

doi:10.3799/dqkx.2015.047

# 西沙石岛生物礁的矿物组成及其环境指示意义

翟世奎<sup>1</sup>, 米立军<sup>2</sup>, 沈星<sup>1</sup>, 刘新宇<sup>3</sup>, 修淳<sup>1</sup>, 孙志鹏<sup>3</sup>, 曹佳琪<sup>1</sup>

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)有限公司勘探部, 北京 100010

3. 中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 广东湛江 524057

**摘要:** 通过对西科1井岩心碳酸盐岩样品进行矿物组成分析, 来研究礁体的发育过程和古海洋环境的变化。初步研究结果表明: 西科1井岩心碳酸盐岩的矿物由低镁方解石、高镁方解石、文石和白云石组成。矿物组成特征表明, 井深35.4 m处为一重要的地层界面或环境变化界面。在岩心(井深0~748 m)中共识别出5个白云岩层, 其中上新统莺歌海组一层(井深: 289.3~312.3 m, 厚约23 m), 上中新统黄流组三层(分别位于井深: 373.3~412.7 m, 厚约39.4 m; 424.7~450.6 m, 厚约26.1 m; 469.70~564.96 m, 厚约95.2 m), 中中新统梅山组一层(井深: 615.20~636.96 m, 厚约21.7 m)。各层的白云岩化程度不尽相同, 5层白云岩中白云石矿物含量的最大值在79.3%~100%之间。生物礁的发育主要受控于古海洋环境的变化, 与古气候变化有关的海平面升降间接地控制了岛礁碳酸盐岩的白云岩化作用。石岛西科1井中的5层白云岩应该是在较长时间稳定环境条件下发育而成, 主要应该是蒸发泻湖渗透回流作用下早期形成的方解石类碳酸岩白云岩化的结果, 但并不排除混合水白云岩化作用的可能性。

**关键词:** 西沙岛礁; 西科1井岩心; 矿物组成; 白云岩层; 生物礁; 海洋地质。

**中图分类号:** P588.24

**文章编号:** 1000-2383(2015)04-0597-09

**收稿日期:** 2014-07-12

## Mineral Compositions and Their Environmental Implications in Reef of Shidao Island, Xisha

Zhai Shikui<sup>1</sup>, Mi Lijun<sup>2</sup>, Shen Xing<sup>1</sup>, Liu Xinyu<sup>3</sup>, Xiu Chun<sup>1</sup>, Sun Zhipeng<sup>3</sup>, Cao Jiaqi<sup>1</sup>

1. Key Lab of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques of Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

2. Exploration Department, CNOOC Ltd., Beijing 100010, China

3. Zhanjiang Branch of China National Offshore Oil Corporation (CNOOC) Limited, Zhanjiang 524057, China

**Abstract:** The reef carbonate rocks of well Xike-1 are analyzed for mineral compositions to explore the development process of reef and paleo-ocean environmental changes. It is found that carbonate minerals in the core of well Xike-1 are mainly composed of calcite (low-Mg and high-Mg), aragonite and dolomite. Mineral characteristics suggest that there is an important stratigraphic or environmental change interface at the core depth of 35.4 m. Five dolomite layers have been identified in the core (0~748 m) including one layer (289.3~312.3 m core depth) in the Yinggehai Formation of Pliocene, three layers (373.3~412.7 m, 424.7~450.6 m and 469.70~564.96 m respectively) in Huangliu Formation of Upper Miocene, and one layer (615.20~636.96 m) in the Meishan Formation of Middle Miocene. The biggest value of dolomite contents varies from 79.3% to 100%, indicating dolomitization difference in different dolomite layers. The development of the reef is mainly controlled by paleo-ocean environment changes and dolomitization of island reef is associated with sea-level changes controlled by paleoclimate events, such as the formation of ice sheet in Arctic in Pliocene, Messinian event in Late Miocene and expansion of ice sheet in Antarctic in Middle Miocene. The five dolomite layers should have been developed during a long-term stable environment mainly by the lagoon seepage-refluction model and possibly by mixed-water model.

**Key word:** Xisha island reef; well Xike-1; mineral composition; dolomite layer; reef; marine geology.

**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.2011ZX05025-002-02-04)。

**作者简介:** 翟世奎(1958—), 教授, 主要从事海洋地质学研究。E-mail: zhaishk@public.qd.sd.cn

**引用格式:** 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.

## 0 引言

生物礁是在造礁生物作用下形成的原地碳酸盐岩沉积体系(Riding, 2002),其发育过程受控于环境条件及造礁生物在地质历史时期的进化和灭绝事件.海洋环境的变化(例如:海平面升降、海水水温和盐度变化、岛礁出露面积的大小等)对生物礁的发育及胶结成岩作用都会产生重要的影响(Riding, 1982),进而影响并决定了生物礁的矿物学特征.

在 20 世纪中期,随着陆上碳酸盐地层油气资源逐渐被发现,人们开始重视对具有高孔隙度和高渗透率特性的生物礁的调查和研究.已有研究证明生物礁是良好的油气储层,在油气资源勘探和储量估算中占有重要地位(范嘉松, 2005;卫平生等, 2006;张学峰等, 2010;杨楚鹏等, 2014).生物礁是海洋中特有的生态系统,有多种生物种类,主要分布在热带和亚热带海域,对环境的温度、盐度、营养状态、水体浊度、气体分压等环境要素要求极为苛刻.因而,生物礁又是古海洋环境演变研究中信息或指标的良好载体.南海区域的地理位置和气候条件,辅以其特有的地质构造和复杂的海底地貌类型,造就了多种多样的生物礁体系.在南海北部珠江口盆地、琼东南盆地、莺歌海盆地和西沙群岛等处均有生物礁发育.

