

吴翼, 付淑清, 夏真. 伶仃洋钻孔岩芯的磁学记录及其对海水进退的响应[J]. 海洋学报, 2021, 43(5): 88–99, doi:10.12284/hyxb2021059
Wu Yi, Fu Shuqing, Xia Zhen. Magnetic variations of sediments from a drilling core in the Lingdingyang Bay, Zhujiang River Estuary, and their responses to marine transgression and regression[J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(5): 88–99, doi:10.12284/hyxb2021059

伶仃洋钻孔岩芯的磁学记录及其对海水进退的响应

吴翼^{1,2,3}, 付淑清^{2,3*}, 夏真⁴

(1. 中国科学院南海海洋研究所 中国科学院边缘海与大洋地质重点实验室, 广东 广州 510301; 2. 广东省科学院广州地理研究所 广东省遥感与地理信息系统应用实验室/广东省地理空间信息技术与应用公共实验室, 广东 广州 510070; 3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广东 广州 511458; 4. 广州海洋地质调查局, 广东 广州 510075)

摘要: 华南珠江三角洲河口地区受到珠江流域和近海海洋环境的共同影响, 其沉积体系中承载的古地质记录对于揭示海陆交互作用下的地质地貌过程演化具有独特意义。本研究对珠江伶仃洋湾口的一条钻孔岩芯进行了环境磁学研究。研究发现, 在晚更新世以来海水入侵的相对高海平面时期, 岩芯沉积物中磁性矿物的组成或高矫顽力组分的来源更稳定, 反映了沉积区环境的稳定性或沉积物源区的相对固定; 在海水退出的风化剥蚀期, 沉积序列中磁性矿物组合出现大幅度旋回变化, 这表明同时期碎屑物质源区可能经历了显著的环境更替。多重磁学参数包括低频磁化率、非磁滞剩磁、饱和等温剩磁以及 HIRM 参数, 在全岩芯中指示了比较一致的磁性变化特征; 相较之下, S-ratio 参数的变化更灵敏地响应了伶仃洋湾口地区海水入侵和退出背景下的沉积演化历史。

关键词: 珠江河口; 沉积物; 磁性变化

中图分类号: P736.2

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2021)05-0088-12

1 引言

江河入海的河口地区位于陆地和海洋两个巨型系统的交汇界面, 区域内河流迅速向海展宽, 而其近海地带频繁受到潮汐的顶托。在此背景下, 河流流速快速衰减, 因而区域内通常会沉降厚层的流水搬运物质。这种特殊地质条件下的水下沉积序列是恢复过去海平面变化和三角洲地质地貌耦合演化历史的良好载体。气候变化是全球范围内备受关注的核心问题, 对于沿海地区, 海平面加速上升预期带来的生态和人文威胁形势十分严峻^[1-2]。因而研究沿海地区海平面升降和环境变化的演化历史, 具有十分重要的现实意义。

铁元素是地壳中丰度最高的氧化还原敏感性金

属元素, 其氧化还原循环是沉积物在埋藏环境下关键的地球化学反应之一。铁的物理、化学状态的改变与沉积物的磁学性质紧密相关。借助岩石磁学的系统方法, 近年发展起来的环境磁学可以有效地研究包括三角洲沉积体系在内的一系列环境过程中含铁的磁性矿物的形成、运移、沉积以及沉积后复杂的改造过程^[3-5]。受成岩作用影响, 沉积序列中含铁化合物的含量和活性等亦可能随深度发生明显变化^[6-7]。借助有效的定性定量指标揭示不同成岩过程和沉积环境下样品的磁性变化, 将有助于进一步认识沉积物所蕴藏的地质历史演化过程。

基于华南珠江三角洲过去的大量钻孔资料, 已有研究发现珠江河口沉积地层中蕴含了海水入侵和陆地风化侵蚀记录的往复更替^[8-18]。本研究聚焦于珠江

收稿日期: 2020-02-26; 修订日期: 2020-08-06。

基金项目: 广东省自然科学基金(2016A0303160, 2017A030311020, 2019A1515011488); 广东省科学院项目(2020GDASYL-20200401001); 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项(GML2019ZD0204, GML2019ZD0301)。

作者简介: 吴翼(1981—), 男, 湖北省石首市人, 博士, 主要从事沉积古气候、磁性地层学和环境磁学方面研究。E-mail: wuy@scsio.ac.cn

* 通信作者: 付淑清(1977—), 女, 副研究员, 主要从事第四纪环境研究。E-mail: fsq519@163.com

下游河口地区的水下沉积序列,结合在伶仃洋湾口所获得的钻孔岩芯全剖面的磁性变化结果,对比沉积物岩性组合和现有的微体古生物证据,尝试从环境磁学角度对钻孔岩芯的沉积序列所反映的地质变化历史做出进一步的探讨。

2 研究区域背景

珠江年径流量是仅次于长江的中国第二大河流,其由东江、北江和西江等多条河流汇聚而成,经由广东境内的八大口门进入南海;由于东江、北江和西江从不同方向汇入河流湾口地区,形成了各自的三角洲,珠江三角洲的几何形态因此与众不同^[8-10,19]。珠江流域面积超过 $45\times 10^4\text{ km}^2$,属于亚热带气候区,多年平均年降水约为 $1\ 600\sim 2\ 200\text{ mm}$,多年均温在 $14\sim 22\text{ }^\circ\text{C}$,雨热同期,是东亚季风气候敏感区。流域内地势整体自西北向东南倾斜。珠江流域受季节性影响显著,径

流年内分布不均,约80%的年径流量和95%的悬移质在汛期4-9月汇入珠江^[20]。珠江三角洲位于珠江流域下游,面积约为 $10\times 10^4\text{ km}^2$,更靠近南亚热带气候区。珠江三角洲沉积发育始于晚更新世^[8-14],相对于长江和黄河三角洲而言明显要年轻。珠江河口地区沉积作用主要由河口动力、泥沙输运所控制,进入河口区的流域来砂颗粒相对较细^[21]。根据河口沉积动力特征,汇入珠江河口及近岸海区的表层沉积物可以划分为砂质、泥质和混合沉积3个典型粒组^[22]。

3 材料和方法

3.1 岩芯概况

本研究选择华南珠江最大的河口湾伶仃洋的一条钻孔岩芯作为研究对象。钻孔编号为NZ2,位于内伶仃岛以北约2 km($22^\circ 26.2'\text{N}$, $113^\circ 48.2'\text{E}$,图1),取样点水深约为4.6 m。岩芯由广州海洋地质调查局于

