

doi:10.3799/dqkx.2015.048

西沙地区晚中新世以来碳酸盐岩的 沉积演化及储层特征

张道军,刘新宇,王亚辉,罗威,尤丽,徐守立

中海石油(中国)有限公司湛江分公司,广东湛江 524057

摘要:生物礁滩相碳酸盐岩是南海海域深水区重要的油气储层之一.通过对西科1井(0~576.5 m)岩心的宏观描述及微观分析,结合古生物、古地磁、高分辨岩心扫描及大量分析测试结果,对碳酸盐岩—生物礁滩体系展开了精细研究.研究表明:该井晚中新世以来记录了6次暴露事件、2次淹没事件,结合古生物、古地磁、Li同位素分析,可划分为8个三级层序,其中晚中新世黄流组和第四系乐东组为主要成礁期.通过细致的岩相学研究,系统刻画了生物礁—碳酸盐岩的岩石类型、成岩作用类型和孔隙类型,重建了成岩环境.

关键词:西科1井;生物礁;层序划分;成岩环境;岩石学.

中图分类号: P588.24

文章编号: 1000-2383(2015)04-0606-09

收稿日期: 2014-08-11

Sedimentary Evolution and Reservoir Characteristics of Carbonate Rocks since Late Miocene in Xisha Area of the South China Sea

Zhang Daojun, Liu Xinyu, Wang Yahui, Luo Wei, You Li, Xu Shouli

Zhanjiang Branch of CNOOC Ltd., Zhanjiang 524057, China

Abstract: Reef-bank carbonate is one of the most important oil and gas reservoirs in deep-water area of the South China Sea. By macroscopic description of the well Xike-1 core (0—576.5 m) and microscopic analysis, combining with paleontology, paleomagnetism, high-resolution core scanning and large amounts of test result analysis, the carbonate reef system is studied in detail in this paper. The research indicates that this well has recorded 6 exposure events, and 2 drowning events since Late Miocene. Based on analyses of paleontology, paleomagnetism and lithium isotopes, 8 third-order sequences can be recognized, among which Late Miocene Huangliu Formation and Quaternary Ledong Formation are the main reef growth phase. By detailed petrography study, the rock types, diagenetic types and pore types of the Quaternary reef carbonate are systematically depicted, and the diagenetic environments are rebuilt.

Key words: well Xike-1; reef; sequence division; diagenetic environment; petrology.

为了强化南海生物礁的研究,中国海洋石油总公司牵头多单位联合设立了“西科1井”钻探研究项目.“西科1井”位于西沙群岛的石岛,该岛与海南三沙市政府所在地永兴岛同处于一个礁盘上,通过约800 m的长堤与永兴岛相连.“西科1井”目前全取心748 m,钻孔浅部以珊瑚礁滩沉积为主,固结总体

较弱,510 m以下为碳酸盐岩台地沉积.该探井的完成为探讨南海新近纪以来地层格架、古海洋、古气候以及碳酸盐岩成岩—储层等复杂科学问题提供了难得的基础资料.本文综合西科1井岩心观察和描述、古生物鉴定、古地磁测试、岩石薄片鉴定、全岩扫描、同位素测试等最新的成果资料,初步建立了层序地

基金项目:国家重大油气专项(No.2011ZX05025-002-02-04).

作者简介:张道军(1973—),男,高级工程师,主要从事储层沉积学研究.E-mail: zhangdaojun@cnooc.com.cn

引用格式:张道军,刘新宇,王亚辉,等,2015.西沙地区晚中新世以来碳酸盐岩的沉积演化及储层特征.地球科学——中国地质大学学报,40(4): 606—614.

层格架,建立了西沙高分辨率生物礁生长模型及其演化序列,为进一步深入系统地认识南海生物礁滩体系提供了参考范例。

1 地质背景

西沙群岛位于西沙隆起区,是我国南海四大群岛中陆地总面积最大的群岛,其北侧毗邻的琼东南盆地是南海北部西区重要的天然气产区之一(图1)。前人研究认为:西沙群岛所在的地块随着古近纪末期南海盆地的扩张,由华南大陆裂离到现今位置(金庆焕,1989),在随后的南海盆地区热沉降过程中,早期的断块高地成为水下隆起(魏喜等,2006a),具有优越的碳酸盐岩台地地貌条件。适宜的温度、盐度及水深,使该区分布了晚渐新世以来大规模的生物礁滩体系(吕修祥和金之钧,2000;吕炳全等,2002;吕彩丽等,2011)。

自1973年底在永兴岛成功钻探西永1井,近30年来西沙群岛陆续又钻探了西石1井、西永2井、西琛1井3口科探井,然限于取心收获率或设计井深问题(何起祥和张明书,1986;秦国权,1987;魏喜等,2006b),对该区生物礁碳酸盐岩的研究始终未能揭示西沙隆起区碳酸盐岩沉积建造、演化历史的全貌。西科1井设计钻遇花岗岩基底,与西永1井相当,且目前0~748 m段的取心收获率高达78.4%,为开展该区礁滩体系的演化、储层发育特征提供了极好的条件。