西沙群岛位于南海西北部,大致位于 $15^{\circ}30'N \sim 17^{\circ}12'N$ ,  $110^{\circ}10'E \sim 112^{\circ}50'E$ ,约 50 万  $\text{km}^2$  的海域.西沙海区分布大小约 40 个岛屿或浅滩,其陆地总面积居南海四大群岛之首.西沙群岛主体由永乐环礁、宣德环礁、东岛环礁、华光环礁、浪花环礁、玉琢环礁、北礁环礁和盘石屿环礁组成.20 世纪 70 年代,我国在西沙群岛的永兴岛上完成了第 1 口钻井(西永 1 井,井深 1 384.68 m,礁体厚 1 251 m),此后又打了西琛 1 井(1983)、西永 2 井(1984)和西石 1 井(1984).对上述钻井岩心的研究工作(王崇友等, 1979;何起祥和张明书, 1986, 1990;韩春瑞和孟祥营, 1990;蔡峰等, 1996;王玉净等, 1996;刘健等, 1998)确定了生物礁的基底类型(古生代片麻花岗岩),建立了中新世晚期以来的礁相地层层序,分析了沉积相及白云岩的成因,为深入认识西沙生物礁的发育机理奠定了基础.但是,限于当时的条件,钻井取心率偏低(最低的只有 9.3%),而且缺乏对生物礁系统的矿物学和地球化学研究,对生物礁的形成演化与古气候和环境的联系研究明显不足.

石岛是西沙群岛宣德环礁上的一个小岛,与永兴岛在同一个礁盘上.西科 1 井位于石岛之上,在井

深 0~748 m 井段取心 586.43 m,平均取心率达 78.4%.

## 1 材料与方法

### 1.1 岩心描述及取样

根据现场和室内观察,综合录井信息、层序地层、邻近钻井对比、钙质超微化石、大化石、磁性特征等资料,确定了钻井岩心的主要地层界面(朱伟林, 2015).

钻井岩心各层段的岩性特征如下(自上而下):

0~216 m 层段.顶部为未固结生物碎屑砂及弱固结生物碎屑灰岩,局部见黑色炭质;中部发育灰白色生物礁灰岩,固结程度较好,局部可见珊瑚、藻类等生物碎屑,且发育有多层风化剥蚀面,可见褐铁矿等;下部为灰白色生物碎屑灰岩,发育大量生物碎屑,可见双壳类印模和藻团块等,局部可见弱白云岩化作用.

216~288 m 层段.大套灰白色生物碎屑灰岩与礁灰岩互层,发育生物碎屑滩,生物碎屑发育.

288~373 m 层段.顶部发育风化暴露面,以土黄色生物碎屑灰岩为主;上部以灰白色生物碎屑白云岩为主;下部为松散,固结较差的生物碎屑灰岩.

373~462 m 层段.顶部黄褐色风化层和暗色炭质充填;上部和下部发育灰白色生物礁云岩及生物碎屑白云岩;中部发育一段碎屑灰岩和礁灰岩.

462~577 m 层段.顶部发育生物碎屑灰岩;上部灰白色生物碎屑白云岩夹泥晶白云岩,可见珊瑚和双壳类碎屑.下部为灰白色珊瑚礁云岩,珊瑚和藻格架发育,固结好,轻度破碎,可见强白云岩化作用.

577~748 m 层段.顶部为含灰泥生物碎屑灰岩,泥粒发育,可见炭质层;上部为灰白色生物碎屑灰岩夹白云岩层,或两者以互层形式出现;下部灰白色含灰泥生物碎屑灰岩,灰白色泥灰岩,含藻团块和有孔虫等,偶见双壳类和螺化石,底部以含灰泥生物碎屑灰岩为主.

岩心取样跨越钻井深度 0.3~747.8 m,共取样品 776 个,采样间隔为 1 m,在特殊层位处(如颜色突变处)进行加密,每个样品取样重约 50 g.

### 1.2 X-射线衍射分析

为了减小或消除海水蒸发遗留盐类和其他杂质对测试分析的干扰,首先对样品进行洗盐处理.主要流程:取适量样品置于烧杯中,加入适量去离子水并充分搅拌,静置 6~8 h,滤除上清液,重复上述过程 3 次后放入 100  $^{\circ}\text{C}$  烘箱中烘 24 h,将烘干后的样品置于密封袋待用.

