

文章编号: 1000-0550(2012)04-0672-07

南海北部深水区沉积物稀土元素特征及其物源指示意义^①

吴梦霜^{1,2} 邵磊¹ 庞雄² 乔培军¹ 向绪洪¹ 赵梦¹

(1. 同济大学海洋地质国家重点实验室 上海 200092; 2. 中国海洋石油(中国)有限公司深圳分公司研究院 广州 510240)

摘要 对南海北部白云深水区沉积物稀土元素的研究表明,渐新世至中新世的物源发生较大变化。渐新世时期,白云深水区不同区域稀土元素的分布特征差异明显,表明沉积物物源不同。深水区北部沉积物主要来自古珠江物源区,深水区东、西部沉积物中含有较多中基性火山物质,南部则主要包含基性火山物质,说明当时南海北部地区构造活动较强,存在较多火山活动,火山活动由北向南基性成分增多。渐新世末的白云运动使南海北部深水区产生强烈持续沉降,造成陆架坡折带北移,白云深水区从渐新世浅海陆架环境演化为中新世陆坡深水环境,中新世期间沉积物主要来自深水区北部的珠江三角洲物源,深水区东部存在东沙隆起源区,而深水区南部沉积物在中新世仍受到基性火山活动的影响。

关键词 稀土元素 物源 南海北部 白云凹陷 沉积学

第一作者简介 吴梦霜 女 1973年出生 博士研究生 沉积学 E-mail: wumsh@cnooc.com.cn

中图分类号 P593 **文献标识码** A

南海是西太平洋边缘海构造活动最为活跃的地区,各种地质作用十分复杂。南海北部自始新世以来沉积环境复杂多变,发育有陆相河流、湖泊到海陆过渡相以及浅海、深海相等多种沉积相,是我国沉积环境最为丰富的沉积盆地。注入南海北部的珠江是我国东部地区年龄最老的河流,珠江三角洲也是我国东部大河三角洲中唯一盛产石油的地区,特别是近几年该地区深水扇系统的发现及其所蕴藏的丰富的油气资源,使该地区为沉积学界所关注^[1~5]。因此,对南海北部深水区沉积及物源演化研究对深化该地区沉积学的认识,以及南海北部油气资源勘探开发具有重要意义。

物源分析的方法与手段较多,从沉积岩的成分、结构、构造探讨与沉积物源区的关系是最常见的方法;单颗粒重矿物的地球化学分异特征或重矿物组合演化也常用来判断物源类型。但是,由于沉积物可能经历了多次搬运、沉积和改造作用,具有多旋回性,使通过重矿物组分或含量变化来直接判断物源类型存在局限;就目前发展趋势及精度而言,通过微量元素比值变化判断物源区的地球化学和同位素方法越来越受青睐,结合沉积相分析可以达到很好的判断效果。

Taylor 等认为,稀土元素(REE)和钇(Y)、钪

(Th)、钪(Sc)、以及钴(Co)等中既有强不相容元素(LREE, Th),也有强相容元素(Sc, Co),可以提供良好的化学分异指数,沉积物中这些元素含量及其比值受风化、剥蚀、搬运、成岩乃至变质作用的影响较弱,不易受沉积环境的影响,主要由源岩特征决定^[6]。因此,这些元素在沉积物物源演化研究中具有重要的示踪价值。

对于南海北部白云深水区的沉积物源研究主要是通过地层划分与对比来推测沉积物来源,在本区从沉积物元素特征分析出发对物源进行研究尚为首次。本文从稀土元素地球化学角度出发,对南海北部白云深水区沉积物代表性样品进行对比分析,探讨南海北部该地区渐新世—中新世时期沉积物来源及其变迁规律,揭示南海盆地构造演化与沉积充填之间的耦合关系。

1 材料与方法

本文选择南海北部深水区白云凹陷及其周边的B6、P33、P30、L19、L18、L21、P34、P35、W3、W4、W9等11口井(图1)的岩芯及岩屑样共1021个,通过沉积物稀土元素含量分布特征进行对比分析,综合研究南海北部深水区的沉积物源演变规律。

样品的前期处理及分析测试均在同济大学海洋

①国家科技重大专项(编号:2011ZX05025-003),国家重点基础研究发展规划项目(编号:2007CB819501)及国家自然科学基金项目(批准号:91128207,40976023)联合资助。

