

doi:10.3799/dqkx.2015.051

西沙石岛西科1井生物礁碳酸盐岩地球化学特征

修淳¹, 罗威², 杨红君², 翟世奎^{1*}, 刘新宇², 曹佳琪¹, 刘晓锋¹, 陈宏言¹, 张爱滨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. 中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 广东湛江 524057

摘要: 对西科1井生物礁碳酸盐岩样品进行了地球化学(常量组分、微量及稀土元素含量等)分析,旨在探讨生物礁的形成演化以及所记录的环境变化信息.结果表明:西科1井岩心在井深36 m附近存在地球化学参数的显著变化,暗示该深度是一处重要的地层界面或环境突变界面.岩心中的常量组分可以分为3类组合:以CaO为主,辅以K₂O的原生碳酸岩组分,该组分对应的主要造岩矿物是方解石,代表了未经白云岩化的生物礁原生碳酸盐沉积;以MgO为主,辅以Na₂O和P₂O₅,代表了白云岩化作用中的富集组分,反映了相对封闭的泻湖环境;以SiO₂为主,加以Al₂O₃、TiO₂、Fe₂O₃和MnO,代表造礁生物对这些组分的富集作用,但不能排除火山组分少量混入的可能性.相对于全球第四纪碳酸盐岩、上陆壳及页岩的平均值,岩心碳酸盐岩中大部分微量元素和稀土元素含量都较低.岩心中氧化还原敏感性微量元素(RSE)含量较低,指示岛礁发育过程中大部分时期处于氧化环境条件下,而RSE含量在岩心中的大幅波动体现出氧化/还原环境的交替变化.微量元素含量、∑REE、∑LREE、∑HREE、LREE/HREE、δCe、δEu等地球化学指标在岩心中的分布与岩心样品的矿物组成无明显的相关性,说明成岩作用和白云岩化作用并没有造成微量和稀土元素含量及特征指标的明显变化.

关键词: 西沙石岛;生物礁;碳酸盐岩;地球化学.

中图分类号: P588.24

文章编号: 1000-2383(2015)04-0645-08

收稿日期: 2014-07-19

Geochemical Characteristics of Reef Carbonate Rocks in well Xike-1 of Shidao Island, Xisha Area

Xiu Chun¹, Luo Wei², Yang Hongjun², Zhai Shikui^{1*}, Liu Xinyu²,
Cao Jiaqi¹, Liu Xiaofeng¹, Chen Hongyan¹, Zhang Aibin¹

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

Abstract: Reef carbonate rocks of well Xike-1 are analyzed for major constituents, trace and rare earth elements in this study, aimed to explore the formation, evolution and environmental change recorded in reef carbonates. The results show that there is an important interface of formation or environmental mutation at depth of 36 m, where geochemical parameters change significantly. The major constituents can be divided into following three components: the lithogenic carbonate components, consisting of CaO and K₂O, corresponding to calcites; the enriched components by dolomitization, including MgO, Na₂O and P₂O₅, which indicates restricted lagoon environment; the enriched components by reef-builders, composed of SiO₂, Al₂O₃, TiO₂, Fe₂O₃ and MnO, potentially including a small amount of volcanic components. Contents of most trace and rare earth elements in well Xike-1 are low compared to those of other endmembers such as carbonate rocks of Quaternary around the world, upper crustal, and shales. The contents of redox-sensitive trace elements (RSE) in well Xike-1 are low, indicating oxic environment through most of development process of reefs. There are alternations of oxidation and reduction environment, with wide fluctuations of RSE contents. In addition, there is no obvious correlation between mineral compositions and geochemical parameter distribution, such as trace elements, REEs and their characteristic parameters, indicating that dolomitization and diagenesis did

基金项目: 中国海洋石油总公司项目(No. CNOOC-2013-ZJ-01); 国家重大专项(No. 2011ZX05025-002-03).

作者简介: 修淳(1989-),男,博士,主要从事地球化学研究. E-mail: oucgeology@163.com

* **通讯作者:** 翟世奎, E-mail: zhaishk@public.qd.sd.cn

引用格式: 修淳, 罗威, 杨红君, 等, 2015. 西沙石岛西科1井生物礁碳酸盐岩地球化学特征. 地球科学——中国地质大学学报, 40(4): 645-652.

not result in the significant changes of trace elements, REEs, and their eigenvalues.

Key words: Shidao island in Xisha; reef; carbonate rock; geochemistry.

生物礁是碳酸盐沉积的重要类型之一,高孔隙度和高渗透率的特性使其成为良好的油气储体,在世界油气储量估算中占有重要地位(曾鼎乾等,1988;范嘉松,2005;卫平生等,2006).生物礁主要由造礁生物组成,这些生物对生长环境(例如:水深、温度、盐度、营养状态、水体浊度、气体分压等)要求极为苛刻.因此,生物礁中保存有丰富的环境变化信息,被广泛应用于古海洋学研究(杨万容和李迅,1995;吴亚生和范嘉松,2001;齐文同,2002).

