

# 南海北部陆坡 GHE24L 柱样沉积物 磁性特征及其环境意义\*

王世朋<sup>①</sup> 李永祥<sup>①</sup> 付少英<sup>②</sup> 向荣<sup>③</sup> 胡建芳<sup>④</sup>

(<sup>①</sup>南京大学地球科学与工程学院, 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 南京 210046;

<sup>②</sup>广州海洋地质调查局, 广州 510760; <sup>③</sup>中国科学院南海海洋研究所, 广州 510301;

<sup>④</sup>中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640)

**摘要** 对取自南海北部陆坡神狐海域的近 6m 长的 GHE24L 柱状样沉积物磁性特征的详细研究,探讨了其磁性特征的纵向变化与沉积环境演变的关系。研究表明,该柱状样沉积物中的磁性矿物没有明显受到后期还原成岩作用的影响。沉积物中的磁性矿物主要是假单畴磁铁矿,其含量和粒度的变化记录了过去 20ka 以来的环境演化,尤其是对末次盛冰期以来的几个重要气候事件如 Heinrich 1 事件、Bølling-Allerød 暖期、新仙女木事件等有很好的响应。研究结果可为重建南海区域环境演化提供依据,也可探究东亚海陆气候变迁的耦合联系提供约束。

**关键词** 南海 环境磁学 末次冰期

**中图分类号** P318.4<sup>+</sup>1, P736, P534.63

**文献标识码** A

## 1 前言

南海是西太平洋热带地区最大的边缘海。其地处东亚季风带,又是亚洲夏季风最早爆发地<sup>[1]</sup>,因而对气候、环境变迁较为敏感<sup>[2]</sup>。相对较高的沉积速率使南海沉积物成为记录高分辨率古环境、古气候变迁的重要载体,也因此长期受到关注<sup>[3,4]</sup>。自 20 世纪 80 年代以来,多个中外合作航次的实施推动了南海的研究工作,使南海沉积演化研究取得了长足进展<sup>[5]</sup>。其中最具代表性的是专门针对南海实施的国际大洋钻探计划(ODP) 184 航次<sup>[6-14]</sup>。该航次从南海钻取了多个长岩芯,从而大大延伸了以往的沉积记录。在此基础上,多种替代指标的运用更进一步提升了对南海在冰期-间冰期长时间尺度上古环境、古海洋演化的认识<sup>[5-23]</sup>。虽然磁学指标的应用相对较少,但已有的研究结果已显示出其在重建南海沉积、环境演化方面所发挥的重要作用。Kissel 等<sup>[19]</sup>以南海北部 ODP1146 站位过去 1.2Ma 沉积物的磁学特征

记录,认为南海北部沉积物磁学特征反映了东亚季风的变迁史;Yang 等<sup>[24]</sup>获得了南海南部过去 130ka 以来的地磁场古强度记录,该记录可用于南海沉积物定年;李粹中<sup>[25]</sup>探讨了南海重力柱状样磁性漂移对定年工作的帮助;侯红明等<sup>[26]</sup>则通过功率谱分析得出南海北部沉积物磁化率与古气候之间存在非线性变化的响应关系;汤贤赞等<sup>[27]</sup>则通过沉积物磁组构特征判断南海南山群岛地区古流向变化。尽管如此,磁学参数在较短时间尺度上的记录所揭示环境演变仍然很少。一个重要原因是沉积物往往受到还原作用影响而使其原始的沉积环境信息丢失<sup>[28]</sup>。

本次研究在南海北部陆坡神狐海域东南边缘取样,旨在获得无明显后期还原成岩作用影响柱状样,通过对柱状样沉积物中指示磁性矿物种类、含量以及粒度变化的多种磁学参数进行详细测量分析,探讨研究区沉积物的磁性参数变化的影响因素及其对沉积环境变化的响应关系,并揭示研究区沉积物磁性特征的环境意义。

第一作者简介:王世朋 男 25 岁 硕士研究生 构造地质学专业 E-mail:njdhwsp@126.com

\* 广州海洋地质调查局“天然气水合物分解的沉积记录”项目(批准号:GZH 201100311-02)和中央高校基本科研业务专项项目(批准号:1126020611)共同资助

2013-12-09 收稿,2014-01-28 收修改稿

通讯作者:李永祥 古地磁与环境磁学研究 E-mail:yxli@nju.edu.cn

## 2 材料和方法

广州海洋地质调查局于 2011 年 8~9 月在南海北部陆坡神狐海域用重力活塞取样器获得 GHE24L 和 GHE27L 两个柱状样(图 1)。本文对 GHE24L 柱状样做了详细的环境磁学研究。GHE24L 孔位于南海北部陆坡神狐海域,水深 1387m,进尺 5.98m,柱状样实际长度为 5.96m。柱状样沉积物主要为灰绿色含有孔虫软泥。在剖开的新鲜面上采集  $2.0 \times 2.0 \times 2.0 \text{ cm}^3$  无磁立方体塑料盒定向样品,取样间距 2cm,共取样 286 个。

在南京大学古地磁实验室,利用 KLY-3 卡帕桥磁化率仪测量 GHE24L 样品的体积磁化率( $\kappa$ ),经密度对  $\kappa$  进行校正而得到样品的质量磁化率( $\chi$ )。使用 Molspin 交变退磁仪及其 pARM 装置(最大交变场为 100mT,直流场为 0.1mT)获得样品的非磁滞剩磁(ARM),经密度校正,以及直流场归一化后的 ARM 即为非磁滞剩磁磁化率( $\chi_{\text{ARM}}$ )。使用 ASC Scientific Model IM-10-30 脉冲磁力仪与 JR-6A 旋转磁力仪测量样品的等温剩磁(IRM)。其中挑选 12 个代表性样品进行详细的 IRM 获得曲线测量,并以  $\text{IRM}_{1200\text{mT}}$  为饱和等温剩磁(SIRM),测量所有样品的饱和等温剩磁。所有样品分别反向加场 300mT,测得其  $\text{IRM}_{-300\text{mT}}$ ,由此计算出样品的 S 比值( $S = -\text{IRM}_{-300\text{mT}}/\text{SIRM}$ )以及 HIRM( $\text{HIRM} = [\text{IRM}_{-300\text{mT}} + \text{SIRM}]/2$ )<sup>[30]</sup>。挑选 16 个代表性样品,使用 CS-3 温控装置和 KLY-3 卡帕桥磁化率仪测量样品在氩

气中的磁化率随温度( $\kappa-T$ )变化曲线。17 个代表性样品的磁滞参数在中国科学院地质与地球物理研究所用 MicroMag 2900-04 型变梯度磁力仪测得。

## 3 结果与分析

### 3.1 岩性描述

GHE24L 孔柱状样岩性均一,主要为灰绿色含有孔虫软泥。观察其沉积剖面,未见浊流或等深流带来的非正常沉积现象,表明研究区自柱状样底部沉积以来一直处于稳定的陆坡-半深海沉积环境。

### 3.2 磁性矿物种类

S 比值( $S_{\text{ratio}}$ )可以用来粗略衡量沉积物中磁性矿物种类,其值大于 0.8 反映以磁铁矿(或磁赤铁矿)为主,小于 0.8 则反映不完全反铁磁性矿物(赤铁矿、针铁矿等)贡献的增加<sup>[31]</sup>。GHE24L 柱状沉积物的 S 比值在 0.88~0.99 之间,非常接近 1(图 2h),表明沉积物中的磁性矿物以“软”磁性亚铁磁性矿物为主。GHE24L 柱状样品的 IRM 获得曲线(图 3)显示,样品在接近 0.2T 外场下已经基本达到饱和等温剩磁,进一步说明 GHE24L 柱状样沉积物中的磁性矿物以亚铁磁性矿物为主。

饱和等温剩磁与磁化率的比值( $\text{SIRM}/\chi$ )也可用于识别磁性矿物类型<sup>[32,33]</sup>。不同磁性矿物的  $\text{SIRM}/\chi$  不同,例如赤铁矿的  $\text{SIRM}/\chi$  通常大于 200 kA/m,磁铁矿的  $\text{SIRM}/\chi$  一般低于 30 kA/m,多集中

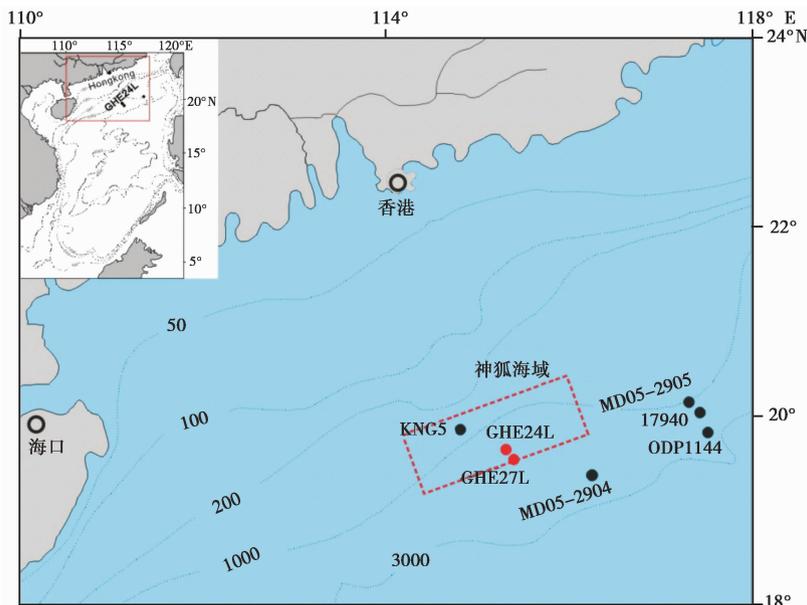


图 1 GHE24L 柱样及附近相关钻孔地理位置(神狐海域位置据文献[29])

