

doi:10.3799/dqkx.2015.052

西沙西科1井第四系生物礁—碳酸盐岩的岩石学特征

孙志鹏¹, 尤丽¹, 李晓², 刘立², 廖静¹, 刘娜², 赵爽², 于亚苹²

1. 中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 广东湛江 524057

2. 吉林大学地球科学学院, 吉林长春 130061

摘要: 从西科1井生物礁—碳酸盐岩的岩心观察和岩石学特征的分析入手, 重点刻画了第四系全新一更新统乐东组生物礁—碳酸盐岩的岩石类型和生物礁类型。543片铸体薄片分析和214.89 m岩心观察表明: 岩石类型主要为粒泥灰岩、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。在纵向上, 埋深0~10 m层段以颗粒灰岩为主, 埋深10~22 m层段为生物碎屑砂分布段, 埋深22.00~214.89 m层段以粒泥灰岩、泥粒灰岩和骨架灰岩为主。生物礁类型以骨架礁为主, 造礁生物为珊瑚和少量珊瑚藻。骨架礁在埋深0~214.89 m均有发育, 丛状和块(段)状礁仅分布于埋深83~98 m。

关键词: 西沙海域; 第四系; 生物礁; 碳酸盐岩; 岩石类型。

中图分类号: P588.21

文章编号: 1000-2383(2015)04-0653-07

收稿日期: 2014-08-09

Petrologic Characteristics of Quaternary Reef-Carbonate Rocks in Well Xike-1, Xisha Area

Sun Zhipeng¹, You Li¹, Li Xiao², Liu Li², Liao Jing¹, Liu Na², Zhao Shuang², Yu Yaping²

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

2. School of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China

Abstract: The reef-carbonate rock types and reef types are described based on the core observation and petrologic characteristic analysis of reef-carbonate rocks in well Xike-1. Analyses of 543 casting lamellas and observation of 214.89 m core samples indicate that the reef-carbonate rock types are composed mainly of wackstone, packstone and framestone, and secondly of bindstone, grainstone, floatstone and rudstone. Vertical variations of rock types are characterized by dominant grain stone at a depth of 0–10 m, bioclastic calcarenite at a depth of 10–22 m, and wackstone, packstone and framestone at a depth of 22–214.89 m, respectively. It is concluded that the reef types are frame reefs and main reef-building organisms consisting of corals and a few coralline algae by the quantitative analysis results. Frame reefs develop at the depth of 0–214.89 m, and cluster and segment reefs only develop at the depth of 83–98 m.

Key words: Xisha area; Quaternary; reef; carbonate rock; rock type.

0 引言

岩石类型是生物礁储层的研究基础。通过西永1井、西永2井、西石1井和西琛1井4口钻井获取的岩心研究, 基本查明了西沙群岛生物礁的岩石学类型及其特征。先后识别出来的岩石类型包括: (1) 骨架岩、障积岩、粘结岩、颗粒岩和灰沙(陈亦寒等,

2007); (2) 格架灰岩、生物砂屑灰岩、生物砾屑灰岩、粘结灰岩、浮砾灰岩和障积灰岩等(张明书和何起祥, 1989); (3) 骨架岩、粘结岩、颗粒岩和灰沙(魏喜, 2006; 魏喜等, 2008)。西科1井不仅为钻穿生物礁的全取心井, 而且岩心收获率高, 为研究西沙群岛生物礁完整的岩石学特征提供了难得的机会。本文以西科1井的第四系全新一更新统乐东组(0~214.89 m)岩心为研究对象, 试图通过系统的岩石学

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

作者简介: 孙志鹏(1966—), 男, 高级工程师, 主要从事中国海域油气地质勘探评价工作。E-mail: sunzhp@cnooc.com.cn

引用格式: 孙志鹏, 尤丽, 李晓, 等, 2015. 西沙西科1井第四系生物礁—碳酸盐岩的岩石学特征. 地球科学——中国地质大学学报, 40(4): 653–659.

描述,确定乐东组生物礁—碳酸盐岩的纵向分布特征,并根据 Riding(1977,2002)提出的方案确定生物礁的类型,为西沙海域古海洋学事件和油气勘探潜力评价提供基础地质信息.

