



南海西北部16 kaBP以来沉积物的环境磁学特征及其物源指示意义

肖春风, 孙启顺, 陈亮, 殷征欣, 陈龙, 官玉龙, 章钰桢, 姜兆霞

Environmental magnetic characteristics and provenance significance of sediments in NW South China Sea since the past 16 ka

XIAO Chunfeng, SUN Qishun, CHEN Liang, YIN Zhengxin, CHEN Long, GUAN Yulong, ZHANG Yuzhen, and JIANG Zhaoxia

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022091301>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

南海北部神狐海域SH37岩芯浊流沉积及其物源分析

Turbidity deposits and their provenance: evidence from core SH37 in Shenhu area of the South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 101

江苏中部海岸晚第四纪沉积物的粒度与磁化率特征及其古环境意义

Characteristics of grain size and magnetic susceptibility of the Late Quaternary sediments from core 07SR01 in the middle Jiangsu coast and their paleoenvironmental significances

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 210

南海南部浅表层柱状沉积物孔隙水地球化学特征对甲烷渗漏活动的指示

Pore water geochemistry of shallow surface sediments in the southern South China Sea and its implications for methane seepage activities

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 112

南海北部陆坡神狐海域SH-CL38站位的粒度特征及沉积记录

Sediment grain size characteristics of the Core SH-CL38 in the Shenhu area on the northern continental slope of the South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 90

南海南部海陆过渡相烃源岩的两类分布模式

Two distribution patterns of the marine-continental transitional source rocks in the southern South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 173

构造-沉积耦合过程的数值模拟：以南海北部阳江凹陷为例

Numerical modeling of the coupling between strike-slip faulting and sedimentation: A case from the Yangjiang Sag of northern South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 139



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

肖春风, 孙启顺, 陈亮, 等. 南海西北部 16 kaBP 以来沉积物的环境磁学特征及其物源指示意义 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(1): 13-26.

XIAO Chunfeng, SUN Qishun, CHEN Liang, et al. Environmental magnetic characteristics and provenance significance of sediments in NW South China Sea since the past 16 ka[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2023, 43(1): 13-26.

南海西北部 16 kaBP 以来沉积物的环境磁学特征及其物源指示意义

肖春风^{1,2}, 孙启顺³, 陈亮^{4,5}, 殷征欣^{4,5}, 陈龙^{1,2}, 官玉龙^{1,2}, 章钰桢^{1,2}, 姜兆霞^{1,2}

1. 中国海洋大学深海圈层与地球系统教育部前沿科学中心, 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 海洋地球科学学院, 青岛 266100

2. 崂山实验室海洋地质与环境功能实验室, 青岛 266237

3. 中国海洋大学崇本学院, 青岛 266100

4. 国家海洋局南海调查技术中心, 广州 510300

5. 自然资源部海洋环境探测技术与应用重点实验室, 广州 510300

摘要:南海是西太平洋最大的边缘海,对东亚季风和全球气候变化具有敏感响应,然而目前对南海沉积物的物源分析仍存在众多争议。对南海琼东南盆地 SCS-02 孔的沉积物样品进行了系统的磁学分析,旨在通过环境磁学参数追踪沉积物的来源。结果表明,SCS-02 岩芯的磁性矿物主要为磁铁矿和赤铁矿。自 16 kaBP 以来,磁性矿物的粒径和成分发生了系统变化,指示了沉积物源-汇过程的改变。15.5~16 kaBP 期间,磁化率较高,粒径较粗,矫顽力也较高。海平面比现今低 100 多米,莺歌海出露于海平面以上,古红河河口距研究区较近,红河的物质可以较容易到达沉积区,因此该时期红河贡献较大,珠江和台湾贡献较小。7.5~15.5 kaBP 期间,随着海平面的迅速上升,磁性矿物组成和粒度发生了变化,总的磁性矿物含量减少,磁铁矿的含量逐渐增加,粒度变细,表明随着海平面的升高,珠江和台湾的贡献有所增加。7.5 kaBP 以来,现代的海陆格局基本形成,磁性矿物组成和粒度变化较稳定,沉积物主要来源于红河和珠江。因此,环境磁学参数可以指示南海西北部沉积物的源-汇变化,为海平面变化和气候演化研究提供有效参考。

关键词:环境磁学;磁性矿物;源-汇信息;南海西北部

中图分类号:P736.21

文献标识码:A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2022091301

Environmental magnetic characteristics and provenance significance of sediments in NW South China Sea since the past 16 ka

XIAO Chunfeng^{1,2}, SUN Qishun³, CHEN Liang^{4,5}, YIN Zhengxin^{4,5}, CHEN Long^{1,2}, GUAN Yulong^{1,2}, ZHANG Yuzhen^{1,2}, JIANG Zhaoxia^{1,2}

1. *Frontiers Science Center for Deep Ocean Multispheres and Earth System, Key Lab of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, MOE, College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China*

2. *Laboratory for Marine Geology, Laoshan Laboratory, Qingdao 266237, China*

3. *Chongben Honors College, Ocean University of China, Qingdao 266100, China*

4. *South China Sea Marine Survey and Technology Center, State Oceanic Administration, Guangzhou 510300, China*

5. *Key Laboratory of Marine Environmental Survey Technology and Application, Ministry of Natural Resources, Guangzhou 510300, China*

Abstract: As the largest marginal sea in the western Pacific Ocean, South China Sea (SCS) is sensitive to the East Asian monsoon and global climate change. The provenance of SCS sediments remains controversial. We carried out a systematic magnetic analysis on Core SCS-02 from the Qiongdongnan Basin, to trace the origin of sediments. Results show that the magnetic carriers of Core SCS-02 sediment are mainly magnetite and hematite. Since 16 kaBP, the particle size and magnetic mineralogy have shown systematic changes, indicating the change of the sedimentary source-sink process. During 15.5~16 kaBP, the sediments were with higher magnetic susceptibility, coarser grain size, and higher coercivity. The sea level was 100 m below the modern one, and the Yingge Sea was above the ancient sea level. The ancient Red River estuary was closer to the study area, leading to more material transported from the old Red River to the depositional area. During 7.5~15.5 kaBP, sea

资助项目:崂山实验室科技创新项目“基于数字孪生的全球深时地貌重塑与资源环境预测(LSKJ202204400);国家自然科学基金优秀青年基金“古地磁学”(41922026);国家自然科学基金创新群体项目“海底古地貌动态重建”(42121005);国家自然科学基金面上项目“红层的重磁化机制:实验模拟与天然样品综合研究”(42274089)

作者简介:肖春风(1997—),女,硕士研究生,主要从事海洋沉积物环境磁学研究, E-mail: xcf@stu.ouc.edu.cn

通讯作者:姜兆霞(1987—),女,教授,主要从事环境磁学研究, E-mail: jiangzhaoxia@ouc.edu.cn

收稿日期:2022-09-13; **改回日期:**2022-11-28. 文凤英编辑

level rose rapidly, the total content of magnetic minerals decreased, but the relative content of magnetite gradually increased, and the magnetic particles became finer, indicating that the contribution of ancient Pearl River and Taiwan increased with the rise of sea level. Since 7.5 kaBP, the modern land and sea pattern had been formed fundamentally, changes in magnetic mineral composition and particle size stabilized relatively, and the sediments were mainly from the modern Red River and the Pearl River. Therefore, the environmental magnetic parameters are good proxies for the source-sink changes of sediments in the South China Sea, and provide an effective reference for the studies of sea level change and climate evolution.

Key words: environmental magnetism; magnetic minerals ; source-sink information; South China Sea

南海周边陆地及岛屿是全球表层陆地风化剥蚀作用最强、剥蚀速率最大的地区, 河流系统发达, 南海每年接收周边河流输入的沉积物超过7亿t, 主要包括珠江、红河和湄公河^[1-2]。大量河流碎屑物的输入使南海具有较高的沉积速率, 而这些巨量的陆源物质在搬运沉积过程中极易受到东亚季风和洋流活动的影响, 因此, 南海沉积物不仅记录了区域物源的环境信息, 还记录了南海对全球气候变化的响应^[3-6]。然而, 海洋沉积物从源到汇最终沉积成岩是一个复杂的作用过程, 受到多种因素的影响, 如陆源区的风化剥蚀、河流和海流的搬运作用、生物作用的影响等^[7]。

物源的分析方法和手段较多, 目前在南海应用较多的是黏土矿物学、同位素地球化学和元素地球化学方法^[8-12]。刘志飞等^[12-14]利用黏土矿物学方法分析了南海北部 ODP1146 站位柱状沉积物的黏土矿物, 发现高岭石主要来源于珠江, 伊利石和绿泥石来源于台湾, 蒙脱石和混层黏土矿物主要来源于吕宋岛和印支半岛, 但是沉积物中黏土矿物的组成受到多种因素的影响, 具有很强的迁移性, 黏土矿物学的方法存在多解性^[7, 15-16]。Chen 等^[17]对南海北部 MD12-3432 站位柱状沉积物进行了磁学分析, 发现冰期-间冰期的磁性存在周期性变化, 冰期时磁铁矿与磁黄铁矿含量增加, 磁性颗粒粒度变粗, 这种周期性变化除了与河流和海洋输送的碎屑物有关外, 也与风尘沉积相关。Xu 等^[18]利用地球化学方法分析了南海西北部陆架区 X2 站位柱状沉积物的物源, 根据上陆壳归一化 REE 模式和 REE 分馏参数, 认为台湾西南部和西部河流及珠江为海南岛西北部陆架区细粒沉积物的主要来源。虽然前人对于南海北部的物源进行了很多探索, 但仍存在争议。

本研究以南海西北部琼东南盆地 SCS-02 岩芯为研究对象, 通过对深海沉积物的磁性矿物类型、含量及粒度等磁学参数的测试分析, 探讨了研究区的沉积物来源, 并辅以稀土元素验证磁学对物源分析的准确性, 在得到准确的物源信息基础上, 探讨其影响因素。环境磁学可以通过物质的磁性测量, 分析其磁性矿物类型、含量和粒度等特征, 利用环