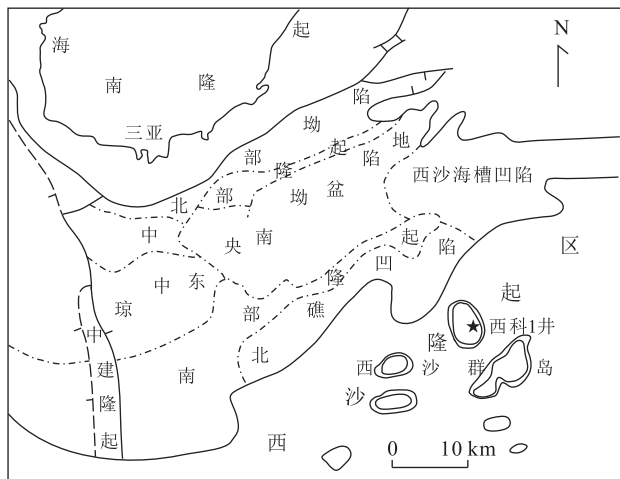


图1 海南岛东南部大地构造及西科1井位置

Fig.1 Geological background of southeastern Hainan Island and the position of well Xike-1

2 地层格架

2.1 生物地层划分

西科1井0~576.5 m井段内已发现珊瑚、大型底栖钙藻、有孔虫、钙质超微、双壳、微型腹足及苔藓虫等动植物门类的古生物化石,为生物地层研究奠定了基础,综合各门类古生物化石研究结果,将西科1井0~576.5 m井段划分:

(1)第四系(0~214.89 m),含较丰富的大型底栖钙藻共4科12属,分别为绿藻门松藻科的仙掌藻属(*Halimeda*)和粗枝藻科的伞轴藻属(*Cymopodia*);红藻门珊瑚藻科的古石枝藻属(*Archaeolithothamnium*)、石枝藻属(*Lithothamnium*)、石叶藻属(*Lithophyllum*)、奇石藻属(*Aethesolithon*)、石孔藻属(*Lithoporella*)、蟹手藻属(*Amphiroa*)、让氏藻属(*Jania*)、中叶藻属(*Mesophyllum*)、珊瑚藻属(*Corallina*)以及裸海松藻科的大孔藻属(*Macroporella*)等。珊瑚化石计有10属和1个未定属,其中蔷薇珊瑚(*Montipora*)、陀螺珊瑚(*Turbinaria*)、蜂房珊瑚(*Favia*)及刺星珊瑚(*Cyphastraea*)等数量较多,滨珊瑚(*Porite*)、内脊沙珊瑚(*Endopsammia*)、角蜂巢珊瑚(*Favites*)、苍珊瑚(*Helipora*)及扁脑珊瑚(*Platygyra*)等少量出现,仅分布于第四纪的内脊沙珊瑚(*Endopsammia*)发现于161.69 m(廖卫华,1997)。在214.29~215.70 m出现一层微体浮游藻类钙质超微化石,发现仅分布于第四系的大洋桥石藻(*Gephyrocapsa oceanica*)、加勒比海桥石藻(*G. caribbeanica*)等;此外,还出现麦氏圆颗石藻(*Calcidiscus macintyreii*),该种的末现面接近于第四纪与新近纪界线(Raffi et al., 2006;李前裕等, 2007)。有孔虫以大型底栖类为主,浮游类个别出现,其中0.10~47.62 m井段底栖有孔虫较丰富,55.021~214.190 m有孔虫丰度和分异度明显降低。

(2)上新统(214.89~374.95 m),珊瑚化石极少出现,仅在3个样品中发现珊瑚2科2属,分别为刺星珊瑚(*Cyphastraea*)和陀螺珊瑚(*Turbinaria*)。251.57~358.21 m井段较连续出现钙质超微化石,其中330.97 m样品化石较丰富,出现钙质超微NN15带顶界的标志化石杉形楔石藻 *Sphenolithus abies* 和新杉形楔石藻 *S. neoabies*,该末现面年龄为3.54 Ma,接近于皮亚琴察阶与赞克勒阶的界线(Wang et al., 2000)。有孔虫较丰富,以底栖大有孔虫为主,浮游类也常有出现。根据有孔虫化石面貌,可建立盖形虫属 *Operculina*-圆盾虫属 *Cyclo-*

clypeus-肾鳞虫属 *Nephrolepidina* 组合,时代为上新世。据有孔虫组合的时代,将 214.89~374.95 m 地层划分为上新统。

(3) 上中新统(374.95~576.5 m)。珊瑚化石数量较上新统有所增加,出现 6 科 9 属,主要为星孔珊瑚(*Astreopora*)、鹿角珊瑚(*Acropora*)和滨珊瑚(*Porites*)等。双壳类化石集中在本段出现,化石保存较好,但其地层分布时限较长。本段有孔虫采用两种方法处理,样品分散后获得有孔虫个体或者直接磨片后观察。经双氧水分散处理过筛后的样品,仅在 373.69 m 及 376.00 m 深度处的 2 个样品发现个别有孔虫化石;在岩石薄片,有孔虫丰度虽低但分布较广。有孔虫化石群以底栖大有孔虫为主,分异度在 10 种以下;其次是底栖小有孔虫,分异度变化较大,从几个种到 20 多个种;浮游有孔虫最少,丰度约占所有孔虫总数的 5% 不到,分异度也低,大部分样品不超过 7 个种。

2.2 三级层序格架

在上述工作的基础上,结合岩心精细描述和定量薄片鉴定成果,从西科 1 井 0~576.5 m 岩心中识别出 6 个暴露面、2 个淹没面,并划分出 8 个三级层序。每个三级层序发育海进体系域(TST)和高位体系域(HST),每个体系域划分了不等的准层序组和准层序(图 2)。各三级层序发育演化与南海区域海平面变化具有很好的吻合关系。其中晚中新世黄流组和第四系乐东组为主要成礁期。