1 研究方法

采用点计法对西科 1 井第四系全新一更新统乐东组岩心(0~214.89 m)大体等间距切制的 543 片铸体薄片进行了组分统计,统计的组分包括异地(allochthonous)颗粒和原地(autochthonous)颗粒、基质和胶结物.异地颗粒主要为生物碎屑.原地颗粒包括所有钙化的微生物、藻类和无脊椎动物的骨骼(Riding,2002).基质为泥晶和重结晶的泥晶.胶结物为分布于粒间和粒内孔隙中的亮晶方解石和文石等.在统计过程中,首先选定具有代表性的视域,采集图像(包括单偏光和正交偏光图像);然后,将等间距的二维坐标网覆盖在待统计的图像之上,按组分类型分别记录落在坐标点上的组分.为保证研究精度,每个薄片均统计 300 个点.

根据以上的统计结果,首先,在岩心观察的基础上,按照 Embry(1971)的碳酸盐岩划分方案,确定每个薄片的岩石类型;然后,在 MSC(基质、骨架和胶结物)图解(Riding,1977,2002)上确定生物礁灰岩所属的生物礁类型;最后,按 1:1 000 编制第四系岩石类型和生物礁类型综合柱状图及相关图件.

2 碳酸盐组分与岩石类型

2.1 碳酸盐组分类型

2.1.1 异地颗粒和原地颗粒 参照王崇友(1985)和 Scholle and Ulmer-Scholle(2003)的研究结果,识别出的颗粒类型包括钙藻、珊瑚、有孔虫、棘皮动物、软体动物和苔藓动物(表 1),其主要特征如下.

钙藻包括红藻门珊瑚藻和绿藻门仙人掌藻.珊瑚藻主要以纹层状、壳状、节形态产出,可见精细网格组织和一系列孢子囊.仙人掌藻具有清晰的管状构造,内部发育椭圆形孢囊,颗粒中心的孢囊相对较大,边缘处的孢囊较小,部分孢囊内充填粒状亮晶方解石.

珊瑚为六射珊瑚,其骨架为文石质,隔壁发育,形状多样:(1)发育典型的羽楣隔壁结构,以文石晶体呈纤维束状由内向外辐射为特征;(2)珊瑚单体隔

表 1 西科 1 井第四系生物礁中骨架颗粒类型
Table 1 Skeletal grain types of Quaternary reef in well Xike-1

颗粒类型	下属种类
钙藻	红藻门珊瑚藻
钙藻	绿藻门仙人掌藻
珊瑚	六射珊瑚
有孔虫	浮游有孔虫
有孔虫	底栖有孔虫
棘皮动物	
软体动物	
苔藓动物	

壁呈放射状,相邻的珊瑚单体紧密堆积;(3)发育多孔的珊瑚隔壁,使其在成岩过程中易受不同程度的蚀变及新生变形作用,可见泥晶和粒状亮晶方解石充填于珊瑚生长格架孔内.

有孔虫包括底栖有孔虫和浮游有孔虫.底栖有孔虫介壳包含多个空的房室,房室之间发育隔壁.房室排列方式呈列状、盘绕状、螺旋状和环绕成圈状.介壳形态多样,呈纺锤状、螺旋锥状、盘状和枝状.浮游有孔虫房室大且单一,介壳上发育骨刺,呈球形.

棘皮动物留存的主要为海胆的脊刺.横切面呈圆裂外廓和花状样式,由内向外呈放射状对称分布.纵切面可见脊刺基部球形的附着窝和长锥形的棘刺自身部分.

软体动物主要为骨架碎片,发育典型的交错片状壳结构,可见双壳类壳壁,发育生长纹层.

苔藓动物群体由大小不同的虫室组成,内部和外部的虫室大小和排列方式均不相同.

2.1.2 基质 基质<62 μm,主要为泥晶.部分泥晶重结晶形成重结晶的亮晶方解石.重结晶的亮晶方解石的特征为表面污浊,晶粒之间接触界线不规则.

2.1.3 胶结物 胶结物由文石、高镁方解石和低镁方解石组成.其中,埋深 0~35.34 m 以文石、高镁方解石和低镁方解石为主,埋深 35.34~214.89 m 为低镁方解石.按照产状可分为粒状、晶簇状、新月形、刀刃状和纤维状.其中,粒状方解石以细粒为主,呈等粒状充填于粒间孔和粒内孔中,是所研究深度段内最为发育的胶结物.晶簇状方解石呈不等粒状,由孔隙边缘向中心粒度增大,主要发育于生物骨架粒间孔内,在所研究的深度段内比较常见.新月形胶结物多见于浅部深度段内,细粒状方解石集合体呈新月形或桥形粘结相邻的骨架颗粒.刀刃状方解石晶体呈长三角形、菱形状,顶端有尖角,垂直生物体腔孔内壁生长,也有沿骨架颗粒边缘生长形成等厚环

边.纤维状胶结物顶端呈针状、纤维状,一般发育于粒间孔和生物体腔孔内,垂直孔隙内壁生长,晶体以文石居多,也有少量高镁方解石.