境磁学参数可以追踪海洋沉积物的来源及其携带的环境信息。另外, 与传统的研究方法相比, 环境磁学具有适用性广、灵敏度高、非破坏性的优点^[19-20]。陆源物质经历了从源到汇的搬运沉积过程, 磁性基本保持稳定状态, 其在海洋中的分布是海平面变化和海洋环流相互作用的结果, 因此可以为古海洋的重建提供丰富的数据支撑^[21]。稀土元素 (REE) 具有性质稳定、在河水和海水中非常难溶且易于被检测追踪的特征, 也是沉积物来源的有效示踪剂^[7], 因此本研究将稀土元素地球化学方法与磁学方法相结合, 以得到准确的物源信息。

1 区域概况

琼东南盆地位于南海西北陆坡, 是北部陆架、海南岛、西沙海槽和西沙群岛之间的交汇地带, 汇集来自南海各方的沉积物, 是研究沉积物来源的理想场所 (图 1)。南海北部陆坡流、南海暖流、广东沿岸流及与之相关的夏季上升流和冬季下降流等构成了南海北部典型的流系^[22]。南海表层海水的冬季风环流以及沿岸流可将红河、珠江等携带的物质向南输送, 南海夏季风环流可将南部湄公河流域的碎屑物质向北部及中央海盆输送, 台湾岛西岸的高屏溪、曾文溪等河流输入物质, 可通过台湾海峡与南下的沿岸流携带的长江物质一起被带入南海北部。此外, 海南岛独特的地形和气候条件利于地表径流的物质剥蚀和搬运入海, 从而也可以为海南岛周边海域提供一定的沉积物质^[23]。进入南海后, 河流沉积物通过各种沿岸流、表层和深层/底层洋流进一步输送, 这些洋流与东亚季风以及通过吕宋海峡从西太平洋侵入的黑潮和深水环流相关。

珠江作为华南地区最大的河流, 是南海北部最重要的物源^[24]。在冬季环流的作用下, 珠江携带的碎屑物质注入南海北部后, 一部分随着洋流被搬运到南海西北部的琼东南盆地, 另一部分继续输送到南海南部和中央海盆。在夏季环流的作用下, 则随着洋流往东北方向搬运^[12]。自晚更新世以来, 红河就是南海西北部地区的重要物源, 红河起源于云南

省中部, 沿哀牢山红河断裂带向东南方向流经越南境内, 经北部湾注入南海(图 1)^[11]。虽然红河每年的输沙量低于珠江, 但对于南海西北部而言, 红河的贡献可能更高。湄公河为南海南部地区的主要物源, 其发源于青藏高原, 于越南流入南海流域, 流域内气候主要为亚热带、热带季风气候^[12, 25]。除了以上三条主要河流以外, 台湾岛上的河流如浊水溪、高屏溪和曾文溪等也为南海北部贡献了大量物质^[26]。吕宋岛的河流输沙量较小, 主要为南部的 Pampanga 河以及西南部的 Ango 河^[27]。

2 材料和方法

2.1 取样和岩性

国家海洋局南海调查技术中心于 2019 年 11 月

在南海北部琼东南盆地用重力活塞取样器获得 SCS-02 柱状样(图 1), 取样位置 16°45'N、110°18'E, 位于南海西沙, 水深 1400 m, 岩芯总长度 254 cm。柱状样沉积物主要为黄绿色软泥。在剖开的新鲜面上用 2.0 cm×2.0 cm×2.0 cm 无磁立方体塑料盒采集定向样品, 取样间距为 2 cm, 共取样 126 个。

2.2 年代学测量

选取 5 个不同深度的散样进行 AMS¹⁴C 测年, 其深度分别为 66~68、132~134、162~164、192~194、246~248 cm。在显微镜下挑选 *G. ruber* 和 *G. sacculifer* 两个属种的有孔虫, 送样至美国 Beta 实验室进行 AMS ¹⁴C 测年。基于校正数据库 Marine 13(针对海相有孔虫样品)和区域 C 储库年龄 ($R=18\pm 37$), 利用 CALLB7.0.4 软件对原始放射性碳年龄数据进行校正, 年代简称为“kaBP”^[37]。

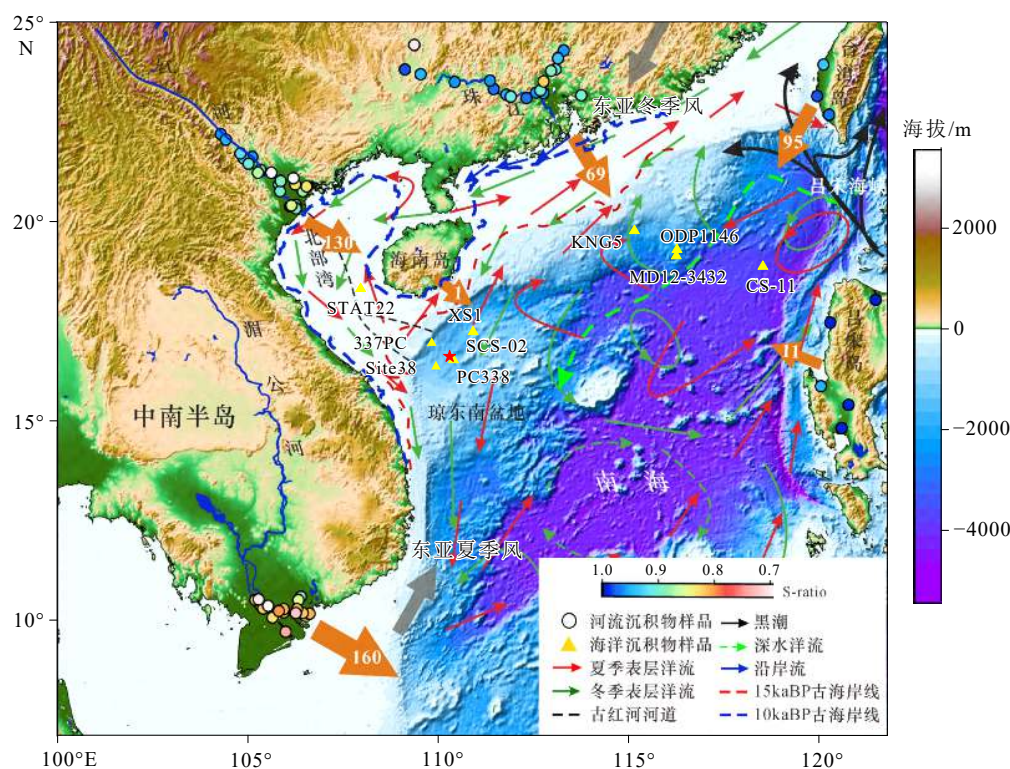


图 1 SCS-02 岩芯位置及南海洋流示意图

圆点为南海周边河流样品, 颜色的变化代表磁性的差异^[1, 28]; 黄色三角形表示前人在南海研究的钻孔 (337PC^[3], MD12-3432^[17], XS1^[29], STA22^[30], Site38^[31], PC338^[32], KNG5^[33], ODP1146^[34], CS-11^[35]); 红色虚线表示 15 kaBP 时南海西北部古海岸线, 蓝色虚线为 10 kaBP 时南海西北部古海岸线^[36]; 黑色虚线为古红河河道; 棕色箭头表示河流输沙量 (Mt/a); 灰色箭头表示东亚季风方向。

Fig.1 Location of core SCS-02 and water currents in the South China Sea

Distribution of the S-ratio in river sediments is illustrated with color coded circles, indicating magnetite versus hematite content^[1, 28]. Yellow triangles indicate previous boreholes studied in the South China Sea (337PC^[3], MD12-3432^[17], XS1^[29], STA22^[30], Site38^[31], PC338^[32], KNG5^[33], ODP1146^[34], CS-11^[35]). The red dashed lines indicate the ancient coastline of the northwestern south China sea at 15 kaBP, The blue dashed lines indicate the ancient coastline of the northwestern south China sea at 10 kaBP^[36]. The black dashed lines indicate paleo-river systems of the red river. The brown arrows show the amount of sediment transported by the river. The gray arrows indicate the East Asian monsoon.

2.3 磁性测试

利用 MFK1-FA 卡帕桥磁化率仪测量所有样品的磁化率各向异性以及高低频体积磁化率, 将体积磁化率进行质量归一化, 获得样品的质量磁化率 χ_{hf} 和 χ_{lf} 。对样品施加 0.05 mT 的直流场和 80 mT 的交变场, 使其获得非磁滞剩磁 (ARM), 经质量归一化以及直流场归一化后, 可以得到非磁滞剩磁磁化率 (χ_{ARM})。室温下用 ASC 脉冲磁强计对无磁性方盒样品施加 1T 外加磁场, 测量饱和等温剩磁 (SIRM), 并随之对样品施加反向 300 mT 的磁场, 测量其反向 IRM, 定义为 IRM_{-300mT} , 进而可计算样品的 S -ratio ($-IRM_{-300mT}/SIRM$)^[38-39]。剩磁测量均利用置于磁屏蔽空间中的 2G-760 岩石超导磁力仪完成。

为了确定岩芯的磁性矿物类型, 选取部分代表性样品, 烘干研磨后利用磁化率仪和温控系统测量样品的磁化率随温度变化 (κ - T) 曲线。所有样品的最高加热温度为 700 °C, 温度梯度为 2 °C/min, 同时为了避免样品在加热过程中发生氧化, 测量均在氩气环境中进行, 氩气流量为 50 mL/min。另外对所有样品进行系统的磁滞回线、反向场退磁曲线和等温剩磁 (IRM) 获得曲线测量, 最大磁场为 0.5 T。计算得到矫顽力 (B_c)、剩余磁化强度 (M_r)、饱和磁化强度 (M_s) 和剩磁矫顽力 (B_{cr})。另外, 为了得到进一步的磁畴状态信息, 对样品进行一阶反转曲线 (FORCs) 测量^[40-41], 所加磁场最高为 0.5 T, 并使用 FORCinel 软件进行处理^[42]。这些实验均使用振荡样品磁力仪 (Lake Shore 8604) 进行测量。

2.4 稀土元素测试

将样品研磨至 200 目后, 称取 40 mg 粉末状样品置于聚四氟乙烯溶样弹中, 加入 0.5 mL 浓硝酸与 1.0 mL 浓氢氟酸, 溶样弹经钢套密封后放入 195 °C 烘箱加热 3 天, 确保彻底消解, 取 6 mL 消解液, 经稀释后利用电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS) 测量样品中的稀土元素。本次测量了 La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb 和 Lu 元素, 将 La-Eu 元素统称为轻稀土元素 (LREE), Gd-Lu 元素统称为重稀土元素 (HREE)。