将经洗盐处理后的样品放入玛瑙研钵中研磨,使样品中各种矿物充分混匀,为将其取向效应降至

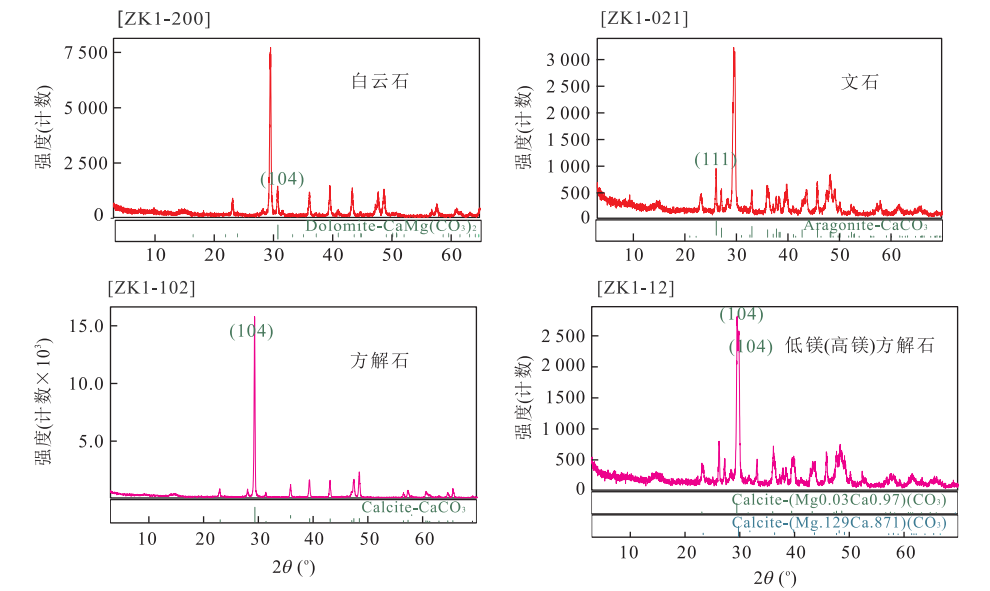


图 1 钻井岩心中方解石(低镁方解石、高镁方解石)、文石、白云石矿物特征图谱

Fig.1 Minerals characteristic spectrum of calcite(high-Mg and low-Mg), aragonite and dolomite in the core of well Xike-1

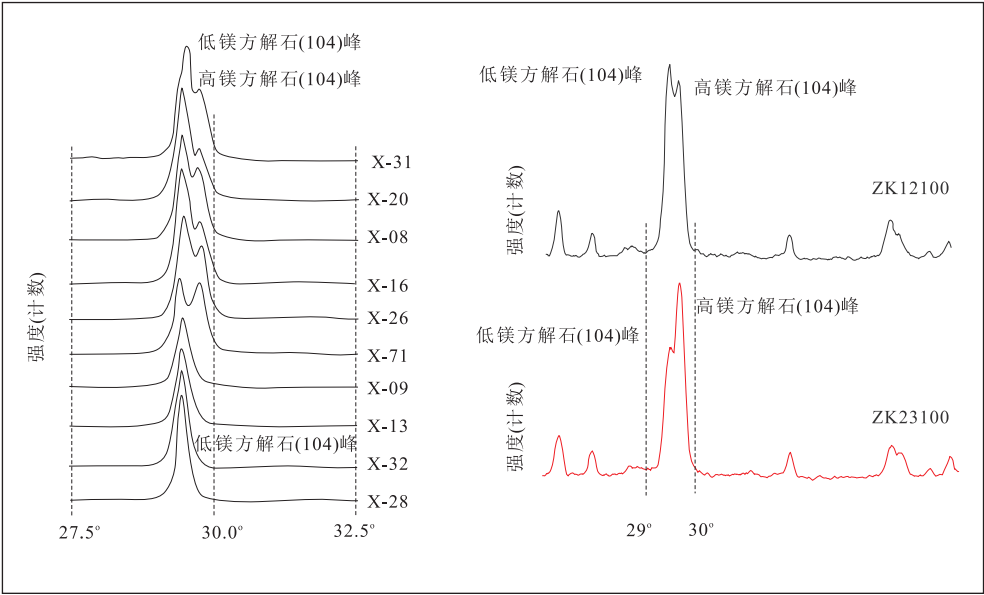


图 2 西沙石岛低镁、高镁方解石(104)分裂峰 X 射线图

Fig.2 X-ray splitting peaks of low-Mg and high-Mg calcites in Shidao Island, Xisha

X-31,X-20,X-08,X-16,X-26,X-71 为两种方解石分裂峰情况;X-09,X-13,X-32,X-28 为只有低镁方解石的单峰(曲高生,1988);ZK12100,ZK23100 为本文样品低镁、高镁方解石(104)特征分裂峰情况

最低,控制研磨后样品粒径在 0.02~0.04 mm 范围内.称量 400 mg 左右样品,用力将样品压入带框槽的玻璃质板内,上机测试.样品的预处理及分析测试工作均在中国海洋大学海洋科学与探测技术教育部重点实验室完成,采用 D/max-rB(日本理学)X 射线衍射仪,使用 Cu 靶旋转靶辐射,管电压 40 kV,管电流 100 mA,步长 0.02°(2θ),扫描范围 3°~70°,分

析测试操作严格按照 SY/T 5163-2010 标准执行,测试过程均为计算机控制,测定时的试验条件均保持相同(图 1,图 2).