2.2 岩石类型及其特征

按照 Embry(1971)修改的 Dunham(1962)的分类方案识别出的岩石类型包括骨架灰岩、粘结灰岩、粒泥灰岩、泥粒灰岩、颗粒灰岩、漂砾灰岩和砾屑灰岩.其主要特征如下.

骨架灰岩(framestone)由造架生物、生物碎屑、泥晶和胶结物组成.造架生物主要为四射珊瑚,也可

见六射珊瑚与伴生的珊瑚藻共同构成骨架灰岩.按照填充物的不同,可将骨架灰岩细分为以下 4 类:(1)珊瑚生长格架孔内无充填物(图 1a);(2)珊瑚生长格架孔被泥晶充填;(3)珊瑚生长格架孔由粒状亮晶方解石充填;(4)珊瑚生长格架孔部分被泥晶充填,部分被粒状方解石充填.一般而言,珊瑚生长格架孔内泥晶充填的多少,反映沉积环境水动力条件的强弱.在水动力条件强的高能沉积环境泥晶含量低,水动力条件弱的低能沉积环境泥晶含量高.

粘结灰岩(bindstone)由藻类等纹层状或贝壳

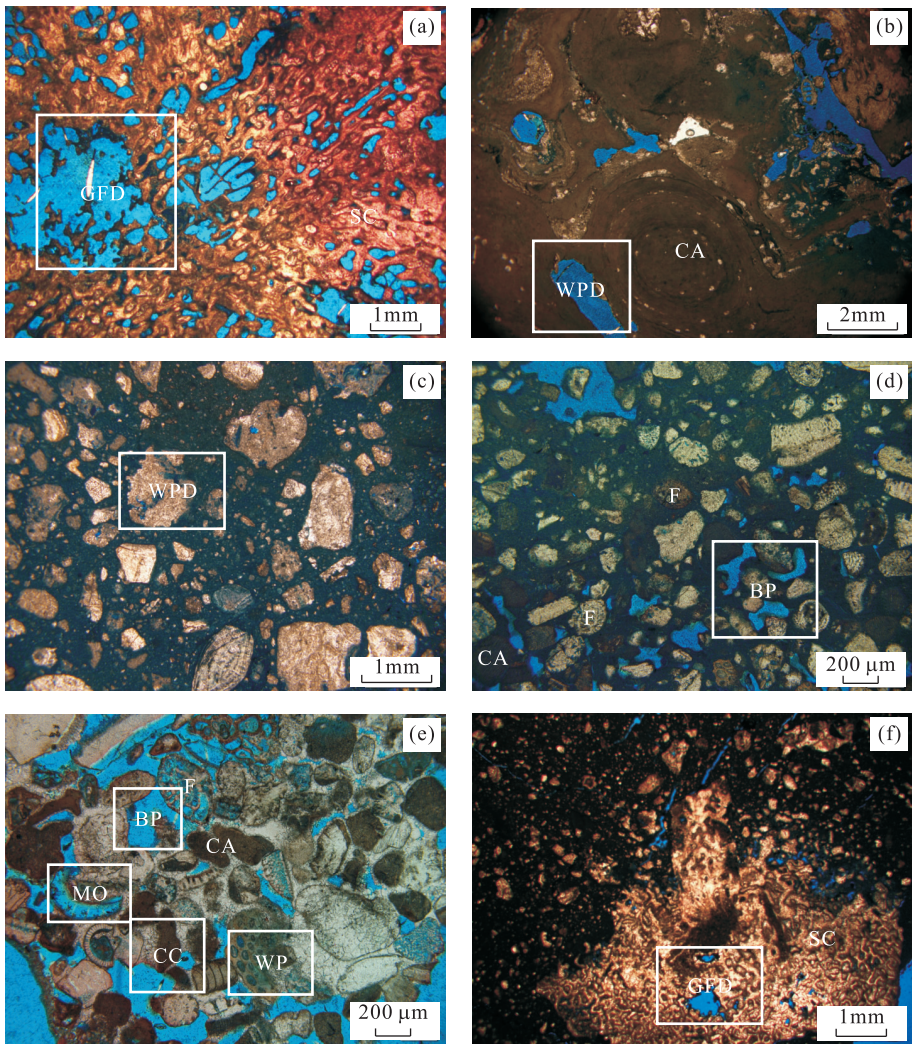


图 1 西科 1 井第四系生物礁岩石类型显微照片

Fig.1 Micro-images of casting lamella of Quaternary reef in well Xike-1

a.骨架灰岩(埋深 25.21 m,单偏光,铸体薄片),造架生物为四射珊瑚(SC),发育生长格架溶蚀孔(GFD);b.粘结灰岩(埋深 120.97 m,单偏光,铸体薄片),造架生物为珊瑚藻(CA),发育粒内溶孔(WPD),被粘结的生物多数为骨骼碎屑;c.粒泥灰岩(92.51 m,单偏光,铸体薄片),骨架颗粒多数破碎成骨架碎屑,发育粒内溶孔(WPD);d.泥粒灰岩(20.36 m,单偏光,铸体薄片),骨架颗粒不同程度破碎,保存较好的为有孔虫(F)和珊瑚藻(CA),发育粒间孔(BP);e.颗粒灰岩(10.55 m,单偏光,铸体薄片),可识别出的骨架颗粒为珊瑚藻(CA)和有孔虫(F),发育粒内孔(WP)、粒间孔(BP)和铸模孔(MO),发育新月形胶结物(CC);f.漂砾灰岩(152.61 m,单偏光,铸体薄片),砾屑为四射珊瑚碎块(SC),发育生长格架溶蚀孔(GFD)