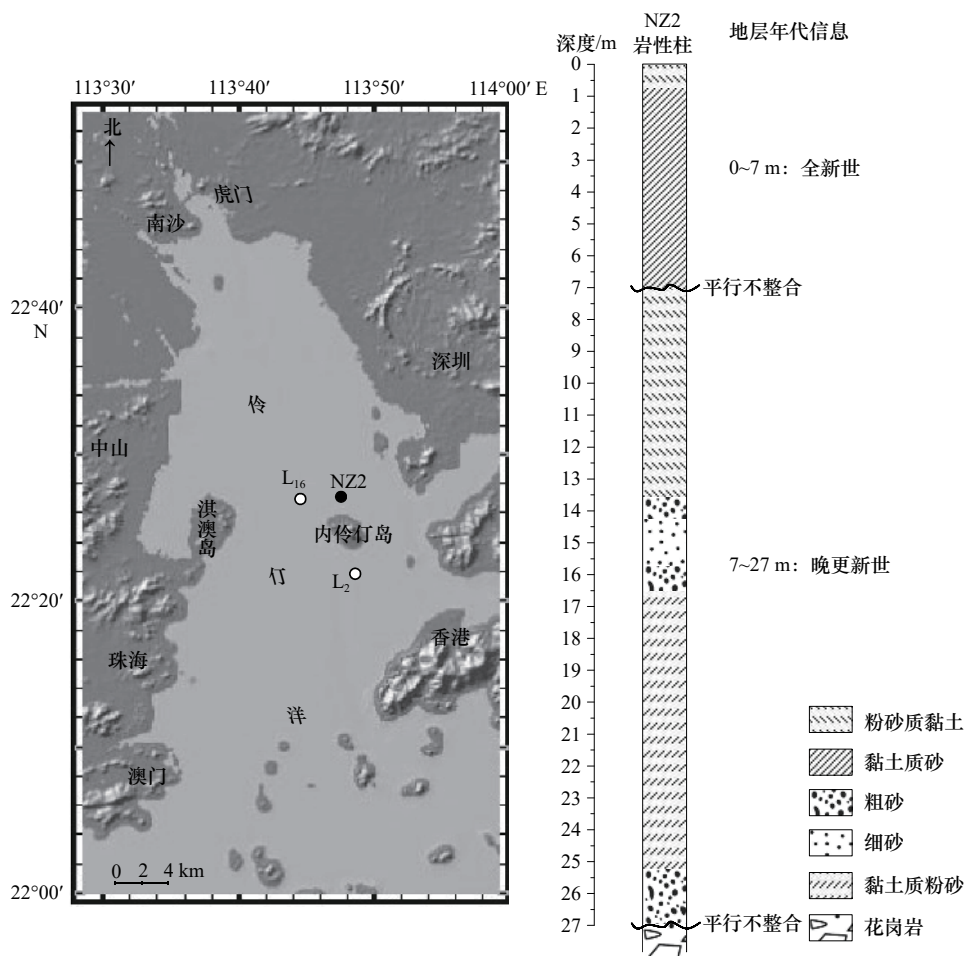


图1 NZ2 钻孔位置及地层信息

Fig. 1 Location of Core NZ2 and its stratigraphic information

背景底图由 GeoMapApp (3.6.6 版) 提供, NZ2 站位和地层信息等根据文献 [23] 改绘, 邻近站位 L_2 和 L_{16} 位置信息来自文献 [24]

Base-map was downloaded from GeoMapApp (Version 3.6.6). Stratigraphic and chronological framework information of the study Core NZ2 were modified from reference [23], and location information of two additional cores L_2 and L_{16} from reference [24]

2003 年获得,使用国产 GY-100 型钻机钻取。岩芯总长度为 27.90 m,以颗粒较细的粉砂质黏土、黏土质粉砂和黏土质砂为主。岩芯中上部 7 m 深度附近可能记录了全新世底界,此界限上下两组沉积物组成明显不同,被认为是平行不整合接触关系^[23](图 1)。根据早期研究中的岩性描述,岩芯顶部至 8.30 m 可划分为 3 层,分别为灰黄色粉砂质黏土(0~0.75 m),灰色黏土质砂(0.75~7.05 m),以及青灰色-黄褐色斑状粉砂质黏土(7.05~8.30 m)^[23]。值得注意的是,这 3 层中都不同程度地出现各种生物遗存,其中,顶层 0.75 m 厚度内含有少量植物碎屑,而有孔虫化石仅在岩芯上部 8.30 m 中被发现^[23,25]。岩芯中部 13.60~16.50 m 记录了从粗砂、细砂至粗砂的 3 个分层。在 25.50 m 深度以下再次出现松散状粗砂层(含少量砾石),厚度约为 1.7 m,底部不整合接触于青灰色或灰色风化花岗岩基岩。

将岩芯经过纵向一分为二切割后,其中一半冷藏保存。在用于分析研究的另一半岩芯纵向切割面上,略微削整表面,将 2 cm 边长的立方体无磁塑料盒沿岩芯自顶至底依次扣入进行样品采集。共采集获得 1 034 个半定向(未标定方位角)样品。因为岩芯管中样品残留量的影响,以下 6 个区段未能采集样品,包括 3.20~3.75 m,4.40~4.80 m,5.45~6.70 m,15.70~16.40 m,22.40~22.80 m,25.20~26.40 m,相应信息在岩性柱图中已做标识。

夏真等^[23]首次报道了该岩芯的 5 个¹⁴C 年代结果,其中 3 处有具体年龄值,分别为:7.6~7.7 m,(16 700±800) a BP(BP 指以 1950 年为年龄起算点往更老推算);13.5~13.6 m,(25 050±1 000) a BP;22.4~22.5 m,(27 520±650) a BP。岩芯 NZ2 中可用于绝对测年的材料比较有限,欲构建精确年代框架仍然存在较大阻碍。

3.2 环境磁学实验

本研究利用捷克 AGICO 公司生产的 MFK1-FA 卡帕桥多频磁化率仪测量了全部 1 034 个半定向样品的室温低频体积磁化率(下文中称为低频磁化率),仪器工作频率为 $F_1=976$ Hz,磁场强度为 400 A/m。利用 2G 公司生产的 615 型非磁滞剩磁磁化仪(ARM Magnetizer)对全部样品磁化获得非磁滞剩磁(ARM),交流场峰值设定为 100 mT,直流场强度为 0.05 mT,剩磁测量在 2G 755 型超导磁力仪上完成。在完成非磁滞剩磁实验的样品中,以等间距挑选 1/4 数量(共计 259 个)的样品,继续利用 2G 交变退磁系统在 100 mT 峰值交变磁场中首先进行退磁清洗,然后在 ASC 脉

冲磁力仪(型号 IM-10-30)中获得等温剩磁(IRM),剩磁测量利用 AGICO 公司生产的旋转磁力仪(JR6)完成。共计 259 个样品分别在 1 000 mT,反向 100 mT 和 300 mT 磁场下获得了 IRM,此处分别记为 SIRM(饱和等温剩磁)、 $IRM_{100\text{ mT}}$ 和 $IRM_{300\text{ mT}}$ 。在沉积环境研究中,低频磁化率通常可用于反映沉积序列整体的铁磁性矿物含量变化情况,ARM 用于提取相对较细颗粒(主要是单畴和准单畴状态)的磁性矿物信息,SIRM 能够用于反映除顺磁性和抗磁性物质以外的磁性颗粒的贡献^[3-5,26]。

结合不同层位的岩性特征及其磁性特点,本研究采集了少量离散样品用于磁性矿物定性研究。这些样品经过自然晾干后,利用玛瑙研钵研磨至比较均匀的状态,即手触无明显颗粒感。粉末样品的磁化率-温度变化曲线在 MFK1-FA 卡帕桥的氩气环境下测量完成,仪器工作频率为 $F_1=976$ Hz,磁场强度为 400 A/m。代表性样品的等温剩磁获得曲线使用前文 IRM 实验相同仪器测量,施加的最高磁场强度达到 3 T。

4 结果与分析

4.1 磁性矿物组成

图 2 中展示的样品来自于岩芯 NZ2 的 3 个不同深度位置,它们的低频磁化率相差比较明显。在升温曲线上,最明显的特征是,这 3 个样品的磁化率在 580℃ 附近显著降低,指示了磁铁矿的存在;在继续升温至 700℃ 的过程中(见图 2 下部单独展示的升温曲线),3 条曲线中都能见到磁化率的进一步降低并趋于 0,表明赤铁矿也对磁化率产生了一定贡献。此外,在升温曲线室温至 280℃ 的区间,3 个样品的磁化率值变化不大,可以识别出缓慢的上升(图 2a)或下降(图 2b,图 2c)的变化趋势,可能受到细颗粒磁性矿物(例如,超顺磁颗粒)逐渐解阻的影响。3 条升温曲线在 400~500℃(图 2a)、280~320℃ 和 450~500℃(图 2b)、280~320℃(图 2c)都出现了磁化率的升高,可能与沉积物样品中含铁的黏土矿物、硅酸盐矿物等,在氩气条件下,受热转化成亚铁磁性磁铁矿有关^[27]。样品在加热前后室温条件下的磁化率值相差悬殊,表明加热过程中有大量新生成的高磁化率矿物,这可能进一步说明经由其他含铁物质受热转化产生了一定量的磁铁矿。

来自 7 个不同层位样品的等温剩磁获得曲线(图 3a)具有相似形态,在 300 mT 之后仍明显有继续上升的趋势,表明样品中低矫顽力和高矫顽力组分的并存。在 300 mT 磁场作用下,这些样品获得的等温