(1) 乐东组(0~214.89 m)。该组的造礁生物为珊瑚和红藻,以珊瑚为主。红藻可以单独造礁,也可以包裹珊瑚,增强其抗浪性。附礁生物主要为有孔虫,个别层段以仙人掌藻为主(如 28 m 附近),次为棘皮类,双壳类和腹足类在表层几十米范围内含量在 3% 左右。该组不见白云化,岩性包括珊瑚骨架礁灰岩、红藻珊瑚骨架礁灰岩、红藻粘结礁灰岩、悬粒岩、亮晶生屑灰岩、泥晶生屑灰岩、生屑泥晶灰岩、内碎屑生屑泥晶灰岩和泥晶灰岩等。该组共划分出 3 个三级层序,每个三级层序发育特征均有所不同(图 2)。

(2) 莺歌海组一段(214.89~288.43 m)。包括两个三级层序 Sq5 和 Sq4,分别对应 214.89~259.50 m 和 259.50~288.43 m 的深度段。Sq4 以 224 m 为最大海泛面分为海进体系域和高位体系域。造礁生物主要为红藻,极少数层段内可见珊瑚;附礁生物主要为有孔虫,次为棘皮类,偶见双壳类和腹足类。该段未见白云化,最显著的特点是在海进体系域

内发育多个淹没面或淹没层段,岩性为生屑泥晶灰岩或泥晶灰岩,代表泻湖、礁后外侧滩或礁基相,反映海平面快速上升,将礁体淹没。礁后外侧滩常见,礁核常常直接在外侧滩基础上生长。礁核多为红藻粘结礁灰岩,反映处于海平面上升速度较快的环境中,红藻来不及大量生长。高位体系域无淹没面,但高位体系域总体很薄,礁核相比海进体系域更发育。Sq5 以 269 m 最大海泛面分为海进体系域和高位体系域。造礁生物主要为红藻,偶见珊瑚(261.46 m);附礁生物主要为有孔虫,次为棘皮类,偶见双壳类和腹足类。该段未见白云岩化。该段生屑滩相更为发育,礁后外侧滩和礁后内侧滩交互发育,以礁后外侧滩为主。礁核相间出现,有时厚度可达 2~3 m,如海侵体系域 276.50~279.04 m 段,连续出现红藻粘结礁灰岩构成的礁核相。总体来看,海进体系域初期和高位体系域末期更容易发育连续厚度大的礁核相沉积。常见的完整相序列组合为礁后外侧滩—礁后内侧滩、礁后外侧滩—礁后内侧滩—礁核—礁基—礁核等。在 260.56 m 处可见较多溶蚀孔和铸模孔,判断为一暴露面,其上紧邻 260.09 m 处对应一个淹没面,可能为初始海泛面。

(3) 莺歌海组二段(288.43~374.95 m)。对应三级层序 Sq6,以 320 m 处为最大海泛面分为海进体系域和高位体系域。造礁生物主要为红藻;附礁生物主要为有孔虫,次为棘皮类,偶见双壳碎片。强烈白云化层段主要集中在高位体系域 288~303 m 层段,其他层段白云化微弱或不存在。329.5~373.0 m 层段绝大部分为生屑滩相,只偶尔出现薄层的红藻粘结礁灰岩。多见泻湖—礁后外侧滩—礁后内侧滩—泻湖的相序列旋回,旋回厚度不等。生屑滩生物组成主要为红藻碎片和有孔虫及其碎片,棘皮含量较少。288.0~329.5 m 层段是生物礁相集中发育的层段,绝大部分为礁核相,但仍可见礁核被淹没,形成泥晶含量很高的泥晶灰岩所组成的礁基相。完整相序列为泻湖—礁后外侧滩—礁后内侧滩—礁核—礁基—礁核—泻湖,常见泻湖—礁后外侧滩—礁核—泻湖、礁基—礁核—礁基。288.91 m、289.36 m 处可见大量的溶蚀孔和铸模孔,明显为一暴露面,其下的白云化可能也是受此暴露面的影响所致。

(4) 黄流组一段(374.95~470.10 m)。对应三级层序 Sq7,以 413 m 处最大海泛面分为海进体系域和高位体系域。造礁生物主要为红藻;附礁生物主要为有孔虫,次为棘皮类。总体来看,海进体系域白云化较弱,而高位体系域白云化较强。该段礁核相也极