状生物在原地生长过程中捕获、吸附周围泥晶和生物颗粒所形成。本区粘结灰岩少见,可见两类不同的粘结灰岩:(1)纹层状珊瑚藻厚度不均,可达厘米级,发育特征的细小网格组织,起到包覆作用,呈不规则圆形将碎屑组分包裹,多见珊瑚藻包裹珊瑚碎块形成的粘结灰岩。(2)珊瑚藻呈贝壳状,起到连结作用,在沉积过程中将碎屑组分捕捉粘结,覆盖在泥晶和骨骼碎屑之上(图 1b)。

粒泥灰岩(wackestone)主要由泥晶和骨骼颗粒组成(图 1c)。骨架主要为珊瑚藻、珊瑚和有孔虫,偶见棘皮动物和软体动物。骨骼颗粒遭受不同程度的破碎,其分选差,磨圆差,形状多样,大小不一,粒径一般为 0.2~1.0 mm,也有少数骨骼保存较完整的形态,长径多为 0.5~2.0 mm,含量 5%~50%。基质为泥晶,含量大于 50%,为基质支撑结构,胶结物含量较低,主要为粒状亮晶方解石。

泥粒灰岩(packstone)主要由骨骼颗粒和泥晶组成,以骨骼颗粒为主(图 1d)。骨骼颗粒包括钙藻、珊瑚、有孔虫、棘皮动物、软体动物和苔藓动物。多数生物骨骼破碎,分选差,为次棱角状一次圆状,大小不一,粒径多为 0.2~2.0 mm。部分钙藻和棘皮动物的骨架保存较好,可见较完整的骨骼形态,长径多在 1.0~3.0 mm 之间;有孔虫骨骼破碎程度不一,形态各异,分选较差,大小不一,粒径多为 0.2~2.0 mm,保存完好的有孔虫长径为 2.0~3.0 mm。骨骼含量 50%~90%。基质为泥晶,含量 10%~40%。胶结物主要为粒状亮晶方解石、刀刃状方解石和纤维状文石。其中,粒状亮晶方解石充填于粒间孔内,刃状方解石和纤维状文石多沿生物体腔内壁生长,为颗粒支撑结构。

颗粒灰岩(grainstone)主要由生物碎屑组成(图 1e)。由于波浪和潮汐的作用发生破碎,包括有孔虫、钙藻、珊瑚、棘皮动物、软体动物和苔藓动物。有孔虫分选相对较好,多为次圆状,粒径一般为 0.2~1.0 mm,含量 30%~45%。钙藻以珊瑚藻最为常见,也可见仙人掌藻,个体完整或破碎,含量 20%~50%,保存较完整的藻长径可达 2.0 mm 以上,破碎的藻屑有一定的磨圆,多为次圆状,大小不一,粒径一般为 0.2~1.0 mm;珊瑚分选相对较好,形态不一,多为次圆状,粒径一般为 0.2~1.0 mm,含量 5%~20%;棘皮动物发育特征的圆裂外廓和花状样式,粒径一般为 0.5~1.0 mm,含量 5%~10%;软体动物主要为介壳碎块,多为次棱角状一次圆状,粒径一般为 0.2~1.0 mm,含量 5%~15%;苔藓动物群体呈

