

东海外陆架厚层砂质沉积岩石磁学特征

刘建兴^{1,2,3}, 石学法^{1,2,3*}, 吴永华^{1,2,3}, 于晓晓^{4,5}, 单新^{1,2,3}, 徐涛玉^{1,2,3}

(1. 自然资源部 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061;

2. 自然资源部 海洋地质与成矿作用重点实验室, 山东 青岛 266061;

3. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 海洋地质过程与环境功能实验室, 山东 青岛 266237;

4. 中国科学院 海洋研究所, 山东 青岛 266071; 5. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 对位于东海外陆架潮流沙脊分布区的 DH03 孔(进尺 101.6 m, 水深 96 m)上部 0~48 m 层位的砂质沉积样品进行了岩石磁学测试分析。研究结果表明: 砂质沉积物中的主要磁性组分为陆源碎屑型磁铁矿(Fe_3O_4), 并含有少量赤铁矿(Fe_2O_3); 不同层位沉积物中的磁性矿物的粒径差别非常显著, 几乎涵盖从单畴(SD)、准单畴(PSD)乃至多畴(MD)的各种磁畴状态, 不利于相对古强度(RPI)的应用, 这与研究区复杂多变的水动力过程和物质来源密切相关; 同时, 部分层位沉积物中原生的铁氧化物特别是磁铁矿已经发生了一定程度的成岩改造, 形成了少量的自生胶黄铁矿(Fe_3S_4), 指示了较高的有机碳供应和沉积速率; 此外, 磁性矿物含量随深度变化也较为明显。揭示了东海外陆架砂质沉积物中磁性矿物的复杂性。

关键词: 东海; 外陆架; 潮流沙脊; 岩石磁学; 磁铁矿; 胶黄铁矿

中图分类号: P736

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2020)03-0435-11

doi: 10.3969/j.issn.1671-6647.2020.03.006

引用格式: LIU J X, SHI X F, WU Y H, et al. Rock-magnetic properties of thick sandy sediments on the outer continental shelf of East China Sea[J]. Advances in Marine Science, 2020, 38(3): 435-445. 刘建兴, 石学法, 吴永华, 等. 东海外陆架厚层砂质沉积岩石磁学特征[J]. 海洋科学进展, 2020, 38(3): 435-445.

近海陆架海域是连接陆地和大洋的桥梁和纽带, 其在不同时空尺度上的物质循环和陆海相互作用等过程一直是海洋地球科学领域研究的前沿问题^[1]。作为西太平洋典型的开放型边缘海, 东海海域辽阔, 总面积约 77 万 km^2 , 其中 2/3 为陆架, 宽度 400~500 km, 最宽 640 km, 是世界上宽阔的陆架之一, 整个陆架以 60 m 水深为界, 划分为内陆架和外陆架两部分^[2]。陆架坡缓水浅, 平均坡度和水深分别为 58" 和 72 m, 大部分区域的水深在 150 m 以浅, 第四纪海面数十米至上百米升降可造成该区岸线在数百千米范围内进退^[3]。陆架沉积体系的形成和发育受多种因素控制, 包括长江等入海河流带来的巨量陆源物质、冰期和间冰期旋回中的季风气候、海洋环流、潮流和波浪等动力条件以及区域沉降等^[4-6]。因此, 东海陆架沉积物记录了丰富的环境演化信息, 是研究第四纪古环境和气候演变、海面波动、沉积地貌与动力响应、季风演化、构造活动等的理想海域。

晚更新世冰期结束后, 气候转暖, 伴随着海面的上升, 太平洋潮波对东海陆架沉积过程的影响逐渐加强, 潮流对海底沉积物进行强烈的侵蚀、搬运和再堆积, 形成了多期次的潮流沙脊^[3,7]。对东海陆架潮流沙脊的研究始于 20 世纪 80 年代末, Yang 等^[8]首次对其形态和成因进行了比较系统的描述和探讨。随后, 众多学

收稿日期: 2019-02-14

资助项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目——东海外陆架沉积岩石磁学与高分辨率磁性地层学研究(2016Q06)和晚第四纪水下长江三角洲沉积构型及其对气候、海平面变化响应机理研究(2017Q08); 国家自然科学基金项目——东海外陆架磁性地层年代框架的建立及其古环境意义(41606075)、东海外陆架晚第四纪高精度年代地层及层序地层研究(41406051)和海洋地质过程与环境(U1606401)

作者简介: 刘建兴(1987-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事海洋古地磁与岩石磁学方面研究. E-mail: jxliu@fio.org.cn

* **通讯作者:** 石学法(1965-), 男, 研究员, 博士, 主要从事海洋沉积与海底成矿方面研究. E-mail: xfshi@fio.org.cn

(陈 靖 编辑)

者从不同角度对其开展了深入研究,在沙脊的形成机制、分布范围以及内部构型等方面取得了一系列的认识^[9-18]。然而,目前未见有关沉积物岩石磁学的报道。相比而言,邻近的内陆架、冲绳海槽以及南黄海等地区在沉积物岩石磁学研究方面则取得了丰硕的成果:对东海内陆架泥质区岩芯的研究表明沉积物中部分原生磁铁矿遭受了一定程度的后期成岩改造,具有重要的古气候指示意义^[19-20];葛淑兰等^[21]对冲绳海槽北部 CSH1 孔岩芯的研究,同样发现自生铁硫化物的存在,表明沉积物遭受了早期成岩作用,而对于该孔南部的 Y179 孔的研究则表明准单畴(PSD)的陆源磁铁矿是其沉积物中的主要磁性组分,其未发生明显的成岩作用的影响^[22];刘健等^[23-26]对南黄海冰后期沉积物做了大量的岩石磁学研究,发现海面升降对于磁性矿物的分布和成岩作用具有重要影响。相比而言,对于东海外陆架沉积物的岩石磁学研究则局限于表层沉积物^[27],缺少对沙脊分布区的相关研究,特别是对于岩芯中磁性矿物性质的把握。这必将严重阻碍对于沙脊乃至整个东海外陆架沉积的全面认识以及相关磁性地层和古环境学研究的进程。

综上所述,本文将对取自东海外陆架潮流沙脊分布区的钻孔中的厚层砂质沉积物开展系统的岩石磁学研究,以期进一步加深对该特殊地质体的系统认识,并有效填补对研究区钻孔沉积物岩石磁学研究的空白,为后续相关研究提供参考。