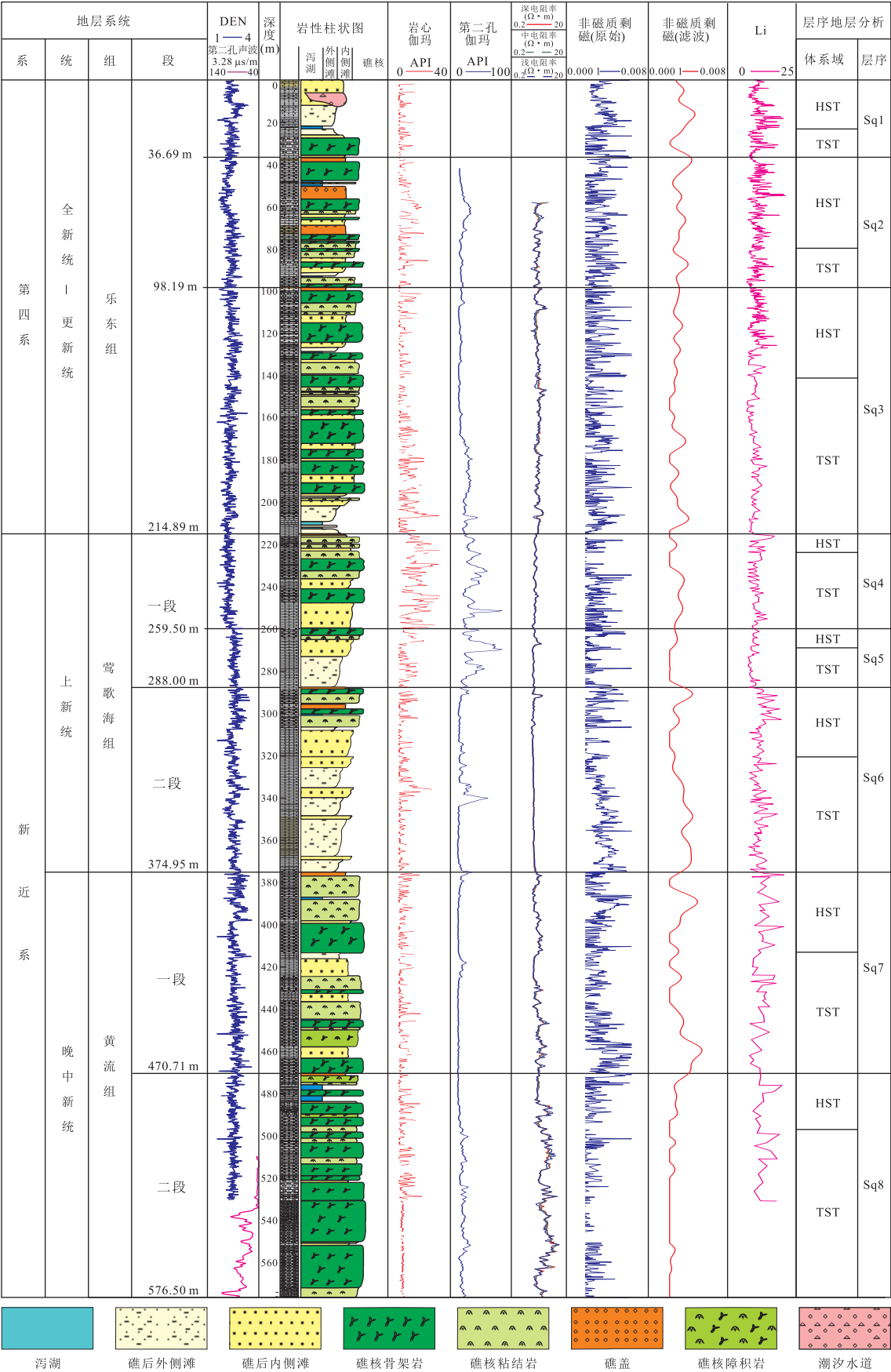


图 2 西科 1 井晚中新世以来碳酸盐岩层序和沉积分析综合柱状图(电阻率为第二孔电阻率)

Fig.2 The histogram of carbonatite sequence and sedimentary of well Xike-1 since Late Miocene

为发育,占绝大部分.礁核之间可见较薄的礁基相或礁后内侧滩和礁后外侧滩.413.96 m 处发育海侵体系域以来的最后一期淹没面,应为最大海泛面.至 387.35 m 处镜下红藻显示棕黄色,有土壤化趋势,判断为一暴露面.随后经过短期的淹没,礁后外侧滩—礁后内侧滩的调整后,红藻粘结礁灰岩又开始发育,直到 380.42 m 处薄片可见较多铸模孔,并可见土壤化特征,为一较大的不整合面.

(5)黄流组二段(470.1~576.5 m).对应三级层序 Sq8,以 497 m 处最大海泛面分为海进体系域和高位体系域.造礁生物主要为红藻;附礁生物主要为有孔虫,次为棘皮,还包括红藻碎屑.该段白云化较强烈—非常强烈,偶见极少量有孔虫或棘皮生屑.另一显著特点是,该段生物礁相极为发育(4 段共计 107 m),占到该段总厚度的 93.5%.因此该段主要为红藻粘结礁灰岩,但由于白云化改造强烈,有些层段红藻部分被改造,尚可见部分原始结构,有些层段红藻几乎被完全改造,只剩孤立的碎片状漂浮在白云石晶体上.其他层段可见原始为粒屑灰岩特征的沉积物发育,但也受白云化改造.这些岩石的原始沉积结构与生屑滩相的岩石类型一致,但由于它们发育在相邻礁核相之间,且厚度与生屑滩相相比很薄,因此定义为礁基更为合适.除此以外,可见两个较为明显的暴露面,一为深度段 475.71~476.50 m,476.50 m 处镜下显示发育很多溶蚀孔和铸模孔,475.71 m 处镜下显示土壤化、结壳化特征,表明该层应为暴露面堆积,而 475.11 m 处的泥晶含量很高,可能对应一个淹没面;其二为 576.50 m 处,镜下可见发育很多溶蚀孔和铸模孔,与上下沉积特征区别明显,该深度恰好为黄流组二段与梅山组一段的分界线.