3 结果

3.1 AMS¹⁴C 测年

AMS¹⁴C 测年结果如图 2 所示, 一共有 5 个年龄

控制点, 岩芯底部 246 cm 的年龄是 15.9 kaBP, 距离顶部 66 cm 处的岩芯样品年龄为 6.0 kaBP, 按照线性内插法获得了岩芯样品的年代框架, 岩芯总体上包含了自末次冰消期约 16 kaBP 以来的连续沉积, 沉积速率为 10.97~96.43 cm/ka。在深度 0~192 cm, 沉积速率为 10.97~14.30 cm/ka, 192 cm 以深处, 沉积速率为 96.43 cm/ka, 其在 15.3 kaBP 发生突变。

3.2 磁性矿物类型

沉积物磁组构 AMS 可以反映沉积时的环境特征 (图 3a)。AMS 结果显示 K_1 -Inc 整体较低, 与水平面近乎平行, AMS 最小轴倾角较高, 与水平面近乎垂直。磁线理 L 多数小于磁面理 F (图 3b), 说明沉积物从底到顶以磁面理发育为主, 样品的磁性颗粒以压扁形为主, 拉长形的磁性颗粒数量较少, 磁化率椭球体的主要方向不明显, 因此沉积物颗粒的取向受水动力条件影响较小, 故 SCS-02 岩芯沉积物是在静水沉积环境中形成的。另外, 磁化率各向异性度 P 与磁线理 L 没有相关性 (图 3c), 说明沉积物的磁组构特征未受明显的水动力作用影响。因此大多数样品的沉积构造未受到明显的外力作用, 沉积环境较为稳定。

磁化率 (χ) 是沉积物中磁性矿物的种类、含量和粒度的综合体现^[20, 43-45]。SCS-02 岩芯的 χ 分布范围为 $7.8544 \times 10^{-8} \sim 14.7872 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$, 随着深度变浅, 磁化率减小 (图 4b)。 χ_{ARM} 变化范围为 $8.716 \times 10^{-7} \sim 2.4407 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$ (图 4e)。 S -ratio 可以反映样品中

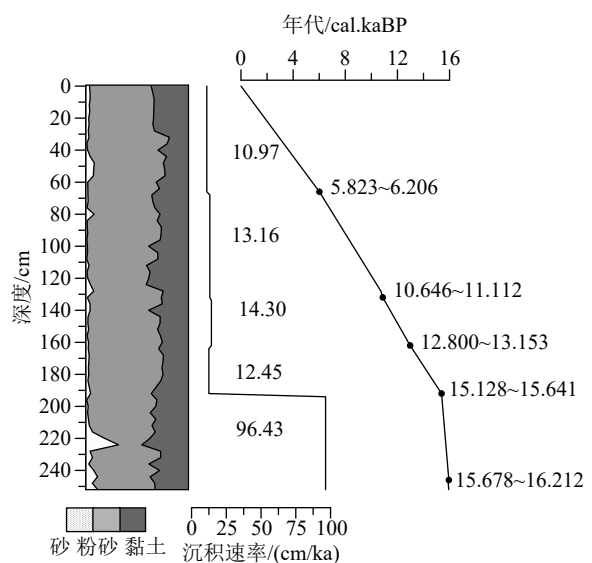


图 2 SCS-02 孔岩性、AMS¹⁴C 年代模型及沉积速率

Fig.2 AMS¹⁴C ages, lithology, age model, and deposition rate of the Core SCS-02

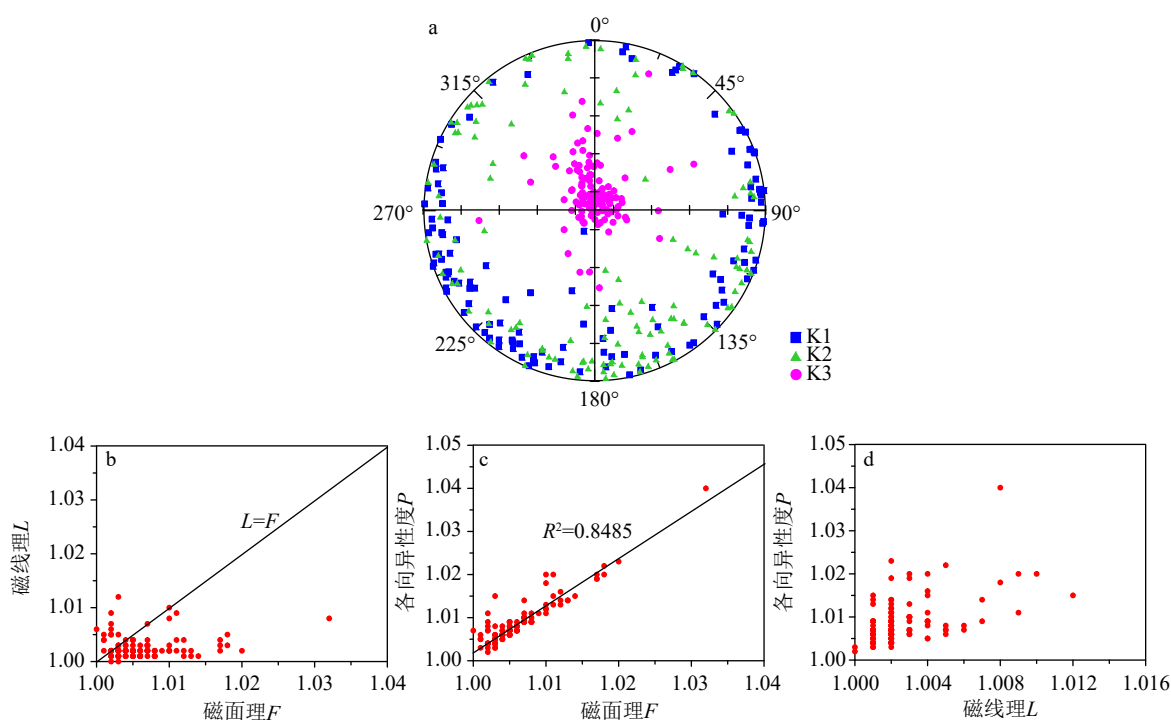


图 3 SCS-02 孔沉积物磁组构特征图

a: AMS 数据等面积投影, b: 磁线理 L 与磁面理 F 投影, c: 各向异性度 P 与磁面理 F 投影, d: 各向异性度 P 与磁线理 L 投影。

Fig.3 Magnetic fabric characteristics of Core SCS-02

a: Equal area projection of AMS data, b: projection of magnetic line and magnetic surface, c: anisotropy and magnetic surface projection, d: anisotropy and magnetic line projection.

亚铁磁性矿物与不完全反铁磁性矿物含量的比例, S -ratio 越接近于 1, 表明亚铁磁性矿物含量占比越高^[46]。样品的 S -ratio 在 200 cm 之上均大于 0.9, 而在 200 cm 之下均低于 0.8, 表明岩芯在 200 cm 之上整体为亚铁磁性矿物占主导, 在 200 cm 以深处可能存在反铁磁性矿物(图 4c)。

根据磁化率随深度的变化趋势, 将岩芯分为 3 段, 分别为 A 段(0~86 cm)、B 段(86~192 cm)和 C 段(192~252 cm)(图 5a)。 κ - T 曲线可以反映加热和冷却过程磁性矿物成分变化, 同时可以识别磁性矿物的种类^[47-48]。A、B、C 段代表性样品的 κ - T 曲线如图 5b-d 所示, 3 个样品的 κ - T 曲线变化趋势大致相同, 在加热过程中, 磁化率逐渐增大, 并在接近 580 °C, 即磁铁矿的居里温度时, 磁化率急剧降低至接近于 0, 表明磁性矿物主要是磁铁矿, C 段代表性样品的 κ - T 曲线在加热 300 °C 之后磁化率显著增加, 可能存在胶黄铁矿。另外, 冷却曲线明显高于加热曲线, 说明加热过程中有强磁性矿物生成。

磁滞回线可以反映沉积物中的磁性矿物类型和磁畴状态。磁滞回线进行顺磁校正后, 在 350 mT 左右剩磁接近饱和, 表明样品中的磁性矿物主要为低矫顽力的磁性矿物。另外, 代表性样品的 IRM 获

得曲线表明, 14 cm 处样品(图 5e)的磁化强度在 200 mT 左右已经达到饱和, 132 cm 和 236 cm 处的样品(图 5f, g)在 600 mT 和 700 mT 左右才达到饱和, 表明在 132 cm 和 236 cm 左右可能存在高矫顽力矿物, 三个深度的样品均在 200 mT 时已经达到了 SIRM 的 90%, 表明样品中的磁性矿物以低矫顽力矿物为主。综合 κ - T 曲线判定该低矫顽力矿物可能为磁铁矿。

3.3 磁性矿物粒度

ARM 不仅可以反映磁性矿物含量的变化, 而且对粒度较细的单畴磁铁矿颗粒更为敏感, 因此 ARM 主要反映沉积物中单畴磁铁矿含量的变化^[49]。SCS-02 岩芯的 ARM 随深度变浅逐渐增大, 说明上部单畴磁铁矿含量较底部多。 χ_{ARM} 和 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 可以反映亚铁磁性矿物粒度的变化, 值越高, 表明磁性颗粒越细^[50-51]。整体上, $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 随深度变浅而逐渐升高, 说明亚铁磁性矿物粒度逐渐变细。FORC 图中, 样品等值线沿 Bu 轴分布较窄, 有明显的闭合轮廓^[42], 表明沉积物载磁矿物绝大部分为单畴(SD)颗粒^[52]。另外, FORC 结果进一步显示, 浅部样品的 SD 信息比底部更强(图 5k-m)^[53]。

