

珠江口盆地番禺低隆起稀土元素配分模式和重矿物组合特征的分析与应用

陈淑慧

(中海石油(中国)有限公司深圳分公司研究院)

摘要 利用稀土元素配分模式和重矿物组合特征,结合构造背景、沉积物源分析以及测井、井壁取心等资料,对珠江口盆地番禺低隆起的前古近系基底、珠海组、珠江组下段提出了新的分层方案,这一分层与已有的其他资料符合性更好。分析了研究区内铈、钕异常的特征与原因,认为除了不同物源的影响以外,较强的化学分化作用和沉积时的氧化环境也是造成本区铈、钕异常的直接原因。

关键词 古近系;新近系;稀土元素异常;重矿物;地层划分;沉积环境;珠江口盆地

中图分类号 TE111.3;P57

文献标识码 A

稀土族元素在地质作用过程中往往相互共生,它们的分布特征可反映沉积物各原始来源物质的本性^[1-4],重矿物的组合特征同样也可指示物源的变化^[4-5],那么,若能确定两套地层的物源存在着变化,则可推断这两套地层的重矿物组合特征、稀土元素分布特征也应有所不同。稀土族元素中存在着两个特殊成员,即变价元素铈(Ce)和钕(Eu),在构造背景、沉积时代和物源相同的情况下,化学风化作用的强弱或氧化还原条件的不同都会导致这两个元素价位的改变,从而使它们与其它稀土元素发生分离^[6-7]。

珠江口盆地番禺低隆起与东沙隆起交界处断层较多,井位稀少,加上地震资料的品质及分辨率问题,导致了地层对比困难,L21井珠海组顶底界面和基底一直存在多种分层方案。由于基底与其之上的地层明显不同,珠海组与其之上的珠江组前人也已经证实物源发生了改变^[2],本次研究利用稀土元素与重矿物组合等特征对所述的分层情况进行细致分析,提出了新的分层方案。

研究区内新钻的L16井处于东沙物源影响范围,笔者对该井从珠海组至韩江组进行岩屑取样,并在取心段选取7个样品作为对比样,进行重矿物和主微量元素分析,从而确定其物源方向及演化特征,并且利用铈和

钕两个元素的异常特征来探讨其古沉积环境。

1 地质和研究概况

番禺低隆起位于珠江口盆地中央隆起带西南部,其南侧是白云凹陷,东北边是东沙隆起区(图1)。在渐新世珠海组沉积晚期,来自东南沿海的海西期—燕山期花岗岩分布区的古珠江物源已经对番禺低隆起提供沉积物,受白云运动影响,古珠江流域向西拓展,物质来源丰富,各种微量元素和稀土元素都在珠海组与珠江组之间的界面上出现突变^[8]。

位于中央隆起带东北部的东沙隆起在南海东北部大陆边缘拉张破裂期(珠海组沉积早期)的剥蚀最

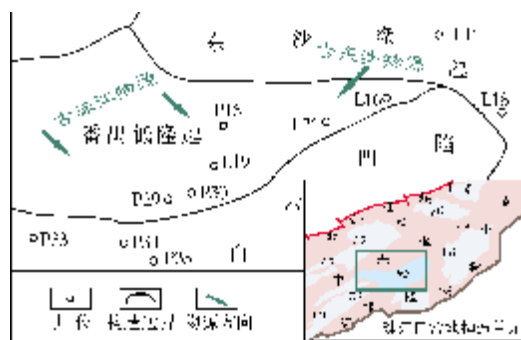


图1 研究区位置及珠江组下段物源示意图

收稿日期: 2012-02-20; 改回日期: 2012-06-19

陈淑慧:女,1979年生,硕士。2003年本科毕业于中国地质大学(武汉),2005年硕士研究生毕业。主要从事成岩作用、物源和古环境分析等方面的研究。通讯地址:510240 广东省广州市海珠区江南大道中168号;电话:(020)84262153

为强烈,为周边坳陷区提供了沉积物质来源;晚渐新世—中新世进入快速裂后沉降阶段,它对番禺低隆起等周边地区的物源供应逐渐减弱,沉积环境也发生了相应变化,开始发育碳酸盐岩和生物礁^[9]。

本次研究对番禺低隆起和东沙隆起多口钻井(图 1 中所示各井)利用沉积岩石学、矿物学及地球化学等方法,分析了物源方向及演化规律,有两点认识。

(1) L19—P30—P34—P33 井区珠海组—韩江组始终受到古珠江物源的影响,稀土元素表现为铈负异常,铈无异常。

(2) L21、L18 井在珠海组、珠江组上段和韩江组具有相同的物源,主要接受古珠江物源的碎屑物质;珠江组下段主要受东沙隆起中性火山物质影响,稀土元素表现为铈正异常或无异常、铈无异常特征。