南海地区位于欧亚板块、印度板块、菲律宾板块和太平洋板块的相互作用带,自古近纪晚期才开始裂陷形成边缘海盆地.特殊的构造环境和地理位置以及复杂的海底地貌类型造就了南海多种多样的生物礁体系.在南海北部的珠江口盆地、琼东南盆地、莺歌海盆地和西沙群岛等地区均有生物礁发育.西沙群岛位于南海西北部大陆坡上,古近纪末逐渐从华南大陆裂解到现今的位置(夏戡原等,2014).中新世以来,伴随着区域热沉降活动,西沙隆起区逐渐沉于水下,为生物礁的发育奠定了地形地貌基础,形成了厚度超过 1 200 m 的礁相沉积物(何起祥和张明书,1986).已有钻井岩心数据表明:西沙群岛生物礁发育在前寒武纪变质岩系基底之上(王国忠,2001),碳酸盐岩地层自下而上依次为中新统、上新统和第四系(韩春瑞和孟祥营,1990;王玉净等,1996).前人通过在西沙群岛钻取的 4 口钻井(西永 1 井、西永 2 井、西石 1 井和西琛 1 井)先后开展了第四纪生物礁地质研究(何起祥和张明书,1986)、生物礁地层研究(韩春瑞和孟祥营,1990;张明书,1990;王玉净等,1996)和沉积成岩作用研究(何起祥和张明书,1990;蔡峰等,1996;刘健等,1998),取得了丰硕的成果.2012 年中海油湛江分公司在西沙群岛石岛上设计钻探了“西科 1 井”,在 0~750 m 井段取心率接近 80%.通过现场和室内观察,综合录井资料、古生物化石和古地磁等资料,将钻井岩心上中新统、上新统和第四系的底界分别定在井深 576.50 m、374.95 m 和 214.89 m(地层界面划分及岩心剖面据朱伟林等,2015).

任何一种地质作用或环境变化均涉及沉积地层地球化学特征的改变,主要体现在元素的迁移、转化、聚集和含量分布上.正是基于上述事实或科学思想,地球化学特征作为地质作用的“指纹”被用于研究诸如物源、动力、过程、环境等再现昔日地质作用

的重要科学问题.本文对西科 1 井生物礁碳酸盐岩样品进行了地球化学(常量组分、微量及稀土元素含量等)分析,旨在探讨生物礁的形成演化以及所记录的环境变化信息.

1 样品与分析方法

根据钻井取心情况和岩心特征,采取不等间距取样法,即:对岩性均一的层段,等间距取样,取样间距较大;对岩性变化明显的层段取样间距较小,且在明显的岩性界面上下各取一个样品.根据以上原则,在 0~748 m 井段,取样 90 个,进行 X 射线衍射光谱(XRF)分析,获取常量组分数据;在 0~373 m 井段,取样 173 个,利用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)分析微量和稀土元素组成,其中在 0~160 m 井段,取样间隔为 1 m,160~373 m 井段取样间隔为 5 m.为了减小或消除取样过程中现今海水中盐类和其他杂质对样品分析结果的干扰,对所有样品进行先期洗盐处理.洗盐处理过程据翟世奎等(2015),洗盐处理、常量组分、微量及稀土元素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.

XRF 分析所用仪器为 SPECTRO XEPOS 型光谱仪,分析流程如下:将经过洗盐处理的岩心样品用玛瑙研钵研磨至 200 目,用硫酸纸包裹后置于 60 °C 恒温箱中干燥 24 h.将烘干后的样品装入直径为 32 mm 的聚乙烯样品杯内,用玛瑙棒均匀压实,保证底面绝对平整,随后将样品装入仪器的样品托盘中,按操作程序进行测试,经质量控制后,得到最终分析结果.测试过程中每 10 个样品加入 1 个平行样,标样选用 GBW07120 碳酸盐岩标准物质进行精度控制.所测元素的偏差为 3%~10%,满足分析要求.

微量及稀土元素分析流程如下:准确称取 40 mg 经洗盐处理并研磨至 200 目的样品,置于聚四氟乙烯消解罐中,加入 2 mL 1:10 的 HF-HNO₃ 混合酸溶液,将其密闭放置在 180 °C 电热板上加热 24 h.随后将消解罐敞口在电热板上蒸干,加入 1 mL H₂O 和 1 mL HNO₃ 在 180 °C 电热板上回溶 12 h.最后用 2% 的 HNO₃ 溶液定容至 80 g,放入 4 °C 冰箱中保存待测.微量元素采用美国 Agilent 7500C 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)分析.为监控测

试精度和准确度,每 20 个样品加入 1 个平行样,上机时每间隔 20 个样品进行标准样和空白样的测试,最后样品测试结果根据标样进行校正,精度由空白样和平行样进行控制,所测元素的相对偏差均低于 10%,满足精度要求.测试过程中加入 20 ng/L 的 Rh 内标溶液检测仪器稳定性.

2 分析结果及讨论

2.1 常量组分

西科 1 井岩心常量组分的 XRF 分析结果列于表 1 中.可以看出:西沙礁相碳酸盐岩造岩氧化物以 CaO 和 MgO 为主,其次是 SiO₂,其他组分含量甚微.若将

CaO 和 MgO 分别换算成 CaCO₃ 和 MgCO₃,则二者之和超过 90%,加之其他碳酸盐组分(如 FeCO₃、MnCO₃等),碳酸盐组分总量则可达 95%以上,说明西科 1 井岩心基本是由碳酸盐矿物组成.

MgO 和 CaO 呈显著负相关关系(图 1,表 2),且分别与白云石和方解石富集层段具有很好的对应关系.在岩心顶部 0~36 m 层段 MgO 的高含量是高镁方解石存在的反映,而非白云石化作用的结果(翟世奎等,2015).在所有的白云岩层段,MgO 含量都出现峰值或高含量(图 1),说明 MgO 组分含量的高低在一定程度上反映了白云岩化作用的强弱.

