

中新世礁相碳酸盐岩沉积构成及成礁模式

——以西沙海域为例

赵新伟¹, 许红²

1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083

2. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 国土资源部油气资源和环境地质重点实验室, 青岛 266071

摘要 结合最新钻井、地震资料, 剖析了中新世生物礁体沉积构成以及成礁演化模式。揭示了研究区造礁生物主要为钙藻, 其次为四射珊瑚, 附礁生物以有孔虫和介形虫为主。根据是否发育造礁生物将岩石分为礁格架-骨架岩和非礁格架-骨架岩2类, 前者包括珊瑚藻格架和珊瑚骨架焦白云岩及红藻-仙人掌藻白云岩2种, 非礁骨架岩分为生物碎屑灰岩、粒泥灰岩和泥粒灰岩3种。沉积相包括礁格架相、礁坪相、礁后滩相、泻湖相和生物碎屑滩相5种。中新世生物礁是在相对海平面不断上升的背景下沉积演化的, 属于加积-退积型生物礁沉积旋回, 礁体发育期可分为奠基、初始繁盛、顶峰、暴露衰退4个阶段, 暴露衰退末期发生强烈的白云化作用, 淡水淋滤溶蚀作用形成较好的储集层。

关键词 生物礁; 格架-骨架岩; 成礁模式; 沉积构成; 中新世; 西沙海域

国内外油气勘探证明, 生物礁碳酸盐岩是一种重要的油气储层, 具有丰度大、产能高的成藏特点, 世界上约有60%的油气产量储存于生物礁及其相关的碳酸盐岩油藏中^[1-3]。近几年来, 随着以普光礁滩储层为代表的海相特大型气田的发现, 揭开了中国生物礁油气勘探的序幕^[4], 超过普光最大单体大气田的磨溪-龙王庙大气田将中国古老生物礁油气勘探引入高潮。西沙海域不仅具有新近纪生物礁发育的良好环境, 更具有生物礁油气藏形成的优越条件, 是未来深水油气勘探的重点区域^[5]。生物礁在本质上为原地固着生物所产生的钙质沉积物^[6], 从太古代的微生物礁到中新世的珊瑚-珊瑚藻礁种类繁多^[7], 因此很难给出清晰的定义和分类^[8-9], 但基于沉积构成这一基本属性的生物礁分类和研究慢慢得到重视。前人分析了西沙海域浅部钻井岩心及一些现代岛礁, 在第四纪生物礁地质、生物礁分布特征及地层划分等方面取得了较多成果^[10-14], 但对中新世生物礁内部沉积构成和礁体的成礁演化模式的研究相对较少。中新世作为西沙生物礁发育最繁荣的时期, 研究其沉积演化特征不仅能了解研究区生物礁的沉积地质特征, 而且能进一步指导该海域深水盆地区的生物礁油气地质勘探工作。本文通过对岩心的观察与描述、薄片鉴定、碳氧同位素、岩石物性分析等研究手段, 结合钻井岩

心和地震资料, 分析礁体的沉积构成(生物组合、岩石类型、沉积相), 最后阐述中新世生物礁的成礁演化模式。

1 地质背景

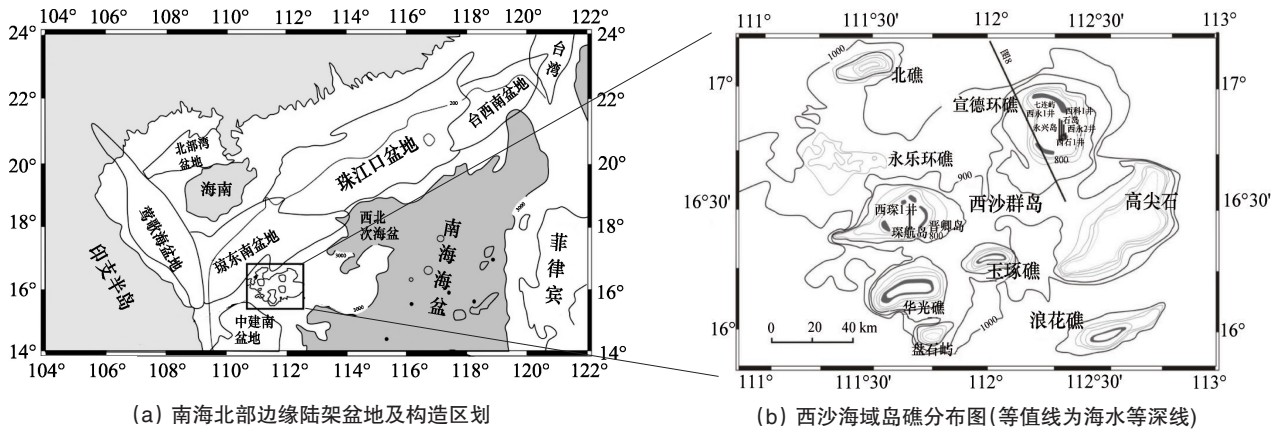
南海是太平洋西南侧的最大的边缘海, 是世界上四大著名含油气区之一^[15]。西沙海域位于南海西北部大陆坡上, 区域构造属于华南陆块的西沙-中沙地块, 西邻海南岛大陆架, 北濒琼东南盆地, 南接中建南盆地, 东与西北次海盆相连^[16](图1(a))。新生代以来西沙隆起一直处于暴露状态, 直到晚渐新世至早中新世期间, 海底再次扩张, 西沙隆起发生沉降, 随后便一直处于相对稳定的热沉降状态。此外, 西沙海域是陆缘之外的孤立台地, 北部为2000 m深的西沙海槽, 远离大陆, 生物礁形成演化不受陆源碎屑的影响, 主要受海平面变化控制, 易形成厚层纯净礁相碳酸盐岩, 为研究生物礁的沉积构成和成礁模式提供了有利条件。目前西沙群岛上5口钻井(图1(b)), 钻井资料揭示本区中新世主要发育西沙组、宣德组两套地层(图2), 生物礁最早在中新世早期形成于前寒武纪花岗片麻岩之上, 中中新世达到顶峰, 晚中新世便开始收缩, 之后发生淹没衰亡, 最后形成孤立的环礁, 如永乐环礁和宣德环礁等(图1(b))。