番禺低隆起上第一口井 P16 井 1984 年开钻。L21 井位于番禺低隆起东北部,邻近东沙隆起,钻于 1991 年,钻遇前古近系盆地基底,古近系仅沉积了珠海组,主要目的层为新近系珠江组。钻井初期仅有二维地震,井位稀少,L19 井以南各井均未开钻,研究区断层较多,地震同相轴不连续,分析资料较少,地层对比手段单一,因此分层方案相对比较粗糙,误差较大。2001 年以后,随着三维地震采集和其他井陆续开钻,在 2005—2010 年“十一五”期间进行了全区地震追踪对比,分层相对较细,但受地震分辨率制约,仍有部分界面误差较大,一些井位稀少、断层复杂地区的层位仍难以对比,如 L21 井、L19 井和 L16 井一带。笔者本次研究主要利用稀土元素与重矿物组合特征,结合岩石学、古生物资料对 L21 井进行细化分层,提出了新的方案(图 2)。

2 分层方案

L21 井位于两物源交汇处(图 1),测井曲线上与 L19 井难以对比划分,地震资料受断层及品质影响难以追踪对比,在钻井初期和“十一五”期间分别出现两种分层方案(图 2)。L21 井完钻井深 2817.3 m,已进入前第三系基底,钻井初期的地层划分,把珠海组的底部划在井深 2779m,顶部划在 2465m。“十一五”期间,对全区在地震格架下进行高分辨率地层对比,把珠海组顶部定在 2528.96 m。笔者此次增加了密

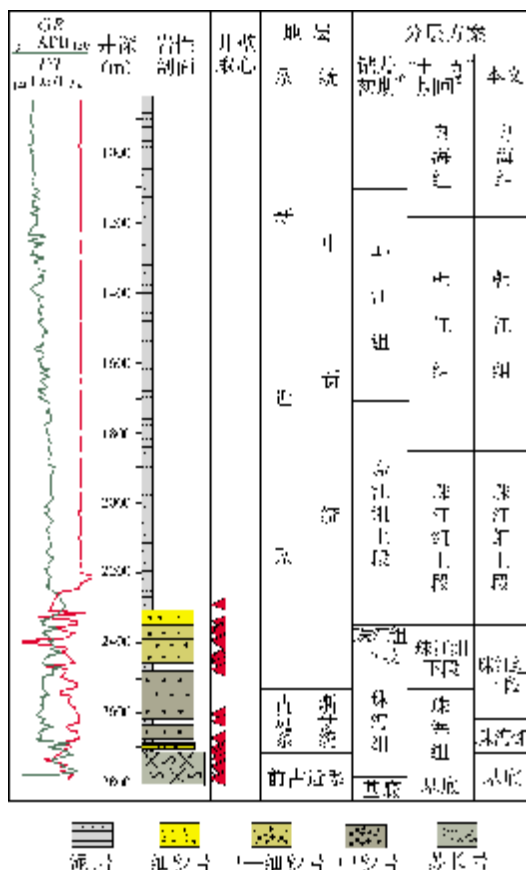


图 2 番禺低隆起 L21 井综合柱状图及三种分层方案^{①②}

集取样的稀土元素、重矿物及取心情况等资料,在地震和古生物资料控制下更精准地进行了层位划分。

首先按“十一五”分层方案绘制了 L21 井的基底、珠海组及珠江组的稀土元素配分模式图(图 3)和重矿物组合图(图 4)。其中发现珠海组样品的稀土元素配分模式(图 3c)、重矿物组合特征(图 4b)分异明显;在图 3c 中,井深 2540m、2580m 和 2590m 处的三个样品表现为铈正异常,其它样品均表现为铈负异常;在图 4b 中,下部井深 2730m 和 2750m 处的两个样品重矿物种类单一,锆石含量明显高于上部其它样品。据此认为“十一五”时期的分层方案仍不符合地质情况,故尝试利用稀土元素配分模式和重矿物组合综合分析,在前人研究基础上进行重新分层。为了便于更准确对比,特给出了从基底到珠江组下段三个地层段的大比例尺分层柱状图(图 5)。

① Gardemal M, Siemann-gartmann S. LIUHUA21 Well post drilling appraisal. AMOCO Orient Petroleum Company, 1991.

② 杨亚娟,张丽丽,等.截至 2009 年底珠江口盆地东部探、评价井地层分层数据表.中海石油(中国)有限公司深圳分公司研究院,2010.