分析各常量组分之间的相关性(表 2),若选择相关系数 > 0.7,可以将常量组分分为 3 类:(1)以

表 1 常量组分分析结果(%)

Table 1 Analysis results of major constituents(%)

| 组分 | Na ₂ O | MgO | Al ₂ O ₃ | SiO ₂ | P ₂ O ₅ | K ₂ O | CaO | TiO ₂ | MnO | Fe ₂ O ₃ |
|-----|-------------------|-------|--------------------------------|------------------|-------------------------------|------------------|--------|------------------|-------|--------------------------------|
| 最小值 | 0.030 | 0.350 | 0.420 | 0.180 | 0.080 | 0.290 | 32.360 | 0.002 | 0.002 | 0.003 |
| 最大值 | 1.390 | 6.320 | 1.640 | 9.340 | 0.490 | 0.570 | 55.430 | 0.110 | 0.022 | 0.625 |
| 平均值 | 0.830 | 1.830 | 0.560 | 1.220 | 0.250 | 0.430 | 48.800 | 0.013 | 0.006 | 0.107 |

表 2 常量组分相关系数矩阵

Table 2 Correlation matrix of major constituents

| 组分 | Na ₂ O | MgO | Al ₂ O ₃ | SiO ₂ | P ₂ O ₅ | K ₂ O | CaO | TiO ₂ | MnO | Fe ₂ O ₃ |
|--------------------------------|-------------------|--------|--------------------------------|------------------|-------------------------------|------------------|-------|------------------|------|--------------------------------|
| Na ₂ O | 1.00 | | | | | | | | | |
| MgO | 0.76 | 1.00 | | | | | | | | |
| Al ₂ O ₃ | 0.18 | 0.31 | 1.00 | | | | | | | |
| SiO ₂ | 0.05 | 0.20 | 0.96 | 1.00 | | | | | | |
| P ₂ O ₅ | 0.86 | 0.50 | 0.01 | -0.09 | 1.00 | | | | | |
| K ₂ O | -0.81 | -0.76 | 0.19 | 0.29 | -0.69 | 1.00 | | | | |
| CaO | -0.89 | -0.88 | -0.21 | -0.09 | -0.69 | 0.92 | 1.00 | | | |
| TiO ₂ | 0.06 | 0.15 | 0.96 | 0.98 | -0.06 | 0.33 | -0.07 | 1.00 | | |
| MnO | -0.27 | -0.002 | 0.61 | 0.64 | -0.31 | 0.44 | 0.18 | 0.68 | 1.00 | |
| Fe ₂ O ₃ | 0.08 | 0.21 | 0.94 | 0.94 | -0.04 | 0.28 | -0.10 | 0.96 | 0.69 | 1.00 |

表 3 微量元素含量变化范围与平均值(μg/g)

Table 3 The range and average value of trace elements (μg/g)

| 地层 | V | Cr | Mn | Co | Rb | Sr | Zr | Nb | Ba | Hf | Th | 资料来源 | |
|-----------|-----|--------|--------|---------|-------|--------|---------|--------|-------|--------|-------|-------|----------------------------|
| 第四系 | 最小值 | 0.030 | 0.780 | 0.750 | 0.190 | 0.030 | 414.00 | 0.060 | 0.001 | 0.060 | 0.001 | 0.010 | |
| | 最大值 | 20.920 | 22.450 | 217.890 | 0.890 | 11.720 | 7457.00 | 12.340 | 2.272 | 11.080 | 0.326 | 1.490 | |
| | 平均值 | 3.810 | 6.390 | 40.040 | 0.380 | 1.210 | 2002.00 | 3.700 | 0.187 | 3.820 | 0.093 | 0.210 | |
| 上新统 | 最小值 | 1.020 | 1.400 | 3.240 | 0.130 | 0.230 | 200.00 | 0.300 | 0.012 | 2.170 | 0.005 | 0.050 | |
| | 最大值 | 22.540 | 14.720 | 68.630 | 0.460 | 2.340 | 1572.00 | 4.740 | 0.261 | 7.450 | 0.113 | 0.390 | |
| | 平均值 | 5.090 | 7.770 | 25.950 | 0.210 | 0.620 | 526.00 | 1.160 | 0.060 | 3.630 | 0.033 | 0.170 | |
| 全球第四纪碳酸盐岩 | | 20.0 | 11.0 | 1100.0 | 0.1 | 3.0 | 610.0 | 19.0 | 0.3 | 10.0 | 0.3 | 1.7 | Turekian and Wedepohl,1961 |
| 上地壳 | | 60.0 | 35.0 | 600.0 | 10.0 | 112.0 | 350.0 | 190.0 | 25.0 | 550.0 | 5.8 | 10.7 | Taylor and McLennan,1985 |