收稿日期: 2015-08-15; 修回日期: 2015-10-10

基金项目: 国家油气重大专项项目(2011ZX05025-002-04)

作者简介: 赵新伟, 博士研究生, 研究方向为沉积学与层序地层学, 电子信箱: zhaoxinwei268@163.com; 许红(通信作者), 研究员, 研究方向为油气成藏与气水合物资源勘探评价, 电子信箱: qdxhong@163.com

引用格式: 赵新伟, 许红. 中新世礁相碳酸盐岩沉积构成及成礁模式——以西沙海域为例[J]. 科技导报, 2016, 34(18): 194-202; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.18.027



(a) 南海北部边缘陆架盆地及构造区划

(b) 西沙海域岛礁分布图(等值线为海水等深线)

图1 西沙海域区域地质图

Fig. 1 Geological setting of Xisha waters in Southern China Sea

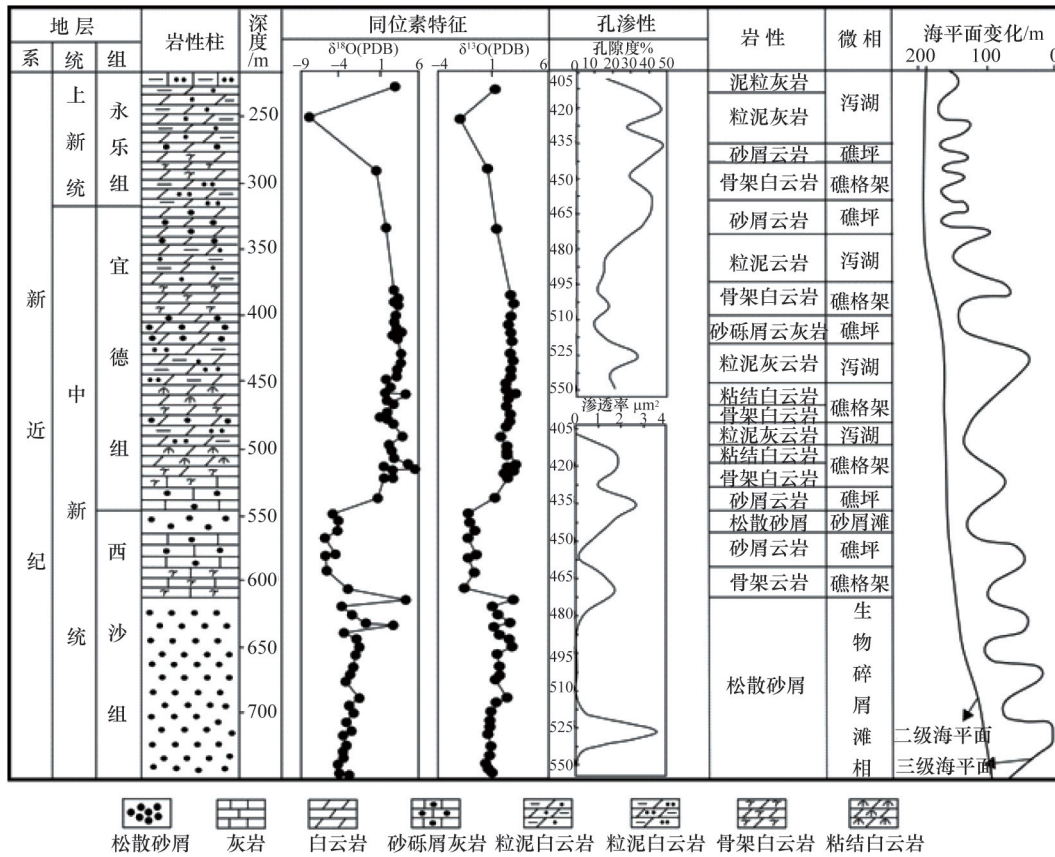


图2 西琛1井中新世综合柱状图

Fig. 2 Stratigraphic column reconstructed from Well Xichen-1 during Miocene

2 生物礁沉积构成

2.1 岩石岩相形态学分析

在前期区域调查的基础上,综合应用钻井岩心、沉积特征、古生物、测井特征及地震响应等资料,对西沙群岛上钻井岩性和沉积相进行了划分(图2)。生物礁岩石类型由生物礁岩石结构控制,岩石结构是指生物礁岩石组分的空间排列方式。根据造礁生物的发育与否,将岩石分为礁格架-骨架岩和非礁格架骨架岩2大类,前者主要为珊瑚藻格架-珊瑚骨架

白云岩和红藻-仙掌藻礁白云岩2种;根据内碎屑、生物碎屑、泥晶和亮晶含量,将后者划分为生物碎屑灰岩、粒泥灰岩和泥粒灰岩3种。

红藻珊瑚骨架白云岩主要由造架生物、生物碎屑和泥晶基质组成。造架生物以珊瑚藻科奇石藻属新种-南海奇石藻为主,含少量珊瑚碎屑。南海奇石藻藻体多呈直立式分枝状或圆柱状,藻体格架间平均间距3~5 cm,最小仅0.5 cm,最大10~20 cm。填隙物主要为泥晶和方解石胶结物。以珊瑚红

藻为主营造形成的珊瑚藻礁所含钙藻生物量大于50%，它们大多呈叠置状、缠绕包裹状、枝状或碎屑状。纵向上看，格架-骨架白云岩内的充填物质不尽相同，主要分为无填充、泥晶充填和粒状方解石或白云石充填3种。一般情况下，骨架间泥晶充填的多少反映了沉积水动力的强弱，水动力强的高能环境中泥晶含量较少，低能环境中泥晶含量较高。