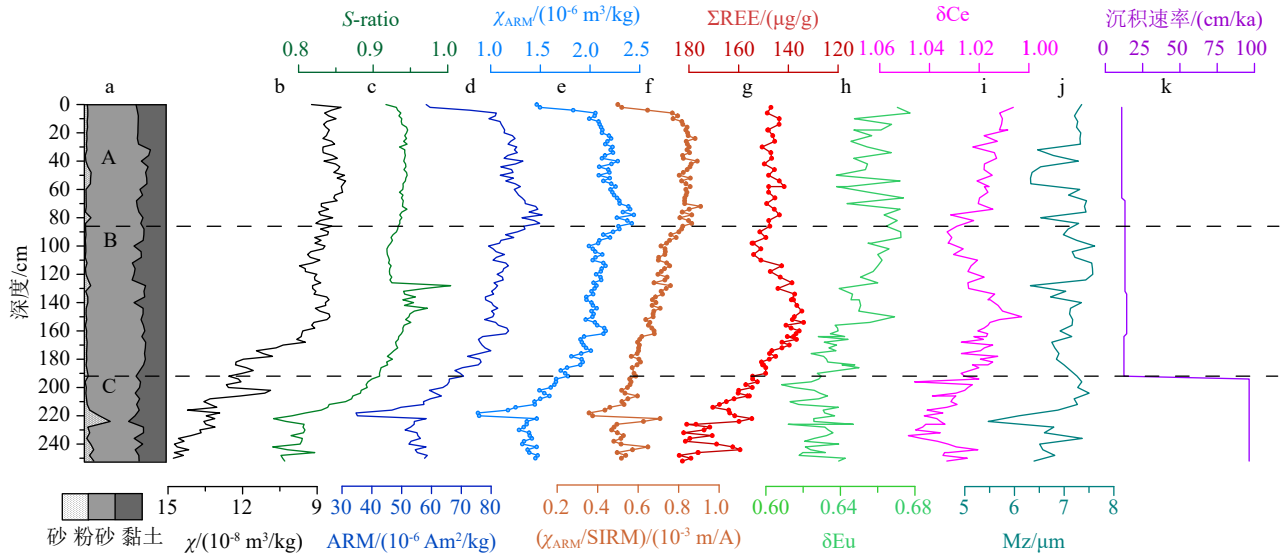


图4 SCS-02孔的岩性及磁学参数、稀土元素参数随深度变化

Fig.4 Down-core lithological and magnetic parameters of Core SCS-02

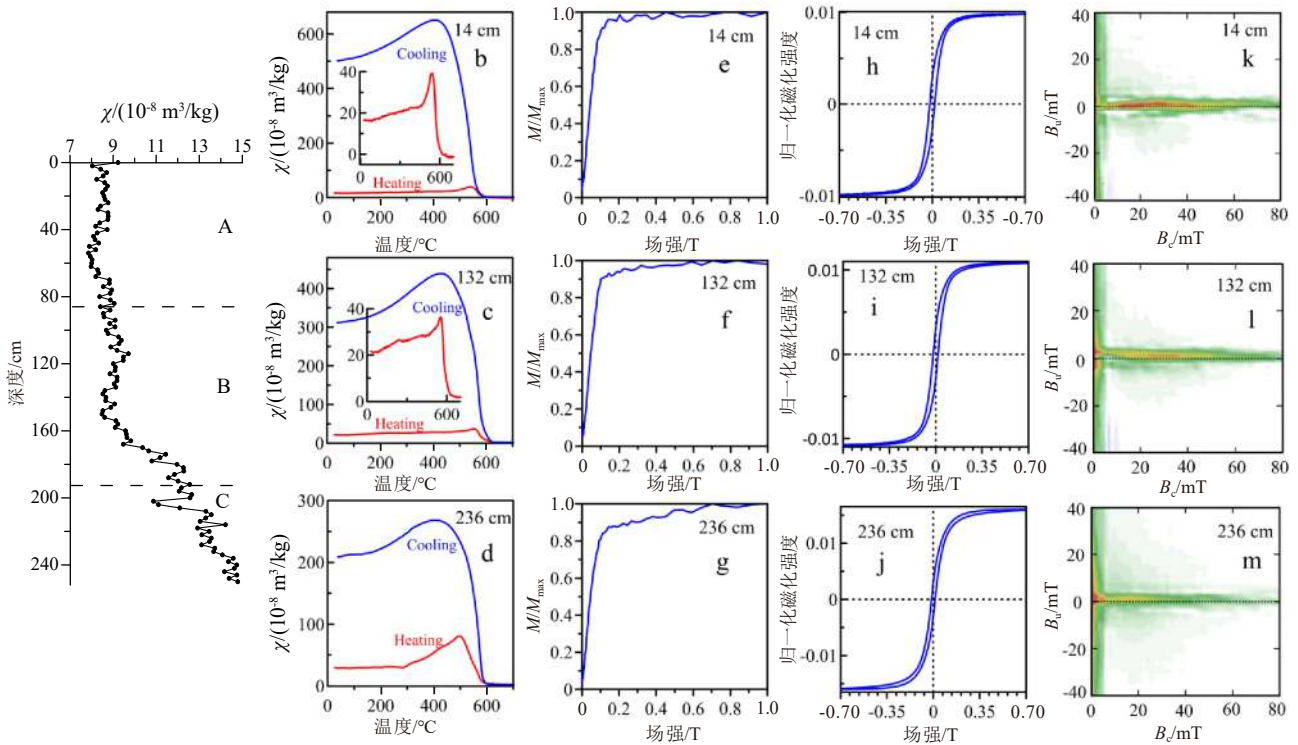


图5 SCS-02孔典型样品的岩石磁学结果

a: 磁化率随深度变化曲线, b-d: 磁化率随温度变化曲线(κ-T曲线), e-g: IRM获得曲线, h-j: 磁滞回线, k-m: FORC(一阶反转曲线)图。

Fig.5 Rock magnetic results of typical samples of Core SCS-02

a: Depth dependence curve of magnetic susceptibility, b-d: κ-T curves, e-g: IRM acquisition curves, h-j: magnetic hysteresis loop, k-m: FORC (first-order reversal curve) diagrams.

3.4 稀土元素含量及其特征参数

SCS-02的稀土元素总量(ΣREE)为133.47~190.11 μg/g, 平均值为155.93 μg/g, LREE为119.69~171.78 μg/g, 平均值为140.35 μg/g, HREE为13.76~

19.14 μg/g, 平均值为13.76 μg/g。

稀土元素的分馏作用对于物源的示踪有重要意义, 常用指标包括LREE/HREE、Eu异常(δEu)、Ce异常(δCe)、(Gd/Lu)_N和(La/Sm)_N, 其中N为球粒陨石标准化后的数值。球粒陨石标准化数据采

用 Boynton 提出的平均值, 上陆壳标准化数据采用 Taylor 和 McLennan 提出的平均值^[54-55]。LREE/HREE 比值可以提供物质来源及沉积环境信息, 陆源沉积物中轻稀土相对富集, LREE/HREE 比值较高, 大洋玄武岩和深海沉积物的轻重稀土分馏特征则不明显, 具有较低的 LREE/HREE 比值。SCS-02 的 LREE/HREE 比值为 8.13~9.52, 平均值为 9.01, 略低于上陆壳 (UCC, 9.54)。(La/Sm)_N、(Gd/Lu)_N 分别代表稀土元素球粒陨石标准化图解中分布曲线的斜率, 其高值代表轻重稀土分馏作用强, (La/Sm)_N 为 3.8~4.0, 均值为 3.97, (Gd/Lu)_N 为 1.56~1.8, 均值为 1.71, 因此, LREE 比 HREE 分馏作用更强。

δEu 和 δCe 是表征 Eu 和 Ce 相对于其他稀土元素分馏程度的参数, 采用的公式为: $\delta\text{Eu}=\text{Eu}_N/(\text{Sm}_N \times \text{Gd}_N)^{1/2}$, $\delta\text{Ce}=\text{Ce}_N/(\text{La}_N \times \text{Pr}_N)^{1/2}$, SCS-02 的 δEu 为 0.60~0.67, δCe 为 1.0~1.04, 变化值较小^[56], 前人研究表明, 大于 1.05 表示正异常, 小于 0.95 表示负异常, 因此, SCS-02 孔沉积物没有表现明显的 Ce 异常, Eu 则表现出明显的负异常^[57-58]。

图 4g、h 和 i 为稀土元素分馏指标在垂向上的分布, 可以看出 $\sum\text{REE}$ 与 δCe 具有相似的变化趋势, 根据磁化率分布特征分段, A 段 (0~86 cm) 的 $\sum\text{REE}$ 、 δCe 及 δEu 均较为稳定, 变化范围小; B 段 (86~192 cm) 从底部到顶部, $\sum\text{REE}$ 与 δCe 先逐渐降低, 再逐渐升高, 而 δEu 则相对稳定, 整体呈上升趋势。C 段 (192~252 cm) 从底部到顶部, $\sum\text{REE}$ 缓慢下降, δCe 呈先增后减的趋势, δEu 缓慢增加。图 6 为 REE 与粒度的相关图, SCS-02 岩芯的 REE 与砂、粉砂及黏土的含量没有明显的相关性, 说明粒度并不是 REE 的主要控制因素。

4 讨论

4.1 磁性矿物类型及来源

南海的陆源物质主要来自于附近河流 (例如珠江、红河和湄公河) 和岛屿山地河流 (例如台湾西南的高屏溪), 各条河流对南海不同区域的贡献不同^[2]。环境磁学参数是追踪物源的良好手段^[21]。南海周边不同河流的磁学性质存在较大差异, 南北之间存在磁性梯度, 表现为珠江和吕宋岛以低矫顽力的磁铁矿为主, 南部的湄公河以高矫顽力的赤铁矿为主, 而红河沉积物中二者兼具, 同时携带少量硫化物, 这种差异可能与不同地区的气候环境、风化程度有关^[1]。基于河流的磁性差异, 可以从海洋沉积

物的磁性特征追踪沉积物中磁性矿物来源。

χ_{ARM} 常用于判断磁性矿物的粒径, 磁性颗粒的粒度与地质和环境过程密切相关, 而 S -ratio 是用来判定磁性矿物成分差异的指标, 因此可以通过二者的相关关系追踪沉积物的来源。基于不同河流 S -ratio 和粒度的差异性, 以 χ_{ARM} 为纵坐标, S -ratio 为横坐标, 对各河流样品进行投图 (图 7)^[1, 28], A、B、C 三段以时间段进行区分, A 段为 0~7.5 kaBP, B 段为 7.5~15.5 kaBP, C 段为 15.5~16 kaBP。0~7.5 kaBP, SCS-02 的磁性数据主要与红河及珠江重合, 与湄公河没有明显重叠; 7.5~15.5 kaBP, SCS-02 的磁性数据点主要落在红河区域, 少部分落在珠江区域, 与湄公河差距较大; 15.5~16 kaBP, 部分数据点落在湄公河区域, 其他落在红河区域内。