3 西科 1 井白云岩特征及形成机制

西科 1 井中新统以来的白云岩主要分布于上新统下部和中新统上部,累计厚度约 225 m,主要的白云岩层段一般发育在褐色铁质矿物浸染的不整合面之下,显示出白云岩的形成可能和海平面下降有成因上的联系;白云岩固结程度高,其硬度普遍大于呈疏松—弱固结状态的灰岩.白云石总体上呈微晶及细粉晶双峰态结构,微晶白云石为灰岩基质经选择性白云石化的结果,呈平直晶面半自形晶,主要为泥微晶基质白云石化的结果;粉晶—细晶白云石呈平直晶面自形晶,为胶结物白云石或过度白云化结果,

过度白云化雾心亮边白云石的“亮边”与胶结物白云石成分一致,阴极发光下二者显示同样的光性特征.

何起祥和张明书(1990)提出咸、淡水混合模式解释西琛 1 井白云岩成因,魏喜等(2006b,2007)认为其为准同生成因,与冰川事件引起的超浓缩海水有关,且白云石在成岩演化过程中,遭受理藏成岩流体和热液流体的改造. Morrow (1982) 和 Land (1985)认为在任何环境下,白云岩化需要以下 3 个基本要素:一是反应物来源(Mg 及 CO₃ 离子),二是促使反应物到达和副产品(Ca 离子,或有 CO₃ 离子)离开白云岩化场所的流体流动机制,三是有利于白云岩化的活跃的热力学条件.西科 1 井白云岩成因研究综合了 Budd(1997)的两种 Mg 离子来源模式,即(卤水)渗透回流和地热加温机制(图 3d,图 3f).西沙地区白云岩形成的主要时期为晚中新世末期至上新世早期,该时间段全球出现了多样的环境突变事件,如南极冰盖扩大至最大、海平面发生显著下降(Hodell *et al.*,1986),古地中海强烈蒸发形成

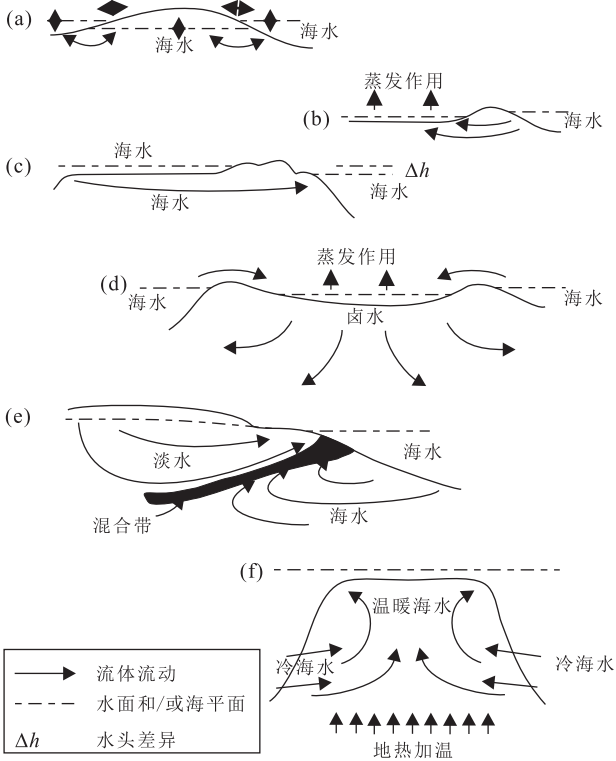


图 3 碳酸盐岛屿、台地或环礁内 Mg 到达白云化场所的 6 种驱动机制

Fig.3 Schematic illustrations of six circulation mechanisms that can deliver Mg to potential dolomitization sites below carbonate islands, platforms, or atolls

a.潮坪蒸发泵;b.渗透回流;c.海面高程差异;d.卤水回流;e.海岸混合带;f.热对流.据 Budd(1997)

巨厚盐岩层(Hsu and Schneider, 1973; Hsu *et al.*, 1977)等, 相关的全球气候背景可能有利于南海中新世末期—上新世早期白云岩的形成; 尽管海平面变化对白云岩形成的作用有一定的争议, 多数学者赞同全球冰期有利于白云岩形成, 如 Meister *et al.* (2008)曾认为秘鲁陆地边缘大洋钻探显示更新世白云岩层可能形成于冰期, 与海平面变化有关。

值得注意的是, 高温的热力学条件有利于白云石形成(Morrow, 1982; Land, 1985); 魏喜等(2006b, 2007)根据包裹体测试认为西琛1井白云石在后生成岩演化过程中曾遭受理藏成岩流体和热液流体的改造; 中新世末期—上新世早期西沙地区构造背景可能支持这一观点, 南海西南海盆残余扩张背景下的岩浆活动(孟林和张健, 2014)及有关的热液侵入、或与之有关的地热加温作用可能对西沙地区白云化作用有积极作用; 在西科1井, 温度可能是白云石在纵向上出现结构差异的主要原因, 在温度较高的流体中(梅山组一段)白云石易于生成, 而岩石所处孔隙水环境的温度降低时, 已形成的白云石易于发生方解石的交代作用, 这种现象主要发生于大段白云岩的底部。