块状、管状分布,破碎程度不一,粒径一般为 0.5~2.0 mm,群体较大者可达 2.0 mm 以上,含量 5%~15%。基质基本不发育,胶结物为粒状亮晶方解石,充填于骨骼颗粒之间,形成典型的新月形胶结物,含量小于 10%。显示清晰的颗粒支撑结构。

漂砾灰岩(floatstone)主要由少量砾屑、颗粒和基质组成(图 1f)。砾屑主要为原地破碎或近源搬运的珊瑚碎块,也可见破碎的珊瑚藻,偶见软体类介壳碎片,砾屑呈无序堆积,形状不规则,磨圆差,多为次棱角状一次圆状,少数有轻微磨圆,大小混杂,一般为 2.0~5.0 mm,砾屑含量大于 10%,砾屑组分的大小反应水体流速及水体能量的大小。颗粒为生物骨骼碎屑,包括钙藻、珊瑚、有孔虫、棘皮动物、软体动物和苔藓动物,分选差,形状不规则,粒径小于 2.0 mm,含量较低,约为 5%~20%。基质为泥晶,含量大于 50%,广布于砾屑与颗粒之间,构成基质支撑结构。

砾屑灰岩(rudstone)主要由砾屑、颗粒和基质组成。砾屑主要有珊瑚、珊瑚藻、有孔虫和软体动物介壳碎屑,其中六射珊瑚占主体地位。除少数有孔虫保存较完整骨架,绝大多数砾屑遭受不同程度的破碎,呈无序堆积,形状不规则,次棱角状一次圆状,粒径一般为 2.0~6.0 mm,与珊瑚相伴生的珊瑚藻其长径可达厘米级,砾屑含量一般为 15%~70%。颗粒为较小的生物骨骼碎屑,包括钙藻、珊瑚、有孔虫、棘皮动物、软体动物和苔藓动物,分选差,形状多样,粒径小于 2.0 mm,含量 10%~30%。基质为泥晶,充填于砾屑及颗粒之间,含量 10%~40%。胶结物为粒状亮晶方解石,大多充填于生物体腔孔内,为颗粒支撑结构。

2.3 岩石类型纵向分布

岩石类型在纵向上的分布如图 2 所示。其中,埋深 3.00~10.00 m 以颗粒灰岩为主,埋深 10.00~22.00 m 为生物碎屑砂分布段,自埋深 22.00 m 至 214.89 m,以泥粒灰岩、粒泥灰岩和骨架灰岩为主,其中,埋深 94.00~130.00 m 粒泥灰岩大量分布,占据主体地位;埋深 130.00~214.89 m 以泥粒灰岩含量增加,成为主要的岩石类型,二者的变化呈现出由粒泥灰岩向泥粒灰岩过渡的趋势,说明基质含量降低,反映出沉积环境趋于高能;骨架灰岩主要分布于埋深 28.00~49.00 m 和 64.00~94.00 m,此深度段内珊瑚骨架发育且保存完好,可见大片珊瑚布满整个视域,少量珊瑚骨架由于波浪和潮汐的作用发生破碎,形成珊瑚碎块,成为漂砾灰岩和砾屑灰岩中砾屑的物质来源。

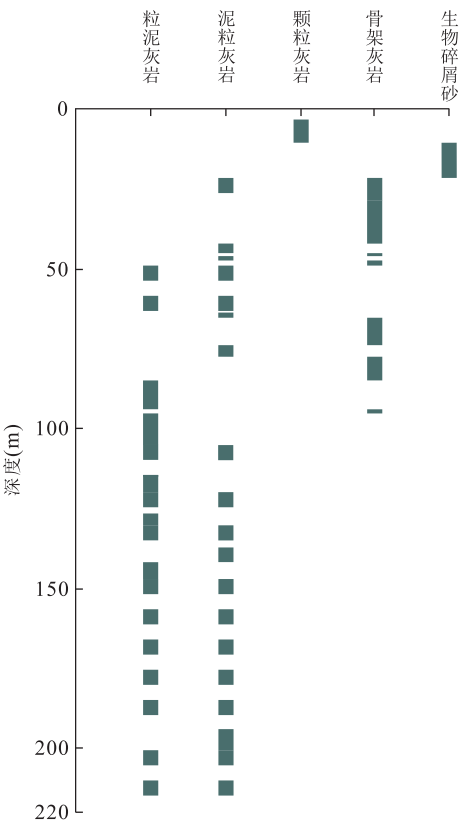


图 2 西科 1 井 0~214.89 m 岩石类型纵向分布
Fig.2 Vertical variation of rock types of Quaternary carbonate rocks with a depth ranging from 0 to 214.89 m in well Xike-1