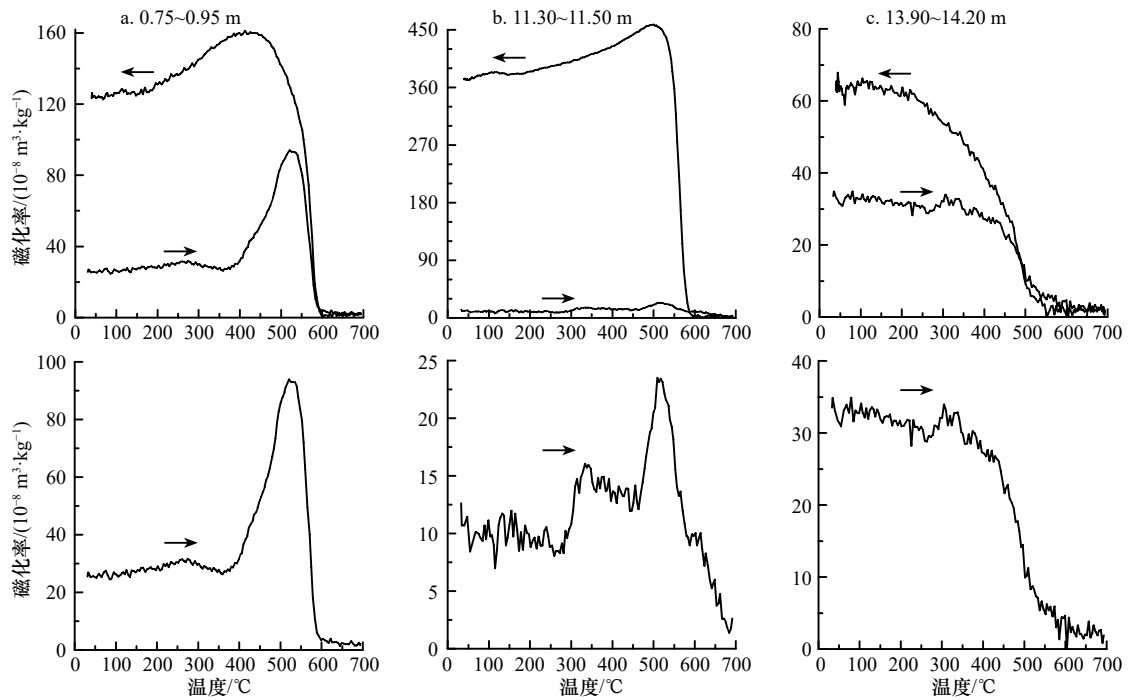


图2 代表样品的磁化率-温度变化曲线

Fig. 2 Temperature dependence of magnetic susceptibility curves from representative samples

箭头方向指示温度变化方向, 即加热或冷却曲线

Arrows indicate heating or cooling directions

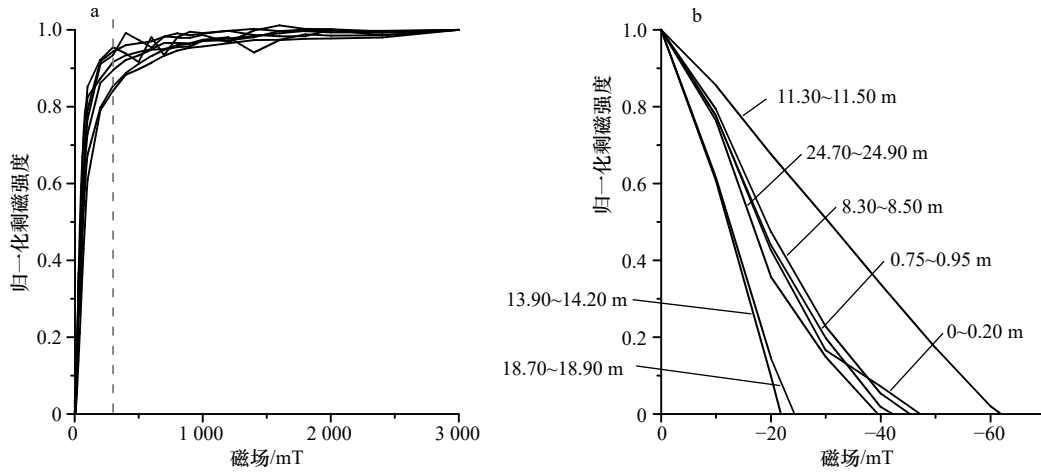


图3 归一化的等温剩磁获得曲线(a)与剩磁矫顽力曲线(b)

Fig. 3 Normalized results for saturation isothermal remanent magnetization acquisition (a) and back-field demagnetization (b) curves for representative samples

a 中虚线对应 300 mT 磁场时的等温剩磁获得情况(参见表 1)

The gray dash line in a indicates the magnetic field is 300 mT (see details in Table 1)

剩磁可以达到饱和等温剩磁(本研究以 3 T 磁场强度计算的)的 84%~96%(表 1)。7 个样品的剩磁矫顽力差别较大, 从大约 22 mT, 到大约 45 mT, 以及较高的大约 62 mT(图 3b, 表 1)。

4.2 沉积序列的磁性变化

如图 4 所示, 低频磁化率、ARM 和 SIRM, 这 3 个

磁学参数反映了沿全岩芯剖面自顶向下比较一致的变化特征。图 4 中, 若不考虑 10.3~11.5 m 区间的记录, 这 3 个参数大体指示了自顶至底“三阶式”的跳跃结构(参考图中的灰色水平分界线): 最高阶(顶部至 1.1 m), 中阶(1.1~7 m), 低阶(7~27 m 至基底)。10.3~11.5 m 层位突出的记录大致与中阶(1.1~7 m)

表 1 样品等温剩磁获得特征的信息

Table 1 Isothermal remanent magnetization acquisition data for representative samples

取样位置/m	300 mT时的IRM/SIRM	剩磁矫顽力/mT
0~0.20	94.34%	47.2
0.75~0.95	89.52%	42.2
8.30~8.50	85.34%	45.3
11.30~11.50	84.15%	61.9
13.90~14.20	91.61%	21.8
18.70~18.90	95.50%	24.3
24.70~24.90	93.41%	39.5

取值水平相近,但明显区别于低阶之中的其他层位。图 4 中同时绘制了每个参数对数坐标下的结果,对比之下并未观察到显著的次级变化特点。

利用 IRM 数据计算了 3 个评价参数,公式如下^[3-4,28]:

$$\text{HIRM} = 0.5 \times (\text{SIRM} + \text{IRM}_{300 \text{ mT}}),$$

$$S\text{-ratio} = -\text{IRM}_{300 \text{ mT}} / \text{SIRM},$$

$$L\text{-ratio} = \text{HIRM} / [0.5 \times (\text{SIRM} + \text{IRM}_{100 \text{ mT}})],$$

式中, HIRM 和 S-ratio 的组合通常用于评价赤铁矿等反铁磁性矿物在研究载体中的绝对和相对含量, S-ratio 取值越低指示反铁磁性矿物的相对含量越高。HIRM (图 5b) 与前述 3 个参数有近似的“三阶式”变化特征