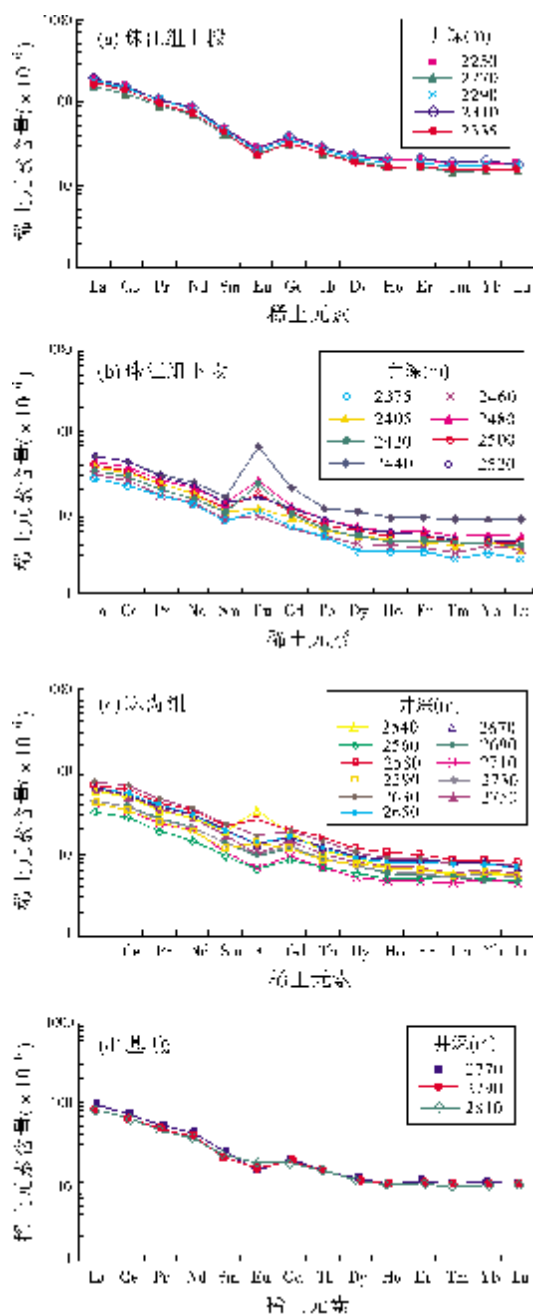


图3 番禺低隆起 L21 井各层段 (按“十一五”分层方案) 稀土元素配分模式图

2.1 L21 井基底顶面

根据“十一五”方案, L21 井基底顶面位于井深 2755.50 m。从图 4c 可以看出, L21 井基底重矿物种类单一, 以锆石为主, 少量电气石和白钛矿, 其中锆石相对百分含量在 74% 以上。根据重矿物组合特征, 我们将“十一五”方案中的珠海组分为两段, 上段

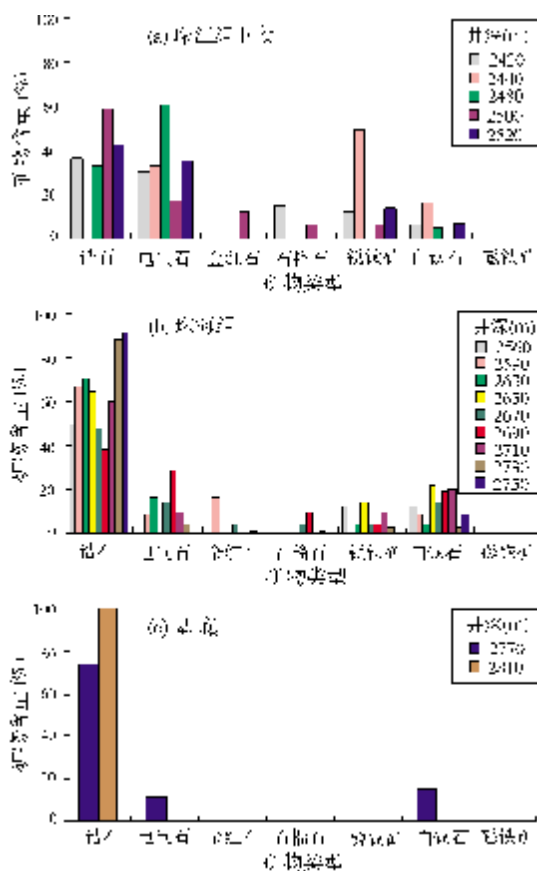


图4 番禺低隆起 L21 井各层段 (按“十一五”分层方案) 重矿物组合图

2560~2710 m 和下段 2730~2750 m, 结果可见, 下段 2730~2750 m 地层中的重矿物种类 (图 6b) 如同图 4c 中的基底一样比较单一, 也以锆石为主, 锆石含量在 80% 以上, 特征与基底样品非常相似。通过井壁取心描述可知 L21 井在 2715.70 m 以下 (2730~2817 m) 为灰绿色闪长岩, L16 井已钻遇基底的样品薄片鉴定为安山质火山角砾岩和含火山角砾安山质凝灰岩, 均为中性火成岩, 说明 L21 井在 2715.7 m 以下地层均属于基底。井壁取心描述还显示上段 2560~2710 m 为碎屑岩 (图 5), 重矿物种类相对较多 (图 6a), 虽仍以锆石为主, 但含量下降为 40%~70%, 其次为电气石、白钛矿, 含量主要在 10%~20% 之间, 重矿物组合特征明显与下段 2730~2750 m 地层不同。经综合分析并结合 GR 和 DT 测井曲线特征, 笔者将基底的顶面确定为井深 2715.70 m。