根据方解石的(104)特征峰  $2\theta = 29.25^{\circ} \sim 29.80^{\circ}$ ,  $d = 2.995\text{\AA} \sim 3.035\text{\AA}$ ;白云石的(104)特征峰  $2\theta = 30.58^{\circ} \sim 31.28^{\circ}$ ,  $d = 2.854\text{\AA} \sim 2.912\text{\AA}$ ;文石的(111)特征峰  $2\theta = 25.5^{\circ} \sim 26.5^{\circ}$ ,  $d = 3.39\text{\AA} \sim 3.40\text{\AA}$

可以从衍射图谱中定性的区分出方解石矿物、文石矿物和白云石矿物(图 1).方解石又分为低镁方解石和高镁方解石.通常,当低镁方解石和高镁方解石共存时,方解石(104)特征峰在  $2\theta=28.5^{\circ}\sim30.5^{\circ}$  之间会出现分裂(不对称峰),低角度者为低镁方解石的特征峰,高角度者为高镁方解石特征峰,无分裂峰者为单一的低镁方解石(图 2).

采用“自清洗法”计算不同样品中不同矿物的百分含量,计算公式为:

$$X_i = \frac{1}{K_i I_i \sum_{i=1}^n (I_i / K_i)}$$

式中: $X_i$  为某矿物组分  $i$  在样品中的重量百分数; $K_i$  为组分  $i$  的参比强度值,亦即任一纯物相与纯内标物(刚玉)以 1:1 比例混合后所测得两者最强衍射谱线之强度比,一般情况下为一常数; $I_i$  为矿物组分  $i$  的衍射强度.自 1978 年开始,国际衍射数据中心(ICDD)发布的 PDF 卡片附加 RIR 值(亦即  $K$  值).对于只有 A、B、C 3 种矿物相的样品,可以通过 PDF 卡片查询每相的  $K$  值( $K_{\text{Al}_2\text{O}_3}^A$ 、 $K_{\text{Al}_2\text{O}_3}^B$ 、 $K_{\text{Al}_2\text{O}_3}^C$ ),得出各矿物相以其中一相 A 为内标的  $K$  值: $K_A^A = \frac{K_{\text{Al}_2\text{O}_3}^A}{K_{\text{Al}_2\text{O}_3}^A} = 1$ ,  $K_A^B = \frac{K_{\text{Al}_2\text{O}_3}^B}{K_{\text{Al}_2\text{O}_3}^A}$ ,  $K_A^C = \frac{K_{\text{Al}_2\text{O}_3}^C}{K_{\text{Al}_2\text{O}_3}^A}$ .根据各矿物相的  $K$  值,应用“基体清洗法”的计算方程即可计算得出各矿物相的相对百分含量.

2 分析结果

X-射线衍射分析结果表明:在整个钻井岩心样品中,低镁方解石含量在 0~100% 之间,平均值为 73.4%;高镁方解石含量在 0~63.1% 之间,平均值为 2.0%;白云石含量在 0~100% 之间,平均值为 20.5%;文石含量在 0~74.5% 之间,平均值为 3.8%.白云石和方解石(包括低镁方解石和高镁方解石)两类矿物含量平均超过 96%.分别在井深 366.6 m、386.9 m 和 387.3 m 层位出现少量的粘土矿物,其矿物种类和含量分别为绿泥石 25.5%、伊利石 29.5% 和伊利石 18.9%.

在钻井岩心顶部 0~35.4 m 层段,出现低镁方解石(通常的方解石)、高镁方解石和文石 3 种矿物共存现象(图 3).方解石含量介于 56.8%~95.4% 之间,平均为 70.4%.高镁方解石含量在 0~63.1% 之间,平均为 19.0%.高镁方解石与低镁方解石呈现互为消长关系.该层段未出现白云石.文石含量在 3.2%~74.5% 之间,平均为 29.6%.

在全井段岩心中方解石和白云石含量大体相等,二者呈明显的互为消长关系(相关系数为 -0.95).高镁方解石在井深 35.4 m 之下的岩心中没有出现.文石除在顶部层段出现较高含量之外,在中上部的 207.3~229.2 m 层段含量在 6.1%~18.2%

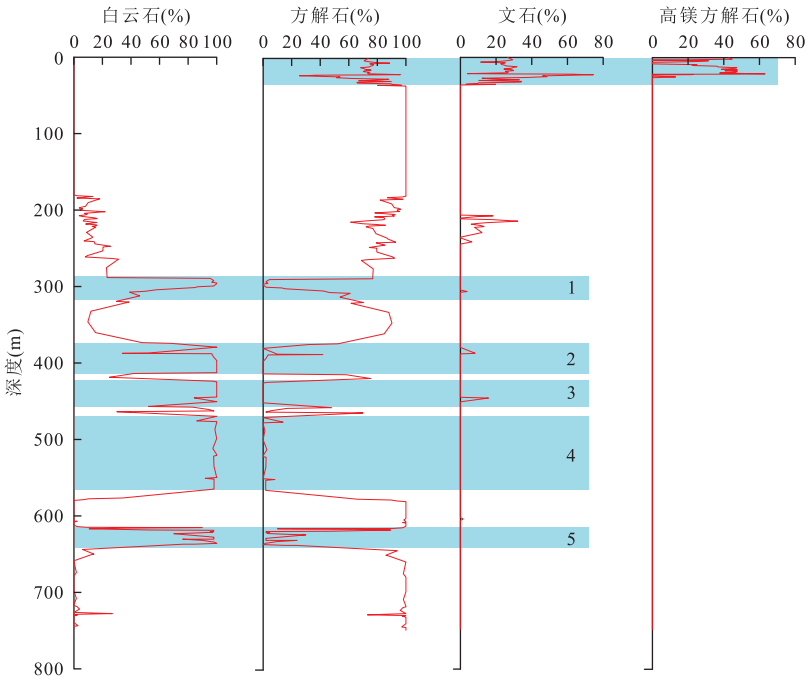


图 3 主要矿物成分含量在岩心中的分布

Fig.3 Main mineral content distributions in the core of well Xike-1

之间,平均为 11.2%,在其余层段偶有个别样品出现微量文石(图 3)。

方解石和白云石含量在全井段的分布具有明显的旋回性。根据白云石和方解石含量的相对变化可以将岩心自上而下分出 5 个白云石富集层段(图 3)。

第 1 段:289.3~312.3 m,厚约 23 m。白云石含量在 39.0%~100%之间,平均为 79.3%,方解石含量在 0~61.0%之间,平均为 20.3%。306.3 m 处一个样品出现文石,含量为 3.9%。