Fig. 1 Map showing the locations of the studied Core GHE24L and the nearby cores

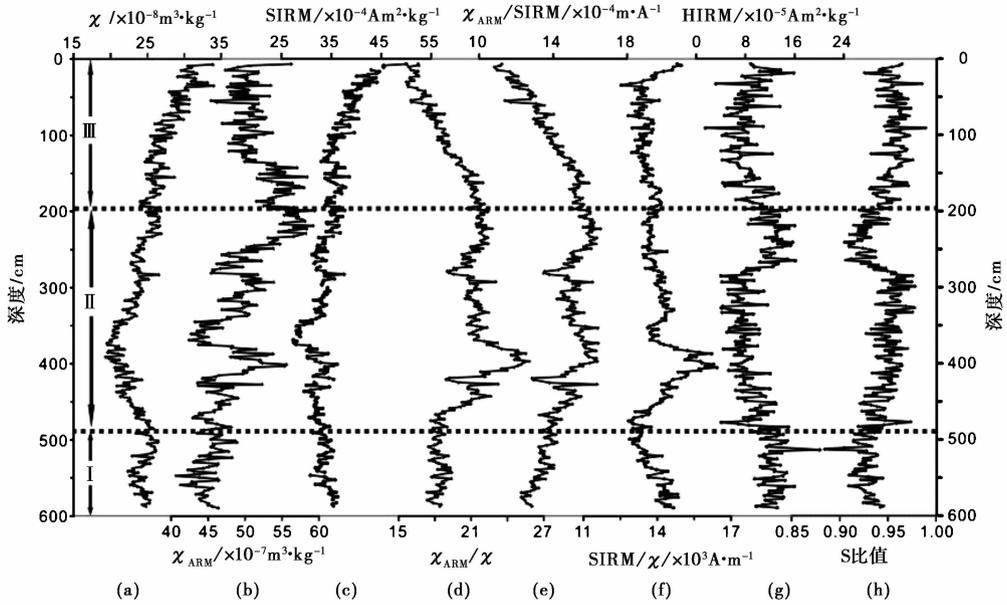


图2 GHE24L磁性参数随深度综合变化

Fig. 2 Downcore variations of magnetic parameters of Core GHE24L

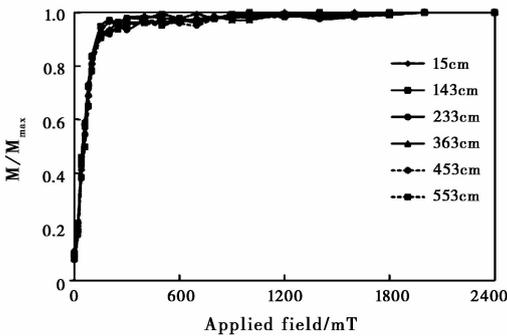


图3 GHE24L柱样典型样品的IRM获得曲线

Fig. 3 IRM acquisition curves for samples of Core GHE24L

在  $10 \text{ kA/m}$  [32,33]。GHE24L 柱样的  $\text{SIRM}/\chi$  处于  $12.48 \sim 20.29 \text{ kA/m}$  之间 (图 2f), 表明软磁性矿物很可能是磁铁矿。

取 GHE24L 孔上、中、下段代表性样品的磁化率随温度变化曲线 (即  $\kappa$ -T 曲线) 显示样品由顶至底热磁曲线特征基本一致 (图 4), 即磁化率值在加热过程中基本不变, 加热温度达到约  $500^\circ\text{C}$  时略微增大, 当温度提升到接近  $580^\circ\text{C}$ , 即磁铁矿的居里点时, 磁化率值急剧降低至接近于零, 表明沉积物中的磁性矿物是磁铁矿。冷却过程中冷却到  $550 \sim 580^\circ\text{C}$  的时候, 样品磁化率值迅速升高, 远远高于加热时的磁化率, 表明加热过程生成了磁铁矿, 可能是由于粘土矿物在加热过程中转变产生的 [30]。取自下段  $543 \text{ cm}$  处的样品在温度高于  $580^\circ\text{C}$  时磁化率并未衰减到零, 而且  $580 \sim 700^\circ\text{C}$  加热过程中磁化率显示微

弱的降低趋势, 表明该段有赤铁矿存在。综上所述, GHE24L 柱状样沉积物中磁性矿物主要是磁铁矿, 赤铁矿磁性特征不明显, 且仅出现在柱状样的下部。

### 3.3 磁性矿物含量

磁化率 ( $\chi$ ) 与沉积物中的磁性矿物的含量、类型以及粒度相关, 反映的是沉积物中所有磁性矿物的综合磁学信息 [34-41], 在磁性矿物类型与粒度变化较小的情况下, 可用来指示磁性矿物含量的变化。GHE24L 孔沉积物的  $\chi$  在  $19.47 \times 10^{-8} \sim 33.84 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$  区间变化, 平均值为  $24.89 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ , 表明沉积物中磁性矿物含量整体较低 (图 2a)。饱和等温剩磁 (SIRM) 通常反映沉积物中亚铁磁性矿物 (如磁铁矿) 的含量 [34], 其分布区间为  $27.35 \times 10^{-4} \sim 50.05 \times 10^{-4} \text{ Am}^2/\text{kg}$ , 平均值为  $34.49 \times 10^{-4} \text{ Am}^2/\text{kg}$  (图 2c)。由于该参数不受顺磁性和抗磁性矿物的影响, 更能真实的反应磁性矿物含量变化。GHE24L 柱状样的  $\chi$  与 SIRM 的高度相关性 (图 5a) 说明,  $\chi$  主要受控于亚铁磁性磁铁矿, 顺磁性和抗磁性矿物对  $\chi$  的贡献很小。

HIRM 通常反映样品中高矫顽力“硬”磁性矿物 (如赤铁矿、针铁矿等) 的含量 [34]。GHE24L 孔 HIRM 含量很低 (图 2g), 在  $1.49 \times 10^{-5} \sim 20.05 \times 10^{-5} \text{ Am}^2/\text{kg}$  区间变化, 平均值为  $9.50 \times 10^{-5} \text{ Am}^2/\text{kg}$ , 赤铁矿类的硬磁性矿物在柱状样沉积物中含量很少。

$\chi_{\text{ARM}}$  是对稳定单畴亚铁磁性矿物颗粒极为敏感

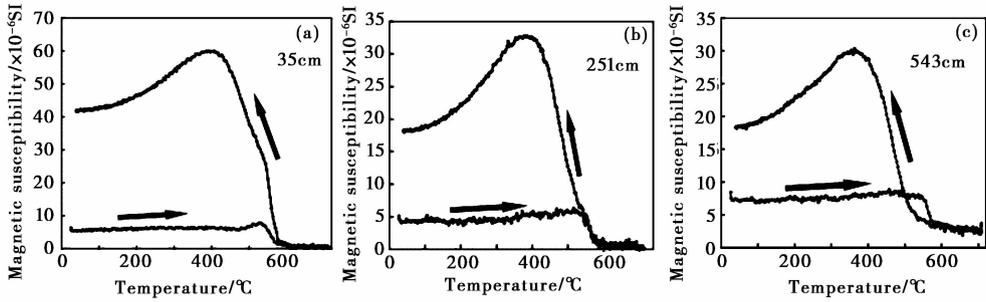


图 4 GHE24L 柱样典型样品磁化率随温度变化曲线

Fig. 4 Typical temperature dependence of magnetic susceptibility curves of samples from different depth intervals of Core GHE24L

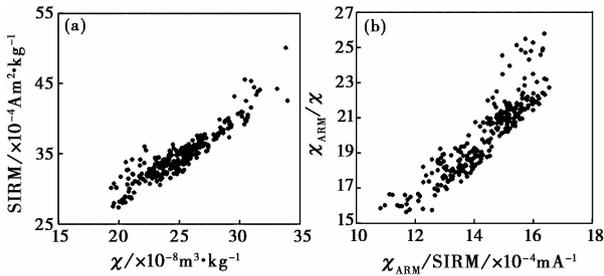


图 5 GHE24L 柱样磁性参数之间相互关系

Fig. 5 Relationships between magnetic parameters of Core GHE24L

的参数<sup>[42-44]</sup>。由图 2b 可知, GHE24L 柱状样中波动较大, 其分布区间为  $40.56 \times 10^{-7} \sim 59.44 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$ , 平均值为  $49.33 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$ , 相较于  $\chi$  和 SIRM,  $\chi_{\text{ARM}}$  波动更大, 磁性特征更为明显, 可能对沉积环境变化更敏感。