收稿日期:2011-07-22; 收修改稿日期:2011-10-29

地质国家重点实验室完成,分析测试采用美国热电公司的电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)完成。沉积物样品首先在低温(约50℃)下烘干,压碎,并在620℃灼烧30 min以剔除有机质及沉积物内黏土矿物中的层间水,称重并计算烧失率。然后用0.1 mol/L HCl除去CaCO₃,尽量避免海洋自生沉积物对分析结果产生的干扰。样品用HF+HNO₃混合酸分解,并用外部标准校正方法在等离子体质谱仪(ICP-MS)上测定微量及稀土元素含量。每个样品测定6次,由国际标样(如GSR-1、JSD-1等)、重复样品以及空白样品进行校正,样品准确度及精确度由控制样品及重复样品监控,元素的相对偏差(RSD)小于2%。此次分析元素包括REE、Y、Sc、Th、Sr、Zr、Hf、U、Nb等元素。

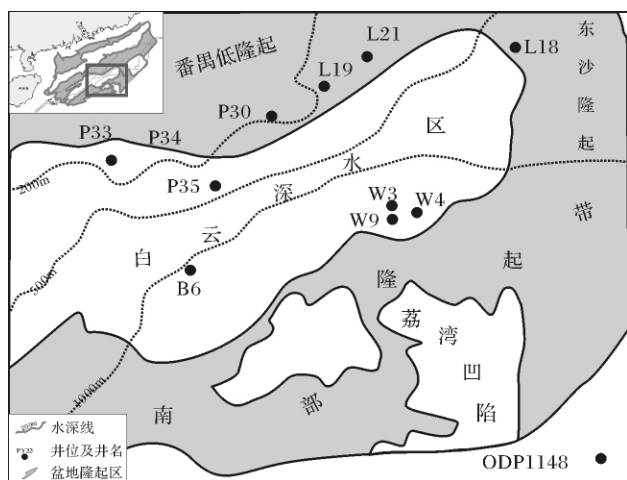


图1 南海北部白云深水区及其周边采样井位分布图

Fig. 1 Location of the samples in Baiyun deepwater area of the northern South China Sea

2 结果及讨论

2.1 稀土元素的地球化学特征

稀土元素(REE)包括La、Ce、Pr、Nd、Pm、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu,其中前6个元素统称为轻稀土元素,用 ΣCe 表示;后9个元素统称为重稀土元素,用 ΣY 表示。REE化学性质相似,稳定性好,溶解度较低,在岩石风化、剥蚀、搬运、沉积及成岩作用过程中,仅发生极微弱的富集与亏损。一般认为,沉积岩中稀土元素含量的变化主要受源区母岩类型控制,与物源区母岩类型密切相关^[7]。因此,研究稀土元素的地球化学特性对揭示沉积岩的物源特征具有重要意义。

由于分析样品众多,本文将各井同一岩石地层单元样品的测试数据平均值来表征该地层单元的REE丰度。经分析,南海北部白云深水区及其周边各井沉积物的REE总量平均值为:152.5 $\mu\text{g/g}$,十分接近中国黄土(171 $\mu\text{g/g}$)的稀土总量值,具有明显的“亲陆性”,沉积物主体以陆源碎屑为主,各井轻重稀土元素含量之比($\Sigma Ce/\Sigma Y$)在2.44~4.46之间,表现出一定程度的轻稀土元素富集,说明沉积物更偏向来源于上地壳。

2.2 稀土元素的球粒陨石标准化配分模式

在稀土元素研究方面,人们先后对北美页岩中的稀土元素(NASC)以及澳大利亚后太古代平均页岩成分中的稀土元素(PAAS)进行了深入的研究,发现它们总体特征极其相似,故认为其代表了上地壳中稀土元素的分布特征。源自上地壳的稀土元素表现出富含轻稀土,重稀土含量稳定及负的Eu元素异常等性质。轻稀土富集说明上地壳中大离子亲石元素的含量相对于原始幔源明显偏高;重稀土含量均匀则是上地壳内缺少使重稀土分馏的因素。由于元素分异作用使稀土元素Eu在上地壳中缺失,造成其在上地壳中出现负异常。相反Eu元素在下地壳中则出现富集,呈现出正异常,同时轻重稀土含量差异在下地壳中也明显缩小。因此,来自上地壳或酸性岩的沉积物中均呈现Eu元素的负异常,而来自下地壳基性岩的沉积物Eu元素则呈现正异常;来自中性岩的稀土元素配分形式出现轻重稀土含量均一,Eu元素没有异常的特性。根据稀土元素的这些分布特征,可以分辨出沉积物源岩的母岩性质。世界上大的河流由于流域范围大,沉积物可以充分混合,其稀土元素配分特征与上地壳的平均值十分接近。而短距离的近源河流,母岩组分单一,其形成的沉积物稀土元素配分特征更接近母岩特性。