3 生物礁类型

3.1 生物礁类型及其特征

按照 Riding(1977)早期的分类方案,并结合研

究区沉积相的划分结果,研究井段的生物礁类型为骨架礁和丛状和块(段)状礁(图 3a).其中,骨架礁(frame reefs)为骨架支撑的生物礁类型,骨架含量 37%~99%,基质含量 0~44%,胶结物含量 0~42%.依据生物骨架在礁体生长过程中所起的主次作用,分为造礁生物和附礁生物.造礁生物为六射珊瑚和少量珊瑚藻,造礁生物主要以两种形态产出:(1)自身形成生物格架,起到支撑作用.(2)骨架发生破碎,相邻的骨架被泥晶或胶结物连结,骨架依然起到支撑作用.附礁生物大量发育,包括有孔虫、软体动物、棘皮动物和苔藓动物,粒间孔被少量泥晶或胶结物充填.

丛状和块(段)状礁(cluster and segment reef)为基质支撑的生物礁类型,骨架含量 16%~43%,基质含量 36%~65%,胶结物含量 4%~31%.生物骨架以钙藻、有孔虫和珊瑚为主,骨架破碎或完整,分布较松散,无法形成生物格架,骨架之间充填泥晶,构成基质支撑结构,从而提高礁体自身的稳定性.

按照 Riding(2002)近年来的分类方案,并结合研究区沉积相的划分结果(朱伟林等,2015),将研究井段的生物礁类型细分为开放式礁、充填式礁和骨架—胶结物礁(图 3b).其中,开放式礁(open frame reefs)为骨架礁的一种类型,骨架含量 46%~95%,基质含量 2%~40%,胶结物含量 2%~21%.造礁生物主要为六射珊瑚,其次为珊瑚藻.其中,六射珊瑚呈分枝状和穹窿状,自身形成坚硬的生物格架,起到支撑作用并能抵抗风浪,发育半开放的生长格架孔,有利于早期胶结物的形成;珊瑚藻呈结壳状大面

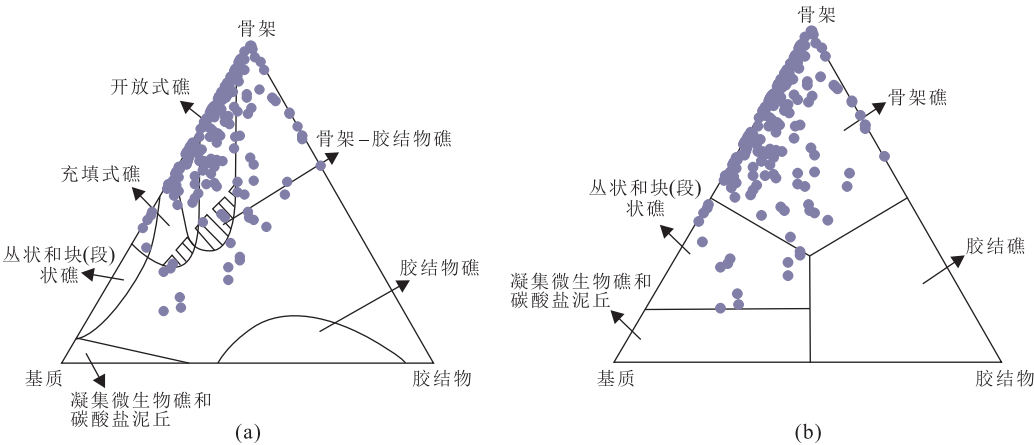


图 3 西科 1 井第四系生物礁类型
Fig.3 Quaternary reef types in well Xike-1
a.据 Riding(1977);b.据 Riding(2002);数据点为本次研究结果