### 3.4 磁性矿物粒度

GHE24L 柱状样沉积物中的主要磁性矿物为亚铁磁性磁铁矿, 其粒度可以通过磁滞回线参数获得。所选 17 个代表性样品的磁滞回线参数在 Day 氏图

上落于假单畴 (PSD) 范围<sup>[45]</sup>内 (图 6), 表明沉积物样品中的磁铁矿主要为假单畴颗粒。也可能是由于单畴 (SD) 与多畴 (MD) 颗粒混合的结果, 根据 Dunlop 等<sup>[45]</sup>显示, 代表性样品的磁滞回线参数均落于 SD+MD 混合线 60%~70% 范围。

$\chi_{\text{ARM}}$  对稳定单畴亚铁磁性矿物颗粒极为敏感, 故  $\chi_{\text{ARM}}/\chi$  和  $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$  比值常用作指示磁性矿物粒度的替代指标: 参数比值越大, 磁铁矿颗粒越细, 比值越小, 则反映磁铁矿中多畴颗粒较多<sup>[44, 46, 47]</sup>。如果样品中含有大量的超顺磁 (SP) 颗粒, 也可能造成的  $\chi_{\text{ARM}}/\chi$  的低值。在 GHE24L 柱样中, 两个参数 (图 2d 和 2e) 呈现一致的变化 (图 5b), 表明 SP 颗粒对  $\chi_{\text{ARM}}/\chi$  影响不大, 柱样磁性矿物中超顺磁颗粒很少。由图 2d 和 2e 变化可知 GHE24L 柱样磁性矿物粒度整体变化不大。

### 3.5 柱状样主要磁性参数变化

根据柱状样各磁性参数磁性特征的垂向变化 (图 2), 可将 GHE24L 孔自下而上分为 3 段: 第 I 段, 458~590cm; 第 II 段, 198~458cm; 第 III 段, 0~198cm。如图 2 示, 第 I 段的  $\chi$ 、 $\chi_{\text{ARM}}$ 、SIRM、

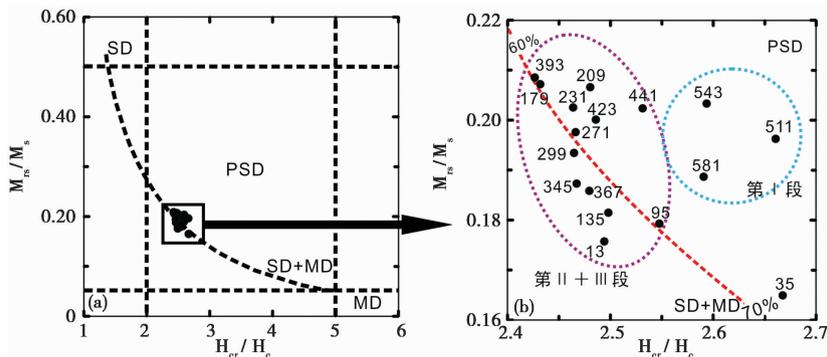


图 6 GHE24L 柱样典型样品的 Day 氏图

样品点旁边的数字为样品深度 [cm]; 磁畴边界和 SD+MD 混合线引自文献<sup>[45]</sup>, 其中 SD 代表单畴, PSD 代表假单畴, MD 代表多畴

Fig. 6 Day plot showing magnetic grain size distributions of selected samples of Core GHE24L

$\chi_{\text{ARM}}/\chi$ 、HIRM 以及 S 比值参数均较为稳定,  $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$  随深度变浅逐渐变大,  $\text{SIRM}/\chi$  随深度变浅逐渐降低; 第 II 段的各参数值变化较大, 不稳定; 第 III 段的  $\chi$  和  $\text{SIRM}$  随深度变浅逐渐增高,  $\chi_{\text{ARM}}$ 、 $\chi_{\text{ARM}}/\chi$  和  $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$  随深度变浅而逐渐下降。

表征磁性矿物含量的参数  $\chi$  与  $\text{SIRM}$  的变化较为一致, 其中第 III 段两参数值明显高于第 I 段和第 II 段; 第 I 段中两参数相对稳定, 变化较小; 在第 II 段中两参数变化较大, 198~368cm, 随深度变浅, 均呈增长趋势, 368~458cm, 随深度变浅, 呈下降趋势, 中间波动较大。第 III 段, 参数变化可分为两段: 0~136cm, 随深度变浅, 参数值迅速增高; 136~198cm, 参数较为稳定, 数值相对偏低。 $\chi_{\text{ARM}}$  可用于指示稳定单畴亚铁磁性矿物含量变化<sup>[42-44]</sup>。总体而言,  $\chi_{\text{ARM}}$  第 III 段值最高, 第 I 段最低, 第 II 段变化最大, 与  $\chi$ 、 $\text{SIRM}$  相比,  $\chi_{\text{ARM}}$  变化特征更为明显, 134~184cm、198~234cm、278~334cm 和 376~410cm 均表现出明显的波峰。

$\chi_{\text{ARM}}/\chi$  和  $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$  比值常用作指示磁性矿物粒度的替代指标<sup>[44,46-49]</sup>。由图 2d 和 2e 可知 GHE24L 柱状样磁性矿物粒度整体变化不大, 但第 II 段磁性矿物粒度相较于第 I 段、第 III 段更细。Day 氏图结果(图 6b) 同样显示第 I 段磁性矿物粒度明显比第 II 段、第 III 段更粗, 而第 II 段粒度分布相对集中, 但第 III 段的粒度分布相对较分散。

## 4 讨论

### 4.1 GHE24L 孔的年代框架

GHE24L 孔的年代框架可通过与邻近有精确测年的柱状样沉积物对比来建立。位于本研究区东北约 200km 处的 17940 柱状样(图 1) 具有详尽的  $\text{AMS}^{14}\text{C}$  年龄约束<sup>[17]</sup>。该柱状样也取自南海北部陆坡, 其沉积环境与本研究区的沉积环境类似。主要区别在于 17940 柱状样取自水深较深的 1728m 深处, 柱状样沉积记录更长, 达 13.15m。从这个 13.15m 长的柱状样上获得了 40 个单种有孔虫的  $\text{AMS}^{14}\text{C}$  年龄<sup>[17]</sup>。这使得 17940 柱状样成为南海北部沉积记录中年代约束最强的记录之一。从 17940 柱状样所获得的 1~2cm 间格的 *Globigerinoides ruber* 的  $\delta^{18}\text{O}$  记录的分辨率可精细到 20a<sup>[17,50,51]</sup>。因此, 17940 柱状样高分辨率的氧同位素记录可以作为与其他南海北部沉积物记录对比和建立基本年代框架的基础。

GHE24L 孔的磁化率与相邻 GHE27L 孔的磁化

率变化总体比较一致(图 7a 和 7b), 显示两个柱状样的地层可以通过磁化率对比关联。而从 GHE27L 孔所获得的有孔虫  $\delta^{18}\text{O}$  同位素变化趋势与 17940 孔的氧同位素变化<sup>[17]</sup> 具有很大的相似性(图 7c 和 7d)。因此, GHE27L 孔的年代可以通过与 17940 孔对比氧同位素的变化趋势获得(图 7c、7d 和 7e)。再进一步根据 GHE24L 孔和 GHE27L 孔柱状样磁化率随深度变化特征(图 7a 和 7b), 估算出两个柱状样相对应层位的年龄。在这些层位的年龄约束下, 通过线性内插和外推便可建立 GHE24L 孔的初步年代框架(图 7)。图 8 给出了基于此年代框架将深度转换为时间的主要环境磁学参数随时间的变化。结果显示, GHE24L 柱状样沉积物记录了过去约 20ka 以来的环境演化。

### 4.2 影响沉积物磁性特征变化因素

磁性特征的变化与沉积物的物源、沉积动力以及沉积后的次生变化等因素有关<sup>[30,34]</sup>。这些因素往往又受气候、构造等控制<sup>[30,34]</sup>。沉积后的次生变化对磁性特征的影响包括磁铁矿的溶解、顺磁性黄铁矿和菱铁矿以及亚铁磁性胶黄铁矿的形成等<sup>[33]</sup>。对 GHE24L 柱状样沉积物的磁学参数分析显示沉积物中不含指示后期较强还原环境影响下生成的胶黄铁矿、黄铁矿等磁性矿物。GHE24L 孔中的磁性矿物以假单畴型磁铁矿为主, 只有在其底部个别层位含有赤铁矿, 沉积物中磁铁矿的粒度变化范围较小。这些特征表明次生变化对 GHE24L 孔沉积物磁性特征的影响很微弱, 可以忽略。GHE24L 柱状样磁性特征变化应该主要反映的是沉积物物源磁性矿物的变化。