第 2 段:373.3~412.7 m,厚约 39.4 m。白云石含量在 34.0%~100.0%之间,平均为 83.0%,方解石含量在 0~52.3%,平均为 11.8%。分别在 386.87 m 和 387.3 m 处出现文石,含量分别为 8.3%和 5.5%。

第 3 段:424.7~450.6 m,厚约 26.1 m。白云石含量在 84.2%~100%之间,平均为 98.7%,方解石含量几乎为 0,在 445.6 m 处样品中出现文石,含量为 15.7%。

第 4 段:469.70~564.96 m,厚约 95.2 m。白云石含量在 86.1%~100%之间,平均为 97.8%。方解石含量在 0~14.0%之间,平均为 2.2%。

第 5 段:615.20~636.96 m,厚 21.7 m 左右。白云石含量在 10.7%~100%之间,平均为 81.1%。方解石含量在 0~89.3%之间,平均为 18.9%。该段白云石含量呈锯齿状波动变化。

3 讨论

3.1 井深 35.4 m 地层界限

现代浅海环境中碳酸钙沉积物主要由文石、低镁方解石、高镁方解石 3 种矿物组成,在地质历史中的相应环境中形成的石灰岩却主要是低镁方解石。因此,文石和高镁方解石在成岩过程中属于不稳定矿物,在形成后的地质过程中逐渐转变为低镁方解石,这种碳酸钙矿物的转变在常温、常压下就可以发生。现代海洋生物碎屑主要由文石和高镁方解石构成,低镁方解石仅出现于少量生物碎屑中。软体类、珊瑚碎屑主要由文石构成,部分有孔虫、棘皮类和珊瑚藻主要由高镁方解石构成。由图 3 可以看出,在钻井岩心 0~35.4 m 层段,同时出现文石、高镁方解石、低镁方解石,三者各占有不容忽视的比例,未出现白云石。上述事实说明该层段(0~35.4 m)岩心没有经历明显的成岩作用改造,基本保留了生物礁碳酸盐形成初期的矿物组成。镜下观察发现该层段基本都是由珊瑚碎屑组成,进一步证明该层段矿物组

成反映了造礁生物以珊瑚和珊瑚藻类为主的事实,自形成后矿物没有发生明显变化。就海洋环境而言,自井深 35.4 m 处环境发生了明显的变化,35.4 m 岩心上部反映了近现代的岛礁环境。当处于淡水环境或淡水—海水混合环境时,文石转化成低镁方解石的时间可以在数千年到数万年之间(Halley and Harris,1979;Budd,1988)。因此,可以认为井深 35.4 m 附近应是一重要的地层界面或环境变化界面。

3.2 白云岩层与白云岩化作用

自井深 35.4 m 处向下,整个岩心中没有再出现高镁方解石,说明早先生物形成的高镁方解石都已转化为普通(低镁)方解石,钻井岩心经历了明显的成岩作用改造。分别在井深 207.30~229.21 m 层段、306.30 m、386.90 m、387.30 m 和 445.60 m 处出现文石、白云石、方解石 3 种矿物共存的现象,以稳定的低镁方解石矿物为主,白云石次之,文石含量最少。岩心切片观察发现这些层段的文石主要是呈纤维状存在于胶结物中(图 4),反映了埋藏压实条件下的成岩作用过程。

井深 181.3 m 之上层段岩心中没有出现白云石。在井深 181.3~288.3 m 层段白云石含量变化于 2.1%~31.2%之间,平均值为 12.3%,说明白云化作用虽有发生,其岩性仍为以方解石为主要矿物相的碳酸盐。在该层段,白云石含量总体上呈现自上向下逐渐增加的趋势(图 3),说明成岩作用中的白云石化作用逐渐加强,这应是埋藏压实作用下的成岩白云石生成过程。

289.3~312.3 m 层段白云石含量大增,变化于 39.0%~100%范围内,平均值高达 80%,其岩性可划为白云岩层(厚约 23 m,图 3 中的层 1)。此类厚层白云岩层在井深 312 m 之下的岩心中又出现 4 次,