在早渐新世(32 Ma以前,图2A),南海北部白云深水区北部与南部的物源明显不同,北部P33井的稀土元素配分模式表现为宽缓的右倾模式,与PAAS曲线基本平行,呈现轻稀土相对富集、重稀土含量均一、Eu元素负异常的特点,W3井的稀土元素配分模式与P33井的稀土元素配分模式相似,显示沉积物来自沉积岩或酸性岩区,极有可能是古珠江物源。而位于白云凹陷南部的W9及W4井的稀土配分模式中轻重稀土含量差异减小,Eu为明显正异常,表明有基性物质的加入,物源与W3井以及北部物源明显不同。

在晚渐新世(23.8~32 Ma,图2B),白云深水区

北部的 P33 ,P34 ,P35 等各井均呈现轻稀土相对富集 ,重稀土含量均一 ,Eu 负异常的特点 ,与 PAAS 曲线完全平行 ,应受古珠江三角洲物源控制。而白云深水区南部 W 井仍保持早渐新世的稀土配分分布特征 ,表明本区持续有基性物质加入; B6 井位于白云深水区中部的火山岛上 ,岩石成分分析表明 ,该时期 B6 井沉积物中包含大量中基性火山碎屑物质 ,火山活动强烈 ,造成该时期沉积物 Eu 元素正异常明显;而在凹陷东部的 L21 井则体现出中性火山岩的特征 ,与该井距东沙火山隆起区较近 ,沉积物受到东沙火山活动的影响有关。

早中新世早期(18.5 ~ 23.8 Ma ,图 2C) ,分布在白云深水区北部的 P33 ,P34 ,P35 各井及相邻的 L19 井的稀土元素配分特征与晚渐新世相同 ,主要受古珠江三角洲物源控制。而白云深水区南部的 W3 ,W4 ,W9 三口井以及白云深水区东部的 L18、L21 及西部

B6 的稀土配分模式均出现 Eu 无异常或为正异常的特点 ,表明中、基性火山物源对这些井的沉积物具有重要影响。

可以看出 ,白云深水区北部在晚渐新世到早中新世 ,主要受古珠江物源的控制 ,而深水区南部均受到南部基性火山喷发物质的影响。特别是早中新世时期 ,该区域为深水远洋环境 ,夹杂基性火山岩碎屑 ,表明该时期南海北部深水陆坡靠近洋壳一侧火山活动较发育。由于基性火山碎屑中稀土元素 Eu 含量较高 ,使该地区沉积物总体呈现 Eu 元素的正异常。因此 ,从沉积物稀土元素含量变化来看 ,在渐新世到早中新世早期 ,南海北部深水区构造活动强烈 ,导致白云深水区东、西、南部火山活动增加 ,沉积物成分中性和基性火山物质含量增多。