由于样品取自南海北部陆坡区域, 陆坡的海洋沉积物中的陆源组分主要来自于华南陆缘<sup>[52-54]</sup>, 全新世时可能也有来自台湾岛以及吕宋岛的沉积物<sup>[55]</sup>。陆源区沉积物中磁性矿物性质的变化会引起南海北部洋盆中沉积物磁性参数(如磁化率、饱和等温剩磁等)的变化<sup>[34,56-59]</sup>。例如, 物源区会因气候冷暖变化而影响到当地的风化过程而使风化产物产生磁性差异<sup>[34]</sup>。当不同冷暖期所产生的风化碎屑物被输入沉积到洋盆中就表现出磁性强弱差异<sup>[55]</sup>。另外, 陆源输入范围内, 物源区距离洋盆的远近也会影响到陆源输入物的含量及变化, 也因此影响沉积物中磁性矿物含量和粒度变化<sup>[59]</sup>。搬运距离越远, 被输入到洋盆的沉积物相对越少, 沉积物粒度也相对较细; 反之, 搬运距离越短, 到达洋盆的

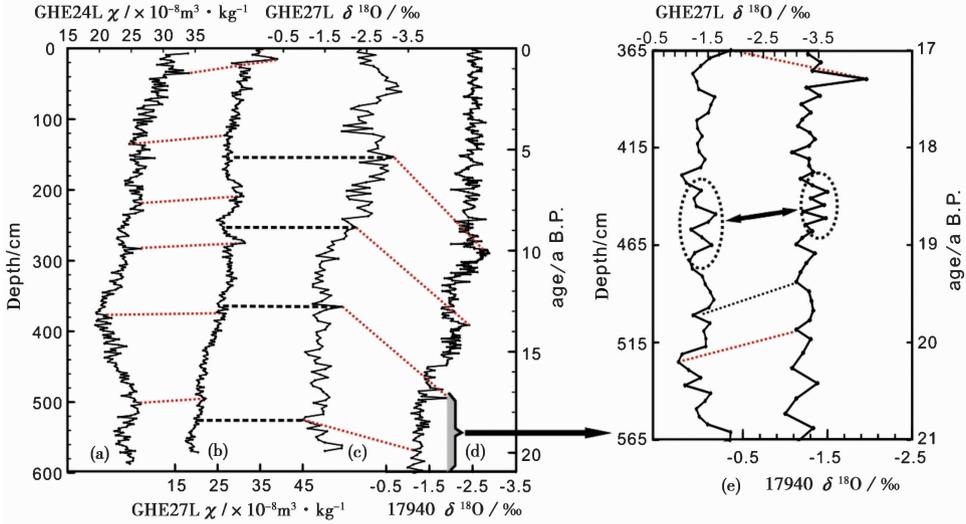


图 7 GHE24L 地层年代框架

(a) GHE24L 孔随深度变化；(b) GHE27L 孔随深度变化；(c) GHE27L 孔  $\delta^{18}\text{O}$  随深度变化；  
(d) 17940 孔  $\delta^{18}\text{O}$  随时间变化，数据引自文献 [17]；(e) 为 (c) 与 (d) 之间第三、第四对应点附近相关数据放大详示

Fig. 7 Age-depth model of Core GHE24L

沉积物就相对较多，沉积物粒度也相对较粗<sup>[59]</sup>。

### 4.3 沉积物磁性特征对环境变化的响应

如 4.1 所述，从 17940 柱状样沉积物获得的有详尽年龄约束的、高分辨率  $\delta^{18}\text{O}$  记录<sup>[17]</sup> 可以作为南海北部沉积物区域对比的基础。17940 柱状样过去 20ka 以来的  $\delta^{18}\text{O}$  记录总体反映了南海北部从冰期到间冰期演化过程中的海面温度和盐度变化 (图 8a)<sup>[17]</sup>，根据其高分辨率的年代约束可以确定出末次冰消期主要气候事件如 Heinrich 1 冷事件、B/A 暖事件以及新仙女木冷事件等所对应的  $\delta^{18}\text{O}$  变化特征 (图 8a)。研究表明 17940 孔全新世  $\delta^{18}\text{O}$  的波动变化应该主要是由降水变化所引起的海水盐度波动造成的<sup>[17]</sup>，因此，该孔全新世  $\delta^{18}\text{O}$  的波动在一定程度上反映了东亚夏季风强弱波动变化<sup>[17,50,51]</sup> 以及南海北部的区域气候环境演变。分析 GHE24L 孔磁学参数变化对环境变迁的响应可以通过将 GHE24L 孔主要磁性参数变化与 17940 孔的  $\delta^{18}\text{O}$  对比 (图 8) 来实现。

在以 17940 柱状样年代为参考建立的 GHE24L 沉积柱状样地层年代框架下，GHE24L 柱状样磁性特征变化可以分为 3 个演化阶段，即：第 I 阶段，20.80~18.74ka；第 II 阶段，18.74~11.31ka；以及第 III 阶段，11.31~0.36ka。

第 I 阶段，20.80~18.74ka。该时期内  $\chi$  值和 SIRM 值较高 (图 8d 和 8f)，表明沉积物中磁性矿物

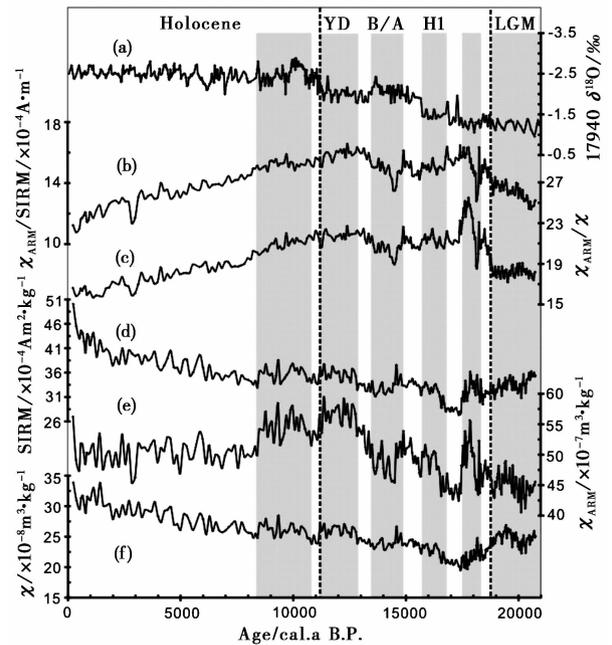


图 8 GHE24L 柱样磁性参数 (b~f)

与 17940 柱状样的  $\delta^{18}\text{O}$  记录 (a)<sup>[17]</sup> 的对比

Fig. 8 Comparison of magnetic parameters of Core GHE24L (b~f) with the  $\delta^{18}\text{O}$  record of the nearby Core 17940 (a) in the northern slope of South China Sea

含量较高。 $\chi_{\text{ARM}}$  值相对较低 (图 8e) 表明输入磁性矿物中细粒磁铁矿含量较低。这与  $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$  和  $\chi_{\text{ARM}}/\chi$  比值偏低 (图 8b 和 8c) 所指示的沉积物中磁性矿物粒度相对偏粗一致。Day 氏图也显示第 I 阶段，即 LGM 时期，磁性矿物的粒度较粗，比第 II 和 III

阶段的粒度都粗(图 6b)。另外,沉积物的热磁特征表明这一阶段有赤铁矿存在(图 4c)。该阶段处于末次盛冰期(LGM)<sup>[17,51,60]</sup>。在 LGM 时,研究区不仅气温比现在低,而且海平面比现代海平面低 120~150m,古岸线向外推移约 100~220km<sup>[61,62]</sup>。低海平面位置时,南海北部宽广的陆架大面积出露<sup>[61]</sup>。因此,在 LGM 时,研究区距珠江口的距离大大缩短。沉积物搬运距离的减小有利于大量陆源物质向陆坡搬运,致使抵达研究区的陆源输入量较高<sup>[16,63]</sup>,而且输入物质的粒度也较粗<sup>[52,64~66]</sup>。在较冷且干燥的条件下,很可能在所暴露的宽阔的陆架上形成了以草本植物为主的植被类型<sup>[67,68]</sup>。在干燥条件下频繁出现的草原火灾<sup>[69]</sup>可能是导致暴露的陆架上沉积物被烘烤氧化而形成赤铁矿的一个重要原因。因此,这一阶段沉积物中出现了赤铁矿(图 4c)。

第 II 阶段,18.74~11.31ka。该时期处于末次冰消期,为末次盛冰期向全新世转变的时期。该时期内,气候波动较大。这一时期内,磁学参数如 SIRM 等都表现为多变的特征(图 8d),表明这些磁学参数对气候波动引起的沉积环境变化较敏感。在这一阶段随着气温回升,冰盖融化,全球海平面逐渐上升<sup>[70]</sup>。随着海平面上升,海岸线向大陆迁移,沉积物从珠江入海口到研究区的搬运距离增大<sup>[53]</sup>。这可能导致如  $\chi_{\text{ARM}}$  所指示研究区在这一阶段沉积物中总体上细粒磁铁矿逐渐增多。18.32~17.45ka 期间,指示磁性矿物含量的 SIRM 和  $\chi_{\text{ARM}}$  均增大(图 8d 和 8e),表征磁性矿物粒度的  $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$  和  $\chi_{\text{ARM}}/\chi$  也都增大(图 8b 和 8c),表明该时期细粒磁铁矿输入大幅度提高。这可能是由于这一时期海平面的快速上升引起的<sup>[71]</sup>。在末次冰消期的气温回升过程中,至少有两次气温突降事件,即大约 16ka 的 Heinrich 1 冷事件(H1)和 12ka 的新仙女木事件(Younger Dryas event,简称 YD 事件),和一次快速变暖事件,即大约 14ka 的 Bølling-Allerød (B/A)事件<sup>[72,73]</sup>。这些快速气候事件波及到了南海。在南海北部多个钻孔的沉积记录中,如 17940 孔、MD2904 孔和 MD2905 孔等,不同的温度替代指标都指示南海北部出现了相应的较大幅度的温度升降波动<sup>[55,66,74,75]</sup>。GHE24L 孔的磁学参数对这些主要气候事件也有明显响应。在 H1 和 YD 冷事件期间,南海北部降水量较低<sup>[76]</sup>,表征磁性矿物粒度的  $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$  和  $\chi_{\text{ARM}}/\chi$  相对增大(图 8b 和 8c),说明磁性矿物细粒组分增加。这可能是由于在干冷气候条件下,降雨减少,河流水动力减弱,从而使相对较