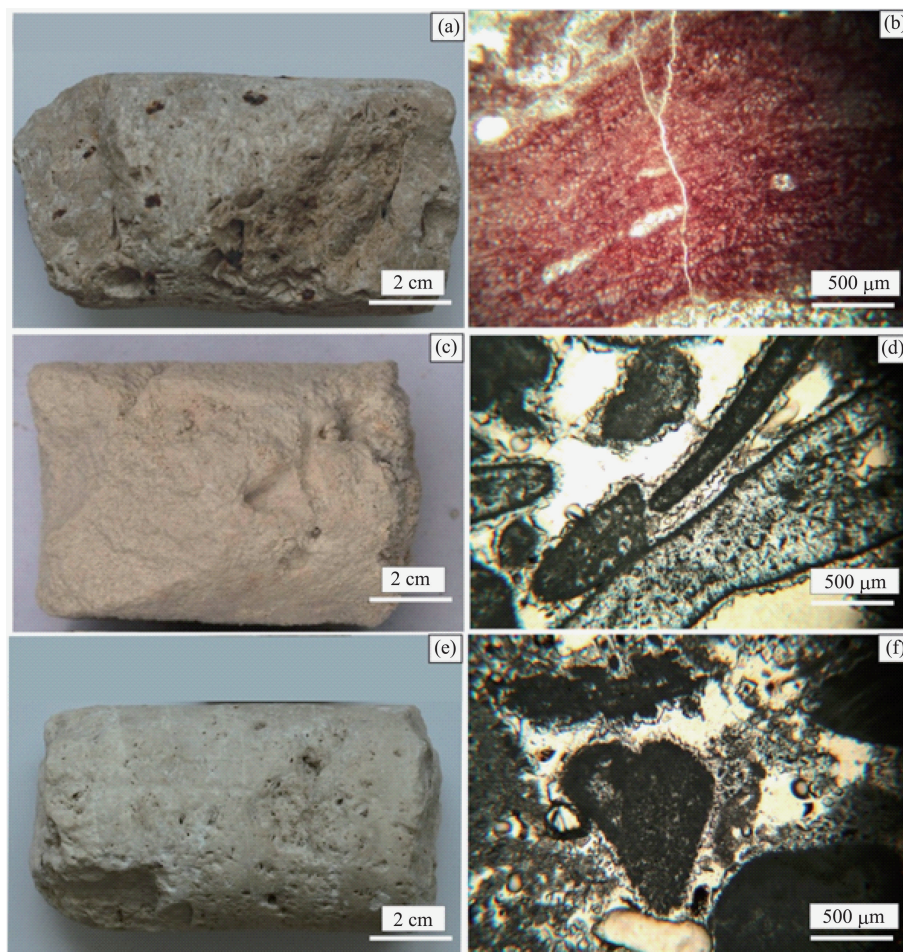
红藻格架-仙掌藻白云岩，其中红藻以藻丝体粘连生物，在原地生长过程中吸附捕捉周围环境中的灰泥和生物颗粒而生长壮大(图3(a)、(b))，具有藻粘结结构和捆扎结构，常见两种红藻相互缠绕包裹，表面常被一些棘皮类、有孔虫及泥晶充填，主要是由于红藻在生长过程中夹杂了生物碎屑及泥晶，体现了红藻在造礁过程中的捆扎和粘合作用。仙掌藻以节片状赋存，所有节片均呈长条状，为仙掌藻藻体纵切面特征，属原地静水水流体系沉积。研究区红藻-仙掌藻白云岩可分为两类：一类为红藻-仙掌藻白云岩，属混合成因，珊瑚藻呈包壳状，不规则分布在生物颗粒周围，沉积后附着、粘结、包覆生物碎屑；另一类以仙掌藻为主，形成仙掌藻白云

岩，基本独立存在，可单独形成数十厘米厚的仙掌藻白云岩。

生物碎屑灰岩主要由经受波浪及潮汐作用呈破碎状的生物碎屑颗粒组成(图3(c)、(d))。生物碎屑包括钙藻、有孔虫和棘皮动物等，钙藻中以红藻门珊瑚藻为主，也可见个体完整的仙掌藻，藻粒大小、长短不一，混杂无序式分布，紧密叠置堆积。粒径一般在0.2~2 mm，保存较好的藻粒直径达3 mm以上，分选差，呈破碎状态的藻粒多具次圆状。基本不含基质，以亮晶方解石胶结为主，含量小于10%，充填于藻颗粒之间，典型的颗粒支撑结构，反映了一种水动力较强的高能环境。

泥粒灰岩主要组分包括泥晶和骨架颗粒，骨架颗粒以珊瑚、珊瑚藻、有孔虫和棘皮类为主，含量大于50%，颗粒多破碎，分选和磨圆差，粒径一般在0.5~2.5 mm之间，偶见保存完整的藻类和孔虫个体。泥晶基质含量大于10%，胶结物主要为亮晶方解石，多呈粒状，含量小于10%，颗粒支撑。

粒泥灰岩主要由骨架颗粒和泥晶构成(图3(e)、(f))，骨架颗粒主要包括珊瑚藻和有孔虫，偶见棘皮类动物，颗粒都



(a) 红藻珊瑚骨架白云岩；(b) 厚层珊瑚藻镜下照片；(c) 生物碎屑灰岩；(d) 仙掌藻节片及其绿藻礁白云岩；(e) 粒泥灰岩；(f) 粒泥灰岩镜下照片

图3 西沙海域的主要岩石类型及其镜下照片

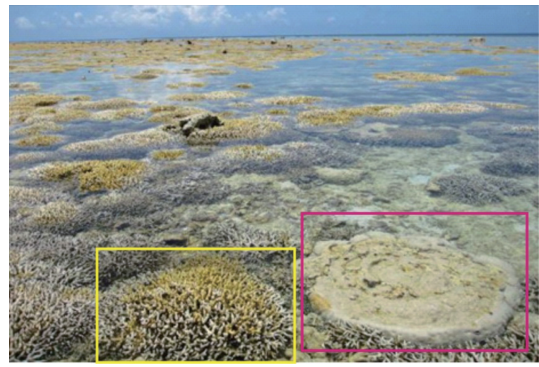
Fig. 3 Photographs and micrographs of reef rocks in Xisha waters

经历了不同程度的破碎,大小不一,分选差,磨圆差,粒径0.1~1 mm,含量约5%~50%,基质主要为泥晶,含量大于50%,胶结物较少,以粒状方解石为主,形成于水动力较弱的低能环境中,多为泻湖相沉积环境。