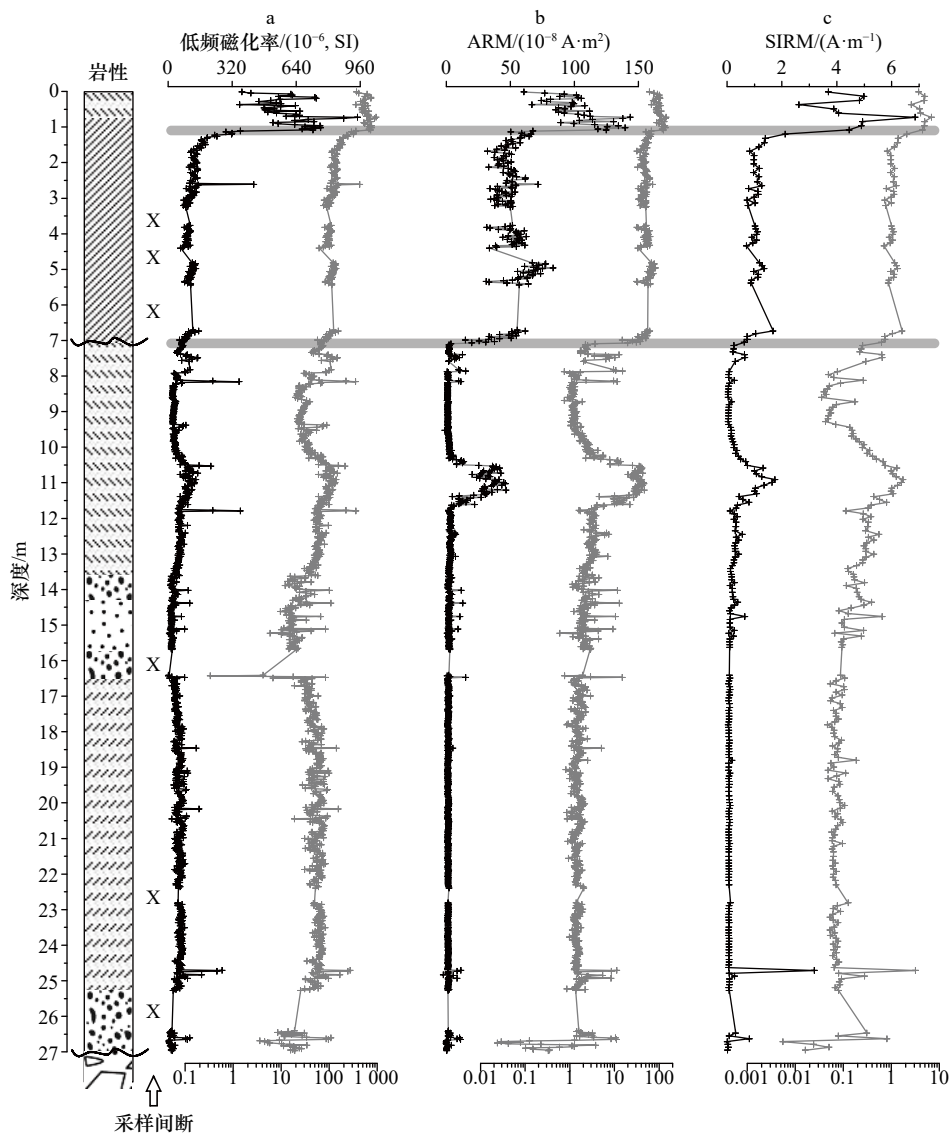


图 4 钻孔 NZ2 沉积序列的磁性变化特征

Fig. 4 Down-core magnetic variations for Core NZ2

灰色曲线展示了对数坐标下各参数的变化,用于与线性坐标下的结果进行对照。灰色水平线用于标记磁性变化剧烈的界限,

符号“X”标记了岩芯中的 6 处未采样的层位

Down-core variations for each parameter are also shown on a log scale for comparison with their counterpart curves on the linear scale. Gray horizontal lines mark the positions of dramatic shifts on the curves. The symbol "X" represents an interval with no samples collected for analysis

(对比图4), 但 HIRM 在约 9.5~14.5 m 的变化特征明显不同于前三者。S-ratio 在岩芯中部约 6.9~15.3 m 变化幅度较大, 在其他层段基本上维持在较稳定状态(取值多高于 80%, 图 5c)。由于矫顽力和磁性矿物含量等变量的共同影响, HIRM 和 S-ratio 这些量化指标会具有多解性, 此处引入另一个参数“L-ratio”, 用于评价和限定前面二者的指示意义。

图 6 显示, L-ratio 与 HIRM 有两种明显不同的对应关系: 其一, HIRM 在较低值范围内变化时, 与 L-ratio 呈较好的线性相关(图中虚线所示, 及图 6c 中拟合关系); 其二, HIRM 增大并在较大范围内变化

时, 与 L-ratio 无明显对应关系, 但 L-ratio 变幅较前一种情况明显偏小(图中灰色方形区域)。前一种对应关系表明 HIRM 的变化更大程度上体现了反铁磁性矿物矫顽力的变化趋势, 可能源于物源区的变化, 而后一种对应关系则表明 HIRM 反映了赤铁矿等高矫顽力磁性矿物的绝对含量变化^[28]。因此, 综合图 5 和图 6 判断, HIRM 和 S-ratio 二者在岩芯中上部, 从顶部至 7.9 m 以及 9.5~14.5 m 的变化(图 6b), 应受控于软磁与硬磁矿物含量的变化, 也就是适用于对这二者常规的解释模式。而岩芯中另外两部分, 包括 7.9~9.5 m 以及 14.5 m 往下至岩芯基底附近(图 6c), HIRM

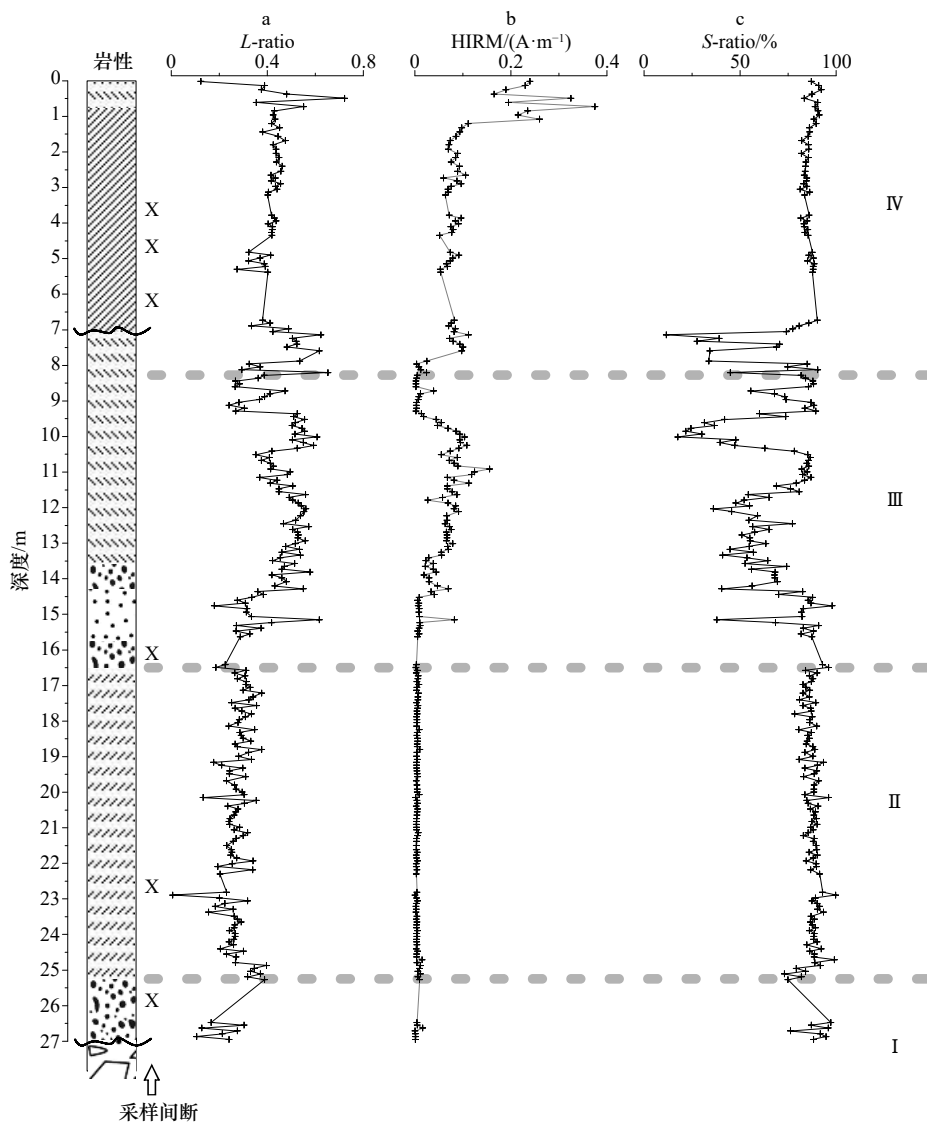


图 5 钻孔 NZ2 沉积序列的磁性矿物含量变化特征

Fig. 5 Down-core variations of magnetic mineral contents for Core NZ2

L-ratio 用于评价参数 HIRM 和 S-ratio 作为反铁磁性矿物含量指标的有效性, 根据文献^[28] 计算得到。灰色虚线将全岩芯记录分为 4 个区段, 符号“X”标记了岩芯中的 6 处未采样的层位