根据南海北部白云深水区各井沉积物稀土元素含量演变特征可以看出(图3) ,P30 ,P33 ,P35 以及

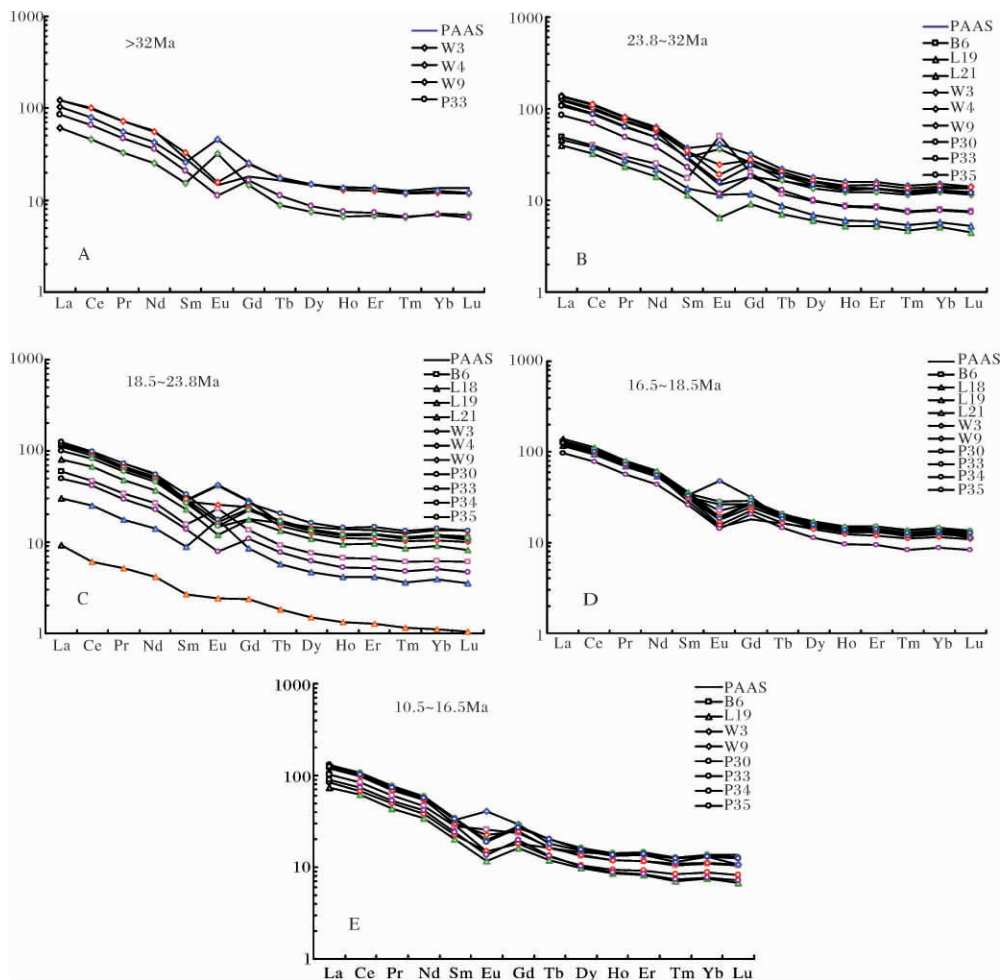


图2 南海北部白云深水区各井不同时期沉积物稀土元素配分特征

Fig.2 The Chondrite-normalised REE distribution for the samples of wells in Baiyun deepwater area of the northern South China Sea

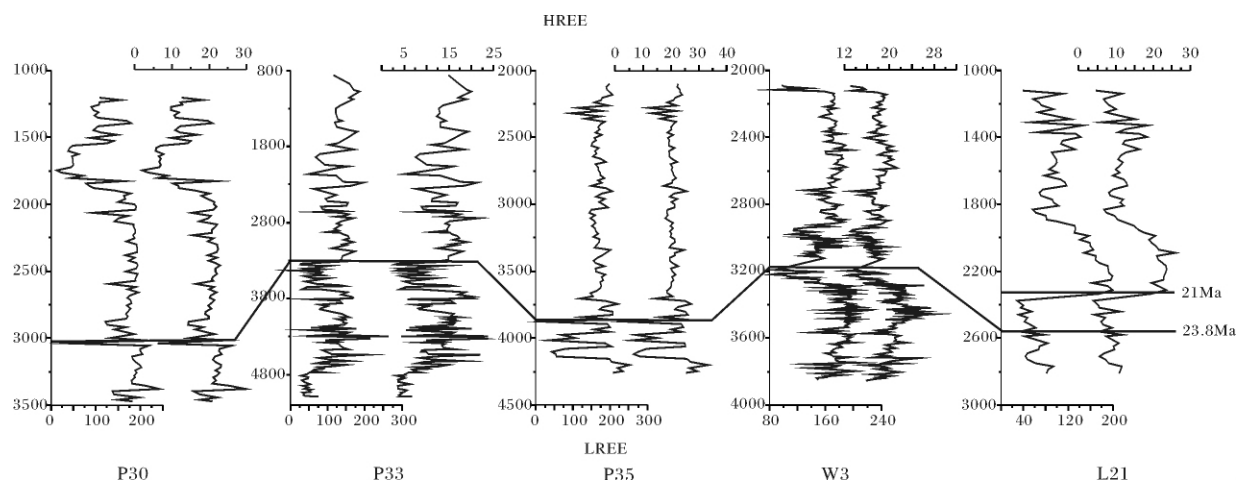


图3 南海北部深水沉积物稀土元素含量变化图

Fig. 3 Content of REE of the sediment in the deepwater area of the northern South China Sea