4 第四系生物礁—碳酸盐岩岩石类型、成岩作用及孔隙特征

依据 Embry and Kovan(1971)修改的 Dunham(1962)的分类方案, 西科1井生物礁—碳酸盐岩岩石类型主要包括粒泥灰岩、泥粒灰岩和骨架灰岩, 其次为粘结灰岩、颗粒灰岩、漂砾灰岩和砾屑灰岩, 纵向分布特征为: 埋深0~10 m以颗粒灰岩为主; 埋深10~22 m为生物碎屑砂分布段; 自埋深22~216 m, 以泥粒灰岩、粒泥灰岩和骨架灰岩为主, 其中骨架灰岩主要分布于埋深28~49 m和64~94 m。按照 Riding(1977)的分类方案, 上述研究井段的生物礁类型以骨架礁为主。

0~216 m段发育溶解作用、胶结作用、泥晶化作用和新生变形作用4种成岩作用类型。溶解作用表现为骨架和部分胶结物发生溶解; 胶结作用为新沉淀碳酸盐矿物对原生或次生孔隙的充填; 胶结物的类型在0~35.34 m层段以文石、高镁方解石和低镁方解石为主; 在35.34~216.00 m层段以低镁方解石为主; 胶结物的产状有新月状、悬垂状、刀刃状、等厚环边状、纤维状、针状、纤维状、镶嵌状等; 泥晶

化作用多表现为发育的泥晶套勾勒出骨架形态, 原始文石质生物骨架被溶蚀, 部分转变为亮晶方解石; 新生变形作用以文石或高镁方解石转化为低镁方解石为特征, 表现为原始的生物骨架被粒状至镶嵌状低镁方解石所交代, 并保留了原始生物骨架的微构造特征。

成岩作用环境研究显示, 0~22.30 m段识别出新月形、悬垂形和晶簇状方解石胶结物, 是典型大气水成岩作用的产物; 22.30~179.88 m段新生变形作用、溶解作用和泥晶化作用较为发育, 可见胶结物呈世代胶结, 同时该段地层因海平面数次升降部分暴露于地表(发育多个暴露面), 推测处于大气水—海水共同改造的成岩环境, 兼具大气水和海水成岩环境特征; 179.88~216.00 m段识别出生长于粒间或粒内孔隙中的纤维状和刀刃状方解石, 推测该胶结物形态为海水成岩环境。以此建立的第四系生物礁—碳酸盐岩成岩演化模式见图4。

该段发育的孔隙类型以粒间、粒内和体腔孔为主, 其次为粒内溶孔及铸模孔。铸模孔主要发育于粒泥灰岩、泥粒灰岩和颗粒灰岩中; 粒内溶孔在粒泥灰岩和泥粒灰岩中较发育。在第四系的主要暴露面中(68.67~72.07 m), 该深度段内的生物骨架、生物碎屑以及自生矿物遭受了大气水的强烈淋滤作用, 表现为各类溶孔较为发育, 识别出的孔隙类型主要为粒间孔和粒间溶孔、粒内孔和粒内溶孔、生长骨架孔和生长骨架溶蚀孔、铸模孔和晶间溶孔。

第四系的储层物性以高一特高孔渗为特征。其中, 孔隙度的分布范围为13.1%~49.2%, 平均为32.96%; 渗透率的分布范围为1.44~>15 000 mD (1 mD=0.986 9×10⁻⁹ m²)。不同岩性的物性略有差别, 其中以颗粒灰岩的物性最好(41.3%~49.2%, >15 000 mD), 其次为骨架灰岩(24.8%~46.1%, 757~>15 000 mD)和泥粒灰岩(22.9%~45.1%, 57.5~>15 000 mD), 而粒泥灰岩的物性非均质性较强(13.1%~45.1%, 1.44~>15 000 mD)。

5 结论

以南海西沙隆起区新近系以来生物礁碳酸盐沉积与古海洋学研究、成岩演化与储层预测为目标的科学探索井——西科1井, 其科学研究工作才刚刚拉开帷幕, 便已取得了可喜的进展, 在西沙地区晚中新世以来的生物地层学、层序地层学、古地磁学、古海洋学、储层沉积学、白云岩化机制研究等方面均取