2.2 生物构成与组合类型

生物礁是由固着生物组成的原地钙质沉积^[6],其形成与造礁生物密切相关,造礁生物的种类和数量决定了生物礁的构造和成分特征^[17]。新近纪与泥盆纪、二叠纪构成中国历史上三大造礁时期,礁体发育旺盛,数目众多,规模巨大,但各时期礁内生物演化更替导致发育不同的造礁生物和附礁生物。总体上,新近纪造礁生物以珊瑚和钙藻为主。此外,现代海洋中珊瑚种类较多,包括菌珊瑚、鹿角珊瑚、枝珊瑚等(图4)。

关于西沙海域中新世礁体是珊瑚礁还是藻礁的问题曾经存在争议。曾鼎乾等^[18]认为西永1井新近纪主要造礁生物为红藻,枝状珊瑚藻数量最多;张明书等^[19]在上新统发现珊瑚礁格架,并认为自成礁以来西沙群岛生物礁造礁生物始终为珊瑚。本课题组综合前人研究成果,详细研究了西琛1井中新世层段岩心,发现中新世礁体造礁生物主要为钙藻,含少量珊瑚碎片等。钙藻化石含量达20%~80%,具有3种最为发育的组合类型及其生物代表为:红藻门珊瑚藻科直立枝状珊瑚藻组合(图5(a)),赋存于西沙组上段,以南海奇石藻组合(*Ae.nanhainensis*)为代表;红藻门珊瑚藻科厚层状珊瑚藻组合,

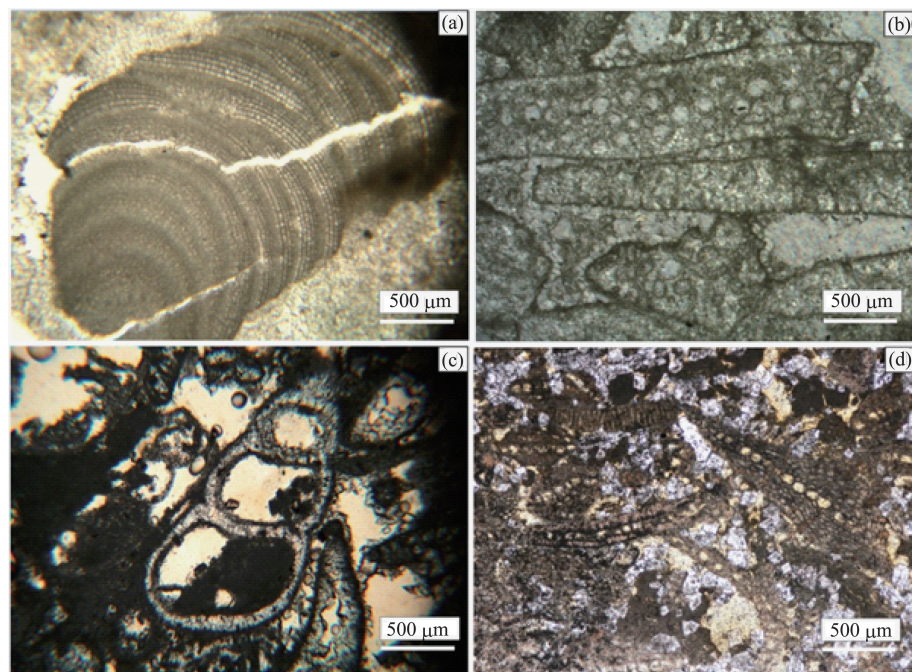


黄色长方形内为鹿角珊瑚,洋红色长方形内为菌珊瑚

图4 西沙群岛现代生物礁盘的菌珊瑚和鹿角珊瑚

Fig. 4 Pavona decussatus and Acropora of the modern reefs in Xisha Islands

属于宣德组,以中叶藻(*Mesophyllumiraqense*)为代表,发现6属20种^[6];有节珊瑚藻属(包括珊瑚藻(*corallina*)和让氏藻(*Jania*))和绿藻门松藻科中的仙掌藻属(*Halimada*)(图5(b)),共3属6种^[10, 20]。附礁生物种类繁多,主要包括有孔虫和介形虫,含少量双壳类、腹足类(图5(c))和腕足类等。特别发育底栖大有孔虫(图5(d)),以*Mioleqidocydina-Miogypsinoides*带和*Cycloclypeus*带为主,其次为底栖小有孔虫,浮游类有孔虫分布最少,丰度不到有孔虫总量的5%。



(a)珊瑚藻;(b)仙掌藻节片;(c)腹足类;(d)底栖大有孔虫。所有图均为普通偏光显微照片

图5 西沙海域的部分造礁生物类型

Fig. 5 Partial types of reef-building organisms in Xisha waters

2.3 沉积相特征

西沙海域中新世礁相碳酸盐岩沉积相主要有礁格架相、礁坪相、礁后滩相、泻湖相和生物碎屑滩相5种类型,其中礁格架相包括珊瑚格架相和藻粘结灰岩相。礁格架相是生物礁的核心部位及主要生长点,也是礁区物源的主要供应地。研究区礁格架相主要由珊瑚藻格架和仙人掌藻格架组成,珊瑚藻等钙藻生物含量大于50%,多呈缠绕状,也发育碎屑状和枝状。礁坪相位于礁格架的后方,宽约数百米,主要发育砂砾屑灰岩,藻粘结现象较为常见,岩性致密。生物组分主要为钙藻屑和珊瑚碎片,间或发育簇状珊瑚,但种属远少于礁格架相,有孔虫以底栖大有孔虫最为发育。沉积物结构成熟度低,分选差,在横向上有一定的粒度分异,由外向内粒度变细。泻湖相是生物礁沉积体系中最重要低能带,水体较浅,波浪和潮汐影响小,发育低能沉积物,以粒泥白云岩为主,可见核形石,有孔虫碎屑、海绵等含量较高,珊瑚藻颗粒较少,白云石化作用普遍。生物碎屑相形成在水动力较弱的环境中,岩石以生物碎屑灰岩和粒泥灰岩/云岩为主,有孔虫和壳状珊瑚藻较为发育,棘皮类和珊瑚等含量较少,多为泥晶基质胶结,重结晶普遍发育。孔隙类型多样,主要有粒内溶孔、粒间溶孔和铸模孔,偶见裂缝。

通过对多口钻井沉积相的对比分析发现,西沙中新世生物礁沉积环境多为泻湖相,而且自宣德组开始沉积相序列沿钻井剖面呈有规律的变化,如格架相-礁坪相-泻湖相序列,这些沉积相变化反映了沉积环境的变化,即西沙群岛中新世