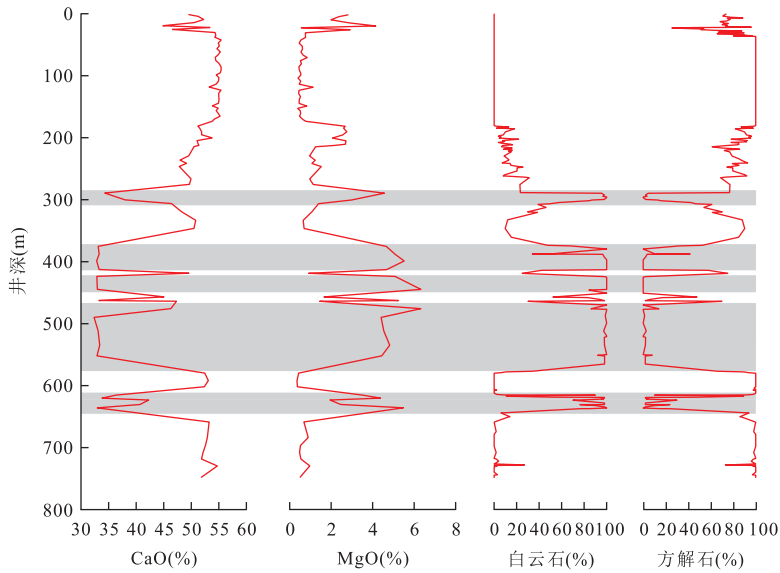


图 1 主要地球化学组分(CaO 和 MgO)与碳酸盐矿物含量的纵向耦合关系

Fig.1 Longitudinal coupling relationship of major geochemical components (CaO and MgO) and carbonate mineral content
深色区域为白云岩层,据翟世奎等(2015)

CaO 为主,辅以 K_2O 的原生碳酸岩组分,该组分对应的主要造岩矿物是方解石(图 1),代表了未经白云岩化的生物礁原生碳酸盐沉积;(2)以 MgO 为主,辅以 Na_2O 和 P_2O_5 ,代表了白云岩化作用中的富集组分,反映的是相对封闭的泻湖环境;(3)以 SiO_2 为主,加以 Al_2O_3 、 TiO_2 、 Fe_2O_3 和 MnO ,由于西沙群岛远离大陆,基本未受陆缘物质的混染,因此反映的应该是造礁生物对上述组分的富集作用,也不排除火山组分少量混入的可能。

2.2 微量元素

由表 3 可以看出,西科 1 井岩心样品中微量元素含量有两个突出的特点,一是变化范围较大(可超过 100 倍);二是除 Sr 和 Co 外的大多数微量元素含量较低,低于全球第四纪碳酸盐岩的平均值(Turekian and Wedepohl, 1961),也远低于上地壳的平均值(Taylor and McLennan, 1985)。在经北美页岩(NASC, Gromet *et al.*, 1984)标准化的微量元素蛛网图(图 2)上,西科 1 井上新统(井深 214.89~374.95 m)和第四系(井深 0~214.89 m)碳酸盐岩样品元素含量较为接近,变化趋势基本一致,总体上与全球第四纪碳酸盐岩平均值的分布趋势相似,体现出相近的地球化学特征。岩心中 Sr 和 Co 元素相对富集,而其他多数微量元素相对亏损,其中变价元素 V、Mn 和 Th 等明显亏损。

大多数变价微量元素属于氧化还原敏感性微量元素(RSE),它们对氧化还原环境反应灵敏。通常情

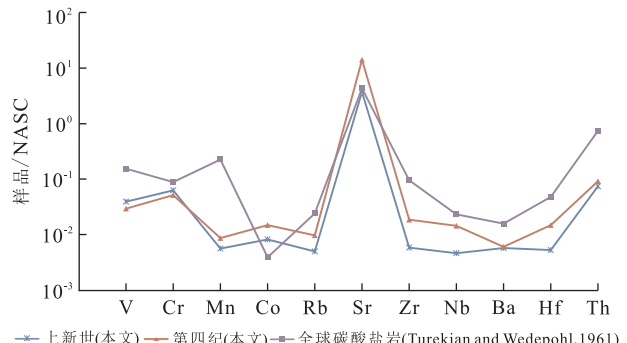


图 2 微量元素组分与全球第四纪碳酸盐岩微量元素组分比较

Fig.2 The comparison of trace elements composition of well Xike-1 and global Quaternary carbonate rocks
NASC 微量元素数据引自 Gromet *et al.*(1984)

况下,RSE 在还原环境下富集,而在氧化环境下则以溶解态的高价离子迁移(许淑梅等,2007)。西科 1 井岩心大多数微量元素(特别是变价元素)含量较低,除了碳酸盐本身微量元素含量不高的因素外,还可能与岛礁发育过程中主要是处于氧化环境有关。而 RSE 元素含量的骤升和大幅波动(图 3)应该是氧化/还原环境交替变化的反应。

由图 3 可以看出,大多数微量元素在井深 36 m 附近含量发生明显变化,揭示该深度为一重要的地球化学界面。西科 1 井岩心的矿物学研究结果(翟世奎等,2015)表明:以井深 35.4 m 处为界,其上低镁方解石、高镁方解石和文石以不同比例共存,其下全