L-ratio, calculated according to reference^[28], is used to evaluate the validity of HIRM and S-ratio as content indices of antiferromagnetic minerals. Gray dashed lines divide the entire section into four phases. The symbol "X" represents an interval with no samples collected for analysis

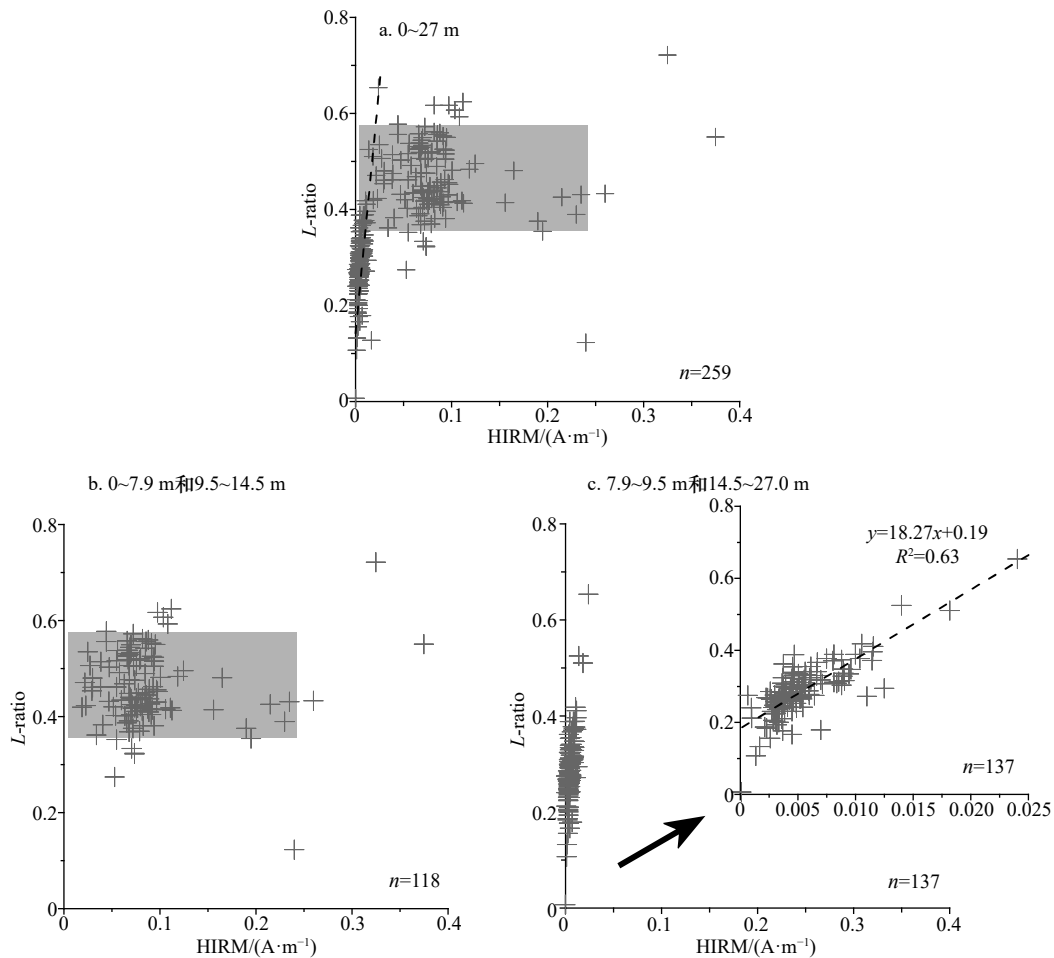


图 6 岩芯 NZ2 样品的 L -ratio 与 HIRM 相互关系模式

Fig. 6 Plots of L -ratio versus HIRM for samples from Core NZ2

和 S -ratio 的变化指示了沉积物中载磁矿物来源的变化信息。

5 讨论

5.1 埋藏环境对沉积物磁信号的影响

沉积物中赋存的磁性矿物因种类、粒径和含量等差异在埋藏环境中会有差异性表现。受还原成岩作用影响,随着深度增加,亚铁磁性矿物(例如磁铁矿)含量通常会表现出整体减少的趋势^[29]。粒径大小不同的磁铁矿颗粒在这一过程中发生改变的时间会有差别,粒径更细的颗粒会较早地被还原^[30-31]。相对而言,反铁磁性矿物(如赤铁矿、针铁矿)则较不易被还原溶解^[32-35]。如前所述,岩芯 NZ2 剖面的磁性变化,包括低频磁化率(图 4a)、ARM(图 4b)、SIRM(图 4c),以及硬磁矿物绝对含量参数 HIRM(图 5b),显示了沿岩芯向下近似阶段式的减小趋势,这一特征似乎与典型的早期成岩作用下沉积物磁性变化特点吻合。然而,观察整个钻孔岩芯的岩性变化特征,上述的一系

列磁性变化可能更大程度上受到物源或沉积环境变化的影响。虽然图 4 中 3 项参数仅仅在 10.3~11.5 m 这一较窄的跨度内显示出相对高值,但是 S -ratio 和 HIRM 在约 6.9~15.3 m 指示了同步的多期(至少 3 组)振荡旋回(图 5)。岩芯中下部 16.5~25.3 m 以及向下至钻孔基底,沉积物颗粒相对较粗(主要为粉砂,底部为花岗岩风化层),磁性矿物含量维持在相对较低水平。综合岩性变化和磁学参数曲线的特点来看,岩芯 NZ2 整体应并未受到明显的早期成岩作用带来的影响。

5.2 磁性变化对物源与沉积环境变化的揭示

当沉积物质组分具有多个来源时,磁学性质的差异性特征对物源区分有一定的指示作用^[3-5]。例如,利用磁学指标体系对南海的深海沉积物^[36]、江苏北部潮滩沉积^[37]、北方风成黄土^[38]、西北内陆干旱区沉积物^[39]等进行系统分析,发现指标的组合特征有助于区分物质的不同来源。基于环境磁学指标体系实施的研究近年已在珠江三角洲地区开展起来^[16, 40-42]。本研

究侧重于对比岩芯地层记录^[23, 25]以及周边站位的已有报道^[13, 15, 17-18, 24],将NZ2的沉积序列整体划分为I~IV 4套沉积层(图5,表2):(I)自基底往上,27.9~25.3 m,(II)25.3~16.5 m,(III)16.5~8.3 m,(IV)8.3 m至岩芯顶。根据全岩芯磁性变化的特点,本研究暂时无法就可能存在的次一级海平面波动进行探讨(例如,对比文献[16])。沉积层II和IV主要承载了两次海侵之后相对高海面条件下的沉积物堆积过程,对应海相或滨海相沉积序列,而I和III则对应受陆相风化和侵蚀背景下的沉积环境。受到测年数据的影响,本文未对岩芯中下部地层提供更详细的年代限制。岩芯NZ2和周边钻孔揭示的地层结构对比可见于表2。

NZ2底部沉积层I之中包含了从硬质基底花岗岩向上至粗砂层的过渡。这一套沉积层(I)在珠江三角洲地区分布普遍^[19]。尽管剩磁信息相对较弱,但非磁滞剩磁和饱和等温剩磁参数仍然显示出从基底面往上过渡时一个小的“跳跃式”变化(图4b,图4c),这可能与岩石风化产生新的细颗粒矿物(包含了磁性矿物)的富集有关,与海平面变化的影响无明显关系。内伶仃岛南侧的L₂孔中留存有类似的砂砾混合层,而更靠近深水槽的L₁₆孔中并没有发现同期的粗颗粒沉积层^[19],反映了这一河口地区水下地貌条件在这几个站位之间亦存在明显的差异。