W3 各井的轻、重稀土元素含量在 23.8Ma 出现明显突变,说明沉积物成分在该界线上发生明显改变。ODP1148 站沉积物成分和 P33 井沉积物钕同位素也在该界线上发生突变,表明南海北部沉积物源区成分发生改变,极有可能反映了古珠江流域在该界线突然发生大规模溯源侵蚀,造成流域面积突然拓展,沉积物搬运距离加大,沉积物成分发生明显改变^[8-12]。但是, L21 井的稀土元素含量曲线在 23.8 Ma 界线处没有出现明显变化,而是在 21 Ma 出现明显改变,反映出该井沉积物在物质来源上与其它四口井不同(图 3)。结合该井沉积物稀土元素配分特征上呈现 Eu 元素正异常(图 2C),反映出东沙隆起的火山活动对该地区持续产生较大影响,直到 21 Ma 这种状况才发生改变。因此, 23.8 Ma 的白云运动极有可能对古珠江来源沉积物成分的影响更大。

早中新世晚期(16.5~18.5 Ma,图 2D),白云深水区北部沉积物仍受古珠江三角洲物源控制,南部持续存在基性火山喷发活动,使南部深水沉积物中包含基性火山碎屑。而在白云深水区东部沉积物中稀土元素 Eu 呈现负异常,说明此时东沙隆起区火山活动停止,没有中、基性源区物质提供。从 18.5 Ma 开始,东沙隆起区开始出现生物碳酸盐岩沉积,碳酸盐岩台地发育,不再向白云深水区东部提供陆源碎屑沉积物。

进入中中新世(10.5~16.5 Ma,图 2E),除白云深水区南部 W9 井的稀土配分模式出现部分 Eu 元素正异常外,白云深水区其它区域沉积物稀土配分模式

均显示 Eu 元素负异常,轻稀土相对富集,重稀土含量均一特点,与 PAAS 稀土配分模式一致。研究表明,上地壳稀土元素配分模式是各种来源的沉积物充分混合的结果^[13,14]。大的河流由于流域面积广,搬运距离长,沉积物经过充分混合,其沉积物稀土配分模式接近上地壳平均值,与 PAAS 类似^[15-17]。南海北部白云深水区沉积物稀土配分模式表明,从中中新世以来南海北部总体构造活动减弱,沉积物源趋于统一,深水区主要受珠江大河三角洲物源的控制。

需要指出的是,处于白云深水区南部的 W3, W4 和 W9 井虽然相距不远,但在沉积物成分明显不同。W3 井 Eu 元素除了早中新世早期以外,其它时期均呈现负异常,与 P 系列井类似,而 W4、W9 井 Eu 元素则一直呈现明显的正异常,直到中中新世才发生改变,说明该地区持续存在火山活动。La/Lu—Zr/Hf—Th/U 三角图表明, W4 和 W9 井渐新世—中新世数据点比较接近,反映这两口井具有相同的物源区;而 W3 井数据点与以上两口井数据点分离,差异明显(图 4)。结合稀土元素配分曲线特征,可以认为 W3 井从渐新世到中新世沉积物源总体相对稳定,主要受古珠江三角洲物源的控制,在 23.8 Ma 的白云运动时期曾受到基性火山活动的短暂影响。但是, W3 井与 W4、W9 沉积物成分差异较大,造成它们在稀土配分模式特征上显著不同。W4、W9 的稀土配分模式从渐新世到早中新世 Eu 元素均呈现明显正异常,反映出基性岩源区始终对该井具有重要的影响。可以认为, W4、W9 受南部隆起基性火山岩的影响更大。

