琼东南盆地深水区钻井岩屑稀土元素地球化学特征及其对沉积物源和环境的指示

姜龙杰[1], 孙志鹏[2], 翟世奎[1], 刘新宇[2], 尤　丽[2], 曹佳琪[1], 张爱滨[1], 毕东杰[1], 张　婉[1]

(1. 中国海洋大学 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 山东 青岛 266100; 2. 中国海洋石油集团有限公司湛江分公司, 广东 湛江 524057)

摘要: 对琼东南盆地深水区 YL19A 钻井岩屑样品进行了稀土元素(REE)地球化学特征分析, 旨在研究琼东南盆地深水区的沉积物源及古环境变化。钻井岩屑样品的球粒陨石标准化 REE 配分模式总体呈轻稀土(LREE)富集、重稀土(HREE)亏损的右倾式, 但在各时代地层之间表现出一定的差异。崖城组和陵水组岩屑呈明显的 Eu 正异常, 而梅山组、三亚组和黄流组岩屑呈 Eu 的弱负异常, 指示了沉积环境和沉积物源上的变化。在早渐新世时期, 研究区物源以来自周边凸起的火山碎屑和陆源碎屑为主, 沉积环境为海陆过渡相; 自渐新世晚期开始, 随着琼东南盆地全区发生海侵, 研究区水深逐渐加大, 沉积环境由海陆过渡相变为浅海相, 物源变为远源陆源物质, 并具有红河与海南岛多物源混合的特征, 红河沉积物对物源的贡献相对较大, 基性火山物质对物源的贡献减弱。YL19A 钻井岩屑的 REE 地球化学特征在距今 30、28.5、25.5 和 23.8 Ma 等地层界面处均发生明显的突变, 对区域性构造运动事件有明显的响应。

关键词: 稀土元素特征; 物源与环境指示; 构造事件记录; 琼东南盆地深水区

中图分类号: P736.21^{+}2　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-3096(2018)04-0089-12

DOI: 10.11759/hykx20170321001

稀土元素(REE)具有十分相似的地球化学性质及很强的稳定性, 其组成及分布模式受风化、剥蚀、搬运、沉积、成岩及变质作用影响很小, 主要受控于母岩, 因而对揭示沉积物的物质来源及源区特征等具有重要意义[1-3]。REE 地球化学方法在分析琼东南盆地的沉积物源及古环境方面已被广泛应用, 并取得了较好认识[4-8], 但目前的研究主要集中在浅水区, 对于深水区则相对薄弱, 缺乏系统的地球化学研究, 影响了深水区油气资源勘探的深入开展。为此, 本文选取大体位于琼东南盆地中心的深水 YL19A 钻井, 对岩屑样品进行了系统的 REE 地球化学特征分析, 并结合粒度与重矿物资料, 探讨了琼东南盆地深水区渐新世至中新世时期的沉积物源及古环境演变, 旨在为该区域油气资源勘探提供科学依据。

1　地质概况

琼东南盆地位于南海北部陆缘, 为新生代陆缘拉张性盆地。盆地西以 1 号断层与莺歌海盆地分界, 东以神狐暗沙隆起与珠江口盆地相接, 南靠永乐隆起。盆地基底是华南大陆向海域的延伸, 基岩主要由古生代变质岩和火山碎屑岩组成, 并发育有大量中生代花岗岩侵入体[9-10]。琼东南盆地内断裂发育, 构造格局复杂, 可划分为北部坳陷带、北部隆起带、中央坳陷带和南部隆起带 4 个一级构造单元[11], 其中深水区是指 2 号断裂以南的区域, 包括中央坳陷和南部隆起带。琼东南盆地在新生代主要经历了裂陷和坳陷两个构造演化阶段[12-13]: 在古近纪裂陷期, 盆地接受了始新统陆相湖盆充填、崖城组海陆过渡相充填和陵水组滨浅海相充填; 在新近纪坳陷期,

收稿日期: 2017-03-21; 修回日期: 2017-08-13

基金项目: 国家重大科技专项(2011ZX05025-002-03); 国家自然科学基金重点项目(41530963)

[Foundation: The National Major Project of Science and Technology of China under Contract, No. 2011ZX05025-002-03; National Natural Science Foundation of China, No. 41530963]

作者简介: 姜龙杰(1993-), 男, 山东威海人, 硕士研究生, 主要从事海洋地质学研究, E-mail: jlongjie@163.com; 翟世奎(1958-), 通信作者, 男, 山东聊城人, 博士, 教授, 主要从事海洋地质学研究, E-mail: zhai2000@ouc.edu.cn

盆地接受了从浅海相到深海相的连续沉积充填。

根据琼东南盆地的演化过程及地理位置，从渐新世至今，其潜在的远源物源区有红河、海南岛和珠江。红河为越南北部最大的河流，流入北部湾，雨季时径流量高达 9 500 m^3/s，年输沙量 1.3×10^9 t，并在莺歌海-琼东南盆地结合部发育有巨型的红河海底扇[14]。已有研究[15]表明，红河是上新世时期琼东南盆地中央峡谷的主要物源，有源于红河的沉积物通过中央峡谷进入琼东南盆地。海南岛地形为中间高凸的山地，其河流系统呈辐射状分布，3 条主要河流中的万泉河直接流入琼东南盆地，而陡峭的地形和频繁的暴雨共同导致了其径流量在雨季呈千倍增加。因此，海南岛是琼东南盆地的另一可能物源地。珠江流入南海北部，沿岸流和季风流可以将源于珠江的沉积物长距离运移至南海[16]。然而，在琼东南盆地和珠江口盆地之间的构造高地(如神狐隆起)在一定程度上阻挡了潮流的搬运作用[17]，使得珠江的沉积物可能大多注入到了珠江口盆地。因此，珠江对琼东南盆地的物源贡献相对于红河和海南岛而言可能微不足道。虽然有研究表明越南中部对盆地物源也有着一定的贡献[18]，但由于钻井和地化资料的缺乏，无法从稀土元素角度对越南中部的物源特征及其演化进行判别，有待进一步研究。