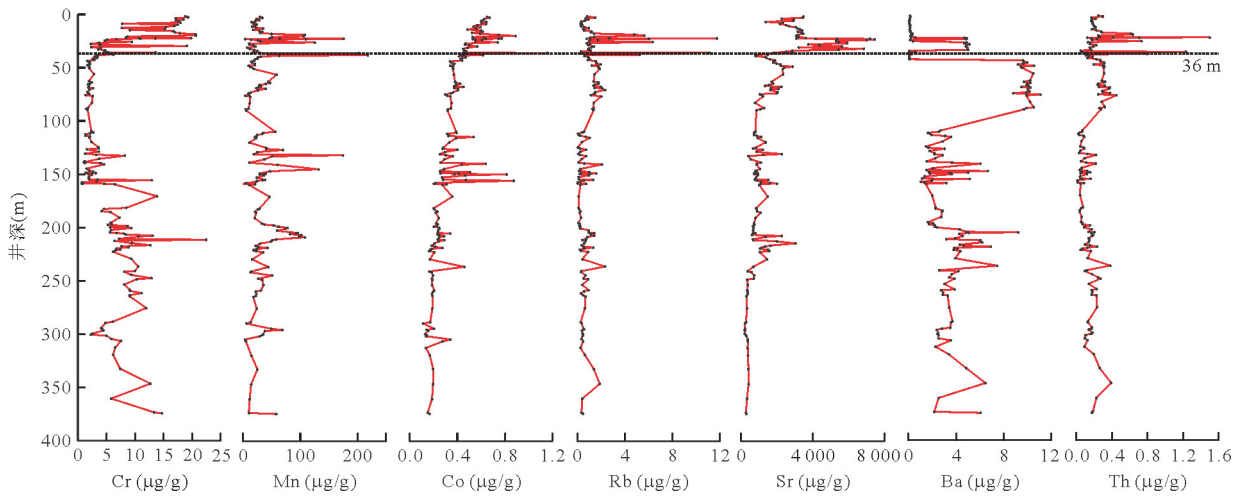


图 3 主要微量元素的纵向变化

Fig.3 The longitudinal changes of main trace elements

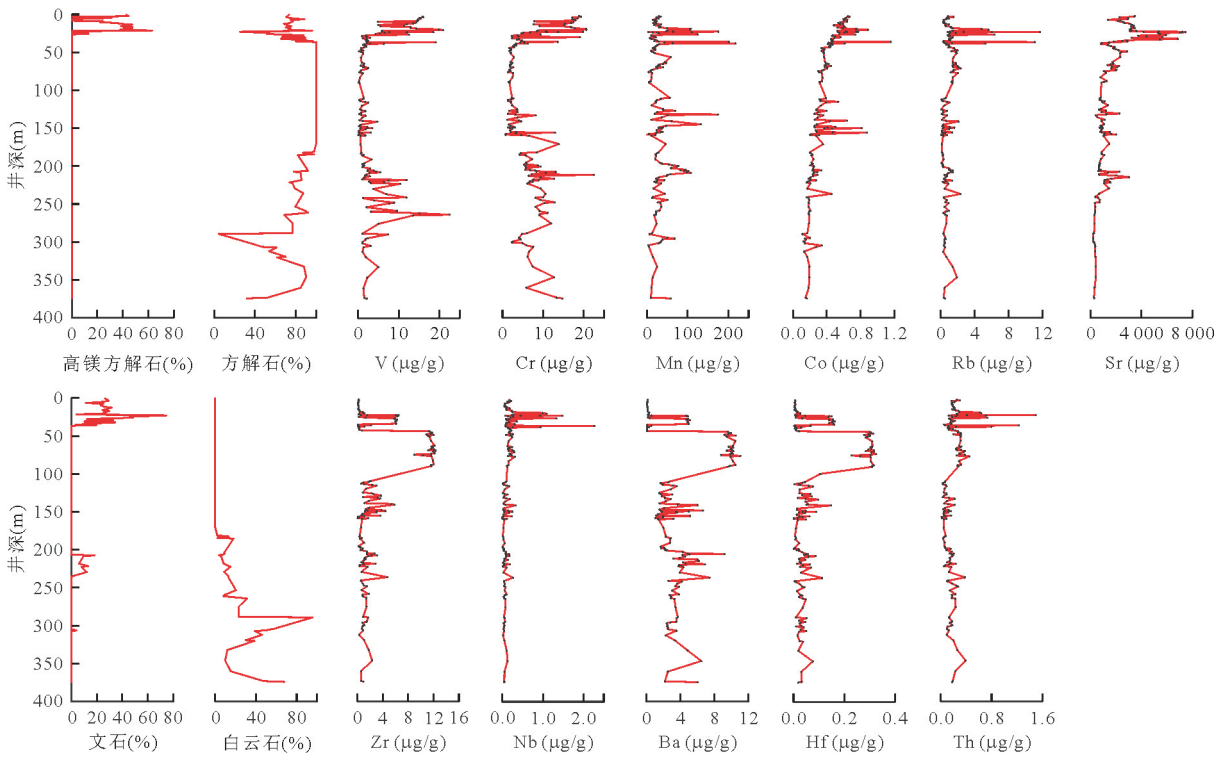


图 4 微量元素分布及其与矿物组成的关系

Fig.4 The relationships between mineral composition and trace elements distribution

矿物数据据翟世奎等(2015)

部转化为低镁方解石,而文石仅在 35.4 m 以下的部分层段偶有出现.因此,结合岩心地球化学和矿物学特征可以认为,井深 36.0 m 附近是一重要的地层界面或环境突变界面.

所有微量元素的含量变化都与矿物组成无明显的相关性(图 4),说明成岩或白云岩化作用没有造成微量元素含量的明显变化.