2.2 L21 井珠海组顶面

从图 3c 中可以看出, 按照“十一五”分层方案绘

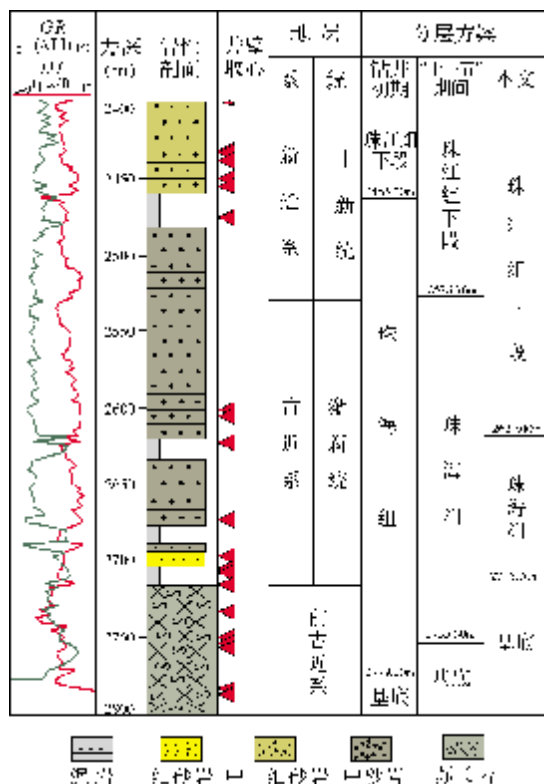


图5 番禺低隆起 L21 井基底至珠江组下段的综合柱状图及三种分层方案

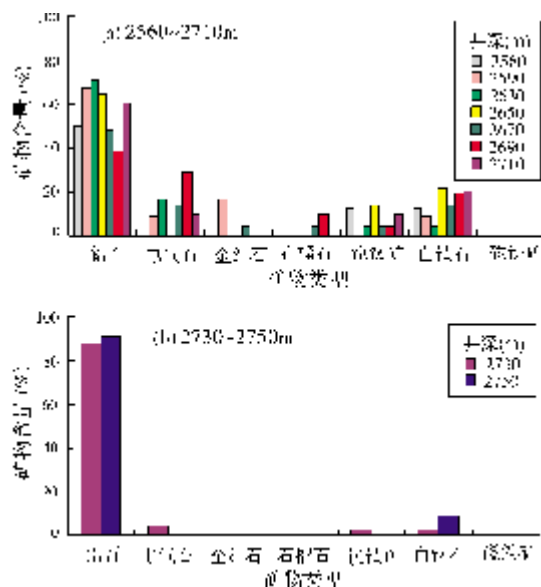


图6 番禺低隆起 L21 井 2715.7m 上下重矿物组合特征

制的珠海组稀土配分模式分异明显,既有铕正异常也有铕负异常。通过分析发现铕正异常的样品深度范围为 2540~2590 m,其中夹一 2560 m 样品为铕

负异常(图 3c,7a);铕负异常深度范围为 2630~2710 m (图 7b)。2540~2590 m 层段与上方(珠江组下段下部)的稀土配分模式(Eu 为正异常,图 3b)相一致,说明该层段的物源与上方珠江组下段地层相同,其中 2560 m 样品与其它三个样品有异,为铕负异常,可能是由于局部的物源变化引起的,但整体仍受东沙物源影响,故建议把“十一五”分层方案中 2540~2590 m 地层划分到珠江组下段中。由古生物资料得知,L21 井在 2500~2670 m 地层段中为双囊粉-桉木粉组合,桉木粉主要出现在珠海组中,说明珠海组顶部很可能在 2500~2670 m 之间,结合上述稀土配分模式特征,考虑把珠海组顶面划分在 2590~2630 m 之间。从图 5 上看,“十一五”的分层方案把珠海组顶面划在 2528.96 m 处,落在了一大套砂岩的中部,显然不太恰当,若移至 2620 m 处则刚好位于该套砂岩的底部,也落在上面所考虑的 2590~2630 m 深度范围内。因此,笔者认为珠海组的顶面划在井深 2620 m 处更为合理。

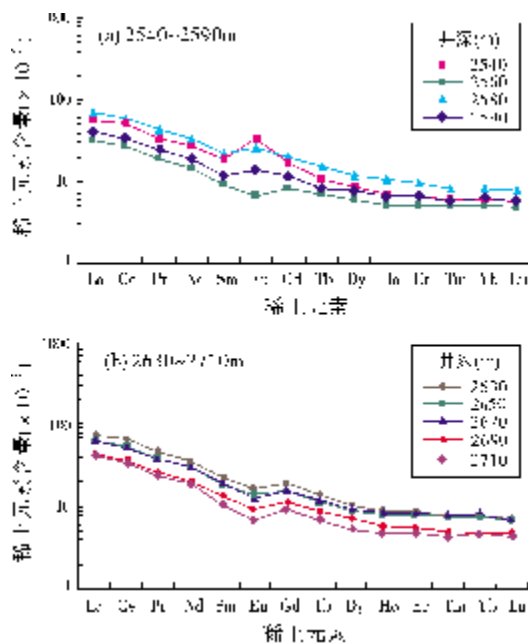


图7 番禺低隆起 L21 井 2620m 上下稀土元素配分模式

结合地震剖面(图 8)分析,珠海组顶面(T_0^0)就从原来的同相轴位置刚好下移至下一个红色同相轴的底部(绿色虚线所示位置)。这一调整方案与区块项目组的最新分层方案相符,参考最新追踪对比方案,发现上面所建议的 L21 井珠海组顶面