1 材料与方法

在浙江沿岸外的东海陆架平原上,自等深线约 60 m 以深、在面积约 7 万 km² 的海底,分布着我国最大的一片线状沙脊群,表现为 70~100 m 的等深线出现急剧的肠状弯曲(图 1)。沙脊呈 NW—SE 方向,长度 100~200 km,起伏幅度可达 20 m 或者更大,主要取决于当地的地形和沉积动力学条件,是东海残留砂的主要组成部分,同时也是全新世海侵对末次冰期沉积物加以改造的实例^[28-29]。已有研究表明,残留砂的年龄跨度比较分散,变化范围为 2 300~42 000 a BP,大多数集中在 15 000~8 000 a BP,这也从侧面印证了残留砂是末次冰期的物质在全新世海侵过程中经过改造的产物^[28]。残留砂都在改造和变化的中途,改造的程度因地而异。当流场较强,特别是在大潮和强风浪的作用下,改造程度更明显^[30]。

所用 DH03 孔岩芯来自于自然资源部第一海洋研究所,于 2015-09 委托上海海洋石油局第一海洋地质调查大队利用“勘 407”号海洋工程地质综合调查船在东海外陆架潮流沙脊区钻取(图 1),其地理坐标为(123°48'E, 28°18'N),水深 96 m,钻孔实际进尺深度 101.6 m,平均采取率 81.56%。岩芯自获取到分样期间一直在 4 °C 条件下保存。沉积物粒度分析使用仪器为英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer 2000 型激光粒度仪,结果显示岩芯上部 0~48.2 m 层位为分选较好的细砂-粉砂质砂,与下伏的黏土质粉砂层界限清晰(图 2),可能存在沉积间断。结合早期研究结果^[13-16],认为该层位属于潮流沙脊沉积。为深入研究厚层砂质沉积物的岩石磁学特征,我们在中科院地质与地球物理研究所古地磁与年代学实验室进行了测试。

以约 1 m 为间距采集 55 份沉积物样品,在<30 °C 进行烘干并取适量装入特制的胶囊中。利用美国普林斯顿仪器公司(Princeton Instruments)生产的 MicroMag 3900 型可变梯度振动磁力仪,测量样品的磁滞

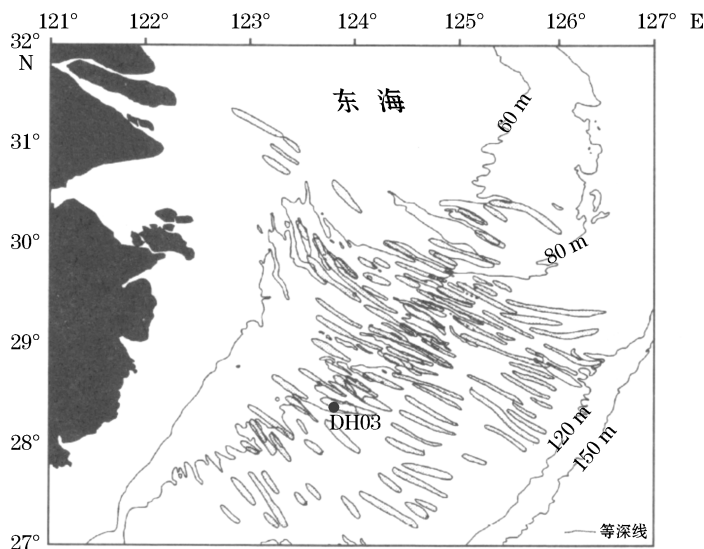


图 1 东海陆架潮流沙脊分布及 DH03 孔位置^[13]

Fig.1 Distribution of tidal sand ridges on the East China Sea continental shelf and location of the sediment core DH03^[13]

回线(Loop)、等温剩磁(Isothermal Remanent Magnetization, IRM)获得曲线和反向场退磁曲线以及代表性样品的一阶反转曲线(First-Order Reversal Curve, FORC)。测量所用饱和场为 1.5 T,测量步长为 5 mT,平均观测时间 300~500 ms;FORC 测量数量为 100 条,借助 Harrison 和 Feinberg 编制的软件^[31]对所获数据进行处理,得到相应的 FORC 图。