对沉积层II的地质背景判断需要结合周边记录的结果。图4中3项参数的曲线在这一套沉积层中绝大部分(除底部25 m深度附近的薄层记录外)都表现为非常稳定而缺少变化的特征,表明这一套厚层黏土质粉砂层中磁性矿物整体偏少。图6调用L-ratio对HIRM评价的结果显示,HIRM在这一区间更大程

度上反映了磁性矿物矫顽力的变化特点。因此,HIRM和S-ratio(图5b,图5c)在这一套粉砂层中相对稳定的特征性记录,应受控于沉积物中硬磁性矿物的矫顽力变化^[28],这一物理属性被认为与载磁矿物的来源存在较密切的关联。在邻近的L₂和L₁₆站位中(图1),基底花岗岩及风化壳之上存留了一套灰黑色“淤泥质黏土”,这一层位与NZ2岩芯的沉积层II为同期沉积类型。已有研究在L₁₆对应层位发现了明确的有孔虫分布^[19],揭示其受到海侵影响。蕨类植物孢子出现于同期沉积中,可能指示了周缘陆相土壤的酸性环境,因此不利于沉积体系中钙质壳体的保存^[15]。Yim和Li^[43]在香港附近的钻孔研究发现,因海平面下降而暴露于地表环境的海相层,有可能受到酸性地下水的溶解作用影响,导致沉积物中部分物质溶解。这一类土壤条件很可能是NZ2以及L₂站位难以发现海相钙质有孔虫的重要原因。这种条件亦可能部分溶解铁氧化物,造成沉积物中磁性矿物的部分流失。就沉积层II而言,由于这一套物质的磁性变化稳定,溶解作用并未造成显著影响,至少不是控制这一套沉积层磁性矿物含量变化的主要因子。

NZ2中上部沉积层III累积厚度约8.2 m,介于上下两套海相沉积层之间。除去顶部(8.3~9.5 m)和底部(14.5~16.5 m),沉积层III大部分表现出软磁性和硬磁性矿物含量此消彼长的显著变化(图5b,图5c),这种振荡不是来自于海平面起伏的影响,而可能缘于珠江搬运的碎屑物质源区的同期环境波动。最显著的磁性增强过程发生在岩芯深度10.3~11.5 m(图4,图5b,图5c),表明同期陆地源区环境有利于土壤发育,形成大量的磁性矿物(包括硬磁和软磁矿物),这

表2 伶仃洋岩芯地层划分及与珠江三角洲晚第四纪地层划分方案对比

Table 2 Stratigraphy divisions on core sediments from Lingdingyang Bay and their comparison with the stratigraphy framework of the Zhujiang River Delta

伶仃洋NZ2孔 (本研究)		伶仃洋L ₂ 和L ₁₆ 孔 文献 ^[15]		珠江三角洲多钻孔资料* 文献 ^[17-18]		
地层单元(深度/m)	沉积相	沉积相	年代/ka BP	地层单元(编号)	沉积相	年代/ka BP
IV(0~8.3)	粉砂质黏土和黏土质砂,含贝壳、有孔虫化石及碎屑(海相层)	海相层(桂州海侵,或全新世海进沉积层)	约9.56~0	M1b	三角洲相(海相层)	8~0 (MIS 1)
III(8.3~16.5)	粉砂质黏土以及粗砂-细砂-粗砂分层(埋藏风化壳,陆相层)	陆相层(新会风化期,或风化与冲洪积层)	约20~9.56	M1a	河流-河口通道相	10.5~8 (MIS 1)
II(16.5~25.3)	黏土质粉砂(海相层)	海相层(礼乐海侵)	约36~20	T1	陆相层	120~10.5 (MIS 5a-d, 4-2)
I(25.3~27.9)	粗砂(风化层,陆相层)	陆相层(风化壳,或珠江冲积层)	超过40~36	M2	浅海相层	126~120 (MIS 5e)
基底	基岩	基岩	—	T2	陆相层	超过126 (MIS 6)
					基岩	—

注:*列MIS指根据氧同位素记录划分的气候阶段,奇数和偶数期分别对应间冰期和冰期气候阶段。—表示无数据。

一时期可能对应了一段持续的水热组合条件优越的气候适宜期^[44-45],或接近于间冰期的气候条件。是否对应了 MIS 3 暖期(参考表 2),还需要获得进一步的年代证据。沉积层Ⅲ的底部和顶部层位,各与海相层形成过渡关系。HIRM 和 *S*-ratio 在这两个过渡层位的变化亦反映了载磁矿物物源的变化信息(图 6c)。可见, HIRM 和 *S*-ratio 在沉积层Ⅲ的指示意义并不一致,但都与沉积物中磁性矿物的物源区信息密切相关。在沉积层Ⅲ的中部主要区间,磁性矿物的含量受到(或许是特定的)物源区的环境变化影响;而在Ⅲ的顶部和底部,对应地质时期分别发生了海侵和海退,在内伶仃河口区的沉积物质来源直接受到影响,因此河流搬运物中硬磁性矿物的来源变化上升为更重要的影响因子。在内伶仃岛南侧和深水槽钻取的两个站位岩芯中(图 1),也识别出一套被称为“埋藏风化壳”的花斑状亚黏土层^[15];来自南侧浅滩钻孔的这一层风化沉积物明显更厚,达到了约 5.5 m,另一孔中为 1.2 m。在其他一些钻孔中,此层厚度多在 3~6 m,最厚的达到 20 m,是介于两套海相层之间的“上部陆相层”^[13]。

有孔虫化石壳体大量出现于 NZ2 岩芯上部 0~8.3 m(沉积层Ⅳ),沉积物以黏土和黏土质砂为主构成,反映了一种相对稳定的沉积环境。在底部 8.3~7 m 这一薄层粉砂质黏土中,多个参数(图 4,图 5b,图 5c)均表现出沿剖面向上显著的磁性记录增强过程,表明了沉积物来源变化造成的影响,从前期的陆源主导型较快地转变为河流和海洋共同作用的情形。低频磁化率、ARM、SIRM(图 4)以及 HIRM(图 5b),在 8.3 m 以上指示了较一致的变化特征。相比之下,*S*-ratio 在 7 m 至顶部变化平稳(81%~92%),其在底部 8.3~7 m 的大幅振荡与其他 4 项参数的变化是一致的。这一多参数同步变化的特征很好地响应了同期的海侵过程。值得注意的是,*S*-ratio 在顶部 0.75 m 并未出现类似于其他 4 项参数显示的又一次“跳跃式”,指示软磁性矿物的相对含量变化并不显著;而从另一个角度来看,这可能正好说明 *S*-ratio 相较其他参数对海水进退过程的响应更敏感。沉积层Ⅳ对应于伶仃洋 L₂ 和 L₁₆ 两个站位上部的厚层“淤泥”,属于高海面环境下的沉积序列^[15]。在此背景下,河流搬运物中亚铁磁性磁铁矿和反铁磁性赤铁矿等物质的组成保持相对稳定,反映了整体流域的气候环境维持在比较平稳

的状态。进入间冰期后,海平面上升,对河口及三角洲的地貌类型转变会产生明显的影响^[46-47]。晚第四纪时期,特别是进入全新世后期,河流搬运物中包含更多具有复杂地表信息的陆源风化碎屑,人类的农业和工业生产活动对铁的物理循环过程造成的干扰^[5]可能逐渐加剧。NZ2 顶部 0.75 m 厚度内的黏土组分保存了全岩芯最高的磁性矿物含量(图 4,图 5b),可能对应了全新世后期区域内与人类活动影响关联的沉积变化响应。Zhong 等^[48]研究发现,在 NZ2 岩芯中(与本研究相同),以 0.75 m 深度为界,上部沉积物中铂族元素含量远高于下部,很可能反映了珠江三角洲地区人类活动的巨大影响。而由于台风对本地区的频繁影响,由此引起的再沉积作用也可能是其中铂族元素富集的潜在原因^[48]。其他研究报道在珠江河道和河口的浅表层沉积物中检测出了营养元素富集^[49]、陆源有机质显著增多^[50],从多重角度反映了流域内土地利用变化和人类活动加剧对河口区沉积记录的影响。