16 kaBP 以来, 海平面逐渐上升, 尤其 15.5~16 kaBP 期间, 海平面变化较为剧烈, 姚衍桃等^[36] 对于南海西北部末次盛冰期以来的古海岸线重建结果 (图 1 红色虚线) 表明, 15 kaBP 莺歌海出露于海面上, 因此红河口距离沉积区较近 (图 1 黑色虚线), 搬运距离大大缩减, 红河携带的沉积物在接近陆坡时倾泻到盆地中, 能够轻易到达沉积区, 导致沉积速率较高。同时陆架对红河沉积物的限制作用也明显减弱, 更多粗粒物质被搬运到海盆中, 如图 8 所示, 磁性矿物粒度指标 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 较低。富含大量陆源碎屑物质的快速埋藏, 往往会造成一些缺氧还原的水体环境, 进而可能形成还原成因的磁性矿物^[59], κ - T 曲线显示 C 段存在胶黄铁矿, 暗示 C 段沉积过程可能受到成岩作用的影响, 小颗粒磁铁矿被溶解, 导致整体粒径变粗, 然而 FORC 图中并没有出现胶黄铁矿的牛眼状特征, 说明胶黄铁矿含量较低, 成岩作用对整体磁性影响较小。因此 C 段的磁性变化可能是物源变化和早期成岩作用的综合影响, 物源变化主导了磁性变化。15.5~16 kaBP 距离最近的红河贡献了最多的陆源物质。另外, 该时期部分大陆架暴露在海平面之上, 大陆架直接风化剥蚀产生的陆源碎屑物质也可以输送到陆坡中^[21]。

7.5~15.5 kaBP, 海平面逐渐上升, 至 7.5 kaBP 时出现全新世中期最大海泛面 (MFS), 此时现代的海陆格局基本形成, 7.5 kaBP 后海平面相对稳定。因此可以认为约 15.5 kaBP, 红河为沉积区贡献了最多的陆源物质, 随着海平面的上升, 珠江携带的碎屑物也可以随着洋流搬运过来, 吕宋岛、台湾及湄公河的贡献则小于红河和珠江。在时间尺度上, 随着沉积物变年轻, S -ratio 的值越来越大, 说明磁铁矿的含量越来越高, 而前人研究表明珠江的磁铁矿含

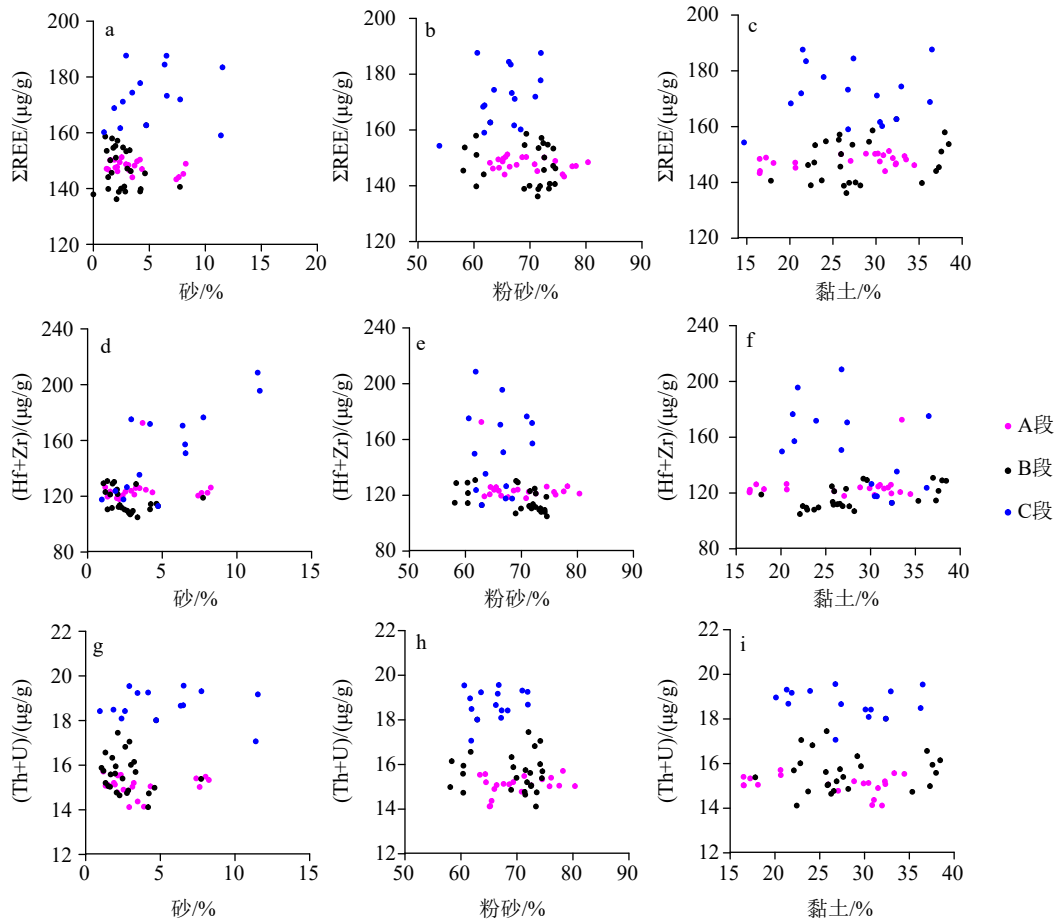


图6 SCS-02孔ΣREE、Hf+Zr、Th+U与粒度之间的相关性

Fig.6 Correlations of grain size with ΣREE, Hf+Zr, and Th+U

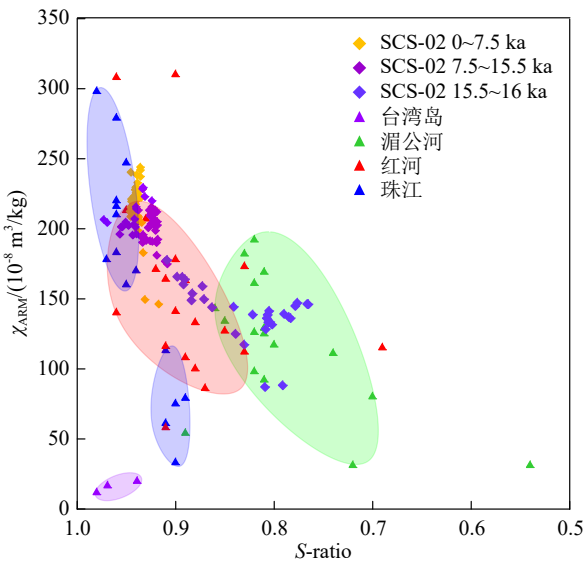


图7 SCS-02孔 S-ratio 和 χ_{ARM} 物源判别图

河流数据引自 Kissel 等 [1, 28]。

Fig.7 Scatterplots of S-ratio and χ_{ARM}

River data are cited from Kissel et al [1, 28].

量高于红河^[1], 因此随着时间的变化, 珠江的贡献有所增长, 磁性矿物粒度指标 χ_{ARM}/SIRM 的上升进一步证实细粒磁铁矿的输入增加。总的来说, 研究区的主要物质来源为红河^[32]。

4.2 稀土元素物源示踪

稀土元素特有的稳定性使其对母岩有很强的继承性, 其在水中溶解度低, 主要以颗粒形态搬运沉积, 在风化剥蚀、搬运和沉积成岩的过程中携带的母岩信息不会丢失, 因此被广泛应用于沉积物物源的判别^[60]。REE 含量及分馏与粒度、沉积速率无一致性的变化趋势, 表明搬运过程中的分选作用对 REE 含量及分馏影响较小, 因而 REE 能较好地保持原岩的岩性和风化信息。SCS-02 的 ΣREE 平均值 180.54 μg/g, 明显高于大洋玄武岩(58.64 μg/g)^[61], 略高于上部地壳(146.37 μg/g)^[55] 及中国大陆架表层沉积物(137.38 μg/g)^[62]。图 9a 为 SCS-02 孔稀土元素 UCC 标准化模式, 以上地壳为标准进行归一化, 稀土元素 UCC 标准化模式整体上表现为富 Dy 和贫 Tb, 将其与潜在的物源区对比, 发现与海南岛、

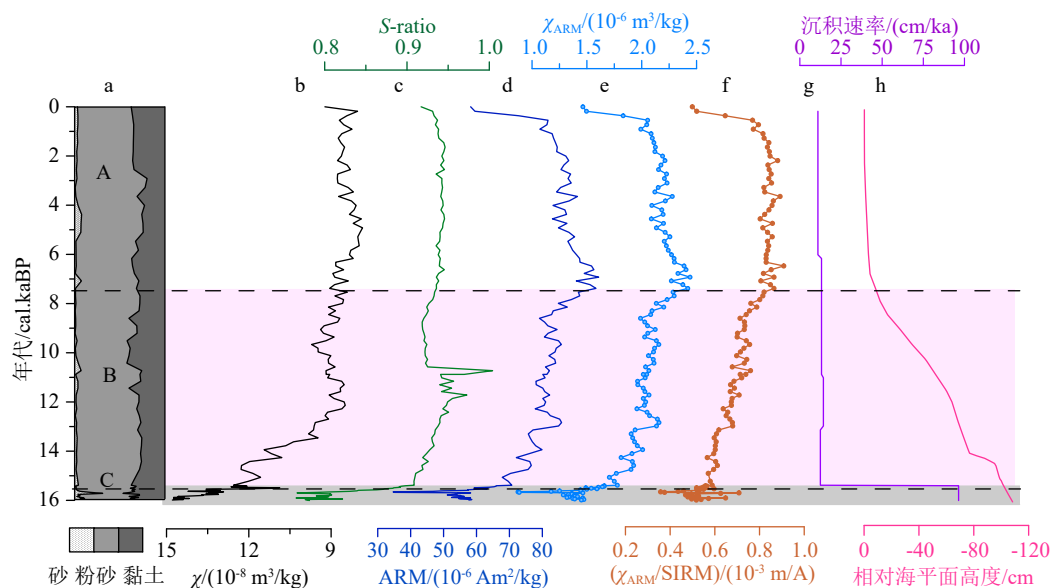


图 8 SCS-02 孔磁性垂向变化

相对海平面高度据文献 [36]。

Fig.8 Down-core variations of environmental magnetic parameters

Relative sea level is from reference[36].