2.3 稀土元素

与泥岩和页岩等其他沉积岩相比,岩心样品稀土元素(REE)含量总体较低.在上新统地层中,稀土总量(\sum REE)、轻重稀土比值(LREE/HREE)、 δ Eu、 δ Ce 等 REE 特征值变化相对较小,而在第四系地层中,上述 REE 特征值变化范围均较大(表 4).在岩心的上部(井深 0~89.3 m 段),Ce 的含量异常

表 4 稀土元素参数变化范围与平均值(μg/g)

Table 4 The range and average value of rare earth elements (μg/g)

| 地层 | | ΣREE | ΣLREE | ΣHREE | LREE/HREE | δEu | δCe | 资料来源 |
|-----|-----|--------|--------|-------|-----------|------|-------|-----------------------------|
| 第四系 | 最小值 | 0.76 | 0.49 | 0.28 | 1.76 | 0.03 | 0.34 | 本文 |
| | 最大值 | 74.09 | 72.48 | 3.25 | 72.40 | 0.29 | 37.88 | |
| | 平均值 | 20.35 | 19.23 | 1.11 | 18.22 | 0.11 | 8.15 | |
| 上新统 | 最小值 | 2.10 | 1.61 | 0.39 | 2.47 | 0.03 | 0.42 | 本文 |
| | 最大值 | 5.76 | 4.48 | 1.32 | 6.46 | 0.12 | 0.78 | |
| | 平均值 | 3.57 | 2.86 | 0.72 | 4.11 | 0.08 | 0.55 | |
| 页岩 | | 207.20 | 188.00 | 19.20 | 9.79 | 0.47 | 0.41 | Turekian and Wedepohl, 1961 |
| 上地壳 | | 157.07 | 144.10 | 12.97 | 11.11 | 0.75 | 0.89 | Taylor and McLennan, 1985 |

注:球粒陨石标准化数据引自 Haskin et al.(1964)(下同).

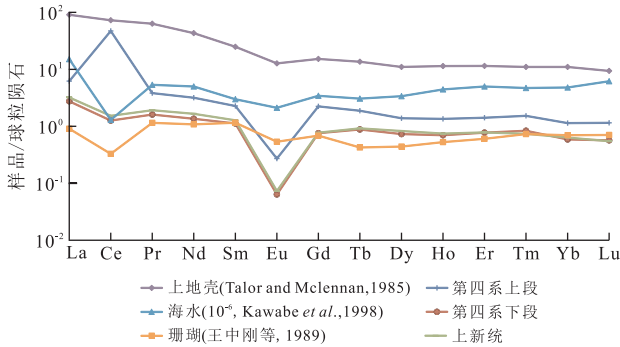


图 5 岩心样品的球粒陨石标准化 REE 配分模式

Fig.5 The rare earth elements distribution patterns standardized by chondrite

高,变化于 0.79 ~ 113.17 μg/g 区间,平均值高达 47.13 μg/g,远高于其下部地层(Ce 的含量变化于 0.12~3.19 μg/g 区间,平均值 1.36 μg/g).

岩心球粒陨石标准化的 REE 配分模式总体表现为轻微的右倾模式,其基本形态与上地壳相差很

大,而与海水和珊瑚配分模式的特征较为相近(图 5),表明西科 1 井生物礁碳酸盐岩的稀土元素主要继承于古海水,珊瑚是主要的造礁生物之一.LREE/HREE 比值变化较大(1.76~72.40 之间),平均值为 15.20.结合表 4 可以看出,LREE/HREE 比值较高和变化范围较大主要是第四系地层中 Ce 含量异常高(δCe 最大值高达 37.88,平均值 8.15)的原因.Ce 在岩心上部异常富集可能是岛礁上部长期暴露风化、处于氧化条件下并且有淡水参与的体现.Ce 易经过淡水淋滤,通过渗流性较好的碳酸盐岩中的孔隙在部分层段富集,在氧化条件下可以形成富铈矿物(如氟碳铈矿——CeFCO₃ 等).在岩心样品中亦存在有明显的 Eu 负异常(δEu=0.03~0.29,平均值 0.10),进一步说明氧化环境的存在.在氧化环境中 Eu 以 Eu³⁺ 离子状态存在,很难置换 Ca²⁺ 离子而进入碳酸盐矿物晶格,并且高价的 Eu³⁺ 离子很容易被流体萃取带走.