多的细粒组分被输送到陆坡区沉积。相反,在 B/A 快速暖事件期间, $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$  和  $\chi_{\text{ARM}}/\chi$  相对减小(图 8b 和 8c),说明粗粒组分增加。这可能是由于在暖湿气候条件下,降雨增多,河流水动力增强,从而使相对较多的粗粒组分被输送到陆坡区沉积。

第 III 阶段,11.31~0.36ka,为全新世。该时期内,各磁性参数变化趋势较为单一。整体而言,主要磁学参数如 SIRM、 $\chi_{\text{ARM}}$  和  $\chi$  等在早全新世 10.80~8.42ka 期间,表现为一个小的波峰,而后呈现出稳定、单一变化的趋势(图 8d,8e 和 8f)。早全新世 SIRM、 $\chi_{\text{ARM}}$  和  $\chi$  小波峰的出现(图 8d,8e 和 8f)表明该时期陆源输入量增多。陆源输入量的增多很可能与早全新世夏季风的增强有关。来自南海北部 KNG5 孔<sup>[55]</sup>、MD05-2905 孔<sup>[66,77]</sup> 和 ODP 1144 孔<sup>[78]</sup> 的海相记录以及来自华南大陆的沉积记录<sup>[79,80]</sup> 都指示早全新世大暖期时东亚夏季风增强。增强的夏季风导致降雨增多,陆源输入量增加。早全新世全球距冰盖较远的中、远程区的海平面经历了快速上升<sup>[81]</sup>。海平面的上升<sup>[82]</sup> 使南海北部陆架区逐渐被全部淹没,到大约 7ka 时海平面已基本稳定<sup>[71,83,84]</sup>。海平面稳定后,沉积物从珠江入海口到研究区的搬运距离就基本维持不变。这可能是 GHE24L 孔中指示细粒磁铁矿含量的  $\chi_{\text{ARM}}$  自大约 8ka 以来总体保持不变的一个重要原因。另一个很有趣的现象是,表征输入量的 SIRM 和  $\chi$  自约 8ka 以来表现为稳定增大的趋势(图 8d 和 8f),表明陆源输入量自约 8ka 逐渐增多。由于  $\chi$  和 SIRM 的增大而  $\chi_{\text{ARM}}$  基本保持不变,导致  $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$  和  $\chi_{\text{ARM}}/\chi$  逐渐减小(图 8b 和 8c),表明粗粒组分逐渐增多;另外,又由于到早全新世晚期时流域内的植被类型也已演化为基本与现代植被相同的类型<sup>[67]</sup>,南海北部和华南大陆区的气候也总体稳定,从珠江流域供应逐渐增多粗粒组分的沉积物的可能性不大。一种可能的解释是与全新世中晚期南海的洋流有关。到大约 8ka 时,海平面已上升到现代海平面以下约 30m 位置处<sup>[85]</sup>,海岸线已经很靠近现代台湾西南端陆地。从台湾陡峭的中央山脉剥蚀的碎屑物可以经山地河流很快被输送到南海<sup>[52,55]</sup>。海表洋流 Kuroshio<sup>[86]</sup> 的一支从菲律宾海穿越巴士海峡进入南海经台西南海域沿南海北部向西南流动,可以将源自台湾的相对较粗粒的沉积物带到南海北部陆坡区沉积。南海北部沉积物的物源分析支持这样的沉积物输送路径<sup>[87]</sup>。

综合以上 3 个阶段磁学参数与南海北部陆坡 17940 孔氧同位素数据比较分析(图 8),我们发现,

总体而言,在诸多磁学参数中  $\chi_{\text{ARM}}$  的变化特征更明显,对该区气候环境演化的响应也最敏感。

## 5 结论

通过对南海北部陆坡神狐海域 GHE24L 柱状沉积物进行详细系统的环境磁学研究,获得了该地区大约 20ka 以来的高分辨率沉积演化记录。研究表明柱样沉积物中的磁性矿物以低矫顽力假单畴磁铁矿为主。磁性矿物含量及粒度变化主要受控于源区物质输入,后期还原成岩作用不明显。受气候冷暖、海平面升降以及季风强弱等因素影响,不同时期柱样沉积物的磁性特征不同。末次盛冰期时期,  $\chi$  和 SIRM 高,而  $\chi_{\text{ARM}}/\chi$  和  $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$  低,指示研究区陆源输入高,且输入磁性矿物粒度粗。这主要是由于末次盛冰期时海平面较低,陆架广泛出露,沉积物搬运距离较小的缘故。在由末次盛冰期向全新世转变时期,海平面上升,气候波动较大,指示粒度和含量磁性参数出现明显的波动变化,是对 Heinrich 1 事件、Bølling-Allerød 暖期及新仙女木事件的良好响应。在大约 16ka 的 Heinrich 1 事件和大约 12ka 的新仙女木气候变冷事件期间,  $\chi_{\text{ARM}}/\chi$  和  $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$  相对增大,显示磁性矿物粒度变细。而在 Bølling-Allerød 暖事件期间  $\chi_{\text{ARM}}/\chi$  和  $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$  相对减小,显示磁性物质粒度增大。这可能是由于冷暖事件相伴随的降雨量变化而引起的水动力条件变化所导致的;全新世初期,磁学参数指示磁性矿物含量增加,表明研究区陆源输入量增多。这可能是受早全新世季风增强事件的影响。自中晚全新世以来,细粒磁铁矿含量相对稳定,而  $\chi_{\text{ARM}}/\chi$  和  $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$  参数逐渐减小,表明沉积物中粗粒磁性矿物的含量逐渐增多。粗粒组分可能源自台湾并随洋流作用被搬运至南海北部陆坡。在诸多磁学参数中  $\chi_{\text{ARM}}$  的变化特征更明显,对该区气候环境演化的响应也最敏感。研究结果可为重建南海区域环境演化提供依据,也可为探究东亚海陆气候变迁的耦合联系提供约束。

**致谢** 感谢广州海洋地质调查局样品库工作人员在取样过程提供的帮助。温斌在中国科学院地质与地球物理所古地磁实验室测量了部分样品的磁滞回线数据并得到了实验室师生的帮助,在此一并致谢!最后感谢两位审稿专家以及编辑部杨美芳老师的意见及帮助。

## 参考文献 (References)

- 1 丁一汇,李崇银.南海夏季风爆发和演变及其与海洋的相互作用.北京:气象出版社,1999.1~423  
Ding Yihui, Li Chongyin. Onset and Evolution of the South China Sea Monsoon and Its Interaction. Beijing: China Meteorological Press, 1999. 1~423
- 2 赵泉鸿,汪品先.南海第四纪古海洋学研究进展.第四纪研究,1999,(6):481~501  
Zhao Quanhong, Wang Pinxian. Progress in Quaternary paleoceanography of the South China Sea: A review. *Quaternary Sciences*, 1999, (6): 481~501
- 3 郑执中,郑守仪.南海北部的浮游有孔虫.海洋与湖沼,1964,6(1):38~73  
Zheng Zhizhong, Zheng Shouyi. The planktonic foraminifera of the northern South China Sea. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1964, 6(1): 38~73
- 4 朱成文.南海西北部近海海底沉积物特征.海洋地质研究,1981,1(2):50~60  
Zhu Chengwen. The features of the offshore deposits in the northwestern South China Sea. *Marine Geological Research*, 1981, 1(2): 50~60
- 5 Wang Pinxian, Li Qianyu. The South China Sea: Paleooceanography and Sedimentology. New York: Springer, 2009. 1~515
- 6 Silcia Hess, Wolfgang Kuhnt. Neogene and Quaternary paleoceanographic changes in the southern South China Sea (Site 1143): The benthic foraminiferal record. *Marine Micropaleontology*, 2005, 54(1~2): 63~87
- 7 Li Qianyu, Li Baohua, Zhong Guangfa *et al.* Late Miocene development of the western Pacific Warm Pool: Planktonic foraminifera and oxygen isotopic evidence. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2006, 237(2~4): 465~482
- 8 Li Baohua, Jian Zhimin, Li Qianyu *et al.* Paleooceanography of the South China Sea since the Middle Miocene: Evidence from planktonic foraminifera. *Marine Micropaleontology*, 2005, 54(1~2): 49~62
- 9 Jia Guodong, Peng Ping'an, Zhao Quanhong *et al.* Changes in terrestrial ecosystem since 30Ma in East Asia: Stable isotope evidence from black carbon in the South China Sea. *Geology*, 2003, 31: 1093~1096
- 10 Kienast M, Higginson M J, Mollenhauer G *et al.* On the sedimentological origin of down-core variations of bulk sedimentary nitrogen isotope ratios. *Paleoceanography*, 2005, 20(2): PA2009
- 11 Wei Gangjian, Li Xianhua, Liu Ying *et al.* Geochemical record of chemical weathering and monsoon climate change since the Early Miocene in the South China Sea. *Paleoceanography*, 2006, 21(4): PA4214
- 12 Boulay S, Colin C, Trentesaux A *et al.* Sediment sources and East Asian monsoon intensity over the last 450 ky. mineralogical and geochemical investigations on South China Sea sediments. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2005, 228(3~4): 260~277
- 13 Liu Zhifei, Alain Trentesaux, Steven C C *et al.* Clay mineral assemblages in the northern South China Sea: Implications for East Asian monsoon evolution over the past 2 million years. *Marine Geology*, 2003, 201(1~3): 133~146