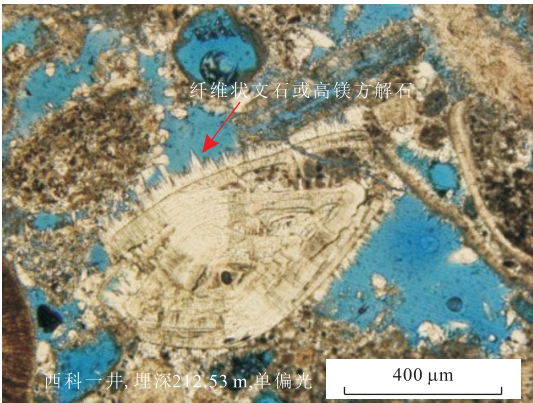


图 4 胶结物中的纤维状文石  
Fig.4 Fibrous aragonite in the cements

分别出现在井深 373.3~412.7 m 层段(厚约 39 m)、424.7~450.6 m 层段(厚约 26 m)、469.7~564.96 m 层段(厚约 95.2 m)和 615.2~637.0 m 层段(厚约 22 m),带有明显的旋回性.这种厚层(厚度达数十米)几近纯净的白云岩层(宏观及微观照片见王振峰等,2015)不可能是在埋藏压实条件下成岩白云石化过程的产物,而且其间还夹有厚度不一的方解石碳酸盐岩层.在早先的西琛 1 井、西永 1 井和西永 2 井的岩心中均发现有白云岩层(何起祥和张明书,1990;魏喜等,2008).已查明的 3 套白云岩分别为上上新统白云岩、中中新统一上中新统白云岩和下中新统白云岩.上述事实说明:西沙群岛礁体白云岩化作用具有区域性,并不局限于个别岛屿.

对于碳酸盐白云岩化作用的研究已总结出众多的模式(尽管至今仍多有争议),例如:蒸发模式(萨

布哈模式)、渗透回流模式、混合水模式、深埋藏白云岩化模式、地热对流模式、热液白云岩化作用模式等(路凤香和桑隆康,2002).成因模式的多样性说明白云岩化机理的复杂性.魏喜(2006)和赵强(2010)对西琛 1 井岩心内发育的 3 套白云岩进行了研究,指出西沙生物礁碳酸盐岩白云岩化作用主要存在浓缩海水模式、混合水白云岩化模式和地热对流驱动白云岩化模式.岩石薄片镜下观察和沉积相研究结果(朱伟林等,2015;刘新宇等,2015)表明,钻井岩心中存在有典型的潟湖相沉积,并有证据(风化面)表明礁体曾经历了多次的暴露和淹没交替过程.基于西沙海域白云岩发育的区域性,结合西科 1 井白云岩层发育的特点和矿物学特征(没有发现有其他矿物),考虑地质历史中的海平面变化和南海盆地的发展历史,作者认为石岛西科 1 井中的 5 层白云岩应