2 材料和方法

YL19A 钻井位于琼东南盆地深水区北礁凹陷西北部(图 1)，水深 1 695.4 m，井深 5 237 m，钻至下渐新统崖城组地层。

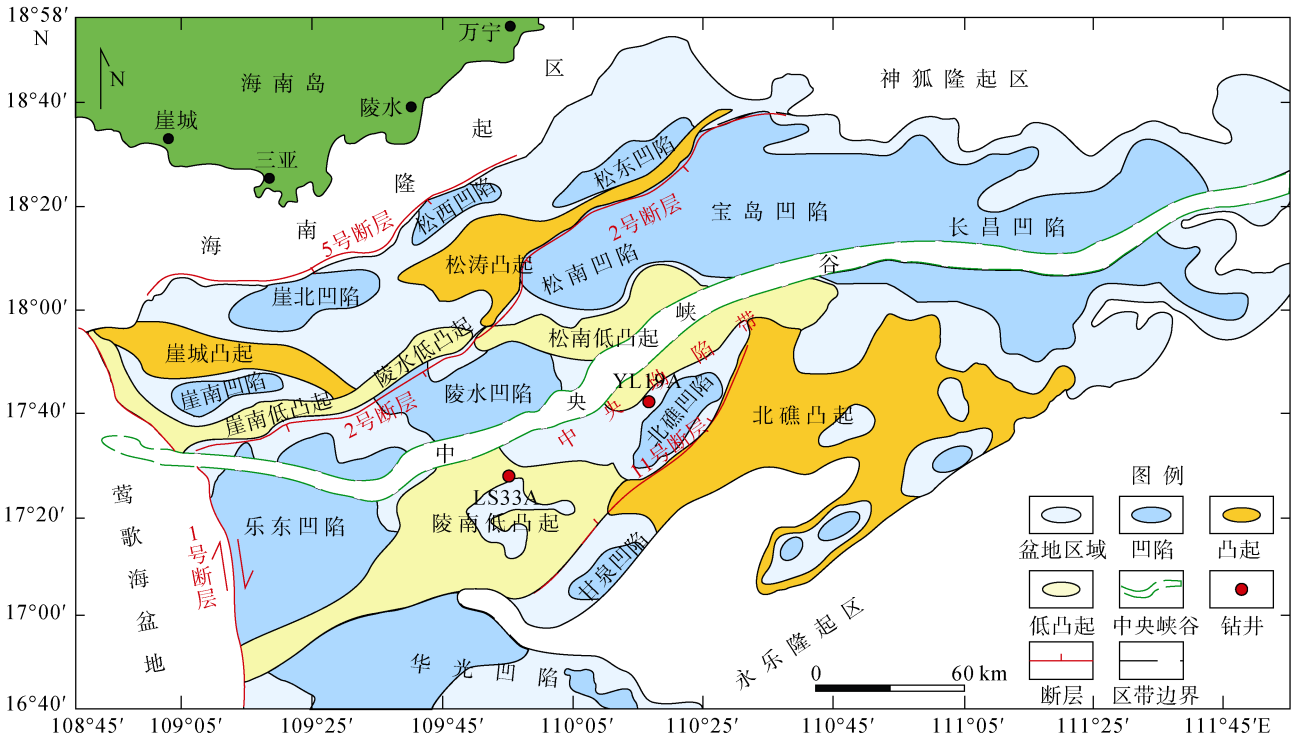

图 1　琼东南盆地构造单元划分及深水钻井位置图

Fig. 1　The geo-tectonic map of the Qiongdongnan Basin and drilling location

YL19A 钻井岩性柱状图如图 2 所示，自上而下取样地层分别依次为上中新统黄流组(厚约 110.9 m)、中中新统梅山组(厚约 212.1 m)、下中新统三亚组(厚约 369.0 m)、上渐新统陵水组(厚约 705.6 m)和下渐新统崖城组(厚约 1209.4 m)。岩性描述如下：

上中新统黄流组(2 630~2 740.9 m)：主要为浅灰色-灰色泥岩，较致密，块状-易碎，含钙，部分可见白垩质，微量白云石。

中中新统梅山组(2 740.9~2 953 m)：主要为灰色-浅灰色泥岩、泥灰岩，较致密，块状-易碎，含钙，夹杂少量褐灰色粉砂岩。

下中新统三亚组(2 953~3 322 m)：三亚组一段主要为浅灰色-中灰色泥岩，中等硬度，含钙。二段为灰色泥岩夹灰白色薄层灰岩，泥岩整体块状-次团块状，中等-强钙质胶结，部分泥灰质；灰岩部分呈黄色侵染，较易碎，棱角状，部分可见白垩质，微量白云石。

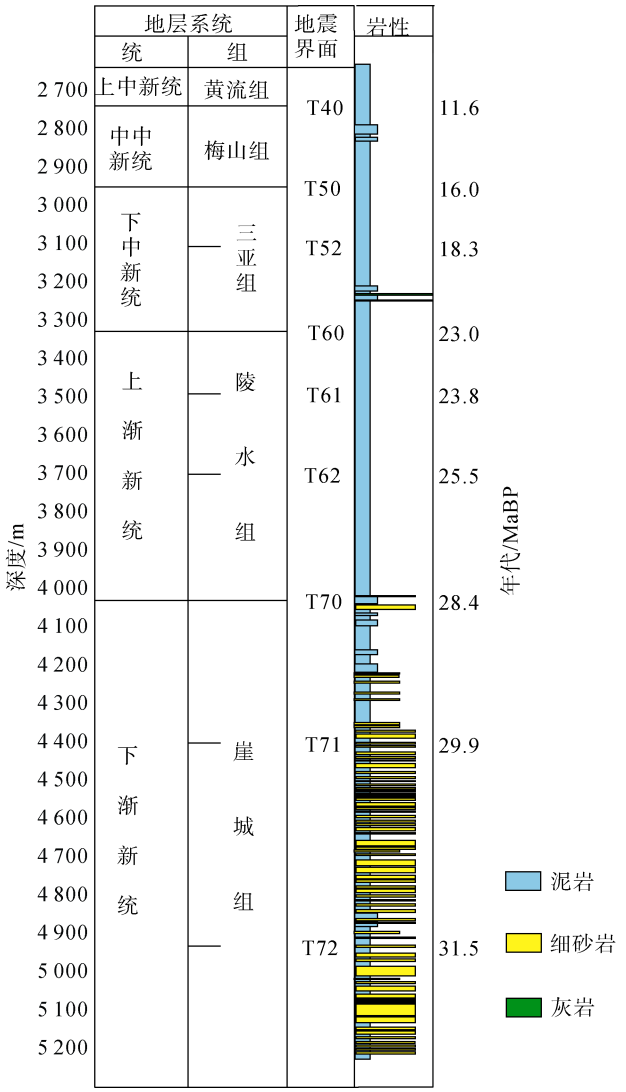

图 2 YL19A 钻井岩性柱状图(修改自中海油湛江分公司资料)

Fig. 2 Core profile of Well YL19A(modified from the foundation drawing provided by Zhanjiang Branch of CNOOC)

上渐新统陵水组(3 322~4 027.6 m): 陵水组均为浅灰色-中灰色泥岩, 质均, 含钙, 见灰岩碎片, 易碎。

下渐新统崖城组(4 027.6~5 237m): 崖城组一段为中灰色泥岩、粉砂岩、松散石英砂岩与透镜状灰岩互层。二段为灰色泥岩、黄灰色泥岩与灰白色砂岩互层。砂岩主要为细砂岩, 少量粉砂岩, 含砾石, 石英含量高, 分选较差, 次棱状-次圆状。泥岩坚硬易碎, 见高岭土化。三段为灰白色细砂岩与灰色泥岩及泥灰岩互层。

本文根据地层特征采用非等间距取样, 自钻井 2 630 m 处开始取样, 在钻井 2 630~4 070 m 层段, 每隔 10 m 采取一个样品。由于北礁凹陷崖城组发育海陆过渡相煤系烃源岩, 为油气勘探目标层, 故在钻井 4 080~5 237 m 层段加密取样, 除个别层段外, 每隔 3 m 采取一个样品。全井岩心共采取岩屑样品 411 个。根据对钻井岩屑样品的观察, 挑选了 128 个具代表性的样品进行 REE 地球化学分析。

样品的前期处理和上机测试工作均在中国海洋大学“海底科学与探测技术教育部重点实验室”完成。主要流程如下: 将经过洗油处理(洗油处理流程见文献[19])的岩屑样品放于 60℃烘箱内, 恒温烘干 12 h。将烘干后的样品用玛瑙研钵研磨至 200 目以下, 烘干后保存于干燥器中。精确称取 40 mg 样品放于消解罐中, 并在消解罐中加入 1.5 mL HF 和 0.5 mL HNO_3, 将处理好的样品放于 180℃电热板上恒温加热 12 h, 直至样品完全消解, 后敞开消解罐蒸酸至近干。在蒸干后的样品中加入 1 mL HNO_3 和 1 mL H_2O 密闭回溶 12 h 至样品完全溶解, 待所有样品完全冷却之后用高纯 H_2O 定容至 80 g, 在电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, DRC Ⅱ型)上进行分析测试。每个样品测试 3 次, 样品测试结果根据标样(GBW07315)进行校正, 精度由空白样及平行样控制, 测试元素的相对偏差均小于 5%。测试过程中加入 20×10^{-12} 的 Rh 内标溶液检测仪器的稳定性。

3 结果与讨论

3.1 REE 含量及其变化

YL19A 钻井各组地层岩屑样品中 REE 含量随深度变化如图 3 所示。可以看出, 就整个钻井而言, 稀土元素总量 $m(\sum REE)$变化较大, 介于 76.78~300.55 μg/g, 平均值为 199.96 μg/g; 轻稀土元素($m(\sum LREE)$, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu)含量介于 66.44~274.57 μg/g, 平均值为 180.94 μg/g; 重稀土元素($m(\sum HREE)$, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu)含量较低, 介于 9.47~28.51 μg/g, 平均值为 19.02 μg/g, 三者随井深的变化特征相似。

根据 $m(\sum REE)$、$m(\sum LREE)$和 $m(m(\sum HREE))$的变化, 可将钻井划分为 3 段:

(1) 崖城组三段至二段, 为 $m(\sum REE)$与 $m(\sum LREE)$低值层段, 平均值分别为167.82 μg/g和151.28 μg/g, 且含量变化较为剧烈, 反映出动荡的沉积环境。

(2) 崖城组一段至陵水组, $m(\sum REE)$与 $m(\sum LREE)$波动趋缓, 先是波动式迅速增加, 然后趋于平稳; $m(\sum REE)$与 $m(\sum LREE)$平均值分别为 230.37 μg/g 和 208.94 μg/g, 高于上述井段底部的平均值, 表明水深逐渐加大, 但沉积环境变化仍较剧烈。在 23.8~23.0 Ma

期间, $m(\sum REE)$、$m(\sum LREE)$和 $m(\sum HREE)$出现较大波动, $m(\sum REE)$最大值与最小值分别为 232.57 μg/g 和 158.72 μg/g, 如此剧烈的波动应为大规模构造运动所导致的物源与沉积环境变化所致。

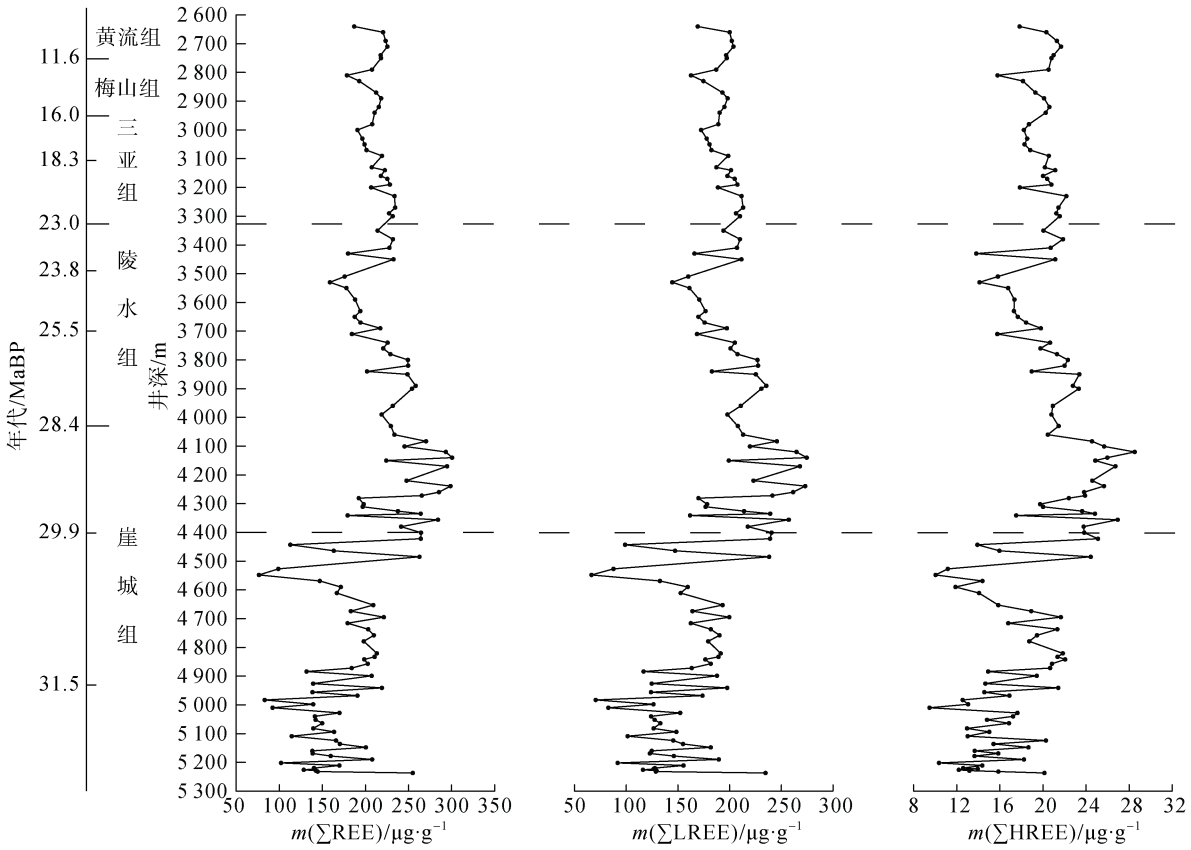

图 3　YL19A 钻井岩屑中 REE 含量随井深的变化

Fig. 3　The variations of REE with depth in Well YL19A sediments

(3) 三亚组至黄流组, $m(\sum REE)$与 $m(\sum LREE)$变化相对较弱, 虽然在梅山组有小幅度下降, 但总体上含量较高, 平均值分别为 212.99 μg/g 和 193.08 μg/g, 反映出较为稳定的沉积环境。在井深 2 805 m 处, $m(\sum REE)$、$m(\sum LREE)$和 $m(\sum HREE)$骤减, 最小值分别为 178.46、162.68 和 15.78 μg/g, 这应是南海新构造期以来构造活动的反映。

3.2　成岩作用和粒度效应对稀土元素含量的影响

已有研究表明, 成岩作用可以改变Ce的异常值, 使其与 δEu 和 $m(\sum REE)$具有较好的相关性[20]。YL19A 钻井中 δCe-δEu 和 δCe-$m(\sum REE)$的相关性均很差, 相关系数分别为 0.058 和 0.074, 说明钻井岩屑 REE 含量及组成受成岩作用影响较小。

沉积物的粒度通常对其化学组成具有一定的控制作用[21]。YL19A 钻井沉积物粒度总体较细, 主要由粉砂和黏土组成(图 4)。沉积物粒度与 $m(\sum REE)$含量的相关性较差: $m(\sum REE)$与黏土组分相关系数为–0.103, 与粉砂组分相关系数为 0.103, 与平均粒径和中值粒径的相关系数分别为 0.069 和 0.036。这表明粒度对 YL19A 钻井岩屑 REE 组成影响十分有限。

以上特征表明, 钻井岩屑 REE 含量及组成受成岩作用和粒度效应影响较小, 主要受物源控制, 可以很好的反映物源区的 REE 地球化学特征。

3.3　标准化 REE 配分模式及其物源指示

已有研究表明, 源于上地壳的沉积物的球粒陨石标准化 REE 配分模式为轻稀土富集、重稀土相对平坦、Eu 呈负异常等特征, 而来自于下地壳以及更深部的物质, 由于元素分异作用使得 Eu 呈正异常, 且 REE 含量较上地壳低[22]。