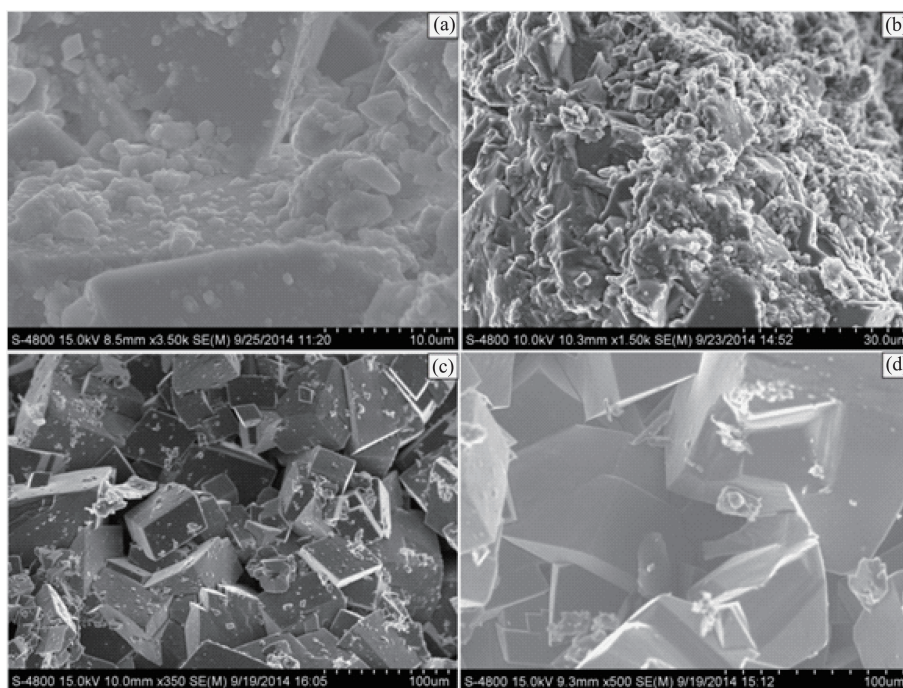
古海洋环境变化的结果,与晚第三纪全球冰川型海退事件及南海古海洋的响应及过程有关。

2.4 白云岩特征及成因

白云石化作用是形成优质碳酸盐岩储层的最有利建设性成岩作用^[21]。由图2可以看出,西琛1井白云岩主要分布在上中新统宣德组,总厚约200 m。此外,上新统永乐组也有分布,约80 m。白云岩中白云石多以微晶、细粉晶结构为主,微晶白云石多是由微晶、泥晶基质以及以微晶方解石为主要骨架组分的生物(藻类、珊瑚等)白云石化形成,晶面较平直,且多为半自形晶,晶体不明亮,呈浑浊状(图6(a)、(b))。

细粉晶白云石是胶结物白云石化的产物,晶体为自形晶且晶面平直,干净明亮(图6(c)、(d)),主要分布在孔隙内部或者生物碎屑颗粒周围呈等厚状分布,并且具有多世代特征。细粉晶白云岩可能是过度白云化作用形成的,其形成的白云石晶体外部轮廓清晰明亮,但内部常包含一些云雾状晶核,具有典型的雾心亮边特征。晶核通常为未分解的母岩包裹体或者可能属于早期亚稳定的沉淀矿物。在纵向上,462 m以下层段细粉晶白云石含量增加,其上以微晶白云石为主。此外,本区白云岩层的顶部多发育褐红色铁质风化壳,或为风化壳产物,自风化壳向下白云石化程度降低。

白云石化作用成因复杂,在本区也不例外。碳、氧同位素作为揭示白云岩成因的地化标志已有很多的研究基础^[22]。针对西沙地区钻井和岩心的实际情况,对西琛1井的岩心样品进行碳、氧同位素测试分析,其中包括一些石灰岩样品^[23]。



(a)、(b)为浑浊状微晶白云石;(c)、(d)为细粉晶白云石

图6 西琛1井中白云岩的扫描电镜照片

Fig. 6 SEM images showing dolomite from Xisha waters

为了更好的显示碳、氧同位素之间的关系,对测试结果作了交会图(图7)。从图7可以看出,白云岩样品的碳氧同位素值具有明显的分区性(图7中粉色点),其中 $\delta^{13}\text{C}$ 在 -1.71‰ ~ 3.16‰ ,平均为 2.37‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 在 -3.17‰ ~ 5.23‰ ,平均为 2.57‰ ,参考前人总结的不同白云岩的成因模式与碳、氧同位素变化之间的关系,可以发现本区白云岩碳、氧同位素与构造热液成因白云岩和混合水白云岩相当(图7)。由此推测,白云岩形成机理可能有构造热液白云石化作用和混合水白云石化作用两种模式。但是要确定具体属于哪一种成因模式还需结合流体包裹体及微量元素等数据综合分析。

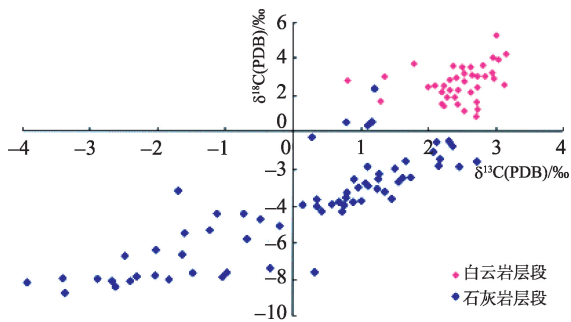


图7 西琛1井岩心样品碳-氧同位素交会图

Fig. 7 Cross plot of $\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})$ and $\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})$ values in core sample from Xichen-1 well