位置恰好能与L16井的珠海组顶面位置进行追踪对比。

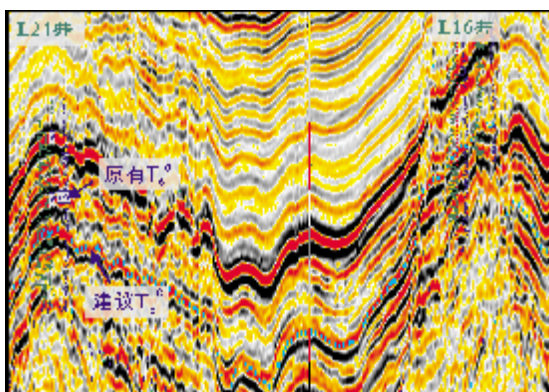


图8 番禺低隆起 L21 井与 L16 井地震连井剖面
地震界面 T_0 为珠海组顶面,在 L21 井中下移到绿色虚线位置后,两井的珠海组顶面可以追踪对比

3 铈、铈异常特征及其成因

3.1 异常特征

按“十一五”分层方案的稀土元素配分模式,L16井珠海组、珠江组上段及韩江组与前人研究认识相同,表现为铈元素负异常,铈元素无异常(图9),主要受古珠江物源的影响。前面已经说明 L21 井珠江组下段(图3b)接受来自东北方向的东沙物源,那么

L16 井在 L21 井的东北侧,自然也属于东沙物源影响范围,其稀土元素配分模式也应表现为铈正异常或无异常。但 L16 井珠江组下段多数样品的稀土元素铈呈现明显负异常,仅 2 个样品为无异常(图 9c),整体表现出铈亏损特征。从图 10 可见,L16 井微量元素与稀土元素比值在珠江组下段发生突变,显示该层段物源与下伏珠海组和上覆珠江组上段均不相同,推断该时期仍受东沙物源影响,那么其铈亏损的原因是什么? 铈在研究区一般都为无异常,但在 L18 井珠江组上段碳酸盐岩中出现亏损,呈明显负异常,铈则基本无亏损,呈无异常(图 11a 中下部曲线),稀土元素表现出这种特征的原因又是什么呢?

3.2 成因分析

3.2.1 对沉积岩铈、铈异常成因的现有认识

在表层沉积物中,陆源碎屑组分基本上不受成岩作用的影响,它们对母岩的稀土元素分布具有很强的继承性^[10-12],但对于深层沉积物而言,由于所处环境的温压条件常会使沉积物受到较强的成岩作用改造,从而降低其对母岩稀土元素分布特征的继承程度,造成物源示踪上的困难。苗卫良等^[13]对珠江口盆地恩平组和珠海组的样品进行了分析,证实成岩作用对珠江口盆地沉积物的稀土元素分异性影响较小,稀土元素仍完全可用来进行物源示踪。