红河及北部湾的配分模式是相似的, 与台湾和珠江则存在明显的差异 [18, 30, 63-67]。

研究区沉积物具有弱的 Eu 负异常, δEu 为 0.60~0.67, 与 UCC 的均值 (0.62~0.65) 较为接近, 表明沉积物对母岩有较强的继承性。 δEu 、 δCe 、 $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 、 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 和 $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 比值都反映轻重稀土的分馏程度, 以这些比值建立物源判别图, 结果如图 9b-e 所示, 总体而言, SCS-02 与红河、北部湾数据重合, 可以认为 SCS-02 的物源主要来源于红河, 台湾和珠江也可以为 SCS-02 提供部分沉积物, 而海南岛虽然距离较近, 但是 REE 与 SCS-02 并不相似, 吕宋岛的 REE 则与 SCS-02 差距较大, 认为其不是南海西北部的物源, 或仅输送少部分的沉积物。将稀土元素 UCC 标准化模式和物源判别图综合考虑, SCS-02 孔的物源主要为红河。

另外, 沉积物的 Sr-Nd 同位素组成也可以指示沉积物整体的来源 [68], Wan 等 [3] 对琼东南盆地 337PC 岩芯进行了 Sr-Nd 同位素分析, 结果发现该岩芯的主要物源来自红河, SCS-02 孔附近 PC338 孔的稀土元素 UCC 标准化模式与北部湾 STAT22 的分配方式基本一致, 北部湾是连接红河与南海西北部的通道, 也说明该区域陆源物质主要来自红河 [30, 32]。前人研究结果表明, 红河对南海西北部沉积物的贡献最大, 台湾和珠江等物源仅对颗粒较小的黏土颗粒有较大的影响, 这与本文研究结果一致。

4.3 海平面变化对沉积物物源的影响

姚衍桃等 [36] 对于南海西北部末次盛冰期以来的古海岸线重建结果表明, 末次盛冰期 (LGM) 以来, 海平面从 -100 多米逐渐变化到现今的高度, 北部湾和越南东北沿海从陆地逐渐演变为海洋。16 kaBP 以来, 南海西北海岸线缓慢后退, 海平面逐渐升高, 至 7.5 kaBP 形成现今海陆格局。图 10 显示 SCS-02 孔的磁学和粒度特征对 16 kaBP 以来的海平面变化有明显的响应, 位于琼东南盆地的 PC338 孔的磁化率和 S-ratio 的趋势与 SCS-02 孔一致, 进一步验证了磁学参数对海平面变化的响应 [32]。

15.5~16 kaBP 南海海平面逐渐后退, 如图 1 红色虚线所示, 北部湾和莺歌海仍出露在海平面以上, 此时的古红河口距离沉积区较近, 可以带来更多的陆源物质。在 15.5~16 kaBP 期间, 沉积速率高达 90 cm/ka, 较高的磁化率值指示沉积速率的增大带来了更多的磁性矿物, 同时较低的 χ_{ARM}/χ 代表磁性矿物颗粒较粗, 较高的 HIRM 指示高矫顽力矿物含量较高, 表明在此期间, 红河为沉积区贡献了大量陆源碎屑物质, 而由于海平面较低, 缺乏深水环流, 珠江和台湾难以为南海西北部提供细粒的碎屑物 [22, 32]。

随后海平面迅速上升, 7.5~15.5 kaBP 减少的陆地面积达 $24 \times 10^4 \text{ km}^2$, 越南东北沿海、北部湾及华南沿海从陆地变为海洋, 至此现今的海陆格局基本

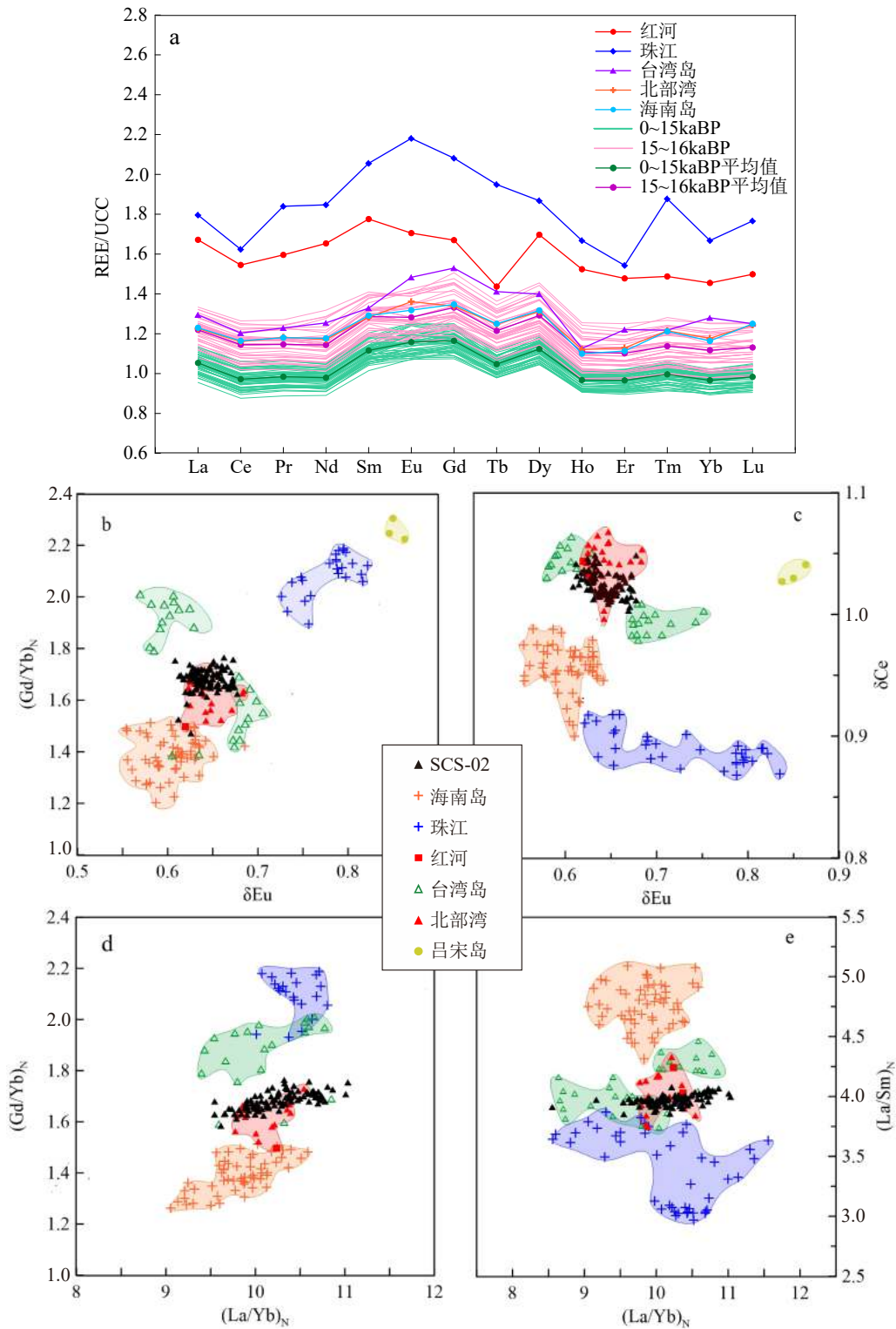


图9 SCS-02 孔稀土元素归一化结果

a: 稀土元素 UCC 标准化模式, b: δEu 与 $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 的物源判别图, c: δEu 与 δCe 的物源判别图, d: $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 与 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 的物源判别图, e: $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 与 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 的物源判别图。UCC 标准化模式和比值数据来自 SCS-02 岩芯和南海周边河流, 包括海南岛^[18]、北部湾^[30]、红河^[63-64]、珠江^[65]、台湾南部河流^[66] 及吕宋岛^[67]。

Fig.9 Results of normalized rare earth element of Core SCS-02

a: UCC-normalized REE patterns, b: Scatterplots of δEu and $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$, c: Scatterplots of δEu and δCe , d: scatterplots of $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ and $(\text{La}/\text{Yb})_N$, e: scatterplots of $(\text{La}/\text{Sm})_N$ and $(\text{La}/\text{Yb})_N$. UCC-normalized REE patterns and ratios are from core SCS-02 and adjacent rivers, including Hainan island^[18], the core STAT22 from Beibu Gulf^[30], the Red River^[63-64], Pearl River Estuary^[65], southwestern Taiwan rivers^[66], and Luzon^[67].

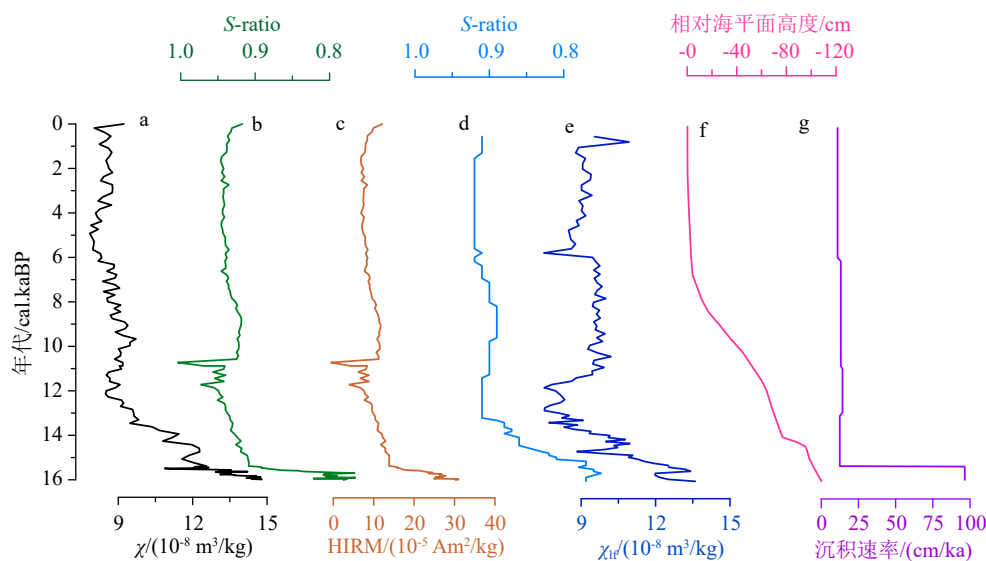


图 10 SCS-02 岩芯对海平面变化的响应

a-c, g: SCS-02 孔, d-e: PC338 孔^[32], f: 南海西北部相对海平面高度^[36]。

Fig.10 Down-core profiles of relative sea level

a-c, g: Core SCS-02, d-e: Core PC338^[32], f: relative sea level in northwestern South China Sea^[36].