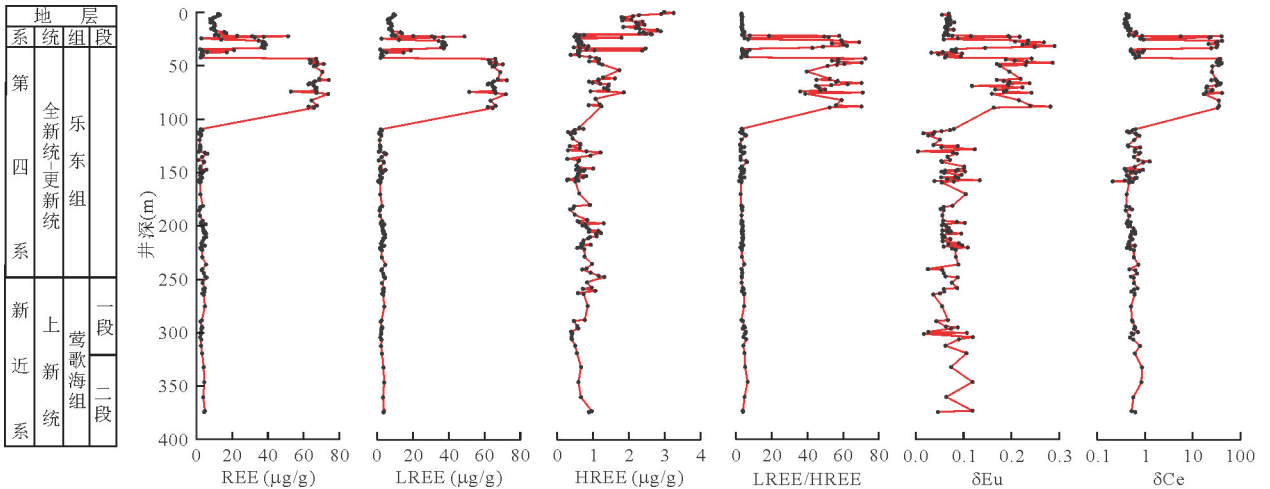


图 6 稀土元素地球化学参数的纵向变化

Fig.6 The longitudinal change of geochemistry parameters of rare earth element

REE 为稀土总量;LREE 为轻稀土总量;HREE 为重稀土含量;δEu=2ω(Eu)_N/(ω(Sm)_N+ω(Gd)_N);δCe=2ω(Ce)_N/(ω(La)_N+ω(Pr)_N)

类似于微量元素含量的分布,REE特征参数在岩心中的分布(图6)同样表现出在井深36 m附近有突变面,而且REE特征参数在岩心中的分布似乎与矿物组成(图4)无关。REE高含量主要表现在井深50~100 m层段,而且主要体现在轻稀土中Ce和Eu的相对富集上。

3 结论

(1)在井深36 m附近存在地球化学参数的显著变化,暗示该深度是一重要的地层界面或环境突变界面。

(2)岩心中的常量组分可以分为3类组合:以CaO为主,辅以K₂O的原生碳酸岩组分,该组分对应的主要造岩矿物是方解石,代表了未经白云岩化的生物礁原生碳酸盐沉积;以MgO为主,辅以Na₂O和P₂O₅,代表了白云岩化作用中的富集组分,反映了相对封闭的泻湖环境;以SiO₂为主,加以Al₂O₃、TiO₂、Fe₂O₃和MnO,代表造礁生物对这些组分的富集作用,但不能排除火山组分少量混入的可能性。

(3)相对于全球第四纪碳酸盐岩、上陆壳及页岩的平均值,西科1井碳酸盐岩中大部分微量元素和稀土元素含量都较低,岩心中氧化还原敏感性微量元素(RSE)含量较低,指示岛礁发育过程中大部分时期处于氧化环境条件下,而RSE含量在岩心中的大幅波动体现出氧化还原环境的变化。

(4)微量元素含量、 \sum REE、 \sum LREE、 \sum HREE、LREE/HREE、 δ Ce和 δ Eu等地球化学指标在岩心中的分布与岩心样品的矿物组成无明显的相关性,说明成岩作用和白云岩化作用并没有造成微量和稀土元素含量及特征指标的明显变化。

References

Cai, F., Xu, H., Hao, X. F., et al., 1996. Comparative Sedimentology of Late Tertiary Organic Reefs in Xisha—Northern South China Sea. *Acta Sedimentologica Sinica*, 14(4): 61—69 (in Chinese with English abstract).

Fan, J. S., 2005. Characteristics of Carbonate Reservoirs for Oil and Gas Fields in the World and Essential Controlling Factors for Their Formation. *Earth Science Frontiers*, 12(3): 23—30 (in Chinese with English abstract).

Gromet, L. P., Haskin, L. A., Korotev, R. L., et al., 1984. The “North American Shale Composite”: Its Compilation, Major and Trace Element Characteristics. *Geochimica et*

Cosmochimica Acta, 48(12): 2469—2482. doi: 10.1016/0016-7037(84)90298-9

Han, C. R., Meng, X. Y., 1990. Foraminiferal Fauna Distribution in Reef-Facies Beds since Late Miocene in Xisha Islands and Its Significance. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 10(2): 65—80 (in Chinese with English abstract).

Haskin, L. A., Frey, F. A., Schmitt, R. A., et al., 1966. Meteoritic, Solar and Terrestrial Rare-Earth Distributions. *Physics and Chemistry of the Earth*, 7: 167—321. doi: 10.1016/0079-1946(66)90004-8

He, Q. X., Zhang, M. S., 1986. Reef Geology of the Xisha Islands, China. Science Press, Beijing (in Chinese).

He, Q. X., Zhang, M. S., 1990. Origin of Neogene Dolomites in Xisha Islands and Their Significance. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 10(2): 45—55 (in Chinese with English abstract).

Kawabe, I., Toriumi, T., Ohta, A., et al., 1998. Monoisotopic REE Abundances in Seawater and the Origin of Seawater Tetrad Effect. *Geochemical Journal*, 32: 213—230.

Liu, J., Han, C. R., Wu, J. Z., et al., 1998. Geochemical Evidence for the Meteoric Diagenesis in Pleistocene Reef Limestones of Xisha Islands. *Acta Sedimentologica Sinica*, 16(4): 71—77 (in Chinese with English abstract).

Qi, W. T., 2002. Ecologic System Evolution of Organic Reef and Global Environmental Change History. Peking University Press, Beijing (in Chinese).

Taylor, S. R., McLennan, S. M., 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Blackwell Scientific Publications, London, 46.

Turekian, K. K., Wedepohl, K. H., 1961. Distribution of the Elements in Some Major Units of the Earth's Crust. *Geological Society of America Bulletin*, 72(2): 175—192. doi: 10.1130/0016-7606(1961)72[175; DOTEIS] 2.0.CO;2

Wang, G. Z., 2001. Reef Sedimentology of the South China Sea. China Ocean Press, Beijing, 200—201 (in Chinese).