6 结论

本研究显示,珠江河口 NZ2 站位岩芯的磁性变化序列并未受到早期埋藏环境下明显的成岩作用改造。结合钻孔岩性特征和已报道的古生物研究结果,本研究发现, NZ2 岩芯沉积序列中的磁性变化特征较好地响应了珠江河口地区晚更新世以来经历的两次海侵事件。低频磁化率、ARM、SIRM 以及 HIRM 参数,指示了全岩芯比较一致的磁性变化特征;在钻孔顶层的淤泥质沉积物中保存了全岩芯中最高磁性矿物含量,可能反映了近期人类生产活动对珠江河物流运输物质组分的影响。在晚更新世以来先后两次海水侵入背景下, HIRM 和 *S*-ratio 的参数组合分别指示了磁性矿物的矫顽力或组分变化的信息,与磁性矿物的来源或其源区环境变化有重要联系。多重参数对比的结果显示, *S*-ratio 参数在本研究中更灵敏地响应了海水的侵入和退出的影响。

致谢: 钟立峰博士提供了部分用于热磁分析的样品,低频磁化率和离散样品的热磁分析测试在中国科学院广州地球化学研究所的环境磁学实验室完成,其他磁学实验在中国科学院南海海洋研究所古地磁实验室完成,评审专家提出了宝贵的意见和建议,谨致谢忱。

参考文献:

- [1] Nicholls R J, Cazenave A. Sea-level rise and its impact on coastal zones[J]. *Science*, 2010, 328(5985): 1517-1520.

- [2] Hauer M E, Fussell E, Mueller V, et al. Sea-level rise and human migration[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, 1(1): 28–39.
- [3] Thompson R, Oldfield F. *Environmental Magnetism*[M]. London: Springer, 1986.
- [4] Evans M E, Heller F. *Environmental Magnetism: Principles and Applications of Enviromagnetics*[M]. San Diego: Academic Press, 2003.
- [5] Liu Qingsong, Roberts A P, Larrasoana J C, et al. Environmental magnetism: principles and applications[J]. *Reviews of Geophysics*, 2012, 50(4): RG4002.
- [6] Berner R A. *Early Diagenesis: A Theoretical Approach*[M]. Princeton, N.J: Princeton University Press, 1980.
- [7] Roberts A P. Magnetic mineral diagenesis[J]. *Earth-Science Reviews*, 2015, 151: 1–47.
- [8] 赵焕庭. 珠江三角洲的形成和发展[J]. *海洋学报*, 1982, 4(5): 595–607.
Zhao Huanting. Formation and development of the Zhujiang Delta[J]. *Haiyang Xuebao*, 1982, 4(5): 595–607.
- [9] 赵焕庭. 珠江河口演变[M]. 北京: 海洋出版社, 1990.
Zhao Huanting. *Evolution of the Pearl River Estuary*[M]. Beijing: China Ocean Press, 1990.
- [10] 赵焕庭. 珠江河口特征认知的发展[J]. *海洋学报*, 2018, 40(7): 1–21.
Zhao Huanting. Cognitive development of characteristics of the Zhujiang River Estuary[J]. *Haiyang Xuebao*, 2018, 40(7): 1–21.
- [11] 黄镇国, 李平日, 张仲英, 等. 珠江三角洲形成发育演变[M]. 广州: 科学普及出版社广州分社, 1982.
Huang Zhenguo, Li Pingri, Zhang Zhongying, et al. *Formation, Development and Evolution of the Zhujiang Delta*[M]. Guangzhou: Science and Technology Press of Guangzhou, 1982.
- [12] 黄镇国, 李平日, 张仲英, 等. 珠江三角洲第四纪沉积特征[J]. *地质论评*, 1985, 31(2): 159–164.
Huang Zhenguo, Li Pingri, Zhang Zhongying, et al. Characteristics of the Quaternary deposits in the Zhujiang (Pearl) Delta[J]. *Geological Review*, 1985, 31(2): 159–164.
- [13] 徐明广, 马道修, 周青伟, 等. 珠江三角洲地区第四纪海平面变化[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1986, 6(3): 93–102.
Xu Mingguang, Ma Daoxiu, Zhou Qingwei, et al. Quaternary sea-level fluctuation in Zhujiang River Delta area[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1986, 6(3): 93–102.
- [14] 龙云作, 霍春兰. 珠江三角洲晚第四纪沉积特征[J]. *海洋科学*, 1990(4): 7–14.
Long Yunzuo, Huo Chunlan. The sedimentation characteristics of Zhujiang River Delta in late Quaternary[J]. *Marine Sciences*, 1990(4): 7–14.
- [15] 陈木宏, 赵焕庭, 温孝胜, 等. 伶仃洋L₂和L₁₆孔第四纪有孔虫群与孢粉化石带特征及其地质意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1994, 14(1): 11–22.
Chen Muhong, Zhao Huanting, Wen Xiaosheng, et al. Quaternary foraminiferal group and sporopollen zones in cores L₂ and L₁₆ in the Lingdingyang Estuary[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1994, 14(1): 11–22.
- [16] 杨小强, Grapes R, 周厚云, 等. 珠江三角洲沉积物的岩石磁学性质及其环境意义[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2008, 51(1): 56–66.
Yang Xiaoqiang, Grapes R, Zhou Houyun, et al. Magnetic properties of sediments from the Pearl River Delta, South China: paleoenvironmental implications[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2008, 51(1): 56–66.
- [17] Zong Yongqiang, Yim W W S, Yu Fengling, et al. Late Quaternary environmental changes in the Pearl River mouth region, China[J]. *Quaternary International*, 2009, 206(1/2): 35–45.
- [18] 宗永强, 黄光庆, 熊海仙, 等. 珠江三角洲晚第四纪地层、海平面变化与构造运动的关系[J]. *热带地理*, 2016, 36(3): 326–333.
Zong Yongqiang, Huang Guangqing, Xiong Haixian, et al. Relationship between late Quaternary lithostratigraphy, sea-level change and tectonics in the Pearl River Delta[J]. *Tropical Geography*, 2016, 36(3): 326–333.
- [19] 韦惺, 吴超羽. 全新世以来珠江三角洲的地层层序和演变过程[J]. *中国科学: 地球科学*, 2011, 54(10): 1523–1149.
Wei Xing, Wu Chaoyu. Holocene delta evolution and sequence stratigraphy of the Pearl River Delta in South China[J]. *Science China Earth Sciences*, 2011, 54(10): 1523–1149.
- [20] Xia X M, Li Y, Yang H, et al. Observations on the size and settling velocity distributions of suspended sediment in the Pearl River Estuary, China[J]. *Continental Shelf Research*, 2004, 24(16): 1809–1826.
- [21] 李家彪. 中国区域海洋学——海洋地质学[M]. 北京: 海洋出版社, 2012.
Li Jiabiao. *Regional Oceanography of China Seas——Marine Geology*[M]. Beijing: China Ocean Press, 2012.
- [22] 陈耀泰. 珠江口沉积分区[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 1995, 34(3): 109–114.
Chen Yaotai. Sedimentation divisions of Pearl River mouth[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 1995, 34(3): 109–114.
- [23] 夏真, 马胜中, 梁开, 等. 珠江口伶仃洋海底沉积[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2008, 28(2): 7–13.
Xia Zhen, Ma Shengzhong, Liang Kai, et al. The characteristics analysis of sea bottom deposit in Lingdingyang Bay of the Pearl River estuary[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2008, 28(2): 7–13.
- [24] 温孝胜, 赵焕庭, 张乔民, 等. 伶仃洋钻孔岩芯的沉积特征及环境演化[J]. *海洋学报*, 1997, 19(2): 121–128.
Wen Xiaosheng, Zhao Huanting, Zhang Qiaomin, et al. Sedimentary characteristics and environmental evolution of a drilling hole in the Lingdingyang Estuary[J]. *Haiyang Xuebao*, 1997, 19(2): 121–128.
- [25] Xia Zhen, Jia Peihong, Ma Shengzhong, et al. Sedimentation in the Lingdingyang Bay, Pearl River Estuary, southern China[J]. *Journal of Coastal Research*, 2013, 66: 12–24.