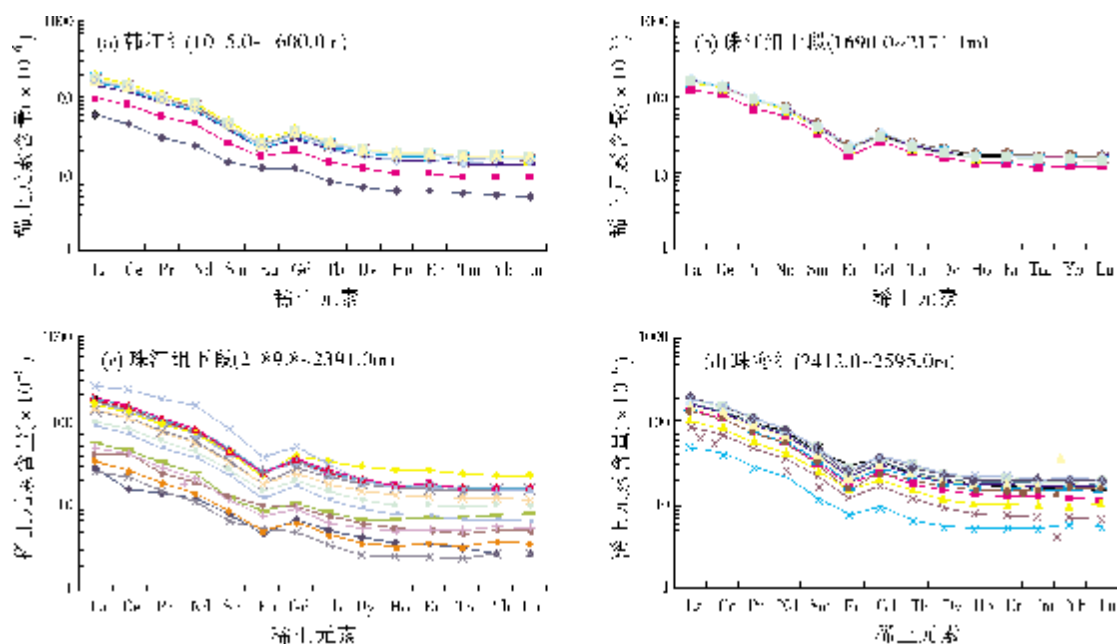


图9 番禺低隆起 L16 井珠海组—韩江组稀土元素配分模式

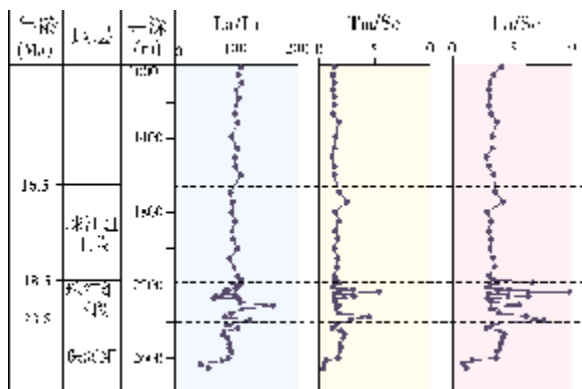


图 10 番禺低隆起 L16 井微量元素与稀土元素质量比

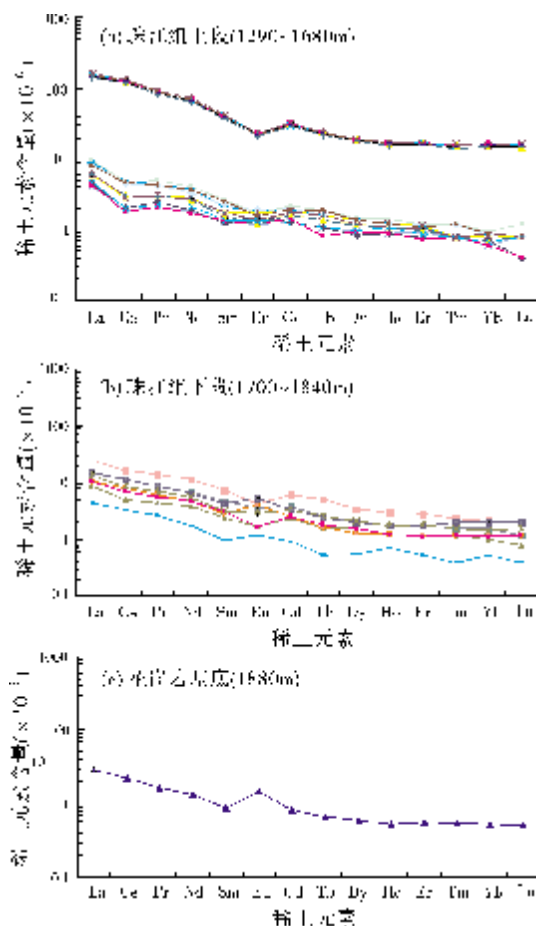


图 11 东沙隆起 L18 井基底至珠江组稀土元素配分模式 (缺失古近系)

一般来说,造成铈异常的原因主要有三方面^[14-16]:

(1) 沉积的大地构造背景 铈在海水中的大量迁移发生在开阔大洋的较深水域,而在靠近大陆边缘浅海区铈的迁移能力相对较弱。

(2) 成岩的氧化还原条件 正铈异常形成于还原环境,负铈异常形成于氧化环境。

(3) 沉积成岩时代 早元古代开始存在的锰结核使得海水中铈被氧化成“+4”价而与其它稀土元素发生分离,使得早元古代后的化学沉积岩有明显的负铈异常。

造成铈异常的原因主要有五个方面^[14]。

(1) 沉积的大地构造背景 与铈的情形相同,认为被动大陆边缘的沉积物是由多次再循环的沉积碎屑、古老侵入岩及变质岩的碎屑所组成,它们的稀土组成类似于太古代之后页岩的平均值,富 LREE (轻稀土元素)。与之相反,活动大陆边缘的沉积物主要由分异程度低的火山岩碎屑组成,它们的稀土组成特征相对富 HREE (重稀土元素)。

(2) 成岩的氧化还原条件 主要是化学沉积物受该条件制约,还原环境下铈负异常,氧化环境下铈正异常。

(3) 沉积成岩时代 太古代铁建造正铈异常,早元古代铈异常不明显,中—晚元古代轻度至明显的铈负异常。

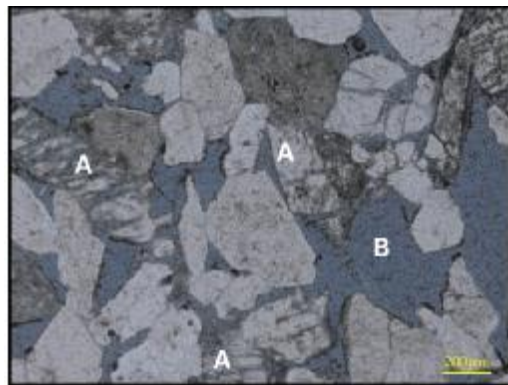
(4) 源区岩石特征 中基性火山岩中明显铈正异常,碳酸盐岩一般负异常。

(5) 化学风化作用强弱 随着化学风化作用,长石、橄榄石等不稳定矿物被风化淋滤,地层的成分成熟度增加,铈的含量随之减少,呈铈负异常^[2]。

3.2.2 研究区沉积岩铈、铈异常的成因解释

上述表明,铈、铈异常的影响因素很多。对于研究区珠江组下段沉积而言,当时番禺低隆起上的 L21 井和 L16 井处于相同的大地构造背景。而此时东沙隆起剥蚀最为强烈^[9],它为周边坳陷提供物质来源,位于该隆起的 L18 井其基底也已证实为具有铈正异常或无异常的花岗岩(图 11c),因此可以推断番禺低隆起上 L21 井和 L16 井中的珠江组下段物源主要应是来源于东沙隆起中性火山岩。L18 井缺失文昌组、恩平组和珠海组,说明它长期遭受风化剥蚀。L21 井珠江组下段沉积时期又正好处于东沙物源影响范围内。结合铸体薄片分析可知,L16 井珠江组下段溶蚀孔发育,长石普遍具有溶蚀现象(图 12a),且长石的含量明显低于 L18 井(图 12b),指示着 L16 井区明显经过较强的化学风化作用。