- 14 Jian Zhimin, Zhao Quanhong, Cheng Xinrong *et al.* Pliocene-Pleistocene stable isotope and paleoceanographic changes in the northern South China Sea. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2003, **193**(3~4): 425~442
- 15 Huang Chiyue, Liew Pingmei, Zhao Meixun *et al.* Deep sea and lake records of the Southeast Asian paleomonsoons for the last 25 thousand years. *Earth and Planetary Science Letters*, 1997, **146**(1~2): 59~72
- 16 周 斌, 郑洪波, 杨文光等. 末次冰期以来南海北部物源及古环境变化的有机地球化学记录. 第四纪研究, 2008, **28**(3): 407~413  
Zhou Bin, Zheng Hongbo, Yang Wenguang *et al.* Provenance and paleo-environment changes in the northern part of South China Sea since the last glacial period as recorded by organic geochemistry proxies. *Quaternary Sciences*, 2008, **28**(3): 407~413
- 17 Wang L, Sarnthein M, Erlenkeuser H *et al.* East Asian monsoon climate during the Late Pleistocene: High-resolution sediment records from the South China Sea. *Marine Geology*, 1999, **156**(1~4): 245~284
- 18 郑洪波, 杨文光, 贺 娟等. 南海的氧同位素 3 期. 第四纪研究, 2008, **28**(1): 68~78  
Zheng Hongbo, Yang Wenguang, He Juan *et al.* Marine isotope stage 3 (MIS 3) of South China Sea. *Quaternary Sciences*, 2008, **28**(1): 68~78
- 19 Kissel Catherine, Carlo Laj, Steven Clemens *et al.* Magnetic signature of environmental changes in the last 1.2 Myr at ODP Site 1146, South China Sea. *Marine Geology*, 2003, **202**(1~3): 119~132
- 20 黄宝琦, 成鑫荣, 翦知潜等. 晚上新世以来南海北部上部水体结构变化及东亚季风演化. 第四纪研究, 2004, **24**(1): 110~115  
Huang Baoqi, Cheng Xinrong, Jian Zhimin *et al.* Variations in upper ocean structure in the South China Sea and the evolution of the East Asian monsoon since Late Pliocene. *Quaternary Sciences*, 2004, **24**(1): 110~115
- 21 黄宝琦, 杨文瑜. 南海北部氧同位素 3 期时上部海水结构的变化. 第四纪研究, 2006, **26**(3): 436~441  
Huang Baoqi, Yang Wenyu. Variations of upper water structure in MIS 3 from the northern South China Sea. *Quaternary Sciences*, 2006, **26**(3): 436~441
- 22 陈萌莎, 黄宝琦, 钮耀诚等. 南海北部 17924 站位氧同位素 3 期古海洋学变化. 第四纪研究, 2011, **31**(2): 299~306  
Chen Mengsha, Huang Baoqi, Niu Yaocheng *et al.* Paleoceanographic variations of the northern South China Sea from site 17924 during marine isotope stage 3. *Quaternary Sciences*, 2011, **31**(2): 299~306
- 23 杨文瑜, 黄宝琦, 肖 洁等. 南海西部浮游有孔虫记录 MIS 3 期表层海洋环境变化. 第四纪研究, 2008, **28**(3): 437~446  
Yang Wenyu, Huang Baoqi, Xiao Jie *et al.* Environmental changes of surface sea recorded in planktonic foraminifera during MIS 3 in the western South China Sea. *Quaternary Sciences*, 2008, **28**(3): 437~446
- 24 Yang Xiaoqiang, Heller Friedrich, Wu Nengyou *et al.* Geomagnetic paleointensity dating of South China Sea sediments for the last 130 kyr. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, **284**(1~2): 258~266
- 25 李粹中. 南海深海短柱样的磁性地层学特征. 沉积学报, 1994, **12**(3): 136~142  
Li Cui Zhong. The magnetostratigraphic characteristics of some shorter cores from the deep South China Sea basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1994, **12**(3): 136~142
- 26 侯红明, 王保贵, 汤贤赞. 南海北部沉积物磁化率对古气候非线性变化的响应. 热带海洋, 1996, **15**(3): 1~5  
Hou Hongming, Wang Baogui, Tang Xianzan. A response to paleoclimatic nonlinear variations from sediment magnetic susceptibility in northern South China Sea. *Tropic Oceanology*, 1996, **15**(3): 1~5
- 27 汤贤赞, 陈木宏, 刘建国等. 南沙群岛海区 NS97-13 柱样沉积物磁化率各向异性研究. 海洋学报, 2009, **31**(6): 69~76  
Tang Xianzan, Chen Muhong, Liu Jianguo *et al.* The anisotropy of magnetic susceptibility of core NS97-13 sediments from the Nansha Islands sea area in the southern South China Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 2009, **31**(6): 69~76
- 28 陈 忠, 陈 翰, 颜 文等. 南海北部白云凹陷 08CF7 岩芯沉积物的磁化率特征及其意义. 现代地质, 2010, **24**(3): 515~520  
Chen Zhong, Chen Han, Yan Wen *et al.* Characteristics and implications of magnetic susceptibility of sediments in core 08CF7 from the Baiyun Sag in northern South China Sea. *Geoscience*, 2010, **24**(3): 515~520
- 29 苏 正, 曹运城, 杨 睿等. 南海北部神狐海域天然气水合物成藏演化分析研究. 地球物理学报, 2012, **55**(5): 1764~1774  
Su Zheng, Cao Yuncheng, Yang Rui *et al.* Analytical research on evolution of methane hydrate deposits in Shenhu area, northern South China Sea. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, **55**(5): 1764~1774
- 30 Dunlop D J, Ozdemir O. *Rock Magnetism: Fundamentals and Frontiers*. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. 1~573
- 31 Wang X S, Løvlie R, Pu S *et al.* Magnetic signature of environmental change reflected by Pleistocene lacustrine sediments from the Nihewan basin, North China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2008, **260**(3~4): 452~462
- 32 Roberts A P, Turner G M. Diagenetic formation of ferrimagnetic iron sulphide minerals in rapidly deposited marine sediments, South Island, New Zealand. *Earth Planetary Science Letter*, 1993, **115**(1~4): 257~273
- 33 Thompson R. Environmental applications of magnetic measurements. *Science*, 1980, **207**(4430): 481~486
- 34 Thompson R, Oldfield F. *Environmental Magnetism*. London: Allen & Unwin, 1986. 1~227
- 35 王 建, 刘泽纯, 姜文英等. 磁化率与粒度、矿物的关系及其古环境意义. 地理学报, 1996, **51**(2): 155~163  
Wang Jian, Liu Zechun, Jiang Wenyong *et al.* A relationship between susceptibility and grain-size and minerals, and their paleo-environmental implications. *Acta Geographica Sinica*, 1996, **51**(2): 155~163
- 36 郭 斌, 朱日祥, 白立新等. 黄土沉积物的岩石磁学特征与土壤化作用的关系. 中国科学 (D 辑), 2001, **31**(5): 376~386  
Guo Bin, Zhu Rixiang, Bai Lixin *et al.* Rock magnetic properties of a loess-paleosol in the Chinese Loess Plateau. *Science in China (Series D)*, 2001, **31**(5): 376~386
- 37 刘青松, 邓成龙, 潘永信. 磁铁矿和磁赤铁矿磁化率的温度和频率特性及其环境磁学意义. 第四纪研究, 2007, **27**(6): 954~962  
Liu Qingsong, Deng Chenglong, Pan Yongxin. Temperature-dependency and frequency-dependency of magnetic susceptibility of