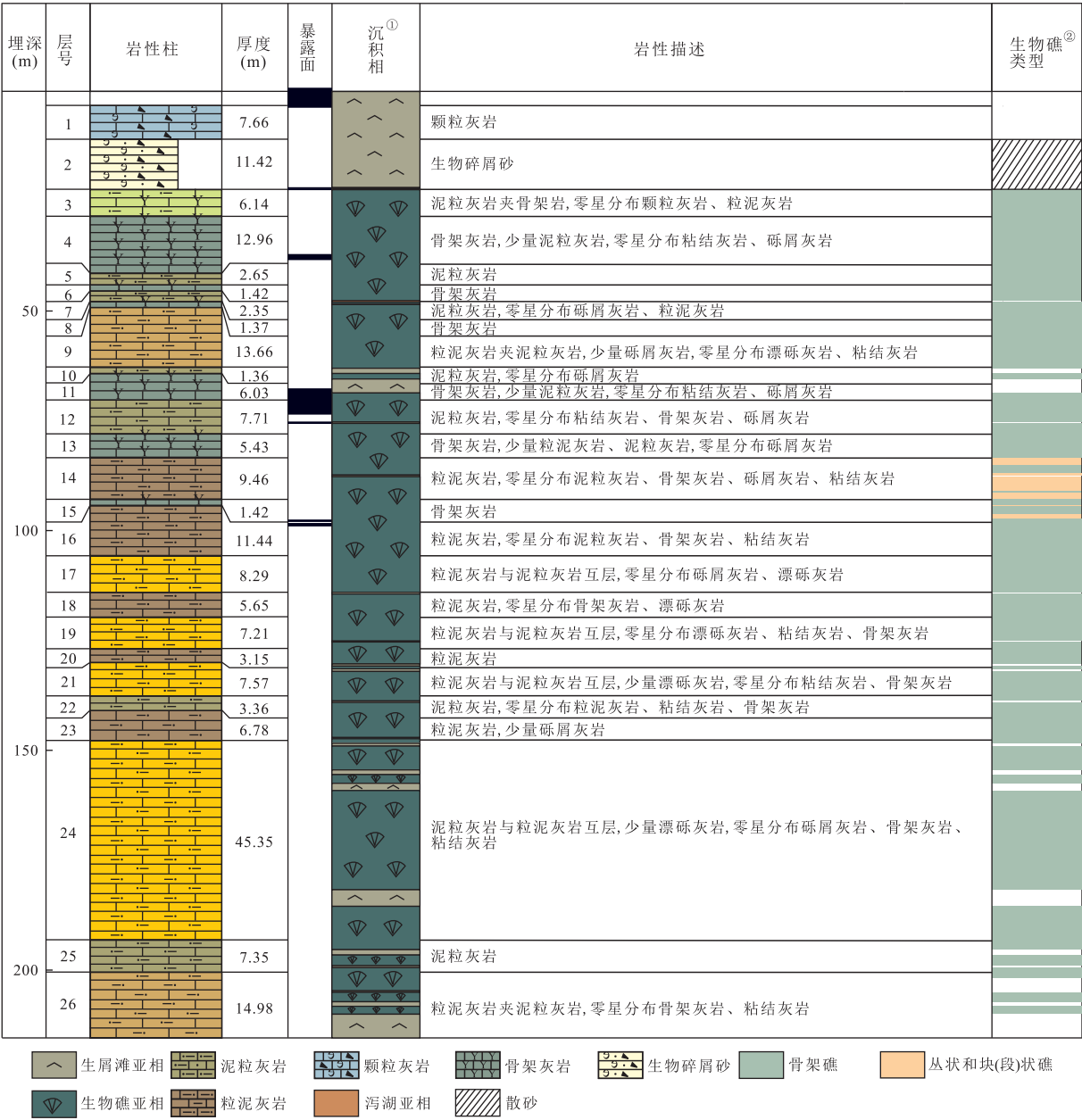


图 4 西科 1 井第四系综合柱状图

Fig.4 Quaternary histogram in well Xike-1

①沉积相据朱伟林等(2015);②生物礁类型据 Riding(1977)

积发育,不发育生物体腔孔,足够密实的生物骨架可以阻挡水体流动,将泥晶和骨架碎屑粘结于自身形成的藻席之下。

充填式礁(filled frame reefs)为骨架礁的一种类型,骨架含量 50%~63%,基质含量 35%~44%,胶结物含量极少,约为 1%。部分六射珊瑚形成充填式礁,在生长过程中生长格架孔被泥晶充填,从而阻碍了胶结物的形成,泥晶的充填使礁体在对抗风浪的破坏作用时更加稳固。珊瑚藻发育致密的层状格架,将泥晶、骨架碎屑包裹于自身形成的不规则包壳

内,起到一定的包覆作用。

骨架-胶结物礁(skeletal cement reefs)为胶结物礁的一种类型,骨架含量 30%~53%,基质含量 27%~57%,胶结物含量 14%~20%,生物骨架有珊瑚、有孔虫和珊瑚藻等,生物骨架发生溶蚀,其粒间孔及粒内孔被胶结物全部或部分充填,未被胶结物充填的孔隙被泥晶填充,孔隙内基质和胶结物的充填加固了礁体,使其能够固着生长于基底之上。此类生物礁的胶结物含量相对较高,其形成与骨架颗粒有直接联系。