YL19A 钻井各地层样品的球粒陨石标准化 REE 配分模式如图 5 所示。所有样品的 REE 配分模式大

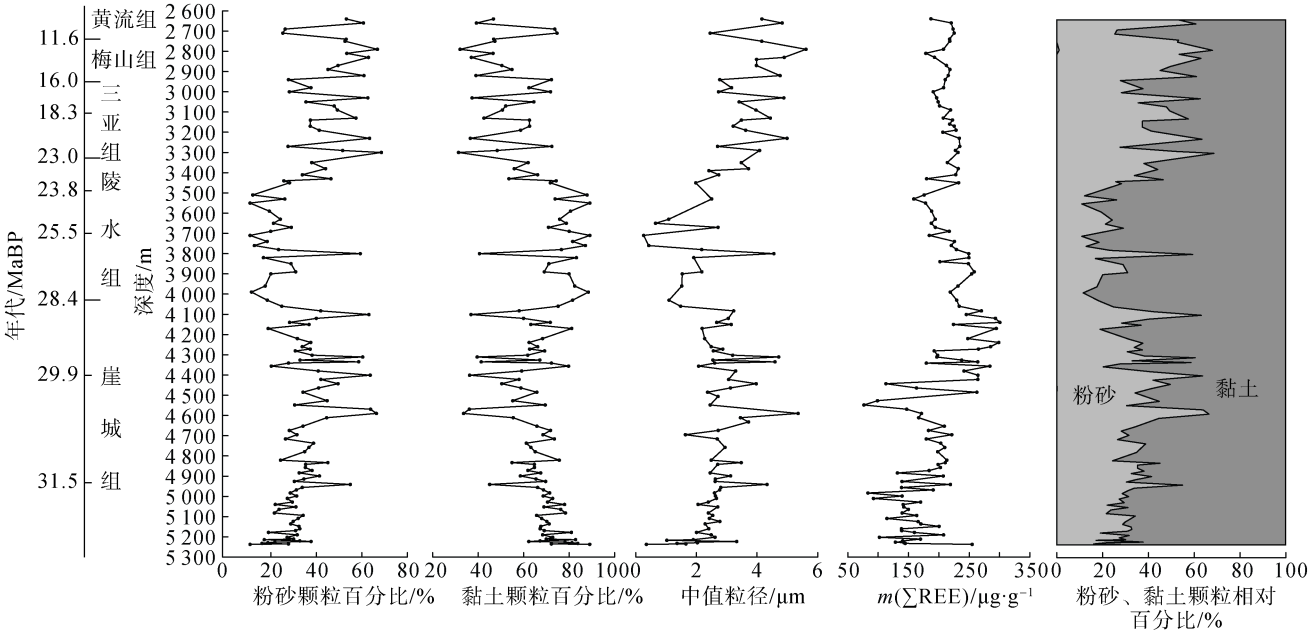

图 4　YL19A 钻井岩屑中粒度含量随井深的变化

Fig. 4　The variations of grain size with depth in Well YL19A sediments

体一致, 都呈现 LREE 富集, HREE 亏损的右倾式, 但在各时代地层之间表现出一定的差异。黄流组、梅山组和三亚组绝大部分样品均呈现出 Eu 的弱负异常, 表明沉积物源主要是源于上地壳酸性岩石的风化产物。崖城组和陵水组样品均表现出不同程度的 Eu 的正异常, 表明沉积物源中可能有源自深部的基性岩组分。南海在新生代发生海底扩张, 岩浆活动频繁, 早期火山活动以基性或中基性火山喷发为特征[23]。在琼东南盆地陵南低凸起的 LS33-1-1 钻井[24], 松南凹陷的 LS4-2-1 钻井、宝岛凹陷的 BD20-1-1 钻井和 BD19-2-2 钻井[4]岩屑中, 在渐新世到中新世时期所形成的沉积物均出现明显 Eu 的正异常, 表明琼东南盆地中西部在该时期的沉积建造中混入了一定数量的基性或中基性的火山喷发(碎屑)物。在中新世, 南海盆地演化进入热沉降期[25], 构造运动及火山活动逐渐减弱, 深部或幔源基性物质对沉积物物源的贡献相应逐渐减小。

YL19A 钻井岩屑各地层样品平均值的北美页岩(NASC)标准化 REE 配分模式如图 6a 所示。各组地层样品的 REE 配分模式较为相似, 各组地层大部分 REE 较 NASC 平均丰度略有富集, LREE 较 HREE 富集更为明显, 并有明显的 Eu 正异常和 Tm 正异常, 自崖城组至黄流组 Eu 的正异常逐渐减小, Tm 的正异常逐渐增加。将 YL19A 钻井岩屑样品的 REE NASC 标准化数据与其他端元进行对比(图 6b)可以看出, 除 Eu 外, 全井段沉积物的 REE 配分模式与上地壳(UCC)和陆源物质的配分曲线大体平行, 而与深海沉积物、大洋玄武岩、火山源及生物源相差较远。这表明 YL19A 钻井自早渐新世以来沉积物源主要是来自上地壳的陆源风化产物。

将 YL19A 钻井岩屑样品的 REE 球粒陨石标准化曲线与红河、珠江和 UCC 等端元对比(图 7)可以看出, YL19A 钻井全井段的 REE 配分模式曲线与 UCC、海南岛花岗岩、红河及珠江等沉积物较为相似, 与大洋玄武岩及深海沉积物相差较大, 同样表明钻井所在研究区物源以来自周边大陆的陆源碎屑为主。从崖城组到黄流组, 样品的 Eu 由正异常逐渐演变为弱负异常, 但 δEu 都高于上述区域, 表明在渐新世到中新世时期, 物源中基性火山物质的比例虽逐渐减小, 但对物源仍有一定贡献。上述特征表明, 研究区沉积物应主要来自于周边大陆及隆起的风化产物, 并可能存在海南岛及红河多物源混合的沉积特征, 但在新近纪早期有一定数量的基性火山物质混入。

3.4　物源判别

在 YL19A 钻井岩屑样品的 m(La)/m(Yb)-m(∑REE)物源判别图(图 8)上, 崖城组到黄流组样品的

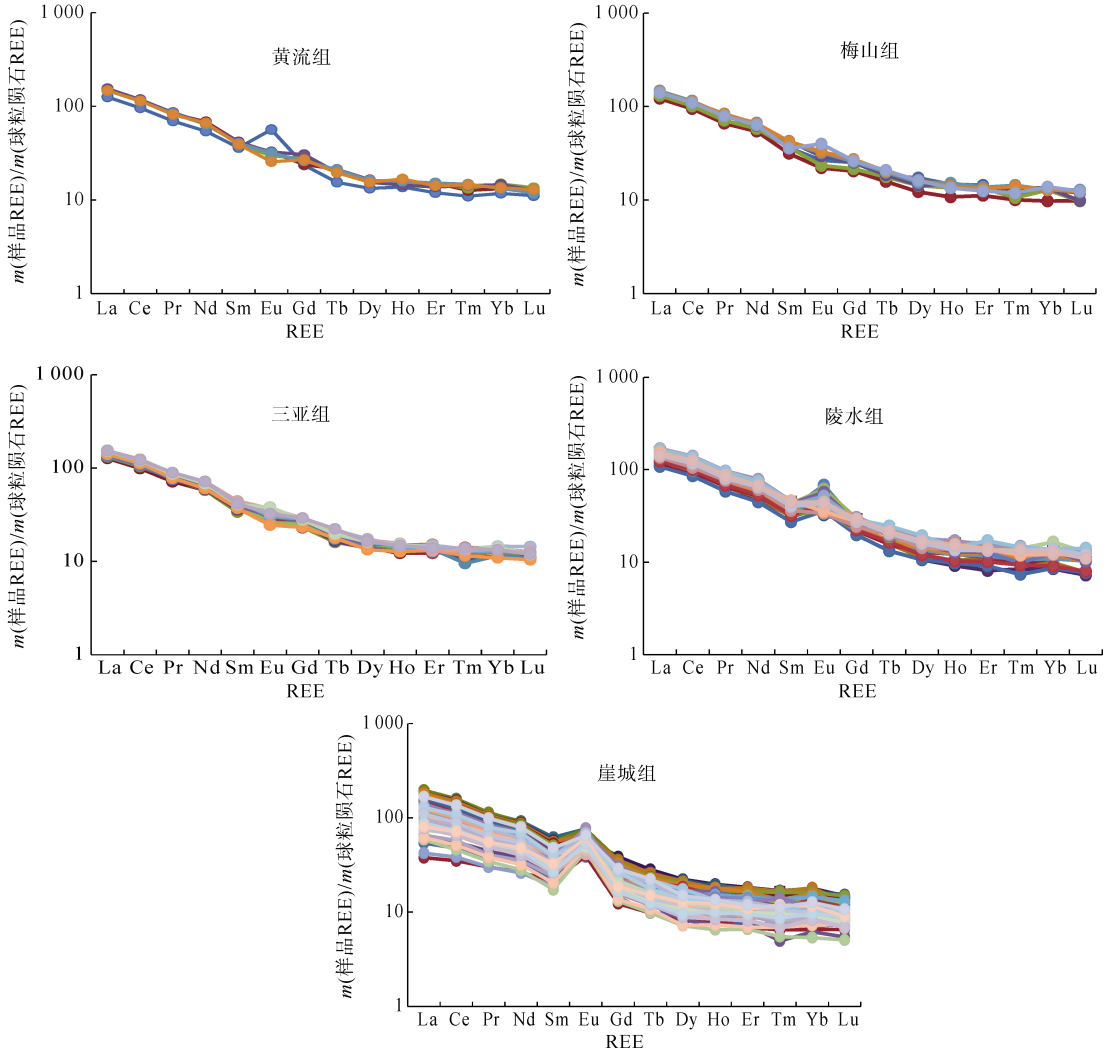

图 5　YL19A 钻井各地层 REE 球粒陨石标准化配分模式

Fig. 5　Chondrite-normalized REE partioning patterns in the core samples of Well YL19A