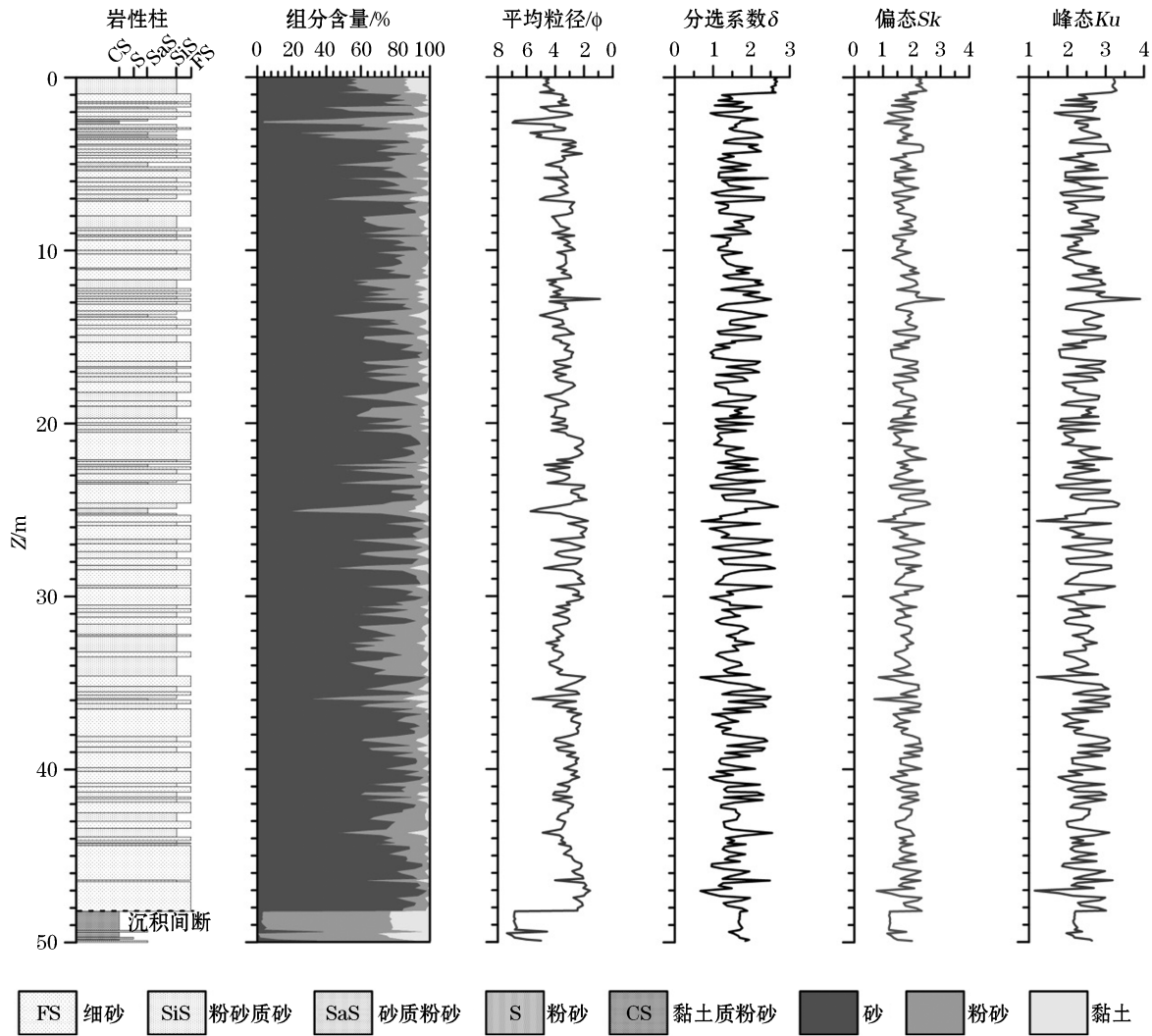


图2 东海外陆架 DH03 孔岩芯上部 50 m 沉积物的岩性特征和粒度分析结果
Fig.2 Lithologic features and results of grain-size analysis for sediments from the upper 50 m of core DH03 on the outer shelf of East China Sea

利用边长 2 cm 的无磁性塑料方盒以约 10 cm 为间距采集 321 个定向样品并称重。首先,在 KLY-4S 自动旋转卡帕桥上测量样品的体积磁化率并进行质量归一化(质量磁化率 χ);之后,待天然剩磁的交变退磁测量完成后,利用 2G-Enterprise 脉冲磁力仪依次对样品施加 1 T 的正向场和 0.3 T 的反向场,并在 2G-760R 超导磁力仪上测量相应的等温剩磁,分别记为 IRM_{1T} 和 $IRM_{-0.3T}$,参数 $S_{ratio} = (1 - IRM_{-0.3T} / IRM_{1T}) / 2$ 用来指示样品中高低矫顽力磁性组分的相对含量,其变化范围为 0~1,分别代表纯的赤铁矿或针铁矿和纯的磁铁矿端元,即其值越大表示低矫顽力组分的比例越高^[32]。

三轴等温剩磁热退磁参考 Lowrie 的操作方法^[33]:取适量沉积物固定在无磁性陶瓷小方盒中,沿其 3 个正交方向(即 z , y , x 轴)上,利用 MC-1 型脉冲磁力仪依次施加 2.50,0.50 和 0.05 T 的场,并在 2G-760R 超

导磁力仪上测量其剩磁,即 3 个方向上的剩磁分别代表样品中的高、中、低矫顽力组分;其后,在 TD-48 热退磁炉内逐步加热,温度范围为 80~690 °C,步长 20~50 °C,并在每一步加热后分别测量其剩磁。

低温曲线测量在 MPMS-5XL 系统下完成:取适量沉积物装入特制胶囊中并固定,在零场状态下将样品冷却至 20 K,施加 2.5 T 的场使样品获得一等温剩磁,撤掉外场,以 5 K/min 的速率逐渐升温至室温(300 K),期间,测量剩磁随温度的变化。

2 结果与讨论

2.1 磁性矿物类型

所有样品的 Loop 和 IRM 获得曲线均显示其在 300 mT 的场之前已基本达到饱和状态(图 3);其矫顽力(H_c)和剩磁矫顽力(H_{cr})的变化范围分别为 2.81~24.77 mT 和 21.39~54.52 mT,平均值分别为 8.84 和 30.98 mT(图 4a 和图 4b); S_{ratio} 值较高,变化范围为 0.90~1.00,平均值为 0.96(图 4c)。实验结果一致表明沉积物中的磁性矿物以低矫顽力组分(如磁铁矿)为主导。

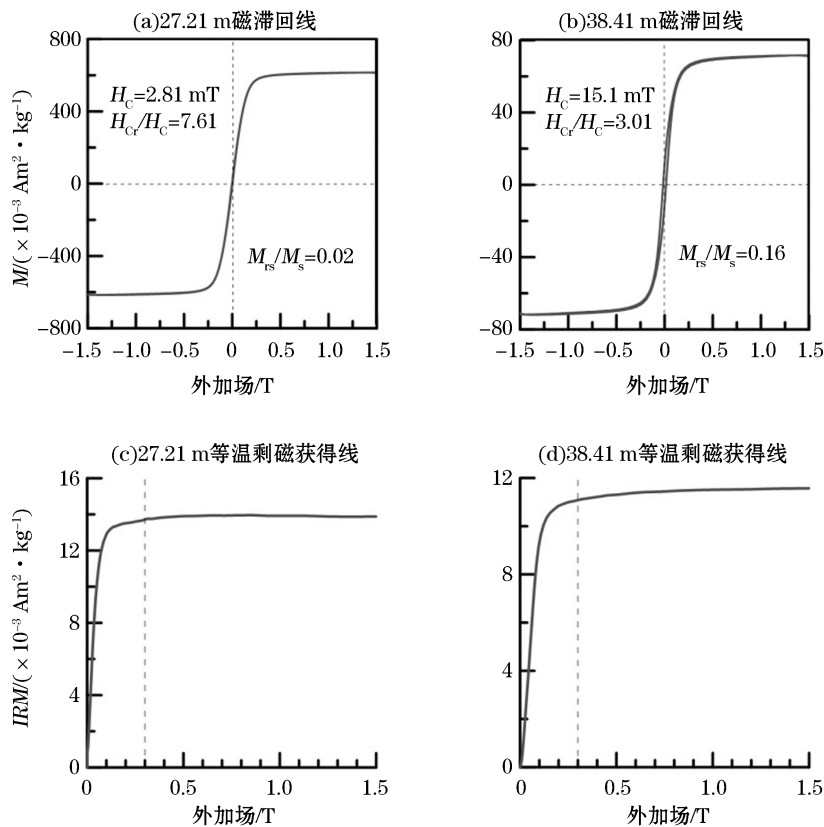
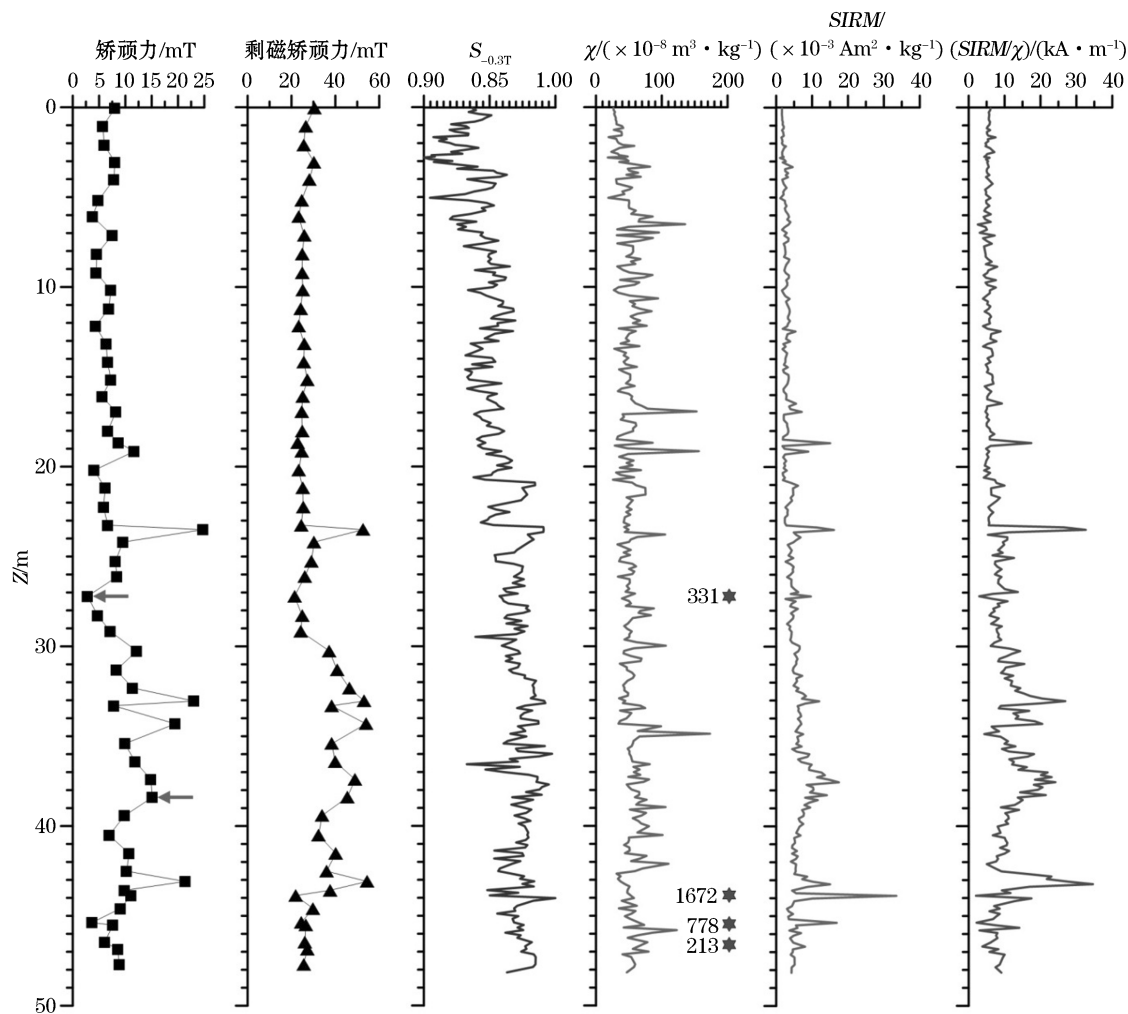