3.2 生物礁类型纵向分布

按照 Riding(1977)的分类方案,西科1井生物礁在纵向上的分布如图4所示。其中,骨架礁占主体地位,自顶界深度一直延续至底界深度,丛状和块(段)状礁少有分布,仅分布于埋深83~98 m,说明礁体内基质含量增加,水体流速减慢。根据骨架礁和丛状和块(段)状礁的分布可以反映出当时的沉积环境经历了高能—低能—高能的变化过程。

4 结论

(1)碳酸盐岩组分类型包括异地颗粒和原地颗粒。颗粒类型包括钙藻、珊瑚、有孔虫、棘皮动物、软体动物和苔藓动物。基质为泥晶,胶结物为文石、高镁方解石和低镁方解石,胶结物的产状为粒状、晶簇状、新月形、刀刃状和纤维状。

(2)生物礁岩石类型主要为粒泥灰岩、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。岩石类型的纵向分布特征为:埋深0.00~10.00 m以颗粒灰岩为主;埋深10.00~22.00 m为生物碎屑砂分布段;自埋深22.00~214.89 m,以泥粒灰岩、粒泥灰岩和骨架灰岩为主,三者呈间断分布于研究深度段始终,其中,骨架灰岩主要分布于埋深28.00~49.00 m和64.00~94.00 m。

(3)生物礁类型以骨架礁为主,发育少量丛状和块(段)状礁,造礁生物为六射珊瑚和少量珊瑚藻,附礁生物为有孔虫、棘皮动物、软体动物和苔藓动物。在纵向上,骨架礁几乎连续分布,而丛状和块(段)状礁仅分布于埋深83.00~98.00 m井段。

References

Chen, Y. H., Liu, D. M., Wei, X., et al., 2007. Reservoir Characteristics and Its Controlling Factors of Late Cenozoic Biogenetic Reef in Xisha Islands of South China Sea: A Case Study on Well Xichen 1. *Journal of Oil and Gas Technology (J. JPI)*, 29(3): 362—363 (in Chinese with English abstract).

Embry, A. F., 1971. A Late Devonian Reef Tract on North-eastern Banks Island; N. W. T. Bulletin of Canadian. *Petrology*, 19(4): 730—781.

Riding, R., 1977. Systematics of *Wetheredella*. *Lethaia*, 10: 94. doi: 10.1111/j.1502—3931.1977.tb00596.x

Riding, R., 2002. Structure and Composition of Organic Reefs and Carbonate Mud Mounds: Concepts and Categories. *Earth-Science Reviews*, 58(1—2): 163—231. doi: 10.1016/S0012—8252(01)00089—7

Scholle, P. A., Ulmer-Scholle, D. S., 2003. A Color Guide to the Petrography of Carbonate Rocks: Grains, Textures, Porosity, Diagenesis. The American Association of Petroleum Geologists, Tulsa, Oklahoma, U.S.A..

Wang, C. Y., 1985. Late Tertiary Ultramicrofossil and Its Geological Significance. *Journal of Geology Institute, Chinese Geology Academy of Science*, (11): 81—100 (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, 35—40 (in Chinese with English abstract).

Wei, X., Jia, C. Z., Meng, W. G., et al., 2008. Biogenetic Reefs and Its Petrological Characteristics of Well Xichen 1, Xisha Sea Area, China. *Geological Bulletin of China*, 27(11): 1933—1938 (in Chinese with English abstract).

Zhang, M. S., He, Q. X., 1989. The Study of Quaternary Reef Carbonate Sedimentary Geology, Xisha Sea Area. Science Press, Beijing, 52—63 (in Chinese).

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

陈亦寒, 刘大锰, 魏喜, 等, 2007. 西沙群岛晚新生代生物礁储层特征及控制因素——基于西琛1井钻探资料. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 29(3): 360—363.

王崇友, 1985. 西沙群岛晚第三纪超微化石及其地质意义. 中国地质科学院地质研究所所刊, (11): 81—100.

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(博士毕业论文). 北京: 中国地质大学, 35—40.

魏喜, 贾承造, 孟卫工, 等, 2008. 南海西沙海域西琛1井生物礁的性质及岩石学特征. 地质通报, 11: 1933—1938.

张明书, 何起祥, 1989. 西沙生物礁碳酸盐沉积地质学研究. 北京: 科学出版社, 52—63.

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.