图中不同颜色表示不同样品，共 128 个样品

different color in the picture represents different samples, a total of 128 core samples

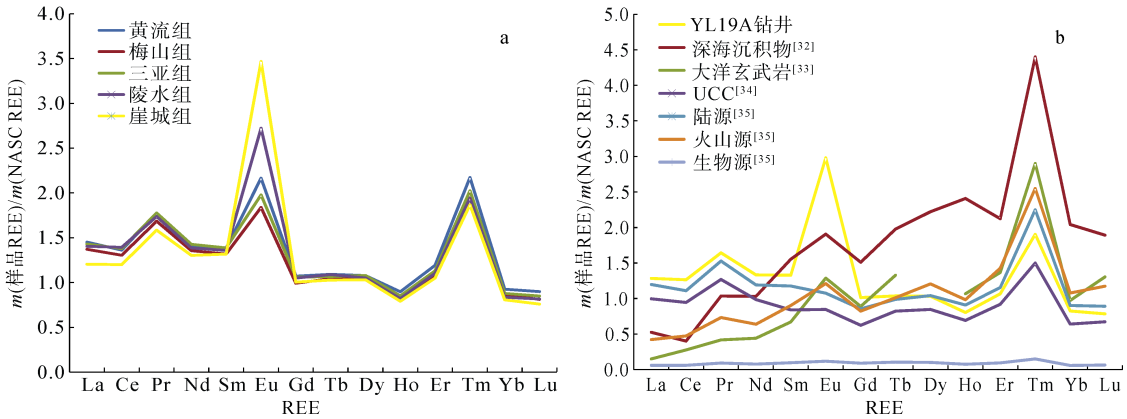

图 6　YL19A 钻井岩屑与其他端元沉积物的 NASC 标准化模式图

Fig. 6　NASC-normalized REE partioning patterns of Well YL19A and comparison of various end-members

a. 为钻井各组样品 NASC 标准化; b. 为钻井与其他端元沉积物 NASC 标准化

a. mean NASC-normalized REE partioning patterns of Well YL19A; b. mean NASC-normalized REE partioning patterns of various end-members and Well19A

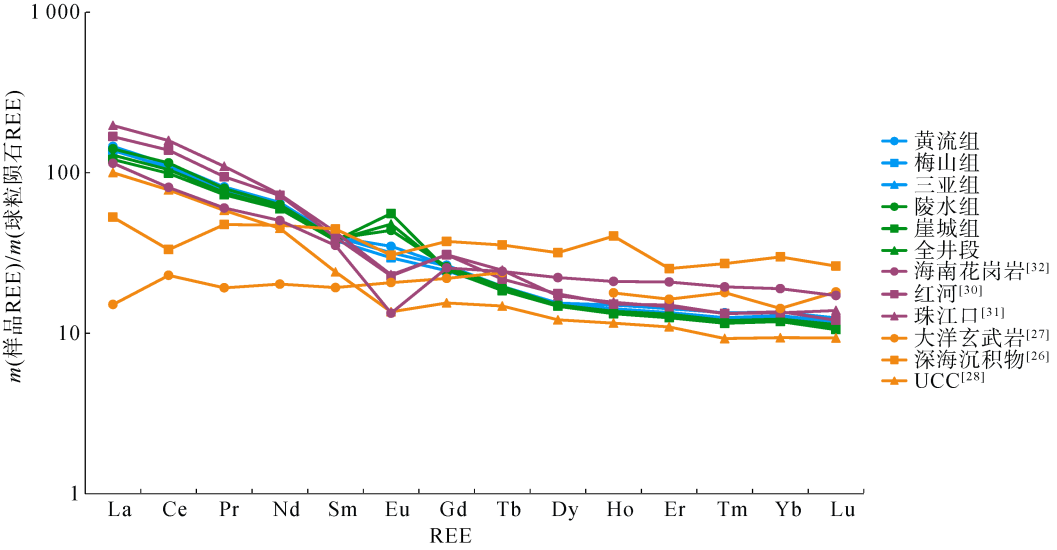

图 7　YL19A 钻井岩屑与代表性端元沉积物 REE 球粒陨石标准化配分模式

Fig. 7　Chondrite-normalized REE partitioning patterns of Well YL19A and various end-members

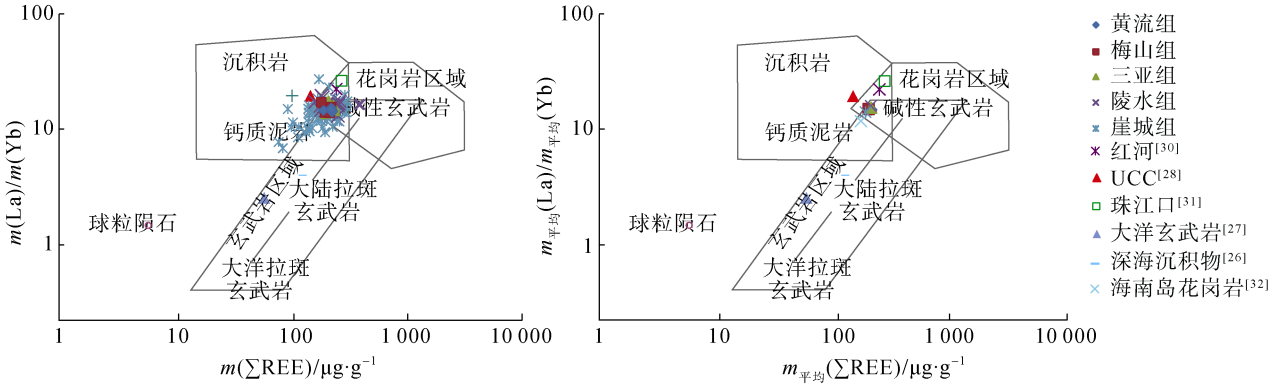

图 8　YL19A 钻井岩屑样品 m(La)/m(Yb)-m(∑REE)物源判别图

Fig. 8　m(La)/m(Yb)-m(∑REE) for provenance discrimination of Well YL19A sediments

平均值均落在沉积岩、花岗岩与碱性玄武岩三者的交汇区域，说明研究区从渐新世至中新世沉积物源为沉积岩、花岗岩与碱性玄武岩三者风化产物的混合，混合沉积物来自琼东南盆地周边大陆广泛分布的花岗岩和沉积岩以及新生代南海海底扩张所引发的火山活动所产生的基性火山碎屑。图 7 中 YL19A 钻井中部分地层样品的 Eu 正异常应是基性火山物质混入的反映。总体来看，YL19A 岩屑样品与 UCC、红河和海南岛花岗岩聚在一起，与深海沉积物及大洋玄武岩相距较远，说明研究区沉积物源是以陆源为主。与上述区域相比，YL19A 钻井各地层样品更接近沉积岩、花岗岩与碱性玄武岩三者的交汇区，这表明研究区物源具有陆源物质和基性火山物质混合的特点。

在岩屑样品的 m(Hf)-m(La)/m(Th)物源判别图(图 9)上，崖城组至梅山组样品平均值均投在长英质、基性岩混合物源区，黄流组样品平均值投在长英质物源区。结合图 7 和图 8 可知，从崖城组到黄流组，基性组分对物源的影响逐渐减弱，研究区物源从有基性火山物质参与的多源混合型转变为以长英质物源为主的相对单一型。

在岩屑样品的 δEu-(m(La)/m(Yb))$_N$ 物源判别图(图 10)上，陵水组至黄流组样品更靠近于红河沉积物，而崖城组大多数样品距海南岛和红河沉积物都较远，说明在早渐新世时期红河与海南岛物源对研究区贡献甚微。而在晚渐新世之后，相比于海南岛，红河沉积物对研究区物源的贡献更大。这是由于渐新世早期研究区为海陆过渡环境，主要接受周边凸