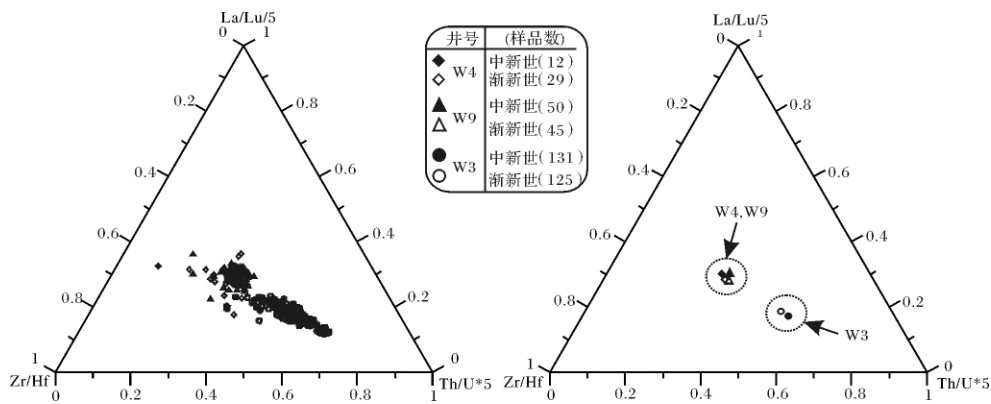


图4 白云深水区南部W系列井沉积物La/Lu—Zr/Hf—Th/U三角图(右图为平均值)

Fig. 4 The La/Lu—Zr/Hf—Th/U triangular chart of the W wells in the southern Baiyun deepwater area (The right chart used mean value)

3 结论

南海北部白云深水区沉积物稀土元素配分模式主要存在三种类型,具体表现在Eu元素含量上的差异,代表沉积物源区成分上的不同。从渐新世到中新世,白云深水区北部沉积物稀土元素配分模式表现为宽缓的右倾模式,与PAAS曲线一致,呈现轻稀土相对富集、重稀土含量均一、Eu元素负异常的特点,显示沉积物来自沉积岩或酸性岩区;而南部沉积物稀土配分模式中轻重稀土含量差异减小,Eu为明显正异常,表明有基性物质的加入;位于白云深水区中部火山岛上的B6井沉积物在渐新世由于包含大量中基性火山碎屑物质而呈现Eu元素明显的正异常,但是到早中新世以后沉积物稀土配分模式与北部相同;在深水区东部从渐新世到早中新世,沉积物稀土配分模式均出现Eu元素无异常或为正异常的特点,说明受到东沙火山活动的影响,到18.5 Ma开始出现Eu元素负异常。

可以看出,白云深水区北部至深水区中部的W3井从渐新世到中新世,主要受古珠江物源的控制;深水区南部持续受到南部基性火山物质的影响,直到中中新世仍存在少量基性火山喷发活动;深水区东部沉积物从渐新世到早中新世早期(18.5~32 Ma),沉积物主要来自东沙隆起区,含较多中、基性火山物质,造成稀土元素Eu呈现无异常或为正异常的特点。从18.5 Ma开始,东沙隆起区火山活动停止,开始出现生物碳酸盐岩沉积,碳酸盐岩台地发育,不再向白云深水区东部提供陆源碎屑物质;中中新世以来(10.5~16.5 Ma),南海北部总体构造活动减弱,沉积物源

趋于统一,深水区主要受珠江大河三角洲物源的控制。

发生在古近系/新近系界线处的白云运动(23.8 Ma)对白云深水区沉积物成分产生重要影响,沉积物成分在该界线上发生明显突变,反映了古珠江流域在该界线突然发生大规模溯源侵蚀,流域面积突然拓展,造成源区母岩类型发生改变,沉积物成分出现突变。从各井沉积物稀土元素含量上也表现出,受古珠江物源影响的区域均出现明显突变。并且还反映出在晚渐新世到早中新世早期,南海北部深水区东、西、南部火山活动增加,构造活动强烈,造成沉积物内中性和基性火山物质含量明显增大。

处于白云深水区南部的W3、W4和W9井虽然相距不远,但在沉积物成分上明显不同。W3井沉积物源从渐新世到中新世总体相对稳定,主要受古珠江三角洲物源的控制,在23.8 Ma的白云运动时期曾受到基性火山活动的短暂影响。W4、W9井沉积物从渐新世到早中新世基性岩源区始终具有重要的影响,说明其受南部隆起基性火山岩的影响较大,到中中新世这种影响才逐步减弱。

参考文献(References)