采用 CIA (化学风化指数) 来表示化学风化强



(a) 长石颗粒溶蚀强烈, 形成较多长石溶孔(A), 部分完全溶解成铸模孔(B)。L16井, 2224.80m。铸体薄片, 单偏光

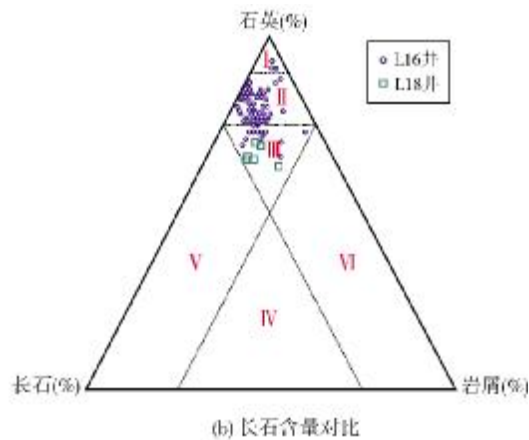


图 12 番禺低隆起 L16 井珠江组下段长石溶蚀现象及与东沙隆起 L18 井长石含量对比

度,公式为^[17]:

$$CIA = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)] \times 100 \quad (1)$$

式中,主要组分均为摩尔数值,CIA 值为摩尔数比,但 CaO^* 代表硅酸盐岩中的 CaO 百分含量。随着化学风化作用的进行,Na、K、Ca 等碱性和碱性土元素不断淋失,CIA 值逐渐增大。通过对比 L16、L21 和 L18 三口井珠江组下段的 CIA 值(图 13),发现 L16 井的 CIA 值明显高于另外两井,说明 L16 井的化学风化作用最强,导致了长石淋滤而含量减少,其中的铈也随之淋滤而出现亏损,因而呈现铈负异常特征(图 9b)。也是由于化学风化作用影响,L16 井珠江组下段的重矿物中只剩下了稳定性高的锆石和磁铁矿、赤褐铁矿,其它重矿物所含极少(图 14)。

L18 井基底花岗岩呈铈无异常、铈无异常或正异常特征,上覆珠江组下段延续了这种特征。但珠江组上段的石灰岩则表现为明显铈负异常、铈无异常或轻微正(负)异常特征(图 11a)。由前述分析可知,海相碳酸盐岩中的铈异常取决于成岩的氧化还原条件,负铈异常形成于氧化环境^[1],而氧化环境下铈呈正异常。中新统珠江组上段沉积时期大规模的海侵作用^[15],导致了古珠江物源影响范围扩大到东沙隆起区,按理说,L18 井应当与 L16 井一样,珠江组上段石灰岩段(图 9b)一样为负铈异常、铈无异常,而事实上却为铈负异常、铈轻微负异常或轻微正异常或无异常(图 11a),这说明了 L18 井该段碳酸盐岩的沉积环境为氧化环境,这才导致了铈的亏损和铈的增加,从而使得该段地层中的铈从原来的无异常变为负异常,铈从原来的负异常变为轻微负异常或无异常或轻微正异常。

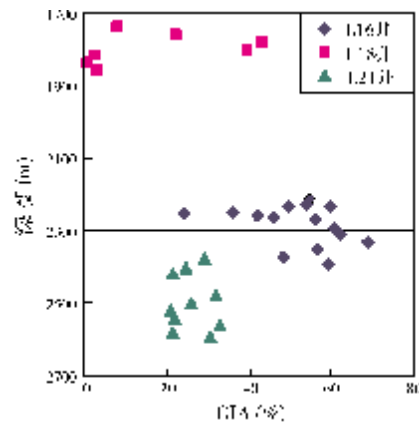


图 13 珠江口盆地 L16、L18、L21 三井珠江组下段 CIA 值对比图

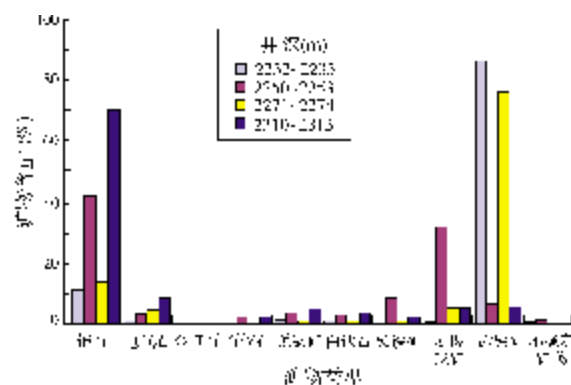


图 14 番禺低隆起 L16 井珠江组下段重矿物组合特征

4 结 语

单纯采用地球化学和重矿物组合特征来确定地层分层的方法是否可行还有待进一步的证实。但在

有古生物、岩石学特征等资料控制的情况下这种分层方法也可进行尝试, 毕竟在该地区铀元素的异常和重矿物组合代表着一定的物源意义。很多学者都证实了在珠海组向珠江组过渡的时期(23.8Ma)本区经历了从断陷向坳陷的转化, 物源发生了改变, 其稀土元素和重矿物组合也相应有所指示。