图3 典型样品的磁滞回线和等温剩磁获得线

Fig.3 Loops and IRM acquisition curves for representative samples

利用特征温度曲线可以进一步明确沉积物中的磁性矿物。代表性样品的三轴 IRM 热退磁结果表明:作为主导磁性矿物的低-中矫顽力组分在被加热至 600 °C 之前已经基本解阻(图 5a 和图 5b),这直接表明磁铁矿是砂质沉积物中的主要磁性矿物^[34]。此外,部分样品的中等矫顽力组分所携带的剩磁在 250~400 °C 明显降低,其对应的 FORC 图也显示存在一中心矫顽力约为 60 mT 的单畴(SD)组分(图 6b),结合已有研究^[35],推断该类样品的磁性组分中存在一定量的胶黄铁矿(Fe_3S_4)。最后,几乎所有样品中均含有极少量的

高矫顽力组分,对应的最大解阻温度约为 680 ℃,中矫顽力组分在此温度下也几乎完全解阻,说明样品中还存在少量的赤铁矿^[34]。



注:箭头指示图 3 所展示样品的位置;星号和数字对应磁化率高值样品

图 4 DH03 孔岩磁学参数随深度的变化

Fig.4 Variations of rock-magnetic parameters versus depths in the core DH03

低温测量的优势为磁性矿物在低温条件下几乎不发生化学变化且与测量仪器有关的干扰较小,因为某些磁性矿物存在特征的低温转换现象^[36]。例如,化学计量的磁铁矿在 110~120 K 的 Verwey 转换^[37]、某些赤铁矿在 250 K 附近的 Morin 转换^[38]、单斜磁黄铁矿在 30~34 K 之间的 Besnus 转换^[39],而胶黄铁矿不具备低温转换^[35]。DH03 孔所有测试样品的低温曲线均可观测到十分明显的 Verwey 转换(图 5c 和图 5d),进一步表明了磁铁矿普遍存在于样品中。

2.2 磁性矿物含量

在磁性矿物组成一定的情况下,物质的磁学性质取决于磁性矿物的含量和粒径。因样品中的主要磁性矿物为磁铁矿,故可将其在 1 T 的场下获得的剩磁即 IRM_{1T} 视为饱和等温剩磁(Saturation Isothermal Remanent Magnetization, SIRM)。在此,选取质量磁化率 χ 和 SIRM 两个参数作为反映沉积物中磁性矿物含量的指标。已有研究表明,当磁铁矿的粒径大于超顺磁(SP)-SD 界限后,其磁化率几乎不随颗粒大小变化,或者仅稍有增加^[40]。然而,当沉积物中 SP 磁性矿物的含量较明显时,由于其磁化率比单畴及以上的颗粒大

得多,却不产生剩磁,使得 χ 不能有效地指示磁性矿物含量变化;此外,沉积物中黏土矿物的顺磁性以及水和碳酸钙等物质的抗磁性对磁化率值的影响也不容忽视^[41]。此时,*SIRM* 将更加真实地反映磁性矿物的含量。总之,要视具体情况而定。