3 生物礁分布特征

生物礁的生长发育受区域构造运动、气候和海平面变化等因素控制^[24]。中新世期间西沙海域构造稳定,基底沉降幅度较小,相对海平面整体上处于上升的状态,海侵时的水体

深度相对较浅,比较适合造礁生物和其他生物繁殖,形成了厚层的生物礁滩沉积。通过解释地震剖面、分析构造发育背景和部分生物礁钻井资料,对西沙海域生物礁的分布进行了系统研究。平面上,生物礁的分布形态主要由基底地形和海平面的变化控制,中新世生物礁主要发育在台地顶部或斜坡等构造高部位之上,随沉积环境的变迁生物礁以碳酸盐岩台地为中心,向台地斜坡部位和盆地延伸,海侵时台地边缘位置有大量生物礁形成,主要有台地边缘礁,在斜坡位置发育点礁、塔礁等,而在台地边缘内部稳定地区易形成礁滩相沉积。从整体上看,生物礁在平面上主要围绕西沙碳酸盐岩台地分布,在台地内部呈条带状分布,在斜坡位置呈斑点状分布。在垂向上,生物礁的生长发育主要受海平面变化的影响,具有高水位期成礁、低水位期暴露的特点^[25]。中新世早期,海平面变化缓慢,生物礁在台地高部位呈并进型生长,形成系列分布的点礁,但是规模不大。中中新世发生小规模海侵,导致海平面的快速上升,礁体以追赶型生长,发育台地边缘礁、堡礁和环礁。晚中新世末期的墨西拿(Messina)事件导致西沙海域海平面下降,发生海退,礁体暴露水面,生物礁垂向生长受到抑制,便开始侧向生长,形成点礁等。此外,礁体由垂向加积转变为侧向并进型生长,生长模式发生了变化。

4 成礁演化模式

结合最新的地震资料解释成果(图8)及礁体生物组合、层序地层格架(图8)、沉积相和相对海平面变化曲线特征(图2),提出中新世生物礁体的成礁模式,具体分为早中新世成礁、中中新世早期成礁、中中新世晚期成礁和晚中新世淹没暴露4个阶段,该演化模式与研究区二级相对海平面的持续上升趋势一致(图2)。

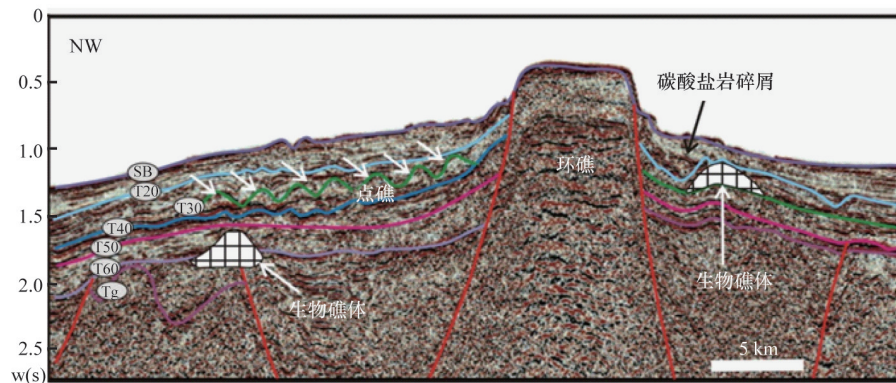


图8 过西沙隆起北部的地震剖面(剖面位置见图1,改自文献[13])

Fig. 8 Seismic profile across the northern Xisha uplift

4.1 早中新世成礁(奠基阶段)

早中新世开始,由于中央海盆扩张导致基底沉降,海平面升高,西沙隆起沉入水下,石枝藻等生命力较强的生物在隆起顶部形成了规模较小、零星分布的生物礁,该期最基本

的特点是藻类和棘皮类生物的软根在海底发育固着器,扎根在海底沉积物中,随后造礁生物在其中生长发育,形成生物礁沉积体(图9(a))。主要生物有钙藻、有孔虫和介形虫,其他生物含量较少,它们构成了最早的抗浪骨架,奠定了生物礁

发育的基础,为生物礁形成演化的定殖阶段。随着海平面上升,在滩体上开始发育生物礁体,并逐步向构造高部位迁移,

隆起区台地斜坡处以点礁发育为主,可能形成小规模规模的堡礁,但尚未形成环礁(图9(a))。

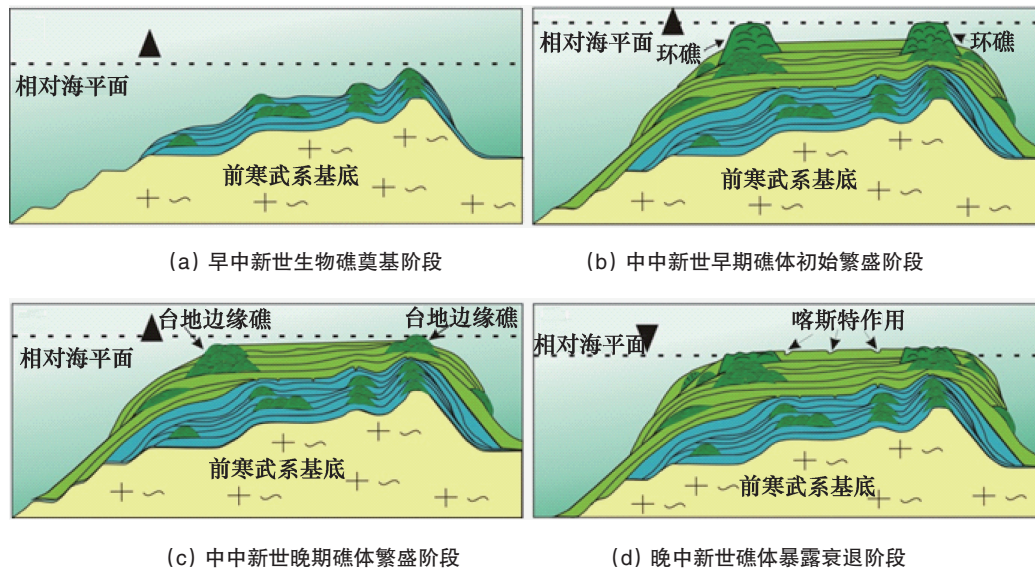


图9 西沙海域中新世礁体沉积成礁演化模式

Fig. 9 Reef formation models of Miocene organic reef in Xisha waters

4.2 中中新世早期成礁(初始繁盛)