Wang, Y. J., Gou, Y. X., Zhang, B. G., et al., 1996. Studies of Miocene Strata, Biota and Palaeoenvironment from Xi-Chen No.1 Hole in Xisha Islands. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 13(3): 215—223 (in Chinese with English abstract).

Wang, Z. G., Yu, X. Y., Zhao, Z. H., et al., 1989. Rare Earth Element Geochemistry. Science Press, Beijing, 292—315 (in Chinese).

Wei, P. S., Liu Q. X., Zhang J. L., et al., 2006. Re-Discussion of Relationship between Reef and Giant Oil-Gas Fields.

- Acta Petrolei Sinica*, 27(2): 38—42 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Y. S., Fan, J. S., 2001. Quantitative Calculation of the Magnitude of Global Sea Level Change Based on Reefs in Maokou Period. *Science in China (Series D)*, 31(3): 233—242 (in Chinese).
- Xia, K. Y., Xia, Z. W., Zhao, M. H., et al., 2014. The Geological Basis of the China Historical Sea Lines in South China Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 36(5): 77—89 (in Chinese with English abstract).
- Xu, S. M., Zhang, X. D., Zhai, S. K., et al., 2007. The Geochemical Behaviors and Environmental Implications of Redox Sensitive Trace Elements in Marine Environment. *Marine Geology Letters*, 23(3): 11—18 (in Chinese).
- Yang, W. R., Li, X., 1995. Permian Reef Types and Controlling Factors of Reef Formation in South China. *Acta Palaeontologica Sinica*, 34(1): 67—75 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, D. Q., Liu, B. W., Huang, Y. M., 1988. Reefs through Geological Ages in China. Petroleum Industry Press, Beijing, 52—60 (in Chinese).
- Zhai, S. K., Mi, L. J., Shen, X., et al., 2015. Mineral Compositions and Their Environmental Implications in Reef of Shidao Island, Xisha. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 40(4): 597—605 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, M. S., 1990. Quaternary Reef Stratigraphic Division in Hole Xiyong-1. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 10(2): 57—64 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, W. L., Wang, Z. F., Mi, L. J., et al., 2015. Sequence Stratigraphic Framework and Reef Growth Unit of Well Xike-1 from Xisha Islands, South China Sea. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 40(4): 677—687 (in Chinese with English abstract).
- 主要控制因素. 地学前缘, 12(3): 23—30.
- 韩春瑞, 孟祥营, 1990. 西沙晚中新世以来礁相地层中有孔虫动物群的分布及其意义. 海洋地质与第四纪地质, 10(2): 65—80.
- 何起祥, 张明书, 1986. 中国西沙礁相地质. 北京: 科学出版社.
- 何起祥, 张明书, 1990. 西沙群岛新第三纪白云岩的成因与意义. 海洋地质与第四纪地质, 10(2): 45—55.
- 刘健, 韩春瑞, 吴建政, 等, 1998. 西沙更新世礁炭岩大气淡水成岩的地球化学证据. 沉积学报, 16(4): 71—77.
- 齐文同, 2002. 生物礁生态系统演化与全球环境变化历史. 北京: 北京大学出版社.
- 王国忠, 2001. 南海珊瑚礁区沉积学. 北京: 海洋出版社, 200—201.
- 王玉净, 勾韵娴, 章炳高, 等, 1996. 西沙群岛西琛一井中新世地层、古生物群和古环境研究. 微体古生物学报, 13(3): 215—223.
- 王中刚, 于学元, 赵振华, 等, 1989. 稀土元素地球化学. 北京: 科学出版社, 292—315.
- 卫平生, 刘全新, 张景廉, 等, 2006. 再论生物礁与大油气田的关系. 石油学报, 27(2): 38—42.
- 吴亚生, 范嘉松, 2001. 根据生物礁定量计算茅口期全球海平面变化幅度. 中国科学(D辑), 31(3): 233—242.
- 夏戡原, 夏综万, 赵明辉, 等, 2014. 我国南海历史性水域线的地质特征. 海洋学报, 36(5): 77—89.
- 许淑梅, 张晓东, 翟世奎, 等, 2007. 海洋环境中氧化还原敏感性微量元素的地球化学行为及环境指示意义. 海洋地质动态, 23(3): 11—18.
- 杨万容, 李迅, 1995. 中国南方二叠纪礁类型及成礁的控制因素. 古生物学报, 34(1): 67—75.
- 曾鼎乾, 刘炳温, 黄蕴明, 1988. 中国各地史时期的生物礁. 北京: 石油工业出版社, 52—60.
- 翟世奎, 米立军, 沈星, 等, 2015. 西沙石岛生物礁的矿物组成及其环境指示意义. 地球科学——中国地质大学学报, 40(4): 597—605.
- 张明书, 1990. 西沙西永 1 井礁相第四纪地层的划分. 海洋地质与第四纪地质, 10(2): 57—64.
- 朱伟林, 王振峰, 米立军, 等, 2015. 南海西沙西科 1 井层序地层格架与礁生长单元特征. 地球科学——中国地质大学学报, 40(4): 677—687.

附中文参考文献

- 蔡峰, 许红, 郝先锋, 等, 1996. 西沙—南海北部晚第三纪生物礁的比较沉积学研究. 沉积学报, 14(4): 61—69.
- 范嘉松, 2005. 世界碳酸盐岩油气田的储层特征及其成藏的