- magnetite and maghemite and their significance for environmental magnetism. *Quaternary Sciences*, 2007, **27**(6): 954~962
- 38 郑妍, 郑洪波, 邓成龙等. 还原成岩作用对磁性矿物的影响及古气候意义: 以长江口水下三角洲岩芯 YD0901 沉积物为例. 第四纪研究, 2012, **32**(4): 655~662  
Zheng Yan, Zheng Hongbo, Deng Chenglong *et al.* Diagenetic alteration on magnetic minerals and the paleoclimate implications, results from core YD0901 of Yangtze subaqueous delta. *Quaternary Sciences*, 2012, **32**(4): 655~662
- 39 赵国永, 刘秀铭, 吕 斌等. 全新世黄土记录的古气候演化及磁化率和粒度参数灵敏度探讨. 第四纪研究, 2012, **32**(4): 777~784  
Zhao Guoyong, Liu Xiuming, Lü Bin *et al.* The paleoclimatic evolution recorded by Holocene loess and discussing on the parameter sensitivity of magnetic susceptibility and medium particle diameter. *Quaternary Sciences*, 2012, **32**(4): 777~784
- 40 胡忠行, 张卫国, 董辰寅等. 东海内陆架沉积物磁性特征对早期成岩作用的响应. 第四纪研究, 2012, **32**(4): 670~678  
Hu Zhongxing, Zhang Weiguo, Dong Chenyin *et al.* Influence of early diagenesis on magnetic properties of inner shelf deposits of the East China Sea. *Quaternary Sciences*, 2012, **32**(4): 670~678
- 41 刘彩彩, 邓成龙. 南方红土的磁性矿物组成及其区域性差异. 第四纪研究, 2012, **32**(4): 626~634  
Liu Caicai, Deng Chenglong. Magnetic mineralogy of the red soil sequences in Southern China and its variety. *Quaternary Sciences*, 2012, **32**(4): 626~634
- 42 Verosub K L, Roberts A P. Environmental magnetism: Past, present, and future. *Journal of Geophysical Research*, 1995, **100**(B2): 2175~2192
- 43 John King, Subir K Banerjee, James Marvin *et al.* A comparison of different magnetic methods for determining the relative grain size of magnetite in natural materials: Some results from lake sediments. *Earth and Planetary Science Letters*, 1982, **59**(2): 404~419
- 44 Maher B. Magnetic properties of some synthetic sub-micron magnetites. *Geophysical Journal International*, 1988, **94**(1): 83~86
- 45 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. *Journal of Geophysical Research*, 2002, **107**(B3): EPM 5- (1~15)
- 46 邓成龙, 刘青松, 潘永信等. 中国黄土环境磁学. 第四纪研究, 2007, **27**(2): 193~209  
Deng Chenglong, Liu Qingsong, Pan Yongxin *et al.* Environment magnetism of Chinese loess-paleosol sequences. *Quaternary Sciences*, 2007, **27**(2): 193~209
- 47 李冠华, 夏敦胜, 温仰磊等. 天山北麓典型黄土沉积序列的磁学特征及主控因子初探. 第四纪研究, 2013, **33**(5): 899~910  
Li Guanhua, Xia Dunsheng, Wen Yanglei *et al.* Rock magnetism of the loess/paleosol sequences in north of the Tianshan Mountains, Northwest China. *Quaternary Sciences*, 2013, **33**(5): 899~910
- 48 脱世博, 方小敏, 宋春晖等. 青藏高原东北部西宁盆地晚渐新世-早中新世沉积物岩石磁学特征及其古环境意义. 第四纪研究, 2013, **33**(5): 829~838  
Tuo Shibo, Fang Xiaomin, Song Chunhui *et al.* Rock magnetic characteristics of the Late Oligocene to Early Miocene sediments in the Xining basin, northeastern Tibetan Plateau. *Quaternary Sciences*, 2013, **33**(5): 829~838
- 49 常秋芳, 常 宏. 罗布泊 Ls2 孔近 7.1Ma 以来沉积物的环境磁学研究. 第四纪研究, 2013, **33**(5): 876~888  
Chang Qiufang, Chang Hong. The environmental magnetism study of core Ls2 in Lop Nur, Tarim since 7.1Ma. *Quaternary Sciences*, 2013, **33**(5): 876~888
- 50 Wang Lüjiang, Michael Sarnthein. Holocene variation in Asian monsoon moisture: A bi-decadal sediment record from the South China Sea. *Geophysical Research Letters*, 1999, **26**(18): 2889~2892
- 51 王律江, Sarnthein M. 南海北部陆坡近四万年来的高分辨率古海洋学记录. 第四纪研究, 1999, (1): 27~31  
Wang Lüjiang, Sarnthein M. High-resolution paleoceanographic records during the last 40000 years from the northern slope of the South China Sea. *Quaternary Sciences*, 1999, (1): 27~31
- 52 刘志飞, 李夏晶, Colin Christophe 等. 南海北部末次冰盛期以来高分辨率粘土矿物记录及其时间序列物源区分析. 科学通报, 2010, **55**(29): 2852~2862  
Liu Zhifei, Li Xiajing, Colin Christophe *et al.* A high-resolution caly mineralogical record in the northern South China Sea since the Last Glacial Maximum, and its time series provenance analysis. *Chinese Science Bulletin*, 2010, **55**(29): 2852~2862
- 53 Liu Jianguo, Xiang Rong, Chen Zhong *et al.* Sources, transport and deposition of surface sediments from the South China Sea. *Deep-Sea Research I*, 2013, **71**: 92~102
- 54 邵 磊, 赵 梦, 乔培军等. 南海北部沉积物特征及其对珠江演变的响应. 第四纪研究, 2013, **33**(4): 760~770  
Shao Lei, Zhao Meng, Qiao Peijun *et al.* The characteristics of the sediment in northern South China Sea and its response to the evolution of the Pearl River. *Quaternary Sciences*, 2013, **33**(4): 760~770
- 55 Huang Jie, Li Anchun, Wan Shiming. Sensitive grain-size records of Holocene East Asian summer monsoon in sediments of northern South China Sea slope. *Quaternary Research*, 2011, **75**(3): 734~744
- 56 Evans M E, Heller F. Environmental Magnetism: Principles and Applications of Environmagnetics. Oxford (UK): Academic Press, 2003. 1~299
- 57 罗 祎, 苏 新, 陈 芳等. 南海北部 DSH-1C 柱状样晚更新世以来沉积物磁性特征及其环境意义. 现代地质, 2010, **24**(3): 521~527  
Luo Yi, Su Xin, Chen Fang *et al.* Magnetic properties of Late Pleistocene sediments in core DSH-1C from northern South China Sea and their environment significance. *Geoscience*, 2010, **24**(3): 521~527
- 58 孟庆勇, 李安春, 靳 宁等. 东非律滨海柱状沉积物的磁性特征. 海洋地质与第四纪研究, 2006, **26**(3): 57~63  
Meng Qingyong, Li Anchun, Jin Ning *et al.* Magnetostratigraphic and magnetic properties of marine sediments from the East Philliping Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2006, **26**(3): 57~63
- 59 Liu Jianguo, Chen Zhong, Chen Muhong *et al.* Magnetic susceptibility variations and provenance of surface sediments in the South China Sea. *Sedimentary Geology*, 2010, **230**(1~2): 77~85
- 60 葛黄敏, 李前裕, 成鑫荣等. 南海北部晚第四纪高分辨率浮游氧同位素地层学及其古气候信息. 地球科学——中国地质大学学报, 2010, **35**(4): 515~525  
Ge Huangmin, Li Qianyu, Cheng Xinrong *et al.* Late Quaternary high resolution monsoon records in planktonic stable isotopes from northern South China Sea. *Earth Science—Journal of China University of Geoscience*, 2010, **35**(4): 515~525
- 61 鲍才旺. 珠江口陆架区埋藏古河道与古三角洲. 海洋地质与第四纪地质, 1995, **15**(2): 25~34