- 1 彭大钧,庞雄,陈长民,等. 南海珠江深水扇系统的形成特征与控制因素[J]. 沉积学报, 2006, 24(1): 10-18 [Peng Dajun, Pang Xiong, Chen Changmin, et al. The characteristics and controlling factors for the formation of deep-water fan system in South China Sea[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(1): 10-18]
- 2 柳保军,袁立忠,申俊,等. 南海北部陆坡古地貌特征与13.8 Ma以来珠江深水扇[J]. 沉积学报, 2006, 24(4): 476-482 [Liu Baojun, Yuan Lizhong, Shen Jun, et al. Northern continental slope palaeogeomorphology and deep-water fan system response of pearl river since

13. 8Ma, South China Sea[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2006, 24(4): 476-482]
- 3 庞雄, 陈长民, 彭大钧, 等. 南海珠江深水扇系统及油气[M]. 北京: 科学出版社, 2007 [Pang Xiong, Chen Changmin, Peng Dajun, *et al.* The Pearl Deep-water Fan System & Petroleum in South China Sea[M]. Beijing: Science Press, 2007]
- 4 庞雄, 陈长民, 邵磊, 等. 白云运动: 南海北部渐新统一中新统重大地质事件及其意义[J]. *地质论评*, 2007, 53(2): 145-151 [Pang Xiong, Chen Changmin, Shao Lei, *et al.* Baiyun movement, a great tectonic event on the Oligocene-Miocene Boundary in the Northern South China Sea and its implications[J]. *Geological Review*, 2007, 53(2): 145-151]
- 5 李云, 郑荣才, 朱国金, 等. 珠江口盆地荔湾3-1气田珠江组深水扇沉积相分析[J]. *沉积学报*, 2011, 29(4): 665-676 [Li Yun, Zheng Rongcai, Zhu Guojin, *et al.* Deep-water fan sedimentary facies analysis of Zhujiang Formation in Liwan3-1 Gas Field, Pearl River Mouth Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(4): 665-676]
- 6 Taylor S R, McLennan S M. The Continental Crust: Its Composition and Evolution[M]. Blackwell, 1985: 312
- 7 Rollinson. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation[M]. Longman Scientific, Technical, 1993: 352
- 8 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]
- 9 庞雄, 陈长民, 施和生, 等. 相对海平面变化与南海珠江深水扇系统的响应[J]. *地学前缘*, 2005, 12(3): 167-177 [Pang Xiong, Chen Changmin, Shi Hesheng, *et al.* Response between relative sea-level change and the Pearl River deep-water fan system in the South China Sea[J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(3): 167-177]
- 10 邵磊, 庞雄, 乔培军, 等. 珠江口盆地的沉积充填与珠江的形成演变[J]. *沉积学报*, 2008, 26(2): 179-185 [Shao Lei, Pang Xiong, Qiao Peijun, *et al.* Sedimentary filling of the Pearl River Mouth Basin and its response to the evolution of the Pearl River[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 26(2): 179-185]
- 11 唐松, 邵磊, 赵泉鸿. 南海渐新世以来粘土矿物的演变特征及意义[J]. *沉积学报*, 2004, 22(2): 337-342 [Tang Song, Shao Lei, Zhao Quanhong. Characteristics of clay mineral in South China Sea since Oligocene and its significance[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004, 22(2): 337-342]
- 12 李云, 郑荣才, 高博禹, 等. 珠江口盆地白云凹陷渐新世/中新世地质事件的碎屑组响应[J]. *现代地质*, 2011, 25(3): 476-481 [Li Yun, Zheng Rongcai, Gao Boyu, *et al.* Characteristics of the detrital response to Ligocene/Miocene Geological Events in Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. *Geoscience*, 2011, 25(3): 476-481]
- 13 McLennan S M. Rare earth elements in sedimentary rocks: influence of provenance and sedimentary processes[C]//Lipin B R, *et al.* Geochemistry and Mineralogy of Rare Earth Elements. The Mineralogical Society of America, Washington, 1989: 169-200
- 14 McLennan S M, Hemming S, McDaniel M J, *et al.* Geochemical approaches to sedimentation, provenance and tectonics[C]//Jonhanson M J, *et al.* Processes Controlling the composition of Clastic Sediments. Boulder, Colorado. Geological Society of America Special Paper 284, 1993: 21-40
- 15 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]. *Advance in Earth Sciences*, 1999, 14(2): 164-167]
- 16 杨守业, 李从先. 黄海周边河流的稀土元素地球化学及沉积物物源示踪[J]. *科学通报*, 2003, 18(6): 1233-1236 [Yang Shouye, Li Congxian. REE geochemical and tracer for sediment source of the rivers around Yellow Sea[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 18(6): 1233-1236]
- 17 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 [Zhao Yiyang, Wang Jintu, Qin Chaoyang, *et al.* REE in the submarine sediment of the continental shelf, China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1990, 8(1): 37-43]