本文把L21井基底与珠海组的界面从“十一五”时期分层方案中的井深2755.50m上移到了2715.70m, 而把珠海组的顶面从2528.96m下移到了2620.00m。这个分层方案比起已有的两种分层方案是否更为合理, 愿与同仁作进一步的商榷。

根据微量元素与稀土元素比值资料, L16井珠江组下段沉积物质来源于东北部东沙隆起, 其铀负异常原因是受强烈化学风化作用所致。L18井珠江组上段碳酸盐岩与L16井的相同层段均受古珠江物源范围控制, 但前者明显偏向形成于氧化环境。

感谢同济大学邵磊老师在资料分析过程中给予的指导和帮助! 感谢研究院番禺项目组徐徽提供的地震剖面和相关分层数据!

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 刘宁, 樊德华, 郝运轻, 等. 稀土元素分析方法研究及应用——以渤海湾盆地东营凹陷永安地区物源分析为例[J]. 石油实验地质, 2009, 31(4):427-432.
- [4] 赵红格, 刘池阳. 物源分析方法及研究进展[J]. 沉积学报, 2003, 21(3):409-413.
- [5] 刘群明, 陈开远, 王键, 等. 柴达木盆地三湖坳陷第四系重矿物物源分析[J]. 现代地质, 2011, 25(2):315-321.
- [6] 冯东, 陈多福. 黑海西北部冷泉碳酸盐岩的沉积岩石学特征及氧化还原条件的稀土元素地球化学示踪[J]. 现代地质, 2008, 22(3):390-396.
- [7] 胡文, 陈琪, 王小林, 等. 白云岩储层形成演化过程中不同流体作用的稀土元素判别模式[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(6):810-818.
- [8] 庞雄, 陈长民, 邵磊, 等. 白云运动: 南海北部渐新统—中新统重大地质事件及其意义[J]. 地质论评, 2007, 53(2):145-151.
- [9] 刘安, 吴世敏, 程卫华, 等. 珠江口盆地东沙隆起的沉降史及其动力机制[J]. 海洋学报, 2011, 33(6):117-124.
- [10] 高爱国, 陈志华, 刘炎光, 等. 楚科奇海表层沉积物的稀土元素地球化学特征[J]. 中国科学 D 辑, 2003, 33(2):148-153.
- [11] 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.
- [12] 韩吟文, 马振东, 张宏飞, 等. 地球化学[M]. 北京:地质出版社, 2003.
- [13] 苗卫良, 邵磊, 庞雄, 等. 南海北部渐新世以来的稀土元素地球化学特征及其意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2008, 28(2):71-78.
- [14] 倪志耀, 莫怀毅, 刘援朝. 冕宁前寒武纪沉积岩的铀、钍异常特征及成因解释[J]. 四川地质学报, 1998, 18(4):259-265.
- [15] 吴明清, 欧阳自远. 铀异常——一个寻迹古海洋氧化还原条件变化的化学示踪剂[J]. 科学通报, 1992, (3):242-244.
- [16] 孙承兴, 王世杰, 季宏兵. 碳酸盐岩风化成土过程中 REE 超常富集及 Ce 强烈亏损的地球化学机理[J]. 地球化学, 2002, 31(2):119-128.
- [17] 刘成禹, 何满潮. 对岩石风化程度敏感的化学风化指数研究[J]. 地球与环境, 2011, 39(3):349-354.

编辑:吴厚松

Analysis and Application of REE Patterns and Heavy Mineral Assemblage Characteristics in Fanyu Lower Uplift, Pearl River Mouth Basin

Chen Shuhui

Abstract: According to the features of rare-earth-element (REE) pattern and heavy mineral assemblage characteristics with integration of GR and AC logging data and sidewall coring data, a new method of strata division from the pre-Paleogene to Neogene (the basement, Zhuhai Fm. and Lower Zhujiang Fm.) is proposed for Fanyu Lower Uplift in Pearl River Mouth Basin. By this method, the boundary between the basement and Zhuhai Fm. is shifted upward from 2,779m to 2,715.7m and the top of Zhuhai Fm. is shifted downward from 2,528.96m to 2,620m. This division is accord better with other available data. It is deemed that the reason why the Eu and Ce elements behave negative anomaly in this area is the influence of chemical differentiation and the oxidation environment during deposition beside the different sediment sources.

Key words: Paleogene; Neogene; REE anomaly; Heavy minerals; Stratum division; Sedimentary environment; Pearl River Mouth Basin

Chen Shuhui; female, M.S., Geology Engineer. Add: Research Institute of Shenzhen Branch Company, CNOOC, 168 Jiangnan Dadao Zhong, Guangzhou, Guangdong, 510240, China