形成^[36]。 χ_{ARM}/χ 增大指示磁性矿物粒度变细, 磁化率也随着海平面的上升逐渐降低, 指示磁性矿物含量整体降低, HIRM(图 10c) 的降低表明高矫顽力矿物含量降低, S-ratio(图 10b) 的增加说明低矫顽力的磁铁矿输入增加。表明在此期间, 随着海平面的迅速上升, 红河口距离沉积区的距离越来越远, 此时粗粒物质难以搬运到沉积区, 细粒组分含量增加。同时随着海平面上升, 海底环流增强, 来自珠江和台湾的陆源碎屑物质能够被运送至南海西北部。除了海平面变化的影响, 气候变化也会影响沉积物的磁学特征, 12.9 kaBP 时发生了短暂的冷事件, 被称为新仙女木事件, 此次冷事件至 11.5 kaBP 结束, 随后气候逐渐升温。由于气候冷干, 地表化学风化不足, 陆源风化释放的磁性矿物难以到达陆坡, 导致磁性矿物含量的整体降低。约 7.5 kaBP 海平面相对稳定, 磁学指标没有发生明显变化, 表明 7.5 kaBP 以来, 沉积物的物源没有发生较大的改变。

因此, 可以认为磁性矿物粒度较粗、浓度较高对应了低海平面时期, 磁性矿物细粒组分增加, 浓度降低反映了海平面逐渐上升的过程。

5 结论

磁学参数可以指示沉积物的物源。 χ_{ARM} 与 S-ratio 的相关图表明琼东南盆地主要的陆源物质来源于红河和珠江, 珠江的贡献低于红河, 而高于其他河流, 台湾和湄公河提供了少量沉积物。稀土元

素结果指示的 SCS-02 孔物源与磁学结果一致, 进一步验证了通过磁学的手段能够追踪海洋沉积物的物源。

SCS-02 孔的磁学参数对环境变化有很好的响应, 15.5~16 kaBP 处于低海平面时期, 北部湾出露于海面上, 红河口与沉积区的距离大大缩短, 红河携带的陆源碎屑物质为琼东南盆地提供了巨量沉积物, 其贡献远高于其他来源, 此时的磁性矿物粒度较粗, 浓度较高。随着海平面上升, 7.5~15.5 kaBP, 磁铁矿的含量增加, 浓度降低, 代表富含磁铁矿的珠江和台湾的贡献有所增加。随着搬运距离变长, 红河的贡献有所降低, 但依然占主导位置。7.5 kaBP 以来, 现代的海陆格局基本形成, 海平面变化对物源的影响较小, 磁性矿物组成和粒度变化较稳定, 沉积物主要来源于红河和珠江。因此, 磁学参数对海平面变化效应敏感, 可以为该海域的古环境恢复提供有效指标。

致谢: 感谢自然资源部第一海洋研究所刘建兴副研究员在实验过程中提供的帮助, 感谢两位匿名审稿人对文章提出的宝贵意见。

参考文献 (References)

- [1] Kissel C, Liu Z F, Li J H, 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.

- [2] Liu Z F, Zhao Y L, Colin C, et al. Source-to-sink transport processes of fluvial sediments in the South China Sea [J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 153: 238-273.
- [3] Wan S M, Toucanne S, Clift P D, et al. Human impact overwhelms long-term climate control of weathering and erosion in southwest China [J]. *Geology*, 2015, 43 (5): 439-442.
- [4] Calvert S E, Pedersen T F. Chapter fourteen elemental proxies for palaeoclimatic and palaeoceanographic variability in marine sediments: interpretation and application [J]. *Developments in Marine Geology*, 2007, 1: 567-644.
- [5] 金秉福, 林振宏, 季福武. 海洋沉积环境和物源的元素地球化学记录释读 [J]. *海洋科学进展*, 2003, 21 (1): 99-106. [JIN Bingfu, LIN Zhenhong, JI Fuwu. Interpretation of element geochemical records of marine sedimentary environment and provenance [J]. *Advances in Marine Science*, 2003, 21 (1): 99-106.]
- [6] 王丽艳, 李广雪. 古气候替代性指标的研究现状及应用 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2016, 36 (4): 153-161. [WANG Liyan, LI Guangxue. Research status and application of paleoclimatic proxies [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2016, 36 (4): 153-161.]
- [7] 蔡观强, 彭学超, 张玉兰. 南海沉积物物质来源研究的意义及其进展 [J]. *海洋科学进展*, 2011, 29 (1): 113-121. [CAI Guanqiang, PENG Xuechao, ZHANG Yulan. The significances of and advances in the study of sediment sources in the South China Sea [J]. *Advances in Marine Science*, 2011, 29 (1): 113-121.]
- [8] 刘志飞, 李夏晶, COLIN C, 等. 南海北部末次冰盛期以来高分辨率黏土矿物记录及其时间序列物源区分析 [J]. *科学通报*, 2010, 55 (35): 4058-4068. [LIU Zhifei, LI Xiajing, COLIN C, et al. A high-resolution clay mineralogical record in the northern South China Sea since the Last Glacial Maximum, and its time series provenance analysis [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55 (35): 4058-4068.]
- [9] 田成静, 钟和贤, 徐子英, 等. 南海北部陆架海域表层沉积物黏土矿物分布特征及物源分析 [J]. *地质学刊*, 2018, 42 (1): 131-136. [TIAN Chengjing, ZHONG Hexian, XU Ziyang, et al. Distribution characteristics and source analysis of clay minerals in the surface sediments from the shelf of the northern South China Sea [J]. *Journal of Geology*, 2018, 42 (1): 131-136.]
- [10] 吴梦霜, 邵磊, 庞雄, 等. 南海北部深水沉积物稀土元素特征及其物源指示意义 [J]. *沉积学报*, 2012, 30 (4): 672-678. [WU Mengshuang, SHAO Lei, PANG Xiong, et al. REE geochemical characteristics of sediments and its implications in the Deepwater area of the Northern South China Sea [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2012, 30 (4): 672-678.]
- [11] 赵梦, 邵磊, 梁建设, 等. 古红河沉积物稀土元素特征及其物源指示意义 [J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 2013, 38 (S1): 61-69. [ZHAO Meng, SHAO Lei, LIANG Jianshe, et al. REE character of sediment from the Paleo-Red River and its implication of provenance [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2013, 38 (S1): 61-69.]
- [12] 刘志飞, 赵玉龙, 李建如, 等. 南海西部越南岸外晚第四纪黏土矿物记录: 物源分析与东亚季风演化 [J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2007, 50 (11): 1674-1684. [LIU Zhifei, ZHAO Yulong, LI Jianru, et al. Late Quaternary clay minerals off Middle Vietnam in the western South China Sea: implications for source analysis and East Asian monsoon evolution [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, 50 (11): 1674-1684.]
- [13] 刘志飞, TRENTESAUX A, CLEMENS S C, 等. 南海北坡ODP1146站第四纪粘土矿物记录: 洋流搬运与东亚季风演化 [J]. *中国科学 (D 辑)*, 2003, 46 (12): 1223-1235. [LIU Zhifei, TRENTESAUX A, CLEMENS S C, et al. Quaternary clay mineralogy in the northern South China Sea (ODP Site 1146) [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2003, 46 (12): 1223-1235.]
- [14] 刘志飞, COLIN C, 黄维, 等. 珠江流域盆地表层沉积物的黏土矿物及其对南海沉积物的贡献 [J]. *科学通报*, 2007, 52 (8): 1101-1111. [LIU Zhifei, COLIN C, HUANG Wei, et al. Clay minerals in surface sediments of the Pearl River drainage Basin and their contribution to the South China Sea [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52 (8): 1101-1111.]
- [15] Vitali F, Blanc G, Larqué P, et al. Thermal diagenesis of clay minerals within volcanogenic material from the Tonga convergent margin [J]. *Marine Geology*, 1999, 157 (1-2): 105-125.
- [16] Chamley H. *Clay Sedimentology* [M]. Berlin: Springer, 1989.
- [17] Chen Q, Kissel C, Liu Z F. Late Quaternary climatic forcing on the terrigenous supply in the northern South China Sea: Input from magnetic studies [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, 471: 160-171.
- [18] Xu F J, Hu B Q, Dou Y G, et al. Sediment provenance and paleoenvironmental changes in the northwestern shelf mud area of the South China Sea since the mid-Holocene [J]. *Continental Shelf Research*, 2017, 144: 21-30.
- [19] 刘青松, 邓成龙. 磁化率及其环境意义 [J]. *地球物理学报*, 2009, 52 (4): 1041-1048. [LIU Qingsong, DENG Chenglong. Magnetic susceptibility and its environmental significances [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52 (4): 1041-1048.]
- [20] 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 [J]. *地理学报*, 1996, 51 (2): 155-163. [WANG Jian, LIU Zechun, JIANG Wenyang, et al. A relationship between susceptibility and grain-size and minerals, and their paleo-environmental implications [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1996, 51 (2): 155-163.]
- [21] 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.
- [22] 舒业强, 王强, 姐婷婷. 南海北部陆架陆坡流系研究进展 [J]. *中国科学 (D 辑): 地球科学*, 2018, 61 (5): 560-571. [SHU Yeqiang, WANG Qiang, ZU Tingting. Progress on shelf and slope circulation in the northern South China Sea [J]. *Science China Earth Sciences*, 2018, 61 (5): 560-571.]
- [23] 刘伟. 南海北部陆坡MIS5以来的古环境记录 [D]. 中国地质大学(北京)博士学位论文, 2012. [LIU Wei. Paleoclimatic records from northern slope of South China Sea since the marine isotope stage 5 [D]. Doctor Dissertation of China University of Geosciences (Beijing), 2012.]
- [24] Liu Z F, Statterger K. South China Sea fluvial sediments: An introduction [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 79: 507-508.