起的近源沉积物，红河与海南岛的沉积物并没有输送至研究区。从渐新世晚期开始，随着琼东南盆地全区发生海侵，研究区变为浅海环境，开始接受来自红河与海南岛的沉积物，而红河沉积物对物源贡献相对较大原因可能是南海在中新世时期相对海平面大幅度下降[11]，造成了莺歌海盆地沉积可容空间的减少，并随着临高低隆起的区域性构造反转，使得莺歌海盆地沉积中心由南部迁移到北部[33]，这两点共同造成了沉积在莺歌海盆地中的红河沉积物通过中央峡谷二次运移到琼东南盆地的中西部区域。

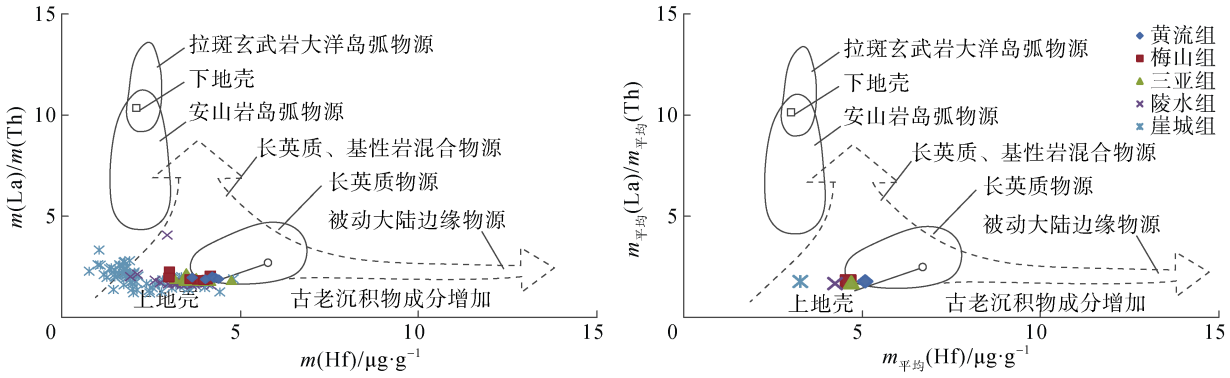

图 9　YL19A 钻井岩屑样品 m(Hf)-m(La)/m(Th)物源判别图

Fig. 9　m(Hf)-m(La)/m(Th) for provenance discrimination of Well YL19A sediments

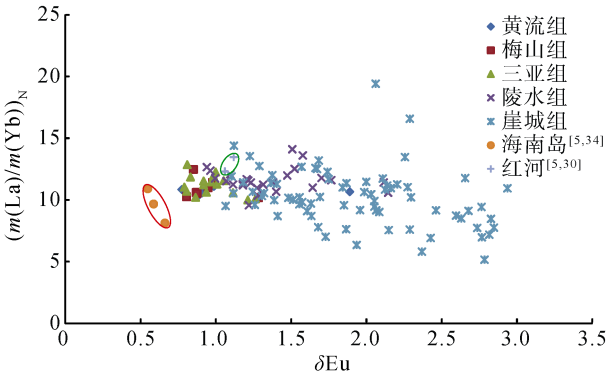

图 10　YL19A 钻井岩屑样品 δEu-(m(La)/m(Yb))$_N$ 物源判别图

Fig. 10　δEu-(m(La)/m(Yb))$_N$ for provenance discrimination of sediments of Well YL19A

3.5　构造及沉积环境分析

YL19A 钻井岩屑样品 REE 特征参数及重矿物含量变化如图 11 所示。重矿物主要由陆源重矿物(角闪石、绿帘石、云母、石榴子石、磁铁矿和褐铁矿等)和自生矿物(黄铁矿、白云石、菱铁矿和绿泥石)组成。众所周知，沉积岩(物)中的黄铁矿一般形成于深水厌(缺)氧环境，白云石反映的是极浅水的强蒸发环境，海绿石反映的是沉积缓慢的还原性浅海环境，菱铁矿通常是低氧环境下生物作用的产物，在沉积盆地中出现代表的是海相或湖相的低氧环境。

在崖三段至崖二段形成时期，陆源重矿物含量为全井段最高，说明物源中有较多的陆源碎屑组分；m(∑REE)与 m(∑LREE)在全井段最低且 REE 配分模式有明显的 Eu 正异常，表明有大量火山碎屑物混入。白云石含量较高，钙质超微化石和有孔虫在该层段也极少甚至缺失，这些都表明当时水深极浅。琼东南盆地崖城组形成于裂陷晚期，当时古湖消亡，大规模海侵即将开始，普遍存在海陆过渡相沉积环境[4]，不利于钙质超微化石和有孔虫化石的保存。以上特征表明，在早渐新世早期(29.9Ma 之前)研究区为海陆过渡相环境，物源以来自周边凸起的陆源碎屑和火山物质为主。

在井深 4 500~4 400 m 层段(形成时代 30.4~29.9 Ma)，陆源重矿物含量骤增，m(∑REE)与 m(∑LREE)骤减，Eu 的正异常明显。且在此之后到 28.4 Ma，陆源重矿物含量减少，m(∑REE)与 m(∑LREE)增加，δEu 降低。表明在 30 Ma 左右，研究区发生了构造运动并伴随有火山活动，导致大量基性火山物质加入沉积物中。南海 ODP1148 站岩屑样品地球化学特征在 30 Ma 也存在明显的突变[35]，南海海盆在经历白垩-早第三纪初期的拉张[36]后，在 30 Ma 时出现了新的洋壳。到 28.4 Ma 期间，陆源重矿物和白云石含量较崖三段和二段减少，黄铁矿含量增加，说明水深增大，沉积环境过渡为滨浅海环境。在陵水-乐东凹陷周边发育的滨岸平原-滨海体系和扇三角洲体系[4]证实了这些依据重矿物和地球化学特征所做的推论。总体而言，

在早渐新世晚期研究区为滨浅海环境，物源主要为周边凸起的陆源碎屑，但仍有基性火山物质的影响。

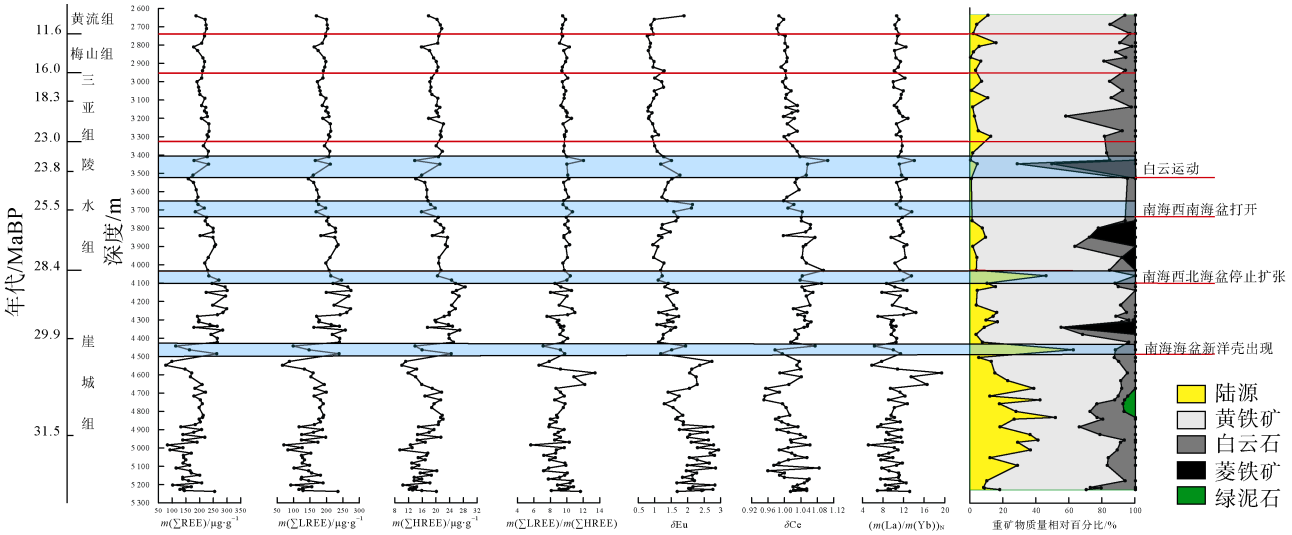

图 11　YL19A 钻井岩屑样品 REE 特征参数及重矿物随井深变化图

Fig. 11　The variations of REE characteristics parameters and heavy mineral with depth in sediments of Well YL19A