REE Geochemical Characteristics of Sediments and Its Implications in the Deepwater Area of the Northern South China Sea

WU Meng-shuang^{1,2} SHAO Lei¹ PANG Xiong² QIAO Pei-jun¹
XIANG Xu-hong¹ ZHAO Meng¹

(1. State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092;

2. Research Institute, Shenzhen Ltd. CNOOC, Guangzhou 510240)

Abstract: The Rare Earth Element study of sediments in the Baiyun deepwater area of the northern South China Sea shows three chondrite-normalized REE distribution characteristics in different parts of the deepwater area from Oligocene to Miocene, indicating that different provenances may dominate the deepwater area. From the Oligocene to the

Miocene, the sediments of the northern Baiyun deepwater area came from the paleo-Pearl River, featuring relative LREE (light rare earth element) enrichment, even content of HREE (heavy rare earth element) and negative Eu-anomalies, just like the chondrite-normalized REE pattern of PAAS (post-Archean average Australian shale). This REE characteristic suggested a parent rock type of sedimentary rocks or acid rocks or both. The sediments of the southern part of Baiyun deepwater area showed reduced divergence between LREE and HREE with obvious positive Eu-anomalies, suggesting a supply of basic materials. Well B6 located on a volcanic island in the central part of the Baiyun deepwater area. The Oligocene sediments of Well B6 contained a large amount of intermediate to basic volcanic materials, featuring positive Eu-anomalies. But the chondrite-normalized REE distribution pattern of the sediments of Well B6 became similar to the REE distribution pattern of the sediments in the north in early Miocene. The sediments of the eastern part of the deepwater area featured no Eu-anomalies or positive Eu-anomalies, indicating that this area was influenced by the volcanic activities on the Dongsha Rise. Negative Eu-anomalies didn't occur around this area until 18.5 Ma.

The sediments from the northern deepwater area to the location area of W3 was dominated by the paleo-Pearl River from the Oligocene to Miocene. The southern part of the deepwater area was influenced by the basic volcanic materials continuously, and the volcanic activities still happened in the mid-Miocene, much less frequently though. The sediments in the eastern deepwater area mainly came from the Dongsha Rise from the Oligocene to the early Miocene (32 ~ 18.5 Ma) and contained plenty of intermediate to basic volcanic materials, with no Eu-anomaly or positive Eu-anomalies. The volcanic activities on the Dongsha Rise stopped after 18.5 Ma. Bio-carbonatite and carbonatite terrains began to occur while the supply of terrigenous debris to the eastern part of Baiyun deepwater area was cut off. Ever since the mid-Miocene (16.5-10.5 Ma), as the tectonic activities in the northern South China Sea weakened, the provenance was simplified and the deepwater area was totally controlled by the Pearl River and its delta.

The Baiyun movement at the end of the Oligocene and the beginning of the Neogene, greatly influenced the sediment composition in the Baiyun deepwater area. Abrupt composition changes of the sediments occurred at this boundary, indicating that the paleo-Pearl River experienced headwater erosion and drainage expansion, causing the changes of parent rock types. The REE content of the sediments of the Pearl River dominating area also showed abrupt changes. Moreover, this suggested that from the late Oligocene to the early Miocene, volcanic activities increased in the eastern, western, and southern parts of the deepwater area in the northern South China Sea. The fierce tectonic activities there lead to an obviously increased content of intermediate and basic volcanic materials in the sediments. Well W3, W4 and W9 located in the southern deepwater area and were near each other, however, the composition of their sediments had great differences. The source of Well W3 stayed stable from the late Oligocene to the Miocene, and this area was dominated by the paleo-Pearl River delta. During the period of the Baiyun movement at 23.8 Ma, Well W3 accepted an instant influence of basic volcanic activities. The basic source of Well W4 and Well W9 played an important role from the Oligocene to the early Miocene, indicating a great influence of the basic volcanic rocks on the South Rise, which did not start weakening until the mid-Miocene.

Key words: REE; sedimentary source; the northern part of the South China Sea; Baiyun Sag; sedimentology