- Bao Caiwang. Buried ancient channels and deltas in the Zhujiang River mouth shelf area. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1995, **15**(2): 25~34
- 62 Hanebuth T, Statterger K, Bojanowski A. Termination of the Last Glacial Maximum sea-level lowstand: The Sunda-Shelf data revisited. *Global and Planetary Change*, 2009, **66**(1~2): 76~84
- 63 周 斌, 郑洪波, 杨文光等. 末次冰期以来南海北部沉积有机碳记录及其古植被环境信息. 第四纪研究, 2011, **31**(3): 498~505
- Zhou Bin, Zheng Hongbo, Yang Wenguang *et al.* Organic carbon records since the last glacial period in the northern South China Sea sediments: Implications for vegetation and environmental changes. *Quaternary Sciences*, 2011, **31**(3): 498~505
- 64 金海燕, 翦知湮, 谢 昕等. 南海北部晚第四纪高分辨率元素比值反映的东亚季风演变. 第四纪研究, 2011, **31**(2): 207~215
- Jin Haiyan, Jian Zhimin, Xie Xin *et al.* Late Quaternary East Asian monsoonal evolution recorded by high resolution elemental ratios in the northern South China Sea. *Quaternary Sciences*, 2011, **31**(2): 207~215
- 65 Lin Dacheng, Chen Minte, Masanobu Y *et al.* Precisely dated AMS<sup>14</sup>C marine cores reveal the complexity of millennial-scale Asian monsoon variability in the northern South China Sea (MD972146, MD972148). *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, **69**: 93~101
- 66 杨文光. 南海北部末次冰期以来高分辨率的沉积学记录及其古环境演化. 上海: 同济大学博士研究生毕业论文, 2008. 1~135
- Yang Wenguang. High-resolution Sedimentary Records and Paleoenvironmental Evolution in Northern South China Sea from the Last Glacial Period. Shanghai: The Doctor's Thesis of Tongji University, 2008. 1~135
- 67 Sun X, Li X. A pollen record of the last 37ka in deep sea core 17940 from the northern South China Sea. *Marine Geology*, 1999, **156**(1~4): 227~244
- 68 Sun X, Li X, Luo Y *et al.* The vegetation and climate at the last glaciation on the emerged continental shelf of the South China Sea. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 2000, **160**(3~4): 301~316
- 69 Sun Xiangjun, Li Xun, Chen Huaicheng. Evidence for natural fire and climate history since 37ka BP in the northern part of South China Sea. *Science in China (Series D)*, 2000, **43**(5): 487~493
- 70 Lambeck Kurt, Chappell John. Sea level change through the last glacial cycle. *Science*, 2001, **292**: 679~686
- 71 Waelbroeck C, Labeyrie L, Michel E *et al.* Sea-level and deep water temperature changes derived from benthonic foraminifera isotopic records. *Quaternary Science Reviews*, 2002, **21**(1~3): 295~305
- 72 Bond G C, Broecker W S, Johnsen S *et al.* Correlations between climate records and North Atlantic sediments and Greenland Ice. *Nature*, 1993, **365**: 143~147
- 73 Dansgaard W, Johnsen SJ, Clausen H B *et al.* Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. *Nature*, 1993, **364**: 218~220
- 74 Ge Qian, Chu Fengyou, Xue Zuo *et al.* Paleoenvironmental records from the northern South China Sea since the Last Glacial Maximum. *Acta Oceanologica Sinica*, 2010, **29**(3): 46~62
- 75 贺 娟, 赵美训, 李 丽等. 南海北部 MD05-2904 沉积柱状样 26 万年以来表层海水温度及陆源生物标志物记录. 科学通报, 2008, **53**(11): 1324~1331
- He Juan, Zhao Meixun, Li Li *et al.* Sea surface temperature and terrestrial biomarker records of the last 260ka of core MD05-2904 from the northern South China Sea. *Chinese Science Bulletin*, 2008, **53**(11): 1324~1331
- 76 范维佳, 陈荣华. 南海北部 5 万年来的表层海水盐度及东亚季风降水. 第四纪研究, 2011, **31**(2): 227~235
- Fan Weijia, Chen Ronghua. Sea surface salinity and East Asian monsoon precipitation since the last 50000 years in the northern South China Sea. *Quaternary Sciences*, 2011, **31**(2): 227~235
- 77 杨文光, 郑洪波, 谢 昕等. 南海北部陆坡沉积记录的全新世早期夏季风极强事件. 第四纪研究, 2008, **28**(3): 425~430
- Yang Wenguang, Zheng Hongbo, Xie Xin *et al.* East Asian summer monsoon maximum records in northern South China Sea during the Early Holocene. *Quaternary Sciences*, 2008, **28**(3): 428~430
- 78 Hu Dengke, Philipp B, Cornelia M *et al.* Deep sea records of the continental weathering and erosion response to East Asian monsoon intensification since 14ka in the South China Sea. *Chemical Geology*, 2012, **326~327**: 1~18
- 79 Wang Shuyun, Lü Houyuan, Liu Jiaqi *et al.* The Early Holocene optimum inferred from a high-resolution pollen record of Huguangyan Maar Lake in Southern China. *Chinese Science Bulletin*, 2007, **52**(20): 2829~2836
- 80 Zhou Weijian, Yu Xuefeng, Jull A J *et al.* High-resolution evidence from Southern China of an Early Holocene optimum and a mid-Holocene dry event during the past 18,000 years. *Quaternary Research*, 2004, **62**(1): 39~48
- 81 Li Yongxiang, Tornqvist T E, Nevitt J M *et al.* Synchronizing a sea-level jump, final Lake Agassiz drainage, and abrupt cooling 8200 years ago. *Earth and Planetary Science Letters*, 2012, **315~316**: 41~50
- 82 Zong Yongqiang. Mid-Holocene sea-level highstand along the southeast coast of China. *Quaternary International*, 2004, **117**(1): 55~67
- 83 谢志仁, 袁林旺. 略论全新世海面变化的波动性及其环境意义. 第四纪研究, 2012, **32**(6): 1065~1077
- Xie Zhiren, Yuan Linwang. Fluctuation characteristics of Holocene sea-level change and its environmental implications. *Quaternary Sciences*, 2012, **32**(6): 1065~1077
- 84 赵希涛, 张景文. 中国沿海全新世海面变化的基本特征. 第四纪研究, 1985, (2): 104~109
- Zhao Xitao, Zhang Jingwen. The primary characteristics of the off shore change Holocene in China littoral. *Quaternary Sciences*, 1985, (2): 104~109
- 85 Zong Y, Huang G, Switzer AD *et al.* An evolutionary model for the Holocene formation of the Pearl River delta, China. *The Holocene*, 2009, **19**(1): 129~142
- 86 Caruso M J, Gawarkiewicz G G, Beardsley R C. Interannual variability of Kuroshio intrusion in the South China Sea. *Journal of Oceanography*, 2006, **62**(4): 559~575
- 87 Liu Zhifei, Tuo Shouting, Colin Christophe *et al.* Detrital fine grained sediment contribution from Taiwan to the northern South China Sea and its relation to regional ocean circulation. *Marine Geology*, 2008, **255**(3~4): 149~155

## ENVIRONMENTAL CHANGES AS RECORDED BY MINERAL MAGNETIC PROPERTIES OF SEDIMENTS FROM THE CORE GHE24L, SOUTH CHINA SEA

Wang Shipeng<sup>①</sup> Li Yongxiang<sup>①</sup> Fu Shaoying<sup>②</sup> Xiang Rong<sup>③</sup> Hu Jianfang<sup>④</sup>

(<sup>①</sup>State key Laboratory for Mineral Deposits Research, School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210046;

<sup>②</sup>Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510760; <sup>③</sup>South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences,

Guangzhou 510301; <sup>④</sup>Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640)

### Abstract

Lots of achievements about the paleoceanographic and paleoenvironmental evolution of the South China Sea (SCS) have been obtained on the glacial-interglacial time scales using multiple proxies including stable isotopes, spores, pollen and so on. Magnetic proxies have not been used extensively on studying the SCS sediments, despite that it has been demonstrated to be a very useful tool in reconstructing the evolution of the SCS. To better understand the environmental significance of magnetic properties of sediments from the SCS, we have conducted a detailed environmental magnetic study of sediments from the Core GHE24L, which was retrieved from water depth 1387m from the Shenhu Water of the northern SCS. It is 5.96m long and consists of light grey mud and silty mud. After the core was split, a total of 286 samples were collected every 2cm from the working half using 8-cm<sup>3</sup> plastic cubes. A number of magnetic parameters have been measured for these samples including magnetic susceptibility ( $\chi$ ), anhysteretic remanent magnetization (ARM), isothermal remanent magnetization (IRM) acquisition curve, saturation IRM (SIRM), magnetic hysteresis and so on. The results show that  $\chi$  varies from  $19.47 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$  to  $33.84 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ ,  $\chi_{\text{ARM}}$  ranges from  $40.56 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$  to  $59.44 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$ , and that SIRM range is between  $27.35 \times 10^{-4} \text{ Am}^2/\text{kg}$  and  $50.05 \times 10^{-4} \text{ Am}^2/\text{kg}$ ,  $S_{\text{-ratio}}$  is close to 1. These data indicate that pseudo-single domain magnetite grains dominate the sediments and sediments appear to have faithfully recorded environmental changes of the study area for the past ca.20ka. Changes in the content and grain size of magnetic minerals of the sediments were mainly controlled by the terrigenous input, which is in turn governed by climate changes by modulating weathering processes. By comparing the variations of different magnetic parameters of the Core GHE24L with the  $\delta^{18}\text{O}$  of the nearby Core 17940, which is very well-dated and deemed as a reference for the northern SCS, we found that changes in magnetic characteristics of the sediments record three distinct stages of evolution. Stage I, from 20.80ka to 18.74ka, is characterized by high  $\chi$ , SIRM, and low  $\chi_{\text{ARM}}/\chi$  and  $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ , indicating enhanced terrigenous input and the dominance of coarser component of magnetic grains during the LGM. Stage II, from 18.74ka to 11.31ka, is characterized by fluctuations of various magnetic parameters, particularly those indicative of grain size variations. These magnetic parameters recorded major climate shifts of this region including the Heinrich 1 event, Bølling-Allerød warm event, Younger Dryas event during Stage II. Stage III, from 11.31ka to 0.36ka, recorded strengthening of Asian Summer Monsoon during early Holocene and the surface circulation in South China Sea, which may have carried coarse sediments from offshore Taiwan to the northern slope of the South China Sea, leading to gradually coarsening upward during the Mid- to Late Holocene. This study not only provides a basis for the SCS' paleoenvironmental reconstruction from Last Glacial Maximum, but also can provide some constraints for exploring the coupling link about land-sea interactions of the Earth system.

**Key words** South China Sea, environmental magnetism, Last Glacial Maximum