在井深 4 100~4 000 m 层段(形成时代 28.8~28.4 Ma)，陆源重矿物含量骤增，$m(\sum REE)$与 $m(\sum LREE)$骤减，在井深 3 750~3 650 m 层段(形成时代 26~25 Ma)也出现了 REE 特征参数的突变，反映了构造运动的影响。南海 ODP1148 站和 LS33A 钻井样品的微量和 REE 特征在 28.4 Ma 和 25.5 Ma 处均发生了明显的突变[8, 36]。其中，在 28.5 Ma 时南海西北海盆停止扩张[37]，南海扩张作用在中央海盆开始，到 25 Ma 时南海扩张轴发生跳跃，由原来 EW 向转为 NEE-SWW 向，南海西南海盆开始打开[38]。在 28.4 Ma 之后，陆源重矿物含量保持低值，黄铁矿含量较高，REE 特征参数也较为稳定，有孔虫和钙质超微化石的丰度、分异度也逐渐升高，反映出沉积环境已由滨浅海变为浅海相环境。且自渐新世晚期，受南海海底扩张的影响，琼东南盆地全区发生海侵[4]，研究区周边的凸起逐渐没于水下，物源区由近源向远源不断扩大。由上推测，从渐新世晚期到中新世，研究区沉积环境为较为稳定的浅海环境，物源变为以远源陆源物质为主。

在井深 3 500~3 400 m 层段(形成时代 23.8~23.3 Ma)，白云石和菱铁矿含量为全井段最高，REE 特征参数出现明显的异常。南海北部和珠江口盆地在 23.8Ma 出现了一次大规模的构造运动——白云运动，使得珠江口盆地及 ODP1148 站位区在渐新统-中新统界限上下沉积速率、地球化学特征等参数均出现明显的异常[35]。YL19A 钻井在 23.8Ma 所出现的异常表明白云运动已影响到了琼东南盆地深水区的中南部地区。

4　结论

1) YL19A 钻井岩屑样品的 $m(\sum REE)$变化较大，$m(\sum REE)$、$m(\sum LREE)$和 $m(\sum HREE)$随地层由老到新呈波动式增加的趋势。岩屑样品的球粒陨石标准化 REE 配分模式总体呈现轻稀土(LREE)富集，重稀土(HREE)亏损的右倾式，但在各时代地层之间表现出一定的差异。崖城组和陵水组岩屑呈现明显的 Eu 正异常，而梅山组、三亚组和黄流组岩屑呈现 Eu 的弱负异常。

2) 在早渐新世时期，研究区物源以来自周边凸起的火山碎屑和陆源碎屑为主，沉积环境为海陆过渡相环境；自渐新世晚期开始，随着琼东南盆地全区发生海侵，研究区水深逐渐增大，沉积环境由海陆过渡相变为浅海相，物源演变为以远源陆源物质为主，并具有红河与海南岛多物源混合的特征，红河沉积物对物源贡献相对较大，基性火山物质的对物源的贡献减弱。

3) 钻井岩屑的 REE 地球化学特征在距今 30、28.5、25.5 和 23.8 Ma 等地层界面处均发生明显的突变，表明沉积环境及物源均发生了明显的变化，反映了构造运动的影响。在南海的构造演化过程中，南海新洋壳出现(30 MaBP)、西北海盆停止扩张(28.5 MaBP)、西南海盆打开(25 MaBP)和白云运动

(23.8 MaBP)等构造事件均在钻井岩屑的REE地球化学特征上都有着良好的记录。

参考文献:

[1] Mclennan S M. Rare-earth elements in sedimentary-rocks-influence of provenance and sedimentary processes[J]. Reviews in Mineralogy, 1989, 21(8): 169-200.

[2] Cullers R L. The controls on the major- and trace- element evolution of shales, siltstones and sandstones of Ordovician to Tertiary age in the wet mountains region, Colorado, U.S.A[J]. Chemical Geology, 1995, 123(1): 107-131.

[3] 杨守业, 李从先. 长江与黄河沉积物 REE 地球化学及示踪作用[J]. 地球化学, 1999, 28(4): 374-380.
Yang Shouye, Li Congxian. REE geochemistry and tracing application in the Yangtze River and Yellow River sediments[J]. Geochimica, 1999, 28(4): 374-380.

[4] 邵磊, 李昂, 吴国瑄, 等. 琼东南盆地沉积环境及物源演变特征[J]. 石油学报, 2010, 31(4): 548-552.
Shao Lei, Li Ang, Wu Guoxuan, et al. Evolution of sedimentary environment and provenance in Qiongdongnan Basin in the northern South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(4): 548-552.

[5] 王永凤, 王英民, 李冬, 等. 琼东南盆地中央峡谷早上新世沉积物稀土元素特征及物源分析[J]. 石油天然气学报, 2011, 33(6): 50-52.
Wang Yongfeng, Wang Yingmin, Li Dong, et al. Features and source analysis on early Pliocene sedimentary REE in central canyon of Qiongdongnan Basin[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2011, 33(6): 50-52.

[6] 吴梦霜, 邵磊, 庞雄, 等. 南海北部深水区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.

[7] 杨文光, 谢昕, 郑洪波, 等. 南海北部陆坡高速堆积体沉积物稀土元素特征及其物源意义[J]. 矿物岩石, 2012, 32(1): 74-81.
Yang Wenguang, Xie Xin, Zheng Hongbo, et al. Rare earth elements chareteristics of sediments from high-deposition-rate sediment in the north slope of South China Sea and its provenance significance[J]. Mineral Petrol, 2012, 32(1): 74-81.

[8] Sun Z, Zhai S K, Xiu C, et al. Geochemical characteristics and their significances of rare-earth elements in deep-water well core at the Lingnan low uplift area of the Qiongdongnan Basin[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2014, 33(12): 81-95.

[9] 雷超, 任建业, 李绪深, 等. 琼东南盆地深水区结构构造特征与油气勘探潜力[J]. 石油勘探与开发.2011, 38(5): 560-569.
Lei Chao, Ren Jianye, Li Xushen, et al. Structural characteristics and petroleum exploration potential in the deep-water area of the Qiongdongnan Basin, South China Sea[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(5): 560-569.

[10] 米立军, 袁玉松, 张功成, 等. 南海北部深水区地热特征及其成因[J]. 石油学报, 2009, 30(1): 27-32.
Mi Lijun, Yuan Yusong, Zhang Gongcheng, et al. Characteristics and genesis of geothermal field in deep water area of the northern Sourth China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(1): 27-32.

[11] 龚再升. 南海北部大陆边缘盆地分析与油气聚集[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
Gong Zaisheng. The Basin Analysis and Hydrocarbon Accumulation in North Marginal Basins of South China Sea[M]. Beijing: Science Press, 1997.

[12] 张云帆, 孙珍, 郭兴伟, 等. 琼东南盆地新生代沉降特征[J]. 热带海洋学报, 2008, 27(5): 30-36.
Zhang Yunfan, Sun Zhen, Guo Xingwei, et al. Tectonic subsidence characteristics of Qiongdongnan Basin in Cenozoic[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2008, 27(5): 30-36.

[13] 李绪宣, 刘宝明, 赵俊青. 琼东南盆地古近纪层序结构、充填样式及生烃潜[J]. 中国海上油气, 2007, 19(4): 217-223.
Li Xuxuan, Liu Baoming, Zhao Junqing. Paleogene sequence configuration, depositional filling pattern and hydrocarbon-generation potential in Qiongdongnan Basin[J]. China off Shore Oil and Gas, 2007, 19(4): 217-223.

[14] Wang Y M, Qiang X U, Dong L I, et al. Late Miocene Red River submarine fan, northwestern South China Sea[J]. Chinese Sci Bull , 2011, 56(14): 1488-1494.