- [25] Milliman J D, Meade R H. World-wide delivery of river sediment to the oceans [J]. *The Journal of Geology*, 1983, 91 (1): 1-21.
- [26] Liu Z F, Tuo S, Colin C, et al. Detrital fine-grained sediment contribution from Taiwan to the northern South China Sea and its relation to regional ocean circulation [J]. *Marine Geology*, 2008, 255 (3-4): 149-155.
- [27] Liu Z F, Zhao Y L, Colin C, et al. Chemical weathering in Luzon, Philippines from clay mineralogy and major-element geochemistry of river sediments [J]. *Applied Geochemistry*, 2009, 24 (11): 2195-2205.
- [28] Kissel C, Liu Z F, Li J H, et al. Magnetic signature of river sediments drained into the southern and eastern part of the South China Sea (Malay Peninsula, Sumatra, Borneo, Luzon and Taiwan) [J]. *Sedimentary Geology*, 2017, 347: 10-20.
- [29] Liu J G, Clift P D, Yan W, et al. Modern transport and deposition of settling particles in the northern South China Sea: Sediment trap evidence adjacent to Xisha Trough [J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2014, 93: 145-155.
- [30] Cui Z N, Schulz-Bull D E, Hou Y M, et al. Geochemical characteristics and provenance of Holocene sediments (Core STAT22) in the Beibu Gulf, South China Sea [J]. *Journal of Coastal Research*, 2016, 321: 1105-1115.
- [31] Liu J G, Rong X, Chen Z, et al. Sources, transport and deposition of surface sediments from the South China Sea [J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2013, 71: 92-102.
- [32] Li M K, Ouyang T P, Roberts A P, et al. Influence of sea level change and centennial east Asian monsoon variations on northern South China Sea sediments over the past 36 kyr [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2018, 19 (5): 1674-1689.
- [33] Huang J, Wan S M, Xiong Z F, et al. Geochemical records of Taiwan-sourced sediments in the South China Sea linked to Holocene climate changes [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2016, 441: 871-881.
- [34] Kissel C, Laj C, Clemens S, et al. Magnetic signature of environmental changes in the last 1.2 Myr at ODP Site 1146, South China Sea [J]. *Marine Geology*, 2003, 201 (1-3): 119-132.
- [35] Xu F J, Hu B Q, Zhao J T, et al. Provenance and weathering of sediments in the deep Basin of the northern South China Sea during the last 38 kyr [J]. *Marine Geology*, 2021, 440: 106602.
- [36] 姚衍桃, HARFF J, MEYER M, 等. 南海西北部末次盛冰期以来的古海岸线重建 [J]. *中国科学 (D 辑): 地球科学*, 2009, 52 (8): 1127-1136. [YAO Yantao, HARFF J, MEYER M, et al. Reconstruction of paleocoastlines for the northwestern South China Sea since the Last Glacial Maximum [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2009, 52 (8): 1127-1136.]
- [37] 万世明, 秦琳, 杨守业, 等. 南海冰期陆架风化与碳循环 [J]. *第四纪研究*, 2020, 40 (6): 1532-1549. [WAN Shiming, QIN Lin, YANG Shouye, et al. South China Sea shelf weathering in glacial periods and its link to carbon cycle [J]. *Quaternary Sciences*, 2020, 40 (6): 1532-1549.]
- [38] 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*, 1992, 97 (B4): 4361-4375.
- [39] Robinson S G. The Late Pleistocene palaeoclimatic record of North Atlantic deep-sea sediments revealed by mineral-magnetic measurements [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1986, 42 (1-2): 22-47.
- [40] Roberts A P, Pike C R, Verosub K L. First-order reversal curve diagrams: A new tool for characterizing the magnetic properties of natural samples [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2000, 105 (B12): 28461-28475.
- [41] Pike C R, Roberts A P, Verosub K L. Characterizing interactions in fine magnetic particle systems using first order reversal curves [J]. *Journal of Applied Physics*, 1999, 85 (9): 6660-6667.
- [42] Harrison R J, Feinberg J M. FORCinel: An improved algorithm for calculating first-order reversal curve distributions using locally weighted regression smoothing [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2008, 9 (5): Q05016.
- [43] Thompson R, Oldfield F. *Environmental Magnetism* [M]. London: Environmental Magnetism, 1986.
- [44] 欧阳婷萍, 田成静, 朱照宇, 等. 南海南部YSJD-86GC孔沉积物磁性特征及其环境意义 [J]. *科学通报*, 2014, 59 (25): 3176-3187. [OUYANG Tingping, TIAN Chengjing, ZHU Zhaoyu, et al. Magnetic characteristics and its environmental implications of core YSJD-86GC sediments from the southern South China Sea [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59 (25): 3176-3187.]
- [45] 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 [J]. *第四纪研究*, 2007, 27 (6): 955-962. [LIU Qingsong, DENG Chenglong, PAN Yongxin. Temperature-dependency and frequency-dependency of magnetic susceptibility of magnetite and maghemite and their significance for environmental magnetism [J]. *Quaternary Sciences*, 2007, 27 (6): 955-962.]
- [46] Reilly W O. *Rock and Mineral Magnetism* [M]. New York: Springer, 1984.
- [47] Hrouda F. A technique for the measurement of thermal changes of magnetic susceptibility of weakly magnetic rocks by the CS-2 apparatus and KLY-2 Kappabridge [J]. *Geophysical Journal International*, 1994, 118 (3): 604-612.
- [48] Van Velzen A J, Dekkers M J. The incorporation of thermal methods in mineral magnetism of loess-paleosol sequences: a brief overview [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44 (S1): 53-63.
- [49] Evans E M, Heller F. *Environmental Magnetism: Principles and Applications of Enviromagnetics* [M]. Oxford: Academic Press, 2003.
- [50] Maher B A. Magnetic properties of some synthetic sub-micron magnetites [J]. *Geophysical Journal International*, 1988, 94 (1): 83-96.
- [51] Banerjee S K, King J, Marvin J. A rapid method for magnetic granulometry with applications to environmental studies [J]. *Geophysical Research Letters*, 1981, 8 (4): 333-336.
- [52] Lascu I, Wohlfarth B, Onac B P, et al. A Late Glacial paleolake record from an up-dammed river valley in northern Transylvania, Romania [J]. *Quaternary International*, 2015, 388: 87-96.
- [53] Roberts A P, Heslop D, Zhao X, et al. Understanding fine magnetic particle systems through use of first-order reversal curve diagrams [J]. *Reviews of Geophysics*, 2014, 52 (4): 557-602.

- [54] Boynton W V. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies [J]. *Developments in Geochemistry*, 1984, 2: 63-114.
- [55] Taylor S R, McLennan S M. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution* [M]. Oxford: Blackwell Publishing, 1985.
- [56] 赵志根, 高良敏. δEu 、 δCe 计算方法的标准化问题[J]. 标准化报道, 1998, 19(5): 23-25. [ZHAO Zhigen, GAO Liangmin. Discussion about standardization of methods to calculate δEu 、 δCe [J]. *Reporting of Standardization*, 1998, 19(5): 23-25.]
- [57] 王中刚, 于学元, 赵振华, 等. 稀土元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1989. [WANG Zhonggang, YU Xueyuan, ZHAO Zhenhua, et al. *Geochemistry of Rare Earth Elements* [M]. Beijing: Science Press, 1989.]
- [58] 周国兴, 赵恩好, 岳明新, 等. 稀土元素地球化学分析在地质学中的意义[J]. *地质与资源*, 2014, 23(5): 495-499. [ZHOU Guoxing, ZHAO Enhao, YUE Mingxin, et al. geological significance of rare earth elements in geochemical analysis [J]. *Geology and Resources*, 2014, 23(5): 495-499.]
- [59] Roberts A P. Magnetic mineral diagenesis [J]. *Earth-Science Reviews*, 2015, 151: 1-47.
- [60] 杨守业, 李从先. REE示踪沉积物物源研究进展[J]. *地球科学进展*, 1999, 14(2): 164-167. [YANG Shouye, LI Congxian. Research progress in REE tracer for sediment source [J]. *Acta Electronica Sinica*, 1999, 14(2): 164-167.]
- [61] Frey F A, Haskin L. Rare earths in oceanic basalts [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1964, 69(4): 775-780.
- [62] 赵一阳, 王金土, 秦朝阳, 等. 中国大陆架海底沉积物中的稀土元素[J]. *沉积学报*, 1990, 8(1): 37-43. [ZHAN Yiyang, WANG Jintu, QIN Chaoyang, et al. Rare-earth elements in continental shelf sediments of the China seas [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1990, 8(1): 37-43.]
- [63] Bayon G, Toucanne S, Skonieczny C, et al. Rare earth elements and neodymium isotopes in world river sediments revisited [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2015, 170: 17-38.
- [64] Gaillardet J, Dupré B, Allègre C J. Geochemistry of large river suspended sediments: Silicate weathering or recycling tracer? [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(23-24): 4037-4051.
- [65] Wang S H, Zhang N, Chen H, et al. The surface sediment types and their rare earth element characteristics from the continental shelf of the northern South China Sea [J]. *Continental Shelf Research*, 2014, 88: 185-202.
- [66] Li C S, Shi X F, Kao S J, et al. Rare earth elements in fine-grained sediments of major rivers from the high-standing island of Taiwan [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 69: 39-47.
- [67] Marini J C, Chauvel C, Maury R C. Hf isotope compositions of northern Luzon arc lavas suggest involvement of pelagic sediments in their source [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2005, 149(2): 216-232.
- [68] Colin C, Turpin L, Blamart D, et al. Evolution of weathering patterns in the Indo-Burman Ranges over the last 280 kyr: Effects of sediment provenance on $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios tracer [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2006, 7(3): Q03007.