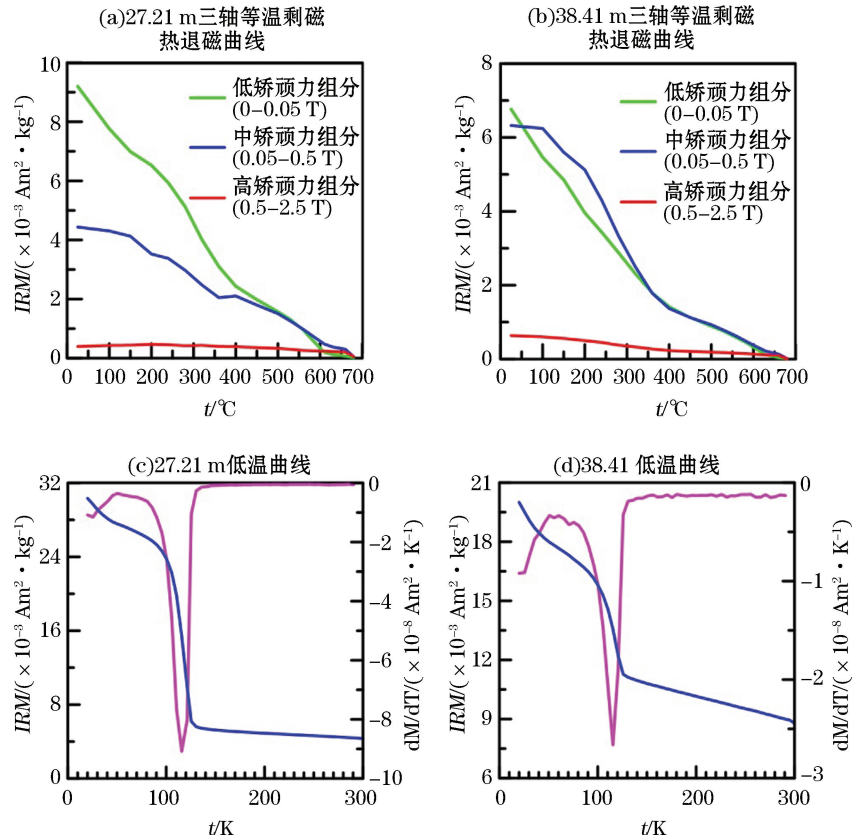


图 5 典型样品的温度特征曲线

Fig.5 Curves of thermal demagnetization of three-axis IRM and variations of IRM versus temperature for representative samples

实验结果显示,DH03 孔砂质沉积层的 χ 波动幅度较大,变化范围为 $(17.85 \sim 1\ 671.91) \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$,平均值为 $62.62 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$,绝大部分样品的值在 $200 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 以下,仅有 4 个样品的值超过 200(图 4d),为了清晰反映磁化率的整体变化,特将这 4 个 χ 高值单独标出。相对于 χ 的波动幅度,*SIRM* 的变化范围明显较小,为 $(1.04 \sim 33.50) \times 10^{-3} \text{ Am}^2/\text{kg}$,平均为 4.69,特别是上部约 0~20 m 层位的值更加稳定(图 4)。整体而言, χ 和 *SIRM* 的变化趋势较为一致,但仍有相当层位存在不一致甚至是相反的变化趋势,分析认为有 2 方面原因:1)某些层位存在一定量的 SP 磁性颗粒,使得 χ 明显升高,而 SP 颗粒不能携带剩磁,而导致 *SIRM* 变化不明显或者呈现低值;2)部分层位的原生碎屑铁氧化物及一些含铁矿物发生了一定程度的成岩改造,生成了 SD 的铁硫化物(如胶黄铁矿,这类样品往往具有相对较高的 H_c 值),使得亚铁磁性矿物的含量明显增加而导致 *SIRM* 和 χ 可能都明显升高,由于 χ 对 SD 颗粒最不敏感^[34],且细粒(如 SP)磁性矿物在还原成岩过程中优先被溶解^[42],从而导致 *SIRM* 值明显升高而 χ 变化不明显或者降低,类似现象在邻区的南黄海也有报道^[43]。显然,*SIRM* 在此更能真实反映钻孔中载磁组分含量。

2.3 磁性矿物粒径

磁性矿物的粒径可通过磁畴状态进行划分,从细到粗依次为 SP-SD-PSD-MD(多畴),也可通过不同磁学参数的比值进行比较和估算。磁滞参数:饱和剩余磁化强度(M_{rs})与饱和磁化强度(M_s)之比和 H_{cr} 与 H_c 。

之比,即 M_{rs}/M_s 和 H_{cr}/H_c 构成的 Day 氏图^[44-46]可以用来确定亚铁磁性矿物的磁畴状态。然而,对自然样品进行投点时,其往往位于 PSD 区域。这就存在多种可能性:样品本身系 PSD 颗粒;也可以是 SP 或者 SD 与 MD 颗粒混合的结果。为了解决这一问题,一般将 Day 图和 FORC 图结合起来使用,原因在于不同磁畴状态的磁性颗粒在 FORC 图上会呈现相应的特征^[47]。

DH03 孔砂质沉积物磁滞参数的比值在 Day 图上的分布较为分散,除大部分位于 PSD 区域,另有一定数量的样品接近 MD 区域,且磁性矿物的粒径和相应沉积物的岩性并不存在很好的对应关系(图 6)。这与以往对东海外陆架表层沉积物的研究结果^[22]十分相似,说明该区沉积物中所含磁性矿物的粒径不论是在空间上还是在时间上的变化都比较剧烈。同时,代表性样品的 FORC 图则更加清晰地显示出 SP-SD-MD 多元磁畴状态的混合(图 6b)以及较单一的 MD 等信号(图 6c)。此外,参数 $SIRM/\chi$ 也可用于指示样品中磁性组分的粒径^[36],DH03 孔 $SIRM/\chi$ (图 4)的变化与 B_c 和 B_{cr} (图 4)具有很好的协同性,其高值同样指示了 SD 颗粒的存在。

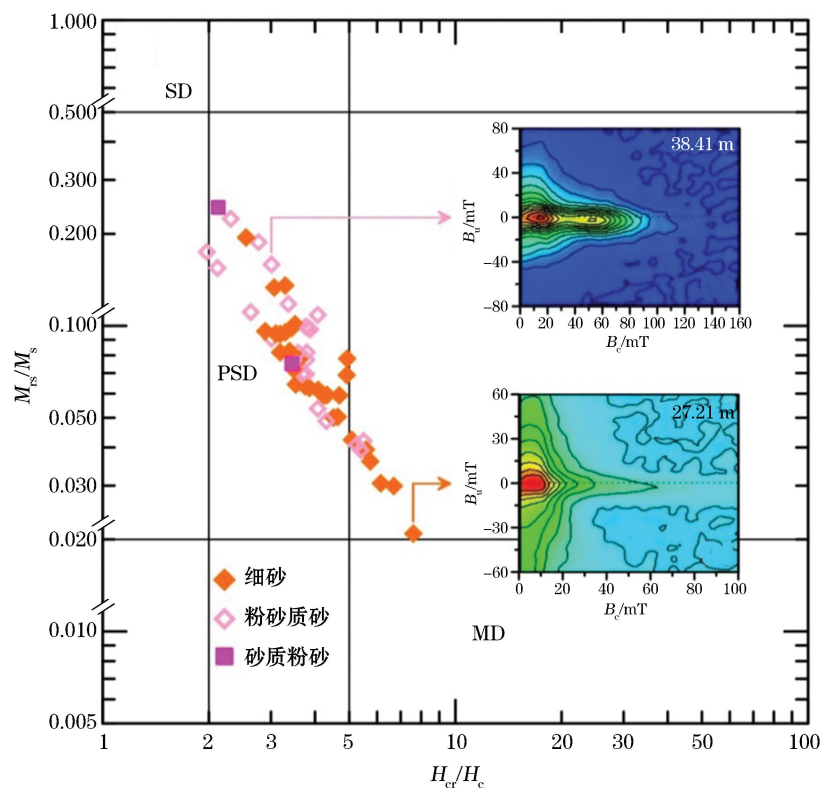


图 6 DH03 孔样品磁滞参数比值的 Day 氏投影^[45-46]和典型样品的一阶反转曲线(FORC)