[15] 李冬, 徐强, 王永凤. 琼东南盆地上新世中央峡谷物源分析及其意义[J]. 沉积学报, 2015, 33(4): 659-664.
Li Dong, Xu Qiang, Wang Yongfeng. Provenance analysis of the Pliocene central canyon in Qiongdongnan Basin and its implications[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2015, 33(4): 659-664.

[16] Liu J, Xiang R, 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(1): 92-102.

[17] Chen H, Xie X, Rooij D V, et al. Depositional characteristics and processes of alongslope currents related to a seamount on the northwestern margin of the Northwest Sub-Basin, South China Sea[J]. Marine Geology, 2014, 355(3): 36-53.

[18] Cao L, Jiang T, Wang Z, et al. Provenance of Upper Miocene sediments in the Yinggehai and Qiongdongnan basins, northwestern South China Sea: Evidence from REE, heavy minerals and zircon U–Pb ages[J]. Marine Geology, 2015, 361: 136-146.

[19] 陈奎. 琼东南盆地油气目标地层沉积物源分析[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
Chen Kui. Sediment source analysis of oil and gas objective strata in the Qiongdongnan Basin[D]. Qingdao: The Ocean University of China, 2012.

[20] Shields G, Stille P. Diagenetic constraints on the use of cerium anomalies as palaeoseawater redox proxies: an isotopic and REE study of Cambrian phosphorites[J]. Chemical Geology, 2001, 175(1–2): 29-48.

[21] Yang S Y, Jung H S, Man S C, et al. The rare earth element compositions of the Changjiang (Yangtze) and Huanghe (Yellow) river sediments[J]. Earth & Planetary Science Letters, 2002, 201(2): 407-419.

[22] Mclennan S M, Hemming S, Mcdaniel D K, et al. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics[J]. Special Paper of the Geological Society of America, 1993, 284: 21-40.

[23] 程世秀, 李三忠, 索艳慧, 等. 南海北部新生代盆地群构造特征及其成因[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2012, 32(6): 79-93.
Cheng Shixiu, Li Sanzhong, Suo Yanhui, et al. Cenozoic tectonics and dynamics of basin groups of the northern Sourth China Sea[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2012, 32(6): 79-93.

[24] 李娜. 琼东南盆地深水区渐新世以来沉积古环境及物源分析[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
Li Na. The sedimentary paleoenvironment and provenance analysis in deepwater area of Qiongdongnan Basin since Oligocene[D]. Qingdao: The Ocean University of China, 2013.

[25] 张功成. 南海北部陆坡深水区构造演化及其特征[J]. 石油学报, 2010, 31(4): 528-533.
Zhang Gongcheng. Tectonic evolution of deepwater area of northern continental margin in South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(4): 528-533.

[26] 王金土. 黄海表层沉积物稀土元素地球化学[J]. 地球化学, 1990, 3(1): 44-53.
Wang Jintu . REE geochemistry of surficial sediments from the Yellow Sea of China[J]. Geochimica, 1990, 3(1): 44-53.

[27] Frey F A, Larry H. Rare earths in oceanic basalts[J]. Journal of Geophysical Research, 1964, 69: 775-780.

[28] Rudnick C, Dalpé P B, Tomascak B W, et al. Lithium isotopic composition and concentration of the upper continental crust[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2004, 68(20): 4167-4178.

[29] 刘娜. 稀土元素在冲绳海槽沉积物物质来源和古海洋环境研究中的应用[D]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2002.
Liu Na. The application of REE in the study of the material source and paleo-environment on the deposit from the Okinawa Through[D]. Qingdao: The First Institute of Oceanography, State Oceanic Adminstration, 2002

[30] 童胜琪. 珠江、红河及湄公河流域表层沉积物元素地球化学研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
Tong Shengqi. Element geochemistry for surface sediments of Pearl, Red and Mekong Rivers[D]. Shanghai: Tongji University, 2007.

[31] 刘岩, 张祖麟, 洪华生. 珠江口伶仃洋海区表层沉积物稀土元素分布特征及配分模式[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1999, 19(1): 103-107.
Liu Yan, Zhang Zulin, Hong Huasheng. Distribution charaters and model of rare earth element in surface sediments from Lingdingyang area of Pearl River estuary[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 1999, 19(1): 103-107.

[32] 许德如, 梁新权, 陈广浩, 等. 海南岛中元古代花岗岩地球化学及成因研究[J]. 大地构造与成矿学, 2001, 25(4): 420-433.
Xu Deru, Liang Xinquan, Chen Guanghao, et al. Research on the geochemistry and genesis of Mesoproterozoic granites on Hainan Island[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2001, 25(4): 420-433.

[33] Zhu M, Graham S, McHargue T. The Red River Fault zone in the Yinggehai Basin, South China Sea[J]. Tectonophysics, 2009, 476: 397-417.

[34] Wei G, Liu Y, Ma J, et al. Nd, Sr isotopes and elemental geochemistry of surface sediments from the South China Sea: Implications for provenance tracing[J]. Marine Geology, 2012, s 319-322(2): 21-34.

[35] 邵磊, 李献华, 汪品先, 等. 南海渐新世以来构造演化的沉积记录: ODP1148 站深海沉积物中的证据[J]. 地球科学进展, 2004, 19(4): 539-544.
Shao Lei, Li Xianhua, Wang Pinxian, et al. Sedimentary record of the tectonic evolution of the South China Sea since the Oligocene: Evidence from deep sea sediments of ODP Site 1148[J]. Advance in Earth Sciences, 2004, 19(4): 539-544.

[36] 刘昭蜀, 赵焕庭, 范时清, 等. 南海地质[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
Liu Zhaoshu, Zhao Huanting, Fan Shiqing, et al. Geology of the South China Sea[M]. Beijing: Science Press, 2002.

[37] Taylor B, Hayes D E. The tectonic evolution of the South China Basin[J]. Washington Dc American Geophysical Union Geophysical Monograph, 1980, 23: 89-104.

[38] Briais A, Patriat P, Tapponnier P. Updated interpretation

of magnetic anomalies and seafloor spreading stages in the South China Sea: Implications for the tertiary tectonics of southeast Asia[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1993, 98(B4): 6299-6328.

The sedimentary environment and provenance analysis based on geochemical characteristics of rare-earth elements in deep-water well core of the Qiongdongnan Basin

JIANG Long-jie[1], SUN Zhi-peng[2], ZHAI Shi-kui[1], LIU Xin-yu[2], YOU Li[2], CAO Jia-qi[1], ZHANG Ai-bin[1], BI Dong-jie[1], ZHANG Wan[1]

(1. Key Laboratory of Submarine Geosciences and Prospection of Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Zhanjiang Branch of CNOOC Ltd., Zhanjiang 524057, China)

Received: Mar. 21, 2017

Key words: rare-earth elements; sedimentary source and environment; tectonic events record; the deepwater area of the Qiongdongnan Basin

Abstract: The geochemical characteristics of rare-earth elements (REE) in samples collected from the deep-water well core YL19A of the Qiongdongnan Basin were analyzed to reveal the changes in sedimentary source and paleoenvironment. The chondrite-normalized REE partitioning patterns in the core samples exhibit the relative enrichment of light rare earth elements and a stable content of heavy rare earth elements on the whole. However, there are differences between the different formations. The samples of the Yacheng and Lingshui formations exhibit significant positive Eu anomaly, and the samples of Meishan, Sanya, and Huangliu formations exhibit weak negative Eu anomaly. This indicates the changes of sedimentary source and paleoenvironment. The provenance in the study region mainly resulted from the volcanic materials and terrigenous debris of the peripheral uplift areas, and the sedimentary environment was continental-marine transitional environment in the early Oligocene. Since the late Oligocene, with the Qiongdongnan Basin transgressions, the sea level increased gradually. The sedimentary environment transformed from continental-marine transition into shallow marine environment, and the provenance expanded from the proximal to the distal realm, exhibiting a characteristic of multi-source sedimentation. The provenance was from the Red River and the Hainan Island, and the sediment coming from the Red River contributed more to the provenance. The basic volcanic materials in provenance decreased. In the strata of well YL19A, 30, 28.5, 25.5, and 23.8 Ma, the REE geochemical characteristics have undergone significant saltations, reflecting the impact of tectonic movements.

(本文编辑：刘珊珊)