中中新世早期海平面再次上升,成礁环境变得更加开阔,海水的温度、养分和光线都达到了珊瑚、钙藻等造礁生物最佳生长条件,钙藻、珊瑚藻和六射珊瑚等开始大量繁殖,同时附礁生物介形虫、有孔虫也繁盛起来,灰泥和一些生物碎屑固着在生物间,形成一套以粘结岩和格架岩为主的礁相沉积,生物礁生长达到顶峰,礁体的发育范围最广,厚度最大(图9(b))。从地震资料上可识别出台地周缘和斜坡部位大量发育台地边缘礁、点礁、点礁复合体和塔礁等各类生物礁,台地边缘的陡坡部位多发育重力垮塌形成的生物碎屑沉积物,属于礁前环境,由于埋深较大,多以压实和胶结作用为主。

4.3 中中新世晚期成礁(顶峰阶段)

随着海平面的继续上升,西沙群岛海域水体明显加深,西永1井岩心中发现了多层有孔虫软白垩沉积,其中钙质超微化石和浮游有孔虫的出现标志着水体的突然加深过程。台地斜坡部位的水深已不再适合造礁生物的生长,礁体被淹没停止生长。随着海平面的快速上升,礁体以海侵追补型发育于西沙隆起之上,致使台地顶部礁相地层明显隆起,此时标志着西沙生物礁进入环礁演化阶段(图9(c))。由于局部地区生物礁生长速度超过海平面上升速度,导致沉积水体逐渐变浅,生物礁暴露出海平面,发生溶蚀作用以及白云石化作用,形成礁顶暴露生屑滩沉积。中中新世晚期生物礁已高出周围基底数千米,以台地边缘礁和补丁礁为主。台地周缘发育礁前垮塌相等重力流沉积。

4.4 晚中新世暴露溶蚀(衰退阶段)

晚中新世早期碳酸盐岩台地发生持续的海退,水深变

浅,生物礁开始呈追赶型生长,造礁生物在台地隆起部位繁殖,但种类和数量都在减少,总体上为一套浅海相沉积,在西探1井和西永1井中均有揭示,其中台地边缘以粘结—障积礁为主。晚中新世末期受地中海米辛尼亚事件的影响,海平面下降,生物礁朝台地边缘斜坡方向生长,形成一小型楔状礁,但随着海平面的持续下降,早期形成的礁体暴露水面,经历大气淡水淋滤溶蚀,近似但区别于喀斯特作用(图9(d)),形成了大量溶蚀孔隙,增加了储层的孔渗性。由于长时间海退(超过1 Ma)暴露,导致了强烈混合水白云化作用,形成中厚层微晶—细晶白云岩和生物碎屑白云岩,具有较好的储集物性,可以作为良好的储层。

5 结论

1) 西沙海域中新世生物礁体是由生长在前寒武纪辉长岩、花岗片麻岩古隆起之上的堡礁、环礁和斜坡处的点礁等构成的,造礁生物以红藻门珊瑚藻为主,其次为绿藻门仙人掌藻,珊瑚藻属中以壳状珊瑚藻最为发育,附礁生物多为有孔虫和介形虫。主要发育生物骨架—障积、生物节片和生物粘结三种岩石结构,其中以骨架白云岩含量最高,沉积相以泻湖相最为发育。

2) 中新世发育的厚层白云岩中白云石以微晶、细粉晶结构为主,部分白云石晶体内部含云雾状晶核,具有典型的雾心亮边特征。碳氧同位素分析发现本区主要有热液白云石化作用和混合水白云石化作用。

3) 西沙海域中新世生物礁是在相对海平面不断上升的背景下形成的一套加积—退积型礁滩旋回,经历了奠基阶段、

初始繁盛、顶峰阶段和暴露衰退4个阶段,第一阶段主要发育小规模低能礁滩相沉积,第二、三阶段以大型粘结礁和生物碎屑滩相发育为主,第四阶段礁滩暴露,为生物礁衰退时期,发育淋滤溶蚀和白云化作用,形成物性良好的储集岩。

参考文献(References)