Fig.6 Day-plot^[45-46] of samples from the core DH03 and the FORC diagrams for representative samples

2.4 岩石磁学意义

有效识别沉积物中磁性矿物及其性质是合理解译磁性地层并得到准确年代框架的前提,同时也是进行古环境学研究的基础^[48]。由于陆架区的沉积环境复杂,导致其沉积物中磁性矿物的组成和来源复杂,这将对古地磁和环境磁学研究产生深刻影响。例如,渤海和南黄海长岩芯开展古地磁学研究过程中,发现部分以粗粒磁性矿物为主要载磁组分的层位,其特征剩磁明显受到后期地磁场的改造,发生重磁化现象^[48-49];陆架沉积物中比较常见的自生铁硫化物(主要是胶黄铁矿),可在上覆沉积层厚度达到 3~30 m 后形成^[42],严重滞后于相应沉积层发生的时间;当胶黄铁矿和大颗粒的磁铁矿共存时,由于磁相互作用,也可发生自反转现

象^[48]。显然,只有对陆架沉积物中的磁性矿物进行系统深入的研究,有效把握磁性矿物的性质,才能建立合理可信的磁性地层年代框架。

除了传统的磁极性地层年代学方法外,相对古地磁场强度(RPI)变化曲线也常常被用来建立海洋沉积序列的年龄框架,特别是对于底界年龄未达到布容-松山极性转换(B/M; 约 0.78 Ma)的岩芯^[41,50],该方法的作用显得更加突出。然而,并非所有岩芯都可应用该方法,需要满足一定的前提条件,即“磁性均一性”标准:磁性矿物以磁铁矿为主,粒径变化为准单畴(1~15 μm),含量变化不超过 10 倍^[51]。因此,沉积物岩芯在开展地磁场相对古强度研究前,必须进行详细的岩石磁学研究,以此来判断 RPI 方法的适用性并对其准确性进行检验。

从 DH03 孔厚层砂质沉积的岩石磁学结果来看,其磁性矿物不论是在种类还是性质上都具有一定的复杂性:既存在大量磁铁矿,又含有极少量的赤铁矿,且部分层位的原生铁氧化物受到一定程度的后期成岩改造而形成少量的次生铁硫化物,如胶黄铁矿,这与该区全新世以来较高的有机碳供给和快速的沉积物堆积密切相关;磁性矿物的粒径分布非常分散,涵盖各种磁畴状态,且与相应沉积物的岩性不存在明显的对应关系(图 6)。这为后续的磁性地层学研究奠定了基础。显然,上述磁性矿物的特征表明不论是传统的磁极性地层还是地磁场相对古强度方法在研究区的应用可能都具有一定的困难和挑战性。

此外,厚层砂质沉积中磁性矿物对于认识研究区的沉积环境、物质来源以及水动力过程也具有很好的指示作用。Liu 等^[27]根据东海外陆架表层细粒沉积物中磁性矿物浓度的变化趋势,推断老黄河和长江物质是其主要来源;此外,与本文研究结果相似,表层沉积物中磁性矿物的粒径变化也很分散,与岩性对应性较差。这表明东海外陆架沉积物中的磁性矿不论是在横向(空间)上还是在纵向(时间)上都具有一定的复杂性。同时,本研究所揭示的磁性矿物的性质相对于表层沉积物^[27]以及内陆架^[19-20]和南黄海^[23-26]等邻近地区更为复杂。这可能与潮流沙脊区物质来源的多元化和沉积环境的多变性的直接相关。另外,磁性矿物粒径的分布特征还可能暗示了与沙脊区频繁受到大潮和强风浪等影响有关;部分层位次生铁硫化物的存在则指示了陆源有机碳和沉积速率的快速增加^[13]。总之,东海外陆架厚层砂质沉积物中的磁性矿物具有重要的古环境意义,值得作进一步研究。

3 结 语

通过对东海外陆架 DH03 孔岩芯上部 48.2 m 砂质沉积物岩石磁学的研究,结合岩芯沉积学特征,获得如下认识:砂质沉积物中磁性矿物以陆源碎屑磁铁矿为主,另含极少量的赤铁矿;部分层位原生铁氧化物发生了一定程度的成岩改造,形成了一定量的自生胶黄铁矿;磁性矿物的粒径分布非常分散,从单畴到多畴,或为多种磁畴状态的混合,或以某一磁畴为主,且与岩性无明显相关性。初步推断上述磁性矿物及其性质的复杂性不仅与物源有关,也指示了后期水动力对砂质沉积物的强烈改造。总之,该研究不仅有效填补了该区钻孔沉积物岩石磁学研究的空白,为下一步古地磁和环境磁学等相关研究奠定了基础,同时也将促进对东海外陆架潮流沙脊沉积的全面理解。

参考文献(References):

- [1] MCMILLAN A A. Onshore Quaternary geological surveys in the 21st century: a perspective from the British Geological Survey[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2002, 21(8-9): 889-899.
- [2] QIN Y S, ZHAO Y Y, CHEN L R, et al. *Geology of the east China Sea*[M]. Beijing: China Science Press, 1987: 1-290. 秦蕴珊, 赵一阳, 陈丽蓉, 等. 东海地质[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 1-290.
- [3] LIU Z X, YIN P, BERNE S, et al. The Quaternary transgression and regression of the East China Sea[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(Suppl.1): 74-79. 刘振夏, 印萍, BERNE S, 等. 第四纪东海的海进层序和海退层序[J]. 科学通报, 2001, 46(增刊 1): 74-79.
- [4] CHEN Z Y, STANLEY D J. Quaternary subsidence and river channel migration in the Yangtze delta plain, eastern China[J]. *Journal of*