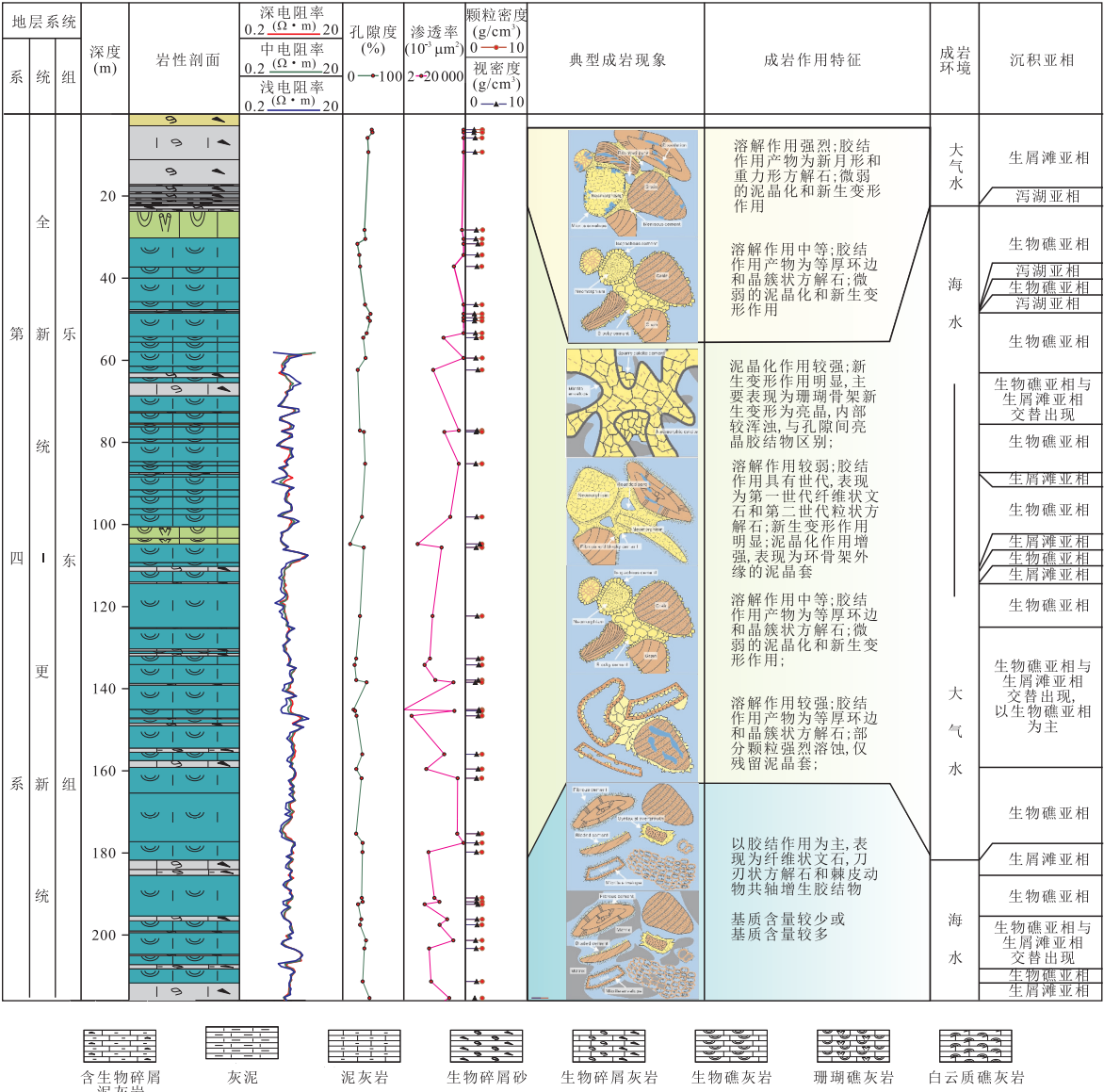


图 4 第四系生物礁—碳酸盐岩成岩演化模式

Fig.4 Diagenetic evolution model of reef and carbonate rocks in Quaternary

地层系统据解习农(2013),项目组内部资料;典型成岩现象分类据 Riding(1977)

得了高水平的成果。

- (1)通过 7 大类古生物化石的综合分析,确定了第四系与上新统、上新统与中新统的生物地层界线。
- (2)通过精细的古地磁学、同位素地层及岩心层序地层分析,在 0~576.5 m 段岩心内识别出 6 个暴露面、2 个淹没面,确定了 8 个三级层序、20 个准层序组,并建立了生物礁生长模型及沉积演化序列。
- (3)通过大量的岩石薄片鉴定和岩相学分析,精细描述了上新统下部和中新统上部白云岩特征,提出了渗透回流和地热加温两种白云岩形成机制;系统刻画了第四系生物礁—碳酸盐岩的岩石类型、成岩作用类型和孔隙类型及物性特征,重建了成岩环境。

References

Budd, D. A., 1997. Cenozoic Dolomites of Carbonate Islands: Their Attributes and Origin. *Earth Sci. Rev.*, 42(1): 1–47. doi:10.1016/S0012-8252(96)00051-7

Dunham, R. J., 1962. Classification of Carbonate Rocks according to Depositional Texture. In: Ham, W. E., ed., *Classification of Carbonate Rocks—A Symposium*. American Association of Petroleum Geologists Memoir 1, 108–121.

Embry, A. F., Kovan, J. E., 1971. A Late Devonian Reef Tract on Northeastern Banks Island, Northwest Territories. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 19(4):

