediment sources: approaches and techniques for data analysis. Journal of Hydrology, 202(1—4): 353—372

Wang W J, Jiang W S, 2008. Study on the seasonal variation of the suspended sediment distribution and transportation in the East China Seas based on SeaWiFS data. Journal of Ocean University of China, 7(4): 385—392

Wang Y H, Dong H L, Li G X *et al*, 2010. Magnetic properties of muddy sediments on the northeastern continental shelves of China: implication for provenance and transportation. Marine Geology, 274(1—4): 107—119

Wang Y H, Yu Z G, Li G X *et al*, 2009. Discrimination in magnetic properties of different-sized sediments from the Changjiang and Huanghe Estuaries of China and its implication for provenance of sediment on the shelf. Marine Geology, 260(1—4): 121—129

Watkins S J, Maher B A, 2003. Magnetic characterisation of present-day deep-sea sediments and sources in the North Atlantic. Earth and Planetary Science Letters, 214(3—4): 379—394

Watkins S J, Maher B A, Bigg G R, 2007. Ocean circulation at

the Last Glacial Maximum: a combined modeling and magnetic proxy-based study. Paleoceanography, 22(2), http://dx.doi.org/10.1029/2006PA001281

Wheeler A J, Oldfield F, Orford J D, 1999. Depositional and post-depositional controls on magnetic signals from saltmarshes on the north-west coast of Ireland. Sedimentology, 46(3): 545—558

Yuan D L, Hsueh Y, 2010. Dynamics of the cross-shelf circulation in the Yellow and East China Seas in winter. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 57(19—20): 1745—1761

Zhang W, Xing Y, Yu L *et al*, 2008. Distinguishing sediments from the Yangtze and Yellow Rivers, China: a mineral magnetic approach. The Holocene, 18(7): 1139—1145

Zhang W G, Yu L Z, 2003. Magnetic properties of tidal flat sediments of the Yangtze Estuary and its relationship with particle size. Science in China Series D: Earth Sciences, 46(9): 954—966

MAGNETIC PROPERTY OF THE EAST CHINA SEA SEDIMENT: INDICATION TO THE PROVENANCE

ZHANG Kai-Di[1, 2], LI An-Chun[1], LU Jian[1], ZHANG Jin[1, 2]

(1. *Key Laboratory of Marine Geology and Environment*, *Institute of Oceanology*, *Chinese Academy of Sciences*, *Qingdao* 266071, *China*; 2. *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *China*)

Abstract To identify the provenance of sediments in the East China Sea continental shelf, multiple magnetic parameters, sediment grain size, and detrital mineral compositions were measured from surface sediments collected in 69 sites. The susceptibility (χ), saturation isothermal remanent magnetization (SIRM), S ratio, and κ-T curve of typical samples show that the magnetic mineralogy is dominated by magnetite with a small amount of hematite and ilmenite, which is consistent with the results of detrital minerals identification under the microscope. Magnetic parameters (frequency-dependent magnetic susceptibility (χ_{fd}%), χ_{ARM}, χ_{ARM}/χ and χ_{ARM}/SIRM) suggested that the magnetic mineral particles are finer in the west of the study area. In the southwest Jeju Island sediments are dominated by single-domain and pseudo-single-domain particle with relatively high concentration of super-paramagnetic particles. While in the middle-outer continental shelf the magnetic mineral particles are dominated by pseudo-single-domain and multi-domain particles. In terms of magnetic parameters S_{-300}, SIRM/χ, and SIRM, the surface sediments can be divided into three types. Type 1 sediments are mainly distributed in the western part of the continental shelf and the northeastern part of the study area. It mainly consists of modern fine grained sediments with high magnetic mineral content, and the magnetic mineral content is positively correlated with silt and clay content. Type 2 sediments are distributed in the middle-outer continental shelf and dominated by coarse relict sediments in low magnetic mineral content and show no significant correlation between the magnetic mineral content and grain size. Sediments in Type 3 are distributed in the eastern part of the study area with high magnetic mineral content and coarse grain size. To a certain extent, the grain size of the magnetic mineral particles is controlled by sediment particles, and the correlation between the content of magnetic minerals and the grain size is different among the three types. The magnetic properties of the samples reflect three major provenances as discriminated in S_{-100} vs. SIRM diagrams in comparison with available studies concerned: the Changjiang (Yangtze) River for most sites, Huanghe (Yellow) River for the northeastern sites, transported by the Yellow Sea coastal current, and Zhejiang-Fujian coastal area in some sites affected by human activities and Oujiang River input.

Key words East China Sea continental shelf; surface sediments; magnetic property; sediment provenance