- Coastal Research, 1995, 11(3): 927-945.
- [5] WANG Z B, YANG S Y, ZHANG Z X, et al. A review of the late Quaternary sedimentological studies on the outer shelf of the East China Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2012, 32(3): 1-10. 王中波, 杨守业, 张志珣, 等. 东海外陆架晚第四纪若干沉积学问题的研究现状与展望[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2012, 32(3): 1-10.
- [6] XUN J, SHI X F, LIU S F, et al. High-resolution sedimentary record of the East Asian Monsoon during Late Holocene: evidence from the inner shelf mud area of East China Sea[J]. Advances in Marine Science, 2018, 36(2): 216-228. 徐军, 石学法, 刘升发, 等. 晚全新世东亚季风高分辨率沉积记录: 来自东海外陆架泥质区的证据[J]. 海洋科学进展, 2018, 36(2): 216-228.
- [7] LIU Z X, XIA D X, WANG K Y. Tidal depositional systems and patterns of China's continental shelf[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1998, 29(2): 142-147. 刘振夏, 夏东兴, 王揆洋. 中国陆架潮流沉积体系和模式[J]. 海洋与湖沼, 1998, 29(2): 142-147.
- [8] YANG C S, SUN J S. Tidal sand ridges on the East China Sea shelf[C]//DE BOER P L, VAN GELDER A, NIO S D. Tide-influenced Sedimentary Environments and Facies, Sedimentology and Petroleum Geology. Netherland: D. Reidel, 1988: 23-28.
- [9] SAITO Y, KATAYAMA H, IKEHARA K, et al. Transgressive and highstand systems tracts and post-glacial transgression, the East China Sea[J]. Sedimentary Geology, 1998, 122(1): 217-232.
- [10] LIU Z X, BERNE S, SAITO Y, et al. Quaternary seismic stratigraphy and paleoenvironments on the continental shelf of the East China Sea[J]. Journal of Asian Earth Science, 2000, 18(4): 441-452.
- [11] BERNE S, VAGNER P, GUICHARD F, et al. Pleistocene forced regressions and tidal sand ridges in the East China Sea[J]. Marine Geology, 2002, 188(3-4): 293-315.
- [12] YIN P. Geomorphology and internal structure of postglacial tidal sand ridges on the East China Sea shelf[J]. Advances in Marine Science, 2003, 21(2): 181-187. 印萍. 东海陆架冰后期潮流沙脊地貌与内部结构特征[J]. 海洋科学进展, 2003, 21(2): 181-187.
- [13] LIU Z X, XIA D X. Tidal sands in the China seas[M]. Beijing: China Ocean Press, 2004: 106-222. 刘振夏, 夏东兴. 中国近海潮流沉积沙体[M]. 北京: 海洋出版社, 2004: 106-222.
- [14] LIU Z X, YU H, XIONG Y Q, et al. A comparative study on tidal sand ridges in the East China Sea and Celtic Sea[J]. Advances in Marine Science, 2005, 23(1): 35-42. 刘振夏, 余华, 熊应乾, 等. 东海和凯尔特海潮流沙脊的对比研究[J]. 海洋科学进展, 2005, 23(1): 35-42.
- [15] WU Z Y, JIN X L, LI J B, et al. The linear sand ridge groups on the outer continental shelf of East China Sea[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(1): 93-103. 吴自银, 金翔龙, 李家彪, 等. 东海外陆架线状沙脊群[J]. 科学通报, 2006, 51(1): 93-103.
- [16] DU W B, YE Y C, ZHUANG Z Y. Sedimentary environment analysis of ancient sand ridges from Zk23 Hole in the East China Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2007, 27(2): 11-16. 杜文博, 叶银灿, 庄振业. 东海 Zk23 孔的古沙脊沉积环境[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2007, 27(2): 11-16.
- [17] LI G X, LI P, LIU Y, et al. Sedimentary system response to the global sea level change in the East China Seas since the last glacial maximum[J]. Earth-Science Reviews, 2014(139): 390-405.
- [18] WANG Z B, YANG S Y, WANG Q, et al. Late Quaternary stratigraphic evolution on the outer shelf of the East China Sea[J]. Continental Shelf Research, 2014(90): 5-16.
- [19] ZHENG Y, KISSEL C, ZHENG H B, et al. Sedimentation on the inner shelf of the East China Sea: magnetic properties, diagenesis and paleoclimate implications[J]. Marine Geology, 2010, 268(1-4): 34-42.
- [20] ZHENG Y, ZHENG H B, KISSEL C, et al. Sedimentation rate control on diagenesis, East China Sea sediments[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2011, 187(3-4): 301-309.
- [21] GE S L, SHI X F, WU Y H, et al. The rock magnetic behavior of gravity core CSH1 from the northern Okinawa Trough and the effect of early diagenesis[J]. Haiyang Xuebao, 2005, 27(7): 56-64. 葛淑兰, 石学法, 吴永华, 等. 冲绳海槽北部 CSH1 孔岩石磁学特征及其早期成岩作用的影响[J]. 海洋学报, 2005, 27(7): 56-64.
- [22] LIU J, ZHU R X, LI T G, et al. Sediment-magnetic signature of the mid-Holocene paleoenvironmental change in the central Okinawa Trough[J]. Marine Geology, 2007, 239(1-2): 19-31.
- [23] LIU J, LI S Q, WANG S J, et al. A rock-magnetic study of the last deglacial to Holocene sedimentary sequence in the YSDP105 core on the northeast shelf of the South Yellow Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1997, 17(4): 13-24. 刘健, 李绍全, 王圣洁, 等. 南黄海东北部陆架 YSDP105 孔冰消期以来沉积层序的磁学特征研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1997, 17(4): 13-24.
- [24] LIU J, ZHU R X, ROBERTS A P, et al. High-resolution analysis of early diagenetic effects on magnetic minerals in post-middle-Holocene continental shelf sediments from the Korea Strait[J]. Journal of Geophysical Research, 2004, 109(B3): B03103.
- [25] LIU J, ZHU R X, LI S Q, et al. Magnetic mineral diagenesis in the post-glacial muddy sediments from the southeastern South Yellow Sea: response to marine environmental changes[J]. Science in China: Series D Earth Sciences, 2005, 48(1): 134-144.
- [26] LIU J, QIN H F, KONG X H, et al. Comparative researches on the magnetic properties of muddy sediments from the Yellow Sea and