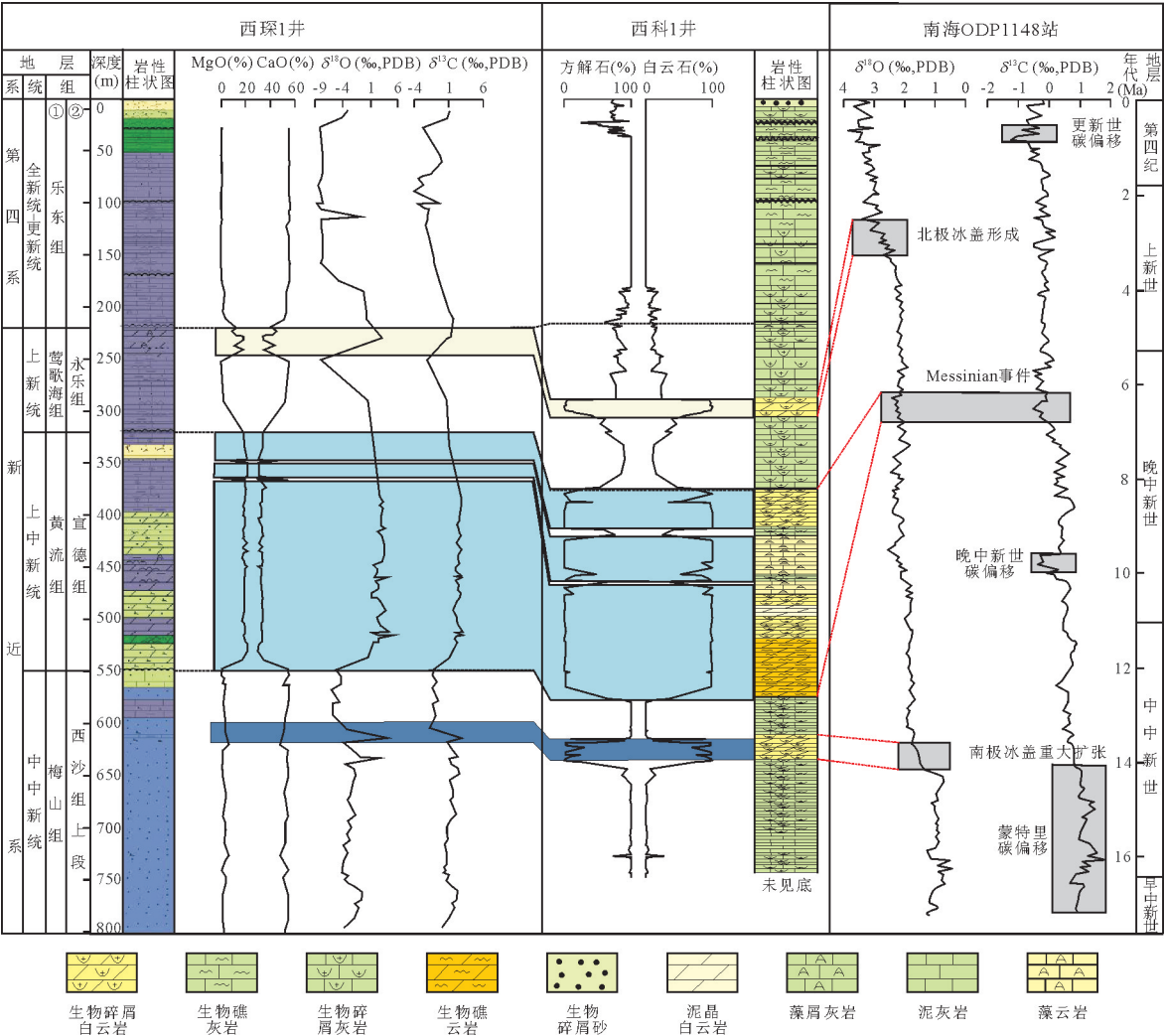


图 5 西沙群岛钻井岩心矿物相发育特征所揭示的古海洋事件  
Fig.5 Paleo-ocean events indicated by mineral characteristics of wells in Xisha Islands  
①西科 1 井地层划分方案;②西琛 1 井地层划分方案

该是在较长时间稳定环境条件下发育而成,主要应该是蒸发泻湖渗透回流作用下早期形成的方解石类碳酸岩白云岩化的结果.当然,仅就目前的资料,还不能排除混合水白云岩化作用的可能性.

西沙岛礁地处热带,海水蒸发强烈,降雨频繁,但蒸发量大于降水量.伴随海平面的升降,一旦形成相对封闭的泻湖,将使间歇性进入泻湖的海水盐度不断增高.随着以文石和高镁方解石为主的碳酸盐矿物的沉淀,逐渐向以石膏和食盐为主的矿物结晶沉淀过渡,这一过程将导致泻湖中富 Mg 重卤水的形成.随着富 Mg 重卤水在礁体内部的下渗和侧向流动, Mg 进入早期沉积物的  $\text{CaCO}_3$  晶格中,逐渐形成白云石.上述过程包括间歇性雨(淡水)的加入.海平面的升降变化导致了钻井岩心中发育有多个白云岩层,泻湖的发育规模和海平面稳定时间的长短控制了白云岩层的厚度.赵强(2010)根据矿物流体包裹体的分析结果推测西沙海域生物礁地层中还存在有地热对流驱动的白云岩化模式,笔者认为,虽不能排除地热对流驱动的白云岩化作用的存在,但这种作用难以形成间隔分布的多层白云岩层.

### 3.3 邻近钻井岩心对比与古海洋学事件

西琛1井岩心的研究表明,  $\text{MgO}$  含量与  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta^{13}\text{C}$  有很好的相关性(图5),三者在岩心中的变化趋势一致(赵强, 2010). 蒸发环境下的白云化作用会导致轻碳和轻氧的流失以及  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta^{13}\text{C}$  值增高,而大气降水及其参与的成岩作用则能引入轻碳和轻氧,使  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta^{13}\text{C}$  值降低.

汪品先等(2001)对南海 ODP1148 钻井岩心氧同位素曲线分析认为,海平面下降导致钻井岩心中不整合面的形成,使得重氧同位素特征在生物礁中体现得更为明显,并发生白云岩化事件.何起祥和张明书(1990)认为西沙岛礁钻井岩心中上上新统白云岩和中中新统一上中新统白云岩是在两次大的古海洋事件中形成的,上上新统白云岩可能与上新世北极冰盖的形成有关,中中新统一上中新统白云岩对应于晚中新世 Messinian(米辛尼亚)事件.在西科1井岩心中,1层(图3,图5)白云岩的形成时代对应于上新世的北极冰盖形成事件,2~4层白云岩(其间间隔很小,可以看成是一段时间内形成的同一套白云岩)的形成时代与晚中新世的 Messinian 事件相当.在西科1井井深 615 m 处附近出现的厚约 22 m 的白云岩层可能与中中新世南极冰盖的扩大事件(图5)有关.

白云岩层的形成时代与古海洋学事件在时间上

良好的对应关系足以说明古气候变化在岛礁形成发育中的主导作用,与古气候变化有关的海平面升降间接地控制了岛礁碳酸盐岩的白云岩化作用.

## 4 结论

(1)西科1井岩心碳酸盐岩的矿物由低镁方解石、高镁方解石、文石和白云石组成.矿物组成特征表明井深 35.4 m 处为一重要的地层界面或环境变化界面.

(2)在岩心(井深 0~748 m)中共识别出 5 个白云岩层,其中上新统莺歌海组一层(井深:289.30~312.30 m,厚约 23.00 m),上中新统黄流组三层(分别位于井深:373.30~412.70 m,厚约 39.40 m; 424.70~450.60 m,厚约 26.10 m; 469.70~564.96 m,厚约 95.20 m),中中新统梅山组一层(井深:615.20~636.96 m,厚约 21.70 m),各层的白云岩化程度不尽相同,5层白云岩中白云石矿物含量的最大值变化于 79.3%~100%之间.

(3)生物礁的发育主要受控于古海洋环境的变化,与古气候变化有关的海平面升降间接地控制了岛礁碳酸盐岩的白云岩化作用.