- 730—781.
- He, Q. X., Zhang, M. S., 1986. Reef Geology of the Xisha Islands, China. Sciences 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).
- Hodell, D. A., Elmsrorn, K. M., Kennett, J. P., 1986. Latest Miocene Benthic $\delta^{18}\text{O}$ Changes, Global Ice Volume, Sea Level and the “Messinian Salinity Crisis”. *Nature*, 320: 411—414. doi:10.1038/320411a0
- Hsu, K. J., Schneider, J., 1973. Progress Report on Dolomitization—Hydrology of Abu Dhabi Sabkhas, Arabian Gulf. Springer, Berlin, 409—422.
- Hsu, K. J., Montadert, L., Bernouilli, D., 1977. History of the Mediterranean Salinity Crisis. *Nature*, 267: 399—403. doi:10.1038/267399a0
- Jin, Q. H., 1989. Geology and Oil and Gas Resources in the South China Sea. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Land, L. S., 1985. The Origin of Massive Dolomite. *J. Geol. Educ.*, 33(1): 112—125.
- Li, Q. Y., Lourens, L., Wang, P. X., 2007. New Ages for Neogene Marine Biostratigraphic Events. *Journal of Stratigraphy*, 31(3): 197—208 (in Chinese with English abstract).
- Liao, W. H., 1997. Stratigraphic Significance of Reef-Building Corals. In: Zhu, Y. Z., Sha, Q. A., Guo L. F., et al., eds., Cenozoic Coral Reef Geology of Yongshu Reef, Nansha Islands. Science Press, Beijing, 23—26 (in Chinese with English abstract).
- Lü, B. Q., Xu, G. Q., Wang, H. G., et al., 2002. Sea Floor Spreading Recorded by Drowning Events of Cenozoic Carbonate Platforms in the South China Sea. *Chinese Journal of Geology*, 37(4): 405—414 (in Chinese with English abstract).
- Lü, C. L., Yao, Y. J., Wu, S. G., et al., 2011. Seismic Responses and Sedimentary Characteristics of the Miocene Wan'an Carbonate Platform in the Southern South China Sea. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 36(5): 931—938 (in Chinese with English abstract).
- Lü, X. X., Jin, Z. J., 2000. Distribution Patterns of Oil-Gas Fields in the Carbonate Rock. *Acta Petrolei Sinica*, 21(3): 8—12 (in Chinese with English abstract).
- Meister, P., Bernasconi, S., McKenzie, J. A., et al., 2008. Sea-Level Changes Control Diagenetic Dolomite Formation in Hemipelagic Sediments of the Peru Margin. *Marine Geology*, 252(3—4): 166—173. doi:10.1016/j.margeo.2008.04.001
- Meng, L., Zhang, J., 2013. The Magmatic Activity Mechanism of the Fossil Spreading Center in the Southwest Sub-basin, South China Sea. *Science China: Earth Sciences*, 44(2): 239—249 (in Chinese).
- Morrow, D. W., 1982. Diagenesis 2 Dolomite—Part 2: Dolomitization Models and Ancient Dolostones. *Geoscience Canada*, 9(2): 95—107. doi:10.12789/gsc.v9i2.3299
- Qin, G. Q., 1987. A Preliminary Study of Foraminiferal Assemblages of Well 1 Xiyong, Xisha Islands and Their Coral Reef Foamation. *Tropic Oceanology*, 6(3): 10—20 (in Chinese with English abstract).
- Raffi, I., Backman, J., Fornaciari, E., et al., 2006. A Review of Calcareous Nannofossil Astrobiochronology Encompassing the Past 25 Million Years. *Quaternary Science Reviews*, 25(23—24): 3113—3137. doi:10.1016/j.quascirev.2006.07.007
- Riding, R., 1977. Calcified Plectonema (Blue-Green Algae), a Recent Example of Girvanella from Aldabra Atoll. *Palaeontology*, 20: 33—46.
- Wang, P. X., Prell, W. L., Blum, P., 2000. ODP Leg 184 Scientific Party. Proceedings of the Ocean Drilling Program Initial Reports 184. Ocean Drilling Program, Texas A & M University, Texas.
- Wei, X., Jia, C. Z., Meng, W. G., et al., 2007. Mineral Content and Geochemistry Characteristics of Carbonate Rock in Well No. Xichen-1 and Geological Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 23(11): 3015—3025 (in Chinese with English abstract).
- Wei, X., Zhu, Y. J., Xu, H., et al., 2006a. Discussion on Neogene Dolostone Forming Condition in Xisha Islands: Evidences from Isotope C and O and Fluid Inclusions. *Acta Petrologica Sinica*, 22(9): 2394—2404 (in Chinese with English abstract).
- Wei, X., Zhu, Y. J., Yin, J. H., et al., 2006b. Constrains and Growing Trend of Biological Reef in South China Sea Basin. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 13(1): 10—15 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 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.
- 金庆焕, 1989. 南海地质与油气资源. 北京: 地质出版社.
- 李前裕, Lucas Lourens, 汪品先, 2007. 新近纪海相生物地层事件年龄新编. 地层学杂志, 31(3): 197—207.
- 廖卫华, 1997. 造礁珊瑚的地层意义. 见: 朱袁智, 沙庆安, 郭丽

芬,等,1997.南沙群岛永暑礁新生代珊瑚礁地质.北京:科学出版社,23—26.

吕炳全,徐国强,王红罡,等,2002.南海新生代碳酸盐台地淹没事件记录的海底扩张.地质科学,(4):405—414.

吕彩丽,姚永坚,吴时国,等,2011.南沙海区万安盆地中新世碳酸盐台地的地震响应与沉积特征.地球科学——中国地质大学学报,36(5):931—938.

吕修祥,金之钧,2000.碳酸盐岩油气田分布规律.石油学报,21(2):8—12.

孟林,张健,2014.南海西南海盆残余洋脊岩浆活动机制的热模拟研究.中国科学(D辑),44(2):239—249.

秦国权,1987.西沙群岛“西永一井”有孔虫组合及该群岛珊瑚礁成因初探.热带海洋,6(3):10—20.

魏喜,贾承造,孟卫工,等,2007.西琛1井碳酸盐岩的矿物成分、地化特征及地质意义.岩石学报,23(11):3015—3025.

魏喜,祝永军,许红,等,2006a.西沙群岛新近纪白云岩形成条件的探讨、同位素和流体包裹体证据.岩石学报,22(9):2394—2404.

魏喜,祝永军,尹继红,等,2006b.南海盆地生物礁形成条件及发育趋势.特种油气藏,13(1):7—13.