- East China Sea shelves and the Korea Strait[J]. *Quaternary Sciences*, 2007, 27(6): 1031-1039. 刘健, 秦华峰, 孔祥淮, 等. 黄东海陆架及朝鲜海峡泥质沉积物的磁学特征比较研究[J]. *第四纪研究*, 2007, 27(6): 1031-1039.
- [27] LIU J, ZHU R X, LI G X. Rock magnetic properties of the fine-grained sediment on the outer shelf of the East China Sea: implication for provenance[J]. *Marine Geology*, 2003, 193(3-4): 195-206.
- [28] LIU X Q. On the relict sediments on the Chinese continental shelf[M]//XU D Y, LIU X Q, ZHANG X H, et al. *Geology of China offshore*. Beijing: China Geology Press, 1997: 123-130. 刘锡清. 关于中国近海陆架的残留沉积问题[M]//许东禹, 刘锡清, 张训华, 等. *中国近海地质*. 北京: 地质出版社, 1997: 123-130.
- [29] YANG C S. Active, moribund and buried tidal sand ridges in the East China Sea and the southern Yellow Sea[J]. *Marine Geology*, 1989, 88(1-2): 97-116.
- [30] HE Q X, et al. *Marine Sedimentary Geology of China*[M]. Beijing: China Ocean Press, 2006: 356-358. 何起祥, 等. *中国海洋沉积地质学*[M]. 北京: 海洋出版社, 2006: 356-358.
- [31] HARRISON R J, FEINBERG J M. FORC_{in}el: an improved algorithm for calculating first-order reversal curve distributions using locally weighted regression smoothing[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2008, 9(5): Q05016.
- [32] BLOEMENDAHL J, KING J W, HALL F R, et al. Rock magnetism of late neogene and pleistocene deep-sea sediments: relationship to sediment source, diagenetic processes, and sediment lithology[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97(B4): 4361-4375.
- [33] LOWRIE W. Identification of ferromagnetic minerals in a rock by coercivity and unblocking temperature properties[J]. *Geophysical Research Letters*, 1990, 17(2): 159-162.
- [34] DUNLOP D J, ÖZDEMİR Ö. *Rock Magnetism: fundamentals and frontiers*[M]. New York: Cambridge University Press, 1997: 1-573.
- [35] ROBERTS A P, CHANG L, ROWAN C J, et al. Magnetic properties of sedimentary greigite (Fe₃S₄): an update[J]. *Reviews of Geophysics*, 2011, 49(1): RG1002, DOI: 10.1029/2010RG000336.
- [36] LIU Q S, ROBERTS A P, LARRASOAA J C, et al. Environmental magnetism: Principles and applications[J]. *Reviews of Geophysics*, 2012, 50(4): RG4002.
- [37] VERWEY E J W. Electronic conduction of magnetite (Fe₃O₄) and its transition point at low-temperature[J]. *Nature*, 1939, 144(3642): 327-328.
- [38] MORIN F J. Magnetic susceptibility of a Fe₂O₃ and a Fe₂O₃ with added titanium[J]. *Physical Reviews*, 1950, 78(6): 819.
- [39] ROCHETTE P, FILLISON P G, DEKKERS M J. Interpretation of low-temperature data: part 4 the low-temperature magnetic transition of monoclinic pyrrhotite[J]. *The IRM Quarterly*, 2011, 21(1): 1-11.
- [40] HEIDER F, ZITELBERGER A, FABIAN K. Magnetic susceptibility and remanence coercive force in grown magnetite crystals from 0.1 mm~6 mm[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1996, 93(3-4): 239-256.
- [41] YAMAZAKI T, IOKA N, EGUCHI N. Relative paleointensity of the geomagnetic field during the Brunhes[J]. *Earth and Planetary Letters*, 1995, 136(3): 525-540.
- [42] LIU J, ZHU R X, ROBERTS A P, et al. High-resolution analysis of early diagenetic effects on magnetic minerals in post-middle-Holocene continental shelf sediments from the Korea Strait[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109(3): B03103.
- [43] LIU J X, MEI X, SHI X F, et al. Formation and preservation of greigite (Fe₃S₄) in a thick sediment layer from the central South Yellow Sea[J]. *Geophysical Journal International*, 2018, 213(1): 135-146.
- [44] DAY R, FULLER M, SCHMIDT V A. Hysteresis properties of titanomagnetite: grain-size and compositional dependence[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1977, 13(4): 260-267.
- [45] DUNLOP D J. Theory and application of the Day plot (M_{rs}/M_s versus H_{cr}/H_c): 1. Theoretical curves and tests using titanomagnetite data[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(B3): 2056.
- [46] DUNLOP D J. Theory and application of the Day plot (M_{rs}/M_s versus H_{cr}/H_c): 2. Application to data for rocks, sediments, and soils [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(B3): 2057.
- [47] QIN H F, LIU Q S, PAN Y X. The first-order reversal curve (FORC) diagram: theory and case study[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2008, 51(3): 743-751. 秦华峰, 刘青松, 潘永信. 一阶反转曲线(FORC)图的原理及应用实例[J]. *地球物理学报*, 2008, 51(3): 743-751.
- [48] LIU J X, SHI X F, LIU Q S, et al. Magnetostratigraphy of a greigite-bearing core from the South Yellow Sea: implications for remagnetization and sedimentation[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2014, 119(10): 7425-7441.
- [49] YAO Z Q, SHI X F, LIU Q S, et al. Paleomagnetic and astronomical dating of sediment core BH08 from the Bohai Sea, China: implications for glacial-interglacial sedimentation[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2014, 393(1): 90-101.
- [50] YAMAZAKI T. Relative paleointensity of the geomagnetic field during Brunhes Chron recorded in North Pacific deep-sea sediment cores: orbital influence?[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1999, 169(1): 23-35.

- [51] TAUXE L. Sedimentary records of relative paleointensity of the geomagnetic field: theory and practice[J]. *Reviews of Geophysics*, 1993, 31(3): 319-354.

Rock-magnetic Properties of Thick Sandy Sediments on the Outer Continental Shelf of East China Sea

LIU Jian-xing^{1,2,3}, SHI Xue-fa^{1,2,3}, WU Yong-hua^{1,2,3}, YU Xiao-xiao^{4,5},
SHAN Xin^{1,2,3}, XU Tao-yu^{1,2,3}

(1. *First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China*

2. *Key Laboratory of Marine Geology and Metallogeny, MNR, Qingdao 266061, China*

3. *Laboratory for Marine Geology, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China*

4. *Institute of Oceanography, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China*

5. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: Systematically rock magnetic analyses have been conducted on the sandy sediments from the upper 0~48 m section of core DH03 that was recovered from the tidal sand-ridge on the outer shelf of the East China Sea. The studied core has a whole drilling length and water depth of 101.6 m and 96 m, respectively. Our data indicate that the major magnetic component in the studied sediments is terrigenous detrital magnetite (Fe_3O_4) with trace of hematite (Fe_2O_3). The grain sizes of magnetic minerals differ remarkably and almost contain all magnetic domains including the single domain (SD), pseudo-single domain (PSD), and multiple domain (MD), which impedes the application of relative paleointensity (RPI) and implies the complexities of provenances and hydrodynamic processes. Meanwhile, the primary iron oxides, especially magnetite in some layers have been altered by diagenesis, resulting in formation of a little of authigenic greigite (Fe_3S_4), which indicates high organic carbon as well as sedimentation rates. In addition, the variations of magnetic mineral content along depths are also relatively evident. In brief, this study reveals the rock magnetic complexity of the sandy sediments on the outer shelf of the East China Sea.

Key words: the East China Sea; outer continental shelf; tidal sand-ridge; rock-magnetism; magnetite; greigite

Received: February 14, 2019