(4)石岛西科1井中的5层白云岩应该是在较长时间稳定环境条件下发育而成,主要应该是蒸发泻湖渗透回流作用下早期形成的方解石类碳酸岩白云岩化的结果.当然,并不排除混合水白云岩化作用的可能性.

## References

- Budd, D. A., 1988. Aragonite-to-Calcite Transformation during Fresh-Water Diagenesis of Carbonates: Insights from Pore-Water Chemistry. *Geological Society of America Bulletin*, 100(8): 1260—1270. doi: 10.1130/0016-7606(1988)100<1260:ATCTDF>2.3.CO;2
- 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).
- Halley, R. B., Harris, P. M., 1979. Fresh-Water Cementation of a 1 000-Year-Old Oolite. *Journal of Sedimentary Research*, 49(3): 969—987.

- 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—81 (in Chinese with English abstract).
- 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).
- 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).
- Liu, X. Y., Zhu, Y. H., Liao, W. H., et al., 2015. Coral Assemblages and Their Ecological Environment of Well Xike-1, Xisha Islands. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 40(4): 688—696 (in Chinese with English abstract).
- Lu, F. X., Sang, L. K., 2002. Petrology. Geological Publishing House, Beijing, 232—235 (in Chinese).
- Qu, G. S., 1988. Quantitative Mineralogical Analysis of Carbonate Sediments by X-Ray Diffraction. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 8(2): 53—66 (in Chinese with English abstract).
- Riding, R., 1982. Cyanophyte Calcification and Changes in Ocean Chemistry. *Nature*, 299: 814—815. doi: 10.1038/299814a0
- Riding, R., 2002. Structure and Composition of Organic Reefs and Carbonate Mud Mounds: Concepts and Categories. *Earth-Science Reviews*, 58(1): 163—231. doi: 10.1016/S0012-8252(01)00089-7
- Wang, C. Y., He, X. X., Qiu, S. Y., 1979. Carbonate Formation and Microbody Paleontological Preliminary Study in Well Xiyong-1 of Xisha Islands. *Petroleum Geology & Experiment*, (1): 23—32 (in Chinese).
- Wang, P. X., Zhao, H. Q., Jian, Z. M., et al., 2003. Deep Sea Records for 3 000 Ma in South China Sea. *Chinese Science Bulletin*, 48(21): 2206—2215 (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. F., Shi, Z. Q., Zhang, D. J., et al., 2015. Microscopic Features and Genetic Analysis for Miocene to Pliocene Dolomite in Well Xike-1, Xisha Islands. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 40(4): 633—644 (in Chinese with English abstract).
- 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).
- Wei, X., 2006. Forming Condition of Late-Cenozoic Reef Facies Carbonate Rocks in Xisha Sea Area and Their Oil and Gas Exploration Potential (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing, 94—102 (in Chinese with English abstract).
- Wei, X., Jia, C. Z., Meng, W. G., 2008. Dolomitization Characteristics of Carbonate Rock in Xisha Islands and Its Formation: A Case Study of Well Xichen-1. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 38(2): 217—224 (in Chinese with English abstract).
- Yang, C. P., Yao, Y. J., Li, X. J., et al., 2014. Sequence Stratigraphy and Sedimentary Cycle of Miocene Carbonate Buildups in Zengmu Basin, the Southern South China Sea. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 39(1): 91—98 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X. F., Liu, B., Cai, Z. X., et al., 2010. Dolomitization and Carbonate Reservoir Formation. *Geological Science and Technology Information*, 29(3): 79—85 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Q., 2010. The Sedimentary Research about Reef Carbonate in Xisha Islands Waters (Dissertation). Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 126—144 (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).

## 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—81.
- 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.

刘新宇,祝幼华,廖卫华,等,2015.西沙群岛西科 1 井珊瑚组合面貌及其生态环境.地球科学——中国地质大学学报,40(4):688—696.

路凤香,桑隆康,2002.岩石学.北京:地质出版社,232—235.

曲高生,1988.西沙群岛石岛碳酸盐 X 射线定量分析方法研究.海洋地质与第四纪地质,8(2):53—66.

王崇友,何希贤,裘松余,1979.西沙群岛西永一井碳酸盐岩地层与微体古生物的初步研究.石油实验地质,(1):23—32.

汪品先,赵泉鸿,翦知潜,等,2003.南海三千万年的深海记录.科学通报,48(21):2206—2215.

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.

王振峰,时志强,张道军,等,2015.西沙群岛西科 1 井中新统一上新统白云岩微观特征及成因.地球科学——中国地质大学学报,40(4):633—644.

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.

魏喜,2006.西沙海域晚新生代礁相碳酸盐岩形成条件及油气勘探前景(博士学位论文).北京:中国地质大学,94—102.

魏喜,贾承造,孟卫工,2008.西沙群岛西琛 1 井碳酸盐岩白云石化特征及成因机制.吉林大学学报:地球科学版,38(2):217—224.

杨楚鹏,姚永坚,李学杰,等,2014.南海南部曾母盆地中新世碳酸盐岩的层序地层.地球科学——中国地质大学学报,39(1):91—98.

张学丰,刘波,蔡忠贤,等,2010.白云岩化作用与碳酸盐岩储层物性.地质科技情报,29(3):79—85.

赵强,2010.西沙群岛海域生物礁碳酸盐岩沉积学研究(博士学位论文).青岛:中国科学院研究生院(海洋研究所),126—144.

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.