- [1] 范嘉松. 中国生物礁与油气[M]. 北京:海洋出版社, 1996.
Fan J S. The ancient organic reefs of China and their relations to oil and gas[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996.
- [2] 陆亚秋, 龚一鸣. 海相油气区生物礁研究现状、问题与展望[J]. 地球科学. 2007, 32(6): 871-878.
Lu Yaqiu, Gong Yiming. On reefs in association with marine oilfields: Actuality, problems and prospects[J]. Earth Science, 2007, 32(6): 871-878.
- [3] Fournier F, Borgomano J, Montaggioni L F. Development patterns and controlling factors of Tertiary carbonate buildups: Insights from high-resolution 3D seismic and well data in the Malampaya gas field (Offshore Palawan, Philippines)[J]. Sedimentary Geology. 2005, 175(1-4): 189-215.
- [4] 胡明毅, 魏欢, 邱小松, 等. 鄂西利川见天坝长兴组生物礁内部构成及成礁模式[J]. 沉积学报. 2012, 30(1): 33-42.
Hu Mingyi, Wei Huan, Qiu Xiaosong, et al. Reef composition and their forming models of Chang xing formation in Jiantianba Section of Lichuan, Western Hubei[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2012, 30(1): 33-42.
- [5] 龚再升. 生物礁是南海北部深水重要勘探领域[J]. 中国海上油气, 2009, 21(5): 289-295.
Gong Zaisheng. Reef: an important exploration realm in the deep-water areas, the northern South China Sea[J]. China Offshore Oil and Gas, 2009, 21(5): 289-295.
- [6] Riding R. Structure and composition of organic reefs and carbonate mud mounds: concepts and categories[J]. Earth-Science Reviews, 2002, 58(1-2): 163-231.
- [7] Flügel E, Kiessling W. A new look at ancient reefs[C]//Kiessling W, Flügel E, Golonka J. Phanerozoic Reef Patterns. SEPM Special Publications, 2002: 3-10.
- [8] Heckel P H. Carbonate buildups in the geologic record: A review[C]//Laporte L F. Reefs in time and space. Vol. 18. Tulsa: Spec Publ, 1974: 90-155.
- [9] Wood R. Are reefs and mud mounds really so different?[J]. Sedimentary Geology, 2001, 145(3-4): 161-171.
- [10] 许红, 王玉净, 等. 西沙中新世生物地层和藻类的造礁作用与生物礁演变特征[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 1-180.
Xu Hong, Wang Yujing, et al. The miocene biostratigraphy, algae reef-building and evolution characteristics in Xisha Waters[M]. Beijing: Science Press, 1999: 1-180.
- [11] 魏喜, 贾承造, 孟卫工, 等. 南海西沙海域西琛1井生物礁的性质及岩石学特征[J]. 地质通报. 2008, 27(11): 1933-1938.
Wei Xi, Jia Chengzao, Meng Weigong, et al. Biogenetic reefs and its petrological characteristics of well Xichen 1, Xisha sea area, China[J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(11): 1933-1938.
- [12] 马玉波, 吴时国, 杜晓慧, 等. 西沙碳酸盐岩建隆发育模式及其主控因素[J]. 海洋地质与第四纪地质. 2011, 31(04): 59-67.
Ma Yubo, Wu Shiguo, Du Xiaohui, et al. Evolutionary model and control factors of Xisha carbonate buildup[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2011, 31(4): 59-67.
- [13] Wu S, Yang Z, Wang D, et al. Architecture, development and geological control of the Xisha carbonate platforms, northwestern South China Sea [J]. Marine Geology, 2014, 350: 71-83
- [14] 匡增柱, 郭依群, 王嘹亮, 等. 西沙海域晚中新世环礁体系的发现及演化[J]. 中国科学:地球科学, 2014, 44(12): 2675-2688.
Kuang Zenggui, Guo Yiqun, Wang Liaoliang, et al. Evolution of the Late Miocene atoll systems offshore Xisha islands[J]. Science China: Earth Sciences, 2014, 44(12): 2675-2688
- [15] Tsai C, Hsu S, Yeh Y, et al. Crustal thinning of the Northern continental margin of the South China Sea[J]. Marine Geophysical Researches, 2004, 25(1-2): 63-78.
- [16] 许红, 蔡峰, 王玉净, 等. 西沙中新世生物礁演化与藻类的造礁作用[J]. 科学通报. 1999, 44(13): 1435-1439.
Xu Hong, Cai Feng, Wang Yujing, et al. The algae reef-building and Miocene organic reef evolution in Xisha[J]. Science Bulletin, 1999, 44(13): 1435-1439.
- [17] Flügel E, Kiessling W. A new look at ancient reefs[C]//Kiessling W, Flügel E, Golonka J. Phanerozoic reef patterns. SEPM Special Publications, 2002, 72: 3-10.
- [18] 曾鼎乾. 南海北部大陆架第三纪生物礁研究及礁油藏勘探历史的回顾[J]. 南海石油. 1989, 6(3): 1-7.
Zeng Dingqian. Studies of Tertiary reef and historical reviews on the reef reservoir exploration in continental shelf, northern South China Sea[J]. South China Sea Oil. 1989, 6(3): 1-7.
- [19] 张明书, 何起祥, 业治铮. 西沙生物礁碳酸盐沉积地质学研究[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 1-117.
Zhang Mingshu, He Qixiang, Ye Zhizheng. Studies of sedimentary geology of reef carbonate in the Xisha Islands[M]. Beijing: Science Press, 1989: 1-117
- [20] 王玉净, 勾韵娴, 章炳高, 等. 西沙群岛西琛一井中新世地层、古生物群和古环境研究[J]. 微体古生物学报, 1996, 13(3): 215-223.
Wang Yujing, Gou Yunxian, Zhang Binggao, et al. Studies of Miocene strata, biota and palaeoenvironment from Xi-Chen No.1 hole in Xisha islands[J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 1996, 13(3): 215-223.
- [21] 张宝民, 刘静江, 边立曾, 等. 礁滩体与建设性成岩作用[J]. 地学前缘. 2009, 16(1): 270-289.
Zhang Baomin, Liu Jingjiang, Bian Lizeng, et al. Reef-banks and reservoir-constructive diagenesis[J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(1): 270-289.
- [22] 初广震. 塔里木盆地寒武-奥陶系碳酸盐岩微相与成岩作用研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2010.
Chu Guangzhen. Microfacies and diagenesis research of cambro-ordovician carbonate rocks in Tarim basin[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2010.
- [23] 赵强. 西沙群岛海域生物礁碳酸盐岩沉积学研究[D]. 北京: 中国科学院海洋研究所, 2010.
Zhao Qiang. The sedimentary research about reef carbonate in Xisha islands waters[D]. Beijing: Institute of Oceanology of Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [24] Moore C H. Carbonate reservoirs - porosity evolution and diagenesis in sequence stratigraphic framework[M]. Elsevier Science, 2001: 1-461.
- [25] Yubo M, Shiguo W, Fuliang L, et al. Seismic characteristics and development of the Xisha carbonate platforms, northern margin of the South China Sea[J]. Journal of Asian Earth Sciences. 2011, 40(3): 770-783.

Sedimentary composition and forming models of Miocene reef carbonate: A case study of Xisha waters

ZHAO Xinwei¹, XU Hong²

1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geoscience, Beijing 100083, China

2. Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environmental Geology, MLR; Qingdao Institute of Marine Geology, CGS, Qingdao 266071, China

Abstract The characteristics of sedimentary composition and evolution models of the Miocene reef are studied by combining the latest drilling data and seismic data. The reef-building organisms in the studied area are mainly calcareous alga, followed by hexacorallia; and accessory reef organisms mainly consist of the foraminifera and ostracod. According to the development of reef-building organism rocks which can be divided into reef skeleton-framestone and non-reef skeleton-framestone, the former includes red coral and reef framework dolomite and red algal-halimeda dolomite, and the non-reef skeleton-framestone mainly consists of bioclastic limestone, grain of marl and packstone. The sedimentary facies include reef framework, reef flat, lagoon, backreef bank and bioclastic facies. The sedimentary evolution of Miocene organic reef follows the rising of the relative sea level, then a set of aggradation-retrogradation reef sedimentary cycles. The reef development can be mainly divided into four stages: the foundation, initial prosperity, peak and expose recession. During the fourth stage for reef and development, the favorable reservoir in studied area was formed by extensive dolomitization of exposure shoals.

Keywords reef; skeleton-framestone; reef-building model; sedimentary composition; Miocene; Xisha waters

(责任编辑 陈广仁)