- [26] Dunlop D J, Özdemir Ö. Rock Magnetism: Fundamentals and Frontiers[M]. New York: Cambridge University Press, 2001.
- [27] Deng Chenglong, Zhu Rixiang, Jackson M J, et al. Variability of the temperature-dependent susceptibility of the Holocene eolian deposits in the Chinese Loess Plateau: a pedogenesis indicator[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 2001, 26(11/12): 873–878.
- [28] Liu Qingsong, Roberts A P, Torrent J, et al. What do the HIRM and *S*-ratio really measure in environmental magnetism?[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2007, 8(9): Q09011.
- [29] Karlin R, Levi S. Diagenesis of magnetic minerals in recent haemipelagic sediments[J]. *Nature*, 1983, 303(5915): 327–330.
- [30] Karlin R. Magnetite diagenesis in marine sediments from the Oregon continental margin[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1990, 95(B4): 4405–4419.
- [31] Bloemendal 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: Solid Earth*, 1992, 97(B4): 4361–4375.
- [32] Yamazaki T, Abdeldayem A L, Ikehara K. Rock-magnetic changes with reduction diagenesis in Japan Sea sediments and preservation of geomagnetic secular variation in inclination during the last 30 000 years[J]. *Earth, Planets and Space*, 2003, 55(6): 327–340.
- [33] Liu Jian, Zhu Rixiang, 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: Solid Earth*, 2004, 109(B3): B03103.
- [34] Rowan C J, Roberts A P, Broadbent T. Reductive diagenesis, magnetite dissolution, greigite growth and paleomagnetic smoothing in marine sediments: A new view[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 277(1/2): 223–235.
- [35] Mohamed K J, Rey D, Rubio B, et al. Onshore–offshore gradient in reductive early diagenesis in coastal marine sediments of the Ria de Vigo, northwest Iberian Peninsula[J]. *Continental Shelf Research*, 2011, 31(5): 433–447.
- [36] Kissel C, Laj C, Jian Z, et al. Past environmental and circulation changes in the South China Sea: Input from the magnetic properties of deep-sea sediments[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2020, 236: 106263.
- [37] Zhang Weiguo, Ma Honglei, Ye Leping, et al. Magnetic and geochemical evidence of Yellow and Yangtze River influence on tidal flat deposits in northern Jiangsu Plain, China[J]. *Marine Geology*, 2012, 319–322: 47–56.
- [38] Liu Qingsong, Sun Youbin, Qiang Xiaoke, et al. Characterizing magnetic mineral assemblages of surface sediments from major Asian dust sources and implications for the Chinese loess magnetism[J]. *Earth, Planets and Space*, 2015, 67(1): 61.
- [39] Zan Jinbo, Fang Xiaomin, Appel E, et al. New insights into the magnetic variations of aeolian sands in the Tarim Basin and its paleoclimatic implications[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2014, 229: 82–87.
- [40] 彭杰, 杨小强, 黄文娅, 等. 珠江三角洲全新世海平面升降及其对全球变化的响应[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2014, 53(6): 63–72.
Peng Jie, Yang Xiaoqiang, Huang Wenya, et al. Sea-level fluctuations and response to global changes during the Holocene in the Pearl River Delta, South China[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2014, 53(6): 63–72.
- [41] Kissel C, Liu Zhifei, Li Jinhua, et al. Magnetic minerals in three Asian rivers draining into the South China Sea: Pearl, Red, and Mekong Rivers[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2016, 17(5): 1678–1693.
- [42] Ouyang Tingping, Li Mingkun, Appel E, et al. Magnetic properties of surface sediments from the Pearl River Estuary and its adjacent waters: Implication for provenance[J]. *Marine Geology*, 2017, 390: 80–88.
- [43] Yim W W S, Li Jiaying. Diatom preservation in an inner continental shelf borehole from the South China Sea[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2000, 18(4): 471–488.
- [44] Long Xiaoyong, Ji Junfeng, Balsam W. Rainfall-dependent transformations of iron oxides in a tropical saprolite transect of Hainan Island, South China: spectral and magnetic measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2011, 116(F3): F03015.
- [45] Ouyang Tingping, Tang Zhihua, Zhao Xiang, et al. Magnetic mineralogy of a weathered tropical basalt, Hainan Island, South China[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2015, 240: 105–113.
- [46] Stanley D J, Warne A G. Worldwide initiation of Holocene marine deltas by deceleration of sea-level rise[J]. *Science*, 1994, 265(5169): 228–231.
- [47] Woodroffe C D, Murray-Wallace C V. Sea-level rise and coastal change: the past as a guide to the future[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2012, 54: 4–11.
- [48] Zhong Lifeng, Yan Wen, Li Jie, et al. Pt and Pd in sediments from the Pearl River Estuary, South China: background levels, distribution, and source[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2012, 19(4): 1305–1314.
- [49] 贾国东, 彭平安, 傅家谟. 珠江口近百年来富营养化加剧的沉积记录[J]. *第四纪研究*, 2002, 22(2): 158–165.
Jia Guodong, Peng Ping'an, Fu Jiamo. Sedimentary records of accelerated eutrophication for the last 100 years at the Pearl River estuary[J]. *Quaternary Sciences*, 2002, 22(2): 158–165.
- [50] 陶慧, 王建华, 陈慧娴, 等. 伶仃洋ZK19孔全新统有机物 $\delta^{13}\text{C}$ 和C/N值特征及东亚季风演变记录[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2019, 58(3): 1–12.
Tao Hui, Wang Jianhua, Chen Huixian, et al. Characteristics of $\delta^{13}\text{C}$ and C/N in the Holocene organic material of borehole ZK19 in Lingdingyang bay and the records of east Asian Monsoon variation[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2019, 58(3): 1–12.

Magnetic variations of sediments from a drilling core in the Lingdingyang Bay, Zhujiang River Estuary, and their responses to marine transgression and regression

Wu Yi^{1,2,3}, Fu Shuqing^{2,3}, Xia Zhen⁴

(1. Key Laboratory of Ocean and Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China; 2. Guangdong Open Laboratory of Geospatial Information Technology and Application, Key Lab of Guangdong for Utilization of Remote Sensing and Geographical Information System, Guangzhou Institute of Geography, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510070, China; 3. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, China; 4. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510075, China)

Abstract: The estuary area of the Zhujiang River Delta is significantly influenced by its drainage and offshore environment. Since being under the interaction of sea and land, the depositional system within the estuary area could be of great potential to reveal the simultaneous succession of geological and geomorphic processes. This paper presents a magnetic investigation report of a sedimentary core drilled from the Lingdingyang Bay at the Zhujiang River Estuary. Results of this study show that, the concentration of magnetic minerals or the source area of the high-coercivity magnetic minerals within the core sediments is relatively constant during the two periods of relatively high sea-level (i.e., under marine transgression) since late Pleistocene, revealing a stable sedimentation environment or a relatively fixed sediment source, respectively; however, during the period of marine regression, when the weathering and denudation processes dominate, the magnetic mineral composition in sediments is characterized by significant large-scale fluctuations, possibly indicating that the source areas of detrital materials have undergone a dramatic climate evolution. Multiple environmental magnetic parameters, including low-frequency magnetic susceptibility, anhysteretic remanent magnetization, saturation isothermal remanent magnetization, and HIRM (the ‘hard’ isothermal remanent magnetization), reveal a synchronous pattern of magnetic variations through the core. In comparison, the *S*-ratio record of the core sediments is more sensitive to the sedimentation evolution history during the marine transgression and regression in the Lingdingyang Bay at the Zhujiang River Estuary.

Key words: Zhujiang River Estuary; sediment; magnetic variation